

三峡小江回水区段 2007 年春季水华与营养盐特征*

李 哲, 方 芳, 郭劲松**, 陈 杰, 张 超, 田 光

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要: 2007 年 5 月中下旬, 三峡水库小江回水区发生水华, 主要分布在高阳平湖、黄石代李子和双江大桥等处. 对水华期间浮游植物群落特点和水环境特征的分析发现蓝藻占主导, 约为浮游植物生物量的 81.43%, 优势藻种为水华鱼腥藻(*Anabaena flos-aquae*), 结合水华期间总氮含量较非水华期间明显偏高且有机氮为氮素主要成份和许多蓝藻门类藻种均带有异形胞的分析结果, 认为此次水华是固氮型蓝藻水华. 水华暴发前初春的强降雨过程导致小江回水区 TP 水平的普遍增加促使了 TN/TP 发生显著的变化, 4 月份较低的 TN/TP 水平诱使固氮型蓝藻在小江回水区迅速生长, 并在 5 月份形成水华. 水华期间生物量的增加造成水中磷酸盐浓度的降低, 使得小江回水区表现出显著的磷限制特征. 调查认为: 高阳平湖段可能是小江回水区蓝藻水华的发源地, 蓝藻生物体随流漂移至下游黄石代李子处并逐渐聚集, 形成自岸边缓流带向河道中心逐渐延伸的肉眼可见的蓝藻生物聚集体, 从而使得黄石代李子处具有最高的生物量和叶绿素值. 而双江大桥处, 则主要是由于河道过水断面的放大导致流速的降低, 同时沿岸云阳县县城的排污使得这一河段的营养负荷相对提高, 从而为上游随流漂移下来的蓝藻提供了较佳的生长环境.

关键词: 三峡水库; 小江回水区; 固氮型蓝藻水华; 浮游植物群落特点; 营养物组成

Spring algal bloom and nutrients characteristics in Xiaojiang River backwater area, Three Gorge Reservoir, 2007

LI Zhe, FANG Fang, GUO Jinsong, CHEN Jie, ZHANG Chao & TIAN Guang

(Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R.China)

Abstract: Cyanobacterial bloom occurred in Lake Gaoyang, Huangshi Dailizi and Shuangjiang Bridge of the backwater area of Xiaojiang River in Three Gorges Reservoir in late May of 2007. After the survey on the phytoplankton and water quality, it was found that cyanobacteria dominated the phytoplankton, taken up to the 81.43% of the total biomass, among which the *Anabaena flos-aquae* was the dominance species. The heterocysts appearing in most species indicated that nitrogen fixation may occur. Low TN:TP ratio in April was that the heavy storm may trigger this nitrogen-fixation algal bloom. Phosphorus limitation was another characteristic, which is the result of the tremendous growth of phytoplankton. Lake Gaoyang may be the source place where algal bloom occurred. Cyanobacteria moved downstream with the water flows, assembling at Huangshi Dailizi, where algal bloom was more than that in the Lake Gaoyang. As a result, total biomass and chlorophyll-a in Huangshi Dailizi was the highest among the sampling spots. Water velocity in Shuangjiang Bridge was slower due to the enlarged cross section downstream, offering a proper environment for the growth of cyanobacteria. Accompanied by the large amount of nutrients loads at Yunyang County, this may be the major reason of the detection of algal bloom in Shuangjiang Bridge.

Keywords: Three Gorges Reservoir; Xiaojiang River backwater area; cyanobacterial algal bloom; phytoplankton community; nutrients

蓝藻水华是水体富营养化的重要表征之一, 备受关注. 一方面, 水中大量分泌的藻毒素(主要来自微

* 中国科学院西部行动计划“三峡库区水土流失与面源污染控制试验示范”项目(KZCX2-XB2-07-02)资助. 2008-01-28 收稿; 2008-06-06 收修改稿. 李哲, 男, 1981 年生, 博士研究生; E-mail: Lizhe1981@126.com.

** 通讯作者; E-mail: Guo0768@126.com.

囊藻属 *Microcystis*)不仅能通过食物链迁移、富集,影响水生生物生长^[1-2],也是目前城镇饮用水处理的一大难题;另一方面,多数蓝藻种群具有生物固氮功能,固氮型蓝藻水华的发生将严重改变水中氮素的生物地化循环过程,破坏水生生态系统的平衡^[3].学术界对固氮型蓝藻水华的研究始于 20 世纪 70 年代,直到 80 年代中后期才对水体中发生的这一固氮现象有了较为深入的了解^[4-5].固氮型蓝藻种群(束丝藻属 *Aphanizomenon*、鱼腥藻属 *Anabaena* 等)带有的异形胞(heterocyst)是生物固氮的重要场所.在缺乏可利用氮素的条件下,异形胞中的固氮酶(nitrogenase)能催化大气中分子态的氮(N_2),将其还原成提供蓝藻自身生长的氮素化合物^[6].大量研究表明湖泊中较低的 TN/TP 比值是除光照、温度、钼酸盐含量外,刺激固氮型蓝藻生长的关键环境要素^[7].Smith 提出了 $TN/TP < 29$ (质量比,下同)^[8]以及 $TN/TP < 22$ ^[9]分别是蓝藻种群和固氮型蓝藻种群在浮游植物群落中占优的重要环境条件^[10].Håkanson 的研究中则将 $TN/TP < 15$ 作为蓝藻出现的边界条件^[3].而 Xie 等的围隔试验研究则认为低 TN/TP 比值是固氮型蓝藻水华生长的结果,并认为这一比值关系不适用于解释在水体超营养状态下(Hypertrophic)的蓝藻生长现象^[11].孔繁翔等的论述中引证并进一步阐释了这一观点^[12].但直到目前仍未见有较为完善、全面的论述以阐释氮、磷比值变化对蓝藻生长的影响及其水华期间蓝藻繁盛-衰减过程同 TN/TP 比值动态变化的相互关系.

2006 年 10 月底,三峡水库蓄水至 156m 水位,进入水库防洪调蓄的第一运行阶段,库区的水环境特点也更加接近于工程完工后的状态,水位的涨落进一步促进了库区水环境要素的重组.2007 年 5 月初,三峡水库小江回水区段(简称“小江回水区”)开始出现水华,5 月 16 日至 20 日小江回水区部分河段出现较大面积藻类聚集上浮的现象,此后由于 5 月 22 日的降雨,成片的藻类聚集体在 5 月 24 日前后逐渐消失,但蓝藻仍为优势种属,并持续至 6 月中旬.此前三峡水库次级河流水华现象的报道多集中在香溪河^[13-14],且多为甲藻水华^[15].本文介绍了三峡水库小江回水区蓝藻水华期间浮游植物群落组成和营养结构特点,同时着重分析水华发生前期以及暴发期间 TN/TP 比值的变化过程,探讨固氮型蓝藻水华的成因,并对小江回水区蓝藻水华空间分布特点与成因进行简要分析.

1 研究区域与采样测试

1.1 研究区域与采样方案

小江流域,介于北纬 $30^{\circ}49' - 31^{\circ}42'$,东经 $107^{\circ}56' - 108^{\circ}54'$ 之间,流域面积 5173km^2 ,干流全长 182.4km ,是三峡库区中段、北岸流域面积最大的次级河流^[16].课题组对小江回水区富营养化的全面跟踪研究开始于 2006 年冬季,沿小江流域 145m 水位以下回水区段(全长约 40km)分别设置 5 个定常采样点(渠马渡口、高阳平湖、黄石镇、双江大桥以及小江河口),采样频率为每月 2 次.在 5 月 10 日的常规采样中^[17],发现除上游渠马渡口采样点外,自高阳平湖开始,回水区下游水域开始出现零星蓝藻絮状、丝状聚集体,判定小江回水区进入蓝藻水华危险期.此后,课题组增加了采样的频率,加强了对小江回水区蓝藻水华的跟踪,同时根据蓝藻水华历程及其空间分布特点,在水华较为严重的时期(5 月 16 日至 20 日)选择双江大桥、黄石代李子、高阳平湖 3 个蓝藻水华现象最为明显的典型河段进行采样,其中高阳平湖、双江大桥采样点位置和常规采样无异.采样时间控制在 10:00 至 16:00,采样点位于河道中泓线处,各采样点空间坐标分别为:高阳平湖($31^{\circ}07'50.5''\text{N}$; $108^{\circ}40'29.5''\text{E}$)、黄石代李子($31^{\circ}03'38.6''\text{N}$; $108^{\circ}41'36.2''\text{E}$)、双江大桥($30^{\circ}56'51.1''\text{N}$; $108^{\circ}41'37.5''\text{E}$).每个采样点采集表层 0.5m 水样,部分指标现场测试,其余指标分析测试为样品带回实验室后于 48h 内完成.

1.2 测试指标与分析方法

现场测试指标包括: pH 值、溶解氧、水温、表层流速、透明度等.其中 pH 值和水温采用 YSI pH100 型酸度计测得,溶解氧采用 HACH LDO 型溶氧仪测得,透明度采用自制的塞氏盘测得.表层流速采用 LS45A 型旋杯流速仪(量程 $0.015 - 3.5\text{m/s}$),分别测试水面下 0.5m 、 1.0m 、 1.5m 、 2.0m 、 2.5m 、 3.0m 共 6 个测点的 20s 瞬时流速值,取平均值作为表层流速值,以避免波浪对表层流速的干扰.在浮游植物样品中,定性样品用 $25\mu\text{m}$ 浮游植物网在水面下作“ ∞ ”捞取,甲醛固定^[18].定量样品则取 1L 水样,现场滴加适量鲁哥试剂,取回实验室静置 48h 浓缩,用浮游植物计数框在光学显微镜(10×40)下观察计数,然后按照相关公式换算藻类的细胞密度^[19],藻类种类鉴定参照文献[20]和文献[21]进行,其中硅藻种类的鉴定根据文献

[19]提供的方法进行预处理.

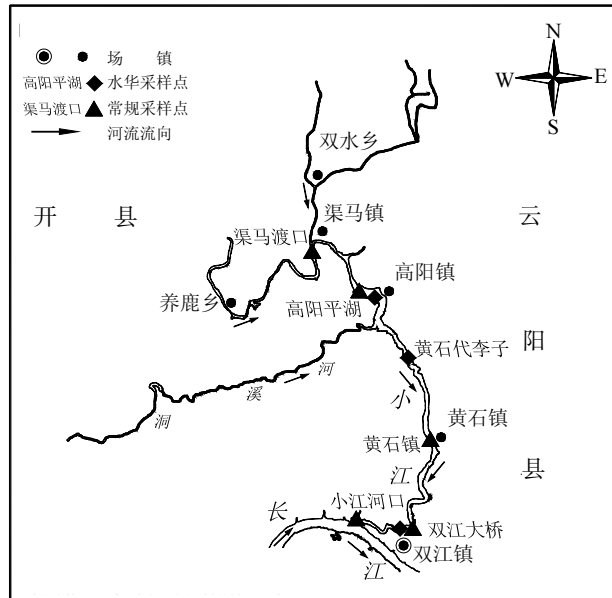


图 1 小江回水区采样点分布(水华期间, 高阳平湖、双江大桥采样点, 同常规采样点空间位置无异, 但图中分开标出以示不同)

Fig.1 Sketch of sampling spots in Xiaojiang backwater area

水质测试指标包括氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、亚硝态氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)、溶解性凯氏氮(DKN)、总凯氏氮(TKN)、溶解性磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, 亦称 SRP)、溶解性总磷(DTP)、总磷(TP)、溶解性硅(DSi)、叶绿素 a(Chl.a). 总凯氏氮(TKN)、总磷(TP)两个指标的测试水样为未经抽滤处理的原水样, 以用于计算水中溶解态或颗粒态物质含量, 其余指标的测试水样均经过 $0.45\mu\text{m}$ 混合纤维滤膜抽滤处理.

水环境中氮素赋存形态大体可以分为溶解态、颗粒态, 另外还包括溶解于水中的游离态 N_2 . 但由于水相中游离态 N_2 以及颗粒态无机氮含量^[22-25]很低, 且河流硝化、反硝化过程的中间产物 NO_x 为不稳定存在形态^[22-23]. 根据上述文献, 本研究认为水相中游离态 N_2 以及颗粒态无机氮可以忽略而不计入, 同时由于凯氏氮包含了氨氮以及能够在相应条件下转化为铵盐的有机氮化合物^[26], 因此根据上述测试指标, 氮素赋存形态的计算关系式如下:

- | | |
|---|--|
| (1)溶解态有机氮(DON)= $\text{DKN}-\text{NH}_3\text{-N}$ ^[22] ; | (2)颗粒态有机氮(PON)= $\text{TKN}-\text{DKN}$ ^[23] ; |
| (3)总无机氮(DIN)= $\text{NH}_3\text{-N}+\text{NO}_3^-\text{-N}+\text{NO}_2^-\text{-N}$ ^[22-24] ; | (4)总溶解氮(TDN)= $\text{DIN}+\text{DON}$ ^[22,24] ; |
| (5)总有机氮(TON)= $\text{PON}+\text{DON}$ ^[23-24] ; | (6)总氮(TN)= $\text{DIN}+\text{DON}+\text{PON}$ ^[22-23] |

各形态磷之间的计算关系式如下:

- | | |
|---|--|
| (1)溶解态磷(DP)= $\text{DTP}-\text{SRP}$ ^[22,25] ; | (2)颗粒态磷(PP)= $\text{TP}-\text{DTP}$ ^[22,25] |
|---|--|

所有指标的分析测试方法参考《水与废水分析测试方法(第四版)》^[26]和《湖泊生态调查观测与分析》^[18]进行. 测得数据录入 SPSS13.0 并进行相关统计分析.

2 分析测试结果

2.1 浮游植物群落组成及其特征分析

此次水华主要集中在高阳平湖、黄石代李子、双江大桥 3 个河段. 绿色的蓝藻絮状、丝状群体肉眼可见并聚集于水体表层, 呈不规则片状、带状分布, 蓝绿相间, 如油漆泼于水面并伴有恶臭. 镜检发现该

絮状、丝状群体主要是由鱼腥藻属和束丝藻属组成. 各采样点共检出藻种 5 门 25 属 56 种(含变种), 其中蓝藻门 4 属 9 种, 绿藻门 12 属 25 种, 硅藻门 7 属 19 种, 甲藻门 1 属 1 种, 隐藻门 2 属 2 种.

水华期间, 各采样点表层水体叶绿素 a 平均含量为 52.36 $\mu\text{g/L}$, 藻类平均细胞密度为 $171.27\times 10^5\text{cells/L}$, 生物量平均值为 49.33 mg/L (表 1), 其中叶绿素 a 最高出现在黄石代李子处, 达到 81.69 $\mu\text{g/L}$, 相应的藻类细胞密度为 $297.52\times 10^5\text{cells/L}$, 生物量达到 83.87 mg/L . 在浮游植物的群落构成方面, 蓝藻占绝对主导(图 2), 约占浮游植物细胞总密度的 83.56%, 占浮游植物生物量的 81.43%, 其中水华鱼腥藻为优势种, 各采样点平均细胞密度为 $110.28\times 10^5\text{cells/L}$, 占各采样点蓝藻平均细胞密度的 77.06%, 其平均生物量为 30.88 mg/L , 约占各采样点蓝藻平均生物量的 76.86%. 在现场调查发现部分河段(高阳平湖、黄石代李子)已出现疑似藻类聚集体死亡后的不规则漂浮物. 镜检中绿藻门的空心藻属数量也保持较高水平, 平均细胞密度为 $15.98\times 10^5\text{cells/L}$, 占各采样点绿藻细胞密度的 59.83%, 生物量占各采样点绿藻生物量的 66.97%. 蓝藻和绿藻是水华期间浮游植物群落中的主要藻种. 值得关注的是在水华期间浮游植物的定性、定量分析中, 发现蓝藻中绝大多数藻种均带有异形胞, 主要为蓝藻的束丝藻属、鱼腥藻属和柱胞藻属. 由于异形胞内含有丰富的固氮酶, 是蓝藻固氮的场所^[6,27], 据此推断此次蓝藻水华为固氮型蓝藻水华.

表 1 小江回水区水华期间浮游植物定量分析结果*
Tab.1 Quantitative analysis of phytoplankton in sampling spots
during cyanobacterial algal bloom in Xiaojiang River backwater area

采样点	Chl.a	总密度	总生物量	硅藻		绿藻		蓝藻		隐藻、甲藻合计	
				密度	生物量	密度	生物量	密度	生物量	密度	生物量
高阳平湖	26.41	44.93	11.73	0.24	0.07	4.85	1.46	39.73	10.18	0.11	0.02
黄石代李子	81.69	297.52	83.87	0.78	0.15	22.30	6.78	273.99	76.66	0.45	0.29
双江大桥	48.98	171.35	52.40	1.71	0.25	53.00	18.25	115.61	33.70	1.05	0.21
平均值	52.36	171.27	49.33	0.91	0.16	26.71	8.83	143.11	40.19	0.57	0.31

* 叶绿素 a 单位: $\mu\text{g/L}$; 细胞密度单位: $\times 10^5\text{cells/L}$; 生物量单位: mg/L (湿重).

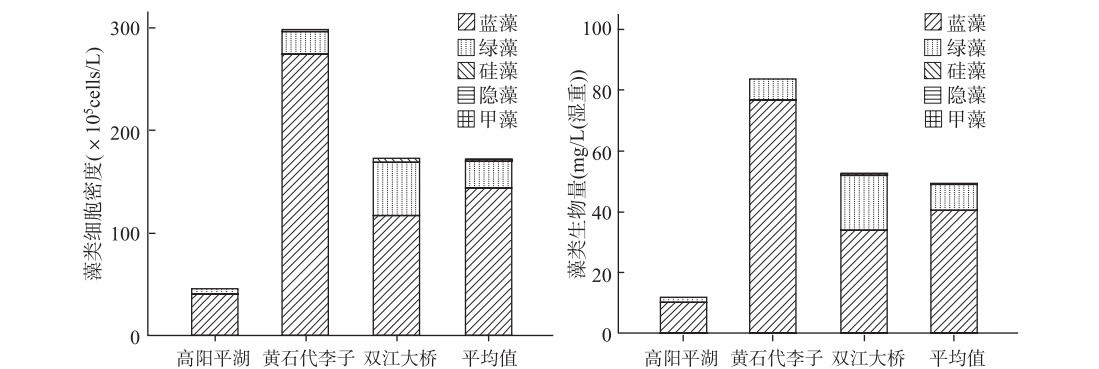


图 2 小江回水区蓝藻水华期间各采样点浮游植物定量分析结果
Fig.2 Quantitative analysis of phytoplankton in sampling spots
during cyanobacterial algal bloom in Xiaojiang River backwater area

2.2 水环境特征与营养物组成

水华期间, 总体上各采样点表层 0.5m 水深处水温保持在 25℃左右, pH 值均>8.3, 平均值为 8.59, 最

高值出现在双江大桥处(pH=8.77). 日间各采样点表层 0.5m 水深处溶解氧水平超过了 14mg/L. 同 2007 年 2 月至 8 月常规调查中 pH 值平均为 7.74, DO 平均值为 8.06mg/L 相比, 水华期间 pH 值和 DO 水平明显偏高. 各采样点透明度在 90-130cm 之间. 表层流速最高出现在黄石代李子处, 达到 0.36m/s, 其余测点表层流速均在 0.11m/s 左右(表 2).

水华期间, 各采样点 TN 平均值为 2450μg/L, 同 2007 年 2 月至 8 月常规水质调查 TN 平均浓度值为 1400μg/L 相比, TN 水平明显偏高. 在各采样点中, 黄石代李子的 TN 含量最高(4040μg/L, 表 3). 各采样点氮素形态分析表明, TON(DON+PON)是 TN 的主要赋存形式, 约占 TN 的 70.2%. DIN 平均值为 730μg/L, 同常规水质调查结果的 DIN 浓度平均值(1000μg/L)差异不大, 但其在 TN 中所占比重则从 71.1%降低至 29.8%. 其中, NO₃⁻-N 为 DIN 的主要赋存形式, 占 DIN 平均值的 67.1%, 占 TN 平均值的 20.0%. NH₃-N 平均浓度值为 200μg/L, 约占 DIN 平均值的 27.4%, 在 TN 中仅占 8.16%(表 3). 各采样点 TP 平均含量 (162μg/L)较常规水质调查结果(59μg/L)略有偏高, 其中黄石代李子的 TP 含量最高, PP 是磷素的主要存在形式(平均为 146μg/L, 图 3), 在 TP 中约占 90.1%, 其次为 DP(平均值为 10μg/L), 在 TP 中所占比重约为 6.2%. SRP 含量相对偏低, 仅占 TP 平均含量的 3.7%. 各磷素之间的相对比重同常规水质调查结果相比改变不大. 溶解性硅 DSi 平均值为 6900μg/L, 同常规水质调查相比(6090μg/L)没有明显变化.

表 2 各采样点水体主要物理化学特征*
Tab.2 Physical and chemical characteristics of water column in sampling spots

采样点	气温(℃)	水温(℃)	pH 值	DO(mg/L)	透明度(cm)	表层流速(m/s)
高阳平湖	34.20	25.90	8.55	14.34	120	0.079
黄石代李子	31.00	24.30	8.39	16.30	130	0.363
双江大桥	31.90	27.40	8.77	15.60	90	0.101
平均值	32.37	25.87	8.57	15.41	113	0.181

* 各采样点表层流速为水面下 0.5m、1.0m、1.5m、2.0m、2.5m、3.0m 共 6 个测点 20s 瞬时流速值的平均值; 其余指标均为水面下 0.5m 的水样测试值.

表 3 各采样点营养物组成(单位: μg/L)
Tab.3 Composition of nutrients in sampling spots

采样点	NH ₃ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	DON	PON	DIN	TN	PO ₄ ³⁻ -P	DP	PP	TP	DSi
高阳平湖	220	47	520	290	940	790	2020	6	11	112	129	5800
黄石代李子	240	33	380	670	2710	660	4040	7	17	268	292	6440
双江大桥	130	35	560	70	480	730	1280	4	3	57	63	8450
平均值	200	38	490	350	1380	730	2450	6	10	146	162	6900

3 讨论

小江回水区蓝藻自 4 月底开始出现以后, 在 5 月中旬气温进一步回暖的情况下开始快速增长, 并在 5 月中下旬形成明显的水华现象且持续至 5 月底. 水华期间 pH 值、DO、TN、TP 水平总体偏高, 而 DSi 则同常规水质调查结果相比没有明显变化. 各采样点 TN/TP 的平均比值为 15.22, 这同 Smith 等描述的固氮型蓝藻喜好在 TN/TP<22 的条件下生长的现象是相一致的^[9-10]. 笔者利用局部加权线性回归的方法(LOESS 拟合)对 2007 年 3-5 月常规采样期间 TN、TP、TN/TP 比值和叶绿素 a 的变化过程进行统计(图 4). 2007 年 3 月份, 小江回水区 TP 水平偏低, 5 个常规采样点 TP 平均值仅为 17μg/L, TN 平均值为 1096μg/L, 使得这一时期 TN/TP 比保持在较高的水平(TN/TP=65.49). 进入 4 月份后, 入春后的首次强降雨过程使小江回水区中磷素水平显著提高(TP 平均值 91μg/L), 但氮素没有明显变化(TN 平均值 1034μg/L), TP 含量的突然升高迫使 TN/TP 比值显著下降(TN/TP=11.81), 明显低于 Smith 提出的

TN/TP=22 的蓝藻占优界限, 造成了小江回水区在氮、磷营养物普遍丰足的情况下氮素却相对匮乏的状况, 从而诱发了固氮型蓝藻从 4 月底在小江回水区出现并开始生长. 5 月份后, 固氮型蓝藻在氮素相对匮乏环境下的生长优势促使其迅速繁盛并形成水华, 小江回水区的叶绿素 a 值也从 4 月初的最低值(2.89 $\mu\text{g/L}$) 迅速增加到 5 月 10 日常规采样时的 27.05 $\mu\text{g/L}$ (图 4). 与此同时, 回水区内 TN 水平在大量蓝藻生物固氮作用下逐渐升高, 而 TP 水平则略有下降, 促使 TN/TP 的比值逐渐上升: 从 5 月初的 19.76 逐渐上升到 5 月末 32.74, 超出了固氮型蓝藻占优的 TN/TP<22 的比值范围. 由此, 笔者推断四月份小江回水区低 TN/TP 比促进了固氮型蓝藻的生长, 并在满足自身生长的同时, 生物固氮作用加速了水中 TN 含量的增加进而逐步提高水中 TN/TP 的比值, 直至周围环境环境条件不再适合固氮蓝藻生存为止. 因此, 低 TN/TP 比可能是刺激固氮型蓝藻生长的主要因素, 并伴随蓝藻的繁盛与强烈的固氮作用逐渐改变了水中 TN、TP 的相对丰度.

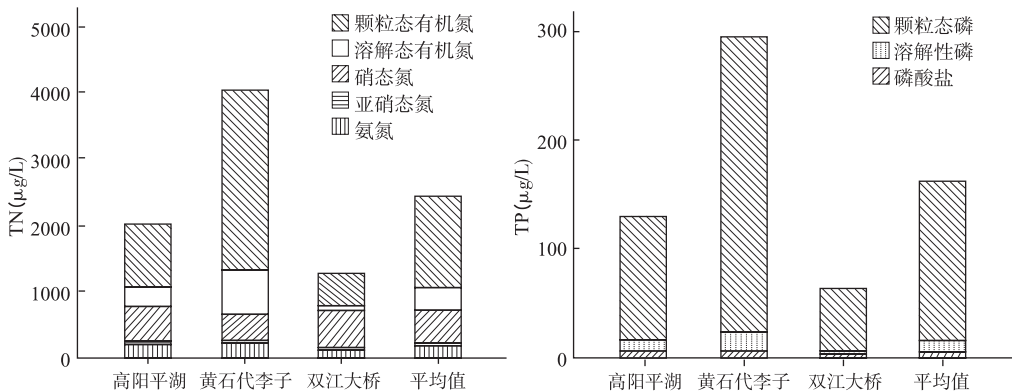


图 3 小江回水区蓝藻水华期间各采样点氮、磷营养物组成情况

Fig.3 Composition of nitrogen and phosphorus during cyanobacterial algal bloom in Xiaojiang River backwater area

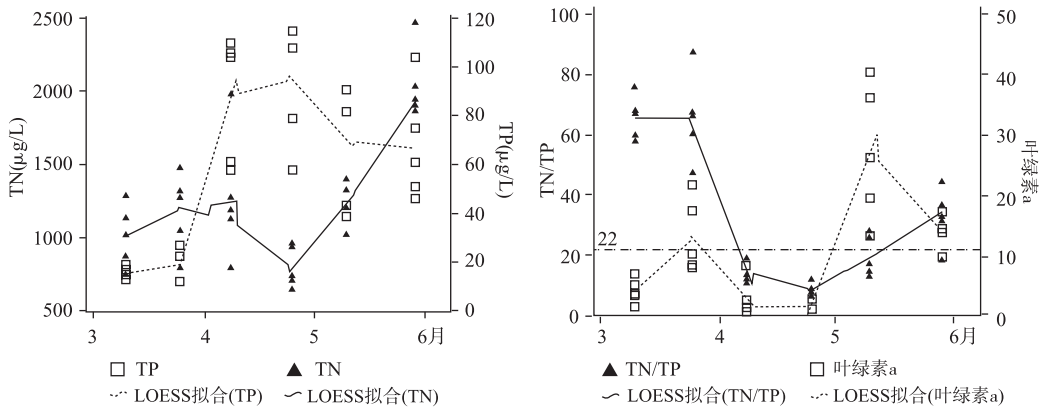


图 4 小江回水区氮、磷要素与叶绿素 a 常规采样结果(2007 年 3-5 月)

Fig.4 Regular sampling result of nutrients and chlorophyll-a in Xiaojiang River backwater area from Mar. to May, 2007

同时, 蓝藻种群的繁盛使得水中 SRP 向生物有机体转移, PP 成为磷素的主要赋存形态, 而 TP 中则 SRP 保持在较低水平^[17]. 水华期间各采样点 DIN/SRP 平均为 121.67, 根据 D.Justić 等提出的营养物限制性评判标准^[28], 小江回水区整体上处于严重的磷限制状态. PP 在磷素中占优和营养结构的磷限制特点是

蓝藻水华的另一个结果.

从水华发生的空间分布上看, 小江回水区水华最严重的河段(叶绿素 *a* 最高值)是在黄石代李子处, 这里的表层流速为 0.36m/s, 是三个采样点中最大的. 这似乎有悖于关于流速和叶绿素 *a* 或浮游植物生物量之间相互关系的普遍观点^[29-30]. 根据本课题组 1 年多的野外观测经验, 笔者认为这一现象同小江回水区的河道特征有很大的关系. 高阳平湖段是小江回水区一个非常独特的河段(图 5), 蓄水之前这里曾是一片高程约在 132-145m 之间的河岸滩地或平坝, 包括李家坝(133-140m, 河岸滩地)、明月坝(134-141m, 河岸滩地)、水马滩(134-140m, 河岸滩地)、燕家院子(142-154m, 平坝)、伽担湾(133-150m, 河岸滩地)等, 面积合计 4km² 左右, 其中面积最大的是李家坝、燕家院子、伽担湾, 曾是当地农民的主要农田耕作区. 156m 蓄水后, 这几个河岸滩地或平坝变成了永久淹没区或消落区(燕家院子等), 并连成了水域面积在 5-6km², 平均水深不到 20m 的平湖, 即高阳平湖. 当水库在 145m 水位下运行时, 这里的平均水深甚至不足 10m, 在物理特征上可近似于浅水湖泊. 由于高阳平湖上游是杨家坝-小江电站的峡谷河段, 下游则是高阳大桥—牛栏溪峡谷河段. 因此, 蓄水后形成的高阳平湖就成为了小江回水区中段一个极具典型的区段. 一方面, 过水断面在这里放大并在下游高阳大桥处缩小, 这使得高阳平湖在水动力特征上相对独立, 水环境特点也有别于其他河段, 是小江回水区相对封闭的区域. 据本课题组 2007 年枯水期(2 月)至丰水期(8 月)的跟踪观测数据显示, 高阳平湖表层流速平均仅为 0.09±0.06m/s. 因此, 高阳平湖不仅为浮游植物生长提供了相对稳定的水力条件, 同时也成为上游来水的营养物以及点面源污染负荷积累的重要场所. 另一方面, 高阳平湖淹没区曾是大片的农耕地, 大量蓄存于农田中的营养物很可能成为高阳平湖另一个重要的营养物来源. 入夏后(5 月 1 日后)水库低水位下运行, 高阳平湖浅水湖泊的物理特征明显, 由于没有分层现象, 水土界面不稳定, 再悬浮作用强烈, 加之营养负荷的累积, 使得这里成为了小江回水区非常容易暴发水华的区段.

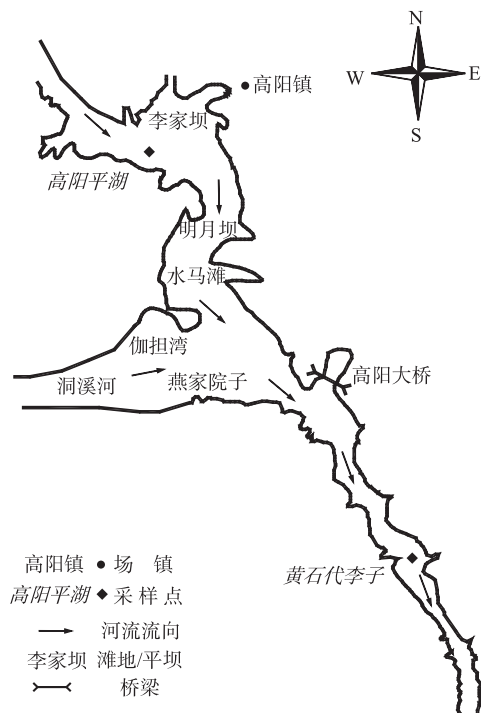


图 5 小江回水区高阳平湖—黄石代李子段河道局部特征

Fig.5 Detail map of the reach from Lake Gaoyang to Huangshi Dailizi in Xiaojiang River backwater area

由于 5 月 10 日的常规采样中, 高阳平湖上游渠马渡口采样点未检出有蓝藻存在, 而自高阳平湖以下均出现了以鱼腥藻、束丝藻为优势藻种的蓝藻种群, 综合上述分析, 笔者认为小江回水区蓝藻可能最先生长于高阳平湖段, 这里提供了相对优越的物理条件, 同时营养负荷的积累以及营养结构在 4 月份春季首场暴雨后的变化促使了蓝藻在高阳平湖迅速繁殖. 此后随着径流量的增加, 鱼腥藻和束丝藻的絮状、丝状群体在未明显聚集成片的情况下随流漂移至下游, 即高阳大桥—黄石代李子河段(这里是高阳平湖下游高阳大桥—牛栏溪峡谷的入口段). 该处过水断面的收缩对水中大量繁殖生长的蓝藻生物群体可能起到了一定的“浓缩”作用, 在气温、光照等环境条件合适的情况下大量蓝藻逐渐上浮, 并形成自岸边缓流带向河道中心逐渐延伸的肉眼可见的片状、带状蓝藻生物聚集体. 虽然该处河道表层流速较大, 但这一流速范围很可能不足以破坏蓝藻生物群体的上浮、聚集成片的生理过程, 从而使得该河段出现了较高的藻类生物量和叶绿素 *a* 值. 而在下游黄石镇河段, 鱼腥藻和束丝藻上浮聚集成片的趋势又因为该处过水断面进一步缩小和表层流速增大而受到抑制或破坏, 野外跟踪发

现水中虽有明显蓝藻絮状、丝状群体, 却不见大面积上浮聚集的现象. 至于下游双江大桥处发生的水华, 笔者认为其原因主要是由于下游河段过水断面的放大导致了表层流速的降低, 而沿岸云阳县城的排污使得这一河段的营养负荷相对提高, 从而为上游随流漂移下来的蓝藻再次提供了较佳的生长环境所致.

4 结语

三峡水库小江回水区于 2007 年 5 月中下旬发生了蓝藻水华, 水华主要分布在小江回水区高阳平湖、黄石代李子、双江大桥三处. 水华期间, 藻类共有 5 门 25 属 56 种(含变种), 其中优势种为蓝藻门的水华鱼腥藻, 平均细胞密度达到 $110.28 \times 10^5 \text{ cells/L}$, 平均生物量为 30.88 mg/L . 镜检发现蓝藻优势藻种中均具有异形胞, 因此推断此次蓝藻水华为固氮型蓝藻水华.

通过对水华发生前期与暴发期间 TN/TP 比的分析可以看出低的 TN/TP 比可能促进固氮型蓝藻生长并诱发其发生水华, 使 TN 含量较非水华期间明显偏高, TON 成为氮素最主要的赋存形态. 水华期间小江回水区磷素以颗粒态磷为主, 并表现出显著的磷限制现象也是此次蓝藻水华的另一个特点.

通过对小江回水区高阳平湖段河道特征的分析并结合野外观测, 笔者推断蓝藻较先出现于高阳平湖, 在过水断面相对狭窄的黄石代李子处大量聚集, 使得该处具有较高的藻类生物量和叶绿素 a 值, 虽然该处表层流速在三个采样点中最大, 但这一流速范围不足以破坏蓝藻的上浮、聚集成片的生理过程. 而双江大桥蓝藻水华的成因是由于过水断面的放大, 流速的变化为随流漂移至下游的蓝藻创造了相对合适的物理环境, 加之沿岸云阳县城的排污为蓝藻生长提供了丰富的营养物所致.

5 参考文献

- [1] Smith VH. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems: a global problem. *Environmental Science and Pollution Research-International*, 2003, **10**: 126-39.
- [2] 许 敏, 赵以军, 程 凯. 水华和赤潮的毒素及其检测与分析. *湖泊科学*, 2001, **13**(4): 376-384.
- [3] Håkanson L, Bryhn AC, Hytteborn JK. On the issue of limiting nutrient and prediction of cyanobacteria in aquatic systems. *Science of the Total Environment*, 2007, **379**: 89-108.
- [4] Howarth RW, Marino R, Lane J *et al.* Nitrogen Fixation in Freshwater, Estuarine, and Marine Ecosystems. 1. Rates and Importance. *Limnology & Oceanography*, 1988, **33**(4): 669-687.
- [5] Howarth RW, Marino R, Cole JJ. Fixation in Freshwater, Estuarine, and Marine Ecosystems. 2. Biogeochemical Controls. *Limnology & Oceanography*, 1988, **33**(4 part2): 688-701.
- [6] Fay P. Oxygen relations of nitrogen fixation in cyanobacteria. *Microbiological Reviews*, 1992, **56**(2): 340-373.
- [7] Wetzel RG. *Limnology: Lakes and River Ecosystems*. CA: Academic Press, 2001: 207-210.
- [8] Smith VH. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in Lake Phytoplankton. *Science*, 1983, **221**: 669-671.
- [9] Smith VH, Bierman VJ, Jones BL *et al.* Historical trends in the Lake Okeechobee ecosystem IV. Nitrogen: phosphorus ratios, cyanobacterial dominance, and nitrogen fixation potential. *Archiv für Hydrobiologie, Monographische Beitrage*, 1995, **107**: 71-88.
- [10] Havens KE, James RT, East TL *et al.* N:P Ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution. *Environmental Pollution*, 2003, **122**: 379-390.
- [11] Xie L, Xie P, Li S *et al.* The low TN:TP ratio, a cause or a result of microcystis blooms? *Water Research*, 2003, **37**: 2073-2080.
- [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] 周广杰, 况琪军, 刘国祥等. 三峡库区藻类水华调查及其毒理学研究. *水生生物学报*, 2006, **30**(1): 37-41.
- [14] 周广杰, 况琪军, 胡征宇等. 香溪河库湾浮游藻类种类演替及水华发生趋势分析. *水生生物学报*, 2006, **30**(1): 42-46.
- [15] 汤宏波, 刘国祥, 胡征宇. 三峡库区高岚河甲藻水华的初步研究. *水生生物学报*, 2006, **30**(1): 47-51.
- [16] 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院编. 三峡库区小江(澎溪河)流域生态环境综合整治工程可行性研究报告. 武汉:

- 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院, 2004: 57-85.
- [17] 陈 杰. 三峡水库小江回水区浮游植物群落结构特点及其影响因素研究[硕士论文]. 重庆: 重庆大学, 2008: 21-30.
- [18] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 2000: 142-144.
- [19] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游植物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991: 338-347.
- [20] 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.
- [21] 福迪 B 著, 罗迪安译. 藻类学. 上海: 上海科学技术出版社, 1980: 17-20.
- [22] Allan JD, Castillo MM. Stream ecology: structure and function of running waters. 2nd Edition. NL: Springer Verlag, 2007: 256-264.
- [23] Reichert P, Borchardt D, Henze H *et al.* River water quality model No. 1 (RWQM1): II. Biochemical process equations. *Water Science & Technology*, 2001, **43**(5): 11-30.
- [24] 沈志良, 刘 群, 张淑美. 长江总氮和有机氮的分布变化与迁移. 海洋与湖沼, 2003, **34**(6): 577-585
- [25] Kucuksezgin F, Kontas A, Altay O *et al.* Elemental composition of particulate matter and nutrient dynamics in the Izmir Bay (Eastern Aegean). *Journal of Marine Systems*, 2005, (56): 67-84.
- [26] 国家环境保护局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 1997: 243-285.
- [27] Reynolds CS. The ecology of phytoplankton. UK: Cambridge University Press, 2006: 164-166.
- [28] Justić D, Rabalais NN, Eugene R *et al.* Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1995, **40**: 339-356.
- [29] 焦世珺, 钟成华, 邓春光. 浅谈流速对三峡库区藻类生长的影响. 微量元素与健康研究, 2006, **23**(2): 48-50.
- [30] 谢 平, 夏 军, 窦 明等. 南水北调中线工程对汉江中下游水华的影响及对策研究(I)——汉江水华发生的关键因子分析. 自然资源学报, 2004, **19**(4): 418-423.



本刊 2008 年第 20 卷第 6 期的文章《高效净化氮磷污水的湿地水生植物筛选与组合》脚注中的“国家自然科学基金项目(30670399)和山东省教育厅项目(J02L05)联合资助”应为“我国近海海洋综合调查与评价(908)专项项目(908-01-ZH2)和国家自然科学基金项目(30670399)联合资助”. 特此更正.