

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 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)

紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应

陈维梁^{1,2}, 高扬^{2*}, 林勇明^{3,6*}, 朱波⁴, 徐亚娟⁵, 于贵瑞², 吴承祯⁶

(1. 福建农林大学生命科学学院, 福州 350002; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 福建农林大学林学院, 福州 350002; 4. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 5. 中南林业科技大学林学院, 长沙 410000; 6. 福建农林大学福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室, 福州 350002)

摘要: 本研究通过观测 3 场不同降雨强度及不同施肥方式处理下氮素随紫色土坡耕地的壤中流迁移过程, 并对氮素淋溶效应的环境健康效应进行风险评价, 进而为控制紫色土地区氮素非点源污染及建立合理施肥制度提供科学依据. 结果表明, 不同降雨强度下, 氮素随壤中流输出形态差异较大, 溶解态氮 (DN) 的比重为 53.74% ~ 99.21%, 其中硝酸盐 (NO_3^- -N) 的比重约为 35.70% ~ 93.65%, 而在中雨强度下硝酸盐比重高达 84.09% ~ 93.65%; 对于不同降雨强度, 中雨强度下 (降雨量为 24.7 mm) 壤中流各形态氮素输出通量最高, 总氮 (TN)、DN、颗粒态氮 (PN)、铵态氮 (NH_4^+ -N) 和亚硝态氮 (NO_2^- -N) 输出通量分别可高达 737.17、711.12、26.06、12.70 和 0.46 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$, 而 NO_3^- -N 输出通量可高达 686.12 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$, 对地下水环境存在巨大污染隐患. 通过对地下水氮素进行污染风险评价, 表明秸秆还田能够有效缓解施肥带来的氮淋溶效应, 降低地下水氮素污染风险, 特别是有机-无机肥配施能有效减缓地下水污染状况, 达到改善土壤肥力从而增加农作物产量的目的.

关键词: 壤中流; 降雨; 施肥处理; 氮素迁移; 紫色土

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2129-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.06.013

Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil

CHEN Wei-liang^{1,2}, GAO Yang², LIN Yong-ming^{3,6}, ZHU Bo⁴, XU Ya-juan⁵, YU Gui-rui², WU Cheng-zhen⁶

(1. College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, 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, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 4. Institute of Mountain Hazard and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 5. College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410000, China; 6. Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: In this paper, we monitored different forms of nitrogen (N) transported by the subsurface flow under three different natural rainfall events and different fertilizations and conducted an associated risk evaluation on environmental health, which provides scientific basis for controlling N non-point pollution and establishing a reasonable fertilization system in purple soil area. The results showed that there were different forms of N transport by subsurface flow under different rainfall events, where in dissolved nitrogen (DN) accounted for about 53.74% - 99.21%, and nitrate (NO_3^- -N) accounted for about 35.70% - 93.65% of DN, and especially under the moderate rainfall, NO_3^- -N could reach 84.09% - 93.65% of DN. The different N fluxes were the highest under moderate rainfall among different rainfall events, in which the flux of total nitrogen (TN), DN, particle nitrogen (PN), ammonia (NH_4^+ -N) and nitrite (NO_2^- -N) reached 737.17, 711.12, 26.06, 12.70 and 0.46 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$, respectively, and the NO_3^- -N flux was as high as 686.12 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$, showing a huge potential threat on groundwater health. Through the risk assessment on N pollution for groundwater quality, we concluded that the straw returning could be used to effectively alleviate the N leaching and groundwater N pollution; especially, the combined application of organic and chemical fertilizer could effectively mitigate the groundwater pollution, improve soil fertility and increase crop yield.

Key words: subflow; rainfall; fertilizations; nitrogen transfer; purple soil

近年来, 农田土壤大量施肥导致氮素在降雨条件下流失进入水环境的情况逐渐加剧^[1~3], 同时, 农田氮素的大量输出是导致水体富营养化以及地下水硝酸盐污染的主要原因^[4~7]. 我国学者曾估计我国每年农用氮肥有 70% 左右进入环境, 相当每年有 1 120 万 t 氮素进入环境^[8], 为了满足日益增长的粮

收稿日期: 2013-10-28; 修订日期: 2013-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31200404, 31290223); 中国科学院秉维优秀青年人才项目 (2012RC202); 中国科学院成都山地所山地地表生过程与生态调控重点实验室开放基金项目 (Y2R20050DD)

作者简介: 陈维梁 (1987 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 C、N、P 生物地球化学循环, E-mail: william1018@qq.com
* 通讯联系人, E-mail: gaoyang@igsrr.ac.cn; monkey1422@163.com

食需求,氮肥在农业生产中广泛应用且用量持续增长^[9],朱兆良等^[10]曾估计全国化肥氮的淋溶和径流流失分别可达到化肥总消费量的2%和5%。随着对水环境污染问题的逐步重视,人们越来越关注氮淋失并展开大量研究工作^[11~15]。张维理等^[16]报道称京津唐地区半数以上地下水硝酸盐含量超过饮用标准($\text{NO}_3^- \text{-N} \leq 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),高者达 $67.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。地下水硝酸盐过高对人体存在巨大的健康隐患^[17,18],人类大量饮用硝酸盐浓度超标的水体容易致癌^[19,20],而地下蓄水层一旦被污染,其净化是极其困难的。

坡耕地的氮流失过程十分复杂,受到降雨(降雨类型、强度及持续时间)和下垫面因素(地形、地貌、土壤的理化性质、植被或作物特征),以及农业管理措施等的综合影响^[21~23]。朱波等^[24]和周明华等^[25]的研究表明壤中流作为紫色土坡耕地的主要方式之一可占总径流60%以上,是土壤硝酸盐淋失的主要机制。紫色土坡耕地已被认为是三峡库区主要的面源污染源^[26,27],在国内外备受关注,但其壤中流不同形态氮素迁移过程的研究^[24]鲜有报道,深入研究紫色土坡耕地氮素流失与迁移过程对土壤养分流失的控制和农业面源污染的防治具有重大意义。本研究着重观测与分析自然降雨条件下有机肥以及无机-有机肥配施下对紫色土坡耕地壤中流的动态过程,并对该研究区地下水氮污染风险作出评价,旨在为控制紫色土地区氮素非点源污染及建立合理施肥制度提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 区域介绍

研究区位于我国西南紫色土区域,紫色土主要分布在四川省和重庆市(三峡库区),作为最重要的耕地资源之一仅四川盆地面积可达 $1.6 \times 10^5 \text{ km}^2$ ^[28],由于紫色土由紫色页岩发育而成,孔隙度大、入渗能力强、土层浅,下伏透水性较弱的泥页岩,独特的岩土结构,致使紫色土坡耕地壤中流发育。研究区试验地位于中国科学院紫色土盐亭农业生态试验站(YAS:105°27'E,31°16'N),该站位于四川省绵阳市盐亭县林山乡,处于四川盆地中部紫色土丘陵地带,嘉陵江一级支流涪江的支流——猕江、湍江分水岭上,具有四川盆地亚热带湿润季风气候特征。多年平均降雨量826 mm左右,年内水量分配不均,降雨主要分布于夏季(占65.5%),秋季(占19.7%),6月下旬至8月,降雨极易产生地表径流

与壤中流。区内土壤为钙质紫色土,质地为中壤,该区农耕发达,农业种植一年两熟制,该区旱地是大面积的油菜(或冬小麦)-夏玉米种植区。紫色土区域的农民习惯顺坡垄作,施肥方式主要分为底肥一次施用、干肥窝施和兑清水后窝施,施肥制度主要为常规施无机肥、单施农家有机肥、秸秆还田、无机-有机肥配施。试验小区土壤的基本理化性质按土壤农化分析方法测定^[29],测试结果为:pH 8.28,质地中壤,有机质含量 $8.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量 $0.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷含量 $0.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾含量 $18.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量 $42.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷含量 $4.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $71.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,饱和导水率 $0.28 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

通过自行设计建造紫色土坡耕地径流小区观测氮素淋溶效应及其迁移过程,坡地排水采集器的设计面积 $8 \text{ m} \times 4 \text{ m}$,土层厚度60 cm,小区坡度为 7° ^[30]。为防止水流侧渗影响,保障小区水系独立完整,在小区四周及底部浇筑混凝土建立隔水墙,在坡底建造反滤层和汇流沟,详细设计与建造^[24]参见相关专利(专利号:ZL2007100640686),设计方案参考图1。径流小区种植制度为冬小麦与夏玉米轮作,植被覆盖度约 $>90\%$ ^[31]。本试验设置7种施肥方式,分别为单施农家肥(OM)、秸秆还田(RSD)、氮磷配施(NP)、氮磷钾配施(NPK)、农家肥-化肥配施(OMNPK)和秸秆-化肥配施(RSDNPK),一个空白对照试验:不施肥(CK),每种处理3次重复,重复小区的设计、构建与观测小区完全一致。施肥方式为穴施,底肥一次施用,施后覆土,研究样地种植夏季玉米。各施肥处理的施氮量控制在相同水平,为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以N计),各施肥情况详见表1。

1.3 水样采集

分别对2012年7、8、9月的3场自然降雨活动进行观测采样。3场降雨分别为7月22日:降雨量24.7 mm,为中雨(24 h内降水量为10~24.9 mm的降雨为中雨)、8月20日:降雨量59 mm,为暴雨(24 h内降水量为50~99.9 mm的降雨为暴雨)、9月10日:降雨量172.8 mm,为大暴雨(24 h内降水量100~250 mm的降雨为大暴雨),采样时间为开始产流至产流结束。降雨初期产流不稳定,采用加密采样,采样时间间隔较短,随着产流逐渐稳定,则逐渐延长采样频率。

1.4 水样检测分析

水样采集结束后立即送往实验室分析测定各形

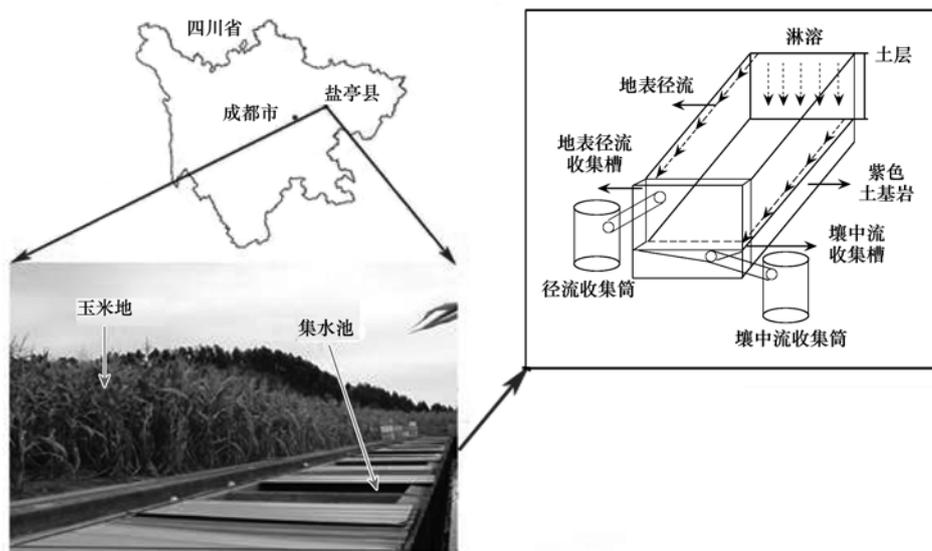


图1 盐亭紫色土农业生态试验站紫色土坡耕地径流小区设计示意

Fig. 1 Schematic illustration of runoff plot structure on sloping cropland of purple soil in YAS

表1 紫色土坡耕地径流小区不同施肥情况

Table 1 Different fertilizations in sloping cropland of purple soil

施肥情况	施肥制度	施肥原料
单施	农家肥(OM)	猪粪 $30.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ($3.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$), 含水量低于 40%
	秸秆还田(RSD)	小麦秸秆 $0.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$
配施: 有机肥 40% 化肥 60%	无机肥(NPK)、(NP)	化学氮肥品种为紫色土丘陵区广泛施用的碳酸氢铵; 磷肥为过磷酸钙, 单季施用量为 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 P_2O_5 计); 钾肥为氯化钾, 单季施用量为 $36 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 K_2O 计)
	农家肥-化肥配施(OMNPK)	猪粪 $12.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ($1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$); 氮肥 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ($0.009 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ -碳酸氢铵 $0.052 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$); 磷肥 $54 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ($0.0054 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ -过磷酸钙 $0.045 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$); 钾肥 $36 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$
	秸秆-化肥配施(RSDNPK)	小麦秸秆 $0.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$

态氮素,或加硫酸酸化至 pH 小于 2 后,置于冰箱中 4°C 保存后测定. 各形态氮素分别为:总氮(TN)、硝态氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)、铵态氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)、亚硝态氮($\text{NO}_2^- \text{-N}$)、溶解态氮(DN),总氮(TN)指可溶性及悬浮颗粒中的含氮量;溶解态氮(DN)指水中可溶性及含可滤性固体(小于 $0.45 \mu\text{m}$ 颗粒物)的含氮量(GB 11894-89). 水样各形态氮素的测试方法:碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894-89)测定总氮(TN);水样经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后,紫外分光光度法(GB/T 8538-1995)测定硝态氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$);纳氏试剂分光光度法(GB/T 8538-1995)测定铵态氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$);重氮偶合比色法(GB/T 8538-1995)测定亚硝态氮($\text{NO}_2^- \text{-N}$);碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894-89)测定溶解态氮(DN). 颗粒态氮 $\text{PN} = \text{TN} - \text{DN}$, 溶解无机氮 $\text{IN} = \text{硝态氮}(\text{NO}_3^- \text{-N}) + \text{铵态氮}(\text{NH}_4^+ \text{-N}) + \text{亚硝态氮}(\text{NO}_2^- \text{-N})$.

1.5 数据分析

1.5.1 氮素输出通量计算

淋溶水的硝态氮浓度及氮淋失通量均为 3 个重复小区测定值的平均值,单次降雨产流事件的硝态氮淋失通量计算公式为:

$$Q_i = c_i \times q_i \quad (1)$$

式中, Q_i 为氮淋失通量($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$), c_i 为壤中流硝态氮含量($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), q_i 为单位面积壤中流径流深(mm).

1.5.2 地下水氮污染风险评价方法

采用模糊综合评价数学模型^[32]对研究区域地下水氮污染风险进行评价,选取地下水环境典型污染物即“三氮”: $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 作为评价指标,地下水氮素质量标准参见表 2. 因素集 $U = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_i\} = \{\text{NO}_3^- \text{-N}, \text{NH}_4^+ \text{-N}, \text{NO}_2^- \text{-N}\}$, 评价集 $V = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_m\} = \{\text{I}, \text{II}, \text{III}, \text{IV}, \text{V}\}$. 指标权重计算公式为:

$$W_i = (c_i/S_i) / \left[\sum_{i=1}^n c_i/S_i \right] \quad (2)$$

式中, W_i 为指标权重; c_i 、 S_i 分别为第 i 种污染物在水中的实际浓度和某种用途的浓度标准(参见表 2)。根据公式(2)计算出指标权重值(如表 3)后,将“三氮”实测数值代入隶属函数,得出各指标对各水质等级的隶属度,参照文献[20,33,34]的方法,最

后根据最大隶属度原则评判水质类别(表 4)进而对地下水氮素污染风险进行评价。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和多重比较分析不同施肥处理对氮随壤中流迁移输出的影响,以最小显著差异法(LSD)比较组间差异,所用软件为 SPSS 18.0 (SPSS, Inc, USA) 和 Microsoft Office Excel-2010; 制图采用 ArcGis 10.0 以及 OriginPro 8.0 软件完成。

表 2 地下水水质类别评判标准¹⁾/mg·L⁻¹

Table 2 Quality standard for groundwater/mg·L⁻¹

水质类别	I	II	III	IV	V
NH ₄ ⁺ -N	<0.02	<0.02	<0.2	<0.5	>0.5
NO ₃ ⁻ -N	<2	<5	<20	<30	>30
NO ₂ ⁻ -N	<0.001	<0.01	<0.02	<0.1	>0.1

1) 摘自国家标准(GB/T 14848-93)

表 3 不同施肥处理方式壤中流氮素形态指标的权重值

Table 3 Weight value of Nitrogen in subsurface flow under different fertilizations

降雨类型	中雨			暴雨			大暴雨		
	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N
CK	0.356	0.3266	0.3174	0.4076	0.3362	0.2561	0.0984	0.1878	0.1878
NP	0.3149	0.3527	0.3323	0.4926	0.1865	0.3209	0.1283	0.0701	0.0701
NPK	0.3567	0.3195	0.3239	0.4626	0.2667	0.2707	0.1066	0.1366	0.1366
OM	0.2332	0.4036	0.3631	0.6253	0.1586	0.2161	0.2025	0.217	0.217
RSD	0.2559	0.3021	0.4419	0.4205	0.3189	0.2606	0.189	0.1979	0.1979

2 结果与分析

2.1 不同强度降雨壤中流过程变化

如图 2 所示,不同强度降雨下,四种施肥处理的壤中流持续时间、径流量表现差异明显。在不同降雨强度下,因壤中流径流量大小不同而出现产流始

末不同,则径流变化曲线的始末端位置不同。在中雨下[图 2(a)]出现曲线 OM 与 RSD 较为一致的变化趋势;暴雨[图 2(b)]中不同施肥处理下的壤中流变化较为一致,但秸秆还田处理(RSD)在产流 121 min 时出现一个高峰值,径流量达 5.93 mL·s⁻¹。在大暴雨下[图 2(c)]曲线 OM 与 RSD 在

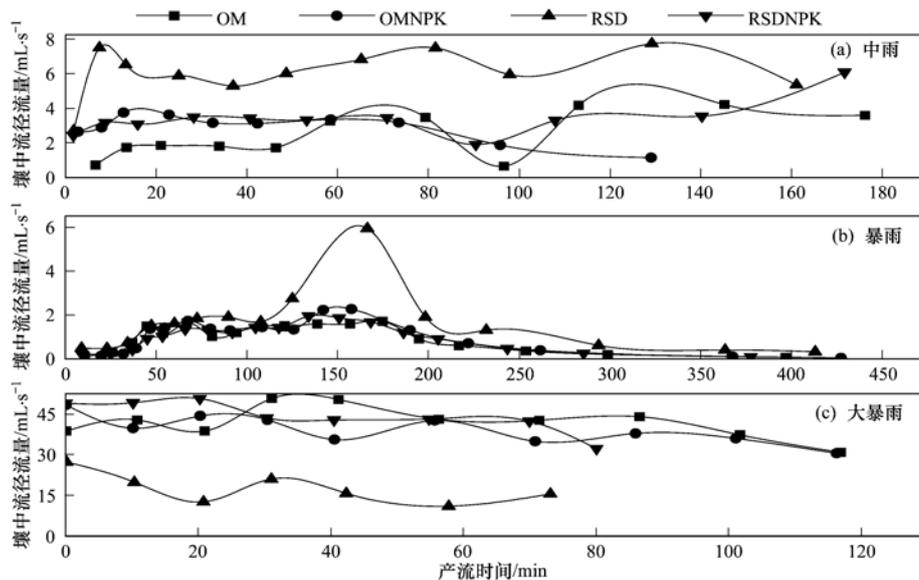


图 2 不同强度降雨下与施肥处理下壤中流径流变化

Fig. 2 Variation of subsurface flow under different rainfall intensity and different fertilizations

表 4 不同强度降雨及施肥处理地下水水质类别

Table 4 Water quality classification of subsoil water in different fertilizations under different rainfall

降雨类型	施肥处理	I	II	III	IV	V	所属类别
中雨	CK	0.813 7	0.524 9	0	0	0	I
	NP	0	0.002	2.774 7	0.848 4	0	III
	NPK	0	0.001 4	2.205 2	1.098 1	0	III
	OM	0	0.147	5.961 1	0.019 5	0	III
	RSD	0.754 5	0.155 9	0.073 6	0.049 2	0	I
暴雨	CK	0.022 9	0.212 8	0.002 9	0	0.262 7	V
	NP	0	2.203 7	0.597 7	0	0.492 6	II
	NPK	0.359 3	0.455 4	0.017 4	0	0.462 6	V
	OM	0	2.26	0.131 7	0.004 1	0	II
	RSD	0.813 7	0.524 9	0	0	0	I
大暴雨	CK	0.188 2	0.001 2	0	0	0.098 4	I
	NP	0.193 7	0.016 7	0.005 3	0.000 3	0.128 3	I
	NPK	0.477 8	0.068 1	0	0	0.106 6	I
	OM	0.384 8	0.267 6	0.000 8	0	0.202 5	I
	RSD	0	0.002	0.001	0.848 4	0	I

产流后 10 ~ 60 min 时段变化趋势较为一致. 同场降雨中不同施肥处理的壤中流产流历时也不同, 中雨强度下农家肥-化肥配施 (OMNPK) 处理壤中流产流历时仅为 129 min, 明显低于其余施肥处理下的产流历时; 暴雨强度中不同施肥处理下的壤中流产流历时相当; 大暴雨强度秸秆还田 (RSD) 与 RSDNPK 处理产流历时分别比其余两种施肥处理下的低, 仅有 73 min 和 80 min.

2.2 不同降雨强度氮输出动态过程变化

如图 3 所示, 在降雨量为 24.7 mm 的中雨下, 农家肥 (OM) 处理下的紫色土坡耕地中各形态氮素随壤中流输出变化趋势较一致 [图 3 (a)], PN 在产流前半期变化平缓, 在 96 min 与 145 min 处出现两个峰值 (分别为 $3.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $5.47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 有机-无机肥配施 (OMNPK 及 RSDNPK) 处理下的各形态氮素变化趋势相对一致 [图 3 (b) 和 3 (d)], 而秸秆还田 (RSD) 处理下的 TN、PN 与 DN 在产流后半期波动较大, TN 与 PN 在 100 ~ 120 min 期间显著下

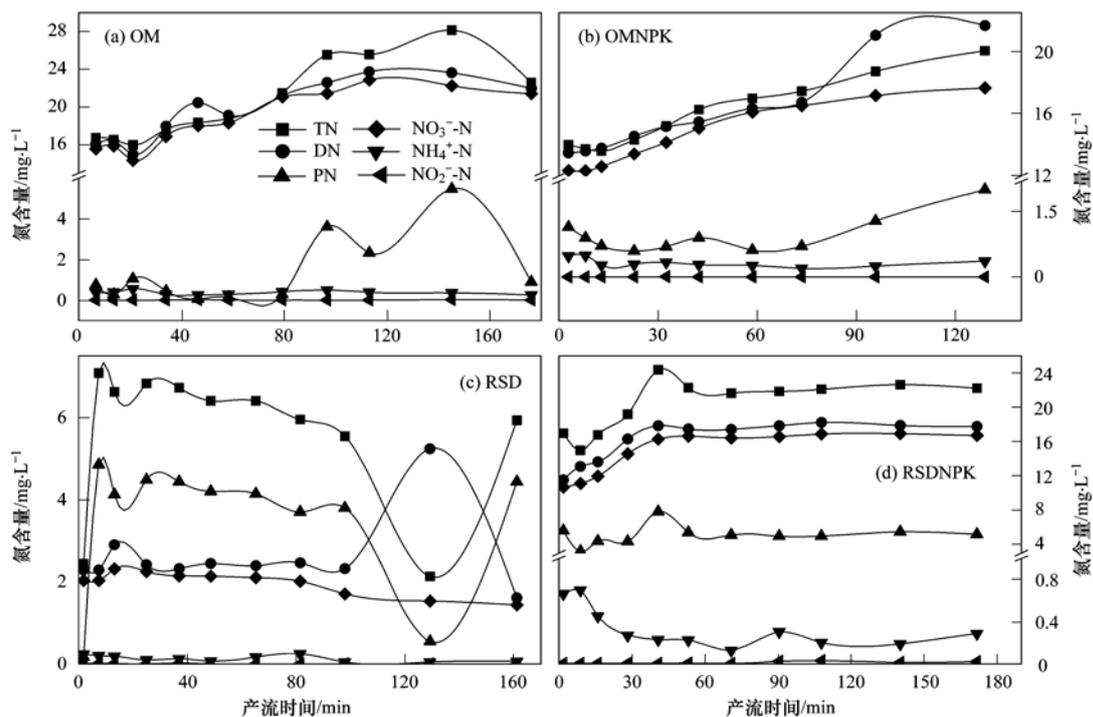


图 3 中雨强度下氮素输出变化过程

Fig. 3 N transport process by subsurface flow under moderate rainfall

降,下降幅度分别为 62% 和 85.6%,最后又显著上升,上升幅度分别高达 179% 和 715%,同期 DN 表现出明显先增后减. 各施肥处理下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量较低,分别在 $0.045 \sim 0.699 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.002 \sim 0.030 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化. 中雨强度下 RSD 处理的壤中流氮素含量最低, TN 在 $2.47 \sim 7.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化,而其余 3 种处理中的 TN 最高达 $22.88 \sim 23.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 从图 3 可看出,中雨条件下相比单施无机肥[图 3(a)和 3(c)],两种有机-无机肥配施下[图 3(b)和 3(d)]各形态氮素变化曲线更稳定.

如图 4 所示,在降雨量为 59 mm 的暴雨下,不

同施肥处理下各形态氮素变化趋势相差较大,各形态氮素变化在产流前半期表现出剧烈波动,其中有机-无机肥配施(OMNPK、RSDNPK)处理下[图 4(b)和 4(d)]各形态氮素在产流后半期呈平缓变化趋势,而秸秆还田(RSD)处理下的 TN、DN 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 表现截然相反,在产流后半期呈陡然上升趋势. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 分别在 $0.58 \sim 1.44 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 与 $0.03 \sim 1.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 不同范围变动. 暴雨强度下单施农家肥(OM)产流初期的 TN 含量明显高于其余 3 个处理,可高达约 $12.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 有机-无机肥配施中[图 4(b)和 4(d)]各形态氮素之间的变化更加稳定且具有较高的一致性.

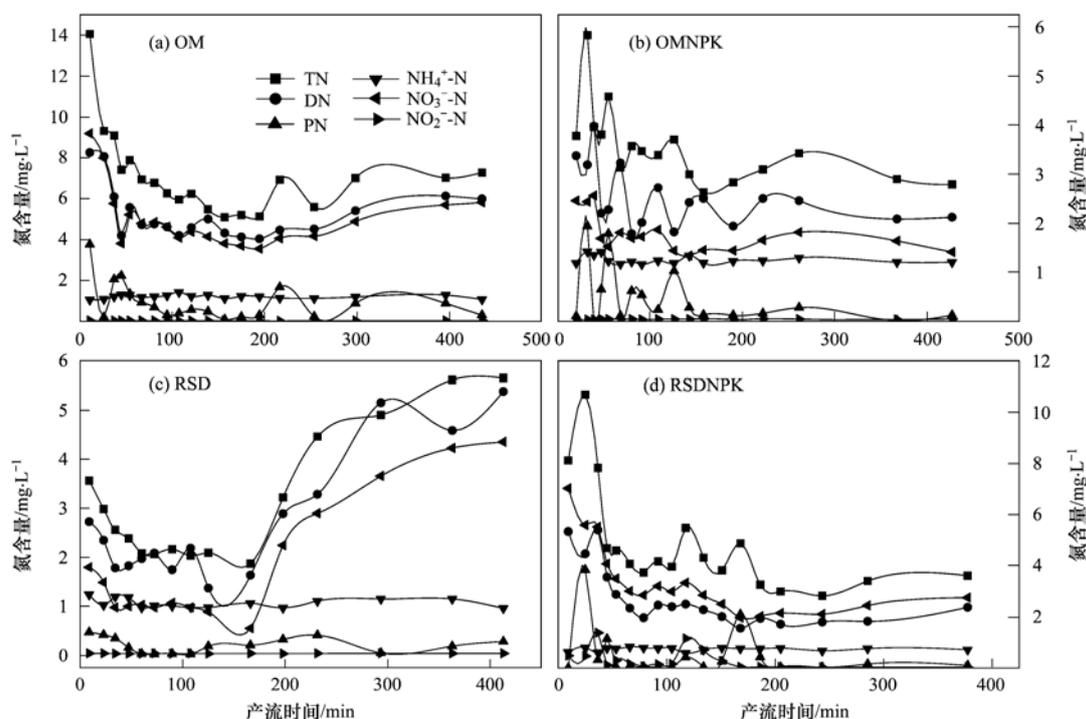


图 4 暴雨强度下氮素输出变化过程

Fig. 4 N transport process by subsurface flow under storm rainfall

在降雨量为 172.8 mm 的大暴雨下,4 种不同施肥处理各形态氮素含量差异明显(图 5),各形态氮素的变化趋势也各不相同. 农家肥(OM)处理下 TN 与 PN 的变化趋势较一致[图 5(a)],在产流后 21 min 处 TN 与 PN 均出现一个峰值,分别达 $12.93 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 与 $9.77 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TN 变化幅度达 70.6% ~ 245.7%,而 PN 增加 18 倍之多. 农家肥-化肥配施(OMNPK)处理下 PN 在产流后 80 ~ 120 min 时段急剧下降,下降幅度为 99.74%. 秸秆还田处理下(RSD)各形态氮素变化趋势较一致,呈波动式缓慢下降. 秸秆-化肥配施处理下(RSDNPK)各形态氮素变化趋势具有较高一致性[图 5(d)],在 42 min 处

出现一个峰值,上升幅度为: TN (66.30%)、PN (117.37%) 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (117.47%),而 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 此时上升 28 倍之多,从 $0.015 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升至 $0.44 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. DN 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的变化相对平缓,分别在 $1.65 \sim 1.90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 与 $0.95 \sim 1.39 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 区间变化. 大暴雨强度 OM 处理下 TN 与 PN 含量在产流 21 min 时明显高与其余 3 种施肥处理,分别高达 $14.42 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $11.26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2.3 不同形态氮素输出通量

表 5 列出不同降雨强度与施肥处理下的氮素输出通量,情况分别为:中雨(NPK > NP > OM > RSD > CK)、暴雨(NPK > OM > RSD > CK > NP) 和大暴雨

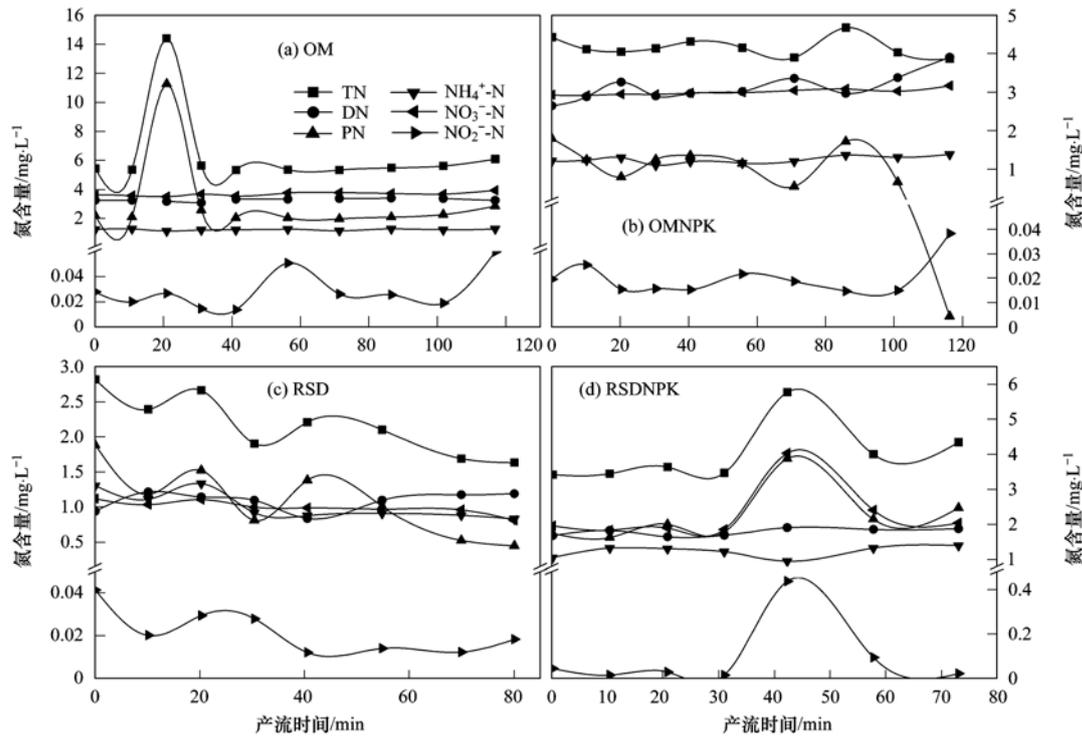


图5 大暴雨强度下氮素输出变化过程

Fig. 5 N transport process by subsurface flow under heavy storm rainfall

(OM > NP > RSD > NPK > CK), 不同降雨强度对各施肥处理中的氮素输出通量差异明显, 主要表现为单施化肥(NPK、NP)与单施农家肥(OM)处理下的氮素输出通量较高. 方差分析结果显示, 中雨及大暴雨下不同施肥对氮输出通量影响差异显著(见表5字母标记), 但暴雨对其影响不显著. 不同强度降雨下氮素输出通量总体排序为中雨 > 大暴雨 > 暴雨, 其中暴雨强度下的氮素输出通量比中雨和大暴雨强度下的氮输出通量小得多, 主要表现为: TN $1.67 \sim 7.02 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、DN $1.33 \sim 5.08 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、PN $0.33 \sim 3.27 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ $1.39 \sim 5.23 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 特别是单施 NP 处理下 TN 输出通量仅为 $1.67 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 明显低于其它施肥处理下 TN 的输出通量. 在一定强度降雨下, 如中雨及暴雨下单施 NPK 处理的氮素输出通量最高, 最高达 $737.17 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 而同场降雨不施肥处理下(CK)的氮素输出通量仅为 $82.82 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$. 当降雨强度足够大, 如大暴雨强度下单施有机肥处理下(OM、RSD) TN 的输出通量也较高, 分别可达 $364.75 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $239.14 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$. 不同强度降雨各形态氮素的分布特征表现为: DN 的输出通量明显高于 PN 的, 可达 $53.74\% \sim 99.21\%$, 无机氮中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的输出通量在三者中明显较高, 可达 $35.70\% \sim$

93.65% , 而大暴雨中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 输出通量在 NPK、RSD 和 CK 处理下分别可高达 51.25% 、 50.62% 和 58.86% , 其比重超过 $\text{NO}_3^- \text{-N}$, 而 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 比重最小, 约 $0.06\% \sim 1.23\%$. 3 种不同强度降雨下, 壤中流径流量与产流历时相关性不明显, 暴雨的产流历时为 380 min , 而壤中流径流量只有 $0.028 \sim 0.064 \text{ m}^3$, 而产流历时仅为 80 min 的大暴雨下壤中流径流量达 $1.56 \sim 3.04 \text{ m}^3$, 此处由于降雨场次欠缺, 不足以产流历时与壤中流径流量的关系. 一定强度降雨条件以及施肥方式对于 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 而言, 能够进一步加快其随壤中流迁移, 而 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 作为氮素对水环境污染的主要成分, 减少 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的输出对于农业面源污染的防治具有一定意义.

2.4 水环境健康评价

按照权重计算公式计算出指标权重值得出表3, 进一步计算出不同强度降雨及施肥处理下地下水水质类别(表4), 从中可看出不同强度降雨及施肥处理下的地下水氮素污染存在不同程度风险. 中雨和暴雨下秸秆还田(RSD)中地下水水质类别均为 I 类, 污染风险较小, 大暴雨下 5 种施肥处理中地下水水质类别均能达到 I 类; 中雨强度农家肥(OM)、单施化肥(NPK、NP)处理下的地下水水质为 III 类, 地下水氮素污染风险较大, 同时, 暴雨下单施化肥

(NPK)与不施肥(CK)处理的地下水为V类,说明该处理为地下水带来严重氮素污染风险;而暴雨下农家肥(OM)、单施化肥(NP)处理下的地下水水质

II类,地下水氮素污染存在一定风险.暴雨下,相比NP处理(II类),NPK处理对地下水氮素污染带来的风险明显大得多(V类).

表5 不同降雨强度与施肥方式下壤中流经流量及不同形态氮输出通量变化¹⁾

Table 5 Nitrogen flux by subsurface flow under different fertilizations in different rainfall

降雨类型	产流历时 /min	施肥方式	壤中流经流量 /m ³	TN /mg·m ⁻²	DN /mg·m ⁻²	PN /mg·m ⁻²	NH ₄ ⁺ -N /mg·m ⁻²	NO ₃ ⁻ -N /mg·m ⁻²	NO ₂ ⁻ -N /mg·m ⁻²
中雨	160	CK	0.841	82.82 ^b	75.66 ^c	7.16 ^b	5.38 ^b	67.05 ^c	0.25 ^a
		NP	0.577	523.02 ^a	497.95 ^b	25.07 ^a	7.23 ^{ab}	489.79 ^b	0.32 ^a
		NPK	0.79	737.17 ^a	711.12 ^a	26.06 ^a	12.7 ^a	686.12 ^a	0.46 ^a
		OM	0.499	197.85 ^b	187.49 ^c	10.36 ^b	5.59 ^b	179.23 ^c	0.38 ^a
		RSD	0.84	91.11 ^b	90.14 ^c	0.97 ^c	6.65 ^{ab}	76.61 ^c	0.23 ^a
暴雨	380	CK	0.064	4.53 ^a	3.59 ^a	0.94 ^a	1.02 ^a	2.99 ^a	0.1 ^a
		NP	0.055	1.67 ^a	1.33 ^a	0.33 ^a	0.09 ^a	1.39 ^a	0 ^a
		NPK	0.037	7.02 ^a	3.76 ^a	3.27 ^a	0.95 ^a	3.44 ^a	0.09 ^a
		OM	0.028	6.2 ^a	5.08 ^a	1.12 ^a	0.55 ^a	5.23 ^a	0.04 ^a
		RSD	0.045	6.17 ^a	4.69 ^a	1.47 ^a	1.65 ^a	4.39 ^a	0.04 ^a
大暴雨	80	CK	1.557	119.61 ^c	99.62 ^c	83.28 ^a	70.4 ^a	42.7 ^a	0.43 ^a
		NP	2.34	280.58 ^b	232.18 ^b	82.75 ^a	108.79 ^a	164.6 ^{ab}	1.08 ^a
		NPK	2.043	180.03 ^b	178.61 ^b	99.21 ^a	92.27 ^a	80.77 ^{ab}	0.44 ^a
		OM	2.053	364.75 ^a	337.73 ^a	92.59 ^a	69.07 ^a	287.57 ^a	1.13 ^a
		RSD	3.043	239.14 ^{bc}	219.69 ^b	91.87 ^a	121.06 ^a	112.9 ^{ab}	1.69 ^a

1) a,b,c表示 $\alpha=0.05$ 显著水平

3 讨论

3.1 不同施肥壤中流氮输出差异特征

不同施肥处理下壤中流的氮素输出过程差异较明显.试验结果表明中雨强度下农家肥(OM)与农家肥-化肥配施(OMNPK),暴雨强度下OM、OMNPK与秸秆-化肥配施(RSDNPK)的氮输出过程变化较一致;而大多数施肥处理与氮素输出过程差异明显,不具明显相关性.这主要由于自然降雨的持续性变化影响氮素输出过程的稳定性,高扬等^[35]在研究降雨条件下紫色土坡耕地磷素迁移的结果也证实持续性变化的降雨更容易引起非点源土壤养分的输出.而能够保持较为一致的变化趋势,一方面由于有机肥(OM、RSD)对土壤吸附氮素的影响,安婷婷等^[36]研究表明施用有机肥有利于团聚体内0.053~0.25 mm颗粒有机物质(POM)的积累,是施用有机肥条件下黑土团聚体内碳固定的主要形式.另一方面,有机肥的施用能提高土壤C/N比,增加土壤氮素固定从而减少氮素流失^[37].不同施肥处理通过影响地表植被覆盖度,而植被能够有效减缓降雨对地表的直接冲刷,间接影响壤中流氮输出过程.氮素利用率也值得关注,有学者称氮肥利用率随施氮量的升高而降低,而损失率相应增加^[38],说明适量施肥也能有效缓解大量氮素淋失.总之,有机肥与

无机肥下氮素的输出差异是多重因素综合作用的结果,而多项研究也表明有机-无机肥配施能够有效缓解氮素淋失量^[39,40].

3.2 不同降雨条件下氮输出差异

不同降雨条件下氮输出同样具有明显的差异,3次降雨中暴雨产流历时最长,中雨次之,大暴雨最短,说明不同产流持续时间在一定程度上影响氮素输出;不施肥(CK)处理下的氮素在各降雨强度下的通量总体为最低,但在暴雨强度下却比氮磷配施(NP)处理下的更高.中雨强度秸秆还田(RSD)处理下氮素通量较低,比CK处理下的稍高,但PN最低,只有0.97 mg·m⁻²,这可能是秸秆吸附了一定的颗粒态氮(PN)导致其通量较低,汪涛等^[41]在研究紫色土有机无机配施对硝酸盐的影响中也得出相近结果;暴雨强度NP处理下氮素通量最低,低于CK处理下的氮通量,这可能与产流历时相对较长有关,氮素在较长径流迁移过程中部分吸附在土壤中导致其通量最低;不同强度降雨各形态氮素的分布特征差异明显,这是由于降雨促使DN溶解在水中及吸附在杂质上同PN一样随壤中流迁移,迁移过程中一部分吸附在土壤上,一部分继续随壤中流迁移,并且径流使原本吸附在土壤上的部分氮素不断溶解到水中并随之迁移^[24,35].需要特别指出,大暴雨强度农家肥(OM)处理下氮输出通量最高,其中TN与

NO_3^- -N 分别高达 $364.75 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $287.57 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$,这主要是由于在高雨强下农家肥比秸秆更易被雨水冲刷,从而氮素通量明显增加. Gburek 等^[21]研究表明高淋失量是降雨、施肥、土壤等条件共同作用的结果.

3.3 氮素对地下水环境的影响

不同形态氮素随壤中流迁移的过程中,不同程度地影响地下水水质,增加地下水氮素污染风险. 中雨和暴雨下秸秆还田(RSD)中地下水类别均为 I 类,污染风险较小,大暴雨下 5 种施肥处理中地下水类别均能达到一类,这主要是由于大暴雨雨强过高,地表植被拦截雨水的能力降低,降雨初期大部分雨水快速形成地表径流,并且此时地表易形成一层阻碍雨水渗透到土壤的水膜,从而仅有少部分雨水渗入土壤形成壤中流,并且大暴雨下壤中流的产流历时相对较少,壤中流对氮素的迁移则表现为较少量,从而该地下水氮素污染风险较小. 但若大暴雨持续时间足够长,地下水氮素污染风险也随之增强. 暴雨下单施 NPK 与不施肥(CK)处理加大地下水氮素污染风险,分析结果表明,单施无机肥在降雨条件下容易对地下水造成氮素污染,而农家肥(OM)处理下的地下水氮素污染风险较秸秆还田(RSD)处理下的大,主要是由于农家肥的主要成分为动物粪便,易遭受雨水冲刷造成部分成分溶解进而污染地下水. 秸秆还田在一定雨强下能够有效防止雨水直接冲击土壤表面,一方面能减缓壤中流产流速度和减少径流量,另一方面能够有效防止土壤由雨水直接冲刷而造成水土流失进而造成地下水污染,同时也解释了中雨和暴雨下秸秆还田的地下水氮素污染风险较小. 但秸秆还田也有一定的局限性,如其养分不足以满足作物需求,这使得有机肥-无机肥配施显得更加能够满足生产需求. 朱波等^[24]和汪涛等^[41]的研究也证实了这一点,并且张云贵等^[42]的相关研究进一步解释有机-无机肥配施通过提高氮素利用效率从而能有效减缓和减少氮素淋失. 但在雨强足够大时,如大暴雨的强大冲击力足以削弱其原本微弱的固土沙能力,从而缓解污染的效果降低. 因此在降水丰富地区,有机-无机肥配施也需慎重考虑. 分析结果表明,暴雨下,NPK 处理为地下水氮素污染带来的风险明显比 NP 处理的(II 类)大得多(V 类),这说明一定降雨下钾肥可能促使氮素流失. 总之,农田施肥导致氮素淋失量增加从而加剧地下水污染,使得施肥方式的选择显得尤为重要. 有机肥对地下水氮素污染风险的影响较单施化肥以及不施肥

的低,而有机-无机肥配施在耕作制度的优化过程中能够发挥重要作用,同时亟需探索新的施肥制度以满足不断变化的农业生产环境.

4 结论

(1)不同强度降雨下,各形态氮素的输出过程呈不同幅度的波动趋势,氮素随壤中流输出主要形态为:DN 比重约 53.74%~99.21%,而“三氮”中, NO_3^- -N 比重达 35.70%~93.65%,尤其在中雨强度下可高达 84.09%~93.65%,而施有机肥能有效稳定氮素输出过程.

(2)不同降雨强度下各形态氮素输出通量各异,特别是中雨条件下 TN、DN、PN、 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 输出通量分别高达 737.17、711.12、26.06、12.70 和 $0.46 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$,而 NO_3^- -N 输出通量高达 $686.12 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$,对研究区地下水环境造成巨大污染隐患.

(3)秸秆还田能够有效缓解大量施用化肥对地下水水质污染状况,化肥配施明显加重地下水污染,而有机-无机肥配施能够减轻地下水水质污染并达到改善土壤肥力的目的.

参考文献:

- [1] Passepport E, Vidon P, Forshay K J, et al. Ecological engineering practices for the reduction of excess nitrogen in human-influenced landscapes: a guide for watershed managers [J]. *Environmental Management*, 2013, **51**(2): 392-413.
- [2] An J, Zheng F, Römkens M J, et al. The role of soil surface water regimes and raindrop impact on hillslope soil erosion and nutrient losses [J]. *Natural Hazards*, 2013, **67**(2): 411-430.
- [3] Sweeney D W, Pierzynski G M, Barnes P L. Nutrient losses in field-scale surface runoff from claypan soil receiving turkey litter and fertilizer [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, **150**(15): 19-26.
- [4] Oenema O, van Liere L, Schoumans O. Effects of lowering nitrogen and phosphorus surpluses in agriculture on the quality of groundwater and surface water in the Netherlands [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, **304**(1): 289-301.
- [5] Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, et al. Nitrate pollution of groundwater in northern China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1996, **59**(3): 223-231.
- [6] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, et al. Nitrogen cycles: past, present, and future [J]. *Biogeochemistry*, 2004, **70**(2): 153-226.
- [7] Randall G W, Vetsch J A, Huffman J R. Nitrate losses in subsurface drainage from a corn-soybean rotation as affected by time of nitrogen application and use of nitrapyrin [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, **32**(5): 1764-1772.
- [8] Kronvang B, Graesbell P, Larsen S E, et al. Diffuse nutrient

- losses in Denmark[J]. *Water Science and Technology*, 1996, **33**(4): 81-88.
- [9] 孙彭力, 王慧君. 氮素化肥的环境污染[J]. *环境污染与防治*, 1995, **17**(1): 38-41.
- [10] 朱兆良, Norse D, 孙波. 中国农业面源污染控制对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [11] Torstensson G, Aronsson H. Nitrogen leaching and crop availability in manured catch crop systems in Sweden [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, **56**(2): 139-152.
- [12] Gebel M, Halbfass S, Bürger S, *et al.* Long-term simulation of effects of energy crop cultivation on nitrogen leaching and surface water quality in Saxony/Germany[J]. *Regional Environmental Change*, 2013, **13**(2): 249-261.
- [13] 连纲, 王德建, 林静慧, 等. 太湖地区稻田土壤养分淋洗特征[J]. *应用生态学报*, 2003, **14**(11): 1879-1883.
- [14] 徐鹏, 后希康, 周丰, 等. 华北平原农田硝态氮淋溶率和淋溶负荷估计[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(11): 3173-3180.
- [15] 杨宪龙, 路永莉, 同延安, 等. 施氮和秸秆还田对小麦-玉米轮作农田硝态氮淋溶的影响[J]. *土壤学报*, 2013, **50**(3): 564-573.
- [16] 张维理, 田哲旭, 张宁, 等. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. *植物营养与肥料学报*, 1995, **1**(2): 80-87.
- [17] Gangolli S D, Van Den Brandt P A, Feron V J, *et al.* Nitrate, nitrite and N-nitroso compounds [J]. *European Journal of Pharmacology: Environmental Toxicology and Pharmacology*, 1994, **292**(1): 1-38.
- [18] Gulisa G, Czompolyova M, Cerhan J R. An ecologic study of nitrate in municipal drinking water and cancer incidence in trnava district, Slovakia[J]. *Environmental Research*, 2002, **88**(3): 182-187.
- [19] Gao Y, Yu G, Luo C, *et al.* Groundwater nitrogen pollution and assessment of its health risks: a case study of a typical village in rural-urban continuum, China [J]. *PLoS One*, 2012, **7**(4): e33982.
- [20] 黄海波, 高扬, 曹杰君, 等. 都市农业村域地下水非点源氮污染及其风险评估[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(3): 56-59.
- [21] Gburek W J, Sharpley A N. Hydrologic controls on phosphorus loss from upland agricultural watersheds [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, **27**(2): 267-277.
- [22] Vadas P A, Meisinger J J, Sikora L J, *et al.* Effect of poultry diet on phosphorus in runoff from soils amended with poultry manure and compost [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, **33**(5): 1845-1854.
- [23] Guerrero C, Faleiro M L, Pita P, *et al.* Inorganic and organic fertilization of "leeks" cultivated in pots: yield, plant mineral content and microbial quality[J]. *European Water*, 2005, **11**(12): 9-16.
- [24] 朱波, 汪涛, 况福虹, 等. 紫色土坡耕地硝酸盐淋失特征[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(3): 525-533.
- [25] 周明华, 朱波, 汪涛, 等. 紫色土坡耕地磷素流失特征及施肥方式的影响[J]. *水利学报*, 2010, **41**(11): 1374-1381.
- [26] 李崇明, 黄真理. 三峡水库入库污染负荷研究: I. 蓄水前污染负荷现状研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, **14**(5): 611-622.
- [27] 李崇明, 黄真理. 三峡水库入库污染负荷研究: II. 蓄水后污染负荷现状研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, **15**(1): 97-106.
- [28] 李仲明. 中国紫色土(上篇)[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [29] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 35-100.
- [30] Zhu B, Wang T, Kuang F H, *et al.* Measurements of nitrate leaching from a hillslope cropland in the Central Sichuan Basin, China [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, **73**(4): 1419-1426.
- [31] Gao Y, Zhu B, Zhou P, *et al.* Effects of vegetation cover on phosphorus loss from a hillslope cropland of purple soil under simulated rainfall: a case study in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, **85**(3): 263-273.
- [32] 吴钢, 蔡井伟, 付海威, 等. 模糊综合评价在大伙房水库下游水污染风险评价中应用[J]. *环境科学*, 2007, **28**(11): 2438-2441.
- [33] 郑文瑞, 王新代, 纪昆, 等. 非确定数学方法在水污染状况风险评价中的应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2003, **33**(1): 59-62.
- [34] 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 等. 不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(6): 2151-2158.
- [35] 高扬, 朱波, 王玉宽, 等. 自然和人工模拟降雨条件下紫色土坡地的磷素迁移[J]. *水土保持学报*, 2006, **20**(5): 34-37.
- [36] 安婷婷, 汪景宽, 李双异, 等. 施用有机肥对黑土团聚体有机碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(2): 369-373.
- [37] 鲁彩艳, 陈欣. 不同施肥处理土壤及不同 C/N 比有机物料中有机 N 的矿化进程[J]. *土壤通报*, 2003, **34**(4): 267-270.
- [38] 巨晓棠, 潘家荣, 刘学军, 等. 北京郊区冬小麦/夏玉米轮作体系中氮肥去向研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, **9**(3): 264-270.
- [39] Sun B, Chen D, Li Y, *et al.* Nitrogen leaching in an upland cropping system on an acid soil in subtropical China: lysimeter measurements and simulation [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, **81**(3): 291-303.
- [40] 宁建凤, 邹献中, 杨少海, 等. 有机无机氮肥配施对土壤氮淋失及油菜生长的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, **23**(11): 95-100.
- [41] 汪涛, 朱波, 况福虹, 等. 有机-无机肥配施对紫色土坡耕地氮素淋失的影响[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(4): 781-788.
- [42] 张云贵, 刘宏斌, 李志宏, 等. 长期施肥条件下华北平原农田硝态氮淋失风险的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, **11**(6): 711-716.

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