

泉州湾赤潮藻类优势种演替影响因子探讨*

江兴龙^{1,2} 宋立荣¹

(1. 中国科学院水生生物研究所 武汉 430072; 2. 集美大学 厦门 361021)

提要 于 2006 年 5—11 月对东海泉州湾赤潮监控区设定 4 个采样站位, 进行赤潮常规监测。结果表明, 泉州湾藻类优势种由中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、太平洋海链藻(*Thalassiosira pacifica*)、微小原甲藻(*Prorocentrum minimum*)、尖刺拟菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens*)、丹麦细柱藻(*Leptocylindrus danicus*)及旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)等赤潮生物组成, 虽然中肋骨条藻为最主要的优势种, 但有 3 个站位出现了上述优势种的演替。通过深入分析该海域水质营养盐含量及组成结构的动态变化对赤潮藻类优势种演替的影响, 发现由于不同的赤潮藻类种群具有各自的生态习性及其适应环境的生长增殖策略, 海域水质营养盐含量和组成结构的变化, 会引起赤潮藻类种群增殖竞争力间强弱的相对变化, 而种群增殖竞争力强的种类有可能迅速增殖取代原有的优势种而演替为新的优势种, 这是一个动态的过程。

关键词 泉州湾, 赤潮监测, 赤潮生物, 营养盐, 优势种演替

中图分类号 X834, X173

赤潮已成为制约海洋可持续发展的严重环境问题之一, 引起了全球广泛关注(Zingone *et al.*, 2000; Batoreu *et al.*, 2005)。赤潮频发的原因中, 一般认为最重要的是人类活动所带来的水体富营养化, 即氮磷含量增高为赤潮的发生提供了物质条件(Hodgkiss *et al.*, 1997; Hallegraef, 1993; Zou *et al.*, 2001; Huang *et al.*, 2003)。然而, 富营养化并不等同于赤潮, 赤潮的发生机制非常复杂, 包括其他物理、化学、生物和气候等各方面的作用及相互作用, 每一类赤潮生物与环境因子的相互关系各不相同, 有他们自身的特点, 所以赤潮发生机制的研究目前已成为各国科学家研究的热点(周名江等, 2001)。海洋浮游微藻是引发赤潮的主要生物, 在 4000 多种海洋浮游微藻中有 260 多种能形成赤潮, 其中有 70 多种能产生毒素。形成赤潮的浮游藻类以甲藻类和硅藻类所占的种类最多(周名江, 1999; 邹景忠, 1992; 石岩峻, 2004¹⁾)。至

今人们还无法解释为什么在一定条件下是某种藻类, 而不是其它藻类会爆发性大量繁殖并形成赤潮(石岩峻, 2004¹⁾)。通过比较不同种类之间的赤潮藻对营养盐的需求特性, 可以更深入地了解赤潮藻的种群动力学(Trigueros *et al.*, 2001; 洪君超等, 1994; 霍文毅等, 2001)。不同海域因其地理环境和各种水文气象条件的差异, 营养盐的含量和组成结构各有特征, 表现出对浮游植物生长繁殖的影响和制约因素也差别很大(石岩峻, 2004¹⁾)。随着经济的发展, 我国沿海赤潮频发, 尤其是东海在中国四大海区中赤潮发生情况最严重, 赤潮发生数占全国总赤潮数的 45%, 而且爆发的时间和面积也在不断变长变大, 危害加重(王修林等, 2004)。东海泉州湾的赤潮研究至今未见报道。

作者于 2006 年 5—11 月首次对东海泉州湾赤潮监控区开展赤潮常规监测, 通过分析该海域赤潮藻类优势种种群增殖竞争力与水质营养盐含量及组成

* 福建省海洋与渔业局重点项目赤潮监测专项经费资助, 闽海渔函 200677 号; NSFC-云南联合基金: 滇池蓝藻水华时空演替及驱动机制研究项目资助, U0833604 号; 中国科学院重大交叉项目: 富营养化水体蓝藻水华发生与致灾的关键过程及其监测指标体系项目资助, KZCX1-YW-14-1 号。江兴龙, 博士, 博士后, 副教授, E-mail: xinlongjiang@hotmail.com

1) 石岩峻, 2004. 赤潮藻对营养盐的吸收及生长和相关特性研究. 北京化工大学博士学位论文

通讯作者: 宋立荣, 研究员, 博导, E-mail: LRSong@ihb.ac.cn

收稿日期: 2008-10-29, 收修改稿日期: 2008-12-27

结构间的关系,探讨影响赤潮藻类优势种演替的主要因素,从而为赤潮的预报预警提供参考。

1 研究区域与方法

1.1 地点

东海泉州湾地处福建东南沿海,位于 118°46'51"—118°50'03"E, 24°46'18"—24°51'33"N,海湾面积 189.0km²,水面面积 138.5km²,滩涂面积 88km²。泉州湾是晋江入海口,北侧还有洛阳江流入,年均径流量 1.63 × 10⁶ m³。这些水系的注入为泉州湾带来大量有机质和营养盐(卢振彬等, 2005)。

1.2 监测站位、时段及频率

在泉州湾赤潮多发海域(赤潮监控区)布设了 4 个监测站位: S1(坐标 118°39'37"E、24°49'18"N), S2(坐标 118°40'42"E、24°51'43"N), S3(坐标 118°43'21"E、24°50'20"N), S4(坐标 118°48'26"E、24°51'16"N)。其中 S1 站位地处晋江入海口区, S2 站位地处洛阳江入海的河口区。监测时段为 5—10 月。监测频率为每月 2 次。

1.3 常规监测主要项目及分析方法

水文要素 表层水温: 表层水温表法, 透明度: 目视法(国家海洋局, 1998a)。

气象要素 风速、风向、气压、气温、光照(晴天, 阴天)(国家海洋局, 1991)。

水化学要素 pH 值: pH 计法、盐度: 盐度计法、溶解氧: 碘量法、叶绿素 *a*: 分光光度法、化学需氧量: 碱性高锰酸钾法、活性磷酸盐: 磷钼蓝分光光度法、亚硝酸盐氮: 萘乙二胺分光光度法、硝酸盐氮: 锌镉还原法、氨氮: 靛酚蓝分光光度法、活性硅酸盐: 硅钼黄法(国家海洋局, 1998a)。

生物学要素 粪大肠菌群: 发酵法、弧菌: 平板计数法; 浮游植物细胞总数(cell/L)、优势种及细胞数量(cell/L): 个体计数法(国家海洋局, 1998b; 国家海洋局, 2005)。

1.4 水样采集

用有机玻璃采水器采集海水表层(水下 0.5m)水样。用于浮游植物定量分析的水样, 样品以 5%甲醛固定保存, 采用浓缩计数法对浮游植物进行定量计数。水样的采集、处理、按《海洋监测规范》执行(国家海洋局, 1998c)。

1.5 相关评价公式

营养指数(*E*)按式(1)计算:

$$E = \frac{COD \times \text{无机氮} \times \text{无机磷} \times 10^6}{4500} \quad (1)$$

式中, 单位以 mg/L 表示, 如 $E > 1$, 则水体呈富营养化状态(国家海洋局, 2005)。

有机污染评价指数(*A*)按式(2)计算:

$$A = \frac{COD}{COD_0} + \frac{DIN}{DIN_0} + \frac{DIP}{DIP_0} - \frac{DO}{DO_0} \quad (2)$$

式中: *COD*、*DIN*、*DIP* 和 *DO* 分别为水体中化学需氧量、溶解态无机氮、溶解态无机磷和溶解氧的实测浓度;

*COD*₀、*DIN*₀、*DIP*₀ 和 *DO*₀ 分别为水体的上述各项指标的评价标准, 其中: *COD*₀ = 3.0mg/L, *DIN*₀ = 0.10mg/L; *DIP*₀ = 0.015mg/L; *DO*₀ = 5.0mg/L。

如 $A > 4$, 则海域水质受到严重污染(国家海洋局, 2005)。

藻类优势度: 样品中某种藻类的细胞密度(细胞数量/L)占样品中总藻类细胞密度(细胞数量/L)的比值。

1.6 数据统计分析

应用 SAS 软件(V9.1, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.)进行数据统计分析, 应用单因素方差分析(Duncan 多重比较), 进行多组数据间的显著差异检验; 取 $P < 0.05$ 为显著差异, $P < 0.01$ 为极显著差异。

2 结果与讨论

2.1 浮游植物优势种的组成

各站位的浮游植物优势种, 以各站位每航次监测所采水样中, 浮游植物的第一优势种的种类组成(表 1)。其中, S1 站位优势种为中肋骨条藻 [*Skeletonema costatum* (Greville) Cleve 1900]; S2 站位的优势种有中肋骨条藻、太平洋海链藻 (*Thalassiosira pacifica* Gran & Angst 1931)、微小原甲藻 [*Prorocentrum minimum* (Pavillard) Schiller 1933]; S3 站位的优势种有中肋骨条藻和太平洋海链藻; S4 站位的优势种有中肋骨条藻; 尖刺拟菱形藻 [*Pseudo-nitzschia pungens* (Grunow & Cleve) Hasle 1965]; 丹麦细柱藻 (*Leptocylindrus danicus* Cleve 1889); 旋链角毛藻 (*Chaetoceros curvisetus* Cleve 1889); 湾平均值的优势种为中肋骨条藻。

根据《赤潮监测技术规程》(国家海洋局, 2005), 上述四个站位及湾平均值的浮游植物优势种均属于赤潮生物。

2.2 赤潮藻类优势种群的时空演替

据表 1 可知, S1 站位的优势种始终为中肋骨条藻, 未发生其它种的演替; S2 站位的优势种主要为中肋骨条藻, 但在 5 月和 9 月分别出现了太平洋海链藻及微小原甲藻优势种的演替。中肋骨条藻细胞密度达

表 1 各站位浮游植物优势种及其优势度
Tab.1 Dominant phytoplankton species and their dominance

| 采样日期(月.日) | S1 优势种 | 优势度(%) | S2 优势种 | 优势度(%) | S3 优势种 | 优势度(%) | S4 优势种 | 优势度(%) |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 05.08 | 中肋骨条藻 | 37.2 | 太平洋海链藻 | 57.1 | 太平洋海链藻 | 53.2 | 中肋骨条藻 | 48.1 |
| 05.22 | 中肋骨条藻 | 86.1 | 中肋骨条藻 | 95.8 | 中肋骨条藻 | 91.6 | 中肋骨条藻 | 93.9 |
| 06.06 | 中肋骨条藻 | 72.2 | 中肋骨条藻 | 75.6 | 中肋骨条藻 | 81.2 | 中肋骨条藻 | 35.2 |
| 06.21 | 中肋骨条藻 | 76.5 | 中肋骨条藻 | 36.6 | 中肋骨条藻 | 73.4 | 尖刺拟菱形藻 | 8.8 |
| 07.03 | 中肋骨条藻 | 99.7 | 中肋骨条藻 | 99.8 | 中肋骨条藻 | 99.7 | 中肋骨条藻 | 87.4 |
| 07.20 | 中肋骨条藻 | 96.8 | 中肋骨条藻 | 98.0 | 中肋骨条藻 | 98.8 | 中肋骨条藻 | 97.7 |
| 08.01 | 中肋骨条藻 | 99.5 | 中肋骨条藻 | 98.6 | 中肋骨条藻 | 98.9 | 中肋骨条藻 | 95.9 |
| 08.21 | 中肋骨条藻 | 74.0 | 中肋骨条藻 | 97.2 | 中肋骨条藻 | 98.9 | 中肋骨条藻 | 94.7 |
| 09.04 | 中肋骨条藻 | 54.2 | 中肋骨条藻 | 44.4 | 中肋骨条藻 | 46.2 | 中肋骨条藻 | 61.0 |
| 09.21 | 中肋骨条藻 | 54.2 | 微小原甲藻 | 42.8 | 中肋骨条藻 | 46.7 | 中肋骨条藻 | 76.9 |
| 10.08 | 中肋骨条藻 | 50.0 | 中肋骨条藻 | 45.8 | 中肋骨条藻 | 56.8 | 丹麦细柱藻 | 39.4 |
| 10.19 | 中肋骨条藻 | 41.5 | 中肋骨条藻 | 45.8 | 中肋骨条藻 | 51.6 | 旋链角毛藻 | 37.6 |
| 平均值 | 中肋骨条藻 | 70.0 | 中肋骨条藻 | 68.0 | 中肋骨条藻 | 74.0 | 中肋骨条藻 | 61.0 |

注: 优势度为优势种群细胞密度占总藻类细胞密度的百分比(%)

10^7 个/L 时, 即可判断为赤潮(国家海洋局, 2005)。在 6 月底至 7 月中旬, S2 站位发生了中肋骨条藻赤潮(细胞密度达 1.80×10^7 个/L); S3 站位的优势种主要为中肋骨条藻, 但在 5 月出现了太平洋海链藻优势种的演替, 在 7 月底至 8 月中旬, 发生了中肋骨条藻赤潮(细胞密度达 2.08×10^7 个/L); S4 站位的优势种主要为中肋骨条藻, 但在 6 月和 10 月分别出现了尖刺拟菱形藻、丹麦细柱藻及旋链角毛藻等优势种的演替。湾平均值的总体优势种是中肋骨条藻, 未达到赤潮细胞密度, 也未发生其它种的演替。

2.3 水质营养状态及污染评价

在 5—10 月, 除 7 月上旬外, 各站位及湾平均值的营养指数 E 均基本上都大于或等于 1。表明, 各站位及湾平均值的营养基本上都呈富营养化状态(国家海洋局, 2005), S1 站位的营养指数均极显著 ($P < 0.0001$) 高于其余站位及湾平均值, 其余站位及湾平均值间均无显著差异。表明 S1 站位水质尤其高度富营养化。

各站位及湾平均值的有机污染指数 A 基本上都大于 4。表明, 各站位及湾平均值的营养基本上都受到严重污染(国家海洋局, 2005), S1 站位的有机污染指数均极显著 ($P < 0.0001$) 高于其余站位及湾平均值, S4 站位的有机污染指数均极显著 ($P < 0.0001$) 低于其余站位及湾平均值, S2、S3 站位及湾平均值间均无显著差异。表明 S1 站位水质污染尤为严重, 而 S4 站位水质相对好些。

2.4 水质营养盐含量

基于对营养盐吸收动力学研究, 许多研究者认为 $Si = 2 \mu\text{mol/L}$, $N = 1 \mu\text{mol/L}$, $P = 0.1 \mu\text{mol/L}$ 可作为浮游植物生长的最低阈值(Brown *et al*, 1979; Nelson *et al*, 1990)。在监测期间, 各站位的无机氮 DIN 均大于浮游植物生长的最低阈值 $1 \mu\text{mol/L}$, 经单因素方差分析, S1 的无机氮显著高于 S3、S4 及湾平均值的浓度, S4 的无机氮显著低于 S1、S2、S3 及湾平均值的浓度, 其余站位间无显著差异 ($P > 0.05$); 各站位及湾平均值的氮氮占无机氮的比值, 基本上低于 0.5, 除 S4 站位显著高于 S2 外, 其余均无显著差异, 表明氨氮不是无机氮的主要存在形式, 亚硝态氮和硝态氮才是无机氮的主要存在形式; 各站位及湾平均值的无机磷 $PO_4\text{-P}$ 除了在 7 月初略低于等于浮游植物生长的最低阈值 $0.1 \mu\text{mol/L}$ 外, 其余均高于最低阈值, S1 的无机磷显著高于 S2、S3、S4 及湾平均值的浓度, 其余站位间无显著差异; 各站位及湾平均值的活性硅酸盐 $SiO_3\text{-Si}$, 除了 S4 在 6 月下旬初前, 略低于等于浮游植物生长的最低阈值 $2 \mu\text{mol/L}$ 外, 其余均高于最低阈值, 各站位及湾平均值间均无显著差异, 但自 8 月下旬起 S1 显著高于 S3、S4, 其余无显著差异。

上述表明, 泉州湾水体的 DIN、 $PO_4\text{-P}$ 和 $SiO_3\text{-Si}$ 基本上都处于较高浓度, 基本上高于浮游植物生长的最低阈值。

2.5 营养盐组成结构

由于地理环境、外来输入等环境因素的差异, 不

同海域的营养盐含量分布、组成结构大不相同。不同赤潮生物对营养盐有不同的响应,营养盐组成结构的变化直接影响赤潮生物的生长和种群结构, DIN/P、Si/DIN、Si/P 比值不仅是赤潮形成过程中营养状况的重要特征,而且是水体中浮游植物受 N、P 或 Si 限制的重要指标(宋秀贤, 2003¹⁾)。有研究者相继提出了一个系统的评估每一种营养盐化学计量限制标准(Dortch *et al.*, 1992; Justic *et al.*, 1995): (1) 若 Si/P>22 和 DIN/P>22, 则磷酸盐为浮游植物生长的限制因子; (2) 若 DIN/P<10 和 Si/DIN>1, 则溶解无机氮为浮游植物生长的限制因子; (3) 若 Si/P<10 和 Si/DIN<1, 则溶解无机硅为浮游植物生长的限制因子。

各站位及湾平均值的 DIN/P 比值(NPR)均大于 22, 它们之间均无显著差异。各站位及湾平均值的 Si/P 比值(SiPR)间均无显著差异。5 月中旬至 6 月下旬初, SiPR 值均小于 10, 6 月下旬中起, SiPR 值均大于 22。表明, 5—10 月, 泉州湾水体虽然呈富营养化, 营养盐浓度基本上也均高于浮游植物生长的最低阈值。但自 6 月下旬中起, 磷酸盐仍然有较大几率成为影响浮游植物生长的限制因子, 尤其是将降低那些对无机磷浓度需求较高藻类种群的生长增殖竞争力。

各站位及湾平均值的 Si/DIN 比值(SiNR), 它们之间均无显著差异, 在 7 月中旬前及 10 月中旬后 SiNR 值均小于 1。由于, 5 月中旬至 6 月下旬初, SiPR 值均小于 10, 因此, 5 月中旬至 6 月下旬初, 溶解无机硅酸盐很可能成为影响浮游植物生长的限制因子。

2.6 影响赤潮藻类优势种群演替的主要因子

2.6.1 PO₄-P 浓度对中肋骨条藻种群增殖的影响

水环境的富营养化及营养组成的变化不但导致赤潮的发生频率增加, 而且还可以引起赤潮藻种的改变(Hodgkiss *et al.*, 1997)。营养盐的组成结构是影响海洋生物量和种群变化的重要因素之一(Neundorfer *et al.*, 1993; Taylor *et al.*, 1995)。在四个站位中, 中肋骨条藻均为主要的优势种, 但只有 S1 站位的优势种始终为中肋骨条藻而未发生其它优势种的演替。由于水质总体均处于较高的富营养化水平, 各站位的无机氮磷硅浓度基本上均高于浮游植物生长的最低阈值。中肋骨条藻与多数硅藻一样最大的优势是具有高生长速率, 硅藻通常在包括硅等营养盐丰富的区域占有绝

对的优势地位(石岩峻, 2004²⁾)。骨条藻在旺发生长期, 其最大增殖速率每天可分裂 6 次, 种群数量每天可增加 64 倍(陆斗定等, 2000), 硅藻细胞表面的生物硅可以作为有效的 pH 缓冲剂, 有效提高胞外碳酸酐酶的活性, 促使 HCO₃⁻ 向 CO₂ 的转换, 最终提高藻细胞对溶解性无机碳的利用(Trigueros *et al.*, 2001; Milligan *et al.*, 2002), 硅藻具有的高生长速率和其表面硅的有效缓冲以便高效浓缩无机碳的能力, 是硅藻易成为优势的原因(Paul *et al.*, 2000)。因此, 中肋骨条藻在泉州湾容易成为主要的优势种。各站位的 DIN/P、Si/DIN、Si/P 比值间均无显著差异, 只有 S1 的无机磷浓度(0.1—3.5 μmol/L, 平均值 1 μmol/L)均显著高于 S2(平均值 0.7 μmol/L)、S3(平均值 0.7 μmol/L)、S4(平均值 0.4 μmol/L)的浓度。在自然环境中, 中肋骨条藻依靠其较强的适应环境中氮的变化的能力而贮存较多的氮盐, 一旦水体中有充足的磷盐供给, 就有可能引发赤潮。磷浓度对中肋骨条藻的增殖起着很重要的控制作用(石岩峻, 2004²⁾)。研究表明, 中肋骨条藻生长易受到磷限制(李铁等, 2000)。围隔实验研究中发现(李瑞香等, 2001), 在氮磷浓度达到富营养化的水体中, 中肋骨条藻并不一定能发生爆发性增殖, 在相对高的磷浓度和相对低的 N/P 比条件下才引发了该藻赤潮。

虽然四个站位的无机磷浓度均高于浮游植物生长的最低阈值, 但可能较高的无机磷浓度, 更有利于持续维持中肋骨条藻较强的种群增殖竞争力, 保持其优势种的地位。然而, 在 N/P 比较高(大于 100)的情况下, S2 和 S3 站位均引发了中肋骨条藻赤潮, 表明中肋骨条藻, 在相对高的磷浓度(0.1—1.1 μmol/L), 较高的 N/P 比(大于 100)条件下仍然会引发该藻赤潮, 也进一步表明, 磷浓度对中肋骨条藻的种群增殖起着很重要的控制作用。

2.6.2 SiO₃-Si 浓度对太平洋海链藻和中肋骨条藻种群增殖的影响

于 5 月上旬, 太平洋海链藻均为 S2 和 S3 站位的优势种, 至 5 月下旬时, 均被中肋骨条藻取代。5 月上旬时, S2 和 S3 站位水体的 DIN、PO₄-P 和 SiO₃-Si 都处于较高浓度, 大大高于浮游植物生长的最低阈值, 且 DIN/P>22, Si/N<1, 10<Si/P<22, 因此, 无机氮磷硅均不可能成为浮游植物生长的

1) 宋秀贤, 2003. 我国典型海域营养盐特征对赤潮形成的影响及赤潮防治方法研究. 中国科学院海洋研究所博士学位论文

2) 石岩峻, 2004. 赤潮藻对营养盐的吸收及生长和相关特性研究. 北京化工大学博士学位论文

限制因子。然而, 于 5 月中旬至 6 月下旬初, 溶解无机硅酸盐成为影响浮游植物生长的限制因子。在一个营养盐受限制的海区, 浮游植物对营养盐的种间响应机制最终决定了一个海区的浮游植物群落结构 (Berdalet *et al.*, 1996)。可能由于太平洋海链藻细胞个体较中肋骨条藻大若干倍, 因而对硅的需求量较高, 当硅成为限制因子时, 生长易受抑制, 种群增殖竞争力相对于中肋骨条藻低, 因此很快被中肋骨条藻演替取代。

自 6 月下旬起, Si 的浓度上升不再成为限制因子, 使中肋骨条藻获得爆发性增殖, S2 站位于 6 月底发生了赤潮, 很快, P 几乎被耗尽, 受 P 限制, 导致种群密度很快下降, 于 7 月中旬赤潮消亡。但由于在外源无机磷丰富或者补充的情况下, 骨条藻可以利用其较高的吸收速率摄取无机磷储存在细胞体内, 而在外源无机磷贫乏的情况下, 其可能利用较小的细胞体积来达到对于无机磷的较高亲和力(王丹等, 2008)。并且水体中 P 的浓度很快又回升增大, 使中肋骨条藻仍维持为优势种。类似地, S3 站位则于 7 月底发生了赤潮 8 月中旬赤潮消亡。表明, 中肋骨条藻种群的爆发性增殖受低硅浓度的抑制较大, 虽然较低的硅浓度时, 中肋骨条藻仍然能维持一定的生长。

2.6.3 $PO_4\text{-P}$ 和 $SiO_3\text{-Si}$ 浓度对微小原甲藻种群增殖的影响 于 9 月下旬, 微小原甲藻取代中肋骨条藻成为 S2 站位的优势种。此时, S2 站位 $PO_4\text{-P}$ 的浓度上升至该站位的最高值($1.3 \mu\text{mol/L}$), DIN 的浓度也上升至较高值($91 \mu\text{mol/L}$), DIN/P 比下降至相对较低值(为 73), 氨氮在 DIN 中的比例上升, $SiO_3\text{-Si}$ 也较高($134 \mu\text{mol/L}$), Si/P 比下降至相对低值(107), Si/DIN 比继续增高(1.46), 水质总体处于较高的富营养化水平。虽然较高的无机磷和氮的浓度, 在 $Si/P > 22$ 和 $DIN/P > 22$ 时, $PO_4\text{-P}$ 仍有可能成为影响浮游植物生长的限制因子(Justic *et al.*, 1995), 但甲藻在贫营养条件下具备较强适应能力, 尤其是在低浓度磷酸盐条件下的适应能力, 磷酸盐没有对甲藻赤潮起到限制作用(吕颂辉等, 2006; 张传松等, 2008)。微小原甲藻可以在低营养盐条件下生长, 对多种氮源可以吸收利用(Fan *et al.*, 2003), 微小原甲藻还可以通过夜间迁移至合适区域来减缓营养限制(Tyler *et al.*, 1981; Smayda, 1993; Antoine *et al.*, 1994)。因此, 可能微小原甲藻具备较好的适应相对低浓度磷酸盐条件下的能力, 因而在与中肋骨条藻的种群竞争中, 微小原甲藻

种群能以一定的速率持续增殖, 细胞数不断增加, 最终取代中肋骨条藻成为优势种。

于 10 月上旬, 中肋骨条藻又演替为优势种, 此时, 虽然无机磷、氮和硅的浓度均有所下降, DIN/P 比、Si/P 比和 Si/DIN 比也均有所下降, 但水质仍然维持较高富营养化水平。微小原甲藻生长最适宜的 N/P 比为(4—13): 1 (Hodgkiss *et al.*, 1997)。中肋骨条藻在富含硅的培养液中易成为优势藻, 而微小原甲藻的生长会受到明显抑制(石岩峻, 2004¹⁾), 由于 DIN/P 比偏高, 且 $SiO_3\text{-Si}$ 浓度也较高, 因此, 微小原甲藻的生长会受到抑制, 微小原甲藻种群不能获得持续长时间的快速增殖, 而中肋骨条藻由于条件适宜, 种群迅速增殖, 又取代了微小原甲藻而演替为优势种。表明, 微小原甲藻具备较强的适应相对低浓度磷酸盐的种群增殖能力, 但会受较高 $SiO_3\text{-Si}$ 浓度的抑制。

2.6.4 $SiO_3\text{-Si}$ 浓度对尖刺拟菱形藻的影响 于 6 月下旬, 尖刺拟菱形藻取代中肋骨条藻成为 S4 站位的优势种。由于 5 月中旬至 6 月下旬, S4 站位的 $SiO_3\text{-Si}$ 浓度始终低于 $2 \mu\text{mol/L}$ 的浮游植物生长最低阈值, $SiO_3\text{-Si}$ 成为影响浮游植物生长的限制因子, 中肋骨条藻种群增殖受到抑制, 而尖刺拟菱形藻可能较能适应或者具有某种应对低硅浓度的生长策略, 而在种群增殖竞争中获胜成为优势种。而自 6 月下旬中起, 由于 Si 的浓度很快回升不再成为限制因子, 使中肋骨条藻种群获得迅速增殖, 又重新成为优势种。此外, 6 月中旬起, 氨氮超过亚硝态氮和硝态氮成为主要的无机氮源, 并且无机氮的浓度不高, 这可能有利于提高尖刺拟菱形藻的种群增殖竞争力。由于尖刺拟菱形藻对不同形态氮的吸收差异较大, $NH_4\text{-N}$ 的值(最大吸收速率和半饱和常数的比值)为 $NO_3\text{-N}$ 的值的 2.57 倍, 尖刺拟菱形藻能更有效的吸收利用 $NH_4\text{-N}$ (张诚等, 1997), 而中肋骨条藻增殖过程中吸收硝态氮为主要氮源(洪君超等, 1994)。

2.6.5 $PO_4\text{-P}$ 和 $SiO_3\text{-Si}$ 浓度对丹麦细柱藻和旋链角毛藻的影响 于 10 月上旬, 丹麦细柱藻取代中肋骨条藻成为 S4 站位的优势种。9 月下旬起, Si/DIN 比小于 1, Si/P 比也降至较低值, $SiO_3\text{-Si}$ 可能成为影响中肋骨条藻较好生长的限制因子。而至 10 月上旬 $PO_4\text{-P}$ 的浓度上升至最高值, 水质处于低硅高磷的状态, 低硅高磷条件下, 中肋骨条藻稳定期缩短, 细胞数很快下降(石岩峻, 2004¹⁾), 因此, 中肋骨条藻生长受到抑制, 而丹麦细柱藻可能较能适应低硅高磷或者具有

1) 石岩峻, 2004. 赤潮藻对营养盐的吸收及生长和相关特性研究. 北京化工大学博士学位论文

某种应对低硅高磷浓度的生长策略,而在种群增殖竞争中获胜成为优势种。此后至 10 月下旬,由于 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度迅速下降, DIN/P 比迅速提高, Si/P 比提高,趋于 $\text{PO}_4\text{-P}$ 限制, Si/N 比小于 1, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度继续下降。在硅酸盐浓度成为硅藻赤潮限制因子的情况下,往往带来赤潮优势种群的演变,出现硅藻小型化的现象(Humborg *et al.*, 1997)。由于丹麦细柱藻细胞个体大,在低 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度下,生长受到抑制,种群增殖受到抑制,很快被细胞个体较小,能适应低 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度下生长,种群增殖竞争力较强的旋链角毛藻所取代,因为旋链角毛藻具有鞭毛,能自由运动,在资源利用方面具有主动性(费岳军等, 2008)。

3 小结

较高的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度,有利于持续维持中肋骨条藻的种群增殖竞争力,保持其优势种的地位;中肋骨条藻种群的暴发性增殖受低 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度的抑制较大,虽然较低的硅浓度时,中肋骨条藻种群仍然能维持一定的增殖。

太平洋海链藻种群增殖竞争力易受较低 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度的抑制;低浓度 $\text{PO}_4\text{-P}$ 时微小原甲藻具有较强的种群增殖竞争力,而较高 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度会抑制其种群增殖。

低浓度 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 时尖刺拟菱形藻具有较强的种群增殖竞争能力;丹麦细柱藻在低 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 和高 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度下具有较强的种群增殖竞争力;旋链角毛藻在低 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 和低 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度下具有较强的种群增殖竞争力。

由于不同的赤潮藻类具有各自的生态习性及其适应环境的生长策略,海域水质营养盐含量和组成结构的变化,会引起赤潮藻类种群增殖竞争力间强弱的相对变化,而种群增殖竞争力强的种类有可能迅速增殖取代原有优势种而演替为新的优势种,这是一个动态的过程。

参 考 文 献

王 丹, 黄春秀, 黄邦钦等, 2008. 黄海两种典型硅藻的磷胁迫生理研究. 海洋科学, 32(5): 22—27
 王修林, 孙 霞, 韩秀荣等, 2004. 2002 年春、夏季东海赤潮高发区营养盐结构及分布特征的比较. 海洋与湖沼, 35(4): 323—331
 卢振彬, 杜 琦, 许翠娅等, 2005. 福建泉州湾贝类养殖容量评估. 热带海洋学报, 24(4): 22—29

吕颂辉, 李 英, 2006. 我国东海 4 种赤潮藻的细胞氮磷营养储存能力对比. 过程工程学报, 16(3): 339—444
 国家海洋局, 2005. 赤潮监测技术规程 HY/T069-2005. 北京: 中国标准出版社, 1—58
 李 铁, 胡立阁, 史致丽, 2000. 营养盐对中肋骨条藻和新月菱形藻生长及生化组成的影响. 海洋与湖沼, 31(1): 46—52
 李瑞香, 朱明远, 陈 尚等, 2001. 围隔生态系内浮游植物对富磷的响应. 生态学报, 21(4): 603—607
 邹景忠, 1992. 赤潮生物与赤潮灾害研究. 见: 曾呈奎主编. 中国海洋科学与开发. 青岛: 青岛出版社, 284—287
 张 诚, 邹景忠, 1997. 尖刺拟菱形藻氮磷吸收动力学以及氮磷限制下的增值特征. 海洋与湖沼, 28(1): 33—37
 张传松, 王江涛, 朱德弟等, 2008. 2005 年春季夏季东海赤潮过程中营养盐作用初探. 海洋学报, 30(2): 153—159
 陆斗定, J Gobel, 王春生等, 2000. 浙江海区赤潮生物监测与赤潮实时预测. 东海海洋, 18(2): 33—44
 周名江, 1999. 赤潮藻毒素研究进展. 中国海洋药物, 18(3): 48—54
 周名江, 朱明远, 张 经, 2001. 中国赤潮的发生趋势和研究进展. 生命科学, 13(2): 54—59
 洪君超, 黄秀清, 蒋晓山等, 1994. 长江口中肋骨条藻赤潮发生过程环境要素分析——营养盐状况. 海洋与湖沼, 25(2): 179—184
 费岳军, 蒋 红, 2008. 舟山朱家尖海域角毛藻赤潮与环境因子关系的研究. 海洋环境科学, 27 增 X(1): 38—41
 国家海洋局, 1998c. 海洋监测规范 GB 17378.3-1998. 北京: 中国标准出版社, 1—13
 国家海洋局, 1998a. 海洋监测规范 GB 17378.4-1998. 北京: 中国标准出版社, 1—182
 国家海洋局, 1998b. 海洋监测规范 GB 17378.7-1998. 北京: 中国标准出版社, 1—86
 国家海洋局, 1991. 海洋调查规范 GB 12763.3-1991. 北京: 中国标准出版社, 1—23
 霍文毅, 俞志明, 邹景忠等, 2001. 胶州湾中肋骨条藻赤潮与环境因子的关系. 海洋与湖沼, 32(3): 311—318
 Antoine S, Rachid A, 1994. Effects of nitrogen limitation on growth and nitrite excretion rates of the dinoflagellate *Prorocentrum minimum*. Mar Eco Pro Ser, 105: 301—309
 Batoreu M C C, Dias E, Pereira P *et al.*, 2005. Risk of human exposure to paralytic toxins of algal origin. Environmental Toxicology and Pharmacology, 19: 401—406
 Berdalet E, Marras C, Estrada M *et al.*, 1996. Microbial community responses to nitrogen and phosphorus deficient nutrient inputs: microplankton dynamics and biochemical characterization. J Plankton Res, 18(9): 1627—1641
 Brown E J, Button D K, 1979. Phosphate-limited growth kinetics of *Selanastrum capricornatum* (Chlorophyceae). Journal of Phycology, 15: 305—311
 Dortch Q, Whitledge T E, 1992. Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume

- and nearby regions? *Continental Shelf Research*, 12: 1293—1309
- Fan C, Glibert P M, Burkholder J M, 2003. Environmental relationships for *Prorocentrum minimum* in natural blooms and laboratory cultures. *Harmful Algae*, 2: 283—299
- Hallegraeff G M, 1993. A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. *Phycologia*, 32: 79—99
- Hodgkiss I J, Ho K C, 1997. Are changes in N: P ratios in coastal waters the key to increased red tide blooms? *Hydrobiologia*, 352: 141—147
- Huang X, Huang L, Yue W, 2003. The characteristics of nutrients and eutrophication in the Pearl River estuary, South China. *Mar Pollut Bull*, 47: 30—36
- Humborg C, Ltekkot V, Cociasu A *et al*, 1997. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature*, 386: 385—388
- Justic D, Rabalais N N, Turner R E *et al*, 1995. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 40: 339—356
- Milligan A J, Morel F M M, 2002. A proton buffering role for silica in diatoms. *Science*, 297: 1848—1850
- Nelson D M, Brzezinski M A, 1990. Kinetics of silicate acid uptake by natural diatom assemblages in two Gulf and Stream warm-core rings. *Marine Ecology Progress Series*, 62: 283—292
- Neundorfer J V, Kemp W M, 1993. Nitrogen versus phosphorus enrichment of brackish waters: response of the submerged plant *Potamogeton perfoliatus* and its associated algal communities. *Marine Ecology Progress Series*, 94: 71—82
- Paul T, Philippe P, 2000. Silica control carbon dioxide. *Nature*, 406: 358—359
- Smayda T J, 1993. Novel and nuisance phytoplankton blooms in the sea: evidence for a global epidemic. In: Graneli E, Sundstrom B, Edler L *et al* ed. *Toxic Dinoflagellates*. Elsevier, New York, 251—256
- Taylor D I, Nixon S W, Granger S L *et al*, 1995. Responses of coastal lagoon plant communities to different forms of nutrient enrichment-amesocism experiment. *Aquat Bot*, 52: 19—34
- Trigueros J M, Orive E, 2001. Seasonal variations of diatoms and dinoflagellates in a shallow, temperate estuary, with emphasis on neritic assemblages. *Hydrobiologia*, 444: 119—133
- Tyler M A, Seliger H H, 1981. Selection for a red tide organism: physiological responses to the physical environment. *Limnol Oceanogr*, 26: 310—324
- Zingone A, Enevoldsen H O, 2000. The diversity of harmful algal blooms: a challenge for science and management. *Ocean and Coastal Management*, 43: 725—748
- Zou L, Zhang J, Pan W *et al*, 2001. *In situ* nutrient enrichment experiment in the Bohai and Yellow Sea. *J Plank Res*, 23(10): 1111—1119

THE INFLUENCE FACTORS ON DOMINANT RED-TIDE ALGAL SPECIES SUCCESSION IN QUANZHOU BAY

JIANG Xing-Long^{1,2}, SONG Li-Rong¹

(1. *Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, 430072*; 2. *Jimei University, Xiamen, 361021*)

Abstract Using data of red-tide monitoring in May—November, 2006 at four stations in Quanzhou Bay, the East China Sea, six dominant red-tide algal species: *Skeletonema costatum*, *Thalassiosira pacifica*, *Prorocentrum minimum*, *Pseudo-nitzschia pungens*, *Leptocylindrus danicus*, and *Chaetoceros curvisetus* were recognized. Succession of these dominants algal species occurred at three sampling stations, although *Skeletonema costatum* was the most dominant one. Content and combination of nutrient and the dynamic changes affect the dominant algal species succession. The result shows that due to the nature of adaption to the environment, different algae species can proliferate with own competitive ecological characteristics and strategies against any ambience change in nutrient status, and thereby resulting in ups and downs of population of a red-tide algal species, and the dynamic succession of the species one another.

Key words Quanzhou Bay, Red-tide monitoring, Red-tide organisms, Nutrient, Succession