

长江口区浮游植物营养限制因子的研究^{*}

I. 秋季的营养限制情况

蒲 新 明 吴 玉 霖 张 永 山

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

摘 要 1998 年 11 月在长江口及周围海域进行了一个航次的环境调查, 并在室内以中肋骨条藻为实验藻种, 应用营养加富生物测定法对本海域浮游植物的营养需求状况进行了研究. 结果表明, 可大致根据离河口的远近将此海域分为 3 个部分: 近河口光限制区、过渡带光和磷酸盐限制区、远河口氮盐限制区. P 与 N 分别为潜在营养限制因子的界线大致沿盐度为 31 的等盐线. 并指出, 以溶解无机氮磷比的判断标准, 在悬浮物浓度较高的区域会高估磷的限制作用.

关键词 营养限制 浮游植物 长江口

中图分类号: Q178.53

1 引言

环境因子对生物群落的调节作用是生态学需要解决的一个基本问题. 在河海交汇的河口区, 营养盐、光照、温度和盐度是调节浮游植物生长的主要因素, 其中营养盐与人类活动的关系最为密切. 20 世纪 80 年代之前多数的研究结果认为氮在近岸和河口生态系统中对生产力比磷起着更重要的限制作用^[1,2], 80 年代之后 P 的限制作用得到强调, 营养的限制因子在不同河口、不同时期会在 N 和 P 之间转变^[3-10]. Si 和 Fe 在限制藻类生长和影响群落结构的研究中也受到越来越多的重视^[6,9].

长江巨大的径流量及所含的营养物质对长江口的浮游植物的变动发挥重要作用. 胡明辉等^[11]研究了三角褐指藻等 4 种藻的生长所需要的最佳 N/P 比, 并以此值同长江口的 N/P 比相比较而得出长江口浮游植物受磷限制的结论. Harrison 等^[3]认为长江口区过高 N/P 比使江口外沿的浮游植物受到 P 的限制, 离河口 500 km 以上的区域则受 N 的限制, 在河口内部, 由于较高的悬浮物浓度, 初级生产力主要受光的限制. 沈志良^[12]认为透明度是近河口水域初级

本文于 1999-05-04 收到, 修改稿于 1999-08-27 收到.

^{*} 中国科学院重大基金资助项目 (编号: KZ 951-B1-403), 中国科学院海洋研究所调查研究报告 (第 3718 号).

第一作者简介: 蒲新明, 男, 25 岁, 硕士生, 从事海洋环境生物学与生态学的研究.

生产力的主要限制因素,营养盐对初级生产力没有明显的限制作用.浮游植物和表层叶绿素的高值区不是在营养盐丰富的河口内部,而是一般位于冲淡水舌的前锋^[13].因此可以认为在河口内部营养盐很少对浮游植物产生实际的限制作用,在冲淡水舌的外侧营养盐上升为主要的限制因素.为了在时空分布上对营养盐的限制作用有进一步的了解,进行本次研究.

2 材料和方法

2.1 现场调查

现场调查于1998年11月20~22日进行,共布设34个站点.观测项目包括营养盐($\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{SiO}_3\text{-Si}$)、盐度、悬浮物、叶绿素a含量和浮游植物的种类组成及数量.在两个典型站点(图1)的表层、中层、底层各采1塑料桶水样, $-25\text{ }^\circ\text{C}$ 左右冷冻保存并运回实验室,以供室内加富实验.

2.2 营养加富实验

实验藻种选择 现场采样分析结果表明,中肋骨条藻 *Skeletonema costatum* (Grev.) Cleve 是长江口区浮游植物组成中占绝对优势,所以选用该藻为实验藻种.本实验所用中肋骨条藻取自中国科学院海洋研究所海洋生物种质室.

加富实验 将每 80 cm^3 解冻后的水样分别加入到 100 cm^3 的锥形瓶中,按照不同的加富策略加入营养盐,加入营养盐的种类及使原水体增加的浓度见表1.然后将已在贫营养海水中培养两天的中肋骨条藻接种到锥形瓶中,使其浓度达到 $1\ 000\text{ 个}/\text{cm}^3$ 左右.所有培养瓶设一平行样.

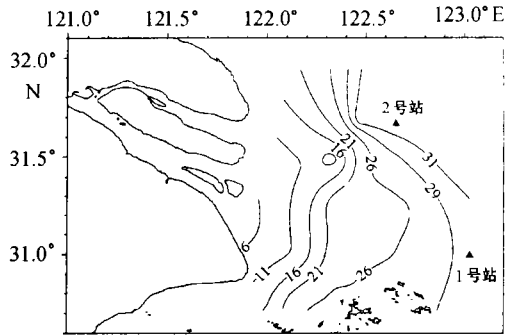


图1 调查海区和取样点站位

表1 各瓶中加富的营养盐*

编号	系列	加富营养盐	编号	系列	加富营养盐
1	对照	无	4	All-Si	N, P, Fe, 维生素
2	All-N	P, Si, Fe, 维生素	5	All-Fe	N, P, Si, 维生素
3	All-P	N, Si, Fe, 维生素	6	All	N, P, Si, Fe, 维生素

* $\text{N} = 30\ \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}\ \text{NaNO}_3$; $\text{P} = 4\ \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}\ \text{K}_2\text{HPO}_4$; $\text{Si} = 20\ \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}\ \text{Na}_2\text{SiO}_3$; $\text{Fe} = 0.2\ \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}\ \text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_7$; 维生素 = $0.125\ \text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}\ \text{V}_{\text{B}1} + 0.3\ \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}\ \text{V}_{\text{B}12}$.

接种后在温度 $18\sim 22\text{ }^\circ\text{C}$, 光照 $2\ 500\text{ lx}$ 左右, 光暗比 12:12 的条件下进行培养. 每天(对数增长期)或间隔一天的同一时刻用活体荧光计测其活体叶绿素的浓度, 以此值代表生物量. 同时用显微镜观察其形态变化. 直至增长缓慢或略有下降, 用 $0.45\ \mu\text{m}$ 的玻璃纤维滤膜进行过滤, 滤膜用 90% 的丙酮溶液萃取测叶绿素的浓度; 滤液用 Skalar San 和 plus 微量自动分析仪测定其中的 $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$.

1998年11月6日采取胶州湾7号站($36^\circ 4' \text{N}$, $120^\circ 14' \text{E}$)表层水, 按以上方法进行同样实验, 以便对比.

3 结果和讨论

3.1 现场调查结果

在调查海区的 122.4°E 以西,是浮游植物生物量和初级生产力的低值区,此区各种营养盐的浓度较高,而透明度都在 1.0 m 以下,说明浮游植物的生长受光的限制. 此区东侧是浮游植物和初级生产力的高值区. 随着透明度的增加和营养盐浓度的下降,营养盐将逐渐成为限制浮游植物生长的主要因素.

1 号站叶绿素 a 含量为 6.172 mg/m³, 共鉴定浮游植物 64 种,其中硅藻类 48 种,甲藻类 16 种,细胞总量 33 414 × 10⁴ 个/m³,其中骨条藻 32 368 × 10⁴ 个/m³,占总量的 96.9%; 2 号站叶绿素 a 含量为 3.388 mg/m³, 共鉴定浮游植物 34 种,其中硅藻类 26 种,甲藻类 8 种,细胞总量 50 847 × 10⁴ 个/m³,其中骨条藻占总量的 99.8%. 骨条藻是一种广温、广盐种,在长江口区是最重要的优势种,一年中浮游植物个体总量的升降,几乎完全取决于中肋骨条藻的生长状况^[13];而且长江口海域亦时有爆发中肋骨条藻赤潮^[14]. 现场海水中的各营养盐的浓度见表 2,其中 1 号站表层 PO₄-P 含量极低, N/P 比高达 714, 随深度的加深而下降, 底层附近为 49.1, 仍远高于 Redfield 比值 16:1, 而且 P 的浓度也比 0.58 μmol/dm³ (18 mg/m³) 的藻类生长最适浓度下限小得多, 显示 P 的极度缺乏. 2 号站 N/P 比在 30 左右, 仍显示 P 的相对缺乏; Si/P 小于 10, 表明 Si 也可能成为硅藻生长的限制因子.

表 2 取样点站位营养盐的浓度

单位: μmol·dm⁻³

站号与层位	PO ₄ ³⁻ -P	TIN	SiO ₃ ⁴⁻ -Si	TIN/P	Si/P	盐度	
1 号站	表层	0.01	7.14	2.1	714	210	29.787
	中层(20 m)	0.05	4.11	0.66	82.2	13.2	32.709
	底层(40 m)	0.11	5.41	2.2	49.2	20	34.629
2 号站	表层	0.23	8.43	2.2	36.6	9.6	32.173
	中层(10 m)	0.24	5.32	1.9	22.2	7.9	32.402
	底层(28 m)	0.15	4.77	1.4	31.8	9.3	33.218

3.2 加富实验结果

实验所得叶绿素的活体荧光值与丙酮萃取的常规方法所得值之间的线性相关系数 R^2 分别为 0.92, 0.97, 0.94, 0.98, 0.86, 0.98 ($n = 6, \alpha < 0.01$), 所以用活体荧光值可以很好的反映藻种在培养期的生长情况. 各组加富实验的生长曲线和最高生物量分别见图 2、图 3.

营养加富生物测定法是一种有效检测浮游植物营养限制的方法^[6-8]. AGP(藻类生长潜力)是指某一水体中浮游植物所能达到的最高生物量. 全营养加富组的 AGP 代表藻种在营养充分, 条件适合的情况下所能达到的最高生物量. 对于缺少某一种的营养盐的加富组来讲, 由于其他营养盐相对过量, 其 AGP 的大小代表起限制作用的营养盐所能支持的生物量. 此值越大, 则说明限制作用越小. 考虑到悬浮体中的营养盐也可通过各种作用释放出来, 水样不经过滤, 直接保存并加富. 把缺少某种营养盐的加富组与全营养加富组的 AGP 相比较, 小于 50% 的则定义为限制元素. 这种方法忽略了光、温和捕食作用对浮游植物的压力, 因此得到的是各种营养盐对浮游植物生长的潜在限制强度. 定义潜在营养限制指数:

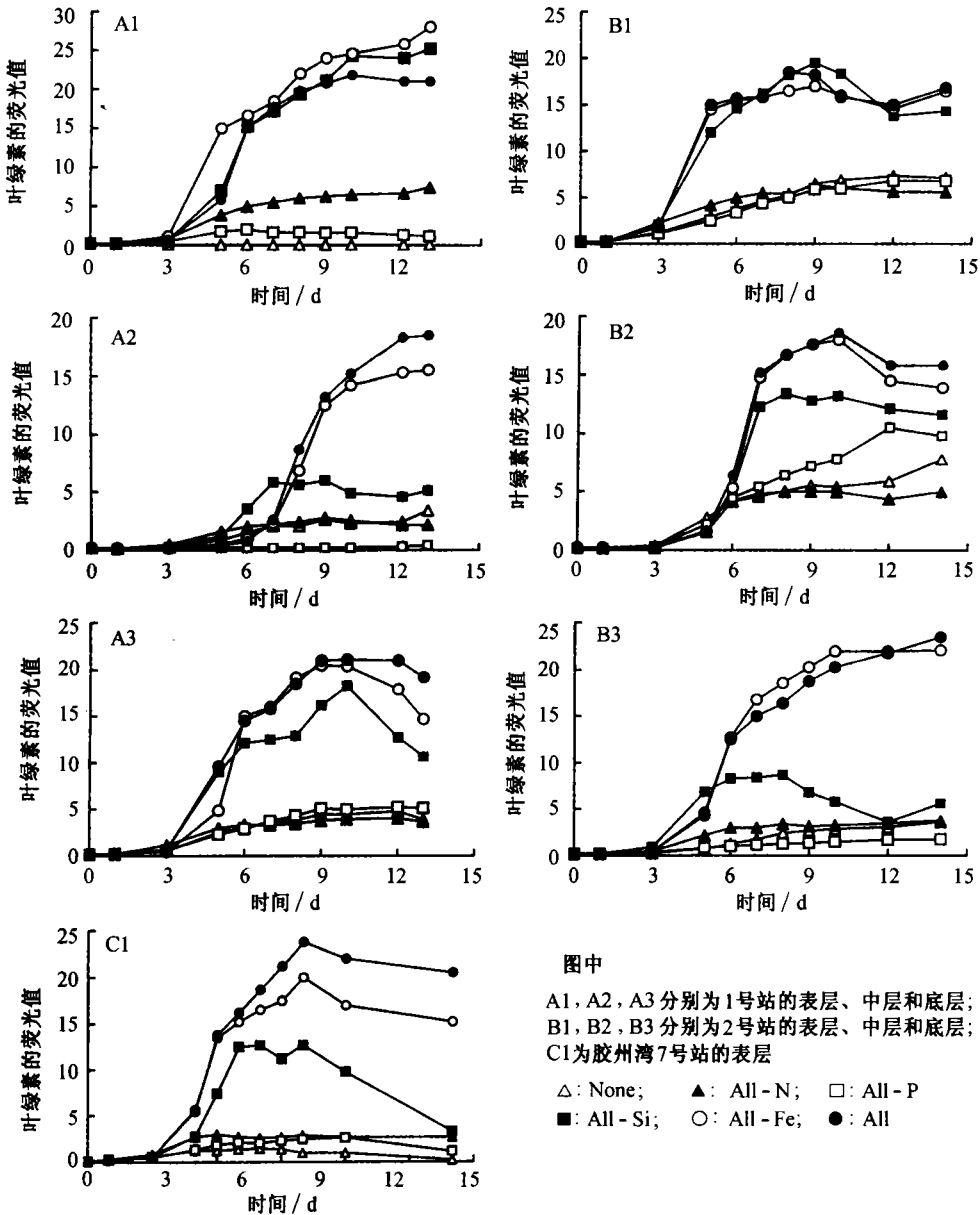


图2 中肋骨条藻在各组加富系列中的生长曲线

$$L(X) = \frac{AGP(All)}{AGP(All-X)} \times \frac{1}{2}$$

当此指数大于1,则营养元素X为限制因子,数值越大,则限制作用越强烈.实验所得两个站位各个水层所有限制因子的潜在营养限制指数见表3.

由表可以看出1号站的表层和中层P是潜在限制因子,其次是N,底层N超过P成为潜在限制因子;2号站的表层和中层N是潜在限制因子,其次是P,底层P超过N成为潜在限制因子.由站位图上看,1号站是长江冲淡水的扩展方向,受高N/P比的冲淡水影响大些,P的

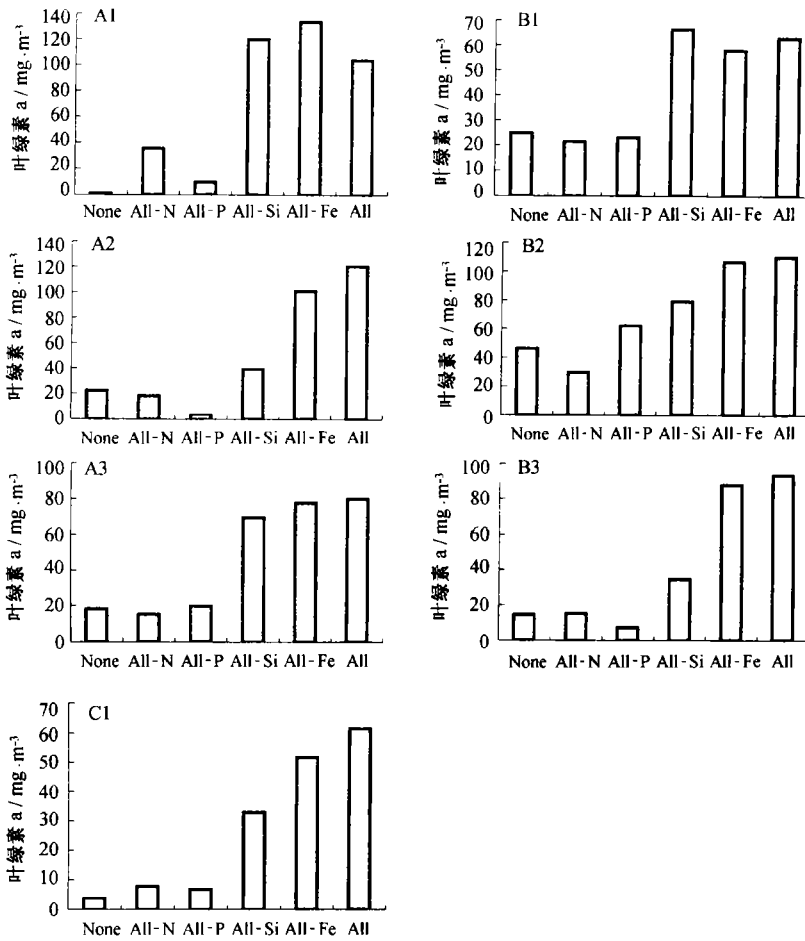


图3 中肋骨条藻在各组加富系列中的最高叶绿素 a 浓度

表3 各站位的营养限制指数

1 号站	表层	P(5.40)	N(1.47)	Si(0.43)	Fe(0.39)
	中层	P(23.1)	N(3.33)	Si(1.54)	Fe(0.60)
	底层	N(2.64)	P(2.03)	Si(0.58)	Fe(0.51)
2 号站	表层	N(1.46)	P(1.36)	Fe(0.54)	Si(0.47)
	中层	N(1.86)	P(0.89)	Si(0.69)	Fe(0.52)
	底层	P(6.64)	N(3.11)	Si(1.35)	Fe(0.53)
胶州湾 7 号站	表层	P(4.49)	N(3.97)	Si(0.94)	Fe(0.60)

限制作用相对显著;2号站则受外海水的影响较大,N的作用突出出来。P与N分别为潜在营养限制的界线大致沿盐度为31的等盐线。Si在1号站的中层和2号站的底层也成为潜在限制因子,但不显著。Fe不是限制因子。这两个站点以内的海区随着营养盐浓度的升高和透明度的下降,光、温度等气候因子对浮游植物的调节作用得到加强,对营养盐来说,由于N/P的

提高, P 的调节作用相对加强, 当气候条件适合藻类生长时, P 可成为藻类暴发的限制因子. 胶州湾 7 号站的潜在限制因子是 P, 其次是 N.

自从 Redfield 指出浮游植物以 15:1 的原子比消耗水中的 N 和 P, 就有一种把此比值同水中的 N/P 比相比较而判断哪种元素起限制作用的倾向. 而本实验中营养加富实验的结果与由 N/P 比所估计的 P 严重限制的结果并不一致. 导致这种现象的原因可能有: (1) 营养盐的浓度与其生物可利用性是两个截然不同的概念, 潮流、海流、风等作用使营养盐不断由底层或周围水体中得到补充, 并使沉积物再悬浮. (2) 河口磷酸盐的缓冲机制. 不同的研究者提出不同的缓冲机制, 如沉淀溶解作用、吸附解吸作用^[16]、微生物的作用促进有机质的降解^[17]. 杨逸萍等^[18]通过实验证明长江口悬浮物中 NaOH 可提取磷是主要的潜在可生物利用形态, 而且细菌和藻类渗出物可促进其转化为活性磷. (3) 浮游植物对磷具有“奢侈消费”和高度富集的能力, 可使其体内的 N/P 比远低于周围的水体^[19], 当原水体中的藻类被冷冻死亡分解后, 其所含有的营养物质又会被实验藻种所利用. 而且浮游植物可以利用有机 P, 所以单纯用溶解态的 N/P 比来判断其限制情况会高估 P 的限制作用.

结合调查和实验结果, 可大致将长江口外海域分为 3 个区域, 如图 1 所示: I. 近河口区 (盐度 < 16), 此区域的透明度不超过 1 m, 过高的悬浮物浓度使真光层变薄以及强烈的潮流混合作用^[20]是影响浮游植物量的主要因素, 营养盐不是限制因子; II. 过渡区 (盐度为 16~31 左右), 透明度为 1~5 m, 真光层较薄依然是限制浮游植物量的一个因素, 在真光层以内磷酸盐是潜在的限制因子; III. 远河口区 (盐度 > 31), 透明度一般大于 5 m, 氮盐是潜在的营养限制因子. 调查海区的温度大多在 18~20 °C 之间, 近河口区略低于远河口区, 这样的温度对温带近岸性浮游植物如中肋骨条藻的生长较为适宜.

实验中由于以玻璃瓶为容器, 玻璃中的硅酸盐会低估硅的限制作用. 由于加富的营养盐浓度远高于原水体中的浓度, 当添加其他元素而使某种元素处于极度短缺状态时, 反而会限制藻种的生长, 表现为缺少某一种元素的加富组的生物量有时反而低于不添加任何营养盐的对照组, 这由另一个侧面反映了这种元素的限制作用.

4 小结

4.1 中肋骨条藻是长江口区最重要的优势种. 其中在 1 号站和 2 号站分别占鉴定浮游植物总量的 96.9% 和 99.8%.

4.2 1号站 P 是首要的潜在限制因子, 其次为 N; 2号站 N 是首要的限制因子, 其次为 P. Si 一般不是限制因子. Fe 不是限制因子.

4.3 根据离河口的远近将此海域分为 3 个部分: 近河口光限制区、过渡带光和磷酸盐限制区、远河口氮盐限制区. P 与 N 分别为潜在营养限制因子的界线大致沿盐度为 31 的等盐线.

4.4 以溶解态无机氮磷原子比为判断标准有可能高估了 P 的限制作用.

参考文献

- 1 Ryther J H, Dunstan W M. Nitrogen phosphorus and eutrophication in the coastal marine environment. *Science*, 1971, 171: 1 008~1 013
- 2 Boynton W R, Kemp W M, Keefe C W. A comparative analysis of nutrients and other factors influencing estuarine phytoplank-

- ton production. In: Kennedy Victor S, ed. Estuarine Comparisons. New York: Academic Press, Inc. 1982. 69~90
- 3 Harrison P J, Hu M H, Yang Y P, et al. Phosphate limitation in estuarine and coastal waters of China. *J Exp Biol Ecol*, 1990, 140: 79~87
 - 4 Pennock J R, Sharp J H. Temporal alternation between light - and nutrient - limitation of phytoplankton production on a coastal plain estuary. *Mar Ecol Prog Ser*, 1994, 111: 275~288
 - 5 O'Donohue M J H, Dennison W C. Phytoplankton productivity response to nutrient concentrations, light availability and temperature along an Australian estuarine gradient, *Estuaries*, 1997, 20(3): 521~533
 - 6 Maestrini S Y, Breret M, Berland B R, et al. Nutrients limiting the algal growth potential (AGP) in the Po River Plume and an adjacent area, Northwest Adriatic Sea: Enrichment bioassays with the test algae *Nitzschia closterium* and *Thalassiosira pseudonana*. *Estuaries*, 1997, 20(2): 416~429
 - 7 Smith S V. Phosphate versus nitrogen limitation in the marine environment. *Limnol Oceanogr*, 1984, 29(6): 1 149~1 160
 - 8 Zohary T, Robarts R D. Experimental study of microbial limitation in the eastern Mediterranean, *Limnol Oceanogr*, 1998, 43(3): 387~395
 - 9 Martin J H, Fitzwater S E. Iron deficiency limits phytoplankton growth in the northeast Pacific subarctic. *Nature*, 1988, 331(28): 341~343
 - 10 蒲新明, 吴玉霖. 浮游植物营养限制的研究进展. *海洋科学*, 2000, 24(2): 27~30
 - 11 胡明辉, 杨逸萍, 徐春林, 等. 长江口浮游植物生长的磷酸盐限制. *海洋学报*, 1992, 11(4): 439~443
 - 12 沈志良. 长江口海区理化环境对初级生产力的影响. *海洋湖沼通报*, 1993, 1: 47~51
 - 13 郭玉洁, 杨则禹. 长江口浮游植物的数量变动及生态分析. *海洋科学集刊*, 1992, 33: 167~189
 - 14 洪君超, 黄秀清, 蒋晓山, 等. 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*, 1994, 25(2): 179~184
 - 15 黄尚高, 杨嘉东, 暨卫东, 等. 长江口水体活性硅、氮、磷含量的时空变化及相互关系. *台湾海峡*, 1986, 5(2): 114~122
 - 16 崔红, 孙秉一. 河口区水体中磷酸盐的缓冲机制. *海洋湖沼通报*, 1991, 1: 77~84
 - 17 林以安, 唐仁友, 李炎, 等. 长江口生源元素的生物地球化学特征与絮凝沉降的关系. *海洋学报*, 1995, 17(5): 65~72
 - 18 杨逸萍, 胡明辉. 河口悬浮物中磷的化学形态分布与转化. *台湾海峡*, 1995, 14(4): 313~319
 - 19 Rhee G Y, Gotham I J. Optimum N:P ratios and coexistence of planktonic algae. *J Phycol*, 1980, 16: 486~489
 - 20 Ning X R, Liu Z S, Liu Z L. Environmental regulation of potential primary production in the Changjiang Estuary and plume. *Biogeochemical Study of the Changjiang Estuary*. Beijing: China Ocean Press, 1990. 150~155

Nutrient limitation of phytoplankton in the Changjiang Estuary

I. Condition of nutrient limitation in autumn

Pu Xinming,¹ Wu Yulin,¹ Zhang Yongshan¹

1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071

Abstract—During November 20~22, 1998, samples were collected at two stations in the Changjiang Estuary. The nutrients limiting algal growth potential (AGP) are estimated by ratios of dissolved inorganic N to P and by nutrient enrichment bioassays using *Skeletonema costatum* as the test algae. P was severely limited at two stations by the method of ratios of N to P, but by bioassays P was the most important nutrient regulate phytoplankton growth at Sta. 1(31°N, 123°E) and N at Sta. 2(31°40'N, 122°40'E). The Changjiang Estuary may be divided into three parts: light - limited area, light - and phosphorus - limited area and nitrogen - limited area.

Key words Changjiang Estuary, nutrient limitation, phytoplankton