

三峡水库蓄水后不同水位期干流氮、磷时空分异特征

郭胜^{1,2}, 李崇明^{1,2*}, 郭劲松², 张晟¹, 张韵¹, 封丽¹

(1. 重庆市环境科学研究院, 重庆 401147; 2. 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要: 研究三峡水库蓄水前后营养盐的变化, 对于探讨水库运行对其的影响并提出合理的管理建议具有重要意义. 依据 2008 年 3 月 ~ 2009 年 2 月对长江干流三峡区段朱沱、寸滩、扇沱、清溪场、晒网坝、培石, 共 6 个断面和其中 1 个垂直断面逐月水文、水质监测, 按照三峡水库运行的水位特点, 将数据样本分成高水位 (10 ~ 2 月) 和低水位 (3 ~ 9 月) 2 个时期, 分别对不同水位期干流营养盐时空变化特征及水环境特征进行了分析. 研究期间, 除 DO 浓度在不同水位期的平均值差异明显, 其他水质参数的差异不大. 水质指标的垂直分布无统计学意义的差异, 未出现明显的分层现象. 在高水位期 DO 浓度平均值 (8.29 mg/L) > 低水位 (7.49 mg/L), DO 饱和度平均为 83.5%. 成库区 TN、NH₄⁺-N、TP 月平均浓度变化范围分别为 1.42 ~ 2.23 mg/L、0.15 ~ 0.36 mg/L、0.08 ~ 0.14 mg/L, 高水位期水体营养水平高于低水位期, 降雨致径流过程是影响干流 TN、NH₄⁺-N、TP 浓度的主要因素. 相关性分析表明, 以寸滩断面流量计, 各营养盐通量与流量有显著相关性. 研究期间, TN、NH₄⁺-N、TP 年通量分别为 36.84、9.72、2.95 万 t, 其中各非点源污染物的通量均占总通量的 55% 以上.

关键词: 三峡水库; 长江干流; 水位期; 氮磷; 时空分异

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2011) 05-1266-07

Spatio-temporal Variation of Nitrogen, Phosphorus in Different Period in Three Gorges Reservoir After Its Impoundment

GUO Sheng^{1,2}, LI Chong-ming^{1,2}, GUO Jing-song², ZHANG Sheng¹, ZHANG Yun¹, FENG Li¹

(1. Chongqing Academe of Environmental Science, Chongqing 401147, China; 2. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: It is very important to investigate the change of nutrient in Three Gorges Reservoir for analyzing the influence after normal storage and proposing reasonable management methods. The water quality parameters were determined monthly from March in 2008 to February in 2009. Six horizontal monitoring sites and one vertical site were set in Three Gorges Reservoir. The period was separated into two different periods with taking account of the water level after the Three Gorges Reservoir storaged water, which were October-February and March-September respectively. Then, the spatial-temporal variation characteristics of nutrient and environmental features in different periods were studied with the water quality data. The results showed that there were no significant differences of water quality parameters except DO in different periods. There were also no significant differences of the vertical distribution of hydrology, water quality indexes among the three observed levels. The concentration of DO in high water level (8.29 mg/L) was higher than that in low water level (7.49 mg/L) and the mean of saturation degree of DO was 83.5%. Total nitrogen (TN), NH₄⁺-N, total phosphorus (TP) values were 1.42-2.23 mg/L, 0.15-0.36 mg/L, 0.08-0.14 mg/L respectively, and plane of nutrition in high water level was higher than that in low water level. The main factor influenced the concentrations of TN, NH₄⁺-N and TP were rainfall runoff process. Significantly positive correlation was observed by correlation analysis between nutrients fluxes and the flux at the section Cun Tan. The fluxes of TN, NH₄⁺-N, TP were 368.4, 97.2, 29.5 thousands tons respectively, and the non-point pollution accounts for more than 55.5%.

Key words: Three Gorges Reservoir; Yangtze River; water level period; nitrogen; phosphorus; spatio-temporal variation

2006 ~ 2009 年三峡水库蓄水试运行, 成为水库水环境质量演替以及峡谷河道型水库生态系统重构的重要过渡性阶段. 近年来, 针对其间不同水位条件下的支流回水区、库湾生态环境特征的观测研究比较多. 主要集中在以下 3 个方面: ①支流回水区营养盐的来源及其季节变化特征分析、空间分布和赋存形态特征^[1-3]; ②从水文生物地球化学过程角度认识支流回水区水体混合过程中营养盐的行为特征^[4]; ③基于水华敏感期的跟踪观测对浮游植物进

行定性定量调查与分析^[5,6], 探讨水华敏感期的水华特征, 以及营养盐构成与富营养化之间的关系^[7]. 在三峡水库成库初期 (135 m), 有学者根据短时期水文、水质监测结果, 对成库区与非成库区干流

收稿日期: 2010-05-24; 修订日期: 2010-08-10

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07104-002, 2009ZX07104-003); 环境保护部专项课题项目 (2009AW-B01)

作者简介: 郭胜 (1986 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制与环境规划, E-mail: guosheng0506@163.com

* 通讯联系人, E-mail: chongming-li@163.com

氮、磷营养盐及水环境特征进行了初步探讨^[8,9]. 分析相关研究文献,水位在 156 m 以后,在不同水位条件下,对干流水环境特征和对前期预测结果的验证分析研究较少^[10,11],对于三峡水库周期性蓄水、泄水的反季节水位调节下,不同水位期营养盐分布特征以及水环境特征尚鲜见报道.

2008 年 3 月~2009 年 2 月三峡水库坝前水位 150~170 m,其中 3~9 月水位在 150~155 m 之间变动(低水位),10~2 月水位在 165~170 m 之间变动(高水位). 这与设计运行状态时水位调节情况类似,水库水位在研究期间最高落差 20 m(设计运行落差 30 m). 本研究就 2008 年 3 月~2009 年 2 月期间,干流朱沱、寸滩、扇沱、清溪场、晒网坝、培石,共 6 个断面的主要水文、水质参数进行多维特征分析,初步探讨三峡水库进入正常蓄水运行,营养盐时空变化特征并分析不同水位条件下水库水环境特征. 通过对逐月水文、水质分析、验证和对比前人研究成果,以期为进一步研究三峡正常运行对水环境的影响和预测提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 样品采集方法

本研究选择长江干流重庆段,设置朱沱(N 29°00′56.7″, E 105°50′59.6″)、寸滩(N 29°37′16.52″, E 106°36′3.08″)、扇沱(N 29°46′22.56″, E 106°59′25.75″)、清溪场(N 29°47′50.70″, E 107°27′16.44″)、晒网坝(N 30°50′2″, E 108°25′59″)、培石(N 31°1′36.03″, E 110°5′33.67″)共 6 个断面(图 1). 其中除朱沱站外其余均已成库. 采样时间 2008 年 3 月~2009 年 2 月. 扇沱断面水平只设一个点,在其垂直线上设置 3 个水样测点(水面下 0.5 m 处、0.5 倍水深处、水底

以上 0.5 m 处),其余 5 个采样点设置左右中 3 个水平测点(水面下 0.5 m 处). 每月共采 21 个水样,均在每月上旬进行,并及时进行分析.

1.2 实验及分析方法

现场测试指标包括: pH 值(LP115pH 携带快速测定仪)、水温(50℃ 水银温度计)、电导率(HI87314 便携式电导率仪). 溶解氧、营养盐在实验室采用国家标准方法进行测定,具体方法为: 溶解氧(DO)为碘量法; 氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)为纳氏试剂光度法; 总氮(TN)为过硫酸钾氧化-紫外分光光度法; 总磷(TP)为过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法^[12].

1.3 数据处理方法

数据前期整理在 Excel 上进行,数据统计分析采用专用软件进行.

2 结果与讨论

2.1 干流水质、水文参数特征

各水位期水质参数统计结果见表 1. 寸滩水文站流量数据见图 2^[13]. 高水位期平均水体温度为 $(14.92 \pm 4.67)^\circ\text{C}$, 低水位期为 $(21.37 \pm 4.70)^\circ\text{C}$, 不同水位期水体温度差异明显. 全年 pH 为 7.90 ± 0.23 , 各采样点变化幅度较小, 为偏碱性水体. 各站点年电导率情况见图 2, 电导率平均值 $(344 \pm 51) \mu\text{S}/\text{cm}$, 空间上变化范围为 $230 \sim 478 \mu\text{S}/\text{cm}$, 可能受流量、地域差异等影响, 平均值和变化幅度高于支流小江 $235 \sim 249 \mu\text{S}/\text{cm}$ ^[4]. 研究期间成库区, 不同水位期平均电导率相差不大, 同时, 沿程随流量增加电导率无明显变化趋势, 与一般认为电导率同流量呈相反的变化趋势^[14,15] 并不一致, 这间接证明成库后原有天然河道水文特点发生了变化. 对成库区扇沱断面垂直方向上进行单因素方差检验, 结果为 pH ($F = 1.300, p = 0.287$)、DO ($F = 0.023, p = 0.978$)、电导率 ($F = 0.008, p = 0.992$), 说明垂直方向上水文、水质不存在统计学意义的差异. 然而, 有研究表明, 部分湖泊深层水呈明显的缺氧状态, 如于桥水库、甘棠湖等, 于桥水库夏季 DO 存在分层状况^[16]. 可能受换水、水质等多方面影响, 尽管蓄水后水深有大幅度的提升, 但 pH、DO、电导率以及温度未出现明显的分层现象.

文献[10]认为影响水体中 DO 含量主要有 4 个因素, 曝气作用、光合作用、呼吸作用和有机物的氧化降解作用. 将 6 个采样点, 按季节平均温度与平均 DO 作相关性分析, 结果表明, 温度与 DO 浓度呈显著负相关关系 ($R^2 = -0.676, p = 0.003, n = 24$). 受

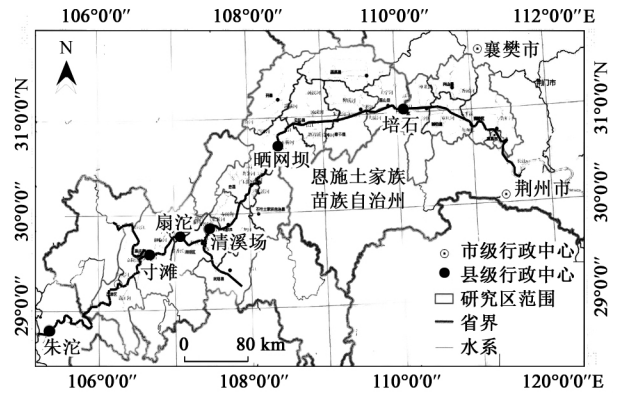


图 1 样品采集点位置

Fig. 1 Investigation stations in the Three Gorges area

表 1 干流水质统计结果

Table 1 Statistical results of hydrology and water quality parameters

项目	电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$		pH		溶解氧/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		水温/ $^{\circ}\text{C}$		饱和度 ¹⁾ / $\%$	
	高水位期	低水位期	高水位期	低水位期	高水位期	低水位期	高水位期	低水位期	高水位期	低水位期
最小值	230	241	7.29	7.45	6.45	5.89	7.30	9.00	62.0	65.0
最大值	478	458	8.54	8.50	9.90	10.15	25.00	28.00	99.0	102.0
平均值	346	342	7.89	7.90	8.29	7.49	14.92	21.37	82.2	84.2
方差	59	44	0.26	0.21	0.79	0.91	4.67	4.70	9.0	7.4
标准差	3 500	1 945	0.07	0.05	0.63	0.84	21.85	22.07	81.5	54.5

1) 参照 YSI 溶解氧仪技术文件附录 A

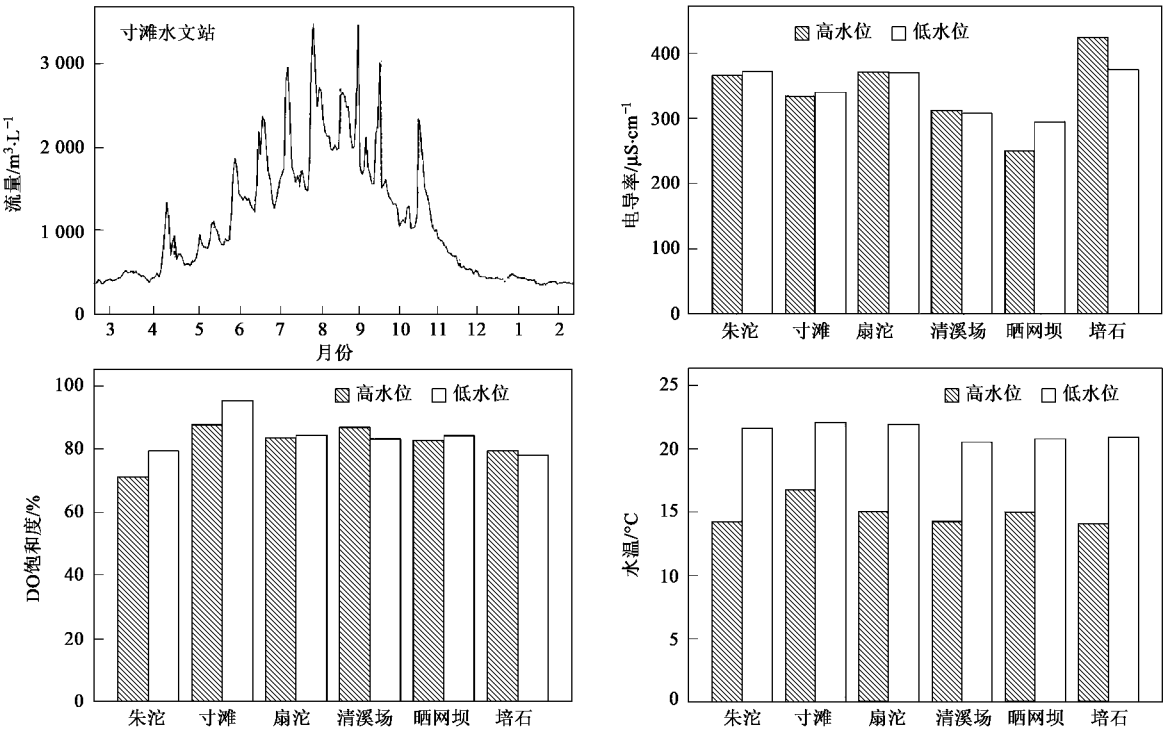


图 2 水质、水文参数变化

Fig. 2 Variation of water quality parameters and hydrology

气温和复氧能力等多重影响,DO 饱和度无明显季节性变化. 总体上,成库区高水位期平均 DO 含量饱和和率(82.2%)略小于低水位期(84.2%);高水位期 DO 浓度平均值(8.29 mg/L) > 低水位(7.49 mg/L),DO 浓度在不同水位时期有显著性差异($p < 0.05$).

2.2 营养盐变化特征

2.2.1 NH_4^+ -N 含量变化及分布

在调查期间,除清溪场采样点外,其余 5 个断面, NH_4^+ -N 含量均为高水位期 $\leq$ 低水位期. NH_4^+ -N 在库区水体中的浓度受氧化转化和底泥释放 2 个基本过程控制^[17].

$$F(c_0) = K_1/A - K_2c_0 \tag{1}$$

上式变形得:

$$1 - F/c_0 = (1 + K_2) - K_1/Ac_0 \tag{2}$$

式中, K_1 为底泥中 NH_4^+ -N 的释放速率 [$\text{g}/(\text{m}\cdot\text{d})$];
 A 为河流平均断面面积(m^2); K_2 为 NH_4^+ -N 氧化速率($1/\text{d}$); c_0 为 NH_4^+ -N 浓度. 其中, $1 - F/c_0$ 定义为 NH_4^+ -N 降低率; $(1 + K_2)$ 定义为 NH_4^+ -N 氧化转化过程; $K_1/A c_0$ 定义为底泥中 NH_4^+ -N 释放过程.

由式(2),假设高水位期和低水位期进入成库区 NH_4^+ -N 的浓度相等. 高水位期与低水位期相比,平均水流速度减小,平均水温明显降低, NH_4^+ -N 氧化转化过程减弱;另一方面,一般认为温度升高和扰动增强都能使底泥中的有机氮转为氨氮而加剧向上覆水体的释放^[18,19],因而在高水位期底泥中 NH_4^+ -N 释放过程会减弱. 因此,高水位期与低水位期 NH_4^+ -N 降低率的大小,由水位变化过程对 2 个基

本过程的影响程度决定. 非成库区与成库区平均浓度对比表明: 三峡进行蓄水运行后,不同水位期的交替可能对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 降解过程的影响大于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 释放过程的影响. 依本研究数据表现为高水位期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 降低率为 16%, 明显低于低水位期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 降低率 48%. 同时,从图 3 也可以看出,在低水位运行时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量沿程有比较明显的下降趋势,而在高水位期沿程无明显变化规律.

调查期间,成库区 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 年均浓度为 $(0.24 \pm 1.49) \text{ mg/L}$, 占总氮的 15.1%, 略高于成库初期 $(13.0\%)^{[9]}$. 沿程分布为成库区小于上游区(朱

沱). 将不同月份同一采样断面(扇沱)的上层、中层、下层分别作配对 T 检验,结果表明 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在垂直方向上分布无显著差异. 依据相关性分析表明(表 2), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 TN 不存在显著相关,可能是氮素在水中组成形态还受其循环过程^[20] 以及 pH 的影响; 与 TP 呈显著相关,表明 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 TP 的输入输出过程相似. 把寸滩流量时间分布(图 2)与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 时间分布(图 3)进行直观对比分析表明, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 年际变化特征与干流流量有明显关系,换句话说,降雨径流过程对于流 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量影响明显.

2.2.2 干流 TN、TP 浓度变化特征及营养状况

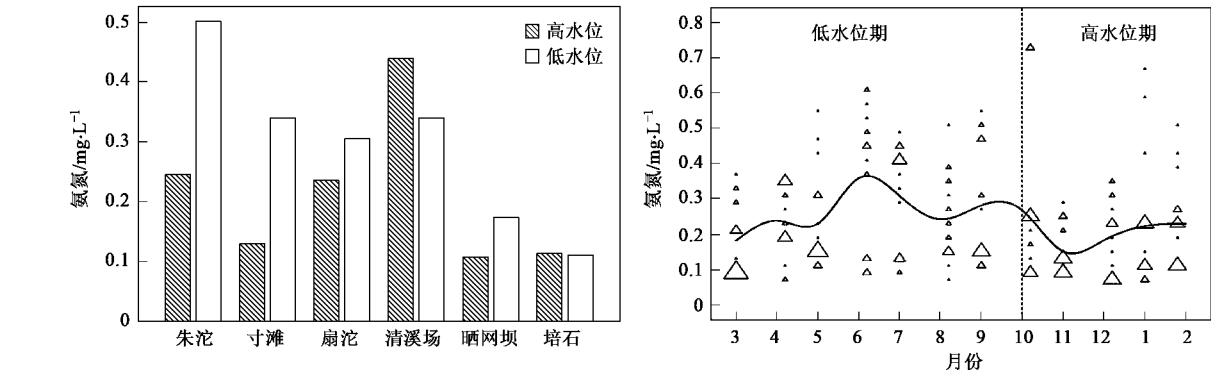


图 3 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 时空变化
Fig.3 Spatio-temporal change of $\text{NH}_4^+\text{-N}$

表 2 各水文、水质指标的相关系数矩阵($n=53$)¹⁾

Table 2 Matrix of correlation coefficients among hydrology and quality indexes($n=53$)									
	电导率	pH	DO	水温	DO 饱和度	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TN	TP	流量
电导率	1.000								
pH	0.387 **	1.000							
DO	0.049	-0.210	1.000						
水温	-0.140	0.034	-0.739	1.000					
DO 饱和度	-0.114	-0.292 *	0.437 **	0.226	1.000				
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	-0.161	-0.318 *	-0.022	0.143	0.156	1.000			
TN	-0.111	-0.245	-0.040	-0.247	-0.383 **	0.054	1.000		
TP	-0.479 **	-0.216	-0.002	0.044	0.039	0.326	0.314 *	1.000	
流量	-0.221	0.057	-0.403 **	0.650 **	0.327 *	0.034	-0.242	0.205	1.000

1) ** 表示显著性水平为 0.01, * 表示显著性水平为 0.05; 流量以寸滩断面计

高水位期, TN、TP 平均浓度分别为 $(1.94 \pm 0.64) \text{ mg/L}$ 、 $(0.11 \pm 0.30) \text{ mg/L}$; 低水位期, TN、TP 平均浓度分别为 $(1.80 \pm 0.72) \text{ mg/L}$ 、 $(0.11 \pm 0.39) \text{ mg/L}$. 对比截流前寸滩断面营养盐背景调查值^[21], TN、TP 年平均浓度下降比较明显. TN、TP 的时间变化近似过程如图 4 所示,不同水位期差异明显. 研究期间 TN 浓度的随时间变化过程为 3~5 月 TN 浓度呈上升趋势,5~9 月整体上呈下降趋势,而 9~12

月呈上升趋势. 可能受氮素复杂的循环过程^[20] 和输入形态^[3] 以及降雨径流的影响, TN 浓度的随时间变化过程与典型沉积型循环的磷截然相反, 表现为 3~5 月水相中 TP 浓度有下降趋势, 5~9 月期间有上升趋势, 9~12 月 TP 浓度大体上呈下降趋势. 这是因为水相中 TP 除点源输入外, 其余主要来源是颗粒的陆源输入^[22]. 入春以来降雨量逐渐增大, 就降雨强度而言, 径流还不具有输运颗粒物的能力, 随着降雨强度

的增加,增强了颗粒磷的陆源输入,并以水相中 TP 浓度增加的形式逐渐显现.从整体上对比分析寸滩流量时间变化过程(图 2)与 TN、TP 浓度时间变化过程(图 4),一定程度上,降雨径流是影响库区 TN、TP 浓

度的关键因素,同时相关性分析也进一步证实这一点(表 2).按不同月份将同一采样断面(扇沱)的上层、中层、下层分别作配对 T 检验,结果表明 TN、TP 含量在垂直方向上分布均无显著差异.

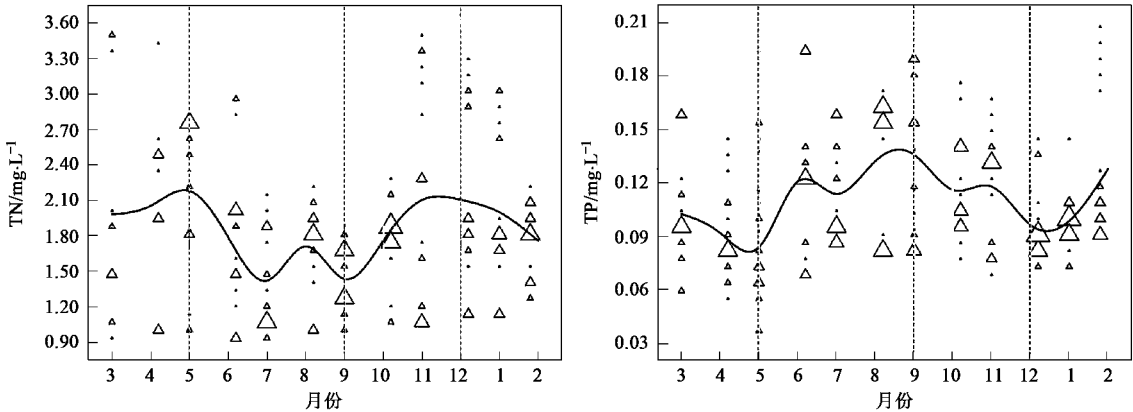


图 4 成库区 TN、TP 浓度时间变化过程

Fig.4 Scatter plots of the variation of total nitrogen and total phosphorus

根据日本国立公害研究所的富营养化标准^[23],研究期间高水位期有 85.6% TN 样本和 38.9% TP 样本超过富营养状态的浓度界限($TN \geq 1.20 \text{ mg/L}$ 、 $TP \geq 0.11 \text{ mg/L}$);低水位期有 77.2% TN 样本和 44.4% TP 样本超过富营养状态的浓度界限.干流水体总体上已经处于中-富营养状态.高水位期 NH_4^+-N 与 TN 比值(11.1%) < 低水位期(18.3%),说明高水位期水体可能处于相对强的还原环境. Stumm 等^[24]认为水体营养水平的提高表现为水体从氧化环境向还原环境的转变,同时 Quriós^[25]也认为氮素形态中还原态 NH_4^+-N 的相对增加直接体现了营养水平的提高,研究期间不同水位期 TN 的浓度差异也证实了上述论断.高水位期有 62.2% TN/TP 样本位于藻类增殖非 N、P 限制的范围($20 < TN/TP < 50$ ^[26]),22.2% 的样本位于藻类增殖的最佳

TN/TP 范围(12 ~ 13^[9]).然而,富营养化发生所需最必要的外力条件为:营养盐相对较充足、缓慢的水流流态和适宜的气候条件^[8],虽然高水位期藻类增殖的营养和水动力条件明显更优于低水位期,但三峡水库与一般性湖泊的水文、水力条件有显明不同(如换水周期,流速等),故目前干流大规模的藻类生长还未见报道.但长期在最佳营养状况下是否会刺激藻类暴发性增殖仍值得跟踪观察和深入研究.

2.3 营养盐通量分析

根据研究期间寸滩水文站日径流量与营养盐浓度,进行了营养盐通量与径流量相关分析并列出一元回归方程(图 5).近年来,许多国家及地区在流域总量控制方面给予了重点关注,在河流通量的估算方法上取得了大量成果,目前常用的方法有 5

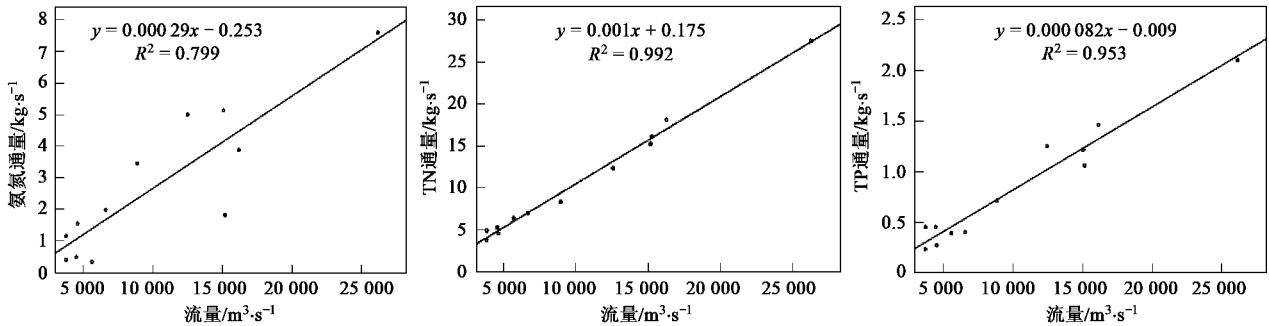


图 5 流量与营养盐通量关系

Fig.5 Correlation of discharge and nutrient

种^[27]. 然而,受众多因素的影响,不同的估算方法所获得的结果差异比较明显. 文献[28]比较系统地阐述了不同方法的适用范围,运用其所述的选择方法和标准作为本研究选择营养盐通量估算方法的依据. 由表 2 知,氨氮浓度与流量相关系数为 $r = 0.034$,相关性不明显,排放的点源特征可能更强一些,同时径流量与通量显著相关性($R^2 = 0.799$,图 5). 故综合分析后氨氮通量估算方法选择文献[28]中所述适合于点源占优的方法 C. 以同样的标准考察 TN、TP 的估算方法,选择文献[28]中所述方法 E. 根据径流分割法原理^[29],考虑点源与非点源污染机制不同,可以认为在汛期污染物通量变化主要受非点源污染输入影响,而视点源污染通量为定值. 因此,点源污染通量的计算关键在于确定基流量和基流浓度. 为充分利用研究期间寸滩水文站流量信息,运用 SPSS 进行频数分析,本研究规定: $p = 5\%$ ($n = 247$) 的流量为基流量. 涉及的公式如下:

$$W_i = aQ_i + b \tag{3}$$

方法 C:
$$W = K \sum_{i=1}^n \frac{W_i}{n} \tag{4}$$

非点源:
$$W_{np} = K \sum_{i=1}^n \frac{(W_i - W_o)}{n} \tag{5}$$

方法 E:
$$W = K \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \bar{Q}_r \tag{6}$$

非点源:
$$W_{np} = K \frac{\sum_{i=1}^n (W_i - W_o)}{\sum_{i=1}^n Q_i} \bar{Q}_r \tag{7}$$

式中, W_i 为第 i 月通量(kg); Q_i 为第 i 月平均流量(m^3/s); a 、 b 为不同营养盐回归系数(图 5); W_o 为基流营养盐通量; W_{np} 为非点源通量; $K = 1$. $\bar{Q}_r$ 为时段平均流量.

计算结果详见表 3. 高水位期、低水位期 TN、 NH_4^+ -N、TP 的非点源通量分别占全年通量 74.4%、80.1%、75.8%; 55.4%、63.0%、57.7%. 其中各水位期, NH_4^+ -N 的非点源通量所占比例均为最大. TN、TP 非点源输入分别比 2002 年下降 31%、6.5%^[30],但各水位期非点源通量仍占有重要比重($>55\%$). 因此,非点源污染在相当长时期里仍是威胁三峡水质的主要因素之一. 与文献[31]预测 2010 年长江和嘉陵江入库低负荷水平相比,本研究 TN、 NH_4^+ -N、TP 通量分别下降了 57.8%、-15.6%、19.0%. 证明预测结果较准确.

表 3 营养盐通量
Table 3 Nutrient flux

项目	代表时段	通量/kg·s ⁻¹			时段通量×1 000/t			非点源通量×1 000/t		
		TN	NH_4^+ -N	TP	TN	NH_4^+ -N	TP	TN	NH_4^+ -N	TP
低水位期	3~9 月	8.90	2.27	0.70	164.00	41.90	13.00	90.90	26.40	7.50
高水位期	10~2 月	15.70	4.24	1.26	204.40	55.30	16.50	152.80	44.30	12.50
总计	12~2 月				368.40	97.20	29.50	243.70	70.70	20.00

3 结论

(1) 三峡水库蓄水后, DO 浓度年平均值为 (7.82 ± 0.95) mg/L,高水位期 DO 浓度平均值(8.3 mg/L) $>$ 低水位 DO 浓度(7.5 mg/L); 库区各站点 DO 饱和度相差不大,DO 饱和度平均为 83.5%,水体呈弱碱性. 水质指标的垂直分布无统计学意义的差异,未出现明显的分层现象.

(2) 三峡蓄水后,水质明显优于蓄水前. 成库区 TN、 NH_4^+ -N、TP 月平均浓度变化范围分别为 $1.42 \sim 2.23$ mg/L、 $0.15 \sim 0.36$ mg/L、 $0.08 \sim 0.14$ mg/L. 不同水位期各营养盐平均浓度相差不大,但高水位期营养水平高于低水位期,其营养和水动力条件更适合藻类增殖. 可能受污染物循环过程、输入形态以

及降雨径流的影响,TN、TP 浓度随时间变化过程截然相反,但 TN、 NH_4^+ -N、TP 浓度整体变化主要是受降雨径流影响.

(3) 以寸滩断面计,各营养盐通量与流量呈极显著相关. 研究期间,TN、 NH_4^+ -N、TP 年通量分别为 36.84、9.72、2.95 万 t,其中各非点源污染物的通量均占总通量的 55% 以上. 库区水体处于中-富营养状态,非点源输入是最主要的原因.

参考文献:

[1] 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.
[2] 方芳,李哲,田光,等. 三峡小江回水区磷素赋存形态季节变化特征及其来源分析[J]. 环境科学,2009, 30(12):3488-3493.
[3] 罗固源,卜发平,许晓毅,等. 三峡库区临江河回水区总氮

和总磷的动态特征[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, **31**(5):106-110.

[4] 冉祥滨,陈洪涛,姚庆祯,等. 三峡水库小江库湾水体混合过程中营养盐的行为研究[J]. 水生生态学杂志, 2009, **2**(2): 21-26.

[5] 郭劲松,陈杰,李哲. 156 m 蓄水后三峡水库小江回水区春季浮游植物调查及多样性评价[J]. 环境科学, 2008, **29**(10):2710-2715.

[6] 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.

[7] 郑丙辉,曹承进,张佳磊,等. 三峡水库支流大宁河水华特征研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(11):3218-3226.

[8] 张晟,刘景红,张全宁,等. 三峡水库成库初期氮、磷分布特征[J]. 水土保持学报, 2005, **19**(4):123-126.

[9] 张晟,刘景红,黎莉莉. 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):1057-1061.

[10] 张晟,李崇明,吕平毓,等. 三峡水库成库后 COD_{Mn}、BOD₅ 空间变化[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(1):70-76.

[11] 何军,夏明. 三峡水库四期试验性蓄水前后嘉陵江饮用水源水质变化规律分析[J]. 三峡环境与生态, 2010, **3**(2):14-18.

[12] 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.

[13] 水位管理系统[EB/OL]. <http://yu-zhu.vicp.net>.

[14] Collins D N. Solute yield from a glacierized high mountain basin. In: Webb B W, ed. Dissolved Loads of Rivers and Surface Water Quantity/Quality Relationships [M]. Wallingford: IAHS Press, 1983. 41-49.

[15] Anter M, Brown G H, Raiswell R, *et al.* A conceptual model of solute acquisition by Alpine glacial melt waters [J]. Journal of Glaciology, 1993, **39**:573-581.

[16] 金相灿. 中国湖泊环境[M]. 北京:海洋出版社, 1995. 236.

[17] 邓春光. 三峡库区富营养化研究[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2007. 63.

[18] 张丽萍,袁文权,张锡辉. 底泥污染物释放动力学研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, **4**(2):22-26.

[19] Reddy K R, Fisher M M, Ivaoff D. Resuspension and diffusive flux of nitrogen and phosphorus in a hypereutrophic lake [J]. Journal of Environmental Quality, 1996, **25**:363-371.

[20] Wetzel R G. Limnology: Lakes and river ecosystems [M]. CA: Academic Press, 2001. 204-238.

[21] 邓春光. 三峡库区重庆段截流前水环境背景值调查报告[R]. 重庆:重庆市环境科学研究所, 1998. 120.

[22] Allan J D, Castillo M M. Stream ecology: structure and function of running waters and edition[M]. NL: Springer Press, 2007, 256-264.

[23] 逢勇,姚琪,濮培民. 太湖地区大气-水环境的综合数值研究[M]. 北京:气象出版社, 1998. 162.

[24] Stumm W, Morgan J. Aquatic chemistry: Chemical equilibria and rates in nature waters [M]. (3rd ed). NY: John Wiley & Sons, 1996. 927-932.

[25] Quriós R. The relationship between nitrate and ammonia concentrations in the pelagic zone of lakes[J]. Limnetica, 2003, **22**(1-2): 37-50.

[26] 李哲,郭劲松,方芳. 三峡水库小江回水区不同 TN/TP 水平下氮素形态分布和循环特点[J]. 湖泊科学, 2009, **21**(4): 509-517.

[27] Webb B W, Phillips J M, Walling D E, *et al.* Load estimation methodologies for British rivers and their relevance to the LOIS RACS(R) programme [J]. Science of the Total Environment, 1997, **194/195**:379-389.

[28] 富国. 河流污染物通量估算方法分析(I)——时段通量估算方法比较分析[J]. 环境科学研究, 2003, **16**(1):1-4.

[29] 蔡明,牛卫华,李文英. 流域污染负荷分割研究[J]. 人民黄河, 2006, **28**(7):24-26.

[30] 梁常德,龙天渝,李继承. 三峡库区非点源氮磷负荷研究[J]. 长江流域资源与环境, 2007, **16**(1):26-30.

[31] 李崇明,黄真理. 三峡水库入库污染负荷研究(II)——蓄水后污染负荷预测[J]. 长江流域资源与环境, 2006, **15**(1): 97-106.