



涠洲岛海域球形棕囊藻藻华过程中营养盐及浮游植物群落组成分析

苏芯莹, 陈波, 牙韩争, 朱冬琳, 张荣灿, 覃仙玲

引用本文:

苏芯莹,陈波,牙韩争,朱冬琳,张荣灿,覃仙玲. 涠洲岛海域球形棕囊藻藻华过程中营养盐及浮游植物群落组成分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(6): 863–O13–1.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4533>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

棕囊藻北部湾株的18S rDNA分子鉴定

Molecular Identification of Phaeocystis from Beibu Gulf Based on 18S rDNA Sequences

热带亚热带植物学报. 2016, 24(2): 176–181 <https://doi.org/10.11926/j.issn.1005-3395.2016.02.008>

南亚热带磷限制水库中浮游植物群落对氮磷比变化的响应

Responses of Phytoplankton Communities to N/P Ratio Changes in Phosphorus-limited Subtropical Reservoir in Southern China

热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 20–30 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4250>

光照-温度交互作用及不同氮源对拟柱孢藻生长的影响

Effects of Temperature-irradiance Interactions and Three Nitrogen Sources on Growth of *Cylindrospermopsis raciborskii*

热带亚热带植物学报. 2018, 26(2): 133–140 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3788>

福建敖江口表层沉积硅藻空间分布特征

Diatom Distribution in Surface Sediments of Aojiang River Estuary in Fujian, China

热带亚热带植物学报. 2021, 29(6): 597–604 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4375>

盐度、温度和光照强度对针叶蕨藻的生长及光合活性的影响

Effects of Salinity, Temperature and Light Intensity on Growth and Photo-synthetic Activity of *Caulerpa sertularioides*

热带亚热带植物学报. 2021, 29(6): 626–633 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4378>

向下翻页，浏览PDF全文

涠洲岛海域球形棕囊藻藻华过程中营养盐及浮游植物群落组成分析

苏芯莹, 陈波, 牙韩争, 朱冬琳, 张荣灿*, 覃仙玲*

(广西近海海洋环境科学重点实验室, 广西科学院, 南宁 530007)

摘要: 球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa*)是近年来北部湾常见的有害藻华原因种, 涠洲岛海域作为广西沿海藻华的高发区之一, 目前仍缺乏关于该海域球形棕囊藻藻华过程的相关研究。为探究涠洲岛海域球形棕囊藻藻华过程中营养盐的状况及藻华的发生对浮游植物群落组成的影响, 对 2017 年 3 月下旬涠洲岛周边发生的球形棕囊藻藻华区域进行取样调查。结果表明, 藻华期间水体中溶解有机磷含量与细胞及囊体密度呈显著正相关。本次藻华主要受水体中溶解态无机氮含量影响, 多个调查站点的无机氮/无机磷(DIN/DIP) <10 , 且硅酸盐/无机氮($\text{SiO}_3^{2-}/\text{DIN}$) >1 , 表明这些站点存在氮限制现象, 而氮限制可能是本次藻华消亡的主要因素。调查区域共鉴定出浮游植物 4 门 58 种, 球形棕囊藻细胞密度最高可达 1.04×10^8 cells/L, 占浮游植物总细胞密度的 98.28%。球形棕囊藻细胞密度与物种多样性指数存在显著的负相关关系。在营养缺乏条件下, 有利于球形棕囊藻成囊的链状硅藻种类具有相对较大的细胞密度。

关键词: 涠洲岛; 球形棕囊藻; 有害藻华; 营养盐; 硅藻

doi: 10.11926/jtsb.4533

Analysis of Nutrient and Phytoplankton Community during *Phaeocystis globosa* Bloom Near Weizhou Island, China

SU Xinying, CHEN Bo, YA Hanzheng, ZHU Donglin, ZHANG Rongcan*, QIN Xianling*

(Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Science, Guangxi Academy of Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract: *Phaeocystis globosa* is a common harmful algal bloom species in the Beibu Gulf in recent years. As one of the areas with high frequency harmful algal blooms in Guangxi coast, there are seldom study on the *P. globosa* blooms in Weizhou Island. In order to investigate the status of nutrient and the effects of *P. globosa* blooms on phytoplankton community near Weizhou Island, a sampling survey was conducted on the area of *P. globosa* bloom occurred around Weizhou Island in late March 2017. The results showed that dissolved organic phosphorus (DOP) content had significantly positive correlation with the cell and colony density of *P. globosa* during the bloom. The bloom was mainly affected by the dissolved inorganic nitrogen (DIN), the ratio of DIN to dissolved inorganic phosphate (DIN/DIP) were lower than 10 in many stations, while the ratio of dissolved silicate to DIN (DSi/DIN) were higher than 1, indicated that nitrogen limitation existed in these areas. Nitrogen limitation was thought to be a major factor during the bloom's demise. There were 58 species in 4 phyla of phytoplankton identified in the survey area. The maximum abundance of *P. globosa* reached 1.04×10^8 cells/L, accounted for 98.28% of total phytoplankton. There was a significantly negative correlation between the abundance of *P.*

收稿日期: 2021-09-23

接受日期: 2021-11-16

基金项目: 广西自然科学基金项目(2018GXNSFBA281011, 2017GXNSFAA198166); 国家自然科学基金(42066002); 广西科学院基本科研业务费资助项目(2018YJJ902)资助

This work was supported by the Project for Natural Science in Guangxi (Grant No. 2018GXNSFBA281011, 2017GXNSFAA198166), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 20666002), and the Project for Basic Science Research in Guangxi Academy of Sciences (Grant No. 2018YJJ902).

作者简介: 苏芯莹(1994 生), 硕士, 研究实习员, 主要从事海洋环境与生态研究。E-mail: suxinying17@mails.ucas.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: 048before@163.com; 190554016@qq.com

globosa and the species diversity index. In addition, under nutrient deficient condition, species of diatoms with chainlike structure which were beneficial to the formation of *P. globosa* colony had relatively greater abundance.

Key words: Weizhou Island; *Phaeocystis globosa*; Harmful algae bloom; Nutrient; Diatom

球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa*)是近年来我国沿岸海域常见的藻华原因种, 适温适盐范围广, 在全球海域均有广泛分布^[1]。球形棕囊藻存在群体与游离单细胞互相交替的异形生活史^[2]。在发生藻华时, 球形棕囊藻细胞以形成球状囊体为主。球形棕囊藻的生长及囊体的形成受到环境因素(营养盐, 温度、盐度、光照等)的影响^[3-6], 浮游生物群落组成也可以影响棕囊藻的生长和囊体形成^[7-10]。棕囊藻藻华的发生不仅会严重危害水体生态, 其产生的溶血毒素及细胞毒素会导致鱼类等水产经济动物死亡, 造成严重的经济损失, 还会产生二甲基硫化物等有毒有害物质, 严重危害沿岸海洋环境。此外, 球形棕囊藻形成的巨大囊体可堵塞沿海核电站冷却水过滤系统, 从而对核电站的安全运行构成威胁^[7,11]。因此棕囊藻囊体的形成与调控机制, 以及藻华暴发的原因是近年来的重要研究方向之一^[2]。

自 2010 年以来, 广西北部湾海域连续 10 a 都发生以球形棕囊藻为主的藻华^[12-13]。从报道中可见, 球形棕囊藻藻华发生的范围几乎遍布整个湾区, 对北部湾海域生态环境的影响不可轻视, 严重时发生囊体堵塞防城港核电站冷却水水源口, 造成严重的生态安全隐患事件^[11], 因此, 研究和治理球形棕囊藻藻华也得到了相关部门的重视和大力支持。目前针对该区域球形棕囊藻藻华的研究包括藻华种的鉴定^[14-15]、治理^[16-17]及影响藻华生消影响因素等的探索^[18-22]。关于营养盐调控的研究中, 研究表明球形棕囊藻的生消过程与氮磷营养盐密切相关^[22-24]。有学者提出在北部湾海域水体中溶解无机氮的增加是造成藻华多发的重要因素之一, 而水体中溶解无机磷的缺乏, 是藻华消亡的关键限制因素^[23-25]。但是这些研究主要集中于中大尺度的走航调查和实验室室内的培养研究。而具有针对性的小尺度区域研究至今仍旧未见相关研究报道。北部湾三面环海, 海岸线较长, 不同区域营养盐含量存在差异^[26], 球形棕囊藻藻华生消过程的影响因素是否一致仍不清楚, 因此提高研究区域精度可为区域化针对性治理球形棕囊藻藻华提供重要的基础依据。

在北部湾海域“盛行”球形棕囊藻藻华期间, 涠洲岛也未能幸免。涠洲岛位于北部湾海域, 距离北

海市约有 50 km, 与雷州半岛直线距离约 260 km, 岛总面积 24.74 km², 年均气温 23 °C^[27], 是我国最年轻的火山岛, 岛周遍布珊瑚礁, 怡人的气候和独特的风景成为广西壮族自治区重要的旅游景点。但是远离大陆的涠洲岛海域却也是广西沿海赤潮发生的高发区之一^[28-29], 为了进一步了解球形棕囊藻藻华过程在远岸区域及小尺度范围所受的影响因素, 浮游植物群落组成对藻华过程是否存在一定关联性, 本文将根据 2017 年 3 月下旬, 涠洲岛周边海域发生的球形棕囊藻藻华事件, 对其过程中浮游植物种群组成和温度、盐度、营养盐等理化因素进行分析研究, 探讨球形棕囊藻藻华过程中, 浮游植物的营养状况及该藻华对浮游植物群落结构的影响, 为预防及治理该类藻华补充小尺度数据。

1 材料和方法

1.1 站点的设置

本次调查于 2017 年 3 月 23 日展开, 根据此次球形棕囊藻藻华发生的范围和分布特征, 共设置 13 个站点(图 1)。现场水样的温度、盐度、溶解氧(DO)和 pH 等使用 AAQ-RINKO 直读式多项目水质分析仪测定(JFE, 日本)。

1.2 样品的采集及处理

水样只采集表层海水, 适量体积的水样采集后立即用 0.45 μm 孔径的醋酸纤维滤膜过滤, 并保存于 500 mL 聚乙烯瓶中用于测定营养盐。取 1 000 mL 水样过滤于 GF/F 膜上, 用 90%丙酮在 4 °C 黑暗下提取 24 h 后由荧光分光光度计测定叶绿素 a (Chl a) 含量。各项营养盐[NO₃⁻、NO₂⁻、NH₄⁺、溶解无机磷(dissolved inorganic phosphate, DIP)和硅酸盐(silicate, SiO₃²⁻)]检测均按照国家《海洋监测规范》(GB 17378.3—2007)进行, 其中溶解无机氮(dissolved inorganic nitrogen, DIN)=NO₃⁻+NO₂⁻+NH₄⁺, 溶解有机磷(dissolved organic phosphorus, DOP)=总溶解磷(total dissolved phosphorus, TDP)-DIP。

取 1 000 mL 水样用鲁哥试剂固定于聚乙烯瓶中, 用于检测浮游植物的种类组成和密度。其中, 球形

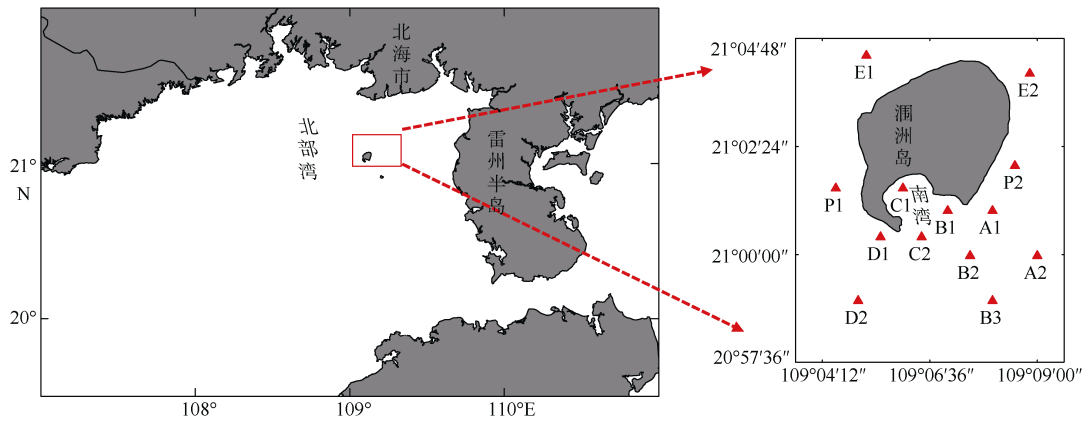


图 1 涠洲岛海域调查站点分布图

Fig. 1 Maps showing sampling stations in the sea area near Weizhou Island

棕囊藻的细胞密度为水样中游离单细胞密度和囊体及囊体碎片上细胞密度的总和。

球形棕囊藻囊体密度检测方法为现场肉眼观察计数, 取适量海水根据密度采取浓缩或者不浓缩处理, 将一定体积水样倒在白色瓷盘中, 在灯光下进行囊体计数。用浮游植物优势度(y)计算群落种类中的优势种^[30], 采用 Shannon-Wiener 指数(H')描述群落种类多样性。

优势度 $y = P_i \times f_i$, 式中: P_i 为第 i 个物种个数占总数的比例, f_i 为第 i 种在各样点中出现的频率; 当 $y > 0.02$ 时定义为优势种。

$$\text{Shannon-Wiener 指数 } H' = -\sum_{i=1}^x P_i \log_2 P_i, P_i = n_i/N,$$

式中, x 为物种数, n_i 为第 i 个物种个数, N 为采样点所有物种的个数。

1.3 数据处理和分析

文中通过冗余分析(RDA)环境因子对球形棕囊藻藻华特征及浮游植物群落组成及分布的影响, 由 R 语言 vegan 包完成。通过统计学软件 SPSS 19.0 分析检验环境因子与球形棕囊藻藻华特征及浮游植

物群落组成的相关性。

2 结果和分析

2.1 环境因子分布特征及营养盐状况

表 1 和图 2 为环境因子的分布特征。调查区域的温度平均为(22.5±0.5) °C, 岛西南和东北两侧较高, 在南湾东部温度较低(图 2: A)。盐度平均为 32.6±0.2, 呈现西北向东南递增的分布趋势(图 2: B)。pH 与溶解氧(DO)平均值分别为(8.26±0.10)和(10.92±0.36) mg/L (表 1)。

采样期间 DIN 平均为(4.62±2.28) μmol/L, 南湾附近含量相对较高, 由南湾向周边递减(图 2: E)。DIP 含量平均为(0.44±0.24) μmol/L, 最大值出现在南湾西侧(图 2: F)。硅酸盐(SiO₃²⁻)平均为(5.80±1.74) μmol/L, 离岸越近, 含量越高(图 2: G)。DOP 平均为(0.49±0.20) μmol/L, 在调查海域西北侧及南湾偏东侧相对较高(图 2: H)。DIN/DIP 整体较低(表 2), 平均为 13.03±8.74, 调查区域多个站点小于 10。SiO₃²⁻/DIN 平均为 1.75±1.58, 除个别区域外均大于 1。SiO₃²⁻/DIP 平均为 16.76±9.18。

表 1 调查海域的环境理化因子

Table 1 Environmental physical and chemical factors in the study area

因子 Factor	Temp (°C)	Sal	pH	DO (mg/L)	DIN (μmol/L)	DIP (μmol/L)	SiO ₃ ²⁻ (μmol/L)	DOP (μmol/L)	Chl a (μg/L)
范围 Range	21.7~23.2	32.1~32.9	7.99~8.37	10.40~11.61	1.18~8.58	0.19~0.98	3.31~8.58	0.26~0.71	1.29~19.71
平均 Mean	22.5±0.50	32.6±0.20	8.26±0.10	10.92±0.36	4.62±0.28	0.44±0.24	5.80±1.74	0.49±0.20	4.63±5.38

Temp: 温度; Sal: 盐度; DO: 溶解氧; DIN: 溶解无机氮; DIP: 溶解无机磷; SiO₃²⁻: 硅酸盐; DOP: 溶解有机磷; Chl a: 叶绿素 a。下同

Temp: Temperature; Sal: Salinity; DO: Dissolved oxygen; DIN: Dissolved inorganic nitrogen; DIP: Dissolved inorganic phosphate; SiO₃²⁻: Silicate; DOP: Dissolved organic phosphorus; Chl a: Chlorophyll a. The same below

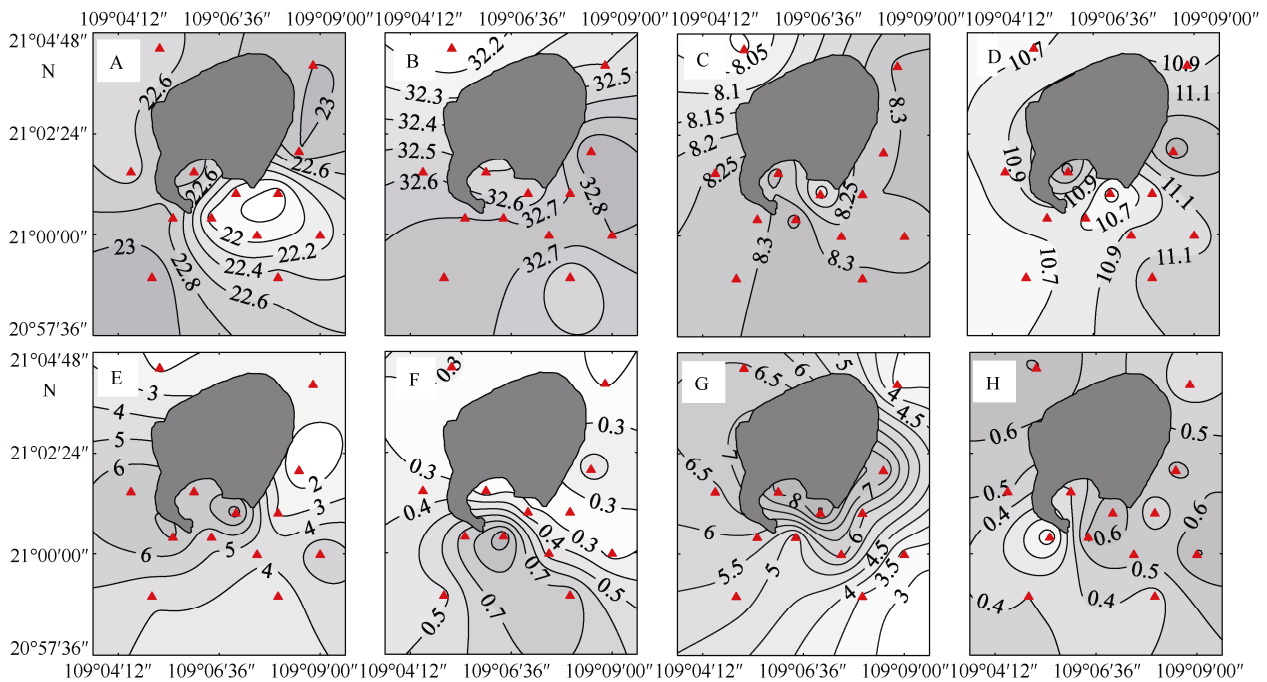


图 2 环境因子分布特征 A: 温度(°C); B: 盐度; C: pH; D: DO; E: DIN ($\mu\text{mol/L}$); F: DIP ($\mu\text{mol/L}$); G: SiO_3^{2-} ($\mu\text{mol/L}$); H: DOP ($\mu\text{mol/L}$)。

Fig. 2 Distribution characteristics of environmental factors. A: Temperature ($^{\circ}\text{C}$); B: Salinity; C: pH; D: Dissolved oxygen; E: DIN ($\mu\text{mol/L}$); F: DIP ($\mu\text{mol/L}$); G: SiO_3^{2-} ($\mu\text{mol/L}$); H: DOP ($\mu\text{mol/L}$).

2.2 球形棕囊藻分布及浮游植物群落组成

本次调查中, 各调查区域水面可见明显球形棕囊藻囊体, 采集表层水样并通过光学显微镜镜检共鉴定出金藻门、硅藻门、甲藻门、蓝藻门共 4 门 58 种浮游植物(表 3)。球形棕囊藻为本次调查的唯一优势种, 优势度(y)为 0.98, 囊体密度为 $4 \times 10^3 \sim 1.78 \times 10^5$ cells/L, 细胞总密度为 $2.34 \times 10^6 \sim 1.04 \times 10^8$ cells/L, 球形棕囊藻细胞密度占浮游植物总细胞密度的 98.28%。叶绿素 a 为 $1.29 \sim 19.71 \mu\text{g/L}$, 平均 $4.63 \mu\text{g/L}$ (表 1), 各站点浮游植物物种多样性指数为 $0.01 \sim 1.29$ (表 4), 整体上球形棕囊藻细胞密度及囊体密度与叶绿素 a 呈显著正相关关系($t=0.94, P<0.01$), 与物种多样性指数呈显著负相关关系($t=-0.97, P<0.01$)。

本次调查除球形棕囊藻外, 硅藻细胞密度较大,

占总细胞密度的 1.59%, 尤其是聚生角毛藻(*Chaetoceros socialis*)、柔弱拟菱形藻(*Pseudonitzschia delicatissima*)及环纹娄氏藻(*Lauderia annulata*)。

2.3 冗余分析结果

将球形棕囊藻、环纹娄氏藻、柔弱拟菱形藻、聚生角毛藻细胞密度进行排序, 根据第一轴值为 0.30, 选择冗余分析(RDA)。根据分值可分为 4 个区域(图 3), I 区: $\text{RDA1} < 0, \text{RDA2} > 0$; II 区: $\text{RDA1} > 0, \text{RDA2} > 0$; III 区: $\text{RDA1} < 0, \text{RDA2} < 0$; IV 区: $\text{RDA1} > 0, \text{RDA2} < 0$ 。其中 I 和 III 区的球形棕囊藻细胞密度及囊体个数较高, 除 DOP、 SiO_3^{2-} 外, 其余因素值较低。II 和 IV 区的 DIN 均高于 I 和 III 区, 另外, I 和 II 区的 DIN/DIP 及聚生角毛藻的细胞密度和囊体个数较 III

表 2 站点的无机营养盐比值

Table 2 Inorganic nutrient ratio of stations

营养盐 Nutrient salt	站点 Station													
	A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2	D1	D2	E1	E2	P1	P2	
DIN/DIP	12.40	22.96	26.58	9.31	4.32	28.19	5.30	9.59	8.76	5.73	12.71	20.96	2.59	
$\text{SiO}_3^{2-}/\text{DIN}$	2.15	0.56	1.00	1.47	1.04	1.28	0.91	0.83	1.29	3.60	1.37	0.91	6.34	
$\text{SiO}_3^{2-}/\text{DIP}$	26.70	12.79	26.57	13.65	4.49	35.97	4.80	7.96	11.29	20.66	17.48	19.13	16.40	

站点分布见图 1。下同

Distribution of stations see Figure 1. The same below

表 3 浮游植物种类及分布

Table 3 Phytoplankton species and distribution

门 Phylum	藻 Algae	站点 Station													
		A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2	D1	D2	E1	E2	P1	P2	
金藻门 Chrysophyta	球形棕囊藻 <i>Phaeocystis globosa</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	小等刺硅鞭藻 <i>Dictyocha fibula</i>	-	+	-	-	-	+	-	+	-	-	+	-	-	
硅藻门 Bacillatiophyta	环纹娄氏藻 <i>Lauderia annulata</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	洛氏菱形藻 <i>Nitzschia lorenziana</i>	-	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	
	新月菱形藻 <i>N. closterium</i>	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	-	-	-	
	琴式菱形藻 <i>N. panduriformis</i>	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	长菱形藻 <i>N. longissima</i>	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	-	
	曲舟藻 <i>Pleurosigma</i> spp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	+	
	嘴状胸隔藻 <i>Mastogloia rostrata</i>	-	-	+	+	-	-	-	+	-	+	-	-	+	
	菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	
	柔弱井字藻 <i>Eunotogramma debile</i>	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	
	斯氏几内亚藻 <i>Guinardia striata</i>	-	-	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	-	
	菱软几内亚藻 <i>Cruinardia flaccida</i>	-	+	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	
	钟形中鼓藻 <i>Bellerochea orologialis</i>	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	
	根管藻 <i>Rhizosolenia</i> spp.	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	
	翼根管藻 <i>R. alata</i>	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	尖刺拟菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	
	柔弱拟菱形藻 <i>P. delicatissima</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp.	+	-	-	+	-	+	+	+	+	-	-	+	-	
	具边线形圆筛藻 <i>Coscinodiscus marginato-lineatus</i>	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	条纹小环藻 <i>Cyclotella striata</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	
	圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> spp.	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	
	布氏双尾藻 <i>Ditylum brightwellii</i>	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	-	
	高齿状藻 <i>Odontella regia</i>	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	
	脆杆藻 <i>Fragilaria</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	
	丹麦细柱藻 <i>Leptocylindrus danicus</i>	+	-	-	+	-	-	-	+	+	-	+	-	-	
	针杆藻 <i>Synedra</i> spp.	+	+	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	
	派格棍形藻 <i>Bacillaria paxillifera</i>	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	膜状缪氏藻 <i>Meuniera membranacea</i>	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	
	中华盒形藻 <i>Biddulphia sinensis</i>	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	
	小辐杆藻 <i>Bacteriastrum seticulosa</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	
	地中海辐杆藻 <i>B. minus</i>	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	
	透明辐杆藻 <i>B. hyalinum</i>	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	优美辐杆藻 <i>B. delicatulum</i>	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	
	洛氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	-	
	北方角毛藻 <i>C. borealis</i>	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-	
范氏角毛藻 <i>C. vanheurckii</i>	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+	-	-		
齿角毛藻 <i>C. denticulata</i>	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	-		
海洋角毛藻 <i>C. pelagicus</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-		
圆柱角毛藻 <i>C. teres</i>	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-		
并基角毛藻 <i>C. decipiens</i>	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+		
聚生角毛藻 <i>C. socialis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
秘鲁角毛藻 <i>C. peruvianus</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-		
旋链角毛藻 <i>C. curvisetus</i>	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+		
卡氏角毛藻 <i>C. astracanei</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-		
冕孢角毛藻 <i>C. subsecundus</i>	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-		
印度角毛藻 <i>C. indicum</i>	-	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-		
柔弱角毛藻 <i>C. debilis</i>	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	-		

续表(Continued)

门 Phylum	藻 Algae	站点 Station													
		A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2	D1	D2	E1	E2	P1	P2	
硅藻门 Bacillatiophyta	垂缘角毛藻 <i>C. lacinosus</i>	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	+	-	-	
	扁面角毛藻 <i>C. compressus</i>	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	
甲藻门 Dinophyta	叉状角藻 <i>Ceratium furca</i>	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	-	
	梭角藻 <i>C. fusus</i>	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	海洋原甲藻 <i>Prorocentrum micans</i>	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-	+	-	-	
	微小原甲藻 <i>P. minimum</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	-	
	三角棘原甲藻 <i>P. triestinum</i>	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	
	原多甲藻 <i>Prorocentrum spp.</i>	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	
	锥状斯氏藻 <i>Scrippsiella trochoidea</i>	-	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-	-	
	春膝沟藻 <i>Gonyaulax verior</i>	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	夜光藻 <i>Noctiluca scientillans</i>	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	
蓝藻门 Cyanophyta	红海束毛藻 <i>Trichodesmium erythraeum</i>	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	

+: 鉴定出; -: 未鉴定出。

+: Identified; -: Unidentified.

表 4 浮游植物群落的物种丰度(cells/L)和物种多样性指数(H')

Table 4 Species abundance (cells/L) of phytoplankton community and species diversity index (H')

站点 Stations	金藻门 Chrysophyta		硅藻门 Bacillatiophyta				甲藻门 Dinophyta	蓝藻门 Cyanophyta	H'
	<i>P. glo</i>	<i>L. ann</i>	<i>P. del</i>	<i>C. soc</i>	Other				
A1	7.08 × 10 ⁷	2.70 × 10 ⁴	2.50 × 10 ⁴	6.80 × 10 ⁵	1.68 × 10 ⁵	9.00 × 10 ³	-	0.12	
A2	2.92 × 10 ⁶	2.60 × 10 ⁴	2.40 × 10 ⁴	6.71 × 10 ⁵	8.20 × 10 ⁴	5.30 × 10 ³	-	1.02	
B1	1.89 × 10 ⁷	2.00 × 10 ³	2.40 × 10 ⁴	1.76 × 10 ⁵	8.10 × 10 ⁴	-	-	0.14	
B2	1.75 × 10 ⁷	1.90 × 10 ⁴	4.80 × 10 ⁴	4.90 × 10 ⁴	1.00 × 10 ⁵	3.00 × 10 ³	1.50 × 10 ⁵	0.14	
B3	3.80 × 10 ⁶	4.60 × 10 ⁴	3.40 × 10 ⁴	9.70 × 10 ⁴	3.61 × 10 ⁵	3.50 × 10 ⁴	-	1.24	
C1	1.09 × 10 ⁷	1.00 × 10 ⁴	3.10 × 10 ⁴	4.30 × 10 ⁴	6.85 × 10 ⁴	4.30 × 10 ³	-	0.16	
C2	1.38 × 10 ⁷	1.20 × 10 ⁴	3.10 × 10 ⁴	4.80 × 10 ⁴	1.04 × 10 ⁵	9.80 × 10 ³	-	0.16	
D1	4.20 × 10 ⁶	1.15 × 10 ⁴	1.60 × 10 ⁴	7.20 × 10 ⁴	1.31 × 10 ⁵	9.50 × 10 ³	-	0.50	
D2	6.30 × 10 ⁶	4.00 × 10 ⁴	2.50 × 10 ⁴	7.30 × 10 ⁴	1.36 × 10 ⁵	1.40 × 10 ⁴	-	0.40	
E1	1.04 × 10 ⁸	1.00 × 10 ⁴	2.40 × 10 ⁴	2.16 × 10 ⁴	1.79 × 10 ⁴	-	1.00 × 10 ⁵	0.01	
E2	2.34 × 10 ⁶	2.00 × 10 ⁴	3.40 × 10 ⁴	2.90 × 10 ⁴	1.10 × 10 ⁵	7.00 × 10 ³	-	0.92	
P1	7.40 × 10 ⁶	1.80 × 10 ⁴	2.40 × 10 ⁴	2.71 × 10 ⁵	7.93 × 10 ⁴	4.15 × 10 ³	-	0.40	
P2	9.86 × 10 ⁶	2.14 × 10 ⁴	2.60 × 10 ⁴	3.14 × 10 ⁴	7.35 × 10 ⁴	6.70 × 10 ³	-	0.17	

P. glo: 球形棕囊藻; *L. ann*: 环纹娄氏藻; *P. del*: 柔弱拟菱形藻; *C. soc*: 聚生角毛藻。下同

P. glo: *Phaeocystis globosa*; *L. ann*: *Lauderia annulata*; *P. del*: *Pseudo-nitzschia delicatissima*; *C. soc*: *Chaetoceros socialis*. The same below

和IV区高, 但 SiO₃²⁻小, 表明位于这 2 个区域的站点 DIN/DIP 比值均较高, 且含有较多的聚生角毛藻, 但 SiO₃²⁻含量较低。

统计学检验表明, DOP、SiO₃²⁻与球形棕囊藻细胞密度($t_{DOP}=0.81, P<0.01$; $t_{SiO_3^{2-}}=0.69, P<0.05$)囊体密度($t_{DOP}=0.8156, P<0.05$)呈正相关, 与温度(Temp)、盐度(Sal)、pH、DIN 及 DIP 呈负相关。3 类主要硅藻(环纹娄氏藻、柔弱拟菱形藻及聚生角毛藻)与球形棕囊藻囊体密度的相关性大于与球形棕囊藻细胞密度的相关性, 均存在负相关关系, 其中环纹娄氏藻与囊体个数呈显著负相关($t=-0.63,$

$P<0.05$)。物种多样性指数(H')与球形棕囊藻细胞密度($t=-0.97, P<0.01$)、囊体密度($t=-0.79, P<0.01$)呈负相关关系。

3 结论和讨论

3.1 环境因子对球形棕囊藻藻华的影响分析

在采样前期, 润洲岛周边区域因为出现连续降雨且以东风为主, 使温度有骤降现象, 以致水体温度相对较低(平均水温 22.46 °C), 相对较低的温度有利于球形棕囊藻生长^[23]。同时降雨促进营养物质

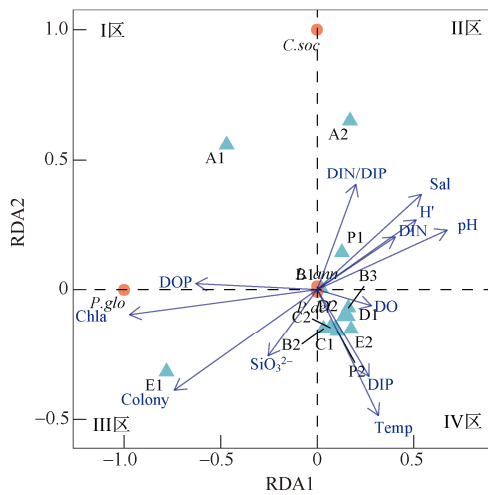


图 3 RDA 分析图

Fig. 3 Map of RDA analysis

从陆源及大气向海水中输入, 适宜的温度和较高营养的环境对球形棕囊藻的生长都极其有利, 并且东风利于营养物质在岛周的聚集尤其是在南湾周围, 可为本次球形棕囊藻藻华的暴发奠定物质基础^[31]。

结合当地渔民发现赤潮的时间以及现场水体中球形棕囊藻囊体的完整度及囊体密度, 推测在进行本次调查时已为藻华后期阶段, 并且部分站点存在消亡过程。受囊体破裂和藻细胞死亡氧化分解释放大量的 CO_2 和有机物影响, 球形棕囊藻细胞密度与 pH 值及 DOP 相关性较高。这与李波^[24]等对涠洲岛邻近水域北海市铁山港及廉州湾区域暴发的球形棕囊藻赤潮监测研究得到的结论一致。藻华发生过程中大量的藻细胞繁殖生长会消耗大量 DIN 以及 DIP, 所以在本次调查结果中各区域水体中的 DIN、DIP 含量较低, 与前人^[23-24]的研究结论一致。但与他们提出的磷限制是球形棕囊藻消亡的主要原因的结论不同。根据 Justic 等^[32]和 Dortch 等^[33]建立的营养盐化学计量限制标准, 当 $\text{DIN}/\text{DIP} < 10$, $\text{DSiO}_3/\text{DIN} > 1$ 时海域为氮限制, 本次球形棕囊藻藻华消亡过程更多考虑是由氮限制造成的。

球形棕囊藻生长和囊体的形成与氮、磷营养盐息息相关, DIN 和 DIP 可影响细胞密度及囊体的形成与大小。球形棕囊藻生长繁殖会大量消耗水体中的无机氮磷营养, 造成此处的无机氮磷(DIN、DIP)含量相对较低, 但在囊体破裂和细胞消亡过程中, 又会产生大量的 DOP^[5,9,34]。而浮游植物赤潮发生达到高峰时, 碱性磷酸酶的活性在浮游植物的生长中可达到最大值, 而与 DIN 代谢相关的硝酸还原酶活

性则会随着环境中 NO_3^- 浓度减少而下降, 因此在自然水体中棕囊藻藻华形成及维持, DOP 可发挥重要作用^[25,35]。在磷缺乏情况下, 球形棕囊藻北部湾株通过高亲和力来竞争磷源, 以维持生长^[36], 而对 DIN 的依赖性更强^[37]。前人的研究监测范围主要分布在北海沿岸区域, 陆源输入对无机营养盐的补充效率更快, 影响更大^[38], 且 DIN 补充速率大于 DIP, 因而 DIN/DIP 呈升高的趋势, 磷成为藻华消亡的限制因素。而涠洲岛周边水域与沿岸区域不同, 涠洲岛受陆源的影响较小, 涠洲岛周边易形成众多的小型涡旋及上升流, 水体交换弱, 营养物质的补给主要受其周围的风场及流场影响^[38], 涠洲岛周边水体的氮磷比值在北部湾海域中相对较低, 春季及夏季平均约为 30^[38-39]。本次调查中 DIN/DIP 和 $\text{SiO}_3^{2-}/\text{DIN}$ 值均主要受 DIN 影响, 整体比值较低, DIN/DIP 与球形棕囊藻细胞密度及囊体密度均存在负相关关系。以分析对比藻细胞密度最大的两个区域(A1、E1)的营养盐成分含量及球形棕囊藻形成囊体的完整度差异为例来进一步阐述氮限制观点: 首先, E1 处出现大量的囊体碎片, A1 处囊体形态较好, 研究发现球形棕囊藻囊体形成依赖于硝酸盐的浓度, 在氮限制时, 球形棕囊藻囊体的形成受到严重抑制^[5,9,34]。结合两个站点位置差异可以发现, A1 靠近南湾口, 南湾沿岸是涠洲岛居民及游客的主要生活聚集地, 人类活动排放的生活废水等对水体营养盐含量的影响更大; 其次, 受外海及通过琼州海峡进入北部湾的珠江口及粤西沿岸富营养水体影响, 在流场和风场作用下污染物更易滞留在南湾处^[31,40]。这 2 个因素都有利于外界对 A1 处水体中 DIN 的补给, 所以两处 DIP 含量差异较小, 但 E1 处 DIN/DIP (5.72) 远低于 A1 处(12.41), 而 DIN 的补给在一定程度上也可以缓解 A1 处球形棕囊藻的氮胁迫程度, 使球形棕囊藻生长得到维持。

3.2 球形棕囊藻藻华的发生对浮游植物群落结构的影响

本次涠洲岛周边水体球形棕囊藻藻华期间, 浮游植物的物种多样性指数与球形棕囊藻细胞密度及囊体个数呈显著负相关, 与学者在北部湾海域球形棕囊藻藻华期间发现球形棕囊藻囊体丰度与群落多样性指数变化趋势相反^[23]结果一致。且通过相关性分析可以发现, 球形棕囊藻囊体密度与环纹娄氏藻、柔弱拟菱形藻及聚生角毛藻等这 3 种硅藻均

存在一定的负相关关系。这 3 种硅藻与球形棕囊藻囊体一样主要受温度及 DIN/DIP 值影响,因此温度及营养盐较低的环境下,竞争的弱势使得其余类群的藻类生长繁殖受到限制,也造成球形棕囊藻囊体个数较大时,物种多样性下降。但是与一些硅藻及甲藻相比,硅藻中的聚生角毛藻、柔弱拟菱形藻及环纹娄氏藻,密度相对较高,且这 3 种藻类在各站点中均有分布,意味着棕囊藻囊体的形成可能与这些硅藻有着密切的联系。

多项研究表明,不同种类的硅藻对于球形棕囊藻囊体形成的影响存在种类差异性,在棕囊藻多个生活史阶段,都不同程度地发现硅藻的参与^[1]。在涠洲岛及其邻近海域角毛藻、拟菱形藻、骨条藻和海藻(Thalassionema)等硅藻在温度较高的春、夏季占优势^[41-43],这些种类多为具有棘、刺或链状结构的硅藻,可以为球形棕囊藻前期的成囊提供附着的基质。本研究发现在调查期间角毛藻属和柔弱拟菱形藻数量较大,且在采样区域均有分布,而这 2 类硅藻都是有利于球形棕囊藻生存发展的硅藻种类,尤其是角毛藻,其角毛被认为是棕囊藻常见的附着位置之一^[44]。而环毛藻(Corethron)等此类藻细胞不仅可以为棕囊藻提供可附着的基质,其硅质细胞壁可保护棕囊藻不被小的捕食者所摄食,从而促进棕囊藻形成更多的囊体,提高棕囊藻的生存机率。不仅如此,硅藻与棕囊藻间还是一种兼性共生的生态类型,硅藻为棕囊藻提供防御摄食的环境,而棕囊藻囊体可作为硅藻栖息地和生长底物^[1,5]。因此与其他硅藻及甲藻相比,聚生角毛藻、柔弱拟菱形藻及环纹娄氏藻等链状硅藻在球形棕囊藻藻华过程中,营养物质相对缺乏的条件下,仍可维持一定数量细胞密度。

综上所述,本次调查期中涠洲岛周边水体球形棕囊藻藻华暴发使水体中无机氮磷以及硅酸盐含量相对较低,在藻华明显发生消亡的区域中存在氮限制的现象。因此,本次涠洲岛周边水体球形棕囊藻藻华的消亡主要受氮限制影响。涠洲岛周边水体发生球形棕囊藻藻华时,球形棕囊藻生长处于优势,消耗水体中大量营养物质,导致其他藻类的生长受到一定程度的抑制,因此球形棕囊藻藻细胞、囊体密度皆与物种多样性指数呈显著的负相关。但在营养受限条件下,仍有一部分具有链状结构的硅藻维持相对较高的密度,而这一类硅藻都具有与球形棕囊藻共生的自身优势。

参考文献

- [1] LIANG J R, LIU Q, JI P Y, et al. on the correlation between diatoms and colony formation of *Phaeocystis* [J]. Mar Environ Sci, 2020, 39(2): 315–320. doi: 10.13634/j.cnki.mes.2020.02.022.
梁君荣, 刘琦, 姬鹏宇, 等. 硅藻与棕囊藻囊体形成的相关性研究进展 [J]. 海洋环境科学, 2020, 39(2): 315–320. doi: 10.13634/j.cnki.mes.2020.02.022.
- [2] SHEN P P, QI Y Z. Research progress on species diversity and distribution of the genus *Phaeocystis* [J]. Oceanol Limnol Sin, 2021, 52(1): 1–15. doi: 10.11693/hyhz20200300085.
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. doi: 10.11693/hyhz20200300085.
- [3] QI Y Z, CHEN J F, WANG Z H, et al. Some observations on harmful algal bloom (HAB) events along the coast of Guangdong, southern China in 1998 [J]. Hydrobiologia, 2004, 512(1/2/3): 209–214. doi: 10.1023/b:hydr.0000020329.06666.8c.
- [4] 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]. J Marine Syst, 2005, 57(1/2): 83–110. doi: 10.1016/j.jmarsys.2005.04.006.
- [5] DENG K. The life cycle of *Phaeocystis globosa* and the effects of light, nutrient and co-existing diatom, Dinoflagellates [D]. Guangzhou: Jinan University, 2013.
邓坤. 光照、营养盐限制及硅藻和甲藻对球形棕囊藻生活史的影响 [D]. 广州: 暨南大学, 2013.
- [6] WANG X D, HUO Y P, YANG F, et al. Induced allelopathic effects of *Thalassiosira weissflogii* on colony formation in *Phaeocystis globosa* [J]. Water, 2021, 13(5): 581–581. doi: 10.3390/w13050581.
- [7] KANG Z J, YANG B, LAI J X, et al. *Phaeocystis globosa* bloom monitoring: Based on *P. globosa* induced seawater viscosity modification adjacent to a nuclear power plant in Qinzhou Bay, China [J]. J Ocean U China, 2020, 19(5): 1207–1220.
- [8] SAZHIN A F, ARTIGAS L F, NEJSTGAARD J C, et al. The colonization of two *Phaeocystis* species (*Prymnesiophyceae*) by pennate diatoms and other protists: A significant contribution to colony biomass [J]. Biogeochemistry, 2007, 83(1/2/3): 137–145. doi: 10.1007/978-1-4020-6214-8_11
- [9] WANG Y, DENG K, WANG X D. The effects of light, nutrient and co-existing diatom on colony formation of *Phaeocystis globosa* [J]. Ecol Sci, 2013, 32(2): 165–170. doi: 10.3969/j.issn.1008-8873.2013.02.005.
王艳, 邓坤, 王小冬. 球形棕囊藻囊体形成中光照、营养盐和共存

- 硅藻的影响 [J]. 生态科学, 2013, 32(2): 165–170. doi: 10.3969/j.issn.1008-8873.2013.02.005.
- [10] LIU Q. Effects of diatom on the growth and colony formation in *Phaeocystis globosa* [D]. Xiamen: Xiamen University, 2019.
刘琦. 硅藻对球形棕囊藻生长与囊体形成的影响 [D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
- [11] HE L Y, SONG X X, YU F, et al. Potential risk and prevention of phytoplankton outbreak to water-cooling system in nuclear power plant in Fangchenggang, Guangxi [J]. Oceanol Et Limnol Sin, 2019, 50(3): 700–706. doi: 10.11693/hyhz20190100004.
贺立燕, 宋秀贤, 於凡, 等. 潜在影响防城港核电冷源系统的藻类暴发特点及其监测防控技术 [J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(3): 700–706. doi: 10.11693/hyhz20190100004.
- [12] XU Y X, ZHANG T, ZHOU J. Historical occurrence of algal blooms in the Northern Beibu Gulf of China and implications for future trends [J]. Front Microbiol, 2019, 10: 451. doi: 10.3389/fmicb.2019.00451.
- [13] JIANG N. Analysis on the evolution trend of red tide in the Beibu Gulf of Guangxi and its prevention and control ideas [J]. Ocean Devel Manag, 2019, 36(11): 82–85.
姜宁. 广西北部湾海域赤潮演变趋势分析及其防控思路 [J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(11): 82–85.
- [14] XU Y X, HE X L, ZHANG T, et al. Causative species of *Phaeocystis* blooms in Beibu Gulf [J]. J Trop Oceanog, 2020, 39(6): 122–130. doi: 10.11978/2020030.
徐轶肖, 何喜林, 张腾, 等. 北部湾棕囊藻藻华原因种分析 [J]. 热带海洋学报, 2020, 39(6): 122–130. doi: 10.11978/2020030.
- [15] QIN X L, LAI J X, CHEN B, et al. Molecular identification of *Phaeocystis* from Beibu Gulf based on 18S rDNA sequences [J]. J Trop Subtrop Bot, 2016, 24(2): 176–181. doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.02.008.
覃仙玲, 赖俊翔, 陈波, 等. 棕囊藻北部湾株的 18S rDNA 分子鉴定 [J]. 热带亚热带植物学报, 2016, 24(2): 176–181. doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.02.008.
- [16] CAO X H, YU Z M, QIU L X. Field experiment and emergent application of modified clays for *Phaeocystis globosa* blooms mitigation [J]. Oceanol Limnol Sin, 2017, 48(4): 753–759. doi: 10.11693/hyhz20170200026.
曹西华, 俞志明, 邱丽霞. 改性黏土法消除球形棕囊藻赤潮的现场实验与效果评估 [J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(4): 753–759. doi: 10.11693/hyhz20170200026.
- [17] TAN S. The study of *Phaeocystis globosa* cell programmed death induced by marine algicidal bacteria [D]. Guangzhou: Jinan University, 2016.
谭烁. 海洋溶藻细菌诱导球形棕囊藻程序性死亡研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2016.
- [18] LU J C, LI J, LAI J X, et al. Top-down control of *Parvocalanus crassirostris* on *Phaeocystis globosa* in coastal water of Guangxi [J]. J Guangxi Acad Sci, 2020, 36(3): 323–329. doi: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20201027.007.
陆家昌, 李杰, 赖俊翔, 等. 广西近岸强额孔雀水蚤对球形棕囊藻的下行控制 [J]. 广西科学院学报, 2020, 36(3): 323–329. doi: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20201027.007.
- [19] LI N, ZHAO H X, JIANG G L X, et al. Phylogenetic responses of marine free-living bacterial community to *Phaeocystis globosa* bloom in Beibu Gulf, China [J]. Front Microbiol, 2020, 11: 0-1624. doi: 10.3389/fmicb.2020.01624.
- [20] ZHANG D. The influence factors for spatio-temporal changes of nutrients and the quantitative reduction of terrestrial TDN in Qinzhou Bay [D]. Nanning, Guangxi University, 2020. doi: 10.27034/d.cnki.ggxiu.2020.001899.
张栋. 钦州湾营养盐时空变化的影响因素与陆源 TDN 的量化减排研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2020. doi: 10.27034/d.cnki.ggxiu.2020.001899.
- [21] YUAN Y Q, LÜ X N, WU Z X, et al. Temporal and spatial distribution of main environmental factors in typical sea area of the Beibu Gulf and its influencing factors [J]. Oceanol Limnol Sin, 2019, 50(3): 579–589. doi: 10.11693/hyhz20181100279.
袁涌铨, 吕旭宁, 吴在兴, 等. 北部湾典型海域关键环境因子的时空分布与影响因素 [J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(3): 579–589. doi: 10.11693/hyhz20181100279.
- [22] LÜ X N. The key effect of nitrate on *Phaeocystis globosa* blooms in Beibu Gulf [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020. doi: 10.27551/d.cnki.gzks.2020.000088.
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]. 北京: 中国科学院大学, 2020. doi: 10.27551/d.cnki.gzks.2020.000088.
- [23] HE C, SONG S Q, LI C W. The spatial-temporal distribution of *Phaeocystis globosa* colonies and related affecting factors in Guangxi Beibu Gulf [J]. Oceanol Limnol Sin, 2019, 50(3): 630–643. doi: 10.11693/hyhz20180800192.
贺成, 宋书群, 李才文. 广西北部湾海域球形棕囊藻藻体时空分布及其影响因素 [J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(3): 630–643. doi: 10.11693/hyhz20180800192.
- [24] LI B, LAN W L, LI T S, et al. Variation of environmental factors during *Phaeocystis globosa* blooms and its implications for the bloom decay [J]. Chin J Ecol, 2015, 34(5): 1351–1358. doi: 10.13292/j.1000-

- 4890.20150311.050.
- 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. doi: 10.13292/j.1000-4890.20150311.050
- [25] HUANG X Y, LONG H, MO Y, et al. Effects of different phosphorus sources on the growth and colony formation of *Phaeocystis globosa* [J]. *Tran Oceanol Limnol*, 2021, 25(1): 116–122. doi: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2021.01.016.
- 黄肖阳, 龙寒, 莫钰, 等. 不同形态磷源对球形棕囊藻生长及囊体形成的影响 [J]. 海洋湖沼通报, 2021, 25(1): 116–122. doi: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2021.01.016
- [26] XU Y X, TAO X P, LIU C H, et al. Nutrients and water quality in the Beihai Peninsula of Guangxi during summers [J]. *Mar Sci*, 2021, 45(6): 107–117. doi: 10.11759/hyxx20210112001.
- 徐轶肖, 陶晓娉, 刘成辉, 等. 广西北海半岛夏季营养盐及水质状况分析 [J]. 海洋科学, 2021, 45(6): 107–117. doi: 10.11759/hyxx20210112001.
- [27] CHEN Y J. Exploring a new path for reform and development and construction of Weizhou Island tourist area [J]. *Coast Enterp Sci Technol*, 2018, 187(6): 51–54.
- 陈禹静. 探索涠洲岛旅游区改革和开发建设新路径 [J]. 沿海企业与科技, 2018, 187(6): 51–54.
- [28] CHI M C, CHEN B. Tracking the source of high concentration nitrogen and phosphorus water in the southeast of Weizhou Island [J]. *Guangxi Sci*, 2015, 22(3): 237–244. doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20150708.001.
- 侍茂崇, 陈波. 涠洲岛东南部海域高浓度氮和磷的来源分析 [J]. 广西科学, 2015, 22(3): 237–244. doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20150708.001.
- [29] QIN X L, CHEN B. The source of high concentration of nitrogen and phosphorus nutrient in Guangxi high frequency algal bloom areas [J]. *J Guangxi Acad Sci*, 2018, 34(3): 222–227. doi: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20180717.002.
- 覃仙玲, 陈波. 广西沿海赤潮多发区高浓度氮磷营养元素来源探讨 [J]. 广西科学院学报, 2018, 34(3): 222–227. doi: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20180717.002.
- [30] MCNAUGHTON S J. Relationships among functional properties of Californian grassland [J]. *Nature*, 1967, 216(5111): 168–169. doi: 10.1038/216168b0.
- [31] ZHU D L, CHEN B, YA H Z, et al. Study on numerical simulation of pollutant transport in Guangxi coastal waters [J]. *Guangxi Sci*, 2019, 26(6): 669–675. doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20200101.002.
- 朱冬琳, 陈波, 牙韩争, 等. 广西近海污染物输运模拟研究 [J]. 广西科学, 2019, 26(6): 669–675. doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20200101.002.
- [32] JUSTIĆ D, RABALAIS N N, TURNER R E, et al. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences *Estuarine [J]. Coastal and Shelf Science*, 1995, 40: 339–356. doi: 10.1016/S0272-7714(05)80014-9.
- [33] DORTCH Q, WHITLEDGE T E. Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions [J]. *Cont Shelf Res*, 1992, 12: 1293–1309. doi: 10.1016/0278-4343(92)90065-R.
- [34] TIAN J J. Effects of environmental factors on the colony formation of *Phaeocystis globosa* [D]. Guangzhou: Jinan Universty, 2010.
- 田晶晶. 环境因子对球形棕囊藻细胞群体形成的影响 [D]. 广州: 暨南大学, 2010.
- [35] HUANG B Q, OU L J, HONG H S, et al. Bioavailability of dissolved organic phosphorus compounds to typical harmful dinoflagellate *Prorocentrum donghaiense* Lu [J]. *Mar Pollut Bull*, 2005, 51(8/9/10/11/12): 838–844. doi: 10.1016/j.marpolbul.2005.02.035.
- [36] QIN X L, CHEN B, LAO J X, et al. Study on the utilization of different phosphorus and alkaline phosphatase characteristics of *Phaeocystis globosa* cultivated from Beibu Gulf [J]. *Guangxi Sci*, 2018, 25(1): 80–86. doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20180123.001.
- 覃仙玲, 陈波, 赖俊翔, 等. 球形棕囊藻北部湾株对不同形态磷源的利用及碱性磷酸酶特性研究 [J]. 广西科学, 2018, 25(1): 80–86. doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20180123.001.
- [37] ZHAO X W. 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, 2010.
- 赵晓玮. 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, 2010.
- [38] YANG J, ZHANG R D, ZHAO Z M, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of nutrients in the coastal seawater of Guangxi Beibu Gulf during the past 25 years [J]. *Ecol Environ*, 2015, 24(9): 1493–1498. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.09.011.
- 杨静, 张仁铎, 赵庄明, 等. 近 25 年广西北部湾海域营养盐时空分布特征 [J]. 生态环境学报, 2015, 24(9): 1493–1498. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.09.011.
- [39] HE B M, LI G Z, WEI M X, et al. Relationship between the seasonality of seawater N : P ratio and the structure of plankton on the reefs of Weizhou Island, northern South China Sea [J]. *J Trop Oceanog*, 2013, 32(4): 64–72. doi: 10.3969/j.issn.1009-5470.2013.04.010.
- 何本茂, 黎广钊, 韦蔓新, 等. 涠洲岛珊瑚礁海域氮磷比值季节变

- 化与浮游生物结构的关系 [J]. 热带海洋学报, 2013, 32(4): 64–72. doi: 10.3969/j.issn.1009-5470.2013.04.010.
- [40] SHI M C, CHEN B. Tracking the source of high concentration nitrogen and phosphorus water in the southeast of Weizhou Island [J]. Guangxi Sci, 2015, 22(3): 237–244. doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20150708.001.
- 侍茂崇, 陈波. 涠洲岛东南部海域高浓度氮和磷的来源分析 [J]. 广西科学, 2015, 22(3): 237–244. doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.20150708.001.
- [41] LIU G Q, SHI H Y, WEI C L, et al. Preliminary studies on phytoplankton and red tide organism composition in the coastal water of the Weizhou Island, Guangxi [J]. Mar Sci Bull, 2008, 27(3): 43–48. doi: 10.3969/j.issn.1001-6392.2008.03.008.
- 刘国强, 史海燕, 魏春雷, 等. 广西涠洲岛海域浮游植物和赤潮生物种类组成的初步研究 [J]. 海洋通报, 2008, 27(3): 43–48. doi: 10.3969/j.issn.1001-6392.2008.03.008.
- [42] JIAN F J, CHEN B, HE B J, et al. Distribution features and relation of phytoplankton with environment factors in the coastal water of Guangxi in summer 2010 [J]. Guangxi Sci, 2012, 19(4): 377–383. doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.2012.04.023.
- 姜发军, 陈波, 何碧娟, 等. 2010年夏季广西北部湾沿岸浮游植物分布特征及其与环境因子的相关性 [J]. 广西科学, 2012, 19(4): 377–383. doi: 10.13656/j.cnki.gxkx.2012.04.023.
- [43] XU S N, LIN H J, DAI M, et al. Ecological characteristics of phytoplankton community in Guangxi coastal area [J]. Chin J Ecol, 2014, 33(10): 2733–2739. doi: 10.13292/j.1000-4890.2014.0238.
- 徐姗楠, 林华剑, 戴明, 等. 广西近岸海域浮游植物群落的生态特征 [J]. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2733–2739. doi: 10.13292/j.1000-4890.2014.0238.
- [44] HEGARTY S G, VILLAREAL T A. Effects of light level and N : P supply ratio on the competition between *Phaeocystis* cf. *pouchetii* (Hariot) Lagerheim (Prymnesiophyceae) and five diatom species [J]. J Exp Mar Biol Ecol, 1998, 226(2): 241–258. doi: 10.1016/S0022-0981(97)00254-2.