

渤海春季营养盐限制的现场实验^{*}

邹 立 张 经

(青岛海洋大学化学化工学院 青岛 266003)

(青岛海洋大学化学化工学院 青岛 266003; 华东师范大学河口海岸国家重点实验室 上海 200062)

提要 1999 年 4—5 月,在现场条件下对天然水体中浮游植物以外加营养盐受控培养的方式,研究和探讨春季渤海中部、莱州湾和渤海海峡 3 个海区的浮游植物生长的营养盐限制问题。结果表明,在莱州湾附近浮游植物生长受到显著的磷限制;尽管水体中硅酸盐浓度较历史水平大大降低,并且实验进行时硅藻为优势种,但是硅酸盐尚不成为限制因子;渤海中部不存在营养盐的限制问题,营养盐浓度和结构相对适宜;渤海海峡也不存在营养盐的限制问题,但是溶解无机氮的相对含量略低。

关键词 渤海,浮游植物,营养盐限制

中图分类号 P736.4

渤海($37^{\circ}07' - 41^{\circ}00'N$, $117^{\circ}35' - 122^{\circ}25'E$)是中国北方的内海,也是多条河流的入海口(如黄河、海河、辽河和滦河等)。由于其面积较小(约为 $7.7 \times 10^4 \text{ km}^2$),深度较浅,平均水深为 18m,并且几乎被陆地所包围,所以渤海的物理、化学和生物特性主要受陆地环境和河流输入的影响。在人文活动影响下,渤海成为我国一个重要的海洋生产场。

浮游植物是海洋生产场的主要初级生产者,担负着将无机物转换成有机物的重任,是天然有机生产体系的基石。通常认为地球拥有丰富的碳资源,因此有机物的骨架——碳元素不会成为浮游植物生长的限制因素,而限制因素往往是浮游植物生命活动中同样不可缺少的氮、磷或铁元素。渤海的营养盐结构和叶绿素浓度不断发生变化,1982 年和 1992 年的调查资料表明(林庆礼等,1991;崔毅等,1996),10 年间溶解无机氮的平均浓度有所增加,而磷酸盐和硅酸盐的平均浓度则大幅度降低,相差约 3 倍。生物活动中的限制因素是那种在量上最接近于维持生命活动所需要的最小量的物质。这个定义可以被应用于从细胞代谢到全球生物地球化学循环的任何尺度中。渤海营养盐结构的改变,使得浮游植物生命活动的营养状况和主要限制因素发生变化。

探讨浮游植物生长的营养盐限制问题,有不同的方法:(1)浮游植物大致按一定的比例吸收营养盐,因此可以根据水体中营养盐的浓度和比例,判断浮游植物的营养盐限制问题;(2)以室内培养的方式,测定浮游植物对营养盐的吸收速率,通过与水体中营养盐浓度的比较,判断浮游植物的营养盐限制问题;(3)直接通过现场的添加营养盐受控培

^{*} 国家自然科学基金资助项目,497901001 号;国家重点基础研究专项经费资助,G19990437 号。邹立,女,出生于 1969 年 10 月,博士,E-mail:zouli@ouqd.edu.cn

养,研究浮游植物的营养盐限制问题。相比较而言,现场受控实验具有更接近于自然状况的特点,因此被越来越多的学者所采用(Bernhard *et al*, 1997; Elser *et al*, 1986; Frey *et al*, 1980; Hutchins *et al*, 1998; Smith, 1984)。目前国内主要采用前2种方法(李铁等, 1999; 朱树屏等, 1961; 张诚等, 1997; 林庆礼等, 1991; 崔毅等, 1996), 而现场受控实验相对较少(王勇等, 1999)。

本文于1999年4—5月,在现场条件下对天然水体中浮游植物以外加营养盐进行受控培养的方式,研究和探讨渤海中部、莱州湾和渤海海峡3个海区浮游植物生长的营养盐限制问题。

1 实验站位与方法

1.1 实验站位

现场受控培养实验在“东方红2号”调查船上进行。实验站位A4、B1和E3分别位于渤海海峡、莱州湾和渤海中部,如图1所示。

1.2 现场培养方法

于设定站位取表层海水,经200μm绢筛滤除大型浮游动物干扰后,分装到1.5L培养瓶中,分别添加高浓度的硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐使用液,使培养瓶中3种营养盐的浓度各约为原水体中浓度的2倍。平行双样,同时设空白对照。摇匀培养瓶后,为避免循环水的沾污,在瓶口处外加一层聚乙烯薄膜,扎紧后置培养箱中培养。培养箱放在甲板上可以直接接受阳光处,通循环海水以维持现场温度条件,并经常振荡以防止浮游植物聚集。培养周期为4—7d,每天定时取Chl. *a*和营养盐样品。实验组的设计和培养时间见表1。

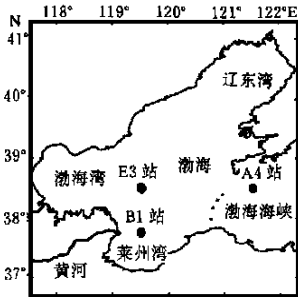


图1 渤海实验站位(1999年春季)
Fig. 1 Sampling location sites in the Bohai Sea (spring season, 1999)

表1 实验组的设计和培养时间
Tab. 1 Experimental groups and incubation times

站位	实验组	培养时间(d)							
		0	1	2	3	4	5	6	7
A4	对照	+	+	+	+	+	+	+	
	加NO ₃ ⁻	+	+	+	+	+	+	+	
	加PO ₄ ³⁻	+	+	+	+	+	+		
	加SiO ₃ ²⁻	+	+	+	+	+	+	+	
E3	对照	+	+	+	+	+	+	+	+
	加NO ₃ ⁻	+	+	+	+	+	+	+	+
	加PO ₄ ³⁻	+	+	+	+	+	+	+	
	加SiO ₃ ²⁻	+	+	+	+	+	+	+	+
B1	对照	+	+	+	+	+			
	加PO ₄ ³⁻	+	+	+	+	+			
	加PO ₄ ³⁻ & SiO ₃ ²⁻	+	+	+	+	+			

实验所用绢筛、培养瓶和过滤器等先用 1: 5HCl 渍泡 24h 以上, 再用去离子水洗净, 最后用现场海水润洗。

1.3 取样方法与样品保存

Chl. *a* 和营养盐样品均用 0. 45μm 滤膜过滤。其中 Chl. *a* 样品过滤时加入碳酸镁饱和溶液, 以防止镁离子的流失。

Chl. *a* 样品膜对折后, 用铝箔包裹深度冷冻保存, 两个月内分析。

营养盐样品加入饱和 HgCl₂ 溶液, 常温避光保存, 半年内分析。

1.4 样品分析

1.4.1 叶绿素 *a* Chl. *a* 的测定为分光光度法(Parsons *et al.*, 1984)。样品用 5ml 90% 丙酮溶液在 4℃以下暗处提取 24h 后, 离心取上清液, 1cm 比色皿测定, 计算公式为:

Chl. *a*(mg/m³)= (11. 85× *E*₆₆₄− 1. 54× *E*₆₆₇− 0. 08× *E*₆₃₀− 10. 23× *E*₇₅₀) 5×/ *V*×1000 (1)

这里, *E*₆₆₄、*E*₆₆₇、*E*₆₃₀ 和 *E*₇₅₀ 分别代表样品在 664、667、630 和 750nm 波长下的吸光值, *V* 的单位为毫升, 代表 Chl. *a* 样品的过滤体积。

1.4.2 营养盐 营养盐采用分光光度法测定(Parsons *et al.*, 1984), 方法、检测限和精度见表 2。其中溶解无机氮(DIN) 浓度为亚硝酸氮、硝酸氮和氨氮浓度之和。

表 2 营养盐分析方法、检测限和精确度
Tab. 2 Methods, measuring ranges and precisions of nutrient analysis

营养盐形态	方法	检测限(μmo/L)	精确度(%)
NO ₂ ⁻	重氮- 偶氮法	0. 02	0. 5
NO ₃ ⁻	Cd- Cu 还原法	0. 05	1. 2
NH ₄ ⁺	次溴酸钠氧化法	0. 15	3. 7
PO ₄ ³⁻	磷钼蓝法	0. 03	0. 6
SiO ₃ ²⁻	硅钼蓝法	0. 05	0. 5

2 结果

A4、E3 和 B1 站现场受控培养的营养盐和 Chl. *a* 浓度结果见图 2 与图 3。

2.1 现场培养盐浓度变化

3 个站位各实验组培养过程中溶解无机氮、磷酸盐和硅酸盐浓度的变化通常与 Chl. *a* 变化方向相反, 即 Chl. *a* 浓度增加时, 营养盐浓度随之降低。由于培养是在相对封闭的培养瓶中进行, 可以认为营养盐浓度的变化只与浮游植物的生命活动有关。

2.2 培养起始时的营养盐与 Chl. *a* 浓度

从 Chl. *a* 指示的生物量来看, 从 A4 站至 E3 站, 到 B1 站, 即从渤海海峡, 渤海中部, 至莱州湾, Chl. *a* 浓度依次增高, 最高与最低浓度相差近 4 倍。从营养盐浓度来看, E3 站即渤海中部的浓度最高; B1 站的磷酸盐浓度很低, 仅为 0. 05μmol/L; A4 站的溶解无机氮浓度较低; 硅的相对含量较高, 为氮的 1. 29—3. 45 倍。

2.3 A4 站营养盐与 Chl. *a* 浓度

与对照组相比, A4 站外加磷酸盐和硅酸盐培养的 Chl. *a* 浓度没有显著变化, 外加磷酸盐培养在前 4d 与对照组没有太大差别, 从第 4 天开始明显高于对照组, 表现出一定的

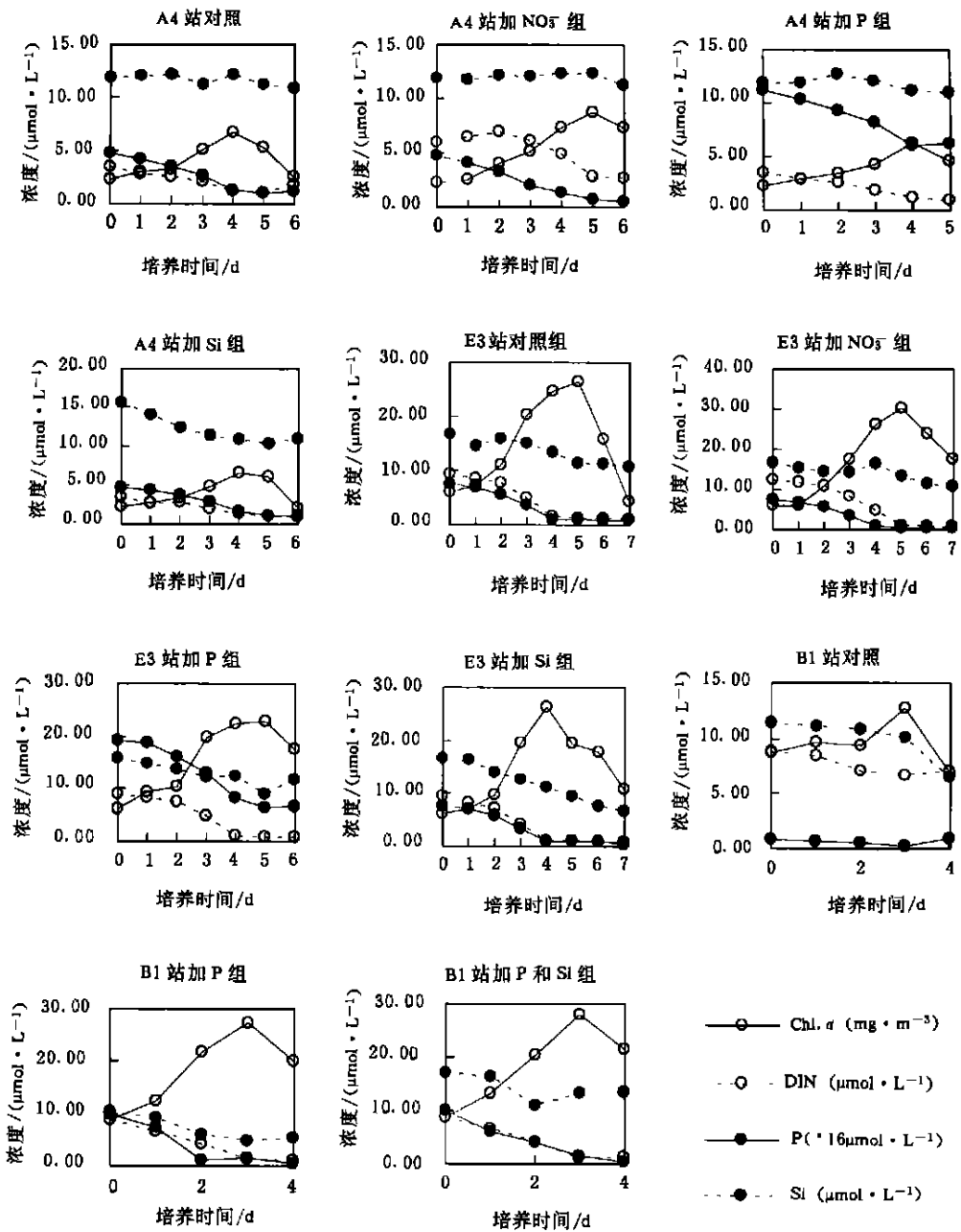


图2 现场受控培养营养盐和叶绿素 *a* 浓度

Fig. 2 Nutrients and Chl. *a* concentrations during incubations *in situ*

注:图中叶绿素 *a* 的浓度单位为($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$);

为使图中磷酸盐的浓度标志更清楚,将实测值乘以 16, 表示为 $\text{P}^* 16$

增长潜力,并且对照组在培养过程中 Chl. *a* 浓度有较明显的峰值,故而认为在 A4 站浮游植物生长不存在显著的营养盐限制问题。

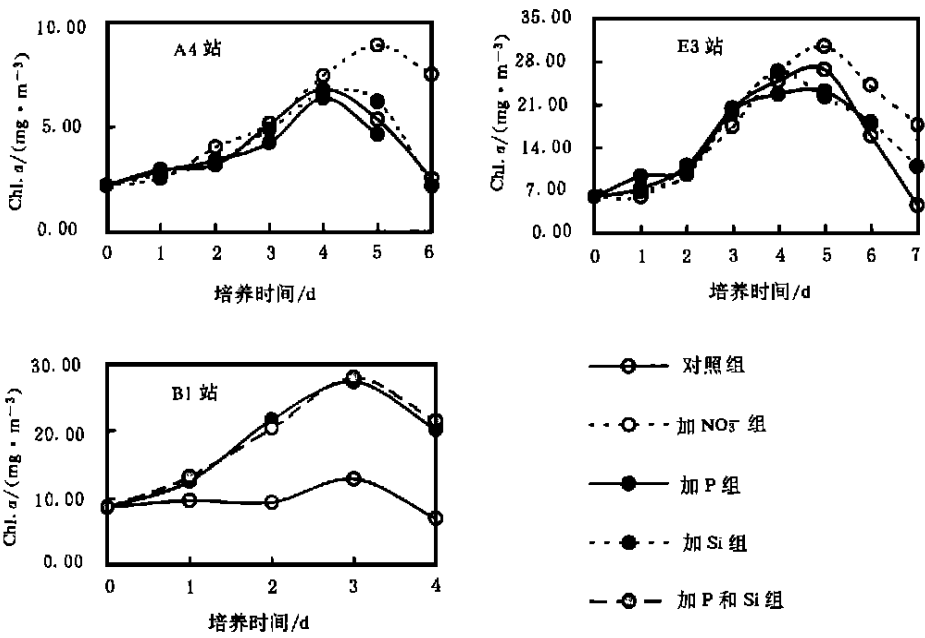


图3 现场培养过程中各实验组叶绿素 *a* 浓度的变化
Fig. 3 Chl. *a* concentrations of the *in situ* enrichment incubations

2.4 E3 站营养盐与 Chl. *a* 浓度

E3 站与 A4 站相似, 对照组在培养过程中 Chl. *a* 有明显的峰值; 并且与对照组相比, 外加 3 种营养盐均没有引起 Chl. *a* 浓度的明显增长。因此认为 E3 站浮游植物生长同样不存在显著的营养盐限制问题。

2.5 B1 站营养盐与 Chl. *a* 浓度

与 A4 站和 E3 站大不相同, 首先对照组在培养过程中没有明显的 Chl. *a* 浓度的高值, 也没有出现显著降低的现象, 浮游植物生长处于相对稳定的状态。与对照组相比, 外加磷酸盐与同时外加磷酸盐和硅酸盐组的 Chl. *a* 浓度显著增加, 而这两个实验组之间却没有显著差异, 并且 B1 站磷酸盐浓度极低, 仅为 0.05μmol/L, 处于几乎被耗尽的状态, 因此认为在 B1 站, 即在莱州湾黄河入海处附近为显著的磷限制。

3 讨论

调查资料表明¹⁾ (林庆礼等, 1991; 崔毅等, 1996), 在人文活动的影响下, 渤海的营养盐浓度和结构不断发生变化, 40 年内渤海中部硝酸氮浓度呈现明显的增加趋势(表 3)。其中 1992 年与 1960 年的年平均浓度相差 5.8 倍, 相当于平均每年递增 15%。从历史资料来看, 1960 年前后, 每年初春浮游植物开始繁殖并消耗海水中的营养盐, 3—4 月浮游植物数量发展到全年最高峰时, 渤海中部硝酸氮含量下降到接近零值, 浮游植物生长受到限制 (朱树屏等, 1961)。1982 年的调查结果表明 (林庆礼等, 1991), 尽管浮游植物的年平均数

1) 顾宏堪, 林庆礼, 1964. 中国近海海水中溶解氧、磷酸盐、硅酸盐及酸碱度的分布. 全国海洋综合调查报告第六册. 中国科学技术委员会海洋组海洋综合调查办公室. 1—96

量(637×10^4 个细胞/ m^3) 比 1959 年(361×10^4 个细胞/ m^3) 增长近一倍, 但是春末渤海中部硝酸氮降到零值的现象不复存在, 而总无机氮对浮游植物有明显影响。本文研究结果表明, 在渤海中部不仅不存在氮限制问题, 而且氮含量处在比较合理的比例上, 并略高于 Redfield 比值(表 4)。

表 3 渤海中部硝酸氮、磷酸盐和硅酸盐的平均浓度($\mu\text{mol/L}$)

Tab. 3 Aaverage concentrations ($\mu\text{mol/L}$) of nitrate, phosphate and silicate

营养盐	1960 年		1982 年		1992 年		1998—1999 年	
	年均	5, 8 月 平均	年均	5, 8 月 平均	年均	5, 8 月 平均	年均	5, 8 月 平均
硝酸氮	0. 30	—	1. 13	1. 10	1. 74	1. 32	—	3. 55
磷酸盐	0. 76	—	1. 14	1. 06	0. 36	0. 33	—	0. 31
硅酸盐	26. 6	—	16. 96	23. 02	6. 44	6. 75	—	6. 59

注: —为缺少资料

表 4 各实验站位的 N/P 和 Si/N

Tab. 4 Ratios of N/P and Si/N at the experimental stations

实验站位	A4	E3	B1
N/P	11. 5	19. 9	177
Si/N	3. 43	1. 78	1. 29

利津监测站的记录表明, 黄河断流的天数由 1982 年的 10d 上升到 1995 年的 119d。同时, 渤海硅酸盐浓度大幅度降低, 1992 年渤海中部硅酸盐的年平均浓度为 1960 年的 25%, 认为河流输入量的减小是渤海硅酸盐浓度降低的主要原因。硅与氮和磷相比再生速率慢, 由此, 硅酸盐浓度较大程度的降低, 尤其在硅藻大量繁殖的季节, 可能成为其生长的限制因素。从 B1 站营养盐结构来看, N/P 值非常大(表 4), 推测为显著的磷限制, 又考虑在 B1 站硅藻为优势种, 在硅藻大量繁殖时是否会出现一定程度的硅限制? 故现场受控培养实验时外加磷酸盐和硅酸盐。与对照组相比, 培养至第 4d 时外加磷酸盐与同时外加磷酸盐和硅酸盐培养的 Chl. *a* 浓度增加近 3 倍, 并且仍保持增长趋势, 表明 B1 站, 即在莱州湾黄河入海处为显著的磷限制; 外加硅酸盐培养的 Chl. *a* 浓度比外加磷酸盐的 Chl. *a* 浓度略有增加而不明显, 表明尽管该海域硅藻为优势种, 但是不存在显著的硅限制。本文研究表明, 尽管硅酸盐浓度与历史资料相比大幅度降低, 但是尚不构成对浮游植物生长的限制。如果渤海中的硅酸盐浓度继续降低, Si/N 达到通常认为维持浮游植物正常生长的 1 以下时, 硅酸盐不见得不会成为渤海的限制因素。

总体看来, 渤海南部的莱州湾浮游植物生长为显著的磷限制; 渤海中部, 营养盐含量和结构较为适宜; 渤海海峡表现为较低程度的氮相对不足, 但是能够满足浮游植物生长的需要。

参 考 文 献

刁焕祥, 沈志良, 刘兴俊等, 1985. 渤海无机氮的分布. 海洋科学集刊, 25: 53—63
王勇, 焦念志, 1999. 北黄海浮游植物营养盐限制的初步研究. 海洋与湖沼, 30(5): 512—518

- 李铁, 史致丽, 仇赤斌等, 1999. 中肋骨条藻和新月菱形藻对营养盐的吸收速率及环境因素影响的研究. 海洋与湖沼, 30(6): 640—645
- 朱树屏, 夏世福, 林庆礼, 1961. 渤海河口综合调查报告. 黄海水产研究丛刊, 5
- 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殖特征. 海洋与湖沼, 28(6): 599—603
- 林庆礼, 宋云利, 杨琴芳等, 1991. 渤海增殖水化学环境. 海洋水产研究, 12: 11—30
- 崔毅, 宋云利, 1996. 渤海营养状况变化. 海洋水产研究, 17: 57—62
- Bernhard A E, Peele E R, 1997. Nitrogen limitation of phytoplankton in a shallow embayment in northern Puget Sound. Estuaries, 20(4): 759—769
- Elser J J, Kimmel B L, 1986. Alteration of phytoplankton phosphorus status during enrichment experiments: Implications for interpreting nutrient enrichment bioassay results. Hydrobiologia, 133(3): 217—222
- Frey B E, Small L F, 1980. Effects of micro-nutrients and major nutrients on natural phytoplankton populations. Journal of Plankton Research, 2(1): 1—22
- Hutchins D A, Buland K W, 1998. Iron-limited diatom growth and Si: N uptake ratios in a coastal upwelling regime. Nature, 393(685): 561—564
- Parsons T R, Maita Y, Laddi C M, 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. New York: Pergamon press, 173
- Smith S V, 1984. Phosphorus versus nitrogen limitation in the marine environment. Limnology and Oceanography, 29(6): 1149—1160
- Yu Z G, Mi T Z, Yao Q Z *et al.*, 2001. Nutrients concentration and changes in decade-scale in the central Bohai Sea. Acta Oceanologica Sinica, 20(1): 65—75

EXPERIMENTAL STUDY ON THE NUTRIENT LIMITATION IN THE SPRING OF BOHAI SEA

ZOU Li, ZHANG Jing^{*}

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003)

^{*}(College of Chemistry and Chemical Engineering Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003;

State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai, 200062)

Abstract Experimental study on the nutrient limitation to the phytoplankton in the Laizhou Bay, Central Bohai Sea and Bohai Sea Strait was carried out in April and May, 1999 by the method of *in situ* nutrient enrichment experiment. It was evident that phosphorus was the first nutrient to limit the growth of phytoplankton in Laizhou Bay, but silicate limitation was not revealed, although silicate concentration decreased greatly compared with the past observations and diatoms were the dominant species; nutrient concentrations were in a relatively suitable ratio in the Central Bohai Sea; and there was no significant nutrient limitation in Bohai Sea Strait, although the concentration of dissolved inorganic nitrogen was relatively low on occasion.

Key word Bohai Sea, Phytoplankton, Nutrient limitation