应用生态学报 2009年8月 第20卷 第8期
Chinese Journal of Applied Ecology, Aug. 2009, 20(8): 1940-1946

# 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*

王 岚[1,2] 蔡庆华[1**] 张 敏[1,2] 谭 路[1,2] 徐耀阳[1,2] 孔令惠[1,2]
([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)

**摘 要** 2008年6—8月,三峡水库香溪河库湾相继暴发蓝藻和绿藻水华.依据香溪河库湾夏季的每周监测,对研究区2次水华分别进行聚类和判别分析,研究了2次水华的时空动态及其影响因素.结果表明:研究区2次水华过程均可划分为无水华组、过渡组和水华组;2次水华的暴发对可溶性硅(DSi)、硝态氮与亚硝态氮($NO_3^-$-N + $NO_2^-$-N)和磷酸盐($PO_4^{3-}$-P)3种营养盐的吸收程度不同:蓝藻水华暴发期间的DSi、总氮/总磷(TN/TP)、DSi/TN和DSi/TP值均低于绿藻水华;判别蓝藻水华暴发的参数为叶绿素a(Chl a)、TN和$PO_4^{3-}$-P,而Chl a和DSi则是绿藻水华暴发的判别因子,将2次水华过程划分为水华组和无水华组的判别效果更好;判断蓝藻和绿藻水华暴发的叶绿素a临界浓度分别为40和20 μg·$L^{-1}$.

**关键词** 蓝藻水华 绿藻水华 聚类分析 判别分析 三峡水库 香溪河库湾
**文章编号** 1001-9332(2009)08-1940-07 **中图分类号** Q178.1 **文献标识码** A

**Spatiotemporal dynamics and related affecting factors of summer algal blooms in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir.** WANG Lan[1,2], CAI Qing-hua[1], ZHANG Min[1,2], TAN Lu[1,2], XU Yao-yang[1,2], KONG Ling-hui[1,2] ([1]*State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan* 430072, *China*; [2]*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*). *-Chin. J. Appl. Ecol.*, 2009, **20**(8): 1940-1946.

**Abstract**: In June - August 2008, the cyanobacterial bloom and chlorophycean bloom broke out one after the other in the Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir. Based on the weekly monitoring in summer in the Bay, and by using cluster analysis and discriminant analysis, the spatiotemporal dynamics and related affecting factors of the two blooms were studied. Each of the blooms could be divided into non-bloom group, transitional group, and bloom group. The two blooms had different uptake levels of dissolved Si (DSi), $NO_3^-$-N + $NO_2^-$-N, and $PO_4^{3-}$-P. Cyanobacterial bloom had lower DSi concentration and lower TN/TP, DSi/TN and DSi/TP ratios than chlorophycean bloom. The discriminant factors of cyanobacterial bloom were Chl a, TN and $PO_4^{3-}$-P, while those of chlorophycean bloom were Chl a and DSi. Better discriminant results were obtained when dividing each bloom into non-bloom group and bloom group. The critical value of Chl a for cyanobacterial bloom and chlorophycean bloom was 40 and 20 μg·$L^{-1}$, respectively.

**Key words**: cyanobacterial bloom; chlorophycean bloom; cluster analysis; discriminant analysis; Three Gorges Reservoir; Xiangxi Bay.

富营养化是世界范围内湖泊和水库面临的主要水质问题之一[1].富营养化水体中营养丰富并伴随浮游植物的大量增加,当水生态系统中浮游藻类数量增加相对迅猛时即产生"水华"[2].水华发生将导致一系列水质问题,如水体透明度降低、水体缺氧、鱼类窒息、对底栖生物的毒害作用以及增加有毒藻类物种的生物量等[3].有毒蓝藻水华还将导致营养级系统严重失衡,并在视觉和嗅觉上造成恶劣影响[4].

水华暴发可以是持续数周的季节性事件,也可

*国家自然科学基金项目(40671197)、中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-YW-427)和国家重点实验室专项经费项目(2008FBZ02)资助.
**通讯作者. E-mail: qhcai@ihb.ac.cn
2009-02-10 收稿,2009-06-02 接受.

能是非周期性、仅持续几天的事件，还有一些则可归为偶然事件[5]. 由于水华期间初级生产力提高，从而影响消费者的能量和种群动态，且水华过程极大地改变了生源要素的生物地球化学循环，某些种类的水华还可能带来经济影响[6]，因此，水华动态研究已成为浮游植物生态学的焦点. 研究季节性水华暴发的原因和动态对水生态系统的可持续发展和水质管理具有十分重要的意义[7-9].

三峡工程是世界上最大的水利枢纽工程，具有防洪、发电、航运等巨大的综合效益，对库区的生态环境也产生显著影响. 三峡成库后，库区水位提高、水流减缓、水体扩散能力减弱、库湾和支流污染物的滞留时间延长，致使部分支流库湾污染加重，局部水域已出现富营养化现象[10]，如三峡水库湖北库区最大的支流库湾香溪河库湾，自水库建成蓄水后，几乎每年春季都不同程度地暴发甲藻和硅藻水华，进一步加重了水体污染. 以往对三峡水库支流库湾藻类水华的研究多侧重于春季[11-15]，而对夏季水体环境状况的关注不多. 2008 年 6 月，三峡水库部分支流库湾（如香溪河、神农溪）暴发了蓄水成库以来规模最大、持续时间最长、影响最深远的蓝藻水华，到 7 月中下旬，又相继暴发了绿藻水华. 为此，本文基于 2008 年 6—8 月对香溪河库湾水华过程的连续监测，对该区蓝藻和绿藻水华的时空分布及其主要影响因素进行了分析，以期为探讨三峡水库支流库湾夏季水华暴发机理和控制对策提供依据.

## 1　材料与方法

2008 年 6 月 6 日—8 月 29 日，在三峡水库香溪河库湾（30°57′—31°13′ N，110°45′—110°47′ E）进行每周采样，共设置 14 个样点（图 1），从河口至库尾依次为：XX00、XX01、XX02、XX02a、XX03、XX03a、XX04、XX05、XX06、XX07、XX08、XX09、XX10、XX10a.

现场用水质多参数仪 YSI-6600（美国，金泉公司）测定水温（WT，℃）、电导率（Cond，ms · cm$^{-1}$）、溶解氧（DO，mg · L$^{-1}$）和 pH，用直径为 20 cm 的萨氏盘测量水体透明度（Sd，cm）. 同时采集水下 0.5 m 处水样，用于藻类叶绿素 a（μg · L$^{-1}$）、总氮（TN，mg · L$^{-1}$）、硝态氮和亚硝态氮（$NO_3^-$-N + $NO_2^-$-N，mg · L$^{-1}$）、铵态氮（$NH_4^+$-N，mg · L$^{-1}$）、总磷（TP，mg · L$^{-1}$）、磷酸盐（$PO_4^{3-}$-P，mg · L$^{-1}$）和可溶性硅（DSi，mg · L$^{-1}$）的实验室测定. 采样及指标测定方法均按中国生态系统研究网络（CERN）水域生态系统长期监测规范[16-17]执行，其中各营养盐采用连续流动分析仪（Skalar San$^{++}$，荷兰）测定.

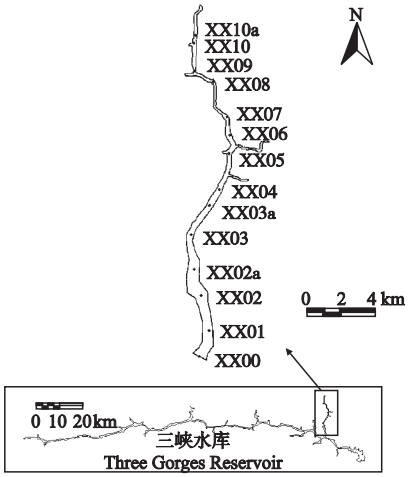



**图 1　香溪河库湾采样点分布**

**Fig. 1**　Distribution of sampling sites in Xiangxi Bay.

采用 Statistica 6.0 软件进行聚类分析，采用 SPSS 16.0 软件进行多重比较和判别分析. 由于三峡水库水位波动原因，样点 XX10a 经常无法采样，故在分析时未考虑该点；而样点 XX10 点由于靠近兴山老县城高阳镇，受外源输入和人为干扰的影响较大，因此未参与聚类和判别分析.

## 2　结果与分析

### 2.1　三峡水库香溪河库湾夏季水华的时空动态

2008 年 6—8 月三峡水库香溪河库湾的实测叶绿素 a 浓度分布见图 2. 初步鉴定结果表明，研究区共暴发 2 次水华，分别是蓝藻和绿藻水华. 蓝藻水华在 6 月 6 日—7 月 11 日持续了 1 个多月，7 月 18 日显著消退. 其中，库湾上游距离河口 25 ~ 30 km 范围内蓝藻水华的持续时间最长，其次为中上游区域，在库湾下游几乎没有水华出现. 从空间分布来看，6 月 13 日距河口约 > 18 km 的库湾均为水华暴发区，暴发区河长超过 10 km，大于库湾全长的 1/3，可认为是蓝藻水华在香溪河库湾的大规模暴发，之后暴发区域逐渐缩小. 从暴发强度来看，6 月 20 日的强度最严重，特别是在距离河口 25 ~ 27.5 km 范围内形成了集中暴发区，叶绿素 a 含量高达 152.07 μg · L$^{-1}$. 由于 6 月 20 日—6 月 22 日的连续降雨过程，蓝藻水华情势有所减缓，但降雨之后，7 月 4 日 XX09 样点的叶绿素 a 含量仍达 94.60 μg · L$^{-1}$.

全库湾范围内绿藻水华持续时间约在 7 月 25 日—8 月 22 日，8 月 29 日则近消失. 库湾中上游距

河口 20 km 附近的水华持续时间最长. 研究区绿藻水华暴发的区域在库湾中部被隔断,即存在库湾中上游和中下游 2 个暴发区. 库湾中上游区域的暴发强度高于中下游. 由此可见,香溪河库湾夏季 2 种水华的暴发持续时间相当,其中蓝藻水华的暴发相对集中和强烈,而绿藻水华的暴发强度小于蓝藻水华,但影响范围更广.

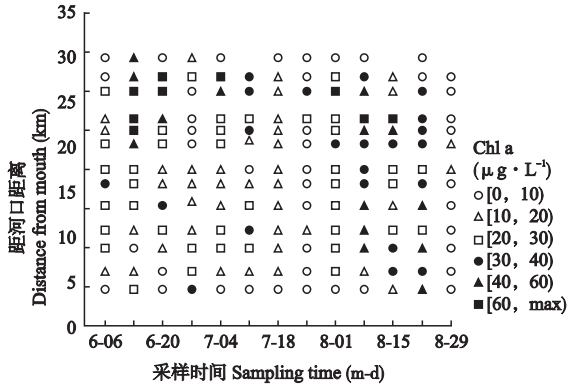



**图 2 香溪河库湾夏季叶绿素 a 浓度的分布**

**Fig. 2** Distribution of Chl a concentration during summer in Xiangxi Bay.

## 2.2 三峡水库香溪河库湾水华暴发的聚类分析

对 2 次水华期间各采样点进行聚类分析(图 3),选择参数为藻类叶绿素 a 和各类营养盐(DSi、$NH_4^+$-N、$NO_3^-$-N + $NO_2^-$-N、TN、$PO_4^{3-}$-P 和 TP)含量,样本间的距离采用欧式距离度量,算法采用 Ward 法. 2 次水华聚类样点标记见表 1,其中第 1 次水华期间(6 月 6 日—7 月 18 日)的编号 1 ~ 84,第 2 次水华(7 月 25 日—8 月 29 日)编号 1 ~ 72.

由图 3 可以看出,研究区蓝藻和绿藻水华期间的样点可分别划分为 3 类. 各组统计量及组间多重比较(Tamhane 's T2 法)的结果如表 2 所示.

蓝藻水华期间,第 1 组的叶绿素 a 浓度不超过 19.60 μg·$L^{-1}$,平均为 12.47 μg·$L^{-1}$,可视为无水华组;第 2 组的叶绿素 a 浓度在 20.60 ~ 35.35 μg·$L^{-1}$,平均为 26.69 μg·$L^{-1}$,可视为过渡组;第 3 组的叶绿素 a 浓度为 43.08 ~ 152.07 μg·$L^{-1}$,平均为 82.12 μg·$L^{-1}$,可视为水华组. 从均值统计结果来看,叶绿素 a 值在 3 组之间两两差异显著,且第 1、2、3 组的均值依次增大;DSi、$NO_3^-$-N + $NO_2^-$-N、TN/TP、DSi/TP、Sd 和 pH 的均值在无水华组和过渡组间较相似,其中,前 5 个参数值在水华组均低于无水华组和过渡组,而 pH 在水华组则高于另外两组;DO 值在水华组和过渡组较相似,且均高于无水华组;$NH_4^+$-N、TN、$PO_4^{3-}$-P、TP、DSi/TN、WT 和 Cond 在 3 组间均无显著差异. 蓝藻水华暴发时肉眼可见水面上漂浮一层较厚的藻体,导致透明度明显下降,pH 值显著上升. 水华组 DSi 和 $NO_3^-$-N + $NO_2^-$-N

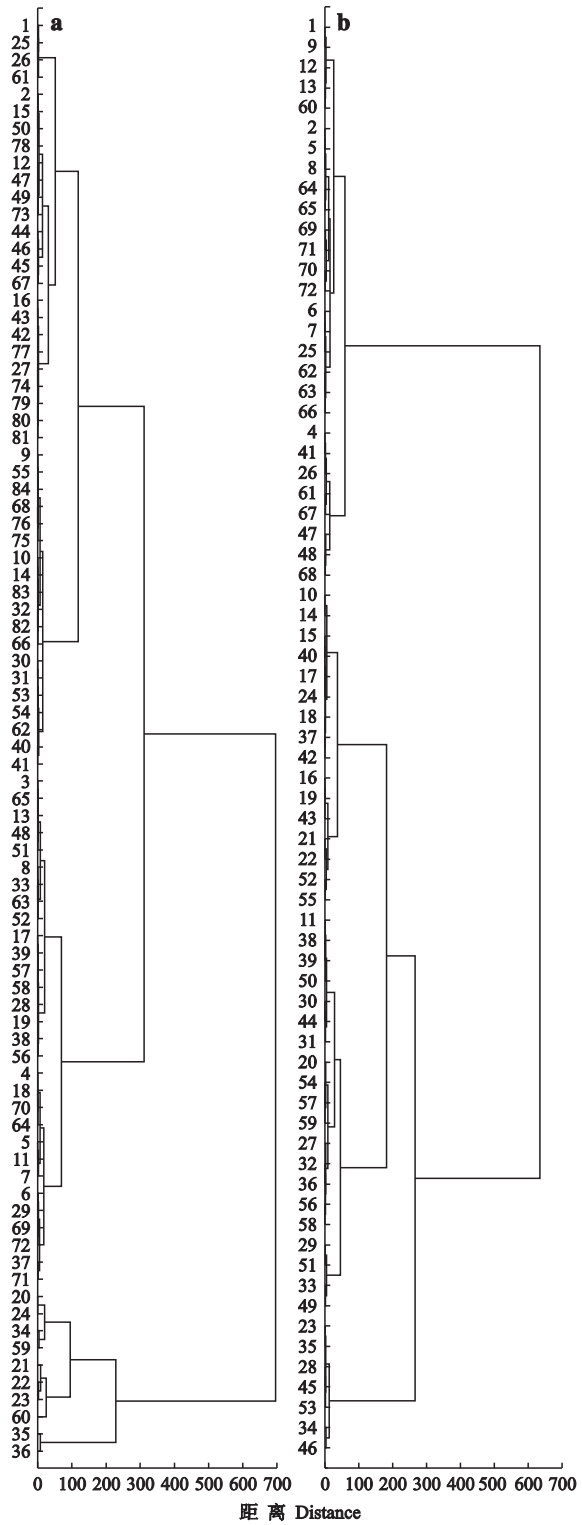



**图 3 研究区蓝藻水华(a)和绿藻水华(b)的聚类图**

**Fig. 3** Dendrogram of cyanobacterial bloom (a) and chlorophycean bloom (b) in the study area.

**纵向数字表示聚类分析样本所对应的编号** Longitudinal number indicated corresponding codes of samples for cluster analysis.

表 1　聚类分析样本所对应的编号

Tab. 1　Corresponding codes of samples for cluster analysis

| 样点 Sampling site | 距河口距离 Distance from mouth (km) | 采样时间 Sampling time (m-d) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 06-06 | 06-13 | 06-20 | 06-27 | 07-04 | 07-11 | 07-18 | 07-25 | 08-01 | 08-08 | 08-15 | 08-22 | 08-29 |
| XX09 | 26.85 | 12 | 24 | 36 | 48 | 60 | 72 | 84 | 12 | 24 | 36 | 48 | 60 | 72 |
| XX08 | 24.99 | 11 | 23 | 35 | 47 | 59 | 71 | 83 | 11 | 23 | 35 | 47 | 59 | 71 |
| XX07 | 21.50 | 10 | 22 | 34 | 46 | 58 | 70 | 82 | 10 | 22 | 34 | 46 | 58 | 70 |
| XX06 | 20.04 | 9 | 21 | 33 | 45 | 57 | 69 | 81 | 9 | 21 | 33 | 45 | 57 | 69 |
| XX05 | 18.46 | 8 | 20 | 32 | 44 | 56 | 68 | 80 | 8 | 20 | 32 | 44 | 56 | 68 |
| XX04 | 15.08 | 7 | 19 | 31 | 43 | 55 | 67 | 79 | 7 | 19 | 31 | 43 | 55 | 67 |
| XX03a | 13.45 | 6 | 18 | 30 | 42 | 54 | 66 | 78 | 6 | 18 | 30 | 42 | 54 | 66 |
| XX03 | 10.70 | 5 | 17 | 29 | 41 | 53 | 65 | 77 | 5 | 17 | 29 | 41 | 53 | 65 |
| XX02a | 7.58 | 4 | 16 | 28 | 40 | 52 | 64 | 76 | 4 | 16 | 28 | 40 | 52 | 64 |
| XX02 | 5.34 | 3 | 15 | 27 | 39 | 51 | 63 | 75 | 3 | 15 | 27 | 39 | 51 | 63 |
| XX01 | 2.33 | 2 | 14 | 26 | 38 | 50 | 62 | 74 | 2 | 14 | 26 | 38 | 50 | 62 |
| XX00 | 0 | 1 | 13 | 25 | 37 | 49 | 61 | 73 | 1 | 13 | 25 | 37 | 49 | 61 |

含量显著降低表明水华暴发时藻类对这 2 种营养盐的明显消耗. 无水华组和过渡组的 TN/TP 值含量较高限制了水华的暴发,这与 Zohary 等[18]的研究结果一致,而蓝藻水华的暴发可能与较低的 TN/TP 值有关[19-20]. 另外,蓝藻水华的暴发可能与 DSi/TP 值的明显下降也有一定关系. Horn 等[21]指出,硅磷比的下降将伴随从硅藻到蓝藻的转变. Rocha 等[22]和 Domingues 等[23]的研究也表明,营养比例从高氮磷比和高硅磷比转变为低氮磷比和低硅磷比,将伴随浮游植物水华类群从春季硅藻向绿藻变化,并最终演变为夏季蓝藻占据优势地位. 根据 6 月 13 日和 6 月 20 日香溪河库湾上游浮游植物的初步鉴定,6 月 13 日硅藻和蓝藻占总密度的 80% 以上,硅藻的密度稍小于蓝藻,但仍达到 $10^7$ 的数量级;而 6 月 20 日蓝藻的相对丰度超过 80%. 6 月 20 日香溪河库湾上游两点的硅磷比分别为 7.66 和 6.89,这一方面,表明蓝藻水华暴发时水体中有硅藻伴生,对 DSi 有一定消耗;另一方面,表明蓝藻暴发程度最高的样点的硅磷比极低,已达到监测期间所有样点中硅磷比的最低值.

绿藻水华期间,第 1 组叶绿素 a 浓度不超过 16.87 μg·$L^{-1}$,平均为 7.64 μg·$L^{-1}$,可视为无水华组;第 2 组叶绿素 a 浓度在 19.95 ~ 48.68 μg·$L^{-1}$,平均为 31.82 μg·$L^{-1}$,可视为过渡组;第 3 组叶绿素 a 浓度在 58.38 ~ 67.09 μg·$L^{-1}$,平均为 61.02 μg·$L^{-1}$,可视为水华组. 与蓝藻水华暴发的情形相似,叶绿素 a 值在 3 组之间两两差异显著,且第 1、2、3 组的均值依次增大;DSi、$NO_3^-$-N + $NO_2^-$-N、$PO_4^{3-}$-P 和 DSi/TN 的均值在水华组和过渡组间较相似,且均低于无水华组;$NH_4^+$-N、TP、TN/TP、DSi/TP、WT、DO 和 pH 均值在无水华组和过渡组间差异显著,其中,TP 在无水华组高于过渡组,而其他指标均在无水华组低于过渡组;TN、Sd 和 Cond 在 3 组间均无显著性差异. 与蓝藻水华相比,绿藻水华暴发时对 DSi、$NO_3^-$-N + $NO_2^-$-N 和 $PO_4^{3-}$-P 3 种营养盐具有明显的吸收作用,且对 DSi/TN 值的下降较敏感,这可能与绿藻水华期间水体中含较多硅藻有关.

对蓝藻水华和绿藻水华的比较分析表明,在无水华组,Chl a、DSi、TN、DSi/TN、Sd、WT、Cond、DO 和 pH 差异显著;在过渡组,Chl a、DSi、$PO_4^{3-}$-P、TP、TN/TP、DSi/TN、DSi/TP、Sd、WT、Cond、DO 和 pH 差异显著;在水华组,TN/TP、DSi/TP 和 Cond 差异显著. 研究区蓝藻水华期间的硅含量以及氮磷比、硅氮比和硅磷比值均显著低于绿藻水华,这与相关研究结论一致[22-24].

### 2.3　三峡水库香溪河库湾水华暴发的判别分析

选取与聚类分析相同的 7 个指标(Chl a、DSi、$NH_4^+$-N、$NO_3^-$-N + $NO_2^-$-N、TN、$PO_4^{3-}$-P 和 TP),采用 Wilks' Lambda 法分别对三峡水库香溪河库湾蓝藻和绿藻水华进行逐步判别分析,结果如下:

蓝藻水华期间三分组的判别函数值 $F$:

$$F_{\text{无水华组}} = -22.414 - 0.159\text{Chl a} + 33.358\text{TN} - 152.135\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$$

$$F_{\text{过渡组}} = -20.890 - 0.045\text{Chl a} + 31.072\text{TN} - 174.505\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$$

$$F_{\text{水华组}} = -23.340 + 0.358\text{Chl a} + 15.041\text{TN} - 99.557\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$$

绿藻水华期间三分组的判别函数值 $F$:

**表 2 分组统计量及组间多重比较**

**Tab. 2 Descriptive and multiple comparisons of different groups**

| 参 数 Parameter | 分组 Group | 蓝藻水华 Cyanobacterial bloom | | 绿藻水华 Chlorophycean bloom | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 样本量 $n$ | 平均值 ± 标准差 Mean ± SD | 样本量 $n$ | 平均值 ± 标准差 Mean ± SD |
| **叶绿素 a 浓度** | A | 44 | 12.47 ± 5.53a | 28 | 7.64 ± 4.70d |
| Chl a concentration ($\mu g \cdot L^{-1}$) | B | 30 | 26.69 ± 4.28b | 36 | 31.82 ± 8.60e |
| | C | 10 | 82.12 ± 38.48c | 7 | 61.02 ± 3.21c |
| **可溶性硅** | A | 44 | 2.96 ± 0.34ab | 28 | 4.30 ± 1.47d |
| DSi ($mg \cdot L^{-1}$) | B | 30 | 2.79 ± 0.49a | 36 | 3.22 ± 0.56b |
| | C | 10 | 2.33 ± 0.31c | 7 | 3.02 ± 0.54abc |
| **铵态氮** | A | 44 | 0.07 ± 0.05ab | 28 | 0.05 ± 0.03a |
| $NH_4^+$-N ($mg \cdot L^{-1}$) | B | 30 | 0.12 ± 0.09bc | 36 | 0.11 ± 0.07c |
| | C | 10 | 0.28 ± 0.28abc | 7 | 0.15 ± 0.06abc |
| **硝态氮 + 亚硝态氮** | A | 44 | 1.21 ± 0.18a | 28 | 1.19 ± 0.16a |
| $NO_3^-$-N + $NO_2^-$-N($mg \cdot L^{-1}$) | B | 30 | 1.13 ± 0.21ab | 36 | 1.04 ± 0.11bd |
| | C | 10 | 0.81 ± 0.18c | 7 | 0.93 ± 0.09cd |
| **总 氮** | A | 44 | 1.45 ± 0.19a | 28 | 1.31 ± 0.17b |
| TN ($mg \cdot L^{-1}$) | B | 30 | 1.42 ± 0.22ab | 36 | 1.30 ± 0.09b |
| | C | 10 | 1.34 ± 0.54ab | 7 | 1.26 ± 0.10b |
| **磷酸盐** | A | 44 | 0.02 ± 0.02a | 28 | 0.06 ± 0.07a |
| $PO_4^{3-}$-P ($mg \cdot L^{-1}$) | B | 30 | 0.02 ± 0.01a | 36 | 0.01 ± 0.01b |
| | C | 10 | 0.05 ± 0.05ab | 7 | 0.01 ± 0.001b |
| **总 磷** | A | 44 | 0.04 ± 0.02a | 28 | 0.09 ± 0.10ab |
| TP ($mg \cdot L^{-1}$) | B | 30 | 0.04 ± 0.02a | 36 | 0.02 ± 0.01c |
| | C | 10 | 0.12 ± 0.10abc | 7 | 0.03 ± 0.01bc |
| **总氮/总磷** | A | 44 | 45.32 ± 20.88a | 28 | 36.05 ± 28.22ab |
| TN/TP | B | 30 | 41.21 ± 17.32a | 36 | 75.26 ± 37.36c |
| | C | 10 | 18.44 ± 14.27b | 7 | 53.47 ± 16.81ac |
| **可溶性硅/总氮** | A | 44 | 2.06 ± 0.22ab | 28 | 3.36 ± 1.39d |
| DSi/TN | B | 30 | 2.01 ± 0.42ab | 36 | 2.47 ± 0.40c |
| | C | 10 | 1.95 ± 0.62ac | 7 | 2.39 ± 0.37abc |
| **可溶性硅/总磷** | A | 44 | 93.74 ± 43.75a | 28 | 96.64 ± 61.46a |
| DSi/TP | B | 30 | 81.19 ± 39.26a | 36 | 191.03 ± 111.08c |
| | C | 10 | 36.31 ± 27.37b | 7 | 129.49 ± 48.38ac |
| **水体透明度** | A | 44 | 147.95 ± 67.63a | 28 | 75.89 ± 52.88b |
| Sd (cm) | B | 30 | 163.63 ± 95.79a | 36 | 90.28 ± 18.90b |
| | C | 10 | 73.00 ± 24.52b | 7 | 74.29 ± 23.70b |
| **水 温** | A | 43 | 26.70 ± 1.64a | 26 | 23.99 ± 3.13c |
| WT (℃) | B | 29 | 26.50 ± 1.26a | 29 | 27.90 ± 1.40b |
| | C | 9 | 26.36 ± 0.73a | 4 | 27.71 ± 2.50abc |
| **电导率** | A | 43 | 0.33 ± 0.02a | 26 | 0.30 ± 0.03b |
| Cond ($mS \cdot cm^{-1}$) | B | 29 | 0.33 ± 0.02a | 29 | 0.29 ± 0.01b |
| | C | 9 | 0.32 ± 0.02a | 4 | 0.29 ± 0.01b |
| **溶解氧** | A | 43 | 13.81 ± 3.97a | 26 | 9.42 ± 0.85c |
| DO ($mg \cdot L^{-1}$) | B | 29 | 16.42 ± 2.74b | 29 | 12.12 ± 2.79a |
| | C | 9 | 20.54 ± 3.08b | 4 | 12.52 ± 4.14abc |
| pH | A | 35 | 8.04 ± 0.36ab | 26 | 7.58 ± 0.30d |
| | B | 29 | 8.25 ± 0.23b | 29 | 7.98 ± 0.28a |
| | C | 9 | 8.54 ± 0.12c | 4 | 8.03 ± 0.44abcd |

A：**无水华组** Non-bloom group；B：**过渡组** Transition group；C：**水华组** Bloom group. **下同** The same below. **同列不同字母表示不同组间的差异达显著水平**（$P < 0.05$）Different letters within the same column indicated significant difference at 0.05 levels.

$$F_{无水华组} = -9.962 + 0.038\text{Chl a} + 4.056\text{DSi}$$

$$F_{过渡组} = -14.241 + 0.598\text{Chl a} + 2.256\text{DSi}$$

$$F_{水华组} = -40.757 + 1.241\text{Chl a} + 1.183\text{DSi}$$

**判别分析结果表明，研究区蓝藻水华的暴发主要由** Chl a、TN **和** $PO_4^{3-}$-P **决定，而绿藻水华是否暴发主要由** Chl a **和** DSi **决定，判别分析正确率分别达到** 89.3% **和** 97.2%（**表** 3）. **除叶绿素** a **在** 3 **组间有显著性差异外，其他指标在组间的差异均不显著，由此造成一定程度上的误判. 由图** 3 **可以看出，蓝藻水华期间的无水华组和过渡组易混淆，而绿藻水华**

**表 3　三分组分类结果**

**Tab. 3　Classification results of three groups for each bloom**

| 期间 Period | 项目 Item | 原始分组 Original group | 预测分组 Predicted group | | | 合计 Total |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | A | B | C | |
| 蓝藻水华期间 | 样本数 | A | 38 | 6 | 0 | 44 |
| Period of cyanobacterial bloom | Number of samples | B | 1 | 29 | 0 | 30 |
| | | C | 0 | 2 | 8 | 10 |
| | 百分数 Percentage | A | 86.4 | 13.6 | 0 | 100 |
| | | B | 3.3 | 96.7 | 0 | 100 |
| | | C | 0 | 20 | 80 | 100 |
| 绿藻水华期间 | 样本数 | A | 28 | 0 | 0 | 28 |
| Period of chlorophycean bloom | Number of samples | B | 0 | 34 | 2 | 36 |
| | | C | 0 | 0 | 7 | 7 |
| | 百分数 Percentage | A | 100 | 0 | 0 | 100 |
| | | B | 0 | 94.4 | 5.6 | 100 |
| | | C | 0 | 0 | 100 | 100 |

**表 4　二分组分类结果**

**Tab. 4　Classification results of two groups for each bloom**

| 期间 Period | 项目 Item | 原始分组 Original group | 预测分组 Predicted group | | 合计 Total |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | A | C | |
| 蓝藻水华期间 | 样本数 | A | 74 | 0 | 74 |
| Period of cyanobacterial bloom | Number of samples | C | 1 | 9 | 10 |
| | 百分数 Percentage | A | 100 | 0 | 100 |
| | | C | 10 | 90 | 100 |
| 绿藻水华期间 | 样本数 | A | 28 | 0 | 28 |
| Period of chlorophycean bloom | Number of samples | C | 0 | 43 | 43 |
| | 百分数 Percentage | A | 100 | 0 | 100 |
| | | C | 0 | 100 | 100 |

期间的水华组和过渡组在空间关系上更接近. 为此，将过渡组分别归入无水华组（蓝藻水华期间）和水华组（绿藻水华期间），选取指标相同，可得到如下的判别函数：

蓝藻水华期间二分组的判别函数值 $F$：

$$F_{无水华组} = -21.197 - 0.084\text{Chl a} + 32.214\text{TN} - 169.242\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$$

$$F_{水华组} = -21.068 + 0.268\text{Chl a} + 17.116\text{TN} - 82.295\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$$

绿藻水华期间二分组的判别函数值 $F$：

$$F_{无水华组} = -9.685 + 0.032\text{Chl a} + 4.127\text{DSi}$$

$$F_{水华组} = -10.392 + 0.284\text{Chl a} + 2.827\text{DSi}$$

由判别函数可知，蓝藻水华的暴发主要由 Chl a、TN、$PO_4^{3-}$-P 决定，而绿藻水华的暴发主要由 Chl a、DSi 决定，其判别正确率明显提高，分别达 98.8% 和 100%（表 4）. 说明将研究区蓝藻和绿藻 2 次水华分别划分为水华组和无水华组有助于判断 2 次水华暴发时叶绿素 a 浓度的临界标准. 三峡水库香溪河库湾蓝藻水华期间过渡组和水华组叶绿素 a 浓度范围分别是 20.60 ~ 35.35 μg · $L^{-1}$ 和 43.08 ~ 152.07 μg · $L^{-1}$，绿藻水华期间无水华组和过渡组叶绿素 a 浓度范围分别是 0.07 ~ 16.87 μg · $L^{-1}$ 和 19.95 ~ 48.68 μg · $L^{-1}$. 由此得到蓝藻水华暴发和绿藻水华暴发叶绿素 a 的临界浓度分别为 40 和 20 μg · $L^{-1}$.

## 3　结　　语

2008 年 6—8 月，三峡水库香溪河库湾相继暴发蓝藻和绿藻水华. 其中，蓝藻水华在 6 月 6 日—7 月 11 日持续一个多月，绿藻水华在全库湾范围内持续时间在 7 月 25 日—8 月 22 日. 蓝藻水华的暴发相对集中和强烈，绿藻水华暴发强度小于蓝藻水华，但影响范围更广.

蓝藻水华暴发时对硅和氮 2 种营养盐有明显吸收，绿藻水华暴发时对硅、氮和磷 3 种营养盐均有明显吸收. 绿藻水华暴发过程具较高的 DSi 含量及 TN/TP、DSi/TN 和 DSi/TP 值.

判别蓝藻水华暴发的参数为 Chl a、TN 和 $PO_4^{3-}$-P，而绿藻水华是否暴发由 Chl a 和 DSi 决定. 将研究期间 2 次水华过程分别划分为水华组和无水华组，判别正确率可分别达 98.8% 和 100%. 叶绿素

*a* 浓度为 40 和 20 μg·$L^{-1}$可作为研究区域蓝藻和绿藻水华暴发的阈值.

## 参考文献


[1] Kuo JT, Lung WS, Yang CP, *et al*. Eutrophication modeling of reservoirs in Taiwan. *Environmental Modelling and Software*, 2006, **21**: 829-844

[2] Pal S, Chatterjee S, Das KP, *et al*. Role of competition in phytoplankton population for the occurrence and control of plankton bloom in the presence of environmental fluctuations. *Ecological Modelling*, 2009, **220**: 96-110

[3] Allen JI, Smyth TJ, Siddorn JR, *et al*. How well can we forecast high biomass algal bloom events in a eutrophic coastal sea? *Harmful Algae*, 2008, **8**: 70-76

[4] Latour D, Sabido O, Salencon MJ, *et al*. Dynamics and metabolic activity of the benthic cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* in the Grangent Reservoir (France). *Journal of Plankton Research*, 2004, **26**: 719-726

[5] Cloern J. Phytoplankton bloom dynamics in coastal ecosystems: A review with some general lessons from sustained investigation of San Francisco Bay, California. *Reviews of Geophysics*, 1996, **34**: 127-168

[6] Cloern JE. Tidal stirring and phytoplankton bloom dynamics in an estuary. *Journal of Marine Research*, 1991, **49**: 203-221

[7] Henson SA, Robinson I, Allen JT, *et al*. Effect of meteorological conditions on interannual variability in timing and magnitude of the spring bloom in the Irminger Basin, North Atlantic. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2006, **53**: 1601-1615

[8] Carstensen J, Conley DJ, Henriksen P. Frequency, composition, and causes of summer phytoplankton blooms in a shallow coastal ecosystem, the Kattegat. *Limnology and Oceanography*, 2004, **49**: 190-201

[9] Huppert A, Blasius B, Olinky R, *et al*. A model for seasonal phytoplankton blooms. *Journal of Theoretical Biology*, 2005, **236**: 276-290

[10] Cai Q-H (蔡庆华), Hu Z-Y (胡征宇). Studies on eutrophication problem and control strategy in the Three Gorges Reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica* (水生生物学报), 2006, **30**(1): 7-11 (in Chinese)

[11] Ye L, Han XQ, Xu YY, *et al*. Spatial analysis for spring bloom and nutrient limitation in Xiangxi bay of Three Gorges Reservoir. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, **127**: 135-145

[12] Ye L, Xu YY, Han XQ, *et al*. Daily dynamics of nutrient and chlorophyll a during a spring phytoplankton bloom in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Freshwater Ecology*, 2006, **21**: 315-321

[13] Zhang Y (张 远), Zheng B-H (郑丙辉), Liu H-L (刘鸿亮). Characteristics of phytoplankton composition with analysis of its impact factors after impounding of the Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2006, **15**(2): 254-258 (in Chinese)

[14] Zheng B-H (郑丙辉), Zhang Y (张 远), Fu G (富国), *et al*. On the assessment standards for nutrition status in the Three Gorges Reservoir. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2006, **26**(6): 1022-1030 (in Chinese)

[15] Li Y-J (李永建), Li D-G (李斗果), Wang D-R (王德蕊). Influence of second phase sluice of the Three Gorges Reservoir on the eutrophication of the reservoir-feeding tributaries. *Journal of Southwest Agricultural University* (Natural Science) (西南农业大学学报·自然科学版), 2005, **27**(4): 474-478 (in Chinese)

[16] Cai Q-H (蔡庆华). Protocols for Standard Observation and Measurement in Aquatic Ecosystems. Beijing: China Environmental Science Press, 2007 (in Chinese)

[17] Huang X-F (黄祥飞), Chen W-M (陈伟民), Cai Q-M (蔡启铭). Survey, Observation and Analysis of Lake Ecology. Beijing: China Standards Press, 2000 (in Chinese)

[18] Zohary T, Pais-Madeira AM, Robarts R, *et al*. Interannual phytoplankton dynamics of a hypertrophic African lake. *Archiv für Hydrobiologie*, 1996, **136**: 105-126

[19] Yi W-L (易文利), Wang G-D (王国栋), Liu X-W (刘选卫), *et al*. Effect of N/P ratios on the growth and some biochemical constituents of *Microcystis aeruginosa*. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry* (Natural Science) (西北农林科技大学学报·自然科学版), 2005, **33**(6): 151-154 (in Chinese)

[20] Bulgakov NG, Levich AP. The nitrogen: phosphorus ratio as a factor regulating phytoplankton community structure. *Archiv für Hydrobiologie*, 1999, **146**: 3-22

[21] Horn H, Horn W. Growth of blue-green algae in the Saidenbach reservoir and its relationship to the silicon budget. *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie*, 1990, **75**: 461-474

[22] Rocha C, Galvao H, Barbosa A. Role of transient silicon limitation in the development of cyanobacteria blooms in the Guadiana estuary, south-western Iberia. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, **228**: 35-45

[23] Domingues RB, Barbosa A, Galvao H. Nutrients, light and phytoplankton succession in a temperate estuary (the Guadiana, south-western Iberia). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, **64**: 249-260

[24] Domingues RB, Sobrino C, Galvao H. Impact of reservoir filling on phytoplankton succession and cyanobacteria blooms in a temperate estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, **74**: 31-43


**作者简介** 王 岚,女,1983 年生,博士研究生. 主要从事淡水生态学和系统生态学研究,发表论文 3 篇. E-mail: wanglan@ihb.ac.cn

**责任编辑** 杨 弘