

三峡水库香溪河库湾蓝藻水华暴发特性及成因探析*

杨敏¹, 张晟^{1**}, 胡征宇²

(1: 重庆市环境科学研究院, 重庆 401147)

(2: 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)

摘要: 2008年夏季, 香溪河库湾自三峡水库建库以来第1次暴发蓝藻水华, 水华波及整个库湾, 持续时间达1个月之余。为了解这次水华暴发特性及发生原因, 本文对蓝藻水华的发生发展过程进行了跟踪调查, 6-7月水华发生期间每周采样1次。调查表明本次蓝藻水华的优势种为鱼腥藻(*Anabaena* sp.)、铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、惠氏微囊藻(*Microcystis wesenbergii*)等, 细胞密度高达 3.82×10^8 cells/L, 蓝藻相对密度达到90%以上。本文将2008年5-7月与2007年同期理化指标比较发现, 2007年5月的N:P为18.6, 而2008年5月的N:P较低, 为6.2, 据文献报道N:P<8有利于微囊藻的复苏, 因此2008年水华前期的低N:P利于微囊藻的复苏, 为微囊藻在适宜条件下的大量增殖提供了种源基础。方差分析表明, 2008年5-7月各采样点真光层深度显著高于2007年同期, 使得底泥中的微囊藻获得一定强度的光照而复苏, 这可能是2008年蓝藻水华在香溪河库湾暴发的原因之一。综上所述, 在具备充足的营养盐基础、较强的水体稳定性以及较高水温的前提下, 香溪河库湾水华发生前期较低的N:P以及较高强度的光照可能是微囊藻复苏的诱导因子, 为蓝藻水华暴发提供了种源基础。

关键词: 香溪河库湾; 三峡水库; 蓝藻水华; N:P; 真光层深度

Characteristics and preliminary regulating factors of cyanobacterial bloom in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir

YANG Min¹, ZHANG Sheng¹ & HU Zhengyu²

(1: *Chongqing Academy of Environmental Sciences, Chongqing 401147, P. R. China*)

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

Abstract: A large-scale cyanobacterial bloom was observed for the first time in Xiangxi Bay in summer 2008, which lasted from early June to late July dominated by the species of *Anabaena* sp., *Microcystis aeruginosa* and *Microcystis wesenbergii*. The cell abundance and relative abundance is up to 3.82×10^8 cells/L and 90%, respectively, during the peak. Controlled by nutrients, temperature and water column stability, cyanobacterial bloom in the TGR was most likely to occur in June and July. In the May of 2008, the ratio of N:P was 6.2, while 18.6 in the May of 2007. As reported, the lower N:P ratio (<8) in the bay is beneficial to the recruitment of cyanobacteria, providing a seed resource for *Microcystis* to proliferate under appropriate conditions. In addition, the solar irradiance from May to July, 2008, was significantly higher than that in 2007, which may be one of the causes of cyanobacterial bloom in 2008. We supposed that on the basis of adequate nutrients, elevated water temperature and high water column stability, the low N:P ratio and high irradiance was inducible for the *Microcystis* recruitment, which maybe the major factors that brought about the cyanobacterial bloom.

Keywords: Xiangxi Bay; Three Gorges Reservoir; cyanobacterial bloom; N:P ratio; photic depth

* 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(2012ZX07104-003)联合资助。2013-03-24 收稿; 2013-11-21 收修改稿。杨敏(1980~), 女, 博士; E-mail: yangm2013@126.com.

** 通信作者; E-mail: shengzsts@126.com.

三峡大坝截流后,库区水体由天然河道变为人工水库,水域环境发生了巨大改变,这种改变引起了库区水体水质及水生生态系统的变化^[1-2]. 香溪河是三峡水库距坝首最近的支流,位于三峡大坝上游约 38 km. 三峡水库蓄水后,香溪河下游约 33 km 的河道形成库湾. 2008 年夏季,香溪河库湾暴发蓝藻水华,几乎覆盖整个库湾,持续时间达 1 个月之余,这是香溪河库湾自三峡水库建库以来第 1 次如此大范围、大规模地暴发蓝藻水华,引起人们的广泛关注.

随着人们对蓝藻水华成因的深入研究,孔繁翔等提出蓝藻水华成因的休眠、复苏、生物量增加(生长)、上浮及聚集的 4 阶段假说,人们逐渐认识到在探讨水华成因时除关注营养盐浓度外,需要提前关注蓝藻群体的形成、蓝藻的复苏及生态阈值,以及蓝藻如何在生长过程中形成群体并逐步成为优势种等^[3]. 至今,三峡水库支流蓝藻水华及其成因研究已多见报道^[4-14],主要从水华发生时的水动力条件、光照、营养盐等方面阐明对蓝藻生长的影响,如田泽斌等认为充足的营养和水体分层是蓝藻水华暴发的必要条件,混合层与真光层比值的变化影响蓝藻的增殖^[9],李哲等则认为真光层深度下降有利于夏季蓝藻丰度的增加^[14],Wang 等认为库湾相对稳定的水体环境是蓝藻水华暴发的必要条件^[11,13],氮磷比增大限制了藻类的增长^[13]等. 以上研究主要偏重于水华暴发过程中理化因子的分析,对水华发生前期水体理化条件对蓝藻复苏影响的关注较少. 本研究以香溪河库湾 2008 年蓝藻水华为例,对比未发生蓝藻水华的 2007 年同期水体理化状态,主要从影响蓝藻(微囊藻)复苏的角度阐明光照、N:P 等蓝藻水华发生的主要因素,以期探讨三峡水库支流蓝藻水华的机理和有效防治支流水华提供参考.

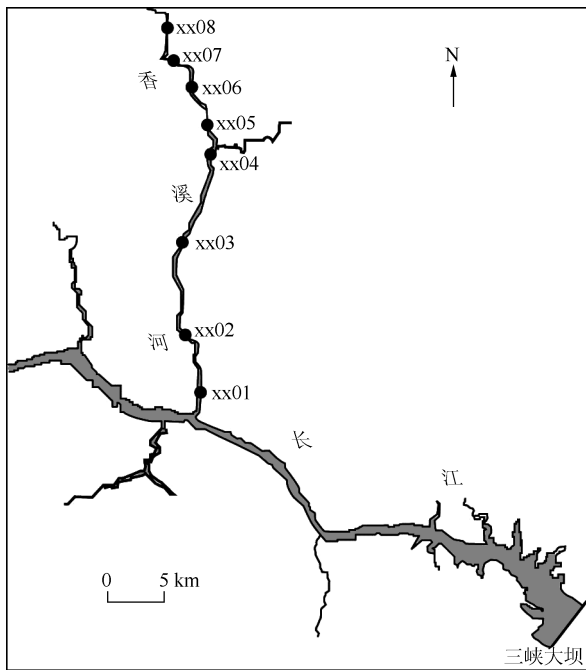


图 1 香溪河库湾采样点设置

Fig. 1 Location of sampling sites in Xiangxi Bay

1 材料和方法

1.1 采样点设置

从香溪河口逆流而上设置 8 个采样点,从河口至河尾分别为 xx01(香溪河口)、xx02(官庄坪)、xx03(盐关)、xx04(峡口)、xx05(1677 处)、xx06(护坡处)、xx07(平邑口下游)和 xx08(高阳镇)(图 1).

1.2 水样采集

在水华发生期间每周采样 1 次,分别于 2008 年 6 月 19 日、6 月 23 日、6 月 29 日、7 月 6 日、7 月 12 日、7 月 18 日进行采样. 在每个采样点用采水器采集表层 0.5 m 水样,1 份用作水化学分析,1 份用作浮游植物分析. 另外,为了比较蓝藻水华发生年和无蓝藻水华年水体理化性质的异同,分别于蓝藻水华发生年 2008 年 5-7 月和无蓝藻水华年 2007 年 5-7 月进行采样,每月中旬采样 1 次.

1.3 理化参数测定

水温、透明度、溶氧、pH、电导率和浊度在野外现场分别用温度计、Secchi 盘、雷磁 JPB-607 溶氧仪、哈纳 HANNA HI98128 pH

计、上海今迈 DDB-303 电导仪和上海昕瑞 WGZ-B 散射光浊度计直接测定. 水样经 0.45 μm 微孔滤膜(Whatman GF/C, Φ47 mm)过滤后,分别用钼锑抗分光光度法、分光光度法和纳氏试剂光度法测定正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)和铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)含量;未过滤的水样经消解后测定 TN、TP 含量,TN 含量用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法进行测定,TP 含量用 5% 过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法进行测定^[15]. 将一定量的水样用 Whatman GF/C 膜抽滤后,滤膜用 90% 丙酮黑暗低温萃取 24 h,样品经离心后用紫外分光光度法测定叶绿素 a 浓度^[14].

1.4 浮游植物分析

将 Lugol's 液固定的 1.2 L 水样室内沉降 24 h, 吸取上清液, 浓缩定容至 30 ml, 加数滴甲醛保存. 计数前充分摇匀, 取 0.1 ml 至计数框. 每个样品计数 2 次, 2 次结果与平均数之差不大于 $\pm 15\%$. 藻类种类鉴定参照胡鸿钧等的方法^[16], 计数参照章家涉等的方法^[17].

1.5 统计分析方法

采用单因子方差分析 (ANOVA) 检验水体理化因子间差异的显著性, 在 SPSS 17.0 软件包中完成. 典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA) 是将对应分析与多元回归分析相结合, 每一步计算都与环境因子进行回归, 又称多元直接梯度分析, 它是在环境因子特征变量构成的空间上, 对环境变量和物种等排序作图, 实现物种与环境因子的对应排序. 这种排序方法既包含了环境因子信息, 又包含了种类组成信息, 可以直观反映出环境因子和物种之间的关系. 在由两个主轴构成的平面上, 环境因子用带有箭头的线段来表示, 箭头连线与排序轴的夹角表示该环境因子与排序轴间的正负相关性, 物种以符号标出, 表明了物种随环境变化的位置. 采用 CCA 研究蓝藻与环境因子的关系, 物种与环境因子数据皆采用百分比进行标准化, 采用无次数限制蒙特-卡罗置换检验 (unrestricted Monte Carlo permutation test) 来检验 CCA 排序轴特征值的显著性. CCA 采用 CANOCO 4.5 软件实现.

2 结果与分析

2.1 水华过程中浮游植物动态

香溪河库湾 2008 年蓝藻水华的优势种为鱼腥藻 (*Anabaena* sp.)、铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 和惠氏微囊藻 (*Microcystis wesenbergii*) 等. 5 月中旬, 首先在 xx04 样点的水体表层发现鱼腥藻, 密度为 1.58×10^5 cells/L, 7 月时 xx06 样点的鱼腥藻密度达到最大, 为 6.83×10^5 cells/L. 微囊藻在 6 月初开始出现, 密度最高出现在 6 月份的 xx06 样点, 为 3.82×10^8 cells/L. 水华发生期间各样点蓝藻的平均密度为 $4.33 \times 10^5 \sim 1.30 \times 10^8$ cells/L, 其中 xx06 样点密度最高, 为 1.30×10^8 cells/L, xx08 样点受上游高泥沙含量、低温度来水的影响密度最低, 为 4.33×10^5 cells/L (图 2).

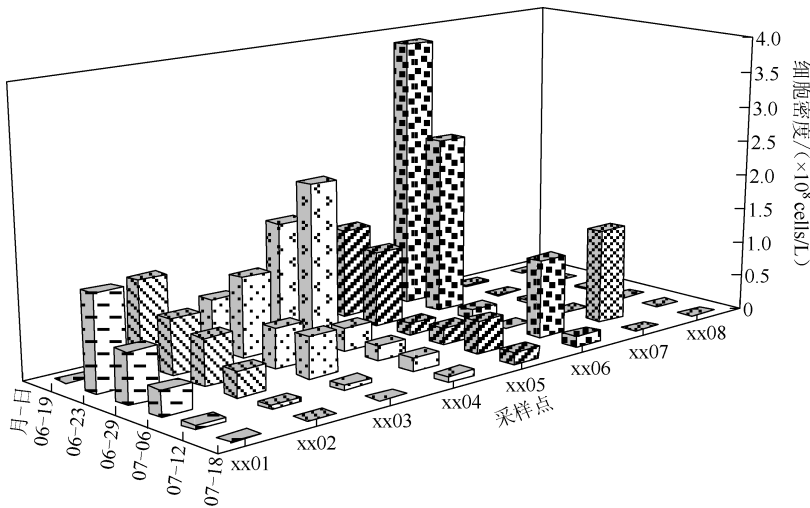


图 2 水华过程中蓝藻细胞密度变化

Fig. 2 Variation of cyanobacterial cell abundance during the bloom

在 6 月 19 - 23 日, 除 xx07 ~ xx08 样点有一定的隐藻和硅藻外, 其他各样点的蓝藻相对密度达到 99% 以上. 随着水华继续推进, 到 7 月 18 日, xx01 ~ xx03 样点小环藻 (*Cyclotella* spp.)、角甲藻 (*Ceratium* sp.)、隐藻 (*Cryptomonas* spp.)、绿藻 ((塔胞藻 (*Pyramimonas* sp.)、实球藻 (*Pandorina* sp.)、栅藻 (*Scenedesmus* spp.)、空星藻 (*Coelastrum* spp.)) 相对密度超过 70%, xx07 ~ xx08 样点硅藻 (小环藻、舟形藻 (*Navicula* spp.))、隐

藻、绿藻类相对密度超过 90%, 只有 xx04 ~ xx06 样点蓝藻相对密度在 70% 以上(图 3)。

水华发生期间叶绿素 a 浓度变化范围为 0.35 ~ 92.80 $\mu\text{g/L}$, 最低值和最高值分别出现在 6 月 19 日的 xx01 和 xx06 样点. 各采样点叶绿素 a 浓度平均值范围为 7.48 ~ 33.06 $\mu\text{g/L}$, 其中 xx07 ~ xx08 样点低于 10 $\mu\text{g/L}$, xx06 样点最高, 为 33.06 $\mu\text{g/L}$, xx02 ~ xx06 样点为 21.14 ~ 21.86 $\mu\text{g/L}$, xx01 样点略低, 为 20.38 $\mu\text{g/L}$ (图 4)。

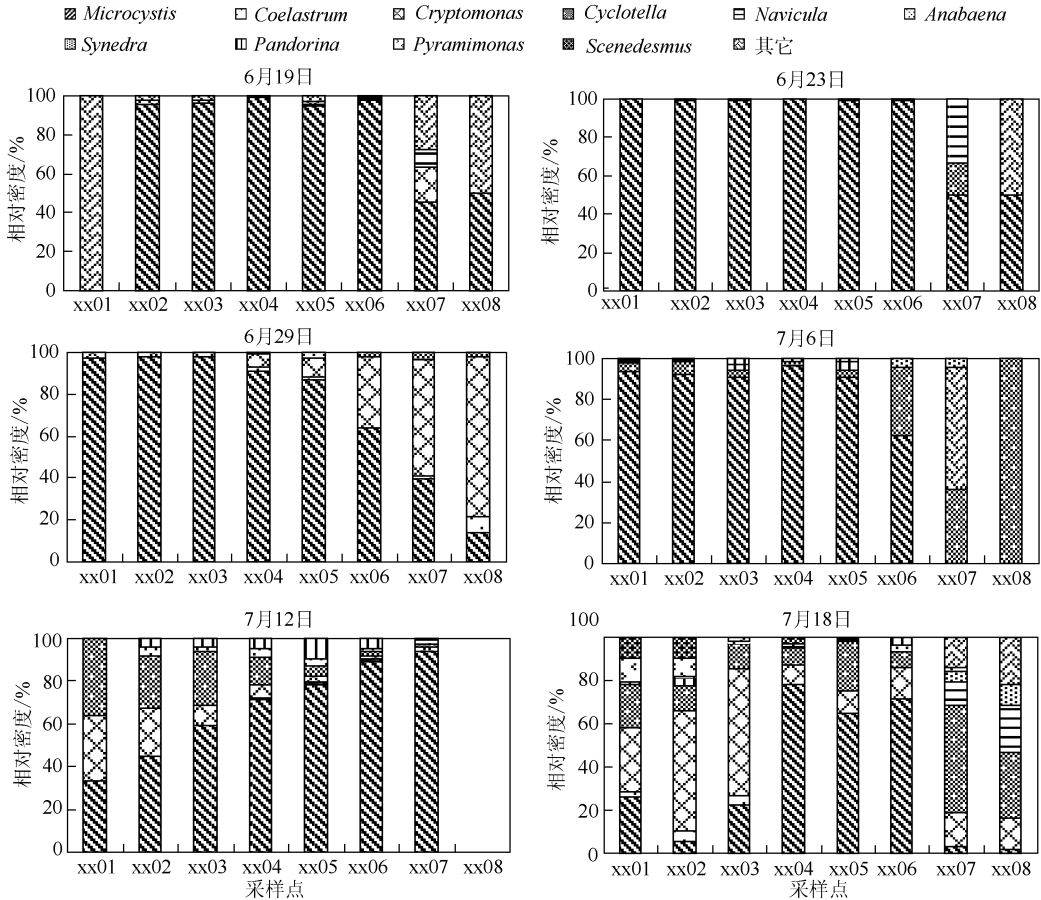


图 3 蓝藻水华期间浮游植物动态

Fig. 3 The dynamics of phytoplankton during cyanobacterial bloom

2.2 香溪河库湾水文特征

2008 年 5 月 22 日至 6 月 12 日, 香溪河库湾水位从 148.77 m 降到 145.15 m, 水位降低 3.62 m, 日间水位变动 0.10 ~ 0.90 m, 水体扰动强烈; 水华发生期间, 从 6 月 12 日到 7 月 31 日, 水位徘徊在 145.89 m 至 145.11 m 之间, 日间水位变动范围为 0.02 ~ 0.26 m, 波动幅度很小, 水体处于较稳定状态(图 5)。

2.3 水体理化参数

2008 年 5—7 月期间, 香溪河库湾水体 TN、TP 浓度变幅分别为 1.42 ~ 1.71、0.14 ~ 0.21 mg/L ; $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度范围分别为 0.03 ~ 0.06、1.14 ~ 1.23 和 0.08 ~ 0.15 mg/L , 水温波动在 24.25 ~ 27.78 $^{\circ}\text{C}$ 之间, 透明度在 1.17 ~ 1.52 m 之间(表 1)。与 2007 年同时期水体理化指标相比, 2008 年 5、6 和 7 月份 TN : TP 的范围分别为 1.81 ~ 12.0、8.1 ~ 17.5 和 14.7 ~ 27.0, 各月平均值分别为 6.2、13.1 和 20.9; 2007 年 5、6 和 7 月份 TN : TP 的范围分别为 8.0 ~ 30.8、1.1 ~ 16.5 和 5.0 ~ 38.3, 各月平均值分别为 18.6、10.3 和 20.9(表 1)。方差分析结果显示, 两年间透明度、水温、pH、DO 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度具有显著差异 ($P < 0.05$), 上述各指标值 2008 年均显著高于 2007 年, 而两年间的 TN、TP 等指标无显著差异 ($P > 0.05$)。

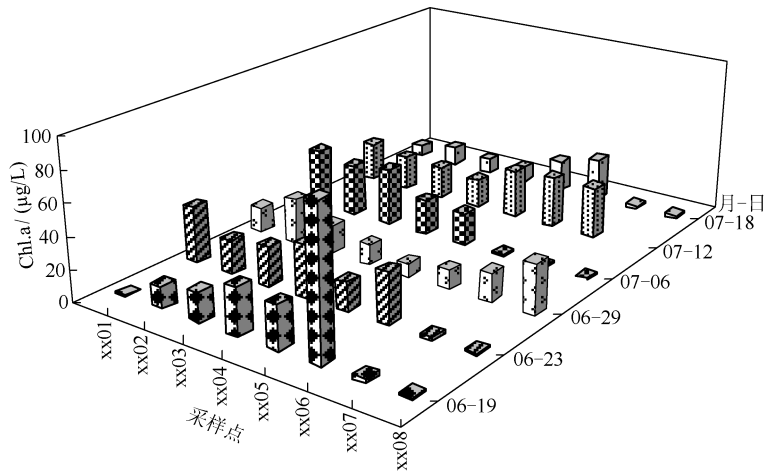


图 4 蓝藻水华发生期间叶绿素 a 浓度变化

Fig. 4 Variation of chlorophyll-a concentration during the cyanobacterial bloom period

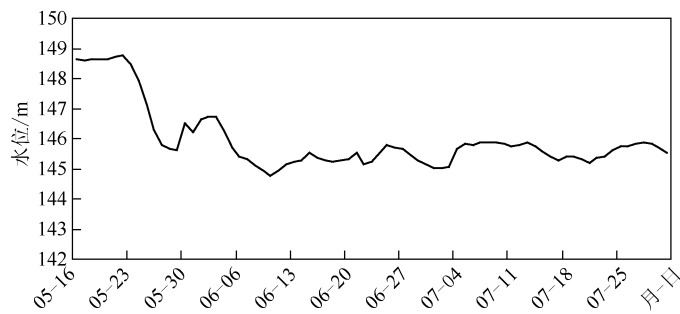


图 5 2008 年 5—7 月水位变化(茅坪站)

Fig. 5 Temporal dynamics of water level from May to July, 2008(Maoping Station)

2.4 真光层深度

以透明度的 2.7 倍为真光层深度,而透明度又与光照强度有直接的关系,因此以理论真光层深度来定量光照强度. 在 5—7 月的水体稳定期,xx01 的水深为 67 m,从库首到库尾水深逐渐下降,xx08 样点水深只有 2.5 m. 2008 年 5 月份,真光层深度从 xx01 样点的 4.59 m 降至 xx08 样点的 2.70 m;2008 年 6 月份的真光层深度为 0.68~5.40 m(图 6). 由于光照强度的逐月增强,真光层深度也在逐月加深. 2007 年 5 月份的真光层深度为 1.35~2.97 m,6 月份则为 0.68~2.70 m. 2007 年各样点的真光层深度随光照强度的逐月增加而加深,但各样点真光层深度远比 2008 年相应样点同时期真光层深度要小. 方差分析表明,2008 年与 2007 年的真光层深度具有显著性差异($P < 0.01$).

2.5 CCA 分析结果

CCA 排序结果见表 2,CCA 第一排序轴和第二排序轴的特征值分别为 0.739 和 0.193,两轴累计变异百分率解释了种类环境关系的 94.2%,排序结果较好地解释了藻类群落与环境因子的关系. 两个物种排序轴(SPEC1、SPEC2)间的相关系数为 0.0124,两个环境排序轴((ENV1、ENV2)间的相关系数为 0,说明排序轴与环境因子间线性结合的程度较好地反映了物种与环境之间的关系,排序结果可靠. 第一排序轴和第二排序轴的环境-种类相关系数分别为 0.980 和 0.806,表明环境因子和浮游植物种群具有较强的相关性. CCA 排序结果表明,Cond、Turb、TN/TP 和 Temp 是影响蓝藻细胞密度变化的主要环境因子(图 7).

表1 香溪河库湾水体主要理化参数
Tab. 1 Physicochemical parameters of water in Xiangxi Bay

理化参数	2008年			2007年		
	5月	6月	7月	5月	6月	7月
PO ₄ ³⁻ -P/(mg/L)	0.03 ± 0.04	0.05 ± 0.04	0.06 ± 0.06	0.13 ± 0.08	0.06 ± 0.02	0.04 ± 0.012
NO ₃ ⁻ -N/(mg/L)	1.23 ± 0.31	1.14 ± 0.23	1.22 ± 0.36	1.48 ± 0.15	1.48 ± 0.15	1.25 ± 0.36
NH ₄ ⁺ -N/(mg/L)	0.15 ± 0.03	0.13 ± 0.05	0.08 ± 0.04	0.08 ± 0.03	0.04 ± 0.03	0.05 ± 0.01
TN:TP	6.2 ± 4.3	13.1 ± 3.5	20.9 ± 6.9	18.6 ± 9.6	10.3 ± 6.1	20.9 ± 12.5
TN/(mg/L)	1.61 ± 0.82	1.71 ± 0.49	1.42 ± 0.39	1.88 ± 0.19	1.16 ± 0.64	1.32 ± 0.43
TP/(mg/L)	0.21 ± 0.09	0.18 ± 0.08	0.14 ± 0.11	0.19 ± 0.13	0.33 ± 0.27	0.26 ± 0.36
SD/m	1.25 ± 0.35	1.17 ± 0.73	1.52 ± 0.28	0.75 ± 0.23	0.62 ± 0.39	0.67 ± 0.21
pH	8.50 ± 0.08	8.39 ± 0.76	8.58 ± 0.23	8.13 ± 0.38	7.52 ± 0.17	7.35 ± 0.17
DO/(mg/L)	8.34 ± 1.15	9.36 ± 1.27	9.00 ± 1.79	11.29 ± 1.80	5.49 ± 0.55	4.96 ± 0.67
WT/°C	24.25 ± 0.85	24.60 ± 0.26	27.78 ± 2.45	22.1 ± 2.8	21.5 ± 3.5	23.1 ± 2.2
Chl. a/(μg/L)	9.98 ± 5.18	21.15 ± 13.54	11.58 ± 8.69	21.52 ± 12.95	1.56 ± 1.12	7.61 ± 6.38

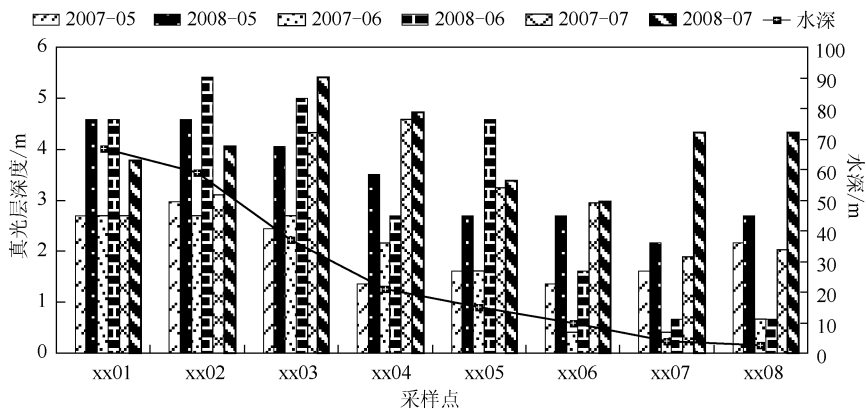


图6 香溪河库湾2008年5-7月与2007年同期真光层深度

Fig. 6 Comparison of photic depth from May to July in 2008 with that in 2007 in Xiangxi Bay

3 讨论

3.1 营养盐对香溪河库湾水华的影响

氮、磷是影响浮游植物生长的主要营养元素. 美国环境保护署(EPA)指出,在湖泊与水库中,TP与TN浓度分别超过0.01 mg/L与0.15 mg/L时即有可能发生蓝藻水华^[18]. 在5-7月的月度采样中,TP > 0.14 mg/L且TN > 1.42 mg/L,香溪河库湾已具备发生蓝藻水华的营养盐条件.

表2 浮游植物类群与环境因子 CCA 分析结果

Tab. 2 CCA analysis for environmental variables and species

	轴1	轴2	轴3	轴4
特征值	0.739	0.193	0.050	0.007
环境-种类相关系数	0.980	0.806	0.822	0.677
环境-种类累积方差百分比/%	74.8	94.2	99.3	100.0

根据 Redfield 氮磷比理论,临界氮磷比按质量计应为7.2:1. 理论上讲,当氮磷比小于该值时,氮元素将成为藻类生长的限制性因子;当氮磷比大于该值时,则出现磷限制. Ståhl-Delbanco等^[19]在瑞典 Krankesjön 湖的研究发现,N:P低有利于微囊藻的复苏,当N:P > 8:1时,微囊藻的复苏率有下降的趋势. 2008年香溪河

库湾水华发生前4—5月的TN:TP为6.7~7.4,按照Redfield的氮磷比理论,4月底到5月中旬水华发生前香溪河库湾出现短暂的氮限制,因而在水华前期具有异形胞且有固氮能力的鱼腥藻在低氮浓度下占据一定优势^[20],并推测香溪河库湾前期低的氮磷比促进了微囊藻的复苏。

3.2 真光层深度对香溪河库湾蓝藻水华的影响

蓝藻在底泥的复苏及在水体中的上浮与光照强度有密切的关系。Brunberg等在Limmaren湖研究夏季(6—9月)的蓝藻复苏情况,发现整个夏季,在底泥表面能够接受到的光强为1~40 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的浅水区,底泥中的微囊藻50%能复苏,而只有少数几个点能检测到 $<1 \mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的光照强度的深水区,底泥中蓝藻复苏率只有8%^[21]。可见,一定强度的光照是微囊藻复苏所必需的。如果底泥接受到的光强很低,甚至为零,这极大地阻碍了微囊藻进行光合作用,导致其生长受抑制,无法复苏进入水体。以透明度的2.7倍为真光层深度^[22],真光层深度是光照强度和水体中悬浮物浓度的综合表现。比较2008年与2007年的真光层深度,发现2008年5—6月各样点真光层深度都大于2007年同时期相应样点的真光层深度,方差分析表明二者具有显著性差异($P < 0.01$)。即使在香溪河库湾6、7月份蓝藻水华集中暴发期间,水体中有高细胞密度(可达 $3.8 \times 10^8 \text{ cells/L}$)的蓝藻悬浮物时,2008年各样点真光层深度仍然大于2007年相应样点真光层深度,这足以说明2008年的5—7月的光照强度要远大于2007年同时期光照强度。这种较高的光照强度穿透了水层,使得底泥能够接受到一定强度的光照,沉积在底泥中的微囊藻得以复苏,上浮进入水体中,在适宜的条件下迅速大量繁殖形成水华,这也可能是诱导2008年香溪河库湾蓝藻水华暴发的原因之一。Liu等^[10]的研究表明混合层变浅是蓝藻水华发生的原因,本观点从另一个角度印证了这一结论。

3.3 2008年香溪河库湾夏季蓝藻水华发生原因分析

2008年香溪河库湾蓝藻水华的优势种为鱼腥藻、铜绿微囊藻、惠氏微囊藻等,细胞密度高达 $3.82 \times 10^8 \text{ cells/L}$,蓝藻相对密度达到90%以上。在5—7月份水温在 25°C 左右,水体稳定性强,既具备了蓝藻水华发生的水温条件,又具备了水动力学条件,因此蓝藻能在这个时期发生。此外,2007年5月的N:P为18.6,而2008年5月的N:P较低,为6.2,据文献报道 $N:P < 8$ 有利于微囊藻的复苏^[19]。因此可能2008年低的N:P利于微囊藻的复苏,为微囊藻在适宜条件下的大量增殖提供了种源基础。2008年5—7月各采样点真光层深度显著高于2007年同期,较高的光照强度穿透了水层,使得底泥能够接受到一定强度的光照,沉积在底泥中的微囊藻得以复苏并上浮进入水体中,在适宜的条件下迅速大量繁殖形成水华。因此推断,在具备充足的营养盐基础、较强的水体稳定性以及较高水温的前提下,香溪河库湾水华发生前期较低的N:P以及较高强度的光照可能是微囊藻复苏的诱导因子,为蓝藻水华暴发提供了种源基础。对诱导香溪河库湾蓝藻水华发生的N:P阈值和真光层深度临界值的定量,还需要进一步的研究。

4 参考文献

[1] 郑丙辉,曹承进,秦延文等. 三峡水库主要入库河流氮营养盐特征及其来源分析. 环境科学,2008,29(1):1-6.
 [2] 任春坪,钟成华,邓春光等. 三峡库区重庆主城江段营养状态变化分析. 三峡环境与生态,2010,32(4):14-18.
 [3] 孔繁翔,高 光. 大型淡水湖泊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.
 [4] 王 岚,蔡庆华,张 敏等. 三峡水库香溪河库湾夏季藻类水华的时空动态及其影响因素. 应用生态学报,2009,20(8):1940-1946.
 [5] 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,2009,37(11):5074-5077.
 [6] 朱孔贤,毕永红,胡建林等. 三峡水库神农溪2008年夏季铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)水华暴发特性. 湖泊科

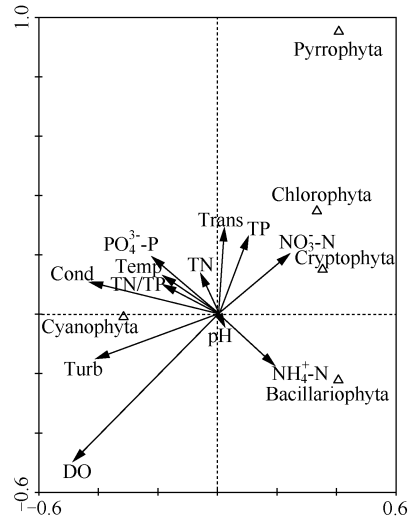


图7 浮游植物与环境变量的CCA双序图
 Fig. 7 Biplot of CCA for environmental variables and phytoplankton species

- 学, 2012, 24(2): 220-226.
- [7] 邱光胜, 胡 圣, 叶 丹等. 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.
- [8] 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.
- [9] 田泽斌, 刘德富, 杨正健等. 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.
- [10] Liu L, Liu DF, David MJ *et al.* Effects of vertical mixing on phytoplankton blooms in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir: Implications for management. *Water Research*, 2012, 46(7): 2121-2130.
- [11] Wang L, Cai QH, Tan L *et al.* Longitudinal difference of phytoplankton community during a period of small water level fluctuations in a subtropical reservoir bay (Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir, China). *International Review of Hydrobiology*, 2011, 96(4): 381-396.
- [12] Wang L, Cai QH, Xu YY *et al.* Weekly dynamics of phytoplankton functional groups under high water level fluctuations in a subtropical reservoir-bay. *Aquatic Ecology*, 2011, 45: 197-212.
- [13] 张 敏, 蔡庆华, 王 岚等. 三峡水库香溪河库湾蓝藻水华生消过程初步研究. 湿地科学, 2009, 7(3): 230-236.
- [14] 李 哲, 郭劲松, 方 芳等. 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. 环境科学, 2010, 31(2): 301-309.
- [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] 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.
- [17] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 2006.
- [18] United States Environmental Protection Agency. Nutrient criteria, technical guidance manual: lakes and reservoirs. USEPA-822-B00-001, 2000.
- [19] Ståhl-Delbanco A, Hansson LA, Gyllström M. Recruitment of resting stages may induce blooms of *Microcystis* at low N:P ratios. *Journal of Plankton Research*, 2003, 25: 1009-1106.
- [20] McQueen DJ, Lean DRS. Influence of water temperature and nitrogen to phosphorus ratios on the dominance of blue-green algae in Lake St. George, Ontario. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1987, 44: 598-604.
- [21] Brunberg AK, Blomqvist P. Recruitment of *Microcystis* (Cyanophyceae) from lake sediments: The importance of littoral inocula. *Journal of Phycology*, 2003, 39: 58-63.
- [22] Cole GA. Textbook of limnology. Illinois: Waveland Press, 1994: 412.