

DOI: 10.3724/j.1007-6336.2025-0127

广州市海域球形棕囊藻赤潮动态及其环境驱动因素

杜佩佩¹, 丁 琛¹, 高广银¹, 王书琰¹, 许嘉文¹,
索安宁², 张 立²

[1.广州市地质调查院(广州市海洋发展促进中心), 广东 广州 510440; 2.中国科学院南海海洋研究所 海洋环境工程中心, 广东 广州 510301]

摘 要:球形棕囊藻 (*Phaeocystis globosa*) 引发的赤潮对海洋生态系统和沿海经济活动构成严重威胁。本研究基于 2024 年 12 月至 2025 年 2 月珠江口广州市海域的一次球形棕囊藻赤潮的现场调查, 结合同步测定的叶绿素 *a*、藻细胞丰度及关键环境因子, 探讨了其发生、发展和消亡的全过程, 分析了赤潮发生过程中球形棕囊藻的丰度和赤潮面积的变化趋势, 并通过相关性分析及广义加性模型 (generalized additive models, GAM) 分析, 量化了各因子对藻华生消的影响程度。结果表明, 广州市海域赤潮暴发期分为赤潮发生前期、赤潮持续暴发期、赤潮衰减期、赤潮衰亡期和赤潮消亡期 5 个阶段, 赤潮持续暴发期的球形棕囊藻平均丰度最大值达到 398000×10^4 ind/L, 赤潮面积最大值达到 7.4 km^2 ; 赤潮衰亡期的球形棕囊藻丰度最大值降至 317×10^4 ind/L。盐度、活性磷酸盐、化学需氧量和铵盐是影响球形棕囊藻丰度的主要因素, 化学需氧量-铵盐、硝酸盐-铵盐及硝酸盐-盐度的两两交互效应揭示了多种理化因子的协同作用和非线性关系。未来应继续开展赤潮长期监测, 并加强对气候变化和生物因素影响的研究, 以全面理解赤潮的发生机制, 为珠江口球形棕囊藻赤潮早期预警提供统计依据与科学参考。

关键词:球形棕囊藻; 广义加性模型; 营养盐; 赤潮; 影响因子

中图分类号: Q178.53; X171

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2026)04-0568-11

Dynamics and environmental drivers of *Phaeocystis globosa* blooms in Guangzhou coastal waters

Du Peipei¹, Ding Chen¹, Gao Guangyin¹, Wang Shuyan¹, Xu Jiawen¹,
Suo Anning², Zhang Li²

[1.Guangzhou Geological Survey Institute (Guangzhou Marine Development Promotion Center), Guangzhou 510440, China;
2.Marine Environmental Engineering Center, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China]

Abstract: Harmful algal blooms (HABs) caused by *Phaeocystis globosa* pose a severe threat to marine ecosystems and coastal economic activities. Based on field surveys of a *P. globosa* bloom in Guangzhou waters of the Pearl River Estuary from December 2024 to February 2025, this study simultaneously measured chlorophyll *a*, abundance, and key environmental factors. It examined the entire process of bloom occurrence, development, and decay, analyzing trends in *P. globosa* abundance and bloom area during the event.

收稿日期: 2025-08-27, 修订日期: 2026-03-11

基金项目: 广州市财政预算项目 (0724-2431Z1970275); 广州市资源规划和海洋科技协同创新中心项目 (2023B04J0301)

作者简介: 杜佩佩 (1994—), 女, 山西大同人, 助理工程师, 硕士, 研究方向为海洋灾害、海洋生态调查监测, E-mail: 1576581767@qq.com

通信作者: 张 立 (1980—), 女, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为海洋生物多样性, 生态修复及管理, E-mail: lizhang@scsio.ac.cn

Correlation analysis and generalized additive models (GAM) were employed to quantify the influence of each factor on the bloom's emergence and decay. Results indicate that the red tide outbreak in Guangzhou waters comprised five distinct phases: pre-outbreak, sustained outbreak, decline phase, decay phase, and extinction phase. During the bloom stage, the maximum average abundance of *P. globosa* reached 398000×10^4 ind/L, and the maximum bloom area reached 7.4 km^2 . In the decay stage, the maximum abundance of *P. globosa* decreased to 317×10^4 ind/L. Salinity, PO_4^{3-} , COD and NH_4^+ are the primary drivers influencing the abundance of *P. globosa*. The pairwise interactions between COD- NH_4^+ , NO_3^- - NH_4^+ , and NO_3^- -salinity also reveal synergistic effects and nonlinear relationships among multiple physicochemical factors. Future efforts should continue long-term monitoring of algal blooms while intensifying research on the impacts of climate change and biological factors. This comprehensive understanding of bloom mechanisms will provide statistical foundations and scientific references for early warning systems targeting *P. globosa* blooms in the Pearl River Estuary.

Key words: *Phaeocystis globosa*; generalized additive models; nutrients; red tide; influence factor

棕囊藻 (*Phaeocystis*) 是一类广泛分布于全球海洋中的有害藻华生物, 属于定鞭藻门 (Haptophyta), 在温带和极地海域较为常见^[1], 具有广温、广盐的特性^[2-4], 在碳与硫的生物地球化学循环、食物网架构乃至全球气候变动中均扮演关键角色^[5]。棕囊藻具有单细胞和囊状群体两种生活形态^[6], 目前已报道的棕囊藻共 10 种^[7], 其中球形棕囊藻 (*Phaeocystis globosa*) 是常见的赤潮生物种。球形棕囊藻通常以囊状群体形式形成赤潮^[8-13], 其囊体由几千乃至数万个单细胞构成, 胶质囊由小到大, 外观颜色从浅绿色、深绿色、浅棕色至咖啡色不等。棕囊藻赤潮是由棕囊藻爆发性繁殖引发的一种赤潮灾害现象^[14], 自 1997 年我国东南沿海首次暴发棕囊藻赤潮^[15]以来, 广西、海南、河北及天津等海域相继发生了该种赤潮^[16-18], 严重影响了海水养殖业和海洋生态环境^[19-21]。

根据《2023 年广东省海洋灾害公报》, 2014—2023 年广东省海域共发生赤潮 95 次, 累计发生赤潮面积约为 3477.97 km^2 , 近 10 年来平均每年发生赤潮 9.5 次。球形棕囊藻是引发广东省海域赤潮的最主要藻华生物。广东省发生赤潮的海域主要是珠江三角洲区域的深圳市大鹏湾和大亚湾海域、珠海市海域以及珠江口海域、粤西地区的湛江市和茂名市沿岸海域, 其中深圳市海域赤潮发生次数最多。赤潮的发生具有明显的季节变化特征, 从广东省各月累计发生赤潮的次数和面积来看, 冬季和春季是赤潮的高发期。

根据《2023 年广东省海洋灾害公报》及曾建军等^[22]对 2013—2022 年赤潮事件的系统梳理可知, 广州市海域近 10 年来未有赤潮记录, 相关影响因素研究亦属空白。2024 年 12 月 26 日至 2025 年 1 月 26 日, 广州市海域暴发球形棕囊藻赤潮, 最大覆盖面积达 7.4 km^2 。本研究跟踪该赤潮过程, 同步监测藻细胞丰度及关键环境因子, 并开展相关性分析及广义加性模型 (generalized additive models, GAM) 分析, 旨在阐明本次球形棕囊藻赤潮的发生、发展过程及主要影响因子, 为广州市乃至珠江口海域赤潮预警提供基础数据与决策依据。

1 材料与方法

1.1 监测站位及时间

由 2024 年 12 月 27 日吉林一号的卫星遥感影像 (图 1a) 和 12 月 28 日 HJ-2B CCD 影像 (图 1b) 可见, 赤潮主要分布于海鸥岛及广州南部海域。据此, 本研究布设 14 个监测站位 (图 1c), 分别于 2024 年 12 月 26 日至 2025 年 1 月 7 日、1 月 9 日、1 月 13 日、1 月 20 日、1 月 26 日、2 月 5 日, 每日同步监测赤潮面积、赤潮生物丰度及关键环境参数, 采样时间及层次列于表 1。样品采集、保存与运输均按照《海洋监测规范 第 3 部分: 样品采集、贮存与运输》(GB 17378.3—2007) 执行。

1.2 分析方法

赤潮物种的监测分析严格遵循《赤潮监测技术规程》(HY/T 069—2005) 进行。海洋环境因子

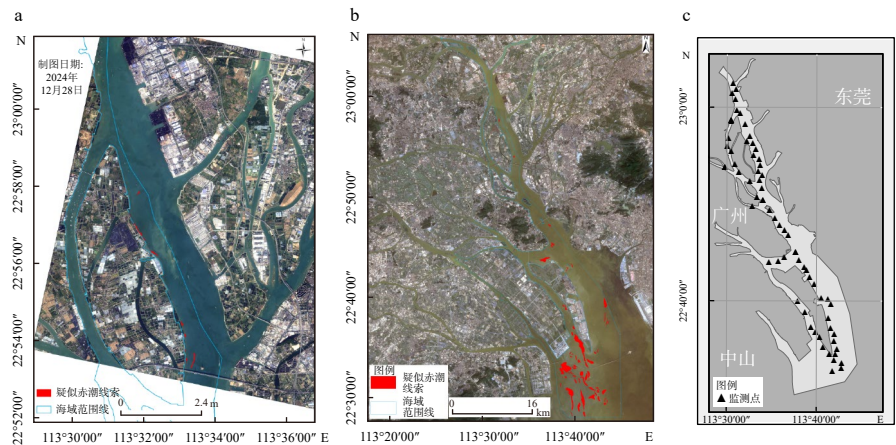


图 1 赤潮调查遥感影像(a、b)及监测站位(c)

Fig. 1 Remote sensing images of red tide investigation(a、b)and monitoring sties(c)

表 1 采样时间与采样层次

Tab.1 Sampling time and sampling strata

日期	采样时间	采样层次	深度/m
12月26日	12:20—14:05	表层、底层	0.5、16.9
12月27日	11:12—19:33	表层、底层	0.5、12.5
12月28日	10:55—16:42	表层、底层	0.5、13.8
12月29日	11:45—16:49	表层、底层	0.5、10.3
12月30日	11:22—14:58	表层、底层	0.5、10.2
12月31日	10:03—13:58	表层、底层	0.5、12.2
1月1日	9:58—12:25	表层、底层	0.5、9.2
1月2日	11:08—16:57	表层、底层	0.5、12.0
1月3日	9:43—15:08	表层、底层	0.5、12.5
1月4日	8:45—14:18	表层、底层	0.5、14.8
1月5日	9:43—13:11	表层、底层	0.5、12.3
1月6日	9:03—11:49	表层、底层	0.5、15.6
1月7日	10:03—14:49	表层、底层	0.5、11.2
1月9日	9:46—13:09	表层、底层	0.5、13.2
1月13日	11:32—14:11	表层、底层	0.5、13.8
1月20日	10:21—13:57	表层、底层	0.5、12.0
1月26日	8:26—11:03	表层、底层	0.5、11.5
2月5日	9:18—11:39	表层、底层	0.5、11.1

的分析按照《海洋调查规范》(GB/T 12763—2007)和《海洋监测规范》(GB 17378—2007)执行。监测指标包括球形棕囊藻的丰度(Richness)、气温(T)、气压(AP)、水温(SST)、盐度(Salinity)、pH、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、活性磷酸盐(dissolved inorganic phosphate, PO_4^{3-})、活性硅酸盐(reactive silicate,

SiO_3^{2-})、叶绿素 a (Chl a)、铵盐(ammonium, NH_4^+)、亚硝酸盐(nitrite, NO_2^-)和硝酸盐(nitrate, NO_3^-)等。具体样品检测方法列于表 2。

表 2 海洋环境因子检测方法

Tab.2 Testing methods for marine environmental factors

序号	项目	分析方法	引用标准
1	T	空气温度观测法	GB/T 14914.2—2019
2	AP	气压观测法	
3	pH	pH计法	GB 17378.4—2007
4	SST	表层水温表法	
5	Salinity	盐度计法	
6	DO	碘量法	
7	COD	碱性高锰酸钾法	
8	PO_4^{3-}	磷钼蓝分光光度法	
9	NO_2^-	萘乙二胺分光光度法	
10	NO_3^-	锌镉还原法	
11	NH_4^+	次溴酸盐氧化法	
12	SiO_3^{2-}	硅钼黄法	
13	Chl a	分光光度法	GB 17378.6—2007

依据《近岸海域环境监测技术规范 第十部分:评价及报告》(HJ 442.10—2020),利用富营养化指数(E)来表征研究区域海水富营养化程度,计算公式如下:

$$E = \frac{C_{\text{COD}} \times C_{\text{DIN}} \times C_{\text{DIP}} \times 10^6}{4500} \quad (1)$$

式中: C_{COD} 、 C_{DIP} 分别为 COD、 PO_4^{3-} 的实测浓度(mg/L); C_{DIN} 是无机氮浓度(mg/L),为 NO_3^- 、 NO_2^- 和 NH_4^+ 实测浓度之和。 E 值的等级划分

为:轻度富营养化, $E \leq 3.0$; 中度富营养化, $3.0 < E \leq 9.0$; 重度富营养化, $E > 9.0$ 。

1.3 相关性分析及 GAM 分析

本研究采用斯皮尔曼(Spearman)秩相关分析来探讨环境因子间及环境因子与球形棕囊藻丰度之间的关联程度,以 Kendall 系数进行显著性检验。相关性热图直观展示了各指标的相关关系,其中 $p < 0.05$ 的显著相关关系用*标注, $p < 0.01$ 的极显著相关关系用**标注, $p < 0.001$ 的超高显著相关关系用***标注。

采用 GAM 深入量化环境因子与球形棕囊藻丰度的复杂关系。以去除共线性后的环境因子作为解释变量,球形棕囊藻丰度作为响应变量,所有变量均加 1 后取自然对数(以“.log”表示),通过 R4.4.3 软件中的 mgcv 程序包^[23]拟合,构建仅考虑单变量效应的 GAM 零模型。由于 SiO_3^{2-} 和 Chl *a* 均不是球形棕囊藻的直接影响要素,因此不纳入 GAM 分析。零模型结构如下:

$$\begin{aligned} \text{Richness.log} \sim & \beta_0 + s(\text{Salinity.log}, bs = "ts") + \\ & s(\text{PO}_4.\text{log}, bs = "ts") + s(\text{COD.log}, bs = "ts") + \\ & s(\text{NH}_4.\text{log}, bs = "ts") + s(\text{NO}_3.\text{log}, bs = "ts") + \\ & s(T.\text{log}, bs = "ts") + \varepsilon \end{aligned} \quad (2)$$

式中: β_0 是模型的截距; Salinity.log 表示盐度的对数值; $\text{PO}_4.\text{log}$ 表示 PO_4^{3-} 浓度的对数值; COD.log 表示 COD 的对数值; $\text{NH}_4.\text{log}$ 表示 NH_4^+ 浓度的对数值; $\text{NO}_3.\text{log}$ 表示 NO_3^- 浓度的对数值; $T.\text{log}$ 表示气温 T 的对数值; ε 是模型的残差; $s()$ 为光滑参数,表示非线性函数。

模型的拟合程度通过自由度、 F 、 p 、调整判定系数 (R^2_{adj})、偏差解释率等参数来表征。自由度用于判断环境因子与球形棕囊藻丰度之间是否存在线性关系, F 用来判断环境因子对球形棕囊藻丰度的影响程度。模型对响应变量总体变化的解释率用 R^2_{adj} 和偏差解释率来衡量, R^2_{adj} 越接近 1, 表明模型拟合效果越好。显著水平定为 $p < 0.05$ 。

进一步基于零模型筛选具有显著单一影响效应的环境要素,构建交互效应模型,分析两两交互作用对棕囊藻丰度的影响。交互模型结构如下:

$$\begin{aligned} \text{Richness.log} \sim & \beta_0 + t_i(\text{COD.log}, \text{NH}_4.\text{log}, bs = "ts") + \\ & t_i(\text{NH}_4.\text{log}, \text{NO}_3.\text{log}, bs = "ts") + \\ & t_i(\text{Salinity.log}, \text{NO}_3.\text{log}, bs = "ts") + \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $t_i(x_1, x_2, bs = "ts")$ 表示环境要素 x_1 和 x_2 的交互作用对棕囊藻丰度变化影响的交互项; 设置收缩型光滑项 $s(x, bs = "ts")$, 允许自动变量选择^[24]。

通过 AIC 选择最优模型,所有光滑参数采用 REML 估计以减少小样本偏差^[25]。计算 R^2_{adj} 与偏差解释率,并绘制主要影响因素交互效应三维空间图,定量分析环境因子交互作用对棕囊藻丰度变化的影响。

1.4 统计学方法

数据处理使用 Origin2022 软件完成,相关性分析使用 SPSS 22.0 软件进行,监测站位图及球形棕囊藻分布图使用 ArcGIS 10.7 软件绘制。

2 结果与讨论

2.1 球形棕囊藻赤潮发生过程

2024 年 12 月 26 日,广州市海域海水水色异常,出现大量囊状胶体。现场采样鉴定囊状胶体为球形棕囊藻单一种,测得的藻类最高丰度为 1460×10^4 ind/L, 超过《赤潮监测技术规程》(HY/T 069—2005)中规定的赤潮临界丰度 (1000×10^4 ind/L), 达到赤潮水平。由此判定广州市海域发生球形棕囊藻赤潮,主要集中在海鸥岛周边和广州市海域南部,呈带状或斑块状分布。

2024 年 12 月 27 日—28 日球形棕囊藻丰度为 $5200 \times 10^4 \sim 8490 \times 10^4$ ind/L, 主要集中在海鸥岛附近,增长缓慢,该时期为赤潮发生前期。2024 年 12 月 29 日球形棕囊藻开始爆发性增殖,藻类丰度维持在较高水平 ($194000 \times 10^4 \sim 398000 \times 10^4$ ind/L)。赤潮面积于 2025 年 1 月 2 日达到峰值,为 7.4 km^2 , 且龙穴岛附近海域藻类丰度明显高于海鸥岛附近,进入赤潮发展持续期。2025 年 1 月 3 日以后赤潮面积波动性下降,球形棕囊藻丰度也逐渐降低,1 月 13 日球形棕囊藻丰度降至 61600×10^4 ind/L, 此阶段为赤潮衰减期。2025 年 1 月 14 日至 26 日球形棕囊藻丰度持续下降,于 1 月 26 日降至 317×10^4 ind/L,

低于赤潮发生阈值,水色基本恢复正常,进入赤潮衰亡期。继续对赤潮进行跟踪监测,2025 年 2 月 5 日球形棕囊藻丰度的平均值已降至 1.0×10^4 ind/L,赤潮消退,进入赤潮消亡期(图 2)。

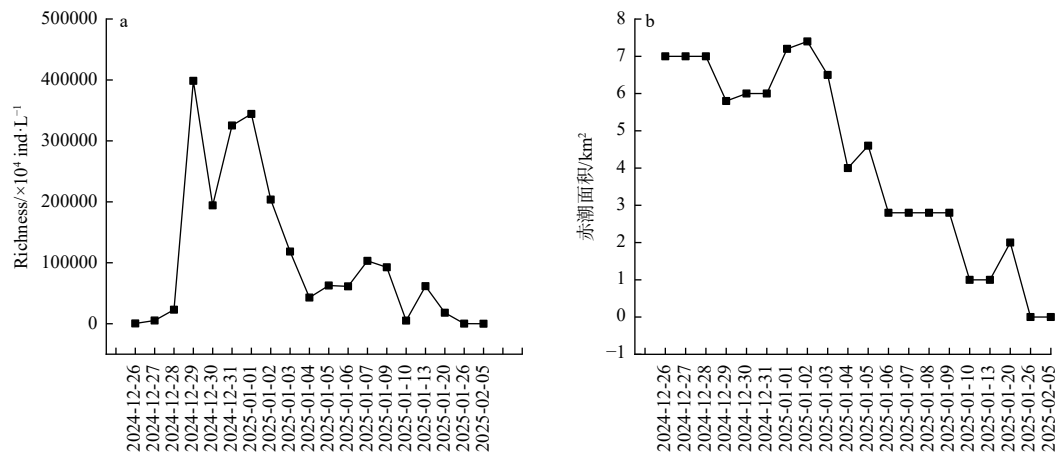


图 2 赤潮期球形棕囊藻丰度和赤潮面积的变化

Fig. 2 Changes in Average density of *Phaeocystis globosa* and red tide area during the red tide period

2.2 水体环境因子特征

2024 年 11 月对广州近海海域的水文气象、水体环境和海洋生物等要素进行了常规监测,监测站位覆盖整个广州市海域,其间未发现赤潮现象。各站位的环境因子测定值的范围及平均值列于表 3。在常规监测期间,广州市海域整体处于富营养化状态。然而,Chl *a* 的含量小于 10 μg/L,未超正常阈值。

表 3 2024 年 11 月广州海域环境因子常规监测结果

Tab.3 Monitoring results of environmental factors in Guangzhou sea area in November 2024

因子	含量
<i>T</i> /℃	27.75(25.2 ~ 31.2)
AP/kpa	101.3(101.09 ~ 101.52)
SST/℃	26.07(25 ~ 29)
Salinity	4.29(0 ~ 12.25)
pH	7.96(7.15 ~ 8.48)
DO/mg·L ⁻¹	6.75(5.58 ~ 8.16)
PO ₄ ³⁻ /mg·L ⁻¹	0.051(0.025 ~ 0.075)
COD	1.27(0.78 ~ 1.84)
SiO ₃ ²⁻ /mg·L ⁻¹	1.46(0.96 ~ 2.12)
NO ₂ ⁻ /mg·L ⁻¹	0.147(0.118 ~ 0.165)
NH ₄ ⁺ /mg·L ⁻¹	0.13(0.052 ~ 0.22)
NO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	0.33(0.18 ~ 0.42)
Chl <i>a</i> /μg·L ⁻¹	1.19(0.85 ~ 1.45)
<i>E</i>	4.9(3.76 ~ 6.62)

2.3 赤潮发生期间 Chl *a* 和水体环境因子变化特征

2.3.1 Chl *a*

Chl *a* 浓度是衡量海水中浮游植物现存量的替代指标,其时空变化可间接反映赤潮生消过程^[26]。本次监测结果显示,在赤潮暴发过程中,球形棕囊藻占绝对优势,Chl *a* 浓度远超 10 μg/L。在赤潮发生前期(2024 年 12 月 28 日至 2025 年 1 月 3 日),赤潮生物大量聚集并快速增殖(图 2)。与此同时,Chl *a* 浓度也呈现快速上升的趋势(图 3)。2024 年 12 月 29 日球形棕囊藻丰度达到最大值,Chl *a* 浓度也升至峰值(138.39 μg/L)。随着赤潮的逐渐消散,Chl *a* 浓度整体呈现下降趋势,并在 2025 年 1 月 26 日至 2 月 5 日接近常规监测值。在此期间,Chl *a* 浓度较常规监测期间增加了 3.19 ~ 137.2 μg/L,远高于常规监测浓度(表 3)。

2.3.2 气温、气压、水温、盐度

温度是球形棕囊藻赤潮发生与消亡的关键因素^[27],南海海域球形棕囊藻赤潮通常发生在水温为 15 ℃ ~ 27 ℃ 的水域^[3-4]。本次赤潮暴发期间,气温为 11.06 ℃ ~ 23.73 ℃(图 4a),明显低于 2024 年 11 月的平均气温,AP 值与 11 月相比变化不大。SST 为 8.96 ℃ ~ 19.33 ℃,明显低于 2024 年 11 月的常规监测值(25 ℃ ~ 29 ℃,表 3)。

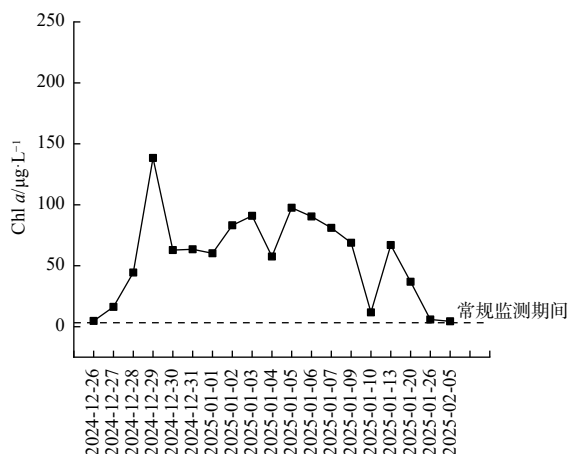


图3 Chl a 浓度变化情况

Fig. 3 The variation of chlorophyll a concentration

随着赤潮灾害逐渐消退,海洋水体温度逐渐恢复正常,该结果与符传辉等^[3]的研究结果一致。

研究表明,球形棕囊藻是一种广盐性的赤潮藻种,能够在较宽的盐度范围内生长,在 25 ~ 40 盐度范围内生长良好,在 15 ~ 20 盐度范围生长缓慢,在 5 ~ 10 盐度范围生长受到抑制^[28-29]。在本次赤潮监测期间,盐度在 2024 年 12 月 27 日—2025 年 1 月 7 日呈先上升后下降趋势,后续随着藻类的消减,盐度有所回升,在 1 月 9 日盐度达到最高值,为 24.25,赤潮监测期间海水的平均盐度为 5.78 ~ 24.25,较常规监测值增加了 1.49 ~ 21.96,比 2024 年 11 月更适宜球形棕囊藻的生长。

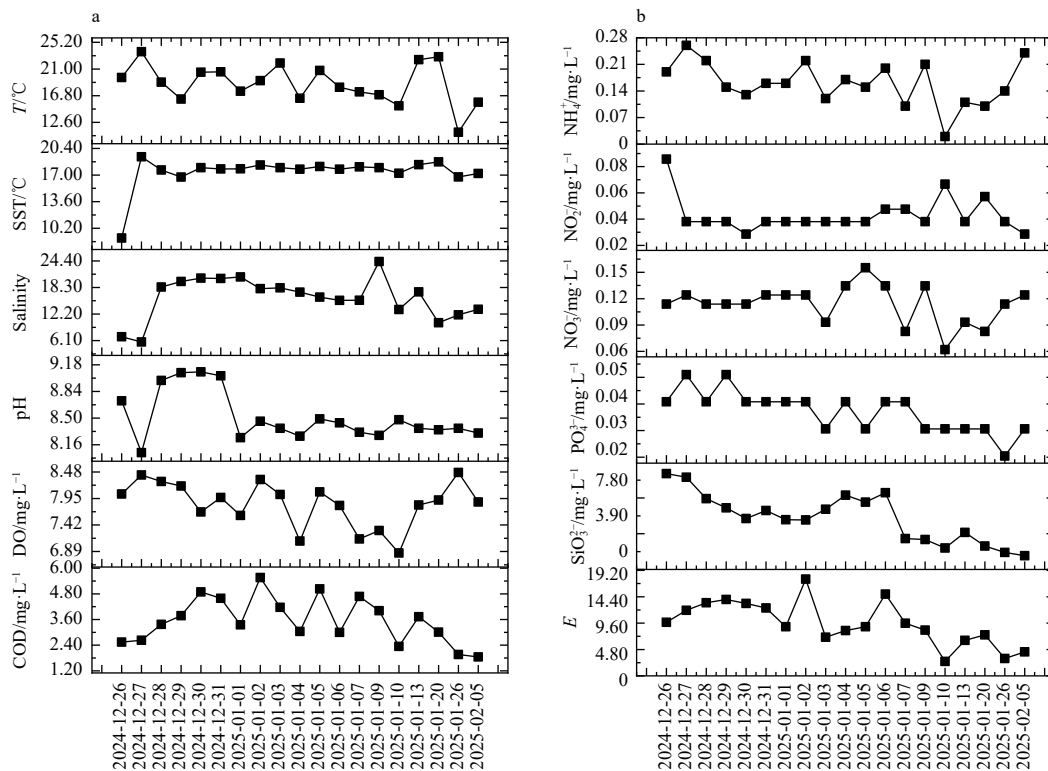


图4 赤潮期间环境因子及富营养化指数变化情况

Fig. 4 Changes in environmental factors and eutrophication index during the red tide period

2.3.3 pH、化学需氧量、活性硅酸盐

赤潮监测期间 pH 变化范围为 8.06 ~ 9.09, 2024 年 12 月 29 日—31 日 pH 达到 9.04 ~ 9.09, 与常规监测值相比, pH 明显升高(图 4a)。COD 较常规监测值高 0.58 ~ 4.29 mg/L, 2025 年 1 月 2 日 COD 浓度达到最高值, 为 5.56 mg/L。水体中还原性物质大量增加, 这很可能与球形棕囊藻

的增殖有关, 因为球形棕囊藻是一种挥发性含硫化合物的高产种^[4]。2024 年 12 月 26 日—2025 年 1 月 10 日, SiO_3^{2-} 浓度较常规监测期间高 0.88 ~ 9.00 mg/L, 2025 年 1 月 13 日后 SiO_3^{2-} 浓度快速下降, 到 2025 年 2 月 5 日基本接近常规监测值。

2.3.4 硝酸盐、亚硝酸盐、铵盐、活性磷酸盐

本次赤潮监测期间, NO_2^- 浓度比 2024 年

11 月正常水体低 29%~79%, 12 月 26 日出现最高值, 为 0.09 mg/L, 2024 年 12 月 27 日—2025 年 1 月 9 日 NO_2^- 浓度均较低, 为 0.03~0.05 mg/L。2024 年 12 月 26 日—2025 年 1 月 9 日 NO_3^- 浓度为 0.08~0.15 mg/L, 明显低于赤潮暴发前的水平。 NH_4^+ 浓度总体高于常规监测值(表 3), 1 月 10 日 NH_4^+ 浓度快速降低, 最低值为 0.02 mg/L。 PO_4^{3-} 浓度为 0.02~0.05 mg/L, 整体呈波动性下降的趋势(图 4b)。

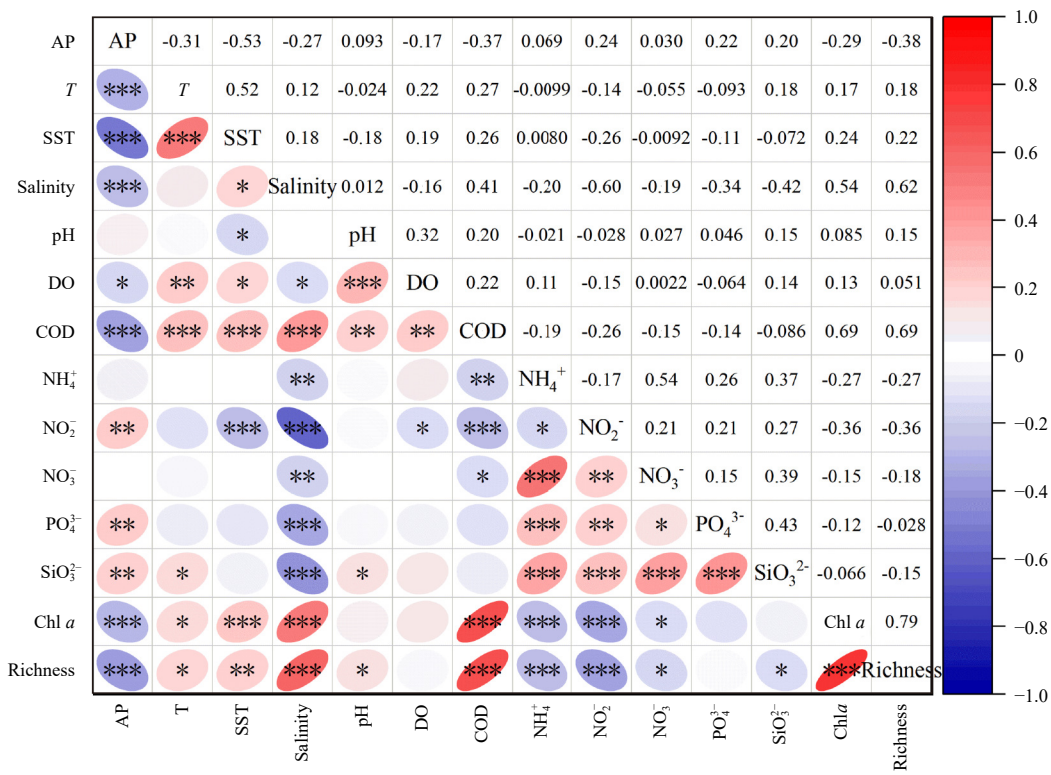
2.3.5 富营养化指数 (E)

球形棕囊藻作为一种典型的浮游藻类, 其大规模群体暴发与水域富营养化状况密切相关。在富营养化水域中, 丰富的营养盐供应为球形棕囊藻的快速增殖提供了物质基础, 进而促进其形成囊体并引发大规模藻华现象^[30]。在本次赤潮发生过程中, 富营养化指数 E 的浓度范围为 2.63~17.62, 表明水体富营养化程度处于中度到重度水平(图 4b)。

2.4 球形棕囊藻丰度与 Chl a 和环境因子的相关性分析

Chl a 的变化是浮游植物光合作用能力和效率的体现, 浮游植物细胞内含有大量 Chl a , 用于光合作用固定能量^[31]。相关性分析结果(图 5)表明, 球形棕囊藻丰度与 Chl a 呈极显著正相关关系, 相关系数为 0.79。在赤潮发生过程中, 球形棕囊藻快速增殖导致细胞丰度大幅上升, 对应的 Chl a 浓度也同步升高。

在本次广州市球形棕囊藻赤潮暴发过程中, 多种水体环境因子与赤潮的发生呈现明显的相关性(图 5), 如 COD、盐度、 NO_2^- 、 NH_4^+ 和 AP 等。在本次监测的环境因子中, COD 和盐度与球形棕囊藻丰度呈极显著的正相关关系, 相关系数分别为 0.69 和 0.62。SST、 T 和 pH 也与球形棕囊藻丰度呈显著正相关关系。球形棕囊藻丰度与 AP、 NO_2^- 、 NH_4^+ 呈极显著负相关关系(相关系数分别为 -0.38、-0.36 和 -0.27), 与 NO_3^- 和



注: *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$; ***表示 $p < 0.001$

Note: * indicates $p < 0.05$; ** indicates $p < 0.01$; *** indicates $p < 0.001$

图 5 球形棕囊藻丰度与 Chl a 和环境因子的相关性热图

Fig. 5 Correlation heatmap between the density of *P. globosa* and Chlorophyll *a* and environmental factors

SiO_3^{2-} 也呈显著负相关关系,这表明暴发期间球形棕囊藻吸收利用了营养盐。

综上所述,影响球形棕囊藻生长发展的主要环境因子为COD、盐度、 NO_2^- 、 NH_4^+ 和AP。盐度和COD浓度的升高以及 NO_2^- 和 NH_4^+ 浓度、AP的降低与赤潮发生具有强相关关系。

此外,环境因子之间也存在明显的相关性。 T 与SST呈显著正相关关系,相关系数为0.52。AP与 T 、SST、盐度、COD均呈极显著负相关关系。盐度与多个环境因子之间均呈极显著相关关系,其中与COD呈极显著正相关关系,相关系数为0.54;与营养盐之间呈显著负相关关系,例如,盐度与 SiO_3^{2-} 、 NO_2^- 、 PO_4^{3-} 的相关系数分别为-0.42、-0.60和-0.34。营养盐之间的正相关关系显著,例如, NH_4^+ 和 NO_3^- 的相关系数为

0.54, SiO_3^{2-} 与 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 的相关系数分别为0.37、0.39和0.43。

2.5 球形棕囊藻丰度与多环境因子的GAM分析

依据方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)不超过5的原则,首先剔除具有高共线性的变量。然后,结合相关性分析结果进行多因素GAM拟合,拟合结果(表4)表明,公式(2)中的所有解释变量和截距项均具有统计学意义,与球形棕囊藻丰度之间具有明显的线性(估计自由度=1)和非线性(估计自由度>1)关系,模型的 R_{adj}^2 为0.729,对球形棕囊藻丰度数据的偏差解释率为75.1%,表明整体拟合优度较高。GAM中环境因子对球形棕囊藻丰度变化的影响程度由高到低依次是盐度、 PO_4^{3-} 、COD、 NH_4^+ 、 T 和 NO_3^- 。

表4 多环境因子GAM拟合参数

Tab.4 Multi-environmental factor GAM model fitting parameters

光滑项	估计自由度(EDF)	参考自由度(Ref.df)	F	p
s(Salinity.log)	1.00	1.00	133.54	<0.001***
s(PO_4 .log)	1.00	1.00	22.28	<0.001***
s(COD.log)	2.93	3.68	23.83	<0.001***
s(NH_4 .log)	4.58	5.64	4.96	<0.001***
s(T .log)	2.74	3.46	3.53	0.016*
s(NO_3 .log)	3.33	4.22	2.75	0.025*

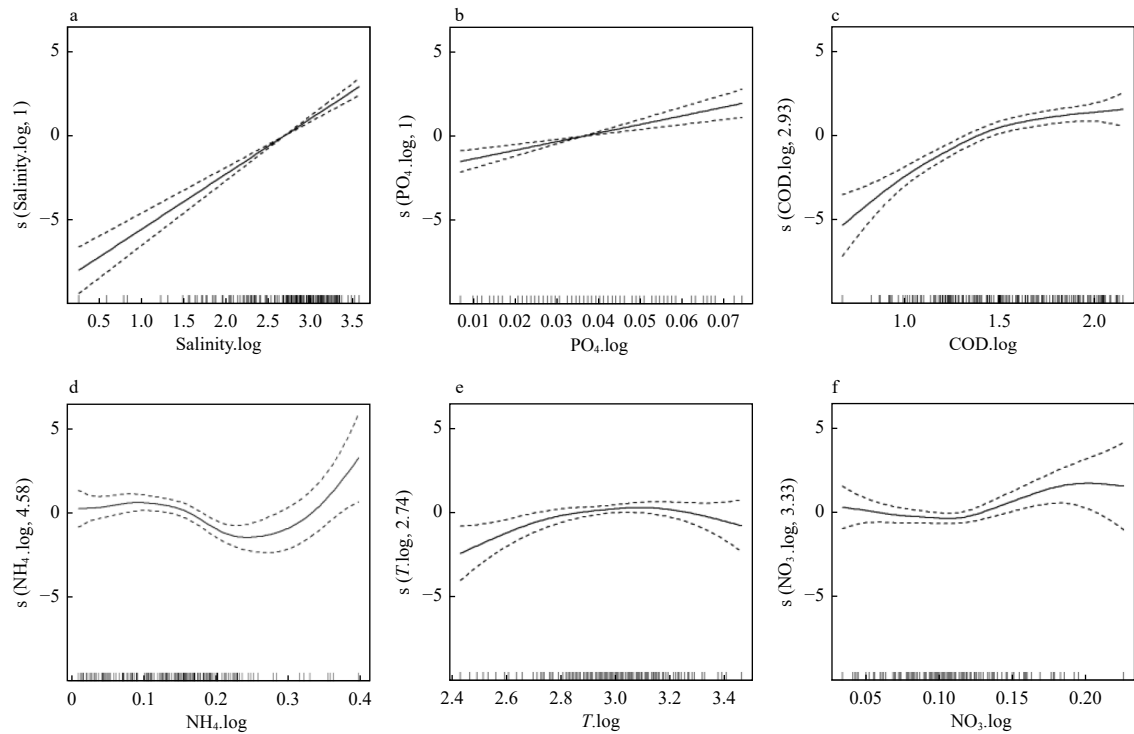
注: *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$; ***表示 $p < 0.001$

通过多环境因子与球形棕囊藻丰度的GAM分析,获取解释变量的平滑回归函数,并得到各显著影响因子对球形棕囊藻丰度影响的效应图。如图6所示,盐度和 PO_4^{3-} 与球形棕囊藻丰度之间呈极显著正向线性关系,其他环境因子与球形棕囊藻丰度之间则呈显著非线性关系。其中盐度的影响较强($\text{EDF} = 1.00$, $F = 133.54$, $p < 0.001$), PO_4^{3-} 影响次之($\text{EDF} = 1.00$, $F = 22.28$, $p < 0.001$)。盐度对球形棕囊藻的光合活性有影响,在适宜的盐度范围内,球形棕囊藻的光合系统功能正常,光合活性较高,而在低盐度条件下,其光合系统受到抑制,生长缓慢甚至死亡^[32]。此外,高盐环境可能抑制硝化作用的进行,导致 NO_2^- 和 NO_3^- 的生成减少。

营养物质是影响球形棕囊藻赤潮发生的主

要因素。 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 NO_2^- 作为浮游植物的氮源,对于球形棕囊藻的暴发至关重要^[33],磷则是球形棕囊藻增殖的限制因子^[34]。本研究中 NH_4^+ 浓度与球形棕囊藻丰度呈极显著非线性关系,当 NH_4^+ 浓度低于0.25(log.mg/L)时,球形棕囊藻丰度变化不大且呈小幅降低的趋势;之后随着 NH_4^+ 浓度的升高,球形棕囊藻丰度明显增长。马方方等^[35]研究表明,近40年来深圳大鹏湾海域发生赤潮的平均次数与无机氮、 PO_4^{3-} 浓度存在显著正相关关系,且 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 与浮游植物的生长密切相关^[31]。于美波等^[2]认为,球形棕囊藻暴发与海域中高浓度的无机氮和 PO_4^{3-} 有关。

水体中有机物、硫化物等还原性物质的浓度可以通过综合性指标——化学需氧量来衡量^[3]。



注: 实线表示球形棕囊藻丰度的平滑拟合值; 虚线为 95 % 置信区间上下限; 纵坐标括号内数值为估计自由度

Note: Solid lines represent the smoothed fitted values of the density of *P. globosa*; dashed lines denote the upper and lower bounds of the 95% confidence interval. The values in parentheses on the vertical axis indicate the estimated degrees of freedom

图 6 多环境因子对球形棕囊藻丰度的影响效应

Fig. 6 Effects of multiple environmental factors on the density of *P. globosa*

GAM 分析结果显示, COD 与球形棕囊藻丰度的单因子正相关效应显著。球形棕囊藻丰度随着 COD 浓度的升高而单调递增, 在 COD 大于 1.8 (log.单位)后增长趋于平缓。本研究中 T 和 NO_3^- 的影响趋势不明显, 不确定性较大。

2.6 环境因子交互作用的影响分析

球形棕囊藻丰度变化受到多环境因子的共同作用, 各解释变量之间的交互作用对球形棕囊藻丰度变化有显著影响。为了厘清这种交互效应, 对解释变量两两加入交互项构建 GAM, 分析交互项对球形棕囊藻丰度变化的作用(表 5)。基于多环境因子的 GAM 分析结果, 本研究仅

探讨表 5 中的解释变量间的交互作用。通过公式(3)筛选出的 3 个显著交互项分别为 COD-NH_4^+ 、 $\text{NH}_4^+-\text{NO}_3^-$ 和盐度- NO_3^- , 其余交互项在建模过程中被剔除。各项自由度均大于 1, 说明交互项与球形棕囊藻丰度之间存在非线性关系; 模型的 R^2_{adj} 为 0.774, 偏差解释率为 79.8%, 表明模型拟合度较好, 交互项的解释率较高。

将这 3 个具有统计学意义的交互项进行可视化绘图(图 7), 可以直观看出球形棕囊藻丰度在不同变量维度下的同时变化特征。图 7a 显示, 盐度和 NO_3^- 对球形棕囊藻丰度均有正向影响, 其中盐度的影响占较大优势; 当二者同时增

表 5 影响因素交互作用与球形棕囊藻丰度的 GAM 拟合参数

Tab.5 Fitting parameters of the GAM model for the interaction of influencing factors and the density of <i>P. globosa</i>				
光滑项	估计自由度EDF	参考自由度Ref.df	<i>F</i>	<i>p</i>
ti(COD.log,NH ₄ .log)	3.58	16	1.26	< 0.001***
ti(NH ₄ .log,NO ₃ .log)	1.76	16	0.66	< 0.001***
ti(Salinity.log,NO ₃ .log)	1.49	16	0.84	< 0.001***

注: *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$; ***表示 $p < 0.001$

加时,特别是在 NO_3^- 浓度大于 $0.12(\log.\text{mg/L})$ 后,球形棕囊藻丰度升高的趋势更加明显。图7b显示,在 NH_4^+ 浓度低于 $0.25(\log.\text{mg/L})$ 时,在 NO_3^- 浓度相同的区域,丰度随 NH_4^+ 浓度增加而下降,之后丰度反而随 NH_4^+ 浓度单调增加;当 NO_3^- 或 NH_4^+ 浓度均较低时,球形棕囊藻丰度较低,当其中之一为高浓度时,球形棕囊藻丰度相当,当二者均为较高浓度时,球形棕囊藻丰度最高;当 NO_3^- 浓度为 $0.12(\log.\text{mg/L})$ 且 NH_4^+ 浓度

为 $0.25(\log.\text{mg/L})$ 时,球形棕囊藻丰度最低。图7c显示,在 NH_4^+ 浓度相同的区域,丰度随COD浓度增加的趋势基本相同,在COD浓度相同的区域,丰度随 NH_4^+ 浓度增加先降低,随后当 NH_4^+ 浓度高于 $0.25(\log.\text{mg/L})$ 时再升高。COD对球形棕囊藻丰度变化趋势的影响较 NH_4^+ 来说更强。 NH_4^+ 和 NO_3^- 分别与球形棕囊藻丰度呈显著非线性关系,交互效应进一步表明,低浓度 NH_4^+ 对球形棕囊藻丰度具有抑制作用。

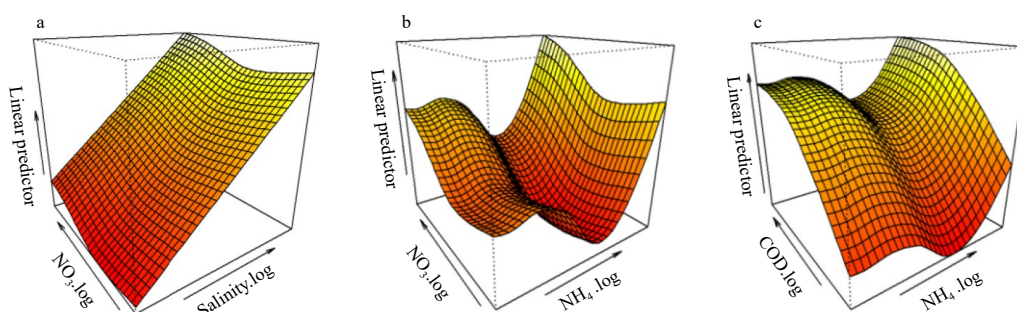


图7 球形棕囊藻丰度分布影响因素的三维效应

Fig. 7 Three-dimensional effects of factors influencing the density of *P. globosa*

由于多种环境因子之间存在相互关联,球形棕囊藻等赤潮生物对环境要素的响应也是多重的。此外,光照、降水等水文气象要素^[36-37]以及浮游动物摄食等生物因素^[4]也可能促进棕囊藻群体的形成及体积的增大。因此,未来对广州市海域的赤潮监测应纳入浮游植物群落指标以及其他气象要素,为厘清赤潮发生、发展机制提供更加全面和系统的数据支撑。

3 结论

(1) 2024年12月至2025年2月广州市海域暴发赤潮。赤潮发生期间球形棕囊藻平均丰度最大值为 $398000 \times 10^4 \text{ ind/L}$,面积峰值为 7.4 km^2 。

(2) 赤潮的发生、发展和消亡受到多种环境因子的复杂影响,相关性分析和广义加性模型分析结果表明,盐度、 PO_4^{3-} 、COD和 NH_4^+ 是主要的影响因素。

(3) COD- NH_4^+ 、 NH_4^+ - NO_3^- 、盐度- NO_3^- 的两两交互效应显著,揭示了河口多重胁迫场景下球形棕囊藻对多种理化因子的复杂响应。

参考文献:

- [1] Verity P G, Brussaard C P, Nejstgaard J C, et al. Current understanding of *Phaeocystis* ecology and biogeochemistry, and perspectives for future research[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 83(1/2/3): 311-330.
- [2] 于美波, 何冬晓, 魏海英, 等. 日照市东北部海区球形棕囊藻赤潮特点及主要影响因子变化特征[J]. *海洋湖沼通报 (中英文)*, 2025, 47(4): 146-153.
- [3] 符传辉, 陈峻峰, 刘志媛, 等. 海南岛西部海域球形棕囊藻赤潮过程环境因子变化特征及影响因素分析[J]. *海洋学报*, 2023, 45(5): 27-38.
- [4] 沈萍萍, 齐雨藻, 欧林坚. 中国沿海球形棕囊藻 (*Phaeocystis globosa*) 的分类、分布及其藻华[J]. *海洋科学*, 2018, 42(10): 146-162.
- [5] Rousseau V, Chrétiennot-Dinet M J, Jacobsen A, et al. The life cycle of *Phaeocystis*: state of knowledge and presumptive role in ecology[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 83(1/2/3): 29-47.
- [6] 吴晓雨, 徐沈晨, 何永奇, 等. 环境因子对球形棕囊藻囊体生长的影响[J]. *安徽农业科学*, 2025, 53(13): 56-63.
- [7] 沈萍萍, 齐雨藻. 棕囊藻属 (*Phaeocystis*) 的种类多样性及地理分布特征研究进展[J]. *海洋与湖沼*, 2021, 52(1): 1-15.
- [8] 蓝彩碧, 李杰, 赖俊翔, 等. 磷限制对球形棕囊藻生长及TEP形成的影响[J]. *海洋技术学报*, 2023, 42(5): 94-101.
- [9] Madhupratap M, Sawant S, Gauns M. A first report on a bloom of the marine prymnesiophycean, *Phaeocystis globosa*

- from the Arabian Sea[J]. *Oceanologica Acta*, 2000, 23(1): 83-90.
- [10] Hai D N, Lam N N, Dippner J W. Development of *Phaeocystis globosa* blooms in the upwelling waters of the South Central coast of Viet Nam[J]. *Journal of Marine Systems*, 2010, 83(3/4): 253-261.
- [11] Rousseau V, Lantoine F, Rodriguez F, et al. Characterization of *Phaeocystis globosa* (Prymnesiophyceae), the blooming species in the Southern North Sea[J]. *Journal of Sea Research*, 2013, 76: 105-113.
- [12] Madhu N V, Anil P, Vishal C R, et al. Occurrence of white gelatinous foam on the beaches of Kollam (southwest coast of India) due to the senescent bloom of *Phaeocystis globosa*[J]. *Current Science*, 2020, 119(8): 1371-1375.
- [13] Zhang Q C, Liu C, Wang J X, et al. Intense blooms of *Phaeocystis globosa* in the South China Sea are caused by a unique "giant-colony" ecotype[J]. *Harmful Algae*, 2022, 114: 102227.
- [14] 赵越, 于仁成, 张清春, 等. 北部湾海域微型、微微型浮游植物类群季节变化及其与棕囊藻赤潮的关系初探[J]. *海洋与湖沼*, 2019, 50(3): 590-600.
- [15] 王朝晖, 吕颂辉, 陈菊芳, 等. 广东沿海几种赤潮生物的分类学研究[J]. *武汉植物学研究*, 1998, 16(4): 310-314.
- [16] 李波, 蓝文陆, 李天深, 等. 球形棕囊藻赤潮消亡过程环境因子变化及其消亡原因[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(5): 1351-1358.
- [17] 刘悦, 李丽, 翟晓辉, 等. 深圳大鹏湾一次球形棕囊藻藻华的发生过程及成因分析[J]. *热带海洋学报*, 2022, 41(3): 164-171.
- [18] 陈曦, 石海明, 徐玉山. 2001-2020年天津近岸海域赤潮特征分析[J]. *海洋开发与管理*, 2024, 41(4): 106-113.
- [19] 史文凯, 徐晓莹, 张凡, 等. 我国球形棕囊藻藻华危害与应对策略[J]. *渔业研究*, 2023, 45(3): 311-316.
- [20] Smith W O Jr, Liu X, Tang K W, et al. Giantism and its role in the harmful algal bloom species *Phaeocystis globosa*[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2014, 101: 95-106.
- [21] Whipple S J, Patten B C, Verity P G. Life cycle of the marine alga *Phaeocystis*: a conceptual model to summarize literature and guide research[J]. *Journal of Marine Systems*, 2005, 57(1/2): 83-110.
- [22] 曾建军, 徐伟, 张露. 广东省海域赤潮灾害的基本特征分析[J]. *海洋开发与管理*, 2024, 41(01): 52-58.
- [23] Wood S N. Generalized additive models: an introduction with R[M]. 2nd ed. New York: Chapman and Hall/CRC, 2017.
- [24] Wei W, Li P, Gong F, et al. Seasonal dynamics and environmental controls of planktonic archaea in a typical subtropical estuary[J]. *Microbiology Spectrum*, 2025, 13(12): 1-16.
- [25] Reiss P T, Ogden R T. Smoothing parameter selection for a class of semiparametric linear models[J]. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 2009, 71(2): 505-523.
- [26] 张健, 杨翼, 杨璐, 等. 东海近岸海域赤潮与环境因子的关系[J]. *广东海洋大学学报*, 2019, 39(1): 66-70.
- [27] Kromkamp J C, Forster R M. The use of variable fluorescence measurements in aquatic ecosystems: differences between multiple and single turnover measuring protocols and suggested terminology[J]. *European Journal of Phycology*, 2003, 38(2): 103-112.
- [28] 韦福佳. 球形棕囊藻不同类型细胞盐度适应的差异比较[D]. 南宁: 广西大学, 2023.
- [29] 黎慧. 几种重要环境因子对球形棕囊藻生长和囊体形成的影响[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2009.
- [30] 张善发, 王茜, 关淳雅, 等. 2001—2017年中国近海水域赤潮发生规律及其影响因素[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(6): 1129-1140.
- [31] Wang K, Chen B H, Gao Y H, et al. Harmful algal blooms caused by *Phaeocystis globosa* from 1997 to 2018 in Chinese coastal waters[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 173: 112949.
- [32] Gäbler-Schwarz S, Hinz F, Kirst G O, et al. Local environment shapes adaptation of *Phaeocystis antarctica* to salinity perturbations: evidence for physiological resilience[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2021, 538: 151527.
- [33] 吕旭宁. 硝酸盐在北部湾球形棕囊藻藻华过程中的关键影响作用[D]. 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2020.
- [34] Riegman R, Noordeloos A A M, Cadée G C. *Phaeocystis* blooms and eutrophication of the continental coastal zones of the North Sea[J]. *Marine Biology*, 1992, 112(3): 479-484.
- [35] 马方方, 冷科明, 周秋伶, 等. 近40年深圳大鹏湾海域赤潮发生规律及其演变机制分析[J]. *海洋环境科学*, 2021, 40(2): 263-271.
- [36] 吴迪生, 王文娟, 俞胜宾, 等. 2002年广东沿海赤潮与海洋水文气象关系的研究[J]. *热带气象学报*, 2011, 27(2): 271-277.
- [37] 张少峰, 李武全, 林明裕, 等. 涠洲岛海域赤潮发生与海洋水文气象关系初步研究[J]. *广西科学*, 2009, 16(2): 200-202.