



中文核心期刊
中国科技核心期刊
《中国科学引文数据库》(CSCD) 收录期刊
国家级优秀海洋期刊

ISSN 1671-6647
CN 37-1387/P

海洋科学进展

ADVANCES IN MARINE SCIENCE ■ www.ams-journal.org.cn

2024

第 42 卷
第 4 期

Vol. 42
No. 4



海洋科学进展
ADVANCES IN MARINE SCIENCE

第四十二卷
第四期
二〇二四年十月

自然资源部第一海洋研究所 中国海洋学会 主办

《海洋科学进展》编辑委员会

Editorial Board for ADVANCES IN MARINE SCIENCE

学术顾问：袁业立 方国洪 黄 镔 丁德文 李家彪 王军成 郭正堂 毛景文

主 编：李铁刚

副 主 编：乔方利 石学法 林霄沛 刘敬圃 孙卫东 刘东艳

执行副主编兼编辑部主任：胡筱敏

编委会成员：（以姓氏拼音为序）

陈 彬	陈建芳	陈 荔	陈沈良	陈义兰	董昌明	董云伟	方 越
高郭平	高会旺	高建华	管长龙	黄邦钦	黄 方	翦知潜	金显仕
靖春生	李才文	李超伦	李福利	李克强	林岩奎	刘传玉	刘乐军
刘青松	刘焱雄	刘永岗	刘志宇	吕颂辉	马 毅	钱培元	秦 松
冉祥滨	史久新	宋振亚	孙承君	孙 军	王东晓	王桂华	王厚杰
王晓雪	王岩峰	王宗灵	魏 皓	魏泽勋	吴怀春	吴 辉	吴时国
熊志方	鄢全树	颜 文	阳凡林	杨德周	杨胜雄	杨永增	于卫东
余克服	俞志明	袁东亮	张光学	张学雷	张 瑶	赵建虎	郑全安
郑彦鹏	周 锋	周 磊	左军成				

编辑部成员：高 峻 陈 靖 王 燕 李 燕 王佳实

封面说明 封面图片展示了1种甲藻新种即尖头角藻 (*Tripos acuticephalotum* sp. nov.) 腹面观 (左图) 和背面观 (右图) 的主要形态特征。自然资源部第一海洋研究所浮游生物研究团队通过对2022年1月在西印度洋 (63°E, 2°S) 处采集的浮游植物网样样品鉴定分析, 发现1种甲藻新种, 根据其主要形态学特征命名为尖头角藻。该藻隶属于甲藻门膝沟藻目角藻科角藻属, 藻体较大, 背腹扁平, 总长348 μm。上壳长于下壳, 为212 μm, 呈尖叶状, 最宽处为112 μm, 由最宽处向顶端急缩, 顶端钝突。下壳短, 底边斜直, 下壳横沟至两底角中线处的长度为60 μm。两底角较粗壮, 左底角略长并略粗于右底角, 自下壳底线向外稍弯, 右底角直。本种与 *Tripos gravidum*、*Tripos praeolongum* 和 *Tripos lanceolatus* 隶属于同一组, 其共性是无顶角, 背腹甚扁, 下壳形状略同; 其不同点在于上壳形状存在差异, 相对于其他3种藻, 本种的上壳较尖, 故将其命名为尖头角藻。该新种的发现丰富了甲藻的物种多样性。详见本期研究报道《西印度洋甲藻门角藻属一新种》, 图片由作者提供。

海洋科学进展

HAIYANG KEXUE JINZHAN

2024年 第42卷 第4期

目次

研究论文

- 基于潜标观测的南海北部陆架海域内潮时空变化特征 尹汉军, 谢波涛, 张琪, 黄必桂, 黄晓冬(611)
- 陆丰海域秋季第一模态内孤立波观测特征分析 李达, 刘涛, 谢波涛, 黄必桂, 张琪, 黄晓冬(623)
- 阿留申群岛阿图岛水道多年夏季水文特征分析 陈红霞, 刘健康, 张学宏, 刘敏, 林丽娜, 刘娜(634)
- 沉积物活性铁锰特征对比研究及其对有机碳矿化的意义——以长江口、黄海中部陆架泥质区和黄河口为例
..... 韦世金, 孟倪, 韦钦胜, 庄光超(643)
- 长江口北支上段滩槽演变过程研究 王凌霄, 戴志军, 梅雪菲, 王杰, 楼亚颖, 乔红杰(663)
- 黄河口及邻近海域表层沉积物甲藻孢囊多样性研究
..... 高晨, 王晓峰, 石雅君, 马元庆, 隋傅, 姜向阳, 刘丽娟, 姜会超, 宋秀凯(677)
- 南海北部夏季浮游植物群落对中尺度涡物理过程的响应 冯友飞, 李佳烜, 杨世民(690)
- 三亚湾近岸海域浮游甲藻与水环境因子相关性研究
..... 王蒙, 王兴华, 李翔, 赵茜, 李格乐, 王辉, 殷安齐(709)
- 永乐环礁表层海水细菌群落多样性及功能预测 舒艾梅, 宫春光, 黄惠琴, 胡永华, 莫坤联(725)
- 群体感应对藻际细菌 *Sulfitobacter pseudonitzschiae* H46 生理活性调控的研究
..... 迟旭辉, 杨淋, 张彦超, 胡天翼, 王帅, 郑立(738)
- 2022年黄河调水调沙对下游有机物和营养盐年内变化的影响 ... 高书铭, 姚爱林, 明玥, 王宪业, 高磊(753)

本期责任编辑: 高峻 英文审校: 黄晓航 方越 鄢全树 宋洪军

期刊基本参数: CN37-1387/P * 1983 * q * A4 * 224 * zh * P * ¥80.00 * 1000 * 17 * 2024-10

寒潮影响下北部湾研究海域颗粒态和溶解态 ²¹⁰ Po 的分布特征	刘文靖, 钟强强, 王 浩, 陈随缘, 黄德坤, 刘进文, 于 涛(769)
2022 年 8 月北黄海北部溶解甲烷分布、海-气交换通量及影响因素	徐雪梅, 王明丽, 何宗财, 韩建波, 邢庆会, 王心怡, 陈 虹(782)
不同压强深度转化模型构建的声速剖面对水下定位的影响	王 松, 贺凯飞, 姬生月, 唐 安, 王 跃, 姚铭飞(794)

研究报道

小道距高分辨率多道地震系统在渤海海峡地层探测中的应用	祁晓雨(807)
基于深度学习联合 WOA18 温盐模型构建声速场	唐 安, 贺凯飞, 吴 宇, 王 松(816)
西印度洋甲藻门角藻属一新种	李 艳, 孙 萍, 李瑞香(830)

CONTENTS IN BRIEF

ARTICLES

- Spatiotemporal Characteristics of Internal Tides on the Continental Shelf of the Northern South China Sea Based on Mooring Observations *YIN Hanjun, XIE Botao, ZHANG Qi, HUANG Bigui, HUANG Xiaodong* (611)
- Property of the First-Mode Internal Solitary Waves in Autumn in the Lufeng Area in Northern South China Sea Revealed by Mooring Observations ... *LI Da, LIU Tao, XIE Botao, HUANG Bigui, ZHANG Qi, HUANG Xiaodong* (623)
- Summer Hydrological Characteristics Analysis of the Near Strait, Aleutian Islands
..... *CHEN Hongxia, LIU Jiankang, ZHANG Xuehong, LIU Min, LIN Lina, LIU Na* (634)
- Comparative Study on the Characteristics of Reactive Iron and Manganese in Sediments From Coastal China and Its Significance for Organic Carbon Mineralization: Case Studies at the Yangtze River Estuary, the Mud Area of the Shelf in Central Yellow Sea, and the Yellow River Estuary
..... *WEI Shijin, MENG Ni, WEI Qinsheng, ZHUANG Guangchao* (643)
- Study on Evolutionary Process of Shoal-Channel at Upper Reach of the North Branch of the Changjiang Estuary
..... *WANG Lingxiao, DAI Zhijun, MEI Xuefei, WANG Jie, LOU Yaying, QIAO Hongjie* (663)
- Diversity of Dinoflagellate Cysts in Surface Sediments in the Yellow River Estuary and Its Adjacent Sea Area
..... *GAO Chen, WANG Xiaofeng, SHI Yajun, MA Yuanqing, SUI Fu, JIANG Xiangyang, LIU Lijuan, JIANG Huichao, SONG Xiukai* (677)
- Response of Phytoplankton Communities to the Physical Processes of Mesoscale Eddy in the Northern South China Sea in Summer *FENG Youfei, LI Jiaxuan, YANG Shimin* (690)
- Correlation Between Planktonic Dinoflagellates and Water Environmental Factors in Coastal Waters of Sanya Bay
..... *WANG Meng, WANG Xinghua, LI Xiang, ZHAO Qian, LI Gele, WANG Hui, YIN Anqi* (709)
- Diversity and Functional Prediction of Bacterial Communities in Surface Seawater of Yongle Atoll
..... *SHU Aimei, GONG Chunguang, HUANG Huiqin, HU Yonghua, MO Kunlian* (725)
- Study on the Biological Activities of Phycospheric Bacterium *Sulfitobacter Pseudonitzschiae* H46 Regulated by Quorum Sensing *CHI Xuhui, YANG Lin, ZHANG Yanchao, HU Tianyi, WANG Shuai, ZHENG Li* (738)
- The Impact of Water and Sediment Regulation on Monthly Changes of Downstream Organic Matter and Nutrients in the Yellow River in 2022 *GAO Shuming, YAO Ailin, MING Yue, WANG Xianye, GAO Lei* (753)
- Distribution Features of Particulate and Dissolved ^{210}Po in Beibu Gulf Under the Influence of Cold Wave
... *LIU Wenjing, ZHONG Qiangqiang, WANG Hao, CHEN Suiyuan, HUANG Dekun, LIU Jinwen, YU Tao* (769)

Distributions, Influencing Factors and Sea-Air Fluxes of Dissolved Methane in the Northern of North Yellow Sea in August 2022
··· *XU Xuemei, WANG Mingli, HE Zongcai, HAN Jianbo, XING Qinghui, WANG Xinyi, CHEN Hong* (782)

The Impact of Constructing Sound Velocity Profiles Through Different Pressure-depth Conversion Models on Underwater
Positioning *WANG Song, HE Kaifei, JI Shengyue, TANG An, WANG Yue, YAO Mingfei* (794)

RESEARCH NOTES

The Application of High Resolution Multichannel Seismic System With Small Group Interval to Stratigraphic Exploration
in Bohai Strait *QI Xiaoyu* (807)

Construction of Sound Velocity Field Based on Deep Learning Combined With WOA18 Temperature and Salinity Model
..... *TANG An, HE Kaifei, WU Yu, WANG Song* (816)

A New Species of the Genus *Triplos* Bory From the Western Indian Ocean *LI Yan, SUN Ping, LI Ruixiang* (830)

基于潜标观测的南海北部陆架海域内潮 时空变化特征

尹汉军¹, 谢波涛^{1*}, 张琪¹, 黄必桂¹, 黄晓冬^{2,3}

(1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028;
2. 中国海洋大学三亚海洋研究院海南省海洋立体观测与信息重点实验室, 海南 三亚 572024;
3. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 为加深对南海北部陆架区域内潮特征的了解, 本文利用位于南海北部陆架海域的 2 套潜标观测资料, 研究了南海北部油气区内潮的时空变化特征。通过提取斜压流速并滤波后发现, LF2 站位内潮较强, 内潮最大流速为 $8.32 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 出现在水下 290 m 深度处。小波分析和能量诊断结果显示, 上述 2 个潜标观测到的半日内潮能量比全日内潮能量整体上小 1~2 个数量级。LF2 站位处全日内潮以第二模态为主, 半日内潮以第一模态为主; LH2 站位处全日内潮以第一模态为主, 半日内潮则第一和第二模态并重。上述 2 个潜标测站全日内潮传播方向接近正 N 向、半日内潮传播方向多为 NW 向, 但在 10 月中旬 LF2 站位处半日内潮传播方向由 NW 向变为 NS 向, LH2 站位处全日内潮方向由正 N 向变为 NE 向。分析实测背景流发现, 10 月中旬内潮传播方向的改变可能与背景场的变化有关。本文的结果将有助于加深对陆架区内潮的时空特征的认识, 促进对南海北部油气区内波时空变化机制的了解。

关键词: 南海北部; 陆架区内波; 内潮; 垂向模态

中图分类号: P731.24

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2024)04-0611-12

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20230818002

引用格式: 尹汉军, 谢波涛, 张琪, 等, 2024. 基于潜标观测的南海北部陆架海域内潮时空变化特征[J]. 海洋科学进展, 42(4): 611-622. YIN H J, XIE B T, ZHANG Q, et al, 2024. Spatiotemporal characteristics of internal tides on the continental shelf of the northern South China Sea based on mooring observations[J]. Advances in Marine Science, 42(4): 611-622.

天文潮流经粗糙的海底地形, 如海山(Baines, 2007)、大陆坡(Kelly et al, 2010)和峡谷(Zhao et al, 2012)等, 会在海洋内部产生内潮。内潮为深海混合提供能量, 这对于维持深海层结(Munk et al, 1998; Wunsch et al, 2004)和驱动大洋经向翻转环流(Kunze, 2017)均有重要的意义。研究内潮的时空变化特征有助于加深人类对海洋混合时空分布特征的认识, 对提高大洋环流模拟和全球气候预测准确性具有重要价值(Whalen et al, 2020)。陆架区作为人类海洋生产活动最为频繁和海洋工程建设最为活跃的区域, 研究此区域的内潮的时空变化特征, 不仅有助于加深对陆架区内潮混合的认识, 而且对于海上石油平台等海洋工程的建设和海洋经济的发展具有重要作用。

南海作为西太平洋最大的边缘海, 其内潮信号十分活跃(Alford et al, 2015; Xu et al, 2016)。南海北部陆架区的内潮既可由远处吕宋海峡生成后经南海海盆(梁辉, 2015)和南海北部陆坡区域中的亚临界

收稿日期: 2023-08-18 网络首发日期: 2024-06-12

资助项目: 中海石油(中国)有限公司科技项目(YXKY-ZX 10 2021); 中国海洋石油集团总公司“十四五”重大科技项目(KJGG2022-0202); 三亚崖州湾科技城科技计划项目(SKJC-2022-01-001); 海南省“南海新星”科技创新人才平台项目(NHXXRCXM202364)

作者简介: 尹汉军(1973—), 男, 正高级工程师, 硕士, 主要从事海洋工程方面研究. E-mail: yinhj@cnooc.com.cn

* 通信作者: 谢波涛(1980—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事海洋工程方面研究. E-mail: xiebt@cnooc.com.cn

(李燕 编辑)

地形(Klymak et al, 2011)后传至陆架,又可源于附近的陆坡和陆架地形区域(Duda et al, 2004)。目前关于南海陆架区内潮时空变化特征的研究结果存在多处不一致。在能量的频率分布上,蒋暑民等(2019)的观测结果表明陆架区全日内潮和半日内潮的能量强度相当,而Duda等(2004)和Gao等(2016)的观测结果显示在南海北部陆架区全日内潮明显强于半日内潮。在内潮的垂向模态结构上,Xu等(2013)和Gao等(2016)的观测表明南海北部陆架区全日内潮以第一模态为主,半日内潮以较高的第二模态为主,而蒋暑民等(2019)的观测结果表明全日内潮以第二模态为主,半日内潮以第一模态为主。这些研究表明南海北部陆架区内潮的时空特征具有很强的地域性,需对不同子区域的内潮进行研究。

本文采用布放于南海北部陆架海域的2套潜标的数据资料,针对半日和全日内潮开展了动力特征和能量诊断分析,并进一步研究了内潮的时间变化特征和垂向模态结构,明晰了南海北部陆架海域的内潮时空变化特征。

1 数据和方法

在南海东北部,标号为LF2和LH2的潜标被布放在南海北部陆架海域(图1)。2个站位处的水深分别为295 m和371 m。LF2和LH2站位处潜标观测的起止时间分别为2021年9月1日至11月19日、2021年8月27日至10月26日。每套潜标上配置有多台测温仪(Temperature logger, T),温盐深仪(conductivity-temperature-depth sensors, CTD)来获得海水的温度剖面数据,并安装了3~4台300 kHz和1台600 kHz声学多普勒流速剖面仪(acoustic doppler current profilers, ADCP)来测量海水流速,其中LF2站位处最上层换能器方向向上的ADCP于10月31日电量耗尽,最终获得时长约2个月的近全水深温度和流速数据。潜标仪器详细配置信息见表1。温度和盐度数据的采样间隔为1 min,流速数据的采样间隔为2 min。

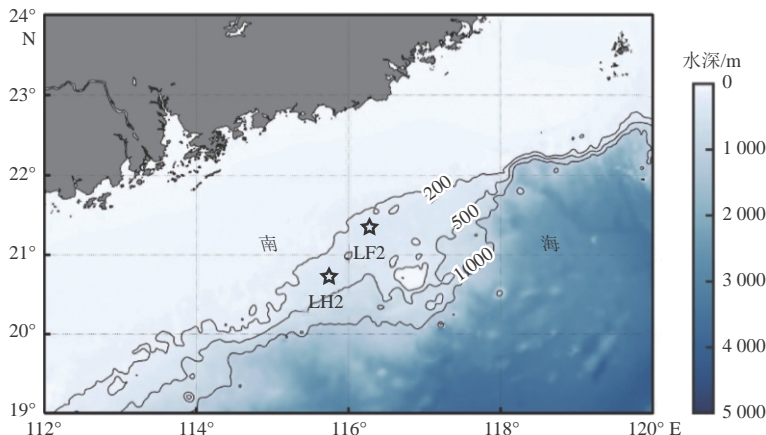


图1 潜标布放位置及南海东北部海底地形

Fig. 1 The location of the moorings and the topography in the northeastern SCS

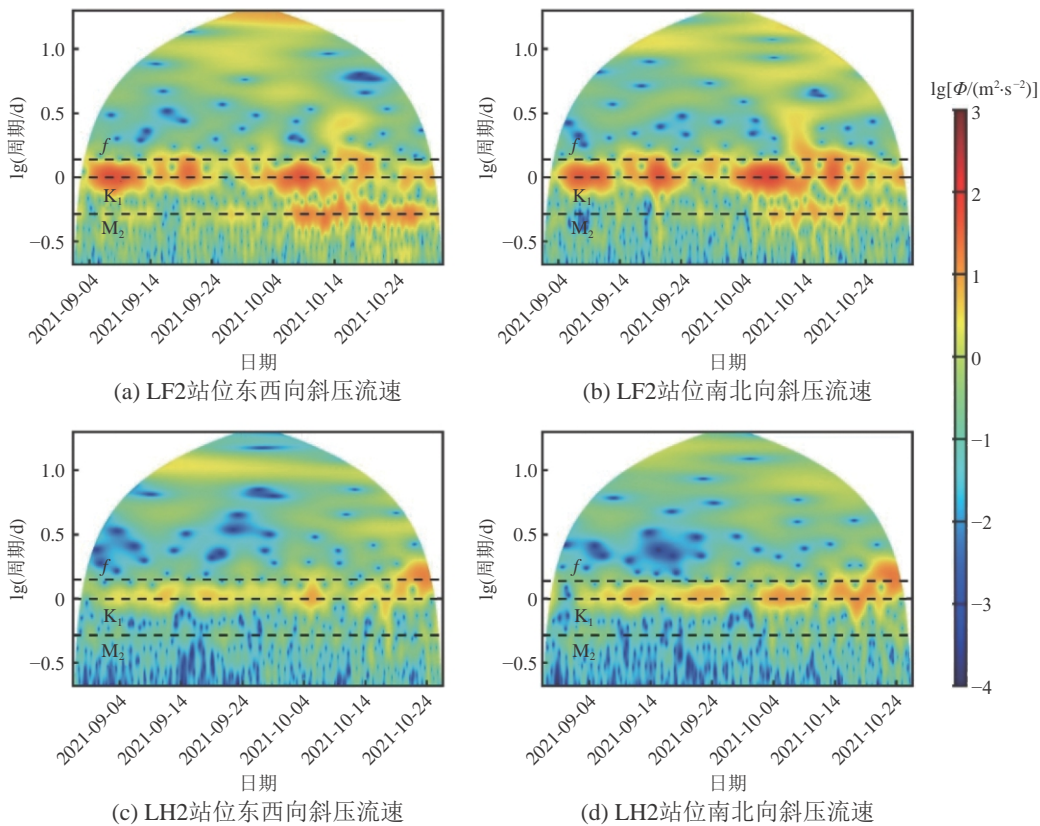
首先对观测数据进行质量控制,剔除上层ADCP因海表声波反射出现的奇异值,流速的有效观测深度范围为50 m至距海底15 m处,2套潜标资料中的流速数据深度覆盖率均超过了75%。然后将观测的流速和温度数据线性插值到垂向间隔为5 m和时间间隔为2 min的网格上。再参照Huang等(2018)的工作,将原始水平流速(u_{raw})进行正压流(u_{bt})和斜压流(u_{bc})分离,

$$u_{bc} = u_{raw} - u_{bt}, \quad (1)$$

式中:正压流为原始流速的全深度平均值,斜压流由原始流速减去正压流得出;利用温度数据计算出等温度面的垂向起伏;对斜压流速进行小波分析(结果见图2)选择合适的滤波频段;采用四阶巴

表 1 潜标仪器配置信息
Table 1 Configuration of the moorings

LF2 潜标			LH2 潜标			LF2 潜标			LH2 潜标		
序号	水深/m	设备	序号	水深/m	设备	序号	水深/m	设备	序号	水深/m	设备
1	50	CTD	13	150	CTD	1	50	CTD	13	150	CTD
2	60	T	14	160	T	2	60	T	14	160	T
3	70	T	15	180	T	3	70	T	15	180	T
4	80	T	16	200	CTD	4	80	T	16	200	CTD
5	90	T	17	220	T	5	90	T	17	220	T
6	91	300 kHz ADCP	18	240	T	6	93	300 kHz ADCP	18	240	T
7	93	300 kHz ADCP	19	278	300 kHz ADCP	7	95	300 kHz ADCP	19	260	T
8	100	CTD	20	280	600 kHz ADCP	8	100	CTD	20	271	300 kHz ADCP
9	110	T				9	110	T	21	280	T
10	120	T				10	120	T	22	300	T
11	130	T				11	130	T	23	354	300 kHz ADCP
12	140	T				12	140	T	24	356	600 kHz ADCP



注: 半日分潮 M_2 、全日分潮 K_1 分潮频率和局地惯性频率 f 在图中用虚线标注, 图中纵坐标和谱强度 Φ 均已取以 10 为底的对数。

图 2 100 m 深度处斜压流速的小波分析结果
Fig. 2 Wavelet analysis of baroclinic currents at 100 m

特沃斯滤波器对斜压流速和垂向起伏进行滤波, 并从中提取全日内潮 ($[0.85, 1.10]$ r/d) 和半日内潮 ($[1.85, 2.10]$ r/d) 引起的水平流速 (\mathbf{u}') 和垂向起伏 (η'), 为避免滤波带来的边界效应对分析结果产生影响, 将滤波后的第一天和最后一天的数据进行了剔除; 计算能量 (E_{total}) 和能通量 (\mathbf{F}):

$$E_{\text{total}} = \frac{1}{2}\rho_0 \int_{-H}^0 \langle \mathbf{u}'^2 \rangle dz + \frac{1}{2}\rho_0 \int_{-H}^0 \langle N^2 \eta'^2 \rangle dz, \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = \int_{-H}^0 \langle \mathbf{u}' p' \rangle dz, \quad (3)$$

式中: ρ_0 为参考密度 (1024 kg/m^3); N 为层化海水的浮频率; H 为水深; p' 为内潮引起的压强扰动,

$$p' = \int_z^0 \rho_0 N^2 \eta' dz - \frac{1}{H} \int_{-H}^0 \int_z^0 \rho_0 N^2 \eta' d\tilde{z} dz. \quad (4)$$

为了解内潮的垂向模态结构, 通过计算垂向模态函数并对内潮进行模态分解 (Nash et al, 2005), 可求得各模态能量占比和各模态 E_{total} 、 \mathbf{F} 的时间序列。为进一步分析背景场对内潮的时间变化特征的影响, 参照 Pickering 等 (2015) 中的方法, 对 \mathbf{u}' 、 η' 、 E_{total} 和 \mathbf{F} 进行相干和非相干分解, 本文中 E_{total} 和 \mathbf{F} 的非相干项包含了分解过程中出现的交叉项。

2 观测结果与分析

2.1 内潮引起的水平流速

由 LF2 站位处内潮引起的流速分布 (图 3) 可以看出, 每个频段的南北向流速结构和东西向流速结构都十分相似。全日内潮引起的流速呈现出“三明治”结构, 即大约在上 100 m、100~200 m 和 200 m 以下均出现流速的极大值, 而半日内潮呈现出以大约 150 m 深度为界限的双层垂向结构。在整个观测期间, LF2 站位处全日内潮引起的流速最大值为 $7.72 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 发生在 9 月 21 日, 位于 290 m

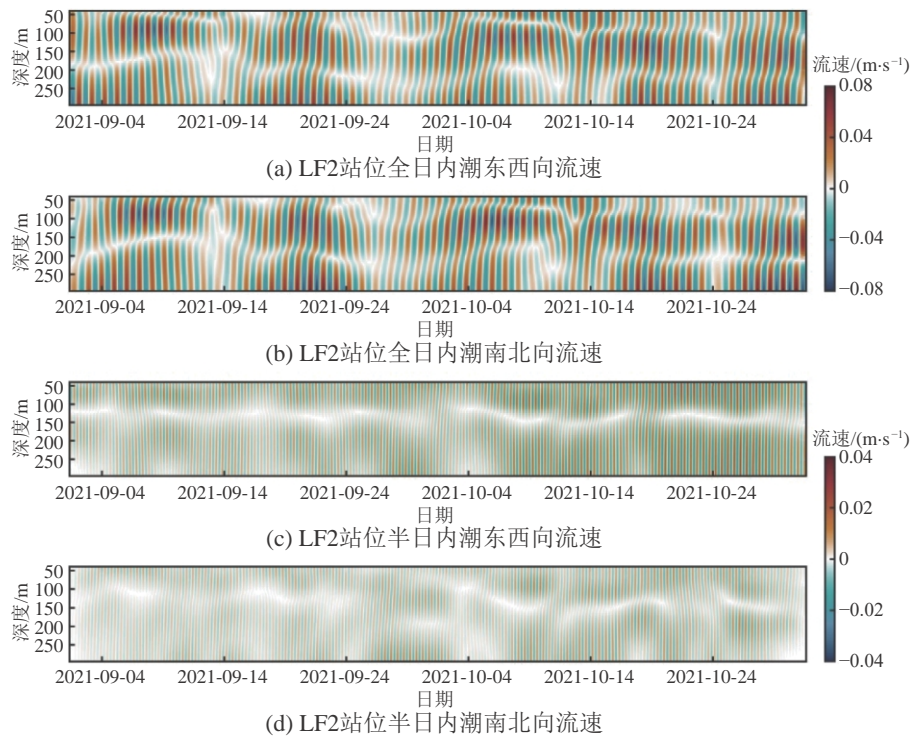


图 3 LF2 站位内潮引起的流速分布

Fig. 3 Baroclinic tidal currents at LF2

深度处; 半日内潮引起的流速最大值为 $2.18 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 发生在 10 月 21 日, 位于 50 m 深度处; 全日和半日内潮引起的流速之和最大值为 $8.32 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 发生在 9 月 21 日, 位于 290 m 深度处。

由 LH2 站位处内潮引起的流速分布(图 4)可以看出, 每个频段的南北向和东西向流速结构都十分类似。全日内潮引起的流速以双层结构为主, 而半日内潮则双层和三层结构居多。在整个观测期间, LH2 站位处全日内潮引起的流速最大值为 $6.51 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 发生在 10 月 14 日; 半日内潮引起的流速最大值为 $0.95 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 发生在 9 月 20 日; 全日和半日内潮引起的流速之和最大值为 $6.66 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 发生在 10 月 13 日。这些最大值均出现在上层, 即 50 m 深度处。

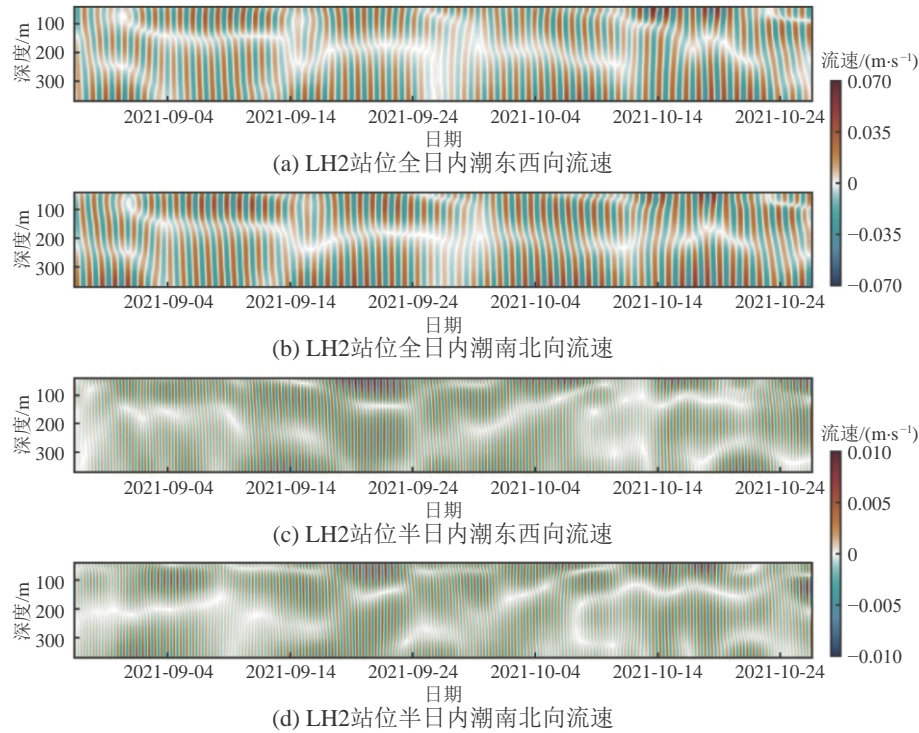


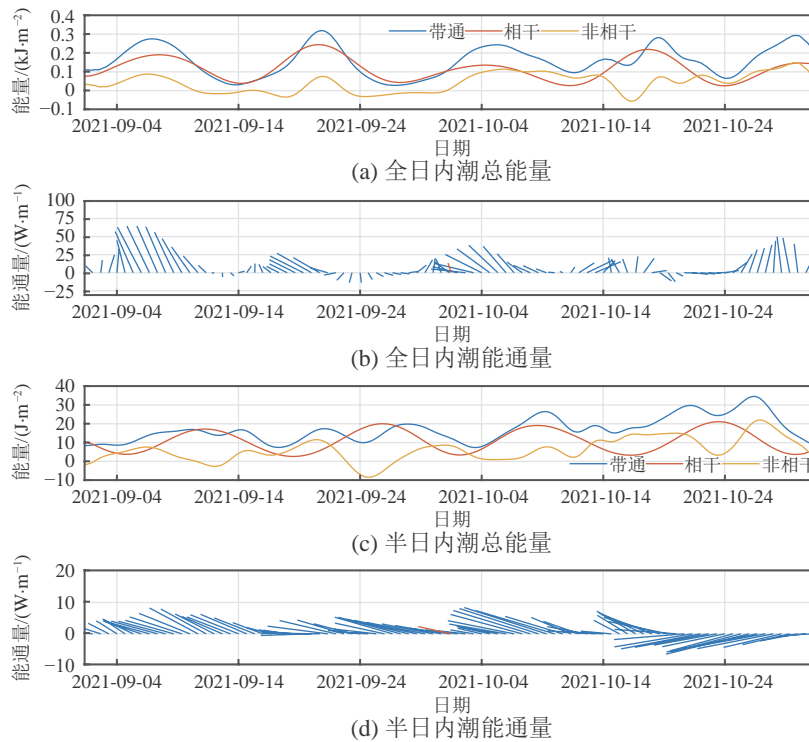
图 4 LH2 站位内潮引起的流速分布

Fig. 4 Baroclinic tidal currents at LH2

2.2 内潮能量和能通量的时间序列

由 LF2 潜标处观测所得的内潮能量的时间变化(图 5)可以看出, 在整个观测期间, 全日内潮能量的平均值为 0.16 kJ/m^2 , 全日内潮能量在 9 月 20 日达到最大值, 为 0.32 kJ/m^2 , 但其非相干部分的最大值出现在 10 月 29 日, 值为 0.16 kJ/m^2 。LF2 处全日内潮能通量平均值为 28.48 W/m , 其平均方向角为 109° (正 E 向为 0° , 逆时针旋转), 指向 NW 且接近正 N 向。与全日内潮能量变化不同, LF2 处全日内潮能通量振幅最大值出现在 9 月 6 日(图 5b), 此时能通量方向角为 117° , 为 NW 向且接近正 N 向。在整个观测时间内, 全日内潮能通量方向并非都接近正 N 向, 其方向角在 $[0^\circ, 360^\circ]$ 区间内变化, 其中在 10 月 18 日左右的大潮期间, 方向角位于 $[270^\circ, 360^\circ]$ 区间内, 能通量方向为 SE 向, 与平均态结果几乎完全相反。LF2 处全日能通量方向的多变表明此处内潮的源地多样性, 包括 LF2 西北部水深更浅的陆架区域、东南部的陆坡区域乃至更偏东侧的吕宋海峡区域, 且源于这些区域的内潮在 LF2 站位处强度可能相当, 均不可忽略。

在整个观测期间, LF2处半日内潮能量的平均值为 0.02 kJ/m^2 。与全日内潮能量 ($O(10^{-1}) \text{ kJ/m}^2$) 相比, 半日内潮能量小一个数量级, 这与小波分析(图2)得出的半日频段斜压流能量弱于全日频段的结果一致。半日内潮能量和其非相干部分的最大值均出现在10月26日, 量值分别为 34.98 J/m^2 和 22.57 J/m^2 (图5c)。LF2处半日内潮能通量振幅平均值为 15.89 W/m , 平均方向角为 171° , 接近正W向。能通量振幅最大值出现在10月26日(图5d), 这与半日内潮能量最大值发生时刻相近。半日内潮能通量方向在10月20日之前主要为NW向, 但在10月下旬转为SW向。



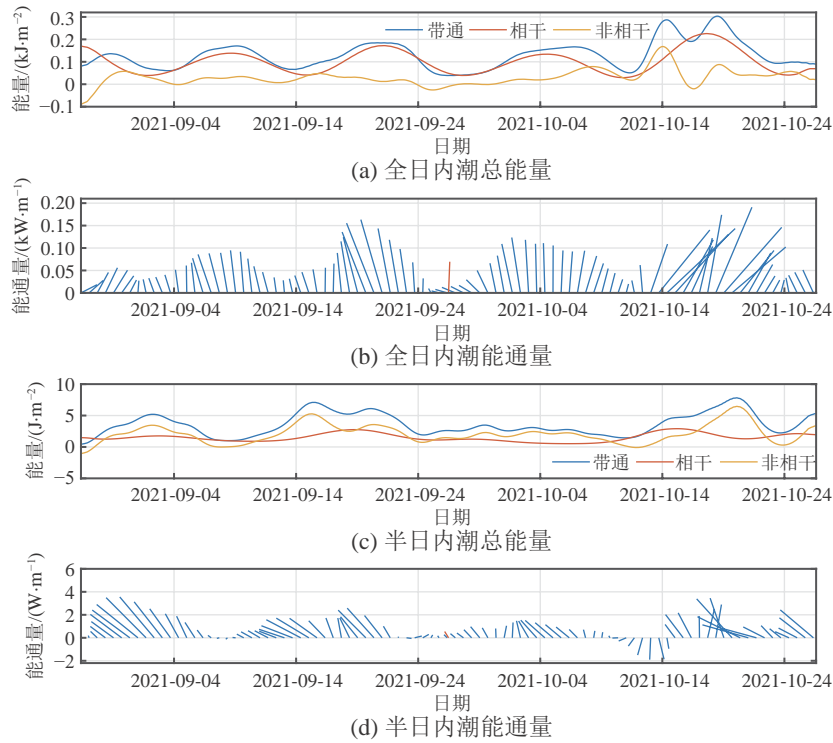
注: 图b和图d中间时刻处的红色矢量为整个观测期间平均后的相干能通量(F^s)。

图5 LF2 站位处内潮的能量和能通量

Fig. 5 Energy and flux of internal tide at LF2

图6为LH2潜标处观测所得的内潮能量和能通量的时间变化。在整个观测期间, 全日内潮能量的平均值为 0.12 kJ/m^2 , 能通量平均值为 79.23 W/m , 平均方向为 86° (正E向为 0° , 逆时针旋转), 接近正N向。全日内潮能量在10月18日达到最大值(0.31 kJ/m^2), 其非相干部分的最大值在此时间点2天出现, 量值为 0.17 kJ/m^2 。与全日内潮能量时间变化不同, 全日内潮最强能通量出现在10月15日, 此时能通量方向角为 50° , 与整个观测期间平均后能通量方向(86°)相比更为偏东。

在整个观测期间, LH2处半日内潮能量的平均值为 3.57 J/m^2 , 能通量平均值为 1.82 W/m , 平均方向为 135° , 为NW向, 但在10月中旬转为S向。与全日($O(100) \text{ J/m}^2$)相比, 半日内潮能量和能通量约小2个数量级。半日内潮能量和其非相干部分的最大值均出现在10月19日左右, 量值分别为 8.10 J/m^2 和 6.74 J/m^2 (图6c)。半日内潮最强能通量出现在9月1日(图6d), 方向为NW向(135°), 与平均方向相近。



注: 图 b 和图 d 中间时刻处的红色矢量为整个观测期间平均后的相干能通量(F^s)。

图 6 LH2 站位处内潮的能量和能通量

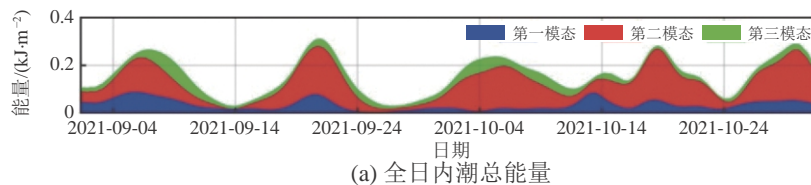
Fig. 6 Energy and flux of internal tide at LH2

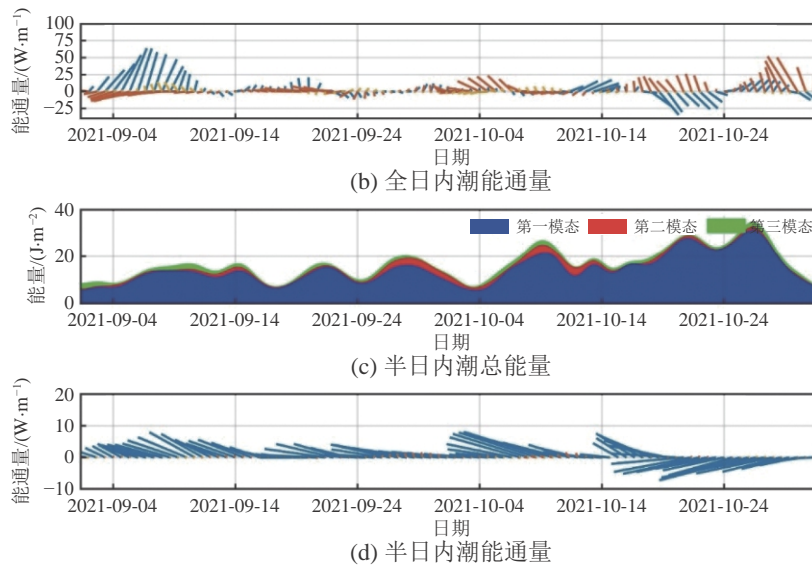
2.3 内潮的垂向模态结构

图 7 为由潜标 LF2 观测数据计算得出的全日内潮各模态能量和能通量。在整个观测期间, LF2 处全日内潮第一、二和三模态的能量占比分别为 22%、62% 和 13%, 即第二模态占主。与全日内潮能量第二模态占主不同, 全日内潮能通量第一模态和第二模态量值相当, 二者振幅的平均值分别为 20.46 W/m 和 20.36 W/m。然而, 第一模态和第二模态能通量方向却明显不同, 在 9 月上旬当第一模态能通量方向偏北时, 第二模态能通量方向偏南; 在 10 月 15 日至 24 日期间当第一模态能通量方向偏南时, 第二模态能通量方向偏北, 这表明第一和第二模态能通量在南北向上方向相反。

图 7c 和图 7d 为潜标 LF2 观测半日内潮各模态能量和能通量的时间变化。在整个观测期间, 半日内潮第一、二和三模态的能量占比分别为 87%、8% 和 5%, 即第一模态占主。半日内潮的第一和第二模态能通量的平均值分别为 15.76 W/m 和 0.54 W/m, 这表明与能量的垂向模态结构相近, 半日内潮的能通量同样为第一模态占主。

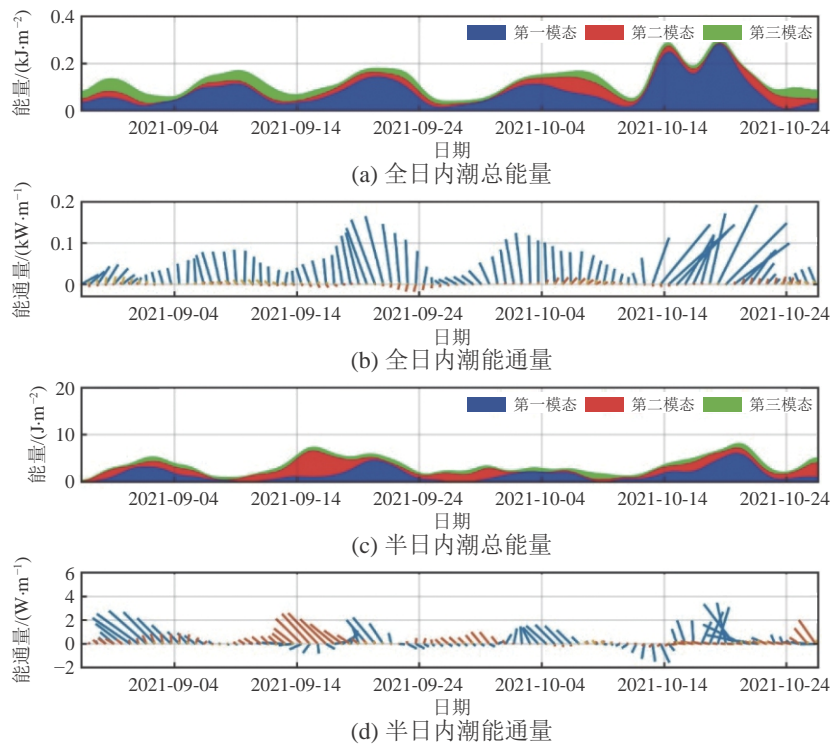
图 8 为潜标 LH2 观测内潮各模态能量和能通量的时间序列。在整个观测期间, LH2 处全日内潮第一、二和三模态的能量占比分别为 65%、19% 和 15%, 其中第一模态占主; 半日内潮第一、二和三模态的能量占比分别为 49%、38% 和 16%, 同样为第一模态占比最大, 但第二模态能量与第一模态量值接近。9 月中旬, LH2 处半日内潮第一和第二模态能通量在南北向存在反位相关系, 这与前面提及的 LF2 处全日内潮情况相近。





注：图 b 和图 d 中的蓝色和红色矢量分别代表第一和第二模态内潮的能通量。

图 7 LF2 站位处第一至第三模态内潮的能量和能通量
 Fig. 7 Energy and flux of modes 1-3 of internal tide at LF2



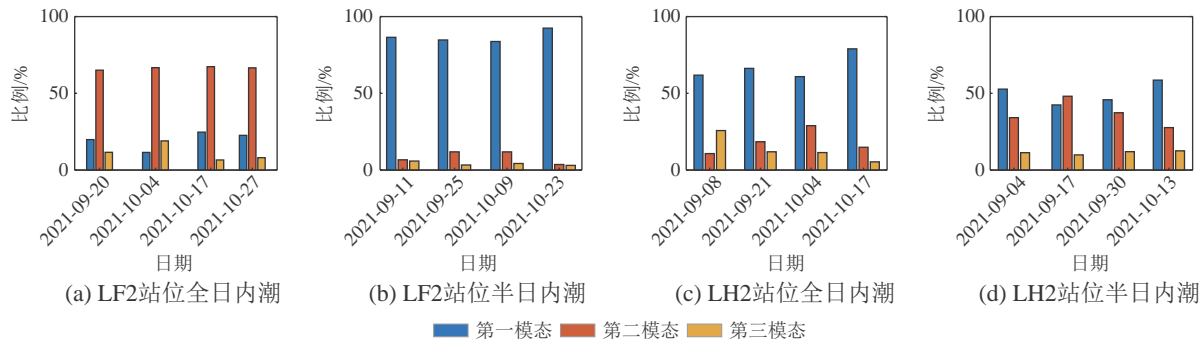
注：图 a 和图 c 中纵坐标的单位并不相同；图 b 和图 d 中的蓝色和红色矢量分别代表第一和第二模态内潮的能通量。

图 8 LH2 站位处第一至第三模态内潮的能量和能通量
 Fig. 8 Energy and flux of modes 1-3 of internal tide at LH2

内潮的垂向模态占比同样具有时间变化的特征。根据各潜标处内潮能量相关部分的大小潮周期变化(图 5 和图 6)，将内潮能量相关部分的极小值出现的时间作为内潮大潮的起止时间。LF2 处内

潮和 LH2 处内潮均历经了 4 个完整的大小潮周期。

如图 9 所示, LF2 处全日内潮第一模态能量占比在 4 个大小潮周期内均低于 30%, 其中占比最小值出现在第 3 个大小潮周期(9 月 28 日至 10 月 10 日), 为 10%。全日内潮第二模态能量占比在 4 个大小潮周期内均高于 40%, 其中在第 1 个大小潮周期(9 月 1 日至 14 日)内占比最低为 42%, 其他 3 个大小潮周期内均高于 60%。第三模态能量占比在 4 个大小潮周期内均小于 25%。与全日内潮相比, LF2 处半日内潮各模态能量占比在 4 个大小潮周期之间变化并不明显, 各模态能量占比变化幅度均不超过 6 个百分点。



注: 横坐标为每个大小潮的中间时刻。不同潜标和不同频段内潮历经的大小潮时间均不相同。

图 9 不同大小潮周期内各模态内潮能量占比

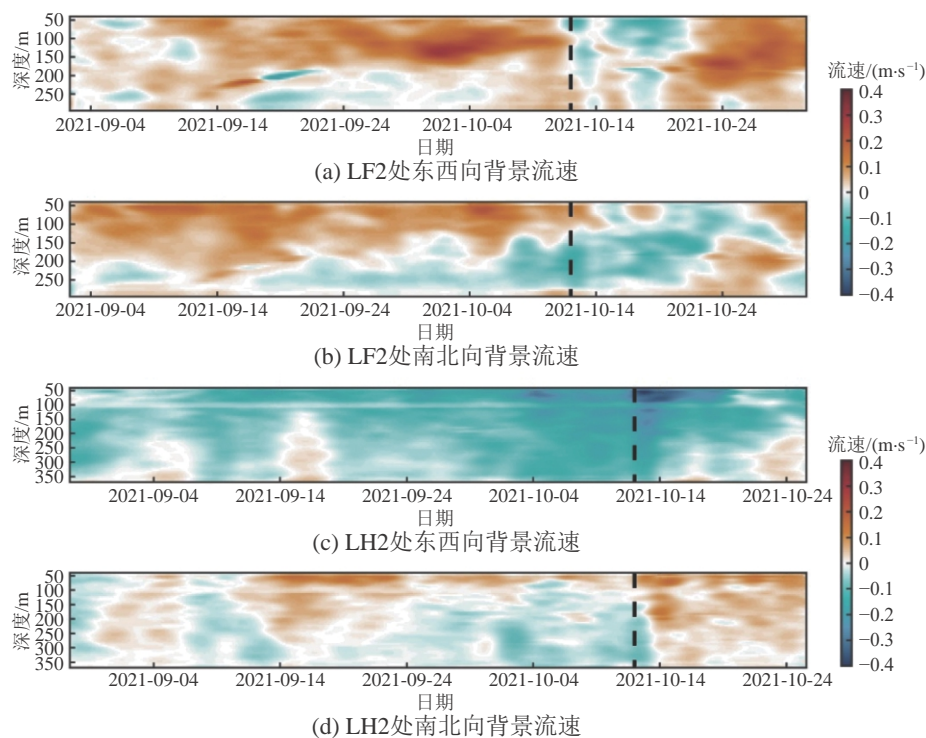
Fig. 9 Modal ratio of internal tide energy in different spring-neap periods

LH2 处全日内潮第一模态能量占比在 4 个大小潮周期内均高于 60%, 其中占比最大值出现在第 4 个大小潮周期(10 月 10 日至 24 日), 为 79%。全日内潮第二模态能量占比在 4 个大小潮周期内均低于 30%, 其中在第 3 个大小潮周期(9 月 27 日至 10 月 10 日)内占比最高为 29%。第三模态能量占比在 4 个大小潮周期内均小于 30%, 其中在第 1 个大小潮周期(9 月 1 日至 14 日)内占比最高为 25%。LH2 处半日内潮第一模态能量占比在 4 个大小潮周期内均高于 40%, 其中占比最大值出现在第 4 个大小潮周期(10 月 6 日至 20 日), 为 60%。第二模态能量占比在第 2 个大小潮周期(9 月 10 日至 25 日)最大, 为 48%。第三模态能量占比的时间变化则并不明显。

2.4 内潮与背景场的联系

LF2 潜标站位处半日内潮在 10 月 20 日之前主要向 NW 向传播, 但在此之后改为向 SW 向传播。全日内潮在 10 月中旬前半段时间内, 主要向 NE 向传播, 但在 10 月中旬后半段和下旬, 改为向 SE 向传播(图 10 a 和图 10 b)。与此同时, LF2 站位处背景流在 10 月中下旬发生明显变化, 10 月 12 日之前多为 NE 向背景流, 10 月 12 日至 20 日期间, 纬向背景流在 150 m 以浅变为 W 向流, 经向背景流则在 150~250 m 变为 S 向流, 在 10 月 20 日之后又逐渐恢复为 NE 向流。LF2 处内潮传播方向和背景流方向均在 10 月中旬发生明显变化。

LH2 潜标站位处全日内潮能通量方向在 10 月 12 日之前多为接近正 N 向(86°)(图 6), 但在此之后传播方向沿顺时针方向变化, 变得更为偏 E 向(50°)。与此同时, 潜标观测到 100 m 以深的背景流(图 10c 和图 10d)方向也在 10 月 12 日前后发生了顺时针方向的变化: 在 10 月 12 日之前多为 SW 向, 在 10 月 12 日 W 向背景流达到最大, 超过 0.35 m/s, 并在 10 月 15 日之后方向变为 NW 向。二者方向变化的一致性表明 10 月中旬 LH2 全日内潮传播方向的变化可能与局地的背景流方向变化有关。



注：背景流速通过对原始流速进行低通滤波(周期大于2天)提取得到；黑色虚线对应的日期为2021年10月12日。

图 10 背景流速

Fig. 10 Background currents

3 结 语

本文基于2套南海北部陆架海域的全水深潜标观测数据,探究了油气区全日和半日内潮的时空变化特征,并与背景场变化开展了对应性分析,得到的主要结果如下。

1) 2套潜标观测到的半日内潮信号均弱于全日内潮,其中LF2站位处半日内潮能量比全日内潮能量小一个数量级,LH2站位处半日内潮能量比全日内潮能量小2个数量级。

2) LF2站位处全日内潮方向角的平均值为 109° (正向为 0° ,逆时针旋转),整个观测期间内在 $[0^\circ, 360^\circ]$ 区间内变化;半日内潮传播方向在10月中旬由NW向变为NS向。LH2站位处全日内潮方向角的平均值为 86° ,在10月中旬变为 50° ;半日内潮主要向NW向传播,但在10月中旬变为向南传播。内潮传播方向在10月中旬的改变与观测背景流的变化有良好的对应关系,但造成背景流变化的原因未来还需借助更多的资料进行分析。

3) 在垂向模态结构方面,陆架区内潮主要以第一模态为主,但LF2潜标处全日内潮较为特殊,其以第二模态为主,另外LH2潜标处在第2个和第3个大小潮期间内观测的半日内潮第一和第二模态能量占比相当。

本文结果显示,受复杂地形和背景动力等影响,南海北部油气区内潮存在显著的时空变化。未来可考虑布放更长观测时间、覆盖更大空间范围、数量更多的潜标,或者借助数值模式对南海陆架区的内潮进行更为详细的分析描述。

参考文献 (References):

- 蒋暑民,戴德君,乔方利,等,2019.南海北部陆架海域内潮特征的观测研究[J].海洋与湖沼,50(1):1-11. JIANG S M, DAI D J, QIAO F L, et al, 2019. The internal tides on continental shelf of the northern South China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 50(1): 1-11.
- 梁辉,2015.南海北部内潮与近惯性内波观测研究[D].青岛:中国海洋大学. LIANG H, 2015. Observational study on the internal tides and near-inertial internal waves in the northern South China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China.
- ALFORD M H, PEACOCK T, MACKINNON J A, et al, 2015. The formation and fate of internal waves in the South China Sea[J]. *Nature*, 521(7550): 65-69.
- BAINES P G, 2007. Internal tide generation by seamounts[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 54(9): 1486-1508.
- DUDA T F, LYNCH J F, IRISH J D, et al, 2004. Internal tide and nonlinear internal wave behavior at the continental slope in the northern South China Sea[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 29(4): 1105-1130.
- GAO D, JIN G, LÜ X, 2016. Temporal variations in internal tide multimodal structure on the continental shelf, South China Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 35(1): 70-78.
- HUANG X D, WANG Z Y, ZHANG Z W, et al, 2018. Role of mesoscale eddies in modulating the semidiurnal internal tide: observation results in the northern South China Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 48(8): 1749-1770.
- KELLY S M, NASH J D, 2010. Internal-tide generation and destruction by shoaling internal tides[J]. *Geophysical Research Letters*, 37(23): L23611.
- KLYMAK J M, ALFORD M H, PINKEL R, et al, 2011. The breaking and scattering of the internal tide on a continental slope[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 41(5): 926-945.
- KUNZE E, 2017. Internal-wave-driven mixing: global geography and budgets[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 47(6): 1325-1345.
- MUNK W, WUNSCH C, 1998. Abyssal recipes II: energetics of tidal and wind mixing[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 45(12): 1977-2010.
- NASH J D, ALFORD M H, KUNZE E, 2005. Estimating internal wave energy fluxes in the ocean[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22(10): 1551-1570.
- PICKERING A, ALFORD M, NASH J, et al, 2015. Structure and variability of internal tides in Luzon Strait[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 45(6): 1574-1594.
- WHALEN C B, DE LAVERGNE C, GARABATO A C N, et al, 2020. Internal wave-driven mixing: governing processes and consequences for climate[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(11): 606-621.
- WUNSCH C, FERRARI R, 2004. Vertical mixing, energy, and the general circulation of the oceans[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 36(1): 281-314.
- XU Z, YIN B, HOU Y, et al, 2013. Variability of internal tides and near-inertial waves on the continental slope of the northwestern South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(1): 197-211.
- XU Z, LIU K, YIN B, et al, 2016. Long-range propagation and associated variability of internal tides in the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(11): 8268-8286.
- ZHAO Z, ALFORD M H, LIEN R-C, et al, 2012. Internal tides and mixing in a submarine canyon with time-varying stratification[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 42(12): 2121-2142.

Spatiotemporal Characteristics of Internal Tides on the Continental Shelf of the Northern South China Sea Based on Mooring Observations

YIN Hanjun¹, XIE Botao¹, ZHANG Qi¹, HUANG Bigui¹, HUANG Xiaodong^{2,3}

(1. *China National Offshore Oil Corporation Research Institute Company Limited, Beijing 100028, China;*

2. *Key Laboratory of Ocean Observation and Information of Hainan Province, Sanya Oceanographic Institution, Ocean University of China, Sanya 572024, China;*

3. *Key Laboratory of Physical Oceanography of the Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

Abstract: Based on the observational data from two moorings deployed in the northern South China Sea, the spatiotemporal variation of internal tide (IT) in the oil and gas field is investigated. The results show that IT at the station LF2 was stronger and the maximum baroclinic tidal current was $8.3 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, which appeared at 290 m depth. Wavelet and energy analysis show that the energy of semidiurnal IT was 1-2 orders smaller than that of diurnal IT in magnitude. The vertical structure of diurnal IT at LF2 was dominated by the second mode while the semidiurnal IT was dominated by the first mode. The diurnal IT at LH2 was dominated by the first mode, but the semidiurnal IT was characterized by both the first and second modes. The averaged propagation directions of diurnal IT at the two mooring stations were both close to due north, while the semidiurnal IT propagated mostly northwestward. However, in mid October, the semidiurnal IT propagation direction at LF2 changed from northwest to southwest, and the diurnal IT propagation direction at LH2 changed from north to northeast. With the analysis of background flow, it is found that the change of IT propagation direction in mid October is probably caused by the change in background field. These findings will help to deepen our understanding of the temporal and spatial characteristics of ITs in the continental shelf area and promote our understanding on the variation mechanisms of the IT in the oil and gas field in the northern South China Sea.

Keywords: the northern South China Sea; waves on the continental shelf; internal tide; vertical mode

Received: August 18, 2023 **Online:** June 12, 2024

陆丰海域秋季第一模态内孤立波观测特征分析

李 达¹, 刘 涛¹, 谢波涛^{1*}, 黄必桂¹, 张 琪¹, 黄晓冬^{2,3,4}

- 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100024;
- 中国海洋大学三亚海洋研究院, 海南 三亚 572024;
- 海南省海洋立体观测与信息重点实验室, 海南 三亚 572024;
- 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 南海北部内孤立波异常活跃, 具有极强的非线性、极高的强度和极大的能量, 其传播特性和精细结构在背景过程影响下更加复杂, 加剧了内孤立波预报和海上石油平台作业的难度。基于南海北部陆丰海域 295 m 水深处一套潜标连续 79 d 的观测资料, 分析了秋季内孤立波的波动特征和统计规律。典型内孤立波表现为波列的形式, 头波振幅达 86.7 m, 在海洋上层导致局地增温超过 8.0 °C, 并诱发最大达 0.83 m/s 的西向流和 0.60 m/s 的北向流, 在波前产生最大达 0.25 m/s 的下降流。对观测期间捕捉到的 91 个内孤立波统计分析表明, 内孤立波主要沿 WNW 方向传播, 平均振幅为 59.9 m, 在海洋上层诱发的最强西向流速平均值为 0.79 m/s; 在天文大潮时期, 内孤立波在 04:00 至 06:00 和 16:00 至 19:00 频繁出现, 且农历初二至初五和十六至十八期间经过陆丰海域的内孤立波具有更大的强度。此外, 全日内潮与半日内潮共同作用下压了温跃层, 导致典型内孤立波中形成了 1 个上凸波动, 其在近底层导致局地降温达 1.3 °C, 并诱发超过 0.30 m/s 的西向流和 0.20 m/s 的北向流; 该上凸波动陡峭的波前汇聚了强剪切, 极易触发剪切不稳定。本研究结果可为陆丰海域海上石油平台施工、勘探船作业等提供重要参考。

关键词: 南海北部; 陆丰海域; 内孤立波; 潜标观测

中图分类号: P731.24

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2024)04-0623-11

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20230828002

引用格式: 李达, 刘涛, 谢波涛, 等, 2024. 陆丰海域秋季第一模态内孤立波观测特征分析[J]. 海洋科学进展, 42(4): 623-633. LI D, LIU T, XIE B T, et al, 2024. Property of the first-mode internal solitary waves in autumn in the Lufeng Area in northern South China Sea revealed by mooring observations[J]. Advances in Marine Science, 42(4): 623-633.

内孤立波是海洋中常见的物理现象, 发生在南海北部的内孤立波最为活跃, 具有周期短、振幅大、流速强的特征(Cai et al, 2012; Alford et al, 2015)。南海北部内孤立波起源于吕宋海峡天文潮与双海脊地形非线性相互作用(Zhao et al, 2006), 在深海盆地可发展成振幅超过 240 m、水平流速超过 2.5 m/s 的极强内孤立波(Huang et al, 2016), 继续向西传播至陆坡-陆架区时多种不稳定被激发(Lien et al, 2014; Huang et al, 2022)并发生极性转化(Orr et al, 2003), 最终在浅水陆架区耗散消亡(刘志宇等, 2022)。南海北部内孤立波极强的非线性伴随着其生成-传播-耗散-消亡的生命周期, 对海上石油平台建设、勘探船作业构成巨大威胁。

收稿日期: 2023-08-28 网络首发日期: 2024-07-15

资助项目: 中海石油(中国)有限公司科技项目(YXKY-ZX 10 2021); 中国海洋石油集团总公司“十四五”重大科技项目(KJGG2022-0202); 三亚崖州湾科技城科技计划项目(SKJC-2022-01-001); 海南省“南海新星”科技创新人才平台项目(NHXXRCXM202364)

作者简介: 李 达(1979—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事海洋工程方面研究. E-mail: lida@cnooc.com.cn

*通信作者: 谢波涛(1980—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事海洋环境条件、海洋水动力要素等方面研究. E-mail: xiebt@cnooc.com.cn

(王 燕 编辑)

近年来,针对南海北部陆架区内孤立波,学者们开展了大量的观测和研究。在波动形态方面,Zhao等(2004)根据多年卫星图像统计发现内孤立波在 118°E 以西演变成包含多个波动的波列,且波动强度沿着波列前进方向逐渐减弱(Apel, 2003; Alford et al, 2010)。在波动特征方面,Ramp等(2004)利用陆架区350 m水深处的潜标观测数据发现,波列内强度最大的头波在海洋上层诱发1.25 m/s的西向流和0.95 m/s的北向流,在波前产生最大达0.60 m/s的下降流,他们在后续的工作中揭示出内孤立波具有“冬季弱夏季强”的季节变化特征(Ramp et al, 2010),Huang等(2017)认为中尺度涡对背景层结和背景流的改变是内孤立波强度呈现季节变化的主要因素。在波动极性方面,Orr等(2003)利用船载观测记录了一列上凸波动在190 m水深附近形成的过程,Zhang等(2018)利用潜标阵列刻画了内孤立波在250 m水深处的极性转化过程,且他们提出中尺度涡和内潮对背景层结的调制作用影响了极性转化发生的位置。

与此同时,南海也是我国最大的海洋油气储存区,素有“第二个波斯湾”之称(陈洁等, 2007; 钟广见等, 2013),目前总探明油气储量约350亿t油当量,是我国油气增储上产增长极和接替区的理想之地。然而,已规模开发的陆架区油田群恰好处于内孤立波传播主轴上,波致强流和剪切以及波动携带的巨大能量极易在短时间内引起石油平台移位(王火平等, 2022),且多尺度背景过程调制下内孤立波诱发的海洋环境场更加复杂,为此,亟须明晰陆架区内孤立波精细结构,保障海上平台施工作业安全。本研究基于2021年秋季在南海北部陆丰海域布放的一套潜标的连续观测资料,分析典型内孤立波波动特征和内孤立波统计规律,探讨内潮对内孤立波精细结构的影响,以期海上平台安装与作业提供重要科学依据。

1 陆丰海域潜标观测数据介绍

1.1 潜标站位及仪器配置

2021年9月1日至11月18日,在南海北部陆丰海域295 m水深处布放了一套潜标(图1)。为刻画全水深流速场,在潜标91 m和278 m深度处各安装了1台换能器向上的300 kHz多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP),在93 m深度处安装了1台换能器向下的300 kHz ADCP,层厚为4 m,共23层;在280 m深度处安装了1台换能器向下的600 kHz ADCP,层厚为0.5 m,共38层,4台ADCP采样频率均为2 min。为刻画全水深温度场,在160 m深度以浅每间隔10 m安装一台温盐深剖面仪(Conductivity-Temperature-Depth, CTD)或测温仪(Temperature loggers, T),160~240 m深度范围内每间隔20 m安装一台CTD或T,温度链采样频率为1 min。

1.2 数据质量控制

为准确地揭示陆丰海域内孤立波特征,需要先对潜标原始数据进行质量控制。对于ADCP记录的流速数据,考虑到内孤立波诱发的强流易造成潜标缆绳水平偏移,当纵摇和横摇角度大于 20° 时,

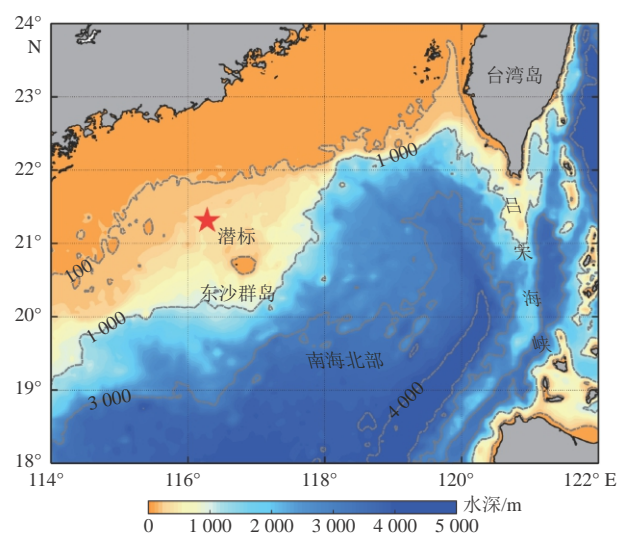
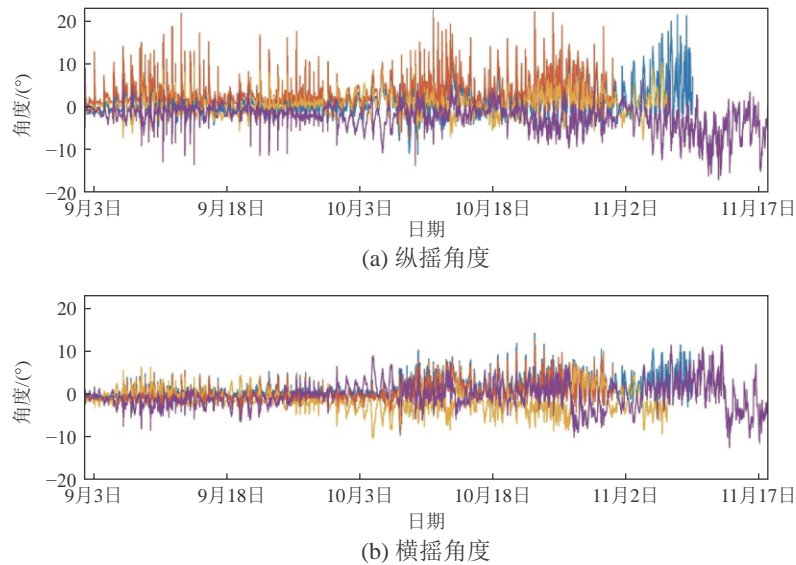


图1 南海北部及吕宋海峡地形

Fig. 1 Bathymetry of northern South China Sea (SCS) and the Luzon Strait

认为流速数据无效。由图 2 可见, 内孤立波造成 6 个时刻的纵摇角度大于 20° , 故先将这 6 个时刻对应的流速值剔除; 其次, 考虑到海表面对声学信号的漫反射, 将上 20 m 的流速观测值剔除; 最后, 将流速数据插值到以 4 m 为间隔的网格上。2021 年 9 月 3 日至 10 月 28 日期间上 180 m 纬向流速质量控制前后的对比如图 3a 和图 3b 所示。



注: 橙线为 91 m 深度处安装的换能器向上的 ADCP、蓝线为 93 m 深度处安装的换能器向下的 ADCP、黄线为 278 m 深度处安装的换能器向上的 ADCP、紫线为 280 m 深度处安装的换能器向下的 ADCP 的纵摇(图 a)或横摇(图 b)角度。

图 2 潜标在位期间所有 ADCP 纵摇和横摇角度时间序列
Fig. 2 Time series of pitch and roll of all the ADCPs during mooring observation period

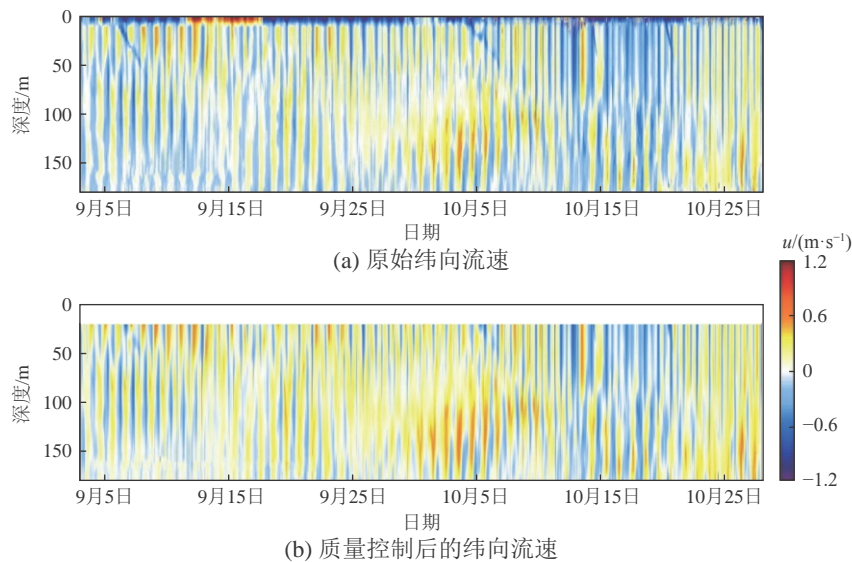


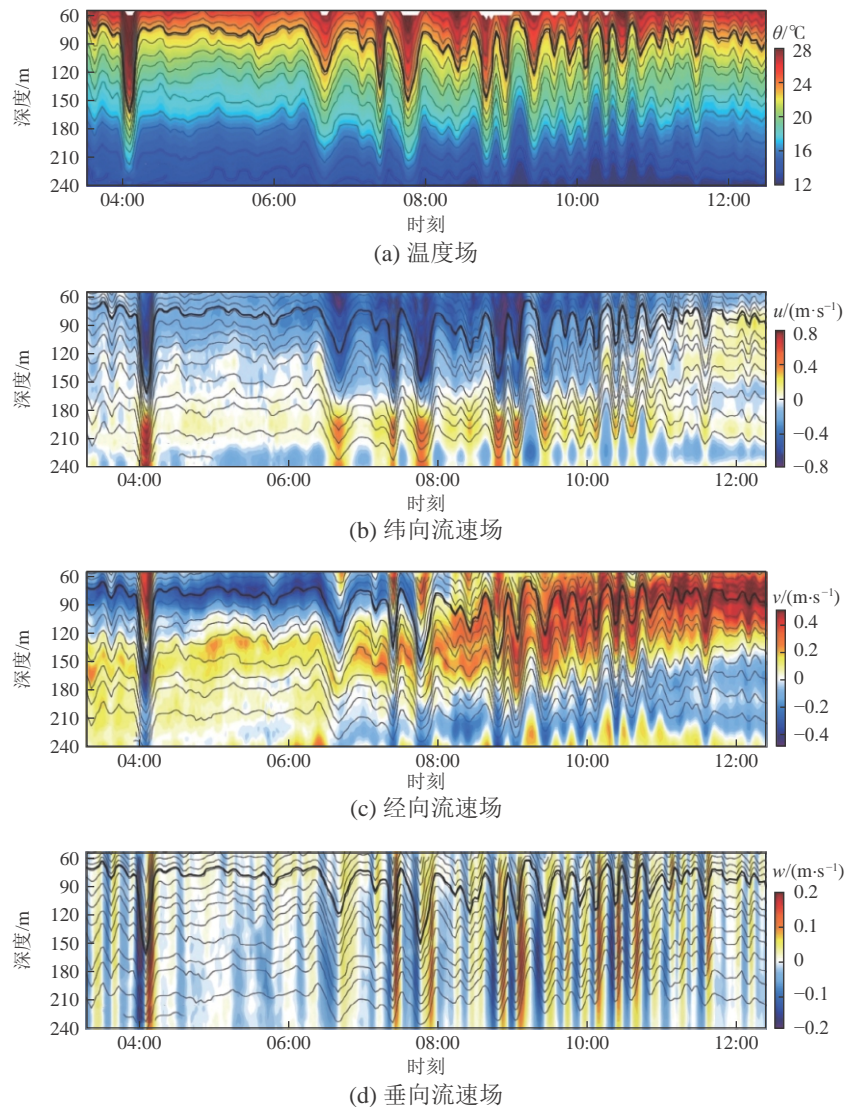
图 3 质量控制前后纬向流速对比
Fig. 3 Comparison of zonal velocity before and after quality control

对于温度数据的质量控制, 首先需要根据仪器布放位置, 通过线性插值 CTD 深度求出各测温仪 T 所在深度, 接着再将温度场原始数据插值到以 4 m 为间隔的网格上。

2 内孤立波特征及统计分析

2.1 秋季典型内孤立波特征

在南海北部陆丰海域秋季连续 79 d 的潜标观测中, 共捕捉到 91 个内孤立波, 从中挑选 2021 年 9 月 9 日 04:00 至 12:00 经过潜标的内孤立波作为典型内孤立波, 详细刻画了其温度和流速结构。整体而言, 典型内孤立波具有第一模态垂向结构, 其导致海洋上层和下层产生方向相反的水平流速。受复杂地形影响, 典型内孤立波演变成至少包含 17 个波动的波包, 头波(波谷时刻为 04:06)引起的等温线起伏最为显著, 它使 19.8~25.9 °C 等温线在 15 min 内下降超过 80 m, 其中 23.2 °C 等温线起伏达 86.7 m(图 4a 中黑色粗曲线)。同时, 头波在海洋上层分别诱发了量值达 0.83 和 0.60 m/s 的西向



注: 黑色细曲线为间隔为 1.0 °C 的等温线, 黑色粗曲线为垂向起伏最大的 23.2 °C 等温线。

图 4 2021 年 9 月 9 日 03:20 至 12:20 经过潜标位置处的典型内孤立波特征
 Fig. 4 Property of the typical internal solitary waves (ISWs) arriving at the mooring from 03:20 to 12:20 on September 9, 2021

和北向流, 在海洋下层分别诱发了量值最高达 0.99 和 0.59 m/s 的东向和南向流(图 4b 和图 4c)。根据上层西向流速与北向流速的比值, 推算出内孤立波沿 312°(正北为 0°)方向传播。此外, 头波在波前产生最大达 0.25 m/s 的下降流, 在波后产生不超过 0.22 m/s 的上升流(图 4d), 这种沿波谷不对称的流速结构造成垂向净输运。对于蕴含多个波动的波包而言, 一次内孤立波过程可以在数小时内持续输运水体, 有效地促进了水体交换、热量输送以及浮游生物群落的繁衍(Wang et al, 2007)。

分析典型内孤立波经过期间 CTD 的深度变化(图 5a)可知, 在头波波谷时刻, 位于 100、150 和 200 m 深度处的 CTD 分别下降了 4.2 m(蓝色曲线)、2.3 m(橙色曲线)和 0.7 m(黄色曲线)。分析 100、150 和 200 m 深度处温度变化的时间序列(图 5b)可知, 头波导致 100、150 和 200 m 深度处分别增温 8.3 °C(蓝色曲线)、7.3 °C(橙色曲线)和 3.2 °C(黄色曲线)。

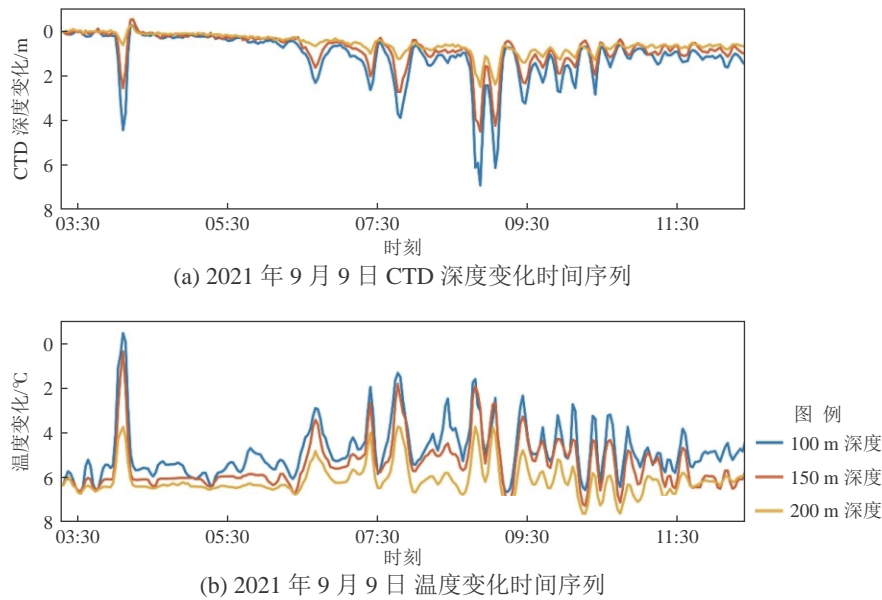


图 5 典型内孤立波引起不同位置处的 CTD 深度变化与温度变化

Fig. 5 Variation of CTD depth and temperature induced by typical ISWs at different locations

2.2 秋季内孤立波统计特征

基于潜标连续观测, 探究秋季陆丰海域内孤立波的统计特征。首先, 提取潜标在位期间捕捉到的 91 个内孤立波振幅、上层最大西向流速和传播方向, 并求出它们的概率密度分布。内孤立波振幅介于 40~90 m 的占总数的 84.6%, 秋季最大内波振幅为 98.2 m, 平均振幅为 59.9 m(图 6a); 内孤立波诱发的最大西向流速量值介于 0.30~1.10 m/s 的占总数的 85.7%, 最强西向流速量值达 1.43 m/s, 平均西向流速量值为 0.79 m/s(图 6b); 根据海洋上层西向流速与北向流速的比值计算出所有内孤立波的传播方向, 从图 6c 可以看出, 秋季陆丰海域内孤立波主要向 NW 方向(270°~310°)传播。然后, 提取出所有内孤立波在 100、150 和 200 m 深度处引起的温度变化, 并求出它们的概率密度分布。内孤立波导致 100 m 深度处的温度变化集中在 2.0~9.0 °C, 最大增温达 8.9 °C, 平均增温为 5.0 °C(图 7a); 与 100 m 深度处温度变化类似, 150 m 深度处的增温也集中在 2.0~9.0 °C, 平均增温略微减弱, 为 4.7 °C(图 7b); 82.4% 的内孤立波引起近底层 200 m 深度处增温 1.0~4.0 °C, 最大增温 6.2 °C, 平均增温 3.1 °C(图 7c)。

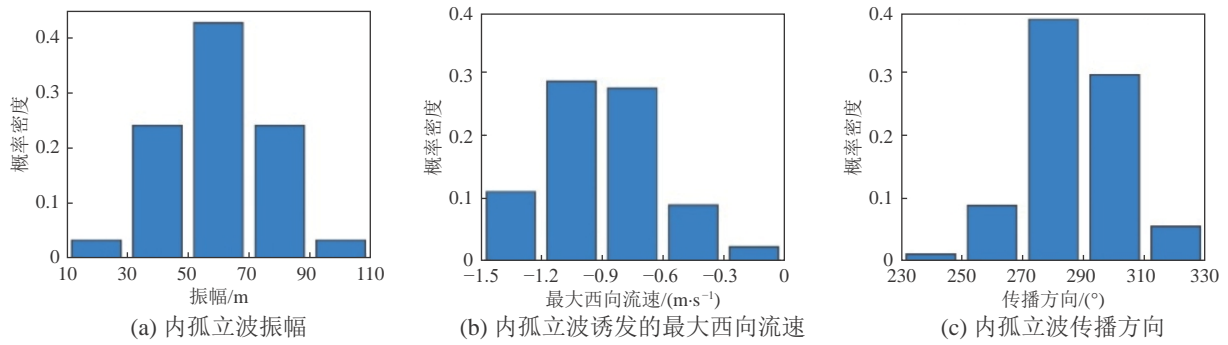


图 6 秋季陆丰海域内孤立波统计特征概率密度分布

Fig. 6 Probability density distribution of different properties of all the observed ISWs in autumn in the Lufeng Area

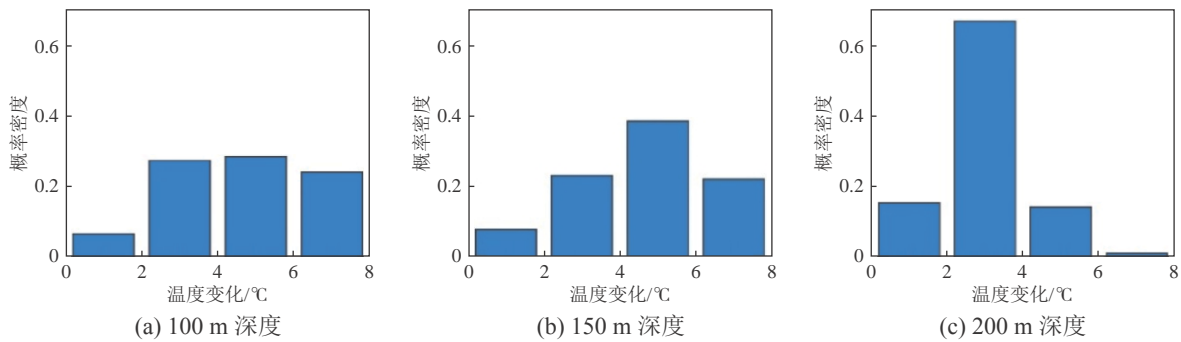


图 7 秋季陆丰海域内孤立波在不同深度处引起的温度变化概率密度分布

Fig. 7 Probability density distribution of temperature variation at different depths induced by all the ISWs observed in autumn in the Lufeng Area

秋季陆丰海域内孤立波小时尺度和季节内尺度的变化如图 8 所示。小时尺度上，大振幅内孤立波集中出现在 04:00 至 06:00 和 16:00 至 19:00，与 Huang 等(2021)观测结果较为一致；受吕宋海峡天文潮调控，内孤立波还具有以 14 d 为周期的季节内变化特征：大潮期间每天有 2 个内孤立波经过，小潮期间每天仅有 1 个甚至没有内孤立波经过，且大潮期间内孤立波振幅显著强于小潮时期。

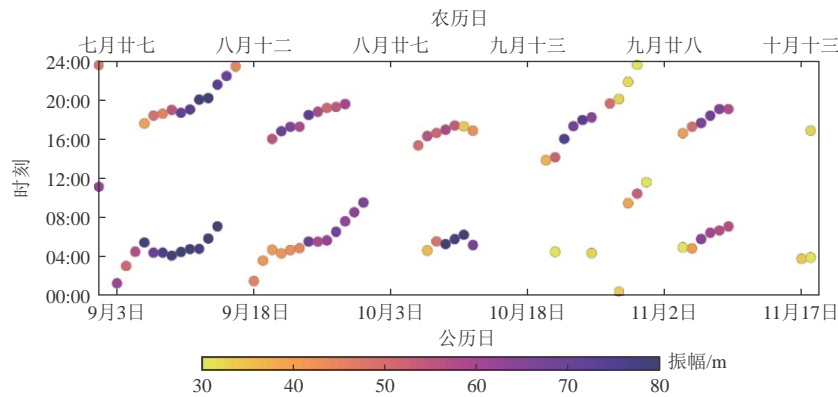


图 8 秋季陆丰海域内孤立波发生频数与振幅小时尺度和季节内尺度的变化

Fig. 8 Hourly and intra-seasonal variations of occurrence frequency and amplitude of the ISWs observed in autumn in the Lufeng Area

2021年9月7日至14日大潮期间潜标位置处240 m以浅温度和水平流速的观测结果如图9和图10所示。从内孤立波发生频次上看, 每天有2个内孤立波经过, 持续时间约为4~8 h; 从内孤立波形态上看, 每个内孤立波均表现为波包的形式, 波包中的头波强度最大; 从内孤立波到达时间上看, 它们每天出现的时间有时与前一天相近, 有时较前一天推迟1 h左右, 这可能与南海北部陆坡-陆架区复杂的地形和多尺度背景动力过程的调制作用有关。

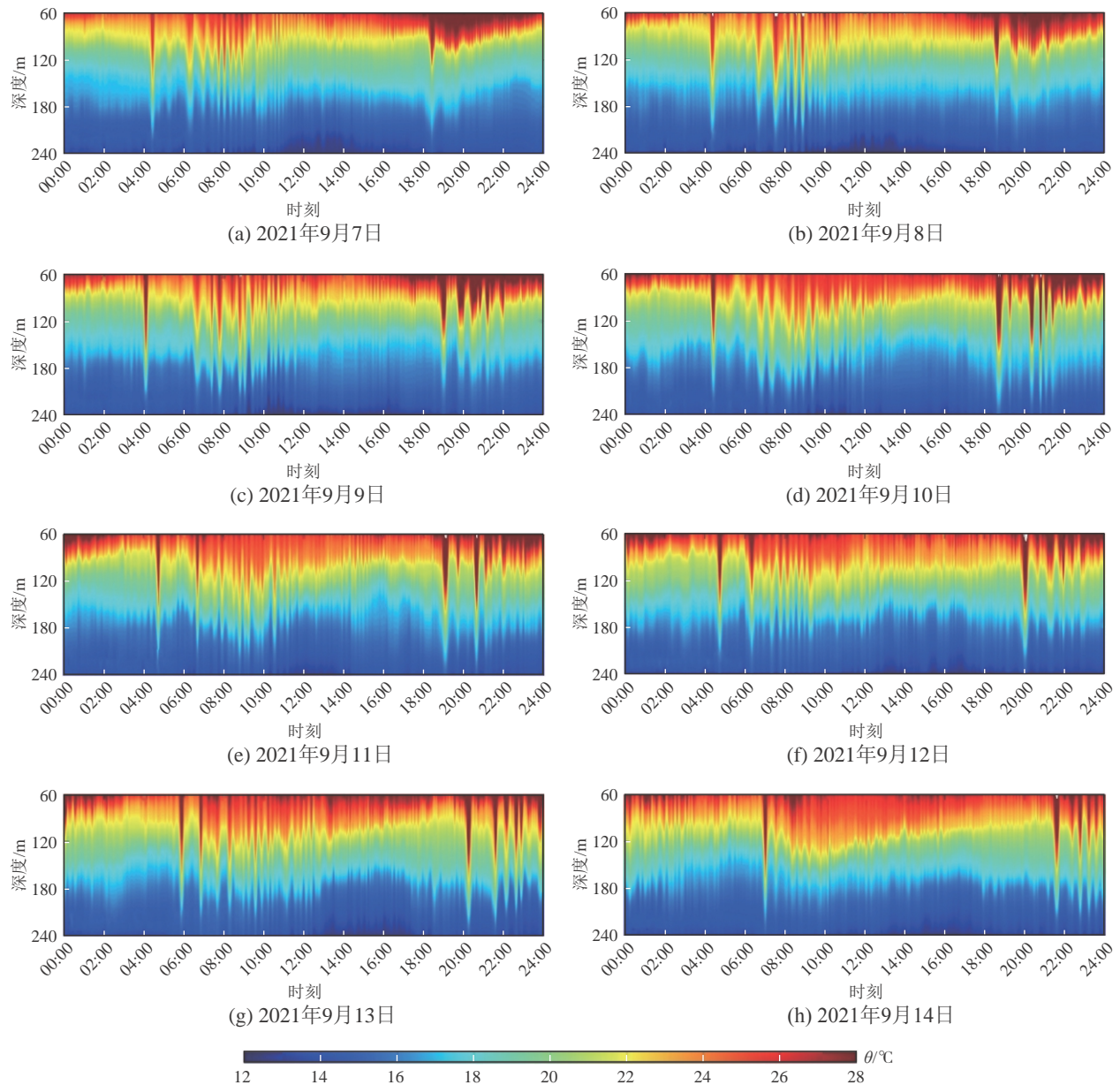


图9 2021年9月7日至14日潜标位置处240 m以浅温度场

Fig. 9 Variation of temperature profile above 240 m at the mooring site from September 7 to 14, 2021

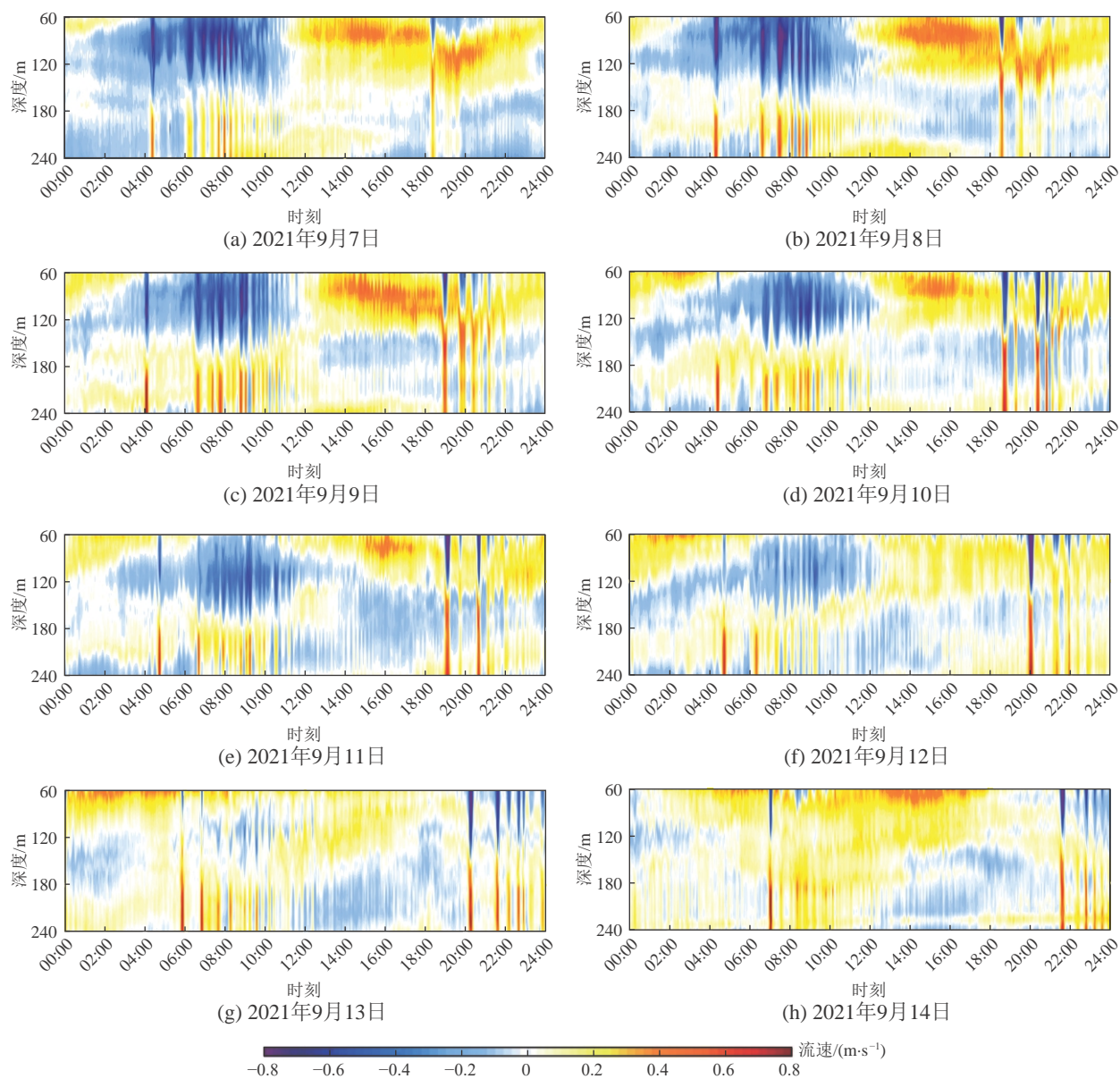


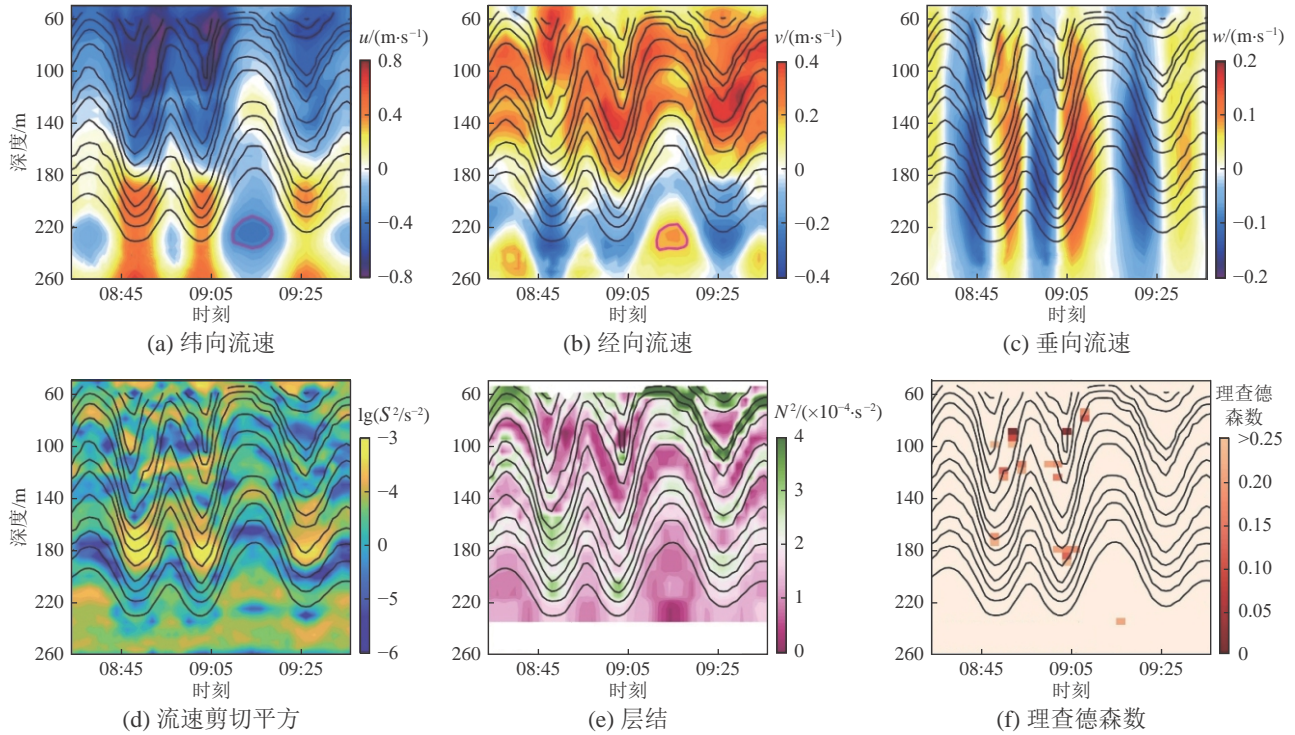
图 10 2021 年 9 月 7 日至 14 日潜标位置处 240 m 以浅纬向流速场

Fig. 10 Variation of zonal velocity profile above 240 m at the mooring site from September 7 to 14, 2021

3 内潮对陆丰海域内孤立波的影响

值得注意的是, 典型内孤立波中还形成了 1 个与头波流速结构相反的波动, 其在近底层诱发了西向和北向流, 在海洋上层诱发了东向和南向流(图 4b 和图 4c 中流速在 09:08 至 09:22 的变化); 同时, 该波动还导致近底层局地温度较背景温度降低 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 5b 中 200 m 深度处 T 在 09:08 至 09:22 的变化)。流速和温度特征均表明该波动为上凸波动。从该上凸波动及其两侧下凹波动的精细结构(图 11)可以看出: 上凸波动波峰时刻发生在 09:12, 其波前为前方下凹波动陡峭的波后, 波后为后方下凹波动的波前。在上凸波动波前, 西向流核沿着陡变等温线分布, 西向流速最大量值达 0.86 m/s (图 11a), 剪切平方达到 $10^{-3}/\text{s}^2$ 量级(图 11d), 理查德森数降低至 0.25 以下(图 11f), 剪切不稳定极易被触发(Miles, 1961)。在近底层 220 m 以深, 上凸波动诱发形成 0.30 m/s 的西向流核以及 0.20

m/s 的北向流核(图 11a 和图 11b 中玫红色曲线); 同时, 层结显著变小(图 11e), 表明上凸波动使近底层水体混合得更加均匀。



注: 图中黑色曲线为间隔为 1.0 °C 的等温线; 图 a 和图 b 中玫红色曲线分别为 0.3 m·s⁻¹ 的西向流速和 0.2 m·s⁻¹ 的北向流速等值线。

图 11 2021 年 9 月 9 日陆丰海域典型内孤立波中上凸波动及其两侧下凹波动的精细结构

Fig. 11 Fine-scale structures of the elevation soliton and two depression solitons associated with a typical ISW in the Lufeng Area on September 9, 2021

在弱非线性假设下, 上下层水体厚度决定了内孤立波极性。根据内孤立波到来前的背景温度剖面, 以及 World Ocean Atlas 2013(WOA13)气候态盐度数据, 计算得出秋季陆丰海域背景温跃层位于 60 m 深度处, 对应于 25.0 °C 等温线。再对潜标在位期间 25.0 °C 等温线垂向起伏进行带通滤波, 提取出全日内潮(22.5~26.7 h)与半日内潮(11.8~13.1 h)引起的起伏, 结果(图 12)表明: 典型内孤立波经过时段内, 半日内潮在 08:00 达到波谷, 25.0 °C 等温线垂向位移约 12 m(图 12 中橙色曲线); 全日内潮在 11:30 达到波谷, 25.0 °C 等温线垂向位移约 6 m(图 12 中蓝色曲线); 在二者共同作用下, 内潮造成 25.0 °C 等温线在 07:30 至 09:30 之间下降超过 15 m, 即温跃层位于 75 m 以下, 当连续经过 2 个超过 70 m 的下凹波动时, 温跃层被下压至 145 m 以下, 导致上层水体厚度大于下层, 形成上凸波动。

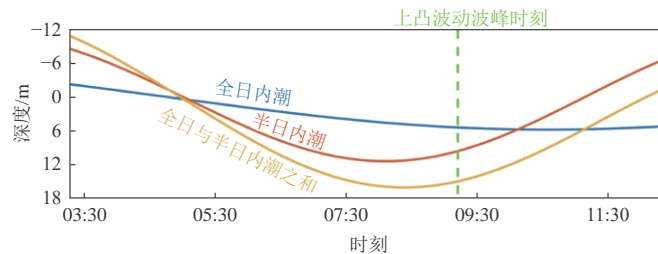


图 12 2021 年 9 月 9 日陆丰海域典型内孤立波经过期间内潮引起的温跃层(25.0 °C 等温线)起伏

Fig. 12 Thermocline (denoted by 25.0 °C isotherm) fluctuations induced during the passage of the typical ISW over the Lufeng Area on September 9, 2021

4 结论

针对南海北部陆架区内孤立波精细结构研究匮乏等问题, 本文基于2021年秋季在陆丰海域295 m水深处布放的一套潜标连续79 d的观测资料, 分析了该海域内孤立波特征和统计规律, 讨论了内潮对内孤立波的影响, 得出如下主要结论。

1) 典型内孤立波演变成波列, 其中头波振幅达86.7 m, 在海洋上层诱发最大达0.83 m/s的西向流和0.60 m/s的北向流, 在海洋下层诱发最高达0.99 m/s的东向流和0.59 m/s的南向流, 在波前产生最大达0.25 m/s的下降流, 在波后产生不超过0.22 m/s的上升流, 并导致100 m和近底层分别增温超过8.0和3.0 °C。

2) 观测期间共捕捉到91个内孤立波, 统计分析结果表明, 它们主要向西北方向(270°~310°)传播, 最大振幅为98.2 m, 平均振幅为59.9 m; 在海洋上层诱发的最强西向流速量值达1.43 m/s, 平均西向流速量值为0.79 m/s; 造成100、150和200 m深度处平均增温达5.0、4.7和3.1 °C。

3) 秋季陆丰海域内孤立波具有小时尺度和季节内尺度的变化特征, 其在04:00至06:00和16:00至19:00时段频繁出现, 并在农历初二至初五和十六至十八期间具有更大的强度。

4) 全日与半日内潮共同作用下压了温跃层深度, 导致典型内孤立波中出现了1个上凸波动, 进而使近底层降温达1.3 °C, 并诱发超过0.30 m/s的西向流速和0.20 m/s的北向流速。上凸波前波形陡峭, 西向强流汇聚, 剪切平方达到 $10^{-3}/s^2$ 量级, 理查德森数降低至0.25以下, 极易激发剪切不稳定。

参考文献 (References):

- 陈洁, 温宁, 李学杰, 2007. 南海油气资源潜力及勘探现状[J]. 地球物理学进展, 22(4): 1285-1294. CHEN J, WEN N, LI X J, 2007. The status of the resource potential and petroleum exploration of the South China Sea[J]. Progress in Geophysics, 22(4): 1285-1294.
- 刘志宇, 白晓林, 马家骏, 2022. 南海北部陆架区内波的演变与耗散机制[J]. 海洋科学进展, 40(4): 791-799. LIU Z Y, BAI X L, MA J J, 2022. Evolution and dissipation mechanisms of shoaling internal waves on the northern continental shelf of the South China Sea[J]. Advances in Marine Science, 40(4): 791-799.
- 王火平, 鞠霞, 孙佳, 等, 2022. 南海北部陆坡海区春末第一模态内孤立波观测及特征分析[J]. 海洋科学进展, 40(3): 399-407. WANG H P, JU X, SUN J, et al, 2022. Observation and analysis of the first mode internal solitary wave in the continental slope of the northern South China Sea in late spring[J]. Advances in Marine Science, 40(3): 399-407.
- 钟广见, 金庆焕, 张宝金, 等, 2013. 南海北部陆坡深水盆地特征及其油气勘探潜力[J]. 地球科学前沿, 3(1): 64-72. ZHONG G J, JIN Q H, ZHANG B J, et al, 2013. The structure characteristics and petroleum exploration potential of deep-water basins in northern South China Sea[J]. Advances in Geosciences, 3(1): 64-72.
- ALFORD M H, LIEN R C, SIMMONS H, et al, 2010. Speed and evolution of nonlinear internal waves transiting the South China Sea[J]. Journal of Physical Oceanography, 40(6): 1338-1355.
- ALFORD M H, PEACOCK T, MACKINNON J A, et al, 2015. The formation and fate of internal solitary waves in the South China Sea[J]. Nature, 521: 65-69.
- APEL J R, 2003. A new analytical model for internal solitons in the ocean[J]. Journal of Physical Oceanography, 33(11): 2247-2269.
- CAI S, XIE J, HE J, 2012. An overview of internal solitary waves in the South China Sea[J]. Surveys in Geophysics, 33: 927-943.
- HUANG X, CHEN Z, ZHAO W, et al, 2016. An extreme internal solitary wave event observed in the northern South China Sea[J]. Scientific Reports, 6: 30041.
- HUANG X, ZHANG Z, ZHANG X, et al, 2017. Impacts of a mesoscale eddy pair on internal solitary waves in the northern South China Sea revealed by mooring array observations[J]. Journal of Physical Oceanography, 47(7): 1539-1554.
- HUANG X, HUANG S, ZHAO W, et al, 2021. Temporal variability of internal solitary waves in the northern South China revealed by long-term mooring observations[J]. Progress in Oceanography, 201: 102716.

- HUANG S, HUANG X, ZHAO W, et al, 2022. Shear instability in internal solitary waves in the northern South China Sea induced by multiscale background processes[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 52(12): 2975-2994.
- LIEN R C, HENYEY F, MA B, et al, 2014. Large-amplitude internal solitary waves observed in the northern South China Sea: Properties and energetic[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 44(4): 1095-1115.
- MILES J W, 1961. On the stability of heterogeneous shear flows[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 10(4): 496-508.
- ORR M H, MIGNEREY P C, 2003. Nonlinear internal waves in the South China Sea: observation of the conversion of depression internal waves to elevation internal waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 108: 3064.
- RAMP S R, TANG T Y, DUDA T F, et al, 2004. Internal solitons in the northeastern South China Sea Part I: Sources and deep water propagation[J]. *IEEE Journal of Oceanic engineering*, 29(4): 1157-1181.
- RAMP S R, YANG Y J, BAHR F L, 2010. Characterizing the nonlinear internal wave climate in the northeastern South China Sea[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 17: 481-498.
- WANG Y H, DAI C F, CHEN Y Y, 2007. Physical and ecological processes of internal waves on an isolated reef ecosystem in the South China Sea[J]. *Geophysical Research Letters*, 34: L18609.
- ZHANG X, HUANG X, ZHANG Z, et al, 2018. Polarity variations of internal solitary waves over the continental shelf of the northern South China Sea: impacts of seasonal stratification, mesoscale eddies, and internal tides[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 48(6): 1349-1365.
- ZHAO Z, KLEMAS V, ZHENG Q, et al, 2004. Remote sensing evidence for baroclinic tide origin of internal solitary waves in the northeastern South China Sea[J]. *Geophysical Research Letters*, 31: L06302.
- ZHAO Z, ALFORD M H, 2006. Source and propagation of internal solitary waves in the northeastern South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 111: C11012.

Property of the First-Mode Internal Solitary Waves in Autumn in the Lufeng Area in Northern South China Sea Revealed by Mooring Observations

LI Da¹, LIU Tao¹, XIE Botao¹, HUANG Bigui¹, ZHANG Qi¹, HUANG Xiaodong^{2,3,4}

(1. *CNOOC Research Institute Ltd.*, Beijing 100024, China;

2. *Sanya Oceanographic Institution, Ocean University of China*, Sanya 572024, China;

3. *Key Laboratory of Ocean Observation and Information of Hainan Province*, Sanya 572024, China;

4. *Key Laboratory of Physical Oceanography of the Ministry of Education, Ocean University of China*, Qingdao 266100, China)

Abstract: Internal solitary waves (ISWs) in northern South China Sea are very active, featured by strong nonlinearity, high intensity, and concentrated energy. Their propagation characteristics and fine-scale structures are complicated under the influence of background processes, increasing the difficulties in predicting ISWs and conducting offshore operations of oil platforms. Based on a mooring deployed at a water depth of 295 m in the Lufeng Area in northern South China Sea for 79 days, the property and temporal variation of the ISWs were carefully analyzed. The typical ISW appeared as wave trains with a leading wave amplitude of up to 86.7 m, and induced local warming of more than 8.0 °C and the maximum westward and northward currents of up to 0.83 m/s and 0.60 m/s in upper layer, respectively. The statistical results showed that 91 ISWs captured during observation period mainly propagated northwestward with an average amplitude of 59.9 m and a mean value of up to 0.79 m/s in upper layer. Moreover, the ISWs occurred more frequently and stronger during 04:00-06:00 and 16:00-19:00 and on the 2-5 and 16-18 lunar days. In addition, thermocline depressed by the diurnal and semi-internal tides formed an elevation soliton in the typical ISWs, which caused local cooling of 1.3 °C and westward and northward currents of more than 0.3 m/s and 0.2 m/s near sea bottom, respectively. The steep front of the elevation soliton converge enhanced shear, making it prone to trigger shear instability. This study provides important references for offshore construction of oil platforms and survey operations in the Lufeng Area.

Keywords: northern South China Sea; Lufeng Area; internal solitary waves; mooring observations

Received: August 28, 2023 **Online:** July 15, 2024

阿留申群岛阿图岛水道多年夏季水文特征分析

陈红霞^{1,2,3}, 刘健康^{1,3}, 张学宏⁴, 刘敏⁴, 林丽娜^{1,2,3*}, 刘娜^{1,2,3}

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266061;

2. 崂山实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东青岛 266061;

3. 自然资源部海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东青岛 266061;

4. 中国人民解放军 91001 部队, 北京 100841)

摘要: 本文基于中国北极科学考察队 2003 年至 2014 年在阿图岛水道连续 5 个航次的 CTD(Conductivity, Temperature, Depth, 温盐深仪)站点观测数据, 采用特征统计和时序分析方法, 对水道多年夏季的分层结构、跃层特点和时序演变特征进行了分析研究。结果表明, 阿图岛水道夏季垂向分层非常显著, 密度和盐度均表现出 4 层的剖面结构, 而温度表现为有时 4 层、有时 5 层的剖面结构。5 个航次均存在跃层结构, 其中温度跃变最为显著、密度次之、盐度最弱。在水道内未发现“海底断崖”, 而“液体海底”特征显著。研究表明, 水道的垂向分层受到夏季局地海表加热和上游海域上一年冬季强烈垂直对流混合的控制, 海表加热和冬季残留水对其跃层结构特点有决定性作用。这一研究对于深入了解阿图岛水道附近海洋环境、气候变化、生态系统和资源利用等具有参考意义。

关键词: 中国北极科学考察队; 阿图岛水道; 液体海底; 海底断崖

中图分类号: P731

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2024)04-0634-09

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20220906001

引用格式: 陈红霞, 刘健康, 张学宏, 等, 2024. 阿留申群岛阿图岛水道多年夏季水文特征分析[J]. 海洋科学进展, 42(4): 634-642. CHEN H X, LIU J K, ZHANG X H, et al, 2024. Summer hydrological characteristics analysis of the Near Strait, Aleutian Islands[J]. Advances in Marine Science, 42(4): 634-642.

阿留申群岛位于白令海和北太平洋的关键位置, 横跨亚洲和北美洲两大洲, 是太平洋-白令海-北冰洋的交通要地。尤其是近年来气候变暖不断加剧, 北极冰川不断融化, 北极航线开通后, 阿留申群岛将真正成为东亚与欧美地区往来的重要枢纽。

阿留申群岛由超过 300 个小的火山岛组成, 长达 2 250 km, 总面积 17 666 km²。这一群岛绝大部分属于美国阿拉斯加州, 仅极西部属于俄罗斯堪察加边疆区。群岛西北端的阿图岛属于美国, 是美国距离俄罗斯最近的地方, 也是从阿留申群岛西部进出白令海最显著的陆标(孙友林, 2011)。

阿图岛水道(Attu Passage, 外文文献中多称为 Near Strait)介于阿图岛到科曼多尔群岛之间, 水道宽约 360 km, 是阿留申群岛众多海峡通道中最为重要的国际水道, 也是我国北极科考进出白令海、北冰洋的主要通道。

这一水道是美国-俄罗斯分界线所在地, 现场调查资料稀少。基于实测资料的研究较少, 且主要由美国科学家完成, 主要是基于短期的 CTD 数据和表面漂流浮标数据, 聚焦于海峡内的流速分布与流量变化(Favorite, 1974; Stabeno et al, 1992, 1994; Reed et al, 1993; Stabeno et al, 2009)和对洋流、潮汐和海

收稿日期: 2022-09-06

资助项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(GY022Y07)

作者简介: 陈红霞(1975—), 男, 教授级工程师, 博士, 主要从事极地与区域海洋动力学方面研究。

E-mail: chenhx@fio.org.cn

* **通信作者:** 林丽娜(1987—), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事北极物理海洋学方面研究. E-mail: linln@fio.org.cn

(李燕 编辑)

冰等现象的一般性分析(Johnson et al, 2003)。随着数值模拟能力的提升,也有基于模拟结果的研究,集中在流量的长期时间变化及其动力机制上(Kinney et al, 2012; Prants et al, 2013; Maslowski et al, 2014)。

由于缺少对阿留申岛西部通道的多年连续观测(Maslowski et al, 2014),至今尚未有基于实测资料的阿图岛水道长期水文特征分析研究见诸发表。自2003年中国第二次北极科学考察以来,阿图岛水道一直是我国极地考察船往返白令海和北冰洋的通道。从那时起,直到2014年第六次北极考察航次,中国在这一水道处连续开展了5个航次的CTD站点剖面调查,取得了极为宝贵的第一手实测水文数据。本文将基于这些数据开展阿图岛水道多年夏季的分层结构、跃层特点、时序演变特征等研究。

1 数据与处理

1.1 数据来源

中国北极科学考察在阿图岛水道的CTD站点布设及采用仪器情况见表1。由表1可见,尽管每个航次在这一水道内站位的命名不尽一致,但在位置上均位于(169°55′48″E, 53°21′36″N)附近。如果将这一点视为中心点,各航次站位最远时距离中心点约为28.5 km,最近时为1.9 km,且呈现为以南北向差距为主,东西向差距为辅的特点。在时间上,各航次观测集中在这一海域夏季的7月中下旬。阿图岛水道和观测站点的位置如图1所示。

表1 阿图岛水道的CTD站点布设及采用仪器情况表

Table 1 Information of the CTD stations and deployed instruments in the Near Strait

航次	站位	调查日期	经度	纬度	各站水深/m	首层水深/m	仪器	准确度
第二次	BR23	2003-07-24	170°01′48″E	53°17′24″N	3 722.1	1.0	MarkIII CTD	电导率: 0.000 3 S·m ⁻¹ 温度: 0.003 °C 压力: 0.03% 满量程
第三次	BR23	2008-07-18	169°59′24″E	53°16′48″N	3 728.8	0.5		
第四次	B03	2010-07-10	169°57′36″E	53°18′48″N	3 726.4	2.0	SBE 911 CTD	电导率: 0.000 3 S·m ⁻¹ 温度: 0.001 °C
第五次	BL02	2012-07-11	169°57′00″E	53°18′48″N	2 046.5	5.0		压力: 0.015% 满量程
第六次	B02	2014-07-18	169°40′48″E	53°34′12″N	1 874.8	3.0		

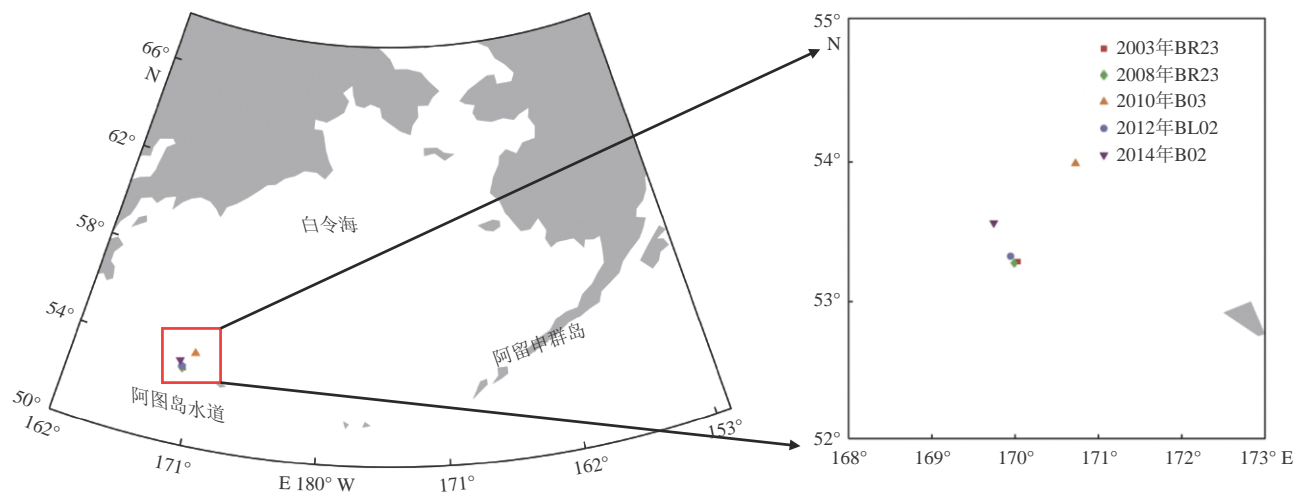


图1 阿图岛水道地理位置和CTD站点分布

Fig. 1 The locations of CTD stations in the Near Strait

结合图1和表1可见,这些站点均位于阿图岛水道内,站点之间距离较小、现场测量仪器准确度较为一致。此外,年度之间的站位位置差异与这一水道水流方向的北偏西向(Maslowski et al, 2014)相一致,而且远小于群岛南侧阿拉斯加海流的流幅(Stabeno et al, 2009)和水道宽度。因此,利用这些实测数据,除了开展逐年水文特征分析外,还可比较多年水文特征的变化。

1.2 数据处理

现场观测时设置的 MarkIII CTD 的采样频率为 24 Hz, 而 SBE(Sea-bird, 美国海鸟公司)911 CTD 的采样频率为 12 Hz。这两种 CTD 温度传感器的响应时间大致相当,为 50~65 ms(兰卉, 2012), 在响应时间上均符合现有标准中一级技术指标(张博等, 2019)。为了便于后期的分析和比较,在处理数据时,仅对下放过程中数据的原始记录按照数据处理的一般过程(杨少磊等, 2008),将数据规范处理到 1 m 深度间隔 1 个记录。

受作业时海况的影响,仪器下放时取得的最上层记录水深约为 0.5~5.0 m。水道处底部地形变化剧烈,而仪器下放时取得的最下层记录水深一般离底 10 m 左右,这导致的最大观测深度也不尽一致。为了便于比较,本文取 2 000 m 深度作为最大研究水深。

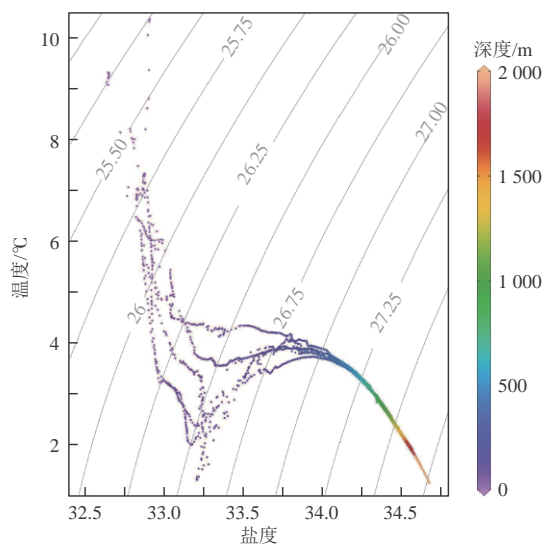
另外,这一海域各要素剖面的垂向变化主要集中在 200 m 深度以浅的上层海洋。为了节约篇幅,本文仅给出目前尚未公开发表的第六次北极考察 B02 站点的剖面图。为了更为直观地比较水道处水文要素的多年变化情况,文中以航次顺序为时间轴重点给出各要素垂向分布剖面 and T-S(Temperature-Salinity, 温盐)散点图。

2 水文特征分析

由 2003 年至 2014 年阿图岛水道的温盐散点图(图 2)可见,水道的水体温度变化相对复杂,随深度的增加而降低,当深度达到一定程度后,水温开始上升,随后再次呈现下降趋势;而盐度和密度(本文中“密度”一词指代“位密”)则表现出随深度增加而升高的稳定趋势。水道上层水团呈现出高温低盐特征;中层水团各水文要素在散点图上较分散,年际变化大;下层水团温度最低,盐度和密度最高,水团性质相较上、中层稳定。基于阿图岛水道的水团分布,本文将进一步从阿图岛水道水体温度、盐度和密度的垂向分层、跃层特征以及时序演变特征等角度开展研究,以深入分析阿图岛水道的水文特征。

2.1 垂向分层

从 B02 站点的剖面图(图 3)和中国极地科学考察水文数据图集(陈红霞等, 2015a, 2015b)相应站点的水文要素剖面分布图上看,阿图岛水道测站处夏季垂向分层非常显著。密度和盐度剖面均表现为典型的上混合层、跃层、过渡层和下混合层的 4 层结构,而温度剖面则从 2010 年转变为 5 层结构。在 2008 年,虽已呈现出受冬季残留水影响的次表层冷水层,但整体上属于前、后两个航次的过渡状态;在 2010 年之后则一直保持为上混合层、跃层、温度逆跃层、过渡层和下混合层的 5 层结构。



注:图中等值线为密度,单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

图 2 2003 年至 2014 年阿图岛水道 T-S 散点图
Fig. 2 T-S diagram in the Near Strait from 2003 to 2014

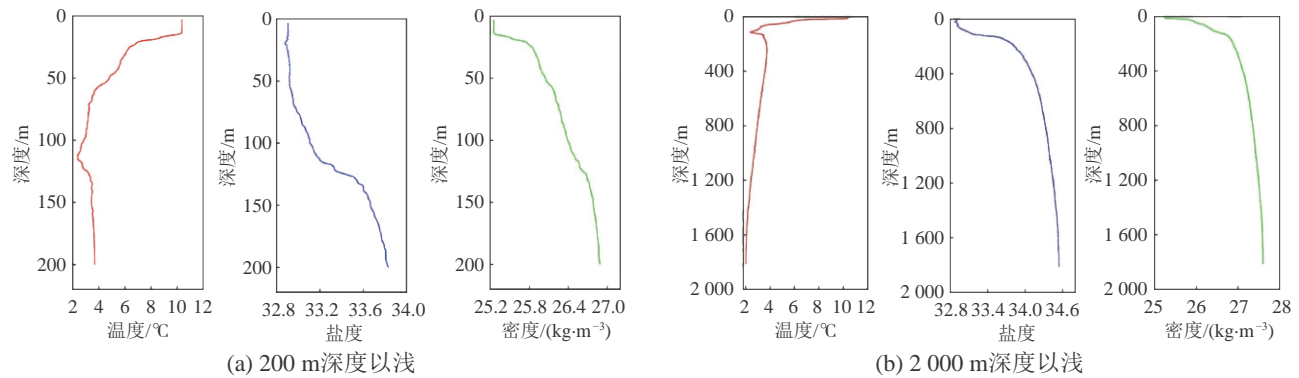


图3 中国第六次北极科考阿图岛水道内B02站200 m深度以浅和2 000 m深度以浅温度、盐度、密度剖面分布
Fig. 3 Temperature, salinity, and density profiles at station B02 in upper 200 m and 2 000 m in the Near Strait during the 6th Chinese Arctic Research Expedition

上混合层的厚度为10~25 m,年际差异不大。这一层被高温、低盐的表层低密度水占据。这一层不仅温度高,温度的年际变化也较大;最低值7.0 °C出现在2012年,最高值12.4 °C出现在2014年。这一层的盐度在整个剖面中最低且年际变化相对较小,在32.8左右。

在上混合层之下有一厚度约为30 m的跃层。跃层处的结构、垂向变化和年际差异较为复杂,将在2.2节跃层特征分析部分予以详细阐述。

温度最低的次表层冷水自2010年开始出现在115~130 m深度附近,温度最低可达1.8 °C,接近2014年、甚至低于2012年底层水的温度。这一水层在附近的白令海深水海盆也广泛存在(高郭平等,2002;刘娜等,2016)。鉴于阿拉斯加沿岸流的上游处于60°N附近的阿拉斯加沿岸,这一水体属于在阿拉斯加沿岸形成的冬季残留水,并保留冬季水的低温、低盐特征。出现这一冷水比不出现时整体上温度低2 °C,盐度低0.2。

150~400 m深度范围内温度已经基本稳定,而盐度变化则随深度缓慢增加,垂向梯度为0.5/(100 m)左右。这一层温度和盐度的年际差异较小,温度在4.0 °C左右,盐度在34.0左右,可以视为从温度逆跃层到下混合层的过渡层。

在400 m以深,温度一般低于4.0 °C,盐度高于33.8。尽管随深度增加仍有温度减小、盐度增加、密度增大的特点,但变率已经很小。同其他深水海域一样,这里属于下混合层。

2.2 跃层特征

海洋要素跃层的时空分布规律是物理海洋学的重要研究内容,海洋要素强度的变化及分布比海洋要素本身的变化及分布更具参考价值(莫军等,2009)。密度跃层作为一种特殊的海洋环境现象,对于海洋水声通讯、探测、监听等海上军事活动,特别是对潜艇的航行状态及其航行安全均有着至关重要的影响(张建华等,2021)。

以2014年为例,在阿图岛水道内,密度的剖面形态和盐度较为接近,呈现为自上而下递增的态势;由于温度跃变强度远比盐度跃变高,在垂向跃变上密度和温度同步,盐度跃变与其基本同步。本文主要研究密度跃层,并分析温度跃变中最显著的主跃层和逆跃层。研究以密度、温度、盐度跃层的厚度和强度(垂向变率的绝对值)为主要指标(表2),对比各航次跃层的分布及其变化情况。

2003年和2008年存在温度主跃层但不存在显著的温度逆跃层。主跃层的厚度只有4~9 m,但跃变强度大。跃层上界分别位于20 m和11 m深度处。在主跃层内,2003年温跃层和密度跃层的强度均是2008年的2倍左右,也是历年航次中最高的,分别为0.46 °C/m和0.11 kg/m⁴。2003年盐跃层强度也是最高的,约为2008年的1.5倍。

表 2 阿图岛水道 CTD 剖面温度跃层类型及其指标对照表

Table 2 Comparison of thermocline types and their indices in CTD profiles in the Near Strait

航次年份	存在的跃层类型	跃层上界深度/m	跃层下界深度/m	跃层厚度/m	跃层强度/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$)
2003 年	温度主跃层	20	24	4	0.46
2008 年	温度主跃层	11	20	9	0.24
2010 年	温度逆跃层	126	138	12	0.09
2012 年	温度逆跃层	134	154	20	0.12
2014 年	温度逆跃层	117	128	9	0.09

2010 年、2012 年、2014 年均不存在主跃层但存在温度逆跃层。2012 年的温度逆跃层最为显著，其厚度是 2014 年的 2 倍以上，且跃层强度也高达 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。整体来看，温度逆跃层上界深度位于 115 m 处附近，逆跃层的厚度介于 9~20 m，跃变强度平均为 $0.10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。

如果把主跃层纳入整个跃层内，5 个航次的跃层上界深度介于 11~26 m，其中 2008 年最浅，2010 年最深。跃层下界深度介于 36~55 m，其中 2014 年的最浅，其他年度非常接近。跃层厚度平均约为 31 m，2010 年仅有 21 m，在 2008 年可达最厚 44 m。

从表 3 得知，航次平均的密度跃层强度约为 $0.02\text{ kg}/\text{m}^4$ 。其中以 2003 年和 2014 年最大，2008 年最小、仅为最大值时的 1/5 左右。平均温跃层强度约为 $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ，2014 年最大，2008 年最小、仅为其 1/2 左右。平均盐跃层强度小于 0.01 m^{-1} ，2003 年最大时也仅为 0.01 m^{-1} ，2014 年最小时仅为其 1/10。实际上，2014 年盐度梯度最大处位于温度逆跃层附近的 123~135 m 深度处，跃变强度为 0.02 m^{-1} ，是其他年份密度跃层处盐度跃变强度的 2 倍。

表 3 阿图岛水道 CTD 剖面密度跃层指标对照表

Table 3 Comparison of pycnocline indices in CTD profiles in the Near Strait

航次年份	密跃层上界深度/m	密跃层下界深度/m	密跃层厚度/m	密跃层强度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-4}$)	温跃层强度/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$)	盐跃层强度/(m^{-1})
2003 年	20	52	32	0.03	0.14	0.01
2008 年	11	55	44	<0.01	0.10	<0.01
2010 年	26	53	27	0.02	0.11	<0.01
2012 年	25	55	30	0.02	0.12	<0.01
2014 年	15	36	21	0.03	0.21	<0.01

整体上看，5 个航次均存在跃层结构，其中温度跃变最为显著，密度次之，盐度最弱。在结构上，尽管存在随着深度增加温度递增、盐度递减，温度和盐度曲线居中靠拢的特点，但由于温度和盐度变化的幅度和所处深度差异较大，且两者变化有时并不存在同步性，整体上仍然较为复杂。

2.3 温、盐、密剖面时序特征

海水的密度跃层在航海安全、海洋科学、军事、环境科学以及天气预测等多个领域具有重要的研究意义。以航海安全为例，密度跃层会直接影响船舶的航行安全，例如在某些情况下，密度跃层可能导致船舶的不稳定。

尽管在 5 个航次中有 3 个航次出现较为显著的温度逆跃层现象, 但从以航次顺序为时间轴给出的密度垂向剖面时间演变图(图 4)上看, 在阿图岛水道内没有出现密度随深度呈负梯度变化的“海底断崖”(王彦磊等, 2010)。

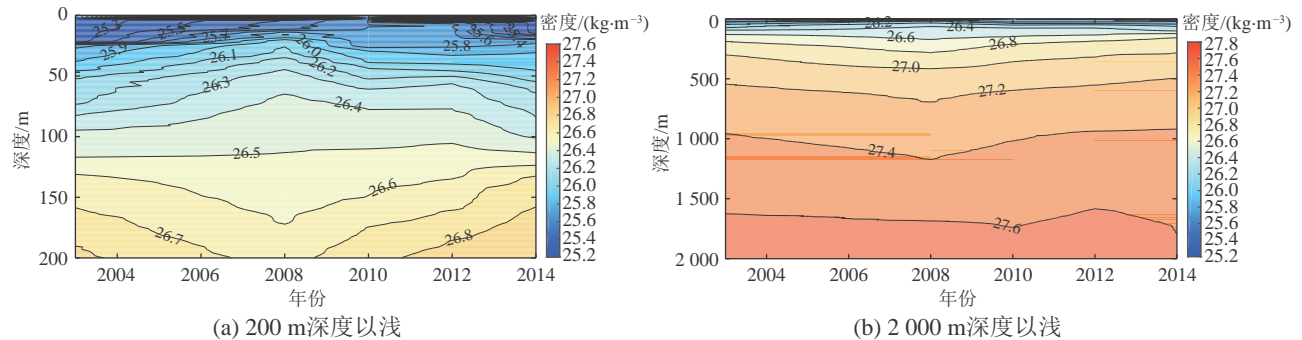


图 4 阿图岛水道站点 200 m 深度和 2 000 m 深度以浅密度剖面时间演变

Fig. 4 Temporal evolution of density profiles at stations in upper 200 m and 2 000 m in the Near Strait

从 200 m 深度以浅的密度等值线分布来看, 在 100 m 深度以浅、尤其是 65 m 深度以浅的等密度线分布最为密集, 并可将 26.3 kg/m^3 密度等值线视为分界线。在分界线之上, 密度梯度一般大于 0.004 kg/m^4 ; 在分界线之下, 密度梯度一般小于 0.004 kg/m^4 , 且密度梯度随着深度的增加而减小。

在等值线稳定性上, 最为典型的是 26.5 kg/m^3 密度等值线。这一等值线以 110.6 m 深度为轴线, 垂向波动幅度不到 3 m。这不仅是 200 m 深度以浅最为稳定的等值线, 而且还是 2 000 m 深度以浅最为平稳的等值线。可见, 如果以 26.5 kg/m^3 为“液体海底”的密度值, 这一“液体海底”和 110.6 m 的水深有着高度的一致性。

此外, 在 150~400 m 深度范围内, 密度为 27.0 kg/m^3 的等值线也较为稳定。其波动轴线为 357.5 m 深度线, 垂向波动幅度为 60.5 m。

以水深为基准, 这里重点给出 500、800、1 200 和 1 600 m 共 4 个水深的密度分布。在 500 m 深度处密度的变化范围是 $27.08 \sim 27.20 \text{ kg/m}^3$ 。在 800、1 200 和 1 600 m 深度处, 密度波动范围分别是 $27.31 \sim 27.35$ 、 $27.41 \sim 27.50$ 、 $27.57 \sim 27.60 \text{ kg/m}^3$ 。

虽然阿图岛水道位于 $53^\circ 18' \text{N}$ 附近的中纬度海域, 但由于其介于白令海和北太平洋之间, 且上游水体为阿拉斯加海流, 在夏季, 其上、中层的分层情况受到局地海表加热和阿拉斯加海流上游海域阿拉斯加湾的直接影响, 与白令海海盆区的水体分层较为相似(图 5)。

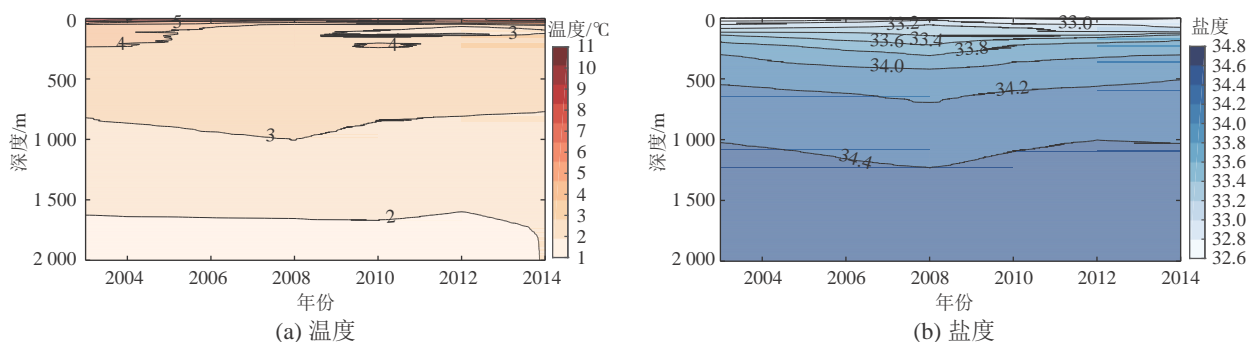


图 5 阿图岛水道站点 2 000 m 深度以浅温度、盐度剖面时间演变

Fig. 5 Temporal evolution of temperature and salinity profiles at stations in upper 2 000 m in the Near Strait

由于夏季表层海水吸收太阳辐射增多, 表层水温度显著增高、垂向混合减小, 表层水温在 5 °C 以上。受到融冰、陆地径流等因素的影响, 盐度最低, 温度盐度性质差异较明显。对比 6 个航次的调查数据发现, 这一水团的温度年际变化较大, 年际差异高达 5.4 °C; 盐度的年际差异为 0.3。

位于高温薄层的夏季表层水团下面的次表层冷水, 是上一年在阿拉斯加沿岸形成的冬季残留水。由于阿拉斯加湾冬季海面冷却降温引起强烈垂直对流混合, 低温均匀层可达 150 m 深度左右。春、夏季期间上表层吸收辐射增温, 垂向稳定度增大, 使下层冬季低温水的特征得以保留。该层水团温度盐度的年际变化远小于夏季表层水, 其温度差异为 0.4 °C, 盐度差异为 0.2。

400 m 深度以深的下混合层内是低温高盐水, 温度随深度增加下降, 直至海底处温度降到 2.0 °C 左右, 此时的盐度高于 34.0, 随深度增加变化不大。深层水体与相邻的太平洋水乃至其他大洋深层水特征较为接近, 水团性质相当稳定少变。

150~400 m 深度之间的过渡混合层是上层水和深层水之间的过渡水团, 温度较上层水略微偏高, 盐度随深度增加略有增加, 这一水团的年际变化不明显。

上层高温、低盐导致的较低密度水叠加在下方低温、高盐的高密度水之上, 这是阿图岛水道跃层稳定出现的根本原因。夏季季节性海表加热及上层的均匀混合是形成温度主跃层的原因。表层海水和其下冬季残留水的温度远低于下方混合层水体的温度, 随着深度增加, 温度梯度迅速变化, 这就是产生温度逆跃层的主要原因。

虽然多数年份有温度逆跃层出现, 但由于同时伴随着盐度随深度的增加, 以及盐度对密度增加的贡献高于温度增加对密度减小的贡献, 使得密度是随深度加大的, 因而并没有出现“海底断崖”现象。500 m 以深各要素的稳定分布表明这一海区的底层水在研究时段内是稳定的, 而密度为 26.5 kg/m³ 的“液体海底”稳定在 110.6 m 深度是上层混合、底部稳定、局地温盐之间对密度变化相互抵消、共同作用的结果。

3 结 论

阿图岛水道不仅是阿拉斯加海流从北太平洋流入白令海的主要通道, 同时还是阿留申群岛众多海峡通道中最为重要的国际水道。本文利用中国北极科学考察队 2003 年以来连续 5 个航次在阿图岛水道的站点调查数据, 分析了这一关键通道多年夏季的分层结构、跃层特点和时序演变特征, 并得到如下结论。

1) 阿图岛水道夏季垂向分层非常显著。密度和盐度剖面均表现为典型的上混合层、跃层、过渡层和下混合层的 4 层结构, 而温度剖面则从 2010 年转变为上混合层、跃层、温度逆跃层、过渡层和下混合层共 5 层结构。

2) 5 个航次均存在跃层结构, 其中的温度跃变最为显著, 密度次之, 盐度最弱。在跃层内密度和温度随着深度递增、盐度递减特点, 但两者变化之间有时并不存在同步性, 整体上仍然较为复杂。前 2 个航次存在主跃层但不存在显著的温度逆跃层。后 3 个航次不存在主跃层但存在温度逆跃层。

3) 在阿图岛水道内尚未发现密度随深度呈负梯度变化的“海底断崖”, 而“液体海底”特征显著。26.3 kg/m³ 等值线可视为密度垂向梯度变化的分界线: 在此之上密度梯度较大, 在此之下密度梯度较小并随着深度的增加而减小。密度为 26.5 kg/m³ 的“液体海底”和 110.6 m 的水深高度吻合。在 500、800、1 200 和 1 600 m 水深处密度梯度均很小, 分别为 0.12、0.04、0.09 和 0.03 kg/m⁴。

4) 阿图岛水道的分层情况受到局地海表加热和阿拉斯加海流上游海域阿拉斯加湾的直接影响, 与白令海海盆区水体分层相似。夏季季节性海表加热和冬季残留水对其跃层结构特点有决定性作用。

本研究对阿图岛水道水文特征的分析具有重要的科学研究价值和现实意义:有助于了解北太平洋与白令海之间的海洋环流系统,对全球气候变化和北极地区海洋变化的研究至关重要;揭示海洋生态系统的格局、多样性和生物量等特征,可为生态保护和资源管理提供科学依据;监测水文特征可发现海洋环境变化,支持海洋环境保护和污染防治;了解水文特征有助于预测海洋条件、优化航线规划、提升航行安全性、降低航运风险,对应对极端海况和气候变化具有重要价值。

参考文献 (References):

- 陈红霞,刘娜,林丽娜,2015a.中国极地科学考察水文数据图集——北极分册(一)[M].北京:海洋出版社. CHEN H X, LIU N, LIN L N, 2015a. Hydrological data atlas of Chinese polar scientific expedition-arctic volume (part I) [M]. Beijing: China Ocean Press.
- 陈红霞,刘娜,林丽娜,2015b.中国极地科学考察水文数据图集——北极分册(二)[M].北京:海洋出版社. CHEN H X, LIU N, LIN L N, 2015b. Hydrological data atlas of Chinese polar scientific expedition-arctic volume (part II) [M]. Beijing: China Ocean Press.
- 高郭平,侍茂崇,赵进平,等,2002.1999年白令海夏季水文特征分析[J].海洋学报,24(1):8-16. GAO G P, SHI M C, ZHAO J P, et al, 2002. Hydrologic features of the Bering Sea in the summer of 1999[J]. Haiyang Xuebao, 24(1): 8-16.
- 兰卉,2012.七电极电导率传感器及CTD测量系统技术研究[D].天津:天津大学. LAN F, 2012. The research on the technology of seven-electrode conductivity sensor and CTD measuring system[D]. Tianjin: Tianjin University.
- 刘娜,林丽娜,何琰,等,2016.白令海海盆区夏季水团分布及其年际变化[J].科学通报,61(13):1478-1487. LIU N, LIN L N, HE Y, et al, 2016. Distribution and interannual variation of water masses in the Bering Sea basin in summer[J]. Chinese Science Bulletin, 61(13): 1478-1487.
- 莫军,徐剑锋,王光辉,2009.中国近海海洋要素最大跃层强度及其对应深度的分布规律研究[J].海洋科学进展,27(4):421-428. MO J, XU J F, WANG G H, 2009. Study on maximum gradient and its depth of marine variable profiles in sea adjacent to China[J]. Advances in Marine Science, 27(4): 421-428.
- 孙友林,2011.白令海及北太平洋高纬航线的安全航行[J].航海技术,5(4):7-11. SUN Y L, 2011. Safe navigation in the Bering Sea and high-latitude routes in the North Pacific Ocean[J]. Marine Technology, 5(4): 7-11.
- 王彦磊,袁博,朱尚卿,等,2010.海洋环境对潜艇活动的影响[J].舰船科学技术,32(6):52-55. WANG Y L, YUAN B, ZHU S Q, et al, 2010. The influence of marine environment on submarine activities[J]. Ship Science and Technology, 32(6): 52-55.
- 杨少磊,谢玲玲,杨庆轩,2008.SBE911plus CTD剖面仪的现场校正与数据处理[J].海洋技术,27(3):23-26. YANG S L, XIE L L, YANG Q X, 2008. Field calibration and data-processing of SBE911plus CTD profiler[J]. Ocean Technology, 27(3): 23-26.
- 张博,袁玲玲,陈华,等,2019.中国-国际海洋观测标准比对分析研究[J].标准科学,4(11):117-120. ZHANG B, YUAN L L, CHEN H, et al, 2019. Comparative analysis and study on Chinese-international marine observation standards[J]. Standard Science, 4(11): 117-120.
- 张建华,黄海峰,胡坤,等,2021.密度跃层对潜艇操纵运动的影响及应对措施研究[J].兵器装备工程学报,42(4):118-122. ZHANG J H, HUANG H F, HU K, et al, 2021. Study on influence of pycnocline on submarine maneuverability and countermeasures[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 42(4): 118-122.
- FAVORITE F, 1974. Oceanography of the Bering Sea with emphasis on renewable resources [M]. Alaska: Institute of Marine Science, University of Alaska: 3-37.
- JOHNSON T L, BYERS K, 2003. The Bering Sea and Aleutian Island: region of wonders[M]. Alaska: Alaska Sea Grant College Program.
- KINNEY J C, MASLOWSKI W, 2012. On the oceanic communication between the western subarctic gyre and the deep Bering Sea[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 66: 11-25.

- MASLOWSKI W, KINNEY J C, OKKONEN S R, et al, 2014. The Pacific Arctic region[M]. Netherlands: Springer Netherlands: 101-132.
- PRANTS S V, ANDREEV A G, BUDYANSKY M V, et al, 2013. Impact of mesoscale eddies on surface flow between the Pacific Ocean and the Bering Sea across the Near Strait[J]. *Ocean Modelling*, 72: 143-152.
- REED R K, STABENO P J, 1993. The recent return of the Alaskan Stream to Near Strait[J]. *Journal of Marine Research*, 51(3): 515-527.
- STABENO P J, REED R K, 1992. A major circulation anomaly in the western Bering Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 19(16): 1671-1674.
- STABENO P J, REED R K, 1994. Circulation in the Bering Sea basin observed by satellite-tracked drifters: 1986-1993[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 24(4): 848-854.
- STABENO P J, LADD C, REED R K, et al, 2009. Observations of the Aleutian north slope current, Bering Sea, 1996-2001[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C5): 1-16.

Summer Hydrological Characteristics Analysis of the Near Strait, Aleutian Islands

CHEN Hongxia^{1,2,3}, LIU Jiankang^{1,3}, ZHANG Xuehong⁴, LIU Min⁴, LIN Lina^{1,2,3}, LIU Na^{1,2,3}

(1. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*

2. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Laoshan Laboratory, Qingdao 266061, China;*

3. *Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, MNR, Qingdao 266061, China;*

4. *Chinese People's Liberation Army 91001 Unit, Beijing 100841, China*)

Abstract: Based on the CTD station observational data of five Arctic consecutive voyages of CHINARE (Chinese National Arctic Research Expedition) in the Near Strait from 2003 to 2014, the multi-year profile structure, characteristics of pycnocline and the “liquid seafloor” in the strait in summer are studied with characteristic statistics and time series analysis. The results show that the vertical stratification in the Near Strait is very significant in summer, and the density and salinity profiles both show a 4-layer structure, while the temperature profile shows a 4-layer or 5-layer structure. All the 5 voyages data exhibit a cline structure, in which the thermocline is most significant, followed by the pycnocline then the halocline. The “submarine cliffs” were not found in the strait, while the “liquid seafloor” is prominent. The study indicates that vertical stratification in the strait is controlled by local sea surface heating in summer and strong vertical convective mixing in upstream sea area in previous winter. Sea surface heating and residual winter water play a key role in the cline structure characteristics. This study is of great reference value for deeper understanding of marine environment, climate change, ecosystems, and resource utilization around the Near Strait.

Keywords: Chinese National Arctic Research Expedition; the Near Strait; liquid seafloor; submarine cliffs

Received: September 6, 2022

沉积物活性铁锰特征对比研究及其对有机碳矿化的意义——以长江口、黄海中部陆架泥质区和黄河口为例

韦世金^{1,2,3,4}, 孟 倪^{1,2,3,4}, 韦钦胜^{4,5}, 庄光超^{1,2,3,4*}

1. 中国海洋大学深海圈层与地球系统前沿科学中心, 山东 青岛 266100;
2. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100;
3. 中国海洋大学化学化工学院, 山东 青岛 266100;
4. 崂山实验室海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266237;
5. 自然资源部第一海洋研究所海洋生态环境科学与技术重点实验室, 山东 青岛 266061)

摘要: 铁锰的早期成岩是海洋沉积物有机碳矿化的重要途径之一, 活性铁锰的含量和分布情况对评估铁锰异化还原作用下的有机碳矿化具有重要意义, 然而目前针对中国近海不同沉积环境下活性铁锰的分布对比研究还比较少。2021 年 8—9 月长江口(CJK1-3)、黄海中部陆架泥质区(YSCW-1)和黄河口(NS-37)三个站位沉积物中活性铁锰的含量及分布特征显示, 长江口沉积物中碳酸盐结合态铁(Fe_{carb})的平均质量摩尔浓度($91.23 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 干重)分别为黄海中部陆架泥质区沉积物($19.35 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 干重)和黄河口沉积物($14.15 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 干重)的 4.71 倍和 6.45 倍, 无定形和弱结晶铁氧化物(Fe_{ox1})的平均质量摩尔浓度顺序为 CJK1-3($111.63 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 干重) $>$ YSCW-1($79.99 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 干重) $>$ NS-37($61.63 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 干重)。3 个站位沉积物中锰氧化物的质量摩尔浓度都低于铁, 可还原态锰(Mn_{re})平均质量摩尔浓度分别为 Fe_{ox1} 的 1.56%、0.91% 和 2.29%。培养实验结果表明铁锰异化还原在原位有机质条件下发生, 铁锰异化还原的评估结果表明铁异化还原是近海(河口)沉积物有机碳矿化的重要途径, 而锰还原是次要途径。研究结果加深了对中国近海(河口)沉积物中铁锰生物地球化学的认识。

关键词: 长江口; 黄海; 黄河口; 铁; 锰; 有机碳

中图分类号: P736.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2024)04-0643-20

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20230823002

引用格式: 韦世金, 孟倪, 韦钦胜, 等, 2024. 沉积物活性铁锰特征对比研究及其对有机碳矿化的意义——以长江口、黄海中部陆架泥质区和黄河口为例[J]. 海洋科学进展, 42(4): 643-662. WEI S J, MENG N, WEI Q S, et al, 2024. Comparative study on the characteristics of reactive iron and manganese in sediments from coastal China and its significance for organic carbon mineralization: case studies at the Yangtze River Estuary, the Mud Area of the Shelf in Central Yellow Sea, and the Yellow River Estuary[J]. Advances in Marine Science, 42(4): 643-662.

有机质氧化分解是早期成岩过程的起点, 也是沉积物中大多数生物地球化学过程的主要驱动力, 对海洋系统中铁、锰、碳、氮、硫、磷等元素的生物地球化学循环至关重要(Berner, 1980; 董宏坤等, 2022)。全球海洋沉积物在地质时间尺度上积累了大量的有机碳, 是地球上最大的碳库, 其中 90%(质量分数)以上有机碳在水深较浅的陆架和陆坡沉积(Berner, 1982; Parkes et al, 2014), 即近海沉

收稿日期: 2023-08-23 网络首发日期: 2024-05-13

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(42076031); 山东省泰山学者项目(tsqn201909057)

作者简介: 韦世金(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋生物地球化学方面研究. E-mail: shijin_wei@163.com

*通信作者: 庄光超(1985—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事海洋生物地球化学和地质微生物学方面研究. E-mail: zgc@ouc.edu.cn

(高 峻 编辑)

沉积物是重要的碳汇。在海洋沉积有机质成岩矿化过程中,有机碳向无机碳形式转变,构成全球碳循环的重要一环,可影响地球气候变化(Berner et al, 1989; Berner, 1990; Siegenthaler et al, 1993)。同时,海洋沉积物中有机碳矿化为微生物提供了丰富碳源和能量来源(Berner, 1982; Henrichs, 1992; Parkes et al, 2014)。在稳态成岩模型中,有机碳矿化途径按照吉布斯自由能从大到小的顺序为有氧呼吸、硝酸盐异化还原(反硝化)、铁锰异化还原、硫酸盐还原和甲烷生成(图1)。其中硫酸盐还原途径研究最为广泛,而铁锰异化还原过程的常被忽略。主要原因是微生物介导下的硫酸盐还原过去被认为主导了近海有机碳厌氧矿化,其次是利用 ^{35}S 示踪法能简单、准确地定量评估硫酸盐还原过程,但缺少铁锰异化还原速率的直接测量方法(Jørgensen, 1982; 朱茂旭等, 2011)。近30年来海洋沉积物中陆续发现了铁锰异化还原主导有机碳矿化的环境,例如巴拿马海盆(Aller et al, 1990)、Skagerrak海(Canfield et al, 1993a, 1993b)、斯瓦尔巴(Vandijken et al, 2006)和巴伦支海(Nickel et al, 2008),这些海域中铁锰异化还原对有机碳矿化的贡献超过90%,说明之前的研究可能低估了铁锰异化还原对近海有机碳矿化的重要性。铁锰异化还原是微生物在厌氧条件下以铁锰氧化物为电子受体的呼吸作用(铁锰呼吸),又称为微生物铁锰还原,铁锰异化还原途径在热力学上优于硫酸盐还原(图1),微生物学和地质学的证据表明“铁呼吸”可能是地球生命最早的“呼吸”形式之一(Lovley, 2000)。沉积物中铁氧化物(Fe_{ox})的含量通常超过氧气、硝酸盐和硫酸盐等电子受体(Lovley et al, 1986),因此,开展近海沉积物活性铁锰地球化学研究具有重要意义。

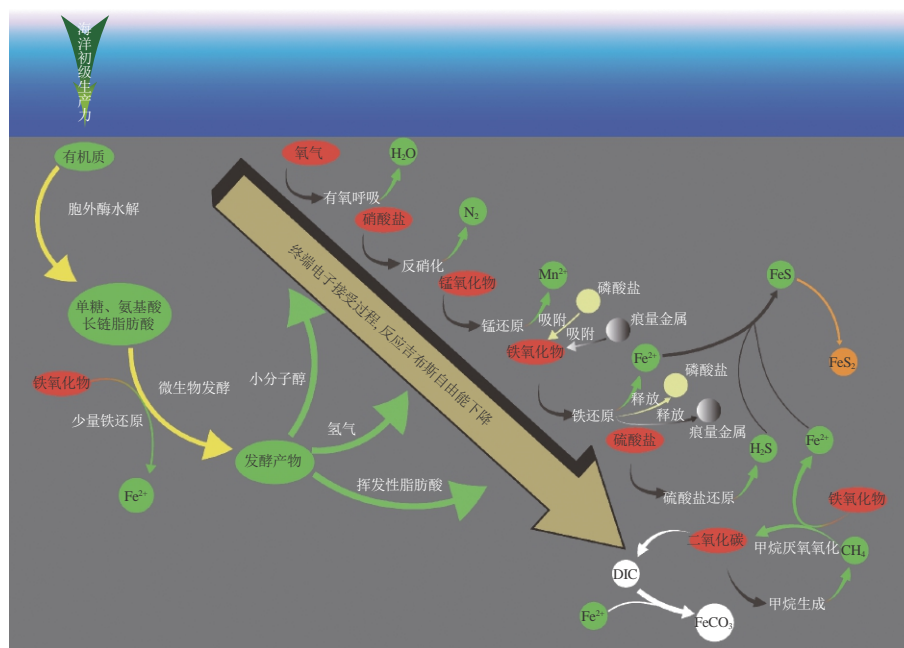


图1 早期成岩过程中有机碳成岩矿化的途径(修改自 Aromokeye, 2018)

Fig. 1 The pathways of organic carbon mineralization in early diagenesis (modified from Aromokeye, 2018)

中国东部边缘海是典型的大河控制下的边缘海,如长江口及其附近海域接收了大量的陆源物质,其中包含丰富的活性铁锰和陆源有机碳(Yao et al, 2015)。长江口水动力条件复杂,在长江冲淡水、黄海沿岸流、浙闽沿岸流和台湾暖流相互作用下形成了从长江口向南延伸至台湾海峡的移动泥带(Mobile Mud Belts, MMBs)(Liu et al, 2003; Liu et al, 2006, 2007; Zhu et al, 2016)。这些移动泥上部容易受到扰动,形成沉积速率高但有机质保存效率低的环境特征。由于扰动的存在,沉积物转向非稳态成岩,不同有机碳矿化路径可能同一深度上重叠。位于中国北方的黄河口处在近封闭的渤海内受陆

地和人类活动的影响强烈。与河口区相比, 位于黄海中部的陆架泥质区受陆地输入影响较小, 沉积环境相对稳定(Dong et al, 2011; Zhou et al, 2015)。针对中国近海沉积物中早期成岩过程中铁锰的生物地球化学研究已经取得了一些进展, 例如 20 世纪 80 年代有研究表明长江口沉积物中铁锰氧化物在微生物介导下参与有机碳成岩矿化(鲍根德等, 1986)。一些研究中的沉积物孔隙水地化参数显示铁锰异化还原可能在黄海和东海沉积物有机质矿化中发挥重要作用(Zhao et al, 2017, 2018; 汲雨等, 2023), 但缺少沉积物固相铁锰数据的支持。尽管已有中国近海沉积物固相中铁形态空间分布和垂向分布研究(吕仁燕, 2011; Zhu et al, 2012a, 2016)陆续开展, 但不同沉积环境下铁锰的分布特征比较研究仍有待探索。

我们利用化学分步提取和分析的方法表征长江口、黄海中部陆架泥质区和黄河口沉积物中不同形态铁锰的质量摩尔浓度, 结合孔隙水地化参数分析不同形态铁锰的垂直分布规律, 通过沉积物厌氧培养实验评估沉积物铁锰异化还原活性, 以期增进中国河口和近海沉积物不同沉积环境下活性铁锰的垂直分布特征及金属异化还原对有机碳矿化的重要性的认识。

1 材料与方法

1.1 样品采集与前处理

2021-08-25—09-10 我们在自然资源部第一海洋研究所的秋季共享航次中搭乘“向阳红 18”海洋科学考察船对东海、黄海和渤海进行科学考察, 分别在长江口站位 CJK1-3(122°59'05"E, 30°58'54"N)、黄海中部陆架泥质区站位 YSCW-1(123°37'30"E, 35°27'54"N)和黄河口站位 NS-37(120°00'00"E, 38°00'06"N)采集沉积物柱状样(采样站位见图 2)。3 个站位采样水深分别为 47.5 m、72.2 m、45.0 m, 获取的柱状样的长度分别为 4.0 m、4.0 m、5.2 m, 柱状样回收后保存在船上的 4 °C 冷库中。

采样返回后, 我们在海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室对柱状样进行前处理。柱状样 PVC 管壁上 20 cm 间距开小孔, 将预先用 1.2 mol·L⁻¹ HCl(购自国药集团化学试剂有限公司)和超纯水(SMART-RO 力康水纯化系统, 上海康雷分析仪器有限公司)洗净的 Rhizon 采样器(荷兰 Rhizosphere 有限公司)插入小孔中抽取沉积物孔隙水, 抽出的孔隙水样品一部分立即用于溶解铁锰的测定, 剩余样品分装保存在-20 °C 的冰箱中, 分别用于营养盐、硫酸盐和溶解有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)等各项地化参数的分析测定, 所有参数在一个月内完成测定。

沉积物的分层取样在孔隙水取样工作完成后进行, 在抽取孔隙水的小孔附近切开 4 cm×4 cm 的小窗, 取 3 mL 沉积物放到 20 mL 的玻璃小瓶中, 小瓶顶空使用体积分数为 99.999% 的高纯氮气(购自青岛德海能源有限公司)吹扫, 丁基橡胶塞和中空铝盖密封, 样品在-20 °C 条件下保存, 用于

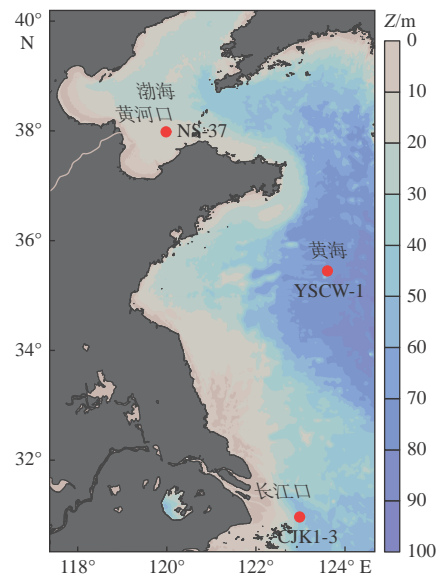


图 2 采样站位分布(●为采样站位)
Fig. 2 Distribution of sampling stations
(● is the sampling stations)

沉积物总有机碳(Total Organic Carbon, TOC)测定及不同形态铁锰的提取和分析。柱状样剩余的沉积物样品分装到用氮气吹扫过的无菌棕色玻璃瓶,保存在4℃冷库中,用于沉积物培养实验。

1.2 孔隙水地化参数分析方法

孔隙水中溶解的 Fe^{2+} 采用美国 Unico 有限公司 V1850 型可见光分光光度计测定。以菲罗嗪(Ferrozine, 购自上海麦克林有限公司)作为显色剂,在 pH 4~9 的水溶液中菲罗嗪与 Fe^{2+} 完全反应生成稳定的紫色络合物 $[\text{Fe}(\text{Ferrozine})_3]^{2+}$,该络合物可在 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 高氯酸条件下稳定存在,在 562 nm 波长处有最大光吸收,其吸光度与 Fe^{2+} 浓度成正比(Stookey, 1970)。因 Fe^{2+} 具有较强的还原性且接触空气时容易被氧化,采样和测定过程应尽可能避免样品与空气的接触。我们将部分孔隙水样品注入真空采血管(无抗凝剂)中,随后转移至厌氧手套箱(Lab2000 型,美国 Etelux 有限公司)中,移取少量样品于 10 mL 离心管中,稀释至 5 mL,分别加入 0.5 mL $5.14\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的酸性菲罗嗪溶液(含 $3\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl)和 0.5 mL $5.19\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CH_3OONH_4 (含 $4.90\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$)缓冲溶液(Ammonium Acetate Buffer, AAB),完成 Fe^{2+} 的固定和显色,其中 HCl、 CH_3OONH_4 和 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 均购自国药集团化学试剂有限公司。

Mn^{2+} 测定前先制备甲醛脲溶液:向 21 mL 超纯水中分别加入 1.00 g $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 、0.5 mL 质量分数为 40% 的甲醛水溶液和 14 mL 浓度为 $14\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 溶液。3 mL 孔隙水样品中加入 0.5 mL 甲醛脲溶液显色,使用可见光分光光度计在 450 nm 波长下测定。其原理为 Mn^{2+} 在 pH 9~10 的碱性溶液中被溶解氧氧化为 Mn(IV),与甲醛脲生成棕色络合物。该络合物的最大吸收波长为 450 nm,其摩尔吸光系数为 $1.1\times 10^4\text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$,锰质量浓度($<4.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和吸光度有良好的线性关系,考虑到样品中可能存在 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 的干扰,显色过程中加入少量的 $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 和乙二胺四乙酸二钠(ETDA)排除干扰(Brewer et al, 1971)。 Mn^{2+} 测定过程中的所用试剂均购自国药集团化学试剂有限公司。

用于营养盐、硫酸盐(SO_4^{2-})和 DOC 分析的孔隙水样品提前一天解冻,摇晃均匀。营养盐测定前先将样品稀释并分装至 10 mL PVC 材质的进样管中,通过德国 Seal 有限公司生产的 AA3 型营养盐自动分析仪测定标准溶液的浓度,建立标准曲线,依据《海洋监测规范 第 4 部分:海水分析》(全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283), 2007)测定孔隙水样品中硝酸盐(NO_3^-)、亚硝酸盐(NO_2^-)、铵盐(NH_4^+)和磷酸盐(PO_4^{3-})浓度;采用离子色谱法(Aitken et al, 2013)测定硫酸盐(SO_4^{2-})的浓度,离子色谱(IC-940 型,瑞士万有通公司)的淋洗液为 $3.2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Na_2CO_3 (购自国药集团化学试剂有限公司)溶液,流速为 $0.8\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,进样体积为 20 μL ;孔隙水中的 DOC 采用高温催化氧化法(Guo et al, 2011)进行测定,使用气密性良好的注射器抽取 50 μL 充分酸化后的样品,通入总有机碳分析仪(TOC-L 型,日本 Shimadzu 有限公司)燃烧管中,样品中的有机碳在 Pt- Al_2O_3 的表面催化氧化为 CO_2 ,DOC 的测量转变为对其氧化产物 CO_2 的定量测定。

1.3 TOC 的测定

沉积物 TOC 使用总有机碳分析仪测定。具体流程参照 Yao 等(2014),冻干沉积物样品研磨过 100 目筛,称取少量的样品于银杯中,将装有样品的银杯置于玻璃干燥器中,使用 $12\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐酸熏蒸 12 h 以去除无机碳,样品在 60℃ 下干燥至恒重,在 900℃ 条件下测定样品的有机碳含量。

1.4 固相铁锰的分步提取

沉积物样品预先使用真空冷冻干燥机(Freezezone 6L 型,美国 Labconco 有限公司)干燥,在-50℃

和真空度 $< 10 \text{ Pa}$ 的条件下冷冻干燥 24 h 以上。依据 Poulton 等(2005)提出的铁分步提取步骤,称取 0.20 g 的干燥沉积物于 50 mL 干净的尖底离心管中,加入 20 mL 提取剂,室温条件下振荡一段时间后,在 $5000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速条件下离心 10 min,上清液经过 $0.22 \mu\text{m}$ 的滤膜过滤后用于铁的测定,移取少量样品溶液于 10 mL 离心管中,稀释至 5 mL,加入 0.5 mL 包含 $1.44 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 的酸性菲啰啉溶液,在 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 水浴条件下充分反应 20 min,冷却至室温后加入 0.5 mL AAB 缓冲溶液,测定方法与孔隙水中 Fe^{2+} 的测定方法相同。剩余的上清液去除,加入 20 mL 超纯水清洗沉积物,重复清洗 3 次,清洗干净的沉积物用于下一铁形态的提取。不同形态铁的提取顺序为 Fe_{carb} 、 Fe_{ox1} 、 Fe_{ox2} 、 Fe_{mag} ,提取条件及其所包含的矿物相见表 1。

表 1 沉积物中 Fe 的目标矿物相及分步提取步骤

Table 1 Targeted mineralogical phases and sequential extraction procedures for iron in sediments

Fe	目标矿物相	提取步骤
Fe_{carb}	菱铁矿(FeCO_3)、铁白云石	加入 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{NaAC}$ ($\text{pH}=4.5$), 室温振荡 24 h
Fe_{ox1}	水铁矿($\text{Fe}(\text{OH})_3$)、纤铁矿($\gamma\text{-FeOOH}$)	加入 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 和 25% HAC (体积分数)混合溶液, 室温振荡 48 h
Fe_{ox2}	针铁矿($\alpha\text{-FeOOH}$)、四方纤铁矿($\beta\text{-FeOOH}$)、赤铁矿(Fe_2O_3)	加入 $50 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ($\text{pH}=4.8$), 室温振荡 2 h
Fe_{mag}	磁铁矿(Fe_3O_4)	加入 $0.2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} (\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ 和 $0.17 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 混合溶液, 室温振荡 6 h

沉积物中锰的提取参考 Tessier 法(Tessier et al, 1979),称取 0.50 g 干燥沉积物于 50 mL 离心管中,加入提取剂(表 2),通过离心将提取后的溶液和沉积物分离,溶液过滤($0.22 \mu\text{m}$)后用于锰的测定,使用与孔隙水 Mn^{2+} 相同的方法测定沉积物锰含量。剩余沉积物使用超纯水洗净后用于下一形态 Mn 的提取测定,根据 Tessier 法的提取步骤分别提取和测定沉积物中的 Mn_{ex} 、 Mn_{carb} 、 Mn_{re} 和 Mn_{org} 。

表 2 沉积物中 Mn 的形态和分步提取步骤

Table 2 Speciation and sequential extraction procedures for Manganese in sediments

Mn	形态	提取步骤
Mn_{ex}	可交换态	加入 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{CH}_3\text{COONH}_4$ ($\text{pH}=7$), 室温振荡 2 h
Mn_{carb}	碳酸盐结合态	加入 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{NaAC}$ ($\text{pH}=5$), 室温振荡 5 h
Mn_{re}	可还原态	加入 $0.04 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 和 25% HAC (体积分数)混合溶液, 水浴加热($96 \text{ }^\circ\text{C}$)6 h
Mn_{org}	有机物结合态或硫化态	加入 3 mL $0.02 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{HNO}_3$ 和 5 mL 酸化的质量分数为 30% 的 H_2O_2 (HNO_3 调节 $\text{pH}=2$), $85 \text{ }^\circ\text{C}$ 加热 2 h, 再加入 3 mL 酸化的质量分数为 30% 的 H_2O_2 , $85 \text{ }^\circ\text{C}$ 加热 3 h, 冷却至室温后加入 5 mL $3.2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{CH}_3\text{COONH}_4$ 和 20% HNO_3 (体积分数)混合溶液酸化, 加入 4 mL 超纯水振荡 30 min

1.5 沉积物培养实验

本研究培养实验所用的人工海水培养基按照 Laso-Pérez 等(2018)的方法制备,将高纯氮气冲入培养基中鼓泡 15 min,在厌氧手套箱中按 1:5(质量体积比)的配比把沉积物和培养基充分混匀,将 80 mL 泥浆分装到 120 mL 无菌血清瓶中,使用氮气置换顶空,以丁基橡胶塞和中空铝盖密封瓶

口, 加入不同浓度的葡萄糖(购自国药集团化学试剂有限公司)作为铁锰异化还原的潜在底物, 使用 $30 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 钼酸盐(购自国药集团化学试剂有限公司)抑制硫酸盐还原。5个培养条件设置: ①空白泥浆; ②空白泥浆灭活; ③添加 $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 葡萄糖; ④添加 $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 葡萄糖; ⑤添加 $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 葡萄糖灭活。所有的培养均设置3个平行子培养, 培养过程中监测溶解 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 的浓度和血清瓶顶空甲烷(CH_4)的摩尔分数变化, 第0天的参数在培养环境稳定12 h过夜后开始测定, 取样工作均在厌氧手套箱中完成。 CH_4 的测定流程为使用1 mL气密性进样针抽取0.5 mL顶空气体, 通过柱头注入配备火焰离子化检测器和HP-PLOT Q毛细色谱柱($30 \text{ m}\times 0.32 \text{ mm}\times 20 \mu\text{m}$)的气相色谱(8890型, 美国Agilent有限公司)测定(Zhuang et al, 2016), 甲烷的摩尔分数通过甲烷标准气体(购自中国计量科学研究院国家标准物质研究中心)建立的标准曲线确定。

2 结果

2.1 孔隙水地球化学参数

站位CJK1-3、YSCW-1和NS-37孔隙水中 NH_4^+ 浓度随深度增加而增加, 最大浓度分别为1.597(图3a₁)、0.759(图3b₁)和1.336 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (图3c₁)。3个站位的 NO_2^- 在整个深度剖面上浓度都小于1.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (图3a₂、图3b₂和图3c₂); NO_3^- 分别为0.4~43.0(图3a₃)、0.2~0.5(图3b₃)、16.3~18.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (图3c₃)。 PO_4^{3-} 在站位CJK1-3(10~230 cm)的浓度为4.4~26.6 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (图3a₄)。在站位YSCW-1的10~250 cm深度范围内随深度增加而增加, 浓度从10 cm处的10.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至250 cm处的21.9 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (图3b₄); 在250~350 cm快速下降, 350 cm处观测到最低浓度为2.9 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。 PO_4^{3-} 浓度在站位NS-37的深度剖面上有明显随深度增加的趋势, 浓度由表层(10 cm)最低(2.3 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)随深度逐渐增加至底层(410 cm)最高(33.3 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)(图3c₄)。3个站位溶解 Mn^{2+} 的浓度范围分别为9.00~33.07(图3a₅)、9.74~32.33(图3b₅)、33.44~62.70 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (图3c₅), 溶解 Fe^{2+} 的浓度范围分别为13.34~52.72(图3a₆)、8.12~67.00(图3b₆)、5.45~33.90 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (图3c₆)。2种溶解金属离子在站位CJK1-3和YSCW-1的浓度随深度先增加后减小, 浓度最高值的深度分别出现在170 cm和350 cm附近, 然而站位NS-37的 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 的变化差别很大, Fe^{2+} 浓度随着深度增加快速下降, Mn^{2+} 随着深度增加而增加, 在470 cm处达到最大值(62.70 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)后随深度下降。 SO_4^{2-} 在3个站位均随着深度增加逐渐下降, 浓度范围分别为4.8~25.0(图3a₇)、9.6~25.3(图3b₇)、16.7~23.6 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (图3c₇)。DOC变化与 SO_4^{2-} 相反, 质量浓度随着深度的增加而增加, 质量浓度范围分别为0.61~3.59(图3a₈)、1.74~6.60(图3b₈)和1.18~3.64 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图3c₈)。

2.2 TOC

站位CJK1-3、YSCW-1和NS-37沉积物中TOC质量比范围分别为5.64~7.06、2.83~12.64、7.21~9.82 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值排序为CJK1-3(6.23 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)<YSCW-1(7.38 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)<NS-37(8.37 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$), 其中站位CJK1-3沉积物TOC质量比与东海内陆架移动泥柱状样的结果(Zhu et al, 2016)一致。3个站位的TOC深度分布差异明显(图4), 站位CJK1-3沉积物中TOC在30~150 cm附近呈现下降趋势, 但150 cm以深的质量比整体呈现随深度波浪式增加的趋势(图4a); 站位YSCW-1沉积物TOC从10 cm的8.45 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 缓慢随深度减小至2.83 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (图4b), 然而在350 cm处质量比突然快速增加, 并在底部达到最大值; 站位NS-37沉积物中的TOC质量比整体随深度增加而增加(图4c), 在470 cm处达到最大值(9.82 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)后降至底部510 cm处的8.39 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

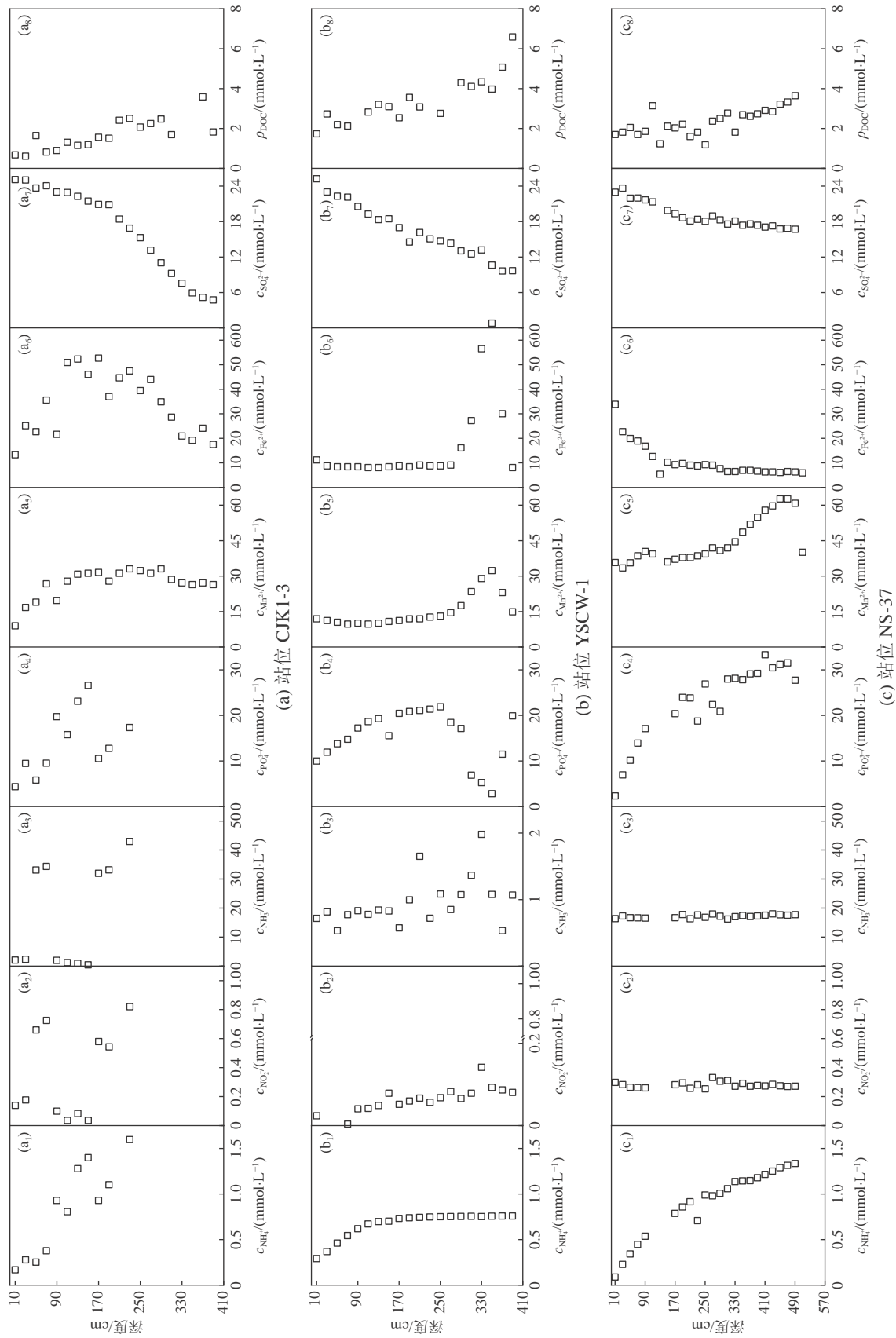


图3 3个站点孔隙水中 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 SO_4^{2-} 、DOC的深度剖面
 Fig. 3 Depth profiles of NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , Mn^{2+} , Fe^{2+} , SO_4^{2-} and DOC in the pore water of the three stations

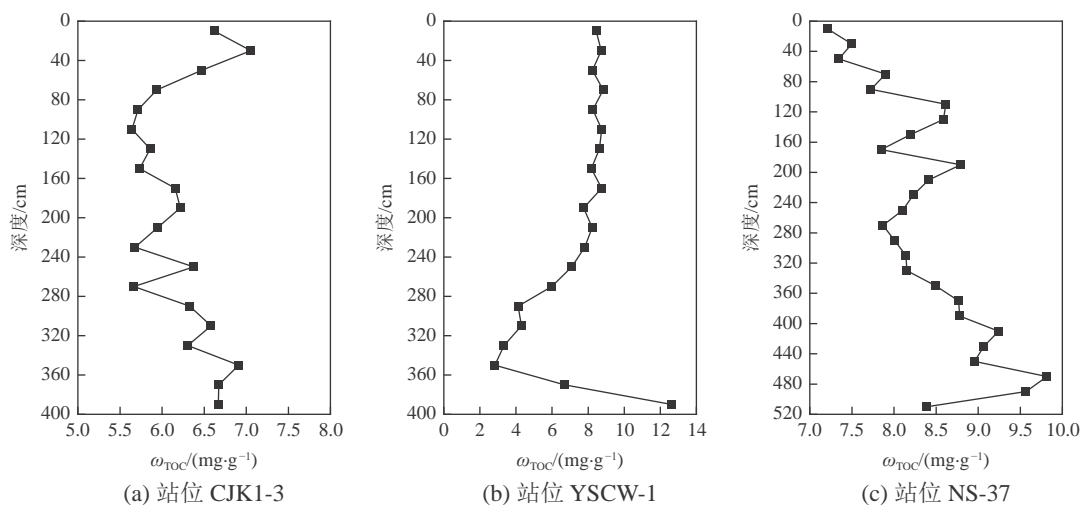


图4 3个站位沉积物中TOC的垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of TOC in sediments of the three stations

2.3 不同固相形态铁的分布特征

Fe_{carb} 在长江口、黄海中部陆架泥质区和黄河口三个站位沉积物中的质量摩尔浓度范围分别为 $77.58 \sim 112.91$ 、 $9.76 \sim 41.34$ 、 $10.32 \sim 30.00 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。站位 CJK1-3 沉积物中 Fe_{carb} 的平均质量摩尔浓度 ($91.23 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ ，我们的实验结果均为干重)最高，分别为站位 YSCW-1 ($19.35 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)和站位 NS-37 ($14.15 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)的 4.71 倍和 6.45 倍(图 5)。 Fe_{ox1} 的质量摩尔浓度范围分别为 $97.58 \sim 125.36$ 、 $37.07 \sim 120.50$ 和 $48.78 \sim 73.44 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ ，平均值顺序为 CJK1-3 ($111.63 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$) > YSCW-1 ($79.99 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$) > NS-37 ($61.63 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$) (图 5)。结晶铁氧化物 (Fe_{ox2}) 的质量摩尔浓度范围分别为 $95.80 \sim 167.36$ 、 $53.69 \sim 190.02$ 和 $100.59 \sim 148.78 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ ，在 3 个站位中的平均值均高于其他形态铁(图 5)，磁铁矿 (Fe_{mag}) 的质量摩尔浓度范围分别为 $19.13 \sim 53.68$ 、 $12.37 \sim 95.46$ 和 $30.38 \sim 74.95 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ ，3 个站位的平均值接近，分别为 33.18、39.57 和 $40.54 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ (图 5)。

2.3.1 Fe_{carb}

Fe_{carb} 是海洋沉积物中重要的亚铁相，包含沉积物吸附的 Fe^{2+} 和自生碳酸盐矿物如菱铁矿等。铁异化还原产生的 Fe^{2+} 首先通过吸附和形成碳酸盐矿物在固相中积累，海洋环境大部分 $Fe(II)$ 保留在沉积物中，少部分以溶解 Fe^{2+} 形式进入孔隙水，菱铁矿在海洋沉积物中的大量生成通常指示硫酸盐的减少和非硫化的环境 (Baker et al, 1996)。因此， Fe_{carb} 在沉积物中的含量和深度变化趋势更能反映铁异化还原的程度。沉积物中 Fe_{carb} 平均质量摩尔浓度顺序为长江口 ($91.23 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$) > 黄海中部陆架泥质区 ($19.35 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$) > 黄河口 ($14.15 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)，总体呈现自南向北递减的纬向趋势。长江口站位 CJK1-3 沉积物中 Fe_{carb} 平均质量摩尔浓度是已报道东海表层沉积物 $36.7 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ (湿重) (Zhu et al, 2012a) 的 2.49 倍，表明长江口沉积物铁还原强度大于东海陆架表层沉积物，前人的研究也表明有机

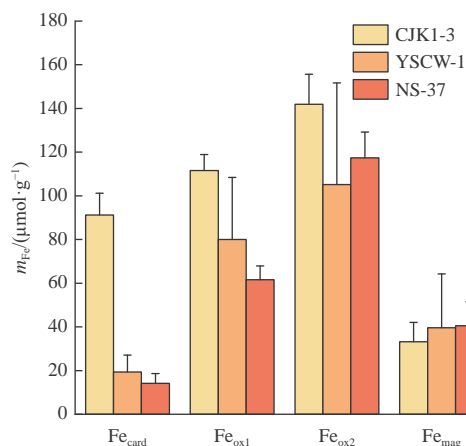


图5 3个站位沉积物固相铁的平均质量摩尔浓度
Fig. 5 Mean molality of iron in solid phase sediments of the three stations

碳矿化速率从长江口沿着离岸方向逐渐降低(Deng et al, 2006)。Zhu等(2012a)使用的样品为湿沉积物,对比对结果存在一定的影响,但不涉及定量,不涉及定性。我们的长江口与黄海中部陆架泥质区(YSCW-1)沉积物 Fe_{carb} 的比较结果也支持河口区铁还原强度高于陆架区。站位YSCW-1和站位NS-37与青岛胶州湾(地理纬度介于站位YSCW-1和NS37之间)表层沉积物的结果($16.1 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$) (Zhu et al, 2015)接近。

长江口沉积物中 Fe_{carb} 在深度上的变化与孔隙水中 Fe^{2+} 的趋势相似,质量摩尔浓度由初始的(10 cm处) $86.91 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 逐渐增加至 $112.91 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,在150 cm以深质量摩尔浓度逐渐降低。10~150 cm同时对应孔隙水中 SO_4^{2-} 浓度快速下降(图3a₇)、而 NH_4^+ (图3a₁)和DOC(图3a₈)浓度缓慢上升,此结果表明0~150 cm沉积物是有机质矿化的主要区域,与沉积物中TOC深度变化(图4a)基本一致,铁氧化物(Fe_{ox})和 SO_4^{2-} 是主要的电子受体。我们使用提取剂 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaAC(pH=4.5)提取沉积物中的 Fe_{carb} ,该方法不能区分 Fe_{carb} 和 Fe_{AVS} (Acid volatile sulfide, AVS),NaAC提取的 Fe_{carb} 实际还可能包含 Fe_{AVS} ,特别是站位CJK1-3、YSCW-1和NS-37沉积物中的孔隙水数据都表明沉积物中的硫酸盐还原,站位CJK1-3沉积物中随深度增加的 Fe_{carb} 可能得到部分FeS的补充。Zhu等(2016)在东海陆架沉积物的研究结果显示 Fe_{carb} 的含量远高于总硫化 $Fe(II)$ ($\sum(Fe_{AVS}+Fe_{pyrite})$),表明硫酸盐还原较弱。我们推测黄海中部陆架泥质区和黄河口沉积物中 Fe_{carb} 没有被硫化,因为站位YSCW-1和NS-37沉积物中 Fe_{carb} 的质量摩尔浓度在深度上总体没有变化,而菱铁矿(碳酸亚铁)能在硫酸盐还原的环境中生成(Kamran et al, 2020),站位NS-37沉积物中 Fe^{2+} 深度下降不太可能是 Fe^{2+} 与 H_2S 反应的结果。铁异化还原的产物 $Fe(II)$ 可能掺杂在其他非碳酸盐相和非硫化相中,如磁铁矿。生物成因的自生磁铁矿是海洋沉积物磁性矿物的重要来源,尤其在高铁和亚氧的环境中有利于趋磁细菌产生磁铁矿(Karlin et al, 1987)。在厌氧条件下磁铁矿也是非趋磁细菌代谢的副产物(Lovley et al, 1987; Lovley et al, 1988),因此长江口和黄河口沉积物中磁铁矿的增加也可能是微生物活动的结果(图6a和图6c)。

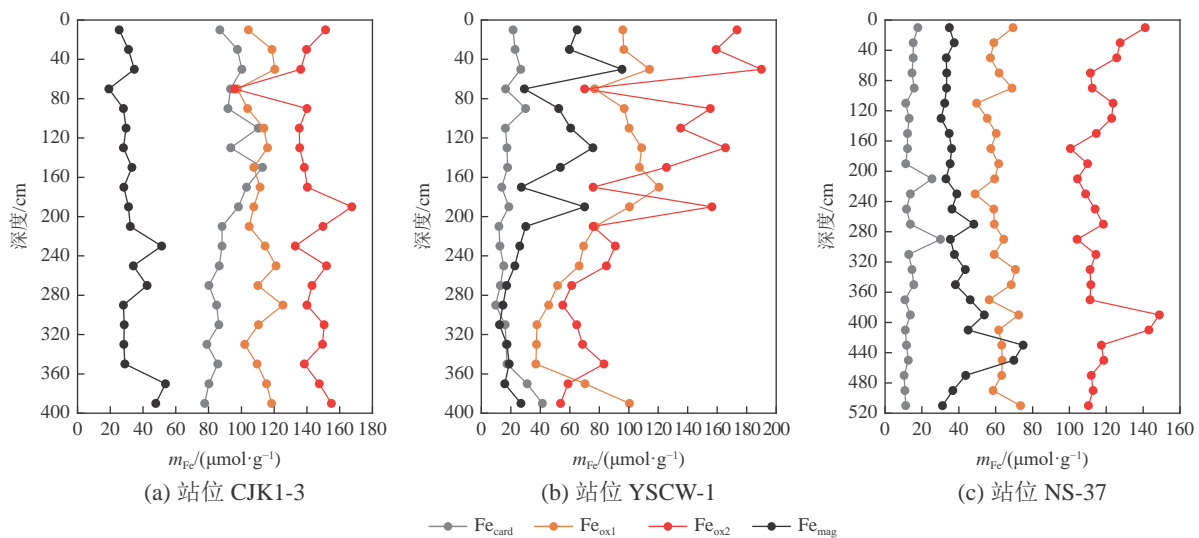


图6 3个站位沉积物中 Fe_{carb} 、 Fe_{ox1} 、 Fe_{ox2} 和 Fe_{mag} 质量摩尔浓度的垂直分布

Fig. 6 Vertical distribution of Fe_{carb} , Fe_{ox1} , Fe_{ox2} and Fe_{mag} molality in sediments of the three stations

2.3.2 Fe_{ox}

海洋沉积物中 Fe_{ox} 包含 Fe_{ox1} 和 Fe_{ox2} ; Fe_{mag} 也是一种重要的铁氧化物,具有一定的磁性和导电性,通常将其归为 Fe_{ox2} (Burdige et al, 2022)。作为地壳中丰度仅次于O、Si、Al的元素,地表岩石中Fe的质量分数高达3.6%(Martin et al, 1979)。地表岩石风化后通过河流搬运到河口和近海陆架成

为海洋沉积物,河口地区通常是铁氧化物富集的区域。以Fe为主要阳离子的游离氧化物是海洋沉积物中Fe的重要组成,Fe_{ox}是沉积物中铁氧化还原化学最重要的驱动相,对铁异化还原和有机质矿化具有重要意义(Thamdrup, 2000a)。长江口沉积物Fe_{ox}平均质量摩尔浓度(287.08 μmol·g⁻¹)明显高于黄海中部陆架泥质区(219.55 μmol·g⁻¹)和黄河口(219.52 μmol·g⁻¹),河流输入可能是一个重要的影响因素,例如长江口泥质区沉积物活性铁的质量比明显高于远离河口的济州岛西南的泥质区的结果(吕仁燕, 2011)。然而同样位于河口的站位NS-37在整个深度上Fe_{ox}的质量摩尔浓度都低于站位CJK1-3(图7),站位NS-37沉积物较低的Fe_{ox}含量可能归因于黄河贫铁颗粒的输入(马伟伟, 2022)。沉积类型也是影响活性铁含量的重要因素,泥质区沉积物中的Fe_{carb}、Fe_{ox1}、Fe_{ox2}含量明显高于砂质区和砂-粉砂-黏土区沉积物(吕仁燕, 2011)。站位CJK1-3沉积物中Fe_{carb}、Fe_{ox1}、Fe_{ox2}的平均质量摩尔浓度分别为长江口泥质区表层沉积物结果(吕仁燕, 2011)的1.8、2.1和1.2倍,同时分别为东海表层沉积物平均结果(吕仁燕, 2011)的2.5、3.0和1.6倍,我们的结果明显与长江口泥质区表层沉积物的结果(吕仁燕, 2011)差别更小,这主要是因为吕仁燕(2011)东海的结果是多种沉积类型的表层沉积物大范围空间分布的平均,而站位CJK1-3的结果是长江口泥质区沉积物的垂直分布的平均。我们根据Poulton等(2005)推荐的提取剂用量提取样品中Fe_{carb}、Fe_{ox1}和Fe_{ox2},单位质量样品的提取剂用量分别是吕仁燕(2011)的2.0、2.0和3.3倍,这也可能导致我们的结果高于其结果。此外样品的前处理、提取方法与条件、保存方式与测定方法的区别也可能是导致我们与其他研究(吕仁燕, 2011)测定的活性铁存在一定差别的原因。

站位YSCW-1沉积物中Fe_{ox}在10 cm处的质量摩尔浓度高于站位CJK1-3和NS-37,30 cm以深质量摩尔浓度快速下降,在190 cm以深低于其他2个站位的(图7);站位YSCW-1孔隙水Fe²⁺和沉积物TOC的剖面数据表明沉积物底部(250~350 cm)发生了铁异化还原过程(图3b₆和图4b),产生的溶解Fe²⁺向上快速扩散可能发生再氧化,形成新的Fe_{ox}。生物灌溉也可能加速Fe²⁺的再氧化过程,研究表明沉积物中的活性铁在埋藏之前,至少发生100次的氧化还原(Canfield et al, 1993b)。铁的氧化还原循环驱动黄海中部陆架泥质区沉积物Fe_{ox}自下而上迁移,最终导致在上部沉积物(10~170 cm)中形成富集的特征(图7)。

3个站位沉积物中Fe_{ox1}/Fe_{ox}(质量摩尔浓度比值)的平均值顺序为CJK1-3(0.39)>YSCW-1(0.37)>NS-37(0.28),明显高于南极半岛陆架沉积物的结果(Burdige et al, 2022)。一个主要原因是南极大陆常年被冰雪覆盖,河流径流量较小,导致陆地输入的铁很少。海洋环境中铁的生物地球化学与Fe_{ox}还原过程密不可分,Fe_{ox1}很容易与H₂S发生还原溶解,时间尺度在几小时到几天之间(Burdige et al, 2022; Poulton et al, 2005)。在富含有机质的海湾中,Fe_{ox1}对H₂S的快速缓冲避免了溶解硫化物积累对底栖生物产生危害(Zhu et al, 2012b)。实验室培养结果显示Fe_{ox1}的生物可用度(bioavailability)远高于Fe_{ox2},通常表现为Fe_{ox1}更高的铁还原率,Fe_{ox1}的含量可能是控制海洋沉积物铁异化还原、硫酸盐还原和甲烷生物生成的主要因素(Lovley et al, 1986; Thamdrup, 2000a),沉积物Fe_{ox1}的数据表明长江口铁异化还原对有机质矿化的重要程度大于黄河口。

3个站位沉积物中Fe_{ox2}/Fe_{ox}(含Fe_{mag})的平均值分别为0.61、0.63和0.72。Fe_{ox2}是Fe_{ox}的重要组成,

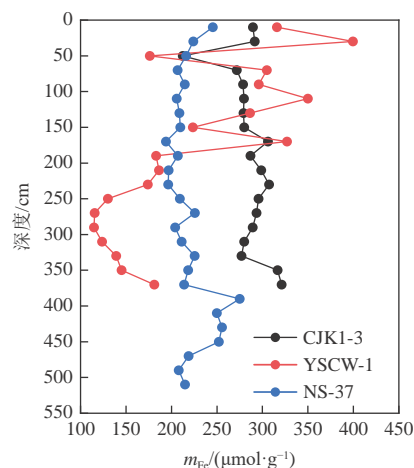


图7 3个站位沉积物中铁氧化物(Fe_{ox})质量摩尔浓度的垂直分布

Fig. 7 Vertical distribution of iron oxides (Fe_{ox}) molality in sediments of the three stations

一般在河流和海洋沉积物中含量高于 Fe_{ox1} ; Fe_{ox2} 结晶度较高; Fe_{ox2} 相较 Fe_{ox1} 发生还原溶解更困难, 抵抗硫化物还原(化学还原)的能力比 Fe_{ox1} 强, 表现为还原溶解时间尺度更长(Poulton et al, 2005; Burdige et al, 2022)。有机质氧化耦合铁还原也是导致铁矿物溶解的重要原因之一, 而与铁矿物的直接接触是微生物将电子从电子供体转移至铁矿物的重要途径(Melton et al, 2014)。铁氧化物结晶通常导致其比表面积减小, 一定程度上减少了与微生物的接触, 在动力学上不利于铁异化还原的进行, 热力学计算表明 Fe_{ox2} 还原的吉布斯自由能高于 Fe_{ox1} (表3)(Arndt et al, 2013)。微生物以 Fe_{ox2} 为电子受体氧化有机质, 获得的能量将小于 Fe_{ox1} 。尽管 Fe_{ox2} 的活性不如 Fe_{ox1} , 以 Fe_{ox2} 还原的终端电子接受过程在热力学上比硫酸盐还原或甲烷生成为主沉积物中可能发生 Fe_{ox2} 的缓慢还原, 在地质时间尺度上可能对铁地球化学产生重要影响(Lovley, 1987; Aromokeye et al, 2020)。

表3 常见末端电子受体在标准状况(25 °C)下的半反应和吉布斯自由能

Table 3 Half-reactions and Gibbs free energies of common terminal electron acceptors under the standard condition (25 °C)

电子受体	半反应	$\Delta\text{Gr}^0/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	矿物类型
O_2	$\text{O}_2 + 4\text{e}^- + 4\text{H}^+ \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	-122.7	—
MnO_2 (软锰矿)	$\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	-120.0	—
$\text{Fe}(\text{OH})_3$ (2线水铁矿)	$\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$	-94.7	Fe_{ox1}
$\alpha\text{-FeOOH}$	$\alpha\text{-FeOOH} + 3\text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	-75.9	Fe_{ox2}
Fe_2O_3	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Fe}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$	-74.6	Fe_{ox2}
SO_4^{2-}	$\text{SO}_4^{2-} + 8\text{e}^- + 9\text{H}^+ \rightarrow \text{HS}^- + 4\text{H}_2\text{O}$	-24.0	—

注: —表示无分类。

2.4 沉积物不同形态锰的质量摩尔浓度及分布特征

站位 CJK1-3 沉积物中 Mn 的质量摩尔浓度总体高于 YSCW-1 和 NS-37。 Mn_{ex} 、 Mn_{carb} 、 Mn_{re} 和 Mn_{org} 的质量摩尔浓度范围分别为 1.07~1.75、 5.71~8.49、 1.11~2.06 和 0.38~3.44 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 其中 Mn_{carb} 的平均值最高, 为 7.06 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。 Mn_{ex} 、 Mn_{re} 和 Mn_{org} 平均值接近, 分别为 1.43、 1.74 和 1.86 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ (图 8)。 站位 YSCW-1 和 NS-37 沉积物中 Mn_{ex} 、 Mn_{carb} 、 Mn_{re} 和 Mn_{org} 的质量摩尔浓度范围分别为 0.18~1.21、 0.48~2.72、 0.17~2.36 和 0.23~1.41 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$; 0.64~1.29、 2.66~4.22、 1.06~1.80 和 0.32~1.10 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。 对应的平均值分别为 0.33、 1.19、 0.73 和 0.80 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$; 0.89、 2.34、 1.41 和 0.56 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ (图 8)。

3 个站位沉积物中 Mn_{carb} 的平均质量摩尔浓度最高, 在站位 CJK1-3 的平均值为 7.06 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 明显高于其他 2 个站位, 深度变化趋势与 Fe_{carb} 相似(图 6a 和图 9a)。

3 个站位沉积物中 Mn_{ex} 、 Mn_{re} 和 Mn_{org} 的质量摩尔浓度在柱样深度上的变化比 Mn_{carb} 更小(图 9)。 站位 YSCW-1 沉积物中 Mn_{ex} 、 Mn_{carb} 和 Mn_{org} 的平均质量摩尔浓度低于 2 个河口站位(图 8),

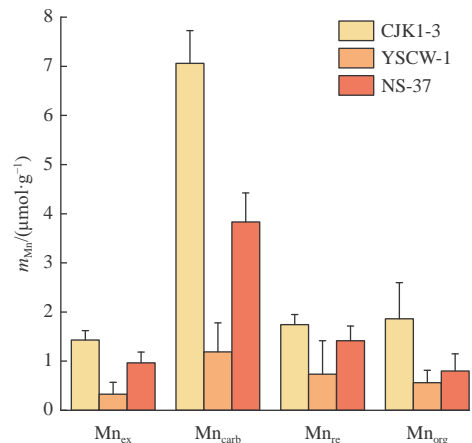


图 8 3 个站位沉积物固相锰的平均质量摩尔浓度

Fig. 8 Mean molality of solid phase manganese in sediments of the three stations

长江和黄河输入可能是河口锰富集的重要原因, Mn_{ex} 和 Mn_{org} 在沉积物大多数深度的质量摩尔浓度都小于 $1 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, Mn_{carb} 和 Mn_{re} 的质量摩尔浓度明显低于 Fe_{ox1} 和 Fe_{ox2} , 但质量摩尔浓度变化趋势类似(图 6b 和图 9b)。站点 NS-37 沉积物中不同形态 Mn 随深度缓慢积累, 其中 Mn_{carb} 的积累最明显, 沉积物底部(470~510 cm) Mn_{carb} 的质量摩尔浓度与站点 CJK1-3 相当(图 9c)。

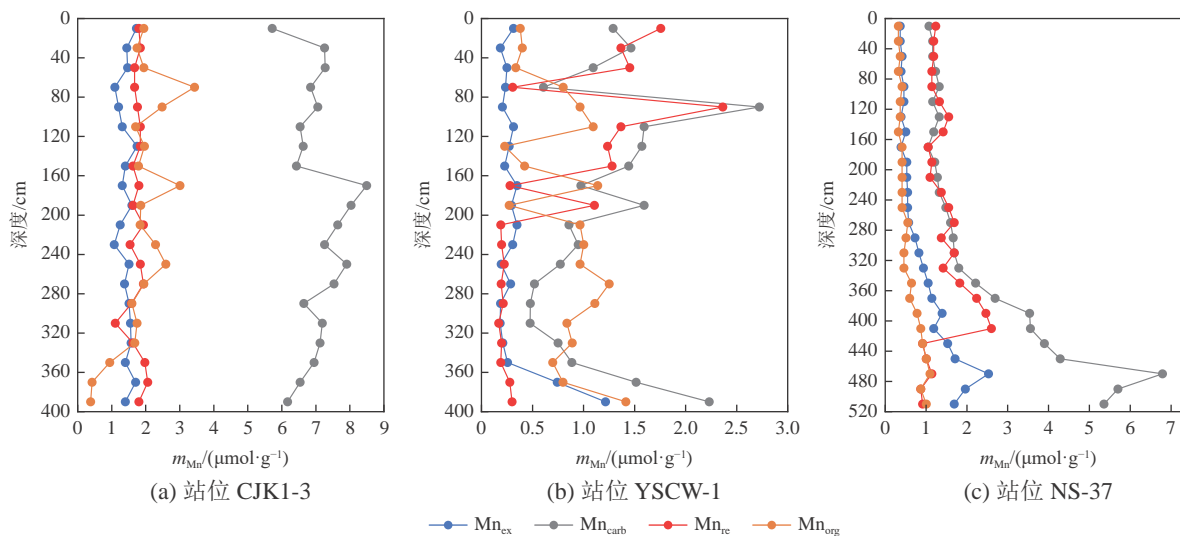


图 9 3 个站点沉积物中 Mn_{ex} 、 Mn_{carb} 、 Mn_{re} 和 Mn_{org} 质量摩尔浓度的垂直分布

Fig. 9 Vertical distribution of Mn_{ex} , Mn_{carb} , Mn_{re} and Mn_{org} molality in sediments of the three stations

2.5 培养实验中溶解 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 和顶空 CH_4 的变化

厌氧培养实验沉积物样品为站点 CJK1-3 柱状样 100~120 cm 深度的沉积物, 以葡萄糖为底物, 研究微生物利用沉积物中铁锰氧化物作为电子受体氧化活性有机质的潜力。结果显示添加 $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 葡萄糖会刺激溶解 Fe^{2+} (图 10a) 和 Mn^{2+} (图 10b) 的产生和积累。

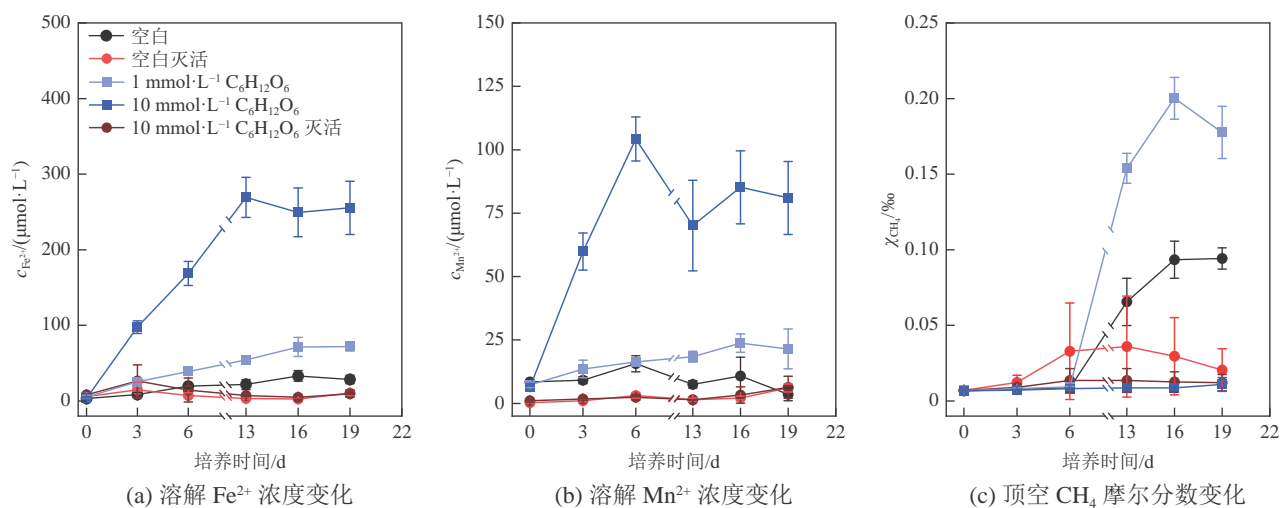


图 10 添加葡萄糖对站点 CJK1-3 沉积物培养泥浆中溶解 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 和顶空中 CH_4 的影响

Fig. 10 Effect of the addition of glucose on dissolved Fe^{2+} and Mn^{2+} in the slurry and headspace CH_4 during the incubation of the sediments of the station CJK1-3

水相中的 Fe^{2+} 浓度由初始(第0天)的 $5.07 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 缓慢增加至 $72.01 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (第19天), Mn^{2+} 浓度表现出相似的变化,水相浓度的峰值出现在第16天($23.79 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)。添加 $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的葡萄糖刺激了更高浓度的 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 的产生,在培养的第3天分别监测到 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 的浓度分别为 $97.70 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $59.84 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,并在随后的培养过程中快速增加至 $269.31 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (第13天)和 $104.26 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (第6天),相比之下,空白(对照)组中溶解 Fe^{2+} 从初始的 $3.26 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 提高到 $26.46 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (第16天),溶解 Mn^{2+} 从初始的 $8.44 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $15.65 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,第6天后浓度呈现下降趋势,第19天浓度降低至 $3.56 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。培养期间同时监测顶空 CH_4 的变化,添加 $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 葡萄糖为底物的培养在第1天~第6天没有甲烷产生,在第13天监测到的 CH_4 摩尔分数为 0.15% (图10c),在第16天达到最高,摩尔分数为 0.20% 。添加 $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 葡萄糖的沉积物泥浆在整个培养过程中没有 CH_4 产生(第8天~第12天未进行测定)。

3 讨论

3.1 孔隙水 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 的分布特征及控制因素

孔隙水中 NH_4^+ (图3a₁、图3b₁和图3c₁)和 DOC (图3a₈、图3b₈和图3c₈)的剖面分布表明站位 CJK1-3、YSCW-1 和 NS-37 沉积物中有机质的持续降解。沉积物孔隙水中 Fe^{2+} 浓度随深度增加应是铁异化还原的标志,这与 Aromokeye 等(2020)的研究结果一致。铁异化还原是沉积物早期成岩的重要过程,影响有机碳矿化和痕量金属与营养盐(磷)在沉积物和上覆水间的交换,铁氧化还原调控底层水磷的清除和释放,对磷的生物地球化学循环具有重要影响(Lovley et al, 1986; Zhou et al, 2023),异化还原导致的铁锰矿物溶解可能会释放铁结合态磷,在孔隙水中表现为磷浓度升高(图3a₄、图3b₄和图3c₄)。

铁异化还原驱动沉积物中溶解 Fe^{2+} 产生和积累,站位 CJK1-3 孔隙水剖面中 Fe^{2+} 随深度(10~170 cm)的增加表明微生物可利用沉积物中的铁氧化物作为电子受体氧化有机质(图3a₆)。值得注意的是,虽然 SO_4^{2-} 深度剖面显示铁异化还原和硫酸盐还原在此深度范围内发生明显重叠(图3a₇),但铁异化还原在热力学上优先于硫酸盐还原,在有机碳含量较低的沉积物环境中有机质的氧化分解一般由铁异化还原主导。铁还原菌通常能在与硫酸盐还原菌的竞争中胜出,并通过竞争优势将有机碳含量控制在硫酸盐还原的阈值以下(Lovley et al, 1986; Lovley, 1987; Kristensen et al, 2011),而富含有机碳的沉积物通常会刺激硫酸盐还原,产生大量的 H_2S 与铁氧化物发生化学还原,从而抑制铁异化还原。铁还原菌和硫酸盐还原菌不具备完全排他性,二者在一定条件下可以共存(朱茂旭等, 2011)。 Fe^{2+} 的深度积累现象表明铁异化还原在有机碳矿化过程中占主导地位,硫酸盐还原受到抑制。然而溶解 Fe^{2+} 浓度达到极大值后(170 cm 以深)逐渐下降,同时 SO_4^{2-} 消耗明显加快,表明沉积物成岩途径硫酸盐还原的增强。最近的一项研究结果表明有机碳在长江口泥质沉积物上部扰动层的矿化方式以铁锰异化还原为主,底部以硫酸还原为主(汲雨等, 2023)。站位 YSCW-1 的 Fe^{2+} 孔隙水剖面显示沉积物底部(250~350 cm)发生铁异化还原(图3b₆),在沉积物上部 SO_4^{2-} 浓度随深度下降而下降表明硫酸盐还原存在(图3b₇),但 TOC 的质量比变化很小(图4b)。孔隙水中存在可检测的 Fe^{2+} , 并且 Fe^{2+} 浓度随 SO_4^{2-} 的变化很小,表明硫酸盐还原作用较弱,其还原产物 H_2S 对 Fe^{2+} 的影响很小。 Fe_{carb} 的质量摩尔浓度没有因为硫酸盐还原随深度增加而增加(图6b),因此我们排除了 Fe_{AVS} 大量掺杂到 Fe_{carb} 的可能性。站位 NS-37 孔隙水剖面显示 Fe^{2+} 主要在表层(10 cm)沉积物中积累,并随着深度增加快速减少(图3c₆)。与 YSCW-1 的情况类似,沉积物中 Fe_{carb} 受 H_2S 和 Fe^{2+} 反应的影响很小,与有机碳矿化作用相关的铁异化还原速率降低可能是孔隙水 Fe^{2+} 浓度降低原因之一(图4a)。磁铁矿的生成导致更多

的Fe(II)在矿物中积累(图6c),在有机碳矿化速率降低的沉积物中Fe²⁺的化学氧化(与锰氧化物)也可能导致Fe²⁺浓度降低和Mn²⁺积累的现象(图3a₅、图3b₅和图3c₅)。

微生物利用沉积物中的锰氧化物作为电子受体氧化有机质导致CJK1-3和YSCW-1孔隙水剖面中Mn²⁺均与Fe²⁺表现出相似的趋势,并且铁锰异化还原的深度基本一致。这是因为在早期成岩过程中,铁锰异化还原是2个相邻的途径(图1),并且以铁氧化物作为电子受体的微生物通常也能够利用锰氧化物。锰氧化物与Fe²⁺的化学还原可能导致Mn²⁺和Fe²⁺的深度剖面表现出了相反的变化趋势(图3c₅和图3c₆)。

3.2 3个站位沉积物有机碳矿化的差异性分析

所有站位沉积物中TOC质量比极小值深度(图4)和Fe²⁺浓度极大值深度(图3a₆、图3b₆和图3c₆)基本一致,TOC和Fe²⁺剖面相反的变化趋势表明铁的早期成岩过程在河口和陆架沉积物有机碳矿化过程中发挥重要作用。3个站位沉积物中TOC平均质量比顺序为站位CJK1-3(6.23 mg·g⁻¹)<YSCW-1(7.38 mg·g⁻¹)<NS-37(8.37 mg·g⁻¹),可反映长江口沉积物较低的有机碳保存效率,TOC质量比在10~150 cm深度快速减少,表明有机碳矿化作用强烈(图4a)。前人基于²¹⁰Pb放射性核素技术评估长江口扰动泥的厚度达1.5 m(杨作升等,2007),长江口复杂的水动力条件可导致沉积物的再悬浮和再移动增强,加速铁的氧化还原循环和有机碳矿化(Yao et al, 2014; Xu et al, 2015; Zhao et al, 2018; Song et al, 2022)。与站位CJK1-3相比,站位YSCW-1沉积物TOC质量比在10~250 cm的深度变化很小,有机碳矿化作用相对较弱;在250~350 cm随着铁异化还原增强有机碳矿化速率加快。站位NS-37沉积物TOC剖面分布表明有机碳矿化随着深度增加的趋势明显减弱。值得注意的是,所有站位沉积物中TOC质量比受硫酸盐浓度变化的影响很小,二者甚至在站位CJK1-3(150~390 cm)、YSCW-1(350~390 cm)和NS-37都表现出了相反的变化趋势。此外Fe_{carb}深度剖面显示3个站位的沉积物环境都属于非硫化的环境,这些结果表明硫酸盐还原可能对有机碳矿化的贡献较小。

沉积物中TOC含量随深度增加这一现象可能与活性铁对有机碳保存有关,近十几年来的研究发现活性铁与有机碳通过共价键形式的吸附、络合、共沉淀等方式结合(OC-Fe)可抵抗微生物的降解,有效地促进海洋中有机碳的长期保存。据估计,全球约21.5%的有机碳以铁结合有机碳(OC-Fe)的形式保存下来(Lalonde et al, 2012; 赵彬等, 2016),通常认为可被柠檬酸盐-连二亚硫酸盐提取的铁组分是与有机碳相关的活性铁(Fe_d)(Lalonde et al, 2012)。铁作为氧化还原敏感元素,氧化还原条件的改变对铁矿物的影响很大,因此不同海洋沉积环境下铁对有机碳的保存效果差异明显。OC-Fe中的碳铁比(C/Fe)可以衡量活性铁对有机碳的保存效率,例如以简单吸附方式结合形成的OC-Fe,其C/Fe不超过1;而以共沉淀方式形成的OC-Fe的C/Fe为6~10(Wagai et al, 2007; 胡利民等, 2023)。TOC/Fe_d能在一定程度上反映不同沉积物环境中活性铁对有机碳的保存效率。经计算,站位CJK1-3、YSCW-1和NS-37沉积物的TOC/Fe_d范围分别为1.31~1.73、1.71~5.38、2.63~4.41,平均值分别为1.51、3.12、3.64,表明有机碳保存效率排序为黄河口>黄海中部陆架泥质区>长江口,但活性铁对这些站位有机碳保存的具体作用机制和贡献还有待进一步研究。

3.3 铁锰异化还原对3个站位沉积物有机碳矿化的贡献

在沉积物培养实验中,空白组中溶解Fe²⁺的增加表明原位的有机质仍能刺激铁异化还原的发生(图10a)。添加葡萄糖的培养结果显示底物的还原当量(电子)流向铁锰氧化物,有机质的浓度可能是控制铁异化还原速率的重要控制因素之一。底物浓度为1 mmol·L⁻¹(图10a)时,流向铁异化还原当量的摩尔分数为0.3%(第19天);当底物浓度增加至10 mmol·L⁻¹(图10a)时,该摩尔分数减小至

0.11%(第16天)。底物的增加削弱铁还原途径对有机碳矿化的贡献, Jones等(1984)将类似的研究结果归因于发酵铁还原过程中有机碳的不完全氧化与氢氧化和铁还原的弱耦合。然而以上的结果仅仅是通过溶解 Fe^{2+} 浓度的简单估计, 固相 Fe(II) 的变化并未纳入计算。更多的富集培养和纯培养表明铁锰异化还原具有完全氧化有机碳的能力(Lovley et al, 1986, 1988), 铁还原途径在热力学上优于硫酸盐还原(表3)。在铁氧化物存在条件下, 铁还原细菌通过竞争优势将竞争性底物的浓度维持在硫酸盐还原阈值以下, 如Canfield等(1993a, 1993b)结合 ^{35}S 同位素等分析手段发现铁异化还原贡献Skagerrak海洋沉积物21%~78%的有机碳矿化, 个别站位富锰沉积物中锰还原贡献甚至超过90%。铁氧化物通常是近海沉积物中最丰富的电子受体, 然而由于各种因素的制约, 只有部分铁氧化物都能被微生物利用。 Fe_{ox1} 是预测沉积物厌氧矿化中铁还原途径的良好指标, 海洋沉积物 Fe_{ox1} 的浓度与铁还原贡献的有机碳矿化关系(Jensen et al, 2003): $\text{FeR}\%=(1-e^{-[\text{Fe(III)}]})\times 100\%$ 。式中 $\text{FeR}\%$ 表示通过铁还原途径的碳氧化占总碳氧化的百分数, $[\text{Fe(III)}]$ 表示 Fe_{ox1} 的浓度($\mu\text{mol}\cdot\text{mL}^{-1}$), 海洋沉积物中常数 $A=0.056$ 。海洋沉积物(采样深度 $<50\text{ m}$)的平均密度为 $1.66\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 压实作用对浅层沉积物密度的影响很小(Tenzer et al, 2014)。基于卢博等(2005)和王凯等(2011)的研究结果, 东海、黄海和渤海表层沉积物的平均密度分别为 1.96 、 1.8 和 $1.86\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 平均含水率分别为33%、40.6%和42.8%, 计算长江口(CJK1-3)、黄海中部陆架泥质区(YSCW-1)和黄河口(NS-37)沉积物中 Fe_{ox1} 平均浓度分别为 146.88 、 87.90 和 $65.56\mu\text{mol}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。带入公式获得站位CJK1-3、YSCW-1和NS-37沉积物铁异化还原对有机碳矿化的平均贡献为99.97%、99.27%和97.46%, 这一结果表明在中国大型河流入海口和近海陆架沉积物中, 铁异化还原可能远比硫酸盐还原重要。

锰异化还原是有机碳矿化的途径之一, 在热力学上优于铁还原途径(表3), 锰异化还原通常主导海洋富锰沉积物有机碳的厌氧氧化, 对一些海域有机碳矿化的贡献超过90%(Aller et al, 1990; Canfield et al, 1993b; Vandieken et al, 2006)。这些富锰沉积物通常是锰的非正常积累导致的, 只占海洋沉积物的一小部分, 例如海底热液释放导致巴拿马海盆沉积物中锰的质量分数高达10%(Aller et al, 1990)。培养实验中溶解 Mn^{2+} 的积累显示出以锰氧化物为电子受体氧化有机碳的潜力(图10b), 然而海洋沉积物中锰异化还原对有机碳矿化的贡献一般小于10%, 大多数情况下可忽略不计(Canfield et al, 1993a; Thamdrup et al, 1994), 原因是沉积物中锰的质量分数通常较低, 这是锰在地壳中的极低丰度导致的, 仅为铁的质量分数的2.3%左右(Thamdrup et al, 2000b; Haynes, 2017)。长江口、黄海中部陆架泥质区和黄河口沉积物中 Mn_{re} 的平均质量摩尔浓度分别为 Fe_{ox1} 的1.56%、0.91%和2.29%, 表明锰异化还原可能是这些地点有机碳矿化的次要途径。此外, 锰氧化物与硫酸盐不同, 容易与无机或有机还原剂发生化学还原反应(站位NS-37), Fe^{2+} 、 H_2S 、丙酮酸、草酸等都是潜在的化学还原剂(Burdige, 1993; Thamdrup, 2000a; 朱茂旭等, 2011), 沉积物中锰的非生物还原很容易削弱锰异化还原对有机碳矿化的贡献。

4 结 论

2021年8—9月我们在长江口(站位CJK1-3)、黄海中部陆架泥质区(站位YSCW-1)和黄河口(站位NS-37)采集沉积物柱状样, 采用分步提取和化学分析方法获得沉积物中 Fe_{carb} 、 Fe_{ox1} 、 Fe_{ox2} 、 Fe_{mag} 和活性锰的数据, 结合孔隙水地化参数和沉积物TOC分析了3个站位孔隙水溶解铁锰和沉积物中不同形态铁锰的分布特征。通过沉积物厌氧培养实验和铁锰氧化物的质量摩尔浓度评估金属异化还原在有机碳矿化中的贡献, 得到以下结论。

1) 长江口和黄海中部陆架泥质区沉积物孔隙水中 Fe^{2+} 主要来源于铁异化还原过程, 微生物利用沉积物中的锰氧化物作为电子受体氧化有机质导致沉积物孔隙水 Mn^{2+} 浓度的增加。沉积物中锰氧化物的化学还原可能引起孔隙水 Fe^{2+} 的消耗和 Mn^{2+} 的积累, 进而导致黄河口沉积物孔隙水出现 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 相反的变化趋势。

2) 沉积物中 Fe_{carb} 平均质量摩尔浓度顺序为长江口 ($91.23 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 干重) > 黄海中部陆架泥质区 ($19.35 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 干重) > 黄河口 ($14.15 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 干重), $\text{Fe}_{\text{ox1}}/\text{Fe}_{\text{ox}}$ 的平均值顺序为长江口 (0.39) > 黄海中部陆架泥质区 (0.37) > 黄河口 (0.28), Fe_{carb} 和 Fe_{ox1} 均呈现自南向北递减的趋势, Fe_{carb} 以自生碳酸盐矿物为主, Fe_{ox} 以 Fe_{ox2} 为主。长江输入的活性铁导致站位 CJK1-3 沉积物 Fe_{ox} 平均质量摩尔浓度 ($287.08 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 干重) 明显高于站位 YSCW-1 ($219.55 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 干重) 和 NS-37 ($219.52 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 干重), 站位 NS-37 在上部 (10~170 cm) 较低的 Fe_{ox} 质量摩尔浓度归因于黄河贫铁颗粒的输入。

3) 沉积物中铁异化还原能在原位浓度的有机质条件下进行, 铁锰异化还原的速率受到底物浓度限制, 底物浓度的增加有利于提高还原速率, 但可能削弱金属异化还原的重要性(贡献)。

4) 沉积物中 TOC 的质量比及 TOC/ Fe_d 结果表明长江口有机碳矿化作用强烈, 有机碳的保存效率低于其他 2 个站位, 孔隙水 Fe^{2+} 、 SO_4^{2-} 、固相 Fe_{carb} 、 Fe_{ox} 和 TOC 分布特征表明硫酸盐还原作用可能弱于铁异化还原。沉积物铁锰异化还原的评估结果显示 3 个站位沉积物铁还原途径对有机碳矿化的贡献超过 90%, 表明河口和近海陆架富含活性铁的沉积物中铁异化还原远比硫酸盐还原重要。沉积物中锰氧化物 (Mn_{re}) 的平均质量摩尔浓度仅为 Fe_{ox1} 的 1.56%、0.91% 和 2.29%, 表明锰异化还原只是有机碳矿化的一个次要途径。

参考文献 (References):

- 鲍根德, 黄德佩, 汪依凡, 等, 1986. 长江口及邻近陆架区表层沉积物和间隙水中锰的地球化学[J]. 东海海洋, 4(2): 38-43.
- BAO G D, HUANG D P, WANG Y F, et al, 1986. Geochemistry of manganese in the surface sediments and interstitial water of the Changjiang Estuary and its adjacent continental shelf[J]. Donghai Marine Science, 4(2): 38-43.
- 董宏坤, 万世明, 刘喜停, 2022. 海洋沉积物早期成岩作用研究进展[J]. 沉积学报, 40(5): 1172-1187. DONG H K, WAN S M, LIU X T, 2022. Research progress on geochemical behavior of minerals and elements in early diagenesis of marine sediments[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 40(5): 1172-1187.
- 胡利民, 季钰涵, 赵彬, 等, 2023. 铁对海洋沉积有机碳保存的影响及其碳汇意义[J]. 中国科学: 地球科学, 66(9): 1946-1959.
- HU L M, JI Y H, ZHAO B, et al, 2023. The effect of iron on the preservation of organic carbon in marine sediments and its implications for carbon sequestration[J]. Scientia Sinica Terrae, 66(9): 1946-1959.
- 汲雨, 赵彬, 李康, 等, 2023. 长江口-东海内陆架早期成岩过程及影响因素[J]. 海洋学报, 45(8): 1-13. JI Y, ZHAO B, LI K, et al, 2023. Early diagenetic processes and influencing factors of the Changjiang River Estuary and East China Sea inner-shelf[J]. Haiyang Xuebao, 45(8): 1-13.
- 卢博, 李赶先, 黄韶健, 等, 2005. 中国黄海、东海和南海北部海底浅层沉积物声学物理性质之比较[J]. 海洋技术, 24(2): 28-33. LU B, LI G X, HUANG S J, et al, 2005. The comparing of sea bed sediment acoustic-physical properties in the Yellow Sea, the East China Sea and the northern South China Sea[J]. Ocean Technology, 24(2): 28-33.
- 吕仁燕, 2011. 东海陆架沉积物中铁的早期化学成岩作用[D]. 青岛: 中国海洋大学. LÜ R Y, 2011. Early chemical diagenesis of iron in the shelf sediments of the East China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China.
- 马伟伟, 2022. 大型河流(黄河)、河口及近海沉积物中活性铁和铁结合态有机碳地球化学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学. MA W W, 2022. Studies on geochemistry of reactive iron and iron associated organic matter in sediments of large-sized river (Huanghe), estuary and continental shelf sea[D]. Qingdao: Ocean University of China.
- 全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283), 2007. 海洋监测规范: 第4部分 海水分析: GB 17378.4—2007[S]. 北京: 中国标准出版社: 109-121. National Technical Committee 283 on Ocean of Standardization Administration of China, 2007.

- The specification for marine monitoring: part 4 seawater analysis: GB 17378.4—2007[S]. Beijing: Standards Press of China: 109-121.
- 王凯, 吴建政, 安永宁, 等, 2011. 渤海湾北部表层沉积物的物理力学性质[J]. 海洋地质前沿, 27(1): 14-18. WANG K, WU J Z, AN Y N, et al, 2011. Physico-mechanic properties of surface sediments in the north of Bohai Bay[J]. Marine Geology Frontiers, 27(1): 14-18.
- 杨作升, 陈晓辉, 2007. 百年来长江口泥质区高分辨率沉积粒度变化及影响因素探讨[J]. 第四纪研究, 27(5): 690-699. YANG Z S, CHEN X H, 2007. Centurial high resolution records of sediment grain-size variation in the mud area off the Changjiang (Yangtze River) Estuary and its influential factors[J]. Quaternary Science, 27(5): 690-699.
- 赵彬, 姚鹏, 于志刚, 2016. 有机碳-氧化铁结合对海洋环境中沉积有机碳保存的影响[J]. 地球科学进展, 31(11): 1151-1158. ZHAO B, YAO P, YU Z G, 2016. The effect of organic carbon-iron oxide association on the preservation of sedimentary organic carbon in marine environments[J]. Advances in Earth Science, 31(11): 1151-1158.
- 朱茂旭, 史晓宁, 杨桂朋, 等, 2011. 海洋沉积物中有机质早期成岩矿化路径及其相对贡献[J]. 地球科学进展, 26(4): 355-364. ZHU M X, SHI X N, YANG G P, et al, 2011. Relative contribution of various early diagenetic pathways to mineralization of organic matter in marine sediments: an overview[J]. Advances in Earth Science, 26(4): 355-364.
- AITKEN C M, JONES D M, MAGUIRE M J, et al, 2013. Evidence that crude oil alkane activation proceeds by different mechanisms under sulfate-reducing and methanogenic conditions[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 109: 162-174.
- ALLER R C, CHARNOCK H, EDMOND J M, et al, 1990. Bioturbation and manganese cycling in hemipelagic sediments[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London—Series A: Mathematical and Physical Sciences, 331(1616): 51-68.
- ARNDT S, JØRGENSEN B B, LAROWE D E, et al, 2013. Quantifying the degradation of organic matter in marine sediments: a review and synthesis[J]. Earth-Science Reviews, 123: 53-86.
- AROMOKEYE D A, 2018. Iron oxide driven methanogenesis and methanotrophy in methanic sediments of Helgoland Mud Area, North Sea[D]. Bremen: University of Bremen.
- AROMOKEYE D A, KULKARNI A C, ELVERT M, et al, 2020. Rates and microbial players of iron-driven anaerobic oxidation of methane in methanic marine sediments[J]. Frontiers in Microbiology, 10: 3041.
- BAKER J C, KASSAN J, HAMILTON P J, 1996. Early diagenetic siderite as an indicator of depositional environment in the Triassic Rewan Group, southern Bowen Basin, eastern Australia[J]. Sedimentology, 43(1): 77-88.
- BERNER R A, 1980. Early diagenesis: a theoretical approach[M]. Princeton: Princeton University Press: 1-2.
- BERNER R A, 1982. Burial of organic carbon and pyrite sulfur in the modern ocean: its geochemical and environmental significance[J]. American Journal of Science, 282(4): 453-473.
- BERNER R A, CANFIELD D E, 1989. A new model for atmospheric oxygen over phanerozoic time[J]. American Journal of Science, 289(4): 333-361.
- BERNER R A, 1990. Atmospheric carbon dioxide levels over phanerozoic time[J]. Science, 249(4975): 1382-1386.
- BREWER P G, SPENCER D W, 1971. Colorimetric determination of manganese in anoxic waters[J]. Limnology and Oceanography, 16(1): 107-110.
- BURDIGE D J, 1993. The biogeochemistry of manganese and iron reduction in marine sediments[J]. Earth-Science Reviews, 35(3): 249-284.
- BURDIGE D J, CHRISTENSEN J P, 2022. Iron biogeochemistry in sediments on the western continental shelf of the Antarctic Peninsula[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 326: 288-312.
- CANFIELD D E, JØRGENSEN B B, FOSSING H, et al, 1993a. Pathways of organic carbon oxidation in three continental margin sediments[J]. Marine Geology, 113(1): 27-40.
- CANFIELD D E, THAMDRUP B, HANSEN J W, 1993b. The anaerobic degradation of organic matter in Danish coastal sediments: iron reduction, manganese reduction, and sulfate reduction[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 57(16): 3867-3883.
- DENG B, ZHANG J, WU Y, 2006. Recent sediment accumulation and carbon burial in the East China Sea[J]. Global Biogeochemical Cycles, 20(3): GB3014.

- DONG L X, GUAN W B, CHEN Q, et al, 2011. Sediment transport in the Yellow Sea and East China Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93(3): 248-258.
- GUO W D, YANG L Y, HONG H S, et al, 2011. Assessing the dynamics of chromophoric dissolved organic matter in a subtropical estuary using parallel factor analysis[J]. *Marine Chemistry*, 124(1/2/3/4): 125-133.
- HAYNES W M, 2017. *CRC handbook of chemistry and physics*[M]. Boca Raton: CRC Press: 14-17.
- HENRICHS S M, 1992. Early diagenesis of organic matter in marine sediments: progress and perplexity[J]. *Marine Chemistry*, 39(1): 119-149.
- JENSEN M M, THAMDRUP B, RYSGAARD S, et al, 2003. Rates and regulation of microbial iron reduction in sediments of the Baltic-North Sea transition[J]. *Biogeochemistry*, 65: 295-317.
- JONES J G, GARDENER S, SIMON B M, 1984. Reduction of ferric iron by heterotrophic bacteria in lake sediments[J]. *Microbiology*, 130(1): 45-51.
- JØRGENSEN B B, 1982. Mineralization of organic matter in the sea bed: the role of sulphate reduction[J]. *Nature*, 296(5858): 643-645.
- KAMRAN A, SCHNEIDER D, RODDATIS V, et al, 2020. Formation of siderite in microbial microcosms derived from a marine sediment[J]. *Geomicrobiology Journal*, 37(5): 475-485.
- KARLIN R, LYLE M, HEATH G R, 1987. Authigenic magnetite formation in suboxic marine sediments[J]. *Nature*, 326(6112): 490-493.
- KRISTENSEN E, MANGION P, TANG M, et al, 2011. Microbial carbon oxidation rates and pathways in sediments of two Tanzanian mangrove forests[J]. *Biogeochemistry*, 103: 143-158.
- LALONDE K, MUCCI A, OUELLET A, et al, 2012. Preservation of organic matter in sediments promoted by iron[J]. *Nature*, 483(7388): 198-200.
- LASO-PÉREZ R, KRUKENBERG V, MUSAT F, et al, 2018. Establishing anaerobic hydrocarbon-degrading enrichment cultures of microorganisms under strictly anoxic conditions[J]. *Nature Protocols*, 13(6): 1310-1330.
- LIU K K, PENG T H, SHAW P T, et al, 2003. Circulation and biogeochemical processes in the East China Sea and the vicinity of Taiwan: an overview and a brief synthesis[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(6): 1055-1064.
- LIU J P, LI A C, XU K H, et al, 2006. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 26(17): 2141-2156.
- LIU J P, XU K H, LI A C, et al, 2007. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea[J]. *Geomorphology*, 85(3): 208-224.
- LOVLEY D R, PHILLIPS E J P, 1986. Organic matter mineralization with reduction of ferric iron in anaerobic sediments[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 51(4): 683-689.
- LOVLEY D R, 1987. Organic matter mineralization with the reduction of ferric iron: a review[J]. *Geomicrobiology Journal*, 5(3/4): 375-399.
- LOVLEY D R, STOLZ J F, NORD G L, et al, 1987. Anaerobic production of magnetite by a dissimilatory iron-reducing microorganism[J]. *Nature*, 330(6145): 252-254.
- LOVLEY D R, PHILLIPS E J P, 1988. Novel mode of microbial energy metabolism: organic carbon oxidation coupled to dissimilatory reduction of iron or manganese[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 54(6): 1472-1480.
- LOVLEY D R, 2000. *Environmental microbe-metal interactions*[M]. Washington D C: American Society for Microbiology: 3-30.
- MARTIN J M, MEYBECK M, 1979. Elemental mass-balance of material carried by major world rivers[J]. *Marine Chemistry*, 7(3): 173-206.
- MELTON E D, SWANNER E D, BEHRENS S, et al, 2014. The interplay of microbially mediated and abiotic reactions in the biogeochemical Fe cycle[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 12(12): 797-808.
- NICKEL M, VANDIEKEN V, BRÜCHERT V, et al, 2008. Microbial Mn(IV) and Fe(III) reduction in northern Barents Sea sediments under different conditions of ice cover and organic carbon deposition[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 55(20): 2390-2398.

- PARKES R J, CRAGG B, ROUSSEL E, et al, 2014. A review of prokaryotic populations and processes in sub-seafloor sediments, including biosphere: geosphere interactions[J]. *Marine Geology*, 352: 409-425.
- POULTON S W, CANFIELD D E, 2005. Development of a sequential extraction procedure for iron: implications for iron partitioning in continentally derived particulates[J]. *Chemical Geology*, 214(3/4): 209-221.
- SIEGENTHALER U, SARMIENTO J L, 1993. Atmospheric carbon dioxide and the ocean[J]. *Nature*, 365(6442): 119-125.
- SONG S, SANTOS I R, YU H, et al, 2022. A global assessment of the mixed layer in coastal sediments and implications for carbon storage[J]. *Nature Communications*, 13(1): 4903.
- STOOKEY L L, 1970. Ferrozine: a new spectrophotometric reagent for iron[J]. *Analytical Chemistry*, 42(7): 779-781.
- TENZER R, GLADKIKH V, 2014. Assessment of density variations of marine sediments with ocean and sediment depths[J]. *The Scientific World Journal*: e823296.
- TESSIER A, CAMPBELL P G C, BISSON M, 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 51(7): 844-851.
- THAMDRUP B, FOSSING H, JØRGENSEN B B, 1994. Manganese, iron and sulfur cycling in a coastal marine sediment, Aarhus bay, Denmark[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(23): 5115-5129.
- THAMDRUP B, 2000a. Bacterial manganese and iron reduction in aquatic sediments[M]//SCHINK B. *Advances in Microbial Ecology*. Boston: Springer US: 41-84.
- THAMDRUP B, ROSSELLÓ-MORA R, AMANN R, 2000b. Microbial manganese and sulfate reduction in Black Sea shelf sediments[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 66(7): 2888-2897.
- VANDIEKEN V, NICKEL M, JØRGENSEN B B, 2006. Carbon mineralization in Arctic sediments northeast of Svalbard: Mn(IV) and Fe(III) reduction as principal anaerobic respiratory pathways[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 322: 15-27.
- WAGAI R, MAYER L M, 2007. Sorptive stabilization of organic matter in soils by hydrous iron oxides[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(1): 25-35.
- XU B C, BIANCHI T S, ALLISON M A, et al, 2015. Using multi-radiotracer techniques to better understand sedimentary dynamics of reworked muds in the Changjiang River Estuary and inner shelf of East China Sea[J]. *Marine Geology*, 370: 76-86.
- YAO P, ZHAO B, BIANCHI T S, et al, 2014. Remineralization of sedimentary organic carbon in mud deposits of the Changjiang Estuary and adjacent shelf: implications for carbon preservation and authigenic mineral formation[J]. *Continental Shelf Research*, 91: 1-11.
- YAO P, YU Z, BIANCHI T S, et al, 2015. A multiproxy analysis of sedimentary organic carbon in the Changjiang Estuary and adjacent shelf[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120(7): 1407-1429.
- ZHAO B, YAO P, BIANCHI T S, et al, 2017. Early diagenesis and authigenic mineral formation in mobile muds of the Changjiang Estuary and adjacent shelf[J]. *Journal of Marine Systems*, 172: 64-74.
- ZHAO B, YAO P, BIANCHI T S, et al, 2018. The remineralization of sedimentary organic carbon in different sedimentary regimes of the Yellow and East China Seas[J]. *Chemical Geology*, 495: 104-117.
- ZHOU C Y, DONG P, LI G, 2015. Hydrodynamic processes and their impacts on the mud deposit in the Southern Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 360: 1-16.
- ZHOU Z, HENKEL S, KASTEN S, et al, 2023. The iron "redox battery" in sandy sediments: its impact on organic matter remineralization and phosphorus cycling[J]. *Science of The Total Environment*, 865: 161168.
- ZHU M X, HAO X C, SHI X N, et al, 2012a. Speciation and spatial distribution of solid-phase iron in surface sediments of the East China Sea continental shelf[J]. *Applied Geochemistry*, 27(4): 892-905.
- ZHU M X, LIU J, YANG G P, et al, 2012b. Reactive iron and its buffering capacity towards dissolved sulfide in sediments of Jiaozhou Bay, China[J]. *Marine Environmental Research*, 80: 46-55.
- ZHU M X, HUANG X L, YANG G P, et al, 2015. Iron geochemistry in surface sediments of a temperate semi-enclosed bay, North China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 165: 25-35.

- ZHU M X, CHEN K K, YANG G P, et al, 2016. Sulfur and iron diagenesis in temperate unsteady sediments of the East China Sea inner shelf and a comparison with tropical mobile mud belts (MMBs)[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121(11): 2811-2828.
- ZHUANG G C, ELLING F J, NIGRO L M, et al, 2016. Multiple evidence for methylotrophic methanogenesis as the dominant methanogenic pathway in hypersaline sediments from the Orca Basin, Gulf of Mexico[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 187: 1-20.

Comparative Study on the Characteristics of Reactive Iron and Manganese in Sediments From Coastal China and Its Significance for Organic Carbon Mineralization: Case Studies at the Yangtze River Estuary, the Mud Area of the Shelf in Central Yellow Sea, and the Yellow River Estuary

WEI Shijin^{1,2,3,4}, MENG Ni^{1,2,3,4}, WEI Qinsheng^{4,5}, ZHUANG Guangchao^{1,2,3,4}

(1. *Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 2. *Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 3. *College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 4. *Laboratory of Marine Ecology and Environmental Science, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China*; 5. *Key Laboratory of Marine Eco-Environmental Science and Technology, FIO, MNR, Qingdao 266061, China*)

Abstract: The early diagenesis of iron and manganese is one of the important pathways of organic carbon mineralization in marine sediments. The details of content and distribution of reactive iron (Fe) and manganese (Mn) are of great significance to evaluating organic carbon mineralization contributed by dissimilatory Fe and Mn reduction in sediments. However, so far, few studies have investigated the distribution of reactive iron and manganese in different sedimentary environments of coastal China. The molality of reactive Fe and Mn in sediments from the Yangtze River Estuary (CJK1-3), the mud area of the shelf in central Yellow Sea (YSCW-1) and Yellow River Estuary (NS-37) was investigated based on the sequential extraction procedures in this study. The relevant biogeochemical analysis was conducted with the depth profiles of Fe and Mn in the sediment gravity cores. Results showed that the mean molality of carbonate-bound iron (Fe_{carb}) in sediments from the Yangtze River Estuary was 4.71 times and 6.45 times higher than that from the mud area of the shelf in central Yellow Sea ($19.35 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, dry weight) and Yellow River Estuary ($14.15 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, dry weight), respectively. The mean value of amorphous and poorly crystalline Fe(III) oxides (Fe_{ox1}) showed the following decreasing trend, CJK1-3 ($111.63 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, dry weight) > YSCW-1 ($79.99 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, dry weight) > NS-37 ($61.63 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, dry weight). The molality of Mn oxides was lower than that of iron in all three stations, and the mean molality of reducible manganese (Mn_{re}) accounted for 1.56%, 0.91% and 2.29% of Fe_{ox1} , respectively. The results of the incubation experiment showed that dissimilatory Fe and Mn reduction occurred under the condition of *in-situ* organic matter. The evaluation results of dissimilatory Fe and Mn reduction indicated that dissimilatory Fe reduction was a major pathway for organic carbon mineralization in coastal (Estuary) sediments, while Mn reduction was a minor one. The results of this study provide some new insights for iron and manganese biogeochemistry in coastal (estuarine) sediments of China.

Keywords: Yangtze River Estuary; Yellow Sea; Yellow River Estuary; iron; manganese; organic carbon

Received: August 23, 2023 **Online:** May 13, 2024

长江口北支上段滩槽演变过程研究

王凌霄¹, 戴志军^{1*}, 梅雪菲¹, 王杰¹, 楼亚颖¹, 乔红杰²

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241;

2. 长江水利委员会水文局长江口水文水资源勘测局, 上海 200136)

摘要: 滩槽系统是河口普遍存在的地貌单元, 其演变过程直接关乎航槽稳定与滩涂资源利用。利用 1992 年—2022 年长江口北支上段实测地形资料、Landsat 遥感影像及长江入海水沙、南北支分流比等数据, 分析北支上段滩槽演变过程及可能的影响因素。结果表明, 崇头边滩淤涨速率为 0.32 km²/a, 新跃沙为 0.25 km²/a, 其中超过 50% 的研究区边滩淤涨发生在 2000 年—2003 年。同时, 崇头河槽在 2000 年—2008 年发生明显侵蚀, 容积扩大超过 50%。崇头边滩与新跃沙淤涨泥沙来源主要由潮流带入, 受上游来沙影响较小。由于北支青龙港河道弯曲及涌潮现象, 引起新跃沙快速淤涨。崇头边滩在洪季受径潮流顶托造成泥沙落淤; 在枯季因科氏力与淤涨滩涂扩展, 形成涨潮冲刷槽, 构成北支“槽冲滩淤”的特点。

关键词: 滩槽系统; 动力地貌演变; 潮汐不对称; 长江口; 北支

中图分类号: P737.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2024)04-0663-14

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20230825001

引用格式: 王凌霄, 戴志军, 梅雪菲, 等, 2024. 长江口北支上段滩槽演变过程研究[J]. 海洋科学进展, 42(4): 663-676. WANG L X, DAI Z J, MEI X F, et al, 2024. Study on evolutionary process of shoal-channel at upper reach of the North Branch of the Changjiang Estuary[J]. Advances in Marine Science, 42(4): 663-676.

滩槽系统作为全球河口、河流三角洲中普遍存在的地貌单元(Lou et al, 2020), 是海防、生态和航运的关键组成部分。滩槽系统的快速变化将通过影响沿岸沉积物输运进而构成河道与岸线变迁(Do et al, 2018), 由此不利于上游泄洪及航槽航运等(何用等, 2018)。近百年来人类活动对河口造成极大影响, 世界范围的大河河口滩槽系统发生退化(Anthony et al, 2014), 长江口上游输沙量亦出现大幅下降, 导致河口发生浅滩淤涨加剧或蚀退的现象(Luan et al, 2016)。因此, 探究长江口滩槽系统演变过程并揭示滩槽系统对相关影响因素的响应, 既可丰富对长江口动力沉积体系变化的认知, 也对维护河道稳定性和保护周边生态系统具有现实意义。

先前已有不少国内外学者对河口滩槽动力地貌过程及其机制进行分析, 认为影响滩槽地貌演变的主要因素包括人工疏浚和抛泥、风暴潮、海平面上升等(Jon, 2006; Jeuken et al, 2010; Kearney et al, 2016; 范吉庆等, 2019)。与此同时, 河口浅滩沉积物来源成为较多学者的关注焦点, 研究发现上游筑坝、挖沙等人类活动导致流域来沙减少、河口滩涂冲淤转型(Giosan et al, 2014; Besset et al, 2019), 但较少提及海域来沙对河口滩涂冲淤的作用(Ganju et al, 2017)。此外, 径潮流作用也对河口滩槽动态稳定过程具有重要影响, 是塑造河口复杂滩槽地形地貌的主要驱动力(黄宇明等, 2022)。

收稿日期: 2023-08-25 网络首发日期: 2024-08-26

资助项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U2040202); 国家重大社科基金项目(23&ZD105); 国家自然科学基金面上项目(42076174); 上海市国际科技合作基金项目(20230713800)

作者简介: 王凌霄(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事河口海岸动力地貌方面研究。

E-mail: 51213904052@stu.ecnu.edu.cn

*通信作者: 戴志军(1973—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事陆海相互作用、河口海岸动力沉积与动力地貌、海岸湿地生态修复方面研究。E-mail: zjdai@sklec.ecnu.edu.cn

(陈靖 编辑)

长江口北支作为长江入海河道一级汉道，历史上曾是长江主流入海通道(孟翊等, 2005)。18世纪以来，受启东诸沙并岸影响，长江主流改道南支(胡高建, 2021)，因此进入北支径流逐渐减少，分流比下降，河槽由河控转变为潮控河道。近期北支分流比不足5%(刘杰等, 2011; 栾华龙等, 2022)，造成大量盐水与泥沙随潮流倒灌南支。这对东风西沙水库、陈行水库和青草沙水库造成影响，严重威胁上海的淡水供应(Lyu et al, 2018)，并造成白茆沙北水道萎缩(张俊勇等, 2015; 陈正兵等, 2016)，影响太仓港岸线的稳定和码头的正常运行(张朝阳等, 2019)。北支上段直接控制着长江径流进入北支的水沙通量，其滩槽演变过程是改变北支入流条件，控制潮流倒灌南支以及北支淤积衰退的关键因素(Dai et al, 2016)。鉴于潮控型河口滩槽受涨潮动力作用的控制而长期处于淤积萎缩状态，这成为当前河口研究的关注重点(胡高建, 2021; 闫天阳, 2021)。基于此，北支作为长江口代表性潮控河道(Dai et al, 2016)，探究其滩槽演变过程有助于对此类型河口动力地貌演化的理解。本文利用近30年的地形资料，对北支上段新跃沙、崇头边滩及河槽动态发展进行分析，揭示其动力地貌变化规律及主控因素，可为长江口北支综合治理提供理论依据和科学指导。

1 资料来源与研究方法

1.1 研究资料

1.1.1 地形及水文数据

本文使用了1992年、2000年、2008年、2013年、2016年、2018年、2019年、2021年及2022年共9期北支上段海图水深地形资料(表1)。同时还收集了长江入海控制站大通水文站1995年—2021年连续日径流量、输沙量数据和南北支分流口2002年—2021年分水分沙比数据。其中，海图水深数据来自长江口航道管理局和中华人民共和国海事局，水深观测采用双频回声测探法。在水深小于5 m的区域，垂直误差为0.02~0.05 m，误差不超过1%。同时，使用GPS进行定位，其水平误差为(±1) m，等深线每100 m测量误差也约为(±1%)，这可确保数据的准确性。所有海图的空间分辨率为0.5~1.0 km，均以吴淞理论最低潮面为基准，平均每平方千米有5~20个观测点，可满足研究区域地貌演变分析的精度要求(Dai et al, 2014)。因部分年份海图河槽部分不够完整，因此在计算河槽深度时，选取了北支上段河槽部分完整的2000年、2008年、2013年、2019年、2021年和2022年的海图进行计算。大通站水文数据来自长江水利委员会，南北支分流比数据来自上海河口海岸研究中心，其中南北支分流比在观测期间大小潮各测一次，每次观测28 h左右，本文取大小潮观测结果平均值进行分析，监测均严格按照《河流流量测验规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2015)进行，以确保数据准确性。

表1 海图水深地形资料年份及比例尺参数

Table 1 Bathymetric year and scale data

序号	时间	比例尺	序号	时间	比例尺	序号	时间	比例尺
1	1992年	1:60 000	4	2013年	1:80 000	7	2019年	1:80 000
2	2000年	1:100 000	5	2016年	1:40 000	8	2021年	1:40 000
3	2008年	1:40 000	6	2018年	1:40 000	9	2022年	1:40 000

本文收集了2002年3月和9月以及2007年3月和8月大潮长江口北支定点实测水文数据(资料来源于长江口航道管理局)，固定垂线流速流向采用SLC9-2A直读式海流计施测，定位和导航采用

AstechGPS 信标机(图 1 和表 2)。流速、流向施测测次除整点外在涨急、落急时段半点各加测一次,使用六点法往返施测,即表层、 $0.2H$ 、 $0.4H$ 、 $0.6H$ 、 $0.8H$ 、河底,其中 H 表示测验时水深。根据长江口水文特征,5月至10月为洪季,11月至翌年4月为枯季。

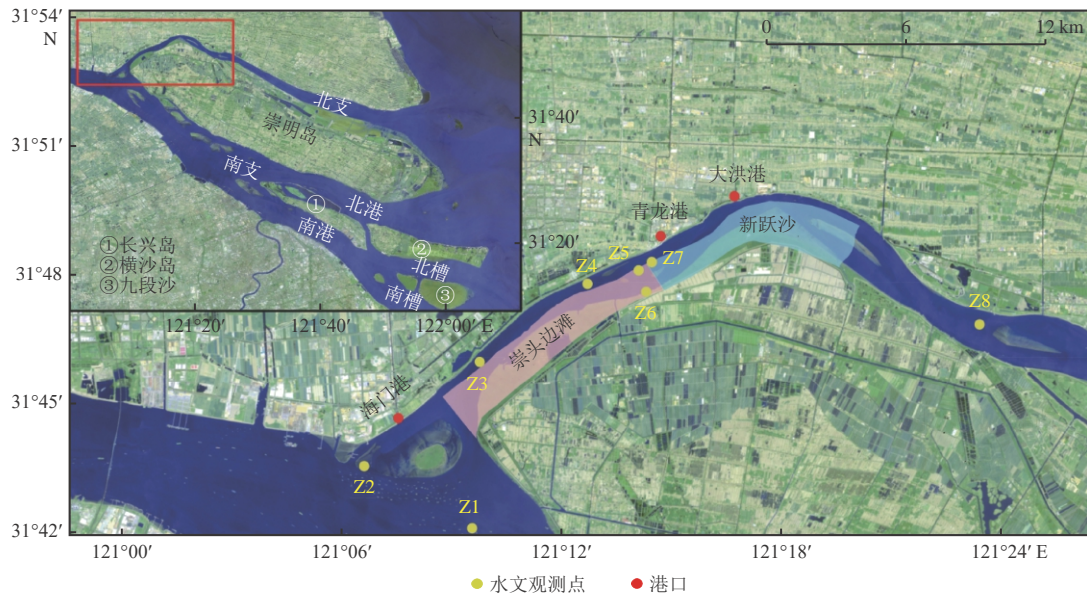


图 1 研究区域位置和水文观测点位置

Fig. 1 Study region and locations of observation stations

表 2 大潮期水文观测信息

Table 2 Summary of hydrological data

时间	站点	观测内容
2002年3月1日至2日	Z1、Z4	流速、流向
2002年9月22日至23日	Z3、Z5	
2007年3月4日至5日	Z2、Z3、Z7、Z8	
2007年8月16日至17日	Z6	

1.1.2 遥感数据及处理

鉴于本文收集的海图资料时间跨度较大,为更好地研究崇头边滩与新跃沙面积年际变化,使用了GEE平台获取Landsat系列卫星1993年—2022年研究区上空云量小于50%的136幅遥感影像(Lou et al, 2022a)。其中,1993年—2011年使用Landsat 5卫星数据,2013年—2022年使用Landsat 8卫星数据。为避免水位波动引起的潮滩面积误差,参考北支上段青龙港站潮汐表,选取潮位相近的遥感影像,遥感数据分辨率为30 m,误差为 $9 \times 10^{-4} \text{ km}^2$,精度较好。将崇头边滩与新跃沙附近区域作为兴趣区域(图1),通过人工目视解译以随机样本法生成3 000个样本点(Long et al, 2022),其中水体与滩地各1 500个样本点,将70%的样本点用于训练,其余样本点用于准确性评估(Lou et al, 2022b),混淆矩阵、总体精度及Kappa系数(赵梓琨等, 2023; Yang et al, 2023)计算结果表明总体精度与Kappa系数平均值大于0.98,说明潮滩区域提取精确度很好。最后将分类结果裁剪至兴趣区域,计算兴趣区域内滩地面积(图2)。

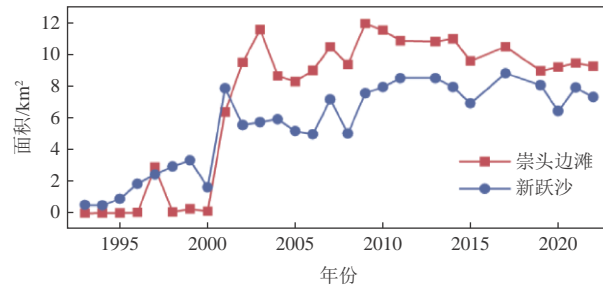


图2 崇头边滩与新跃沙面积变化

Fig. 2 Area changes of the Chongtou Shoal and the Xinyue Shoal

1.2 研究方法

1.2.1 地形数据处理

为系统阐述长江口北支上段槽滩演化过程, 首先利用 ArcGIS 软件对海图资料进行数字化, 选取 8 个固定地标作为地理参考控制点, 将不同时期海图地形数据统一校正到 WGS1984 坐标系与理论深度基准面; 然后采用 Natural Neighbour 插值方法, 构建长江口北支上段区域不同年份的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM); 再使用 Minus 工具制作北支上段区域冲淤变化图, 获取不同年份 DEM 间的体积与高程变化; 最后利用 Contour 工具提取北支上段不同年份 0、2 和 5 m 等深线, 并对其进行空间叠加, 其中 0 m 以上区域定义为滩, 0 m 以下区域定义为槽, 由此分析区域滩槽地貌的时空变化。

1.2.2 优势流、优势沙计算

基于 2002 年与 2007 年洪枯季长江口北支水文测验获得的水文泥沙数据, 对涨、落潮量分别进行计算和统计, 并计算优势流(R_Q)和优势沙(R_G):

$$R_Q = \frac{Q_e}{Q_e + Q_f}, \quad (1)$$

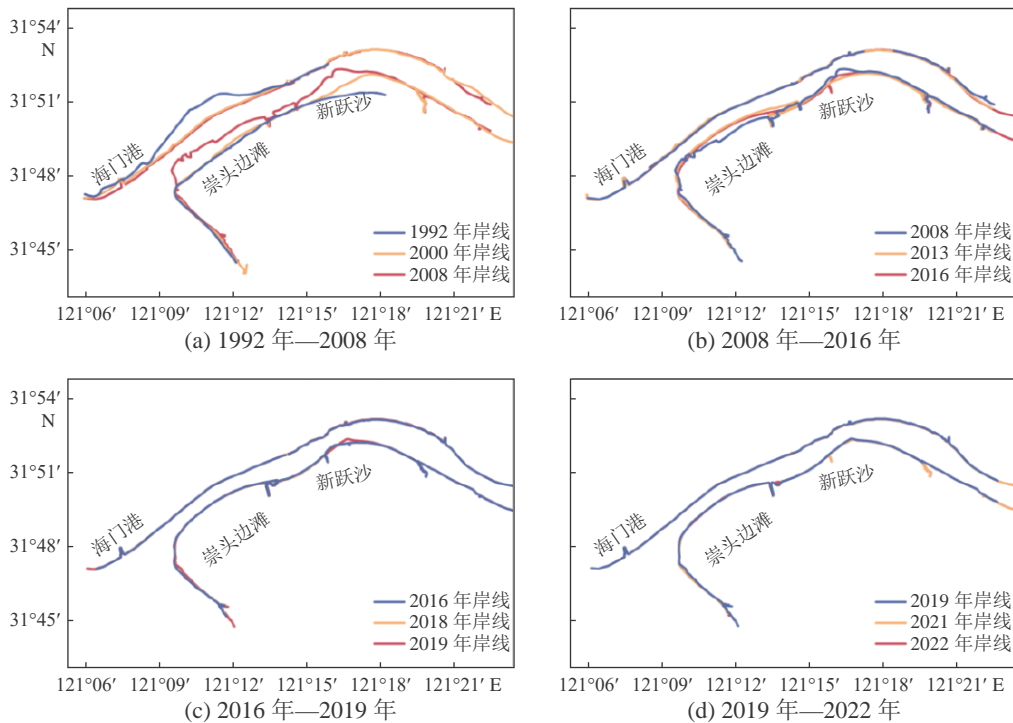
$$R_G = \frac{G_e}{G_e + G_f}, \quad (2)$$

式中: Q_e 和 Q_f 分别为落潮潮量和涨潮潮量; G_e 和 G_f 分别为落潮沙量和涨潮沙量。 R_Q 反映涨、落潮强弱, $R_Q > 50\%$ 时表示落潮流占优势、 $R_Q < 50\%$ 时表示涨潮流占优势; $R_G > 50\%$ 时表示落潮优势沙、 $R_G < 50\%$ 时则表示涨潮优势沙(林益帆等, 2015)。

2 结果

2.1 北支上段滩槽变化

北支上段滩槽形态在最近 30 年期间发生明显改变。1992 年—2000 年期间, 北支入口北岸围垦约 10 km², 使得岸线更为顺直, 北支入流条件得到改善。新跃沙在此期间进行约 4.9 km²的围垦, 导致大洪港河面宽度从 3.5 km 大幅减少至 2.5 km, 从而使北支弯道的过水面积严重缩减(图 3a)。2000 年—2008 年期间, 崇明侧边滩发生大幅淤涨, 其中崇头边滩淤涨超过 9 km², 新跃沙附近淤涨超过 5 km²(图 2), 导致崇头及新跃沙附近河道均缩窄至 800 m 左右。2008 年—2013 年期间, 崇头边滩岸线小幅扩张, 新跃沙岸线遭到一定冲刷, 两者变得更加平滑。自 2013 年以来, 北支上段崇头边滩与新跃沙面积出现小幅波动(图 2), 但河槽水深没发生较大变化。



注:岸线为海堤线。

图3 长江口北支上段岸线分布

Fig. 3 Shorelines of the upper reach of the North Branch of the Changjiang Estuary

简而言之,北支上段滩槽演变可分为4个阶段:①1992年—2000年,崇头海门岸段进行约10 km²的围垦,使两侧岸线平行顺直,流向更为集中,从而改善入流条件。在此期间新跃沙围垦导致大洪河面宽度显著缩减。②2000年—2008年,崇头边滩和新跃沙发生大幅淤涨,使得北支上段河道宽度进一步减小。③2008年—2016年,北支上段河道岸线在崇头附近出现微小变化,由不规则的形态转变为光滑的弧形,其余部分则保持稳定(图3b)。④2016年—2022年,北支上段滩槽形态基本保持稳定(图3c和图3d)。

2.2 北支上段等深线变化

1992年—2000年期间,长江北支上段河槽大幅淤积:崇头2 m等深线向北移动超过1 km,崇头附近原有5 m深槽消失;在北支进口段,2 m与5 m等深线变化相对较小(图4a)。2000年—2008年期间,北支进口段2 m与5 m等深线均向南扩张,北支上段河槽2 m等深线长度增长至原来的近4倍,由3 km增长至11 km,同时出现超过7 m的深槽。新跃沙附近河槽变化较小,2 m和5 m等深线均基本保持稳定(图4b)。2008年—2013年期间,北支入口段2 m与5 m等深线由原来向北弯曲的形态转变为平直状态,并与北支流向垂直。由于北支上段河道深泓线向南迁移,崇头附近的河道被重新冲刷出深度超过6 m的槽沟。新跃沙附近河道也遭到冲刷,导致2 m与5 m等深线长度增长(图4c)。2013年—2016年期间,北支入口处2 m等深线沿南北支分汉口崇头侧向北延伸,而5 m等深线则小幅向南拓展。在崇头对岸与新跃沙附近区域,5 m等深线长度继续保持延伸的趋势(图4d)。2016年—2018年期间,海门港侧出现了新的2 m等深线,并且在崇头侧出现深度超过6 m的槽沟。除此之外,北支上段河道水深变化较小(图4e)。在2018年之后,北支上段河道水深基本没有发生较大变化(图4f~图4h)。

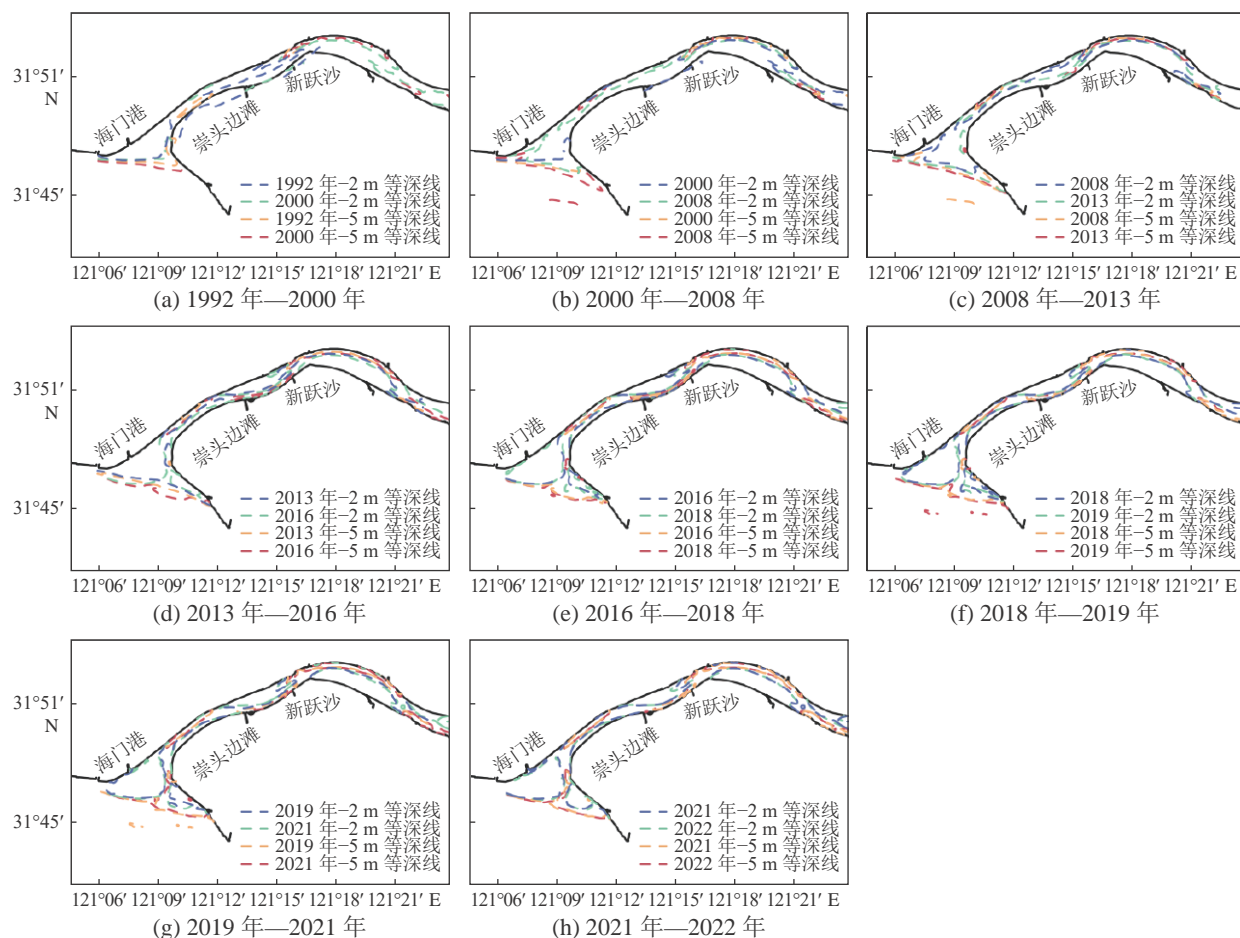


图4 1992年—2022年长江口北支上段2 m与5 m等深线形态变化
 Fig. 4 Evolution of 2 m and 5 m isobaths of upper reach of the North Branch of the Changjiang Estuary from 1992 to 2022

2.3 北支上段区域冲淤特征

为揭示北支上段河道年际冲淤变化特征, 将长江北支上段历年数字高程模型(DEM)进行对比分析(图5)。1992年—2000年, 北支进口段及上段河槽发生大面积淤积, 淤积厚度最高超过6 m, 淤积最严重的区域为崇头和北支进口段南部(图5a)。2000年—2008年崇头河槽发生冲刷, 平均冲刷厚度接近1.5 m(图5b), 容积增长超过60%(图6), 新跃沙东侧则发生小幅淤积, 河槽容积有所减小。2008年—2013年北支进口段与上段河槽发生淤积, 淤积最严重的区域为海门港南侧, 最高淤积厚度达5 m(图5c)。崇头河槽与新跃沙河槽容积下降约20%。2013年—2016年北支进口段西南部出现明显淤积, 与此同时北支上段河槽沿深泓线发生冲刷, 冲刷最严重区域发生在新跃沙西侧, 冲刷厚度最高近6 m, 崇头河槽与新跃沙河槽深度均增长超过1倍(图5d), 河槽容积均增长超过20%。在2017年之后北支进口段以及上段河槽整体冲淤幅度较小, 趋于稳定状态(图5e~图5h)。由此可见, 北支进口段和上段河槽在1992年—2022年期间呈现“淤积-冲刷-淤积-冲刷-稳定”这种逐步变化的状态。

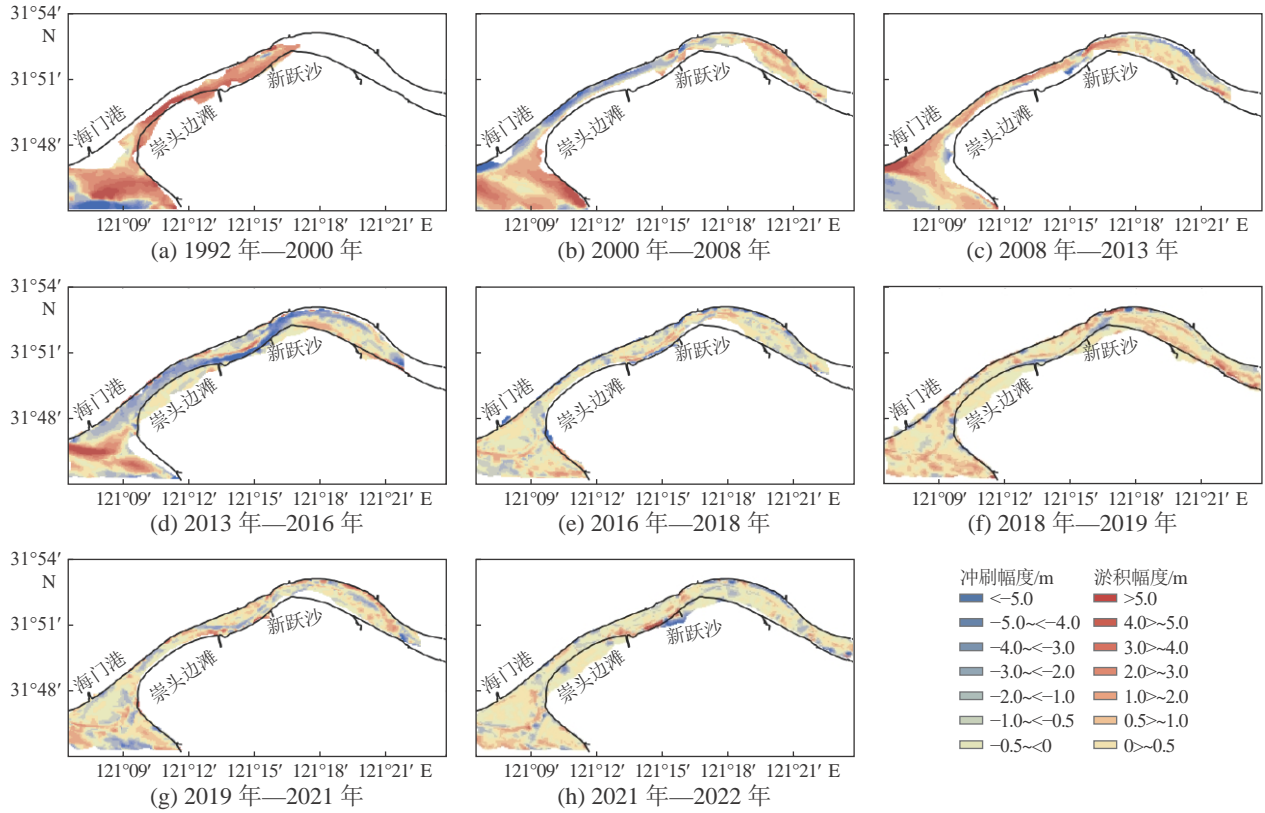


图5 1992年—2022年长江口北支上段冲淤变化

Fig. 5 Bathymetric changes of the upper reach of the North Branch of the Changjiang Estuary from 1992 to 2022

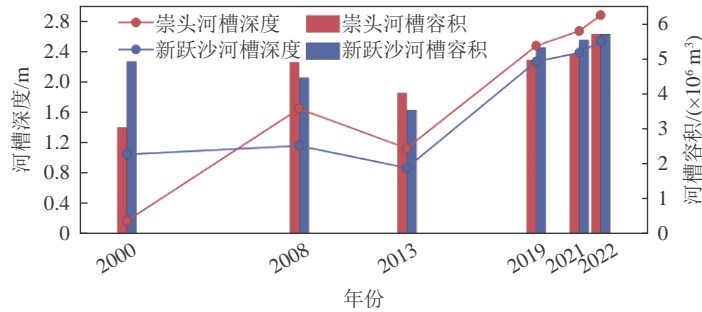


图6 2000年—2022年崇头与新跃沙河槽容积变化

Fig. 6 Yearly channel volume changes of the Chongtou Shoal and the Xinyue Shoal from 2000 to 2022

3 讨论

3.1 陆海水沙条件的影响

由大通水文站近30年的水沙数据可知,在1998年—2009年期间,其年均径流量与年均输沙量均呈逐渐下降趋势(图7)。其中在2000年—2003年期间,崇头边滩与新跃沙发生大幅淤涨(图2),两者面积与年均输沙量呈负相关(图8),表明流域来沙并不是崇头与新跃沙淤涨的主要来源。在上游来沙减少的同时,崇头河槽高程减小、容积增加,两者存在较好相关性(图8),表明上游来沙对崇头河槽的影响作用可能大于边滩,其为崇头河槽的主要泥沙来源之一。新跃沙河槽距离上游较崇头河槽更远,因此受上游来沙影响较小。在2011年后,大通站年径流量小幅回升,但年输沙率基

本没有较大变化。北支分流比在2014年之后逐渐升高。与此同时，崇头边滩面积逐渐减少，两者具有较好相关性(图8和图9)。由于崇头边滩面积减小、河道宽度增长、北支径流入流条件有所改善，从而导致北支分流比升高。

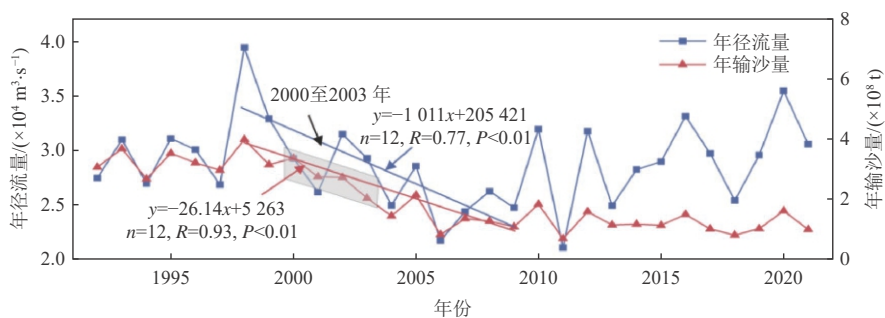


图7 大通水文站年均流量和输沙量变化

Fig. 7 Yearly water and sediment discharges at the Datong Station

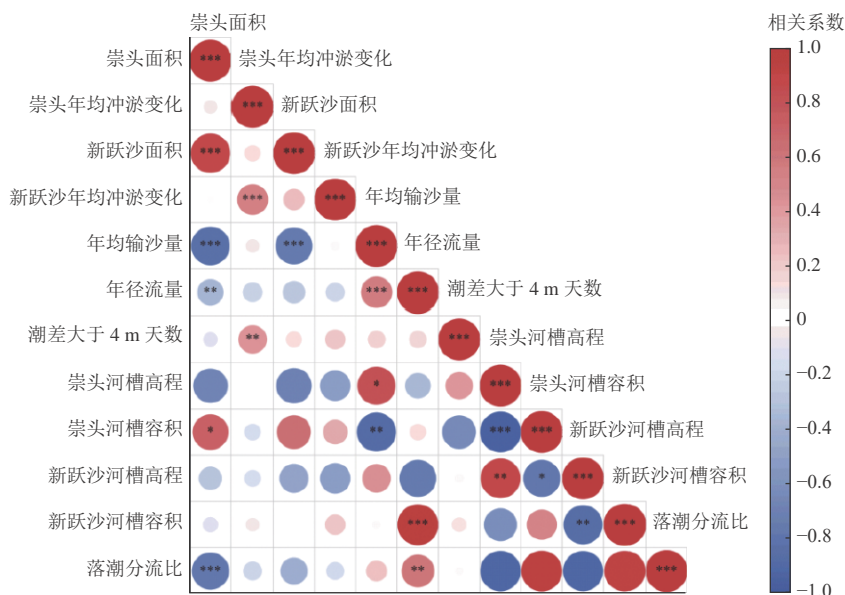


图8 崇头和新跃沙地形变化及其影响因素相关性热图

Fig. 8 Heat map of correlation coefficients of morphodynamic changes and influencing factors in the Chongtou Shoal and the Xinyue Shoal

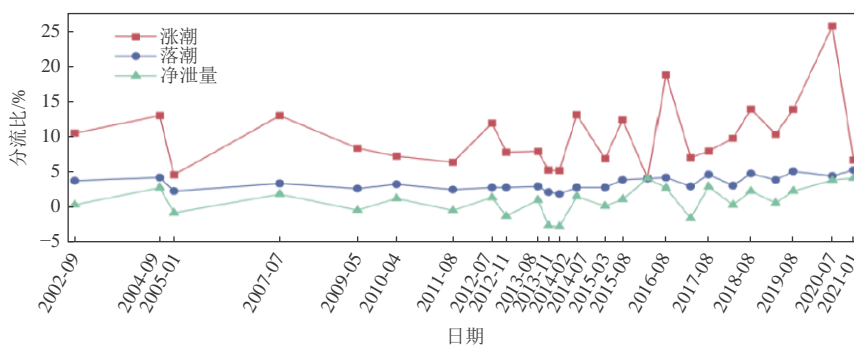


图9 长江口南北支分流口分流比

Fig. 9 Discharge diversion ratios of the South Branch and the North Branch of the Changjiang Estuary

潮差大于 4 m 的河口一般被定义为强潮河口 (Davies et al, 1964)。北支属于潮控型河口,其潮流作用较强,潮差超过 4 m 时易发生涌潮现象,导致水体中含沙量升高,造成边滩淤积。故本文统计了青龙港潮差大于 4 m 的时长,发现青龙港站潮差大于 4 m 的时长在 1999 年—2002 年超过 40 天(图 10),这与崇头边滩发生淤涨的时间(2000 年—2003 年)对应。相关性分析也表明青龙港潮差大于 4 m 的天数与崇头年均冲淤变化之间存在良好的相关性(图 8)。此外,北支因具有喇叭形河势和 水下浅滩易于引发涌潮现象(许宝华等, 2019),潮涌使得水体含沙量升高。在崇头边滩以及新跃沙淤涨速率最快的 2001 年,青龙港站实测含沙量在涌潮发生后曾达到 15.92 kg/m^3 (陈沈良等, 2003),表明经潮流作用进入北支的海域来沙是崇头边滩与新跃沙淤涨的主要泥沙来源。

3.2 北支动力条件变化的影响

由长江口北支上段 6 个实测站点的潮流玫瑰图(图 11)可知,北支上段涨落潮流向均较为集中,但 2002 年滞留点附近区域的 Z4 站点出现了旋转流,导致涨落潮流向分散,这有利于泥沙在此区域“辐聚”(魏稳, 2017)。而位于北支进口段的 Z1 与 Z2 站点由于更易受到径流的作用,整体流向相较北支上段更加分散。在 2002 年洪季 Z3 与 Z5 站点的优势流与优势沙系数均在 0.5 左右,表明北支上段滞留点位于 Z3~Z5 附近区域,径流与潮流在此汇合,形成落淤区。在此区域,下游悬沙净向上输运,上游悬沙净向下输运,造成了边滩淤涨。前人对北支整体进行的分析发现,落潮流与涨潮流在大洪港以下的北支主槽段交汇,形成落淤区(胡高建, 2021; Dai et al, 2016)。本文聚焦北支上段,该区域也存在类似落淤区,即在径流和潮流交汇处(Z3~Z5 之间)流速降低,泥沙淤积。因此,本文是对早期工作的细化和补充。而在 2007 年洪季,尽管 Z6 站点优势流系数为 0.49(仍在 0.50 左右),但优势沙系数下降至 0.38,转为涨潮优势,这表明在此区域泥沙向上游输运,淤涨趋势有所缓减(图 12a)。

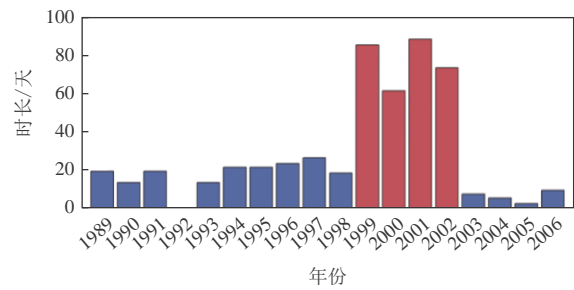


图 10 青龙港潮差大于 4 m 的时长

Fig. 10 Days with tidal range greater than 4 meters in the Qinglong Port

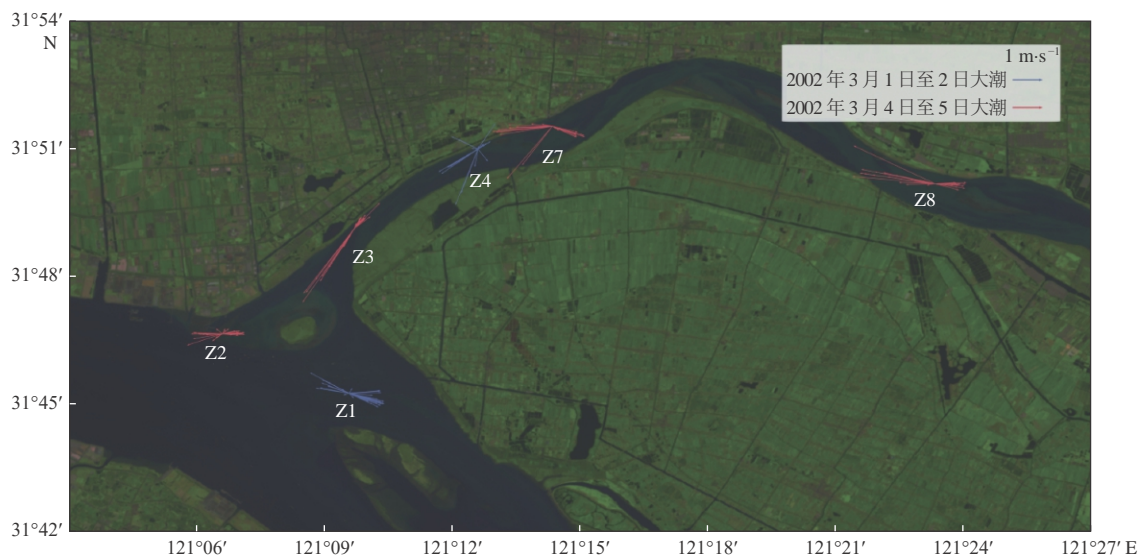


图 11 长江口北支上段实测站点潮流玫瑰图

Fig. 11 Flow velocity rose diagram of the upper reach of the North Branch of the Changjiang Estuary

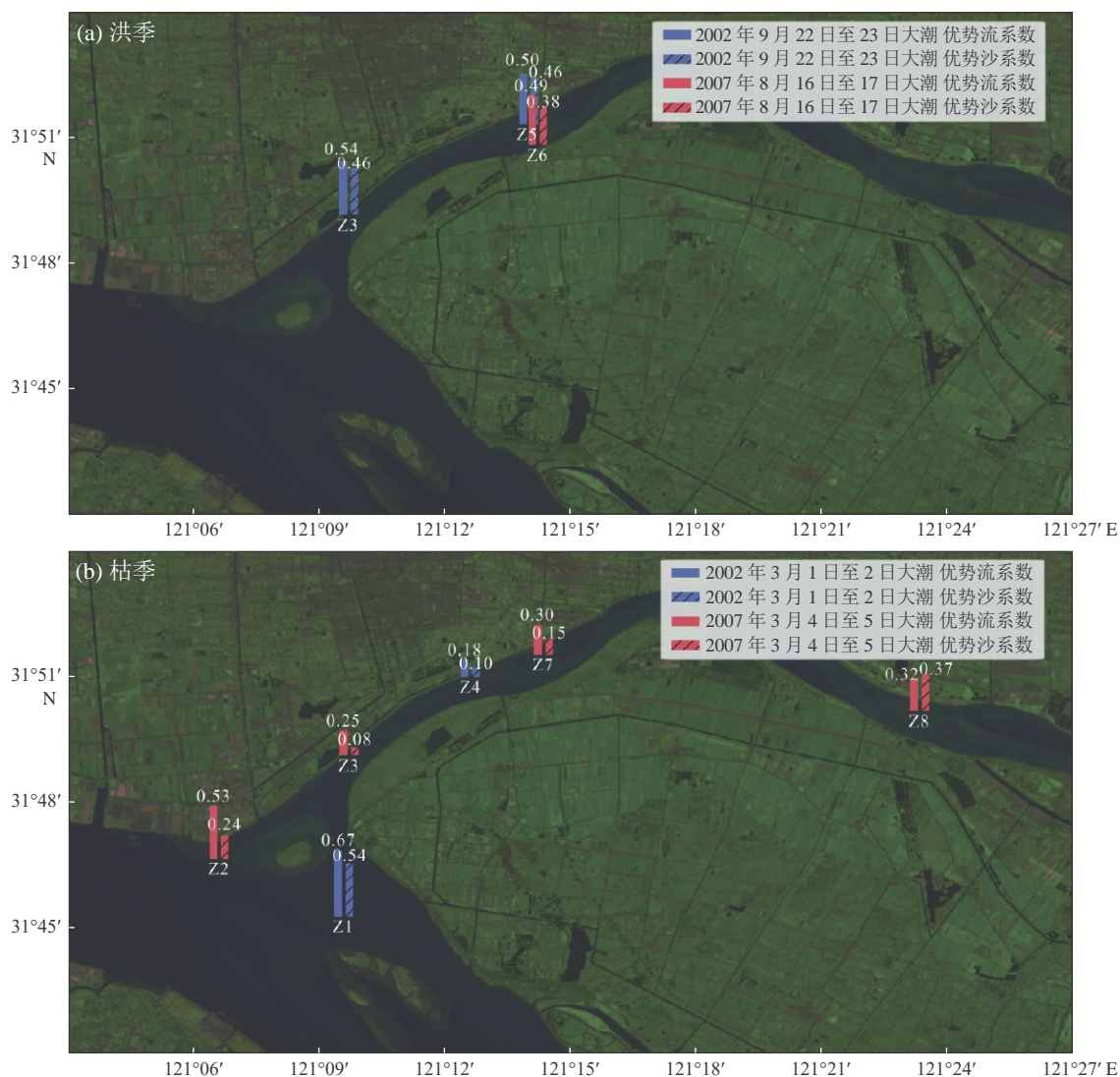


图 12 长江口北支上段洪季和枯季优势流与优势沙系数分布

Fig. 12 Dominant flow and sediment coefficient of the upper reach of the North Branch of the Changjiang Estuary

北支上段地貌演变随着洪枯季动力条件不同, 响应程度也有所差异。相较于洪季, 枯季径流供给充足, 然而北支上段枯季径流作用明显减弱。2002年与2007年, 北支上段优势流与优势沙系数相较洪季大幅下降, 均表现为涨潮优势, 水体与悬沙向上游输移。但在白茆沙北部的Z1站点, 优势流与优势沙系数均大于0.5, 表现为落潮优势, 这表明从北支的水体与悬沙会经此倒灌南支。Z2站点位于北支进口外, 靠近上游, 其优势流与优势沙系数相较同期北支上段站点更高, 说明Z2站点受径流作用更强。但其优势沙系数仍远低于0.5(图12b), 一方面可能是由于研究区域位于北半球, 受右偏科氏力影响(游博文, 2018), 南北两侧河道潮流作用大小不一致, 北侧河道潮流作用更强; 另一方面则可能是由南支上溯到北支的泥沙补充所致。涨潮流对崇头河槽的冲刷作用大于对崇头边滩的冲刷作用, 因此导致崇头区域发生了“槽冲滩淤”的现象。

3.3 北支上段滩槽演变格局

北支上段的滩槽演变模式在洪季与枯季呈现不同的特点。如前所述, 在崇头附近优势流系数和优势沙在洪季约为0.5, 枯季约为0.2(图12)。在洪季, 径流作用相对较强, 径流最远可上溯至崇头

边滩附近,在此与潮流汇合,径潮流作用在此区域达到平衡,引发崇头边滩淤涨,这与前人关于北支进口段泥沙受水流顶托易落淤的结论相互印证(林芬芬等,2021)。而新跃沙位于北支上段青龙港与灵甸港之间的弯曲河道,弯道对水流的阻滞作用导致流速降低(图13a),易引起泥沙落淤(胡高建,2021)。北支上段在枯季和洪季的滩槽演变模式的不同之处主要体现在崇头区域,北支枯季径流作用减弱,潮流控制整个北支,甚至可能出现倒灌南支的现象。此时崇头水动力作用较强,尤其是海门港侧由于受科氏力的影响,涨潮流作用更强,沿深泓线形成涨潮冲刷槽(陈正兵等,2016),造成崇头区域“槽冲滩淤”的现象(图13b)。

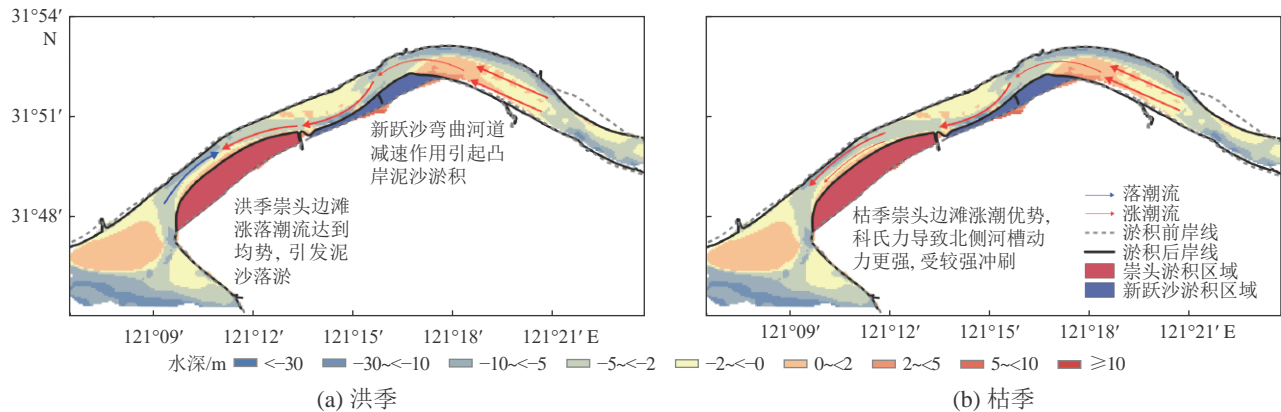


图13 长江口北支上段流场及淤积区域分布

Fig. 13 Flow field and siltation area along the upper reach of the North Branch of the Changjiang Estuary

3.4 海平面上升和沉积物类型等因素的影响

海平面上升与沉积物供应也可能是滩槽格局形成的关键因素(Friedrichs et al, 2011)。海平面上升会改变滩槽系统的水动力条件,包括流速、潮汐不对称性与潮差(Elmilady et al, 2021),进而影响沉积物输运。北支作为潮控河道,在海平面上升背景下,涨潮动力作用加强且引起潮汐不对称性增加,促进泥沙向陆运输,进一步促使浅滩淤积。相较粗颗粒泥沙,细颗粒泥沙更容易被潮流输送至浅滩。北支上段河槽沉积物平均粒径较细,约为 4ϕ (胡高建,2021),这种沉积物易淤积于浅滩。此外,长江口滩槽系统普遍存在横向环流,潮滩与邻近的河槽之间存在泥沙交换(李九发,1990),但不同区域的泥沙交换情况有所不同,北支上段崇头边滩更靠近滞留区,而新跃沙位于北支上段的弯道处,由于流速减弱,横向环流导致泥沙较容易落淤潮滩。

4 结论

利用1992年—2022年30年的实测地形和长江入海水沙通量数据,分析长江口北支上段不同阶段冲淤变化和地貌演变特征及其影响机制,得到主要结论如下。

1)北支上段滩槽演变可分为4个阶段:第一阶段(1992年—2000年),北支上段河槽大幅淤积;第二阶段(2000年—2008年),崇头边滩自然淤涨超过 9 km^2 ,新跃沙淤涨超过 7 km^2 ,与此同时,崇头河槽容积迅速增长,形成“槽冲滩淤”的现象;第三阶段(2008年—2016年)北支上段边滩基本达到稳定状态,而河槽仍持续冲刷;第四阶段(2016年—2022年),北支上段的滩槽系统维持稳定。

2)长江流域来沙供给无法解释崇头边滩和新跃沙的面积变化,经潮流作用进入北支的海域来沙是两沙体淤涨的主要泥沙来源。

3)涌潮作用和地形影响是新跃沙淤涨的主要原因。洪季,南北支会潮点在崇头附近,潮流以旋流转为主,这导致了泥沙的落淤。而在枯季,由于涨潮流优势与受科氏力共同影响,引起河槽冲刷,造成北支上段整体表现为“槽冲滩淤”的特点。

参考文献 (References):

- 陈沈良, 陈吉余, 谷国传, 2003. 长江口北支的涌潮及其对河口的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), (2): 74-80. CHEN S L, CHEN J Y, GU G Z, 2003. The tidal bore on the North Branch of Changjiang Estuary and its effects on the estuary[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, (2): 74-80.
- 陈正兵, 陈前海, 谢作涛, 2016. 长江口北支近期水沙特性及河道演变特征[J]. 人民长江, 47(23): 5-9. CHEN Z B, CHEN Q H, XIE Z T, 2016. Recent flow-sediment characteristics and riverbed evolution of North Branch of Yangtze River Estuary[J]. *Yangtze River*, 47(23): 5-9.
- 范吉庆, 杨世伦, 史本伟, 等, 2019. 风暴对滨海湿地潮沟水沙输运的影响——以长江口崇明东滩为例[J]. 海洋地质前沿, 35(10): 11-22. FAN J Q, YANG S L, SHI B W, et al, 2019. Impacts on storm on water and sediment transportation through tidal creeks of coastal wetlands: a case from Eastern Chongming Tidal Flat, Yangtze Estuary[J]. *Marine Geology Frontiers*, 35(10): 11-22.
- 何用, 卢陈, 杨留柱, 等, 2018. 珠江河口口门区滩槽演变及对泄洪的影响研究[J]. 水利学报, 49(1): 72-80. HE Y, LU C, YANG L Z, et al, 2018. The impact of channel-floodplain evolution on the flood release in the mouths of Pearl River Estuary[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 49(1): 72-80.
- 胡高建, 2021. 长江口北支河槽动力沉积变化过程研究[D]. 上海: 华东师范大学. HU G J, 2021. Sedimentary dynamic processes of the North Branch in the Changjiang Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University.
- 黄宇明, 缴健, 郭海军, 等, 2022. 河口地区泥沙运动及滩槽演变研究综述[C]//第二届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 南京: 河海大学出版社: 7. HUANG Y M, JIAO J, GUO H J, et al, 2022. Review of research on sediment movement and shoal evolution in estuarine areas[C]//Proceedings of the 20th China Coastal Engineering Conference. Nanjing: Hohai University Press: 7.
- 李九发, 1990. 长江河口南汇潮滩泥沙输移规律探讨[J]. 海洋学报, 12(1): 75-82. LI J F, 1990. Changes in water and sediment of the bifurcation mouth between the North and South Passage during the flood season, Yangtze Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 12(1): 75-82.
- 林芬芬, 季岚, 曹慧江, 等, 2021. 长江口北支河段碍航特性及治理思路[J]. 水运工程, (6): 178-182. LIN F F, JI L, CAO H J, et al, 2021. Characteristics of navigation-obstruction and regulation idea of the North Branch of the Yangtze Estuary[J]. *Port & Waterway Engineering*, (6): 178-182.
- 林益帆, 戴志军, 李为华, 等, 2015. 长江口南北槽分流口洪季水沙变化过程研究[J]. 海洋学报, 37(3): 114-125. LIN Y F, DAI Z J, LI W H, et al, 2015. Changes in water and sediment of the bifurcation mouth between the North and South Passage during the flood season, Yangtze Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 37(3): 114-125.
- 刘杰, 赵德招, 程海峰, 2011. 长江口南支河床近期冲淤演变机制[J]. 水运工程, (7): 113-118. LIU J, ZHAO D Z, CHENG H F, 2011. Recent erosion-accretion evolution mechanism of South Branch in the Yangtze Estuary[J]. *Port & Waterway Engineering*, (7): 113-118.
- 栾华龙, 渠庚, 柴朝晖, 等, 2022. 长江口典型滩槽系统近期演变及河势控制对策探讨[J]. 人民长江, 53(1): 7-12. LUAN H L, QU G, CHAI Z H, et al, 2022. Discussion on recent evolution of a typical channel-shoal system in Changjiang Estuary and measures for river regime control[J]. *Yangtze River*, 53(1): 7-12.
- 孟翊, 程江, 2005. 长江口北支入海河段的衰退机制[J]. 海洋地质动态, 21(1): 1-10. MENG Y, CHENG J, 2005. The atrophy of the Estuarine North Branch of the Yangtze River[J]. *Marine Geology Letters*, 21(1): 1-10.
- 魏稳, 2017. 长江河口边滩多时间尺度动力地貌过程[D]. 上海: 华东师范大学. WEI W, 2017. Multi-time-scale morphodynamics of the Changjiang estuarine marginal shoal[D]. Shanghai: East China Normal University.
- 许宝华, 乔红杰, 2019. 长江口北支涌潮现状分析[J]. 长江科学院院报, 36(5): 13-17. XU B H, QIAO H J, 2019. Current situation of tidal bore in North Branch of the Yangtze River Estuary[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 36(5): 13-17.

- 闫天阳, 2021. 潮控型河口水沙动力过程的观测与模拟[D]. 上海: 华东师范大学. YAN T Y, 2021. The observation and simulation of the hydrological and sedimentary dynamic at a tide-dominated estuary[D]. Shanghai: East China Normal University.
- 游博文, 2018. 长江口北支与口外沉积特征及其影响机制研究[D]. 上海: 华东师范大学. YOU B W, 2018. On the characteristics and influencing factors of sediments over the North Branch and offshore area of the Yangtze Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University.
- 张朝阳, 刘羽婷, 张志林, 2019. 长江口太仓段险工近期发展新特点及趋势[J]. 人民长江, 50(12): 7-12. ZHANG C Y, LIU Y T, ZHANG Z L, 2019. New development characteristics and trend of river-course vulnerable spot of Taicang reach, Yangtze Estuary[J]. Yangtze River, 50(12): 7-12.
- 张俊勇, 陈立, 吴华林, 等, 2015. 长江口近期河道演变特征[J]. 泥沙研究, (2): 74-80. ZHANG J Y, CHEN L, WU H L, et al, 2015. Study on recent evolution characteristics of the Yangtze River Estuary[J]. Journal of Sediment Research, (2): 74-80.
- 赵梓琨, 田园盛, 翁学先, 等, 2023. 1986—2021年黄河流域地表水体面积的时空变化特征[J]. 应用生态学报, 34(3): 761-769. ZHAO Z K, TIAN Y S, WENG X X, et al, 2023. Temporal and spatial variation characteristics of surface water area in the Yellow River Basin from 1986 to 2021[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 34(3): 761-769.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2015. 河流流量测验规范: GB 50179—2015[S]. 北京: 中国标准出版社. Ministry of Water Resources of PRC, 2015. Code for liquid flow measurement in open channels: GB 50179—2015[S]. Beijing: Standards Press of China.
- ANTHONY E J, MARRINER N, MORHANGE C, 2014. Human influence and the changing geomorphology of Mediterranean deltas and coasts over the last 6000 years: from progradation to destruction phase?[J]. Earth-Science Reviews, 139(5): 336-361.
- BESSET M, ANTHONY E J, BOUCHETTE F, 2019. Multi-decadal variations in delta shorelines and their relationship to river sediment supply: an assessment and review[J]. Earth-Science Reviews, 193: 199-219.
- DAI Z, LIU J, WEI W, et al, 2014. Detection of the Three Gorges Dam influence on the Changjiang (Yangtze River) submerged delta[J]. Scientific Reports, 4(6600): 1-7.
- DAI Z, FAGHERAZZI S, MEI X, et al, 2016. Linking the infilling of the North Branch in the Changjiang (Yangtze) Estuary to anthropogenic activities from 1958 to 2013[J]. Marine Geology, 379(11): 1-12.
- DAVIES J L, 1964. A morphogenic approach to world shorelines[J]. Zeitschrift für Geomorphologie, 8(5): 127-142.
- DO A T, DE VRIES S, STIVE M J, 2018. Beach evolution adjacent to a seasonally varying tidal inlet in Central Vietnam[J]. Journal of Coastal Research, 34(1): 6-25.
- ELMILADY H, WEGEN M, ROELVINK D, et al, 2021. A modeling the morphodynamic response of estuarine intertidal shoals to sea-level rise[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 127(1): e2021JF006152.
- FRIEDRICH S, 2011. Tidal flat morphodynamics[J]. Treatise on Estuarine and Coastal Science, 3: 137-170.
- GANJU N K, DEFNE Z, MATTHEW L, et al, 2017. Spatially integrative metrics reveal hidden vulnerability of microtidal salt marshes[J]. Nature Communications, 8(1): 14156.
- GIOSAN L, JAMES S, CONSTANTINESCU S, et al, 2014. Climate change: protect the world's deltas[J]. Nature, 516(7129): 31-33.
- JEUKEN L, WANG Z B, 2010. Impact of dredging and dumping on the stability of ebb-flood channel systems[J]. Coastal Engineering, 57(6): 553-566.
- JON F, 2006. Tidal marsh sedimentation and resilience to environmental change: exploratory modelling of tidal, sea-level and sediment supply forcing in predominantly allochthonous systems[J]. Marine Geology, 235(1): 119-136.
- KEARNEY M S, TURNER R E, 2016. Microtidal marshes: can these widespread and fragile marshes survive increasing climate-sea level variability and human action?[J]. Journal of Coastal Research, 32(3): 686-699.
- LONG C Q, DAI Z J, WANG R M, et al, 2022. Image-based machine learning for monitoring the dynamics of the largest delta in Northern Beibu Gulf, China: reasons and causes[J]. Forest Ecology and Management, 504(1): 119855.
- LOU Y Y, DAI Z J, HE Y Y, et al, 2020. Morphodynamic couplings between the Biandan Shoal and Xinqiao Channel, Changjiang (Yangtze) Estuary[J]. Ocean and Coastal Management, 183: 105036.
- LOU Y Y, DAI Z J, LONG C Q, et al, 2022a. Image-based machine learning for monitoring the dynamics of the largest

- salt marsh in the Yangtze River Delta[J]. *Journal of Hydrology*, 608(12): 127681.
- LOU Y Y, DAI Z J, LU X X, et al, 2022b. Anthropogenic pressures induced hydromorphodynamic changes of riverine islands in the Upper Jingjiang reach along the Changjiang (Yangtze) River[J]. *Catena*, 217(2): 106488.
- LUAN H L, DING P X, WANG Z B, et al, 2016. Decadal morphological evolution of the Yangtze Estuary in response to river input changes and estuarine engineering projects[J]. *Geomorphology*, 256(1): 12-23.
- LYU H, ZHU J, 2018. Impacts of the bottom drag coefficient on saltwater intrusion in the extremely shallow estuary[J]. *Journal of Hydrology*, 557: 838-850.
- YANG J J, DAI Z J, LOU Y Y, et al, 2023. Image-based machine learning for monitoring the dynamics of deltaic islands in the Atchafalaya River Delta complex between 1991 and 2019[J]. *Journal of Hydrology*, 623(1): 129814.

Study on Evolutionary Process of Shoal-Channel at Upper Reach of the North Branch of the Changjiang Estuary

WANG Lingxiao¹, DAI Zhijun¹, MEI Xuefei¹, WANG Jie¹, LOU Yaying¹, QIAO Hongjie²

(1. *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research*, Shanghai 200241, China;

2. *Yangtze River Estuary Survey Bureau of Hydrology and Water Resources, Changjiang Water Resources Commission*, Shanghai 200136, China)

Abstract: Shoal-channel system is a common estuarine geomorphic unit. Its evolution process directly dominates the channel stability and tidal flat utilization. Based on historical bathymetric charts, Landsat remote sensing images, fluvial water and sediment discharge records and the discharge diversion ratios, this study explored the shoal-channel evolution process of upper reach of the North Branch during 1992-2022. The results showed that Chongtuo Shoal and Xinyue Shoal exhibit an average annual siltation of 0.32 km² and 0.25 km², respectively, with over 50% of siltation occurring during 2000-2003. The channel of the Chongtuo Shoal experienced significant erosion during 2000-2008, with the volume enlarging by exceeding 50%; while the channel of the Xinyue Shoal changed relatively small. Landward sediment transport from the sea to the North Branch driven by tidal current supports siltation of the Chongtuo and Xinyue Shoals, while fluvial sediment supply has a slight contribution; The curved channel pattern around the Qinglong Port and tidal surge are responsible for the Xinyue Shoal siltation, During the flood season, the ebb and flow of tidal currents are responsible for the Chongtuo Shoal siltation. Due to Coriolis force and shoal expansion, flood current flows to the north and generates flood channel in dry season, and thus the North Branch is featured by "channel erosion and shoal siltation".

Keywords: shoal-channel system; morphodynamic evolution; tidal asymmetry; Changjiang Estuary; the North Branch

Received: August 25, 2023 **Online:** August 26, 2024

黄河口及邻近海域表层沉积物甲藻孢囊多样性研究

高 晨¹, 王晓峰², 石雅君², 马元庆¹, 隋 傅¹, 姜向阳¹, 刘丽娟¹, 姜会超¹, 宋秀凯^{1*}

(1. 山东省海洋资源与环境研究院山东省海洋生态修复重点实验室, 山东 烟台 264006;

2. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003)

摘要: 2022 年 11 月采集了黄河口及邻近海域 16 个站位的表层沉积物样品, 鉴定出 35 种甲藻孢囊(隶属 13 个属)和 3 种未定种, 其中优势种为甲藻孢囊 A 型、原多甲藻 (*Brigantidium* sp.1)、膝沟藻 (*Spiniferites* spp.)、原多甲藻 (*Brigantidium* spp.)、网状原管藻 (*Operculodinium centrocarpum*)、甲藻孢囊 C 型和甲藻孢囊 B 型。其中, 孢囊物种丰富度指数 (d_{Ma}) 为 3.66~5.91, 多样性指数 (H') 为 2.72~3.68, 均匀度指数 (J) 为 0.53~0.73。孢囊总丰度为 35~921 个/g(干重, 下同), 平均丰度为 346 个/g。研究表明, 从黄河口及邻近海域和莱州湾至渤海中部海域甲藻孢囊多样性和丰度逐渐升高, 高比率的异型甲藻孢囊显示了该海域的富营养化程度较高; 2 种产虾夷扇贝毒素 (Yessotoxin, YTX) 甲藻 (具刺膝沟藻 *Gonyaulax spinifera* 和多边舌甲藻 *Lingulodinium polyedrum*) 孢囊和 3 种产麻痹性贝类毒素 (PSP) 甲藻 (链状亚历山大藻 *Alexandrium catenella*、微小亚历山大藻 *Alexandrium minutum* 和链状裸甲藻 *Gymnodinium catenatum*) 孢囊调查海域分布广泛但丰度比较低。

关键词: 甲藻孢囊; 黄河口; 沉积物; 有毒有害赤潮

中图分类号: Q178.53; X145

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2024)04-0677-13

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20230828001

引用格式: 高晨, 王晓峰, 石雅君, 等, 2024. 黄河口及邻近海域表层沉积物甲藻孢囊多样性研究[J]. 海洋科学进展, 42(4): 677-689. GAO C, WANG X F, SHI Y J, et al, 2024. Diversity of dinoflagellate cysts in surface sediments in the Yellow River Estuary and its adjacent sea area[J]. Advances in Marine Science, 42(4): 677-689.

甲藻孢囊是甲藻度过不良环境条件的一种休眠方式, 研究表明至今约 200 多种甲藻能在其生活的某一时期形成孢囊 (Matsuoka et al, 2000; 王朝晖, 2007)。甲藻孢囊经过一段时间的休眠期后, 一旦遇到适宜的环境条件则会再度萌发、繁殖, 形成种群, 可能会成为引发赤潮的种源; 某些甲藻在赤潮消亡过程中, 也可能再次形成孢囊保存在沉积物中 (丁德文等, 2005; 王朝晖, 2007; 蓝东兆等, 2014; 孙军等, 2019)。因此, 了解水域沉积物中甲藻孢囊的种类、丰度及分布特征, 可以使我们对海区中浮游甲藻调查研究有较全面的认识, 从而有针对性地可能对引发赤潮的种类进行监测, 为研究赤潮发生机理及预测预报提供基础资料。

在我国已有对相关部分河口 (如长江口、珠江口和闽江口等) 甲藻孢囊研究的报道 (王朝晖等, 2003; 顾海峰等, 2004; 方琦等, 2004; 康伟等, 2016, 2004b; 王艳等, 2006; 付永虎等, 2009; 黄海燕等, 2009; Dai et al, 2012; 康伟等, 2016; 戴鑫烽等, 2021), 但对黄河口及邻近海域沉积物中甲藻孢囊的种类和数量的空间分布研究鲜有报道。本文对黄河口及邻近海域表层沉积物中甲藻孢囊的种类和数量

收稿日期: 2023-08-28

资助项目: 山东省海洋局财政项目 (HYSTJCPJ2021-2023)

作者简介: 高 晨 (1995—), 女, 研究实习员, 主要从事海洋生物多样性和湿地保护方面研究。

E-mail: chen_gv@163.com

* **通信作者:** 宋秀凯 (1979—), 男, 研究员, 硕士, 主要从事海洋生态环境方面研究. E-mail: xiukaisong@163.com

(胡筱敏 编辑)

的空间分布开展了研究,以期了解该海区的甲藻分布情况,为今后深入开展该水域的赤潮研究提供参考。

1 材料和方法

1.1 样品采集与处理

2022年11月5日至11日在国家自然科学基金委员会共享航次计划2021年度黄河口关键过程及物质输运协同效应重大科学考察实验研究航次(航次编号: NORC2022-304)中,搭载中国科学院烟台海岸带研究所的“创新一”科考船在黄河口及邻近海域采集16个站位的表层沉积物样品(图1)。

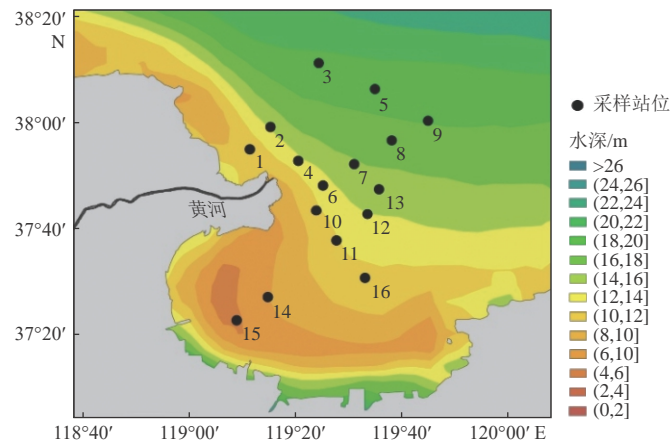


图1 采样站位

Fig. 1 Sampling sites

用箱式采泥器在黄河口及邻近海域采集了16个站位的表层沉积物,用自制透明塑料管(直径为5 cm)从箱式采泥器中未受扰动的区域采集表层2 cm的样品。样品采集后,放入4 °C冰箱中避光保存。

所有样品被分成两份:一份在60 °C烘箱中烘干至恒重,以测定沉积物的含水率;另一份则进行孢粉学处理,即加入盐酸($w(\text{HCl})=10\%$)和氢氟酸($w(\text{HF})=40\%$),除去钙质和硅质,脱酸后,用超声波处理30 s,然后通过125 μm 和15 μm 不锈钢网筛,收集两个筛网之间的样品并转移至离心管中,定容至2 mL。

分析鉴定时,吸取0.10~0.70 mL已处理样品至浮游植物计数框(HYDRO-BIOS, Germany)中,并加入适量的超纯水稀释,然后在400倍倒置显微镜(Olympus CKX41)下进行种类鉴定和计数(Matsuoka et al, 2000; Fujii et al, 2006; 王朝晖, 2007; 蓝东兆等, 2014; 石雅君等, 2020)。重复分析鉴定数次,使每个样品至少分析鉴定到100个孢囊;对于孢囊丰度低的样品,重复分析鉴定数次,至少分析鉴定到50个孢囊。孢囊丰度以每克干重沉积物的孢囊数表示(个/g,下同)。对于无法鉴定到种的甲藻孢囊类,以属来表示。

1.2 统计分析

对孢囊的物种丰富度指数(d_{Ma})(Margalef, 1958)、物种多样性指数(H')(Shannon et al, 1949)、物种均匀度指数(J)(Pielou, 1969)和优势度指数(Y)进行计算:

$$d_{Ma} = \frac{S-1}{\ln N}, \quad (1)$$

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \times \log_2 P_i, \quad (2)$$

$$J = \frac{H'}{\log_2 S}, \quad (3)$$

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i, \quad (4)$$

式中: N 为样品中所有物种的总个体数; S 为样品中的物种总数; P_i 为第 i 种的个体数与样品总个体数的比值; n_i 为第 i 种的总个体数; f_i 为该种在各样品中出现的频率。本研究中孢囊物种优势度 $Y \geq 0.02$ 的物种即为优势种。

2 结 果

2.1 孢囊物种多样性

在黄河口及邻近海域 16 个站位的表层沉积物样品中共鉴定出 35 种甲藻孢囊(包括 3 种未定种), 隶属 13 个属, 自养型甲藻孢囊和异养型甲藻孢囊分别为 13 种和 19 种(表 1)。其中有 12 种膝沟藻目(*Gonyaulacales*)、3 种裸甲藻目(*Gymnodiniales*)、17 种原多甲藻目(*Peridinales*)和 3 种未定种(表 1)。优势种为甲藻孢囊 A 型($Y=1.22$)、原多甲藻(*Brigantedinium* sp.1, $Y=0.044$)、膝沟藻(*Spiniferites* spp., $Y=0.042$)、原多甲藻(*Brigantedinium* spp., $Y=0.039$)、网状原角管藻(*Operculodinium centrocarpum*, $Y=0.034$)、甲藻孢囊 C 型($Y=0.033$)、甲藻孢囊 B 型($Y=0.027$)。其中, 网状原角管藻(*Operculodinium centrocarpum*)、原多甲藻 *Brigantedinium* sp.1)、原多甲藻(*Brigantedinium* spp.)和甲藻孢囊 A 型在所有 16 个站位都有分布(表 1)。

黄河口及邻近海域各站位的甲藻孢囊的种类数为 14~22 种, 站位 2 和站位 15 甲藻孢囊种类数最少, 为 14 种, 而站位 6 和站位 7 甲藻孢囊种类数最多, 为 22 种(表 1)。物种丰富度指数 d_{Ma} 范围介于 3.66~5.91, 平均值为 4.68(图 2a); 物种多样性指数 H' 范围为 2.72~3.68, 平均值为 3.31(图 2b); 均匀度指数 J 范围为 0.53~0.73, 平均值为 0.65(图 2c)。黄河口及邻近海域甲藻孢囊多样性空间分布总体呈现出从黄河口及邻近海域和莱州湾向渤海中部海域逐渐增大的趋势(图 2)。

黄河口及邻近海域共发现 2 种产虾夷扇贝毒素(YTX)甲藻(具刺膝沟藻和多边舌甲藻)的孢囊和 3 种产麻痹性贝类毒素(PSP)的孢囊(链状亚历山大藻, 微小亚历山大藻和链状裸甲藻)。具刺膝沟藻的孢囊分布除站位 14 和 16 之外的其他 14 个站点, 多边舌甲藻的孢囊分布除站位 4、14 和 16 之外的其他 13 个站点(表 1)。亚历山大藻的孢囊在黄河口及邻近海域 16 个站点中均有分布, 而链状裸甲藻仅分布在站位 7 和 15(表 1)。

2.2 孢囊丰度

黄河口及邻近海域表层沉积物中的孢囊总丰度在不同站点之间差异较大, 介于 35~921 个/g 之间, 平均丰度为 346 个/g(图 3a)。其中站点 9 的孢囊总丰度最高, 达到 921 个/g; 而站点 2 的孢囊总丰度最低, 仅为 35 个/g(图 3a)。黄河口及邻近海域孢囊总丰度空间分布总体呈现出沿河口至离岸海域逐渐增多趋势(图 3a)。

表 1 黄河口及邻近海域各采样点甲藻孢囊的分布
Table 1 Distribution of dinoflagellate cysts in the surface sediments of the Yellow River Estuary

孢囊类型	分类	种名	学名	站 位															
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
自养型孢囊 Autotrophs cysts	膝沟藻目 Gonyaulacales	链状亚历山大藻	<i>Alexandrium catenella</i>		+	+				+	+		+		+		+	+	
		微小亚历山大藻	<i>Alexandrium minutum</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
		具指膝沟藻	<i>Spiniferites bentori</i>	+	+	+							+	+	+	+			+
		膜状膝沟藻	<i>Spiniferites membranaceus</i>									+							
		斯氏膝沟藻	<i>Spiniferites bulloideus</i>									+							
		具刺膝沟藻	<i>Spiniferites hyperacanthus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+
		具刺膝沟藻	<i>Spiniferites mirabilis</i>										+						
		膝沟藻	<i>Spiniferites bentori</i> var. <i>truncata</i>	+	+		+	+	+	+	+	+		+	+	+	+		+
		膝沟藻	<i>Spiniferites delicatus</i>										+						
		膝沟藻	<i>Spiniferites</i> spp.										+	+	+	+	+	+	+
		多边舌甲藻	<i>Lingulodinium machaerophorum</i>	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+			+
		网状原角管藻	<i>Operculodinium centrocarpum</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
		异养型孢囊 Heterotrophs cysts	裸甲藻目 Gymnodiniales	链状裸甲藻	<i>Gymnodinium catenatum</i>														
科夫多沟藻	<i>Polykrikos kofoidii</i>																	+	
无纹多沟藻	<i>Polykrikos schwartzii</i>																	+	
原多甲藻目 Peridinales	窄角原多甲藻		<i>Votadinium spinosum</i>	+														+	+
	锥形原多甲藻		<i>Selenopemphix quanta</i>	+	+	+	+		+	+	+		+		+				+
	锥腹原多甲藻		<i>Brigantedinium simplex</i>																+
	分支原多甲藻		<i>Xandaradinium xanthum</i>																+
	宽刺原多甲藻		<i>Protoperidinium latissimum</i>																+
	里昂原多甲藻		<i>Quinquecupis conretum</i>	+	+	+												+	+
	微小原多甲藻		<i>Protoperidinium minutum</i>															+	+
	长形原多甲藻		<i>Votadinium calvum</i>	+	+	+	+	+	+	+	+							+	+
	赛裸原多甲藻		<i>Selenopemphix nephroides</i>																
	五边原多甲藻		<i>Brigantedinium majusculum</i>																
原多甲藻	<i>Trinovantedinium capitatum</i>																+		
原多甲藻	<i>Brigantedinium</i> sp.1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
原多甲藻	<i>Selenopemphix</i> sp.1																+		
原多甲藻	<i>Protoperidinium</i> sp.1	+	+	+													+		
原多甲藻	<i>Protoperidinium</i> spp.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
原多甲藻	<i>Brigantedinium</i> spp.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
未定孢囊 Unknown cysts	甲藻孢囊 A 型																	+	
	甲藻孢囊 B 型																	+	
	甲藻孢囊 C 型																	+	

注：+代表该站位有分布，空白代表该站位无分布。

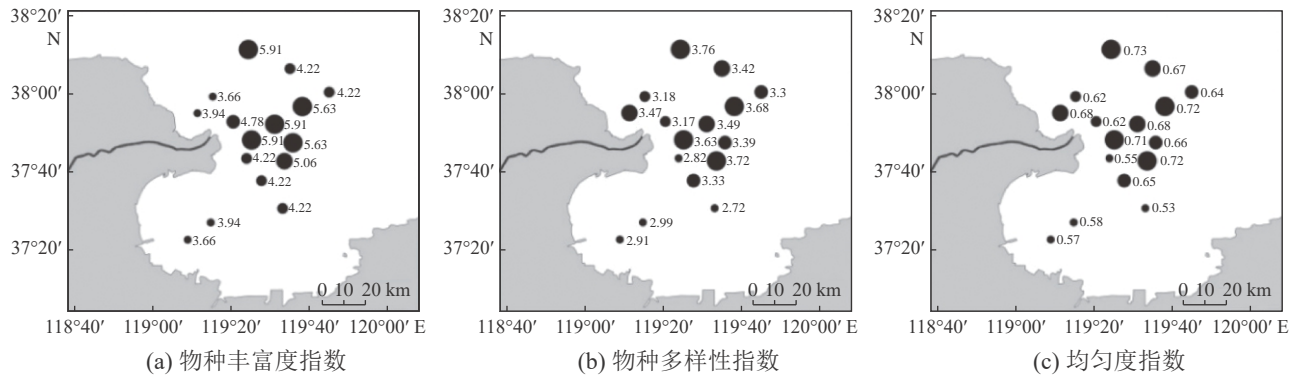


图 2 黄河口及邻近海域孢囊物种丰富度指数、物种多样性指数和均匀度指数的分布

Fig. 2 Spatial distribution of cyst richness index, species diversity index and evenness index in the Yellow River Estuary

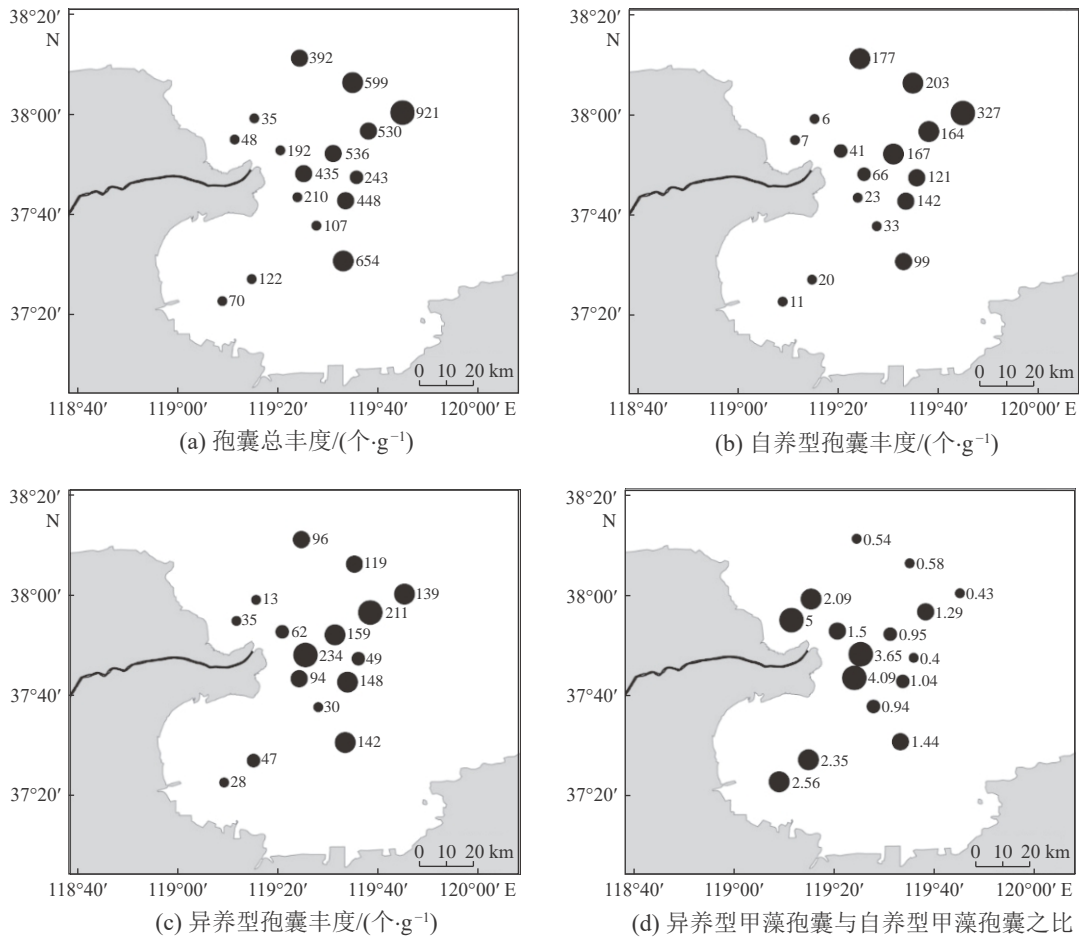


图 3 黄河口及邻近海域表层沉积物中甲藻孢囊丰度分布

Fig. 3 Spatial distribution of dinoflagellate cyst abundance in the surface sediment of the Yellow River Estuary

黄河口及邻近海域自养型甲藻孢囊丰度介于 6~327 个/g, 平均值为 101 个/g(图 3b)。其中站点 9 的自养型甲藻孢囊丰度最高, 达 327 个/g; 而站点 2 的自养型甲藻孢囊丰度最低, 为 6 个/g(图 3b)。黄河口及邻近海域异养型甲藻孢囊丰度, 介于 13~211 个/g, 平均值也是 101 个/g(图 3c)。其中站点 8 的异养型甲藻孢囊丰度最高, 达到 211 个/g; 而站点 2 的异养型甲藻孢囊丰度最低, 仅为 13 个/g(图 3c)。黄河口及邻近海域表层沉积物中自养型甲藻孢囊丰度和异养型甲藻孢囊丰度的分布规

律与孢囊总丰度的分布规律相似：总体呈从黄河口及邻近海域和莱州湾向渤海中部海域逐渐增多趋势(图 3b 和图 3c)。黄河口及邻近海域异养型甲藻孢囊与自养型甲藻孢囊之比(H/A)为 0.40~5.00, 平均值为 1.80(图 3d)。其中站位 1 的 H/A 最高, 达到 5; 而站位 13 的 H/A 最低, 仅为 0.40(图 3d)。北黄海异养型甲藻孢囊与自养型甲藻孢囊之比(H/A)和孢囊丰度的分布规律不同: 总体上呈从黄河河口至邻近海域逐渐减小的趋势(图 3d)。

3 讨论

3.1 黄河口及邻近海域甲藻孢囊分布特征

在黄河口及邻近海域 16 个站位的表层沉积物中, 本研究共发现 35 种甲藻孢囊; 其中, 每个站位鉴定的孢囊种类数为 14~22 种(表 1)。而我国部分河口区沉积物中甲藻孢囊种类数为 17~55 种。因此, 黄河口及邻近海域与我国已有研究的河口区沉积物中的甲藻孢囊种类数相近(表 2)。同样, 黄河口及邻近海域表层沉积物中甲藻孢囊物种多样指数(H')为 2.72~3.68, 平均值为 3.31, 黄河口及邻近海域与已有研究的长江口海区沉积物中的物种多样性指数 H' 相近(表 2)。

表 2 我国部分河口区的甲藻孢囊
Table 2 Dinoflagellate cysts in some estuary areas of China

河口区	孢囊多样性 ^a	H' ^b	孢囊丰度/(个·g ⁻¹) ^b	参考文献
黄河口及邻近海域	35(14~22)	3.31(2.72~3.68)	346(35~921)	本研究
长江口	38(10~25)	(2.2~4.2)	(12~587)	王朝晖等, 2003; Wang et al, 2004a
长江口	24(11~18)	(2.57~3.27)	(189~846)	王艳等, 2006
长江口	27(1~15)			黄海燕等, 2009
长江口	28			顾海峰等, 2004
长江口	46		366.2(125.0~722.2)	付永虎等, 2009
长江口	55	(2.0~2.2)	(1 427~1 533)	Dai et al, 2012; 戴鑫烽等, 2021
桂山岛(珠江口)	17		350	Wang et al, 2004b
桂山岛(珠江口)	21(6~10)		202(100~315)	康伟等, 2016
闽江口	17		(0~169)	方琦等, 2004

注: ^a表示数据为总数(范围); ^b表示数据为平均值(范围); 空白表示无数据。

本研究黄河口及邻近海域表层沉积物中甲藻孢囊的丰度为 35~921 个/g, 平均丰度为 346 个/g。黄河口及邻近海域与长江口和珠江口沉积物中的甲藻孢囊丰度相近(表 2), 但低于我国近岸海湾(Wang et al, 2004a; 王艳等, 2006), 其主要原因为甲藻孢囊丰度受沉积速率影响, 沉积速率高则甲藻孢囊丰度低, 例如长江口(Wang et al, 2004a)。黄河口及邻近海域沉积速率 2~9.6 cm/a (Yuan et al, 2020), 长江口海域沉积速率为 0.64~7.5 cm/a(Dai et al, 2012; 戴鑫烽等, 2021), 珠江口海域沉积速率为 1.58~7.25 cm/a(刘志勇等, 2010; 张亮等, 2016), 这些海域都是高速沉积区, 因而甲藻孢囊丰度较低。本研究的结果进一步证明了我国大型河口区沉积物中甲藻孢囊丰度相近, 明显低于我国近岸海湾(491~3 552 个/g)(Wang et al, 2004b)。

黄河口及邻近海域表层甲藻孢囊多样性和丰度分布特征为从黄河河口至远离河口海域增多(图 2

和图3)。此特征与长江口(Wang et al, 2004a)和闽江口(方琦等, 2004)类似, 主要是因为黄河口及邻近海域孢囊的地域分布与黄河口的悬浮物颗粒特征密切相关, 悬浮物颗粒越粗越不利于孢囊沉降聚集。黄河以水少沙多著称, 根据利津水文站实测数据, 2000年至2017年黄河平均年输沙量为1.13亿t。由于河口的过滤和物理分选作用, 粗粒沉积物主要沉积在河口(Yuan et al, 2020), 从而导致黄河口及邻近海域表层沉积物中的孢囊密度和种类在沉积物颗粒粗、含砂量高的近河口海域较低, 而向远离河口海域方向孢囊密度明显增加。

黄河口及邻近海域异养型甲藻孢囊与自养型甲藻孢囊之比(H/A)为0.40~5.00, 平均值为1.80, 异养型甲藻孢囊丰度基本高于自养型甲藻孢囊丰度, 与长江口和珠江口表层沉积物中甲藻孢囊分布特征相似(Wang et al, 2004a; 王艳等, 2006; 康伟等, 2016)。康伟等(2016)对珠江口桂山岛海域表层沉积物中甲藻孢囊的分布情况进行研究, 珠江口桂山岛海域有效高异养型甲藻孢囊体积百分比(H/A)为56.5%, H/A为工业污染和富营养化的重要指标, 反映了该海域较高的富营养化程度。同样, 由长江口海域异养型甲藻孢囊的高体积百分比可见, 该海域具有较高的富营养化程度和初级生产力(Wang et al, 2004a)。黄河口邻近海域的渤海湾和莱州湾是我国主要的富营养化区域(中华人民共和国生态环境部, 2019—2023)。孙珊等(2019)研究也表明黄河口及邻近海域呈富营养化状态, 并且黄河调水调沙过程加剧了调查海域富营养化状态。因此, 本研究与往期研究均表明, 黄河口及邻近海域异养型甲藻孢囊比例较高与该海域富营养化程度有关。

3.2 黄河口及邻近海域沉积物中有毒有害甲藻孢囊的分布及赤潮发生风险

黄河口及邻近海域为易发赤潮灾害的海域(周健等, 2020)。在本研究中共鉴定出具刺膝沟藻、多边舌甲藻、链状亚历山大藻, 微小亚历山大藻和链状裸甲藻五种有毒有害赤潮藻类孢囊种类。亚历山大藻是麻痹性贝类毒素(Paralytic Shellfish Poisoning, PSP)原因种, 在我国沿海引发了多起赤潮(于仁成 et al, 2020), 同时亚历山大藻的孢囊也广泛分布在我国沿海沉积物中(石雅君等, 2020), PSP也在浮游植物和贝类样品中被广泛检出(Liu et al, 2017)。本研究鉴定出链状亚历山大藻和微小亚历山大藻两种亚历山大藻孢囊, 为PSP原因种。链状亚历山大藻孢囊丰度介于0~37个/g, 平均值为10个/g; 微小亚历山大藻孢囊丰度为0~24个/g, 平均值为3个/g; 链状裸甲藻孢囊也在本研究中检出, 丰度为0~6个/g, 平均值小于1个/g。这些产PSP的孢囊仅零星分布且密度较低, 与其他有PSP问题海域孢囊丰度(Wang, et al, 2004a; 李影等, 2017)相比, 黄河口及邻近海域发生亚历山大藻赤潮、链状裸甲藻赤潮和PSP中毒事件的风险较低。但由于PSP是危害海水养殖业的重要问题, 宋秀凯等(2009)在渤海海峡的南隍城岛附近海域发现亚历山大藻的赤潮, 因此应加强对亚历山大藻孢囊和链状裸甲藻孢囊的监测与预警。

具刺膝沟藻和网状原角藻能产生虾夷扇贝毒素(Yessotoxin, YTX)(Chikwililwa et al, 2019), 而且具刺膝沟藻的孢囊(丰度为0~36个/g, 平均值为10个/g)和网状原角藻的孢囊(丰度为0~18个/g, 平均值为7个/g)虽分布广泛、但丰度较低。虽然我国目前尚无YTX原因种的赤潮, 但是这些藻类的孢囊在沉积物中普遍分布(石雅君等, 2011; Tang et al, 2021), YTX也经常浮游植物样品和贝类样品中被检出(Jiang et al, 2017; Liu et al, 2021)。

4 结 语

本文采用光学显微镜鉴定技术, 对黄海口及邻近海域16个站位表层沉积物中甲藻孢囊的分布情况进行了研究, 共分离鉴定出32种甲藻孢囊和3种未定孢囊; 孢囊平均丰度为346个/g; 物种多样性指数(H')平均值为3.31, 物种丰富度指数(d_{Ma})平均值为4.68; 均匀度指数(J)平均值为0.65;

黄海口及邻近海域表层沉积物中异养型甲藻孢囊与自养型甲藻孢囊之比(H/A)平均值为1.80。结果表明,甲藻孢囊的分布从黄海口及邻近海域和莱州湾向渤海中部海域逐渐增多,异养型甲藻孢囊的丰度高于自养型甲藻孢囊的丰度表明该海域富营养化程度较高。

此外,2种产生虾夷扇贝毒素甲藻的孢囊和3种产麻痹性贝类毒素的孢囊在黄海口及邻近海域有分布,但丰度比较低,这表明这些孢囊引发赤潮以及有毒有害事件的风险较低。

致谢: 本研究的数据及样品采集得到国家自然科学基金委员会共享航次计划项目(项目批准号:42149301)的资助。该航次(航次编号:NORC2022-304)由“创新一”号科考船实施,在此一并致谢。

参考文献 (References):

- 戴鑫烽,曾宇兰,李冬融,等,2021.长江口甲藻孢囊与水体富营养化和厄尔尼诺指数关系研究[J].海洋学报,43(2):78-87.
DAI X F, ZENG Y L, LI D R, et al, 2021. Relationship between dinoflagellate cysts and water eutrophication and EN-SO index in the Changjiang River Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 43(2): 78-87.
- 丁德文,刘胜浩,刘晨临,等,2005.孢囊及其与赤潮爆发关系的研究进展[J].海洋科学进展,23(1):1-10. DING D W, LIU S H, LIU C L, et al, 2005. Advances in researches on cyst and its relation to harmful algal blooms[J]. Advances in Marine Science, 23(1): 1-10.
- 方琦,蓝东兆,顾海峰,等,2004.闽江口海域表层沉积物中甲藻休眠孢囊的初步研究[J].海洋通报,23(6):21-25. FANG Q, LAN D Z, GU H F, et al, 2004. Preliminary study on dinoflagellate resting cysts in surface sediments from Minjiang Estuary[J]. Marine Science Bulletin, 23(6): 21-25.
- 付永虎,王朝晖,康伟,等,2009.长江口及其邻近海域近代沉积物中甲藻孢囊的垂直分布[J].暨南大学学报(自然科学版),30(1):106-110. FU Y H, WANG C H, KANG W, et al, 2009. Vertical distribution of dinoflagellate resting cysts in recent sediments from the Changjiang River Estuary and adjacent waters[J]. Journal of Jinan University (Natural Science), 30(1): 106-110.
- 顾海峰,方琦,李瑞香,等,2004.长江口甲藻孢囊的初步研究[J].海洋与湖沼,35(5):413-423. GU H F, FANG Q, LI R X, et al, 2004. Preliminary study on dinoflagellate cysts in Changjiang River Estuary[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 35(5): 413-423.
- 黄海燕,陆斗定,夏平,等,2009.2006年冬季长江口海域表层沉积物中甲藻孢囊的分类学研究[J].生态学报,29(11):5902-5911. HUANG H Y, LU D D, XIA P, et al, 2009. Taxonomic study of dinoflagellate cysts in Changjiang Estuary in the winter of 2006[J]. Acta Ecologica Sinica, 29(11): 5902-5911.
- 康伟,王朝晖,2016.桂山岛海域甲藻孢囊的分布与浮游植物休眠体萌发研究[J].海洋科学,40(7):33-40. KANG W, WANG C H, 2016. Distribution of dinocysts and the germination of phytoplankton resting spores in surface sediments from the Guishan Island sea area in the Pearl River Estuary of the South China Sea[J]. Marine Sciences, 40(7): 33-40.
- 蓝东兆,顾海峰,2014.中国近海甲藻孢囊[M].北京:科学出版社. LAN D Z, GU H F, 2014. Dinoflagellate cysts of China Sea[M]. Beijing: Science Press.
- 李影,汤亚楠,沈萍萍,等,2017.胶州湾表层沉积物中甲藻孢囊的分布[J].海洋与湖沼,48(4):760-766. LI Y, TANG Y N, SHEN P P, et al, 2017. Distribution of dinoflagellate resting cysts in surface sediment of Jiaozhou Bay, China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 48(4): 760-766.
- 刘志勇,潘少明,程功弼,等,2010.珠江口沉积物²¹⁰Pb分布特征及环境意义[J].沉积学报,28(1):166-175. LIU Z Y, PAN S M, CHENG G B, et al, 2010. ²¹⁰Pb Characteristic in the sediment cores from the Pearl River mouth and its environmental implication[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 28(1): 166-175.
- 石雅君,刘东艳,邵红兵,等,2011.北黄海表层沉积物中甲藻孢囊的分布特征[J].海洋通报,30(3):320-327. SHI Y J, LIU D Y, SHAO H B, et al, 2011. Distribution of dinoflagellate cysts in the surface sediments from the northern Yellow

- Sea, China[J]. Marine Science Bulletin, 30(3): 320-327.
- 石雅君, 邸宝平, 王艳娜, 等, 2020. 渤海沉积硅藻与甲藻[M]. 北京: 科学出版社. SHI Y J, DI B P, WANG Y N, et al, 2020. The diatom and dinoflagellate in the sediment of the Bohai Sea and the Yellow Sea[M]. Beijing: Science Press.
- 宋秀凯, 马建新, 刘义豪, 等, 2009. 隍城岛海域塔玛亚历山大藻赤潮发展过程及其成因[J]. 海洋湖沼通报, (4): 93-98. SONG X K, MA J X, LIU Y H, et al, 2009. Evolution and formation causes of *Alexandrium tamarense* red tide in the sea area of the Nanhuangcheng Island[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, (4): 93-98.
- 孙军, 杨双, 张晓东, 2019. 海洋甲藻孢囊及沿革[J]. 天津科技大学学报, 34(5): 1-12, 20. SUN J, YANG S, ZHANG X D, 2019. Marine dinoflagellates cysts and their evolution[J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 34(5): 1-12, 20.
- 孙珊, 苏博, 李凡, 等, 2019. 调水调沙对黄河口及邻近海域环境状况的影响[J]. 海洋环境科学, 38(3): 399-406. SUN S, SU B, LI F, et al, 2019. Effects of water and sediment discharge regulation on environment in the Yellow River Estuary and adjacent waters[J]. Marine Environmental Science, 38(3): 399-406.
- 王朝晖, 齐雨藻, 2003. 甲藻孢囊在长江口海域表层沉积物中的分布[J]. 应用生态学报, 14(7): 1039-1043. WANG C H, QI Y Z, 2003. Distribution of dinoflagellate resting cysts in surface sediments from the Changjiang River Estuary[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 14(7): 1039-1043.
- 王朝晖, 2007. 中国沿海甲藻孢囊与赤潮研究[M]. 北京: 海洋出版社. WANG C H, 2007. The study on dinoflagellate cysts and red tides of China[M]. Beijing: China Ocean Press.
- 王艳, 腾琳, 2006. 2004年春季长江口海域甲藻孢囊的分布研究[J]. 生态科学, 25(2): 131-134. WANG Y, TENG L, 2006. Distribution of dinoflagellate cysts from Changjiang River Estuary in the spring of 2004[J]. Ecologic Science, 25(2): 131-134.
- 于仁成, 吕颂辉, 齐雨藻, 等, 2020. 中国近海有害藻华研究现状与展望[J]. 海洋与湖沼, 51(4): 768-788. YU R C, LÜ S H, QI Y Z, et al, 2020. Progress and perspectives of harmful algal bloom studies in China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 51(4): 768-788.
- 张亮, 崔振昂, 汪亚平, 等, 2016. 珠江口内伶仃洋海域近百年来沉积物粒度变化和重金属分布特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 36(1): 27-41. ZHANG L, CUI Z A, WANG Y P, et al, 2016. Grain size variation and heavy metals distribution during last hundred years under the impact of human activities in the inner Lingdingyang Bay of the Pearl River Estuary[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 36(1): 27-41.
- 中华人民共和国生态环境部, 2019—2023. 中国海洋生态环境状况公报[EB/OL]. [2023-08-28]. <https://www.mee.gov.cn/hj-zl/sthjzk/jagb/>. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2019—2023. Bulletin on the state of marine ecological environment in China [EB/OL]. [2023-08-28]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/jagb/>.
- 周健, 王玮, 吴志宏, 等, 2020. 山东沿海赤潮灾害基本特征及防控对策建议[J]. 海洋环境科学, 39(4): 537-543. ZHOU J, WANG W, WU Z H, et al, 2020. The basic characteristics and prevention countermeasures of red tide in Shandong coast waters[J]. Marine Environmental Science, 39(4): 537-543.
- CHIKWILILWA C, MCCARRON P, WANIEK J J, et al, 2019. Phylogenetic analysis and yessotoxin profiles of *Gonyaulax spinifera* cultures from the Benguela Current upwelling system[J]. Harmful Algae, 85: 101626.
- DAI X F, LU D D, XIA P, et al, 2012. A 50-year temporal record of dinoflagellate cysts in sediments from the Changjiang Estuary, East China Sea, in relation to climate and catchment changes[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 112: 192-197.
- FUJII R, MATSUOKA K, 2006. Seasonal change of dinoflagellates cyst flux collected in a sediment trap in Omura Bay, West Japan[J]. Journal of Plankton Research, 28(2): 131-147.
- JIANG T, LIU L, LI Y, et al, 2017. Occurrence of marine algal toxins in oyster and phytoplankton samples in Daya Bay, South China Sea[J]. Chemosphere, 183: 80-88.
- LIU Y, YU R C, KONG F Z, et al, 2017. Paralytic shellfish toxins in phytoplankton and shellfish samples collected from the Bohai Sea, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 115: 324-331.
- LIU C, JI Y, ZHANG L, et al, 2021. Spatial distribution and source of biotoxins in phytoplankton from the South China

- Sea, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 418: 126285.
- MARGALEF R, 1958. Information theory in ecology[J]. General Systems, 3: 36-71.
- MATSUOKA K, FUKUYO Y, 2000. Technical guide for modern dinoflagellate cyst study[M]. Tokyo: Japan Society of the Promotion Science.
- PIELOU E C, 1969. An introduction to mathematical ecology[M]. New York, USA: Wiley-Interscience.
- SHANNON C E, WEAVER W, 1949. The mathematical theory of communication[M]. Urbana, USA: University of Illinois Press.
- TANG Y Z, GU H F, WANG Z H, et al, 2021. Exploration of resting cysts (stages) and their relevance for possibly HABs-causing species in China[J]. Harmful Algae, 107: 102050.
- WANG Y H, QI Y Z, LU S H, et al, 2004a. Seasonal distribution of dinoflagellate resting cysts in surface sediments from Changjiang River Estuary[J]. Phycological Research, 52: 387-395.
- WANG Z H, MATSUOKA K, QI Y Z, et al, 2004b. Dinoflagellate cysts in recent sediments from Chinese coastal waters[J]. Marine Ecology, 25(4): 289-311.
- YUAN P, WANG H J, WU X, et al, 2020. Grain-size distribution of surface sediments in the Bohai Sea and the Northern Yellow Sea: sediment supply and hydrodynamics[J]. Journal of Ocean University of China, 19(3): 589-600.

Diversity of Dinoflagellate Cysts in Surface Sediments in the Yellow River Estuary and Its Adjacent Sea Area

GAO Chen¹, WANG Xiaofeng², SHI Yajun², MA Yuanqing¹, SUI Fu¹, JIANG Xiangyang¹,
LIU Lijuan¹, JIANG Huichao¹, SONG Xiukai¹

(1. Shandong Key Laboratory of Marine Ecological Restoration, Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai 264006, China;

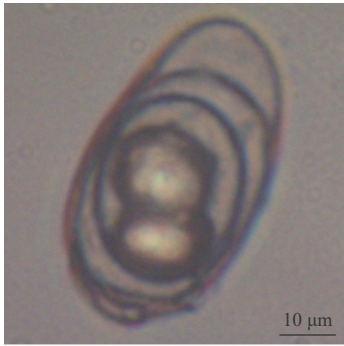
2. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

Abstract: Dinoflagellate cysts in the surface sediment were collected and analyzed at 16 stations in the Yellow River Estuary in 2022. Thirty-five dinoflagellate cyst taxa of thirteen genera and three uncertain taxa were identified from samples. The dominant taxa were Cyst A, *Brigantedinium* sp.1, *Spiniferites* spp., *Brigantedinium* spp., *Operculodinium centrocarpum*, Cyst C and Cyst B. Cyst richness index (d_{Ma}) ranged 3.66-5.91; species diversity index (H') ranged 2.72-3.68; evenness index (J) ranged 0.53-0.73. The total cyst abundance ranged between 35 cysts/g and 921 cysts/g (in dry weight), and the average was 346 cysts/g (in dry weight). The results showed that the total abundance and diversity of dinoflagellate cysts displayed a gradually increase from both Yellow River Estuary and Laizhou Bay the central to the central Bohai Sea. The high ratio of heterotypic dinoflagellate cysts indicated a high degree of eutrophication in this sea area. The cysts of two toxic dinoflagellate species (*Gonyaulax spinifera* and *Lingulodinium polyedrum*), which produce Yessotoxin (YTX), and the cysts of three toxic dinoflagellate species (*Alexandrium catenella*, *Alexandrium minutum* and *Gymnodinium catenatum*), which produce paralytic shellfish poisoning (PSP), were distributed widely in the Yellow River Estuary, but with relatively low abundance.

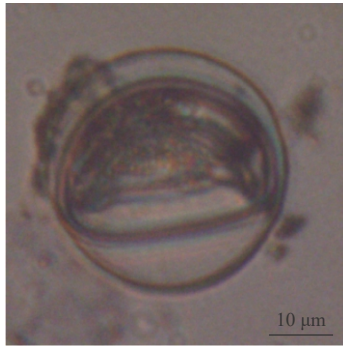
Keywords: dinoflagellate cysts; Yellow River Estuary; sediment; harmful algal bloom

Received: August 28, 2023

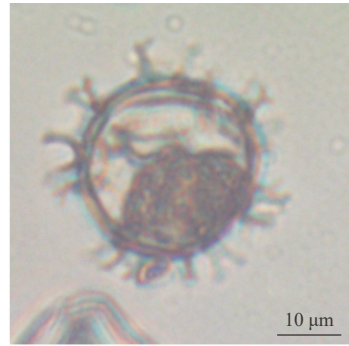
附图



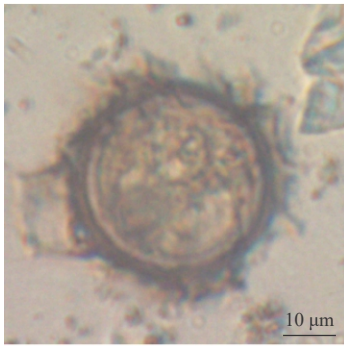
附图1 链状亚历山大藻
Alexandrium catenella



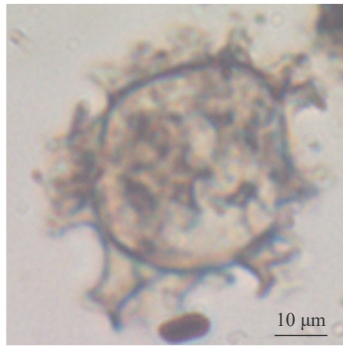
附图2 微小亚历山大藻
Alexandrium minutum



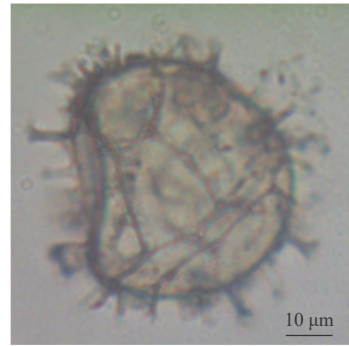
附图3 具指膝沟藻
Spiniferites bentori



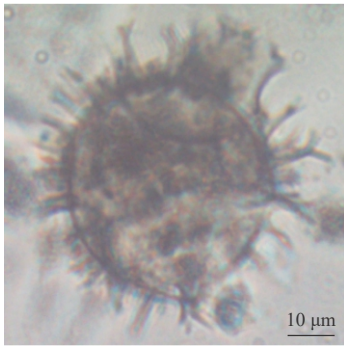
附图4 膜状膝沟藻
Spiniferites membranaceus



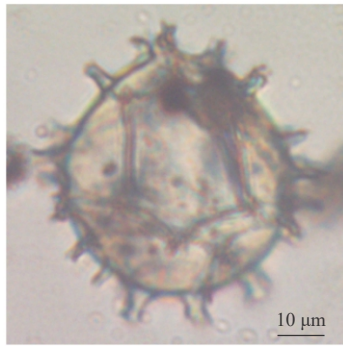
附图5 斯氏膝沟藻
Spiniferites bulloideus



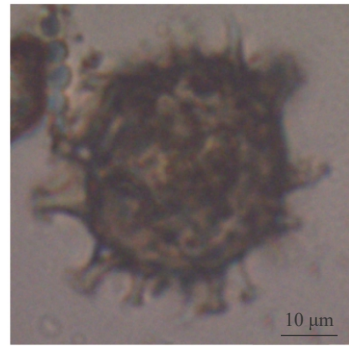
附图6 具刺膝沟藻
Spiniferites hyperacanthus



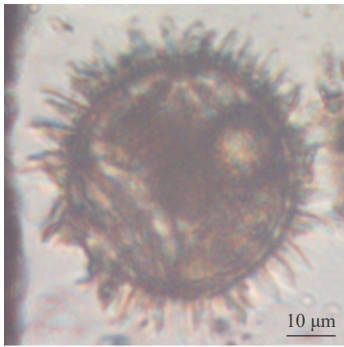
附图7 具刺膝沟藻
Spiniferites mirabilis



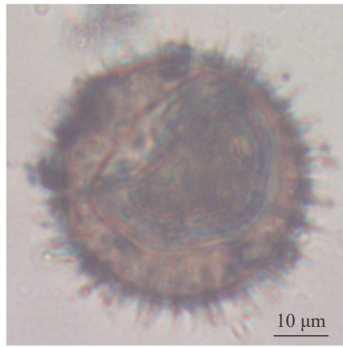
附图8 膝沟藻
Spiniferites bentori var. *truncata*



附图9 膝沟藻
Spiniferites delicatus



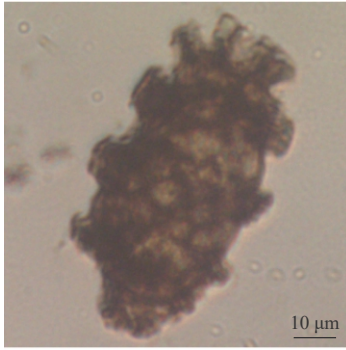
附图10 多边舌甲藻
Lingulodinium machaerophorum



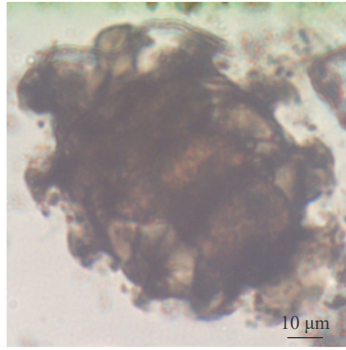
附图11 网状原角管藻
Operculodinium centrocarpum



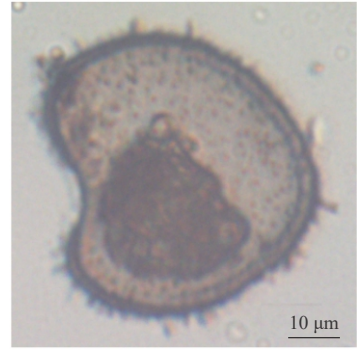
附图12 链状裸甲藻
Gymmodinium catenatum



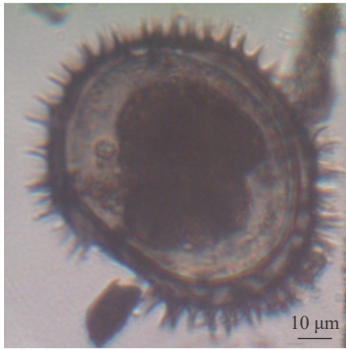
附图13 科夫多沟藻
Polykrikos kofoidii



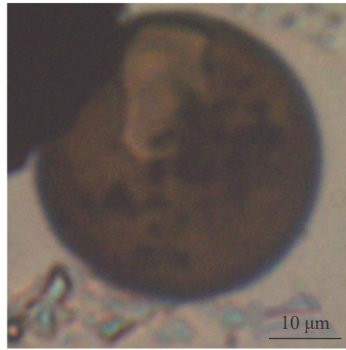
附图14 无纹多沟藻
Polykrikos schwartzii



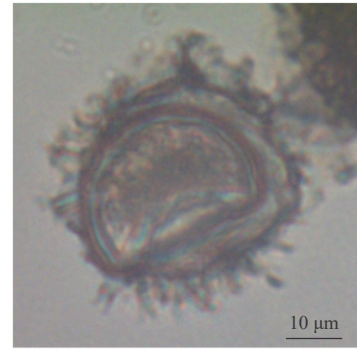
附图15 窄角原多甲藻
Votadinium spinosum



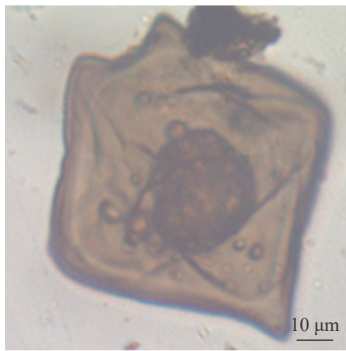
附图16 锥形原多甲藻
Selenopemphix quanta



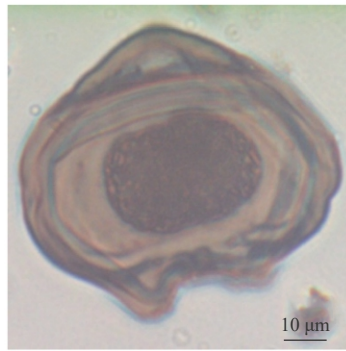
附图17 锥腹原多甲藻
Brigantedinium simplex



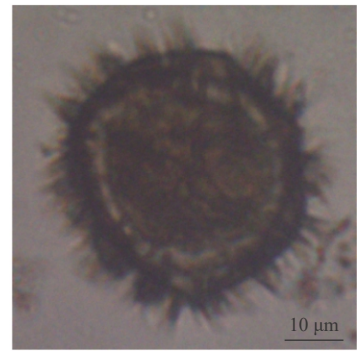
附图18 分支原多甲藻
Xandaradinium xanthum



附图19 宽刺原多甲藻
Protoperidinium latissimum



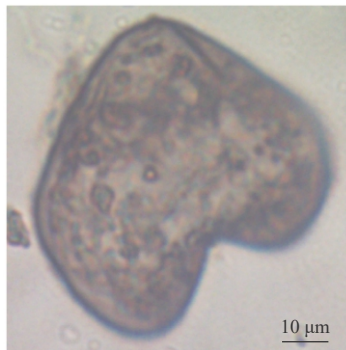
附图20 里昂原多甲藻
Quinquacuspis conretum



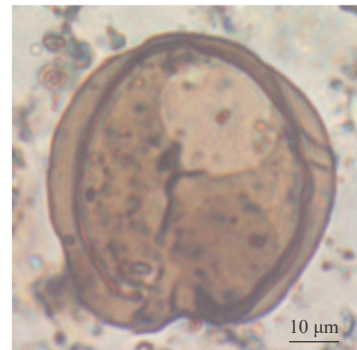
附图21 微小原多甲藻
Protoperidinium minutum



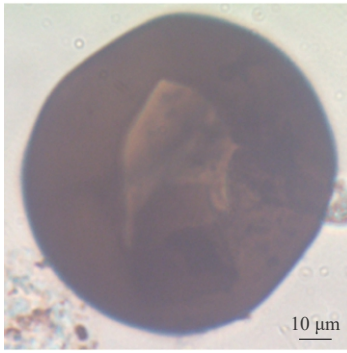
附图22a 长形原多甲藻
Votadinium calvum



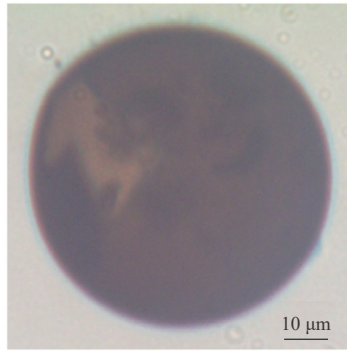
附图22b 长形原多甲藻
Votadinium calvum



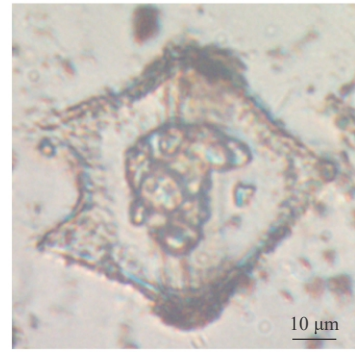
附图23 赛裸原多甲藻
Selenopemphix nephroides



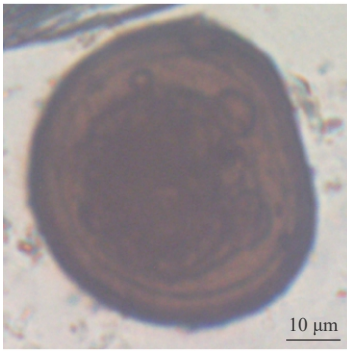
附图24 五边原多甲藻
Brigantedinium majusculum



附图25 小齿原多甲藻
Brigantedinium irregulare



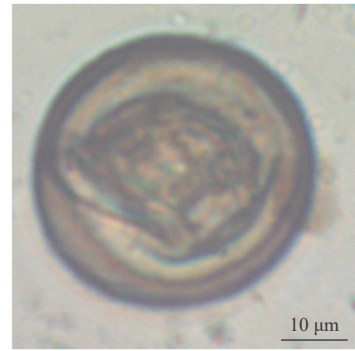
附图26 原多甲藻
Trinovantedinium capitatum



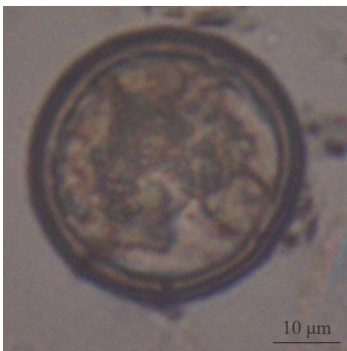
附图27 原多甲藻
Brigantedinium sp.1



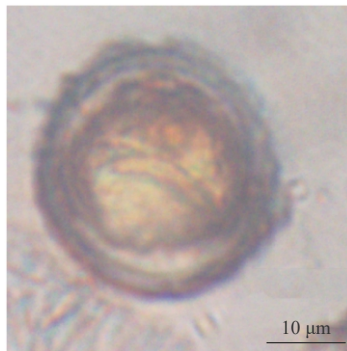
附图28 原多甲藻
Selenopemphix sp.1



附图29 原多甲藻
Protoperidinium sp.1



附图30 甲藻孢囊 A 型



附图31 甲藻孢囊 B 型



附图32 甲藻孢囊 C 型

南海北部夏季浮游植物群落对 中尺度涡物理过程的响应

冯友飞¹, 李佳烜², 杨世民^{1*}

(1. 中国海洋大学海洋生命学院, 山东 青岛 266003;
2. 中国海洋大学信息科学与工程学部电子工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 为了分析南海北部浮游植物群落对中尺度暖涡的响应, 于 2021 年夏季在南海北部海域布设了 19 个大面站, 采集浮游植物水样, 并分析浮游植物丰度、群落特征指数, 以及水体叶绿素极大值层和营养盐浓度分布等, 结果表明: 共鉴定出隶属于 3 门 82 属的 307 种浮游植物, 其中甲藻和硅藻为该海域主要的浮游植物类群, 分别有 176 种 (33 属) 和 129 种 (48 属), 优势种为菱形海线藻 (*Thalassionema nitzschioides*)、菱形藻属 (*Nitzschia* spp.)、环沟藻属 (*Gyrodinium* spp.)、斯克里普藻属 (*Scrippsiella* spp.); 在中尺度暖涡中心, 叶绿素极大值层 (Deep Chlorophyll Maximum, DCM) 相比边缘区域更深, 营养盐浓度分布也呈现类似特点; 中尺度涡的物理过程对浮游植物群落结构产生显著影响, 表现为暖涡中心区域的浮游植物丰度低于边缘区域。斯皮尔曼相关性分析 (Spearman Correlation Analysis) 表明, 在暖涡中心区域, 随着温度升高, 硅藻丰度开始降低, 且硅藻在中心区域的丰度低于边缘区域; 相比之下, 甲藻在中心区域的丰度高于边缘区域。进一步分析硅藻优势种的分布特征可知, 菱形海线藻, 菱形藻在暖涡中心区域的丰度要小于边缘区域, 而环沟藻、斯克里普藻则相反。通过对暖涡区域群落特征指数的分析发现, 从边缘区域到中心区域, 物种多样性显著降低, 物种分布趋于均匀。本研究可为探索浮游植物对中尺度涡响应提供基础资料。

关键词: 南海北部; 中尺度暖涡; 浮游植物; 群落结构; 环境因子

中图分类号: Q178.53; S932.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-6647(2024)04-0690-19

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20230306002

引用格式: 冯友飞, 李佳烜, 杨世民, 2024. 南海北部夏季浮游植物群落对中尺度涡物理过程的响应[J]. 海洋科学进展, 42(4): 690-708. FENG Y F, LI J X, YANG S M, 2024. Response of phytoplankton communities to the physical processes of mesoscale eddy in the northern South China Sea in summer[J]. Advances in Marine Science, 42(4): 690-708.

海洋浮游植物处于海洋食物网的第一营养级, 为浮游动物和鱼类等提供了关键的食物来源 (Gui et al, 2020)。作为海洋生态系统中关键的初级生产者, 它们贡献了全球约一半的初级生产力 (黄邦钦等, 2021), 在生物地球化学循环中扮演着至关重要的角色, 尤其在寡营养盐海域, 它们可以明显地促进海洋碳循环 (Behrenfeld et al, 2001; 陈楠生等, 2021), 还会影响海洋中碳的输送效率 (Field et al, 1998)。因此, 深入研究海洋浮游植物群落结构对于理解海洋生态系统、渔业资源管理以及气候变化的影响至关重要。

南海是全球最大的边缘海之一, 属于热带海洋性季风气候。南海的生态环境复杂, 包含多个类型的典型生态系统, 如河口、海湾和深海等; 还有一些重要的海洋现象, 如上升流、内孤立波和中

收稿日期: 2023-03-06

资助项目: 国家自然科学基金项目 (31750001)

作者简介: 冯友飞 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋浮游植物分类学和生态学方面研究。

E-mail: 17852061901@163.com

*通信作者: 杨世民 (1974—), 男, 教授级高级实验师, 硕士, 硕士生导师, 主要从事海洋浮游植物分类学和生态学方面研究. E-mail: yangplankton@163.com

(王 燕 编辑)

尺度涡旋等(凌娟等, 2012; 孙丽娜等, 2022), 区域性特征明显。其中, 中尺度涡活跃性非常强(Hu et al, 2000; Mao et al, 2021), 按照自转方向, 中尺度涡可以分为两种类型: 一种是气旋式涡旋, 也称为冷涡; 另一种是反气旋式涡旋, 也称暖涡(Gustaaf et al, 2010)。冷涡可以将深层海水带至表层(Jia et al, 2011), 而暖涡则可将表层海水带至深层, 大量浮游植物伴随海水向深水层转移, 使得深水的碳生物量增加(Wu et al, 2017)。

浮游植物作为海洋生态系统中高度敏感的生物, 其群落结构受中尺度涡影响显著(Lin et al, 1995; 钟超等, 2013; 郑全安等, 2017; Cavalcanti et al, 2020; Mi et al, 2020)。近年来, 虽然关于南海北部浮游植物群落结构的研究较为丰富(柳丽华等, 2007; 孙军等, 2007; 凌娟等, 2012; 乐凤凤等, 2015; 薛冰等, 2016; 刘志勇等, 2020), 获取了较多数据, 但关于中尺度涡对浮游植物群落结构影响的研究仍相对有限。基于此, 本文采用斯皮尔曼模型, 分析了2021年夏季南海北部中尺度涡区域浮游植物群落的结构和环境因子的相互作用, 并深入探讨了浮游植物群落对中尺度涡的响应机制, 以期为未来南海的生物地球化学循环相关研究提供重要的基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究区域与站位设置

2021年夏季, 我们通过高度计遥感发现南海北部存在一个中尺度涡旋, 通过分析每日海面高度异常(Sea Surface Height Anomaly, SSHA)确定了2021年南海北部中尺度涡的位置, 涡旋中心在(114°30'E, 18°00'N)附近, 该涡旋东西直径约180 n mile, 南北直径约120 n mile, 高度计遥感卫星观测到该涡旋持续时间较长, 持续时间从7月初到10月底, 因此, 中国海洋大学海洋浮游植物实验室团队依托国家自然科学基金共享航次对该海域中尺度涡开展研究。本次研究选取位于(114°36'~116°00'E, 16°00'~20°00'N)的一片狭长形中尺度涡旋海域作为调查和研究区域(图1)。

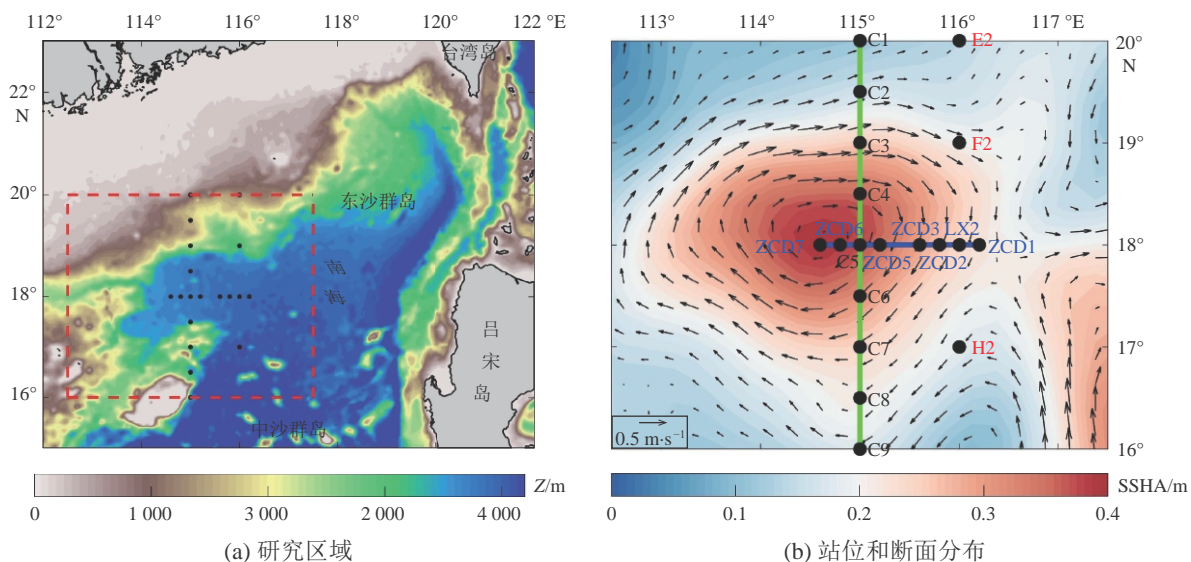


图1 研究区域及站位和断面分布

Fig. 1 Study region, the distribution of sampling stations and section

为了更好地研究南海中尺度涡对浮游植物群落结构的影响, 中国海洋大学海洋浮游植物实验室团队搭乘“东方红3”科考船在2021年8月21日至9月3日在调查区域进行了加密站点的采样, 以中尺度涡旋为中心于东西方向设置8个站位为Z断面、南北方向设置9个站位为C断面, 为了更好

地研究中尺度涡现象, 根据科考船的预定航线, 我们又在距离中尺度涡较远的地方设置了 E2、F2、H2 站位, 共设置 19 个站位(图 1), 采集了浮游植物水样, 观测了环境因子和海流等。

1.2 样品采集与分析

利用车载 SBE9 CTD 采水器于这 19 个大面站采集水样。采集浮游植物水样, 于 5 m(表层), 25、50 和 75 m(中层), 以及 100、150、200 和 300 m(底层)各水层采集 2 L 水样于广口塑料瓶中, 并向每瓶水样加入 20 mL 体积分数为 1% 的鲁戈氏碘液试剂以固定保存样品。

样品于实验室内浓缩, 取 25 mL 样品静置沉淀 24 h, 然后置于 Hydro-Bios 计数框内, 在 Nikon TS100 倒置显微镜下进行浮游植物物种鉴定和细胞计数。根据 Shannon 等(1950)计算单位体积内浮游植物丰度, 计算公式为:

$$N = \frac{n}{A} \times \frac{v_1}{v_0}, \quad (1)$$

式中: N 为每升水中浮游植物的数量; n 为显微镜下计数框中浮游植物细胞数量; A 为计数框面积; v_1 为浓缩前的取样体积; v_0 为浓缩后的样品体积。

利用车载 CTD 采水器现场测定温度和盐度数据, 利用 SEAL AA3 营养盐自动分析仪测定 NO_3^- 、 NO_2^- 、 SiO_3^{2-} 、 PO_4^{3-} , 并利用次溴酸钠氧化-分光光度法测定 NH_4^+ 。

使用车载 CTD 采水器采集 1 L 海水, 在样品中加入 1 mL 碳酸镁悬浊液, 使用直径为 47 mm、孔径为 0.7 μm 的 Whatman 玻璃纤维滤膜过滤, 将滤膜置于 -20°C 冰箱内保存。样品滤膜置于研磨钵中, 加入 3 mL 丙酮溶液, 研磨至糊状, 将完全破碎后的细胞提取液转移至离心管中, 将离心管放入离心机, 以 4 500 r/min 离心 10 min。然后用针式滤器过滤上清液得到叶绿素 a (Chl a)的丙酮提取液待测。本过程全部在车载实验室完成。

将待测试样移至比色皿中, 以丙酮溶液为参比溶液, 使用日本日立 F-4700 荧光光度计于波长 750、664、647 和 630 nm 处测量吸光度。

1.3 数据处理方法

1.3.1 群落结构特征指数

生物多样性是生物群落的重要特征, 在水体条件较好的情况下, 生物的种类较多, 个体数相对越稳定。当水体受到污染时, 不同的生物对污染因子的敏感性和耐受的能力是不同的, 敏感的种类在不利的条件下衰亡, 抗性强的种类在新的条件下大量发展, 物种的多样性指数是表示环境质量的一个重要尺度。

对于多样性指数, 本文使用 Shannon-Wiener 多样性指数 H' (Shannon et al, 1950), 其计算公式为:

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log_2(P_i); \quad (2)$$

对于均匀度指数(J), 本文采用 Pielou 指数(Pielou, 1969), 其计算公式为:

$$J = H' / \ln(S); \quad (3)$$

采用优势度指数(Y)确定优势种, 其计算公式为:

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i. \quad (4)$$

式(2)至式(4)中: S 为群落中的总物种数; P_i 为所有物种的显著性概率, $P_i = n_i/N$; n_i 为第 i 种浮游植物的数量; N 为所有浮游植物细胞总数; f_i 为每个站位第 i 种浮游植物出现的频率。当 $Y > 0.02$ 时, 确定某种浮游植物为优势种。

1.3.2 群落结构及其与环境因素的相关性分析

在统计分析中, 非参数统计方法是一类不依赖于数据分布假设的统计技术, 广泛应用于生态学、

生物学等多个领域。相比传统的参数统计方法(如线性回归分析),非参数方法不要求数据符合正态分布,也不假设变量之间具有特定的分布形式,因此在处理非正态分布、离群值或小样本数据时,非参数统计方法具有更高的稳健性和灵活性(Conover, 1999)。

斯皮尔曼相关性分析(Spearman Correlation Analysis)是一种常用的非参数统计方法,用于评估两个变量之间的单调关系(Spearman, 1904)。这种方法基于秩数据的相关性,计算变量之间的秩次差异,进而得出它们之间的相关性强弱。与经典的皮尔逊相关性分析不同,斯皮尔曼相关性分析不受数据分布的限制,更适合分析非线性关系或者当数据存在异常值时的情况(Zar, 2005)。斯皮尔曼相关系数的计算方法为:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)}, \quad (5)$$

式中: r_s 为斯皮尔曼相关系数; d_i 为每对观测值的秩次差异; n 为样本的数量。当 r_s 接近 1 或 -1 时,表示变量之间存在强正相关或负相关;当 r_s 接近 0 时,表示变量之间没有显著的单调关系。斯皮尔曼秩相关系数的显著性通过假设检验来检验,通常使用 t 分布或者随机置换检验来确定相关系数是否显著(Conover, 1999)。

为了分析环境因子(如温度、叶绿素浓度、磷酸盐浓度和氨氮浓度等)与浮游植物群落(包括硅藻、甲藻及其优势种群)的相关性,我们采用了斯皮尔曼相关性分析。该分析方法的优势在于它对异常值不敏感,并且能够揭示出复杂的非线性关系,这对于浮游植物种群丰度的多样性和环境因子的复杂关系尤为重要,而且,通过对各个环境因子与不同种类浮游植物的相关性分析,可以更全面地了解环境变化对浮游植物群落结构的影响(Behrenfeld et al, 2006; Boyce et al, 2010)。

2 结果与分析

2.1 中尺度涡旋的确定

本文使用了来自欧洲哥白尼气候变化服务网站(<http://marine.copernicus.eu/>)的海表面高度异常数据和表层绝对地转流速数据。这些数据的水平空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间分辨率为 1 d, 适用于海洋和气候研究。通过对所得数据进行分析,在中尺度涡区域的 75、100 和 200 m 水深处出现了一个温度高值区,且越靠近涡旋中心,温度越高,符合暖涡的典型特征,如图 2 所示。

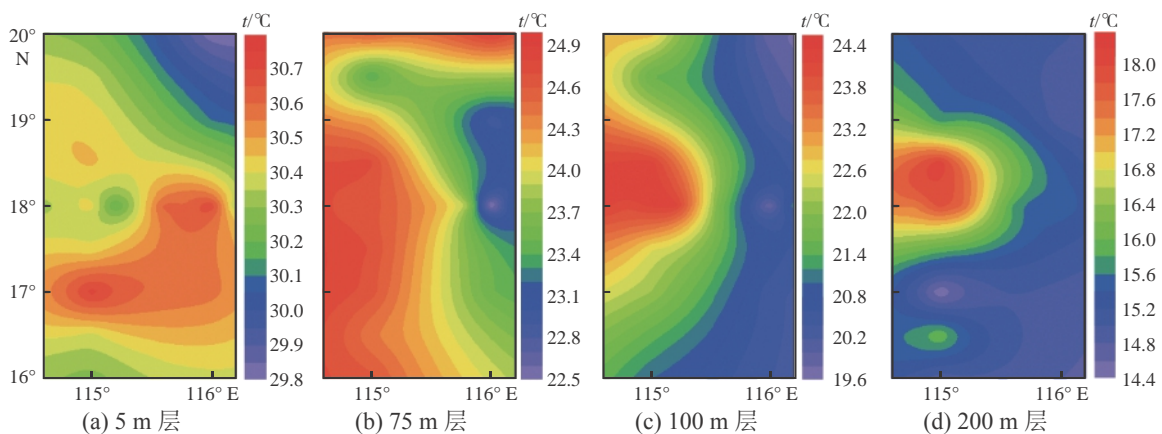


图 2 中尺度涡区域各水层温度平面分布

Fig. 2 Horizontal distribution of temperature in the study region

由C断面和Z断面的温度和营养盐参数的垂直分布(图3和图4)可以清晰地观察到,位于暖涡中心站位(C4和C5站)的温度明显高于其他站位,营养盐 SiO_3^{2-} 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的垂直分布和温度分布规律相似,即在中尺度涡区域营养盐下沉明显,离涡旋越远,下沉现象越弱;而在不受涡旋影响的C8、C9和ZCD1站,并未发现温度和营养盐出现明显下沉现象,这说明在暖涡的作用下,营养盐低值区整体发生了下移。

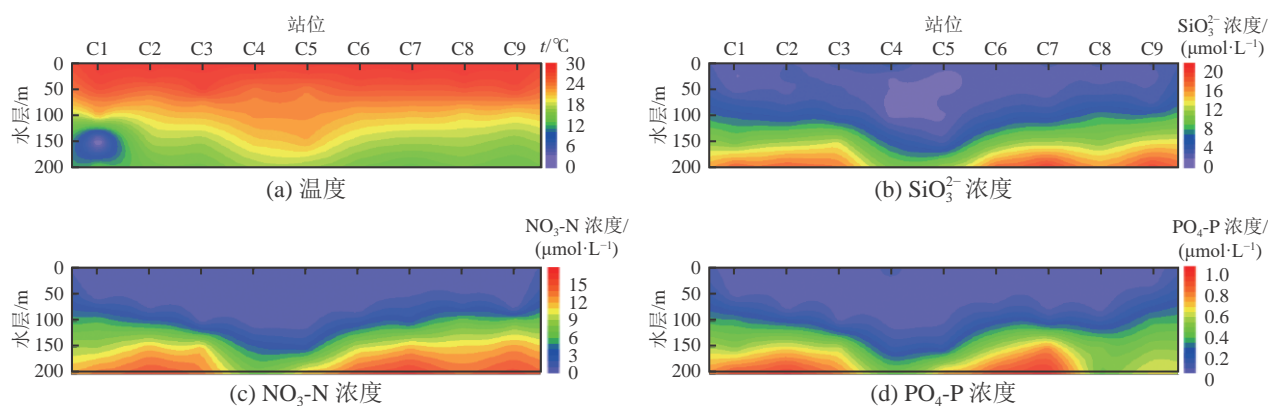


图3 C断面温度与营养盐分布

Fig. 3 The vertical distribution of temperature and nutrients in C-section

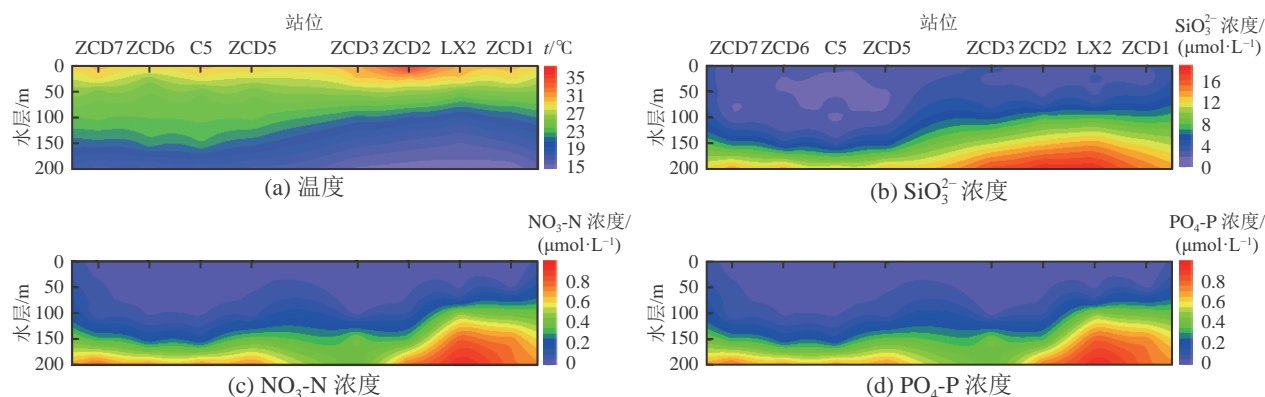


图4 Z断面温度与营养盐分布

Fig. 4 The vertical distribution of temperature and nutrients in Z-section

2.2 浮游植物群落结构特征

2.2.1 物种组成

在本次调查的中尺度涡海域中共鉴定出浮游植物3门82属307种(包括变种、变型)(附录A)。其中,硅藻门48属129种,占总物种数的42.02%;甲藻门33属176种,占总物种数的57.33%;金藻门1属2种,占总物种数的0.65%。硅藻门以角毛藻属(*Chaetoceros* sp.)种类最多(25种)。甲藻门中原多甲藻属(*Protoperdinium* sp.)(36种)和新角藻属(*Neoceratium* sp.)(34种)的物种较为丰富。所以,硅藻和甲藻是南海北部区域浮游植物的主要类群。

2.2.2 优势种组成

南海北部中尺度涡区域夏季浮游植物的优势种为:菱形海线藻(*Thalassionema nitzschioides*)、菱形藻属(*Nitzschia* spp.)、环沟藻属(*Gyrodinium* spp.)和斯克里普藻属(*Scrippsiella* spp.),其优势度分别

为0.074、0.060、0.044和0.040。调查区域优势种出现频率较高,菱形海线藻、环沟藻属的出现频率均大于60%。

2.2.3 生态类型

本次调查的中尺度涡海域浮游植物生态类型主要为广温广布性属种,如菱形海线藻、斯克里普藻属等;还有较多的热带性属种,如帽状尖甲藻(*Oxytoxum mitra*)、厚尖甲藻(*Oxytoxum crissum*)、短尖尖甲藻(*Oxytoxum mucronatum*)、节杖尖甲藻(*Oxytoxum sceptrum*)、旋风尖甲藻(*Oxytoxum turbo*)等;也普遍出现了近岸性属种,如亚历山大藻属(*Alexandrium* sp.)。本次调查的中尺度涡海域的浮游植物整体生态类型表现为热带性质。

2.3 浮游植物丰度特征

2.3.1 浮游植物丰度的水平分布

中尺度涡海域的浮游植物丰度介于12.32~1 095.01个/L,平均丰度为225.91个/L。中尺度涡海域硅藻丰度范围为4.16~1 032.80个/L,平均丰度为108.99个/L,占总丰度的48.25%;甲藻丰度介于8.32~664.10个/L,平均丰度为115.77个/L,占总丰度的51.24%。所以,硅藻和甲藻影响着调查海域浮游植物的总体分布趋势。

中尺度涡海域各水层浮游植物丰度的平面分布如图5所示。由图5可以明显地看出,位于中尺

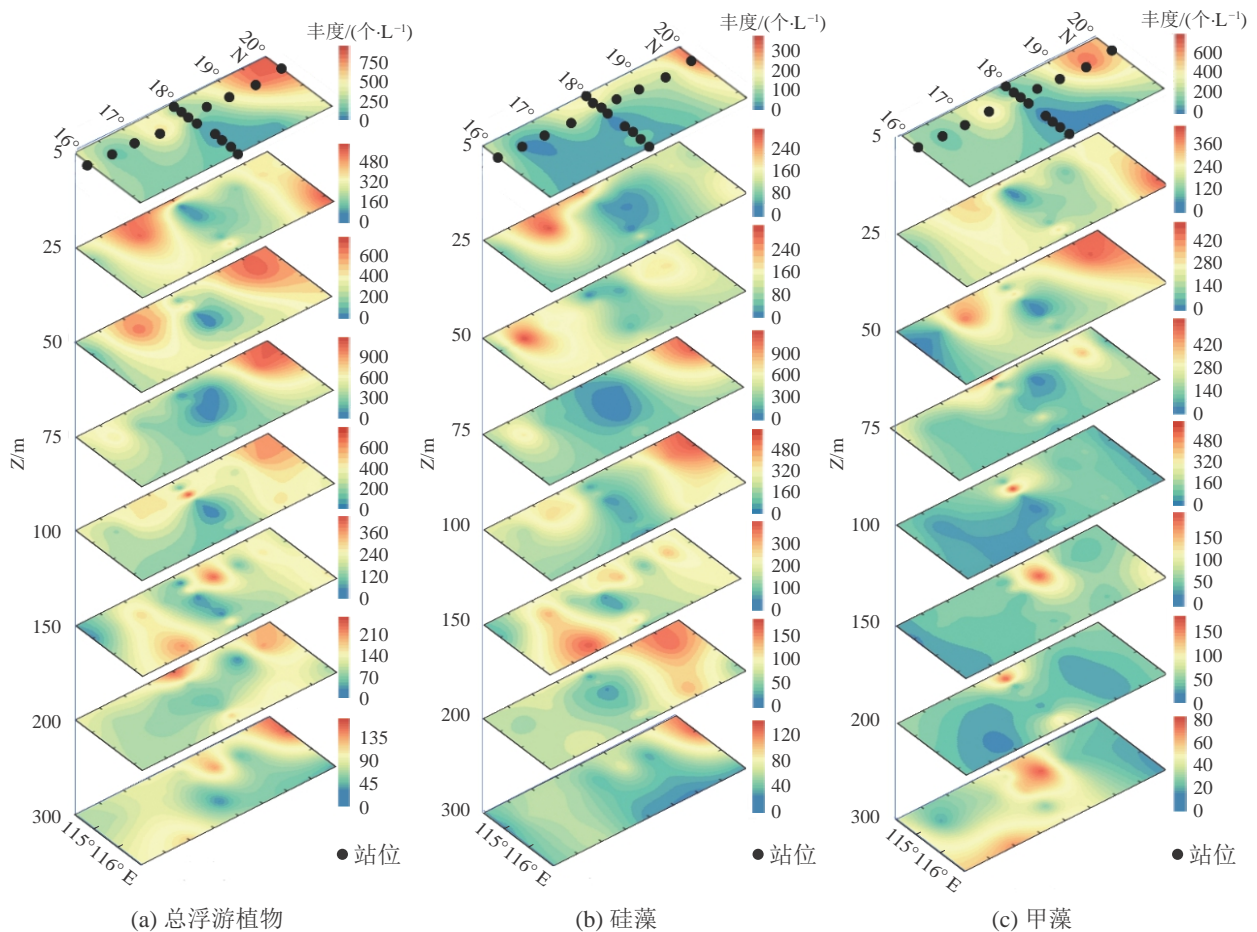


图5 中尺度涡区域浮游植物丰度平面分布

Fig. 5 Horizontal distribution of phytoplankton cell abundance in mesoscale eddy region

度涡外部的C1站位, 浮游植物丰度较高, 这主要是由陆源营养盐大量输入造成的。受暖涡影响站位的浮游植物丰度低于暖涡外围站位的, 即使是在叶绿素极大值层(DCM层), 暖涡中心C5站的浮游植物丰度也只有253.92个/L。硅藻丰度分布与总浮游植物群落结构的分布特征基本相同, 在受中尺度涡影响的海域, 硅藻丰度最高值(806.76个/L)出现在C5站的100 m水层, 此处分布着大量的菱形藻和斯克里普藻。硅藻的丰度总体在中尺度涡区域较低, 从表层到200 m水深处都反映出这样的特征。而甲藻丰度的平面分布呈现与硅藻丰度分布相反的特征, 其在中尺度涡中心附近站位的75 m、100 m和200 m处均出现了高值, 尤其是在C4、C5站位, 其甲藻丰度高于其他站位。

2.3.2 浮游植物丰度的垂直分布

以暖涡中心为原点的横纵两断面的浮游植物总丰度及硅藻、甲藻的丰度分布如图6所示。C断面浮游植物总丰度的最大值出现在75~100 m水层, 这主要由于该区域分布着大量的菱形藻、菱形海线藻和斯克里普藻。位于暖涡站位的浮游植物总丰度低于边缘站位的丰度, 从C断面来看, 位于中尺度涡区域的C4、C5站位的丰度最大值在100 m层上下, 其他站位的最大值都出现在75 m层上下, 这意味着在暖涡区域, DCM层发生了下移。Z断面浮游植物总丰度的最大值在100 m层上下, 较C断面浮游植物总丰度的高值区有所下移, C5站位的100 m水层处也是Z断面的浮游植物丰度最大值所在区域, 靠近涡旋中心的ZCD7和ZCD6站位丰度较低, 远离涡旋中心的ZCD2、LX2和ZCD1站位丰度分布比较均匀。硅藻丰度分布与浮游植物总丰度的整体分布呈现出一致的特征。硅藻在暖涡中心区域附近的站位丰度较低, 而在暖涡外缘的站位丰度较高, 其丰度高值区在75 m水层附近。而甲藻丰度垂直分布则呈现出与硅藻不一样的特征, 暖涡中心区域的甲藻丰度大于边缘站位的甲藻丰度, 其在暖涡站点的高值区在100 m水层。

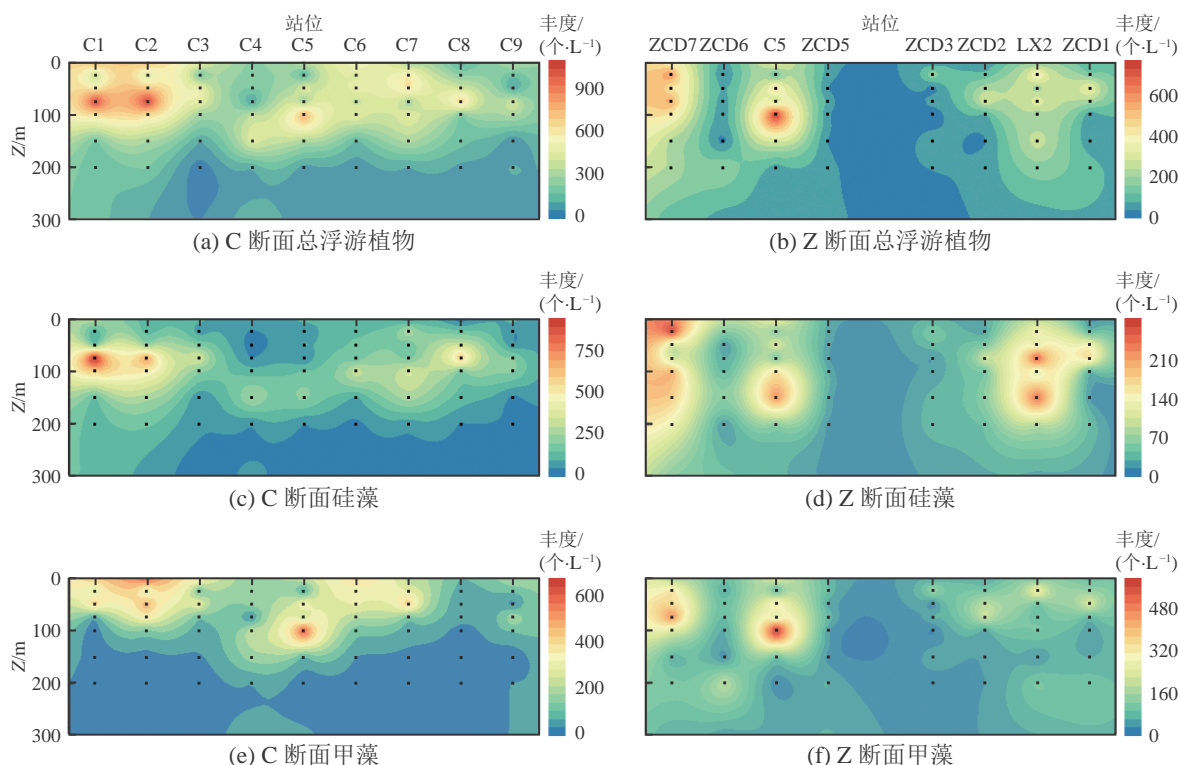


图6 浮游植物总丰度及硅藻、甲藻丰度的垂直分布

Fig. 6 Vertical distribution of total phytoplankton, diatom and dinoflagellate abundances in study region

2.4 优势种丰度的水平分布

本次调查海域的优势种为菱形海线藻、菱形藻两种硅藻和环沟藻属、斯克属里普藻两种甲藻,其平面分布如图7所示。隶属于硅藻的菱形海线藻的丰度最高,该物种主要分布在75 m水层中,在LX2站位的75 m水层丰度最高,为224.66个/L。另一种硅藻优势种菱形藻的分布特征与菱形海线藻相似。这两种硅藻优势种在中尺度涡旋中心区域的分布都比较少,而在暖涡外缘区域分布较多。甲藻优势种环沟藻丰度最大值在ZCD7站的75 m水层,为200.88个/L,而且环沟藻丰度在中尺度涡旋中心区域站点的200 m水层有高值区,其丰度明显高于周边暖涡外缘区域。斯克里普藻在中尺度涡旋区域有高值区,其在75 m和100 m水层处的丰度大于涡旋边缘地区,且在75 m水层处中尺度涡旋中心区域的丰度要低于涡旋边缘地区,而在水体表层和100 m水层处中尺度涡旋中心区域的丰度要高于涡旋边缘地区。

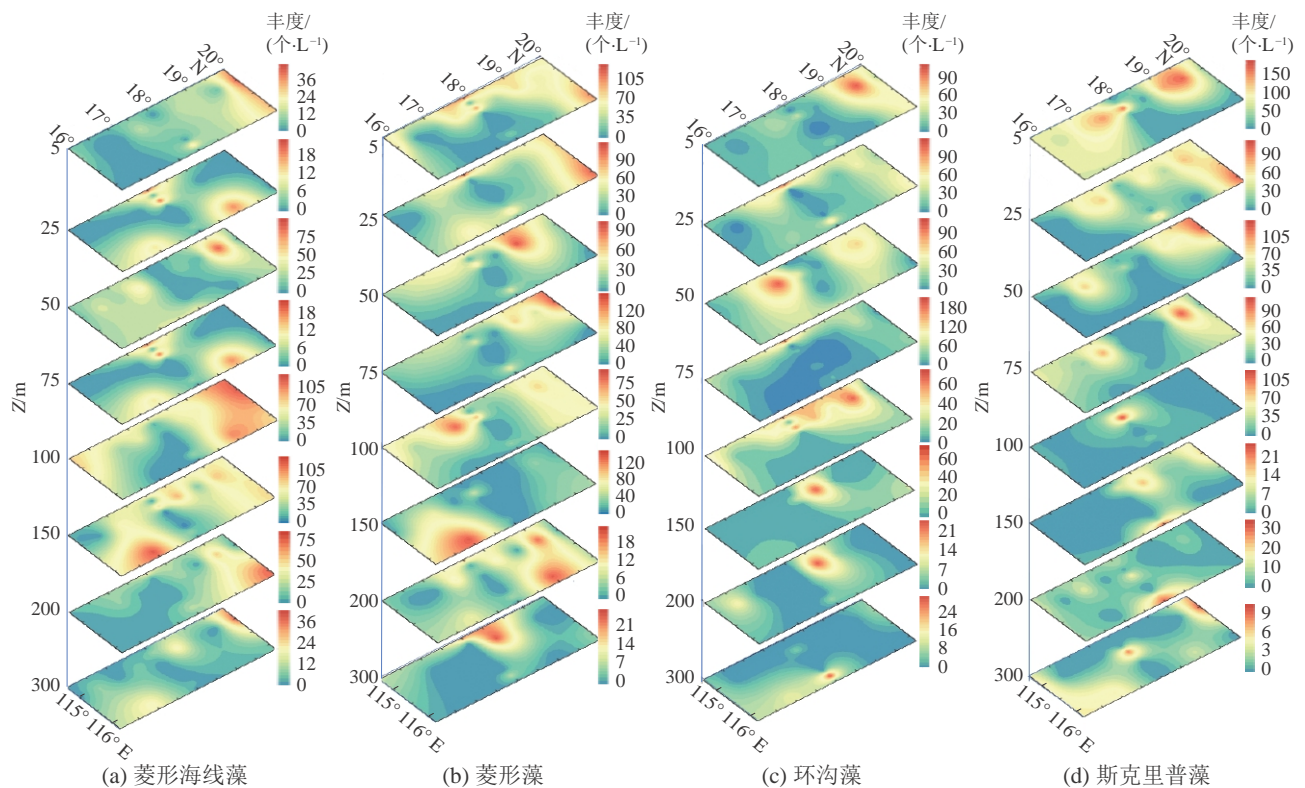


图7 中尺度涡区域浮游植物优势种丰度平面分布

Fig. 7 Horizontal distribution of the dominant phytoplankton species abundances

2.5 群落特征指数分析

Shannon-Wiener 多样性指数(H')和 Pielou 均匀度指数(J)常被用来衡量浮游植物群落结构的稳定性。分析调查海域表层的多样性指数和均匀度指数平面分布特征(图8)可知,表层 H' 范围为 2.32~4.25, 平均值为 3.38; 75 m 水层 H' 范围为 2.85~4.78, 平均 H' 为 3.71, 高值区出现在调查海域的西北部, 所以在中尺度涡区域的多样性指数较低。5 m 水层 J 范围为 0.71~0.97, 平均值为 0.85; 75 m 水层 J 范围为 0.71~0.98, 平均值为 0.86; 高值区位于暖涡中心海域, 尤其是在暖涡区 75 m 水层, 表明在暖涡的 75m 水层处物种相对均匀。从多样性指数来看, 自中尺度涡区域的表层到 75 m

水层, 多样性低值区的范围逐渐变大, 表明在暖涡中心区域, 物种多样性有降低的趋势; 但均匀度指数自表层到 75 m 水层, 均匀度指数高值区的范围变大, 这表明在暖涡中心区域各物种的分布较为均匀, 群落结构更趋于稳定。

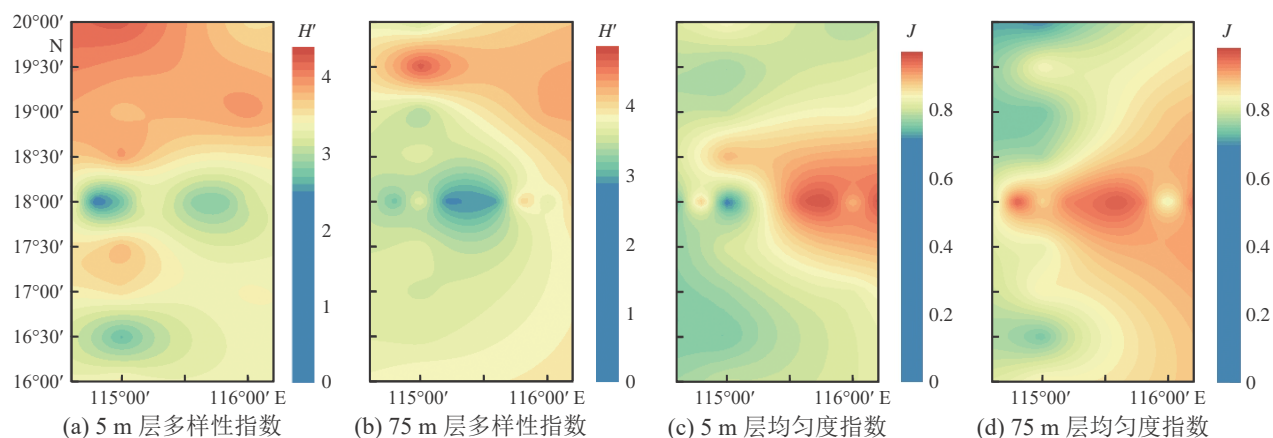


图 8 中尺度涡区域群落特征指数

Fig. 8 Characteristics of phytoplankton community in mesoscale eddy region

3 讨论

3.1 中尺度涡区域叶绿素分布特征

Chl *a* 参数的垂直分布特征结果(图 9)表明: Chl *a* 质量浓度在表层及 200 m 处最低, 其值小于 $0.1 \mu\text{g/L}$; Chl *a* 的质量浓度呈随着水深的增加先升高后降低的趋势, 即其在表层(5 m)与 200 m 底层较低, 在其他水层较高; 在 A 断面, 离涡旋中心较远的 C1、C2、C8 和 C9 站位的 DCM 层在 75 m 处, 而处于涡旋中心的 C4、C5 站, 其 DCM 层下沉到了 100 m 处, 出现这一现象是因为暖涡造成了 DCM 层的下移(蒋泽鸣等, 2023)。

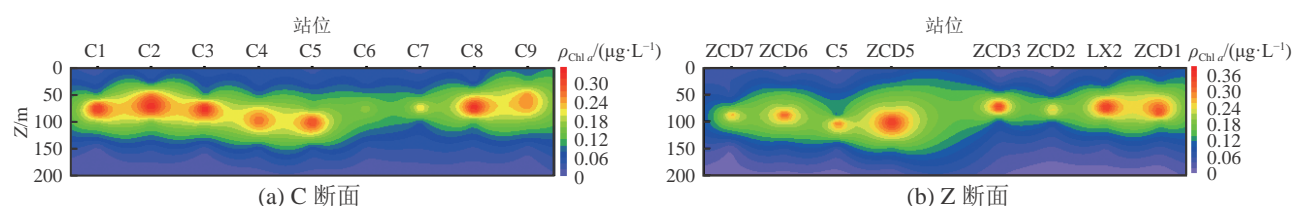


图 9 C 断面与 Z 断面 Chl *a* 质量浓度的分布

Fig. 9 Vertical distribution of chlorophyll *a* concentrations in C-section and Z-section

3.2 浮游植物物种结构特征

本次调查共记录浮游植物 3 门 82 属 307 种。调查海域的浮游植物以广温、广布性和热带、亚热带性种为主, 这与以往的研究结果一致(Shannon et al, 1950; Li et al, 2022)。与历史资料(李冬融等, 2014)相比, 本次调查的中尺度涡影响范围较大, 甲藻属种数较多而硅藻属种数较少, 这可能与中尺度涡海域的温度较高有关。本次调查海域的优势种主要是菱形海线藻、菱形藻、环沟藻和斯克里普藻, 与以往的优势种相同, 分析两种甲藻优势种环沟藻和斯克里普藻的丰度分布特征可知, 在温

度较高的中尺度涡旋中心区域,甲藻出现茁壮生长趋势,说明甲藻虽受温度的影响显著,但适应高温的能力更强。

物种均匀度是指某一群落或生境中全部物种个体数目的分配状况,其反映了各物种个体数目分配的均匀程度。生物群落的均匀度指数越高,表示该群落的浮游植物分布越均匀。同样,在不受暖涡影响的E2站位,均匀度指数为0.79,其中浮游植物丰度为401.76个/L,其中硅藻丰度占60%,甲藻丰度占40%;而暖涡处C5站位的浮游植物均匀度指数为0.89,其中浮游植物丰度为259.92个/L,硅藻丰度占15%,甲藻丰度占84%。

硅藻优势种菱形海线藻在E2站位的丰度是106.02个/L,占E2站位浮游植物总丰度的26.39%,在C5站位的丰度是16.56个/L,占C5站位浮游植物总丰度的6.37%。甲藻优势种环沟藻在E2站位的丰度是36.74个/L,占E2站位浮游植物总丰度的26.39%,在C5站位的丰度是59.76个/L,占C5站位浮游植物总丰度的14.87%。在暖涡影响下,暖涡中心区域的硅藻丰度占比降低,甲藻丰度占比升高。这表明在暖涡区域以优势种为代表的浮游植物群落结构更趋向均匀稳定。

3.3 浮游植物的平面分布及垂直分布特征

在中尺度涡旋的中心区域75 m水层中,甲藻的丰度超过了硅藻,主要是由于环沟藻和斯克里普藻在暖涡中心大量增加,同时帽状尖甲藻的丰度也较高。相对而言,在这一相同区域,硅藻的丰度显著下降,而甲藻在暖涡中心相对于边缘区域的丰度有所提高,尽管如此,该区域浮游植物的总丰度整体呈下降趋势。此外,中尺度涡旋中心区域的DCM层要比边缘区域站位的DCM更深,这是因为暖涡导致了DCM的下移。

在中尺度涡旋的中心区域,浮游植物的平面分布和垂直分布与Chl *a*的分布特征表现出较高的一致性。这一现象体现在,涡旋中心区域浮游植物丰度的最大值通常出现在100 m深的水层附近,这一结果与Chl *a*分布的结果相吻合,说明Chl *a*的分布模式可作为解释浮游植物分布的一个有效指标。这种一致性是由于Chl *a*作为浮游植物的主要光合色素,直接反映了浮游植物生物量和活动的平面和垂直分布模式。硅藻的丰度分布与浮游植物总丰度分布呈现相似趋势,具体表现为在中尺度涡旋中心区域的丰度较低。这一现象可以通过分析中尺度涡旋中心区域营养盐,特别是硅酸盐的浓度来解释。在中心区域,由于硅酸盐浓度较低,限制了硅藻对硅酸盐的吸收和利用。硅藻生长繁殖依赖于充足的硅酸盐供应,而在暖涡中心由于硅酸盐浓度偏低,对硅藻的生长与繁殖构成了制约,最终导致其丰度降低。在暖涡中心的C4和C5站点,各水层(包括50、75、100、150和200 m层)的温度普遍高于其他站位。在这些中尺度涡旋的中心站位,甲藻的丰度在表层和75 m水层呈现高值,这主要是因为甲藻比硅藻更能适应高温环境。由于高温条件更有利于甲藻的生长与繁殖,因此相比于边缘区域,暖涡中心的甲藻展现出更高的丰度。

浮游植物主要生活在海洋的真光层内,真光层最深可延伸至大约200 m水深,在此范围内,光照是浮游植物生长的关键限制因素。然而,根据我们的调查结果,即便在暖涡影响下的300 m深水层,仍然存在少量的浮游植物,特别是甲藻,这表明某些甲藻物种可能具备通过营异养方式在真光层以下存活的潜力。

3.4 环境因子对浮游植物分布的影响

浮游植物的生长和分布是多个环境因素相互作用的结果,其中温度、盐度和营养盐浓度扮演着重要的角色。斯皮尔曼模型分析结果揭示,在中尺度涡海域中,温度是影响浮游植物特别是硅藻和甲藻丰度的关键因素。在暖涡边缘区域,温度适度升高能促进硅藻丰度的增加。然而,随着温度的进一步上升,这种促进效应逐渐减弱,并最终转变为限制因素,尤其是在暖涡中心区域,硅藻细胞

丰度显著下降。相反,甲藻丰度在暖涡影响区域随温度升高而呈现出稳定增长的趋势,并在暖涡中心区域的丰度显著高于边缘区域。这种差异表明,相比于硅藻,甲藻对温度变化的适应能力更强,能在更宽广的温度范围内保持增长(Behrenfeld et al, 2006)。

斯皮尔曼的分析结果还显示甲藻与 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 SiO_3^{2-} 之间存在显著的负相关性(图 10)。这是因为在暖涡区域,由于水团相对稳定,水体的垂直混合受到限制,导致表层水体中的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 供应减少。一些甲藻,如多米尼环沟藻,属于混合营养型浮游植物,它们不仅依赖光合作用,还可以通过捕食或吸收溶解有机物来获取营养(Stoecker et al, 1990)。这种多样化的营养策略使它们能够在 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度较低的环境中继续生长和繁殖,显示出其对营养盐匮乏环境的适应能力(Smayda, 1997)。此外,甲藻与 SiO_3^{2-} 的负相关也反映了,由于甲藻不需要 SiO_3^{2-} 形成细胞壁,在硅酸盐浓度较低的环境中,其不会受到 SiO_3^{2-} 限制,更能占据竞争优势(Anderson et al, 2012)。

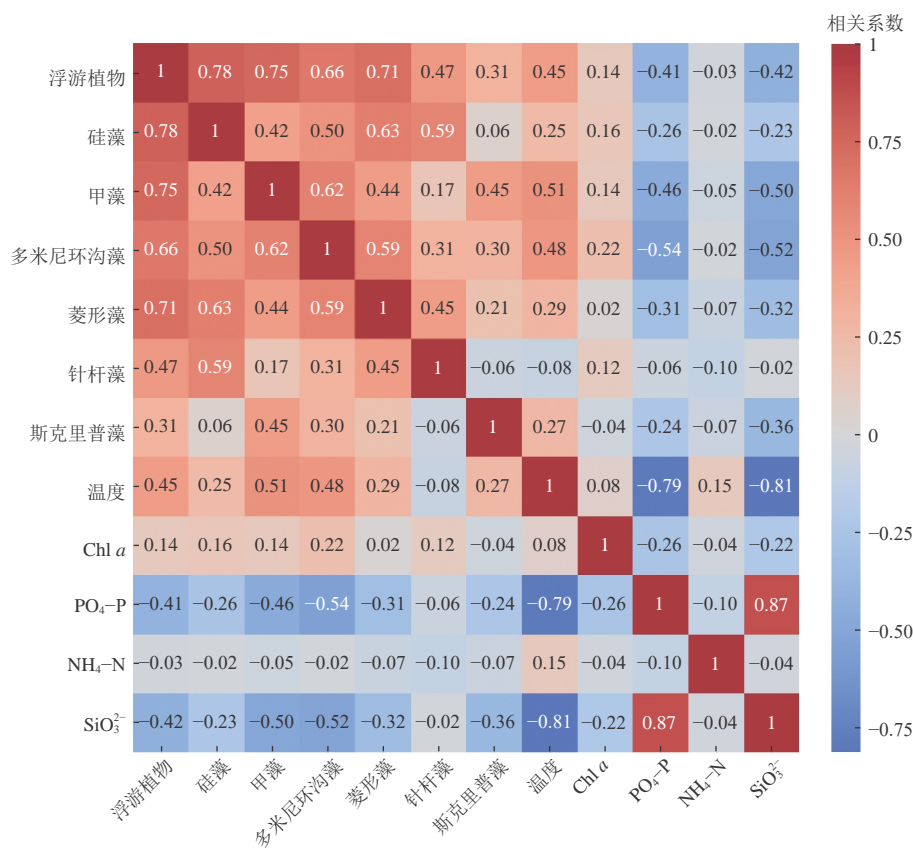


图 10 浮游植物与环境因子在中尺度涡区域的斯皮尔曼相关性分析结果

Fig. 10 Spearman correlation analysis results of phytoplankton and environmental factors in mesoscale eddy region

4 结 论

2021年9月对南海北部中尺度涡海域主要环境因素和浮游植物群落开展了一个航次的调查,在掌握了中尺度涡的变化特征及浮游植物的种类组成、优势种和丰度分布特征情况的基础上,利用GAM分析了本航次的浮游植物群落结构特征及其影响因素,得出主要结论如下。

1)中尺度暖涡可以将海洋表层中的寡营养盐海水带至真光层以下,影响浮游植物群落的分布,受中尺度涡的影响,暖涡中心区域的DCM比边缘区域的DCM深。

2)浮游植物群落结构受中尺度涡影响显著,暖涡中心区域的硅藻细胞丰度低于边缘区域,而甲藻丰度则高于边缘区域,由于硅藻丰度在中心区域减少的幅度大于甲藻丰度增加的幅度,因而浮游植物丰度也呈现出中心低、边缘高的特征,这与叶绿素的分布也相吻合;在暖涡中心区域,硅藻物种的大量减少也导致了物种多样性指数的降低。

3)Spearman分析表明,温度是影响浮游植物的重要因素,在中心区域,温度较高,甲藻更适应这种环境,表现为甲藻丰度增加,而硅藻则受高温限制,加之中心区域缺乏硅藻生长繁殖所需的硅酸盐,使得硅藻丰度从边缘区域到中心区域大幅降低,从而导致浮游植物总丰度也呈现降低的趋势。

致谢:本研究的数据及样品采集得到国家自然科学基金委员会共享航次计划项目(项目批准号:31750001)的资助。该航次(航次编号:NORC2021-05)由“东方红3”科考船实施。在此一并感谢。

参考文献 (References):

- 陈楠生,张梦佳,2021.中国海洋浮游植物和赤潮物种的生物多样性研究进展(三):南海[J].海洋与湖沼,52(2):385-435.
- CHEN N S, ZHANG M J, 2021. Advances in the study of biodiversity of phytoplankton and red tide species in China (III): the South China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 52(2): 385-435.
- 黄邦钦,肖武鹏,柳欣,2021.中国边缘海浮游植物群落时空格局与演变趋势[J].厦门大学学报(自然科学版),60(2):390-397.
- HUANG B Q, XIAO W P, LIU X, 2021. Spatial-temporal distributions and successional patterns of phytoplankton communities in the Chinese marginal seas[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 60(2): 390-397.
- 蒋泽鸣,商玗,张志伟,等,2023.南海东北部中尺度涡对海表叶绿素 a 浓度的影响规律研究[J].海洋与湖沼,54(4):987-999.
- JIANG Z M, SHANG G, ZHANG Z W, et al, 2023. Effect of mesoscale eddies on sea surface chlorophyll a concentration in northeastern South China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 54(4): 987-999.
- 乐凤凤,蔡昱明,孙军,等,2015.2009年冬、夏季南海北部超微型浮游生物的分布特征及其环境相关分析[J].海洋学报,37(12):41-55.
- LE F F, CAI Y M, SUN J, et al, 2015. Seasonal variation of picoplankton abundance and biomass in the northern South China Sea in summer and winter 2009[J]. *Haiyang Xuebao*, 37(12): 41-55.
- 李冬融,戴鑫烽,陆斗定,等,2014.2012年夏季南海西北部网采浮游植物群落结构[J].海洋学研究,32(3):87-96.
- LI D R, DAI X F, LU D D, et al, 2014. Community structure of net-phytoplankton in the northwest South China Sea in the summer of 2012[J]. *Journal of Marine Sciences*, 32(3): 87-96.
- 林金美,1995.中国海浮游甲藻类多样性研究[J].生物多样性,3(4):187-194.
- LIN J M, 1995. Diversity study of planktonic dinoflagellates in China Seas[J]. *Biodiversity Science*, 3(4): 187-194.
- 凌娟,董俊德,张燕英,等,2012.2008年夏季南海北部浮游植物群落结构特征分析[J].生物学杂志,29(2):42-46.
- LING J, DONG J D, ZHANG Y Y, et al, 2012. Structure characteristics of phytoplankton community in northern South China Sea in the summer of 2008[J]. *Journal of Biology*, 29(2): 42-46.
- 柳丽华,左涛,陈瑞盛,等,2007.2004年秋季长江口海域浮游植物的群落结构和多样性[J].渔业科学进展,28(3):112-119.
- LIU L H, ZUO T, CHEN R S, et al, 2007. Community structure and diversity of phytoplankton in the estuary of Yangtse River in autumn[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 28(3): 112-119.
- 刘志勇,陈杨航,杨毕铨,等,2020.诏安湾及其邻近海域浮游植物群落结构与环境因子的关系[J].应用海洋学学报,39(3):359-367.
- LIU Z Y, CHEN Y H, YANG B C, et al, 2020. Community structure of phytoplankton in Zhao'an Bay and its adjacent waters and environmental factors[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 39(3): 359-367.
- 孙军,宋书群,乐凤凤,等,2007.2004年冬季南海北部浮游植物[J].海洋学报,29(5):132-145.
- SUN J, SONG S Q, LE F F, et al, 2007. Phytoplankton in northern South China Sea in the winter of 2004[J]. *Haiyang Xuebao*, 29(5): 132-145.
- 孙丽娜,张杰,孟俊敏,等,2022.基于遥感的南海北部中尺度涡对内孤立波传播的影响[J].海洋学报,44(7):137-144.
- SUN L N, ZHANG J, MENG J M, et al, 2022. Influence of mesoscale eddy on internal solitary wave propagation in the north-

- ern South China Sea based on remote sensing[J]. *Haiyang Xuebao*, 44(7): 137-144.
- 薛冰, 孙军, 李婷婷, 2016. 2014年夏季南海北部浮游植物群落结构[J]. *海洋学报*, 38(4): 54-65. XUE B, SUN J, LI T T, 2016. Phytoplankton community structure of northern South China Sea in summer of 2014[J]. *Haiyang Xuebao*, 38(4): 54-65.
- 郑全安, 谢玲玲, 郑志文, 等, 2017. 南海中尺度涡研究进展[J]. *海洋科学进展*, 35(2): 131-158. ZHENG Q A, XIE L L, ZHENG Z W, et al, 2017. Progress in research of mesoscale eddies in the South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 35(2): 131-158.
- 钟超, 肖武鹏, 黄邦钦, 2013. 中国南海西部浮游植物对中尺度涡的响应[J]. *海洋科学进展*, 31(2): 213-220. ZHONG C, XIAO W P, HUANG B Q, 2013. The response of phytoplankton to mesoscale eddies in western South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 31(2): 213-220.
- ANDERSON D M, CEMBELLA A D, HALLEGRAEFF G M, 2012. Progress in understanding harmful algal blooms: paradigm shifts and new technologies for research, monitoring, and management[J]. *Annual Review of Marine Science*, 4(1): 143-176.
- BEHRENFELD M J, RANDERSON J T, MCCLAIN C R, et al, 2001. Biospheric primary production during an ENSO transition[J]. *Science*, 291(5513): 2594-2597.
- BEHRENFELD M J, O'MALLEY R T, SIEGEL D A, et al, 2006. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity[J]. *Nature*, 444(7120): 752-755.
- BOYCE D G, LEWIS M R, WORM B, 2010. Global phytoplankton decline over the past century[J]. *Nature*, 466(7306): 591-596.
- CAVALCANTI L F, CUTRIM M V J, LOURENÇO C B, et al, 2020. Patterns of phytoplankton structure in response to environmental gradients in a macrotidal estuary of the Equatorial Margin (Atlantic Coast, Brazil)[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 245: 106969.
- CONOVER W J, 1999. *Practical nonparametric statistics*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons.
- FIELD C B, BEHRENFELD M J, RANDERSON J T, et al, 1998. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components[J]. *Science*, 281(5374): 237-240.
- GUI J, WEI Y Q, SUN J, et al, 2020. Summer phytoplankton assemblages and carbon biomass in the northern South China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 210: 104276.
- GUSTAAF M H, 2010. Ocean climate change, phytoplankton community responses, and harmful algal blooms: a formidable predictive challenge[J]. *Journal of Phycology*, 46(2): 220-235.
- HU J Y, KAWAMURA H, HONG H S, et al, 2000. A review on the currents in the South China Sea: seasonal circulation, South China Sea warm current and Kuroshio intrusion[J]. *Journal of Oceanography*, 56: 607-624.
- JIA Y, CHASSIGNET E P, 2011. Seasonal variation of eddy shedding from the Kuroshio intrusion in the Luzon Strait[J]. *Journal of Oceanography*, 67(5): 601-611.
- LI Y X, YANG S M, YAN Y T, 2022. Characteristics of phytoplankton assemblages in the central South China Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 174: 113189.
- MAO Y J, LI X Q, ZHANG G C, et al, 2021. Sinking rate and community structures of autumn phytoplankton responses to mesoscale physical processes in the western South China Sea[J]. *Frontiers in Microbiology*, 12: 777473.
- MI S Y, YEJIN K, YUBEEN J, et al, 2020. Weak response of biological productivity and community structure of phytoplankton to mesoscale eddies in the oligotrophic Philippine Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125: 12.
- PIELOU E C, 1969. *An introduction to mathematical ecology*[M]. New York: Wiley InterScience.
- SHANNON C E, WEAVER W, WIENER N, 1950. The mathematical theory of communication[J]. *Physics Today*, 3(9): 31-32.
- SMAYDA T J, 1997. Harmful algal blooms: their ecophysiology and general relevance to phytoplankton blooms in the sea[J]. *Limnology and Oceanography*, 42(2): 1137-1153.
- SPEARMAN C, 1904. The proof and measurement of association between two things[J]. *The American Journal of Psy-*

chology, 15: 72-101.

STOECKER D K, CAPUZZO J M, 1990. Predation on protozoa: its importance to zooplankton[J]. *Journal of Plankton Research*, 12(5): 891-908.

WU M L, WANG Y S, WANG Y T, et al, 2017. Scenarios of nutrient alterations and responses of phytoplankton in a changing Daya Bay, South China Sea[J]. *Journal of Marine Systems*, 165: 1-12.

ZAR J H, 2005. *Biostatistical analysis*[M]. New York: Pearson Education.

Response of Phytoplankton Communities to the Physical Processes of Mesoscale Eddy in the Northern South China Sea in Summer

FENG Youfei¹, LI Jiakuan², YANG Shimin¹

(1. *College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;*

2. *Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

Abstract: This paper aims to study the response of phytoplankton communities in the northern South China Sea to mesoscale warm eddies. Phytoplankton water samples were collected in the 19 stations during summer cruise in 2021, and a series of analyses were conducted on the phytoplankton abundance, diversity index, evenness index, etc. A total of 307 species of phytoplankton were identified in 3 phyla and 82 genera. The results show that dinoflagellates and diatoms are the main phytoplankton groups in this area, with 176 and 129 species respectively. The main dominant species are *Thalassionema nitzschioides*, *Nitzschia* spp., *Gyrodinium* spp. and *Scrippsiella* spp.. The depths of chlorophyll maximum in the eddy center are deeper than those in the edge region, and the nutrient concentrations show a similar distribution pattern. The abundance of phytoplankton in the central region is lower than that in the marginal region, suggesting a significant effect of the physical processes of mesoscale eddy on phytoplankton community structure. The Spearman correlation analysis showed that the diatom cell abundance began to decrease with the increase of temperature in the central region of the warm eddy, and the diatom abundance in the central region is lower than that in the marginal region. In contrast, dinoflagellates have a higher cell abundance in the central region than in the marginal region. The abundance of *Thalassionema nitzschioides* and *Nitzschia* spp. in the warm eddy center region is lower than that in the marginal region, whereas the abundance of *Gyrodinium* spp. and *Scrippsiella* spp. exhibits the opposite trend. The analysis of community characteristic index of warm eddy region suggested that species diversity decreased significantly from marginal region to central region, and species distribution tended to be uniform. This study provides basic data for future exploration of phytoplankton response to mesoscale eddy.

Keywords: the northern South China Sea; mesoscale warm eddy; phytoplankton; community structure; environmental factors

Received: March 6, 2023

附录 A 2021 年夏季南海北部中尺度涡海域浮游植物种类

序号	物种	拉丁名	序号	物种	拉丁名
硅藻门 Bacillariophyta					
1	短柄曲壳藻	<i>Achnanthes brevipes</i> Agardh	25	平滑角毛藻	<i>Chaetoceros laevis</i> Leuduger-Fortmorel
2	爱氏辐环藻辣氏变种	<i>Actinocyclus ehrenbergii</i> v. <i>ralfsii</i>	26	劳氏角毛藻	<i>Chaetoceros lorenzianus</i> Grunow
3	八幅辐环藻	<i>Actinocyclus octonarius</i> Ehrenberg	27	短叉角毛藻	<i>Chaetoceros messanensis</i> Castracane
4	六角辐桐藻	<i>Actinoptychus hexagonus</i> Grunow in Schmidt	28	海洋角毛藻	<i>Chaetoceros pelagicus</i> Cleve
5	南方星芒藻	<i>Asterolampra marylandica</i> Ehrenberg	29	后垂角毛藻	<i>Chaetoceros pendulus</i> Karsten
6	大星芒藻	<i>Asterolampra vanheurckii</i> Brun	30	秘鲁角毛藻	<i>Chaetoceros peruvianus</i> Brightwell
7	近圆星脐藻	<i>Asteromphalus heptactis</i>	31	拟金色角毛藻	<i>Chaetoceros pseudoaurivillii</i> Ikari
8	粗星脐藻	<i>Asteromphalus rubustus</i> Castracane	32	拟旋链角毛藻	<i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i> Mangin
9	派格棍形藻	<i>Bacillaria paxillifera</i>	33	根状角毛藻	<i>Chaetoceros radicans</i> Schütt
10	丛毛辐杆藻	<i>Bacteriastrum comosum</i> Pavillard	34	舞姿角毛藻	<i>Chaetoceros saltans</i> Cleve
11	丛毛辐杆藻刚刺变种	<i>Bacteriastrum comosum</i> var. <i>hispidula</i>	35	角毛藻	<i>Chaetoceros</i> spp.
12	优美辐杆藻	<i>Bacteriastrum delicatulum</i> Cleve	36	短尖圆筛藻平顶变种	<i>Coscinodiscus apiculatus</i> var. <i>ambigus</i> Grunow
13	长辐杆藻	<i>Bacteriastrum elongatum</i> Cleve	37	星脐圆筛藻	<i>Coscinodiscus asteromphalus</i> Ehrenberg
14	透明辐杆藻	<i>Bacteriastrum hyalinum</i> Lauder	38	具翼漂流藻	<i>Coscinodiscus bipartitus</i> Rattray
15	小辐杆藻	<i>Bacteriastrum minus</i> Karsten	39	中心圆筛藻	<i>Coscinodiscus centralis</i> Ehrenberg
16	菱面盒形藻	<i>Biddulphia rhombus</i>	40	弓束圆筛藻	<i>Coscinodiscus curvatus</i> Grunow ex Schmidt
17	舟形鞍链藻	<i>Campylosira cymbelliformis</i>	41	明壁圆筛藻	<i>Coscinodiscus debilis</i> Grove
18	双角角管藻	<i>Cerataulina bicornis</i>	42	减小圆筛藻	<i>Coscinodiscus decrescens</i> Grunow
19	大洋角管藻	<i>Cerataulina pelagica</i>	43	畸形圆筛藻	<i>Coscinodiscus deformatus</i> Mann
20	窄隙角毛藻	<i>Chaetoceros affinis</i> Lauder	44	巨圆筛藻	<i>Coscinodiscus gigas</i> Ehrenberg
21	桥联角毛藻	<i>Chaetoceros anastomosans</i> Grunow	45	格氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus granii</i> Grough
22	大西洋角毛藻	<i>Chaetoceros atlanticus</i> Cleve	46	强氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus janischii</i> A. Schmidt
23	大西洋角毛藻那不勒斯变种	<i>Chaetoceros atlanticus</i> var. <i>neapolitana</i>	47	琼氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus jonesianus</i>
24	金色角毛藻	<i>Chaetoceros aurivillii</i> Cleve	48	具边线形圆筛藻	<i>Coscinodiscus marginato-lineatus</i> Schmidt
			49	高圆筛藻	<i>Coscinodiscus nobilis</i> Grunow

续表

序号	物种	拉丁名	序号	物种	拉丁名
50	短孢角毛藻	<i>Chaetoceros brevis</i> Schütt	79	虹彩圆筛藻	<i>Coscinodiscus oculus-iridis</i> Ehrenberg
51	卡氏角毛藻	<i>Chaetoceros castracanei</i> Karsten	80	辐射列圆筛藻	<i>Coscinodiscus radiatus</i> Ehrenberg
52	扁面角毛藻	<i>Chaetoceros compressus</i> Lauder	81	圆筛藻	<i>Coscinodiscus</i> spp.
53	丹麦角毛藻	<i>Chaetoceros danicus</i> Cleve	82	细弱圆筛藻	<i>Coscinodiscus subtilis</i> Ehrenberg
54	并基角毛藻单胞变型	<i>Chaetoceros decipiens</i> f. <i>singularis</i> Gran	83	威利圆筛藻	<i>Coscinodiscus walesii</i> Gran & Angst
55	双孢角毛藻	<i>Chaetoceros didymus</i> Ehrenberg	84	条纹小环藻	<i>Cyclotella striata</i>
56	异角毛藻	<i>Chaetoceros diversus</i> Cleve	85	新月菱形藻	<i>Cylindrotheca closterium</i> Reimann et Levin
57	粗股角毛藻	<i>Chaetoceros femur</i> Schütt	86	地中海细柱藻	<i>Dactyliosolen mediterraneus</i>
58	飞燕角毛藻	<i>Chaetoceros hirundinellus</i> Qian	87	矮小短棘藻	<i>Detonula pumila</i>
59	唐氏藻	<i>Donkinia</i> sp.	88	钝根管藻半刺变型	<i>Rhizosolenia hebetata</i> f. <i>semispina</i>
60	浮动弯角藻	<i>Eucampia zodiacus</i> Ehrenberg	89	透明根管藻	<i>Rhizosolenia hyalina</i> Ostenfeled et Schmidt
61	柔弱井字藻	<i>Eunotogramma debile</i> Grunow in Van Heurck	90	覆瓦根管藻细径变种	<i>Rhizosolenia imbricata</i> var. <i>schrubsolei</i>
62	脆杆藻	<i>Fragilaria</i> spp.	91	粗根管藻	<i>Rhizosolenia robusta</i> Norman ex Ralfs
63	鼓形拟脆杆藻	<i>Fragilariopsis doliolus</i> (Wallich) Medlin & Sims	92	刚毛根管藻	<i>Rhizosolenia setigera</i> Brightwell
64	热带环刺藻	<i>Gossleriella tropica</i> Schütt	93	中华根管藻	<i>Rhizosolenia sinensis</i> Qian
65	圆柱几内亚藻	<i>Guinardia cylindrus</i>	94	笔尖形根管藻	<i>Rhizosolenia styliformis</i> Brightwell
66	薄壁几内亚藻	<i>Guinardia flaccida</i>	95	笔尖形根管藻粗径变种	<i>Rhizosolenia styliformis</i> var. <i>latissima</i> Brightwell
67	斯氏几内亚藻	<i>Guinardia striata</i>	96	中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i>
68	波罗的海布纹藻	<i>Gyrosigma balticum</i>	97	热带骨条藻	<i>Skeletonema tropicum</i> Cleve
69	楔形半盘藻	<i>Hemidiscus cuneiformis</i>	98	双菱藻	<i>Surirella</i> sp.
70	细弱明盘藻	<i>Hyalodiscus subtilis</i> Bailey	99	针杆藻	<i>Synedra</i> spp.
71	环纹娄氏藻	<i>Lauderia annulata</i> Cleve	100	佛氏海线藻	<i>Thalassionema frauenfeldii</i>
72	丹麦细柱藻	<i>Leptocylindrus danicus</i> Cleve	101	菱形海线藻	<i>Thalassionema nitzschioides</i> Grunow
73	短楔形藻	<i>Licmophora abbreviata</i> Agardh	102	离心列海链藻	<i>Thalassiosira eccentrica</i>
74	嘴状胸隔藻	<i>Mastogloia rostrata</i>	103	细长列海链藻	<i>Thalassiosira leptopus</i>
75	膜状缪氏藻	<i>Meuniera membranacea</i>	104	海链藻	<i>Thalassiosira</i> spp.
76	舟形藻	<i>Navicula</i> spp.	105	长海毛藻	<i>Thalassiothrix longissima</i> Cleve et Grunow
77	长菱形藻	<i>Nitzschia longissima</i>	106	细纹三角藻	<i>Triceratium affine</i> Grunow
78	洛氏菱形藻	<i>Nitzschia lorenziana</i> Grunow	107	蜂窝三角藻	<i>Triceratium favus</i> Ehrenberg

续表

序号	物种	拉丁名	序号	物种	拉丁名
108	琴式菱形藻	<i>Nitzschia panduriformis</i> Gregory	142	球状拟翼藻	<i>Diplopsalopsis globula</i> Abé
109	菱形藻	<i>Nitzschia</i> spp.	143	定组亚历山大藻	<i>Alexandrium cohorticula</i>
110	中华齿状藻	<i>Odontella sinensis</i>	144	扁形亚历山大藻	<i>Alexandrium compressum</i>
111	具槽帕拉藻	<i>Paralia sulcata</i>	145	凹形亚历山大藻	<i>Alexandrium concavum</i>
112	羽纹藻	<i>Pinnularia</i> spp.	146	微小亚历山大藻	<i>Alexandrium minutum</i> Halim
113	美丽漂流藻	<i>Planktoniella formosa</i>	147	亚历山大藻	<i>Alexandrium</i> sp.
114	端尖曲舟藻	<i>Pleurosigma acutum</i> Norman	148	塔马亚历山大藻	<i>Alexandrium tamarense</i>
115	海洋曲舟藻	<i>Pleurosigma pelagicum</i> Peragallo	149	二齿双管藻	<i>Amphisolenia bidentata</i> Schröder
116	曲舟藻	<i>Pleurosigma</i> spp.	150	缩尾双管藻	<i>Amphisolenia brevicauda</i> Kofoid
117	翼鼻状藻	<i>Proboscia alata</i>	151	二球双管藻	<i>Amphisolenia globifera</i> Stein
118	柔弱伪菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	152	膨胀双管藻	<i>Amphisolenia inflata</i> Murray & Whitting
119	尖刺伪菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	153	微刺双管藻	<i>Amphisolenia spinulosa</i> Kofoid
120	距端假管藻	<i>Pseudosolenia calcar-avis</i>	154	美丽囊甲藻	<i>Blepharocysta splendor-maris</i>
121	范氏圆箱藻	<i>Pyxidicual weyprechtii</i> Grunow	155	多刺角甲藻	<i>Ceratocorys horrida</i> Stein
122	翼根管藻印度变型	<i>Rhizosolenia alata</i> f. <i>indica</i>	156	比利时伞甲藻	<i>Corythodinium belgicae</i>
123	伯氏根管藻	<i>Rhizosolenia bergonii</i> Peragallo	157	龙骨伞甲藻	<i>Corythodinium carinatum</i>
124	卡氏根管藻	<i>Rhizosolenia castracanei</i> Peragallo	158	扁形伞甲藻	<i>Corythodinium compressum</i>
125	克菜根管藻	<i>Rhizosolenia clevei</i> Ostfeld	159	缢缩伞甲藻	<i>Corythodinium constrictum</i>
126	螺端根管藻	<i>Rhizosolenia cochlea</i> Brun	160	弯尾伞甲藻	<i>Corythodinium curvicaudatum</i>
127	厚刺根管藻	<i>Rhizosolenia crassispina</i> Schröder	161	佛利伞甲藻	<i>Corythodinium frenguelli</i>
128	翼根管藻纤细变型	<i>Rhizosolenia gracillima</i> Cleve	162	宽阔伞甲藻	<i>Corythodinium latum</i>
甲藻门 Dinophyta			163	披针新角藻	<i>Neoceratium belone</i>
129	网状伞甲藻	<i>Corythodinium reticulatum</i>	164	二裂新角藻	<i>Neoceratium biceps</i>
130	方格伞甲藻	<i>Corythodinium tessellatum</i>	165	毕氏新角藻	<i>Neoceratium bigelowii</i>
131	阿曼达鳍藻	<i>Dinophysis amandula</i>	166	波氏新角藻	<i>Neoceratium boehmii</i>
132	光亮鳍藻	<i>Dinophysis argus</i>	167	蜡台新角藻	<i>Neoceratium candelabrum</i>
133	头状鳍藻	<i>Dinophysis capitulata</i> Balech	168	蜡台新角藻宽扁变种	<i>Neoceratium candelabrum</i>
134	环状鳍藻	<i>Dinophysis circumscuta</i>	169	歧分新角藻	<i>Neoceratium carriense</i>
135	蜂窝鳍藻	<i>Dinophysis favus</i>	170	反转新角藻	<i>Neoceratium contrarium</i>
136	矛形鳍藻	<i>Dinophysis hastata</i> Stein	171	偏转新角藻	<i>Neoceratium deflexum</i>
137	极小鳍藻	<i>Dinophysis pusilla</i> Jørgensen	172	细齿新角藻	<i>Neoceratium denticulatum</i>
138	网状鳍藻	<i>Dinophysis reticulata</i> Gaarder	173	埃氏新角藻	<i>Neoceratium ehrenbergii</i>
139	圆鳍藻	<i>Dinophysis rotundata</i>	174	奇长新角藻	<i>Neoceratium extensum</i>
140	透镜翼藻	<i>Diplopsalis lenticula</i> Bergh	175	镰状新角藻	<i>Neoceratium falcatum</i>
141	蓬勃拟翼藻	<i>Diplopsalopsis bomba</i>	176	叉状新角藻	<i>Neoceratium furca</i>

续表

序号	物种	拉丁名	序号	物种	拉丁名
177	轮状拟翼藻	<i>Diplopsalopsis orbicularis</i>	207	叉状新角藻矮胖变种	<i>Neoceratium furca</i> var. <i>eugrammum</i>
178	线纹长甲藻	<i>Dolichodinium lineatum</i>	208	叉状新角藻细小变种	<i>Neoceratium furca</i> var. <i>nannofurca</i>
179	球形屋甲藻	<i>Goniodoma sphaericum</i>	209	曲肘新角藻	<i>Neoceratium geniculatum</i>
180	井脊膝沟藻	<i>Gonyaulax birostris</i> Stein	210	科氏新角藻	<i>Neoceratium kofoidii</i>
181	短纵沟膝沟藻	<i>Gonyaulax brevisulcata</i> Dangeard	211	线纹新角藻	<i>Neoceratium lineatum</i>
182	双刺膝沟藻	<i>Gonyaulax diegensis</i> Kofoid	212	长咀新角藻	<i>Neoceratium longirostrum</i>
183	具指膝沟藻	<i>Gonyaulax digitale</i>	213	微小新角藻	<i>Neoceratium minutum</i>
184	脆弱膝沟藻	<i>Gonyaulax fragilis</i>	214	羽状新角藻	<i>Neoceratium pennatum</i>
185	透明膝沟藻	<i>Gonyaulax hyalina</i> Ostensfeld & Schmidt	215	五角新角藻	<i>Neoceratium pentagonum</i>
186	科氏膝沟藻	<i>Gonyaulax kofoidii</i> Pavillard	216	施氏新角藻	<i>Neoceratium schrankii</i>
187	单刺膝沟藻	<i>Gonyaulax monospina</i> Rampi	217	舒氏新角藻	<i>Neoceratium schuettii</i>
188	椭圆膝沟藻	<i>Gonyaulax ovalis</i> Schiller	218	针状新角藻	<i>Neoceratium seta</i>
189	太平洋膝沟藻	<i>Gonyaulax pacifica</i> Kofoid	219	刚毛新角藻	<i>Neoceratium setaceum</i>
190	多纹膝沟藻	<i>Gonyaulax polygramma</i> Stein	220	苏门答腊新角藻	<i>Neoceratium sumatranum</i>
191	斯克里普膝沟藻	<i>Gonyaulax scrippsae</i> Kofoid	221	对称新角藻直变种	<i>Neoceratium symmetricum</i> var. <i>orthoceras</i>
192	球状膝沟藻	<i>Gonyaulax sphaeroidea</i> Kofoid	222	圆柱新角藻	<i>Neoceratium teres</i>
193	具刺膝沟藻	<i>Gonyaulax spinifera</i>	223	波状新角藻	<i>Neoceratium trichoceros</i>
194	条纹膝沟藻	<i>Gonyaulax striata</i> Mangin	224	拟三角新角藻	<i>Neoceratium tripodioides</i>
195	钻形膝沟藻	<i>Gonyaulax subulata</i> Kofoid & Michener	225	兀鹰新角藻	<i>Neoceratium vultur</i>
196	春膝沟藻	<i>Gonyaulax verior</i> Sournia	226	夜光藻	<i>Noctiluca scintillans</i>
197	偏心倒转藻	<i>Gotoius excentricus</i>	227	异孔鸟尾藻	<i>Ornithocercus heteroporus</i> Kofoid
198	多米尼环沟藻	<i>Gyrodinium dominans</i> Hulbert	228	大鸟尾藻	<i>Ornithocercus magnificus</i> Stein
199	环沟藻	<i>Gyrodinium</i> sp.	229	方鸟尾藻原变种	<i>Ornithocercus quadratus</i>
200	勃氏异甲藻	<i>Heterodinium blackmanii</i>	230	中距鸟尾藻	<i>Ornithocercus thumii</i>
201	双叶帆鳍藻	<i>Histioneis biremis</i> Stein	231	查林尖甲藻	<i>Oxytoxum challengeroides</i> Kofoid
202	锥形帆鳍藻	<i>Histioneis para</i> Murray & Whitting	232	厚尖甲藻	<i>Oxytoxum crassum</i> Schiller
203	米氏凯伦藻	<i>Karenia mikimotoi</i> Hansen & Moestrup	233	弯曲尖甲藻	<i>Oxytoxum curvatum</i>
204	多边舌甲藻	<i>Lingulodinium polyedrum</i>	234	扁形尖甲藻	<i>Oxytoxum depressum</i> Schiller
205	泰勒瘦甲藻	<i>Lissodinium taylorii</i> Carbonell-Moore	235	延长尖甲藻	<i>Oxytoxum elongatum</i> Wood
206	宽角尖甲藻	<i>Oxytoxum laticeps</i> Schiller	236	扁形原多甲藻	<i>Protoperidinium depressum</i>

续表

序号	物种	拉丁名	序号	物种	拉丁名
237	长角尖甲藻	<i>Oxytoxum longiceps</i> Schiller	269	无香原多甲藻	<i>Protopteridinium exaggeratum</i> Balech
238	地中海尖甲藻	<i>Oxytoxum mediterraneum</i> Schiller	270	球形原多甲藻	<i>Protopteridinium globulus</i>
239	米尔纳尖甲藻	<i>Oxytoxum milneri</i> Murray & Whitting	271	格氏原多甲藻	<i>Protopteridinium granii</i>
240	帽状尖甲藻	<i>Oxytoxum mitra</i> Stein	272	异轮原多甲藻	<i>Protopteridinium heterocanthum</i>
241	短尖尖甲藻	<i>Oxytoxum mucronatum</i> Hope	273	河滨原多甲藻	<i>Protopteridinium hirobis</i>
242	小型尖甲藻	<i>Oxytoxum parvum</i> Schiller	274	宽刺原多甲藻	<i>Protopteridinium latispinum</i>
243	辐射尖甲藻	<i>Oxytoxum radiosum</i> Rampi	275	宽阔原多甲藻	<i>Protopteridinium latissimum</i>
244	节杖尖甲藻	<i>Oxytoxum sceptrum</i>	276	地中海原多甲藻	<i>Protopteridinium mediterraneum</i>
245	刺尖甲藻	<i>Oxytoxum scolopax</i> Stein	277	甜瓜原多甲藻	<i>Protopteridinium melo</i>
246	球体尖甲藻	<i>Oxytoxum sphaeroideum</i> Stein	278	卵形原多甲藻	<i>Protopteridinium ovum</i>
247	钻形尖甲藻	<i>Oxytoxum subulatum</i> Kofoid	279	华丽原多甲藻	<i>Protopteridinium paradoxum</i>
248	旋风尖甲藻	<i>Oxytoxum turbo</i> Kofoid	280	稀疏原多甲藻	<i>Protopteridinium parcum</i>
249	易变尖甲藻	<i>Oxytoxum variabile</i> Schiller	281	小型原多甲藻	<i>Protopteridinium parvum</i> Abé
250	单围古秃藻	<i>Palaeophalacroma uncinatum</i> Schiller	282	灰甲原多甲藻	<i>Protopteridinium pellucidum</i>
251	四齿多甲藻	<i>Peridinium quadridentatum</i>	283	五角原多甲藻	<i>Protopteridinium pentagonum</i>
252	二足甲藻网状变种	<i>Podolampas bipes</i> var. <i>reticulata</i>	284	囊状原多甲藻	<i>Protopteridinium pouchetii</i>
253	掌状足甲藻	<i>Podolampas palmipes</i> Stein	285	点刺原多甲藻	<i>Protopteridinium punctulatum</i>
254	单刺足甲藻	<i>Podolampas spinifera</i> Okamura	286	直状原多甲藻	<i>Protopteridinium rectum</i>
255	海洋原夜光藻	<i>Pronoctiluca pelagica</i> Fabre-Domerqne	287	席勒原多甲藻	<i>Protopteridinium schilleri</i>
256	具齿原甲藻	<i>Prorocentrum dentatum</i> Stein	288	螺旋原多甲藻	<i>Protopteridinium spirale</i>
257	闪光原甲藻	<i>Prorocentrum micans</i> Ehrenberg	289	斯氏原多甲藻	<i>Protopteridinium steinii</i>
258	反曲原甲藻	<i>Prorocentrum sigmoides</i> Böhm	290	赛裸原多甲藻	<i>Protopteridinium subinerve</i>
259	三鳍原甲藻	<i>Prorocentrum triestinum</i> Schiller	291	亚梨形原多甲藻	<i>Protopteridinium subpyriforme</i>
260	无色原多甲藻	<i>Protopteridinium achromaticum</i>	292	威斯纳原多甲藻	<i>Protopteridinium wiesneri</i>
261	双锥原多甲藻	<i>Protopteridinium biconicum</i>	293	帽状苏提藻	<i>Schuetiella mitra</i>
262	网刺原多甲藻	<i>Protopteridinium brochii</i>	294	锥状斯克里普藻	<i>Scripsiella trochoidea</i>
263	樱桃原多甲藻	<i>Protopteridinium cerasus</i>	295	乔利夫螺沟藻	<i>Spiraulax jolliffei</i>
264	窄角原多甲藻	<i>Protopteridinium claudicans</i>	296	双角三管藻	<i>Triposolenia bicornis</i> Kofoid
265	双曲原多甲藻	<i>Protopteridinium conicoides</i>	金藻门 Chrysophyta		
266	锥形原多甲藻	<i>Protopteridinium conicum</i>	297	小等刺硅鞭藻	<i>Dictyocha fibula</i> Ehrenberg
267	达喀尔原多甲藻	<i>Protopteridinium dakariense</i>	298	六等刺硅鞭藻	<i>Dictyocha speculum</i> Ehrenberg
268	公平原多甲藻	<i>Protopteridinium decens</i>			

三亚湾近岸海域浮游甲藻与水环境因子相关性研究

王蒙^{1,2,3,4,5}, 王兴华^{2,5}, 李翔^{1,2,3,4,5}, 赵茜⁶, 李格乐⁷, 王辉⁸, 殷安齐^{1,2,3,4,5*}

1. 海南热带海洋学院热带海洋生物资源利用与保护教育部重点实验室, 海南 三亚 572022;
2. 海南热带海洋学院海南省现代化海洋牧场工程研究中心, 海南 三亚 572022;
3. 海南热带海洋学院海南省热带海洋渔业资源保护与利用重点实验室, 海南 三亚 572022;
4. 海南热带海洋学院海南省近岸海洋生态环境过程与碳汇重点实验室, 海南 三亚 572022;
5. 海南热带海洋学院生态环境学院, 海南 三亚 572022;
6. 中国科学院深海科学与工程研究所, 海南 三亚 572000;
7. 湛江港(集团)股份有限公司, 广东 湛江 524068;
8. 三亚市农业技术推广服务中心, 海南 三亚 572019)

摘要: 为了解三亚湾近岸海域浮游甲藻分布状况及其与水环境因子的关系, 本研究分别于 2022 年枯水期(4 月)、丰水期(7 月)和平水期(11 月)水采了三亚湾近岸海域浮游甲藻样品及水环境样品, 并进行了研究与分析。样品分析结果显示, 三亚湾近岸海域共鉴定出甲藻 5 目 13 科 17 属 50 种, 按类群分类赤潮甲藻可分为 25 种, 其中有毒赤潮甲藻占 13 种; 3 个水期共计优势甲藻 10 种, 其中 9 种为赤潮甲藻, 有毒赤潮甲藻占 5 种; 枯水期、丰水期、平水期第一优势甲藻均为赤潮甲藻, 分别为凯伦藻(*Karenia* sp.)、四齿多甲藻(*Peridinium quadridentatum*)和环状异帽藻(*Heterocapsa circularisquama*); 同一站点不同水期水环境因子波动较小, 空间上无机氮磷营养盐两端站点质量浓度高, 中间站点质量浓度低。Spearman 相关性分析表明, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 及 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 是影响三亚湾近岸海域浮游甲藻群落结构的主要驱动因子。RDA 分析结果显示, 三亚湾近岸海域优势赤潮甲藻分布与水温、盐度、无机氮磷营养盐质量浓度相关性显著。总体而言, 三亚湾近岸海域浮游甲藻尤其是优势赤潮甲藻, 对无机氮磷营养盐响应最为密切。本研究调查结果可作为三亚湾浮游甲藻种类分布统计数据的补充, 并为分析其与水环境因子的相关性、监测该海域甲藻赤潮风险程度提供基础资料。

关键词: 甲藻; 水环境因子; 赤潮; 三亚湾

中图分类号: X55

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2024)04-0709-16

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20230815001

引用格式: 王蒙, 王兴华, 李翔, 等, 2024. 三亚湾近岸海域浮游甲藻与水环境因子相关性研究[J]. 海洋科学进展, 42(4): 709-724. WANG M, WANG X H, LI X, et al, 2024. Correlation between planktonic dinoflagellates and water environmental factors in coastal waters of Sanya Bay[J]. Advances in Marine Science, 42(4): 709-724.

海南岛位于中国南海的西北部, 独特的地理气候条件形成了海南岛丰富的生态旅游资源, 加之推行“打造国际旅游岛”战略, 滨海旅游作为发展最快速的旅游产业已成为海南岛赖以生存的核心产业(孟阳, 2022)。随着滨海旅游产业迅猛发展, 海南岛近岸海域环境不容乐观(王兴华等, 2022)。三亚湾地处海南岛南部沿海, 东起三亚港、西至天涯湾, 总长 22 km, 沿岸形似半个椭圆边线; 湾区包括 1 条天然河流三亚河以及 1 个河流入海口天然港口三亚港。作为我国热带季风气候的海湾代

收稿日期: 2023-08-15 网络首发日期: 2024-07-03

资助项目: 海南热带海洋学院教育教学改革研究项目(RHYjg2023-15)

作者简介: 王蒙(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事环境监测与评价方面研究. E-mail: 1014376206@qq.com

* 通信作者: 殷安齐(1985—), 女, 副教授, 博士, 主要从事海洋浮游生物学方面研究. E-mail: inanqi@yeah.net

(胡筱敏 编辑)

表, 三亚湾季节差异较小, 全年日均温度范围为 25~31 °C, 初级生产力结构受季节性环境指标差异影响不大, 降水及径流导致的河口近岸营养盐质量浓度变化是其主要影响因子(宋星宇等, 2011)。三亚湾是三亚市区六大海湾之一, 是三亚海滨风景区、民用港区与旅游度假区的重要衔接, 近年来受旅游、生活污水排放等人类活动影响, 沙滩疑似泥化黑化(崔振昂等, 2020; 刘文涛等, 2021; 胡梦茜等, 2022; 王艳红等, 2022); 水环境质量均劣于三亚其他海湾, 营养盐质量浓度较高(李巧香等, 2010; 李由明等, 2014; 钟鸿干等, 2014; 骆丽珍等, 2015), 渐显富营养化趋势, 为赤潮生物数量激增、威胁海洋生态环境埋下隐患。

我国近海赤潮生物 148 种, 其中甲藻 71 种, 所占比例达 48%(郭皓, 2004)。2011 年至 2022 年, 我国海域引发赤潮次数最多、面积总计最大的赤潮生物均为甲藻(自然资源部, 2011—2022)。近 10 年, 海南岛近岸海域记录赤潮十几起, 其中甲藻所引发的赤潮占比居多, 肇因种为夜光藻(*Noctiluca scintillans*)、尖顶斯氏藻(*Scrippsiella acuminata*)、反曲原甲藻(*Prorocentrum sigmoides*)、血红哈卡藻(*Akashiwo sanguinea*)以及米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*)(郭皓等, 2015); 2015 年, 夜光藻、尖顶斯氏藻、反曲原甲藻在三亚湾部分海域引发赤潮(殷安齐等, 2019)。甲藻赤潮发生时, 短时间内数量激增, 水体中溶解氧、营养盐等水环境因子随甲藻数量变化而波动, 影响其他海洋生物正常生理活动, 进而改变所在海域生物群落结构(胡国成, 2006)。此外, 有毒赤潮甲藻分泌生物毒素, 导致水体中的鱼虾贝类因中毒而死亡(陈建华, 2013), 甚至沿食物链危害公众健康。

甲藻大多营浮游生活, 少数底栖生活在海洋基底表面或沉积物中以及大型海藻和悬浮颗粒物表面, 且部分也具有一定的浮游生活能力(黄凌风等, 2000, 2001)。三亚湾海域自然资源优渥, 具有甲藻等浮游植物赖以繁衍增殖的天然条件。目前, 鲜见三亚湾浮游甲藻方面的研究, 且有关浮游植物的研究多为网采目标样品, 主要采用网目尺寸为 77 μm 的浅水 III 型浮游生物网(车志伟等, 2014; 程贤松等, 2021; 洪鹏等, 2023), 采样过程中因网目过大漏采部分小体积目标个体的情况时有发生。高月鑫等(2018)调查研究发现长江口北支邻近海域浮游植物丰度偏低, 原因是采用浅水 III 型浮游生物网会遗漏样品中小粒径浮游植物; 张青田等(2017)调查研究发现通过网采、水采两种方法采集得到的浮游植物种类有较大差别, 一些甲藻和非丝状群体藻类更易出现在水采样品中, 水采样品中甲藻等小体积浮游植物细胞丰度和物种较网采样品更多。基于三亚湾水采浮游甲藻的研究较少且为调查水采与网采结果的差异性, 本研究于 2022 年枯水期、丰水期及平水期水采三亚湾近岸海域浮游甲藻样品及水环境样品, 着重分析了三亚湾近岸海域浮游甲藻的时空分布及其与水环境因子的相关性, 为三亚湾近岸海域浮游甲藻研究补充基础资料。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

结合三亚湾海域实际情况, 遵循典型性、代表性原则, 本研究在三亚湾沿岸水深小于 10 m 区域设置 6 个采样站点(图 1): 三亚湾与天涯湾分界处(S1)、观景台处(S2)、12 号停车场附近(S3)、海月广场附近铁桥处(S4)、三亚河入海口右岸三亚港码头处(S5)、半山半岛帆船港右岸(S6)。S1 沿岸为防波堤石块、S2~S4 沿岸为沙滩、S5 沿岸为水泥结构码头、S6 沿岸为淤泥滩。参照《海洋调查规范》(GB/T 12763—2007)(国家海洋标准计量中心, 2007)、《海洋监测规范》(GB 17378—2007)(全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283), 2007)和《近岸海域环境监测技术规范》(HJ 442—2020)(生态环境部, 2020), 于 2022 年枯水期(4 月)、丰水期(7 月)、平水期(11 月)水采浮游甲藻及水环境样品。

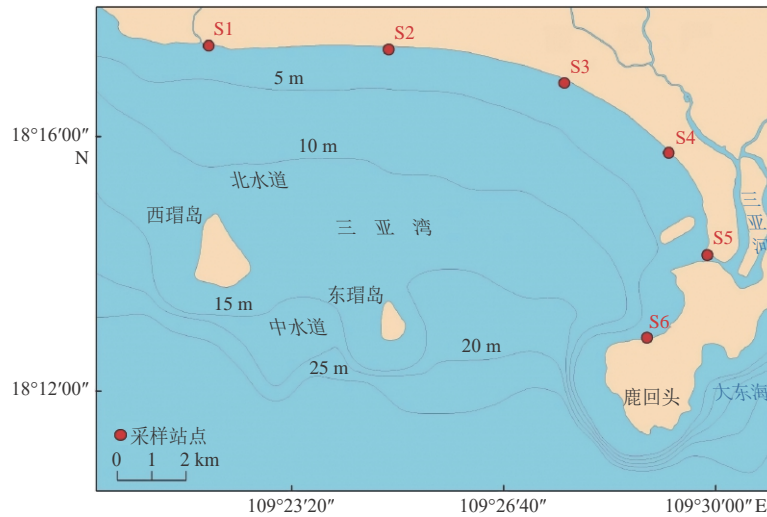


图1 三亚湾近岸海域采样站点

Fig. 1 Sampling sites in coastal waters of Sanya Bay

1.1.1 浮游甲藻样品

水采浮游甲藻样品 1 L, 加入体积分数为 2%~4% 的甲醛溶液, 最终将其体积分数固定至 1%~2%; 静置沉淀、浓缩样品至 10~30 mL; 取沉淀浓缩后的样品 0.05 mL 置于藻类计数框中, 在尼康 ECLIPSE Ni-U 正置显微镜下对甲藻进行种类鉴定和细胞计数。

1.1.2 水环境样品

对采集的水环境样品进行指标测定: 分别使用温度计、盐度计、便携式 pH 计及溶解氧仪对水温(θ)、盐度(S)、酸碱度(pH)及溶解氧(DO)进行现场测定; 对化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)、五日生化需氧量(Five-day Biochemical Oxygen Demand, BOD₅)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)、活性磷酸盐(PO₄³⁻-P)进行实验室测定(表 1)。

表 1 水环境因子测定分析方法

Table 1 Methods for determination and analysis of water environmental factors

水环境因子	测定分析方法
COD	碱性高锰酸钾法
BOD ₅	五日培养法
NH ₄ ⁺ -N	次溴酸盐氧化法
NO ₃ ⁻ -N	锌镉还原法
NO ₂ ⁻ -N	萘乙二胺分光光度法
PO ₄ ³⁻ -P	磷钼蓝分光光度法

1.2 数据分析

1.2.1 优势种确定

用物种优势度指数(Y)确定优势种(Austin, 1968), 计算公式如下:

$$Y = \frac{f_i \times n_i}{N}, \quad (1)$$

式中: f_i 为第 i 个物种在各个站点出现的频率; n_i 为第 i 个物种的个体数; N 为全部物种的个体总数; 以 $Y > 0.02$ 作为优势种。

1.2.2 统计分析

利用 Excel 2019 软件处理统计浮游甲藻及水环境样品基本数据。利用 ArcGIS 10.0 软件、Hiplot Pro 平台分别绘制采样站点图、数据展示图(凌娟等, 2013; Xiao et al, 2022)。利用 SPSS 26.0 软件判断数据是否符合正态分布(骆丽珍等, 2015), 符合正态分布对浮游甲藻与环境因子采用 Pearson 相关性分析, 不符合则采用 Spearman 相关性分析。利用 Canoco 5.0 软件对浮游甲藻优势种作去趋势对应分

析 (Detrended Correspondence Analysis, DCA), 根据 DCA 第一轴长结果选取模型分析浮游甲藻优势种与环境因子的相关性(程贤松等, 2021): 当 DCA 结果大于等于 4.0 时选取典范对应分析 (Canonical Correspondence Analysis, CCA); 当 DCA 结果小于等于 3.0 时选取冗余分析 (Redundancy Analysis, RDA); 当 DCA 结果在 3.0~4.0 范围内 2 种分析模型任选。

2 结果与分析

2.1 浮游甲藻种类组成及丰度

三亚湾近岸海域 3 个水期共鉴定出 5 目 13 科 17 属 50 种浮游甲藻 (图 2), 种类较为丰富, 其中枯水期含 33 种, 平水期含 31 种, 丰水期含 25 种; 鳍藻目 2 种、膝沟藻目 11 种、裸甲藻目 5 种、多甲藻目 27 种、原甲藻目 5 种; 赤潮种 25 种, 其中有毒赤潮种 13 种。枯水期塔玛亚历山大藻 (*Alexandrium tamarense*)、尖顶斯氏藻在各个站点出现的频率最高, 丰水期塔玛亚历山大藻、四齿多甲藻、尖顶斯氏藻在各个站点出现的频率最高, 平水期米氏凯伦藻、环状异帽藻、四齿多甲藻、灰

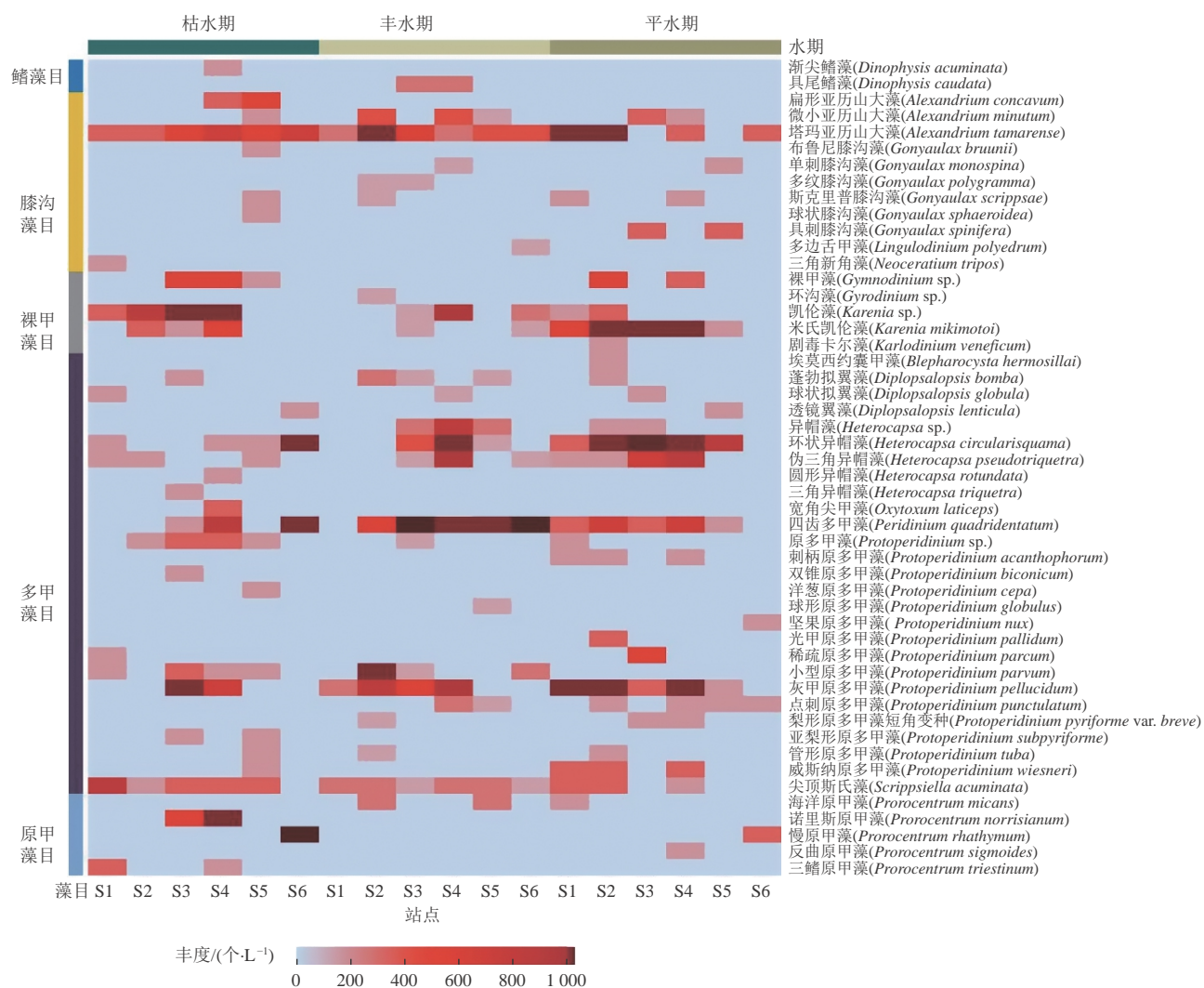


图 2 三亚湾近岸海域浮游甲藻分布及丰度

Fig. 2 Distribution and abundance of planktonic dinoflagellates in the coastal waters of Sanya Bay

甲原多甲藻(*Protoperidinium pellucidum*)在各个站点出现的频率最高; 全年 S4 站点种类最多, S6 站点种类最少。

三亚湾近岸海域 3 个水期浮游甲藻丰度范围为 $37.333 \times 10^3 \sim 39.733 \times 10^3$ 个/L。枯水期与丰水期浮游甲藻丰度相差不大, 平水期浮游甲藻丰度最低; 多甲藻目丰度在各水期均为最高; 枯水期丰度最高的浮游甲藻为慢原甲藻(*Prorocentrum rhathymum*), 丰水期和平水期丰度最高的浮游甲藻均属多甲藻目, 分别为四齿多甲藻和环状异帽藻。全年 S4 站点浮游甲藻丰度最高, S1 站点浮游甲藻丰度最低; S6 站点浮游甲藻丰度变化最大, 在枯水期所有站点中丰度最高, 在平水期所有站点中丰度最低。

2.2 浮游甲藻优势种

以 $Y > 0.02$ 作为优势种, 结果显示, 优势浮游甲藻 10 种, 其中赤潮种 9 种, 有毒赤潮种 5 种(表 2 和图 3)。不同水期甲藻优势种存在差异, 枯水期、丰水期和平水期浮游甲藻优势种分别为 7、6 和 6 种; 枯水期、丰水期、平水期第一优势种分别为凯伦藻、四齿多甲藻、环状异帽藻, 优势度分别为 0.102、0.361 和 0.216。塔玛亚历山大藻、环状异帽藻、尖顶斯氏藻、四齿多甲藻、伪三角异帽藻(*Heterocapsa pseudotriquetra*)及灰甲原多甲藻在 3 个水期均有分布且至少在 2 个水期为优势种。

表 2 优势浮游甲藻优势度及丰度

Table 2 Dominance and abundance of dominant planktonic dinoflagellates

甲藻名称	枯水期		丰水期		平水期	
	优势度	丰度/ ($\times 10^3$ 个·L ⁻¹)	优势度	丰度/ ($\times 10^3$ 个·L ⁻¹)	优势度	丰度/ ($\times 10^3$ 个·L ⁻¹)
塔玛亚历山大藻(<i>Alexandrium tamarense</i>) ^{T R}	0.077	3.000	0.084	3.333	0.051	2.833
环状异帽藻(<i>Heterocapsa circularisquama</i>) ^{T R}	0.009	0.500	0.054	4.267	0.216	9.667
伪三角异帽藻(<i>Heterocapsa pseudotriquetra</i>) ^{T R}	0.057	3.333	0.019	1.467	0.030	1.667
凯伦藻(<i>Karenia</i> sp.) ^R	0.102	6.000	0.017	1.333	0.005	0.500
米氏凯伦藻(<i>Karenia mikimotoi</i>) ^{T R}	0.013	1.000	0.002	0.267	0.149	6.667
四齿多甲藻(<i>Peridinium quadridentatum</i>) ^R	0.056	4.333	0.361	17.200	0.049	2.167
慢原甲藻(<i>Prorocentrum rhathymum</i>) ^{T R}	0.029	6.833	—	—	0.002	0.333
小型原多甲藻(<i>Protoperidinium parvum</i>)	0.023	1.333	0.029	2.267	—	—
灰甲原多甲藻(<i>Protoperidinium pellucidum</i>) ^R	0.017	2.000	0.043	2.533	0.108	4.833
尖顶斯氏藻(<i>Scrippsiella acuminata</i>) ^R	0.043	2.000	0.034	1.333	0.011	0.833

注: ^T 表示有毒种, ^R 表示赤潮种; — 表示未检出。

枯水期丰度最高的是第二优势种慢原甲藻, 其只在 S6 站点检出; 丰水期和平水期丰度最高的均为第一优势种, 分别为四齿多甲藻和环状异帽藻, 其中丰水期四齿多甲藻丰度为所有浮游甲藻任一水期丰度最高值, 达 17.200×10^3 个/L。

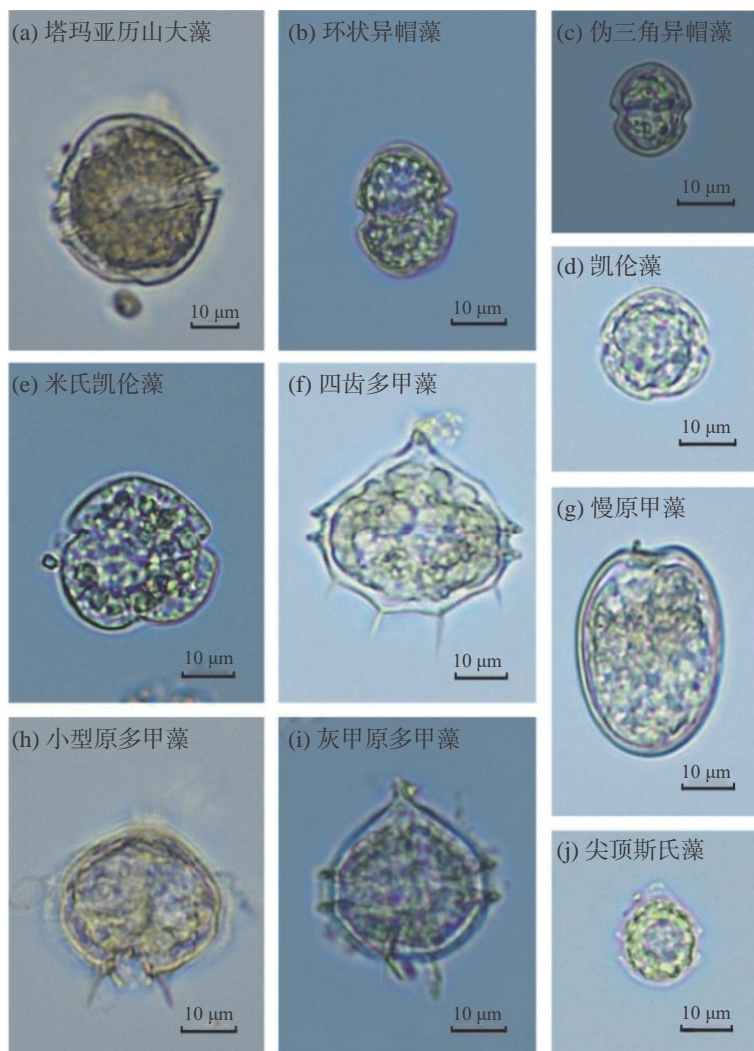


图3 三亚湾近岸海域优势浮游甲藻

Fig. 3 Dominant planktonic dinoflagellates in the coastal waters of Sanya Bay

2.3 浮游甲藻与水环境因子的关系

2.3.1 水环境因子状况

水温(θ)、盐度(S)、酸碱度(pH)、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD_5)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝酸盐氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、亚硝酸盐氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)及活性磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)测定结果显示(图4), θ 在各水期波动较稳定,丰水期中位线高于其他水期,整体最高; S 在枯水期波动很小且中位线比其他水期高3‰以上,平水期整体波动大; pH 在枯水期、平水期较丰水期波动略小,丰水期中位线明显高于其他水期; DO 质量浓度在平水期波动较大,中位线最高,丰水期中位线较低; COD 质量浓度在枯水期波动最大,丰水期波动最小,平水期中位线高于其他水期; BOD_5 质量浓度在各水期波动都较小,丰水期波动最小、中位线最高; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度在丰水期波动较大,枯水期中位线较高; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度在枯水期波动较大、丰水期波动极小,各水期中位线相差不大; $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度在丰水期波动较小,枯水期波动较大、中位线略低; $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度在各水期波动小、中位线接近,数值较稳定。超出正常统计波动范围值的站点为S1或S6, S1站点的枯水期 pH ,丰水期 S 和

平水期 NO_3^- -N质量浓度、pH, 数值都显著高于同期其他站点; S6 站点的 3 个水期 BOD_5 质量浓度, 枯水期 DO、 NH_4^+ -N 和 PO_4^{3-} -N 质量浓度, 以及丰水期、平水期 θ , 都显著高于同期其他站点; S6 站点丰水期 DO 质量浓度则是显著低于同期其他站点。

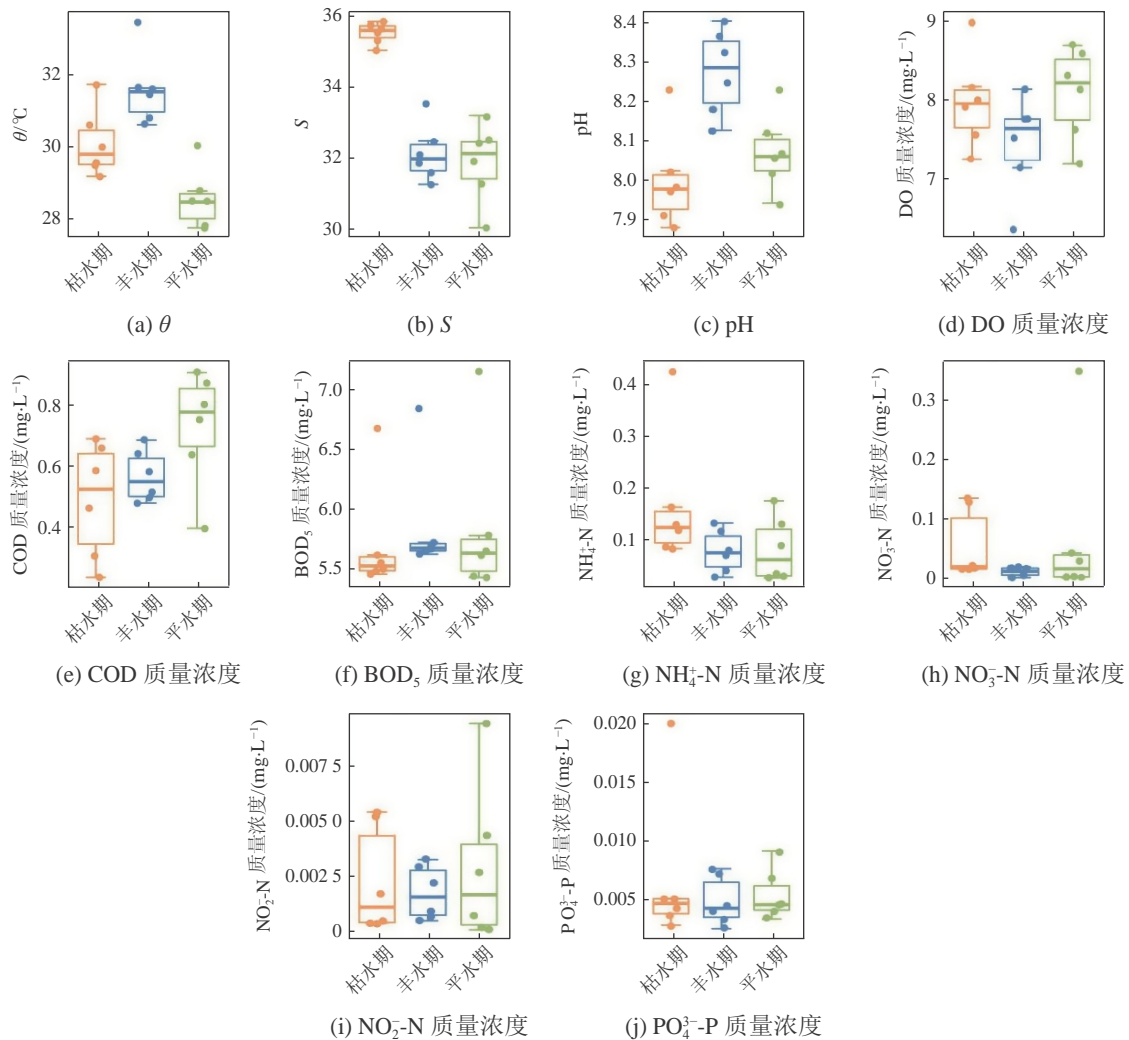
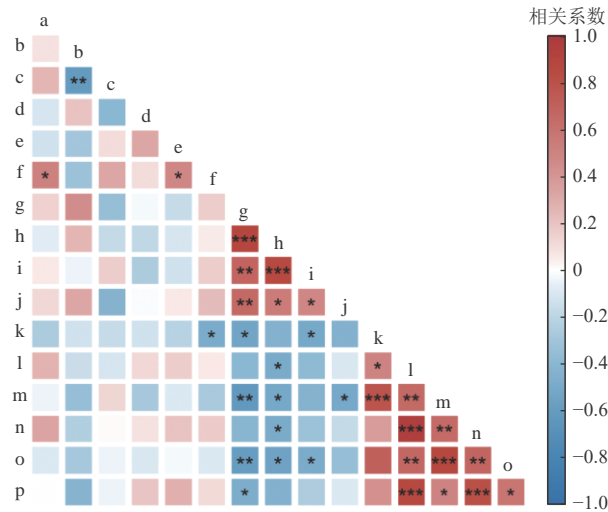


图 4 水环境指标箱线图

Fig. 4 Boxplot of water environmental indicators

2.3.2 甲藻群落及水环境因子相关性

甲藻群落及水环境因子数据不符合正态分布, 选用 Spearman 进行相关性分析(图 5), 分析结果显示, S 与 pH 呈极显著负相关; BOD_5 与 θ 、COD 较为呈显著正相关; 无机氮磷营养盐之间相关性极其显著, NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 及 PO_4^{3-} -P 相互呈显著正相关, 其中 NO_3^- -N 与 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 呈极显著正相关($P < 0.001$)。三亚湾近岸海域甲藻种类数与丰度呈显著正相关, 甲藻种类与丰度可间接反映其生长分布状况。甲藻群落整体受 BOD_5 、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 及 NO_2^- -N 影响较为显著; 赤潮甲藻包括有毒赤潮甲藻种类数及丰度主要与 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 关系密切, 其中种类数与 NH_4^+ -N 呈极显著负相关; PO_4^{3-} -P 仅与赤潮甲藻种类数呈显著负相关。甲藻丰度相较种类数可能受水环境因子外其他因素影响, 其整体包括赤潮甲藻丰度仅与 NO_3^- -N 呈显著负相关, 与其他水环境因子指标未呈现统计学意义上的相关性, 其中有毒赤潮甲藻丰度与 NH_4^+ -N 负相关性更为显著。



注：a代表 θ ；b代表S；c代表pH；d代表DO；e代表COD；f代表 BOD_5 ；g代表 NH_4^+-N ；h代表 $NO_3^- -N$ ；i代表 $NO_2^- -N$ ；j代表 $PO_4^{3-} -P$ ；k代表甲藻总种类；l代表甲藻总丰度；m代表赤潮甲藻种类；n代表赤潮甲藻丰度；o代表有毒赤潮甲藻种类；p代表有毒赤潮甲藻丰度；相关显著性水平*代表 $P < 0.05$ ，**代表 $P < 0.01$ ，***代表 $P < 0.001$ 。

图5 甲藻群落及水环境因子相关性热图

Fig. 5 Heat map of correlation between dinoflagellate community and water environmental factors

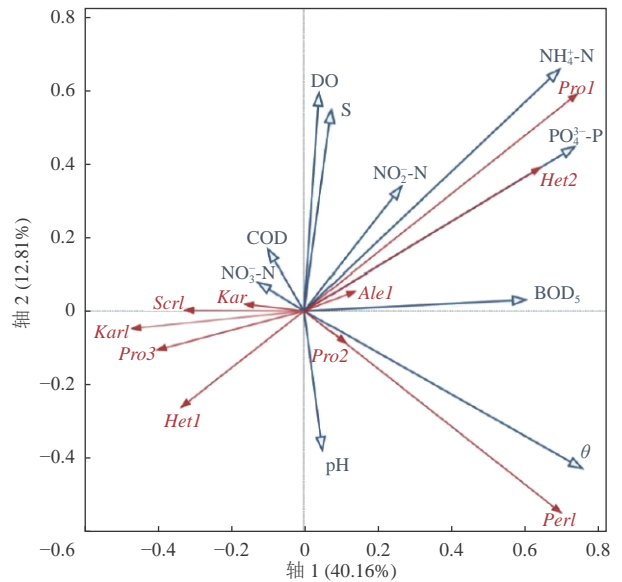
2.3.3 优势浮游甲藻与水环境因子相关性

将三亚湾近岸海域优势浮游甲藻进行DCA，采用RDA对第一轴长数值2.65(小于3)进行排序(图6)，结果显示，甲藻物种集中于第一、三、四象限，与水环境因子的关系大致分为3类：第一类为塔玛亚历山大藻、伪三角异帽藻及慢原甲藻，与S、DO、 BOD_5 、 NH_4^+-N 、 $NO_2^- -N$ 及 $PO_4^{3-} -P$ 呈正相关；第二类为凯伦藻、米氏凯伦藻、灰甲原多甲藻、尖顶斯氏藻及环状异帽藻，与 $NO_3^- -N$ 呈正相关，与S、DO、 BOD_5 、 NH_4^+-N 、 $NO_2^- -N$ 及 $PO_4^{3-} -P$ 呈负相关；第三类为四齿多甲藻、小型原多甲藻，与 θ 、pH、 BOD_5 呈正相关，与S、DO、COD及 $NO_2^- -N$ 呈负相关。

3 讨论

3.1 浮游甲藻群落特征

三亚湾近岸海域3批样品共鉴定出50种甲藻，其中枯水期33种、平水期31种、丰水期25种，丰度范围在 $37.333 \times 10^3 \sim 39.733 \times 10^3$ 个/L，整体上甲藻种类、丰度较为稳定。共鉴定出5



注：Ale1代表塔玛亚历山大藻；Het1代表环状异帽藻；Het2代表伪三角异帽藻；Kar代表凯伦藻；Kar1代表米氏凯伦藻；Per1代表四齿多甲藻；Pro1代表慢原甲藻；Pro2代表小型原多甲藻；Pro3代表灰甲原多甲藻；Scr1代表尖顶斯氏藻。

图6 优势浮游甲藻丰度与水环境因子RDA排序
Fig. 6 The abundance of dominant planktonic dinoflagellates ranked by RDA of water environmental factors

目甲藻,其中多甲藻目种类、丰度占比最高,其次是膝沟藻目。具有赤潮种属性的种类数占甲藻总种类数的50%,但丰度达甲藻总丰度的86%。

从水采时间上看,丰水期甲藻种类最少、丰度最高,枯水期、平水期种类数差距不大,但平水期丰度最低。程贤松等(2021)在2019年三亚湾网采调查发现甲藻种类数春秋两季相差不大,车志伟等(2014)在2011年三亚湾网采调查发现甲藻种类数夏季最少、秋冬季较多,与本调查浮游甲藻种类数的时间变化趋势相似,但两次调查结果的浮游甲藻种类数及丰度与本调查差异较大,推测是因为二者都选用了网采的采样方式,而本调查选用了水采,小体积甲藻种类、细胞丰度较网采样品更多。例如,程贤松等(2021)调查结果显示三角新角藻(*Neoceratium tripos*)为优势种之一,该藻尺寸远大于浅水III型浮游生物网网目尺寸(77 μm),本调查得到的10种优势甲藻尺寸皆小于浅水III型浮游生物网网目尺寸,且三角新角藻只在枯水期检出、丰度较低。

在空间分布上,各站点甲藻种类与丰度基本成正比,三亚湾近岸海域甲藻种类与丰度大体呈现两端站点少、中间站点多的特点。程贤松等(2021)在本调查S2~S4坐标附近调查发现其甲藻种类、丰度呈递增趋势,车志伟等(2014)同样发现在本调查S4坐标附近浮游植物丰度相对较高,二者调查结果与本调查得到的S4站点浮游甲藻种类、丰度相较其他站点优势明显的特征相似。

优势种种类数决定其群落结构的稳定性,种类数越多、优势度越小,群落结构越稳定(Jin et al, 2007)。本研究发现3个水期优势种较多、种类数差距不大,塔玛亚历山大藻、环状异帽藻、尖顶斯氏藻、四齿多甲藻、伪三角异帽藻及灰甲原多甲藻六种甲藻在3个水期均有分布,且每种甲藻至少在2个水期为优势种,对上述6种甲藻在各水期大于0.02的优势度进行统计,发现其平均值仅为0.09,其中有79%的优势度数值低于平均值,说明只有个别优势种优势极为明显,而优势度较小的优势种占比居多,因此三亚湾近岸海域浮游甲藻整体群落结构较为稳定。

3.2 浮游甲藻群落及水环境因子相关性分析

本研究丰水期 θ 、pH显著高于其他水期,S较低,甲藻丰度最高,李志林等(2023)认为海水中碳酸盐的解离平衡与水团混合过程会使pH随S降低而升高,而丰水期受径流影响会使pH降低,本研究pH与S呈显著负相关,其主要原因可能是受碳酸盐解离平衡与水团混合等过程影响,三亚河径流对三亚湾整体pH的影响较小;石鑫等(2019a, 2019b)认为 θ 升高会导致植物光合作用吸收 CO_2 能力增强从而pH升高,浮游植物生物量越高,pH越高,本研究丰水期 θ 升高加强了植物光合作用并间接提高了以甲藻为代表的浮游植物生物量从而导致pH升高。本研究COD与 BOD_5 呈显著正相关,但平水期COD质量浓度显著高于其他水期, BOD_5 质量浓度整体反而偏低,其主要原因是平水期 θ 降低,以甲藻为代表的浮游生物丰度减少、活性降低,生化作用减弱。 BOD_5 与微生物的活性和增长速率有关(金媛娟, 2012),本研究 BOD_5 与 θ 呈显著正相关,因此丰水期 BOD_5 质量浓度偏高且波动最小可能是因为一定程度的 θ 升高有利于提高甲藻等浮游生物丰度及活性,体现在丰水期 BOD_5 质量浓度较高;而甲藻种类与 BOD_5 呈显著负相关,主要原因是枯水期、平水期氮磷营养盐质量浓度适宜多种甲藻生长;丰水期氮磷营养盐缺乏,具有溶解利用有机氮磷能力的甲藻成为优势种(Butler et al, 1979),丰度变高,导致 BOD_5 质量浓度增加,甲藻种类变少。

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 及 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 是三亚湾近岸海域甲藻群落结构的主要影响因子。赵晓玮(2012)实验结果表明米氏凯伦藻生长过程对氮类营养盐比磷类营养盐需求更高,在不同的氮类营养盐环境下,其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 条件下生长优势明显;这与本研究 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与甲藻群落相关性最强的结论一致,并且只有赤潮甲藻种类与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 呈显著负相关,说明三亚湾近岸海域甲藻受 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 影响小于无机氮类营养盐。本研究无机氮磷营养盐分布呈现两端站点质量浓度高、中间站点质量浓度低的特点,其主要原因是受三亚河径流影响,进而导致三亚河附近站点无机氮磷营养盐质量浓度较中间站点高,此外,

各站点沿岸质地不同也可能影响无机氮磷营养盐质量浓度,如淤泥质地的S6站点无机氮磷营养盐质量浓度最高。浮游甲藻种类、丰度与无机氮类营养盐在空间分布上则呈负相关,是由于中间站点浮游植物丰度较高、对无机氮磷营养盐消耗较大,使具有溶解利用有机氮磷能力的甲藻生长优势更为明显,如位于海月广场附近,人流量密集、海浴等人为活动最为频繁的S4站点,该站点浮游甲藻丰度最高,无机氮类营养盐平均值为各站点最低。杨雪(2015)发现当无机营养盐缺乏时,代表甲藻的多甲藻素质量浓度增加;郜培怡等(2021)研究发现硅藻主要吸收无机氮,甲藻吸收有机氮使自身生长优势凸显,并且可以通过有机氮有效地进行竞争性生长;黄学辉(2018)也发现浮游植物种群在无机营养盐进行的竞争性生长中,某些甲藻种类占有一定生长优势;说明三亚湾近岸海域的甲藻在无机氮类营养盐缺乏时,可以有效溶解利用有机氮,维持自身正常生长增殖,从而造成S4站点甲藻种类最多丰度最高、无机氮类营养盐质量浓度最低。S6站点海滩黑化泥化明显,可能是受底层淤泥影响,有机质质量浓度变高,导致该站点水环境因子指标异常,这是该站点全年甲藻种类最少、丰度波动最大的原因;此外,大量浮游生物死亡后沉降进一步维持了该站点海滩全年黑化泥化(亢振军,2013)。

3.3 优势浮游甲藻与水环境因子相关性分析

3.3.1 我国赤潮引发种与水环境因子相关性分析

塔玛亚历山大藻在各项水环境因子上的投影很短,对 θ 、 S 、营养盐等水环境因子的变化高度适应(颜天等,2002;方琦等,2006;刘青等,2015),因此作为近岸性种在3个水期均有分布且丰度范围稳定。

环状异帽藻主要集中分布于丰水期S4站点,平水期S2、S3、S4站点,其显著特点是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 及 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度均为同期最低且 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度低于同期平均值。在缺乏无机营养盐时,具有利用有机营养物如溶解有机磷酸盐(Dissolved Organic Phosphorus, DOP)或溶解有机硝酸盐(Dissolved Organic Nitrogen, DON)能力的物种优势性得以凸显(Butler et al, 1979); Yamamoto等(2017)研究认为环状异帽藻能在无机氮、无机磷缺乏时,有效利用自然环境中的氮素、磷素营养。环状异帽藻主要分布于低无机氮、无机磷站点,可能与环状异帽藻具有较强利用有机营养盐能力有关;该藻平水期优势明显,平水期COD质量浓度明显升高,COD又往往作为衡量水体中有机物质质量浓度多少的指标,说明平水期海水中溶解有机物质质量浓度显著高于其他水期,推测是环状异帽藻优势明显的主要原因。

苏金洙等(2020)认为米氏凯伦藻对 θ 、 S 变化极为敏感,且此两项因子是促使米氏凯伦藻在平潭海域浮游植物群落结构中占优的原因。在英吉利海峡西北部米氏凯伦藻引发赤潮的海域是经历一段时间的高温之后 S 降低的海域,赤潮原因是高温破坏了海水的稳定性、使温跃层迅速变化(Hartman et al, 2014);本研究丰水期 θ 普遍高于其他水期,丰水期后平水期 θ 显著降低,且受“暹芭”“奥鹿”及“纳沙”台风影响,降水增多, S 也有所降低,致使平水期温跃层变化明显,这是米氏凯伦藻平水期丰度增加的主要原因;但RDA排序(图6)中体现不出米氏凯伦藻与 S 的相关性,主要原因是枯水期该藻检出量很低,丰水期、平水期 S 变化较小,因此, θ 显著降低及台风季导致的温跃层变动应是米氏凯伦藻平水期优势明显的主要原因。

尖顶斯氏藻与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈显著负相关,S1、S6站点的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度始终较高,其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度最高的S6站点枯水期和平水期均未检出该藻,3个水期的S1站点、丰水期的S6站点尖顶斯氏藻丰度均为同一水期所有站点中最低值。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度升高会促进尖顶斯氏藻的生长,但高浓度 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 对尖顶斯氏藻具有一定的毒害作用(Cooper et al, 2016;王志富等,2018;Liu et al, 2021)。推测S1、

S6 站点 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度可能已经对尖顶斯氏藻生长增殖起到一定的抑制作用, 导致该藻在三亚湾呈现上述分布特点。

3.3.2 我国潜在赤潮引发种与水环境因子相关性分析

四齿多甲藻与氮磷呈正相关, 枯水期主要分布在 S6 站点, 该站点枯水期 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度全年最高, 平水期 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度 3 个水期最低且并未发现四齿多甲藻。这与 Rodríguez-gómez 等(2021)对四齿多甲藻喜生长在富营养化、高 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 水域的调查研究结论一致。Okolodkov 等(2016)研究发现四齿多甲藻曾在墨西哥湾韦拉克鲁斯港最暖的月份(4月至10月)引发过赤潮, 且自2002年至今始终为墨西哥湾韦拉克鲁斯港沿海主要赤潮肇因藻。本研究丰水期 θ 普遍高于其他水期, 受降水影响 S 相对较低、无机氮磷营养盐质量浓度较低, 四齿多甲藻优势极其明显; 枯水期 S6 站点高 θ 、高无机氮磷营养盐质量浓度, 四齿多甲藻优势同样明显。因此, 高 θ 、高无机氮磷营养盐质量浓度是四齿多甲藻生长的主要驱动因子, 高 θ 相对于高无机氮磷营养盐质量浓度对四齿多甲藻影响更显著。

慢原甲藻与 θ 、 S 呈正相关, 95% 的慢原甲藻分布于枯水期的 S6 站点, 该站点 θ 始终为调查同期最高值, 且枯水期 S 显著大于其余水期。Aissaoui 等(2014)与 Ben-gharbia 等(2016)研究发现, 该藻同属的利玛原甲藻(*P. lima*)与 θ 和 S 呈正相关; Thomas 等(2020)调查研究发现阿拉伯海慢原甲藻赤潮发生在春季季风气候季节, 具有高海表温度和海面盐度; 慢原甲藻对高 S 环境的适应能力更强, 南海株生长对高 S 海域倾向性更高, 且在氮磷营养盐浓度偏高的水域可达到其最大细胞丰度和较高生长率(刘俏等, 2013)。这与本研究慢原甲藻 RDA 排序图及分布特征结果相似, 推测慢原甲藻分布状况与其生长喜高 θ 、高 S 、高氮磷营养盐环境有关。

4 结 论

本研究通过对三亚湾近岸海域枯水期、丰水期和平水期浮游甲藻的调查, 并结合水环境因子分析了浮游甲藻分布及其之间的相关性, 得到以下结论。

三亚湾近岸海域共鉴定出 5 目 13 科 17 属 50 种, 丰度整体较为稳定; 多甲藻目种类及丰度最多, 鳍藻目种类及丰度最少; 赤潮甲藻有 25 种, 其丰度高达甲藻总丰度的 86.5%; 优势甲藻赤潮种共有 9 种, 其丰度占甲藻总丰度近八成; 总之, 三亚湾近岸海域浮游甲藻种类丰富、丰度较高, 赤潮种优势明显。

三亚湾近岸海域水环境因子调查在时间上水温、盐度、酸碱度、溶解氧及化学需氧量随水期变化波动明显; 空间上主要是无机氮磷营养盐分布呈现两端站点质量浓度高, 中间站点质量浓度低的特点; 同一站点不同水期水环境因子波动较小, 其中 S1 站点和 S6 站点各水环境因子与其他站点差别较大。

水环境因子中盐度与酸碱度呈显著负相关性, 五日生化需氧量分别与水温及化学需氧量呈一定正相关性, 无机氮磷营养盐之间正相关性极其显著; 五日生化需氧量与甲藻总种类呈一定负相关性, 而无机氮类营养盐是影响浮游甲藻整体群落结构的主要因素; 分析结果显示水温与米氏凯伦藻、四齿多甲藻及慢原甲藻相关性密切, 盐度与慢原甲藻相关性较为密切, 而无机氮磷营养盐与多数优势赤潮甲藻相关性更为密切, 是影响其分布的驱动因子。

本研究未发现某种甲藻在 3 个水期具有绝对生长优势并已有形成赤潮风险的趋势, 结合分析数据建议对 95% 分布于枯水期 S6 站点的慢原甲藻和丰水期第一优势种四齿多甲藻加以重视, 对曾在我国海域引发赤潮的平水期前二优势种环状异帽藻和米氏凯伦藻以及曾在本研究海域引发赤潮的枯水期、丰水期优势种之一尖顶斯氏藻加强监测力度。

参考文献 (References):

- 车志伟, 史云峰, 曲江勇, 2014. 三亚湾海域浮游植物群落结构研究[J]. 琼州学院学报, 21(5): 87-92. CHE Z W, SHI Y F, QU J Y, 2014. Community structure of phytoplankton in the Sanya Bay[J]. Journal of Qiongzhou University, 21(5): 87-92.
- 陈建华, 2013. 我国典型贝类增殖养殖海域藻毒素组成、分布状况及贝类染毒特征分析[D]. 青岛: 中国科学院大学. CHEN J H, 2013. Composition, distribution of phycotoxins and contamination status of shellfish in two representative mariculture zones of shellfish in China[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences.
- 程贤松, 李亚军, 李兴涵, 等, 2021. 三亚湾春秋浮游植物分布及其与环境因子的关系[J]. 热带生物学报, 12(1): 15-24. CHENG X S, LI Y J, LI X H, et al, 2021. Phytoplankton distribution and its relationship with related environmental factors in Sanya Bay in spring and autumn[J]. Journal of Tropical Biology, 12(1): 15-24.
- 崔振昂, 吴自军, 李亮, 等, 2020. 三亚湾海滩泥黑化调查评价[J]. 地质论评, 66(增1): 157-158. CUI Z A, WU Z J, LI L, et al, 2020. Investigation and evaluation on muddy and blacken in Sanya Bay beach[J]. Geological Review, 66(Suppl.1): 157-158.
- 方琦, 顾海峰, 蓝东兆, 等, 2006. 温、盐度及营养盐对不同藻株塔玛亚历山大藻生长的影响[J]. 海洋通报, 25(6): 20-25. FANG Q, GU H F, LAN D Z, et al, 2006. Effect of temperature, salinity and nutrient on the growth of different strains of *Alexandrium tamarense*[J]. Marine Science Bulletin, 25(6): 20-25.
- 郜培怡, 李克强, 陈衍, 等, 2021. 氮形态组成对海洋浮游植物群落结构的影响与动力学研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 51(5): 57-71. GAO P Y, LI K Q, CHEN K, et al, 2021. The study of effects of nitrogen forms on marine phytoplankton community structure and related dynamics[J]. Periodical of Ocean University of China, 51(5): 57-71.
- 高月鑫, 江志兵, 曾江宁, 等, 2018. 春季长江口北支邻近海域浮游植物群落及其影响因子[J]. 海洋通报, 37(4): 430-439. GAO Y X, JIANG Z B, ZENG J N, et al, 2018. Phytoplankton community in relation to environment factors off the north branch of the Yangtze River Estuary[J]. Marine Science Bulletin, 37(4): 430-439.
- 郭皓, 2004. 中国近海赤潮生物图谱[M]. 北京: 海洋出版社: 1-2. GUO H, 2004. Illustrations of planktons responsible for the blooms in Chinese coastal waters[M]. Beijing: China Ocean Press: 1-2.
- 郭皓, 丁德文, 林凤翔, 等, 2015. 近20 a我国近海赤潮特点与发生规律[J]. 海洋科学进展, 33(4): 547-558. GUO H, DING D W, LIN F A, et al, 2015. Characteristics and patterns of red tide in China coastal waters during the last 20 a[J]. Advances in Marine Science, 33(4): 547-558.
- 国家海洋标准计量中心, 2007. 海洋调查规范: GB/T 12763—2007[S]. 北京: 中国标准出版社. Ministry of Natural Resources, 2007. The specification for oceanographic survey: GB/T 12763—2007[S]. Beijing: Standards Press of China.
- 洪鹏, 曾茹, 何金曼, 等, 2023. 三亚湾近岸海域浮游植物群落特征的变化[J/OL]. 热带生物学报: 1-9. [2023-07-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1078.s.20230519.1121.002.html>. HONG P, ZENG R, HE J M, et al, 2023. Characteristics of phytoplankton community in the offshore area of Sanya Bay[J/OL]. Journal of Tropical Biology: 1-9. [2023-07-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1078.s.20230519.1121.002.html>.
- 胡国成, 2006. 我国沿海赤潮发生的原因及其危害[J]. 中国水产, (2): 73-74, 80. HU G C, 2006. Causes and harms of coastal red tides in China[J]. China Fisheries, (2): 73-74, 80.
- 胡梦茜, 崔振昂, 吴自军, 等, 2022. 三亚湾海滩泥黑化空间差异与形成条件[J]. 海洋地质前沿, 38(7): 23-30. HU M Q, CUI Z A, WU Z J, et al, 2022. Spatial differences and formation conditions of beach mudding blackening in Sanya Bay[J]. Marine Geology Frontiers, 38(7): 23-30.
- 黄凌风, 李少菁, 2000. 海洋底栖甲藻研究——国际有害藻华研究的一个重要领域[J]. 海洋科学, 24(11): 13-16. HUANG L F, LI S J, 2000. Marine benthic dinoflagellate study: an important field of international hab study[J]. Marine Sciences, 24(11): 13-16.
- 黄凌风, 郭丰, 门谷茂, 等, 2001. 海洋底栖甲藻的浮游行为特征研究[J]. 海洋科学, 10(25): 8-11, 57. HUANG L F, GUO F, MEN G M, et al, 2001. Study on planktonic characteristics of marine benthic dinoflagellates[J]. Marine Sciences, 10(25): 8-11, 57.

- 黄学辉, 2018. 鄱阳湖浮游植物对水位变化与人类干扰的响应[D]. 南昌: 东华理工大学. HUANG X H, 2018. Responses of phytoplankton to water level changes and human disturbance in Poyang Lake[D]. Nanchang: East China University of Technology.
- 金媛娟, 2012. 测定“五日生化需氧量”的影响因素浅析[J]. 能源与环境, 112(3): 77-78. JIN Y J, 2012. Analysis of influencing factors for determining "five-day biochemical oxygen demand"[J]. Energy and Environment, 112(3): 77-78.
- 亢振军, 2013. 东海赤潮区沉积物中有机质来源及其与浮游植物群落关系初探[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(中国科学院海洋研究所). KANG Z J, 2013. A primary study on sources of the organic matters in sediment of the red-tide zone in the East China Sea and its relationship with phytoplankton community[D]. Qingdao: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology), Chinese Academy of Sciences.
- 李巧香, 周永召, 李鹏山, 2010. 夏季三亚湾近岸海域海水水质状况分析与评价[J]. 海洋湖沼通报, 126(3): 100-106. LI Q X, ZHOU Y Z, LI P S, 2010. Evaluation of water quality status of coastal water in Sanya Bay in summer[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 126(3): 100-106.
- 李由明, 王平, 李义军, 等, 2014. 三亚近岸海域水体的水质状况分析和评价[J]. 畜牧与饲料科学, 35(增1): 3-7. LI Y M, WANG P, LI Y J, et al, 2014. Evaluation and comparison of water quality of Sanya Bay[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 35(Suppl.1): 3-7.
- 李志林, 姜会超, 张娟, 等, 2023. 山东近岸海域夏季pH分布特征及影响因素分析[J]. 海洋环境科学, 42(2): 193-199. LI Z L, JIANG H C, ZHANG J, et al, 2023. Distributions and influencing factors of pH in Shandong coastal area in summer[J]. Marine Environmental Science, 42(2): 193-199.
- 凌娟, 张燕英, 董俊德, 等, 2013. 三亚湾珊瑚礁海域蓝藻群落组成的空间分布特征及其与环境因子的关系[J]. 科学通报, 58(17): 1610-1619. LING J, ZHANG Y Y, DONG J D, et al, 2013. Spatial variability of cyanobacterial community composition in Sanya Bay as determined by DGGE fingerprinting and multivariate analysis[J]. Chinese Science Bulletin, 58(17): 1610-1619.
- 刘俏, 龙丽娟, 2013. 环境因子对慢原甲藻(*Prorocentrum rhathymum*)生长的影响[J]. 热带海洋学报, 32(3): 93-100. LIU Q, LONG L J, 2013. Effect of environmental factors on the growth of *Prorocentrum rhathymum*[J]. Journal of Tropical Oceanography, 32(3): 93-100.
- 刘青, 刘冰莉, 王仁锋, 等, 2015. 光照强度和盐度对塔玛亚历山大藻(*Alexandrium tamarense*)生长的影响[J]. 海洋环境科学, 34(2): 199-205. LIU Q, LIU B L, WANG R F, et al, 2015. Effect of intensity and illumination on the growth of *Alexandrium tamarense*[J]. Marine Environmental Science, 34(2): 199-205.
- 刘文涛, 杨永鹏, 2021. 海南三亚湾-红塘湾海岸地形季节性变化和极端天气下变化特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 51(增刊1): 60-67. LIU W T, YANG Y P, 2021. Coastal topographic evolution in the seasonal and extreme weather event along Sanya Bay to Hongtang Bay in Hainan Island[J]. Periodical of Ocean University of China, 51(Suppl.1): 60-67.
- 骆丽珍, 庞勇, 2015. 夏季三亚半山半岛帆船港附近海域水质环境特征分析[J]. 海洋开发与管理, 32(11): 104-110. LUO L Z, PANG Y, 2015. Analysis of water quality and environmental characteristics of the sea near the sailing port of Sanya Banshan Peninsula in summer[J]. Marine Development and Management, 32(11): 104-110.
- 孟阳, 2022. 海南生态旅游及其发展策略研究[J]. 文化产业, 235(18): 122-124. MENG Y, 2022. Research on Hainan eco-tourism and its development strategy[J]. Culture Industry, 235(18): 122-124.
- 全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283), 2007. 海洋监测规范: GB 17378—2007[S]. 北京: 中国标准出版社. National Technical Committee 283 on Ocean of Standardization Administration of China (SAC/TC 283), 2007. The specification for marine monitoring: GB 17378—2007[S]. Beijing: Standards Press of China.
- 生态环境部, 2020. 近岸海域环境监测技术规范: HJ 442—2020[S]. 北京: 中国环境出版社. Ministry of Ecological Environment, 2020. Regulation for offshore environmental monitoring: HJ 442—2020[S]. Beijing: China Environmental Science Press.
- 石鑫, 2019a. 现场海水酸碱度的表征与典型海域pH变化及酸化趋势研究[D]. 青岛: 中国科学院大学: 13-27. SHI X, 2019. Representation for the seawater acidity at *in situ* temperature and its application of the pH changes and acidification

- trend in the typical seawaters[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences: 13-27.
- 石鑫, 宋金明, 李学刚, 等, 2019b. 长江口邻近海域海水pH的季节变化及其影响因素[J]. 海洋与湖沼, 50(5): 1033-1042. SHI X, SONG J M, LI X G, et al, 2019b. Seasonal change of pH in the waters off ChangJiang River Estuary and its impact factors[J]. Oceanologia et Limnologia sinica, 50(5): 1033-1042.
- 宋星宇, 谭焯辉, 黄良民, 等, 2011. 三亚湾春夏季初级生产力的分布特征及环境影响研究[J]. 海洋环境科学, 30(1): 19-23. SONG X Y, TAN Y H, HUANG L M, et al, 2011. Primary production in Sanya Bay during spring and summer[J]. Marine Environmental Science, 30(1): 19-23.
- 苏金洙, 高佳, 苏玉萍, 等, 2020. 福建平潭海域米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*)增殖影响因子研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 36(4): 43-49, 56. SU J Z, GAO J, SU Y P, et al, 2020. Study on the factors affecting the proliferation of *Karenia mikimotoi* in the Pingtan coastal area of Fujian Province[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 36(4): 43-49, 56.
- 王兴华, 李格乐, 吴小芳, 等, 2022. 海南岛近岸海域水质时空特征及污染因子研究[J]. 环境科学与管理, 47(8): 42-45. WANG X H, LI G L, WU X F, et al, 2022. Analysis on spatial-temporal characteristics of water quality and pollution factors in coastal areas around Hainan Island[J]. Environmental Science and Management, 47(8): 42-45.
- 王艳红, 曾成杰, 陆培东, 等, 2022. 三亚湾东段海岸侵蚀与海滩养护[J]. 自然资源学报, 37(4): 1049-1060. WANG Y H, ZENG C J, LU P D, et al, 2022. Beach erosion and nourishment in the east section of Sanya Bay, China[J]. Journal of Natural Resources, 37(4): 1049-1060.
- 王志富, 丰卫华, 许恒韬, 等, 2018. 不同无机氮对锥状斯氏藻(*Scrippsiella trochoidea*)生长和抗氧化酶活性的影响[J]. 海洋环境科学, 37(2): 221-227. WANG Z F, FENG W H, XU H T, et al, 2018. Effects of different nitrogen source on antioxidant enzymes activities of *Scrippsiella trochoidea*[J]. Marine Environmental Science, 37(2): 221-227.
- 颜天, 周名江, 钱培元, 2002. 环境因子对塔玛亚历山大藻(*Alexandrium tamarense*)生长的综合影响[J]. 海洋学报(中文版), 24(2): 114-120. YAN T, ZHOU M J, QIAN P Y, 2002. Study on the combined effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of dinoflagellate *Alexandrium tamarense*[J]. Acta Oceanologica Sinica, 24(2): 114-120.
- 杨雪, 2015. 微表层浮游植物群落对氮磷的响应研究[D]. 广州: 暨南大学. YANG X, 2015. Studies on effects of nitrogen and phosphorus on phytoplankton from the surface microlayer[D]. Guangzhou: Jinan University.
- 殷安齐, 王兴华, 2019. 海南岛近岸海域赤潮的时空与生物特征[J]. 安全与环境学报, 19(4): 1456-1460. YIN A Q, WANG X H, 2019. Specific spatial-temporal and biological features of red tide in coastal waters around Hainan Island[J]. Journal of Safety and Environment, 19(4): 1456-1460.
- 张青田, 张桢途, 史江江, 等, 2017. 采样方法对北塘河口浮游生物多样性分析的影响[J]. 水生态学杂志, 38(2): 70-75. ZHANG Q T, ZHANG A T, SHI J J, et al, 2017. Influence of sampling method on the analysis of plankton biodiversity in Beitang Estuary[J]. Journal of Hydroecology, 38(2): 70-75.
- 赵晓玮, 2012. 环境中不同氮磷营养盐浓度及氮源形态对米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*)生长的影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学. ZHAO X W, 2012. Effects of the variously ambient nitrogen, phosphorus concentrations and nitrogen sources on growth of *Karenia mikimotoi* under laboratory conditions[D]. Qingdao: Ocean University of China.
- 钟鸿干, 李培, 2014. 三亚湾、大东海、亚龙湾沿岸海域水体总氮、总磷动态研究[J]. 河北渔业, 245(5): 12-14, 26. ZHONG H G, LI P, 2014. The dynamics of total nitrogen and total phosphorus along the coast of Sanya Bay, Dadong Sea and Yalong Bay[J]. Hebei Fishery, 245(5): 12-14, 26.
- 自然资源部, 2011-2022. 中国海洋灾害公报[R]. 北京: 海洋出版社. Ministry of natural Resources, 2011-2022. China Marine Disaster Bulletin[R]. Beijing: China Ocean Press.
- AISSAOUI A, ARMI Z, AKROUT F, et al, 2014. Environmental factors and seasonal dynamics of *Prorocentrum lima* population in coastal waters of the Gulf of Tunis, South Mediterranean[J]. Water Environment Research, 86(12): 2256-2270.
- AUSTIN M P, 1968. Relationships among functional properties of Californian Grassland[J]. Nature, 217(5134): 1163-1163.
- BEN-GHARBIA H, YAHIA O K, AMZIL Z, et al, 2016. Toxicity and growth assessments of three thermophilic benthic dinoflagellates (*Ostreopsis cf. ovata*, *Prorocentrum lima* and *Coolia monotis*) developing in the southern Mediter-

- ranean Basin[J]. *Toxins*, 8(10): 297-297.
- BUTLER E I, KNOX S, LIDDICOAT M I, 1979. The relationship between inorganic and organic nutrients in sea water[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 59(1): 239-250.
- COOPER J T, SINCLAIR G A, WAWRIK B, 2016. Transcriptome analysis of *Scrippsiella trochoidea* CCMP 3099 reveals physiological changes related to nitrate depletion[J]. *Frontiers in microbiology*, (7): 639-657.
- HARTMAN S E, HARTMAN M C, HYDES D J, et al, 2014. The role of hydrographic parameters, measured from a ship of opportunity, in bloom formation of *Karenia mikimotoi* in the English Channel[J]. *Journal of Marine Systems*, 140: 39-49.
- JIN X M, WAN L, ZHANG Y K, et al, 2007. A study of the relationship between vegetation growth and groundwater in the Yinchuan Plain[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(3): 197-203.
- LIU X F, LIU Y, MD A N, et al, 2021. Physiological changes and elemental ratio of *Scrippsiella trochoidea* and *Heterosigma akashiwo* in different growth phase[J]. *Water*, 13(2): 132-142.
- OKOLODKOV Y B, CAMPOS-BAUTISTA G, GÁRATE-LIZÁRRAGA I, 2016. Circadian rhythm of a red-tide dinoflagellate *Peridinium quadridentatum* in the port of Veracruz, Gulf of Mexico, its thecal morphology, nomenclature and geographical distribution[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 108(1/2): 289-296.
- RODRÍGUEZ-GÓMEZ C F, VÁZQUEZ G, MAYA-LASTRA C A, et al, 2021. Potential distribution of the dinoflagellate *Peridinium quadridentatum* and its blooms in continental shelves globally: an environmental and geographic approach[J]. *Marine Biology*, 168(3): 29-42.
- THOMAS L C, NANDAN S B, PADMAKUMAR K B, 2020. First report on an unusual bloom of the potentially toxic epibenthic dinoflagellate *Prorocentrum rhathymum* from Bangaram Lagoon of the Lakshadweep archipelago: Arabian Sea[J]. *Regional Studies in Marine Science*, (41): 101549-101553.
- XIAO J J, WANG Y L, FU S H, et al, 2022. Distribution of heavy metals and the exploration of potential indicators and hyperaccumulators in Jiang'an River, Chengdu, PR China[J]. *Ecological Indicators*, 145: 10-16.
- YAMAMOTO T, KISHIGAMI T, NAKAGAWA H, 2017. Uptake kinetics of nitrate, ammonia and phosphate by the dinoflagellate *Heterocapsa circularisquama* isolated from Hiroshima Bay, Japan[J]. *Phycological Research*, 65(4): 333-339.

Correlation Between Planktonic Dinoflagellates and Water Environmental Factors in Coastal Waters of Sanya Bay

WANG Meng^{1,2,3,4,5}, WANG Xinghua^{2,5}, LI Xiang^{1,2,3,4,5}, ZHAO Qian⁶,
LI Gele⁷, WANG Hui⁸, YIN Anqi^{1,2,3,4,5}

1. Key Laboratory of Utilization and Conservation for Tropical Marine Bioresources, Ministry of Education, Hainan Tropical Ocean University, Sanya 572022, China;
2. Modern Marine Ranching Engineering Research Center of Hainan, Hainan Tropical Ocean University, Sanya 572022, China;
3. Hainan Key Laboratory for Conservation and Utilization of Tropical Marine Fishery Resources, Hainan Tropical Ocean University, Sanya 572022, China;
4. Hainan Key Laboratory for Coastal Marine Ecological Environment Process and Carbon Sink, Hainan Tropical Ocean University, Sanya 572022, China;
5. College of Ecology and Environment, Hainan Tropical Ocean University, Sanya 572022, China;
6. Institute of Deep-sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China;
7. Zhanjiang Port (Group) Co., Ltd., Zhanjiang 524068, China;
8. Sanya Agricultural Technology Extension Service Center, Sanya 572019, China)

Abstract: In order to understand the distribution of planktonic dinoflagellate in the coastal waters of Sanya Bay and its relationship with water environmental factors, samples of both planktonic dinoflagellate and water environment in the coastal waters of Sanya Bay were collected and investigated during the dry season (April), wet season (July) and normal season (November) in 2022 during dry season (April), wet season (July) and normal season (November). The results of sample analysis showed that, 50 species of dinoflagellates were identified in 5 orders, 13 families and 17 genera, including 25 species of red tide dinoflagellates, of which 13 species were toxic. There were 10 dominant dinoflagellates in the water of seasons, of which 9 were red tide dinoflagellates and 5 were toxic red tide dinoflagellates. The most dominant species of dinoflagellates were *Karenia* sp., *Peridinium quadridentatum* and *Heterocapsa circularisquama* in dry season, wet season and normal season, respectively. The fluctuations of water environment factors at the same location in the different water seasons were small, and the concentrations of inorganic nitrogen and phosphorus were high at both ends of the Sanya Bay and low at central Sanya Bay. Spearman correlation analysis showed that, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ were the main driving factors affecting the community structure of planktonic dinoflagellate in the coastal waters of Sanya Bay. The results of RDA analysis showed that, the distribution of dominant red tide dinoflagellate in the coastal waters of Sanya Bay was significantly correlated with water temperature, salinity, inorganic nitrogen and phosphorus content. In general, the planktonic dinoflagellates, especially the dominant red tide dinoflagellates, responded most closely to inorganic nitrogen and phosphorus nutrients. In general, results of this study could be used as a supplement to the statistical data on the distribution of planktonic dinoflagellate species in Sanya Bay, and provide basic data for both analyzing the correlation between dinoflagellate species and water environmental factors and monitoring the risk of red tide in this sea area.

Keywords: dinoflagellate; water environment factor; red tide; Sanya Bay

Received: August 15, 2023 **Online:** July 3, 2024

永乐环礁表层海水细菌群落多样性及功能预测

舒艾梅^{1,2}, 宫春光¹, 黄惠琴², 胡永华^{2,3}, 莫坤联^{2*}

- (1. 河北农业大学海洋学院, 河北 秦皇岛 066003;
2. 中国热带农业科学院热带生物技术研究所, 海南海口 571101;
3. 中国热带农业科学院湛江实验站, 广东 湛江 524013)

摘要: 为探究永乐环礁表层海水环境中细菌群落结构组成以及差异性, 采集了 6 个岛礁的表层海水样品, 利用高通量宏条形码测序技术分析不同岛礁海水细菌的群落结构组成差异, 并探索了环境因子对细菌群落结构的影响, 同时对菌群功能基因进行了预测分析。共获得优化序列 891 892 条, 聚类为 7 499 个操作分类单元(Operational Taxonomic Units, OTUs), 隶属于 49 个门、144 个纲、392 个目、663 个科和 1 274 个属。优势细菌类群主要包括变形菌门(Proteobacteria)、蓝细菌门(Cyanobacteriota)、拟杆菌门(Bacteroidota)、放线菌门(Actinobacteriota)、髌骨细菌门(Patescibacteria)和厚壁菌门(Firmicutes)。通过冗余分析发现主要的环境影响因子为电导率、pH 值和温度。PICRUSt 功能预测结果显示不同岛礁中细菌主要涉及 6 个生物代谢通路及 46 个子功能, 共得到 399 个三级通路相关功能基因, 其中代谢途径和次生代谢产物等方面的功能基因较为丰富。本文初步揭示了永乐环礁 6 个岛屿表层海水微生物群落组成与基因功能预测, 可为研究永乐群岛岛礁生态及环境保护提供一定的参考, 并为后续进一步的微生物资源调查和开发利用提供基础研究数据。

关键词: 永乐环礁; 细菌多样性; 环境因子; 功能预测

中图分类号: Q938

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2024)04-0725-13

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20230725001

引用格式: 舒艾梅, 宫春光, 黄惠琴, 等, 2024. 永乐环礁表层海水细菌群落多样性及功能预测[J]. 海洋科学进展, 42(4): 725-737. SHU A M, GONG C G, HUANG H Q, et al, 2024. Diversity and functional prediction of bacterial communities in surface seawater of Yongle atoll[J]. Advances in Marine Science, 42(4): 725-737.

西沙群岛是我国南海诸岛中数量最多、陆地面积最大的群岛, 扼守着中国南海的东南门户, 在国际上具有极其重要的地位。永乐环礁作为西沙群岛典型的大洋型珊瑚环礁(方周等, 2021), 其蕴藏着丰富的微生物资源, 不仅参与珊瑚礁生态系统的化学循环和物质转化, 还与珊瑚礁生态系统中各种生物的健康息息相关(周进等, 2014)。微生物是海洋生物中数量最多、种类最为丰富的一类生物, 而表层海水则是海洋中生命活动最活跃的区域之一。表层海水中的浮游细菌以其高物种多样性和高代谢活性等特性支撑起整个海洋表层生态系统, 并在碳循环和光能转换以及食物链平衡中发挥着重要作用(洪居慧, 2020)。了解表层海水细菌的群落组成、结构和分布特征, 揭示微生物的代谢特性, 是深入了解海洋微生物生态功能的前提。目前, 利用高通量测序技术对南海岛礁微生物的多样性研究主要集中在沉积物(张浩等, 2013; 刘瑞志等, 2019; 杨睿, 2019; Zhang et al, 2019; 苏洁等, 2020)

收稿日期: 2023-07-25 网络首发日期: 2024-05-23

资助项目: 海南省自然科学基金青年基金项目(323QN278); 农业农村部财政专项(NFZX2021)

作者简介: 舒艾梅(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋生物多样性方面研究。

E-mail: 18136523522@163.com

* 通信作者: 莫坤联(1985—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事海洋微生物方面研究. E-mail: mokunlian@163.com

(胡筱敏 编辑)

和生物体(赵金发等, 2023), 对表层海水中微生物群落组成以及功能基因多样性进行的相关研究却鲜有报道。

本文通过高通量测序技术, 分析了永乐环礁6个岛礁表层海水样品的细菌物种组成、群落结构及多样性的变化规律, 并对菌群功能进行预测, 为进一步了解各岛礁中的细菌群落结构组成差异与生态环境之间的关联提供数据支持, 也为南海微生物资源的进一步开发利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

结合岛礁分布和开放区划情况, 在晋卿岛(JQ)、石屿(SY)、银屿(YY)、鸭公岛(YG)、甘泉岛(GQ)和羚羊礁(LY)六个岛礁各选择3个采样位点(图1), 于2019年9月24日至9月30日随中国热带农业科学院热带生物技术研究所科考船在每个位点分别采集3份表层海水样品, 除石屿样品为上午采集外, 其余样品均在下午采集。现场使用水质检测仪(AZ86031)测量各采样点的电导率(Electrical Conductivity, EC)、温度(t)和pH值。每份水样取0.5 m深海水样品15 L, 使用3 μm 微孔滤膜去除大颗粒杂质后, 再经0.22 μm 和0.1 μm 微孔滤膜分别进行真空抽滤。将抽滤完毕的0.22 μm 和0.1 μm 滤膜合并后放置于2 mL 无菌离心管中, 于-20 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中保存并带回实验室。各水样的氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、总磷(Total Phosphorus, TP)和总氮(Total Nitrogen, TN)的质量浓度使用多参数水质测定仪(JH-TD403)在实验室完成测定。

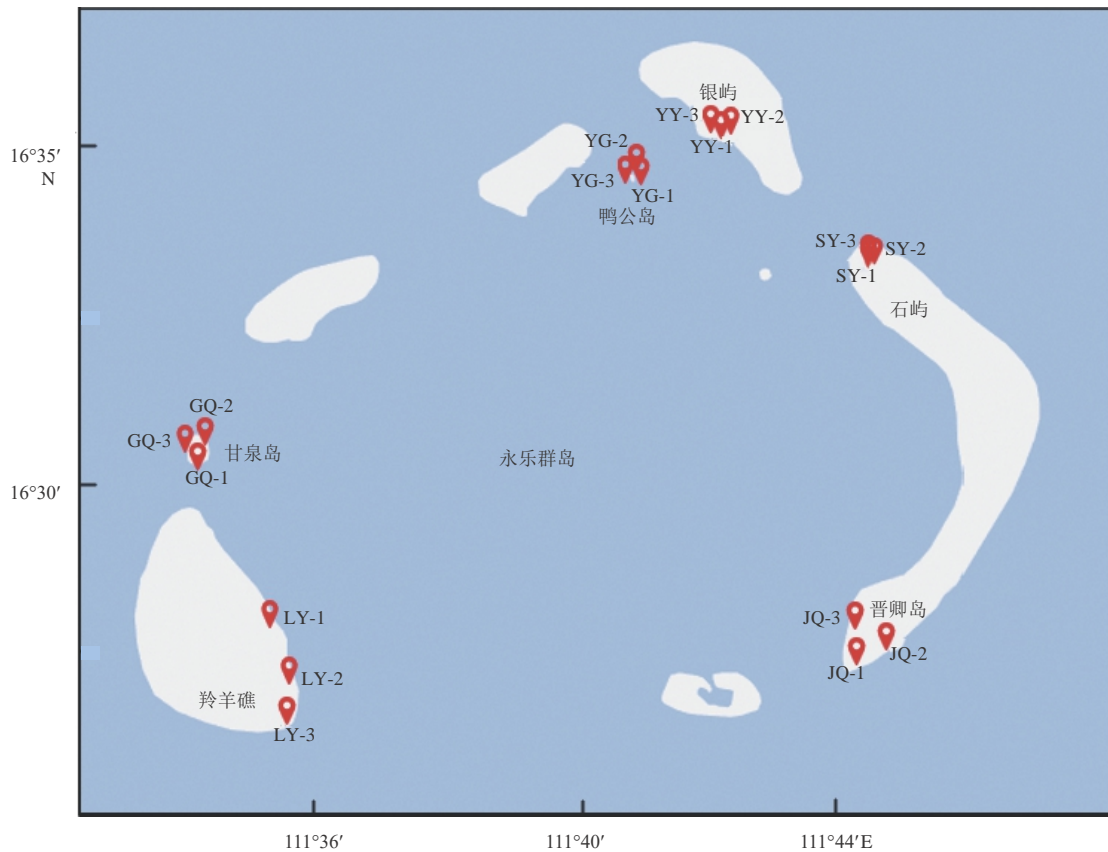


图1 采样位点分布

Fig. 1 The geographic location of sampling sites

1.2 总 DNA 提取及 16S rRNA 基因序列扩增

细菌总 DNA 的提取和 PCR 扩增以及序列测定均在上海美吉生物医药科技有限公司完成。细菌总 DNA 提取的主要流程为: 第一, 使用 FastDNA® Spin Kit for Soil 试剂盒 (MP Biomedicals, USA) 抽提滤膜样品总 DNA; 第二, 检测 DNA 浓度和纯度后使用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 提取的质量。PCR 扩增及序列测定的主要操作流程为: 首先, 采用引物 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3') 和 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3') 对样品 16S rRNA 基因的 V3~V4 区进行扩增; 其次, 将同一样本的 PCR 扩增产物混合, 利用 2% 琼脂糖凝胶回收; 再对回收产物定量检测, 使用 NEXTFLEX® Rapid DNA-Seq Kit 进行建库; 最后, 在 Illumina 公司的 Miseq PE300 平台进行测序。

1.3 生物信息学分析

测序数据经长度过滤、去除嵌合体得到优化序列, 根据 97% 的相似度对序列进行 OTU (Operational Taxonomic Units) 聚类。将 OTU 代表序列对照 Silva 数据库 (silva138/16s_bacteria) 分类比对, 获得注释后的代表性 OTU。去除比对到叶绿体和线粒体的 OTU 再进行抽平, 将获得优化后的 OTU 用于后续的分析。

数据分析在美吉生信云分析平台 (<https://cloud.majorbio.com/>) 上进行, 包括对 6 个岛礁样本的 OTU 注释、Alpha 多样性分析、Beta 多样性分析、不同组间的差异物种组成以及 PICRUST2 功能预测等。

2 结果与分析

2.1 采样点环境特点

6 个岛礁 18 个采样位点的各生态因子和营养盐数据见表 1, 其样本名称以所在位点名命名。由表 1 可见, 该批次样品采集时海水温度多在 30 °C 左右, pH 值偏碱。不同岛礁样品的电导率除晋卿岛较低外, 其余岛礁变化较小, 均在 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 左右。在所有营养盐数据中, 氨氮质量浓度在甘泉岛样品中较高, 而在其他岛礁中相对稳定; 总磷质量浓度在羚羊礁海水样品中较高; 总氮的质量浓度在羚羊礁和鸭公岛较高。

表 1 各采样点环境因子检测结果

Table 1 The environment factors of each sampling station

样品名称	$t/^\circ\text{C}$	pH	EC/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	$\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	TP 质量浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	TN 质量浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
GQ-1	33.7	8.25	49.6	1.132	0.083	19.99
GQ-2	31.2	8.24	49.8	1.269	0.051	20.68
GQ-3	31.7	8.35	49.2	1.779	0.042	20.28
JQ-1	30.4	8.47	29.5	0.531	0.019	23.59
JQ-2	30.3	8.49	29.8	0.543	0.021	23.42
JQ-3	30.4	8.53	29.4	0.537	0.024	23.63
LY-1	27.7	8.22	49.6	0.346	0.357	34.37
LY-2	27.7	8.28	50.6	0.307	0.409	34.79
LY-3	27.6	8.06	50.9	0.200	0.371	33.09
SY-1	21.6	8.25	49.9	0.418	0.056	19.04
SY-2	21.8	8.29	50.1	0.426	0.052	19.06
SY-3	21.4	8.24	50.2	0.436	0.054	19.30

续表

样品名称	$t/^\circ\text{C}$	pH	EC/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	$\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	TP 质量浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	TN 质量浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
YG-1	28.2	8.32	51.2	0.433	0.055	32.48
YG-2	28.0	8.27	51.2	0.445	0.052	32.46
YG-3	28.0	8.24	51.3	0.447	0.062	32.37
YY-1	28.1	8.30	49.1	0.336	0.069	20.80
YY-2	28.1	8.28	50.6	0.245	0.062	19.43
YY-3	28.0	8.31	51.1	0.387	0.058	23.12

2.2 物种注释与评估

2.2.1 OTU 分析

对 18 份 16S rDNA 文库进行测序, 共获得有效拼接序列 552 366 条。对所有序列按照 97% 相似水平进行物种注释, 共产生 7 364 个 OTU, 隶属于 43 个门、138 个纲、383 个目、652 个科、1 264 个属和 2 280 个种。

2.2.2 Alpha 多样性分析

利用 ACE、Shannon、Simpson 和 Chao1 指数以及 Coverage(覆盖率)等 Alpha 多样性指数表征物质的丰富度和多样性, 如表 2 所示, 样品分析覆盖率均达到 97% 以上, 表明各岛礁的样本覆盖率较为全面, 测序数据真实可信。Chao1 和 ACE 指数能反映细菌群落的丰富度, 其数值越大代表样本细菌群落丰富度越高。甘泉岛样本的 Chao1 和 ACE 丰富度指数最高, 羚羊礁最低, 表明甘泉岛样本的细菌群落丰富度最高、羚羊礁最低。Shannon 和 Simpson 指数反映的是微生物群落的多样性, 分析结果表明羚羊礁和甘泉岛的物种多样性较高, 而鸭公岛样品的物种多样性最低。

表 2 不同岛礁的细菌 Alpha 多样性指数

Table 2 Alphadiversity index of bacteria in different islands and reefs

岛礁	OTU 数	Chao1 指数	ACE 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	覆盖率/%
GQ	1 260	3 018	3 525	4.950	0.034	97.2
JQ	842	2 540	3 296	4.251	0.043	97.6
LY	1 042	1 231	1 255	5.073	0.026	99.3
SY	781	2 020	2 709	4.172	0.059	98.1
YG	973	2 485	2 908	3.572	0.160	97.6
YY	959	1 523	1 915	4.290	0.083	99.0

2.3 物种组成分析

2.3.1 样本与物种关系

分析物种与样本关系发现, 所有样品的优势菌门为变形菌门(Proteobacteria)、蓝细菌门(Cyanobacteriota)、拟杆菌门(Bacteroidota)、放线菌门(Actinobacteriota)、髌骨细菌门(Patescibacteria)和厚壁菌门(Firmicutes)(图 2)。变形菌门在各个岛礁样本中的相对丰度均为 50.0% 以上, 其中银屿最高, 占 75.0%; 蓝细菌门在石屿样本中的相对丰度最高, 为 26.0%, 在晋卿岛样本中的相对丰度最低, 为 0.6%; 拟杆菌门、放线菌门和疣微菌门(Verrucomicrobiota)在晋卿岛样本中相对丰度较高, 分别是 23.0%、8.1% 和 2.7%; 髌骨细菌门和蛭弧菌门(Bdellovibrionota)在甘泉岛相对丰度最高, 分别占 4.6% 和 1.8%; 而厚壁菌门在羚羊礁相对丰度较高, 为 3.9%。

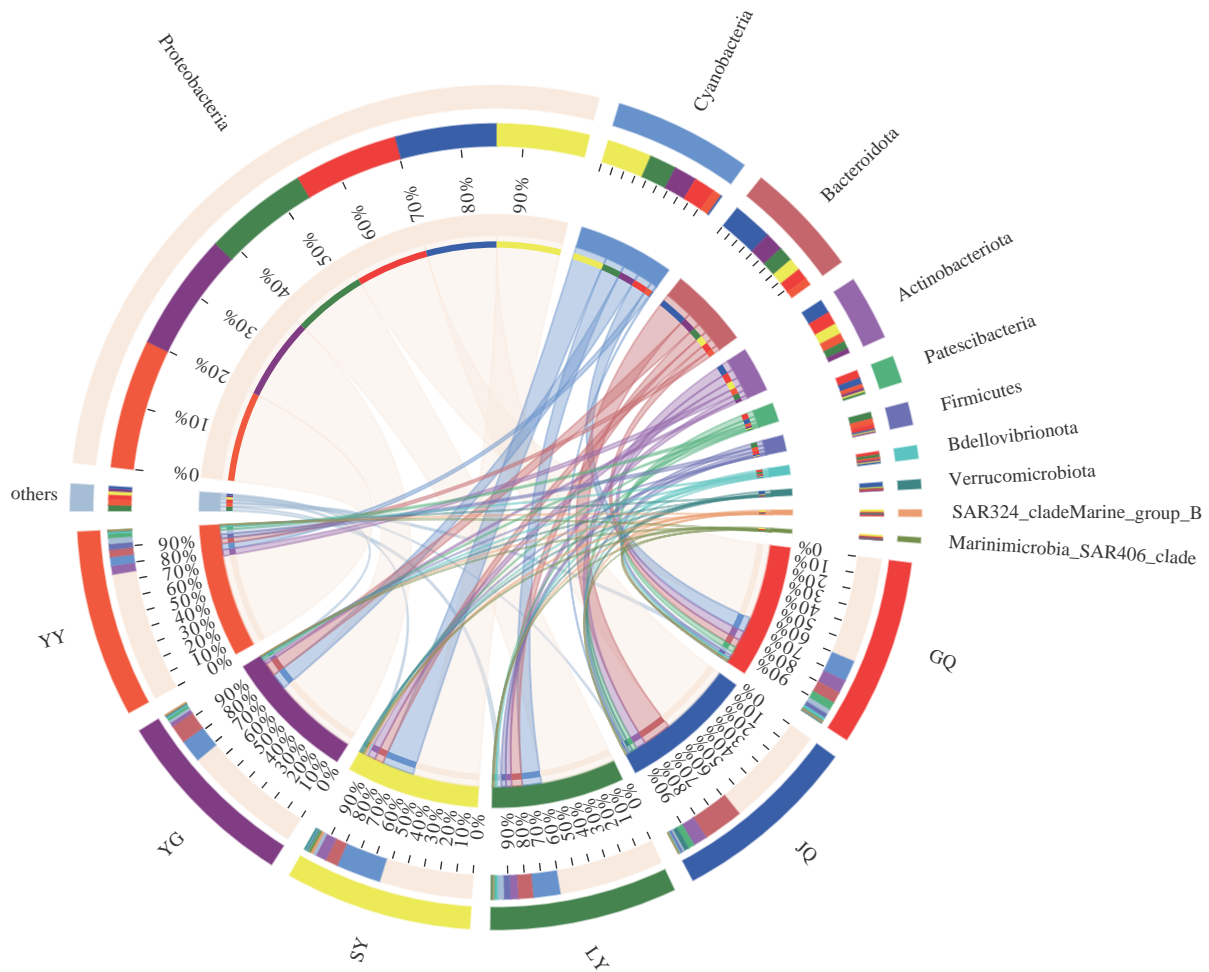


图 2 门水平的物种分布比例圈图

Fig. 2 Distribution of microbial communities at phylum level by circus plot

2.3.2 群落组成分析

为更直观展现各岛礁优势细菌的丰度变化以及相似性, 利用相对丰度排名前 20 纲水平细菌绘制群落热图, 如图 3 所示, 变形菌门的 α -变形菌纲和 γ -变形菌纲是所有样品中的优势类群。除鸭公岛样品中 γ -变形菌纲相对丰度最高外, 其他岛礁中均以 α -变形菌纲为主。拟杆菌纲、放线菌纲和疣微菌纲在晋卿岛海水中相对丰度较高。蓝细菌纲在石屿样品中相对丰度最高, 但在晋卿岛样品中其相对丰度非常低。

基于属分类水平的 6 个岛礁的细菌群落结构如图 4 所示, 除去未分类的菌株, 各岛礁样本的细菌构成和占比差异较为明显。细菌群落主要包括: 交替单胞菌属 (*Alteromonas*)、赤杆菌属 (*Erythrobacter*)、原绿球藻属 (*Prochlorococcus*)、聚球藻属 (*Synechococcus*) 以及短波单胞菌属 (*Brevundimonas*) 等。鸭公岛的优势菌为交替单胞菌属, 其相对丰度为 33.0%; 银屿的优势菌为赤杆菌属, 其相对丰度为 19.0%; 石屿和甘泉岛的优势菌为原绿球藻属, 其相对丰度分别为 19.0% 和 9.1%; 羚羊礁的优势菌为聚球藻属, 其相对丰度为 8.7%; 晋卿岛的优势菌为短波单胞菌属, 其相对丰度为 11.0%。

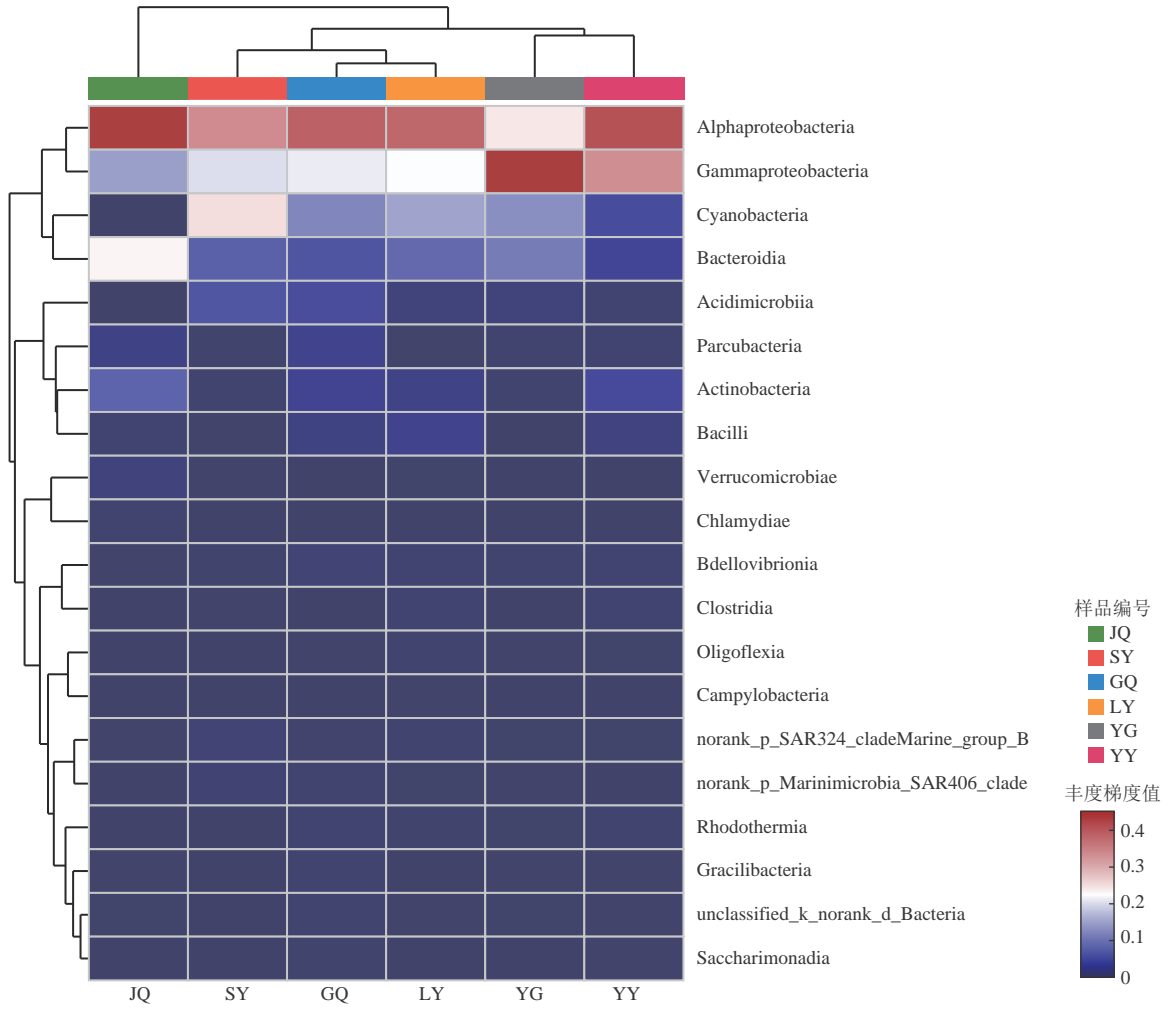


图 3 纲水平细菌相对丰度热图

Fig. 3 Heatmap of bacterial relative abundances at class level

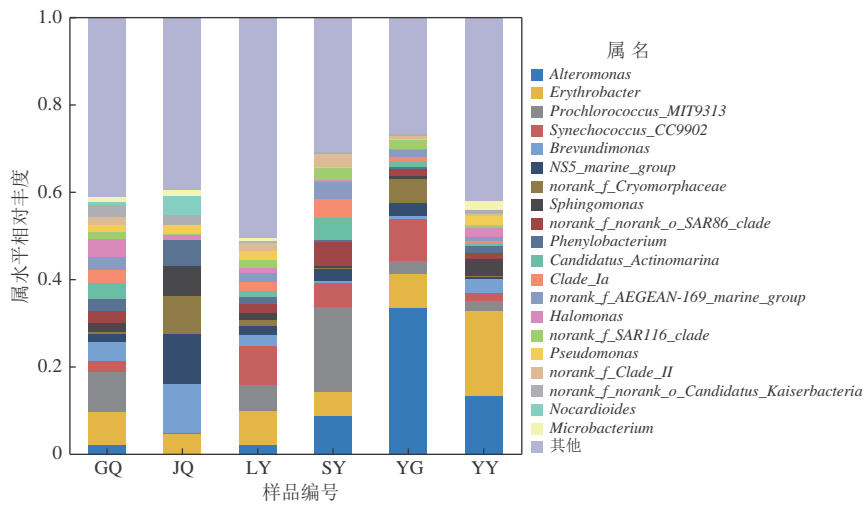


图 4 属水平的群落柱状图

Fig. 4 Barplot of bacterial communities at genus level

2.4 样本比较分析

Beta 多样性可反映不同样本微生物群落之间物种组成的差异。基于不同分组对各个样本进行非度量多维尺度(Non-metric Multidimensional Scaling, NMDS)分析, 不同样品在不同分类水平上的细菌群落组成的相似性以及基于进化关系或数量距离矩阵对比样本之间的差异如图 5 所示。与其他岛礁相比, 晋卿岛与其他岛礁样本的细菌群落组成存在明显的距离, 而鸭公岛、甘泉岛、羚羊礁和银屿样本之间距离相对较近, 表明这几个样本的细菌群落组成差异较小。从组内比较来看, 鸭公岛和甘泉岛的样本距离相对分散, 表明这两个岛礁样本组内的细菌群落结构差异较大。

2.5 细菌群落组成与环境因子的相关性

在门水平上, 构建了细菌群落与各环境因子之间的 RDA/CCA(Redundancy Analysis/Canonical Correspondence Analysis)分析图, 如图 6 所示, 对海水细菌群落影响最大的水质因子为电导率、pH 值和温度, 而总磷、总氮和氨氮对各岛礁物种的影响相对较小。RDA 分析结果显示第一轴可以解释 37.09% 的环境因子总变异, 第二轴解释 25.19% 总变异。与第一轴呈正相关的环境因子是电导率、总磷和氨氮, 说明细菌丰富度随着这 3 个环境因子值的增加而增加。此外, 电导率对石屿样本群落分布相对影响较大。

通过对门水平的前 20 位优势细菌类群与环境因子的相关性绘制热图, 发现浮霉菌门(Planctomycetota)与电导率显著正相关; 蓝细菌门与电导率显著正相关, 与温度和 pH 值极显著负相关; 骸骨菌门与氨氮、温度和 pH 正相关, 但与总磷负相关; 在晋卿岛相对丰度较高的放线菌门、疣微菌门和拟杆菌门菌群与电导率负相关, 且放线菌门与电导率为极显著负相关(图 7)。

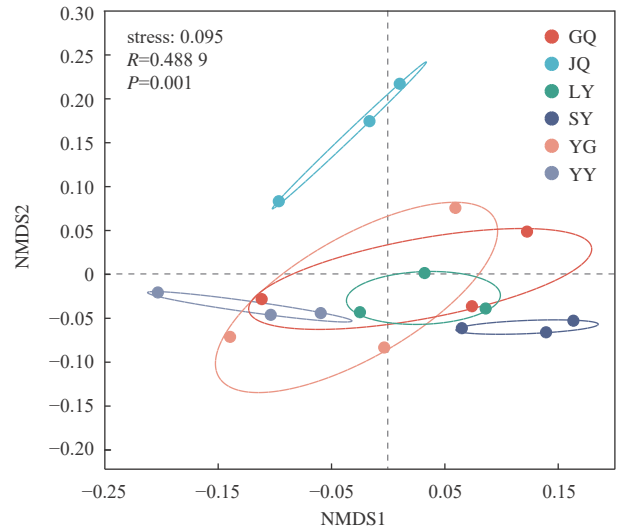


图 5 基于门水平分组的 NMDS 分析
Fig. 5 NMDS analysis based on the grouping at phylum level

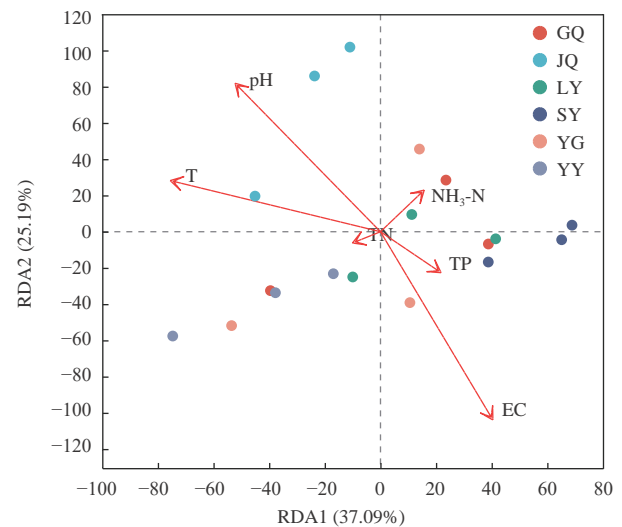
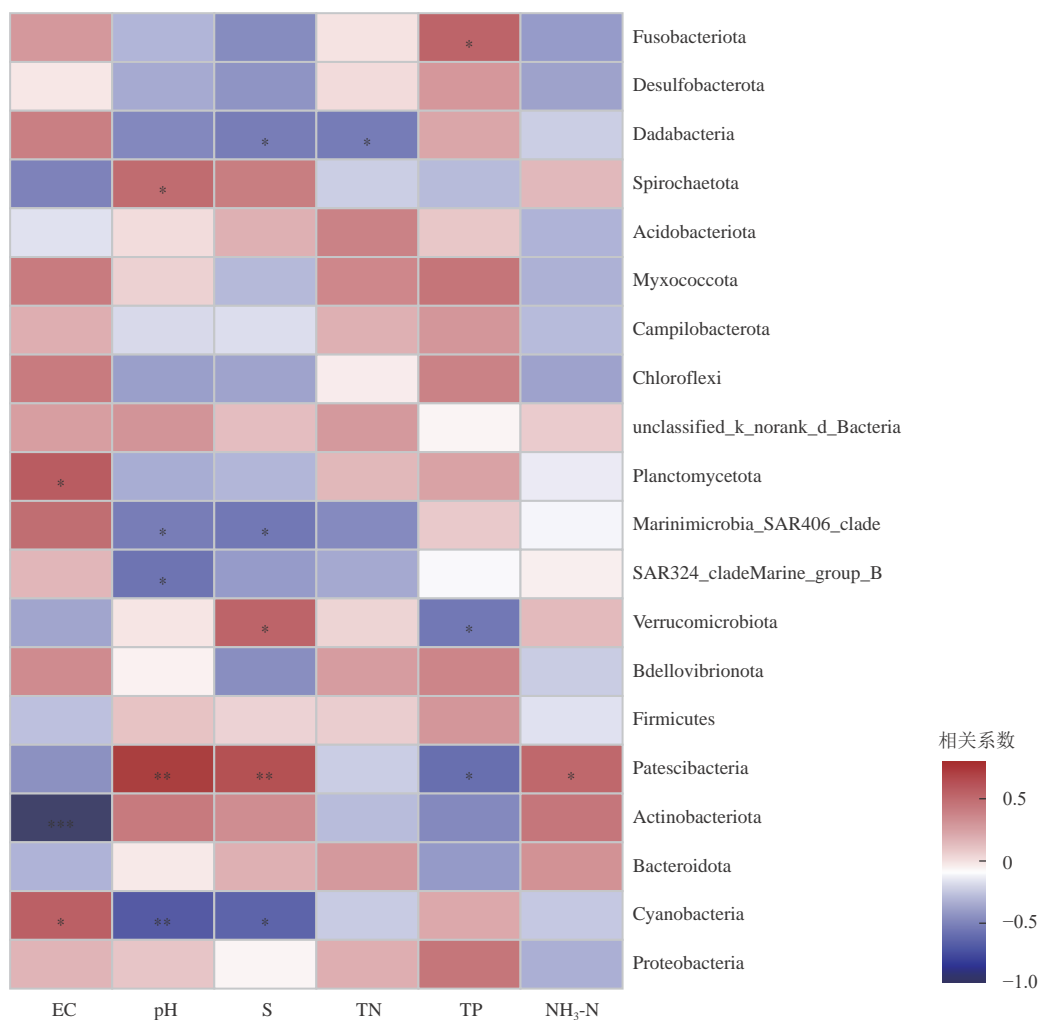


图 6 门水平细菌群落组成和环境因子的 RDA 分析
Fig. 6 The RDA analysis with microbial community and environmental factor on phylum level



注: X轴和Y轴分别为环境因子和物种, 通过计算获得相关性R值和P值; R值在图中以不同颜色展示, 红色代表正相关, 蓝色代表负相关, 白色代表无相关性; *代表 $P < 0.05$, **代表 $P < 0.01$, ***代表 $P < 0.001$ 。

图7 门水平优势细菌类群与环境因子的相关性热图

Fig. 7 Heatmap of correlation between dominant microbial group and environmental factors at phylum level

2.6 海水中细菌相关功能基因预测分析

基于16S rRNA基因, 通过PICRUST2软件研究各个岛礁的细菌相关功能潜力, 得到KEGG途径中3个级别水平的功能基因相对丰度: 一级通路按相对丰度由高到低顺序为代谢(76.56%~78.24%)、遗传信息处理(6.34%~7.34%)、环境信息处理(4.63%~5.49%)、人类疾病(4.05%~4.87%)、细胞过程(3.84%~4.81%)和生物体系统(1.89%~2.00%); 二级通路共得到海水细菌相关功能基因46个, 相对丰度由高到低为全局和概述地图、碳水化合物代谢、氨基酸代谢、能量代谢、辅助因子和维生素的代谢、翻译、信号转导、膜运输、复制和修复, 相对丰度最低的是信号分子和相互作用以及感觉系统; 三级通路共得到海水细菌相关功能基因399个, 图8为KEGG数据库比对到的50个相对丰度较高的三级功能层级热图, 不同样本功能基因丰度差异不明显。

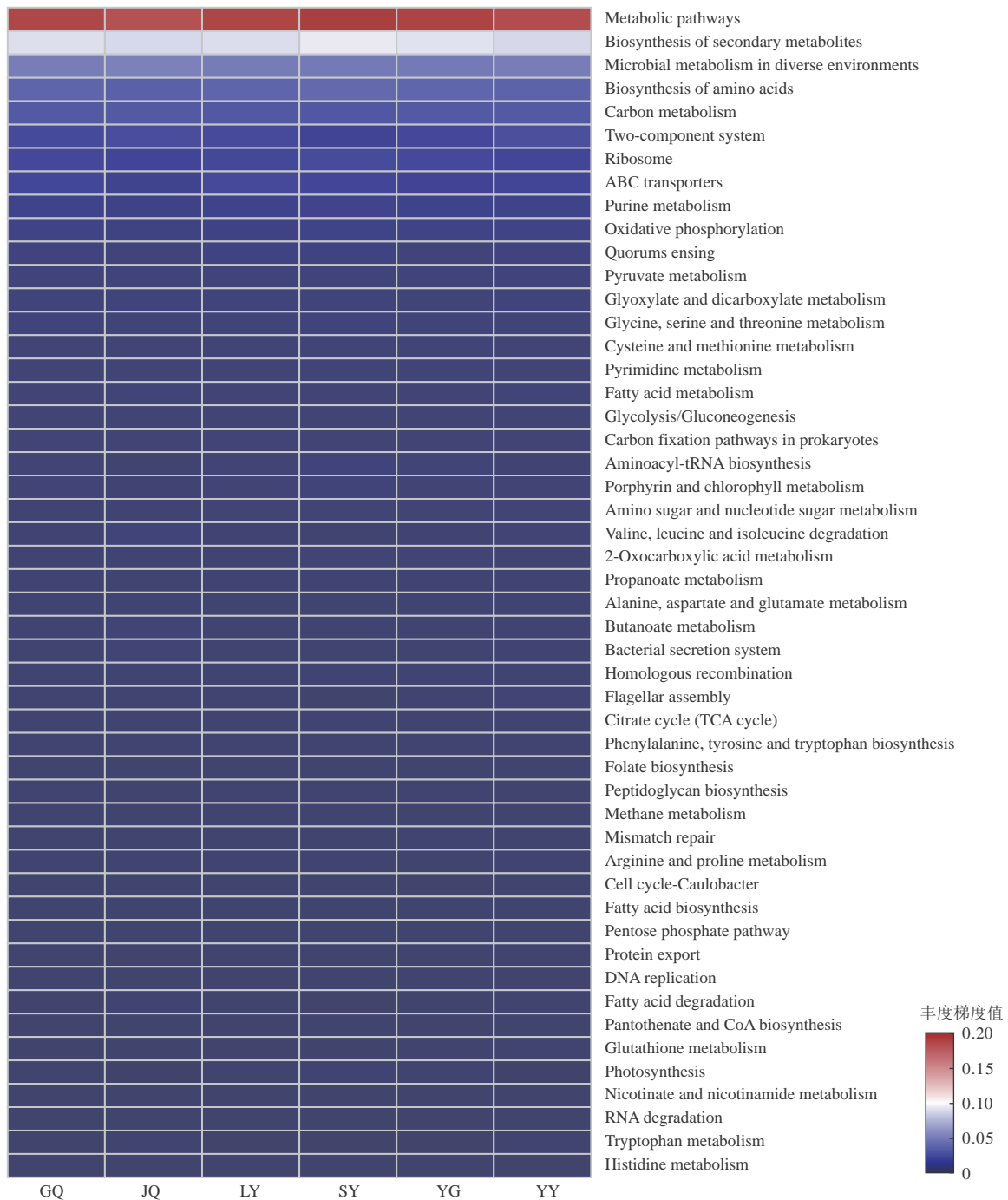


图 8 三级功能预测热图

Fig. 8 Heatmap of functional prediction on the metabolic pathways at level 3

三级通路中功能基因的相对丰度由高到低分别是代谢途径、次生代谢物的生物合成、微生物在不同环境中的代谢、氨基酸的生物合成以及碳代谢。晋卿岛样本的功能基因丰度较高, 其次为羚羊礁, 而鸭公岛样本的功能基因丰度最低。功能基因丰度与细菌多样性结果相对应。石屿样品的脂肪酸降解和氨基酸代谢基因相对丰度较低, 而在光合作用以及卟啉和叶绿素代谢通路富集, 这一结果与其海水样本中优势菌群为蓝细菌门的结果相对应。

3 讨论

3.1 细菌群落结构及其与环境的关系

本研究中,变形菌门是相对丰度最高的细菌类群,在各岛礁样本中均占据绝对优势,与前人进行的南海岛礁细菌群落空间结构的研究结果一致(徐蕾, 2017; He et al, 2019; 于淑贤等, 2019; 孙涛, 2021; 庄康, 2021; Liu et al, 2022; 夏呈强等, 2022; 赵旺等, 2022)。蓝藻菌门为第二大优势菌类群,主要由原绿球藻属和聚球藻属两大类群组成,其相对丰度在各个岛礁间的变化较大(0.6%~26%)。原绿球藻和聚球藻作为海洋中最丰富的光合微生物,是海洋初级生产力和碳循环的主角之一,对初级生产力有重要贡献(Flombaum et al, 2013)。据 Jiao 等(2002)报道,原绿球藻属广泛分布在营养贫瘠的海域,聚球藻属则在营养较丰富的海水中富集,本研究也得到类似的结果。石屿是6个岛礁中唯一没有居民居住的区域,总氮、总磷和氨氮均处于较低的质量浓度,本研究发现原绿球藻属在石屿表层海水中的相对丰度最高(19%),与大多数外海区的原绿球藻属相对丰度相似(Partensky et al, 1999; Johnson et al, 2006);聚球藻属主要在总氮质量浓度较高的鸭公岛和羚羊礁中富集。然而,在营养较不丰富的晋卿岛样本中,聚球藻属和原绿球藻属的相对丰度均极低(分别为0.2%和0.016%),原因可能与该岛礁表层海水较低的电导率有关,也可能存在其他未被测定的对群落结构有影响的环境因子。

羚羊礁作为渔民聚落区域,岛礁附近海水受到人类活动影响较大;同时羚羊礁也是贝类养殖区,海水中富含细菌生长所需的有机物质。有研究发现,大量营养物质的供应可以促使微生物适应各种环境(酸性、碱性、富营养和少营养环境),从而促进了微生物数量的增加(Gibson et al, 2018),因此,羚羊礁样本细菌多样性表现较高可能与该岛有较丰富的有机质相关。不少研究也发现贝类养殖区表层海水的微生物多样性较高,且主要以变形菌门和蓝细菌门为优势菌群(马景雪等, 2022; 黄文豪等, 2023)。研究表明,在上升流系统中交替单胞菌属会大量增加(Sun et al, 2020),在本研究中,交替单胞菌属在鸭公岛的相对丰度最高(33%),而鸭公岛由于受石屿门和银屿门两道水门的影响,岛礁附近海水流速极快,因此交替单胞菌在该岛样本中的富集可能与该岛的强对流海水有关。人类活动导致的各种有机物富集和岛礁本身复杂的水文条件可能是导致细菌多样性发生变化的原因,然而还需要更多的环境因素去验证。

3.2 不同岛礁的细菌功能性差异

PICRUSt 软件分析结果表明,晋卿岛海水细菌功能基因丰度最高,其次为羚羊礁,鸭公岛最低,这一结果与细菌多样性结论一致,因此较高的细菌多样性可能也暗示了较丰富的功能多样性。通过分析细菌群落组成我们发现拟杆菌纲、放线菌纲、嗜热油菌纲(Thermoleophilia)和疣微菌纲均主要集中在晋卿岛,说明细菌功能基因的丰度差异除了与细菌群落多样性有关,还和群落结构组成密切相关(孙涛, 2021)。此外,通过比较我们发现有人类居住的岛礁和无居民岛礁其细菌群落在功能基因丰度上差异不明显,与李存等(2022)的研究结论一致,这一结果表明岛礁表层海水细菌的生态功能并未因为岛礁上的人为活动而受到影响。

4 结论

本研究利用16S rDNA高通量测序技术,对永乐环礁的6个岛礁表层海水细菌群落的结构和组成进行了分析,同时对细菌群落多样性与环境因子相关性进行了分析,并采用PICRUSt软件预测其功能,主要结论如下。

1)所得的合格序列中,大部分 16S rDNA 序列归属于变形菌门。在纲水平, α -变形菌纲和 γ -变形菌纲是所有岛礁样品中的优势类群,而在属水平,各岛礁样品的优势菌群差异较大。细菌群落组成与结构主要与电导率、温度和 pH 相关,而受总氮、总磷和氨氮的影响相对较小。

2)PICRUSt 功能预测分析表明各岛礁的表层海水细菌主要涉及代谢、遗传信息处理和环境信息处理等 6 类生物代谢通路,三级代谢通路以代谢途径、次生代谢物的生物合成相对丰度最高。各岛礁海水细菌群落在功能丰度上有所差异,其中晋卿岛的功能丰度较高,但总体而言,有居民岛礁和无居民岛礁其表层海水的细菌群体在其生态功能方面变化较小。

本研究为西沙群岛细菌群落组成和环境的关系以及细菌功能基因的进一步研究提供了理论参考。但由于本研究样品量有限,并且缺乏对不同季节和年份的样品采集,因此无法对永乐环礁细菌群落进行更深入的研究。

参考文献 (References):

- 方周,谭飞,杨红强,等,2021. 西沙海域甘泉岛和全富岛海滩上的塑料垃圾与微塑料分布特征[J]. 热带海洋学报, 40(5): 123-133. FANG Z, TAN F, YANG H Q, et al, 2021. Distribution characteristics of plastic debris and microplastics on the beaches of Ganquan Island and Quanfu Island in Xisha Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 40(5): 123-133.
- 洪居悬,2020. 凡纳滨对虾幼体肠道菌群演替及几种益生菌的育苗效果[D]. 湛江: 广东海洋大学. HONG J K, 2020. Succession of intestinal microbiota of *Litopenaeus vannamei* larvae and the impacts of several probiotics on larviculture[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University.
- 黄文豪,刘婷,郑明刚,等,2023. 日照贝类养殖区海水微生物群落结构特征及其影响因素[J]. 海洋科学进展, 41(2): 295-308. HUANG W H, LIU T, ZHENG M G, et al, 2023. Characteristics and impact factors of seawater microbial community structure in Rizhao shellfish aquaculture area[J]. Advances in Marine Science, 41(2): 295-308.
- 李存,崔林青,杨红强,等,2022. 三份南海岛礁珊瑚砂样品中可培养细菌多样性[J]. 热带海洋学报, 41(2): 149-158. LI C, CUI L Q, YANG H Q, et al, 2022. Diversity of cultured bacteria isolated from three coral reef sediments in South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 41(2): 149-158.
- 刘瑞志,雷坤,王丽平,等,2019. 三沙永乐龙洞内沉积物细菌种群特征[J]. 海洋环境科学, 38(6): 919-926. LIU R Z, LEI K, WANG L P, et al, 2019. Bacterial population characteristics of sediment from Sansha Yongle Blue Hole, China[J]. Marine Environmental Science, 38(6): 919-926.
- 马景雪,张培玉,王宗兴,等,2022. 青岛崂山湾近海扇贝养殖区细菌多样性及环境因子分析[J]. 海洋科学进展, 40(2): 307-319. MA J X, ZHANG P Y, WANG Z X, et al, 2022. Analysis of bacterial diversity and environmental factors in off-shore scallop culture area of Laoshan Bay, Qingdao[J]. Advances in Marine Science, 40(2): 307-319.
- 苏洁,明红霞,陈泉睿,等,2020. 南沙海区深海沉积物中细菌多样性分析[J]. 生物学杂志, 37(1): 50-53. SU J, MING H X, CHEN Q R, et al, 2020. Analysis on bacterial diversity in Nansha deep-sea sediments[J]. Journal of Biology, 37(1): 50-53.
- 孙涛,2021. 南海海域海水和沉积物中细菌多样性和分布特征[D]. 上海: 上海海洋大学. SUN T, 2021. The diversity and distribution characteristics of bacteria in seawater and sediments of the South China Sea[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University.
- 夏呈强,李毅,党延茹,等,2022. 中印度洋与南海西部表层海水细菌多样性[J]. 生物多样性, 30(1): 1-10. XIA C Q, LI Y, DANG Y R, et al, 2022. Diversity of culturable and in situ bacteria in surface seawater from the central Indian Ocean and the western South China Sea[J]. Biodiversity Science, 30(1): 1-10.
- 徐蕾,2017. 南海北部陆坡不同水层微生物的多样性以及海洋细菌 *Kangiella* 的生理特性的初步研究[D]. 上海: 上海交通大学. XU L, 2017. Microbial Communities structure and in the northern slope of South China Sea & priliminary functional studies of *Kangiella* strains[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University.
- 杨睿,2019. 南海宣德环礁表层沉积物微生物群落及其环境指示作用研究[D]. 北京: 中国地质大学. YANG R, 2019. The

- study of microbial communities and their potentiality to be environmental indicators of surfacelayer sediments in Xuande Atoll, the South China Sea[D]. Beijing: China University of Geosciences.
- 于淑贤, 王寅初, 李佳霖, 等, 2019. 南海北部水层间及沉积表层细菌群落的比较分析[J]. 海洋科学进展, 37(1): 102-114. YU S X, WANG Y C, LI J L, et al, 2019. Comparative analysis of bacteria communities from water and sediment in northern South China Sea[J]. Advances in Marine Science, 37(1): 102-114.
- 张浩, 吴后波, 王广华, 等, 2013. 南海北部表层沉积物中原核微生物多样性[J]. 微生物学报, 53(9): 915-926. ZHANG H, WU H B, WANG G H, et al, 2013. Prokaryote diversity in the surface sediment of northern South China Sea[J]. Acta Microbiologica Sinica, 53(9): 915-926.
- 赵金发, 刘永, 李纯厚, 等, 2023. 应用高通量测序技术研究永乐环礁和东岛鱼卵种类组成和分布[J]. 热带海洋学报, (6): 1-10. ZHAO J F, LIU Y, LI C H, et al, 2023. Study on species composition and distribution of fish eggs in Yongle Atoll and Dongdao Island by high-throughput sequencing technology[J]. Journal of Tropical Oceanography, (6): 1-10.
- 赵旺, 黄星美, 邓正华, 等, 2022. 夏季美济礁潟湖养殖区海水细菌多样性及其与环境因子的相关性[J]. 中国水产科学, 29(5): 720-731. ZHAO W, HUANG X M, DENG Z H, et al, 2022. Analysis of bacterial diversity and correlation with environmental factors in the aquaculture area of Mischief Reef Lagoon in summer[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 29(5): 720-731.
- 周进, 晋慧, 蔡中华, 2014. 微生物在珊瑚礁生态系统中的作用与功能[J]. 应用生态学报, 25(3): 919-930. ZHOU J, JIN H, CAI Z H, 2014. A review of the role and function of microbes in coral reef ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 25(3): 919-930.
- 庄康, 2021. 南海岛礁海域细菌群落特征及柴油降解菌特性分析[D]. 舟山: 浙江海洋大学. ZHUANG K, 2021. Analysis of bacterial community and characteristics of diesel degrading bacteria in islands area of the South China Sea[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University.
- FLOMBAUM P, GALLEGOS J L, GORDILLO RA, et al, 2013. Present and future global distributions of the marine cyanobacteria *Prochlorococcus* and *Synechococcus*[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 110(24): 9824-9829.
- GIBSON B, WILSON D J, FEIL E, et al, 2018. The distribution of bacterial doubling times in the wild[J]. Proceedings Biological Sciences, 285(1880): 20180789.
- HE H, FU L L, LIU Q, et al, 2019. Community structure, abundance and potential functions of bacteria and archaea in the Sansha Yongle Blue Hole, Xisha, South China Sea[J]. Frontiers in Microbiology, 10: 2404.
- JIAO N Z, YANG Y H, 2002. Ecological studies on *Prochlorococcus* in China seas[J]. Chinese Science Bulletin, 47(15): 1243-1250.
- JOHNSON Z I, ZINSER E R, COE A, et al, 2006. Niche partitioning among *Prochlorococcus* ecotypes along ocean-scale environmental gradients[J]. Science, 311: 1737-1740.
- LIU S J, XIE Z X, WU P F, et al, 2022. Composition and assembly of the bacterial community in the overlying waters of the coral reef of China's Xisha Islands[J]. Frontiers in Microbiology, 13: 1059262.
- PARTENSKY F, BLANCHOT J, VAULOT D, 1999. Differential distribution and ecology of *Prochlorococcus* and *Synechococcus* in oceanic waters: a review[J]. Marine Cyanobacteria, Special No. 19: 457-476.
- SUN F L, WU M L, WANG Y S, et al, 2020. Diversity and potential function of bacterial communities in different upwelling systems[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 237: 106698.
- ZHANG J, CHEN M, HUANG J F, et al, 2019. Diversity of the microbial community and cultivable protease-producing bacteria in the sediments of the Bohai Sea, Yellow Sea and South China Sea[J]. PLoS One, 14(4): 1-18.

Diversity and Functional Prediction of Bacterial Communities in Surface Seawater of Yongle Atoll

SHU Aimei^{1,2}, GONG Chunguang¹, HUANG Huiqin², HU Yonghua^{2,3}, MO Kunlian²

(1. *College of Oceanography, Agriculture University of Hebei, Qinhuangdao 066003, China;*

2. *Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, CATAS, Haikou 571101, China;*

3. *Zhanjiang Experimental Station, CATAS, Zhanjiang 524013, China*)

Abstract: To investigate the bacterial community structure, composition and diversity in surface seawater of Yongle atoll, Illumina MiSeq sequencing was used to analyze the difference in composition of the bacterial communities at six islands and reefs. The main environmental impact factors affecting bacteria community structure were explored and the functional genes of bacteria community were also predicted. A total of 891 892 high-quality sequences clustering 7 499 optimized OTUs were obtained. These OTUs were subordinated to 49 phyla, 144 classes, 392 orders, 663 families, and 1 274 genera. The bacteria communities were dominated by *Proteobacteria*, *Cyanobacteria*, *Bacteroidetes*, *Actinobacteria*, *Patescibacteria* and *Firmicutes*. Redundancy analysis revealed that the conductivity, pH and temperature were the main environmental factors affecting the microbial assemblages. The results of PICRUSt analysis showed that 6 biological metabolic pathways and 46 subfunctionalities were predicted; a total of 399 functional genes at level 3 pathways were obtained, of which the most abundant functional genes were related to metabolic pathways and the biosynthesis of secondary metabolites. This study analyzes the bacterial community compositions in surface seawater and predicts their gene functions at six islands and reefs of Yongle atoll, providing a basic data for further investigation and development of microbial resources.

Keywords: Yongle atoll; bacteria diversity; environmental factors; functional prediction

Received: July 25, 2023 **Online:** May 23, 2024

群体感应对藻际细菌 *Sulfitobacter pseudonitzschiae* H46 生理活性调控的研究

迟旭辉¹, 杨 淋¹, 张彦超¹, 胡天翼¹, 王 帅¹, 郑 立^{1,2*}

(1. 自然资源部第一海洋研究所青岛市现代分析与近海生态环境安全保障重点实验室,
山东 青岛 266061;

2. 崂山实验室海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 针对海洋细菌群体感应调控功能的热点问题, 研究了藻际细菌 *Sulfitobacter pseudonitzschiae* H46 的群体感应系统对菌株 H46 的生态功能和抑藻活性的影响, 探讨了基于群体感应介导的藻菌相互作用关系。通过添加不同浓度群体感应抑制剂(β -环糊精), 分析了亚硫杆菌 H46 成膜性、DMSP 降解能力、抑藻活性的变化, 了解了亚硫杆菌 H46 群体感应系统潜在的调控功能。结果表明, β -环糊精在一定程度上淬灭了亚硫杆菌 H46 的群体感应信号分子 AHLs 的诱导活性, 导致亚硫杆菌 H46 的成膜能力、DMSP 降解能力和抑藻活性受到抑制。本文以群体感应调节细菌生态学功能为切入点, 探讨了藻际细菌对微藻生长的抑制作用, 为藻菌互作机制研究提供新的视角。

关键词: 藻菌互作; 藻际环境; 亚硫杆菌; 群体感应; 抑藻活性

中图分类号: Q93-3

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2024)04-0738-15

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20230915001

引用格式: 迟旭辉, 杨淋, 张彦超, 等, 2024. 群体感应对藻际细菌 *Sulfitobacter pseudonitzschiae* H46 生理活性调控的研究[J]. 海洋科学进展, 42(4): 738-752. CHI X H, YANG L, ZHANG Y C, et al, 2024. Study on the biological activities of phycospheric bacterium *Sulfitobacter pseudonitzschiae* H46 regulated by quorum sensing[J]. Advances in Marine Science, 42(4): 738-752.

海洋微藻作为全球碳循环中重要的初级生产者, 其种类的变化对海洋生态环境、海区生产力等会产生影响(Falkowski, 1994)。在藻类的生长过程中, 藻细胞不断向其周围环境分泌多种代谢产物如脂质、多糖、酶类、氨基酸、维生素、毒素, 以及生长抑制和促进因子等(高亚辉, 2001), 吸引大量细菌聚集, 这些细菌与藻细胞共同构成了相对稳定的藻际环境(Phycosphere)(Zhou et al, 2020)。在藻际环境中, 细菌和藻细胞通过营养物质代谢、信息分子交流, 实现互利、拮抗等复杂关系。一方面, 细菌可以利用微藻的胞外物质生存, 并分泌维生素 B12、生长素和吲哚乙酸等代谢产物促进藻细胞生长, 实现互惠互利(Wagner-Döbler et al, 2006)。另一方面, 部分细菌会分泌溶藻物质使得藻细胞裂解死亡, 从而控制微藻生物量(Park et al, 2007)。其中, 藻际细菌对微藻生长的抑制是调控微藻群落的重要生态学现象, 特别是对一些赤潮微藻, 影响着赤潮的生消过程。

研究发现, 细菌对微藻的抑制并不是在藻菌共栖期间持续发生的, 会受到特定机制的调控

收稿日期: 2023-09-15 网络首发日期: 2024-06-20

资助项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(2021Q10); 国家自然科学基金项目(41776176 和 4180620); 泰山产业领军人才工程专项经费项目(tscx202306084); 国家留学基金项目(2022)

作者简介: 迟旭辉(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事藻菌关系方面研究. E-mail: x.x.x.chi@163.com

* 通信作者: 郑 立(1976—), 男, 研究员, 博士, 主要从事微生物方面研究. E-mail: zhengli@fio.org.cn

(胡筱敏 编辑)

(Furusawa et al, 2003; Paul et al, 2011; Li et al, 2016)。当细菌对某种藻类具有趋化作用, 由于藻类分泌特殊营养物质吸引细菌, 使得细菌趋向藻类并附着在表面后, 释放抑藻物质裂解藻细胞获取其释放物(Li et al, 2016)。另外, 在营养稀缺条件下, 细菌可能竞争杀死藻类从而获取藻细胞中丰富的营养物质, 此时抑藻物质的产生与环境中 PO_4^{3-} 、 Mg^{2+} 呈现负相关(Furusawa et al, 2003)。另外, 细菌生长和繁殖的过程中会向外界分泌信号分子——自体诱导物(Autoinducer, AI)(Miller et al, 2001), 随着藻际细菌密度增大, 信号分子逐渐增多, 当其浓度达到某一阈值时, 便可被相应的受体感知, 进而启动相关基因的表达, 激活相应的代谢通路, 调节菌群的生理特性, 这种现象被称为群体感应(Quorum Sensing, QS)(Waters et al, 2005)。细菌对微藻的抑制也受到群体感应的调控。细菌的多种功能特性均受QS调控, 包括生物膜的形成、菌体的运动、毒素的分泌、抗生素以及细菌素的产生等(Papenfort et al, 2016)。在细菌中最为普遍的是由N-酰基高丝氨酸内酯类(N-acyl-homoserine lactones, AHLs)及其衍生物类信号分子介导的QS系统, 受到AHLs合成酶LuxI和转录调控因子LuxR两种蛋白调控。多项研究已经证明群体感应是藻类和共栖细菌之间重要的信息交流机制(Tang et al, 2015; Zhou et al, 2016a, 2016b, 2016c), 但是对于抑藻活性而言, 却少有发现群体感应系统的调控参与。此前有学者发现赤潮初期抑藻菌虽然增多但并不表现出抑藻活性, 只有当细菌生长到一定密度, 才会发生抑藻现象进而加速藻类消亡(史顺玉等, 2004; Sohn et al, 2004; Volk, 2005; Paul et al, 2011)。这种依赖一定细菌密度的抑藻活性可能受到QS系统调节(李馨子, 2014)。2011年Paul和Pohnert发现拟杆菌门细菌 *Kordia algicida* 的抑藻蛋白酶存在群体感应依赖性排泄机制(Paul et al, 2011), 是QS调控抑藻活性的一个很好的证据。周文礼等(2011)发现小球藻的共栖菌株Z-QS01抑藻物质的分泌存在明显的密度效应, 进一步说明QS可能调控的溶藻行为。Zhou等(2016a, 2016b)发现产长链AHLs的耐压希瓦氏菌(*Shewanella piezotolerans* 34)的抑藻能力与AHLs浓度呈线性关系, 且在分泌C6-AHL分子的海洋肠杆菌(*Enterobacter* sp. ST3)中也发现了这种抑藻能力和AHLs分子的相关性。但关于藻际细菌通过群体感应调控抑藻活性的研究还未见报道。

亚硫杆菌 *Sulfitobacter pseudonitzschiae* 属于 α -变形菌纲中红杆菌目红杆菌科玫瑰杆菌类群 *Rosebacter* 类群, 玫瑰杆菌类群是海洋中重要的优势细菌类群, 具有许多独特的功能, 如较强的成膜性, 抑菌和抑藻活性等, 还可以降解烃类化合物(Hara et al, 2003; Buchan et al, 2019)和二甲基巯基丙酸内盐(Dimethylsulphoniopropionate, DMSP)(Zeng et al, 2019)。目前, 玫瑰杆菌中的亚硫杆菌在研究中被认为是与硅藻互利共生的一种类群(樊乾龙, 2016; 韩光耀等, 2017; Bigalke et al, 2019), 且具有产生吡啶乙酸和降解DMSP的功能(韩光耀等, 2017; Bigalke et al, 2019)。通过对藻际细菌多样性研究发现, 亚硫杆菌存在于多种海洋微藻藻际环境中(Schäfer et al, 2002; Kaczmarek et al, 2005; Grossart et al, 2005; Sapp et al, 2007a, 2007b, 2007c; Hünken et al, 2008; Hong et al, 2015; Töpel et al, 2019), 但它对不同藻类的作用方式存在差异(Amin et al, 2015)。

我们在前期实验中, 从东海原甲藻(甲藻) *Prorocentrum donghaiense* 和赤潮异弯藻(针胞藻) *Heterosigma akashiwo* 的藻际环境中分离得到藻际细菌 *Sulfitobacter pseudonitzschiae* H46, 检测发现其存在由N-酰基高丝氨酸内酯(AHLs)作为信号分子介导的群体感应系统。抑藻活性检测显示出菌株H46对甲藻类的塔玛亚历山大藻和针胞藻纲的卡盾藻都具有非常明显的抑制能力, 且具有一定的成膜和DMSP降解能力(Hu et al, 2021)。但是H46的生理活性, 特别是抑藻活性与群体感应存在何种关系, 群体感应的调控功能是什么尚不清楚。因此, 本研究以 *Sulfitobacter pseudonitzschiae* H46 为研究对象, 通过群体感应抑制剂 β -环糊精(Ikeda et al, 2002)淬灭AHLs信号分子活性, 探究群体感应对H46的成膜性、DMSP降解能力及对卡盾藻的抑藻活性的调控作用, 进而探讨群体感应在藻菌作用关系中的生态角色, 为赤潮的生物防控技术提供一个新的思路。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 所用菌株、藻株

实验所用的 13 株微藻均来自于自然资源部第一海洋研究所藻种库, 分别为: 常见的绿藻(饵料藻), 包括小球藻(*Chlorella vulgaris*)、青岛大扁藻(*Platymonas helgolandica tsingtaoensis*)和盐生杜氏藻(*Dunaliella salina*); 硅藻, 包括长菱形藻(*Nitzschia longissima*)、新月菱形藻(*Nitzschia Closterium*)和三角褐指藻(*Phaeodactylum tricornutum*); 常见的赤潮藻, 包括利玛原甲藻(*Prorocentrum lima*)、微小原甲藻(*Prorocentrum minimum*)、东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*)、米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*)和塔玛亚历山大藻(*Alexandrium tamarensense*)五种甲藻, 赤潮异弯藻(*Heterosigma akashiwo*)、海洋卡盾藻(*Chattonella marina*)两种针胞藻。

实验所用菌株亚硫杆菌 *Sulfitobacter pseudonitzschiae* H46 为本实验组前期实验所得, 筛选自海洋微藻东海原甲藻 *Prorocentrum donghaiense* 和赤潮异弯藻 *Heterosigma akashiwo* 的藻际环境。检测 AHLs 信号分子的指示菌株为根癌农杆菌 *Agrobacterium tumefaciens* KYC55 (pJZ372) (pJZ384) (pJZ410), 由美国马里兰大学海洋环境与技术研究所 Hill 教授惠赠。

1.1.2 培养基

对 H46 细菌采用 2216E 进行常规培养, 利用 DMSP 培养基进行降解实验, 并采用 LB 培养基进行 *E. coli* 培养(李馨子, 2014; Hu et al, 2021)。

AT 固体及液体培养基(李馨子, 2014)用于指示菌株 KYC55 的纯化、培养与 AHLs 检测, 为避免菌株 KYC55 传代丢失质粒, 需在 AT 培养基灭菌后加入抗生素(四环素终浓度为 4.5 μg/mL, 庆大霉素终浓度为 50 μg/mL, 壮观霉素终浓度为 50 μg/mL), 用 0.22 μm 的滤膜过滤备用(Hu et al, 2021)。f/2 培养基用于各类微藻培养(李馨子, 2014; Hu et al, 2021)。

1.2 实验方法

1.2.1 H46 抑藻谱研究

选取 13 种微藻作为抑藻目标藻株。H46 在 30 °C、150 r/min、2216E 培养 24 h, 4 °C、8 000 r/min 条件下离心 10 min 得到上清, 将 H46 上清按终浓度 10%(V/V)添加到对数生长期的藻液中, 以 2216E 液体培养基为阴性对照。将灭菌小瓶放置于光照培养箱中, 在 20 °C、光照强度为 76 μmol/(m²·s⁻¹)、12 h 光照、12 h 黑暗条件下培养 5 d。取样 200 μL 通过酶标仪在 488 nm 激发波长、682 nm 发射波长条件下测量叶绿素 *a* 自发荧光曲线顶点变化, 计算获得 H46 菌液上清对藻细胞生长的抑制率 IR(%):

$$IR = \frac{I^0 - I}{I^0} \times 100, \quad (1)$$

式中: I^0 为阴性对照组藻液叶绿素 *a* 荧光强度; I 为处理组藻液 H46 上清处理后的叶绿素 *a* 荧光强度。

1.2.2 群体感应信号分子的研究

1) AHLs 信号分子的萃取

将 H46 培养至 OD₆₀₀=0.7, 参考 Hu 等(2021)和 Zhang 等(2022)方法用乙酸乙酯(分析纯)萃取 H46 菌液上清。将乙酸乙酯萃取液按 500:1 浓缩至乙酸乙酯(含 0.01% 乙酸, V/V)相中, 放在 -20 °C 冰箱中保存。

2) 生物自显影检测群体感应现象

将 0.8% 琼脂培养基高压灭菌后, 在超净工作台取 10 mL 铺在无菌培养皿中, 待其凝固后吸取

20 μL H46 的乙酸乙酯萃取物滴在琼脂中央。在 55 $^{\circ}\text{C}$ 的 AT 固体培养基中,按 1%(V/V)接种 KYC55 (Hu et al, 2021; Zhang et al, 2022)。摇匀后倒入 5 mL 接种 KYC55 的 AT 培养基覆盖于上述 0.8% 琼脂培养基上,在 30 $^{\circ}\text{C}$ 倒置培养 24 h 后观察变色情况。

3) 生物自显影分析 AHLs 种类

将 5 μL 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ AHLs 标准品 (C6-HSL、C8-HSL、3-oxo-C6-HSL、3-oxo-C8-HSL、3-oxo-C10-HSL) 和 10 μL 菌株 H46 的 AHLs 粗提物浓缩液依次在 TTL-DC C18 反相薄层层析色谱板(美国 Merck 公司)上点样,用 60% 的色谱甲醇溶液进行展层。参考 Hu 等(2021)和 Zhang 等(2022)方法观察 TLC 硅胶板上蓝斑的位置和数目,计算比移值(Retention Factor, Rf)并与 AHLs 标准品进行比对 (Ibelings et al, 2004),从而确定 H46 细菌产生 AHLs 的种类。

4) GC-MS 分析 AHLs 信号分子的种类

取 50 μL 用 0.22 μm 滤膜过滤后的 H46 菌 AHLs 粗提物浓缩液于气相小瓶中进行 GC-MS 检测,并以 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ AHLs 标准品作为阳性对照,使用气相色谱质谱串联方法(Cataldi et al, 2007)对 AHLs 的种类以及含量进行检测。

1.2.3 群体感应抑制剂 β -环糊精对细菌 H46 生长的影响

用 β -环糊精作为群体感应抑制剂,探究 β -环糊精淬灭群体感应之后对 H46 抑藻活性影响,需要先确定 β -环糊精对 H46 的生长是否产生影响。培养 H46 至 $\text{OD}_{600}=0.7$,将活化后的 H46 按 2% 接种于 2216E 培养基,并添加终浓度为 1、3 和 5 mg/mL 的 β -环糊精,培养 54 h。定期取样,测定菌液 OD_{600} 并绘制生长曲线,以此表示细菌的生长情况。

1.2.4 群体感应抑制剂 β -环糊精对 H46 群体感应信号分子 AHLs 的螯合影响

培养 H46 至 $\text{OD}_{600}=0.7$,将活化后的 H46 按 2% 接种于 2216E 培养基,并添加终浓度为 1、3 和 5 mg/mL 的 β -环糊精,培养 24 h。采用乙酸乙酯萃取法(Hu et al, 2021)获得 H46 上清液中的 AHLs 信号分子,采用生物自显影方法(Hu et al, 2021)将与不同浓度 β -环糊精共培养 24 h 后萃取获得的 H46 的乙酸乙酯萃取物吸取 20 μL 依次点在不同 0.8% 琼脂的平板上,覆盖含有 KYC55 的 AT 固体培养基后,在 30 $^{\circ}\text{C}$ 倒置培养 24 h 后观察变色情况。测量与不同浓度 β -环糊精共培养后获得的 H46 乙酸乙酯萃取物的显色距离,显色距离为点样处与其正下方距其最远的蓝斑之间的直线距离。

1.2.5 淬灭群体感应对细菌 H46 成膜能力研究

分别取 10 μL 的 H46 菌液($\text{OD}_{600}=0.3$)和含终浓度为 0、1、3 和 5 mg/mL β -环糊精的 2216E 培养基各 190 μL 加入到 96 孔微量培养板中,在 30 $^{\circ}\text{C}$ 静置培养 72 h;采用结晶紫染色实验(Hu et al, 2021)检测 H46 细菌的成膜能力;用酶标仪测量 OD_{600} 处的吸光值并做记录;以 *E.coli* DH5 α 为阴性对照,比较 H46 菌株成膜能力。

1.2.6 淬灭群体感应对细菌 H46 的 DMSP 降解功能研究

将 H46 培养至 $\text{OD}_{600}=0.7$,随后在超净台中将 180 μL DMSP 培养基和 20 μL 的 H46 菌液加入到气相小瓶中并添加终浓度为 0、1、3 和 5 mg/mL 的 β -环糊精,立即拧紧瓶盖,在 200 r/min , 30 $^{\circ}\text{C}$ 避光培养。利用顶空-气相色谱仪检测培养 48 h 后 H46 体系的 DMSP 的含量来反推样品中 DMSP 的降解量(Dacey et al, 1987; Williams et al, 2019)。通过碱解不同浓度梯度的 DMSP 标准溶液,绘制了 DMSP 质量浓度与净峰面积之间关系的标准曲线,其标准曲线的关系为:

$$\sqrt{A} = 199.07\rho + 0.5822, \quad (2)$$

式中: A 为净峰面积; ρ 为 DMSP 质量浓度,该曲线 $R^2=0.9992$ 。

1.2.7 淬灭群体感应对 H46 抑藻活性影响

以海洋卡盾藻为抑藻活性检测微藻,向指数生长期的卡盾藻中分别添加 10% 的海水、2216E 培养基(添加与实验组一致浓度的 β -环糊精)和 H46 培养 24 h 离心所得的菌液上清。每天取 1 mL 的藻

液, 加入 10 μL 鲁格氏液固定 2 h 后, 吸取 100 μL 藻液在浮游植物计数框内, 10 \times 20 倍显微镜下进行观察计数。H46 菌液上清对卡盾藻的抑制率用 IR(%) 来表示, 计算公式如下:

$$\text{IR} = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} \times 100, \quad (3)$$

式中: ρ_0 为阴性对照组藻细胞密度; ρ 为 H46 上清处理组藻细胞密度。

2 结果与分析

2.1 菌株 H46 的抑藻谱

通过对菌株 H46 抑藻活性研究, 发现菌株 H46 对大多数供试藻株具有一定的抑制作用(图 1), 抑藻率为 17.60%~89.17%。菌株 H46 对黄藻门(Xanthophyta)针胞藻纲的海洋卡盾藻表现出最强的抑藻活性, 抑藻率高达 89.16%。菌株 H46 对于甲藻门(Pyrrophyta)的利玛原甲藻、米氏凯轮藻和塔玛亚历山大藻表现出较强的抑藻活性, 分别为 34.28%、33.95% 和 25.18%; 对硅藻门(Bacillariophyta)的长菱形藻、小新月菱形藻表现出中等的抑制效果, 分别为 30.84% 和 17.60%。抑藻结果显示该菌即使对同一门类的微藻, 抑制效果也有差异, 但对于同属于绿藻门(Chlorophyta)的青岛大扁藻、小球藻和盐生杜氏藻的抑制效果均不明显。

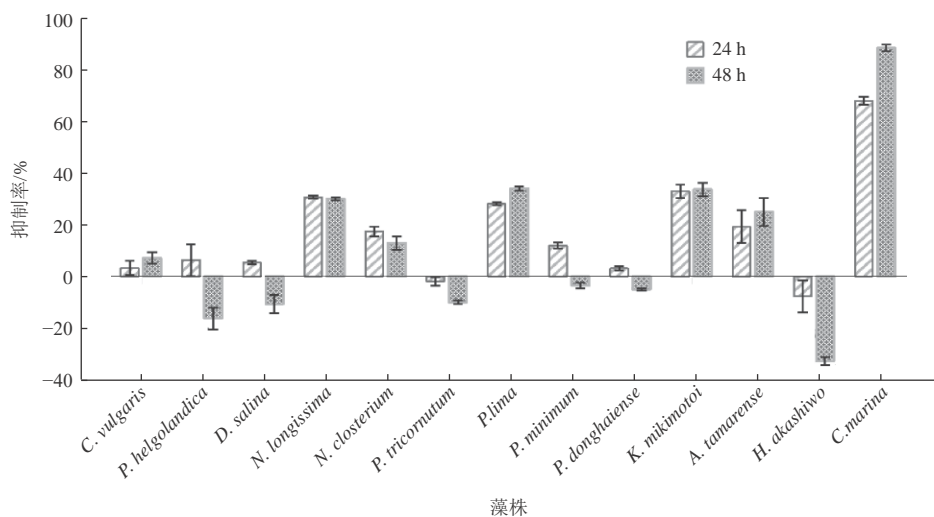
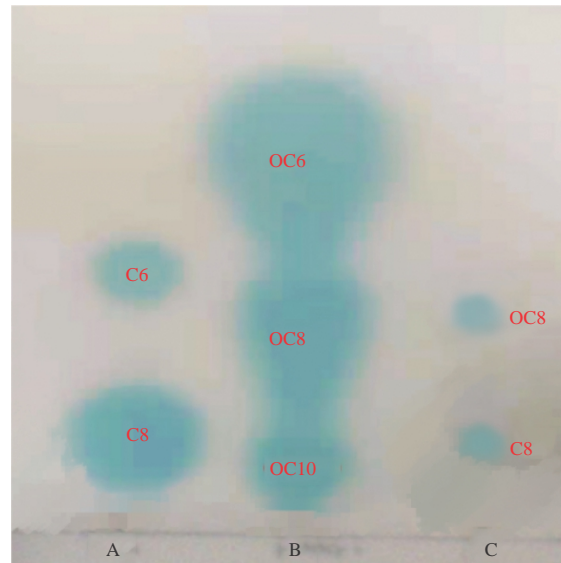


图 1 菌株 H46 抑藻谱的测定

Fig. 1 The Algae suppression spectrum of bacteria strain H46

2.2 H46 菌株群体感应信号分子的分析

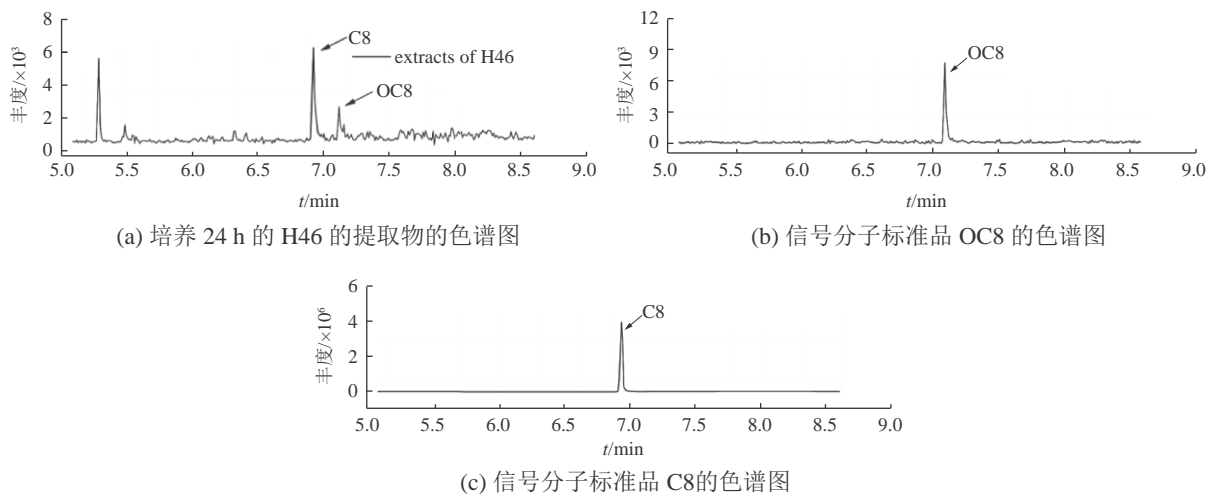
细菌 H46 所产生的信号分子经生物自显影鉴定(图 2), H46 菌株主要含有 2 种 AHLs 信号分子, 其 Rf 值与 3-oxo-C8 和 C8-HSL 两种信号分子的 Rf 值最接近, 分别为 0.32 和 0.09, 据此结果推测 H46 细菌所产生的信号分子可能为 C8-HSL、3-oxo-C8-HSL。通过 GC-MS 检测方法, 选择 m/z 143 作为标记碎片, 对 H46 粗提液进行 AHLs 检测 (Cataldi et al, 2007; Guo et al, 2011), 得到 H46 的色谱图(图 3a)。与 AHLs 标准品的色谱图(图 3b 和图 3c)比对发现, H46 色谱图(图 3a)中在保留时间为 6.845 min 和 7.075 min 处有峰, 能够与 OC8-HSL 和 C8-HSL 比对上。因此, 本文进一步明确了 H46 能够产生 C8-HSL、3-oxo-C8-HSL 这 2 种种类的信号分子。



注: A 代表 C-3 非取代类信号分子标准品, B 代表 C-3 氧代类信号分子标准品, C 代表培养 24 h 的 H46 的提取物; C6 代表 C6-HSL, C8 代表 C8-HSL, OC6 代表 3-oxo-C6-HSL, OC8 代表 3-oxo-C8-HSL, OC10 代表 3-oxo-C10-HSL。

图 2 生物自显影检测 AHLs 信号分子种类结果

Fig. 2 Results of AHLs signal molecules types detected by bioautography



注: C8 代表 C8-HSL, OC8 代表 3-oxo-C8-HSL, extracts of H46 代表培养 24 h 的 H46 的提取物。

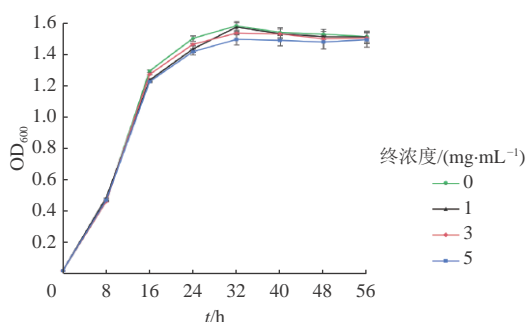
图 3 GC-MS 检测 AHLs 信号分子种类

Fig. 3 AHLs signal molecules types detected by GC-MS

2.3 群体感应抑制剂 β -环糊精对菌株 H46 生长曲线的影响

图 4 为在 2216E 培养基中添加不同终浓度 β -环糊精得到的细菌 H46 的生长曲线, 由图 4 可知, 培养 4 h 后, H46 进入对数期; 培养 32 h 后, H46 进入平台期。培养 0~12 h 期间, H46 生长基本不受 β -环糊精影响。培养 16 h 后, 与对照组相比, 实验组细菌的生物量未见明显变化 ($P > 0.05$)。对照组菌最大 ($OD_{600} = 1.581$), 添加终浓度为 1、3 和 5 mg/mL 的 β -环糊精后, 此时 H46 菌最大 OD_{600} 分

别为 1.573、1.550 和 1.506，最大抑制效果仅为 4.74%，可见 β -环糊精对细菌 H46 生长影响不大。因此添加 1、3 和 5 mg/mL β -环糊精培养得到的 H46 上清，均可进行后续抑藻实验。

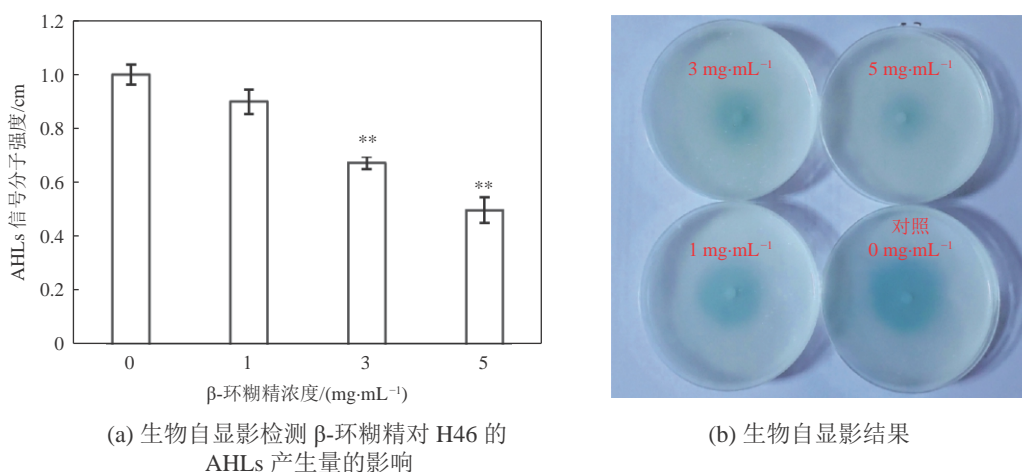


注：细菌细胞浓度在吸光值为 OD₆₀₀ 下测得。

图 4 培养基中添加不同终浓度 β -环糊精情况下细菌 H46 的生长曲线
Fig. 4 Growth curves of bacteria strain H46 under different β -CD concentrations

2.4 群体感应抑制剂 β -环糊精对菌株 H46 群体感应信号分子 AHLs 产生量的影响

生物自显影分析结果(图 5)表明，添加 β -环糊精后，H46 产生 AHLs 的产生量(蓝色显色圈大小)比对照组的明显减少，并且随着 β -环糊精添加浓度增加，细菌 H46 的 AHLs 显色强度逐渐减弱，说明细菌 H46 的 AHLs 的生产积累量受到 β -环糊精抑制。由于菌液加入 β -环糊精后， β -环糊精能够螯合 AHLs 分子，使得培养基中 AHLs 的量大幅度减少，因此推测 β -环糊精对群体感应有一定的抑制作用。



注：图 a 中**代表 $P < 0.01$ 。

图 5 生物自显影检测 β -环糊精对 H46 分泌 AHLs 的螯合影响
Fig. 5 Chelating effect of β -CD on bacteria strain H46 secreted AHLs detected by bioautography

2.5 群体感应抑制剂 β -环糊精对菌株 H46 生物膜形成能力的影响

本研究采用结晶紫染色法评估不同浓度的 β -环糊精对 H46 群体感应淬灭后其成膜能力的大小。将 H46 与终浓度为 0、1、3 和 5 mg/mL β -环糊精共培养，细菌的成膜能力变化以结晶紫溶液的 OD₆₀₀

显示(图 6)。由图 6 可知, H46 生物膜结晶紫实验 OD_{600} 值和群体感应信号分子 AHLs 的强度(图 5)均随 β -环糊精浓度增加呈现明显的下降趋势, 二者下降趋势基本一致。且当 β -环糊精终浓度为 5 mg/mL 时, 与对照组差异最为显著($P < 0.01$), 抑制作用最强, 抑制率达到 46.46%。综上所述可以看出, 淬灭群体感应后, H46 的成膜能力受到抑制, 且细菌成膜性的抑制和 β -环糊精对 H46 分泌的 AHLs 量淬灭趋势一致, 说明细菌 H46 成膜性很有可能受到群体感应信号分子 AHLs 调控。

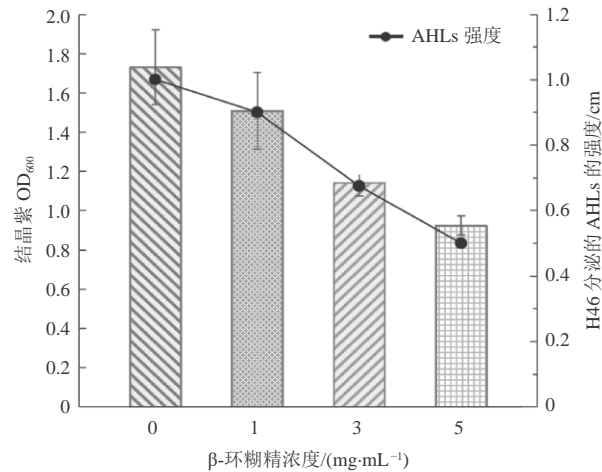
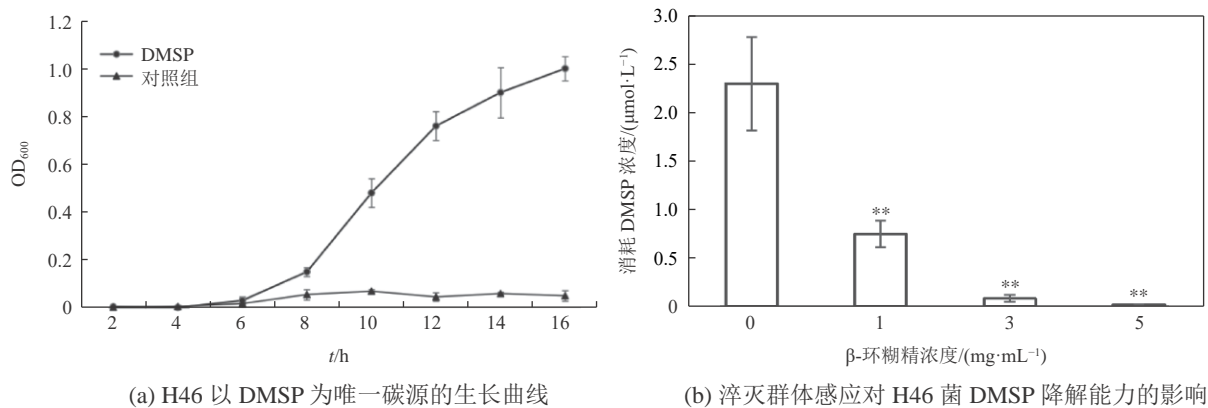


图 6 淬灭群体感应对细菌 H46 成膜能力的影响

Fig. 6 Effect of quenched quorum sensing on biofilm formation of H46

2.6 群体感应抑制剂 β -环糊精对菌株 H46 利用 DMSP 降解能力的影响

根据 DMSP 降解情况(图 7), 发现藻际细菌 H46 能够降解 DMSP 并利用 DMSP 为唯一碳源生长。在与终浓度为 0、1、3 和 5 mg/mL 的 β -环糊精共培养 48 h 后, H46 菌株总 DMSP 降解浓度分别为 2.29、0.74、0.08 和 0.02 $\mu\text{mol/L}$ 。表明 H46 菌对 DMSP 的降解能力随 β -环糊精浓度增加呈现明显的下降趋势, 即 H46 菌的 DMSP 降解能力随群体感应信号分子 AHLs 的淬灭而受到显著抑制, 说明 H46 菌的 DMSP 降解能力很有可能受到群体感应信号分子 AHLs 调控。



(a) H46 以 DMSP 为唯一碳源的生长曲线

(b) 淬灭群体感应对 H46 菌 DMSP 降解能力的影响

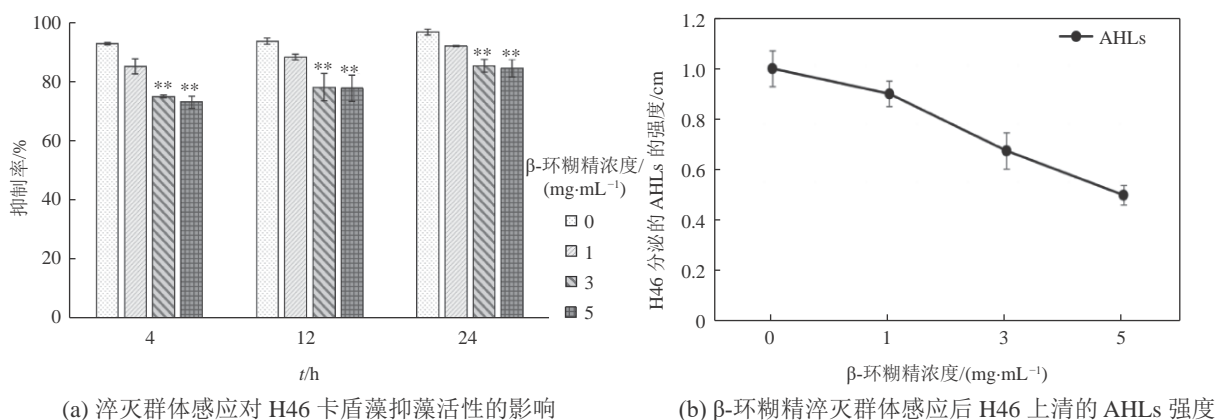
注: **代表 $P < 0.01$ 。

图 7 淬灭群体感应对 H46 菌 DMSP 降解能力的影响

Fig. 7 Effect of quenched quorum sensing on the rate of DMSP consumption by bacteria strain H46

2.7 群体感应抑制剂 β -环糊精对菌株H46抑藻活性的影响

由抑藻活性检测结果(图8)可知,不管是对照组还是添加 β -环糊精培养得到的H46上清对海洋卡盾藻均具有明显的抑制作用,随着培养时间增加,各组的抑制作用明显增强,而不同浓度 β -环糊精的对H46抑藻活性的影响各异。其中,对照组对海洋卡盾藻抑制效率最高,随着 β -环糊精添加,H46菌对卡盾藻抑藻活性明显减弱,添加终浓度(5 mg/mL)的 β -环糊精后,H46抑藻效率与对照组相比降低了21.56%。因此说明,向H46培养基中添加 β -环糊精后,伴随着H46菌AHLs的生产积累大幅度减少(图8b),H46的抑藻活性也受到抑制,这些证据显示H46的QS系统可能参与调控细菌的抑藻活性。



(a) 淬灭群体感应对H46卡盾藻抑藻活性的影响

(b) β -环糊精淬灭群体感应后H46上清的AHLs强度

注: **代表 $P < 0.01$ 。

图8 淬灭群体感应对H46抑卡盾藻活性的影响

Fig. 8 Effect of quenched quorum sensing on the algae suppression activity of bacteria strain H46 against *Chattonellamarina*

3 讨论

群体感应作为一种常见的基于化学信号的微生物交流系统,依赖信号分子AHLs的产生和传递,来实现微生物群体密度依赖性的基因调控,并引起下游基因表达,从而调节许多生物学功能,例如生物膜的形成、毒力因子产生等(Croft et al, 2005; Geng et al, 2010; Albuquerque et al, 2012)。有研究表明, QS会促进ATP的合成,增加胞外聚合物的分泌,改变细胞膜表面特性和细菌的运动,调节生物膜的形成,从而影响细菌与藻类附着共生(Geng et al, 2010)。QS除了可以调节细菌中一系列代谢过程,还可在许多方面介导微藻和细菌之间的互动,例如营养获取、生态位构建、拮抗和共同进化(Hünken et al, 2008)。一方面, QS是促进藻类和细菌互利共生的驱动因素,细菌产生的QS分子(如AHLs)对藻类的生长、代谢、孢子繁殖和基因表达具有调节作用(Hu et al, 2021),例如细菌QS系统调节铁载体的产生以促进宿主藻类的生长(Sapp et al, 2007b);另一方面,藻类可以感知细菌的QS信号,并产生QS抑制分子来调节细菌群落组成和生态功能,从而选择性地保留对宿主藻类有益的细菌种群(Kaczmaeska et al, 2005; Sapp et al, 2007a, 2007b)。

AHLs作为细菌和微藻之间的QS信号分子之一,具有种类多样性和生态功能多样性(Ziesche et al, 2015; Doberva et al, 2017; Ziesche et al, 2018)。例如, Ziesche等(2015)在海洋玫瑰杆菌分离株中检测到19株不同的产AHLs菌株(AHLs的链长范围为C10-HSL~C18-HSL); Stock等(2019)发现不同

AHLs 发挥了不同的生态作用, C14-AHL 可以促进硅藻 *Seminavis robusta* 生长, OH-C14-AHL 和 oxo-C14-AHL 则对硅藻生长有抑制作用; Stock 等(2019)发现 oxo-C12-AHL 也对三角褐指藻 *Phaeodactylum tricoratum* 的生长产生抑制; Stock 等(2019)和 Gao 等(2020)发现, 海水条件下某些 AHLs(如 oxo-C12-AHL、oxo-C5-AHL)会自发地重排形成四聚酸, 强烈抑制 *P. tricoratum* 的生长和光合效率。本文作者团队及其他学者对藻际 QS 细菌进行 GC-MS 分析发现, 其 AHLs 分子种类大多数是 OC10-HSL、C8-HSL、OC8-HSL, 其中多数 QS 细菌表现出成膜、DMSP 降解和抑制藻类生长效应(Decho et al, 2009; Ziesche et al, 2015; Chi et al, 2017; Doberva et al, 2017; Hu et al, 2021; Zhang et al, 2022)。本研究分离出来的 H46 细菌产生 2 类 AHLs: C8-HSL、OC8-HSL, 属于中短链 AHLs 分子, 比淡水环境中发现的 AHLs 分子(例如 C4-AHL 和 C6-AHL)长, 比海洋环境中发现的 AHLs 短(Ziesche et al, 2015; Doberva et al, 2017), 但和滨海湿地植物根际细菌产生的 AHLs 长度相似(Stock et al, 2019), 这可能是植物细胞共栖细菌特有的 QS 信号分子种类。目前这些 AHLs 具体的生态学功能还有待进一步研究。

β -环糊精作为 QS 淬灭剂, 可以抑制 AHLs 分子活性, 从而阻止其与受体结合, 淬灭下游基因的表达, 达到抑制群体感应的作用(He et al, 2015)。Rahman 等(2009)用高剂量的 β -环糊精直接影响费氏弧菌中的 QS 表达, 这表明可以利用 β -环糊精淬灭群体感应来研究 QS 的调控功能。后来 Nakashima 等(2005, 2006)添加 β -环糊精与 QS 细菌 *Hahella* sp. 共培养后, 发现其抑藻色素 Prodigiosin 的产量降低; Chi 等(2017)用 β -环糊精作用于 QS 细菌 *Ponticoccus* sp. 后, 发现该菌的杀藻活性明显降低, 认为细菌的 QS 系统可以调控抑藻活性的产生。本文通过添加 β -环糊精与 H46 共培养来淬灭 QS, 经过生物自显影和 GC-MS 检测验证得到, 添加 β -环糊精的实验组与未添加 β -环糊精的对照组相比, AHLs 分子的活性检出量明显降低, 说明 β -环糊精能抑制 H46 菌株的群体感应; 群体感应信号分子淬灭的同时, H46 菌株的成膜能力、DMSP 降解能力和抑藻活性明显减弱, 表明这些功能可能受到 QS 的调节。

玫瑰杆菌作为海洋细菌的优势类群, 存在大量的抑藻细菌, 且这些细菌的 QS 参与调控多种杀藻物质的产生。玫瑰杆菌 *Phaeobacter gallaeciensis* 可以合成抑藻物质 roseobactin(Seidysayamdost et al, 2011a, 2011b), 玫瑰杆菌 *Phaeobacter gallaeciensis* 可以产生 tropodithetic acid(TDA)抑制硅藻生长(Ziesche et al, 2015), 其中 roseobactin 和 TDA 的合成受 QS 信号分子, 特别是 OH-C10-AHL 的调节(Berger et al, 2011; Wang et al, 2016)。Guo 等(2016)通过同源重组证明 *Aeromonas* sp. GLY-2 107 产生的 2 种抑藻物质 3-甲基吡啶和环状二肽环(Gly-Phe)的产生受到 AHLs(C4-HSL)介导的 QS 的调节。但关于藻际分离的 QS 细菌的抑藻效应是否受 QS 的调控还未见报道。因此, 本文对 QS 调控藻际细菌 H46 的抑藻活性进行了探究。当 H46 与不同浓度 β -环糊精共培养后, 生长曲线未发生明显变化, 各组细胞浓度基本一致, 说明 β -环糊精对细菌生长没有产生影响。而添加 β -环糊精的实验组与对照组相比, 随着胞外 AHLs 积累量的减少(QS 功能淬灭), H46 菌株抑藻活性明显减弱, 表明 H46 菌株的抑藻活性受到 QS 系统的调控。这也是首次发现藻际细菌的 QS 可调控抑藻活性的报道, 从抑藻的角度证实藻际细菌的 QS 对塑造微藻群落结构具有重要的生态学意义。

研究藻菌之间 QS 通讯对于阐明藻类与其相关细菌的相互作用非常重要, 关于 QS 介导的藻菌相互作用的研究很少, 尽管本研究得到一些初步的结论, 但后期还需要开展 QS 相关基因的敲除和信号分子回补实验, 来进一步验证藻际细菌 QS 调控的生态功能。

4 结 论

本文利用 β -环糊精作为抑藻藻际细菌 *Sulfitobacter pseudonitzschiae* H46 的群体感应淬灭剂, 通过

分析群体感应淬灭对亚硫杆菌 H46 生理活性的影响, 探究了 QS 对藻际细菌 H46 的生态功能及藻菌相互作用关系的调节作用, 得到如下结论。

1) 藻际细菌 H46 具有较为广泛的抑藻谱, 对针胞藻(海洋卡盾藻)表现最强的抑藻活性(89.16%), 但对不同藻种的抑藻效果存在差异。

2) 藻际细菌 H46 存在 AHLs 介导的群体感应系统, 能够产生 C8-HSL、3-oxo-C8-HSL 两种类型的信号分子。

3) 添加 β -环糊精淬灭群体感应系统后, 菌株 H46 的成膜能力、DMSP 降解能力和抑藻活性均受到明显抑制, 表明以上生理活性受到群体感应调控。

参考文献 (References):

- 樊乾龙, 2016. 溶解铜绿微囊藻的细菌筛选及溶解效果的研究[D]. 北京: 北京林业大学. FAN Q L, 2016. Study on the isolation and lysing effects of algicidal bacteria to the *Microcystis aeruginosa*[D]. Beijing: Beijing Forestry University.
- 高亚辉, 2001. 海洋微藻分类生态及生物活性物质研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 40(2): 566-573. GAO Y H, 2001. Studies on taxonomy, ecology and bioactive products of marine microalgae[J]. Journal of Xiamen University (Nature Science), 40(2): 566-572.
- 韩光耀, 谢丽玲, 毕潇, 等, 2017. 溶藻细菌DH-e代谢产物对东海原甲藻的抑制作用[J]. 应用海洋学学报, 36(2): 151-157. HAN G Y, XIE L L, BI X, et al, 2017. Inhibitory effect of metabolites from algicidal bacterium DH-e on *Prorocentrum donghaiense*[J]. Journal of Applied Oceanography, 36(2): 151-157.
- 李馨子, 2014. 海洋细菌 PD-2 抑藻活性研究及群体感应基因 *zlb-I* 敲除方法的建立[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所. LI X Z, 2014. Study on algicidal activity of microalgae-associated bacterium *Rhodobacteraceae* PD-2 and gene knockout method of quorum sensing regulating gene *zlb-I*[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration.
- 史顺玉, 刘永定, 沈银武, 等, 2004. 细菌DC₁₀的溶藻作用及环境因子对该作用的影响[J]. 中国科学C辑: 生命科学, 34(6): 564-568. SHI S Y, LIU Y D, SHEN Y W, et al, 2004. Alalytic effect of bacterial DC₁₀ and the influence of environmental factors on this effect[J]. Science in China Series C: Life Sciences, 34(6): 564-568.
- 周文礼, 肖慧, 乔秀亭, 等, 2011. Z-QS01菌株对小球藻的生态学效应及对UV-B辐射的响应[J]. 北京理工大学学报, 31(1): 109-112. ZHOU W L, XIAO H, QIAO X T, et al, 2011. Quorum sensing of an associated heterotrophic bacteria-Z-QS01 with *Chlorella vulgaris* and response to enhanced UV-B radiation[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 31(1): 109-112.
- ALBUQUERQUE P, CASADEVALL A, 2012. Quorum sensing in fungi (a review)[J]. Medical Mycology, 50(4): 337-345.
- AMIN S A, HMELO L R, VAN TOI H M, et al, 2015. Interaction and signalling between a cosmopolitan phytoplankton and associated bacteria[J]. Nature, 522(7554): 98-101.
- BERGER M, NEUMANN A, SCHUIZ S, et al, 2011. Tropodithietic acid production in *Phaeobacter gallaeciensis* is regulated by *N*-acyl homoserine lactone-mediated quorum sensing[J]. Journal of Bacteriology, 193(23): 6576-6585.
- BIGALKE A, POHNERT G, 2019. Algicidal bacteria trigger contrasting responses in model diatom communities of different composition[J]. MicrobiologyOpen, 8(8): e00818.
- BUCHAN A, GONZÁLEZ J M, CHUA M J, 2019. Taxonomy, genomics and ecophysiology of hydrocarbon-degrading microbes[M]. New York: Springer: 93-104.
- CATALDI T R I, BIANCO G, PALAZZO L, et al, 2007. Occurrence of *N*-acyl-L-homoserine lactones in extracts of some Gram-negative bacteria evaluated by gas chromatography-mass spectrometry[J]. Analytical Biochemistry, 361: 226-235.
- CHI W D, ZHENG L, HE C F, et al, 2017. Quorum sensing of microalgae associated marine *Ponticoccus* sp. PD-2 and its algicidal function regulation[J]. AMB Express, (7): 1-10.

- CROFT M T, LAWRENCE A D, RAUX-DEERY E, et al, 2005. Algae acquire vitamin B₁₂ through a symbiotic relationship with bacteria[J]. *Nature*, 438: 90-93.
- DACEY J W H, BLONGH N V, 1987. Hydroxide decomposition of dimethylsulfoniopropionate to form dimethylsulfide[J]. *Geophysical Research Letters*, 14(12): 1246-1249.
- DECHO A W, VISSCHER P T, FERRY J, et al, 2009. Autoinducers extracted from microbial mats reveal a surprising diversity of *N*-acylhomoserine lactones (AHLs) and abundance changes that may relate to diel pH[J]. *Environmental Microbiology*, 11(2): 409-420.
- DOBERVA M, STIEN D, SORRES J, et al, 2017. Large diversity and original structures of acyl-homoserine lactones in strain MOLA 401, a marine *Rhodobacteraceae* bacterium[J]. *Frontiers in Microbiology*, 8: 1152.
- FALKOWSKI P G, 1994. The role of phytoplankton photosynthesis in global biogeochemical cycles[J]. *Photosynthesis Research*, 39: 235-258.
- FURUSAWA G, YOSHIKAWA T, YASUDA A, et al, 2003. Algicidal activity and gliding motility of *Saprospira* sp. SS98-5[J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 49(2): 92-100.
- GAO C, FERNANDEZ V I, LEE K S, et al, 2020. Single-cell bacterial transcription measurements reveal the importance of dimethylsulfoniopropionate (DMSP) hotspots in ocean sulfur cycling[J/OL]. (2020-04-23)[2023-09-15].<https://doi.org/10.1038/s41467-020-15693-z>.
- GENG H, BELAS R, 2010. Molecular mechanisms underlying *Roseobacter*-phytoplankton symbioses[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 21(3): 332-338.
- GROSSART H P, LEVOLD F, ALLGAIER M, et al, 2005. Marine diatom species harbour distinct bacterial communities[J]. *Environmental Microbiology*, 7(6): 860-873.
- GUO X, ZHENG L, ZHOU W, et al, 2011. A case study on chemical defense based on quorum sensing: antibacterial activity of sponge-associated bacterium *Pseudoalteromonas* sp. NJ6-3-1 induced by quorum sensing mechanisms[J]. *Annals of Microbiology*, 61: 247-255.
- GUO X, LIU X, WU L, et al, 2016. The algicidal activity of *Aeromonas* sp. strain GLY-2107 against bloom-forming *Microcystis aeruginosa* is regulated by *N*-acyl homoserine lactone-mediated quorum sensing[J]. *Environmental Microbiology*, 18(11): 3867-3883.
- HARA A, SYUTSUBO K, HARAYAMA S, 2003. *Alcanivorax* which prevails in oil-contaminated seawater exhibits broad substrate specificity for alkane degradation[J]. *Environmental Microbiology*, 5(9): 746-753.
- HE C F, ZHENG L, GAO W, et al, 2022. Diversity and functions of quorum sensing bacteria in the root environment of the *Suaeda glauca* and *Phragmites australis* coastal wetlands[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(36): 54619-54631.
- HONG Z, LAI Q L, LUO Q, et al, 2015. *Sulfitobacter pseudonitzschiae* sp. nov., isolated from the toxic marine diatom *Pseudonitzschia multiseries*[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 65(Suppl.1): 95-100.
- HU T, WANG S, SHAN Y, et al, 2021. Complete genome of marine microalgae associated algicidal bacterium *Sulfitobacter pseudonitzschiae* H46 with quorum sensing system[J]. *Current Microbiology*, 78(10): 3741-3750.
- HÜNKEN M, HARDER J, KIRST G O, 2008. Epiphytic bacteria on the Antarctic ice diatom *Amphiprora kufferathii* Mangin cleave hydrogen peroxide produced during algal photosynthesis[J]. *Plant Biology*, 10(4): 519-526.
- IBELINGS B W, DE BRUIN A, KAGAMI M, et al, 2004. Host parasite interactions between freshwater phytoplankton and chytrid fungi (*Chytridiomycota*)[J]. *Journal of Phycology*, 40(3): 437-453.
- IKEDA T, INOUE Y, SUEHIRO A, et al, 2002. The effects of cyclodextrins on autoinducer activities of quorum sensing in *Pseudomonas aeruginosa*[J]. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 44: 381-382.
- KACZMARSKA I, EHRMAN J M, BATES S S, et al, 2005. Diversity and distribution of epibiotic bacteria on *Pseudonitzschia multiseries* (Bacillariophyceae) in culture, and comparison with those on diatoms in native seawater[J]. *Harmful Algae*, 4(4): 725-741.

- LI Y, LEI X Q, ZHU H, et al, 2016. Chitinase producing bacteria with direct algicidal activity on marine diatoms[J]. Scientific Reports, 6: 21984.
- MILLER M B, BASSLER B L, 2001. Quorum sensing in bacteria[J]. Annual Reviews in Microbiology, 55(1): 165-199.
- NAKASHIMA T, KURACHI M, KATO Y, et al, 2005. Characterization of bacterium isolated from the sediment at coastal area of Omura Bay in Japan and several biological activities of pigment produced by this isolate[J]. Microbiology and Immunology, 49(5): 407-415.
- NAKASHIMA T, MIYAZAKI Y, MATSUYAMA Y, et al, 2006. Producing mechanism of an algicidal compound against red tide phytoplankton in a marine bacterium *γ-proteobacterium*[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 73: 684-690.
- PAPENFORT K, BASSLER B L, 2016. Quorum sensing signal-response systems in Gram-negative bacteria[J]. Nature Reviews Microbiology, 14(9): 576-588.
- PARK J R, BAE J W, NAM Y D, et al, 2007. *Sulfitobacter litoralis* sp. nov., a marine bacterium isolated from the East Sea, Korea[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 57(4): 692-695.
- PAUL C, POHNERT G, 2011. Interactions of the algicidal bacterium *Kordia algicida* with diatoms: regulated protease excretion for specific algal lysis[J]. PloS One, 6(6): e21032.
- RAHMAN I A, VEJAYAKUMARAN P, SIPAUT C S, et al, 2009. Size-dependent physicochemical and optical properties of silica nanoparticles[J]. Materials Chemistry and Physics, 114(1): 328-332.
- SAPP M, SCHWADERER A S, WILTSHIRE K H, et al, 2007a. Species-specific bacterial communities in the phycosphere of microalgae[J]. Microbial Ecology, 53: 683-699.
- SAPP M, WICHELS A, GERDTS G, 2007b. Impacts of cultivation of marine diatoms on the associated bacterial community[J]. Applied and Environmental Microbiology, 73(9): 3117-3120.
- SAPP M, WICHELS A, WILTSHIRE K H, et al, 2007c. Bacterial community dynamics during the winter-spring transition in the North Sea[J]. Fems Microbiology Ecology, 59(3): 622-637.
- SCHÄFER H, BEN A, HARRY W, et al, 2002. Genetic diversity of 'satellite' bacteria present in cultures of marine diatoms[J]. Fems Microbiology Ecology, 42(1): 25-35.
- SEYEDSAYAMDOST M R, CARR G, KOLTER R, et al, 2011a. Roseobactin: small molecule modulators of an algal-bacterial symbiosis[J]. Journal of the American Chemical Society, 133(45): 18343-18349.
- SEYEDSAYAMDOST M R, CASE R J, KOLTER R, et al, 2011b. The Jekyll-and-Hyde chemistry of *Phaeobacter gallaeciensis*[J]. Nature Chemistry, 3(4): 331-335.
- SOHN J H, LEE J H, YI H, et al, 2004. *Kordia algicida* gen. nov., sp. nov., an algicidal bacterium isolated from red tide[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 54(3): 675-680.
- STOCK F, SYRPAS M, CREVELD S G V, et al, 2019. *N*-acyl homoserine lactone derived tetramic acids impair photosynthesis in *Phaeodactylum tricorutum*[J]. ACS Chemical Biology, 14(2): 198-203.
- TANG K, SU Y, BRACKMAN G, et al, 2015. MomL, a novel marine-derived *N*-acyl homoserine lactonase from *Muricauda olearia*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 81(2): 774-782.
- TÖPEL M, PINDER M I M, JOHANSSON O N, et al, 2019. Complete genome sequence of novel *Sulfitobacter pseudonitzschiae* Strain SMR1, isolated from a culture of the marine diatom *Skeletonema marinoi*[J]. Journal of Genomics, 7: 7-10.
- VOLK R B, 2005. Screening of microalgal culture media for the presence of algicidal compounds and isolation and identification of two bioactive metabolites, excreted by the cyanobacteria *Nostoc insulare* and *Nodularia harveyana*[J]. Journal of Applied Phycology, 17: 339-347.
- WAGNER-DÖBLER I, BIEBL H, 2006. Environmental biology of the marine *Roseobacter* lineage[J]. Annual Review of Biochemistry, 60: 255-280.
- WANG R, GALLANT É, SEYEDSAYAMDOST M R, 2016. Investigation of the genetics and biochemistry of roseobacti-

- cide production in the *Roseobacter* clade bacterium *Phaeobacter inhibens*[J]. *Microbiology*, 7(2): e02118. DOI: 10.1128/MBio. 02118-15.
- WATERS C M, BASSLER B L, 2005. Quorum sensing: cell-to-cell communication in bacteria[J]. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 21: 319-346.
- WILLIAMS B T, COWLES K, BERMEJO MARTÍNEZ A, et al. Bacteria are important dimethylsulfoniopropionate producers in coastal sediments[J]. *Nature Microbiology*, 2019, 4(11): 1815-1825.
- ZENG Y X, QIAO Z Y, 2019. Diversity of dimethylsulfoniopropionate degradation genes reveals the significance of marine *Roseobacter* clade in sulfur metabolism in coastal areas of Antarctic Maxwell Bay[J]. *Current Microbiology*, 76: 967-974.
- ZHANG Y, ZHENG L, WANG S, et al, 2021. Quorum sensing bacteria in the phycosphere of HAB microalgae and their ecological functions related to cross-kingdom interactions[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(1): 163.
- ZHOU J, LAO Y M, CAI Z H, 2016a. Draft genome sequence of *Providencia sneebia* strain ST1, a quorum sensing bacterium associated with marine microalgae[J]. *Journal of Genomics*, 4: 10-12.
- ZHOU J, LAO Y M, MA Z P, et al, 2016b. Genome sequence of *Enterobacter* sp. ST3, a quorum sensing bacterium associated with marine dinoflagellate[J]. *Genomics Data*, 7: 195-199.
- ZHOU J, LYU Y, RICHLIN M L, et al, 2016c. Quorum sensing is a language of chemical signals and plays an ecological role in algal-bacterial interactions[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 35(2): 81-105.
- ZHOU J, LAO Y, SONG J, et al, 2020. Temporal heterogeneity of microbial communities and metabolic activities during a natural algal bloom[J]. *Water Research*, 183: 116020.
- ZIESCHE L, BRUNS H, DOGS M, et al, 2015. Homoserine lactones, methyl oligohydroxybutyrates, and other extracellular metabolites of macroalgae-associated bacteria of the *Roseobacter* clade: identification and functions[J]. *Chem-biochem: a European Journal of Chemical Biology*, 16(14): 2094-2107.
- ZIESCHE L, WOLTER L, WANG H, et al, 2018. An unprecedented medium-chain diunsaturated *N*-acyl homoserine lactone from marine *Roseobacter* group bacteria[J]. *Marine Drugs*, 17(1): 20.

Study on the Biological Activities of Phycospheric Bacterium *Sulfitobacter Pseudonitzschiae* H46 Regulated by Quorum Sensing

CHI Xuhui¹, YANG Lin¹, ZHANG Yanchao¹, HU Tianyi¹, WANG Shuai¹, ZHENG Li^{1,2}

(1. Qingdao Key Laboratory of Analytical Technology Development and Offshore Eco-Environment Conservation, First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;

2. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China)

Abstract: This paper focused on the hot issue of quorum sensing regulatory function of marine bacteria. The influence of the quorum sensing system of the phycospheric *Sulfitobacter pseudonitzschiae* H46 on its ecological function and algae inhibition was studied and algal-bacterial interaction modulated by quorum sensing was explored. H46 was co-cultured with different concentrations of quorum sensing inhibitor (β -cyclodextrin). Then the functions of biofilm formation, DMSP degradation and algicidal activity of H46 were analyzed. And the potential regulation function of H46 quorum sensing system was confirmed. The results showed that the induced activity of the quorum sensing signaling molecule AHLs of H46 was partially quenched by β -CD. And then the biological ability of membrane forming, DMSP degradation and alga-inhibit of H46 were inhibited. In this paper, we explore the inhibitory effect of bacteria on the growth of microalgae, which provides a new perspective for the study of mechanism of algal-bacterial interaction.

Keywords: algae-bacterial interaction; phycosphere; *Sulfitobacter*; quorum sensing; algicidal activity

Received: September 15, 2023 **Online:** June 20, 2024

2022 年黄河调水调沙对下游有机物 和营养盐年内变化的影响

高书铭¹, 姚爱林¹, 明 玥^{1,2}, 王宪业¹, 高 磊^{1*}

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241;
2. 国家海洋环境监测中心国家环境保护海洋生态环境整治修复重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 2021 年 11 月至 2022 年 10 月, 在黄河下游涿口站进行了为期一年、每月一次的采样, 测定了河水中溶解有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)、有色溶解有机物(Chromophoric Dissolved Organic Matter, CDOM)、荧光溶解有机物(Fluorescent Dissolved Organic Matter, FDOM)、营养盐, 以及悬浮颗粒物(Suspended Particulate Matter, SPM)中颗粒有机碳(Particulate Organic Carbon, POC)占比(POC 占 SPM 的质量百分比, POC%)、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 等生源要素相关指标。结果表明, 调水调沙已经成为控制黄河下游多种生源要素在一年之中变化格局的关键因素, 决定着其全年变化范围的上限和下限。在调水调沙的调水阶段, 脉冲式激增的径流量通过稀释作用使得 DOC 浓度、CDOM 浓度、FDOM 中的类腐殖质组分含量, 以及 SPM 中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 达到全年的最低值, 而 CDOM 光谱斜率($S_{275-295}$)达到最高值。在调水调沙的排沙阶段, 上述指标则在相反方向上达到全年的极值。最近 20 年间, 在调水调沙、流域生态环境保护、气候变化等一系列措施的影响下, 黄河下游营养盐和 DOC 浓度呈现明显的下降趋势, 而 POC% 的上升迹象也初步显现。黄河下游生源要素浓度、组成、性质、输出通量正经历着复杂而深刻的变化, 将直接影响到黄河口的海洋生态环境。本研究有助于进一步理解在人类活动背景下大河生源要素的响应特征和反馈机制及其对邻近海洋生态环境的潜在影响。

关键词: 黄河; 调水调沙; 溶解有机碳; 颗粒有机碳; 有色溶解有机物; 荧光溶解有机物; 营养盐

中图分类号: P76; X145

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2024)04-0753-16

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20230807001

引用格式: 高书铭, 姚爱林, 明玥, 等, 2024. 2022 年黄河调水调沙对下游有机物和营养盐年内变化的影响[J]. 海洋科学进展, 42(4): 753-768. GAO S M, YAO A L, MING Y, et al, 2024. The impact of water and sediment regulation on monthly changes of downstream organic matter and nutrients in the Yellow River in 2022[J]. Advances in Marine Science, 42(4): 753-768.

半个多世纪以来, 世界大河普遍受到了全球气候变化(如厄尔尼诺-拉尼娜事件)和人类活动(如流域水库和大坝的修建)的双重影响(Wang et al, 2011)。作为我国第二长河, 黄河受到人类活动的干预尤其强烈。在黄河流域生活着超过一亿的人口(Wang et al, 2006)。此外, 近几十年来, 黄河流域已经修建了 3 000 余座水库和大坝, 其中位于上游的龙羊峡和刘家峡水库, 以及位于中游的三门峡和小浪底水库坝高均超过 100 m(Yu et al, 2013a)。这些水库和大坝的修建导致黄河入海径流量和输沙量在 20 世纪下半叶呈现快速下降的趋势(Wang et al, 2007; Kong et al, 2015b), 黄河下游甚至出现了

收稿日期: 2023-08-07 网络首发日期: 2024-01-15

资助项目: 国家自然科学基金项目(42276217); 国家自然科学基金联合重点项目(U2243207)

作者简介: 高书铭(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事生物地球化学方面研究。

E-mail: 51213904023@stu.ecnu.edu.cn

*通信作者: 高 磊(1980—), 男, 研究员, 博士, 主要从事化学海洋学和海洋生物化学方面研究。

E-mail: lgao@sklec.ecnu.edu.cn

(王 燕 编辑)

断流。其中, 利津站从1972年的断流18天开始, 断流天数逐年增加, 直至1997年出现断流226天的极端状况(张效龙等, 2001)。进入21世纪以来, 随着调水调沙、全流域合理调配水资源, 以及气候变化等因素的叠加影响, 黄河的年径流量又开始稳步恢复(Kong et al, 2015b; Zhang et al, 2021)。伴随着水沙通量的整体下降和水沙关系的调整, 黄河水体中相关常量离子(如钠、镁、钙、硫酸盐)和生源要素(如碳、氮、磷、硅)的浓度在近几十年来也已经发生了相应的改变(Chen et al, 2005; Liu et al, 2015; Ran et al, 2015; Wu et al, 2021)。

人类活动对黄河的影响在进入21世纪以后又有了新的内涵。自2002年开始, 除2016年和2017年因黄河水沙总量明显减少而中断外(陈俊卿等, 2019), 黄河水利委员会开展了每年例行的汛前调水调沙, 其中包括前期的调水和后期的排沙两个阶段(Kong et al, 2015b)。调水调沙的目的是缓解黄河输沙量逐年下降的趋势、促进河道冲刷、避免水库和河道的淤积、协调黄河水沙关系, 以及维护黄河三角洲的稳定(Kong et al, 2015a, 2015b; Bi et al, 2019; 苏志明等, 2022)。调水调沙的实施为黄河水沙输运和其中生源要素的时空变化引入了新的变数。在调水调沙期间, 黄河下游的径流量和含沙量往往以脉冲的形式急剧变化, 即短短几天内2个参数先后迅速地升高和回落, 由此, 黄河调水调沙目前已经成为决定黄河下游径流量和输沙量在全年峰值和分配的最重要因素(Yu et al, 2013b)。

调水调沙还在很大程度上改变了黄河冲淡水 and 陆源泥沙在黄河口海域的输出和扩展(Yu et al, 2013a), 同时影响了同陆源水沙一同挟带输出的有机物、营养盐等生源要素在黄河口海域的分布和变化(Liu et al, 2012; 张永领等, 2015; Xia et al, 2016; Li et al, 2017)。Yu等(2013b)的研究表明, 2010年黄河为期38天的调水调沙输出的径流和泥沙通量分别占到了全年的47%和87%。姚庆祯等(2009)的研究表明, 2002年黄河调水调沙期间营养盐的入海通量占到全年的一半左右。Zhang等(2013)的研究表明, 在2008年不到20天的调水调沙时间内, 溶解有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)和颗粒有机碳(Particulate Organic Carbon, POC)的向海输出通量分别占到了全年的35%和56%。此外, 黄河口的盐度分布及其海域浮游生物的丰度和优势类群都受到了调水调沙的直接影响(王柯萌等, 2019; Zhang et al, 2021)。

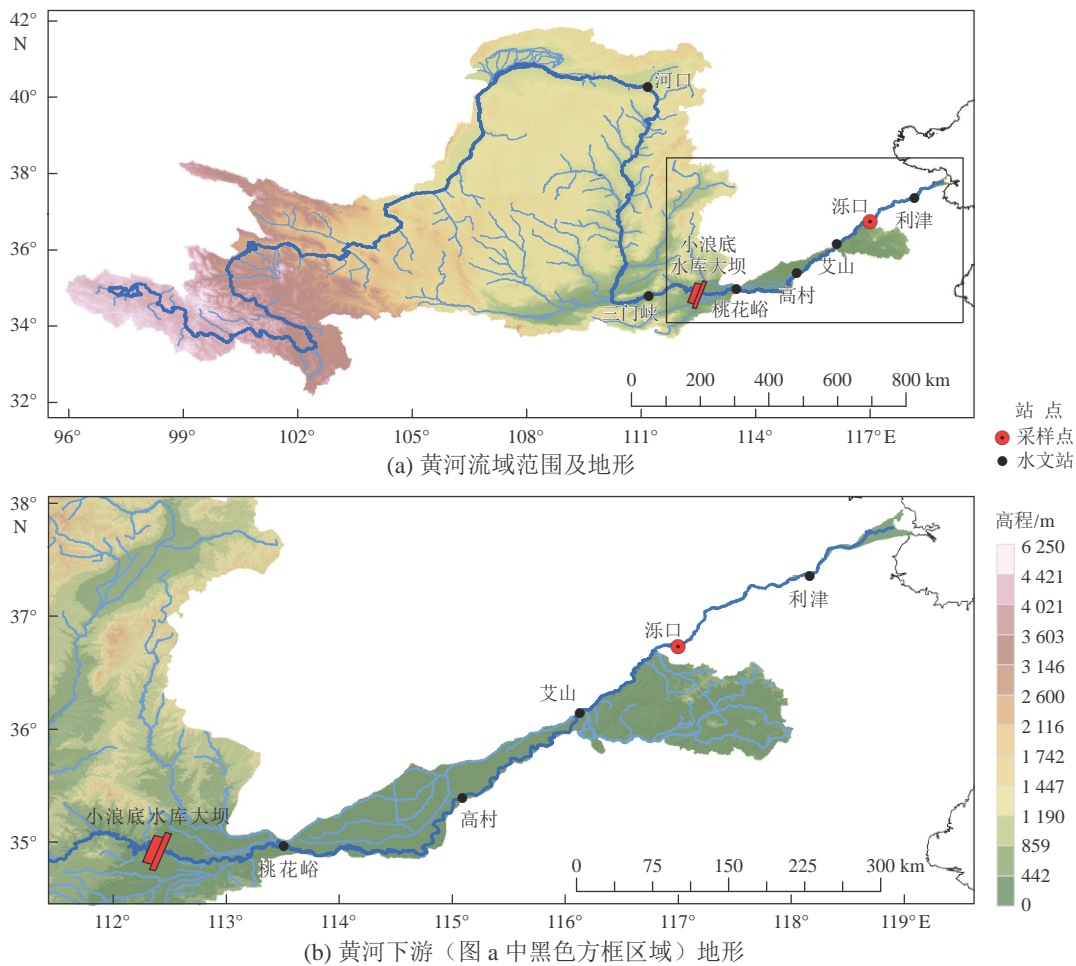
人类活动对于黄河的干预和影响除了流域水库和大坝的修建, 以及调水调沙以外, 还包括近年来国家在长江、黄河等大河流域实施的生态环境保护工程。在长江流域, 最新的研究已经表明(Wang et al, 2023), 与之前几十年的状况不同, 在最近10年间(2012年以来), 长江下游营养盐的浓度和输出通量已经开始呈现出显著下降的趋势。与此同时, Ming等(2023)发现长江下游的DOC浓度、悬浮颗粒物(Suspended Particulate Matter, SPM)中POC质量占比(即POC%)、POC中 $\delta^{13}\text{C}$ 值、颗粒氮(Particulate Nitrogen, PN)中 $\delta^{15}\text{N}$ 值在近几十年来也都发生了相应的改变。在同样受益于上述生态环境保护工程的黄河, Wu等(2021)的研究表明, 黄河下游的营养盐浓度和通量自2001年以来也开始呈现出与以往几十年持续上升不同的下降趋势。这些研究均表明, 目前可能是长江、黄河等我国大河生源要素年代际趋势变化的“关键时间节点”, 亟须开展相关研究以完整、准确记录其中生源要素在当前的状态, 为国家进一步制定大河流域生态环境保护方案提供和积累重要的历史背景数据。

基于此, 本研究于2021年11月至2022年10月在黄河下游涑口站进行了为期一年、每月一次的采样, 测定河水中DOC、有色溶解有机物(Chromophoric Dissolved Organic Matter, CDOM)、荧光溶解有机物(Fluorescent Dissolved Organic Matter, FDOM)、营养盐的浓度, 以及SPM中生源要素指标(POC%、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$), 本研究利用这些数据全面探究了黄河下游水体中上述指标近期的变化特征, 尤其关注调水调沙对上述指标的影响。此外, 在整合本研究最新的数据与历史文献数据的基础上, 进一步揭示了重要生源要素在调水调沙实施以来最近20年间的变化趋势。

1 材料与方法

1.1 研究区域

黄河全长 5 464 km, 流域面积 $79.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1a), 处于低降雨量、高蒸发量的干旱和半干旱地带(Ding et al, 2011)。自源头至内蒙古河口镇为黄河上游, 全长 3 471 km。自河口镇至河南桃花峪为其中游, 全长 1 206 km, 该段流经黄土高原, 造就了黄河水体高含沙量的特点。其中 1999 年 10 月开始蓄水、2000 年 5 月开始运行的小浪底水库(距离入海口 870 km), 库区全长约 130 km, 位于黄河中游最后一段峡谷的出口处。自桃花峪到入海口为其下游(图 1b), 全长 786 km, 中游侵蚀的泥沙在下游大量沉积, 导致下游河床高于周围地面几米的“地上悬河”以及下游没有支流等独特现象(Ding et al, 2011)。



注: 图中标出了一些关键控制站位, 包括小浪底水库大坝位置及本研究的采样站位涑口。

图 1 黄河流域及其下游地形

Fig. 1 Topographic map of the Yellow River Basin and its lower reach

1.2 现场观测、样品采集和预处理

2021 年 11 月至 2022 年 10 月, 在距离黄河入海口约 280 km 的下游涑口站(117°00'13"E,

36°43'53"N)(图1)进行每月一次的表层河水样品采集,其中2022年4月和5月的2个样品由于新冠疫情影响未能采集,共获得一年观测期之内10个不同月份的样品。在每次采集过程中,现场使用HACH盐度计(型号为HQ-40d)测定表层河水盐度(10个样品盐度值均小于0.54)。使用Nalgene高密度聚乙烯瓶储存样品,采样瓶预先用稀盐酸浸泡24h以上,之后使用Milli-Q高纯水彻底清洗。在样品采集后12h内,使用已预先称重、孔径为0.7 μm的GF/F玻璃纤维膜(Whatman公司,美国)过滤用于测定有机物的样品(过滤前先将样品摇匀,该膜在使用前已在450℃下灼烧5h)。使用孔径为0.45 μm的醋酸纤维膜(Whatman公司,美国)过滤用于测定营养盐的样品(该膜在使用前已在pH=2的稀盐酸中浸泡并使用Milli-Q水冲洗干净),过滤后的滤液在加入体积分数为1.5%的饱和氯化汞溶液后于4℃下保存至营养盐测定。过滤后的玻璃纤维膜保存于-20℃下用于后续SPM质量浓度、POC和PN浓度及其稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$)的测定。在玻璃纤维膜过滤后的滤液中,用于测定DOC浓度的部分在-20℃下保存直至测定,用于测定CDOM和FDOM浓度和性质的部分于4℃下临时保存并于采样次日测定。

1.3 样品测定

1.3.1 SPM质量浓度、POC、PN、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$

过滤后的玻璃纤维膜在50℃下烘干48h以上直至恒重,将该质量与过滤前空白膜的质量做差,差值与过滤体积的商即为样品的SPM质量浓度(单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。对于烘干后的过滤膜,将用于测定POC和 $\delta^{13}\text{C}$ (相对于V-PDB)的部分放入浓盐酸蒸汽中熏72h以上后再次烘干,而用于测定PN和 $\delta^{15}\text{N}$ (相对于大气中的氮气)的部分无须执行此操作步骤。将上述膜样品压实于锡舟中并使用同位素质谱仪(型号为Delta plus XP, Thermo Electro公司,德国)测定。对于 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 这2个指标,其标准样品测试结果与标准值相比,偏差分别小于0.1%和0.2%。关于碳氮同位素质谱仪的测试细节参见Gao等(2014)。

1.3.2 DOC、CDOM和FDOM

DOC浓度(单位为 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)使用总有机碳分析仪(型号为TOC-VCPH,岛津公司,日本),依据高温燃烧法(Guo et al, 1995)测定。样品在测定前使用高纯度的浓盐酸酸化至 $\text{pH} < 2$ 。所有样品均被重复测定3~5次以保证平行测量结果的相对标准偏差小于2%。每个测定日均建立新的标准曲线。测量时每隔3个样品插入一个Milli-Q水样品以监控测定过程中的程序空白。此外,测定实验室自配的DOC标准溶液和来自美国迈阿密大学的标准深海DOC样品以保证数据质量。

CDOM吸收光谱使用紫外-可见分光光度计(型号为TU-1810DPC,普析通用仪器有限公司,北京)测定,使用的石英比色皿的光程为5 cm。测定得到的吸收光谱的波长范围为200~800 nm,将各波长处的原始吸光度减去650~800 nm处的平均吸光度,以消除折射效应的影响,得到最终使用的各波长处的吸光度。各波长处的吸光系数(a)(单位为 m^{-1})的计算式为:

$$a_{\lambda} = 2.303A_{\lambda}/L, \quad (1)$$

式中: A 为各波长处的吸光度(无量纲); λ 为波长(单位为nm); L 为光程(即0.05 m)。在本研究中,使用254 nm处的吸光系数 a_{254} 来定量河水中CDOM浓度,使用254 nm处的吸光度(A_{254})与DOC浓度(此处单位为 $\text{mgC}\cdot\text{L}^{-1}$)的比值 SUVA_{254} (Specific UV Absorbance)(单位为 $\text{L}\cdot\text{mgC}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)来定量样品中溶解有机物(Dissolved Organic Matter, DOM)的芳香化程度(Weishaar et al, 2003),使用波长275~295 nm处的光谱斜率 $S_{275-295}$ (单位为 nm^{-1})来估计样品中CDOM的分子量大小(Helms et al, 2008)。

使用荧光分光光度计(型号为F-2500,日立公司,日本)测定FDOM的荧光激发-发射三维谱(Excitation-Emission Matrix, EEM)。测定过程中使用的石英比色皿的规格为1 cm × 1 cm。激发波长的

扫描范围为220~450 nm,步长为5 nm。每一个激发波长下发射波长的扫描范围为230~600 nm,测定时每2 nm记录1个数据。激发光和发射光的狭缝宽度均设定为5 nm。根据Kothawala等(2013)的研究,自然水体在测定FDOM前一般不需要稀释,其内滤效应(inner filter effect)只需要根据其吸光度光谱校正即可。通过样品的吸光度光谱来计算内滤校正矩阵 I ,将其与经过光谱校正后的EEM相乘,以消除内滤效应的影响。内滤校正矩阵 I 的计算式为:

$$I_{\lambda_{ex},\lambda_{em}} = 10^{0.5(A_{\lambda_{ex}}+A_{\lambda_{em}})}, \quad (2)$$

式中: $A_{\lambda_{ex}}$ 为激发波长下的吸光度; $A_{\lambda_{em}}$ 为发射波长下的吸光度(Murphy et al, 2010, 2013; Kothawala et al, 2013)。每个测定日均使用当天新配制的 $0\sim 6.4\times 10^{-2}\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 二水硫酸奎宁标准曲线,测定的EEM每一位置处的荧光读数均通过除以 $\text{Ex/Em}=350/450\text{ nm}$ 处 $1.3\times 10^{-3}\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度二水硫酸奎宁的荧光强度值予以校正。因此,本研究的荧光强度的单位为ppb-QSE(ppb-Quinine Sulfate Equivalents)。FDOM测定细节参见Gao等(2010)。

1.3.3 营养盐

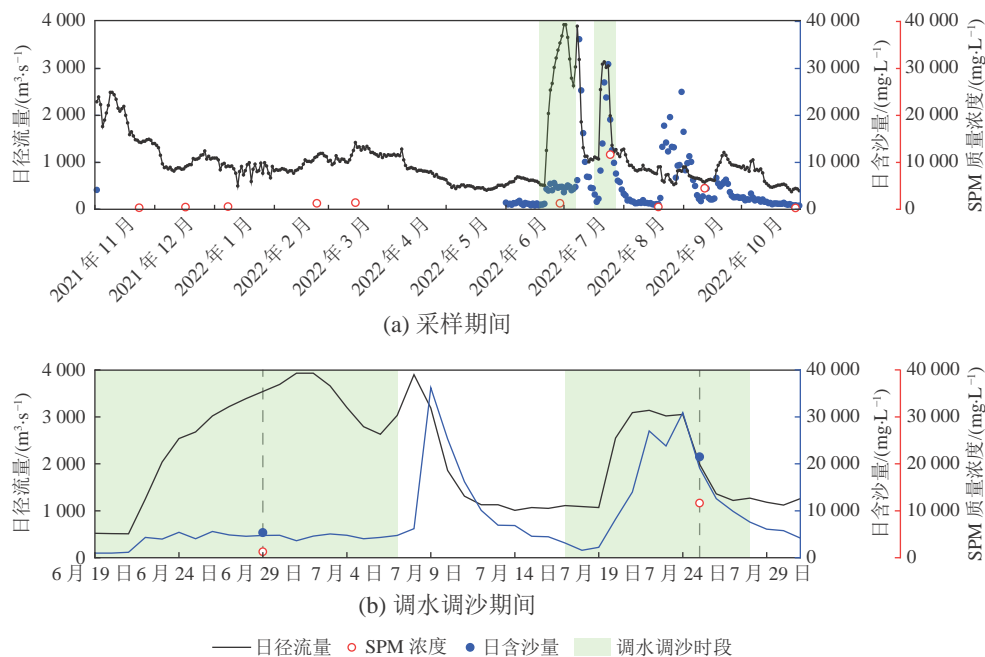
使用气泡分段流动分析仪(型号为Sanplus System, Skalar Analytical, 荷兰)测定营养盐,得到 NO_3^- 、 SiO_3^{2-} 、 PO_4^{3-} 、 NH_4^+ 和 NO_2^- 五项营养盐的浓度。每个测定日均建立新的标准曲线。其中使用Cd-Cu柱将样品中的 NO_3^- 还原为 NO_2^- ,测定结果(NO_3^- 与 NO_2^- 浓度之和)与在样品没有通过还原柱情况下测得的 NO_2^- 浓度值之差即为 NO_3^- 的浓度值。 NO_3^- 、 SiO_3^{2-} 、 PO_4^{3-} 、 NH_4^+ 和 NO_2^- 的检出限(10个空白样品测定结果的标准偏差的3倍)分别为0.05、0.04、0.01、0.36和0.01 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。营养盐测试的技术细节参见Gao等(2012)和Wang等(2023)。

2 2022年黄河调水调沙

在为期一年的采样周期内(2021年11月至2022年10月),根据由黄河水文局网站(<http://www.hwsj.com.cn/>)获取的日平均径流量和含沙量数据,黄河涪口站日均径流量和含沙量变化特征如图2a所示。在本文中,“含沙量”特指黄河水文局网站报告的数据,“SPM质量浓度”特指本研究测得的10个样品的数据,2个参数都反映了黄河水体在特定时间内SPM的质量浓度,都使用同一单位 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在图2b中,将涉及调水调沙的2022年6月19日至7月7日以及7月17日至28日的分布放大处理,从中可以看到更多关于日径流量和日含沙量“脉冲式”变化的细节。

从图2a可以看出,黄河涪口站全年日径流量和日含沙量的最高值均出现在调水调沙期间,并且这2个指标在调水调沙的1个月内产生了剧烈的振荡变化。2022年黄河汛前调水调沙前期调水阶段始于6月19日,7月4日凌晨进入排沙阶段,整个汛前调水调沙结束于7月7日22:00。其中6月19日小浪底水库开始进入前期调水阶段,3天后的6月22日涪口站日径流量开始急剧增长,从6月21日的 $510\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 急速上升至7月1日和2日的峰值(均为 $3930\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$),其后短暂小幅回落至7月6日的 $2630\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,之后随着调水调沙后期排沙阶段的到来又再次迅速上升至7月8日的 $3900\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。此后,随着7月7日小浪底汛前调水调沙的结束,涪口站日径流量也回落至7月12日至19日的 $1010\sim 1130\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。

在汛前调水调沙的调水阶段,与6月19日至20日的背景含沙量(分别为971和970 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)相比,涪口站尽管在6月22日至7月7日含沙量略有上升,但上升幅度并不大,基本保持稳定,这16天的日含沙量均为 $3610\sim 5590\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。7月4日小浪底水库开始进入排沙阶段,大约4天后涪口站接收到排沙的信号,于7月8日显示出日含沙量($6200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)上升的迹象,并于1天后的7月9日迅速达到峰值($36200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),该峰值仅维持1天,即于7月10日又开始急速下降,并于7月18日回落至调水调沙前的水平($1580\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)(图2b)。



注：日平均径流量和含沙量数据来自 <http://www.hwsj.com.cn/>；图 b 中 2 条虚线对应 2 次采样日期。

图 2 采样期间及调水调沙期间黄河下游涑口站日径流量和日输沙量变化

Fig. 2 Variations of daily river discharge and daily sediment concentration at the Luokou Station in the lower Yellow River during sampling period and WSR period

为了应对渭河 1 号洪水，保障黄河下游防洪安全，小浪底水库于 7 月 17 日至 28 日开始泄洪排沙运作，开展了一次汛期调水调沙（高兴等，2023）。3 天后涑口站接收到这一信号，7 月 20 日至 31 日其日径流量和日含沙量又有一次明显升高的过程（图 2b），峰值分别出现在 7 月 22 日（径流量 $3\,140\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ）和 7 月 24 日（日含沙量 $30\,900\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ），这 2 个峰值分别相当于前期汛前调水调沙期间 7 月 1 日至 2 日径流量峰值的 80% 和 7 月 9 日含沙量峰值的 85%。并且，与 6 月 19 日至 7 月 7 日汛前调水调沙峰值仅维持一天的情况相比，7 月 17 日至 28 日汛期调水调沙涑口站日径流量和日含沙量的峰值均维持了 3 天以上。同一年份实施多次调水调沙在以往年份也有先例，如 2007 年实施了 2 次，2010 年甚至实施了 3 次，每一次都导致黄河下游利津站相应的一次日径流量和日含沙量“脉冲”变化的过程（Yu et al, 2013b; 吴念等, 2017）。此外，从 2022 年汛前和汛期两次调水调沙涑口站的响应时间来看，洪峰从小浪底大坝到涑口站大概需要 3 天。

2022 年黄河汛前和汛期两次调水调沙期间，本研究在涑口站的采样时间分别为 6 月 29 日和 7 月 25 日，其中 6 月 29 日处于汛前调水调沙的调水阶段，7 月 25 日处于汛期调水调沙的排沙阶段。6 月 29 日和 7 月 25 日的日径流量分别为 $3\,540$ 和 $1\,990\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ，前者明显高于后者，而日含沙量分别为 $4\,750$ 和 $19\,100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，前者明显低于后者（图 2b），即这两日涑口站分别表现出了“高径流量低含沙量”和“低径流量和高含沙量”的特征。本研究的这 2 次观测结果为我们“捕捉”到了在调水调沙、人造洪峰的背景下，黄河下游分别处于调水和排沙两种情景影响下的状态。

3 结果

3.1 DOC 和 CDOM

本研究全年采集的 10 个样品中测得的 SPM 质量浓度的变化范围为 $264\sim 11\,633\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ （表 1），

最低值和最高值分别出现在2022年10月29日和受调水调沙排沙阶段影响的2022年7月25日,后者是前者的约44倍。另外,在受调水调沙调水阶段影响的2022年6月29日测得的样品中SPM质量浓度为 $1\,254\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,仅约为7月25日的11%(表1)。

表1 黄河下游冻口站采集的10个样品SPM质量浓度、DOC浓度、 a_{254} 、 $SUVA_{254}$ 和 $S_{275-295}$ 的测定结果

Table 1 Results of SPM mass concentration, DOC concentration, a_{254} , $SUVA_{254}$, and $S_{275-295}$ measured in the 10 samples collected at the Luokou Station from the lower Huanghe River

采样时间	SPM 质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	DOC 浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	a_{254}/m^{-1}	$SUVA_{254}/$ ($\text{L}\cdot\text{mgC}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)	$S_{275-295}/\text{nm}^{-1}$
2021年11月23日	330	222	15.2	2.48	0.0167
2021年12月17日	444	187	13.0	2.52	0.0155
2022年1月8日	577	167	11.7	2.52	0.0167
2022年2月23日	1\,257	172	12.2	2.57	0.0165
2022年3月15日	1\,398	186	13.5	2.63	0.0159
2022年6月29日	1\,254	160	11.3	2.54	0.0254
2022年7月25日	11\,633	235	16.6	2.55	0.0145
2022年8月19日	489	217	14.4	2.40	0.0179
2022年9月12日	4\,479	180	12.9	2.59	0.0156
2022年10月29日	264	177	12.2	2.49	0.0180

冻口站采集的样品中生源要素的浓度和性质主要取决于上游来水中相关指标在全年的浓度变化,在此基础上,小浪底水库的调水调沙施加了进一步的影响。全年10个样品DOC浓度的最低值($160\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)出现在调水调沙的调水阶段(2022年6月),而最高值($235\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)则出现在调水调沙的排沙阶段(2022年7月),10个样品的平均值为(190 ± 25) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (图3a和表1)。与DOC浓度类似,全年表征CDOM浓度的 a_{254} 的最低值($11.3\ \text{m}^{-1}$)和最高值($16.6\ \text{m}^{-1}$)也均出现在2022年6月、7月(图3a和表1)。综合结果表明:调水调沙对黄河下游DOC和CDOM的浓度产生了重要影响,使得这2个指标在调水调沙1个月左右内的变化幅度就决定了其在全年的变化范围。

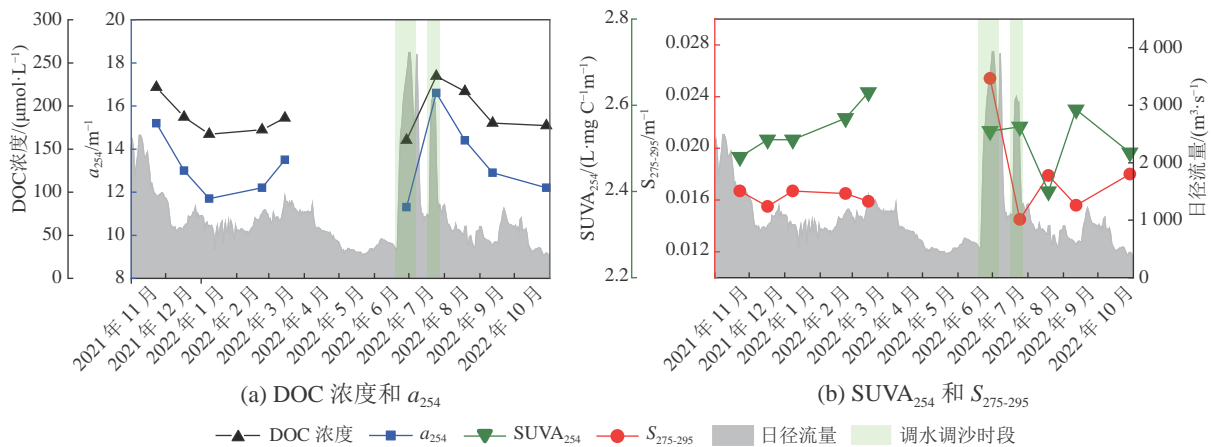


图3 黄河下游冻口站DOC浓度和 a_{254} 值,以及 $SUVA_{254}$ 和 $S_{275-295}$ 值的变化

Fig. 3 Variations in DOC concentration and a_{254} value, as well as $SUVA_{254}$ and $S_{275-295}$ values at the Luokou Station in the lower Yellow River

表征DOM芳香化程度的 $SUVA_{254}$ 值在全年的变化范围并不大($2.40\sim 2.63\ \text{L}\cdot\text{mgC}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$),最低值和最高值分别出现在2022年8月和2022年3月(图3b和表1)。此外,对于表征CDOM分子量大小

的 $S_{275-295}$ ，其全年最大值和最小值也分别出现在 2022 年 6 月和 7 月(图 3b 和表 1)。 $S_{275-295}$ 值越高，CDOM 分子量越小； $S_{275-295}$ 值越低，则 CDOM 分子量越大(Helms et al, 2008)。由此， $S_{275-295}$ 变化结果表明，调水调沙前期的调水阶段向下游带来了大量的低分子量 CDOM 物质，而随着调水调沙排沙阶段的到来，黄河下游全年分子量最低的 CDOM 物质又迅速在 1 个月之内被全年分子量最高的 CDOM 物质所取代。

3.2 FDOM

从全年 10 个样品 FDOM 的 EEM 中可以看出(图 4)，最明显的峰是位于 $Ex/Em = 230/350$ nm 处的类蛋白质 A_T 峰(Coble, 2013)。该峰在 2022 年 3 月的样品中峰值最高(298 ppb-QSE)，在寒冷期 12 月至翌年 3 月以及在调水调沙期间(6 月和 7 月)都是 EEM 中最重要的峰。从 8 月开始，该峰逐渐消失，并被 A_C 峰所取代($Ex/Em = 260/440$ nm 附近，其命名也根据 Coble (2013))，从 8 月开始直到 11 月 A_C 峰在 EEM 中均占据最重要位置(图 4)。除上述 2 个峰以外，在 $Ex/Em = 285/355$ nm 位置附近也经常出现与 A_T 峰成对的 T 峰(Coble, 2013)，该峰同样为类蛋白质峰；与 A_C 峰相反，T 峰在 8 月至 11 月不明显(图 4)。

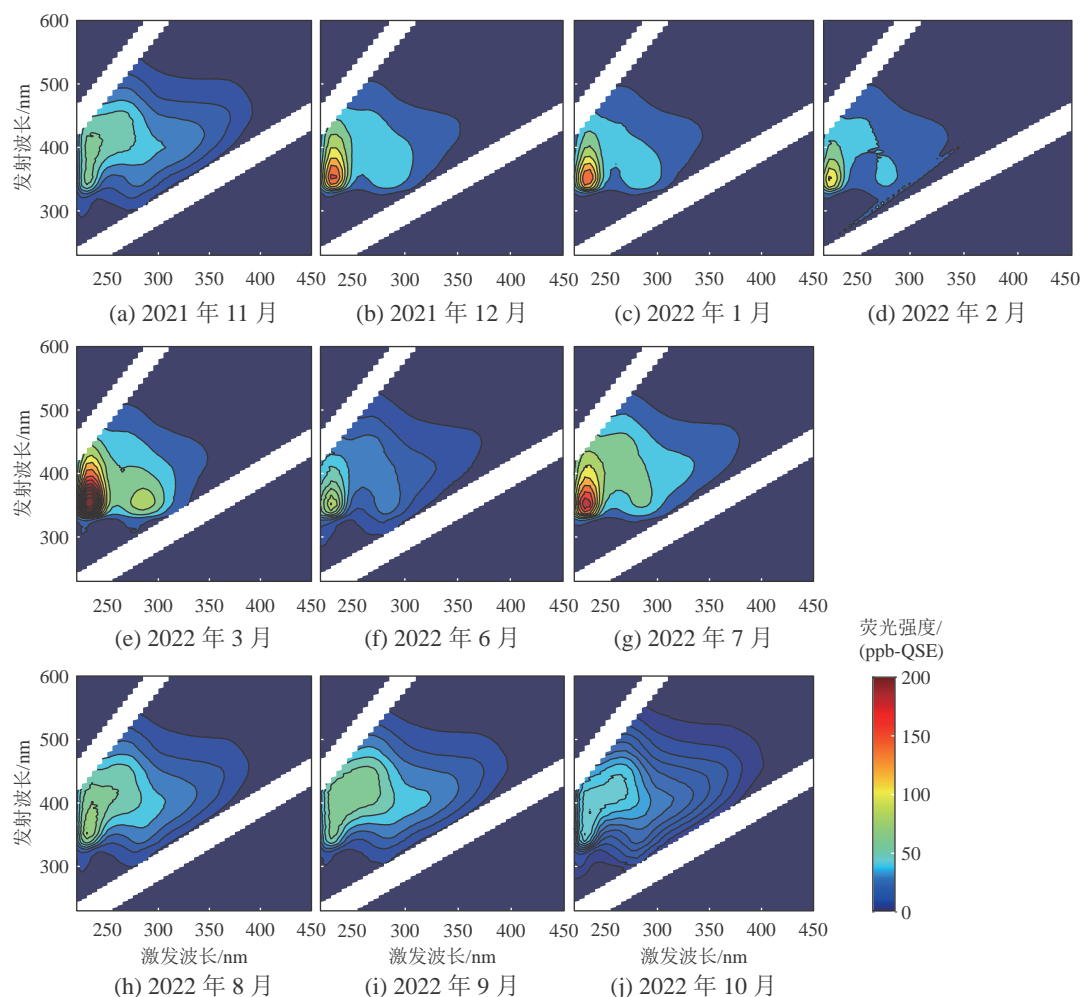


图 4 黄河下游涿口站样品测得的荧光激发-发射三维谱

Fig. 4 Fluorescence excitation-emission matrix spectra of the samples collected from the Luokou Station in the lower Yellow River

本研究解析得到 A_T 、 A_C 和 T 三个 FDOM 成分, 结果如图 5 所示。除此之外, 还研究了以往文献中经常报道的类腐殖质 C 峰 ($Ex/Em = 350/450$ nm, 其命名仍参考 Coble (2013))。在 4 个组分的全年变化中, 2 个类腐殖质组分 (A_C 和 C) 之间及 2 个类蛋白质组分 (A_T 和 T) 之间的变化模式都十分相似, 其中 A_C 和 C 组分峰高之间相关系数 $R^2 = 0.90$, A_T 和 T 组分峰高之间相关系数 $R^2 = 0.99$ 。在调水调沙期间, 7月处于排沙阶段样品的 4 个组分峰高均明显高于 6月调水阶段样品的峰高(图 5), 调水调沙的调水阶段急剧升高的径流量对 FDOM 的 4 个组分均产生了明显的“稀释效应”。

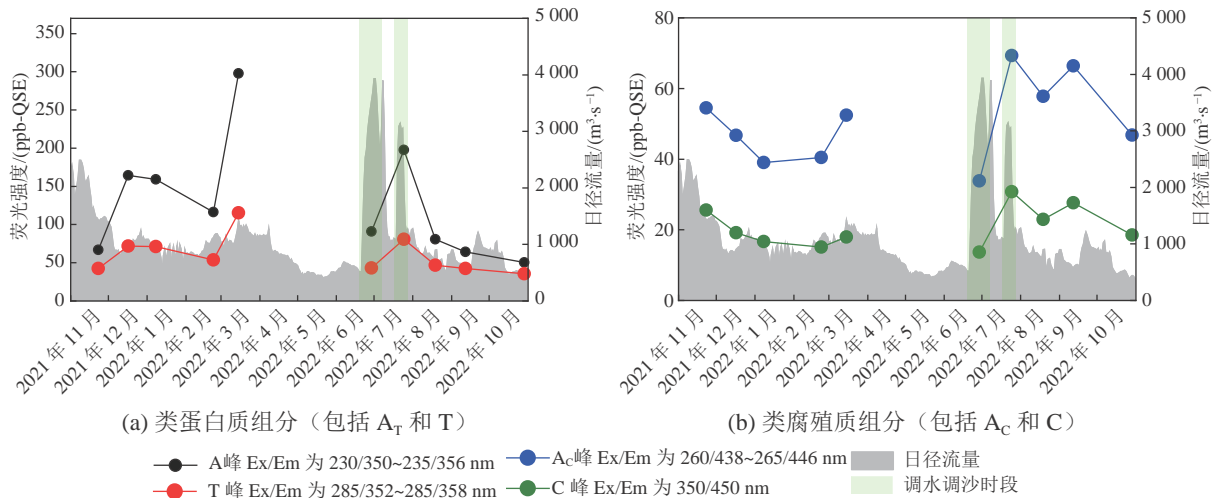


图 5 黄河下游泇口站样品测得的 FDOM 中 2 个类蛋白质组分及 2 个类腐殖质组分峰高的变化
Fig. 5 Variations in peak heights of the two protein-like components and the two humic-like components in FDOM measured from the samples collected at the Luokou Station in the lower Yellow River

3.3 POC%、 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$

POC% 表明了 SPM 中有机碳组分的比例。全年 POC% 值介于 0.36%~1.44%(图 6 和表 2), 最低值和最高值分别出现在 2022 年 2 月和 10 月。夏秋季 POC% 普遍较高, 可能与该季节水体中较旺盛

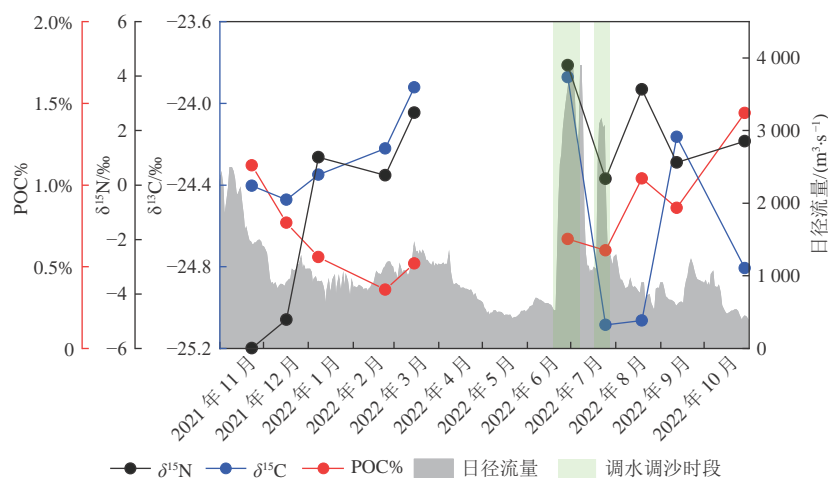


图 6 黄河下游泇口站样品测得的 SPM 中有机碳比例(POC%)及 POC 中 $\delta^{13}C$ 和 PN 中 $\delta^{15}N$ 的变化
Fig. 6 Variations in the proportion of organic carbon in SPM (POC%), as well as $\delta^{13}C$ in POC and $\delta^{15}N$ in PN, measured from the samples collected at the Luokou Station in the lower Yellow River

表2 黄河下游冻口站采集样品 SPM 中 POC%、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的测定结果
Table 2 POC%, $\delta^{13}\text{C}$, and $\delta^{15}\text{N}$ in SPM measured in the samples collected at the Luokou Station from the lower Huanghe River

采样时间	POC%	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	采样时间	POC%	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$
2021年11月23日	1.12%	-24.4	-6.0	2022年6月29日	0.67%	-23.9	4.4
2021年12月17日	0.77%	-24.5	-5.0	2022年7月25日	0.60%	-25.1	0.2
2022年1月8日	0.56%	-24.4	1.0	2022年8月19日	1.04%	-25.1	3.5
2022年2月23日	0.36%	-24.2	0.4	2022年9月12日	0.86%	-24.2	0.8
2022年3月15日	0.52%	-23.9	2.7	2022年10月29日	1.44%	-24.8	1.6

的生物活动有关，而在寒冷的冬季该值一般较低，这可能是由调水调沙中急剧增加的径流量和输沙量对生物活动的扰动所致。2022年6月和7月2个样品并没有显示出 POC% 高值。

$\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 这2个指标都可以指示河水 SPM 中外源有机物和自生来源有机物的相对比例，2个指标的值越高，SPM 中自生有机物的比例也越高(Ming et al, 2023)。在图6和表2中，全年 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化范围分别为 $-25.1\text{‰} \sim -23.9\text{‰}$ 和 $-6.0\text{‰} \sim 4.4\text{‰}$ 。 $\delta^{13}\text{C}$ 的最低值和最高值均分别出现在调水调沙期间的2022年6月和7月，说明调水调沙对黄河输出 SPM 中 POC 组成和性质变化具有重要影响。 $\delta^{15}\text{N}$ 的最低值出现在冬季的2021年11月和12月，最高值出现在夏季的2022年6月和8月(表2)。其中，2022年7月 $\delta^{15}\text{N}$ 的低值(0.2‰)可能与采样当时处于第二次调水调沙有关。

3.4 营养盐

全年10个样品 NO_3^- 浓度在 $205 \sim 309 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ，平均值为 $(253 \pm 43) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ，最低值和最高值分别出现在2022年8月和2022年2月(表3)。高值(大于 $280 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)均出现在较为寒冷的2021年11月至2022年3月，而低值(小于 $230 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)均出现在较为温暖的2022年6月至10月，该结果可能反映了不同季节河水中生物活动及径流量的影响。与2022年8月至10月的结果($205 \sim 225 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)相比，2022年6月和7月的调水调沙在强烈地改变 DOC 浓度、CDOM 浓度、FDOM 的类腐殖质组分含量的同时，对 NO_3^- 浓度产生的影响则相对较小，这2个月 NO_3^- 浓度分别为 210 和 $212 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ，差别很小，并且这2个浓度值也并非全年的最高值或最低值。

表3 黄河下游冻口站采集样品中营养盐的测定结果
Table 3 Nutrients concentrations measured in the samples collected at the Luokou Station from the lower Huanghe River

采样时间	NO_3^- 浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	SiO_3^{2-} 浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	PO_4^{3-} 浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	NO_2^- 浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	NH_4^+ 浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)
2021年11月23日	282	116	0.44	1.83	7.5
2021年12月17日	291	106	0.39	1.76	6.8
2022年1月8日	292	105	0.45	1.76	1.5
2022年2月23日	309	101	0.38	2.23	0.9
2022年3月15日	292	98	0.41	1.85	1.5
2022年6月29日	210	63	0.38	1.18	3.6
2022年7月25日	212	117	0.43	0.14	7.6
2022年8月19日	205	109	0.31	0.89	2.6
2022年9月12日	212	122	0.53	0.06	8.0
2022年10月29日	225	87	0.33	1.30	1.3

全年 SiO_3^{2-} 浓度在 $63\sim 122\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $(102\pm 17)\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,最低值和最高值分别出现在2022年6月和2022年9月(表3)。调水调沙中调水阶段突增的径流量对 SiO_3^{2-} 浓度同样产生了明显的“稀释效应”,使得2022年6月的浓度达到全年的最低值。2022年7月排沙阶段明显升高的SPM质量浓度尽管也使 SiO_3^{2-} 浓度在短时间有所升高,但并未达到全年最高值。

黄河涿口站全年 PO_4^{3-} 浓度一般较低,均在 $0.31\sim 0.53\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $(0.40\pm 0.06)\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,且变化幅度不大,调水调沙也没有明显地改变 PO_4^{3-} 的浓度(表3)。与长江相比(Gao et al, 2012; Wang et al, 2023),黄河全年较高的 NO_3^- 浓度和较低的 PO_4^{3-} 浓度对应了黄河下游涿口站测得的全年极高的 $\text{NO}_3^-/\text{PO}_4^{3-}$ 值(大于397)。

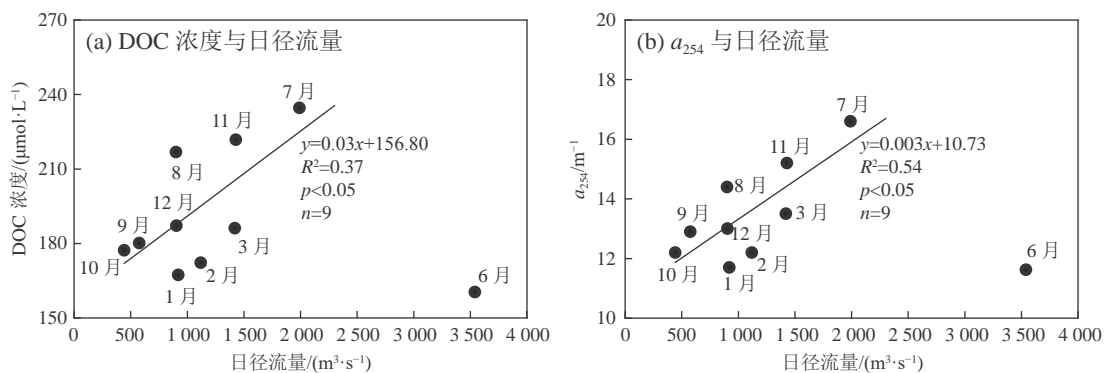
全年10个样品 NH_4^+ 和 NO_2^- 的变化范围分别为 $0.9\sim 8.0\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.1\sim 2.2\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值分别为 (4.1 ± 3.0) 和 $(1.3\pm 0.7)\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (表3)。与 NO_3^- 浓度相比, NH_4^+ 和 NO_2^- 的浓度低一个数量级以上。另外,调水调沙期间 NH_4^+ 和 NO_2^- 的浓度也在其余月份的浓度变化范围之内。 NO_2^- 浓度在较寒冷的2021年11月至2022年3月($1.8\sim 2.2\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)明显高于较为温暖的2022年6月至10月($0.1\sim 1.3\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)。

4 讨论

4.1 径流量对溶解态生源要素浓度的影响

Creed等(2015)指出,径流量对溶解态生源要素的浓度可能产生“冲刷效应”或“稀释效应”,前者表现为径流量的增加导致生源要素浓度的增加,而后者则相反。Zhao等(2021)和Ming等(2023)研究均表明,在长江下游,径流量的季节变化对DOC浓度往往产生冲刷效应,DOC浓度与径流量表现为正相关关系。另一方面,Gao等(2012)和Wang等(2023)研究则表明,针对营养盐,长江径流量的季节变化对下游 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 表现为“稀释效应”,而对 SiO_3^{2-} 则既不表现为“冲刷效应”也不表现为“稀释效应”。

在黄河下游,本研究发现,对于大部分溶解态生源要素指标,如DOC、 a_{254} 、FDOM中的2个类腐殖质组分(A_c 和C)和 SiO_3^{2-} ,在调水调沙的调水阶段,随着径流量的急剧增加,上述指标均出现全年浓度的最低值。进一步分析发现,如果去掉2022年6月的数据点,则与长江下游类似,黄河下游径流量对DOC浓度和 a_{254} 值也总体上表现为“冲刷效应”(图7),而2022年6月进一步急剧增加的径流量反而产生了“稀释效应”,使这2个指标呈现出全年的最低值。



注:图中拟合线计算所依据的数据不包括6月的结果。

图7 黄河下游涿口站采集样品测得的DOC浓度和 a_{254} 值与日径流量的关系

Fig. 7 The relationships between daily river discharge and DOC concentration, and between daily river discharge and a_{254} value of the samples collected from the Luokou Station in the lower Yellow River

对于 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 和FDOM的2个类蛋白质组分(A_T 和T), 尽管2022年6月其浓度与其他月份相比处于较低水平, 但并没有达到全年最低值(表3和图5), 说明这些组分除了受到径流量的影响外, 还受到生物活动等其他因素的控制。Ming等(2023)研究表明, 长江下游SPM中高的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值往往指示了POC中高比例的自生有机物或当地较活跃的生物活动。而在2022年6月的黄河下游涿口站, 本研究测得的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 同时达到了全年的最高值, 这一现象进一步佐证了除受到径流量影响以外, 河水中生源要素也受到不同季节不同强度生物活动的影响。

$S_{275-295}$ 值在2022年6月(0.0254 nm^{-1})也远远高于其他月份(均小于 0.0180 nm^{-1})(图3b和表1)。根据Helms等(2008), 上述结果进一步表明小浪底水库调水调沙的调水阶段为黄河下游带来了大量的低分子量CDOM物质。之后, 在2022年7月调水调沙的排沙阶段, 样品中SPM质量浓度急剧升高, DOC浓度、 a_{254} 值以及FDOM中的2个类腐殖质组分(A_C 和C)都同时达到了全年最高值, 并且 $S_{275-295}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 这2个指标也达到了全年最低值。排沙阶段大幅升高的SPM质量浓度又为黄河下游带来了低 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的SPM物质及分子量较大的CDOM。这些情况说明, 调水调沙通过径流量和输沙量的急剧变化, 对河水中生源要素的影响十分快速且复杂。

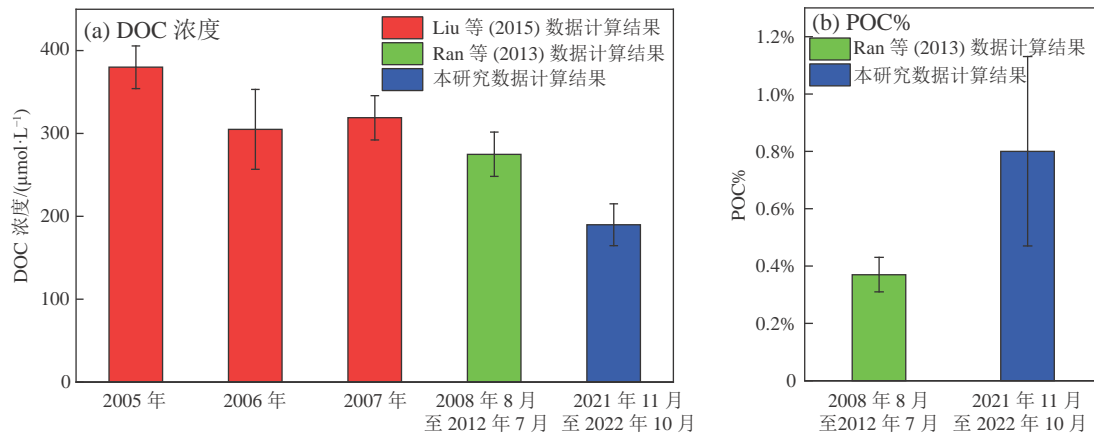
4.2 年代际变化趋势

Wu等(2021)研究了本世纪以来(2001年至2018年)黄河下游营养盐浓度的变化趋势, 发现溶解无机氮(dissolved inorganic nitrogen, DIN, 为 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 NO_2^- 三者之和)、 SiO_3^{2-} 、 PO_4^{3-} 三种营养盐浓度都在持续下降, 将其归因于近年来流域化肥施用量的严格管控、污水处理工艺的提高及流域各项生态环境保护工程的有效实施。本研究于2021年11月至2022年10月在黄河下游涿口站测得的DIN、 SiO_3^{2-} 和 PO_4^{3-} 的浓度范围分别为 $209\sim 312$ 、 $63\sim 122$ 和 $0.31\sim 0.53\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (表3)。对于DIN, 与Wu等(2021)近5年(2014年至2018年)的数据相比, 本研究2021年11月至2022年10月一年中季节变化范围明显偏小, 此外, 本研究测得的DIN最高值($312\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)与2014年至2018年间最高值(这5年年内最高值在 $327\sim 373\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)相比略有降低。对于 SiO_3^{2-} , 未观测到2021年11月至2022年10月(本研究数据)与2014年至2018年(Wu et al, 2021)两个时间段($0.52\sim 136\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)之间 SiO_3^{2-} 浓度明显的变化趋势。对于 PO_4^{3-} , 本研究2021年11月至2022年10月的浓度值一般高于Wu等(2021)中2014年至2018年的浓度值, 但与Wu等(2021)中2001年至2013年的数据相比仍呈现出明显下降的趋势。总之, 本研究最新的数据进一步证实了Wu等(2021)提出的本世纪以来黄河下游营养盐浓度处于逐渐下降趋势的观点。

Liu等(2015)于2005年至2007年以每10天一次的频率采集了黄河下游涿口站的样品, 分析表明2005年、2006年、2007年该站点DOC浓度的年度平均值分别为 $380\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (范围在 $216\sim 847\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)、 $305\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (范围在 $83\sim 598\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)、 $319\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (范围在 $130\sim 569\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)。Ran等(2013)于2008年8月至2012年7月在黄河下游利津站(据入海口约110 km)每周一次采样的结果表明, 这4年DOC浓度平均值为 $275\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。与2005年至2007年的数据相比, 2008年至2012年黄河下游DOC的浓度已经呈现出明显的下降。本研究则更进一步表明, 黄河下游DOC浓度下降趋势直至2021年至2022年仍未停止, DOC浓度的年度平均值由2008年至2012年的 $275\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 继续降低至2021年11月至2022年10月的 $190\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (范围在 $160\sim 235\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)(表1和图8a)。上述趋势很可能是黄河入海径流量在本世纪以来逐步恢复、气候变化及流域生态环境保护工程的实施等因素综合作用的结果(Kong et al, 2015b; Zhang et al, 2021)。

此外, Ran等(2013)在利津站的研究还表明, 黄河下游SPM中POC%在2008年8月至2012年7月的年度平均值为0.37%, 而本研究涿口站2021年11月至2022年10月的平均值为0.80%(0.36%~

1.44%)(图6和表2),说明近年来该指标在黄河下游可能存在上升的迹象(图8b)。该上升趋势与邻近的长江下游的相关发现一致(Ming et al, 2023),可能反映了近年来长江和黄河等我国大河河水中泥沙含量下降、水体停留时间延长、自生有机物比例增高的状况。需要指出的是,利津站和冻口站尽管都处在黄河下游,但两站之间仍相距约170 km,两地之间生源要素本身的空间差异也会对上述不同时期的比较造成一定的干扰。但上述关于营养盐和有机物等生源要素指标的趋势变化仍表明,同长江一样,黄河在最近几十年,尤其是在2002年调水调沙实施后,其水沙关系、生源要素含量和生态系统结构正在经历着复杂而深刻的变化,而当前正处于这一转型过程的关键时间节点。



注: 2005年至2007年冻口站DOC数据(红色)来自Liu等(2015), 2008年8月至2012年7月利津站数据(绿色)来自Ran等(2013), 2021年11月至2022年10月冻口站数据(蓝色)为本研究观测数据。

图8 近20年黄河下游DOC浓度和SPM中POC%值变化

Fig. 8 Variations of DOC concentration and POC% in SPM in the lower Yellow River over the past 20 years

5 结 语

本研究在2021年11月至2022年10月期间,采集了黄河下游冻口站表层河水样品,测定了包括DOC和CDOM浓度、FDOM、POC及营养盐等一系列指标,结果表明,调水调沙已经成为决定黄河下游生源要素浓度和输出通量在全年变化的重要因素。调水阶段中急剧增加的径流量通过“稀释效应”明显降低了大多数生源要素(如DOC、CDOM、FDOM中2种类腐殖质组分、 SiO_3^{2-})的浓度,使其浓度达到了全年的最低值。另外,这一阶段 $S_{275-295}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的最高值也意味着调水调沙的调水过程为黄河下游带来了更多的小分子量CDOM和具有更高自生有机物比例的SPM物质。在短短一个月之内,调水调沙后期排沙阶段中DOC、CDOM、FDOM中2种类腐殖质等浓度指标则迅速呈现出全年的最高值,同时 $S_{275-295}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 则表现为全年的最低值。本研究不仅进一步证实了调水调沙对黄河生源要素输出的关键作用,还揭示了调水和排沙两个阶段如何及在多大程度上影响着黄河下游生源要素的浓度和组成。

先前的研究(Wu et al, 2021)已经证实,在流域生态环境保护工程开展和实施后,黄河下游氮、磷营养盐浓度已经呈现出新的年代际变化趋势,由20世纪下半叶的持续上升趋势转变为本世纪最近20年的下降趋势。本研究则进一步表明,DOC浓度在最近20年间也可能产生了显著的下降趋势,而同时期SPM中有机物组成比例(POC%)则可能存在升高的迹象。上述生源要素指标的变化趋势及其受控机制需要今后在更大采样频率和积累更多现场观测数据的基础上进一步明确和阐释。

参考文献 (References):

- 陈俊卿, 范勇勇, 吴文娟, 等, 2019. 2016–2017年调水调沙中断后黄河口演变特征[J]. 人民黄河, 41(8): 6-10. CHEN J Q, FAN Y Y, WU W J, et al, 2019. Evolution characteristics of the Yellow River Estuary after interruption of the Yellow River water and sediment regulation in 2016-2017[J]. Yellow River, 41(8): 6-10.
- 高兴, 朱呈浩, 陈翠霞, 等, 2023. 考虑黄河水沙丰枯变化的小浪底水库调水调沙优化研究[J]. 人民黄河, 45(10): 19-24. GAO X, ZHU C H, CHEN C X, et al, 2023. Study on the optimization of water and sediment regulation of the Xiaolangdi Reservoir considering the change of wet-dry water and sediment in the Yellow River[J]. Yellow River, 45(10): 19-24.
- 苏志明, 孙永福, 宋玉鹏, 等, 2022. 基于GEE和GIS的黄河三角洲面积多尺度时间序列分析[J]. 海洋科学进展, 40(1): 90-101. SU Z M, SUN Y F, SONG Y P, et al, 2022. Multiscale time series analysis of Yellow River Delta area based on GEE and GIS[J]. Advances in Marine Scienc, 40(1): 90-101.
- 王柯萌, 孙永福, 宋玉鹏, 等, 2019. 调水调沙对黄河三角洲切变锋及冲淡水扩散的影响[J]. 海洋科学进展, 37(4): 551-564. WANG K M, SUN Y F, SONG Y P. et al, 2019. Characteristics of shear fronts and dispersal of diluted water during the water-sediment regulation scheme in Yellow River Delta[J]. Advances in Marine Science, 37(4): 551-564.
- 吴念, 刘素美, 张桂玲, 2017. 黄河下游调水调沙与暴雨事件对营养盐输出通量的影响[J]. 海洋学报, 39(6): 114-128. WU N, LIU S M, ZHANG G L, 2017. Impacts of water-sediment regulation and rainstorm events on nutrient transports in the lower Huanghe River[J]. Haiyang Xuebao, 39(6): 114-128.
- 姚庆祯, 于志刚, 王婷, 等, 2009. 调水调沙对黄河下游营养盐变化规律的影响[J]. 环境科学, 30(12): 3534-3540. YAO Q Z, YU Z G, WANG T, et al, 2009. Effect of the first water-sediment regulation on the variations of dissolved inorganic nutrients' concentrations and fluxes in the lower main channel of the Yellow River[J]. Environmental Science, 30(12): 3534-3540.
- 张效龙, 邱汉学, 张权, 2001. 环渤海经济区水资源现状及其可持续利用对策[J]. 海岸工程, 20(1): 64-71. ZHANG X L, QIU H X, ZHANG Q, 2001. Current situation of water resources in the circum-Bohai area and its sustainable utilization measures[J]. Coastal Engineering, 20(1): 64-71.
- 张永领, 王明仕, 董玉龙, 2015. 黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响[J]. 环境科学, 36(4): 1249-1255. ZHANG Y L, WANG M S, DONG Y L, 2015. Effect of the runoff-sediment control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC transport[J]. Environmental Science, 36(4): 1249-1255.
- BI N S, SUN Z Q, WANG H J, et al, 2019. Response of channel scouring and deposition to the regulation of large reservoirs: a case study of the lower reaches of the Yellow River (Huanghe)[J]. Journal of Hydrology, 568: 972-984.
- CHEN J S, WANG F Y, MEYBECK M, et al, 2005. Spatial and temporal analysis of water chemistry records (1958-2000) in the Huanghe (Yellow River) basin[J]. Global Biogeochemical Cycles, 19: GB3016.
- COBLE P G, 2013. Colored dissolved organic matter in seawater[M]. Cambridge, UK: Woodhead Publishing: 98-118.
- CREED I F, MCKNIGHT D M, PELLERIN B A, et al, 2015. The river as a chemostat: fresh perspectives on dissolved organic matter flowing down the river continuum[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 72(8): 1272-1285.
- DING T P, GAO J F, TIAN S H, et al, 2011. Silicon isotopic composition of dissolved silicon and suspended particulate matter in the Yellow River, China, with implications for the global silicon cycle[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 75(21): 6672-6689.
- GAO L, FAN D D, LI D J, et al, 2010. Fluorescence characteristics of chromophoric dissolved organic matter in shallow water along the Zhejiang coasts, Southeast China[J]. Marine Environmental Research, 69(3): 187-197.
- GAO L, LI D J, ZHANG Y W, 2012. Nutrients and particulate organic matter discharged by the Changjiang (Yangtze River): seasonal variations and temporal trends[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 117: G04001.
- GAO L, LI D J, ISHIZAKA J, 2014. Stable isotope ratios of carbon and nitrogen in suspended organic matter: seasonal and spatial dynamics along the Changjiang (Yangtze River) transport pathway[J]. Journal of Geophysical Research:

- Biogeosciences, 119(8): 1717-1737.
- GUO L D, SANTSCI P H, WARNKEN K W, 1995. Dynamics of dissolved organic carbon (DOC) in oceanic environments[J]. *Limnology and Oceanography*, 40(8): 1392-1403.
- HELMS J R, STUBBINS A, RITCHIE J D, et al, 2008. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter[J]. *Limnology and Oceanography*, 53(3): 955-969.
- KONG D X, MIAO C Y, WU J W, et al, 2015a. Bi-objective analysis of water-sediment regulation for channel scouring and delta maintenance: a study of the lower Yellow River[J]. *Global and Planetary Change*, 133: 27-34.
- KONG D X, MIAO C Y, WU J W, et al, 2015b. The hydro-environmental response on the lower Yellow River to the water-sediment regulation scheme[J]. *Ecological Engineering*, 79: 69-79.
- KOTHAWALA D N, MURPHY K R, STEDMON C A, et al, 2013. Inner filter correction of dissolved organic matter fluorescence[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 11(12): 616-630.
- LI X Y, CHEN H T, JIANG X Y, et al, 2017. Impacts of human activities on nutrient transport in the Yellow River: the role of the water-sediment regulation scheme[J]. *Science of the Total Environment*, 592: 161-170.
- LIU S M, LI L W, ZHANG G L, et al, 2012. Impacts of human activities on nutrient transports in the Huanghe (Yellow River) estuary[J]. *Journal of Hydrology*, 430: 103-110.
- LIU J R, SONG X F, WANG Z M, et al, 2015. Variations of carbon transport in the Yellow River, China[J]. *Hydrology Research*, 46(5): 746-762.
- MING Y, GAO L, GUO L D, 2023. Dissolved and particulate organic carbon dynamics in the lower Changjiang River on timescales from seasonal to decades: response to climate and human impacts[J]. *Journal of Marine Systems*, 239: 103855.
- MURPHY K R, BUTLER K D, SPENCER R G M, et al, 2010. Measurement of dissolved organic matter fluorescence in aquatic environments: an interlaboratory comparison[J]. *Environmental Science & Technology*, 44(24): 9405-9412.
- MURPHY K R, STEDMON C A, GRAEBER D, et al, 2013. Fluorescence spectroscopy and multi-way techniques. PARAFAC[J]. *Analytical Methods*, 5(23): 6557-6566.
- RAN L S, LU X X, SUN H G, et al, 2013. Spatial and seasonal variability of organic carbon transport in the Yellow River, China[J]. *Journal of Hydrology*, 498: 76-88.
- RAN X B, CHE H, ZANG J Y, et al, 2015. Variability in the composition and export of silica in the Huanghe River Basin[J]. *Science China Earth Sciences*, 58: 2078-2089.
- WANG H J, YANG Z S, SATIO Y, et al, 2006. Interannual and seasonal variation of the Huanghe (Yellow River) water discharge over the past 50 years: connections to impacts from ENSO events and dams[J]. *Global and Planetary Change*, 50(3/4): 212-225.
- WANG H J, YANG Z S, SATIO Y, et al, 2007. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950–2005): impacts of climate change and human activities[J]. *Global and Planetary Change*, 57(3/4): 331-354.
- WANG H J, SAITO Y, ZHANG Y, et al, 2011. Recent changes of sediment flux to the Western Pacific Ocean from major rivers in East and Southeast Asia[J]. *Earth-Science Reviews*, 108(1/2): 80-100.
- WANG Y, GAO L, MING Y, et al, 2023. Recent declines in nutrient concentrations and fluxes in the lower Changjiang River[J]. *Estuaries and Coasts*, 46: 1475-1493.
- WEISHAAR J L, AIKEN G R, BERGAMASCHI B A, et al, 2003. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon[J]. *Environmental Science & Technology*, 37(20): 4702-4708.
- WU N, LIU S M, ZHANG G L, et al, 2021. Anthropogenic impacts on nutrient variability in the lower Yellow River[J]. *Science of the Total Environment*, 755: 142488.
- XIA X H, DONG J W, WANG M H, et al, 2016. Effect of water-sediment regulation of the Xiaolangdi reservoir on the concentrations, characteristics, and fluxes of suspended sediment and organic carbon in the Yellow River[J]. *Science of the Total Environment*, 571: 487-497.

- YU Y G, SHI X F, WANG H J, et al, 2013a. Effects of dams on water and sediment delivery to the sea by the Huanghe (Yellow River): the special role of water-sediment modulation[J]. *Anthropocene*, 3: 72-82.
- YU Y G, SHI X F, WANG H J, et al, 2013b. New discharge regime of the Huanghe (Yellow River): causes and implications[J]. *Continental Shelf Research*, 69: 62-72.
- ZHANG L J, WANG L, CAI W J, et al, 2013. Impact of human activities on organic carbon transport in the Yellow River[J]. *Biogeosciences*, 10(4): 2513-2524.
- ZHANG J J, LI F, LÜ Q M, et al, 2021. Impact of the water-sediment regulation scheme on the phytoplankton community in the Yellow River estuary[J]. *Journal of Cleaner Production*, 294: 126291.
- ZHAO L, GAO L, GUO L D, 2021. Seasonal variations in molecular size of chromophoric dissolved organic matter from the lower Changjiang (Yangtze) River[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(8): e2020JG006160.

The Impact of Water and Sediment Regulation on Monthly Changes of Downstream Organic Matter and Nutrients in the Yellow River in 2022

GAO Shuming¹, YAO Ailin¹, MING Yue^{1,2}, WANG Xianye¹, GAO Lei¹

(1. *Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China;*

2. *State Environmental Protection Key Laboratory of Marine Ecosystem Restoration, National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China*)

Abstract: From November 2021 to October 2022, 12 monthly samplings were conducted at Luokou Station in the lower Yellow River (Huanghe River) to measure dissolved organic carbon (DOC), chromophoric dissolved organic matter (CDOM), fluorescent dissolved organic matter (FDOM), nutrients, as well as the proportion of POC, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values in suspended particulate matter (SPM) in the river water. The results indicate that water and sediment regulation (WSR) has become a key factor in controlling the pattern of annual changes in various biogenic elements in the lower Yellow River, and determines the upper and lower limits of its annual variation range. During the early stage of WSR, the pulsed increase of river discharge caused the concentration of DOC, CDOM and humic-like components in FDOM, and $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ to their lowest values in a year, through water dilution, while the CDOM spectral slope ($S_{275-295}$) reached its highest value. In the late stage of WSR, the above parameters reached their annual extreme values in the opposite direction. In the past 20 years, under the influences of WSR, watershed ecological environment protection projects and climate change, the concentrations of nutrients and DOC in the lower Yellow River have shown significant downward trends, while the increase in the proportion of organic matter in SPM has also shown preliminary signs. The concentrations, compositions, properties, and output fluxes of biogenic elements in the lower Yellow River are undergoing complex and profound changes, which will directly affect the marine ecological environment of the Yellow River estuary. This study helps us further understand the response characteristics and feedback mechanisms of major river biogenic elements, as well as their potential impacts on adjacent marine ecosystems, in the context of human activities.

Keywords: the Yellow River (Huanghe River); water and sediment regulation; dissolved organic carbon (DOC); particulate organic carbon (POC); chromophoric dissolved organic matter (CDOM); fluorescent dissolved organic matter (FDOM); nutrients

Received: August 7, 2023 **Online:** January 15, 2024

寒潮影响下北部湾研究海域颗粒态 和溶解态²¹⁰Po 的分布特征

刘文靖^{1,2}, 钟强强^{1,2}, 王浩^{1,2}, 陈随缘^{1,2}, 黄德坤^{1,2}, 刘进文^{1,2}, 于涛^{1,2*}

(1. 自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361000;

2. 自然资源部北部湾滨海湿地生态系统野外科学观测研究站, 广西 北海 536015)

摘要: ²¹⁰Po 是天然放射性核素, 具有较强的颗粒活性, 可用于水体悬浮颗粒物来源及传输、污染物清除等过程的示踪研究。2021—2022 年冬季寒潮过境期间北部湾研究海域不同形态²¹⁰Po 的活度浓度分布及地球化学行为特征实测结果表明, 表层水体中溶解态和颗粒态²¹⁰Po 的活度浓度水平分别为 0.36~1.39 dpm·(100 L)⁻¹ (1 Bq=60 dpm) 和 0.60~12.15 dpm·(100 L)⁻¹; 水体中²¹⁰Po 主要以颗粒态形式存在。实测的颗粒态²¹⁰Po 活度浓度和总悬浮颗粒物 (TSM) 质量浓度之间存在显著正相关性 ($R^2=0.968$, $P<0.01$) 表明, 溶解态²¹⁰Po 被颗粒物显著“清除”的现象; 进一步分析发现北部湾寒潮期间水体中²¹⁰Po 的分配系数 (K_d 值) 为 $(1.16\sim 17.95)\times 10^5$ mL·g⁻¹, 与其他海域相同 TSM 质量浓度条件下相比明显增加, 再次表明溶解态²¹⁰Po 在北部湾寒潮过境期间得到强化“清除”。原因可能是寒潮期间北部湾水体中的再悬浮过程和输送过程的加强促使水体 TSM 质量浓度增加, 溶解态²¹⁰Po 因被颗粒物吸附而被强化“清除”。冬季北部湾海域频发的寒潮等强对流天气过程导致水动力混合加剧, 影响 TSM 分布的同时也改变了北部湾水体中²¹⁰Po 的分布。这对认识寒潮、台风等强对流气象事件影响下近岸海域水体悬浮颗粒物及其携带的污染物的传输过程具有重要的意义。

关键词: 溶解态²¹⁰Po; 颗粒态²¹⁰Po; 寒潮; 总悬浮颗粒物; 北部湾

中图分类号: P734.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2024)04-0769-13

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20230813001

引用格式: 刘文靖, 钟强强, 王浩, 等, 2024. 寒潮影响下北部湾研究海域颗粒态和溶解态²¹⁰Po 的分布特征[J]. 海洋科学进展, 42(4): 769-781. LIU W J, ZHONG Q Q, WANG H, et al, 2024. Distribution features of particulate and dissolved ²¹⁰Po in Beibu Gulf under the influence of cold wave[J]. Advances in Marine Science, 42(4): 769-781.

²¹⁰Po 是一种天然放射性核素, 半衰期为 138 d, 普遍分布于岩石、土壤、大气和天然水体中。²¹⁰Po 属于²³⁸U 衰变系, 主要来自其母体²¹⁰Pb 的衰变。²¹⁰Po 被广泛应用于大气、海洋学过程的示踪研究。海洋中的²¹⁰Po 主要来自于²¹⁰Pb 的衰变, 而²¹⁰Pb 来自²²⁶Ra 的原位衰变和大气沉降 (Bacon et al, 1976; Matthews et al, 2007; Yang et al, 2011; Su et al, 2017; Bam et al, 2020)。气溶胶在大气的停留时间一般较短, 因此²¹⁰Po 大气沉降通量通常小于²¹⁰Pb 大气沉降通量的 10% (Tateda et al, 2008; Wei et al, 2011; Bam et al, 2020)。²¹⁰Pb 和²¹⁰Po 都具有颗粒活性, 但成岩颗粒主要吸附²¹⁰Pb, 而²¹⁰Po 因具有生物亲和力容易被浮游生物和生物颗粒等有机颗粒物吸收。海源生物颗粒的输出导致海洋上层水体的²¹⁰Po 相对于²¹⁰Pb 呈现亏损, 所以利用²¹⁰Po/²¹⁰Pb 比可研究颗粒有机碳的输出、颗粒活性污染物行为、颗

收稿日期: 2023-08-13 网络首发日期: 2024-04-22

资助项目: 自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费专项资金资助项目 (2023007 和 2020017); 国家自然科学基金项目 (42206166); 亚洲合作基金项目

作者简介: 刘文靖 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋环境科学方面研究. E-mail: liuwenjing@tio.org.cn

*通信作者: 于涛 (1971—), 女, 正高级工程师, 博士, 硕士生导师, 主要从事海洋环境放射化学方面研究. E-mail: yutao@tio.org.cn

(高峻 编辑)

颗粒物来源和运输、营养元素循环等(Matthews et al, 2007; Tateda et al, 2008; Yang et al, 2011; Su et al, 2017; Subha et al, 2018; Bam et al, 2020; Zhang et al, 2020)。进入到海洋中的污染物受到大量颗粒物的相互作用和颗粒动力学的影响(Wei et al, 2012)。颗粒动力学在海洋碳循环(颗粒有机碳形式)中具有重要作用,颗粒有机碳的迁移通量直接反映海洋的固碳能力,了解颗粒的迁移有助于研究海洋作为碳汇吸收大气中CO₂的能力,是全球气候变化的研究依据(Wei et al, 2011, 2015; Subha et al, 2018)。颗粒在海洋中的一系列生物地球化学过程,涉及颗粒的产生、分解、聚集、沉降和运移,颗粒活性的放射性核素作为良好的示踪剂有助于了解其中的一些信息。利用²¹⁰Po的半衰期较长这一特征可获得在天-季节时间尺度上的颗粒迁移信息(Ma et al, 2017; Zhong et al, 2023)。此外,²¹⁰Po作为一种具有生物亲和力的放射性核素,其行为类似于营养元素(硫),被浮游植物吸收后进入到细胞质和细胞壁中,因此也可作为具有类似生物地球化学特征的其他物质的代表(Bam et al, 2020; Zhong et al, 2023)。

北部湾位于中国南海西北部,平均水深为38 m,最大深度小于100 m。北部湾沿岸河流众多,有大风江、钦江、北仑河、昌化江等河流输入。它属于热带、亚热带季风气候,雨季和旱季分明,雨季年平均降水量为1 500~1 800 mm,旱季年平均降水量降至10~120 mm(Chen et al, 2009; Cheng et al, 2017; Guo et al, 2020; 王希龙等, 2022)。北部湾具有丰富的渔业资源,在中国和越南的经济中发挥重要作用(Cheng et al, 2017; Gao et al, 2017)。随着人类活动的增加,水体污染加剧,因此水体的自净能力倍受关注(Baskaran et al, 1993)。北部湾长期受季风影响,目前已有的研究中主要是将季风作为影响北部湾环流的影响因素。北部湾的环流受季风驱动,夏季的西南季风驱使琼州海峡以北具有气旋式环流,冬季的东北季风使琼州海峡以北保持气旋式环流,琼州海峡以南转变为气旋式环流(Gao et al, 2014)。涉及强对流的极端天气条件下北部湾的颗粒物迁移研究,如2009年海南岛西部的东方海岸在台风“凯萨娜”影响下水动力条件加强,颗粒物迁移能力加强,使海底沙丘形态短时间发生改变(Ma et al, 2013)。

在水体²¹⁰Po的地球化学行为的研究中,以往主要聚焦于将风暴等强对流天气的影响视为一种可能影响因素(Baskaran et al, 1993; Zuo et al, 1993; Yang et al, 2013),缺少强对流气象条件下²¹⁰Po地球化学行为的具体观测和分析。我们基于2021—2022年冬季北部湾的采样,分析冬季强对流天气影响下的北部湾²¹⁰Po地球化学行为、冬季寒潮过境时北部湾研究海域不同形态²¹⁰Po的分布特征,进一步探讨了特殊天气条件对²¹⁰Po浓度空间分布的影响及²¹⁰Po在北部湾研究海域的地球化学行为。这将为北部湾放射性核素活度水平监测、污染物源汇和迁移转化过程等相关研究提供基础数据。对于理解强对流气象事件影响下近岸海域水体悬浮颗粒物及其携带的污染物质的运输具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 样品采集及采样期间气象条件

2021-12-26—2022-01-04我们搭乘“中国海监203号”在北部湾研究海域(107°30′~109°52′E, 18°51′~21°15′N)采集样品。本研究中共设置29个采样站位(图1),均采集表层海水水样,其中有11个站位同时采集底层海水水样,共采集40个海水样品,所有站位和层次采样信息详见表1。每个样品的采水体积为20 L。采样期间北部湾研究海域受到一次强烈的寒潮事件影响。钦州、北海和防城港三市的气象数据显示,此次寒潮影响时间为2021-12-25—2021-12-31(图2a)。采样期间北部湾研究海域海表气温分布显示受寒潮影响的气温低值区可覆盖到北部湾20°N附近(图2b)。整个采样期间,研究海域大部分海区海表风速大于10 m·s⁻¹(图2c),风向主要为NE。

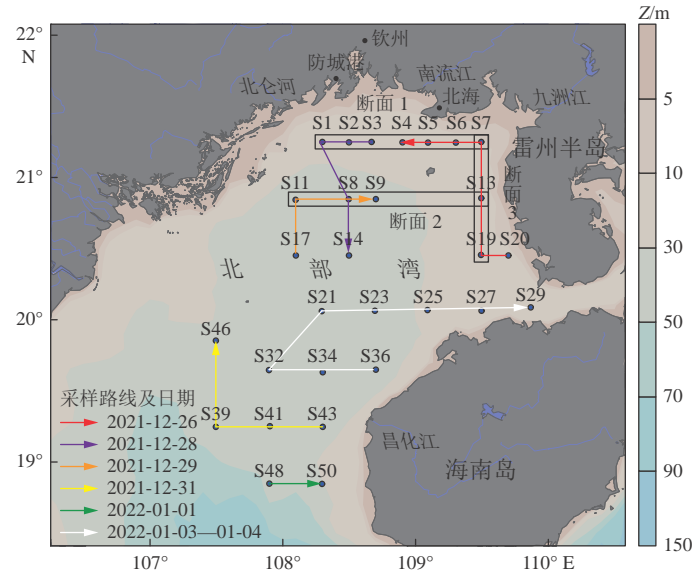


图 1 采样站点(•)、断面和采样路线分布

Fig. 1 Schematic diagram of sampling stations(•), sections and routes

表 1 采样站点及其气象参数

Table 1 Sampling stations and meteorological parameters

站 位	采样时刻	位 置	采样层次	风速/(m·s ⁻¹)
S1	2021-12-28T12:44	108°18'E, 21°15'N	表层、底层(水深 27.8 m)	10.7
S2	2021-12-28T11:00	108°30'E, 21°15'N	表层、底层(水深 25.2 m)	13.7
S3	2021-12-28T09:17	108°40'E, 21°15'N	表层、底层(水深 23.8 m)	12.5
S4	2021-12-26T15:38	108°54'E, 21°15'N	表层、底层(水深 22.0 m)	11.9
S5	2021-12-26T13:58	109°06'E, 21°15'N	表层	9.0
S6	2021-12-26T12:33	109°18'E, 21°15'N	表层、底层(水深 17.4 m)	9.1
S7	2021-12-26T10:44	109°30'E, 21°15'N	表层、底层(水深 19.4 m)	11.9
S8	2021-12-28T16:34	108°30'E, 20°51'N	表层	11.5
S9	2021-12-29T06:08	108°42'E, 20°51'N	表层、底层(水深 37.3 m)	10.6
S11	2021-12-29T02:50	108°06'E, 20°51'N	表层、底层(水深 25.5 m)	6.1
S13	2021-12-26T08:03	109°30'E, 20°51'N	表层、底层(水深 14.8 m)	11.4
S14	2021-12-28T19:31	108°30'E, 20°27'N	表层	7.6
S17	2021-12-29T00:13	108°06'E, 20°27'N	表层	5.3
S19	2021-12-26T02:10	109°30'E, 20°27'N	表层、底层(水深 23.0 m)	13.3
S20	2021-12-26T00:22	109°42'E, 20°27'N	表层、底层(水深 19.4 m)	12.0
S21	2022-01-03T13:25	108°18'E, 20°04'N	表层	9.0
S23	2022-01-03T16:45	108°42'E, 20°04'N	表层	9.0
S25	2022-01-03T20:05	109°05'E, 20°04'N	表层	10.5
S27	2022-01-03T23:12	109°30'E, 20°04'N	表层	5.1

续表

站点	采样时刻	位置	采样层次	风速/(m·s ⁻¹)
S29	2022-01-04T02:24	109°52'E, 20°05'N	表层	3.3
S32	2022-01-03T07:40	107°54'E, 19°39'N	表层	8.5
S34	2022-01-03T04:17	108°18'E, 19°38'N	表层	8.9
S36	2022-01-03T01:05	108°42'E, 19°39'N	表层	10.3
S39	2021-12-31T18:34	107°30'E, 19°15'N	表层	10.1
S41	2021-12-31T14:50	107°54'E, 19°15'N	表层	11.5
S43	2021-12-31T11:10	108°18'E, 19°15'N	表层	12.7
S46	2021-12-31T21:35	107°30'E, 19°51'N	表层	9.3
S48	2022-01-01T02:13	107°54'E, 18°51'N	表层	4.8
S50	2022-01-01T05:53	108°18'E, 18°51'N	表层	4.1

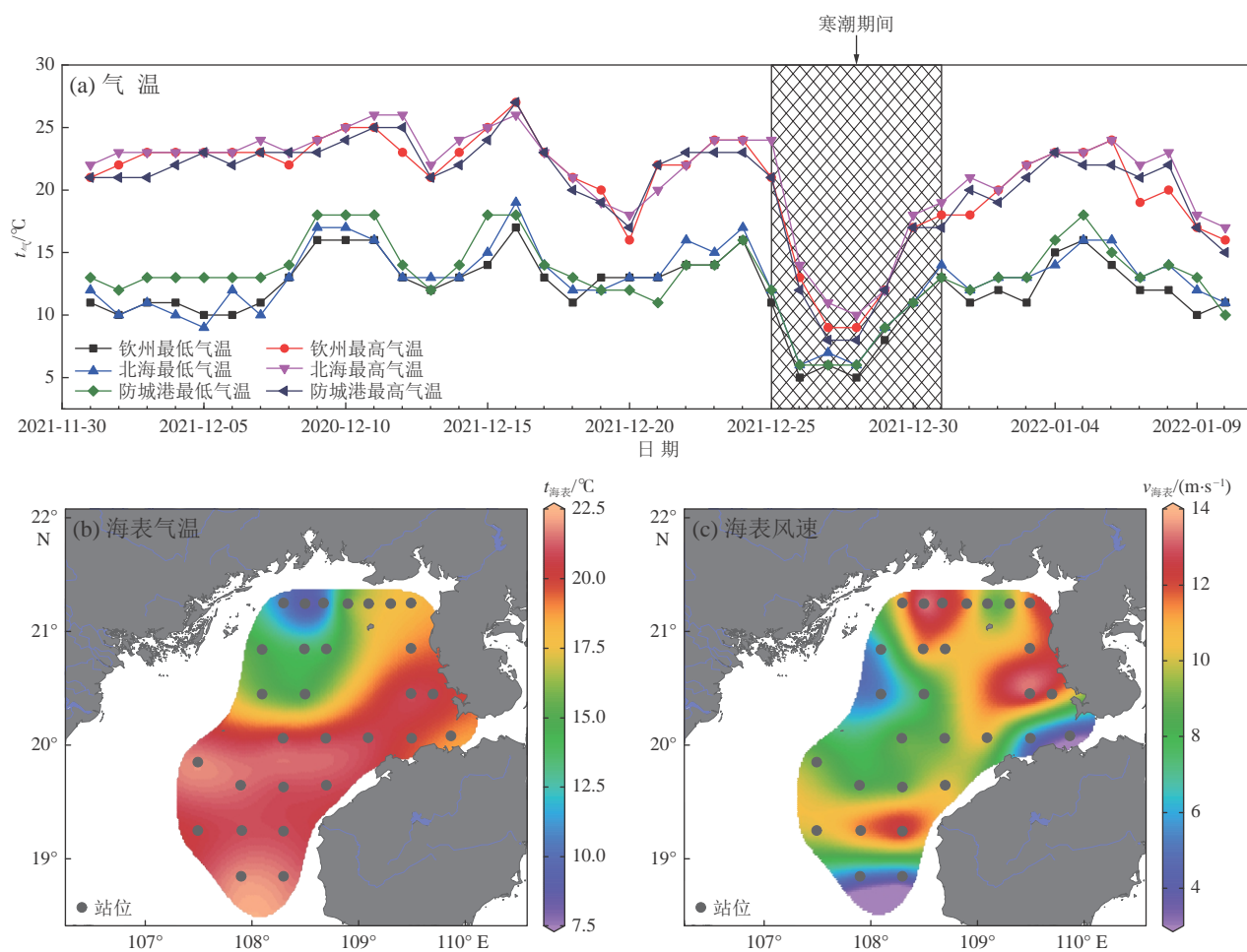


图2 2021-12-01—2022-01-10 钦州、北海和防城港的最高和最低气温
(数据来自 <http://www.tianqihoubao.com>)、采样期间海表气温和海表风速分布

Fig. 2 Maximum and minimum temperatures of Qinzhou, Beihai and Fangchenggang City from December 1, 2021 to January 10, 2022 (data from <http://www.tianqihoubao.com>), distribution of sea surface air temperature and sea surface wind speed during the sampling period

1.2 分析方法

水样²¹⁰Po的富集采用Fe(OH)₃共沉淀法(钟强强, 2020)。首先使用0.45 μm孔径的醋酸纤维滤膜(购自天津津腾试验设备有限公司)过滤。滤液用浓盐酸(分析纯, 购自西陇科学股份有限公司)酸化至pH为1~2, 然后加入约1.82 dpm(1 Bq=60 dpm)²⁰⁹Po示踪剂(购自美国Eckert & Ziegler Isotope Product公司)和100 mg Fe³⁺载体(FeCl₃·6H₂O, 分析纯, 购自国药集团化学试剂有限公司), 搅拌均匀, 静置6 h以上。再加入20 mL氨水(分析纯, 购自西陇科学股份有限公司)调节pH约为8, 形成Fe(OH)₃共沉淀。通过虹吸和离心(转速4 500 r·min⁻¹)收集沉淀并加入9 mol·L⁻¹盐酸溶解, 加入约0.3 g抗坏血酸(分析纯, 购自西陇科学股份有限公司)去除干扰离子(如Fe³⁺)对Po自沉积的影响, Po自沉积在镍片上。过滤滤膜干燥后, 称重计算水中的总悬浮颗粒物(Total Suspended Particulate Matter, TSM)的质量浓度。TSM的分析参考王希龙等(2022)使用的方法。将滤膜剪碎后放入干净特氟龙烧杯中, 加入1.82 dpm ²⁰⁹Po示踪剂、硝酸(分析纯, 购自西陇科学股份有限公司)和氢氟酸(分析纯, 购自国药集团化学试剂有限公司)将滤膜消解。Po自沉积的步骤与溶解态样品相同。最后将完成²¹⁰Po自沉积的镍片放入低本底多道α能谱仪(Alpha Ensemble-8型, 美国ORTEC公司生产)进行测定。²⁰⁹Po和²¹⁰Po在α能谱的位置分别在4 800 keV和5 300 keV左右, 通常要求²⁰⁹Po和²¹⁰Po的峰面积>400, 确保²⁰⁹Po和²¹⁰Po测量相对误差<5%, 结束测量; 如果²¹⁰Po的活度很低, 在测量第7天可以停止测量。²⁰⁹Po的测量相对误差范围为1.3%~8.7%, ²¹⁰Po的测量相对误差范围为1.6%~23.5%。

2 结果和讨论

2.1 表层溶解态²¹⁰Po和颗粒态²¹⁰Po活度浓度、TSM质量浓度分布

寒潮过境期间表层水体中溶解态²¹⁰Po活度浓度在北部湾的分布(图3a)表明, 最高值为1.39 dpm·(100 L)⁻¹(站位S4), 最低值为0.36 dpm·(100 L)⁻¹(站位S1)。空间分布上, 广西和雷州半岛沿岸海域的溶解态²¹⁰Po活度浓度属于本次实测的较高水平, 整体上北部湾海域溶解态²¹⁰Po基本呈现随着离岸距离的增加而逐渐降低的分布特征。位于北部湾中部海域的多数站位包括远离海岸的站位S41(最高为1.27 dpm·(100 L)⁻¹)溶解态²¹⁰Po活度浓度比周围站位高, 即整个中部海域表现为溶解态²¹⁰Po的另一个高值区。北部湾表层水体颗粒态²¹⁰Po活度浓度的分布(图3b)表明, 颗粒态²¹⁰Po活度浓度的变化范围为0.60~12.15 dpm·(100 L)⁻¹, 从高到低依次为雷州半岛西南部沿岸海域(站位S20)、海南岛西部沿岸海域、北部湾-广西外海海域(站位S39), 呈现十分明显的随离岸距离的增加而逐渐降低的分布规律。观测期间北部湾表层水体TSM质量浓度为2.21~33.52 mg·L⁻¹, 在广西沿岸海域较低, 在雷州半岛沿岸海域和海南岛西部沿岸海域较高, 整体上呈现随着离岸距离的增加而逐渐降低的特征(图3c)。

寒潮过境期间北部湾表层水体中²¹⁰Po主要存在形式为颗粒态(图3d, 站位S34数据因实验问题缺失)。相比其他海区未发生台风等强对流天气情况下溶解态²¹⁰Po和颗粒态²¹⁰Po的活度浓度(表2), 冬季寒潮事件影响的北部湾表层水体的溶解态²¹⁰Po活度浓度整体处于偏低的水平而颗粒态²¹⁰Po活度浓度居于中-高等水平。其中断面1(站位S1~S7)的溶解态²¹⁰Po(0.76~1.39 dpm·(100 L)⁻¹)、颗粒态²¹⁰Po(0.64~1.97 dpm·(100 L)⁻¹)和TSM(2.21~3.84 mg·L⁻¹)与相邻的2021年夏季北部湾广西近岸相比(王希龙等, 2022), 都属于较低水平。这一现象说明, 寒潮影响期间北部湾水体中²¹⁰Po经历被悬浮颗粒物从溶解态向颗粒态迁移的“清除”过程。

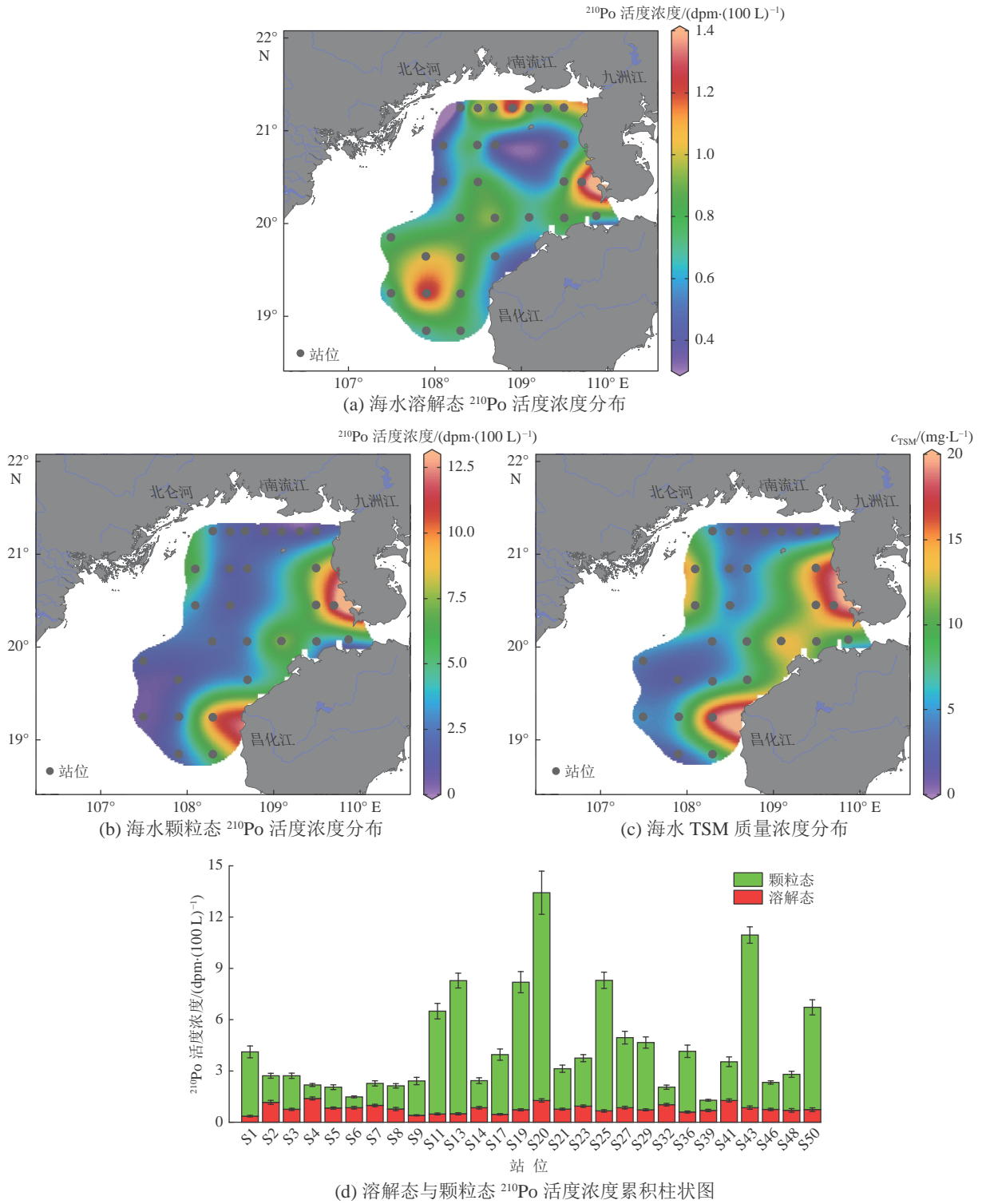


图3 北部湾各站位表层水体溶解态 ^{210}Po 和颗粒态 ^{210}Po 活度浓度、TSM质量浓度分布、溶解态与颗粒态 ^{210}Po 活度浓度累积柱状图

Fig. 3 Distribution of dissolved ^{210}Po and particulate ^{210}Po activity concentrations, TSM mass concentration and the cumulative histogram of dissolved and particulate ^{210}Po activity concentrations at each station in surface water of Beibu Gulf

表2 不同地点表层海水的溶解态和颗粒态²¹⁰Po活度浓度范围Table 2 The activity concentrations ranges of dissolved and particulate ²¹⁰Po in surface seawater at different sites

地点	季节	溶解态 ²¹⁰ Po活度浓度/ (dpm·(100 L) ⁻¹)	颗粒态 ²¹⁰ Po活度浓度/ (dpm·(100 L) ⁻¹)	数据来源
红海	冬季	0.4~1.5	0.11~0.97	Chung et al, 1982
塔霍河口	冬季	0.1~8.7	5.0~27.6	Carvalho, 1997
黄海	冬季	0.3~11.1	1.2~64.3	Hong et al, 1999
马来西亚瓜拉雪兰莪河口	夏季、秋季	0.1~6.7	3~1 405	Theng et al, 2005
南海南部	夏季	0.66~10.38	1.14~4.50	Yang et al, 2006
台湾西部	春季	0.8~3.4	1.1~2.9	Wei et al, 2012
海南岛南部近海	春季	5.40~11.04	1.24~2.34	马媯, 2013
	夏季	3.00~29.28	3.00~4.32	
	秋季	1.14~3.60	2.58~6.54	
	冬季	6.06~12.78	1.86~2.88	
特拉华河口	春季、夏季	1.3~4.7	1.1~18.0	Marsan et al, 2014
上切萨皮克河口	春季、夏季	0.8~4.4	0.3~31.0	
北冰洋	加拿大海盆	夏季、秋季	0.064~7.900	Bam et al, 2020
	内部海盆	夏季、秋季	0.290~15.200		0.023~7.600
北部湾广西近岸	夏季	0.96~16.68	0.84~14.58	王希龙等, 2022
北部湾	冬季	0.36~1.39	0.60~12.15	本研究

2.2 北部湾海域溶解态²¹⁰Po和颗粒态²¹⁰Po活度浓度、TSM质量浓度的垂向分布特征

寒潮过境期间²¹⁰Po活度浓度和TSM质量浓度在断面1~3的垂向分布(图4)表明,3个断面²¹⁰Po活度浓度和TSM质量浓度呈现完全不同的分布特点。断面1(东西向)位于靠近广西近岸的海域。溶解态²¹⁰Po活度浓度呈现表层高、底层低的分布特征(图4a);颗粒态²¹⁰Po活度浓度与TSM质量浓度的分布规律一致(图4b和图4c),具体表现为自西向东逐渐降低、由表及底逐渐增加。这种分布特征表明断面1垂向上存在明显的再悬浮过程,同时也是寒潮过境北部湾海域的信号响应。断面2与断面1平行,位于断面1以南大约6.5 km处。溶解态²¹⁰Po活度浓度随水深增加而增加,在水平方向上均匀分布,溶解态²¹⁰Po的最高值仅出现在站位S9的底层(图4d)。颗粒态²¹⁰Po活度浓度和TSM质量浓度的分布规律也十分接近(图4e和图4f),在断面2东西两端的站位S13和S11最高,分别向中部逐渐降低;底层自西向东逐渐减少。站位S11和S13颗粒态²¹⁰Po活度浓度和TSM质量浓度随水深增加而减少,中部的站位S9垂向上分布均匀。表层颗粒态²¹⁰Po和TSM的分布表明断面2存在由近岸向远海的离岸输送过程,即在寒潮入侵时近岸水团离岸输送加强,近岸悬浮颗粒物向远海输送增加。断面3(南北向)位于靠近雷州半岛近岸海域,²¹⁰Po和TSM的垂向分布比断面1和断面2复杂。表层溶解态²¹⁰Po活度浓度在南北两端站位S19和S7较高,中部站位S13较低;随水深增加,溶解态²¹⁰Po活度浓度逐渐减小,底层的溶解态²¹⁰Po自北向南逐渐减少(图4g)。表层的颗粒态²¹⁰Po和TSM自北向南逐渐增加(图4h和图4i)。断面3的站位S7、S13和S19的颗粒态²¹⁰Po和TSM垂向分布特征不同:站位S7的颗粒态²¹⁰Po和TSM在垂向上分布较均匀,站位S13的颗粒态²¹⁰Po和TSM随水深增加而减少,站位S19的颗粒态²¹⁰Po和TSM随水深增加而增加。站位S7与S13的底层颗粒态²¹⁰Po和TSM分布较均匀,自站位S13向南底层颗粒态²¹⁰Po和TSM迅速增加。从站位S19至S7颗粒态²¹⁰Po活度浓度和TSM质量浓度呈现出一条明显的浓度由高至低的羽流状水舌,这

是由于冬季北部湾海流自南向北从琼州海峡至雷州半岛输送(Gao et al, 2017), 颗粒态 ^{210}Po 和TSM存在自南向北沿着雷州半岛南端海域向广西近岸海域方向的输送过程(图4h和图4i)。

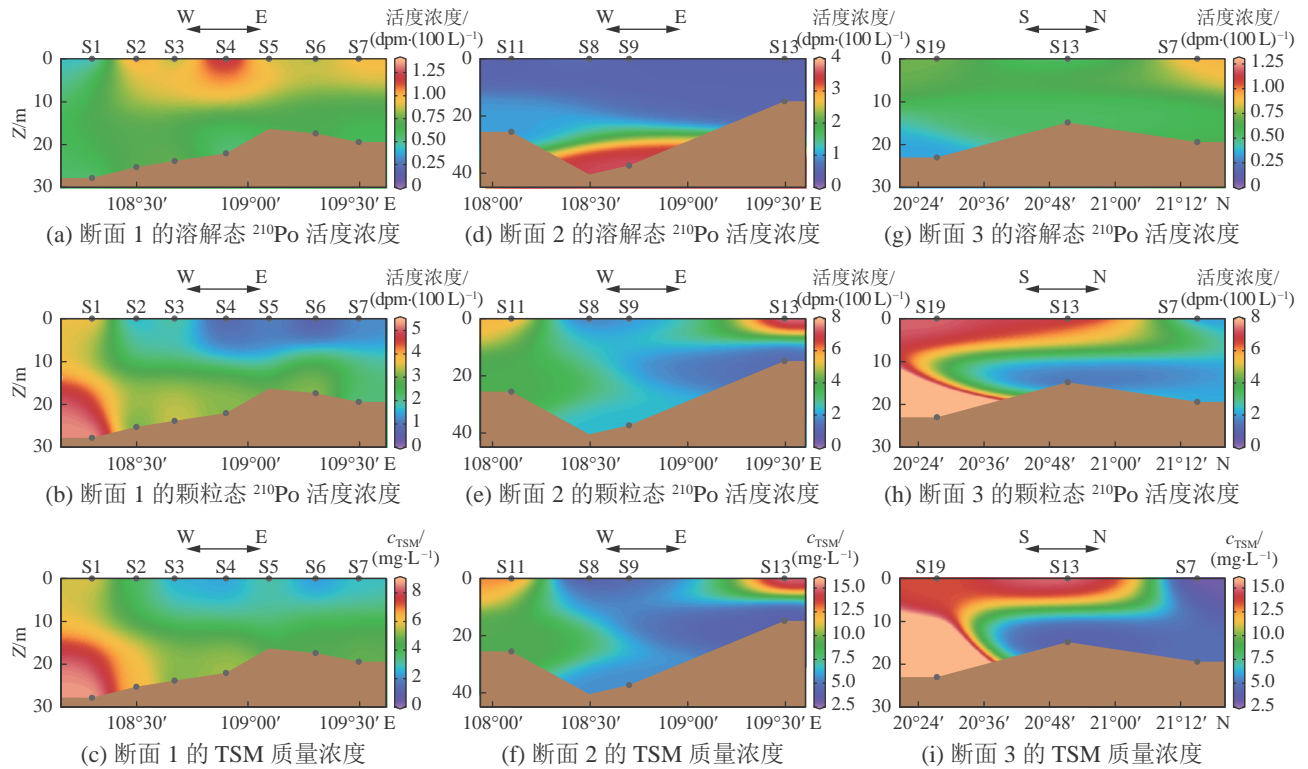


图4 北部湾断面1~3的溶解态 ^{210}Po 和颗粒态 ^{210}Po 活度浓度、TSM质量浓度分布

Fig. 4 Distribution of dissolved ^{210}Po and particulate ^{210}Po activity concentrations, TSM mass concentration in section 1 to 3 in Beibu Gulf

2.3 寒潮过境期间北部湾溶解态 ^{210}Po “清除”的影响因素

使用软件SPSS 24(Statistical Product and Service Solutions, 美国IBM公司)对TSM质量浓度、溶解态 ^{210}Po 活度浓度和颗粒态 ^{210}Po 活度浓度进行Pearson相关性分析(表3)。颗粒态 ^{210}Po 活度浓度与TSM质量浓度在0.01水平上存在显著性相关, Pearson相关系数为0.968 ($R^2=0.94$, 表3), 显示颗粒态 ^{210}Po 活度浓度与TSM质量浓度具有极好的线性正相关关系(图5), 而溶解态 ^{210}Po 活度浓度与TSM质量浓度之间也呈现负相关关系(表3)。 ^{210}Po 是强颗粒活性的放射性核素, 可以被吸附到颗粒表面, 因此海洋水体中悬浮颗粒物可以控制 ^{210}Po 的分布和行为, 具体表现为颗粒物质量浓度增加伴随着溶解态 ^{210}Po 活度浓度的减少和颗粒态 ^{210}Po 活度浓度的增加(Carvalho, 1997; Marsan et al, 2014)。

表3 TSM质量浓度、颗粒态 ^{210}Po 和溶解态 ^{210}Po 活度浓度的Pearson相关性分析

Table 3 Pearson correlation analysis of TSM mass concentration, particulate ^{210}Po and dissolved ^{210}Po activity concentrations

项目	$c_{\text{TSM}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	颗粒态 ^{210}Po 活度浓度 $/(\text{dpm}\cdot(100\text{L})^{-1})$	溶解态 ^{210}Po 活度浓度 $/(\text{dpm}\cdot(100\text{L})^{-1})$
$c_{\text{TSM}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	1.000	0.968*	-0.190
颗粒态 ^{210}Po 活度浓度 $/(\text{dpm}\cdot(100\text{L})^{-1})$		1.000	-0.144
溶解态 ^{210}Po 活度浓度 $/(\text{dpm}\cdot(100\text{L})^{-1})$			1.000

注: *表示显著性水平为0.01(双侧)。

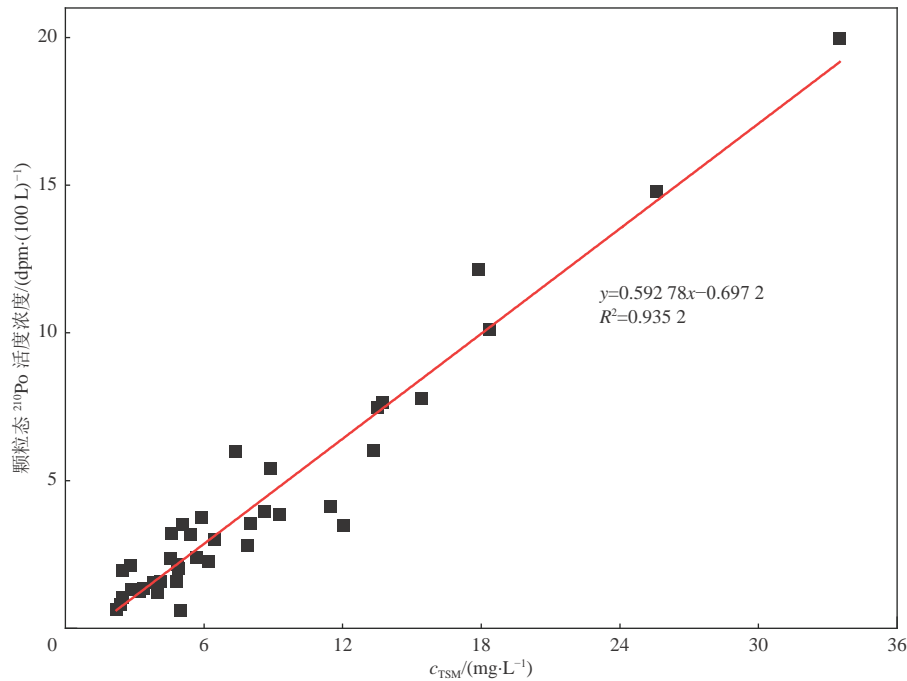


图5 颗粒态 ^{210}Po 活度浓度与TSM质量浓度的相关性分析结果

Fig. 5 Correlation analysis between particulate ^{210}Po activity concentration and TSM mass concentration

强对流天气如寒潮、台风可使海底底流增大,达到扰动海底泥沙的流速,进而海水动力作用下使颗粒物以推移或悬浮的形式运动。风暴停止时颗粒物慢慢向海底沉降,水中TSM质量浓度高低表现为风暴进行中>风暴后>风暴前(周其坤等,2018;许国辉等,2019)。2009年的台风“莫拉克”和2015年的台风“灿鸿”影响海域都观察到台风过境迅速提高TSM质量浓度的现象,并且在台风、寒潮等强对流天气过境后还能在一段时间内保持较高的TSM质量浓度(Li et al, 2018; Lu et al, 2018; Cong et al, 2021)。

在3个断面采样时寒潮过境使北部湾采样区域水动力条件加强,引起底层沉积物/颗粒物发生再悬浮过程。断面1的站点S1底层再悬浮现象最明显;但断面2的站点S9几乎没有发生再悬浮,可能是水深较深,寒潮的动力条件不足以引起颗粒物再悬浮。然而断面3的颗粒态 ^{210}Po 和TSM的分布也表现出再悬浮和向北输送的特征,但其输送方向与风向几乎相反。表层TSM和颗粒态 ^{210}Po 的自琼州海峡南端向广西近岸海域的输送很可能与海流有关(Gao et al, 2017)。断面3位于琼州海峡西侧出口,通常冬季时南海海水向西流过琼州海峡进入北部湾(Gao et al, 2017; Chen et al, 2019),在琼州海峡西侧径向沉积(Cheng et al, 2017)。 ^{210}Po 的分布受到颗粒物分布的强烈控制,溶解态 ^{210}Po 被颗粒物“清除”,因此颗粒态 ^{210}Po 与TSM的分布几乎完全相同(图4)。溶解态 ^{210}Po 的分布则反映了再悬浮的强弱,如站点S9由于几乎没发生颗粒物再悬浮, ^{210}Po 在底层的行为可能以再矿化为主。

2.4 寒潮影响北部湾溶解态 ^{210}Po 的强化“清除”

海洋中颗粒活性核素的清除能力通常与核素在溶解态和颗粒态之间的分配有关,可用分配系数 K_d 描述(Su et al, 2017; Zhang et al, 2020; 钟强强, 2020)。计算得到北部湾研究海域 ^{210}Po 分配系数 K_d 为 $1.16 \times 10^5 \sim 17.95 \times 10^5 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$,平均值为 $7.09 \times 10^5 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 。分配系数越大,颗粒物对核素的清除能力越强。近海海区悬浮颗粒物浓度接近的情况下,不同海域 ^{210}Po 分配系数的测量结果(表4和图6)表明,与TSM质量浓度相近的其他海区相比,冬季寒潮过境影响下的北部湾海域水体中 ^{210}Po 的 K_d 值明显高于其他地区。这与Zhang等(2020)在台湾海峡冬季的观测结果一致。说明冬季北部湾悬浮颗粒物

在寒潮过境期间对溶解态 ^{210}Po 的“清除”程度得到了强化。寒潮过境能显著加强水动力条件和水体混合。通过寒潮带来的大风天气向水体输入能量,启动了水体中颗粒物的再悬浮作用和输送过程,最终强化了颗粒物对北部湾水体中溶解态 ^{210}Po 的“清除”过程,即提高了 ^{210}Po 的 K_d 值。

表 4 不同地点的 TSM 质量浓度和 K_d 对比

Table 4 Comparison of TSM mass concentration and K_d in different locations

海域	$c_{\text{TSM}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$K_d/(\times 10^5 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1})$	季节	数据来源
镇海湾	2.9~37.8	0.02~1.97	夏季	Kim et al, 2004
南黄海	5.3~87.2	0.09~12.71	夏季	Zhong et al, 2019
东海	1.31~33.17	0.73~7.05	夏季	钟强强, 2020
北部湾广西近岸	3.06~25.22	0.37~3.71	夏季	王希龙等, 2022
北部湾	2.21~33.52	1.16~17.95	冬季(寒潮)	本研究
台湾海峡	0.76~35.84	0.64~148.33	冬季	Zhang et al, 2020

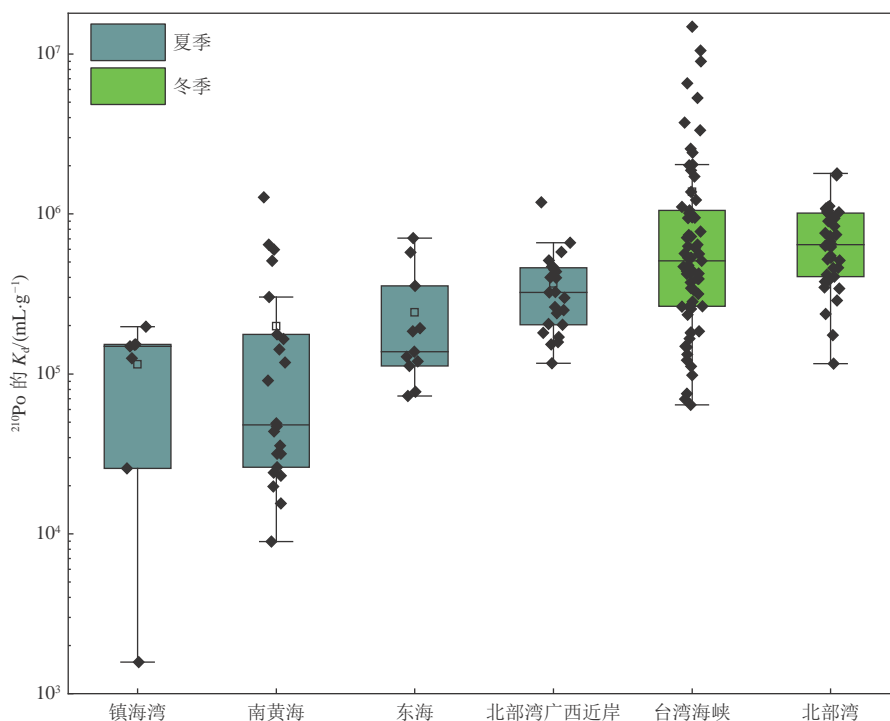


图 6 TSM 质量浓度相近的不同海域实测 ^{210}Po 的分配系数(K_d - ^{210}Po)对比(数据引自表 4)

Fig. 6 Comparison of the distribution coefficient (K_d - ^{210}Po) of the actual measured ^{210}Po values in different sea areas with similar mass concentration of TSM (data cited from Table 4)

3 结 语

通过分析 2021-12-26—2022-01-04 在北部湾东部海域($107^{\circ}30'\sim 109^{\circ}52'E$, $18^{\circ}51'\sim 21^{\circ}15'N$)采集的水样,研究了冬季寒潮过境期间北部湾研究海域水体溶解态和颗粒态 ^{210}Po 的活度浓度分布及其地球化学行为特征。结果表明,北部湾冬季寒潮过境期间水体中 ^{210}Po 主要以颗粒态形式存在,

颗粒态 ^{210}Po 活度浓度和TSM质量浓度之间表现显著正相关关系, ^{210}Po 的分配系数明显高于其他海区。颗粒态 ^{210}Po 活度浓度和TSM质量浓度的空间分布特征表明寒潮过境时强化了北部湾水体颗粒物再悬浮过程和输送过程,增加了水体中TSM质量浓度,进一步强化“清除”了水体溶解态 ^{210}Po ;寒潮驱动颗粒物迁移在影响TSM分布的同时也影响了溶解态 ^{210}Po 和颗粒态 ^{210}Po 的分布。

参考文献 (References):

- 马婧, 2013. 中国边缘海 ^{210}Po 、 ^{210}Pb 地球化学行为及其应用[D]. 厦门: 厦门大学. MA Q, 2013. Geochemical behaviors of ^{210}Po and ^{210}Pb and their application in the China marginal seas[D]. Xiamen: Xiamen University.
- 王希龙, 苏锴骏, 钟强强, 等, 2022. 广西北部湾北部近海水体中不同形态 ^{210}Po 的分布及地球化学行为[J]. 海洋学研究, 40(3): 120-131. WANG X L, SU K J, ZHONG Q Q, et al, 2022. Distribution and geochemical behavior of different phases for ^{210}Po in offshore water of the northern Beibu Gulf, Guangxi[J]. Journal of Marine Sciences, 40(3): 120-131.
- 许国辉, 曾俞, 刘志钦, 等, 2019. 风暴引发的海底沉积物流起源过程[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), (增刊1): 59-65. XU G H, ZENG Y, LIU Z Q, et al, 2019. The origin of storm sediment flows in coast[J]. Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition), (Suppl.1): 59-65.
- 钟强强, 2020. 核素大气沉降过程及其对上层海洋POC输出通量研究的启示[D]. 上海: 华东师范大学. ZHONG Q Q, 2020. Atmospheric deposition of radionuclides and its application in POC export fluxes of the upper sea[D]. Shanghai: East China Normal University.
- 周其坤, 孙永福, 胡光海, 等, 2018. 南海北部海底沙波迁移规律及其在台风作用下的响应研究[J]. 海洋学报, 40(9): 78-89. ZHOU Q K, SUN Y F, HU G H, et al, 2018. Research on the migration rule and the typhoon impact on the submarine sand waves of the northern South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 40(9): 78-89.
- BACON M P, SPENCER D W, BREWER P G, 1976. $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ and $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ disequilibria in seawater and suspended particulate matter[J]. Earth and Planetary Science Letters, 32(2): 277-296.
- BAM W, MAITI K, BASKARAN M, et al, 2020. Variability in ^{210}Pb and ^{210}Po partition coefficients (K_d) along the US GEOTRACES Arctic transect[J]. Marine Chemistry, 219: 103749.
- BASKARAN M, SANTSCHI P H, 1993. The role of particles and colloids in the transport of radionuclides in coastal environments of Texas[J]. Marine Chemistry, 43(1/2/3/4): 95-114.
- CARVALHO F P, 1997. Distribution, cycling and mean residence time of ^{226}Ra , ^{210}Pb and ^{210}Po in the Tagus estuary[J]. The Science of the Total Environment, 196(2): 151-161.
- CHEN Z Z, XU S N, QIU Y S, et al, 2009. Modeling the effects of fishery management and marine protected areas on the Beibu Gulf using spatial ecosystem simulation[J]. Fisheries Research, 100(3): 222-229.
- CHEN B, XU Z X, YA H Z, et al, 2019. Impact of the water input from the eastern Qiongzhou Strait to the Beibu Gulf on Guangxi coastal circulation[J]. Acta Oceanologica Sinica, 38(9): 1-11.
- CHENG G L, GONG W P, WANG Y P, et al, 2017. Modeling the circulation and sediment transport in the Beibu Gulf[J]. Acta Oceanologica Sinica, 36(4): 21-30.
- CHUNG Y, FINKEL R C, KIM K, 1982. ^{226}Ra , ^{210}Pb and ^{210}Po in the Red Sea[J]. Earth and Planetary Science Letters, 58(2): 213-224.
- CONG S A, WU X, GE J Z, et al, 2021. Impact of Typhoon Chan-hom on sediment dynamics and morphological changes on the East China Sea inner shelf[J]. Marine Geology, 440: 106578.
- GAO J S, SHI M C, CHEN B, et al, 2014. Responses of the circulation and water mass in the Beibu Gulf to the seasonal forcing regimes[J]. Acta Oceanologica Sinica, 33(7): 1-11.
- GAO J S, WU G D, YA H Z, 2017. Review of the circulation in the Beibu Gulf, South China Sea[J]. Continental Shelf Research, 138: 106-119.
- GUO J, COSTA O S, WANG Y H, et al, 2020. Accumulation rates and chronologies from depth profiles of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and ^{137}Cs in sediments of northern Beibu Gulf, South China Sea[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 213: 106136.

- HONG G H, PARK S K, BASKARAN M, et al, 1999. Lead-210 and polonium-210 in the winter well-mixed turbid waters in the mouth of the Yellow Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 19(8): 1049-1064.
- KIM Y W, YANG H S, 2004. Scavenging of ^{234}Th and ^{210}Po in surface water of Jinhae Bay, Korea during a red tide[J]. *Geochemical Journal*, 38(6): 505-513.
- LI Y H, XU X H, ZHENG B X, 2018. Satellite views of cross-strait sediment transport in the Taiwan Strait driven by Typhoon Morakot (2009)[J]. *Continental Shelf Research*, 166: 54-64.
- LU J, JIANG J B, LI A C, et al, 2018. Impact of Typhoon Chan-hom on the marine environment and sediment dynamics on the inner shelf of the East China Sea: in-situ seafloor observations[J]. *Marine Geology*, 406: 72-83.
- MA X C, YAN J, FAN F X, et al, 2013. Response of bedload transport, submarine topography, and dune internal structures to typhoon processes off Dongfang coast in the Beibu Gulf[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 32(4): 27-40.
- MA H Y, YANG W F, ZHANG L H, et al, 2017. Utilizing ^{210}Po deficit to constrain particle dynamics in mesopelagic water, western South China Sea[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(4): 1594-1607.
- MARSAN D, RIGAUD S, CHURCH T, 2014. Natural radionuclides ^{210}Po and ^{210}Pb in the Delaware and Chesapeake Estuaries: modeling scavenging rates and residence times[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 138: 447-455.
- MATTHEWS K M, KIM C K, MARTIN P, 2007. Determination of ^{210}Po in environmental materials: a review of analytical methodology[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 65(3): 267-279.
- SU K J, DU J Z, BASKARAN M, et al, 2017. ^{210}Po and ^{210}Pb disequilibrium at the PN section in the East China Sea[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 174: 54-65.
- SUBHA A S, RENGARAJAN R, SHENOY D, et al, 2018. POC export fluxes in the Arabian Sea and the Bay of Bengal: a simultaneous $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ and $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ study[J]. *Marine Chemistry*, 198: 70-87.
- TATEDA Y, IWAO K, 2008. High ^{210}Po atmospheric deposition flux in the subtropical coastal area of Japan[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99(1): 98-108.
- THENG T L, MOHAMED C A R, 2005. Activities of ^{210}Po and ^{210}Pb in the water column at Kuala Selangor, Malaysia[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 80(3): 273-286.
- WEI C L, LIN S Y, SHEU D D D, et al, 2011. Particle-reactive radionuclides (^{234}Th , ^{210}Pb , ^{210}Po) as tracers for the estimation of export production in the South China Sea[J]. *Biogeosciences*, 8(12): 3793-3808.
- WEI C L, LIN S Y, WEN L S, et al, 2012. Geochemical behavior of ^{210}Pb and ^{210}Po in the nearshore waters off western Taiwan[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 64(2): 214-220.
- WEI C L, CHEN P R, LIN S Y, et al, 2015. Distributions of ^{210}Pb and ^{210}Po in surface water surrounding Taiwan: a synoptic observation[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 117: 155-166.
- YANG W F, HUANG Y P, CHEN M, et al, 2006. Disequilibria between ^{210}Po and ^{210}Pb in surface waters of the southern South China Sea and their implications[J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 49(1): 103-112.
- YANG W F, HUANG Y P, CHEN M, et al, 2011. A large excess of ^{210}Po in the overlying water of the Zhubi Coral Reef flat, in the South China Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 62(5): 912-917.
- YANG W F, GUO L D, CHUANG C Y, et al, 2013. Adsorption characteristics of ^{210}Pb , ^{210}Po and ^7Be onto micro-particle surfaces and the effects of macromolecular organic compounds[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 107: 47-64.
- ZHANG L H, YANG W F, CHEN M, et al, 2020. Distribution patterns of ^{210}Po , ^{210}Pb and the particle export in the Taiwan Strait during the winter[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 39(2): 12-21.
- ZHONG Q Q, WANG J L, DU J Z, et al, 2019. The $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ disequilibrium in a spring-blooming marginal sea, the Southern Yellow Sea[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 207: 15-26.
- ZHONG Q Q, GUO W Y, WANG H, et al, 2023. ^{210}Po and ^{210}Pb as tracers for particle cycling in a shallow semi-enclosed bay of Taiwan Strait[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 207: 105228.
- ZUO Z Z, EISMA D, 1993. ^{210}Pb and ^{210}Po distributions and disequilibrium in the coastal and shelf waters of the southern North Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 13(8/9): 999-1022.

Distribution Features of Particulate and Dissolved ²¹⁰Po in Beibu Gulf Under the Influence of Cold Wave

LIU Wenjing^{1,2}, ZHONG Qiangqiang^{1,2}, WANG Hao^{1,2}, CHEN Suiyuan^{1,2}, HUANG Dekun^{1,2},
LIU Jinwen^{1,2}, YU Tao^{1,2}

(1. *Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361000, China;*

2. *Observation and Research Station of Coastal Wetland Ecosystem in Beibu Gulf, MNR, Beihai 536015, China*)

Abstract: ²¹⁰Po is a natural radionuclide with strong particulate activity, which can be used as a tracer to investigate both the source and transportation of suspended particulate matter and the removal process of pollutants in the water column. The distribution of activity concentration and characteristics of geochemical behaviour of different forms of ²¹⁰Po in the study area of Beibu Gulf were investigated during the winter cold wave from 2021 to 2022. The results of actual measurement showed that the activity concentration levels of dissolved and particulate ²¹⁰Po in the surface water ranged from 0.36 to 1.39 dpm·(100 L)⁻¹ (1 Bq=60 dpm) and from 0.60 to 12.15 dpm·(100 L)⁻¹, respectively. The particulate phase was the main existence form of ²¹⁰Po. An excellent positive correlation ($R^2=0.968$, $P<0.01$) was observed between the activity concentration of ²¹⁰Po in the particulate phase and the mass concentration of total suspended particulate matter (TSM), suggesting the phenomenon of significant scavenging of dissolved ²¹⁰Po by particulate matter. Further analyses revealed that the distribution coefficients (K_d values) of ²¹⁰Po in the water column were from 1.16×10^5 mL·g⁻¹ to 17.95×10^5 mL·g⁻¹ during the cold wave in Beibu Gulf, which was significantly increased compared with the same TSM mass concentration conditions in other sea areas, once again indicating that dissolved ²¹⁰Po was intensively scavenged during the transit of the cold wave in Beibu Gulf. This may be due to the increase of water mass concentration of TSM driven by the enhanced resuspension and transportation processes in the water column, and enhanced removal of dissolved ²¹⁰Po by adsorption to particulate matter in the water column after the cold wave transit in Beibu Gulf. Strong convective weather processes, such as cold waves, which occur frequently in the Beibu Gulf waters in winter, can make the hydrodynamic mixing intensify. Not only it can affect the distribution of TSM, but also change the distribution of ²¹⁰Po in the water column of Beibu Gulf. This is of great significance for understanding the transportation process of both suspended particulate matter and particulate matter carried pollutants in near shore waters under the influence of strong convective weather events such as cold waves and typhoons.

Keywords: dissolved ²¹⁰Po; particulate ²¹⁰Po; cold waves; total suspended particulate matter; Beibu Gulf

Received: August 13, 2023 **Online:** April 22, 2024

2022 年 8 月北黄海北部溶解甲烷分布、 海-气交换通量及影响因素

徐雪梅¹, 王明丽^{2*}, 何宗财¹, 韩建波¹, 邢庆会¹, 王心怡³, 陈虹¹

(1. 国家海洋环境监测中心, 辽宁大连 116023;

2. 山东省青岛生态环境监测中心, 山东青岛 266003;

3. 大连海事大学环境科学与工程学院, 辽宁大连 116026)

摘要: 科学评估陆架边缘海溶解甲烷(CH₄)的分布及海-气交换通量对于认识陆架边缘海 CH₄ 的释放对大气 CH₄ 的区域性贡献具有重要意义。基于 2022 年 8 月的现场调查数据和资料, 研究北黄海北部海水溶解 CH₄ 的分布、海-气交换通量及影响因素。结果表明: 研究海域溶解 CH₄ 浓度为 4.0~63.3 nmol/L, 饱和度为 168%~2360%, 高值区位于鸭绿江口附近海域, 随着离岸距离的增加表层海水溶解 CH₄ 浓度迅速降低。鸭绿江等陆源冲淡水的输入耦合海水及沉积物有机质的降解致使近岸海域海水 CH₄ 升高; 陆源冲淡水与海水混合过程中海水 CH₄ 的氧化消耗也是控制 CH₄ 浓度和分布不容忽视的重要过程。离岸海域海水及沉积物有机质厌氧降解耦合黄海冷水团的作用使得底层海水溶解 CH₄ 浓度高于表层海水。研究海域海-气 CH₄ 交换通量为 18.4~578.8 μmol/(m²·d), 是大气 CH₄ 的源; 鸭绿江口附近海域海-气 CH₄ 交换通量高于离岸海域。由此可见, 受陆源冲淡水输入的影响研究海域溶解 CH₄ 浓度和海-气交换通量具有显著的区域性差异, 且变幅高于世界其他海域; 加强河口以及近海调查研究对于准确评估陆架边缘海 CH₄ 的排放, 明确 CH₄ 排放源项的构成及制定 CH₄ 减排的有效措施至关重要。

关键词: 北黄海; 溶解甲烷; 海-气 CH₄ 交换通量; 冲淡水输入; 有机质厌氧降解

中图分类号: X142

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2024)04-0782-12

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20230729001

引用格式: 徐雪梅, 王明丽, 何宗财, 等, 2024. 2022 年 8 月北黄海北部溶解甲烷分布、海-气交换通量及影响因素[J]. 海洋科学进展, 42(4): 782-793. XU X M, WANG M L, HE Z C, et al, 2024. Distributions, influencing factors and sea-air fluxes of dissolved methane in the northern of North Yellow Sea in August 2022[J]. Advances in Marine Science, 42(4): 782-793.

CH₄ 是全球大气中仅次于 CO₂ 的第 2 大温室气体, 对全球变暖的贡献率约为 18.2%(IPCC, 2021)。CH₄ 具有增温潜势高、寿命短的特点, 因此 CH₄ 减排是在较短时间内实现减缓气候变化的最强有力的手段之一。2021 年第 26 届联合国气候变化大会超过 100 个国家签署了《全球 CH₄ 承诺》, 承诺到 2030 年各签署国 CH₄ 排放量减少 30%(United Nations Environment Programme, 2021)。然而, 基础数据缺失、调查研究有限的现状难免导致不同尺度 CH₄ 排放量估算的偏差。为此, 国际甲烷排放平台(the International Methane Emissions Observatory)启动了基于全球卫星遥感的 CH₄ 高排放预警系统(冉泽, 2022)。

收稿日期: 2023-07-29 网络首发日期: 2024-04-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(41876128 和 41206060); 大连市海洋碳汇重点实验室项目

作者简介: 徐雪梅(1982—), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事海洋碳循环观测评估方面研究。

E-mail: xmxu@nmemc.org.cn

*通信作者: 王明丽(1981—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事环境监测评估方面研究。

E-mail: wangml2996@163.com

(高峻 编辑)

海洋是大气 CH_4 的源, 对全球气候变化的影响不容小觑。每年向大气释放 CH_4 的量为 $2.2\sim 6.3 \text{ Tg}$ (Weber et al, 2019)。受人类活动影响的陆架边缘海面积仅占全球海洋面积的 16%, 但 CH_4 排放量约占全球海洋 CH_4 排放量的 75% (Denman et al, 2007)。陆架边缘海溶解 CH_4 分布具有显著的时空差异性且影响因素更加复杂, 虽然一直是海洋科学和环境科学学者研究的重点, 但目前观测研究仍匮乏, 陆架边缘海 CH_4 排放量估算的不确定性较大 (Bange et al, 1994; Zang et al, 2020; 徐雪梅等, 2023)。

北黄海面积约 $7.13\times 10^4 \text{ km}^2$, 平均水深约为 40 m, 是西北太平洋典型的半封闭陆架边缘海 (Sun et al, 2018)。北黄海由于紧邻陆地且有多条季节性输入量变化较大的河流注入, 营养物质丰富且生物资源蕴藏量很高; 同时也是海洋、陆地和大气各种过程相互作用较为激烈的典型地带 (鲍献文等, 2010)。已有研究表明北黄海是大气 CH_4 的源, 特别是近岸海域溶解 CH_4 浓度较高 (Yang et al, 2010; 徐雪梅等, 2023)。鸭绿江是流入北黄海径流量最大的河流, 流域面积为 $6.19\times 10^4 \text{ km}^2$, 年径流量为 300 多亿 m^3 , 年输沙量为 $113\times 10^4 \text{ t}$ (刘朝钊, 2013), 对北黄海生物地球化学循环有着重要影响。已有研究表明鸭绿江输入对北黄海北部 CH_4 有重要影响 (徐雪梅等, 2023)。然而大多研究聚焦北黄海离岸海域 (张桂玲, 2004; 许洁, 2006; Yang et al, 2010; 臧昆鹏等, 2014, 2018), 关于鸭绿江等陆源冲淡水输入影响的近岸海域的相关研究报道非常匮乏。随着沿海城市经济的发展, 城市污水、工农业废水、雨水、河水等陆源冲淡水不断排放使得河口海域环境受到更加复杂的影响 (刘朝钊, 2013)。科学评估不同季节鸭绿江等陆源冲淡水输入对北黄海溶解 CH_4 的分布及海-气交换通量的影响, 有助于认识河口及陆架边缘海 CH_4 的分布特征及其对大气 CH_4 的区域性贡献, 也可校正卫星观测结果, 还可有效实现 CH_4 减排提供基础支撑。

1 材料和方法

1.1 站位布设及样品采集、测定

2022年8月在北黄海北部开展了夏季现场调查, 布设 41 个站位 (图 1)。通过 SBE 19plus CTD (美国海鸟公司生产) 测定不同站位海水的温度、盐度等参数, 并利用 CTD 卡盖式采水器采集海水。依据不同站位水深以及温度、盐度跃层情况设置取样层次 (图 1), 表层采集 41 个、底层采集 29 个、中层采集 17 个站位, 共计 87 个水样。断面 AB 以盐度最低的站位 A ($123^\circ 58' \text{ E}$, $39^\circ 46' \text{ N}$) 和盐度最高的站位 B ($123^\circ 22' \text{ E}$, $38^\circ 58' \text{ N}$) 为端点, 纵贯研究海域东北部近岸海域、中部海域、西南部海域三个区域, 可以反映研究海域典型的水文特征。站位 C1 ($123^\circ 14' \text{ E}$, $38^\circ 52' \text{ N}$) 为表、底层海水温度差值最大站位, 站位 C2 ($123^\circ 54' \text{ E}$, $39^\circ 44' \text{ N}$) 和 C3 ($123^\circ 40' \text{ E}$, $39^\circ 34' \text{ N}$) 分别为研究海域不同区域表、底层海水溶解氧饱和度差值最大的站位。

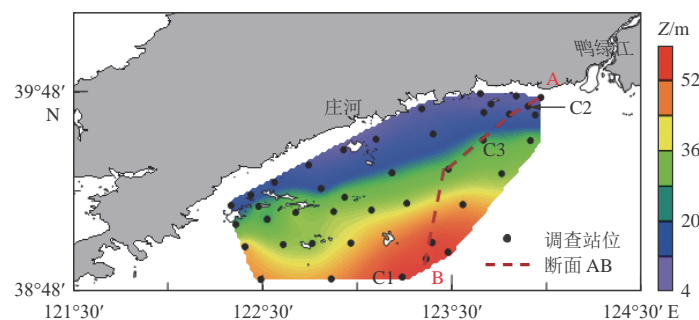


图 1 北黄海北部调查站位和断面分布

Fig. 1 Distribution of the sampling sites in the northern of the North Yellow Sea

海水溶解 CH_4 采集和测定依据《海水中溶解甲烷的测定 顶空平衡-气相色谱法》进行, 该方法 CH_4 检出限为 1.2 nmol/L, 重复性相对标准偏差 $\leq 5\%$ (全国海洋标准化技术委员会, 2018); 采用安捷伦气相色谱仪 (GC-7890A 型, 美国安捷伦科技有限公司生产) 进行分析, 海水 CH_4 测定精密度优于 2%、准确度优于 2% (臧昆鹏等, 2014, 2018), CH_4 标准气体重复性相对标准偏差 $\leq 2\%$ (臧昆鹏等, 2014)。海水溶解氧 (DO) 按照 Winkler 流程 (Intergovernmental Oceanographic Commission, 1994) 进行采集、分取、固定和滴定。

1.2 海水溶解 CH_4 饱和度和海-气交换通量的计算

海水溶解 CH_4 浓度的计算公式 (Johnson et al, 1990):

$$c_{\text{CH}_4} = c_g (\beta R' T / V_{\text{CH}_4} + V_g / V_l), \quad (1)$$

式中: c_{CH_4} 为海水溶解 CH_4 浓度 (nmol/L); c_g 为气相色谱仪测定的气液平衡后气相中 CH_4 浓度 (nmol/L); β 为 CH_4 溶解度系数 (L/(L·atm)), 1 atm 为 1.01325×10^5 Pa, $\ln \beta = -68.8862 + 101.4956 \times 100/T + 28.7314 \times \ln(T/100) + S \times [-0.076146 + 0.043970 \times T/100 - 0.006872 \times (T/100)^2]$; R' 为气体状态常数, 0.082057 (L·atm)/(mol·K); T 为绝对温度 (K); V_{CH_4} 为标准状态下 CH_4 的摩尔体积, 为 22.356 L/mol; V_g 和 V_l 分别为顶空平衡时气相和液相的体积 (L)。

海水溶解 CH_4 饱和度 (S'_{CH_4} , %) 及海-气 CH_4 交换通量 (F , $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$) 计算公式:

$$S'_{\text{CH}_4} = c_{\text{CH}_4} / c_{\text{eq}} \times 100\%, \quad (2)$$

$$F = k_w \times (c_{\text{CH}_4} - c_{\text{eq}}), \quad (3)$$

式中: c_{eq} 为表层海水与大气平衡时海水溶解 CH_4 浓度 (Weisenburg and Guinasso, 1997)。大气 CH_4 浓度采用北黄海 Tae-ahn Peninsula 站近 5 a 的 8 月大气 CH_4 平均浓度 (http://gml.noaa.gov/aftp/data/trace_gases/ch4/flask/surface/txt/ch4_tap_surface-flask_1_ccgg_month.txt)。 k_w 是气体交换速率 (cm/h), $k_w = 0.251 U_{10}^2 \times (Sc/660)^{-0.5}$ (Wanninkhof, 2014); U_{10} 为海面上方 10 m 的风速, 在现场实时风速调查数据缺乏的现状下, 我们采用 2022 年 8 月 CCMP (Cross Calibrated, Multi-Platform Ocean Surface Wind Velocity) 海表风速的月平均值 (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center, 2022); Sc 为施密特数, $Sc = 2356.2 - 166.38t + 6.3952t^2 - 0.13422t^3 + 0.0011506t^4$ (Raymond et al, 2001), t 为表层海水温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

1.3 DO 饱和度及表观耗氧量 (AOU) 的计算

DO 饱和度指海水 DO 浓度 (c_{DO}) 与该条件下海水与大气平衡时海水 DO 浓度 ($c_{\text{DO}_{\text{eq}}}$) (Benson et al, 1984) 的百分比 (S'_{DO} , %), 由式 (4) 计算:

$$S'_{\text{DO}} = c_{\text{DO}} / c_{\text{DO}_{\text{eq}}} \times 100\%. \quad (4)$$

表观耗氧量 (Apparent Oxygen Utilization, AOU) 指海水 DO_{eq} 与 DO 质量摩尔浓度的差 ($\mu\text{mol}/\text{kg}$), 计算公式:

$$m_{\text{AOU}} = m_{\text{DO}_{\text{eq}}} - m_{\text{DO}}, \quad (5)$$

假定海水 DO 最初与大气平衡的前提下, $m_{\text{AOU}} > 0$ 表示群落呼吸作用消耗 DO, $m_{\text{AOU}} < 0$ 表示浮游植物光合作用产生 DO (Li et al, 2021a, 2022a)。

1.4 两端元混合模型

鸭绿江等陆源冲淡水与北黄海海水的混合过程是影响研究海域溶解 CH_4 浓度的重要因素。为分析陆源冲淡水与海水混合过程对海水溶解 CH_4 的影响, 利用两端元混合模型, 以盐度 (S) 作为保守参数, 由式 (6) 和 (7) 计算陆源冲淡水与海水的混合比例 (Fry, 2002):

$$f_r + f_{\text{sw}} = 1, \quad (6)$$

$$S_r \times f_r + S_{\text{sw}} \times f_{\text{sw}} = S, \quad (7)$$

式中: f_r 和 f_{sw} 分别为陆源冲淡水与海水的混合比例, S_r 和 S_{sw} 分别为陆源冲淡水和海水的盐度。

海水溶解 CH_4 浓度只受物理混合过程控制的理论混合值 ($c_{\text{CH}_4(\text{mix})}$) 计算公式:

$$c_{\text{CH}_4(\text{mix})} = c_{\text{CH}_4(\text{r})} \times f_{\text{r}} + c_{\text{CH}_4(\text{sw})} \times f_{\text{sw}}, \quad (8)$$

式中: $c_{\text{CH}_4(\text{r})}$ 和 $c_{\text{CH}_4(\text{sw})}$ 分别为陆源冲淡水与海水溶解 CH_4 浓度。

$c_{\Delta\text{CH}_4}$ 为海水溶解 CH_4 浓度与 $c_{\text{CH}_4(\text{mix})}$ 的差值, 计算公式:

$$c_{\Delta\text{CH}_4} = c_{\text{CH}_4} - c_{\text{CH}_4(\text{mix})} \circ \quad (9)$$

1.5 相关分析

为评估北黄海北部海水溶解 CH_4 浓度的分布及影响因素, 采用美国 IBM 公司 SPSS(Statistical Package for the Social Sciences)27 软件, 对海水溶解 CH_4 浓度与海水温度、盐度等不同参数开展相关分析。

2 结果

2.1 海水温度及盐度的分布

2022年8月北黄海北部表层海水温度范围为 $21.79 \sim 27.45 \text{ }^\circ\text{C}$ (图 2a), 盐度范围为 $15.48 \sim 30.65$ (图 2c)。底层海水温度范围为 $13.53 \sim 23.72 \text{ }^\circ\text{C}$ (图 2b), 盐度范围为 $16.36 \sim 31.62$ (图 2d)。

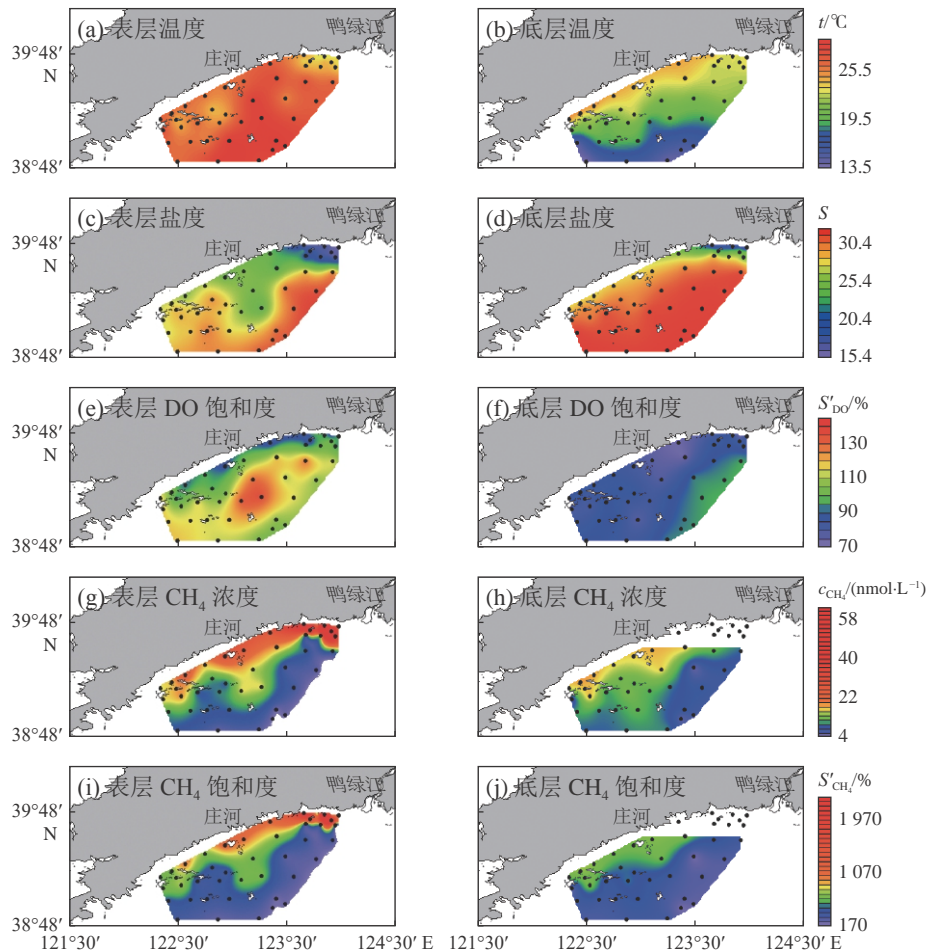


图 2 北黄海北部海水温度、盐度、DO 饱和度、 CH_4 浓度和 CH_4 饱和度的平面分布示意图

Fig. 2 Horizontal distributions of temperature, salinity, DO saturation, CH_4 concentration and CH_4 saturation in the northern of the North Yellow Sea

基于海水温度、盐度的空间分布特征,将研究海域分为3个区域,即东北部近岸海域、中部海域、西南部海域。研究海域的东北部近岸海域受鸭绿江等陆源冲淡水输入的影响呈现为低温低盐区,且表、底层温度、盐度分布基本一致;西南部海域受黄海冷水团的影响(姚志刚等, 2012; Xu et al, 2016),底层存在温度低值区和盐度高值区,站位 C1 表、底层海水温度差值最大为 12.78 °C;中部海域是东北部近岸海域与西南部海域海水混合的过渡海域,海水温度、盐度等参数的特征介于东北部近岸海域与西南部海域海水温度、盐度等参数特征之间,以下不再做重点讨论。

为进一步分析水文特征,选取纵贯研究海域东北部近岸海域、中部海域、西南部海域三个区域的断面 AB(图 1)分析海水各参数的垂直分布特征。断面 AB 海水温度和盐度的剖面分布示意图(图 3a 和 3b)表明,研究海域东北部近岸海域垂直方向上表、底层海水温度和盐度差异较小,由东北部近岸海域向西南部离岸海域随着水深的增加,底层海水温度明显低于表层,在黄海冷水团影响的西南部海域出现海水分层。

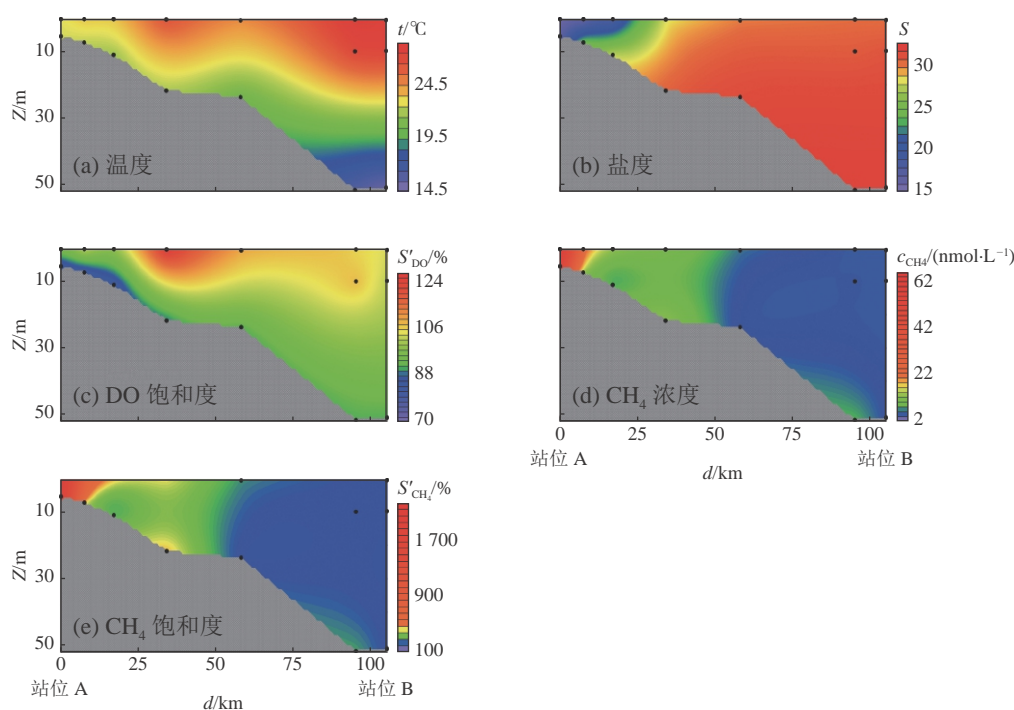


图 3 北黄海北部断面 AB 海水温度、盐度、DO 饱和度、CH₄ 浓度和 CH₄ 饱和度的剖面分布示意图

Fig. 3 Profile distribution of seawater temperature, salinity, DO saturation, CH₄ concentration and CH₄ saturation at the section AB in the northern of the North Yellow Sea

2.2 海水 DO 质量浓度及 DO 饱和度的分布

2022 年 8 月北黄海北部表层海水 DO 质量浓度为 5.73~9.19 mg/L, 平均值为(7.43±0.73) mg/L; DO 饱和度为 79%~132%, 近岸海域表层海水 DO 呈现欠饱和状态, 而离岸海域海水 DO 呈现饱和或过饱和状态(图 2e)。底层海水 DO 质量浓度较低, 为 5.16~7.66 mg/L, 平均值为(6.45±0.55) mg/L; DO 饱和度为 70%~93%, 平均值为(84±5)%, 呈现欠饱和状态, 低于表层(图 2f)。海水 DO 饱和度剖面分布(图 3c)表明, 近岸海域海水 DO 呈现欠饱和状态, 且底层海水 DO 饱和度远低于表层, 站位 C2 表、底层海水 DO 饱和度的差值(19%)最大。离岸海域表层海水 DO 饱和度逐渐升高处于过饱和状态, 而底层海水 DO 仍然处于欠饱和状态, 站位 C3 表、底层海水 DO 饱和度的差值(37%)最大。

2.3 海水溶解 CH₄ 浓度及 CH₄ 饱和度的分布

2022年8月北黄海北部表层海水溶解 CH₄ 浓度为 4.0~63.3 nmol/L, 平均值为(20.6±16.9) nmol/L; CH₄ 饱和度为 177%~2360%, 平均值为(678±541)%, 可见表层海水溶解 CH₄ 呈现过饱和状态, 高值区位于研究海域东北部近岸海域(图 2g 和 2i)。底层海水溶解 CH₄ 浓度为 4.5~17.6 nmol/L, 平均值为(10.9±3.80) nmol/L; CH₄ 饱和度为 168%~707%, 平均值为(411±160)%(图 2h 和 2j)。垂直方向上研究海域东北部近岸海域海水溶解 CH₄ 浓度和 CH₄ 饱和度变化不大, 基本呈现混匀状态(图 3d 和 3e); 随着水深加深, 在研究海域西南部海域逐渐出现海水 CH₄ 浓度和 CH₄ 饱和度的层化现象, 底层海水 CH₄ 浓度和 CH₄ 饱和度高于表层, 与底层海水低温、低 DO 区相对应。综上所述, 北黄海北部不同区域表、底层海水溶解 CH₄ 浓度呈现不同分布规律, 研究海域东北部近岸海域海水溶解 CH₄ 浓度呈现高值, 且随着离岸距离增加, 表层海水溶解 CH₄ 浓度呈现迅速降低趋势, 研究海域西南部海域底层海水 CH₄ 浓度高于表层。

3 讨论

3.1 海水温度变化对 CH₄ 分布的影响

海水温度变化是影响溶解 CH₄ 分布的重要因素(叶旺旺, 2015), 一方面海水温度升高和 CH₄ 溶解度降低, 另一方面海水温度变化会影响微生物活动进而影响 CH₄ 的产生。研究海域海水溶解 CH₄ 浓度处于过饱和状态, 且受海水温度变化的影响不明显(图 4a)。表层海水溶解 CH₄ 浓度呈现出随海水温度升高而降低的趋势, 二者呈现负相关, $c_{\text{CH}_4} = -7.2 \times t + 198.8$ ($n=41, R^2=0.5$)。研究海域东北部近岸海域海水溶解 CH₄ 浓度与海水温度的关系偏离溶解 CH₄ 浓度和海水温度的线性直线, 因此海水温度变化对 CH₄ 分布的影响作用有限。特别是研究海域东北部近岸海域以及离岸底层海域应该存在其他因素主导海水溶解 CH₄ 的分布, 如陆源冲淡水输入的影响等。

3.2 鸭绿江等陆源冲淡水输入的影响

陆源冲淡水输入会导致河口海域海水 CH₄ 浓度升高, 影响海水 CH₄ 的分布(Ye et al, 2019)。研究海域东北部近岸低盐区海水 CH₄ 呈现高值。海水溶解 CH₄ 浓度随海水盐度的升高而降低, 二者呈现负相关, $c_{\text{CH}_4} = -2.9 \times S + 95.5$ ($n=87, R^2=0.8$)(图 4b)。海水溶解 CH₄ 浓度处于过饱和状态。因此表明海水盐度变化所表征的淡咸水混合过程对 CH₄ 的分布具有重要影响作用。基于两端元混合模型, 选取研究海域东北部近岸海域盐度最低的站位 A 作为陆源冲淡水端元点、研究海域西南部盐度最高的站位 B 作为海水端元点, 探究鸭绿江等陆源冲淡水与海水混合过程对海水溶解 CH₄ 的影响。结果表明, 海水 CH₄ 浓度随着 CH₄(mix) 浓度升高而升高, 二者呈现正相关, $c_{\text{CH}_4} = 0.86 \times c_{\text{CH}_4(\text{mix})}$ ($n=87, R^2=0.9$)(图 4c)。由此可见, 陆源冲淡水和海水的混合是研究海域海水溶解 CH₄ 浓度分布的重要影响因素, 高 CH₄ 浓度的鸭绿江等陆源冲淡水的输入致使研究海域海水溶解 CH₄ 浓度升高。此外, 值得注意的是研究海域东北部近岸海水 DO 欠饱和区域 CH₄ 与 CH₄(mix) 偏离二者的线性直线(图 4c)。因此除陆源冲淡水输入外还存在其他因素影响研究海域海水溶解 CH₄ 的分布, 如底层沉积物有机质厌氧降解产生甲烷向上输送、海水 CH₄ 的氧化反应以及海-气 CH₄ 交换等过程。

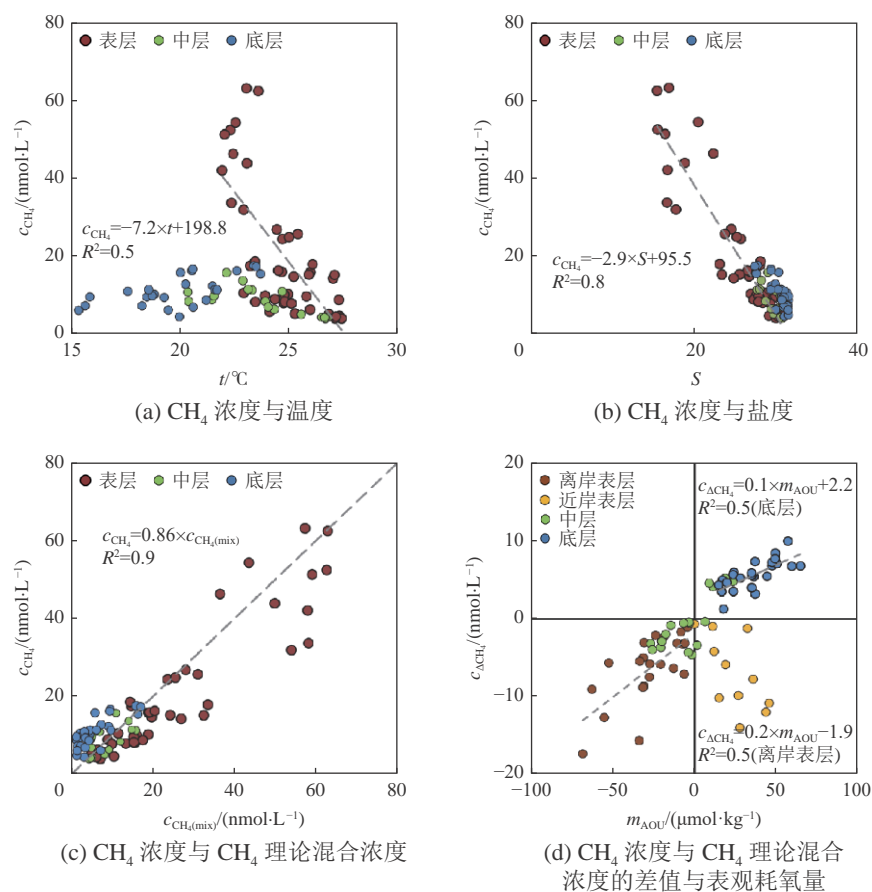


图 4 北黄海北部海水 CH_4 浓度与温度、盐度、 CH_4 浓度理论混合值的关系，以及 CH_4 浓度差值和表观耗氧量的关系

Fig. 4 Relationship between seawater CH_4 concentration and temperature, salinity, $\text{CH}_4(\text{mix})$ concentration and the relationship between ΔCH_4 concentration and AOU in the northern of the North Yellow Sea

3.3 海水及沉积物有机质厌氧降解的影响

厌氧环境下微生物降解海水及沉积物中有机质的生物化学过程是影响海水 CH_4 浓度分布的另一个重要因素(李思琦等, 2022; Mao et al, 2022)。鸭绿江等陆源冲淡水以及研究海域广泛分布的海水养殖业给北黄海北部带来了丰富的营养物质, 海水和沉积物有机质含量相比离岸海域高, 有机质的微生物厌氧降解会导致 CH_4 的释放进而影响海水溶解 CH_4 的分布(徐雪梅等, 2023)。然而海水中 DO 的存在会使得水体颗粒有机碳降解释放的 CH_4 被氧化消耗, 因此沉积物有机质厌氧降解产生 CH_4 通常是最主要影响因素(Marty et al, 2001; 李思琦等, 2022; Zang et al, 2022)。海水 ΔCH_4 可表明非物理混合因素对海水溶解 CH_4 浓度的影响, 即海水 CH_4 消耗(包含氧化反应以及海-气交换)与生成(主要为沉积物有机质的厌氧降解)的差, 当海水 CH_4 消耗大于生成时 ΔCH_4 为负值, 反之为正值。2022 年 8 月研究海域底层海水中 ΔCH_4 为 1~10 nmol/L, 且 c_{CH_4} 与 m_{AOU} 呈现正相关, $c_{\Delta\text{CH}_4} = 0.1 \times m_{\text{AOU}} + 2.2$ ($n=29$, $R^2=0.5$)(图 4 d), 底层沉积物有机质降解产生 CH_4 释放到底层海水中, 特别是研究海域西南部受黄海冷水团温跃层的影响, 沉积物有机质厌氧降解产生的 CH_4 在底层海水中累积, 使得底层海水 CH_4 浓度高于表层(李思琦等, 2022; 徐雪梅等, 2023)。这与地中海西北部的狮子湾、罗纳河近岸海域等其他陆架边缘海(Marty et al, 2001)基本一致, 揭示了陆架边缘海底层海水溶解 CH_4 浓度升高的原因。

研究海域东北部近岸海域海水 DO 浓度出现最低值, 整体处于欠饱和状态, AOU 呈现正值(图 4d

中黄色点所示, $n=12$)且表、底层垂直混合比较均匀, 底层有机质降解产生的 CH_4 更易于释放到上层水体中。离岸海域表层海水 ΔCH_4 为 $-14\sim-1$ nmol/L, 表明虽然底层有机质降解产生的 CH_4 易于输送到表层, 但该过程中海水 CH_4 的氧化反应以及海-气 CH_4 交换等过程导致海水中溶解 CH_4 浓度降低。此外, 离岸海域表层海水 DO 过饱和的 24 个站位(图 2e), 海水 ΔCH_4 随着 AOU 升高而升高, 二者呈现正相关, $c_{\text{CH}_4}=0.2\times m_{\text{AOU}}-1.9$ ($n=24, R^2=0.5$) (图 4d), 进一步证明表层海水 CH_4 的氧化反应消耗是一个重要的过程。这与 Mao 等 (2022) 的研究结论一致。由此可见, 陆源冲淡水输入耦合沉积物有机质厌氧降解的影响致使北黄海北部海域海水 CH_4 升高, 但海水 CH_4 的氧化反应以及海-气 CH_4 交换等过程也是影响研究海域溶解 CH_4 浓度的重要因素。

3.4 北黄海海-气 CH_4 交换通量

2022年8月北黄海北部研究海域表现为大气 CH_4 的源。基于 Wanninkhof (2014) 公式, 计算得到研究海域海-气 CH_4 交换通量为 $18.4\sim 578.8$ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 平均值为 (178.4 ± 172.0) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 其中研究海域东北部近岸海域呈现为高值区, 随着离岸距离的增加海-气 CH_4 交换通量迅速降低。

不同季节海-气 CH_4 交换通量的计算结果(表 1)显示, 北黄海全年表现为大气 CH_4 的源。值得注意的是北黄海夏季海水溶解 CH_4 浓度和海-气 CH_4 交换通量高于春季 (Yang et al, 2010; 徐雪梅等, 2023)、秋季 (Yang et al, 2010) 以及冬季 (Yang et al, 2010; 臧昆鹏等, 2018), 如夏季北黄海海-气 CH_4 交换通量是冬季的 $3\sim 446$ 倍。夏季是典型的汛期, 通常情况下河流径流量最大, 如 7-9 月鸭绿江径流量占全年径流总量的 36%, 8 月最多, 达 15% (高建华等, 2003); 大量陆源冲淡水的输入导致北黄海北部海水溶解 CH_4 浓度较高; 同时夏季海水温度升高导致生物生产力提高, 溶解 CH_4 浓度达到全年最高水平。此外, 不同研究获得的同一季节的海水溶解 CH_4 浓度及海-气交换通量存在较大差别。研究中北黄海北部夏季溶解 CH_4 浓度和海-气 CH_4 交换通量约是 Yang 等 (2010) 观测值的 8 倍。研究海域位于辽东半岛的东部海域, 涵盖了海水溶解 CH_4 浓度和海-气 CH_4 交换通量较高的鸭绿江口等附近海域, 而 Yang 等 (2010) 的观测区域则集中在辽东半岛的西南侧海域以及渤海海交界海域, 河流等陆源冲淡水输入的影响不显著。此外, 随着近些年辽东半岛及周边地区社会和经济的发展, 溶解 CH_4 浓度和海-气 CH_4 交换通量较高的河流等陆源输入的影响加剧也是关键因素所在。

表 1 北黄海表层海水溶解 CH_4 浓度及海-气交换通量

Table 1 Dissolved methane concentration in the surface seawater and sea-air CH_4 flux in the North Yellow Sea

季节(数据来源)	$c_{\text{CH}_4}/$ (nmol·L ⁻¹)	($c_{\text{CH}_4}\pm\text{SD}$)/ (nmol·L ⁻¹)	海-气 CH_4 交换通量/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	(海-气 CH_4 交换通量平均值 $\pm\text{SD}$)/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)
春季 (Yang et al, 2010)	3.0~14.4	6.4 \pm 2.5	-0.3~36.6	6.9 \pm 7.3
春季 (徐雪梅等, 2023)	3.2~11.2	5.9 \pm 2.4	0.7~61.1	20.9 \pm 18.2
夏季 (Yang et al, 2010)	5.1~39.7	12.0 \pm 5.7	1.0~72.8	21.1 \pm 16.4
夏季 (本研究)	4.0~63.3	20.6 \pm 16.9	18.4~578.8	178.4 \pm 172.0
秋季 (Yang et al, 2010)	2.4~20.4	5.7 \pm 3.5	0~110.9	14.6 \pm 22.3
冬季 (Yang et al, 2010)	2.4~4.9	3.4 \pm 0.6	-3.0~11.4	0.4 \pm 1.7
冬季 (臧昆鹏等, 2018)	4.3~7.3	5.4 \pm 0.9	0.2~17.4	6.3 \pm 5.1

北黄海北部研究海域溶解 CH_4 分布的影响因素复杂多变, 涵盖海水温度变化、河流输入 (许洁, 2006; 赵玉川等, 2011; 徐雪梅等, 2023)、沉积物有机质厌氧降解 (李思琦等, 2022) 等诸多过程, 因此

海-气 CH_4 交换通量时空变异性大且普遍高于其他近岸海域, 如比利时的北海近岸海域(Borges et al, 2018)、加拿大的萨格奈峡湾(Li et al, 2021b)及圣劳伦斯河口(Li et al, 2022b)等。综上所述, 河口及陆架边缘海海水溶解 CH_4 的浓度及海-气交换通量存在较大的时空变异性, 特别是河口海域海-气 CH_4 交换通量往往显著高于离岸海域。然而已有研究大多聚焦于离岸海域, 对于鸭绿江等陆源冲淡水输入影响的近岸海域的相关观测数据及研究比较匮乏(徐雪梅等, 2023), 限制了河口及陆架边缘海海-气 CH_4 交换通量的科学评估。加强对河口以及陆架边缘海不同季节的深入调查研究, 才能更加科学地评估陆架边缘海 CH_4 的分布特征及海-气 CH_4 交换通量, 进而更加明确 CH_4 排放源项的构成。

4 结 论

科学评估陆架边缘海溶解 CH_4 的分布及海-气交换通量, 可更加准确地认识该海域 CH_4 的释放对大气 CH_4 的区域性贡献。我们研究分析了 2022 年 8 月北黄海北部海水溶解 CH_4 的分布、海-气交换通量及影响因素, 得到以下主要结论。

1) 2022 年 8 月北黄海北部海水溶解 CH_4 浓度较高且存在区域性差异, 海水溶解 CH_4 高值区出现在鸭绿江口附近海域, 随着离岸距离的增加表层海水溶解 CH_4 浓度迅速降低。

2) 陆源冲淡水的输入耦合海水及沉积物有机质的厌氧降解导致近岸海域海水 CH_4 显著升高; 但冲淡水与海水混合过程中海水 CH_4 的氧化消耗也是不容忽视的重要过程。离岸海域海水及沉积物有机质厌氧降解耦合黄海冷水团的作用使得底层海水溶解 CH_4 浓度高于表层海水。

3) 2022 年 8 月北黄海北部海水 CH_4 处于过饱和状态, 是大气 CH_4 的源; 海-气 CH_4 交换通量为 $18.4\sim 578.8 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 特别是鸭绿江附近海域海-气 CH_4 交换通量显著高于离岸海域, 且变幅明显高于其他海域。

陆架边缘海特别是河口海域作为大气 CH_4 重要的源, 其海水溶解 CH_4 的分布具有显著的时空差异性且影响因素更加复杂。加强河口以及陆架边缘海不同季节的深入研究对于科学评估陆架边缘海海-气 CH_4 交换通量及其对大气 CH_4 的区域性贡献具有重要意义。

参考文献 (References):

- 鲍献文, 宋军, 姚志刚, 等, 2010. 北黄海潮流、余流垂直结构及其季节变化[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 40(11): 11-18. BAO X W, SONG J, YAO Z G, et al, 2010. The vertical structure and seasonal variation of the tide current and residual current in the North Yellow Sea[J]. Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition), 40(11): 11-18.
- 高建华, 高抒, 董礼先, 等, 2003. 鸭绿江河口地区沉积物特征及悬沙输送[J]. 海洋通报, 22(5): 26-33. GAO J H, GAO S, DONG L X, et al, 2003. Sediment distribution and suspended sediment transport in Yalu River Estuary[J]. Marine Science Bulletin, 22(5): 26-33.
- 李思琦, 陈焯, 尹霞, 等, 2022. 春季黄、渤海沉积物中 CH_4 和 N_2O 的垂向分布特征研究[J]. 地学前沿, 29(5): 35-46. LI S Q, CHEN Y, YIN X, et al, 2022. Vertical distributions of CH_4 and N_2O in sediments of the Bohai and Yellow Seas in spring[J]. Earth Science Frontiers, 29(5): 35-46.
- 刘朝钊, 2013. 浅析近代中国鸭绿江流域的资源开发及其正负效应[D]. 长春: 吉林大学. LIU C Z, 2013. A brief analysis of the resource development and its positive and negative effects of Yalu River in Modern China[D]. Changchun: University of Jilin, China.
- 全国海洋标准化技术委员会, 2018. 海水中溶解甲烷的测定 顶空平衡-气相色谱法: HY/T: 262—2018[S]. 北京: 中国标准出

- 出版社: 1-10. National Technical Committee 283 on Ocean of Standardization Administration of China, 2018. Determination of dissolved methane in seawater by headspace equilibrium gas chromatography: HY/T:262—2018[S]. Beijing: Standards Press of China: 1-10.
- 冉泽, 2022. 浅析全球甲烷承诺能源路径[J]. 城市燃气, (9): 43-45. RAN Z, 2022. Analysis of the global methane commitment energy path[J]. Urban Gas, (9): 43-45.
- 许洁, 2006. 南海、黄海及长江口海域溶解氧化亚氮和甲烷的分布及海-气交换通量研究[D]. 青岛: 中国海洋大学. XU J, 2006. Studies on distributions and sea-to-air fluxes of dissolved nitrous oxide and methane in the South China Sea, Yellow Sea and Yangtze River Estuary[D]. Qingdao: Ocean University of China.
- 徐雪梅, 臧昆鹏, 王晓萌, 等, 2023. 春季北黄海辽东半岛东部邻近海域溶解甲烷的分布、影响因素及海-气交换通量[J]. 海洋环境科学, 42(1): 22-28. XU X M, ZANG K P, WANG X M, et al, 2023. Distributions, influencing factors and fluxes of dissolved methane in the eastern part of Liaodong Peninsula in the North Yellow Sea in spring[J]. Marine Environmental Science, 42(1): 22-28.
- 姚志刚, 鲍献文, 李娜, 等, 2012. 北黄海冷水团季节变化特征分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 42(6): 9-15. YAO Z G, BAO X W, LI N, et al, 2012. Seasonal evolution of the Northern Yellow Sea Cold Water Mass[J]. Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition), 42(6): 9-15.
- 叶旺旺, 2015. 东、黄海溶存甲烷的分布、产生及释放[D]. 青岛: 中国海洋大学. YE W W, 2015. Distribution, production and release of dissolved methane in the East and Yellow Seas[D]. Qingdao: Ocean University of China.
- 臧昆鹏, 王菊英, 赵化德, 等, 2014. 顶空平衡-双通道气相色谱法测定海水中溶解态甲烷和氧化亚氮[J]. 环境化学, 33(12): 2094-2101. ZANG K P, WANG J Y, ZHAO H D, et al, 2014. Simultaneous determination of dissolved CH₄ and N₂O in seawater using head space-dual channel GC system[J]. Environmental Chemistry, 33(12): 2094-2101.
- 臧昆鹏, 霍城, 郑楠, 等, 2018. 冬季北黄海溶解态CH₄和N₂O的浓度分布及海-气交换通量[J]. 环境化学, 37(5): 959-967. ZANG K P, HUO C, ZHENG N, et al, 2018. Distributions and fluxes of dissolved CH₄ and N₂O in the North Yellow Sea in winter[J]. Environmental Chemistry, 37(5): 959-967.
- 张桂玲, 2004. 中国近海部分海域溶解甲烷和氧化亚氮的生物地球化学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学. ZHANG G L, 2004. Studies on biogeochemistry of dissolved methane and nitrous oxide in the coastal waters of China[D]. Qingdao: Ocean University of China.
- 赵玉川, 张桂玲, 刘素美, 2011. 2009年8月底长江口海水中甲烷的分布与释放通量[J]. 海洋科学, 35(11): 9. ZHAO Y C, ZHANG G L, LIU S M, 2011. Distribution and fluxes of methane at Changjiang (Yangtze River) Estuary at the end of August 2009[J]. Marine Science, 35(11): 9.
- BANGE H W, BARTELL U, RAPSOMANIKIS S, et al, 1994. Methane in the Baltic and North Seas and a reassessment of the marine emissions of methane[J]. Global Biogeochemistry Cycles, 8(4): 465-480.
- BENSON B B, KRAUSE D, 1984. The concentration and isotopic fractionation of oxygen dissolved in fresh water and seawater in equilibrium with the atmosphere[J]. Limnology and Oceanography, 29: 620-632.
- BORGES A V, SPEECKAERT G, CHAMPENOIS W, et al, 2018. Productivity and temperature as drivers of seasonal and spatial variations of dissolved methane in the Southern Bight of the North Sea[J]. Ecosystems, 21: 583-599.
- DENMAN K, BRASSEUR G, 2007. The physical science basis: contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. Computational Geometry, 18(2): 95-123.
- FRY B, 2002. Conservative mixing of stable isotopes across estuarine salinity gradients: a conceptual framework for monitoring watershed influences on downstream fisheries production[J]. Estuaries, 25(2): 264-271.
- Intergovernmental Oceanographic Commission, 1994. Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) core measurements[R]. Paris, France: UNESCO-IOC.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2021. Climate change 2021: the physical science basis[R]// Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge and New York: Cambridge University Press.
- JOHNSON K M, HUGHES J E, DONGHAY P L, et al, 1990. Bottle-calibration static head space method for the determi-

- nation of methane dissolved in seawater[J]. *Analytical Chemistry*, 62: 2408-2412.
- LI C L, ZHAI W D, 2021a. Mechanism-based deduction of subsurface aragonite saturation state in a semi-enclosed and seasonally stratified coastal sea[J]. *Marine Chemistry*, 232: 103958.
- LI Y J, XIE H X, SCARRATT M, et al, 2021b. Dissolved methane in the water column of the Saguenay Fjord[J]. *Marine Chemistry*, 230: 103926.
- LI C L, ZHAI W D, 2022a. Effects of warming, eutrophication and climate variability on acidification of the seasonally stratified North Yellow Sea over the past 40 years[J]. *Science of the Total Environment*, 815: 152935.
- LI Y, XIE H, SCARRATT M G, DAMM E, et al, 2022b. Dissolved methane in the world's largest semi-enclosed estuarine system: the estuary and Gulf of St. Lawrence (Canada)[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(8): e2022JC018850.
- MAO S H, ZHANG H H, ZHUANG G C, et al, 2022. Aerobic oxidation of methane significantly reduces global diffusive methane emissions from shallow marine waters[J]. *Nature Communication*, 13: 7309.
- MARTY D, BONIN P, MICHOTEY V, et al, 2001. Bacterial biogas production in coastal systems affected by freshwater input[J]. *Continental Shelf Research*, 21: 2105-2115.
- Physical Oceanography Distributed Active Archive Center, 2022. Cross calibrated, multi-platform ocean surface wind velocity[DB/OL]. (2022-09-15) [2023-07-29]. <https://data.remss.com/ccmp/v02.1.NRT>.
- RAYMOND P A, COLE J J, 2001. Gas exchange in rivers and estuaries: choosing a gas transfer velocity[J]. *Estuaries*, 24(2): 312-317.
- SUN M S, ZHANG G L, MA X, et al, 2018. Dissolved methane in the East China Sea: distribution, seasonal variation and emission[J]. *Marine Chemistry*, 202: 12-26.
- United Nations Environment Programme, 2021. Fast action on methane to keep a 1.5 °C future within reach[DB/OL]. (2021-11-13) [2023-07-29]. <https://www.globalmethanepledge.org>.
- WANNINKHOF R, 2014. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 12(6): 351-362.
- WEBER T, WISEMAN N A, KOCK A, 2019. Global Ocean methane emissions dominated by shallow coastal waters[J]. *Nature Communications*, 10(1): 4584.
- WEISENBURG D A, GUINASSO N L, 1997. Equilibrium solubilities of methane, carbon monoxide and hydrogen in water and seawater[J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 24(4): 356-360.
- XU X M, ZANG K P, ZHAO H D, et al, 2016. Monthly CO₂ at A4HDYD station in a productive shallow marginal sea (Yellow Sea) with a seasonal thermocline: controlling processes[J]. *Journal of Marine Systems*, 159: 89-99.
- YANG J, ZHANG G L, ZHENG L X, et al, 2010. Seasonal variation of fluxes and distributions of dissolved methane in the North Yellow Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 30: 187-192.
- YE W W, ZHANG G L, ZHENG W J, et al, 2019. Methane distribution and sea-to-air fluxes from the Pearl River Estuary and the northern South China Sea[J]. *Deep Sea Research II: Topical Studies in Oceanography*, 167: 34-45.
- ZANG K P, ZHANG G, XU X M, et al, 2020. Impact of air-sea exchange on the spatial distribution of atmospheric methane in the Dalian Bay and adjacent coastal area, China[J]. *Chemosphere*, 251: 126412.
- ZANG K P, ZHANG G, XU X M, et al, 2022. Methane emission via sediment and water interface in the Bohai Sea, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 114: 465-474.

Distributions, Influencing Factors and Sea-Air Fluxes of Dissolved Methane in the Northern of North Yellow Sea in August 2022

XU Xuemei¹, WANG Mingli², HE Zongcai¹, HAN Jianbo¹, XING Qinghui¹,
WANG Xinyi³, CHEN Hong¹

(1. *National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China;*

2. *Shandong Provincial Qingdao Eco-environment Monitoring Center, Qingdao 266003, China;*

3. *College of Environment Science and Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China*)

Abstract: Scientific assessment of the distribution and sea-air fluxes of dissolved methane (CH₄) in the marginal sea is important for understanding the regional contribution of CH₄ emission to the atmosphere. The distribution, influencing factors and sea-air fluxes of CH₄ in the northern of the North Yellow Sea were studied based on a survey in August 2022. The results showed that the dissolved CH₄ concentrations range were from 4.0 nmol/L to 63.3 nmol/L with saturations from 168% to 2 360% in the study area. High CH₄ concentrations were observed in Yalu River estuary, and the dissolved CH₄ concentrations in surface seawater decreased rapidly as the estuary extends to the sea, while the input of diluted water from terrestrial sources such as the Yalu River coupled with the degradation of seawater and sediment organic matter led to an increase in CH₄ in inshore area. The oxidative consumption of CH₄ in seawater mixing with the terrestrial diluted water was also an important process that could not be ignored in controlling CH₄ concentration and distribution. The action of North Yellow Sea Cold Water Mass coupled with anaerobic degradation of sediment organic matter resulted in relatively high dissolved CH₄ concentrations in bottom seawater than that in surface seawater in the offshore area. In the study area the sea-air CH₄ fluxes were from 18.4 μmol/(m²·d) to 578.8 μmol/(m²·d), being the source of atmospheric CH₄ and it was significantly higher in the inshore area than that of the offshore area. Therefore, the dissolved CH₄ concentrations and sea-air fluxes in this area had significant differences due to the inputs of diluted water, and the variation amplitude was higher than that of other sea area in the world. It is crucial to strengthen the investigation and research in coastal areas such as estuary to accurately assess the CH₄ emissions and emission source composition to formulate effective CH₄ reduction measures.

Keywords: the North Yellow Sea; dissolved methane; air-sea CH₄ flux; inputs of diluted water; anaerobic degradation of organic matter

Received: July 29, 2023 **Online:** April 22, 2024

不同压强深度转化模型构建的声速剖面 对水下定位的影响

王松, 贺凯飞*, 姬生月, 唐安, 王跃, 姚铭飞

(中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院, 山东青岛 266580)

摘要: 高精度水下声学定位需要高精度的声速剖面, 目前使用声速剖面仪、温盐压仪测得的声速剖面中深度信息由压强转换得到。为解决高精度水下目标定位所需的高精度声速剖面问题, 本文研究了压强深度转换模型对于水下目标定位精度的影响。由 EOS-80 海水状态方程推导的压强深度转换模型较为常用, 但其考虑的影响因素较少。相反, TEOS-10 海水状态方程则综合了温度、盐度、压强等多重因素, 计算方法更严密。本文在全球范围内选择 10 组 Argo 浮标观测的 CTD 数据, 并使用常梯度声线跟踪方法对使用 EOS-80 和 TEOS-10 两种模型构建的声速剖面进行水下声学定位模拟。结果表明, 使用 2 种压强深度转换模型构建的声速剖面在水下目标定位中存在最大为 4.1 cm 的互差。因此, 在高精度的水下目标定位中, 建议采用更精确的 TEOS-10 压强深度转换模型构建声速剖面。

关键词: 水下定位; 声速剖面; TEOS-10; EOS-80

中图分类号: P229

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2024)04-0794-13

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20231007001

引用格式: 王松, 贺凯飞, 姬生月, 等, 2024. 不同压强深度转化模型构建的声速剖面对水下定位的影响[J]. 海洋科学进展, 42(4): 794-806. WANG S, HE K F, JI S Y, et al, 2024. The impact of constructing sound velocity profiles through different pressure-depth conversion models on underwater positioning[J]. Advances in Marine Science, 42(4): 794-806.

随着我国对时空信息需求的持续增长, 杨元喜等(2016)提出了基于不同物理原理的“综合 PNT”体系, 构建从深空到深海、无缝衔接且融合多物理原理的 PNT 信息源体系。我国的综合 PNT 建设需要海洋时空基准的支撑, 水下导航定位技术是支撑海洋时空基准的关键。目前, 水下定位技术主要采用全球卫星定位系统和声学测距组合技术 GNSS-A (Global Navigation Satellite System-Acoustic ranging combined) (Fujita et al, 2006)。GNSS-A 系统的水下部分由海面声学换能器和海底声学应答器组成, 通过精确测量声波在两者之间的往返传播时间来计算传播路径, GNSS-A 水下定位技术发展出了长基线定位(Long Baseline Positioning)系统、短基线定位(Short Baseline Positioning)系统、超短基线定位(Ultra Short Baseline Positioning)系统、GNSS-声学浮标(GNSS-Acoustic Buoys)系统等技术方法(孙大军等, 2012)。随着 GNSS-A 技术的发展, 复杂多变的海洋环境已经成为限制水下定位精度的重要因素(Zhang et al, 2016)。对于采用距离交会原理的水下声学定位系统, 主要存在往返传播时间延迟的时间测量误差、仪器的校准误差以及声速相关误差等(韩云峰等, 2017)。声速相关误差又可细分为声线折射误差和声速剖面代表性误差。对于声线折射误差, 可以通过声线跟踪技术进行有效削弱; 而要减少声速剖面代表性误差的影响, 则需要构建更为精确的水下声速场模型。在这些误

收稿日期: 2023-10-07 **网络首发日期:** 2024-07-31

资助项目: 国家自然科学基金项目(42174021)

作者简介: 王松(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事水下定位方面研究. E-mail: 1843942701@qq.com

* **通信作者:** 贺凯飞(1982—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事 GNSS 导航定位、水下导航定位方面研究. E-mail: hekaifei983@163.com

(陈靖 编辑)

差中,声速相关误差又可分为声线折射误差和声速剖面代表性误差。声线折射误差可以通过声线跟踪技术进行有效削弱;而要减少声速剖面代表性误差的影响,则需要构建更为精确的水下声速场模型(王君婷,2023)。由于海水中声速在时间和空间上并不均匀,声波在海水中并不是沿直线传播,而是遵循 Snell 定律沿不规则曲线传播。为了削弱声波在海水中折射引起的误差,目前主要采用常梯度声线跟踪依赖声速剖面数据(陆秀平等,2012)。声速剖面数据的获取主要有直接测量法和间接反演法,其中直接测量法分为声速剖面仪(SVP 仪)直接测量法以及声速经验公式法。SVP 直接测量法精度高,但其可用数据量少,且所获得的数据中不包含影响压强深度转换的温度、盐度等信息;声速经验公式法采用温盐压仪(CTD 仪)来测量海水的盐度、温度和压力,然后通过声速经验公式计算得出声速信息(李佳璐等,2022)。在这种方法中,深度信息是通过压强深度转换关系计算得到的(Saunders et al, 1981)。随着科学研究和生产生活对海洋声速信息需求的增加,间接反演法得到了广泛发展。这些方法主要包括空间内插法、基于经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)的反演法和基于机器学习的反演法等。张春玲等利用基于梯度相关尺度的最优插值客观分析法(Gradiente-dependent Correlation Scale Method, GDCSM)构建了次表层(5~2 000 m)三维网格数据(中国 Argo 实时资料中心,2021)。空间内插法仅考虑空间特性,因此构建的声速剖面受声速变化的影响较大。EOF 函数能够精确描述任意一条声速剖面,并有效构建声速剖面,且只需要前五阶 EOF 即可准确地表示测区内的声速剖面(Park et al, 1996)。利用已知点的实时声速信息可以求解 EOF 重构系数来构建整条声速剖面(王旭等,2024)。但对于温度变化较大的温跃层,EOF 构建的声速剖面精度明显降低。苑黎明等利用机器学习算法构建温盐场反演模型从而获取声速场(苑黎明等,2023)。随着机器学习技术的发展,目前已有多种不同的神经网络应用在声速剖面的反演中,声速剖面的反演正朝着智能化高精度的方向发展(黄威等,2023),为海洋声学和相关领域的研究提供新的有力工具。

声速剖面的精度对水下目标的定位精度具有重要影响。上述声速剖面的构建方法,都依赖于高精度的压强深度转换关系。随着海洋科学的不断发展,海水状态方程 TEOS-10(Thermodynamic Equation of Seawater-2010)被用于海洋环境的研究,根据 TEOS-10 海水状态方程可以构建更加精确的压强与深度转换关系。TEOS-10 压强深度转换需要使用 CTD 数据,而 Argo(Array for Real-time Geostrophic Oceanography)浮标所采集的数据中包含 CTD 数据,同时全球 Argo 组织每月采集 12 000 个数据文件,这远超使用其他方法采集的海面以下的水文数据量,因此本文选择使用 Argo 数据进行研究。本文采用 TEOS-10 与 EOS-80 两种不同的压强深度转换模型构建声速剖面,使用常梯度声线跟踪理论对海底应答器进行定位,并分析了使用不同模型构建的声速剖面对于定位的影响。

1 水下声学定位模型

1.1 非差最小二乘定位模型

水下基准点的定位主要采用距离交会进行定位,本文采用非零距离交会对后续研究进行分析。如图 1 所示,海面的测量船通过其搭载的 GNSS 接收机实时地获取载体的位置,根据测量船的姿态信息和 GNSS 天线相位中心与船底换能器的坐标转换关系来计算船底换能器各历元的坐标,声信号在船底换能器和海底应答器之间的往返时间延迟为 $2t_r$,则单向传播时间为 t_r 。在声速剖面信息已知时,通过声线跟踪计算船底换能器和海底应答器之间的几何距离(ρ_r),然后根据距离交会来计算海底应答器的坐标。

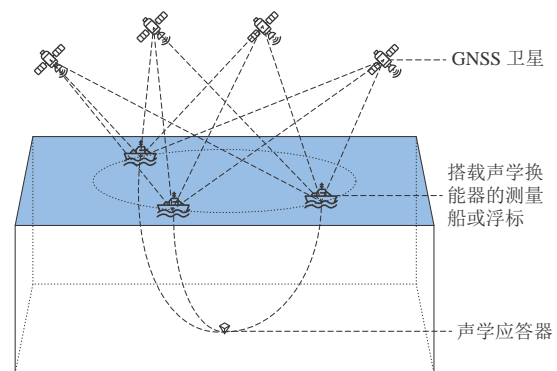


图 1 GNSS-A 水下定位示意

Fig. 1 A schematic diagram of GNSS-A underwater positioning

水下非差声学定位模型(吴永亭, 2013):

$$\rho_i = f(X_i, X_0) + \delta d_i + \delta p_i + \delta c_i + \varepsilon_i, \quad (1)$$

式中: X_i 为船底换能器坐标; X_0 为水下应答器坐标; $f(X_i, X_0)$ 为船底换能器坐标与水下应答器坐标之间的真实几何距离; δd_i 为时间延迟相关的系统误差; δp_i 为位置参数校准相关的系统误差; δc_i 为声速相关的系统误差; ε_i 为测量偶然误差。

将方程(1)线性化可得

$$\rho_i - f(X_i, X_0^0) = a_i dX_0 + \delta d_i + \delta p_i + \delta c_i + \varepsilon_i + b_i \varepsilon_{X_i}, \quad (2)$$

$$\mathbf{L} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{V}, \quad (3)$$

式中: X_0^0 、 dX_0 分别为应答器坐标的近似值和坐标改正值; a_i 、 b_i 分别为 $f(X_i, X_0^0)$ 对应答器坐标 X_0 和换能器坐标 X_i 的一阶偏导数; ε_{X_i} 为与换能器位置相关的随机误差; \mathbf{L} 为常数项,

$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \rho_1 - f(X_1, X_0^0) \\ \rho_2 - f(X_2, X_0^0) \\ \vdots \\ \rho_n - f(X_n, X_0^0) \end{bmatrix}$; \mathbf{A} 为观测方程的设计矩阵; \mathbf{X} 为坐标改正项, $\mathbf{X} = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z]$; \mathbf{V} 为观测残差项。

在忽略各类系统误差的情况下, 非差最小二乘解为:

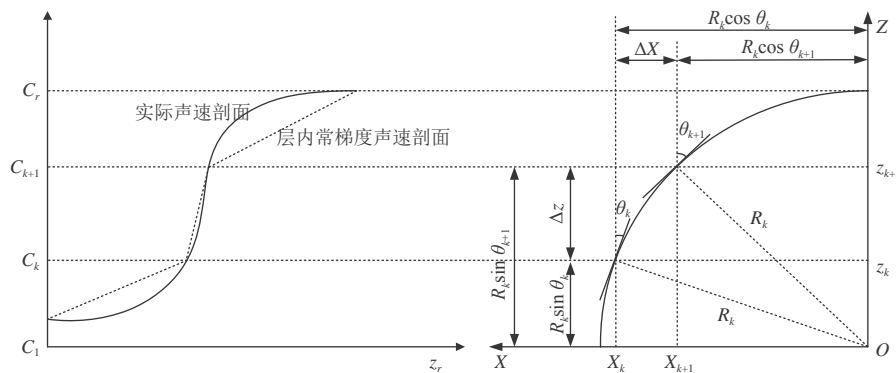
$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{L}. \quad (4)$$

非差最小二乘定位模型忽略了各类系统误差的影响, 但在实际测量工作中必须对各类系统误差进行控制。只有当换能器与应答器之间的直线距离与 ρ_i 相等时, 才能保证水下定位的精度。但由于海洋环境的复杂性, 海水并非均匀的传播介质, 海水中的声速存在时间和空间上的变化, 除了应该尽可能地用实测声速剖面来进行定位, 还应该对声线的传播路径进行跟踪, 尽可能地削弱声速变化所引起的定位误差。

1.2 常梯度声线跟踪模型

声线跟踪模型大多只考虑声速沿垂直方向的变化, 其基本思想是将海水沿垂直方向分为若干个水层, 获取各个水层的声速信息, 分别对各个水层的声线进行跟踪, 从而得出整个声速剖面的近似传播路径(陆秀平等, 2012)。常梯度声线跟踪法是目前精度最高的声线跟踪方法, 本文采用此方法开展研究。

常梯度声线跟踪法是将整个声速剖面划分为若干层, 每一层的声速变化梯度为一常数, 用逐层累加的方法计算声线的传播时间以及传播路径(辛明真等, 2020), 其原理示意图如图2所示。



注: 图片改绘自辛明真等(2020)。

图2 常梯度声线跟踪法原理示意图

Fig. 2 The plots of ray tracing with constant gradient

水下第 k 层的深度区间为 (z_k, z_{k+1}) ,第 k 层上、下表面的声速分别为 c_k 和 c_{k+1} ,第 k 层的声线入射角为 θ_k ,则第 k 层的声速梯度(g_k)为:

$$g_k = \frac{c_{k+1} - c_k}{z_{k+1} - z_k} \quad (5)$$

根据声学理论,声线在常梯度的介质内沿圆弧传播,圆弧半径(R_k)计算式为:

$$R_k = \frac{1}{|p g_k|} \quad (6)$$

式中 p 为 Snell 常数, $p = \frac{\sin \theta_k}{c_k}$ 。

根据 Snell 定律和常梯度声线跟踪理论,声线在第 k 层传播的水平距离 Δy_k 、垂直方向的传播距离 Δz_k 、传播时间 Δt_k 计算式分别为:

$$\begin{cases} \Delta y_k = R_k (\cos \theta_{k+1} - \cos \theta_k) \\ \Delta z_k = R_k (\sin \theta_{k+1} - \sin \theta_k) \\ \Delta t_k = \frac{1}{g_k} \ln \frac{\tan\left(\frac{\theta_{k+1}}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\theta_k}{2}\right)} \end{cases} \quad (7)$$

声信号的总水平位移 Y 、总垂直位移 Z 、经声线跟踪改正后的几何距离 ρ 计算式分别为:

$$\begin{cases} Y = \sum_{k=1}^n \Delta y_k \\ Z = \sum_{k=1}^n \Delta z_k \\ \rho = \sqrt{Y^2 + Z^2} \end{cases} \quad (8)$$

将 ρ 带入式(1),构建非差观测方程,再根据式(4)计算坐标改正数,通过迭代计算来求解水下应答器坐标。

2 海水热力学方程构建声速剖面

声速剖面主要由声速信息和深度信息组成。无论是声速剖面的直接测量还是间接反演,都需要将测量点的压强数据转换为深度数据。鉴于我国建立水下大地基准网的需求,本研究使用覆盖面积广、观测频率高的 Argo 浮标测得的 CTD 数据来构建声速剖面。

使用 CTD 数据构建声速剖面时,需要利用声速经验公式将温度、盐度、压力数据转换为声速数据。目前,常用的声速经验公式包括 Dell Grosso 公式(Grosso, 2005)、Chen Millero 公式(Meinen et al, 1997)、Jack R. Lovett 公式(Lovett, 1998)、Kenneth V. Mackenzie 公式(Mackenzie, 1981)等。由于本文主要研究声速剖面的深度与压强的转换关系,因此不再对比各个声速经验公式,而直接选用 Jack R. Lovett 声速经验公式。

Jack R. Lovett 声速经验公式为:

$$\begin{cases} C = C_3 + C_t + C_S + C_P + C_{tSP} \\ C_3 = 1402.394 \\ C_t = 5.01132t - 5.513036 \times 10^{-2}t^2 + 2.221008 \times 10^{-4}t^3 \\ C_S = 1.332947S \\ C_P = 1.605336 \times 10^{-2}P + 2.12448 \times 10^{-7}P^2 \\ C_{tSP} = -1.266383 \times 10^{-2}tS + 9.543664 \times 10^{-5}t^2S \\ \quad - 1.052396 \times 10^{-8}tP^2 + 2.183988 \times 10^{-13}tP^3 \\ \quad - 2.253828 \times 10^{-13}SP^3 + 2.062107 \times 10^{-8}tS^2P \end{cases} \quad (9)$$

式中: t 为温度($^{\circ}\text{C}$); S 为盐度($\times 10^{-6}$); P 为压强(dbar)。

目前常用的海水热力学方程包括 1980 年认可的国际海水状态方程 EOS-80(Fofonoff et al, 1983) 和 2009 年由联合国教科文组织政府间海洋学委员会(UNESCO-IOC)第 25 次大会决议通过的最新版本国际海水热力学方程 TEOS-10(Millero, 2010)。与 EOS-80 相比, TEOS-10 的显著优势是其引入了 Gibbs 函数, 并第一次系统地考虑了海水成分的空间变化。此种变化对开放大洋中水平密度梯度具有重要影响, 不可忽略。本文基于 EOS-80 传统方法和 TEOS-10 静压近似方法来构建声速剖面, 并使用不同方法构建的声速剖面进行定位分析。

2.1 EOS-80 压强深度转换

1983 年, Fofonoff 等(1983)根据 EOS-80 海水状态方程提出了一种新的压强深度(Z)的转换公式, 该公式通过静力学方程求解:

$$Z = Z_s(P, \phi) + \frac{\Delta D}{9.8}, \quad (10)$$

式中: Z 为深度; P 为压强; ϕ 为纬度; $\frac{\Delta D}{9.8}$ 为与重力位有关的项; $Z_s(P, \phi)$ 为“标准海洋”(温度 $t = 0^\circ\text{C}$, 盐度 $S=35$) 中的深度, $Z_s(P, \phi) = \frac{9.7266 \times 10^2 P - 2.512 \times 10^{-1} P^2 + 2.28 \times 10^{-4} P^2 - 1.8 \times 10^{-7} P^4}{9.7803(1 + 5.3 \times 10^{-3} \sin^2 \phi) + 1.1 \times 10^{-4} P}$ 。

令 $\delta f_i = \frac{\Delta D}{9.8}$ 、 $f(P, \phi) = Z_s(P, \phi)$, 则式(10)可以改写为:

$$Z = f(P, \phi) + \delta f_i(Z). \quad (11)$$

Leroy 在 1997 年对 Fofonoff 等(1983)所提出的压强深度转换公式作出了改进, 将改正数 $\delta f_i(Z)$ 定义为与适用海域相关的随压强 P 变化的函数 $\delta f_i(P)$ (Leroy, 1997), δf_i 的选取与地理位置有关, 其表达式如表 1 所示。

表 1 Leroy 压强深度转换公式适用海域及 $\delta f_i(P)$ 表达式

Table 1 The applicative marine areas of the Leroy's pressure-depth conversion formula and expressions for $\delta f_i(P)$

序号	适用区域	纬度	$\delta f_i(P)$ 表达式	精度/m
0	中低纬度普通海域	60°N~40°S	$P/(P+1) + 5.7 \times 10^{-2} P$	±0.8
1	大西洋东北部海域	30°~35°N	$P/(P+2) + 3 \times 10^{-2} P$	±0.3
2	环极地大西洋海域	视情况而定	$4 \times 10^{-2} P - 2 \times 10^{-4} P^2$	±0.1
3	地中海		$-7 \times 10^{-2} P + 2 \times 10^{-3} P^2$	±0.2
4	红海			±0.2
5	北冰洋			±0.1
6	日本海		$6 \times 10^{-2} P$	±0.1
7	苏禄海	8°N	$0.9P/(P+1) + 0.17P + 7 \times 10^{-4} P^2$	±0.2
8	哈马黑拉海域	0°	$0.8P/(P+0.5) + 0.125P$	±0.1
9	苏拉威西海域	4°N	$1.2P/(P+1) + 6.7 \times 10^{-2} P + 2.2 \times 10^{-4} P^2$	±0.4
10	黑海	43°N	1.1P	±0.1
11	波罗的海	60°N	1.8P	±0.1

注: 空白表示无数据。

2.2 TEOS-10 深度压强转换

基于 EOS-80 海水状态方程构建的压强深度转换模型存在以下问题: ①未将重力加速度沿垂直方向的变化考虑在内; ②未考虑整个剖面温度、盐度的分布情况对于压强深度转换的影响。估算精度有待提高。而 TEOS-10 模型则将上述影响压强深度转换的参数加以考虑。假设 CTD 仪每次记录

间隔内海水密度为恒梯度变化,则每一水层的深度变化量为:

$$\Delta h_i = \int_{P_i}^{P_{i+1}} \frac{1}{\rho_0(P)g(P)} dP, \quad (12)$$

式中将指定水层的密度 ρ_0 、重力加速度 g 视为压强 P 的函数,其中密度 ρ_0 及其参数的表达式为:

$$\begin{cases} \rho_0(P) = [\rho(S_{A,i+1}, t_{i+1}, P_{i+1}) - \rho(S_{A,i}, t_i, P_i)] \frac{(P - P_i)}{(P_{i+1} - P_i)} \\ \rho(S_A, t, P) = \frac{1}{gibbs(S_A, t, P)} \\ gibbs(S_A, t, P) = g_w(t, P) + g_s(S_A, t, P) \end{cases}, \quad (13)$$

式中: ρ 为上下水层分界处的密度; $gibbs(S_A, t, P)$ 为海水的 $gibbs$ 函数(Feistel, 2003); g_w 为 $gibbs$ 函数的纯水部分; g_s 为 $gibbs$ 函数的盐水部分,其表达式为:

$$\begin{cases} g_w(t, P) = g_u \sum_{j=0}^7 \sum_{k=0}^6 g_{jk} y^j z^k \\ g_s(S_A, t, P) = g_u \sum_{j,k} \left\{ g_{1,k} x^2 \ln x + \sum_{i>1} g_{ijk} x^i \right\} y^j z^k \end{cases}, \quad (14)$$

式中参数可以通过查海水的 $gibbs$ 系数表(Feistel, 2008)得到, S_A 由函数 $S_A(S_P, P, long, lat)$ 获得:

$$S_A = \frac{35.16504}{35} S_P (1 + R_\delta), \quad (15)$$

式中: S_P 为实际盐度($g \cdot kg^{-1}$); R_δ 为全局绝对盐度异常率,可使用GSW库(McDougall et al, 2011)中的数据集进行内插得到。与纬度 ϕ 和压强 P 有关的重力加速度 g 的函数表达式为:

$$g \approx 9.780327 (1 + 5.2792 \times 10^{-3} \sin^2 \phi + 2.32 \times 10^{-5} \sin^4 \phi) (1 + 2.22 \times 10^{-7} P). \quad (16)$$

2.3 声速剖面比较分析

选取分布在全球范围内的10个Argo浮标所测得的CTD数据构建声速剖面,剖面观测位置分布如图3所示、坐标及基本信息如表2所示。

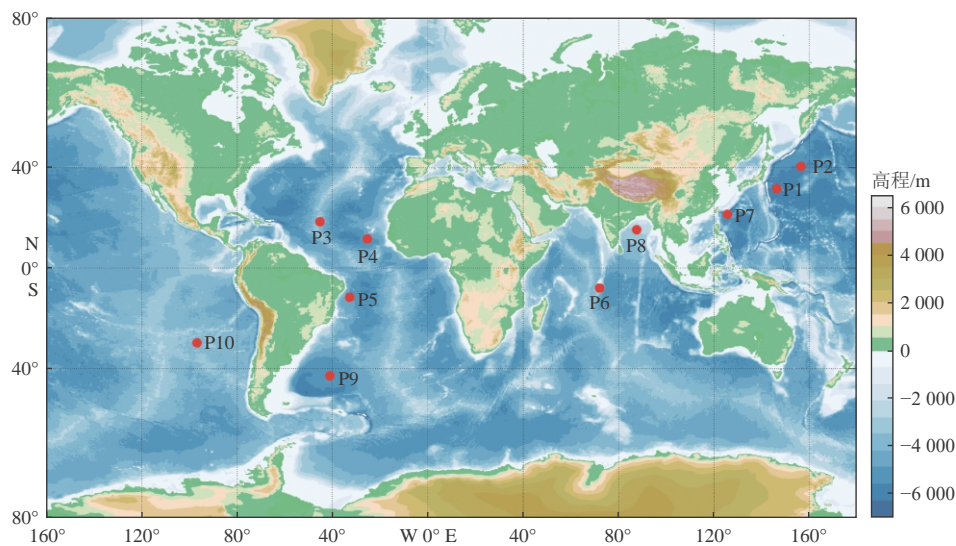


图3 Argo剖面观测位置分布

Fig. 3 Distribution of Argo monitoring stations

表 2 Argo 剖面观测位置信息
Table 2 Information of Argo monitoring stations

剖面观测位置	数据来源	经度	纬度	观测日期	设备型号
P1	中国 Argo 实时资料中心	146°15'25"E	32°15'25"N	2023-06-04	PROVOR_CTS5
P2	JMA	156°25'41"E	40°28'34"N	2022-11-13	ARVOR
P3	AOML	45°10'59"W	19°18'00"N	2023-08-17	S2A
P4	CORIOLIS	25°18'11"W	12°16'16"N	2023-08-20	PROVOR_V_JUMBO
P5	AOML	32°46'01"W	12°16'30"S	2023-08-21	S2A
P6	AOML	71°55'19"E	8°19'55"S	2023-08-17	NAVIS_A
P7	JMA	125°35'31"E	22°16'59"N	2023-08-27	ARVOR
P8	CSIO	87°33'54"E	16°01'23"N	2023-08-25	PROVOR
P9	CSIO	41°05'20"W	42°27'50"S	2022-11-12	PROVOR
P10	CSIO	96°46'41"W	30°24'54"S	2015-01-08	PROVOR

由 Argo 浮标获得的 CTD 数据按 EOS-80 和 TEOS-10 模型构建的声速剖面与两种模型构建的声速剖面的声速差分布如图 4 所示。分析图 4 和图 5 可知, 由于使用 EOS-80 声速剖面与 TEOS-10 声速剖面在声速的计算上使用了相同的声速经验公式, 只在压强深度的转换上存在区别, 因此两种模型构建的声速剖面较为接近, 整体上难以看出声速之间的偏差。

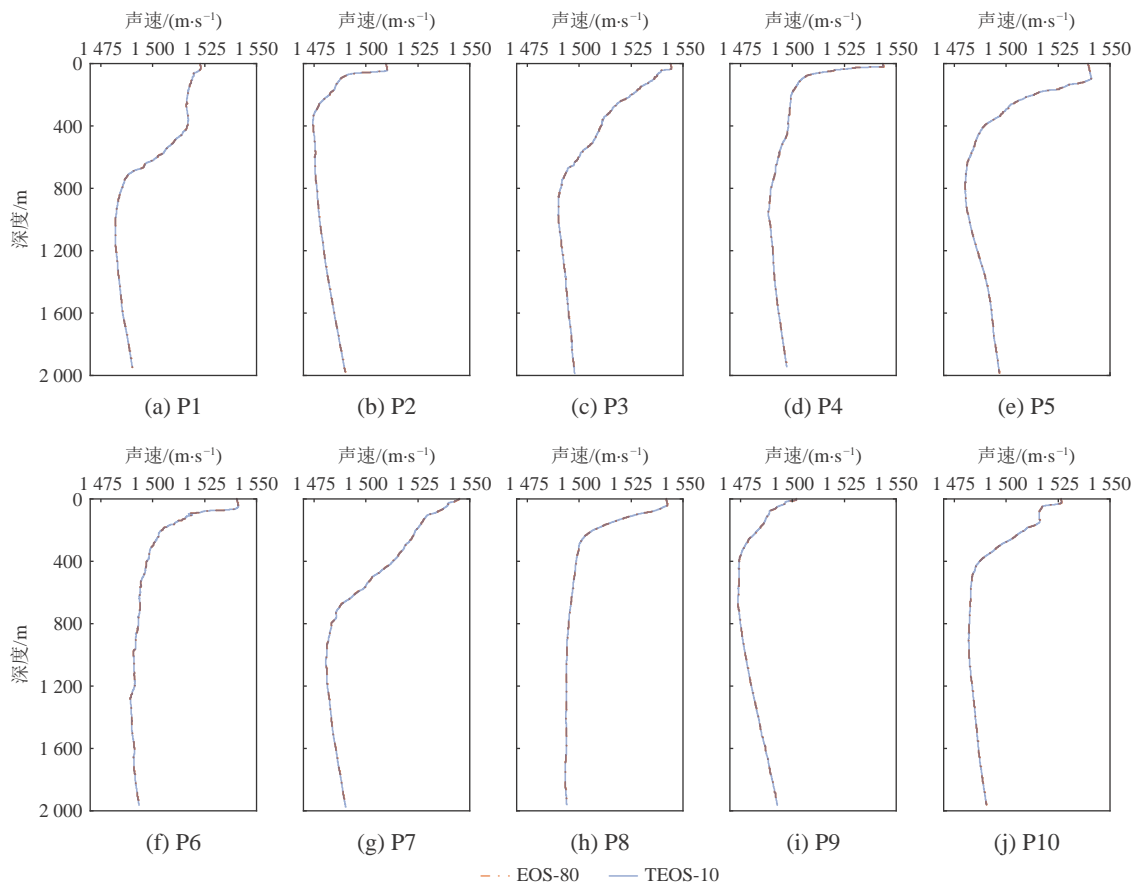


图 4 各观测点位声速剖面
Fig. 4 Sound velocity profiles at each monitoring point

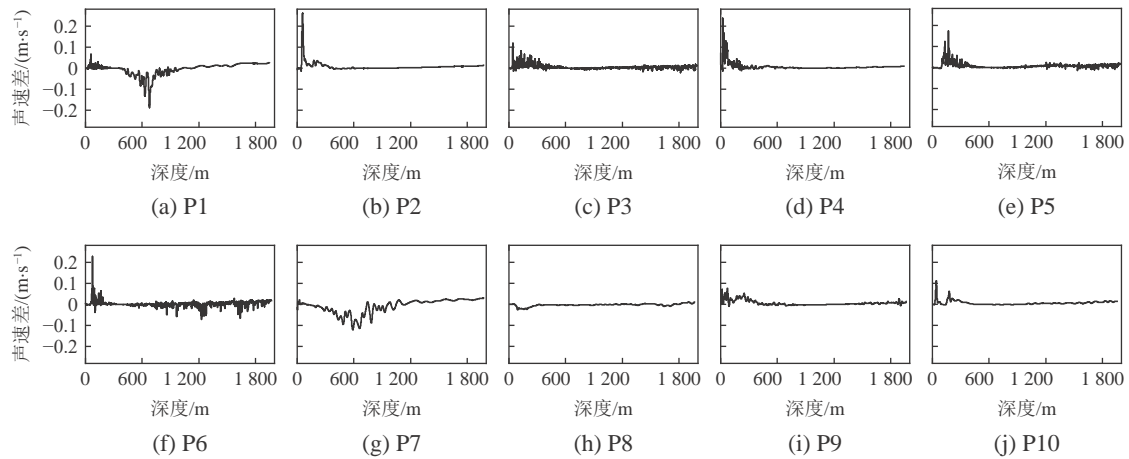


图 5 不同模型构建的声速剖面之间的声速差

Fig. 5 Sound velocity differences between sound velocity profiles constructed by different models

由表 3 中各观测点位声速剖面之间的声速差则可以看出, 使用 EOS-80 模型构建的声速剖面与使用 TEOS-10 模型构建的声速剖面之间的声速存在明显差异, 最大值达到 0.26 m/s, 这对于高精度水下定位来说不可忽视。

表 3 使用不同方法构建的声速剖面之间的声速差

Table 3 Sound velocity differences between sound velocity profiles constructed using different methods

剖面观测位置	最大值/(m·s ⁻¹)	平均值/(m·s ⁻¹)	剖面观测位置	最大值/(m·s ⁻¹)	平均值/(m·s ⁻¹)
P1	0.186 8	0.017 9	P6	0.248 7	0.008 7
P2	0.261 4	0.008 1	P7	0.121 6	0.025 2
P3	0.124 4	0.007 2	P8	0.025 9	0.004 3
P4	0.247 6	0.007 0	P9	0.076 8	0.007 8
P5	0.179 2	0.008 8	P10	0.112 1	0.007 1

3 实验与分析

分别使用 EOS-80 和 TEOS-10 两种模型构建的声速剖面进行水下定位, 以分析不同压强深度转换关系对于水下定位的影响。本文采用圆走航与十字走航结合的航迹进行模拟实验, 圆走航观测路径近似水平对称, 有利于削弱归心参数误差、声速误差、声线弯曲等系统误差的影响(刘经南等, 2019), 但圆走航垂向的几何结构较弱, 易受垂向分布的声速系统误差影响, 在圆走航的基础上增加十字观测可以增强圆走航的几何结构(马越原等, 2022), 圆走航与十字走航结合航迹如图 6 所示。常梯度声线跟踪水系定位的流程图如图 7 所示。

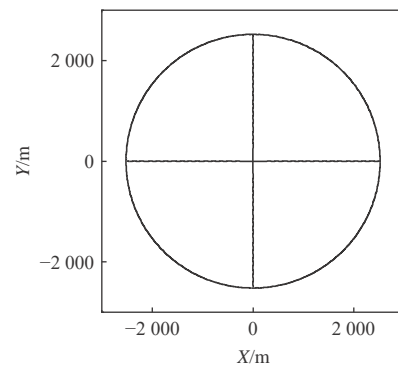


图 6 圆走航与十字走航结合航迹

Fig. 6 Combination of circular walk and cross-shaped measuring tracks

分别使用 1 000 m 水深和 1 800 m 水深模拟水下定位, 设置水下应答器坐标为(0, 0, 1 000)和(0, 0, 1 800), 圆走航的半径为应答器深度的 1.4 倍, 为了模拟真实的测量环境, 对每个观测历元的 X 、 Y 方向分别添加了振幅为 2 m 的正弦波动。对 Z 方向添加了振幅为 0.5 m 的正弦波动, 时间延迟根据船底换能器坐标、水下应答器坐标和声速剖面通过常梯度声线跟踪计算得到, 时间延迟观测量添加了振幅为 8×10^{-5} s、周期为 15 min 的内波短周期误差, 振幅为 2×10^{-4} s、周期为 12 h 的内波长周期误差, 以及振幅为 3.3×10^{-5} s 的随机误差。测量船航速为 2.5 m/s, 两次时间延迟观测量值的测量间隔为 10 s。

本文分别对 1 000 m 水深和 1 800 m 水深进行了 30 次测量, 1 000 m 水深的每一组观测值包含 556 个历元, 其中圆走航 352 个历元, 十字航迹 204 个历元; 1 800 m 水深的每一组观测值包含 998 个历元, 其中圆走航 634 个历元, 十字航迹 364 个历元。

对表 4 和表 5 分析可以看出, 使用不同的压强深度转换模型建立的声速剖面对于非差最小二乘

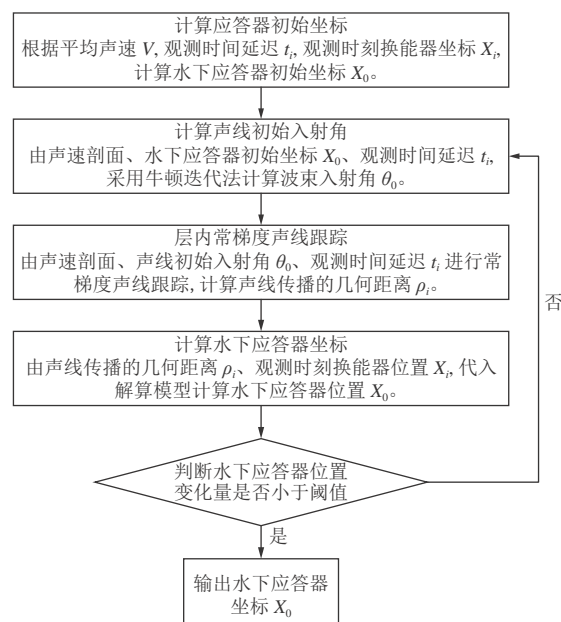


图 7 非差最小二乘常梯度声线跟踪定位流程

Fig. 7 Flowchart of ray tracking positioning using non-difference least squares constant-gradient

表 4 1 000 m 水深圆走航与十字航迹结合定位结果

Table 4 Positioning results combining a 1 000 m deep circular walk and cross-shaped measuring tracks

剖面观测位置	声速剖面构建模型	X/m	Y/m	Z/m	X 向中误差/m	Y 向中误差/m	Z 向中误差/m
P1	EOS-80	0.000	0.003	999.974	0.019	0.049	0.329
	TEOS-10	0.000	0.003	999.999	0.019	0.049	0.329
P2	EOS-80	-0.001	0.002	1 000.013	0.020	0.050	0.333
	TEOS-10	-0.001	0.002	1 000.000	0.020	0.050	0.333
P3	EOS-80	-0.002	0.002	1 000.008	0.020	0.051	0.331
	TEOS-10	-0.002	0.002	999.999	0.020	0.051	0.331
P4	EOS-80	-0.002	0.003	1 000.011	0.020	0.050	0.334
	TEOS-10	-0.002	0.003	999.999	0.020	0.050	0.334
P5	EOS-80	-0.001	0.001	1 000.010	0.021	0.050	0.331
	TEOS-10	-0.001	0.001	999.999	0.021	0.050	0.331
P6	EOS-80	-0.001	0.002	1 000.003	0.020	0.051	0.335
	TEOS-10	-0.001	0.002	1 000.001	0.020	0.051	0.335
P7	EOS-80	-0.001	0.003	999.957	0.021	0.052	0.328
	TEOS-10	-0.001	0.003	999.998	0.021	0.052	0.328
P8	EOS-80	-0.001	0.001	999.992	0.020	0.050	0.335
	TEOS-10	-0.001	0.001	999.999	0.020	0.050	0.335
P9	EOS-80	-0.001	0.003	1 000.012	0.019	0.049	0.332
	TEOS-10	-0.001	0.003	999.999	0.019	0.049	0.332
P10	EOS-80	-0.002	0.003	1 000.008	0.019	0.050	0.331
	TEOS-10	-0.002	0.003	999.999	0.019	0.050	0.331

定位来说,在水平方向上没有差别,但在本文选取的10个点位1 000 m水深定位和1 800 m水深定位的两组数据中,垂直方向上会存在最大为4.1 cm的互差。在高精度的水下定位中,这种系统性的互差不可忽视。在实际测量中,EOS-80压强深度转换模型并没有考虑海水状态的时空分布不均,也没有细致考虑影响压强深度转换的多种因素,而TEOS-10深度压强转换模型将不同层的海水盐度、密度、温度的状态都考虑在内,相对于EOS-80深度压强转换模型所建立的声速剖面,TEOS-10深度压强转换模型构建的声速剖面更加适用于水下目标的高精度定位。

表5 1 800 m水深圆走航与十字航迹结合定位结果

Table 5 Positioning results combining a 1 800 m deep circular walk and cross-shaped measuring tracks

剖面观测位置	声速剖面构建模型	X/m	Y/m	Z/m	X向中误差/m	Y向中误差/m	Z向中误差/m
P1	EOS-80	-0.002	0.000	1 799.984	0.032	0.015	0.194
	TEOS-10	-0.002	0.000	1 799.998	0.032	0.015	0.194
P2	EOS-80	-0.002	0.000	1 800.016	0.032	0.015	0.195
	TEOS-10	-0.002	0.000	1 799.998	0.032	0.015	0.195
P3	EOS-80	-0.002	-0.001	1 800.012	0.033	0.015	0.195
	TEOS-10	-0.002	-0.001	1 799.998	0.033	0.015	0.195
P4	EOS-80	-0.002	0.000	1 800.013	0.032	0.015	0.195
	TEOS-10	-0.002	0.000	1 799.997	0.032	0.015	0.195
P5	EOS-80	-0.003	0.000	1 800.016	0.032	0.015	0.196
	TEOS-10	-0.003	0.000	1 799.997	0.032	0.015	0.196
P6	EOS-80	-0.002	-0.001	1 800.001	0.032	0.015	0.194
	TEOS-10	-0.002	-0.001	1 799.998	0.032	0.015	0.194
P7	EOS-80	-0.002	0.000	1 799.971	0.032	0.015	0.194
	TEOS-10	-0.002	0.000	1 799.998	0.032	0.015	0.194
P8	EOS-80	-0.002	0.000	1 799.989	0.032	0.015	0.194
	TEOS-10	-0.002	0.000	1 799.997	0.032	0.015	0.194
P9	EOS-80	-0.002	0.000	1 800.013	0.032	0.014	0.196
	TEOS-10	-0.002	0.000	1 799.998	0.032	0.014	0.196
P10	EOS-80	-0.002	0.000	1 800.013	0.032	0.014	0.195
	TEOS-10	-0.002	0.000	1 799.997	0.032	0.014	0.195

4 结 论

水下声学定位需要高精度的声速剖面,针对声速剖面中深度信息的转换问题,本文首先对基于EOS-80海水状态方程和TEOS-10海水状态方程的压强深度转换模型进行了分析,然后分别对两种压强深度转换模型构建的声速剖面进行水下声学定位模拟实验。主要结论如下。

1)基于EOS-80海水状态方程的压强深度转换模型中深度只与压强与纬度有关,虽然考虑到不同海域的海水状态不同,但其改正数适用的海域范围较大,对于时空分布不均的海水状态,其转换并不严密。基于TEOS-10海水状态方程的压强深度转换模型中,深度为温度、盐度、压强、纬度的函数,TEOS-10压强深度转换模型考虑了影响压强深度转换的多种因素,是更为严密的数学模型。

2)在模拟水深1 000 m和1 800 m的圆走航与十字航迹结合的水下声学定位中,采用TEOS-10压强深度转换模型与传统的EOS-80压强深度转换模型相比,定位结果在水平方向上没有明显差别,在垂直方向存在最大为4.1 cm的系统性互差。

本文研究表明,使用不同的压强深度转换模型建立的声速剖面之间的声速差在高精度水下声

学定位中不可忽视。在实际的高精度水下声学定位中应使用更为严密的 TEOS-10 模型构建声速剖面。

参考文献 (References):

- 韩云峰, 郑翠娥, 孙大军, 2017. 长基线声学定位系统跟踪解算优化方法[J]. 声学学报, 42(1): 14-20. HAN Y F, ZHENG C E, SUN D J, 2017. An optimized estimation method in long baseline acoustic positioning systems[J]. Acta Acustica, 42(1): 14-20.
- 黄威, 高凡, 王君婷, 等, 2023. 水下声速场构建方法综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 44(11): 2005-2017. HUANG W, GAO F, WANG J T, et al, 2023. A survey on underwater sound speed profile construction[J]. Journal of Harbin Engineering University, 44(11): 2005-2017.
- 李佳璐, 曾安敏, 龙瑛芝, 2022. 水下声速经验模型及其比较分析[C]//第十三届中国卫星导航年会论文集——S09PNT体系与PNT新技术. LI J L, ZENG A M, LONG Y Z, 2022. The empirical model of underwater sound speed and its comparative analysis[C]//The 13th China Satellite Navigation Annual Conference: S09PNT system and PNT new technique.
- 刘经南, 陈冠旭, 赵建虎, 等, 2019. 海洋时空基准网的进展与趋势[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 44(1): 17-37. LIU J N, CHEN G X, ZHAO J H, et al, 2019. Development and trends of marine space-time frame network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 44(1): 17-37.
- 陆秀平, 边少锋, 黄谟涛, 等, 2012. 常梯度声线跟踪中平均声速的改进算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 37(5): 590-593. LU X P, BIAN S F, HUANG M T, et al, 2012. An improved method for calculating average sound speed in constant gradient sound ray tracing technology[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 37(5): 590-593.
- 马越原, 杨元喜, 曾安敏, 2022. GNSS-A直线测量模式及航迹组合优化分析[J]. 地球物理学报, 65(10): 3797-3808. MA Y Y, YANG Y X, ZENG A M, 2022. GNSS-A straight-line survey pattern and trajectory combination optimization analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics, 65(10): 3797-3808.
- 孙大军, 郑翠娥, 钱洪宝, 等, 2012. 水声定位系统在海洋工程中的应用[J]. 声学技术, 31(2): 125-132. SUN D J, ZHENG C E, QIAN H B, et al, 2012. The application of underwater acoustic positioning systems in ocean engineering[J]. Technical Acoustics, 31(2): 125-132.
- 王君婷, 2023. 海洋精密声学数据处理理论与方法研究[D]. 济南: 山东大学. WANG J T, 2023. Research on theory and method of marine precise acoustic data processing[D]. Jinan: Shandong University.
- 王旭, 刘宗伟, 甘忠良, 等, 2024. 基于平均声速测量的声速剖面实时重构方法[J]. 海洋科学进展, 42(3): 602-610. WANG X, LIU Z W, GAN Z L, et al, 2024. A real-time reconstruction method of sound velocity profiles based on mean sound velocity measurement[J]. Advances in Marine Science, 42(3): 602-610.
- 吴永亭, 2013. LBL精密定位理论方法研究及软件系统研制[D]. 武汉: 武汉大学. WU Y T, 2013. Study on theory and method of precise LBL positioning and development of positioning software system[D]. Wuhan: Wuhan University.
- 辛明真, 阳凡林, 薛树强, 等, 2020. 顾及波束入射角的常梯度声线跟踪水下定位算法[J]. 测绘学报, 49(12): 1535-1542. XIN M Z, YANG F L, XUE S Q, et al, 2020. A constant gradient sound ray tracing underwater positioning algorithm considering incident beam angle[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 49(12): 1535-1542.
- 杨元喜, 2016. 综合PNT体系及其关键技术[J]. 测绘学报, 45(5): 505-510. YANG Y X, 2023. 测绘学报[J]. Scientia Sinica (Terrae), 45(5): 505-510.
- 苑黎明, 张宝强, 姜浩, 等, 2023. 基于XGBoost的三维温盐反演模型声速仿真应用[J]. 海洋科学进展, 41(3): 520-539. YUAN L M, ZHANG B Q, JIANG H, et al, 2023. Application of 3D thermohaline inversion model based on XGBoost for sound velocity simulation[J]. Advances in Marine Science, 41(3): 520-539.
- 中国Argo实时资料中心, 2021. 全球海洋Argo网格化资料(GDCSM-Argo)用户手册(第三版)[EB/OL]. [2024-09-07]. https://www.argo.org.cn/uploadfile/2021/1110/GDCSM_Argo_readme_CN.pdf. China Argo Real-time Data Center, 2021. User manual (3rd version) of GDCSM Argo gridded data set[EB/OL]. [2024-09-07]. https://www.argo.org.cn/uploadfile/2021/1110/GDCSM_Argo_readme_CN.pdf.

- FEISTEL R, 2003. A new extended Gibbs thermodynamic potential of seawater[J]. *Progress in Oceanography*, 58(1): 43-114.
- FEISTEL R, 2008. A Gibbs function for seawater thermodynamics for -6 to 80 °C and salinity up to 120 g·kg⁻¹[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 55(12): 1639-1671.
- FOFONOFF N P, MILLARD R C, 1983. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater[J]. *UNESCO technical papers in marine science*, 44(1): 1-53.
- FUJITA M, ISHIKAWA T, MOCHIZUKI M, et al, 2006. GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application[J]. *Earth, Planets and Space*, 58(3): 265-275.
- GROSSO D, 2005. New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations)[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 56(4): 1084-1091.
- LEROY C C, 1997. Depth-pressure relationships in the oceans and seas[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 103(3): 1346-1352.
- LOVETT J R, 1998. Merged seawater sound-speed equations[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 63(6): 1713-1718.
- MACKENZIE K V, 1981. Nine-term equation for sound speed in the oceans[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 70(3): 807-812.
- MCDUGALL T J, Barker P M, 2011. Getting started with TEOS-10 and the Gibbs Seawater (GSW) oceanographic toolbox[J]. *SCOR/IAPSO WG*, 127(1): 1-28.
- MEINEN C S, WATTS D R, 1997. Further evidence that the sound-speed algorithm of Del Grosso is more accurate than that of Chen and Millero[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 102(4): 2058-2062.
- MILLERO F J, 2010. History of the equation of state of seawater[J]. *Oceanography*, 23(3): 18-33.
- PARK J C, KENNEDY R M, 1996. Remote sensing of ocean sound speed profiles by a perceptron neural network[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 21(2): 216-224.
- SAUNDERS P M, 1981. Practical conversion of pressure to depth[J]. *American Meteorological Society*, 11(4): 573-574.
- ZHANG K, LI Y, ZHAO J H, et al, 2016. Underwater navigation based on real-time simultaneous sound speed profile correction[J]. *Marine Geodesy*, 39(1): 98-111.

The Impact of Constructing Sound Velocity Profiles Through Different Pressure-depth Conversion Models on Underwater Positioning

WANG Song, HE Kaifei, JI Shengyue, TANG An, WANG Yue, YAO Mingfei

(College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: High-precision underwater acoustic positioning requires high-precision sound speed profiles. Currently, the depth information in the sound velocity profile, measured by the sound velocity profiler and the temperature salt pressure instrument, is calculated using the pressure depth conversion function. In order to solve the problem of high-precision underwater target positioning requiring high-precision sound velocity profiles, this study investigated the impact of different pressure depth conversion models on underwater target localization. The pressure depth conversion model derived from the EOS-80 seawater state equation is commonly used, but it considers fewer influencing factors. The pressure depth conversion model derived from the TEOS-10 seawater state equation considers factors such as temperature, salinity, and pressure that affect pressure depth conversion, and the model has a more rigorous calculation method compared to the EOS-80 model. This study selected 10 sets of CTD data collected by Argo buoys worldwide, and used the sound velocity profiles constructed by the two pressure depth conversion models mentioned above for underwater target positioning. During the positioning process, constant gradient sound line tracking was used to calculate geometric distance. The results showed that the sound velocity profiles constructed by two pressure depth conversion models produced a maximum difference of 4.1 cm when used for underwater positioning. In high-precision underwater target positioning, a more rigorous TEOS-10 pressure depth conversion model should be used to construct sound velocity profiles.

Keywords: underwater positioning; sound velocity profile; TEOS-10; EOS-80

Received: October 7, 2023 **Online:** July 31, 2024

小道距高分辨率多道地震系统在渤海海峡 地层探测中的应用

祁晓雨

(中国铁路设计集团有限公司, 天津 300251)

摘要: 渤海海峡横亘于山东半岛和辽东半岛之间, 建设一条横跨渤海海峡的跨海通道一直是人们的梦想。为查明渤海海峡拟建桥隧通道第四系沉积层厚度和断裂分布特征, 在收集区域地质资料和前人研究的基础上, 以大能量等离子体震源为发射源, 结合小道距高分辨率地震电缆采集系统, 进行了海域多道地震反射波法探测试验。首先通过海上试验, 选择合适的震源能量和地震记录接收系统参数, 以提高原始地震数据质量。再通过分析噪声特点及多次波发育情况, 制定了一套适合于研究区的多道地震数据处理流程, 最终获得的地震剖面具有较高的信噪比, 能够清晰地反映渤海海峡区域的沉积地层展布和基岩起伏特征, 其理论垂向分辨率优于 1.0 m。本次探测结果为后期渤海海峡跨海通道的设计提供了参考依据。

关键词: 渤海海峡; 跨海通道; 多道地震; 高分辨率

中图分类号: P715; P738

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2024)04-0807-09

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20230908001

引用格式: 祁晓雨, 2024. 小道距高分辨率多道地震系统在渤海海峡地层探测中的应用[J]. 海洋科学进展, 42(4): 807-815. QI X Y, 2024. The application of high resolution multichannel seismic system with small group interval to stratigraphic exploration in Bohai Strait[J]. Advances in Marine Science, 42(4): 807-815.

渤海海峡位于辽东半岛南端老铁山角和山东蓬莱之间, 南北最短距离约 106 km, 平均水深约 25 m, 最大水深超过 80 m(陈义兰等, 2013)。庙岛群岛在渤海海峡内呈 NE 向分布, 岛屿将海峡划分为若干水道(图 1)。这些水道规模不一, 其中北部老铁山水道规模最大。渤海海峡海底地形复杂, 海底近东西向的沟槽与庙岛群岛诸岛屿相间分布。众多岛屿将海峡分隔成一系列东西向排列的峡道, 在潮流侵蚀作用下, 区内多个水道发育, 水道内水较深。此外, 庙岛群岛各岛屿之间也形成潮流冲刷槽, 这些沟槽长度和规模均较小, 深度为 30~60 m。沟槽底部基岩出露, 有的有砾石堆积, 地形较为复杂。渤海海峡是连接渤海和北黄海的海上通道, 却也限制了环渤海两岸的交通和经济往来, 成为横亘在辽东半岛和山东半岛间的海上天堑(侯方辉等, 2016)。因此, 建设一条横跨渤海海峡的跨海通道一直是人们的梦想。而在建设跨海通道前, 必须对渤海海峡及周边的地形地貌特征、基岩埋深及起伏状态、冲刷和淤积情况、断裂分布、特殊性岩土(如软土)以及不良地质现象等方面开展精细研究。

海上地震勘探作为一种常见的海洋地球物理调查方法, 其在海底资源勘探、地壳稳定性评价等方面有着广泛的应用(吴志强等, 2013; 裴彦良, 2022)。在浅海区域的工程勘探中多采用的是浅地层剖面或单道地震勘探技术。浅地层剖面技术在探测浅部地层信息、海底特殊目标调查等海洋地质与工程地质研究方面应用广泛。其中, 便携式参量阵型浅剖最为常见, 具有工作效率高、探测数据质量高等优点; 而电火花型浅剖则具有穿透能力强的特点, 穿透深度可以达到几百米并能保证米级的

收稿日期: 2023-09-08 网络首发日期: 2024-04-19

资助项目: 中国铁路设计集团有限公司科技开发课题(2023A0226406)

作者简介: 祁晓雨(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事工程物探应用方面研究. E-mail: qixiaoyu@crdc.com

(陈靖 编辑)

分辨率(杨国明等, 2021)。虽然海上单道地震操作简便、高效经济、配置灵活,但在浅水区多次波会对单道地震剖面的质量产生较大的影响,难以准确对深部构造进行成像(李军峰等, 2004; 郑江龙等, 2015)。多道地震则可以利用丰富的处理方法对多次波衰减,从而提高勘探深度和剖面信噪比。因此,高分辨率多道地震勘探技术逐渐被引入到浅海工程勘探中。相较于传统的单道地震和浅地层剖面,多道地震勘探技术具有分辨率高、穿透能力强、反射特征显著等优势。这使得它能提供具有更高分辨率和信噪比的地震剖面。传统的多道地震系统通常具有频率低、激发能量高、排列长、道间距大的特点,更适用于在广阔海域探测深部地层构造(史慧杰等, 2015)。

渤海海峡附近岛屿遍布,岛屿之间的海流流速较快,航道内船只往来频繁,且渔业养殖区密集,不利于大道间距、长排列的常规多道地震系统的作业,难以实现地震数据的准确采集。因此,探索适合研究区的高分辨率多道地震探测方法是非常必要的。国产大能量电火花震源具有激发能量大、炮间距小、频率高的特点,与3.125 m道间距的24道高分辨率地震采集系统相结合,能够获取具有更高信噪比和分辨率的地震剖面。本研究利用国产大能量电火花震源和小道距高分辨率地震电缆,在渤海海峡区域开展了沉积地层和断裂构造的探测试验,探索出一套适合近岸浅水区的多道地震探测技术和数据处理流程。

1 海上试验简介

结合前人研究成果(王志才等, 2006; 陆凯等, 2021; 孙元春等, 2021)以及现有的工作设备和区域水文地质环境数据,中国铁路设计集团有限公司于2022年7月在渤海海峡区域开展了3条测线的小道距高分辨率多道地震采集试验(位置见图1)。通过本次采集试验,验证了所选用的仪器设备及参数设置既能满足勘探深度的要求,又能确保探测资料具有较高的信噪比和分辨率。

1.1 试验设备

1.1.1 震源系统

海洋地震勘探中常用的震源主要有水枪、气枪以及电火花震源(裴彦良等, 2007, 2022)。气枪震源穿透深度大、重复性强、结构简单、子波频率低,在深层地震勘探应用较多(张世阳, 2019)。水枪震源具有产生气泡少、频带较宽、可重复性好的优势。电火花震源则具有环保、安全性高、成本低廉的特点,并且所得数据频带宽,可以实现高分辨率地震勘探的目标,在浅层高分辨率勘探中应用较广(严辉等, 2012; 戚宾等, 2020)。本次试验采用国产PPS-5000J型电火花震源,该震源的最大发射能量为5 000 J,具有较高的主频和分辨率。

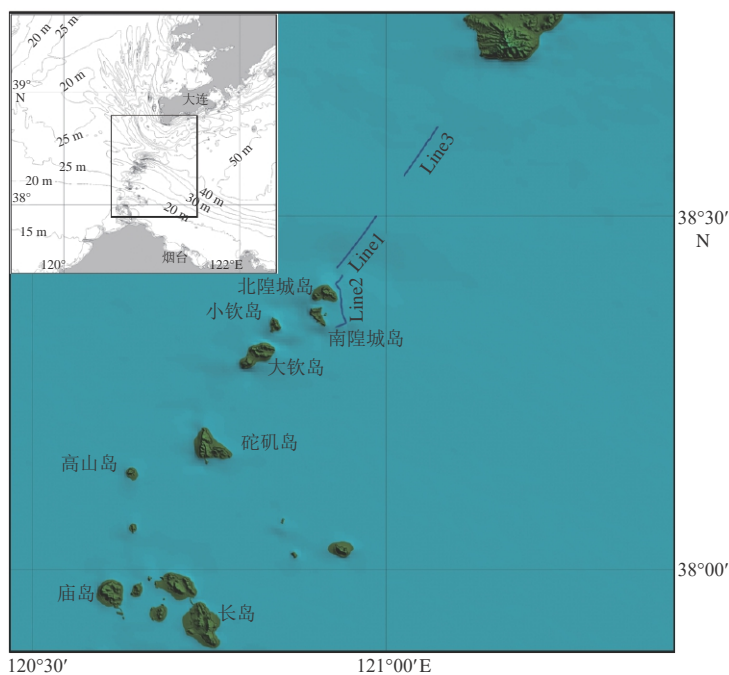


图1 渤海海峡地形及多道地震采集试验测线位置
Fig. 1 Topographic morphology of the Bohai Strait and multi-channel seismic lines

1.1.2 地震数据接收系统

在地震信号接收过程中,选择合适的参数对确保海上地震数据采集质量至关重要,这些参数包括道间距、偏移距和电缆道数等(裴彦良等,2010,2013)。本次试验选用荷兰 GeoResource 公司的 Geo-Sense 接收电缆,该电缆总共有 24 道,每道信号由 3 个检波器组成,道间距为 3.125 m。模数转换由电缆绞车中的 Multi-Trace 24 模块完成,该模块经网线与采集计算机连接,并利用专用软件完成参数设置、质量监控、数据采集、在线处理及数据回放等功能。此外,Multi-Trace 24 模块还可接入单道地震电缆,来自单道电缆的数据作为辅助道存储在多道数据文件中。单道地震数据可以提供现场质量监控,并为多道地震数据处理提供参考依据。图 2 显示了本次探测 GPS、震源和接收系统的位置关系。

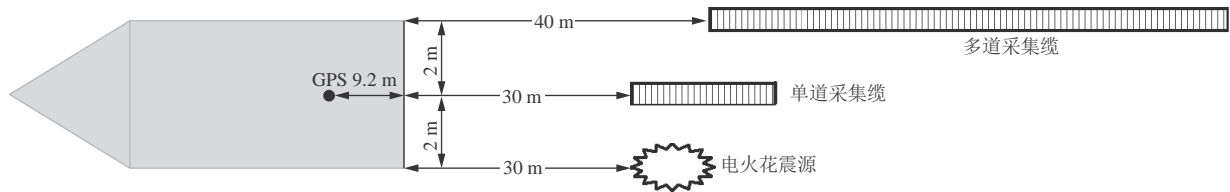


图 2 多道地震采集系统布设示意

Fig. 2 Sketch map of multi-channel seismic acquisition system

1.2 震源能量对比试验

为了确定最佳的震源发射能量,在研究区开展了不同震源能量的探测效果对比试验。试验使用国产 PPS-5000J 型大能量电火花震源,并设定了 1 000、2 000、3 000、4 000 和 5 000 J 五个不同的震源能量值。其他采集参数相同,设置为:电缆道数 24 道、道间距 3.125 m、覆盖次数 6 次、最小偏移距 6.25 m、采样间隔 0.25 ms。

采用不同能量电火花震源试验得到的地震资料,按照相同的流程处理后得到了叠加剖面(图 3)。通过对比分析可知,随着电火花震源能量的增加,深部的有效反射信号逐渐增强。在保证地层高分

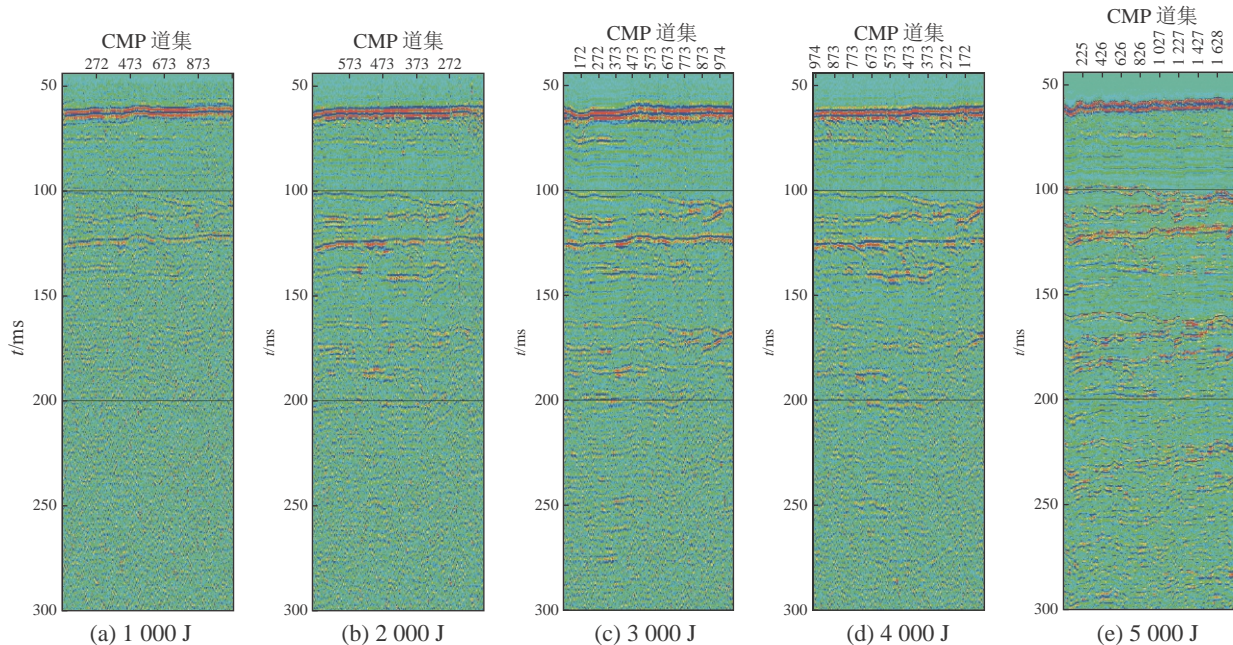


图 3 电火花震源能量对比试验叠加剖面

Fig. 3 Stacked profiles of energy comparison experiment for electric spark source

分辨率的条件下,使用5000 J电火花震源采集地震资料能够有效地穿透地层,深度大于200 m,这更有利于探测深部地层构造和基岩面。

结合采集试验结果,考虑到研究区环境、仪器设备和勘探精度等要求,最终确定的正式勘测时采用的施工参数见表1。

表1 多道地震探测施工参数

Table 1 Multi-channel seismic detection parameters

震源类型	震源能量/J	接收数量/道	道间距/m	炮间距/m	覆盖数量/次	最小偏移距/m	记录时长/ms	采样间隔/ms
电火花	5000	24	3.125	6.25	6	6.25	600	0.125

2 数据处理

多道地震资料处理是地震勘探的重要组成部分,其处理质量直接关系到后续地震资料解释的准确性。通过深入了解研究区域的地质情况,以及对原始资料进行细致分析,结合地震资料的特点和处理难点,制定了本次资料处理的策略。首先,由于外业采集的资料信噪比较低,采用了保真的叠前多域噪声压制技术对噪声进行衰减,同时保护有效信号,从而显著提高资料的信噪比。其次,通过确定性水层多次波压制(Deterministic Water-layer Demultiple, DWD)和曲波(Curvelet)变换组合的方法,以及自适应相减法来压制多阶多次波,以突出有效地层信息。最后,针对电火花震源导致的深部低频信号能量不足的问题,采用径向预测滤波和相干加权加强的方法提高有效信息的反射能量,从而提升资料的成像质量。多道地震数据处理的流程见图4。

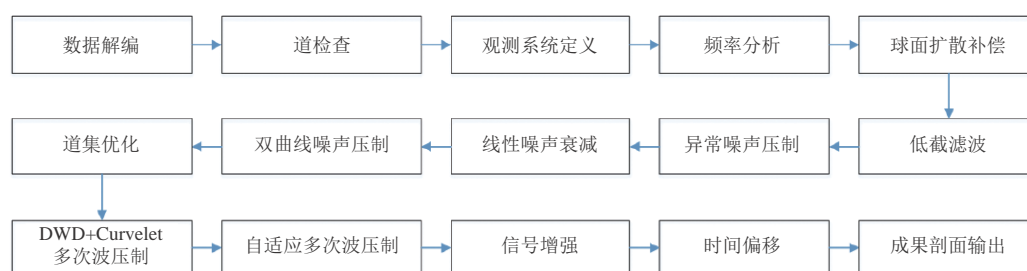


图4 多道地震数据处理流程

Fig. 4 Flow chart of multi-channel seismic data processing

2.1 噪声去除

由于近岸浅水区地震数据采集方式的特殊性,原始数据的质量会受到海浪、洋流、过往船只和不规则海底结构的影响,甚至岛礁都可能是复杂干扰的信号源(吴长江,2009)。本次处理主要从原始单炮、初叠剖面等方面对原始资料的信噪比和干扰波进行全面分析,获得干扰波的分布类型及特征,为后续干扰波的去除提供依据。

2.2 多次波组合压制

由于研究区洋流流速较大,海底表层松散沉积物较少,使得海上地震资料多次波发育的能量更强,对有效波的干扰更为严重。因此,对于多道地震资料的处理而言,将多次波视为噪声并在地震数据的叠前处理阶段进行压制,进而提高地震剖面的质量至关重要(Dragoet et al, 1998; Verschuur, 2010; 陈见伟等, 2011; 宋家文等, 2014; 颜中辉等, 2020; 彭思凯等, 2021)。由于本次地震数据采集采用

了主频较高电火花震源, 导致多次波形态较为发散。同时, 研究区海底崎岖、地形起伏较大, 只靠 DWD 方法难以对多次波进行压制。需要通过道域的自适应相减方法对残留多次波进行处理, 从而彻底压制多次波。基于此, 本次多次波组合压制的策略是: 首先采用 DWD 方法得到多次波模型, 然后通过 Curvet 域相减, 以达到压制多次波的效果。

2.3 信号增强

为了使地震波组特征更清晰、同相轴连续性更好, 能有效地突出有效地层反射, 便于后续的解释工作, 采用径向预测滤波技术和相干加权加强方法对地震信号进行了适当的增强处理。其思路是: 通过径向预测滤波技术提高剖面的信噪比, 然后通过与经过径向滤波的叠加剖面进行相干分析, 计算加权系数, 重新加权叠加后得到信号增强后的剖面。

3 分析

3.1 多道地震处理效果分析

与原始叠加剖面相比, 处理后的叠加地震剖面效果显著提升, 各种干扰和多次波压制较为彻底, 有效反射更突出, 资料的信噪比和分辨率得到了很大的提高, 为后续的主要反射层的连续追踪和对比解释提供了支持(图 5 和图 6)。经处理后的地震剖面从浅层到深层反射信息丰富, 反射同相轴连续性好。有针对性地应用多次波组合压制技术和信号加强技术, 进一步提升了地震剖面的信噪比,

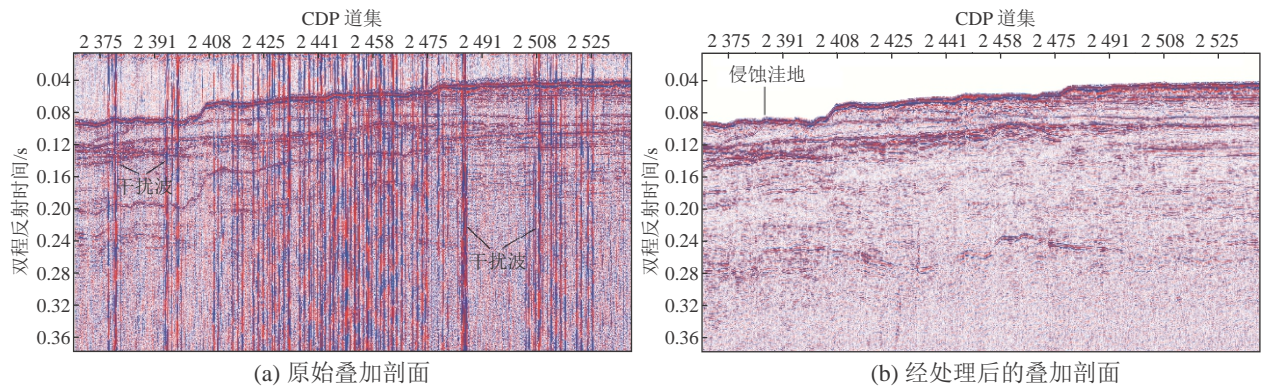


图 5 L1 测线多道地震剖面
Fig. 5 Multichannel seismic profiles of Line 1

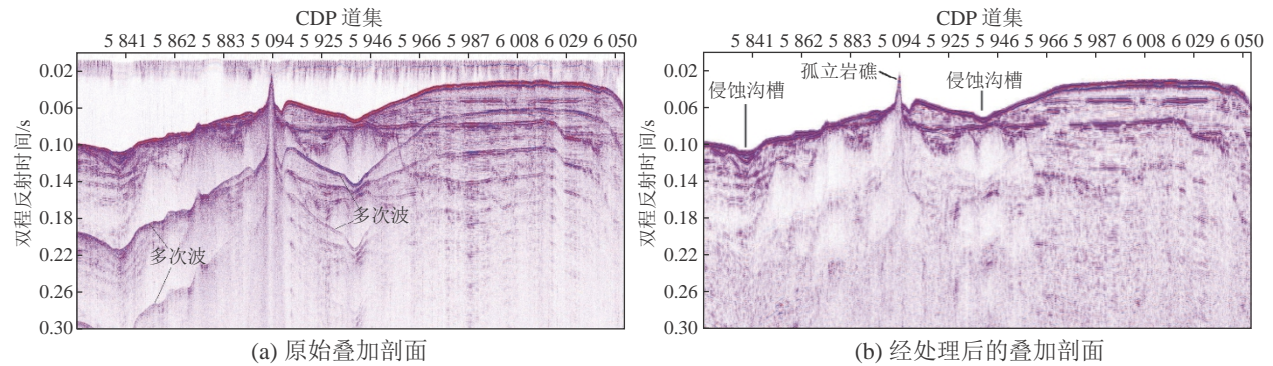


图 6 L2 测线多道地震剖面
Fig. 6 Multichannel seismic profiles of Line 2

加强了弱反射信号, 处理后的地震剖面从浅层到深层各主要反射层的产状、构造形态清晰, 地质现象清楚, 能量强弱分明, 波组特征活跃。

3.2 多道地震资料与单道地震资料效果对比

选取本次获得老铁山水道北段的多道地震剖面与前期探测获得的单道地震剖面进行对比(如图7所示, 剖面位置见图1)。因为震源能量和数据处理方法的局限性, 前期的单道地震剖面的信噪比较差, 沉积地层和基岩面反射信息较为模糊。而本次探测获得的多道地震剖面信噪比远高于单道地震剖面, 地层的连续性更好、断层更清晰、波组的特征更明显。多道地震剖面能更清晰地反映沉积地层和断层构造, 在浅、中、深层都有较高的信噪比。

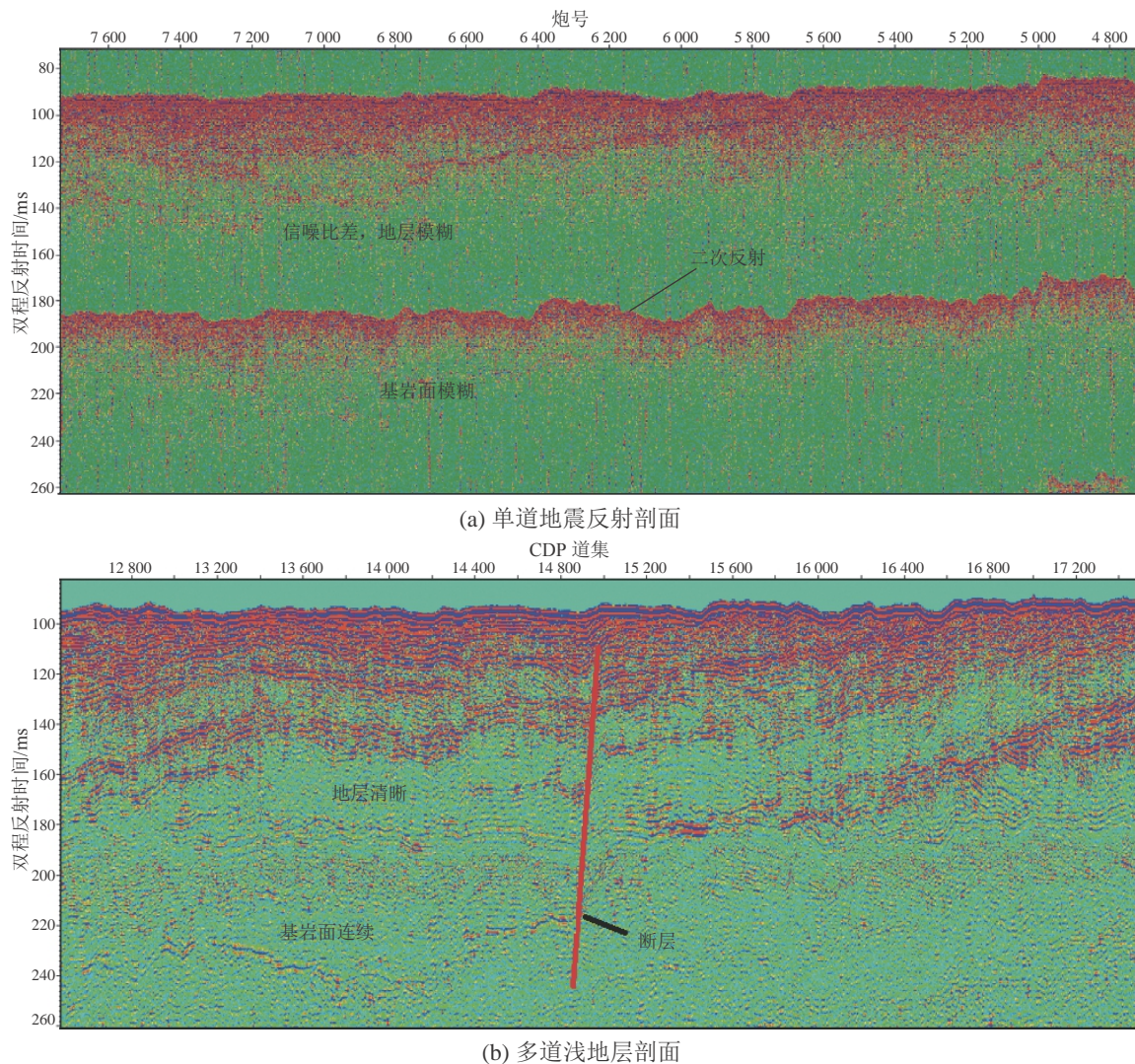


图7 L3测线多道地震与单道地震剖面对比

Fig. 7 Comparison of multi-channel seismic and single channel seismic profiles of Line 3

3.3 多道地震资料的分辨率

本次多道地震探测采用的国产大能量电火花震源, 具有电声转换效率高和激发间隔小的特点。

在满足覆盖次数和探测深度的情况下, 该震源能提供较高的主频分辨率。由图 8 可知, 经处理后的多道地震剖面优势频带约为 600 Hz。以平均速度 1 800 m/s 来计算, 地震波的优势波长约为 3.0 m。因此, 理论上具有 1/4 优势波长, 即优于 1.0 m 的垂向分辨率。

4 结 语

为查明渤海海峡拟建桥隧通道的沉积层厚度和断裂分布特征, 在渤海海峡区域开展了多道地震反射波法探测试验。试验采用国产 PPS-5000J 型大能量电火花震源和小道距高分辨率电缆进行地震数据采集, 并对实测资料进行了针对性的分析和处理, 得到以下主要结论。

1) 当电火花震源能量从 1 000 J 增加至 5 000 J 时, 深部有效反射信号逐渐增强。在确保地层高分辨率的情况下, 5 000 J 电火花震源能采集到具有较好的地层穿透深度的地震资料, 对深部地层构造特征的探测更有利。

2) 在近岸浅水区域, 噪声类型复杂, 包括低频背景噪声、电缆噪声、尾流噪声等。此外, 多次波干扰严重, 原始数据覆盖次数较低导致速度分析不准确, 从而影响成像品质。通过噪声分析和消除, 采用 DWD+Curvelet 的多次波压制方法以及信号增强技术, 能够取得理想的处理效果。

3) 与单道地震剖面相比, 多道地震剖面在深部构造成像上分辨率更高, 连续性更好、断层更清晰、波组特征更明显。多道地震剖面在浅、中、深层都表现出较高的信噪比。以国产 PPS-5000J 型大能量电火花为震源的多道地震剖面优势频带约为 600 Hz, 以平均速度 1 800 m/s 来计算, 其理论垂向分辨率优于 1.0 m。

参考文献 (References):

- 陈见伟, 庄锡进, 胡冰, 等, 2011. 多次波压制组合技术在海洋地震资料处理中的应用[J]. 海相油气地质, 16(1): 68-73. CHEN J W, ZHUANG X J, HU B, et al, 2011. Application of the combination method to multiple attenuation in marine seismic data processing[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 16(1): 68-73.
- 陈义兰, 吴永亭, 刘晓瑜, 等, 2013. 渤海海底地形特征[J]. 海洋科学进展, 31(1): 75-82. CHEN Y L, WU Y T, LIU X Y, et al, 2013. Features of seafloor topography in the Bohai Sea[J]. Advances in Marine Science, 31(1): 75-82.
- 侯方辉, 王保军, 孙建伟, 等, 2016. 渤海海峡跨海通道新构造运动特征及其工程地质意义[J]. 海洋地质前沿, 32(5): 25-30. HOU F H, WANG B J, SUN J W, et al, 2016. Neotectonic movement across the Bohai Strait and its engineering geologic significance[J]. Marine Geology Frontiers, 32(5): 25-30.
- 李军峰, 肖都, 孔广胜, 等, 2004. 单道海上反射地震在海上物探工程中的应用[J]. 物探与化探, 28(4): 365-368. LI J F, XIAO D, KONG G S, et al, 2004. The application of single-channel marine reflection seismic survey to marine geophysical exploration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 28(4): 365-368.
- 陆凯, 褚宏宪, 孙军, 等, 2021. 渤海海峡跨海通道地区海洋地质调查研究进展[J]. 地质通报, 40(2): 287-297. LU K, CHU H X, SUN J, et al, 2021. Research progress of marine geological survey of the Bohai Strait[J]. Geological Bulletin of China, 40(2): 287-297.
- 裴彦良, 王揆洋, 李官保, 等, 2007. 海洋工程地震勘探震源及其应用研究[J]. 石油仪器, 21(2): 20-23. PEI Y L, WANG K Y, LI G B, et al, 2007. Application study of marine engineering seismic sources[J]. Petroleum Instruments, 21(2): 20-23.

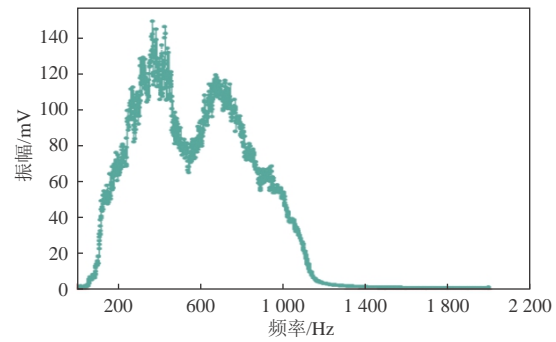


图 8 处理后多道地震剖面的频谱分布
Fig. 8 Spectral map of processed multi-channel seismic profiles

- 裴彦良, 赵月霞, 刘保华, 等, 2010. 近海高分辨率多道地震拖缆系统及其在海洋工程中的应用[J]. 地球物理学进展, 25(1): 331-336. PEI Y L, ZHAO Y X, LIU B H, et al, 2010. Research on the offshore high-resolution multi-channel seismic streamer and its application to the ocean engineering[J]. Progress in Geophysics, 25(1): 331-336.
- 裴彦良, 刘保华, 连艳红, 等, 2013. 海洋高分辨率多道数字地震拖缆技术研究与应用[J]. 地球物理学进展, 28(6): 3280-3286. PEI Y L, LIU B H, LIAN Y H, et al, 2013. Marine high resolution multi-channel digital seismic streamer and its application in the ocean engineering[J]. Progress in Geophysics, 28(6): 3280-3286.
- 裴彦良, 温明明, 刘保华, 等, 2022. 近海底高分辨率地震探测系统设计与实现[J]. 海洋科学进展, 40(1): 79-89. PEI Y L, WEN M M, LIU B H, et al, 2022. Design and implementation of near ocean bottom high-resolution multichannel seismic system[J]. Advances in Marine Science, 40(1): 79-89.
- 彭思凯, 李志娜, 李振春, 2021. 地震资料多次波压制方法研究进展及展望[J]. 地球物理学进展, 36(5): 2069-2081. PENG S K, LI Z N, LI Z C, 2021. Research progress and prospect of multiple suppression method for seismic data[J]. Progress in Geophysics, 36(5): 2069-2081.
- 戚宾, 王祥春, 赵庆献, 2020. 海洋电火花震源地震勘探研究进展[J]. 物探与化探, 44(1): 107-111. QI B, WANG X C, ZHAO Q X, 2020. Research on the progress of marine sparker seismic exploration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 44(1): 107-111.
- 史慧杰, 赵铁虎, 褚宏宪, 等, 2015. 海域高分辨率24道地震采集技术在渤海海峡跨海通道项目中的应用[J]. 海洋地质前沿, 31(10): 47-56. SHI H J, ZHAO T H, CHU H X, et al, 2015. Application of small group interval 24-channel high-resolution seismic to the project on Bohai Strait cross path[J]. Marine Geology Frontiers, 31(10): 47-56.
- 宋家文, VERSCHUUR D J, 陈小宏, 2014. 多次波压制的研究现状与进展[J]. 地球物理学进展, 29(1): 240-247. SONG J W, VERSCHUUR D J, CHEN X H, 2014. Research status and progress in multiple elimination[J]. Progress in Geophysics, 29(1): 240-247.
- 孙元春, 陈则连, 尚海敏, 2021. 渤海海峡跨海通道工程地质条件初步分析[J]. 工程地质学报, 29(6): 1898-1906. SUN Y C, CHEN Z L, SHANG H M, 2021. Preliminary analysis on engineering geological conditions of Bohai Strait cross sea passage[J]. Journal of Engineering Geology, 29(6): 1898-1906.
- 王志才, 邓起东, 晁洪太, 等, 2006. 山东半岛北部近海海域北西向蓬莱-威海断裂带的声波探测[J]. 地球物理学报, 49(4): 1092-1101. WANG Z C, DENG Q D, CHAO H T, et al, 2006. Shallow-depth sonic reflection profiling studies on the active Penglai-Weihai fault zone offshore of the northern Shandong Peninsula[J]. Chinese Journal of Geophysics, 49(4): 1092-1101.
- 吴长江, 2009. 泌阳凹陷三维地震资料叠前噪声压制方法研究[J]. 石油地质与工程, 23(6): 41-44, 135. WU C J, 2009. Research on 3D seismic data prestack noise suppression method in Biyang Sag[J]. Petroleum Geology and Engineering, 23(6): 41-44, 135.
- 吴志强, 闫桂京, 童思友, 等, 2013. 海洋地震采集技术新进展及对我国海洋油气地震勘探的启示[J]. 地球物理学进展, 28(6): 3056-3065. WU Z Q, YAN G J, TONG S Y, et al, 2013. New advances in marine seismic data acquisition technology and enlightenment to domestic offshore petroleum seismic exploration[J]. Progress in Geophysics, 28(6): 3056-3065.
- 严辉, 黄逸凡, 裴彦良, 等, 2012. 等离子体震源及在海洋勘探中的应用[J]. 高电压技术, 38(7): 1711-1718. YAN H, HUANG Y F, PEI Y L, et al, 2012. Plasma seismic source and its application in ocean seismic exploration[J]. High Voltage Engineering, 38(7): 1711-1718.
- 颜中辉, 王小杰, 刘媛媛, 等, 2020. 东海多次波压制的关键技术[J]. 海洋地质前沿, 36(7): 64-72. YAN Z H, WANG X J, LIU Y Y, et al, 2020. Key techniques for multiple wave suppression in the East China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 36(7): 64-72.
- 杨国明, 朱俊江, 赵冬冬, 等, 2021. 浅地层剖面探测技术及应用[J]. 海洋科学, 45(6): 147-162. YANG G M, ZHU J J, ZHAO D D, et al, 2021. Development and application of sub-bottom profiler technologies[J]. Marine Sciences, 45(6): 147-162.
- 张世阳, 2019. 空气枪震源控制系统的发展和预测[J]. 海洋地质前沿, 35(9): 76-82. ZHANG S Y, 2019. Development and prospect of an air gun source control system[J]. Marine Geology Frontiers, 35(9): 76-82.
- 郑江龙, 许江, 李海东, 等, 2015. 海上单道地震勘探中船舶等背景噪声的影响分析及压制[J]. 应用海洋学学报, 34(1): 17-23.

- ZHENG J L, XU J, LI H D, et al, 2015. Analysis of how the background noise influencing the seismic data acquisition by single-channel seismograph[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 34(1): 17-23.
- VERSCHUUR D J, 2010. 地震多次波消除技术的过去、现在和未来[M]. 陈浩林, 等, 译. 北京: 石油工业出版社. VERSCHUUR D J, 2010. Seismic multiple removal techniques: past, present and future[M]. CHEN H L, et al, tran. Beijing: Petroleum Industry Press.
- DRAGOSET W H, JERIČEVIĆŽ, 1998. Some remarks on surface multiple attenuation[J]. *Geophysics*, 63(2): 772-789.

The Application of High Resolution Multichannel Seismic System With Small Group Interval to Stratigraphic Exploration in Bohai Strait

QI Xiaoyu

(*China Railway Design Corporation, Tianjin 300251, China*)

Abstract: The Bohai Strait is located between the Liaodong Peninsula and the Shandong Peninsula, with the shortest distance of about 106 km from north to south along the strait. The trans-strait passage project has been under discussion for many years. In order to investigate the thickness of Quaternary sediments and fault distribution of the proposed trans-strait passage area of the Bohai Strait, we performed a multi-channel seismic reflection exploration survey in the sea area. Based on the experiments of comparing different source of energy, such as 1 000 J, 2000 J, 3 000 J, 4 000 J and 5 000 J, the field acquisition parameters were determined. The multi-channel seismic acquisition system includes an electrical sparker with a maximum energy is 5 000 J, and a 24 channel seismic streamer with a group interval of 3.125 m. In order to eliminate noise and multiples, a set of seismic data processing methods suitable for the study area was determined, and a high-resolution seismic profile was obtained with a resolution better than 1.0 m. This data can provide a reference for subsequent geological interpretation and geological suggestions for the construction of the trans-strait passage project.

Keywords: Bohai Strait; trans-strait passage; multi-channel seismic; high resolution

Received: September 8, 2023 **Online:** April 19, 2024

基于深度学习联合 WOA18 温盐模型构建声速场

唐安, 贺凯飞*, 吴宇, 王松

(中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院, 山东青岛 266580)

摘要: 声速变化是影响水下精密定位的重要因素, 受制于现有的声速剖面获取手段, 目前的声速代表性误差严重影响着水下定位精度。针对现实中难以实现一定海域内时间空间的连续观测, 本文以地转海洋学实时观测阵(Array for Real-time Geostrophic Oceanography, Argo)温盐度数据作为真值, 利用美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)提供的 2018 世界海洋地图集(The World Ocean Atlas 2018, WOA18)中的历史温盐数据, 基于添加注意力机制的长短期记忆神经网络模型(Long Short Term Memory, LSTM), 来构建局部海域声速场。结果表明, 该方法可用于反演局部海域 500~1 500 m 深度范围内较为精准的声速剖面, 且添加注意力机制的 LSTM 神经网络模型反演的声速在太平洋局部海域均方根误差为 0.34 m/s, 在大西洋局部海域声速均方根误差为 0.78 m/s, 相比传统反向传播神经网络(Back Propagation Neural Network, BPNN)和添加了遗传因子的反向传播神经网络(Back Propagation Neural Network+Genetic Algorithm, BPNN+GA)在精度上得到了改善。

关键词: 声速剖面反演; WOA18; Argo; 深度学习

中图分类号: P229.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2024)04-0816-14

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20230728001

引用格式: 唐安, 贺凯飞, 吴宇, 等, 2024. 基于深度学习联合 WOA18 温盐模型构建声速场[J]. 海洋科学进展, 42(4): 816-829. TANG A, HE K F, WU Y, et al, 2024. Construction of sound velocity field based on deep learning combined with WOA18 temperature and salinity model[J]. Advances in Marine Science, 42(4): 816-829.

水下定位中, 高精度海洋声速剖面的获取是提高定位精度的关键。由于复杂的海洋环境和海水介质不均匀的特性, 声速剖面的变化非常复杂。在海洋声速剖面的测量中, 难以全覆盖获取某一海域连续时空变化的声速剖面, 因此海洋环境参数的获取、局部海域内声速剖面的反演及声速代表性误差的消除对于水下高精度定位具有重要意义。

根据国内外学者的研究, 目前描述声速剖面的方法主要分为 2 类。第一类是解析函数法, 即利用数学表达式拟合并描述声速剖面, 如比较通用的 Munk(1974)研究发现的深海声道“三层结构”的数学表达式。Davis 等(1986)利用 GDEM 模型(Generalized Digital Environmental Model)描述海洋温度和盐度剖面, 再通过经验声速公式来推算声速剖面。第二类是 EOF 经验正交函数模型(Empirical Orthogonal Function, EOF), 此模型可以用一组相互正交的向量来描述声速剖面对平均声速剖面的扰动。研究发现经验正交函数是描述声速剖面最有效的基函数(Davis, 1976; Leblanc et al, 1980)。近年来, 国内的诸多学者也证明了此方法的有效性和可行性(沈远海等, 1999; Peng et al, 2003)。随着深度学习的发展和广泛应用, 一些学者将 EOF 与深度学习的方法相结合反演声速剖面。艾锐锋等(2015)

收稿日期: 2023-07-28 网络首发日期: 2024-04-18

资助项目: 国家自然科学基金项目(42174021); 山东省自然科学基金项目(ZR2021MD060)

作者简介: 唐安(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事水下定位方面研究. E-mail: 84702156@qq.com

*通信作者: 贺凯飞(1982—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事大地测量学方面研究.

E-mail: kfhe@upc.edu.cn

(李燕 编辑)

利用后向传播神经网络(Back Propagation Neural Network, BPNN)建立了声速反演模型,将经验正交分解后的特征向量和历史声速剖面数据代入 BP 神经网络中进行反演。胡军(2018)利用径向基函数(Radial Basis Function, RBF)非线性拟合逼近学习能力强、有强鲁棒性的特征,证明了 RBF 网络在声速剖面反演的优势。孙佳龙等(2021)研究发现以 BP 神经网络作为基础,并在量子粒子群优化(Quantum Particle Swarm Optimization, QPSO)算法的基础上引入双种群约束策略,有效地改善了反演精度。袁浩等(2023)利用遥感数据中的历史海表温盐数据,将 EOF 分解后的主要特征和历史声速剖面代入添加遗传因子的反向传播神经网络(Genetic Algorithm BP Neural Network, GA-BPNN)模型中反演实时声速剖面并进行声速改正。

针对实际测量难以获取特定海域内深层海洋声速剖面数据,且传统的平均温盐数据仅可获取海表温度、盐度,本文提出了基于深度学习联合 2018 世界海洋地图集(The World Ocean Atlas 2018, WOA18)温盐数据模型对声速剖面进行反演。将实测声速剖面代入神经网络训练,利用 EOF 函数分解得到的贡献率较高的前 k 阶特征向量和 WOA18 模型提供的历史平均温盐模型对声速剖面进行反演,以构建局部海域的声速场。

1 数据

1.1 Argo 温盐数据

全球地转海洋学实时观测阵(Array for Real-time Geostrophic Oceanography, Argo)浮标由美国、中国、德国和日本等 30 个国家贡献组成,于 1998 年完成了全球海洋观测网的构建。Argo 收集的数据主要为海水的温度和盐度剖面数据,一些浮标还测量了海洋生物/化学要素。至 2022 年 12 月底,Argo 的 3 500 多个浮标在全球海洋已累计获得超过 260 万条温、盐度剖面数据,且平均每年还将增加 14 万条声速剖面数据。

Argo 提供温度、盐度和压强等海洋数据及其改正值,可以用于海洋气候科学的研究。本文分别选取了太平洋琉球群岛海域附近($125^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$, $20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$)(图 1a)和大西洋加那利群岛附近海域($15^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{W}$, $20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$)(图 1b)同一浮标测得的 10 个点位的温盐数据产品,时间分辨率为天,空间分辨率为 $1''\times 1''$,深度为 $0\sim 2\ 000\ \text{m}$ 左右。选点信息如表 1 所示。

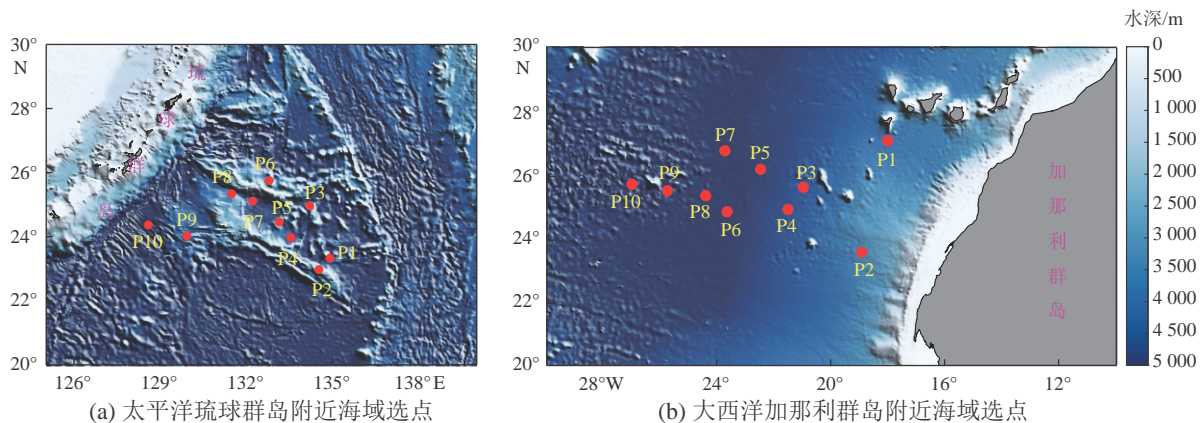


图 1 Argo 浮标选点分布

Fig. 1 Distribution of the selected Argo buoys

表 1 太平洋琉球群岛及大西洋加那利群岛附近海域选点信息

Table 1 Locations and dates of the selected Argo buoys near the Ryukyu Islands in the Pacific Ocean and the Canary Islands in the Atlantic Ocean

浮标 点位	太平洋琉球群岛附近海域选点		浮标 点位	大西洋加那利群岛附近海域选点	
	位置	日期		位置	日期
P1	(134°53'13"E, 23°26'42"N)	2014-07-02	P1	(27°00'08"W, 25°46'51"N)	2015-10-06
P2	(134°30'10"E, 23°05'02"N)	2014-06-23	P2	(25°45'11"W, 25°34'48"N)	2015-09-06
P3	(134°11'02"E, 25°05'09"N)	2013-10-30	P3	(24°24'36"W, 25°34'48"N)	2015-08-07
P4	(133°31'40"E, 24°05'42"N)	2014-05-28	P4	(23°39'36"W, 24°55'22"N)	2015-04-19
P5	(133°07'08"E, 24°34'55"N)	2013-09-25	P5	(23°44'06"W, 26°49'22"N)	2014-11-10
P6	(132°45'57"E, 25°52'12"N)	2014-01-13	P6	(22°29'03"W, 26°15'00"N)	2014-07-23
P7	(132°12'10"E, 25°14'06"N)	2013-08-16	P7	(21°31'12"W, 24°59'38"N)	2014-06-13
P8	(131°27'39"E, 25°27'36"N)	2014-10-10	P8	(20°58'48"W, 25°41'13"N)	2014-04-04
P9	(129°54'00"E, 24°08'49"N)	2014-02-12	P9	(18°56'06"W, 23°38'38"N)	2013-09-16
P10	(128°33'32"E, 24°29'24"N)	2014-12-04	P10	(18°01'47"W, 27°08'06"N)	2013-02-28

注：太平洋琉球群岛附近海域选点数据信息来自日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)；大西洋加那利群岛附近海域选点信息来自科里奥利海洋数据中心(Coriolis Operational Oceanography, CORIOLIS)。

1.2 WOA18 温盐数据

2018 世界海洋地图集(The World Ocean Atlas 2018, WOA18)是由美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)发布的一组客观分析了海洋气候学领域的地图集,包括温度、盐度、溶氧度和密度等在标准深度下的海洋气候数据。时间分辨率可分为年、季度和月;空间分辨率可分为 $1^\circ \times 1^\circ$ 和 $(1/4)^\circ \times (1/4)^\circ$ 。可以在其中指定地理区域、深度和海洋学变量,以查看给定变量的气候平均值或相关统计数据。本文根据所选取的 Argo 浮标的位置和时间,在 WOA18 历史平均温度、盐度数据集中选取了对应的空间分辨率为 $(1/4)^\circ \times (1/4)^\circ$ 、时间分辨率为月及深度为 0~5 500 m 的温度、盐度数据。

2 实验方法

本文利用经验公式将从 Argo 浮标获取的温盐数据计算得到声速剖面。利用 Akima 插值法对声速剖面的深度数据按 WOA18 数据的标准深度进行标准化。对标准化后的声速剖面进行经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分解、提取,选取贡献率高的前 k 阶 EOF 正交向量和深度、温度、盐度作为输入值代入到添加注意力机制的 LSTM 神经网络中进行训练,利用训练后的模型与 WOA18 温盐数据反演声速场。

2.1 EOF 经验正交分解简介

海洋中的声速随着温度、盐度、压强等复杂的海洋环境变化而变化(王君婷, 2022)。根据国内、外的研究成果,目前常采用的经验公式有: Mackenzie(Mackenzie, 1981)、Chen-Millero(Meinen et al, 1997)、Grosso(Grosso, 2005)以及 Lovett(Lovett, 1998)等(黄辰虎等, 2016)。本文采用 Mackenzie 经验公式,将 Argo 获取的温盐数据通过计算得到声速剖面。由于 Argo 提供的温盐数据的深度标准不统一,为方便研究,利用 Akima 插值对经验公式计算得到的样本声速剖面按 WOA18 的深度标准进行插值,统一深度标准。

对深度标准统一后的声速剖面进行 EOF 正交分解,提取特征向量用于深度学习网络反演。EOF 经验正交向量获取的具体计算原理如下。

在测区内选取 N 个声速剖面组成声速剖面群 $\mathbf{C} = [c_1, c_2, c_3, \dots, c_N]$, 该测区的声速剖面矩阵 $\mathbf{C}_{M \times N}$:

$$\mathbf{C}_{M \times N} = \begin{bmatrix} c_{1(d_1)} & c_{2(d_1)} & \cdots & c_{N(d_1)} \\ c_{1(d_2)} & c_{2(d_2)} & \cdots & c_{N(d_2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{1(d_M)} & c_{2(d_M)} & \cdots & c_{N(d_M)} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: M 为标准深度值的个数; N 为声速剖面的个数; d 为深度值; 声速剖面矩阵 $\mathbf{C}_{M \times N}$ 的列为 Akima 标准插值后的声速剖面, 行为某一深度下所有声速剖面的声速值。对每一深度下的声速进行平均, 得到此声速剖面群的平均声速剖面 $\bar{\mathbf{C}}_{M \times 1}$:

$$\bar{\mathbf{C}}_{M \times 1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_{i(d)}. \quad (2)$$

将平均声速剖面矩阵扩展成一个 $M \times N$ 的矩阵 $\bar{\mathbf{C}}_{M \times N}$, 扰动矩阵 $\Delta \mathbf{C}_{M \times N}$ 由声速剖面矩阵 $\mathbf{C}_{M \times N}$ 和平均声速剖面矩阵 $\bar{\mathbf{C}}_{M \times N}$ 作差得到:

$$\Delta \mathbf{C}_{M \times N} = \mathbf{C}_{M \times N} - \bar{\mathbf{C}}_{M \times N}, \quad (3)$$

扰动矩阵 $\Delta \mathbf{C}_{M \times N}$ 的协方差矩阵 $\mathbf{R}_{M \times M}$ 为:

$$\mathbf{R}_{M \times M} = \frac{\Delta \mathbf{C}_{M \times N} \Delta \mathbf{C}_{M \times N}^T}{N}, \quad (4)$$

协方差矩阵 $\mathbf{R}_{M \times M}$ 的元素 r_{ij} 为:

$$r_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [c_{n(d_i)} - \bar{c}_{(d_i)}] [c_{n(d_j)} - \bar{c}_{(d_j)}], \quad (5)$$

将扰动矩阵 $\mathbf{R}_{M \times M}$ 特征分解可得:

$$\mathbf{R}_{M \times M} \mathbf{F}_{M \times N} = \mathbf{D}_{M \times M} \mathbf{F}_{M \times N}, \quad (6)$$

分解后, $\mathbf{F}_{M \times N}$ 为特征向量矩阵, 即 EOF 空间函数, $\mathbf{D}_{M \times M}$ 为特征值矩阵,

$$\mathbf{D}_{M \times M} = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M], \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_{M \times N} = [f_{(1)}, f_{(2)}, \dots, f_{(k)}], \quad (8)$$

式中: λ 为特征值; k 阶特征向量 $f_{(k)}$ ($k = 1, 2, \dots, N$) 为 $M \times 1$ 的列向量。

2.2 EOF 经验正交重构简介

特征值的大小代表了其对应 EOF 空间函数对线性空间的影响权重(张志伟等, 2017), 一般按照 λ 从大到小的顺序排列。

前 k 阶经验正交函数的贡献率为:

$$Q = \sum_{i=1}^k \lambda_i / \sum_{m=1}^M \lambda_m, \quad (9)$$

一般认为当贡献率大于等于 95% 时, 可以用前 k 阶经验正交函数来代表测区海域的主要声速特征(禹小康, 2022)。声速剖面可表示为:

$$C_{(d)} = \bar{C}_{(d)} + \sum_{i=1}^k \alpha_i f_{(i)(d)}, \quad (10)$$

式中: k 为经验正交函数的阶数; α_i 为重构系数; $f_{(i)(d)}$ 为 EOF 空间函数。

2.3 注意力机制简介

本文在 LSTM 模型的基础上添加注意力机制(李梅等, 2019), 作用是在将输入向量输入 LSTM 之前, 先对输入特征的权重进行自适应分配, 挖掘数据特征在预测中的重要性。通过特征注意机制可以使重要的特征在训练中增大权重, 减小影响较小的特征的训练权重。

可以用键值(key-value pair)表示输入值:

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_N] = [(k_1, v_1), (k_2, v_2), \dots, (k_N, v_N)] = (k, v), \quad (11)$$

每个输入 x 由地址 (key) k 和值 (value) v 组成, 给定查询向量 (query) q , 根据 query 和 key 计算二者的相似度, 得到注意力得分 s_i :

$$s_i = F(q, k_i). \quad (12)$$

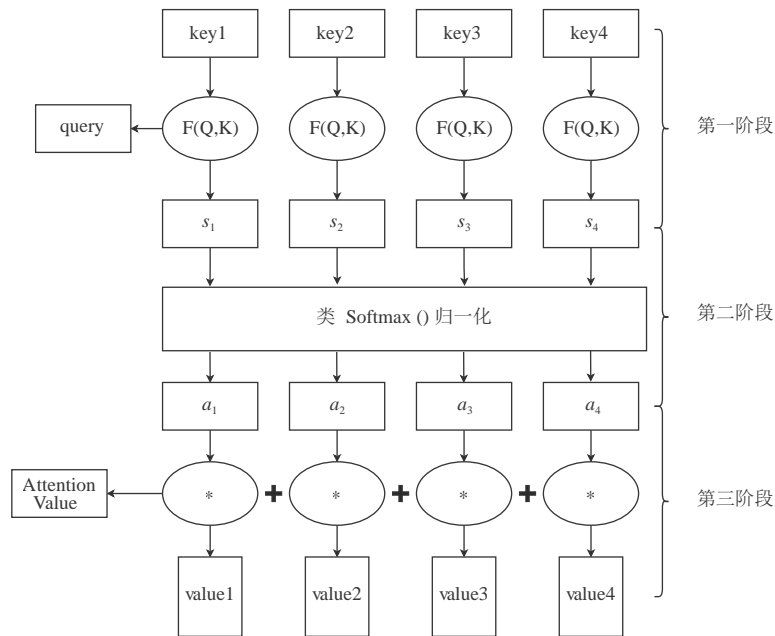
再用 Softmax 函数对注意力得分进行数值转换:

$$\alpha_i = \text{Softmax}(s_i) = \frac{\text{Exp}(s_i)}{\sum_{j=1}^N \text{Exp}(s_j)}, \quad (13)$$

得到 α_i 表示注意力权重系数分布。最后, 利用 α_i 对 value 加权求和:

$$\text{Attention}((k, v), q) = \sum_{i=1}^N \alpha_i v_i. \quad (14)$$

式中 Attention 为注意力机制函数。注意力机制原理如图 2 所示。



注:本图修改自王同等(2022), *表示乘号。

图 2 注意力机制原理

Fig. 2 Schematic diagram of the attention mechanism

2.4 添加注意力机制的 LSTM

本文采用的长短期记忆神经网络(Long Short Term Memory, LSTM)是一种特殊的递归神经网络(Hochreiter et al, 1997), 在循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)的基础上得到了发展, 可以学习长期依赖信息。在编码-解码模型的基础上, 编码阶段引入注意力机制, 对输入进行选择, 构建输入注意力层, 来捕获输入当中的相关特征以及相关的历史时刻, 构建时间注意力层。在这一构建思想上, 针对全海深声速剖面反演, 构建 Attention-LSTM 模型。

编码时, 将输入序列 x_t 映射到 h_t :

$$h_t = f_1(h_{t-1}, x_t), \quad (15)$$

式中: t 为任一时刻, h_t 为编码器在 t 处的隐藏层; f_1 为非线性的激活函数, 本文使用 Sigmoid 激活函数。

在编码阶段引入注意力机制:

$$e_t^k = v_f^T \tanh(\omega_f [h_{t-1}, s_{t-1}] + u_f x^k + b_f), \quad (16)$$

$$\alpha_t^k = \frac{\text{Exp}(e_t^k)}{\sum_{i=1}^n \text{Exp}(e_t^i)}, \quad (17)$$

式中: e_t^k 为 t 时刻第 k 个特征的注意力得分; s_{t-1} 为 t 时刻上一时刻的细胞状态; v_f 、 b_f 、 ω_f 、 u_f 均为模型过程参数; α_t^k 表示 t 时刻第 k 个特征的注意力权重。则输入序列 x 经过注意力机制更新后为:

$$\tilde{x}_t = (\alpha_t^1 x_t^1, \alpha_t^2 x_t^1, \dots, \alpha_t^n x_t^n)^T, \quad (18)$$

更新后隐藏层:

$$h_t = f_1(h_{t-1}, \tilde{x}_t). \quad (19)$$

输入门控制当前需要保存的信息:

$$i_t = \sigma(W_{ii} \tilde{x}_t + W_{hi} h_{t-1} + b_i), \quad (20)$$

式中: W 为权重矩阵; b 为偏置向量; σ 为 Sigmoid 激活函数; i 为输入门。遗忘门控制上一时刻细胞状态需要丢弃的信息:

$$f_t = \sigma(W_{ff} \tilde{x}_t + W_{hf} h_{t-1} + b_f), \quad (21)$$

$$\tilde{c}_t = \tanh(W_{cc} \tilde{x}_t + W_{hc} h_{t-1} + b_c), \quad (22)$$

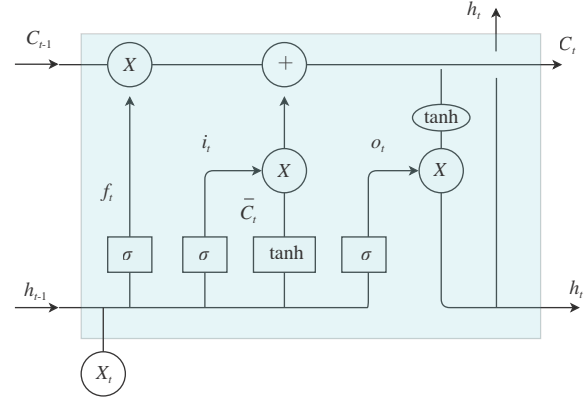
式(21)中 f 为遗忘门; 式(22)中 c 为单元激活向量。

输出门控制当前时刻细胞状态需要输出的信息:

$$o_t = f_t * c_{t-1} + i_t * \tilde{c}_t, \quad (23)$$

$$h_t = o_t * \tanh(c_t), \quad (24)$$

式中: o 为输出门; $*$ 为乘号。上述原理如图 3 所示。



注: 此图修改自代保庆等(2023)。

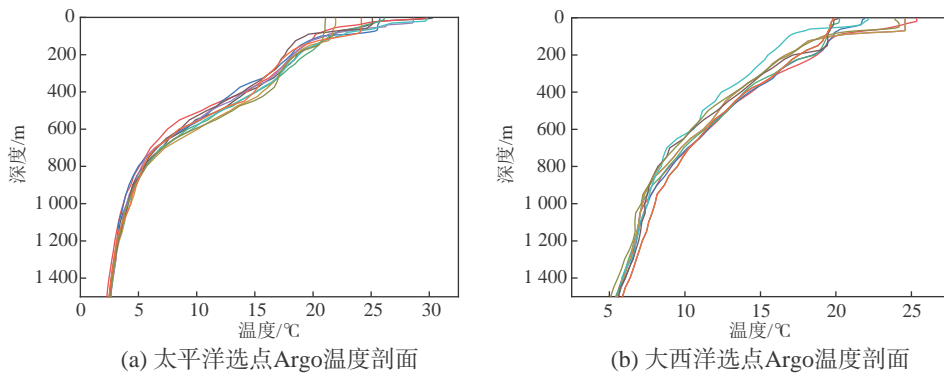
图 3 LSTM 原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the Long Short Term Memory

3 实验验证

3.1 温盐度数据对比分析

针对同一选点, 分别提取一条 Argo 温盐数据和以及对应的 WOA18 温盐数据, 将每组实验的 10 个选点的温盐数据放在同一张图中比较分析。如图 4、图 5 所示, 盐度场的误差较小, 且变化对声速剖面的影响也较轻(图 4c、图 4d、图 5c 和图 5d)。将 Argo 实测数据与 WOA18 平均温盐度数据作差得到的误差图(图 4e、图 4f、图 5e 和图 5f), 可以看出 2 组样本的 Argo 实测温度与 WOA18 平均温度误差保持在 ± 6 °C 内, 盐度剖面误差保持在 ± 0.8 内, 相比太平洋海域样本, 大西洋海域样本的温盐剖面更具多样性, 海洋环境更为复杂, 同时与实测温盐剖面的差异也更大。



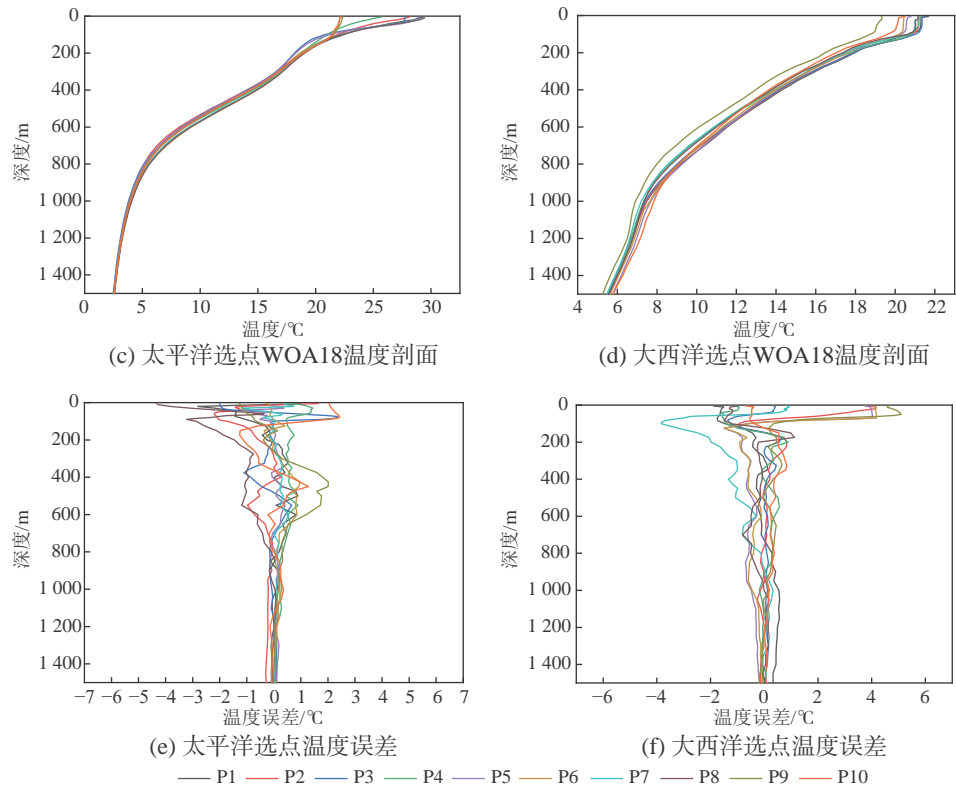
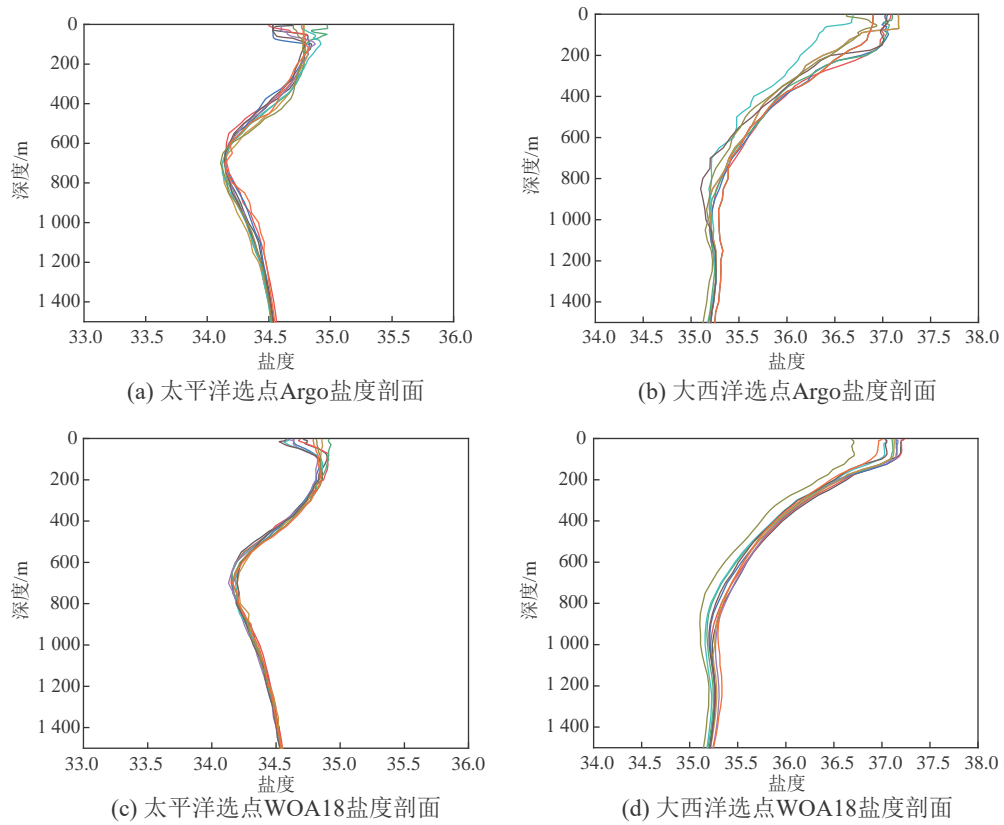


图 4 温度剖面对比

Fig. 4 Comparison of temperature profiles



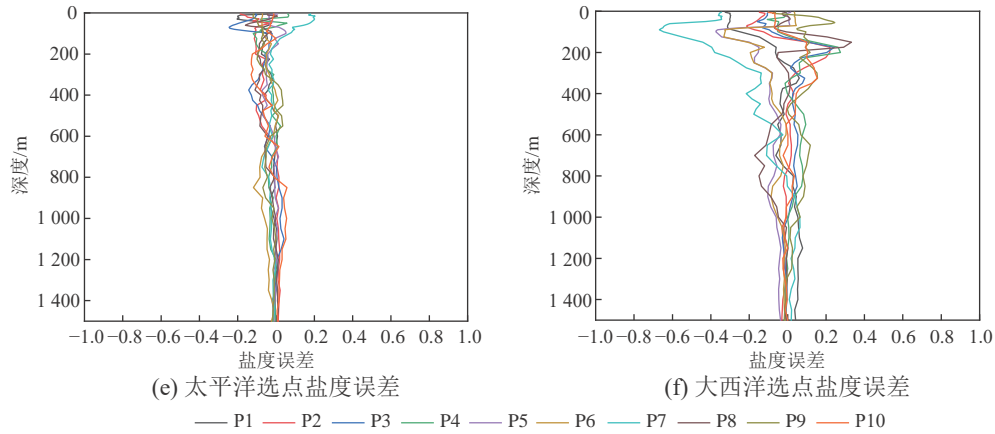
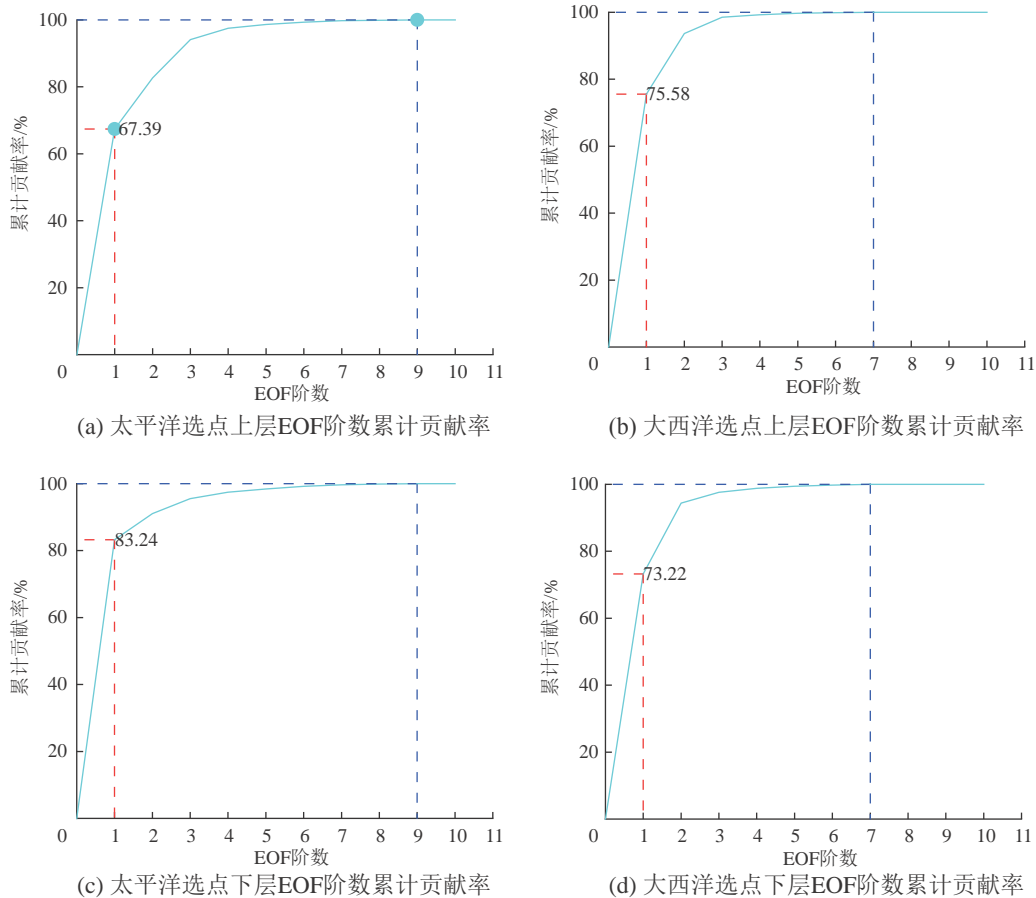


图5 盐度剖面对比

Fig. 5 Comparison of salinity profiles

3.2 EOF 特征向量选取

本文选取 Mackenzie 经验公式, 利用 Argo 获取的温盐数据推导出声速剖面, 并按 WOA18 标准深度对声速剖面利用 Akima 插值进行标准化。对标准化后的声速剖面进行 EOF 分解、提取, 分别计算上层(0~500 m)、下层(500~1 500 m)的 EOF 累计贡献率, 根据贡献率选取合适的前 k 阶特征向量。可以看出, 太平洋区域的样本下层的 EOF 累计贡献率在阶数为 1 时就维持在 83.24%, 较上层和全层的 EOF 累计贡献率, 更小的阶数维持了更高的累计贡献率(图 6a、图 6c 和图 6e)。因此进



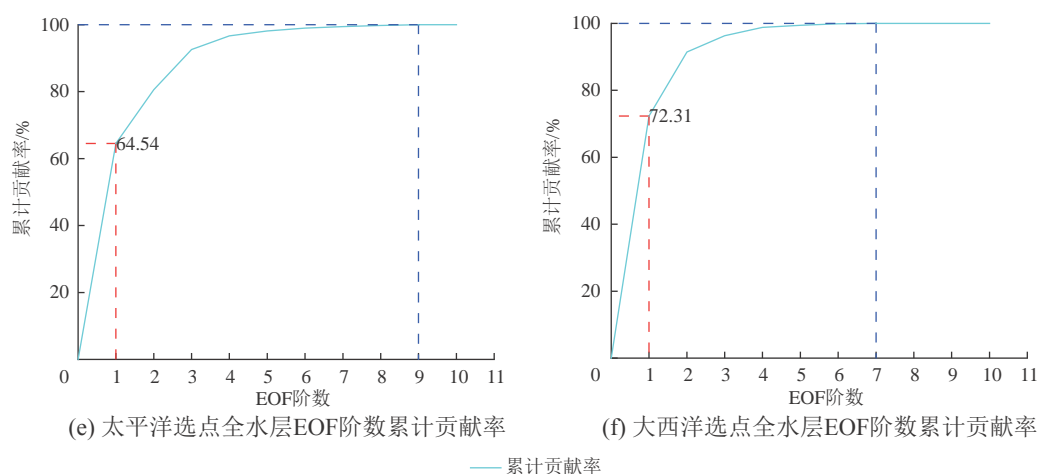


图6 EOF阶数累计贡献率

Fig. 6 EOF order accumulative contribution rate

一步证实了此方法适用于反演 500~1 500 m 范围内的声速剖面。2 组样本前 6 阶 EOF 累计贡献率高达 99.2%(图 6), 因此选取前 6 阶 EOF 阶特征向量代入网络训练。

3.3 反演后的声速数据精度分析

将每组实验中的 10 个 Argo 声速剖面作为训练集, 将其标准深度下的 Argo 温盐数据和 6 阶 EOF 特征向量作为输入向量 $X = [x_1, x_2, \dots, x_{10}]$ (x_i 为 $M \times 10$ 的向量, M 为标准深度的个数) 一同代入 LSTM 网络, 并将这 10 个点位对应的同深度标准的 WOA18 历史温盐数据分别作为测试集进行训练。设置时间步长 T 为 3, 隐藏层的个数设置为 64, 网络模型使用 Adam 优化器, 初始学习率为 0.001, 最大迭代次数为 3 000 次。

评价标准选择 RMSE(均方根误差), 计算式为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{D} \sum_{i=1}^D (y_i - \tilde{y}_i)^2}, \quad (25)$$

式中: D 为测试集中声速剖面的个数; y_i 为预测声速; \tilde{y}_i 为真实声速。

选择了 BP、BP+GA 两种网络模型作为对比, 分别将添加注意力机制的 Attention-LSTM、BP 及 BP+GA 这 3 种网络在相同的迭代次数和学习率下进行训练。将 Argo 温盐度数据通过经验公式推得的声速作为真值, 对比将 WOA18 温盐度代入后反演的各点位的声速与真值的误差。

对比 3 种模型可以看出, 由于 WOA18 温盐模型是历史平均温度和盐度, 在时域上与 Argo 实测温盐数据无法保持高度同步, 因此反演后不同点位的声速误差随深度分布存在差异。添加注意力机制 Attention-LSTM(Attention-Long Short Term Memory)网络相比 BP 网络更好地捕捉了声速随深度变化的趋势, 反演后的声速剖面的声速误差在 500~1 500 m 呈现波动性变化, 并且明显优于 BP 网络模型与添加了遗传算法后的 BP 网络模型(图 7、图 8)。为了更好地对比各模型的预测精度, 对预测结果的最大声速误差和均方根误差进行统计对比。

在太平洋琉球群岛海域添加注意力机制的 Attention-LSTM 网络相比 BP 网络模型精度提高了 45%, 比改进后的 GA+BP 网络模型提高了 20%。大西洋加那利群岛海域添加了遗传算法的 GA+BP 网络相比 BP 网络在精度上并没有得到较好的改善, 而添加注意力机制的 Attention-LSTM 网络相比 BP 精度提高了 20%, 相比 GA+BP 网络提高了 18%(表 2), 反演后的声速剖面在精度上得到了显著提升。

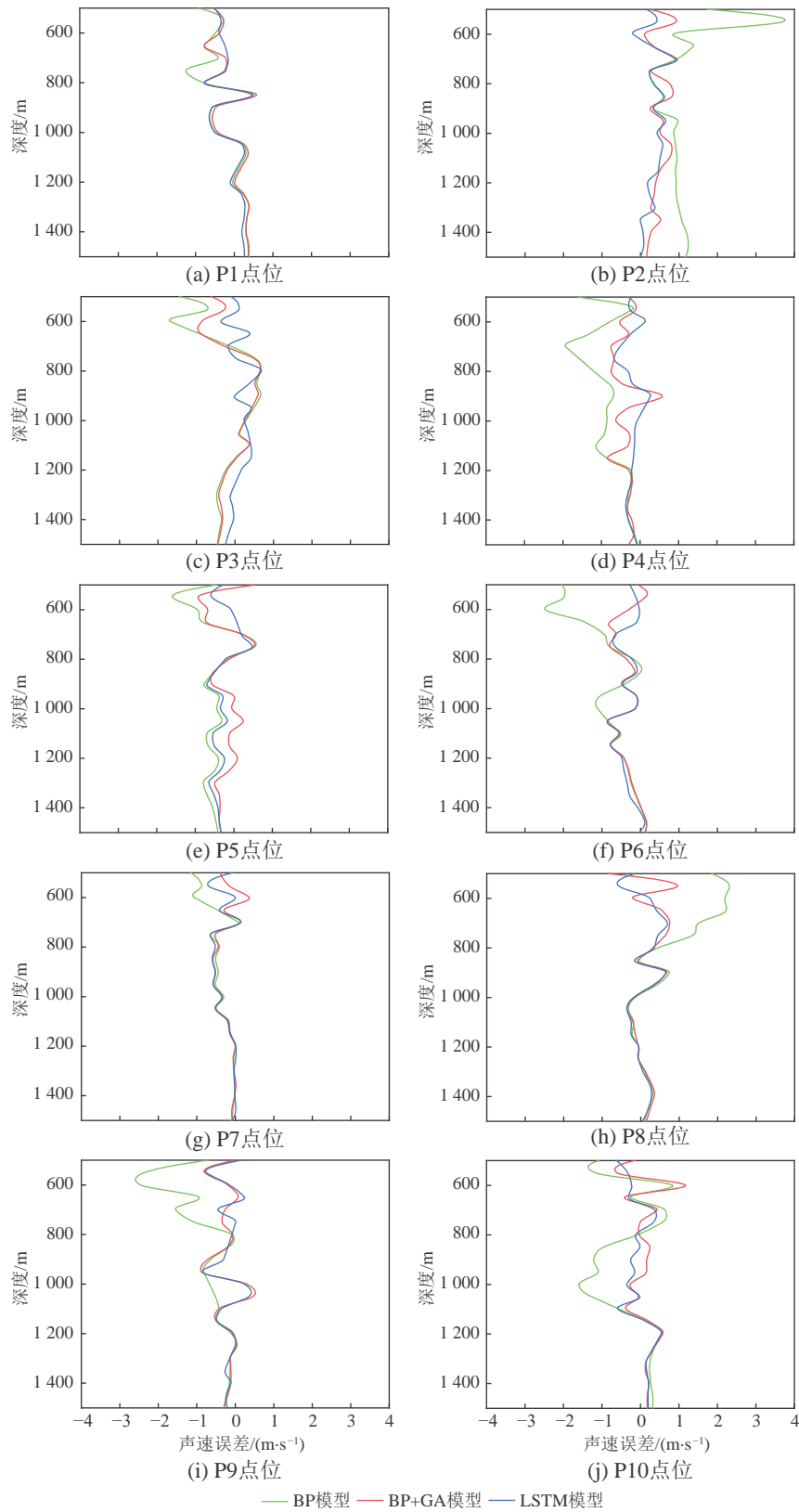


图 7 太平洋选点 3 种模型反演后的声速误差对比

Fig. 7 Error comparison of the inverted sound velocity by three different models in the Pacific Ocean

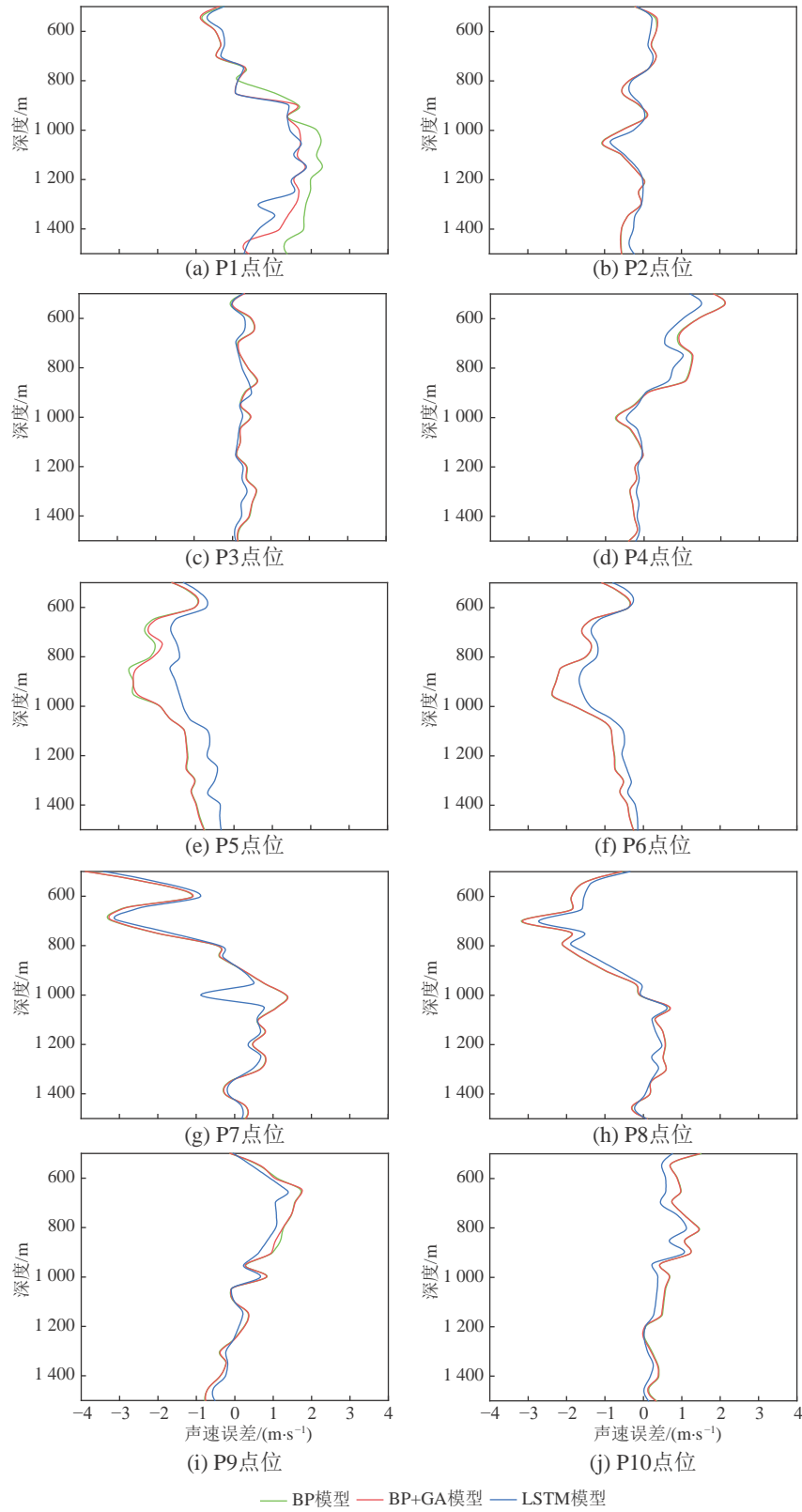


图 8 大西洋选点 3 种模型反演后的声速误差对比

Fig. 8 Error comparison of the inverted sound velocity by three different models in the Atlantic Ocean

表 2 3 种模型反演声速精度对比
Table 2 Comparison of inversion accuracy of the three models

样本位置	比对项	BP 模型	BP+GA 模型	Attention-LSTM 模型
太平洋琉球群岛附近海域	最大声速差/(m·s ⁻¹)	3.70	1.17	-0.86
	均方根误差平均值/(m·s ⁻¹)	0.79	0.43	0.34
	最大均方根误差/(m·s ⁻¹)	1.26	0.54	0.41
大西洋加那利群岛附近海域	最大声速差/(m·s ⁻¹)	-3.87	-3.88	-3.40
	均方根误差平均值/(m·s ⁻¹)	1.06	1.01	0.78
	最大均方根误差/(m·s ⁻¹)	1.71	1.63	1.33

4 结 语

本文针对声速剖面获取手段困难的问题,提出了联合 WOA18 温盐模型利用神经网络反演高精度深层声速剖面的方法,并采用 3 种神经网络对声速剖面反演,对比其反演后的精度,结果如下。

1)针对此方法利用添加注意力机制的 LSTM 神经网络模型解决了声速反演过程中长期依赖的问题,精度相较 BP 和 GA+BP 网络显著提高,可广泛应用于声速剖面的反演。

2)选取了大西洋和太平洋两个测区的声速剖面数据进行实验,当 WOA18 平均温盐数据与实测温盐数据差异较大时,添加注意力机制的 LSTM 网络模型可以捕捉区域内声速随深度的变化趋势,更有效地提升精度。

3)利用 WOA18 平均温盐数据模型在深度 500~1 500 m 区域内可以构建精度较好的声速场,解决声速剖面难以获取或缺失的问题。

本文使用的 WOA18 历史平均温盐数据可以在时间分辨率为月,空间分辨率为 1°×1°的范围内对声速剖面进行反演,对 500~1 500 m 的声速场的构建具有参考意义,但是受到海域海洋特性,模型改正等因素的影响,且 0~500 m 内温度随时间的变化差异较大导致所使用数据温度数据与实测温度数据的差异较大,进而大大影响了反演后的声速剖面的精度,待进一步研究海域的海洋特性加以改正。

参考文献 (References):

- 艾锐峰,程杰,欧阳军,等,2015.海区声速剖面的现场反演方法[J].计算机应用,35(增1):327-330,338. AI R F, CHENG J, OUYANG J, et al, 2015. On-line retrieval methodology for sound speed profile of sea area[J]. Journal of Computer Applications, 35(Suppl. 1): 327-330, 338.
- 代保庆,彭家琼,张天环,等,2023.基于Attention机制的LSTM测井曲线预测方法[J].井技术,47(2):167-175. DAI B Q, PENG J Q, ZHANG T H, et al, 2023. LSTM logging curve prediction method based on attention mechanism[J]. Well Logging Technology, 47(2): 167-175.
- 胡军,2018.基于RBF神经网络的声速剖面反演及软件实现[D].湖南:湘潭大学. HU J, 2018. The sound speed profile inversion and its software realization base on RBF neural network[D]. Hunan: Xiangtan University.
- 黄辰虎,周丰年,申家双,等,2016.全球海域最优声速计算模型的综合选定(二):精度分析及实际应用[J].海洋测绘,36(4):16-20,30. HUANG C H, ZHOU F N, SHEN J S, et al, 2016. Statistical characteristics of mesoscale eddies in the South China Sea based on satellite altimetry data[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 36(4): 16-20, 30.
- 李梅,宁德军,郭佳程,2019.基于注意力机制的CNN-LSTM模型及其应用[J].计算机工程与应用,55(13):20-27. LI M,

- NING D J, GUO J C, 2019. Attention mechanism- based CNN- LSTM model and its application[J]. *Computer Engineering and Applications*, 55(13): 20-27.
- 沈远海, 马远良, 屠庆平, 等, 1999. 浅水声速剖面用经验正交函数(EOF)表示的可行性研究[J]. *应用声学*, 18(2): 21-25.
- SHEN Y H, MA Y L, TU Q P, et al, 1999. Feasibility of description of the sound speed profile in shallow water via empirical orthogonal functions (EOF)[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 18(2): 21-25.
- 孙佳龙, 张杰, 唐玥, 等, 2012. 双种群约束QPSO-BP的声速剖面反演方法[J]. *测绘科学*, 46(8): 127-134.
- SUN J L, ZHANG J, TANG Y, et al, 2021. Inversion method of sound velocity profile based on QPSO-BP with two population constraints[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 46(8): 127-134.
- 王君婷, 2022. 海洋精密声学数据处理理论与方法研究[D]. 威海: 山东大学.
- WANG J T, 2022. Research on theory and method of marine precise acoustic data processing[D]. Weihai: Shandong University.
- 王同, 苏林, 任群言, 等, 2022. 基于注意力机制的全海深声速剖面预测方法[J]. *电子与信息学报*, 44(2): 726-736.
- WANG T, SU L, REN Q Y, et al, 2022. Full-sea depth sound speed profiles prediction using RNN and attention mechanism[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 44(2): 726-736.
- 禹小康, 2022. 海洋声速场构建与海底基准网平差方法研究[D]. 西安: 长安大学.
- YU X K, 2022. Research on key technology of high-precision acoustic positioning of seafloor control point[D]. Xi'an: Chang'an University.
- 袁浩, 贾帅东, 金绍华, 等, 2023. 利用GA-NN模型反演声速剖面的众源水深数据声速改正[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 48(3): 377-385.
- YUAN H, JIA S D, JIN S H, et al, 2023. Correction for crowd sourced bathymetry data using GA-NN model to inverse sound velocity profiles[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 48(3): 377-385.
- 张志伟, 暴景阳, 林建炬, 2017. 多波束测量声速剖面EOF表示阶次选取研究[J]. *海洋测绘*, 37(5): 17-21.
- ZHANG Z W, BAO J Y, LIN J J, 2017. Order selection of EOF expression of sound velocity profile in multibeam surveys[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 37(5): 17-21.
- DAVIS R E, 1976. Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 6(3): 249-266.
- DAVIS T M, COUNTRYMAN K A, CARRON M J, 1986. Tailored acoustic products utilizing the NAVOCEANO GDEM (a generalized digital environmental model)[C]//Proceedings 36th Naval Symposium on Underwater Acoustics. San Diego: Naval Ocean Systems Center.
- GROSSO D, 2005. New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations)[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 56(4): 1084-1091.
- HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J, 1997. Long short-term memory[J]. *Neural Computation*, 9(8): 1735-1780.
- LEBLANC L R, MIDDLETON F H, 1980. An underwater acoustic sound velocity data model[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 67: 2055-2062.
- LOVETT J R, 1998. Merged seawater sound-speed equations[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 63(6): 1713-1718.
- MACKENZIE K V, 1981. Nine-term equation for sound speed in the oceans[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 70(3): 807-812.
- MEINEN C S, WATTS D R, 1997. Further evidence that the sound-speed algorithm of Del Grosso is more accurate than that of Chen and Millero[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 102(4): 2058-2062.
- MUNK W H, 1974. Sound channel in an exponentially stratified ocean with application to SOFAR[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 55(2): 220-226.
- PENG L H, WANG L, QIU X F, et al, 2003. Modal wave number tomography for South China Sea front[J]. *China Ocean Engineering*, 17(2): 289-294.

Construction of Sound Velocity Field Based on Deep Learning Combined With WOA18 Temperature and Salinity Model

TANG An, HE Kaifei, WU Yu, WANG Song

(College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: The change in sound velocity is an important factor affecting the precise positioning of underwater. Due to the existing sound velocity profile acquisition methods, the current sound velocity representation error seriously affects the underwater positioning accuracy. In view of the difficulty in realizing continuous temporal and spacial observation in a certain sea area in reality, this paper uses the temperature and salinity data of the Array for Real-time Geostrophic Oceanography (Argo) as the true value and a neural network model based on Long Short Term Memory (LSTM) with added attention mechanisms as well as the World Ocean Atlas 2018 (WOA18) historical thermohaline data to construct local ocean sound velocity field. The results show that this method can be used to retrieve relatively accurate sound velocity profiles in the depth range of 500-1 500 m in local waters of the Pacific Ocean, and the root-mean-square error of sound velocity inversion by LSTM neural network model with added attention mechanism is 0.34 m/s. The root-mean-square error of sound velocity in the local waters of the Atlantic Ocean is 0.78 m/s. Compared with the traditional Back Propagation Neural Network, the accuracy of BPNN and Back Propagation Neural Network Genetic Algorithm (BPNN+GA) neural networks with added genetic factors has been improved.

Keywords: acoustic velocity profile inversion; WOA18; Argo; deep learning

Received: July 28, 2023 **Online:** April 18, 2024

西印度洋甲藻门角藻属一新种

李艳^{1,2}, 孙萍^{1,2}, 李瑞香^{1,2}

(1. 自然资源部第一海洋研究所海洋生态研究中心, 山东青岛 266061;
2. 自然资源部海洋生态环境科学与技术重点实验室, 山东青岛 266061)

摘要: 记述了海洋甲藻门角藻属一新种, 命名为尖头角藻 *Tripos acuticephalotum* sp. nov.。标本于 2022 年 1 月 1 日采自西印度洋海域的站点(63°E, 2°S)。新种尖头角藻的形态特征为: 细胞大型, 背腹扁平, 似叶片; 总长 348 μm, 上壳远大于下壳; 上壳呈尖叶状, 横沟以上约 1/3 处最宽, 达 112 μm; 顶端钝突, 钝突处两侧边缘不光滑, 呈锯齿状; 下壳短, 底边斜直; 两个底角较粗壮, 左底角略长于右底角; 横沟平直或向左下方略倾斜。

关键词: 角藻属; 分类鉴定; 新种; 尖头角藻; 西印度洋

中图分类号: Q948.8

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2024)04-0830-05

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20240724002

引用格式: 李艳, 孙萍, 李瑞香, 2024. 西印度洋甲藻门角藻属一新种[J]. 海洋科学进展, 42(4): 830-834. LI Y, SUN P, LI R X, 2024. A new species of the genus *Tripos* Bory from the western Indian Ocean[J]. Advances in Marine Science, 42(4): 830-834.

角藻属(*Tripos* Bory de Saint-Vincent, 1823)与 *Ceratium* F. Schrank, 1793 和新角藻属(*Neoceratium* F. Gómez, D. Moreira & P. López-García, 2010)是同属异名, 是甲藻门(Dinophyta)甲藻纲(Dinophyceae)膝沟藻目(Gonyaulacales)角藻科(Cerataceae)的一个大属, 也是甲藻中被最早定名的一个属(Schrank, 1793)。角藻科分类系统曾出现过一个重大改变, 即新角藻属的提出和修订。Gómez 等(2010)根据海洋角藻和淡水角藻之间形态和分子学上的差异, 将海洋角藻划为新属——新角藻属(*Neoceratium*); 根据命名优先的原则, Calado 等(2010)提出应该使用最早命名的 *Tripos* 属, 因此, Gómez (2013)将海洋中的 *Neoceratium* 重新修订为 *Tripos*, 这一修订已得到 WoRMS(www.marinespecies.org)和 AlgaeBase(www.algaebase.org)两大数据库的认可。

角藻科甲藻是海洋浮游植物中最常见、种类最多的具甲甲藻(Gómez et al, 2010)。从热带到极地, 从近岸到大洋, 角藻的分布极为广泛, 在世界各大海域均开展过相关的研究(Von Paula, 1793; Graham et al, 1944; Dowidar, 1969; Burns et al, 1980; Carbonell, 1982; Dodge, 1982; 郭玉洁等, 1983; 李瑞香等, 1985; Huisman, 1989; Tomas, 1997; 林永水, 2009; 杨世民等, 2016; Gómez, 2021)。截至目前, 全世界报道的角藻有 120 多种(Gómez, 2005)。本文对 2021 年 12 月至 2022 年 2 月在西印度洋采集的样品进行鉴定时, 发现角藻属一新种, 进一步丰富了角藻属的名录和多样性。

1 材料与方

自然资源部第一海洋研究所浮游生物研究团队于 2021 年 12 月至 2022 年 2 月搭乘“向阳红 01”

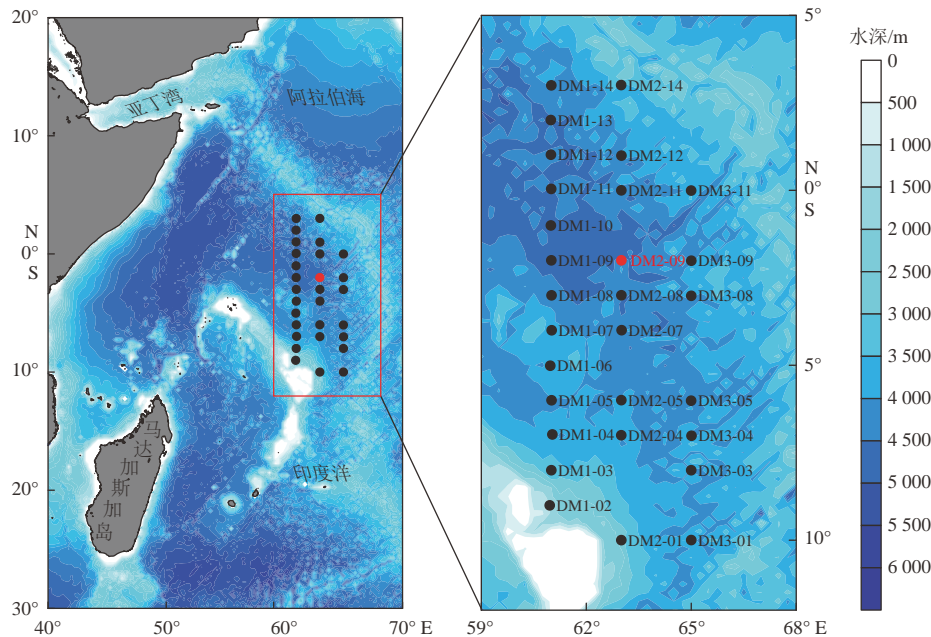
收稿日期: 2024-07-24 网络首发日期: 2024-08-08

资助项目: “全球变化与海气相互作用(二期)”专项(GASI-01-WINDSTwin)

作者简介: 李艳(1974—), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事浮游植物生态学方面研究. E-mail: liyan@fio.org.cn

(王燕 编辑)

科学考察船在西印度洋海域(45°~70°E, 20°S~5°N)29个站位(图1)采集了小型浮游生物样品。样品采集方法为:利用小型浮游生物网(网长为280 cm,网口内径为37 cm,网口面积为0.1 m²,筛绢孔径为77 μm),从200 m水深处至表层垂直拖曳。采集的小型浮游生物样品用缓冲甲醛溶液固定,使其体积分数为5%,之后带回实验室,用尼康TE2000-U显微镜进行分类鉴定。将固定后的新种样本作为模式标本(正模标本),保存于自然资源部第一海洋研究所。



注:所有实心圆点为小型浮游生物样品采集站位,其中1个红色圆点(DM2-09)为新种出现的站位。

图1 2021—2022年冬季西印度洋调查站位分布

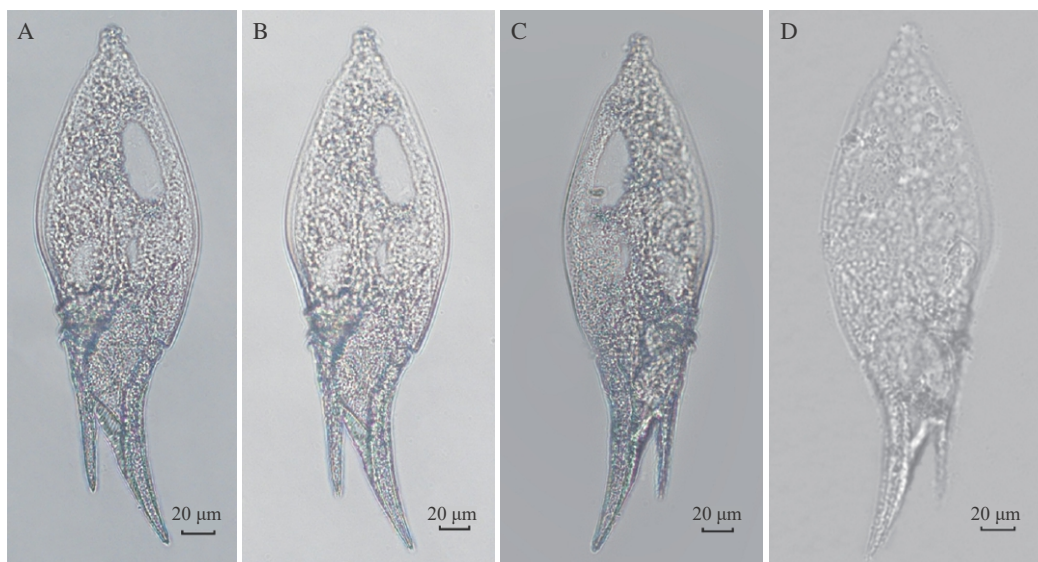
Fig. 1 Location of survey stations in the western Indian Ocean in the winter during 2021-2022

2 结果

在2022年1月1日于DM2-09站(63°E, 2°S)采集的小型浮游生物样品中鉴定出1个新种,即尖头角藻 *Tripes acuticephalotum* sp. nov.。

2.1 形态特征

该新种藻体细胞大型,背腹扁平,似叶片(图2中A)。藻体总长348 μm,上壳长度为212 μm,远大于下壳;上壳呈尖叶状,横沟以上约1/3处最宽,其宽度为112 μm(图2中A和B);由最宽处向顶端急缩,顶端钝突,钝突处两侧边缘不光滑,呈锯齿状,突起的高度约16 μm,与宽度近等(图2中A~D);下壳短,底边斜直,下壳横沟至两底角中线处的长度为60 μm;两底角较粗壮,左底角略长于右底角,分别为56和48 μm;右底角直,与细胞纵轴平行方向伸出,左底角较右底角粗,自下壳底线向外稍弯;横沟平直或向左下方略倾斜;环孔小,具顶孔。



注：A 和 B 为腹面观；C 和 D 为背面观。

图 2 尖头角藻 *Tripes acuticephalotum* sp. nov. 光学显微图

Fig. 2 Light micrographs of *Tripes acuticephalotum* sp. nov.

2.2 词源

根据《国际植物命名法规(维也纳法规)(中文版)》(国际植物学大会命名法分会, 2006), 生物学名称由属名和种加词构成, 是一个物种在全世界的唯一正名。本研究发现的新种采用角藻 *Tripes* 这一属名, 与国际最新命名法则一致, 种加词根据其上壳顶部形状钝突及略尖的形态特征而命名为 *acuticephalotum*, 该词是复合词, 其中 *acut-* 示尖, *i* 为连接词, *-cephalus* 示头, *-tum* 为词尾 (Stearn, 1973)。

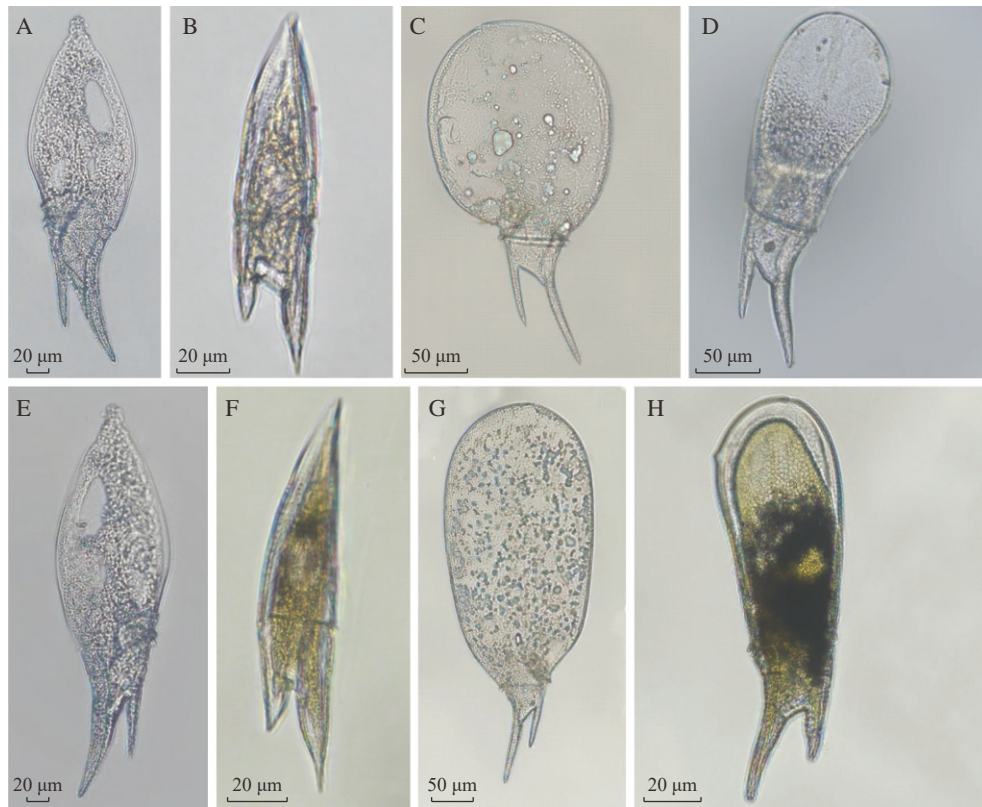
2.3 生态类型

该新种属于热带大洋性种。

3 讨论

新种尖头角藻与矛形角藻 (*Tripes lanceolatus* (Kofoid) Gómez, 2013) (同物异名: *Ceratium lanceolatum* Kofoid, 1907; *Neoceratium lanceolatum* (Kofoid) Gómez, Moreira & López-Garcia, 2010) 形态相近 (图 3), 二者均背腹扁平, 下壳长, 无顶角; 二者不同之处在于: 新种上壳宽披针形或近梭形, 顶端钝突, 具不光滑突起, 细胞更扁平, 下壳两底角斜向外伸出 (图 3 中 A 和 E); 矛形角藻顶端较尖, 上壳呈宽矛状, 下壳两底角沿纵轴方向伸出 (图 3 中 B 和 F)。在西印度洋采集的样品中同时鉴定出圆头角藻 (*Tripes gravidus* (Gourret) Gómez, 2013) (同物异名: *Ceratium gravidum* Gourret, 1883; *Neoceratium gravidum* (Gourre) Gómez, Moreira & López-Garcia, 2010) 和长头角藻 (*Tripes praeolongum* (Lemmermann) Gómez, 2013) (同物异名: *Ceratium praeolongum* (Lemmermann) Kofoid ex Jörgensen, 1911; *Neoceratium praeolongum* (Lemmermann) Gómez, Moreira & López-Garcia, 2010), 二者与尖头角藻外形亦非常相似, 其共性是无顶角, 上部宽扁, 背腹甚扁, 下壳形状略同 (图 3)。三者不同之处在于上壳形状的差异: 新种尖头角藻上壳尖, 宽披针形或近梭形, 顶端尖 (图 3 中 A 和 E); 圆头角藻上壳膨大, 近圆

形或卵圆形,顶端圆钝,无顶角,上壳在横沟上缘处急剧缩窄(图3中C和G);长头角藻上壳如舌状,顶端圆钝,长约为宽的2.5倍(图3中D和H)。



注: A 和 E 为新种尖头角藻 *T. acuticephalotum* sp. nov.; B 和 F 为矛形角藻 *T. lanceolatus* (Kofoid) Gómez, 2013; C 和 G 为圆头角藻 *T. gravidus* (Gourret) Gómez; D 和 H 为长头角藻 *T. praeolongum* (Lemmermann) Gómez。A、B、C、D 和 F 为腹面观; E、G 和 H 为背面观。

图 3 尖头角藻与矛形角藻、圆头角藻、长头角藻的形态特征比较

Fig. 3 Morphological characteristics comparison of *T. acuticephalotum* sp. nov., *T. lanceolatus* (Kofoid) Gómez, *T. gravidus* (Gourret) Gómez and *T. praeolongum* (Lemmermann) Gómez

参考文献 (References):

- 国际植物学大会命名法分会, 2006. 国际植物命名法规(维也纳法规)(中文版)[M]. 张丽兵, 译, 2007. 北京: 科学出版社. Nomenclature Section, International Botanical Congress, 2006. International code of botanical nomenclature (Vienna Code) (Chinese edition)[M]. ZHANG L B, trans., 2007. Beijing: Science Press.
- 郭玉洁, 叶嘉松, 周汉秋, 1983. 西沙、中沙群岛海域的角藻[J]. 海洋科学集刊, 20: 69-108. GUO Y J, YE J S, ZHOU H Q, 1983. *Ceratium* around the Xisha and Zhongsha Islands[J]. *Studia Marina Sinica*, 20: 69-108.
- 李瑞香, 毛兴华, 1985. 东海陆架区的甲藻[J]. 东海海洋, 3(1): 41-55. LI R X, MAO X H, 1985. Dinoflagellate in the continental shelf of the East China Sea[J]. *Donghai Marine Science*, 3(1): 41-55.
- 林永水, 2009. 中国海藻志: 第六卷 甲藻门 第一册 甲藻纲 角藻科[M]. 北京: 科学出版社. LIN Y S, 2009. Flora algarum marinarum sinicarum: Tomus VI Pyrrophyta (No. I) Dinophyceae Ceratiaceae[M]. Beijing: Science Press.
- 杨世民, 李瑞香, 董树刚, 2016. 中国海域甲藻II (膝沟藻目)[M]. 北京: 海洋出版社. YANG S M, LI R X, DONG S G, 2016. Dinoflagellates in the China's Seas II (Gonyaulacales)[M]. Beijing: China Ocean Press.

- BURNS D A, MITCHELL J S, 1980. Some dinoflagellates of the genus *Ceratium* from around New Zealand[J]. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 14(2): 149-153.
- CARBONELL M C, 1982. *Ceratium Schrank* (Dinoflagellate, Peridiniales) de las Islas del Rosario[J]. Caribe Colombiano, 12: 71-91.
- DODGE J D, 1982. Marine dinoflagellates of the British Isles[M]. London: Hobbs the Printers of Southampton.
- DOWIDAR N M, 1969. The genus *Ceratium* from the Red Sea[J]. Journal of the Faculty of Marine Science, 3: 5-36.
- GÓMEZ F, 2005. A list of free-living dinoflagellate species in the world's oceans[J]. Acta Botanica Croatica, 64: 129-212.
- GÓMEZ F, MOREIRA D, LOPEZ-GARCIA P, 2010. *Neoceratium* gen. nov., a new genus for all marine species currently assigned to *Ceratium* (Dinophyceae)[J]. Protist, 161: 35-54.
- GÓMEZ F, 2013. Reinstatement of the dinoflagellate genus *Tripos* to replace *Neoceratium*, marine species of *Ceratium* (Dinophyceae, Alveolata)[J]. CICIMAR Oceanides, 28(1): 1-22.
- GÓMEZ F, 2021. Speciation and infrageneric classification in the planktonic dinoflagellate *Tripos* (Gonyaulacales, Dinophyceae)[J]. Current Chinese Science, 1(3): 346-372.
- GRAHAM H W, BRONIKOVSKY N, 1944. The genus *Ceratium* in the Pacific and North Atlantic Oceans: biology part 5[M]. USA: Literary Licensing, LLC.
- HUISMAN J M, 1989. The genus *Ceratium* (Dinophyceae) in Bass Strait and adjoining waters, southern Australia[J]. Australian Systematic Botany, 2(4): 425-454.
- STEARNS W T, 1973. 植物学拉丁文(上册)[M]. 秦仁昌, 译, 1978. 北京: 科学出版社. STEARNS W T, 1973. Botanical Latin (volume 1)[M]. QIN R C, trans., 1978. Beijing: Science Press.
- TOMAS C R, 1997. Identifying marine phytoplankton[M]. San Diego: Academic Press.
- VON PAULA S F, 1793. Mikroskopische Wahrnehmungen[J]. Der Naturforscher, 27: 26-37.

A New Species of the Genus *Tripos* Bory From the Western Indian Ocean

LI Yan^{1,2}, SUN Ping^{1,2}, LI Ruixiang^{1,2}

(1. Marine Ecology Research Center, First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;

2. Key Laboratory of Science and Engineering for Marine Ecology and Environment, MNR, Qingdao 266061, China)

Abstract: A new species of the genus *Tripos* Bory de Saint-Vincent, 1823: *Tripos acuticephalotum* sp. nov. was reported in this study. The samples of *Tripos* were collected from the western Indian Ocean (63°E, 2°S) on January 1, 2022. The morphological characteristics of the new species are as follows. They are large cells, cell considerably flattened dorso-ventrally and leaf like. The total length is 348 μm, and the epitheca is much longer than the hypotheca. The epitheca is sharp leaf shaped, and the widest point at about one-third above the cingulum with about 112 μm. The top of the epitheca is blunt, and the edges on both sides of the blunt protrusion are not smooth and serrated. The hypotheca is short, with a slanted and straight bottom edge. The two antapical horns are relatively thick, with the left slightly longer than the right. The sulcus is straight or inclined towards the lower left.

Keywords: *Tripos*; taxonomic identification; new species; *Tripos acuticephalotum* sp. nov.; the western Indian Ocean

Received: July 24, 2024 **Online:** August 8, 2024

《海洋科学进展》第 42 卷(2024 年)

总 目 次

第 1 期

东海区域海洋学调查研究回顾	冉祥滨,徐腾飞,赵彬,郭景松,乔淑卿,魏泽勋,冷疏影(1)
龙目和翁拜海峡海流季节内变化特征与机制分析	赵海峰,徐腾飞,官晟,王冠琳,滕飞,李淑江,曹国娇(21)
风作用下规则波在岸礁地形上的水动力特性数值研究	王勇杰,蒋昌波,邓斌,吴睿轩,朱庆雄(38)
曼谷湾顶红树林区近百年来有机碳埋藏记录及影响因素	徐元芹,李萍,高伟,刘杰(48)
南极普里兹湾表层沉积硅藻及其与环境因素的关系	马瑞雯,黄玥(62)
2021 年 6 月和 9 月唐山近岸海域浮游植物群落结构特征及影响因素	马新,姚抒含,徐金涛,张万磊,杨雯,王众,李微微,谭法启(75)
结合地理信息与 AIS 数据的海上航道自适应提取方法	孙伟峰,孙少奇,李小彤,纪永刚,戴永寿(92)
融合多尺度卷积和侧窗滤波的 HY-1C CZI 云检测方法	王新念,马毅,刘荣杰,崔学荣,赵鑫,葛化鑫(102)
基于频谱细化和二阶同步压缩变换的船载地波雷达目标检测方法	刘亚春,王祎鸣,杨俊钢(116)
基于卷积神经网络的高频地波雷达有效波高反演	于彩彩,楚晓亮,王曙曜(126)
基于深度学习的 SAR 影像海洋涡旋检测算法对比分析	贾翊文,荆文龙,杨骥,舒思京,李勇,邓应彬(137)
基于多源数据融合的澎湖水道数字水深模型构建	熊桂芳,王波,朱长德,张国栋,郭澍(149)
基于水下滑翔机观测的印度洋东南海域环境噪声风关特性	王金成,潘海东,王冠琳,王岩峰(160)
珠海市前山河污染物溯源预警理想数值实验研究	游志伟,徐广珺,刘雨立,谢文鸿,刘志国,董昌明(170)
海洋温差发电混合工质二次热回收循环系统理论和实验研究	陈风云,彭景平,刘蕾,葛云征,王泉斌,刘伟民(185)
基于物联网的浮标数据采集与控制系统设计	张新文,刘同木,周保成,马玉,孟强,林冠英,许铭彬(196)

第 2 期

- 太平洋涌浪池年际变化与成因研究 李东泽, 李 瑞, 吴克俭(207)
- 基于 FVCOM 的夏季珠江冲淡水年际变化特征 骆明钧, 李骏旻, 丁 扬, 张 丛, 周玲玲(221)
- CMIP6 模式对北极海冰的模拟及夏季无冰时间集合预估 赵海波, 李佳琦, 王梓琦, 王晓春(238)
- CMIP6 计划中我国地球气候系统模式北极海冰空间分布的模拟评估 李佳琦, 王晓春, 赵立清(254)
- 全球变暖背景下中国海域风速长期变化趋势分析及风资源评估
..... 徐 杰, 胡玉植, 李江夏, 朱博渊, 任宁丹(269)
- 刚性植物对聚焦波爬坡影响的数值模拟 列彦成, 屈 科, 王 旭(281)
- 南大西洋赤狐热液区硫化物特征及成矿机制 张 琦, 李 兵, 刘季花, 李传顺, 王 赛, 石学法(296)
- 山东半岛东部典型砂质海岸侵蚀特征及其影响因素
..... 魏 霞, 高 伟, 李 萍, 刘 杰, 徐元芹, 张卓立, 李安龙(312)
- 基于 CEL 算法的神狐海域泥火山内部物质运动过程数值模拟
..... 刘晓艳, 孙永福, 宋玉鹏, 修宗祥, 李西双, 宋丙辉(325)
- 2021 年渤海浮游植物群落结构及其季节性变化 李亚倩, 张 倩, 杨世民(337)
- 基于 NaI(Tl) 伽马谱仪的反演分析法在海水放射性探测中的应用
..... 毕海杰, 张颖颖, 吴丙伟, 冯现东, 石 岩(349)
- 海洋碳汇分类方法框架探索与构建 刘大海, 董 通, 刘 超, 李晓璇, 刘镇杭, 池 源(358)
- 基于多帧聚类的紧凑型地波雷达海上目标航迹起始方法 孙伟峰, 刘秋爽, 李小彤, 纪永刚(370)
- 基于无人机航测的红树林潮滩地貌高程反演 梁喜幸, 戴志军, 黄 鹄, 王 杰, 黎树式, 王日明, 庞文鸿(384)
- 一种 Kongsberg EM 多波束后向散射强度波束指向性残余改正方法 理 晨, 赵建虎, 徐 冲, 浣 石(400)
- 下凹和上凸型海洋内孤立波对遥控潜航器的作用力研究 赵 洁, 查国震, 宋新政, 宋新新, 彭红春(412)

第 3 期

- 基于测绘学角度探讨海岸线及其测定方法 刘焱雄, 陈义兰, 杨 龙, 高 珊(425)

不同层结条件下海浪生湍流混合特征分析及其对上层海洋的影响	庄展鹏,袁业立(437)
安达曼海南部内孤立波生成与传播的三维数值模拟	张培超,王刚,戴德君,乔方利,黄传江(452)
黑潮延伸区系泊浮标海表 pH 的年际和季节变化	武雨茜,刘聪,贺双颜,陈栋,姜庆岩,李培良(466)
基于锋线提取和 VMD-LSTM 的东海黑潮温度锋强度预测	徐为帅,张磊,王华(478)
基于 Argos 漂流浮标资料的南海及邻近海域次中尺度涡识别及特征分析	崔虎山,孙佳,郭廷良,熊学军(490)
海洋低信噪比小道距地震处理关键技术	颜中辉,杨传胜,王小杰,刘鸿,杨睿,刘欣欣,李海龙(501)
东印度洋东经 90°海岭的地球物理特征和成因探讨	朱佳豪,裴彦良,支鹏遥,刘晨光,刘焱光,刘洋(515)
西南印度洋龙旗热液区沉积物地球化学特征及其指示意义	陈延军,李萍,徐元芹,高伟,刘杰(532)
基于改进 SiamRPN 的高速无人船海上目标视觉跟踪研究	金久才,张家林,刘德庆,刘兰军,任鹏,马毅(545)
基于探空数据的测风激光雷达在黄海西部海岸带的适用性分析	时晓曦,鄢坤,王琳森,庞华基(555)
福建东山湾几种产胶红藻的 DNA 条形码记录	刘晨临,李艳,王晓,孙萍(568)
基于 FIO-COM 的复杂海洋环境下的声传播效应研究	杨春梅,李润,刘宗伟,姜莹,吕连港,李显阳(578)
基于声传播损失的南海海域地声参数敏感性分析	李润,杨春梅,宋鹏,李官保,刘宗伟,姜莹,吕连港(590)
基于平均声速测量的声速剖面实时重构方法	王旭,刘宗伟,甘忠良,姜莹,杨春梅,吕连港(602)

第 4 期

基于潜标观测的南海北部陆架海域内潮时空变化特征	尹汉军,谢波涛,张琪,黄必桂,黄晓冬(611)
陆丰海域秋季第一模态内孤立波观测特征分析	李达,刘涛,谢波涛,黄必桂,张琪,黄晓冬(623)
阿留申群岛阿图岛水道多年夏季水文特征分析	陈红霞,刘健康,张学宏,刘敏,林丽娜,刘娜(634)
沉积物活性铁锰特征对比研究及其对有机碳矿化的意义——以长江口、黄海中部陆架泥质区和黄河口为例	韦世金,孟倪,韦钦胜,庄光超(643)
长江口北支上段滩槽演变过程研究	王凌霄,戴志军,梅雪菲,王杰,楼亚颖,乔红杰(663)

黄河口及邻近海域表层沉积物甲藻孢囊多样性研究	高 晨, 王晓峰, 石雅君, 马元庆, 隋 傅, 姜向阳, 刘丽娟, 姜会超, 宋秀凯(677)
南海北部夏季浮游植物群落对中尺度涡物理过程的响应	冯友飞, 李佳烜, 杨世民(690)
三亚湾近岸海域浮游甲藻与水环境因子相关性研究	王 蒙, 王兴华, 李 翔, 赵 茜, 李格乐, 王 辉, 殷安齐(709)
永乐环礁表层海水细菌群落多样性及功能预测	舒艾梅, 宫春光, 黄惠琴, 胡永华, 莫坤联(725)
群体感应对藻际细菌 <i>Sulfitobacter pseudonitzschiae</i> H46 生理活性调控的研究	迟旭辉, 杨 淋, 张彦超, 胡天翼, 王 帅, 郑 立(738)
2022 年黄河调水调沙对下游有机物和营养盐年内变化的影响	高书铭, 姚爱林, 明 玥, 王宪业, 高 磊(753)
寒潮影响下北部湾研究海域颗粒态和溶解态 ²¹⁰ Po 的分布特征	刘文靖, 钟强强, 王 浩, 陈随缘, 黄德坤, 刘进文, 于 涛(769)
2022 年 8 月北黄海北部溶解甲烷分布、海-气交换通量及影响因素	徐雪梅, 王明丽, 何宗财, 韩建波, 邢庆会, 王心怡, 陈 虹(782)
不同压强深度转化模型构建的声速剖面对水下定位的影响	王 松, 贺凯飞, 姬生月, 唐 安, 王 跃, 姚铭飞(794)
小道距高分辨率多道地震系统在渤海海峡地层探测中的应用	祁晓雨(807)
基于深度学习联合 WOA18 温盐模型构建声速场	唐 安, 贺凯飞, 吴 宇, 王 松(816)
西印度洋甲藻门角藻属一新种	李 艳, 孙 萍, 李瑞香(830)

ADVANCES IN MARINE SCIENCE

Vol. 42, 2024

CONTENTS IN BRIEF

No. 1

- A Review on the Progress of Regional Oceanography in the East China Sea
..... *RAN Xiangbin, XU Tengfei, ZHAO Bin, GUO Jingsong, QIAO Shuqing, WEI Zexun, LENG Shuying* (1)
- Intraseasonal Variation of the Throughflow in the Lombok Strait and Ombai Strait and Its Driven Mechanism
..... *ZHAO Haifeng, XU Tengfei, GUAN Sheng, WANG Guanlin, TENG Fei, LI Shujiang, CAO Guojiao* (21)
- Numerical Study on Hydrodynamic Characteristics of the Regular Waves on Fringing Reefs Under Wind Forcing
..... *WANG Yongjie, JIANG Changbo, DENG Bin, WU Ruixuan, ZHU Qingxiong* (38)
- Organic Carbon Burial Records and Influencing Factors of Mangrove Forest at the Tip of Bangkok Bay Over the Past
Century *XU Yuanqin, LI Ping, GAO Wei, LIU Jie* (48)
- Diatoms in Surface Sediments of Prydz Bay, Antarctica and Their Relationship to Environmental Factors
..... *MA Ruiwen, HUANG Yue* (62)
- Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Influencing Factors in Tangshan Coastal Waters in June and
September, 2021 *MA Xin,
YAO Shuhan, XU Jintao, ZHANG Wanlei, YANG Wen, WANG Zhong, LI Weiwei, TAN Faqi* (75)
- An Adaptive Extraction Method of Maritime Channels by Combining Geographic Information and AIS Data
..... *SUN Weifeng, SUN Shaoqi, LI Xiaotong, JI Yonggang, DAI Yongshou* (92)
- HY-1C CZI Cloud Detection Method Based on Multi-Scale Convolution and Side Window Filtering
..... *WANG Xinnian, MA Yi, LIU Rongjie, CUI Xuerong, ZHAO Xin, GE Huaxin* (102)
- Ship Target Detection Method of Shipborne Surface Wave Radar Based on Spectrum Refinement and Second-Order
Synchronosqueezing Transform *LIU Yachun, WANG Yiming, YANG Jungang* (116)
- Significant Wave Height Inversion of High Frequency Surface Wave Radar Based on Convolutional Neural Network
..... *YU Caicai, CHU Xiaoliang, WANG Shuyao* (126)
- Comparative Analysis of Ocean Eddy Detection Algorithms Based on Deep Learning in SAR Images
..... *JIA Yiwen, JING Wenlong, YANG Ji, SHU Sijing, LI Yong, DENG Yingbin* (137)
- Construction of Penghu Channel Digital Bathymetric Model Based on Multisource Data Fusion
..... *XIONG Guifang, WANG Bo, ZHU Changde, ZHANG Guodong, GUO Shu* (149)
- Wind-Generated Characteristics of Ambient Noise in Southeastern Indian Ocean Based on Underwater Glider Observation
..... *WANG Jincheng, PAN Haidong, WANG Guanlin, WANG Yanfeng* (160)
- Idealized Numerical Study on the Traceability and Early Warning of Pollutants in the Qianshan River, Zhuhai City
..... *YOU Zhiwei, XU Guangjun, LIU Yuli, XIE Wenhong, LIU Zhiguo, DONG Changming* (170)
- Theoretical and Experimental Study on Secondary Heat Recovery Cycle System of Mixed Working Fluid for Ocean
Thermal Energy Conversion
..... *CHEN Fengyun, PENG Jingping, LIU Lei, GE Yunzheng, WANG Quanbin, LIU Weimin* (185)
- Design of Buoy Data Acquisition and Control System Based on Internet of Things
..... *ZHANG Xinwen, LIU Tongmu, ZHOU Baocheng, MA Yu, MENG Qiang, LIN Guanying, XU Mingbin* (196)

No. 2

- The Interannual Variation and Causes of the Swell Pools in the Pacific Ocean ... *LI Dongze, LI Rui, WU Kejian* (207)

Inter-Annual Variation of the Pearl River Diluted Water in Summer Based on FVCOM	
.....	<i>LUO Mingjun, LI Junmin, DING Yang, ZHANG Cong, ZHOU Lingling</i> (221)
CMIP6 Simulations of the Arctic Sea Ice and Their Ensemble Projection of Ice Free Time in Boreal Summer	
.....	<i>ZHAO Haibo, LI Jiaqi, WANG Ziqi, WANG Xiaochun</i> (238)
Evaluation of the Spatial Distribution of Arctic Sea Ice Concentration in CMIP6 Models Developed in China	
.....	<i>LI Jiaqi, WANG Xiaochun, ZHAO Liqing</i> (254)
Assessment of Long-Term Variations of Wind Speed and Wind Resources in China Seas Under the Global Warming	
.....	<i>XU Jie, HU Yuzhi, LI Jiangxia, ZHU Boyuan, REN Ningdan</i> (269)
Numerical Simulation on Influences of Rigid Vegetation Patch on Runup of Focused Wave Groups	
.....	<i>LIE Yancheng, QU Ke, WANG Xu</i> (281)
Sulfide Characteristics and Metallogenic Mechanism of the Chihu Hydrothermal Field in the South Atlantic Ocean	
.....	<i>ZHANG Qi, LI Bing, LIU Jihua, LI Chuanshun, WANG Sai, SHI Xuefa</i> (296)
Erosion Characteristics and Influencing Factors of Typical Sandy Coasts in the Eastern Shandong Peninsula	
.....	<i>WEI Xia, GAO Wei, LI Ping, LIU Jie, XU Yuanqin, ZHANG Zhuoli, LI Anlong</i> (312)
Numerical Simulation of Substance Motion in Mud Volcano in the Shenhu Area Based on CEL Algorithm	
.....	<i>LIU Xiaoyan, SUN Yongfu, SONG Yupeng, XIU Zongxiang, LI Xishuang, SONG Binghui</i> (325)
Phytoplankton Community Structure and Its Seasonal Variation in the Bohai Sea in 2021	
.....	<i>LI Yaqian, ZHANG Qian, YANG Shimin</i> (337)
Application of Inversion Analysis Method Based on NaI(Tl) Spectrometer in Seawater Radioactivity Detection	
.....	<i>BI Haijie, ZHANG Yingying, WU Bingwei, FENG Xiandong, SHI Yan</i> (349)
Exploration and Construction of Methodological System for Ocean Carbon Sink Classification	
.....	<i>LIU Dahai, DONG Tong, LIU Chao, LI Xiaoxuan, LIU Zhenhang, CHI Yuan</i> (358)
A Maritime Target Track Initiation Method Based on Multi-Frame Clustering for Compact Ground Wave Radar	
.....	<i>SUN Weifeng, LIU Qiushuang, LI Xiaotong, JI Yonggang</i> (370)
Elevation Inversion of Mangrove Tidal Flat Geomorphology Based on UAV Aerial Survey	
.....	<i>LIANG Xixing, DAI Zhijun, HUANG Hu, WANG Jie, LI Shushi, WANG Riming, PANG Wenhong</i> (384)
A Kongsberg EM Multibeam Backscatter Strength Beam Pattern Residual Correction Method	
.....	<i>LI Chen, ZHAO Jianhu, XU Chong, HUAN Shi</i> (400)
Study on the Acting Force of Depression and Elevation Ocean Internal Solitary Waves on a Remotely Operated Vehicle	
.....	<i>ZHAO Jie, ZHA Guozhen, SONG Xingai, SONG Xinxin, PENG Hongchun</i> (412)

No. 3

Discussion on the Determination of the Coastline Based on Surveying and Mapping	
.....	<i>LIU Yanxiong, CHEN Yilan, YANG Long, GAO Shan</i> (425)
Characteristics Analysis of Turbulent Mixing Generated by Surface Waves Under Different Stratification Conditions and Its Influences on Upper Ocean	
.....	<i>ZHUANG Zhanpeng, YUAN Yeli</i> (437)
Three-Dimensional Numerical Study of Internal Solitary Waves in the Southern Andaman Sea	
.....	<i>ZHANG Peichao, WANG Gang, DAI Dejun, QIAO Fangli, HUANG Chuanjiang</i> (452)
Decadal Trend and Seasonal Variation of Sea Surface pH of the Kuroshio Extension Observatory Moored Buoy	
.....	<i>WU Yuqian, LIU Cong, HE Shuangyan, CHEN Dong, JIANG Qingyan, LI Peiliang</i> (466)
Prediction of Temperature Front Strength of Kuroshio in the East China Sea Based on Front Extraction and VMD-LSTM	
.....	<i>XU Weishuai, ZHANG Lei, WANG Hua</i> (478)
Identification and Feature Analysis of Submesoscale Eddies in the South China Sea and Adjacent Regions Based on Argos	

Drifters	<i>CUI Hushan, SUN Jia, GUO Yanliang, XIONG Xuejun</i> (490)
The Key Technology of Marine Low SNR Seismic Data Processing for Small Group Interval .....	..... <i>YAN Zhonghui, YANG Chuansheng, WANG Xiaojie, LIU Hong, YANG Rui, LIU Xinxin, LI Hailong</i> (501)
Geophysical Characteristics and Genesis of the Ninetyeast Ridge in the Eastern Indian Ocean .....	..... <i>ZHU Jiahao, PEI Yanliang, ZHI Pengyao, LIU Chenguang, LIU Yanguang, LIU Yang</i> (515)
Geochemical Characteristics and Indicative Significance of Sediments in the Longqi Hydrothermal Area of the Southwest Indian Ocean .....	..... <i>CHEN Yanjun, LI Ping, XU Yuanqin, GAO Wei, LIU Jie</i> (532)
Visual Tracking of Maritime Targets for a High-Speed Unmanned Surface Vehicle Based on Improved Siamese Region Proposal Network .....	..... <i>JIN Jiucui, ZHANG Jialin, LIU Deqing, LIU Lanjun, REN Peng, MA Yi</i> (545)
Doppler Wind Lidar Applicability Research in Western Yellow Sea Coastal Zone Based on Radiosonde .....	..... <i>SHI Xiaomeng, YAN Shen, WANG Linmiao, PANG Huaji</i> (555)
Records of Several Species of Gracilariales Economic Red Algae in Dongshan Bay, Fujian .....	..... <i>LIU Chenlin, LI Yan, WANG Xiao, SUN Ping</i> (568)
Acoustic Propagation Effects in Complex Ocean Environments Based on FIO-COM .....	..... <i>YANG Chunmei, LI Run, LIU Zongwei, JIANG Ying, LÜ Liangang, LI Xianyang</i> (578)
Sensitivity Analysis of Geo-Acoustic Parameters in the South China Sea Based on Acoustic Transmission Loss .....	..... <i>LI Run, YANG Chunmei, SONG Peng, LI Guanbao, LIU Zongwei, JIANG Ying, LÜ Liangang</i> (590)
A Real-Time Reconstruction Method of Sound Velocity Profiles Based on Mean Sound Velocity Measurement .....	..... <i>WANG Xu, LIU Zongwei, GAN Zhongliang, JIANG Ying, YANG Chunmei, LÜ Liangang</i> (602)

No. 4

Spatiotemporal Characteristics of Internal Tides on the Continental Shelf of the Northern South China Sea Based on Mooring Observations .....	..... <i>YIN Hanjun, XIE Botao, ZHANG Qi, HUANG Bigui, HUANG Xiaodong</i> (611)
Property of the First-Mode Internal Solitary Waves in Autumn in the Lufeng Area in Northern South China Sea Revealed by Mooring Observations .....	..... <i>LI Da, LIU Tao, XIE Botao, HUANG Bigui, ZHANG Qi, HUANG Xiaodong</i> (623)
Summer Hydrological Characteristics Analysis of the Near Strait, Aleutian Islands .....	..... <i>CHEN Hongxia, LIU Jiankang, ZHANG Xuehong, LIU Min, LIN Lina, LIU Na</i> (634)
Comparative Study on the Characteristics of Reactive Iron and Manganese in Sediments From Coastal China and Its Significance for Organic Carbon Mineralization: Case Studies at the Yangtze River Estuary, the Mud Area of the Shelf in Central Yellow Sea, and the Yellow River Estuary .....	..... <i>WEI Shijin, MENG Ni, WEI Qinsheng, ZHUANG Guangchao</i> (643)
Study on Evolutionary Process of Shoal-Channel at Upper Reach of the North Branch of the Changjiang Estuary .....	..... <i>WANG Lingxiao, DAI Zhijun, MEI Xuefei, WANG Jie, LOU Yaying, QIAO Hongjie</i> (663)
Diversity of Dinoflagellate Cysts in Surface Sediments in the Yellow River Estuary and Its Adjacent Sea Area .....	..... <i>GAO Chen, WANG Xiaofeng, SHI Yajun, MA Yuanqing, SUI Fu, JIANG Xiangyang, LIU Lijuan, JIANG Huichao, SONG Xiukai</i> (677)
Response of Phytoplankton Communities to the Physical Processes of Mesoscale Eddy in the Northern South China Sea in Summer .....	..... <i>FENG Youfei, LI Jiaxuan, YANG Shimin</i> (690)
Correlation Between Planktonic Dinoflagellates and Water Environmental Factors in Coastal Waters of Sanya Bay .....	..... <i>WANG Meng, WANG Xinghua, LI Xiang, ZHAO Qian, LI Gele, WANG Hui, YIN Anqi</i> (709)
Diversity and Functional Prediction of Bacterial Communities in Surface Seawater of Yongle Atoll .....	..... <i>SHU Aimei, GONG Chunguang, HUANG Huiqin, HU Yonghua, MO Kunlian</i> (725)

Study on the Biological Activities of Phycospheric Bacterium <i>Sulfitobacter Pseudonitzschiae</i> H46 Regulated by Quorum Sensing	<i>CHI Xuhui, YANG Lin, ZHANG Yanchao, HU Tianyi, WANG Shuai, ZHENG Li</i> (738)
The Impact of Water and Sediment Regulation on Monthly Changes of Downstream Organic Matter and Nutrients in the Yellow River in 2022	<i>GAO Shuming, YAO Ailin, MING Yue, WANG Xianye, GAO Lei</i> (753)
Distribution Features of Particulate and Dissolved ²¹⁰ Po in Beibu Gulf Under the Influence of Cold Wave	<i>LIU Wenjing, ZHONG Qiangqiang, WANG Hao, CHEN Suiyuan, HUANG Dekun, LIU Jimwen, YU Tao</i> (769)
Distributions, Influencing Factors and Sea-Air Fluxes of Dissolved Methane in the Northern of North Yellow Sea in August 2022	<i>XU Xuemei, WANG Mingli, HE Zongcai, HAN Jianbo, XING Qinghui, WANG Xinyi, CHEN Hong</i> (782)
The Impact of Constructing Sound Velocity Profiles Through Different Pressure-depth Conversion Models on Underwater Positioning	<i>WANG Song, HE Kaifei, JI Shengyue, TANG An, WANG Yue, YAO Mingfei</i> (794)
The Application of High Resolution Multichannel Seismic System With Small Group Interval to Stratigraphic Exploration in Bohai Strait	<i>QI Xiaoyu</i> (807)
Construction of Sound Velocity Field Based on Deep Learning Combined With WOA18 Temperature and Salinity Model	<i>TANG An, HE Kaifei, WU Yu, WANG Song</i> (816)
A New Species of the Genus <i>Tripes</i> Bory From the Western Indian Ocean	<i>LI Yan, SUN Ping, LI Ruixiang</i> (830)

《海洋科学进展》征稿简则

《海洋科学进展》是由自然资源部第一海洋研究所和中国海洋学会共同主办,国内外公开发行的全国性海洋科学学术期刊。主要刊登国内、外在海洋科学基础、应用基础和应用研究以及与海洋有关的交叉学科领域最新的学术成果。主要栏目:院士论坛、学术论文、研究报道、学术讨论、专题评述与综述、成果介绍、实验室介绍、海洋科学家介绍、快讯、书讯等。

一、来稿要求

1. 来稿内容应具有科学性、前沿性、创新性和实用性,能反映海洋科学研究的最新学术成果。来稿要求论点明确,研究方法合理,数据可靠,逻辑严密,语言简洁严谨。综述性文章第一作者仅限高级职称科技人员。

2. 来稿内容不得涉密和有学术不端行为,必要时须提供相关证明。

3. 文章内容应包括:中文题名;中文作者信息,包括作者及其工作单位(全称)、单位地址(省名、市名和邮编);中文摘要;中文关键词(3~8个为宜);中图分类号;正文;致谢(若有);参考文献;英文题名;对应中文作者信息的英文;英文摘要;英文关键词。首页脚注处注明资助项目类别和编号。同时,注明第一作者和通信作者(若有)简介,内容包括作者姓名(出生年—)、性别、职称、学位、研究生导师级别、主要研究方向和电子邮箱。

4. 论文摘要采用报道性文摘格式,内容应包括研究目的、方法、结果和结论。字数不少于250字。摘要中不出现图、表、化学结构式和公式。英文摘要可以与中文摘要内容一致,也可包含中文摘要内容、且比中文摘要更多有助于加深对文章内容了解的信息。

5. 论文应根据需要划分章节,每个章节应有层级编号和标题,前言或引言部分不加章节序号和标题。正文章节一般不宜超过4级,章节编号采用阿拉伯数字,如:“1”“1.1”“1.1.1”。

6. 文中所用名词术语、人名、地名等的中、外文和汉语拼音均应符合国家有关标准和规定。非公知公用的简称、外文缩略语和缩写词在正文中首次出现时应给出全称、中文翻译或解释。计量单位须采用中华人民共和国法定计量单位。文中所用外文及符号的格式应准确,英文、日文以外的外文请注明文种。

7. 来稿应附必要的图件和表格(图件同时提供矢量格式原图)。图件应简洁、清晰、美观,推荐使用彩图;表格应使用三线表。按照先文后图表的格式要求,将图、表放在文中相应位置,并提供中、英文对照的图题和表题,如有分图应编写分图序和分图名。图件中出现的地图应符合自然资源部《公开地图内容表示规范》的要求。建议使用自然资源部相关部门提供的有审图号的公益性地图(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>),或不涉及国界、领土范围和行政区划的示意性地图,并标示经纬度(度分秒格式)、主要地名(地名标注使用地理名称,非行政名称)和海域名。地图图幅范围、我国重要岛屿、行政区划内容、重要地理信息数据均须符合国家规定,不得出现地图涉密内容。

8. 参考文献采用“著者-出版年制”著录。正文中,应按引用文献时间的先后顺序,将各篇文献的著者姓氏和出版年置于对应文字后的“()”内。文末参考文献按照先中文后英文(均以字母为序)排序。本刊要求中英文双语文献著录,即中文参考文献应全部译成英文(译文应引自原稿英文)列出,紧排中文之后。其编排格式如下。

1) **中、外文期刊:** 作者名(外文姓前名后不用省略点,姓应全拼大写,名只取第1个字母,大写;如系多位作者,第三位作者后用“等”或“et al”缩略),出版年. 文献题名[J]. 期刊名(全称),卷(期)号:起止页码。

2) **论文集析出的文献:** 析出文献作者名,出版年. 析出文献名[C]//原文献主要责任者. 论文集名. 出版地:出版者:析出文献起止页码. 或者析出文献作者名,出版年. 析出文献名[C]//会议名称. 会议地点。

3) **著作(译著):** 作者名,出版年. 著作名[M]. (译者名,译.) 出版地:出版者:起止页码。

4) **技术标准:** 归口单位,出版年. 标准名称:第x部分子名称:标准序号[S]. 出版地:出版单位:页码。

5) **学位论文:** 作者名,收藏年. 论文题名[D]. 收藏地名:收藏学校。

6) **专利文献:** 专利申请者或所有者,公开年. 专利题名:专利国别,专利号[P]. 公告日期或公开日期[引用日期]. 获取和访问路径。

7) **电子文献:** 主要责任者. 题名:其他题名信息[文献类型标志/文献载体标志]. 出版地:出版者,出版年(更新或修改日期)[引用日期]. 获取和访问路径。

9. 引用他人观点、数据、图表、实验方法、公式等时必须注明出处。其他未提及的来稿格式有关细节和要求,可参阅本刊官网有关说明及已刊登文章。

二、来稿文责自负。编辑部有权对来稿做文字性删改,作者如不同意,投稿时请声明。

三、编辑部自收到稿件2个月内给出接受与否意见。来稿按规定收取版面费和审稿费。一经发表,即按著作权法给付稿酬(本刊所付稿酬已包括文本稿酬、电子期刊稿酬及本刊加入的各种数据库、媒体传播稿酬及著作权使用费),并赠送当期期刊2册。

四、投稿及联系方式

投稿方式: 请提供 word 格式电子版及文中所有图件的矢量图,登录我刊官网 <http://www.ams-journal.org.cn> 投稿。

编辑部地址: 山东省青岛市崂山区仙霞岭路6号(邮编266061)

E-mail: ams@fio.org.cn

联系电话: 0532-88967804

海洋科学进展

ADVANCES IN MARINE SCIENCE ■ www.ams-journal.org.cn



扫码访问官方网站

www.ams-journal.org.cn

本刊被下列国内检索系统收录:

- 《中文核心期刊要目总览》
- 中国科技核心期刊
- 《中国科学引文数据库》(CSCD)
- 《中国学术期刊(网络版)》
- 《中国核心期刊(遴选)数据库》
- 《中文科技期刊数据库》
- 《中国生命科学文献数据库》(CBA)
- 《中国生物学文摘》

本刊被下列国际检索系统收录:

- 俄罗斯《文摘杂志》(AJ)
- 英国《动物学记录》(ZR)
- 美国ProQuest公司数据库:
 - 《水生物科学和渔业文摘》(ASFA)
 - 《地球、大气及水生物科学数据库》
 - 《科技全辑》
 - 《水生物科学全辑》
 - 《自然科学全辑》

海洋科学进展

Haiyang Kexue Jinzhan (季刊 1983年创刊)
第42卷 第4期 2024年10月15日出版

Advances in Marine Science (QUARTERLY, STARTED IN 1983)
Vol.42 No.4 October 15, 2024

主办: 自然资源部第一海洋研究所 中国海洋学会

主编: 李铁刚

编辑: 《海洋科学进展》编辑部

地址: 青岛市崂山区仙霞岭路6号

电话: 0532-88967804 | 邮编: 266061

网址: <http://www.ams-journal.org.cn> | 电子邮箱: ams@fio.org.cn

出版: 《海洋科学进展》编辑部

印刷装订: 廊坊一二〇六印刷厂

国内总发行: 青岛市邮政局

国内订阅: 全国各地邮政局

国外总发行: 中国国际图书贸易总公司(北京399信箱)

Sponsored by:

First Institute of Oceanography, MNR, P.R. China

Chinese Society of Oceanography

Chief Editor: Li Tie-gang

Edited by: Editorial Office of Advances in Marine Science

Address: 6 Xianxialing Road, Laoshan District, Qingdao 266061, P.R. China

Telephone: +86-532-88967804 | Website: <http://www.ams-journal.org.cn>

E-mail: ams@fio.org.cn

Published by: Editorial Office of Advances in Marine Science

Printed by: Langfang 1206 Printing

Distributed by: China International Book Trading Corporation

(P. O. Box 399, Beijing 100044, P.R. China)

Issue Number: 4093QR

中国标准连续出版物号: $\frac{\text{ISSN } 1671-6647}{\text{CN } 37-1387/P}$

邮发代号: 国内 24-58
国外 4093QR

公开发行
定价: 80.00元

ISSN 1671-6647



9 771671 664242

10