J. Lake Sci.(湖泊科学),2010,**22**(2):201-207
http://www.jlakes.org. E-mail:jlakes@niglas.ac.cn
© 2010 by *Journal of Lake Sciences*

三峡水库典型支流上游区和回水区营养状态分析*

张　晟[1,2],宋　丹[1,2],张　可[1],曾凡海[3],李斗果[1]
(1:重庆市环境科学研究院,重庆 401147)
(2:西南大学资源环境学院,重庆 400716)
(3:重庆市涪陵区环境监测站,重庆 408000)

摘　要:2006 年 3、5、8 月,对三峡水库成库后 5 条支流的上游区和回水区水质参数及营养因子分布进行了初步研究. 研究结果表明,支流高锰酸盐指数范围在 1.00 - 2.50mg/L、COD 范围为 6.00 - 26.5mg/L,上游区与回水区有机物含量差异不大,支流目前未受到有机物污染影响. NH_4^+-N 范围为 0.039 - 0.367mg/L,各支流含量均为丰水期最大. TN 范围在 0.58 - 1.67mg/L,TP 范围在 0.005 - 0.133mg/L,支流回水区 TN 和 TP 含量均远高于水体发生富营养化的最低限制值,水体存在发生富营养化的风险. 大多支流 N/P 比值处于适宜藻类生长范围. Chl. a 浓度范围为 0.94 - 28.9mg/m^3,各支流回水区 Chl. a 浓度均为 5 月最大. 河流回水区 Chl. a 浓度高于上游区,上游区、回水区 Chl. a 含量有显著差异. 选用修正的 Carlson 营养状态指数(Trophic State Index)TSI_M法,评价了支流水体营养状态,TSI_M指数范围在 36.0 - 64.2,上游区除龙河、澎溪河 5 月达到富营养水平外,其余支流均为贫-中营养水平. 回水区各支流均达到中-富营养水平. 支流回水区营养状态指数均高于上游区,但各支流增加幅度不同. 支流回水区水体营养状态明显受三峡水库蓄水水体流速减缓的影响. Chl. a 与 COD($n = 15$,$P < 0.01$)呈极显著正相关,与其它营养因子无明显相关关系. 三峡水库完工后,支流回水区水体流速减缓,富营养化趋势可能加重.
关键词:三峡水库;支流;回水区;营养状态

Trophic status analysis of the upper stream and backwater area in typical tributaries, Three Gorges Reservoir

ZHANG Sheng[1,2], SONG Dan[1,2], ZHANG Ke[1], ZENG Fanhai[3] & LI Douguo[1]
(1: *Chongqing Academy of Environmental Science*, *Chongqing* 401147, *P. R. China*)
(2: *College of Resource and Environment*, *Southwest University*, *Chongqing* 400716, *P. R. China*)
(3: *Fuling District Environmental Monitoring Station of Chongqing*, *Chongqing* 408000, *P. R. China*)

Abstract: Through sampling and analyzing in 5 typical tributaries of Three Gorges Reservoir, parameters of the water quality and main nutrients were monitored in Mar., May and Aug. of 2006. The variation of permenganate index of oxygen demand and COD ranged from 1.00 - 2.50mg/L and 6.00 - 26.5mg/L respectively. Concentration of organic contamination was not discrepancy in upstream and backwater areas. Values of ammonia nitrogen (NH_4^+-N), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were 0.039 - 0.367mg/L, 0.58 - 1.67mg/L and 0.005 - 0.133mg/L, respectively. Concentration of NH_4^+-N in Aug. was higher than thoses in Mar. and May, when concentrations of TN and TP were largely exceed the minimum limited value of eutrophic state. The ratio of TN and TP were favored well for algae growth in nearly all tributaries. Chl. a ranged from 0.94 - 28.9mg/m^3. Chl. a values in backwater areas of tributaries were exceed upstream and the concentration of Chl. a in May was higher than in Mar. and Aug.. Utilizing the method of modified Carlson trophic state index (TSI_M) has assessed the trophic states of the studied area. The values of TSI_M ranged from 36.0 - 64.2, showing that the trophic state of upstream area was oligotropher to mesotropher and the backwater areas were mesotropher to eutropher. Trophic state of backwater areas were poorer than upstream, and was affected by impoundment of the Three Gorges Reservoir. There was a significant positive correlation between Chl. a and COD, but Chl. a was

* 国家重大水专项项目(2009ZX07104 - 003)资助. 2009 - 10 - 13 收稿;2009 - 12 - 08 收修改稿. 张晟,男,1971 年生,博士,研究员;E-mail:shengzsts@126.com.

not significant correlation with other nutrient factors. After the Three Gorges Reservoir was completed in 2009, eutrophic trend of tributaries in backwater areas would be more serious with the decrease of flow velocity.

Keywords: Three Gorges Reservoir; tributary; backwater areas; trophic state

三峡工程是举世瞩目的特大型水利水电工程,是治理和开发长江的关键性骨干工程,具有防洪、发电、航运等巨大的综合效益.但三峡工程改变了部分长江水文情势,对库区、长江中下游及河口地区的生态、环境将产生不同程度的影响[1].三峡水库成库后,对库区而言水环境条件的改变已经引发新的生态与环境问题[2-4].水库干流营养因子的分布[5-8]特别是部分支流回水区(库湾)的富营养化问题已引起广泛关注[9-12].支流回水区是受干流、支流不同生境连接形成的生态交错区,相邻生境间进行着有关物理、化学、生物等过程的重要交换,并彼此影响.支流回水区的范围与支流地形条件(坡度)和干、支流流速、流量有关,该区域干流水体倒灌及其顶托作用而引起支流水体的流速减缓、水质污染、生物多样性等的显著变化[13].三峡库区重庆段受三峡水库 139m 蓄水影响的约有 20 条流域面积在 100km^2 以上的一级支流,部分支流流经区域接纳了大量工业、生活废水和受农业面源污染的影响,一般水体中污染物含量较高.三峡水库蓄水后,支流受干流回水的影响,支流回水区由天然河流演变为库湾,该区带水文条件区别与其它河段,和一般意义上的湖泊、水库又有明显差别,因此该区带水体富营养化较其它水体可能更为复杂.本文通过对三峡水库典型支流上游区与回水区营养盐等营养状态因子的调查,对营养因子时空分布进行初步研究并对水体营养状态进行评价,探讨不同河流水力环境条件的改变对富营养化因子分布的影响.

表 1 调查支流基本情况

Tab. 1 Survey of investigated tributaries

行政区	支流名称	流域面积 (km^2)	年均流量 (m^3/s)	河流全长 (km)
丰都县	龙河	2732	55.8	159
云阳县	澎溪河	5225	110	183
	汤溪河	1707	55.1	104
	磨刀溪	3092	57.5	191
巫山县	大宁河	4199	129	165

1 材料与方法

1.1 样品采集方法

2006 年对三峡水库重庆段流域面积 >1000km^2,年均流量 >50m^3/s 且河道全长 >100km 的 5 条支流(表 1)分别进行 3 次采样分析,根据三峡库区多年支流流量统计,以 2006 年 3 月代表枯水期,2006 年 5 月代表平水期,2006 年 8 月代表丰水期.在各支流设置 2 个采样断面(支流入库断面、库湾回水区断面),按水样采集规范[8],根据不同支流的宽度,各断面分别设置 1 - 3 个采样点,采集 0.5m 以上表层水.同一断面超过 1 个采样点时,取平均值代表断面平均水质状况.

1.2 样品分析方法

水质理化监测项目为化学需氧量(COD)、总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)、高锰酸盐指数、叶绿素 a(Chl. a)、pH、溶解氧(DO)、电导率、透明度(SD)、水温等 11 项.pH 采用玻璃电极法;DO 采用碘量法;水温采用水温度计法;电导率采用电导仪法;Chl. a 采用丙酮萃取分光光度法;高锰酸盐指数采用 GB11892 - 89 规定的方法;TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法;TP 采用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法;COD 采用重铬酸钾法;NH_4^+-N 采用纳氏试剂比色法[14].为了控制测定的准确性,在 COD、高锰酸盐指数、TN、TP、NH_4^+-N 分析时,每测定 10 个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 <10%.

2 结果与讨论

2.1 基本物理化学参数特征

支流水温各季节均 >10℃,其中 5 月水温处于适宜藻类生长的水温范围,不同季节间水温有显著差异,同一季节支流水温差异不大;pH 范围在 7.32 - 8.39,为中偏弱碱性水体.大宁河位于巫山县境内,为典型的喀斯特地貌区,水体全年 pH 值较高,均值达到 8.26,与其它支流比较呈显著差异;DO 含量范围在 6.00 -

9.50mg/L，在正常值范围内，DO 饱和率 54.5% －104% ；电导率 200 －648μS/cm，不同季节、不同支流变化较大；SD 0.8 －5.0m，不同季节各支流有显著差异，其中大宁河流域为山区，受人为影响较小、植被覆盖率高，SD 显著高于其它支流. SD 主要受水体中浮游藻类和悬浮物含量影响，三峡库区是我国水土流失严重地区之一，一般水体 SD 受悬浮物影响更大. 由于 2006 年夏季，重庆市遭遇连晴高温，降雨与常年比较严重偏少，导致各支流丰水期 SD 不低于其它季节.

表 2 支流物理化学参数

Tab. 2 Physical and chemical parameters of tributaries

支流名称	水温(℃)			pH			DO(mg/L)			电导率(μS/cm)			SD(m)		
	3 月	5 月	8 月	3 月	5 月	8 月	3 月	5 月	8 月	3 月	5 月	8 月	3 月	5 月	8 月
龙河	11.0	21.0	26.0	7.73	7.32	7.38	6.00	7.30	7.30	200	267	198	1.8	0.6	1.2
澎溪河	11.0	21.0	26.5	7.58	7.72	7.70	6.11	6.97	6.57	436	465	631	0.8	1.0	0.5
汤溪河	10.0	21.5	26.5	7.56	7.90	7.66	6.96	6.34	6.71	365	568	648	0.8	1.2	0.8
磨刀溪	10.0	21.5	24.5	7.40	7.62	7.54	6.25	6.48	6.75	374	423	549	0.8	1.1	1.0
大宁河	13.0	23.0	25.0	8.25	8.39	8.15	9.50	8.89	8.21	386	337	312	2.3	5.0	1.2

2.2 有机物变化特征

高锰酸盐指数作为有机污染的指标，当其超过 4mg/L 时，表示水体已受到有机污染[15]，调查的 5 条支流高锰酸盐指数含量均远低于 4mg/L，优于地表水Ⅱ类标准(GB3838 －2002). 支流上游区、回水区高锰酸盐指数范围分别在 1.00 －2.50mg/L、1.06 －2.50mg/L. 支流上游区、回水区 COD_{Cr} 范围分别为 6.00 －26.5mg/L、6.10 －24.6mg/L，除澎溪河 5 月仅达到地表水Ⅲ类标准外，其它河流均优于Ⅰ类标准(图 1). 各季节上游区与回水区有机物含量差异不大，调查支流目前未受到有机物污染影响.

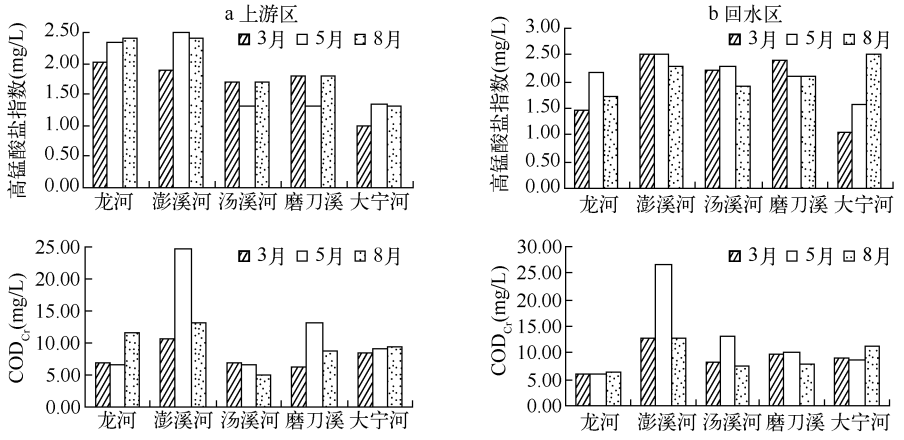


图 1 支流上游区(a)和回水区(b)有机物含量

Fig. 1 Concentration of organic contamination in upstream(a) and backwater area(b) of tributaries

2.3 N、P 变化特征

上游区、回水区 NH_4^+-N 范围分别为 0.047 －0.367mg/L、0.039 －0.317mg/L，优于地表水Ⅱ类标准(GB3838 －2002)，其中大宁河上游含量最低，各支流含量均为丰水期最大；TN 含量较高，上游区、回水区范围在 0.58 －1.63mg/L、0.84 －1.67mg/L，仅达到地表水Ⅲ－Ⅴ类标准；TP 范围分别在 0.005 －0.117mg/L、0.028 －0.133mg/L(图 2)，达到地表水Ⅰ－Ⅲ类标准，除大宁河上游含量各季节低于 0.02mg/L 外，大宁河回水区以及其余支流均远大于 0.02mg/L. TP 含量在各支流上游区均为丰水期最大，与雨季水土流失导致水体中 TP 含量增高有关. 一般认为，当水体中 TN、TP 含量分别达到 0.20、0.02mg/L 以上时，水体存在发生富营养化的风险，调查支流回水区水体的 TN 和 TP 含量均远高于限制值，表明支流回水区 N、P 浓度条件适宜藻

类生长. N/P 比值对藻类的暴发性生长具有重要作用,当水体中 N/P < 7,氮将限制藻类的生长,N/P 在 8 - 30 为适应藻类生长范围,N/P > 30,P 将成为藻类生长的限制因子[16]. 支流上游区、回水区 N/P 范围分别在 8.5 - 154、8.4 - 51,支流回水区除大宁河丰水期 N/P > 30 外,其它支流均在适应藻类生长范围内. 上游区大宁河各季节 N/P > 30,表明大宁河上游区藻类生长可能主要受 P 限制,其它支流上游区 N/P 均在适应藻类生长范围内.

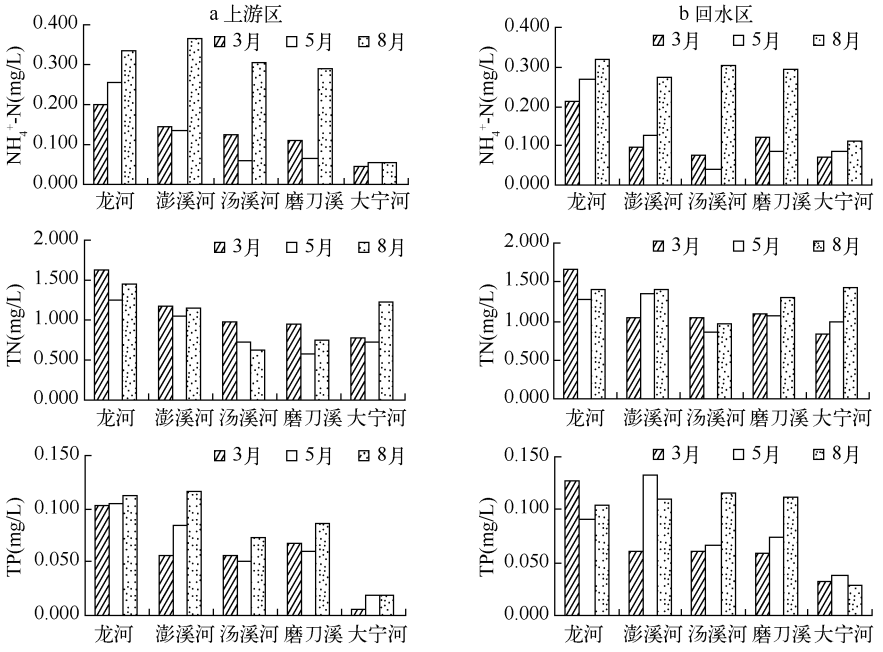


图 2 支流上游区(a)和回水区(b)N、P 含量

Fig. 2 Concentration of N and P in upstream(a) and backwater area(b) of tributaries

2.4 Chl. a 变化特征

浮游植物色素的测定可作为生物量的重要指标,从 Chl. a 含量的测定确定藻类生物量的大小,Chl. a 含量是水体中浮游植物生物量的综合指标,代表富营养化程度. Chl. a 浓度在上游区和回水区范围分别为 0.94 - 4.35mg/m^3,2.49 - 28.9mg/m^3,各支流回水区 Chl. a 浓度均为 5 月最大,可能与水温有关. 适宜于浮游藻类生长的水温条件一般为 15 - 25℃,3 月、8 月 Chl. a 值较低可能与水温超过适宜藻类生长温度有关. 根据 OECD 富营养化单因子(Chl. a)评价标准(Chl. a < 3mg/m^3 为贫营养;Chl. a 3 - 11mg/m^3 为中营养;Chl. a 11 - 78mg/m^3 为富营养;Chl. a > 78mg/m^3 为严重富营养)[17],澎溪河、汤溪河、磨刀溪的回水区 Chl. a 值 5 月达到富营养化水平,其它河流上游区、回水区 Chl. a 值均处于贫-中营养水平. 龙河上游区与回水区 Chl. a 含

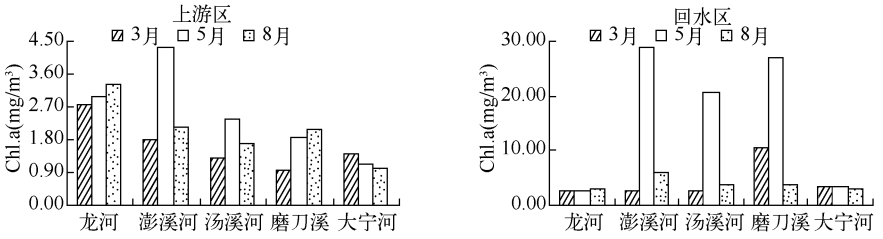


图 3 支流 Chl. a 含量变化

Fig. 3 Concentration of Chl. a in tributaries

量均较低，无显著差异. 其它河流上游区、回水区 Chl. a 含量有显著差异.

2.5 营养状态评价

选用修正的 Carlson 营养状态指数(Trophic State Index, TSI_M)法，评价支流上游区、回水区营养状态，评价指标为 Chl. a、TP、SD、TN、COD 5 项，其计算公式为[18]：

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

$$TSI_M(\text{Chl. a}) = 10 \times (2.46 + \ln(Chl.\ a)/\ln 2.5);$$

$$TSI_M(\text{TP}) = 10 \times (2.46 + (6.71 + 1.15 \times \ln(TP))/\ln 2.5);$$

$$TSI_M(\text{SD}) = 10 \times (2.46 + (3.69 - 1.53 \times \ln(SD))/\ln 2.5);$$

$$TSI_M(\text{TN}) = 10 \times (2.46 + (3.93 + 1.35 \times \ln(TN))/\ln 2.5);$$

$$TSI_M(\text{COD}) = 10 \times (2.46 + (1.50 + 1.36 \times \ln(SD))/\ln 2.5)$$

5 项指标相对重要性为 Chl. a > SD > TP > TN > COD，相应权重为 W = (0.455, 0.251, 0.154, 0.086, 0.054). 评价标准为 TSI_M <37 为贫营养，37 < TSI_M <53 为中营养，TSI_M >53 为富营养. 不同季节支流回水区营养状态评价结果见图 4. 上游区、回水区 TSI_M 指数范围分别在 36.0 - 53.5、42.9 - 64.2，上游区除龙河、澎溪河 5 月达到富营养水平外，其余支流均为贫-中营养水平. 回水区各支流均达到中-富营养水平，其中澎溪河、汤溪河和磨刀溪在不同月份达到富营养水平. 总体上，修正的 Carlson 营养状态指数评价结果都表明，支流回水区营养状态指数均高于上游区，但各支流增加幅度不同. 支流回水区水体营养程度的加重明显受三峡水库蓄水水体流速减缓的影响.

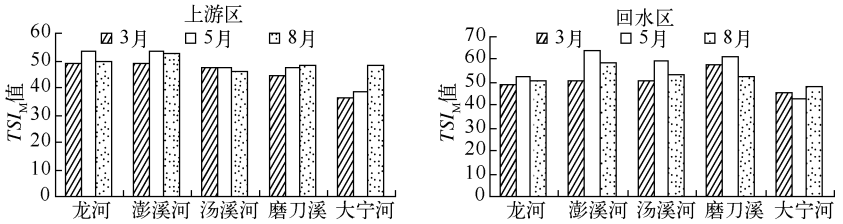


图 4 支流 TSI_M 值

Fig. 4 Value of TSI_M in tributaries

3 讨论

3.1 营养因子关系

Chl. a 与营养因子的关系较复杂，一般在湖泊、水库等相对静水条件下，Chl. a 与 SD 呈负相关，与部分营养盐呈正相关[19-21]. 但对具一定流速水体如河流而言，这种线性关系不一定明显. 支流回水区水体比天然河流状态流速有不同程度下降，但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尽相同. 三峡水库支流回水区营养因子间相关关系见表 3. Chl. a 与 COD、高锰酸盐指数、TP 呈正相关，其中仅与 COD(n = 15, P <0.01)呈极显著正相关；Chl. a 与 NH_4^+-N、TN、SD 呈负相关，但相关关系均不显著. Chl. a 与 SD 的相关关系表明回水区 SD 受水体中浮游藻类和悬浮物双重影响，与该区域复杂的水环境条件有关；有机物高锰酸盐指数与 COD 呈显著正相关(n = 15, P <0.05)，表明水体中有机污染物可能有相同来源. NH_4^+-N、TN 与 TP 呈显著正相关(n = 15, P <0.05)，表明水体中 N、P 可能有相同来源.

3.2 支流富营养化趋势

富营养化发生所需的必要条件基本上是一样的，最主要影响因素有 3 个方面[22-23]：总磷、总氮等营养盐相对比较充足；缓慢的水流流态(流速、水深等)；适宜的气象条件(水温、光照等). 只有在 3 方面条件都比较适宜的情况下，才会出现某种优势藻类“疯”长现象，暴发富营养化. 对三峡水库支流而言，水体营养盐含量

表3 营养因子间相关关系

Tab. 3 Correlation coefficients among trophic factors

营养因子	高锰酸盐指数	NH_4^+-N	COD	TN	TP	SD	Chl. a
高锰酸盐指数	1						
NH_4^+-N	-0.09626	1					
COD	0.504728	-0.33945	1				
TN	0.106365	0.547721	0.004109	1			
TP	0.060122	0.703996	0.176567	0.55969	1		
SD	-0.58012	-0.32724	-0.13526	-0.22807	-0.4013	1	
Chl. a	0.355685	-0.37996	0.70139	-0.15061	0.187572	-0.15508	1

均能满足发生富营养化的条件;一般在2月,三峡库区水温达到10℃左右,达到藻类生长的温度范围内. 以乌江为例,多次发生水体藻类暴发性生长的时期为2月,表明水温较低的月份也能导致富营养化的发生[24]. 2009年三峡工程蓄水175m,随着水位抬高,过水面积增大,三峡水库干流流速迅速减小,枯水期库区江段平均流速为0.17m/s,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0.04m/s,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,可能对干流水体生态系统产生巨大影响. 对部分支流,由于水位的抬高,支流回水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60km;乌江从武隆至入库汇流口,全长约68km. 澎溪河开县段枯水期平均流速由建库前的0.65m/s,降低为0.006m/s,而且岸边流速更小,可能基本静止,接近湖泊型水库的流速[25],库区支流回水区的水文条件将与水库相似,即具备诱发富营养化的形态要素条件. 三峡水库蓄水175m,将可能增加部分区域干流水体特别是支流回水区发生富营养化的风险.

富营养化的发生、发展是由于水体整个环境系统出现失衡,导致某种优势藻类大量繁殖、生长的过程. 对于不同的水域,由于区域地理特性、自然气候条件、水生生态系统和污染特性等诸多差异,会出现不同的富营养化表现症状,也即出现不同的优势藻类种群[26]. 本研究对三峡库区5条典型支流的调查也表明,各支流营养水平、富营养化程度均有差异. 其它研究也表明,同一支流回水区在不同时间富营养化程度以及水体中优势藻类也有较大差别. 因此,在对三峡水库回水区富营养化研究中,有必要在典型支流开展水域生态系统动态的长期观测,从气象、水文、化学、生物、生态等多学科综合角度,研究水体富营养化形成的机理. 同时对其它支流回水区进行不定期的调查,以进一步了解支流回水区富营养化影响程度及趋势.

4 结论

调查的三峡水库支流目前未受到有机物污染影响,高锰酸盐指数优于地表水Ⅱ类标准,COD除澎溪河5月仅达到地表水Ⅲ类标准外,其它河流均优于Ⅰ类标准. 有机物各季节上游区与回水区含量差异不大. NH_4^+-N优于地表水Ⅱ类标准,各支流含量均为丰水期最大. 支流回水区N、P浓度适宜藻类生长,TN含量较高,仅达到地表水Ⅲ-Ⅴ类标准. TP达到地表水Ⅰ-Ⅲ类标准,调查支流回水区水体的TN和TP含量均远高于水体发生富营养化的限制值,存在发生富营养化的风险. 回水区N/P比值基本在适宜藻类生长范围内. 各支流回水区Chl. a浓度均为5月最大,龙河上游区与回水区Chl. a浓度均较低,无显著差异. 其它河流回水区Chl. a浓度高于上游区且有显著差异. 对支流营养状态评价结果表明,支流回水区营养状态指数均高于上游区,但各支流增加幅度不同. 支流回水区水体营养程度的加重明显受三峡水库蓄水水体流速减缓的影响. Chl. a仅与COD呈极显著正相关,与NH_4^+-N等其它营养因子相关关系均不显著. 三峡水库蓄水175m后,可能增加部分区域干流水体特别是支流回水区发生富营养化的风险.

5 参考文献

[1] 长江水利委员会. 三峡工程生态环境影响研究. 湖北:湖北科学技术出版社,1997:32-33.

[2] 方子云. 长江流域水环境的主要问题、原因及对策. 长江流域资源与环境,1997,6(4):346-349.

[3] 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.

[4] 胡征宇，蔡庆华. 三峡水库蓄水前后水生生态系统动态的初步研究. 水生生态学报，2006，**30**(1)：1-6.
[5] 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. 环境科学，2006，**27**(6)：19-24.
[6] 张　晟，刘景红，张全宁等. 三峡水库成库初期氮、磷分布特征. 水土保持学报，2005，**19**(4)：123-126.
[7] 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. 湖泊科学，2007，**19**(1)：70-76.
[8] 曹　明，蔡庆华，刘瑞秋等. 三峡水库库首初期蓄水前后理化因子的比较研究. 水生生物学报，2006，**30**(1)：12-19.
[9] 韩新芹，叶　麟，徐耀阳等. 香溪河库湾春季叶绿素 a 浓度动态及其影响因子分析. 水生生物学报，2006，**30**(1)：89-94.
[10] 张　晟，郑　坚，刘婷婷等. 三峡水库入库支流水体中营养盐季节变化及输出. 环境科学，2009，**30**(1)：58-63.
[11] 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.
[12] 张　晟，李崇明，付永川等. 三峡水库成库后支流库湾营养状态及营养盐输出. 环境科学，2008，**29**(1)：7-12.
[13] Melanie C, Franz S, Christoph DM. Effects of increased flow in the main stem of the River Rhine on the invertebrate communities of its tributaries. *Freshwater Biology*，2005，**50**(1)：10-26.
[14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第 4 版). 北京：中国环境科学出版社，2002：123-165.
[15] 刘建康. 东湖生态学研究(二). 北京：科学出版社，1995：63-226.
[16] 彭近新，陈慧君. 水质富营养化与防治. 北京：中国环境出版社，1988：15-47.
[17] Organization for Economic Cooperation and Development. Eutrophication of waters monitoring, assessment and control. OECD. Paris：OECD，1982.
[18] 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] Jones JR, Knowlton MF. Limnology of Missouri reservoirs：an analysis of regional patterns. *Lake and Reservoir Management*，1989，**8**：17-30.
[20] Erwin E, van Nieuwenhuyse, Jones JR. Phosphorus-chlorophyll relationship in temperate streams and its variation with stream catchment area. *Can J Fish Aquat Sci*, 1996，**53**：29-36.
[21] 林秋奇，胡　韧，段舜山等. 广东省大中型水库营养现状及浮游生物的响应. 生态学报，2003，**23**(6)：1101-1108.
[22] 叶　闽，洪一平，彭盛华. 三峡水库水体富营养化的潜势研究. 见：黄真理编. 中国环境水力学 2002. 北京：中国水利水电出版社，2002：26-30.
[23] 李锦秀，廖文根. 三峡库区富营养化预测方法探讨. 见：黄真理编. 中国环境水力学 2002. 北京：中国水利水电出版社，2002：37-42.
[24] 张　晟，李崇明，王毓丹等. 乌江水污染调查. 中国环境监测，2003，**19**(1)：23-26.
[25] 黄真理，李玉梁，李锦秀等. 三峡水库水环境容量计算. 水利学报，2004，**3**：7-14.
[26] 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.