

# 三峡小江回水区蓝藻季节变化及其与主要环境因素的相互关系

李哲,郭劲松\*,方芳,高旭,盛金萍,周红,龙曼

(重庆大学城市建设与环境工程学院,重庆 400045)

**摘要:**三峡水库支流回水区富营养化和水华近年来备受关注。通过对库区小江流域回水区段蓝藻群落组成及丰度的监测研究发现,2007 年 5 月~2008 年 5 月小江回水区共鉴定出蓝藻 15 属,40 种,其细胞密度均值为 $(23.50 \pm 10.30) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ ,占藻类总密度的 24.1%,生物量均值为 $(768.70 \pm 287.40) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,占藻类总生物量的 8.9%。蓝藻丰度季节变化明显,春末夏初为蓝藻的繁盛期,盛夏后蓝藻丰度逐渐下降,并在冬季达到全年最低水平。鱼腥藻、平裂藻、束丝藻、席藻、微囊藻是常见蓝藻,它们的细胞密度总和约占蓝藻细胞总密度的 79.1%,生物量总和约占蓝藻总生物量的 77.6%,是小江回水区蓝藻的优势种群。对蓝藻丰度和营养物、温度、透明度、真光层深度等环境因素的相关性分析发现,小江回水区蓝藻生长对无机态氮、磷的吸收利用显著,且蓝藻生长摄取硝态氮可能比利用氨氮更加明显。温度升高、水下光学透射性能下降有利于蓝藻细胞密度和生物量的增加。结合研究同期水文、气象条件的观测结果,发现在降雨、径流的作用下,水土流失严重的小江回水区氮、磷营养物同泥沙一起输入水体,为蓝藻生长提供丰厚的物质基础。受泥沙颗粒的影响,水体混浊度提高而真光层深度减少,蓝藻自身对低光照、高浊条件的敏感性及其悬浮生长机制促其能够在上层水体大量生长并形成优势。

**关键词:**三峡水库;小江回水区;蓝藻;营养物;水文气象条件;真光层深度

中图分类号:X52 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)02-0301-09

## Seasonal Variation of Cyanobacteria and Its Potential Relationship with Key Environmental Factors in Xiaojiang Backwater Area , Three Gorges Reservoir

LI Zhe ,GUO Jing-song ,FANG Fang ,GAO Xu ,SHENG Jin-ping ,ZHOU Hong ,LONG Man

( Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering , Chongqing University , Chongqing 400045 , China )

**Abstract:** Eutrophication and algal blooms occurred in the backwater areas of tributaries in Three Gorges Reservoir were the hot ecological issues in recent years. A one year field survey on cyanobacteria was put forward from May ,2007 to May ,2008 in Xiaojiang backwater area. 15 genera and 40 species of cyanophyta were detected. Mean value of cyanobacterial cell density was  $(23.50 \pm 10.30) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ , i. e. 24.1% in the algal community, while the biomass was  $(768.70 \pm 287.40) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  which was 8.9% in the total biomass of algal community. Seasonal variation of cyanobacteria was apparent. Generally, cyanobacteria bloom occurred during late spring and early summer. Its abundance decreased after summer and reached the minimum level in winter. *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Microcystis*, *Merismopedia* and *Phormidium* were the common cyanobacterial genera. The cumulated cell density of these five genera of cyanobacteria above accounted up to 79.1% in the total cell density of cyanobacteria, while that of biomass accounted up to 77.6%. Spearman correlation analysis among the cell density, biomass as well as the key environmental factors indicated that utilization of inorganic nitrogen and phosphorus for anabolism was evident; however, nitrate would be the major nitrogen source for cyanobacteria. Moreover, increase of temperature and decrease of depth of euphotic zone had a significant effect on the abundance of cyanobacteria. According to co-analysis of hydrology and rainfall data in the whole year circle, it was found that nitrogen and phosphorus were input by the heavy rain and surface runoff with inorganic sediments, offering the enriched nutrients in water column. Meanwhile, turbidity increased by the inorganic suspended sediments decreased the depth of euphotic zone. The physiological advantage of cyanobacteria in low light and high turbidity environment might be the cause of cyanobacteria bloom in Xiaojiang backwater area.

**Key words:** Three Gorges Reservoir ;Xiaojiang backwater area ;cyanobacteria ;nutrients ;hydrology and weather condition ;euphotic zone

蓝藻的大量出现被普遍认为是富营养化和水华暴发的重要标志<sup>[1]</sup>。蓝藻大量上浮水面将导致水体感官恶化,且由于许多蓝藻代谢过程将分泌各种藻毒素,对饮用水处理造成严重影响<sup>[2,3]</sup>,对水中蓝藻环境行为和潜在生态影响的研究从 20 世纪 70 年代末开始一直都是富营养化的研究热点<sup>[2,3]</sup>。对极端

环境条件的耐受性,对氮、磷和 CO<sub>2</sub> 等营养物的竞

收稿日期 2009-03-31,修订日期 2009-07-03

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07104-003,2009ZX07104-005);重庆市科技攻关计划重点项目(CSTC2008AB7036)

作者简介:李哲(1981~),男,博士研究生,主要研究方向为水体富营养化,E-mail:Lizhe1981@126.com

\* 通讯联系人,E-mail:guo0768@126.com

争性,生理上易上浮水面、生态上不易被浮游动物摄食等生理生态方面的优势<sup>[2]</sup>,使蓝藻在淡水水体中得以占优。其形成水华是一系列复杂的藻类-水体物理化学环境-各种动植物之间相互作用的结果。不同水域物理、化学、生物背景不一,影响蓝藻生长的环境因素各不相同<sup>[4,5]</sup>,形成蓝藻水华的生态机制也有显著差异,迄今为止还很难对蓝藻水华进行准确地预测<sup>[1]</sup>。

三峡水库成库后支流回水区富营养化问题近年来备受关注。水动力条件的改变和营养物输入、积累被广泛认为是富营养化的根本原因<sup>[6,7]</sup>。但这一过渡型生态系统没有湖泊系统自然演进过程形成的营养物丰厚的沉积层以满足上覆水体藻类生长对营养物的需求;水动力条件受人工调蓄和天然河道径流过程交叠影响,同湖泊亦有天壤之别<sup>[8]</sup>。因此,三峡水库复杂水动力条件下,各环境要素对藻类群落生长的影响机制及其二者之间的相互关系仍不十分明晰。虽然对温带-亚热带浅水湖泊的大量研究已初步揭示其蓝藻水华的形成机制和制约、调控因素<sup>[14,9]</sup>,但目前的研究结论尚难以合理阐释库区支流回水区的富营养化和水华现象。

笔者所在课题组自2006年底开始,在三峡库区较典型的小江回水区段,对其富营养化和水华现象进行了持续跟踪研究。本研究总结了2007年5月~2008年5月小江回水区蓝藻的季节变化过程,结合同期主要环境因素(营养物、温度、光照、悬浮颗粒物等)和水动力条件的跟踪观测结果,探讨分析小江回水区蓝藻生长同主要环境要素的潜在联系,以期为进一步认识该水域富营养化和蓝藻水华特点提供基础。

1 材料与方 法

1.1 研究区域

小江流域(图1),介于北纬30°49'~31°42',东经107°56'~108°54'之间,流域面积5 172.5 km<sup>2</sup>,干流全长182 km,河口距三峡大坝约250 km,是三峡库区中段、北岸流域面积最大的支流。三峡水库蓄水至156 m后,小江回水区延伸至开县渠口镇境内近60 km。但考虑回水区末端受156~145 m水位涨落的影响,本研究选择145 m以下的永久回水区,即云阳县养鹿杨家坝至小江河口,约40 km河段作为研究区域。根据该区域内的河道特征,将其划分为4个河段(图2),分别为:杨家坝-小江电站(约13 km)、高阳平湖(小江电站-代李子,约7 km)、代李

子-牛栏溪(约11 km)以及牛栏溪-小江河口(约10 km)。其中,杨家坝-小江电站与代李子-牛栏溪河段均为峡谷型河道,河谷狭长而断面变化不大,水力条件相对单一,而高阳平湖段则为小江回水区在蓄水后形成的面积在4~5 km<sup>2</sup>的水域,145 m水位下平均水深不到10 m,近似于浅水湖泊,是小江回水区中部相对独立且封闭的区域;牛栏溪以下河段,河道断面放宽,水力条件上易受长江干流回灌影响。

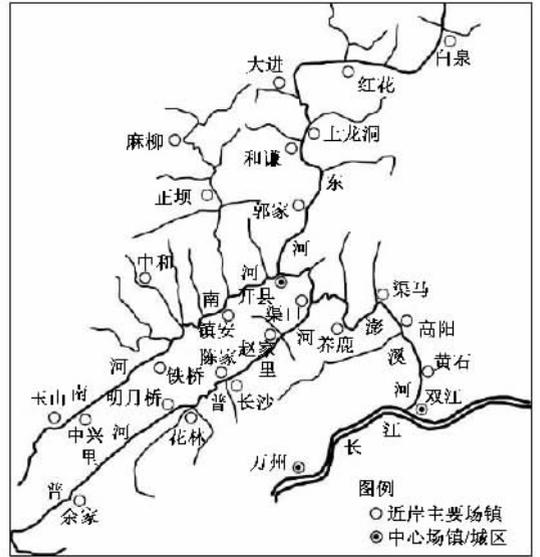


图1 小江流域水系

Fig. 1 Drainage system of Xiaojiang watershed

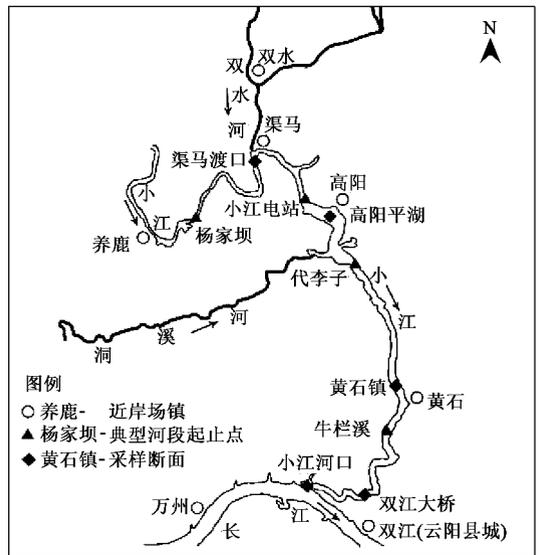


图2 养鹿-河口段回水区示意和采样点分布

Fig. 2 Map of backwater area and sampling spots

## 1.2 采样方案

为全面反映小江回水区上述 4 个河段的水环境特点,并综合考虑沿岸场镇排污的影响,笔者在小江回水区共布置 5 个采样断面(图 2),分别为:杨家坝-小江电站河段的渠马渡口( $N31^{\circ}07'50.8''$   $E108^{\circ}37'13.9''$ )、高阳平湖( $N31^{\circ}548.2''$   $E108^{\circ}4020.1''$ )、代李子-牛栏溪河段的黄石镇( $N31^{\circ}00'29.4''$   $E108^{\circ}42'39.5''$ )以及下游的双江大桥( $N30^{\circ}56'51.1''$   $E108^{\circ}41'37.5''$ )和小江河口( $N30^{\circ}57'03.8''$   $E108^{\circ}39'30.6''$ )。各断面采样点位于河道深泓线处,每月 2 次采集水深 0.5、1、2、3、5、8 m 处共 6 个测点的水样,采样时间控制在采样当日 09:30~16:30。除现场测试指标外,对上述各深度水样进行等量混合,混合后水样于 48 h 内完成所有化学指标的分析测试工作。

## 1.3 测试分析与数据处理方法

现场测试指标包括水温、透明度、水下光合作用有效强度(PAR)等,其中 PAR 采用美国 LI-COR 192SA 水下光量子仪测定。化学测试指标包括氨氮( $NH_4^+-N$ )、硝态氮( $NO_3^- -N$ )、亚硝态氮( $NO_2^- -N$ )、溶解态凯氏氮(DKN)、总凯氏氮(TKN)、磷酸盐( $PO_4^{3-} -P$ )、总磷(TP)等。其中,TKN、TP 为原水水样直接进行测试,其余指标测试水样均预先通过 0.45  $\mu m$  纤维滤膜抽滤处理,化学测试分析方法参照文献[10]。总悬浮颗粒(TPM)、无机悬浮颗粒(TIM)的测试方法参照文献[11]进行。

在各氮素指标的换算关系中,溶解态无机氮(DIN)视为 $NH_4^+-N$ 、 $NO_3^- -N$ 与 $NO_2^- -N$ 的总和,而 TN 则认为是颗粒态有机氮(PON)、溶解态有机氮(DON)和 DIN 的总和,PON、DON 通过 TKN、DKN 和 $NH_4^+-N$ 的关系进行计算,详见文献[12]。

藻类定性/定量样品为各层水深水样现场滴加鲁哥试剂固定,取回实验室等量混合后取 1 L,采用 48 h 静置沉淀方法浓缩至 30 mL 后进行藻种鉴定、计数。藻种鉴定与分类方法参照文献[13]进行,藻种鉴定、计数至种,但本研究中数据整理统计至属。真光层深度( $Z_{eu}$ )的计算参照文献[14]提供的方法进行。小江河口水位(RMlevel)根据长江干流万县水文站和三峡大坝日实测水位进行推算,降雨量和河口流量(RMflow)引自重庆大学龙天渝教授课题组的研究结果<sup>[15,16]</sup>。本研究对降雨量实测值进行了均化,采用 2 次采样间隔的日均降雨量(AveRain)作为采样前期降水指标参与相关性分析,具体计算公式为:

$$AveRain = \frac{2 \text{ 次采样间隔各日降雨量总和}}{2 \text{ 次采样间隔天数}}$$

本研究选择 2007 年 5 月~2008 年 5 月采集的 5 个断面总共 125 个数据样本进行分析。各采样点测试数据录入 SPSS 进行统计分析,采用局部加权回归方法(LOESS)对各次采样数据进行回归平滑,说明数据总体变化趋势。由于水温、降雨量、径流量等水文条件在上述研究区域内并无显著差异而前期研究亦发现各采样点间氮、磷营养物和真光层深度等环境因素并没有显著统计差异<sup>[12,17]</sup>,本研究仅考虑全年环境要素对蓝藻季节变化的影响,暂不考虑对蓝藻空间分布特点进行分析。采用 Spearman 相关性分析方法分析各测试指标之间的统计关系。根据全年气温、水温变化情况并参照重庆地区季节变化规律,对研究期间季节变化情况定性划分为:春季 3~5 月上旬、夏季 5 月中旬~9 月中旬、秋季 9 月下旬~11 月下旬、冬季 12 月~次年 2 月。

## 2 结果与分析

### 2.1 蓝藻细胞密度、生物量和群落结构的季节变化

研究期间,共鉴定出蓝藻 15 属,40 种,各季节蓝藻细胞密度、生物量及其在藻类中所占相应比重见表 1。研究期间蓝藻细胞密度均值为( $23.50 \pm 10.30$ ) $\times 10^5$  cells  $\cdot L^{-1}$ ,约占藻类总密度的 24.1% (均值,下同),生物量(湿重,下同)均值为( $768.70 \pm 287.40$ )  $\mu g \cdot L^{-1}$ ,约占藻类总生物量的 8.9% (表 1)。小江回水区蓝藻种群丰度季节间差异显著(图 3),大体上,蓝藻于 4~5 月春末夏初开始大量出现并迅速增殖,春末初夏时节蓝藻细胞密度和生物量达到全年最高水平。进入盛夏后,蓝藻细胞密度和生物量逐渐下降,并在冬季末期(2~3 月初)达到全年最低值,部分采样点样品甚至未检出蓝藻。

研究期间出现 2 次较明显的蓝藻疯长现象,分别为 2007 年 5 月蓝藻水华(鱼腥藻 *Anabaena* sp.、束丝藻 *Aphanizomenon* sp. 为优势藻种)<sup>[18]</sup>和 2008 年 4~5 月角甲藻 *Ceratium* sp. 在水华期间相伴出现的微囊藻 *Microcystis* sp. 和鱼腥藻疯长现象。其中,2007 年 5 月蓝藻水华期间(以 5 月 29 日为例),蓝藻细胞密度占藻类总密度的 71.2%,生物量占藻类总生物量的比重达 73.7%。在 2008 年 4~5 月角甲藻水华期间(以 5 月 26 日为例),各断面蓝藻细胞密度占藻类总密度的 66.8%,但由于角甲藻细胞体积远大于微囊藻,其细胞重量约是微囊藻单个细胞的 500~600 倍<sup>[19]</sup>,因此虽然蓝藻细胞密度占优,但

其生物量水平仅占藻类总生物量的 1.7%(图 4)。

研究期间蓝藻种群结构季节变化见图 5、图 6。鱼腥藻、平裂藻 *Merismopedia* sp.、束丝藻、席藻 *Phormidium* sp.、微囊藻等 5 种蓝藻在研究期间出现频次较高,是小江回水区蓝藻的常见种,上述 5 种蓝藻细胞密度总和约占蓝藻细胞总密度的 79.1%,生物量总和约占蓝藻总生物量的 77.6%,是小江回水区蓝藻的优势种群。鱼腥藻、束丝藻、微囊藻均主要集中出现于春末夏初期间,是该时期主要的蓝藻藻

种,同时冬季鱼腥藻、束丝藻亦在蓝藻群落中占较大比重。平裂藻虽在生物量中所占比重并不大,但其细胞密度却在夏末和秋季期间明显占优,而席藻出现频次较高,但主要集中于秋、冬季节,是入秋后蓝藻种群中的主要藻种之一。除上述 5 中蓝藻藻种外,研究期间出现频次较多且细胞密度、生物量水平较大的其他蓝藻藻种还有颤藻 *Oscillatoria* sp.、小尖头藻 *Raphidiopsis* sp. 和浮鞘丝藻 *Planktolyngbya* sp.。

表 1 三峡小江回水区蓝藻细胞密度、生物量及其在藻类中所占相应比重<sup>1)</sup>

Table 1 Cell density and biomass of cyanobacteria and its relative abundance in phytoplankton community during research period

项目	参数	全年 (n = 125)	春季 (n = 30)	夏季 (n = 40)	秋季 (n = 25)	冬季 (n = 30)
蓝藻生物密度 $\times 10^5/\text{cells} \cdot \text{L}^{-1}$	均值	23.50 $\pm$ 10.30	12.74 $\pm$ 3.14	60.70 $\pm$ 31.52	4.98 $\pm$ 1.13	0.07 $\pm$ 0.01
	变化范围	0.00 ~ 1 132.03	0.00 ~ 72.84	0.28 ~ 1 132.03	0.14 ~ 18.00	0.00 ~ 0.28
在藻类总密度中所占比重/%	均值	24.1 $\pm$ 2.3	27.3 $\pm$ 4.7	39.5 $\pm$ 4.5	21.2 $\pm$ 2.9	2.6 $\pm$ 0.6
	变化范围	0.0 ~ 98.0	0.0 ~ 87.4	1.5 ~ 98.0	0.4 ~ 58.1	0.0 ~ 16.2
蓝藻生物量(湿重)/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	均值	768.70 $\pm$ 287.40	435.04 $\pm$ 223.70	2 006.50 $\pm$ 856.10	103.06 $\pm$ 20.49	6.64 $\pm$ 1.28
	变化范围	0.00 ~ 24 661.40	0.00 ~ 6 212.09	4.26 ~ 24 661.40	3.02 ~ 347.30	0.00 ~ 24.42
在藻类总生物量中所占比重/%	均值	8.9 $\pm$ 1.5	4.58 $\pm$ 2.2	18.3 $\pm$ 3.9	6.9 $\pm$ 1.3	2.4 $\pm$ 0.5
	变化范围	0.0 ~ 92.7	0.0 ~ 60.0	0.4 ~ 92.7	0.2 ~ 21.7	0.0 ~ 8.0

1) n 为样本数,下同

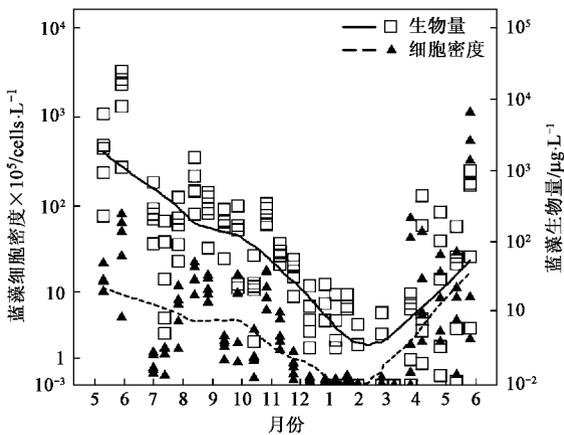


图 3 蓝藻细胞密度、生物量的季节变化

Fig. 3 Variation of cell density and biomass of cyanophyta

## 2.2 蓝藻丰度同主要环境因素的相关关系

影响蓝藻生长和水华形成的环境因素包含物理、化学、生物等多个方面<sup>[2]</sup>,但其中温度、水体光学特性、营养物含量被大多数研究认为是直接诱导蓝藻形成水华的充分条件<sup>[20]</sup>,它们对淡水蓝藻生长的影响最直接且较显著,故本研究选择小江回水区水温、水体光学特性和氮、磷等主要营养物含量的同步跟踪结果,通过相关性分析,说明小江回水区蓝藻同主要环境因素的潜在联系。

研究期间,小江回水区  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N、DIN、

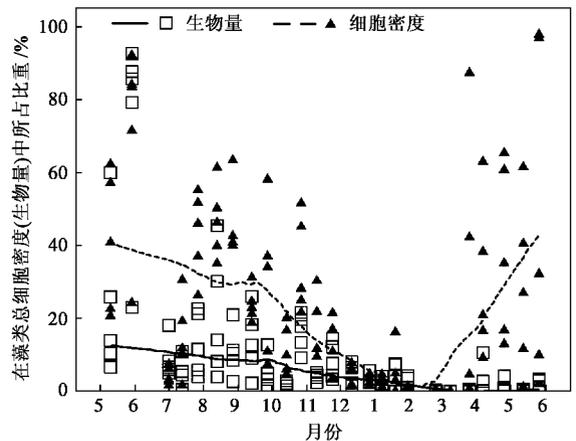


图 4 蓝藻细胞密度(生物量)在藻类总细胞密度(生物量)中所占比重的季节变化

Fig. 4 Variation of relative abundance of cyanophyta cell density (biomass) in total algal cell density (biomass)

TN、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P、TP、TN/TP、水温、透明度(SD)和真光层深度( $Z_{eu}$ )的同期跟踪结果见表 2。上述各指标同蓝藻细胞密度(生物量)及其在藻类总密度(生物量)中相对丰度的相关性分析结果见表 3。研究发现,蓝藻细胞密度(生物量)及其相对丰度同各环境要素的相关关系基本一致:同  $\text{NO}_3^-$ -N、DIN、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P 均呈显著的负相关关系,与  $\text{NH}_4^+$ -N、TN、TP、TN/TP 的统计相关性并不明显(除生物量相对丰度同 TN

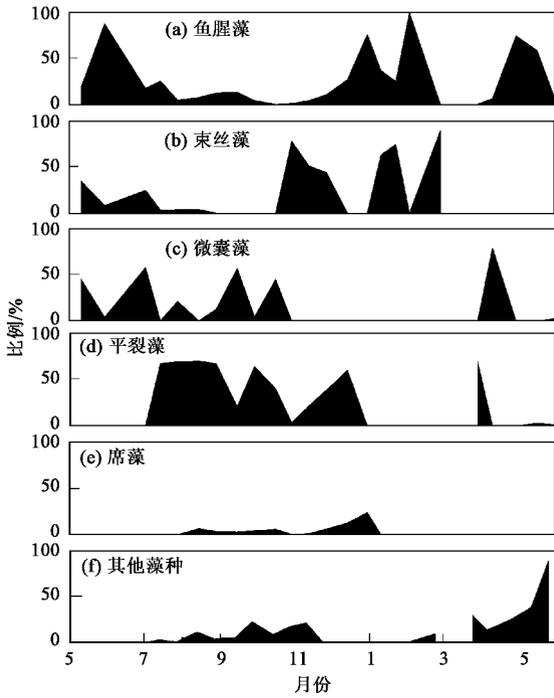


图5 各蓝藻藻种在蓝藻总密度中所占比例季节变化

Fig. 5 Variation of composition of cyanobacteria in terms of cell density

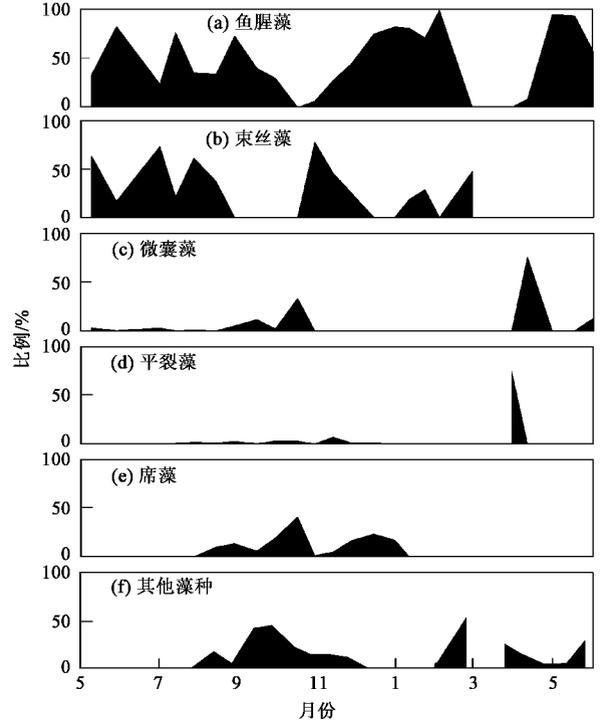


图6 各蓝藻藻种在蓝藻总生物量中所占比例季节变化

Fig. 6 Variation of composition of cyanobacteria in terms of biomass

表2 研究期间小江回水区蓝藻生长主要环境因素季节变化的同步观测结果<sup>1)</sup>

Table 2 Results of major environmental factors in Xiaojiang backwater area during research period

时期	参数	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	DIN	TN	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	TP	TN/TP	水温 <sup>2)</sup> /°C	Z <sub>eu</sub> /m	SD/cm	TPM	TIM
全年	均值	324 ± 19	732 ± 28	1 079 ± 34	1 768 ± 49	13.3 ± 1.3	70.8 ± 3.6	28.6 ± 0.9	20.7 ± 0.6	6.74 ± 0.33	165 ± 10	10 214 ± 1 296	7 014 ± 1 175
(n = 125)	变化范围	10 ~ 1 036	18 ~ 1 606	95 ~ 2 002	658 ~ 3 264	0.5 ~ 100.9	22.0 ~ 349.6	9.0 ~ 80.4	9.2 ~ 31.4	0.88 ~ 20.19	10 ~ 550	333 ~ 91 180	67 ~ 82 860
春季	均值	249 ± 29	895 ± 68	1 184 ± 85	2 214 ± 120	16.4 ± 3.8	89.2 ± 6.6	28.1 ± 2.4	18.5 ± 0.9	6.74 ± 0.73	158 ± 22	7 375 ± 903	4 044 ± 694
(n = 30)	变化范围	10 ~ 703	338 ~ 1 606	384 ~ 2 002	1 016 ~ 3 264	2.2 ~ 100.9	32.2 ~ 190.1	11.7 ~ 80.4	10.4 ~ 25.3	2.30 ~ 20.19	50 ~ 550	333 ~ 18 933	133 ~ 12 200
夏季	均值	429 ± 38	587 ± 49	1 041 ± 66	1 735 ± 80	5.6 ± 0.8	74.3 ± 8.9	29.6 ± 2.0	27.4 ± 0.3	3.45 ± 0.22	75 ± 5	20 735 ± 3 428	16 089 ± 3 187
(n = 40)	变化范围	34 ~ 1 036	18 ~ 1 344	95 ~ 1 861	658 ~ 3 153	0.5 ~ 28.2	22.0 ~ 349.6	9.0 ~ 61.7	24.4 ~ 31.4	0.88 ~ 7.30	10 ~ 150	5 133 ~ 91 180	2 333 ~ 82 860
秋季	均值	220 ± 26	701 ± 51	929 ± 52	1 386 ± 55	7.5 ± 1.2	47.5 ± 2.7	30.4 ± 1.4	21.8 ± 0.6	7.68 ± 0.60	189 ± 16	5 539 ± 513	2 741 ± 564
(n = 25)	变化范围	15 ~ 560	289 ~ 1 226	588 ~ 1 499	1 014 ~ 2 089	0.9 ~ 23.1	28.8 ~ 82.1	19.2 ~ 53.1	17.7 ~ 27.1	2.40 ~ 12.71	40 ~ 380	3 467 ~ 13 400	133 ~ 11 333
冬季	均值	346 ± 39	789 ± 36	1 151 ± 49	1 687 ± 58	25.3 ± 1.6	67.3 ± 2.8	26.2 ± 1.3	12.8 ± 0.4	10.32 ± 0.36	272 ± 13	2 920 ± 122	1 444 ± 131
(n = 30)	变化范围	74 ~ 820	529 ~ 1 193	668 ~ 1 819	1 087 ~ 2 302	8.9 ~ 41.0	44.0 ~ 92.4	12.8 ~ 41.1	9.2 ~ 16.1	6.09 ~ 15.03	140 ~ 470	1 600 ~ 4 333	67 ~ 2 867

1) 营养物、TPM、TIM 单位为  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ , TN/TP 无量纲 2) 水温为 0 ~ 8 m 各水深处水温的平均值

的相关关系外)。水温、SD 和  $Z_{eu}$  对蓝藻细胞密度(生物量)及其相对丰度的影响亦十分明显,同 SD、 $Z_{eu}$  呈极显著的负相关关系,同水温显著正相关。其余各环境指标之间的统计关系如下。

(1)  $\text{NH}_4^+$ -N 仅同 DIN、TN 和 TP 保持显著的正相关关系,同其他营养物指标并无显著统计关系; $\text{NO}_3^-$ -N 同 DIN、TN、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P 和 TP 均显著正相关,且同它们的相关性强于  $\text{NH}_4^+$ -N; DIN 和 TN 之间亦有显著正相关关系,且二者均同  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 和 TP 亦显著正相关,但 TN 同  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 的正相关性并不强。

TN/TP 仅同 TP、 $\text{NO}_3^-$ -N 保持显著的负相关关系,同 DIN 显著负相关,但相关性强度较弱。

(2) 水温同  $\text{NH}_4^+$ -N 有弱的正相关关系,但同  $\text{NO}_3^-$ -N、DIN、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P 显著负相关,同 SD、 $Z_{eu}$  显著负相关。

(3) 真光层深度  $Z_{eu}$  是水柱中支持净初级生产力的部分,是藻类生长光环境的关键指标;SD 则间接提供了光线在水下透射程度强弱的基本信息。SD 和  $Z_{eu}$  保持极为显著的正相关关系(相关系数达 0.902),这同它们的物理意义相符,另外它们均与

表 3 研究期间蓝藻细胞密度、生物量水平同主要环境要素的相关系数矩阵<sup>1)</sup>

Table 3 Spearman correlation coefficient matrix among cyanobacterial cell density, biomass and major environmental factors

	细胞密度	生物量	细胞密度 相对比重	生物量 相对比重	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	DIN	TN	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	TP	TN/TP	水温	SD
细胞密度	1.000												
生物量	0.796 **	1.000											
细胞密度相对比重	0.948 **	0.794 **	1.000										
生物量相对比重	0.500 **	0.837 **	0.591 **	1.000									
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	—	—	—	—	1.000								
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	-0.284 **	-0.328 **	-0.232 **	-0.218 **	—	1.000							
DIN	-0.270 **	-0.296 **	-0.214 *	-0.185 *	0.542 **	0.790 **	1.000						
TN	—	—	—	-0.361 *	0.310 **	0.456 **	0.569 **	1.000					
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	-0.528 **	-0.524 **	-0.487 **	-0.322 **	—	0.427 **	0.369 **	0.197 *	1.000				
TP	—	—	—	-0.241 **	0.208 *	0.528 **	0.539 **	0.621 **	0.250 **	1.000			
TN/TP	—	—	—	—	—	-0.282 **	-0.185 *	—	—	-0.743 **	1.000		
水温	0.666 **	0.745 **	0.660 **	0.574 **	0.257 **	-0.367 **	-0.179 *	—	-0.688 **	—	—	1.000	
SD	-0.507 **	-0.452 **	-0.497 **	-0.223 *	-0.258 **	—	—	-0.209 *	0.462 **	—	—	-0.691 **	1.000
Z <sub>eu</sub>	-0.477 **	-0.459 **	-0.483 **	-0.294 **	-0.333 **	—	—	—	0.472 **	—	—	-0.719 **	0.902 **

1) \* 表示显著性水平为 0.05; \*\* 表示显著性水平为 0.01; — 表示无显著相关性, 样本数  $n = 125$

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 显著负相关, 同 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 显著正相关, 且相关性较强。

### 3 讨论

小江回水区 DIN、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 分别同蓝藻细胞密度(生物量)及其相对丰度呈显著负相关, 说明蓝藻生长对氮、磷无机盐类的吸收利用十分明显。由于 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 是藻类能直接摄取的氮素形态, 研究期间 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 同蓝藻细胞密度(生物量)及其相对丰度均无显著相关性, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 却同蓝藻细胞密度(生物量)及其相对丰度显著负相关, 表明小江回水区蓝藻生长对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的吸收利用较 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 明显, 在大多数情况下小江回水区维持蓝藻生长的无机氮源可能以 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 为主。但小江回水区全年 TN、TP 以及 TN/TP 的变化对蓝藻细胞密度(生物量)及其相对丰度的影响并不显著。Smith<sup>[21]</sup> 所总结的低 TN/TP 条件易于蓝藻生长且使其趋于占优的现象, 在小江回水区年际观测尺度下并不明显。温度、水体光学特征对蓝藻细胞密度(生物量)及其相对丰度的影响亦十分显著, 总体表现为温度升高、真光层深度下降有利于蓝藻丰度增加。

结合对小江回水区 2 年多的野外观测研究, 笔者发现, 该水域蓝藻生长的上述特点同河道型的小江回水区水文径流过程不无关系。从营养物输入特点上, 小江回水区水中 TP 和作为磷素最主要赋存形态的颗粒态磷(PP)含量受到流域降雨、径流过程显著影响。小江河口流量(RMflow)、河口水位(RMlevel)的全年变化过程线以及 2 次采样间隔日

均降雨量(AveRain)的变化情况见图 7。TP、PP、TPM、PIM 同上述 3 个水文指标的 Spearman 相关系数矩阵见表 4。相关性分析表明, TP 同 AveRain 保持较弱的显著正相关关系, 而 PP 同 RMflow、AveRain 的正相关关系却十分显著。同时, TPM、TIM 则同 RMflow、AveRain 保持极强的显著正相关关系, 同河口水位亦有非常显著的负相关关系。由于 TIM 在 TPM 中占很大比重(表 2), 且 TP 和 PP 同 TPM、TIM 均保持较显著的正相关关系, PP 同 TPM、TIM 的相关性强于 TP, 故可认为研究期间小江回水区降雨、径流过程造成以无机泥沙为主的颗粒物通过水土流失、面源污染或淹没区、消落带底质再悬浮的方式, 携带大量以颗粒态磷(PP)为主要赋存形态的磷素进入水体, 使水中 TP 含量的增加。该现象同曹承进等<sup>[7]</sup> 对三峡水库主要入库支流的调查结果一致。另外, 表 3 中 TN 和 TP 的显著正相关关系说明 TN 输入途径可能同磷素相同<sup>[20]</sup>。

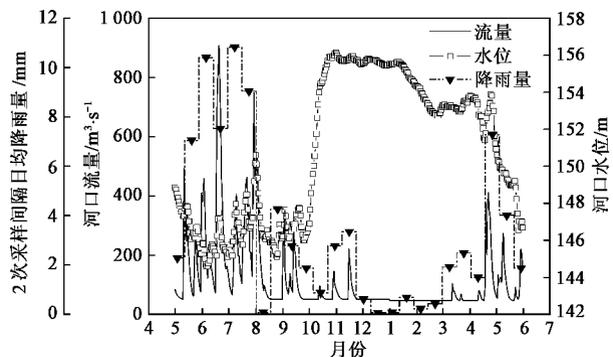


图 7 小江回水区主要水文、气象指标的季节变化

Fig. 7 Variation of rainfall and hydrological data during research

表 4 研究期间降雨、水文要素同蓝藻细胞密度、生物量及主要环境要素的相关系数矩阵

Table 4 Spearman correlation coefficient matrix among rainfall, flow, water level and other key environmental factors

	细胞密度	生物量	细胞密度 相对比重	生物量 相对比重	PP	TP	TN/TP	SD	Z <sub>eu</sub>	TIM	TPM	RMflow	RMlevel
细胞密度	1.000												
生物量	0.796 **	1.000											
细胞密度相对比重	0.948 **	0.794 **	1.000										
生物量相对比重	0.500 **	0.837 **	0.591 **	1.000									
PP	0.214 *	—	0.191 *	—	1.000								
TP	—	—	—	-0.241 **	0.683 **	1.000							
TN/TP	—	—	—	—	-0.614 **	-0.743 **	1.000						
SD	-0.507 **	-0.452 **	-0.497 **	-0.223 **	-0.447 **	—	—	1.000					
Z <sub>eu</sub>	-0.477 **	-0.459 **	-0.483 **	-0.294 **	-0.400 **	—	—	0.902 **	1.000				
TIM	0.378 **	0.461 **	0.420 **	0.371 **	0.284 **	0.175 *	—	-0.715 **	-0.724 **	1.000			
TPM	0.609 **	0.616 **	0.635 **	0.418 **	0.351 **	0.153 *	—	-0.795 **	-0.776 **	0.867 **	1.000		
RMflow	0.449 **	0.534 **	0.495 **	0.429 **	0.362 **	—	—	-0.669 **	-0.697 **	0.718 **	0.771 **	1.000	
RMlevel	-0.408 **	-0.483 **	0.369 **	-0.246 **	—	—	—	0.653 **	0.640 **	-0.546 **	-0.591 **	-0.420 **	1.000
AveRain	0.403 **	0.441 **	0.398 **	0.308 **	0.402 **	0.113 *	—	-0.612 **	-0.639 **	0.630 **	0.669 **	0.782 **	-0.522 **

TN 浓度随 TP 含量增加而升高<sup>[17]</sup>。在这样的营养物质输入模式下,春末(4、5月)开始的洪水季节,回水区氮、磷含量的逐渐升高为藻类生长提供了丰厚的物质基础<sup>[17]</sup>。

另一方面,降雨和径流过程形成的以无机泥沙(TIM)为主的悬浮颗粒态物质(TPM)在很大程度上影响了光线在水下的传播:SD、Z<sub>eu</sub>同TPM、TIM、RMflow和AveRain呈极显著的负相关关系,而同RMlevel显著正相关。由于蓝藻生理特征上其原核细胞的光合作用系统同真核细胞的其他藻种存在较大差异,其特有的藻胆素扩展了能被捕获用于光合作用的波长范围<sup>[1,2]</sup>,其I<sub>k</sub>值(饱和光合作用速率所需光强)远低于其他真核藻类<sup>[19]</sup>,使得蓝藻在低光照、高浊度条件下较其他藻种具有较明显的竞争优势<sup>[19,22,23]</sup>,在高强度光照条件下的耐受性亦强于其他藻种<sup>[2,3]</sup>。而研究期间发现的许多蓝藻藻种其细胞内均含有伪空胞(gas vacuolate),能通过自身的上浮机制维持其在表层水体悬浮生长以满足对光源的需求<sup>[2,3]</sup>。由此推测,小江回水区降雨、径流过程带来的大量无机泥沙降低了光线在水下的透射性能,真光层压缩使水下光环境并不利于藻类生长,但蓝藻在生理上对光照的竞争优势以及自身的上浮生长机制却有可能诱使其在这样的环境下较其他藻类大量生长并占优。这一研究结果与Scheffer等<sup>[22]</sup>、Reynolds等<sup>[24,25]</sup>的研究发现一致。

近几年在蓝藻生长和水华形成机制的研究中,越来越多的研究倾向于运用包括营养物含量、光照条件、温度、CO<sub>2</sub>、混合层深度等在内的物理化学要素(physicochemical factors)的协同变化反映蓝藻生境的变迁以解释蓝藻占优和水华形成的现象<sup>[25]</sup>。而且有充分的证据显示通过大气固氮作用而维持蓝藻生长所需的固氮量仅占蓝藻生长氮需求量不到10%,通过氮内循环补给蓝藻自身生理需求则可能是维持蓝藻生长的主要途径<sup>[23]</sup>。在这样的情况下,建立在营养物资源竞争理论基础上的蓝藻生长N/P学说引起各方面越来越多的质疑<sup>[22-27]</sup>。Reynolds<sup>[25]</sup>认为N/P学说混淆了蓝藻生长同环境营养物丰度之间的因果关系,难以进一步阐明调控蓝藻生长的生态过程和机制,而Blomqvist等<sup>[26]</sup>、Downing等<sup>[27]</sup>许多研究均发现N/P很难用于解释蓝藻生长和固氮型蓝藻水华占优的生态过程。Scheffer等<sup>[22]</sup>的研究则直接阐明低光照和水体浊度程度提高同蓝藻生长、占优密切相关,N/P对蓝藻生长的调控作用并不显著。基于目前学术界对蓝藻生长和水华形成的普遍认识和上述小江回水区蓝藻同主要环境因素的相互关系,笔者对研究期间小江回水区蓝藻生长的生态模式进行初步探索。

亚热带大陆性季风气候背景下的三峡库区,雨季开始于春末夏初的4、5月期间,水温亦达到20℃左右并随气温持续上升,水库进入低水位运行阶段

且径流量的增加使小江回水区水体滞留时间大大缩短,水动力条件趋近于天然河道。在水土流失严重的流域背景下,大量无机形态泥沙受降雨、径流的作用进入水体,并诱导产生两方面的生态效应:①水体 TN、TP 含量升高,为蓝藻生长提供了丰厚的物质基础。②受无机颗粒泥沙的影响,水体混浊度提高而真光层深度却大大减少,蓝藻自身对低光照的敏感性及其悬浮生长机制促使其能够迅速在上层水体大量生长并在藻类群落中占优。但该生态模式暂无法进一步解释小江回水区蓝藻生长的 2 个问题。

(1)研究发现蓝藻生长同氨氮并无显著统计关系却与硝态氮关系密切,这同浅水湖泊的研究结果有明显差异<sup>[2,4,26]</sup>。有研究发现蓝藻繁盛期周围细菌群落可实现对硝态氮的反硝化以维持蓝藻生长的氮源<sup>[5]</sup>,且上述机制是维持蓝藻生长的关键,但在深水河道型的小江回水区,该机制是否存在值得研究。

(2)大量研究认为蓝藻可在冬季真光层底部休眠生长,并在出现温跃层时( $Z_{eu}/Z_{mix} \leq 1$ )上浮形成水华<sup>[2,3,19]</sup>,研究区域冬季高水位条件下真光层底部蓝藻是否是春季水华的来源值得探索。

#### 4 结 论

(1)研究期间,小江回水区共鉴定出蓝藻 15 属 40 种,其中鱼腥藻、平裂藻、束丝藻、席藻、微囊藻等是蓝藻中的常见藻,颤藻、小尖头藻和浮鞘丝藻亦较常见。蓝藻细胞密度均值为 $(23.50 \pm 10.30) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ ,约占藻类总密度的 24.1%,生物量均值为 $(768.70 \pm 287.40) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,约占藻类总生物量的 8.9%。蓝藻丰度季节差异明显,春末夏初时节为蓝藻的繁盛期,盛夏后蓝藻丰度逐渐下降,并在冬季达到全年最低水平。

(2)小江回水区蓝藻生长对无机氮、磷的吸收利用十分显著,且蓝藻生长摄取硝态氮可能比利用氨氮更加明显。温度升高、真光层深度下降有利于蓝藻丰度增加。

(3)河道型的小江回水区降雨、径流过程使 TN、TP 等营养物含量升高,为蓝藻生长提供丰厚物质基础。而悬浮泥沙增加使水体混浊度提高,蓝藻对低光照的敏感性及其悬浮生长机制将有可能促其在上层水体大量生长。

参考文献:

[1] 谢平. 论蓝藻水华的发生机制——从生物进化、生物地球化学和生态学观点[M]. 北京:科学出版社,2007. 30-76.

- [2] Paerl H W, Fulton R S, Moisander P H, et al. Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria[J]. The Scientific World, 2001, 1: 76-113.
- [3] Oliver R L, Ganf G G. Freshwater blooms[A]. In: Whitton B A, Potts M (Eds). The Ecology of Cyanobacteria [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000. 149-194.
- [4] 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): 589-595.
- [5] Ploug H. Cyanobacterial surface blooms formed by *Aphanizomenon* sp. and *Nodularia spumigena* in the Baltic Sea: Small-scale fluxes, pH, and oxygen microenvironments [J]. Limnol Oceanogr, 2008, 53(3): 914-921.
- [6] 郑丙辉, 曹承进, 秦延文, 等. 三峡水库主要入库河流流营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 1-6.
- [7] 曹承进, 秦延文, 郑丙辉, 等. 三峡水库主要入库河流磷营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2008, 29(2): 310-315.
- [8] 郑丙辉, 张远, 富国等. 三峡水库营养状态评价标准研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(6): 1022-1030.
- [9] 吴晓东, 孔繁翔, 张晓峰, 等. 太湖与巢湖水华蓝藻越冬和春季复苏的比较研究[J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1313-1318.
- [10] 国家环境保护总局. 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, 1997. 243-285.
- [11] GB/T 12763.9-2007. 海洋调查规范: 第九部分 海洋生态调查指南[S].
- [12] 李哲, 郭劲松, 方芳, 等. 三峡小江回水区氮素赋存形态与季节变化特点[J]. 环境科学, 2009, 30(6): 1588-1594.
- [13] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类-系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 23-203.
- [14] 张运林, 冯胜, 马荣华, 等. 太湖秋季真光层深度空间分布及浮游植物初级生产力的估算[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3): 380-388.
- [15] 龙天渝, 梁常德, 李继承, 等. 基于 SLURP 模型和输出系数法的三峡库区非点源氮磷负荷预测[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3): 574-581.
- [16] 吴磊, 龙天渝, 刘腊美, 等. 三峡库区小江流域溶解态非点源污染负荷研究[A]. 见: 中国环境与生态水力学 2008[C]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. 221~227.
- [17] 李哲, 郭劲松, 方芳, 等. 三峡小江回水区不同 TN/TP 水平下氮素形态分布和循环特点研究[J]. 湖泊科学, 2009, 21(4): 509-517.
- [18] 李哲, 方芳, 郭劲松, 等. 三峡小江回水区段 2007 年春季水华与营养盐特征[J]. 湖泊科学, 2009, 21(1): 36-44.
- [19] Reynolds C S. The ecology of phytoplankton [M]. UK: Cambridge Press, 2006. 93-144.
- [20] Havens K E, James T, East T L, et al. N:P ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution[J]. Environ Pollut, 2003, 122: 379-399.
- [21] Smith V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton[J]. Science, 1983,

- 211 :669-671.
- [ 22 ] Scheffer M , Rinaldi S , Gagnani A , *et al.* On the Dominance of Filamentous Cyanobacteria in Shallow , Turbid Lakes [ J ]. *Ecology* , 1997 , **78**( 1 ) : 272-282.
- [ 23 ] Ferber L R , Levine S N , Lini A , *et al.* Do cyanobacteria dominate in eutrophic lakes because they fix atmospheric nitrogen ? [ J ] *Freshwater Biology* , 2004 , **49** : 690-708.
- [ 24 ] Reynolds C S , Huszar V , Kruk C , *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton [ J ]. *J Plankton Res* , 2002 , **24**( 5 ) : 417-428.
- [ 25 ] Reynolds C S. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status ? [ J ]. *Hydrobiologia* , 1998 , **369/370** : 11-26.
- [ 26 ] Blomqvist P , Petterson A , Hyenstrand P. Ammonium-nitrogen : a key regulatory factor causing dominance of non-nitrogen fixing cyanobacteria in aquatic systems [ J ]. *Arch Hydrobiol* , 1994 , **132** : 141-164.
- [ 27 ] Downing J A , Watson S B , McCauley E. Predicting cyanobacteria dominance in lakes [ J ]. *Can J Fish Aquat Sci* , 2001 , **58** : 1905-1908.