

三峡小江回水区磷素赋存形态季节变化特征及其来源分析

方芳, 李哲, 田光, 郭劲松*, 张超

(重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要: 磷被普遍认为是富营养化的限制性因子, 但河道型的三峡水库支流回水区在变化的水动力条件下磷的季节变化有其独特性. 对 2007 年 3 月~ 2008 年 3 月三峡小江回水区磷素的跟踪观测结果进行了分析. 研究期间小江回水区总磷(TP) 平均浓度为 $(61.7 \pm 2.7) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 虽然各采样断面磷浓度差异不大, 但其季节变化明显, 大体上冬季最高、夏季较高、春季次之、秋季较低. 颗粒态磷占 TP 平均浓度的 54.05%, 是 TP 的主要组成部分. 结合同期对叶绿素 a、悬浮无机颗粒物、悬浮有机颗粒物、河口流量、河口水位等主要环境变量的跟踪观测结果发现, 颗粒态磷以吸附于泥沙颗粒表面或同矿质相结合的无机形态为主, 并在降雨、径流的作用下进入水体使水中 TP 含量增加, 该现象在低水位运行状态下更加明显. 而在高水位运行条件下水动力条件的改变使磷素赋存形态向溶解态形式转变. 小江回水区藻类生长对溶解性磷酸盐的生物利用过程十分明显, 溶解性磷酸盐浓度同叶绿素 a 显著负相关. TP 亦同叶绿素 a 呈负相关关系. 研究认为, 降雨、径流强度的加大及水位的降低虽然带来丰富的营养物质, 但亦使河道型的回水区水体更新周期缩短; 而悬浮颗粒浓度升高导致的水体光学透射性能的下降以及洪水脉冲带来的不稳定的生长环境却阻碍了浮游植物的进一步生长和繁盛, 这两方面综合作用的结果可能是小江回水区 TP-Chla 负相关的原因.

关键词: 三峡水库; 小江回水区; 磷素; 赋存形态; 季节变化

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)12-3488-06

Seasonal Variation of Phosphorus in Xiaojiang Backwater Area, Three Gorges Reservoir

FANG Fang, LI Zhe, TIAN Guang, GUO Jing-song, ZHANG Chao

(Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Phosphorus is regarded as the limiting factor for eutrophication in backwater areas of tributaries in Three Gorges Reservoir (TGR). However, distinct seasonal variation patterns and potential ecological impacts of phosphorus are apparent due to the ultimate hydrodynamic condition in the site. Seasonal variation of different forms of phosphorus in Xiaojiang backwater area (XBA) in Three Gorges Reservoir from Mar. 2007 to Mar. 2008 was reported. It was found that average concentration of total phosphorus (TP) was $(61.7 \pm 2.7) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. No remarkable difference was found among sampling sites, while significant variation among seasons were detected. Generally, TP was high in summer and winter while low in autumn. Particulate phosphorus (PP) was the major forms of phosphorus in XBA. The co-analysis among phosphorus and key environmental variables, i.e. chlorophyll, inorganic/organic particles, flows and water levels in river estuary, indicated that inorganic forms of PP should dominate in PP, and might transfer into the water body by rainfall and river flows, resulting in the increase of TP in XBA. This phenomenon was more significant when TGR was set at low water level. Soluble reactive phosphorus (SRP) had a significantly negative correlation with chlorophyll a, indicating the evident assimilation process of phosphorus by algae. It was inferred that heavy rainfall and increased river flow shortened the water renewal cycle and brought in amounts of suspended sediments that increased the light attenuation underwater. With the frequent flood impulse, phytoplankton community should suffered the instable living environment that decreased the concentration level of chlorophyll a in XBA. This might be the potential reason for the negative correlation between TP and chlorophyll a.

Key words: Three Gorges Reservoir; Xiaojiang backwater area; phosphorus; different forms; seasonal variation

磷是核酸、细胞膜和骨骼的主要成分, 是生物不可缺少的重要元素^[1]. 生物的代谢过程都需要磷的参与, 是细胞内生化能量转化的载体. 磷作为水生生物的主要营养物质, 通常被认为是控制水体富营养化的关键营养元素^[2]. 根据 OECD(经济合作与发展组织)的研究结果, 80% 的湖泊富营养化受磷元素的制约^[2]

三峡水库成库后, 水位升高, 流速减缓, 水体被动扩散能力减弱, 更新周期延长, 使得陆源输入的大

收稿日期: 2008-12-30; 修订日期: 2009-03-08

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-07-02); 国家水专项课题项目(2008ZX07104-003-02); 重庆市重点科技攻关项目(CSTC2008AB7083)

作者简介: 方芳(1973~), 女, 副教授, 主要研究方向为水体污染控制理论与技术, E-mail: xiduo@tom.com

* 通讯联系人, E-mail: Guo0768@126.com

量氮、磷、硅等生源要素在支流回水区出现汇积的现象,并诱使局部水域藻类大量增殖,甚至暴发水华^[3-5].虽然已有研究认为三峡水库支流回水区藻类生长仍普遍受到磷的限制^[6,7],水动力条件的改变是支流回水区富营养化和水华暴发的关键诱因^[8],但由于河道型三峡水库各次级流域的空间差异性,不同支流回水区营养物负荷与输入模式各不相同^[9],富营养化生态机制和水华暴发特点亦存在显著差异.文献[10]对三峡水库典型的小江流域回水区氮素赋存形态与循环特点进行了研究.本研究在小江回水区2007年3月~2008年3月跟踪检测的基础上,就小江回水区磷素赋存形态与季节变化特点,并结合同期小江的水文、水动力特点,分析探讨磷素赋存形态及其同浮游植物生长的潜在关系.

1 材料与方法

小江流域地处四川盆地东南边缘,大巴山南麓,位于东经 107°56′~108°54′,北纬 30°50′~31°42′之间,流域面积 5172.5 km²,干流全长约 182.4 km,是三峡水库中段较大的次级流域之一.三峡水库蓄水至 156 m 后,小江的回水区段延伸至开县渠口镇境内,长约 60 km.本研究选择 145 m 以下的永久淹没回水区:养鹿乡杨家坝至小江河口,约 40 km 河段作为研究区域,如图 1 所示.为全面反映小江回水区的水环境特点,并综合考虑沿岸场镇排污的影响以及采样时交通便利等原因,在小江回水区设置了渠马渡口(N31°07′50.8″,E108°37′13.9″)、高阳平湖(N31°07′50.5″,E108°40′29.5″)、黄石镇(N31°00′29.4″,E108°42′39.5″)、双江大桥(N30°56′51.1″,E108°41′37.5″)、小江河口(N30°57′03.8″,E108°39′30.6″)共 5 个采样断面.各断面采样点均位于河道深泓线处,每月 2 次采集水深 0.5、1、2、3、5、8 m 处共 6 个测点的水样,采样时间控制在采样当日 09:30~16:30.除现场测试指标外,对上述各深度水样进行等量混合,混合后水样于 48h 内完成所有指标的分析测试工作.

本研究测试分析指标包括溶解态磷酸盐(SRP)、溶解态总磷(DTP)、总磷(TP)、叶绿素 a(Chla)、无机悬浮颗粒(TIM)和悬浮颗粒态有机物(POM)等.其中 SRP、DTP 和 Chla 的测试水样需预先通过 0.45 μm 纤维滤膜抽滤处理.TP 和 DTP 的差值(TP-DTP)认为是以颗粒形式存在的磷素,即颗粒态磷(PP)^[11].除 TIM 和 POM 的测试方法参考文献[12]外,其余指标的分析测试工作均参照文献[13]

进行.小江河口水位(RMlevel)根据长江干流万县站和三峡大坝日实测水位进行推算,降雨量和河口流量(RMflow)引自文献[14,15]的研究结果.

所有监测数据均录入 SPSS 进行统计分析,并采用局部加权回归方法(LOESS)对各次采样数据进行回归平滑,说明数据的总体变化趋势.同时,由于各形态磷素数据序列正态性检验(Q-Q 图、Skewness 偏度检验)的结果表明研究期间上述数据序列不呈正态分布,因此,所有相关性分析或检验均采用非参数检验方法进行(Spearman 相关性分析、K-相关样本非参检验等).

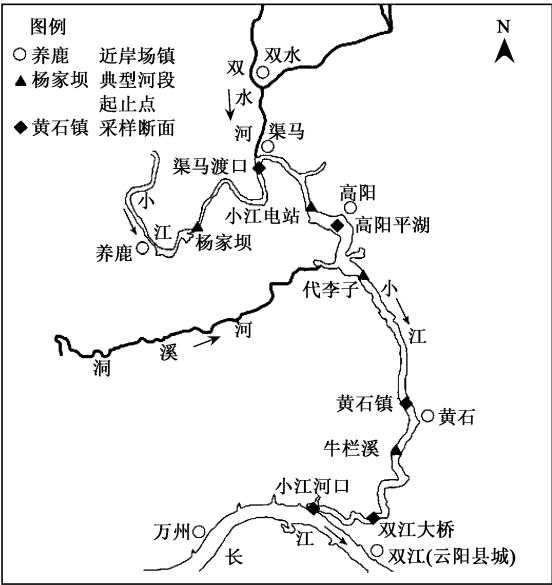


图1 养鹿-河口段回水区示意和采样点分布
Fig. 1 Map of backwater area and sampling spots

本研究选择 2007 年 3 月~2008 年 3 月采集的 5 个断面总共 125 个数据样本进行分析.根据全年气温、水温变化情况并参照重庆地区季节变化规律[16],对研究期间季节情况划分为:春季 3~5 月上旬;夏季 5 月中旬~9 月中旬;秋季 9 月下旬~11 月下旬;冬季 12 月~次年 2 月.另根据研究期间水库实际调蓄情况(145~156 m)将水库运行状态定性划分如下:低水位运行期为 5~10 月,高水位运行期为 11 月至次年 4 月.

2 结果与分析

2.1 总磷(TP)含量与季节变化

研究期间,TP 平均浓度为(61.7±2.7) μg·L⁻¹,季节变化如图 2 所示,变化范围为 12.0~191.0 μg·L⁻¹.各采样点间 TP 浓度差异并不显著(显著性

水平 $\text{Sig.} = 0.284 > 0.05$), 但小江回水区 TP 的季节变化甚为明显: 2007 年 3 月份小江回水区 TP 含量总体维持在较低水平[3 月 TP 均值仅为 $(17.2 \pm 1.6) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$], 但受 4 月初全流域暴雨径流的影响, 小江回水区总磷含量急剧升高, 并在夏季维持在较高水平, 夏季各采样点 TP 均值为 $(62.3 \pm 5.2) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 虽然夏末秋初小江回水区 TP 含量略有下降, 但入冬后小江回水区 TP 持续升高. 研究期间小江回水区 TP 含量总体呈波浪形的季节变化特点, 夏、冬季节较高, 春季次之, 秋季最低.

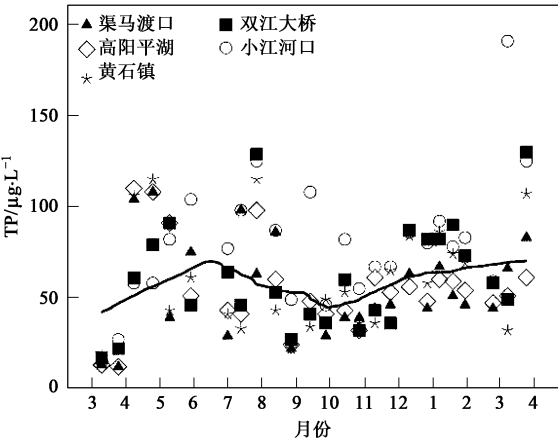


图2 研究期间 TP 季节变化过程
Fig.2 Seasonal variation of TP in XBA

2.2 溶解性磷酸盐(SRP) 含量与季节变化

图3 和图4 分别给出了研究期间 SRP、PP 的季节变化以及占 TP 比重的变化情况. 研究期间小江回水区 SRP 浓度平均值为 $(15.0 \pm 1.3) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 变化范围 $1.0 \sim 101.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 约占 TP 的 24.3% (均值, 下同). 虽然各采样点间 SRP 浓度差异并不明显, 但其季节变化显著: 2007 年 3 月小江回水区 SRP 保持在较低水平, 均值仅为 $(7.0 \pm 1.0) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 为同期 TP 的 40.7%, 但受 4 月初全流域暴雨径流的影响, 小江回水区 SRP 浓度在 4 月初出现突跃, 但此后 SRP 浓度逐渐下降, 在 7~ 10 月期间稳定保持在较低的水平, 7~ 10 月小江回水区 SRP 均值仅为 $(5.8 \pm 0.7) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 入冬后, 小江回水区 SRP 含量逐渐上升, 冬季小江回水区 SRP 均值为 $(25.3 \pm 1.6) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 是全年的最高水平, 但在 2~ 3 月的冬末初春时节出现较明显的突降. 大体上, 小江回水区冬、春季 SRP 含量较高, 夏、秋季 SRP 含量较低.

2.3 颗粒态磷(PP) 含量与季节变化

研究期间小江回水区 PP 浓度平均值为 $(35.1 \pm$

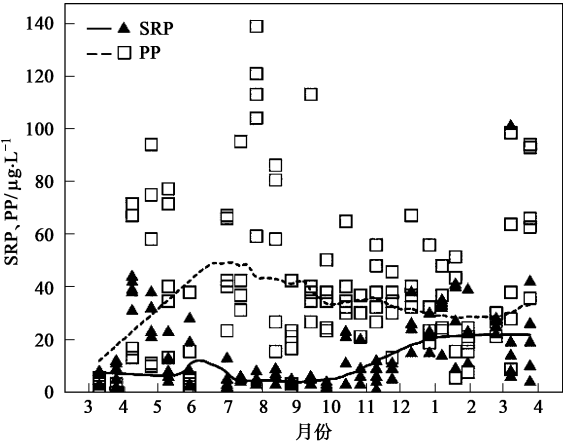


图3 研究期间 SRP、PP 的季节变化
Fig.3 Seasonal variation of SRP and PP in XBA

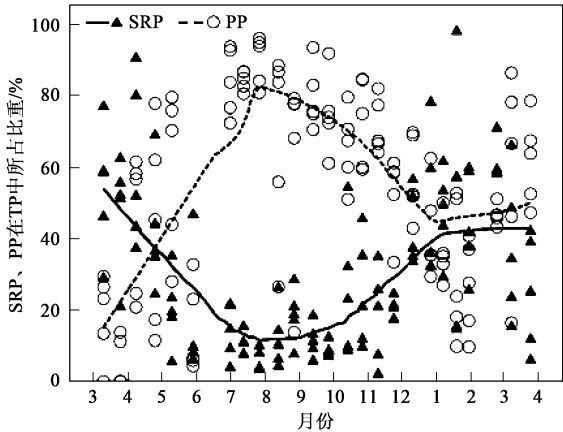


图4 SRP、PP 在 TP 中所占比重的季节变化
Fig.4 Relative abundance of SRP and PP in TP

$2.3) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 变化范围 $0.1 \sim 124.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均约占 TP 的 56.9%, 是磷的主要赋存形态. 但 PP 季节变化十分显著, 变幅较大. 2007 年春季 PP 含量, 春末夏初受降雨影响而迅速上升, 并在夏季达到全年的最高水平. 夏季小江回水区 PP 含量均值为 $(45.2 \pm 5.6) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 是同期 TP 含量的 72.6%, 且夏季小江回水区 PP 含量呈现出剧烈波动变化的特点. 夏末初秋小江回水区 PP 含量略有下降, 但基本保持在 $20 \sim 50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间. 入冬后, 小江回水区 PP 含量较秋季略微下降, 但在冬末初春有所上升.

2.4 磷素形态与水文因子的相关性分析

研究期间小江河口水位、流量的跟踪结果如图 5 所示, 对同期水中无机悬浮颗粒(TIM) 和颗粒态有机物(POM) 的监测结果见图 6, 叶绿素 a 的同期跟踪结果见图 7. 研究期间 TP、SRP、PP 同叶绿素 a、TIM、POM、河口水位、流量的相关性分析结果见表 1.

表 1 各形态磷素同主要环境变量的相关系数矩阵¹⁾ (全年样本数 $n = 125$)

Table 1 Matrix of the correlation coefficients among different forms of phosphorus and key environmental variables

	TP	SRP	PP	SRP/TP	PP/TP	Chla	TM	POM	RMLlevel
TP	1.000								
SRP	0.454**	1.000							
PP	0.702**	—	1.000						
SRP/TP	—	0.821**	-0.460**	1.000					
PP/TP	—	-0.482**	0.748**	-0.680**	1.000				
Chla	-0.218*	-0.404**	—	-0.288**	—	1.000			
TM	—	-0.366**	0.205**	-0.469**	0.268**	0.272**	1.000		
POM	—	-0.257**	—	-0.236**	—	0.313**	—	1.000	
RMLlevel	—	0.421**	—	0.387**	-0.213**	-0.438**	-0.605**	-0.288**	1.000
RMLflow	0.112*	-0.382**	0.304**	-0.509**	0.428**	—	0.681**	0.358**	-0.525**

1) * 表示显著性水平为 0.05; ** 表示显著性水平为 0.01; “—” 表示无显著相关性, 下同

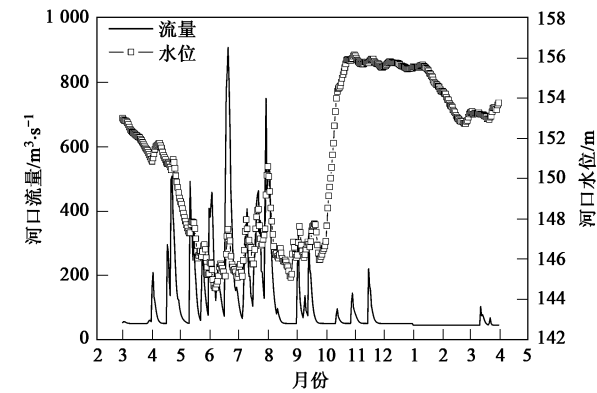


图 5 研究期间小江回水区河口流量、水位变化过程

Fig. 5 Variation of river flow and water level at river mouth of Xiaojiang River

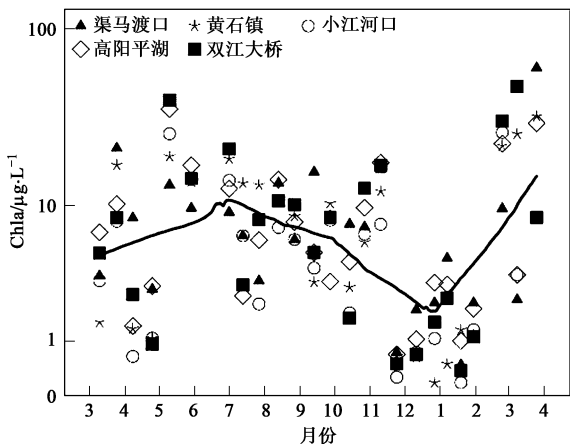


图 7 研究期间小江回水区叶绿素 a 季节变化

Fig. 7 Seasonal variation of Chla in XBA

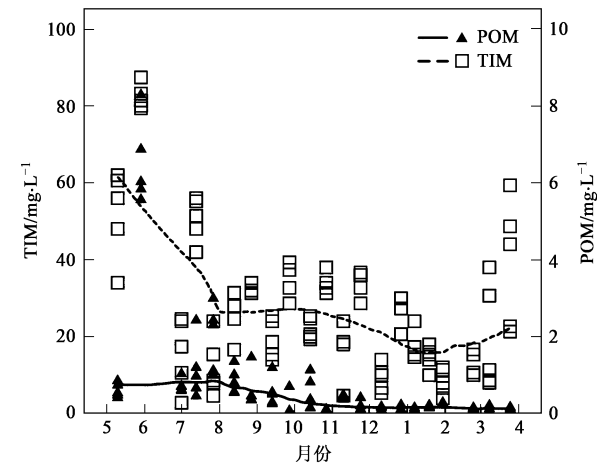


图 6 研究期间 TIM、POM 的季节变化过程

Fig. 6 Seasonal variation of TIM and POM in XBA

由表 1 可以看出, 水文径流过程同小江回水区磷形态分布密切相关. 径流量增加和水位的降低在一定程度上提高了河道型的小江回水区对颗粒态物质的运输能力, 使得研究期间 TIM、POM 含量同流量

显著正相关而同水位则显著负相关, 小江回水区 PP 含量及其在 TP 中所占比重亦随流量的增加而显著升高(PP、PP/TP 同 RMLflow 显著正相关). 由图 6 可知小江回水区 TIM 浓度远大于 POM, 说明悬浮颗粒物以无机形态为主, 同时研究期间 PP 是 TP 的主要赋存形态, 且 PP 含量及其在 TP 中所占比重与 TIM 呈显著正相关关系而与 POM 并无显著相关性. 故此, 研究期间小江回水区 PP 主要应以吸附于泥沙颗粒表面或同矿物质相结合的无机形态为主, 且在降雨、径流的作用下通过水土流失、面源污染或淹没区、消落带底质再悬浮的方式进入水体, 并使水中 TP 含量增加^[6], 并与流量呈正相关关系.

对不同水位运行状态下小江回水区磷素赋存形态及其同主要环境要素相关性进一步分析可发现(表 2), 虽然高水位运行和低水位运行条件下小江回水区 TP 含量并未有显著的差异(图 8), 但磷素形态构成特点却发生了显著的变化: 高水位运行下

SRP、DTP 含量显著高于低水位运行状态, 而 PP 含量显著低于低水位状态, 即是高水位运行下小江回水区磷形态以溶解态为主, 而低水位运行下则以颗粒态为主. 三峡水库于 4~ 5 月开始逐渐进入低水位运行状态而与此同时水库区域也进入主汛期. 相关性分析结果说明低水位运行下 TP、PP 同 TIM、RMflow 保持显著的正相关关系, 这进一步说明低水位运行状态下降雨、径流过程对回水区磷含量的影响是较为显著的. 而在高水位运行状态下这一上述现象并不明显. 这些现象表明, 三峡水库的动态调蓄可能在一定程度上影响了小江流域尤其是回水区段对磷的搬运与输移过程, 并干扰了磷作为生源要素刺激藻类生长的生态过程.

表 2 不同水位运行状态下各形态磷素同
主要环境变量的相关系数

Table 2 Correlation coefficients among different forms of phosphorus and key environmental variables under two water level stages			
低水位 (n = 45)	TP	SRP	PP
Chla	- 0.234* *	—	—
TIM	0.685* *	—	0.295*
POM	—	—	- 0.399* *
RMlevel	—	—	0.343*
RMflow	0.326*	—	0.382* *
高水位 (n = 80)	TP	SRP	PP
Chla	—	- 0.322* *	—
TIM	—	—	—
POM	—	- 0.259*	—
RMlevel	—	—	0.236*
RMflow	—	—	—

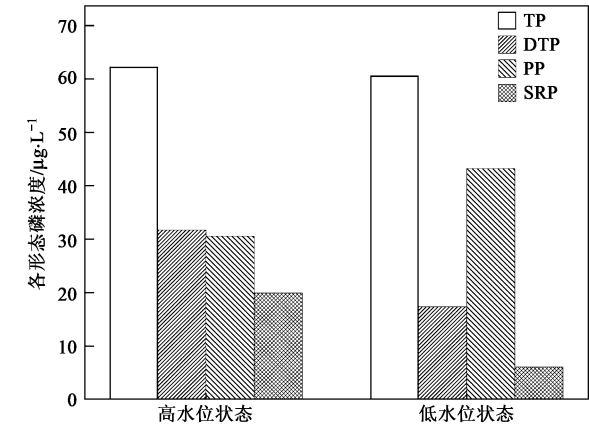


图 8 不同水位状态下各形态磷的平均浓度值
Fig. 8 Mean value of different forms of phosphorus
under two water level stages

2.5 叶绿素与磷素形态的相关性分析

研究期间, 小江回水区叶绿素与总磷呈显著负

相关. 三峡水库于 4~ 5 月开始主汛期, 水库逐渐进入低水位运行状态. 在低水位运行条件下, 小江回水区水体滞留时间仅为 20~ 30 d 或更短, 水生态系统呈现出河道型生态系统特点. 虽然低水位运行条件下光热条件有利于浮游植物的生长和初级生产力的提高, 也时值浮游植物生长旺盛季节, 降雨、径流强度的加大使回水区以无机颗粒态磷为主要赋存形态的 TP 含量迅速增加^[17], 并为藻类生长提供了较丰厚的物质基础, 但悬浮颗粒浓度升高导致的水体光学透射性能的下降, 以及水动力条件却不适合浮游植物的大量生长. 对小江回水区的一维水动力模型研究表明, 在夏季总磷含量处于较高的季节, 断面平均流速为 0.20 m/s, 最大可达 0.54 m/s. 已有研究表明在此流速下, 浮游植物的生长将受到抑制^[18, 19], 从而制约了叶绿素的含量, 成为富营养化的限制因子. 此外低水位时为汛期, 洪水脉冲带来的不稳定的生长环境也阻碍了浮游植物的进一步生长和繁盛, 也是小江回水区 TP-Chla 负相关原因. 在野外观测中发现小江回水区水华一般发生在 4~ 5 月的主汛期来到之前^[17] 以及 8~ 9 月的主汛期末段的现象在一定程度上支持了上述观点. 在高水位运行期, 枯水季节回水区水体更新周期延长至 80~ 90 d 或更长, 水生态系统呈现静水生态系统特点. 根据对三峡水库悬移态泥沙在不同 pH、温度下对磷酸盐吸附解吸特性的研究结果^[20, 21], 大量颗粒态磷伴随悬浮颗粒物在回水区沉积, 并有可能同淹没区底质土壤一起, 在水温降低、pH 改变等影响下促使吸附于颗粒表面的磷以溶解态形式释放进入水体, 使磷素赋存形态向溶解态形式转变. 值得注意的是野外跟踪发现在高水位运行状态下, 冬末初春(2~ 3 月)气温回暖诱使硅藻出现疯长, SRP 浓度亦在此时迅速下降(2~ 3 月), 表明藻类对 SRP 的摄取、利用较低水位时更加密切相关. 因此, 这些生态现象进一步说明河流水体较湖泊水体浮游植物的生长分布除受营养盐浓度影响外, 不同的河流流速, 流域泥沙的输入等都将使得水体生产力指标 Chla 与富营养化指标之间的关系更为复杂^[22].

3 结论

(1) 研究期间, 小江回水区总磷浓度为 12.0~ 191.0 μg·L⁻¹, 平均浓度为 (61.7 ± 2.7) μg·L⁻¹, 季节差异明显. SRP 平均浓度为 (15.0 ± 1.3) μg·L⁻¹, PP 平均浓度为 (35.1 ± 2.3) μg·L⁻¹. 颗粒态磷是小江回水区磷素最主要的赋存形态.

(2) 小江回水区磷形态以吸附于泥沙颗粒表面或同矿质相结合的无机形态的颗粒态磷为主。颗粒态磷受降雨、径流的作用进入水体使水中TP 含量增加。这一现象在低水位运行状态下更加明显, 而在高水位运行状态下, 水文、水动力条件的改变可使磷素赋存形态向溶解态形式转变。

(3) 小江 Chla 与 SRP 显著负相关, SRP 与生物作用关系密切; 回水区河道型水库的物理背景使 Chla-TP 相关性受到水动力条件的影响, 强降雨和强径流过程往往使回水区段营养物输入强度加大, 但水动力条件却不适宜浮游植物的生长, 从而使 Chla-TP 表现出显著负相关关系。

参考文献:

- [1] Wetzel R G. Limnology: Lakes and river ecosystems [M]. CA: Academic Press, 2001. 204-238.
- [2] 谢平. 论蓝藻水华的发生机制——从生物进化、生物地球化学和生态学观点[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 30-76.
- [3] 蔡庆华, 胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究[J]. 水生生物学报, 2006, 30(1): 7-11.
- [4] 富国. 湖库富营养化敏感分级水动力概率参数研究[J]. 环境科学研究, 2005, 18(6): 80-84.
- [5] 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[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 1-6.
- [6] 张晟, 李崇明, 付永川, 等. 三峡水库成库后支流库湾营养状态及营养盐输出[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 7-12.
- [7] 李哲, 方芳, 郭劲松, 等. 三峡小江回水区段 2007 年春季水华与营养盐特征[J]. 湖泊科学, 2009, 21(1): 36-44.
- [8] 郭劲松, 陈杰, 李哲, 等. 156 m 蓄水后三峡水库小江回水区春季浮游植物调查及多样性评价[J]. 环境科学, 2008, 29(10): 2710-2715.
- [9] 冯明磊, 胡荣桂, 许克翠, 等. 三峡小流域水体硝态氮含量变化特征及其影响因素研究[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 13-18.
- [10] 李哲, 郭劲松, 方芳, 等. 三峡小江回水区氮素赋存形态与季节变化特点[J]. 环境科学, 2009, 30(6): 1585-1594.
- [11] Allan J D, Castillo M M. Stream ecology: Structure and function of running waters [M]. (2nd ed). NL: Springer Press, 2007. 256-264.
- [12] GB/T 12763. 9-2007. 海洋调查规范: 第九部分. 海洋生态调查指南[S].
- [13] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 1997. 243-285.
- [14] 龙天渝, 梁常德, 李继承, 等. 基于 SLURP 模型和输出系数法的三峡库区非点源氮磷负荷预测[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3): 574-581.
- [15] 吴磊, 龙天渝, 刘腊美, 等. 三峡库区小江流域溶解态非点源污染负荷研究[A]. 见: 中国环境与生态水力学[C]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. 221-227.
- [16] 李哲, 郭劲松, 方芳, 等. 三峡小江回水区不同 TN/TP 水平下氮素形态分布和循环特点[J]. 湖泊科学, 2009, 21(4): 509-517.
- [17] 曹承进, 秦延文, 郑丙辉, 等. 三峡水库主要入库河流磷营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2008, 29(2): 310-315.
- [18] 高月香, 张毅敏, 张永春. 流速对太湖铜绿微囊藻生长的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(2): 57-60.
- [19] 王红萍, 夏军, 谢平, 等. 汉江水华水文因素作用机理——基于藻类生长动力学研究[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(3): 282-285.
- [20] 王晓青, 李哲, 吕平毓, 等. 三峡库区悬移质泥沙对磷污染物的吸附解吸特性[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 31-36.
- [21] 郭劲松, 杨程, 吕平毓, 等. 三峡库区悬浮态泥沙对磷酸盐的吸附特性研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 26(6): 75-78.
- [22] Tillman D. Resource competition between planktonic algae: An experimental and theoretical approach[J]. Ecology, 1977, 58(2): 338-348.