



三峡水库神农溪 2014 年春季浮游藻类演替成因分析

徐慧¹, 龙良红¹, 纪道斌^{1*}, 刘德富², 宋林旭¹, 崔玉洁¹, 苏青青¹, 黄亚男¹, 吴庆¹

¹ 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002

² 湖北工业大学河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068

摘要:【目的】研究三峡水库神农溪库湾春季水华期间浮游藻类演替及其成因分析。【方法】2014 年 3–5 月在神农溪库湾布置了 6 个断面(SN01–SN06), 在神农溪汇入长江干流河口附近水域设置 1 个断面 CJBD, 对浮游藻类、相关环境因子及水动力因子进行了同步监测, 据此分析了水体层化结构及水动力特性。

【结果】神农溪在监测时段内共检测到浮游藻类 6 门 38 种(属); 库湾浮游藻类生物量时间上差异显著(ANOVA, $P < 0.05$)。春季浮游藻类群落结构具有明显的演替规律, 3 月份暴发大面积的硅藻水华(藻密度 $> 100 \times 10^5$ cells/L), 小环藻(*Cyclotella* spp.)为优势藻种; 4 月在 SN02–SN06 暴发以小球藻(*Chlorella* spp.)为主要优势种、衣藻(*Chlamydomonas* spp.)为次优势种的绿藻水华(藻密度 $> 100 \times 10^5$ cells/L), 5 月份受水位大幅消落影响, 浮游藻类生物量降低且无明显优势藻种。【结论】在具备充足的营养盐的水体中, 水体层化结构与水动力特性对浮游藻类演替影响重大。三峡水库水位处于快速消落阶段时, 流速成为抑制神农溪库湾藻类生长的主要因素。

关键词: 三峡水库, 神农溪库湾, 浮游藻类, 环境因子, 水体分层, 水动力

三峡库区的蓄水, 较大程度上改变了原有河流的生境条件, 河流连续体^[1]遭到破坏, 原河流生态系统逐渐演变为水库生态系统, 在许多库湾出现了水体富营养化及水华问题^[2–4]。神农溪系三峡库区典型支流之一, 同时是南水北调中线一期引江补汉工程的源头, 其水质好坏不仅关系到周边

居民的供水安全和三峡库区的生态环境, 同时也对改善汉江中下游生态环境状况具有重大战略意义。受水库干流顶托作用^[5], 神农溪流速变缓, 水体滞留时间变长^[6], 水温出现分层^[7], 透明度增加, 致使库湾水华频繁发生^[8], 2008 年夏季神农溪库湾暴发的铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)显示

基金项目: 国家“973 项目”(2014CB460601); 国家科技合作与交流专项(2014DFE70070); 国家自然科学基金青年基金(51509086); 水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07104-005-01, 2014ZX07104-005-02)

*通信作者。Tel: +86-717-6392318; E-mail: dbji01101@163.com

收稿日期: 2016-06-23; 修回日期: 2016-09-29; 网络出版日期: 2016-11-04

优势藻种有从河流型向湖泊型转变的趋势^[4]。水华对当地人民日常生活、工农业用水造成严重的负面影响。2013年作为三峡水库湖北段第二大支流被列入三峡水库生态环境监测十大重点支流。然而，目前关于神农溪水华藻类方面的研究甚少，仅有研究关注了神农溪倒灌异重流特性及其对营养盐分布的影响^[9]。因此，本研究于2014年3–5月在神农溪布点对水温、流速、营养盐及藻生物量等进行了监测，分析影响藻类生长的环境因子，探讨春季浮游藻类演替规律及原因，以期对神农溪库湾水环境演化规律和水华防控提供参考。

1 材料和方法

1.1 采样点分布

神农溪是湖北巴东长江北岸的一级支流，发源于神农架的南坡，自北向南在巫峡口以东2.0 km处汇入长江，全长60.6 km，流域面积1031.5 km²。根据神农溪的地形地貌特征，于2014年3–5月，

从神农溪河口到沿渡河镇石喊山村之间共设6个监测点，依次记SN01–SN06，在与神农溪交汇的水库干流布设1个监测点，记为CJBD(图1)。

1.2 监测指标与方法

本研究监测时间为2014年春季的3月20日、4月13日、5月27日。主要监测指标为总氮(TN)、总磷(TP)、溶解性硅酸盐(D-Si)浓度、浮游藻类密度和种类、水位、水深、水温、光照强度、流速和透明度等。

在各监测点用采水器取350 mL表层水2瓶，储存于洁净的聚乙烯瓶中。其中1瓶加酸至pH值小于2，于室内实验室测定TN、TP浓度；另1瓶经电动抽滤机用醋酸纤维滤膜(孔径0.45 μm)抽滤，抽滤后的水样用于测定D-Si浓度，测试中均设2组平行样重复测试。TN、TP和D-Si浓度测定方法参照《水和废水监测分析方法》^[10]；水位从中国长江三峡集团公司网站(<http://www.ctg.com.cn/inc/sqsk.php>)获取；光照强度由水下光量子测量

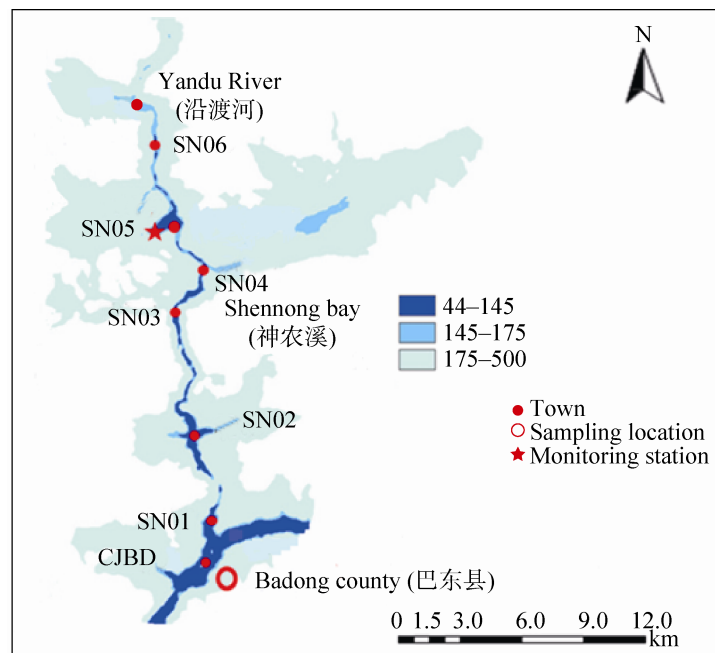


图1. 采样点位布置

Figure 1. Sampling location.

记录仪(LI-1400, 美国)测得, 水深、水温由 Hydrolab DS5-44783 多参数水质监测仪(美国)分层测定, 沿垂向每 1 m 监测一组数据, 水深、水温精度分别为 ± 0.1 m、 ± 0.10 °C; 流速采用 Vector 三维点式流速仪 6 MHz Vector ADV(Acoustic Doppler Vector) (Nortek AS, 挪威)现场测定, 可监测采样点沿 E、N 及沿水深方向的流速大小, 沿垂向每 1 m 监测一组数据, 测量可选范围为 0.01–7.00 m/s; 透明度采用塞氏盘法现场测定。用 PVC 塑料瓶取 1 瓶 200 mL 表层水样, 加鲁哥试剂固定, 带回实验室沉降浓缩至 100 mL, 在显微镜(10×40 倍)下对浮游藻类细胞进行计数, 藻类鉴定参照《湖泊生态调查观测与分析》^[11]和《中国淡水藻类: 系统、分类及生态》^[12]。

1.3 数据处理

对每月各监测指标数据取平均值进行分析。采用 SPSS 20 软件对浮游藻密度、10 m 内的流速进行相关性分析, 以 Pearson 相关系数和 Kendall 秩相关系数来评价混合层内流速 V 对藻密度的影响。

真光层深度(Z_{eu})是浮游藻类生长光学环境的重要指标之一, 本研究将采用透明度的 2.7 倍来计算 Z_{eu} ^[13]。混合层深度(Z_{mix})反映了水体垂向紊动的混合条件, 本研究采用与表层水温相差不大于 0.2 °C 的深度范围^[13]。

水体稳定系数($RWCS$, S_{RWC})是表征水体垂向混合程度及水体分层状态的参数^[14], 计算参照公式(1)。

$$S_{RWC} = \frac{\rho_b - \rho_s}{\rho_4 - \rho_5} \quad \text{公式(1)}$$

其中, ρ_b 是底部水体密度, ρ_s 是表面水体密度, ρ_4 、 ρ_5 是纯水分别在 4 °C 和 5 °C 时的水体密度。忽略水体中泥沙对水体密度的影响, 根据

Lawson 等^[15]的公式(2)计算不同水温(T)对应的水体密度(ρ_T)。

$$\rho_T = 1000 \times \left[1 - \frac{T + 288.9414}{508929.2 \times (T + 68.12963)} \times (T - 3.9863)^2 \right] \quad \text{公式(2)}$$

2 结果和分析

2.1 浮游藻类结构分布

群落结构是指群落中所有生物及其个体在空间和时间上的分布状态^[16]。在水华敏感期的 3–5 月份, 3 次采样共镜检出浮游藻类 6 门 38 种(属), 其中以绿藻门(Chlorophyta)和硅藻门(Bacillariophyta)种类最多, 分别为 18 种(属)和 8 种(属), 其次是蓝藻门(Cyanophyta) 5 种(属)、甲藻门(Dinophyta) 4 种(属)、裸藻门(Euglenophyta) 2 种(属)、隐藻门(Cryptophyta) 1 种(属)。具体浮游藻类的种类组成及代码见表 1。

由图 2 可知, 3 月份神农溪库湾浮游藻类总密度为 94.5×10^5 – 716.8×10^5 cells/L, SN02–SN04 浮游藻类总密度为 322.756×10^5 – 415.558×10^5 cells/L, SN05 和 SN06 浮游藻类总密度超过 600×10^5 cells/L, 均超过水华暴发临界值 100×10^5 cells/L^[17]。从空间上来看, 硅藻门(Bacillariophyta)生物量最高, 占浮游藻类总生物量的 81.2%, 且以小环藻(*Cyclotella* spp., A1)为优势藻, 出现于每一断面, 其藻密度以 SN02、SN05 和 SN06 居多; 其次是小球藻(*Chlorella* spp., C1)为次优势藻, 占绿藻门(Chlorophyta)的 56.8%。3 月份浮游藻类密度空间上差异性较大, SN02–SN06 暴发大面积硅藻水华, 其中 SN05–SN06 水华情势最为严重。

4 月份神农溪库湾浮游藻类总密度为 101.7×10^5 – 345.4×10^5 cells/L, 从河口至上游逐渐递

表 1. 浮游藻类的种类及代码

Table 1. Codes of phytoplankton species

Name	Serial number	Name	Serial number	Name	Serial number
Bacillariophyta	A	Chlorophyta	C	<i>Westella</i> spp.	C15
<i>Cyclotella</i> spp.	A1	<i>Chlorella</i> spp.	C1	<i>Tetraspora</i> spp.	C16
<i>Melosiro</i> spp.	A2	<i>Chlamydomona</i> spp.	C2	<i>Acanthosphaera</i> spp.	C17
<i>Synedra</i> spp.	A3	<i>Actinastrum</i> spp.	C3	<i>Sphaerocystis</i> spp.	C18
<i>Fragilaria</i> spp.	A4	<i>Scenedesmus</i> spp.	C4	Cryptophyta	D
<i>Navicula</i> spp.	A5	<i>Ankistrodesmus</i> spp.	C5	<i>Cryptomonas</i> spp.	D1
<i>Nitzschia</i> spp.	A6	<i>Kirchneriella</i> spp.	C6	Euglenophyta	E
<i>Eunotia</i> spp.	A7	<i>Selenastrum</i> spp.	C7	<i>Euglena</i> spp.	E1
<i>Meridion</i> spp.	A8	<i>Eudorina</i> spp.	C8	<i>Lepocinclis</i> spp.	E2
Cyanophyta	B	<i>Cosmarium</i> spp.	C9	Dinophyta	F
<i>Oscillatoria</i> spp.	B1	<i>Nephrocytiu</i> spp.	C10	<i>Ceratium</i> spp.	F1
<i>Phormidium</i> spp.	B2	<i>Tetraedrom</i> spp.	C11	<i>Peridinium</i> spp.	F2
<i>Chroococcus</i> spp.	B3	<i>Closterium</i> spp.	C12	<i>Peridiniopsis</i> spp.	F3
<i>Microcystis</i> spp.	B4	<i>Coelastrum</i> spp.	C13	<i>Glenodinium</i> spp.	F4
<i>Anabaena</i> spp.	B5	<i>Pandorina</i> spp.	C14		

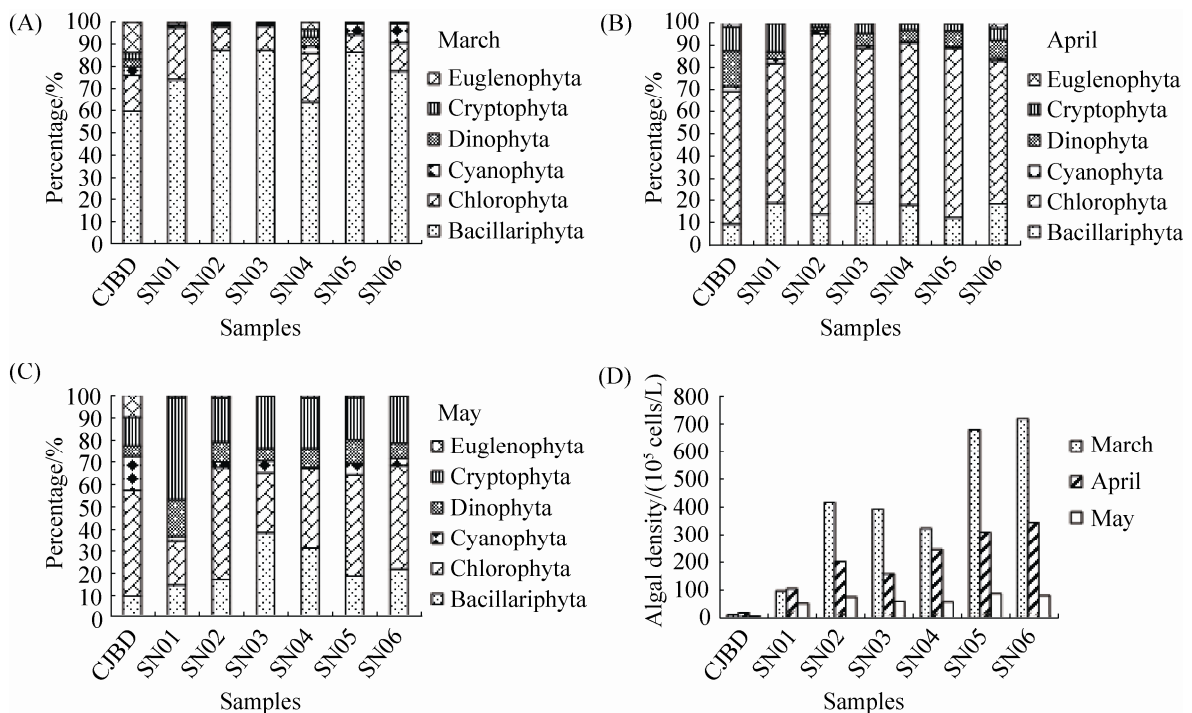


图 2. 2014 年 3-5 月神农溪库浮游藻类组分(A, B, C)及其时空分布(D)

Figure 2. Spatial and temporal distribution of planktonic algae (D) and its component in Shennong bay in March (A), April (B) and May (C) in 2014.

增。总体上,绿藻门(Chlorophyta)分布总类最多,生物量最大,最高占总密度的 71.9%,且以小球藻(*Chlorella* spp., C1)为优势藻,其藻密度在以 SN02、SN04–SN06 断面居多;其次是衣藻(*Chlamydomonas* spp., C2)为次优势藻,在 SN05 和 SN06 断面较多;4 月份浮游藻类较 3 月发生显著改变,由硅藻门(Bacillariophyta)向绿藻门(Chlorophyta)演变,优势藻种由小环藻(*Cyclotella* spp., A1)向小球藻(*Chlorella* spp., C1)过渡,衣藻(*Chlamydomonas* spp., C2)数量也显著增加(ANOVA, $P < 0.05$)。4 月份各断面藻类密度较 3 月份有明显降低,但仍大于水华暴发临界值 100×10^5 cells/L,水华情势严重。

5 月份库湾浮游藻类总密度为 42.6×10^5 – 78.1×10^5 cells/L,库湾各断面之间的差异性较小。由图 2 可知,整体来看绿藻门(Chlorophyta) (43.2%)仍占优,与 4 月相比生物量进一步降低;5 月份神农溪库湾无明显优势藻种,硅藻门(Bacillariophyta) (25.0%)和隐藻门(Cryptophyta) (26.4%)生物量相差不大。5 月份浮游藻类密度较之前显著降低(ANOVA, $P < 0.05$),水华情势逐渐降低。

总体来看,2014 年春季干流 CJBD 总浮游藻类

密度较小,变化范围是 7.01×10^5 – 17.49×10^5 cells/L,而神农溪库湾春季水华敏感期浮游藻类演变规律明显,由硅藻水华向绿藻水华演变,5 月底水华情势得到缓解,生物量逐渐降低至临界值以下。

2.2 水环境分布特征

2.2.1 水位:本研究中水位采用巴东大量程水位,采样期间水位变化如图 3 所示。根据三峡水库水情实况,将 2014 年汛前消落期按水位日变幅及变化趋势分为 3 个阶段,本研究的 3 次采样分别在这 3 个阶段进行。第 I 阶段水位下降较慢,水位持续下降至 3 月 28 日的 160.86 m,日变幅 -0.25 – 0.04 m,平均日变幅 -0.10 m;第 II 阶段 3 月 29 日至 4 月 28 日,水位从 160.86 m 变化至 163.07 m,日变幅 -0.26 – 0.61 m,平均日变幅 0.07 m,期间出现多次小幅波动;第 III 阶段从 4 月 29 日至汛期水位持续下降,从 163.07 m 下降至 149.34 m,日降幅 0.03 – 0.61 m,平均日变幅 -0.42 m,库湾水位下降较大。

2.2.2 水温:水温是藻类生长的重要影响因子,直接影响藻类进行光合作用及营养物质运输和转换的酶系统活性,对光合作用能力、呼吸速率和生

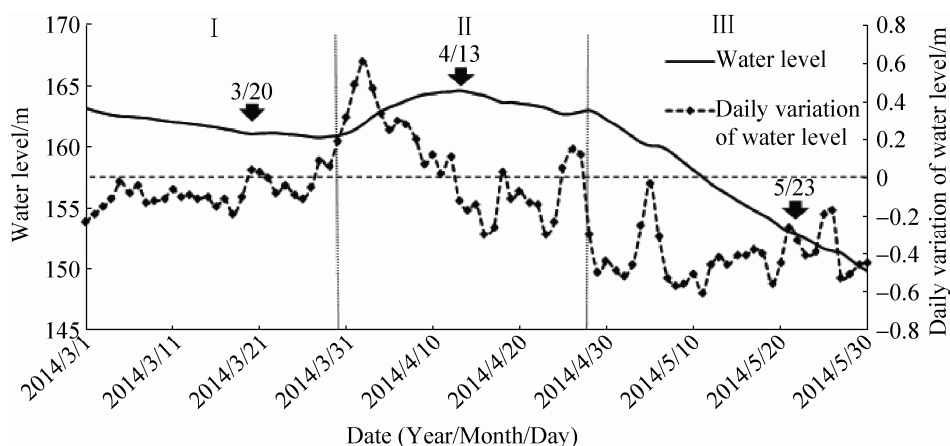


图 3. 2014 年 3–5 月神农溪水位变化特征

Figure 3. Variation of water level in Shennong bay in March, April and May in 2014.

长率都有重要作用^[18]。水温的变化不仅会影响藻类的生长，还会导致藻类的演替^[19-20]。如图 4 所示，由于支流河口处(SN01)受长江干流影响较大，中上层水体垂向掺混均匀，水体无明显变化，水深 60 m 以下存在低温水体。春季库湾表层水体几乎没有混合层，斜温层深度在 10 m 左右；在中下层水体，水温变化相对较小、比较均匀；表底温差相对较大，这说明在春季神农溪库湾已经出现了显著的水温分层。另外，随时间的推移，春季气温逐渐升高，导致表层水温也逐渐升高，适合藻类的生长；3 月表层水温为 12.63–16.05 °C，库湾底层水体温度较中层高，水温结构极不稳定；4 月表层水温为 15.41–20.51 °C，表底温差最大达 8.10 °C，水温分层极为明显；5 月表层水温为 19.87–21.61 °C，表底温差有所减小。从空间上看，3 月神农溪库湾上游来水水温较低，导致 SN03–SN06 这段表层水温逐渐降低，而干流(CJBD)、河口处(SN01)及 SN02 水体掺混较剧烈，则表层水温较低；4 月和 5 月神农溪库湾表层水温从河口到上游逐渐升高，但是除了 4 月 CJBD、

SN01 表层水温较低，其余样点水温变化较为平稳。

2.2.3 流速：水动力是影响浮游植物生长的重要因素，一方面水体扰动能够使底泥再悬浮促进营养盐释放；另一方面，扰动能影响浮游藻类在水体中的位置而决定其生长条件^[17]。其中流速是影响藻类生长的关键动力学因子^[21-22]。神农溪库湾流速分布如图 5 所示，监测结果显示，春季神农溪库湾均存在倒灌异重流现象；随着水位的缓慢消落，3 月 20 日长江干流水体从河口由中层 20–50 m 倒灌潜入神农溪库湾，然后逐渐向上游延伸至 13 km 处；由于上游低温来水和河水之间的温差作用，上游来流的低温水潜入库湾下层，以底部异重流的形式向干流运动，最大流速发生在 SN03 水深 11 m 处为 0.234 m/s。4 月份倒灌异重流潜入深度有所上移，4 月 13 日表现为中上层倒灌，河口最大潜入深度 45 m，异重流强度有所增加，影响范围向上游延伸至(SN05)16 km 处，表层水体流速较低在 0.010 m/s，上游水体从底层流向河口，最大流速发生在河口附近底层 70 m 处，流

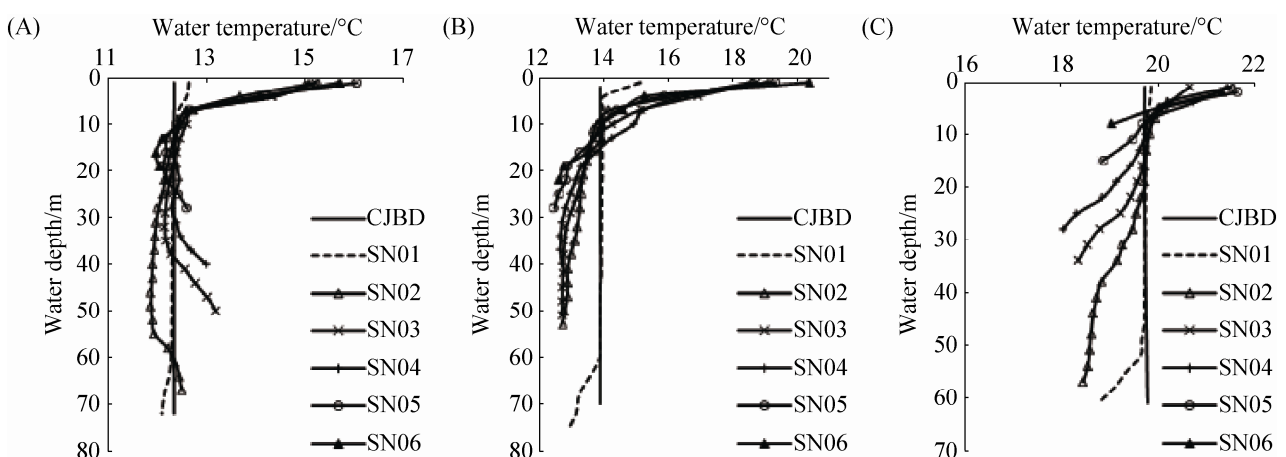


图 4. 2014 年 3–5 月神农溪库湾水体水温时空变化特征

Figure 4. Characteristics of spatial and temporal variation of water temperature in Shennong bay in March (A), April (B) and May (C) in 2014.

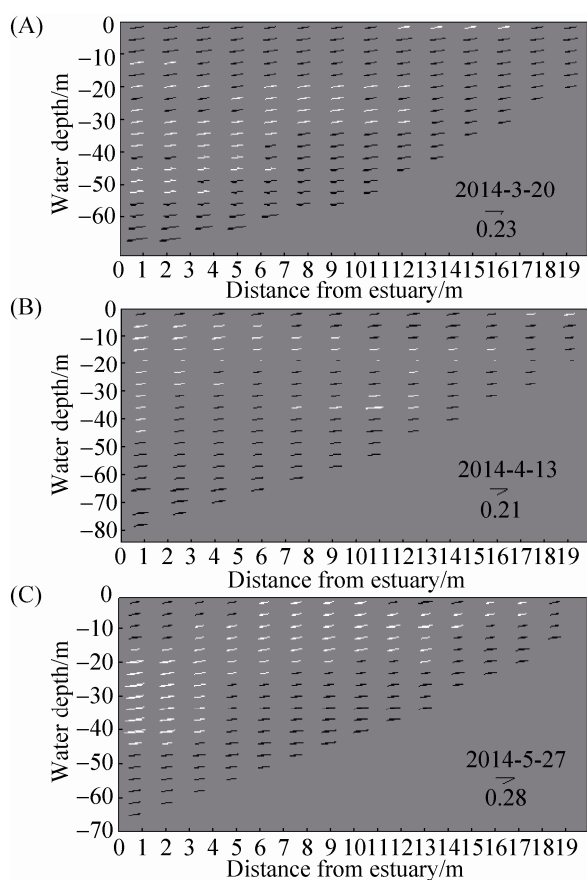


图5. 2014年3-5月神农溪库湾水体流速时空变化特征
Figure 5. Characteristics of spatial and temporal variation of water velocity in Shennong bay in March (A), April (B) and May (C) in 2014. Direction water flowed into tributaries is the positive. On the contrary, negative. The white arrows show the positive flow velocity, the black show the negative.

速达到 0.242 m/s, 整个库湾水体分层显现明显, 表中底 3 层水体分界明显。进入 5 月表现为中上层倒灌, 最大潜入流速达 0.281 m/s, 潜入水体逐渐向表层延伸, 神农溪中上游表层水体均表现为逆向流动。

2.2.4 营养盐: 氮、磷、硅营养盐是藻类进行光合作用所消耗的主要营养盐, 它们在水体中的含量变动直接影响藻类的生长状况, 是评价水体富营养化的重要指标^[23]。监测点表层的 TN、TP、D-Si 浓度如图 6 所示, 从神农溪库湾下游到上游, TN、TP、D-Si 浓度均呈逐渐减小的趋势, 但是由于 SN04 和 SN05 的硅藻浓度有所降低, D-Si 浓度在 3 月有所回升。3、4、5 月 CJBD 和 SN01-SN06 的 TN 浓度变化范围为 1.065-2.598 mg/L, TP 浓度变化范围为 0.011-0.194 mg/L, D-Si 浓度变化范围为 0.913-7.819 mg/L, 可见 TN 浓度波动不大, 而 TP 和 D-Si 浓度受藻生物量影响波动较大。另外, 4 月 SN04-SN06 的 TP 含量分别为 0.015、0.011、0.011 mg/L, 不利于藻类生长; 其余监测点这 3 个月以来 TN 和 TP 含量均大于富营养化阈值 (TN 浓度为 0.2 mg/L, TP 浓度为 0.02 mg/L)^[24], 所以营养盐对研究区藻类的生长几乎不构成限制。

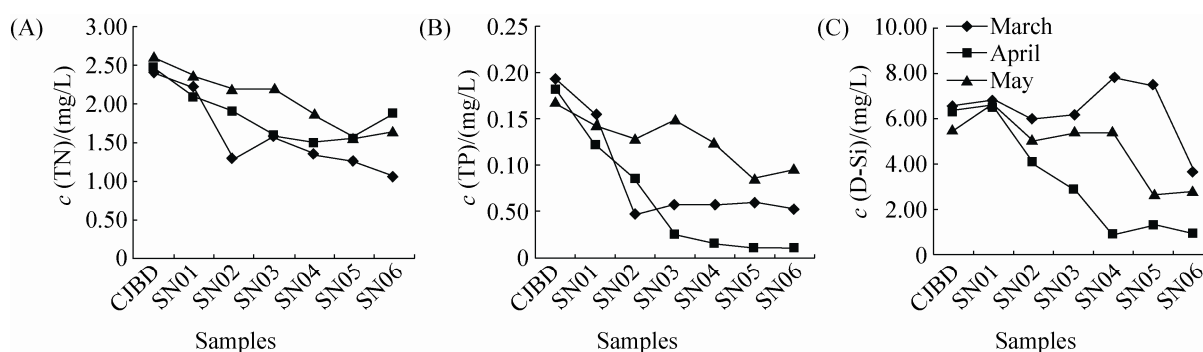


图6. 2014年3-5月神农溪库湾水体 TN (A)、TP (B)和 D-Si (C)浓度时空变化特征

Figure 6. Characteristics of spatial and temporal variation of TN (A), TP (B) and D-Si (C) in Shennong bay in March, April and May in 2014.

3 讨论

3.1 水体层化结构形成机制

水体稳定系数用来表征水体垂向掺混程度，水体稳定系数越大，水体垂向越稳定，越易形成分层水体；水体稳定系数越小，越易形成混合水体^[25]。如表 2 所示，从干流到库湾上游，水体稳定系数[由公式(1)和(2)计算所得]呈逐渐增大的趋势。2014 年的 3–5 月从干流到上游水体稳定系数变化范围分别为 0–61.436、1.418–150.158、0.251–131.460，最大值均出现在 SN06。结合图 4 发现，3 月库湾水体稳定度最小，处于弱分层状态，4 月库湾水体呈较强的分层状态，5 月次之。而干流水体掺混剧烈，水体稳定系数最小，不分层。

三峡水库支流库湾水体分层结构与其特殊的水动力背景关系密切，在三峡水库干流水体以不同形式潜入支流库湾时，由于潜入水体在垂向上温度梯度很小，分层异重流可以增大水体垂向混合程度，打破库湾原有的水温垂向分层结构，使库湾垂向水温呈现独特的分布状态^[26]。结合图 4 和图 5 可知，3 月神农溪库湾水体河口处呈现出中层倒灌模式，库湾上游水体分别从表层、底层流

入长江干流，由于库湾水温处于升温初期，库湾垂向水温处于弱分层，温跃层^[27]厚度约为 8 m，温差为 3.42 °C；4 月监测结果表明长江干流水体从中上层倒灌潜入库湾，从底层汇入干流，同时水位波动较小，表层(0–5 m)水体长期处于稳定状态，加上水温的迅速回升，库湾水体处于强分层状态；5 月受水位快速下降的影响，倒灌水体的潜入深度有所上移，SN03 以上断面倒灌水体上移至表层，使得表层水体流速显著增加，水温分层相对减弱。整个春季库湾上游来流水温远低于回水区水温，以底部异重流形式流入库湾，虽然水体较浅，但表底温差较大，水体分层强；库湾中游水温分层的强弱与干流水体倒灌强弱、潜入深度和影响范围关系密切；库湾下游河口处由于长期与干流水体有频繁的交流过程，因此水体处于长期混合水体或弱分层型。

真光层(Z_{eu})的大小直接影响水中浮游植物生物量、种群分布和群落演替过程，是浮游植物生长光学环境的重要指标之一^[28]。混合层深度(Z_{mix})反映了水体垂向紊动的混合条件。如表 2 所示，2014 年 3–5 月库湾 Z_{eu} 变化范围分别为 3.47–10.65 m、2.68–13.02 m 和 5.94–11.32 m； Z_{mix} 变化范围分别为 2–7 m、1–2 m 和 1–4 m；干流由于上下掺混剧

表 2. 水体稳定度系数、混合层深度和真光层深度时空分布特征

Table 2. Characteristics of spatial and temporal distribution of S_{RWC} (water stability coefficient), Z_{mix} (depth of mixing layer) and Z_{eu} (depth of euphotic layer)

Samples	March			April			May		
	S_{RWC}	Z_{mix}	Z_{eu}	S_{RWC}	Z_{mix}	Z_{eu}	S_{RWC}	Z_{mix}	Z_{eu}
CJBD	0	72	9.89	1.42	75	10.39	0.25	62	7.10
SN01	8.07	7	9.52	30.20	5	11.45	27.32	4	9.08
SN02	46.53	3	5.16	113.63	3	13.02	84.01	2	9.82
SN03	33.36	4	6.54	120.97	2	4.92	58.13	3	11.32
SN04	28.15	4	10.65	131.14	1	4.07	91.56	2	11.31
SN05	60.63	3	4.57	144.07	1	3.37	123.14	1	7.33
SN06	61.44	4	3.47	150.16	1	2.68	131.46	1	5.94

烈, Z_{mix} 接近水体深度, Z_{eu} 相对很小, 水体呈完全混合状态, 上下掺混水体所携带的藻类进入真光层以下无法接受充足的光照, 生长受到抑制, 与 3 次实测 CJBD 断面的浮游藻类生物量较低 ($7.01 \times 10^5 - 17.49 \times 10^5$ cells/L) 相一致。研究^[29]表明, 对于呈现分层状态的水体, 若 $Z_{\text{eu}} > Z_{\text{mix}}$, 藻类会迅速繁殖, 水华暴发风险较大; 若 $Z_{\text{eu}} < Z_{\text{mix}}$, 混合层内的藻类受到光照的限制, 藻类生长率降低, 从而水华消失。

3.2 水体层化结构对藻类生长的影响

一般认为较高的营养盐水平、适宜的气象与水文条件是水华发生的必要因子。然而浮游藻类种类繁多, 不同状态的水体中将分布着不同的浮游藻类群落^[30], 从采样结果来看, 长江巴东、神农溪库湾的 TN、TP 含量均大于富营养化阈值, 能够为浮游藻类的生长提供充足的营养盐。从图 4 可以看出, 春季神农溪库湾水温持续上升, 由 12.63°C 升高至 21.61°C , 在浮游藻类最适生长温度范围内。从 3 次采样结果来看, 2014 年神农溪春季浮游植物群落结构具有明显的演替规律, 3 月份暴发大面积的硅藻水华、4 月绿藻门(Chlorophyta) 占主要优势, 5 月份浮游植物生物量降低且无明显优势藻种。研究表明, 水体层化结构的差异对表层水体的浮游植物生长存在影响, 由于硅藻个体密度一般大于水体密度^[31]且不具有鞭毛, 完全依靠水流作用保持悬浮状态^[32], 依靠水体扰动来减缓其下沉趋势^[33], 因此, 硅藻适宜在弱分层水体中生长。3 月份库湾表层水温在 15°C (硅藻最适生长温度^[34]为 $13-25^\circ\text{C}$) 左右, Z_{mix} 相对较深(2-7 m), 水体垂向紊动混合均匀, 水温结构处于弱分层状态, 结合图 3, 水位日变幅相对较低, 较大范围内的硅藻可以通过水体扰动悬浮在水面, 接收光照

并逐渐成为优势藻种, 大量繁殖, 暴发硅藻水华。4 月库湾表层水温整体上升 $3-4^\circ\text{C}$, Z_{mix} 相对变浅(1-2 m), 水体稳定系数增大, 库湾水体处于强分层状态, 硅藻个体密度较大, 垂向紊动范围的减小使得硅藻不能抵抗重力作用, 沉降到 Z_{mix} 以下, 加上溶解性硅酸盐含量显著降低制约硅藻生长, 因此硅藻逐渐消退。研究发现, 绿藻门中衣藻(*Chlamydomonas* spp., C2) 和小球藻(*Chlorella* spp., C1) 适宜生长在营养丰富、分层明显的浅混合层水体中, 从图 2 的统计结果来看, 随着硅藻的消退, 绿藻门生物量显著增加, 在水温升高、水体稳定系数增大、 Z_{mix} 减小、竞争对手硅藻消退的共同影响下, 绿藻门中小球藻(*Chlorella* spp., C1) 逐渐成为新的优势藻种, 衣藻(*Chlamydomonas* spp., C2) 成为次优势藻种。

3.3 水动力特性对藻类生长的影响

大量研究表明三峡水库支流库湾富营养化, 主要是由于水库蓄水后, 其水环境条件尤其是水动力条件发生显著变化^[26]。水动力条件能直接作用于水华藻类细胞^[34], 同时改变水体环境及营养盐的状况。流速是表征水动力条件最基本、最直观的因子, 不仅对藻类的生长聚集与分布具有十分明显的影响, 同时还能影响水体营养物质与优势藻的种类^[35]。采用 SPSS 20 软件对采样结果进行分析, 以 Pearson 相关系数和 Kendall 秩相关系数来评价混合层内流速 v 对藻密度的影响, 结果如表 3 所示。2 m 和 4 m 的流速和藻密度存在显著相关关系, 2 m 的流速与藻密度成显著负相关, 流速越大, 藻密度浓度越低, 藻类生长受到抑制。而真光层内其他水深对应的流速与藻密度的分布相关性较小, 因此选择 2 m 水深的流速来分析流速特性对浮游藻类生长的影响。

表 3. 真光层内分层流速与藻类生长的相关关系

Table 3. Correlation between stratified water velocity in euphotic layer and growth of planktonic algae

	Pearson correlation coefficient	<i>P</i>	Kendall rank correlation coefficient	<i>P</i>	Spearman correlation coefficient	<i>P</i>
Algal density	1.000	–	1.000	–	1.000	–
$v_{0.5\text{ m}}$	–0.324	0.173	–0.162	–0.124	–0.210	0.194
$v_{2\text{ m}}$	–0.615*	0.020	–0.642*	0.022	–0.732*	0.005
$v_{4\text{ m}}$	–0.734*	0.001	–0.637*	0.014	–0.572*	0.013
$v_{6\text{ m}}$	–0.417	0.046	–0.397	0.079	–0.525*	0.050
$v_{8\text{ m}}$	–0.351	0.098	–0.312	0.083	–0.428	0.142
$v_{10\text{ m}}$	–0.298	0.168	–0.247	0.172	–0.192	0.182

*showed correlation was significant, $P < 0.05$.

从 3 次采样的结果来看, 3 月和 4 月库湾水流过程较稳定, 水位消落过程较平缓。实测 SN02 以上断面 2 m 的流速范围在 $-0.07\text{--}0.05\text{ m/s}$, 水流扰动较小, 成为藻类水华暴发的敏感区域。而河口(SN01)断面受干流水体影响较为明显, 水体扰动较大, 与长江干流水体交换频繁, 实测的流速较大, 浮游生物生长受到抑制。进入 5 月份, 三峡水库水位处于快速消落阶段, 水位日变幅达到 0.5 m, 导致库湾水流扰动较大, 实测 2 m 水深最大流速达到 0.141 m/s, 远大于早有藻类生长的最佳流速^[36](0.040 m/s), 流速成为抑制藻类生长的主要因素, 加上 5 月份神农溪库湾经历了为期 1 周的降雨, 最终导致 5 月份浮游藻类的消退。

4 结论

(1) 2014 年 3–5 月对神农溪的监测结果表明, 3 月份水温适中, 营养盐充足, 水体弱分层, 水流扰动平缓为硅藻迅速生长提供有利环境, 故在 SN02–SN06 暴发以小环藻为主要优势种的硅藻水华(藻密度 $>100 \times 10^5\text{ cells/L}$); 4 月份水温持续升高, 营养盐进一步消耗, 水体强分层, 溶解性硅酸盐降低及混合层减小成为限制硅藻持续生长

的主要因素, 故在 SN02–SN06 暴发以小球藻为主要优势种、衣藻为次优势种的绿藻水华(藻密度 $>100 \times 10^5\text{ cells/L}$); 5 月份库湾水体受水位大幅消落影响, 混合层内流速显著增加, 抑制浮游藻类生长, 水华消退。

(2) 分析 2014 年春神农溪库湾水体的层化结构、环境因子、水动力特性, 发现春季藻类种群演替主要受层化结构影响, 3 月弱分层水体下以硅藻生长占优, 4 月强分层状态绿藻占优, 而 5 月浮游生物的消退受流速影响较为明显。

(3) 神农溪浮游藻类生长表现出较大的空间异质性, 浮游生物主要集中在上游段, SN05 至 SN06 断面为春季水华暴发敏感区, 这种空间异质性与库湾水体层化结构和流速差异有显著关系。三峡水库水位处于快速消落阶段时, 流速成为抑制神农溪库湾藻类生长的主要因素。

参考文献

- [1] Vannote RL, Minshall GW, Cummins KW, Sedell JR, Cushing CE. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, 37(1): 130–137.
- [2] Kong FX, Gao G. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 589–595. (in Chinese)

- 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.
- [3] Cai QH, Sun ZY. Water environment and aquatic ecosystem of Three Gorges Reservoir, China: progress and prospects. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(2): 169–177. (in Chinese)
蔡庆华, 孙志禹. 三峡水库水环境与水生生态研究的进展与展望. *湖泊科学*, 2012, 24(2): 169–177.
- [4] Qiu GS, Hu S, Ye D, Yuan L, Zang XP. Investigation on the present situation of eutrophication and water bloom in the branches of Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(3): 311–316. (in Chinese)
邱光胜, 胡圣, 叶丹, 袁琳, 臧小平. 三峡库区支流富营养化及水华现状研究. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(3): 311–316.
- [5] Yi ZQ, Liu DF, Yang ZJ, Ma J, Ji DB. Water temperature structure and impact of which on the bloom in spring in Xiangxi Bay at Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydroecology*, 2009, 30(5): 6–11. (in Chinese)
易仲强, 刘德富, 杨正健, 马骏, 纪道斌. 三峡水库香溪河库湾水温结构及其对春季水华的影响. *水生态学杂志*, 2009, 30(5): 6–11.
- [6] Li CM, Huang ZL, Zhang S, Chang JB. Risk forecast of algal bloom in the Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(1): 1–6. (in Chinese)
李崇明, 黄真理, 张晟, 常剑波. 三峡水库藻类“水华”预测. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(1): 1–6.
- [7] Liu L, Liu DF, Xiao SB, Kong S, Chen YY, Fang XF. Effects of thermal stratification on spring blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir. *Environmental Science*, 2012, 33(9): 3046–3050. (in Chinese)
刘流, 刘德富, 肖尚斌, 孔松, 陈媛媛, 方小凤. 水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响. *环境科学*, 2012, 33(9): 3046–3050.
- [8] Cai QH, Hu ZY. Studies on eutrophication problem and control strategy in the Three Gorges Reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(1): 7–11. (in Chinese)
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.
- [9] Lv Y, Liu DF, Huang YL, Yang ZJ, Ji DB, Cui YJ. Impacts of reverse density flow on nutrient distribution in Shennong Bay during pre-flood water supply period. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(4): 653–660. (in Chinese)
吕焱, 刘德富, 黄钰铃, 杨正健, 纪道斌, 崔玉洁. 汛前供水期神农溪库湾倒灌异重流特性及其对营养盐分布的影响. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(4): 653–660.
- [10] 魏复盛. 水和废水监测分析方法. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] 陈伟民, 黄祥飞, 周万平. 湖泊生态系统观测方法. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- [12] 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.
- [13] Lawrence I, Bormans M, Oliver R, Ransom G, Sherman B, Ford P, Wasson B. Physical and nutrient factors controlling algal succession and biomass in Burrinjuck Reservoir. Technical report—project UOC12. Canberra, Australia: University of Canberra, 2000: 119–120.
- [14] Padisák J, Barbosa FAR, Koschel R, Krienitz L. Deep layer cyanoprokaryota maxima in temperate and tropical lakes. *Archiv Für Hydrobiologie Beiheft Advances in Limnology*, 2003, 58: 175–199.
- [15] Lawson R, Anderson MA. Stratification and mixing in Lake Elsinore, California: an assessment of axial flow pumps for improving water quality in a shallow eutrophic lake. *Water Research*, 2007, 41(19): 4457–4467.
- [16] Yao XJ, Liu DF, Yang ZJ, Fang XF, Hu XL, Fang LJ, Tian ZB. Distribution characteristics of phytoplankton community structure in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir during spring and summer. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2012, 44(S2): 211–220. (in Chinese)
姚绪姣, 刘德富, 杨正健, 方小凤, 胡响铃, 方丽娟, 田泽斌. 三峡水库香溪河库湾水华高发期浮游植物群落结构分布特征. *四川大学学报(工程科学版)*, 2012, 44(S2): 211–220.
- [17] 杨正健. 分层异重流背景下三峡水库典型支流水华生消机理及其调控. 武汉大学博士学位论文, 2014.
- [18] Rhee GY, Gotham IJ. The effect of environmental factors on phytoplankton growth: temperature and the interactions of temperature with nutrient limitation. *Limnology and Oceanography*, 1981, 26(4): 635–648.
- [19] Fang LJ, Liu DF, Yang ZJ, Tian ZB. Effects of water temperature on the phytoplankton community structure. *Environmental Science and Technology*, 2014, 37(S2): 45–50. (in Chinese)
方丽娟, 刘德富, 杨正健, 田泽斌. 水温对浮游植物群落结构的影响实验研究. *环境科学与技术*, 2014, 37(S2): 45–50.
- [20] Tian ZB, Liu DF, Yang ZJ, Fang XF, Yao XJ, Fang LJ.

- Cyanobacterial bloom in Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir. *China Environmental Science*, 2012, 32(11): 2083–2089. (in Chinese)
- 田泽斌, 刘德富, 杨正健, 方小凤, 姚绪姣, 方丽娟. 三峡水库香溪河库湾夏季蓝藻水华成因研究. *中国环境科学*, 2012, 32(11): 2083–2089.
- [21] Wang HP, Xia J, Xie P, Dou M. Mechanisms for hydrological factors causing algal blooms in Hanjiang River—based on kinetics of algae growth. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(3): 282–285. (in Chinese)
- 王红萍, 夏军, 谢平, 窦明. 汉江水华水文因素作用机理—基于藻类生长动力学的研究. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(3): 282–285.
- [22] Wagner I, Zalewski M. Effect of hydrological patterns of tributaries on biotic processes in a lowland reservoir—consequences for restoration. *Ecological Engineering*, 2000, 16(1): 79–90.
- [23] Li Y, Liu DF, Kong S, Ji DB, Yang ZJ, Chen YY. Comparative analysis of the impact of discharging and impounding process of Three Gorges Reservoir on the algal bloom in the Xiangxi Bay. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(8): 1882–1893. (in Chinese)
- 李媛, 刘德富, 孔松, 纪道斌, 杨正健, 陈媛媛. 三峡水库蓄泄水过程对香溪河库湾水华影响的对比分析. *环境科学学报*, 2012, 32(8): 1882–1893.
- [24] Zheng BH, Zhang Y, Fu G, Liu HL. On the assessment standards for nutrition status in the Three Gorge Reservoir. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(6): 1022–1030. (in Chinese)
- 郑丙辉, 张远, 富国, 刘鸿亮. 三峡水库营养状态评价标准研究. *环境科学学报*, 2006, 26(6): 1022–1030.
- [25] Zhang Y, Prepas EE. Regulation of the dominance of planktonic diatoms and cyanobacteria in four eutrophic hardwater lakes by nutrients, water column stability, and temperature. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1996, 53(3): 621–633.
- [26] 谢涛. 三峡水库调度对香溪河库湾水温特性的影响研究. 三峡大学硕士学位论文, 2014.
- [27] Jiang H. A study about calculation methods of reservoir water temperature. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 1999, 18(2): 60–69. (in Chinese)
- 蒋红. 水库水温计算方法探讨. *水力发电学报*, 1999, 18(2): 60–69.
- [28] Doyon P, Klein B, Ingram RG, Legendre L, Tremblay JE, Therriault JC. Influence of wind mixing and upper–layer stratification on phytoplankton biomass in the Gulf of St. Lawrence. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2000, 47(3/4): 415–433.
- [29] Brown CW, Esaias WE, Thompson AM. Predicting phytoplankton composition from space—using the ratio of euphotic depth to mixed–layer depth: an evaluation. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 53(3): 172–176.
- [30] Zhu Y, Shen GX, Qian XY, Wang ZQ, Chen J. Characteristics of phytoplankton community structure and evaluation of water quality of Dalian Lake, Shanghai. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(6): 544–549. (in Chinese)
- 朱英, 沈根祥, 钱晓雍, 王振旗, 陈俭. 上海大莲湖水域浮游植物群落结构特征及水质评价. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(6): 544–549.
- [31] 张佳磊. 三峡库区大宁河富营养化和水华研究. 华东师范大学博士学位论文, 2011.
- [32] 代玲玲. 三峡水库富营养化藻类特征及环境因素影响研究. 重庆大学硕士学位论文, 2007.
- [33] Huisman J, Jonker RR, Zonneveld C, Weissing FJ. Competition for light between phytoplankton species: experimental tests of mechanistic theory. *Ecology*, 1999, 80(1): 211–222.
- [34] Li JX, Du B, Sun YS. Effect of hydrodynamics on the eutrophication. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2005, 36(5): 15–18. (in Chinese)
- 李锦秀, 杜斌, 孙以三. 水动力条件对富营养化影响规律探讨. *水利水电技术*, 2005, 36(5): 15–18.
- [35] Liang PY, Wang X, Ma FB. Effect of hydrodynamic conditions on water eutrophication: a review. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25(4): 455–462. (in Chinese)
- 梁培瑜, 王焯, 马芳冰. 水动力条件对水体富营养化的影响. *湖泊科学*, 2013, 25(4): 455–462.
- [36] Long TY, Wu L, Meng GH, Guo WH. Numerical simulation for impacts of hydrodynamic conditions on algae growth in Chongqing section of Jialing River, China. *Ecological Modelling*, 2011, 222(1): 112–119.

Causes of succession of planktonic algae in Shennong bay of Three Gorges Reservoir in spring in 2014

Hui Xu¹, Lianghong Long¹, Daobin Ji^{1*}, Defu Liu², Linxu Song¹, Yujie Cui¹, Qingqing Su¹, Yanan Huang¹, Qing Wu¹

¹College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei Province, China

²Hubei Key Laboratory of Ecological Restoration of River-lakes and Algal Utilization, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei Province, China

Abstract: [Objective] Algal blooms occurred in some sections of Shennong bay after impounding of Three Gorges Reservoir. [Methods] Related environmental and hydrodynamic factors were monitored during the period of algal blooming season in 2014 (March 20, April 13, May 23) in Shennong bay, Three Gorges Reservoir. To study succession of planktonic algae, water stable coefficient, euphotic depth and mixed layer depth were used to analyze stratification and hydrodynamic characteristics. [Results] We identified 6 phyla, 38 species (genera) planktonic algae. The sensitive area of algal bloom was at SN05 (677.677×10^5 cells/L) and SN06 (716.761×10^5 cells/L), and the planktonic algae biomass during this period was significantly different (ANOVA, $P < 0.05$). Moderate water temperature, adequate nutrients, weak stratification and poor mixing promoted the rapid growth and breakout of the diatom bloom with *Cyclotella* spp. as the dominant species in March. Further increase of water temperature, stronger stratification and decrease of dissolved silicate and mixing layer restricted the diatom growth. *Chlorella* spp. and *Chlamydomonas* spp. grew better in shallow mixed layer with rich nutrients and evident stratification. Then Chlorophycean bloom broke out with *Chlorella* spp. as the dominant species and *Chlamydomonas* spp. the next-dominant species. High biomass maintained in April. In May, algal bloom gradually vanished due to sharp fluctuation of water level and increase of velocity. Monitored maximum water velocity was 0.1141 m/s at 2 m depth, exceeded an optimal flow rate perfect for growth of planktonic algae. [Conclusion] Stratification and hydrodynamic characteristics had important effect on planktonic algae under the condition of adequate nutrients. Velocity became the main factor that inhibited the growth of algae in Shennong bay in pre-flood falling stage of the Three Gorges Reservoir.

Keywords: Three Gorges Reservoir, Shennong bay, planktonic algae, environmental factors, stratification, hydrodynamic

(本文责编: 张晓丽)

Support by the National Basic Research Program of China (2014CB460601), by the International Science and Technology Cooperation Program of China (2014DFE70070), by the National Natural Science Foundation of China (51509086) and by the National Water Pollution Control and Treatment Science and Technology Major Project (2014ZX07104-005-01, 2014ZX07104-005-02)

*Corresponding author. Tel: +86-717-6392318; E-mail: dbji01101@163.com

Received: 23 June 2016; Revised: 29 September 2016; Published online: 4 November 2016