

重庆主城区三峡水域优势藻类的演替及其增殖行为研究

刘信安, 张密芳

(重庆大学化学化工学院, 重庆 400044)

摘要:通过在三峡水系中重庆主城段的长江与嘉陵江现场布点、采样和分析自然水体中的藻类,在实验室内分别模拟氮磷比、光照和流速对嘉陵江水体中藻类生长的影响,发现在不同 TN/TP 和光照强度的静水环境中蓝藻和绿藻生长迅速,硅藻消亡很快,其它藻类变化不大,总藻细胞密度最大可达 10^7 个/L 以上;而在 0.03 m/s 左右的缓流下总藻细胞增长最明显,但密度也只能达到 10^6 个/L,硅藻比例提高,当流速进一步加快,蓝藻和绿藻比例降低.显然,优势藻类随水文情势发生演替.总藻密度分别与 TN/TP、流速拟合的可决系数 R^2 均在 0.93 以上,与光照强度的拟合效果次之.自然状态下两江的现场水样分析还表明:嘉陵江总藻密度大于长江,硅藻占绝对优势,其次为绿藻和蓝藻,与实验室测试结果相符.

关键词:三峡库区;藻类;水华;实验模拟;藻类生长

中图分类号:X524; X143 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2008)07-1838-06

Behavior of Evolution and Growth of Dominant Algae in the Chongqing Urban Section Along the Three-Gorges Valley

LIU Xin-an, ZHANG Mi-fang

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Through sampling and analyzing algae species in natural water-body of the Yangtze river and the Jialing river located at Chongqing urban section along the Three-Gorges valley, and combining with monitoring on the influencing parameters to algae growth, such as TN/TP, light intensities and current velocities by experimental simulation, the effect on the algae propagation behavior has been studied systemically. The results show that under static hydrological condition with various TN/TP and light intensities the *Chlorophyta* and *Cyanophyta* would grow rapidly while the *Bacillariophyta* disappear quickly, and other algae species had little change, and the total algal cell density could exceed 10^7 cells/L. However, even if under lower current velocity as about 0.03 m/s, the total algae cell density would increase at most obviously while its density could only reach 10^6 cells/L, and the proportion of *Bacillariophyta* would increase with the increase of current velocity, the proportion of *Chlorophyta* and *Cyanophyta* begin decrease at same time. Apparently, evolution of the dominant algae species would take place according to the change of hydrological condition. The density of total algae is primal regressed to TN/TP and current velocities with coefficients of determination (R^2) are all over 0.93 while it has lower regression coefficient with the light intensities. The samples analysis of the above two rivers under natural state also demonstrates that total algae density in the Jialing river is higher than that in the Yangtze river, and the *Bacillariophyta* has the absolute domination, and then are *Cyanophyta* and *Chlorophyta*, which fit in with the experimental results in our laboratory.

Key words: Three-Gorges reservoir region; algae species; algal bloom; experimental simulation; algae growth

水华是水体富营养化的一种表现现象,水华暴发时大量浮游藻类聚集在水域表面,严重影响了鱼类等水生生物的生存和水环境安全^[1].尤其是三峡水库形成后,库区内长江与次级河流的流速减缓、自净能力降低、温差变小以及光照增强,从而在沿江两岸水域形成独特的消落带,在河口汇入段形成更平缓的回水区,这些都将直接影响藻类演替、增殖和聚集行为,进而成为三峡流域水华暴发的重要诱发因子^[2].水华暴发的敏感时段多在春季,敏感区域就是上述次级河流回水区以及长江两岸的消落带水域^[3],本研究在春季通过对重庆主城区范围的长江和嘉陵江进行现场布点、采样和分析,并结合实验室

模拟,系统考察了三峡成库后主要环境因子(氮磷比、光照强度和流速)对藻类群落结构的演替和生长行为的影响,试图揭示成库后可能暴发的水华类型,表征优势藻类生长行为与环境因子的关联性,以期三峡水域环境保护提供有指导意义的依据.

1 材料与方法

1.1 现场布点采样

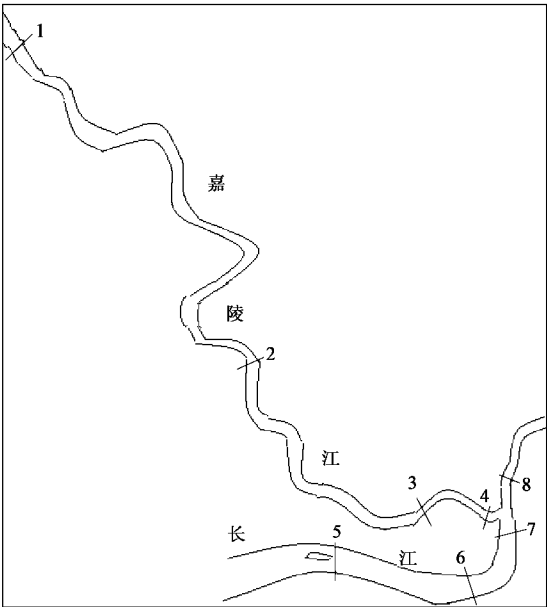
2007 年 4~5 月,在三峡库区重庆主城区的长江

收稿日期:2007-07-29; 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,主要研究方向为生态环境、计算化学和复杂性科学.

和嘉陵江段上各设4个采样点,如图1所示.水样用有机玻璃采水器置于所设断面中间水面以下0.5 m处.监测参数:水温,透明度(SD,用黑白盘现场测定),总氮(TN,用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定),总磷(TP,用钼酸铵分光光度法测定)^[4].浮游藻类的定性和定量分析:1.0 L水样用15.0 mL 鲁哥氏液固定,室内静置48 h后浓缩定容至30.0 mL,用0.1 mL浮游植物计数框在10×40倍下镜检计数,并鉴定种类^[5,6].



1.北碚朝阳桥; 2.磁器口; 3.大溪沟; 4.朝天门四码头
5.珊瑚坝; 6.望龙门; 7.朝天门九码头; 8.弹子石

图1 长江、嘉陵江采样点示意

Fig.1 Sampling points of the Yangtze River and the Jialing River

1.2 实验室模拟试验

表1 嘉陵江原水的水质参数

Table 1 Water quality parameters of the natural water from the Jialing River

水温/℃	SD/m	TN/mg•L ⁻¹	TP/mg•L ⁻¹	藻密度×10 ⁴ /个•L ⁻¹	优势藻及所占比例/%	优势藻门类
24.0	0.8	1.68	0.069	20.25	短线脆杆藻(23.46) 系带舟形藻(14.81)	硅藻

2 结果与分析

2.1 现场采样结果分析

8个采样点的现场监测数据见表2,自然状态下,长江优势藻主要以硅藻门的短线脆杆藻出现频率较高,而嘉陵江优势藻以硅藻门的小环藻出现频率较高,两江的优势藻均为硅藻,如图2所示,但嘉陵江总藻密度高于长江.水温变化范围为17~23℃,TN和TP浓度变化范围分别为1.23~3.01

试验在12只5.0 L的透明大烧杯中进行,调整光源使其光暗比为12:12,光照强度6300 lx,藻类培养用水取自嘉陵江原水,水温控制在25℃左右,试验开始时测定原水样的TN、TP、藻密度和藻类优势种(见表1),之后每隔2d定时采样,水样按常规方法^[7]进行镜检计数并通过各种藻类比例的变化来确定优势藻的演替.

1.2.1 不同TN/TP比藻类生长试验

根据原水氮、磷浓度添加氮磷营养盐,使得1~4号器皿的TN/TP值分别为50.0、30.0、20.0和10.0.每隔2d测1次TN、TP,并向这4个器皿中添加氮或磷的营养盐以保持TN/TP值恒定.

1.2.2 不同光照条件下藻类生长试验

利用塑料薄膜遮盖形成4种不同透光率(即不同光强),5号器皿无膜遮盖,6号器皿用2层塑料薄膜遮盖,即80%的光照强度,7号器皿用4层塑料薄膜遮盖,即65%的光照强度,8号器皿用6层塑料薄膜遮盖,即40%的光照强度.每隔2d定时采样并测定TN、TP,继续向这4个器皿中添加适量氮或磷的营养盐以保持原水的氮磷浓度不变.

1.2.3 不同流速下藻类生长试验

利用电动搅拌器在9~12号器皿中形成不同水体流速,经如下公式换算:

$$v = \frac{2\pi rP}{t}$$
 (1)

式中, v 为流速, P 为搅拌速度(r/min), r 为搅拌棒摆动半径, t 为时间,分别得到相应的流速:0.008、0.03、0.10和0.20 m/s.每隔2d定时采样并向这4个器皿中添加适量氮磷营养盐以保持原水氮磷浓度不变.

mg•L⁻¹和0.03~0.33 mg•L⁻¹,最高值分别超出和达到(GB 2301-2002)地表V类和Ⅳ类水质上限,浮游藻类总细胞密度均低于10⁶个•L⁻¹.由于三峡水库水位目前在135~155 m高程运行,尚未到达重庆主城区水位,故长江和嘉陵江基本处于流速较快的自然河流水文状态,且光强和水体透明度的变化较大,还不具备大规模暴发水华的条件.8个采样点共检出浮游藻类7门33属,65种(包括变种),其中硅藻46种,其他藻较少,组成比例由高到低依次为硅藻、绿

藻、蓝藻、甲藻、隐藻、裸藻和金藻.由图 2 可以看出,8 个采样点的浮游藻类均以硅藻为主,所占比例都超过 60%.主要因为春季阳光充足且水温适宜,再加上适宜的营养盐浓度和水流速度波动相对较大,适合具有硅质壁,能抗机械损伤、对光适应能力较强的硅藻生长^[8],进一步说明自然状态下三峡水系的优势藻类为硅藻.

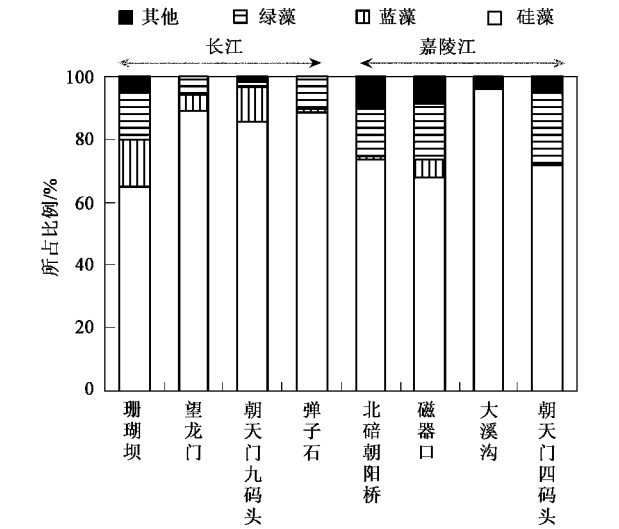


图 2 现场采样点监测到的主要藻类及其所占比例
Fig.2 Main algae and their percentage inspected each sampling station

2.2 实验室结果分析

2.2.1 优势藻类演替

在一定范围内氮磷比值越大越有利于蓝藻和绿藻快速增殖而演替为优势藻类^[9,10],也就最容易导致缓流态水体中常见的蓝藻或绿藻水华污染,如图 3(a).试验开始时原水的优势藻为硅藻(如图 2),试验过程中硅藻迅速减少,蓝藻和绿藻,尤其是浮游蓝藻类(主要包括水华微囊藻、铜绿微囊藻)的增长最快,其它藻类生长缓慢且所占比例甚少,说明蓝藻的大量繁殖抑制了其它藻类,尤其是原来优势藻——硅藻的生长.

营养盐和光照强度充足的静水条件下,蓝藻和绿藻迅速增长,如图 3(b)所示.在 2 层膜遮盖的中等光强(3 号样)和 6 层膜遮盖的低光(1 号样)下优势种均为蓝藻,因为许多蓝藻细胞具有垂直迁移的特性,在适宜藻类生长的中光强(5 040 lx)下蓝藻比其它藻类竞争光照方面存在明显的优势^[11,12];又加之蓝藻仅需较少的能量就能维持其细胞的结构和功能,所以它在较低光照条件下可以比其他藻类具有更高的生长速率^[13].在 4 层膜遮盖下(2 号样),绿藻逐渐取代蓝藻,水体中优势种为附生的绿藻类(小球藻),说明小球藻在4 095 lx 光强下生长最好.在无遮

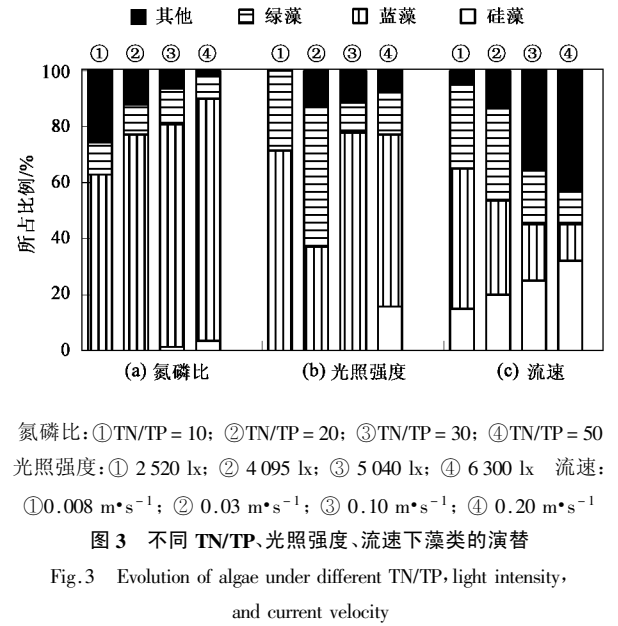
表 2 2007 年春季长江、嘉陵江各采样点的监测指标								
Table 2 Monitoring data of each sampling location along the Yangtze River and the Jialing River during spring 2007								
河流	编号	采样点	水温 /℃	透明度 /m	总氮 /mg·L ⁻¹	总磷 /mg·L ⁻¹	藻密度×10 ⁴ /个·L ⁻¹	优势藻及所占比例/%
嘉陵江	1	北碚朝阳桥	21	1.5	1.92	0.03	24.0	具星小环藻(52.94)
	2	磁器口	18	1.5	2.10	0.31	17.0	梅尼小环藻(14.71)、尖针杆藻(11.76)
	3	大溪沟	17	1.5	2.43	0.18	13.0	颗粒直链藻最窄变种(34.62)
	4	朝天门四码头	18	1.0	1.33	0.08	10.7	尖针杆藻(10.94)、小球藻(17.19)
长江	5	珊瑚坝	22	0.5	2.49	0.33	10.0	短线脆杆藻(15)、梅尼小环藻(10)
	6	望龙门	23	0.5	3.01	0.17	18.0	短线脆杆藻(11.11)、普通等片藻(11.11)
	7	朝天门九码头	23	0.5	2.92	0.16	14.0	短线脆杆藻(10.71)、长等片藻(8.93)
	8	弹子石	18	0.5	1.23	0.14	13.2	尖针杆藻(16.46)
								优势藻所属门类

盖的高光照强度下(4 号样),虽然蓝藻仍占优势,不过硅藻也开始占一定比例,但由于实验室的静水环境条件限制了硅藻的生长,明显比原嘉陵江自然水中的比例低很多(见图 2).

图 3(c)说明随着流速增大,蓝、绿藻迅速减少,硅藻生长加快.因为蓝藻多数具有伪空胞里面包含有氮气,绿藻细胞壁主要成分为纤维素且多数细胞前端带有鞭毛,这些形态结构特征使得蓝、绿藻在静水条件下易于浮上水面集合成蓝绿色的藻带^[14~19],水流加快就易冲刷藻带使其下沉甚至消失;硅藻多数以单细胞个体存在于水中且细胞壁为壳体,静水

条件下沉降速率快,它的硅质壁薄而不具鞭毛完全依靠水流的作用保持悬浮状态从而获得光照和营养盐含量的调节^[20],所以动水环境对硅藻生长有利.当 $v = 0.20$ m/s(类似成库前自然水流速度)时各门藻类总体上呈平行发展趋势,几乎无优势藻类且培养器皿中硅藻总体上要大于另外 3 种不同流速,即 v 为 0.10、0.03 和 0.008 m/s 时的硅藻百分比.

如图 3 所示,从总体上讲,缓静态水域最有利于蓝、绿藻的生长,较高流速对硅藻生长有利(如现场水流速度 v 为 0.20~0.30 m/s 时监测到的硅藻最多);同时也反映了静态或缓流态水体中藻类的种群



组成比流水体中的藻类更为简单,主要表现为种类单一,优势藻为蓝藻和绿藻.

2.2.2 氮磷比、光照强度和流速对藻类生长的影响

细胞密度变化直接反映出藻类生长状况^[21],而藻类生长又与水环境中氮磷比、光照强度和流速等因素密切相关^[22-24],因此在实验室模拟三峡成库的水环境条件,对优势藻类的细胞密度分别与 TN/TP、光照强度和流速进行拟合,以找出影响藻类生长及演替最大的环境因子.

由图 4(a)可以看出,在不同 TN/TP 的静水体模拟试验中总藻的细胞密度可达到 10⁷ 个/L 以上;而流动水体试验中,即使营养盐和光照充足,总藻细胞密度也只能达到 10⁶ 个/L,如图 4(c)所示,则说明随流速加快,藻生长速率直线下降.总藻藻细胞密度与 TN/TP、流速的拟合效果较好,可决系数 R^2 都在 0.93 以上,与光照强度如图 4(b)]的拟合效果次之.但都表明 TN/TP、流速和光照在总体上对藻类的生长影响很大.

蓝藻密度不仅与 TN/TP 拟合效果较好, $R^2 = 0.9777$,而且细胞密度变化范围为 $2.5 \times 10^6 \sim 8.9 \times 10^6$ 个·L⁻¹, 占总藻 90% 左右[如图 4(a)];蓝藻密度与光照强度的拟合效果虽不及与 TN/TP 的拟合效果好,但仍能较好描述藻类生长与光照的关联性.同时蓝藻起主导作用,因为总藻密度与光照强度的可决系数 $R^2 = 0.7748$ 接近蓝藻密度与光照强度的可决系数 $R^2 = 0.7963$,且直线斜率非常相近,说明蓝藻与总藻增长趋势几乎一致[如图 4(b)];蓝藻密度与流速的线性关系则不如与 TN/TP、光照强度那样好,

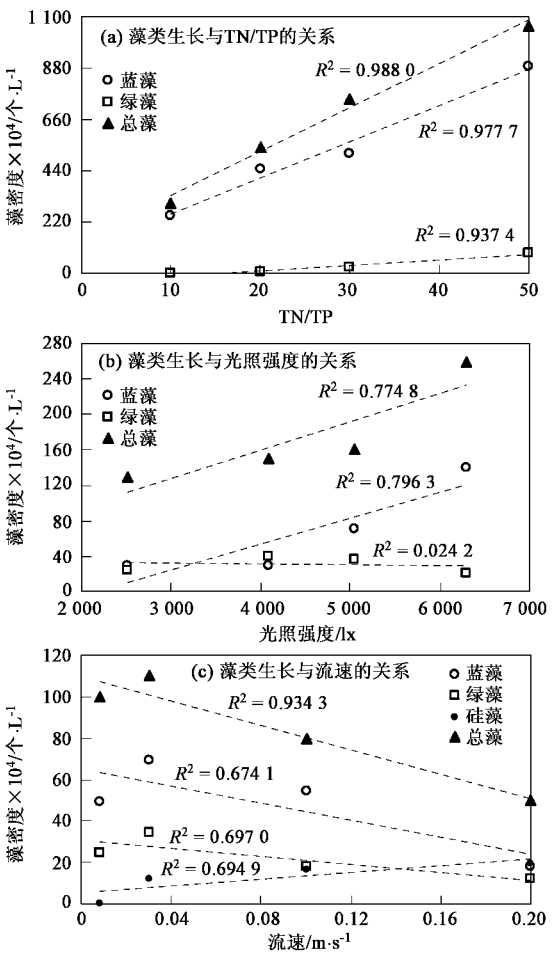


图 4 藻类生长与氮磷比、光照强度、流速的关系
Fig.4 Relationship between TN/TP, light intensity, current velocity and algal growth

可决系数为 $R^2 = 0.6741$,但大体上能反映流速与蓝藻密度的反比关系[如图 4(c)].

绿藻密度与 TN/TP 拟合效果较好,可决系数 $R^2 = 0.9374$ [如图 4(a)],藻密度随氮磷比值的升高逐渐增大,但增长幅度远不及蓝藻.由图 4(b)可以看出,绿藻密度与光照强度之间没有线性相关性,这主要因为绿藻是受光照起伏性影响最大的一门藻类^[25],例如绿藻中的小球藻在过强的光线下细胞生长减缓,最后会失绿而死亡;而绿藻中的栅藻在高光照下却能以较高概率竞争而形成优势种,绿藻的这种相互之间的协同作用消除了线性关系.绿藻密度与流速有一定线性关系,且与蓝藻一样与流速成反比[如图 4(c)].

静水试验中硅藻迅速减少而占百分比降至极低,故只考虑流水中的硅藻密度与流速的线性关系[如图 4(c)],硅藻密度随流速的增大缓慢上升,与流速成正比关系,可决系数 $R^2 = 0.6749$.

3 讨论

本研究通过野外调查和室内实验相结合的方法,分析了氮磷比、光照强度和流速对优势藻类的演替及其增殖的影响,得出了理想的实验结果.在实验室 5 L 烧杯的小体系内既能模拟接近三峡成库后的水文条件,又便于控制与监测重要环境因子对藻类生长的影响,对预测生物学来讲可能是一种行之有效的方法.但三峡水库是一个复杂的生态系统,影响藻类生长的因素很多,在小体系中模拟试验得出的结论对于整个三峡成库后的藻类生长情况主要还是一种对照性、参考性的作用.

由于小体系只考虑了影响藻类生长的几个重要环境因子,但自然水体中藻类生长除受氮磷比、光照和流速等重要环境因子影响外,还受到水中各种有机物、无机物和水生生物等多因素的影响.另外,自然水体中各重要环境因子是频繁变化的,而在小体系中这些环境因子都控制在某一范围内.所以实验室结论只能反映三峡成库后藻类演替及其增殖行为的大致变化趋势,但由于水样完全取自三峡水域,因此又具有相对的合理性和针对性.

4 结论

(1) 根据长江和嘉陵江自然水体的监测结果,硅藻占绝对优势,藻细胞密度和所占百分比都相当高,绿藻和蓝藻次之,其它较少,嘉陵江的总藻密度高于长江.

(2) 静止或缓流水体模拟实验表明:优势藻由硅藻向蓝绿藻发生演变,且总藻细胞密度明显变化:原水中硅藻占绝对优势且总细胞密度大约为 10^5 个/L,在静或缓流水环境中由于蓝、绿藻比例显著上升,硅藻同时急剧下降,其他藻类变化不大,总藻细胞密度最大可达 10^7 个/L 以上,蓝、绿藻演替为优势藻类.由此推论三峡成库后,由于水体流速,尤其是沿江两岸消落带和次级河流出口的流速减缓甚至往复回流、自净化能力降低使得氮磷营养盐含量高、温差减小和水体透明度增加而使光照增强等原因,蓝、绿藻极有可能成为导致水华暴发的优势藻类.在缓、静态水体中蓝、绿藻将迅速演替为优势藻,因此有理由预测或判断:三峡成库后最可能暴发的水华是蓝藻水华或绿藻水华.

(3) 动态水体模拟试验中,硅藻随流速加快而增多,但总藻细胞密度增长幅度不大.在 < 0.03 m/s 的缓流下总藻密度增长最明显,流速 > 0.03 m/s 后

总藻密度下降较快,证明流速对藻类生长确实有很大影响.这一结果与现场采样结果相符.长江水体流速总体上比嘉陵江要快,所以总藻细胞密度要比嘉陵江水体中总藻密度要低.

(4) 总藻密度与 TN/TP、流速的拟合效果较好,可决系数 R^2 都在 0.93 以上,与光照强度的拟合效果次之.蓝藻密度与 TN/TP 的拟合效果最好 $R^2 = 0.9777$,与光照强度的次之 $R^2 = 0.7963$,与流速的 $R^2 = 0.6741$.说明蓝藻与静态水体的环境因子有较好的线性关系,进一步揭示三峡成库后,在特定时期的局部水域如沿江两岸消落带发生蓝藻或绿藻水华污染中,蓝藻所占比例要高得多.

参考文献:

- [1] 《全国主要湖泊、水库富营养化调查研究》课题组. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京:中国环境科学出版社,1987. 19-265.
- [2] 李锦秀,廖文根. 三峡库区富营养化预测方法探讨[A]. 中国环境水力学 2002 [C]. 北京:中国水利水电出版社,2002. 303-306.
- [3] 叶阔,彭盛华,杨国胜. 谨防三峡暴发“水华”[J]. 建设科技, 2003, (7): 14-15.
- [4] 国家环保总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京:中国环境科学出版社, 2002. 425-426.
- [5] 胡鸿钧,李尧英,魏印心,等. 中国淡水藻类[M]. 上海:上海科学技术出版社,1980. 1-525.
- [6] 周凤霞,陈剑虹. 淡水微型生物图谱[M]. 北京:化学工业出版社, 2005. 35-178.
- [7] 章宗涉,黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京:科学出版社,1991. 333-357.
- [8] Reynolds C S, Descy J P, Padisak J. Are phytoplankton dynamics in rivers so different from those in shallow lakes [J]. Hydrobiologia, 1994, 289: 1-7.
- [9] 林碧琴,谢淑琦. 水生藻类与水体污染监测[M]. 沈阳:辽宁大学出版社,1988. 10-36.
- [10] 陈琼. 氮、磷对水华发生的影响[J]. 生物学通报, 2006, 41 (5): 12-13.
- [11] Dokulil M T, Teubner K. Cyanobacterial dominance in lakes [J]. Hydrobiologia, 2000, 438: 1-12.
- [12] Irene K E, Brunberg A K. The importance of shallow sediments in the recruitment of anabaena and aphanizomenon (Cyanophyceae) [J]. Journal of Phycology, 2004, 40: 831-836.
- [13] 孔繁翔,高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 589-591.
- [14] Reynold C S, Walsby A E. Water-blooms [J]. Biol Rev, 1975, 50: 437-481.
- [15] Ganf G G, Oliver R L. Vertical separation of light and available nutrients as a factor causing replacement of green algae by blue-green algae in the plankton of a stratified lake [J]. J Ecol, 1982, 70: 829-844.

- [16] Reynolds C S, Oliver R L, Walsby A E. Cyanobacterial dominance: the role of buoyancy regulation in dynamic lake environments [J]. NZ J Mar Freshwater Res, 1987, **21**: 379-390.
- [17] Walsby A E. Gas vesicles [J]. Microbiol Mol Biol Rev, 1994, **58**: 94-144.
- [18] Oliver R L, Ganf G G. Freshwater blooms [A]. In: Whitton B A, Potts M (eds). The Ecology of Cyanobacteria [C]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000. 149-194.
- [19] Bonner M P, Poulin M. Numerical modeling of the planktonic succession in a nutrient-rich reservoir; environmental and physiological factors leading to *Microcystis aeruginosa* dominance [J]. Ecol Model, 2002, **156**: 93-112.
- [20] 宋丽娟. 重庆长江嘉陵江交汇段浮游藻类变化规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006. 9-10.
- [21] 况琪军, 周广杰, 胡征宇. 三峡库区藻类种群结构与密度变化及其与氮磷浓度的相关性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2007, **16**(2): 234-235.
- [22] 万蕾, 朱伟, 赵联芳. 氮磷对微囊藻和栅藻生长及竞争的影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1230-1235.
- [23] Rier S T, Stevenson R J. Effects of light, dissolved organic carbon, and inorganic nutrients on the relationship between algae and heterotrophic bacteria in stream periphyton [J]. Hydrobiologia, 2002, **489**: 179-184.
- [24] 焦世珺, 钟成华, 邓春光. 浅谈流速对三峡库区藻类生长的影响[J]. 微量元素与健康研究, 2006, **23**(2): 48-49.
- [25] Huisman J, Jonker R R, Zonneveld C, *et al*. Competition for light between phytoplankton species: experimental tests of mechanistic theory [J]. Ecology, 1999, **80**: 211-212.