

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 $(1\,553 \pm 43) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 季节差异显著但总体呈上升趋势. DIN 平均浓度为 $(1\,031 \pm 32) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 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_3^- -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 $(273 \pm 23) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(249 \pm 23) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 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_4^+ -N/ NO_3^- -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_4^+ -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_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)06- -

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 Three 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 $(1553 \pm 43) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 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 $(1031 \pm 32) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 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 $(273 \pm 23) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ and $(249 \pm 23) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, taking up to 26.48% and 24.15% in TN separately. However, the DON/PON ratio was only 3.63 ± 0.93 , 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_4^+ -N/ NO_3^- -N and TON/TN indicated the increase of TON in TN might contribute 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^[1,2]. 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^[3], 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^[2], 使氮素的循环过程更具开放性、复杂性^[4]. (因此了解特定水生生态区系中氮素存在形态

收稿日期 2008-07-20 修订日期 2008-11-28
基金项目 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB2-07-02) 重庆市重大科技专项 (CSTC2006BA7030)
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, E-mail: Lizhe1981@126.com
* 通讯联系人, E-mail: xiduo@tom.com

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^[5].水动力条件的改变^[6]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^[7~9],探讨独特水文、水动力条件对浮游植物生长的影响^[10],寻找合理解释浮游植物大量生长的证据^[11,12],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5 276 km²,干流全长182 km,河口距三峡大坝约250 km,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-小江电站(约13 km);高阳平湖(小江电站-代李子,约7 km);代李子-牛栏溪(约11 km)以及牛栏溪-小江河口(约10 km).其中,杨家坝-小江电站与代李子-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 km²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,水力条件上易受长江

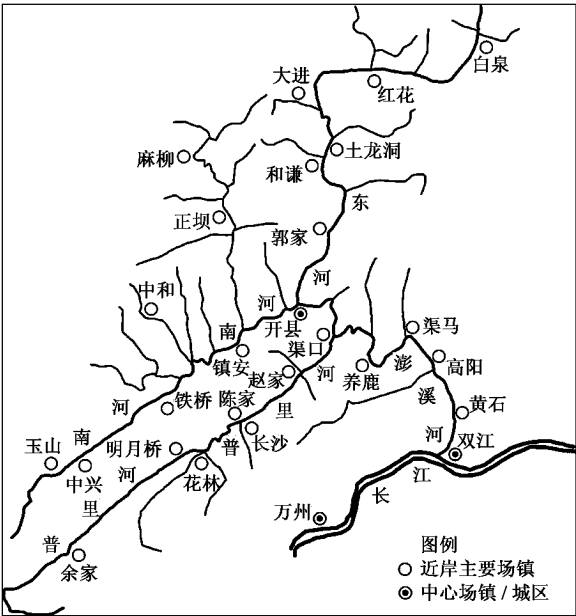


图1 小江流域水系
Fig.1 Drainage system of Xiaojiang watershed

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-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-牛栏溪河段的黄石镇

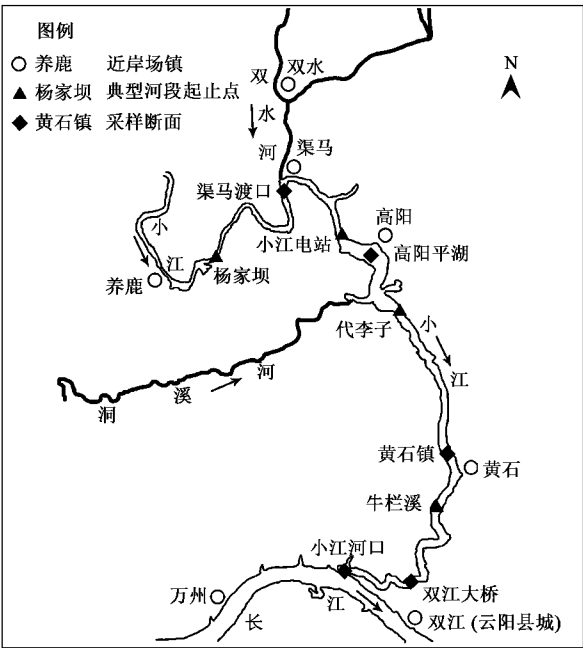


图2 养鹿-河口段回水区示意和采样点分布
Fig.2 Map of backwater area and sampling spots

(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泓线处,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($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、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 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ^[13],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)^[14],但由于其吸附量有限且易受水质理化特征的干扰^[14,15],本研究对水相中的 PNH_3 不予考虑^[14~16].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- $\text{NH}_4^+\text{-N}$

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) = TKN-DKN

总有机氮(TON) = DON + PON

总氮(TN) = DIN + DON + PON

溶解态总氮(DTN) = DIN + 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^[18],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 $(1\,553 \pm 43)\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (表1),变化范围为 $664 \sim 3\,239\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,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 $(1\,098 \pm 60)\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.5月中旬开始,回水区暴发固氮型蓝藻水华^[19],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 $(1\,693 \pm 79)\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.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 $(2\,217 \pm 192)\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.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($753\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \leq \text{TN} \leq 1\,875\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)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($\text{TN} \geq 1\,875\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$).就TN含量而言,小江回水区总体处于中-富营养状态.

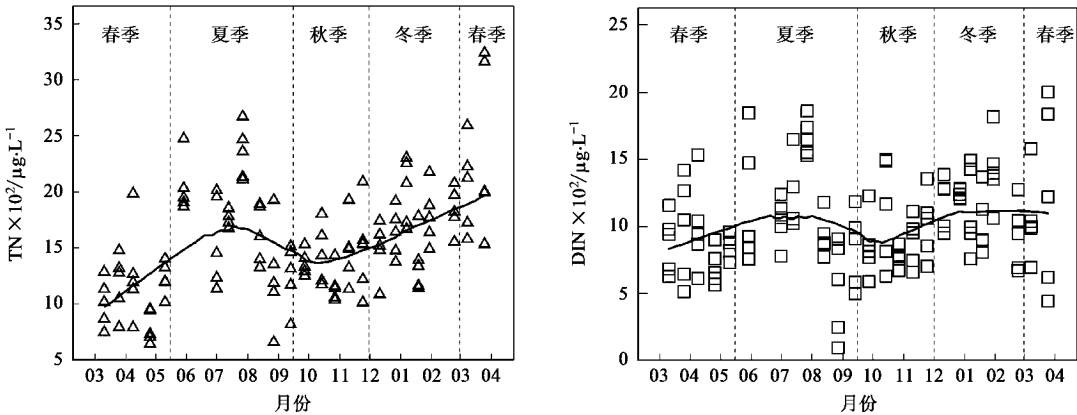


图3 小江回水区TN和DIN浓度季节变化过程

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

表1 小江回水区氮素赋存形态调查结果/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Results for the different forms of nitrogen in Xiaojiang backwater area/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

项目		NH_4^+-N	NO_3^--N	NO_2^--N	DIN	DON	PON	TON	TN
全年数据 ($n=125$)	平均值	304 ± 19	706 ± 26	21.0 ± 1.6	$1\,031\pm32$	273 ± 23	249 ± 23	522 ± 31	$1\,553\pm43$
	范围	15~1 036	18~1 606	0.0~116.0	95~2 002	0~1 207	6~1 523	8~1 898	644~3 239
春季 ($n=35$)	平均值	192 ± 15	733 ± 55	32.0 ± 3.2	958 ± 62	180 ± 45	279 ± 62	460 ± 82	$1\,417\pm110$
	范围	49~360	338~1 606	11.0~116.0	442~2 002	0~1 207	6~1 523	8~1 898	644~3 239
夏季 ($n=35$)	平均值	439 ± 43	611 ± 54	22.6 ± 3.0	$1\,073\pm73$	343 ± 46	276 ± 32	620 ± 45	$1\,693\pm79$
	范围	34~1 036	18~1 344	4.0~77.0	95~1 861	9~1 045	19~798	205~1 192	659~2 671
秋季 ($n=25$)	平均值	22 ± 3	701 ± 51	8.4 ± 1.9	929 ± 52	289 ± 41	168 ± 29	457 ± 48	$1\,386\pm55$
	范围	15~560	289~1 226	0.0~38.0	588~1 499	59~747	13~672	110~946	1 014~2 089
冬季 ($n=30$)	平均值	346 ± 39	789 ± 36	16.6 ± 2.1	$1\,151\pm49$	286 ± 49	250 ± 43	536 ± 56	$1\,687\pm58$
	范围	74~820	529~1 119	1.0~39.0	668~1 819	5~1 095	25~897	85~1 127	1 087~2 302

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($1\,031\pm32$) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,变化范围为 $95\sim2\,002\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 1),占 TN 平均浓度的 66.38%,是回水区氮素的主要赋存形态.DIN 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 DIN 中, NO_3^--N 平均浓度为(706 ± 26) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,占 DIN 平均浓度的 68.48%,占 TN 平均浓度的 45.46%,是 DIN 的主要组成部分, NH_4^+-N 平均浓度为(304 ± 19) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,占 DIN 平均浓度的 29.39%,是 TN 浓度平均值的 19.58%.而 NO_2^--N 平均浓度为(21.0 ± 1.6) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,仅占 DIN 平均浓度的 2.03%.

研究期间, NO_3^--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) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,占 DIN 的 30.11%.进入盛夏后,回水区 NO_3^--N 浓度逐渐升高,在 7 月末达到全年的第 1 个峰值($1\,129\pm59$) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,虽然夏末秋初回水区 NO_3^--N 含量有一定下降,但进入 10 月份后 NO_3^--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_4^+-N 含量季节波动较 NO_3^--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_2^--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) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,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) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,仅占同期 DIN 平均浓度的 0.17%.

2.3 DON、PON 含量与季节变化

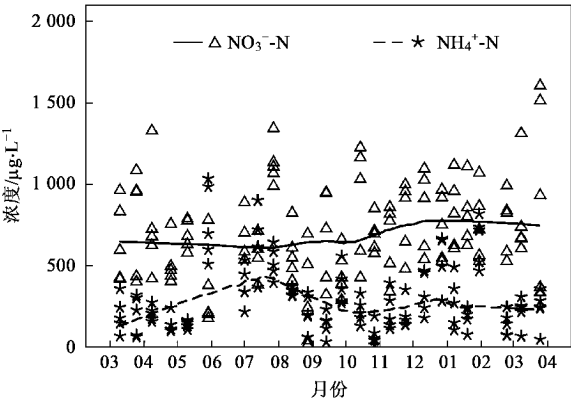


图4 硝态氮和氨氮的季节变化过程

Fig.4 Variation of nitrate and ammonia

研究期间,小江回水区 DON 平均浓度为(273 ± 23) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 1),变化范围为 $0\sim1\,270\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,占 TN 平均浓度的 26.48%.PON 平均浓度为(249 ± 23) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,变化范围为 $6\sim1\,523\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,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 $\text{Sig.}=0.896>0.01$).同时,二者季节变化过程基本相同(图 5):

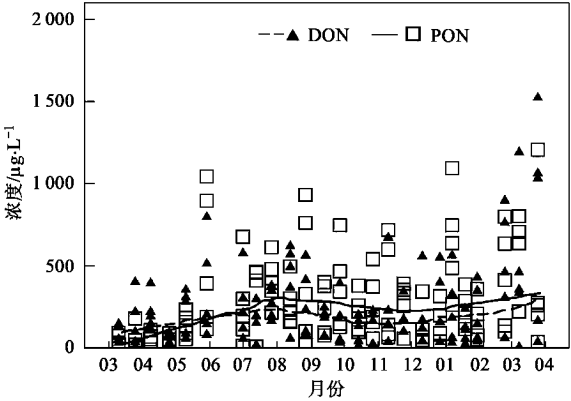


图5 DON 和 PON 的季节变化过程

Fig.5 Variation of different forms of organic nitrogen

2007 年春季开始逐渐增加并在夏季达到较高水平,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^[14],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^[3]。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 $\text{NH}_3\text{-N}$,返回无机环

境,并通过亚硝化、硝化、反硝化等作用在“三氮”($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$)间进行循环,反硝化产物 N_2 (或 NO_x 等)则重返大气^[3,14]。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^[14]。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^[20]。大量调查亦证实不同营养水平下氮素赋存形态和循环特点亦有明显不同^[21],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。

研究期间,小江回水区 DIN 在 TN 中所占比重

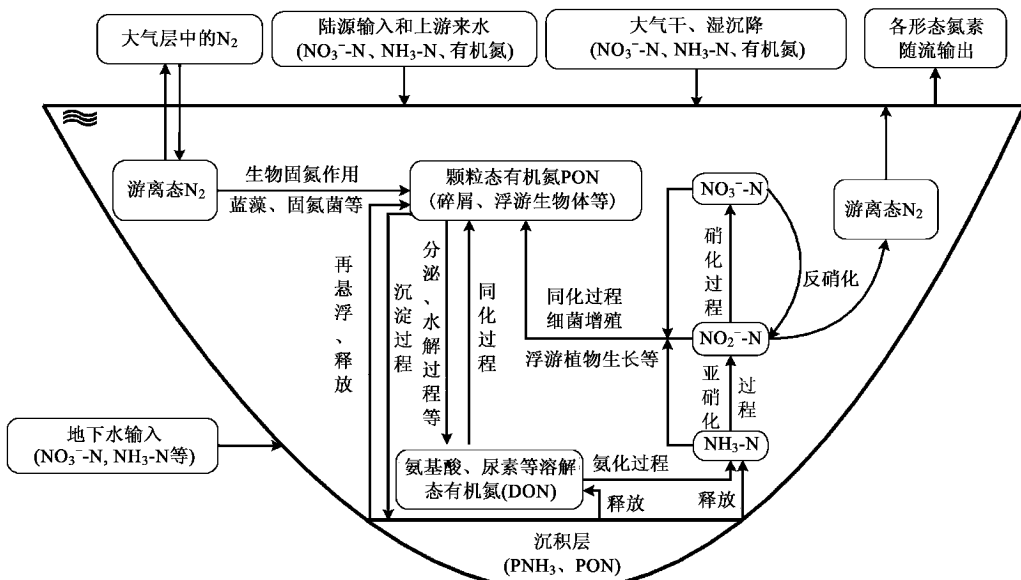


图 6 水相中不同形态氮素间的生物地化循环过程(在文献[14]基础上进行简化)

Fig. 6 Generalized nitrogen cycles in water column

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,DIN 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) 而 TN-TON 的 log-log 模型斜率则 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^[14,22],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%^[23],DON/PON 比约为 5~10^[14]。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

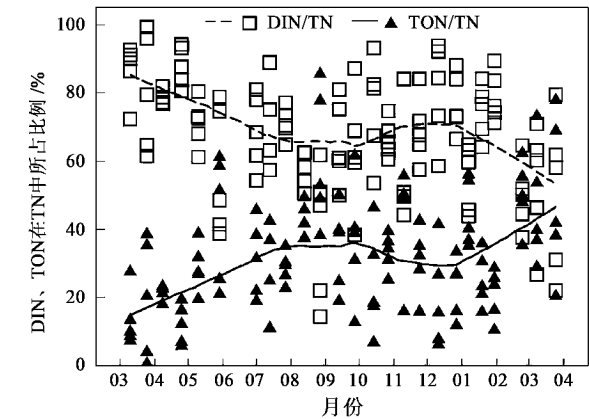


图7 DIN/TN 和 TON/TN 季节变化过程

Fig.7 Scatter dot for the variation of DIN/TN and TON/TN

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^[23].与此相反的是在氮素相对丰足的条件,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^[14] 认为

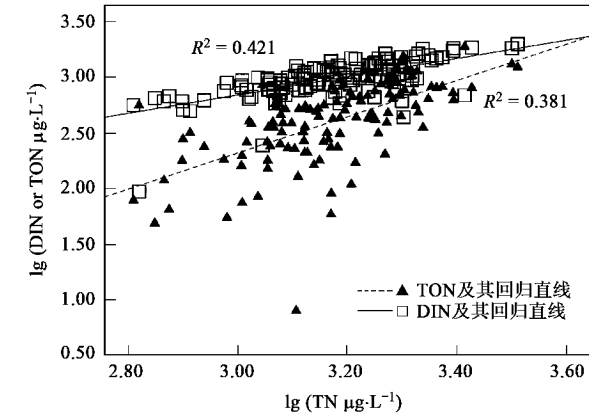


图8 TN 和 DIN、TON 的 log-log 线性模型

Fig.8 The log-log linear regression model for TN-DIN and TN-TON

DON/PON 比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^[20,23],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^[14],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^[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, Quriós^[25] 进一步提出氮素形态中还原态的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 相对增加和氧化态的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 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 $\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的增加而升高.研究期间,小江回水区 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 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 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 水平(平均浓度仅占 DIN 的 2.03%) 表明小江水体自净能力仍相对较强. $\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{NO}_3^- \text{-N}$ 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 DIN/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 Quriós 的研究结论一致^[25].同时, $\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{NO}_3^- \text{-N}$ 与 DON 含量和 DON/TN 显著正相关,表明水体中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 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 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 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 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量高低及其生物利用过程的关键因素^[20].小江回水区 DON 氨化降解成 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 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.

表 2 $\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{NO}_3^- \text{-N}$ 比同其他主要氮素指标的相关系数矩阵¹⁾ (样本数 $n = 125$)

Table 2 Matrix of the correlation coefficients among $\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{NO}_3^- \text{-N}$ ratio and other indices of nitrogen forms

	$\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{NO}_3^- \text{-N}$	TON/TN	PN/TN	DIN/TN	DON/TN
$\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{NO}_3^- \text{-N}$	1.000				
TON/TN	0.313 **	1.000			
PN/TN	—	0.544 **	1.000		
DIN/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 **

1) * 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

4 结论

(1) 研究期间,小江回水区 TN 平均浓度为 $(1553 \pm 43) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,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, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 是 DIN 的主要组分,而 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 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 DIN 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, $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 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, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 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 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 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:

- [1] 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): 7-11.
- [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): 5-6.
- [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): 781-785.
- [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] 国家环保局. 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.cn/service/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): 86-94.
- [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] Quiros 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 Limnología a la Gestión en Sudamerica* [C]. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología 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] Quirós R. The relationship between nitrate and ammonia concentrations in the pelagic zone of lakes [J]. *Limnologia*, 2003, 22 (1-2): 37-50.