

## 三峡水库神农溪 2008 年夏季铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 水华暴发特性\*

朱孔贤<sup>1,2</sup>, 毕永红<sup>1</sup>, 胡建林<sup>1,3</sup>, 艾鹰<sup>1,2</sup>, 胡征宇<sup>1\*\*</sup>

(1: 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3: 宁波环境监测中心, 宁波 315012)

**摘要:** 对三峡水库一级支流神农溪 2008 年夏季蓝藻水华进行调查, 结果表明神农溪蓝藻水华优势种是铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*), 暴发水域面积约 0.2 km<sup>2</sup>, 持续时间约 50 d. 本次水华暴发与水体总磷浓度呈正相关, 温度、降雨、光照和营养盐等对水华暴发具有重要影响. 研究发现尽管神龙溪水域总体处于中-富营养状态, 但局部水域由于水流缓慢、水体滞留时间长、营养稀释扩散速率小, 在夏季出现富营养化状态, 这是蓝藻水华暴发的根本原因. 建议开展包括流域综合治理在内的环境整治, 确保神农溪水体生态环境的稳定.

**关键词:** 神农溪; 铜绿微囊藻; 蓝藻水华; 富营养化; 三峡水库

## Characteristics of *Microcystis aeruginosa* bloom in summer 2008 in Shennong River of Three Gorges Reservoir

ZHU Kongxian<sup>1,2</sup>, BI Yonghong<sup>1</sup>, HU Jianlin<sup>1,3</sup>, AI Ying<sup>1,2</sup> & HU Zhengyu<sup>1</sup>

(1: State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P. R. China)

(2: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

(3: Environmental Monitoring Center of Ningbo, Ningbo 315012, P. R. China)

**Abstract:** An investigation was made to study the variations of the environmental factors and the composition of plankton when *Microcystis* bloomed in Shennong River which is the primary tributary of Three Gorges Reservoir during June and August in 2008. The results show that *Microcystis aeruginosa* is the absolutely dominant species forming the algal bloom. The *Microcystis* bloom lasted about 50 d and covered about 0.2 km<sup>2</sup>. The biomass of *Microcystis* are in direct correlation with the total phosphorus. With Three Gorges Dam stored water, the flow velocity of Shennong River has been slowed down greatly and the self-purification ability of the river declined. As a result, nutrient accumulated constantly and causing the water eutrophication. High content of nutrients in the water of Shennong River is the main reason responsible for the algal bloom formation while suitable natural conditions also contribute to the process. Based on the research, we proposed several strategies to mitigate the eutrophication and control algal blooms in Shennong River including pollution control and river ecosystem management.

**Keywords:** Shennong River; *Microcystis aeruginosa*; algal bloom; eutrophication; Three Gorges Reservoir

三峡工程自 2003 年蓄水以来, 已有 12 条一级支流不同程度地出现富营养化及“水华”现象<sup>[1]</sup>, 特别是 2007 年冬季大宁河<sup>[2,3]</sup>、2008 年夏季香溪河<sup>[4]</sup>和神农溪出现微囊藻 (*Microcystis*) 水华之后, 三峡水库的蓝藻水华问题更是引起人们的广泛关注.

\* 国家重点基础研究发展计划“973”项目 (2008CB418002) 和国家水体污染控制与治理科技重大专项项目 (2009ZX07104-005) 联合资助. 2011-10-15 收稿; 2011-12-19 收修改稿. 朱孔贤, 男, 1985 年生, 博士研究生; E-mail: zhukx@foxmail.com.

\*\* 通信作者; E-mail: huzy@ihb.ac.cn.

国内外已有许多关于蓝藻水华发生机理的理论或假说<sup>[5]</sup>. Schindler 用实验证明淡水水体中 TN/TP 为 15 时易出现束丝藻水华<sup>[6]</sup>. Smith 认为 TN/TP 不能超过 29, 适宜蓝藻生长的 TN/TP 较低, 为 10~16, 而适宜真核藻类生长的比率为 16~23<sup>[7]</sup>. Reynolds 等根据气囊浮力理论绘制了铜绿微囊藻年生活周期图, 认为蓝藻细胞通过气囊或气囊群调节沉浮在其年生活周期中起着重要的作用<sup>[8]</sup>. Roberts 等则认为蓝藻水华的发生主要是由水温升高引起的<sup>[9]</sup>. 国内对太湖蓝藻水华研究发现, 气温偏高、光照充足以及降水量偏少等是造成太湖蓝藻水华暴发的主要因素<sup>[10-11]</sup>. 孔繁翔等针对大型浅水富营养化湖泊提出了蓝藻水华成因的四阶段理论假说, 即在四季分明、扰动剧烈的长江中下游大型浅水湖泊中, 蓝藻的生长与水华的形成可以分为休眠、复苏、生物量增加(生长)、上浮及聚集 4 个阶段, 每个阶段中蓝藻的生理特性及主导环境影响因子有所不同<sup>[12]</sup>.

神农溪是三峡水库巴东段最大一级支流, 发源于神农架, 自北向南流程 90 多千米, 于巴东县西壤口注入长江. 神农溪是长江三峡旅游线上 5 大景点之一, 现已开发为国家 5A 级景区, 2007 年接待中外游客逾 30 万人次. 同时它也是“引江补汉”工程的源头. 目前关于神农溪水环境的研究较少, 本研究旨在通过调查监测神农溪 2008 年夏季微囊藻水华暴发及消亡期间浮游藻类的种群演替、数量变化以及同期的水体理化指标等, 了解水体的营养状况和微囊藻水华生消过程的基本特征, 探讨水华发生的潜在原因, 鉴此对神农溪水环境的综合治理提供意见和建议.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点设置

采样点共有 7 个, 主要设置在神农溪中下游回水区域, 包括 S1 河口、S2 龙船河、S3 疑无路、S4 燕子阡、S5 绵竹峡、S6 罗坪和 S7 瑶家滩(图 1). 由于 S7 瑶家滩处于回水末端, 属上游自然河道来水, 水温比其它采样点低 5.8~12.0℃, 且水深不足 3 m(三峡大坝水位为 145.8 m 时), 水流较快, 泥沙含量较高, 浊度显著偏大 ( $P < 0.05$ ), 所以在营养盐分析及除趋势典型对应分析(DCCA)时只选取回水区 S1~S6 采样点的数据.

### 1.2 样品的采集、处理及分析

分别于 2008 年 6 月 25 日(三峡大坝水位 145.8 m), 7 月 28 日(三峡大坝水位 145.9 m), 8 月 21 日(三峡大坝水位 145.8 m) 进行采样. 采样后, 现场测定透明度(SD)、气温、水温(WT)、溶解氧(OD)、电导率(Cond)、pH 和浊度(Turb). 定性样品用 25 $\mu$  绢网捞取, 定量样品用 5 L 采水器取水面以下 0.5 m 水样 1.2 L, 用鲁哥氏液现场固定并沉淀浓缩至 30 ml, 在 Olympus BX 41 显微镜下用浮游植物计数框(0.1 ml)计数<sup>[13]</sup>. 藻类种类鉴定参照文献[14].

水体中正磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ )、总磷(TP)、硝氮( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )、总氮(TN)和叶绿素 a 含量(Chl. a)的测定方法参照《水和废水监测分析方法》<sup>[15]</sup>.

### 1.3 数据分析

1.3.1 多样性指数 用 Shannon-Wiener 指数( $H'$ ) 计算浮游植物多样性<sup>[16]</sup>, 公式为:  $H' = -\sum P_i \log_2 P_i$ , 式中,  $P_i = N_i/N$ ,  $N$  为同一样品中的物种总数,  $N_i$  为第  $i$  种的个体数.

1.3.2 营养状态指数 采用 Chl. a、SD 及 TP 指标分析神农溪 6—8 月富营养化时空分布状况, 选用 Carlson 提出<sup>[17]</sup>经 Aizaki 修订<sup>[18]</sup>的营养状态指数(Trophic State Index,  $TSI_M$ )法. 各指标计算公式分别为:

$$TSI_M(\text{Chl. a}) = 10 \times (2.46 + \ln(\text{Chl. a})/\ln 2.5);$$

$$TSI_M(\text{SD}) = 10 \times (2.46 + (3.69 - 1.53 \times \ln(\text{SD}))/\ln 2.5);$$

$$TSI_M(\text{TP}) = 10 \times (2.46 + (6.71 + 1.15 \times \ln(\text{TP}))/\ln 2.5);$$

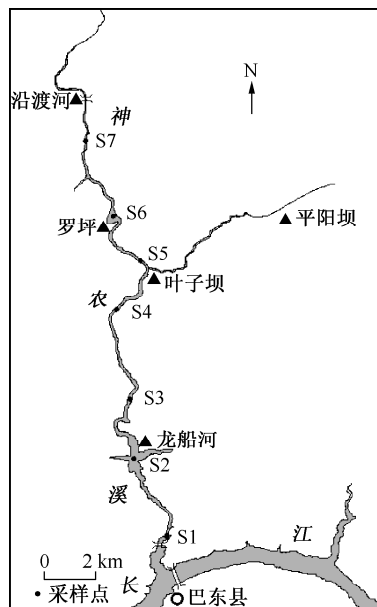


图 1 神农溪采样点设置

Fig. 1 Sampling sites in Shennong River

$$TSM = W(\text{Chl. a}) \times TSI_M(\text{Chl. a}) + W(\text{SD}) \times TSI_M(\text{SD}) + W(\text{TP}) \times TSI_M(\text{TP})$$

式中,  $TSI_M$  为综合营养状态指数,  $W(X)$  为上述三参数的权重, 即  $W(\text{Chl. a}) = 54.0\%$ ,  $W(\text{SD}) = 29.7\%$ ,  $W(\text{TP}) = 16.3\%$ . 评价标准为  $TSI_M < 30$  为贫营养,  $30 \leq TSI_M < 50$  为中营养,  $TSI_M \geq 50$  为富营养<sup>[19-20]</sup>.

1.3.3 除趋势典型对应分析 数据统计分析时使用软件 SPSS 13.0,  $P < 0.05$  时具有显著性. 并利用 Canoco for Windows 4.5 软件对数据进行除趋势典型对应分析(DCCA), 研究神农溪浮游植物群落与环境因子的关系. 分析过程中选择 2nd Polynomials 进行除趋势, 保留 8 个环境因子和 11 属(门)浮游藻类, 对物种数据不进行转换.

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游植物组成与变化

对神农溪 6-8 月各采样点浮游植物进行分析, 结果表明(图 2), 6 月神农溪暴发微囊藻水华, 水华优势种为铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*). S1 河口受长江干流影响, 而 S7 瑶家滩属上游来水, 两者均含较多泥沙、生物量低, 浮游藻类以硅藻为主; 中游 S2~S6 样点微囊藻细胞密度均超过  $10^7$  cells/L, 在总细胞密度中所占比重也均超过 76%. 水华最严重的 S6 罗坪点则达到  $1.8 \times 10^8$  cells/L, 所占比重达 95%. 7 月神农溪优势种仍然是微囊藻, 但其细胞密度有所下降, 仅 S2 龙船河微囊藻细胞密度超过  $10^7$  cells/L; 同时微囊藻所占比重最大也没有超过 57%, 其它藻类如实球藻(*Pandorina*)、小环藻(*Cyclotella*)、隐藻(*Cryptomonas*)等比重有所增加. 8 月神农溪微囊藻显著减少, 其细胞密度不超过  $10^6$  cells/L, 所占比重不足 6%, 藻类优势种变为针杆藻(*Synedra*). 在 6-8 月微囊藻水华从暴发到消退的过程中, 蓝藻(主要是微囊藻)显著减少, 而硅藻逐渐增加, 同时绿藻、隐藻和甲藻均有所增加(图 3), 神农溪的物种多样性也随水华消退逐渐增加, 6-8 月 Shannon-Wiener 指数分别为 0.82、2.11、2.80.

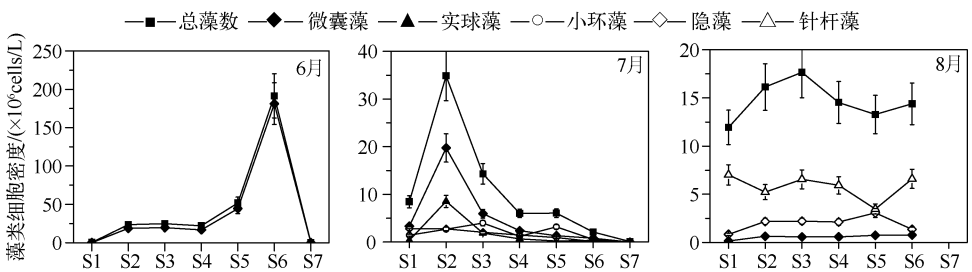


图 2 神农溪 6-8 月各采样点藻类细胞密度变化

Fig. 2 The variations of the density of algae from June to August of each sampling site in Shennong River

### □ 蓝藻门 □ 硅藻门 □ 绿藻门 □ 隐藻门 □ 甲藻门 2.2 营养盐及叶绿素 a 变化

神农溪 6-8 月 TN 浓度月平均值分别为  $2.549 \pm 0.489$ 、 $1.934 \pm 0.162$  和  $2.937 \pm 0.233$  mg/L, TP 浓度月平均值分别为  $0.116 \pm 0.040$ 、 $0.106 \pm 0.019$  和  $0.048 \pm 0.056$  mg/L, TN 和 TP 含量均超过国际公认的富营养化阈值( $TN = 0.2$  mg/L,  $TP = 0.02$  mg/L)<sup>[21]</sup>.

从叶绿素 a 浓度评价标准看, 小于  $3 \mu\text{g/L}$  的水体为贫营养,  $3 \sim 7 \mu\text{g/L}$  为中营养,  $7 \sim 40 \mu\text{g/L}$  为富营养, 大于  $40 \mu\text{g/L}$  为重富营养<sup>[22]</sup>, 而本次采样神农溪 6-8 月 Chl. a 浓度月平均值分别为  $17.54 \pm 13.27$ 、 $11.91 \pm 5.73$  和  $23.60 \pm 4.12 \mu\text{g/L}$ , 除 6 月份 S1 河口样点较低外(图 4), 其它均处于富营养水平. 进一步统计表明: 8 月份 TN 和 Chl. a 浓度较 7 月均显著升高

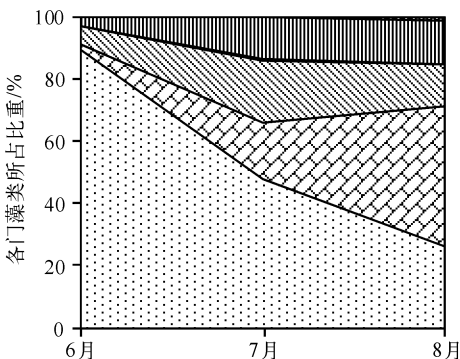


图 3 神农溪 6-8 月各门藻类所占比重

Fig. 3 Phytoplankton compositions from June to August in Shennong River

( $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ ), 而 TP 浓度 6、7 月份无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 到 8 月份则显著下降 ( $P < 0.05$ ), 同时 8 月份  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度较 6 月份也显著下降 ( $P < 0.05$ ).

分析 Chl. a 与 TP 等理化因子相关性发现 (表 1): Chl. a 与 pH、DO 呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 相关系数分别为 0.642 和 0.709. Chl. a 表示浮游植物的生物量, Chl. a 浓度越高藻类生物量越高, 光和作用过程中消耗更多的  $\text{CO}_2$  导致水体 pH 值升高<sup>[23]</sup>, 同时释放出更多的  $\text{O}_2$  使水体中 DO 升高. 另一方面, Chl. a 与 TN 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 生物量的增加使氮富集进而使 TN 增加. 而 WT 在 6—8 月无显著变化, Chl. a 与 WT 的相关性无实际意义.

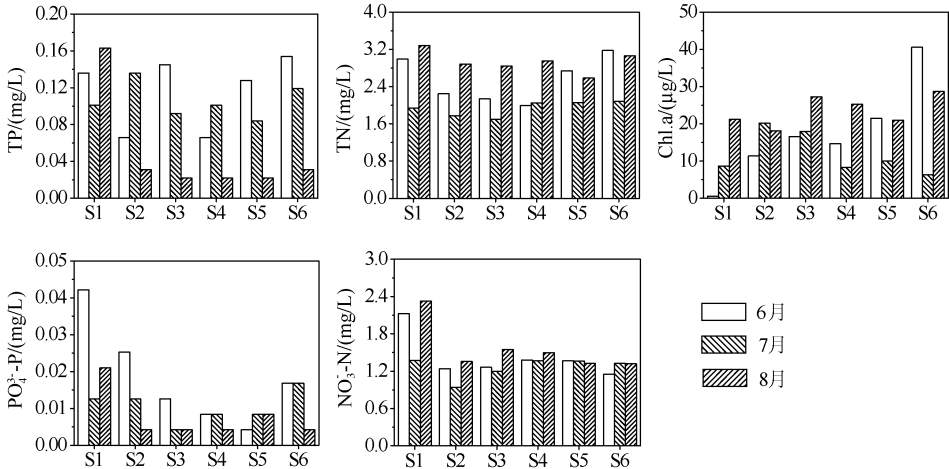


图 4 神农溪 6—8 月 TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和 Chl. a 含量变化

Fig. 4 The variation of concentrations of TP,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ , TN,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  and Chl. a from June to August in Shennong River

表 1 水体各理化因子 Pearson 相关系数

Tab. 1 Pearson correlations among chemical and physical factors

理化因子	Chl. a	TP	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	TN	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	pH	Cond	DO
Chl. a	1							
TP	-0.150	1						
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	-0.450	0.516 *	1					
TN	0.508 *	-0.094	0.164	1				
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	-0.232	0.193	0.511 *	0.558 *	1			
pH	0.642 **	-0.510 *	-0.604 **	0.073	-0.376	1		
Cond	-0.268	0.616 **	0.534 *	-0.107	0.173	-0.299	1	
DO	0.709 **	-0.608 **	-0.492 *	0.421	-0.294	0.761 **	-0.498 *	1
WT	0.538 *	-0.460	-0.237	0.336	-0.313	0.693 **	-0.262	0.906 **

\* 代表  $P < 0.05$ , 显著相关; \*\* 代表  $P < 0.01$ , 极显著相关.

### 2.3 营养状态指数时空变化

根据  $\text{TSI}_M$  法计算神农溪 6—8 月各采样点营养状态指数并进行营养状态分级, 结果表明神农溪总体处于中-富营养状态 (表 2). 上游 S7 瑶家滩样点叶绿素水平较低, 但水体泥沙较多、透明度偏低, 处于中营养状态. 下游 S1 河口样点靠近长江, 6 月份叶绿素较低, 处于中营养状态, 7、8 月份叶绿素含量升高, 呈富营养状

态. 中游 S2 ~ S6 浮游藻类大量生长, Chl. a 浓度较高, 一直处于富营养状态.

表 2  $TSI_M$  的计算结果

Tab. 2 Results of  $TSI_M$

月份	$TSI_M$	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	平均值
6	Chl. a	18.7	51.1	55.3	53.9	58.1	65.0	14.3	54.2
	SD	76.4	57.0	58.1	59.3	60.5	64.9	73.4	62.9
	TP	72.8	63.7	73.6	63.7	72.0	74.4	61.9	69.8
	$TSI_M$	44.7	54.9	59.1	57.1	61.1	66.5	39.6	59.3
	营养分级	中营养	富营养	富营养	富营养	富营养	富营养	富营养	中营养
7	Chl. a	48.2	57.4	56.1	47.7	49.7	44.7	6.7	50.0
	SD	66.6	59.3	59.3	73.4	64.9	64.1	85.0	65.7
	TP	69.1	72.8	67.9	69.1	66.7	71.1	77.5	71.1
	$TSI_M$	57.1	60.5	59.0	58.8	57.0	54.7	41.5	58.1
	营养分级	富营养	富营养	富营养	富营养	富营养	富营养	富营养	中营养
8	Chl. a	57.9	56.2	60.7	59.9	57.8	61.2	—	59.1
	SD	78.2	61.1	64.9	64.9	61.8	64.9	—	65.2
	TP	75.0	54.2	49.9	49.9	49.9	54.2	—	59.8
	$TSI_M$	66.7	57.4	60.2	59.7	57.7	61.2	—	61.0
	营养分级	富营养	富营养	富营养	富营养	富营养	富营养	富营养	—

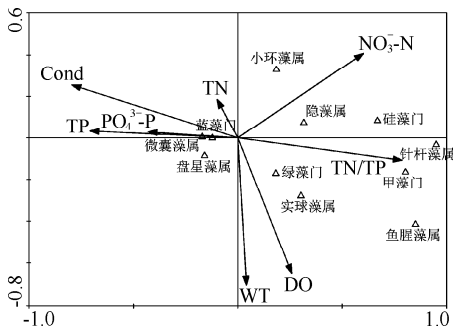


图 5 种群多度与环境因素 DCCA 双轴排序图

Fig. 5 DCCA ordination biplots of species density and environmental variable

## 2.4 DCCA 分析结果

DCCA 排序中总特征值为 0.804, 其中前两个排序轴的特征值分别为 0.548 和 0.042, 分别解释了 68.2% 和 5.2% 的藻类群落变化, 四个排序轴累计解释 77.2% 的藻类群落变化, 排序结果较好地解释了藻类群落与环境因子的关系. 选取的 8 个环境因子中 TP、 $NO_3^-$ -N、TN/TP 和 Cond 与物种第一轴呈显著相关 ( $P < 0.01$ ), 相关系数分别为 -0.704、0.600、0.784 和 -0.790. DO 与 WT 则与物种第二轴呈显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 相关系数分别为 -0.549 和 -0.595.

双轴排序结果表明: 微囊藻的丰度与 TP、 $PO_4^{3-}$ -P 和 Cond 呈正相关 (图 5). 有研究表明, 氮浓度不变时, 铜绿微囊藻对  $PO_4^{3-}$ -P 的蓄积效果与磷浓度呈正相关<sup>[24]</sup>. 针杆藻的丰度则与 TN/TP、 $NO_3^-$ -N 呈正相关. 营养盐 (主要是 TP 和  $NO_3^-$ -N) 的变化影响神农溪浮游藻类群落结构的改变.

## 3 讨论与结论

### 3.1 神农溪微囊藻水华基本特性

本次神农溪微囊藻水华暴发水域面积约 0.2 km<sup>2</sup>, 主要集中在 S6 至 S5 绵竹峡河段, 其中 S6 点最为严重, 是水华的发源地, 向下游微囊藻生物量及比重逐渐减少. 水华优势种是铜绿微囊藻, 其它包括水华微囊藻 (*Microcystis flos-aquae*)、史密斯微囊藻 (*Microcystis smithii*) 和惠氏微囊藻 (*Microcystis wesenbergii*) 等<sup>[25]</sup>. 这与三峡水库其它支流微囊藻水华种类基本相同, 2007 年底大宁河微囊藻水华优势种为水华微囊藻和铜绿微囊藻<sup>[3]</sup>, 2008 年 6 月香溪河暴发的微囊藻水华优势种也是铜绿微囊藻<sup>[4, 26]</sup>. 2008 年夏季神农溪微囊藻水华 6 月下旬暴发, 至 8 月初完全消退, 持续时间约 50 d.

### 3.2 水华暴发的原因

从水体理化指标监测与  $TSI_M$  分析来看,神农溪水体总体处于中-富营养化状态,上游非回水区及河口水体较好,中游回水区河段处于富营养化状态,营养盐、Chl. a 浓度等均严重超标. 研究表明,从铜绿微囊藻生长速率来看,其增加速度较快的 TP 浓度区间为 0.005 ~ 0.2 mg/L, TN 浓度区间为 0.01 ~ 2 mg/L; 从生长量来看,其增加速度较快的 TP 浓度区间为 0.005 ~ 1 mg/L, TN 浓度区间则为 0.01 ~ 10 mg/L<sup>[27]</sup>. 另外,从藻类的种群结构和细胞密度来看,神农溪浮游藻类优势种从蓝藻门的微囊藻变为硅藻门的针杆藻. 依据藻类生物学评价的观点,作为指示生物微囊藻指示的是富营养型水体,而针杆藻指示中-富营养型水体<sup>[28]</sup>. 神农溪富营养化的水体为微囊藻水华的暴发提供了基本营养条件<sup>[29]</sup>. 同时,神农溪处于三峡水库支流回水区,属湖泊型水体<sup>[30]</sup>,汛期除上游 S7 瑶家滩外,回水区河段流速缓慢,水体滞留时间较长,营养稀释扩散速率减缓,加速了营养盐的富集和水体的富营养化. 对室内铜绿微囊藻的研究表明,较缓慢的流速和不剧烈的扰动也为微囊藻的暴发与生长提供了合适的生境<sup>[31-32]</sup>. S6 罗坪点属回水淹没农田区,地势开阔,日照时间较峡谷河段更长,也促使其成为水华最早暴发的区域.

巴东所在的恩施州 1999—2007 年 6 月份平均气温为 24.8℃,平均累计降雨量为 178.6 mm,平均雨日为 15.6 d. 而 2008 年 6 月平均气温为 25.4℃,累计降雨量为 110.6 mm,仅为往年同期的 61.9%,雨日仅有 10 d. 汤溪水库 2003 年 7 月降水量异常偏少,较强的水体稳定性导致蓝藻水华相对往年提前暴发<sup>[33]</sup>,表明降雨对蓝藻水华的暴发具有重要影响. 同时 6 月采样期间神农溪回水区 S2 ~ S6 样点平均水温高达 29.1℃,远高于形成微囊藻水华的适宜温度 26℃<sup>[34]</sup>,也接近室内实验证明的太湖微囊藻的最适生长温度 30 ~ 35℃<sup>[35]</sup>. 气温偏高、降水量偏少和日照充足都为神农溪微囊藻水华的暴发提供了适宜的条件,这与其他学者关于太湖蓝藻水华暴发的气象学研究结果相一致<sup>[10-11]</sup>.

有关三峡水库暴发的微囊藻水华已有许多研究. 曹承进等研究认为三峡水库大宁河 2007 年 12 月至 2008 年 1 月微囊藻水华是由于水华区域流速几乎为零、水域开阔、光照充足,加上磷营养盐含量突然升高、pH 值 8.0 ~ 9.5 等条件均适宜水华优势种蓝藻微囊藻的生长<sup>[2]</sup>. 杨敏关于三峡水库香溪河 2008 年夏季微囊藻水华的研究表明,在具备充分的营养盐基础以及较高水温的前提下,香溪库湾前期较低的 TN/TP 可能是微囊藻复苏的诱导因子,水体较强的稳定性以及较高强度的光照可能是蓝藻水华暴发的关键因子<sup>[4]</sup>. 胡建林关于香溪河上游古洞口二级水库微囊藻水华的调查也表明,水体的富营养化是暴发微囊藻水华的基础<sup>[26]</sup>.

### 3.3 神农溪富营养化及微囊藻水华的防治措施

三峡水库蓄水之后,大部分库湾已呈现富营养化态势,多次暴发以甲藻和硅藻为主的藻类水华<sup>[36]</sup>,而神农溪在 2008 和 2009 年均暴发了不同程度的微囊藻水华,必须采取措施加强对神农溪水体富营养化及微囊藻水华的控制与治理. 1) 采取必要的应急处理. 对突发的微囊藻水华,可以采取人工打捞、机械收集、絮凝剂沉降、植物提取物杀藻等应急措施迅速减少微囊藻生物量,但这些都是治标不治本的方法<sup>[37]</sup>; 2) 加强流域综合治理. 以神农溪小流域为单元,在全面规划的基础上,合理安排旅游、农、林、牧等用地,因地制宜地布设综合治理措施,治理与开发相结合,对流域水土等自然资源进行保护、改良与合理利用<sup>[38]</sup>. 对神农溪而言,沿岸无工业污染,但沿岸乡镇及农村规划较落后,应合理布局城镇结构,增加绿化面积,妥善处理生活污水,避免直排库区. 通过改革沿岸耕作方式以及调整化肥营养元素比例等来减少地表径流污染,对回水淹没的消落区进行固磷固氮等处理,从根本上阻断水体富营养化的源头. 同时,通过建设浮床、人工湿地、投放鲢鳙等生物措施,减少水体中藻类富集,吸收分解水体营养盐,还应合理开发利用神农溪旅游产业,防止过度开发破坏自然资源,做到可持续发展.

致谢:感谢巴东县神农溪风景管理处在采样过程中提供的便利与协助.

## 4 参考文献

- [1] 杨桂山,翁立达,李利锋. 长江保护与发展报告 2007. 武汉:长江出版社,2007:168.
- [2] 曹承进,郑丙辉,张佳磊等. 三峡水库支流大宁河冬、春季水华调查研究. 环境科学, 2009, 30(12):3471-3480.
- [3] 任春坪,钟成华,邓春光等. 三峡库区冬季微囊藻水华探析. 安徽农业科学, 2009, 37(11):5074-5077.
- [4] 杨敏. 三峡水库香溪库湾浮游植物群落动态研究[学位论文]. 武汉:中国科学院水生生物研究所,2010:57.

- [ 5 ] 胡鸿钧. 水华蓝藻生物学. 北京: 科学出版社, 2011: 249-267.
- [ 6 ] Schindler DW. Evolution of phosphorus limitation in lakes(Natural mechanisms compensate for deficiencies of nitrogen and carbon in eutrophied lakes). *Science*, 1977, **195**: 260-262.
- [ 7 ] Smith VH. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Science*, 1983, **221**(4611): 669-671.
- [ 8 ] Reynolds CS, Jaworski GHM, Cmiech HA *et al.* On the annual cycle of the blue-green algae *Microcystis aeruginosa* Kutz, emend Elenkin. Philosophical transactions of planktonic algae. *J Phycol*, 1981, **16**: 486-489.
- [ 9 ] Robarts RD, Zohary T. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1987, **21**: 391-399.
- [ 10 ] 任 健, 蒋名淑, 商兆堂等. 太湖蓝藻暴发的气象条件研究. 气象科学, 2008, **28**(2): 221-226.
- [ 11 ] 高龙华, 谢 龙. 太湖蓝藻暴发的气象条件影响及其治理措施. 中国资源综合利用, 2011, **29**(9): 35-38.
- [ 12 ] 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. 生态学报, 2005, **25**(3): 589-595.
- [ 13 ] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.
- [ 14 ] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统, 分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.
- [ 15 ] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法;第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [ 16 ] Shannon CE, Wiener W. The mathematical theory of communication. Illinois: University of Illinois Press, 1963.
- [ 17 ] Carlson RE. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 1977, **22**(2): 361-369.
- [ 18 ] Aizaki M. Application of modified Carlson's trophic state index to Japanese lakes and its relationships to other parameters related to trophic state. *Research Report of National Institute of Environmental Study*, 1981, (23): 13-31.
- [ 19 ] 蔡庆华. 湖泊富营养化综合评价方法. 湖泊科学, 1997, **9**(1): 89-94.
- [ 20 ] Cai QH, Liu JK, King L. A comprehensive model for assessing lake eutrophication. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(12): 1674-1678.
- [ 21 ] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1999.
- [ 22 ] Claude DB, Candfield DE, Bachmann RW. Seasonal patterns of chlorophyll, nutrient concentrations and secchi disk transparency in Florida Lakes. *Lake and Reserv Mannag*, 1998, **14**: 60-76.
- [ 23 ] Shapiro J. Current beliefs regarding dominance by blue-greens: The case for the importance of CO<sub>2</sub> and pH. *International Vereinigung fuer Theoretische und Angewandte Limnologie*, 1990, **24**(1): 38-54.
- [ 24 ] 张胜花, 葛芳杰, 王红强等. 不同氮磷营养条件下铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)对正磷酸盐的蓄积效果. 长江流域资源与环境, 2008, **17**(6): 909-914.
- [ 25 ] 虞功亮, 宋立荣, 李仁辉. 中国淡水微囊藻属常见种类的分类学讨论——以滇池为例. 植物分类学报, 2007, **45**: 1-15.
- [ 26 ] 胡建林. 三峡水库浮游植物群落研究[学位论文]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2010.
- [ 27 ] 郑朔方, 杨苏文, 金相灿. 铜绿微囊藻生长的营养动力学. 环境科学, 2005, **26**(2): 152-156.
- [ 28 ] 况琪军, 马沛明, 胡征宇等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展. 安全与环境学报, 2005, **5**(2): 87-91.
- [ 29 ] Steiberg CEW, Hartmann HM. Planktonic bloom forming cyanobacteria and the eutrophication of lake and rivers. *Freshwater Biology*, 1988, **20**: 279-287.
- [ 30 ] 《三峡水库水环境质量评价技术规范》编制组. 《三峡水库水环境质量评价技术规范(试行)》(征求意见稿)编制说明. 2011, 4.
- [ 31 ] 高月香, 张毅敏, 张永春. 流速对太湖铜绿微囊藻生长的影响. 生态与农村环境学报, 2007, **23**(2): 57-60, 88.
- [ 32 ] 金相灿, 李兆春, 郑朔方等. 铜绿微囊藻生长特性研究. 环境科学研究, 2004, **17**(增刊): 52-54, 61.
- [ 33 ] 赵孟绪, 韩博平. 汤溪水库蓝藻水华发生的影响因子分析. 生态学报, 2005, **25**(7): 1554-1561.
- [ 34 ] 华锦彪, 宗志祥. 洋河水库“水华”发生的实验研究. 北京大学学报: 自然科学版, 1994, **30**: 476-484.
- [ 35 ] 陈宇炜, 高锡云. 西太湖北部微囊藻时空分布及其与光温等环境因子关系的研究. 见: 蔡启铭编. 太湖环境生态研究(一). 北京: 气象出版社, 1998:142-148.
- [ 36 ] 蔡庆华, 胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 7-11.
- [ 37 ] 马国红, 杜兴华. 除藻技术应用现状及发展. 渔业现代化, 2007, **34**(4): 25-27.
- [ 38 ] 王礼先. 小流域综合治理的概念与原则. 中国水土保持, 2006, (2): 16-17.