

# 广西北部湾海域球形棕囊藻囊体 时空分布及其影响因素\*

贺成<sup>1, 2, 3, 4</sup> 宋书群<sup>1, 2, 4</sup> 李才文<sup>1, 2, 3, 4</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋生态与环境科学功能实验室 青岛 266237; 3. 中国科学院大学 北京 100049; 4. 中国科学院海洋大科学研究中心 青岛 266071)

**摘要** 为揭示广西北部湾海域球形棕囊藻囊体的时空分布特征, 探讨其与水体环境因素的关系, 于 2016 年 12 月至 2017 年 6 月对该海域 29 个站位进行了 6 次综合调查。结果表明, 调查海域球形棕囊藻囊体丰度介于  $0-4.09 \times 10^4 \text{col/m}^3$ , 12 月至次年 3 月囊体丰度较高; 西南深水区域囊体丰度呈现逐月递减趋势, 而广西和雷州半岛近岸海域囊体丰度呈现先升高再降低的趋势。相关性分析显示该海域囊体丰度与水温、磷酸盐和硅酸盐浓度呈显著负相关( $P < 0.01$ ); 与叶绿素 *a* 浓度、溶解氧呈显著正相关( $P < 0.01$ ); 在局部区域与盐度呈显著正相关( $P < 0.01$ ), 与硝酸盐浓度呈显著负相关( $P < 0.01$ )。典型站位分析结果显示球形棕囊藻囊体丰度的变化趋势与其他浮游植物的相同, 而与群落多样性指数的变化趋势相反。球形棕囊藻囊体的时空分布主要取决于环境条件的变化, 也会受到其他浮游植物群落结构改变的影响。

**关键词** 北部湾; 球形棕囊藻; 囊体; 时空分布; 环境因子; 浮游植物

**中图分类号** Q948.885.3; X55 doi: 10.11693/hyhz20180800192

棕囊藻(*Phaeocystis*)是一类广温、广盐性定鞭藻类(Haptophytes 或 Prymnesiophyte) (Baumann *et al.*, 1994), 在全球范围内广泛分布, 并频繁暴发大规模赤潮(Schoemann *et al.*, 2005)。棕囊藻具有复杂的生活史, 能产生溶血性毒素, 同时还是二甲基丙磺酸(DMSP)和二甲基硫醚(DMS)的高产种(齐雨藻等, 2002); 其赤潮暴发能显著影响海洋生态系统稳定性, 威胁养殖生物和人类健康, 并在一定程度上影响全球气候变化。因此, 棕囊藻赤潮受到学者们的高度关注, 相关研究在国内外得到广泛开展(Riegman *et al.*, 1992; 徐宁等, 2003; Schoemann *et al.*, 2005; 王艳等, 2006; Poulton *et al.*, 2007; Grattepanche *et al.*, 2011)。

北部湾三面环陆, 水交换条件较差, 径流输入的

大量有机物和无机盐引起营养盐富集(高东阳等, 2001), 为赤潮暴发创造了便利条件。近年来, 球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa*)赤潮频繁发生, 成为该海域的主要生态灾害。2015 年 1—2 月暴发的一次球形棕囊藻赤潮几乎覆盖了整个广西近岸海域(罗金福等, 2016), 除影响海洋渔业、生态环境和滨海自然景观外, 还严重威胁了防城港核电厂的冷源安全。有关北部湾球形棕囊藻赤潮的研究主要涉及赤潮原因种的鉴定(覃仙玲等, 2016)、浮游生物生态学(高东阳等, 2001)以及近海环境因素的影响(陈振华, 2013; 李波等, 2015)等, 较为缺乏对球形棕囊藻囊体时空分布及相关影响因素的系统研究。本文基于在广西北部湾海域开展的 6 次现场调查, 研究了球形棕囊藻囊体的时空分布, 分析了其与主要环境因子和浮游植物群

\*国家科技部重点研发计划, 2017YFC1404300 号; 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目, 2016ASKJ02-3 号; “鳌山人才”优秀青年学者资助项目, 2015ASTP 号。贺成, 博士研究生, E-mail: hecheng15@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 李才文, 博士生导师, 研究员, E-mail: cwli@qdio.ac.cn

收稿日期: 2018-08-02, 收修改稿日期: 2018-11-20

落的关系, 以期为深入探讨棕囊藻赤潮的生长和消亡机制提供基础资料, 并为棕囊藻赤潮的预警及防控提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 航次信息

于 2016 年 12 月至 2017 年 6 月间, 搭载“海顺 6”号和“海科 68”号科考船在北部湾海域开展了 6 个航次现场调查, 共布设 29 个站位(图 1), 每次调查的起止时间列于表 1。

表 1 航次调查信息  
Tab.1 Specifications of the cruises

航次编号	调查站位数	起始日期	终止日期
1612	29	2016-12-10	2016-12-14
1701	25*	2017-01-14	2017-01-19
1702	29	2017-02-22	2017-02-28
1703	29	2017-03-22	2017-03-27
1704	29	2017-04-20	2017-04-26
1706	29	2017-06-06	2017-06-10

注: \* ZN1-1 站、ZN1-2 站、ZN1-3 站和 ZN4-3 站因海况恶劣取消

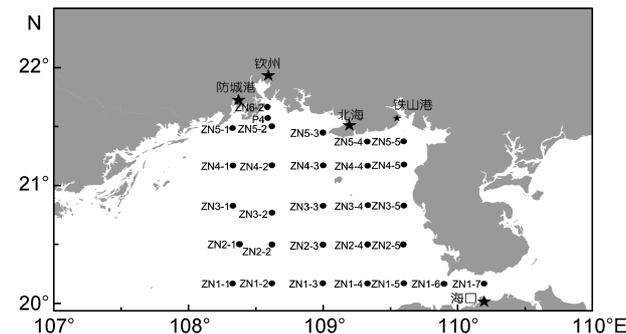


图 1 广西北部湾研究区域与调查站位

Fig.1 The study area and sampling stations in the Beibu Gulf, Guangxi, South China Sea

### 1.2 样品采集及分析

现场样品的采集、保存及部分环境因子的测定按照《海洋调查规范》(GB/T 12763.2—2007, GB/T 12763.4—2007, GB/T 12763.6—2007)进行。利用船载 CTD (SEB911 plus, Sea-Bird) 获得海水温度、盐度和叶绿素荧光剖面, 使用 Niskin 瓶分别在表层、温盐跃层下上、叶绿素荧光最大层和底层采集水样。采用碘量滴定法现场测定水体溶解氧。取 100mL 水样经 0.45 $\mu$ m 孔径醋酸纤维滤膜过滤后加氯仿冷冻保存; 实验室内使用营养盐连续流动分析仪(San Plus,

SKALAR)测定硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐的浓度。取 300—500mL 水样在<50KPa 负压下抽滤到 GF/F 滤膜上, -20°C 避光保存; 实验室内在低温避光条件下, 90% 丙酮萃取 24h, 使用荧光计 (Trilogy, Turner Design) 测定叶绿素 *a* 浓度 (Timothy *et al.*, 1984)。

由底(底上 2m)至表垂直拖曳浅水型浮游生物网采集浮游植物样品。取 6mL 网样使用体视显微镜 (SZ61, Olympus) 对棕囊藻囊体进行现场计数, 并利用测微尺测量囊体直径; 剩余网样加入中性甲醛溶液固定(终浓度 5%), 实验室内取 0.25mL 亚样品置于 Palmer-Maloney 计数框内使用光学显微镜 (BX53, Olympus) 进行浮游植物物种鉴定与细胞计数 (金德祥等, 1965; 孙军等, 2002)。

### 1.3 数据分析

球形棕囊藻囊体丰度以每立方米出现的囊体数表示, 单位为 col/m<sup>3</sup>; 其他浮游植物丰度以每立方米出现的细胞数表示, 单位为 cell/m<sup>3</sup>。

浮游植物优势物种根据优势度 (*Y*) 确定, 其计算公式为:

$$Y = \frac{n_i}{N} \cdot f_i,$$

其中,  $n_i$  为第  $i$  种的细胞数,  $f_i$  为第  $i$  种在调查海域出现的频率,  $N$  为所有种的总细胞数; 将优势度  $Y > 0.02$  的物种定为优势物种。

浮游植物群落多样性采用 Shannon-Wiener 指数 ( $H'$ ) 表征, 其计算公式为:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i,$$

其中,  $P_i$  是第  $i$  种的细胞数和该站位总细胞数的比值,  $S$  为该站位的物种数。

浮游植物群落均匀度采用 Pielou 指数 ( $J$ ) 表征, 其计算公式为:

$$J = \frac{H'}{\log_2 S}.$$

浮游植物物种丰富度采用 Margalef 指数 ( $d_{Ma}$ ) 表征, 其计算公式为:

$$d_{Ma} = (S-1) / \ln N.$$

使用 Golden Software Surfer 12.0 软件绘制站位图和环境因子、球形棕囊藻囊体的平面分布图; 使用 Origin 9.0 软件绘制囊体丰度和粒径及典型站位浮游植物群落参数的月际变化图; 使用 SPSS 19.0 软件对囊体丰度和主要环境因子进行 Spearman 秩相关分析; 其他数据处理均通过 Excel 完成。环境数据取表

层和底层的平均值。

## 2 结果

### 2.1 环境特征

调查期间水温变化幅度较大,各航次平均水温介于 19.76—28.39°C(表 2);水温在 12 月至次年 2 月呈现近岸低而离岸高的趋势(图 2a—c),3 月至 6 月近岸海域水温升高,高于离岸深水区域(图 2d—f)。海水盐度变化幅度较小,各航次平均盐度介于 31.44—

31.90(表 2);盐度水平分布呈现近岸低而离岸高的趋势,低值区主要出现在钦州湾附近海域(图 3)。水体叶绿素 *a* 浓度变化幅度较大,各航次平均叶绿素 *a* 浓度介于 0.89—2.29 μg/L(表 2),平面分布总体上呈现近岸高而离岸低的趋势(图 4);高值区月际变化明显,12 月和次年 1 月高值区出现在广西近岸及涠洲岛附近海域(图 4a—b),2 月和 3 月高值区主要出现在涠洲岛附近海域(图 4c—d),4 月和 6 月高值区主要出现在雷州半岛西岸及钦州湾附近海域(图 4e—f)。

表 2 广西北部湾海域水温、盐度和叶绿素 *a* 浓度  
Tab.2 Temperature, salinity and chlorophyll *a* in Beibu Gulf, Guangxi, South China Sea

航次编号	水温(°C)		盐度		叶绿素 <i>a</i> (μg/L)	
	均值±SD	范围	均值±SD	范围	均值±SD	范围
1612	22.33±1.30	19.31—24.38	31.81±1.18	25.86—33.56	1.57±1.31	0.27—5.62
1701	19.97±1.52	15.79—22.92	31.45±1.17	25.70—33.41	0.89±0.62	0.27—2.72
1702	19.76±1.24	16.25—22.79	31.62±0.76	28.79—33.58	1.45±1.10	0.28—5.36
1703	21.30±1.13	19.61—23.98	31.44±1.11	25.85—33.66	1.45±2.15	0.14—13.40
1704	23.26±1.14	21.08—25.94	31.68±0.99	27.62—33.43	1.15±0.98	0.16—5.33
1706	28.39±1.91	22.81—31.34	31.90±1.22	26.96—33.48	2.29±2.24	0.18—11.01

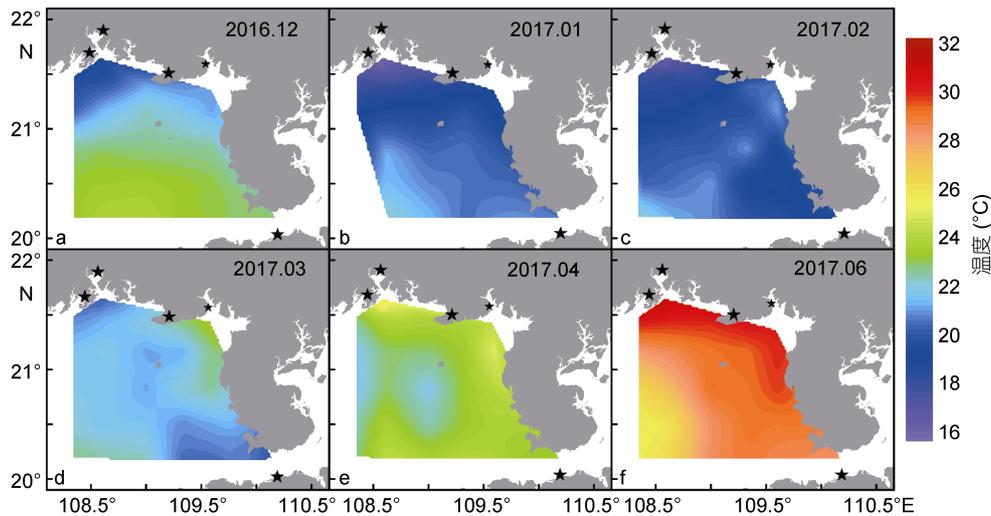


图 2 广西北部湾海域水温的平面分布

Fig.2 Horizontal distribution of temperature in Beibu Gulf, Guangxi, South China Sea

### 2.2 球形棕囊藻囊体的时空分布

**2.2.1 月际变化** 调查期间球形棕囊藻囊体丰度介于 0— $4.09 \times 10^4$  col/m<sup>3</sup>,月际变化明显,12 月至次年 3 月逐渐升高,3 月达到最高值,从 4 月开始降低,6 月仅有少量囊体在个别站位出现(图 5)。囊体粒径以直径 1—5mm 的居多,其次是 0—1mm,在测量的 512 个囊体中,前者有 313 个,后者有 144 个。从月际变

化看,直径 0—1mm 囊体的丰度在 1 月份达到峰值,在 4 月份出现次高峰,6 月份处于较低水平;直径 1—5mm 和 5—10mm 的囊体从 12 月至次年 3 月不断增多,之后迅速减少,其中直径 5—10mm 的囊体减少更为显著;直径 10—15mm 的囊体仅在 2 月份和 3 月份出现,3 月份还发现少量直径 15—20mm 的囊体(图 6)。

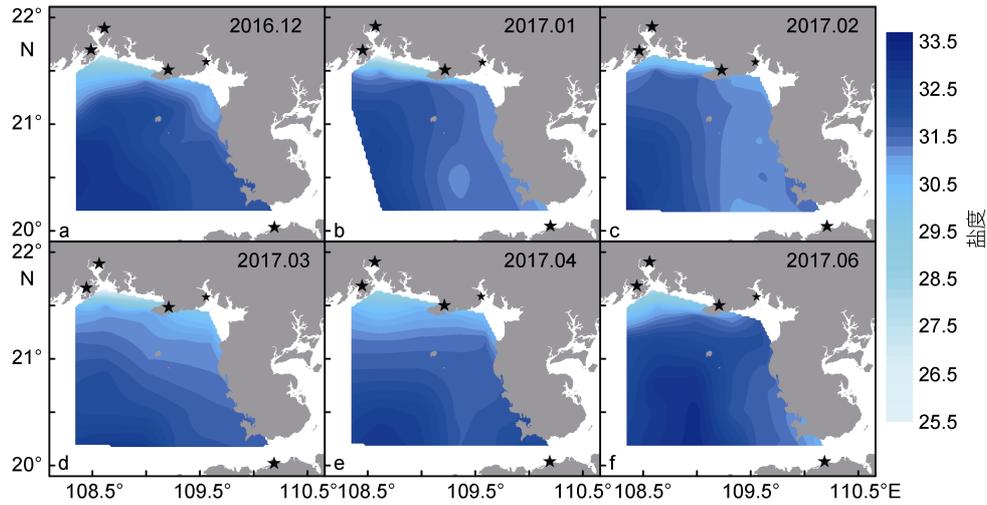


图 3 广西北部湾海域盐度的平面分布

Fig.3 Horizontal distribution of salinity in Beibu Gulf, Guangxi, South China Sea

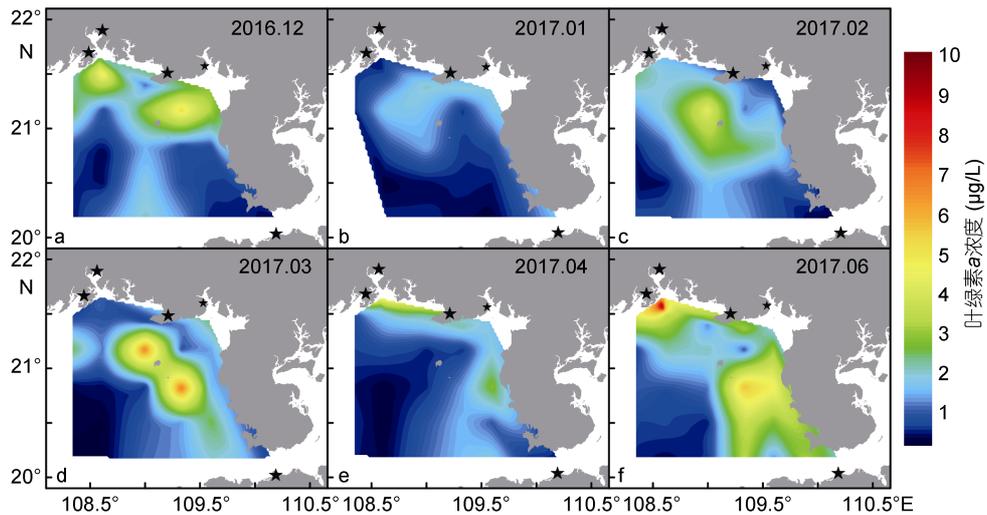


图 4 广西北部湾海域叶绿素 a 浓度的平面分布

Fig.4 Horizontal distribution of chlorophyll a in Beibu Gulf, Guangxi, South China Sea

**2.2.2 平面分布** 广西北部湾海域球形棕囊藻囊体的时空分布示于图 7。12 月, 囊体丰度在北海铁山港和涠洲岛邻近海域较高, 最高值  $1.08 \times 10^4 \text{col/m}^3$  出现在铁山港以南的 ZN5-5 站, 在琼州海峡和防城港—钦州湾水域未见分布(图 7a)。1 月, 囊体分布范围与 12 月类似, 但防城港外水域也有囊体出现, 最高值  $2.43 \times 10^4 \text{col/m}^3$  出现在涠洲岛西北侧的 ZN3-2 站(图 7b)。2 月, 囊体在琼州海峡和防城港—钦州湾水域出现, 但从北海铁山港—涠洲岛海域消失; 囊体丰度超过  $10^4 \text{col/m}^3$  的站位有 5 个, 最高值  $1.88 \times 10^4 \text{col/m}^3$  出现在雷州半岛附近的 ZN3-5 站(图 7c)。3 月, 囊体几乎从调查区西部海域消失, 集中分布在北海以东海域, 最高值  $4.09 \times 10^4 \text{col/m}^3$  出现在

ZN2-4 站(图 7d)。4 月, 囊体分布范围继续向雷州半岛方向收缩, 完全从调查区中西部海域消失, 最高值  $1.97 \times 10^4 \text{col/m}^3$  出现在海南岛西北侧的 ZN1-4 站(图 7e)。6 月, 囊体仅在雷州半岛西侧 3 个站位和涠洲岛附近的 ZN3-3 站出现, 最高值  $0.11 \times 10^4 \text{col/m}^3$  出现在 ZN2-5 站(图 7f)。

**2.3 球形棕囊藻囊体与环境因子的关系**

根据球形棕囊藻囊体的时空分布特征将调查海域划分为四个区域(图 8), 分别对各区域内球形棕囊藻囊体与环境因子进行 Spearman 秩相关分析, 结果示于表 3。在区域 , 囊体丰度与水温 and 磷酸盐浓度呈负相关, 与溶解氧呈显著正相关; 在区域 , 囊体丰度与盐度、溶解氧呈显著正相关, 而与磷酸盐和硅

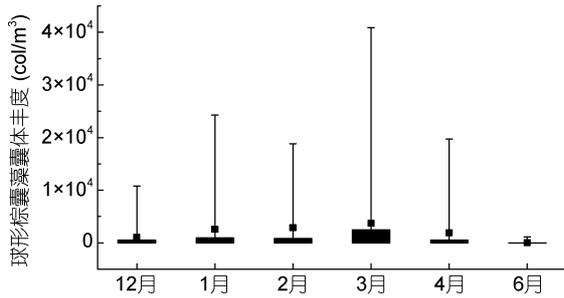


图5 广西北部湾球形棕囊藻囊体丰度的月际变化  
Fig.5 Monthly variation of *P. globosa* colony abundance in Beibu Gulf, Guangxi, South China Sea

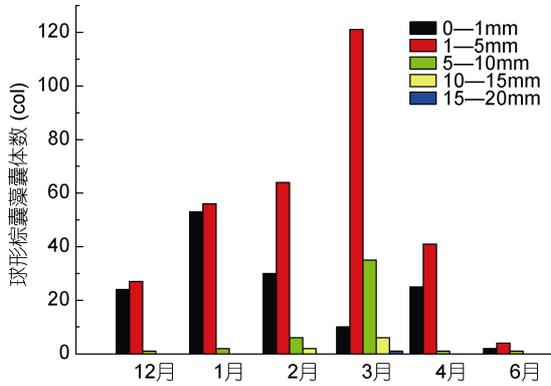


图6 广西北部湾球形棕囊藻囊体直径的月际变化  
Fig.6 Monthly variation of *P. globosa* colony diameter in Beibu Gulf, Guangxi, South China Sea

酸盐浓度呈显著负相关; 在区域 , 囊体丰度与各环境因子没有显著的相关性; 在区域 , 囊体丰度与叶绿素 *a* 浓度和溶解氧呈正相关, 而与三项营养盐浓度均呈显著的负相关。从整个调查海域来看, 囊体丰度与水温、磷酸盐浓度和硅酸盐浓度呈显著负相关( $P<0.01$ ), 与叶

绿素 *a* 浓度、溶解氧呈显著正相关( $P<0.01$ )。

### 2.4 典型站位球形棕囊藻囊体与其他浮游植物的关系

根据球形棕囊藻囊体的分布特征, 选取钦州湾内 P4 站、铁山港附近的 ZN5-5 站、调查区中部的 ZN3-3 站和 ZN4-2 站、雷州半岛西侧的 ZN3-5 站、调查区西南部深水区的 ZN2-2 站和琼州海峡西侧的 ZN1-5 站作为典型站位, 研究球形棕囊藻囊体与其他浮游植物的关系。

**2.4.1 浮游植物种类组成及优势种** 典型站位共鉴定浮游植物(不包括球形棕囊藻)4门55属140种(表4), 硅藻占绝对优势, 其次是甲藻。浮游植物优势种 ( $Y=0.02$ )共 17 种, 多为链状硅藻或较大型硅藻, 包括角毛藻(*Chaetoceros* sp.)、细弱海链藻(*Thalassiosira subtilis*)、菱形藻(*Nitzschia* spp.)和笔尖形根管藻(*Rhizosolenia styliformis*)等, 其中角毛藻在所有调查月份都占据优势(表 5)。甲藻优势种包括夜光藻(*Noctiluca scintillans*)、角藻(*Ceratium* spp.)、原多甲藻(*Protoperdinium* spp.)和具尾鳍藻(*Dinophysis caudata*)等(表 6)。

**2.4.2 囊体丰度与硅藻和甲藻的关系** 在典型站位, 球形棕囊藻囊体与硅藻细胞丰度变化趋势大致相同, 高值几乎同步出现, 在 ZN3-3 站、ZN3-5 站、ZN4-2 站和 ZN5-5 站表现尤为明显(图 9)。球形棕囊藻囊体与甲藻细胞丰度的月际变化示于图 10。除 ZN2-2 站外, 囊体丰度较高的月份总伴随着较高丰度的甲藻; 但高丰度的甲藻却不一定对应高丰度的球形棕囊藻囊体, 比如在 P4 站、ZN3-5 站和 ZN5-5 站。

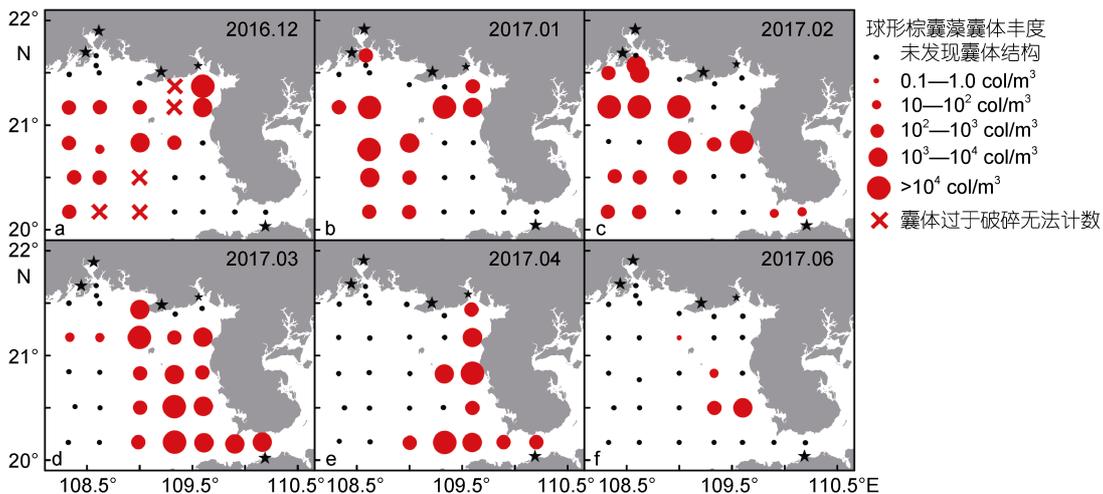


图7 广西北部湾球形棕囊藻囊体丰度的平面分布  
Fig.7 The horizontal distribution of *P. globosa* colony abundance in Beibu Gulf, Guangxi, South China Sea

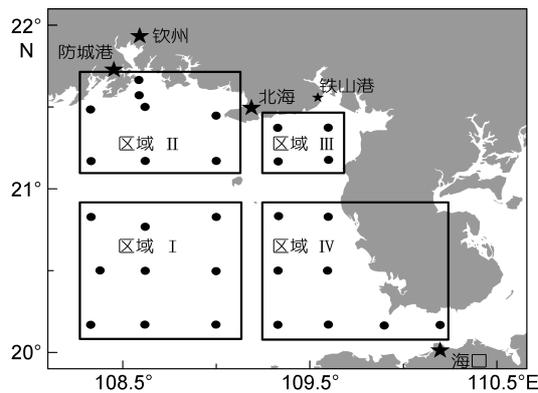


图 8 调查站点区域划分

Fig.8 The division of sampling stations

2.4.3 囊体丰度与浮游植物群落多样性的关系在典型站位, 球形棕囊藻囊体丰度与浮游植物群落多样性指数的变化趋势大致相反, 囊体丰度较高时, 多样性指数总体上偏低; 囊体丰度降低时, 多样性指数出现升高趋势, 囊体未出现时多样性指数处于较

高水平(图 11)。除 ZN3-3 站外, 其他站位与球形棕囊藻囊体伴生的浮游植物优势种较为单一, 如 P4 站 2 月的主要优势种为笔尖形根管藻(丰度占比 95.65%)、ZN1-5 站 3 月的主要优势种为菱形藻(丰度占比 61.77%)、ZN2-2 站 1 月的主要优势种为细弱海链藻(丰度占比 85.15%)、ZN3-5 站 4 月的主要优势种为浮动弯角藻(*Eucampia zodiacus*) (丰度占比 70.36%), 这导致浮游植物群落的多样性指数偏低。在 ZN3-3 站囊体丰度从 12 月到 2 月骤增, 但浮游植物群落多样性指数保持较高水平, 几种优势种丰度占比相差较小。

### 3 讨论

#### 3.1 球形棕囊藻囊体的时空分布与环境因子的关系

3.1.1 水温 球形棕囊藻是广温性藻类, 低温能促进球形棕囊藻囊体的形成, 而高温会增加游离单细胞的比例, 不利于囊体的形成(王小冬, 2010; 田晶晶, 2010), 本研究中囊体丰度与水温的显著负相关也

表 3 广西北部湾球形棕囊藻囊体丰度与环境因子的 Spearman 秩相关分析

Tab.3 Spearman correlation analysis between *P. globosa* colony abundance and environmental factors in Beibu Gulf, Guangxi, South China Sea

	区域 I	区域 II	区域 III	区域 IV	调查海域
水温(°C)	-0.475**	-0.239	-0.26	0.038	-0.204**
盐度	-0.246	0.491**	-0.088	0.169	0.118
叶绿素 a(μg/L)	0.259	0.155	0.165	0.350*	0.203**
溶解氧(mg/L)	0.470**	0.412**	-0.045	0.371*	0.330**
硝酸盐(μmol/L)	0.161	-0.172	-0.054	-0.544**	-0.073
磷酸盐(μmol/L)	-0.299*	-0.438**	-0.182	-0.620**	-0.344**
硅酸盐(μmol/L)	-0.098	-0.586**	-0.139	-0.666**	-0.416**

注: \*\*表示  $P < 0.01$  水平下极显著相关; \*表示  $P < 0.05$  水平下显著相关; 其他均为  $P > 0.05$ , 相关性不显著

表 4 典型站位浮游植物的种类组成

Tab.4 Phytoplankton composition in typical stations

	硅藻		甲藻		蓝藻		硅鞭藻		合计	
	属	种	属	种	属	种	属	种	属	种
12 月	32	76	7	15	1	1	1	1	41	93
1 月	31	70	7	19	1	1			39	90
2 月	34	76	7	16	1	1			42	93
3 月	28	57	5	15	1	1			34	73
4 月	30	57	6	16	1	1	1	1	38	75
6 月	32	78	8	20	1	1			41	99
全部航次	43	108	10	30	1	1	1	1	55	140

表 5 典型站位的浮游植物优势种  
Tab.5 Dominant phytoplankton in typical stations

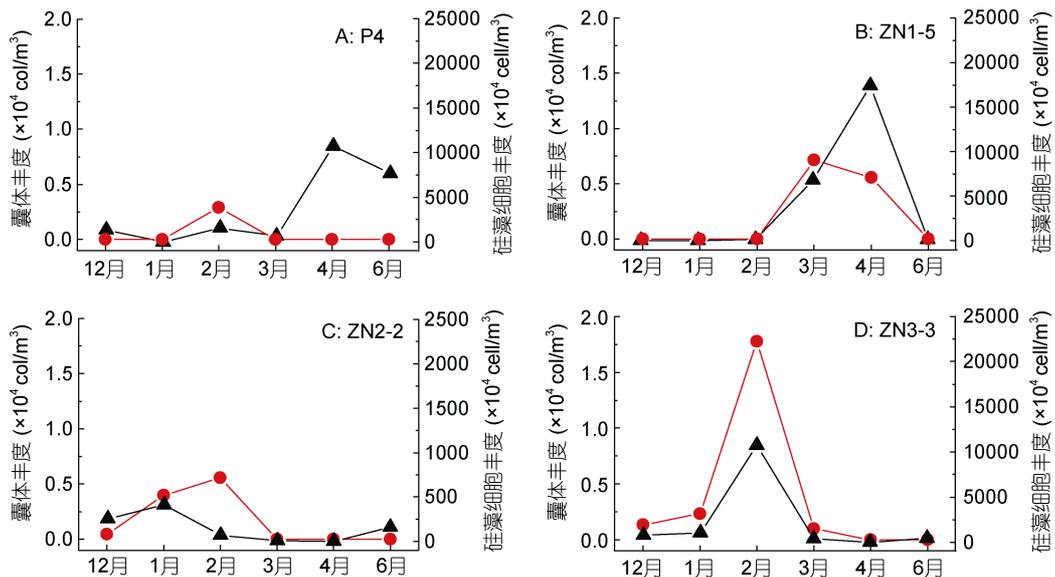
调查月份	种名	丰度比例(%)	频率 $f_i$	优势度 $Y$	
2016 年 12 月	角毛藻	<i>Chaetoceros</i> sp.	25.24	0.86	0.2163
	伏氏海线藻	<i>Thalassionema frauenfeldii</i>	14.11	1.00	0.1411
	菱形海线藻	<i>Thalassionema nitzschioides</i>	16.05	0.86	0.1376
	并基角毛藻	<i>Chaetoceros decipiens</i>	12.53	0.86	0.1074
	骨条藻	<i>Skeletonema</i> sp.	5.94	0.86	0.0509
	尖刺伪菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	4.11	1.00	0.0411
	新月柱鞘藻	<i>Cylindrotheca closterium</i>	4.73	0.71	0.0338
	布氏双尾藻	<i>Ditylum brightwellii</i>	2.61	0.86	0.0224
	细弱海链藻	<i>Thalassiosira subtilis</i>	72.36	0.57	0.4135
	2017 年 1 月	角毛藻	<i>Chaetoceros</i> sp.	5.44	0.71
派格棍形藻		<i>Bacillaria paxillifera</i>	2.95	0.71	0.0211
2017 年 2 月	角毛藻	<i>Chaetoceros</i> sp.	18.46	0.86	0.1582
	浮动弯角藻	<i>Eucampia zodiacus</i>	16.54	0.86	0.1418
	菱形海线藻	<i>Thalassionema nitzschioides</i>	12.29	0.86	0.1053
	细弱海链藻	<i>Thalassiosira subtilis</i>	12.15	0.57	0.0694
	新月柱鞘藻	<i>Cylindrotheca closterium</i>	7.27	0.86	0.0623
	笔尖形根管藻	<i>Rhizosolenia styliformis</i>	8.54	0.57	0.0488
	菱形藻	<i>Nitzschia</i> spp.	42.66	0.57	0.2438
	细弱海链藻	<i>Thalassiosira subtilis</i>	24.90	0.86	0.2134
2017 年 3 月	角毛藻	<i>Chaetoceros</i> sp.	10.13	1.00	0.1013
	笔尖形根管藻	<i>Rhizosolenia styliformis</i>	6.05	0.57	0.0346
	印度角毛藻	<i>Chaetoceros indicum</i>	3.70	0.57	0.0212
	角毛藻	<i>Chaetoceros</i> sp.	39.71	0.71	0.2836
2017 年 4 月	细弱海链藻	<i>Thalassiosira subtilis</i>	34.05	0.57	0.1945
	浮动弯角藻	<i>Eucampia zodiacus</i>	15.07	0.29	0.0431
	洛氏菱形藻	<i>Nitzschia lorenziana</i>	4.78	0.86	0.0410
	柔弱伪菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	39.09	0.71	0.2792
	角毛藻	<i>Chaetoceros</i> sp.	19.50	0.86	0.1671
2017 年 6 月	菱形海线藻	<i>Thalassionema nitzschioides</i>	10.87	0.86	0.0932
	尖刺伪菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	12.79	0.43	0.0548
	环纹劳德藻	<i>Lauderia annulata</i>	3.35	1.00	0.0335

表 6 典型站位甲藻优势种  
Tab.6 Dominant heterotrophic dinoflagellates in typical stations

调查月份	种名	占甲藻丰度比例(%)	频率 $f_i$	占甲藻优势度 $Y$	
2016 年 12 月	叉状角藻	<i>Ceratium furca</i>	30.57	0.71	0.2183
	夜光藻	<i>Noctiluca scintillans</i>	15.67	0.43	0.0671
	原多甲藻	<i>Protoperdinium</i> sp.	10.50	0.57	0.0600
	具尾鳍藻	<i>Dinophysis caudata</i>	9.14	0.57	0.0522
	三角角藻	<i>Ceratium tripos</i>	3.76	0.57	0.0215
	梭状角藻	<i>Ceratium fusus</i>	4.80	0.43	0.0206
	波状角藻	<i>Ceratium trichoceros</i>	24.89	0.71	0.1778
	2017 年 1 月	叉状角藻	<i>Ceratium furca</i>	18.48	0.57
夜光藻		<i>Noctiluca scintillans</i>	17.09	0.57	0.0976

续表

调查月份	种名	占甲藻丰度比例(%)	频率 $f_i$	占甲藻优势度 $\gamma$	
2017 年 2 月	海洋原多甲藻	<i>Protoperdinium oceanicum</i>	9.01	1.00	0.0901
	三角角藻	<i>Ceratium tripos</i>	10.40	0.86	0.0891
	梭状角藻	<i>Ceratium fusus</i>	5.91	0.43	0.0253
	夜光藻	<i>Noctiluca scintillans</i>	43.17	0.57	0.2467
	具尾鳍藻	<i>Dinophysis caudata</i>	14.03	0.43	0.0601
	海洋原多甲藻	<i>Protoperdinium oceanicum</i>	8.79	0.43	0.0377
	叉状角藻	<i>Ceratium furca</i>	8.54	0.43	0.0366
	波状角藻	<i>Ceratium trichoceros</i>	5.71	0.57	0.0326
	梭状角藻	<i>Ceratium fusus</i>	7.09	0.43	0.0304
	夜光藻	<i>Noctiluca scintillans</i>	31.11	0.57	0.1778
2017 年 3 月	叉状角藻	<i>Ceratium furca</i>	17.30	0.86	0.1483
	具尾鳍藻	<i>Dinophysis caudata</i>	17.57	0.71	0.1255
	三角角藻	<i>Ceratium tripos</i>	13.14	0.86	0.1126
	低顶角藻	<i>Ceratium humile</i>	7.19	0.71	0.0514
	叉状角藻	<i>Ceratium furca</i>	25.35	1.00	0.2535
	夜光藻	<i>Noctiluca scintillans</i>	26.04	0.57	0.1488
	具尾鳍藻	<i>Dinophysis caudata</i>	10.70	0.71	0.0765
	海洋原多甲藻	<i>Protoperdinium oceanicum</i>	13.09	0.57	0.0748
2017 年 4 月	梭状角藻	<i>Ceratium fusus</i>	8.70	0.86	0.0746
	波状角藻	<i>Ceratium trichoceros</i>	5.26	0.71	0.0376
	三角角藻	<i>Ceratium tripos</i>	3.64	0.57	0.0208
	叉状角藻	<i>Ceratium furca</i>	16.00	0.86	0.1372
	梭状角藻	<i>Ceratium fusus</i>	10.56	0.86	0.0905
	裸甲藻	<i>Gymnodinium sp.</i>	4.63	0.86	0.0397
2017 年 6 月	原多甲藻	<i>Protoperdinium sp.</i>	3.85	0.57	0.0220
	海洋原多甲藻	<i>Protoperdinium oceanicum</i>	3.59	0.57	0.0205



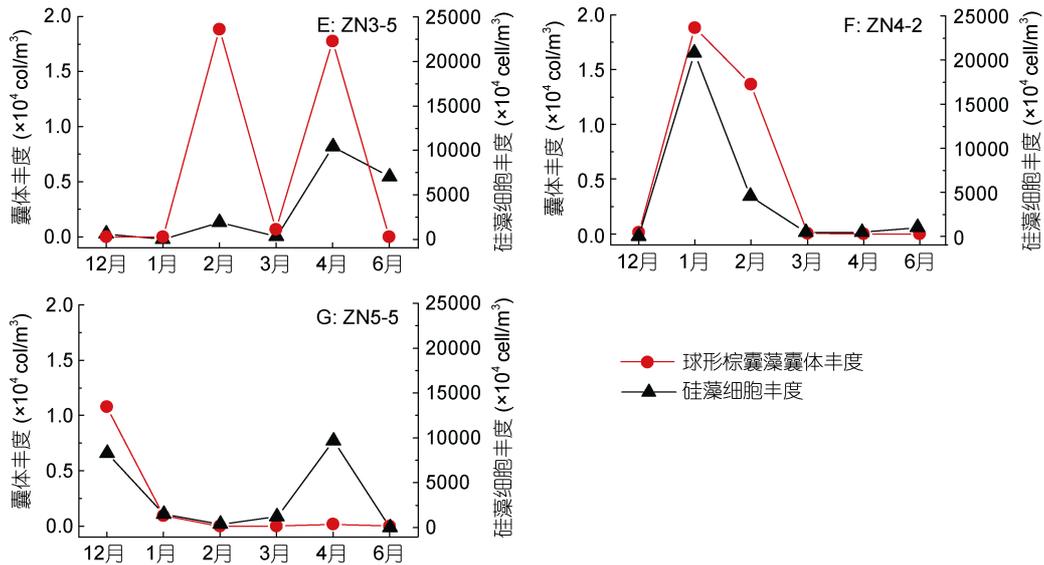


图9 广西北部湾典型站位球形棕囊藻囊体和硅藻细胞丰度的月际变化

Fig.9 Monthly variation of *P. globosa* colony and diatom cell abundance in typical station in Beibu Gulf, Guangxi, South China Sea

验证了这一点(表 3)。球形棕囊藻赤潮主要在我国东南沿海暴发, 赤潮期间水温一般介于 15—27°C (陈菊芳等, 1999; 徐宁等, 2003; 田晶晶, 2010; 李波等, 2015)。本次调查中, 1 月至 3 月水温介于 15.79—23.98°C, 平均值为 20.10±1.46°C, 水温较低且相对稳定, 利于囊体的形成, 囊体丰度最大值出现在 3 月的 ZN2-4 站(表底水温均值 20.88°C)。6 月水温平均值为 28.74°C, 但在该月航次雷州半岛西部海域少数站位 (ZN2-5 站水温低值 28.88°C、ZN2-4 站水温低值 28.78°C、ZN3-4 站平均水温 29.01°C、ZN4-3 站平均水温 29.09°C) 仍然残留极少量囊体, 这说明了水温在该区域不是主要影响因素。

**3.1.2 盐度** 球形棕囊藻为广盐种, 室内实验发现其可以在较宽的盐度范围内(23—33)形成囊体(田晶晶, 2010)。在防城港—钦州湾外水域(区域 ), 囊体丰度与盐度呈显著正相关( $P < 0.01$ , 表 3), 冬季钦州湾入海径流量较小, 盐度维持在较高水平(1 月盐度均值 30.41, 2 月盐度均值 31.09), 可能为囊体的形成提供了适宜的条件。在高盐的西南海域虽然也有囊体存在, 但其丰度明显低于低盐的近岸海域(图 7), 这说明适宜的盐度是球形棕囊藻囊体大量形成的基础。

**3.1.3 叶绿素 *a*** Wang 等(2011)室内实验发现当硝酸盐作为主要氮源时, 球形棕囊藻对水体叶绿素 *a* 的贡献处于较高水平, 且在很长时间内趋于稳定; Riegman 等(1992)发现北海(the North Sea)沿岸的棕囊藻赤潮引起了叶绿素 *a* 浓度的升高。本研究球形棕

囊藻囊体丰度高值区与叶绿素 *a* 浓度高值区存在良好的对应关系(图 4, 图 7), 相关性分析也表明囊体丰度与叶绿素 *a* 浓度呈显著正相关( $P < 0.01$ , 表 3), 这与 Poulton 等(2007)调查结果一致。

**3.1.4 溶解氧** 本次调查中, 在球形棕囊藻囊体丰度最高的 3 月, 溶解氧介于 6.88—9.78mg/L, 与历史报道中棕囊藻赤潮期间溶解氧的水平相当(陈菊芳等, 1999; 李波等, 2015)。相关性分析显示囊体丰度与溶解氧呈显著正相关( $P < 0.01$ , 表 3), 球形棕囊藻囊体丰度较高时水体溶解氧含量也升高; 而当囊体数量减少甚至消失时, 溶解氧含量也处于较低水平, 可能与囊体的老化分解有关。例如: ZN3-5 站在 1 月中未出现囊体, 水体溶解氧含量为 6.86mg/L; 2 月囊体丰度升至  $1.88 \times 10^4$  col/m<sup>3</sup>, 溶解氧含量升高至 8.66mg/L; 3 月随着囊体丰度降低至  $0.07 \times 10^4$  col/m<sup>3</sup>, 溶解氧含量也降低到 7.76mg/L。

**3.1.5 硝酸盐** Riegman 等(1992)发现在氮限制条件下依然有囊体存在, 指出自然环境中棕囊藻可能会随着水体中氮源的增加而暴发赤潮。相关研究表明硝酸盐是北海(the North Sea)球形棕囊藻暴发赤潮期间的主要氮源, 硝酸盐时空分布与春季棕囊藻赤潮关系密切(Riegman *et al.*, 1992; Lancelot *et al.*, 2007)。室内实验也表明棕囊藻囊体形成对氮源需求具有专一性, 硝酸盐是其囊体形成的基础, 而且在硝酸盐作为主要氮源条件下囊体细胞生长速率明显高于游离单细胞(Wang *et al.*, 2011)。另外, 在棕囊藻培养基中

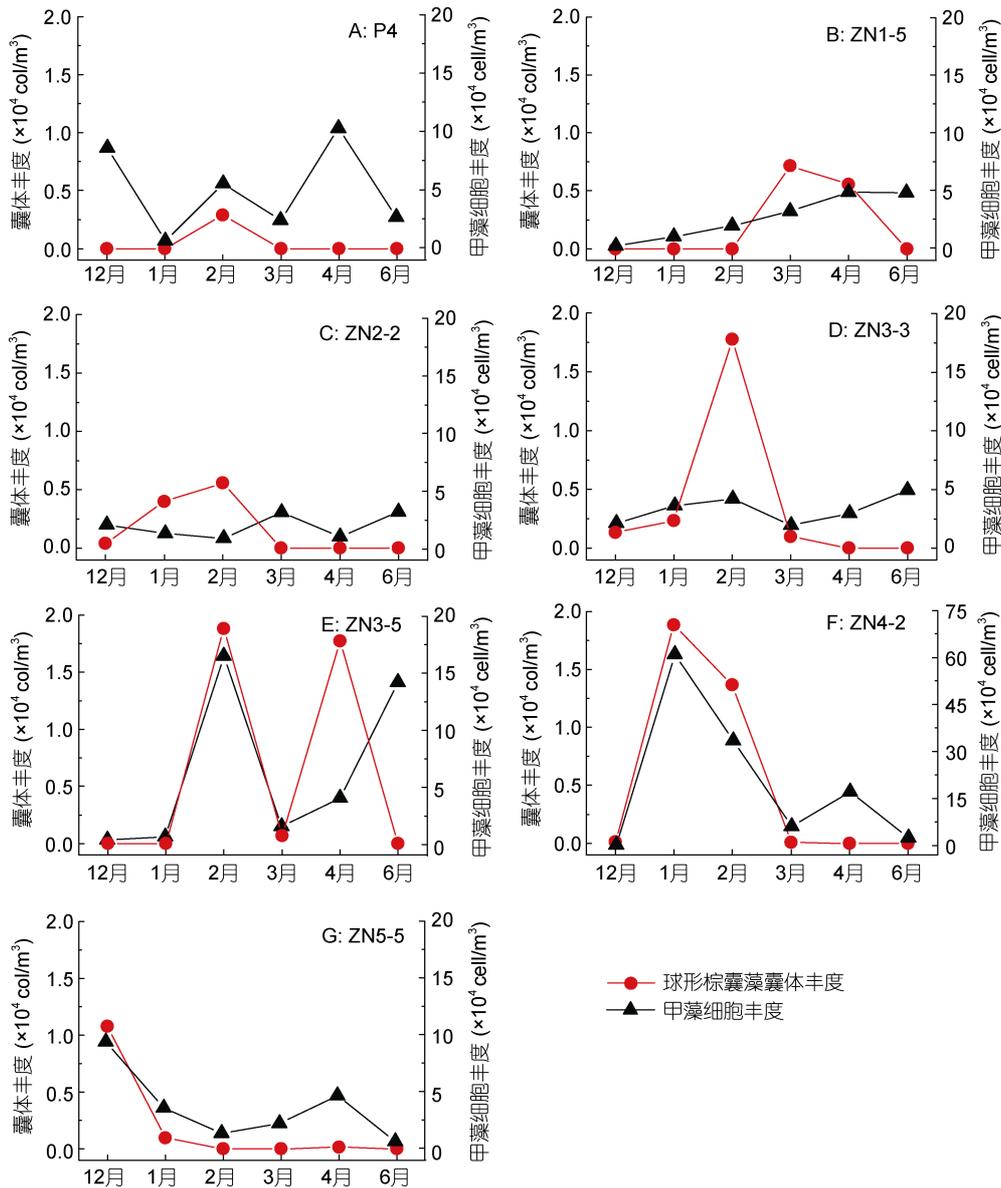


图 10 广西北部湾典型站位球形棕囊藻囊体和甲藻细胞丰度的月际变化

Fig.10 Monthly variation of *P. globosa* colony and dinoflagellate cell abundance in typical station in Beibu Gulf, Guangxi, South China Sea

添入硝酸盐会增加藻细胞对外源硝酸盐的吸收,从而提高藻细胞密度,当硝酸盐含量超过  $7.24\mu\text{mol/L}$  时棕囊藻细胞生长较快,但在硝酸盐含量在  $3.62\mu\text{mol/L}$  时藻细胞密度最大(王艳等, 2006)。本调查发现区域硝酸盐含量较高且月际变化明显(1月硝酸盐含量均值  $11.04\mu\text{mol/L}$ , 2月硝酸盐含量均值  $7.32\mu\text{mol/L}$ , 3月硝酸盐含量均值  $3.92\mu\text{mol/L}$ , 数据未发表),这说明较高的硝酸盐含量为囊体形成提供了营养盐基础,而在囊体形成过程中消耗水体硝酸盐,可能导致水体硝酸盐含量降低。

**3.1.6 磷酸盐** Riegman 等(1992)室内试验发现囊体在磷限制条件下不能形成, Cariou(1991)研究发现磷酸盐在  $0.5\text{--}1\mu\text{mol/L}$  范围内是棕囊藻囊体细胞成囊的必要条件。在本次调查中磷酸盐平均值为  $0.66\pm 0.12\mu\text{mol/L}$ (数据未发表),处于磷源需求范围内,这说明该海域磷酸盐不是球形棕囊藻囊体丰度分布的主要限制因子。相关性分析显示球形棕囊藻囊体丰度与磷酸盐呈显著负相关( $P<0.01$ , 表 3),原因可能是棕囊藻及伴生浮游植物消耗了水体磷酸盐。

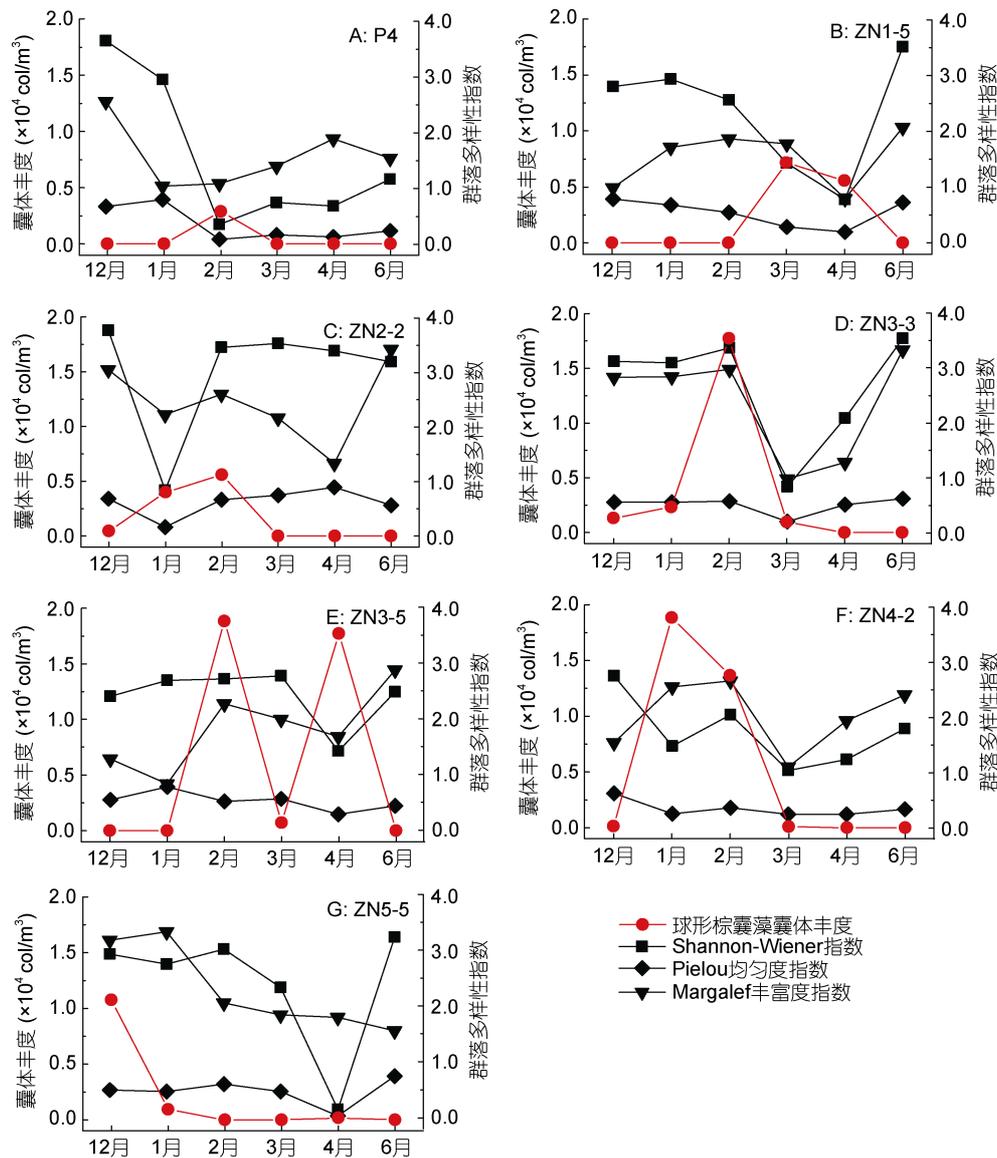


图 11 广西北部湾典型站位球形棕囊藻囊体丰度和浮游植物群落多样性指数的月际变化

Fig.11 Monthly variation of *P. globosa* colony abundance and community biodiversity index in typical station in Beibu Gulf, Guangxi, South China Sea

**3.1.7 硅酸盐** 伴生硅藻的大量繁殖同时也消耗了大量硅酸盐,致使水体硅酸盐含量降低,所以球形棕囊藻囊体丰度与硅酸盐呈显著负相关( $P < 0.01$ , 表 3)。因而推测球形棕囊藻囊体丰度与水体硅酸盐的关系主要是通过伴生硅藻间接产生的。在广西北部湾海域球形棕囊藻囊体丰度分布与水体营养盐存在着直接或间接关系,其相互影响机制需要更加细致深入的研究。

### 3.2 球形棕囊藻成囊与伴生浮游植物的关系

棕囊藻赤潮消长过程中伴生浮游植物多为较大型硅藻(如笔尖形根管藻、中华盒形藻等)和链状硅藻

(如伪菱形藻、海链藻、海线藻、角毛藻和骨条藻等)(Rousseau *et al.*, 1994; 徐宁等, 2003; Poulton *et al.*, 2007; 王超等, 2010)。本次调查中球形棕囊藻囊体丰度较高的 12 月至次年 4 月,浮游植物优势种全部为硅藻(表 5),与其他海域研究结果较为一致。Rousseau 等(1994)在棕囊藻赤潮现场发现囊体早期依附于某些角毛藻的角毛上,认为其能够为提供囊体附着基质,在囊体形成过程中扮演重要角色。棕囊藻囊体依附于硅藻的角毛或刺结构上更容易使其稳定悬浮于水体中(黎慧等, 2010),相对稳定的环境更有利于囊体的进一步形成。另外,球形棕囊藻与硅藻的伴生关系还

表现在营养物质相互利用, Sazhin 等(2007)研究表明囊体形成时会包埋某些硅藻, 硅藻在囊体形成初期可以为囊体细胞提供营养; 在囊体形成后期硅藻不仅仅利用囊体作为栖息地, 还会利用囊体多糖基质作为直接营养来源。

棕囊藻囊体在生态功能上与较大型、链状或群体硅藻相似, 在季节性水体中生态位较为相似, 硅藻与棕囊藻之间存在明显的竞争关系(徐宁等, 2003)。当水体硅酸盐含量充足时, 硅藻可能大量暴发成为主要优势种, 例如 2 月 ZN1-5 站硅酸盐达到  $12.60\mu\text{mol/L}$ , 菱形海线藻 (*Thalassionema nitzschioides*) 为主要优势种, 未在该站发现棕囊藻囊体; 3 月 P4 站硅酸盐达到  $15.40\mu\text{mol/L}$ , 笔尖形根管藻为主要优势种, 同样未发现棕囊藻囊体。

本次调查发现甲藻细胞丰度与囊体丰度变化较为一致(图 10)。球形棕囊藻囊体的形成虽然有利于抵制其他生物的摄食, 降低死亡率, 但是当环境发生变化时会出现棕囊藻单细胞逸出现象(Verity *et al.*, 1988)。异养甲藻具有摄食棕囊藻的能力, 其丰度会随着棕囊藻赤潮暴发而迅速增加(杨和福, 2004), 小型囊体及囊体逸出的单细胞可能成为甲藻的食物来源, 这就导致甲藻丰度在囊体丰度较高的月份处于较高水平。Grattepanche 等(2011)在研究英吉利海峡东岸海域棕囊藻赤潮暴发期间浮游植物群落结构时也发现了类似现象, 并认为异养甲藻是该区域棕囊藻和其他浮游植物的最主要消费者。Weisse 和 Scheffel Möser(1990)认为异养甲藻对棕囊藻牧食作用意义重大, 其中夜光藻(*Noctiluca scintillans*)是棕囊藻游离单细胞和囊体的主要消费者。而本研究也发现在囊体丰度较高的 2 月和 3 月甲藻优势种主要为夜光藻(表 6), 囊体则以小型囊体为主, 并存在少量直径超过 10mm 的较大型完整囊体(图 6), 小型囊体以及囊体逸出单细胞可能为夜光藻提供了充足的食物来源。对比图 9 和图 10 可以发现硅藻丰度变化与甲藻丰度变化基本相同, 尤其在未发现或存在极少量棕囊藻囊体的站位(4 月 P4 站和 ZN5-5 站; 6 月 ZN2-2 站和 ZN3-5 站)硅藻丰度与甲藻丰度均维持较高水平。甲藻自身生长率较低, 其需要相对较高的食物丰度来支撑自身生长(Hansen, 1992), 甲藻可以通过复杂的方式捕食硅藻(孙军等, 2011), 伴生硅藻的大量存在也可能为甲藻提供了充足的食物来源。因此推测在该海域球形棕囊藻囊体丰度与甲藻丰度的关系可能受球形棕囊藻自身及伴生硅藻丰度变化共同影响。

## 4 结论

(1) 球形棕囊藻囊体丰度介于  $0-4.09\times 10^4\text{col/m}^3$ , 囊体丰度较高的月份为 12 月至次年 3 月, 6 月在该区域也有极少量囊体出现。

(2) 球形棕囊藻囊体丰度在调查区西南水深较深海域棕囊藻囊体丰度呈现逐月递减趋势, 而广西近岸海域以及雷州半岛西部海域棕囊藻囊体丰度呈现先升高再降低的趋势。

(3) 球形棕囊藻囊体粒径以直径 1—5mm 的居多; 从月际变化看, 3 月份囊体粒径较大, 有较多直径 10—15mm 和少量直径 15—20mm 的囊体出现。

(4) 球形棕囊藻囊体丰度时空分布受多种物理海洋学过程和生物化学过程的综合影响, 其中水温是主要影响因素, 在局部区域丰富的硝酸盐可能为囊体形成提供了营养盐基础。

(5) 球形棕囊藻囊体丰度与其他浮游植物细胞丰度变化趋势相同, 而与群落多样性指数变化趋势相反。

致谢 自然资源部第二海洋研究所管卫兵研究员提供温度和盐度数据, 中国科学院海洋研究所俞志明研究员提供溶解氧和营养盐数据, 谨致谢忱。

## 参 考 文 献

- 王 艳, 唐海溶, 蒋 磊等, 2006. 硝酸盐对球形棕囊藻生长和硝酸还原酶活性的影响. 植物学报, 23(2): 138—144
- 王 超, 李新辉, 赖子尼等, 2010. 珠江口球形棕囊藻 (*Phaeocystis globosa*) 赤潮后期的浮游植物群落结构特征研究. 生态科学, 29(2): 140—146
- 王小冬, 2010. 棕囊藻囊体形成及对环境压力的响应. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 55—73
- 田晶晶, 2010. 环境因子对球形棕囊藻细胞群体形成的影响. 广州: 暨南大学硕士学位论文, 9—43
- 齐雨藻, 徐 宁, 王 艳等, 2002. 中国赤潮研究的新进展——球形棕囊藻赤潮及其产硫的研究. 中国基础科学, (4): 23—28
- 孙 军, 刘东艳, 2002. 中国海区常见浮游植物种名更改初步意见. 海洋与湖沼, 33(3): 271—286
- 孙 军, 郭术津, 2011. 甲藻的异养营养型. 生态学报, 31(20): 6270—6286
- 李 波, 蓝文陆, 李天深等, 2015. 球形棕囊藻赤潮消亡过程环境因子变化及其消亡原因. 生态学杂志, 34(5): 1351—1358
- 杨和福, 2004. 棕囊藻的生物学概述 I. 形态分类和生理生态学. 东海海洋, 22(1): 49—63
- 陈振华, 2013. 北部湾环流季节变化的数值模拟与动力机制分析. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 30—69
- 陈菊芳, 徐 宁, 江天久等, 1999. 中国赤潮新记录种——球形棕囊藻 (*Phaeocystis globosa*). 暨南大学学报(自然科学

- 与医学版), 20(3): 124—270
- 罗金福, 李天深, 蓝文陆, 2016. 北部湾海域赤潮演变趋势及防控思路. 环境保护, 44(20): 40—42
- 金德祥, 陈金环, 黄凯歌等, 1965. 中国海洋浮游硅藻类. 上海: 上海科学技术出版社
- 徐 宁, 齐雨藻, 陈菊芳等, 2003. 球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa* Scherffel)赤潮成因分析. 环境科学学报, 23(1): 113—118
- 高东阳, 李纯厚, 刘广锋等, 2001. 北部湾海域浮游植物的种类组成与数量分布. 广东海洋大学学报, 21(3): 13—18
- 覃仙玲, 赖俊翔, 陈 波等, 2016. 棕囊藻北部湾株的 18S rDNA 分子鉴定. 热带亚热带植物学报, 24(2): 176—181
- 黎 慧, 高春蕾, 王小冬等, 2010. 小角毛藻对球形棕囊藻囊体形成的影响. 海洋科学进展, 28(1): 57—63
- Baumann M E M, Lancelot C, Brandini F P *et al*, 1994. The taxonomic identity of the cosmopolitan prymnesiophyte *Phaeocystis*: a morphological and ecophysiological approach. Journal of Marine Systems, 5(1): 5—22
- Cariou V, 1991. Etude des mécanismes de formation des colonies de *Phaeocystis*: influence des phosphates. DEA Thesis, University of Pierre et Marie Curie, Paris, 6—41
- Grattepanche J D, Breton E, Brylinski J M *et al*, 2011. Succession of primary producers and micrograzers in a coastal ecosystem dominated by *Phaeocystis globosa* blooms. Journal of Plankton Research, 33(1): 37—50
- Hansen P J, 1992. Prey size selection, feeding rates and growth dynamics of heterotrophic dinoflagellates with special emphasis on *Gyrodinium spirale*. Marine Biology, 114(2): 327—334
- Lancelot C, Gypens N, Billen G *et al*, 2007. Testing an integrated river-ocean mathematical tool for linking marine eutrophication to land use: The *Phaeocystis*-dominated Belgian coastal zone (Southern North Sea) over the past 50 years. Journal of Marine Systems, 64(1—4): 216—228
- Poulton A J, Moore C M, Seeyave S *et al*, 2007. Phytoplankton community composition around the Crozet Plateau, with emphasis on diatoms and *Phaeocystis*. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 54(18—20): 2085—2105
- Riegman R, Noordeloos A A M, Cadée G C, 1992. *Phaeocystis* blooms and eutrophication of the continental coastal zones of the North Sea. Marine Biology, 112(3): 479—484
- Rousseau V, Vaulot D, Casotti R *et al*, 1994. The life cycle of *Phaeocystis* (Prymnesiophyceae): evidence and hypotheses. Journal of Marine Systems, 5(1): 23—39
- Sazhin A F, Artigas L F, Nejstgaard J C *et al*, 2007. The colonization of two *Phaeocystis* species (Prymnesiophyceae) by pennate diatoms and other protists: a significant contribution to colony biomass. Biogeochemistry, 83(1—3): 137—145
- Schoemann V, Becquevort S, Stefels J *et al*, 2005. *Phaeocystis* blooms in the global ocean and their controlling mechanisms: a review. Journal of Sea Research, 53(1—2): 43—66
- Timothy P, Yoshiaki M, Carol M L, 1984. A manual of chemical and biological methods for sea water analysis. Pergamon Press, 395: 475—490
- Verity P G, Villareal T A, Smayda T J, 1988. Ecological investigations of blooms of colonial *Phaeocystis pouchetti*. II. The role of life-cycle phenomena in bloom termination. Journal of Plankton Research, 10(4): 749—766
- Wang X D, Wang Y, Smith W O Jr, 2011. The role of nitrogen on the growth and colony development of *Phaeocystis globosa* (Prymnesiophyceae). European Journal of Phycology, 46(3): 305—314
- Weisse T, Scheffel-Möser U, 1990. Growth and grazing loss rates in single-celled *Phaeocystis* sp. (Prymnesiophyceae). Marine Biology, 106(1): 153—158

## THE SPATIAL-TEMPERAL DISTRIBUTION OF *PHAEOCYSTIS GLOBOSA* COLONIES AND RELATED AFFECTING FACTORS IN GUANGXI BEIBU GULF

HE Cheng<sup>1,2,3,4</sup>, SONG Shu-Qun<sup>1,2,4</sup>, LI Cai-Wen<sup>1,2,3,4</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

**Abstract** We investigated the spatial-temporal distribution of *Phaeocystis globosa* colonies in monthly cruise from December 2016 to June 2017 in Beibu Gulf, Guangxi, South China Sea, and analyzed the correlation between *P. globosa* colonies and environmental factors. Results show that *P. globosa* colony abundance was between 0 and  $4.09 \times 10^4$  col/m<sup>3</sup>, and the *P. globosa* colonies were abundant from December 2016 to March 2017. The colony abundance decreased month by month in the southwestern part of the investigation area, while fluctuated in the coastal waters of Guangxi and the western waters of Leizhou Peninsula. Correlation analysis colicated that colony abundance was correlated negatively with temperature, phosphate, and silicate ( $P < 0.01$ ), and positively with chlorophyll *a* and dissolved oxygen ( $P < 0.01$ ) in the study area. A significant positive correlation was found between colony abundance and salinity ( $P < 0.01$ ) in Region II of the study area and a significant negative correlation between coloney abundance and nitrate ( $P < 0.01$ ) in Region IV. The trend of colony abundance coincided with the abundance of other phytoplanktons, but was contrary to the trend of community diversity colex in some stations. Overall, the spatial-temporal distribution of *P. globosa* colonies varied with environment conditions and structures of other phytoplankton communities.

**Key words** Beibu Gulf; *Phaeocystis globosa*; colonies; spatial-temporal distribution; environmental factors; phytoplankton