

不同光照水平下浮游藻类对氮、磷营养盐添加的响应

方涛^{1,2}, 冯志华¹, 高磊²

(1. 淮海工学院 江苏省海洋生物技术重点建设实验室, 江苏 连云港 222005; 2. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 2007 年 11 月于长江口邻近海域通过在不同光照强度下往培养水体添加不同量的磷酸盐(或硝酸盐)进行现场培养实验, 对培养过程中叶绿素 a 质量浓度变化以及比生长速率与氮磷浓度之间的关系进行了研究。结果表明: 无光照下叶绿素 a 没有增加趋势, 其他光照下浮游藻类生长有着很长的平台期, 且 100%光照下叶绿素 a 终浓度可以为 80%、60%、40%、20%光照下的 1.5 倍、2 倍、4 倍、15 倍; 相同光照下, 叶绿素 a 质量浓度在不同营养盐水平之间差异不明显, 浮游藻类生长主要受光照的限制, 而不是营养盐; 培养介质中磷酸盐和硝酸盐浓度与浮游藻类比生长速率之间有一个临界点, 当氮磷浓度超过阈值时, 浮游藻类比生长速率会减小, 其中磷酸盐的阈值浓度约为 1~2 $\mu\text{mol/L}$, 硝酸盐阈值约为 20~25 $\mu\text{mol/L}$ 。

关键词: 光照; 磷酸盐; 硝酸盐; 比生长速率

中图分类号: Q178.53

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2012)11-0014-05

光照和营养盐氮磷是限制浮游藻类生长的主要因子, 如有学者观察到, 在美国 Puget Sound 北部的一个泥沼河口, 所有实验期间, 可溶解无机 N 与 P 比例小于 16 : 1, 这样在河口环境, 每单位 P 只有小于浮游植物细胞结构所需要的 N 可供利用, 因此推测 N 是这些河口光合作用的限制因子^[1]。长江口过高 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, 特别是最大浑浊带水域, 由于较高的悬浮物浓度, 初级生产力主要受光的限制^[2]。Goosen 等^[3]比较了欧洲的 Elbe、Westerschelde 和 Gironde 河口, 发现总悬浮物浓度在 Gironde 河口最高, 在 Elbe 河口最低, 浮游植物初级生产在 Gironde 河口最低且与光亮层深度呈正相关。

目前关于自然光照和营养盐对藻类的影响研究多是通过室内培养实验或者现场调查自然海区浮游藻类生物的分布或者模型计算来得出结论, 现场的生理生态培养实验还比较缺乏。现场培养实验能够尽量模拟现场的各种环境因子, 浮游藻类的生长环境相对于室内浮游植物培养更接近于真实的海洋环境^[4], 由现场培养实验所得到的浮游植物与环境因子相互作用的各项参数更有实际意义, 因此近年来有不少学者采用该方法研究海水营养盐与浮游植物之间的关系^[5-8]。本文着重以现场培养实验为手段,

来对不同光照水平下浮游藻类对氮、磷营养盐添加后的叶绿素 a 以及生长速率变化进行研究。

1 材料与方法

1.1 培养方法

2007 年 11 月于长江口邻近海域站点 (122°40'E, 30°50.8'N), 取表层海水经孔径为 100 μm 的筛绢滤出较大型浮游生物的明显干扰^[9], 混匀后分装入 78 个 5L 透明塑料桶中(C1~C78)(表 1)。根据长江口营养盐浓度的变化范围^[10], 确定往培养瓶中添加不同体积的 5 mmol/L NaH_2PO_4 溶液或 5 mmol/L KNO_3 溶液, 使得培养瓶中磷酸盐和硝酸盐处于不同的浓度水平。同时分别套上事先打好细孔的遮光布, 控制其透光率为现场光强的 100%, 80%, 60%, 40%, 20%, 0, 培养桶固定在岸边通有循环海水的水槽中, 水温约 16℃, 采样时间间隔分别为 0、15、26、39、48、70、109 h。

收稿日期: 2012-02-25; 修回日期: 2012-06-19

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(40906054); 淮海工学院江苏省海洋生物技术重点建设实验室研究基金项目(2010HS12); 淮海工学院引进人才科研启动基金资助项目(KQ09016); 上海市自然科学基金项目(10ZR1408900); 江苏省环保厅项目(2010043)

作者简介: 方涛(1980-), 博士, 讲师, 研究方向为河口海岸生态与环境, E-mail: tomtaofang@yahoo.com.cn

表 1 实验组的设计

Tab. 1 The experiment groups

光照水平 (%)	对照	加磷组(mL)						加氮组(mL)					
		0.05	0.10	0.25	0.50	1.00	2.00	0.10	0.50	1.00	2.00	5.00	10.00
100	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
80	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26
60	C27	C28	C29	C30	C31	C32	C33	C34	C35	C36	C37	C38	C39
40	C40	C41	C42	C43	C44	C45	C46	C47	C48	C49	C50	C51	C52
20	C53	C54	C55	C56	C57	C58	C59	C60	C61	C62	C63	C64	C65
无	C66	C67	C68	C69	C70	C71	C72	C73	C74	C75	C76	C77	C78

1.2 样品采集与分析方法

样品采集及营养盐和叶绿素 a 的测定同文献 [11]。

1.3 数据处理

浮游藻类生长速率按下列计算公式得出：

$$\mu = \ln (C_t / C_0) / (t - t_0)$$

式中, μ 为比生长速率, C_t 和 C_0 表示在 t 和 t_0 时测得的叶绿素 a 质量浓度。

2 结果与讨论

2.1 叶绿素 a 质量浓度变化

对照组叶绿素 a 质量浓度初始值为 0.56 $\mu\text{g/L}$, 磷酸盐浓度初始值为 0.94 $\mu\text{mol/L}$, 以 P1 表示, 其余 6 个实验瓶中浓度分别为 1, 1.05, 1.2, 1.45, 1.95, 2.95 $\mu\text{mol/L}$, 以 P2~P7 表示。加氮组对照瓶硝酸盐浓度初始值为 21.6 $\mu\text{mol/L}$, 以 N1 表示, 其余 6 个实验瓶中浓度分别为 21.7, 22.1, 22.6, 23.6, 26.6, 31.6 $\mu\text{mol/L}$, 以 N2~N7 表示。

现场培养实验组中, 加磷加氮组无光照下叶绿素 a 质量浓度基本没有增加的趋势(图 1), 而 100%光照下浮游藻类生长有着很长的平台期, 加磷组前 6 次采样时, 叶绿素 a 质量浓度缓慢增加, 达到初始浓度的 4 倍, 但在最后 1 次采样, 叶绿素 a 质量浓度可以增加至初始值的 40 倍, 加氮组也可以达到初始浓度的 35 倍, 说明浮游植物从这个时刻开始进入了指数生长期, 其他光照下, 浮游植物生长变化与此类似, 只是终浓度要小于 100%光照。相同光照水平下在 P1~P7、N1~N7, 叶绿素 a 质量浓度最大值往往不是出现在 P7 或者 N7 水平, 如加磷组 40%和 100%光

照下, 叶绿素 a 质量浓度最高值都出现在 P5 水平, 分别为 7.4、20.8 $\mu\text{g/L}$;加氮组 40%光照下叶绿素 a 最大值出现在 N4 水平, 为 4.92 $\mu\text{g/L}$, 60%光照最大值为 9.98 $\mu\text{g/L}$, 出现在 N3 水平。

总体来说, 随着光照强度的增加, 叶绿素 a 质量浓度显著增加, 100%光照下叶绿素 a 终质量浓度可以为 80%、60%、40%、20%光照的 1.5 倍、2 倍、4 倍、15 倍。而在同等光照下, 叶绿素 a 质量浓度在不同营养盐水平之间差异不大, 说明浮游藻类生长的营养盐限制性不明显。培养介质磷酸盐初始浓度为 0.94 $\mu\text{mol/L}$, 而总无机氮浓度为 28.9 $\mu\text{mol/L}$, N/P 值为 31, 根据 Redfield 比值应该属于磷限制, 但在添加磷营养盐后, 浮游藻类生长并没有得到明显促进, 可见在营养盐绝对浓度较高且 N/P 值接近于 16 : 1 时藻类生长才会非常快, 而两者不能达到浮游植物最适状态时, 营养盐的绝对浓度对吸收速率的影响较比例的影响更明显, 由于本实验培养水体磷酸盐、硝酸盐的绝对浓度都比较高, 浮游藻类不受营养盐限制, 而主要受光照水平的限制。

2.2 氮、磷浓度对比生长速率的影响

培养介质中的磷浓度与浮游藻类比生长速率之间有一个临界点(图 2), 且不同光照水平下该临界阈值大小近似, 当磷浓度低于该临界浓度时, 随着磷浓度的增加会促进浮游藻类比生长速率的增加, 但当磷浓度高于该临界浓度时, 浮游藻类比生长速率的增加会受到抑制。这可能由于磷浓度增大, 藻类生长受磷的限制程度逐渐降低, 但由于氮浓度相对减小, 此时受氮的限制程度就会逐渐增强, 由此可能限制了浮游植物的生长, 本实验中磷酸盐的这一临

界浓度为 $1\sim 2\ \mu\text{mol/L}$ 。同样加氮组也表现出相同的规律。硝酸盐阈值为 $20\sim 25\ \mu\text{mol/L}$ 。兰智文等^[12]在巢湖中的试验曾经发现正磷酸盐与叶绿素 a 之间有

一个临界点, 正磷酸盐超过某一浓度后叶绿素浓度几乎不再增加, 而本实验研究发现营养盐浓度较高会抑制浮游植物的生长。

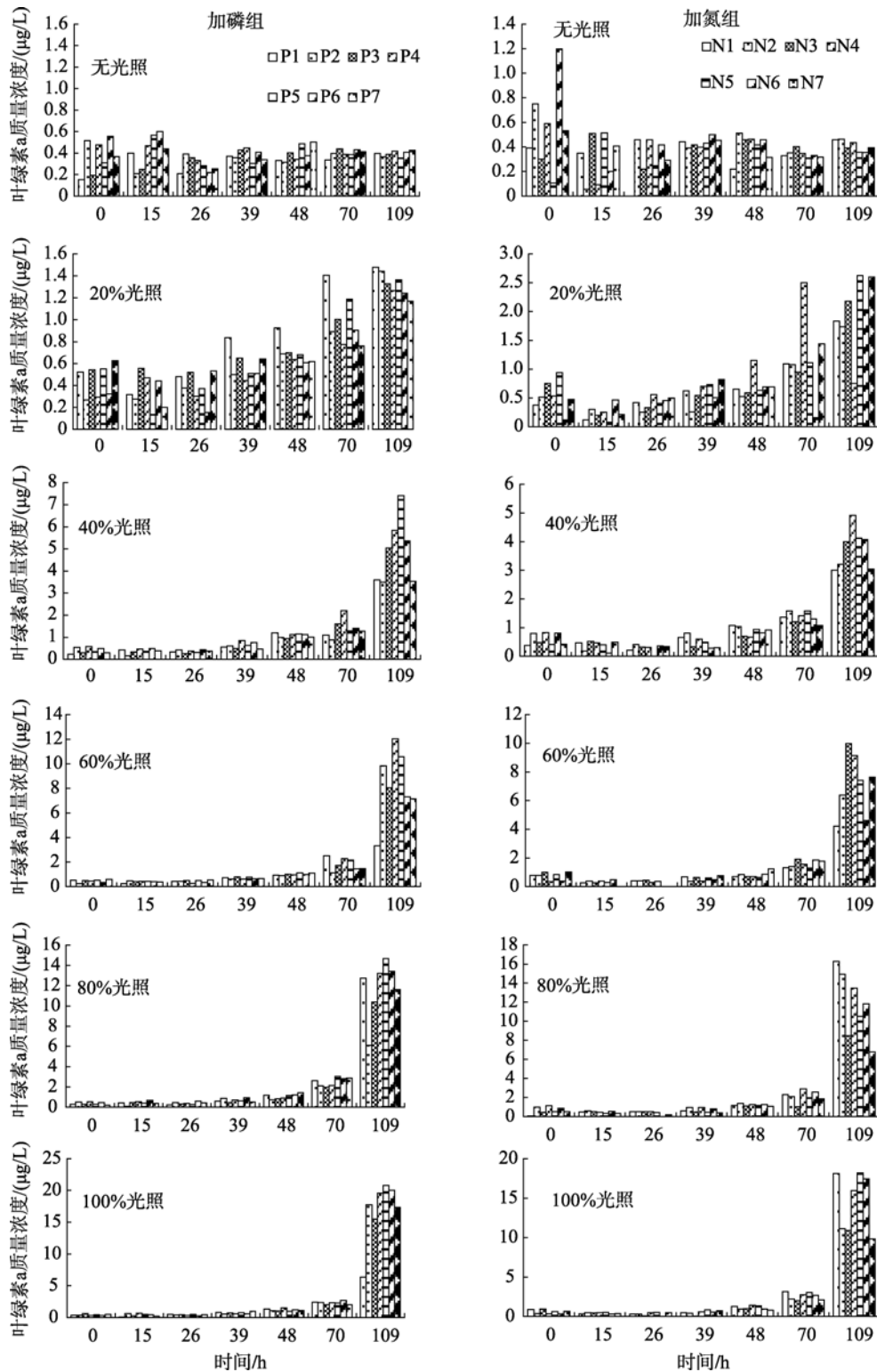


图 1 不同光照水平下加磷加氮组叶绿素 a 质量浓度变化

Fig. 1 Temporal variations of chlorophyll a concentrations under different irradiance in the group of phosphate or nitrate added

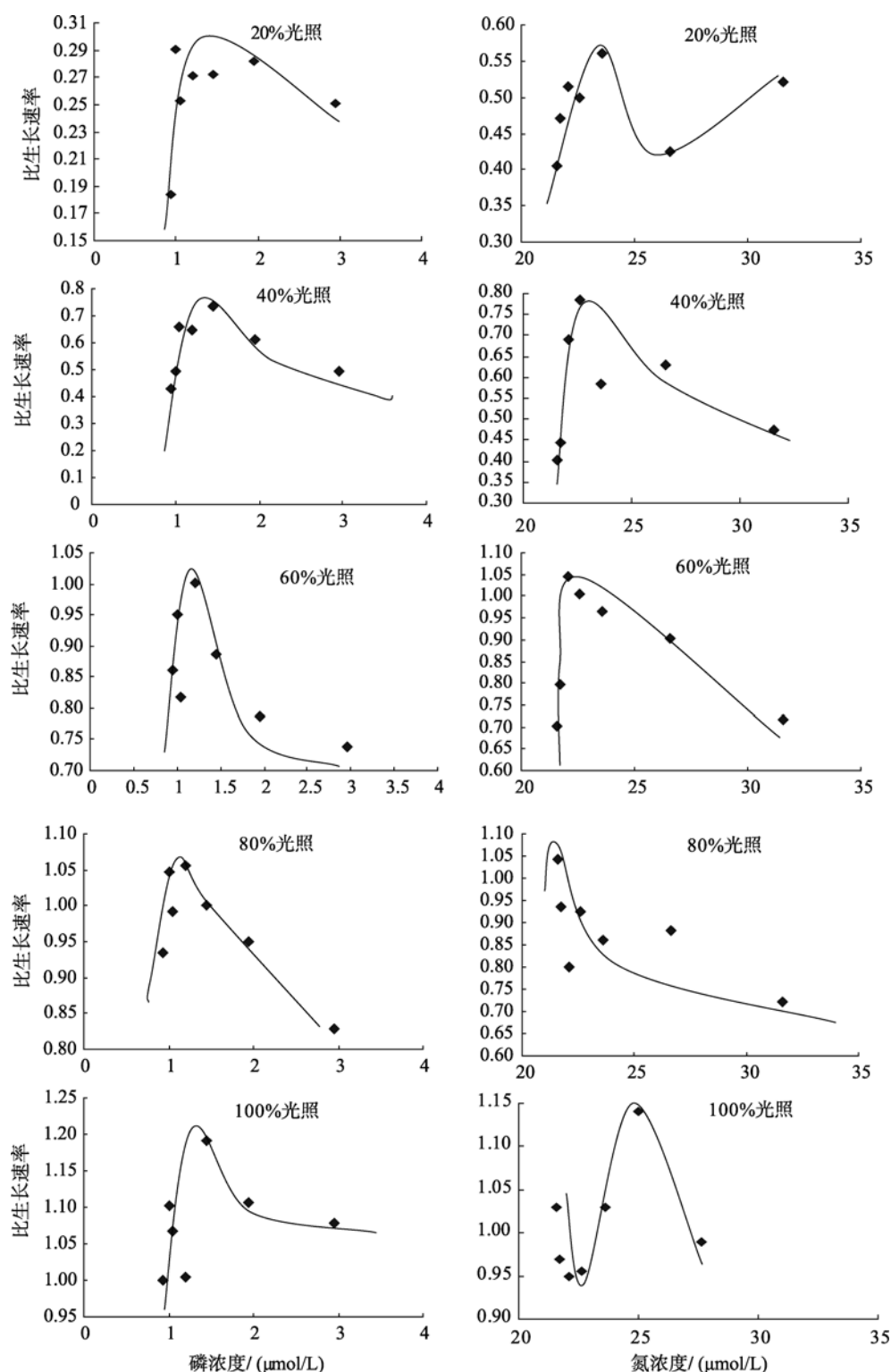


图2 不同光照水平下磷、氮浓度对比生长速率的影响

Fig. 2 Effect of phosphate or nitrate concentrations on specific growth rate under different irradiance

3 结论

无光照下叶绿素 a 没有增加趋势, 其他光照下浮游藻类生长有着很长的平台期, 随后呈指数增长,

且 100%光照下叶绿素 a 终浓度可以为 80%、60%、40%、20%光照的 1.5 倍、2 倍、4 倍、15 倍, 且相同光照下, 叶绿素 a 质量浓度在不同营养盐水平之

间差异不明显。

培养介质中磷酸盐和硝酸盐浓度与浮游藻类比生长速率之间有一个临界点, 氮磷浓度超过这个临界浓度时, 浮游藻类生长会出现抑制, 其中磷酸盐的临界浓度约为 1~2 $\mu\text{mol/L}$, 硝酸盐阈值为 20~25 $\mu\text{mol/L}$ 。

参考文献:

- [1] Bernhard A E, Peele E R. Nitrogen limitation of phytoplankton in a shallow embayment in northern Puget Sound [J]. *Estuaries*, 1997, 20(4): 759-769.
- [2] Harrison P J, Hu M H, Yang Y P, et al. Phosphate limitation in estuarine and coastal waters of China[J]. *Journal of Experimental Biology and Ecology*, 1990, 140: 79-87.
- [3] Goosen N K, Kromkamp J, Peene J, et al. Bacterial and phytoplankton production in the maximum turbidity zone of three European estuaries: The Elbe, Besterschelde and Gironde[J]. *Journal of Marine Systems*, 1999, 22(2): 151-171.
- [4] Hein M, Riemann B. Nutrient limitation of phytoplankton biomass or growth rate: an experimental approach using marine enclosures[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1995, 188: 167-180.
- [5] 邹立, 张经. 渤海春季营养盐限制的现场实验[J]. *海洋与湖沼*, 2001, 32(6): 673-678.
- [6] 王勇, 焦念志. 胶州湾浮游植物对营养盐添加的相应关系[J]. *海洋科学*, 2002, 26 (4): 8-12.
- [7] Beardall J, Berman T, Heraud P, et al. A comparison of methods for detection of phosphate limitation in microalgae[J]. *Aquatic Sciences*, 2001, 63:107-121.
- [8] Louise S. The influence of nutrient addition on growth rates of phytoplankton groups, and microzooplankton grazing rates in a mesocosm experiment[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1998, 228: 53-71.
- [9] Probyn T A. Size-fractionated measurements of nitrogen uptake in aged upwelled waters: Implication for pelagic food webs[J]. *Limnology and Oceanography*, 1990, 35(1): 202-210.
- [10] 方涛, 李道季, 李云, 等. 夏秋季长江口及毗邻海域氮磷营养盐分布及其潮汐变化[J]. *海洋环境科学*, 2008, 27(5): 437-442.
- [11] Fang T, Li D J, Yu L H. Changes in nutrient uptake of phytoplankton under the interaction between sunlight and phosphate in Changjiang (Yangtze) River Estuary[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2008, 27(2): 161-170.
- [12] 兰智文, 赵鸣, 伊澄清. 围隔模拟生态系统中藻类生长的磷酸盐浓度阈值研究[J]. *水生生物学报*, 1993, 17(1): 95-97.

Response of phytoplankton to phosphate or nitrate added under different irradiance

FANG Tao^{1,2}, FENG Zhi-hua¹, GAO Lei²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Marine Biotechnology, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China; 2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Received: Feb., 25, 2012

Key words: irradiance; phosphate; nitrate; specific growth rate

Abstract: *In situ* incubation experiments were conducted to investigate the variations of chlorophyll a concentration and relation between phosphate or nitrate concentration and specific growth rate controlled by the addition of phosphate or nitrate under different irradiance in adjacent sea of Changjiang Estuary in November, 2007. the results showed that phytoplankton growth had a long stationary phase under all the controlled irradiance except absence of natural irradiance, and the peak of chlorophyll a under 100% of natural irradiance was 1.5, 2, 4, 15 times of that under 80%, 60%, 40%, 20% of natural irradiance, respectively, and variations of chlorophyll a in different phosphate or nitrate levels were similar, so that the phytoplankton growth was limited by the irradiance instead of the nutrient. Moreover, the phosphate and nitrate both had a threshold concentration affecting algal specific growth rate, and the phosphate threshold concentration was between 1~2 $\mu\text{mol/L}$ while the nitrate threshold concentration was between 20~25 $\mu\text{mol/L}$.

(本文编辑: 梁德海)