# 三峡小江回水区氮素赋存形态与季节变化特点

李哲,郭劲松,方芳\*,陈杰,张超,田光

(重庆大学城市建设与环境工程学院,重庆 400045)

摘要: 氮素是浮游植物生长的关键生源要素之一,本研究对 2007 年 3 月~2008 年 3 月三峡小江回水区水中氮素的跟踪观测结 果进行总结,分析不同形态氮素季节变化过程与相对组成特点.研究期间,回水区TN 的平均浓度为(1553±43)  $\mu_{g}$  L<sup>-1</sup>,季节 差异显著但总体呈上升趋势. DIN 平均浓度为(1031±32)  $\mu_{g}$  L<sup>-1</sup>,占TN 平均浓度的 66 38%,是该水域氮素的主要赋存形态, 其中NO<sub>3</sub>-N含量较高说明小江回水区总体上处于较强氧化环境且自净能力较强. DON、PON 平均浓度分别为(273±23)  $\mu_{g}$  L<sup>-1</sup>、(249±23)  $\mu_{g}$  L<sup>-1</sup>,占TN 的 26 48% 和 24 15%; DON PON 比值为 3.63±0.93,说明该水域氮素代谢强度与周转速率较 高. 小江回水区 DIN 在 TN 中所占比重从 2007 年 3 月约占 TN 的 80% 逐渐下降到 2008 年春季约占TN 的 60%,而 TON 在 TN 中 的比重则相应上升,说明氮素赋存形态向有机态转变的趋势明显;而对 DIN-TN 和 TON-TN 的  $\log$  log 线性模型斜率比较发现 TON 对 TN 的贡献将随TN 浓度的升高而增大,表明该水域营养水平有升高的趋势. NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N NO<sup>3</sup><sub>3</sub>-N 同 TON/TN 存在显著正相关 关系,说明 TON 相对丰度的增加有可能使水体向还原性环境转变.同时NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N相对丰度的变化同水中 DON 含量及其在 TN 中 所占比重关系密切,但该水域 DON 氨化降解成NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N并再次被利用的内循环过程是否存在或会否成为调控氮素循环的关键 过程有待更深入的研究.

关键词: 三峡水库; 小江回水区; 氮素赋存形态; 季节变化; 循环特点 中图分类号: X522; X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)061588-07

# Seasonal Variation of Nitrogen in Xiaojiang Backwater Area, Three Gorges Reservoir

LI Zhe, GUO Jing-song, FANG Fang, CHEN Jie, ZHANG Chao, TIAN Guang

(Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Nitrogen is one of the key nutrients for phytoplankton. Seasonal variation of different forms of nitrogen in Xiaojiang backwater area (XBA) in Thee Gorges Reservoir from Mar. 2007 to Mar. 2008 was reported. It was found that average concentration of total nitrogen (TN) during the research period was  $(1553\pm43) \ \mu_g \cdot L^{-1}$ . Although remarkable seasonal variability of TN, it showed a general trend of increase of TN during the research period. Dissolved inorganic nitrogen (DIN) was the major form of nitrogen with an average concentration of ( $1031\pm32$ )  $\ \mu_g \cdot L^{-1}$ , amounted up to 66 38% in TN. The relatively high level of nitrate in DIN indicated that XBA remained a strong oxidation environment with a good self purification generally. Mean value of the concentration of dissolved organic nitrogen (DON) and particulate organic nitrogen (PON) were  $(273\pm23) \ \mu_g \cdot L^{-1}$  and  $(249\pm23) \ \mu_g \cdot L^{-1}$ , taking up to 26 48% and 24 15% in TN separately. However, the DON PON ratio was only 3.  $63\pm0.93$ , which represented the intensive nitrogen cycling and high turnover rates. The amount of DIN in TN decreased from 80% in Mar. 2007 to 60% in Mar. 2008, which showed a trend that forms of nitrogen had been transferring from inorganic forms to organic forms. Compared to the lower slope of DIN-TN log-log linear model, the relatively high slope of TON-TN log-log linear model indicated the contribution of total organic nitrogen (TON) to TN would become significant with the increase of TN. Meanwhile, the positive correlation between NH<sub>4</sub><sup>4</sup>-NNO<sub>5</sub><sup>5</sup>-N and TON TN indicated the increase of TON in TN might cortribute to a reductive environment in XBA. Nevertheless, it also showed a close relationship between ammonia and DON, but whether the ammonification of DON existed or might become the controlling process of nitrogen cycling in XBA still needs further study.

Key words: Three Gorges Reservoir; Xiaojiang backwater area; forms of nitrogen; seasonal variation; characteristic of cycling

氮素是生命活动必不可少的营养元素. 在水体 富营养化过程中, 陆源输入的大量氮素直接促进了 浮游植物的生长, 生产力水平的普遍提高加速了氮 素的循环并破坏了水中氮、磷等营养物构成平衡, 迫 使浮游植物群落结构发生变化<sup>[1,2]</sup>. 同时, 水环境中 普遍存在的生物固氮和反硝化过程以及大气层中的 干、湿沉降将水相中氮素的循环过程同大气中庞大 而稳定的无机氮库紧密连接<sup>[3]</sup>, 适时地调节水中氮 含量的高低,缓解或加速富营养化水体营养结构的 失衡状态<sup>[2]</sup>,使氮素的循环过程更具开放性、复杂 性<sup>[4]</sup>.因此了解特定水生生态区系中氮素存在形态

- 基金项目:中国科学院西部行动计划项目(KZCX 2-XB2-07-02);重庆 市重大科技专项(CSTC 2006BA7030)
- 作者简介: 李哲(1981~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水体富营 养化, F-mail: Lizhe1981@126 com
  - \* 通讯联系人, E-mail: xiduo@ tom. com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

收稿日期: 2008-07-20;修订日期: 2008-11-28

与季节变化过程,分析调控氮素生物地化循环的潜 在因子、过程,对更清晰地认识水体富营养化的发展 趋势具有重要意义.

三峡水库成库后次级河流回水区段富营养化问题近年来颇受关注<sup>[5]</sup>.水动力条件的改变<sup>[6]</sup>和流域内大量营养物输入并积累被普遍认为是富营养化的根本原因.目前大量研究报道集中于分析库区氮、磷营养物来源<sup>[7~9]</sup>,探讨独特水文、水动力条件对浮游植物生长的影响<sup>[10]</sup>,寻找合理解释浮游植物大量生长的证据<sup>[11,12]</sup>,探索三峡库区次级河流回水区富营养化控制、环境管理的方法和新途径.但对于该过渡型生态系统,从营养物赋存形态及其生物地化循环的角度反映和剖析水体富营养化特点却少有报道. 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.本研究总结了 2007 年 3 月~2008 年 3 月小江回水区氮素赋存形态与季节变化过程,并对该水域氮素循环特点进行了分析探讨.

1 材料与方法

1.1 研究区域

小江流域(图1),介于北纬30°49~31°42,东经 107°56~108°54之间,流域面积5276km<sup>2</sup>,干流全长 182km,河口距三峡大坝约250km,是三峡库区中 段、北岸流域面积最大的次级河流.流域地貌属典型 的叶形丘陵山地,上游为大巴山南麓中低山地,中下 游为川东平行岭谷低山丘陵,集中了三峡水库库中 与库尾川东丘陵区各次级河流流域的主要地貌与气 候特点,具有典型的代表性.

三峡水库蓄水至 156 m 后, 小江流域回水区段 延伸至开县渠口镇境内, 近 60 km. 但考虑回水区末 端受 156~145 m 水位涨落的影响, 本研究选择 145 m 以下的永久回水区, 即云阳县养鹿杨家坝至小江 河口, 约 40 km 河段作为研究区域. 根据研究区域内 的河道特征, 将其划分为 4 个河段(图 2), 分别为: 杨家坝一小江电站(约 13 km)、高阳平湖(小江电站 一代李子, 约 7 km)、代李子一牛栏溪(约 11 km) 以 及牛栏溪一小江河口(约 10 km). 其中, 杨家坝一小 江电站与代李子一牛栏溪河段均为峡谷型河道, 河 道狭长且断面变化不大, 水力条件相对单一; 而高阳 平湖段则为小江回水区在蓄水后形成的面积在 4~ 5 km<sup>2</sup> 的水域, 145 m 水位下平均水深不到 10 m, 近 似于浅水湖泊, 是小江回水区中部相对独立且封闭 的区域; 牛栏溪以下河段, 河道断面放宽, 水力条件



图1 小江流域水系 Fig.1 Drainage system of Xiaojiang watershed

上易受长江干流回灌影响.

1.2 采样方案

为全面反映小江回水区上述 4 个河段的水环境 特点,并综合考虑沿岸场镇排污的影响,笔者在小江 回水区共布置 5 个采样断面(图 2),分别为:杨家坝 一小 江 电 站 河 段 的 渠 马 渡 口 (N31°07′50.8″ E108°37′13.9″)、 高 阳 平 湖 (N31°07′50.5″ E108°40′29.5″)、代李子一牛栏 溪河 段的 黄 石 镇



图 2 养鹿一河口段回水区示意和采样点分布

区域: 牛栏溪以下河段, 河道断面放宽, 水力条件。 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. and http://www.cnki.net (N31°00′29.4″E108°42′39.5″)以及下游的双江大桥 (N30°56′51.1″E108°41′37.5″)和小江河口 (N30°57′03.8″E108°39′30.6″).各断面采样点均位于 河道深弘线处,每月2次采集水深0.5、1、2、3、5、8 m 处共6个测点的水样,采样时间控制在采样当日 09:30~16:30.除现场测试指标外,对上述各深度水 样进行等量混合,混合后水样于48 h内完成所有指 标的分析测试工作.

1.3 测试分析与数据处理方法

测试指标包括:氨氮(NH<sup>4</sup>-N)、硝态氮 (NO<sup>3</sup>-N)、亚硝态氮(NO<sup>2</sup>-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<sup>1</sup><sup>4</sup>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NH<sup>4</sup>-N<sup>[13]</sup>,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<sub>3</sub>)<sup>[14]</sup>,但由于其吸附量有限且易受水质理化特 征的干扰<sup>[14,15]</sup>,本研究对水相中的 PNH<sub>3</sub> 不予考 虑<sup>[14-16]</sup>.根据文献[15],本研究中各形态氮素的计 算关系式如下:

溶解态有机氮(DON) = DKN-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N

溶解态无机氮(DIN) =  $NH_4^+ - N + NO_3^- - N + NO_2^- - N$ 

颗粒态有机氮(PON) = TKN-DKN

总有机氮(TON)= DON+ PON

总氮(TN)= DIN+ DON+ PON

溶解态总氮(DTN)= DN+ DON

所有指标的分析测试方法参照文献[13,17]进行. 各采样点测试数据均录入 SPSS 进行统计分析, 并采用局部加权回归方法(LOESS) 对各次采样数据 进行回归平滑,说明数据的总体变化趋势.所有相关 性分析或检验均采用非参数统计方法进行 (Spearman 相关性分析等).

本研究选择 2007 年 3 月~2008 年 3 月采集的 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<sup>[18]</sup>,对研究期间季节变化情况定性划分为: 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 结果与分析

2.1 回水区水体TN含量与季节变化

研究期间,小江回水区 TN 的平均浓度为(1553 ±43) <sup>1</sup>/<sub>19</sub>•L<sup>-1</sup> (表 1), 变化范围为 664~ 3 239 № L<sup>-1</sup>, 季节变化明显(图 3): 2007 年春季回水区 TN 保持在较低水平,平均值仅为(1098±60) <sup>µ</sup>g•L<sup>-1</sup>.5月中旬开始,回水区暴发固氮型蓝藻水 华<sup>[19]</sup>. 生物固氮作用使 TN 浓度在入夏后迅速升高. 夏季回水区TN 平均值为(1693±79) 以•L<sup>-1</sup>.夏末 秋初. 回水区 TN 浓度迅速下降, 是全年的最低水 平. 但入冬后 TN 水平再次逐渐升高, 并在 2008 年春 季达到全年的最高水平, 2008 年 3 月 TN 平均值为 (2217±192) <sup>µ</sup>g•L<sup>-1</sup>. 研究期间, 回水区 TN 含量总 体呈上升趋势,大体上,夏、冬季TN 浓度较高、春季 次之,秋季最低. 根据 Wetzel 提供的湖泊、水库营养 状态划分标准[14],研究期间小江回水区 62.0% 的样 本 TN 位于中营养状态(753 μg•L<sup>-1</sup> ≤TN ≤1875  $l_{g} \cdot L^{-1}$ )的浓度范围内, 34.0%的样本 TN 超过富营 养状态的 TN 浓度 阈值( TN ≥1 875 峠 •L<sup>-1</sup>) . 就 TN 含量而言,小江回水区总体处于中,富营养状态,



#### 图 3 小江回水区 TN 和 DIN 浓度季节变化过程

Fig. 3 Scatter dots of the variation of total nitrogen & DIN

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表1 小江回水区氮素赋存形态调查结果/¤g•L<sup>-1</sup>

Table 1	Results for	the different	forms o	f nitrogen	in 1	Xiao jiang	backwater	area/µg•L⁻	- 1
---------	-------------	---------------	---------	------------	------	------------	-----------	------------	-----

项	∃	NH4-N	$NO_3 - N$	$NO_2^ N$	DIN	DON	PON	TON	TN
全年数据	平均值	$304 \pm 19$	706±26	21. 0±1.6	$1031\pm32$	$273 \pm 23$	249 ±23	522±31	$1553 \pm 43$
( <i>n</i> = 125)	范围	15~ 1036	18~ 1 606	0. 0~ 116.0	95~ 2002	0~ 1207	6~ 1 523	8~ 1898	644~ 3239
春季	平均值	$192 \pm 15$	733±55	32. $0 \pm 3.2$	$958 \pm 62$	$180 \pm 45$	279 ±62	460±82	$1417 \pm 110$
( <i>n</i> = 35)	范围	49~ 360	338~ 1 606	11. 0~ 116.0	442~ 2002	0~ 1207	6~ 1 523	8~ 1898	644~ 3239
夏季	平均值	$439 \pm 43$	611±54	22. $6 \pm 3.0$	$1073\pm73$	$343 \pm 46$	276±32	$620 \pm 45$	1 693 ± 79
( <i>n</i> = 35)	范围	34~ 1036	18~ 1 344	4. 0~ 77. 0	95~ 1861	9~ 1045	19~ 798	205~ 1 192	659~ 2671
秋季	平均值	$22 \pm 3$	701±51	8.4±1.9	$929 \pm 52$	$289 \pm 41$	168 ± 29	457±48	$1386\pm55$
( <i>n</i> = 25)	范围	15~ 560	289~ 1 226	0. 0~ 38 0	588~ 1499	59~ 747	13~ 672	110~ 946	1014~ 2089
冬季	平均值	$346 \pm 39$	789 ±36	16. 6±2. 1	$1151\pm49$	$286 \pm 49$	$250 \pm 43$	536±56	$1687\pm58$
( <i>n</i> = 30)	范围	74~ 820	529~ 1 119	1. 0~ 39 0	668~ 1819	5~ 1095	25~ 897	85~ 1 127	1087~ 2302

2.2 DIN 含量与季节变化

研究期间, 小江回水区 DIN 平均浓度为(1031 ±32) μg•L<sup>-1</sup>, 变化范围为 95~ 2 002 μg•L<sup>-1</sup>(表 1), 占 TN 平均浓度的 66.38%, 是回水区氮素的主要赋 存形态. DN 的季节变化过程同 TN 相似(图 3), 但 略有不同: DIN 在 2007 年冬季和 2008 年春季间并无 明显上升趋势. 检验结果表明回水区 DIN 浓度季节 间差异并不明显.

在 DN 中, NO<sub>3</sub>-N 平均浓度为(706 ± 26)  $\mu_{g}$ •L<sup>-1</sup>,占 DIN 平均浓度的 68.48%,占 TN 平均浓 度的 45.46%,是 DN 的主要组成部分, NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N平均 浓度 为(304 ± 19)  $\mu_{g}$ •L<sup>-1</sup>,占 DN 平均浓度的 29.39%,是 TN 浓度平均值的 19.58%.而NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N平 均浓度为(21.0±1.6)  $\mu_{g}$ •L<sup>-1</sup>,仅占 DIN 平均浓度的 2.03%.

研究期间, NO<sub>3</sub>-N在 2007 年春季保持相对较高 水平(图4), 但在5 月末蓝藻水华期间出现了较明 显的下降, 平均浓度仅为(352±113) <sup>µ</sup>g•L<sup>-1</sup>, 占 DIN 的 30. 11%. 进入盛夏后, 回水区NO<sub>3</sub>-N浓度逐渐升 高, 在7 月末达到全年的第1 个峰值(1 129±59)



图 4 硝态氮和氨氮的季节变化过程

 $\mu_{g}$ • L<sup>-1</sup>, 虽然夏末秋初回水区NO<sub>3</sub>-N含量有一定下降,但进入 10 月份后NO<sub>3</sub>-N浓度再次上升, 并在 2008 年春季达到全年的最高值. 回水区NH<sup>4</sup>-N含量 季节波动较NO<sub>3</sub>-N明显, 最高水平出现在盛夏季节 (6~8月),在入秋后逐渐下降,入冬后虽有所上升, 但却在 2008 年 2 月末又迅速下降(图 4). NO<sub>2</sub>-N季 节变化不明显,峰值出现在 2007 年 5 月蓝藻水华期间, 5 月末各采样断面平均浓度达(49.8±8.0)  $\mu_{g}$ • L<sup>-1</sup>, 占同期 DIN 平均浓度的 4. 26%; 其在 10 月 末达到全年的最低水平, 平均浓度为(1.2±0.7)  $\mu_{g}$ • L<sup>-1</sup>, 仅占同期 DIN 平均浓度的 0. 17%.

## 2.3 DON、PON 含量与季节变化

研究期间,小江回水区 DON 平均浓度为(273± 23) μg•L<sup>-1</sup>(表1),变化范围为 0~1 270 μg•L<sup>-1</sup>,占 TN 平均浓度的 26.48%. PON 平均浓度为(249±23) μg•L<sup>-1</sup>,变化范围为 6~1 523 μg•L<sup>-1</sup>,占TN 平均浓 度的 24.15%.统计检验表明小江回水区 DON 和 PON 含量并无显著差异(显著性水平 Sig. = 0.896> 0.01).同时,二者季节变化过程基本相同(图 5): 2007 年春季开始逐渐增加并在夏季达到较高水平,



图 5 DON 和 PON 的季节变化过程

1591

© 1994-26 Fig.<sup>4</sup> China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. "http://www.cnki.net

夏末初秋略有回落但从 11 月中旬开始继续上升并 在 2008 年春季达到全年最高水平.

3 讨论

如图 6,水中氮素主要来自陆源输入、大气沉 降、地下水渗入、沉积层释放等<sup>[14]</sup>,其在水相中循环 的基本模式为: DIN 在浮游植物或水生高等植物的 光合作用下被同化成有机生命体中的 PON(蛋白质 等),进入水中食物网,在不同营养层级中至下而上 逐级传递<sup>[3]</sup>.随着生物体的衰减、死亡,碎屑中的 PON 在细菌等的作用下,分解成 DON(氨基酸、多 肽、嘌呤、尿素等)进而氨化成NH+-N,返回无机环 境,并通过亚硝化、硝化、反硝化等作用在"三氮" (NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N、NO<sup>3</sup><sub>3</sub>-N和NO<sup>5</sup><sub>2</sub>-N)间进行循环,反硝化产物 N<sub>2</sub>(或NO<sub>4</sub>等)则重返大气<sup>[3, 14]</sup>.但在特殊条件下,具 有固氮功能的细菌和蓝藻能直接利用大气中的氮气 参与自身合成代谢过程,成为水相中氮素的重要来 源<sup>[14]</sup>.另外,部分DON 物质(尿素等)在浮游植物繁 盛期可以未经细菌降解而直接被浮游植物利用,使 氮素循环过程缩短<sup>[20]</sup>.大量调查亦证实在不同营养 水平下氮素赋存形态和循环特点亦有明显不同<sup>[21]</sup>, 以下对研究期间小江回水区氮素形态季节变化过程 中反映出来的氮素循环过程若干方面特点及其同水 体营养水平的潜在联系进行初步分析探讨.



图 6 水相中不同形态氮素间的生物地化循环过程(在文献[14]基础上进行简化) Fig. 6 Generalized nitrogen cycles in water column

研究期间,小江回水区 DIN 在 TN 中所占比重 呈下降趋势,从 2007 年 3 月份约占 TN 的 80% 逐渐 下降到 2008 年春季约占 TN 的 60%.与此相反的是 TON 在 TN 中的比重则呈逐渐上升的趋势,从 2007 年 3 月约占 TN 的 20% 逐渐上升到 2008 年春季约占 TN 的 40% (图 7),说明研究期间小江回水区氮素赋 存形态有从无机态向有机态转移的趋势.相关性分 析表明, DN 和 TON 同 TN 均显著正相关,但 TON 同 TN 的相关性较强(DIN-TN 的相关系数 r = 0.631, TON-TN 的相关系数 r = 0.678),而采用 log log 线性 模型分析 TON 和 DIN 随 TN 含量增加而变化的特点 (图 8),发现 TN-DIN 的 log log 模型斜率仅为 0.821 (Sig = 0.000< 0.01) 面 TN-TON 的 log log 模型斜率





(Sig. = 0.000 < 0.01) 而 TN-TON 的 log-log 模型斜率 Fig. 7 Scatter dot for the variation of DIN/TN and TON/TN in the second se

则 1.628(Sig. = 0.000< 0.01),表明随着 TN 含量的 升高,TN 中 TON 的增量要大于 DIN 的增量,说明TON 对回水区中 TN 含量增加的贡献有增大的趋势.由于 TON 是氮素中贮存能量的存在形式,TON 含量在 TN 中的相对比重随水体生产力总体水平的提高而提 高<sup>[14,22]</sup>,因此从氮素赋存形态转变、水体能量储存增 加的角度,上述现象说明 2007 年 3 月~2008 年 3 月小 江回水区营养水平随时间推移而提高.

通常情况下,未明显污染或贫营养的湖泊、河流中,水中氮素的代谢强度和周转速率相对较低,DON 在溶解态总氮(DTN)中所占比例一般为40%~ 50%<sup>[23]</sup>,DON/PON比约为5~10<sup>[4]</sup>.在氮素受限的 富营养化水体中,含量相对偏低的氮素在抑制浮游 植物生长的同时也在很大程度上限制了氮素通过内 循环的途径再次被利用,因此DON在TN中所占比 例甚至超过50%以上<sup>[23]</sup>.与此相反的是在氮素相对 丰足的条件下,氮素代谢强度的增加在刺激PON加 速合成的同时,也刺激了细菌、浮游植物等生物群体 对DON的消耗,DON在TN中的比例下降,同时使 DON/PON的比值也接近于1,因此Wetzel<sup>[14]</sup>认为







₹

DON/ PON 将随水体营养水平的升高而降低. 研究期 间,小江回水区 DON/ DTN 比值平均为 0.20 ±0.01, 和其他的文献报道相比<sup>[20,23]</sup>, DON 在 DTN 中比重明 显偏低; 同时,小江回水区 DON/ PON 比值平均为 3.63 ±0.93, 和 Lawrence 湖、Ysel 湖等富营养湖泊的 研究结果基本相同<sup>[14]</sup>,反映出小江回水区氮素总体 上较为丰足, 且氮素代谢强度与周转速率可能保持 在较高的水平.

Stumm 等<sup>[24]</sup> 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, Ouri s<sup>[25]</sup> 进一步 提出氦素形态中还原态的NH<sup>1</sup>-N相对增加和氢化态 的NO3-N相对减少将是上述转变的最直接体现,水 体的营养水平将随着NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/NO<sub>3</sub><sup>-</sup>N的增加而升高. 研究期间,小江回水区NO<sub>3</sub>-N普遍占优,是氮素最主 要的赋存形态,说明小江回水区总体上处于较强的 氧化环境,且较低的NO2-N水平(平均浓度仅占DN 的2.03%)表明小江水体自净能力仍相对较强。 NH4-N/NO3-N与TON/TN 显著正相关但与 DIN/TN 有明显的负相关关系(表 2),说明研究期间小江回 水区虽总体处于较强的氧化环境,但随着TON/TN 的上升和DN/TN 的下降,回水区营养水平提高将有 使水体向还原性环境转变的趋势,这同 Quri s 的研 究结论一致<sup>[25]</sup>. 同时, NH<sup>+</sup><sub>4</sub>-N/NO<sup>-</sup><sub>3</sub>-N与 DON 含量和 DON/TN 显著正相关, 表明水体中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N相对丰度 的变化同水中DON 含量及其在TN 中所占比重关系 密切. 在氮素循环中 DON 的氨化作用被认为是  $NH_{-}^{+}N$ 的潜在来源之一,尤其是在氮素循环强度较 高的水体中, DON 有可能是决定水相中NH4-N含量 高低及其生物利用过程的关键因素<sup>[20]</sup>. 小江回水区 DON 氨化降解成 $NH_4^+$ -N 并再次被利用的内循环过 程是否存在或会否成为调控氮素循环的关键仍需更 持续的深入研究.

₹2	$NH_4^+ - N NO_3^-$	-N比同其他主	要氮素指标的构	相关系数矩阵 <sup>1)</sup>	(样本数	n=	125)
----	---------------------	---------	---------	----------------------	------	----	------

Table 2 Matrix of the correlation coefficients among NH4-NNO3-N ratio and other indices of nitrogen forms

				e e	
	$NH_4^+ - N/NO_3^ N$	TON/TN	PN/ TN	DIN/ TN	DOŊ' TN
$NH_{4}^{+}-N/NO_{3}^{-}-N$	1. 000				
TON/ TN	0 313* *	1.000			
PN/ TN	-	0. 544* *	1. 000		
DI N' TN	- 0 313* *	- 1.000* *	- 0 544* *	1. 000	
DON/TN	0 319* *	0. 682* *	- 0 243* *	- 0. 682* *	1.000
DON	0 216*	0. 639* *	- 0 208*	- 0. 639* *	0. 921**

\* 表示显著性水平为 0.05; \* \* 表示显著性水平为 0.01; "-"表示无显著相关性

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

### 4 结论

(1)研究期间,小江回水区 TN 平均浓度为 (1553±43) №·L<sup>-1</sup>,其季节差异明显,但总体呈上升 趋势,大体上,夏、冬季较高,春季次之、秋季较低. DIN 是小江回水区氮素的主要赋存形态,但季节间 差异并不显著.

(2) 各形态氮素中, NO<sub>3</sub>-N是 DIN 的主要组分, 而NO<sub>2</sub>-N仅占 DIN 平均浓度的 2.03%, 说明该水域 总体处于较强的氧化环境且水体自净能力仍较好. 同时, DON 在 DTN 中所占比重较低, 且 DON/PON 比 值仅为 3.63 ±0.93, 表明该水域氮素总体较为丰足, 且代谢强度与周转速率可能较高.

(3) 对研究期间 TON 和 DN 相对丰度变化过程 的分析表明研究期间, 小江回水区氮素赋存形态有 从无机态向有机态转移的趋势. 同时, 随着 TON 在 TN 中相对比重的加大, NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N/NO<sup>5</sup><sub>3</sub>-N比值的升高 可能使水体出现向还原性环境转变的趋势. 研究发 现, NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N相对丰度的变化同水中 DON 含量及其在 TN 中所占比重关系密切, 但小江回水区 DON 氨化 降解成NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N并再次被利用的内循环过程是否存在 或会否成为调控氮素循环的关键过程有待进一步 研究.

#### 参考文献:

- Tilman D. Resource competition between planktonic algae: An experimental and theoretical approach [J]. Ecology, 1977, 58(2): 338-348.
- [2] Smith V H. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: An empirical and theoretical analysis [J]. Limnol Oceanogr, 1982, 27(6): 1101-1112.
- [3] Odum E P 著, 孙儒泳, 钱国桢, 等译. 生态学基础[M]. 北京: 人民教育出版社, 1981. 83-100.
- [4] Meybeck M. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers[J]. Am J Sci, 1982, 282: 401-450.
- [5] 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):711.
- [6] 富国. 湖库富营养化敏感分级水动力概率参数研究[J]. 环境 科学研究, 2005, **18**(6):80-84.
- [7] 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.
- [8] 曹承进,秦延文,郑丙辉,等.三峡水库主要入库河流磷营养 盐特征及其来源分析[J].环境科学,2008,29(2):310-315.

- [9] 冯明磊,胡荣桂,许克翠,等.三峡小流域水体硝态氮含量变化特征及其影响因素研究[J].环境科学,2008,29(1):13-18.
- [10] 罗专溪, 张远, 郑丙辉, 等. 三峡水库蓄水初期水生态环境特 征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(6):78+785.
- [11] 郭劲松,陈杰,李哲,等. 156m 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): 22-27.
- [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[J].水生生物学报,2006,30(1):116-119.
- [13] 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,1997.243-285.
- [14] Wetzel R G. Limnology: Lakes and river ecosystems [M]. CA: Academic Press, 2001. 204-238.
- [15] Allan J D, Castillo M M. Stream ecology: Structure and function of running waters[M]. (2nd ed). NL: Springer Press, 2007. 256-264.
- [16] 沈志良,刘群,张淑美.长江总氮和有机氮的分布变化与迁移[J].海洋与湖沼,2003,34(6):577-585.
- [17] 黄祥飞.湖泊生态调查观测与分析[M].北京:中国标准出版 社,2000.142-144.
- [18] 重庆气象网. 重庆市气候与气象灾害[EB/OL]. http://www. 121 cq. cr/ servic∉ cqweather.htm# one, 2007.
- [19] 李哲,方芳,郭劲松,等. 三峡小江回水区段 07 年春季水华
  与营养盐特征的初步分析[J].湖泊科学,2009,21(1):36-44.
- [20] Berman T. The role of DON and the effect of N: P ratios on occurrence of cyanobacterial blooms: Implications from the outgrowth of *Aphanizomenon* in Lake Kinneret[J]. Limnol Oceanogr, 2001, 46 (2): 443-447.
- [21] 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[J].中国科学 D 辑, 2005, 35(增刊 II):111-120.
- [22] Quir s R. The nitrogen to phosphorus ratio for lakes: A cause or a consequence of aquatic biology? [A]. In: Fernandez A C, Chalar G M (eds.). El Agua en Iberoamerica: De la Limnolog a a la Gesti n en Sudamerica[C]. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnologia para el Desarrollo (CYTED), Buenos Aires, Argentina, 2003. 11-26.
- [23] Willett V B, Reynolds B A, Stevens P A, et al. Dissolved organic nitrogen regulation in freshwaters [J]. J Environ Qual, 2004, 33: 201-209.
- [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] Quir s R. The relationship between nitrate and ammonia concentrations in the pelagic zone of lakes[J]. Limnetica, 2003, 22 (1-2): 37-50.