

闽江福州下游段水体 N 含量季节变化及 对湿地土壤 N 含量的影响

吴耀建¹, 张永勋^{2,3}, 黄佳芳^{2,3}, 林贤彪^{2,3}, 曾从盛^{2,3,4}, 仝川^{2,3,4}, 王维奇^{2,3,4}

(1. 国家海洋局 第三海洋研究所, 福建 厦门 361005; 2. 福建师范大学 地理科学学院,

福建 福州 350007; 3. 福建师范大学 亚热带湿地研究中心, 福建 福州 350007;

4. 福建师范大学 湿润亚热带生态—地理过程省部共建教育部重点实验室, 福建 福州 350007)

摘要: 选取闽江福州下游段水体及河口短叶茳芩湿地土壤水作为研究对象, 采用 SAN⁺⁺ 连续流动分析仪测试样品中 NO₃⁻-N, NO₂⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量, 以揭示河流水体 N 含量的季节差异和对土壤水 N 含量的影响。研究结果表明: (1) 闽江福州下游段秋季河流水 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量高于春季, NO₂⁻-N 含量低于春季; 秋季短叶茳芩湿地土壤水 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 含量也明显高于春季, 土壤水 NO₃⁻-N 含量低于春季; 春、秋季土壤水 NH₄⁺-N 含量皆高于河流水, 而 NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 含量皆明显低于河流水。(2) 河流水的浸淹对土壤 N 含量影响较大, 说明河流水是湿地土壤的主要 N 源。(3) 闽江福州下游段河流水 3 种形态的 N 含量表现为秋季大于春季, 存在较明显的季节差异。(4) 与 2007—2008 年的观测值相比较, 闽江河口水体 N 含量呈大幅上升趋势, 水体富营养化加剧。

关键词: 闽江; 潮间带湿地; 硝态氮; 铵态氮; 亚硝态氮

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)04-0076-05

中图分类号: X522

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.04.028

Seasonal Variations of N Content in Fuzhou Downstream Section of Minjiang River and Its Influence on N Content in Wetland Soil

WU Yao-jian¹, ZHANG Yong-xun^{2,3}, HUANG Jia-fang^{2,3},

LIN Xian-biao^{2,3}, ZENG Cong-sheng^{2,3,4}, TONG Chuan^{2,3,4}, WANG Wei-qi^{2,3,4}

(1. Third Institute of Oceanography, State of Oceanic Administration, Xiamen, Fujian 361005, China;

2. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China; 3. Research Center of

Wetlands in Subtropical Region, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China; 4. Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China)

Abstract: Water-body in Fuzhou downstream section of Minjiang River and soil water of wetland growing *Cyperus malaccensis* in intertidal region of estuary were selected as object of study. The contents of nitrate nitrogen(NO₃-N), nitrite nitrogen(NO₂-N) and ammonium nitrogen(NH₄⁺-N) in the samples were measured by SAN⁺⁺ Continuous Flow Analytical System for showing the difference of their contents between spring and autumn, and the influence of N contents in river water on the contents of soil water. The result showed that: (1) The contents of NH₄⁺-N and NO₃-N in river water in autumn are higher than in spring, and the content of NO₂-N was opposite; In the soil water, the contents of NH₄⁺-N and NO₂-N in autumn were higher than in spring, and the content of NO₃-N was invers; the content of NH₄⁺-N in soil water was higher than that in river water, on the contrary, the contents of NO₃-N and NO₂-N in soil water were less than that in river water; (2) River water was the main source for N in wetland soil water due to submersion of river water influencing on N content of the soil water significantly; (3) The total contents of NO₃-N, NO₂-N and NH₄⁺-N in river water in autumn were more than in spring, there was a obvious seasonal difference; (4) Compared with the contents in river water from Minjiang River in 2007—2008, the N

收稿日期: 2013-04-03

修回日期: 2013-04-12

资助项目: 国家自然科学基金项目“盐度梯度对闽江口潮滩湿地 N₂O 排放影响研究”(41201101)

作者简介: 吴耀建(1963—), 男(汉族), 福建省厦门市, 高级工程师, 主要从事资源与环境评价研究。Email: 824930528@qq.com。

通信作者: 曾从盛(1954—), 男(汉族), 福建省宁化县人, 研究员, 博士生导师, 主要从事生物地球化学循环研究。E-mail: czseng@fjnu.edu.cn。

contents in river water increased sharply in recent years, as a result, the river water eutrophication was aggravated.

Keywords: Minjiang River; intertidal zone wetland; nitrate nitrogen; ammonium nitrogen; nitrite nitrogen

大量研究表明,随着科技的发展、化肥农药在农业中的广泛使用以及工业化和城市化进程的不断加快,不同区域水体质量呈现出不同程度的下降^[1-5]。水体质量问题主要表现在农药污染、重金属污染和水中 N、P 和 K 等营养元素不断增加导致的水体富营养等方面^[6-9],其中水体中 N 和 P 含量增加导致的水体富营养化问题十分普遍,也越来越受到广泛的关注^[10-11]。河流作为连接陆地和海洋的主要通道,承担着海—陆物质循环纽带的重要角色。一般来说,河流穿越的地区较多,河流水环境的影响因素也就越多,其不仅直接受农业、工业和人类生活等排放的废水,而且随着工业化和城市化进程的不断加速,大气中的氮氧化物含量也不断增加,这些物质以干、湿沉降的方式进入河流,也可能导致河流水体的 N 含量增加,从而导致水体的富营养化。河流水体的富营养化除水质恶化影响人类用水外,也会影响河流沿岸的湿地等生态系统,导致当地生态系统失衡,如物种入侵、生物多样性减少,改变 C 和 N 循环规律以及温室气体排放等。加强河流水质监测、掌握河流水质时间尺度上的变化规律和探索影响河流水质的因素,具有重要的社会价值和现实意义。

河口湿地是陆地水注入海洋的重要交接地,担负着净化陆地和海洋水体的重要角色^[12-13]。由于河口地区地形平坦,土壤肥沃,往往是城市密集区和主要的农业基地,是受人类活动影响最为剧烈的场所之一。闽江河口区地处福州市,是海西经济区核心区之一,大量农田废水、工业和居民生活污水排入,使河水养分含量丰富,湿地生态系统受到较大的影响。本研究在春、秋季以大潮到小潮半个潮汐周期为研究时段,分别对闽江福州下游感潮河段河水和潮间带湿地土壤水的 NH_4^+-N , NO_3^--N 和 NO_2^--N 进行监测,以揭示春、秋季闽江水体 N 含量的变化,以及在潮汐作用下它们对湿地土壤 N 素含量的影响。

1 研究区概况

闽江河口地处中亚热带与南亚热带过渡区,气候暖湿,水量丰富,沿途分布城镇较多。试验地选择在距福州约 25 km 的下游感潮河段闽江口南部梅花水道,是闽江河水流经福州市区注入海洋的主要通道,其沿岸的潮间带鳝鱼滩湿地 ($26^\circ 00' 36''-26^\circ 03' 42''\text{N}$, $119^\circ 34' 12''-119^\circ 40' 40''\text{E}$) 是闽江河口区沿岸面积最

大的天然洲滩湿地,面积约 $3\ 120\ \text{hm}^2$ 。区内年均气温 $19.3\ ^\circ\text{C}$,年降水量约 $1\ 346\ \text{mm}$,降水多发生在 3—9 月,潮汐属正规半日潮^[14]。据多年观测,夏秋季潮位高(9 月最高,大潮日到小潮日高潮时试验地皆可淹水),冬春季潮位低(3—4 月最低,仅大潮日高潮时试验地才可淹水),由于河水受到潮汐的作用,试验地有规律的被河水淹没与排干。试验地植物建群种主要有短叶茼蒿(*Cyperus malaccensis* var. *brevifolius*)、芦苇(*Phragmites australis*)、蔗草(*Scirpus triqueter* L.)和互花米草(*Spartina alterniflora*)等挺水植物。水样采集点选择在鳝鱼滩湿地中部 ($119^\circ 37' 31''\text{E}$, $26^\circ 01' 46''\text{N}$),位于高潮与中潮带过渡区的短叶茼蒿湿地。

2 研究方法

2.1 试验设计及样品测定

河水和短叶茼蒿湿地土壤水的采样时间选择在 2011 年 9 月 26 日至 10 月 2 日(农历 8 月 29 至 9 月初 6,大潮月)和 2012 年 3 月 23 日至 3 月 27 日(农历 3 月初 2 至 3 月初 6,小潮月)进行。根据白天涨落潮时间及天气变化情况,秋季和春季高潮采样点可淹水时,在涨潮淹水前 2 h 和落潮排水后 2 h,分别采集短叶茼蒿湿地土壤水,在高潮时采集短叶茼蒿湿地上覆河水;春季高潮短叶茼蒿湿地无淹水时,分别在高潮前 2 h、高潮时和高潮后 2 h 采集湿地土壤水样,每次采样设置 3 个重复。用自制陶管—真空棒抽取湿地表层 0—15 cm 土壤水,抽取的样品注入容积为 100 ml 的乳白色塑料瓶密封保存。

采集的湿地土壤水和河水中的 NO_3^--N , NO_2^--N 和 NH_4^+-N 含量在实验室采用荷兰 SKALAR 公司生产的 SAN⁺⁺ 连续流动分析仪测试。

2.2 数据处理方法

运用 Execl 数据分析中的描述统计功能对实验数据进行统计,运用单因素方差分析功能对潮汐不同阶段河流水体 NO_3^--N , NO_2^--N 和 NH_4^+-N 的含量与湿地土壤水 NO_3^--N , NO_2^--N 和 NH_4^+-N 的含量分别进行差异性分析。

3 结果与分析

3.1 河水和湿地土壤水 NH_4^+-N 含量变化及关系

秋季,河水 NH_4^+-N 含量范围为 $0.263\ 3\sim$

0.970 0 mg/L, 平均含量为 0.451 9 mg/L; 短叶茛苳湿地土壤水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量范围为 0.206 7~1.916 7 mg/L, 平均含量为 0.959 5 mg/L。春季, 河流水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量范围为 0.133 3~0.366 7 mg/L, 平均含量为 0.250 0 mg/L, 湿地在高潮被水淹没时, 其土壤水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量范围为 0.216 7~0.603 3 mg/L, 平均含量为 0.396 7 mg/L, 高潮无水淹没时, 土壤水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量范围为 0.136 7~0.516 7 mg/L, 平均含量为 0.253 0 mg/L。可见, 秋季河流水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量明显高于春季, 湿地土壤水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量也明显高于春季。

春、秋季潮间带短叶茛苳湿地在高潮期间被水淹没时, 其土壤水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量在不同观测日的涨潮前和落潮后的数值各不相同, 没有呈现明显的差异性规律(图 1)。多日观测平均值, 秋季涨潮前(0.950 0 mg/L)略低于落潮后(0.970 0 mg/L), 但差异性不显著($p=0.916 > 0.05$)。

秋季河流水的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量除 9 月 28 日、9 月 30 日和 10 月 2 日与土壤水接近, 其它观测日均明显低于土壤水, 总体上, 秋季河流水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量低于涨、落潮前后的土壤水含量; 春季, 3 月 23—24 日河流水和短叶茛苳湿地土壤水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的差异性明显减小, 随着潮水位的逐渐降低, 高潮无淹水时(3 月 25 日)土壤水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量高于涨潮前和落潮后, 且 3 者的差异性较大, 3 月 26—27 日高潮时、高潮前和高潮后 3 个时间点的表层土壤水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量十分接近。这是因为 3 月 25 日高潮时水位低于湿地表面在 10 cm 以内, 采集的表层土壤水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量仍然会受到河流水的影响, 而 3 月 26—27 日高潮时水位低于湿地表面在 20 cm 以下, 采集的表层土壤水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量基本不受河流水的影响。

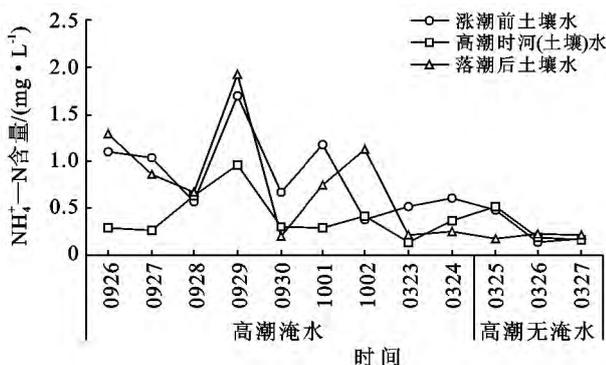


图 1 春、秋季河流水与湿地土壤水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的变化

注: 图例中“高潮时河(土壤)水”在试验地点高潮淹没时指河流水, 无淹水时指土壤水。下同。

对比河水与土壤水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量, 可以发现春、秋季土壤水中的含量皆高于河流水中的含量, 差异性显著($p=0.026$)。春秋季河流水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量与涨潮前的土壤水含量差异性显著($p=0.014$), 而和落潮后土壤水含量差异性不显著($p=0.071$)。综上可知, 河流水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量对短叶茛苳湿地土壤水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量有较明显的影响。

3.2 河水和湿地土壤水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的变化及关系

河流水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量范围在秋季为 0.599 6~1.313 3 mg/L, 平均含量为 1.001 9 mg/L; 短叶茛苳湿地土壤水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量范围为 0.030 0~1.232 3 mg/L, 平均含量为 0.267 9 mg/L。河流水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量范围在春季为 0.502 0~0.804 0 mg/L, 平均含量为 0.653 0 mg/L, 湿地在高潮可被水淹没时, 土壤水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量范围为 0.112 7~0.881 0 mg/L, 平均含量为 0.358 9 mg/L, 高潮无水淹时, 土壤水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量范围为 0.066 3~0.145 3 mg/L, 平均含量为 0.119 5 mg/L。秋季河流水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量明显高于春季, 而在高潮有水淹没时, 湿地土壤水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量低于春季, 高于无水淹没时的土壤水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量。比较河流水与土壤水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量, 可以看出, 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 相反, 春、秋季土壤水的含量皆极显著低于河流水中的含量($p=0.000 2 < 0.05$)。

图 2 表明, 春、秋季湿地在高潮淹水时, 除 9 月 26—27 日湿地土壤水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量在涨潮前高于落潮后, 其它观测日均低于落潮后。落潮后土壤水的波动性较大, 而河流水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 总体上含量都较土壤水高。从多日观测平均值来看, 秋季河流水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量(1.001 9 mg/L) > 落潮后土壤水(0.324 4 mg/L) > 高潮前土壤水(0.211 3 mg/L), 春季三者关系与秋季相同(分别为 0.653 0, 0.573 0, 0.148 8 mg/L), 但分析表明, 涨潮前与落潮后土壤水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的差异性不大($p=0.278 > 0.05$); 高潮湿地无淹水时, 土壤水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量变化不大。可见, 河流水在潮汐顶托下, 淹没湿地增加了土壤水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量。

3.3 河水和湿地土壤水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量的变化及关系

秋季, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 在河水中的含量范围为 0.009 8~0.093 3 mg/L, 平均含量为 0.034 4 mg/L; $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 在短叶茛苳湿地土壤水中的含量范围为 0.004 7~0.059 7 mg/L, 平均含量为 0.022 6 mg/L。春季, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 在河流水中的含量范围为 0.024 3~0.048 0 mg/L, 平均含量为 0.036 2 mg/L, 湿地在高潮可被水淹没时, 土壤水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的含量范围为 0.009 0~

0.020 0 mg/L, 平均含量为 0.014 0 mg/L, 高潮无水淹没时, 土壤水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的含量范围为 0.004 7 ~ 0.026 0 mg/L, 平均含量为 0.010 0 mg/L。与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 不同, 秋季河流水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的含量低于春季, 而在高潮有水淹没时, 秋季湿地土壤水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量高于春季, 也高于无水淹没时的土壤水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量。比较河流水与土壤水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的含量, 可以看出, 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 一致, 春季与秋季土壤水的含量皆低于河流水中的含量, 但差异性不如 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 显著 ($p=0.199 > 0.05$)。

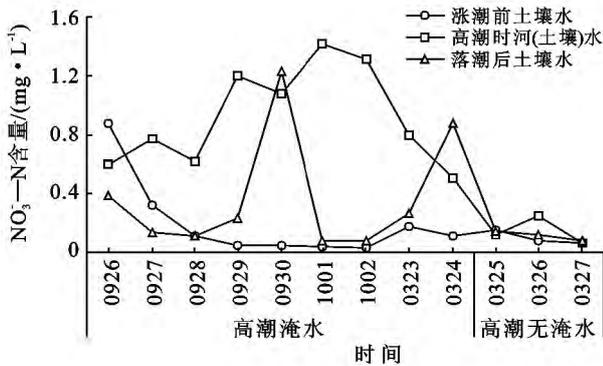


图 2 春、秋季河流水与湿地土壤水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的变化

图 3 表明, 高潮在湿地淹水时, 除 9 月 26 日落潮后土壤水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的含量低于涨潮前土壤水, 其它观测日皆高于涨潮前的土壤水中的含量, 但差值不大。河流水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的含量在 9 月 26—30 日期间, 与湿地土壤水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的含量之间没有明显规律, 不同的观测日各有高低, 10 月 1 日至 3 月 24 日这几个观测日河流水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的含量明显高于短叶茳茳湿地土壤水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量。高潮无水淹水时, 高潮前、高潮时和高潮后 3 次观测, 湿地土壤水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量差异明显减少, 随着潮水水位的降低, 3 月 26—27 日的 3 次观测值差异极小。河流水的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量对短叶茳茳湿地土壤 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量的影响也十分明显。

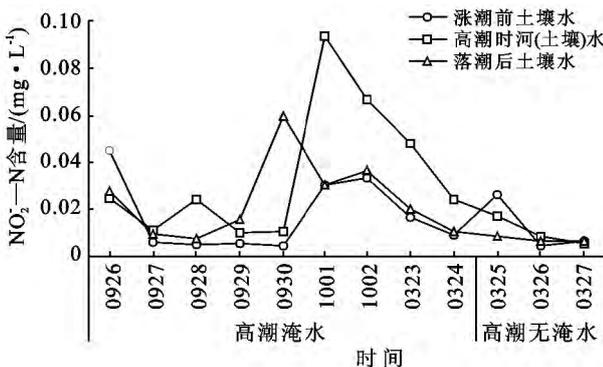


图 3 春、秋季河流水与湿地土壤水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量的变化

3.4 春、秋季河水 3 种形态 N 总含量的变化及对湿地土壤水 N 含量的影响

秋季, 河水 3 种形态 N 总含量范围为 0.914 3 ~ 2.178 3 mg/L, 平均含量为 1.488 1 mg/L; 短叶茳茳湿地土壤水 3 种形态 N 总含量范围为 0.443 3 ~ 2.164 0 mg/L, 平均含量为 1.249 9 mg/L。春季, 河流水 3 种形态 N 总含量范围为 0.893 0 ~ 0.985 3 mg/L, 平均含量为 0.939 2 mg/L, 湿地在高潮被水淹没时, 土壤水 3 种形态 N 总含量范围为 0.501 7 ~ 1.148 3 mg/L, 平均含量为 0.767 9 mg/L, 高潮无水淹没时, 土壤水 3 种形态 N 总含量范围为 0.224 3 ~ 0.660 0 mg/L, 平均含量为 0.400 4 mg/L。由图 4 可知, 除 9 月 26—27 日河流水 3 种形态 N 总含量低于土壤水中的含量, 其它观测日都高于土壤水, 而涨潮前和落潮后土壤水 3 种形态 N 总含量对比没有表现出明显的规律性, 说明短期的河流水浸淹对湿地土壤的影响不明显。

综上所述可以看出, 无论是春季还是秋季, 河水 3 种形态 N 总含量均高于土壤水的含量, 但是不显著 ($p=0.327 > 0.05$), 这可能是由于不同观测日观测值差异较大造成的。当高潮无水淹时, 土壤水 3 种形态 N 总含量明显下降。秋季河流水 N 含量较高, 土壤水的含量也较高, 春季河流水 N 含量较低, 土壤水 N 含量也较低, 这可初步认为河流水是湿地土壤的主要 N 源, 河流的浸淹对土壤养分的含量影响较大。河流水 3 种形态 N 含量及总含量的变化(性)大于土壤水的变化(性), 这可能是由于潮汐顶托作用, 河流水处于混合过程中导致的时空差异。

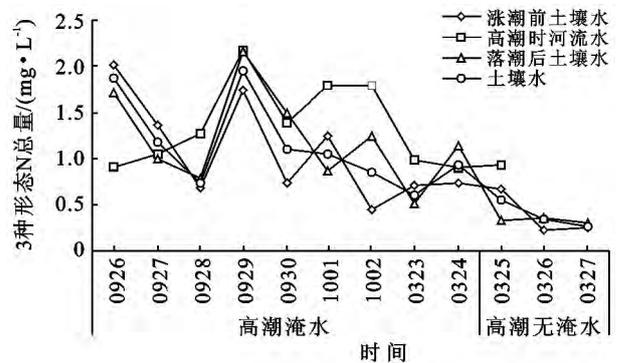


图 4 春、秋季河流水与湿地土壤水 3 种形态 N 总含量的变化

4 结果讨论

闽江福州下游段河水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量在春、秋季皆低于短叶茳茳湿地土壤水。这是因为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为正价, 易受土壤胶体的吸附^[15]。当河水浸淹湿地时, 河水中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 受土壤胶体吸附作用束

缚^[3],在土壤中运移速度急剧下降,最终在土壤中累积^[16],从而导致湿地土壤水中 NH_4^+-N 的含量高于河流水的含量。而 NO_3^--N 和 NO_2^--N 在土壤中运移的主要动力为硝态氮的浓度梯度、干湿土壤之间的水势梯度等^[17],湿地土壤在潮汐的周期性淹没下,土壤水含量高,基本处于水饱和状态,退潮时 NO_3^--N 和 NO_2^--N 被又潮水带走^[18],所以湿地土壤水中硝态氮和亚硝态氮含量较河水中的含量低。随着潮水水位的降低,春季中、小潮时湿地不被河水淹没,无法受到河水 NH_4^+-N , NO_3^--N 和 NO_2^--N 的补给,同时春季短叶茳茳正处萌发生长期,吸收大量的 N,加之湿地土壤在非淹水状态下,硝化、反硝化作用加强,部分硝态氮转化成铵态氮或部分铵态氮转化为硝态氮,在这两个转化过程中,部分 N 转化成 N_2O 排放到大气中^[19],因而非淹水时湿地土壤 N 含量慢慢降低。

秋季,河流水和湿地土壤水 N 含量较春季高,这可能是由于 9—10 月份植物处于逐渐枯萎期,其生长需要的养分较少,同时这个季节也是二季稻排水晒田的季节,沿江农田排水可能是闽江下游河流水体 N 含量上升的一个重要的原因。而同样短叶茳茳也正逐渐转入枯萎期,生命活力降低,养分需求较少;春季 3 月份植物正处萌发生长季节,需要吸收大量的养分维持生长,河流水中的 N 被土壤吸附使其含量相对降低。此外,这一时期是福建沿海的大潮月,潮间湿地土壤不断被河流水淹没,最终导致湿地土壤的 N 含量较高。河流水体 N 含量还会受工业、人类生产生活规律等因素影响,具体影响机制还需进一步研究。

本研究的观测结果与郑小宏^[20]2007—2008 年对闽江河口水质观测结果相比,春、秋季闽江口河流水 NH_4^+-N , NO_3^--N 和 NO_2^--N 的含量均有很大幅度的上升(表 1),说明伴随着闽江沿途经济的发展,农业生产中化肥的大量使用,工业化程度的提高和人口向沿江地区集中,大量含 N 营养物质的排放,导致闽江水体富营养化的程度在加剧,需要相关部门的监管控制。

表 1 不同年份闽江口河水 N 含量对比 mg/L

时间	春季		秋季	
	2007—2008	2012	2007—2008	2011
NH_4^+-N	0.076	0.250	0.009	0.452
NO_3^--N	0.382	0.653	0.424	1.002
NO_2^--N	0.020	0.036	0.009	0.034
合计	0.478	0.939	0.442	1.488

5 结论

(1) 闽江福州下游感潮河段秋季河流水 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的含量高于春季, NO_2^--N 的含量低于春季;秋季短叶茳茳湿地土壤水 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 的含量也明显高于春季,土壤水 NO_3^--N 含量低于春季;春、秋季土壤水 NH_4^+-N 的含量皆高于河水中的含量,而 NO_3^--N 和 NO_2^--N 的含量皆明显低于河水中的含量。河流水 NH_4^+-N , NO_3^--N 和 NO_2^--N 的含量对潮间带短叶茳茳湿地 NH_4^+-N , NO_3^--N 和 NO_2^--N 的含量影响形式不同。

(2) 闽江福州下游感潮段春、秋季河水 3 种形态 N 总含量均高于土壤水的含量,当高潮无河流淹没时,土壤水 3 种形态 N 总含量明显的下降。秋季河水 N 含量较高,土壤水的含量也较高,春季河水 N 含量较低,土壤水 N 含量也较低,表明河流水是湿地土壤的主要 N 源,河流水的浸淹对土壤养分的含量影响较大。

(3) 闽江福州下游段河水的 3 种形态 N 含量秋季大于春季含量,存在较明显的季节差异。

(4) 与 2007—2008 年的观测值相比,2011—2012 年闽江河口河流水体 N 含量有大幅度的上升,水体富营养化加剧。

致谢:本研究在野外观测阶段,得到何清华、章文龙、马永跃和张子川等同学的热心帮助;室内样品测定阶段,得到杨平和高君颖同学、杨柳明和彭园珍老师的指导和帮助,在此一并感谢!

[参 考 文 献]

- [1] 岳隽,王仰麟,李正国,等. 河流水质时空变化及其受土地利用影响的研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(3): 359-364.
- [2] 范旻,季宏兵,丁淮剑. 城市化过程对北京周边河流水化学特征的影响[J]. 首都师范大学学报:自然科学版, 2010, 31(5): 43-50.
- [3] 白军红,王庆改,肖蓉,等. 霍林河下游洪泛区湿地土壤中铵态氮水平运移模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11): 2203-2207.
- [4] 沃飞,陈效民,吴华山,等. 太湖流域典型地区农村水环境氮、磷污染状况的研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 819-825.
- [5] 张千千,王效科,郝丽岭,等. 重庆市盘溪河水质不同季节变化规律及水质评价[J]. 环境科学, 2012, 37(7): 2251-2258.

(下转第 86 页)

- tion reserve program effects on soil quality indicators [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 1999, 54(1): 439-444.
- [17] Landgraf D, Klose S. Mobile and readily available C and N fractions and their relationship to microbial biomass and selected enzyme activities in a sandy soil under different management systems[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2002, 165(1): 9-16.
- [18] 孙天聪, 李世清, 邵明安. 长期施肥对褐土有机碳和氮素在团聚体中分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(9): 1841-1848.
- [19] Gong Wei, Yan Xiaoyuan, Wang Jingyan, et al. Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat-maize cropping system in northern China[J]. *Geoderma*, 2009, 149(2/3): 318-324.
- [20] 赵红, 吕贻忠, 杨希, 等. 不同配肥方案对黑土有机碳含量及碳库管理指数的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(9): 3164-3169.
- [21] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. *土壤学报*, 2006, 43(5): 723-729.
- [22] 刘云慧, 宇振荣, 张风荣, 等. 县域土壤有机质动态变化及其影响因素分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(3): 294-301.
- [23] Gregorich F G, Ellert B H, Monreal C M. Turnover of soil organic matter and storage of corn residue carbon estimated from natural ^{13}C abundance [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995, 75(2): 161-167.
- [24] 张璐, 张文菊, 徐明岗, 等. 长期施肥对中国 3 种典型农田土壤活性有机碳库变化的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(5): 1646-1655.
- [25] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australia Journal of Agriculture Research*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [26] 宇万太, 赵鑫, 马强, 等. 长期定位试验下施肥对潮棕壤活性碳库及碳库管理指数的影响[J]. *土壤通报*, 2008, 39(3): 539-544.
- [27] 吴小丹, 蔡立湘, 鲁艳红, 等. 长期不同施肥制度对红壤性水稻土活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(12): 283-288.
- [28] 邵月红, 潘剑君, 孙波. 长期施用有机肥对瘠薄红壤有效碳库及碳库管理指数的影响[J]. *土壤通报*, 2005, 36(2): 177-180.

(上接第 80 页)

- [6] 齐维晓, 刘会娟, 曲久辉, 等. 天津主要纳污及入海河流中有机氯农药的污染现状及特征[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(8): 1543-1550.
- [7] 窦明, 马军霞, 谢平, 等. 河流重金属污染物迁移转化的数值模拟[J]. *水电能源科学*, 2007, 25(3): 22-25.
- [8] 张建锋, 单奇华, 钱洪涛, 等. 坡地固氮植物篱在农业面源污染控制方面的作用与营建技术[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(5): 180-185.
- [9] Newall P, Tiller D. Derivation of nutrient guidelines for streams in Victoria, Australia [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2002, 74(1): 85-103.
- [10] Castillo M M, Allan J D, Brunzell S. Nutrient concentrations and discharges in a Midwestern agriculture catchment [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(4): 1142-1151.
- [11] Sanchez C S, Alvarez C M. Nutrient dynamics and eutrophication patterns in a semi-arid wetland: The effects of fluctuating hydrology [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2001, 131(1/4): 97-118.
- [12] Bel H M. Spatial and temporal variability in nutrients and suspended material processing in the Fierd' Ars Bay (France) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2001, 52(4): 457-469.
- [13] Cifuentes L A. Spatial and temporal variations in terrestrial-derived organic matter from sediments of the Delaware Estuary [J]. *Estuaries and Coasts*, 1991, 14(4): 414-429.
- [14] 刘剑秋, 曾从盛, 陈宁. 闽江河口湿地研究[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [15] 闫亚丹, 徐福利, 邹诚, 等. 黄土高原坡地苹果园土壤肥力及矿质氮累积分析[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(4): 31-36.
- [16] 杨靖民, 刘金华, 于晓斌, 等. 长春地区河水和地下水氮含量的时空变化[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 255-257, 262.
- [17] 白军红, 欧阳华, 邓伟, 等. 向海沼泽湿地土壤中硝态氮的水平运移规律[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(4): 414-418.
- [18] 陈效民. 土壤环境中硝态氮运移的特点、模型描述及其在太湖地区乌栅土上的应用研究[D]. 江苏 南京: 南京农业大学, 2000.
- [19] Wrage N, Velthof G L, van Beusichem M L, et al. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide [J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2001, 33(12/13): 1723-1732.
- [20] 郑小宏. 闽江口海域氮磷营养盐含量的变化及富营养化特征[J]. *台湾海峡*, 2010, 29(1): 42-46.