

## 三峡小江回水区透明度季节变化及其影响因子分析\*

张 呈, 郭劲松\*\*, 李 哲, 蒲清平, 方 芳, 龙 曼, 高 旭  
(重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

**摘 要:** 三峡成库后其季节调蓄过程使该水域湖沼学特征具有独特性. 根据三峡小江流域回水区段为期 2 年的定位跟踪观测, 对透明度 (SD) 和主要环境指标的相互关系进行分析研究. 研究期间, 小江回水区透明度均值为  $170 \pm 7$  cm, 各采样点透明度差异不明显且季节变化过程一致, 自春末夏初开始降至最低水平, 夏季汛期相对稳定, 夏末入秋持续升高, 冬季维持在较高状态, 入春后下降. 对透明度和主要环境指标的相关性分析发现, 无机悬浮颗粒 (PIM) 是影响透明度的主要指标. 透明度同 PIM, Chl. a 多元回归模型为:  $SD = (-89.389 \pm 8.101) \cdot \lg(PIM) + (-84.008 \pm 8.624) \cdot \lg(Chl. a) + (264.132 \pm 8.232)$ . 汛期低水位状态下 (145 - 150m) 小江回水区水动力条件趋于天然河道, 河道输沙量增加使无机悬浮颗粒含量远高于藻类生物量而成为影响透明度的主要环境指标. 在中水位 (150 - 156m) 和高水位 (156m 以上), 虽然藻类进入非生长季节, 但水位抬升和水体滞留时间的延长促使悬浮颗粒物大量沉淀, 悬浮生长于表层水体的藻类成为影响透明度的主要环境指标, 生物作用对透明度的影响明显.

**关键词:** 三峡水库; 小江回水区; 透明度; 无机悬浮颗粒; 叶绿素 a

## Seasonal variation of transparency and its regulating factors in the Xiaojiang backwater area, Three Gorges Reservoir

ZHANG Cheng, GUO Jinsong, LI Zhe, PU Qingping, FANG Fang, LONG Man & GAO Xu  
(Faculty of Urban Construction & Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** Limnological characteristic of the Three Gorges Reservoir (TGR) is unique due to its seasonal operation of the Three Gorges Dam. A 2-year monitoring along 5 sampling sites was conducted in the backwater areas of Xiaojiang River (XBA) in the TGR. Mean value of transparency (SD) in the XBA was  $170 \pm 7$  cm during the study. No significant difference was detected among the sampling sites through the seasons. It was found that SD was low during the flood season, increased in the late summer, and continuously increased to winter during the high water level operation stage. Spearman rank correlation analysis on SD and environmental variables showed that particulate inorganic matter (PIM) and chlorophyll-a (Chl. a) were the factors that impacted SD in the XBA. The regression model of SD and log transformed PIM, Chl. a was  $SD = (-89.389 \pm 8.101) \cdot \lg(PIM) + (-84.008 \pm 8.624) \cdot \lg(Chl. a) + (264.132 \pm 8.232)$ . It showed that under the low water level operation stage (145 - 150m), hydrodynamic condition in the XBA was close to that in natural rivers with high concentration levels of PIM that much more significantly impact on the variation of SD than on Chl. a. In operation stages of intermediate water level (150 - 156m) and high water level (above 156m), with the sedimentation of large amount of PIM, the suspended phytoplankton became the principle factor that influence the variation of SD instead of PIM, even if the investigated period was not the growing season of phytoplankton.

**Keywords:** Three Gorges Reservoir; Xiaojiang backwater area; transparency; inorganic particulate; chlorophyll-a

透明度 (Transparency) 是综合反映水体光学透射性能的关键生态指标也是定性评判水体质量好坏的感官指标<sup>[1-2]</sup>, 同水体中悬浮颗粒浓度、藻类等浮游生物个体数量、水体色度变化等密切相关<sup>[3]</sup>. 通常悬浮生长于水体表层的藻类大量繁殖将可能严重干扰水体的光学透射性能, 致使水体透明度下降<sup>[1]</sup>, 因而, 在湖泊营

\* 国家水专项课题 (2009ZX07104-003; 2009ZX07104-005) 和重庆市科技攻关计划重点项目 (CSTC2008AB7036) 联合资助. 2009-10-18 收稿, 2009-12-10 收修改稿. 张呈, 男, 1988 年生; E-mail: zc881215@gmail.com.

\*\* 通讯作者; E-mail: guo0768@126.com.

养状态评价中,透明度被作为营养状态高低的重要考核指标<sup>[1]</sup>.但在天然河道<sup>[1]</sup>、浅水湖泊<sup>[3]</sup>或水库<sup>[1]</sup>等系统中,透明度改变是各种环境因素综合影响的结果,辨识影响透明度的主要环境要素对于正确评价营养状态变化具有关键意义.

三峡成库后,其独特的河道型水库特点使得该水域的湖沼学特征既不同于湖泊也与天然河道有明显差别<sup>[4-5]</sup>.近年来的研究多从营养物汇积现象及其同藻类水华的相互关系入手<sup>[6-7]</sup>,研究三峡水库支流回水区的富营养化问题,一些研究借助于湖泊营养状态评价方法对库区支流主要环境指标进行评价并得出库区支流回水区普遍呈中-富营养状态的结论<sup>[8,9]</sup>.但对于三峡水库运行状态下支流回水区透明度同各环境要素的相互关系却鲜有报道.同湖泊相比,三峡支流回水区透明度的改变是否主要受控于藻类生长,抑或是同其它环境要素有关,值得深入探究.

作者所在课题组对三峡水库典型支流——小江流域回水区段水体富营养化现象展开了两年(2007年5月至2009年5月)的跟踪观测,本研究着重分析水库调蓄下小江回水区透明度的季节变化特点,探讨在三峡水库运行状态下小江回水区透明度同环境要素的相互关系,揭示水库季节调蓄下影响透明度的主要环境要素,为进一步认识三峡支流回水区的富营养化问题,正确评价其营养状况提供研究基础.

### 1 研究区域与研究方法

#### 1.1 研究区域与采样方案

小江(亦称:澎溪河)流域(图1),介于北纬30°49′-31°42′,东经107°56′-108°54′之间,流域面积5172.5km<sup>2</sup>,下游河口距三峡大坝247km,是三峡库区中段、北岸流域面积最大的次级河流.三峡水库蓄水至156m后,小江回水区延伸至开县渠口镇境内,长约60km.但考虑回水区末端受到156-145m水位涨落的影响,本研究选择145m以下的永久回水区:养鹿乡至小江河口,约40km河段作为研究区域(图2).为全面反映小江回水区河段水力条件,并综合考虑沿岸场镇排污的影响,笔者在研究区域共布置5个采样断面:渠马渡口(31°07′50.8″N,108°37′13.9″E)、高阳平湖(31°07′50.5″N,108°40′29.5″E)、黄石镇(31°00′29.4″N,108°42′39.5″E)、双江大桥(30°56′51.1″N,108°41′37.5″E)和小江河口(30°57′03.8″N,108°39′30.6″E).各断面采样点均位于河道深泓线处,2007年5月至2009年5月间,每月2次采集水深0.5、1、2、3、5、8m处共6个测点的水样,采样时间控制在当日9:30至16:30.除现场测试指标外,对上述不同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.

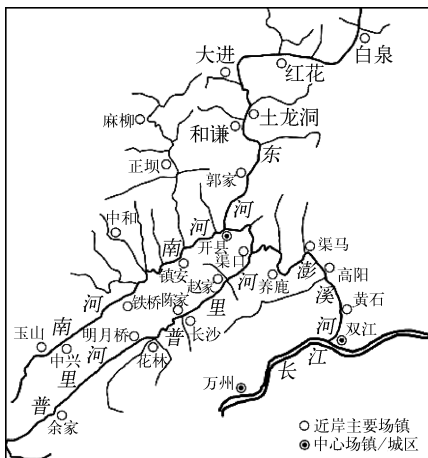


图1 小江流域水系

Fig. 1 Drainage system of Xiaojiang watershed

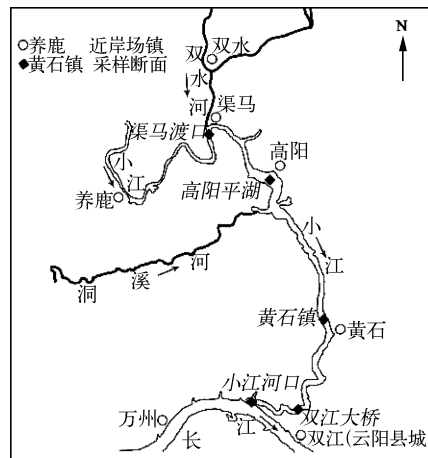


图2 养鹿-小江河口回水区段采样点分布

Fig. 2 Sketch map of Xiaojiang backwater area

#### 1.2 测试分析与数据处理方法

透明度(SD)采用塞式盘现场测量,化学分析指标包括:总氮(TN)、总磷(TP)、无机悬浮颗粒(PIM)、有

机悬浮颗粒(POM)、叶绿素 a(Chl. a)等. TN、TP 为原水水样直接进行消解测试,其余指标测试时水样均预先通过 0.45 $\mu\text{m}$  纤维滤膜抽滤处理,测试方法参照《水和废水监测分析方法(第四版)》<sup>[10]</sup> 进行. 另外,Chl. a 为 500ml 原水经 GF/C 膜滤后采用丙酮萃取,总悬浮颗粒(TPM)、PIM 为 500ml 原水经 GF/F 膜滤后分别在 65 $^{\circ}\text{C}$  和 450 $^{\circ}\text{C}$  下烘干称重测得,二者差值即为 POM. 由于天然水体中色度变化并不显著,本研究暂不考虑色度改变对透明度测试结果的影响.

运用 SPSS 软件对各采样点测试结果进行统计分析. 采用局部加权回归方法(LOESS 拟合)对各次采样数据进行回归平滑,说明数据序列的总体变化特点;采用非参数的 Spearman 相关性分析方法分析不同变量间变化趋势的同步性;采用多元逐步线性回归方法建立透明度同主要环境要素的统计关系,并利用标准化系数比较自变量对因变量的贡献大小. 本研究选择采集的 5 个断面总共 235 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,对研究期间季节变化划分为:春季 3 月-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.

小江河口水位根据长江干流万县水文站和三峡大坝日实测水位推算,小江河口距长江干流万县站约 38.3km,距三峡大坝约 247.0km. 研究期间河口水位日变化过程见图 3. 为能说明 2 次采样间隔水库调蓄状态透明度同主要环境指标的相互关系,研究对河口水位日推算值进行均化处理,2 次采样间隔水位(Level)计算公式为:

$$Level = \frac{2 \text{ 次采样间隔日水位总和}}{2 \text{ 次采样间隔天数}}$$

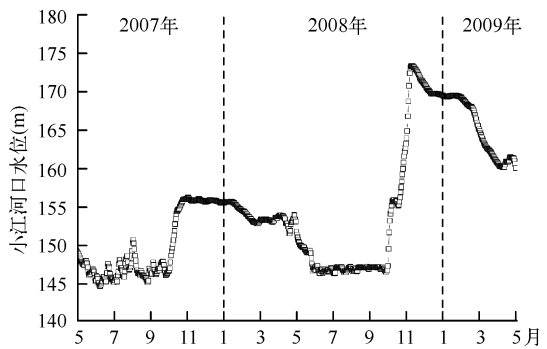


图 3 小江河口水位日变化过程  
Fig. 3 Daily water surface level of the estuary of Xiaojiang River

## 2 结果分析

### 2.1 小江回水区透明度的季节变化特点

研究期间,小江回水区 SD 均值为 170 $\pm$ 7cm(表 1). 对各采样点间数据样本的方差分析发现,5 个采样点间的 SD 均无显著的统计差异(Oneway ANOVA, Sig.  $\geq$ 0.05),而相关性分析发现各采样点间的 SD 值均呈极显著的正相关关系( $r \geq$ 0.80, Sig.  $\leq$ 0.01),说明各采样点透明度的季节变化过程同步(图 4). 据此本研究着重探讨小江回水区透明度的季节变化特点.

2007 年 5 月小江回水区透明度均值为 118 $\pm$ 12cm. 入汛后(6-9 月中旬),透明度下降,并保持在相对较低的水平(70 $\pm$ 5cm). 透明度在 9 月下旬入秋后随着枯水期的来临和水库水位的升高而增加,2007 年 11 月至 2008 年 1 月,透明度均值为 276 $\pm$ 11cm,是研究期间的较高水平. 冬末初春,小江回水区透明度开始迅速下降,4 月小江回水区透明度为 150 $\pm$ 33cm,入汛后小江回水区真光层深度再次保持在相对稳定的低水平,2008 年 5 月至 9 月中旬透明度均值仅为 77 $\pm$ 5cm. 自 2008 年 9 月下旬开始,小江回水区透明度再次升高,并在冬季保持在相对较高的水平(257 $\pm$ 14cm),而在 2009 年冬末初春开始下降. 大体上,小江回水区透明度自春末夏初开始降至很低水平,汛期保持相对稳定,而从夏末入秋开始则持续升高,进入冬季后维持在较高状态,并在从 2 月下旬入春开始逐渐下降. 两年研究期间,上述季节变化特点具有较明显的重现性(表 1).

表 1 研究期间小江回水区透明度季节变化特点  
Tab. 1 Seasonal variation of SD in the XBA during the study period

参数	2007-2009 年	春季	夏季	秋季	冬季
样本数	235	50	75	50	60
均值(cm)	170 $\pm$ 7	181 $\pm$ 17	76 $\pm$ 4	179 $\pm$ 12	272 $\pm$ 9
变化范围(cm)	10-550	45-550	10-150	40-450	140-470
$C_V$	0.635	0.666	0.412	0.471	0.265

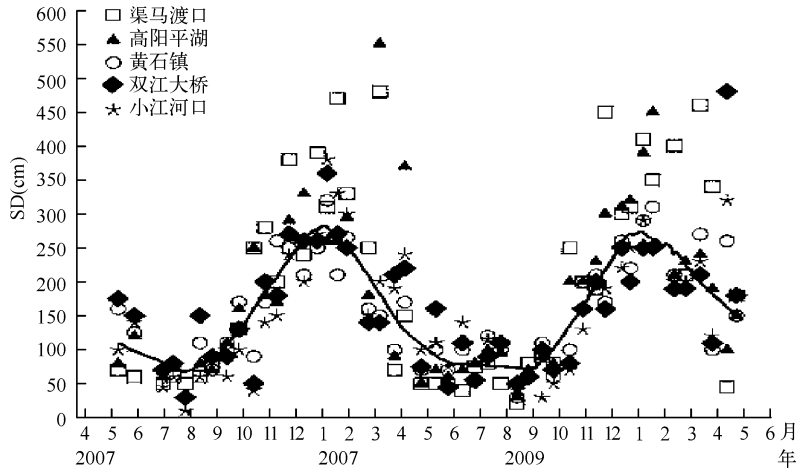


图4 研究期间小江回水区透明度季节变化过程

Fig. 4 Seasonal variation of SD in the XBA

2.2 小江回水区透明度同主要环境指标的相关关系

采用 Spearman 方法对透明度和主要环境要素进行相关性分析(表2), 结果发现小江回水区 SD 同 PIM、POM、Chl. a 均呈显著的负相关关系, 同 TN、TP 的统计相关性并不显著. 对相关系数大小的比较发现,  $r_{SD-PIM} > r_{SD-Chl. a} > r_{SD-POM}$ . 采用多元逐步回归方法建立 SD 同上述环境指标对数值间的线性回归关系(表3), 研究发现在多元回归关系中 PIM、Chl. a 对 SD 的影响显著强于其余3个环境指标, 且 PIM 对 SD 的贡献显著强于 Chl. a. 根据表3, 研究期间 SD 同 PIM、Chl. a 的多元拟合公式为:

$$SD = (-89.389 \pm 8.101) \cdot \lg(PIM) + (-84.008 \pm 8.624) \cdot \lg(Chl. a) + (264.132 \pm 8.232) \quad (1)$$

表2 小江回水区 SD 同环境指标的 Spearman 相关系数 (Sig.  $\leq 0.01$ ) \*

Tab. 2 Correlation coefficients of SD and key environmental parameters under different operation stage

类别	样本数	Level	Chl. a	TN	TP	POM	PIM
全部数据序列	235	0.726	-0.487	-	-	-0.373	-0.710
低水位	95	-	-	-0.311	-0.427	-	-0.593
中水位	70	0.652	-0.589	-0.374	-	-0.497	-0.443
高水位	70	-	-0.576	-	-	-	-

\* “-”表示无显著统计相关性.

表3 小江回水区主要环境指标对数值同 SD 的逐步回归模型结果

Tab. 3 Stepwise regression results of SD on key environmental variables in the XBA

逐步回归筛选的模型		非标准化系数		标准化系数		t 检验	显著性检验 Sig. $\leq 0.05$	拟合 优势度 $R^2$	显著性检验 Sig. $\leq 0.05$
编号	自变量	B	标准误	$\beta$					
1	常数	205.741	6.704			30.688	0.000	0.338	0.000
	$\lg(PIM)$	-102.397	9.494	-0.581		-10.785	0.000		
2	常数	264.132	8.232			32.086	0.000	0.533	0.000
	$\lg(PIM)$	-89.389	8.101	-0.507		-11.034	0.000		
	$\lg(Chl. a)$	-84.008	8.624	-0.448		-9.741	0.000		

表 4 不同水位状态下小江回水区主要环境指标对数值同 SD 多元逐步回归分析\*

Tab. 4 Stepwise regression among SD and key environmental parameters under different operation stages

低水位			中水位			高水位		
自变量	$\beta$	$R^2$	自变量	$\beta$	$R^2$	自变量	$\beta$	$R^2$
$\lg(PIM)$	-0.393	0.272	$\lg(Chl. a)$	-0.456	0.420	$\lg(Chl. a)$	-0.576	0.431
$\lg(TP)$	-0.230		$\lg(PIM)$	-0.394		$\lg(TN)$	-0.466	
					$\lg(TP)$	0.328		

\* 上述所有模型和自变量均通过显著性检验,  $Sig. \leq 0.01$ ;  $\beta$  为标准化系数;  $R^2$  为拟合优度.

为进一步分析三峡水库水位季节调蓄中 SD 同主要环境指标的相互关系, 将 2 年内水库调蓄分为 3 个状态: 150m 以下 (低水位)、150 - 156m (中水位) 和 156m 以上 (高水位). 不同水位下主要环境要素含量见图 5. SD 同上述环境指标的 Spearman 相关系数见表 2, 逐步多元回归结果见表 4. 研究发现, 随着水库运行水位的升高, SD 显著增加, SD 同水位呈极显著的正相关关系. 在低水位状态下 PIM 是影响小江回水区透明度的主要环境因素, 协同影响透明度的环境指标还有 TP, 而 Chl. a 对透明度的影响并不显著; 在中水位状态下, Chl. a、PIM、TN、POM 均同 SD 呈显著的负相关关系, 相关系数大小分别为  $r_{SD-Chl. a} > r_{SD-POM} > r_{SD-PIM} > r_{SD-TN}$  (表 2), Chl. a 对透明度的贡献亦强于 PIM, 是影响透明度的主要环境指标; 在高水位运行状态下, SD 仅同 Chl. a 呈显著的负相关关系而与其他环境指标无统计相关性, Chl. a 对 SD 的贡献最大.

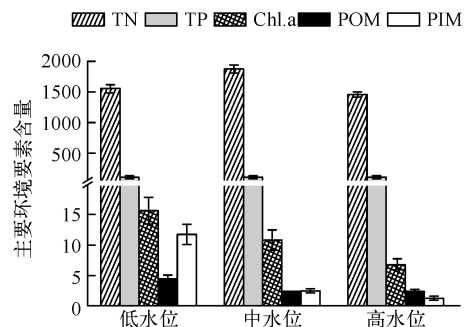


图 5 不同水位状态下小江回水区主要环境要素含量

(TN、TP、Chl. a 单位为  $\mu\text{g/L}$ ;  
POM、PIM 单位为  $\text{mg/L}$ )

Fig. 5 The main environmental variables under different operation stages

### 3 讨论

三峡水库“蓄清排混”的调度运行方式使得三峡水库湖沼学的宏观特征既受水库调蓄的影响, 也与水文、生态、生物要素的季节变化密切相关, 是水库调蓄和季节变化协同作用的结果. 从春末夏初 (5 月) 开始, 水库进入低水位运行的防洪状态, 支流回水区水力滞留时间缩短, 水动力特点接近于天然河道, 而降雨量的增加使得小江流域径流量迅速增加, 在水土流失严重的流域背景下, 河道输沙量亦随降雨、径流过程的增加而加大, 以无机泥沙颗粒为主悬浮颗粒物含量显著增加<sup>[5, 11]</sup>. 虽然同期为藻类繁盛生长季节, 藻类生长诱使颗粒态有机物含量增加并将可能对透明度产生一定影响, 但同含量远高于藻类生物量的 PIM 相比 (图 5), Chl. a 对透明度的影响显著弱化. PIM 成为影响该时期小江回水区透明度的主要环境指标, 降雨、径流等物理过程对透明度的影响较为显著. 该特征与同处亚热带季风气候的太湖、Okeechobee 湖等浅水湖泊中主要环境指标对透明度的影响特征相同<sup>[12-13]</sup>. Reynolds<sup>[14]</sup>、Padisák 等<sup>[15]</sup>认为天然河流影响透明度的主要因素是其输送的悬浮颗粒物, 这同底质易于再悬浮的浅水湖泊水下光学特性的影响机制相同, 并在很大程度上主导了该生境状态下的水生态特征.

中水位状态下, 水位抬升与汛期结束来水量减少的交叠影响使得小江回水区水体滞留时间显著延长, 水深迅速加大, 水动力条件趋近于深水型湖泊, 河道型的小江回水区携沙输移能力减弱, 大量悬浮物无机泥沙沉淀下来而使得水中 PIM 含量迅速下降, 并维持在相对较低的水平. 虽然藻类生长随着季节变化进入非生长季节, 但期间 PIM 显著的相对下降使得悬浮生长于表层水体中的浮游生物 (主要是藻类) 成为干扰水下光学特性的主要介质. 因此, 在中水位和高水位状态下, Chl. a 是影响透明度的主要环境指标, 生物作用对透明度的影响更为显著, 这同许多深水湖泊 (Lake Washington, Lake Michigan, Lake Erie 等) 研究结果相同<sup>[1, 16]</sup>.

湖泊研究中氮、磷含量的升高被普遍认为是营养状态升高的标志,不少研究证实 TN、TP 含量的持续增加将促进藻类繁盛并提高水中藻类生物量对透明度影响的贡献程度<sup>[1,14-15]</sup>。但研究期间 TN、TP 对透明度产生的影响总体上并无显著统计意义,在 3 种水位状态下 TN、TP 含量差异不大,且在中、高水位状态下,小江回水区 TN、TP 含量的增加并未显著影响 SD,这与上述湖泊研究结论相异。

#### 4 结论

两年观测期间(2007-2009 年)小江回水区透明度均值为  $170 \pm 7$ cm,各采样点透明度差异并不明显且季节变化过程一致,自春末夏初开始降至最低水平,夏季汛期相对稳定,夏末入秋开始持续升高,进入冬季后维持在较高状态,2 月下旬入春开始逐渐下降。

观测期间影响小江回水区透明度的指标总体上以 PIM 为主。汛期低水位状态下小江回水区水动力条件趋近于天然河道,河道输沙量增加使水中无机悬浮颗粒含量远高于藻类生物量而成为影响透明度的主要环境指标,降雨、径流等物理过程主导了透明度的变化。在中水位和高水位状态下,水位抬升和水力滞留时间的延长促使悬浮颗粒物大量沉淀,悬浮生长于表层水体的藻类成为影响透明度的主要环境指标。TN、TP 等营养物对透明度的影响尚需进一步研究揭示。

#### 5 参考文献

- [ 1 ] Wetzel RG. *Limnology: Lakes and river ecosystems*. CA: Academic Press, 2001: 49-70.
- [ 2 ] 潘继征,熊 飞,李文朝等. 云南抚仙湖透明度的时空变化及影响因子分析. *湖泊科学*, 2008, **20**(5): 681-686.
- [ 3 ] 秦伯强,胡维平,陈伟民等. 太湖水环境演化过程与机理. 北京:科学出版社,2004: 53-106.
- [ 4 ] 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. *湖泊科学*, 2009, **21**(1): 36-44.
- [ 5 ] 李 哲,郭劲松,方 芳等. 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. *湖泊科学*, 2009, **21**(4): 509-517.
- [ 6 ] 张 晟,李崇明,郑丙辉等. 三峡库区次级河流营养状态及营养盐输出影响. *环境科学*, 2007, **28**(3): 500-505.
- [ 7 ] 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. *环境科学*, 2008, **29**(2): 310-315.
- [ 8 ] 蔡庆华,胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究. *水生生物学报*, 2006, **30**(1): 7-11.
- [ 9 ] 张 晟,李崇明,郑 坚等. 三峡水库支流回水区营养状态季节变化. *环境科学*, 2009, **30**(1): 64-69.
- [ 10 ] 《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,2002.
- [ 11 ] 方 芳,李 哲,田 光等. 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. *环境科学*, 2009, **30**(12): 48-53.
- [ 12 ] Ke Z, Xie P, Guo L. Controlling factors of spring-summer phytoplankton succession in Lake Taihu (Meiliang Bay, China). *Hydrobiologia*, 2008, **607**: 41-49.
- [ 13 ] James R, Havens K, Zhu G *et al.* Comparative analysis of nutrients, chlorophyll and transparency in two large shallow lakes (Lake Taihu, P. R. China and Lake Okeechobee, USA). *Hydrobiologia*, 2009, **627**: 211-231.
- [ 14 ] Reynolds CS. Hydroecology of river plankton: the role of variability in channel flow. *Hydrological Processes*, 2000, **14**: 3119-3132.
- [ 15 ] Padisák J, Reynolds CS. Shallow lakes: the absolute, the relative, the functional and the pragmatic. *Hydrobiologia*, 2003, **506-509**: 1-11.
- [ 16 ] Reynolds CS. *The ecology of phytoplankton*. UK: Cambridge University Press, 2006: 211-436.