

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响	
..... 周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)	
利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态	黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)
南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究	朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)
北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究	苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)
重庆市主城区 PM _{2.5} 时空分布特征	刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)
大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比	庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)
深圳市大气中全氟化合物的残留特征	何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)
北京上甸子站大气 CO ₂ 及 δ ¹³ C(CO ₂) 本底变化	夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)
梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布	刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)
城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险	刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)
北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估	
..... 曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)	
西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析	王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)
PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究	刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)
海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价	张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)
曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究	薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)
滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源	李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)
江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价	李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)
城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究	刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)
我国北方温排水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性	
..... 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)	
额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征	韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)
太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析	冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)
铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征	程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)
基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究	马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)
重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算	张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)
山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)
伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡河道脱氮机制的影响	韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)
环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征	高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)
藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律	陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)
扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响	郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)
铅改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响	章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)
电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究	王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)
水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用	
..... 赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)	
多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除	乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)
污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析	牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)
高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析	李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)
连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制	吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 徐乐中, 沈耀良 (1472)
反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复	王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)
低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响	
..... 何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)	
低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究	
..... 杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)	
短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响	谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)
不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子	崔海, 张亚红 (1507)
塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性	贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)
小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响	刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)
鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析	王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)
水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素	罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)
高温纤维素降解菌筛选及产酶特性	冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)
基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发	
..... 戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)	
养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价	金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)
4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响	王兰君, 王金花, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)
新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应	林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)
水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究	李蕾, 王铁宇, 王晓军, 肖荣波, 李奇峰, 彭驰, 韩存亮 (1584)
《环境科学》征订启事 (1218) 《环境科学》征稿简则 (1370) 信息 (1352, 1412, 1498)	

基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究

马秋梅^{1,2,3}, 李玮⁴, 王毅^{1,2*}, 刘新亮^{1,2}, 李勇^{1,2}, 吴金水^{1,2}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2. 中国科学院长沙农业环境观测研究站, 长沙 410125; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 长沙县气象局, 长沙 410205)

摘要: 随着经济的迅猛发展和人民生活水平的逐步提高, 亚热带农业小流域的面源污染日趋严峻, 恶化的水体环境质量已经成为该区域可持续发展和生态文明建设的重要障碍. 基流过程对流域生态水文过程有重要影响, 因此本研究选取湖南省长沙县的脱甲和洞山两个农业小流域作为调查对象, 通过流域观测和模型估算方法, 对比分析 2011 年 1 月至 2013 年 12 月间流域基流过程对总氮 (TN) 输出的贡献. 结果表明, 在较高强度水稻种植的脱甲流域的月平均基流流量、平均基流 TN 流量加权浓度和平均基流对 TN 输出贡献 [$15.2 \text{ mm} \cdot \text{month}^{-1}$ 、 $4.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.54 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{month})^{-1}$], 均大于较低强度水稻种植的洞山流域 [$11.4 \text{ mm} \cdot \text{month}^{-1}$ 、 $1.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.20 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{month})^{-1}$]. 基流对 TN 输出贡献呈现明显的季节性变化, 如在水稻生长季, 脱甲和洞山流域基流对 TN 输出贡献分别为 23.2% 和 18.6%, 均低于休耕季的 46.9% 和 40.0%, 表明水稻种植会提高休耕季的流域基流过程对 TN 输出的贡献. 因此, 为缓解农业小流域水体面源污染, 应当在农业小流域中实施合理的稻田管理措施来降低基流对 TN 输出的贡献.

关键词: 流域环境; 氮素迁移; 土地利用方式; 面源污染; 水稻种植

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1371-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.04.023

Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments

MA Qiu-mei^{1,2,3}, LI Wei⁴, WANG Yi^{1,2*}, LIU Xin-liang^{1,2}, LI Yong^{1,2}, WU Jin-shui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Changsha Research Station for Agricultural & Environmental Monitoring, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Meteorological Bureau of Changsha County, Changsha 410205, China)

Abstract: With the fast development of economics and improvement of people's living standard, non-point source pollution of the agricultural catchments in subtropical China has become more and more severe, where water quality deterioration has become a main barrier for sustainable development and ecological restoration. The process of ecohydrology in catchment is greatly influenced by the process of base flow in channel. This study selected the Tuoja and Jianshan catchments located in Changsha County, Hunan Province, to quantify and compare the contribution of base flow to total nitrogen (TN) loading from January 2011 to December 2013, through field observation and model estimation. The results suggested that the Tuoja catchment with higher intensity of rice agriculture had the greater volume of base flow, higher average flow-weighted TN concentration in base flow, and greater monthly TN loading via base flow [$15.2 \text{ mm} \cdot \text{month}^{-1}$, $4.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.54 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{month})^{-1}$, respectively] than those in the Jianshan catchment with lower intensity [$11.4 \text{ mm} \cdot \text{month}^{-1}$, $1.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.20 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{month})^{-1}$, respectively]. The base flow contribution to TN loading showed an apparently seasonal pattern. During rice-growing seasons, the contributions of base flow to TN loading were 23.2% and 18.6% in the Tuoja and Jianshan catchments, respectively, lower than those in the fallow seasons (46.9% and 40.0%) correspondingly. These results suggested that rice agriculture increased the contribution of base flow in the fallow season to TN loading. Therefore, to alleviate the suffering of non-point source pollution in the rice agriculture catchments, reasonable management measure of rice fields should be implemented to decrease contribution of base flow to TN loading.

Key words: catchment environment; nitrogen migration; land use; non-point source pollution; rice agriculture

氮素是作物必需的养分物质,也是农业面源污染的主要公害^[1,2]. 投入农田中的氮素大约有 20% ~ 25% 最终会通过各种途径进入水体环境^[3]. 亚热带坡地上地表径流只占年降雨量的 5% ~ 16%, 而地下径流部分却占年降雨量的 14% ~ 77%^[4,5]. 因而,在亚热带丘陵区,以地下水为水源的基流过程可能是造成流域氮素流失和环境风险的主要水文途

径^[6]. 开展基流过程及其对氮素迁移贡献的研究,将提高对亚热带丘陵区生态水文过程的认识,对该

收稿日期: 2015-09-24; 修订日期: 2015-11-17

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2012CB417105); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41301202)

作者简介: 马秋梅 (1988 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为流域环境模型模拟, E-mail: simonemaqm@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wangyi@isa.ac.cn

区域防治农业面源污染、寻求环境和经济的和谐发展具有重要的理论和现实意义^[7]。

基流是补给河水的地下径流,为河流提供持续稳定的基本流量^[8]。在亚热带地区,基流是总径流较为稳定的组成部分,尤其在旱季,基流对总径流贡献达 48%~96%^[9]。基流水质和水量直接影响流域内的生态水文环境,基流量调节地表过程,而基流水质状况则直接影响流域生态稳定性。土地利用方式对农业流域的基流过程及其物质传输规律有显著影响^[10]。稻田是南方亚热带丘陵区最常见的农业土地利用方式。作为一种间断性或持续性淹水的人工湿地生态系统,稻田通常被认为是农业流域地下水补给的重要源头^[11]。然而,水稻的种植往往伴随高强度的氮肥施用。稻田田间水分对流域地下水的补给过程必然会强化稻田土壤中氮素向深层土壤和地下水系统的淋溶过程^[12,13]。Wang 等^[14]的研究表明,在亚热带地区水稻生态系统中氮素淋失强度可达 $7.4\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$,几乎与地表径流流失强度相当。因此,水稻种植会引发流域地下水系统中氮素浓度逐年升高。有研究表明,江西省鹰潭稻作农业流域地下水的平均 TN 浓度为 $9.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[15,16];本研究区稻作农业流域地下水 TN 的最高浓度水平可达 $98.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[17]。稻作农业流域地下水中的高氮素浓度意味着大量的氮素可能会随地下径流迁移^[18],而以地下水为主要补给水源的基流过程可能是流域地下水氮素输出的主要途径。然而目前为止,稻作农业流域中基流对氮素输出的贡献尚不清楚。

因此,本研究运用流域对比方法,选择气候、地形地貌、土壤和耕作方式相似,但水稻种植面积比例不同的脱甲和涧山流域作为对象,通过水文水质观测和数学模型估算方法,量化亚热带丘陵区典型

农业流域中基流对氮素输出的贡献及其与水稻种植的关系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

涧山流域和脱甲流域位于湖南省长沙县金井镇($27^{\circ}55'\sim 28^{\circ}40'\text{N}$, $112^{\circ}56'\sim 113^{\circ}30'\text{E}$),是两个典型的亚热带农业稻作小流域,地理位置毗邻,面积相当(50.24 km^2 和 52.28 km^2),土地利用方式都以马尾松林地为主(77% 和 57%),其次为稻田(19% 和 32%)(图 1)。研究区年平均气温 17.2°C ,降雨量 $1\,200\sim 1\,400\text{ mm}$,地势波状起伏、沟谷相间,海拔 $43\sim 460\text{ m}$,土壤以花岗岩和板页岩母质发育的红壤和水稻土为主,属南方低丘地貌。两个流域内水系都起源于西北部林地,最终汇入湘江二级支流捞刀河上游的金井河。流域基本情况见表 1。研究区内的稻田种植双季稻,单季氮肥施用量为 $187\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中基肥施用量为 $112\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (秧苗移栽时),追肥施用量为 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (移栽一个月后)。马尾松林则不施肥。

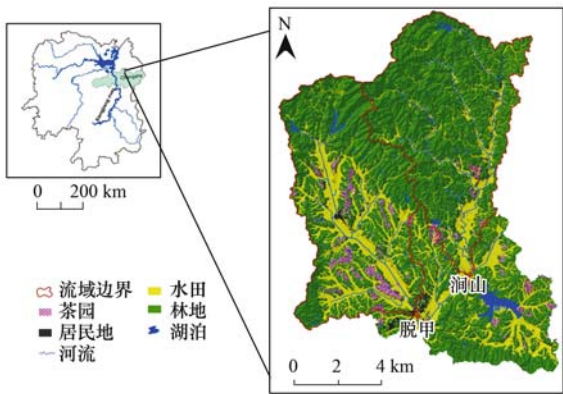


图 1 流域地理位置和土地利用类型

Fig. 1 Location and land use types in the studied catchments

表 1 涧山和脱甲流域所选地形特征和土地利用方式

Table 1 Topographical characteristics and land use types in Jianshan and Tuoja catchments

流域	面积/ hm^2	平均高程/ m	平均坡度/%	起伏比	土地利用方式				
					水稻/%	森林/%	水体/%	茶园/%	其他/%
脱甲	5212	121.0	14.5	377	32.2	58.0	4.3	3.0	2.5
涧山	5020	146.6	20.7	382	18.8	77.1	2.0	0.8	1.3

1.2 数据来源与处理

流域内气象数据由微型气候自动观测站(InteliMent Advantage, Dynamax Inc., 美国)监测,每小时记录一次气温、降水、空气湿度等气象数据(图 1)。两个流域出水口断面分别设有压力传感器(LMZ 投入式水位计,无锡惠公仪表经营部),自动

记录水位高度,观测时间间隔为每 10 min 一次(图 1)。对应水位高度的流速用流速仪(LS25-3C2 型螺旋杯式流速仪,重庆守正科技有限公司)人工测得。在流域出口处,沿河道横截面每隔 2 m 设置一个观测点,然后测定每个观测点水面以下 3 个不同水深处的流速,然后根据数学积分法,估算整个河流断面

的平均流速.通过观测不同水位高度下河流的平均流速,建立水位与流速的关系式,最后可根据水位-流速关系式推导任意时刻河道径流量.观测期间从2011年1月开始,至2013年12月为止.

流域出口断面处还设有水样采集点,每10天在采样点水面下0.2 m深处采集1 L样品,然后运入

实验室,采用流动注射仪于24 h内完成TN浓度分析.脱甲和涧山流域河流水体中观测的TN浓度见图2.脱甲流域的月平均TN浓度为 $4.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而涧山流域中为 $1.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.两个流域的TN平均浓度均超出中国地表水环境质量标准GB 3838-2002^[19,20]的Ⅲ类水标准.

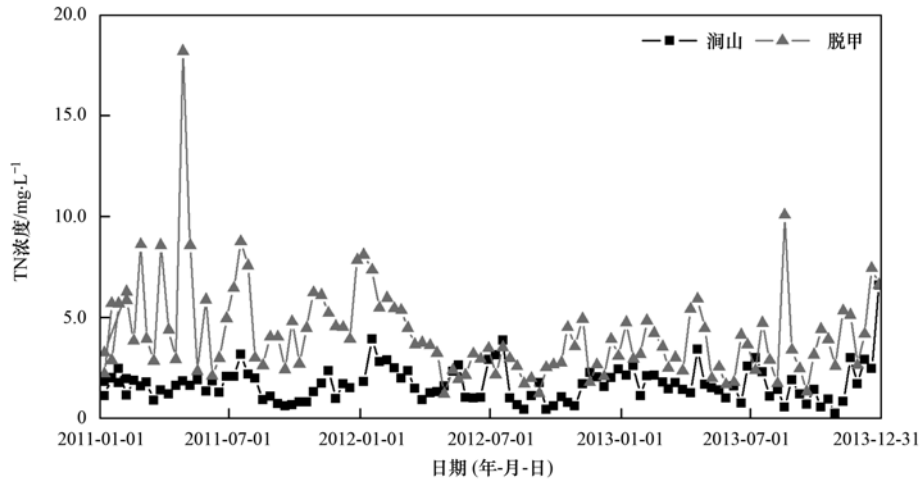


图2 脱甲流域和涧山流域的TN观测浓度值

Fig. 2 Observed TN concentrations in stream flow in the Tuojia and Jianshan catchments

本研究选用Baseflow Program^[21]分割基流流量.该程序的日径流算法是水位回归曲线位移法的变型,基于日径流记录使用自动数字滤波技术分割基流.该技术的数学方程如下:

$$q_t = \beta \times q_{t-1} + \frac{1+\beta}{2} \times (Q_t - Q_{t-1}) \quad (1)$$

式中, q_t 为 t 时刻经过滤波的地表径流, Q 为初始时刻总径流, β 为滤波参数,取常数0.925^[21].基流(b_t)根据下式计算:

$$b_t = Q_t - q_t \quad (2)$$

该算法具有快速、可再生的优点.两个流域的日TN负荷采用美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)的ESTIMATOR程序^[22,23]估算,计算公式如下:

$$L_t = \int_0^t Qcdt \quad (3)$$

式中, L_t 为总负荷, Q 为瞬时径流量, c 为浓度, t 为时间. ESTIMATOR 基于对数径流值和TN的对数浓度值,建立了含有7个变量的回归模型,然后使用最小方差无偏估计法求解. ESTIMATOR 的输入包括两个流量-浓度数据集,一个是观测期间的日径流和TN浓度数据(按时间排序),用此数据集估算的结果即流域出口断面上来自径流的连续日TN负荷.另一数据集是基流流量以及数据集一中TN浓

度的子集,该子集满足对应日期的基流指数 > 0.9 ^[24].用此数据集估算结果即流域出口断面上基流中TN负荷.此外,TN的流量加权浓度通过日TN负荷除以日径流量得到,其计算公式如下:

$$c_f = \frac{F}{Q \times 10^9} \quad (4)$$

式中, c_f 为径流或基流的流量加权浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), F 是径流或基流中的TN日负荷 $[\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}]$, Q 是径流或基流流量(L).

2 结果与讨论

2.1 流域的径流和基流与水稻种植的关系

2011年1月至2013年12月间降雨量为4 115.3 mm,其中68.1%出现在每年的3~7月(图3).充沛的降雨导致流域内形成大量河道径流.脱甲流域中月平均径流量为 $46.9 \text{ mm} \cdot \text{month}^{-1}$,占月平均降雨量的41.0%.而涧山流域的径流量为 $40.8 \text{ mm} \cdot \text{month}^{-1}$,占月平均降雨量的35.7%.两个流域中大部分径流都出在3~7月,且分别占年总量的65.5%(脱甲流域)和70.9%(涧山流域).经统计分析,两个流域中降雨和径流存在显著正相关 $[r = 0.83$ (脱甲流域), 0.90 (涧山流域); $P < 0.05]$.脱甲流域的平均月基流量为15.2 mm,约占月径流量的32.4%,分别高于涧山流域中的11.4 mm和28.0%.

对比两个流域中基流随时间的动态变化曲线,脱甲流域的基流表现出剧烈波动(变异系数:CV = 66.0%),而涧山流域的基流随季节变化平缓而规则(CV = 40.1%)(图3).与涧山流域相比,水稻种植面积比例较高的脱甲流域基流量更大,变化幅度大且波动性更强,这说明水稻种植会强化流域基流过程.脱甲流域的基流量在2011年10月出现极小值,主要原因是该时段降雨较少,水坝截留了部分径流用于灌溉,导致

径流几乎断流;而 Baseflow Program 会切割出较小的基流值. Feng 等^[12]认为稻田不同于其他生态系统,密集灌溉使稻田持续或间断性淹水,这会促进田间水向地下水的补给. Chen 等^[11]指出在水稻种植区域,稻田是地下水补给的主要水源.地下水补给增多导致通过基流过程进入流域径流的水量增加^[21],尤其是在地下水位(120 ~ 140 cm)较浅的脱甲和涧山流域,这一效果更为明显.

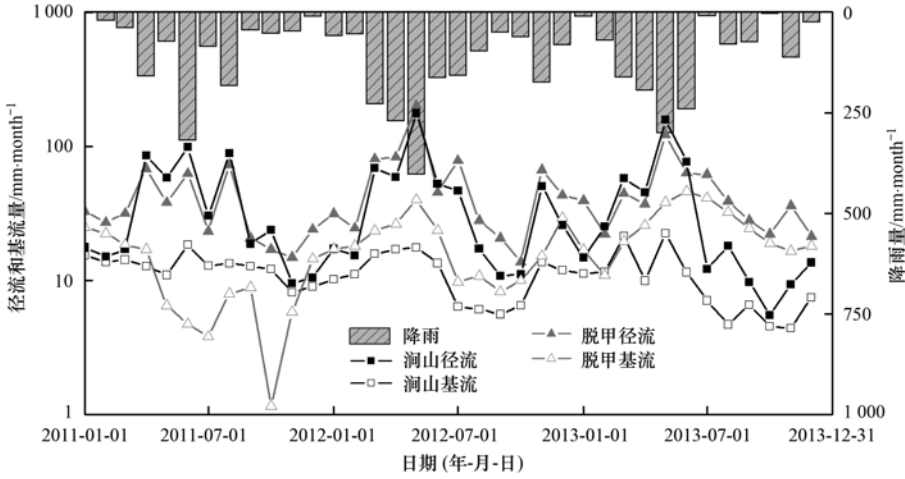


图3 脱甲流域和涧山流域径流和基流的月流量

Fig. 3 Monthly stream flow and base flow in the Tuoja and Jianshan catchments

按照水稻生长季(5 ~ 10月)和休耕季(11月 ~ 次年4月),对流域径流和基流做配对样本 *T* 检验,结果表明(表2)两个流域中水稻生长季的月平均径流显著高于休耕季,而生长季的月平均基流则低于休耕季($P < 0.05$).比较这两个流域,脱甲流域中水稻生长季/休耕季的月平均径流均高于涧山流域,同时其在水稻生长季/休耕季的月平均基流也高于涧山流域(表2).两个流域中大部分径流量出现在水稻生长季,而大部分基流量却出现在水稻休耕季,

造成径流、基流这种异步性的主要原因是地下水补给地表水体是个缓慢过程,即基流具有迟滞性.休耕季的基流指数显著高于水稻生长季($P < 0.05$).从平均值上看,脱甲流域休耕季和生长季的基流指数分别为0.44和0.22,高于涧山流域的0.39和0.21.需要指出的是,虽然两个流域中水稻生长季的径流量高于休耕季,但生长季的径流系数却低于休耕季,这主要是由生长季水稻种植消耗了流域内大量的地表水分造成的.

表2 脱甲流域和涧山流域中水稻生长季和休耕季的径流和基流流量

Table 2 Stream flow and base flow during the rice-growing and fallow seasons in the Tuoja and Jianshan catchments

时间	降雨 /mm·month ⁻¹	径流量/mm·month ⁻¹		基流/mm·month ⁻¹		径流系数		基流指数	
		脱甲	涧山	脱甲	涧山	脱甲	涧山	脱甲	涧山
2011年休耕期	55.2	39.8	33.7	20.7	14.0	0.72	0.61	0.52	0.42
2011年生长期	126.0	39.1	53.0	5.5	13.4	0.31	0.42	0.14	0.25
2012年休耕期	111.6	43.1	30.0	17.5	11.9	0.39	0.27	0.41	0.40
2012年生长期	155.4	64.5	52.4	17.0	9.3	0.41	0.34	0.26	0.18
2013年休耕期	115.4	42.1	36.5	19.1	13.3	0.36	0.32	0.41	0.36
2013年生长期	117.9	55.8	46.5	14.3	9.5	0.47	0.39	0.27	0.20
休耕期均值	94.1 ± 33.7	41.7 ± 1.7	33.4 ± 3.3	19.1 ± 1.6	13.1 ± 1.1	0.49 ± 0.20	0.40 ± 0.19	0.44 ± 0.06	0.39 ± 0.03
生长季均值	133.1 ± 19.7	53.1 ± 12.9	50.6 ± 3.6	12.3 ± 6.0	10.7 ± 2.3	0.40 ± 0.08	0.38 ± 0.04	0.22 ± 0.07	0.21 ± 0.04

2.2 TN 流量加权浓度与水稻种植的关系

脱甲和涧山两个流域中径流 TN 流量加权浓度

显示出明显的季节变化规律[图4(c)].脱甲流域中径流的 TN 流量加权浓度最大值、最小值和均值

分别为 6.11、2.94 和 4.06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均高于涧山流域的 2.36、1.16 和 1.72 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 3)。考虑到两个流域的气候、土壤、地形、土地利用、水文地质和农业耕作管理措施均相似,脱甲流域中较高的 TN 浓度主要是高强度的水稻种植造成的^[14]。脱甲流域中径流和基流的 TN 流量加权浓度均随季节变化而剧烈波动,在水稻生长季处于波谷段且在 8~9 月间出现最低值,休耕季处于波峰段并在 2~3 月出现最高值。相对于脱甲流域而言,涧山流域中径流和基流的 TN 流量加权浓度均随季节变化缓和且稳定,但波谷和波峰段出现时间与脱甲流域类似。上述现象表明脱甲流域的基流过程促进了河道径流中 TN 浓度升高。

Wang 等^[14]的估算表明,两个流域中稻田生态系统氮素处于富余状态,通过氮肥、大气氮沉降、生物固氮等进入稻田生态系统的氮达 422.5 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$,然而水稻对氮素的利用量仅为 244.1 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$,扣除氮的气态损失外,约有 7.0 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 通过地表径流进入流域水体。考虑到稻田生态系统的氮素富余,水稻种植面积比例更高的脱甲流域会流失更多的 TN 进入流域河道,径流 TN 流量加权浓度也会更高。而稻田生态系统中氮素淋失量为 7.4 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ ^[25],因此,脱甲流域也会有更高的基流 TN 流量加权浓度。脱甲流域中基流 TN 流量加权浓度高于径流 TN 流量加权浓度,而在涧山流域中基流和径流的 TN 流量加权浓度相当[图 4(c)和(d),表 3],这表明高强度水稻种植的脱甲流域比涧山流域的地下水中滞留了更多的氮素。

2.3 TN 负荷与水稻种植的关系

两个流域中径流 TN 负荷随时间变化的趋势一致[图 4(a)],但脱甲流域中径流 TN 负荷[18.25 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$]高于涧山流域[9.19 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$]。这两个流域中径流 TN 负荷的最大值均出现在每年的 4~5 月。脱甲流域中径流 TN 负荷的三年最大值为 5.55 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{month})^{-1}$,而涧山流域中为 3.42 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{month})^{-1}$ 。由于水稻

种植过程中灌溉频繁,田间长期处于淹水状态,这为地表径流的形成提供水源。脱甲流域中水稻种植强度较大,所以田间持水较多,从而产生的河道径流量较大,加之水稻种植强度大所需投入流域的氮肥多,引起水体氮浓度的增加,最终导致脱甲流域的径流中 TN 负荷较高。另外,田间持水量较大以及水体氮浓度较高,这也是两个流域中径流 TN 负荷在水稻生长季高于休耕季的原因[图 5(a)]。但是需要指出的是,脱甲流域中 2011 年的径流 TN 负荷在休耕季远高于生长季[图 5(a)],这一现象可能是由地下水 N 库(源)补给流域径流 TN 负荷造成的。2011 年休耕季研究区域发生了严重的干旱,两个流域中大部分的河道径流都主要来自于基流补给(表 2)。Wang 等^[25]的观测结果表明稻田土地利用方式地下水中 TN 最高浓度达 98.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,远高于流域地表水体中的最高 TN 浓度(18.19 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),因此,在此期间大量地下水中的 N 通过基流过程从流域中输出,尤其是在高水稻种植强度的脱甲流域,从而使得脱甲流域中径流 TN 负荷在 2011 年的休耕季高于生长季。

两个流域中基流 TN 负荷的变化趋势存在明显差异,脱甲流域中基流 TN 负荷波动幅度较大($CV=66.2\%$),而涧山流域中变化平缓($CV=47.1\%$)[图 4(b)和表 3]。因为脱甲流域基流量比较大,且基流 TN 流量加权浓度也较高,导致该流域的基流 TN 负荷较高。脱甲流域中基流 TN 平均负荷和基流对 TN 输出的年平均贡献分别为 6.51 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 和 35.7%,而在涧山流域中分别为 2.43 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 和 26.5%。Janke 等^[26]报道了美国 Capitol Region 流域的基流对径流 TN 输出的贡献率约为 31%~68%,远大于本研究区。这一差异表明基流对 TN 输出的贡献由于受到气候、土壤、地形、土地利用、水文地质、农业措施以及社会经济等因素的影响,具有较大的时空变异性^[27]。脱甲流域中基流 TN 负荷的最高值均出现在每年 4~5 月,且 3 年最高值为 1.39 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{month})^{-1}$,而涧山流域的最高值出现在每年 3~4 月,3 年最高值为

表 3 脱甲流域和涧山流域中 TN 负荷和流量加权浓度统计情况

Table 3 Statistics of TN loadings and flow-weighted TN concentrations in the Tuojia and Jianshan catchments

统计值	径流 TN 负荷		基流 TN 负荷		径流 TN 流量加权浓度		基流 TN 流量加权浓度	
	/ $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{month})^{-1}$		/ $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{month})^{-1}$		/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	
	脱甲	涧山	脱甲	涧山	脱甲	涧山	脱甲	涧山
平均值	1.55	0.77	0.72	0.20	4.06	1.72	4.14	1.72
标准差	0.86	0.79	0.36	0.10	0.87	0.36	0.96	0.40
CV/%	55.3	102.6	49.8	47.1	21.5	20.7	23.1	23.1

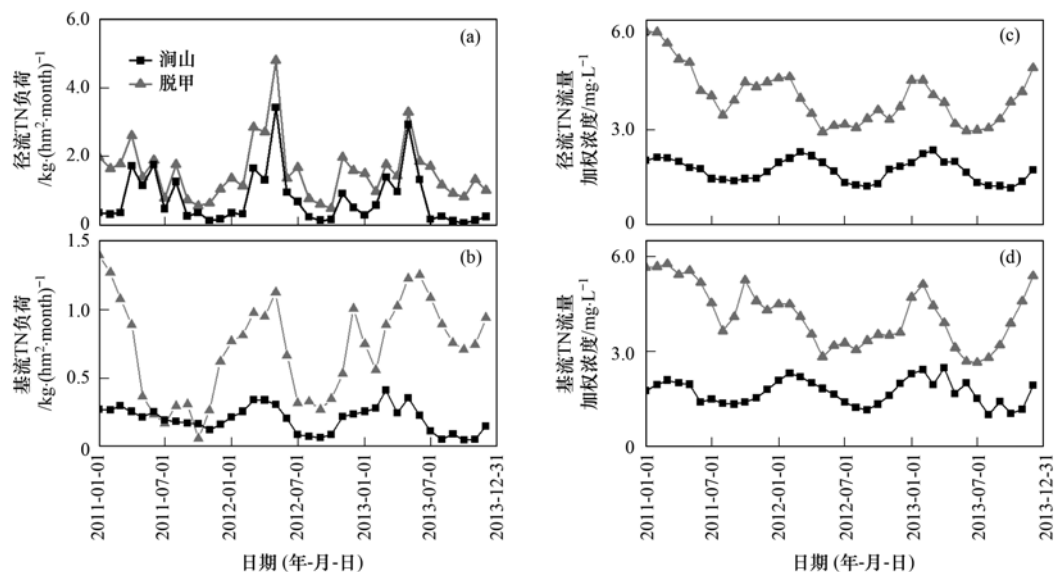


图4 径流和基流中 TN 负荷和 TN 流量加权浓度

Fig. 4 TN loadings and flow-weighted TN concentrations in stream flow and base flow

$0.41 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{month})^{-1}$. 两个流域中基流 TN 负荷最高值出现的时间不同与基流中氮素滞留时间和基流流量有关.

2.4 基流对 TN 输出的贡献与水稻种植的关系

图 5(a) 对水稻生长季和休耕季的汇总结果表明, 脱甲流域中径流和基流的 TN 负荷在休耕季均显著高于水稻生长季. 而涧山流域中径流 TN 负荷在休耕季低于生长季, 而基流 TN 负荷在休耕季高于生长季. 休耕季的基流 TN 月平均负荷在脱甲流域为 $0.83 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{month})^{-1}$, 在涧山流域为 $0.26 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{month})^{-1}$, 均高于相应流域中生长季的值

[脱甲流域: $0.34 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{month})^{-1}$, 涧山流域: $0.16 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{month})^{-1}$]. 图 5(b) 表明两个流域中基流对 TN 输出贡献在休耕季均高于水稻生长季. 从平均值角度看, 该贡献在休耕季的脱甲流域为 46.9%, 涧山流域为 37.0%, 均高于水稻生长季中脱甲流域的 23.2% 和涧山流域的 18.6%. 造成这一现象的主要原因是, 水稻种植导致土壤氮库中积累了大量 TN, 由于基流流速较慢, 这部分被积累的 TN 滞留到休耕季输出, 这一现象常称为“流域景观养分库”的滞后效应^[28]. 这一结果与 Chambers 等^[27]的研究结果一致, 他们发现稻作农业流域中休

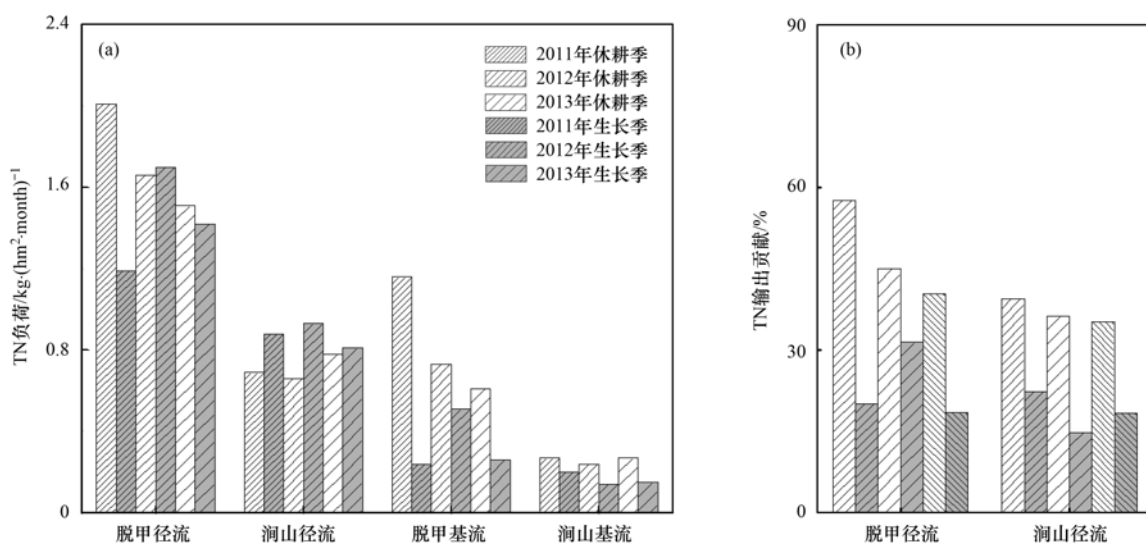


图5 脱甲和涧山流域中水稻生长季和休耕季的 TN 负荷和基流对 TN 输出的贡献

Fig. 5 Statistics of TN loadings and contributions of base flow to TN loading during the rice-growing and fallow seasons in the Tuojia and Jianshan catchments

耕季基流对硝态氮的贡献要高于生长季。休耕季较高的基流对 TN 输出贡献表明了休耕季基流过程对流域氮素输出和水体环境污染的重要性。许多研究往往只强调水稻生长季地表径流过程对流域氮素输出的意义^[29,30],而本研究结果表明相当部分的流域氮素是通过基流过程输出的,尤其是在水稻休耕季。因此,为有效减少流域氮素流失,应尽量削减休耕季流域氮素通过基流途径的输出。

本研究结果表明基流对径流 TN 输出的贡献与农业土地利用类型有关,稻田种植面积越大,贡献越大,尤其是在休耕季,该贡献更加明显。然而,本研究仅仅量化了基流中 TN 负荷及对 TN 输出的贡献,但 TN 在基流中的传输过程和机制仍不清楚,因此仍需对此做进一步的深入研究。下一步工作应当围绕基流的流量、流速和时空变异性如何综合影响流域 TN 输出展开。

3 结论

(1)水稻种植会强化流域基流过程。水稻种植面积比例越高,流域基流流量越大,基流占流域河道径流的比例越大。

(2)水稻种植提高基流 TN 流量加权浓度,增加基流 TN 负荷。同时,水稻种植面积比例越高,基流 TN 流量加权浓度和基流 TN 负荷的时间变异性越强。

(3)水稻种植增强基流对径流 TN 输出的贡献。水稻种植强度较高的脱甲流域中基流对 TN 输出的贡献较大;由于“流域景观养分库”的滞后效应,水稻种植会提高休耕季节流域基流过程对 TN 输出的贡献。

致谢:感谢在本研究观测过程中提供大力帮助的湖南农业大学刘济同学。

参考文献:

- [1] 欧阳威,蔡冠清,黄浩波,等. 小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2411-2418.
- [2] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, *et al.* Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, **514**(7523): 486-489.
- [3] Chatterjee R. Projecting the future of nitrogen pollution[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(6): 1659.
- [4] 陈维梁,高扬,林勇明,等. 紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2129-2138.
- [5] Wang Y, Zhang B, Lin L, *et al.* Agroforestry system reduces subsurface lateral flow and nitrate loss in Jiangxi Province, China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, **140**(3-4): 441-453.
- [6] Price K. Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: a review[J]. *Progress in Physical Geography*, 2011, **35**(4): 465-492.
- [7] 杨峰,王鹏举,杨珊珊,等. 城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2652-2658.
- [8] 董薇薇,丁永建,魏霞. 祁连山疏勒河上游基流变化及其影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2014, **36**(3): 661-669.
- [9] 高东东,吴勇,王橦樵. 山地森林系统小流域降雨过程水循环与地下水补给[J]. 水文地质工程地质, 2014, **41**(1): 7-14.
- [10] 黄来明,杨金玲,张甘霖. 我国亚热带丘陵地区流域氮素的平衡与源汇特征[J]. 环境科学, 2010, **31**(12): 2981-2987.
- [11] Chen S K, Liu C W. Analysis of water movement in paddy rice fields (I) experimental studies[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, **260**(1-4): 206-215.
- [12] Feng Y W, Yoshinaga I, Shiratani E, *et al.* Characteristics and behavior of nutrients in a paddy field area equipped with a recycling irrigation system[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, **68**(1): 47-60.
- [13] Jin Z F, Li F L, Chen L X, *et al.* Hydrochemical and stable isotopic assessment of groundwater quality and its variations in rice-growing areas in East China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2013, **96**(2-3): 171-184.
- [14] Wang Y, Li Y, Liu F, *et al.* Linking rice agriculture to nutrient chemical composition, concentration and mass flux in catchment streams in subtropical central China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **184**: 9-20.
- [15] 唐家良. 中国亚热带农业综合小流域生态水文过程研究[D]. 南京:中国科学院南京土壤研究所, 2005. 23-30.
- [16] 范宏翔,徐力刚,赵旭,等. 太湖流域典型稻-麦轮作农田区氮素流失过程研究[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(2): 255-262.
- [17] 宋立芳,王毅,吴金水,等. 水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 150-156.
- [18] Fitzgerald A, Roy J W, Smith J E. Calculating discharge of phosphorus and nitrogen with groundwater base flow to a small urban stream reach[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, **528**: 138-151.
- [19] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [20] Guidelines for drinking-water quality (4th ed)[S].
- [21] Arnold J G, Allen P M, Muttiah R, *et al.* Automated base flow separation and recession analysis techniques[J]. *Ground Water*, 1995, **33**(6): 1010-1018.
- [22] Pellerin B A, Bergamaschi B A, Gilliom R J, *et al.* Mississippi river nitrate loads from high frequency sensor measurements and regression-based load estimation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(21): 12612-12619.
- [23] White M J, Santhi C, Kannan N, *et al.* Nutrient delivery from

- the Mississippi River to the Gulf of Mexico and effects of cropland conservation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **69**(1): 26-40.
- [24] King K W, Fausey N R, Williams M R. Effect of subsurface drainage on streamflow in an agricultural headwater watershed [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, **519**: 438-445.
- [25] Wang Y, Liu X L, Li Y, *et al.* Rice agriculture increases base flow contribution to catchment nitrate loading in subtropical central China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, **214**: 86-95.
- [26] Janke B D, Finlay J C, Hobbie S E, *et al.* Contrasting influences of stormflow and baseflow pathways on nitrogen and phosphorus export from an urban watershed [J]. *Biogeochemistry*, 2014, **121**(1): 209-228.
- [27] Chambers P A, Meissner R, Wrona F J, *et al.* Changes in nutrient loading in an agricultural watershed and its effects on water quality and stream biota[J]. *Hydrobiologia*, 2006, **556**(1): 399-415.
- [28] Li Y Y, Jiao J X, Wang Y, *et al.* Characteristics of nitrogen loading and its influencing factors in several typical agricultural watersheds of subtropical China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(3): 1831-1840.
- [29] 王飞, 陈安磊, 彭英湘, 等. 不同土地利用方式对红壤坡地水土流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, **27**(1): 22-26.
- [30] Zhao Z, Zhang H L, Li C S, *et al.* Quantifying nitrogen loading from a paddy field in Shanghai, China with modified DNDC model[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **197**: 212-221.

CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} in Chongqing Urban Areas	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO ₂ and δ ¹³ C(CO ₂) Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caoheidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppes	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources: Method Proposed and Case Demonstration	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

《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)

2016年4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 15, 2016

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