

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*

李 哲, 郭劲松**, 方 芳, 张 超, 盛金萍, 周 红

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要: TN/TP 的变化是水中浮游植物营养结构特点的重要反映. 对 2007 年 3 月至 2008 年 3 月三峡水库小江回水区的 TN、TP 和 TN/TP 的跟踪观测结果进行总结, 发现小江回水区 TN 平均浓度为 $1553\pm43\mu\text{g/L}$, TP 平均浓度为 $61.7\pm2.7\mu\text{g/L}$. 二者季节变化过程相似, 但季节差异明显: 2007 年春季保持较低水平, 在春末夏初出现较大幅度的增加, 并在夏季达到全年的较高水平, 入秋后 TN、TP 浓度逐渐下降, 但入冬后继续缓慢上升. 研究期间 TN/TP 平均值为 30.6 ± 1.4 , 总体表现为磷素限制, 且季节变化不显著. TN 与 TP 显著正相关, 说明氮、磷输入和输出的途径大体相同. TP 的波动是调控该水域 TN/TP 的主要因素. 对不同 TN/TP 水平下各形态氮素和 TP、TN/TP 的相关性分析发现, 当 $\text{TN/TP}\leq 22$ 时, TN 是调控水体营养结构特点的主要因素, 生物固氮作用有可能发生以调节 TN/TP、消纳水中相对丰足的 TP. 当 $22<\text{TN/TP}<32$ 时, 通过对 NO_3^- -N 的利用、摄取以实现氮素有机合成的生态过程较为明显. 而当 $\text{TN/TP}\geq 32$ 时, 较低的 TP 含量水平可能使氮素的有机合成过程受到抑制, NH_4^+ -N 有可能是影响该状态下氮素循环的关键因子. 研究认为, 强降雨和强径流过程往往使回水区段营养物输入强度加大但同期水动力条件却不适宜浮游植物的生长, 使得在 $\text{TN/TP}\leq 22$ 水平下, 虽 TP 大量输入但不适宜的水动力条件在一定程度上抑制了氮素的有机合成, NH_4^+ -N/ NO_3^- -N 则下降, 而在较高的 TN/TP 水平下, 水动力条件改善为浮游植物生长创造了相对稳定的物理环境, 并加速了对无机氮素的生物利用, 使 TON 含量及其在 TN 中所占比重均有所提高而 NO_3^- -N 含量及其比重则明显下降.

关键词: 三峡水库; 小江回水区; TN/TP; 氮素形态组成; 循环特点; 水动力条件

Potential impact of TN/TP ratio on the cycling of nitrogen in Xiaojiang backwater area, Three Gorges Reservoir

LI Zhe, GUO Jinsong, FANG Fang, ZHANG Chao, SHENG Jinping & ZHOU Hong

(Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment of Chongqing University, Ministry of Education, Chongqing 400045, P.R.China)

Abstract: TN/TP ratio represents the nutrients structure for phytoplankton in aquatic ecosystem. Observed data of TN, TP and TN/TP ratio from March 2007 to March 2008 in Xiaojiang backwater area in Three Gorges Reservoir were summarized in the paper. It was found that mean value of TN is $1553\pm43\mu\text{g/L}$, while that of TP was $61.7\pm2.7\mu\text{g/L}$. Although both TN and TP showed remarkable seasonal variability, their variations were approximately the same. Generally, they were low in early spring while suffered a sharp increase in the late spring and reached a maximum level in the summer due to the frequent storm. Concentrations of both TN and TP decreased in the autumn while increased again in the late winter. Average ratio of TN/TP was 30.6 ± 1.4 and indicated a phosphorus-limitation in the XBA generally. The significant positive correlation between TN and TP indicated that both nutrients might have the same importing and exporting approaches to the water area. TP was major nutrient that controls TN/TP level. When $\text{TN/TP}\leq 22$, nitrogen is control factor and the relatively intensive TP input can result in the decrease of TN/TP ratio. Nitrogen fixation might occur to overcome the surplus phosphorus in water column. When $22<\text{TN/TP}<32$, TP manipulated nutrients that controlled the

* 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-07-02)和重庆市重大科技专项(CSTC2006BA7030)联合资助. 2008-11-11 收稿; 2008-12-15 收修改稿. 李哲, 男, 1981 年生, 博士研究生; E-mail: Lizhe1981@126.com.

** 通讯作者; E-mail: Guo0768@126.com.

TN/TP ratio. It was also anticipated that the organic anabolism loop from nitrate to PON might be the dominant process in nitrogen organic anabolism. When $TN/TP \geq 32$, low TP would considerably prohibit the organic anabolism process, while ammonia might become the potential significant factor that impacted on the pattern of nitrogen cycling. It was suggested that due to the relatively short hydraulic retention time in XBA, nitrogen cycling would not be influenced by TP but also impacted by the hydrodynamic condition. Intensive nutrients loadings that increased TP were due to the relatively heavy precipitation and surface runoff in XBA, followed by the unstable physical living environment for planktonic communities, while the decrease of TP indicated the feasible living environment, stimulated the organic anabolism process of nitrogen.

Keywords: Three Gorges Reservoir; Xiaojiang backwater area; TN/TP ratio; forms of nitrogen; characteristic of nitrogen cycling; hydrodynamic condition

氮、磷是浮游植物生长的关键生源要素。在水体富营养化过程中, 氮、磷等营养物的大量输入与积累是造成水体生产力水平迅速提高的主要原因^[1], 但由于不同浮游植物生长所需营养物比例关系各不相同^[2-3], 氮、磷要素相对丰度(TN/TP)的季节变化将改变水中营养物限制性特征^[4], 成为调控浮游植物生长交替的关键因素之一^[2-4]。Downing 认为, TN/TP 在很大程度上表征了湖泊受氮、磷输入负荷的比例关系, 反映了营养物输入对湖泊营养结构的影响, 湖泊营养水平随 TN/TP 的降低而提高^[5]。Quriós 进一步分析了水相中 NH_4^+-N 同 NO_3^--N 相对丰度变化与 TN/TP 的潜在联系, 强调 NH_4^+-N/NO_3^--N 随水体营养水平的提高而升高^[6-7]。近年来, 越来越多的研究已不满足于仅停留在对水体氮、磷限制性特点的定性评判上^[8-9], 虽然 Reynold 强调 TN/TP 的变化对浮游植物群落演替的调节并不显著^[10], 但作为湖泊营养物限制性特征的反映, 大量调查发现, TN/TP 的变化在影响浮游植物生长的同时^[11], 也将显著改变生源要素在水相中的形态分布与循环过程^[6-7]。

三峡成库后, 库区次级河流回水区段的富营养化问题颇受关切。近年来围绕着库区次级河流回水区段浮游植物群落组成与季节变化特点展开了大量的调查与研究^[12-13], 对水动力条件下的富营养化发生发展特点进行了分析探讨^[14-15]。有观点认为三峡库区次级河流回水区段水体普遍受磷素的限制^[16], 但在这一独特的过渡型生态系统中, TN/TP 同浮游植物生长和生源要素赋存形态及其循环过程的潜在联系尚不明晰。对太湖、巢湖、东湖等长江中下游地区浅水湖泊群的研究结果认为上覆水体中浮游植物的繁盛加速了对表层水体磷素的生物利用, 并促进沉积层磷素的释放, 进而造成了水体 TN/TP 的下降^[17-18]。但物理背景完全不同的三峡库区次级河流回水区段, 没有浅水湖泊自然演进过程形成的营养物丰厚的沉积层以满足浮游植物生长对营养物的需求; 水文条件上受人工调蓄和天然河道径流过程交叉影响, 同浅水湖泊亦有天壤之别。因此, 浅水湖泊中 TN/TP 对氮、磷循环的影响机制还很难于合理阐释三峡库区次级河流回水区段的水华现象。

笔者所在课题组自 2006 年底开始, 在三峡库区较典型的小江流域回水区段对水体富营养状态及过程进行了持续跟踪研究。文献[19]对 2007 年 3 月至 2008 年 3 月氮素赋存形态与季节变化过程进行了分析。本文将着重探讨该时期小江回水区 TN/TP 的季节变化过程, 结合氮素赋存形态与季节变化特点, 分析该水域各形态氮素同 TP、TN/TP 的相互关系, 对不同 TN/TP 水平下小江回水区氮素形态组成和循环特点进行初步研究。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域与采样方案

小江流域(图 1), 介于北纬 $30^{\circ}49'-31^{\circ}42'$, 东经 $107^{\circ}56'-108^{\circ}54'$ 之间, 流域面积 5172.5km^2 , 下游河口距三峡大坝 247km, 是三峡库区中段、北岸流域面积最大的次级河流。三峡水库蓄水至 156m 后, 小江回水区延伸至开县渠口镇境内, 长约 60km。但考虑回水区末端受到 156-145m 水位涨落的影响, 本研究选择 145m 以下的永久回水区: 养鹿乡至小江河口, 约 40km 河段作为研究区域(图 2)。为全面反映小江回水区河段水力条件, 并综合考虑沿岸场镇排污的影响, 笔者在小江回水区段共布置 5 个采样断面, 分别为: 渠马渡口($N31^{\circ}07'50.8''$, $E108^{\circ}37'13.9''$)、高阳平湖($N31^{\circ}5'48.2''$, $E108^{\circ}40'20.1''$)、黄石镇($N31^{\circ}00'29.4''$, $E108^{\circ}42'39.5''$)、双江大桥($N30^{\circ}56'51.1''$, $E108^{\circ}41'37.5''$)和小江河口($N30^{\circ}57'03.8''$, $E108^{\circ}39'30.6''$)。各断面

采样点均位于河道深泓线处，每月 2 次采集水深 0.5m、1m、2m、3m、5m、8m 处共 6 个测点的水样，采样时间控制在采样当日 09:30 至 16:30。除现场测试指标外，对上述不同深度水样进行等量混合，混合后水样于 48h 内完成所有指标的分析测试工作。



图 1 小江流域水系

Fig.1 Drainage system of Xiaojiang watershed

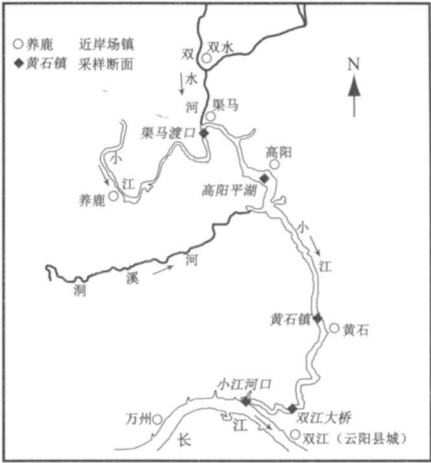


图 2 养鹿-小江河口回水区段采样点分布

Fig.2 Sketch map of Xiaojiang backwater area

1.2 测试分析与数据处理方法

测试指标包括：氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、亚硝态氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)、溶解性凯氏氮(DKN)、总凯氏氮(TKN)。其中，TKN 为混合水样直接进行消解、测试，其余指标的测试水样均预先通过 $0.45\mu\text{m}$ 纤维滤膜抽滤处理。另外，TKN 包括总有机氮(TON)、溶解态形式存在的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ^[20]，也包含了可能吸附于无机颗粒或胶体表面的颗粒态氨氮(PNH_3)^[1]，但由于 PNH_3 吸附量有限且易受水质理化特征的干扰^[1,21]，本研究对水相中的 PNH_3 不予考虑^[21]。根据文献[21]，本研究中各形态氮素的计算关系式如下：

溶解态有机氮(DON)= $\text{DKN}-\text{NH}_4^+\text{-N}$ ；溶解态无机氮(DIN)= $\text{NH}_4^+\text{-N}+\text{NO}_3^-\text{-N}+\text{NO}_2^-\text{-N}$ ；颗粒态有机氮(PON)= $\text{TKN}-\text{DKN}$ ；总有机氮(TON)= $\text{DON}+\text{PON}$ ；总氮(TN)= $\text{DIN}+\text{DON}+\text{PON}$ 。

所有指标的分析测试方法参考文献[20]进行。各采样断面测试结果录入 SPSS 进行统计分析。为使相关性分析和回归分析稳定，减少分析误差，本研究将变量进行对数化处理，并采用局部加权回归方法(LOESS 拟合，核函数为 Tricube)对各次采样数据进行回归平滑，说明数据序列的总体变化特点。本研究选择 2007 年 3 月-2008 年 3 月期间采集的 5 个断面总共 125 个数据样本进行分析。根据全年气温、水温变化情况并参照重庆地区季节变化规律^[22]，对研究期间季节变化进行定性划分为：春季 3-5 月上旬；夏季 5 月中旬-9 月中旬；秋季 9 月下旬-11 月下旬；冬季 12 月-次年 2 月。

2 结果分析

2.1 回水区氮、磷浓度的季节变化过程

2007 年 3 月至 2008 年 3 月，小江回水区 TN 的平均浓度为 $1553\pm43\mu\text{g/L}$ ，变化范围为 664-3239 $\mu\text{g/L}$ 。TP 平均浓度为 $61.7\pm2.7\mu\text{g/L}$ ，变化范围为 12.0-191.0 $\mu\text{g/L}$ (表 1)。TN、TP 的季节变化过程类似(图 3)，但季节差异明显。2007 年春季，小江回水区 TN、TP 均保持在相对较低水平，期间 TN、TP 平均值分别为 $1098\pm60\mu\text{g/L}$ 、 $57.0\pm7.8\mu\text{g/L}$ 。受入春后首场强降雨影响，4 月初 TN、TP 普遍增加，其中 TP 的增幅尤为显著。在 5 月蓝藻水华期间，TP 浓度没有明显升高，但 TN 浓度却受蓝藻生物固氮的影响显著提高^[27]。进入夏季后，TN、TP 逐渐上升，夏季 TN、TP 均值分别为 $1693\pm79\mu\text{g/L}$ 、 $62.3\pm5.2\mu\text{g/L}$ 。夏末 TN、TP 水平普遍下降，但入秋后二者均开始缓慢升高，在 2008 年 2 月、3 月间达到全年的最高水平，2008 年 3 月 TN、TP 平均值分别达到 $2217\pm192\mu\text{g/L}$ 、 $89.5\pm15.4\mu\text{g/L}$ 。根据 Wetzel 提供的湖泊、水库营养状态划分标准^[1]，研

究期间小江回水区 96.0%的 TN 样本和 90.4%的 TP 样本超过中营养状态的浓度界限(TN≥753μg/L, TP≥26.7μg/L), 而 34.0%的 TN 样本和 22.6%的 TP 样本高于富营养状态的相应浓度值(TN≥1875μg/L, TP≥84.4μg/L), 小江回水区总体上处于中-富营养状态.

表 1 小江回水区 TN、TP 和 TN/TP 统计结果*

Tab.1 Results for the concentration level of TN, TP and TN/TP in Xiaojiang backwater area		全年(n=125)	春季(n=35)	夏季(n=35)	秋季(n=25)	冬季(n=30)
TN (μg/L)	均值	1552±43	1417±110	1693±79	1386±55	1686±58
	变化范围	644-3239	644-3239	659-2671	1014-2089	1087-2302
	S.D.	484	651	468	274	315
TP (μg/L)	均值	61.7±2.7	66.3±7.4	62.3±5.2	47.6±2.7	67.3±2.8
	变化范围	12.0-191.0	12.0-191.0	22.0-129.0	29.0-82.0	44.0-92.0
	S.D.	30.5	43.7	31.1	13.4	15.4
TN/TP	均值	30.6±1.4	33.9±4.2	31.5±2.0	30.3±1.4	26.2±1.3
	变化范围	6.8-87.3	6.8-87.3	13.5-61.5	19.1-52.8	12.7-40.8
	S.D.	15.3	24.7	11.7	6.9	7.0

* n 为样本数.

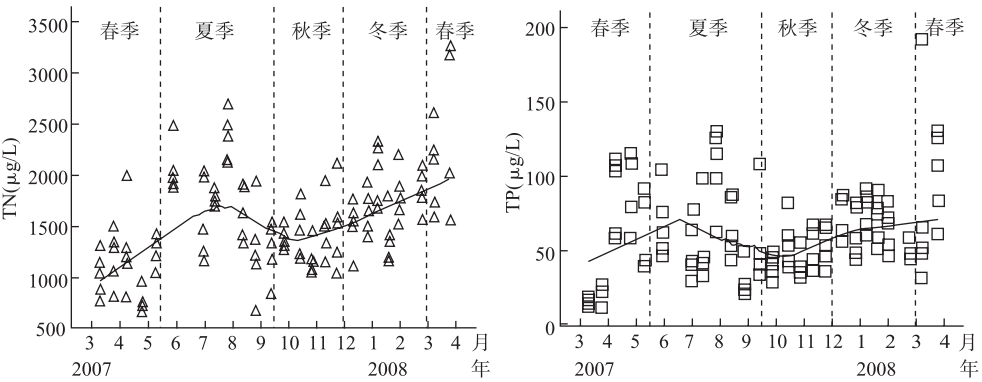


图 3 小江回水区 TN、TP 浓度季节变化过程
Fig.3 Scatter dots of the variation of total nitrogen and total phosphorus

2.2 氮、磷相对丰度的季节变化过程

研究期间, 小江回水区 TN/TP 平均值为 30.6±1.4(表 1), 变化范围为 6.8-87.3. 2007 年 3 月, 小江回水区 TN/TP 保持在全年最高水平(图 4), 但 4 月 TN/TP 陡然下降至全年最低水平, 4 月末回水区各采样断面 TN/TP 平均仅为 8.8. 此后回水区 TN/TP 逐渐回升, 在 7 月末、8 月初虽略有下降, 但入秋后 TN/TP 均基本保持在 20-40 之间. 统计检验表明小江回水区 TN/TP 全年季节间差异并不明显, 但春季 TN/TP 的变幅却是各季节最大的. 根据 Guildford 等提出的水中营养物限制性分类标准^[8]: TN/TP≥50(摩尔比, 换算成质量比约为 22.6)为磷限制状态, 而 TN/TP≤20(摩尔比, 换算成质量比约为 9.0)为氮限制状态, 研究期间 70.4%的 TN/TP 处于磷限制状态, 仅 3.2%的数据样本处于氮限制状态. 虽然研究期间小江回水区总体处于磷限制状态, 但氮限制状态的存在表明研究期间营养物限制状态交替的情况可能存在, 并有可能对浮游植物生长和群落演替产生影响.

3 讨论

参照 Guildford 的营养物限制性标准^[8], 将研究期间小江回水区 TN/TP 划分为以下三个水平: TN/TP ≤22(质量比, 下同)、22<TN/TP<32 和 TN/TP≥32. 表 2 提供了在上述状态下各形态氮素以及 TP 的平均浓度和变化范围, 图 5 反映了不同 TN/TP 水平下的氮素组成情况.

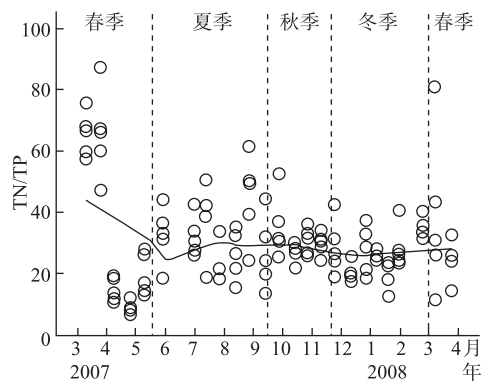


图 4 小江回水区 TN/TP 的季节变化情况

Fig.4 Scatter dot of the variation of TN/TP ratio

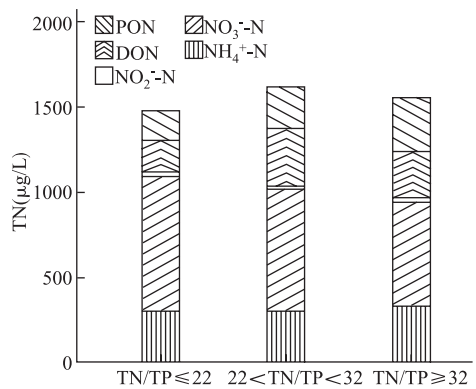


图 5 不同 TN/TP 水平下氮素组成情况

Fig.5 Composition of TN under different TN/TP ratio

研究期间,小江回水区 TN 与 TP 呈显著正相关关系(表 3),表明小江回水区氮、磷输入和输出的途径大致相同. 由于磷素属典型的沉积型循环^[23],除城镇生活污水与工业废水外,水相中 TP 最主要来源是流域矿质颗粒的随流输移和陆源输入^[21],TP 含量的高低反映了该水域营养物输入负荷强度的大小^[5,24]. 研究期间, TN/TP 与 TN 无明显统计关系,但同 TP 总体呈较强的负相关关系,其 log-log 线性模型斜率为 -0.725, LOESS 拟合近似于 3 次多项式的曲线形式(图 6),同 Downing、Quriós 等的研究结果一致^[5-6],说明磷素的波动是调控小江回水区 TN/TP 的主要影响因素^[5]. 另外, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 同 TP 和 TN/TP 无显著相关性,而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与 TP 显著正相关但同 TN/TP 显著负相关(表 3),且 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为水相中氮素的主要赋存形态,说明 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是小江回水区氮素输入的主要形式,且和 TP 的输入途径可能相同.

当 $\text{TN/TP} \leq 22$ 时,水相中 TP 含量明显高于其余两种 TN/TP 水平下的 TP 含量(表 2),说明该状态下营养物输入负荷较高. 较高的 TP 浓度是使该状态下 TN/TP 保持在较低水平的主要原因^[5]. 研究发现该状态下 TN/TP 同 TP 无显著统计关系,但 TN 同 TN/TP 显著正相关(图 7),TN 的增加或减少是改变 TN/TP 的关键,表明在营养物输入强度较大的情况下,TP 相对丰足使 TN 成为影响小江回水区营养结构特点的主要因素,该状态下系统将有可能通过自身的生物固氮作用刺激 TN 含量的增加,调节 TN/TP 以消纳相对过量的 TP^[4,11,24],研究期间在 $\text{TN/TP} \leq 22$ 时出现了固氮型蓝藻的生长证实了上述推断^[27],同时 Smith 亦认为 $\text{TN/TP} \leq 22$ 是固氮型蓝藻占优势的主要标志^[24].

表 2 不同 TN/TP 水平下各形态氮素和 TP 的平均浓度与变化范围*
Tab.2 Mean value and range of TP and different forms of nitrogen under different TN/TP ratios

		TN/TP≤22(<i>n</i> =36)	22<TN/TP<32(<i>n</i> =46)	TN/TP≥32(<i>n</i> =43)
TP	均值	92.6±4.5	60.5±3.1	37.1±2.4
	变化范围	41.0–191.0	27.0–130.0	12.0–75.0
TN	均值	1476±87	1616±74	1550±66
	变化范围	644–2671	659–3239	748–2592
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	均值	297±33	289±26	325±39
	变化范围	78–902	15–737	34–1036
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	均值	793±50	724±44	613±37
	变化范围	213–1344	18–1606	40–1087
$\text{NO}_2^-\text{-N}$	均值	25.4±2.5	17.9±2.9	20.5±2.6
	变化范围	2–55	0.0–116.0	0.0–77.0
DON	均值	184±29	342±39	274±45
	变化范围	9–639	5–1207	0–1045
PON	均值	177±27	242±35	317±49
	变化范围	6–798	13–1063	8–1523

* 单位为 µg/L, *n* 为样本数.

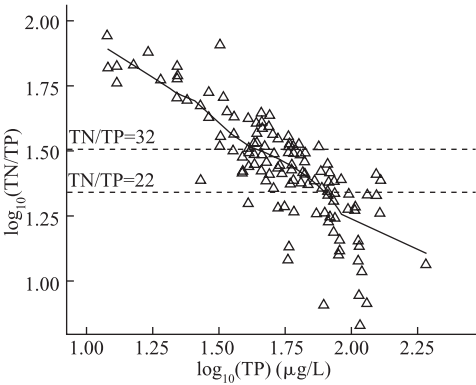


图 6 TP 和 TN/TP 的 log-log 相关关系
Fig.6 Scatter dot of the TP-TN/TP log-log relationship

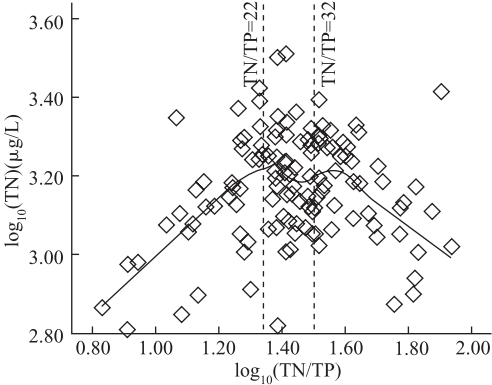


图 7 TN 和 TN/TP 的 log-log 相关关系
Fig.7 Scatter dot of the TN-TN/TP log-log relationship

表 3 研究期间小江回水区不同 TN/TP 水平下各形态氮素同 TP、TN/TP 的相关系数矩阵

Tab.3 Martix of correlation coefficients among different forms of nitrogen, TP and TN/TP ratios

全年数据	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	DON	PON	TN	TP
NH ₄ ⁺ -N	1.000						
NO ₃ ⁻ -N	-	1.000					
NO ₂ ⁻ -N	-	-	1.000				
DON	-	-	-	1.000			
PON	-	-	-	-	1.000		
TN	0.453**	0.453*	-	0.461**	0.416**	1.000	
TP	-	0.445**	-0.226*	-	-	0.464**	1.000
TN/TP	-	-0.219*	-0.192*	-	-	-	-0.813*
TN/TP≤22	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	DON	PON	TN	TP
NH ₄ ⁺ -N	1.000						
NO ₃ ⁻ -N	-	1.000					
NO ₂ ⁻ -N	-0.434**	-0.437**	1.000				
DON	-	0.398*	-0.348*	1.000			
PON	-	-	-	-	1.000		
TN	0.703**	0.749**	-0.414*	0.543**	0.506**	1.000	
TP	-	0.390*	-	-	-	0.479**	1.000
TN/TP	0.580**	0.402*	-0.544**	0.337*	0.451**	0.594**	-
22<TN/TP<32	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	DON	PON	TN	TP
NH ₄ ⁺ -N	1.000						
NO ₃ ⁻ -N	-	1.000					
NO ₂ ⁻ -N	-	-	1.000				
DON	-	-	-	1.000			
PON	-	0.416**	0.295*	-	1.000		
TN	0.380**	0.560**	-	0.387**	0.629**	1.000	
TP	0.303*	0.551**	-	0.370*	0.612**	0.938**	1.000
TN/TP	-	-	-	-	-	-	-0.442**
TN/TP≥32	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	DON	PON	TN	TP
NH ₄ ⁺ -N	1.000						
NO ₃ ⁻ -N	-	1.000					
NO ₂ ⁻ -N	-	-	1.000				
DON	-	-	-	1.000			
PON	-	-	-	-	1.000		
TN	0.399**	-	-	0.459**	0.460**	1.000	
TP	0.436*	-	-	0.351**	0.468**	0.861**	1.000
TN/TP	-0.296*	-	-	-	-0.362*	-0.416*	-0.788**

* 显著性水平为 0.05; **显著性水平为 0.01; “-” 表示无显著相关性.

当 $22 < \text{TN}/\text{TP} < 32$ 时, TN 和 TP 高度正相关, 相关系数达到 0.983(表 3), 但 TN 同 TN/TP 无显著相关性而 TP 同 TN/TP 呈显著负相关, 说明该状态下 TP 取代 TN 成为调控水体营养结构特点的主要因素. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DON 和 PON 与 TN 均有显著正相关关系, 但对相关系数的比较发现, 该状态下 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 PON 的增加对 TN 增加的贡献较大. 同时, PON 同 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 亦有显著正相关关系, 而同 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 无明显相关性. 由于磷限制状态下水相中氮素最主要的合成途径为 $\text{NO}_3^-\text{-N} \rightarrow \text{PON}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N} \rightarrow \text{PON}$ ^[1], 相比之下, 研究认为该状态下系统通过对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的摄取、利用以合成有机氮素的生态过程更为明显.

当 $\text{TN}/\text{TP} \geq 32$ 时, 小江回水区水相中 TP 含量保持在较低水平(表 2)^[24], 使 TN/TP 相对较高. 相关性分析发现 TN 和 TP 保持较强的正相关关系, 相关系数为 0.861(表 3). 虽然各形态氮素之间相关关系不明显, 但 TN 和 TP 均与 DON、PON 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 显著正相关, 且 DON、PON 同 TN、TP 的相关性大于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (表 3), 说明该状态下 TP 含量同有机氮含量关系紧密. 而 PON 与 TN/TP 有显著负相关关系, 说明该状态下水中 PON 含量下降同 TN/TP 升高或 TP 含量下降有关, 据此推测该状态下 TN/TP 升高有使 PON 含量减少的趋势, 反映出浮游植物利用无机氮素合成 PON 的过程将有可能受到抑制. 结合该状态下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 同 TN、TP 显著正相关, 同 TN/TP 显著负相关, 研究认为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 可能是影响该状态下上述氮素合成和循环过程的关键因子.

作为湖泊营养结构的关键表征, TN/TP 变化将明显改变湖泊生境. 对不同类型湖泊的大量调查发现, TN/TP 的降低是湖泊营养水平提高的标志^[5-6], 而伴随 TN/TP 的降低, $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 随 TN/TP 的降低而增加^[6], 湖泊水体将从氧化性环境向还原性环境转变^[7,25], 同时氮素循环强度亦明显提高^[1], DON/PON 将随湖泊营养程度的加重而降低^[1]. 但在本研究中, 小江回水区 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 随 TN/TP 的增加而升高, 而 DON/PON 则相应地呈现出下降的趋势(图 8). 另外, 当 $22 < \text{TN}/\text{TP} < 32$ 和 $\text{TN}/\text{TP} \geq 32$ 时 TON(DON+PON) 含量及其在 TN 中所占比重相当, 且均大于 $\text{TN}/\text{TP} \leq 22$ 水平下的相应值, 同时 PON 含量及其在 TN 中所占比重在 $\text{TN}/\text{TP} \geq 32$ 水平下最高, 而在 $\text{TN}/\text{TP} \leq 22$ 水平下最低. 可以看出, 小江回水区氮素形态组成($\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 DON/PON)随 TN/TP 升高或降低而发生的变化均未表现出湖泊已有研究中所反映出的特点^[1,6].

根据前述分析并结合野外实地观测经验, 研究发现该区域河道型水库的独特物理背景和水动力条件在一定程度上支配着 TP 的季节变化过程. 研究期间, 小江回水区 TP 和作为磷素主要赋存形态的颗粒态磷(PP)同径流、降雨量均有显著的正相关关系. 换句话说, 强降雨和强径流过程在很大程度上带来了高强度的营养物输入, 使回水区 TP 含量有明显升高. 由于河道型水库水体更新周期远小于湖泊(据笔者计算小江回水区 145m 水位下夏季洪水季节水体更新周期仅 20d 左右, 而 156m 水位下冬季枯水季节更新周期为 80-90d), 较强的降雨和径流过程却有可能使回水区水体更新周期过快而不适宜浮游生物生长. 因此, 在 $\text{TN}/\text{TP} \leq 22$ 水平下, TP 大量输入的同时, 不适宜的水动力条件有可能在一定程度上抑制了氮素的有机合成, 使得该状态下 DON、PON 含量以及它们在 TN 中所占比重为比其余两种 TN/TP 水平下的相应值低, 而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量及其在 TN 中所占比重为最高, $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 则下降. 但伴随强降雨和强径流过程的终结, TP 含量下降但 TN/TP 却有所升高, 水动力条件趋于改善为浮游植物生长创造了相对稳定的物理环境, 并加速了对无机氮素的生物利用, 使得在 $\text{TN}/\text{TP} \geq 32$ 和 $22 < \text{TN}/\text{TP} < 32$ 水平下, DON、PON 含量及其在 TN 中所占比重均较 $\text{TN}/\text{TP} \leq 22$ 时的相应值高, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量及其在 TN 中所占比重则明显下降. 但目前的研究暂无法解释以下两个现象:

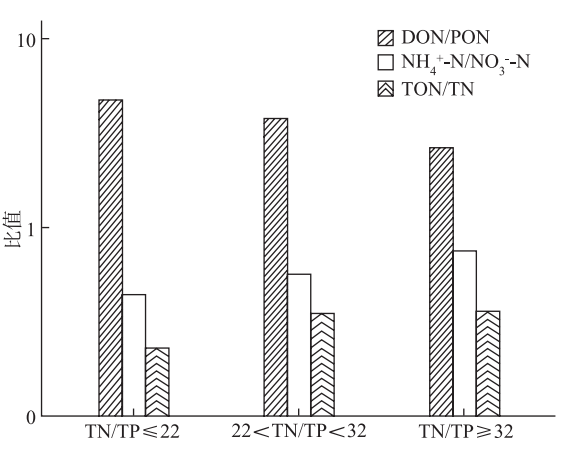


图 8 不同 TN/TP 下主要氮素形态相对丰度变化情况
Fig.8 Variation of relative abundance of major forms of nitrogen under different TN/TP ratio

(1)当 $TN/TP \leq 22$ 时, 较强的强降雨和径流过程使 TP 含量增加, NO_3^- -N 含量亦明显增加, 回水区中无机氮(DIN)较为丰富. 虽然生物固氮作用的发生被认为是为了消纳该状态下系统中相对丰足的 TP, 但从氮素形态组成上看, 该状态下并不存在无机氮的相对不足而迫使蓝藻通过固氮作用满足自身生长的物质条件^[26], 这同生物固氮研究中的普遍认识^[26]有一定矛盾. 同时, 该状态下 NO_2^- -N 同各形态氮素和 TN 均显著负相关, 且 DON 与 NO_3^- -N 有显著的正相关关系, 研究推测生物固氮的产生可能同无机氮素的生物可利用性密切相关, 并将很可能改变该状态下的氮素循环模式, 但由于缺乏更多的信息, 目前尚难以就上述问题作进一步阐释.

(2)当 $TN/TP \geq 32$ 时, 虽然研究认为 NH_4^+ -N 对该状态的氮素循环有明显影响, 但 NH_4^+ -N 在氮素合成和分解环中所扮演的角色并不明晰. 另外, 该状态下 TN 同 TN/TP 有显著的负相关关系(表 3、图 7), 表明除 TP 影响 TN/TP 的变化外, TN 含量的改变亦同水体磷限制程度的变化有密切联系. 但目前的研究仍无法揭示其潜在的生态机制.

4 结论

研究期间, 小江回水区 TN 的平均浓度为 $1553 \pm 43 \mu\text{g/L}$, TP 平均浓度为 $61.7 \pm 2.7 \mu\text{g/L}$, 回水区总体处于中-富营养状态. TN、TP 的季节变化过程类似, 但季节差异明显, 其基本变化过程是: 2007 年春季保持相对较低水平, 受入春后暴雨的影响在春末夏初出现较大幅度的增加, 在夏季达到全年的较高水平, 入秋后 TN、TP 浓度逐渐下降, 但入冬后继续缓慢上升. 研究期间, TN/TP 平均为 30.6 ± 1.4 , 表现为磷素限制, 全年季节变化并不明显, 但在春季变幅较大. 该水域氮、磷输入、输出的途径大致相同, TP 的波动是调控小江回水区 TN/TP 的主要影响因素.

当 $TN/TP \leq 22$ 时, TN 是影响小江回水区营养结构特点的主要因素, 生物固氮作用有可能发生以调节 TN/TP , 消纳相对丰足的 TP. 当 $22 < TN/TP < 32$ 时, TP 取代 TN 成为调控 TN/TP 的主要因素, 系统通过对 NO_3^- -N 的摄取、利用以合成有机氮素的生态过程较明显. 当 $TN/TP \geq 32$ 时, TP 含量保持在较低水平, TP 和 TN/TP 对有机氮含量影响显著. 研究推测 TN/TP 的升高有使氮素有机合成受到抑制的潜势, NH_4^+ -N 有可能是影响 $TN/TP \geq 32$ 水平下氮素合成和循环过程的关键因子.

小江回水区过渡型生态系统的独特物理背景使得不同 TN/TP 水平下氮素形态组成和循环过程带上了水动力的烙印: 强降雨和强径流过程使回水区段营养物输入强度加大, 水中 TP 含量提高但水动力条件却不适宜浮游植物的生长, 有机氮含量及其在 TN 中所占比重随 TP 含量的升高和 TN/TP 的下降而下降. 但伴随强降雨和强径流过程的终结, TP 含量下降但 TN/TP 却有所升高, 水动力条件趋于改善为浮游植物生长创造了相对稳定的物理环境, 加速了对无机氮的生物利用, 使 TON 含量及其在 TN 中所占比重升高, NO_3^- -N 含量及其在 TN 中所占比重则明显下降. 但是目前的研究上尚未能就 $TN/TP \leq 22$ 时生物固氮作用的产生机制以及 $TN/TP \geq 32$ 水平下 TN 对 TN/TP 的调控作用等现象做进一步的阐释.

5 参考文献

- [1] Wetzel RG. Limnology: Lakes and river ecosystems. CA: Academic Press, 2001: 207-210.
- [2] Tilman D. Resource competition between planktonic algae: An experimental and theoretical approach. *Ecology*, 1977, **58**(2): 338-348.
- [3] 宋玉芝, 秦伯强, 高 光. 氮及氮磷比对附着藻类及浮游藻类的影响. 湖泊科学, 2007, **19**(2): 125-130.
- [4] Smith VH. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: An empirical and theoretical analysis. *Limnol & Oceanogr*, 1982, **27**(6): 1101-1112.
- [5] Downing JA, McCauley E. The Nitrogen: Phosphorus Relationship in Lakes. *Limnol & Oceanogr*, 1992, **37**(5): 936-945.
- [6] Quirós R. The relationship between nitrate and ammonia concentrations in the pelagic zone of lakes. *Limnetica*, 2003, **22**(1-2): 37-50.
- [7] Quirós R. The nitrogen to phosphorus ratio for lakes: A cause or a consequence of aquatic biology? In: Fernandez AC, Chalar GM eds. El Agua en Iberoamerica: De la Limnología a la Gestión en Sudamerica. Programa Iberoamericano de Ciencia y

- Tecnologia para el Desarrollo (CYTED). Buenos Aires, Argentina, 2003: 11-26.
- [8] Guildford SJ, Hecky RE. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship? *Limnol & Oceanogr*, 2000, **45**(6): 1213-1223.
- [9] Håkanson L, Bryhn AC, Hytteborn JK. On the issue of limiting nutrient and prediction of cyanobacteria in aquatic systems. *Sci Total Enviro*, 2007, **379**: 89-108.
- [10] Reynolds CS. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status? *Hydrobiologia*, 1998, **369/370**: 11-26.
- [11] Smith VH. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Science*, 1983, **211**: 669-671.
- [12] 胡建林, 刘国祥, 胡征宇等. 三峡库区重庆段主要支流春季浮游植物调查. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 116-119.
- [13] 邓文娜, 余育和, 冯伟松等. 三峡库区浮游生物群落结构与 DNA 多态性比较分析. 湖泊科学, 2007, **19**(3): 333-339.
- [14] 富 国. 湖库富营养化敏感分级水动力概率参数研究. 环境科学研究, 2005, **18**(6): 80-84.
- [15] 郑丙辉, 张 远, 富 国等. 三峡水库营养状态评价标准研究. 环境科学学报, 2006, **26**(6): 1022-1030.
- [16] 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.
- [17] 吴世凯, 谢 平, 王松波等. 长江中下游地区浅水湖群中无机氮和 TN/TP 变化的模式及生物调控机制. 中国科学(D 辑), 2005, **35**(增刊 II): 111-120.
- [18] Xie L, Xie P, Li S *et al*. The low TN:TP ratio, a cause or a result of Microcystis blooms? *Wat Res*, 2003, **37**: 2073-2080.
- [19] 李 哲, 郭劲松, 方 芳等. 三峡小江回水区氮素形态组成与季节变化特点. 环境科学, 2009, **30**(6): 28-34.
- [20] 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(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 1997: 243-285.
- [21] Allan JD, Castillo MM. Stream ecology: structure and function of running waters 2nd Edition. NL: Springer Press, 2007: 256-264.
- [22] 重庆气象网. 重庆市气候与气象灾害. 2007. <http://www.121.cq.cn/service/cqweather.htm#one>.
- [23] Odum EP 著, 孙儒泳, 钱国桢等译. 生态学基础. 北京: 人民教育出版社, 1981: 83-100.
- [24] Havens KE, James RT, East TL *et al*. N:P ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution. *Enviro Pollut*, 2003, **122**: 379-390.
- [25] Stumm W, Morgan JJ. Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in nature waters(3rd ed). NY: John Wiley & Sons. 1996: 927-932.
- [26] Howarth RW, Marino R, Cole JJ. Fixation in freshwater, estuarine, and marine ecosystems. 2. biogeochemical controls. *Limnol & Oceanogr*, 1988, **33**(4 part2): 688-701.
- [27] 李 哲, 方 芳, 郭劲松等. 三峡小江回水区段 2007 年春季水华与营养盐特征. 湖泊科学, 2009, **21**(1): 36-44.