

三峡水库成库后支流库湾营养状态及营养盐输出

张晟, 李崇明, 付永川, 张勇, 郑坚

(重庆市环境科学研究院, 重庆 400020)

摘要: 三峡水库成库后, 对受成库影响的 12 条主要支流库湾营养状态及营养盐输出状况进行了初步研究. 结果表明, 支流库湾总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数、叶绿素 a 含量和透明度差异较大, 透明度范围为 0.10 ~ 3.5m, TN 含量范围为 0.535 ~ 7.47 mg·L⁻¹, TP 含量范围为 0.016 ~ 0.835 mg·L⁻¹, 高锰酸盐指数范围为 1.55 ~ 5.88 mg·L⁻¹, 叶绿素 a 范围为 1.38 ~ 23.7 mg·m⁻³. 支流受到不同程度污染, 水体中 N 含量丰富, 部分次级河流富营养化的限制因子为 P. 利用相关分析方法, 分析了叶绿素 a 与营养盐之间的关系, 叶绿素 a 与高锰酸盐指数呈显著正相关($r = 0.6242$, $p < 0.01$). 利用综合营养状态指数法评价了次级河流富营养化程度, 结果表明, 5 月和 6 月份分别有 5 条和 8 条支流达到富营养化水平, 其余河流为中营养. 三峡水库蓄水后, 支流库湾的富营养化程度较成库前严重. 12 条次级河流排放 TN、TP、高锰酸盐指数和 NH₄⁺-N 分别为 668、26.7、890 和 99.2 g·s⁻¹. 三峡水库完工后, 因支流库湾区水体流速进一步减缓, 富营养化趋势将加重.

关键词: 三峡水库; 支流; 库湾; 营养状态; 营养盐

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)01-0007-06

Trophic States and Nutrient Output of Tributaries Bay in Three Gorges Reservoir After Impoundment

ZHANG Sheng, LI Chong-ming, FU Yong-chuan, ZHANG Yong, ZHENG Jian

(Chongqing Academe of Environmental Science, Chongqing 400020, China)

Abstract: After the Three Gorges Reservoir stored water in June 2003, total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), chlorophyll a (Chl-a), potassium permanganate index and Secchi depth (SD) were determined in 12 tributaries bay in Three Gorges Reservoir. Trophic states were assessed and output fluxes of TN, TP and potassium permanganate index were calculated. The results showed that value of TN, TP, potassium permanganate index, SD and Chl-a were different in each tributary bay. SD, TN, TP, potassium permanganate index and Chl-a value were 0.10 ~ 3.5m, 0.535 ~ 7.47 mg·L⁻¹, 0.016 ~ 0.835 mg·L⁻¹, 1.55 ~ 5.88 mg·L⁻¹ and 1.38 ~ 23.7 mg·m⁻³ respectively. The water body of tributaries is polluted at various levels. The concentration of TN is abundant. The rate of TN and TP showed that a part of tributaries eutrophication were limited by TP. The correlation of nutrient and Chl-a were researched. It indicated there was a significant positive correlation($r = 0.6242$) between chlorophyll a and potassium permanganate index. Utilizing the method of integrated nutrition state index, it assessed the trophic states degree of tributaries bay. The integrated nutrition state index ranged from 33.3 to 66.1. Among all of the studied tributaries, 5 tributaries are eutrophic in May and 8 tributaries are eutrophic in June. The rest of tributaries are mesotrophic. The degree of eutrophication is more serious than before the Three Gorges Reservoir impoundment. The nutrient fluxes load was calculated by discharge and concentration of each tributary. The nutrient fluxes load of TN, TP, potassium permanganate index and NH₄⁺-N are 668, 26.7, 890 and 99.2 g·s⁻¹ respectively. After the Three Gorges Dam was completed in 2009, eutrophication trend of tributaries estuaries will be more serious with the more slow flow velocity.

Key words: Three Gorges Reservoir; tributary; bay; trophic state; nutrient

天然河流水体的物理、化学特征不但受地理、地形和气候等因素的影响^[1,2], 而且人为干扰如土地利用、各种污染物的排放以及筑坝等均能影响河流生态系统的完整性和健康状态^[3]. 三峡水库于 2003-06 成库蓄水, 库区水体由天然河道改变为人工水库, 这种改变已经引起三峡水体干流水生态系统的变化^[4,5], 而三峡水库成库后对部分支流库湾 DO 及 N、P 等的分布产生了更大的影响^[6]. 由于受干流回水顶托的影响, 支流库湾水体流速缓慢, 形成了有利于藻类生长的水文条件, 藻类大量繁殖导致部分支流库湾发生了不同程度的水体富营养化. 在重庆段受

三峡水库 139 m 蓄水影响的约 20 条流域面积在 100 km² 以上的一级支流, 其库湾流速明显减缓, 部分成库前水环境质量较好的支流库湾区也发生了严重的富营养化现象^[7]. 三峡水库支流库湾的富营养化现象已经引起广泛关注. 三峡水库成库后, 针对某一条或几条特定支流库湾富营养化的研究较多, 但对较大尺度上支流库湾富营养化的研究报道不多^[8]. 本

收稿日期: 2007-01-25; 修订日期: 2007-03-25

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(2007BB7241, 2007BB7242); 重庆市建委基金项目(200612)

作者简介: 张晟(1971~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为污染生态学和环境化学, E-mail: shengzsts@126.com

研究对三峡水库重庆段受 139 m 蓄水影响的主要 12 条支流库湾平水期的水体富营养化程度以及营养盐输出负荷进行了初步分析,为三峡库区支流富营养化研究提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 样品采集方法

2004-05 和 2004-06,对 12 条受三峡水库 139 m 蓄水影响的支流库湾各进行一次采样分析.在各支流设置 2 个采样点(库湾上游河流区和库湾区),采集 0.5 m 以上表层水.其中库湾上游河流区营养盐浓度用于计算支流营养盐输出负荷,库湾区浓度用于评价库湾水体营养状态.支流库湾位置及采样点位见图 1.

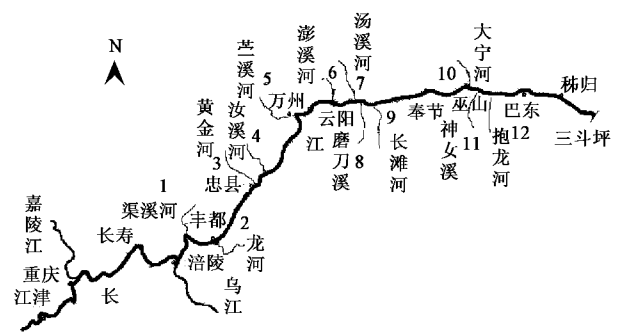


图 1 样品采集点位

Fig.1 Investigation stations of tributaries in Three Gorges Reservoir

1.2 样品分析测试方法

水质理化监测项目总磷(TP)、总氮(TN)、叶绿素 a(Chl-a)、高锰酸盐指数、透明度(SD)、pH、溶解氧(DO)、水温等 8 项.透明度(SD)采用塞氏盘法;pH 采用玻璃电极法;DO 采用滴定法;水温为水温度计法;高锰酸盐指数采用 GB 11892-89 规定的方法;叶绿素 a 采用丙酮萃取分光光度法;总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法;总磷采用钼酸铵分光光度法;NH₄⁺-N 采用纳氏试剂比色法^[9].为了控制测定的准确性,在高锰酸盐指数、TN、TP、NH₄⁺-N 分析时,每 10 个测定样品用标准样品校验.另 10% 的平行样分析用于控制实验的精密度,平行样的相对误差小于 10%.

1.3 营养状态评价方法

水体的营养状态主要取决于一系列相关因子的综合作用,如 N、P 等营养盐和 SD 等.本文采用了包括 Chl-a、高锰酸盐指数、TN、TP 和 SD 在内的相关加权综合营养状态指数来评价各河流的营养状态^[10].

综合营养状态指数计算公式为:

$$TLI(\sum) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j)$$

式中,TLI(∑)为综合营养状态指数;TLI(j)为第 j 种参数的营养状态指数;W_j为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重,各因子 W_j取值见表 1,以 Chl-a 作为基准参数.营养状态指数计算公式为:

$$\begin{aligned} TLI(\text{Chl-a}) &= 10(2.5 + 1.086 \ln \text{Chl-a}); \\ TLI(\text{TP}) &= 10(9.436 + 1.624 \ln \text{TP}); \\ TLI(\text{TN}) &= 10(5.453 + 1.694 \ln \text{TN}); \\ TLI(\text{SD}) &= 10(5.118 - 1.94 \ln \text{SD}) \end{aligned}$$

TLI(高锰酸盐指数) = 10(0.109 + 2.661 ln 高锰酸盐指数).采用 0 ~ 100 的一系列连续数字对水体营养状态进行分级:TLI(∑) < 30 贫营养;30 ≤ TLI(∑) ≤ 50 中营养;TLI(∑) > 50 富营养(50 < TLI(∑) ≤ 60 轻度富营养;60 < TLI(∑) ≤ 70;中度富营养;TLI(∑) > 70 重度富营养).在同一营养状态下,指数值越高,其营养程度越重.

表 1 Chl-a 与其它因子的 W_j 值

Table 1 W _j value of Chl-a and other parameter					
参数	Chl-a	TP	TN	SD	高锰酸盐指数
W _j	0.266 3	0.187 9	0.179 0	0.183 4	0.183 4

2 结果与分析

2.1 物理化学参数特征

三峡水库主要支流库湾区 2 次测定的物理化学参数结果见表 2. pH 为 7.17 ~ 8.69,均为中性偏弱碱性水体,在地表水环境质量标准允许范围内;水温范围在 19.0 ~ 26.0℃,6 月水温略高于 5 月;DO 范围在 5.80 ~ 9.44 mg·L⁻¹,均达到地表水环境质量标准Ⅲ类以上,DO 饱和度范围在 64% ~ 114%;电导率范围在 166 ~ 705 μS/cm,苈溪河远高于其它支流,与该流域存在盐化工工业溶解性盐排放入支流有关;SD 大小主要受水体中悬浮物和浮游生物量的影响,由于各支流流域生态环境状况不同,水土流失对 SD 的影响也不一致,导致 SD 范围变化大,各支流 SD 范围在 20 ~ 350 cm.由于三峡库区是中国水土流失最严重的地区之一,6 月随着降雨的逐渐增多,6 月各支流 SD 普遍远低于 5 月.

2.2 营养状态因子特征

如图 2 所示,高锰酸盐指数范围在 1.55 ~ 5.88

表 2 物理化学参数
Table 2 Results of physical chemistry parameters

支流编号	支流名称	水温/℃		pH		DO/mg•L ⁻¹		SD/cm		电导率/μS•cm ⁻¹	
		5 月	6 月	5 月	6 月	5 月	6 月	5 月	6 月	5 月	6 月
1	渠溪河	20.2	22.0	7.32	7.47	7.50	7.10	30	30	331	329
2	龙河	19.0	19.0	7.34	7.17	7.55	7.10	30	20	251	166
3	黄金河	23.5	18.2	8.66	7.76	7.38	7.83	80	60	267	258
4	汝溪河	25.3	18.6	8.69	7.64	7.58	6.70	100	70	329	296
5	芑溪河	19.7	20.6	8.18	8.15	6.45	7.95	70	50	705	470
6	澎溪河	20.0	24.5	8.64	8.06	5.80	7.65	80	10	519	320
7	汤溪河	20.0	24.5	8.41	7.60	7.40	7.50	100	10	400	423
8	磨刀溪	19.5	24.5	7.31	8.02	6.05	7.55	100	10	460	393
9	长滩河	19.0	24.5	7.88	8.04	6.15	7.60	100	10	484	305
10	大宁河	25.0	21.0	8.04	8.26	9.44	8.51	300	60	408	335
11	神女溪	23.0	26.0	7.74	8.29	6.94	7.51	200	50	356	345
12	抱龙河	22.0	25.0	7.84	8.38	7.12	9.01	350	50	356	345

mg•L⁻¹,达到Ⅰ~Ⅲ类水质标准(GB 3838-2002).高锰酸盐指数作为有机污染的指标,当其超过4 mg•L⁻¹时,表示水体受到有机污染^[11],除受严重污染的芑溪河外,库区其支流高锰酸盐指数均值低于4 mg•L⁻¹,表明受三峡水库蓄水影响的次级河流库湾还未受有机污染严重影响;TN含量范围在0.535~7.47 mg•L⁻¹,为Ⅲ~劣Ⅴ类水质标准.三峡库区是重庆市主要农业区,同时各支流流域也是居民稠密分布区,水体中N含量较高可能与城镇生活污水排入和农村化肥的施用有关;TP含量范围在0.016~0.835 mg•L⁻¹,除芑溪河为劣Ⅴ类外,其余支流达到Ⅰ~Ⅲ类水质标准.NH₄⁺-N范围在0.042~1.40 mg•L⁻¹,除芑溪河5月仅达到Ⅳ类水外,其余河流均能达到Ⅰ~Ⅲ类水质标准.从污染因子分析,芑溪河由于接纳万州城区城市污水和工业废水在支流中污染最重,已经不能达到地表水环境质量和水域功能的要求.一般认为,当水体中TN、TP含量分别达到0.20、0.02 mg•L⁻¹以上时,水体存在发生富营养化的风险,调查支流库湾水体的TN、TP含量均远高于限制值,表明N、P浓度条件适宜藻类生长.Chl-a范围在1.38~23.7 mg•m⁻³,根据OECD富营养化单因子(Chl-a)评价标准(Chl-a<3 mg•m⁻³为贫营养;Chl-a 3~11 mg•m⁻³为中营养;Chl-a 11~78 mg•m⁻³为富营养;Chl-a>78 mg•m⁻³为严重富营养),黄金河、汝溪河、芑溪河和澎溪河达到富营养化水平,其余河流为贫-中营养水平.其中有7条河流Chl-a含量5月高于6月,2条河流6月较高,3条河流变化不大.

为研究营养盐和有机物对12条河流库湾区水体影响程度的相似性,将12条河流的TN、TP、高锰

酸盐指数和NH₄⁺-N含量采用系统聚类分析.聚类分析是使用一定的相似距离测度方法不断把性质最接近的2类合并成更大的类,基本原则是使同一类中个体差异最小,不同类别之间差异最大.12条河流库湾区聚类结果见图3.根据污染物含量的不同,当聚类距离取0.62,支流可分为4类.渠溪河、龙河为一类,水体中NH₄⁺-N含量较高;澎溪河、神女溪、抱龙河、磨刀溪、大宁河、汤溪河、长滩河为一类,营养盐和有机物含量均较低;黄金河、汝溪河为一类,水体中高锰酸盐指数含量较高;芑溪河单独为一类,具有极高的营养盐和有机物含量.

2.3 营养状态评价

图4显示了2个月份支流库湾的营养化评价结果.综合营养指数范围在33.3~66.1,支流库湾水体营养程度较高,无贫营养水平,12条河流库湾均达到中营养水平以上,其中5月份有5条(41.7%)河流库湾达到富营养化水平,6月份达到富营养化的河流达8条(66.7%),2次调查均为富营养化的河流有4条.从综合营养状态评价结果分析,6月份三峡水库支流库湾水体营养程度高于5月.与三峡水库成库后春季22条支流库湾比较,富营养化程度较低^[12].表明三峡水库成库后,支流库湾水体营养程度变化与不同季节气候条件的变化有关.2003年,对三峡库区成库前支流营养程度比较,综合营养状态指数范围为23.56~58.25,最高值为芑溪河,最小值为大宁河.达到富营养化的只有芑溪河,且为轻度富营养化;汤溪河、大宁河达到贫营养,其余河流为中营养水平^[13].而各支流库湾综合营养状态指数成库后比三峡水库成库前均有不同程度的增高,表明三峡水库成库后,支流库湾水体营养程度的加重明

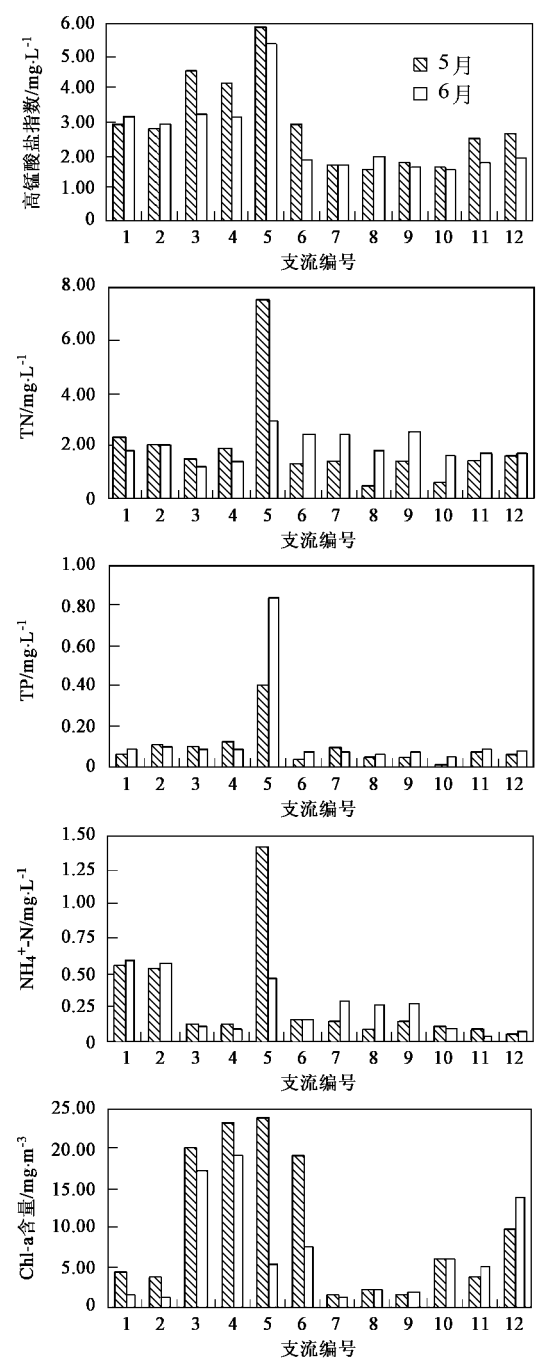


图 2 营养状态因子变化

Fig.2 Change of trophic state factors

显受三峡水库蓄水水体流速减缓的影响.

2.4 营养盐输出

利用三峡库区次级河流平水期流量与污染物浓度,估算 C、N、P 对三峡水库的输入负荷,计算公式为:污染物负荷($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$)= 污染物浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) $\times$ 流量($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) $\times$ 换算系数

研究支流平水期流量见图 5. 污染物浓度为平水期各支流库湾上游河流区营养盐浓度 2 次测定值

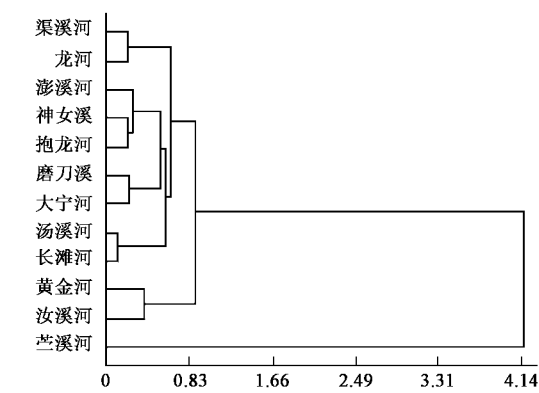


图 3 营养盐聚类分析结果

Fig.3 Clustering analysis results of nutrient

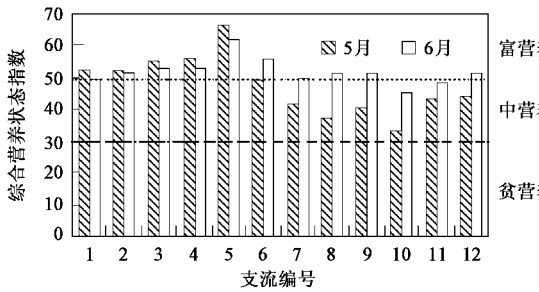


图 4 支流库湾水体营养状态评价结果

Fig.4 Assessment results of trophic states in tributaries bay

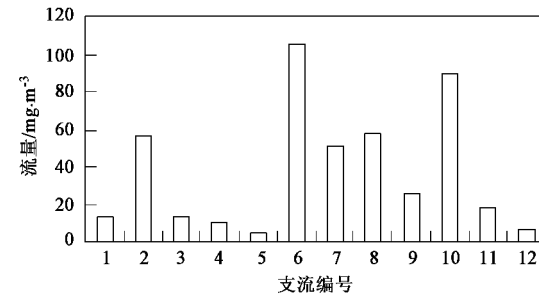


图 5 支流平水期流量

Fig.5 Flux of tributaries in normal season

的平均值. 流量范围在 $104.6 \sim 5.94 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, 流量最大为澎溪河, 最小为抱龙河. 支流营养盐输出负荷计算结果见图 6. 12 条支流高锰酸盐指数、TN、TP 和 NH_4^+-N 这 4 种污染物共输出 $1683 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, 其中高锰酸盐指数输出 $890 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, TP 输出 $26.7 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, TN 输出 $668 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, NH_4^+-N 输出 $99.2 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$. 三峡库区支流营养盐输出负荷主要受流量的影响, 流量最大为澎溪河其 4 种污染物输出负荷最大, 分别达到 288、188、6.07 和 $17.6 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, 分别占总负荷的 32.3%、

28.1%、21.9%和17.7%;高锰酸盐指数、TN、TP输出负荷最小为抱龙河,分别为14.4、9.14和0.46 g•s⁻¹.12条次级河流丰水期N/P输入原子比约为25:1,总体上三峡库区支流N污染较重.

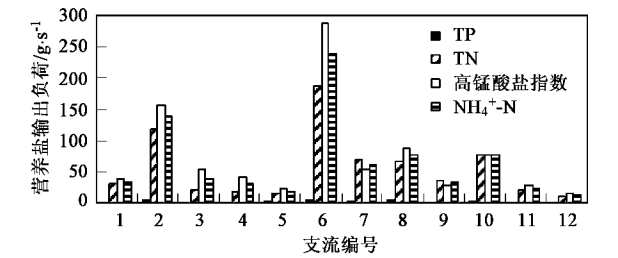


图6 支流营养盐输出负荷

Fig.6 Fluxes load of N,P and potassium permanganate index in tributaries

3 讨论

3.1 Chl-a与营养盐关系

由于研究区域较大,支流污染物在不同月份含量变化不一致.支流库湾水体中高锰酸盐指数、TN、TP含量因受长江干流回水和支流本底值的不同影响,与库湾上游河流区比较有增有减.但有10条支流库湾Chl-a含量远高于上游河流区,2条河流无显著差异.与三峡水库成库前河口区比较,Chl-a含量除龙河略有降低外,其余支流库湾均有显著增高,其中大宁河增幅达10倍以上.与三峡水库成库后,支流库湾在干流回水顶托作用影响下形成了库湾缓流库区,缓流条件适宜于藻类生长有关.日本湖沼学家合田建提出:湖水总氮和总磷浓度比为12:1~13:1时,最适宜藻类生长,当该比值小于4时,氮是水体富营养化的限制性因素^[14].对调查的12条次级河流的TN/TP进行计算,范围为3.57~34.5,除已丧失水域功能的芭溪河外,其余河流比值均>10.表明三峡库区支流水体中N元素不是发生富营养化

的限制因子,其中4条河流TN/TP比值在21以上,可能P成为这些河流藻类生长的限制因子.三峡库区主要为农业区,可能由于大量氮肥的使用造成水体中TN/TP较高.

在湖泊、水库缓流状态下,一般Chl-a与N、P间存在不同程度的线性关系^[15,16].但由于河流库湾是一个非常复杂的环境生态体系,一方面受支流上游来水的影响,另外还受干流顶托水的影响,所涉及的因子很多.又由于本次调查的河流分布范围广,污染来源复杂,加之流域泥沙流失和人为活动的干扰,使得次级河流生产力指标Chl-a与富营养化指标之间的关系更为复杂.12条支流库湾富营养化指标相关性分析结果见表3.和大多数湖泊、水库不同,支流库湾Chl-a与高锰酸盐指数、TN、TP均呈正相关,但与高锰酸盐指数呈显著正相关($r = 0.6242, p < 0.01$),而与TN、TP相关性不显著;Chl-a与SD和DO无明显相关性.高锰酸盐指数与TN($r = 0.61262, p < 0.01$)、TP($r = 0.69833, p < 0.01$)呈显著正相关,表明3种污染物来源相同,可能与地表径流产生的面源污染有关.对重庆市范围内大中型水库富营养化调查也发现^[17],Chl-a与TP相关性不显著,与高锰酸盐指数呈显著正相关,和支流库湾调查结论一致.而在水库水体中Chl-a与SD呈显著负相关,可能与水库为静止水体,颗粒态物质沉降,SD主要受藻类生物量的增长影响有关.三峡水库139m蓄水,受蓄水影响的支流库湾水体流速虽然比天然河流状态时有不同程度下降,但支流水体与干流交换依然较快,与其它湖泊、水库水文条件相比还不完全相同.但在三峡水库2009年175m蓄水后,由于水位的抬升支流库湾水体流速进一步减缓,库湾的水文条件将更接近湖泊、水库特征,Chl-a与营养因子间的关系可能与湖泊、水库接近一致.

3.2 库湾富营养化趋势

三峡水库139m蓄水后,对支流库湾的营养状

表3 Chl-a与营养化因子相关性

Table 3 Correlation coefficients between chlorophyll a and trophic factors								
	Chl-a	水温	pH	高锰酸盐指数	TN	TP	SD	NH ₄ ⁺ -N
Chl-a	1							
水温	-0.0468	1						
pH	0.5373	0.43604	1					
高锰酸盐指数	0.6242	-0.2557	0.1870	1				
TN	0.31156	-0.07315	0.08814	0.61262	1			
TP	0.12329	-0.17167	0.13034	0.69833	0.53186	1		
SD	0.09476	0.08006	0.09259	-0.06509	-0.2637	-0.13818	1	
NH ₄ ⁺ -N	0.11012	-0.31068	-0.2395	0.60298	0.86506	0.46247	-0.29994	1

态调查表明,由于支流库湾区流速减缓,蓄水对水体富营养化已经有明显影响.三峡水库分 139 m(2003 年)、156 m(2006 年)和 175 m(2009 年)蓄水,受蓄水影响的支流数量和范围不断增加.其中三峡库区最大的 2 条支流乌江和嘉陵江均将受蓄水的影响,由于 2 条江营养盐含量较高,并且流量占长江流量的 20% 以上.随着三峡大坝蓄水水位的不断增高,受蓄水影响的支流对三峡水库营养盐输出将进一步增加.2009 年三峡工程完工后,随着水位抬高,过水面积极增大,三峡水库干流流速迅速减小,枯水期库区江段平均流速为 $0.17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,比天然河道减小约 4 倍.尤其在坝前深水区,水库建成后断面平均流速下降为 $0.04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,比天然河道的断面平均流速减小约 5 倍,水流运动特征的巨大变化,对干流水体生态系统将产生更大影响.对部分支流而言,由于水位的抬高,支流库湾区面积和长度有不同程度的增加,其中嘉陵江河口区从北碚至入库汇流口,全长约 60 km;乌江从武隆至入库汇流口,全长约 68 km.澎溪河开县段枯水期平均流速由建库前的 $0.65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,降低为 $0.006 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而且岸边流速更小,可能基本为静止^[18],接近湖泊型水库的流速,因此三峡库区支流库湾的水文条件基本与发生富营养化现象的水库相似,即具备诱发富营养化的形态要素条件.三峡库区支流营养盐含量水平已经远超过发生水体富营养化的最低值.因此三峡水库 175 m 蓄水后,将进一步增加部分区域水体特别是三峡水库支流库湾区发生富营养化的风险.

4 结论

(1) 三峡库区支流库湾水体中 N 污染严重, P 污染相对较轻,但水体中 N、P 含量均超过发生富营养化的最低含量.除沱溪河外,其余水体中高锰酸盐指数含量较低,还未受有机物污染. Chl-a 含量不同水体有较大差异,但普遍较三峡水库成库前有不同程度增高.

(2) 支流库湾水体综合营养状态评价指标较高,均达到中营养以上水平,部分水体达到富营养化水平,6 月份富营养化程度大于 5 月份.较成库前,富营养化程度有明显增高.

(3) 12 条支流高锰酸盐指数、TN、TP 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

共输出 $1\,683 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$,其中高锰酸盐指数输出 $890 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, TP 输出 $26.7 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, TN 输出 $668 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 输出 $99.2 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$. 三峡库区支流营养盐输出负荷主要受流量的影响,流量最大为澎溪河其 4 种污染物输出负荷最大.

参考文献:

- [1] Gibbs R J. Mechanism controlling world water chemistry [J]. Science, 1970, **170**: 1088-1090.
- [2] Webb B W, Walling D E. Water quality II. Chemical characteristics [A]. In: Petts G, Calow P. River flows and channel forms [C]. Oxford: Blackwell Science Ltd, 1996. 102-109.
- [3] Petts G, Calow P. River restoration [M]. Oxford: Blackwell Science Ltd, 1996. 102-109.
- [4] 张晟,刘景红,黎莉莉,等.三峡水库成库初期营养盐与浮游植物分布特征[J].环境科学, 2006, **27**(6): 1056-1061.
- [5] 张晟,李崇明,吕平毓,等.三峡水库成库后水体中 COD_{Mn} 、 BOD_5 空间变化[J].湖泊科学, 2007, **19**(1): 70-76.
- [6] 方涛,付长营,敖鸿毅,等.三峡水库蓄水前后香溪河氮磷污染状况研究[J].水生生物学报, 2006, **30**(1): 26-30.
- [7] 李永建,李斗果,王德蕊.三峡工程 II 期蓄水对支流富营养化的影响[J].西南农业大学学报(自然科学版), 2005, **27**(4): 474-478.
- [8] 胡建林,刘国祥,蔡庆华,等.三峡库区重庆段主要支流春季浮游植物调查[J].水生生物学报, 2006, **30**(1): 116-119.
- [9] 国家环境保护总局.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, 2002. 102-186.
- [10] 金相灿,屠清英.湖泊富营养化调查规范[M].北京:中国环境科学出版社, 1990. 286-302.
- [11] 刘健康.东湖生态学研究(二)[M].北京:科学出版社, 1990. 63-226.
- [12] 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.
- [13] 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[J].环境科学, 2007, **28**(3): 500-505.
- [14] 彭近新,陈慧君.水质富营养化与防治[M].北京:中国环境出版社, 1988. 15-47.
- [15] Prairie Y T, Duarte C M, Kalff J. Unifying nutrient-chlorophyll relationships in lakes[J]. Can J Fish Aquat Sci, 1989, **46**: 1176-1182.
- [16] Erwin E, Van Nieuwenhuysse, Jones J R. Phosphorus-chlorophyll relationship in temperate streams and its variation with stream catchment area[J]. Can J Fish Aquat Sci, 1996, **53**: 29-36.
- [17] 刘景红,张晟,陈玉成,等.重庆市水库富营养化调查及评价[J].水土保持学报, 2005, **19**(4): 131-134.
- [18] 黄真理,李玉梁,李锦秀,等.三峡水库水环境容量计算[J].水利学报, 2004, **35**(3): 7-14.