

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM _{2.5} 分布格局演变及其影响因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)
中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析	方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)
阳泉市秋冬季 PM _{2.5} 化学组分及来源分析	王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)
泰安市夏季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源	衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)
黄山秋季大气颗粒物理化特性	卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)
北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性	曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)
淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征	王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)
鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析	付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)
浙江省汽车整车制造行业挥发性有机物产排污系数	滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)
基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征	王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)
薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征	牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 燕莹莹, 祁士华 (1107)
精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法	叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)
2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估	施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)
中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势	庞凯莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)
京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单	韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)
在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测	王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵玺乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)
参数选取对畜禽养殖业大气氨排放的影响: 以长三角地区为例	张琪, 黄凌, 殷司徒, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)
乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析	吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)
长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征	李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)
伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素	刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹霜, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)
城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)
基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例	王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)
黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素	梁晓文, 郇田田, 王涛 (1217)
人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析	温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)
滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)
太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997~2017 年)	杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)
汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系	薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)
盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价	王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 刘向阳 (1265)
三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量	陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)
化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响	罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)
利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)
茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性	范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)
3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性	王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)
新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附	徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)
三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险	方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)
固城湖及出入湖河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估	阚可聪, 谷孝鸿, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)
衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)
北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估	张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)
基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性	马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)
PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性	王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)
中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化	付昆明, 杨宗珏, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)
抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响	代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 亮根祥, 胡双庆 (1401)
多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验	张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志成, 曹思雨 (1409)
剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响	邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)
硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响	何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)
工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析	李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)
耕地土壤重金属健康风险空间分布特征	姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)
黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析	赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)
不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响	李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)
红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征	章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)
有机肥与无机肥配施对潮土 N ₂ O 排放的影响	孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)
冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系	王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)
钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响	鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)
桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应	方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)
外源亚精胺对 As ⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响	刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩廿, 刘玉荣, 胡红青 (1505)
《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)	

化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响

罗东海¹, 王子芳¹, 龙翼², 严冬春², 徐国鑫¹, 李娇¹, 高明^{1*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要: 磷是农作物生长所必需的营养元素, 但过量磷的投入是造成水体富营养化问题的重要原因. 探究实际生产中施肥方式与磷素流失之间的关系, 为科学施肥和合理减施化肥提供理论依据. 本试验采用野外径流小区对紫色土坡耕地 2017~2018 年度多次降雨产流产沙进行定点监测, 研究了不施肥处理、常规施肥处理、优化施肥处理和减量施肥配施生物炭 4 种不同方案对紫色土坡耕地壤中流、地表径流和泥沙磷素流失的影响. 结果表明: ① 各处理的产流总量表现为: 优化 (20 737.23 L) > 常规 (18 513.17 L) > CK (18 134.58 L) > 生物炭 (13 594.85 L), 各处理的产沙总量表现为: CK (1 998 kg·hm⁻²) > 生物炭 (1 884 kg·hm⁻²) > 优化 (1 681 kg·hm⁻²) > 常规 (910 kg·hm⁻²). 壤中流是紫色土坡耕地雨季产流的主要类型, 占到总产流量的 60.14%~87.34%, 各处理的产沙总量除常规外, 其他处理不存在显著性差异 ($P > 0.05$). ② 各处理的全磷流失通量均表现为泥沙 > 地表径流 > 壤中流. 通过壤中流流失的磷素最少, 只占全磷流失通量的 2.63%~12.91%, 而泥沙磷素流失通量占比可达 63.74%~78.74%, 是紫色土坡耕地土壤磷素流失的主要输出途径. ③ 配施生物炭可以有效减少紫色土坡耕地土壤的壤中流产流量, 以及壤中流的正磷酸盐的流失通量, 较常规处理分别减少 49.94% 和 56.45%. 但是对地表径流的截留效果不佳, 对颗粒态磷的流失通量无明显影响, 同时增加了地表径流与泥沙中的全磷流失通量, 较常规处理显著增加 73.28% 和 123.53% ($P < 0.05$). 因此, 为控制西南地区紫色土坡耕地磷的流失, 应着重减少土壤泥沙流失的发生. 而生物炭在农业生产实际应用中也应进一步优化与化肥磷素投入配比.

关键词: 生物炭; 坡耕地; 磷流失; 地表径流; 壤中流

中图分类号: X52; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1286-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201909221

Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland

LUO Dong-hai¹, WANG Zi-fang¹, LONG Yi², YAN Dong-chun², XU Guo-xing¹, LI Jiao¹, GAO Ming^{1*}

(1. College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China)

Abstract: Phosphorus is an essential nutrient for crop growth, but the input of excess phosphorus is a significant cause of eutrophication. This study explored the relationship between fertilization methods and phosphorus loss in actual production, providing a theoretical basis for scientific fertilization and rational reduction of fertilizer application. In the experiment, a wild-type OD flow plot was used to monitor the occurrence of multiple rainfall runoff and sediment yield in purple soil sloping farmland in 2017-2018. Four different schemes of non-fertilizer treatment, conventional fertilization treatment, optimized fertilization treatment, and reduced fertilization combined with biochar were studied. The effects of soil flow, surface runoff, and sediment phosphorus loss on purple soil sloping farmland were analyzed. The results showed that: ① The total yield of each treatment was optimized (20 737.23 L) > conventional (18 513.17 L) > CK (18 134.58 L) > biochar (13 594.85 L), and the total sediment yield of each treatment was CK (1 998 kg·hm⁻²) > biochar (1 884 kg·hm⁻²) > optimized (1 681 kg·hm⁻²) > conventional (910 kg·hm⁻²). The middle stream of soil is the main type of runoff in the rainy season, accounting for 60.14%-87.34% of the total output flow. The total amount of sediment produced by each treatment was not significantly different from that of the conventional treatment ($P > 0.05$). ② The flux of total phosphorus loss in each treatment was characterized by sediment > surface runoff > soil middle flow. Phosphorus lost through the middle stream of soil is the least, accounting for only 2.63%-12.91% of the flux of total phosphorus loss, while the flux of sediment loss of phosphorus can reach 63.74%-78.74%, and thus is the main output route of soil phosphorus loss. ③ The application of biochar can effectively reduce the runoff flow in the soil of purple soil sloping land, and the loss flux of orthophosphate in the middle stream, which are 49.94% and 56.45% lower than the conventional treatment, respectively. However, the interception effect on surface runoff is not good, and there is no significant influence on the flux loss of particulate phosphorus. At the same time, the flux of total phosphorus in surface runoff and sediment is significantly increased by 73.28% and 123.53%, respectively, compared with conventional treatment ($P < 0.05$). Therefore, to control the loss of phosphorus in purple soil sloping farmland in southwest China, we should focus on reducing the occurrence of soil sediment loss. Bio-carbon should be further optimized in the practical application of agricultural production with the phosphorus fertilizer input ratio.

Key words: Bio-charcoal; sloping land; phosphorus loss; overland flow; runoff

收稿日期: 2019-09-24; 修订日期: 2019-10-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0800101); 重庆市技术创新与应用专项 (cstc2018jszx-zdyfcmX0014)

作者简介: 罗东海 (1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤面源污染防治, E-mail: 1030979061@qq.com

* 通信作者, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

磷是植株生长发育所必需的元素^[1],也是水体富营养化的关键性限制因子^[2]. 植株生长一般从土壤磷库和外界施入两个方向获得磷素,但磷肥施入土壤后很容易被固定而难以被植株所利用,所以当季利用率一般只有 10%~25%^[3]. 在农业生产中,为保证高产稳产,每年会施入大量的磷肥和有机肥,从而增加了土壤表层中的磷素累积量,过量的磷素会通过壤中流和地表径流等方式进入水体^[4],进而造成水体富营养化等严重的环境问题. 紫色土作为西南地区的代表性土壤,宜种作物多、出产丰富,具有风化作用迅速、矿物组成复杂、矿质养分含量丰富和自然肥力高等特点,是一种宝贵的农业土壤资源. 但是紫色土发育时间短,物理风化强烈,容易形成大量胶结能力极弱的松散碎屑物,而且紫色土分布区雨量丰富,降雨集中,暴雨频繁,地面植被覆盖差,耕地类型也主要为坡耕地,使得紫色土分布区的土壤侵蚀非常严重,易发生水土流失^[5-7].

生物炭是秸秆、粪便等有机物料在低氧环境下,经过高温热解炭化产生的一种具有多孔隙、比表面积大,富含碳元素以及有很高的生物化学稳定性的高度芳香化物质^[8-10],常应用于土壤和环境管理领域的一类炭化有机物^[11]. 近年来,生物炭在农业领域有广泛的应用,生物炭施入土壤可以显著提高土壤有机碳含量^[12]、降低容重^[13,14]、改良土壤结构^[15]和改善农作物的生长环境. 生物质在炭化过程中,会产生一部分磷酸盐,当生物炭施入土壤后,这部分磷酸盐可以成为土壤磷素的直接来源^[16],为农作物生长提供必需的营养元素. 生物炭还对土壤中的养分流失存在一定的影响, Laird 等^[17]通过室内模拟的方法,在土柱中加入了生物炭,发现生物炭处理的土柱,全磷流失量降低了 69%,证明了生物炭可以减弱土壤中磷淋失量. 吴蔚君^[18]通过在水稻田中施入生物炭发现,施用生物炭可以有效降低农田径流中的氮磷流失量和流失率. 近年来,以环境优化为基础的减量施肥配施有机肥、秸秆和生物炭已经成为众多学者关注的热点方向,国内外对生物炭施用对磷流失影响的研究较为丰富,但大部分学者都是以农田水稻土为研究对象,且以地表径流为主,而生物炭施用对紫色土坡耕地磷流失的研究还鲜有报道. 因此,开展生物炭施用对紫色土坡耕地土壤磷流失的影响研究具有重要的科学理论意义和实际生产价值. 本研究在连续监测油菜-玉米轮作制度下紫色土各次径流不同磷形态的浓度变化特征,并结合不同施肥处理下的紫色土坡耕地磷流失通量规律,探讨了紫色土坡耕地磷流失对生物炭的响应特征,以期生物炭在紫色土坡

耕地施用中减少磷流失的实际应用提供试验依据和理论指导.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三峡库区绝大部分是山地丘陵地貌,面积达到 58 000 km²,其中山地面积占比超过 70%,海拔落差达到 2 800 m. 在三峡库区范围内,有嘉陵江、大宁河、香溪河以及乌江等主要支流,这些支流的年径流量占长江流域年水资源总量的一半左右^[19]. 库区属于中亚热带湿润季风气候,一般表现为春早、夏热、秋雨、冬暖且经常伏旱的特点,年均温度为 18℃左右,年均降雨量约为 1 100 mm,年均相对湿度大致为 82%.

本研究依托于中国科学院三峡库区水土保持与环境研究试验站,其位于重庆市忠县石宝镇新政村 (E108°10', N30°22'), 距离忠县县城约 32 km, 地处忠县、万州、石柱三县(区)的交界处,是三峡库区的腹心地带. 试验区内山丘起伏连绵,田土错落,年均温度 19.2℃,雨量充沛,年均降雨量为 1 150 mm,无霜期 320 d 左右,日照充足. 试验小区位于长江主河道北岸,土壤为紫色土,为三峡库区的代表性耕地类型,土壤基本理化性质为: pH 8.33, 有机质 7.56 g·kg⁻¹, 碱解氮 25.71 mg·kg⁻¹, 速效磷 9.16 mg·kg⁻¹, 速效钾 0.10 g·kg⁻¹, 全氮 0.35 g·kg⁻¹, 全磷 0.30 g·kg⁻¹, 全钾 32.31 g·kg⁻¹.

1.2 试验设计与处理

本试验径流小区为长方形,各小区投影面积为 100 m² (20 m × 5 m), 坡度设置为 10°, 底面以及四周均为混凝土修筑,每个小区下方地表及距离地表 40 cm 设置集水槽,以收集地表径流、泥沙和壤中流,在集水槽一角随导流管汇入下方的集流桶,为防止夏季产流量过大,在集流桶旁设计添加分流桶,具体装置见图 1.

本研究在该试验基地设置了 4 个处理,分别为: ①不施肥处理(CK 处理)、②常规施肥处理、③优化施肥处理、④减量施肥配施生物炭处理. 各处理

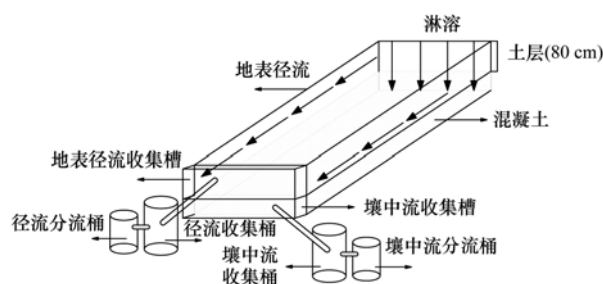


图 1 径流小区设计示意

Fig. 1 Schematic diagram of runoff plot design

分别标记为 CK、常规、优化、生物炭,各处理 3 次重复,同一处理的施肥量相同,具体施肥量见表 1,各小区农作管理均相同。

本试验种植模式采用“油玉两熟”制,于 2017 年 10 月 23 日种植油菜开始,2018 年 10 月 22 日结束,油菜和玉米的肥料用量依照当地农民种植施用量进行减量施用,各季作物栽培方式和田间管理措施均按照当地习惯进行。其中油菜于 2017 年 10 月

23 日栽种,2018 年 4 月 29 日收获。玉米于 2018 年 4 月 13 号栽种,2018 年 7 月 20 日收获。油菜季氮肥分基肥和薹肥两次施用(基肥占 80%),磷肥、钾肥、硼肥做基肥一次性施入,基肥和薹肥施用时间分别为 2017 年 11 月 7 日和 2017 年 12 月 5 日,于小雨前后撒施。玉米季肥料分两次施入,第一次为玉米移栽时,于各处理施入尿素 $16.67 \text{ kg} \cdot \text{亩}^{-1}$ ($250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),其余肥料于 4 月 27 日一次性施入。

表 1 各处理施肥量

Table 1 Amount of fertilizer applied in each treatment

项目	处理	纯 N/kg·亩 ⁻¹	P ₂ O ₅ /kg·亩 ⁻¹	K ₂ O/kg·亩 ⁻¹	硼砂/kg·亩 ⁻¹
油菜季	不施肥	0	0	0	0
	常规施肥	10	6	6	1
	优化施肥	8	5	5	1
	85% 优化施肥 + 每亩 666.7 kg 生物炭	6.8	4.25	4.25	1
玉米季	不施肥	0	0	0	0
	常规施肥	20	10	9	0
	优化施肥	18	8	7	0
	85% 优化施肥 + 每亩 666.7 kg 生物炭	15.3	6.8	5.95	0

1.3 采样与分析方法

1.3.1 水样和泥沙采集

本试验观测于 2017 年 10 月 23 日栽种油菜后开始,于 2018 年 10 月 22 日结束。在观测期内,逢降雨产流就进行采样。每次采样时,分别先测定各个径流小区的地表径流和壤中流的水位,以此计算各个小区的地表径流和壤中流的流量。水位测定完毕后,用洗净的聚乙烯塑料瓶分别采集地表径流和壤中流,若分流桶中也有水样,则径流桶和分流桶均需要采样。采集地表径流和壤中流时,均需要将收集池或分流池中的水样充分搅拌,其中地表水样搅拌后,迅速采集水沙混合样两瓶,一瓶用于测定养分含量,一瓶用于测定泥沙含量及泥沙养分。而壤中流样品在搅拌后,先让水体静置,待悬浮物沉淀后再进行采样。收集池和分流池的样品分别测定其养分含量,然后计算其整体的平均养分含量。

水样采集后,立即进行各种形态氮磷养分的含量。如来不及分析,则在样品中加酸化至 pH 小于 2 并将其储存于 4℃ 的冰箱中。测定时,需先将样品 pH 调至 7.0 左右,然后取 200 mL 样品过 0.45 μm 滤膜,用于测定硝态氮、铵态氮、可溶性总氮、正磷酸盐、可溶性总磷等指标,全氮和全磷用未过滤水样测定。降雨量数据从试验站人工气象降雨观测平台获取,观测仪器为虹吸式雨量计。

1.3.2 土样采集

在各个小区中用多点随机采样,四分法随机取样的方法采取 0~20 cm 表层土,带回实验室风干后,进行研磨和分粒径过筛,用保鲜袋保存,用于分

析土壤的氮、磷基本理化性质。

1.3.3 分析方法

水样测定的指标中,全磷和可溶性全磷用过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法测定;正磷酸盐用钼蓝比色法测定。颗粒态磷浓度 = 全磷浓度 - 可溶性全磷浓度。

土样测定的指标中,全氮用 H₂SO₄ 消煮-凯氏定氮法测定;全磷用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定;全钾用 NaOH 熔融-火焰光度计法测定;铵态氮用 KCl 提取-靛酚蓝比色法测定;硝态氮用 KCl 提取-紫外分光光度法测定;碱解氮用碱解扩散法测定;速效磷用钼蓝比色法测定。泥沙样全氮、全磷测定方法与土样相同。具体测定详细步骤参见文献[20,21]。

每次降雨后,计算地表径流和壤中流产流量。各种形态磷流失量及年流失通量均为 3 个小区测定值的平均值。单次降雨事件各种形态磷流失量和各形态磷年流失通量计算公式如下:

$$Q_i = c_i \times V_i \times 10^{-6} \quad (1)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (Q_i \times 100) \quad (2)$$

式中, Q_i 为各小区第 i 次降雨中地表径流或壤中流各形态磷流失量(kg), c_i 为第 i 次降雨中各形态磷流失浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), V_i 为第 i 次降雨中地表径流或壤中流产流量(L)。 Q 为各形态磷年流失通量 [$\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]。

1.4 数据处理

采用 EXCEL 2016、Origin 2018 和 SPSS 23.0 软

件进行数据处理和图表绘制. 所有结果均用 3 次测定平均值表示. 不同处理之间的多重比较采用 LSD 最小显著差数法 ($P < 0.05$).

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理下紫色土坡耕地产流产沙特征

如图 2 所示, 观测期内, 共降雨 18 次, 主要集中在 4、5 和 9 月, 其中降雨量峰值出现在 4 月 26 日, 达到 140 mm; 7 月和 8 月降雨量低, 且出现连续高温天气. 观测期内, 并不是每次降雨所有处理都有径流或壤中流的产生, 在降雨量集中的月份, 壤中流流量均大于其地表径流量. 在 18 次降雨中, CK、常规、优化和生物炭处理分别产生了 13、14、14、13 次壤中流和产生了 11、9、9、11 次地表径流. 对壤中流

而言, 各处理在降雨集中的 4~5 月出现了峰值, 生物炭处理的壤中流量明显低于其他处理 ($P < 0.05$). 对地表径流而言, 各处理的径流量的峰值较壤中流的峰值略有推迟, 均在 5 月 8 日达到最大值, 其中生物炭与优化处理的地表径流量明显高于其他处理. 由图 3 可知, 各处理的产流总量表现为: 优化 (20 737.23 L) > 常规 (18 513.17 L) > CK (18 134.58 L) > 生物炭 (13 594.85 L). 壤中流各处理的产流总量都远高于地表径流的产流总量, 4 个处理壤中流的产流总量占各处理总产流量的 60.14%~87.34%, 是雨季产流的主要类型. 生物炭处理的壤中流产流总量显著低于其他处理的产流总量 ($P < 0.05$), 较常规处理的壤中流产流总量显著降低了 49.94% ($P < 0.05$).

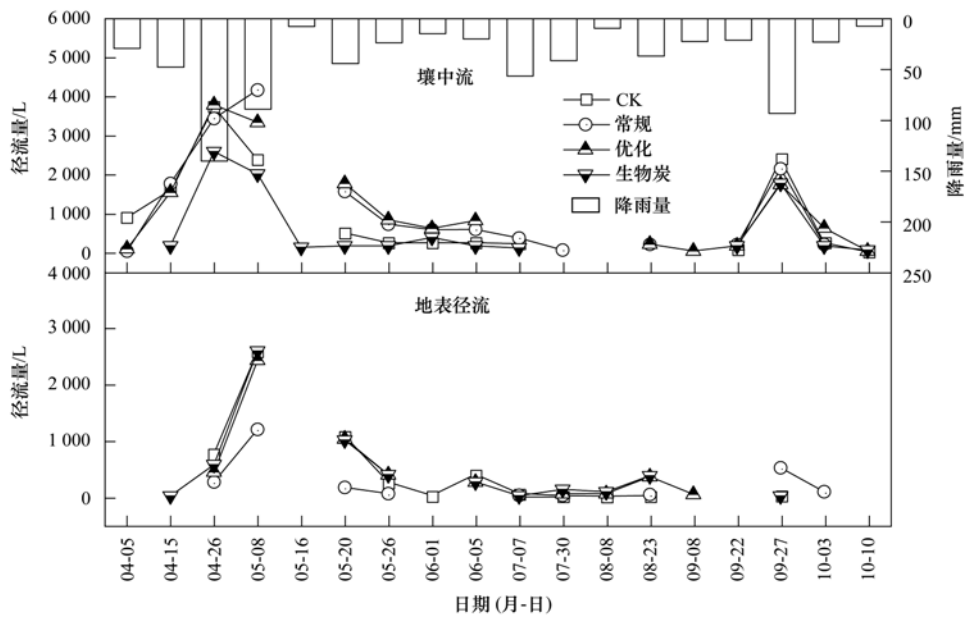


图 2 不同施肥下各处理壤中流和地表径流产流情况
Fig. 2 Runoff and surface runoff production and flow under different fertilization treatments

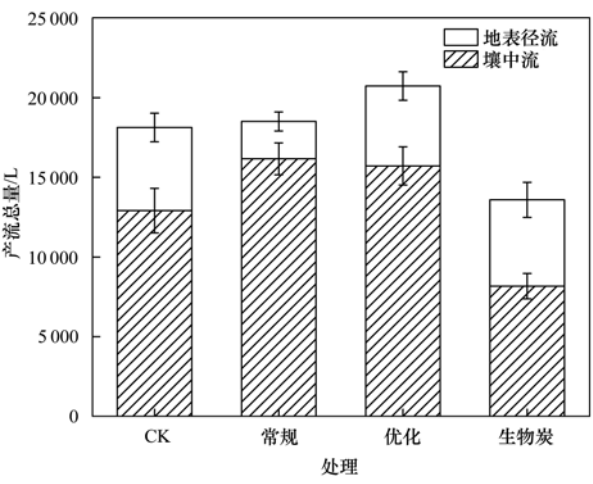


图 3 不同施肥下各处理壤中流和地表径流产流总量
Fig. 3 Characteristics of midstream and surface runoff production under different fertilization treatments

从表 2 中可以看出, 各处理的泥沙流失总量表现为 CK ($1\,998\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) > 生物炭 ($1\,884\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) > 优化 ($1\,681\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) > 常规 ($910\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$). CK 处理泥沙流失总量最大, 达到 $1\,998\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其次为生物炭处理 ($1\,884\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 常规施肥处理的泥沙流失总量最低, 显著低于其他处理 ($P < 0.05$), 仅为 $910\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. 较 CK 处理的泥沙流失量降低了 54.45%.

2.2 不同施肥处理下紫色土坡耕地正磷酸盐流失特征

2.2.1 壤中流正磷酸盐流失特征

如图 4(a) 所示, 各施肥处理之间变化趋势大致相同, 均在 4 月和 9 月浓度较高, 其他月份较低, 且均出现了两次峰值. 第一次峰值出现于 4 月 15 日, 且以常规处理 ($0.058\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 为最大, 第二次峰值

表 2 不同施肥下各处理产沙情况/kg·hm⁻²

Table 2 Sediment yield of different fertilization treatments/kg·hm⁻²

处理	日期(月-日)									总量
	04-26	05-08	05-20	05-26	06-05	07-30	08-08	08-23	09-27	
CK	295	477	817	193	205	1	3	2	5	1 998
常规	81	531	264	12	0	1	0	5	16	910
优化	69	451	232	196	99	17	51	566	0	1 681
生物炭	151	573	49	144	47	46	116	291	26	1 884

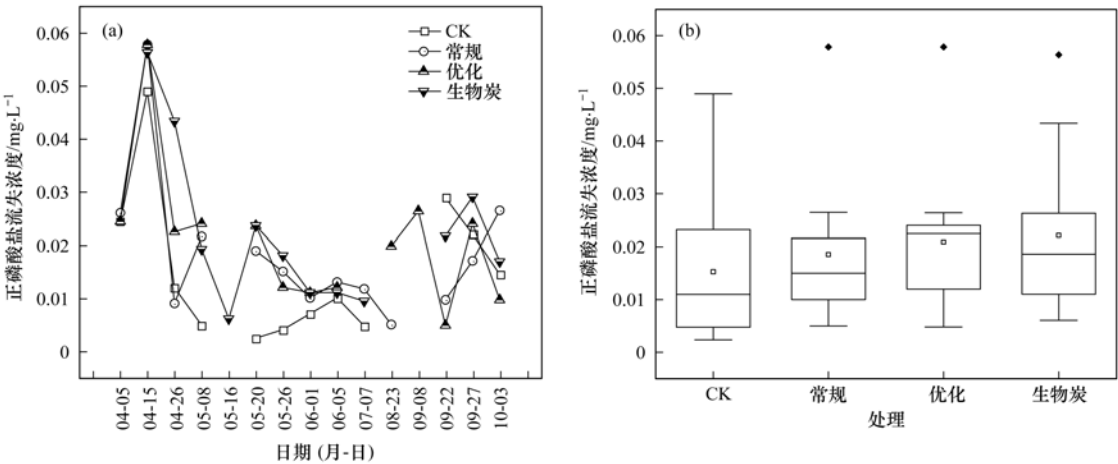


图 4 不同施肥下各处理壤中流中正磷酸盐浓度变化特征

Fig. 4 Characteristics of orthophosphate concentration in the middle stream under different fertilization treatments

出现于 9 月,但各处理的峰值并不是出现在同一次降雨中,且各处理的峰值差别不大,分布在 0.021 ~ 0.029 mg·L⁻¹之间,从图 4(b)可以看出,生物炭处理浓度均值最大,达到 0.022 mg·L⁻¹,但各处理之间的浓度均值并不存在显著性差异.

2.2.2 地表径流正磷酸盐流失特征

从图 5(a)中可以看出,各施肥处理正磷酸盐浓度变化趋势大致相同,在施肥后(5 月 8 日)径流中明显提升,然后迅速下降,除在 7 月 30 日径流中有波动外,其余时间均处于一个较低的水平.在 5 月 8 日的径流中,浓度最大的为优化

处理,达到 0.58 mg·L⁻¹,而 CK 处理浓度显著低于各施肥处理,仅为 0.010 mg·L⁻¹.在 7 月 30 日的径流中,各处理的径流浓度均有所提升,常规处理较前一次径流浓度提升最大.从正磷酸盐浓度均值来看[图 5(b)],常规处理的浓度均值最大,达到 0.15 mg·L⁻¹,优化处理和生物炭处理浓度均值相差不大,均在 0.11 mg·L⁻¹左右,CK 处理浓度均值显著低于常规处理.从极值范围看,常规处理的变化范围最大,为 0.020 ~ 0.43 mg·L⁻¹;优化处理的变化范围最小,为 0.030 ~ 0.12 mg·L⁻¹.

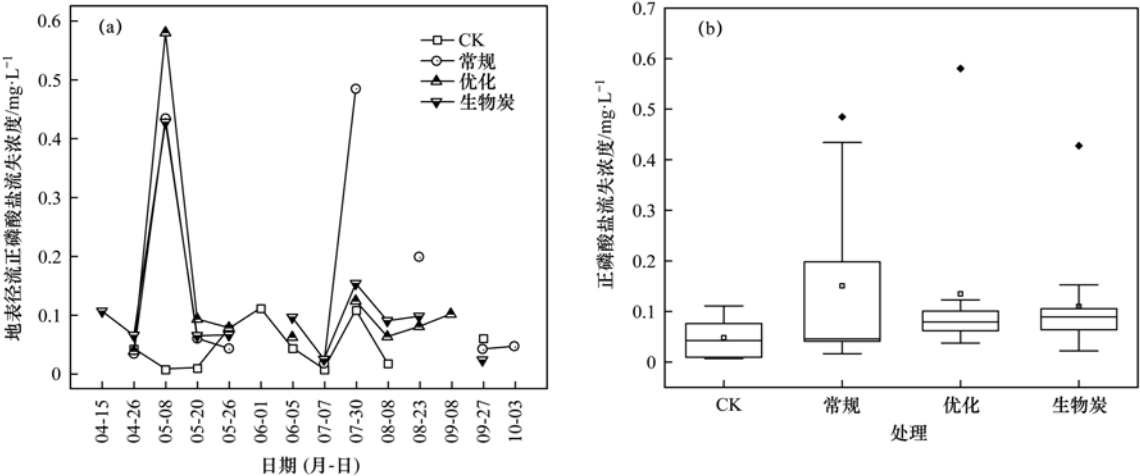


图 5 不同施肥下各处理地表径流中正磷酸盐浓度变化特征

Fig. 5 Characteristics of orthophosphate concentration in surface runoff under different fertilization treatments

2.2.3 正磷酸盐流失通量特征

从图 6 中可以看出,各施肥处理的正磷酸盐流失通量表现为: 优化 $[0.20 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}] > \text{生物炭} [0.15 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}] > \text{常规} [0.090 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}] > \text{CK} [0.040 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$. 各施肥处理与 CK 处理相比较正磷酸盐流失通量提高了 1.17 ~ 3.90 倍; 优化处理流失通量最大, 为 $0.20 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 生物炭处理与优化处理相比下降了 22.42%. 在各小区处理中, 地表径流流失通量占比达到 55.35% ~ 87.49%, 说明正磷酸盐主要通过地表径流途径流失.

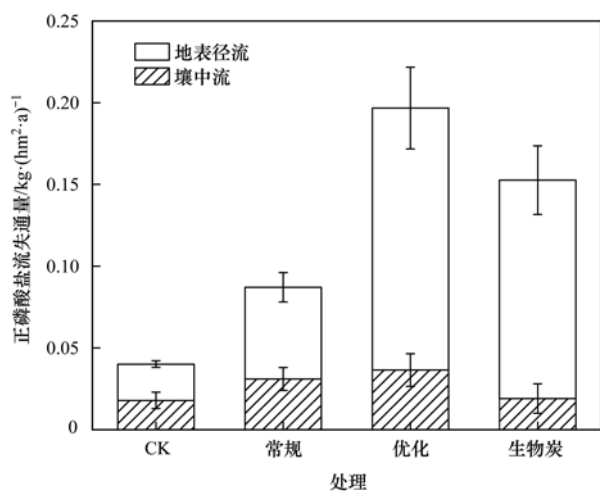


图 6 不同施肥处理下正磷酸盐流失通量特征

Fig. 6 Characteristics of loss flux of orthophosphate in different fertilization treatments

2.3 不同施肥处理下紫色土坡耕地颗粒态磷流失特征

2.3.1 颗粒态磷浓度变化特征

从图 7 中可以看出,各施肥处理在 4、5 月和 7、8 月的径流中,颗粒态磷浓度较大,各施肥处理均出现两次峰值. 第一次峰值出现于 5 月 8 日,其中常规处理浓度最大,达到 $0.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, CK 处理浓度最低,仅为 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 各施肥处理第二次峰值出现于不同时期的径流中,主要集中在 8 月 8 日及其左右两次径流,其中优化处理浓度最高,为 $0.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而 CK 处理浓度为 $0.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,较前期径流的浓度有大幅提升.

2.3.2 颗粒态磷流失通量特征

从图 8 可以看出,各处理颗粒态磷流失通量表现为: 常规 $[0.11 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}] > \text{生物炭} [0.10 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}] > \text{优化} [0.082 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}] > \text{CK} [0.036 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$. 各施肥处理颗粒态磷流失通量与 CK 处理相比较显著提高了 1.24 ~ 2.06 倍,其中常规处理流失通量最大,达到 $0.11 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,生物炭处理与常规处理相比无显著

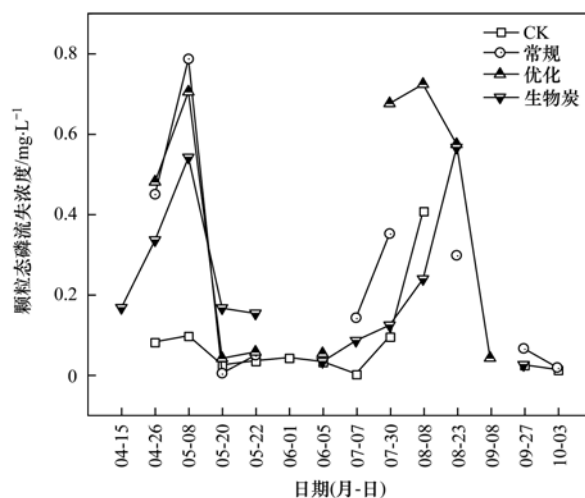


图 7 不同施肥下各处理颗粒态磷浓度变化特征

Fig. 7 Characteristics of granular phosphorus concentration under different fertilization treatments

性差异; 优化处理与常规处理相比显著下降了 26.80% ($P < 0.05$). CK 处理的颗粒态磷流失通量最低, 仅为 $0.04 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 仅为常规处理的 32.43%.

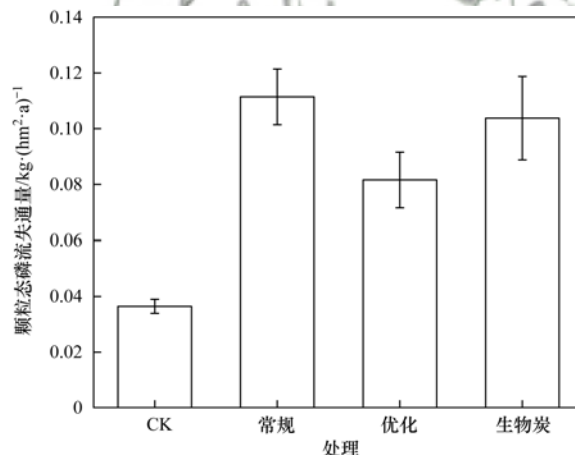


图 8 不同施肥处理下颗粒态磷流失通量特征

Fig. 8 Characteristics of loss flux of particulate phosphorus in different fertilization treatments

2.4 不同施肥处理下紫色土坡耕地全磷流失特征

2.4.1 壤中流全磷流失特征

从图 9(a)中可以看出,各处理之间壤中流全磷浓度变化趋势无明显差异,均在 4 月浓度较大,其余时间浓度处于较低水平. 除生物炭处理外,各处理浓度峰值均出现于 4 月 15 日,其中 CK 处理浓度最大,达到 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 生物炭处理的峰值出现于 4 月 26 日,浓度为 $0.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与 CK 处理浓度峰值相比下降了 32.61%. 从平均浓度来看[图 9(b)], CK 处理的平均浓度为 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,各施肥处理平均浓度大小依次为常规处理 > 优化处理 > 生物炭处理,与 CK 处理相比,分别上升了 27.14%、10.20% 和 9.17%,各处理之间的全磷平均浓度无显著性差

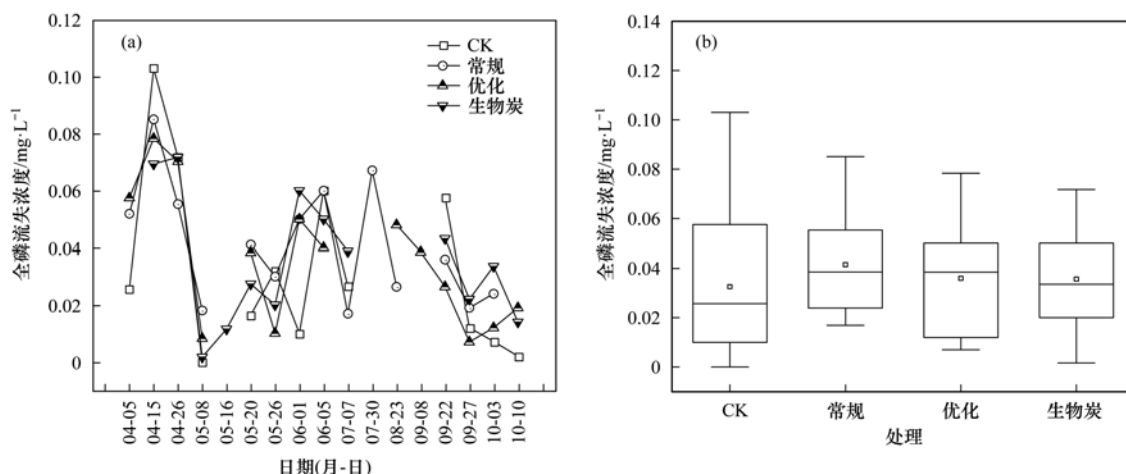


图9 不同施肥下各处理壤中流中全磷浓度变化特征

Fig. 9 Characteristics of TP concentration in the middle stream under different fertilizations treatments

异 ($P < 0.05$). 从极值范围看, CK 处理的变化范围最大, 为 $0 \sim 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

2.4.2 地表径流全磷流失特征

从图 10(a) 中可以看出, 各施肥处理在 5、7 和 8 月的流失浓度较高, 其余月份浓度基本低于 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 各施肥处理均出现了两次峰值, 第一次峰值出现于 5 月 8 日, 其中常规处理浓度最大, 为 $0.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, CK 处理浓度最低, 为 $0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 除 CK 与生物炭处理外, 其余施肥处理第二次峰值均出现于 7 月 30 日, 其中常规处理全磷浓度以 $0.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为最大, 生物炭处理的第二次峰值出现于 8 月 23 日, 浓度为 $0.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 是该处理全年浓度的最大值, CK 处理全磷浓度在 8 月 8 日达到峰值, 较 5 月 8 日浓度提高了 2.76 倍. 从浓度均值来看 [图 10(b)], 优化处理 $>$ 常规处理 $>$ 生物炭处理 $>$ CK 处理, 其中 CK 处理分别与常规处理和优化处理之间存在显著性差异 ($P < 0.05$). 从极值范围来看, 常规处理极值范围最大, 为 $0.06 \sim 0.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; CK 处理的极值范围最小, 为 $0.01 \sim 0.28$

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 各施肥处理的极值范围均明显大于 CK 处理的极值范围, 说明施肥会提高地表径流全磷浓度变化范围.

2.4.3 全磷流失通量特征

从表 3 中可以看出, 各处理的全磷流失通量表现为: 生物炭 [$1.01 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] $>$ 优化 [$0.67 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] $>$ CK [$0.64 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] $>$ 常规 [$0.53 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]. 在各处理小区中, 生物炭处理全磷流失通量与 CK 处理相比显著提高了 59.61%, 常规处理和优化处理与 CK 处理之间无显著差异; 泥沙是全磷流失的主要途径, 各处理通过泥沙流失的全磷通量占总流失通量的比例达到 63.79%~78.74%, 壤中流流失通量占比最小, 仅占 2.63%~12.91%, 其中以生物炭处理的占比最低, 生物炭处理的壤中流流失通量与常规处理相比降低了 56.45%. 各处理通过地表径流流失的全磷通量占总流失通量的比例为 8.35%~24.58%, 其中以常规处理的占比最高, CK 处理的占比最低. 通过地表径流流失和泥沙流失的全磷流失通量都是生物炭处理最

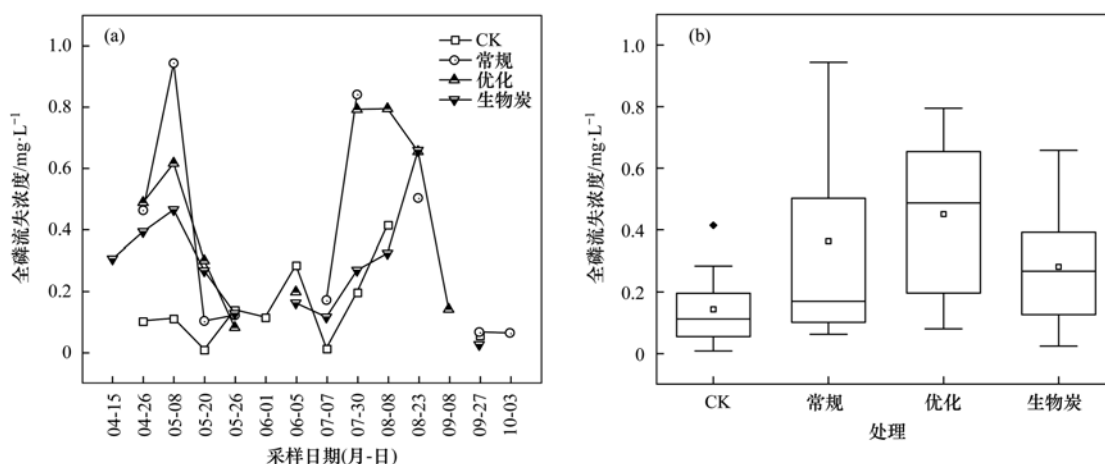


图10 不同施肥下各处理地表径流中全磷浓度变化特征

Fig. 10 Characteristics of total phosphorus concentration in surface runoff under different fertilization treatments

表 3 不同施肥处理下全磷流失通量特征¹⁾/kg·(hm²·a)⁻¹
Table 3 Characteristics of loss flux of total phosphorus in different fertilization treatments/kg·(hm²·a)⁻¹

处理	壤中流失通量	地表径流失通量	泥沙流失通量	总流失通量
CK	0.082 ± 0.013a	0.053 ± 0.008c	0.50 ± 0.122b	0.635 ± 0.143b
常规	0.062 ± 0.011b	0.131 ± 0.024b	0.34 ± 0.046bc	0.533 ± 0.064bc
优化	0.064 ± 0.010b	0.136 ± 0.031b	0.47 ± 0.063b	0.670 ± 0.097b
生物炭	0.027 ± 0.002c	0.227 ± 0.018a	0.76 ± 0.141a	1.014 ± 0.153a

1) 表中不同字母表示同一流失途径不同施肥处理之间差异显著($P < 0.05$)

多,与常规处理相比分别增加了 73.28% 和 123.53%.

3 讨论

本研究中,由于生物炭具有丰富的孔隙度和较大的表面积,具有较强的吸附性,施入生物炭可以增加土壤持水量^[22],从而显著减少生物炭处理产流量.虽然施生物炭处理在一定程度上降低了壤中流产流量,可是生物炭处理对地表径流截留效果不佳.这是因为生物炭具有较强的吸水性,减少了水流向下渗漏,但生物炭具有保水性的同时也存在一定的临界值,在降雨量较大的时候,径流量超过了其保水性^[23],因此在降雨量较大的时期,施生物炭处理的地表径流径流量较高,甚至超过了常规施肥处理.施入土壤中的磷肥容易被表层土壤固定,而较难向下层土壤渗透^[24].有研究表明,地表径流是土壤中磷流失的主要途径,而在地表径流中,颗粒态磷是其流失的主要形态^[25].在本研究中,坡耕地土壤随地表径流流失的不同磷素浓度也均远大于壤中流.与氮素情况不同,施肥对地表径流的磷素浓度的影响远大于壤中流,本试验中,5月8日各施肥处理地表径流的正磷酸盐浓度和全磷浓度均大幅上升,而壤中流浓度变化幅度不大,这与蒋锐等^[26]的研究结果一致.壤中流带走的磷素较少,但近年的研究发现壤中流对磷素迁移也具有重要的作用,特别是在地表径流处于低流速的状态时,壤中流在磷素迁移过程中的重要性将大幅增加^[27].

生物炭还田对土壤中的磷流失量具有一定的影响,一般认为其可以有效地减少土壤可溶态磷的淋失量^[28],这与本试验研究结果一致,本试验中,施生物炭处理均有效降低了正磷酸盐流失通量,这是因为生物炭可以促进阴离子交换能力,影响磷与阳离子的相互作用,从而增加了土壤中有效磷的活性,减少可溶性磷的流失^[29].韩晓飞等^[30]和冯轲等^[31]通过在水稻田中施入适量生物炭后发现生物炭对降低田面水的全磷流失量具有明显的效果,而本研究中,生物炭处理的地表径流与泥沙的磷流失通量均表现为 4 个处理中的最高值,从而使得生物炭处理的全

磷的流失通量最高,生物炭施用增加了坡耕地的全磷流失风险,这可能是因为生物炭自身含有大量磷,其所含的磷不能完全被植所吸收,在降雨产生径流时,一部分磷会通过解析作用以可溶态磷形态流失,另一部分未被吸收的剩余磷素则会以颗粒态磷形态随地表径流和泥沙流失,从而加大了坡耕地全磷的流失风险. Steiner 等^[32]的研究发现,在较高配比的混施生物炭能够使土壤中有效性较低的闭蓄态磷向有效磷转化,提高土壤中磷素的流失风险.所以在今后生物炭的研究与实际应用中,可以进一步探讨最优的生物炭-化肥投放比例,减少配施化肥中的磷素投入,在保障作物良好生长的前提下,减少土壤磷素流失.紫色土是由紫色页岩发育而成,其孔隙大、质地松、渗透能力强,是一种侵蚀型高生产力的“岩土二元结构体”^[33],易产生水土流失,因此控制紫色土坡耕地磷流失首先最重要的是控制土壤侵蚀,其次也应在平衡配施生物炭的同时采取增加地表覆盖、增厚土层以及提升土壤有机质等农田治理措施,进一步减少土壤的磷素流失.

4 结论

(1) 壤中流是雨季径流输出的主要途经,泥沙流失是全磷流失的主要方式,通过泥沙流失的全磷含量占比达到了 63.74%~78.74%,而壤中流的全磷流失通量的占比最小,仅占 2.63%~12.91%.所以控制紫色土坡耕地的磷素流失的主要任务是控制土壤侵蚀.

(2) 施肥对地表径流的磷素浓度的影响远大于壤中流.地表径流是正磷酸盐的主要流失方式.减量施肥配施生物炭可以降低正磷酸盐的流失通量,但对于颗粒态磷流失通量无明显影响.

(3) 减量施肥配施生物炭能够有效减少紫色土坡耕地土壤的壤中流产流量,以及壤中流的全磷流失通量,与常规施肥相比分别降低了 49.44% 和 56.45%.但是对地表径流的截留效果不佳,同时增加了地表径流与泥沙中的全磷流失风险,生物炭处理的地表径流和泥沙流失的全磷流失通量与常规施肥处理相比分别增加了 73.28% 和 123.53%.因此,

应进一步优化生物炭与农业化肥的投入配比,减少磷素流失。

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] 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**(S1): 55-59.
Zhen L, Liao W H, Liu J L. A study on phosphorus movement in soil and phosphorus pollution from agricultural non-point sources in water environment[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2002, **25**(S1): 55-59.
- [3] 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.
- [4] McDowell R W. Minimising phosphorus losses from the soil matrix[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2012, **23**(6): 860-865.
- [5] 张玉启, 郑钦玉. 三峡库区农业面源污染控制的生态补偿政策研究[J]. 农机化研究, 2012, **34**(1): 230-233.
Zhang Y Q, Zheng Q Y. The policy research of ecological compensation about controlling agricultural pollution of three Gorges Reservoir Region [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, **34**(1): 230-233.
- [6] 李孝坤. 重庆三峡库区水环境问题与保护对策探讨[J]. 水土保持研究, 2005, **12**(4): 220-222.
Li X K. Study on the problems of water environment and countermeasures in the Three Gorges Reservoir of Chongqing [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, **12**(4): 220-222.
- [7] 唐萍, 翟红娟, 邹家祥. 三峡库区水环境保护与生态修复初步研究[J]. 水资源保护, 2011, **27**(5): 43-46.
Tang P, Zhai H J, Zou J X. Preliminary study on water environmental protection and ecological restoration in Three Gorges reservoir area[J]. Water Resources Protection, 2011, **27**(5): 43-46.
- [8] 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 等. 生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3388-3396.
Li Q Q, Xu C Y, Geng Z C, *et al.* Impact of biochar on soil bulk density and aggregates of Lou Soil [J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 3388-3396.
- [9] 安艳, 姬强, 赵世翔, 等. 生物炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 293-300.
An Y, Ji Q, Zhao S X, *et al.* Effect of biochar application on soil aggregates distribution and moisture retention in orchard soil [J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 293-300.
- [10] Gul S, Whalen J K, Thomas B W, *et al.* Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, **206**: 46-59.
- [11] Johannes L. Biochar for environmental management: science, technology and implementation (2nd ed.) [M]. New York: Earthscan, 2015. 15801-15811.
- [12] 田冬, 高明, 黄容, 等. 油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2988-2999.
Tian D, Gao M, Huang R, *et al.* Response of soil respiration and heterotrophic respiration to returning of straw and biochar in rape-maize rotation systems[J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2988-2999.
- [13] 潘全良, 陈坤, 宋涛, 等. 生物炭及炭基肥对棕壤持水能力的影响[J]. 水土保持研究, 2017, **24**(1): 115-121.
Pan Q L, Chen K, Song T, *et al.* Influences of biochar and biochar-based compound fertilizer on soil water retention in brown soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, **24**(1): 115-121.
- [14] 赵占辉, 张丛志, 蔡太义, 等. 不同稳定性有机物料对砂姜黑土理化性质及玉米产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, **23**(10): 1228-1235.
Zhao Z H, Zhang C Z, Cai T Y, *et al.* Effects of different stable organic matters on physicochemical properties of lime concretion black soil and maize yield [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, **23**(10): 1228-1235.
- [15] 李江舟, 代快, 张立猛, 等. 施用生物炭对云南烟区红壤团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(6): 2114-2120.
Li J Z, Dai K, Zhang L M, *et al.* Effects of biochar application on soil organic carbon distribution and soil aggregate composition of red soils in Yunnan tobacco planting area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(6): 2114-2120.
- [16] Gundal M J, DeLuca T H. Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal[J]. Forest Ecology and Management, 2006, **231**(1-3): 86-93.
- [17] Laird D, Fleming P, Wang B Q, *et al.* Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil [J]. Geoderma, 2010, **158**(3-4): 436-442.
- [18] 吴蔚君. 生物炭对水稻产量及稻田氮磷流失影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
Wu W J. Effect of biochar on rice yield and loss of nitrogen and phosphorus in rice field [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018.
- [19] 长江水利委员会. 三峡工程生态环境影响研究[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [22] Obia A, Mulder J, Martinsen V, *et al.* In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils[J]. Soil and Tillage Research, 2016, **155**: 35-44.
- [23] 魏永霞, 王鹤, 吴昱, 等. 生物炭对不同坡度坡耕地土壤水动力学参数的影响[J]. 农业机械学报, 2019, **50**(3): 231-240.
Wei Y X, Wang H, Wu Y, *et al.* Effect of biochar on soil hydrodynamic parameters under different slopes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, **50**(3): 231-240.
- [24] 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.
Chen L, Liu D F, Song L X, *et al.* Characteristics of nutrient loss by runoff in sloping arable land of yellow - brown under different rainfall intensities[J]. Environmental Science, 2013, **34**(6): 2151-2158.
- [25] 王春梅, 蒋治国, 赵言文. 太湖流域典型蔬菜地地表径流氮磷流失[J]. 水土保持学报, 2011, **25**(4): 36-40.
Wang C M, Jiang Z G, Zhao Y W. Nitrogen and phosphorus runoff in the typical vegetable fields in Tai Lake Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, **25**(4): 36-40.
- [26] 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.
- Jiang R, Zhu B, Tang J L, *et al.* Transportation processes and loss fluxes of nitrogen and phosphorous through storm runoff in a typical small watershed in the hilly area of purple soil [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, **40**(6): 659-666.
- [27] Bosch D D, Truman C C, Potter T L, *et al.* Tillage and slope position impact on field-scale hydrologic processes in the South Atlantic Coastal Plain [J]. Agricultural Water Management, 2012, **111**: 40-52.
- [28] 崔虎, 王莉霞, 欧洋, 等. 生物炭-化肥配施对稻田土壤氮磷迁移转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(2): 412-421.
- Cui H, Wang L X, Ou Y, *et al.* Effect of the combined application of biochar and chemical fertilizer on the migration and transformation of nitrogen and phosphorus in paddy soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(2): 412-421.
- [29] 李卓瑞, 韦高玲. 不同生物炭添加量对土壤中氮磷淋溶损失的影响[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(2): 333-338.
- Li Z R, Wei G L. Effects of biochar with different additive amounts on the leaching loss of nitrogen and phosphorus in soils [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25**(2): 333-338.
- [30] 韩晓飞, 高明, 谢德体, 等. 减磷配施有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2770-2778.
- Han X F, Gao M, Xie D T, *et al.* Reduction effect of reduced phosphorus fertilizer and combining organic fertilizers on phosphorus loss of purple soil sloping field [J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2770-2778.
- [31] 冯轲, 田晓燕, 王莉霞, 等. 化肥配施生物炭对稻田田面水氮磷流失风险影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(2): 329-335.
- Feng K, Tian X Y, Wang L X, *et al.* Influence of combined synthetic fertilizer and biochar applications on nitrogen and phosphorus losses from surface water of paddy field [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(2): 329-335.
- [32] Steiner C, Glaser B, Teixeira W G, *et al.* Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, **171**(6): 893-899.
- [33] 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.
- Chen X Y, Niu Q X, Zhou J, *et al.* Study on spatial variability characters of steep purple soil particles under rainfall simulation condition [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, **24**(5): 163-168.



CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	JI Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)