

三峡水库小江回水区水环境时空变化特征研究

陈小娟¹, 潘晓洁¹, 邹 曦¹, 胡 莲¹, 张志永¹, 冯 坤¹, 郑志伟¹, 彭建华¹, 万成炎¹, 赵秀兰²

(1. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 武汉 430079;

2. 西南大学, 重庆 400715)

摘要:监测了三峡水库小江回水区 2008–2010 年间的水环境状况, 研究了水环境因子时空变化特征, 以及水体水质、富营养化状态的变化趋势。结果表明: 小江回水区大多数水环境因子在不同月份间、不同年度间有显著差异; 各断面间水环境因子差异不显著; 小江回水区总氮(TN)、总磷(TP)污染一直比较严重, 但 2008 年 175m 试验性蓄水后小江回水区水质未呈现进一步恶化趋势; 小江回水区总体呈现轻度富营养化水平, 2009 年、2010 年的富营养化状况较 2008 年有所降低。叶绿素 a 与水环境因子间的相关关系分析发现, 叶绿素 a 含量与溶解氧(DO)呈显著正相关, 与透明度(SD)呈显著负相关; 与叶绿素 a 含量关系密切的环境因子随季节发生变化。

关键词:小江, 水环境, 富营养化, 时空变化

中图分类号:X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1674–3075(2012)06–0001–06

经历了 2003 年的 135 m 初期蓄水、2006 年的 156 m 二期蓄水和 2008 年的 175 m 试验性蓄水(实际蓄水至坝前 172.8 m)后, 三峡水库水位于 2010 年 10 月到达坝前 175 m 的设计水位。作为国家重要战略淡水资源库, 三峡水库特别是支流的水环境问题受到广泛关注。根据国家环保部发布的长江三峡工程生态与环境监测公报(2005–2011)以及有关研究结果(邓春光, 2007; 曹承进等, 2009; 蔡庆华和孙志禹, 2012), 库区支流回水区因水文情势发生变化, 水体流速较低, 营养物质易于富集, 局部水域存在水体富营养化和藻类水华爆发等现象, 威胁水库生态安全。

小江(又名澎溪河)是三峡水库北岸的一条重要支流, 发源于重庆市开县白泉乡钟鼓村, 于云阳县双江镇汇入长江, 全长 182.4 km。根据本课题组多年观测及有关研究结果(李哲等, 2009), 三峡水库蓄水以来, 小江多次发生水华, 其中, 2007 年 4 月开始小江河口、双江大桥、黄石代李子大桥、高阳大桥等河段大规模暴发蓝藻水华, 造成较严重的生态影响。因而, 小江成为水环境管理部门和三峡水库管理部门的重点监测对象。目前, 已有的小江回水区水环境研究主要集中于三峡水库小江回水区氮磷等营养盐的行为特征、形态分布和循环特点及其来源

分析(冉祥滨等, 2009; 李哲等, 2009a; 李哲等, 2009b; 方芳等, 2009), 透明度季节变化及其影响因子分析(张呈等, 2010), 以及与藻类结构、水华藻类间关系分析等(李哲等, 2009c; 李哲等, 2010; 郭劲松等, 2010), 对于 2008 年 175 m 试验性蓄水后的水环境特征及其变化趋势的研究较少。本文基于 2008–2010 年对三峡水库小江回水区水环境的监测, 研究水环境因子时空变化特征, 分析水体水质与富营养化变化趋势, 探讨水环境因子与浮游植物生物量间的关系, 以期对小江水环境保护与水华控制提供科学基础。

1 材料与方法

1.1 样品采集

在小江回水区共设置 6 个采样断面, 分别位于渠口、养鹿、渠马、高阳、黄石和双江。具体位置如图 1。2008 年, 在渠口、养鹿、高阳、黄石和双江 5 个采样断面, 于 4 月、7 月、11 月各采样 1 次; 2009 年和 2010 年, 在渠口、渠马、高阳、黄石和双江 5 个断面, 于 3 月、6 月、9 月各采样 1 次。

1.2 数据分析

根据《湖泊富营养化调查规范》(金相灿和屠清瑛, 1990), 选取叶绿素 a(Chl. a)、总磷(TP)、总氮(TN)、透明度(SD)、化学需氧量(COD)为指标, 计算综合营养状态指数(TLI), 以此来评价小江水体富营养化程度。用 SPSS17.0 软件多因素方差分析中的 Turkey 显著差异法分析不同月份、断面间的理化参数差异, 用 Pearson 相关与多元逐步回归分析叶

收稿日期: 2012–10–14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51009099、51009100、50979061), 十二五国家科技支撑项目(2012BAC06B04)。

作者简介: 陈小娟, 1981 年生, 女, 副研究员, 博士, 从事浮游动物生态学研究 and 生态规划等。E-mail: chenxiaojuan@mail.ihe.ac.cn

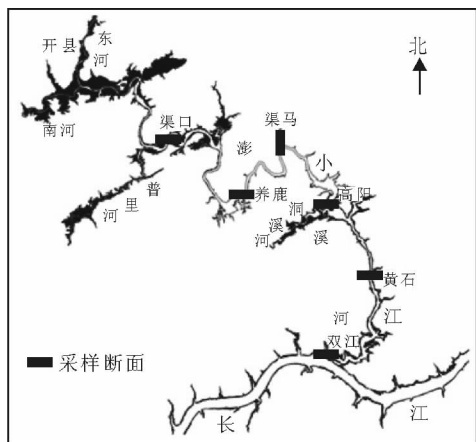


图1 小江水样采集断面分布

Fig.1 Sampling sections in Xiaojiang

绿素 a 含量与环境因子间的相关关系,并取 $P < 0.05$ 作为显著性判定标准。利用 Statistica 6.0 软件进行样品间聚类分析,其中样品间距离采用欧氏距离,类间距离采用类平均法 (Unweighted pair - group average)。差异分析与聚类分析前对各参数数据取对数,使数据呈正态分布。

2 结果与分析

2.1 水环境因子时间变化

小江回水区 2008 - 2010 年各月份的水环境因子监测结果如图 2。

多因素方差分析结果显示:除 COD 外,2008 年 3 个月份间的各环境因子存在显著性差异,7 月份的

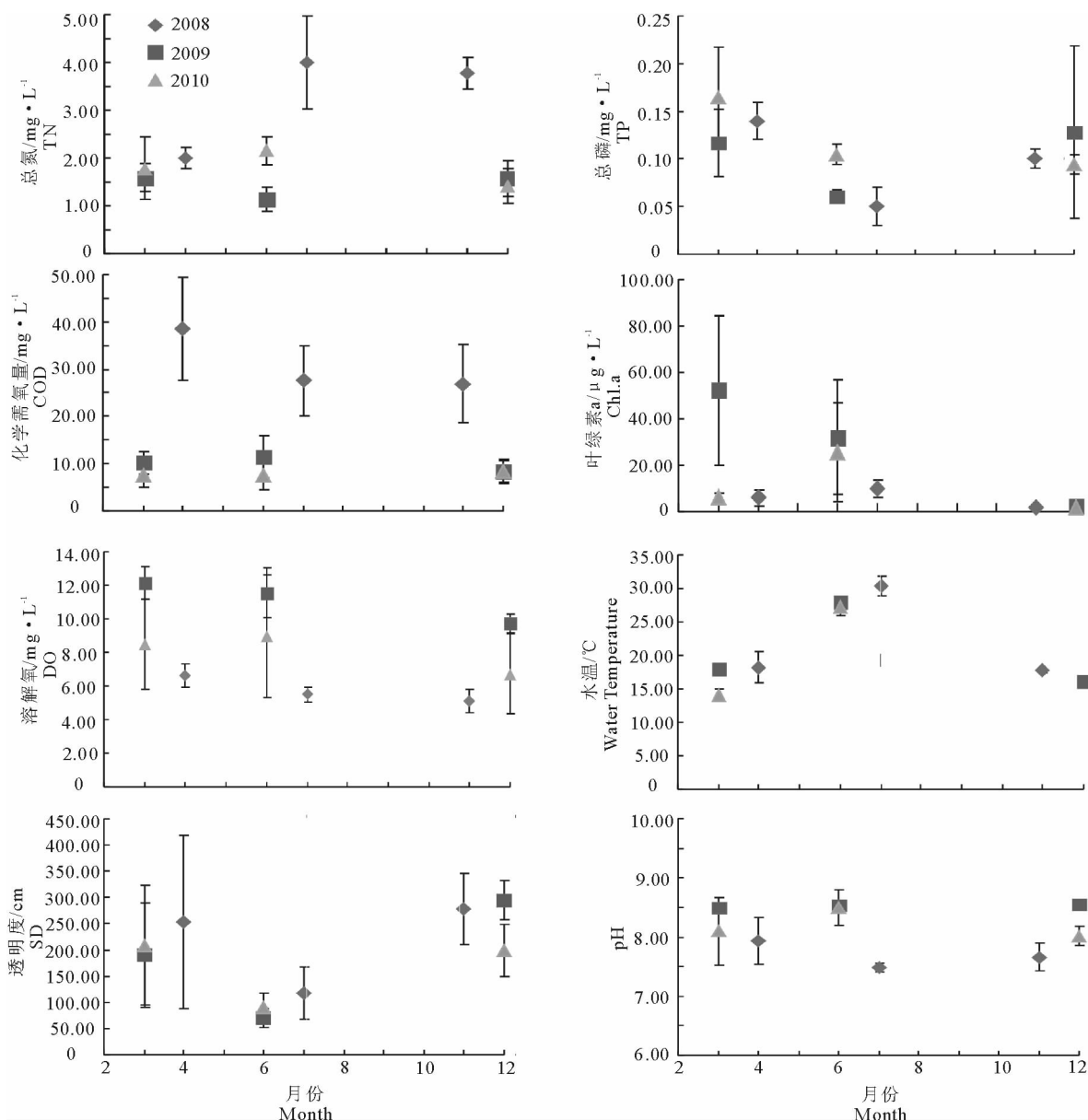


图2 小江回水区水环境因子季节性变化

Fig.2 Seasonal variations of water environmental factors of Xiaojiang backwater region

TN、Chl. a、WT 值最高,4 月份的 TP、DO、pH 值最高,11 月份的 SD 值最高;除 Chl. a、WT、SD 外,2009 年 3 个月份间的各环境因子无显著性差异,3 月份的 Chl. a 值最高,6 月份的 WT 值最高,12 月份的 SD 值最高;除 TN、COD、pH、SD 外,2010 年 3 个月份间的各环境因子存在显著性差异,3 月份的 TP 值最高,6 月份的 Chl. a、DO、WT 值最高。

小江 2008 - 2010 年间的年度水环境因子均值与标准差如表 1。

表 1 2008 - 2010 年小江水环境因子的年度均值
Tab.1 Annual mean values of the water environmental factors in Xiaojiang from 2008 to 2010

理化参数	2008		2009		2010	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
TN/mg · L ⁻¹	3.26	1.07	1.44	0.36	1.79	0.53
PO ₄ ³⁻ /mg · L ⁻¹	0.06	0.03	0.05	0.04	0.05	0.05
TP/mg · L ⁻¹	0.10	0.04	0.10	0.06	0.12	0.04
COD/mg · L ⁻¹	30.99	9.94	10.06	3.23	7.87	2.56
Chl. a/μg · L ⁻¹	5.96	4.37	28.99	30.28	11.40	15.68
DO/mg · L ⁻¹	5.75	0.89	11.13	2.94	8.04	1.41
WT/℃	22.09	6.20	20.68	5.48	18.92	6.18
SD/cm	215.67	122.80	184.78	111.30	166.40	87.37
pH	7.69	0.32	8.53	0.30	8.20	0.42

多因素方差分析显示:2008 年的 TN、COD 浓度

显著高于 2009、2010 年,但 2009 与 2010 年间无显著性差异;2009 年的 Chl. a 含量显著大于 2008、2010 年,2008 与 2010 年间差异不显著;2008 年的 TP 含量显著大于 2010 年;DO、pH、WT 在 3 个年度间均差异显著,2008 年度的 WT 最高,2009 年度的 DO 和 pH 最大;PO₄³⁻ 和 SD 在 3 个年度间差异均不显著。

2.2 水环境因子空间变化

2008 - 2010 年间,双江、黄石、高阳和渠口 4 个断面的不同水环境因子的均值与标准差见表 2。多因素方差分析显示,各水环境因子在不同断面间均无显著性差异。

基于 2008 - 2010 年各断面水环境因子的聚类结果(图 3)表明,黄石与高阳首先聚为一支,然后与双江聚为一个大支;渠口断面单独为一支。高阳、黄石、双江均处于 145m 回水区内,其水环境特征总体较渠口断面更为相似,因而聚为一个大支。其中的双江断面位于河口处,受长江干流水动力学、水环境因素影响相比高阳、黄石更为显著。渠口断面位于 145m 回水区外、175m 回水区内,受上游河流来水影响较其他断面更为显著,因而单独聚类一支。

表 2 小江各采样断面水环境因子均值

理化指标	双江		黄石		高阳		渠口	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
PO ₄ ³⁻ /mg · L ⁻¹	0.07	0.06	0.06	0.03	0.05	0.03	0.06	0.04
NH ₄ ⁺ /mg · L ⁻¹	0.61	0.75	0.61	0.81	0.51	0.61	0.53	0.71
TN/mg · L ⁻¹	2.12	0.91	2.11	0.93	2.05	0.99	2.42	1.44
TP/mg · L ⁻¹	0.12	0.05	0.11	0.05	0.09	0.03	0.12	0.08
COD/mg · L ⁻¹	16.08	10.85	16.32	11.31	18.65	15.39	17.20	15.60
Chl. a/μg · L ⁻¹	16.54	20.55	22.10	27.78	15.68	25.20	6.64	5.60
DO/mg · L ⁻¹	19.79	5.95	20.23	6.01	21.19	6.62	20.69	5.91
WT/℃	8.45	3.59	8.69	3.11	8.73	3.25	6.94	1.30
SD/cm	180.70	65.54	200.56	131.50	201.04	99.98	186.67	142.70
pH	8.20	0.43	8.30	0.47	7.98	0.71	8.04	0.37

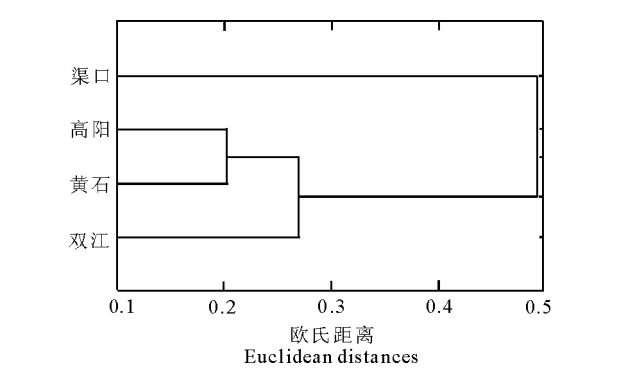


图 3 水环境因子聚类分析

Fig.3 Cluster analyses of environment parameters

3 讨论

3.1 水环境评价及变化趋势

对照地表水环境质量标准 GB3838-2002,对小江回水区 2008 - 2010 年水质进行评价,2008 年水体 TN 总体处于劣 V 类、TP 为 IV 类、COD 为 IV ~ V 类、DO 为 II ~ III 类;2009 年水体 TN 处于 III ~ IV 类、TP 为 IV 类、COD 和 DO 为 I ~ II 类;2010 年水体 TN 处于 IV ~ V 类、TP 为 IV ~ V 类、COD 和 DO 为 I ~ II 类。相比而言,2009 和 2010 年的 COD 和 DO 浓度较 2008 年有所降低,水体有机污染状况有所改

善。这可能是由于水体本身较强的复氧能力促进了有机污染物的降解。此外,近年来小江周边加强污染防治,取缔网箱养殖,实施鲢、鳙等鱼类的增殖放流等,对于减少有机污染输入,改善有机污染物循环等起到了较大作用。从监测结果来看,小江回水区主要污染物仍以氮磷为主,这主要是因为小江周边水土流失、化肥损失等造成的面源污染比较严重(高银超,2011)。根据李哲等(2009b)的研究结果,2007 年 3 月至 2008 年 3 月,小江回水区 TN 的平均浓度为 (1.55 ± 0.04) mg/L,变化范围为 0.66 ~ 3.24 mg/L;TP 平均浓度为 (0.061 ± 0.003) mg/L,变化范围为 0.012 ~ 0.19mg/L;季节差异明显。与本文研究结果比较发现,小江回水区 TN、TP 一直处于较高水平,且具有时间异质性。总体上,2008 年 175 m 试验性蓄水后,小江回水区水体水质未呈现进一步恶化趋势。

从空间变化上看,尽管不同断面的水环境因子无显著性差异,但聚类结果显示,小江回水区水环境因子特征的空间相似性呈现出沿着入库水流方向的空间梯度变化。水库纵向的生态区通常沿入库水流方向被划分为河流区、过渡区和湖泊区。在不同生态区,水动力条件差异影响了水体理化参数和水生生物群落的分布,从而导致这些指标会沿着水库纵轴的空间梯度变化而产生一定差异性(Straskraba, 1999;Wetzel, 2001)。因此,小江各断面沿入库方向的空间分布不同,不同断面间水环境特征相似度因受三峡水库蓄水运行、上游河流来水等因素影响的程度不同而有所差异。

3.2 富营养化评价及时空变化

为反映小江回水区水体富营养化状况,采用综合营养状态指数法进行指数计算,并按照其分级标准判定水体营养水平。小江回水区不同年度、月份的综合营养状态指数见表 3。2008 年的全年指数值均大于 50、小于 60,表明水体全年均处于轻度富营养水平,且 3 个月份间无显著性差异。在 2009 和 2010 年,3 月、6 月的综合营养状态指数大于 50、小于 60,表明水体处于轻度富营养水平;12 月份的指数值约为 46,表明水体处于中营养水平;2009 和 2010 年的年均指数值均显示水体总体处于轻度富营养水平;2009 和 2010 年冬季(12 月)的营养水平分别显著低于春季(3 月)和夏季(6 月)。多参数差异分析结果显示,2008 年的综合营养状态指数显著高于 2009 年和 2010 年,但 2009 与 2010 年间无显著性差异。有关 2006 年 5 月小江消落带水体富营

养化的模糊评价结果显示,大部分断面为中度富营养化状态(裴廷权等,2008)。这与本文 2008 年小江回水区水体富营养化评价结果相似。从富营养化评价结果来看,175m 试验性蓄水后,小江回水区水体富营养化水平有所降低;TN、COD 对水体富营养化的贡献率较大。

基于 2008 - 2010 年的水环境因子,获得小江回水区双江、黄石、高阳和渠口 4 个断面的水体综合营养状态指数见图 4。各断面的综合营养状态指数均值大于 50、小于 60,表明各断面水体总体为轻度富营养水平;各断面间的差异分析结果显示,各断面的综合营养状态指数无显著性差异,即营养水平相似。

表 3 2008 - 2010 年小江水体营养状态

Tab.3 Trophic status in Xiaojiang from 2008 to 2010			
年	月	TLI 均值	TLI 标准差
2008 年	4 月	57.75	2.08
	7 月	58.56	3.41
	11 月	53.22	1.75
	全年	56.51	3.37
2009 年	3 月	55.87	5.16
	6 月	54.97	5.19
	12 月	45.94	3.92
	全年	52.26	6.42
2010 年	3 月	50.76	4.40
	6 月	55.45	3.80
	12 月	46.12	1.56
	全年	51.16	5.64

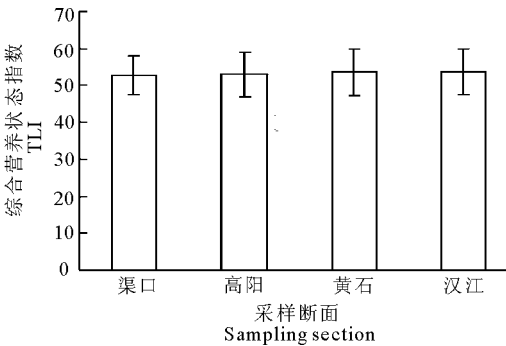


图 4 小江各采样断面水体营养状态

Fig.4 Trophic status of the different sampling sections in Xiaojiang

3.3 Chl. a 含量与水环境因子间关系

浮游藻类生长受环境因子直接或间接的影响。小江回水区叶绿素 a 含量与藻类生物量极显著相关(郭劲松等,2011)。为此,本研究对 2008 - 2010 年间监测结果的相关分析(表 4)表明,叶绿素 a 含量与 DO、pH 呈显著正相关,与 SD 呈显著负相关。

为筛选出对藻类生物量相对重要的环境因子,采用多元逐步回归分析,建立不同环境因子与叶绿

表4 小江回水区 Chl. a 含量与水环境因子间的相关关系 (n = 45)

Tab.4 Correlation between Chl. a concentrations and the water environmental factors (n = 45)

	Chl. a	PO ₄ ³⁻	TN	TP	COD	WT	DO	SD	pH	TN/TP
Chl. a	1									
PO ₄ ³⁻	-0.200	1								
TN	-0.176	0.055	1							
TP	-0.024	0.849**	-0.084	1						
COD	-0.141	0.201	0.527**	0.044	1					
WT	0.263	-0.416**	0.387**	-0.342*	0.214	1				
DO	0.729**	-0.076	-0.380**	0.132	-0.308*	0.214	1			
SD	-0.337*	0.404**	0.046	0.298*	0.256	-0.421**	-0.114	1		
pH	0.306*	0.192	0.078	0.356*	-0.003	0.409**	.0626**	0.130	1	
TN/TP	-0.090	-0.293*	0.777**	-0.439**	0.324*	0.518**	-0.284	-0.145	-0.052	1

* 表示显著相关, $P < 0.05$; ** 表示极显著相关, $P < 0.01$ 。

* is significant correlation ($P < 0.05$). ** is highly significant correlation ($P < 0.01$).

素 a 含量间的“最优”回归方程。对 2008 - 2010 年全年、不同季节的叶绿素 a 含量与其他水环境因子进行回归分析(表 5)发现,全年中 DO、SD 与藻类生物量关系最为密切,分别为正相关、负相关;不同季节筛选出对藻类生物量关系密切的环境因子随季节发生变化。春季(3、4 月)的藻类生物量与 DO、WT、TN 显著正相关;夏季(6、7 月)的藻类生物量与 DO 显著正相关;秋冬季(11、12 月)的藻类生物量与 DO 显著正相关。

表5 叶绿素 a 含量与环境因子逐步回归分析

Tab.5 Stepwise regression results of Chl. a and environmental factors

季节	方程	相关系数
全年	Chl. a = 4.81 × DO - 0.051 × SD - 14.66	0.772
春季	Chl. a = 10.01 × DO + 2.24 × WT + 13.68 × TN - 131.53	0.969
夏季	Chl. a = 4.63 × DO - 17.57	0.768
秋冬季	Chl. a = 0.17 × DO - 0.92	0.518

Pearson 相关性分析和多元逐步回归分析结果均表明,藻类生物量增加导致水体透明度降低,同时藻类光合作用所释放氧气能够提高水体溶解氧含量,从而表现出藻类生物量与 DO 显著正相关、与 SD 显著负相关。小江回水区浮游藻类以蓝藻、绿藻、甲藻为主(郭劲松等,2011),其适宜生长在温暖的水体中,因此水温成为春季藻类生物量增加的限制因子。同时,春季营养盐 TN 表现出的正相关性说明 TN 成为春季藻类生物量提高的促进因子。因此,春季叶绿素 a 含量较高,与夏季差异不大,在一定程度上是春季 TN 较高导致。但夏季小江回水区藻类生物量仅与 DO 呈正相关,并未表现出显著的磷限制特征。这与李哲等(2009)的研究结果不同,可能与小江回水区磷浓度较高有关。在温度较低的

秋冬季,藻类生物量并未表现出通常的与水温正相关性,分析可能是因为冬季浮游植物以适宜在较低水温下生长发育的硅藻为主。

参考文献

蔡庆华, 孙志禹. 2012. 三峡水库水环境与水生态研究的进展与展望[J]. 湖泊科学, 24(2): 169 - 177.

曹承进, 郑丙辉, 张佳磊, 等. 2009. 三峡水库支流大宁河冬、春季水华调查研究[J]. 环境科学, 30(12): 3471 - 3479.

邓春光. 2007. 三峡库区富营养化研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社.

方芳, 李哲, 田光, 等. 2009. 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[J]. 环境科学, 30(12): 3488 - 3493.

高银超. 2011. 基于 AnnAGNPS 模型的三峡库区小江流域农业面源污染负荷研究[D]. 重庆: 西南大学.

郭劲松, 陈园, 李哲, 等. 2011. 三峡小江回水区叶绿素 a 季节变化及其同主要藻类的相互关系[J]. 环境科学, 32(4): 976 - 981.

郭劲松, 李哲, 张呈, 等. 2010. 长江科学院院报, 27(10): 60 - 64, 87.

金相灿, 屠清瑛. 1990. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社.

李哲, 郭劲松, 方芳, 等. 2009a. 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, 30(6): 1588 - 1594.

李哲, 郭劲松, 方芳, 等. 2009b. 三峡水库小江回水区不同 TN/TP 水平下氮素形态分布和循环特点[J]. 湖泊科学, 21(4): 509 - 517.

李哲, 方芳, 郭劲松, 等. 2009c. 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, 21(1): 36 - 44.

李哲, 郭劲松, 方芳, 等. 2010. 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[J]. 环境科学, 31(2):301-309.
- 裴廷权, 王里奥, 韩勇, 等. 2008. 三峡库区小江流域水体富营养化的模糊评价[J]. 农业环境科学学报, 27(4): 1427-1431.
- 冉祥滨, 陈洪涛, 姚庆祯, 等. 2009. 三峡水库小江库湾水体混合过程中营养盐的行为研究[J]. 水生态学杂志, 2(2):21-27.
- 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩, 等. 1990. 微型生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 王家楫. 1961. 中国淡水轮虫志[M]. 北京: 科学出版社.
- 王晓青, 郭劲松. 2012. 三峡水库蓄水后小江水环境容量的变化[J]. 环境科学研究, (1): 36-42.
- 魏复盛. 2002. 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.
- 张呈, 郭劲松, 李哲, 等. 2010. 三峡小江回水区透明度季节变化及其影响因子分析[J]. 湖泊科学, 22(2):189-194.
- Straskraba M, Tundisi J. 1999. Guidelines of lake management (Volume 9): reservoir water quality management[M]. International Lake Environment Committee.
- Wetzel R G. 2001. Limnology: Lakes and river ecosystems [M]. California: Academic Press.

(责任编辑 张俊友)

Studies on the Temporal and Spatial Variation of Water Environment in Xiaojiang Backwater Region of Three Gorges Reservoir

CHEN Xiao-juan¹, PAN Xiao-jie¹, ZOU Xi¹, HU Lian¹, ZHANG Zhi-yong¹, FENG Kun¹,
ZHENG Zhi-wei¹, PENG Jian-hua¹, WAN Cheng-yan¹, ZHAO Xiu-lan²

- (1. Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences. Wuhan 430079, P. R. China;
2. Southwest University, Chongqing 400715, P. R. China)

Abstract: The water environment in Xiaojiang backwater region of Three Gorges Reservoir was monitored from 2008 to 2010. Then its temporal and spatial variation was studied. The water environmental factors were different significantly among different seasons, but their annual variations were not significant. It was also not significantly different among the sampling sections. TN and TP concentrations were very high in backwater region of Xiaojiang. The water environment did not become worse after 175m experimental impoundment of 2008. The trophic level assessments showed that the water was at slight eutrophic level and the trophic level decreased after 2008. Pearson correlations and stepwise regression results between Chl. a concentrations and the water environmental factors showed that Chl. a concentrations had significant positive correlations with DO, but negative correlations with SD. Furthermore, the important environmental factors to Chl. a concentration varied with seasons.

Key words: Xiaojiang; water environment; eutrophication; temporal and spatial variation