

环境科学

(HUANJING KEXUE)

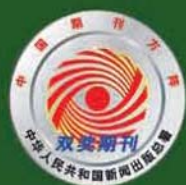
ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

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

2015 年北京市两次红色预警期间 PM _{2.5} 浓度特征	
..... 程念亮, 张大伟, 陈添, 石爱军, 孙峰, 刘保献, 邹本东, 王琴, 李倩, 王小菊, 姜磊, 孟凡 (2409)	
北京市冬季雾霾天人体呼吸高度 PM _{2.5} 变化特征对气象因素的响应	张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 段鹏程, 毛先如, 王亚龙 (2419)
兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析	李英红, 饶志国, 谭吉华, 段晋春, 马永亮, 贺克斌 (2428)
南京北郊冬季 PM _{2.5} 中芳香酸的测定及来源解析	张亚飞, 马嫣, 仝鲁, 王振, 王利朋, 朱麟 (2436)
海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响	孔亚文, 盛立芳, 刘骞, 李秀镇 (2443)
新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价	杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 高宇潇, 刘芳, 夏楠 (2453)
重庆地区大气场降水氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系	温艳茹, 王建力 (2462)
湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因素分析	
..... 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 王伟, 温学发, 胡诚, 刘诚, 刘寿东, 李旭辉 (2470)	
河水-地下水侧向交互带地球化学特征: 以重庆市马鞍溪为例	
..... 张宇, 杨平恒, 王建力, 谢世友, 陈峰, 詹兆君, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 孟元可 (2478)	
亚热带典型岩溶流水气界面 CO ₂ 交换通量变化过程及其环境影响	李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 于爽, 肖琼, 张陶 (2487)
淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱	
..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2496)	
淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 荧光光谱	
..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2506)	
华东地区某水源水中 13 种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价	
..... 金磊, 姜蕾, 韩琪, 薛佳怡, 叶辉, 曹国民, 林匡飞, 崔长征 (2515)	
北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平	张华方, 杨军, 杜鹏, 王琮淙, 李喜青 (2522)
输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险	昌盛, 赵兴茹, 付青, 郭睿, 王山军 (2530)
卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征	何明靖, 李琦, 赵佳渊, 王登祥 (2539)
岩溶地下水多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 廖昱, 江泽利, 王尊波, 梁作兵 (2547)
哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性	孙夕涵, 刘硕, 万鲁河, 王宏 (2556)
降水对泃河水质和水体微生物的影响	卢思丹, 孙寓姣, 赵轩, 王蕾, 郑丹阳 (2563)
不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对砷酸盐的响应	王振红, 张汉鹏, 罗专溪 (2570)
布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究	景瑞瑛, 杨扬, 戴玉女, 万翔, 邵义萍, 樊静静 (2577)
化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响	蔡广强, 傅学敏, 刘丽君, 卢小艳, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (2586)
活性炭负载 Co ₃ O ₄ 活化过一硫酸盐降解金橙 G	王忠明, 陈家斌, 张黎明, 李文卫, 黄天寅 (2591)
碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙 G 过程及动力学	张黎明, 陈家斌, 李文卫, 王忠明, 黄天寅 (2601)
碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素	邓飞, 唐柏彬, 张进忠, 汤民, 刘江 (2610)
铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中 AOX、色度和 TOC 的去除效果研究	
..... 舒小铭, 徐灿灿, 文晓刚, 朱静娜, 赵远, 刘锐, 陈吕军 (2618)	
Fenton 氧化去除制药企业活性污泥中 AOX 的效果研究	陈思, 徐灿灿, 刘锐, 李国华, 陈吕军, 郑伟 (2625)
中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估	刘春, 张晶, 张静, 陈晓轩, 张磊, 曹丽亚 (2632)
基于 CANON 工艺的新型 HABR 反应器生物脱氮性能研究	鲍林林, 陈婉秋 (2639)
异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究	李祥, 马航, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵, 朱强 (2646)
基于高通量测序的 ABR 厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析	
..... 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 喻徐良, 王建芳, 沈耀良 (2652)	
NUA-DAS 生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究	汪龙眠, 仇皓雨, 车昱晓, 张松贺, 郭照冰, 张毅敏 (2659)
葡萄糖生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合	程鹏飞, 王艳, 杨期勇, 汤明, 刘天中 (2666)
拉乌尔菌 sari01 的分离及其异养硝化好氧反硝化特性	颜薇芝, 郝健, 孙俊松, 史吉平 (2673)
海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌 SLWX ₂ 的筛选及脱氮特性	成钰, 李秋芬, 费聿涛, 张艳 (2681)
焦化废水活性污泥中降解硫化物细菌种群多样性分析	徐伟超, 蒙小俊, 尹莉, 张玉秀, 李海波, 曹宏斌 (2689)
浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应	戴文芳, 阳石页, 阙治家, 熊金波 (2696)
磷脂脂肪酸 (PLFA) 法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构	左易灵, 贺学礼, 王少杰, 赵丽莉 (2705)
半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应	赵慢, 王蕊, 李如剑, 杜兰兰, 吴得峰, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (2714)
三峡库区消落带 N ₂ O 排放及其影响因素	李睿, 雷利国, 江长胜, 柴雪思, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2721)
不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与 N ₂ O 排放研究	高雪梅, 余冬立, 颜晓元, 夏永秋 (2731)
冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征	易建婷, 杨雨洽, 张成, 陈宏, 赵秀兰, 木志坚 (2738)
藏东南春季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析	罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强 (2745)
基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析	宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 刘潇威, 张铁亮 (2756)
水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响	丁长欢, 王莲阁, 唐江, 慈恩, 谢德体 (2763)
减磷施肥有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳, 陈晨 (2770)
水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律	
..... 杜光辉, 饶伟, 李鑫, 张亚楠, 王代长, 杨军, 化党领, 刘世亮, 李培培, 刘红恩 (2779)	
组配改良剂对污染稻田中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 钝化效果持续性比较	
..... 吴玉俊, 周航, 杨文骏, 邹紫今, 朱维, 辜娇峰, 彭佩钦, 张平, 曾敏, 廖柏寒 (2791)	
生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制	商儒, 朱能武, 康乃馨, 石超宏 (2799)
热处理天然褐铁矿制备 γ-Fe ₂ O ₃ 及其 NH ₃ -SCR 活性探究	徐彬, 陈天虎, 刘海波, 朱承驻, 陈冬, 邹雪华, 蒋阳 (2807)
《环境科学》征订启事 (2569) 《环境科学》征稿简则 (2576) 信息 (2744, 2769, 2790)	

减磷配施有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应

韩晓飞¹, 高明^{1*}, 谢德体¹, 王子芳¹, 陈晨²

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 辽宁省发展与改革委员会农业资源区划研究所, 沈阳 110034)

摘要: 采用野外径流小区对紫色土旱坡地 2014 年雨季(5~8 月)3 次典型降雨产流进行定点监测, 研究了优化施肥(P)、优化施肥+猪粪有机肥(MP)、优化施肥+秸秆还田(SP)、优化施肥量氮磷钾均减 20%+猪粪有机肥(MDP)、优化施肥量氮磷钾均减 20%+秸秆还田(SDP)、不施磷肥(P0)等不同方案对紫色土旱坡地地表径流和壤中流磷素流失的影响。结果表明, 壤中流是雨季径流主要输出途径, 而次降雨地表径流总磷(TP)平均含量和流失负荷都远高于壤中流; 地表径流磷素流失是紫色土旱坡地雨季磷素流失主要方式。发现减磷配施有机肥对紫色土旱坡地地面径流中磷素流失有显著消减效应, SDP、MDP 分别比优化施肥 P 的总磷含量降低 57% 和 48%, 配施秸秆效果好于配施猪粪有机肥。次降雨磷素平均流失负荷为 0.01~0.26 kg·hm⁻², 磷素平均流失负荷表现为 P>MP>SP>MDP>SDP>P0。减磷配施猪粪和秸秆有机肥对土壤磷素地表径流损失具有显著消减效应, 但增加壤中流磷素淋失风险。

关键词: 减磷; 有机-无机协同施肥; 磷素流失; 地表径流; 壤中流

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2770-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.07.046

Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field

HAN Xiao-fei¹, GAO Ming^{1*}, XIE De-ti¹, WANG Zi-fang¹, CHEN Chen²

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Liaoning Provincial Development and Reform Commission, Shenyang 110034, China)

Abstract: In order to better understand the effect of reduced phosphorus fertilizer and combining organic fertilizers on phosphorus loss of purple soil sloping field, three rainfall-runoff events were monitored using field runoff observation method in the purple soil sloping field in 2014. There were six treatments in this research, including optimized fertilization (P), optimized fertilization + pig manure application (MP), optimized fertilization + straw return (SP), optimized fertilization which was reduced by 20% + pig manure application (MDP), optimized fertilization which was reduced by 20% + straw return (SDP), without phosphate (P0). The results indicated that the interflow was the main pathway of runoff for purple soil sloping field. The average contents of total phosphorus (TP) and the phosphorus loss load of overland flow were all much higher than those of the interflow. The overland flow was the main pathway of the phosphorus loss load for purple soil sloping field. Reduced phosphorus fertilizer and combining organic fertilizers had a significant reduction effect on phosphorus loss of purple soil sloping field. Compared with the treatment P, the average content of total phosphorus on SDP was reduced by 57% and that on MDP was reduced by 48% in the storm rainfall. Combining straw was better than pig manure. The average contents of the phosphorus loss load of typical rainfall changed between 0.01 and 0.26 kg·hm⁻². In different fertilization treatments, the average contents of the phosphorus loss load followed the order of P>MP>SP>MDP>SDP>P0. Reduced phosphorus fertilizer and combining organic fertilizers had a significant reduction effect on phosphorus loss of overland flow, but increased soil phosphorus leaching for purple soil sloping field.

Key words: reduced phosphorus fertilizer; combining organic and inorganic fertilizers; phosphorus loss; overland flow; interflow

磷素不仅是植物生长发育所必需的大量营养元素^[1], 也是湖泊水体富营养化关键限制性因子^[2~4]。植株所需磷主要从土壤磷库和外界施入磷肥中获得的, 磷肥容易被土壤固定而难以被植物利用, 当季利用率一般 10%~25%^[5]。为维持农业高产稳产, 每年向土壤中施加大量化学磷肥与生物有机肥, 过量施肥造成土壤耕层中磷素大量累积^[6~9], 土壤过量磷素通过地表径流、壤中流等方式进入地表水体和地下水, 造成农业面源污染^[10,11], 已经成为水体富营养化重要来源^[12]。近年来, 基于环境优化的减量施肥研究已成为众多学者关注热点^[13]。

国内外对磷素在土壤中的迁移、转化、循环及污染控制进行较多研究^[14~30], 同时土壤磷素行为与有机无机肥料协同之间关系也越来越被广大研究者所关注^[31,32], Vadas 等^[33]采用模拟降雨方法发现, 地表径流和渗漏流失是土壤表施有机肥中磷素流失的主要途径, 其中地表径流贡献较大。王涛等^[32]在

收稿日期: 2016-01-06; 修订日期: 2016-02-26

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD14B18); 国际科技合作专项项目(2013DFG92520); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2013D005)

作者简介: 韩晓飞(1984~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为农业面源污染磷素迁移转化, E-mail: hanxiaofei55@126.com

* 通讯联系人, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

滇池流域通过人工模拟降雨研究农田施用不同量水平有机肥(猪粪)对磷素流失的影响发现随着施用有机肥(猪粪)量增加,农田各形态磷素平均浓度也相应提高,两者呈显著正相关关系.我国有机肥磷流失研究大多集中在对畜禽粪便排放量、发生量的统计^[34],即使进行有机肥对水体富营养化影响研究也大多数是在实验室内针对降雨条件下土壤磷素地表径流流失特征方面的研究,田间原位条件下研究较少,尤其是野外条件下坡耕地坡面尺度壤中流和地表径流磷迁移输出的研究成果少见报道^[35-37],而磷肥减量配施不同有机肥对紫色土旱坡地原位土壤磷素流失影响还未有深入全面研究.本研究选择长江三峡地区紫色土旱坡地为对象,通过连续定位监测不同施磷水平以及磷肥减量配施不同有机肥条件下紫色土旱坡地土壤磷素流失特征,分析地表径流与壤中水流磷素在水土界面迁移特征,探讨不同有机肥对土壤磷素

流失的影响,对控制紫色土旱坡地农田土壤磷素流失产生的水体污染、制定施磷消减优化方案和评价秸秆还田、猪粪有机肥的生态效应具有重要的实践意义.

1 材料与方法

1.1 供试土壤与试验处理

试验地点设在重庆市北碚区西南大学试验农场,为农业部南方山地丘陵面源污染监测试验点之一.地处东经 106°24'20",北纬 29°48'42",属紫色丘陵区,方山浅丘坳谷地形,年均气温 18.4℃,日照 1 276.7 h,年降水 1 105.5 mm,其中 5~9 月降雨量占全年总量 70% 以上,为亚热带季风气候.土壤为侏罗纪沙溪庙组紫色泥页岩发育形成的紫色土,中性紫色土亚类,灰棕紫泥土属,长江三峡流域旱坡地多分布于此类土壤.土层较浅 60 cm 左右,中等肥力水平.土壤基本理化性质见表 1.

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil							
pH	有机质 /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	全磷 /g·kg ⁻¹	全钾 /g·kg ⁻¹	碱解氮 /g·kg ⁻¹	有效磷 /g·kg ⁻¹	速效钾 /g·kg ⁻¹
7.04	8.75	0.76	0.68	10.9	40.3	18.29	71.39

试验小区坡度 15°(紫色丘陵区坡耕地常见坡度),每个小区面积 32 m²(坡长 8 m,宽 4 m),坡向为东西方向.小区四周用砖砌成,之间用水泥墙的田埂隔开,同时每个小区底部设置径流和壤中流集流、收集装置,并连接两个独立水池,分别收集地表径流、壤中流样品.每个径流池的规格为 1.5 m×1.2 m×1.0 m,容积为 1.8 m³,池内安装自记水位计记录水位,用以计算地表径流和壤中流量.小区与水池之间由汇流沟连接,通过汇流管道将小区产生的地表径流和壤中流分别导入相对应的集水池.试验小区种植制度为紫色土旱坡地典型的“冬小麦-夏玉米”轮作模式.根据不同施肥措施设 6 个处理,3 次重复:①不施磷肥(P0);②优化施肥(P);③优化施肥+秸秆还田(SP);④优化施肥+猪粪有机肥(MP);⑤优化施肥量氮磷钾均减 20%+秸秆还田(SDP);⑥优化施肥量氮磷钾均减 20%+猪粪有机肥(MDP).优化施肥指按照当地种植夏玉米所推荐的优化施肥量(每 1 hm²施用 N、P₂O₅、K₂O 分别为 188、90、150 kg),其中全部磷肥、钾肥和 1/3 氮肥作为底肥于 2014 年 4 月 1 日施用,用木耙平整土壤且使肥料与土壤混合充分.2/3 的氮肥作为追肥分别于 2014 年 5 月 12 日和 2014 年 6

17 日施用.处理中优化施肥量氮磷钾均减 20% 是按推荐氮、磷、钾施用量相应均减少 20%.各处理所用氮、磷和钾化肥品种分别为尿素(含 N 46.4%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)、氯化钾(含 K₂O 60%).处理中 M 代表猪粪有机肥(猪粪经过一周左右腐熟),其中的大量营养元素全氮、磷、钾含量分别为 1.34%、1.3%、0.8%,施用量每年 22 500 kg·hm⁻²;S 代表秸秆还田,其中的营养元素含量折合成 N、P₂O₅、K₂O 分别为 0.49%、0.18%、0.75%,施用量每年 7 500 kg·hm⁻².有机肥作为底肥与土壤混合均匀施用.夏玉米于 2014 年 4 月 9 日移栽,株行距为 40×150 cm,8 月 7 日收获.其它田间管理按照当地传统.

1.2 样品采集与测定项目及方法

2014 年雨季 5~8 月采集每次降雨产流事件小区的径流和壤中流过程样,降雨产流结束后,测定集水池中径流和壤中流量,然后将池中水样充分混匀,用蒸馏水洗净的玻璃瓶在池中不同深度多点取混合水样 500 mL,送往实验室放入 4℃ 冰箱中保存,并与 48 h 内完成分析测定.用烘干法测定悬浮物.每次取样后都将池内水和泥沙排放清洗干净,供下次降雨备用.试验点布置虹吸式自记雨量计一个,

记录降雨量. 试验期间发生 61 次降雨事件, 总降雨量 604.5 mm. 根据降雨强度等级划分^[38], 61 次降雨事件中有中雨 6 次, 大雨 4 次, 暴雨 2 次, 其余为比较小降雨. 大部分小雨降雨事件没有径流产生, 试验期间共采集到地表径流和壤中流 10 次有效数据. 研究以雨季 3 次典型的降雨事件(5 月 10 日中雨, 降雨量 18.9 mm; 7 月 11 日暴雨, 降雨量 71.9 mm; 8 月 9 日大雨, 降雨量 42.8 mm)为重点研究对象. 水样分析指标为总磷(total phosphorus, TP)、总可溶性磷(total dissolve phosphorus, TDP)、可反应性无机磷(molybdate reaction phosphorus, MRP)、颗粒态磷(particle phosphorus, PP)、可溶性有机磷(dissolve organic phosphorus, DOP). 以上指标按照标准方法分析^[39]. TP 采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$ 消解, 钼锑抗比色法; TDP 采用真空泵 0.45 μm 滤膜过滤, $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$ 消解, 钼锑抗比色法; MRP 采用真空泵 0.45 μm 滤膜过滤, 钼锑抗比色法; $\text{PP} = \text{TP} - \text{TDP}$; $\text{DOP} = \text{TDP} - \text{MRP}$. 同时玉米收获后分别采集各小区 0 ~ 20 cm, 20 ~ 40 cm, 40 ~ 60 cm 土壤样品. 土壤基本理化性质按常规方法测定^[40].

次降雨土壤磷素流失负荷计算公式:

$$W_T = (c_{SM}q_S + c_{BM}q_B)/1\ 000$$

式中, W_T 为单次总磷流失负荷($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$); c_{SM} 、 c_{BM} 分别为小区地表径流和壤中流平均质量浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); q_S 、 q_B 分别为小区地表径流和壤中流单

位面积径流深度(mm). 采用 Microsoft Excel 2007、SPSS 17.0 进行数据处理, 均值多重比较采用 LSD 法(显著性水平 0.05).

2 结果与分析

2.1 不同施肥方式对旱坡地坡面产流、产沙的影响

由图 1 可以看出, 紫色土旱坡地雨季典型次降雨中到大雨平均径流深 10.68 ~ 52.32 mm, 泥沙量 13.58 ~ 40.20 $\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}$. 壤中流所占比例较大, 占径流 53% 以上, 是雨季径流主要输出方式, 与紫色土土壤质地疏松、孔隙度大导水率较高及下伏弱透水性母质的“岩土二元结构”^[41] 有关, 与文献[26, 42]的研究结果一致. 同一施肥方式下, 随着降雨量增大, 地表径流和壤中流亦增加. 雨季地表径流量大小呈现: 优化施肥(P) $\approx$ 不施磷肥(P0) > 优化施肥 + 秸秆还田(SP) $\approx$ 优化施肥 + 猪粪有机肥(MP) $\approx$ 优化施肥量氮磷钾均减 20% + 秸秆还田(SDP) $\approx$ 优化施肥量氮磷钾均减 20% + 猪粪有机肥(MDP) 的关系. 有机肥处理(SP、MP、SDP、MDP) 小区的地表径流量显著低于单施化肥(P、P0) 处理($P < 0.05$), 表明有机、无机肥配施能显著减少地表径流量, 主要是猪粪和秸秆与化肥长期配合施用显著降低土壤容重, 提高土壤孔隙度、土壤团聚体稳定性和土壤持水量^[43], 并且有机肥具有保护土壤而减缓雨水对土壤冲击洗刷的效应^[44].

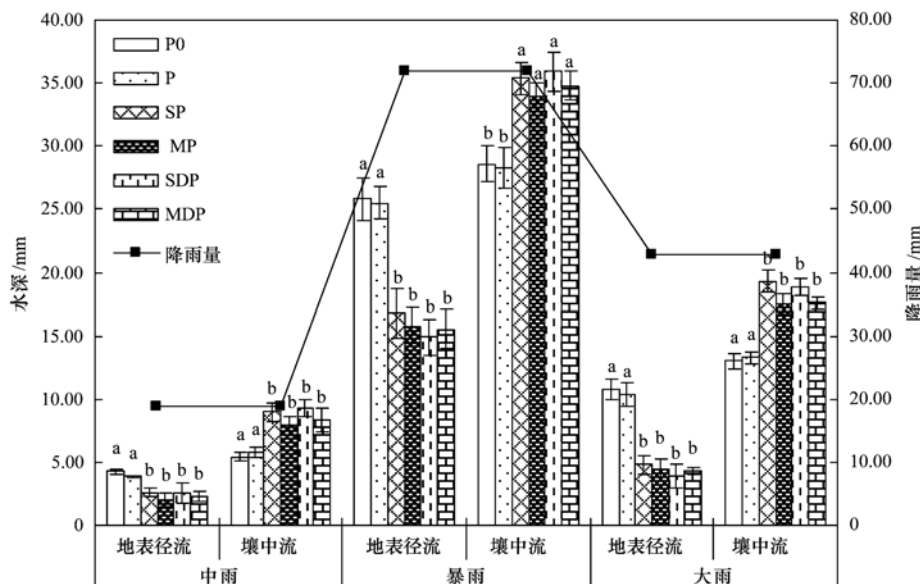


图 1 不同施肥处理紫色土旱坡地地表径流、壤中流径流变化

Fig. 1 Variation of overland flow and interflow in purple soil sloping field with different fertilization treatments

壤中流径流量大小与地表径流不同, 呈现优化施肥(P) $\approx$ 不施磷肥(P0) < 优化施肥 + 猪粪有机肥

(MP) $\approx$ 优化施肥量氮磷钾均减 20% + 猪粪有机肥(MDP) < 优化施肥 + 秸秆还田(SP) $\approx$ 优化施肥量氮

磷钾均减 20% + 秸秆还田 (SDP) 的关系。有机肥处理 (SP、MP、SDP、MDP) 小区壤中流量显著高于单施化肥 (P、P0) 处理 ($P < 0.05$), 主要是有机无机肥配施显著增加紫色土旱坡地壤中流径流量, 其中秸秆还田处理 (SP、SDP) 要比猪粪有机肥处理 (MP、MDP) 更为显著。主要是施入土壤中有机肥未完全分解 (秸

秆) 会形成多孔管道, 雨水进入孔隙管道形成优势流增加壤中流量。中、大、暴雨处理小区的产沙量可以看出 (图 2), 含有有机肥处理 (SP、MP、SDP、MDP) 产沙量要显著低于单施化肥 (P、P0) 处理, 主要是施入土壤中秸秆和猪粪有机肥增加土表粗糙度, 有效降低雨滴对表土的击溅, 具有良好的控蚀功能。

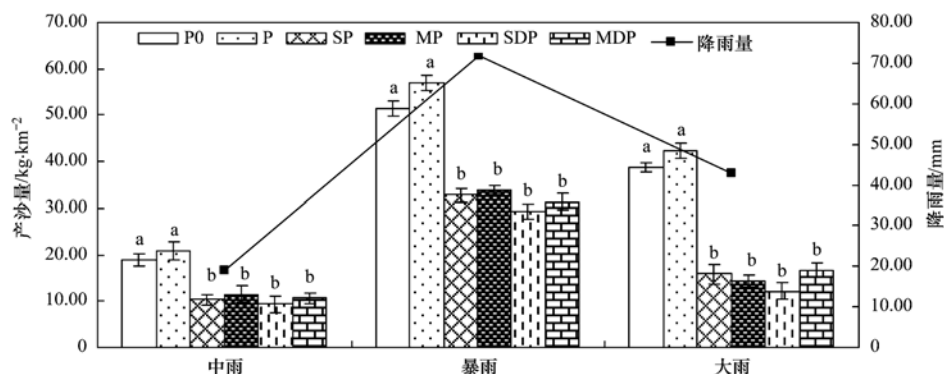


图 2 不同施肥处理紫色土旱坡地径流产沙量变化

Fig. 2 Variation of sediment yield in purple soil sloping field with different fertilization treatments

2.2 不同施肥方式对紫色土旱坡地坡面径流和壤中流磷素含量的影响

紫色土旱坡地地表径流和壤中流中磷素含量受化肥施用量及秸秆还田和猪粪有机肥影响 (表 2), 同样条件下, 单施化肥处理中地表径流不同形态磷素含量要高于其他处理, TP 含量最高达到 $1.490 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 显著高于其他施肥处理 ($P < 0.05$)。同时磷肥施用量的不同形态磷素含量高于施用量小的。6 个处理地表径流中 TP 含量大小呈现出优化施肥 (P) > 优化施肥 + 猪粪有机肥 (MP) > 优化施肥 + 秸秆还田 (SP) > 优化施肥量氮磷钾均减 20% + 猪粪有机肥 (MDP) > 优化施肥量氮磷钾均减 20% + 秸秆还田 (SDP) > 不施磷肥 (P0)。从结果可以看出, 在暴雨条件下 SDP、MDP 分别比 P 总磷含量降低 57% 和 48%, 说明减磷配施有机肥对紫色土旱坡地坡面径流中磷素流失有显著消减效应, 配施秸秆比配施猪粪有机肥效果要好一些, 与龚蓉等^[13]在中南丘陵旱地上和周明华等^[26]在四川紫色土上的研究相一致。从壤中流不同形态磷素含量来看, 同样条件下配施有机肥的壤中流中磷素含量要高于其他单施化肥, TP 含量最高达到 $0.060 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 显著高于其他施肥 ($P < 0.05$)。同时磷肥施用量的处理磷素含量高于施用量小。壤中流中 TP 含量呈现出优化施肥 + 猪粪有机肥 (MP) > 优化施肥 + 秸秆还田 (SP) > 优化施肥 (P) > 优化施肥量氮磷钾均减 20% + 猪粪有机肥 (MDP) > 优化施肥量氮磷钾均减 20% + 秸

秆还田 (SDP) > 不施磷肥 (P0)。TDP 表现为相同趋势。从结果可以看出, 磷肥施用量增大和配施秸秆和猪粪有机肥提高紫色土旱坡地土壤磷素淋失风险, 与胡宏祥等^[29]在黄褐土上研究结果一致。

从图 3 中可以看出, 不同施肥方式地表径流中 PP 在 TP 中所占质量分数都要高于 TDP, 均值达到 70% 以上, 说明在紫色土旱坡地磷素地表径流流失主要形态以颗粒态磷为主。

图 4 中可以看出壤中流 DOP 平均占 TDP 60% 以上, 是紫色土旱坡地磷素壤中流流失主要形态。

2.3 地表径流和壤中流耦合对紫色土旱坡地磷素流失的影响

通过野外定点试验研究紫色土坡耕地雨季典型的降雨事件 (中雨、大雨、暴雨), 得出不同施肥方式下磷素流失负荷, 结果表明减磷配施有机肥对紫色土旱坡地磷素流失有显著影响 ($P < 0.05$) (表 3)。雨季典型次降雨磷素平均流失负荷 $0.01 \sim 0.26 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不同施肥处理, 典型次降雨磷素平均流失负荷大小呈现出优化施肥 (P) > 优化施肥 + 猪粪有机肥 (MP) > 优化施肥 + 秸秆还田 (SP) > 优化施肥量氮磷钾均减 20% + 猪粪有机肥 (MDP) > 优化施肥量氮磷钾均减 20% + 秸秆还田 (SDP) > 不施磷肥 (P0)。暴雨条件下单施化肥的磷素流失负荷显著高于其它减磷配施有机肥 ($P < 0.05$)。

地表径流磷素流失占平均磷素流失负荷 90% 以上, 是紫色土旱坡地雨季磷素流失主要途径。壤

表 2 不同施肥方式地表径流和壤中流各形态磷含量¹⁾/mg·L⁻¹

Table 2 Content of all the other forms of phosphorus in overland flow and interflow with different fertilization treatments/mg·L⁻¹

降雨强度	处理	地表径流磷素平均含量			壤中流磷素平均含量			
		TP	TDP	PP	TP	TDP	DOP	MRP
中雨(18.9 mm)	P0	0.170 ± 0.030d	0.049 ± 0.011d	0.121 ± 0.010d	0.009 ± 0.001c	0.007 ± 0.001c	0.004 ± 0.000c	0.003 ± 0.000b
	SDP	0.430 ± 0.120c	0.116 ± 0.030c	0.314 ± 0.031c	0.025 ± 0.002b	0.016 ± 0.000b	0.013 ± 0.001b	0.003 ± 0.000b
	MDP	0.460 ± 0.230c	0.115 ± 0.021c	0.345 ± 0.020c	0.027 ± 0.004b	0.019 ± 0.001b	0.013 ± 0.001b	0.007 ± 0.000a
	P	0.790 ± 0.160a	0.190 ± 0.030a	0.600 ± 0.009a	0.029 ± 0.000b	0.019 ± 0.000b	0.012 ± 0.001b	0.007 ± 0.001a
	SP	0.550 ± 0.130b	0.127 ± 0.040c	0.424 ± 0.022b	0.036 ± 0.004a	0.024 ± 0.002a	0.017 ± 0.002a	0.007 ± 0.001a
	MP	0.610 ± 0.110b	0.165 ± 0.012b	0.445 ± 0.023b	0.038 ± 0.001a	0.024 ± 0.001a	0.018 ± 0.001a	0.006 ± 0.002a
大雨(42.8 mm)	P0	0.210 ± 0.050e	0.046 ± 0.020c	0.164 ± 0.011d	0.007 ± 0.001d	0.005 ± 0.000d	0.003 ± 0.000c	0.002 ± 0.000c
	SDP	0.430 ± 0.130d	0.006 ± 0.030d	0.424 ± 0.070c	0.028 ± 0.004c	0.020 ± 0.001c	0.014 ± 0.001b	0.006 ± 0.001b
	MDP	0.660 ± 0.150c	0.139 ± 0.050b	0.521 ± 0.040c	0.030 ± 0.001bc	0.024 ± 0.003bc	0.016 ± 0.000b	0.008 ± 0.002b
	P	1.120 ± 0.330a	0.168 ± 0.022a	0.952 ± 0.110a	0.038 ± 0.004b	0.029 ± 0.005b	0.017 ± 0.003ab	0.011 ± 0.003ab
	SP	0.840 ± 0.310b	0.160 ± 0.040a	0.680 ± 0.037b	0.048 ± 0.005a	0.032 ± 0.001b	0.023 ± 0.001a	0.009 ± 0.001b
	MP	0.960 ± 0.230b	0.163 ± 0.030a	0.797 ± 0.063b	0.051 ± 0.002a	0.041 ± 0.003a	0.029 ± 0.003a	0.013 ± 0.003a
暴雨(71.9 mm)	P0	0.170 ± 0.150d	0.027 ± 0.001c	0.143 ± 0.050d	0.008 ± 0.000d	0.005 ± 0.002d	0.004 ± 0.000d	0.002 ± 0.000c
	SDP	0.640 ± 0.060c	0.077 ± 0.016c	0.563 ± 0.050c	0.032 ± 0.001c	0.022 ± 0.004c	0.016 ± 0.001c	0.005 ± 0.001b
	MDP	0.770 ± 0.140c	0.131 ± 0.045b	0.639 ± 0.039c	0.035 ± 0.000c	0.022 ± 0.001c	0.016 ± 0.002c	0.006 ± 0.000b
	P	1.490 ± 0.440a	0.224 ± 0.051a	1.267 ± 0.331a	0.040 ± 0.001b	0.030 ± 0.001b	0.024 ± 0.002b	0.006 ± 0.001b
	SP	0.930 ± 0.070b	0.121 ± 0.010b	0.809 ± 0.070b	0.052 ± 0.002a	0.042 ± 0.005a	0.035 ± 0.002a	0.006 ± 0.000b
	MP	1.090 ± 0.070b	0.109 ± 0.031b	0.981 ± 0.121b	0.060 ± 0.003a	0.042 ± 0.007a	0.033 ± 0.001a	0.009 ± 0.001a

1) 同列相同雨强条件下不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

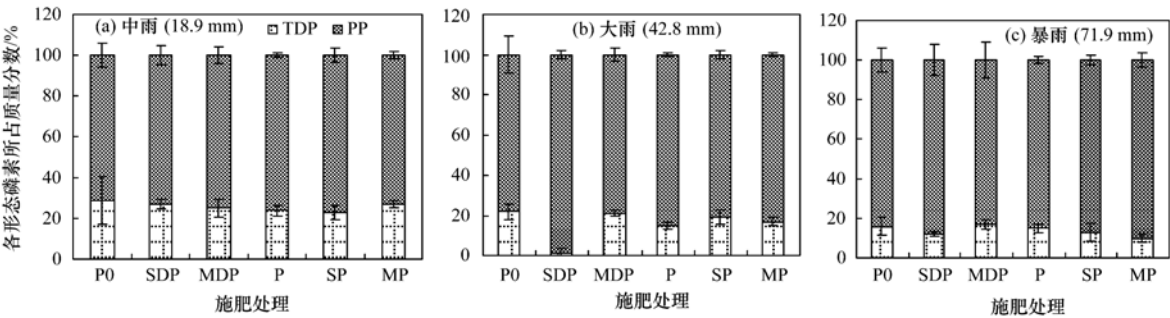


图 3 雨季典型降雨地表径流中各形态磷所占质量分数

Fig. 3 Mass fraction of different forms of phosphorus in typical overland flow during rainy season

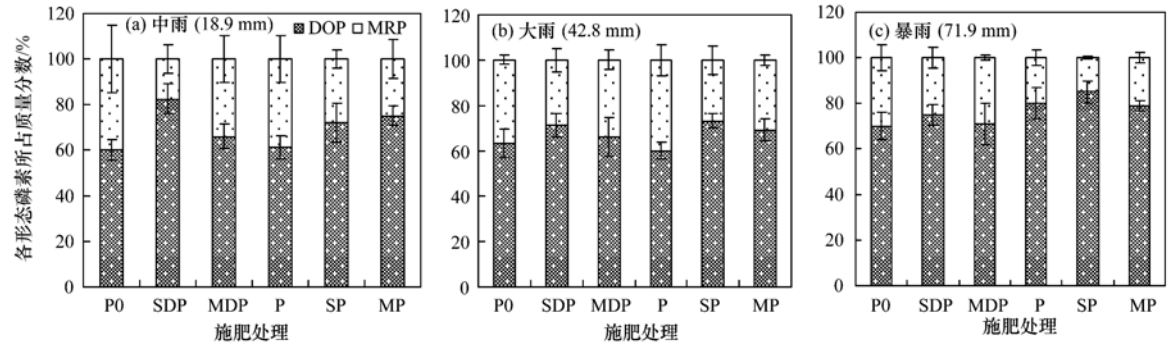


图 4 雨季典型降雨壤中流中各形态磷所占质量分数

Fig. 4 Mass fraction of different forms of phosphorus in typical interflow during rainy season

中流存在于土壤剖面中,其磷素流失环境效应不容忽视. 秸秆还田和猪粪有机肥配施无机化肥对地表径流磷流失有很好控制作用,但对壤中流磷流失起

到促进作用. 因此,在满足作物生长发育营养需求同时,秸秆及猪粪有机肥和化学磷肥配比对降低土壤磷素流失机制值得进一步地研究.

2.4 不同施肥方式对紫色土旱坡地剖面土壤全磷、有效磷含量的影响

表 4 所示,玉米收获后不同施肥处理土壤中的全磷和有效磷含量也存在一定的差异,不同处理不同层次之间的差异程度也不尽相同. 0 ~ 20 cm 土层,土壤全磷含量大小是,优化施肥 + 猪粪有机肥 (MP = 0.73 g·kg⁻¹) > 优化施肥 + 秸秆还田 (SP = 0.71 g·kg⁻¹) ≈ 优化施肥量氮磷钾均减 20% + 猪粪有机肥 (MDP = 0.71 g·kg⁻¹) > 优化

施肥 (P = 0.69 g·kg⁻¹) > 优化施肥量氮磷钾均减 20% + 秸秆还田 (SDP = 0.65 g·kg⁻¹) > 不施磷肥 (P0 = 0.59 g·kg⁻¹). 其中 MDP、MP、SP、P 之间差异不显著,P 与 SDP 之间差异也不显著 (P < 0.05). 但是 SDP 与 SP 处理之间差异显著,且施肥处理与不施磷肥处理之间差异均达到显著水平 (P < 0.05). 在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层,土壤各处理之间全磷含量变化不大,基本没有显著性差异.

表 3 不同施肥方式下雨季典型次降雨磷素流失负荷/kg·hm⁻²

Table 3 Phosphorus loss load of typical rainfall in different fertilization treatments/kg·hm⁻²

降雨强度	处理	地表径流失负荷	壤中流流失负荷	总流失负荷
中雨 (18.9 mm)	P0	0.01 ± 0.00b	0.00 ± 0.00b	0.01 ± 0.00b
	SDP	0.02 ± 0.00b	0.00 ± 0.00b	0.02 ± 0.00b
	MDP	0.02 ± 0.00b	0.00 ± 0.00b	0.02 ± 0.00b
	P	0.05 ± 0.00a	0.00 ± 0.00b	0.05 ± 0.00a
	SP	0.04 ± 0.00a	0.00 ± 0.00b	0.04 ± 0.00a
	MP	0.04 ± 0.00a	0.01 ± 0.00a	0.05 ± 0.00a
大雨 (42.8 mm)	P0	0.02 ± 0.00d	0.00 ± 0.00c	0.02 ± 0.00c
	SDP	0.03 ± 0.00c	0.00 ± 0.00c	0.03 ± 0.01bc
	MDP	0.03 ± 0.00c	0.01 ± 0.00b	0.04 ± 0.00b
	P	0.05 ± 0.01a	0.01 ± 0.00b	0.06 ± 0.00a
	SP	0.04 ± 0.00b	0.01 ± 0.00b	0.04 ± 0.00b
	MP	0.04 ± 0.01b	0.02 ± 0.00a	0.05 ± 0.00ab
暴雨 (71.9 mm)	P0	0.04 ± 0.00d	0.01 ± 0.00c	0.05 ± 0.01d
	SDP	0.13 ± 0.03c	0.01 ± 0.00c	0.14 ± 0.01c
	MDP	0.14 ± 0.01c	0.02 ± 0.00b	0.16 ± 0.02c
	P	0.24 ± 0.03a	0.02 ± 0.00b	0.26 ± 0.05a
	SP	0.16 ± 0.02b	0.03 ± 0.00ab	0.19 ± 0.03bc
	MP	0.17 ± 0.02b	0.05 ± 0.00a	0.22 ± 0.04b

表 4 不同处理不同层次土壤全磷、有效磷含量

Table 4 Total phosphorus and available phosphorous of different soil depth in different fertilization treatments

处理	全磷/g·kg ⁻¹			有效磷/mg·kg ⁻¹		
	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm
P0	0.59 ± 0.01c	0.58 ± 0.01b	0.60 ± 0.02a	10.31 ± 0.39c	8.38 ± 0.23c	7.11 ± 0.31c
SDP	0.65 ± 0.02b	0.60 ± 0.03ab	0.63 ± 0.07a	19.81 ± 0.82ab	14.63 ± 0.76ab	9.98 ± 0.29b
MDP	0.71 ± 0.02a	0.64 ± 0.01a	0.65 ± 0.01a	20.55 ± 0.94ab	15.39 ± 1.32a	10.06 ± 0.50ab
P	0.69 ± 0.03ab	0.65 ± 0.01a	0.66 ± 0.01a	19.14 ± 1.13b	13.01 ± 0.82b	11.08 ± 1.02a
SP	0.71 ± 0.01a	0.62 ± 0.02a	0.61 ± 0.04a	21.34 ± 1.32a	15.89 ± 1.63a	11.38 ± 1.14a
MP	0.73 ± 0.01a	0.67 ± 0.01a	0.62 ± 0.07a	22.71 ± 1.03a	16.45 ± 1.87a	12.15 ± 1.09a

各处理之间有效磷含量也差异明显. 首先,各施肥处理各层土壤有效磷均高于不施磷处理. 0 ~ 20 cm 土层,优化施肥 + 猪粪有机肥 (MP) 处理的土壤中速效磷含量最高,达到了 22.71 mg·kg⁻¹,不施磷肥处理的速效磷含量最低仅为 10.31 mg·kg⁻¹. 优化施肥 + 秸秆还田 (SP) 处理的土壤中有有效磷的含量也达到了 21.34 mg·kg⁻¹. 即使优化施肥量氮磷钾均减 20% + 秸秆还田 (SDP) 和优化施肥量氮

磷钾均减 20% + 猪粪有机肥 (MDP) 处理土壤中有有效磷含量也都高于优化施肥 (P) 处理. 20 ~ 40 cm 土层,优化施肥 + 猪粪有机肥 (MP)、优化施肥 + 秸秆还田 (SP)、优化施肥量氮磷钾均减 20% + 猪粪有机肥 (MDP) 与优化施肥 (P) 处理之间有效磷含量达到了显著性差异水平 (P < 0.05). 40 ~ 60 cm 土层,优化施肥量氮磷钾均减 20% + 秸秆还田 (SDP) 与优化施肥 + 猪粪有机肥 (MP)、优化施肥 + 秸秆

还田(SP)和优化施肥(P)处理间差异显著($P < 0.05$)。以上结果说明猪粪有机肥和秸秆还田对土壤中磷素有一定的活化作用,促进了磷素在土壤中的迁移,且猪粪有机肥对土壤磷素活化作用更强。

3 讨论

我国丘陵山区现有旱坡地2 400万 hm^2 ,占全国耕地面积19.7%^[45]。随着旱坡地利用强度加大,农田化肥施用量显著增加,引起的水土流失和农业面源污染问题受到了人们广泛关注^[46]。坡面磷素迁移受到诸如土壤性质、气候条件、施肥方式和施肥量、土地利用类型等因素影响^[47~49]。施肥是影响坡耕地土壤磷素流失重要因素。本文主要研究化学磷肥不同施用量及减量化肥配施不同有机肥对紫色土旱坡地土壤磷素流失的消减效应。研究结果表明,同等条件下化学磷肥减量可以降低紫色土旱坡地径流以及壤中流水中磷素含量,减少磷素流失。龚蓉等^[13]在研究中南丘陵旱地磷肥减量对不同形态磷素养分淋失的影响中指出,磷肥减量10%~30%后渗漏水中总磷及可溶性渗漏淋失量均显著减少。胡宏祥等^[29]在秸秆还田配施化肥对黄褐土氮磷淋失、Wang等^[50]在秸秆配施化肥对稻田土壤中氮磷淋失等研究都得出类似结论。

研究结果表明,减磷配施猪粪和秸秆有机肥对土壤磷素地表径流损失具有一定消减效应,主要是有机肥保护土壤而减缓雨水对土壤的冲击洗刷效应。田雁飞等^[51]、赵庆雷等^[52]研究发现,水稻减量化肥配施有机肥与常量NPK施肥相比,配施有机肥处理由于有机物循环利用明显提高土壤磷素活化度,改善土壤磷素供肥特性,促进水稻对磷吸收利用,降低磷素流失风险,且环境效益可观。李学平等^[53]研究表明,秸秆与磷肥配合施用是减少稻田磷素流失较好措施。虽然有机肥对地表径流磷素流失有一定控制作用,但按照农民习惯全量施用化肥之后再大量施用有机肥的方式,遇到一定强度雨水,可能会引起磷素迁移入水体,加剧水体富营养化程度^[32]。习斌等^[54]在研究有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响中,发现在等氮量条件下,有机肥施入会给农田土壤带来大量磷素累积。胡宏祥等^[29]发现实行秸秆还田会增大土壤中活性磷素淋失,提高土壤磷素淋失风险。本研究结果表明,猪粪有机肥和秸秆还田对土壤磷素壤中淋溶流失具有一定促进作用,且猪粪作用比秸秆作用要大,主要是猪粪和秸秆与化肥配合施用促进5~0.5 mm水稳

性团聚体形成和提高土壤团聚体稳定性,并且降低土壤容重和土粒密度,提高土壤中孔隙度^[43],有利于土壤中优势流形成,使得可溶性磷肥随优势流有向下层迁移的风险。再者,部分学者认为施用有机肥料提高磷素活性是有机肥影响土壤磷的吸附解吸作用。有机无机肥配施模式下,有机肥在分解作用下产生有机酸,有机酸与磷酸根之间竞争吸附降低土壤矿物仅仅对磷酸根的吸附,同时有机酸根离子与土壤中金属离子可以发生络合反应,在一定程度上屏蔽掉土壤磷的吸附位点,导致磷素在土壤中迁移变得相对容易。李想等^[31]研究有机无机肥配合对土壤磷素吸附、解吸和迁移的影响,发现有机无机肥配施可以减少土壤对磷的固定,促进磷素在土体中迁移。另外研究表明^[55],某些有机物料施入土壤后,土壤磷素与其有机质功能团(如羟基)等发生螯合作用,降低磷素在土壤溶液中的迁移能力。李同杰等^[56]研究磷在棕壤中淋溶迁移特征就发现秸秆与磷肥配合施用减少磷素向下层迁移,江永红等^[57]研究表明秸秆还田后一般会发生固磷现象。是否因为秸秆施入土壤中发生了类似的化学变化过程导致对土壤磷素活化迁移作用比猪粪作用弱,还需要进一步研究。根据植物需肥特征和土壤供肥规律,施行有机-无机协同施肥模式既能降低生产成本又能保护环境,因此研究土壤磷素行为与有机-无机肥料协同之间的关系具有重要意义。此外,有机-无机肥料施用最佳合理配比尚需深入研究。

紫色土旱坡地土壤结构特点也是造成容易发生壤中流重要原因,紫色土由紫色页岩发育而成,土壤孔隙大、质地疏松,渗透能力强,是一种侵蚀型高生产力的“岩土二元结构体”^[41],致使坡耕地壤中流发育,容易形成较大流量壤中流。研究表明,紫色土旱坡地壤中流比地表径流所占比例要大,占径流53%以上,是紫色土旱坡地雨季径流主要输出方式。朱波等^[58]研究发现紫色土旱坡地常规施肥下壤中流流量达到 (121.46 ± 5.59) mm,占径流60%以上。因此控制磷素流失首先要控制水土侵蚀,在平衡配施有机肥同时注意采取增厚土层、提升土壤有机质等综合治理措施。

4 结论

(1)紫色土旱坡地地表径流和壤中流受降雨强度影响,雨季典型次降雨中到大雨平均径流深10.68~52.32 mm,泥沙量13.58~40.20 $\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$ 。壤中流占径流53%以上,是紫色土旱坡地雨季径流

主要输出方式。

(2) 减磷配施有机肥对紫色土旱坡地地表径流和壤中流磷素含量影响显著。地表径流中 TP 呈现出优化施肥(P) > 优化施肥 + 猪粪有机肥(MP) > 优化施肥 + 秸秆还田(SP) > 优化施肥量氮磷钾均减 20% + 猪粪有机肥(MDP) > 优化施肥量氮磷钾均减 20% + 秸秆还田(SDP) > 不施磷肥(P0); 壤中流中 TP 呈现出优化施肥 + 猪粪有机肥(MP) > 优化施肥 + 秸秆还田(SP) > 优化施肥(P) > 优化施肥量氮磷钾均减 20% + 猪粪有机肥(MDP) > 优化施肥量氮磷钾均减 20% + 秸秆还田(SDP) > 不施磷肥(P0)。TDP 表现为相同趋势。磷素地表径流流失主要形态以颗粒态磷为主, 占 70% 以上; 壤中流磷素流失形态以 DOP 为主。

(3) 紫色土旱坡地雨季典型次降雨磷素平均流失负荷 $0.01 \sim 0.26 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。地表径流磷素流失占总磷素流失负荷 90% 以上, 是紫色土旱坡地雨季磷素流失主要途径。减磷配施猪粪和秸秆有机肥对土壤磷素地表径流损失具有显著消减效应, 但对壤中流磷素淋失有一定促进作用。

参考文献:

- [1] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 169-175.
- [2] Haygarth P M, Sharpley A N. Terminology for phosphorus transfer[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, **29**(1): 10-15.
- [3] 甄兰, 廖文华, 刘建玲. 磷在土壤环境中的迁移及其在水环境中的农业非点源污染研究[J]. *河北农业大学学报*, 2002, **25**(S): 55-59.
- [4] 张乃明, 洪波, 张玉娟. 农田土壤磷素非点源污染研究进展[J]. *云南农业大学学报*, 2004, **19**(4): 453-456, 465.
- [5] Pavinato P S, Merlin A, Rosolem C A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, **105**(1): 149-155.
- [6] 王新民, 侯彦林. 有机物料对石灰性土壤磷素形态转化及吸附特性的影响研究[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(3): 440-443.
- [7] 颜晓, 王德建, 张刚, 等. 长期施磷的产量效应及其环境风险评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3205-3210.
- [8] 戚瑞生, 党廷辉, 杨绍琼, 等. 长期轮作与施肥对农田土壤磷素形态和吸附特性的影响[J]. *土壤学报*, 2012, **49**(6): 1136-1146.
- [9] Zheng Z M, Simard R R, Lafond J, et al. Changes in phosphorus fractions of a Humic Gleysol as influenced by cropping systems and nutrient sources[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2001, **81**(2): 175-183.
- [10] Hendricks N P, Sinnathamby S, Douglas-Mankin K, et al. The environmental effects of crop price increases: nitrogen losses in the U. S. Corn Belt[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2014, **68**(3): 507-526.
- [11] McDowell R W. Minimising phosphorus losses from the soil matrix[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2012, **23**(6): 860-865.
- [12] 毛战坡, 杨素珍, 王亮, 等. 磷素在河流生态系统中滞留的研究进展[J]. *水利学报*, 2015, **46**(5): 515-524.
- [13] 龚蓉, 刘强, 荣湘民, 等. 中南丘陵旱地磷肥减量对不同形态磷素养分淋失的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, **29**(5): 106-110.
- [14] 袁东海, 王兆骞, 陈欣, 等. 红壤小流域不同利用方式氮磷流失特征研究[J]. *生态学报*, 2003, **23**(1): 188-198.
- [15] 杨皓宇, 赵小蓉, 曾祥忠, 等. 不同农作制对四川紫色丘陵区地表径流氮、磷流失的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(6): 2344-2348.
- [16] 黄利玲, 王子芳, 高明, 等. 三峡库区紫色土旱坡地不同坡度土壤磷素流失特征研究[J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(1): 30-33.
- [17] 高超, 张桃林, 吴蔚东. 农田土壤中的磷向水体释放的风险评价[J]. *环境科学学报*, 2001, **21**(3): 344-348.
- [18] 李庆召, 王定勇, 朱波. 自然降雨条件下紫色土区磷素的非点源输出规律[J]. *农业环境科学学报*, 2005, **23**(6): 1050-1052.
- [19] 王建国, 杨林章, 单艳红, 等. 长期施肥条件下水稻土磷素分布特征及对水环境的污染风险[J]. *生态与农村环境学报*, 2006, **22**(3): 88-92.
- [20] 田娟, 刘凌, 丁海山, 等. 淹水土壤土-水界面磷素迁移转化研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(7): 1818-1823.
- [21] 刘方, 罗海波, 舒英格, 等. 黄壤旱地-水系统中磷释放及影响因素的研究[J]. *中国农业科学*, 2006, **39**(1): 118-124.
- [22] 庄远红, 吴一群, 李延. 有机无机磷肥配施对蔬菜地土壤磷素淋失的影响[J]. *土壤*, 2007, **39**(6): 905-909.
- [23] 李学平, 孙燕, 石孝均. 紫色土稻田磷素淋失特征及其对地下水的影响[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(9): 1832-1838.
- [24] 蒋锐, 朱波, 唐家良, 等. 紫色丘陵区典型小流域暴雨径流氮磷迁移过程与通量[J]. *水利学报*, 2009, **40**(6): 659-666.
- [25] 李学平, 石孝均. 模拟条件下农田磷素渗漏淋失特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(3): 32-36.
- [26] 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.
- [27] 曹雪艳, 李永梅, 张怀志, 等. 滇池流域原位模拟降雨条件下不同土壤质地磷素流失差异研究[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(3): 13-17.
- [28] 秦伟, 陆欢欢, 王芳, 等. 太湖流域典型农田系统土壤中磷的流失[J]. *江苏农业科学*, 2012, **40**(6): 321-323.
- [29] 胡宏祥, 汪玉芳, 陈祝, 等. 秸秆还田配施化肥对黄褐土氮磷淋失的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, **29**(5): 101-105.
- [30] 叶玉适, 梁新强, 李亮, 等. 不同水肥管理对太湖流域稻田磷素径流和渗漏损失的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(4): 1125-1135.
- [31] 李想, 刘艳霞, 刘益仁, 等. 有机无机肥配合对土壤磷素吸

- 附、解吸和迁移特性的影响[J]. 核农学报, 2013, **27**(2): 253-259.
- [32] 王涛, 张维理, 张怀志. 滇池流域人工模拟降雨条件下农田施用有机肥对磷素流失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, **14**(6): 1092-1097.
- [33] Vadas P A, Haggard B E, Gburek W J. Predicting dissolved phosphorus in runoff from manured field plots[J]. Journal of Environmental Quality, 2005, **34**(4): 1347-1353.
- [34] 武淑霞. 我国农村畜禽养殖业氮磷排放变化特征及其对农业面源污染的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2005.
- [35] 郭智, 周炜, 陈留根, 等. 施用猪粪有机肥对稻麦两熟农田稻季养分径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(6): 21-25.
- [36] 张英鹏, 于仁起, 孙明, 等. 不同施磷量对山东三大土类磷有效性及磷素淋溶风险的影响[J]. 土壤通报, 2009, **40**(6): 1367-1370.
- [37] 吴家森, 陈闻, 姜培坤, 等. 不同施肥对雷竹林土壤氮、磷渗漏流失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(2): 33-37, 44.
- [38] 范兴科, 吴普特, 冯浩. 暴雨的判定方法和评价指标[J]. 中国水土保持科学, 2003, **1**(3): 72-75.
- [39] 谢贤群, 王立军. 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法-水环境要素观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [40] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 141-149.
- [41] 陈晓燕, 牛青霞, 周继, 等. 人工模拟降雨条件下紫色土陡坡地土壤颗粒分布空间变异特征[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(5): 163-168.
- [42] 刘刚才, 林三益, 刘淑珍. 四川丘陵区常规耕作制下紫色土径流发生特征及其表面流数值模拟[J]. 水利学报, 2002, **33**(12): 101-108.
- [43] 聂军, 郑圣先, 杨曾平, 等. 长期施用化肥、猪粪和稻草对红壤性水稻土物理性质的影响[J]. 中国农业科学, 2010, **43**(7): 1404-1413.
- [44] 潘根兴, 焦少俊, 李恋卿, 等. 低施磷水平下不同施肥对太湖地区黄泥土磷迁移性的影响[J]. 环境科学, 2003, **24**(3): 91-95.
- [45] 郑海金, 王辉文, 杨洁, 等. 地表径流和壤中流对坡耕地氮磷流失影响研究概述[J]. 中国水土保持, 2015, (2): 36-39.
- [46] 水利部, 中国科学院, 中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全: 南方红壤区卷[M]. 北京: 科学出版社, 2010. 21-147.
- [47] 李裕元. 坡地磷素迁移研究进展[J]. 水土保持研究, 2006, **13**(5): 1-4.
- [48] 杨茜, 蒋珍茂, 石艳, 等. 低分子量有机酸对三峡库区消落带典型土壤磷素淋溶迁移的影响[J]. 水土保持学报, 2015, **29**(1): 126-131.
- [49] 李宗新, 董树亭, 王空军, 等. 不同施肥条件下玉米田土壤养分淋溶规律的原位研究[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(1): 65-70.
- [50] Wang J, Wang D J, Zhang G, *et al.* Nitrogen and phosphorus leaching losses from intensively managed paddy fields with straw retention[J]. Agricultural Water Management, 2014, **141**: 66-73.
- [51] 田雁飞, 马友华, 褚进华, 等. 水稻减量化施肥与氨基酸水溶性肥配施效果研究[J]. 中国农学通报, 2011, **27**(15): 34-39.
- [52] 赵庆雷, 王凯荣, 马加清, 等. 长期不同施肥模式对稻田土壤磷素及水稻营养的影响[J]. 作物学报, 2009, **35**(8): 1539-1545.
- [53] 李学平, 石孝均. 紫色水稻土磷素动态特征及其环境影响研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(2): 434-439.
- [54] 习斌, 翟丽梅, 刘申, 等. 有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, **21**(2): 326-335.
- [55] Haygarth P M, Jarvis S C. Transfer of phosphorus from agricultural soil[J]. Advances in Agronomy, 1999, **66**(8): 195-249.
- [56] 李同杰, 刘晶晶, 刘春生, 等. 磷在棕壤中淋溶迁移特征研究[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(4): 35-39.
- [57] 江永红, 宇振荣, 马永良. 秸秆还田对农田生态系统及作物生长的影响[J]. 土壤通报, 2001, **32**(5): 209-213.
- [58] 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.

CONTENTS

Concentration Characteristics of PM _{2.5} in Beijing During Two Red Alert Periods	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, <i>et al.</i> (2409)
Response of Human Respiratory Height PM _{2.5} Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollutional Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City	LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (2428)
Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM _{2.5} from the Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, <i>et al.</i> (2436)
Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea	KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, <i>et al.</i> (2443)
Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang	YANG Chun, Tashpolat Tiyp, HOU Yan-jun, <i>et al.</i> (2453)
Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing	WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)
Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors	XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, <i>et al.</i> (2470)
Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing	ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, <i>et al.</i> (2478)
Variations of CO ₂ Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (2487)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; UV-Vis Spectrum	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2496)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; Fluorescence Spectra	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2506)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China	JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, <i>et al.</i> (2515)
Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing	ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, <i>et al.</i> (2522)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, <i>et al.</i> (2530)
Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River	HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, <i>et al.</i> (2539)
Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (2547)
Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin	SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, <i>et al.</i> (2556)
Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms	LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (2563)
Response of <i>Microcystis aeruginosa</i> Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes	WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)
Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands	JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-ni, <i>et al.</i> (2577)
Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine	CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, <i>et al.</i> (2586)
Activated Carbon Supported Co ₃ O ₄ Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation	WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, <i>et al.</i> (2591)
Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes	ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, <i>et al.</i> (2601)
Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrochemical Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode	DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2610)
Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dye Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process	SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, <i>et al.</i> (2618)
Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation	CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (2625)
Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2632)
Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process	BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)
Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water	LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (2646)
Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing	CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (2652)
Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter	WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, <i>et al.</i> (2659)
Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with <i>Botryococcus braunii</i> Biofilm Attached Cultivation	CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, <i>et al.</i> (2666)
Isolation of <i>Raoultella</i> sp. sarI01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics	YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, <i>et al.</i> (2673)
Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX ₂ from Sea Water	CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, <i>et al.</i> (2681)
Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater	XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, <i>et al.</i> (2689)
Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges	DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, <i>et al.</i> (2696)
Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> by Phospholipid Fatty Acid (PLFA)	ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, <i>et al.</i> (2705)
Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions	ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, <i>et al.</i> (2714)
Features and Influencing Factors of N ₂ O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2721)
Denitrification Loss and N ₂ O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments	GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (2731)
Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter	YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (2738)
Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau	LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)
Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China	SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir	DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, <i>et al.</i> (2763)
Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2770)
Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil	DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, <i>et al.</i> (2779)
Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil	WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (2791)
Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism	SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, <i>et al.</i> (2799)
Preparation of γ -Fe ₂ O ₃ Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (2807)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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7月15日 第37卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 7 Jul. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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