

# 胶州湾营养盐限制浮游植物生长的初步模拟现场实验研究\*

王 勇<sup>1</sup> 赵 澎<sup>1</sup> 单宝田<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 青岛市环保局 266003)

(<sup>2</sup> 青岛海洋大学 266003)

**提要** 于1998年8月至1999年2月,在胶州湾采用现场添加营养盐的实验方法初步研究了硝酸盐、磷酸盐、铁、硅酸盐对浮游植物生长的限制作用。分级叶绿素a的结果显示,在1998年夏季,氮(N)或单位、或与磷(P)同时限制浮游植物的生长;在1998年秋季则可能是N与P共同对浮游植物群落产生调控作用;而在1999年冬季,硅(Si)则是首要的限制浮游植物生长的营养元素。

**关键词** 胶州湾,浮游植物,营养盐限制

现场实验的结果证实,在大多数沿岸海洋生态系统中,N或者P是首要的限制元素。Malone<sup>[2]</sup>1996年发现在切萨皮克湾,有冬、春季P限制与夏季N限制的季节交替。在挪威的Oslofjord,情况则正好相反,Paasche和Erga<sup>[4]</sup>1988年的现场实验证实,春季第一次硅藻的爆发被N所限制,但在鞭毛藻处于优势的夏秋季则有明显的P限制作用。由于工农业的迅速发展,沿岸海水中Si限制的可能性也越来越大,这主要是因为Si的溶解与循环比N与P慢许多,所以沿岸Si限制的情况也比较常见。Hutchins和Bruland<sup>[6]</sup>1998年发现在加利福尼亚沿岸上升流海区有较明显的Fe限制作用,他们同时还发现,由于Fe的限制作用,硅藻不能充分利用海水中的N,导致硅藻有较高的Si:N吸收比,从而进一步产生Si的限制作用。

胶州湾代表着太平洋西岸北温带海湾生态系统的主要类型。由于青岛市经济的迅速发展,大量的污水排入胶州湾,可能导致胶州湾海水的富营养化。目前在胶州湾,是否存在营养盐限制,是常量营养盐还是微量元素限制,是否存在Si限制等问题还有不同的看法,急需通过科学研究予以解决。已有学者开展对胶州湾营养盐限制的室内研究和化学计量法研究,但有关现场实验的结果目前未见报道。本文对胶州湾营养盐限制浮游植物生长的情况进行了初步的现场实验研究,以期对这一关键问题的解决提

供有效的研究数据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 采样站点描述

每季度进行的胶州湾生态调查共设10个站点。营养盐限制的现场实验研究开展于湾中央的5号站(120°15'E、36°6'N)。根据1998年8月至1999年2月的调查结果,5号站平均水深14.7m,表层平均的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为5.04  $\mu\text{mol/L}$ ,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度为5.57  $\mu\text{mol/L}$ ,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度为2.02  $\mu\text{mol/L}$ ,  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度为0.39  $\mu\text{mol/L}$ ,  $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$ 浓度为4.03  $\mu\text{mol/L}$ 。平均水色为16。平均透明度为1.8m。表层平均温度为16.46°C,平均盐度为31.79(表1)。

### 1.2 叶绿素a的测定

水样用塑料桶采集,每个粒级(超微型浮游植物(picophytoplankton),简称pico-, <2  $\mu\text{m}$ ;微型浮游植物(nanophytoplankton),简称nano-, 2~20  $\mu\text{m}$ ;网采浮游植物(netphytoplankton),简称net-, 20~200

\* 中国科学院知识创新工程项目:典型湖泊与海湾富营养化机理及生态系统响应的研究KZCX2-403

第一作者:王勇,出生于1973年,博士,研究方向:海洋生态。E-mail:wangyong@ms.qdio.ac.cn

收稿日期:2001-11-26;修回日期:2002-05-09

表 1 胶州湾 5 号站表层海水中营养盐与水文状况(1998 年 8 月至 1999 年 2 月)

Tab.1 Status of nutrient and hydrological factors in surface seawater at Sta. 5 in Jiaozhou Bay(from August, 1998 to February, 1999)

| 采水时间<br>(年-月) | 水深(m) | 温度(℃) | 盐度    | 水色   | 透明度(m) | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup><br>(μmol/L) | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup><br>(μmol/L) | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(μmol/L) | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup><br>(μmol/L) | SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup><br>(μmol/L) |
|---------------|-------|-------|-------|------|--------|--|--|--|---|--|
| 1998-08       | 15    | 27.20 | 31.65 | 13   | 3      | 4.49                                     | 1.67                                     | 7.88                                     | 0.20                                      | 4.03                                       |
| 1998-11       | 15    | 16.98 | 31.84 | 19   | 1      | 4.97                                     | 3.95                                     | 7.10                                     | 0.55                                      | 5.35                                       |
| 1999-02       | 14    | 5.20  | 31.89 | 16   | 1.4    | 5.66                                     | 0.45                                     | 1.74                                     | 0.41                                      | 2.71                                       |
| 平均值           | 14.7  | 16.46 | 31.79 | 16.0 | 1.8    | 5.04                                     | 2.02                                     | 5.57                                     | 0.39                                      | 4.03                                       |

μm)取 300~500 ml 水样。先用 20 μm 的筛绢, 2 μm 的 Poretics 公司聚碳酸酯膜对水样进行分级, 每个粒级取 250 ml 水样在小于 13 290 Pa 的压力下过滤(用 25 mm Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜收集叶绿素 a), 滤液在 -20 °C 黑暗保存。叶绿素 a 含量采用 Welschmeyer<sup>[3]</sup>1994 年的方法测定。先用 90% 的丙酮在冰箱的黑暗条件下提取色素 24~30 h, 然后用岛津公司的 RF-5301 型荧光分光光度计测定, 标准曲线用 Sigma 公司的标准叶绿素 a 样品制作, 在这之前, 该标准样品用三波长法标定。

### 1.3 生物实验设计

采集表层水 40~50 L, 先过 200 μm 筛绢, 以去除大型浮游动物的随机性影响。采用 5 L 的玻璃瓶对 N、P、Fe 的上行效应进行研究。共分为 6 种实验处理: (1)对照(C); (2)低 N 添加组(LN: 10 μmol/L NO<sub>3</sub><sup>-</sup>); (3)高 N 添加组(HN: 20 μmol/L NO<sub>3</sub><sup>-</sup>); (4)P 添加组(P: 2 μmol/L PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>); (5)N 与 P 同时添加组(N + P: 10 μmol/L NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + 2 μmol/L PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>); (6)铁(Fe)添加组(Fe: 7 nmol/L Fe)。采用 1 L 的聚碳酸酯瓶, 对 Si 的作用进行研究, 分为(1)聚碳酸酯瓶对照(CPC); (2)Si 添加组(Si: 20 μmol/L Si)。将瓶置于流水控温槽中模拟现场培养 8 d, 在每次实验的开始与结束时取样测定叶绿素 a。

## 2 结果

### 2.1 浮游植物对营养盐添加的响应效果

1998 年夏季, 各组 net-叶绿素 a 与初始时刻比较都增加, HN 实验组与 N + P 实验组增加最显著; 对照、CPC 与 LN 实验组 nano-叶绿素 a 较初始时刻下降, 其它各组都增加, N + P 组增加最显著; 各组 pico-叶绿素 a 较初始时刻都下降(图 1)。

1998 年秋季, 各组 net-叶绿素 a 与初始时刻比较都增加, N + P 实验组增加最显著; 各组 nano-叶绿素 a 与初始时刻比较都增加, 除对照、LN 与 CPC 组外各组都增加显著; 各组 pico-叶绿素 a 较初始时刻都增加, LN 实验组增加最显著(图 1)。

1999 年冬季, 对照组 net-叶绿素 a 较初始时刻下降, 其它各组 net-叶绿素 a 与初始时刻比较都增加, Si 实验组增加最显著; 各组 nano-叶绿素 a 与初始时刻比较都增加, 但对照与 Fe 实验组增加不如其它各组显著; 各组 pico-叶绿素 a 较初始时刻都增加, Si 实验组增加最显著(图 1)。

### 2.2 培养前后各粒级浮游植物叶绿素 a 组成比例的变化

1998 年夏季, 初始时刻 net-叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例最大, 达到 67.2%, pico-最小, 仅为 10.4%; 与初始值比较, 第 8 天各组 net-叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例都增加, LN 实验组增加最显著, 达到 85.5%; 除 Fe 实验组外, 各组 nano-叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例都下降; 第 8 天各组 pico-叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例都较初始值低; 第 8 天, 各组仍然是 net-占总叶绿素 a 的比例最大(图 2)。

1998 年秋季, 初始时刻 nano-与 net-叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例最大, 分别为 46.4% 与 43.2%; 与初始值比较, 第 8 天各组 net-叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例都增加, N + P 实验组增加最显著, 达到 67.9%, 对照组也较显著; 仅 Fe 实验组 nano-叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例略有增加; 除 LN 与 CPC 组 pico-叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例增加外, 其它各组均下降, LN 实验组增加最显著, 达到 14.8%; 第 8 天, 除 Fe 实验组外, 各组都是 net-占总叶绿素 a 的比例最大(图 2)。

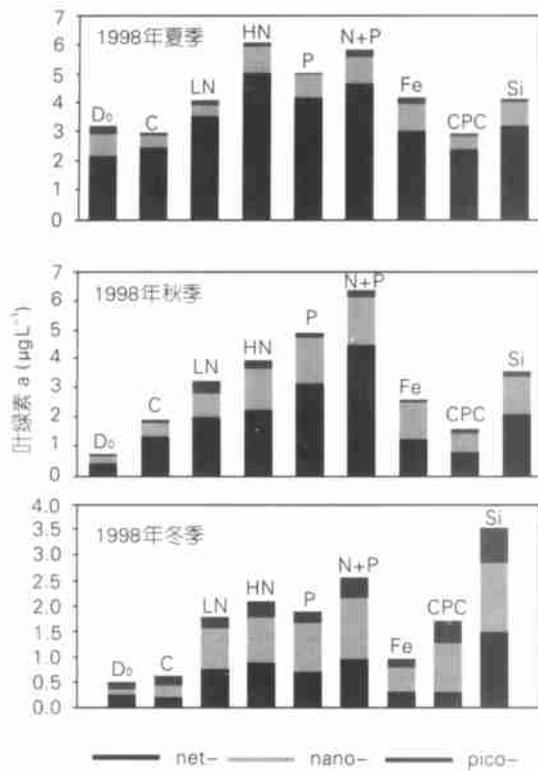


图1 胶州湾现场实验中初始时刻与第8天各组分粒级叶绿素 a 含量的比较

D<sub>0</sub>: 初始值; C: 对照; LN: 低 N 实验组; HN: 高 N 实验组; P: P 实验组; N+P: N、P 实验组; Fe: Fe 实验组; CPC: 聚碳酸酯瓶对照组; Si: Si 实验组

Fig. 1 Comparison of size-fractionated Chl a in Day 0, Day 8 of every treatment in *in-situ* experiments in Jiaozhou Bay

D<sub>0</sub>: start value; C: control; LN: low N enrichment; HN: high N enrichment; P: P enrichment; N+P: N and P enrichment; Fe: Fe enrichment; CPC: control of polycarbonate bottle; Si: Si enrichment

1999 年冬季, 初始时刻 net- 叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例最大, 为 46.6%, nano- 占的比例最小, 仅为 20.2%; 与初始值比较, 第 8 天各组 net- 叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例都下降; 各组 nano- 叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例都增加, CPC 组增加最显著, 达到 57.1%; 各组 pico- 叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例都下降, P 实验组下降最显著, 仅为 12.8%; 第 8 天, 除 Si 与 HN 实验组 net- 与 nano- 叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例接近外, 各组均是 nano- 叶绿素 a 占总叶绿素 a 的比例最大(图 2)。

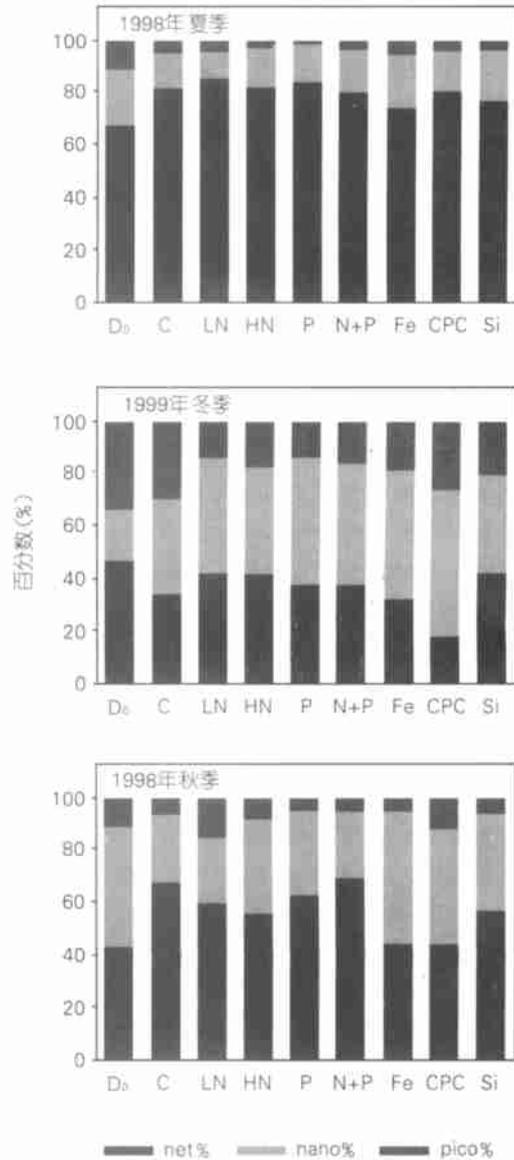


图2 胶州湾现场实验中各粒级叶绿素 a 占总叶绿素 a 的百分比

D<sub>0</sub>: 初始值; C: LN, HN, P, N+P, Fe, CPC, Si; 第 8 天叶绿素 a 浓度

Fig. 2 Comparing of percentage of size-fractionated Chl a to bulk Chl a in *in-situ* experiments in Jiaozhou Bay

D<sub>0</sub>: start value; C: LN, HN, P, N+P, Fe, CPC, Si: Chl a concentration in Day 8

### 3 讨论

#### 3.1 胶州湾营养盐限制的季节变化

在整个胶州湾的水平上, 化学计量法的结果显

示:过去 10 年中,从季节来看,春季(占观察次数的 78%)与冬季(60%)几乎肯定会发生 Si 限制作用,但很少会在夏季(5%)与秋季(5%)。P 限制偶然会发生在秋季(23%)与夏季(11%),但不太可能发生在春季(8%)与冬季(6%)<sup>①</sup>。在胶州湾的现场实验中,冬季发生了比较显著的 Si 限制作用,在夏季与秋季都有 P 限制作用发生,从结果上对化学计量结果予以支持,但由于实验频次较少,还不能下明确性的结论

### 3.2 营养盐添加对浮游植物群落生长和粒级组成的影响

胶州湾模拟现场实验的结果反应:在胶州湾,各种营养盐的添加对浮游植物的生长都有促进作用,但 Fe 的效果最不显著。1998 年夏季,伴随着营养盐的添加,培养期间 HN 组与 N+P 组叶绿素 a 的增长最显著,说明有 N 单独或与 P 共同的营养盐限制作用;1998 年秋季,培养期间 N+P 实验组的叶绿素 a 浓度增长最为显著,可能在这段时期 N 与 P 共同限制浮游植物的生长;1999 年冬季,培养期间 Si 实验组叶绿素 a 的增长程度最大,其它各组都不如 Si 实验组显著,说明在调查期间, Si 是首要的限制浮游植物生长的营养元素。

1998 年夏季,在采样前曾有异常天气状况,导致胶州湾发生大面积赤潮,因此虽然本次实验采水期间, N 营养盐含量较高,但由于浮游植物新陈代谢旺盛和此前的异常气象条件,导致仍然有比较显著的 N 限制作用发生,本底  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 含量较低,所以 P 也对浮游植物的生长产生限制作用;1999 年冬季,本底  $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si 含量较低,导致 Si 限制作用的发生。1998 年秋季的结果较异常,营养盐本底值含量较高,似不应该出现营养盐限制,但实验结果则显示了比较显著的 N 与 P 共同限制作用,这可能与浮游植物群落的组成有关。

从叶绿素 a 的结果来看, nano- 与 net- 是胶州湾浮游植物生物量的主要组成部分,这与吴玉霖和张永山<sup>[1]</sup>1995 年的结果相似。各航次中都是 nano- 或 net- 占浮游植物生物量的比例最大。伴随着营养盐的添加,一些实验中浮游植物群落的粒级组成发生了变化,但在绝大多数实验中,培养后期仍然是 nano- 或 net- 占浮游植物生物量的比例最大。

1998 年夏季的模拟现场实验中, pico- 叶绿素 a 含量在培养期间都下降,这说明在实验中有“瓶子效应”发生。Rudek 等<sup>[5]</sup>1991 年指出,“瓶子效应”包括生物在瓶壁上的生长,自然食物网的变化,以及封闭的生物群落与横向或纵向营养盐流通的隔离。现场实验的一个缺点就是不能完全杜绝“瓶子效应”,但在胶州湾现场实验的研究中,“瓶子效应”对实验结果没有造成显著影响。

### 参考文献

- 1 吴玉霖、张永山. 胶州湾叶绿素 a 和初级生产力的分布特征. 见:董金海、焦念志主编. 胶州湾生态学研究, 北京:海洋出版社, 1995. 137~149
- 2 Malone T. C., Conley D. J., Fisher T. R. *et al.*. Scales of nutrient-limited phytoplankton productivity in Chesapeake Bay, *Estuary*, 1996, 19:371~385
- 3 Welschmeyer N. A. . Fluorometric analysis of chlorophyll a in the presence of chl-b and phaeopigments, *Limnol. Oceanogr.*, 1994, 39: 1 985~1 992
- 4 Paasche E., Erga S. R. . Phosphorus and nitrogen limitation of phytoplankton in the inner Oslofjord (Norway), *Sarsia*, 1988, 73:229~243
- 5 Rudek J., Paerl H. W., Mallin M. A. *et al.*. Seasonal and hydrological control of phytoplankton nutrient limitation in the Lower Neuse River Estuary, North Carolina, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1991, 73:133~142
- 6 Hutchins D. A., Bruland K. W. . Iron-limited diatom growth and Si: N uptake ratios in a coastal upwelling regime, *Nature*, 1998, 393:561~564

<sup>①</sup> Jiao N., Zhao S., Wang Y., Shen Z., Wu Y, 2000. Causes and consequences of changes in nutrient structure in a typical coastal waterbody, with special reference to silica-limitation of phytoplankton, *Limnol. Oceanogr.*, (待发表)。

研究报告 *REPORTS*

# PRELIMINARY IN-SITU EXPERIMENTAL STUDIES OF NUTRIENT LIMITATION TO PHYTOPLANKTON IN JIAOZHOU BAY

WANG Yong<sup>1</sup> ZHAO Peng<sup>1</sup> SHAN Baotian<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Environmental Protection Bureau of Qingdao, 266003)

(<sup>2</sup> Ocean University of Qingdao, 266003)

Received: Nov., 26, 2001

**Key Words:** Jiaozhou Bay, Phytoplankton, Nutrient limitation

## Abstract

The preliminary studies of nitrate, phosphate, iron, silicate limitation to phytoplankton was conducted in Jiaozhou Bay with insitu experiments from August 1998 to February 1999. Size-fractionated Chlorophyll a results showed that phytoplankton growth was limited singly by nitrogen or colimited by both nitrogen and phosphorus in summer 1998. Phytoplankton community was colimited by N and P in autumn 1998. But Si was the primary nutrient limiting to phytoplankton growth in winter 1999.

(本文编辑:张培新)