

围隔生态系内浮游植物对富磷的响应

李瑞香, 朱明远, 陈 尚, 吕瑞华, 李宝华

(国家海洋局第一海洋研究所, 国家海洋局海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 青岛 266061)

摘要: 在长江口外应用围隔生态系实验方法, 研究了富磷与浮游植物生物量的相关性以及浮游植物对磷吸收的种间竞争。结果表明, 可溶性磷(主要是 PO_4^{3-}) 在实验的第 5 天以前呈指数函数减少, 浮游植物生物量则反之。当浮游植物细胞数量和叶绿素 a 达到最高峰时, 种类多样性指数和均匀性指数处于最小值, 分别为 0.008 和 0.003。这次实验引发了中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*) 赤潮。文中还探讨了中肋骨条藻的分裂速度以及对磷的吸收速度。

关键词: 围隔; 磷; 富营养化; 中肋骨条藻; 赤潮

Responses of phytoplankton on phosphate enrichment in mesocosms

LI Rui-Xiang, ZHU Ming-Yuan, CHEN Shang, LU Rui-Hua, LI Bao-Hua (First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China)

Abstract: The correlation between the excess phosphate and biomass of phytoplankton and species composition was studied by mesocosm experiments in the water of Changjiang River Estuary. After adding the phosphate, the biomass of phytoplankton increased exponentially and the concentration of dissolved inorganic phosphate decreased exponentially until the fifth day. When the density of phytoplankton and the concentration of chlorophyll a reached the peak, the species diversity and evenness declined to the lowest. These two indexes were 0.008 and 0.003 respectively. The red tide of *Skeletonema costatum* was induced by adding phosphate. The growth rate of *Skeletonema costatum* and uptake rate on phosphate were estimated.

Key words: mesocosm; phosphate; eutrophication; *Skeletonema costatum*; red tide

文章编号: 1000-0933(2001)04-0603-05 中图分类号: Q143 文献标识码: A

海洋浮游植物的生长、繁殖及赤潮形成依赖于丰富的营养物质, 磷是促进浮游植物生长及引发赤潮的重要营养元素之一。近些年来, 由于环境污染日趋加重, 随之而来的海洋富营养化程度更加突出, 尤其是长江径流入海所携带的大量营养盐类, 形成了长江口区特有的富营养环境。根据近几年的监测结果, 氮、磷、含量超过我国海水 2 类水质标准, 在我国各河口区属最高, 因此赤潮发生频率亦明显高于其他海区。有关磷对浮游植物的效应研究国内外有过不少论著, 陈慈美等人^[1]通过实验室模拟的方法研究了磷形态转化速率以及与浮游植物的增殖竞争关系。林昱等人^[2]采用不断添加的方法在围隔生态系中研究了富营养引起的赤潮。Harrison^[3]利用围隔装置研究了不同比例的营养盐对浮游植物群落的调控作用。暨卫东等人^[4]根据厦门港海域的监测结果分析了活性磷与浮游植物的相关性, 并指出其相关性受季节和海流的影响。本文采用大水体围隔生态系实验方法, 在排除海流等因素的情况下, 研究了可溶性磷与浮游植物的关系。

1 材料与方法

1.1 围隔装置 围隔装置由日本国立环境研究所提供(图 1), 由聚乙烯和聚脂纤维布制成, 结实、柔韧而

基金项目: 国家自然科学基金(编号 49876030) 国家自然科学基金重大基金(编号 3979010) 资助项目和中日合作项目
营养盐数据由海洋大学王修林教授和石晓勇老师提供, 在此表示诚挚的感谢。

收稿日期: 1999-01-18; 修订日期: 2000-01-26

作者简介: 李瑞香, 女, 山东高密人, 副研究员。主要从事浮游植物分类和生态研究。

万方数据

且半透明(透明度 50%)，桶容积 25m³，上部有浮筏，下部用重锤牵引以防倾斜和随海流漂移，并用绳系在抛锚的调查船上。围隔装置放于水中注满水后随即关闭闭锁装置。

1.2 实验时间与地点 实验于 1997-10-10 在长江口外花鸟山附近海域进行，实验周期为 7d。

1.3 取样及分析 实验装置安装好后，一次性加入可溶性磷，每天上午 9:00 在 1m 水深处取样，分别测定各化学和生物参数。营养盐分析方法按《海洋调查规范》进行，叶绿素 a 用特纳荧光计测定，浮游植物样品用 5% 福尔马林固定，沉降 48h 后浓缩于小容器中，根据浓度定容到一定体积，取 0.5ml 在倒置显微镜下鉴定计数。

2 结果与讨论

2.1 理化环境的变化

1997-10-17 于花鸟山附近海区自然海水中与围隔内的温度波动范围在 22.67~23.3℃ 之间，围隔内、外相差甚微。围隔内的盐度变化在 24.9~26.5 之间，随着实验呈上升趋势，围隔外受海流的影响较大，盐度波动幅度亦较大，在 26.1~30.1 之间，而且没有规律。围隔内的 pH 值和溶解氧分别在 8.12~8.32 和 6.8~7.72mg/L 之间，两者的变化趋势一致，第 5 天以前呈上升，随后下降。自然海水中两者均略低于围隔内，分别在 8.09~8.3 和 6.29~7.8mg/L 之间。营养盐变化表现出明显的不同(图 2、图 3)，围隔外的海水中溶解无机氮和无机磷含量分别为 23.9μmol/L 和 0.75μmol/L，N/P 比值为 31.9，富营养化程度较高，在整个实验过程中，氮含量一直处于高水平，在 10.72~23.9μmol/L 之间波动，N/P 比值在 24.6~46.6 之间，硅含量在 15.5~30.7μmol/L 之间。围隔内无机氮的起始浓度为 18.15μmol/L，一次加入可溶性磷后，使其浓度达 3.25μmol/L，此时 N/P 比值为 5.58。由于浮游植物对营养盐的大量消耗，营养盐下降很快，实验后期，氮的含量很低，N/P 比值低于 3，硅含量降至 0.53μmol/L。

在整个实验过程中，氮含量一直处于高水平，在 10.72~23.9μmol/L 之间波动，N/P 比值在 24.6~46.6 之间，硅含量在 15.5~30.7μmol/L 之间。围隔内无机氮的起始浓度为 18.15μmol/L，一次加入可溶性磷后，使其浓度达 3.25μmol/L，此时 N/P 比值为 5.58。由于浮游植物对营养盐的大量消耗，营养盐下降很快，实验后期，氮的含量很低，N/P 比值低于 3，硅含量降至 0.53μmol/L。

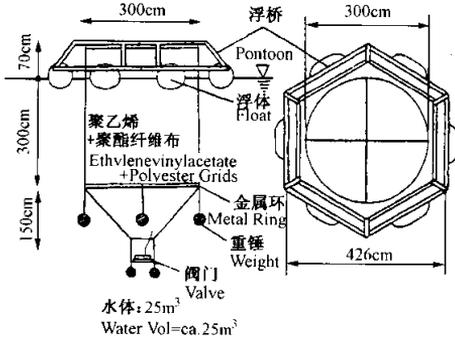


图 1 围隔生态实验装置示意图

Fig. 1 Schematic view of mesocosm

在整个实验过程中，氮含量一直处于高水平，在 10.72~23.9μmol/L 之间波动，N/P 比值在 24.6~46.6 之间，硅含量在 15.5~30.7μmol/L 之间。围隔内无机氮的起始浓度为 18.15μmol/L，一次加入可溶性磷后，使其浓度达 3.25μmol/L，此时 N/P 比值为 5.58。由于浮游植物对营养盐的大量消耗，营养盐下降很快，实验后期，氮的含量很低，N/P 比值低于 3，硅含量降至 0.53μmol/L。

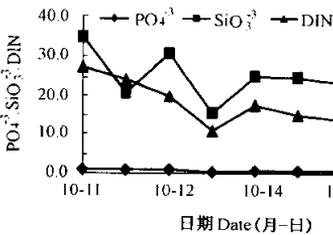


图 2 自然海水中营养盐的变化

Fig. 2 Nutrients (μmol/l) in natural seawater

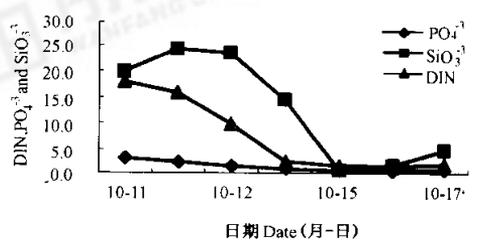


图 3 加磷围隔中营养盐的变化

Fig. 3 Nutrients (μmol/l) in the phosphate-enriched mesocosm

2.2 浮游植物细胞密度与叶绿素 a 的变化

花鸟山海域的浮游植物非常丰富，围隔外自然海水中浮游植物起始密度为 1.72×10⁶ 个/L，波动范围在 6.9×10⁴~7.3×10⁶ 个/L 之间，实验期间时常有黄褐色水团漂移过来，可断定周围海域正发生赤潮。从图 4 看出，10 月 13 日，浮游植物出现小的高峰，此时，磷浓度只有 0.23μmol/L，氮浓度为 10.72μmol/L，N/P 比值达 46.6。此后尽管氮、磷、硅都有上升，但浮游植物一直较低，这可能是低磷成为限制因子。围隔内，浮游植物的起始密度为 2.54×10⁶ 个/L，在富磷作用下，实验的第 2 天就显示出明显的指数生长(图 4)，第 5 天达最高峰，细胞数量为 2.93×10⁷ 个/L，比起始密度增加了 11.5 倍。叶绿素 a 的变化趋势与细胞数量

一致,相关系数 0.99,它们的关系十分紧密(图 5)。叶绿素 a 在第 5 天达到峰值,为 $74.89\mu\text{g/L}$,比起始浓度 ($13.54\mu\text{g/L}$) 高 5 倍多,此时,磷浓度为 $0.53\mu\text{mol/L}$,氮为 $1.46\mu\text{mol/L}$,硅也降至最低值。随后浮游植物数量骤减,实验末期降到 7.8×10^4 个/L,叶绿素 a 降至 $2\mu\text{g/L}$ 以下。氮和硅终止这次赤潮可能起主要作用。从水色上看,从实验一开始水色就呈褐色,并随实验水色愈深,随后水色变清,即赤潮消亡。造成这次赤潮的种类是中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)。

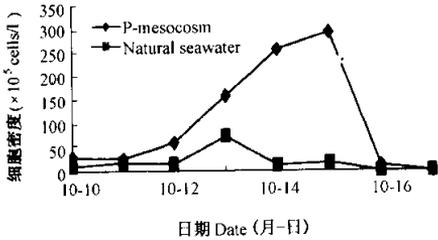


图 4 加磷围隔和自然海水中浮游植物密度的变化

Fig. 4 Density of phytoplankton in the phosphate-enriched mesocosm and natural seawater

2.3 优势种及物种多样性和均匀性的变化

中肋骨条藻在本次调查的浮游植物群落中占绝对优势,该种在长江口及附近浙江沿岸海域发生赤潮的频率很高^[5],从实验一开始,围隔内、外的细胞数量分别为 2.38×10^6 个/L 和 7.29×10^5 个/L,所占比例分别达 88.2% 和 84.5%。按照日本学者安达六郎^[6]划分的赤潮生物密度标准,这已属赤潮状态。围隔生态系内,在富磷的作用下随着实验时间更显示出它的增殖竞争能力,其百分比越来越高,到第 5 天数量达到 2.93×10^7 个/L,占群落生物量的 99.9%,随后其细胞数量骤减,第 7 天只有 1.5×10^4 个/L,所占比例不足 20%。海链藻(*Thalassiosira* sp.) 为第 2 优势种类,在围隔外占浮游植物群落总生物量的 10% 左右,细胞数量有时超过 4×10^5 个/L,但是在围隔桶内,它的起始浓度为 1.93×10^5 个/L (7.6%),随实验时间不断减少,第 6 天以后几乎绝迹(图 6)。这意味着海链藻的增殖竞争能力较弱。实验后期,骨条藻大量死亡而不再成为优势种,但以多甲藻(*Peridinium* spp.) 和亚历山大藻(*Alexandrium* sp.) 为主的甲藻数量迅速增多成为优势。本次实验由于优势种单一,物种间个体数量分配非常不均,故多样性指数和均匀性指数很低。一般来讲大洋里的浮游植物种类多样性指数高于近岸水域,非赤潮期高于赤潮期。林永水等人^[7]将赤潮期间多样性指数和均匀性指数的阈值定为 $H'=1.00, J=0.2$ 。本文研究结果显示,桶外自然水体中 H' 值和 J 值分别在 0.216~1.304 和 0.111~0.7 之间,可见,此时的浮游植物生态状况不是太好。桶内结果显示, H' 和 J 随赤潮的发展而降低(图 7)。中肋骨条藻数量最高的第 5 天, H' 和 J 分别只有 0.008 和 0.003。在实验末期,水环境发生了变化,优势种亦发生了更替,种类增多, H' 和 J 上升为整个实验过程中的最高值,分别为 1.567 和 0.503。

2.4 中肋骨条藻的繁殖速率和对磷的吸收

处于营养增殖期的藻类,其生物量按指数函数增加,但在自然界,藻类数量的增加速度受诸多因素影响,如被其他生物的捕食,藻体自身死亡,藻体向无光层沉降等方面。由于围隔桶仅有 3m,大多数时间的有光层深度大于 3m,藻体向无光层沉降可忽略不计,而且处于指数生长期的藻类自身死亡率亦很低,如果先不考虑被捕食这一主要因素,中肋骨条藻的增加速度以单位时间内的分裂次数来表示,根据冈市友利^[8]公式 $\mu = K'/\log 2$ 式中, μ 表示种群生长速度, $K' = (\log N_t - \log N_0)/t$, N_0 和 N_t 分别为单位水体藻类细胞的起始数量和经 t 天后的细胞数量(个/L),求得围隔生态系内中肋骨条藻在生长期内的增殖速率平均为 0.993 次/d,在第 3 天的最大繁殖速率为 1.419 次/d,这一结果与其他学者的报道相比要低得多。饭塚昭二^[9]报道了天然种群的生长速率为 2.3 次/d, Furnas^[10]报道了该种在自然条件下对天然种群的培养结果,其最大增殖速率为 5.9 次/d。本文结果偏低的原因除浮游动物的捕食外,可能还与其他营养

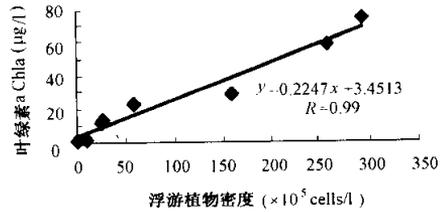


图 5 加磷围隔中浮游植物密度与叶绿素 a 的相关性

Fig. 5 Relationship between the phytoplankton density and Chl a in the phosphate-enriched mesocosm

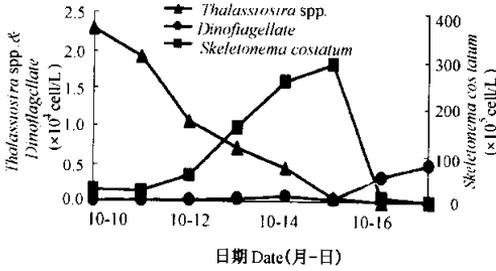


图 6 加磷围隔中浮游植物优势种的变化($\times 10^5$ cells/L)
Fig. 6 Dominant species of phytoplankton in the phosphate-enriched mesocosm

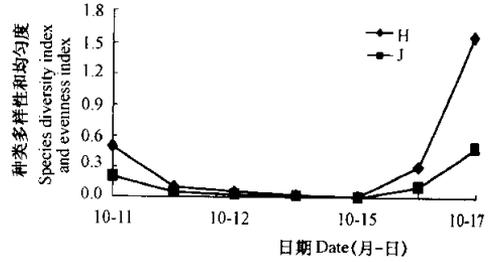


图 7 加磷围隔中浮游植物种类多样性指数(H')和均匀性指数(J)的变化
Fig. 7 Indexes of species diversity (H') and evenness (J) of phytoplankton in the phosphate-enriched mesocosm

元素的限制和温盐等环境因子有关。

浮游植物对磷的吸收在其生长阶段显示出明显的负相关关系(图 8 和图 9),按米氏方程

$$V = V_m \cdot S / (K_s + S)$$

式中, V 为吸收速度, V_m 为最大吸收速度, S 是水体的营养盐浓度, K_s 表示 $1/2V_m$ 时营养盐的浓度,计算出围隔生态系内浮游植物天然种群对磷的吸收速度为 $6.542 \times 10^{-9} \mu\text{mol}/\text{cell} \cdot \text{h}$,而且最大吸收速度在第 2 天和第 3 天,恰与中肋骨条藻的最大繁殖期相对应。根据陈慈美等人^[1]在实验室模拟的结果,在磷丰富的条件下,硅藻种类的增殖速率大于甲藻。当无机磷耗尽时则相反。本文围隔实验,从优势种的变化和种群的演替看与陈慈美等人的结果相吻合。从图 6 看出,中肋骨条藻在实验期的前 5 天处绝对优势地位,第 7 天骤降,而甲藻的数量开始上升,第 7 天成为优势,甲藻的这一变化趋势与溶解有机磷(DOP)完全一致。可见甲藻对有机磷的利用能力大于硅藻。

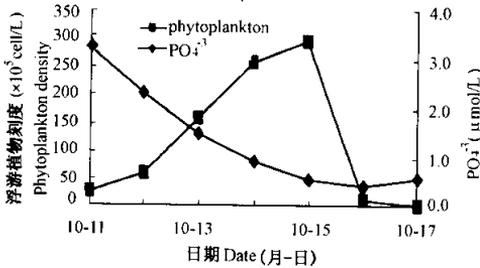


图 8 加磷围隔中浮游植物和无机磷($\mu\text{mol/L}$)的变化
Fig. 8 Phytoplankton and phosphate ($\mu\text{mol/L}$) in the phosphate-enriched mesocosm

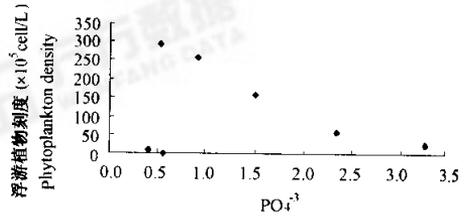


图 9 加磷围隔中浮游植物和无机磷($\mu\text{mol/L}$)的相关性要
Fig. 9 Correlation between the phytoplankton and phosphate ($\mu\text{mol/L}$) in the phosphate-enriched mesocosm

2.5 浮游植物细胞形态的变化

浮游植物在不同的时期,其细胞形态有明显的差别,在实验期的前 4d,样品中的碎屑很少,各种藻细胞清晰,中肋骨条藻链长且直,有的多达 50 个细胞,到第 6 天,尽管该种的细胞数量处于高峰,但形态已不正常,很多连体出现扭曲、弯曲或断链,样品中碎屑增多,原生动物的变形虫开始出现,这表明生态环境开始变化,第 6 天细胞大量死亡,色素变淡,胞质从壳内脱落并被原生动物吞食,这可能与硅元素在后期的贫乏致使硅质壳脱落有关。同时还观察到中肋骨条藻的膨大孢子,这是藻类渡过不良环境的一种适应方式,沈 等人^[11]在长江口海域中肋骨条藻赤潮后期也观察到这一现象,这可解释为什么中肋骨条藻在该海域

经常发生赤潮的原因。

3 结语

3.1 在围隔实验开始前,花鸟山附近海域已处于中肋骨条藻赤潮期。该种的起始浓度达 2.38×10^6 个/L,在富磷的作用下,其数量呈指数函数持续增加,第 5 天达 2.93×10^7 个/L,此时叶绿素 a 的浓度达 $74.89 \mu\text{g/L}$ 。

3.2 由于优势种单一,故种类多样性指数和均匀性指数很低,而且随赤潮的发展逐渐降低,最低值对应于中肋骨条藻的峰值,分别为 0.008 和 0.003,当骨条藻赤潮消亡,种类发生了更替, H' 和 J 值上升为 1.576 和 0.503,此时甲藻种类增多,多甲藻以较快的速度上升,如果再添加足够的营养盐,可能会引发多甲藻的赤潮。

3.3 中肋骨条藻在生长期的增殖速度平均为 0.933 次/d。最大增殖速度为 1.419 次/d,在富磷条件下,对磷的吸收速度为 $6.542 \times 10^{-9} \mu\text{mol/cell} \cdot \text{h}$ 。磷被消耗最快的时间恰是骨条藻的繁殖盛期。当赤潮终止时, PO_4^{3-} 浓度为 $0.53 \mu\text{mol/L}$,仍然接近于富营养阈值,但是硅和总无机氮含量很低,分别为 $0.53 \mu\text{mol/L}$ 和 $1.46 \mu\text{mol/L}$,说明硅和总无机氮对终止赤潮起了重要作用。

参考文献

- [1] 陈慈美,等. 纳污海域营养物质形态及含量水平与浮游植物增殖竞争关系 I. 磷的效应. 海洋环境科学,1990,9(1):6~12.
- [2] 林 昱,等. 围隔生态系内富营养引起赤潮的初步研究. 海洋与湖沼,1992,23(3):312~317.
- [3] Harrison P J and Turpin D H. The manipulation of physical, chemical and biological factors to select species from natural phytoplankton communities. In: Grice G. D. and M. R. Reeve eds. *Mesocosm*. New York: Springer-Verlag, 1982, 275~289.
- [4] 暨卫东,等. 台湾海峡西部营养盐变化特征 III. 水系混合及浮游植物摄取转移对磷酸盐含量变化影响的统计分析. 海洋学报,1990,12(4):447~454.
- [5] 洪群超,等. 长江口中肋骨条藻赤潮发生全过程调查. 海洋与湖沼,1994,25(2):179~184.
- [6] 安达六郎. 赤潮の規定. 昭和 48 年度日本海洋学会秋季大会讲演旨集,1973.
- [7] 林永水,等. 多样性指数法在赤潮预测中的应用. 见:林永水主编. 近海富营养化与赤潮研究. 北京:科学出版社,1997. 25~29.
- [8] 冈市友利. 赤潮の科学. 东京:恒星社厚生阁,1987.
- [9] 饭稼昭二. 赤潮生物の生理学特性. 赤潮——发生机构と对策. 日本水产学会编. 东京:恒星社厚生阁,1980. 38~39.
- [10] 张水浸,等. 赤潮及其防治对策. 北京:海洋出版社,1994. 127.
- [11] 沈 洪君超. 长江口中肋骨条藻赤潮发生全过程调查报告——浮游植物群落结构及细胞形态研究. 海洋与湖沼,1994,25(6):591~595.