

局部水域绿藻硅藻的生长速率模型形式^{*}

王志红¹, 崔福义²

(1. 广东工业大学建设学院, 广东 广州 510006)

2 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘 要: 由于我国南方热带亚热带地区具有持续高温期比较长、生态多样性显著的特征, 藻华的危害、防治及其预警技术一直是研究热点问题。论文利用广东省大沙河水库原水进行一系列藻类培养试验, 采用人工模拟微宇宙环境系统, 通过控制培养的初始营养盐浓度, 过程中的光照、水深、PH值等生态条件, 考察不同初始营养条件、不同光照情况下藻种群密度在藻生长迟缓期和对数期内的增长规律, 建立藻生物量的生长速率模式。结果表明, 两种情况下的藻生长速率模式高度一致, 为指数模型, 模型中的参数与初始培养条件有着密切的关系。该模型可以为综合因素的藻生长速率建模提供参考。

关键词: 藻华; 模型; 生长速率; 预测; 局部

中图分类号: X52 TU991.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2007) 04-0074-05

近 20 年来, 我国经济和工业得到了持续快速的发展, 但各种污水的不合理排放, 淡水资源的水质污染问题日益严峻。其中湖泊水库由于具有物质、能量半封闭半循环的特征, 污染物负荷能力和相应的自净容量有着很大的差异, 水体富营养化程度日趋严重, 给藻类水华的暴发提供了营养基础。藻华的暴发对生态环境持续性发展、工业和居民用水的安全等方面造成了负面的影响。而湖泊水库作为我国重要的饮用水源, 原水水质的安全问题更加令人关注。对于以湖泊水库水为水源的给水处理厂, 最大的困难在于如何对藻类“水华”进行预测, 使水厂可以及时调整处理流程, 保证供水水质。

目前国内外有关藻类和富营养化监测的模型研究主要分为以下 3 类:

(1) 利用单变量或多变量营养指标法。Seele 等^[1]在考察德国巴伐利亚地区湖泊时用底栖硅藻 (Benthic Diatom) 来监测湖泊营养状况, 利用水草指标来监测湖泊营养物的流入。Kelly 等^[2]利用深水硅藻来监测大型污水处理厂下游水体的水质和营养情况。但是水厂往往需要借助其他数据才能完成模型所需参数的检测, 造成实际监控的滞后性, 难以保证监测的连续性。

(2) 利用水质模型进行富营养化监测和预测。Muhammedoglu 等^[3]建立了一个很有代表性的三维

水质—水草相互作用模型, 用于描述水草与水质指标如 DQ 有机氮、氨氮、有机磷等之间的相关性。Hassar 等^[4]则建立了一个气候—水质模型进行藻类生长速率评估。这一类模型在应用时, 需要结合湖泊水库的具体条件, 恰当的选择相适应的物理过程模型和逻辑动力学模型, 整个过程需要有良好的理论基础和研究经历。

(3) 利用地理信息系统 (GIS) 或遥感系统。Lehman 等^[5]利用 GIS 系统对瑞士日内瓦湖水生植物的空间多相性与沉积物成分、水深的相关性进行了研究。Schmieder^[6]则利用 GIS 系统针对德国 Constance 湖研究了浮游植物的个体生态学、监测方法等。Xu 等^[7]在巢湖开展了类似的研究, 利用 GIS 系统进行湖泊富营养化评价。该技术的使用往往是针对大型的水体, 也需要区域内多行业的技术相配合, 这是一般水厂难以实现的。而且水厂关心的仅仅是取水的小范围水域的水质变化情况, 而不是整个水体的水质。

因此, 我们认为上述 3 种类型的模型都不适用于给水处理厂进行短期内水源水局部水域的实时、及时水质监测。王志红等^[8-11]已经阐述了藻生物量模型的建立和应用, 在此基础上进一步开展了藻生长速率预测的建模方法研究。本文将在控制生态因子条件下, 对藻类的生长速率模型的形式进行初

* 收稿日期: 2006-11-20

基金项目: 国家“十五”科技攻关资助项目 (2002BA806B04); 广东省自然科学基金资助项目 (06021461); 广东省教育厅自然科学基金重点项目 (05J011)

作者简介: 王志红 (1975 年生), 女, 副教授, 博士, E-mail: gdwzhihong@126.com

步的探讨。试验的目的主要是确定在单因子控制条件下，藻生长速率模型可能的构建形式，以实验室小试为主，为后续建模提供思路。

1 试验设计

1.1 试验场地

试验主要在广东省开平振华水厂进行。水厂日处理量 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 原水为大沙河水库中层水，平均浊度为 3~12 NTU 总氮平均值 0.4 mg/L 总磷平均值 0.018 mg/L 氮磷比约为 22:1 水库较容易出现藻类“暴发”。在 2000 年 9 月—10 月间，由于持续高温晴天，水库水位大幅度下降，大沙河水库暴发了一次藻类“水华”，短短几天藻类含量高达每升水中数百万至数千万个。

1.2 藻类培养

(1) 试验在人工藻类培养环境中进行。培养原水是采用水厂的 actual 原水，可以根据原水的具体总氮、总磷再考虑增加氮盐和磷酸盐调节初始营养状况。

设计正交试验，控制培养的初始营养因子、生态因子，考察不同初始条件下的藻种群生长过程，根据藻种群的生长规律和检测指标的变化规律，寻找两者之间的相关性。

(2) 人工培养环境为微宇宙系统，培养水体容量介于 $0.05 \sim 1 \text{ m}^3$ ，日交换容量约为 2%。以水厂原水（大沙河水库中层水）作为培养原水，加入培养液，间歇培养，控制培养过程的光暗比 12 h :12 h 定时每天人工摇动 2~4 次^[12-13]。

(3) 试验分为 7—10 月和 12 月—次年 1 月两个阶段，共计进行了 32 组不同初始条件下的藻类培养，试验数据显示的变化趋势基本是一致的。重点选取了第一阶段水温为 $30 \pm 1^\circ\text{C}$ 的试验数据进行分析说明。在高峰生物量期间，水体呈绿色，色度达 25 度，透明度降低。优势藻种为硅藻和绿藻，藻种群分布情况如表 1 所示。

表 1 藻种群分布情况¹⁾

Tab 1 Statistics of algae community distribution

分类	所占百分数/%	藻属
绿藻	31.4	小球藻属、栅连藻、盘星藻属等
硅藻	58.3	直链藻、舟形藻、圆筛藻属等
其他	10.3	蓝藻、甲藻、裸藻等

1) 水温 $30 \pm 1^\circ\text{C}$

1.3 测试项目及方法

主要参考《水和废水监测分析方法》(1998)，总氮采用过硫酸钾—紫外分光光度法；总磷采用钼

化亚锡还原光度法；氨氮采用纳氏试剂分光光度法；高锰酸盐指数采用酸性法；pH 值采用目视比色法；色度采用铂钴标准比色法；溶解氧采用碘量法。藻细胞数量的确定：福尔马林固定，浮游生物个体计数法。

仪器主要有上海精科生产的 722 型分光光度计和 752 型紫外分光光度计。

2 藻生长速率单因子模型

在营养盐充足的水体中，水温和光照是藻华出现的主要诱因。藻生长速率的主要影响因素是光照和水温。初始营养状态反映了藻类暴发的潜力，对藻生长速率也有一定的影响。可以认定初始营养盐浓度、光照和水温对藻类的生长速率都有影响。因此，首先尝试性从数学角度来定量分析，建立单因子藻生长速率模型，为后续综合因素建模提供参考。

2.1 不同初始氮磷条件对藻生长速率的影响及模型表达

考察不同初始营养条件下培养过程中藻生物量随时间的变化情况如图 1 所示。图中系列 I~IV 对应的初始总氮和总磷 (mg/L) 分别为：I (2.0 0.1)、II (2.0 0.08)、III (2.0 0.05) 和 IV (1.5 0.05)。可以看出，初始总氮和总磷不同，藻类生长的速率有区别：系列 I 在培养的第 11 天达到藻生物高峰值，对应地，系列 II 是在第 8 天、系列 III 在第 12 天、系列 IV 在第 10 天达到藻细胞数量高峰值。这说明初始的营养条件对藻的生长速率有影响，这是因为初始氮磷反映了藻类增长可利用的营养物质，直接影响了生长速率。

进一步具体考察不同初始营养条件下藻的生长速率，主要以藻数量增长阶段——迟滞期和对数期的数据进行统计，得到相应的藻生长关系式。结果如表 2 所示。

表 2 不同初始营养条件下的藻生长曲线

Tab 2 Relationship between algae biomass and time under different initial TN/TP concentrations

初始营养条件		藻生长关系式	R ²	P	n
TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)				
2.0	0.1	$D=102.825e^{0.195t}$	0.903	<0.05	11
2.0	0.08	$D=70.097e^{0.317t}$	0.910	<0.05	8
2.0	0.05	$D=17.227e^{0.4808t}$	0.945	<0.05	12
2.0	0.01	$D=3.809e^{0.6187t}$	0.859	<0.05	11
1.5	0.05	$D=76.499e^{0.2806t}$	0.927	<0.05	10
0.5	0.1	$D=93.856e^{0.2108t}$	0.908	<0.05	8

由表 2 中可以得出，不同初始营养状态下，藻生长速率的具体值有所不同。但藻细胞数量与时间之间的关系式都满足指数函数形式，而且表中的 6 个回归关系式有 5 个的决定系数 R^2 在 0.900 以上。因此，可以初步建立不同初始营养状态下的藻生长模型如下： $D = Ae^{Bt}$

式中 A B——系数。

而藻生长速率的数学式为： $\frac{dD}{dt} = AB e^{Bt}$

2.2 不同光照条件对藻生长速率的影响及模型表达

藻类是光能自养生物，光质和光强对藻类生长有着重要的影响。光合作用的光谱范围只限于可见光区（386~760 nm）。而不同的藻需要不同的光照强度。在最适光强范围内，随着光强的增加，藻类光合作用的速度加快，若超出该范围，光合作用将受到抑制^[14-15]。

试验将重点寻找在中—富以上营养水平的营养状态下，根据试验中藻生长周期中迟滞期和对数期的数据，考察不同光照条件下藻生物量的增长规律。试验结果如图 2—4 所示。

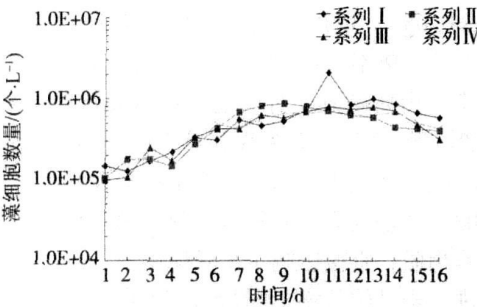


图 1 藻生长动力学曲线

Fig 1 Curve of alga growth dynamics

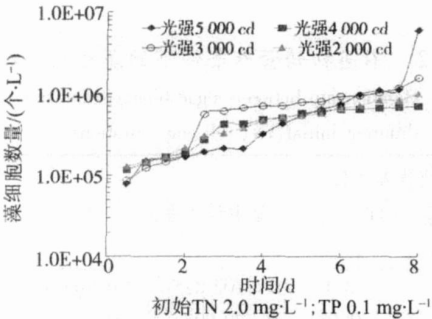


图 2 不同光强下的藻细胞数量

Fig 2 Algae abundance vs different light intensity

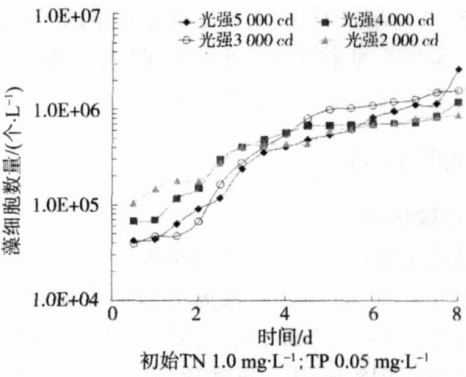


图 3 不同光照条件下的藻细胞数量

Fig 3 Algae abundance vs different light intensity

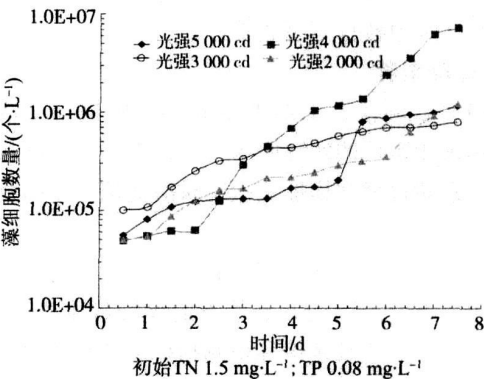


图 4 不同光照条件下的藻细胞数量

Fig 4 Algae abundance different light intensity

从图中可以看到，在不同光照条件下，藻细胞数量高峰值随光强的不同变化不大。但藻细胞数量随着时间的延长而增长，增长速率有所差异。例如，在图 2 中，初始营养状态为富营养等级，光强由 2 000~5 000 cd 变化时，对藻细胞数量高峰值的影响不大，4 种光强条件下的藻细胞数量都为 10^6 数量级。不同光强条件下的藻生长速率不同，光强 5 000 cd 时，藻迟滞期持续到第 4 天，就进入对数期，快速增长，从图中表现为，对应的藻细胞数量增长曲线对数期斜率相对其他光强条件下较大。

通过对数据进行回归拟合，参考不同营养状态下藻生长速率的指数函数形式，建立不同营养状态和光强条件下的藻生物量—时间模型，结果如表 3 所示。

从表 3 可以看到，与不同初始营养盐水平下的藻生长速率形式非常类似，但藻生长动力学方程是高度一致的，仅仅是参数的不同，而且都具有良好的拟合精度，均可以表达为： $D = Ae^{Bt}$ 。

表 3 不同光照条件下的藻生物量—时间关系（迟滞期和对数期）和藻生长速率¹⁾

Tab 3 Algae biomass time relationship (in lag Phase and log Phase) and algae growth velocity under different light intensity

光照条件	相关参数	图 2	图 3	图 4
5 000 cd	藻生长曲线	$D=66\ 086\ e^{0.4318\ t}$	$D=35\ 942\ e^{0.519\ t}$	$D=41\ 499\ e^{0.4402\ t}$
	R	0.903	0.960	0.887
	P	<0.05	<0.05	<0.05
	n	8	8	8
	藻生长速率关系式	$dD/dt=28\ 536\ e^{0.4318\ t}$	$dD/dt=8\ 654\ e^{0.519\ t}$	$dD/dt=18\ 268\ e^{0.4402\ t}$
4 000 cd	藻生长曲线	$D=139\ 868\ e^{0.2425\ t}$	$D=87\ 673\ e^{0.3516\ t}$	$D=23\ 208\ e^{0.7809\ t}$
	R	0.865	0.839	0.980
	P	<0.05	<0.05	<0.05
	n	8	8	8
	藻生长速率关系式	$dD/dt=33\ 918\ e^{0.2425\ t}$	$dD/dt=30\ 826\ e^{0.3516\ t}$	$dD/dt=18\ 123\ e^{0.7809\ t}$
3 000 cd	藻生长曲线	$D=125\ 768\ e^{0.3375\ t}$	$D=37\ 384\ e^{0.5449\ t}$	$D=118\ 422\ e^{0.289\ t}$
	R	0.828	0.901	0.904
	P	<0.05	<0.05	<0.05
	n	8	8	8
	藻生长速率关系式	$dD/dt=42\ 447\ e^{0.3375\ t}$	$dD/dt=28\ 536\ e^{0.5449\ t}$	$dD/dt=34\ 224\ e^{0.289\ t}$
2 000 cd	藻生长曲线	$D=132\ 654\ e^{0.2678\ t}$	$D=125\ 531\ e^{0.2727\ t}$	$D=44\ 333\ e^{0.405\ t}$
	R	0.960	0.924	0.953
	P	<0.05	<0.05	<0.05
	n	8	8	8
	藻生长速率关系式	$dD/dt=35\ 525\ e^{0.2678\ t}$	$dD/dt=34\ 232\ e^{0.2727\ t}$	$dD/dt=17\ 955\ e^{0.405\ t}$

1) D: 藻细胞数量 / (个 · L⁻¹); t: 时间 / d; R²为回归拟合曲线相应的决定系数

2.3 藻生长速率模型的提出

2.3.1 模型的建立 综合 2.1 和 2.2 中的描述,认为在不同的初始营养状态下、光照条件下得到的藻生长速率经验模型有着相同的形式,可以将藻的迟缓期和对数期的生长速率模型写成:

$$dD/dt=AB^{Bt}$$

式中,参数 A、B 的取值主要受初始营养值、光照条件、水温等因素的影响。

2.3.2 模型的理论分析 已有的文献表明,藻类生长是一个多因素综合作用的过程,影响因素主要可分为营养因子、生态因子和地形因子 3 类。当藻类在某一生态环境中生存时,任何稳态条件的建立都是生态环境中至少某一种因子限制的结果。其中营养因子是藻类生长和增殖的根本源动力,决定着藻生长潜力的大小。在富营养化的湖泊水库中,营养充足,营养物质已经不是藻类生长的限制条件,水温、光照等环境条件成为藻类生长的限制因素,所以夏季高温季节往往成为南方湖泊藻华爆发的高危险期。一般条件下,藻种群由于对温度、光照等生态因子的适应,也极大影响了藻种群的生长能力

和生长速率。因此认为藻类的生长速率函数应该是一个综合多因素的表达式,而问题的关键则在于各种因素如何组合,如何用数学模式来表达各种因素的影响权重。

藻类的完整生长阶段可以分为迟缓期、对数期、稳定期和衰亡期,迟缓期内藻类数量缓慢增长,对数期内藻数量快速增长。为了研究藻数量的增长速率,判断藻种群密度达到峰值所需要的时间,需要利用迟缓期和对数期的藻数量变化数据,进行回归建模,从而判断增长量与时间之间的定量关系。结果发现指数形式是最好的函数表达形式,式中的参数代表了生长条件的区分,生长条件不同,具体取值有所不同。

3 结 论

通过实验结果和数据分析、建模,得到以下结论:

(1) 通过对藻生物量增加阶段的数据进行分析,认为迟缓期和对数期的藻生长都符合指数增长规律。

(2) 提出在藻细胞数量增加阶段,藻生长速率

的预测模型可以表达为: $dD/dt = AB^E$, A 、 B 的取值主要受初始营养值、光照条件、水温等因素的影响, 合理反映了生长条件的区分。

(3) 该模型可以适用于湖泊水库的小范围湖区/库区, 水体的营养水平为中富营养等级, PH 为 7.0~8.5, 水温 20~30 °C, 优势藻种为绿藻或硅藻。

与此同时, 生长速率模型中的参数 A 、 B 是与藻生长影响因子有关的因素, 可以考察具体每个因子对生长速率的影响, 利用实验数据, 进行合理拟合, 采用具体的数学表达式来综合表述对藻生长速率的影响权重和相互关系, 藻生长速率模型就可以做到完整表达, 完成藻生长速率的后续建模过程。

参考文献:

- [1] SEELE J, MAYR M, STAAB F, et al. Combination of two indication systems in pre-alpine lakes: diatom index and macrophyte index [J]. *Ecological Modelling* 2000(130): 145—149.
- [2] KELLY M G. Use of similarity measures for quality control of benthic diatom samples [J]. *Water Research* 1991, 25(11): 2784—2788.
- [3] MUHAMMETOGLU A, SOYUPAK S. A three-dimensional water quality-macrophyte interaction model for shallow lakes [J]. *Ecological Modelling* 2000(133): 161—180.
- [4] HASSAN H, HANAKI K, TOMONORI M, TSUQ A. A modeling approach to simulate impact of climate change in lake water quality: phytoplankton growth rate assessment [J]. *Water Science Technology* 1998, 37(2): 177—185.
- [5] LEHMANN A, JAQUET J M, LACHAVANNE J B. A GIS approach of aquatic spatial heterogeneity in relation to sediment and depth gradients: Lake Geneva, Switzerland [J]. *Aquatic Botany* 1997(58): 347—361.
- [6] SCHMIEDER K. Littoral zone GIS of lake constance: a useful tool in lake monitoring and autecological studies with submersed macrophytes [J]. *Aquatic Botany* 1997(58): 333—346.
- [7] XU F L, TAO S, DAWSON R W, et al. A GIS-based method of lake eutrophication assessment [J]. *Ecological Modelling* 2001, (144): 231—244.
- [8] 王志红, 崔福义, 安全, 等. PH 值与水库富营养化进程的相关性研究 [J]. *给水排水*, 2004, 30(5): 37—41.
- [9] 王志红, 崔福义, 安全, 等. 水温与营养值对大沙河水库绿藻硅藻藻华态势的相关性探讨 [J]. *给水排水*, 2004, 30(11): 10—15.
- [10] 王志红, 崔福义. 营养因子与藻生物量的回归模型 [J]. *广东工业大学学报*, 2005, 22(2): 26—30.
- [11] 王志红, 崔福义, 韦朝海, 等. 局部湖区两种藻类藻生物量的综合因子预测模型 [J]. *环境科学学报*, 2006, 26(8): 1379—1385.
- [12] 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩, 等. 微生物监测新技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
- [13] 黄玉瑶. 内陆水域污染生态学—原理与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [14] 刘建康. 高级水生生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [15] 张锡辉. 水环境修复工程学原理与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.

Growth Model of Green Algae and Diatom in a Local Lake Water Body

WANG Zhihong, CUI Fuyi

(1. School of Construction, Guangdong University of Technology, Guangzhou 150090, China;

2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin University of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Because of its typical tropic and subtropical climates, e.g. long-lasting high temperature and various ecological population distributions, there are algae blooming hazards. Prevention and predication technologies in this region. In this paper, 32 experiments have been done using raw water from subsurface water at Dashuhe Reservoir of Guangdong Province. Under the controlled initial conditions, different nutrient concentration, light intensity, water depth and PH values, algae were cultivated within a designed microcosmos. Based on the change of the algae population, models of algae growth are established. The results indicate that the growth models all have a similar exponent function style, only parameters varies individually. So, it proposes a meaningful growth model in lag phase and log phase, importantly, which can offer references to construct a comprehensive model afterward.

Key words: algae blooming model; growth velocity; predication; local