

三峡水库主要入库河流磷营养盐特征及其来源分析

曹承进^{1,2}, 秦延文¹, 郑丙辉^{1*}, 黄民生²

(1. 中国环境科学研究院 河流与海岸带环境研究室, 北京 100012; 2. 华东师范大学资源与环境科学学院, 上海 200062)

摘要:以 2004~2005 年的三峡水库 3 条主要入库河流(长江、嘉陵江、乌江)中的水文、水质的调查参数为依据,研究了三峡水库入库河流中主要的水文变化特征、磷营养盐的季节性分布规律、形态组成及富营养化状态。结果表明,3 条入库河流的流量、悬浮物呈现明显的季节性变化,丰水期的悬浮物含量明显高于枯水期。3 条入库河流总磷的平均值在 0.12~0.29 mg/L 之间,均远远高于 20 世纪 70 年代的总磷含量,长江朱沱断面水体的磷含量高于嘉陵江北碛断面和乌江武隆断面的磷含量。总磷含量(TP)中以总颗粒态磷酸盐(TPP)为主,平均占 75% 以上;3 个监测断面中流量、悬浮物与 TP、TPP 均呈显著正相关性,TPP 和 TP 也呈显著正相关性。结果表明泥沙将颗粒态磷带入河流是主要的磷污染源,总磷的污染受面源污染影响较大。氮和磷都不是三峡水库入库河流中浮游植物的限制因子,3 条入库河流中的 N/P 值较高(>30),表明磷有可能被优先消耗到低值。

关键词:三峡水库入库河流;磷营养盐;分布特征;污染源

中图分类号:X824 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2008)02-0310-06

Analysis of Phosphorus Distribution Characters and Their Sources of the Major Input Rivers of Three Gorges Reservoir

CAO Cheng-jin^{1,2}, QIN Yan-wen¹, ZHENG Bing-hui¹, HUANG Min-sheng²

(1. River and Coastal Environment Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Resource and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: The seasonal characters of the water flux and suspended substance, phosphorus in the water of input rivers of Three Gorges Reservoir (TGR) were discussed, and the their distributions among three major input rivers (Changjiang river, Jialingjiang river and Wujiang river) were studied, according to the survey conducted from Jan. 2004 to Dec. 2005. The results indicate that those parameters' seasonal changes are obvious. The flux and suspended substance in abundant water period are more higher than them in low water period, which displays suspended substance origins from bedload and that the water and soil severely lose in drainage areas of three input rivers. In the three monitor sections of input rivers of TGR, the average contents per year of total phosphorus are about 0.12~0.29 mg/L, which exceeds the 1970s level of the three input rivers. Most of total phosphate is total solid phosphate (TPP) exceeding 75% of them. TP and TPP have both distinct positive correlation with the flux and suspended substance in water of input rivers of TGR, and TPP and TP have also the same correlation, which means that phosphate pollution in the input rivers of TGR comes from bedload. The nonpoint source pollution has had far-reaching influence upon phosphate pollution. Nitrogen and phosphate are not the major limiting factor of the nutritious salts in the input rivers of TGR. The rate of between nitrogen and phosphate (N/P) is in higher level (above 30), that is phosphate first will reach lower level and maybe become the limiting factor of the nutritious salts in the input rivers of TGR.

Key words: input rivers of Three Gorges Reservoir; phosphorus; distribution features; pollution source

三峡水库形成之后对库区水质的影响,尤其是水库形成之后的富营养化问题是目前环境工作者关注的焦点^[1~7]。已有学者对成库之后氮、磷等营养盐浓度、污染负荷以及富营养化趋势等开展了一系列相关研究。张远等^[4~6]对三峡水库二期蓄水之后水体氮、磷营养盐的分布特征的研究结果表明,由于三峡水库是一个河道型水库,蓄水后磷是三峡水库生态系统生产力的限制性因素。张恩仁等^[7]研究了三峡水库对长江中氮、磷营养盐的截留效果及对水库水体 N/P 比值的影响。然而,三峡水库水体的富营养化状态,与 3 条主要入库河流(长江、嘉陵江、乌江)氮、磷营养盐的输入息息相关,因此,上游入库河流水体中氮、磷的分布和组成会对整个库区的水质和

富营养化过程及结果产生重大影响。

入库河流水体中磷的含量和组成对整个库区磷含量和组成有何影响,入库河流的氮、磷营养盐结构组成对库区水体富营养化状态有何影响? 这些问题都是进一步研究三峡库区水环境演变过程与趋势的基础。为此,本研究拟在三峡水库主要入库河流水质现状调查的基础上,对三峡水库主要入库河流中磷营养盐的形态组成、分布规律以及磷含量对富营养化存在的潜在影响进行了分析。

收稿日期:2007-03-21;修订日期:2007-07-03

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002B412409)

作者简介:曹承进(1980~),男,博士研究生,主要研究方向为环境修复技术、河流水污染防治。

* 通讯联系人, E-mail: zhengbh@caes.org.cn

1 材料与方法

1.1 调查范围

根据三峡水库回水情况和水文水质监测断面的布设, 分别设置 3 个采样监测断面, 长江入库断面: 黄谦(朱沱水文站, 距朝天门河道 54 km); 嘉陵江入库断面: 北碚水文站(距朝天门河道 62 km); 乌江入库断面: 武隆水文站(距乌江河道 71 km). 每个采样断面分左、中、右 3 点, 所有采样点分为表、中、底 3 层. 调查时间为 2004-01-05 ~ 2005-12-06, 每月采样监测 1 次, 连续监测 24 个月. 采样点位详见文献[8].

1.2 分析方法

水样采集后立即用 0.45 μm 微孔滤膜过滤, 并加 H_2SO_4 (1 mol/L) 酸化保存. 同时分析测定过滤水样以及未过滤水样中的氮、磷等生源要素. 其中, 活性磷酸盐采用磷钼蓝比色法测定, 总磷(TP)采用过硫酸钾氧化-磷钼蓝光度法, 硫酸钾氧化-磷钼蓝光度法测定的过滤水样 TP 含量即为总溶解态磷(TDP)含量, 具体分析测试方法参见文献[9]. 水动力学参数采用多普勒河流流量测量系统(ADCP)测定, 项目包括断面流量、流速、宽度、水深等.

2 结果与讨论

2.1 入库河流的主要水文特征

2.1.1 流量

分析 2004 ~ 2005 年三峡水库主要入库河流流量的数据(图 1, 月均值)可以看出, 3 条主要的入库河流流量监测结果呈现非常规律的季节性变化. 每年 6 ~ 11 月份流量明显变大, 最大值都出现在此范围内. 并且 3 条河流的年平均流量、枯水期流量、丰水期流量 2 a 内基本持平(表 1). 另外, 长江朱沱站流量显著高于同期的嘉陵江北碚站和乌江武隆站的流量. 这可能与 3 条河流流域的地理位置有关, 乌江流域多为高原山区气候影响区, 而长江和嘉陵江流经陕西、甘肃、四川、重庆等省市, 相比较而言高原山区气候下降雨的季节性变化不太明显, 相反每年 5 ~ 11 月份则是四川、重庆等地的多雨季节, 降雨丰

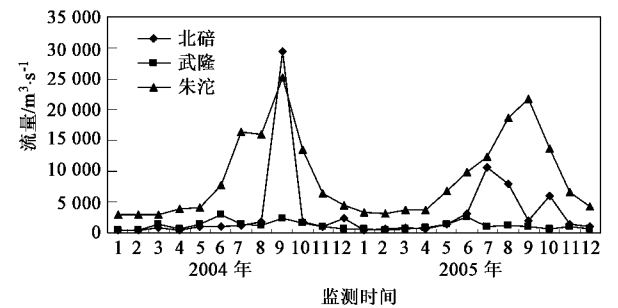


图 1 2004 ~ 2005 年三峡水库入库河流流量月变化
Fig.1 Water flux distribution per month of input rivers of TGR (2004 ~ 2005)

表 1 2004 ~ 2005 年三峡水库入库河流流量和悬浮物的变化

Table 1 Distribution of flux and suspended substance in water of input rivers of TGR (2004 ~ 2005)

监测断面	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$				悬浮物/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$			
	流量范围	枯水期	丰水期	平均值	悬浮物范围	枯水期	丰水期	平均值
朱沱	2 840 ~ 25 100	3 973	13 793	8 883	20.9 ~ 1 068.7	115.2	462.6	298.6
北碚	351 ~ 29 500	814	5 591	3 202	7.3 ~ 1 633.3	17.0	247.9	132.4
武隆	304 ~ 2 800	632	1 481	1 056	10.4 ~ 427.5	59.4	104.7	82.0

富, 河流流量增加明显.

2.1.2 悬浮物

图 2 是三峡水库主要入库河流 2004 ~ 2005 年悬浮物含量逐月变化情况. 对比流量与悬浮物含量的关系(图 1、2)可以看出, 悬浮物含量与流量关系密切, 呈高度正相关关系($r > 0.8$). 每年的 5 ~ 11 月份是 3 条河流中悬浮物含量变化最为明显的时期, 丰水期悬浮物含量均明显高于枯水期, 这表明入库河流的悬浮物质主要来自流域水土流失, 以泥沙为主. 因此, 3 条入库河流悬浮物含量随着河流流量、流速呈现季节性变化趋势.

同时, 对比 3 条入库河流的悬浮物含量的变化趋势, 可以发现长江 > 嘉陵江 > 乌江. 这可能与流域

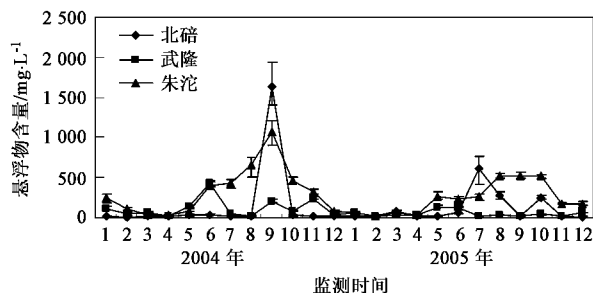
的地质条件有关. 长江流域土壤主要以紫色砂页岩为主, 成土过程快, 质地松软, 易于风化、流失和崩塌, 加上地形陡、降雨强度大, 水土流失严重^[10], 再加之长江朱沱站监测断面的流量、流速较大, 因此其悬浮物含量比嘉陵江和乌江断面要高.

2.2 主要入库河流磷营养盐含量变化

2.2.1 总磷(TP)

图 3 是 2004 ~ 2005 年三峡水库入库河流总磷含量月变化情况. 3 条入库河流中 TP 含量在 0.04 ~ 0.7 mg/L 之间. 其中, 长江朱沱断面的 TP 含量在 0.08 ~ 0.67 mg/L 之间, 平均值为 0.29 mg/L; 嘉陵江北碚断面的 TP 含量在 0.03 ~ 0.70 mg/L 之间, 平均为 0.13 mg/L; 乌江武隆断面的 TP 含量范围为 0.05

~0.34 mg/L, 平均 0.12 mg/L. 3 条入库河流 TP 含量均呈现一定的季节性变化特征, 即丰水期含量要高于枯水期, TP 最高值均出现在每年的 7~9 月份, 这表明 3 条入库河流磷营养盐主要来自于农业面源污染.



“ I ”线表示每个断面 9 个数据的误差线, 以最大值和平均值的差作上线, 最小值和平均值的差作下线(每个采样断面分左、中、右 3 点, 所有采样点分为表、中、底 3 层, 共 9 个数据), 下同

图 2 2004~2005 年三峡水库入库河流悬浮物(SS)含量月变化

Fig.2 Distribution of suspended particles in water per month of input rivers of TGR (2004~2005)

3 条河流中长江朱沱断面总磷近 2 a 的平均浓度最高, 嘉陵江北碚断面和乌江武隆断面总磷的平均值相差不大. 水体中的总磷的含量均远远高于发生藻类疯长时的临界值(0.02 mg/L)^[11]. 比较 3 条河流中氮营养盐的含量(1.55~2.15 mg/L), 可以看出 3 条入库河流中 N、P 营养盐浓度总体已经偏高, 意味着在适宜的水体和自然条件(水温、光照、流速、透明度)下, 藻类可能会快速繁殖与生长, 甚至造成水华的暴发. 有报道^[6,12], 近年来, 长江流域的一级支流乌江局部江段多次发生水华, 主要集中于 3 月份枯水季节. 乌江自 1994 年以来几乎每年 3 月份均发生水华, 流速减缓、径污比减少是主要原因.

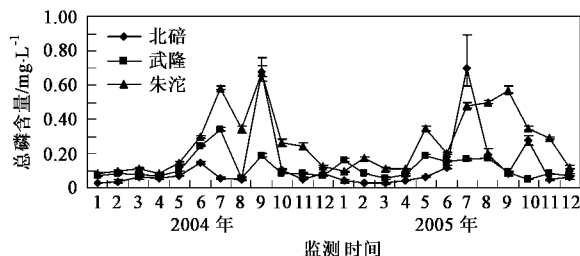


图 3 2004~2005 年三峡水库入库河流总磷含量月变化

Fig.3 Distribution of TP in water per month of input rivers of TGR (2004~2005)

2.2.2 磷的形态组成

经过 0.45 μm 微孔滤膜过滤后水样测定的总磷

含量可以认为是总溶解态磷酸盐(TDP)的含量, 而未过滤水样测定的 TP 浓度减去 TDP 后得到总颗粒态磷酸盐(TPP)浓度. 3 条入库河流总磷含量(TP)中以总颗粒态磷酸盐(TPP)为主, 平均占 75% 以上.

由于藻类生长和 TDP 密切相关, 因此有必要对 TDP 作进一步的分析, 图 4 是 2004~2005 年三峡水库 3 条入库河流 TDP 在 TP 中所占百分比例(TDP/TP)的变化趋势. 从图 4 中可以看出, 三峡水库 3 条入库河流 TDP 在 TP 中所占百分比例变化幅度很大, 从 0 变化到 78%, 而且 TDP/TP 的变化还呈现出一定的季节性规律. 嘉陵江北碚断面 TDP/TP 在 3~6 月份呈现高值之后, 7~10 月份呈下降趋势, 10 月份之后又出现较大反弹; 而其余 2 个断面(长江朱沱和乌江武隆)TDP/TP 高值出现在 4 月份, 4 月份之后均呈较大幅度的下降. 因此, 三峡水库 3 条入库河流 TDP/TP 的季节性变化规律的共同点是: TDP/TP 高值均出现在 4 月份(枯水期), 低值出现在 9 月份(丰水期). 出现这种现象的主要原因是泥沙将颗粒态磷带入河流是主要的磷污染源. 另外, TDP 的比例较小也可能是由于发育的水生态系统使得更多的溶解态磷转化为悬浮态磷造成的^[7,13]. 丰水期, 随着径流量的加大, 河流中的颗粒态磷所占比例将加大, 因此可溶态磷所占比例反而减少.

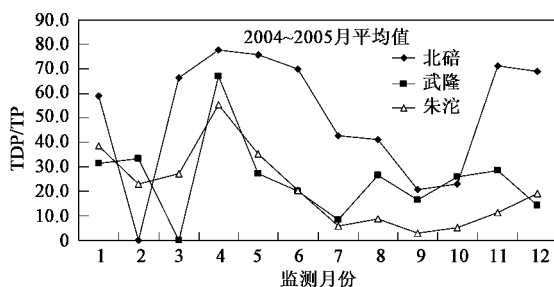


图 4 2004~2005 年三峡水库入库河流 TDP/TP 变化趋势(月平均值)

Fig.4 Changing trend of TDP/TP in water per month of input rivers of TGR (2004~2005)

颗粒态磷是三峡水库入库河流水体中磷污染存在的最主要形态, 一般不能被植物体直接利用, 但是作为水体的磷储备. 有机磷在微生物的作用下, 可通过矿化作用转化为无机磷. 无机磷可以以不溶性和可溶性磷酸盐 2 种形式存在; 不溶性磷酸盐在某些产酸微生物的作用下转化成可溶性磷酸盐; 后者同某些盐基化合物结合, 转化成不溶性的钙盐、镁盐、铁盐等, 从而构成了磷在入库河流中的循环^[13,14].

2.3 入库河流水文与水质因子的相关性分析

为了考察入库河流断面水质状况和磷营养盐之 间的关系,对监测数据中的流量、流速、悬浮物和总磷进行相关性分析^[15],相关系数见表 2.

表 2 三峡水库主要入库河流水文与水质的相关系数分析¹⁾
Table 2 Correlation analysis about hydrologic and water quality parameters of input rivers of TGR (average values per month)

项目	流量	悬浮物	总磷	TPP
流量	1.000			
悬浮物	0.906/0.991/0.695 ²⁾	1.000		
总磷	0.927/0.870/0.590	0.818/0.877/0.382	1.000	
TPP	0.929/0.874/0.555	0.824/0.885/0.328	0.997/0.992/0.982	1.000

1) $\alpha = 0.01$, $n = 24$, SPSS11.0 统计软件所作; 2) 第 1 排数据为朱沱断面分析结果,第 2 排为北碚断面分析结果,第 3 排为武隆断面分析结果

分析结果表明,入库河流断面中的流量与悬浮物具有显著正相关性($r > 0.69$),说明流量越大,河水越浑浊,这可能与水土流失和河床的冲刷等有关,长江和嘉陵江的水土流失较为严重^[1].3 个监测断面中流量、悬浮物与 TP、TPP 均呈显著正相关性;而 3 个断面中的 TPP 和 TP 也呈高度正相关性($r > 0.9$),对照清样中 TP 含量分析可知:3 条河流中的 TP 主要以悬浮态的磷为主,SS 越高,则 TP 越高,而朱沱断面和北碚断面更甚.雨季(丰水期)TPP 与流量、流速有良好的正相关性,说明泥沙将颗粒态磷带入河流是主要的磷污染源.磷矿开采、加工是三江流域中的支柱产业之一,水体中的磷素的积累作用远大于稀释作用,除水文因素和藻类代谢作用外,沿岸磷矿开采、加工以及磷肥厂含磷废水的排放可能是主要原因,沿岸堆放的垃圾淋溶、浸泡导致污染^[16,17].

2.4 营养盐结构(N/P 比值)变化

营养盐结构常常以 N/P 比值来表示,这是表征水环境营养盐结构的重要指标之一^[18-20].由于水体中可被生物利用的氮多为无机氮,以溶解态无机氮 DIN 为主;而水体中可被生物利用的磷多为溶解态无机磷,主要以正磷酸盐形式存在,可能包含少量无机聚磷酸盐,三峡水库入库河流水体中的有机磷含量较少,本研究以总溶解态磷(TDP)代替溶解态无机磷(DIP)进行讨论,N/P 值为 DIN/TDP. Justic 等^[21-23]在研究河口海洋营养盐与浮游植物的关系时,提出营养盐浓度的绝对限制和相对限制法则,即限制浮游植物生长的营养盐只有 1 种.限制浮游植物生长的营养盐浓度阈值为:可溶性 $\text{SiO}_2 = 2 \mu\text{mol/L}$, $\text{DIN} = 1 \mu\text{mol/L}$, $\text{P} = 0.1 \mu\text{mol/L}$,这称为营养盐浓度的绝对限制法则.另外,当水体中 $\text{Si}:\text{P} > 22$ 和 $\text{N}:\text{P} > 22$ 时,P 为浮游植物营养盐的限制因子;当 $\text{N}:\text{P} < 10$ 和 $\text{Si}:\text{N} > 1$ 时,N 为限制因子;当 $\text{Si}:\text{P} < 10$

和 $\text{Si}:\text{N} < 1$,Si 为限制因子,这称为营养盐浓度的相对限制法则.如果每种营养盐的浓度都大于浮游植物生长的阈值,那么就不存在营养盐限制因子.如果某种营养盐的浓度低于浮游植物生长的阈值,那么这种营养盐就是唯一的限制因子.如果 2 种或 2 种以上的营养盐浓度低于浮游植物生长的阈值,那么就要通过相对限制法则来判断营养盐限制因子.

北碚、武隆、朱沱 3 个监测断面 2004 ~ 2005 年平均 DIN 值分别为 1.54 mg/L ($110 \mu\text{mol/L}$)、 2.13 mg/L ($152 \mu\text{mol/L}$)、 1.35 mg/L ($96 \mu\text{mol/L}$)^[8],而 3 个断面的 TDP 分别为: 0.04 mg/L ($1 \mu\text{mol/L}$)、 0.03 mg/L ($0.97 \mu\text{mol/L}$)、 0.03 mg/L ($0.97 \mu\text{mol/L}$),由于监测数据中缺少可溶态的 SiO_2 数据,此处只讨论氮磷的情况.按照 Justic 等提出的营养盐浓度的绝对限制和相对限制法则可知,DIN 和 TDP 的值远远高于阈值,两者均可满足三峡水库入库河流水域浮游植物的生长,N 和 P 都不是入库河流浮游植物生长的限制因子.此时的 N/P 值只是反映哪种营养盐将是首先被损耗到低值.表 3 是三峡水库入库河流的 N/P 值,分析可知,3 个监测断面中的 N/P 值均非常高,都在 30 以上,这表明如果出现藻类大量生长,水体中的 N 和 P 将会被大量消耗,P 营养盐将会优先被消耗到低值,有可能低于阈值,从而使 P 成为浮游植物的限制因子.另外,3 个监测断面 TP 含量主要受水力学特性和泥沙悬移质变化的影响,其中,大部分的 TP

表 3 三峡水库主要入库河流的 N/P 值

Table 3 N/P ratio of input rivers of TGR(2004 ~ 2005)

监测断面	N/P		
	枯水期	丰水期	年均
朱沱	44	34	39
北碚	45	34	38
武隆	81	83	82

是以颗粒态存在的,进入水库后随着流速逐渐减小,水体当中的颗粒态的磷逐渐沉降下来,以固态磷的形式贮存下来,当浮游植物生长时消耗掉大量的无机磷,沉积下来的固态磷又逐渐释放出来,形成一个磷平衡。

2.5 三峡水库入库河流中磷污染的来源

随着工农业生产的增长,人口的增加,含磷洗涤剂 and 农药、化肥的大量使用,近年来三峡水库入库河流的水体中磷污染日益加剧^[24~27]。造成三峡水库入库河流磷污染的污染源有点源和非点源 2 大类型。点源是指通过排放口或管道排放污染物的污染源,它的量可以直接测定或者定量化,包括:工业废水、城镇生活污水、固体废物处置场。非点源是指点源以外的污染源,主要包括由降雨产流过程,把地表和大气中溶解和固态的污染物带入湖泊水域而使湖泊遭受污染的所有污染源^[28,29],包括城镇地表径流、农业地表径流、林区地表径流、矿区地表径流、大气降雨降尘、水产养殖业和流动船舶。

由以上分析可知,入库河流水体中磷都是以颗粒态的磷为主,TP、TPP 和流量、悬浮物均成显著正相关性,3 个监测断面丰水期的磷含量明显高于枯水期,这说明磷污染主要来自水土流失,其受非点源污染影响大,因为工业污染源和生活污染源季节性变化较小,只有农田污染源和暴雨径流随流量和雨季的变化大。具体包括:农田径流、城市污水、工业废水流动污染源等^[30,31]。

(1) 农田径流 农田径流常将磷带入水体。由于农耕所用磷肥大多被土壤吸收,流失于水体的磷一般浓度较低,但是,随着三峡水库的蓄水,造成流域内的土壤侵蚀严重,水土流失严重,土壤中的磷大量转入水体。据统计,2004 年,三峡库区 19 个县、181 个乡镇化肥施用总量按纯量折算为 11.20 万 t,其中磷肥 2 057 t,农药折纯使用量为 649.66 t,其中有机磷 325.24 t^[24]。

(2) 城市污水 城市污水包括居民生活污水、公建、商业污水以及部分经下水道排放的工业废水。含磷化合物,含磷洗涤剂的大量使用是导致城市污水中磷浓度较高的原因之一。2004 年库区 26 个区(县)直排三江的城市污水 49 851.63 万 t,其中总磷 1 442.11 t,在城市污水中的等标污染负荷比为 47.1%。重庆主城区、万州区、涪陵区为主要排污区域^[24]。

(3) 工业废水 磷矿开采、加工是三江流域中的支柱产业之一。磷肥厂、农药厂、化工厂(炼磷、磷

酸)、机械厂(清洗剂)排放的废水中都含磷,动物屠宰场的污水中也含有较高浓度的磷,这些磷随废污水排入水体。

(4) 流动污染源 三峡水库入库河流的流动污染源是船舶,包括来自机舱废水、客轮上旅客产生的生活污水和生活垃圾以及船舶污染事故等。2004 年三峡库区注册船舶 9 300 多艘,产生油污水污染的共 6 079 艘。这也是入库河流磷污染源之一。

此外,还有自然界中含磷矿物质,经风化分解后通过雨淋随径流进入水体,或作为植物养料进入土壤为植物吸收,再经动物食用后排出,最后回到土壤或进入水体。紫色砂页岩是入库河流流域的主要成分,土壤富磷、贫氮,成土过程快,质地松软,易于风化、流失和崩塌,加上地形陡、降雨强度大,水土流失严重,这些都能造成磷污染。

3 结论

(1) 3 条主要的入库河流流量和悬浮物呈现非常规律的季节性变化。每年 5~11 月份流量和悬浮物明显变大。长江朱沱站流量和悬浮物显著高于同期的嘉陵江北碚站和乌江武隆站的流量。丰水期的悬浮物含量明显高于枯水期。入库河流的悬浮物质不是以浮游生物为主,而是以泥沙为主。泥沙的含量随流量、流速以及雨季呈现季节性变化。

(2) 3 条入库河流中总磷含量在 0.04~0.7 mg/L 之间,丰水期的总磷含量均明显高于枯水期;长江朱沱断面总磷的平均值最高(0.29 mg/L),嘉陵江北碚断面和乌江武隆断面较低(分别为 0.13 mg/L 和 0.12 mg/L),但均远远高于 20 世纪 70 年代的水平。

(3) 3 条入库河流总磷含量(TP)中以总颗粒态磷酸盐(TPP)为主,平均占 75% 以上,丰水期的 TPP 与流量、流速有良好的正相关性,泥沙将颗粒态磷带入河流是主要的磷污染源,总磷的污染受非点源污染影响较大。

(4) 3 条入库河流中的悬浮物与流量呈显著正相关性($r > 0.69$),流量越大,河水越浑浊;3 个监测断面中流量、悬浮物与 TP、TPP 均呈显著正相关性;3 个断面中的 TPP 和 TP 也呈显著正相关性($r > 0.9$);长江和嘉陵江的水土流失严重,水体中的磷素的积累作用远大于稀释作用。

(5) DIN 和 TDP 的值远远高于限制浮游植物生长的阈值,N 和 P 都不是入库河流浮游植物生长的限制因子;3 个监测断面中的 N/P 比值均非常高(> 30),P 营养盐有可能会优先被消耗到低值。

参考文献:

[1] 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[J].水生生物学报,2006,30(1):12-19.

[2] 刘永明,贾绍凤,蒋良维,等.三峡水库重庆段一级支流回水河段富营养化潜势研究[J].地理研究,2003,22(1):67-72.

[3] 叶闯,洪一平,彭盛华,等.三峡水库水体富营养化潜势分析[A].见:中国环境水力学[C].北京:中国水利水电出版社,2002.297-302.

[4] 张远,郑丙辉,刘鸿亮,等.三峡水库蓄水后氮、磷营养盐的特征分析[J].水资源保护,2005,21(6):23-26.

[5] 郑丙辉,张远,富国,等.三峡水库营养状态评价标准研究[J].环境科学学报,2006,26(6):1022-1030.

[6] 张远,郑丙辉,刘鸿亮.三峡水库蓄水后的浮游植物特征变化及影响因素[J].长江流域资源与环境,2006,15(2):254-258.

[7] 张恩仁,张经.三峡水库对长江 N、P 营养盐的截留效应的模型分析[J].湖泊科学,2003,15(1):41-48.

[8] 郑丙辉,曹承进,秦延文,等.三峡水库主要入库河流氮营养盐特征及其来源分析[J].环境科学,2008,29(1):1-6.

[9] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.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,2002.239-284.

[10] 刘光德,李其林,黄昀.三峡库区面源污染现状与对策研究[J].长江流域资源与环境,2003,12(5):462-466.

[11] Thomann R V, Mueller J A. Principle of surface water quality modeling and control[M]. New York: Haper & ROV, 1987.

[12] 李锦绣,廖文根.三峡库区富营养化主要诱发因子分析[J].科技导报,2003,(2):49-52.

[13] Tchobanoglous G, Burton F L, Stensel D H. Wastewater Engineering- I : Treatment and Reuse[M]. (4th ed). McGraw-Hill Inc, New York, 2003. 63-64.

[14] 徐亚同,史家梁,张明.污染控制微生物工程[M].北京:化学工业出版社,2001.93-96.

[15] 程子峰,徐富春.环境数据统计分析基础[M].北京:化学工业出版社,2006.77-97.

[16] 况琪军,毕永红,周广杰,等.三峡水库蓄水前后浮游植物调查及水环境初步分析[J].水生生物学报,2005,29(4):353-358.

[17] 王海云.三峡水库蓄水对香溪河水环境的影响及对策研究[J].长江流域资源与环境,2005,14(2):233-237.

[18] Redfield A C, Ketchum B II, Richards F A. The influence of organisms on the composition of sea water[A]. In: M N II ill (Ed.). The sea Interscience[C].New York, 1963. 26-27.

[19] Vollenweider R A. Elemental and biochemical composition of plankton biomass: some comments and explorations [J]. Arch Hydrobiol, 1985, 105: 11-29.

[20] Home A J, Goldman C R. Limnology[M].(Second Edition). New York: McGraw Hill, Inc, 1994.

[21] Justic D, Rabalais N N, Turner R E, et al, Changes in nutrient structure of rive-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences [J]. Estuarine Coastal and Shelf Sci, 1995, 40: 339-356.

[22] 杨东方,张经,陈豫,等.营养盐限制的唯一性因子探讨[J].海洋科学,2001,25(12):49-51.

[23] 李军,刘丛强,王仕禄,等.太湖水体溶解营养盐(N、P、Si)的冬夏二季变化特征及其与富营养化的关系[J].地球与环境,2005,33(1):63-67.

[24] 国家环境保护总局.长江三峡工程生态与环境监测公报[R].北京:国家环境保护总局,2005.

[25] 熊强,幸治国,钟成华,等.三峡库区总磷污染现状及防治措施[J].云南环境科学,2004,23(4):49-51.

[26] 李瑞雪,余长明,倪九派,等.三峡库区农业非点源污染的思考[J].中国农学通报,2005,21(9):372-375.

[27] 余炜敏,魏朝富,谢德体.太湖流域与长江三峡库区农业非点源污染对比研究[J].水土保持学报,2004,18(1):115-118.

[28] 金相灿.中国湖泊水库环境调查研究[M].北京:中国环境科学出版社,1990.

[29] 金相灿,屠清英.湖泊富营养化调查规范[M].(第二版).北京:中国环境科学出版社,1990.292-293.

[30] 三峡水库水污染控制课题技术领导小组.三峡水库水污染控制研究总报告[R].2003.

[31] 钟成华.三峡水库对重庆库段生态环境影响及整治对策研究[R].重庆:重庆市环境科学研究院,2002.