

# 光照和营养盐磷对微型及微微型浮游植物生长的影响

方 涛, 李道季\*, 余立华, 高 磊, 张利华

(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 2004 年 9 月, 在长江口及邻近水域通过在培养水体中添加不同量的磷酸盐和改变光照强度进行现场受控培养实验, 对光照和营养盐磷耦合培养作用下浮游植物生长及对磷营养盐的吸收变化进行了研究, 结果表明: 高光照条件下 (100 % 自然光照), 磷酸盐浓度在高磷水平 (0.60  $\mu\text{mol/L}$ ) 培养水体中下降速率明显比中磷 (0.41  $\mu\text{mol/L}$ )、低磷水平 (0.25  $\mu\text{mol/L}$ ) 快, 浮游植物生长存在着显著的磷限制性, 微型浮游植物 (nanophytoplankton, 简称 Nano, 2~20  $\mu\text{m}$ ) 在高磷水平下的生长明显得到促进, 聚球藻 (*Synechococcus* sp., 简称 Syn, < 2  $\mu\text{m}$ ) 密度在培养初期有小幅度增加, 而微微型真核浮游植物 (picoeukaryote, 简称 Euk, < 2  $\mu\text{m}$ ) 在低磷水平下生长较快; 在低光照条件下 (50 % 自然光照), 磷酸盐浓度在高磷水平培养水体中的下降是受到抑制的, Nano 和 Syn 也都更宜在中磷水平培养水体中生长, Euk 在高磷水平下的生长也是受到抑制的, 且在中磷水平培养水体中, 三类浮游植物的生长周期都得到延长; 无光照暗环境培养条件下磷酸盐浓度在不同磷水平下始终保持着增加趋势, 三类浮游植物也都无法生长, 磷酸盐浓度随培养时间呈线性增加趋势, 浮游植物细胞密度则呈指数下降趋势, 且磷酸盐的添加对其本身的释放速率和浮游植物衰减速率都没有影响。

**关键词:** 长江口; 浮游植物; 光照; 磷酸盐

文章编号: 1000-0933 (2006) 09-2783-08 中图分类号: Q143, Q178.53, Q938.8, P734.2 文献标识码: A

## Effect of irradiance and phosphate on growth of nanophytoplankton and picophytoplankton

FANG Tao, LI Dao-Ji\*, YU Li-Hua, GAO Lei, ZHANG Li-Hua (State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 2783~2790.

**Abstract:** *In situ* incubation experiments were conducted to investigate the phosphate uptake and growth variations of nano- and pico-phytoplankton controlled by the coupling between different phosphorus concentrations and different levels of irradiances in Changjiang estuary and its adjacent sea. By comparing the nutrient concentrations in incubation bottles at fixed intervals and the species numbers of both nanophytoplankton and picophytoplankton, the results were as follows: The uptake rates of phosphate increased distinctly at a high phosphate level (0.60  $\mu\text{mol/L}$ ) under high irradiance (100 % natural irradiance), which showed that the growth of phytoplankton was strongly phosphate-limited. The cell densities of nanophytoplankton and *Synechococcus* sp. also increased obviously. Moreover, picoeukphytoplankton seemed to be adapted to a low phosphate level (0.25  $\mu\text{mol/L}$ ), which reflected that growth of different phytoplankton species had different adaptation to phosphate level. It was also possible that there was nutrient competition between nanophytoplankton and picoeukphytoplankton, when nanophytoplankton grown and became dominate species at a high phosphate level the growth of picoeukphytoplankton could be limited. Therefore, the larger phytoplankton species was in favor of a high phosphate level in the maximum turbidity zone of the Changjiang estuary. Under low

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划资助项目 (2002CB412405)

**收稿日期:** 2005-12-09; **修订日期:** 2006-07-21

**作者简介:** 方涛 (1980~), 男, 安徽淮南人, 博士生, 主要从事海洋生物地球化学研究. E-mail: fang. tao13 @yahoo. com. cn

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: daoji1 @sklec. ecnu. edu. cn

**致谢:** 海监 47 号所有船员给予巨大帮助, 在此深表感谢!

**Foundation item:** The project was supported by The National Key Basic Research Program of the Ministry of Science and Technology, China (No. 2002CB412405)

**Received date:** 2005-12-09; **Accepted date:** 2006-07-21

**Biography:** FANG Tao, Ph. D. candidate, mainly engaged in marine biogeochemistry. E-mail: fang. tao13 @yahoo. com. cn

irradiance (50 % of nature irradiance), phosphate uptake was restrained at high phosphate levels and the growth of both nanophytoplankton and *synechococcus* sp. was also limited. Moreover, they grew well at intermediate phosphate levels (0.41  $\mu\text{mol/L}$ ) and picoeukphytoplankton grew well at a low phosphate levels. In fact, there was no such environment with a low irradiance and a low phosphate levels in the maximum turbidity zone, so that phytoplankton bloom hardly occurred there. In addition, the results also showed that the growth periods of all three kinds of phytoplankton at intermediate phosphate levels were prolonged obviously, suggesting that the limitation of phytoplankton growth mainly reflected its growth period changes. Without irradiance, the addition of phosphate didn't affect the release rates of phosphate with lineal increase and the growth rates of phytoplankton with exponential decrease, which showed that phosphate regeneration was faster in day than in night and the irradiance was a significant factor to affect phosphorous biogeochemical cycle in the Changjiang estuary.

**Key words:** Changjiang estuary; phytoplankton; irradiance; phosphate

长江大量物质的输送入海是河口及邻近海域营养盐的主要来源,营养盐的浓度及其比例的变化对河口生态系统中浮游植物的初级生产有着重要影响<sup>[1]</sup>,其 N/P 值往往是 Redfield 值<sup>[2,3]</sup>的 2 倍多,表明长江口浮游植物生长存在着显著的磷限制性<sup>[4~8]</sup>。但营养盐对藻类生长的限制往往是潜在的,浮游植物的生长繁殖还会受到光照等因子的限制。长江径流挟带的悬沙与潮流扰动产生的再悬浮泥沙在长江口形成透明度 3m 和 3m 以下的浑浊带,虽然有高浓度的营养盐水平,但浑浊带悬沙的消光作用抑制了长江口门区的初级生产力,使口门区的浮游植物生物量及密度显著低于邻近羽状峰水域<sup>[9]</sup>。蒲新明等<sup>[10,11]</sup>认为长江口可分为 3 个部分:近河口的光限制区、过渡带的光和磷酸盐限制区,以及远河口的氮盐限制区。这种沿着盐度梯度表现出来的光限制转换为营养盐限制的过程在国外众多研究中都有过报道<sup>[12~14]</sup>,问题是在河口生态系统中,光和营养盐是如何相互作用于浮游植物生长的?尤其是如何作用于微型及微微型浮游植物(picophytoplankton)生长的?而这部分浮游植物在世界各大洋中可占到初级生产力的 60%~70%<sup>[15~17]</sup>,另外,目前国内外的研究多集中于其在海洋生态系统的生物量和初级生产力以及在海洋营养盐再生与碳循环中发挥的作用等方面<sup>[18~24]</sup>,而对其生理生态等现场培养实验研究还很缺乏。本文通过现场改变培养水体的磷酸盐浓度和外在光照条件,进行了一系列的现场培养实验,来探讨光和营养盐磷对浮游植物生长的影响以及高浑浊河口的生物地球化学过程。

## 1 材料与方法

### 1.1 采水站位

现场培养实验于 2004 年 9 月 24~29 日在“海监 47 号”调查船上进行。采水站位位于 123°00'E, 30°05'N (图 1),该处水深 46m,表层水平均的  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度为 10.95  $\mu\text{mol/L}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度为 3.01  $\mu\text{mol/L}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$  浓度为 0.08  $\mu\text{mol/L}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度为 0.25  $\mu\text{mol/L}$ ,  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  浓度为 8.09  $\mu\text{mol/L}$ , 水温 24.84 °C, 盐度为 28.68, 悬沙含量为 0.033  $\text{kg/m}^3$ 。

### 1.2 现场培养方法

在设定站位取表层海水,经 50  $\mu\text{m}$  筛绢滤除浮游动物干扰后,分装到 5L 透明 PET 培养瓶,然后调查船在长江口羽状峰水域走航进行现场培养。根据长江口浑浊带和羽状峰水域磷浓度的变化范围<sup>[25]</sup>,确定向培养瓶中添加不同体积的 5mmol/L  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  溶液,使得培养瓶中磷酸盐处于不同的浓度水平,即低磷水平(0.25  $\mu\text{mol/L}$ )、中磷(0.41  $\mu\text{mol/L}$ )和高磷水平(0.60  $\mu\text{mol/L}$ ) (表 1),并通过用黑色透光塑料袋和不透光的布料对某些培养瓶进行遮光和避光培养,以控制 3 种不同的光照,即高光照(100 %自然光照)、低光照(50 %自然光照)和无光

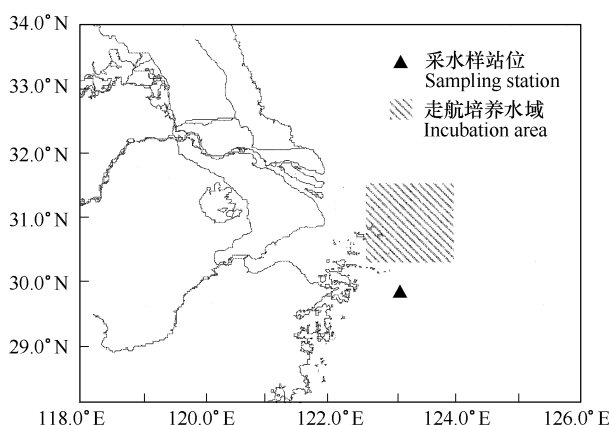


图 1 采水样站位 (▲) 及走航培养水域 (阴影部分)

Fig. 1 Sampling station (▲) and incubation area (shadow)

照(0 %自然光照)(透入光强用光度计测定确定),分别用来模拟羽状峰表层水域光照、长江口浑浊带光照和底层黑暗环境。培养瓶置于甲板上的培养水槽中,通过温控系统控制水温在 16 °C左右,并每隔约 6h 即振荡 1 次培养瓶以防止浮游植物聚集。

实验所用筛绢、培养瓶和过滤器等先用稀盐酸(pH = 4.0)浸泡 24h 以上,再分别用去离子水和 Mili-Q 水洗净,使用时用现场海水润洗。

表 1 实验组的设计

| Table 1 The design of experimental groups |                                                                                                             |                                                                    |                                 |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 培养瓶<br>Incubation bottles                 | 加 5mmol/L NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 溶液的体积数<br>Volumes of NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> added (ml) | 培养水体中磷酸盐浓度水平<br>Phosphate concentration levels of incubation water | 光照条件<br>Condition of irradiance |
| C1                                        | 0                                                                                                           | 低磷 Low phosphate                                                   | 高光照 High irradiance             |
| C2                                        | 0.5                                                                                                         | 中磷 Middle phosphate                                                | 高光照 High irradiance             |
| C3                                        | 1                                                                                                           | 高磷 High phosphate                                                  | 高光照 High irradiance             |
| C4                                        | 0                                                                                                           | 低磷 Low phosphate                                                   | 低光照 Low irradiance              |
| C5                                        | 0.5                                                                                                         | 中磷 Middle phosphate                                                | 低光照 Low irradiance              |
| C6                                        | 1                                                                                                           | 高磷 High phosphate                                                  | 低光照 Low irradiance              |
| C7                                        | 0                                                                                                           | 低磷 Low phosphate                                                   | 无光照 No irradiance               |
| C8                                        | 0.5                                                                                                         | 中磷 Middle phosphate                                                | 无光照 No irradiance               |
| C9                                        | 1                                                                                                           | 高磷 High phosphate                                                  | 无光照 No irradiance               |

1.3 营养盐测定

用于营养盐测定的培养水样采集后立刻通过孔径 0.45μm 的醋酸纤维滤膜(预先经过稀盐酸(pH = 4.0)浸泡 24h)过滤,滤液保存于加有 1 %饱和 HgCl<sub>2</sub> 溶液的 100ml 棕色瓶中,滤瓶和棕色瓶预先也经过稀盐酸(pH = 4.0)酸浸,并用去离子水和 Mili-Q 水洗净。营养盐在 SKLAR 间隔流动分析仪使用比色法测定(Skalar<sup>plus</sup> System, 荷兰 Skalar 分析仪器公司)。

1.4 流式细胞仪分析

用于测定微型和微微型浮游植物种类和数量的水样,直接通过孔径 20μm 的醋酸纤维滤膜,去除较大悬浮颗粒,以免上机测试时堵塞流式细胞仪进样口,造成不必要损失。滤液放于 5ml 的冻存管中,并加入 1 %多聚甲醛(PEA)置于液氮中保存,样品带回实验室后使用流式细胞仪(FACScan Cytometer,美国 Becton Dicknson 公司)进行分析测定。

1.5 数据计算方法

浮游植物细胞的生长速率按以下计算公式得出:

$$\mu = \ln \left( \frac{C_1}{C_0} \right) / (t_1 - t_0)$$

式中,μ称作比生长速度,C<sub>1</sub>和C<sub>0</sub>表示在t<sub>1</sub>和t<sub>0</sub>时测得的细胞数目。

2 结果及讨论

2.1 现场磷酸盐浓度的变化

在高光照条件下,低浓度磷和中浓度磷水平的培养水体中,磷酸盐浓度随时间的变化具有相似性,即开始培养阶段随时间下降,实验后期又缓慢上升(图 2),而在高浓度磷培养水体中,磷酸盐浓度一直呈下降状态,且磷酸盐浓度下降速率明显比低中磷水平下高得多。磷酸盐浓度随时间变化的曲线几乎成一直线(线性回归方程为 y = - 0.071x + 0.58, R<sup>2</sup> = 0.99)。

根据实验测得的结果,该水域 N/P 约为 46,明显高于 Redfield 比值中 N/P 的 16,表明该水域 P 为潜在的限制性营养因子,而上述浮游植物在高浓度磷的环境下磷酸盐的吸收速率明显加快的特征也表明了磷的限制性。

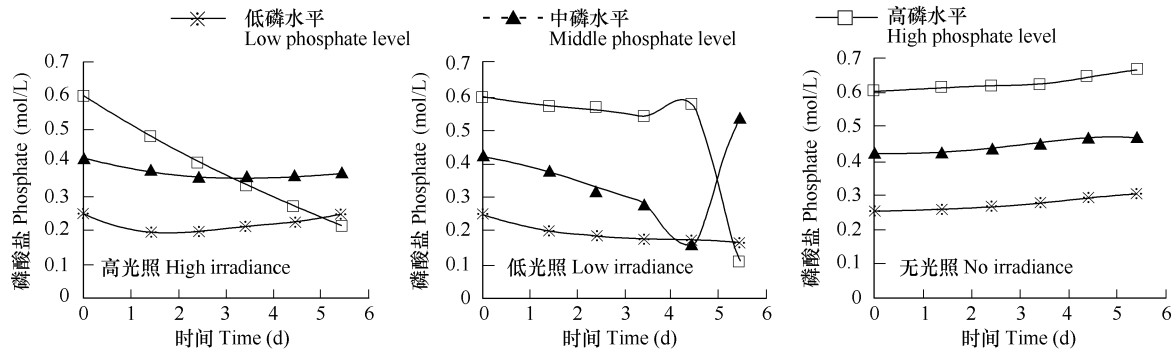


图2 3种浓度水平的磷酸盐在不同光照环境下的吸收变化

Fig. 2 Temporal changes of phosphate absorption at the three phosphate concentration levels under the different irradiances

在低光照条件下,高浓度磷水平的培养水体中磷酸盐吸收曲线并没有像在高光照条件下那样出现快速的下降,而且呈现出抑制性。不同浓度磷水平培养水体中的初始 N/P 从高至低分别为 46,28 和 17,因而在低光照条件下,浮游植物对营养盐的吸收并不按照 Redfield 比值,而是高于 Redfield 值 16。

在黑暗无光照条件下,磷酸盐在不同磷水平培养过程中的浓度都是一直在增加的,统计分析表明磷酸盐浓度与时间有着很强的线性关系(表 2),而且 3 种磷水平下的线性方程斜率是非常接近的,分别为 0.0096, 0.0109 和 0.0106(三者之间的标准偏差值为 0.0006),因此,在无光照环境下磷酸盐浓度水平并不影响磷酸盐浓度的增加速率,即暗环境下,磷酸盐的降解速率是一定的。

有必要指出的是,在实验培养体系中,吸收磷酸盐的浮游植物种类主要包括小于 20 $\mu\text{m}$  的微型及微微型浮游植物以及部分大于 20 $\mu\text{m}$  的浮游植物种类。因此,它们对磷酸盐的吸收量是不同的,需要在进一步的实验研究中给出。

## 2.2 现场微型及微微型浮游植物生长的变化

**2.2.1 高光照条件培养** 在高光照条件下,与磷酸盐浓度变化相应的是 Nano 的生长变化对浓度磷的增大也有着明显的响应性(图 3)。通过计算,其在高磷水平培养水体中的初始生长速率为 0.98 d<sup>-1</sup>,比低浓度磷条件下 0.73 d<sup>-1</sup>要高出 35.39%,且 Nano 的生长周期得到延长,即生长达到峰值的时间较长,约 2~3d,其处于峰值的细胞密度也明显的高于中、低磷水平,约为 1.5262  $\times 10^4$  cells/ml,而中、低磷水平下处于生长峰值的细胞密度分别只有 0.7407  $\times 10^4$  cells/ml 和

0.5957  $\times 10^4$  cells/ml,为高浓度磷培养水体中的 48.53%和 39.03%,因此,高光照条件下,适宜 Nano 生长的磷浓度水平较高。

微微型浮游植物一般可划分为 3 个类群:聚球藻属 (*Synechococcus*)、原绿球藻属 (*Prochlorococcus*)、微微型真核浮游植物 (Picoeukaryoplankton) [26]。从测定结果看,长江口聚球藻的密度很高,可以达到 1.57469  $\times 10^5$  cells/ml,比 Nano 和 Euk 要高出一个数量级。在高光照下,高磷水平培养初期也促进了聚球藻密度小幅增加,其在低、中磷水平则一直是呈衰亡状态的。由于原绿球藻 (*Prochlorococcus*) 密度在长江口几乎为零,因此流式细胞分析测定并未发现培养瓶中存在原绿球藻。Euk 在低磷水平培养实验初期的生长速率是最高的,为 0.11 d<sup>-1</sup>,其次为中浓度磷的 0.06 d<sup>-1</sup>,最小的是高浓度磷的 0.03 d<sup>-1</sup>,说明微微型的真核浮游植物更适应较低的磷酸盐含量的生长环境,所以在营养盐浓度很低的大洋也能够大量生长繁殖,承担着大洋初级生产力的大部分 [27,28],也可能是因为 Euk 与 Nano 之间有着种间竞争的关系,当 Nano 在高浓度磷条件下快速生长成为

表2 无光照暗环境下磷酸盐浓度在 3 种磷水平下随时间变化的线性回归方程

Table 2 The lineal regression formulas between phosphate concentrations and incubation time at the three phosphate concentration levels without irradiance

| 项目 Item             | 线性回归方程<br>Lineal regression formulas | R <sup>2</sup> 值<br>Value of R <sup>2</sup> |
|---------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------|
| 低磷 Low phosphate    | $y = 0.0096x + 0.2493$               | 0.9483                                      |
| 中磷 Middle phosphate | $y = 0.0109x + 0.4122$               | 0.9577                                      |
| 高磷 High phosphate   | $y = 0.0106x + 0.5971$               | 0.896                                       |

优势种时,势必限制了 Euk 的生长,因此,可以认为加磷的受益者主要是个体较大的浮游植物。

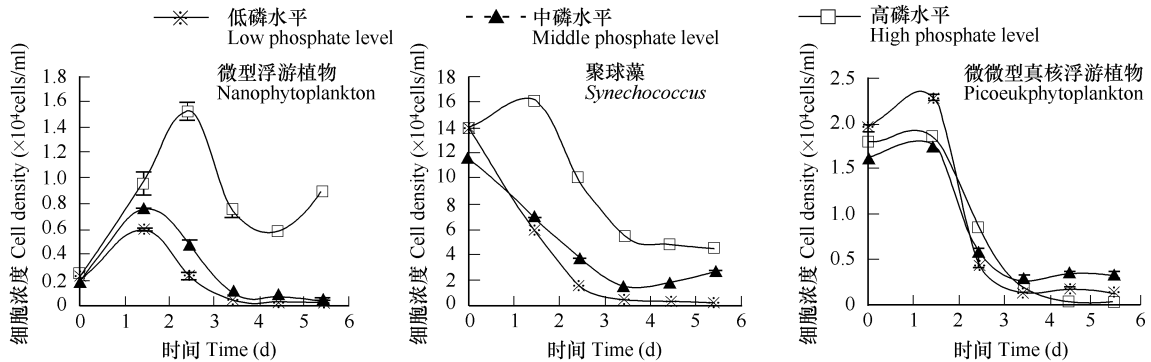


图3 高光照下微型及微微型浮游植物在3种磷浓度水平中的的生长变化曲线

Fig. 3 Growth changes of nanophytoplankton and picophytoplankton at the three phosphate concentration levels with high irradiance

**2.2.2 低光照条件培养** 如前所述,在低光照条件下高磷浓度是抑制磷酸盐浓度下降的,同样,Nano 在高磷水平培养水体中的生长也是受到抑制的(图4),其初始生长速度在高磷水平下生长速率只有  $0.15 \text{ d}^{-1}$ ,分别只有中低磷水平下的 27.07 %和 33.60 %。Nano 在中浓度磷培养水体中生长峰值时的细胞密度为  $0.8750 \times 10^4 \text{ cells/ml}$ ,比低浓度磷条件下高出 42.11 %,为高浓度下的 2.34 倍,因而在低光照条件下 Nano 更适宜在中浓度磷培养水体中生长,与高光照条件下适宜在高浓度磷水平中生长不同,这是一个非常重要的发现。以往众多的研究都把浑浊带不能发生赤潮的原因都归因于低光辐照<sup>[29]</sup>,而从本文的研究结果可以看出,浑浊带中的高营养盐浓度也可能是赤潮不能爆发的一个重要原因,因为高营养盐浓度在低光照环境下也抑制了某些浮游植物的生长。

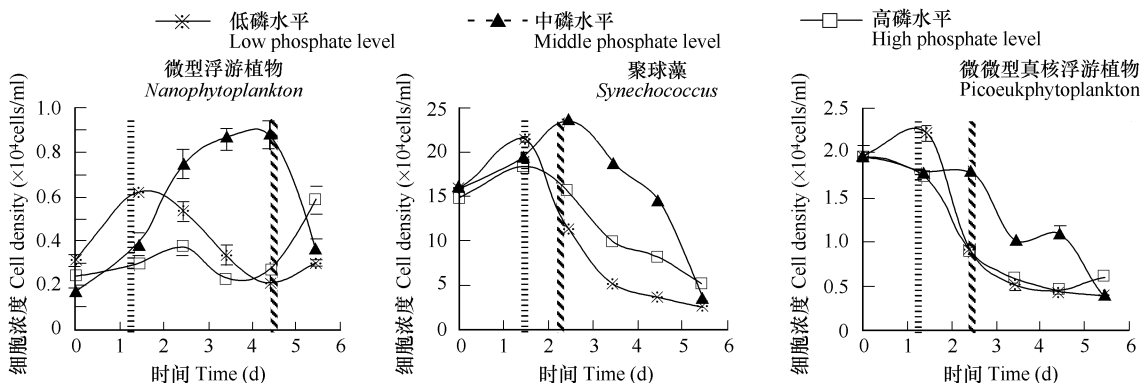


图4 低光照下微型及微微型浮游植物在3种磷浓度水平中的的生长变化曲线

Fig. 4 Growth changes of nanophytoplankton and picophytoplankton at the three phosphate concentration levels with low irradiance

与 Nano 变化类似,聚球藻在中磷水平下达到生长峰值的细胞密度为  $2.36728 \times 10^5 \text{ cells/ml}$ ,低磷水平下细胞密度峰值为其 90.3 %,高磷水平下则只有其值的 77.1 %。在高光照环境下,聚球藻在中低浓度磷条件下都没有生长,一直呈衰亡状态,只有在高浓度磷中,细胞密度在实验初期出现了小幅度的增加,而后也处于细胞衰减阶段(图3),其初始生长速率为  $0.10 \text{ d}^{-1}$ 。而在低光照下,其初始速率在低中高磷水平下分别为  $0.22 \text{ d}^{-1}$ ,  $0.15 \text{ d}^{-1}$  和  $0.15 \text{ d}^{-1}$ ,都比现场光照高浓度磷下的初始速率值大,分别高出 106.11 %,40.69 %和 39.45 %。总而言之,Syn 也更适应在较低磷水平和较低光照的环境下生长。Euk 在高磷水平下的生长也是受到抑制的,其更宜在低磷环境下生长,这一点与在高光照条件下相似。

值得一提的是 3 类浮游植物在中磷水平培养水体中的生长周期都明显被延长(图 4 柱形条带所示),尤其是 Nano,其达到生长峰值的时间可被延长约 3d 左右,表明在低光照环境下,浮游植物生长的限制作用主要反映在对其生长周期的影响。

2.2.3 无光照暗环境培养 无光照下,磷酸盐在不同水平下都是表现出释放状态的,表明浮游植物存在着死亡从而释放磷酸盐。从培养实验结果来看,三类浮游植物在黑暗无光下都是无法生长的(图 5)。浮游植物细胞在培养初期快速地死亡,而后衰减趋于缓慢,通过统计分析,无光照下浮游植物细胞数目与时间之间有着很强的指数回归性(表 3),且他们分别在高中低磷水平培养水体中的衰减曲线具有相似的特性,因此无光照环境中磷酸盐的添加对于浮游植物的衰减没有大的影响,说明光照在浮游植物生长所需因子中是处于首要位置的,只有在保证充分的光照情况下,磷的添加才有可能促进浮游植物的生长。

图形中 Euk 的衰减曲线最陡,其次是 Syn,因而 Euk 的衰减速率最快, Syn 次之, Nano 最慢。另外在表 3 中, pico 指数回归方程  $x$  前的系数也明显大于 nano 和 syn,浮游植物细胞快速地死亡也是磷酸盐再生的主要原因。另外,3 类浮游植物对该系数具有一定的特定性, Nano 在  $-0.3329 \sim -0.2836$ , Euk 在  $-0.7575 \sim -0.8389$ , Syn 在  $-0.6947 \sim -0.5736$ ,该系数反映出它们降解速率是不同的。

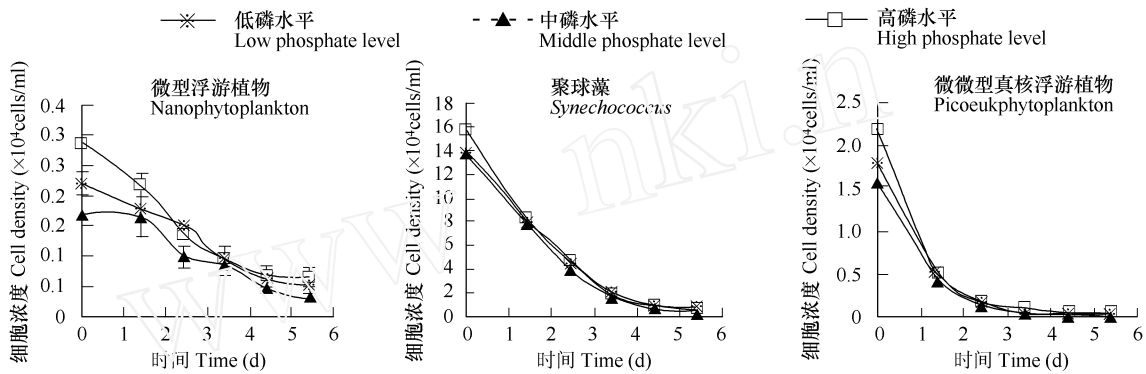


图 5 无光照下微型及微微型浮游植物在 3 种磷浓度水平中的的生长变化曲线

Fig. 5 Growth changes of nanophytoplankton and picophytoplankton at the three phosphate concentration levels without irradiance

3 结论

(1) 通过现场高光照下加入不同量的磷酸盐,发现高磷水平培养水体中磷酸盐浓度下降趋势明显加快, Nano 细胞密度也都得到显著增加,而 Syn 密度小幅度增加, Euk 在低磷水平培养水体中生长较快,表明不同类型浮游植物对不同磷浓度水平的适应性,也可能是 Euk 与 Nano 之间有着种间竞争的关系,当 Nano 在高浓度磷条件下快速生长成为优势种时,势必限制了 Euk 的生长,因此高磷浓度对个体较大的浮游植物生长有利。

(2) 在低光照下培养中,磷酸盐浓度变化并没有出现高光照下的变化趋势,其高磷水平培养水体中浓度的下降是受到抑制的,与此相应的是 Nano 和 Syn 的生长在高磷水平下也受到抑制,更宜在中磷水平下生长, Euk 同样是在较低磷水平下生长较快,但浑浊

表 3 无光照暗环境下微型及微微型浮游植物细胞数在 3 种磷水平下随时间变化的指数回归方程

Table 3 The exponential regression formulas between nanophytoplankton and picophytoplankton cells and incubation time at the three phosphate concentration levels without irradiance

| 磷浓度水平<br>Phosphate<br>concentration levels | 指数回归方程<br>Exponential<br>regression formulas | $R^2$ 值<br>value of $R^2$ |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------|
| 低磷 Low phosphate                           | $y = 0.2496e^{-0.2836x}$                     | 0.9608                    |
| Nano 中磷 Middle phosphate                   | $y = 0.2136e^{-0.3329x}$                     | 0.9255                    |
| 高磷 High phosphate                          | $y = 0.2917e^{-0.2995x}$                     | 0.9655                    |
| 低磷 Low phosphate                           | $y = 1.2893e^{-0.7575x}$                     | 0.8745                    |
| Euk 中磷 Middle phosphate                    | $y = 1.265e^{-0.8245x}$                      | 0.9658                    |
| 高磷 High phosphate                          | $y = 1.6755e^{-0.8389x}$                     | 0.9659                    |
| 低磷 Low phosphate                           | $y = 1.5859e^{-0.5736x}$                     | 0.9752                    |
| Syn 中磷 Middle phosphate                    | $y = 1.7339e^{-0.6947x}$                     | 0.9846                    |
| 高磷 High phosphate                          | $y = 1.7934e^{-0.6367x}$                     | 0.9863                    |

带水域并不存在低光照低磷的环境,因此,浑浊带水域不能发生赤潮的原因不能都归因于低光辐照。另外,在中磷水平培养水体中,3类浮游植物的生长周期都显著被延长,表明浑浊带水域浮游植物生长的限制作用主要反应在对其生长周期的影响。

(3) 无光照暗环境下,磷酸盐在不同磷水平培养水体中一直都呈释放状态,浮游植物也都无法生长,磷酸盐浓度随培养时间呈线性增加关系,浮游植物细胞密度与培养时间则呈指数下降关系,且磷酸盐的添加对其本身的释放速率和浮游植物的衰减速率都没有大的影响,表明光照在浮游植物生长中的重要性,只有在充足的光照和适宜的温度下,磷浓度的增加才有可能促进赤潮的产生。

#### References:

- [ 1 ] Justic D, Rabalais N N, Turner R E. Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication. *Marine Pollution Bulletin.*, 1995, 30:41~46.
- [ 2 ] Redfield A C. On the Proportions of organic Derivatives in seawater and theirs relation to the composition of plankton. In: James Johnstone Memorial Volume. Univ. Liverpool. , 1934, 176~192.
- [ 3 ] Redfield A C, Ketchum B H and Richards F A. The influence of organisms in the composition of seawater. In: Hill M N, ed. *The Sea*, Interscience, NY, USA, 1963. 2: 26~77.
- [ 4 ] Zhang J. Nutrient elements in large Chinese estuaries. *Continental Shelf Research*, 1996, 16:1023~1045.
- [ 5 ] Liu S M, Zhang J, Chen H T, *et al.* Nutrients in the Changjiang and its tributaries. *Biogeochemistry*, 2003, 62:1~18.
- [ 6 ] Zhang J, Su J L. Nutrient dynamics of the China Seas: The Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea and South China Sea. In: Robinson A R, and Brink K H, ed. *The sea*, . Harvard Press, Massachusetts, 2005. 14:637~671.
- [ 7 ] Harrison P H, Hu M H, Yang Y P, *et al.* Phosphate limitation in estuarine and coastal waters of China, *J. Exp. Bio. Ecol.*, 1990, 140:79~87.
- [ 8 ] Hu M H, Yang Y P, Xu C L, *et al.* Phosphate limitation of phytoplankton in Yangtze estuary, *Acta Oceanologica Sinica*, 1989, 11 (4) :439~443.
- [ 9 ] He W S, Lu J J. Effects of high-density suspended sediment on primary production at the Yangtze estuary, *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9 (4) : 24~27.
- [ 10 ] Pu X M, Wu Y L, Zhang Y S. Nutrient limitation of phytoplankton in the Changjiang estuary I. Condition of nutrient limitation in autumn, *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22 (4) :60~66.
- [ 11 ] Pu X M, Wu Y L, Zhang Y S. Nutrient limitation of phytoplankton in the Changjiang estuary II. Condition of nutrient limitation in spring, *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 22 (3) :57~65.
- [ 12 ] Filardo M J, Dunstan W N. Hydrodynamic control of phytoplankton in low salinity waters of the James River estuary. Virginia, U. S. A. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 1985, 21:653~667.
- [ 13 ] Pennock J R, Sharp J H. Phytoplankton production in the Delaware estuary: temporal and spatial variability. *Marine ecology Progress Series*, 1986, 34:143~155.
- [ 14 ] Fisher. T R, Harding Jr. L W, Stanley D W, Ward L G. Phytoplankton, nutrients, and turbidity in the Chesapeake, Delaware, and Hudson estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1988, 27:61~93.
- [ 15 ] Murphy L S, Haugen E M. The distribution and abundance of phototrophic ultraplankton in the north Atlantic, *Limnol, Oceanogra.*, 1985, 30: 47~58.
- [ 16 ] Olson R J, Chisholm S W, Zettler E R, *et al.* Pigments, Size and distribution of *Synechococcus* in the north Atlantic and Pacific Ocean, *Limnol, Oceanogra.*, 1990, 35: 45~58.
- [ 17 ] Le bouteiller A, Blanchot J, Rodier, *et al.* Size distribution pattern of phytoplankton in the western Pacific; towards a generation for tropical open ocean, *Deep-Sea Research*, 1992, 39: 501~509.
- [ 18 ] Chen Y L. Comparisons of primary productivity and phytoplankton size structure in the marginal regions of southern East China Sea. *Cont. Shelf Res.*, 2000, 20:437~458.
- [ 19 ] Li W K W, Harrison W G. Chlorophyll, bacteria and picophytoplankton in ecological provinces of the North Atlantic. *Deep-Sea Res.* II, 2001, 48:2271~2293.
- [ 20 ] Liu H, Suzuki K, Minami C, Saino T, Watanabe M. Picoplankton community structure in the subarctic Pacific Ocean and the Bering Sea during summer 1999. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 2002, 237:1~14.
- [ 21 ] Liu H, Dagg M, Campell L, Urbarr-Rich J. Picophytoplankton and bacterioplankton in the Mississippi River plume and its adjacent waters, *Estuaries*, 2004, 27:147~156.
- [ 22 ] Tarran G A, Zubkov M V, Sleight M A, Burkill P H, Yallop M. Microbial community structure and standing stocks in the NE Atlantic in June and July of 1996. *Deep-Sea Res.* II, 2001, 48:963~985.

- [23] Detmer A E, Bathmann U V. Distribution patterns of autotrophic pico- and nanoplankton and their relative contribution to algal biomass during spring in the Atlantic sector of the Southern Ocean. *Deep-Sea Res.* II, 1997, 44:299~320.
- [24] Jiao N Z, Yang Y H. Study progress on *prochlorococcus* in Chinese sea area, *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(7):485~491.
- [25] Ye X S, Zhang Y, Xiang Y T. Characteristic of nitrate distribution in the Changjiang River estuary and its Cause of Formation. *Marine Science Bulletin*, 2000, 19(1):89~92.
- [26] Blanchot J, M Roder, A Le Bouteiller. Effect of El Nino southern oscillation on the distribution and abundance of phytoplankton in the western Pacific, *Journal of Plankton Research*, 1992, 14:137~156.
- [27] Feng S Z, Li F Q, Li S Q. *Introduction of Oceanography*, Beijing: Higher Education Press, 1999. 310~314.
- [28] Marie D, F Partensky. D Vaultot and C Brussaard, Enumeration of phytoplankton, bacteria and viruses in marine samples. In Robinsin J R, *et al.* ed, *Current Protocols in Cytometry*, New York International Society for Analytical Cytology, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1999.
- [29] Irigpion X, Castel J. Light limitation and distribution of chlorophyll pigments in a highly turbid estuary: the Gironde (SW France), *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1997, 44: 507~517.

#### 参考文献:

- [8] 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*, 1989, 11(4): 439~443.
- [9] 何文珊,陆健健. 高浓度悬沙对长江河口水域初级生产力的影响. *中国生态农业学报*, 2001, 9(4):24~27.
- [10] 蒲新明,吴玉霖,张永山. 长江口区浮游植物营养盐限制因子的研究 I. 秋季的营养限制情况. *海洋学报*, 2000, 22(4):60~66.
- [11] 蒲新明,吴玉霖. 长江口区浮游植物营养盐限制因子的研究 II. 春季的营养限制情况. *海洋学报*, 2001, 22(3):57~65.
- [24] 焦念志,杨燕辉. 中国海原绿球藻研究. *科学通报*, 2002, 47(7):485~491.
- [25] 叶仙森,张勇,项有堂. 长江口海域营养盐的分布特征及成因. *海洋通报*, 2000, 19(1): 89~92.
- [27] 冯士筌,李凤岐,李少筌. *海洋科学导论*. 北京:高等教育出版社, 1999. 310~314.