

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究	孙建林, 常文静, 陈正侠, 曾辉 (1513)
北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究	崔彤, 程婧晨, 何万清, 任培芳, 聂磊, 徐东耀, 潘涛 (1523)
2006~2010 年珠三角地区 SO ₂ 特征分析	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邓涛, 徐婉筠, 冉靓, 赵春生 (1530)
环境空气 PM _{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试	王强, 钟琪, 迟颖, 张杨, 杨凯 (1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放	裴冰 (1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应	方峰, 王磊, 席雪飞, 胡佳俊, 付小花, 陆兵, 徐殿胜 (1550)
基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算	冯驰, 金琦, 王艳楠, 赵丽娜, 吕恒, 李云梅 (1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析	吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 罗进, 蒋浩 (1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析	高磊, 陈建耀, 王江, 柯志庭, 朱爱萍, 许凯 (1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究	刘肖, 杨琰, 彭涛, 赵景耀, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响	肖时珍, 熊康宁, 蓝家程, 张晖, 杨龙 (1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异	赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利 (1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响	孙玉川, 王永启, 梁作兵, 袁道先 (1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究	曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 王炳华, 王云倩 (1615)
摇蚊幼虫扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应	史晓丹, 李勇, 李大鹏, 王忍, 邓猛, 黄勇 (1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响	郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞 (1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响	黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 石纹豪, 杨珊 (1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响	汪小雄, 姜成春, 李锦卫, 汪晓军 (1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用	陈亚楠, 袁玲 (1655)
饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制	丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 缪佳 (1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性	凌晓, 胡晨燕, 程明, 谷建 (1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响	张灿, 刘文君, 史云, 安代志, 白森, 徐稳 (1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性	马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 钟金魁, 李安邦 (1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铅的研究	张晓峰, 陈迪云, 彭燕, 刘永胜, 熊雪莹 (1686)
SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响	张静, 肖太民, 张晶, 曹丽亚, 杜亚威, 刘春, 张磊 (1694)
TiO ₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制	郭宏生, 刘亚楠, 乔琪, 魏红, 董呈幸, 薛洁, 李克斌 (1700)
新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能	王刚, 杜凤龄, 常青, 徐敏 (1707)
基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量	曾善文, 王泽宇, 高敬, 刘东, 张代钧, 卢培利 (1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制	黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和, 白洁 (1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响	张喻, 韩融, 陆文静, 王洪涛, 明中远, 王强, 夏伟 (1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究	吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 杨慧娟, 孙剑辉 (1733)
百乐克 (BIOLAK) 活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析	田美, 刘汉湖, 申欣, 赵方庆, 陈帅, 姚永佳 (1739)
异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性	梁贤, 任勇翔, 杨垒, 赵思琪, 夏志红 (1749)
菌株 <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学	任磊, 史延华, 贾阳, 姚雪松, Ruth Nahurira, 弥春霞, 闫艳春 (1757)
短短芽胞杆菌及其芽胞对苣的降解	刘芷辰, 叶锦韶, 彭辉, 刘则华, 邓庭进, 尹华, 廖丽萍 (1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探	李蕾, 徐晶, 赵由才, 宋立岩 (1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查	麦晓蓓, 陶然, 杨扬, 张敏, 林剑华, 满滢 (1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响	柳蓉, 龙焰, 王立立, 何婷, 叶锦韶 (1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 李洪建, 李君剑, 武江星 (1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响	姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 刘庆芳, 王志齐, 张彦军, 李娜娜, 李如剑, 吴得峰, 孙棋棋 (1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估	张文超, 吕森林, 刘丁戎, 刘品威, 米持真一, 王效举, 王青耀 (1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义	张俊辉, 王瑾, 张健, 房妮, 夏敦胜 (1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征	毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 张小凯, 何丽芝, 王海龙 (1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响	李君剑, 刘峰, 周小梅 (1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究	肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应	黄昭露, 陈泉源, 周娟, 谢墨函 (1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应	杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 王婷婷, 张明辉 (1856)
可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究	卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭蒙 (1864)
绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性	金诚, 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 武文飞, 王厚成 (1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响	王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领 (1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响	李苗苗 (1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索	蔡锋, 赵士波, 陈刚才, 鲜思淑, 杨清玲, 周贤杰, 余海 (1902)
《环境科学》征订启事 (1543) 《环境科学》征稿简则 (1756) 信息 (1667, 1726, 1809, 1848)	

南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响

郝卓^{1,2}, 高扬^{2*}, 张进忠^{1*}, 徐亚娟^{2,3}, 于贵瑞²

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 中南林业科技大学林学院, 长沙 410000)

摘要: 本研究通过对江西千烟洲香溪流域雨季氮湿沉降及径流过程进行监测, 分析降雨及径流过程的各形态氮浓度变化, 探讨南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响。结果表明: ① 2014 年雨季(3~6 月)共 27 场降雨, 产生的氮湿沉降负荷达 43.64~630.59 kg, 氮沉降通量为 0.44~6.43 kg·hm⁻², 呈现出极大的季节变异性; ② 对其中 3 场降雨过程进行动态分析发现, 当降雨量为 8~14 mm 时, 流域氮沉降负荷达 18.03~41.16 kg, 而该地区氮湿沉降通量为 0.18~0.42 kg·hm⁻²。其中 3 场次降雨事件导致流域水体的总径流量为 4 189.38 m³, TN 总流失负荷 16.72 kg, 输出通量为 4.64 kg·hm⁻²; DTN 总流失负荷为 9.64 kg, 输出通量为 2.68 kg·hm⁻²; NH₄⁺-N 总流失负荷 2.93 kg, 输出通量为 0.81 kg·hm⁻²; NO₃⁻-N 总流失负荷 5.60 kg, 输出通量为 1.56 kg·hm⁻²。③ 流域氮湿沉降对流域氮输出的贡献率约为 56%~94%, 说明降雨对流域氮流失影响巨大, 并以硝酸盐为主, 流域水体中总氮浓度超过河流水体富营养化阈值(1.5 mg·L⁻¹) 存在发生富营养化的隐患。

关键词: 千烟洲; 流域; 氮湿沉降; 降雨径流; 氮负荷

中图分类号: X131.3; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1630-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.05.016

Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China

HAO Zhuo^{1,2}, GAO Yang^{2*}, ZHANG Jin-zhong^{1*}, XU Ya-juan^{2,3}, YU Gui-rui²

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410000, China)

Abstract: In this study, Qianyanzhou Xiangxi River Basin in the rainy season was monitored to measure different nitrogen form concentrations of rainfall and rainfall-runoff process, in order to explore the southern red soil region of nitrogen wet deposition characteristics and its influence on N output in watershed. The results showed that there were 27 times rainfall in the 2014 rainy season, wherein N wet deposition load reached 43.64~630.59 kg and N deposition flux were 0.44~6.43 kg·hm⁻², which presented a great seasonal variability. We selected three rainfall events to make dynamic analysis. The rainfall in three rainfall events ranged from 8 to 14mm, and the deposition load in the watershed were from 18.03 to 41.16 kg and its flux reached 0.18 to 0.42 kg·hm⁻². Meanwhile, this three rainfall events led to 4 189.38 m³ of the total runoff discharge, 16.72 kg of total nitrogen (TN) load and 4.64 kg·hm⁻² of flux, wherein dissolved total nitrogen (DTN) were 9.64 kg and 2.68 kg·hm⁻², ammonium-nitrogen (NH₄⁺-N) were 2.93 kg and 0.81 kg·hm⁻², nitrate-nitrogen (NO₃⁻-N) were 5.60 kg and 1.56 kg·hm⁻². The contribution rate of N wet deposition to N output from watershed reached 56%~94%, implying that the rainfall-runoff had tremendous contribution to N loss in this small watershed. The concentrations of TN in water had exceeded 1.5 mg·L⁻¹ of eutrophication threshold, which existed an eutrophication potential.

Key words: Qianyanzhou; watershed; nitrogen wet deposition; rainfall-runoff; N loss load

氮湿沉降是指在重力作用下, 水溶性或颗粒态氮被雨、雪溶解或冲刷降至地面的过程。湿沉降中的氮通常分为氨态氮、硝态氮和有机氮^[1]。大气氮沉降为陆地、河口、海湾等生态系统输入过量的营养元素氮, 从而引发土壤酸化、水体富营养化、生物群落结构改变等一系列生态环境问题^[2]。氮沉降超过了自然界可以承受的范围, 将造成氮饱和及水质恶化的危害, 影响水生和陆地生态系统的结构和功能^[3,4]。在国外, 氮沉降已经作为重要的氮源纳入到流域氮循环的研究范围之内^[5~7]。据统计, 1860 年

全球大气氮沉降量为 31.6 Tg·a⁻¹, 在 1990 年达到 103 Tg·a⁻¹, 预计到 2050 年该数据会上升到 195 Tg·a⁻¹^[8]。目前我国大气氮素湿沉降通量平均值达 8.85 Tg·a⁻¹^[9], 已经成为继欧洲和美国之后的第三大沉降区^[10,11]。氮沉降作为全球变化的重要现象和

收稿日期: 2014-10-10; 修订日期: 2014-12-12

基金项目: 中国科学院兼维优秀青年人才项目(2012RC202); 国家自然科学基金项目(31200404)

作者简介: 郝卓(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气氮湿沉降及其生物化学过程, E-mail: hzhfut@163.com

* 通讯联系人, E-mail: gaoyang@igsrr.ac.cn; jzhzhang@swu.edu.cn

氮循环的主要环节,其研究意义十分重大^[12]. 我国虽然是氮排放严重地区,但氮沉降的研究却分布零散,大量的研究也只集中在氮沉降对陆地生态系统(如森林、草地等)的影响,以流域为单位对氮沉降进行的研究比较少见^[11].

南方广泛分布的红壤是高度风化的土壤类型,土壤 pH 值,阳离子交换量和盐基饱和度均低,黏粒矿物以高岭石和铁铝氧化物为主,缓冲容量低,对酸沉降非常敏感^[13]. 南方红壤地区一直是酸沉降的重污染区,目前我国酸沉降已由 H_2SO_4 型向 H_2SO_4 - HNO_3 混合型转变,氮沉降在酸沉降中的比重越来越大. 本文通过对位于江西泰和县千烟洲试验区的研究,分析降雨过程的氮湿沉降特征对流域水体氮输出的贡献及其对水质的影响,以期为进一步研究大气氮沉降对红壤区氮素生物地球化学循环以及评估氮湿沉降对水环境的影响提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本实验研究区为中国科学院千烟洲生态网络试验站农业生态系统,位于江西省吉泰盆地泰和县灌溪镇桃源村境内($115^{\circ}04'13''E$, $26^{\circ}44'48''N$) (图 1), 平均海拔高度为 110.8 m, 土壤类型为红壤^[14]. 年

均气温 $16.5^{\circ}C$, 降雨量季节分配不均匀, 雨季多集中于 3~9 月, 年均降水量 1 542 mm, 其中 4~6 月降雨量约占全年的一半, 7~8 月高温少雨, 易出现伏旱, 年均相对湿度 84%, 具有典型亚热带季风气候特征^[15~17]. 区内共有 9 条小溪, 3 条初级小流域, 香溪流域为其中之一. 香溪流域总面积为 98 hm^2 . 流域内河流流经林地、稻田、桔园, 最终汇入架竹河. 架竹河水系为赣江流域的二级支流, 最终汇入鄱阳湖水系^[17].

1.2 研究方法

1.2.1 采样方法

在千烟洲香溪流域综合考虑了空间分布、土地利用类型及采样便利等因素均匀的设立 8 个采样点 (图 1), 分别为上游的 A、B、C, 中游的 D、E、F, 及下游的 G、H, 依次流经水塘, 稻田, 桔园等不同的土地利用类型. 设立的这 8 个常规采样点, 自 2014 年 3 月至 6 月每月采集样品 2 次 (分别在每月的 9 号和 19 号进行人工采样). 并在流域 G 点处设置一台 ISOC6710 水沙自动采样装置, 降雨后进行径流水样的采集. 将降雨触发模块设置为 5 mm (即降雨量超过 5 mm 时, 自动采样装置开始采集地表径流), 当降雨触发模块运行后, 每隔 30 min 自动采集 200 mL 径流样, 直到收集完 24 个样品. 该仪器同时实时监

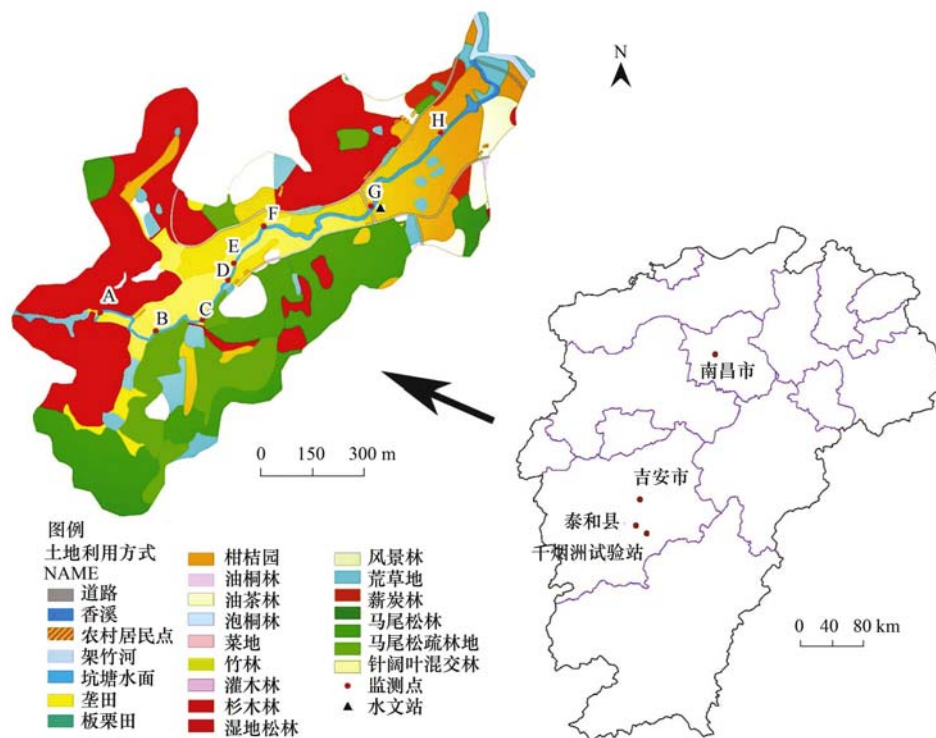


图 1 流域采样点分布及土地利用方式

Fig. 1 Sampling point distribution of watersheds and different land-uses

测水位,流量以及流速的变化.在试验区屋顶安装雨量计,每次降雨后,雨量计收集雨水,人工采集雨水进行分析.2014年3~6月共收集到27场降雨,其中4月2场降雨、5月11场及6月12场降雨,其中中小雨居多(日降雨量小于10 mm为小雨,10~25 mm为中雨,25~50 mm为大雨,50 mm以上为暴雨).将收集的水样分装到聚乙烯塑料瓶(100 mL),样品采集后立刻送往实验室,放置于冰箱保存并在一月内取回至中科院地理所进行试验分析.

1.2.2 样品的测定

本实验样品包括雨水、常规采样点水样及径流水样主要检测指标均为:总氮(TN)、溶解性总氮(DTN)、硝态氮(NO_3^- -N)、氨氮(NH_4^+ -N).将水样分为两部分,一部分通过国家标准碱性过硫酸钾-紫外分光光度法(GB 11894-89)的消解方法处理水样,通过流动分析仪(法国 Futura 型号)测定总氮(TN);另一部分通过经0.45 μm 有机微孔滤膜(经过80℃水浴12 h处理)过滤后通过流动分析仪测定溶解性总氮(DTN)、氨氮(NH_4^+ -N)及硝氮(NO_3^- -N).无机氮(DIN) = NO_3^- -N + NH_4^+ -N.

1.3 数据分析

1.3.1 氮湿沉降通量的计算方法

采用式(1)对氮湿沉降通量进行计算^[11]:

$$F = \sum \left(\frac{P \times c}{100} \right) \quad (1)$$

式中, F 代表沉降通量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), P 代表逐月降雨量(mm), c 代表雨水中总氮浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

1.3.2 径流量及氮排放负荷计算方法^[18]

径流量计算见公式(2),氮排放负荷根据同步流量和浓度监测值按公式(3)进行计算.

$$x = \int_0^t q_i(t) dt \approx \sum_{i=1}^{n-1} Q_i \Delta t_i = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{q_i + q_{i+1}}{2} \quad (2)$$

$$y_j = \int_0^t c_i(t) \times q_i(t) dt \approx \sum_{i=1}^{n-1} c_i Q_i \Delta t_i$$

$$= \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t \frac{c_i + c_{i+1}}{2} \times \frac{q_i + q_{i+1}}{2} \quad (3)$$

式中, y_j 为第 j 种污染物的排放负荷(g); c_i 为 t 时刻径流中第 j 种污染物的浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); q_i 为 t 时刻的流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); c_i 为第 j 种污染物在样本 i 监测时的浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); q_i 为样本 i 在监测时的流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); x 为径流量(m^3); Δt 为样本 i 和 $i+1$ 的时间间隔(s).

1.3.3 流域氮沉降对水体氮贡献量的估算

流域内的氮沉降通过降雨的直接方式和土壤流的间接方式进入流域河流中,土壤径流向水体输入氮的过程会因为土壤和植被的截留而减少.氮沉降的输出与土地利用方式和土壤性质有关.根据相应区域的氮沉降负荷、输出率和土地面积,便可计算出氮沉降对流域内河流的氮贡献量,计算流域氮沉降对河流贡献量采用美国宾夕法尼亚州氮输出系数计算(表1)^[4,5,7],具体计算公式:

$$M = \sum (F_i \times S_i \times E_i) \quad (4)$$

式中, M 代表氮沉降通过土壤截留之后向该区域河道输入的氮量; F_i 代表 i 区域氮沉降通量 [$\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], S_i 代表 i 区域土地利用面积(hm^2), E_i 代表 i 区域内相应土壤类型的氮输出率.表1中A~D依次代表透水性好到透水性差的4种土壤,其中C代表透水性较差的土壤,主要为黏壤土,D代表透水性很差的土壤,主要为黏土^[11].根据香溪流域土壤类型的调查,流域内以红壤为主是透水性较差的土壤,属于表1中C~D类的氮输出率.将其土壤类型估测为C类土壤时,则为输出的最少估测值,估测为D类土壤时,则为输出的最大值.

表1 氮沉降在不同土壤类别下的氮输出率^[11]

Table 1 Percentage of deposited nitrogen delivered to surface water

土地类型	林地				耕地				水体			
土壤水文分组	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
氮沉降负荷输出率/%	2	4	6	8	25	25	46	67	100	100	100	100

2 结果与分析

2.1 流域氮湿沉降雨季特征

图2为3~6月雨水中各形态氮浓度的月平均值变化规律,从中可以看出,4、5月各形态氮浓度均为最大,铵态氮和硝态氮浓度十分接近,而其他月份

硝态氮浓度明显高于铵态氮,其中4月铵态氮浓度达最大值0.89 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 超过了硝态氮;而6月铵态氮浓度只有0.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为最小值.如图2所示,千烟洲试验区雨水中的主要成分是无机氮,通过对各个月中各场降雨TN浓度计算平均值得到平均沉降及平均沉降通量,计算各月中每场雨TN浓度之和

得到总沉降负荷列于表 2。从中可知,3、4 月分别采集到 2 场降雨,但 4 月氮沉降负荷明显高于 3 月,甚至达到两倍以上,说明外部环境发生了变化,其变化原因可能是当地农民常选在 4 月对农作物追肥,氮肥中氨氮挥发导致氮沉降负荷增高;5、6 月各采集到 11、12 场降雨,氮沉降负荷较高是由降雨频繁引起的。

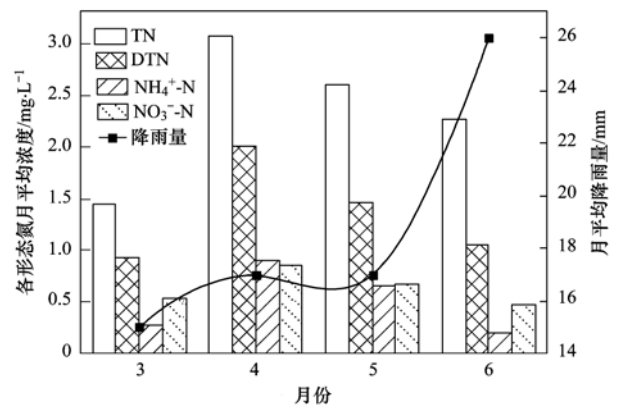


图 2 各形态氮浓度月变化及降雨量
Fig. 2 Monthly variation of different forms of nitrogen concentration and the rainfall

表 2 氮平均沉降负荷及沉降通量的月变化				
Table 2 Average monthly variation of nitrogen load and deposition fluxes				
项目	3 月	4 月	5 月	6 月
平均沉降负荷/kg	21.32	51.31	43.32	56.82
平均沉降通量/kg·hm ⁻²	0.22	0.52	0.44	0.59
总沉降负荷/kg	43.56	105	554.25	630.90

2.2 次降雨事件氮湿沉降特征

4~6 月为千烟洲雨季,从中选取降雨量相近的 3 场降雨分析其氮沉降特征:4 月 25 日降雨量为 14 mm,5 月 17 日 8 mm,5 月 21 日 10 mm,均为小雨。3 次降雨的氮沉降负荷分别为:41.16、18.03、21.01 kg;3 场降雨氮沉降总负荷为:83.20 kg。3 场降雨氮的沉降通量分别为:0.42、0.18、0.25 kg·hm⁻²。DTN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的体积加权平均浓度分别为 2.34、1.09、0.90 mg·L⁻¹。按照占总溶解性氮浓度的比,NH₄⁺-N (46.4%) > NO₃⁻-N (38.6%) > DON (15.0%),说明 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 是千烟洲香溪河流域氮湿沉降的主要成分。表 3 中显示 3 场降雨 pH 分别为 4.65、5.01、4.22,均为酸沉降。

表 3 雨水中各形态氮浓度及降雨量

Table 3 Various nitrogen form concentrations in rainwater and the rainfall								
日期	TN /mg·L ⁻¹	DTN /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	DON /mg·L ⁻¹	PN /mg·L ⁻¹	pH	降雨量 /mm
2014-04-25	3.00	2.50	1.11	0.94	0.45	0.50	4.65	14
2014-05-17	2.30	0.49	0.31	0.18	0	1.81	5.01	8
2014-05-21	2.45	2.11	1.05	0.85	0.21	0.34	4.22	10

如表 3 所示,5 月 17 日 DTN 沉降明显低于另外两次沉降,可能是由于降雨量小(8 mm),降雨初期先将空气中附着在颗粒上的氮冲刷下来,之后才是溶解性氮。5 月 21 日降雨量 10 mm,DTN 浓度明

显增高。说明降雨量小于 10 mm 时,雨水中的氮主要形态为颗粒氮,超过 10 mm 后为溶解性氮。雨水中铵态氮主要来源于大气 NH₃ 的溶解,而大气 NH₃ 主要来源于畜禽养殖、化肥施用与生物燃烧。NH₃ 与 NH₄⁺ 等水溶性氮主要在对流层进行扩散,一般在较短时间内随雨水形成氮的湿沉降^[12]。千烟洲地区人类活动主要就是农业生产,所以空气中 NH₃ 含量较高,从表 3 中就可以看出:3 场降雨氨氮浓度均大于硝态氮浓度。从图 3 中也可看出各形态氮浓度变化与降雨量有关,降雨量大氮素浓度也偏大。

2.3 流域氮输出特征

无降雨条件下流域 3~6 月各常规采样点 pH 变化特征如图 4 所示,流域水体 pH 最高值为 8.65,最低值为 6.22。4 月 19 日至 5 月 19 日 pH 变化范围较大,因千烟洲地区进入 4 月下旬稻田追肥,引起水体 pH 发生变化,即人为活动对流域影响十分明显。图 5 分别为 4 月 9 日、4 月 19 日、5 月 9 日、5 月

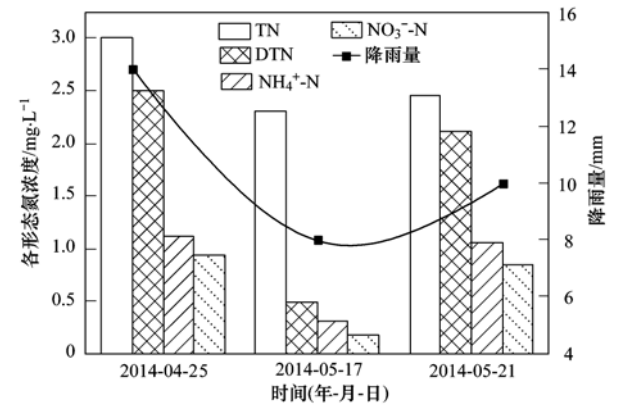


图 3 3 场降雨各形态氮浓度及降雨量
Fig. 3 Different nitrogen form concentrations and rainfall under different rain events

19 日香流域常规采样点各形态氮的浓度变化情况:DTN、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 的变化规律相似;TN 并没有明显的规律性,由于 4、5 月采样点周围稻田施肥,认为外界施加的氮源含量不稳定. 4 月 19 日的各形态氮浓度均大于其它几次常规采样,总氮最高值甚至达 $23.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,并且氨氮含量明显高于硝态氮,可以推测在 19 日前后当地农民对采样点周围的稻田施用肥料,导致氮浓度普遍偏高.

为了直观地反映不同土地利用类型下流域的各形态氮浓度,将采样点按照上、中、下游进行划分. 上游(A、B、C)主要是林业用地,中游(D、E、F)主要是稻田和桔园混合用地,下游(G、H)主要是桔园. 图 6 表明,在流域的中游 DTN 浓度均是最高值,中游是稻田和桔园混合种植区域,4、5 月为施肥期,所

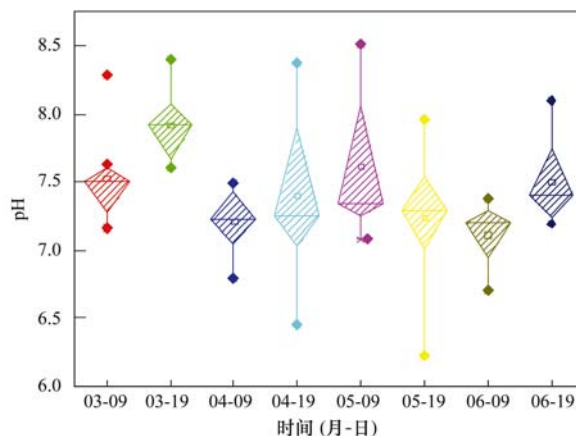


图 4 3~6 月常规采样各采样点 pH 变化

Fig. 4 Changes of pH at each sampling point during March to June regular sampling

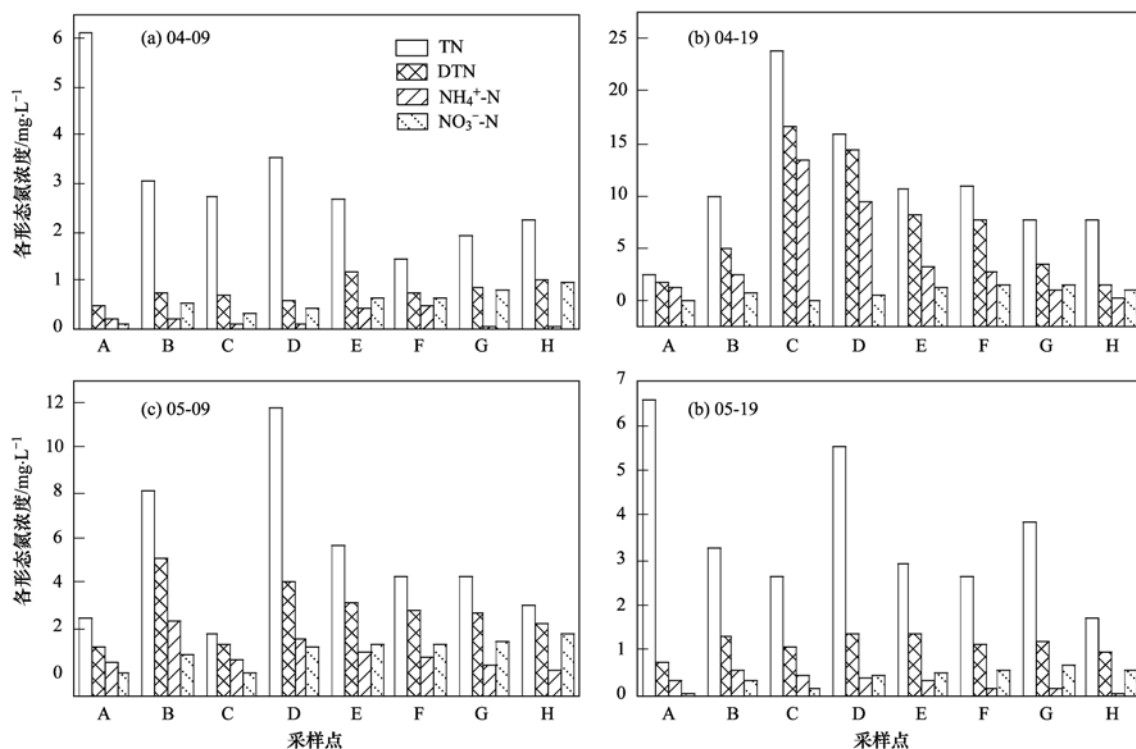


图 5 流域不同形态氮雨季变化特征

Fig. 5 Nitrogenform concentration under normal condition

以浓度较高属于正常情况. 硝态氮浓度从上游到下游呈上升趋势,而氨氮呈下降趋势,说明在中游施肥量大于下游,其次河流流动的过程中氨态氮与硝态氮发生了相互转化过程.

2.4 次降雨事件流域 N 输出动态特征

流域内的氮沉降通过降雨的直接方式和雨水冲刷土壤的间接方式输入到流域内的河道中,会引起流域水体中氮素含量的变化. 图 7 为 3 场降雨 12 h 变化过程的径流量,最大流量发生在 4 月 25 日初期

降雨时段. 3 场降雨都是在降雨初期出有明显的流量峰值,分别为 4 月 25 日 $0.27 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 5 月 17 日 $0.05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 5 月 21 日 $0.11 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 在 G 采样点对 3 场典型降雨进行径流水样采集,5 月 17 日采样历时只有 9 h,是由于雷雨天气导致千烟洲站上断电使得样品没有采集完全,但并不影响总体趋势. 图 8 为 3 场次降雨事件引起的径流过程中不同形态氮浓度变化特征,从中可知,次降雨事件后,各形态氮浓度变化随径流量的涨落呈明显的阶段分配特点,在

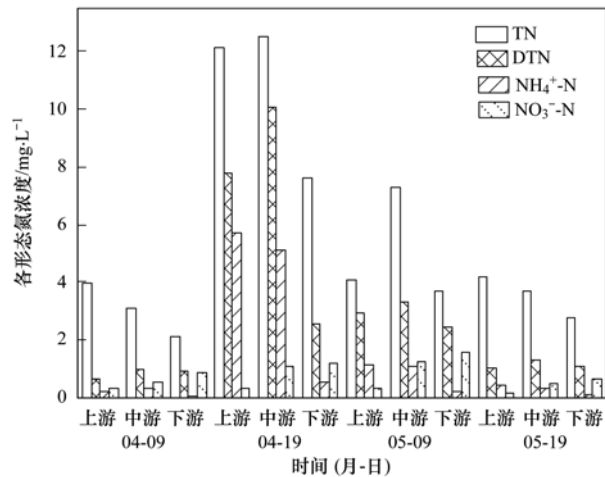


图6 小流域4、5月上、中、下游各形态氮浓度

Fig. 6 Different nitrogen form concentrations of upper, middle and lower reaches in small watershed during April and May

流量峰值之前,氮素各形态浓度随流量增加而增加,在峰值之后呈下降趋势. 3 场降雨的总氮的变化幅度较大,并不存在规律性,TN 的最高值出现在4月25日浓度为 $5.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最低值出现在5月17日浓度为 $1.55\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 硝态氮与溶解性总氮变化规律基本一致,说明溶解性总氮的主要成分是硝态氮. 氨氮含量均偏低且变化平稳,与常规条件下相比,雨水进入河流后氨氮浓度明显下降,硝态氮浓度明显

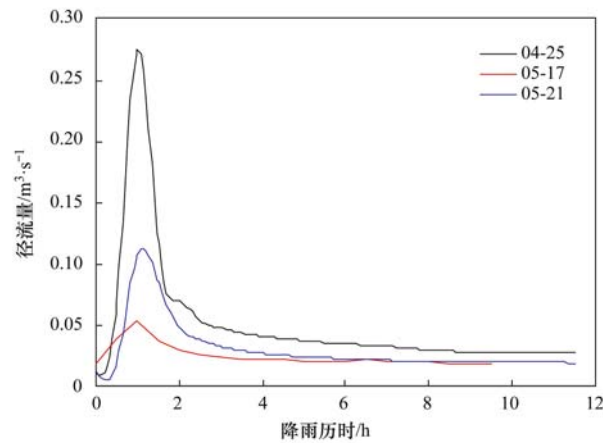


图7 3场降雨径流过程的径流量

Fig. 7 Volume of runoff for three rainfall events

高于氨氮,其原因可能有3个方面:一方面由于雨水使河流发生搅动,创造了好氧条件引起硝化反应,促进氨氮与硝氮之间的转化;另外氨态氮易被土壤吸收,随水体流失的主要是硝态氮;农药化肥的施用也会有影响. 次降雨事件流域水体中4月25日各形态氮浓度均是3场降雨的最大值,与本文推测在4月19日前后稻田追肥的结论保持一致;5月17日降雨量只有8 mm,所以在3场降雨的氮湿沉降量最小.

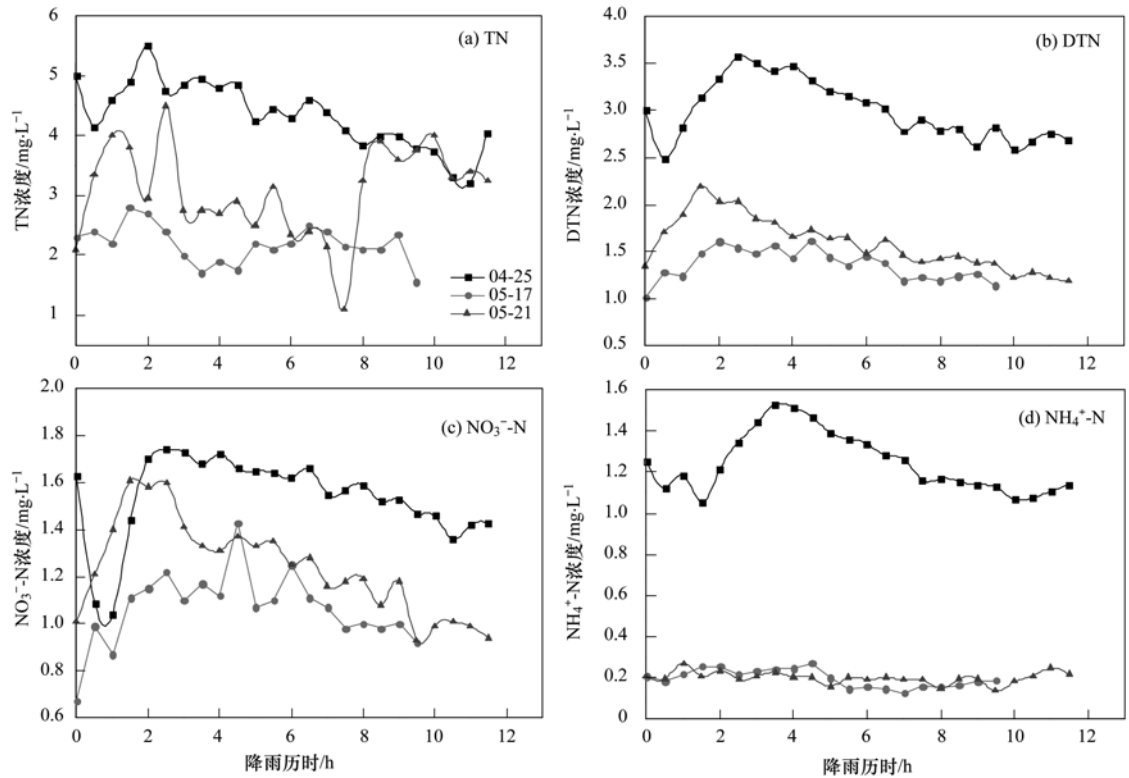


图8 不同形态氮浓度随降雨时间变化

Fig. 8 Changes of the nitrogen forms in different rainfall events

3 讨论

3.1 季节氮湿沉降对流域河流氮输出贡献

根据流域不同土地利用方式(图1)将湿地松、马尾松、杉木林等均定为林地其面积为69 hm²,菜地、垄田、草地定为耕地面积为19.3 hm²,水域面积为3.6 hm².流域湿沉降平均负荷为23.18 kg·(hm²·a)⁻¹,根据式(4)估算出流域内大气氮湿沉降对河流氮贡献量为385.2~511.1 kg.根据当地居民提供资料,流域内氮肥年均使用量约为17 000~20 000 kg,约有6 000~9 000 kg的氮肥未被吸收流入水体.因此流域氮湿沉降相对氮肥而言对水体氮的贡献率很小,只占氮肥贡献率的约4.3%~5.7%.3场降雨氮的沉降通量分别为:

0.42、0.18、0.25 kg·hm⁻²;3场降雨对河流氮贡献量为:6.98~9.26、3.06~4.06、4.07~5.40 kg.

表4所示,2014年4、5月小流域3次典型降雨总径流量为4 189.38 m³,TN总流失负荷16 722.57 g,平均负荷为3.99 g·m⁻³;DTN总流失负荷为9 643.06 g,平均负荷为2.30 g·m⁻³;NH₄⁺-N总流失负荷2 933.62 g,平均负荷为0.70 g·m⁻³;NO₃⁻-N总流失负荷5 599.80 g,平均负荷为1.34 g·m⁻³.3场典型降雨对流域氮输出的贡献率分别为:94.48%、56.08%、86.08%,说明次降雨事件对流域氮流失贡献巨大.其中DTN占TN的57.7%,NH₄⁺-N、NO₃⁻-N分别占DTN的30.4%和58.3%.DTN形态的氮素控制着降雨径流中氮素的流失.

表4 降雨径流过程不同形态氮的输出负荷

Table 4 Different nitrogen form loads under rainfall-runoff events

降雨日期	累积径流量/m ³	TN/g	DTN/g	NH ₄ ⁺ -N/g	NO ₃ ⁻ -N/g
2014-04-25	2 005.64	10 475.57	6 230.16	2 480.71	2 968.20
2014-05-17	866.45	1 933.45	1 179.29	176.67	915.77
2014-05-21	1 317.29	4 314.55	2 233.61	276.24	1 715.83
总量	4 189.38	16 722.57	9 643.06	2 933.62	5 599.80
平均值	1 396.46	5 574.19	3 214.35	977.87	1 866.60

对3次降雨径流过程中瞬时径流量和污染物排放负荷分别进行多项式回归,结果列于表5.各形态氮迁移负荷与径流量之间存在极显著的相关关系,其统计方程可见非点源污染与研究区的土地利用类型、土壤理化性质和流域农田管理措施等多种因素

有关,表5所列经验方程对于典型小流域径流过程的理解有一定的参考价值^[18].

3.2 次降雨事件溶解性有机氮及颗粒氮的变化特征

雨水中适量的可溶性有机氮可以被生物利用,从而提高生态系统的初级生产力,但浓度过高时不

表5 降雨过程径流量与TN、DTN输出负荷回归方程

Table 5 Regression equation of runoff, TN and DTN load under rainfall-runoff events

降雨日期	指标	回归方程	R ²	P
2014-04-25	TN	y = 6.599 3x - 126.56	0.986 7	<0.01
	DTN	y = 3.019 5x + 1.966 7	0.990 7	<0.01
2014-05-17	TN	y = 2.886 8x - 28.285	0.958 2	<0.01
	DTN	y = 1.408 6x - 1.988 5	0.897 3	<0.01
2014-05-21	TN	y = 4.095 4x - 45.056	0.955 4	<0.01
	DTN	y = 2.121 6x - 23.379	0.976 4	<0.01

会再起到营养作用,反而会加速陆地生态系统氮流失^[19].千烟洲地区雨水及河流水体中溶解性有机氮含量相对偏低,最高浓度仅为0.65 mg·L⁻¹.3场降雨雨水中DON浓度占TN的比例最高为15%,最低趋于0%,对实验区的生态环境没有影响.次降雨事件后河流径流DON浓度变化趋势与无机态氮相似.如图9所示:在流量峰值之前,DON浓度随流量增加而增加,在峰值之后呈下降趋势,并且在流量峰

值前浓度随降雨量大小变化,降雨量越大DON浓度也越大,峰值之后3场降雨后的DON浓度变化趋于一致接近于0.1 mg·L⁻¹.香溪流域河流水体符合天然水体DON浓度范围^[20].

雨水中的颗粒态氮与降雨量有关,3场降雨中颗粒态氮浓度分别为:0.45、1.81、0.34 mg·L⁻¹.其中5月17日降雨量小于10 mm,PN为1.81 mg·L⁻¹从这3场雨的数据可以推测降雨初期雨水

中的主要成分为颗粒态氮,随降雨量增加溶解性氮含量增加。次降雨事件引起的径流过程中 PN 浓度变化无明显规律。水体中的颗粒态氮来源是河流流动过程带起的河岸及河底泥沙。

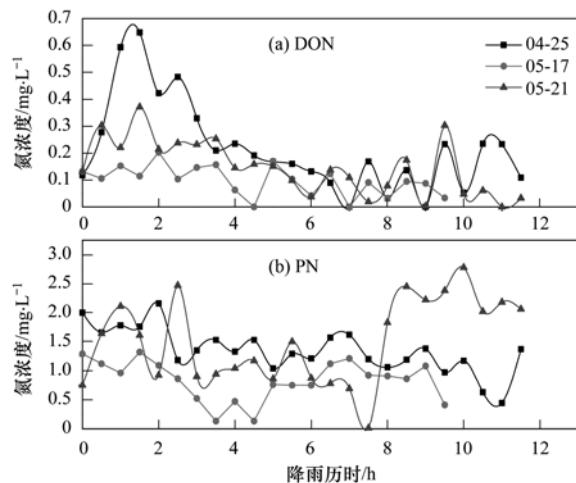


图9 DON、PN 浓度随降雨时间变化

Fig. 9 Changes of DON and PN in different rainfall events

3.3 次降雨事件氮沉降对流域水质的影响

3 场典型降雨均为酸沉降,酸沉降到水体中降低水体 pH 值,严重时会导致水生生物的死亡,还会杀死水中的浮游生物,减少鱼类食物来源,从而打破水生生态系统的平衡。香溪小流域河流最终汇入架竹河,对其水质会产生一定的影响。流域水体中的氮素通过降雨的直接方式及雨水冲刷土壤的间接方式输入到流域的河道中,会引起流域水体中氮素含量的变化。降雨径流对小流域氮流失贡献巨大,并且氮是以硝酸盐为主要流失形式。该地区降水、常规条件及降雨径流过程中的 TN 浓度均超过河流水体富营养化阈值($1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[21],而湖泊水体中富营养化阈值仅为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[22]。氮沉降无疑会加速河流、湖泊、海洋等水体的富营养化的进程。虽然千烟洲试验区还没有出现富营养化状态,但也要高度重视大气氮沉降及农田生态系统的养分输入对水体富营养化的贡献,随时做好处理措施。

3.4 大气中氮沉降来源及特点

大量实验研究表明:空气中的 NO_3^- -N 主要来自石油和生物体的燃烧及雷击过程,迁移距离可达几 km 以上; NH_4^+ -N 主要来自土壤、肥料和家畜粪便中的 NH_3 挥发及生物质和化石燃料燃烧;有机组分的来源比较复杂,大气有机氮的主要来源包括:生物质燃烧、工农牧业生产、废弃物处理、填土挥发以及土壤和动植物等直接向大气中释放;另一个重要来

源是大气层中性质活跃的 NO_x 与碳氢化合物发生光化学反应的产物^[23,24]。从本研究的 3 场典型降雨看出千烟洲地区氮湿沉降的特点是: NH_4^+ -N (46.4%) > NO_3^- -N (38.6%) > DON (15.0%),说明 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 是千烟洲香溪河流域氮湿沉降的主要成分。千烟洲主要是农业生产,采样点周围分布鱼塘、稻田、桔园,这里的水稻一年两熟,化肥使用率较高。研究区位于泰和县的农村,机动车辆较少,所以 NH_4^+ -N 浓度比 NO_3^- -N 高。由此可以推测:千烟洲试验区大气中的氮主要来自于农业化肥的使用。

我国南方地区大气氮湿沉降的变化范围较大,九龙江地区的大气氮湿沉降量是 $9.9 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,而广东鼎湖山地区的高达 $38.4 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,缙云山地区无机氮沉降量为 $11.49 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[23,24]。本研究的 3 场降雨氮的沉降通量分别为: 0.42 、 0.18 、 $0.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,总的氮沉降通量为: $0.85 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。香溪小流域 2014 年湿沉降量约为 $23.18 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。造成这些明显差异的原因可能是南方地区经济发展不平衡,经济发达地区往往也是工农业相对发达和氮肥的高投入地区,因此其人为活性氮的大气排放往往显著高于经济欠发达地区,所以经济越发达地区的大气氮沉降量越高^[25]。目前对千烟洲地区只做了短期研究且是中小雨没有明显的变化特征,需要在今后的研究中寻找特点。

4 结论

(1) 在香溪流域雨季期间,氮湿沉降通量达 $13.52 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,平均负荷为 331.22 kg ,其中氨态氮沉降通量为 $6.27 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,硝态氮沉降通量为 $5.21 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。降雨频繁程度和降雨量是影响氮沉降负荷的主要因素。

(2) 降雨初期雨水将空气中的颗粒氮冲刷下来即降雨量小于 10 mm 时,雨水中的氮主要形态为颗粒氮,超过 10 mm 后溶解性氮含量明显增加。千烟洲地区 2014 年雨季雨水中各形态氮占总氮浓度的比为, NH_4^+ -N (46.4%) > NO_3^- -N (38.6%) > DON (15.0%),具有一定的参考价值。

(3) 流域内大气氮湿沉降对河流氮贡献量为 $385.2 \text{ kg} \sim 511.1 \text{ kg}$,约占氮肥贡献率的 4.3% ~ 5.7%,3 场降雨对河流氮贡献量为: $6.98 \sim 9.26 \text{ kg}$ 、 $3.06 \sim 4.06 \text{ kg}$ 、 $4.07 \sim 5.40 \text{ kg}$ 。流域氮湿沉降对流域氮输出的贡献率约为 56% ~ 94%,说明次降雨对

流域氮流失贡献巨大,其中 DTN 占 TN 的流失负荷的 57.7%, NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 分别占 DTN 的 30.4% 和 58.3%。降雨径流中氮素的流失是以硝态氮的形式流失。

参考文献:

- [1] Russell K M, Galloway J N, Macko S A, *et al.* Sources of nitrogen in wet deposition to the Chesapeake Bay region [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**(14-15): 2453-2465.
- [2] Liu X J, Zhang Y, Han W X, *et al.* Enhanced nitrogen deposition over China [J]. *Nature*, 2013, **494**(7438): 459-462.
- [3] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, *et al.* Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences [J]. *Ecological Applications*, 1997, **7**(3): 737-750.
- [4] 陈能汪, 洪华生, 张路平. 九龙江流域大气氮湿沉降研究 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(1): 38-46.
- [5] Whittall D, Hendrickson B, Paerl H. Importance of atmospherically deposited nitrogen to the annual nitrogen budget of the Neuse River estuary, North Carolina [J]. *Environment International*, 2003, **29**(2-3): 393-399.
- [6] Nizeyimana E, Evans B M, Anderson M C, *et al.* Quantification of NPS pollution loads within Pennsylvania watersheds; Prepared for the Pennsylvania department of environmental protection, bureau of water quality protection [R]. Res. Rep. ER9708. Pennsylvania: Environmental Resources Research Institute, Pennsylvania State University, University Park, 1997.
- [7] Sheeder S A, Lynch J A, Grimm J. Modeling atmospheric nitrogen deposition and transport in the Chesapeake Bay watershed [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, **31**(4): 1194-1206.
- [8] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, *et al.* Nitrogen cycles: Past, present, and future [J]. *Biogeochemistry*, 2004, **70**(2): 153-226.
- [9] Lü C Q, Tian H Q. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: Synthesis of observational data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**(D22): 1-10.
- [10] Twonsend A R, Braswell B H, Holland E A, *et al.* Spatial and temporal patterns in terrestrial carbon storage due to deposition of fossil fuel nitrogen [J]. *Ecological Applications*, 1996, **6**(3): 806-814.
- [11] 王金杰, 张克荣, 吴川, 等. 汉江上游金水河流域氮湿沉降 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 66-72.
- [12] 陈能汪, 洪华生, 肖健, 等. 九龙江流域大气氮干沉降 [J]. *生态学报*, 2006, **26**(8): 2602-2607.
- [13] 黄运湘, 廖柏寒, 王志坤. 模拟酸雨对森林红壤中铝的溶出及不同土层酸度变化的影响 [J]. *生态环境*, 2005, **14**(4): 478-482.
- [14] 黄昆, 王绍强, 王辉民, 等. 中亚热带人工针叶林生态系统碳通量拆分差异分析 [J]. *生态学报*, 2013, **33**(17): 5252-5265.
- [15] 涂洁, 刘琪璟, 王辉民. 江西千烟洲木荷液流特征及其与气象因子的关系 [J]. *长江流域资源与环境*, 2014, **23**(2): 267-273.
- [16] 任小丽, 何洪林, 刘敏, 等. 基于模型数据融合的千烟洲亚热带人工林碳水通量模拟 [J]. *生态学报*, 2012, **32**(23): 7313-7326.
- [17] 陈建平, 李艳, 董思宏, 等. 江西千烟洲农业生态系统水环境氮污染研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2012, **23**(6): 51-54.
- [18] 蒋锐, 朱波, 唐家良, 等. 紫色丘陵区典型小流域暴雨径流氮磷迁移过程与通量 [J]. *水利学报*, 2009, **40**(6): 659-666.
- [19] 邵伟, 张颖, 宋玲, 等. 西藏林芝大气有机氮沉降 [J]. *生态学报*, 2009, **29**(10): 5586-5591.
- [20] 卢宁, 刘茵. 长江口原水中溶解性有机氮类化合物分析 [J]. *人民长江*, 2013, **44**(21): 104-107.
- [21] Dodds W K, Jones J R, Welch E B. Suggested classification of stream trophic state; distributions of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen, and phosphorus [J]. *Water Research*, 1998, **32**(5): 1455-1462.
- [22] 房增国, 赵秀芬. 青岛大气氮湿沉降动态变化 [J]. *水土保持学报*, 2013, **27**(1): 263-266.
- [23] 宋欢欢, 姜春明, 宇万太. 大气氮沉降的基本特征与监测方法 [J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(2): 599-610.
- [24] 孙素琪, 王云琦, 王玉杰. 缙云山大气氮湿沉降组成及其变化特征 [J]. *北京林业大学学报*, 2013, **35**(4): 47-54.
- [25] 刘文竹, 王晓燕, 樊彦波. 大气氮沉降及其对水体氮负荷估算的研究进展 [J]. *环境污染与防治*, 2014, **36**(5): 88-93.

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoremediation of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行