

三峡水库库首初期蓄水前后理化因子的比较研究

曹明^{1,2} 蔡庆华¹ 刘瑞秋¹ 渠晓东^{1,2} 叶麟^{1,2}

(1 淡水生态与生物技术国家重点实验室; 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072;

2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 根据2002—2004年对三峡水库库首的监测, 对该水域的理化特征及其动态进行了比较分析, 并对三峡水库初期蓄水前后的数据进行了差异显著性分析。结果显示主要理化指标空间差异不大, 主要随季节变化。部分理化指标在蓄水前后有显著差异。其中TN、TP在蓄水后与蓄水前同期比较有明显降低, 分别由蓄水前的周年平均值 2.38mg/L 、 0.274mg/L 下降到蓄水后的 1.62mg/L 、 0.132mg/L 。在无机氮组成中, $\text{NO}_3\text{-N}$ 高达91.25%, 而 $\text{NO}_2\text{-N}$ 仅占1.05%, 这表明调查水域有较强的自净能力。透明度、浊度月变化很大, 且呈良好的负相关, 并在7—9月分别有显著降低与升高, 表明本地区水土流失在降雨季节十分剧烈。而TP也随库区水体中悬浮物增高而显著增高, 表明流失水土受磷污染严重。但由于同时期 $\text{PO}_4\text{-P}$ 反而是降低的, 则说明此污染并不能有效转化为 $\text{PO}_4\text{-P}$ 。对营养状态指数(TSI_M)的评价表明, 尽管蓄水后库首水质污染较之蓄水前有明显降低, 但仍呈中营养化水平。与国内其他大型水库比较, 结果显示TP、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 都远远高于被比较水库。

关键词: 三峡水库; 初期蓄水; 理化因子; 富营养化

中图分类号: Q178.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2006)01-0012-08

对三峡库区生态系统的研究始于1999年对香溪河流域考察, 现研究范围扩大到从茅坪到巴东的三峡水库湖北部分的长江干流, 以及香溪河、袁水河、童庄河、青干河、神农溪等五个支流。为了研究三峡水库初期蓄水对水库库首区水生生态系统的影响, 2003年6月前, 按江中心点与近岸点布置采样点的原则, 在库区从茅坪到归州平均每8km处的五个横断面设置了10个采样点, 2003年7月在原基础上增至14个采样点。调查对象包括: (1) 水体理化指标: 水体主要营养元素的含量、水深、水温、透明度、pH值、电导率、TDS等; (2) 浮游植物: 种类组成、密度和生物量、叶绿素 a ; (3) 浮游动物: 种类组成与分布、密度和生物量; (4) 底栖动物: 种类组成与分布、功能摄食类群、现存量。

本文仅对三峡水库库首水域中的理化因子进行分析研究。

1 研究方法

1.1 采样点的设置 三峡水库坝前作为监测的第一个横断面, 蓄水后按江中、近北岸、近南岸设置3个采样点, 命名为SX01、SX01L、SX01R。从SX01向上游方向大约每8km设置一组采样点, 除了长江第三组采样点所在江道过于狭窄只设了2个采样点外, 其他四组均按江中和左、右岸设置3个采样点。其中, SX04(L、R)位于香溪河与长江交汇处, SX05(L、R)于归州, 见图1。蓄水前采样点设置为江中、岸边各一, 江中采样点蓄水前后保持一致, 蓄水前岸边采样点仅作参考。

1.2 监测指标 主要项目有: 水深、水温、塞氏透明度(SD, 以下简称透明度)、浊度(Turb)、电导率(Cond)、pH、总溶解固体(TDS)、总氮(TN)、硝酸盐氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、亚硝酸盐氮($\text{NO}_2\text{-N}$)、总磷(TP)、正磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)、碱度(Alk)、总硬度(HD), 以

收稿日期: 2005-07-20; 修订日期: 2005-09-20

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-SW-111); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412300); 国家自然科学基金

基金重点项目(30330140)资助

作者简介: 曹明(1975—), 男, 湖北武汉人; 在职研究生。主要从事淡水生态学研究、网络信息系统管理、GIS生态学研究等工作。E-mail: caoming@ihb.ac.cn

通讯作者: 蔡庆华, E-mail: qhcai@ihb.ac.cn

下简称硬度)、氯离子(Cl^-)、二氧化硅($\text{SiO}_2\text{-Si}$)、化学耗氧量(COD)、叶绿素 a (Chl. a)。

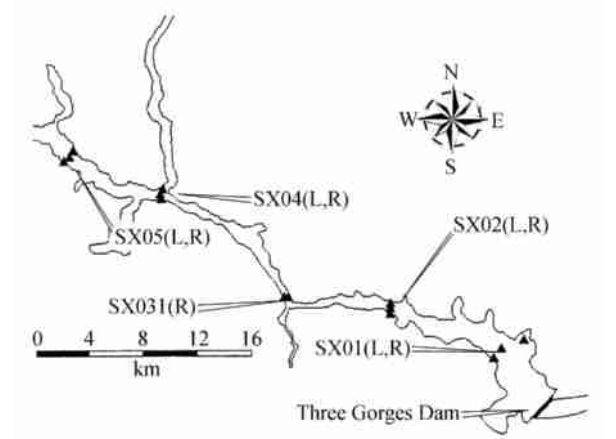


图 1 采样点设置图
Fig. 1 Sampling sites

1.3 监测方法 除水温、电导率、浊度、pH、TDS、透明度为现场测定外, 其他指标均由采取混合水样带

回室内处理。混合水样标准为离表层 0.5m、5m、10m 水样的均匀混合。

水温用温度计法测定; 透明度用塞氏盘法; 浊度用 HACH Fau 浊度法; 电导率用 HACH 电导率法; pH 用 HACH pH 法; TDS 用 HACH TDS 法; TN 用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (GB/T 11894-89); $\text{NO}_3\text{-N}$ 用酚二磺酸分光光度法 (GB/T 7480-87); $\text{NH}_4\text{-N}$ 用钠氏试剂分光光度法; $\text{NO}_2\text{-N}$ 用分光光度法 (GB/T 7493-87); TP 用钼酸铵分光光度法 (GB/T 11893-89); $\text{PO}_4\text{-P}$ 用磷钼蓝比色法 (GB/T 8538-1995); 碱度用酸碱指示剂滴定法; 硬度用 EDTA 测定法; Cl^- 用硝酸银滴定法 (GB/T 11896-89); $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 用硅钼蓝自动比色法; COD 用重铬酸盐法 (GB/T 11914-89); Chl. a 用紫外分光光度法^[3]。

2 结果与讨论

主要理化指标分析结果月平均值如下, 见表 1。

表 1 主要理化指标月平均值动态表
Tab. 1 Monthly averages of the major physicochemical indices

月份		6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5
TN (mg/L)	蓄水前	1.44	3.13	2.18	3.88	2.04	2.09	1.80	2.61	1.35	3.43	1.90	2.27
	蓄水后 ¹	2.85	2.96	0.99	1.71	0.92	1.43	0.82	1.82	1.50	1.67	1.54	1.73
	蓄水后 ² *	1.73	2.04	1.06	1.07	1.40	1.26	1.31	1.53	1.32	1.29	1.65	3.26
TP (mg/L)	蓄水前	0.15	0.48	0.49	0.66	0.21	0.14	0.15	0.22	0.13	0.06	0.12	0.05
	蓄水后 ¹	0.04	0.39	0.29	0.40	0.08	0.11	0.09	0.08	0.17	0.12	0.09	0.06
	蓄水后 ²	0.10	0.20	0.12	0.16	0.05	0.07	0.07	0.08	0.11	0.08	0.11	0.09
pH	蓄水前		8.21	8.08	8.30	8.37	8.32	8.25	8.46	8.34	8.28	8.22	8.19
	蓄水后 ¹	8.11	8.29	8.19	8.31	8.16	8.12	8.07	8.10	8.27	8.49	7.75	8.17
	蓄水后 ²	7.93	8.22	8.22	7.25	—	7.54	8.18	8.31	—	—	—	—
Chl. a (mg/m ³)	蓄水前	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	蓄水后 ¹	—	1.29	3.50	2.14	0.53	0.48	0.71	0.99	5.99	7.37	3.97	5.26
	蓄水后 ²	6.32	2.03	1.41	0.70	0.85	1.12	0.82	0.69	0.71	4.74	6.47	0.82
COD (mg/L)	蓄水前	—	3.00	—	—	4.38	3.62	2.70	3.95	3.42	3.26	—	3.68
	蓄水后 ¹	2.31	4.00	4.36	4.03	2.27	1.88	—	3.60	3.46	2.85	2.68	4.41
	蓄水后 ²	3.97	3.46	3.35	3.74	2.98	2.65	3.95	—	2.48	2.88	3.34	3.55
SD (cm)	蓄水前	3.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	蓄水后 ¹	79.9	54.3	59.6	41.9	81.6	152	190	204	234	115	168	179
	蓄水后 ²	60.0	44.4	45.3	44.5	98.1	181	267	354	374	347	287	188

* 蓄水前为 2002 年 6 月—2003 年 5 月, 蓄水后¹ 为 2003 年 6 月—2004 年 5 月, 蓄水后² 为 2004 年 6 月—2005 年 5 月。

2.1 水深、水温

蓄水前水流过大, 无法测量水深, 各采样点平均水位 64m, 蓄水后水位 135m, 2003 年 11 月后上升至

139m。蓄水后对各采样点测量水深, 则岸边采样点水深一般为 20—50m, 江中水深一般为 80—100m。

水温随季节变化, 各采样点之间差异不大, 周年

变化范围为 10.5—27.6℃, 平均温度 18.4℃。蓄水后多次按逐米的原则测量水温, 从近岸采样点的水面到水底以及江中的水面到水深 50m 处, 水温下降幅度不大, 下降速度相近, 无明显跳跃点。表明水库中水流的影响并未下降到足以形成温跃层的水平。

2.2 透明度(SD)、浊度(Turb)

2003 年 6 月蓄水前, 采样点处江面流速较大, 除了 2002 年 6 月外其他月份均无法准确测量。从蓄水后开始常规监测透明度, 测量数值空间差异不大(各采样点之间比较), 主要随时间变化(与汛期有关), 变化范围 13—440cm。2003 年 6 月蓄水后至 9 月, 透明度呈下降趋势, 10 月开始上升, 至 2 月份达到最高值。

2003 年蓄水后 6 月、11 月份各采样点透明度平均值与 2002 年 6 月平均值 4cm 以及 1998 年 11 月长江中上游江段透明度平均值 19.57cm^[4] 比较则可以看出蓄水后水库透明度有明显升高(表 1)。可以看出, 2004 年 10 月份后枯水期(11 月—次年 4 月)库首透明度较之 2003 年同期水平进一步升高(t 检验—平均值成对二样本比较, 下同, $P=0.003507$)。

本研究调查中浊度空间差异不大, 主要随时间变化, 呈夏秋两季高, 冬春两季低的特点, 蓄水前后均是 9 月份达到最大值, 然后 10 月开始下降, 到 2 月份达到最低点。蓄水前后同期比较则蓄水后有明显降低($P=0.015$), 表明蓄水后由于库区沉积作用加强的影响, 水体中悬浮物较蓄水前明显减少(图 2)。

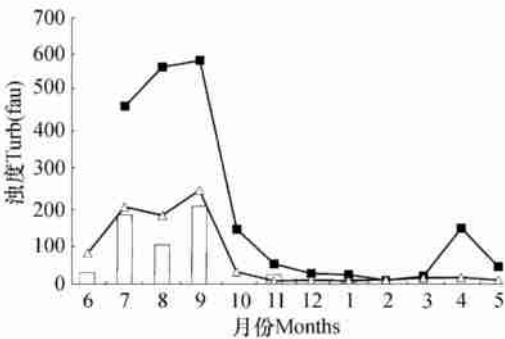


图 2 蓄水前后浊度月平均值比较

Fig. 2 Comparison of monthly turbidity averages before and after impounding

—■—蓄水前 —△—蓄水后¹ □—蓄水后²

以蓄水后的浊度数据对透明度作回归分析, 则浊度与透明度的倒数表现出显著的相关性($F=228.195$)。因透明度最大值与浊度最小值均出现在 9 月, 说明水质变浑浊是受夏秋降雨季大量泥沙等悬浮物随地表径流汇入三峡库区水体以及库区水生生物旺盛繁殖的影响。

2.3 电导率(Cond)、总溶解固体(TDS)

电导率空间差异不大, 随时间变化。蓄水后电导率较蓄水前同期有明显降低($P=0.004623$)。其中 2004 年 4—8 月电导率较 2003 年同期水平有显著降低($P<0.01$)(图 3)。

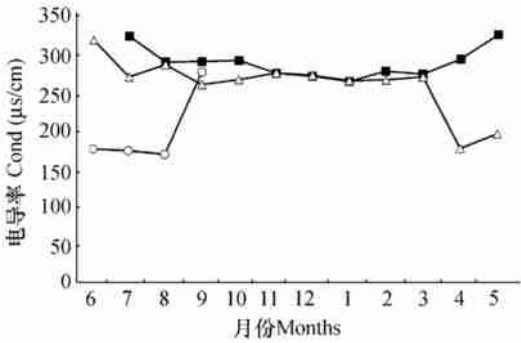


图 3 蓄水前后电导率月平均值比较

Fig. 3 Comparison of monthly conductivity averages before and after impounding

—■—蓄水前 —△—蓄水后¹ —○—蓄水后²

图 3—图 8 图例同

TDS 空间差异不大, 随时间变化。夏季低, 秋季高。蓄水前后同期比较, 则蓄水后明显降低($P=0.005609$), 其中 2004 年 4—8 月 TDS 与电导率相似有显著降低($P<0.01$)(图 4)。

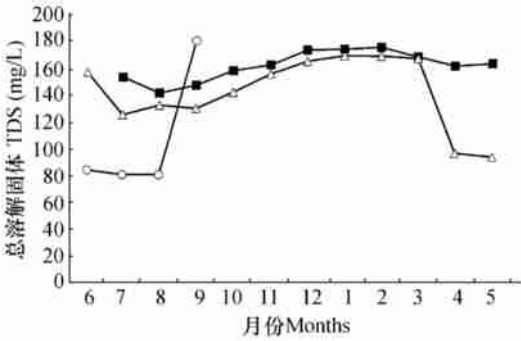


图 4 蓄水前后 TDS 月平均值比较

Fig. 4 Comparison of monthly TDS averages before and after impounding

从 TDS 对比温度、透明度、浊度的分析结果来看, 夏季高温与夏季高水平的水土流失, 并未有助于水体中溶解盐含量的增高, 反而是有所下降。其原因是夏季生命活动旺盛, 水生生物对水体中营养盐摄取造成的。而 2004 年 4—8 月电导率与 TDS 显著降低, 应是由于春夏季藻类暴发生长对水体中营养盐摄取引起的, 相关研究正在进行中。

2.4 pH、碱度(Alk)

调查水域 pH 值从空间变化上来看, SX01L 的 pH 值总是高于其他采样点, 应与长江北岸边施工工程石灰性施工材料污染有关。除去 SX01L, 其他采

样点 pH 差异不大, 其月平均值蓄水前后变化不明显。整个观测期间调查水域 pH 平均值变化范围为 7.11—8.12, 呈中性—弱碱性, 蓄水前后无明显差异 ($P=0.416472$) (表 1)。

调查水域碱度从空间变化上来看, 近岸采样点偶尔会出现较平均水平高的现象, 应是受到江岸工程与人类活动的影响。但其他采样点则差异不大, 主要随时间变化, 呈现春季高、夏季低的特点。同期比较蓄水后碱度明显大于蓄水前 ($P=0.00982$) (图 5)。

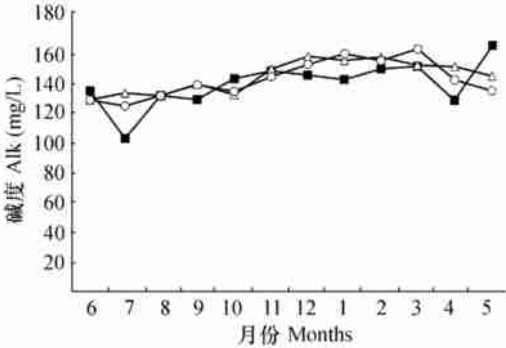


图 5 蓄水前后碱度月平均值比较

Fig.5 Comparison of monthly alkalinity averages before and after impounding

经分析, 调查水域中碱度并未表明出与 pH 的相关性 ($F=0.661676$)。由于 pH 总的来说小于 8.3, 可认为调查水域碱度主要由 HCO_3^- 提供^[3]。且夏季碱度水平明显小于冬季, 表明夏季生物活动呼吸作用相对光合作用较冬季弱, 因而水体中 CO_2 浓度冬季较之夏季为高。

2.5 总硬度(HD)

在空间上无较大变化, 随时间变化, 总体上呈现夏季低, 冬季高的特点, 蓄水前后同期比较无明显差异 ($P=0.823828$)。调查期间硬度变化范围 6.12—12.18 德度, 平均值 8.78 德度, 属于软水。

2.6 化学需氧量(COD)

整个调查期间 COD 空间变化不明显, 随时间变化, 蓄水前后同期比较无明显差异 ($P=0.782151$)。变化范围为 1.57—4.96mg/L, 平均值为 3.22mg/L, 稍高于长江水系 COD 的平均水平 (1.5—2.0mg/L)^[9], 表明该水域受还原性物质污染程度较高。

2.7 氯离子(Cl^-)和 二氧化硅(SiO_2)

Cl^- 空间变化不明显, 随时间波动, 蓄水前后同期比较无显著差异 ($P=0.765591$)。总体上来说 Cl^- 含量高, 变化范围为 10.0—25.0mg/L, 平均值为 14.5mg/L。

SiO_2 空间变化不明显, 随时间波动, 蓄水前后同

期比较无差异 ($P=0.44912$)。调查期间 SiO_2 变化范围为 1.28—10.47mg/L, 平均值为 4.71mg/L, 总的说来含量较高, 有利于硅藻生长。

2.8 总氮(TN)、氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、硝酸盐氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、亚硝酸盐氮($\text{NO}_2\text{-N}$)

水中的氮主要以溶解的氮气、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 以及有机氮等形式存在, 其中溶解的无机氮是可被植物直接吸收的最重要的形式, 而对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的分析, 可以一定程度上了解水质污染和自净的变化。

蓄水前后同期比较, $\text{NH}_4\text{-N}$ 蓄水前后无明显差异; 除 5、6 月各类氮指标比较明显与其他月份不同外, $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN 蓄水后都有明显下降, 而 $\text{NO}_2\text{-N}$ 在蓄水后第一年明显下降, 但值得注意的是 2004 年 12 月份—2005 年 4 月份, $\text{NO}_2\text{-N}$ 都显著高于蓄水后第一周年同期数值。对 6 月份的比较差异可以认为, 受到 6 月份初期蓄水的影响, 三峡水库库首的水生态环境尚未形成稳定状态, 对氮影响较大。

TN 空间变化不大, 随时间变化幅度较大。总的说来, 除 6 月外蓄水前后同期比较则蓄水后有明显降低 ($P<0.01$), 蓄水前 TN 平均值为 2.34mg/L, 蓄水后为 1.62mg/L (表 1)。

$\text{NO}_3\text{-N}$ 空间变化不大, 随时间变化, 与 TN 类似。蓄水前后同期比较则蓄水后有明显降低 ($P<0.01$), 蓄水前 $\text{NO}_3\text{-N}$ 平均值为 1.48mg/L, 蓄水后为 1.22mg/L (图 6, a)。

$\text{NH}_4\text{-N}$ 从空间变化上来看, 近岸采样点经常出现较当月平均值差异大的数值 ($P<0.01$), 说明 $\text{NH}_4\text{-N}$ 对环境变化敏感, 受此地区人为活动干扰大。蓄水前后同期比较则无明显差异。调查期间 $\text{NH}_4\text{-N}$ 变化范围为 0.010—0.730mg/L, 平均为 0.103mg/L, 2004 年 2 月出现一次极高峰值 (图 6, b)。作为最宜为生物摄取的形式^[7], 可以认为由于 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度显著提高导致 2004 年 3 月份藻类大量繁殖, 从而出现 Chl. a 当月的极高值。

$\text{NO}_2\text{-N}$ 空间变化不大, 随时间变化。蓄水前后同期比较则蓄水后有明显降低 ($P=0.00073$), 蓄水前 $\text{NO}_2\text{-N}$ 平均值为 25.03 $\mu\text{g/L}$, 蓄水后为 13.98 $\mu\text{g/L}$ (图 6, c)。蓄水后 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的降低说明作为氨氮硝化的中间产物, $\text{NO}_2\text{-N}$ 在蓄水后更难以保持稳定状态, 从而说明蓄水后水体的自净能力得到进一步加强。值得注意的是 2004 年 12 月—2005 年 4 月, 调查水域 $\text{NO}_2\text{-N}$ 处于危险的水平, 表明此段时间该水域的

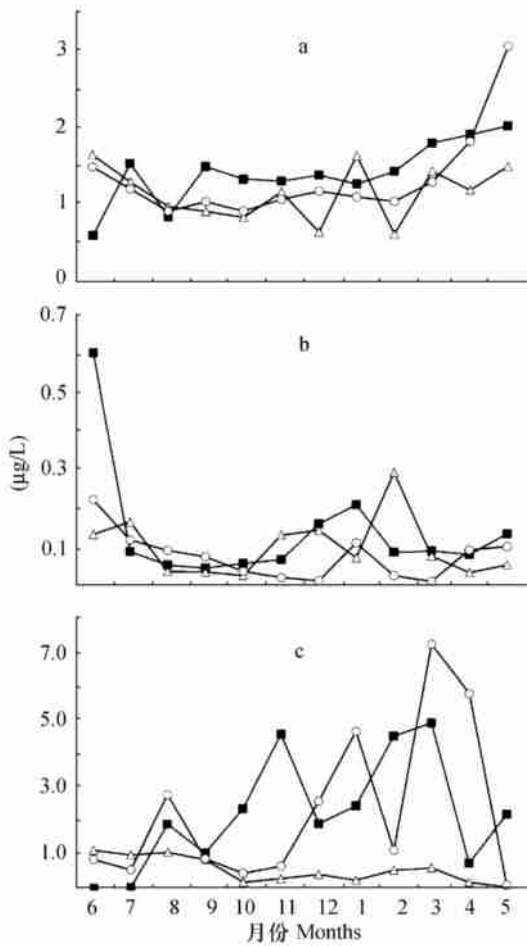


图 6 蓄水前后 N 营养盐月平均值比较

Fig. 6 Comparison of monthly Nitrogen Nutrients averages before and after impounding
a $\text{NO}_3\text{-N}$; b $\text{NH}_4\text{-N}$; c $\text{NO}_2\text{-N}$

污染超过其自净负荷。

从无机氮中各类氮所占比例来看,除了蓄水前 2002 年 6 月份 $\text{NO}_3\text{-N}$ 占总无机氮总量的 45.953%, $\text{NH}_4\text{-N}$ 占 54.045%, $\text{NO}_2\text{-N}$ 占 0.002% 外,其他月份均是 $\text{NO}_3\text{-N}$ 占明显优势。其平均比例为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 占 91.25%, $\text{NH}_4\text{-N}$ 占 7.70%, $\text{NO}_2\text{-N}$ 占 1.05%。表明调查水体处于一种较强的氧化环境中。而低浓度的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 则表明调查水域有相当强的自净能力。

2.9 总磷(TP)、正磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)

从空间变化上来看,TP 在近岸采样点易出现差异明显的数值,说明 TP 容易受到河岸污染的影响。从时间变化上来看,夏季 TP 明显高于其他季节,而最高值总是出现在 9 月,然后逐急剧降低,至 6 月保持较低水平。这与透明度、浊度的结果分析吻合。蓄水前后同期比较则蓄水后 TP 明显降低,且蓄水后第二周年比第一周年进一步降低($P<0.01$)。

从空间变化上来看, $\text{PO}_4\text{-P}$ 在近岸点易出现差异明显的数值。从时间变化上来看,与 TP 相反, $\text{PO}_4\text{-P}$ 冬季出现最高值,4 月份开始降低,最低值总是出现在夏季。蓄水前后同期比较则蓄水后 $\text{PO}_4\text{-P}$ 明显降低($P=0.002181$)(图 7)。

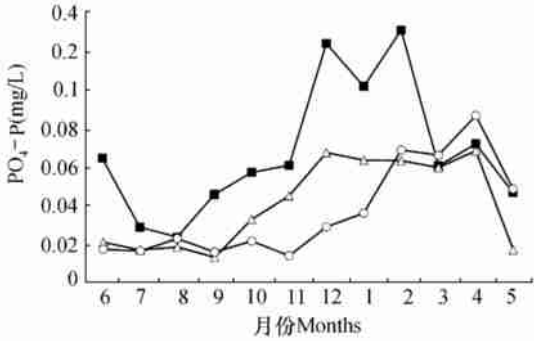


图 7 蓄水前后 $\text{PO}_4\text{-P}$ 月平均值比较

Fig. 7 Comparison of monthly $\text{PO}_4\text{-P}$ averages before and after impounding

TP/ $\text{PO}_4\text{-P}$ 的比较:夏季,TP 远远大于 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度,为 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度 10 倍以上,其他季节,TP 平均为 $\text{PO}_4\text{-P}$ 2.7 倍(图 8)。

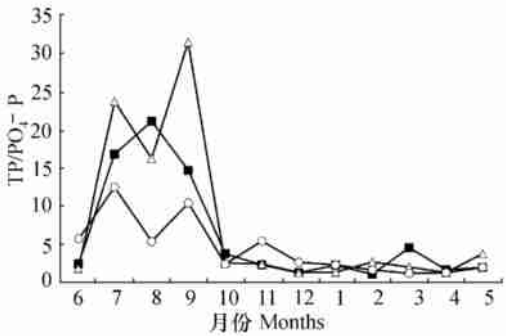


图 8 TP/ $\text{PO}_4\text{-P}$ 月平均值变化

Fig. 8 Monthly averages changes of TP/ $\text{PO}_4\text{-P}$ in the sampling period

以上结果表明,夏季由于高降雨量的影响,大量有机磷及难溶磷酸盐随地表径流汇入三峡水库,使得水体中 TP 急剧升高。而有机磷与难溶磷酸盐转化正磷酸盐的速度远小于浮游生物对正磷酸的吸收,从而造成 $\text{PO}_4\text{-P}$ 明显降低。

国内外研究表明,氮和磷是引起富营养化的重要元素^[8-10],而磷的限制最为普遍^[11-12]。而本研究中即使是蓄水后,TP 仍高达 0.132mg/L,平均 12.3 的 TN/TP 也远小于国内其他湖库^[9],说明在本调查水域中,过量的磷污染不是本水域富营养化的限制瓶颈所在。

比之蓄水前,TP、TN 都有明显下降。分析其原因则是由于蓄水后库区流速减小一方面使得河流对

污染物的扩散能力大大减弱^[13],一方面使得水体中难溶污染物沉降作用加强造成的。在降雨季,N、P的各项指标中只有TP有显著升高,表明调查水域受上游地区磷污染胁迫严重且说明该地域主要是磷污染。

2.10 叶绿素 *a* (Chl. *a*)

蓄水前泥沙较多,过滤难度较大,因而对水体中Chl. *a* 的测定是从蓄水后开始的。Chl. *a* 空间分布差异极大,一般来说,近岸采样点Chl. *a* 监测值比江中采样点更高。长江2左在2003年8月份、长江5右在2004年2月份、长江1左在2004年3、4月份,出现较月平均值数量级上的差异。表明近岸水滞留点藻类容易暴发生长。除了这几个采样点外,整个调查期间Chl. *a* 随季节变动,范围为0.019—12.81 μ g/L,平均值为2.31 μ g/L,2003年8月、2004年3月、2004年6月、2005年5月分别出现季高峰值,表明藻类生长高峰期的出现时间(表1)。

2.11 营养状态评价

蓄水后无论是TP总平均浓度0.132mg/L还是TN总平均浓度1.62mg/L,都远超过国际公认的富

营养化阈值(TP=0.02mg/L,TN=0.2mg/L)^[9,10],按日本国立公害研究所的富营养化标准也已达到富营养化水平(TP>0.11mg/L,TN>1.2mg/L)^[14]。从叶绿素浓度看,小于3mg/m³的水体为贫营养,3—7mg/m³为中营养,7—40mg/m³为富营养,大于40mg/m³为重富营养^[13],而本研究中叶绿素平均值2.68处于贫营养化水平。因而本研究采用Aizaki修正的Carlson营养状态指数TSIM来评价三峡水库库首富营养化程度。

根据表1与TSIM的计算公式^[8,16-18]分别计算TSIM(Chl. *a*)、TSIM(TP)、TSIM(SD)、TSIM(TN)、TSIM(COD)。相关的加权营养状态指数TSIM(Σ)计算公式为:

$$TSIM(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TSIM(j)$$

据研究表明对于Aixaki等修正Carlson指数中的5项指标,相对重要性有:

$$Chl. \ a > SD > TP > TN > COD$$

则相应权重为W=(0.455,0.251,0.154,0.086,0.054)^[22],据此权重计算TSIM(Σ),最后结果见表2。

表2 TSIM的计算结果
Tab.2 Results of TSIM

TSIM	月份	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5
Chl. <i>a</i>	蓄水后 ¹	—	27.4	38.3	32.9	17.7	16.6	20.9	24.5	44.1	46.4	39.6	42.7
	蓄水后 ²	44.7	32.3	28.3	20.7	22.8	25.8	22.4	20.6	20.9	41.6	45.0	22.4
SD	蓄水后 ¹	68.6	75.1	73.5	79.4	68.3	57.9	54.2	53.0	50.7	62.5	56.2	55.1
	蓄水后 ²	73.4	78.4	78.1	78.4	65.2	55.0	48.5	43.8	42.8	44.1	47.3	54.3
TP	蓄水后 ¹	57.4	86.0	82.3	86.3	66.1	70.1	67.6	66.1	75.6	71.2	67.6	62.5
	蓄水后 ²	68.9	77.6	71.2	74.8	60.2	64.5	64.5	66.1	70.1	66.1	70.1	67.6
TN	蓄水后 ¹	82.9	83.5	67.3	75.4	66.3	72.8	64.6	76.3	73.5	75.0	73.9	75.6
	蓄水后 ²	75.6	78.0	68.3	68.5	72.4	70.9	71.5	73.8	71.6	71.2	74.9	84.9
COD	蓄水后 ¹	53.4	61.5	62.8	61.7	53.1	50.3	—	60.0	59.4	56.5	55.6	63.0
	蓄水后 ²	61.4	59.4	58.9	60.5	57.2	55.4	61.4	—	54.5	56.7	58.9	59.8
TSIM(Σ)	蓄水后 ¹	—	55.0	57.7	58.0	43.9	41.9	—	44.4	54.0	57.3	51.9	52.8
	蓄水后 ²	59.2	56.3	52.5	49.8	45.3	44.6	41.8	—	40.1	49.4	52.7	44.8

从TSIM的计算结果来看,TSIM(TP)、TSIM(TN)以及TSIM(SD)、TSIM(COD)绝大部分月份都大于富营养化标准(评价标准为:TSIM<37为贫营养,37<TSIM<53为中营养,TSIM>53为富营养)^[13-15]。而TSIM(Chl. *a*)范围为16.6—46.4,波动很大,但并未达到富营养化标准。这表明三峡水库库区与湖泊仍有很大不同,水流的存在限制了初级生产力的发展。而加权营养状态指数TSIM(Σ)表明调查水域总体呈现中营养化水平(TSIM(Σ)平均值=49.6),部分

月份达到富营养化水平。

2.12 三峡水库蓄水后的理化因子与国内部分大型水库的比较

将本研究中三峡蓄水后的主要理化因子的周年数据与漫湾水库(建站后1993—1997年)^[9]、丹江口水库(1987—1996)^[19]、太平湖水库(1985—1986)^[20]进行比较,可以看出三峡水库水体TP、NO₃-N远高于其他水库,TP的比较进一步表明了三峡水库主要是磷污染,NO₃-N的比较说明此地区受农业面源污染严重(表3)。

表 3 蓄水后三峡水库的主要理化因子与国内其他大型水库的比较
Tab 3 Comparison of the major physicochemical factors between Three Gorges Reservoir and other reservoirs

		水温 (℃)	pH	SD (cm)	Cond (μs/cm)	COD	NH ₃ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N (mg/L)	TN	PO ₄ -P	TP
三峡水 库库首	最小值	11. 2	5. 99	5	179	1. 57	0. 010	0	0. 31	0. 13	0. 002	0. 023
	最大值	27. 6	8. 80	360	314	4. 96	0. 427	0. 105	3. 14	4. 40	0. 210	0. 954
	平均值	18. 9	7. 93	160	270	3. 20	0. 103	0. 014	1. 22	1. 62	0. 038	0. 132
漫湾水 库库区	最小值	16	6. 70	5	60. 2	2. 20	0. 080	0	0. 010	—	—	0. 010
	最大值	23	8. 60	100	170	11. 4	0. 580	0. 016	0. 330	—	—	0. 370
	平均值	18. 3	7. 54	42. 3	91. 2	4. 68	0. 290	0. 005	0. 115	—	—	0. 068
丹江口 水库坝前	最小值	6. 8	7. 2	—	—	1. 1	0. 005	0. 002	0. 014	—	—	0. 013
	最大值	29. 5	8. 4	—	—	5. 6	0. 105	0. 027	4. 058	—	—	0. 243
	平均值	14. 2	8. 1	—	—	2. 5	0. 021	0. 006	0. 616	—	—	0. 025
太平湖 水库库区	最小值	6. 7	6. 56	90	36. 1	—	0. 50	0	0. 009	0. 71	0	0. 004
	最大值	30. 0	8. 60	640	114	—	1. 112	0. 021	0. 389	3. 36	0. 014	0. 026
	平均值	16	7. 40	321	73. 3	—	0. 230	0. 004	0. 121	1. 49	0. 003	0. 012

参考文献:

[1] Zhang J S, Zhao N S, Mao X B. Analysis on the impoundment process of Three Gorges Reservoir up to EL. 135 m[J]. *Water Power*, 2003, **12**: 19—22[张继顺, 赵南山, 毛晓波. 三峡水库 135m 蓄水过程分析. 水利发电, 2003, **12**: 19—21]

[2] Hu X E, Feng Z P. On the water impoundment at elevation of 139 m of the Three Gorges Reservoir [J]. *Water Power*, 2003, **12**: 22—27 [胡兴娥, 冯正鹏. 浅谈三峡水库 139m 水位蓄水. 水利发电, 2003, **12**: 22—27]

[3] Huang X F. Survey, observation and analysis of lake ecology [M]. Beijing: Standards Press of China, 2000[黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社出版, 2000]

[4] Liu R Q. Preliminary report on physicochemical properties of main channel and tributaries in upper and middle reaches of the Changjiang River, before and after damming of the Three Gorges Project [J]. *Acta Hydrobiologia Sinica*, 2000, **24**(5): 446—450[刘瑞秋. 三峡大坝截流前后长江中上游江段水化学特性的初步调查. 水生生物学报, 2000, **24**(5): 446—450]

[5] Liu J K. Ecological research on lake Donghu I [M]. Beijing: Science Press, 1990[刘建康. 东湖生态学研究(一). 北京: 科学出版社, 1990]

[6] The College of life Sciences and Chemistry of Yunnan University, Manwan Hydropower Station of Yunnan Province. The ecological Environment and biological resources of Manwan Hydropower Station Reservoir along Lancang River in Yunnan [M]. Kunming: Science & Technology Press, 2000, 1—17, 24[云南大学生命科学与化学学院, 云南省漫湾发电厂. 云南澜沧江漫湾水电站库区生态环境与生物资源. 昆明: 云南科技出版社, 2000, 1—17, 24]

[7] Liu J K. Advanced Hydrobiology [M]. Beijing: Science Press, 1999 [刘建康. 高级水生生物学. 北京: 科学出版社, 1999]

[8] Coda T. Comprehensive studies on the eutrophication of freshwater areas. XI: summary of researches [R]. The National Institute for Environmental Studies, 1981, (27): 59—71

[9] Jin X C. Chinese lakes and environments [M]. Beijing: Ocean Press, 1995[金相灿. 中国湖泊与环境. 北京: 海洋出版社, 1995]

[10] Jin X C, Tu Q Y. Investigation criterion of lake eutrophication [M]. Beijing: Chinese Environment Science Press, 1999[金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1999]

[11] Allen H E, Kramer J R. Nutrients in natural waters [M]. London: John Wiley and Sons, 1972

[12] Colterman H L. Physiological limnology [M]. Amsterdam-Oxford-New York, 1975

[13] Zhong C H, Xing Z G, Deng C G. Preliminary study on three gorge dam impacting on the water quality of Yangtze River and Jialing River in Chongqing [J]. *Chongqing Environmental Science*, 1994, **16**(4): 35—39[钟成华, 幸治国, 邓春光. 三峡水库对长江、嘉陵江重庆城区段水质影响初探. 重庆环境科学, 1994, **16**(4): 35—39]

[14] Liu Y M, Jia S F, Jiang L W. A study on the impact of the Three Gorges Reservoir on potential eutrophication in backwaters of tributaries of Chongqing section of Yangtze River [J]. *Geographical Research*, 2003, **22**(1): 67—72[刘永明, 贾绍凤, 蒋良维. 三峡水库重庆段一级支流回水河段富营养化潜势研究. 地理研究, 2003, **22**(1): 67—72]

[15] Claude D B, Canfield D E, Bachmann R W. Seasonal Patterns of Chlorophyll, Nutrient Concentrations and Secchi Disk Transparency in Florida Lakes [J]. *J. Lake and Reserv. Mgmt*, 1998, **14**: 60—76

[16] Carlson R E. A trophic state index for lakes [J]. *Limnol Oceanogr*, 1977, **22**(2): 361—369

[17] Aizaki M. Application of modified Carlson's trophic state index to Japanese lakes and its relationships to other parameters related to trophic state [J]. *Res Rep Nati Inst Environ Stud*, 1981, (23): 13—31

[18] Cai Q H. On the comprehensive evaluation methods for lake eutrophication[J] . *Journal of lake sciences*, 1997, 9(1): 89—94[蔡庆华. 湖泊富营养化综合评价方法. 湖泊科学, 1997, 9(1): 89—94]

[19] Yin K H, Yuan H R, Ruan Y. Variation and correlation of environmental parameters in the water of Danjiangkou Reservoir [J] . *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2001, 10 (1): 75—81

[尹魁浩, 袁弘任, 阮娅. 丹江口水库水质要素变化特征及其相互关系. 长江流域资源与环境, 2001, 10(1): 75—81]

[20] Zhang S Y, Liu Q X, Hua L. Physicochemical characteristics of Taiping Reservoir [J] . *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, 24 (5): 530—536 张水元, 刘衢霞, 华俐. 太平湖水库水质的理化特征. 水生生物学报, 2000, 24(5): 530—536]

COMPARATIVE RESEARCH ON PHYSICOCHEMICAL FACTORS IN THE FRONT OF THREE GORGES RESERVOIR BEFORE AND AFTER THE INITIATE IMPOUNDING

CAO Ming^{1, 2}, CAI Qing-Hua¹, LIU Rui-Qiu¹, QU Xiao-Dong^{1, 2} and YE Lin^{1, 2}

(1. Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences; State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Wuhan 430072;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: Based on the routine monitoring in the front region of Three Gorges reservoir from 2002 to 2004, the physicochemical indices were analyzed, and the significant tests for the investigated data before and after the initial impounding were carried out. The results indicated that the major physicochemical indices were not significant differences spatially, but mainly vary with time. Some indices were significantly different before and after impounding. Among them, the annual averages of TN、TP reduced from 2.38mg/L、0.274mg/L before impounding to 1.62mg/L、0.132mg/L after impounding respectively. Among inorganic nitrogens, NO₃-N was as high as 91.25%, while NO₂-N was only 1.05%, indicating that the Three Gorges Reservoir has great self-purification capacity.

The results also showed that monthly averages of transparency and turbidity changed greatly, the two indices were negatively related, and transparency decreased and turbidity increased significantly during July to September, which implied that there were heavy soil erosion during rainfall seasons in this area. Meanwhile, TP also increased significantly along with turbidity increase, indicating that phosphorus pollution is heavy in the soil erosion area. However, since PO₄-P deceased at the same time, it also indicated that this phosphorus pollution could not be effectively changed to PO₄-P.

Based on the evaluation of the trophic state indices (TSI_M), the front region of the Three-Gorges reservoir was still middle eutrophical due to huge pollution basis (TSI_M>37), although the water pollution reduced much after the impounding.

At last, we compared the major physicochemical indices with those of other large local reservoirs, the results showed that concentrations of TP、NO₃-N in the studying area were much greater.

Key words: Three Gorges Reservoir; Initial impounding; Physicochemical factors; Eutrophication