

球等鞭金藻的生长速率与培养液中营养盐的关系研究

孙颖颖¹, 王长海^{1,2}

(1.大连理工大学 环境与生命学院, 辽宁 大连 116024; 2.烟台大学 海洋学院, 山东 烟台 264005)

摘要: 通过一次培养试验, 分别研究了培养液中营养盐 N、P、Si、Fe 浓度变化对球等鞭金藻 (*Isochrysis galbana*) 生长速率的影响。实验结果表明, 生长速率与单一营养盐浓度符合 Monod 方程, 而且将 Monod 方程扩展得到了可以表示多种营养盐对球等鞭金藻生长的复合限制模式。

关键词: 球等鞭金藻(*Isochrysis galbana*); 营养盐; 生长速率; 半饱和常数

中图分类号: P745 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 3096(2006)01 - 0082 - 06

海洋中几种营养盐, 尤其是 N, P, Si, Fe 对海洋浮游植物生长是非常重要的^[1]。营养盐限制浮游植物的光合作用, 是浮游植物生长决定因素。当海水中某种营养盐浓度过低, 会限制浮游植物的生长; 当某种营养盐浓度过高, 同样会对浮游植物生长不利。已有文献报道, 浮游植物生长与海水营养盐浓度有直接关系^[2]。目前有关球等鞭金藻 (*Isochrysis galbana*) 培养与育苗试验以及生长与光强、温度和盐度等生态条件的关系研究已有报道^[3~6], 但有关营养盐方面的文献很少见^[7~9]。为此, 作者以球等鞭金藻为研究对象, 从经验性方程式 Monod 方程角度研究球等鞭金藻生长速率与培养液中营养盐浓度的关系, 通过确定外界营养盐控制藻生长的 Monod 方程中的各个参数, 对球等鞭金藻生长速率与营养盐的关系进行定性、定量地描述。

1 材料和方法

1.1 实验材料

球等鞭金藻 (*Isochrysis galbana*) 藻种由中国海洋大学提供, 由烟台大学海洋生化工程研究所保存, 实验时需进行活化。

1.2 培养条件

1.2.1 海水处理

培养用水取自烟台莱山区近海, 沉淀后先经脱脂棉过滤, 再经 0.2 μm 微孔膜过滤。

1.2.2 培养方法

将纯种接种于 250 mL 三角瓶中置于自制光照培

养箱中, 参数设定为温度 $t=23\text{ }^{\circ}\text{C}$, 光照 2 246 lx, 光暗比为 16:8, 不通气培养, 每天定时摇动 3 次, 每个实验组作 3 个平行样。

1.2.3 培养基

采用 f/2 培养基, 然后根据试验改变其组成, f/2 培养基配方见文献[10]。

1.3 生物量的测定

藻液用血球计数板计数, 同时计算藻体生长速率, 公式为: $\mu=(\ln N_t-\ln N_0)/\ln 2(t-t_0)$ ^[2]。其中, N_t 为试验进行 t 天的细胞数目, N_0 为实验初始的细胞数目。

2 结果与讨论

2.1 营养盐与球等鞭金藻生长速率定性关系

2.1.1 硝酸钠对球等鞭金藻生长速率的影响

培养液为 f/2 (缺氮), 共设 7 个 $\text{NaNO}_3\text{-N}$ 质量浓度梯度, 依次为 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15 g/m^3 。根据公式求得生长速率 (μ) 后, 以 μ 对硝酸盐质量浓度 (c) 作图, 见图 1。

在图 1 中, 当硝酸钠在较低范围内, μ 随硝酸钠

收稿日期: 2004 - 03 - 31; 修回日期: 2005 - 02 - 28

基金项目: 教育部回国人员科研启动基金

作者简介: 孙颖颖(1978 -), 女, 黑龙江人, 在读博士, 从事海洋微藻方面研究, E-mail: syy - 999@163.com; 王长海, 通讯作者, 教授, 电话: 0535 - 6706288, E-mail: chwang2001@sina.com

c 增大而增大, 当硝酸钠 c 继续增加超过 10 g/m^3 , μ 随硝酸钠 c 增大而趋向较稳定值。

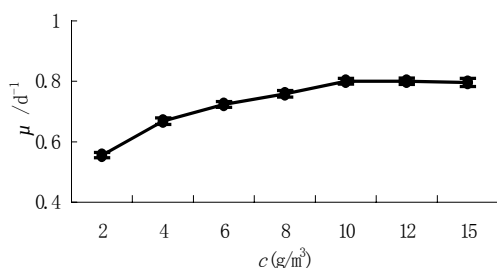


图1 硝酸钠质量浓度对球等鞭金藻生长速率的影响
Fig.1 The effect of initial concentration of NaNO_3 on the growth rates of *Isochrysis galbana*

2.1.2 磷酸二氢钾对球等鞭金藻生长速率的影响

培养液为 f/2 (缺磷), 共设 5 个 $\text{KH}_2\text{PO}_4\text{-P}$ 质量浓度梯度, 依次为 $0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 \text{ g/m}^3$ 。磷酸二氢钾对球等鞭金藻生长速率影响与硝酸盐钠相似, 如图 2。

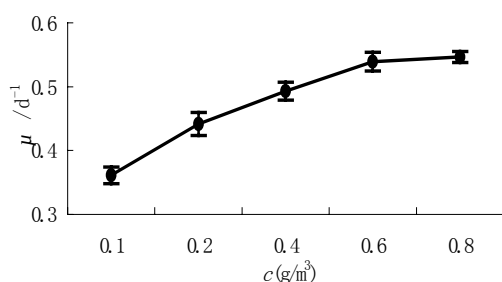


图2 磷酸二氢钾质量浓度对球等鞭金藻生长速率的影响
Fig.2 The effect of initial concentration of KH_2PO_4 on the growth rates of *Isochrysis galbana*

图 2 表明, 当磷酸二氢钾在较低范围内, μ 随磷酸二氢钾 c 增大而增大, 当磷酸二氢钾 c 继续增加超过 0.8 g/m^3 , μ 随磷酸二氢钾 c 增大而趋向较稳定值。

2.1.3 硅酸钠对球等鞭金藻生长速率的影响

培养液为 f/2, 共设 5 个 $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-Si}$ 质量浓度梯度, 依次为 $0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40 \text{ g/m}^3$ 。硅酸钠对球等鞭金藻生长速率影响与硝酸盐、磷酸二氢钾对球等鞭金藻生长速率影响稍有不同 (图 3)。

由图 3 可知, μ 随硅酸钠 c 增大而增大, 在试验浓度范围内虽然未见硅酸钠对 μ 的饱和质量浓度, 但是从曲线趋势上可以看出, μ 随硅酸钠 c 增大势必趋向一个稳定值。

2.1.4 三氯化铁对球等鞭金藻生长速率的影响

培养液为 f/2 (微量元素中缺铁), 共设 5 个 $\text{FeCl}_3\text{-Fe}$ 质量浓度梯度, 依次为 $0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 \text{ g/m}^3$ 。三氯化铁对球等鞭金藻的生长速率的影响与硅酸钠对球等鞭金藻生长速率影响相似, 见图 4。

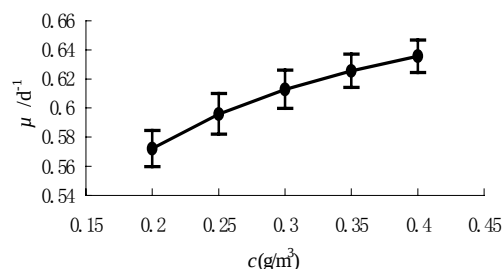


图3 硅酸钠质量浓度对球等鞭金藻生长速率的影响
Fig.3 The effect of initial concentration of Na_2SiO_3 on the growth rates of *Isochrysis galbana*

在图 4 中, μ 随三氯化铁 c 增大而增大, 在试验浓度范围内虽然也未见三氯化铁对 μ 的饱和质量浓度, 但是从曲线趋势上可以看出, μ 随三氯化铁 c 增大势必趋向一个稳定值。

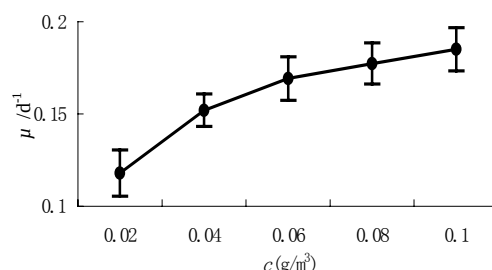


图4 三氯化铁质量浓度对球等鞭金藻生长速率的影响
Fig.4 The effects of the initial concentration of FeCl_3 on the growth rates of *Isochrysis galbana*

从图 1~4 可以看出, 培养介质营养盐质量浓度与球等鞭金藻 μ 的关系均为上升-饱和关系, 而 Monod 方程反映的就是营养盐含量从低到高变化过程中 μ 的上升-饱和关系^[11,12], 从而在试验的营养盐质量浓度范围内, 球等鞭金藻生长速率与营养盐质量浓度的定性关系与 Monod 方程描述的营养盐控制浮游藻类的生长模型相类似。

2.2 营养盐与球等鞭金藻生长速率定量关系

2.2.1 硝酸盐对球等鞭金藻生长速率的影响

以球等鞭金藻生长速率的倒数 $1/\mu$ 对硝酸钠质量浓度的倒数 $1/c$ 作图, $1/\mu$ 和 $1/c$ 关系见表 1 及图 5。

表 1 培养试验中硝酸钠初始质量浓度对球等鞭金藻生长速率的影响

Tab.1 Effects of initial concentrations of NaNO_3 of the culture media on the growth rates of *Isochrysis galbana*

c (g/m^3)	μ (d^{-1})	$1/c$ (m^3/g)	$1/\mu$ (d)	μ^* (d^{-1})
2	0.556	0.500	1.799 5	0.553
4	0.669	0.250	1.495 4	0.677
6	0.723	0.167	1.382 7	0.732
8	0.758	0.125	1.317 9	0.763
10	0.800	0.100	1.249 4	0.783
12	0.800	0.083	1.249 7	0.797

注: μ^* 是根据 Monod 方程计算的结果

将球等鞭金藻生长速率的倒数和硝酸钠质量浓度倒数按照 Monod 方程用双倒数作图法处理, 由图 5 可以看出, 它们符合直线关系, 相关系数 R^2 为 0.992 8。根据图 5 和公式 $1/\mu = (1/\mu_{\max}) \times (1 + K_{\mu}/c)$, 式中, μ 为生长速率, $\mu_{\max}$ 为生长速率的最大值, c 为营养盐质量浓度, K_{μ} 为半饱和常数, 即是 μ 为最大生长速率 $\mu_{\max}$ 的一半时培养液中营养盐的质量浓度(其中下角标 μ 仅表示半饱和常数 K 为对应生长速率 μ 的 K_{μ} , 下同), 可以求算生长速率的最大值 $\mu_{\max}$ 和半饱和常数 K_{μ} 。

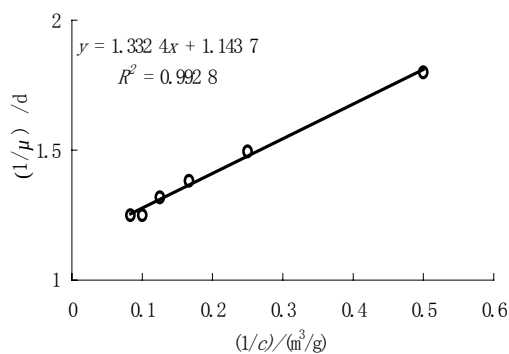


图 5 球等鞭金藻生长速率倒数和硝酸钠质量浓度倒数的关系
Fig.5 The relationship between reciprocal of the growth rates of *Isochrysis galbana* and reciprocal of the concentration of NaNO_3

在图 5 中, $1/\mu_{\max} = 1.143 7 (1)$, $K_{\mu}/\mu_{\max} = 1.332 4 (2)$, 联立(1), (2)可以求算 $\mu_{\max}$ 和 K_{μ} , 即 $\mu_{\max} = 0.874 \text{ d}^{-1}$,

$K_{\mu} = 1.165 0 \text{ g}/\text{m}^3$, 因此, Monod 方程为: $1/\mu = 1.143 7(1 + 1.165 0/c)$ 。

利用 Monod 方程 $1/\mu = 1.143 7(1 + 1.165 0/c)$ 计算球等鞭金藻 μ , 表 1 表明, μ^* 与 μ 两者非常的接近, 在硝酸钠 $2 \sim 12 \text{ g}/\text{m}^3$ 质量浓度范围内, 用 Monod 方程来描述球等鞭金藻生长速率与硝酸钠的质量浓度关系是很适合的。

2.2.2 磷酸二氢钾对球等鞭金藻生长速率的影响

以球等鞭金藻生长速率的倒数 $1/\mu$ 对磷酸二氢钾质量浓度的倒数 $1/c$ 作图, $1/\mu$ 和 $1/c$ 关系见表 2 及图 6。

表 2 培养试验中磷酸二氢钾初始质量浓度对球等鞭金藻生长速率的影响

Tab.2 Effects of initial concentrations of KH_2PO_4 of the culture media on the growth rates of *Isochrysis galbana*

c (g/m^3)	μ (d^{-1})	$1/c$ (m^3/g)	$1/\mu$ (d)	μ^* (d^{-1})
0.1	0.361	10.0	2.767 1	0.360
0.2	0.441	5.00	2.265 3	0.445
0.4	0.492	2.50	2.028 8	0.504
0.6	0.539	1.67	1.855 5	0.528
0.8	0.546	1.25	1.829 2	0.541

注: μ^* 是根据 Monod 方程计算的结果

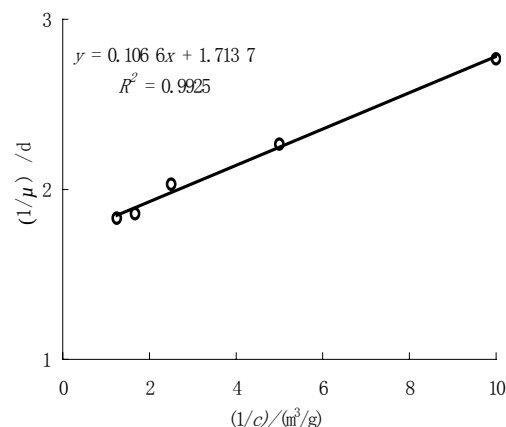


图 6 球等鞭金藻生长速率倒数和磷酸二氢钾质量浓度倒数的关系
Fig.6 The relationship between reciprocal of the growth rates of *Isochrysis galbana* and reciprocal of the concentration of KH_2PO_4

将球等鞭金藻生长速率的倒数和磷酸二氢钾质

量浓度倒数按照 Monod 方程用双倒数作图法处理, 由图 6 可以看出, 它们符合直线关系, 相关系数 R^2 为 0.992 6。根据图 6 和公式 $1/\mu = (1/\mu_{\max}) \times (1 + K_{\mu}/c)$, 可以求算 $\mu_{\max}$ 和 K_{μ} 。

在图 6 中, $1/\mu_{\max} = 1.713\ 7$ (1), $K_{\mu}/\mu_{\max} = 0.106\ 6$ (2), 联立(1), (2)可以求算 $\mu_{\max}$ 和 K_{μ} , 即 $\mu_{\max} = 0.583\ \text{d}^{-1}$, $K_{\mu} = 0.062\ \text{g/m}^3$, 因此, Monod 方程为: $1/\mu = 1.713\ 7$ $(1 + 0.062/c)$ 。

利用求算的 Monod 方程 $1/\mu = 1.713\ 7(1 + 0.062/c)$ 计算球等鞭金藻 μ , 计算结果见表 2 中的 μ' , 由结果可知, μ' 与 μ 两者非常的接近, 在磷酸二氢钾 $0.1 \sim 0.8\ \text{g/m}^3$ 质量浓度范围内, 用 Monod 方程来描述球等鞭金藻生长速率与磷酸二氢钾的质量浓度关系也是很适合的。

2.2.3 硅酸盐对球等鞭金藻生长速率的影响

以球等鞭金藻生长速率的倒数 $1/\mu$ 对硝酸钠质量浓度的倒数 $1/c$ 作图, $1/\mu$ 和 $1/c$ 关系见表 3 及图 7。

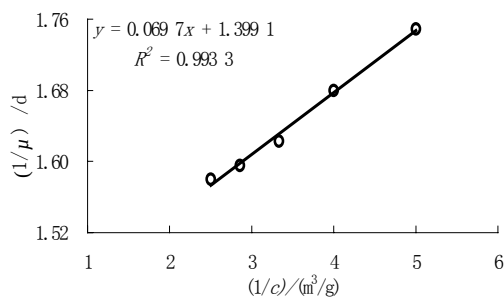


图 7 球等鞭金藻生长速率倒数和硅酸钠质量浓度倒数的关系

Fig.7 The relationship between reciprocal of the growth rates of *Isochrysis galbana* and reciprocal of the concentration of Na_2SiO_3

表 3 培养试验中硅酸钠初始质量浓度对球等鞭金藻生长速率的影响

Tab.3 Effects of initial concentrations of Na_2SiO_3 of the culture media on the growth rates of *Isochrysis galbana*

c (g/m^3)	μ (d^{-1})	$1/c$ (m^3/g)	$1/\mu$ (d)	μ^* (d^{-1})
0.20	0.572	5.00	1.749 3	0.572
0.25	0.602	4.00	1.679 9	0.596
0.30	0.616	3.33	1.623 0	0.612
0.35	0.626	2.86	1.595 8	0.625
0.40	0.639	2.50	1.580 0	0.636

注: μ^* 是根据 Monod 方程计算的结果

将球等鞭金藻生长速率的倒数和硅酸钠质量浓度倒数按照 Monod 方程用双倒数作图法处理, 由图 7 可以看出, 它们符合直线关系, 相关系数 R^2 为 0.995 5。根据图 7 和公式 $1/\mu = (1/\mu_{\max}) \times (1 + K_{\mu}/c)$, 可以求算 $\mu_{\max}$ 和 K_{μ} 。

在图 7 中, $1/\mu_{\max} = 1.399\ 1$ (1), $K_{\mu}/\mu_{\max} = 0.069\ 7$ (2), 联立(1), (2)可以求算 $\mu_{\max}$ 和 K_{μ} , 即 $\mu_{\max} = 0.715\ \text{d}^{-1}$, $K_{\mu} = 0.050\ \text{g/m}^3$, 因此, Monod 方程为: $1/\mu = 1.399\ 1$ $(1 + 0.050/c)$ 。

利用求算的 Monod 方程 $1/\mu = 1.399\ 1(1 + 0.050/c)$ 计算球等鞭金藻 μ , 由表 3 可以看出, μ^* 与 μ 两者非常的接近, 在硅酸钠 $0.20 \sim 0.40\ \text{g/m}^3$ 质量浓度范围内, 用 Monod 方程来描述球等鞭金藻生长速率与硅酸钠的质量浓度关系是很适合的。

2.2.4 三氯化铁对球等鞭金藻生长速率的影响

以球等鞭金藻生长速率的倒数 $1/\mu$ 对三氯化铁质量浓度的倒数 $1/c$ 作图, $1/\mu$ 和 $1/c$ 关系见表 4 及图 8。

表 4 培养试验中三氯化铁初始质量浓度对球等鞭金藻生长速率的影响

Tab.4 Effects of initial concentrations of FeCl_3 of the culture media on the growth rates of *Isochrysis galbana*

c (g/m^3)	μ (d^{-1})	$1/c$ (m^3/g)	$1/\mu$ (d)	μ^* (d^{-1})
0.02	0.118	50.0	8.4747	0.118
0.04	0.152	25.0	6.5780	0.152
0.06	0.169	16.7	5.9099	0.169
0.08	0.178	12.5	5.6405	0.178
0.10	0.185	10.0	5.4034	0.184

注: μ^* 是根据 Monod 方程计算的结果

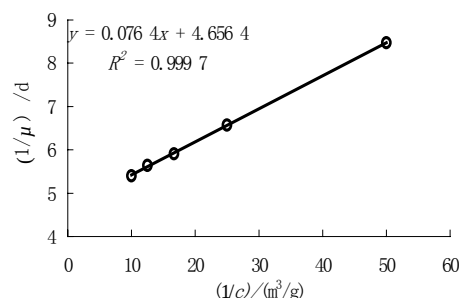


图 8 球等鞭金藻生长速率倒数和三氯化铁质量浓度倒数的关系

Fig.8 The relationship between reciprocal of the growth rates of *Isochrysis galbana* and reciprocal of the concentration of FeCl_3

将球等鞭金藻生长速率的倒数和三氯化铁质量浓度倒数按照 Monod 方程用双倒数作图法处理, 由图 8 可以看出, 它们符合直线关系, 相关系数 R^2 为 0.999 7。根据图 8 和公式 $1/\mu = (1/\mu_{\max}) \times (1 + K_{\mu}/c)$, 可以求算 $\mu_{\max}$ 和 K_{μ} 。

在图 8 中, $1/\mu_{\max} = 4.656 \text{ 4}(1)$, $K_{\mu}/\mu_{\max} = 0.076 \text{ 4}(2)$, 联立(1), (2)可以求算 $\mu_{\max}$ 和 K_{μ} , 即 $\mu_{\max} = 0.215 \text{ d}^{-1}$, $K_{\mu} = 0.016 \text{ g/m}^3$, 因此, Monod 方程为: $1/\mu = 4.656 \text{ 4}(1 + 0.016/c)$ 。

利用求算的 Monod 方程 $1/\mu = 4.656 \text{ 4}(1 + 0.016/c)$ 计算球等鞭金藻 μ , 由结果可见, μ^* 与 μ 两者非常的接近, 在三氯化铁 $0.02 \sim 0.10 \text{ g/m}^3$ 质量浓度范围内, 用 Monod 方程来描述球等鞭金藻生长速率与三氯化铁的质量浓度关系是很适合的。

微藻细胞生长稳态条件下培养介质营养盐含量对浮游植物生长速率的影响, 可用 Monod 方程来描述, 即 $\mu = \mu_{\max} c / (K_{\mu} + c)$, $\mu_{\max}$ 为生长速率的最大值, c 为限制营养盐浓度, K_{μ} 为半饱和常数, 许多作者用 Monod 方程对不同藻类的一次培养试验结果进行处理, 求算了 K_{μ} (i 代表营养盐, 如硝酸盐和磷酸盐等) 和 $\mu_{\max}$ [13,14]。作者将球等鞭金藻生长速率的倒数和营养盐浓度倒数按照 Monod 方程用双倒数作图法处理, 由图 5~8 可以看出, 它们符合直线关系。按照 Monod 方程处理试验结果, 可以求出 K_{μ} (i 代表 N, P, Si 和 Fe) 和 $\mu_{\max}$, 而且由此方程式计算出的 μ , c 和试验结果很接近(见表中 μ^*), 因而球等鞭金藻的生长速率和营养盐浓度可用 Monod 方程来描述。

Monod 方程形式类似米氏方程, 米氏方程是描述酶反应动力学的, 但细胞的生化反应一般都是酶作用的结果, 而且由于微藻反应过程的主要特征 [15,16]: (1) 微藻是反应过程的主体; (2) 微藻是反应过程的催化剂; (3) 微藻反应的本质是复杂的酶催化反应体系, 因而这种类似是可以理解的。另外, 微藻尤其是单胞藻的生长行为与微生物具有类似性 [17,18], 这也为它们的类似性又提供了一种可能。

2.3 营养限制复合模式

一般认为, N, P, Si 是限制因子, 而 Fe 为生长促进因子 [1], 在本试验营养盐浓度范围内, 未见硅酸钠和三氯化铁对生长速率 μ 的饱和浓度。因此, 这里仅给出 N, P 营养限制复合模式。

2.3.1 N, P 营养限制复合模式

当培养液中 N, P 盐同时存在时, 可以认为 N,

P 营养限制复合模式为 $\mu = \mu_{\max 0} \Phi_N \Phi_P$ [2], 式中 $\mu_{\max 0}$ 为不受 N, P 质量浓度限制时微藻所能达到的最大生长速率, Φ_N 和 Φ_P 分别为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 对 μ 的限制作用系数。限制作用系数 Φ 的公式求法为: $\Phi_i = c_i / (c_i + K_{\mu i})$, 式中, c_i 表示 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的浓度, $K_{\mu i}$ 表示 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的半饱和常数, i 代表 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ (下同)。由 Φ_i 的表达式可知, c_i 越小, Φ_i 越小, μ 就越小; c_i 越大, Φ_i 越大, μ 就越大, 可见对球等鞭金藻生长构成限制的主要是营养盐的各自浓度。

由 $K_{\mu i}$, $\mu_{\max 0}$ (硝酸钠对球等鞭金藻生长速率的半饱和常数 $K_{\mu} = 1.1650 \text{ g/m}^3$, $\mu_{\max} = 0.874 \text{ d}^{-1}$; 磷酸二氢钾对球等鞭金藻生长速率的半饱和常数 $K_{\mu} = 0.062 \text{ g/m}^3$, $\mu_{\max} = 0.583 \text{ d}^{-1}$) 以及公式 $\mu = \mu_{\max} \Phi_N \Phi_P$, 可以进一步求得不受 N、P 浓度限制时球等鞭金藻的最大生长速率 $\mu_{\max 0}$, 即 $\mu_{\max 0}(\text{N}) = 0.922 \text{ d}^{-1}$, $\mu_{\max 0}(\text{P}) = 0.638 \text{ d}^{-1}$, 与 $\mu_{\max}(\text{N}) = 0.874 \text{ d}^{-1}$, $\mu_{\max}(\text{P}) = 0.583 \text{ d}^{-1}$ 比较, 结果基本一致, 说明 N, P 营养限制复合模式是适用的。

李铁等 [2] 证明, Monod 方程扩展所得的营养限制复合模式能够反映中肋骨条藻和新月菱形藻的营养盐浓度限制。试验结果也表明, 该复合模式可以反映硝酸钠和磷酸二氢钾营养盐浓度对球等鞭金藻生长的限制状况。由于 Monod 方程式是以一种基质浓度作为浮游植物生长的限制条件, 但很多情况下浮游植物生长可能同时会受到多种基质浓度的限制, 因此, 有必要将 Monod 方程扩展。在藻生长同时受到培养液中多种营养盐浓度影响时, 营养限制复合模式将会反映不同营养盐对藻生长影响程度的差别。

3 结论

一次培养试验中, 球等鞭金藻生长速率和营养盐质量浓度符合 Monod 方程。硝酸钠, 磷酸二氢钾, 硅酸钠, 三氯化铁影响球等鞭金藻生长速率的半饱和常数分别为 1.165 0, 0.062, 0.050, 0.016 g/m^3 。由半饱和常数推断, 球等鞭金藻的生长更易受硝酸钠的限制。

用 Monod 方程扩展所得的营养限制复合模式对试验结果进行分析, 表明了培养液的营养盐浓度是限制球等鞭金藻生长的决定因素, 并且限制作用可用 $\Phi_i = c_i / (c_i + K_{\mu i})$ 表示。

参考文献:

- [1] 杨东方,张经,陈豫,等.营养盐限制的唯一性因子探究[J].海洋科学,2001,25(12):49-50.
- [2] 李铁,胡立阁,史致丽.营养盐对中肋骨条藻和新月菱形藻生长及氮磷组成的影响[J].海洋与湖沼,2000,31(1):47-50.
- [3] 陈椒芬,何义潮,谭桂英,等.两种新分离的海洋金藻及其对贻贝幼虫的饲养效果[J].海洋湖沼通报,1985,14(2):44-66.
- [4] 周汝伦,孙爱淑,杨震.金藻 8701 人工培养的生态条件研究[J].青岛海洋大学学报, 1994,24(2):181-186.
- [5] Kain J M, G E Fogg. Studies on the growth of marine phytoplankton[J]. **Mar Bio Ass U K**, 1958, 37:781-788.
- [6] Ukeles R. The effect of temperature on the growth and survival of several marine algal species[J]. **Biol Bull**, 1961, 120:255-263.
- [7] 周汝伦,孙爱淑,杨震.等鞭藻 8701 培养液的营养组成研究[J].海洋湖沼通报,1994,1:17-23.
- [8] Droop M R. Auxotrophy and organic compounds in the nutrition of marine phytoplankton[J]. **Gen Microbiol**, 1957, 16:286-293.
- [9] 陈椒芬,潘永尧.等鞭藻的生长及其主要营养成分研究[J].海洋与湖沼,1987,18:55-63.
- [10] Borowitzka M A *et al.* Microalgal Biotechnology[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1988. 457-465.
- [11] Dodds W K. Availability, uptake and regeneration of phosphate in mesocosms with varied levels of P deficiency[J]. **Hydrobiologia**, 1995, 297:1-9.
- [12] Istvanovics V, Herodek S. Estimation of net uptake and leakage rates of orthophosphate from ³²P-uptake kinetics by a linear force-flow model[J]. **Limnol Oceanogr**, 1995, 40(1):17-32.
- [13] Fogg G E, Thake B. Algal Culture and Phytoplankton Ecology[M]. Madison: The University of Wisconsin Press, Ltd, 1987,57-80.
- [14] Holm H P, Armstrong D E. Role of nutrient limitation and competition in the population of *Asteriella formosa* and *Microcystis aeruginosa* in semicontinuous culture[J]. **Limnol Oceanogr**, 1981, 26:622-534.
- [15] 李叙凤,王长海,鞠宝.微藻及其生长动力学研究[J].海洋通报,1999,18(6): 73-75.
- [16] 韩秀荣,王修林,祝陈坚.角毛藻对营养盐的吸收/释放速率常数的测定[J].海洋水产研究,2001,22(2): 52-54.
- [17] 陈慈美,包建军,吴瑜端.纳污海域营养物质形态及含量水平与浮游植物增值竞争关系- I .磷的效应[J].海洋环境科学,1990,9:6-12.
- [18] 崔启武,刘家冈.生物种群增长营养动力学[M].北京:科学出版社,1991.101-106.

Study on relation between the growth rates of *Isochrysis galbana* and nutrient salt concentration

SUN Ying - ying¹, WANG Chang - hai^{1,2}

(1. School of Environment and Life Science, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. School of Ocean, Yantai University, Yantai 264005, China)

Received: Mar.,31,2004

Key words: *Isochrysis galbana*; nutrients; growth rate; half-saturation constant

Abstract: The effects of nutrients on the growth rates of *Isochrysis galbana* were studied by batch culture. The results indicate that the effects of nutrient limitation on the growth rates of *Isochrysis galbana* can be described using the Monod equation. The multi-limitation model arrived by expanding the Monod equation could express the degrees of the different nutrient limitations.

(本文编辑:谭雪静)