

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

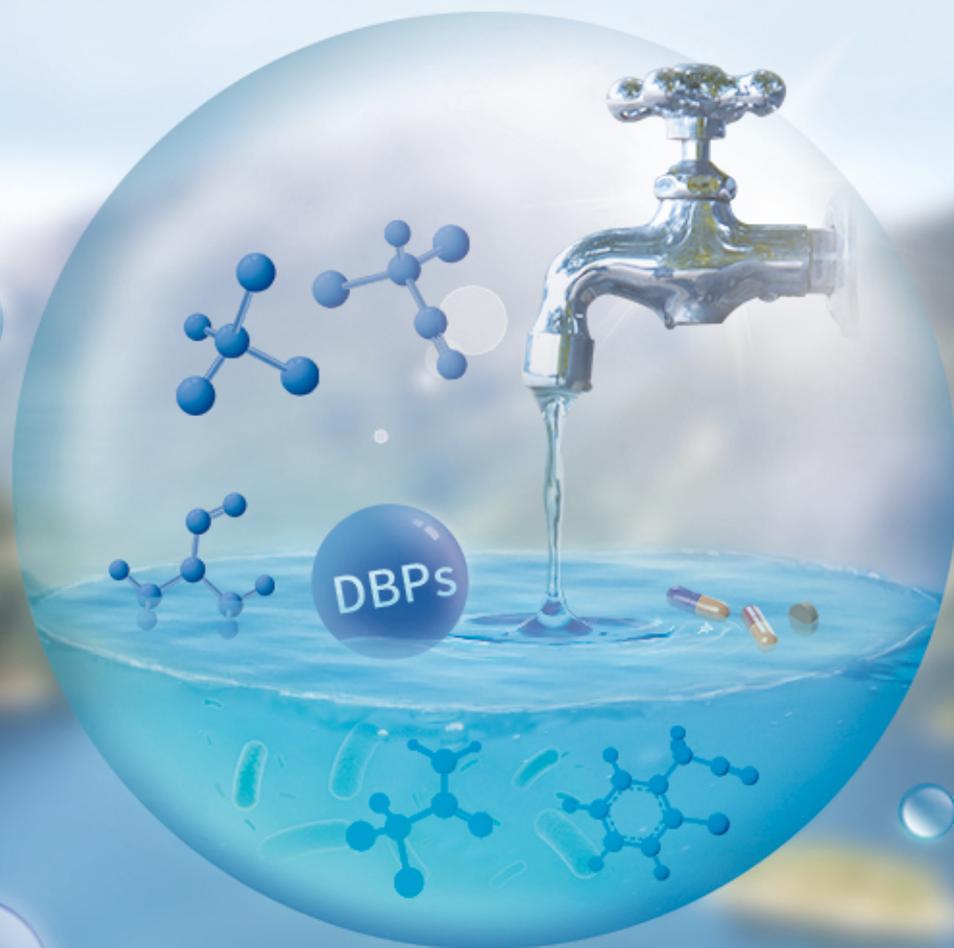
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略

楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期
Vol.42 No.11

目次

综述与专论

饮用水中的消毒副产物及其控制策略 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华(5059)
生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹(5086)

研究报告

1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 PM_{2.5} 浓度时空分布的影响 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑(5100)
COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平(5109)

汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铨, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华(5122)

石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇(5131)

天津市冬季空气湿度对 PM_{2.5} 和能见度的影响 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹(5143)

承德市 PM_{2.5} 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升(5152)

中国生活源挥发性有机物排放清单 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍(5162)

2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启(5169)

基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华(5180)

典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润(5193)

沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 库盈盈, 任万辉, 苏枫棋, 于兴娜(5201)

天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强(5210)

郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙(5220)

基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O₃ 浓度变化的影响 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超(5228)

长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月(5239)

河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞晗, 张馨童, 姚波, 崔建升(5250)

城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋(5264)

北京城市河流水和沉积物中微塑料的组成与分布 胡嘉敏, 左剑恶, 李頔, 谢珍雯, 陈磊(5275)

太湖西岸地表水中中性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯(5284)

河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧(5294)

白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升(5303)

雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊(5312)

基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南(5322)

千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮(5333)

巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠(5346)

洪泽湖围网养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 瞿鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞(5355)

成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛(5364)

雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰(5375)

粤港澳大湾区陆源氮污染源结构与空间分布 董斯齐, 黄翀(5384)

红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇(5394)

减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璞骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲(5405)

互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞(5414)

基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 彭柯, 董志, 邸琰蓉, 郭道宇(5424)

硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 赵敏, 张小平, 王梁嵘(5433)

高锰酸钾改性桉木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹤, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华(5440)

混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤(5450)

负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟(5460)

一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送(5472)

生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳(5481)

紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组含量对施肥管理的响应 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳(5491)

南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京(5500)

城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君(5510)

我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平(5519)

典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平(5526)

稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区, 以重庆市某区为例 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠(5535)

镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 耿杰, 李佳欣, 陈文清(5545)

纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5554)

《环境科学》征订启事(5108) 《环境科学》征稿简则(5151) 信息(5249, 5263, 5283)

紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应

徐曼¹, 余烁², 王富华¹, 王丹³, 王莹燕¹, 杨文娜¹, 高明¹, 王子芳^{1*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市璧山区防汛抗旱调度中心, 重庆 402760; 3. 重庆地质矿产研究院, 重庆 401120)

摘要: 紫色土旱坡地作为三峡地区的主要耕地类型, 其土壤肥力直接决定着作物产量. 为探究不同施肥处理对紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量的影响, 在中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所三峡库区试验站开展田间试验, 设置5个处理: 不施肥(CK)、常规施肥(T₁)、优化施肥(T₂)、85%优化施肥配施生物炭(T₃)和85%优化施肥配施秸秆(T₄), 研究不同施肥处理下土壤团聚体组成及不同坡位土壤总有机碳、可溶性有机碳、微生物量碳含量间的差异. 结果表明: ①施肥均能增加土壤大团聚体含量, 提高土壤有机碳含量, 以T₃和T₄处理尤为显著. ②CK、T₁和T₂处理的土壤有机碳含量均表现为: 下坡位 > 中坡位 > 上坡位, 而T₃和T₄处理土壤有机碳均是在中坡位含量最大. ③随着坡位的降低, CK、T₁、T₂和T₃处理土壤可溶性有机碳含量呈增加趋势, CK、T₁、T₂和T₄处理土壤微生物量碳呈增加趋势, 而T₃处理土壤微生物量碳在坡面上的分布为中坡位最高, 下坡位其次. 总体上, 生物炭和秸秆处理均能显著提高土壤碳含量, 且能延缓土壤碳素在坡面迁移, 对改善三峡库区紫色土旱坡地土壤质量和减少水环境污染具有指导意义.

关键词: 紫色土旱坡地; 生物炭; 秸秆; 有机碳; 坡位

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5491-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202103097

Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields

XU Man¹, YU Luo², WANG Fu-hua¹, WANG Dan³, WANG Ying-yan¹, YANG Wen-na¹, GAO Ming¹, WANG Zi-fang^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Bishan District Flood Control and Drought Relief Dispatching Center, Chongqing 402760, China; 3. Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 401120, China)

Abstract: The purple soil sloping field is the main cultivated land type in the Three Gorges area, and the soil fertility directly determines crop yield. In order to explore the effects of different fertilization treatments on the soil organic carbon content at different slope positions, field experiments were carried out at the Three Gorges Reservoir Test Station of Chengdu Institute of Mountain and Disasters, Chinese Academy of Sciences. A total of five treatments were set up: no fertilization (CK), conventional fertilization (T₁), optimum fertilization (T₂), biochar combined with 85% of T₂ (T₃), and straw combined with 85% of T₂ (T₄), to study the differences in soil aggregate composition, soil total organic carbon, soluble organic carbon, and microbial carbon content at different slope positions under different fertilization treatments. The results showed that: ① Fertilization increased the content of soil mass and improved the organic carbon content of soil, especially with T₃ and T₄ treatments. ② The sequence of distribution of soil organic carbon content with CK, T₁, and T₂ treatments in different slope positions was downslope position > middle slope position > upslope position, while the soil organic carbon content of T₃ and T₄ treatments was the highest at the middle slope position. ③ With the decrease of slope, the soluble organic carbon content of CK, T₁, T₂, and T₃ treated soil showed an increasing trend; the carbon content of CK, T₁, T₂, and T₄ treated soil microorganisms increased; while the distribution of T₃ treated soil microbial carbon on the slope was highest at the middle slope followed by the lower slope. In general, both biochar and straw treatments can significantly increase soil carbon content and delay the migration of soil carbon on slopes, which provides guidance for improving the soil quality and reducing water pollution of purple soil dry slopes in the Three Gorges reservoir area.

Key words: purple soil sloping field; biochar; straw; organic carbon; slope

土壤有机碳是土壤肥力的核心,常作为评价土壤质量高低的重要指标. 研究表明,全球土壤有机碳的储量是大气碳库的2倍左右,是陆地植物碳库的2~3倍^[1]. 因此,提高土壤有机碳含量对于提升土壤质量和减缓全球气候变暖具有重要意义^[2-4]. 土壤有机碳含量受到土壤性质、水热条件、施肥和耕作管理措施等因素的影响. 其中,施肥显著影响土壤碳含量,杜林森等^[5]的研究表明,与不施肥相比,化肥和秸秆施入土壤后能显著提高土壤酶活性,土壤中的C、N含量是不施肥处理土壤的1.1~13.7倍. 紫色土旱坡地作为三峡库区的主要耕地类型,具有

发育时间短、结构差和有机质含量低等特点^[6],另外,紫色土区降雨集中,主要在4~9月,约占全年降雨量的70%以上,土壤表层土中的有机碳容易随径流和泥沙迁移,结果不仅造成土壤肥力降低,而且影响水环境安全. 因此,探究不同施肥处理对紫色土旱

收稿日期: 2021-03-11; 修订日期: 2021-05-12

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)

作者简介: 徐曼(1999~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤质量与环境, E-mail: 592854581@qq.com

* 通信作者, E-mail: zifangw@126.com

坡地土壤有机碳组分含量的影响对于控制土壤养分流失和保证水环境安全具有重要意义。

近年来,生物炭和秸秆常作为土壤改良剂来减少土壤侵蚀和增加土壤养分,以达到改善土壤结构、提高土壤肥力的目的。秸秆和生物炭作为重要的农业可再生资源,不仅本身含碳量较高,还田后能直接增加土壤碳含量^[7~9],并且秸秆覆盖条件下可滞后坡面产流时间、降低地表产流^[10],从而增加土壤养分固持;生物炭由于自身孔隙结构丰富、比表面积大,使得其可以更好地吸附土壤中的营养元素,减少养分流失^[11,12]。另外,相关研究表明秸秆和生物炭还田均能改变土壤团聚体粒径分布,增加土壤中大团聚体含量,对土壤稳定性有积极作用。例如,王碧胜等^[13]的研究表明,添加秸秆可显著提高土壤有机碳和大团聚体含量,且土壤有机碳含量与 >2 mm 和 0.25~2 mm 团聚体比例呈显著正相关关系。Huang 等^[14]的研究发现,与 CK 处理相比,生物炭处理减少了地表径流的侵蚀量,促进了土壤大团聚体的形成。Qi 等^[15]的研究表明生物炭具有减少土壤碳排放的潜力,有助于提高土壤碳储量。

目前,国内外关于生物炭和秸秆对土壤养分流失和碳组分含量的影响已有较多研究,但内容多集中于不同施肥处理对土壤养分的调控效应,忽略了在不同立地类型(坡上、坡中和坡下)上土壤养分的差异,对紫色土旱坡耕地土壤有机碳组分在坡面上的迁移、分配机制的研究尚不十分清楚。因此,本文通过田间定位试验,以三峡库区紫色土旱坡地油菜/玉米轮作农田生态系统为研究对象,设置不施肥(CK)、常规施肥(T_1)、优化施肥(T_2)、85%优化施肥配施生物炭(T_3)和85%优化施肥配施秸秆(T_4)这5个处理,研究紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分在不同施肥管理下的含量变化,根据坡面养分状况制定合理的施肥方式,以期为实现资源高值化利用、减少三峡库区养分流失和水环境污染

提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所三峡库区试验站位于重庆市忠县石宝寨(E108°10', N30°27'),石宝镇地处忠县东部,距离忠县县城约32 km,濒临长江北岸,是三峡库区的腹心地带,同时是忠县的东大门。试验站所属的三峡库区地处暖湿亚热带东南季风区,温热寒凉,四季分明,雨量充沛,日照充足。年均温度 18.2℃,年均降雨量为 1 100 mm,无霜期 320 d 左右。试验小区位于长江主河道北岸,土壤母质为沙溪庙组泥岩、粉砂岩和砂岩,土壤类型是在三峡库区坡耕地上具有很强代表性的紫色土。

1.2 试验设计

本试验小区于 2015 年建成,投影面积为 100 m² (20 m×5 m),试验小区底部以及小区四周均为混凝土修筑,小区坡度为 15°,土层厚度为 60 cm。每个小区分为 3 个部分:上坡位(0~7 m),中坡位(7~14 m)和下坡位(14~20 m)。由于小区土壤是人工填装的试验区周边未利用的新垦紫色土,因此试验开展前按照当地常规方式轮作玉米和油菜进行匀地 3 a,以均衡土壤肥力。本试验共设置 5 个不同的处理:①不施肥(CK)、②常规施肥(T_1)、③优化施肥(T_2)、④85%优化施肥配施生物炭(T_3 ,生物炭用量为 10 000 kg·hm⁻²)和⑤85%优化施肥配施秸秆(T_4),秸秆用量为 4 500 kg·hm⁻²。生物炭购自勤丰众成生物质新材料(南京)有限公司,以玉米秸秆为原料在 450℃ 高温厌氧条件下热解 1 h 烧制;玉米秸秆购自试验地周围农户。生物炭全氮含量为 5.20 g·kg⁻¹,全磷含量为 3.10 g·kg⁻¹,玉米秸秆的全氮含量为 8.23 g·kg⁻¹,全磷含量为 3.15 g·kg⁻¹。各小区施肥前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

处理	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 /mg·kg ⁻¹	有效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹
CK	8.27	7.03	0.51	0.72	31.79	26.45	8.15	106.99
常规(T_1)	8.23	7.06	0.46	0.68	32.31	26.71	8.16	105.21
优化(T_2)	8.19	6.99	0.44	0.73	31.42	25.88	8.03	105.64
生物炭(T_3)	8.25	7.09	0.50	0.77	31.55	26.58	8.15	106.85
秸秆(T_4)	8.18	6.97	0.47	0.67	31.57	25.91	8.08	106.25

本试验开展时间为 2018 年 10 月 15 日至 2019 年 10 月 14 日,采用油菜/玉米轮作种植模式,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 日播种,2019 年 8 月 2

日收获。秸秆和生物炭均是在种植油菜前 2 d 均匀覆盖于地表。油菜季施用化肥情况为:氮肥分基肥和基肥两次施用(其中基肥施肥量占氮肥施肥总量的 80%),磷钾硼肥作为基肥一次性施用,施用

方法均为小雨前后撒施. 玉米季施用化肥情况为: 氮肥的施用方法与油菜一致, 磷、钾肥则是作为基肥一次性施用. 关于肥料使用量, 优化施肥处理是在常规施肥的基础上, 对油菜和玉米的各肥料进

行减量施用, 生物炭和秸秆用量依据重庆市紫色土旱坡地秸秆和生物炭还田的最佳用量确定, 其他田间管理措施与当地习惯保持一致, 各处理具体施肥量见表 2.

表 2 各处理施肥量

Table 2 Amount of fertilizer applied in each treatment

项目	处理	N /kg·hm ⁻²	P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²	K ₂ O /kg·hm ⁻²	硼砂 /kg·hm ⁻²	秸秆 /kg·hm ⁻²	生物炭 /kg·hm ⁻²
油菜季	CK	—	—	—	—	—	—
	T ₁	150	90	90	15	—	—
	T ₂	120	75	75	15	—	—
	T ₃	102	63.75	63.75	15	—	10 000
	T ₄	102	63.75	63.75	15	4 500	—
玉米季	CK	—	—	—	—	—	—
	T ₁	300	150	135	—	—	—
	T ₂	270	120	105	—	—	—
	T ₃	229.5	102	89.25	—	—	10 000
	T ₄	229.5	102	89.25	—	4 500	—

1.3 样品采集与测定

本试验过程中一共采集两次土壤样品, 第一次是试验前采集基础土样, 第二次是玉米收获后采样. 采用梅花形多点取样法分别在每个小区的上坡、中坡和下坡位置取 0~20 cm 表层土, 然后用四分法保留约 1 kg 的土壤样品. 带回实验室的土壤样品先去杂质(如秸秆、生物炭、植物的根系及枯枝落叶、石子和土壤动物等), 再将土样自然风干、研磨和过筛, 最后充分混匀.

土壤基本理化性质的测定主要参照文献[16]的方法; 土壤机械性团聚体采用萨维诺夫干筛法, 分离出: >5、5~2、2~1、1~0.5、0.5~0.25 和 <0.25 mm 粒级的团聚体; 土壤有机碳含量采用 K₂CrO₇ 外加热法测定; 土壤可溶性有机碳采用去离子水浸提(土水比为 1:2), 浸提液用 Multi N/C 2100 分析仪(耶拿, 德国)测定; 土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法测定.

1.4 数据处理与统计分析

选取平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、>0.25 mm 团聚体质量分数(R_{0.25})作为土壤团聚体稳定性的评价指标, 计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i W_i$$

$$GMD = \exp\left(\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{x}_i\right)$$

$$R_{0.25} = 1 - \frac{M_{x < 0.25}}{M_T}$$

式中, n 为粒径分组的组数, \bar{x}_i 为 i 粒级分组团聚体的平均直径; W_i 为第 i 级团聚体的质量; $M_{x < 0.25}$ 为 <0.25 mm 团聚体的质量; M_T 为团聚体总质量.

土壤微生物熵(qMB)按如下公式计算:

$$qMB = \text{土壤微生物量碳} / \text{土壤有机碳}$$

采用 Origin 2016、EXCEL 2016 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. 不同处理之间采用 LSD 最小显著差数法进行多重比较, 显著水平为 0.05.

2 结果与分析

2.1 施肥处理对土壤团聚体分布的影响

本试验采用干筛法将各处理的土壤团聚体进行分级, 其分布情况如表 3 所示. 总体上看, 各处理土壤力稳性团聚体粒径组成大致呈“V”型趋势, 各处理中占比最多的团聚体粒径均为 5~2 mm, 变化范围为 28.41%~34.11%. 对于 >5 mm 粒级团聚体, T₃ 显著高于 CK、T₁、T₂ 和 T₄, 增幅分别为 13.48%、124.40%、166.15% 和 168.42%. 对于 5~2、2~1 和 1~0.5 mm 粒级团聚体, T₁、T₂、T₃ 和 T₄ 处理的含量均高于 CK 处理, 说明施用化肥、生物炭和秸秆均能提高这 3 个粒级的团聚体含量. 土壤中 >0.25 mm 的团聚体被称为大团聚体, 其含量越高, 则表明土壤中团聚体结构越稳定. 各处理土壤中 >0.25 mm 的力稳性团聚体质量分数表现为: T₃ > T₁ > T₄ > T₂ > CK, 且差异性显著 ($P < 0.05$).

2.2 施肥处理对土壤团聚体稳定性的影响

MWD 和 GMD 是反映土壤团聚体大小分布的常用指标, 其值越大, 说明土壤结构越稳定. 不同处理土壤团聚体 MWD、GMD 和 R_{0.25} 值如表 4 所示, 从中可知, 各处理团聚体 MWD 大小依次为: T₃ > CK > T₁ > T₄ > T₂, 并且各个处理之间差异显著. 团聚体 GMD 大小依次为: T₃ > T₁ > CK > T₄ > T₂, T₃ 较 CK、

T_1 、 T_2 和 T_4 分别显著增加了 40.83%、37.40%、62.50% 和 45.69%。与 CK 相比, T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 处理团聚体 $R_{0.25}$ 均有显著提高, 增幅分别为 11.08%、

5.15%、12.63% 和 9.60%。总体来看, T_3 处理的 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 值都高于 T_4 处理, 说明生物炭还田提高土壤团聚体稳定性的作用优于秸秆还田。

表 3 各处理土壤团聚体分布特征¹⁾

Table 3 Distribution characteristics of soil aggregates in each treatment

处理	团聚体含量/%					
	>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
CK	21.73 ± 1.43Bc	28.41 ± 0.81Ca	8.50 ± 0.60Cd	9.45 ± 0.75Bd	8.16 ± 0.26Bd	23.75 ± 0.25Ab
T_1	10.99 ± 0.49Cde	33.11 ± 0.61Aa	13.60 ± 0.90Acd	17.15 ± 0.26Ab	9.84 ± 0.94Ae	15.30 ± 0.70Dbc
T_2	9.27 ± 0.57De	29.72 ± 1.22Ba	14.22 ± 0.62Ad	16.66 ± 0.86Ac	10.31 ± 0.51Ae	19.82 ± 0.28Bb
T_3	24.66 ± 1.16Ab	34.11 ± 0.09Aa	9.88 ± 0.98Bd	11.04 ± 1.64Bd	6.20 ± 0.40Ce	14.12 ± 0.62Ec
T_4	9.19 ± 0.49De	33.09 ± 0.01Aa	14.51 ± 0.41Ac	16.45 ± 0.55Ab	10.33 ± 0.83Ad	16.43 ± 0.63Cb

1) 不同大写字母表示不同处理同一粒团聚体间差异显著, 不同小写字母表示级同一处理不同粒级团聚体间差异显著 ($P < 0.05$)

表 4 不同施肥处理土壤团聚体稳定性¹⁾

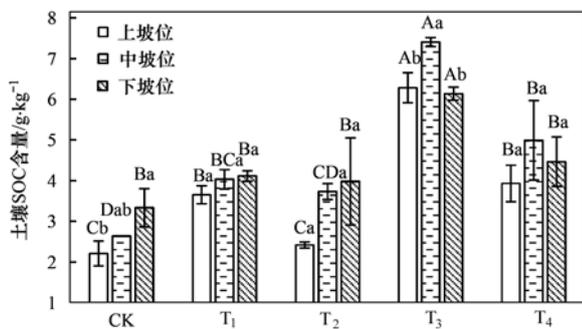
Table 4 Stability of soil aggregates in different fertilization treatments

处理	平均重量直径 MWD/mm	几何平均直径 GMD/mm	>0.25 mm 粒级团 聚体含量 ($R_{0.25}$)/%
CK	2.56 ± 0.10B	1.20 ± 0.05BC	76.25 ± 0.25E
T_1	2.26 ± 0.12C	1.23 ± 0.01B	84.70 ± 0.70B
T_2	2.00 ± 0.09D	1.04 ± 0.03D	80.18 ± 0.28D
T_3	2.95 ± 0.07A	1.69 ± 0.03A	85.88 ± 0.62A
T_4	2.11 ± 0.02CD	1.16 ± 0.00C	83.57 ± 0.63C

1) 不同大写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

2.3 施肥处理对紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳含量的影响

如图 1 所示, 在上、中、下坡位, T_3 处理土壤有机碳含量均显著高于其余 4 个处理。在上坡位, 土壤有机碳含量高低呈现出: $T_3 > T_4 > T_1 > T_2 > CK$, 其中, T_4 较 T_1 土壤有机碳含量提高了 7.70%, 差异并不显著; T_2 与 CK 之间土壤有机碳含量差异较小。在中坡位, T_3 土壤有机碳含量分别较 CK、 T_1 、 T_2 和 T_4 提高了 180.81%、83.56%、98.52% 和 48.43%, 并且与各处理间差异显著, 说明生物炭显著增加了中坡位土壤有机碳含量, 能改变土壤有机碳在坡面上的分布, 有效阻断养分在坡面的损失途径。



不同大写字母表示同一坡位不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一处理下不同坡位之间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 1 各施肥处理不同坡位土壤有机碳含量

Fig. 1 Soil organic carbon content at different slope positions under different fertilization treatments

在图 1 中, 对于同一处理的不同坡位, T_3 和 T_4 的土壤有机碳含量均表现出中坡位最高, 其中 T_3 中坡位土壤有机碳含量与上坡位、下坡位存在显著性的差异, 分别较上坡位和下坡位增加了 17.84% 和 20.67%, 但 T_4 各坡位之间土壤有机碳含量差异不显著。CK、 T_1 和 T_2 不同坡位土壤有机碳含量均表现为: 下坡位 > 中坡位 > 上坡位, CK 处理的下坡位中土壤有机碳含量显著高于中坡位和上坡位, 分别较中坡位和上坡位增加了 26.41% 和 51.05%, 而 T_1 和 T_2 的上、中、下坡位土壤有机碳含量差异均不显著。

2.4 施肥处理对紫色土旱坡地不同坡位土壤可溶性有机碳含量的影响

如图 2 所示, 在上坡位和下坡位, 土壤可溶性有机碳含量均是 $T_3 > T_4 > CK > T_2 > T_1$, 其中, T_1 、 T_2 、 T_3 和 CK 处理不同坡位土壤可溶性有机碳含量均为: 下坡位 > 中坡位 > 上坡位, T_3 处理的下坡位土壤可溶性有机碳含量分别比上坡位和中坡位显著高出 20.53% 和 7.57%; 随着坡位的下降, T_1 处理的土壤可溶性有机碳含量呈上升趋势, 下坡位土壤可溶性有机碳含量分别比上坡位和中坡位显著高出 71.83% 和 28.15%, 且上、中、下坡位之间均存在着显著的差异性; 而 T_4 的不同坡位之间土壤可溶性

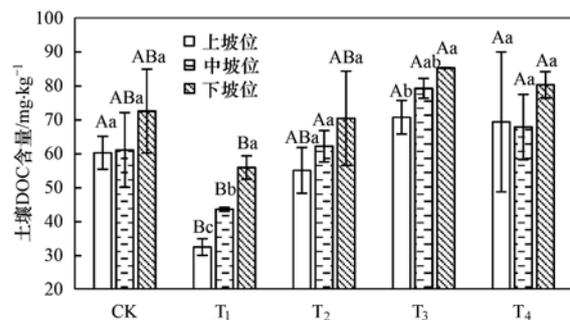


图 2 各施肥处理不同坡位土壤可溶性有机碳含量

Fig. 2 Content of soil soluble organic carbon at different slope positions under different fertilization treatments

有机碳含量为:下坡位 > 上坡位 > 中坡位, 3 个坡位之间差异并不显著。

2.5 施肥处理对紫色土旱坡地不同坡位土壤微生物量碳含量的影响

各处理(CK、T₁、T₂、T₃和T₄)不同坡位土壤微生物量碳含量如图3所示。无论是在上坡位、中坡位,还是下坡位,T₁的土壤微生物量碳含量都低于CK处理,说明单施化肥会降低土壤的微生物量碳含量。对于同一处理的不同坡位,除T₃外,其余处理坡下和坡中土壤微生物量碳均高于坡上。而T₃土壤微生物量碳在坡面上的分布为:中坡位 > 下坡位 > 上坡位。另外,T₄的中坡位和下坡位土壤微生物量碳差异不显著,但均显著高于上坡位,分别比上坡位高43.24%和49.54%。对于T₃处理,中坡位土壤微生物量碳含量显著高于上坡位和下坡位,分别比上坡位和下坡位显著高出55.45%和45.37%,说明生物炭还田能够减缓土壤微生物量碳从坡上部到坡下部的迁移速度,使其在坡中部聚集。

2.6 土壤微生物熵和可溶性有机碳分配比例(DOC/SOC)的变化

如表5所示,与CK相比,各施肥处理均降低了土壤可溶性碳分配比例。随着坡位的下降,T₂、T₃和T₄处理的DOC/SOC比值变化趋势为先下降再上

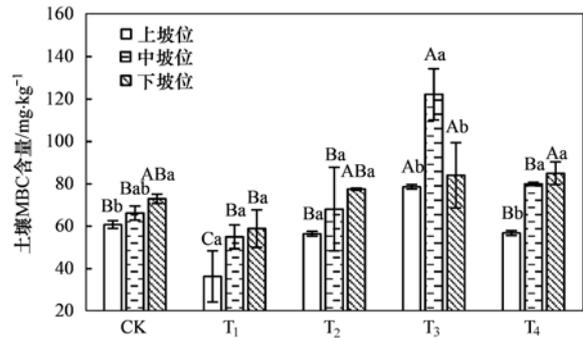


图3 各施肥处理不同坡位土壤微生物量碳含量

Fig. 3 Soil microbial biomass carbon content in different slope positions under different fertilization treatments

升,而CK处理的DOC/SOC比值呈下降趋势,T₁处理的DOC/SOC比值呈上升趋势。

土壤微生物熵的高低可反映土壤有机质活性及其被微生物利用效率,其值越高,说明土壤微生物对有机碳的利用效率越高。如表5所示,CK处理土壤微生物熵在2.19%~2.75%之间变化,T₁、T₂、T₃和T₄土壤微生物熵的变化范围分别为1.00%~1.43%、1.82%~2.34%、1.25%~1.65%和1.45%~1.90%。与T₁相比,T₃增加了上坡位和中坡位的土壤微生物熵,增幅分别为25.00%和21.32%,T₄增加了整个坡面的土壤微生物熵。

表5 土壤微生物熵和可溶性有机碳分配比例(DOC/SOC)的变化¹⁾/%

Table 5 Changes of soil microbial entropy and soluble organic carbon allocation ratio(DOC/SOC)/%

处理	DOC/SOC			微生物熵		
	上坡位	中坡位	下坡位	上坡位	中坡位	下坡位
CK	2.73 ± 0.22Aa	2.32 ± 0.42Aa	2.18 ± 0.37Aa	2.75 ± 0.08Aa	2.51 ± 0.12Aa	2.19 ± 0.07Ab
T ₁	0.89 ± 0.07Db	1.08 ± 0.01Cb	1.36 ± 0.08Ba	1.00 ± 0.33Da	1.36 ± 0.14Ba	1.43 ± 0.22Ba
T ₂	2.28 ± 0.28ABa	1.67 ± 0.12Ba	1.77 ± 0.35ABa	2.34 ± 0.05Ba	1.82 ± 0.53Ba	1.95 ± 0.01Aa
T ₃	1.13 ± 0.08Cdb	1.07 ± 0.04Cb	1.39 ± 0.00Ba	1.25 ± 0.02CDa	1.65 ± 0.16Ba	1.37 ± 0.25Ba
T ₄	1.77 ± 0.52BCa	1.36 ± 0.19BCa	1.80 ± 0.09ABa	1.45 ± 0.03Cb	1.60 ± 0.02Bb	1.90 ± 0.12Aa

1) 不同大写字母表示同一坡位不同处理之间差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示同一处理下不同坡位之间差异显著($P < 0.05$)

2.7 土壤有机碳与团聚体组成的相关分析

由表6中结果可知,MBC含量与SOC、DOC含量呈显著正相关关系。SOC含量与5~2mm团聚体比例呈显著正相关,与0.5~0.25mm和<0.25mm团聚体比例呈显著负相关。DOC含量与>5mm团聚体比例呈显著正相关,与2~1、1~0.5和0.5~0.25mm团聚体比例呈显著负相关。MBC含量与

>5mm团聚体比例呈显著正相关,与0.5~0.25mm团聚体比例呈显著负相关。

2.8 施肥处理对作物产量的影响

各处理玉米和油菜的产量如表7所示,就油菜产量而言,常规处理的油菜产量最大,较CK处理增产264.28%,增产效果显著。玉米产量则是优化处理的最大,为8944.25 kg·hm⁻²,其次为常规施肥处

表6 土壤有机碳与团聚体组成的相关系数¹⁾

Table 6 Correlation of soil organic carbon and aggregate composition

项目	SOC	DOC	MBC	土壤中团聚体的粒径/mm					
				>5	5~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	<0.25
SOC	1	0.399	0.756**	0.393	0.792**	-0.101	-0.134	-0.589*	-0.799**
DOC		1	0.681**	0.658**	0.006	-0.586*	-0.650**	-0.676**	0.081
MBC			1	0.581*	0.308	-0.383	-0.494	-0.674**	-0.283

1) *表示相关性达到显著水平($P < 0.05$),**表示相关性达到极显著水平($P < 0.01$)

理,各处理之间玉米产量差异显著. CK 处理的油菜和玉米产量均是最低,相较于 CK 处理,秸秆处理和生物炭处理的油菜增产 192.86% 和 157.14%,但是秸秆和生物炭处理的油菜和玉米产量均小于常规和优化处理.

表 7 各施肥处理下油菜和玉米产量¹⁾/kg·hm⁻²
Table 7 Yields of oilseed rape and maize in different fertilization treatments/kg·hm⁻²

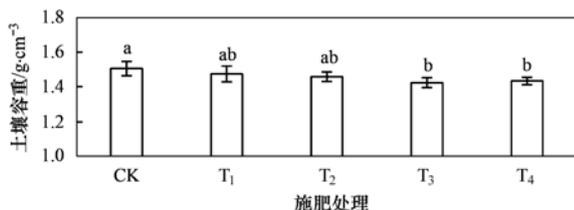
处理	油菜	玉米
CK	595 ± 5.09e	990.9 ± 13.01e
常规	2 167.5 ± 23.33a	7 039.1 ± 17.82b
优化	2 082.5 ± 10.61b	8 944.25 ± 35.43a
生物炭	1 530 ± 26.73d	5 965.1 ± 13.44d
秸秆	1 742.5 ± 13.29c	6 910.4 ± 14.71c

1) 不同的小写字母表示不同施肥处理之间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)

3 讨论

3.1 不同施肥处理对不同坡位土壤有机碳(SOC)含量的影响

本研究结果表明:与试验前相比,各施肥处理均能增加土壤有机碳含量,增加幅度为 23.83% ~ 142.45%,这与孔凡磊等^[17]和尚杰等^[18]的研究结果类似.与优化施肥处理相比,常规施肥处理土壤有机碳含量更高,这是因为供试土壤是填装的紫色土,本试验开展前测得的土壤有机质含量仅为 7.00 g·kg⁻¹左右,土壤肥力较低,对养分的需求比熟化土壤更多,短时间内土壤有机碳含量随施肥量的增加而增加.本研究发现,生物炭还田提高土壤有机碳的效果优于秸秆还田,分析其原因,一方面,生物炭孔隙结构丰富,吸附性强,提高土壤中 5 ~ 2 mm 粒级团聚体含量的效果优于秸秆(表 3),而土壤有机碳的含量与这一粒级团聚体含量呈显著正相关关系.另一方面,与秸秆还田相比,生物炭还田降低土壤容重的效果更好(图 4),有利于促进土壤微生物的生长,从而有效促进土壤碳循环,提高土壤固碳能力.



不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)

图 4 各施肥处理的土壤容重

Fig. 4 Soil bulk density of each fertilization treatment

坡位是影响土壤养分含量的重要因素,此外,坡位还通过土壤侵蚀和水土流失影响土壤养分在空间

上的分布,对土壤有机碳的储量和再分布有重要影响.有研究表明,在降雨带来的冲刷和侵蚀作用下,土壤中的 SOC 含量会随着坡位的降低而增加^[19].本研究发现,随着坡位的下降,CK 处理土壤有机碳含量逐渐增加,这表明坡面上存在养分运移的风险,而水土流失是引起土壤养分在坡面分布存在差异的主要因素之一.刘银等^[20]在不同坡位和经营模式对黄果柑坡地果园土壤养分的影响研究中发现,在同一种经营模式下,土壤有机质含量随着坡位的下降而增加.在本文中,CK 处理、常规处理(T₁)和优化处理(T₂)的土壤有机碳含量在坡面上的分布与刘银等的研究结果一致,可能是因为降雨产生径流时,当径流冲刷力大于土壤内聚力,坡面侵蚀区土壤大团聚体(>0.25 mm)被分解破坏,土壤有机碳释放出来^[21,22],随降雨产生的地表径流由坡上部向坡下部迁移,在迁移过程中,坡面上的植被等障碍物拦截了一部分土壤有机碳,因此土壤有机碳含量随坡位自上而下呈增加趋势.但是张欣等^[23]的研究发现,下坡位土壤有机质含量低于上坡位,分析其原因,可能是张欣等布置的取样点是在河道坡面,下坡位位于近河道处,人为活动更加频繁,土壤有机碳分解速度更快.

3.2 不同施肥处理对不同坡位土壤可溶性有机碳(DOC)含量的影响

在土壤有机碳库中,土壤可溶性有机碳是比较活跃且容易变化的组分,也是微生物的碳源之一^[24],其含量能够反映土壤碳库在短期内的变化.在本研究中,CK 处理、常规处理(T₁)、优化处理(T₂)的 DOC 含量在坡面上的分布与其 SOC 含量分布特征一致,均表现为:下坡位 > 中坡位 > 上坡位,这一结果与雷金银等^[25]的研究结果相似.但是王艳丹等^[26]的研究发现,DOC 含量在不同坡位上的分布为:上坡位 > 下坡位 > 中坡位,这可能是因为在本文试验小区位于三峡地区,降雨较多,而王艳丹等的试验区位于气候干燥酷热、终年无霜的干热河谷坝区,降雨次数少且强度不大,雨水对土壤的侵蚀冲刷作用不强.另外,有研究表明,枯枝落叶的分解系数随坡位自下而上逐渐减小,分解率明显降低^[27];而且酸角树上坡位的根系更发达,其周转速度更快,可为土壤可溶性有机碳的产生提供更多的基质^[28],导致上坡位土壤有机碳含量高于下坡位.因此,不同地区的水热条件和生态系统差异是影响土壤可溶性有机碳含量空间分布的重要因素.本文还发现,相较于 CK 处理,生物炭处理并不能改变土壤可溶性有机碳在坡面上的分布,这是因为本课题组其他研究表明^[29],生物炭还田会增加地表径流 DOC 和壤中

流 DOC 流失通量,不能阻断 DOC 在坡面的流失途径。

DOC/SOC 在一定程度上反映土壤有机碳的稳定程度,其比值越高代表土壤有机碳的矿化作用越强,反之则说明土壤有机碳的稳定性越高。本文中各处理 DOC/SOC 的比值高低如下: $CK > T_2 > T_4 > T_3 > T_1$, CK 处理的土壤有机碳矿化作用最强。与 CK 处理相比,生物炭处理和秸秆处理降低了土壤有机碳的矿化作用,即增加了土壤有机碳的稳定性,有利于提高土壤有机碳储量,这与马欣等^[30]和王毅等^[31]的研究结果一致。因为生物炭和秸秆质轻,施入土壤后能降低土壤容重(图 4),增加土壤大团聚体的含量,减弱了土壤团聚体中碳的矿化作用。

3.3 不同施肥处理对不同坡位土壤微生物量碳(MBC)含量的影响

土壤微生物量碳驱动有机物分解,其作为土壤有机碳的活性组分之一,对外界环境变化十分敏感。土壤微生物量碳受到土壤理化性质、气候、耕作习惯和地形等因素的影响^[32]。即使在相同的气候和耕作习惯下,土壤地形的差异也会对土壤微生物量碳产生较大影响。本研究发现,相较于 CK、常规、优化和秸秆处理,生物炭处理能够减缓土壤微生物量碳从中坡位到下坡位的迁移速度,使其聚集在中坡位,在坡面上的分布为:中坡位 > 下坡位 > 上坡位。这是因为生物炭吸附性较强,能够有效减少土壤径流^[33],阻断坡上养分随径流向坡下的迁移途径,并且生物炭能够增加土壤团聚体的稳定性,可减弱土壤团聚体随径流向下坡位的迁移,因此在坡中对养分有较好的保持、截断作用,从而改变微生物量碳的空间分布。

微生物熵是微生物量碳占有有机碳的百分比,其值与土壤微生物对有机碳的利用率呈正相关。在本文中,不同施肥处理的微生物熵平均值大小依次为: $CK > T_2 > T_4 > T_3 > T_1$,生物炭处理的微生物熵平均值小于 CK 处理,这与史登林等^[34]的研究结果相反,可能是因为生物炭比表面积较大,且含有一定量的 $CaCO_3$ 和 $Fe(OH)_3$ 等矿物质,容易与土壤和有机物质形成有机-无机复合体,生成更稳定的团聚体,外界微生物不易分解贮存在团聚体的有机碳^[35]。孔凡磊等^[17]的研究表明,与 CK 相比,秸秆还田提升了沙化土壤的微生物熵,而本文结果表明,秸秆还田降低了土壤的微生物熵,与其结果相异,因为本研究是将玉米秸秆切成 10 cm 左右的小段直接还田,而孔凡磊等的研究是将秸秆进行改良后加工成颗粒后再还田,秸秆本身的性质发生了变化,并且由于秸秆被加工成颗粒状,秸秆分解释放到土壤中的有机碳

更容易被微生物利用。因此,不同的秸秆还田方式对土壤理化性质的改变效果不同,在农业生产中应根据当地水热条件和土壤状况选择合适的秸秆还田方式,以实现秸秆资源利用最大化。

3.4 不同施肥处理对作物产量的影响

作物产量因施肥产生差异,实质上是作物从土壤中可吸收的养分存在差异。本研究表明,相较于 CK 处理,秸秆处理和生物炭处理均能提高作物产量,这是因为生物炭和秸秆作为宝贵的农业资源,本身养分含量丰富,施入土壤后能够直接增加土壤养分含量,在作物生长后期能将其含有的养分缓慢释放给作物,达到增产的目的;另一方面,生物炭和秸秆能够有效减少土壤碳、氮等养分流失^[29],提高土壤-作物系统的养分利用率。与高鸣慧等^[36]研究结果不同的是,本研究常规处理提高玉米产量的效果优于秸秆处理和生物炭处理,这可能是因为本试验的土壤为新垦紫色土,土壤肥力水平较低,施用化肥相较于有机肥能快速提供作物生长发育所需的养分。总的来说,生物炭和秸秆配施化肥还田是一种良好的养管理方式,在提高作物产量的同时能有效减少化肥造成的环境污染问题。

4 结论

(1) 施肥处理均能增加土壤大团聚体含量,提高土壤有机碳含量,以生物炭处理和秸秆处理尤为显著。CK 处理、常规处理和优化处理的土壤有机碳含量在不同坡位的分布均表现为:下坡位 > 中坡位 > 上坡位,而生物炭和秸秆处理土壤有机碳含量均是在中坡位最大。

(2) 除秸秆处理外,其他 4 个处理的土壤可溶性有机碳分布均表现为:下坡位 > 中坡位 > 上坡位;CK、 T_1 、 T_2 和 T_4 处理的土壤微生物量碳含量分布表现为:下坡位 > 中坡位 > 上坡位,而生物炭处理的表现:中坡位 > 下坡位 > 上坡位。

(3) 秸秆和生物炭还田不仅能提高土壤碳含量,而且还可以延缓有机碳在坡面中的迁移,使养分聚集在中坡位。因此,在三峡库区不仅要提倡减量化肥配施秸秆和生物炭,还应根据养分在坡面的迁移、分布特点施肥,适当增加在上坡位的施肥量,减少下坡位的施肥量。

参考文献:

- [1] 刘京,常庆瑞,陈涛,等. 陕西省土壤有机碳密度空间分布及储量估算[J]. 土壤通报, 2012, 43(3): 656-661.
Liu J, Chang Q R, Chen T, et al. Spatial distribution characteristics and estimation of soil organic carbon density and storage in Shanxi Province, in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(3): 656-661.

- [2] Ahirwal J, Maiti S K, Singh A K. Changes in ecosystem carbon pool and soil CO₂ flux following post-mine reclamation in dry tropical environment, India [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **583**: 153-162.
- [3] 邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 等. 有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40** (10): 4691-4699.
- Shao H Y, Li Z Y, Liu D, *et al.* Effects of manure application rates on the soil carbon fractions and aggregate stability [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (10): 4691-4699.
- [4] 徐明岗, 张旭博, 孙楠, 等. 农田土壤固碳与增产协同效应研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, **23** (6): 1441-1449.
- Xu M G, Zhang X B, Sun N, *et al.* Advance in research of synergistic effects of soil carbon Sequestration on crop yields improvement in croplands [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, **23** (6): 1441-1449.
- [5] 杜林森, 唐美铃, 祝贞科, 等. 长期施肥对不同深度稻田土壤碳氮水解酶活性的影响特征[J]. *环境科学*, 2018, **39** (8): 3901-3909.
- Du L S, Tang M L, Zhu Z K, *et al.* Effects of long-term fertilization on enzyme activities in profile of paddy soil profiles [J]. *Environmental Science*, 2018, **39** (8): 3901-3909.
- [6] 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.
- [7] 吴玉红, 郝兴顺, 田霄鸿, 等. 秸秆还田与化肥配施对汉中盆地稻麦轮作农田土壤固碳及经济效益的影响[J]. *作物学报*, 2020, **46** (2): 259-268.
- Wu Y H, Hao X S, Tian X H, *et al.* Effect of straw returning combined with NPK fertilization on soil carbon sequestration and economic benefits under rice-wheat rotation in Hanzhong basin [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, **46** (2): 259-268.
- [8] 丛萍, 逢焕成, 王婧, 等. 粉碎与颗粒秸秆高量还田对黑土亚耕层土壤有机碳的提升效应[J]. *土壤学报*, 2020, **57** (4): 811-823.
- Cong P, Pang H C, Wang J, *et al.* Effect of returning chopped and pelletized straw at a high rate enhancing soil organic carbon in subsoil of farmlands of black soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57** (4): 811-823.
- [9] 贾辉, 赵亚鹏, 符云鹏, 等. 施用生物炭和秸秆对植烟土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. *烟草科技*, 2020, **53** (4): 11-19.
- Jia H, Zhao Y P, Fu Y P, *et al.* Effects of biochar and straw on stability and organic carbon distribution of tobacco-planting soil aggregates [J]. *Tobacco Science & Technology*, 2020, **53** (4): 11-19.
- [10] 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.
- [11] 王舒, 王子芳, 龙翼, 等. 生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41** (5): 2406-2415.
- Wang S, Wang Z F, Long Y, *et al.* Effect of fertilizer reduction and biochar application on soil nitrogen loss in purple upland [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (5): 2406-2415.
- [12] 吴昱, 刘慧, 杨爱争, 等. 黑土区坡耕地施加生物炭对水土流失的影响[J]. *农业机械学报*, 2018, **49** (5): 287-294.
- Wu Y, Liu H, Yang A Z, *et al.* Influences of biochar supply on water and soil erosion in slopping farm-land of black soil region [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, **49** (5): 287-294.
- [13] 王碧胜, 于维水, 武雪萍, 等. 不同耕作措施下添加秸秆对土壤有机碳及其相关因素的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, **54** (6): 1176-1187.
- Wang B S, Yu W S, Wu X P, *et al.* Effects of straw addition on soil organic carbon and related factors under different tillage practices [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, **54** (6): 1176-1187.
- [14] 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.
- [15] Qi L, Pokharel P, Chang S X, *et al.* Biochar application increased methane emission, soil carbon storage and net ecosystem carbon budget in a 2-year vegetable-rice rotation [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, **292**, doi: 10.1016/j.agee.2020.106831.
- [16] 杨剑虹. 土壤农化分析与环境监测 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [17] 孔凡磊, 刘晓林, 陈伟, 等. 秸秆和菌渣改良剂对高寒沙地土壤有机碳库的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, **34** (4): 288-294.
- Kong F L, Liu X L, Chen W, *et al.* Effects of granulated straw and fungus residue amendments on soil organic carbon pool in alpine sandy land [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, **34** (4): 288-294.
- [18] 尚杰, 耿增超, 陈心想, 等. 施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34** (3): 509-517.
- Shang J, Geng Z C, Chen X X, *et al.* Effects of biochar on soil organic carbon and nitrogen and their fractions in a rainfed farmland [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34** (3): 509-517.
- [19] 李龙, 姚云峰, 秦富仓. 内蒙古赤峰梯田土壤有机碳含量分布特征及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2014, **33** (11): 2930-2935.
- Li L, Yao Y F, Qing F C. Distribution and affecting factors of soil organic carbon of terraced fields in Chifeng, Inner Mongolia [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33** (11): 2930-2935.
- [20] 刘银, 何露露, 强薇, 等. 不同坡位和经营模式对黄果柑坡地果园土壤养分的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, doi: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2020.03051.
- Liu Y, He L L, Qiang W, *et al.* The effect of different slope positions and management modes on soil nutrients in slope Huangguogan orchard [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, doi: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2020.03051.
- [21] 李光录, 姚军, 庞小明. 黄土丘陵区土壤和泥沙不同粒径有机碳分布及其侵蚀过程[J]. *土壤学报*, 2008, **45** (4): 740-744.
- Li G L, Yao J, Pang X M. Distribution and erosion process of organic carbon in the different particle size fractions in Loess Hills region [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, **45** (4): 740-744.
- [22] Chaplot V, Podwojewski P, Phachomphon K, *et al.* Soil erosion impact on soil organic carbon spatial variability on steep tropical slopes [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, **73** (3): 769-779.

- [23] 张欣, 梁敬, 于铄, 等. 清水河流域山区坡面土壤养分分布特征[J]. 河北农业大学学报, 2017, **40**(6): 27-32, 38.
Zhang X, Liang J, Yu S, *et al.* Analysis of the distribution characteristics of soil nutrients of mountain slope in Qingshui river watershed [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2017, **40**(6): 27-32, 38.
- [24] Zimmerman A R, Gao B, Ahn M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(6): 1169-1179.
- [25] 雷金银, 雷晓婷, 周丽娜, 等. 耕作措施对缓坡耕地土壤养分分布及肥料利用率的影响[J]. 农业工程学报, 2020, **36**(18): 127-134.
Lei J Y, Zhou X T, Zhou L N, *et al.* Effects of tillage measures on soil nutrients distribution and fertilizer use efficiency on gentle slope farmland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, **36**(18): 127-134.
- [26] 王艳丹, 何光熊, 宋子波, 等. 酸角人工林不同坡位土壤有机碳及其活性组分的变化[J]. 土壤, 2020, **52**(6): 1256-1262.
Wang Y D, He G X, Song Z B, *et al.* Study on soil organic carbon and its active fractions at different slope sites of tamarindus indica plantation [J]. Soils, 2020, **52**(6): 1256-1262.
- [27] Sigua G C, Coleman S W. Spatial distribution of soil carbon in pastures with cow-calf operation; effects of slope aspect and slope position [J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, **10**(2): 240-247.
- [28] Zhou G Y, Zhou X H, He Y H, *et al.* Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: a meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2017, **23**(3): 1167-1179.
- [29] 熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 等. 不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 967-976.
Xiong Z Y, Zheng J B, Wang D, *et al.* Characteristics of dissolved organic carbon loss in purple soil sloping fields with different fertilization treatments [J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 967-976.
- [30] 马欣, 魏亮, 唐美玲, 等. 长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5680-5686.
Ma X, Wei L, Tang M L, *et al.* Effects of varying long-term fertilization on organic carbon mineralization and priming effect of paddy soil [J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5680-5686.
- [31] 王毅, 张俊清, 况帅, 等. 施用小麦秸秆或其生物炭对烟田土壤理化特性及有机碳组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, **26**(2): 285-294.
Wang Y, Zhang J Q, Kuang S, *et al.* Effects of wheat straw and its biochar application on soil physicochemical properties and organic carbon fractions in flue-cured tobacco field [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, **26**(2): 285-294.
- [32] 覃乾, 朱世硕, 夏彬, 等. 黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1973-1980.
Qin Q, Zhu S S, Xia B, *et al.* Temporal and spatial dynamics of soil microbial biomass carbon and its influencing factors on an eroded slope in the Hilly Loess Plateau region [J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1973-1980.
- [33] Devereux R C, Sturrock C J, Mooney S J. The effects of biochar on soil physical properties and winter wheat growth [J]. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 2012, **103**(1): 13-18.
- [34] 史登林, 王小利, 刘安凯, 等. 黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 443-449.
Shi D L, Wang X L, Liu A K, *et al.* Response of microbial biomass carbon and nitrogen and rice quality in a yellow soil paddy field to biochar combined with nitrogen fertilizer [J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 443-449.
- [35] Huang R, Lan M L, Liu J, *et al.* Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil; the role of different straws returning [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(36): 27942-27952.
- [36] 高鸣慧, 李娜, 彭靖, 等. 秸秆和生物炭还田对棕壤团聚体分布及有机碳含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, **26**(11): 1978-1986.
Gao M H, Li N, Peng J, *et al.* Effects of straw and biochar returning on soil aggregates distribution and organic carbon content in brown soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, **26**(11): 1978-1986.

CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies; A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i>	(5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i>	(5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i>	(5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOU Wei, <i>et al.</i>	(5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i>	(5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i>	(5131)
Impact of Air Humidity on PM _{2.5} Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i>	(5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i>	(5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i>	(5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i>	(5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i>	(5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i>	(5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i>	(5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i>	(5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i>	(5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O ₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i>	(5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i>	(5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i>	(5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i>	(5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i>	(5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i>	(5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i>	(5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i>	(5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i>	(5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i>	(5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i>	(5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i>	(5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i>	(5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i>	(5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DONG Si-qi, HUANG Chong, <i>et al.</i>	(5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in a Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i>	(5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	(5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong, <i>et al.</i>	(5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i>	(5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i>	(5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i>	(5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i>	(5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i>	(5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i>	(5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i>	(5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i>	(5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i>	(5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i>	(5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i>	(5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i>	(5554)