

目次(卷终)

基于气象条件指数的我国重点区域 PM _{2.5} 和臭氧复合污染气象影响评估	杨欣, 杨元琴, 李红, 高健, 牛军捷, 储王辉, 刘世杰, 陈义珍, 何友江, 赵好希 (6433)
“2+26”城市 PM _{2.5} 与气象因子的尺度依存关系及影响因素分析	吴舒祺, 金团团, 郑冬阳, 顾杨吻, 赵文吉 (6441)
武汉军运会前后大气 PM _{2.5} 化学组分和来源	刘世豪, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 祁士华 (6452)
2016~2020年邯郸市冬季 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊, 胡伟, 胡德豪, 吴春苗, 马心怡, 纪晓腾, 樊景森, 王金喜 (6463)
渭南市冬季 PM _{2.5} 化学组成及来源解析	郭景宁, 李小飞, 余锋, 张蕊, 高月, 杨雯 (6474)
长三角城郊冬季 PM _{2.5} 中铵盐的形成过程及来源解析	项妍琨, 曹芳, 张雯洪, 范美益, 章炎麟 (6486)
上海城区硝基芳香族化合物的化学组成及特征分析	杨露, 马英歌, 郁建珍, 吴宇航, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 黄成, 童张法 (6495)
吕梁市 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评估	牟玲, 刘紫叶, 李杨勇, 李雪梅, 李晓帆, 刘添, 冯传阳, 姜辛 (6508)
广西背景大气中生物质燃烧对碳质气溶胶组成和吸光性的影响	吴星麒, 曹芳, 洪一航, 邢佳莉 (6518)
南京北郊大气棕碳吸光特性、来源及其季节变化特征	陈星州, 崔世杰, 张运江, 先久坤, 王镜雯, 汪俊峰, 盖鑫磊 (6529)
京津冀地区“煤改电”对 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	张茹婷, 陈传敏, 刘松涛, 吴华成, 周卫青, 李朋 (6541)
基于化学损耗修正的青岛胶州市环境 VOCs 来源解析	孔翠丽, 吴雨彤, 顾瑶, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 刘保双 (6551)
聊城市城区夏季 VOCs 污染特征及来源解析	李万勇, 黄浩瑜, 王艳振, 朱子博, 王一秋, 高艳珊, 彭娜娜, 伦小秀, 黄亮, 冯如帆, 菅月诚, 王强 (6564)
基于三维空气质量模型的淄博市臭氧及前体物来源解析	张馨心, 赵秀颖, 黄凌, 薛金, 卞锦婷, 王杨君, 李莉 (6576)
中国高温下臭氧抑制事件的时空特征及其影响因素	欧林冲, 陈伟华, 伍永康, 吴乐敏, 王雪梅 (6586)
基于无人机的城市大气颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究进展	曲雅微, 王体健, 袁成, 吴昊 (6598)
京津冀地区机动车细颗粒物污染的健康影响分析	郝永佩, 宋晓伟, 宋晓东, 王京伟, 程鹏 (6610)
中国水泥行业通过 CCUS 技术的减排潜力评估	魏宁, 刘胜男, 魏凤, 李小春 (6621)
钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估	宋晓璐, 杜帅, 邓陈宁, 谢明辉, 沈鹏, 赵慈, 陈忱, 刘晓宇 (6630)
珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素	胡景心, 沙青娥, 刘慧琳, 张雪驰, 郑君瑜 (6643)
东莞市低碳路径下加速电气化对 CO ₂ 和污染物协同减排影响	吴乐敏, 陈丙寅, 欧林冲, 白玉洁, 刘可旋, 王伟文, 彭勃, 王雪梅 (6653)
县域尺度下长株潭地区城市化与碳排放的关系	刘贤赵, 李阳 (6664)
城市草坪温室气体排放特征及影响因素	陈丽涵, 刘硕, 林溢, 郭娜, 臧昆鹏, 陈圆圆, 李嘉鑫, 邱珊珊, 卿雪梅, 洪海祥, 蒋凯, 熊浩宇, 方双喜 (6680)
双视角下中国畜牧业甲烷排放的温室效应	刘舒乐, 严薇, 高庆先, 马占云 (6692)
中国典型流域有机磷酸酯的污染特征与风险评估	赵江陆, 路海健, 吕佳佩, 杨江涛, 罗莹, 曹渺, 孙善伟, 郭昌胜, 徐建 (6700)
黄河下游悬河段饮用水源地土壤重金属污染、来源及健康风险	彭超月, 任翀, 申浩欣, 王艳峰, 段海静, 王玉龙, 李旭辉, 刘德新, 马建华 (6710)
黄河干流沉积物重金属的赋存形态特征及污染评价	王依滴, 欧阳威, 刘连华, 陆中桂 (6720)
土地利用结构与空间格局对鄱阳湖流域中小河流水质的影响	温嘉伟, 王鹏, 黄高翔, 张华, 聂明华, 丁明军, 折远洋 (6728)
内蒙古典型湖泊水环境特征及水质评价	王欣远, 潘保柱, 王立新, 刘铁军, 廖梓龙, 韩语, 杨子杰 (6744)
锡林河上游雨季降水、河水和地下水转化关系	孙金, 王怡璇, 杨璐, 段利民, 褚少杰, 张桂馨, 张波, 刘廷玺 (6754)
西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素	艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 房丽晶, 王银龙 (6767)
巴里坤-伊吾盆地平原区地下水污染风险评价	刘钰, 曾妍妍, 周金龙, 闫志云, 白凡 (6778)
亚硫酸氢盐强化微量 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解扑热息痛	莫苗婷, 聂淑华, 晏彩霞, 丁明军, 陈诗瑶, 聂明华 (6790)
污泥生物炭活化过一硫酸盐降解环丙沙星	郑大洋, 邹佳丽, 徐皓, 王滕, 石宇翔, 陈永健, 李彬阳, 王亚宜, 冯沁, 吴敏 (6801)
NaHCO ₃ 活化荞麦皮生物炭对碘酸钾的吸附	魏红, 赵江娟, 景立明, 钮金芬, 付冉, 董莹 (6811)
竹基 N、P 共掺杂活性炭的制备及其铜离子吸附性能	王贵龙, 刘艳艳, 江荣源, 李思敏, 林冠峰, 卢贝丽, 黄彪, 陈燕丹 (6823)
西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析	赖金林, 齐实, 崔冉冉, 廖瑞恩, 唐颖, 李鹏 (6833)
生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析	孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (6847)
农田土壤碳循环过程及其量化方法	孙昭安, 朱彪 (6857)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机碳组分的影响	牟芝熠, 沈育伊, 曹杨, 王紫卉, 陈运霜, 滕秋梅, 黄科朝, 毛馨月, 徐广平 (6869)
喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征	蔡华, 舒英格, 王昌敏, 廖远行, 罗秀龙, 龙慧, 李雪梅 (6880)
中国典型抗生素在环境介质中的污染特征与生态风险评估	陈丽红, 曹莹, 李强, 孟甜, 张森 (6894)
基于 MGWR 的土壤 pH 值空间建模及其影响因素分析	赵明松, 陈宣强, 徐少杰, 邱士其, 王世航 (6909)
某燃煤电厂周边农田土壤重金属污染特征及源解析	张军, 李旭, 刘磊玉, 李雨茹 (6921)
重庆典型在产石化场地土壤污染特征及来源解析	张渝蓉, 罗帅, 陈媛, 曹军, 刘斌, 刘元元 (6933)
高垦殖丘陵区不同类型农用地土壤中抗生素抗性基因分布特征	陈瑞, 程建华, 唐翔宇 (6947)
有机肥配施生物炭对果园土壤反硝化微生物和酶活性的影响	邓正昕, 高明, 熊子怡, 王莹燕, 谢军, 王子芳 (6955)
有机肥处理对旱地红壤细菌群落及玉米生产力的影响	林婷婷, 郑洁, 朱国繁, 梁璐, 杨叶钰萍, 刘佳, 徐勤松, 孙波, 蒋瑞霖 (6965)
微塑料和镉复合污染对狼尾草根际土壤微生物群落结构和功能的影响	段莉阳, 张玉, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (6973)
设施番茄种植年限对土壤理化性质及微生物群落的影响	赵阳阳, 刘银双, 宋瑶, 张晓旭, 贾振华, 黄亚丽 (6982)
3 种氧化剂对焦化场地多环芳烃的修复效果与土著微生物的响应关系	李伟, 王伟伟, 孟祥宇, 孙英杰, 王亚楠, 李书鹏, 杨乐巍, 刘鹏, 刘渊文 (6992)
河北省不同盐渍化土壤类型的微生物多样性与种群结构	刘银双, 牛宏进, 赵阳阳, 孙宏勇, 陈晓波, 黄亚丽 (7004)
玉米根际微生物氮磷转化的功能基因组学分析	汪香君, 姜美彤, 李森, 倪浩为, 孙波, 梁玉婷 (7014)
外源菌剂联合柠檬酸强化龙葵修复土壤镉污染	王楷, 王丽, 王一钡, 游梦, 梁婷, 邹茸, 范洪黎 (7024)
1 株肠杆菌与硫酸盐联合施用对水稻积累镉的影响	张朴心, 姚俊帆, 刘玉玲, 张威宇, 尹雪斐, 铁柏清 (7036)
《环境科学》第 44 卷(2023 年)总目录	(7045)
《环境科学》征订启事(6507)	
《环境科学》征稿简则(6620)	
信息(6743, 6846, 6856)	

生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机碳组分的影响

牟芝熠^{1,2}, 沈育伊^{3*}, 曹杨^{1,2}, 王紫卉⁴, 陈运霜^{1,2}, 滕秋梅², 黄科朝², 毛馨月^{1,2}, 徐广平^{2*}

(1. 广西师范大学生命科学学院, 广西漓江流域景观资源保育与可持续利用重点实验室, 桂林 541006; 2. 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 桂林 541006; 3. 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西植物功能物质与资源持续利用重点实验室, 桂林 541006; 4. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541006)

摘要: 研究生物炭不同施用量施用 5 a 后桉树人工林土壤有机碳组分的变化特征, 明确生物炭施用下土壤的固碳潜力, 为桉树林业废弃物生物炭的土壤改良效应提供科学依据。基于 2017 年建立的桉树人工林生物炭中长期定位试验, 以桉树人工林废弃枝条为原料, 在 500℃ 条件下厌氧制备生物炭, 选取 CK(0%)、T1(0.5%)、T2(1.0%)、T3(2%)、T4(4%) 和 T5(6%) 这 6 个处理, 一次性施用生物炭 5 a 后测定不同处理下有机碳组分含量特征。结果表明: ① 与对照相比, 土壤有机碳及其组分随生物炭施用量的增加而增大, 且在 T4 或 T5 达到最大值, 土壤有机碳、可溶性有机碳、易氧化态有机碳、颗粒有机碳、微生物生物量碳和碳储量分别增加了 101.62%、67.46%、143.03%、164.78%、110.88% 和 41.73%。② 随着生物炭施用量的增加, 各生物炭处理土壤轻组有机碳和重组有机碳含量在 0~10、10~20、20~30 cm 土层的增幅分别为 41.41%~140.63%、9.26%~87.04%、-19.54%~106.90% 和 15.32%~78.99%、15.72%~75.25%、89.49%~148.64%。0~30 cm 土层土壤轻组有机碳和重组有机碳含量的平均值亦呈现增大的趋势, 土壤碳库中以较稳定的重组有机碳为主。③ 土壤有机碳、碳储量和有机碳组分含量均随着土层的加深而减小。总体上, 生物炭施用 5 a 显著增加了土壤有机碳和碳组分含量, 有利于提高土壤固碳能力和土壤稳定性碳库, 生物炭施用是提升桉树林土壤质量的有效措施。研究结果可为林业废弃物资源化利用和桉树人工林土壤肥力提升提供参考依据。

关键词: 生物炭; 土壤有机碳(SOC); 有机碳组分; 活性有机碳; 桉树人工林

中图分类号: X143; X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)12-6869-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202212201

Effects of Biochar Application on Soil Organic Carbon Component in *Eucalyptus* Plantations After Five Years in Northern Guangxi

MOU Zhi-yi^{1,2}, SHEN Yu-yi^{3*}, CAO Yang^{1,2}, WANG Zi-hui⁴, CHEN Yun-shuang^{1,2}, TENG Qiu-mei², HUANG Ke-chao², MAO Xin-yue^{1,2}, XU Guang-ping^{2*}

(1. Guangxi Key Laboratory of Landscape Resources Conservation and Sustainable Utilization in Lijiang River Basin, College of Life Sciences, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Functional Phytochemicals and Sustainable Utilization, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, China; 4. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: To investigate the effects of biochar(BC) addition on soil organic carbon(SOC) contents and its fractions under different biochar applications, *Eucalyptus* waste twigs in Northern Guangxi were used to produce BC at 500℃. Additionally, we sought to clarify and define the carbon sequestration potential of soil and provide a basis for the preparation of biochar from *Eucalyptus* forest wastes and soil improvement. In a long-term positioning test of biochar application from 1997, six different treatments were selected: 0(CK), 0.5%(T1), 1%(T2), 2%(T3), 4%(T4), and 6%(T5). The contents of SOC, light fraction organic carbon(LFOC), heavy fraction organic carbon(HFOC), easily oxidized organic carbon(EOC), dissolved organic carbon(DOC), particulate organic carbon(POC), microbial biomass carbon(MBC), and carbon stock(CS) following the different treatments were measured. The results showed that: ① compared to that in the control, biochar application induced an increase in each soil organic carbon fraction with increasing application rate and reached a maximum under the T4 or T5 treatments; with the increase in biochar application, the contents of SOC, DOC, EOC, POC, MBC, and CS increased significantly by 101.62%, 67.46%, 143.03%, 164.78%, 110.88%, and 41.73%, respectively. ② The contents of LFOC and HFOC in the 0-10, 10-20, and 20-30 cm soil layers increased significantly by 41.41%-140.63%, 9.26%-87.04%, and -19.54%-106.90% and 15.32%-78.99%, 15.72%-75.25%, and 89.49%-148.64%, respectively, with the increase in biochar application. The average contents of LFOC and HFOC in the 0-30 cm soil layer also increased gradually. The soil carbon pool of the *Eucalyptus* forest was dominated by a relatively stable heavy fraction organic carbon. ③ The contents of carbon stock, soil

收稿日期: 2022-12-27; 修订日期: 2023-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(42267007); 广西自然科学基金项目(2020GXNSFBA297048, 2018GXNSFAA050069); 广西重点研发计划项目(AB21220057); 广西漓江流域景观资源保育与可持续利用重点实验室研究基金项目(LRCSU21K0203); 广西科学院基本科研业务费(CQZ-E-1912); 广西植物研究所基本业务费(桂植业 22003); 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室基金项目(22-035-26)

作者简介: 牟芝熠(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为森林生态与环境土壤学, E-mail: 453934995@qq.com

* 通信作者, E-mail: 417850389@qq.com; xugpx@163.com

organic carbon, and its fractions decreased with the increase in soil depth. In conclusion, the application of forestry waste biochar for five years could significantly increase the content of SOC and its components, thereby increasing soil organic carbon activity. Therefore, increasing the amount of biochar was an effective measure to enhance the carbon storage, soil stable carbon pool, and soil quality of the *Eucalyptus* plantation field. This study provides a reference for the resource utilization of forestry waste and improvements in soil fertility of *Eucalyptus* plantations.

Key words: biochar; soil organic carbon (SOC); organic carbon fractions; active organic carbon; *Eucalyptus* plantations

土壤是地球最大的陆地有机碳库,在全球的碳循环中有着重要的作用. 土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC) 是由腐殖质、动植物残体经过微生物作用所形成的含碳有机物^[1], 能为土壤微生物提供能量与营养物质, 优化土壤结构, 促进植物生长^[2], 在稳定全球碳循环以及调节全球气候等多方面具有重要意义^[3]. 土壤 SOC 作为土壤的重要组成部分, 与土壤质量息息相关. 有机碳按照密度分为轻组有机碳 (light fraction organic carbon, LFOC) 和重组有机碳 (heavy fraction organic carbon, HFOC), 按照其活性程度分为活性有机碳和惰性有机碳. 活性有机碳是土壤中易氧化易分解、稳定性差且有一定溶解性的碳, 主要由可溶性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC)、微生物生物量碳 (microbial biomass carbon, MBC)、易氧化态有机碳 (easily oxidizable carbon, EOC) 和颗粒有机碳 (particulate oxidizable carbon, POC) 等组成, 虽然活性有机碳占比较小^[4], 但它对土壤养分、区域环境的变化有着敏感的指示作用^[4], 活性有机碳的变化也影响着土壤碳库平衡、土壤肥力保持等方面^[5]. 因此, 深入认识土壤有机碳组分特征, 是探究土壤碳库稳定性及其固碳机制的关键.

生物炭是通过热解生物质 (动植物废弃物等) 而形成的, 且不同的热解温度或者不同的生物质类型对生物炭有不同的影响^[6], 其多孔的结构, 大比表面积, 能够提高土壤孔隙度, 降低容重和密度, 增强持水能力, 加之本身含有大量的离子和碱性物质, 丰富的含碳量和稳定的芳香结构可以降低土壤酸度, 提高土壤养分以及保肥能力^[7,8]. 当前, 生物炭作为一种新型的环境材料, 被广泛应用于环境科学和土壤学领域, 在农业土壤改良和土壤碳库提升等方面发挥了重大作用^[9,10]. 付琳琳等^[11]的研究表明施加生物炭可以提高活性有机碳含量, 这与生物炭本身活性有机碳的含量密切相关. 尚杰等^[12]的研究表明施用生物炭可以显著提高土壤总有机碳、EOC、POC 和 MBC 含量. 周凤等^[13]的研究表明施用生物炭显著提高了土壤 SOC, 秸秆生物炭的施入有利于土壤碳库的增加和稳定^[14]. 罗梅等^[10]的研究表明, 施用生物炭提高了土壤 SOC、DOC 和 EOC 的含量, 适量生物炭处理的土壤有机碳及其稳定性较高, 有利于土壤有机碳积累, 促进土壤固碳. 王颖

等^[15]的研究表明, 3% 比例的锯末生物炭对半干旱区土壤改良及细菌群落的作用效果较佳. 段春燕等^[8]的研究表明, 在桉树人工林 0 ~ 30 cm 土层施用 4% ~ 6% ($40 \sim 60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的生物炭 1 a 后, 对培肥土壤的综合效果较优. 李倩倩等^[16]的研究表明, 废弃果树树干、枝条 (450℃、限氧条件下) 制备生物炭, 从经济效益和改善效果综合考虑, 在陕西关中平原耕层土壤施入 $40 \sim 60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物炭较合适. 而其他研究表明^[17], 生物炭的碳源为惰性碳源, 添加后不能显著促进微生物的繁殖, 因此没有增加土壤 MBC. 潘全良^[18]的研究表明, 连续 6 a 定位施用生物炭、炭基肥和传统培肥方式均可提高土壤有机碳和活性有机碳含量, 与传统培肥方式相比, 生物炭处理对于土壤总有机碳和 DOC 的提升作用弱于对照处理. 可见, 生物炭对土壤有机碳含量及组分有着重要的影响, 但由于生物炭材料、土壤类型、施用年限和区域环境等不同, 其研究结果也不尽一致, 还有待进一步的研究.

桉树 (*Eucalyptus*) 是我国三大速生树种之一, 广西的桉树人工林面积居全国首位, 桉树人工林具有良好的经济效益和生态服务功能, 为国家木材战略储备做出了重要贡献, 而长期以来桉树林采伐后林业废弃物采取焚烧等整地措施, 高强度集约化管理引起了土壤肥力下降等问题, 加重了土壤酸化的趋势^[19]. 随着桉树人工林的快速发展, 林业废弃物产生量日益增加, 给生态环境造成了巨大压力. 桉树林每年产生大量的林业废弃物, 是较理想的生物炭材料, 将林业废弃物制备成生物炭并就地返还桉树林土壤, 是林业废弃物资源化利用的有效途径之一^[20]. 笔者团队前期的研究表明, 桉树枝条生物炭施用 1 a 后可以增加桉树人工林土壤 SOC 含量, 显著改善了土壤肥力^[8], 生物炭施入土壤后, 对于土壤改良及土壤环境变化的影响是长期的, 会随着时间的推移而变化^[21], 验证生物炭对农业生产的有效性需要进行长期的野外定位试验来证实^[22], 研究生物炭一次施用的后效作用更具有实用价值. 一次性施用生物炭 5 a 后对桉树林土壤有机碳及其组分的持续效应如何, 生物炭不同施用量对有机碳固定的调控作用目前还不清楚. 因此, 本研究利用团队 2017 年建立的生物炭施用定位试验平台, 桉树枝条废弃物生物炭不同施用量一次性施用 5 a 后, 探讨

桉树林土壤有机碳组分的变化特征, 分析生物炭施用对桉树林土壤碳储量的影响, 以期对林业废弃物生物炭对桉树人工林土壤固碳和地力提升的研究提供科学依据, 同时为林业废弃物生物炭在林业生产中的合理应用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选择在广西国有黄冕林场, 地处柳州市鹿寨县与桂林市永福县交界区域, $24^{\circ}37'25'' \sim 24^{\circ}52'11''\text{N}$, $109^{\circ}43'46'' \sim 109^{\circ}58'18''\text{E}$, 该区域属于中亚热带气候, 无霜期长, 雨热同期; 年均气温为 19°C , 年平均降雨量为 $1\,750 \sim 2\,000\text{ mm}$, 主要集中在 4 ~ 8 月, 热量充足, 年均蒸发量 $1\,426 \sim 1\,650\text{ mm}$ 。黄冕林场主要为低山和丘陵地貌, 地形起伏大, 坡面险峻, 林地土壤类型主要以砂岩和砂页岩等发育而成的红壤和山地黄红壤为主^[19]。

1.2 试验方法

1.2.1 样地设置和样品采集

本试验是段春燕等^[8]于 2017 年 3 月桉树林生物炭施用定位试验的延续, 以黄冕林场试验地及周边区域内桉树林采伐剩余物枝条为原料, 经过高温 (500°C) 无氧条件下裂解制备为生物炭。生物炭基本性质: 比表面积 $43.21\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$, 电导率 $692.82\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 阳离子交换量 $51.48\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, ω (灰分) 41.05% , pH 值 9.52, ω (C) 55.86% , ω (H) 3.13% , ω (O) 23.70% , ω (N) 1.36% , ω (P) $5.46\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, ω (K) $32.48\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[8]。以桉树人工林土壤作为研究对象, 生物炭施用比例参考生物炭与土壤的质量分数进行控制^[23], 设置 CK (0%)、T1 (0.5%)、T2 (1.0%)、T3 (2%)、T4 (4%) 和 T5 (6%) 这 6 个处理, 每个处理设 3 个重复, 采用完全随机区组设计, 共设 18 个试验小区, 每个小区规格为 $8\text{ m}\times 8\text{ m}$, 小区间设 1 m 缓冲带。采用农耕工具分别将各小区内表层 30 cm 深的土壤均匀翻耕, 将生物炭一次性按照设定的比例与翻耕的土壤充分混合, 对照组采用同样的翻耕等处理^[23]。于 2022 年 3 月, 生物炭施用 5 a 后进行土壤取样。按照 S 型方法在各样地中选取 5 个代表性样点, 按 0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 不同层次用土壤取样器分层取土, 同层 5 个点土壤混匀为 1 个土样。将每个样地采集的土壤样品, 先挑出根系、凋落物等, 装在全密封袋中, 迅速置于密封冰袋容器中冷藏后带回实验室, 于 4°C 冰箱中保存备用。鲜样用于土壤 DOC 和 MBC 的分析; 风干样用于土壤碳组分、全氮等理化性质的测定。

1.2.2 土壤碳组分的分析

土壤有机碳 (SOC) 采用总有机碳 TOC 仪 (岛津 5000A, 日本) 测定。土壤轻组有机碳 (LFOC) 和重组有机碳 (HFOC) 采用 NaI 密度分离法^[24], 用 Multi N/C 3100 TOC 仪 (德国耶拿) 测定其有机碳含量; 土壤易氧化态碳 (EOC) 采用高锰酸钾氧化-比色法测定^[25]; 土壤可溶性有机碳 (DOC) 采用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ K}_2\text{SO}_4$ 浸提法^[26]; 土壤颗粒有机碳 (POC) 采用六偏磷酸钠分散法测定^[27]; 土壤 MBC 采用氯仿熏蒸浸提法测定^[28]。以上相关试验方法详见文献^[5]的描述。

$$\text{土壤碳储量} = 10C \cdot \rho \cdot h$$

式中, $C(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$ 为全碳质量比, $\rho(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ 为土壤容重, $h(\text{cm})$ 为实际土层深度。容重采用环刀法, 带回实验室烘干称重后计算土壤容重。土壤含水量 (SWC) 采用烘干法进行测定。

1.3 数据分析

采用 SPSS 单因素方差分析 (one-way ANOVA) 检验不同处理、土壤不同层次间土壤碳组分的差异, 采用 Origin 2022 作图。

2 结果与分析

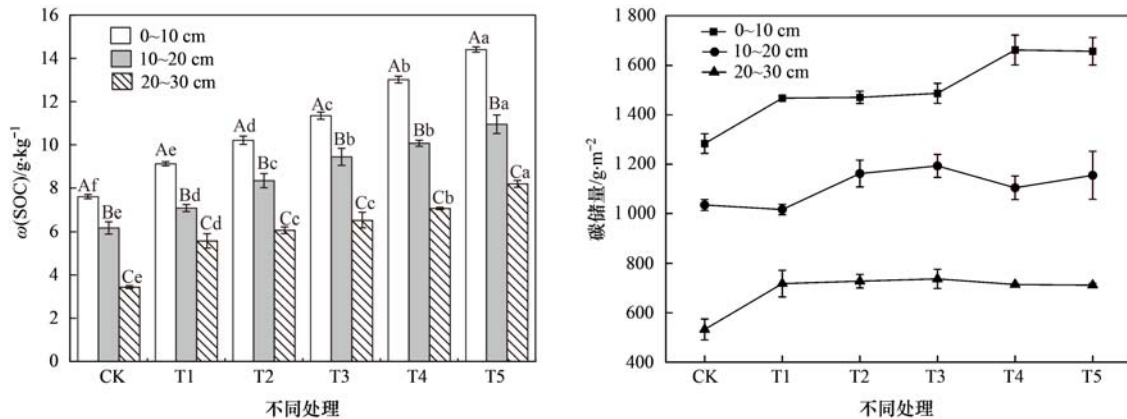
2.1 施用生物炭对土壤有机碳的影响

从图 1 可以看出, 不同生物炭处理下土壤 SOC 含量有显著变化, 在同一处理不同土层, 表层土壤 SOC 含量最高, 且随着土层深度的增加而减小, 各土层之间均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。同一土层不同处理土壤 SOC 均随施用量的增大而增大, 并且在 T5 达到最高值。0 ~ 10 cm 土层中, 各个不同处理间均存在着显著性差异; 10 ~ 20 cm 土层中, 除 T3 与 T4 无显著性差异之外, 其余处理均有显著性差异 ($P < 0.05$); 20 ~ 30 cm 土层中, 除 T3 与 T2 无显著性差异外, 其它均存在着显著性差异 ($P < 0.05$)。各土层土壤 SOC 的变化趋势一致且表现为: $T5 > T4 > T3 > T2 > T1 > \text{CK}$, 表明生物炭显著提高了 SOC 含量。

同时, 不同土层土壤碳储量有所不同, 表层土壤碳储量最高。随着土层深度的增加, 碳储量明显减少; 与对照相比, 随着生物炭施用量的增加, 各处理碳储量均有不同程度地增加, 0 ~ 10 cm 土层在 T4 处理时达到最高值, 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm 分别在 T3 处理达到最高值, 说明生物炭施用对提高桉树人工林土壤碳储量有积极的作用效果。

2.2 施用生物炭对土壤有机碳组分的影响

不同生物炭处理土壤 LFOC 与 HFOC 含量的变化如图 2 所示, 在同一处理不同土层间, 表层土壤 LFOC 与 HFOC 含量最高, 随土层深度的增加而减



不同大写字母表示同一处理不同土层间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图1 不同生物炭处理土壤有机碳含量与碳储量的变化

Fig. 1 Changes in soil organic carbon content and carbon storage under different biochar treatments

小. 0~10 cm 与 10~20 cm 土层中 LFOC 与 HFOC 含量均随施炭量的增加而增加. 在 0~10 cm 土层, 除了 LFOC 含量在 T4 与 T5 之间、T1 与 T2 间无显著性差异之外; 10~20 cm 土层中, 除了 LFOC 含量在 CK 与 T1 之间、T3 和 T4 之间无显著性差异、HFOC 含量在 T4 与 T3、T5 间无显著性差异之外; LFOC 和 HFOC 在其他各处理间均有存在显著性差异 ($P < 0.05$). 在 20~30 cm 土层, 土壤 LFOC 含量变化趋势为: T5 > T4 > T3 > T2 > CK > T1, 其中 T4、T2 和 T3 两两间, CK、T1、T2 和 T3 两两间均无显著性差异, 但其他各处理间则均有显著性差异 ($P < 0.05$). HFOC 含量变化趋势为: T5 > T4 > T3 > T1 > T2 > CK, 其中 CK 和 T5 分别与其他处理间均具有显著性差异 ($P < 0.05$). 与 CK 相比, 各生物炭处理 LFOC 含量在 0~10、10~20 和 20~30 cm 土层的增幅分别为 41.41%~140.63%、9.26%~87.04% 和 -19.54%~106.90%. 各生物炭处理 HFOC 含量在 0~10、10~20 和 20~30 cm 土层的增幅分别为 15.32%~78.99%、15.72%~75.25% 和 89.49%~148.64%. 总体上, 各土层中 HFOC 占 SOC 的比例

高于 LFOC 占 SOC 的比例.

2.3 施用生物炭对土壤活性有机碳组分的影响

不同生物炭处理下土壤 DOC、EOC、POC 和 MBC 的变化如图 3 所示. 在同一处理不同土层中, 0~10 cm 层土壤中 DOC、EOC、POC 和 MBC 含量最高, 随着土层深度的增加而减少, 且各土层间差异显著 ($P < 0.05$). 在 0~10 cm 土层, DOC 与 MBC 含量变化趋势一致为: T4 > T5 > T3 > T2 > T1 > CK, 其中除了 DOC 在 T2 与 T3 间无显著性差异, MBC 在 T4 与 T5 间无显著性差异之外, DOC 和 MBC 在其他处理间则均有显著性差异 ($P < 0.05$); EOC 与 POC 含量则随着生物炭施用量的增加而增加, 且各处理间均有显著性差异 ($P < 0.05$). 在 10~20 cm 土层, DOC 含量变化趋势为: T4 > T3 > T5 > T2 > T1 > CK, 其中 T5 除了分别与 T2、T3 间无显著性差异之外, 与其他处理均有显著性差异 ($P < 0.05$); EOC 含量随着施炭量的增加而增加, 各处理间差异显著 ($P < 0.05$); POC 和 MBC 的含量变化趋势为: T4 > T5 > T3 > T2 > T1 > CK, 除了 MBC 在 T5 与 T4 间, CK 与 T1 间差异不显著之外 ($P > 0.05$), POC 和 MBC 在

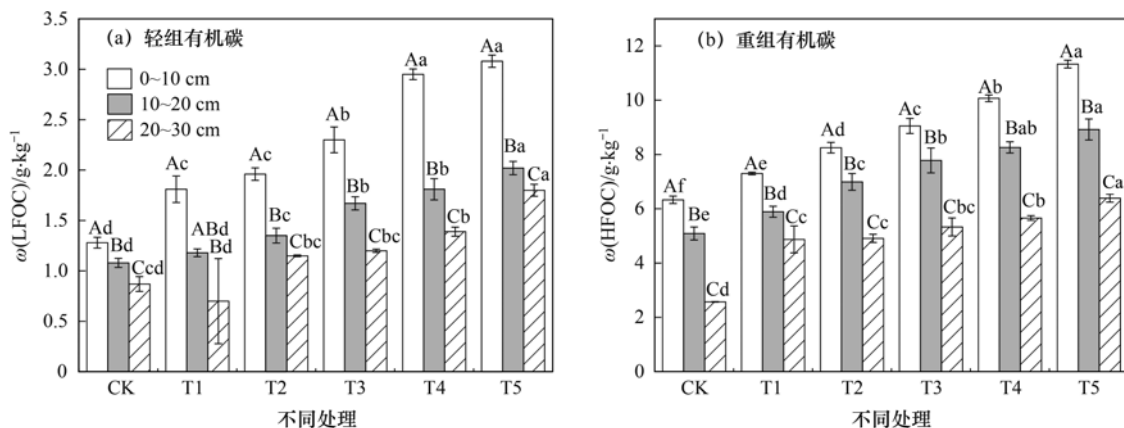


图2 不同生物炭处理土壤轻组与重组有机碳含量的变化

Fig. 2 Changes in soil light and heavy fraction organic carbon content under different biochar treatments

其他处理间均存在显著性差异 ($P < 0.05$). 在 20 ~ 30 cm 土层, DOC 含量变化趋势为: $T4 > T3 > T5 > T2 > T1 > CK$, 其中除了 $T1$ 、 $T2$ 、 $T5$ 两两间无显著性差异之外, 其他各处理间均有显著差异 ($P < 0.05$); POC 含量随生物炭施用量的增加而增加, 除了 $T1$ 分别与 CK 、 $T2$ 间无显著性差异之外, 其他各

处理间均差异显著 ($P < 0.05$); EOC 和 MBC 含量变化趋势为: $T4 > T5 > T3 > T2 > T1 > CK$, 其中除了 MBC 分别在 $T4$ 与 $T5$ 、 CK 与 $T1$ 之间差异不显著之外, 其他各处理间均存在显著性差异 ($P < 0.05$). 总体上, 生物炭施用量在 $T4$ 或 $T5$ 处理时, 对提高土壤活性有机碳的效果较明显.

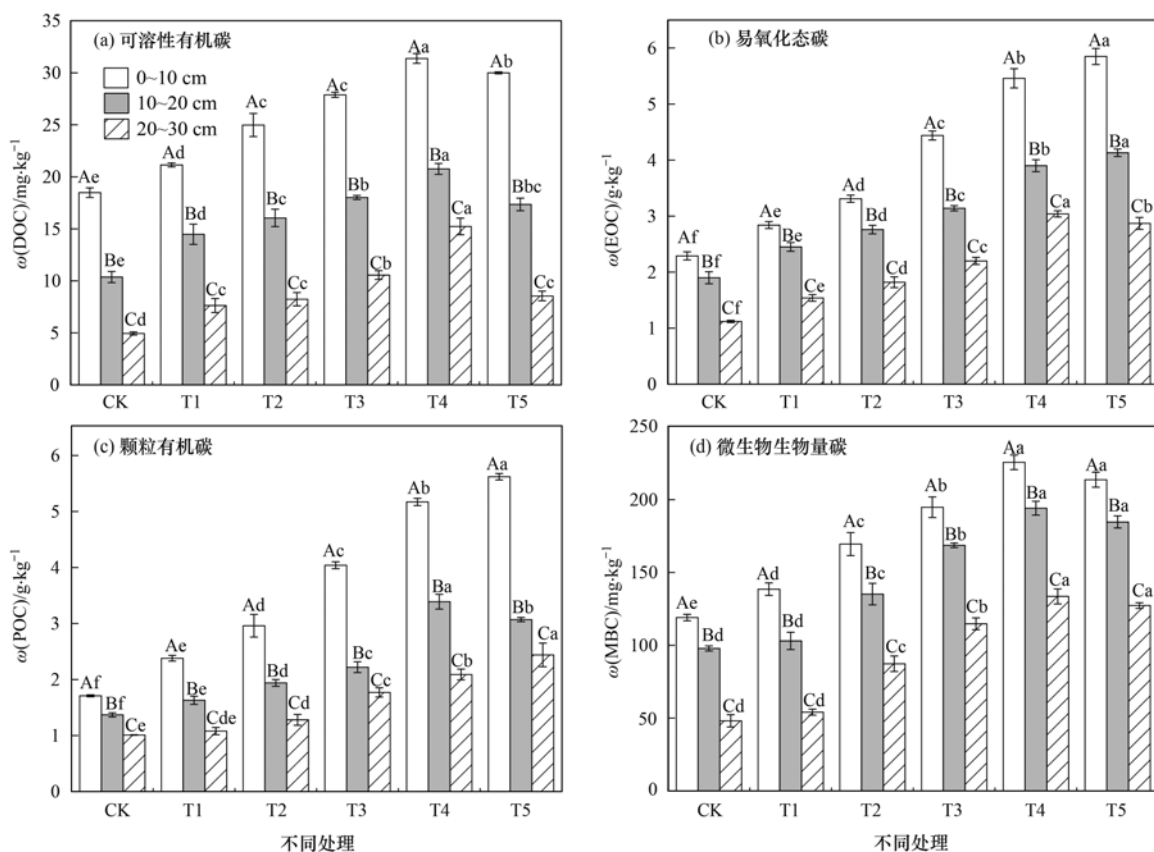


图 3 不同生物炭处理活性有机碳含量的变化

Fig. 3 Changes in soil labile organic carbon content under different biochar treatments

2.4 不同生物炭处理有机碳组分在有机碳中的比例分配

从表 1 可知, 相较于 CK , LFOC 占 SOC 的比例随生物炭施用量的增加呈现先减小后逐渐增大的趋势, 0 ~ 30 cm 土层 LFOC 占 SOC 的比例平均值变化范围为 16.43% ~ 20.60%; HFOC 占 SOC 的比例随生物炭施用量的增加呈现先增大后逐渐减小的趋势, 变化范围为 79.40% ~ 83.57%. 在 CK , LFOC 占 SOC 的比例随土层加深而增加, $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 和 $T4$ 处理 LFOC 占 SOC 的比例总体上随土层的加深而减小, $T5$ 处理则呈现先减小后增大的趋势. 而 HFOC 占 SOC 的比例则相反, $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 和 $T4$ 处理 HFOC 占 SOC 的比例总体上随土层的加深而增大, $T5$ 处理则呈现先增大后减小的趋势. 与 CK 相比, EOC 占 SOC 的比例呈现先减少后增大的趋势, 变化范围在 31.17% ~ 41.27%, 随土层的加深无明显的变化趋

势. DOC 占 SOC 的比例呈现先增大后略减少, 变化范围在 0.16% ~ 0.22%, 其占比随土层的加深总体上呈现减小的趋势. POC 占 SOC 的比例呈现先减少后增大的趋势, 变化范围在 22.63% ~ 34.32%, 随土层的加深呈减小趋势. MBC 占 SOC 的比例呈现先减少后增大的趋势, 变化范围在 1.32% ~ 1.85%, 随着土层的加深无明显的变化趋势.

2.5 土壤有机碳组分与理化性质的相关性

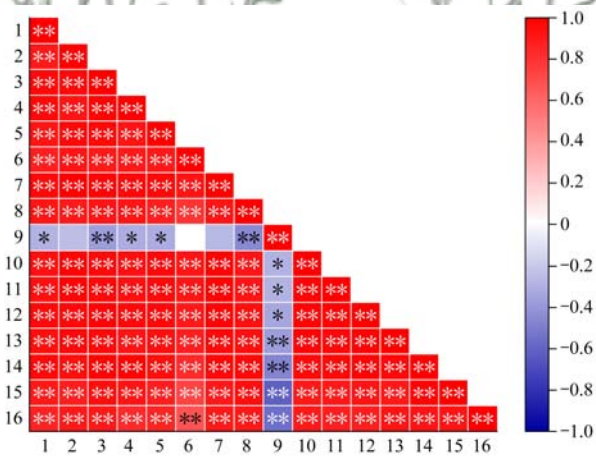
由图 4 可知, 除了 DOC 与 ρ (容重) 间无显著性差异之外 ($P > 0.05$), 土壤 SOC 及有机碳组分与 ρ (容重) 均具有负相关关系; 土壤 SOC 及有机碳组分均与 pH 值、SWC 和 TN 等理化性质具有显著正相关关系 ($P < 0.05$). 土壤 SOC 与有机碳组分间亦具有显著正相关关系, 说明生物炭对土壤质量有积极的影响, 有机碳组分与 SOC 之间存在密切的相互关系.

表1 生物炭不同处理土壤有机碳组分在有机碳中所占比例(平均值±标准差)/%

Table 1 Proportion of organic carbon component in soil organic carbon under different biochar treatments(mean±standard deviation)/%

不同处理	土层/cm	LFOC/SOC	HFOC/SOC	EOC/SOC	DOC/SOC	POC/SOC	MBC/SOC
CK	0~10	16.83±0.85Bb	83.17±0.85Aa	30.12±1.21Ad	0.24±0.01Aa	22.53±0.36Be	1.56±0.03Abc
	10~20	17.54±0.18Bab	82.46±0.18Aab	32.48±2.64Ac	0.17±0.01Bb	22.25±1.64Bc	1.59±0.05Ac
	20~30	25.26±1.66Aa	74.74±0.16Bb	32.48±1.03Abc	0.14±0.00Cbc	29.47±0.45Aa	1.40±0.15Acd
	均值	19.88	80.12	31.39	0.18	24.75	1.52
T1	0~10	19.84±1.24Abc	80.16±1.24Abc	31.15±0.68Bed	0.23±0.00Ab	26.11±0.84Ad	1.52±0.03Ac
	10~20	16.80±0.95Aab	83.20±0.95Aab	34.71±1.49Abc	0.20±0.02Aa	22.29±0.80Ac	1.46±0.12Ad
	20~30	12.66±7.64Ab	87.34±7.64Aa	27.66±1.03Cd	0.14±0.01Bc	19.49±2.16Bb	0.97±0.09Bd
	均值	16.43	83.57	31.17	0.19	22.63	1.32
T2	0~10	19.17±0.68Ac	80.83±0.68Bb	32.43±0.87Ac	0.25±0.01Aa	28.94±1.58Ac	1.66±0.05Aab
	10~20	16.20±0.88Bb	83.80±0.88Aa	33.2±1.70Ac	0.19±0.01Ba	23.24±0.24Bc	1.62±0.03Abc
	20~30	18.97±0.40Aab	81.03±0.40Bab	30.03±2.00Acd	0.14±0.01Cc	21.15±1.46Bb	1.44±0.11Bc
	均值	18.11	81.89	31.89	0.19	24.44	1.57
T3	0~10	20.25±1.36Abc	79.75±1.36Abc	39.12±0.53Ab	0.22±0.00Ac	35.61±0.95Ab	1.72±0.08Aa
	10~20	17.71±1.41Aab	82.29±1.41Aab	33.33±0.95Bc	0.19±0.01Ba	23.61±1.88Cc	1.79±0.08Aab
	20~30	18.42±0.72Aab	81.58±0.72Aab	33.78±1.65Bb	0.16±0.01Cb	27.13±0.31Ba	1.76±0.11Aab
	均值	18.79	81.21	35.41	0.19	28.78	1.76
T4	0~10	22.63±0.27Aa	77.37±0.27Bd	41.97±1.52Aa	0.24±0.00Ac	39.69±0.95Aa	1.73±0.04Ba
	10~20	18.01±1.16Bab	81.99±1.16Aab	38.69±1.14Ba	0.21±0.00Ba	33.66±1.33Ba	1.93±0.03Aa
	20~30	19.76±0.73Ba	80.24±0.73Ab	43.15±0.92Aa	0.22±0.01Ba	29.62±1.14Ca	1.89±0.08Aa
	均值	20.13	79.87	41.27	0.22	34.32	1.85
T5	0~10	21.35±0.48Aab	78.65±0.48Bed	40.58±1.22Aab	0.21±0.00Ad	39.02±0.31Aa	1.48±0.05Bc
	10~20	18.49±0.55Ba	81.51±0.55Ab	37.79±2.07ABab	0.16±0.01Bb	28.1±1.44Bb	1.69±0.10Abc
	20~30	21.95±0.69Aa	78.05±0.69Bb	35.13±1.90Bb	0.10±0.01Cd	29.87±2.26Ba	1.56±0.05Abbc
	均值	20.60	79.40	37.83	0.16	32.33	1.58

1) 同列不同大写字母表示同一处理不同土层间差异性显著($P<0.05$), 同列不同小写字母表示同一土层不同处理间差异性显著($P<0.05$)



1. LFOC(轻组有机碳), 2. HFOC(重组有机碳), 3. EOC(易氧化态碳), 4. POC(颗粒有机碳), 5. MBC(微生物生物量碳), 6. DOC(可溶性有机碳), 7. SOC(有机碳), 8. pH(酸碱度), 9. ρ (容重), 10. SWC(土壤含水量), 11. TN(全氮), 12. TP(全磷), 13. TK(全钾), 14. AN(速效氮), 15. AP(速效磷), 16. AK(速效钾); 红色表示两个变量呈正相关, 蓝色表示两个变量呈负相关, 色彩越深表示变量相关性越大; * 表示不同因子间的相关性呈显著水平, $P<0.05$; ** 表示不同因子间的相关性呈极显著水平, $P<0.01$

图4 土壤有机碳、碳组分与理化性质之间的相关性
Fig. 4 Correlation between soil organic carbon, organic carbon fractions, and physicochemical properties

3 讨论

3.1 生物炭施用对土壤有机碳的影响

土壤 SOC 被看作是土壤质量的一个重要指标,也是评价土壤可持续利用以及评估二氧化碳固定能力的重要指标^[29]. 本研究中,生物炭施用后 0~30 cm 土层土壤 SOC 含量呈现增加趋势,随着生物炭施用量的增加而增加,且与对照具有显著性差异($P<0.05$). 这与其他研究结果类似^[30~32],例如,张继旭等^[30]的研究表明,将秸秆生物炭施入植烟土壤中高炭量(5%)使土壤 SOC 含量显著增加. 孙强等^[31]的研究表明,与不施炭相比,将玉米秸秆生物炭施入棕壤中,可以显著提高 0~40 cm 土层的 SOC 含量,且随施炭量增加而增加. 杜倩等^[32]将不同类型生物炭配合不同还田方式施入植烟土壤中,生物炭总体上增加了植烟土壤的 SOC 含量. 究其原因,一方面,可能是桉树枝条废弃物生物炭自身丰富的碳对 SOC 有直接的促进作用,另一方面,可能是因为生物炭有较强的吸附能力以及较大的比表面积,能形成难以被土壤微生物分解的有机质^[33],加之生物炭具有生物化学稳定性较强的特征,长期保留于土壤后会成为土壤 SOC 的组成部分.

有研究表明,碳源与碳汇广泛存在于自然界中,固碳减排便要增加碳汇,促使碳储量的增加^[34]. 本研究中,生物炭施用 5 a 后提高了桉树林土壤的碳储存,说明桉树枝条废弃物生物炭可作为较好的固碳材料,制备为生物炭后返还于桉树林土壤中,有较好的固碳效果,对土壤碳封存积极的作用. 这可能与桉树枝条生物炭本身含有大量的碳有关,也有可能是生物炭施用提高了土壤养分含量,土壤养分与 SOC 具有显著正相关关系,养分的增加促进了土壤微生物的活性,加速了土壤养分的周转,进而增加了土壤 SOC. 与本研究结果一致的是, Criscuoli 等^[35]将木屑生物炭添加到葡萄园土壤中,通过田间试验与原土壤对照相比,发现短期内能显著增加了土壤碳储量. Sui 等^[36]的研究表明,生物炭施入水稻田里更能增加土壤 SOC 含量,更有利于碳储存. 马欣等^[37]的研究也表明,与 CK 处理相比,生物炭处理增加了土壤 SOC 的稳定性,有利于提高土壤有机碳储量.

3.2 生物炭施用对轻组和重组有机碳组分的影响

土壤 LFOC 主要来源于不同分解阶段的植物残体,对土壤有机质周转有重要作用,是植物养分的短期储存库,是土壤中不稳定有机碳库的重要组成部分^[38]. HFOC 与 LFOC 相比较,对环境变化的适应能力以及矿化和周转的速率较慢,比 LFOC 较稳定^[39]. 本研究中,桉树枝条生物炭施入土壤后, LFOC 和 HFOC 含量均有所增加, HFOC 含量远大于 LFOC 含量,这可能与桉树林种植区土壤中 HFOC 所占比例较大,以及生物炭施用后促进了微生物的固定有关. 与本研究结果相似, 聂阳意^[40]将外源碳输入土壤中后发现, LFOC 与 HFOC 含量均有所增加,外源碳分解后大部分都进入了 HFOC 中. 孟雨田等^[41]研究将玉米秸秆生物炭施入黑土中发现, LFOC 与 HFOC 含量均随着生物炭含量的增加而增加, HFOC 均高于 LFOC.

由于桂北桉树林种植区地处亚热带,湿热的气候条件可能有利于土壤 LFOC 的分解,此外,桉树多种植于坡地,地表径流可能加大了对桉树林植物凋(枯)落物和残体的冲刷作用,造成 LFOC 的流失以至于 LFOC 的富集量较少. 同时,生物炭施用条件下,桉树林植物凋落物分解对 LFOC 含量的影响,还有待进一步的研究.

本研究中,随着生物炭施用量的增加,各土层的 LFOC 和 HFOC 含量均有不同程度地增加,而 HFOC 占 SOC 的比例相对较大,这与其他研究的结果一致^[42~44]. 王毅等^[42]将小麦秸秆生物炭施入植烟土壤中,与对照相比,生物炭显著增加 LFOC 含量,高

施炭量效果更显著. 乔丹丹等^[43]的研究发现,相对于对照,生物炭施入黄褐土中能显著增加 LFOC 和 HFOC 含量,生物炭配施其他有机肥的 HFOC 和 LFOC 含量也较高, LFOC 占 SOC 的比例较低. 韩玮等^[44]将生物炭施入水稻土中,通过对比发现添加生物炭后显著增加 LFOC 含量,且随着生物炭的热解程度也呈上升趋势, HFOC 虽也有提高,幅度远小于 LFOC,但 HFOC 在土壤中仍占主要比例.

有研究表明,生物炭施入土壤中会与土壤黏土矿物结合成为重组有机碳的一部分^[45],而生物炭本身小密度以及形态稳定的特性,会使得 LFOC 能够在土壤中集中起来且不容易被分解^[46]. 本研究表明,各处理 LFOC 和 HFOC 占土壤 SOC 的比例分别为 16.43%~20.60% 和 79.40%~83.57%,这也表明在桉树林土壤 SOC 中 HFOC 占优势, LFOC 是有机碳库的重要组成部分. 总的来说,与 CK 相比,随着生物炭施用量的增加,0~30 cm 土层土壤 SOC、LFOC 和 HFOC 的平均值均呈现增大的趋势,且变化趋势一致为: T5 > T4 > T3 > T2 > T1 > CK, 其中土壤 LFOC 分配比相对较低, HFOC 分配比较高,说明桉树林土壤碳库以较稳定的 HFOC 为主,生物炭施用 5 a 后,有利于提高土壤碳库的稳定性.

3.3 生物炭施用对活性有机碳组分的影响

土壤活性有机碳在土壤有机碳总量中占比虽小,但是参与了土壤生物化学转化过程,对土壤碳库变动具有重要的意义^[46],其具有移动性快、活性高、易氧化矿化的特性,是土壤 SOC 的重要组成. 土壤活性有机碳占 SOC 比例更能表明土壤 SOC 的稳定性与质量,比例越高则表示容易被微生物吸收利用,周转速率快,活性高;值越低则表明较稳定,容易存储^[10]. DOC 在土壤有机碳库中是微生物的碳源之一,并且比较活跃易变化. 黎嘉成等^[47]的研究表明,生物炭施入显著提高了农田土壤的 DOC 含量,生物炭还田后 DOC 占 SOC 的比例比秸秆还田的比值要低. 本研究中 DOC 含量随生物炭施用量的增加而增加,在 T4 达到最高值,这可能是因为生物炭为微生物的生长繁殖提供了碳源和能源,提高了微生物的活性,促进了土壤中难溶态物质的分解,进而增加了 DOC 含量^[48]; DOC 占 SOC 的比例在 T5 处理略低于对照,表明生物炭中低施用量(T1~T4)有效提高了土壤肥力,促进养分分解从而提高植物吸收利用,而高生物炭施用量(T5),主要提高了土壤 SOC 的稳定性,有利于土壤固碳^[47]. EOC 在土壤中属于移动快,易氧化易矿化、不稳定的活性有机碳组分. 本研究中,高生物炭施用量处理下土壤 EOC 占 SOC 的比例较对照高,说明桉树枝条生物炭促进

了土壤有机碳活性,加快养分循环,有利于桉树植株的生长.与本研究结果类似,柯跃进等^[49]的研究也表明,耕地土壤中 EOC 含量随着水稻秸秆生物炭添加量的增加而提高.

POC 作为土壤微生物的能量来源,由微生物、动、作物残体组成,是容易流失的 SOC,也是营养物质的储存碳库^[50],它对环境的变化以及土壤的碳源输入响应以及管理措施较为敏感.本研究中,随着生物施用量的增加,同一土层 POC 含量不断增加,这与王月玲等^[51]的研究结果相一致.生物炭能提高 POC 含量,这是由于其自身的特性促进土壤大团聚体的形成^[52],从而使得土壤碳固持且长期形成 POC. POC 占 SOC 的比例则反映了土壤中非稳定性有机碳的相对数量,POC 所占比例越低,有机碳不稳定的部分越少^[4].本研究中生物炭施用使得 20 ~ 30 cm 土层 POC 占 SOC 的比例较低,表层 POC 占 SOC 的比例较高,这与对照相反,表明生物炭施用促进了底层土壤的固碳能力,提高表层土壤的肥力.

MBC 对土壤碳循环起着重要的作用,虽然含量较少,但在碳库中比较活跃,在一定程度上可以指示土壤肥力^[5].本研究中,MBC 含量随着生物炭施用量的增加而增加,在 T4 处理达到高值,MBC 含量的提高可能是因为生物炭本身的多孔结构为微生物提供了繁殖的场所,使得微生物活性提高.朱利霞等^[53]的研究表明,生物炭添加显著影响了 MBC 含量,0 ~ 30 cm 土层中,均随着施炭量的增加而增加,其与本研究的结果一致. MBC/SOC 即微生物熵 (q_{MB}),可指示土壤有机碳的活性,其值越高表明土壤中有有机质向微生物量碳转化的效率越高,其土壤碳活性越大^[54].本研究中,高生物炭施用量处理相比较对照和低施炭量,其微生物熵值较高,这表明高施炭量处理下土壤更容易被微生物分解利用,从而增加了土壤微生物数量,土壤碳活性较大,提高了土壤肥力.施用林业废弃物生物炭可以显著提高桉树林土壤的 EOC、POC 和 MBC 含量,这与其他学者研究的结果一致^[11,12];不同的是,也有研究表明生物炭的添加对 EOC 含量并无明显变化^[55],在红壤中降低了 MBC 含量,显著提高了黑土 MBC 含量^[56],说明土壤活性有机碳的变化还受土壤类型、管理措施和生物炭本身复杂性等因素的影响.总之,桉树枝条废弃物生物炭施用提高了土壤活性有机碳,有利于桉树林土壤肥力的提升,这对于桉树人工林的可持续经营有积极的作用效果.

4 结论

(1) 随生物炭施用量的增加,显著增加了桉树

林土壤有机碳、轻组有机碳和重组有机碳含量,均随土层的加深而趋于减少;重组有机碳在土壤有机碳中占比较大,轻组有机碳的比例较小.生物炭施用增加了可溶性有机碳、易氧化态碳、颗粒有机碳和微生物生物量碳含量,提高了土壤活性有机碳.土层深度的增加对可溶性有机碳、颗粒有机碳、易氧化态碳和微生物生物量碳分别占有有机碳的比例无显著影响.

(2) 桉树枝条废弃物生物炭施用 5 a 后,对桉树人工林土壤有机碳及其组分含量的增加有显著的持续效应,且增加了土壤碳储量,有利于提高土壤稳定性碳库.桉树林业废弃物制备成生物炭,就地还田,是提高桉树人工林土壤固碳能力的重要途径,是桉树人工林土壤质量改善与地力提升的有效管理措施,施用 4% ~ 6% 量的桉树枝条生物炭是提高土壤有机碳及碳组分含量的较优处理.

参考文献:

- [1] 杜雪,王海燕.中国森林土壤有机碳活性组分及其影响因素[J].世界林业研究,2022,35(1):76-81.
Du X, Wang H Y. Active components of forest soil organic carbon and its influencing factors in China[J]. World Forestry Research, 2022, 35(1): 76-81.
- [2] Hou G L, Delang C O, Lu X X, et al. A meta-analysis of changes in soil organic carbon stocks after afforestation with deciduous broadleaved, sempervirent broadleaved, and conifer tree species[J]. Annals of Forest Science, 2020, 77(4): 1-13.
- [3] 李成,王让会,李兆哲,等.中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素[J].环境科学,2021,42(5):2432-2439.
Li C, Wang R H, Li Z Z, et al. Spatial differentiation of soil organic carbon density and influencing factors in typical croplands of China[J]. Environmental Science, 2021, 42(5): 2432-2439.
- [4] 胡慧蓉,马焕成,罗承德,等.森林土壤有机碳分组及其测定方法[J].土壤通报,2010,41(4):1018-1024.
Hu H R, Ma H C, Luo C D, et al. Forest soil organic carbon fraction and its measure methods[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(4): 1018-1024.
- [5] 徐广平,李艳琼,沈育伊,等.桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征[J].环境科学,2019,40(3):1491-1503.
Xu G P, Li Y Q, Shen Y Y, et al. Soil organic carbon distribution and components in different plant communities along a water table gradient in the Huixian Karst wetland in Guilin[J]. Environmental Science, 2019, 40(3): 1491-1503.
- [6] Tomczyk A, Sokołowska Z, Boguta P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2020, 19(1): 191-215.
- [7] 武玉,徐刚,吕迎春,等.生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J].地球科学进展,2014,29(1):68-79.
Wu Y, Xu G, Lü Y C, et al. Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: current status and knowledge gaps[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(1): 68-79.

- [8] 段春燕, 沈育伊, 徐广平, 等. 桉树枝条生物炭输入对桂北桉树人工林酸化土壤的作用效果[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4234-4245.
Duan C Y, Shen Y Y, Xu G P, *et al.* Effects of *Eucalyptus* branches biochar application on soil physicochemical properties of acidified soil in a *Eucalyptus* plantation in Northern Guangxi[J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 4234-4245.
- [9] 张健乐, 曾小英, 史东梅, 等. 生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 2209-2218.
Zhang J L, Zeng X Y, Shi D M, *et al.* Effects of biochar on soil organic carbon of eroded cultivated layer of slope farmland in purple hilly area[J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 2209-2218.
- [10] 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.
- [11] 付琳琳, 蔺海红, 李恋卿, 等. 生物质炭对稻田土壤有机碳组分的持效影响[J]. 土壤通报, 2013, **44**(6): 1379-1384.
Fu L L, Lin H H, Li L Q, *et al.* Persistent effects of biochar application on organic carbon fractions of paddy soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, **44**(6): 1379-1384.
- [12] 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.
- [13] 周凤, 许晨阳, 王月玲, 等. 生物炭对壤土 CH₄、N₂O 排放的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(9): 3831-3839.
Zhou F, Xu C Y, Wang Y L, *et al.* Effect of biochar on CH₄ and N₂O emissions from Lou soil[J]. Environmental Science, 2017, **38**(9): 3831-3839.
- [14] 侯亚红, 王磊, 付小花, 等. 土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2655-2661.
Hou Y H, Wang L, Fu X H, *et al.* Response of straw and straw biochar returning to soil carbon budget and its mechanism[J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2655-2661.
- [15] 王颖, 孙层层, 周际海, 等. 生物炭添加对半干旱区土壤细菌群落的影响[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(5): 2170-2179.
Wang Y, Sun C C, Zhou J H, *et al.* Effects of biochar addition on soil bacterial community in semi-arid region[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(5): 2170-2179.
- [16] 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.
- [17] 张婷, 王旭东, 逢萌雯, 等. 生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2298-2303.
Zhang T, Wang X D, Pang M W, *et al.* Impacts of biochar and straw application on soil organic carbon transformation[J]. Environmental Science, 2016, **37**(6): 2298-2303.
- [18] 潘全良. 施用生物炭和炭基肥对棕壤有机碳组分和活性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- Pan Q L. Influences of application of biochar and biochar-based compound fertilizer on carbon component and active on brown soil[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.
- [19] 徐广平, 沈育伊, 滕秋梅, 等. 桉树人工林生态环境效应研究[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2021.
Xu G P, Shen Y Y, Teng Q M, *et al.* Research on ecological environmental effect of *Eucalyptus* plantation[M]. Nanning: Guangxi Science and Technology Publishing House, 2021.
- [20] 徐广平, 沈育伊. 农林废弃物制备生物炭实践与应用[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2022.
Xu G P, Shen Y Y. Practice and application of preparing biochar from agricultural and forestry wastes[M]. Nanning: Guangxi Science and Technology Publishing House, 2022.
- [21] Bruun S, Jensen E S, Jensen L S. Microbial mineralization and assimilation of black carbon: Dependency on degree of thermal alteration[J]. Organic Geochemistry, 2008, **39**(7): 839-845.
- [22] 张美芝, 耿煜函, 张薇, 等. 秸秆生物炭在农田中的应用研究综述[J]. 中国农学通报, 2021, **37**(21): 59-65.
Zhang M Z, Geng Y H, Zhang W, *et al.* The role of straw biochar in farmland: a review[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, **37**(21): 59-65.
- [23] 郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 等. 生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3393-3400.
Guo Y L, Wang D D, Zheng J Y, *et al.* Effect of biochar on soil greenhouse gas emissions in semi-arid region[J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3393-3400.
- [24] Zhang J B, Song C C, Wang S M. Dynamics of soil organic carbon and its fractions after abandonment of cultivated wetlands in northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2007, **96**(1-2): 350-360.
- [25] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, **46**(7): 1459-1466.
- [26] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, **38**(5): 991-999.
- [27] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, **56**(3): 777-783.
- [28] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [29] 朱丹苗, 陈俊辉, 姜培坤. 杉木人工林土壤有机碳和微生物特征及其影响因素的研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2021, **38**(5): 973-984.
Zhu D M, Chen J H, Jiang P K. Research progress on soil organic carbon and microbial characteristics of *Cunninghamia lanceolata* plantation and their influencing factors[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2021, **38**(5): 973-984.
- [30] 张继旭, 张继光, 张忠锋, 等. 秸秆生物炭对烤烟生长发育、土壤有机碳及酶活性的影响[J]. 中国烟草科学, 2016, **37**(5): 16-21.
Zhang J X, Zhang J G, Zhang Z F, *et al.* Effects of straw biochar on tobacco growth, soil organic carbon and soil enzyme activities[J]. Chinese Tobacco Science, 2016, **37**(5): 16-21.
- [31] 孙强, 杨旭, 孟军, 等. 生物炭对棕壤团聚体空间分布及有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, **41**(11): 2515-2524.
Sun Q, Yang X, Meng J, *et al.* Effects of biochar on soil

- aggregate spatial distribution and soil organic carbon in brown earth soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, **41** (11): 2515-2524.
- [32] 杜倩, 黄容, 李冰, 等. 生物炭还田对植烟土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. *核农学报*, 2021, **35**(6): 1440-1450.
Du Q, Huang R, Li B, *et al.* Effect of biochar returning on labile organic carbon and enzyme activity in tobacco-growing soil [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, **35**(6): 1440-1450.
- [33] 花莉, 金素素, 洛晶晶. 生物质炭输入对土壤微域特征及土壤腐殖质的作用效应研究[J]. *生态环境学报*, 2012, **21** (11): 1795-1799.
Hua L, Jin S S, Luo J J. Effect of biochar on the micro-environment characteristics and humus in soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(11): 1795-1799.
- [34] 杜氏清闲. 炼山和施生物炭对桉树人工林生物量和碳储量的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
Du S Q X. Effects of controlled burning and biochar addition on biomass and carbon stocks in *Eucalyptus* plantation [D]. Nanning: Guangxi University, 2018.
- [35] Criscuoli I, Ventura M, Wiedner, *et al.* Stability of woodchips biochar and impact on soil carbon stocks: results from a two-year field Experiment[J]. *Forests*, 2021, **12**(10): 1350.
- [36] Sui Y H, Gao J P, Liu G H, *et al.* Interactive effects of straw-derived biochar and N fertilization on soil C storage and rice productivity in rice paddies of Northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **544**: 203-210.
- [37] 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.
- [38] 董洪芳, 于君宝, 管博. 黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 288-292.
Dong H F, Yu J B, Guan B. Distribution characteristics of soil organic carbon and its composition in Suaeda salsa wetland in the Yellow River Delta [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 288-292.
- [39] 徐赛亚, 徐占军, 毕如田, 等. 添加木本泥炭改良剂对矿区新复垦耕地土壤有机碳组分的影响[J]. *山西农业科学*, 2021, **49**(3): 324-331.
Xu S Y, Xu Z J, Bi R T, *et al.* Effects of adding woody peat modifier on the soil organic carbon components of newly reclaimed land [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2021, **49** (3): 324-331.
- [40] 聂阳意. 外源碳输入对武夷山不同海拔土壤有机碳组分和激发效应的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2018.
Nie Y Y. Effects of fresh carbon addition on soil organic carbon fractions and soil priming effect along an elevation gradient in Wuyi Mountain, China [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2018.
- [41] 孟雨田, 赵承森, 李晓庆, 等. 生物质炭对黑土有机碳组分的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2018, **40**(6): 1340-1347.
Meng Y T, Zhao C S, Li X Q, *et al.* Effects of biochar on soil organic pools in Phaeozem [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2018, **40**(6): 1340-1347.
- [42] 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.
- [43] 乔丹丹, 吴名宇, 张倩, 等. 秸秆还田与生物炭施用对黄褐土团聚体稳定性及有机碳积累的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018, (3): 92-99.
Qiao D D, Wu M Y, Zhang Q, *et al.* Effect of biochar and straw with chemical fertilizers on soil aggregate distribution and organic carbon content in yellow cinnamon soil [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018, (3): 92-99.
- [44] 韩玮, 申双和, 谢祖彬, 等. 生物炭及秸秆对水稻土各密度组分有机碳及微生物的影响[J]. *生态学报*, 2016, **36**(18): 5838-5846.
Han W, Shen S H, Xie Z B, *et al.* Effects of biochar and straw on both the organic carbon in different density fractions and the microbial biomass in paddy soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(18): 5838-5846.
- [45] 宇万太, 柳敏, 赵鑫, 等. 不同有机物料及其配施对潮棕壤轻组有机碳的动态影响[J]. *土壤通报*, 2008, **39**(6): 1307-1310.
Yu W T, Liu M, Zhao X, *et al.* Effects of different organic materials on light fraction organic carbon of soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, **39**(6): 1307-1310.
- [46] 陈桂香, 王维奇, 曾从盛. 炉渣与生物炭施加对稻田土壤活性有机碳组分及矿化的影响[J]. *实验室研究与探索*, 2018, **37**(4): 38-44.
Chen G X, Wang W Q, Zeng C S. Effects of slag and biochar on soil organic carbon fractions and mineralization in paddy soil [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2018, **37**(4): 38-44.
- [47] 黎嘉成, 高明, 田冬, 等. 秸秆及生物炭还田对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. *草业学报*, 2018, **27**(5): 39-50.
Li J C, Gao M, Tian D, *et al.* Effects of straw and biochar on soil organic carbon and its active components [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, **27**(5): 39-50.
- [48] Lemke R L, VandenBygaart A J, Campbell C A, *et al.* Crop residue removal and fertilizer N: effects on soil organic carbon in a long-term crop rotation experiment on a Udic Boroll [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, **135**(1): 42-51.
- [49] 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.
- [50] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover [J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, **52**(3): 345-353.
- [51] 王月玲, 周凤, 张帆, 等. 施用生物炭对土壤呼吸以及土壤有机碳组分的影响[J]. *环境科学研究*, 2017, **30**(6): 920-928.
Wang Y L, Zhou F, Zhang F, *et al.* Influence of biochar on soil respiration and soil organic carbon fractions [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30**(6): 920-928.
- [52] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal-a review [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, **35** (4): 219-230.
- [53] 朱利霞, 陈居田, 徐思薇, 等. 生物炭施用下土壤微生物量

- 碳氮的动态变化[J]. 中国农业科技导报, 2021, **23**(8): 193-200.
- Zhu L X, Chen J T, Xu S W, *et al.* Dynamics of soil microbial biomass carbon and nitrogen after biochar application [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, **23**(8): 193-200.
- [54] 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 等. 干热河谷不同利用方式下土壤活性有机碳含量及其分配特征[J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1365-1371.
- Tang G Y, Li K, Sun Y Y, *et al.* Soil labile organic carbon contents and their allocation characteristics under different land uses at Dry-hot Valley [J]. Environmental Science, 2010, **31**(5): 1365-1371.
- [55] 赵承森. 秸秆和生物炭对退化黑土有机碳库和细菌群落的影响机制[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.
- Zhao C S. The effects of straw and biochar on soil organic carbon pools and soil bacterial community in degraded black soil [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020.
- [56] 盖霞普, 翟丽梅, 王洪媛, 等. 生物炭对土壤微生物量及其群落结构的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, **48**(4): 399-410.
- Gai X P, Zhai L M, Wang H Y, *et al.* Impacts of biochar on soil microbial biomass and community structure [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, **48**(4): 399-410.

环境科学

CONTENTS

Meteorological Impact Assessment of PM _{2.5} and O ₃ Complex Pollution in Key Regions of China Based on Meteorological Conditions Index	YANG Xin, YANG Yuan-qin, LI Hong, <i>et al.</i>	(6433)
Scale Dependence Between PM _{2.5} and Meteorological Factors and Its Influencing Factors in “2+26” Cities	WU Shu-qi, JIN Jian-nan, ZHENG Dong-yang, <i>et al.</i>	(6441)
Chemical Constituents and Sources of PM _{2.5} Around the Wuhan Military Games Period	LIU Shi-hao, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(6452)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution During Winter in Handan City from 2016 to 2020	NIU Hong-ya, GAO Na-na, BAO Xiao-lei, <i>et al.</i>	(6463)
Chemical Compositions and Sources of PM _{2.5} in Weinan City	GUO Jing-ning, LI Xiao-fei, YU Feng, <i>et al.</i>	(6474)
Analysis of Formation Processes and Sources of PM _{2.5} Ammonium During Winter and Summer in Suburban Area of the Yangtze River Delta	XIANG Yan-kun, CAO Fang, ZHANG Wen-qi, <i>et al.</i>	(6486)
Chemical Composition and Characterization of Nitroaromatic Compounds in Urban Areas of Shanghai	YANG Lu, MA Ying-ge, YU Jian-zhen, <i>et al.</i>	(6495)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} , Liliang City	MU Ling, LIU Zi-ye, LI Yang-yong, <i>et al.</i>	(6508)
Effect of Biomass Burning on Carbonaceous Aerosol Composition and Light Absorption in Guangxi Regional Background Site	WU Xing-qi, CAO Fang, HONG Yi-hang, <i>et al.</i>	(6518)
Characteristics of Light Absorption, Sources, and Seasonal Variation of Atmospheric Brown Carbon in Northern Nanjing	CHEN Xing-zhou, CUI Shi-jie, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i>	(6529)
Health Benefit Assessment of Coal-to-electricity Policy on PM _{2.5} Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHANG Ru-ting, CHEN Chuan-min, LIU Song-tao, <i>et al.</i>	(6541)
Source Apportionment of Ambient VOCs in Qingdao Based on Photochemical Loss Correction	KONG Cui-li, WU Yu-tong, GU Yao, <i>et al.</i>	(6551)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Liaocheng in Summer	LI Wan-yong, HUANG Hao-yu, WANG Yan-zhen, <i>et al.</i>	(6564)
Source Analysis of Ozone and Its Precursors in Zibo Based on 3-D Air Quality Model	ZHANG Xin-xin, ZHAO Xiu-ying, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(6576)
Spatio-temporal Characteristics and Influencing Factors of Ozone Suppression Events Under High Temperature in China	OU Lin-chong, CHEN Wei-hua, WU Yong-kang, <i>et al.</i>	(6586)
Review of UAV-based Atmospheric Fine Particulate Matter and Ozone Pollution Detection and Source Localization	QU Ya-wei, WANG Ti-jian, YUAN Cheng, <i>et al.</i>	(6598)
Health Impact Analysis of Fine Particulate Pollution from Vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Yong-pei, SONG Xiao-wei, ZHU Xiao-dong, <i>et al.</i>	(6610)
Assessment of Emission Reduction Potential of CO ₂ Capture, Geological Utilization, and Storage in Cement Industry of China	WEI Ning, LIU Sheng-nan, WEI Feng, <i>et al.</i>	(6621)
Life Cycle Carbon Emission Accounting and Emission Reduction Potential Assessment of Steel Industry	SONG Xiao-cong, DU Shuai, DENG Chen-ning, <i>et al.</i>	(6630)
Evolution Characteristics and Driving Forces of Carbon Dioxide Emissions and Sinks in the Pearl River Delta Region, China	HU Jing-xin, SHA Qing-e, LIU Hui-lin, <i>et al.</i>	(6643)
Impact of Accelerated Electrification Under the Low Carbon Path in Dongguan City on the Coordinated Emission Reduction of CO ₂ and Pollutants	WU Le-min, CHEN Bing-yin, OU Lin-chong, <i>et al.</i>	(6653)
Relationship Between Urbanization and Carbon Emissions in the Chang-Zhu-Tan Region at the County Level	LIU Xian-zhao, LI Yang, <i>et al.</i>	(6664)
Characteristics and Influencing Factors of Greenhouse Fluxes from Urban Lawn	CHEN Li-han, LIU Shuo, LIN Yi, <i>et al.</i>	(6680)
Dual-Perspective Analysis of the Warming Effect of the Methane Emissions from Animal Husbandry in China	LIU Shu-le, YAN Wei, CAO Qing-xian, <i>et al.</i>	(6692)
Pollution Level and Risk Assessment of OPEs in Typical River Basins of China	ZHAO Jiang-lu, LU Hai-jian, LÜ Jia-pei, <i>et al.</i>	(6700)
Soil Heavy Metal Contamination, Sources, and Health Risk of Typical Drinking Water Sources in the Suspended Reach of the Lower Yellow River	PENG Chao-yue, REN Chong, SHEN Hao-xin, <i>et al.</i>	(6710)
Fraction Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Yellow River Mainstream	WANG Yi-di, OUYANG Wei, LIU Lian-hua, <i>et al.</i>	(6720)
Influence of Land Use Structure and Spatial Pattern on Water Quality of Small and Medium-sized Rivers in Poyang Lake Basin	WEN Jia-wei, WANG Peng, HUANG Gao-xiang, <i>et al.</i>	(6728)
Water Environment Characteristics and Water Quality Assessment of Typical Lakes in Inner Mongolia	WANG Xin-yuan, PAN Bao-zhu, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(6744)
Relationship Between Precipitation, River Water, and Groundwater Conversion in the Upper Reaches of Xilin River During the Rainy Season	SUN Jin, WANG Yi-xuan, YANG Lu, <i>et al.</i>	(6754)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in the Northwest Salt Lake Basin	YAN Yan, GAO Rui-zhong, LIU Ting-xi, <i>et al.</i>	(6767)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	LIU Yu, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(6778)
Bisulfite Promoted Minute Fe ²⁺ -Activated Peroxydisulfate for Paracetamol Degradation	MO Xi-ting, NIE Shu-hua, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(6790)
Degradation of Ciprofloxacin by Activating Peroxymonosulfate with Sludge Biochar	ZHENG Da-yang, ZOU Jia-li, XU Hao, <i>et al.</i>	(6801)
Adsorption of Iopamidol by NaHCO ₃ -activated Buckwheat Biochar	WEI Hong, ZHAO Jiang-juan, JING Li-ming, <i>et al.</i>	(6811)
Preparation of Bamboo-based N, P Co-doped Activated Carbon and Its Lanthanum Ion Adsorption Performance	WANG Gui-long, LIU Yan-yan, JIANG Rong-yuan, <i>et al.</i>	(6823)
Analysis of Vegetation Change and Influencing Factors in Southwest Alpine Canyon Area	LAI Jin-lin, QI Shi, CUI Ran-ran, <i>et al.</i>	(6833)
Effect of Biochar on Agricultural Soil Aggregates and Organic Carbon: A Meta-analysis	MENG Yan, SHEN Ya-wen, MENG Wei-wei, <i>et al.</i>	(6847)
Carbon Cycling Processes in Croplands and Their Quantification Methods	SUN Zhao-an, ZHU Biao, <i>et al.</i>	(6857)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Carbon Component in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	MOU Zhi-yi, SHEN Yu-yi, CAO Yang, <i>et al.</i>	(6869)
Evolution Characteristics of Soil Active Organic Carbon and Carbon Pool Management Index Under Vegetation Restoration in Karst Area	CAI Hua, SHU Ying-ge, WANG Chang-min, <i>et al.</i>	(6880)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Environmental Media in China	CHEN Li-hong, CAO Ying, LI Qiang, <i>et al.</i>	(6894)
Spatial Prediction Modeling for Soil pH Based on Multiscale Geographical Weighted Regression (MGWR) and Its Influencing Factors	ZHAO Ming-song, CHEN Xuan-qiang, XU Shao-jie, <i>et al.</i>	(6909)
Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Around a Coal-fired Power Plant	ZHANG Jun, LI Xu, LIU Lei-yu, <i>et al.</i>	(6921)
Characteristics of Soil Pollution and Source Analysis of Typical Pollutants in the Petrochemical Site	ZHANG Yu-rong, LUO Shuai, CHEN Yuan, <i>et al.</i>	(6933)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes Distribution in Different Types of Agricultural Land Soils in Highly Cultivated Hilly Areas	CHEN Rui, CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6947)
Effects of Organic Fertilizer Combined with Biochar on Denitrifying Microorganisms and Enzyme Activities in Orchard Soil	DENG Zheng-xin, GAO Ming, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i>	(6955)
Effects of Organic Fertilization on Bacterial Community and Maize Productivity in Dryland Red Soil	LIN Ting-ting, ZHENG Jie, ZHU Guo-fan, <i>et al.</i>	(6965)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Cadmium on Microbial Community Structure and Function of <i>Pennisetum hybridum</i> Rhizosphere Soil	DUAN Li-yang, ZHANG Yu, REN Xue-min, <i>et al.</i>	(6973)
Effects of Tomato Planting Years on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Communities	ZHAO Yang-yang, LIU Yin-shuang, SONG Yao, <i>et al.</i>	(6982)
Remediation of Three Oxidants on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Coking Contaminated Soil and Its Response to Indigenous Microorganisms	LI Wei, WANG Hua-wei, MENG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6992)
Microbial Diversity and Population Structure of Different Salinized Soil Types in Hebei Province	LIU Yin-shuang, NIU Hong-jin, ZHAO Yang-yang, <i>et al.</i>	(7004)
Functional Genomics Analysis of Nitrogen and Phosphorus Transformation in Maize Rhizosphere Microorganisms	WANG Xiang-jun, JIANG Mei-tong, LI Sen, <i>et al.</i>	(7014)
Remediation of Soil Cadmium Contamination by <i>Solanum nigrum</i> L. Enhanced by the Combination of Exogenous Bacteria and Citric Acid	WANG Kai, WANG Li, WANG Yi-kun, <i>et al.</i>	(7024)
Effect of Combined Application of an <i>Enterobacter</i> and Sulfur Fertilizer on Cadmium and Arsenic Accumulation in Rice	ZHANG Pu-xin, YAO Jun-fan, LIU Yu-ling, <i>et al.</i>	(7036)