

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析..... 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)

阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究 苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)

上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究 包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)

七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究 马娟娟, 李真 (2060)

冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究 宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)

大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价 徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)

深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征 王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)

表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析 孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)

桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程 唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)

汾河源区不同景观带水文过程研究 杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)

北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征 郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)

光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用 章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)

紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应 陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)

基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究 陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)

镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价 周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)

两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响 杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)

湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化 武晓飞, 李大鹏 (2164)

不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响 王尚, 李大鹏 (2171)

池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究 吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)

再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放 王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)

低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响 赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)

活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂 刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)

准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学 刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)

AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究 涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)

镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究 杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)

微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究 刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)

聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究 唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)

丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响 侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)

聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化 周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)

鄱阳湖持久性有机污染物 (POPs) 长距离传输潜力模拟 弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)

基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估 廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)

农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策 谭冰, 王铁宇, 李奇锋, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)

渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价 王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)

基于荧光传感器 F_{rex} 的特性检测水质环境中生物毒性物质 赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)

对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放 张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)

基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育 赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)

酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究 刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)

河蚬 (*Corbicula fluminea*) 扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响 王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)

海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态 田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)

DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响 吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)

重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究 田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)

1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性 王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)

黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响 江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)

黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应 李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)

宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征 蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)

长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响 张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)

长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响 常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)

伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价 赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)

江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价 张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)

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 欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)

保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究 张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)

米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究 吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)

水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响 刘晓焯, 张洪, 李永峰 (2433)

《环境科学》征订启事 (2208) 《环境科学》征稿简则 (2400) 信息 (2084, 2200, 2229, 2391)

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

欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君

(北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 土壤呼吸与硝化特性是控制土壤生态系统中氮素转化和面源氮流失的关键因子, 也是土壤氮循环的重要组成部分。选取位于巢湖北部的柘皋河流域作为案例研究区, 应用 BaPS 技术测定林地和农田土壤呼吸、硝化和反硝化特性, 运用 SWAT 模型分析农业面源氮污染输出的时空特征, 并初步探讨土壤呼吸和硝化特性与农业面源氮污染的相互作用关系。结果表明, 由于土地利用和施肥量的变化, 1996~2012 年间的年均和月均面源氮污染负荷明显大于 1980~1995 年间的模拟结果, 不同月份的面源氮污染输出负荷均存在显著性差异, 月均氮负荷受降雨量影响密切。1996~2012 年流域面源总氮流失平均负荷为 $10.40 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 明显大于 1980~1995 年的 $8.10 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 方差分析表明两个时期面源总氮流失负荷的空间分布存在一定的差异。林地的呼吸速率远大于农田的呼吸速率。农田较高的总硝化速率和反硝化速率导致土壤氮库中的氮素减少, 从而在一定程度上使得面源氮污染的输出负荷减小。农田土壤的总硝化速率大于反硝化速率, 导致农田硝态氮的面源污染流失量增加, 而有机氮的流失量有所减少。因此, 土壤呼吸与硝化特性的研究有利于从土壤生物学角度深入分析土壤氮循环, 对农业面源氮污染的防治具有重要的理论和现实意义。

关键词: 农业面源氮污染; 土壤呼吸; 硝化和反硝化过程; SWAT 模型; 时空特征

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2411-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.06.050

Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification

OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, GENG Xiao-jun

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The soil respiration, nitrification and denitrification processes play an important role on soil nitrogen transformation and diffuse nitrogen loading. These processes are also the chains for soil circle. In this study, the Zhegao watershed located north of Chaohu Lake was selected to explore the interactions of these processes with diffuse nitrogen pollution. The BaPS (Barometric Process Separation) was applied to analyze the soil respiration, nitrification and denitrification processes in farmland and forest. The SWAT (Soil and Water Assessment Tool) simulated the temporal and spatial pattern of diffuse nitrogen loading. As the expanding of farmland and higher level of fertilization, the yearly mean loading of diffuse nitrogen increased sustainably from 1980-1995 to 1996-2012. The monthly loading in 1996-2012 was also higher than that in the period of 1980-1995, which closely related to the precipitation. The statistical analysis indicated that there was a significant difference between two periods. The yearly averaged loading of the whole watershed in 1996-2012 was $10.40 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, which was $8.10 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ in 1980-1995. The variance analysis demonstrated that there was also a big difference between the spatial distributions of two periods. The forest soil had much higher soil respiration than the farmland soil. But the farmland had higher nitrification and denitrification rates. The more intensive nitrogen transformation in the farmland contributed to the less diffuse nitrogen loading. As the nitrification rate of farmland was higher than denitrification rate, agricultural diffuse nitrate nitrogen loading would increase and organic nitrogen loading would reduce. The analysis of soil respiration, nitrification and denitrification is helpful for the study of soil nitrogen circle form the aspect of soil biology, which also benefits the control of agricultural diffuse nitrogen pollution.

Key words: agricultural diffuse nitrogen pollution; soil respiration; nitrification and denitrification processes; SWAT model; temporal-spatial distribution

近 30 年来农业开发和经济发展强度日益强烈, 流域土地利用方式发生剧烈变化, 加之农药和化肥投入量增加的共同作用, 使得流域农业面源污染不断增加^[1]。此外, 农村生活垃圾和农田土壤侵蚀等都增加了农业面源污染的流失负荷^[2]。我国多个流域农业面源的氮污染负荷占流域污染总负荷的 33%~66%, 部分区域甚至超过了来自工业和城市

污水的点源污染的贡献率^[3,4]。

为系统分析流域面源氮污染流失负荷和时空规律, 输出系数法、分布式水文模型和空间数据分析

收稿日期: 2013-09-30; 修订日期: 2013-11-21

基金项目: 农业公益性行业科研专项(20103014); 中央高校基本科研业务费专项; 教育部留学回国人员科研启动基金项目

作者简介: 欧阳威(1980~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水文水资源及非点源污染控制, E-mail: wei@bnu.edu.cn

等方法得到广泛运用^[5]. 分布式水文模型 SWAT (soil and water assessment tool) 有强大的空间数据分析能力, 通过构建土地利用、土壤和地形的基础空间信息库, 能对面源污染参数进行有效地敏感性分析和率定, 目前已经在多个流域得到运用^[6]. 农业面源氮污染输出负荷年内分布不均, 随着月份而变化. 在降雨量和径流量较大的月份, 其总氮输出负荷较大^[7,8]. 农业面源氮污染的输出负荷同土壤侵蚀模数、降水强度、土地利用类型以及土壤类型等密切相关^[9], 这些因素导致农业面源氮污染负荷具有较大的空间差异^[8].

土壤属性是农业面源氮污染的重要影响因子. 除土壤理化性质外, 土壤生物学特征亦是重要的指标^[10]. 土壤呼吸能够用来表征土壤中微生物的活动强度^[11], 其和农业耕作管理措施密切相关, 包括肥料种类、施肥量、农业灌溉方式等^[12,23]. 土壤硝化和反硝化作用是农田生态系统中重要的土壤生物过程, 也是土壤生态系统中氮素循环的重要环节^[14]和氮素流失的重要途径^[15]. 农田约 30% 的氮肥损失源于反硝化作用. 土壤含水率、土壤有机质含量、碳氮比和 pH 值等因素均能够影响硝化和反硝化过程, 并进一步影响土壤氮素的转化和损失^[16].

目前, 在农业面源氮污染、土壤呼吸和消化特性等方向, 均有较为深入的研究. 但是鲜有学者探讨两者之间的相互作用关系. 土壤呼吸、硝化和反硝化作用的研究有利于深入理解土壤的氮素循环, 对农业面源氮污染的研究具有极其重要的理论意义. 基于此, 本研究选取农业开发活动强烈的柘皋河小流域作为对象, 运用 SWAT 模型分析农业面源

氮污染输出负荷在时间尺度和空间尺度的变化特征, 并分析土壤呼吸、硝化和反硝化作用, 旨在探究微观层面的土壤呼吸和硝化特性与宏观层面的农业面源氮污染的相互作用关系, 为中国南方河网地区农业面源氮污染的防治和管理提供科学的理论依据和决策支持.

1 材料与方法

1.1 研究区概况及样品采集

本研究区柘皋河流域地处安徽巢湖流域境内, 面积约 507 km², 地势北高南低(图 1). 位于北亚热带湿润季风气候区, 年降水量为 1 000 ~ 1 158 mm, 春夏季节降水量多, 秋冬季节降水量少. 年均蒸发量为 1 469 ~ 1 629 mm. 年平均风速 3.0 ~ 3.4 m·s⁻¹, 夏季以偏南风为主, 冬季以偏北风为主^[17]. 研究区内土地利用类型包括农田、林地、草地、水体、居民区等, 其中农田是最主要的土地利用类型; 土壤类型包括黄褐土、黄棕壤、水稻土、粗骨土、石灰岩土等, 其中水稻土所占比例最大.

研究区作为典型的小流域, 流域面积小, 土地利用类型较为单一, 土壤的差异性较小. 此外, 考虑到土壤呼吸和硝化特性的测定必须使用新鲜土壤, 本研究于 2013 年 6 月采集了两种主要土地利用类型(农田和林地)的土壤样品(图 1). 其中每个采样点设置 3 m × 3 m 的采样区域, 用环刀采集 3 个重复的表层(0 ~ 20 cm)原状土壤样品, 并冷藏保存.

1.2 土壤属性和呼吸特性测定

本研究对土壤样品先后进行了含水率、pH、亚硝酸盐氮、氨态氮、硝态氮、总磷等测定分析^[18].

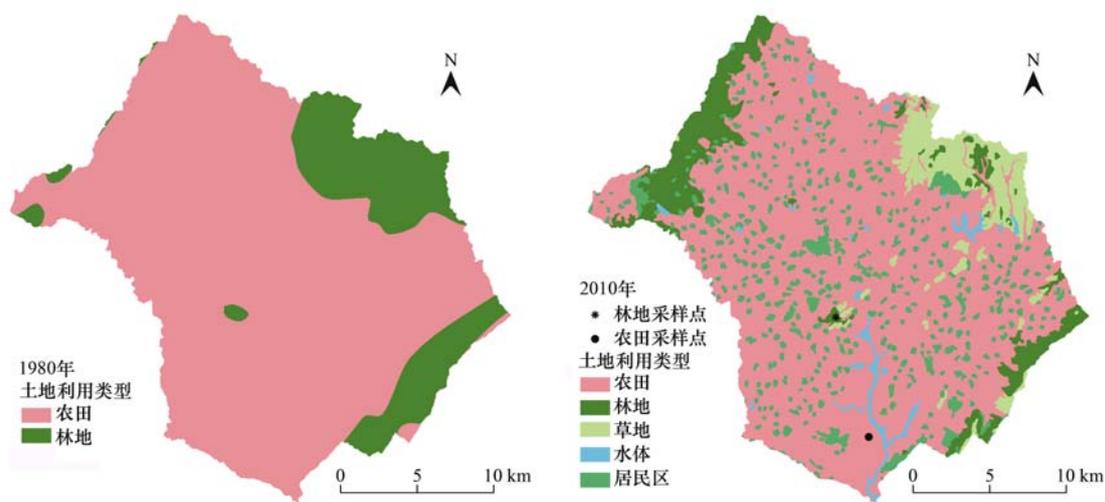


图 1 研究区土地利用历史演替概况及采样点位置示意

Fig. 1 Overview of study watershed land use variation and the locations of samples

新鲜土壤样品直接进行土壤呼吸、总硝化和反硝化速率的测定,采用德国 UMS 公司的 BaPS (barometric process separation) 系统进行测试. 在装有土壤样品的恒温密闭系统中,监测土壤微生物等作用过程引起的系统中压力、O₂ 和 CO₂ 浓度的变化,由气压平衡原理可精确计算土壤呼吸、总硝化和反硝化速率. 充分发挥了 BaPS 操作简便,快速可靠,成本较低的优势^[19].

1.3 SWAT 模型准备和运行

SWAT 是在国内外均有广泛应用的农业面源污染模拟模型. 模拟需要的高程数据使用国际科学数据服务平台提供的 30 m 分辨率的 DEM 数据^[20]; 通过解译 1980 年和 2010 年的 Landsat-TM 影像得到两期土地利用的输入数据,分别作为 1980~1995 年和 1996~2012 年两个时期模拟的土地利用信息; 土壤属性数据库则参考全国土壤类型数据库; 运用当地气象观测站的观测数据构建气象属性数据库; 参考安徽省农业年鉴构建农业耕作数据库.

由于研究区是小流域,没有水文监测站点,缺少常规的水文和氮污染监测数据,无法对模型进行率定和验证. 在国际上,参数移植是被广泛接受的解决方法. 本研究中 SWAT 模拟的关键参数借

鉴新安江流域 SWAT 成功案例,两个流域处于相同的纬度,地理位置较近,且自然和社会条件相似^[21]. SWAT 模型关键参数的率定结果见已有的研究成果^[22]. 在数据库构建和敏感性参数阈值设定的基础上,对 1980~2012 年期间研究区农业面源氮污染进行模拟. 考虑到分析时段内土地利用的变化和农田氮肥施用量的增加,将分析时段划分为 1980~1995 年和 1996~2012 年两个时期,分别进行农业面源氮污染的模拟,以分析其时空变化规律.

2 结果与讨论

2.1 农田和林地的土壤属性

首先测定分析土壤含水率、pH、铵态氮、硝态氮和总磷含量等土壤理化性质(表 1). 农田和林地的土壤物理属性和化学属性有较大的差异. 由于施肥和耕种的缘故,农田土壤 pH 小于林地,农田的总磷含量为 2 476.63 mg·kg⁻¹,高于林地总磷的 1 972.25 mg·kg⁻¹. 而农田中铵态氮和硝态氮的含量均高于林地,其中硝态氮含量差别接近 5 倍. 不平衡施肥导致土壤养分不平衡,影响作物正常吸收利用,是造成耕地土壤硝态氮积累的重要原因^[23].

表 1 农田和林地土壤物理属性和化学属性

Table 1 Physical and chemical properties of soil in the upland and forest

土地利用类型	含水率/%	pH	铵态氮/mg·kg ⁻¹	硝态氮/mg·kg ⁻¹	总磷/mg·kg ⁻¹
农田	26.68	7.76	2.284	15.567	2 476.63
林地	13.09	7.83	1.638	3.753	1 972.25

2.2 面源氮污染时间尺度变化

利用两期土地利用模拟得到 1980~2012 年流域出口处面源总氮污染负荷(图 2). 受降雨量差异

的影响,年均波动明显,33 a 间面源总氮年负荷平均值为 2 327.69 t,1998 年的流失负荷为最大值 5 426.98 t,而 1995 年的最小流失量为 585.83 t. 尤其

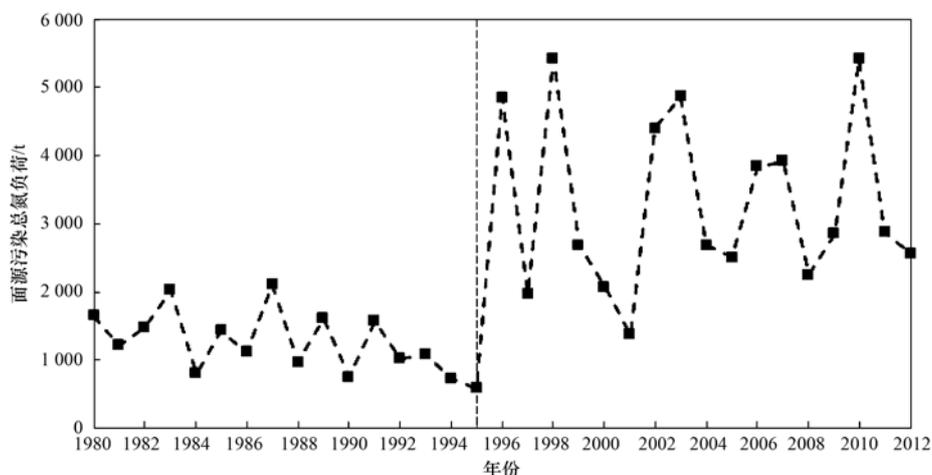


图 2 1980~2012 年流域出口处面源氮负荷的年度变化

Fig. 2 Yearly variation on diffuse nitrogen loading in the watershed outlet from 1980 to 2012

是土地利用方式的转变使得总氮流失平均负荷增加了 164%，1980~1995 年间的年均面源氮污染负荷为 1 263.39 t，而 1996~2012 年间氮污染负荷达到 3 329.39 t。农田面积由 1980 年的 451 km² 减少到 2010 年的 380 km²，与此同时林地面积由 1980 年的 90.67 km² 减少到 2010 年的 50.27 km²，虽然耕地面积有所减少，但由于 1996~2012 年间农田氮肥的使用量远高于 1980~1995 年的施肥水平，使得流域地

表总氮流失负荷明显增加，而城镇用地的增加和草地面积的减少使得通过径流进入河流的氮负荷增加。

年平均氮流失负荷的统计分析显示 1980~1995 年的各项指标均小于 1996~2012 年(表 2)。两个时期的面源氮污染年均负荷差异性 *t* 检验结果表明，在置信区间为 95% 情况下，*t* 值为 6.261，对应的概率 *P* 值为 0，小于显著性水平 0.05。因此，这两个时期的总氮年负荷之间存在显著性差异。

表 2 两个模拟阶段流域出口处面源氮负荷的年度变化统计分析

Table 2 Statistical analysis for yearly diffuse N loading at watershed outlet of two modeling periods

年限	均值	均值标准误	标准差	方差	极大值	极小值	<i>t</i> 检验	
							<i>t</i>	<i>P</i>
1980~1995	1 263.39	114.32	457.27	209 094	2 104.37	585.83	6.261	0.000
1996~2012	3 329.39	309.54	1 276.25	1 628 819	5 426.98	1 378.18		

两个时期的月平均面源总氮负荷在时间尺度上存在一定的差异(图 3)。1980~1995 年最大值出现在 7 月，从 1 月开始负荷逐步增加；而近期的最大值出现在 8 月和 9 月，6 月的输出负荷小于 5 月。时间尺度趋势表明巢湖地区面源污染的输出主要受降雨的影响，夏季是主要的污染输出时段，而两个时期的月负荷差异主要受耕作模式和土地利用的影响。1980~1995 年的月均面源氮污染负荷为 105.28 t，而 1996~2012 年月均氮污染负荷增加了 164%，达到 277.45 t。在不同月份面源氮污染负荷变化方面，非汛期的 11 月至来年 2 月，两个时期的总氮负荷均很小，且差异较小，而汛期的月均负荷差异较大。

两个时期的月均流失负荷统计分析也证明不同土地利用条件下流失负荷差异巨大，除多年统计月均负荷增加外，极小值增加了近 4 倍，而极大值也增加了 2.5 倍左右(表 3)。*t* 检验分析表明两个阶段的月均面源氮流失负荷存在显著性差异，在置信区

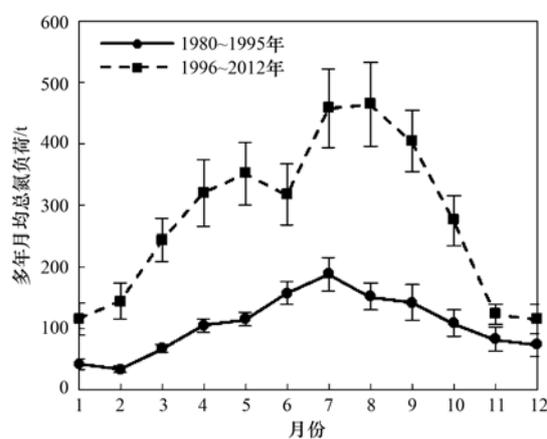


图 3 1980~1995 年和 1996~2012 年流域出口处面源负荷的月际变化

Fig. 3 Monthly variation on diffuse N loading at outlet of two modeling periods

间为 95% 情况下，*t* 值为 6.531，对应的概率 *P* 值为 0，小于显著性水平 0.05。

表 3 两个模拟阶段流域出口处月平均面源氮负荷的统计分析 (*n* = 12)

Table 3 Statistical analysis for mean monthly diffuse N loading at outlet of two modeling periods

年限	均值	均值标准误	标准差	方差	极大值	极小值	<i>t</i> 检验	
							<i>t</i>	<i>P</i>
1980~1995	105.28	13.89	48.10	2 313.64	188.13	33.38	6.531	0.000
1996~2012	277.45	37.78	130.86	17 123.99	465.14	114.67		

通过与茅坪河流域^[2](属于长江流域)、丹江口水库流域^[8]氮污染输出负荷的研究结果的对比，发现研究区和上述流域在农业面源氮污染负荷的月际变化上有相同的变化规律，即这些流域在径流量大的月份均有较大的农业面源氮污染输出负荷。但是这些流域农业面源氮污染输出负荷较大的月份有所不同，其中研究区在两个时期内分别集中在 6~9

月和 7~9 月。

2.3 面源氮污染负荷的空间分布

2.3.1 有机氮负荷的空间分布

根据两个时期研究区面源有机氮流失负荷的空间分布分析(图 4)，两期流失负荷空间分布存在一定的差异，流域出口处和流域北部有机氮流失负荷都较大，但流域中部和东部的流失负荷差异明显。

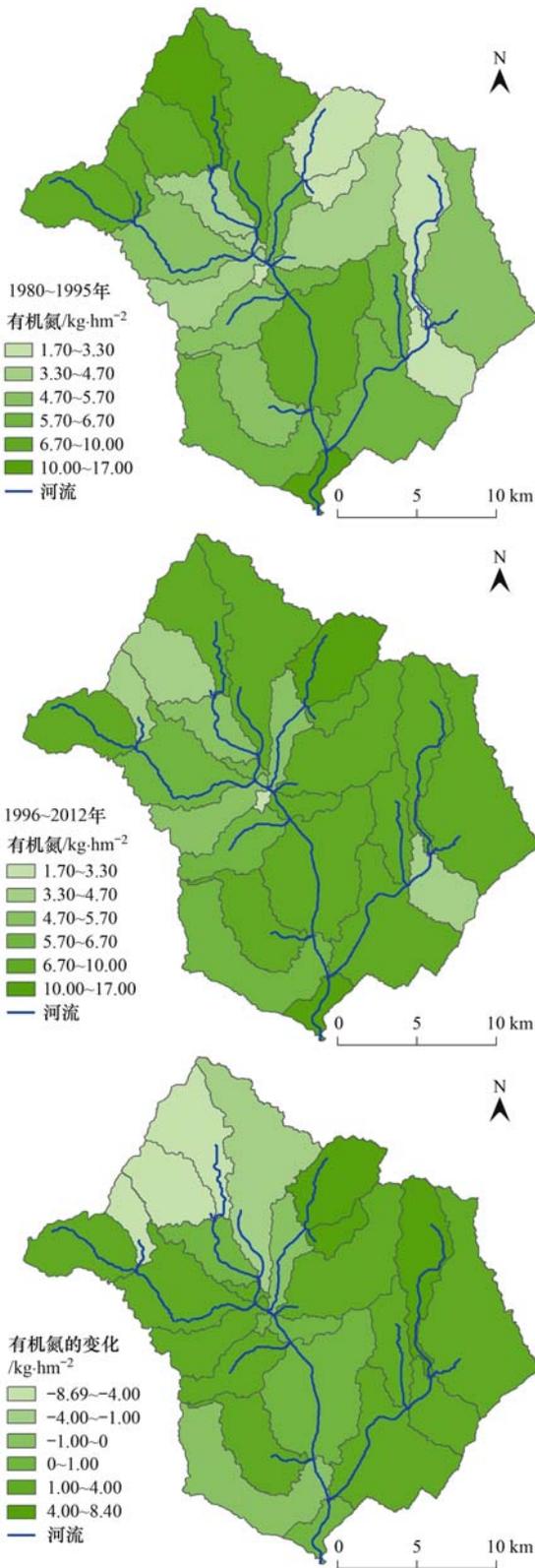


图4 1980~1995年和1996~2012年年均面源有机氮负荷的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of mean yearly diffuse organic N loading of two modeling periods

1980~1995年和1996~2012年两个时期研究区有

机氮负荷分别介于 1.77 ~ 16.94 kg·hm⁻²和 3.29 ~ 11.20 kg·hm⁻²之间,流域尺度的平均有机氮负荷分别为 6.18 kg·hm⁻²和 7.08 kg·hm⁻²,表明面源有机氮负荷略有增加. 流域的绝大部分区域 1996~2012年的有机氮负荷较大;流域北部的有机氮负荷在 1980~1995年期间较大,但后期大幅度减少,最大降幅为 8.69 kg·hm⁻². 结合土地利用变化 1980~1995年间流域西北部山区的耕地面积减少,而林地的面积有所增加,从而减少了有机氮的流失^[24]. 土地利用类型的变化是导致 1996~2012年该区域有机氮流失负荷减小的主要因素. 流失负荷空间分布的均匀程度方面,通过亚流域尺度流失负荷的方差分析,结果表明 1980~1995年的有机氮负荷在整个流域尺度上差异较大,而 1996~2012年的有机氮负荷在空间分布上存在较小的差异,方差值由 11.36 下降到 3.92.

2.3.2 硝态氮负荷的空间分布

模拟分析表明研究区面源硝态氮流失负荷明显增加(图 5),1980~1995年和 1996~2012年两个时期研究区硝态氮负荷分别介于 0.81 ~ 2.40 kg·hm⁻²和 1.36 ~ 4.28 kg·hm⁻²之间,流域尺度的平均硝态氮负荷分别为 1.92 kg·hm⁻²和 3.32 kg·hm⁻². 两个时期研究区硝态氮负荷的空间分布变化和有机氮流失负荷存在一定的相似性,整体流域流失负荷增加,但硝态氮流失负荷在流域西部的负荷较大,而流域东部的负荷较小. 除流域西北部亚流域由于农田面积减少导致流失负荷减小外,绝大部分的区域流失负荷呈增加趋势,最大增幅为 2.10 kg·hm⁻²,主要原因是这一时期无机类氮肥的大量施用. 与有机氮存在显著的空间差异不同,方差分析表明两个时期的硝态氮负荷在整个流域尺度上差异均较小,空间分布较为均匀.

2.3.3 总氮负荷的空间分布

面源总氮模拟结果表明(图 6),1980~1995年和 1996~2012年两个时期总氮负荷分别介于 2.61 ~ 19.15 kg·hm⁻²和 5.21 ~ 14.42 kg·hm⁻²之间,流域平均总氮负荷分别为 8.10 kg·hm⁻²和 10.40 kg·hm⁻². 总氮负荷的空间分布存在一定的差异,尤其是东部区域流失负荷明显增加,最大增幅为 10.50 kg·hm⁻². 流失负荷空间分布统计分析表明 1980~1995年的空间分布差异较大,而 1996~2012年的空间分布差异较小. 结合土地利用和农业耕作信息可知本流域内农田化肥施用水平在 30 a 内增加明显,造成土壤中氮元素累积,进而会产生较大的

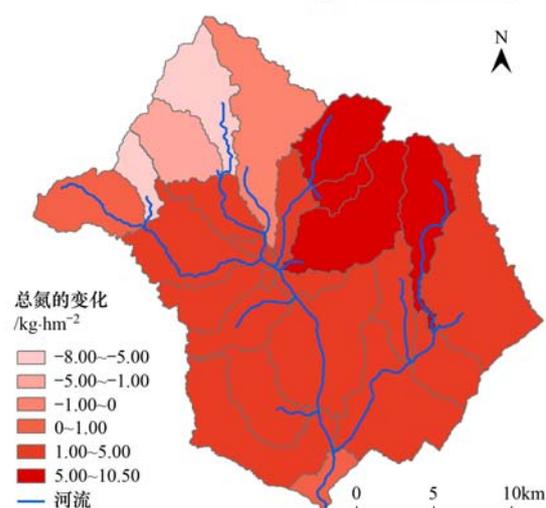
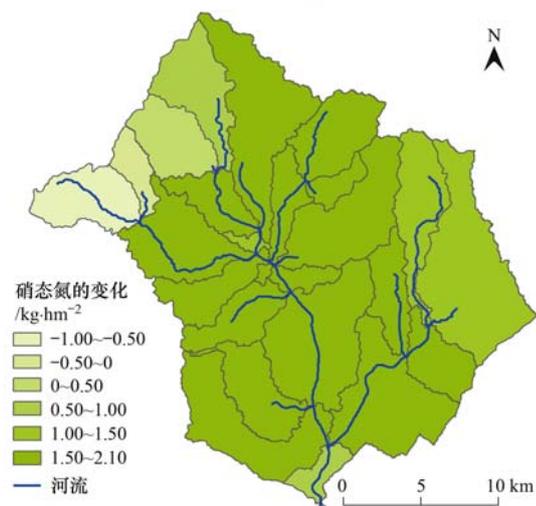
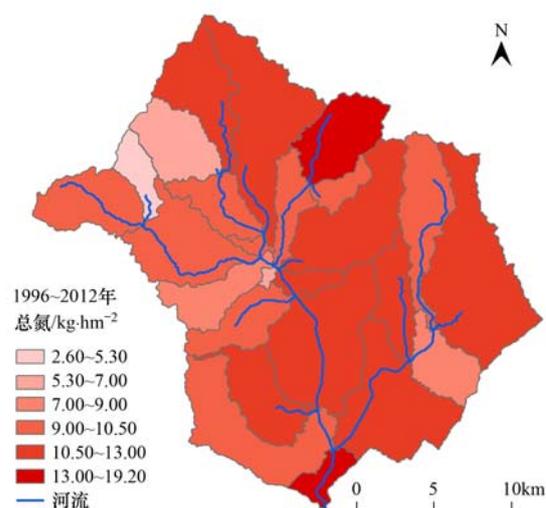
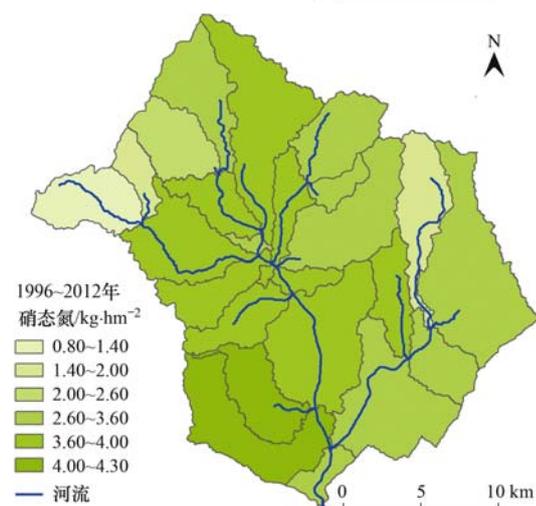
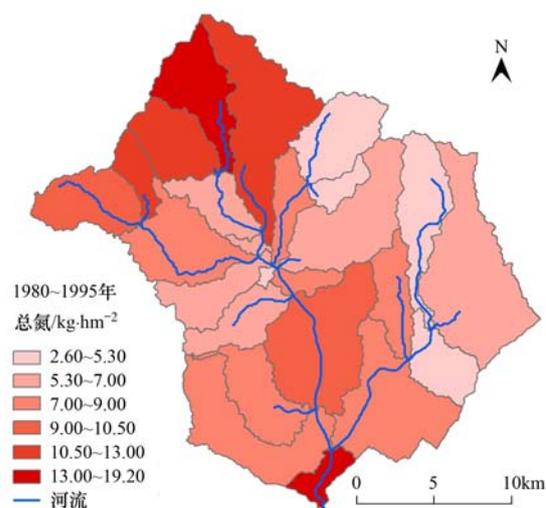
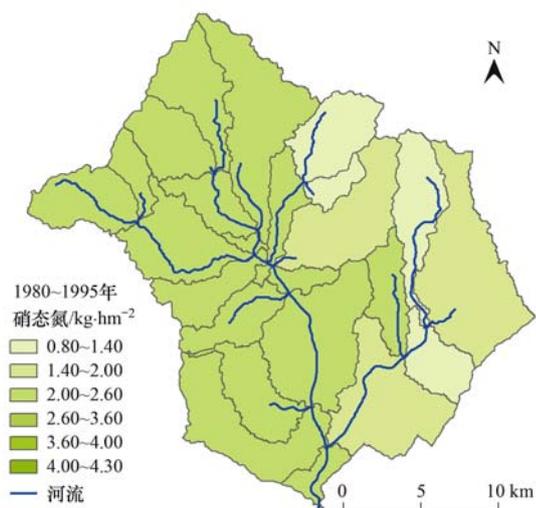


图5 1980~1995年和1996~2012年年均
面源硝态氮负荷的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of mean yearly diffuse nitrate
N loading of two modeling periods

图6 1980~1995年和1996~2012年年均
面源总氮负荷的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of mean yearly diffuse
total N loading of two modeling periods

总氮负荷. 两种形态的面源氮污染分析表明, 两个时期的有机氮负荷分别占总氮负荷的 76.32% 和 68.06%, 而有机氮大部分以泥沙吸附的形态进入水

体^[25], 可见控制土壤侵蚀(水土流失)是减少面源氮污染的有效措施.

与其它流域的研究结果相比,研究区在农业面源氮污染的形态上有明显的特征. 茫溪河流域^[26] (属于闽江流域)和苕溪流域^[27] (属于太湖流域)的有机氮负荷约占总氮负荷的 82%~92%,硝态氮负荷约占总氮负荷的 8%~18%. 而研究区的有机氮负荷和硝态氮负荷分别占总氮负荷的 68%和 32%,其硝态氮负荷的比例明显高于其它流域. 这可能与巢湖流域的氮肥施用量明显高于全国平均水平有关.

从 1980~2012 年,研究区的农业面源氮污染输出负荷总体上呈增加的趋势. 不同的土地利用类型产生的面源氮污染负荷存在较大差异. 研究表明,农田和居民用地的面源氮污染输出负荷大于林地的输出负荷^[28]. 在 1980~2012 年期间,随着研究区经济和社会的快速发展,林地面积减少了近一半,减少的林地被开垦为农田和居民用地,导致研究区的农业面源氮污染输出负荷增加. 此外,在同一耕种作物下,氮肥施用量越高,农田产生的面源氮污染输出负荷越大^[1]. 与 1980~1995 年相比,1996~2012 年期间的氮肥施用量为 $333 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (以 N 元素计),增加了 139%. 氮肥施用量的增加,引起农田面源污染输出负荷的增加,进一步导致研究区农业面源氮污染加重.

2.4 土壤呼吸和硝化特征与农业面源氮污染的关系

长时段农业面源氮污染输出负荷时空差异表明土地利用方式变化是主要的影响因子,而土壤属性是不同土地利用类型的面源氮输出负荷差异的根本因素. 由于本研究区对面源氮污染输出作用尤为明显的是农田和林地,因此对两者的土壤呼吸速率、总硝化速率和反硝化速率进行测试分析具有重要意义.

研究结果表明(图 7),林地土壤呼吸速率远大于农田,为 $2198.11 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$,这表明林地碳循环更加强烈. 而土壤呼吸也需要消耗部分土壤氮,使得氮流失降低. 农田的总硝化速率和反硝化速率分别为 $1396.35 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $1007.88 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$,远大于林地的测定结果,其中林地的反硝化速率仅为 $28.86 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$.

在硝化过程中,土壤微生物将 NH_4^+ 氧化为 NO_3^- ,过程中有产生少量的 N_2O ; 在反硝化过程中,反硝化微生物将 NO_3^- 和 NO_2^- 转化为低价态的氮的氧化物(如 N_2O)或 N_2 . 在硝化和反硝化过程中,由于 N_2O 和 N_2 的产生,导致土壤氮循环过程中氮素的减少. 农田的总消化速率和反硝化速率较大,表明

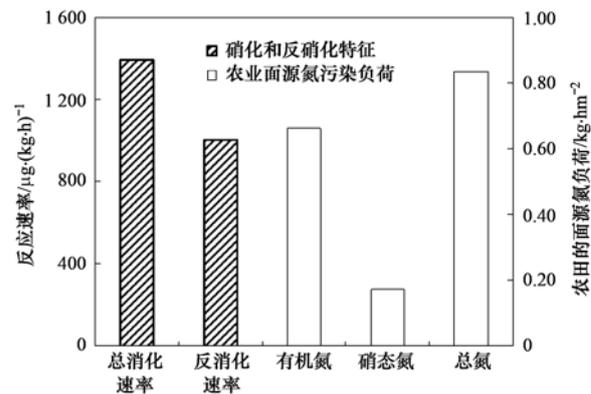


图 7 农田的总硝化速率、反硝化速率与面源氮负荷

Fig. 7 Soil gross nitrification rate, denitrification rate and diffuse N loading of farmland

农田土壤通过消化和反硝化作用流失的氮素更多,其土壤氮库中的氮素减少,从而在一定程度上使得面源氮污染的输出负荷减小. 土壤的硝化过程产生 NO_3^- ,而反硝化过程消耗 NO_3^- . 对于农田土壤,总硝化速率大于反硝化速率,则土壤中 NO_3^- 的生成量大于它的消耗量,将导致土壤氮库中硝态氮的累积,同时有机氮将会相应地减少. 这表明农田土壤中硝态氮的面源污染流失量将会增加,而有机氮的面源污染流失量将有所减少.

此外,氮肥的施用导致土壤的总硝化速率和反硝化速率增加,使得农田氮循环速率加快,进而增加了面源氮污染流失的概率. 在此条件下农田的有机氮、硝态氮和总氮负荷分别为 0.66 、 0.17 和 $0.84 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (图 7). 土壤的硝化和反硝化反应,直接影响土壤中的氮循环,并进一步对面源氮污染负荷产生影响. 通过探究土壤呼吸和硝化特征对农业面源污染的影响,提高了土壤氮转化和流失过程的认知,为农业面源氮污染的防治提供重要工具.

对基于 SWAT 模型这类分布式水文模型得到的流域面源污染负荷,均存在一定的不确定性,已有研究表明降雨、土地利用、土壤属性、SCS 径流曲线数、基流 alpha 因子和平均坡长等都是影响面源污染模型不确定性的主要因子,这些因子也会影响本研究的氮污染输出负荷. 为降低系统误差和提高相关分析的准确性,与土壤呼吸硝化相关分析中使用的是 1996~2012 年的多年平均值表示.

3 结论

(1) 在 1980~1995 年和 1996~2012 年这两个时期,研究区的农业面源氮污染输出负荷在时间尺度和空间尺度上均存在一定的差异. 农业面源氮污

染的输出负荷主要受降雨的影响。

(2)从1980~2012年,研究区农业面源氮污染输出负荷总体上呈增加的趋势。土地利用的变化和施肥强度的增加是导致农业面源氮污染加重的主要因素。氮肥施用的增加导致硝态氮负荷所占的比例相应地增加。

(3)由于施肥和土壤氮碳含量的差异,林地呼吸速率远大于农田呼吸速率,而林地的总硝化速率和反硝化速率均明显小于农田。

(4)农田较高的总硝化速率和反硝化速率导致土壤氮库中的氮素减少,从而在一定程度上使得面源氮污染的输出负荷减小。农田土壤的总硝化速率大于反硝化速率,导致农田硝态氮的面源污染流失量增加,而有机氮的流失量有所减少。

参考文献:

- [1] 郝芳华,程红光,杨胜天. 非点源污染模型理论与应用[M]. 北京:中国环境科学出版社,2006. 24-118.
- [2] 丁晓雯,沈珍瑶. 涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别[J]. 环境科学,2012,33(11):4025-4032.
- [3] 周亮,徐建刚,孙东琪,等. 淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制[J]. 环境科学,2013,34(2):547-554.
- [4] Ouyang W, Huang H B, Hao F H, *et al.* Synergistic impacts of land-use change and soil property variation on non-point source nitrogen pollution in a freeze-thaw area [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 495(12): 126-134.
- [5] 邓欧平,孙嗣响,吕军. 基于ArcSWAT模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析[J]. 环境科学,2013,34(4):1284-1290.
- [6] 孟晓云,于兴修,泮雪芹. 云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响[J]. 环境科学,2012,33(6):1789-1794.
- [7] 许其功,刘鸿亮,沈珍瑶,等. 茅坪河流域非点源污染负荷模拟[J]. 环境科学,2006,27(11):2176-2181.
- [8] 汤洁,刘畅,杨巍,等. 基于SWAT模型的大伙房水库汇水区农业非点源污染空间特性研究[J]. 地理科学,2012,32(10):1247-1253.
- [9] 乔卫芳,牛海鹏,赵同谦. 基于SWAT模型的丹江口水库流域农业非点源污染的时空分布特征[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(2):219-225.
- [10] 李良谟,潘映华,周秀如,等. 太湖地区主要类型土壤的硝化作用及其影响因素[J]. 土壤,1987,19(6):289-293.
- [11] 刘巧辉,黄耀,郑循华,等. 基于BaPS系统的旱地土壤呼吸作用及其分量确定探讨[J]. 环境科学学报,2005,25(8):1105-1111.
- [12] 刘方平,柳根水,许亚群,等. 基于BaPS系统的棉花土壤硝化和反硝化作用分析[J]. 江西农业学报,2011,23(12):121-123.
- [13] 柳云龙,施振香,卢小遮,等. 上海城郊大棚蔬菜地土壤总硝化与反硝化作用研究[J]. 长江流域资源与环境,2011,20(5):592-596.
- [14] Abbasi M K, Adams W A. Loss of nitrogen in compacted grassland soil by simultaneous nitrification and denitrification [J]. *Plant and Soil*, 1998, 200(2): 265-277.
- [15] Davidson E A, Maston P A, Vitousek P M, *et al.* Processes regulating soil emissions of NO and N₂O in a seasonally dry tropical forest [J]. *Ecology*, 1993, 74(1): 130-139.
- [16] 刘巧辉. 应用BaPS系统研究旱地土壤硝化-反硝化过程和呼吸作用[D]. 南京:南京农业大学,2005. 21-34.
- [17] 储茵,朱江,夏守先,等. 巢湖典型支流柘皋河水质污染时空变化特征[J]. 水土保持学报,2011,25(4):243-248.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [19] 于克伟,陈冠雄,Stru S,等. 丹麦森林土壤反硝化作用的动力学分析[J]. 应用生态学报,1998,9(2):163-167.
- [20] Ouyang W, Hao F H, Wang X L, *et al.* Non-point source pollution responses simulation for conversion cropland to forest in mountains by SWAT in China [J]. *Environmental Management*, 2008, 41(1): 79-89.
- [21] Wang X L, Wang Q, Wu C Q, *et al.* A method coupled with remote sensing data to evaluate non-point source pollution in the Xin'anjiang catchment of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 430(15): 132-143.
- [22] 欧阳威,黄浩波,蔡冠清,等. 巢湖地区无监测资料小流域面源磷污染输出负荷时空特征[J]. 环境科学学报,2014,34(4):1024-1031.
- [23] 姚春霞,陈振楼,陆利民,等. 上海市蔬菜地土壤硝态氮状况研究[J]. 生态环境,2005,14(2):220-223.
- [24] Shen Z Y, Chen L, Hong Q, *et al.* Assessment of nitrogen and phosphorus loads and causal factors from different land use and soil types in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 454-455: 383-392.
- [25] 宋凯宇. 挠力河流域农业活动胁迫下的非点源污染效应研究[D]. 北京:北京师范大学,2011. 58-66.
- [26] 蔡孟林. SWAT模型在茫溪河流域非点源污染研究中的应用[D]. 成都:西南交通大学,2013. 45-50.
- [27] 戴露莹. 基于SWAT模型的典型小流域非点源污染控制研究[D]. 杭州:浙江大学,2012. 42-57.
- [28] 王晓燕,秦福来,欧洋,等. 基于SWAT模型的流域非点源污染模拟——以密云水库北部流域为例[J]. 农业环境科学学报,2008,27(3):1098-1105.

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiyi Glacier Region	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Flex	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行