

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。

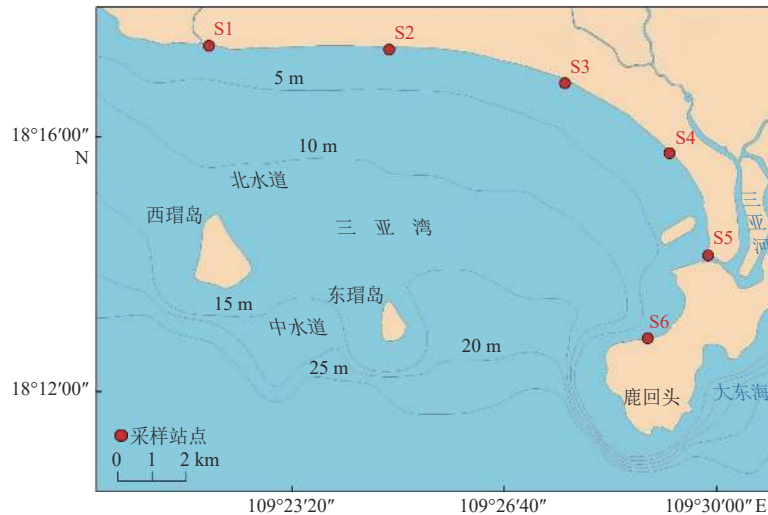


图 1 三亚湾近岸海域采样站点

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

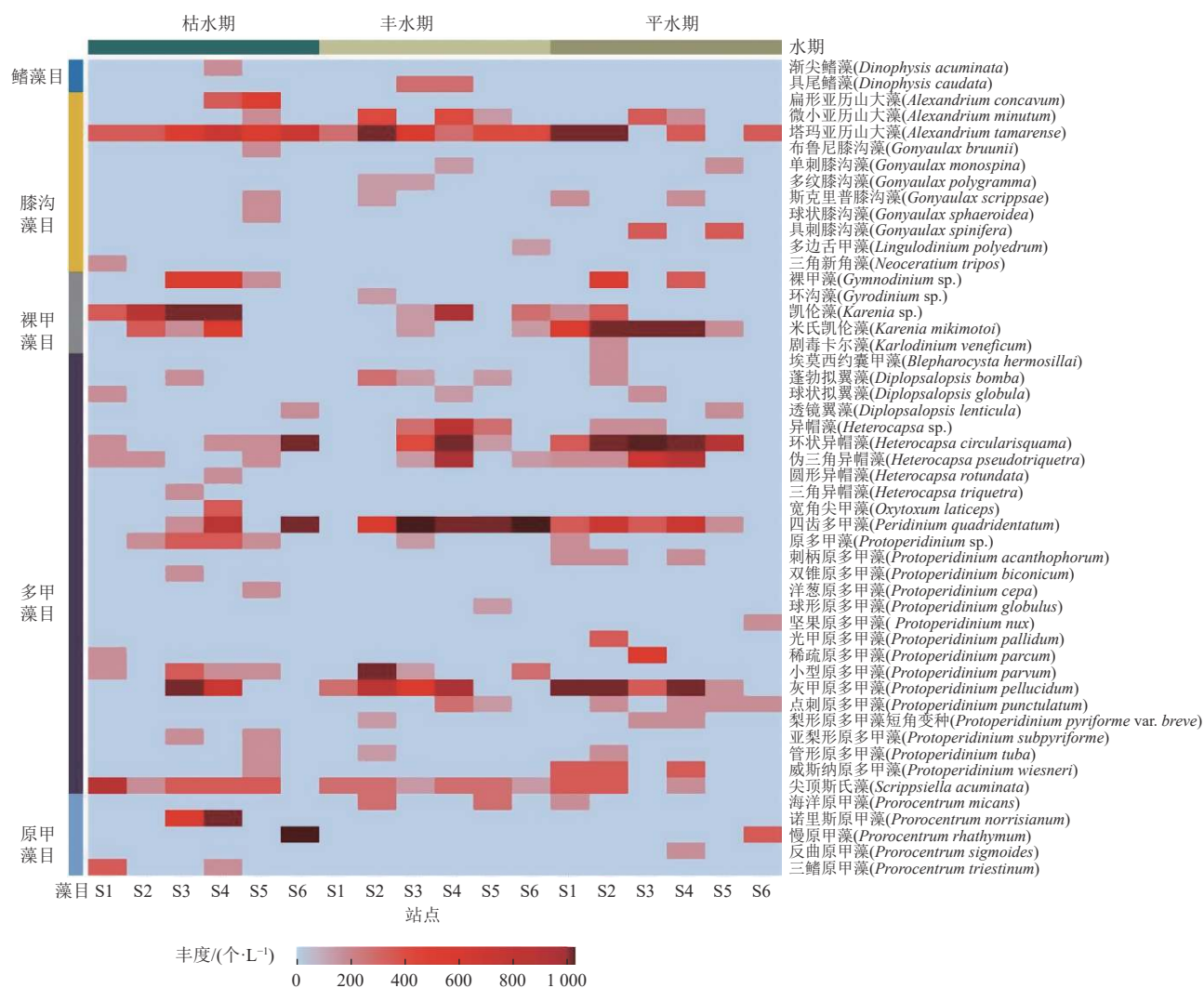


图 2 三亚湾近岸海域浮游甲藻分布及丰度

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。

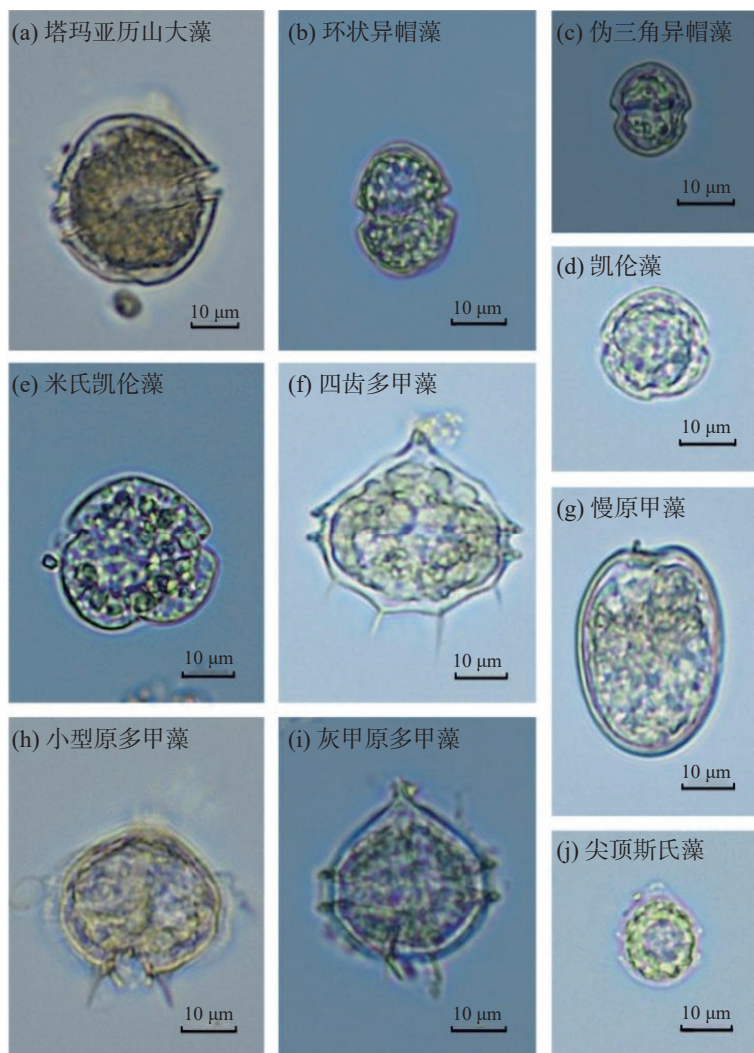


图 3 三亚湾近岸海域优势浮游甲藻

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(NH_4^+-N)、硝酸盐氮(NO_3^--N)、亚硝酸盐氮(NO_2^--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; NH_4^+-N 质量浓度在丰水期波动较大, 枯水期中位线较高; NO_3^--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; NO_2^--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。

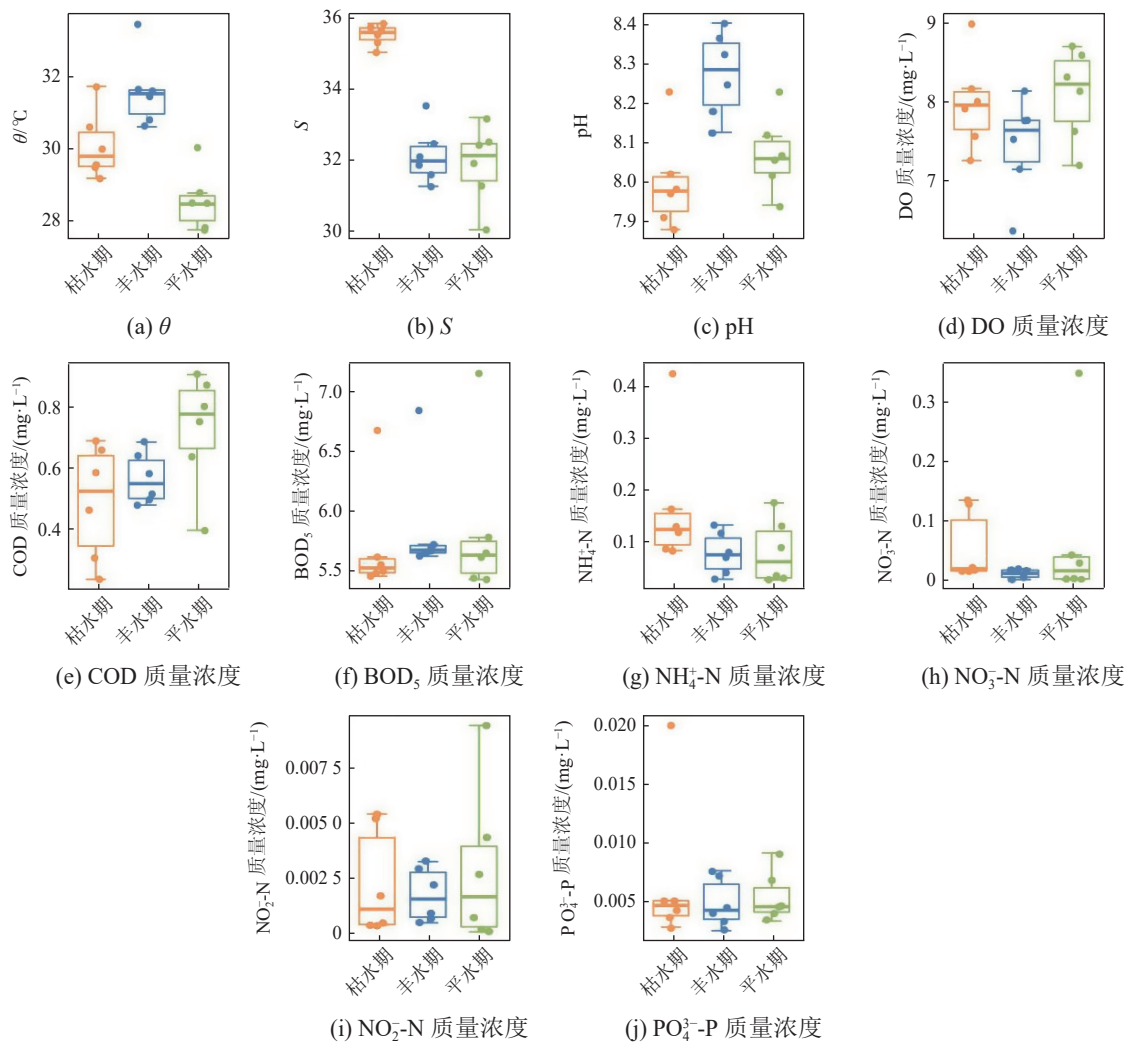
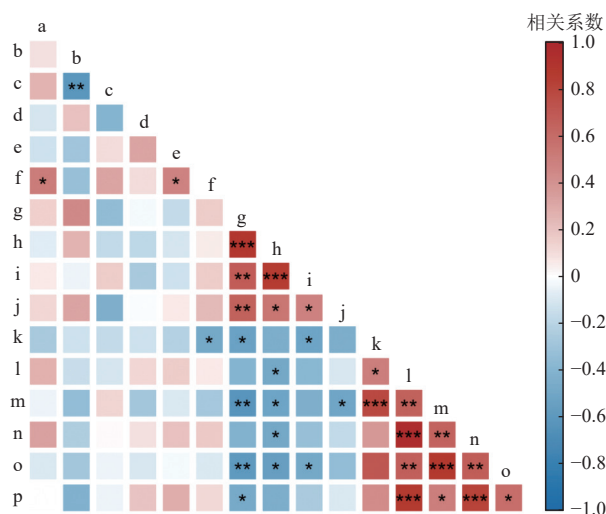


图 4 水环境指标箱线图

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

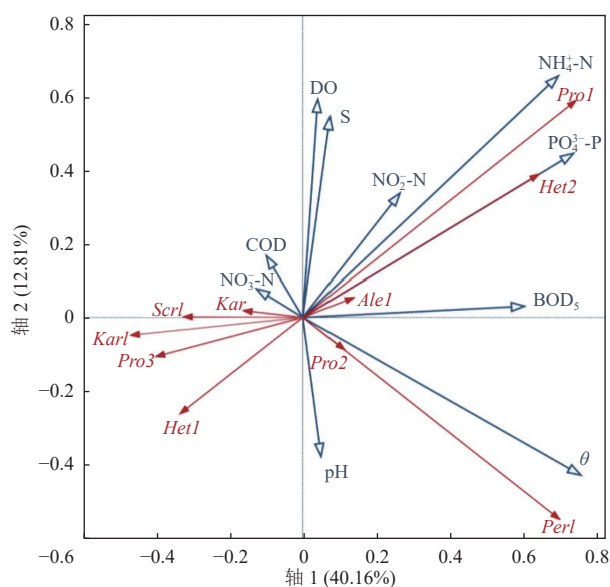
2.3.3 优势浮游甲藻与水环境因子相关性

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; Perl 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.
- 郇培怡, 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-GHARIBIA 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-

- anean 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