

东海区域海洋学调查研究回顾

冉祥滨^{1,2}, 徐腾飞^{1,2}, 赵彬¹, 郭景松¹, 乔淑卿^{1,2}, 魏泽勋^{1,2*}, 冷疏影^{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, 山东青岛 266237;

3. 国家自然科学基金委员会地球科学部, 北京 10085)

摘要: 由于近几十年来日益增强的人类活动影响, 近海海洋环境较过去发生了巨大变化; 科学认知近海海洋环境特征、变化和控制因素对于应对全球变化具有重要意义, 是当前海洋学关注的重要议题。东海作为中国重要的海洋区域之一, 存在独特的环流系统, 孕育了大河口、上升流和黑潮三个代表性的生态系统, 其海洋科学研究对于我国的海洋资源开发、环境保护和国家安全具有重要意义。本文通过对东海区域海洋学研究的现状进行综述, 围绕海洋生物地球化学这一主线, 重点总结了物理海洋学、海洋化学、海洋地质学和生物海洋学的相关研究进展, 分析了目前存在的问题, 并展望了未来的发展方向。研究表明, 东海区域海洋环境受到人类活动和气候变化的深刻影响, 呈现新的变化格局; 长江径流输入、黑潮北上及其入侵陆架是东海三大生态系统格局形成的主要驱动力。除主要的环流结构外, 穿刺锋面和跨陆架海流是连接东海内陆架和外陆架水体的主要动力过程, 并促进了碳等重要生源物质的跨陆架输送。相关研究在海洋生态环境、应对气候变化、海洋灾害等方面取得了一定的成果, 但仍面临着数据不足、研究领域不够广泛等挑战。东海海洋环境在时间和空间上变化均较大, 且存在近岸富营养化、大河口低氧现象等主要环境问题, 因此有必要加强东海区域海洋学的研究。未来, 应鼓励自由探索研究, 加强国内、国际合作, 提高数据共享和技术创新能力, 推动东海海洋研究迈向更高水平。

关键词: 综述; 区域海洋学; 海洋调查; 东海

中图分类号: P72

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2024)01-0001-20

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20231222001

引用格式: 冉祥滨, 徐腾飞, 赵彬, 等. 2024. 东海区域海洋学调查研究回顾[J]. 海洋科学进展, 42(1): 1-20.

RAN X B, XU T F, ZHAO B, et al, 2024. A review on the progress of regional oceanography in the East China Sea[J].

Advances in Marine Science, 42(1): 1-20.

近海是人类活动最为频繁的海域, 具有极高的资源与环境价值。近海海洋环境现状和演变与区域经济社会的可持续发展息息相关, 是量化人类活动对海洋影响的重要窗口。近年来, 受气候变化和日益增强的人类活动影响, 我国近海海洋环境发生了较为显著的变化(Lu et al, 2018; Wang et al, 2023a), 突出表现在海洋污染和富营养化日趋严重, 海洋营养盐结构失衡导致以硅藻为基础的生态系统逐渐向硅藻与甲藻联合占优的新模态转变(Wang et al, 2021b), 使海洋资源量逐渐萎缩(Fu et al, 2018)。近年来, 研究人员开始关注气候与营养盐的结构变化对海洋环境演变的影响, 上述变化导致我国近海有害藻华爆发的频率增加(Wang et al, 2021a), 爆发时间也季节性前移。除此之外, 水

收稿日期: 2023-12-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(42149902)

作者简介: 冉祥滨(1980—), 男, 研究员, 博士, 主要从事生物地球化学方面研究. E-mail: rxb@fio.org.cn

* 通信作者: 魏泽勋(1970—), 男, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事海洋环流和潮波动力学方面研究.

E-mail: weizx@fio.org.cn

冷疏影(1965—), 女, 研究员, 主要从事海洋科学与极地科学、地理科学的学科发展战略研究、学科前沿热点分析及基础研究项目管理工作. E-mail: lengsy@nsfc.gov.cn

(李燕 编辑)

母爆发、绿潮灾害等新的环境问题不断出现(Wang et al, 2023a),使近海海洋环境变化呈现新模式。因此,我们需要关注海洋环境变化和气候变暖带来的近海生态灾害的发生情况,重视海水酸化、水体缺氧等热点环境问题的机制研究。开展环境管理/治理的重要前提是需要从过程变化、形成机理、生态环境和碳汇效应等多角度对近海海洋环境进行全方位认识,这同样需要结合现场调查和实验室培养以及数值模式等多科学手段对近海海洋系统的变化过程和机制进行深入研究。

东海是我国大陆架东缘的边缘海,属于世界上第三大陆架边缘海;东海地形西北高、东南低,宽度最大处超过 600 km,海区平均水深 370 m(表 1),最深处位于台湾岛东北部,可达 2 322 m。东海地形独特(包括岛屿、海峡、陆架、陆坡与海槽),有着丰富的河流径流输入,与太平洋之间存在活跃的跨陆架水交换,并受到复杂的台风与季风强迫作用。这使东海形成了独具特色的海洋动力与地质沉积环境,发育了较为典型的海洋生态系统。因此,东海逐渐成为国内外海洋学和环境学等领域研究的热点区域(Mackenzie et al, 2019; Qiu, 2019)。特别是随着大河流域筑坝的进行,河流入海的物质发生了显著的变化,长江口及东海陆架物质循环和沉积环境也发生了较大的变化,使陆海/河海相互作用成为东海区域海洋学研究的新热点。随着我国海洋强国建设的不断推进和“双碳”目标的提出,东海逐渐成为研究陆海相互作用、大洋与近海相互作用、海-气相互作用、多尺度动力过程耦合、上升流形成与生态学效应、冲淡水输入变异、碳源汇过程演变及其生态学效应等过程与机理研究的理想海域。同时,东海在我国海洋资源开发、海洋生态环境保护、海洋科技创新和海洋权益维护等方面发挥着不可替代的作用。

表 1 东海与我国其他近海海域主要环境参数的比较

Table 1 Comparison of major environmental factors between the East China Sea and other marginal seas of China

海域	面积/ ($\times 10^4 \text{ km}^2$)	水深/ m	pH ⁽¹⁾	氮磷比 (N/P) ^(1,2)	二氧化碳分压 ($p\text{CO}_2$)/ μatm	总有机碳(TOC) / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) ⁽¹⁾	叶绿素 $a^{(6)}$ / ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	硅甲藻比 ⁽⁶⁾	沉积速率 ⁽⁹⁾ / ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)
东海	77	370	8.18	40.6±8.96	286~408 ⁽³⁾	1.09±0.08	1.94±1.82	2.92 ⁽⁸⁾	>5.0 ⁽¹⁰⁾
黄海	38	44	8.11	20.7±3.68	271~534 ⁽⁴⁾	1.86±0.28	1.13	2.61 ⁽⁸⁾	6.1~8.1 ⁽¹⁰⁾
南海	350	1 210	8.18	22.5±1.34	360~425 ⁽⁵⁾	2.57±0.91	1.70±3.57	2.20 ⁽⁸⁾	0.27~0.65 ⁽¹¹⁾
渤海	7.7	18	8.11	38.5±10.3	402±80 ⁽¹⁾	5.41±0.94	1.42 ⁽⁷⁾	2.19 ⁽⁸⁾	5.9 ⁽¹⁰⁾

注: ⁽¹⁾为中位数的平均值和方差,数据引自暨卫东(2017); ⁽²⁾为中位数的平均值和方差,数据引自宋金明等(2019); ⁽³⁾数据引自Guo等(2015); ⁽⁴⁾数据引自Song等(2018); ⁽⁵⁾数据引自Zhai等(2013); ⁽⁶⁾为表层数据,数据引自孙松等(2012); ⁽⁷⁾为南海北部数据; ⁽⁸⁾为物种数的比值; ⁽⁹⁾为现代沉积速率; ⁽¹⁰⁾数据为泥质区的沉积速率,引自Qiao等(2017); ⁽¹¹⁾数据为南沙海域的沉积速率,引自邓爽等(2021)。

过去 30 年来,随着我国海洋事业的快速发展,东海海洋研究取得了一定的进展。然而,目前仍存在问题,如基础数据量小、缺少连续观测、研究领域不够广泛及多学科交叉研究不足等。因此,本文旨在综述东海海洋研究的现状,分析问题所在,并展望未来的发展方向。需说明的是,涉及东海的研究领域和方向较多,本文仅从区域海洋学的理念出发,聚焦东海海域海洋生物地球化学的主题进行总结,未覆盖东海海域全部的研究工作。

1 东海的基本特征

1.1 东海区域水文和地质特征

东海海流系统是我国东部海域环流最重要的部分,其独特的水文特征决定了其海洋生态环境的典型性(Cui et al, 2021),大致形成了长江口(大河口)、上升流和黑潮三个代表性的生态系统。东海的环流系统主要由黑潮及其分支和局地沿岸流(部分为风生海流)两大流系组成。黑潮是北太平洋

西边界流, 受水深和地形影响, 黑潮在台湾东北和九州西南海域存在入侵陆架现象, 这一外海流系北上、沿岸流系南下, 大体构成一个气旋式环流。由于受到季风影响, 此环流存在明显的季节变化 (Wang et al, 2016), 并在气候变化的背景下有年际变率增强的趋势 (Yuan et al, 2018)。总体而言, 作为我国近海主要的外来洋流系统, 黑潮及其分支具有流速大、流量大、物质输送能力强的特征, 并向近海供应了大量的营养物质 (Zuo et al, 2016; Zhang et al, 2019a; Chi et al, 2020), 对东海生态环境的影响极为显著 (Hung et al, 2007; Zuo et al, 2016; Cui et al, 2021)。

除拥有典型的环流系统外, 长江等主要河流的冲淡水也是控制东海海洋环境的重要因素 (Liu et al, 2018)。在众多河流中, 长江、钱塘江、甌江、闽江是注入东海的主要河流, 并在入海口形成了独特的河口生态系统。受淡水输入和外海水团的共同作用, 在东海内陆架, 特别是长江口形成了一系列低盐水团。这些低盐水团是中国近海营养盐最丰富的水域之一, 具有较高的 pH 和氮磷比, 赤潮等生态灾害频发 (表 1)。此外, 冲淡水的输入携带了大量陆源有机碳进入东海 (Zhao et al, 2021), 且具有明显的季节和年代际变化, 对东海海洋环境的影响也较为显著 (Zhang et al, 2007)。在区域上, 东海东部属于热带海区, 黑潮暖流不仅携带大量的热量, 还将太平洋赤道水域的热带浮游藻类和浮游动物带到这一水域, 使之呈现出不同于内陆架的典型特征; 而东海西部、东海东北部都是亚热带-温带海区。在东海, 季风对海洋环境同样有重要的影响。例如在西北风盛行的季节, 东海北部和南部近海的一部分又呈现暖温带的海洋环境特征。因此, 东海区域生态系统多样性显著, 特定生境水域是研究区域海洋学的理想区域。

在地形的作用下, 并受到大河和环流系统的控制, 东海发育了以陆源碎屑组分为主的地质沉积体系, 相对于开阔海域具有较高的沉积速率 (表 1), 是陆源物质在近海埋藏的重要场所。其中, 东海内陆架区的主要地质沉积体系由长江三角洲、浙闽沿岸泥质区和扬子浅滩潮流沙席所构成。在外陆架区域, 尤其是水深 60~120 m 的区域发育出了大量潮流沙脊和沙席 (郭志刚等, 2000)。同时, 东海沉积物动力过程具有显著的季节特征。夏季, 大部分长江来源的沉积物首先在河口口门附近积累; 冬季, 在沿岸流和冬季风暴的影响下, 这些积累的沉积物与三角洲的沉积物一同被输运至东海内陆架 (Liu et al, 2007)。由于台湾暖流的阻挡, 长江来源的沉积物主要沉积在长江口及其邻近的东海内陆架 (水深小于 50 m) (Liu et al, 2007)。前人的研究表明, 长江河口和东海近岸强烈的潮汐活动引起的沉积物再悬浮不仅影响了物质循环, 同时提升了有机碳的再矿化过程 (Bao et al, 2016; Zhao et al, 2018)。可见, 东海沉积体系极为独特, 其变动对物质循环和生态环境具有重要作用。因此, 关于东海底质沉积物和悬浮体分布规律和特征及其对生态环境影响的研究, 一直是海洋学家广泛关注的重要课题 (Gao et al, 2019)。

1.2 多重压力影响下的东海环境演变

东海是我国浮游植物生物量 and 生产力较高的海域, 也是我国多种经济鱼类的渔场。在全球暖化的背景下, 东海增暖最快, 且冬季升温显著快于夏季 (Wu et al, 2017; Wang et al, 2023a)。增暖趋势还引发了日益频发的极端高温事件, 中国近海“海洋热浪”的发生频次、持续时间和平均强度均在显著增加 (Tang et al, 2020), 造成了东海渔业、养殖业的重大损失 (Shaw et al, 2022)。同时, 在人类活动的影响下, 输入东海的陆源营养物质不断增加, 使中国近海总体呈现富营养化加重的趋势。增暖和富营养化共同造成了日益严重的近海海洋缺氧和酸化趋势, 威胁着海洋生物, 特别是底栖生物的生存和繁衍 (He et al, 2020)。伴随着物理和化学背景的改变, 包括东海在内的中国近海的浮游、底栖、鱼类生物群落也发生了复杂的变化, 呈现出“小型化”和暖水物种北扩的特征 (Wang et al, 2023a)。

近年来, 东海赤潮 (尤其是有害有毒藻华) 与水母等生态灾害频发 (Wang et al, 2009; Wang et al, 2018a), 对区域海洋环境, 乃至东海渔业等重要生物资源产生了不利影响。同时, 人类活动影响加剧也使得长江口外海域底层海水的缺氧现象变得不容忽视 (Li et al, 2002; Wei et al, 2017)。水体缺氧

既威胁海洋生物的生存,也会影响缺氧水域物质循环模式以及碳汇过程。由于东海海洋环境状况与我国经济发展密切相关,因此迫切需要定量研究东海生源要素变化驱动下的长期生态学效应,进而甄别引发生态系统变化的关键驱动因子及其资源与环境效应等,阐释东海海洋环境演变的驱动机制。相关工作将丰富对区域生物地球化学过程和相关环境问题的认识,维持海洋环境良性发展。

2 东海区域海洋学研究发展趋势

2.1 东海研究的主要进展

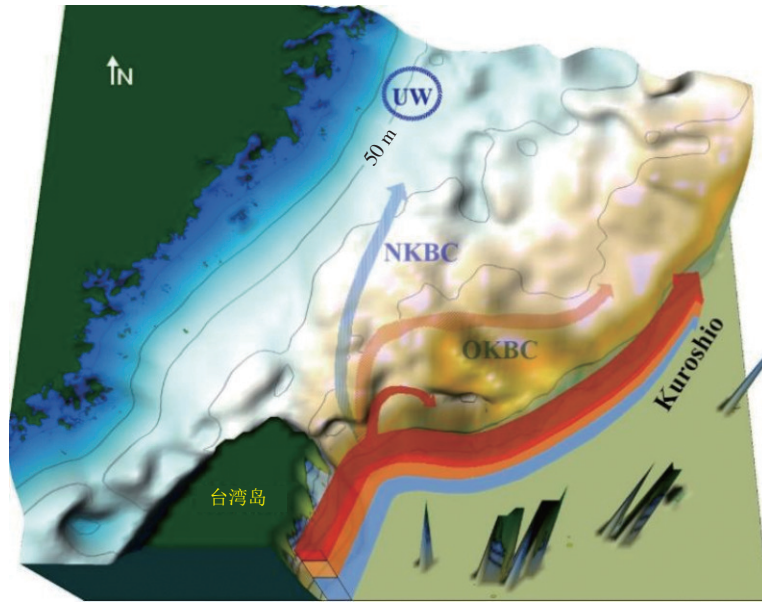
自20世纪50年代末全国第一次海洋普查开始,我国对海洋调查的支持力度不断加大,以科学考察船为代表的海洋科学观测平台建设不断加强。早期的工作大多是分区域展开,其中渤海、黄海和东海有4个测区、南海有3个测区;这种分区设立测区的做法一直延续至今,例如当前国家自然科学基金的共享航次计划也采用了类似的测区设置。

最初关于东海的研究主要针对长江口、浙闽泥质区、东海内陆架和外陆架展开,并注重与黑潮、南海和南黄海的关联研究;研究手段主要为观测和数值模式,注重季节变化和空间变化,相关热点词汇主要为营养盐、沉积物、上升流、台湾暖流、富营养化和浮游植物等。当前,由于气候变化和人类活动的影响越来越显著,东海的研究深度和广度均有很大的拓展,特别是观测技术和计算科学的进步推动了东海区域海洋学的研究逐渐从定性观测发展到定量认识,推动了我国海洋学的发展。

2.1.1 物理海洋学

东海物理海洋相关的研究主要体现在海洋环流理论、海洋中小尺度动力过程、大洋能量传递及其气候效应、海洋气候变率与气候变化等方面。在东海区域海洋学尺度上,长江冲淡水 and 黑潮入侵是影响东海水文和营养盐的主要外部因素(Zhou et al, 2019)。由于二者体量巨大,并携带大量营养物质进入东海,使得东海成为我国一个具有高生产力的边缘海。该海域浮游植物的分布不仅受长江冲淡水延伸程度的影响,还受到长江冲淡水理化特征变化的影响(Lee et al, 2017; Luo et al, 2023)。黑潮的入侵显著提高了东海的固氮作用(Jiang et al, 2023),同时也影响了东海缺氧区的位置、范围和强度(Zhang et al, 2019b)。此外,黑潮的入侵位置不同还可能造成富含磷的水体的季节变化差异(Wang et al, 2018c)以及磷酸盐的供应量(Xu et al, 2020a),影响区域物质循环和生态系统变化。对黑潮入侵东海的三维立体结构(图1)的解析(Yang et al, 2018; Cui et al, 2021)是加深对黑潮与东海陆架区相互作用认知的关键所在。由图1可知,黑潮入侵东海陆架主要发生在台湾东北海域,入侵强度(即东海陆架与黑潮水交换强度)通常可用跨200 m等深线的水体输运作为指示。黑潮入侵东海具有显著的空间结构,水平方向分别从台湾岛东北和九州岛西南海域入侵,垂直方向表层和底层入侵稳定,而中层则不稳定,并受到中尺度涡等过程的显著影响(Yang et al, 2018; Yuan et al, 2018; Cui et al, 2021)。进入东海陆架后,北上的东海黑潮一部分越过100 m等深线继续向北流动直抵长江口(即黑潮近岸分支),另一部分则沿100 m等深线向东流动(黑潮离岸分支)(图1),两者均携带黑潮次表层低温、高盐水,并在东海北部近底层形成2个低温、高盐核(Yang et al, 2018; 李博等, 2019; Zhu et al, 2022)。

在陆海界面,长江冲淡水主要以羽状模式扩散到东海,并在风场和上升流的作用下在东海北部形成相对孤立的低盐水团(Zhu et al, 2022);长江口外孤立低盐水团的生消周期一般较短(1周到几周不等),受长江径流、风场等的影响,该低盐水团可脱离主体并向外输运,其中偏北风和偏南风分别对水团输运起到抑制和促进作用(李博等, 2019)。由于具有高营养盐和有机质的特性,低盐水团的脱离和向外输运过程加强了长江冲淡水携带的营养盐和陆源有机物的跨陆架输运。另外,长江口夏季台风频繁,导致长江冲淡水输运和扩展路径出现明显的变化。例如,2015年夏季台风“灿鸿”过境3天后在东海观测到大量低盐度水体(宽达70 km, 厚达20 m, 淡水量约为37 km³),这些异常



注: Kuroshio 为黑潮, NKBC(nearshore Kuroshio branch current)为近岸黑潮分支, OKBC(offshore Kuroshio branch current)为 离岸黑潮分支, UW(upwelling)为上升流; 本图改绘自文献 Yang 等(2018)。

图 1 黑潮入侵三维分支结构

Fig. 1 Three-dimensional structure of the Kuroshio intrusion in the East China Sea

的低盐水可在研究区域停留 13~21 天(Hou et al, 2021; Lin et al, 2023), 极大地提高了上层水体中叶绿素 *a* 和有机碳的含量。此外, 东海北部长江冲淡水的外缘也是黄东海跨陆架水交换的主要区域; Yuan 等(2010)通过坐底式潜标观测和卫星遥感资料, 首次揭示黄东海冬季由近海向外陆架跨陆架流动的东海海流的存在, 该跨陆架环流可通过潜沉进入黑潮次表层, 并随着黑潮加入全球大洋次表层环流。伴随着跨陆架环流的潜沉, 大量颗粒和溶解无机碳、有机碳被输运至深海, 这一“跨陆架埋碳过程”对东海海域碳等生源物质的输送具有重要的作用(Yuan et al, 2018)。除跨陆架输送外, 长江冲淡水南下的过程还在东海内陆架形成了极为独特的水文过程; 在风、地形、台湾暖流和潮汐等综合因素的作用下, 东海内陆架形成了较为稳定的浙闽近岸锋面区, 并大致沿 50 m 等深线分布。相较于浙闽近岸锋面, 东海内陆架形成的穿刺锋面(驱动因素较多, 方向大多指向东或东南, 穿刺距离在 100~200 km, 有少部分大型穿刺锋面穿刺距离超过 300 km)(Yuan et al, 2005; He et al, 2010)改变了近岸锋面较为稳定的状态, 连通了内陆架和外陆架, 从而增强了近岸海域跨陆架方向的水体交换, 并影响了陆架外海的生物地球化学过程。

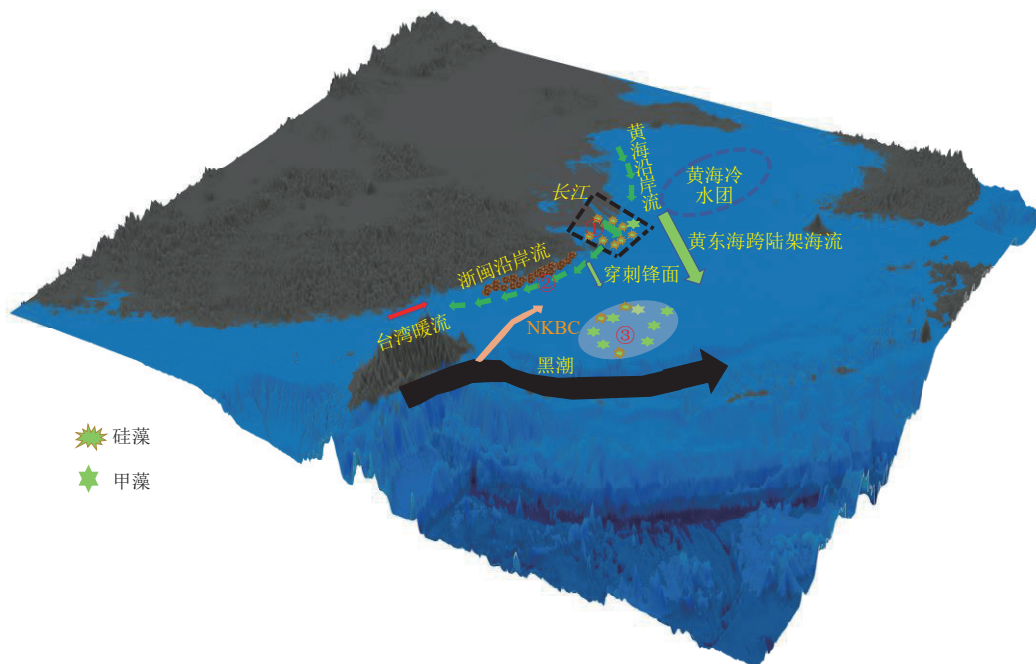
在东海赤潮高发区, 有研究证实黑潮入侵东海陆架近岸的底部分支和赤潮发生具有一定的同步性, 这可能是黑潮影响近海生态过程的主要途径(Yang et al, 2018)。黑潮入侵的底部分支可以把具有高磷酸盐、高盐度、低溶解氧等特征的黑潮次表层水输送到长江口邻近海域, 从而对东海陆架生态系统产生重要影响。进一步研究发现该底部分支的强度和位置存在显著的季节变化。通常情况下这一分支在春季出现, 在夏季(一般在 7 月份)达到最强; 其向西可以入侵到近岸 50 m 等深线, 向北可到达 30°30'N 附近; 在秋、冬季其入侵主轴位置逐渐远离岸线、向外海偏移(Yang et al, 2018)。此外, 这一黑潮入侵的底部分支还存在年际变化; 当冬季东亚季风异常强(弱)时, 东海南部的黑潮会被抑制(增强)(Yin et al, 2018)。这是由于在年际时间尺度上, 东海黑潮流轴的变化与厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)周期密切相关; 在 ENSO 周期下, 东海黑潮流轴部分会发生离岸移动; 而在拉尼娜现象下, 黑潮流轴部分会发生在岸移动, 北部黑潮流轴的表现则在空间变化上则与之相反(Zhang et al, 2023)。在十年时间尺度上, 太平洋涛动和北太平洋环流涛动可能导致风应力旋度和相对涡度异

常, 进而调节黑潮流轴的摆动及其入侵东海的格局(Joh et al, 2019)。

黑潮不仅影响了东海营养盐和溶解氧的区域性变化, 而且也影响东海的水体温度。同时, 黑潮入侵还会影响东海东南部大陆坡上的半日性内潮出现突然增强的现象(Yang et al, 2022a), 这一能量的改变或影响区域物质输送和沉积体系。长期的观测还显示, 黑潮与东海大陆架区域的海面温度年际变化趋势有显著差异: 根据 1982—2014 年东海黑潮温度的观测数据, 东海黑潮上游作为上升流区, 与东海黑潮下游形成水平偶极结构; 在暖化期间(1999—2014 年), 上升流的减弱引发了整个东海黑潮上层的明显暖化趋势(Wei et al, 2023)。20 世纪东海海面温度(sea surface temperature, SST)的变率是全球平均 SST 变率的数倍之多, 冬季的 SST 趋势最大(Sasaki et al, 2021)。上升流减弱趋势和全球变暖条件可能会导致黑潮区域在本世纪中叶会出现强劲的变暖。另外, 快速变暖的边界流有可能出现二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)上升的趋势, 导致在气候变化下海洋对二氧化碳(CO_2)的吸收逐渐减少(Wang et al, 2020; Tsao et al, 2023)。

此外, 黑潮的路径还受到邻近的海洋涡流的干扰(Shi et al, 2021), 当一个强气旋(反气旋)涡旋自外侧向东海黑潮流轴挤压时, 黑潮海流路径会被涡旋排斥(吸引)。涡流对黑潮路径的扰动主要发生在相互作用区域附近, 并向其流经路径的下游传播, 形成消散的波状波动, 并对黑潮前缘表层的湍流混合起到关键作用(Yang et al, 2019)。受此影响, 东海黑潮上下游区域的涡动能有着完全不同的季节变化特征(王思雯等, 2022)。

综上, 黑潮在从低纬度海区向中纬度海区输送热量的同时, 也输送着包括营养盐在内的各种溶解物质。在其长距离的流路上, 黑潮与其内侧陆架海发生着多种时空尺度的水交换和物质交换。黑潮通过与东海陆架的双向生源物质的交换及其支流借助对马暖流向开阔大洋的输送作用, 将东海与西北太平洋的物质循环联系在一起, 对区域生态环境演变产生了极为重要的影响。除此之外, 东海中部陆架东北向流动的台湾暖流、内陆架的季节性闽浙沿岸流, 以及长江冲淡水 and 闽浙沿岸穿刺锋面等也对东海营养盐等物质输运有着不容忽视的贡献(图 2)。



注: ①为长江口生态系统; ②为上升流生态系统; ③为黑潮生态系统;
NKBC(nearshore Kuroshio branch current)为近岸黑潮分支。

图 2 东海环境与主要驱动力

Fig. 2 Environmental status and main drivers in the East China Sea

2.1.2 海洋化学和生态学效应

当前东海海洋化学研究主要体现在近海生物地球化学循环过程、营养盐沉降过程、海洋生源活性气体、生物标志物及其示踪应用、海洋酸化和海洋低氧等方面,且交叉研究的程度越来越高。对于东海区域海洋学而言,顾宏堪主编的《渤、黄、东海海洋化学》(顾宏堪,1991)一书出版代表中国区域海洋化学研究进入一个重要阶段。该书系统介绍了东海海洋化学的基本特征与规律,为后续研究东海环境演变规律提供了基础依据和参考。

当前,准确量化长江和黑潮对东海的影响的重要性日益凸显。在陆向海方向,河流输送贡献了输入东海 DIN 和 DSi 总量的 10% 左右,而 DIP 的贡献较少,仅在 4.75% 左右;东海 DIN、DIP 和 DSi 的跨陆架净输送通量分别为 $(339 \pm 215) \text{ Gmol/a}$ ($(10.7 \pm 6.81) \text{ kmol/s}$)、 $(28.6 \pm 7.94) \text{ Gmol/a}$ ($(0.91 \pm 0.25) \text{ kmol/s}$) 和 $(415 \pm 405) \text{ Gmol/a}$ ($(13.2 \pm 12.8) \text{ kmol/s}$) ($1 \text{ G} = 10^9$ 、 $1 \text{ k} = 10^3$), 显著高于长江的输送通量,这表明长江可能并不是东海营养盐的主要来源(刘珈铭,2023)。此外,受陆地过程变化(如化肥使用量减少、污水处理率提高)的影响,长江营养盐通量在近些年呈降低的趋势(Wu et al, 2023),或对东海区域海洋学产生不确定性影响。然而,长江营养盐输送通量的变化对东海的影响尚缺少量化分析,亟待进一步的研究。

在陆架区域尺度上,东海陆架是我国最为活跃的交换海区之一。东海陆架向黑潮,以及黑潮向东海陆架这 2 个方向的水平通量的时空变化是当前关注的重点。在机制方面,揭示黑潮与东海陆架之间的生源物质(营养盐和与生物活动有关的有机物)的水平通量,以及对下游海域(日本以南黑潮和日本海)的生源物质浓度的影响可以深化对黑潮与东海海域相互作用的认识,可为进一步阐明西北太平洋的营养盐和初级生产的时空变化提供科学依据。Zhao 等(2011)将生态数值模式和高分辨三维水动力学模式耦合,再现了东海的营养盐季节变化的主要特征,并利用模式结果重新计算水体积、硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐等跨东海 200 m 等深线的通量,其年平均值分别为 1.53 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$)、 9.4 kmol/s 、 0.7 kmol/s 和 18.2 kmol/s ,这一模型估算结果与上述基于质量平衡的收支结果(刘珈铭,2023)较为一致。进一步分析显示,黑潮中层水对东海陆架的入侵受底层埃克曼(Ekman)效应的控制,且黑潮的入侵量与台湾海峡流量成正比(Zhao et al, 2011),这表明黑潮中层水对东海海域的物质分布和输送具有重要影响。同样,三维模型的结果也显示,与河流、大气和台湾海峡来源的营养盐通量相比,黑潮是东海营养盐的最主要来源,其占总量的 70% 左右,极大地影响了开阔陆架的初级生产力(Zhao et al, 2011)。近些年的研究显示大气沉降也是东海无机氮的重要来源,但其对东海无机氮的贡献率小于渤海和黄海(Wang et al, 2021a);此外,经台湾海峡输送和陆地河流流入的无机氮总量基本相当,但台湾海峡来源的无机磷总量要大于河流流入的部分,因此对浮游植物和营养盐结构的影响两者差别很大(Guo et al, 2011; Zhao et al, 2011)。值得说明的是,台湾海峡来源的营养盐主要影响东海陆架和对马海峡附近海域,而河流来源的营养盐则集中在河口附近和内陆架海域(Guo et al, 2011; Zhao et al, 2011)。此外,黑潮水中氮磷比接近 Redfield 比值,其输入对于东海内陆架异常高的氮磷比(表 1)具有重要的调和作用,从而对东海的生态系统起到稳定和缓冲的作用。

此外,在 1987—2009 年 PN 断面水文和营养盐资料分析的基础上,Guo 等(2012)估算了东海黑潮流轴方向的营养盐通量,发现其年际变化远大于季节变化,而引起年际变化的主要原因是黑潮流速的变化;与此同时,黑潮中层水的营养盐浓度在 2004 年以后上升了 20%,这主要与气候变化导致的流场变化和东海的跨陆架输送有关。Wu 等(2012)进一步指出,海洋里的变暖信号在包括黑潮等的西边界流区最强。在变暖背景下,海洋低营养级生态系统的响应随着全球变暖引起的密度层结的强化发生变化,原本营养盐不足的黑潮区因为持续消耗变得更低,生物生产力也随之下降。然而,这一观点的一个重要局限性在于其仅考虑了营养盐的垂直方向的供给,而忽略了水平方向的热输送,因为黑潮自低纬度海区向中纬度海区输送着大量的热量,给东亚带来温暖的气候是一个众所周知的

事实。和热输送一样,溶解物质的营养盐也会通过黑潮从南向北输送。如,横穿东海黑潮的PN断面的硝酸盐输运通量(黑潮流速和硝酸盐浓度的乘积)可以达到170 kmol/s(Guo et al, 2012)。PN断面的硝酸盐输运通量是黑潮向东海陆架的硝酸盐输运通量的17倍(Zhang et al, 2007)。由此可见,除了沿黑潮流轴方向的营养盐的水平输运以外,黑潮与黑潮内侧(如东海陆架)之间的营养盐的水平输运也是存在的,这一输送通量或将因为内陆架的富营养化而被提高。在过去的十几年,研究者大多关注由黑潮向东海陆架的营养盐供给,并发现在东海陆架上来源于黑潮的营养盐通量比来源于长江的多(Chen et al, 1999; Zhang et al, 2007; Guo et al, 2012)。实际上,东海陆架自南向北超过1 000 km,在这么大的空间尺度上,黑潮向陆架和陆架向黑潮的物质输送均十分重要,后者即为跨陆架输送过程。然而,长期以来我们无法回答哪里进、哪里出,进和出的营养盐形态和通量等问题。最近,在跨陆架输送方面,Hao等(2023)初步给出了跨陆架输送的路径,并量化了其通量和未来变率,为营养盐输送研究提供了重要参考。

受东海物质来源和营养盐分布的影响,东海内陆架以硅藻为主,而外陆架以甲藻为主要类群(Xiao et al, 2018),但优势度随着时间和空间变化表现出很强的区域变异性,这归根结底是受到了不同水团变化的影响。随着陆源输入营养盐通量的不断升高和营养盐结构的改变,长江口和东海浮游生物的群落结构也相应发生改变,赤潮优势种也在不断演替。研究表明,从20世纪80年代到21世纪初,东海陆架区硅藻赤潮占比从33%降低至24%,而甲藻赤潮的占比则不断升高,从12.5%升高至36%,赤潮优势种有从硅藻演变为甲藻的趋势(Jiang et al, 2014; Xiao et al, 2018; Zhou et al, 2022),值得进一步关注。

值得一提的是,东海营养盐来源和通量的独特性也使得碳循环过程极为典型,这一海域每年可吸收约21.6 Tg($1\text{T}=10^{12}$)的大气 CO_2 ,是我国重要的碳汇海域(表1)(Na et al, 2024)。东海有机碳的来源主要包括河流输入和海洋初级生产,是我国潜在的海洋碳汇区(Jiao et al, 2018)。东海不仅可以接收长江、钱塘江和闽江等河流输送的陆源有机碳,也会接收来自老黄河口和沿岸地区侵蚀所带来的陆源有机碳(Deng et al, 2006; Wu et al, 2013; Zhao et al, 2021)。研究表明,东海陆源有机碳的主要来源是长江,其溶解有机碳和颗粒有机碳的浓度在长江口附近的盐度锋面和浊度锋面区内具有最大值,并由陆向海逐渐降低(Zhao et al, 2019)。当这些长江来源的陆源有机碳进入海洋环境后会经历长时间的输运和降解过程,并在沿岸流的影响下主要在近岸泥质区积累,而外海砂质区陆源有机碳的含量较低(Bao et al, 2016)。对于海源有机碳,长江口和浙闽沿岸上升流区的海洋初级生产水平显著高于河口外区域,产生大量海源有机碳并沉积下来(Zhao et al, 2021)。由于沉积物的长距离输运,海源有机碳不断添加,使东海沉积有机碳以海洋来源为主(Tao et al, 2016)。不过,与陆源有机碳相比,海源有机碳会优先发生降解。如,Zhao等(2018)发现东海有机碳的再矿化速率与沉积物海源有机碳的含量成正比,这表明海源有机碳在再矿化过程中优先被微生物所利用。前人的研究利用沉积有机碳的含量和沉积速率建立了东海陆架有机碳的收支模型,发现只有不到5%的沉积有机碳会被输送到外陆架和深海(Deng et al, 2006; Zhao et al, 2021)。但是,近期的研究显示,位于东海陆架边缘的冲绳海槽沉积物中含有大量长江来源的陆源有机碳,证明了陆源有机碳存在跨陆架的输运。Hao等(2024)最新的研究显示这一过程比河流输送量要大,是东海海域另一重要的埋碳机制。因此,东海不同区域有机碳的输运、埋藏和迁移转化过程还需要进一步研究。

2.1.3 海洋地质学

海洋地质和地球物理专业的研究主要体现在古地理演变历史、气候变化的低纬驱动假说、亚洲大陆边缘的“源-汇”过程等方面。近年来东海陆架沉积物“源-汇”格局研究的一个重要进展是明确了东海受到了两类河流体系的控制,即大型河流(如长江)和山地河流(如台湾山地河流)两类河流系统,它们处于不同的构造地貌背景,沉积物从源到汇的过程和控制机制也明显不同。两类河流的流

域化学风化强度和搬运过程的主控因素不同。一方面, 长江及大陆东南沿海的河流入海物质主要受季风气候控制, 而构造活跃区的台湾山地河流物质则受气候、降水和强烈的物理侵蚀等因素控制 (Bi et al, 2015)。另一方面, 两类河流沉积物滞留时间不同, 基于 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比值的粉碎年龄计算显示, 长江沉积物的年龄自上游约 200 ka 增加至下游 400 ka 左右, 而来自台湾山地河流的沉积物搬运时间只有 100 ka 左右 (Li et al, 2016)。山地河流沉积物物源存在明显的空间不均一性, 快速转换的沉积物搬运模式是其搬运时间短的主要原因 (Deng et al, 2019)。不同地质历史时期, 这两类河流对东海沉积物的贡献和影响因素也存在不同。钕同位素比值 (ϵNd) 和氧 ($\delta^{18}\text{O}$) 同位素等指示全新世以来长江沉积物“源-汇”过程从自然因素控制逐渐转变为受人类活动影响控制, 长江上游沉积物在近 2 ka 来才大量进入河口地区 (Bi et al, 2017)。铀同位素比值 ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) 和 ϵNd 等进一步指示了 30 ka 来冲绳海槽南部沉积物的主要来源逐渐从长江变为台湾山地河流 (Li et al, 2016)。

两类“源-汇”过程造成了东海不同的沉积物收支格局。台湾海峡作为一系列山地型河流沉积物的汇, 其每年沉积 $160 \times 10^6 \text{ t}$ 的沉积物, 这与除长江之外其他河流入海物质量相当 (Huh et al, 2011)。Qiao 等 (2017) 利用 413 个站位的沉积速率、18 000 站沉积物粒度和干密度资料, 划分了中国东部陆架细粒级沉积区 (平均粒径 $>6\phi$), 明确了中国东部陆架现代沉积速率的分布特征和规律: 长江三角洲区域沉积速率较高, 变化范围为 $0 \sim 96 \text{ mm/a}$, 三角洲外泥质区沉积速率为 $3.9 \sim 8.1 \text{ mm/a}$; 砂质区沉积速率较低, 基本在 3 mm/a 以下, 甚至出现侵蚀; 陆坡区域沉积速率基本小于 1 mm/a , 但在冲绳海槽南部由于浊流作用沉积速率可高达 50 mm/a (Huh et al, 2006; Qiao et al, 2017)。Jia 等 (2018) 将东海内陆架划分为长江、浙江和福建泥质沉积区, 进一步明确了长江影响范围内泥质区沉积速率和沉积物收支平衡。中国东部海沉积物收支平衡揭示出渤海、黄海和东海周边河流现在每年向海输入沉积物约为 $1.650 \times 10^6 \text{ t}$, 其中约 45% 沉积形成陆地三角洲, 约 40%~50% 沉积在水下三角洲和陆架区域, 如东海陆架区的水下三角洲等, 仅有不超过 5% 的沉积物被搬运到陆架之外 (Qiao et al, 2017)。

受日益增强的人类活动影响, 近年来东海海域入海沉积物和污染物均发生了显著变化, 这些变化进一步影响了海洋环境、海底沉积物的组成和生态环境。自 2003 年长江三峡大坝运行之后, 长江口泥沙供给减少 70% 左右, 长江中下游由原来流域沉积物的汇区转变为入海沉积物的源区 (Gao et al, 2018), 长江来沙量的锐减导致长江三角洲整体呈现侵蚀现象, 岸段侵蚀后退与潮滩下蚀加剧, 海岸侵蚀范围扩大, 水下三角洲沉积物粗化, 并造成浙闽泥质区沉积速率降低 (Gao et al, 2019)。

除人类活动以外, 自然事件如台风、洪水等也是影响海底沉积物组成的重要因素 (单新等, 2023)。这些台风和风暴等极端气候事件造成河流流域内降雨增加、化学风化增强, 由此影响了沉积物搬运过程与沉积物的地球化学组成。除此之外, 台风等极端事件从多个方面改变了海水的流体结构与水文过程。一方面, 台风等极端事件导致表层水体输运方向发生改变, 阻滞海水离岸输运, 从而破坏水体流场结构, 导致上升流系统破坏; 另一方面, 台风促使海底沉积物中的生源硅含量增加, 进而影响海底地球化学循环, 并导致不同空间尺度上沉积地球化学过程的不均一性 (Bi et al, 2015; Deng et al, 2019)。台风事件对河流输入物质影响的研究也备受关注。如 2005 年 7 月超级台风“海棠”导致高屏溪发生洪水, 快速侵蚀的巨量泥沙以异重流的方式搬运至深海 (Liu et al, 2013)。同时, 典型台风 (如“莫拉克”台风) 过程还对水体-悬浮颗粒物-底质沉积物体系产生重要的影响 (Li et al, 2012)。如位于台湾东北部的兰阳溪是南冲绳海槽的主要物源供应者, 洪水引发的异重流可将 56 年中 23% 的泥沙通量在 196 h 之内输送入海 (Liu et al, 2013)。除台风外, 东海陆架周边地区的极端洪水事件对于沉积物“源-汇”过程、海底生态环境改变等方面也产生重要影响。如台湾西部的浊水溪作为台湾海峡内最主要的供源河流, 由洪水引发的异重流在沿海底输运的过程中会侵蚀海底的细颗粒沉积物, 并最终混合事件层 (表明侵蚀的泥质沉积物驱使流体由浊流向碎屑流转化) 的形式保存于沉积记录中 (Jin et al, 2021), 该过程可能会改变海底沉积物分布特征。洪水期间长江冲淡水

是东海陆架区最重要的淡水和陆源物质来源,随之带来的生源要素、有机污染物、重金属等在水体和沉积物中的分布及其环境效应等都是值得关注的科学问题。

近年来的研究还揭示了泥质区沉积记录的全新世东亚季风演化历史和极端气候事件及其对新仙女木、8.2 ka、5.5 ka等全球气候突变事件的响应,探讨了末次冰盛期晚期和末次冰消期长江物质、台湾入海物质及其他中小型河流对内陆架泥质区南部的贡献及输运路径(Liu et al, 2010; Gao et al, 2014; Dong et al, 2018)。目前,多数研究者认为东海内陆架全新世以来泥质沉积物主要来源于长江,而Gao等(2014)则认为,8 000~2 000 a期间东海内陆架泥质沉积主要来源于经潮汐作用再次改造的已沉积地层,长江物质很少,只是在最近的2 000 a期间,长江物质才在浙闽沿岸流的作用下向南悬浮搬运。因此,相关的争论亟待地球化学指标的进一步证实。

随着研究的深入,对末次冰盛期之前东海内陆架泥质区的形成与演化也有了进一步的认识。Shan等(2023)的研究报道了东海内陆架泥质区在晚MIS 3时期(水深约30~35 m)就开始发育。Xu等(2020b)将钻孔与地震剖面结合,识别出了3个层序(从上到下依次为Sq1~Sq3,分别对应于MIS 1-2、MIS 3-6和MIS 7-8时期),明确了海底潮汐沙脊的发展与古河口密切相关,并证实其在海侵时向岸迁移。Yang等(2022b)依据浙闽泥质区沉积记录和模拟研究提出亚洲粉尘释放增强应是小冰期台风活动增强的主控因素。Liu等(2023)在东海外陆架2根钻孔沉积物样品中发现了磁性矿物组合可用于恢复陆架古环境演化,研究结果表明黄铁矿、胶黄铁矿和磁铁矿可分别作为MIS 3早期、MIS 3晚期和末次冰盛期沉积物中主要的磁性矿物,其含量变化主要受控于海平面升高和洋流随时间的变化。可见,东海第四纪中晚期陆架环境的演化综合受控于第四纪海平面变化、河流供给、活跃的沉降、缓坡地形以及海侵和海退伴随的侵蚀过程。自人类世以来,东海受到日益增强的人类活动影响,沉积物源汇过程和生态效应均发生了较大变化,如随着河流筑坝、海平面变化(主要是升高),东海有机碳埋藏或将发生较大变化,这一问题值得进一步关注。

2.1.4 生物海洋学

东海生境多变,既有富营养化的大河河口和沿岸上升流生态系统,也有相对寡营养的台湾暖流和黑潮生态系统(孙松等, 2012)(图2)。受营养盐、水温、透明度等因素影响,东海初级生产力的分布较为复杂,呈现出较为明显的区域化特征,高值主要集中在河口、上升流区和陆架中部(Wu et al, 2021; Luo et al, 2023)。其中,在长江口,受大河淡水和物质输入的影响,生物量和初级生产力的高值多出现在夏季(部分区域叶绿素 a 高值大于 5 mg/m^3)(Liu et al, 2019),且表现出明显的河口区生境特征。在河口以外的区域,尤其是外陆架(大多海域叶绿素 a 小于 1 mg/m^3),生物量和初级生产力多呈现春秋高(部分是仅春季高)、冬夏季低,具有热带海域的基本特征(Liu et al, 2019)。

东海生物量和初级生产力的分布特征与区域的水系特点紧密相关(Zhou et al, 2019; Luo et al, 2023),这也是东海生态系统开展划区评价的基础依据;通常,长江口海域是生产力最高、生物资源最为丰富的区域。4月至5月,东海是赤潮(水华)的高发期,发生的区域也多集中在河口和近岸,且爆发时水柱内多有跃层形成(Zhou et al, 2019)。不过,东海水团复杂,温度差异大,生物量和初级生产力的季节变化难以一概而论,季节性温度变化、富营养化的沿岸水体和贫营养的黑潮水团的消长是控制其时空变化和藻华形成的主要因素。值得一提的是,春季藻华和夏季长江口浮游植物生产力的高峰是该区域最为显著的2个初级生产过程,为区域丰富的海洋资源提供了重要物质基础。

除长江水流量外,流域人类活动影响也通过河流传递到东海,因此东海浮游植物类群组成也受到人类活动的深度影响,由此引起藻华频发、浮游植物结构变化(主要表现在硅甲藻比持续降低)(Zhou et al, 2022; Wang et al, 2023b)、多样性水平降低等生态环境问题,特别是全球暖化或导致甲藻生物量进一步增加(Liu et al, 2016; Xiao et al, 2019),相关研究也得到人们的广泛关注。值得注意的是,富营养化或较过去提高东海海域初级生产力水平,而气候变化又可能改变藻华发生的时间和周期,

使得东海生态系统格局呈现不确定的变化。不过, 目前涉及浮游植物的研究主要集中在长江口、浙闽近岸海域, 其他区域数据相对较少; 由于数据的匮乏(部分数据存在网样和水样不一致的情况), 目前尚不能给出较为系统的认识。此外, 全球变化或加强东海海域细菌等微生物的活动(Liu et al, 2016), 然而关于东海细菌和其他类群微生物的研究也很有限, 这使得我们无法进一步了解微食物网、明确其碳循环过程, 这方面工作亟待加强。

2.2 关键动力过程与生态效应

黑潮、台湾暖流、沿岸流和长江冲淡水等海洋中尺度过程对东海浮游植物类群组成和时空分布产生显著影响。受台湾暖流和黑潮影响的水域可见外洋暖水性浮游藻种, 同时二者还控制着光合自养原核生物的分布(体积微小, pico 级)(Jiao et al, 2005)。例如, 黑潮水直接影响的东海区域浮游植物细胞体积较浙闽上升流区和其他陆架区小, 这一区域微型浮游植物对叶绿素 *a* 和初级生产力的贡献占 67%~89%, 而在上升流区和陆架区, 其贡献则低很多(分别为 29%~86% 和 19%~72%)(孙松等, 2012)。最近的研究发现东海区最为典型的中小尺度过程, 即穿刺锋面和跨陆架输送(Yuan et al, 2010), 也对生物过程和物质输送产生显著影响。例如, 穿刺锋面是东海内陆架上一种典型的水体物质跨陆架输送形式, 其尺度一般在百千米至几千米, 发生区域经常伴随着叶绿素 *a* 高值区, 表明它对近海区域的物质循环和生态过程等具有重要的意义。东海背景密度层结沿等深线方向变化导致的热风效应是驱动穿刺锋面的重要动力机制, 而东海潮波的辐散造成非均匀混合是导致密度层结这种特征的主因(Wu, 2015); 由于潮汐是定常的动力因子, 背景密度层结的变化以及相应穿刺锋面的发生位置比较固定, 而这些位置较好地对应了几个赤潮高发的区域。在夏季, 台风作用下长江冲淡水南下(具有较高的营养盐)并堆积在浙闽沿岸是产生穿刺锋面的一个重要前提(叶鹏等, 2022), 这不难理解为何穿刺锋面区往往对应着叶绿素 *a* 高值。不过, 目前尚不清楚穿刺锋面对东海区物质输送的具体影响。

东海内陆架区基础生产力较高(表 1), 不但可以向黑潮区直接输送营养盐, 也可以输送生源有机物, 形成碳汇, 即跨陆架碳埋藏。进一步的评估表明, 东海向深海大洋净输送的无机碳约占通过海-气界面和径流输入东海的总无机碳的 70%(Na et al, 2024), 证实了物理过程对维持东海陆架碳汇的重要作用(图 2)。不过, 上述过程对东海碳输送的贡献尚未准确量化, 其短期和中、长期的变化还不清楚, 因此精准评估东海碳汇潜力及其变化是当前亟待解决的科学问题。同时, 东海陆架向黑潮区的生源物质的输送是黑潮区营养盐的重要来源之一, 对东海陆架-黑潮和黑潮-东海陆架双向量化的研究可为黑潮水体内的营养盐浓度的时空变化提供一个更合理的解释(Guo et al, 2012)。另外, 黑潮向东海陆架的营养盐输送, 加上长江等陆地来源的营养盐也可以穿过对马海峡进入到日本海, 对这个过程的定量化认识对理解黑潮内外两侧的边缘海生态系统的变迁必不可少。在全球变暖背景下, 跨陆架输运有不断增强的趋势(Yuan et al, 2018; Hao et al, 2024), 这或可能是未来海洋负排放去除大气二氧化碳最佳的实施区域。因此, 对陆架碳泵等关键过程的研究将有助于提升对陆架边缘海碳循环的理解以及对全球海洋碳收支估算的准确度, 同时也有助于海洋负排放的实施。

浙闽沿岸泥质区是发生穿刺锋面的主要区域, 其或加强黄东海的跨陆架物质输运。随着人类活动导致的营养盐输入量的增加, 浙闽沿岸泥质区总有机碳(total organic carbon, TOC)在 20 世纪 70 年代后呈增长趋势, 且海源 TOC 不断增加(Wang et al, 2018b)。可见, 在闽浙沿岸泥质区生物地球化学过程不仅可以为有机碳的沉积提供有利条件, 也为碳的跨陆架输送量的增加提供了物质基础。

此外, 全球变暖还会对东海区域海洋学特征产生显著影响。由于目前缺乏对东海陆架边缘(如 100 m 等深线)附近跨陆架碳输送格局及其季节变化的深入研究, 且对东海内陆架上升流-穿刺锋面-泥质区的综合碳汇效应认识不足(宋金明等, 2023), 相关海域碳库分布和碳源汇效应的信息缺失,

无法为“碳达峰”和“碳中和”的国家战略提供科学依据。上述关键海域碳循环的主要过程以及碳汇潜力的评估是我国海洋碳汇研究的重要内容。因此,阐明控制东海碳源汇格局的主要过程和机制是我国近海碳循环研究的重要科学问题,也是建立科学预测模式的关键依据所在。不过,由于缺少长期的资料,这方面研究尚无系统的认识,需要进一步深入开展工作。

2.3 整合研究与发展趋势

进入21世纪,国内外海洋科学研究已经进入一个崭新阶段。目前,海洋科学正在整体进入转型期,学科已逐步提升到集成整合、探索机理的系统科学新高度,深化拓展近海研究与管理、聚焦深海与极地新疆域、开展多圈层多尺度耦合研究成为世界各国海洋研究的新趋势。

我国海洋科学的研究对象已经从仅仅关注陆地周边的近岸、近海拓展到了包括深海大洋、极地的全海域范围;研究手段也从局地、间歇的考察扩展到了大区域、全天候的持续观测。与之相应,海洋科学的三大发展趋势体现在:从各单一学科的“单打独斗”转向强调多学科、跨尺度的系统性研究;从“科学受限于技术、技术单纯服务于科学”转向科学与技术紧密合作、协同发展;从科考平台的专用化、科研数据的孤岛性转向平台公用化和数据网络化。如Wang等(2023a)的工作是整合研究较有代表的案例,研究显示相比过去中国近海生态环境变化显著,环境方面富营养化、缺氧(脱氧)、酸化趋势明显,生物多样性受损。又如,学者发现在东海台湾暖流和黑潮分支的变动与东海春、夏季大规模藻华发生存在一定的内在联系(Xu et al, 2020a),而包括东海在内的中国东部海赤潮爆发频率增加与陆源氮磷输入增加有关,且近海新出现的环境问题(如抑食金球藻(*Aureococcus anophagefferens*)爆发)与水体有机氮磷的积累存在较为直接的关联(Wang et al, 2023b);相关研究极大地丰富了对我国近海生物地球化学和生物海洋学的认识。此外,我国近海营养盐循环并非处于稳态,存在溶解无机氮相比磷积累和有机氮与磷增加两个基本事实,并导致硅藻和甲藻赤潮爆发频率的增加(Wang et al, 2023c)。因此,加强陆海界面的研究也是未来东海区域海洋学研究需要着力的地方(图2)。

3 东海区域海洋学调查研究历程、布局和建议

我国海洋领域科研成果的数量快速增长、影响力稳步提升,2019年我国发表海洋科学论文数量已位居世界第一位、篇均被引用频次为世界第三位,切实体现了国家科技研发投入对科学研究的促进作用。当前,中国科学家的研究区域从中国近海拓展到深海大洋与极地海域,研究问题正在逐步从单一学科的科学问题向多学科交叉问题过渡,且海洋领域各学科均取得了一系列重要的研究成果。

需指出的是,我国海洋科技投入的资金主要由政府提供,用于支持海洋基础研究、应用研究、前沿技术研究和重大共性关键技术研究等。在国家层面,目前主要由科学技术部、国家自然科学基金委员会、原国家海洋局(2018年并入自然资源部)和中国科学院等部门负责组织项目的立项,资金的管理等。科学技术部支持了系列重大科学研究计划和项目,其中涉及东海的有20多项,先后投入经费超4亿元,主要工作涉及河口与近海陆海相互作用、水母与赤潮等生态灾害、近海碳收支、陆架边缘海海洋物理环境演变等工作。国家自然科学基金委员会一直是东海研究的主要支撑力量。据统计,1986—2023年国家自然科学基金委员会资助海洋科学领域总项目数达到6000余项,总资助金额超过30亿元,其中涉及东海的研究项目约占11%。原国家海洋局是推动我国海洋领域科技发展的国家机构,先后围绕中国近海开展过系列研究,如中国近海海洋综合调查与评价专项;相关项目对于了解东海的海洋环境状况、海岛海岸带自然环境状况发挥了关键作用。同时,中国科学院也围绕近海生态系统健康等开展了系列研究,如中国科学院战略性先导科技专项等。

值得指出的是,自2009年以来国家自然科学基金共享航次计划(简称共享航次计划)为东海海

洋科学考察提供了稳定、可靠的调查平台保障,极大地推动了相关国家自然科学基金资助项目的研究,同时也推动了海洋科学调查资料的共享。根据科学机构的统计(依托 Web of Science SCIE(Science Citation Index Expanded,科学引文索引扩展版)论文数据库,构建检索式:TS="East China Sea",发文年代限定为2013年至今),近10年来中文文章的资助项目占比依次为国家自然科学基金项目(43.4%)、科技部国家科技计划类项目(28.8%)、省市基金项目(19.5%)、其他项目(8.3%),英文文章为国家自然科学基金项目(46.3%)、科技部国家科技计划类项目(17.2%)、省市基金项目(15.7%)、其他项目(20.8%)。因此,单从资金投入和成果产出这一点来看,国家自然科学基金项目较其他类型项目具有更高的收益比;由于共享航次计划在机制上保证了科学研究的连续性和稳定性,这一平台在很大程度上推动了东海区域海洋学研究的发展,并有可能提升我国海洋科学基础研究的原始创新能力。然而,也要清晰认识到,当前我国海洋领域的研究水平相比其他海洋科技强国仍存在一定差距。基础研究方面缺乏对奠基性理论的实质贡献,尚未在整体上形成引领学科前沿发展的态势,海洋模式开发、观测体系建设、灾害监测预警方面仍受到技术瓶颈的制约。目前,尽管我国科研投入较过去有较大增加,但科研经费投入不持续、投入组成中竞争性经费偏多、科研队伍方面缺乏跨学科的综合海洋研究人才等均为制约我国区域海洋学发展的重要问题;此外,国际合作方面或跨国、跨区域大型研究计划中缺少由中国发起或主导的国际大科学计划和大科学工程,国际话语权明显不足。未来,我国海洋科学的继续发展需重视优势学科、补强薄弱环节、提高稳定支持力度、推进交叉学科的创新,以科学引领技术的进步,以技术推动科学的发展,力求在近海攻克一系列具有深远现实意义和理论价值的重大科学问题与技术瓶颈。

4 结论与展望

东海具有独特的水文、地质和化学特性,其特定的生境造就了东海独特的生物生态学特征(图2)。近些年,不同学科围绕东海区域海洋学开展了系列研究,取得了较大的进步。未来,我们需要更多地关注富营养化问题,关注营养盐的来源、通量和结构变化导致的浮游植物类群的演替及其对区域生态系统健康与稳定的影响,同时关注其演变的过程和机理。由于海洋科学的属性,东海的研究不仅仅涉及到东海海域,陆海、海气、东海与相邻近海和开阔大洋多界面、多过程的研究亟须增强,以期为区域海洋学认识提升提供关键依据。

当前,海洋科学正在整体进入转型期,学科已逐步提升到集成整合、探索机理的系统科学新高度。因此,深化拓展东海研究、聚焦东海与开阔大洋的相互作用、开展多圈层多尺度耦合研究成为区域海洋学研究的新趋势。当前推动我国东海海洋科学发展的关键科学领域主要体现在3个方面:①区域海洋学的理论创新是我们科学认识东海的基础,如何加强海洋环境演变规律的认识是推动区域海洋学发展、建设海洋强国战略的关键,这其中海洋化学和海洋生物学领域的观测和研究能力亟待加强。②海洋环境演变及其碳汇效应同样是东海未来研究的重点。在气候变化和人类活动影响下,东海海洋环境变化的趋势、长期的生态学效应及碳源汇格局是关系东海碳汇潜力、海洋资源与环境稳定的重要议题,也是海洋学研究的重要内容,特别是东海的碳库分布时空格局、跨陆架输送与埋碳是国家“双碳”目标亟须解决的重要科学问题。③海洋可持续产出,东海蕴藏着丰富的生物资源以及应对气候变化的潜能,其海岸带还是人类生活的重要场所,也是我国海洋养殖的重要场所;东海海洋环境稳定和物质的持续产出是实现我国“一带一路”、长三角一体化发展、长江经济带发展、粤港澳大湾区建设等的命脉。为此,我们今后应继续在东海开展多学科研究,重视锋面、跨陆架输送等中尺度过程,同时加强与西太平洋、南海、黄海等关联研究,明确东海在区域海洋学中的重要作用,预测其未来环境变率,服务国家海洋战略。

致谢：感谢海洋一所张志新博士、钟晓松博士和冯耀硕士生 在文章撰写阶段提供的素材和修改。文章的构思源于2023年9月召开的首届东海区域海洋学学术研讨会，相关工作得到了与会专家的大力支持，在此一并表示感谢！

参考文献 (References):

- 邓爽, 刘劲, 吴雨田, 等, 2021. 南沙海域沉积物²²⁶Ra和²¹⁰Pb的分布特征及环境意义[J]. 环境化学, 40(8): 2535-2543. DENG S, LIU J, WU Y T, et al, 2021. Characteristics of distribution and environmental significance of ²²⁶Ra and ²¹⁰Pb in sediments in Nansha sea area[J]. Environmental Chemistry, 40(8): 2535-2543.
- 顾宏堪, 1991. 渤、黄、东海海洋化学[M]. 北京: 科学出版社. GU H K, 1991. Marine chemistry of the Bohai, Yellow and East China Seas[M]. Beijing: Science Press.
- 郭志刚, 杨作升, 曲艳慧, 等, 2000. 东海陆架泥质区沉积地球化学比较研究[J]. 沉积学报, 18: 284-289. GUO Z G, YANG Z S, QU Y H, et al, 2000. Study on comparison sedimentary geochemistry of mud area on East China Sea continental shelf[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 18: 284-289.
- 暨卫东, 2017. 中国近海海洋——海洋化学[M]. 北京: 海洋出版社. JI W D, 2017. China's Offshore Oceans: Marine Chemistry[M]. Beijing: Ocean Press.
- 李博, 卢军炯, 王鹏皓, 等, 2019. 长江冲淡水扩展区域孤立水团分析[J]. 海洋与湖沼, 50(6): 1181-1190. LI B, LU J J, WANG P H, et al, 2019. Isolated low-salinity water mass in expansion area of Changjiang Diluted Water[J]. *Ocnologia et Limnologia Sinica*, 50(6): 1181-1190.
- 刘珈铭, 2023. 东海营养盐浓度与结构变化和收支研究[D]. 青岛: 自然资源部第一海洋研究所. LIU J M, 2023. Nutrient concentration, stoichiometry and budget in the East China Sea[D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, MNR.
- 单新, 石学法, 金丽娜, 等, 2023. 东海陆架与台湾海峡地层中混合事件层的发现与意义[J]. 海洋科学进展, 41(4): 599-609. SHAN X, SHI X F, JIN L N, et al, 2023. Discovery of hybrid event beds from the East China Sea shelf and the Taiwan strait and its implications[J]. *Advances in Marine Science*, 41(4): 599-609.
- 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 等, 2019. 渤黄东海生源要素的生物地球化学[M]. 北京: 科学出版社. SONG J M, LI X G, YUAN H M, et al, 2019. Biogeochemistry of biogenic elements in the Bohai, Yellow, and East China Seas[M]. Beijing: Science Press.
- 宋金明, 曲宝晓, 李学刚, 等, 2023. 海洋碳汇观测与评估的现状与思考[J]. 海洋科学进展, 41(4): 577-592. SONG J M, QU B X, LI X G, et al, 2023. Estimate of ocean carbon sink: current status and reflections[J]. *Advances in Marine Science*, 41(4): 577-592.
- 孙松, 李超伦, 宁修仁, 等, 2012. 中国区域海洋学——生物海洋学[M]. 北京: 海洋出版社: 488. SUN S, LI C L, NING X R, et al, 2012. Regional oceanography of China Seas: biological oceanography[M]. Beijing: Ocean Press: 488.
- 王思雯, 杨洋, 梁湘三, 等, 2022. 东海黑潮上下游不同的涡动能季节变化特征及其产生机制[J]. 海洋与湖沼, 53(2): 278-294. WANG S W, YANG Y, LIANG X S, et al, 2022. Distinctly different seasonal eddy kinetic energy variations and their mechanisms in the upstream and downstream Kuroshio within the East China Sea sector[J]. *Ocnologia et Limnologia Sinica*, 53(2): 278-294.
- 叶鹏, 宣基亮, 黄大吉, 2022. 夏季浙闽沿岸穿刺锋面生消演变过程及其动力机制的探讨[J]. 中国科学: 地球科学, 52(4): 634-648. YE P, XUAN J L, HUANG D J, 2022. Evolution and dynamics of a summertime penetrating front off the Zhejiang-Fujian coast, China[J]. Science China Earth Sciences, 52(4): 634-648.
- BAO R, MCINTYRE C, ZHAO M X, et al, 2016. Widespread dispersal and aging of organic carbon in shallow marginal seas[J]. *Geology*, 44(10): 791-794.
- BI L, YANG S Y, LI C, et al, 2015. Geochemistry of river-borne clays entering the East China Sea indicates two contrasting types of weathering and sediment transport processes[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(9): 3034-3052.

- BI L, YANG S Y, ZHAO Y, et al, 2017. Provenance study of the Holocene sediments in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and inner shelf of the East China Sea[J]. *Quaternary International*, 441: 147-161.
- CHEN T A, WANG S L, 1999. Carbon, alkalinity and nutrient budgets on the East China Sea continental shelf[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C9): 20675-20686.
- CHI L B, SONG X X, YUAN Y Q, et al, 2020. Main factors dominating the development, formation and dissipation of hypoxia off the Changjiang Estuary (CE) and its adjacent waters, China[J]. *Environmental Pollution*, 265: 115066.
- CUI X, YANG D Z, SUN C J, et al, 2021. New insight into the onshore intrusion of the Kuroshio into the East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(2): e2020JC016248.
- 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.
- DENG K, YANG S Y, BI L, et al, 2019. Small dynamic mountainous rivers in Taiwan exhibit large sedimentary geochemical and provenance heterogeneity over multi-spatial scales[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 505: 96-109.
- DONG J, LI A C, LIU X T, et al, 2018. Sea-level oscillations in the East China Sea and their implications for global seawater redistribution during 14.0-10.0 kyr BP[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 511: 298-308.
- FU X M, ZHANG M Q, LIU Y, et al, 2018. Protective exploitation of marine bioresources in China[J]. *Ocean & Coastal Management*, 163: 192-204.
- GAO S, COLLINS M B, 2014. Holocene sedimentary systems on continental shelves[J]. *Marine Geology*, 352: 268-294.
- GAO J H, JIA J J, KETTNER A J, et al, 2018. Reservoir-induced changes to fluvial fluxes and their downstream impacts on sedimentary processes: the Changjiang (Yangtze) River, China[J]. *Quaternary International*, 493: 187-197.
- GAO J H, SHI Y, SHENG H, et al, 2019. Rapid response of the Changjiang (Yangtze) River and East China Sea source-to-sink conveying system to human induced catchment perturbations[J]. *Marine Geology*, 414: 1-17.
- GUO X Y, ZHAO L, 2011. Response of nutrients and primary production over the shelf in the East China Sea to the reduction of oceanic nutrient supply[C]//OMORI X G K, YOSHIE N, FUJII N I C, et al. Interdisciplinary studies on environmental chemistry: marine environmental modeling & analysis. Tokyo: TERRAPUB: 19-30.
- GUO X Y, ZHU X H, WU Q S, et al, 2012. The Kuroshio nutrient stream and its temporal variation in the East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C1): C01026.
- GUO X H, ZHAI W D, DAI M H, et al, 2015. Air-sea CO₂ fluxes in the East China Sea based on multiple-year underway observations[J]. *Biogeosciences*, 12(18): 5495-5514.
- HAO J J, YUAN D L, HE L, et al, 2024. Cross-shelf carbon transport in the East China Sea and its future trend under global warming[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 129: e2022JC019403. <https://doi.org/10.1029/2022JC019403>.
- HE L Z, LI Y, ZHOU H, et al, 2010. Variability of cross-shelf penetrating fronts in the East China Sea[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 57: 1820-1826.
- HE L Z, SHOU L, LIAO Y B, et al, 2020. The relationship of macrobenthic functional group composition and hypoxia in the Changjiang River Estuary and its adjacent areas[J]. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 23: 313-322.
- HOU W L, BA M L, BAI J, et al, 2021. Numerical study on the expansion and variation of Changjiang Diluted Water in summer and autumn[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(3): 317.
- HUH C A, SU C C, WANG C H, et al, 2006. Sedimentation in the Southern Okinawa Trough: rates, turbidites and a sediment budget[J]. *Marine Geology*, 231(1): 129-139.
- HUH C A, CHEN W, HSU F H, et al, 2011. Modern (<100 years) sedimentation in the Taiwan Strait: rates and source-to-sink pathways elucidated from radionuclides and particle size distribution[J]. *Continental Shelf Research*, 31: 47-63.
- HUNG C C, GONG G C, 2007. Export flux of POC in the main stream of the Kuroshio[J]. *Geophysical Research Letters*, 34(18): L18606.
- JIA J J, GAO J H, CAI T L, et al, 2018. Sediment accumulation and retention of the Changjiang (Yangtze River) subaqueous delta and its distal muds over the last century[J]. *Marine Geology*, 401: 2-16.
- JIANG Z B, LIU J J, CHEN J F, et al, 2014. Responses of summer phytoplankton community to drastic environmental

- changes in the Changjiang (Yangtze River) Estuary during the past 50 years[J]. *Water Research*, 54: 1-11.
- JIANG Z B, ZHU Y L, SUN Z H, et al, 2023. Enhancement of summer nitrogen fixation by the Kuroshio intrusion in the East China Sea and Southern Yellow Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 128(3): e2022JG007287.
- JIAO N Z, YANG Y H, HONG N, et al, 2005. Dynamics of autotrophic picoplankton and heterotrophic bacteria in the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 25(10): 1265-1279.
- JIAO N Z, LIANG Y T, ZHANG Y Y, et al, 2018. Carbon pools and fluxes in the China Seas and adjacent oceans[J]. *Science China Earth Sciences*, 61(11): 1535-1563.
- JIN L N, SHAN X, SHI X F, et al, 2021. Hybrid event beds generated by erosional bulking of modern hyperpycnal flows on the Choshui River delta front, Taiwan Strait[J]. *Sedimentology*, 68(6): 2500-2522.
- JOH Y J, DI LORENZO E, 2019. Interactions between Kuroshio extension and central tropical Pacific lead to preferred decadal-timescale oscillations in Pacific climate[J]. *Scientific Reports*, 9(1): 13558.
- LEE Y J, YANG E J, YOUN S Y, et al, 2017. Influence of the Changjiang diluted waters on the nanophytoplankton distribution in the northern East China Sea[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 98(7): 1535-1545.
- LI D J, ZHANG J, HUANG D J, et al, 2002. Oxygen depletion off the Changjiang (Yangtze River) Estuary[J]. *Science China*, 45: 1137-1146.
- LI Y H, WANG A J, QIAO L, et al, 2012. The impact of typhoon Morakot on the modern sedimentary environment of the mud deposition center off the Zhejiang-Fujian coast, China[J]. *Continental Shelf Research*, 37: 92-100.
- LI C, YANG S Y, ZHAO J X, et al, 2016. The time scale of river sediment source-to-sink processes in East Asia[J]. *Chemical Geology*, 446: 138-146.
- LIN Y P, LI Y H, CONG S, et al, 2023. Downcoast redistribution of Changjiang Diluted Water due to typhoon Chan-Hom (2015)[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 128(4): e2023JC019791.
- 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.
- LIU S F, SHI X F, LIU Y G, et al, 2010. Records of the East Asian winter monsoon from the mud area on the inner shelf of the East China Sea since the mid-Holocene[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(21): 2306-2314.
- LIU J T, KAO S J, HUH C A, et al, 2013. Gravity flows associated with flood events and carbon burial: Taiwan as instructional source area[J]. *Annual Review of Marine Science*, 5(1): 47-68.
- LIU X, XIAO W P, LANDRY M R, et al, 2016. Responses of phytoplankton communities to environmental variability in the East China Sea[J]. *Ecosystems*, 19(5): 832-849.
- LIU X C, BEUSEN A H W, VAN BEEK L P H, et al, 2018. Exploring spatiotemporal changes of the Yangtze River nitrogen and phosphorus sources, retention and export to the East China Sea and Yellow Sea[J]. *Water Research*, 142: 246-255.
- LIU X, LAWS E A, XIE Y Y, et al, 2019. Uncoupling of seasonal variations between phytoplankton chlorophyll *a* and production in the East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(7): 2400-2415.
- LIU J P, XU T Y, ZHANG Q, et al, 2023. Exploring spatiotemporal paleoenvironmental and paleoceanographic changes on the continental shelf using authigenic greigite: a case study from the East China Sea[J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 38(6): e2023PA004621.
- LU Y L, YUAN J J, LU X T, et al, 2018. Major threats of pollution and climate change to global coastal ecosystems and enhanced management for sustainability[J]. *Environmental Pollution*, 239: 670-680.
- LUO Y F, SHI J, GUO X Y, et al, 2023. Yearly variations in nutrient supply in the East China Sea due to the Zhejiang coastal upwelling and Kuroshio intrusion[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 128(4): e2022JC019216.
- MACKENZIE F T, VER L M, 2019. Land-sea global transfers[M]//COCHRAN J K, BOKUNIEWICZ H J, YAGER P L. Encyclopedia of ocean sciences. 3rd ed. Oxford: Academic Press: 90-99.
- NA R, RONG Z R, WANG Z A, et al, 2024. Air-sea CO₂ fluxes and cross-shelf exchange of inorganic carbon in the East

- China Sea from a coupled physical-biogeochemical model[J]. *Science of the Total Environment*, 906: 167572.
- QIAO S Q, SHI X F, WANG G Q, et al, 2017. Sediment accumulation and budget in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. *Marine Geology*, 390: 270-281.
- QIU B, 2019. Kuroshio and Oyashio currents[M]//COCHRAN J K, BOKUNIEWICZ H J, YAGER P L. Encyclopedia of ocean sciences. 3rd ed. Oxford: Academic Press: 384-394.
- SASAKI Y N, UMEDA C, 2021. Rapid warming of sea surface temperature along the Kuroshio and the China coast in the East China Sea during the twentieth century[J]. *Journal of Climate*, 34(12): 4803-4815.
- SHAN X, DALRYMPLE R W, SHI X F, et al, 2023. Changjiang coastal mud-belt deposits in Taiwan Strait: controls on its distribution and facies[J]. *Sedimentology*, 70(4): 1131-1163.
- SHAW R, LUO Y, CHEONG T S, et al, 2022. Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability[M]// P RTNER D C R H O, TIGNOR M, POLOCZANSKA E S, et al, 2022. Contribution of working group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Ambridge, UK and New York, USA: 1457-1579.
- SHI Q, WANG G H, 2021. Meander response of the Kuroshio in the East China Sea to impinging eddies[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(9): e2021JC017512.
- SONG J M, QU B X, LI X G, et al, 2018. Carbon sinks/sources in the Yellow and East China Seas: air-sea interface exchange, dissolution in seawater, and burial in sediments[J]. *Science China Earth Sciences*, 61(11): 1583-1593.
- TANG Y L, HUANGFU J L, HUANG R H, et al, 2020. Surface warming reacceleration in offshore China and its interdecadal effects on the East Asia-Pacific climate[J]. *Scientific Reports*, 10(1): 14811.
- TAO S Q, EGLINTON T I, MONTLUÇON D B, et al, 2016. Diverse origins and pre-depositional histories of organic matter in contemporary Chinese marginal sea sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 191: 70-88.
- TSAO S E, SHEN P Y, TSENG C M, 2023. Rapid increase of $p\text{CO}_2$ and seawater acidification along Kuroshio at the east edge of the East China Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 186: 114471.
- WANG J H, WU J Y, 2009. Occurrence and potential risks of harmful algal blooms in the East China Sea[J]. *Science of the Total Environment*, 407(13): 4012-4021.
- WANG P X, LI Q Y, TIAN J, et al, 2016. Monsoon influence on planktic $\delta^{18}\text{O}$ records from the South China Sea[J]. *Quaternary Science Reviews*, 142: 26-39.
- WANG B D, XIN M, WEI Q S, et al, 2018a. A historical overview of coastal eutrophication in the China Seas[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 136: 394-400.
- WANG J H, XIAO X, ZHOU Q Z, et al, 2018b. Rates and fluxes of centennial-scale carbon storage in the fine-grained sediments from the central South Yellow Sea and Min-Zhe belt, East China Sea[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 36(1): 139-152.
- WANG W T, YU Z M, SONG X X, et al, 2018c. Intrusion pattern of the offshore Kuroshio branch current and its effects on nutrient contributions in the East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(3): 2116-2128.
- WANG J, DONG C M, YU K, 2020. The influences of the Kuroshio on wave characteristics and wave energy distribution in the East China Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 158: 103228.
- WANG J J, BOUWMAN A F, LIU X C, et al, 2021a. Harmful algal blooms in Chinese coastal waters will persist due to perturbed nutrient ratios[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 8(3): 276-284.
- WANG Y J, LIU D Y, XIAO W P, et al, 2021b. Coastal eutrophication in China: trend, sources, and ecological effects[J]. *Harmful Algae*, 107: 102058.
- WANG F, LI X G, TANG X H, et al, 2023a. The seas around China in a warming climate[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(8): 535-551.
- WANG H, BOUWMAN A F, VAN GILS J, et al, 2023b. Hindcasting harmful algal bloom risk due to land-based nutrient pollution in the eastern Chinese coastal seas[J]. *Water Research*, 231: 119669.
- WANG H, RAN X B, BOUWMAN L, et al, 2023c. Competitive advantages of HAB species under changing environmental conditions in the coastal waters of the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*,

- 259: 104991.
- WEI Q S, WANG B D, YU Z G, et al, 2017. Mechanisms leading to the frequent occurrences of hypoxia and a preliminary analysis of the associated acidification off the Changjiang Estuary in summer[J]. *Science China Earth Sciences*, 60(2): 360-381.
- WEI Y, DING R B, HUANG D J, et al, 2023. The weakened upwelling at the upstream Kuroshio in the East China Sea induced extensive sea surface warming[J]. *Geophysical Research Letters*, 50(1): e2022GL101835.
- WU L X, CAI W J, ZHANG L P, et al, 2012. Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents[J]. *Nature Climate Change*, 2(3): 161-166.
- WU Y, EGLINTON T, YANG L Y, et al, 2013. Spatial variability in the abundance, composition, and age of organic matter in surficial sediments of the East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118(4): 1495-1507.
- WU H, 2015. Cross-shelf penetrating fronts: a response of buoyant coastal water to ambient pycnocline undulation[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(7): 5101-5119.
- WU R H, LI C Y, LIN J M, 2017. Enhanced winter warming in the Eastern China coastal waters and its relationship with ENSO[J]. *Atmospheric Science Letters*, 18(1): 11-18.
- WU Y M, ZHU H P, DANG X Y, et al, 2021. Spatial-temporal change of phytoplankton biomass in the East China Sea with MODIS data[J]. *Journal of Ocean University of China*, 20(2): 454-462.
- WU W T, WANG J J, WANG H, et al, 2023. Trends in nutrients in the Changjiang River[J]. *Science of the Total Environment*, 872: 162268.
- XIAO W P, LIU X, IRWIN A J, et al, 2018. Warming and eutrophication combine to restructure diatoms and dinoflagellates[J]. *Water Research*, 128: 206-216.
- XIAO X, AGUSTÍ S, PAN Y R, et al, 2019. Warming amplifies the frequency of harmful algal blooms with eutrophication in Chinese coastal waters[J]. *Environmental Science & Technology*, 53(22): 13031-13041.
- XU L J, YANG D Z, GREENWOOD J, et al, 2020a. Riverine and oceanic nutrients govern different algal bloom domain near the Changjiang Estuary in summer[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 125(10): e2020JG005727.
- XU T Y, SHI X F, LIU C G, et al, 2020b. Stratigraphic framework and evolution of the mid-late Quaternary (since marine isotope stage 8) deposits on the outer shelf of the East China Sea[J]. *Marine Geology*, 419: 106047.
- YANG D Z, HUANG R X, YIN B S, et al, 2018. Topographic beta spiral and onshore intrusion of the Kuroshio current[J]. *Geophysical Research Letters*, 45(1): 287-296.
- YANG G B, ZHENG Q, YUAN Y, et al, 2019. Effect of a mesoscale eddy on surface turbulence at the Kuroshio front in the East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(3): 1763-1777.
- YANG B, HU P, HOU Y J, 2022a. Variation of internal tides on the continental slope of the southeastern East China Sea[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(1): 104.
- YANG Y, PIPER D J W, XU M, et al, 2022b. Northwestern Pacific tropical cyclone activity enhanced by increased Asian dust emissions during the Little Ice Age[J]. *Nature Communications*, 13(1): 1712.
- YIN M, LI X, XIAO Z N, et al, 2018. Relationships between intensity of the Kuroshio current in the East China Sea and the East Asian winter monsoon[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 37(7): 8-19.
- YUAN D L, QIAO F L, SU J. 2005. Cross-shelf penetrating fronts off the southeast coast of China observed by MODIS[J]. *Geophysical Research Letter*, 32: L19603.
- YUAN D L, HSUEH Y, 2010. Dynamics of the cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas in winter[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 57(19): 1745-1761.
- YUAN D L, HAO J J, LI J L, et al, 2018. Cross-shelf carbon transport under different greenhouse gas emission scenarios in the East China Sea during winter[J]. *Science China Earth Sciences*, 61(6): 659-667.
- ZHAI W D, DAI M H, CHEN B S, et al, 2013. Seasonal variations of sea-air CO₂ fluxes in the largest tropical marginal sea (South China Sea) based on multiple-year underway measurements[J]. *Biogeosciences*, 10(11): 7775-7791.
- ZHANG J, LIU S M, REN J L, et al, 2007. Nutrient gradients from the eutrophic Changjiang (Yangtze River) Estuary to

- the oligotrophic Kuroshio waters and re-evaluation of budgets for the East China Sea shelf[J]. *Progress in Oceanography*, 74(4): 449-478.
- ZHANG J, GUO X Y, ZHAO L, 2019a. Tracing external sources of nutrients in the East China Sea and evaluating their contributions to primary production[J]. *Progress in Oceanography*, 176: 102122.
- ZHANG W X, WU H, HETLAND R D, et al, 2019b. On mechanisms controlling the seasonal hypoxia hot spots off the Changjiang River Estuary[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(12): 8683-8700.
- ZHANG X S, WANG B, WANG X D, et al, 2023. Interannual and decadal variations of the Kuroshio axis in the East China Sea[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2486(1): 012001.
- ZHAO L, GUO X Y, 2011. Influence of cross-shelf water transport on nutrients and phytoplankton in the East China Sea: a model study[J]. *Ocean Science*, 7(1): 27-43.
- 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.
- ZHAO L B, GAO L, 2019. Dynamics of dissolved and particulate organic matter in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and the adjacent East China Sea shelf[J]. *Journal of Marine Systems*, 198: 103188.
- ZHAO B, YAO P, BIANCHI T S, et al, 2021. Controls on organic carbon burial in the Eastern China marginal seas: a regional synthesis[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 35(4): e2020GB006608.
- ZHOU Z X, YU R C, SUN C, et al, 2019. Impacts of Changjiang River discharge and Kuroshio intrusion on the diatom and dinoflagellate blooms in the East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(7): 5244-5257.
- ZHOU Z X, YU R C, ZHOU M J, 2022. Evolution of harmful algal blooms in the East China Sea under eutrophication and warming scenarios[J]. *Water Research*, 221: 118807.
- ZHU B S, YANG W, JIANG C F, et al, 2022. Observations of turbulent mixing and vertical diffusive salt flux in the Changjiang Diluted Water[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 40(4): 1349-1360.
- ZUO J L, SONG J M, YUAN H M, et al, 2016. Particulate nitrogen and phosphorus in the East China Sea and its adjacent Kuroshio waters and evaluation of budgets for the East China Sea shelf[J]. *Continental Shelf Research*, 131: 1-11.

A Review on the Progress of Regional Oceanography in the East China Sea

RAN Xiangbin^{1,2}, XU Tengfei^{1,2}, ZHAO Bin¹, GUO Jingsong¹, QIAO Shuqing^{1,2},
WEI Zexun^{1,2}, LENG Shuying³

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

2. *Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China ;*

3. *Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China)*

Abstract: Due to the increasing impact of human activities in recent decades, the nearshore marine environment has undergone significant changes compared to the past. Scientific understanding of the characteristics, changes, and control factors of the nearshore marine environment is of great significance for addressing global changes and has become an important topic of current oceanographic concern. As one of important marginal seas of China, the East China Sea has a unique circulation system and gives birth to three typical ecosystems linked to the Yangtze River Estuary, the Upwelling Current, and the Kuroshio Current, respectively. Its marine scientific research is critically important to China's marine resource development, environmental protection, and national security. This article reviews the progress of marine research in the East China Sea with major focus on marine biogeochemistry. It summaries relevant research progress in physical oceanography, marine chemistry, marine geology, and biological oceanography,

and explores existing problems and looks forward to future development directions. Existing studies show that the marine environment in the East China Sea is deeply influenced by human activities and climate change, and exhibits a new pattern. The discharge of the Changjiang River and the Kuroshio as well as its intrusion into the continental shelf region are main driving forces for formation of the three ecological systems in the East China Sea. In addition to main circulation system, the penetrating front and cross-shelf current are main dynamic processes connecting the water between the inner and outer shelves in the East China Sea, which promotes cross-shelf transport of important biogenic materials such as carbon. Although related research has achieved certain progress in areas of marine ecological environment, climate change, and marine disasters, we are still facing many challenges due to insufficient data and limited studies. Considering the significant temporal and spatial variations of marine environment and the major environmental concerns of eutrophication and estuarine hypoxia, it is necessary to strengthen the regional oceanographic research on the East China Sea. In the future, we should encourage free exploration and research, strengthen international cooperation, enhance data sharing and technological innovation capabilities, and promote marine research in the East China Sea to an academic higher level.

Keywords: review; regional oceanography; oceanographic survey; the East China Sea

Received: December 22, 2023