

## 南麂列岛海域原甲藻种群动态及其环境影响因子分析

李扬<sup>1</sup> 吕颂辉<sup>1,2</sup> 江天久<sup>1,2</sup> 李欢<sup>1</sup> 萧云朴<sup>3</sup> 尤胜炮<sup>4</sup>

(1. 华南师范大学生命科学学院, 广东省植物发育生物工程重点实验室, 广州 510631; 2. 暨南大学赤潮与水环境中心, 广州 510632; 3. 浙江省平阳县海洋与渔业局, 平阳 325400; 4. 浙江省南麂海洋环境监测站, 平阳 325400)

**摘要:** 研究了 2006 年 4 月至 2007 年 3 月之间, 南麂海域原甲藻种群的种类组成、季节动态、空间分布及其与水温、盐度、氮磷营养盐等环境因子的关系。原甲藻种类有三角棘原甲藻、东海原甲藻、海洋原甲藻和反曲原甲藻, 前者是南麂海域最为优势的种类, 它们的分布季节集中在春季(4—6月), 并先后于 5 月 12 日和 5 月 25 日形成赤潮。原甲藻细胞数量在表层水体中的数量显著高于底层, 这与原甲藻种类能够自主运动, 具有明显的昼夜垂直移动特性有关。三角棘原甲藻较高细胞数量相对集中出现在水温为 18.5—19.5℃, 盐度为 29.58‰—30.95‰的水体中; 东海原甲藻较高细胞数量则相对集中出现在水温为 18.5—21.3℃, 盐度为 29.03‰—30.92‰的水体中。氮盐和磷酸盐浓度与原甲藻细胞数量之间呈负相关, 磷营养盐浓度的高低对原甲藻种群动态影响更甚。对原甲藻细胞数量和环境因子之间进行相关性分析, 发现原甲藻细胞数量与 N:P 值之间存在显著的正相关性, 并与磷酸盐浓度之间存在显著的负相关性。原甲藻细胞具有较强储备氮磷营养物质能力的生物学特性使其能够在低营养条件下取得生长竞争的优势。

**关键词:** 原甲藻; 种群动态; 环境因子; 南麂列岛海洋自然保护区

**中图分类号:** Q145+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2009)02-0236-10

原甲藻属 (*Prorocentrum*) 隶属于甲藻纲 (Pyrrophyta), 原甲藻目 (Prorocentrales), 原甲藻科 (Prorocentraceae)。我国沿海常见的原甲藻属种类主要有东海原甲藻 *P. donghaiense* Lu, 三角棘原甲藻 *P. triestinum* Schiller, 海洋原甲藻 *P. micans* Ehrenberg, 反曲原甲藻 *P. sigmoides* Bohm, 微小原甲藻 *P. minimum* (Pavillard) Schiller, 利玛原甲藻 *P. lima* (Ehrenberg) Dodge 等种类, 其中东海原甲藻目前是我国东海近海海域最为重要的赤潮生物, 常于每年春季引发赤潮, 无论是暴发频次、涉及海域面积, 还是对海洋生态系统的破坏, 均达到非常严重的程度。自 20 世纪 90 年代以来, 我国在东海海域, 尤其是在长江口附近海域以及浙江近岸海域先后进行过多次大规模的海洋生态调查, 监测到多起面积空前的东海原甲藻赤潮。目前, 国内外学者开展了形态分类学、种群营养生理学、种群赤潮生态学、分子生物学等多方面的研究<sup>[1-5]</sup>。

南麂列岛位于浙江省南部海域, 距离浙江省平

阳县鳌江港以东海域 56km, 地处亚热带, 自然环境条件优越。南麂海域是浙江沿岸流与台湾暖流交汇和交替消长的区域, 流系复杂, 锋面发达, 水色终年较清, 这些独特而多样的生态环境为海洋动植物的生长和繁衍提供了十分理想的条件, 因此, 南麂列岛自然保护区素有天然博物馆、基因库和“南种北移、北种南移”的引种过渡驯化基地。1990 年 9 月经国务院批准建立南麂列岛国家级海洋自然保护区, 是我国首批 5 个海洋类型的自然保护区之一, 是中国最早加入联合国教科文组织世界生物圈保护网络的海洋类型自然保护区, 是联合国环境开发署生物多样性示范保护区。近年来, 有学者对南麂海域的浮游动物和贝类资源进行了研究<sup>[6-8]</sup>, 但关于该海域浮游植物的系统性调查资料相对较少<sup>[9]</sup>。对南麂海域原甲藻种群的季节动态、分布规律及其与环境因子的关系进行分析, 有利于揭示原甲藻赤潮形成机理, 为预测和防治提供参考依据, 并为南麂列岛国家级海洋自然保护区海洋生态学的研究以及典型海

收稿日期: 2008-08-15 修订日期: 2009-01-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 30700046; 国家自然科学基金重点项目 U0733006; 国家重点基础研究发展规划项目 2001CB409709; 广东省自然科学基金 7300190; 温州市科技计划项目 S2006A007资助

通讯作者: 李扬 (1978—), 男, 河南信阳人; 博士; 主要从事藻类分类学和生态学研究。E-mail: liyang@scau.edu.cn

洋保护区生态系统服务功能的价值评价提供基础资料和参考依据。

### 1 材料与方法

在南麂海域设置了 4 个采样点(图 1)。于 2006 年 4 月至 2007 年 3 月之间,对南麂海域进行周年采样调查。其中, 2006 年 4 月至 6 月间,约每星期采集一次样品(2006 年 4 月采集了 4 批样品,2006 年 5 月和 6 月均采集了 5 批样品),其余时间(2006 年 7 月至 2007 年 3 月)为每月采集一次样品。各调查站位的水深均在 10m 以内,分别采集表层和底层样品。

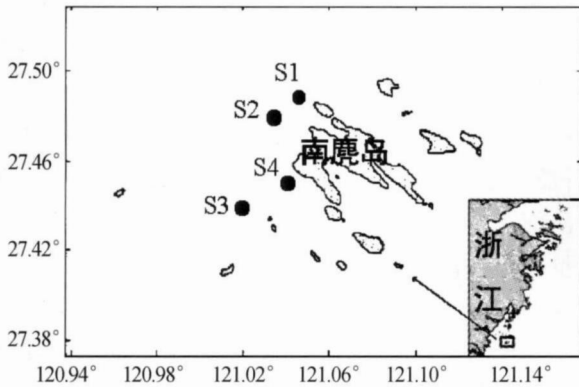


图 1 南麂列岛海域调查站位图

Fig 1 Sampling locations in Nanji Islands Sea Area

利用小体积采水器分别采集表层和底层海水,取出其中 1L,加入 4% 中性福尔马林固定,用于浮游植物的分析。带回实验室后,逐步沉淀浓缩至 10mL 左右,具体可视浮游植物细胞丰度而定。然后摇匀水样,取出 0.1mL 样品,利用浮游植物计数框在 Olympus BH-2 显微镜下观察、计数和分析。

利用小体积采水器分别采集水样,经 GF/F (Whatman) 滤膜过滤后,现场用 VAR D 袖珍型 pH / Cond 测定仪测定 pH、盐度、温度,然后加入 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 酸化保存,用于实验室营养盐的分析测定;溶解氧 DO 通过现场固定样品后带回实验室测定。各项营养盐的测定均采用分光光度法<sup>[10-11]</sup>,其中铵盐(NH<sub>4</sub>-N)用次溴酸钠氧化法,硝酸盐(NO<sub>3</sub>-N)用镉铜还原-偶氮比色法,亚硝酸盐(NO<sub>2</sub>-N)用重氮偶氮比色法,磷酸盐(PO<sub>4</sub>-P)用磷钼蓝法。溶解无机氮(DN)浓度为氨盐、硝酸盐和亚硝酸盐浓度之和。

利用 SPSS(Statistics Packing for Social Science, Window 13.0)统计软件对各站位原甲藻细胞数量与环境因子分别进行逐步线性回归分析。

### 2 结果与讨论

#### 2.1 原甲藻的种类组成

在为期一年的调查中,共观察到 4 种原甲藻:三角棘原甲藻、东海原甲藻、海洋原甲藻和反曲原甲藻。其中,三角棘原甲藻和东海原甲藻主要分布在春季(4 月—6 月),是南麂海域春季的绝对优势种类,并且分别在 5 月份的不同时段引发原甲藻赤潮,细胞数量达到 10<sup>6</sup> cells/L 水平以上。三角棘原甲藻的分布季节相对较广,除了春季的 3 个月份之外,在 7 月和 8 月份也有发现,但细胞数量较低,在 10<sup>2</sup> cells/L 水平左右。东海原甲藻的分布季节相对较窄,春季之外的其他月份中,没有观察到它的存在。海洋原甲藻较为常见,4、7、8、11 月份均有发现,但细胞数量不高,基本都在 10<sup>3</sup> cells/L 水平以下。反曲原甲藻仅在 8 月份有见,细胞数量低,基本在 10<sup>2</sup> cells/L 水平左右。因此,本文的研究对象主要是三角棘原甲藻和东海原甲藻。

#### 2.2 原甲藻种群的周年动态

以每个月份调查结果的平均值为分析数据,得到南麂海域原甲藻种群的周年动态。由图 2 可以看出,三角棘原甲藻和东海原甲藻集中出现在春季(4—6 月),之后的 7 月和 8 月有较少分布。并且三角棘原甲藻和东海原甲藻的细胞数量呈现典型的单峰曲线,最高峰值出现在 5 月,该月平均细胞数量维持在 10<sup>5</sup> cells/L 水平以上。其中,三角棘原甲藻的最高细胞数量达到 2.69 × 10<sup>6</sup> cells/L(5 月 12 日 S2 站位),东海原甲藻的最高细胞数量达到 2.78 × 10<sup>6</sup> cells/L(5 月 25 日 S4 站位),原甲藻种群的最高细胞数量达到 2.92 × 10<sup>6</sup> cells/L(5 月 12 日 S2 站位);次峰值出现在 6 月份,平均细胞数量在

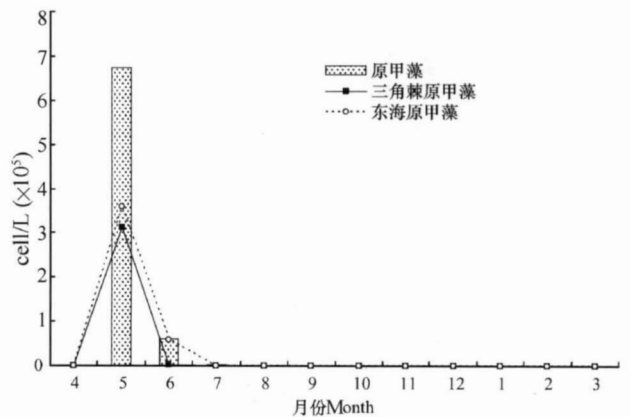


图 2 原甲藻细胞密度的周年动态

Fig 2 Annual variations of Proocentrum population

$10^4$  cells/L 水平; 4 月份的细胞数量较低, 在  $10^2$  cells/L 水平。

### 2.3 原甲藻种群的春季动态

由于两种原甲藻在南麂海域的出现季节集中在春季(4—6月), 因此, 利用各站点春季表层水样的数据来分析两种原甲藻的春季动态(图 3)。三角棘原甲藻细胞数量的春季动态表现为规则的单峰曲线, 有一个最高峰值出现在 5 月 12 日, 平均细胞数量达到  $1.76 \times 10^6$  cells/L; 还有一个次峰值, 出现在 5 月 8 日, 平均细胞数量达到  $6.64 \times 10^5$  cells/L, 而在其余时段, 三角棘原甲藻的细胞数量都很低。东海原甲藻细胞数量的春季动态也表现为单峰曲线, 最高峰值出现在 5 月 25 日, 平均细胞数量达到  $1.52 \times 10^6$  cells/L; 除了最高峰值之外, 还有几个较低的峰值, 出现在最高峰值的前后, 如在 5 月 8 日、5 月 12 日、5 月 29 日和 6 月 3 日, 细胞数量均在  $10^5$  cells/L 水平以上。在不同时段分别受到两种原甲藻动态的影响, 原甲藻种群的平均细胞数量在春季的动态表现为双峰曲线, 两个最高峰值出现在 5 月 12 日和 5 月 25 日, 细胞数量在  $10^6$  cells/L 水平以上, 分别与三角棘原甲藻和东海原甲藻细胞数量的最高值相对应, 这两个高值区分别以三角棘原甲藻和东海原甲藻为优势贡献者。其次, 还有次峰值, 出现在 5 月 8 日、5 月 29 日和 6 月 3 日, 平均细胞数量在  $10^5$  cells/L 水平以上。

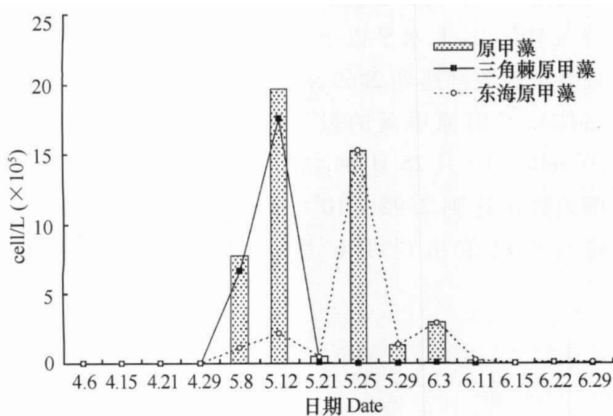


图 3 原甲藻细胞密度的春季动态

Fig 3 Variations of *Prorocentrum* population in spring 2006

以各站点表层水体中原甲藻细胞数量的平均值来看, 可以得出一个结论: 南麂海域 5 月份发生两起赤潮, 即 5 月 12 日前后发生三角棘原甲藻赤潮, 5 月 25 日前后发生东海原甲藻赤潮。但事实并非如此, 若具体分析各站点表层水体中原甲藻细胞数量的动态(图 4), 可以看出不同站点发生原甲藻赤潮

的时间不尽相同。三角棘原甲藻早在 4 月 15 日即出现在部分站点, 细胞数量在  $10^2$  cells/L 水平, 在之后的半个月, 细胞数量升至  $10^3$  cells/L 水平。其赤潮最早于 5 月 8 日出现在 S3 站位, 细胞数量为  $1.08 \times 10^6$  cells/L, 占浮游植物细胞总数的 59.51%, 伴随大量东海原甲藻的存在。此时, 其他三个站位的三角棘原甲藻细胞数量均维持在  $10^5$  cells/L 水平。之后的 5 月 12 日, S3 站位三角棘原甲藻细胞数量降至  $8.62 \times 10^5$  cells/L, 而其他三个站位的三角棘原甲藻细胞数量都升到  $10^6$  cells/L 水平以上, 其中 S2 站位最高, 达到  $2.69 \times 10^6$  cells/L, 占浮游植物细胞总数的 87.68%, 也伴随有大量东海原甲藻。到了 5 月 21 日, 各站位的三角棘原甲藻大幅下降, S1 和 S2 站位的细胞数量在  $10^3$  cells/L 水平, S3 和 S4 基本没有发现。

东海原甲藻在各站位的出现要晚于三角棘原甲藻, 最早于 4 月 21 日仅在 S4 站位发现少量东海原甲藻细胞, 4 月 29 日, S1 和 S4 站位都有发现, 细胞数量在  $10^2$ — $10^3$  cells/L 水平。而在 5 月 8 日, 东海原甲藻在各个站点普遍存在, 细胞数量保持在  $10^4$ — $10^5$  cells/L 水平之间。在各站点发生三角棘原甲藻赤潮的时段内, 东海原甲藻的细胞数量也快速增加。三角棘原甲藻赤潮快速消亡的 5 月 21 日左右, 东海原甲藻细胞数量也呈下降趋势, 但还保持在  $10^3$ — $10^4$  cells/L 水平, 为之后形成赤潮提供了充足的种源。5 月 25 日, S3 和 S4 首先发生东海原甲藻赤潮, 细胞数量在  $10^6$  cells/L 水平以上, S4 站位最高, 达到  $2.78 \times 10^6$  cells/L, 占浮游植物细胞总数的 99.89%。此时, S1 和 S2 站位的细胞数量在  $10^5$  cells/L 水平以上。之后的 5 月 29 日, 各站位的东海原甲藻均出现小幅下降至  $10^4$ — $10^5$  cells/L 水平。然后在 6 月 3 日, 各站点东海原甲藻细胞数量又小幅上升, 但还保持在  $10^4$ — $10^5$  cells/L 水平。之后, 东海原甲藻在各站位的细胞数量逐渐减少, 部分站位的某些时段基本不能检测到它的存在。

因此, 具体而言, 本次调查的 4 个站点均发生了三角棘原甲藻赤潮, 但发生时间不完全一致, S3 站位发生在 5 月 8 日, 其余三个站位发生在 5 月 12 日。而东海原甲藻赤潮并未发生在所有站点, 只有 S3 和 S4 在 5 月 25 日发生了该种的赤潮, 其余站位的东海原甲藻细胞数量虽然较高, 但并未形成赤潮。以往关于三角棘原甲藻赤潮的报道多发生在日本、韩国以及中国香港、珠江口等海域, 浙江沿岸海域

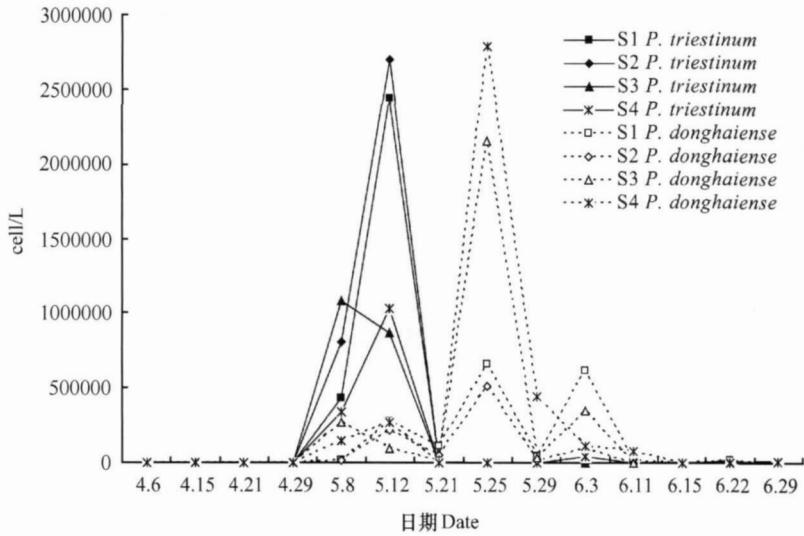


图 4 各站位原甲藻种群细胞数量的春季变化

Fig 4 Variations of *Prorocentrum* population in four spots in spring 2006

发生该种赤潮的报道比较少见。李道季等曾在长江口外羽状锋水域监测到一起三角棘原甲藻赤潮, 经过跟踪监测, 发现本种赤潮从发生到消亡仅持续 2d 因此认为该种赤潮具有持续时间短和消亡快的特点<sup>[12]</sup>, 这一特征也体现在本文描述的本种赤潮中。赤潮持续时间的长短更多地是由赤潮种间对营养盐的竞争以及自身对营养盐消耗变化的生理生态反应所决定, 因此, 海域营养盐消耗和补充之间平衡的变化等因素, 会对赤潮的持续时间产生重要的影响。

#### 2.4 原甲藻种群的垂直分布

以 S4 站位为例, 比较了原甲藻在该站位的表层和底层水体中的分布。三角棘原甲藻和东海原甲藻都集中分布在表层水体中, 细胞数量显著高于底层水体。表层和底层水体中藻细胞数量的时间变化呈现相互一致的趋势。原甲藻在表层水体中的数量高于底层的原因与该藻细胞的生物特性有关, 原甲藻具有鞭毛, 能够自主运动, 具有明显的昼夜垂直移动特性<sup>[3]</sup>。白天时, 原甲藻能够主动游动到靠近表层的水层中, 以便能够更好的利用光能; 夜间, 它向中下层水体运动。本次调查过程, 采样时间主要集中在白天 8 时至 13 时, 因此导致在所采水样中, 原甲藻在表层水体的数量高于底层水体。

#### 2.5 原甲藻种群的分布与水温 and 盐度的关系

南麂海域原甲藻细胞数量的分布与水温的关系 (图 5)。三角棘原甲藻分布的水温范围是 14.7—29.5°C, 较高细胞数量则相对集中出现在水温为

18.5—19.5°C 之间, 这与 5 月 8 日至 12 日的水温一致。以往研究所报道的三角棘原甲藻生长适宜水温不尽相同, 这与藻种分离自不同地理海域有关。李道季等曾在长江口外羽状锋水域监测到三角棘原甲藻赤潮, 记录赤潮发生时的水温为 22.17°C<sup>[12]</sup>, 高于本文的结果。值得注意的是, 在 5 月 8 日之前的一周之内, 水温存在一个显著的上升趋势, 各站位表层水温在一周内上升 2—2.2°C, 明显高于其他调查间期的水温升幅 (基本在 1°C 左右), 这可能是促使三角棘原甲藻快速增殖的一个诱因。东海原甲藻分布的水温范围在 15.6—25.7°C, 较高细胞数量则相对集中出现在水温为 18.5—21.3°C 之间。有学者对 2004 年春季发生在浙江沿岸海域的面积超过 1 万 km<sup>2</sup> 的东海原甲藻赤潮进行了跟踪监测, 认为东海原甲藻赤潮期间水温在 17—21°C, 最适水温为 19°C<sup>[13]</sup>。王金辉和黄秀清则认为长江口和舟山海域的东海原甲藻的最适水温为 18—22°C<sup>[14]</sup>。以上结论均包含本文的结果, 但因不同地理藻株而异。

南麂海域原甲藻细胞数量的分布与盐度的关系 (图 6)。三角棘原甲藻分布的盐度范围是 26.63‰—33.23‰, 较高细胞数量则相对集中出现在盐度为 29.58‰—30.95‰ 之间。李道季等在长江口外羽状锋水域监测到三角棘原甲藻赤潮, 记录赤潮发生时的盐度为 27.51‰<sup>[12]</sup>。以往有报道三角棘原甲藻赤潮发生在河口水域, 也有报道发生在内湾, 说明三角棘原甲藻适宜生长的盐度范围较大。东海原甲藻分布的盐度范围是 28.34‰—33.8‰,

较高细胞数量则相对集中出现在盐度为 29.03‰—30.92‰之间。陈翰林等认为东海原甲藻的最适生长盐度在 30‰左右<sup>[13]</sup>；王金辉和黄秀清认为它的适宜盐度范围较大,在 22‰—31‰之间<sup>[14]</sup>。东海原甲藻可在河口和近岸水域引发赤潮,适宜其生长的

盐度范围较广。本文调查的盐度较窄,跟调查海域的地理位置有关。南麂海域距离大陆有 55km,几乎不受河流等陆源淡水的影响,盐度较高,且相对稳定,基本维持在 29‰—33‰之间,盐度的变化主要受降水和洋流的影响。

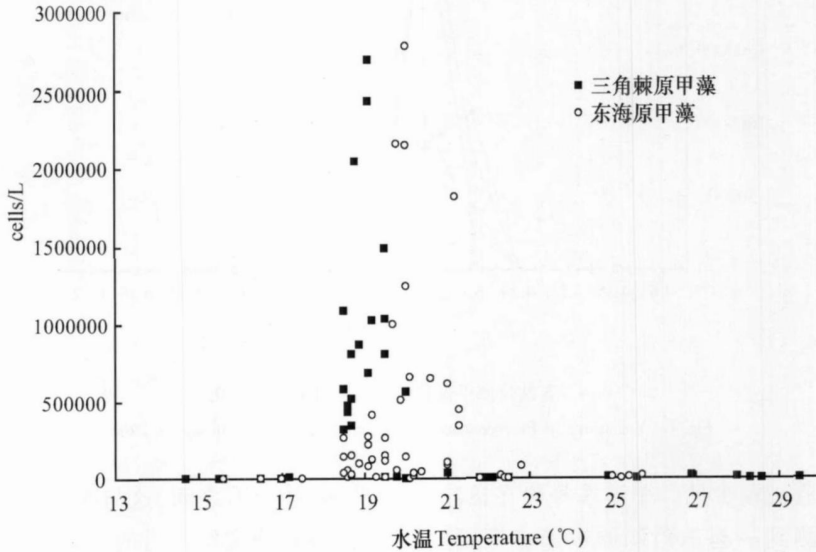


图5 原甲藻细胞数量与水温的关系

Fig. 5 Cell abundance of *Prorocentrum* population plotted against water temperature

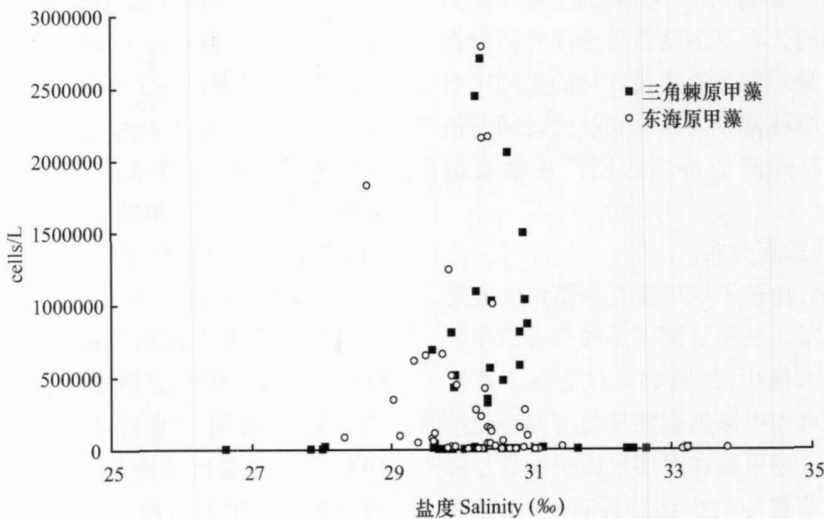


图6 原甲藻细胞数量与盐度的关系

Fig. 6 Cell abundance of *Prorocentrum* population plotted against salinity

与以往研究相比,本研究所获得的南麂海域春季两种原甲藻高细胞数量分布的水温和盐度范围均相对集中,变化范围均较窄。两种原甲藻细胞的大量出现,除了受到水温和盐度的影响之外,还受到当时水体其他环境因子,如氮、磷营养盐的补充和消耗、水体溶氧量和透明度等理化参数以及浮游动物数量等生物因素等因素的影响,同时与研究海域的

地理条件也有密切的关系。因此,本文获得的两种原甲藻分布的适宜水温和盐度范围是在自然海区其他环境因子的共同作用下形成的。

## 2.6 原甲藻种群的细胞数量与氮、磷营养盐的关系

氮磷营养盐是藻类生长和繁殖的物质基础,浮游植物细胞数量的变化与氮磷营养盐浓度之间存在一定的联系。南麂海域各站位表层水体中原甲藻平

均细胞数量与磷酸盐浓度变化的趋势(图7)。在原甲藻细胞开始大量出现前的时段,由于骨条藻(*Skeletonema*)和角毛藻(*Chaetoceros*)等种类细胞数量的升高和降低,磷酸盐浓度呈现对应的下降和升高,平均浓度始终维持在 $10\mu\text{g/L}$ 以上的水平。在原甲藻种类成为绝对优势种并引发赤潮时,水体中磷酸盐浓度与原甲藻细胞数量之间呈现对应的负相关性。在三角棘原甲藻细胞数量从4月29日的 $9.38 \times 10^2$  cells/L快速上升到5月8日的 $6.64 \times 10^5$  cells/L,并继续升至5月12日的 $1.76 \times 10^6$  cells/L的过程中,磷酸盐浓度依次从4月29日的 $16.25\mu\text{g/L}$ 下降至5月8日的 $4.88\mu\text{g/L}$ ,然后继续降至5月12日的 $3.38\mu\text{g/L}$ ,此时磷酸盐浓度降至调查期间的最低水平。5月21日,三角棘原甲藻和东海原甲藻的细胞数量分别降至 $10^3$  cells/L和 $10^4$  cells/L水平,水体中磷酸盐浓度相应地上升到 $12.75\mu\text{g/L}$ 。从5月21日到5月25日期间,东海原甲藻赤潮形成,细胞数量快速上升到 $1.52 \times 10^6$  cells/L,磷酸盐浓度随着下降到 $7.5\mu\text{g/L}$ 。之后的时段,两种原甲藻的细胞数量都大幅下降并维持在较低的水平( $10^2-10^3$  cells/L之间),浮游植物的优势种类转变为拟菱形藻(*Pseudo-nitzschia*)等硅藻种类,磷酸盐浓度转而主要受拟菱形藻等硅藻种类细胞数量动态的影响。

南麂海域氮盐浓度的变化趋势与磷酸盐相似,各站位表层水体中原甲藻平均细胞数量与氮盐浓度变化的趋势(图8)。在三角棘原甲藻和东海原甲藻先后引发赤潮及其逐渐消亡的过程中,氮盐浓度随原甲藻细胞数量升高而降低,随细胞数量下降而上

升,即呈负相关性。在东海原甲藻赤潮消亡之后的时段,氮盐浓度的变化主要受拟菱形藻等硅藻种类的影响。南麂海域氮盐浓度较高,在被藻细胞吸收之后,很快能够得到补充而恢复到较高浓度。补充氮盐的来源可能是沿岸养殖水域的饵料或洋流等原因,尚需明确。

南麂海域氮盐水平较高,在原甲藻细胞数量开始大幅上升的前期,水体中氮盐浓度均处于较高的水平( $250-320\mu\text{g/L}$ )。较高的氮盐水平有利于原甲藻种类的生长,尤其是在低磷条件下,原甲藻种类更具有生长优势。有研究报道,东海原甲藻细胞储备氮、磷营养物质的能力远高于硅藻种类<sup>[15]</sup>,因此,它们可以在低营养条件下仍保持较好的生长状态、较快繁殖速度,并在一段时期内维持这种状态,不同种类的藻细胞营养储存能力的差异对决定藻类种群的生态对策及其种群在群落中的竞争结局都有重要的影响<sup>[16-19]</sup>。东海原甲藻和塔玛亚历山大藻(*Alexandrium tamarense*)在生态策略上的一致性使得它们可以在同一环境中并发成为优势种,这一现象近年来常常发生在浙江沿岸海域。在本文的调查期间也出现了这一现象,不过构成这一现象的赤潮藻是三角棘原甲藻和塔玛亚历山大藻。在5月8日,S3站位形成三角棘原甲藻赤潮,该站位的塔玛亚历山大藻细胞数量也达到最高,为 $3.14 \times 10^5$  cells/L。因此,S3站位形成了三角棘原甲藻和塔玛亚历山大藻的双相赤潮。由此,我们可以推断三角棘原甲藻除了在生长适宜的水温和盐度上与东海原甲藻接近,两者在种群营养生理方面的特征也很接近。

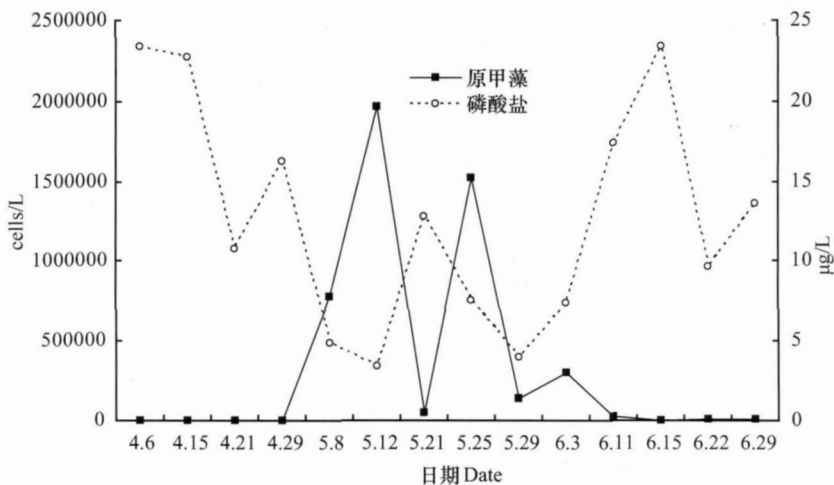


图7 原甲藻细胞数量与磷酸盐浓度的变化趋势

Fig. 7 Curves of *Prorocentrum* population cell abundance and  $\text{PO}_4\text{-P}$  concentration in spring 2006

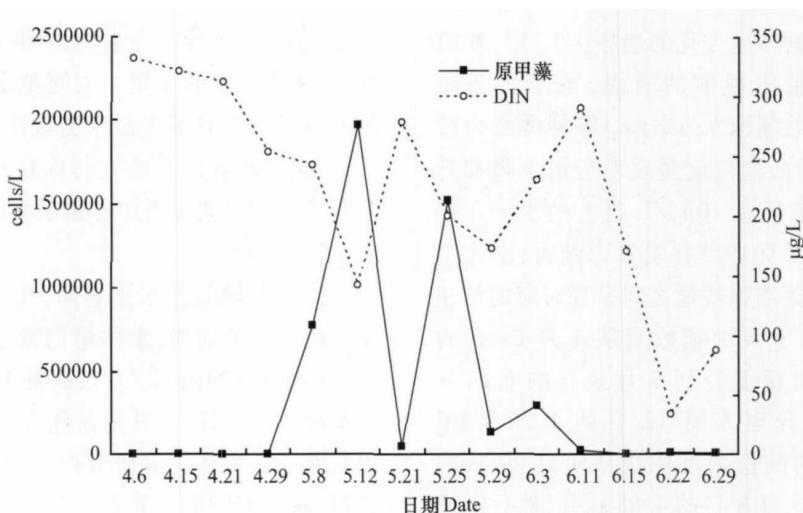


图 8 原甲藻细胞数量与氮盐浓度的变化趋势

Fig 8 Curves of *Prorocentrum* population cell abundance and nitrogen nutrition concentration in spring 2006

南麂海域的氮盐水平较高, 不存在氮盐缺乏的情况, 因此, 磷酸盐水平的高低对浮游植物群落变化的影响极为显著。在低磷酸盐浓度时期来临之前, 需要有一个中高水平磷酸盐浓度时期的存在, 这段中高水平磷酸盐浓度时期的存在, 保证了原甲藻种类的细胞能够快速完成胞内营养物质的储备。随后而来的低磷酸盐浓度水平在一定程度上又抑制了其他藻类如硅藻种类的生长, 原甲藻种类因为体内已经积累充分的营养物质而受低营养环境的影响较小, 因此能够保证它们的继续生长, 继而成为优势种类<sup>[15 20-22]</sup>。本文的调查结果正反映了这一结论。在 4 月 29 日之前的几个调查时段, 水体中磷酸盐维持在 10—23 µg/L 水平之间, 此段时期内, 磷酸盐水平维持在中等水平, 浮游植物以骨条藻、角毛藻等硅藻种类为优势, 细胞数量在  $10^5$  cells/L 以上。到了 4 月 29 日, 磷酸盐浓度已下降至 16.25 µg/L, 这是由于硅藻种类增长的消耗, 以及原甲藻细胞的吸收和胞内积累造成的。在 4 月 29 日至 5 月 8 日的时段内, 磷酸盐水平继续下降至 4.88 µg/L, 这个水平已不能满足硅藻种类的生长, 骨条藻和角毛藻等种类快速消亡, 而原甲藻种类因为胞内营养物质的储备而能够继续增长。之后的 5 月 12 日, 磷酸盐浓度更是下降至 3.38 µg/L, 在这个水平上, 三角棘原甲藻在大部分站位形成赤潮。在东海原甲藻赤潮形成之前也有一个磷酸盐浓度恢复的过程, 如在三角棘原甲藻赤潮消亡的 5 月 21 日, 磷酸盐浓度恢复到 12.75 µg/L, 为东海原甲藻赤潮的形成提供了充足的磷营养物质, 在东海原甲藻赤潮的后期, 磷酸盐水平也下降至 4 µg/L, 低于骨条藻、角毛藻等硅藻种类

的临界值。因此, 原甲藻种类较强的磷营养物质储存能力是其能够在低磷条件下生长并成为优势种类的重要原因。磷酸盐浓度在一定范围之内是越低越有利于原甲藻种类的生长和繁殖, 但是有个最低临界限度。有研究认为甲藻赤潮的消亡可能是因为磷酸盐被耗尽所致<sup>[23 24]</sup>。

总的来说, 南麂海域氮盐水平较高, 并不会成为原甲藻种类生长和增殖的限制因子, 而磷营养盐浓度的高低对原甲藻种群动态具有更加明显的影响。

## 2.7 原甲藻细胞数量与环境因子的相关性分析

将南麂海域 2006 年春季期间, 原甲藻种群的细胞数量与环境因子进行相关性分析, 结果 (表 1)。以 4 个站位表层水体中原甲藻细胞数量的平均值进行的分析中, 发现细胞数量与 N:P 值之间呈现显著的正相关性, 即水体中 N:P 值越高, 越有利于原甲藻细胞数量的增加; 同时, 细胞数量还与磷酸盐浓度之间呈现显著的负相关性, 即磷酸盐浓度越低, 越有利于原甲藻细胞数量的升高。本文认为, 高 N:P 值和低磷酸盐浓度对原甲藻细胞数量促进作用的本质是一致的, 原甲藻细胞数量与 N:P 值之间的正相关性, 其实质应该是水体中磷酸盐浓度的消耗速率快于氮盐, 即较低的磷酸盐浓度引起 N:P 值的升高, 继而有利于原甲藻种类的生长和增殖。在原甲藻细胞数量的峰值期, 水体中 N:P 值均在 25 以上, 最高达到 63.25 这说明在低磷条件下, 原甲藻比其他藻类更具有生长的优势, 这与原甲藻细胞能够储备营养物质的生物学特性有关。若分别以 4 个站位表层水体中的原甲藻细胞数量进行分析, 只有 S3 站位的

细胞数量与 N:P 值之间呈现显著的正相关性, 并与磷酸盐浓度之间呈现显著的负相关性。其余三个站位并未发现与原甲藻细胞数量之间具有显著相关性

的环境因子。具体原因尚不能确定, 可能与洋流干扰有关, 或与原甲藻赤潮后期伴随出现的一定数量的其他藻类有关, 尚需确认。

表 1 春季表层水体中原甲藻细胞数量与环境因子相关系数

Tab. 1 Significant of multivariate general linear factorial analysis between cell abundance of *Prorocentrum* population and environmental factors in water surface in Spring 2006

	T	pH	S	DO	PO <sub>4</sub> -P	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	N:P
S1	- 0.015	0.528	- 0.025	0.515	- 0.478	0.075	- 0.137	- 0.24	0.418
S2	- 0.037	0.567 <sup>f</sup>	0.002	0.446	- 0.502	- 0.007	- 0.22	- 0.278	0.484
S3	- 0.032	0.576 <sup>e</sup>	0.102	- 0.163	- 0.539 <sup>e</sup>	0.285	- 0.027	- 0.125	0.564 <sup>e</sup>
S4	0.002	0.736 <sup>d</sup>	- 0.077	0.119	- 0.487	- 0.106	- 0.146	- 0.265	0.286
Ave	- 0.024	0.631 <sup>f</sup>	- 0.029	0.29	- 0.591 <sup>e</sup>	0.213	- 0.113	- 0.251	0.563 <sup>e</sup>

各站位原甲藻细胞数量的平均值与各项环境因子之间的逐步回归方程是:

$$Pro. = - 224171 + 24533.609 N:P \quad (r = 0.563, r^2 = 0.317, \text{校正 } r^2 = 0.260, F = 5.576, p = 0.036)$$

S3表层原甲藻细胞数量与环境因子的逐步回归方程是:

$$Pro. = - 159424 + 20912.437 N:P \quad (r = 0.564, r^2 = 0.318, \text{校正 } r^2 = 0.261, F = 5.598, p = 0.036)$$

另外, 4个站位表层水体中原甲藻细胞数量的平均值还与 pH 值之间呈现显著的正相关性, 除了 S1 站位, 其他 3 个站位也存在这个结论, 这是因为原甲藻细胞白天时进行光合作用, 吸收消耗水体中大量 CO<sub>2</sub>, 导致水体的 pH 值升高。

### 3 结 论

(1) 南麂海域原甲藻的优势种类是三角棘原甲藻和东海原甲藻, 它们都集中出现在春季 (4—6月)。

(2) 三角棘原甲藻和东海原甲藻细胞数量的春季动态表现为规则的单峰曲线, 前者的最高峰值出现在 5月 12日, 后者的最高峰值出现在 5月 25日, 两者均分别引发赤潮。

(3) 三角棘原甲藻较高细胞数量则相对集中出现在水温为 18.5—19.5℃, 盐度为 29.58‰—30.95‰的水体中; 东海原甲藻较高细胞数量则相对集中出现在水温为 18.5—21.3℃, 盐度为 29.03‰—30.92‰的水体中。

(4) 水体中氮盐和磷酸盐浓度都与原甲藻细胞数量之间呈现对应的负相关, 磷营养盐浓度的高低对原甲藻种群动态具有更加明显的影响。

(5) 原甲藻细胞数量与 N:P 值之间存在显著的正相关性, 并与磷酸盐浓度之间存在显著的负相关性。

### 参考文献:

- [ 1 ] Zhou M J, Zhu M Y, Zhang J Status of harmful algal blooms and related research activities in China [ J ]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2001, 13( 2 ): 54—59 [ 周名江, 朱明远, 张经. 中国赤潮的发生趋势和研究进展. 生命科学, 2001, 13( 2 ): 54—59 ]
- [ 2 ] Lu D D Five red tide species in genus *Prorocentrum* including the description of *Prorocentrum donghaiense* Lu sp. nov. from the East China Sea [ J ]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2001, 19( 4 ): 337—344
- [ 3 ] Wang JH. The HAB species *Prorocentrum dentatum* and its characteristics in East China Sea [ J ]. *Journal of Zhejiang Ocean University*, 2003, 22( 2 ): 128—131 [ 王金辉. 东海赤潮生物具齿原甲藻及其特征. 浙江海洋学院学报 ( 自然科学版 ), 2003, 22( 2 ): 128—131 ]
- [ 4 ] Tang D L, Di B P, Wei G F, et al. Spatial seasonal and species variation of harmful algal blooms in the South Yellow Sea and East China Sea [ J ]. *Hydrobiology*, 2006, 568( 1 ): 245—253
- [ 5 ] Ji H H, Ye S F, Liu X, et al. Ecological characteristics of phytoplankton and causes for frequent occurrence of dinoflagellates red tide in the Nanji Islands Sea Area [ J ]. *Advances in Marine Science*, 2008, 26( 2 ): 234—242 [ 纪焕红, 叶属峰, 刘星, 等. 南麂列岛海域浮游植物生态特征及甲藻赤潮频发原因. 海洋科学进展, 2008, 26( 2 ): 234—242 ]
- [ 6 ] Ji H H, Ye S F, Liu X, et al. The species composition and diversity of zooplankton in Nanji Islands National Nature Reserve [ J ]. *Biodiversity Science*, 2006, 14( 3 ): 206—215 [ 纪焕红, 叶属峰, 刘星, 等. 南麂列岛海洋自然保护区浮游动物的物种组成及其多样性. 生物多样性, 2006, 14( 3 ): 206—215 ]
- [ 7 ] Zhang X H, Zhou Y, Long H, et al. Investigation on zooplankton in Nanji Marine Protected Area [ J ]. *Chinese Journal of Zoology*, 2006, 41( 4 ): 83—86 [ 张晓辉, 周燕, 龙华, 等. 南麂列岛海洋保护区浮游动物调查. 动物学杂志, 2006, 41( 4 ): 83—86 ]



- [ 8 ] Gao A G, Zeng J N, Chen Q Z, *et al*. Time and space distribution of Molluscs of intertidal zone in Nanji Archipelago Marine Nature Reserve [ J ]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, **29**( 2 ): 105—111 [高爱根, 曾江宁, 陈全震, 等. 南麂列岛海洋自然保护区潮间带贝类资源时空分布. 海洋学报, 2007, **29**( 2 ): 105—111]
- [ 9 ] Yao W M, Lu Y B. Red tide and red tide plankton in the center and south coastal area of Zhejiang [ J ]. *Journal of Wenzhou Normal College (Natural Science)*, 2005, **26**( 5 ): 59—62 [姚伟民, 卢益炳. 浙江中、南海域的赤潮和赤潮生物. 温州师范学院学报(自然科学版), 2005, **26**( 5 ): 59—62]
- [ 10 ] Grasshoff K, Kremling K, Ehrhardt M. *Methods of Seawater Analysis (Third Edition)* [ M ]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 1999, 203—223.
- [ 11 ] Zhang C S, Wang J T, Zhu D D, *et al*. The preliminary analysis of nutrients in harmful algal blooms in the East China Sea in the spring and summer of 2005 [ J ]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, **30**( 2 ): 153—159 [张传松, 王江涛, 朱德弟, 等. 2005年春夏季东海赤潮过程中营养盐作用初探. 海洋学报, 2008, **30**( 2 ): 153—159]
- [ 12 ] Li D J, Cao Y, Zhang J. Continuous observation of chlorophyll in *Prorocentrum triestinum* of the Changjiang (Yangtze River) Estuary in the red tide dying time [ J ]. *China Environmental Science*, 2002, **22**( 5 ): 400—403 [李道季, 曹勇, 张经. 长江口尖叶原甲藻赤潮消亡期叶绿素连续观测. 中国环境科学, 2002, **22**( 5 ): 400—403]
- [ 13 ] Chen H L, Li S H, Zhang C S, *et al*. A survey on the red tide of *Prorocentrum donghaiense* in East China Sea 2004 [ J ]. *Ecological Science*, 2006, **25**( 3 ): 226—230 [陈翰林, 吕颂辉, 张传松, 等. 2004年东海原甲藻赤潮爆发的现场调查和分析. 生态科学, 2006, **25**( 3 ): 226—230]
- [ 14 ] Wang J H, Huang X Q. Ecological characteristics of *Prorocentrum dentatum* and the cause of harmful algal bloom formation in China Sea [ J ]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**( 7 ): 1065—1069 [王金辉, 黄秀清. 具齿原甲藻的生态特征及赤潮成因浅析. 应用生态学报, 2003, **14**( 7 ): 1065—1069]
- [ 15 ] Li S H, Li Y. Nutritional storage ability of four harmful algal from the East China Sea [ J ]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2006, **6**( 3 ): 439—444 [吕颂辉, 李英. 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, 2006, **6**( 3 ): 439—444]
- [ 16 ] Anderson T, Schartau A K L, Paasche E. Quantifying external and internal nitrogen and phosphorus pools as well as nitrogen and phosphorus supplied through remineralization in coastal marine plankton by means of a dilution technique [ J ]. *Marine Ecological Progress Series*, 1991, **69**: 67—80
- [ 17 ] Kilham P, Hecky R E. Comparative ecology of marine and freshwater phytoplankton [ J ]. *Limnology and Oceanography*, 1988, **33**: 776—795
- [ 18 ] Dortsch Q, Clayton J R, Thoresen S S. Species differences in accumulation of nitrogen pools in phytoplankton [ J ]. *Marine Biology*, 1984, **81**: 237—250
- [ 19 ] Thompson P A, Oh H M, Rhee G Y. Storage of phosphorus in nitrogen-fixing *Anabaena flos-aquae* (Cyanophyceae) [ J ]. *Journal of Phycology*, 1994, **30**: 267—273
- [ 20 ] Hou J L, Zhang C S, Shi X Y, *et al*. Effect of phosphate in two typical HAB species in East China Sea by mesocosm experiments [ J ]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, **36**( Sup. ): 163—169 [侯继灵, 张传松, 石晓勇, 等. 磷酸盐对两种东海典型赤潮藻影响的围隔实验. 中国海洋大学学报, 2006, **36**( Sup. ): 163—169]
- [ 21 ] Zhang C L, Shi X Y, Han X R, *et al*. Mesocosm experiments of the effects of nutrients on the growth of dominant HAB species in the East China Sea [ J ]. *Marine Fisheries Research*, 2006, **27**( 4 ): 29—35 [张春雷, 石晓勇, 韩秀荣, 等. 营养盐对东海赤潮优势藻种生长影响的船基围隔实验. 海洋水产研究, 2006, **27**( 4 ): 29—35]
- [ 22 ] Li Y B, Han X R, Hu Y C, *et al*. Test on effects of nutrients on growth of phytoplankton in East China Sea in situ [ J ]. *Marine Environmental Science*, 2008, **27**( 2 ): 113—117 [李雁宾, 韩秀荣, 胡跃诚, 等. 营养盐对东海浮游植物生长影响的现场培养实验. 海洋环境科学, 2008, **27**( 2 ): 113—117]
- [ 23 ] Shi Y J, Hu H H, Ma R Y, *et al*. Nitrogen and phosphorus absorption and growth characteristics of *Alexandrium tamarense* [ J ]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**( 7 ): 1143—1146 [石岩峻, 胡晗华, 马润宇, 等. 塔玛亚历山大藻对氮和磷的吸收及其生长特性. 应用生态学报, 2003, **14**( 7 ): 1143—1146]
- [ 24 ] Jiang T J, Xu Y X. Study on the growth of *Alexandrium tamarense* Balech [ J ]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**( 4 ): 472—476 [江天久, 徐轶肖. 塔玛亚历山大藻的生长研究. 水生生物学报, 2006, **30**( 4 ): 472—476]

## DYNAMICS OF *PROROCENTRUM* POPULATION AND ITS RELATION WITH ENVIRONMENTAL FACTORS IN NANJI ISLANDS SEA AREA

LI Yang<sup>1</sup>, LÜ Song-Hui<sup>1,2</sup>, JIANG Tian-Jiu<sup>1,2</sup>, LI Huan<sup>1</sup>, XIAO Yun-Pu<sup>3</sup> and YOU Sheng-Pao<sup>4</sup>

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Biotechnology for Plant Development, College of Life Science, South China

Normal University, Guangzhou 510631; 2. Institute of Harmful Algae and Aquatic Environment, College of Science and Engineering,

Jinan University, Guangzhou 510632; 3. Pingyang Oceanic and Fishery Bureau, Pingyang 325400; 4. Nanji Marine Environmental

Monitoring Station, Pingyang 325400)

**Abstract** *Prorocentrum* is a kind of very common dinoflagellate species in China coastal waters and *P. donghaiense* Lu is the most key bloom causative species in East China Sea in recent years. Better understanding and analysis about the dynamics of *Prorocentrum* population in Nanji Islands Sea Area may support many useful data and provide helpful guides for the ecological studies and protection of Nanji Islands National Nature Reserve. A series of water samples were collected from four stations in Nanji Islands National Nature Reserve from April 2006 to March 2007. During this investigation period monthly samples were gathered from July 2006 to March 2007, which including and corresponding the summer, autumn and winter periods. And in the spring from April to June, 2006, in which period the *Prorocentrum* blooms occurred frequently in recent several years, water samples were collected nearly every week. Both surface and bottom samples were got respectively. Species composition, seasonal variations and vertical distribution of *Prorocentrum* population as well as several chemical parameters were investigated. And the connections between *Prorocentrum* dynamics and several environmental factors such as water temperature, salinity, nitrogen and phosphorus nutrition concentration were analyzed. Totally, four *Prorocentrum* species have been found: *P. triestinum* Schiller, *P. donghaiense* Lu, *P. micans* Ehrenberg and *P. sigmoides* Bohm, in which *P. triestinum* and *P. donghaiense* were the dominant species of phytoplankton, especially in spring and induced blooms in 12 May and 25 May respectively. During *Prorocentrum* blooms periods *Prorocentrum* cell abundances distributing in the surface water levels were much higher than that in the bottom water levels. It was the result that *Prorocentrum* cells had the ability to move anywhere through their flagella swinging. So they could shift their vertical distribution based on different times in a day moving to and distributing near the upper water levels in the daylight for better sunshine and moving to the bottom water levels during the dark. Peak abundances of *P. triestinum* occurred under the water temperature 18.5—19.5°C and salinity 29.58‰—30.95‰. And the peak abundances of *P. donghaiense* occurred under the water temperature 18.5—21.3°C and salinity 29.03‰—30.92‰. Higher *Prorocentrum* population cell abundances corresponded to both lower phosphorus and nitrogen nutrition concentrations. Using correlate analysis by SPSS, it is revealed that the dynamics of *Prorocentrum* population has obvious positive correlation with the ratio of DIN to PO<sub>4</sub>-P, and obvious negative correlation with the phosphorus concentrations. The phosphorus concentration is the key role influencing on the variation of *Prorocentrum* population. The nutritional storage ability of *Prorocentrum* cells is much higher than that of many diatom species. Maybe it is the actual reason why *Prorocentrum* cells could grow better and cause blooms under lower nutrition concentration in spring in Nanji Islands National Nature Reserve.

**Key words** *Prorocentrum* population; Dynamics; Environmental factors; Nanji Islands National Nature Reserve