

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂茂, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷 (1013)
《环境科学》征订启事 (522)	
《环境科学》征稿简则 (722)	
信息 (748, 899, 924)	

不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征

熊子怡¹, 郑杰炳², 王丹², 王富华¹, 王莹燕¹, 王子芳¹, 高明^{1*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆地质矿产研究院, 重庆 401120)

摘要: 明确紫色土旱坡地可溶性有机碳在不同施肥条件下的流失特征, 得出最佳的养分管理方式, 对提升三峡库区的耕地质量、维持土壤碳平衡和减轻土壤碳流失造成的环境污染具有重要意义。在中国科学院三峡库区水土保持与环境研究试验站内设置标准化径流小区, 研究紫色土旱坡地在不施肥(CK)、常规施肥(常规)、优化施肥(优化)、85% 优化施肥配施生物炭(生物炭)和85% 优化施肥配施秸秆(秸秆)条件下的产流产沙情况和土壤有机碳的流失特征。结果表明: ① 壤中流径流量占径流总量(径流包括地表径流和壤中流)的52.84%~92.23%, 壤中流可溶性有机碳(DOC)流失通量占DOC总流失通量的43.64%~87.35%, 壤中流是雨季径流的主要方式和土壤DOC流失的主要途径。② 秸秆处理的地表径流量、产沙量、地表径流DOC流失通量和泥沙有机碳流失通量较优化处理分别降低了30.39%、39.41%、28.71%和23.97%, 壤中流径流量和壤中流DOC流失通量较优化处理略有升高。生物炭处理的产流产沙量、地表径流DOC流失通量、壤中流DOC流失通量和泥沙有机碳流失通量均显著高于优化处理。③ DOC流失通量占土壤有机碳总流失通量的99.31%~99.94%, DOC是紫色土旱坡地土壤有机碳流失的主要形式, 各处理的DOC流失通量呈现: 生物炭>优化>秸秆>常规>CK。④ 生物炭和秸秆处理的SOC含量较优化处理分别提高了95.79%和32.16%。85% 优化施肥配施秸秆能显著减少紫色土旱坡地的地表径流量、泥沙流失量和土壤有机碳流失通量, 同时提高土壤有机碳含量, 是紫色土旱坡地的最佳养分管理方式。

关键词: 紫色土旱坡地; 可溶性有机碳(DOC); 地表径流; 壤中流; 施肥处理

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0967-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007139

Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments

XIONG Zi-yi¹, ZHENG Jie-bing², WANG Dan², WANG Fu-hua¹, WANG Ying-yan¹, WANG Zi-fang¹, GAO Ming^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 401120, China)

Abstract: The characteristics of dissolved organic carbon loss with different fertilization treatments were examined to derive the best nutrient management method for sloping farmland in the Three Gorges Reservoir area where maintaining the soil carbon balance and reducing environmental pollution caused by carbon loss is crucial. Experimental runoff plots were set up at the Experimental Station for Soil and Water Conservation and Environmental Research in the Three Gorges Reservoir Region, Chinese Academy of Sciences, involving the following five treatments: No fertilization (CK), conventional fertilization (conventional), optimum fertilization (optimum), biochar combined with 85% optimum fertilizer (biochar), and straw combined with 85% optimum fertilizer (straw). The effects of the five treatments on runoff flux, sediment yield, and soil organic carbon flux were monitored and evaluated. Results show that: ① Subsurface flow accounted for 52.84%-92.23% of the runoff (both surface and subsurface flow) and the loss flux of dissolved organic carbon (DOC) in the subsurface accounted for 43.64%-87.35% of the total loss flux. Thus, in this sloping farmland, subsurface flow was the main pathway of runoff and dominated dissolved organic carbon transport. ② Compared with the optimum treatment, straw treatment reduced the surface runoff flux, sediment yield, surface loss flux of DOC, and loss flux of organic carbon in the sediment by 30.39%, 39.41%, 28.71%, and 23.97%, respectively, but increased the subsurface runoff flux and loss flux of DOC. Compared with the optimum treatment, the biochar treatment significantly increased the surface and subsurface runoff flux, sediment yield, loss flux of DOC in the surface and subsurface, and the loss flux of organic carbon in the sediment. ③ The loss flux of DOC accounted for 99.31%-99.94% of the loss flux of soil organic carbon, and DOC was the major species of organic carbon in the organic carbon loss in this type of sloping farmland. The loss flux of DOC under the different fertilization treatments was ranked biochar > optimum > straw > conventional > CK. ④ Compared to the optimum treatment, the straw treatment and biochar treatment increased the soil organic carbon (SOC) content by 95.79% and 32.16%, respectively. Based on these results, straw combined with 85% of optimum fertilizer is the best nutrient management method for this sloping farmland as it can reduce surface runoff flux, sediment yield, and the loss flux of soil organic carbon while increasing the soil organic carbon content.

Key words: purple soil sloping field; dissolved organic carbon(DOC); surface runoff; interflow; fertilization treatment

收稿日期: 2020-07-14; 修订日期: 2020-07-30

基金项目: 重庆市技术创新与应用示范专项重点研发项目(cstc2018jcx-mszdX0061); 国家重大水利工程建设基金三峡后续工作科研项目(5001022019CF50001); 国家重点研发计划项目(2017YFD0800101)

作者简介: 熊子怡(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤质量与环境, E-mail: 550828749@qq.com

* 通信作者, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

土壤有机碳是衡量土壤肥力的重要指标之一,也是全球碳循环的重要组成部分^[1]. 土壤有机碳主要富集在土壤表层,容易以吸附态和溶解态的形式随泥沙和径流迁移出土体,其中,可溶性有机碳是主要的流失形式^[2]. 据国际碳循环计划组织(IPPC)估算,土壤有机碳的损失有 50%~70% 是土壤侵蚀造成的^[3]. 土壤有机碳的流失不仅会导致土壤肥力下降,还会促进温室气体的排放,造成全球气候变暖等环境问题. 紫色土旱坡地是三峡库区的主要耕地类型,该区地形坡度大,降雨丰富,暴雨集中,是土壤侵蚀的主要策源地,由于紫色土土层浅薄且土壤下伏透水性极差,降雨时土壤中的养分易随径流和泥沙进入水体,造成环境污染^[4~6]. 因此,减少紫色土旱坡地可溶性有机碳的流失对提升三峡库区的耕地质量和减轻土壤碳流失造成的环境污染具有重要意义.

培肥是改良土壤结构、提高土壤肥力和减少水土流失的重要途径^[7]. Gholami 等^[8]关于秸秆覆盖对土壤径流流失量和产沙量影响的研究表明,秸秆覆盖能显著地改善土壤侵蚀状况. Gómez 等^[9]的研究发现,秸秆处理的径流流失量和径流泥沙携带的养分流失量均低于传统耕作处理. 范亚琳等^[10]的研究结果表明,秸秆覆盖配施化肥较单施化肥不仅能显著降低红壤坡耕地的地表径流量和泥沙流失量,还能有效减少土壤有机碳的流失. 相关研究均表明秸秆还田能显著提高土壤的抗侵蚀能力,对减少养分流失有积极的作用^[11, 12],但是不同学者对生物炭还田能否减少水土流失和土壤养分流失持不同看法,一些研究认为施用生物炭能有效减少水土流失和土壤养分流失^[13~16],但也有研究认为生物炭的施用会加剧土壤侵蚀和养分流失,特别是在雨强较大的情况下^[17]. 范亚琳等^[10]通过研究不同培肥措

施对红壤有机碳流失的影响发现,生物炭配施化肥处理与单施化肥处理相比,阻控土壤侵蚀的效果不显著,且生物炭配施化肥处理的泥沙有机碳流失总量最多.

目前,许多学者对土壤有机碳的流失规律等进行了研究,但内容主要集中在土壤有机碳随地表径流及泥沙的流失特征,对壤中流的研究很少,且对象主要是红壤坡耕地^[18~20]. 因此,本文依托中国科学院三峡库区水土保持与环境研究试验站,以壤中流发达的紫色土旱坡地为研究对象,通过观测不同施肥处理(不施肥、常规施肥、优化施肥、85% 优化施肥配施生物炭和 85% 优化施肥配施秸秆)条件下紫色土旱坡地的产流产沙情况和土壤有机碳流失特征,探讨适合紫色土旱坡地的养分管理方式,以期为提高紫色土旱坡地的土壤肥力和减少三峡库区的土壤碳排放提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市忠县石宝镇新政村(E108°10', N30°22')的中国科学院三峡库区水土保持与环境研究试验站内,具体地理位置见图 1. 试验站地处万州、石柱和忠县这 3 个县(区)的交界处,距离忠县县城大约 32 km,是三峡库区的腹地地带. 三峡库区是典型的丘陵地貌,山地面积超过 70%,属于亚热带东南季风区山地气候,日照充足,雨量充沛,降雨主要集中在 5~10 月,年均降雨量 1 150.0 mm,年均温度 19.2℃,无霜期 320 d 左右,森林覆盖率为 19.5%,主要植被是常绿阔叶林和针叶林,以马尾松林为主,当地天然林破坏严重,多为次生林,土壤类型主要包括紫色土、黄壤、水稻土和冲积土等,

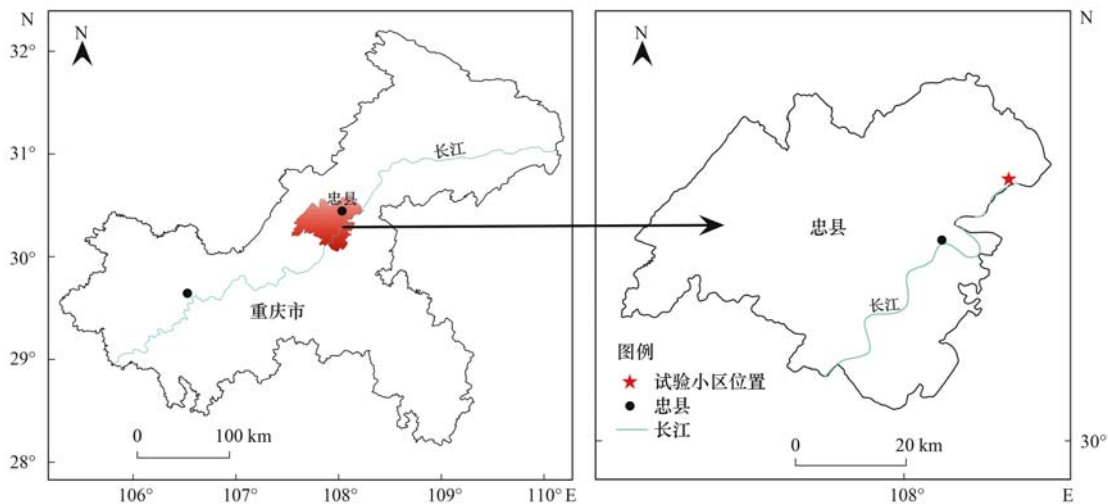


图 1 试验站地理位置示意

Fig. 1 Location of the experimental station

分布最广且比较具有代表性的是紫色土,占耕地总面积的 78.7%.

供试土壤是由沙溪庙组泥岩、粉砂岩和砂岩风化形成的紫色土,土壤的基本理化性质见表 1. 试验所用的生物炭购自南京勤丰众成生物质新材料有限公司,

生物炭的碳含量为 $614.46\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量为 $5.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷含量为 $3.10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 玉米秸秆购自研究区周围的农户,玉米秸秆的有机碳含量为 $452.78\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量为 $8.23\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷含量为 $3.15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

项目	pH	有机质 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有机碳 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碱解氮 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	全钾 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
参数	8.27	7.03	2.73	0.51	26.45	0.72	8.15	31.79	106.99

1.2 试验设计

本试验采用的是坡度为 15° 的标准人工径流小区,各小区平行排列,投影面积均为 100 m^2 (长 20 m ,宽 5 m),底部及四周均由混凝土修筑,地表径流和壤中流的出水口处均设有汇流沟,各小区外均安装地表径流和壤中流的收集桶,为应对雨季过大的产流量,在收集桶旁边添加分流桶,具体装置见图 2.

物炭处理和⑤85% 优化施肥配施秸秆处理,各处理依次标记为 CK、常规、优化、生物炭和秸秆,每个处理 3 次重复. 试验的种植模式采用“油菜-玉米两熟”制,油菜于 2018 年 10 月 15 日种植,2019 年 4 月 30 日收获,玉米于 2019 年 4 月 10 日移栽至油菜的行间,2019 年 8 月 2 日收获. 油菜和玉米的施肥在当地施肥习惯的基础上进行减量施用,田间管理依照当地习惯进行. 油菜季的氮肥分为两次施用,第一次于 2018 年 10 月 27 日作为基肥施用(施用量是油菜季氮肥施用总量的 80%),第二次于 2018 年 11 月 20 日作为基肥施用,磷肥、钾肥和硼肥作为基肥一次性施用. 玉米季的氮肥也分为两次施入,第一次在玉米移栽时作为基肥施用(施用量是玉米季氮肥施用总量的 80%),第二次于 2019 年 5 月 3 日作为基肥施用,磷肥和钾肥作为基肥一次性施用,肥料均在小雨前后撒施. 秸秆和生物炭在种植油菜前 2 d 均匀覆盖在地表,生物炭按 $10\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的施用量施用,秸秆切成 10 cm 左右按 $4\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的施用量均匀覆盖在小区地表. 同一处理的各小区施肥量和田间管理均相同,具体的施肥量见表 2.

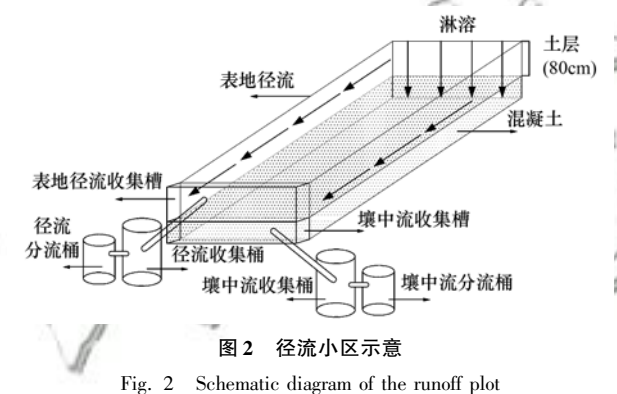


图 2 径流小区示意

Fig. 2 Schematic diagram of the runoff plot

本试验共设置 5 个处理:①不施肥处理、②常规施肥处理、③优化施肥处理、④85% 优化施肥配施生

表 2 各处理的施肥量

Table 2 Amount of fertilizer applied in each treatment

项目	处理	N/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	P ₂ O ₅ / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	K ₂ O/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	硼砂/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
油菜季	不施肥	—	—	—	—
	常规施肥	150	90	90	15
	优化施肥	120	75	75	15
	85% 优化施肥配施生物炭	102	63.75	63.75	15
	85% 优化施肥配施秸秆	102	63.75	63.75	15
玉米季	不施肥	—	—	—	—
	常规施肥	300	150	135	—
	优化施肥	270	120	105	—
	85% 优化施肥配施生物炭	229.5	102	89.25	—
	85% 优化施肥配施秸秆	229.5	102	89.25	—

1.3 样品采集与测定

本试验的观测期为 2018 年 10 月 15 日至 2019 年 10 月 14 日. 在观测期内,每次降雨产流后进行采样. 采样时先测量各小区地表径流和壤中流收集

桶中的水位以计算地表径流和壤中流径流量,若分流桶中有水样,也需要测定. 将地表径流收集桶中的水样搅拌均匀,用塑料瓶采集两瓶混合水样,若分流桶中有水样,要将两个桶中的水样混合均匀后采

样,一瓶用来测定径流泥沙量,一瓶用来测定径流养分含量.将壤中流收集桶中的水样搅拌均匀,待水样静置至悬浮物沉淀后采集一瓶水样以测定径流养分含量,若分流桶中有水样,需要先将两桶水样混合均匀后采样.水样采集后立即测定可溶性有机碳(DOC)含量,或在样品中加入硫酸至 pH 小于 2 后储存在低于 4℃ 的冰箱里,待测.将水样过 0.45 μm 滤膜,用 Multi N/C 2100 分析仪(耶拿,德国)测定水样中的可溶性有机碳(DOC)含量.

采用梅花形多点取样法在各小区取 0~20 cm 的土壤,四分法混合后保留 1.0 kg 土样,将土样带回实验室保存.土样去除杂物后自然风干、研磨、过筛,用于测定土壤有机碳(SOC)含量和土壤基本理化性质,土壤有机碳(SOC)含量采用 K_2CrO_7 外加热容量法测定,土壤基本理化性质的测定方法见文献[21].试验过程中采集两次土样,第一次是采集试验处理前的基础土样,第二次是玉米收获后进行采样.降雨量数据由试验站人工气象降雨观测平台提供,观测的仪器是虹吸式雨量计.

1.4 数据处理

数据分析和图表绘制用 SPSS 23.0 和 Microsoft

Excel 2016 软件进行.所有的结果用 3 次重复的平均值表示.采用 LSD 最小显著差数法进行不同处理间的多重比较($P < 0.05$).

2 结果与分析

2.1 紫色土旱坡地的产流产沙特征

由图 3 可知,在观测期内有 36 次产生径流(径流包括地表径流和壤中流)的降雨,累计降雨 847.7 mm,降雨主要集中在 6、7 和 8 月,降雨量峰值出现在 8 月 8 日,达到 84.8 mm. CK、常规、优化、生物炭和秸秆处理的紫色土旱坡地分别产生了 10、6、9、5、4 次地表径流和 32、15、26、27、30 次壤中流,壤中流径流量占径流总量的 52.84%~92.23%,说明壤中流是紫色土旱坡地径流的主要流失方式.秸秆处理的地表径流总量最小(1 311.9 L),较 CK、常规和优化处理分别降低了 76.20%、65.68% 和 30.39%,生物炭处理的地表径流总量为 4 146.15 L,仅低于 CK 处理.秸秆处理能显著减少紫色土旱坡地的地表径流量,生物炭处理在降雨量较小时能阻控地表径流的产生,在降雨量大时反而起促进作用,相比于其它 4 个处理,生物炭处理在整体上显著增

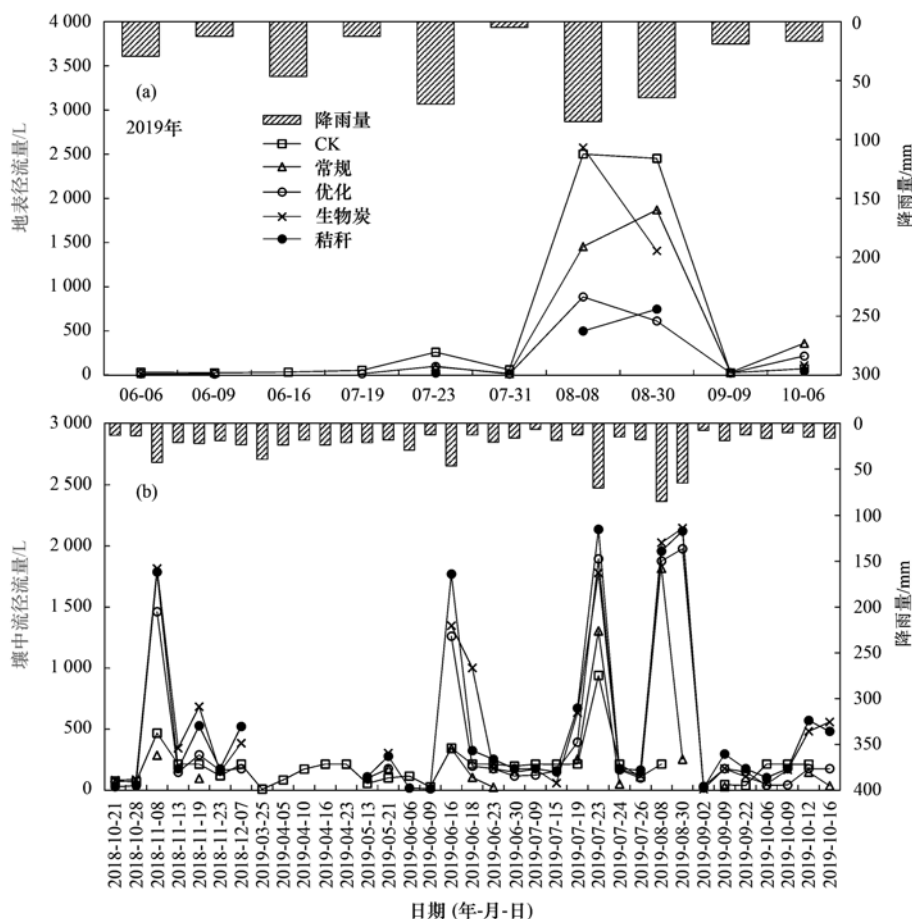


图 3 紫色土旱坡地不同施肥处理条件下的地表径流量和壤中流径流量

Fig. 3 Surface and subsurface runoff fluxes under different fertilization treatments on sloping farmland

加了紫色土旱坡地的地表径流量。在降雨量较小的3月和4月,只有CK处理产生了壤中流,随着降雨量的增大,各处理的壤中流径流量也在不断增加。不同施肥处理的壤中流径流量表现为:秸秆>生物炭>优化>CK>常规,施用生物炭和秸秆对紫色土旱坡地壤中流的产生均有促进作用。

如表3所示,不同施肥处理的产沙量呈现:生物炭>常规>CK>优化>秸秆,秸秆处理的产沙量较CK、常规、优化和生物炭处理分别降低了48.61%、

76.47%、39.41%和93.30%。各施肥处理的泥沙流失主要集中在降雨量较大的8月8日和8月30日,其中,生物炭处理在这两天的产沙量占观测期间总产沙量的99.53%,显著高于其它4个处理,但生物炭处理在6、7和9月的产沙量显著低于CK、常规和优化处理($P<0.05$)。施用秸秆能显著减少紫色土旱坡地的泥沙流失,而施用生物炭在降雨量较少的时候能减少泥沙流失量,在降雨量大时会导致泥沙流失更加严重。

表3 紫色土旱坡地在不同施肥处理条件下的产沙量¹⁾/kg

处理	日期(月-日)									总量
	06-06	06-09	07-19	07-23	07-31	08-08	08-30	09-09	10-06	
CK	0.23±0.02a	0.06±0.00	0.07±0.02	0.33±0.09a	0.05±0.02a	5.87±0.75c	7.57±0.97b	0.13±0.01a	0.75±0.00b	15.08±0.21c
常规	—	—	—	0.08±0.01b	0.02±0.00b	14.29±1.91b	16.19±2.24a	0.12±0.02a	2.24±0.31a	32.94±0.75b
优化	0.05±0.00b	0.03±0.00	0.01±0.00	0.09±0.03b	0.01±0.00b	6.74±0.79c	4.94±0.53b	0.08±0.00b	0.85±0.15b	12.79±0.17d
生物炭	0.06±0.01b	—	—	0.06±0.00b	—	95.95±8.91a	19.18±3.01a	—	0.43±0.09c	115.67±2.40a
秸秆	—	—	—	0.02±0.01b	—	2.11±0.32c	5.51±0.77b	—	0.11±0.04d	7.75±0.29e

1) 数据是平均值±标准差, 同列不同字母表示各处理差异显著 ($P<0.05$)

2.2 不同施肥处理条件下可溶性有机碳(DOC)的流失特征

在图4(a)中,CK处理的地表径流DOC流失浓度变化范围为5.41~11.85 mg·L⁻¹,显著小于其它施肥处理(常规、优化、生物炭和秸秆)。地表径流DOC流失浓度的最小值出现在8月8日的秸秆处理,为1.91 mg·L⁻¹,同期的CK、常规、优化和生物炭处理较秸秆处理分别提高了324.67%、563.78%、

579.27%和325.72%。生物炭和秸秆处理的地表径流DOC流失浓度在8月30日达到峰值,分别为21.14 mg·L⁻¹和17.74 mg·L⁻¹,CK、常规和优化处理的峰值分别为11.85、16.96和13.53 mg·L⁻¹。在图4(b)中,从平均值来看,各施肥处理的地表径流DOC平均流失浓度大小呈现:生物炭>优化>秸秆>常规>CK,生物炭处理显著高于其它4个处理,常规、优化和秸秆处理之间的差异并不显著。就其极值范围来看,秸秆处理的变化范围最大。

图5(a)是各施肥处理壤中流DOC流失浓度的变化情况,各施肥处理壤中流DOC流失浓度的最小值均出现在2018年11月。施肥后的第1d,生物炭处理的壤中流DOC流失浓度达到了最大值,为20.74 mg·L⁻¹,秸秆处理为20.27 mg·L⁻¹,分别是同期CK处理的9.38和9.17倍,生物炭和秸秆处理的壤中流DOC流失浓度随着降雨过程出现了多次峰值。从图5(b)中可以看出,生物炭处理的壤中流DOC平均流失浓度最大,为8.75 mg·L⁻¹,CK处理的最小,为5.14 mg·L⁻¹,常规、优化、生物炭和秸秆处理的DOC平均流失浓度均显著高于CK处理,但这4个处理之间无显著性差异。秸秆处理的极值范围最大,生物炭处理次之,CK处理的最小。

从表4可以看出,各施肥处理的地表径流DOC流失通量之间均存在显著差异,生物炭处理的地表径流DOC流失通量最大,其次为CK、常规和优化处理,秸秆处理的地表径流DOC流失通量显著低于其它4个处理($P<0.05$)。优化、生物炭和秸秆处理的

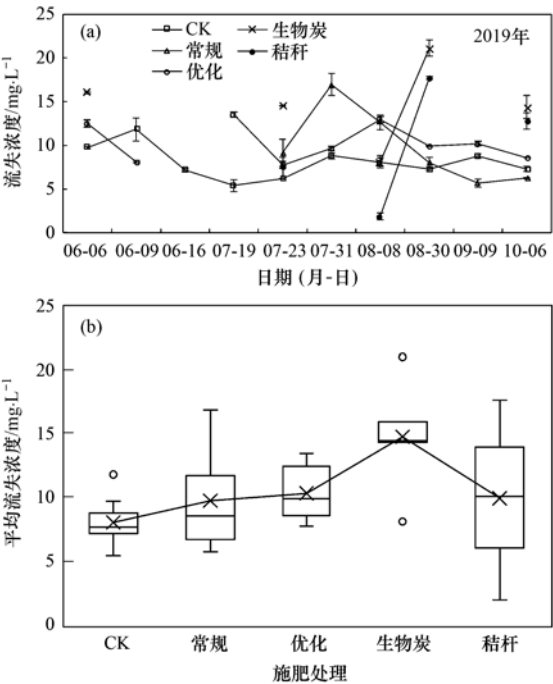


图4 地表径流DOC流失浓度的变化情况和箱形图

Fig. 4 Changes and box plots of DOC loss concentration in the surface runoff flow

壤中流 DOC 流失通量均显著高于 CK 处理,但这 3 个处理之间不存在显著性差异. 不同施肥处理的 DOC 总流失通量大小依次为:生物炭 > 优化 > 秸秆 > 常规 > CK,生物炭处理的 DOC 总流失通量显著高于其它 4 个处理,优化和秸秆处理之间差异不显

著. 各施肥处理的壤中流 DOC 流失通量占 DOC 总流失通量的 43. 64%~87. 35%,地表径流 DOC 流失通量占 DOC 总流失通量的 12. 65%~56. 36%. 说明壤中流是紫色土旱坡地可溶性有机碳 (DOC) 流失的主要途径.

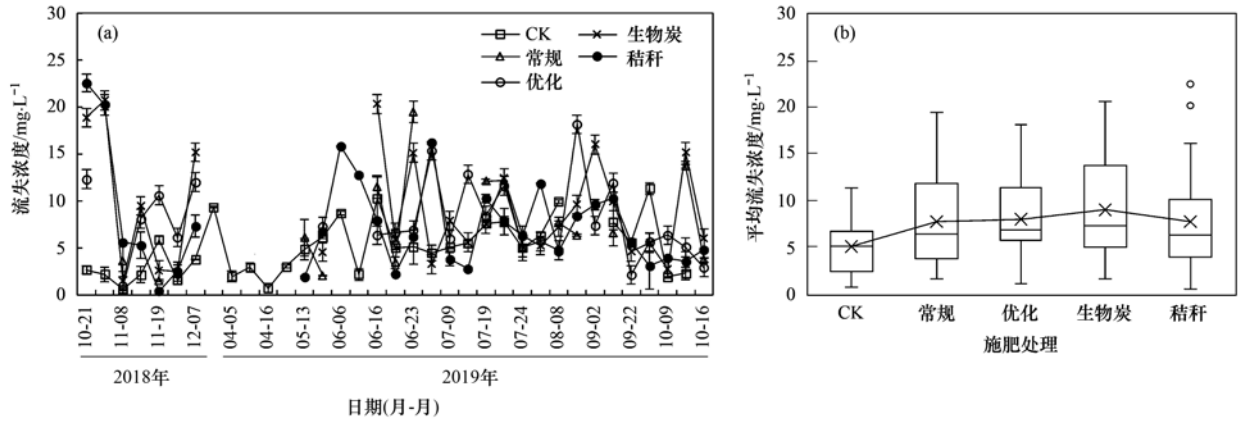


图 5 壤中流 DOC 流失浓度的变化情况和箱形图
Fig. 5 Changes and box plots of DOC loss concentration in the subsurface runoff flow

表 4 不同施肥处理条件下 DOC 的流失通量¹⁾

Table 4 DOC loss fluxes under different fertilization treatments

处理	流失通量/ $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$		总流失通量 / $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$	所占比例/%	
	地表径流	壤中流		地表径流	壤中流
CK	$4.21\pm0.05\text{b}$	$3.26\pm0.31\text{b}$	$7.47\pm0.18\text{c}$	56.36	43.64
常规	$3.69\pm0.02\text{c}$	$4.43\pm0.14\text{b}$	$8.12\pm0.08\text{c}$	45.44	54.56
优化	$2.09\pm0.03\text{d}$	$10.26\pm2.26\text{a}$	$12.35\pm1.15\text{b}$	16.92	83.08
生物炭	$5.30\pm0.44\text{a}$	$13.52\pm2.02\text{a}$	$18.82\pm1.23\text{a}$	28.16	71.84
秸秆	$1.49\pm0.04\text{e}$	$10.31\pm0.42\text{a}$	$11.80\pm0.23\text{b}$	12.65	87.35

1) 所列数据是平均值 $\pm$ 标准差, 同列不同字母表示各处理差异显著 ($P<0.05$)

2.3 不同施肥处理条件下泥沙有机碳的流失特征

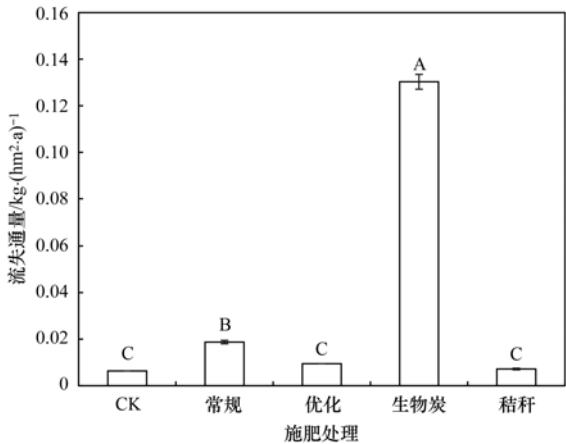
在图 6 中,不同施肥处理的泥沙有机碳流失通量呈现:生物炭 > 常规 > 优化 > 秸秆 > CK,生物炭处理的泥沙有机碳流失通量为 0.130

$\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$,显著高于其它 4 个处理,CK、优化和秸秆处理的泥沙有机碳流失通量之间不存在显著性差异,但是均显著低于常规处理. 秸秆处理的泥沙有机碳流失通量较常规处理降低了 61.60%,相比于常规施肥,秸秆还田能显著减少紫色土旱坡地侵蚀泥沙中有机碳的流失,而施用生物炭会增加侵蚀泥沙中的有机碳流失 ($P<0.05$).

土壤有机碳流失包括 DOC 流失和泥沙有机碳流失,CK、常规、优化、生物炭和秸秆处理的泥沙有机碳流失通量分别占土壤有机碳总流失通量的 0.08%、0.23%、0.08%、0.69% 和 0.06%,各施肥处理的 DOC 流失通量占土壤有机碳总流失通量的 99.31%~99.94%,说明可溶性有机碳 (DOC) 是紫色土旱坡地土壤有机碳流失的主要形式.

2.4 不同施肥处理条件下土壤有机碳 (SOC) 的含量

图 7 是不同施肥处理条件下 SOC 的含量,生物炭处理的 SOC 含量最大 ($6.61\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),其次是秸秆处理 ($4.46\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),CK 处理的 SOC 含量最低 ($2.73\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$). 生物炭处理的 SOC 含量较 CK、常

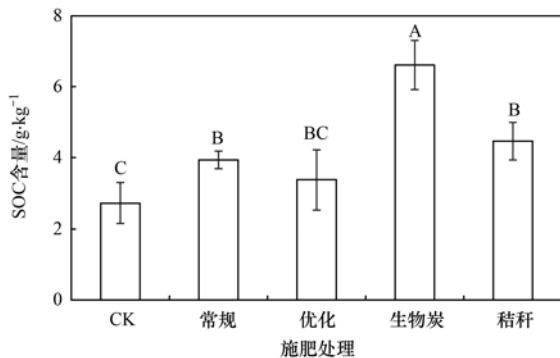


不同字母表示不同施肥处理的有机碳流失通量差异显著 ($P<0.05$)

图 6 不同施肥处理条件下泥沙有机碳的流失通量

Fig. 6 Loss flux of organic carbon in sediment under different fertilization treatments

规和优化处理分别提高了 142.45%、68.04% 和 95.79%, 秸秆处理的 SOC 含量较 CK、常规和优化处理分别提高了 63.66%、13.43% 和 32.16%, 常规和优化处理的 SOC 含量较 CK 处理分别提高了 44.28% 和 23.83%。相比于 CK 处理, 其它 4 个施肥处理(常规、优化、生物炭和秸秆)均能显著提高土壤有机碳(SOC)含量, 以施用生物炭的效果最佳。



不同字母表示不同施肥处理的 SOC 含量差异显著 ($P < 0.05$)

图 7 不同施肥处理条件下 SOC 的含量

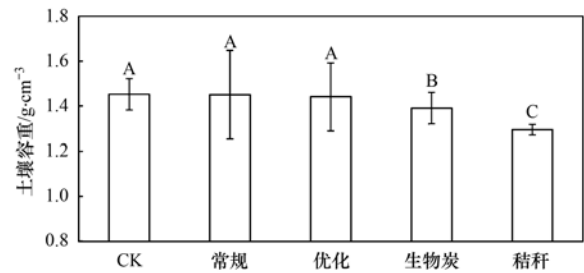
Fig. 7 Content of SOC under different fertilization treatments

3 讨论

3.1 秸秆和生物炭处理对紫色土旱坡地径流产沙量的影响

本研究表明, 壤中流径流量占径流总量的 52.84%~92.23%, 是紫色土旱坡地径流的主要流失方式。这与 Zhu 等^[22]对紫色土壤中流和地表径流流失特征的研究结果一致。紫色土区降雨丰富, 紫色土土层浅薄, 具有风化成土速度快、质地疏松、孔隙度大、入渗能力强等特点, 土壤水分在降雨时极易下渗至土壤-岩石界面, 而紫色泥页岩透水性弱, 水分到达岩层后难以继续下渗, 沿坡侧向流动汇集成壤中流, 因此紫色土旱坡地的壤中流极为发育, 是雨季径流的主要方式^[23, 24]。本研究发现, 秸秆和生物炭处理均显著增加了紫色土旱坡地的壤中流径流量, 与龙天渝等^[25]和刘海涛等^[26]的研究结果一致。因为秸秆和生物炭质轻, 施入土壤后会使得土壤更加疏松, 显著降低了土壤容重(图 8), 提高了土壤的水分入渗能力和入渗速率^[27], 入渗的水分侧向流动汇集形成壤中流, 导致壤中流增多。

土壤培肥是改良土壤结构、提高土壤肥力和减少水土流失的有效措施^[7]。本研究发现, 相比于 CK、常规和优化处理, 秸秆处理能显著减少紫色土旱坡地的地表径流量和产沙量, 与孔樟良等^[28]和林超文等^[29]的研究结果一致。因为秸秆作为地被防护物覆盖在农田地表, 能有效阻挡雨滴对土壤的冲击和溅蚀, 防止地表土壤形成结皮, 推迟地表径流产



不同字母表示不同施肥处理的土壤容重差异显著 ($P < 0.05$)

图 8 不同施肥处理条件下的土壤容重

Fig. 8 Soil bulk density under different fertilization treatments

生的时间, 秸秆覆盖还能提高地表糙度, 增强地表的蓄水能力, 拦蓄随径流迁移的土壤颗粒, 从而减少地表径流量和泥沙流失量^[30, 31]。本研究还发现, 生物炭处理在降雨量较小的时候能减少紫色土旱坡地的地表径流量和产沙量, 但是在强降雨条件下, 反而会加剧地表径流和泥沙流失, 与范亚琳等^[10]的研究结果一致。因为生物炭具有丰富的孔隙结构、较大的比表面积和较多的含氧官能团, 在降雨量较小时施入土壤中能改善土壤的吸附性和持水性^[32], 但是在强降雨时, 由于雨滴具有很大的动能, 对土壤和生物炭产生较大的击打和溅蚀作用, 会破坏土壤结构, 促进坡面地表结皮, 加速地表径流的产生, 质轻的生物炭容易随地表径流和泥沙一起流失, 导致地表径流量和泥沙流失量增加。

3.2 秸秆和生物炭处理对可溶性有机碳(DOC)流失的影响

降雨过程中, 水分通过溶解土壤中的可溶性有机碳(DOC)并汇入壤中流中, 成为紫色土旱坡地 DOC 流失的主要驱动力。在本文中, CK、常规、优化、生物炭和秸秆处理的壤中流 DOC 流失通量分别占总流失通量的 43.64%、54.56%、83.08%、71.84% 和 87.35%, 说明壤中流是紫色土旱坡地 DOC 流失的主要途径, 武万华等^[33]对紫色土坡耕地玉米各生育期 DOC 流失特征的研究也得出了相同的结论。

本研究发现, 秸秆处理能显著减少紫色土旱坡地地表径流 DOC 流失通量, 但是无法阻控壤中流 DOC 的流失, 生物炭处理的地表径流 DOC 流失通量和壤中流 DOC 流失通量均高于其它处理, 不同施肥处理的 DOC 总流失通量大小依次为: 生物炭 > 优化 > 秸秆 > 常规 > CK。因为 DOC 是通过地表径流和壤中流的形式流失的, 所以地表径流和壤中流 DOC 流失通量表现出和径流流失量一致的规律。

3.3 秸秆和生物炭处理对泥沙有机碳流失的影响

在本文中, 秸秆处理能显著减少紫色土旱坡地泥沙有机碳的流失, 而生物炭处理会增加泥沙有机

碳的流失。因为覆盖在地表的秸秆能拦蓄随径流流失的土壤颗粒,减少泥沙流失量和随泥沙流失的养分含量,而生物炭质轻且含碳量很高,容易随地表径流和泥沙一起流失,成为泥沙有机碳流失的重要来源,导致泥沙有机碳流失通量的增加。

肖胜生等^[34]通过研究自然降雨条件下红壤坡面有机碳的选择性迁移发现,不同坡面的土壤有机碳随泥沙迁移的比例为 36.03%~64.67%,泥沙有机碳是土壤有机碳流失的重要来源。郭太龙等^[2]的研究也认为土壤有机碳流失主要以泥沙为载体,随径流流失的有机碳只是很少一部分。这些研究只关注随地表径流流失的部分有机碳,忽略了壤中流 DOC 的流失,因此对土壤有机碳流失特征的分析出现了偏差,本研究充分考虑了随壤中流流失的 DOC,发现可溶性有机碳(DOC)流失通量占土壤有机碳总流失通量的 99.31%~99.94%,是紫色土旱坡地土壤有机碳流失的主要形式,与李太魁等^[35]的研究结果一致。

3.4 秸秆和生物炭处理对土壤有机碳(SOC)含量的影响

本研究表明,秸秆和生物炭处理均能显著提高土壤有机碳(SOC)含量,以生物炭处理的效果最好,这和徐国鑫等^[36]的研究结果一致。施用秸秆一方面能减少紫色土旱坡地的 DOC 流失通量和泥沙有机碳流失通量,另一方面,玉米秸秆中大约含有 40%~50%的碳元素,施入土壤后成为土壤有机碳的来源^[37],秸秆还田在减少土壤有机碳流失的同时为土壤提供了新的碳源,从而提高 SOC 含量,是一种经济又环保的土壤培肥措施。生物炭含碳量高达 60%以上,加入土壤中能显著提高 SOC 含量^[38],但是生物炭在降雨时会成为紫色土旱坡地有机碳流失的重要来源,加剧碳流失造成的环境污染问题,不适合作为最佳养分管理方式在紫色土区推广施用。

4 结论

(1) 秸秆处理的地表径流量和产沙量较优化处理分别降低了 30.39% 和 39.41%,但是壤中流径流量显著高于优化处理,生物炭处理的产流产沙量均显著高于优化处理,各处理的壤中流径流量占径流总量的 52.84%~92.23%,壤中流是紫色土旱坡地径流流失的主要方式。

(2) 各处理的壤中流 DOC 流失通量占 DOC 总流失通量的 43.64%~87.35%,壤中流是土壤可溶性有机碳(DOC)流失的主要途径。秸秆和生物炭处理的壤中流 DOC 流失通量和优化处理之间的差异不显著,秸秆处理的地表径流 DOC 流失通量较优化

处理减少了 28.71%,生物炭处理的地表径流 DOC 流失通量最高,显著高于其它 4 个施肥处理。

(3) 不同施肥处理的泥沙有机碳流失通量呈现:生物炭>常规>优化>秸秆>CK,DOC 流失通量呈现:生物炭>优化>秸秆>常规>CK,各处理的 DOC 流失通量占土壤有机碳总流失通量的 99.31%~99.94%,可溶性有机碳(DOC)是紫色土旱坡地土壤有机碳流失的主要形式,秸秆处理较优化处理能减少紫色土旱坡地的土壤有机碳流失通量,生物炭处理则加剧了紫色土旱坡地的土壤有机碳流失。

(4) 生物炭处理的 SOC 含量最大(6.61 g·kg⁻¹),其次是秸秆处理(4.46 g·kg⁻¹),生物炭和秸秆处理的 SOC 含量较优化处理分别提高了 95.79% 和 32.16%,施用生物炭和秸秆均能显著提高紫色土旱坡地的土壤有机碳(SOC)含量。

(5) 综上所述,85% 优化施肥配施秸秆(秸秆处理)是减少紫色土旱坡地产流产沙量和土壤有机碳流失通量并提高土壤有机碳含量的最佳养分管理方式,是既经济又环保的土壤培肥措施,对实现农田土壤的可持续发展具有重要意义,因此,在三峡库区应该大力提倡减量化肥配施秸秆。

参考文献:

- [1] 罗梅,田冬,高明,等. 紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4327-4337.
Luo M, Tian D, Gao M, et al. Soil organic carbon of purple soil as affected by different application of biochar[J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4327-4337.
- [2] 郭太龙,谢金波,孔朝晖,等. 华南典型侵蚀区土壤有机碳流失机制模拟研究[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(8): 1266-1273.
Guo T L, Xie J B, Kong C H, et al. Experimental study on soil organic carbon loss in red soil erosion under different simulated rainfall intensity and slope gradient [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, **24**(8): 1266-1273.
- [3] 黄磊,王长科,巢清尘. IPCC《气候变化与土地特别报告》解读[J]. 气候变化研究进展, 2020, **16**(1): 1-8.
Huang L, Wang C K, Chao Q C. Interpretation of IPCC special report on climate change and land [J]. Climate Change Research, 2020, **16**(1): 1-8.
- [4] 苏正安,熊东红,张建辉,等. 紫色土坡耕地土壤侵蚀及其防治措施研究进展[J]. 中国水土保持, 2018, (2): 42-47.
Su Z A, Xiong D H, Zhang J H, et al. Research progress of soil erosion of purple soil slope farmland and its prevention and control measures [J]. Soil and Water Conservation in China, 2018, (2): 42-47.
- [5] 焉莉,操梦颖,胡中强,等. 施肥方式对东北玉米种植区氮磷流失的影响[J]. 环境污染与防治, 2018, **40**(2): 170-175, 180.
Yan L, Cao M Y, Hu Z Q, et al. The effect of fertilization method on nitrogen and phosphorus loss in maize planting zone in Northeast China [J]. Environmental Pollution and Control, 2018, **40**(2): 170-175, 180.

- [6] 张梦, 李冬杰, 周玥. 雨强和坡度对黄土坡面土壤侵蚀及氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2018, **32**(1): 85-90.
Zhang M, Li D J, Zhou Y. Effects of rainfall intensity and slope gradient on soil erosion, nitrogen and potassium loss on loess slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, **32**(1): 85-90.
- [7] 黄东风, 王利民, 李卫华, 等. 培肥措施培肥土壤的效果与机理研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2014, **22**(2): 127-135.
Huang D F, Wang L M, Li W H, *et al.* Research progress on the effect and mechanism of fertilization measure on soil fertility[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, **22**(2): 127-135.
- [8] Gholami L, Sadeghi S H, Homaee M. Straw mulching effect on splash erosion, runoff, and sediment yield from eroded plots[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, **77**(1): 268-278.
- [9] Gómez J A, Guzmán M G, Giráldez J V, *et al.* The influence of cover crops and tillage on water and sediment yield, and on nutrient, and organic matter losses in an olive orchard on a sandy loam soil[J]. Soil and Tillage Research, 2009, **106**(1): 137-144.
- [10] 范亚琳, 刘贤赵, 高磊, 等. 不同培肥措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失的影响[J]. 土壤学报, 2019, **56**(3): 638-649.
Fan Y L, Liu X Z, Gao L, *et al.* Effects of fertility-building practices on soil organic carbon loss with sediment in sloping cropland of red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, **56**(3): 638-649.
- [11] Jordán A, Zavala L M, Gil J. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain[J]. CATENA, 2010, **81**(1): 77-85.
- [12] Prosdociimi M, Jordán A, Tarolli P, *et al.* The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards[J]. Science of the Total Environment, 2016, **547**: 323-330.
- [13] Huang R, Gao X S, Wang F H, *et al.* Effects of biochar incorporation and fertilizations on nitrogen and phosphorus losses through surface and subsurface flows in a sloping farmland of Entisol[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, **300**, doi: 10.1016/j.agee.2020.106988.
- [14] Feng Y Z, Xu Y P, Yu Y C, *et al.* Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, **46**: 80-88.
- [15] Jien S H, Wang C S. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil[J]. CATENA, 2013, **110**: 225-233.
- [16] 褚军, 薛建辉, 金梅娟, 等. 生物炭对农业面源污染氮、磷流失的影响研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2014, **30**(4): 409-415.
Chu J, Xue J H, Jin M J, *et al.* Review of researches on effects of biochar in reducing nitrogen and phosphorus losses with agricultural nonpoint source pollution[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014, **30**(4): 409-415.
- [17] Nguyen B T, Lehmann J, Kinyangi J, *et al.* Long-term black carbon dynamics in cultivated soil[J]. Biogeochemistry, 2008, **89**(3): 295-308.
- [18] 聂小东, 李忠武, 王晓燕, 等. 雨强对红壤坡耕地泥沙流失及有机碳富集的影响规律研究[J]. 土壤学报, 2013, **50**(5): 900-908.
Nie X D, Li Z W, Wang X Y, *et al.* Effect of rainfall intensity on soil loss from slope farmland of red soil and organic carbon enrichment in sediment[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, **50**(5): 900-908.
- [19] 张雪, 李忠武, 申卫平, 等. 红壤有机碳流失特征及其与泥沙径流流失量的定量关系[J]. 土壤学报, 2012, **49**(3): 465-473.
Zhang X, Li Z W, Shen W P, *et al.* Characteristics of loss of organic carbon in red soil and their quantitative relationships with sediment and runoff generation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, **49**(3): 465-473.
- [20] 陆银梅, 李忠武, 聂小东, 等. 红壤缓坡地径流与土壤可蚀性对土壤有机碳流失的影响[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(19): 135-141.
Lu Y M, Li Z W, Nie X D, *et al.* Effects of overland flow and soil erodibility on soil organic carbon loss in red soil sloping land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(19): 135-141.
- [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] 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.
- [23] 熊子怡, 王子芳, 龙翼, 等. 紫色土旱坡地氮流失通量对减配施肥秸秆的响应[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1930-1940.
Xiong Z Y, Wang Z F, Long Y, *et al.* Response of nitrogen loss flux in purple soil sloping field to reduced fertilizer and combining straw[J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1930-1940.
- [24] 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.
- [25] 龙天渝, 刘金辉, 刘祥章, 等. 地表覆盖对紫色土坡耕地壤中流流动和硝态氮运移过程的影响[J]. 水土保持研究, 2018, **25**(6): 68-73.
Long T Y, Liu J H, Liu X Z, *et al.* Effects of surface mulching on interflow and nitrate migration process in a sloping farmland of purple soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, **25**(6): 68-73.
- [26] 刘海涛, 姚莉, 朱永群, 等. 深松和秸秆覆盖条件下紫色土坡耕地水分养分流失特征[J]. 水土保持学报, 2018, **32**(6): 52-57, 165.
Liu H T, Yao L, Zhu Y Q, *et al.* Characteristics of water and nutrients loss under subsoiling and straw mulching in purple soil slope cropland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, **32**(6): 52-57, 165.
- [27] 寇青青. 生物炭对紫色土水分下渗及再分布过程影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
Kou Q Q. Effect of biochar on water infiltration and redistribution process of purple soil[D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [28] 孔樟良, 章明奎, 谢国雄. 秸秆覆盖对低龄茶园土壤性状和地表养分流失的影响[J]. 江西农业学报, 2015, **27**(4): 24-27.
Kong Z L, Zhang M K, Xie G X. Effects of straw mulch on soil properties and nutrient runoff loss in young tea garden[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2015, **27**(4): 24-27.
- [29] 林超文, 罗春燕, 庞良玉, 等. 不同耕作和覆盖方式对紫色

- 丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(22): 6091-6101.
- Lin C W, Luo C Y, Pang L Y, *et al.* Effects of different cultivation and mulching methods on soil erosion and nutrient losses from a purple soil of sloping land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(22): 6091-6101.
- [30] 费凯, 张丽萍, 邓龙洲, 等. 极端暴雨下裸地坡面径流及壤中流中碳素输移特征[J]. 土壤学报, 2020, **57**(3): 623-635.
- Fei K, Zhang L P, Deng L Z, *et al.* Carbon loss with slope surface runoff and interflow on bare slopes as affected by Severe Rainstorm[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57**(3): 623-635.
- [31] Zhou H, Peng X H, Darboux F. Effect of rainfall kinetic energy on crust formation and interrill erosion of an ultisol in subtropical China[J]. *Vadose Zone Journal*, 2013, **12**(4): 1-9.
- [32] van Zwieten L, Kimber S, Morris S, *et al.* Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant and Soil*, 2010, **327**(1-2): 235-246.
- [33] 武万华, 何淑勤, 宫渊波, 等. 玉米季横垄坡面径流及可溶性有机碳流失特征[J]. 中国水土保持科学, 2017, **15**(5): 31-38.
- Wu W H, He S Q, Gong Y B, *et al.* Characteristics of runoff and dissolved organic carbon loss in slope farmland with contour ridges during maize growth stages[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, **15**(5): 31-38.
- [34] 肖胜生, 汤崇军, 王凌云, 等. 自然降雨条件下红壤坡面有机碳的选择性迁移[J]. 土壤学报, 2017, **54**(4): 874-884.
- Xiao S S, Tang C J, Wang L Y, *et al.* Soil erosion-induced selective transfer of organic carbon in red soil slope field under natural rainfall[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, **54**(4): 874-884.
- [35] 李太魁, 杨小林, 花可可, 等. 紫色土坡耕地可溶性有机碳淋失特征[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(10): 1836-1842.
- Li T K, Yang X L, Hua K K, *et al.* Characteristics of dissolved organic carbon leaching from sloping cropland in the purple soil[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2018, **27**(10): 1836-1842.
- [36] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 355-362.
- Xu G X, Wang Z F, Gao M, *et al.* Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 355-362.
- [37] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(5): 526-535.
- Pan J L, Dai W A, Shang Z H, *et al.* Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, **21**(5): 526-535.
- [38] 柯跃进, 胡学玉, 易卿, 等. 水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其CO₂释放的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 93-99.
- Ke Y J, Hu X Y, Yi Q, *et al.* Impacts of rice straw biochar on organic carbon and CO₂ release in arable soil[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 93-99.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)