

三峡库区水华优势藻类生长动力学的普适性研究

刘信安¹, 封丽¹, Charles Q. Jia²

(1. 重庆大学化学化工学院, 重庆 400044; 2. Chemical Engineering & Applied Chemistry College, University of Toronto, Canada M5S 3E5)

摘要:从蓝绿藻中选取绿藻门的普通小球藻(*Chlorella vulgaris*, CV 藻)为研究对象,应用 Monod 方程考察氮、磷营养盐对 CV 藻生长的影响,分别计算出 CV 藻对 TP、TN 的半饱和常数 K_{SP} 和 K_{SN} . 结果表明 $K_{SN} \gg K_{SP}$, 说明 TP 对 CV 藻生长的影响明显大于 TN. CV 藻生长速率对磷质量浓度反应很灵敏: 与空白值相比,在 $0.002 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的低浓度下 μ 就有提高,而浓度到 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, μ 明显增大;但在 $0.000 \sim 0.050 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 氮浓度范围内 μ 几乎没有变化. 通过系统比较 CV 藻与优势蓝绿藻,甚至海水藻的生长动力学特征,探讨了 CV 藻与其它蓝绿藻的动力学普适性和共同性,证实这些藻类都具有非常类似的生长动力学和生态学特征. 因此,推测 CV 藻生长动力学模型可以从整体上反映和代表库区优势蓝绿藻的生长行为. 同时分析和归纳了蓝绿藻生长模型的相似性和规律性,得出三峡库区优势藻类生长行为存在普遍一致性的初步结论.

关键词: 三峡库区; 普通小球藻; 氮; 磷; 优势藻生长动力学共性

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)08-2143-06

Generalized Behavior Study on the Growth Dynamics for Dominant Algae Species Forming Algal Bloom in the Three Gorges Reservoir Region

LIU Xin-an¹, FENG Li¹, Charles Q. Jia²

(1. Chemistry & Chemical Engineering College, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chemical Engineering & Applied Chemistry College, University of Toronto, Canada M5S 3E5)

Abstract: From the blue-green algae species a representative algae, namely, *Chlorella vulgaris* (CV) to belong to *Chlorophyta* is selected as one of algae species studied in order to investigate the effect of TN, TP on the growth behavior of CV with the Monod equation, and calculate the semi-saturation constants of CV to TP (K_{SP}) and TN (K_{SN}). $K_{SN} \gg K_{SP}$ showed that the effect of TP on growth of CV is obvious significant than that of TN. The growth rate of *Chlorella vulgaris* is very sensitive to the concentration of phosphorus: Compares with the blank value, the special growth rate (μ) has been enhanced under the low concentration of $0.002 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, then the concentration turned to $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ the special growth rate (μ) has been enhanced obviously; but there was hardly any change under the concentration of nitrogen from 0.000 to $0.050 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. At the same time, in order to reveal whether there was a generalized character associating the growth dynamics of CV with that of dominant blue-green algae species, the dynamic models including CV constructed from our experimental data, dominant blue-green algae and sea algae from literature information have been compared and analyzed systemically, and the results showed that their growth dynamics behavior and ecological characteristic were extremely similar and common. According to extrapolation of the intercommunity of all growth dynamics we could describe and show availably there is a common behavior to the growth of dominant blue-green algae in the Three Gorges reservoir region. This conclusion would have some important theoretical and applied significance.

Key words: Three Gorges reservoir region; *Chlorella vulgaris*; nitrogen; phosphorus; generalized growth dynamics of dominant algae

三峡水库蓄水后,库区水文情势和气候环境已发生变化^[1~4]. 平水期表面最大流速降至 0.2 m/s , 平均流速降至 0.06 m/s , 枯水期岸边流速普遍小于 0.02 m/s ^[5]. 库区部分次级河流的回水区,尤其是沿岸消落带水域的优势藻将从成库前的硅藻演替为蓝绿藻. 因此很有可能在上述局部水域出现以蓝绿藻为优势藻类的大规模水华污染^[6~11].

普通小球藻(*Chlorella vulgaris*, CV 藻)是一种全球性分布的淡水绿藻,属富营养型藻类,在三峡库区水域中广泛存在,是形成蓝绿藻水华的一种典型藻种. CV 藻为普生性单细胞藻,利用光能自养,对生长条件要求简单,环境耐受性强,增殖速率高^[12~16]. 斯

托姆提出藻类的经验分子式为 $\text{C}_{106} \text{H}_{263} \text{O}_{100} \text{N}_{16} \text{P}^{[17]}$, 其生产量主要取决于水环境中磷/氮的供应量,当磷或氮供应充足时,藻类便充分增殖. 在藻类种群动力学研究中,Monod 方程与 Droop 方程是 2 个将营养盐的可利用性与微生物生长直接联系起来的基本动力学方程^[18]. 已有人用 Monod 方程研究了营养盐浓度对栅藻(*Scenedesmus*)、铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、赤潮异弯藻(*Heterosigma akashiwo*)和新月菱形藻(*Nitzschia clostetsuma*)等藻类生长的影

收稿日期: 2007-08-16; 修订日期: 2007-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(20377054)

作者简介: 刘信安(1954~),男,教授,主要研究方向为水资源保护、湖库富营养化控制等, E-mail: xaliu@cqu.edu.cn

响^[19~22].本研究以 CV 藻为对象,在微生物生长动力学的基础上分析氮、磷对 CV 藻生长的影响,并通过考察和对比 CV 藻与其它蓝绿藻的生长动力学模型,以期用 CV 藻的动力学行为以及典型蓝绿藻生长行为的相似性和规律性,为三峡水环境安全提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 主要仪器与设备

OLYMPUS TH4-200 生物倒置荧光显微镜、血球计数板、电热压力蒸汽灭菌器、超声波清洗器、电热恒温鼓风干燥箱和离心机等.试验需要的玻璃仪器用超声波洗净后,在 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 稀盐酸中浸泡 30 min,然后用新鲜去离子水冲洗干净,在 121°C 用高压蒸汽灭菌,烘干后备用.

1.2 藻种及培养基

CV 藻购自中国科学院武汉水生生物研究所 (FACHB 编号 6).试验以 BG11 培养基为基础^[23],采用新鲜去离子水配制成无磷或无氮培养基, pH 值调节至 7.4.按试验需要加入相应量的磷或氮,以 K_2HPO_4 为磷源, NaNO_3 为氮源.

1.3 接种与培养^[24]

藻种试验前扩大培养 1 周,再饥饿培养 3 d.取一定体积的藻种以 5000 r/min 的速度离心,弃掉上层清液,用 $15.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的碳酸氢钠溶液洗涤后离心,重复 3 次,用无菌水稀释后用于接种.控制起始藻密度在 $5.0 \times 10^4 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$ 左右.

培养基配制好后在 121°C 高压下蒸汽灭菌 30 min.在三角瓶中先加入 99.0 mL 的培养液,然后每瓶加入 1.0 mL 的接种藻液,每个处理组有 3 个平行样;光照强度 3000 lx (自然光),光暗比 14:10,温度 $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$;每天定时人工摇动培养瓶 3 次.每天在同一时间取样检测生物量(即藻细胞密度),由于取样量极少(约 0.5 mL 左右),相对于培养液总体积可以近似认为符合动力学中分批培养试验的要求(试验过程中无底物和菌体的供应和移走).整个过程在无菌操作台上操作.

1.4 细胞生物量的测定和增长率计算^[25]

接种次日起,每日在同一时间利用微量吸液器吸取 1.0 mL 的藻类培养液,移至经高压灭菌的加有 0.05 mL 鲁格氏液的青霉素瓶中,取样过程都在无菌操作台上进行.采用血球计数板计数法测定生物量.培养开始后每日定时采样计数,每个样计数 3 次,取其平均数.当每组试验每天生物量的平均增长

率低于 5% 时,认为该组试验已达到最大现存量,停止测定.

特定增长率(μ)指在某一时间间隔内藻类生长的速率,计算公式如下:

$$\mu = \ln(x_2/x_1)/t_2 - t_1 \quad (1)$$

式中, x_2 为某一时间间隔终结时的藻类现存量; x_1 为某一时间间隔开始时的藻类现存量; $t_2 - t_1$ 为某一时间间隔.

1.5 动力学参数计算^[21]

应用 Leneweaver-Burk 作图法,将 Monod 方程式 $\mu = \mu_{\max} S/(S + K_s)$ 变换为以下形式:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{K_s}{\mu_{\max}} \frac{1}{S} + \frac{1}{\mu_{\max}} \quad (2)$$

式中, μ 为微生物的比增殖速度(d^{-1}); $\mu_{\max}$ 为在饱和浓度中微生物最大比增殖速度(d^{-1}); S 为溶液中限制微生物增殖的底物浓度; K_s 为半饱和常数,其值为 $\mu = \mu_{\max}/2$ 时的底物浓度.以 $1/\mu$ 对 $1/S$ 做图,通过最小二乘法求得 $\mu_{\max}$ 和 K_s 值.

2 模型构建

2.1 CV 藻在缺磷/氮胁迫下生长动力学参数的测定及计算

将处理后的 CV 藻接种到不同初始营养盐浓度的 BG11 中,每天定时测定细胞密度并计算特定增长率,试验结果如图 1.从中可以看出 CV 藻的生长期分为:适应期(4~6 d)、指数期(10~12 d)和衰减期.在不同氮、磷浓度下 CV 藻生长曲线的指数期均能较好符合指数曲线形式.图 1 中的小图对低 TP、TN 浓度下 CV 藻的生长曲线作了局部放大,有利于更清晰分辨和观察低藻细胞密度区的重叠曲线.

根据试验数据,按照式(1)的方法计算各实验组的 μ 以及相关参数,结果见表 1, CV 藻生长速率对磷质量浓度反应很灵敏,与空白值相比:在 $0.002 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的低质量浓度下 μ 值就开始增加,当质量浓度到 $0.200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, μ 值明显增大.但 CV 藻在小于 $0.050 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 氮质量浓度范围内 μ 值几乎没有变化.

不同初始营养盐浓度对 CV 藻的 μ 和最大现存量存在显著影响如图 2.在不同初始营养盐浓度下, CV 藻的生长速率基本都呈现先上升后平稳的趋势.从图 2 可以看出对 CV 藻的 μ 来说,其增加速度较快的 TP 浓度区间为 $0.000 \sim 0.200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 浓度区间为 $0.050 \sim 0.800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;而最大现存量增加速

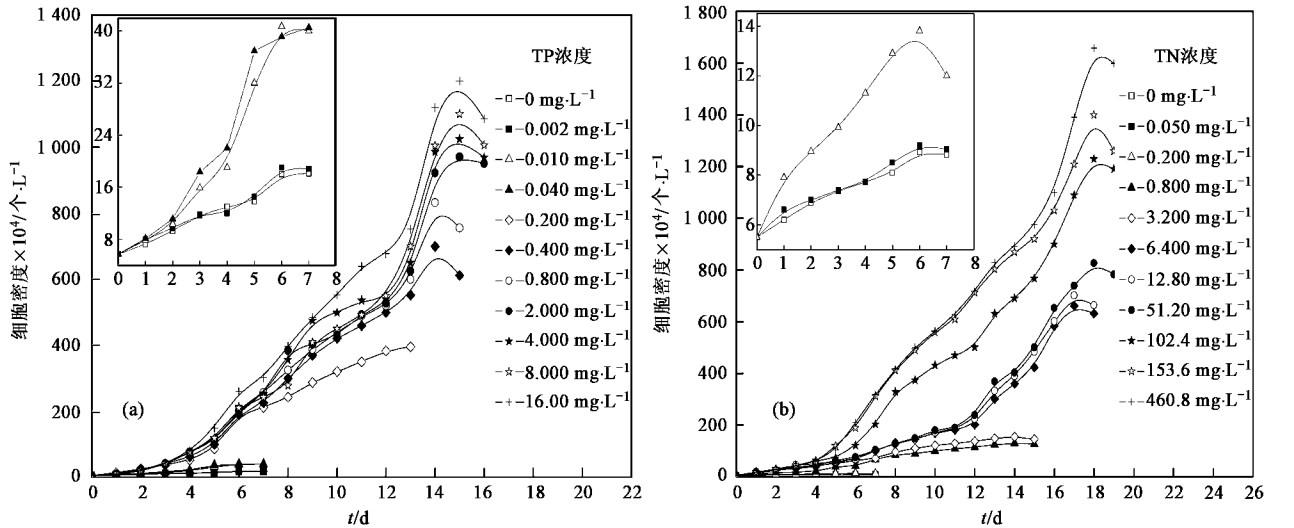


图 1 不同初始营养盐浓度下 CV 藻的生长曲线

Fig.1 Growth curves of *Chlorella vulgaris* under different initial nutrition concentrations

表 1 不同初始限制底物浓度下 CV 藻的平均生长率($\bar{\mu}$)及标准差分析

Table 1 $\bar{\mu}$ of *Chlorella vulgaris* under different concentrations of initial limiting substrate and the ANOVA

磷限制			氮限制		
$c_P/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\bar{\mu}_P/\text{d}^{-1}$	标准差 SD	$c_N/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\bar{\mu}_N/\text{d}^{-1}$	标准差 SD
0.000	0.191 7	0.086 8	0.000	0.064 5	0.023 1
0.002	0.200 7	0.093 1	0.050	0.068 3	0.022 1
0.010	0.327 6	0.127 7	0.200	0.108 3	0.030 7
0.040	0.321 0	0.178 6	0.800	0.174 6	0.180 7
0.200	0.350 0	0.289 1	3.200	0.148 1	0.088 5
0.400	0.343 6	0.244 5	6.400	0.212 7	0.101 7
0.800	0.356 0	0.256 2	12.80	0.230 9	0.170 8
2.000	0.342 5	0.266 9	51.20	0.217 4	0.113 7
4.000	0.349 2	0.270 4	102.40	0.240 5	0.183 0
8.000	0.350 9	0.237 1	153.60	0.240 1	0.192 0
16.000	0.356 7	0.254 2	460.80	0.255 1	0.183 4

度较快的 TP 浓度区间为 0.040 ~ 0.400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TN 浓度区间为 0.800 ~ 6.400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

按照式(2)对实验结果进行回归分析,为了更清楚地表达数据间的线性关系,将图 2 中的营养盐浓度和 μ 分别取倒数做图,横坐标采用对数坐标(图 3).回归分析后得到二者的线性方程,并根据线性方

程的截距和斜率计算出 CV 藻对 TP 和 TN 的 $\mu_{\max}$ 以及 K_s 如表 2 所示.

根据回归分析求得的最大生长速率 $\mu_{\max}$ 为当限制性底物浓度趋向无穷大时生物的生长速率;半饱和常数 K 值通常是用来衡量生物物种对营养物质的亲和性, K_s 值小,表示亲和性好,只需很低的营养

表 2 本研究方程与文献方程的对比

Table 2 Models comparison between literature information and experiment results

种类	水环境	限制性底物	回归方程	显著性检验 ($p < 0.01$)	$\mu_{\max}$ / d^{-1}	$K_s/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
普通小球藻(绿藻) ^[1] <i>Chlorella vulgaris</i>	淡水	TP	$y = 0.004\,2x + 2.850$	$R = 0.989\,1$	0.350 9	0.001 5
		TN	$y = 0.515\,6x + 4.843$	$R = 0.955\,8$	0.206 5	0.106 3
栅藻(绿藻) ^[19] <i>Scendesmus</i>	淡水	TP	$y = 0.079\,7x + 2.534$	$R = 0.999\,7$	0.395 0	0.031 0
		TN	$y = 0.411\,5x + 3.313$	$R = 0.979\,2$	0.301 8	0.124 2
铜绿微囊藻(蓝藻) ^[20] <i>Microcystis aeruginosa</i>	淡水	TP	$y = 0.018\,0x + 0.935$	$R = 0.909\,9$	1.070 0	0.019 0
		TN	$y = 0.113\,0x + 1.012$	$R = 0.850\,3$	0.988 0	0.111 0
赤潮异弯藻(黄藻) ^[21] <i>Heterosigma akashiwo</i>	海水	TP	$y = 1.351\,0x + 3.307$	$R = 0.999\,8$	0.302 4	0.408 6
		TN	$y = 54.410x + 2.878$	$R = 0.989\,5$	0.347 5	18.910 0
新月菱形藻(硅藻) ^[22] <i>Nitzschia clostetsuma</i>	海水	TP	$y = 1.282\,0x + 2.564$	$R = 0.982\,6$	0.390 0	0.500 0
		TN	$y = 32.440x + 2.222$	$R = 0.978\,6$	0.450 0	14.600 0

1)为本研究构建方程,其它为引用文献的方程

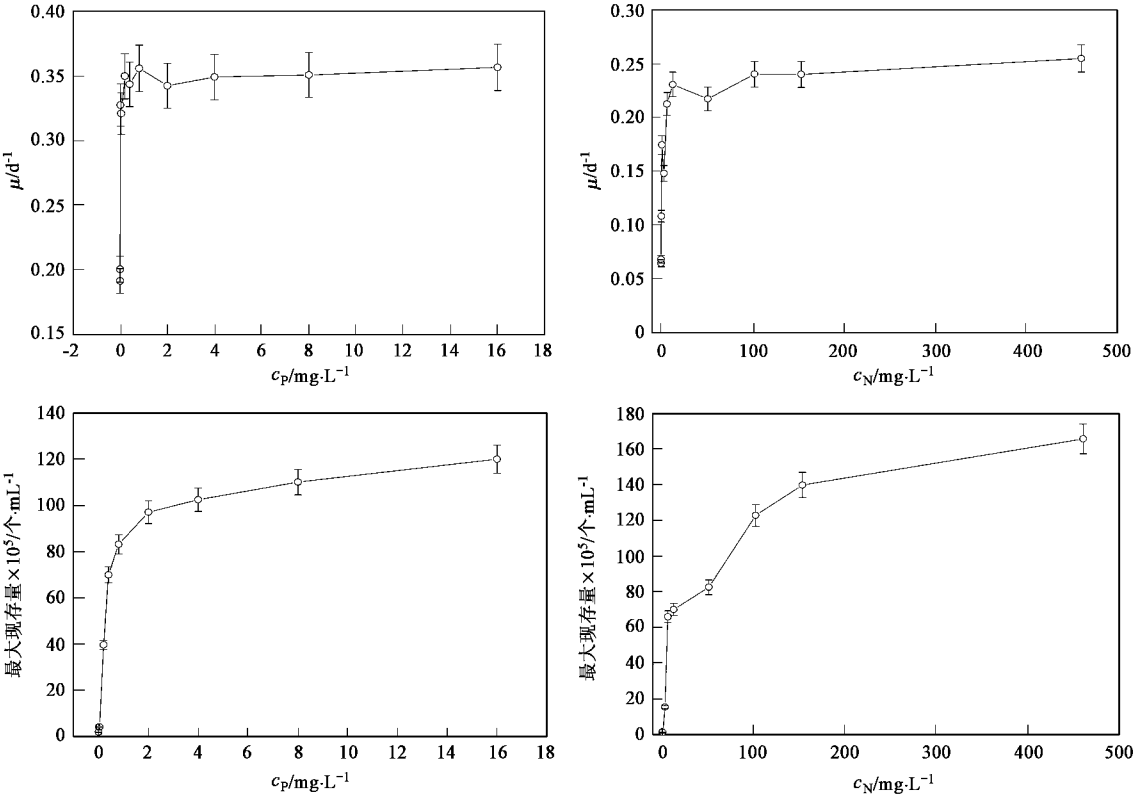


图 2 不同初始营养盐浓度对 CV 藻生长率(μ)和最大现存量的影响

Fig. 2 Effect of different nutrition concentrations on μ and maximum extant quantity of *Chlorella vulgaris*

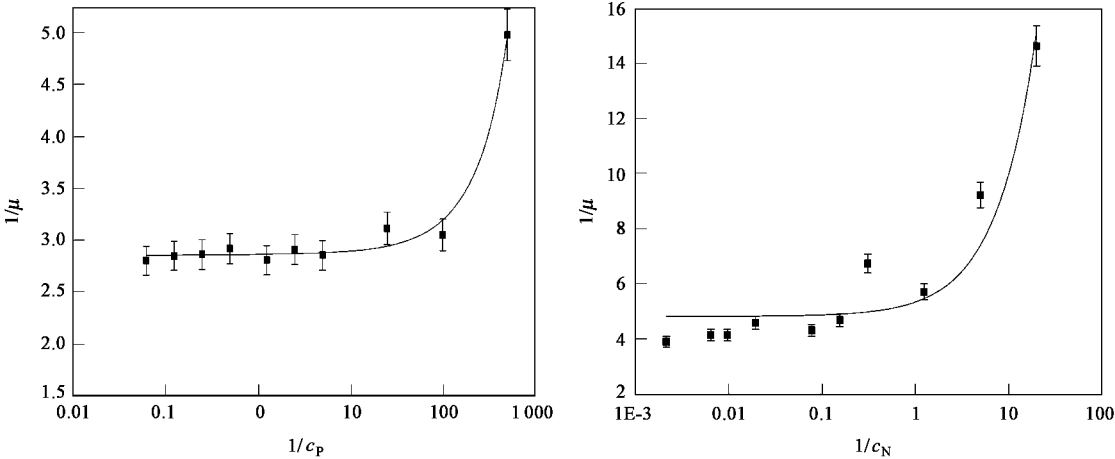


图 3 求解动力学参数

Fig. 3 Computation of dynamic parameters

物浓度就能使种群增殖率达到最大生长率的一半, 即 $\mu_{\max}/2$; K_S 值大, 则亲和性差, 需要很高的营养物浓度才能使种群增殖率达到 $\mu_{\max}/2$ ^[26]. 比增长率和半饱和常数是不同营养盐促进/限制藻类生长过程的重要指标. 通过比较藻类在不同营养盐的影响下生长的 $\mu_{\max}$ 和 K_S 可以推测出不同营养盐限制条件下藻类的生长状态. 从本实验的数据处理结果可以看出 (表 2), 以 TP 为限制底物时的半饱和常数 K_{Sp} 远小于

以 TN 为限制底物时的半饱和常数 K_{SN} , 所以 CV 藻对 TP 比对 TN 有更好的亲和性, 即 TP 增加更易促进 CV 藻的生长, 这符合蓝绿藻生长的一般性规律.

2.2 CV 藻生长与磷、氮的关系分析

根据试验结果如图 4(a), 初始磷浓度对 CV 藻生长的最大现存量的影响较大, 其中初始浓度在 $0.800 \sim 8.000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内时, CV 藻生长最大现存量与磷的初始浓度之间存在较好的相关性如图 4

(b),当初始浓度 $< 0.800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 或 $> 8.000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,相关性消失;初始氮浓度对 CV 藻的 μ 及最大现存量也有较大影响,在初始浓度 $6.400 \sim 153.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内,CV 藻生长最大现存量与氮的初始浓度之间存在较好的相关性如图 4(d),当初始浓度 $> 153.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后 CV 藻的 μ 变化趋缓如图 4(c).虽然根据半饱和和常数分析,TP 浓度的增加更易促进 CV

藻的生长,但也不能忽略 TN 浓度的影响.根据以上求得的动力学参数,应用式(1)、(2)从理论上分析了在不同 TN、TP 浓度下 CV 藻的生长量及生长速率.无论 TN 还是 TP 对 CV 藻生长速率及生长量的影响效果均表现为在一定浓度范围内的影响较大,而浓度不在该范围时,TN 或 TP 的变化对 CV 藻生长无明显影响.

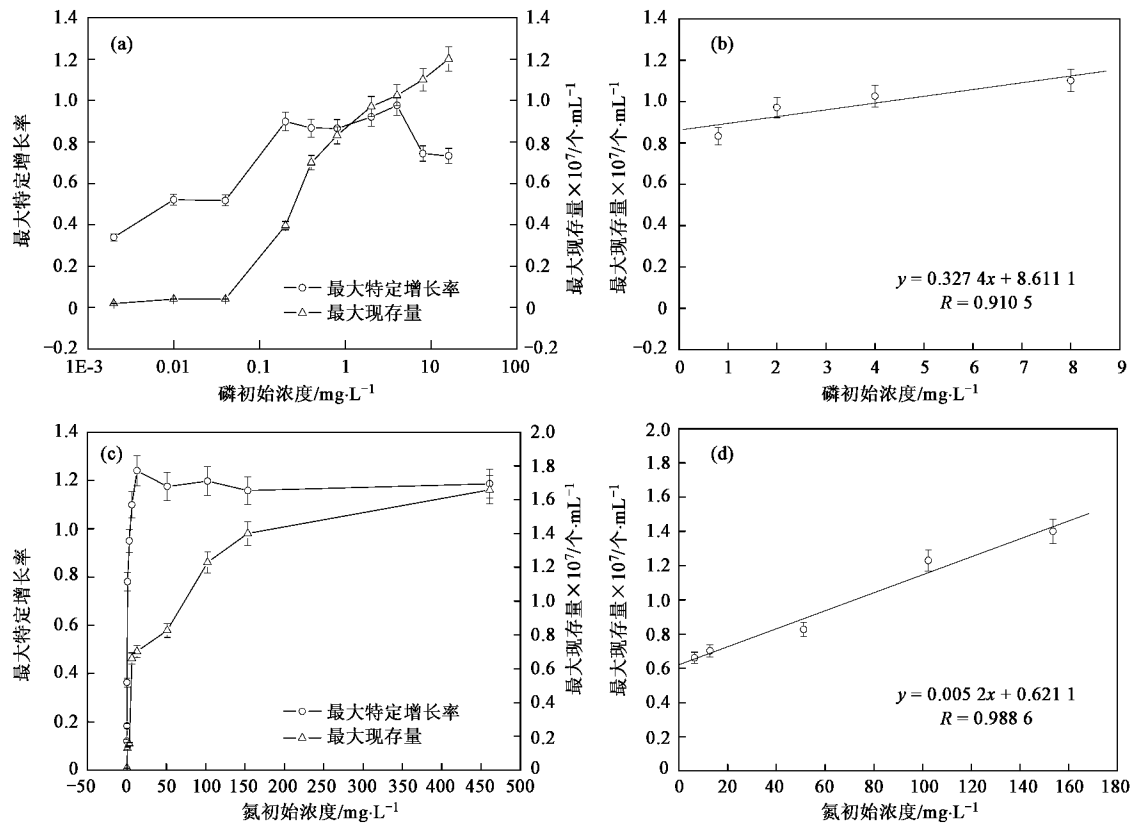


图 4 磷、氮对 CV 藻生长的影响
Fig.4 Effect of phosphorus and nitrogen on the growth of *Chlorella vulgaris*

3 结果与分析

现场监测资料表明:三峡水域已经发生的是以蓝绿藻为优势藻类的水华污染.因此,本研究选取并分析的 CV 藻生长动力学是否具有适合于描述主要蓝绿藻生长行为的普适性和代表性,对于预测和揭示库区水环境的富营养化过程和水华污染形成机制至关重要,也能说明本研究是否确实具有一定的广义性和实用价值.因此,本研究根据文献资料,结合 CV 藻生长行为的实验,分析比较了用 Monod 方程考察不同营养盐下栅藻 (*Scenedesmus*)、铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*)、赤潮异弯藻 (*Heterosigma akashiwo*)、新月菱形藻 (*Nitzschia clostetsuma*) 的生长行为如表 2.显然,文献构建的回归方程与本研究构建的 CV 藻生长回归方程在对 TP 或 TN 的敏感性、

最大比增殖速率 μ_{max} 、相关性甚至回归方程的函数形式等方面确实都存在很好的相似性和一致性,并在此基础上分析出所列藻类生长动力学行为的普适规律性如表 3 所示.反映出 CV 藻与蓝绿藻在淡水中的生长动力学行为存在相当一致的规律性和趋势.而表 2 中各种藻类的 K_{SN} 都远远大于 K_{SP} ,则表示这些藻类对磷的亲性和都远比氮要好,说明在三峡水域中磷会成为藻类生长的主要限制性条件.根据以上对照性分析,本研究提出的 CV 藻与其它蓝藻、绿藻存在相似动力学行为的这种共同性结论具有规律性和代表性.这样,在此基础上可以进一步推论:三峡库区的蓝绿优势藻应该都具有相似的生长动力学模式.进而有可能将本研究得出的结论应用于三峡优势蓝绿藻水华形成机制的分析中.

表 3 共同性特征	
Table 3 Intercommunity characters of dynamics behavior	
比较项目	普适性、共同性与规律性
回归方程	斜率:①TP << TN;②淡水藻的 TP 的斜率都远远小于 0.1 截距:①TP < TN(淡水藻);②TP > TN(海水藻) 显著性检验:所有的 $R > 0.85$ (即存在明显的相关性),且 TP 的相关性远好于 TN,即 $R_{TP} > R_{TN}$ 表达式:具有完全一致的函数形式
μ_{max}	TP > TN(淡水藻);TP < TN(海水藻)
K_s	TP << TN, 各种藻类对磷的亲性和都明显好于对氮的亲性和

4 结论

(1)CV 藻生长速率对磷质量浓度反应很灵敏:与空白值相比,在 $0.002\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的低浓度下 μ 就有提高,而浓度到 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, μ 明显增大;但在 $0\sim0.050\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 氮浓度范围内 μ 几乎没有变化。

(2) CV 藻指数生长期与指数形式的曲线符合较好。

(3)CV 藻对 TP 的半饱和常数 $K_{sp}=0.0015$,对 TN 的半饱和常数 $K_{sn}=0.1063$,说明 CV 藻对 TP 的吸收能力远高于对 TN 的吸收能力。

(4)据半饱和和常数分析,TP 浓度增加更易促进 CV 藻的生长,但不能忽略 TN 浓度的影响.根据求得的动力学参数,理论上 TN、TP 对 CV 藻生长速率及生长量的影响效果均表现为在一定浓度范围内的影响较大,而当浓度超出该范围后,TN 或 TP 浓度的变化对 CV 藻生长的影响变弱。

(5)由于 CV 藻与其它淡水蓝绿藻甚至某些海水藻类的生长动力学行为(对 TP、TN 的敏感性和特定增长率等)和模型(如回归方程的斜率、截距和相关性)在总体趋势上存在很好的相似性和一致性.因此,初步推断 CV 藻可以作为一种能在很大程度(趋势)上反映和表征优势蓝绿藻生长动力学的典型藻类,而这些优势蓝绿藻在总体上又都具有相似的生长动力学性态.这种通过比较得出的动力学共性推论有可能应用于研究三峡库区蓝绿藻水华污染,从而具有一定的应用价值。

参考文献:

[1] 郭红娟,郭生练.水库水文情势与浮游植物群落结构[J].水科学进展,2001,12(1):51-55.

[2] Straskraba M, Dostalkova I. The effects of reservoir on phosphorus concentration [J]. Int Revue Ges Hydrobiol, 1995, 80:403-413.

[3] Kawara O, Yura E. A study on the role of hydraulic retention time in eutrophication of the Asahi River Dam reservoir [J]. Wat Sci Tech,

1998, 37: 245-252.

[4] Wu J G, Huang J H, Han X G, et al. Three Gorges Dam experiment in habitat fragmentation [J]. Science, 2003, 300: 1239-1240.

[5] 王海云,程胜高,黄磊.三峡水库“藻类水华”成因条件研究[J].人民长江,2007,38(2):16-18.

[6] Kiplagat K, Lothar K, Francis M M. Temporal changes in phytoplankton structure and composition at the Turkwel Gorge Reservoir [J]. Hydrobiologia, 1998, 368: 41-59.

[7] 李锦秀,廖文根.三峡库区富营养化主要诱发因子分析[J].科技导报,2003,2:49-52.

[8] 陈海柳,潘纲,闫海,等.六价铬抑制淡水蓝绿藻生长的毒性效应[J].环境科学,2003,24(2):13-18.

[9] 韩德举,胡菊香,高少波,等.三峡水库 135 m 蓄水过程坝前水域浮游生物变化的研究[J].水利渔业,2005,25(5):55-58.

[10] 曾辉,宋立荣,于志刚,等.三峡水库“水华”成因初探[J].长江流域资源与环境,2007,16(3):336-339.

[11] Przytocka J M, Dusazota M, Matusiak K. Intensive culture of Chlorella vulgaris as the second stage of biological purification of nitrogen industry waste water [J]. Water Res, 1984, 18(1):1-7.

[12] 闫海,张宾,王素琴,等.小球藻异养培养的研究进展[J].现代化工,2007,27(4):18-21.

[13] 胡桂坤,张青田.氯化铵和磷酸二氢钠对小球藻增殖的影响[J].盐业与化工,2006,35(5):26-32.

[14] 单爱琴,郭小品,赫红艳,等.磷对云龙湖富营养化优势藻及混合藻生长的影响[J].环境科学与技术,2006,29(8):36-38.

[15] 张青田,胡桂坤.硝氮,磷酸盐,Fe³⁺,Zn²⁺影响小球藻生长的均匀设计试验[J].盐业与化工,2006,35(6):25-27.

[16] 沈颂东.氮磷比对小球藻吸收作用的影响[J].淡水渔业,2003,33(1):23-25.

[17] 彭近新.水质富营养化与防治[M].北京:中国环境科学出版社,1988.1-2.

[18] Spijkerman E. Phosphorus uptake & growth kinetics of two planktonic desmid species[J]. European Journal of Phycology, 1996, 31: 53-60.

[19] 许海,杨林章,茅华,等.铜绿微囊藻、斜生栅藻生长的磷营养动力学特征[J].生态环境,2006,15(5):921-924.

[20] 郑朔方,杨苏文,金相灿.铜绿微囊藻生长的营养动力学[J].环境科学,2005,26(2):152-156.

[21] 江艳,甘旭华,唐欣昀,等.氮磷营养因子对赤潮异弯藻生长的影响[J].应用生态学报,2006,17(3):557-559.

[22] 李铁,胡之阁,史致丽,等.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].海洋和湖沼,2001,31(1):46-52.

[23] 胡小贞,马祖友,易文利,等.4 种不同培养基下铜绿微囊藻和四尾栅藻生长比较[J].环境科学研究,2004,17(增刊):55-57.

[24] 全国富营养化调查组.湖泊富营养化调查规范[M].北京:中国环境科学出版社,1990.

[25] 张自杰,周帆.活性污泥反应动力学[M].北京:中国环境科学出版社,1989.

[26] 崔启武.生物种群增长的营养动力学[M].北京:科学出版社,1991.