

三峡水库及香溪河库湾理化特征的比较研究

曹 明^{1,2} 蔡庆华¹ 刘瑞秋¹ 渠晓东^{1,2} 叶 麟^{1,2}

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

2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 根据2003年6月三峡水库初期蓄水后对香溪河库湾的常规监测,对该水域的理化特征及其动态进行了分析,并与三峡水库库首的数据进行了比较研究。结果显示库湾TN、NO₃-N浓度要显著低于库首,前者两周年平均值为1.29mg/L, 0.88mg/L, 后者两周年平均值为1.62mg/L, 1.22mg/L。而PO₄-P则是库湾显著高于库首,并且在7—9月库首的TP/PO₄-P有显著提高。结果同时表明库首的水土流失较严重,而库湾则有较好的水土保持。最后对TSI_M的计算结果表明,由于TP、TN都处于高水平,库首呈现中营养化(TSI_M>37),而库湾则呈现严重富营养化(TSI_M>53)。

关键词: 三峡水库; 香溪河库湾; 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)01-0020-06

为了研究三峡水库初期蓄水后香溪河库湾形成过程中,库湾水生态系统的变化以及库湾水生态系统与库区水生态系统的相互影响,本研究组在三峡水库初期蓄水后在蓄水至135m的水淹区范围内设置了11个采样点,并对此11个采样点进行了频度为每月1次的常规监测调查。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、分布、密度和生物量;(4)底栖动物:种类组成、分布、功能摄食类群、现存量。

本文主要对三峡水库蓄水后两周年内香溪河库湾水域中的理化因子进行探讨,并与三峡库首的理化数据进行了比较研究。

1 材料与方法

1.1 采样点的设置

香溪河入江口处上溯至三峡水库蓄水至135m时香溪河域新淹区最高点设置11个采样点(图1)。为与本研究组对香溪河按1次/2季度大采样所布置采样点保持名称一致性,分别

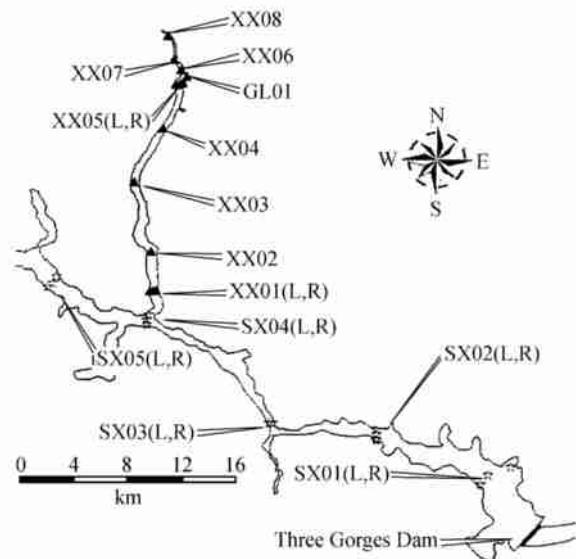


图1 采样点设置图

Fig. 1 Sampling sites

命名为XX01(L, R)、XX02、XX03、XX04、XX05(L, R)、XX06、XX07、XX08、GL01。其中XX01、XX05处除在河中心外,还分别在左右近岸处布点,命名为

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); 国家自然科学基金重点项目(30330140)

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: qhai@ihb.ac.cn

XX01L、XX01R、XX05L、XX05R。而三峡水库库首的数据则来自于三峡大坝前至姊归大约每8km设置一组采样点共5组14个采样点的平均值。这14个采样点分别命名为SX01(L, R), SX02(L, R), SX03L(R), SX04(L, R), SX05(L, R)。

1.2 监测指标 主要监测项目为: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(NO_3^- -N)、氨氮(NH_4^+ -N)、亚硝酸盐氮(NO_2^- -N)、总磷(TP)、正磷酸盐(PO_4^{2-} -P)、碱度(Alk)、总硬度(HD, 以下简称硬度)、氯离子(Cl^-)、二氧化硅(SiO_2 -Si)、化学耗氧量(COD)、叶绿素a(Chl. a)。

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, 对水深不足10m处的采样点GL01、XX08则按离表层0.5m、2.5m、5m取水样均匀

混合。

水温用温度计测定; 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); NO_3^- -N用酚二磺酸分光光度法(GB/T 7480-87); NH_4^+ -N用钠氏试剂分光光度法; NO_2^- -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); PO_4^{2-} -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); SiO_2 -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^[1]。

2 结果与讨论

香溪河库湾主要理化指标分析结果月平均值见表1。

表1 香溪河库湾理化主要指标月平均值动态表

Tab. 1 Monthly averages of the major physicochemical indices in Xiangxi Bay, Three Gorges

时间	NH_4^+ -N (mg/L)	NO_2^- -N ($\mu\text{g/L}$)	NO_3^- -N (mg/L)	TN (mg/L)	PO_4^{2-} -P (mg/L)	TP (mg/L)	pH	COD (mg/L)	SD	Chl. a ($\mu\text{g/L}$)
Jun., 3	0.08	16.45	0.78	1.94	0.04	0.02	8.39	2.90	183	—
Jul., 3	0.26	7.63	0.94	2.67	0.03	0.14	8.65	3.40	93	7.61
Aug., 3	0.14	5.82	0.64	0.74	0.04	0.08	8.43	3.45	108	13.20
Sep., 3	0.08	5.66	0.74	1.59	0.05	0.11	8.65	3.09	75	17.51
Oct., 3	0.05	5.53	0.83	0.92	0.04	0.09	8.33	1.79	90	10.23
Nov., 3	0.25	6.02	1.07	1.29	0.06	0.16	8.16	1.90	162	2.99
Dec., 3	0.17	4.51	0.53	0.64	0.12	0.15	8.10	—	177	2.78
Jan., 4	0.06	1.11	1.27	1.50	0.17	0.22	8.19	3.94	175	8.22
Feb., 4	0.17	2.03	0.37	0.92	0.18	0.32	8.44	3.07	174	11.89
Mar., 4	0.08	1.42	0.51	0.57	0.18	0.38	8.92	2.45	66	20.40
Apr., 4	0.03	1.85	0.74	1.29	0.15	0.19	8.42	2.33	116	13.36
May., 4	0.04	0.35	1.22	1.44	0.05	0.09	8.47	4.48	113	10.52
Jun., 4	0.29	31.87	1.31	1.74	0.04	0.18	7.64	3.90	70	15.67
Jul., 4	0.15	9.07	1.17	2.05	0.05	0.11	8.45	3.01	70	7.47
Aug., 4	0.08	15.38	0.80	0.99	0.04	0.07	8.35	3.14	67	5.48
Sep., 4	0.11	14.16	0.59	0.78	0.06	0.12	7.22	3.34	77	6.79
Oct., 4	0.02	7.85	0.77	1.06	0.09	0.08	—	2.10	168	5.76
Nov., 4	0.02	12.73	0.83	0.89	0.07	0.16	7.65	2.93	217	4.14
Dec., 4	0.05	5.13	0.78	1.08	0.07	0.17	8.28	4.13	231	6.43
Jan., 5	0.44	37.59	0.88	1.27	0.11	0.21	8.42	—	323	7.71
Feb., 5	0.37	55.95	0.86	1.57	0.02	0.07	—	2.91	304	8.87
Mar., 5	0.03	32.45	0.68	0.76	0.16	0.18	—	2.64	134	16.28
Apr., 5	0.14	25.71	0.72	0.81	0.19	0.25	—	3.12	103	66.52
May., 5	0.11	6.77	2.10	2.51	0.07	0.12	—	1.47	192	10.97

2.1 氮(TN、NH₄-N、NO₃-N、NO₂-N)

库湾 TN、NO₃-N、NH₄-N、NO₂-N 两周年平均值分别为 1.29mg/L, 0.88mg/L, 0.13mg/L, 13.0 μ g/L, NO₂-N、NH₄-N、NO₃-N 在总无机氮中所占比例为 86.0%, 12.7%, 1.3%。与国内大部分湖泊、河流相似, 无机氮中 NO₃-N 占优势。库湾内 TN 浓度相当高, 变化范围 0.308—3.567mg/L, 平均值 1.29mg/L。

NH₄-N 在空间与时间上的差异都相当大(等方差 t 检验: $P < 0.01$), 变化范围为 0.005—0.466mg/L, 平均值为 0.13mg/L。时空上的差异表明 NH₄-N 对环境变化敏感, 且此水域受人为活动影响明显。

NO₂-N 变化范围为 0.085—28.36 μ g/L, 平均值 13.0 μ g/L。从表 1 可以看出, 库湾中 NO₂-N 月平均值第一周年变化明显, 随时间呈稳定下降趋势, 但是第二周年则急剧升高(表 1)。这表明蓄水后库湾水体第一周年自净能力逐月得到加强, 但是从 2004 年 6 月开始对污染的耐受力开始受到持续污染的威胁。

NO₃-N 变化范围为 0.207—1.687mg/L, 平均值 0.88mg/L。

库湾水体中无机氮以 NO₃-N 占优势, 但与库首 NO₂-N、NH₄-N、NO₃-N 在总无机氮中所占比例 91.25%、7.70%、1.05% 相比较, 则库湾内 NH₄-N 所占比例更高, NO₃-N 相对较低。

将库湾与库首 N 指标作 t 检验(成对双样本均值分析), 结果表明, 库湾 NO₃-N, TN 浓度要显著低于库首($P < 0.01$), NH₄-N, NO₂-N 无明显差异($P > 0.01$)(图 2, 图 3)。这说明整个水域处于高氮污染的氧化水体中, NH₄-N, NO₂-N 转化为 NO₃-N 效率较高。而库首 NO₃-N, TN 显著大于库湾表明库区主干流上游地区对库首的氮污染要高于香溪河库湾。而 NO₃-N 在库区较高比例也表明库区主要是以农业氮

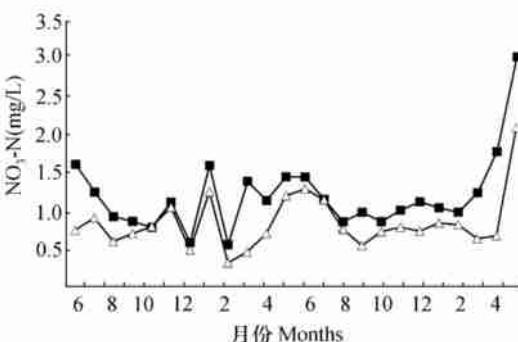


图 2 库湾与库首 NO₃-N 两周年月动态比较

Fig. 2 Comparison of monthly NO₃-N averages between Xiangxi Bay and Reservoir
—■—库首 —△—库湾(图 3 至图 7 的图例同)

肥污染为主, 而库湾较之库区为高的 NH₄-N 比例则表明库湾受人为活动、生活废水污染影响较库区大。

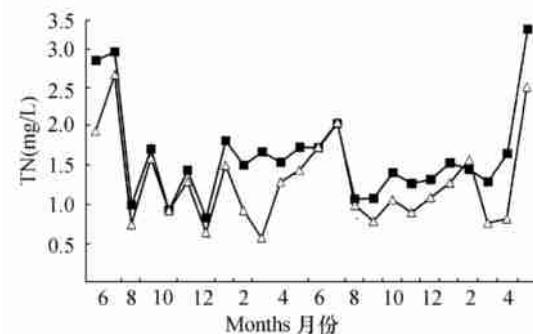


图 3 库湾与库区 TN 两周年月动态比较

Fig. 3 Comparison of monthly TN averages between Xiangxi Bay and Reservoir

2.2 磷(TP、PO₄-P)

库湾水体中 TP、PO₄-P 两周年平均值为 0.153mg/L, 0.086mg/L, 较之中国其他湖泊水库可以说是相当高的^[2]。其中 TP 在调查期间变化范围为 0.020—0.577mg/L, PO₄-P 变化范围为 0.002—0.412mg/L。从时间变化上来看, TP、PO₄-P 月动态表现出较高的一致性。对 TP、PO₄-P 作回归分析则有显著的相关性($P = 3.56E-05$)。其夏季均出现极低值, 而极高值均出现在春季, 见表 1。可以认为库湾中 TP、PO₄-P 污染来源一致, 主要受到香溪河上游磷矿的影响。

将库湾与库首 P 指标作 t 检验(成对双样本均值分析), 结果表明, 从两周年动态来看库区与库湾 TP 无显著差异($P > 0.01$), PO₄-P 比较则库湾显著大于库首($P < 0.01$)。这说明库湾受香溪河上游磷矿无机磷污染严重, 且说明库湾对库首磷贡献主要是正磷酸盐(图 4)。尽管从 t 检验分析结果来看, 库湾与库首总磷无显著差异, 但比较两者同期月动态可

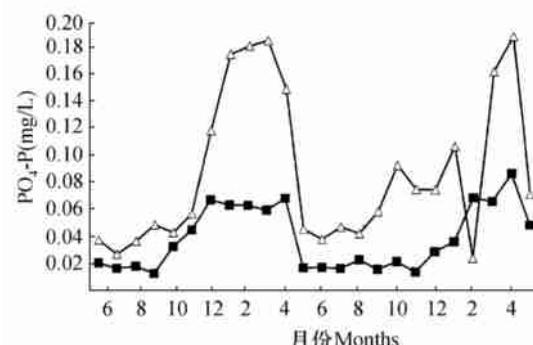


图 4 库湾与库首 PO₄-P 两周年月动态比较

Fig. 4 Comparison of monthly PO₄-P averages between Xiangxi Bay and Reservoir
—■—库首 —△—库湾(图 3 至图 7 的图例同)

以看出,这是由于7—9月库首总磷远远高于库湾造成的,而其他月份则表现出库湾TP高于库首水平(图5)。

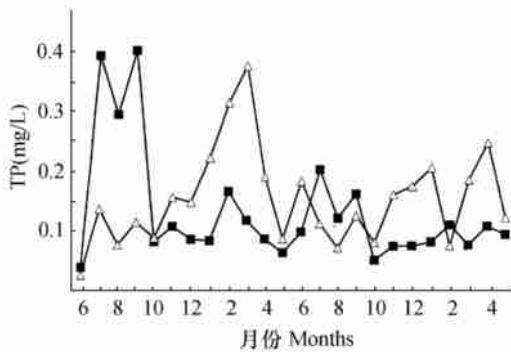


图5 库湾与库首TP两周年月动态比较

Fig. 5 Comparison of monthly TP averages between Xiangxi Bay and Reservoir

对库首TP/PO₄-P的比较可以看出,在夏季库首TP远远大于PO₄-P浓度,平均为PO₄-P浓度10倍以上,其他季节,TP平均为PO₄-P2.7倍,而库湾则无此剧烈的变化,全年TP/PO₄-P变化差不多,平均值为2.1(图6)。

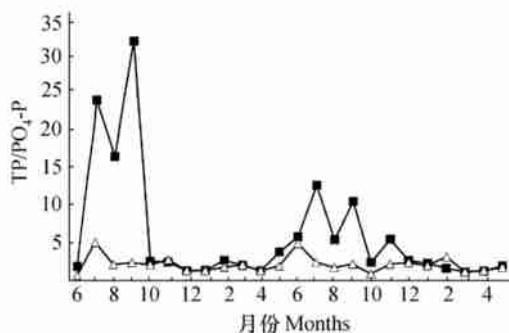


图6 库湾与库首TP/PO₄-P两周年月动态比较

Fig. 6 Comparison of monthly TP/PO₄-P averages between Xiangxi Bay and Reservoir

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库首,使得水体中TP急剧升高,因而说明库区的水体流失情况是相当严重的。而库湾与库首TP变化的差异则说明了库湾无此严重的水土流失。

2.3 叶绿素a(Chl. a)

调查期间,库湾Chl. a随季节变动,变动范围为2.635—92.268mg/m³,平均值为11.7μg/L,2004年极高值出现在3月,2005年极高值出现在4月,这表明库湾春季藻类暴发生长(图7)。

将库湾与库首叶绿素a指标作t检验,成对双样本均值分析。结果表明,库湾叶绿素显著高于库

首($P=0.0003$),同时库湾浮游植物的种类与总数也明显高于库首^[4]。这是由于库湾由于河水滞留因而更适宜藻类生长,因而对库湾富营养化治理应投入更多的关注。

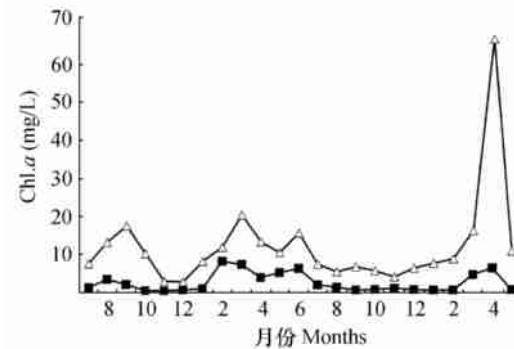


图7 库湾与库区Chl. a两周年月动态比较

Fig. 7 Comparison of monthly Chl. a averages between Xiangxi Bay and Reservoir

2.4 其他理化指标

2.4.1 水温 库湾水温在水平空间分布上差异小,主要随季节变动,变化范围11.5—29.3℃,平均水温19.7℃。

2.4.2 电导率 调查期间库湾电导率变动范围为159.6—356.0μs/cm,平均值为243.1μs/cm。空间上电导率变化不大,但随时间变动,从2003年6月以来呈稳定下降趋势。这说明蓄水后库湾水体中的悬浮物浓度降低河溶解盐含量的减少。

2.4.3 透明度、浊度 库湾透明度水平空间分布上差异小,随季节变动,变动范围40—340cm,平均值145cm,极小值出现在7—9月,2004年3月,2005年4月。7—9月透明度减小应是夏秋季降雨量大,地表径流活动加剧水体中泥沙增多所导致。2004年3月,2005年4月出现的极小值,表明此时透明度主要受春季藻类生长旺盛的影响,此结论与叶绿素a分析结果一致。

库湾浊度空间分布差异小,随季节变动,变化范围2—116Fau,平均值20.7Fau,极大值出现在2004年7月与2005年8月。这表明浊度主要受地表径流的影响。

2.4.4 pH值 观测期间库湾pH值变动在7.53—9.35之间,平均值8.38,属中性偏弱碱性水体。

2.4.5 COD 库湾的COD在调查期间空间变化不明显,随时间变化,变化范围为1.11—4.86mg/L,平均值为2.97mg/L,稍高于长江干流COD1.5—2.0mg/L平均水平^[3]。

2.4.6 碱度 调查期间变动范围在100.1—185.2mg/L,

平均值为 141.1mg/L。总的看来,库湾的总碱度较为均一。

2.4.7 总硬度、钙离子 调查期间库湾总硬度含量较高,变化范围为 5.89—12.35 德国度,平均值为 8.99 德国度,钙离子变化范围为 8.34—53.30mg/L,平均值为 33.94mg/L。总硬度、钙离子空间分布均无差异,主要随时间变动,其极大值极小值均出现在 1 月与 7 月。其结果是受到温度影响导致难溶盐在水体中的溶解度变化所造成。

将总硬度、钙离子作回归分析,则呈显著相关性($P=6.14E-05$),表明库湾中硬度主要受钙盐的影响。

2.4.8 与库首相应理化指标的比较 将以上库湾各项理化指标与库首相应理化指标作 t 检验-成对双样本均值分析,结果如下。

库湾与库首的各指标比较中,碱度、硬度、Ca、COD 均无显著差异。

对 Cond、浊度、Sal、SD 的比较,库湾与库首无明显差距,这表明库湾、库首水体中携带悬浮物水平差

不多。但 SiO_2 、TDS 库湾要显著低于库首。进一步说明干流总体水土流失较香溪河支流严重,其对水体中可溶盐,尤其是可溶硅酸盐贡献也较大。

库湾水温、pH 显著高于库首($P<0.01$)。较高的水温表明库湾受人为活动影响明显。pH 则是由于库湾受生活废水污染的影响因而较高。这种影响随着水体与长江干流合流而减弱。

2.5 富营养化评价

根据 TSI_M 的计算公式^[5-7] 分别计算 TSI_M (Chl. a)、 TSI_M (TP)、 TSI_M (SD)、 TSI_M (TN)、 TSI_M (COD)。

相关加权卡尔森营养指数 $\text{TSI}_M(\Sigma)$ 计算公式为:

$$\text{TSI}_M(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot \text{TSI}_M(j)$$

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

$$\text{Chl. } a > \text{SD} > \text{TP} > \text{TN} > \text{COD}$$

则相应权重为 $W=(0.455, 0.251, 0.154, 0.086, 0.054)$ ^[7], 据此权重计算 $\text{TSI}_M(\Sigma)$, 最后结果见表 2。

表 2 香溪河库湾与三峡水库库首 TSI_M 月动态

Tab. 2 Monthly TSI_M dynamics of Xiangxi Bay and the front region of Three Gorges Reservoir

	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月
库湾	2003—2004		59.4	58.8	63.2	58.3	51.3		57.4	59.1	65.4	60.6
	2004—2005	64.2	59.6	56.4	57.7	52.9	51.5	54.1		53.0	60.3	69.2
库首	2003—2004	—	55.0	57.7	58.0	43.9	41.9	—	44.4	54.0	57.3	51.9
	2004—2005	59.2	56.3	52.5	49.8	45.3	44.6	41.8	—	40.1	49.4	52.7
												44.8

从上表可以看出,除了 11 月份湾 $\text{TSI}_M < 53$, 其他月份均超过 53, 呈现严重的富营养化水平。(评价标准为: $\text{TSI}_M < 37$ 为贫营养, $37 < \text{TSI}_M < 53$ 为中营养, $\text{TSI}_M > 53$ 为富营养)^[8-10] 而库首虽然部分月份也表现出富营养化,但是总体上是处于中营养化水平的($\text{TSI}_M(\Sigma)$ 平均值 = 49.6)。 t 检验-成对双样本均值分析, $P=5.54E-09$ 也表明出库湾营养化水平显著高于库区,进一步支持库湾等支流回水带更易形成富营养化的说法。

参考文献:

- [1] 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]
- [2] 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]
- [3] The College of life Sciences and Chemistry of Yunnan University, Manwan Hydro-power 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]
- [4] Kuang Q J, Bi Y H, Zhou G J. Study on the phytoplankton in the Three Gorges Reservoir before and after sluice and the protection of water quality [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2005, 29(4): 353—358[况琪军, 毕永红, 周广杰. 三峡水库蓄水前后浮游植物调查及水环境初步分析. 水生生物学报, 2005, 29(4): 353—358]
- [5] Carlson R E. A trophic state index for lakes [J]. *Limnol Oceanogr*, 1977, 22(2): 361—369
- [6] 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(23): 13—31
- [7] 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]

[8] 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]

[9] 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]

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

COMPARATIVE RESEARCH ON PHYSICOCHEMICAL FACTORS BETWEEN XIANGXI BAY AND THE FRONT REGION OF THREE GORGES RESERVOIR

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 Xiangxi Bay after the initial impounding in Three Gorges Reservoir in June, 2003, the physicochemical indices and the dynamics were analyzed and compared with the data of the front region of Three Gorges Reservoir. The results indicated that the concentrations of TN, NO₃-N in Xiangxi Bay were lower than those in the reservoir significantly. The biyearly averages of TN, NO₃-N were 1.29mg/L, 0.88mg/L in Xiangxi Bay and 1.62mg/L, 1.22mg/L in the front reservoir. However, PO₄-P was higher in Xiangxi Bay than in the front reservoir, and monthly averages of TP/PO₄-P in the front reservoir were significantly higher than those in Xiangxi Bay during July to September. The results also showed that there were heavy soil erosion in the reservoir, while soil and water were kept better in Xiangxi Bay. Based on the evaluation of the trophic state indices (TSI_M), Three Gorges Reservoir was middle eutrophical (TSI_M>37), and Xiangxi Bay was eutrophical (TSI_M>53) due to high phosphorus and nitrogenous pollution.

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