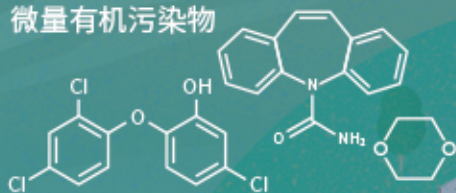


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路

王文龙, 吴乾元, 杜烨, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

下游城市河湖

污水达标排放

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期
Vol.42 No.6

目次

综述与专论

- 城市环境生物安全研究的进展与挑战 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)
城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)
污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

- 北京大气 PM_{2.5} 载带金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)
京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM_{2.5} 质量浓度特征及相关性分析 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)
天津市 PM_{2.5} 中二次硝酸盐形成及防控 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)
南京市大气细颗粒物(PM_{2.5})中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)
汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)
西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析
... 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沐, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)
气溶胶中溶解性有机质(DOM)液相氧化 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)
基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析
... 曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)
石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)
基于光化学指标法的邯郸市臭氧生成敏感性 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)
基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)
基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)
中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)
北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)
工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)
基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)
基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)
基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)
大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)
不同流域水陆过渡带氮磷有效态的特征对比及环境意义 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)
基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析
... 李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)
渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)
太湖流域上游南苕溪水系夏秋季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素
... 梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡延江 (2826)
低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量:以白洋淀为例 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)
覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)
圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)
两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)
铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)
CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)
pg-C₃N₄/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)
海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI) 的还原去除 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 李诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)
超顺磁性纳米 Fe₃O₄@SiO₂ 功能化材料对镉的吸附机制 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)
典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)
印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)
短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)
厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)
市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)
不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 黄福义, 周曙屹, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)
宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)
温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响
... 许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)
小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)
农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)
汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)
调理剂对磷富集土壤中两种元素交互作用的影响 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)
S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)
连续 4 个生长季大气 CO₂ 升高与土壤铅(Pb)污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征
... 贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)
嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)
冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤禄, 蒋敏, 宋琪 (3063)
罗红霉素对大型溞生殖生长及抗氧化系统的影响 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)
中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染的响应关系 冯兆忠, 彭金龙 (3084)
《环境科学》征订启事(2698) 《环境科学》征稿简则(2712) 信息(3027, 3055, 3073)

小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响

刘振杰^{1,2}, 李鹏飞^{1,2}, 黄世威^{1,2}, 金相乐^{1,2}, 张阿凤^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 为探究生物质炭施用对不同耕作条件下土壤碳含量的影响, 通过室内恒温培养试验, 以免耕和翻耕土壤为研究对象, 分别添加 0、5 和 20 g·kg⁻¹ 的小麦生物质炭, 分析生物质炭对免耕和翻耕土壤有机碳 (SOC)、可溶性有机碳 (DOC)、微生物生物量碳 (MBC)、易氧化有机碳 (ROC)、pH、无机碳 (SIC)、水溶性 Ca 和 Mg 以及土壤 CO₂ 排放的影响。结果表明: ① 与对照相比, 不同用量的生物质炭添加下, 免耕处理土壤 SOC、ROC、DOC、水溶性 Ca 和 Mg 分别增加 20.3%~105.6%、0.5%~36.0%、0.8%~30.5%、3.5%~42.3% 和 2.4%~75.2%; 翻耕处理土壤 SOC、ROC、DOC、水溶性 Ca 和 Mg 分别增加 29.2%~145.1%、1.3%~63.9%、2.4%~55.6%、18.2%~89.8% 和 10.1%~150.5%; 且随着生物质炭施用量增加而增大。5 g·kg⁻¹ 的小麦生物质炭施用量下, 免耕土壤 CO₂ 累积排放量最大, 而翻耕土壤 CO₂ 累积排放量随着生物质炭施用量增加而增大。培养结束时, 与对照相比, 翻耕土壤 MBC 增加 35.5%~45.7%, 且土壤 MBC 随着生物质炭施用量的增加而增大。生物质炭施用对翻耕和免耕土壤 pH 和 SIC 没有显著性影响。② 相同用量的生物质炭施用条件下, 与翻耕相比, 免耕土壤 CO₂ 累积排放量、SOC、ROC、DOC、MBC、水溶性 Ca 和 Mg 含量分别增加了 34.2%~79.0%、8.9%~45.5%、28.2%~73.9%、40.4%~78.4%、0.2%~131.7%、8.7%~39.8% 和 0.3%~61.0%; 土壤 pH 和 SIC 分别降低 0.08~0.17 个单位和 2.4%~13.9%。综上所述, 生物质炭添加增加了免耕和翻耕土壤总有机碳、活性有机碳、水溶性 Ca 和 Mg 的含量以及土壤 CO₂ 累积排放量, 但对土壤无机碳含量没有显著性的影响。

关键词: 生物质炭; 耕作措施; 有机碳; 无机碳; CO₂ 排放

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-3000-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202010090

Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices

LIU Zhen-jie^{1,2}, LI Peng-fei^{1,2}, HUANG Shi-wei^{1,2}, JIN Xiang-le^{1,2}, ZHANG A-feng^{1,2*}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: This study intended to examine the influence of biochar application on soil carbon content under different tillage conditions. For this, an indoor incubation experiment was performed with treatments included wheat straw-derived biochar application (0, 5, and 20 g·kg⁻¹) and soil with different tillage measures (ploughing and no-tillage). The effects of biochar addition on soil organic carbon (SOC), dissolved organic carbon (DOC), soil microbial biomass carbon (MBC), readily oxidized organic carbon (ROC), soil inorganic carbon (SIC), pH, water soluble calcium and magnesium, and soil CO₂ emissions were analyzed. The results showed that: ① Compared with the control, the contents of SOC, ROC, DOC, and water soluble Ca and Mg increased by 20.3%-105.6%, 0.5%-36.0%, 0.8%-30.5%, 3.5%-42.3%, and 2.4%-75.2% in the no-tillage treatments, respectively; and the contents of SOC, ROC, DOC, water-soluble Ca and Mg increased by 29.2%-145.1%, 1.3%-63.9%, 2.4%-55.6%, 18.2%-89.8%, and 10.1%-150.5% in the ploughing treatment, respectively, under different dosage biochar amendments, and was enhanced with an increase in the biochar application amount. Cumulative CO₂ emissions were highest with biochar amendment at 5 g·kg⁻¹ under the no-tillage soil condition; however, this increased with an increase in the biochar amount in the ploughing treatment. At the end of incubation experiment, the soil MBC content increased by 35.5%-45.7% compared with the control treatment; however, there was no significant effect on soil pH and SIC between the treatments. ② Compared with the ploughing treatment, the cumulative CO₂ emissions, SOC, ROC, DOC, MBC, and water-soluble Ca and Mg contents of the no tillage treatment increased by 34.2%-79.0%, 8.9%-45.5%, 28.2%-73.9%, 40.4%-78.4%, 0.2%-131.7%, 8.7%-39.8%, and 0.3%-61.0%, respectively, while soil pH and SIC decreased by 0.08-0.17 unit and 2.4%-13.9%, respectively, under the same biochar amendment treatments. Overall, the addition of biochar significantly increased soil organic carbon, active organic carbon, soil water soluble calcium and magnesium content, and soil cumulative CO₂ emissions, but no significant effect was observed on soil inorganic carbon content.

Key words: biochar; tillage measure; organic carbon; inorganic carbon; CO₂ emission

收稿日期: 2020-10-16; 修订日期: 2020-11-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200106); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2020JQ-274); 西北农林科技大学基本科研业务费专项(2452020164)

作者简介: 刘振杰(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤碳循环, E-mail: liuzhenjie0908@163.com

* 通信作者, E-mail: zhangafeng@nwfu.edu.cn

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,其中 1 m 深的土壤中有有机碳和无机碳储量分别达到 1 500 Pg和1 200 Pg^[1]. 土壤有机碳库是陆地生态系统最重要和最活跃的碳库,土壤有机碳的含量一定程度上代表了土壤的健康状况和土壤肥力^[2]. 而土壤有机碳的活性组分对外界环境变化的响应更为敏感,且更能表征土壤质量的变化^[3],土壤无机碳是土壤碳库的另一个重要组成部分,有研究表明,土壤有机碳库可以影响土壤无机碳库,土壤无机碳可以通过“SOC-CO₂-SIC”微碳循环固定 CO₂^[4],增加土壤碳库,减缓温室效应,所以土壤碳库的变化对土壤肥力和全球碳平衡具有重大影响.

耕作是农业活动中一项重要的土壤管理措施,农田耕作方式对土壤结构稳定性,有机碳矿化具有很大的影响^[5,6]. 传统连年翻耕的耕作模式破坏了土壤的团粒结构,加快了土壤有机碳的分解,导致土壤退化;免耕虽然减少了人们对土壤的扰动,减缓了土壤有机碳的分解,但同时也使土壤容重增加,养分分层加剧^[7]. 生物质炭作为一种碳含量丰富的土壤改良剂,对土壤的固碳改良效果已有较多研究,有研究表明生物质炭具有疏松多孔的结构^[8,9],可以降低土壤容重^[10],改善土壤结构,促进土壤团聚体的形成;Blanco-Canqui 等^[11]的研究发现生物质炭增加了免耕土壤有机碳含量,降低了土壤有机碳矿化速率,生物质炭通过物理吸附作用,减少溶解性有机碳的矿化分解,以此促进土壤有机碳的积累,但是对土壤团聚体稳定性没有影响;柯跃进等^[12]将生物质炭按 0%、3%、6% 和 100% 的比例与土壤进行室内培养发现,生物质炭添加提高了土壤总有机碳含量,易氧化有机碳含量,并且降低了 CO₂ 排放量,最大减排达 41.5%,这主要是因为生物质炭与土壤团聚体结合减小了接触面积,反应性降低,且生物质炭不稳定成分经过复杂的物理化学生物作用转化为微生物难以利用的有机大分子,从而降低了 CO₂ 排

放. 但是也有不同的研究结果,Sultan 等^[13]的研究发现生物质炭应用于旱地土壤增加了土壤有机碳含量,微生物生物量,增加了 CO₂ 累积排放量;Luo 等^[14]的研究发现芒草生物质炭添加加速了土壤原有有机碳的矿化,增大了土壤 CO₂ 的排放. 这可能是生物质炭中含有不稳定的有机碳激活了微生物活性,加速了土壤有机碳的矿化. 土壤 CO₂ 浓度的增加是土壤次生碳酸盐形成的前提因子,另外生物质炭本身含有盐基离子如 Ca 和 Mg 等,施入土壤后可能会增加土壤 Ca 和 Mg 含量,促进土壤无机碳的形成^[15,16]. 有研究发现生物质炭虽然增加了土壤无机碳含量^[17,18],但不足以抵消生物质炭施用对土壤原有有机碳的矿化作用. 可见,生物质炭对土壤碳库的作用可能会因为土壤性质,农田管理措施,气候环境等因子而产生不同的影响^[19]. 本研究以渭北旱塬两种不同耕作措施(连年免耕、连年翻耕)土壤为对象,通过添加不同量的小麦生物质炭,来探究生物质炭对不同耕作措施下土壤碳含量的影响,以期为生物质炭对渭北旱塬的土壤改良和合理的耕作制度提供数据和理论支撑.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为黑垆土,取自陕西省合阳县甘井镇田间长期定位试验(35°19′54.45″N, 110°05′58.35″E)连年免耕和连年翻耕小区,小区 2007 年 9 月~2019 年 6 月连年种植小麦,一年一熟制,小麦收获后秸秆全额粉碎覆盖. 小麦收获后分别对上述两个小区采集耕层(0~20 cm)土样,取样时采用多点混合法采样. 在去除植物根系、可见有机物残体和石头后,取出部分的新鲜土壤样品测定土壤样品基础指标. 剩余部分置于室内自然风干,磨细过 2 mm 筛,充分混合均匀. 供试土壤的理化性质见表 1.

表 1 供试土壤的基本理化性质¹⁾

Table 1 Basic properties of soil samples used in the experiments

项目	有机碳 /g·kg ⁻¹	无机碳 /g·kg ⁻¹	pH	全氮 /g·kg ⁻¹	全磷 /g·kg ⁻¹	全钾 /mg·kg ⁻¹	水溶性钙 /mg·kg ⁻¹	水溶性镁 /mg·kg ⁻¹
免耕土壤	13.1±0.86a	10.3±0.08b	8.21±0.05a	1.40±0.01a	0.99±0.05a	23.9±0.43a	211±28.58a	9.86±1.6a
翻耕土壤	9.14±0.50b	11.4±0.43a	8.22±0.09a	1.29±0.08b	0.74±0.02b	22.9±1.12a	165±29.65a	7.35±1.42a

1) 同一列不同小写字母表示两种土壤差异显著(P<0.05)

1.2 生物质炭制备

将收集来的小麦秸秆洗净风干,用剪刀剪成 1~2 cm 的小段,然后将秸秆装入铁盒内并用盖子密封,放入马弗炉(雅马拓 FO410C)内,并通入氮气,之后以 3℃·min⁻¹ 的升温速率升至 350℃,并保持此

温度 120 min. 然后停止加热,冷却至室温,将制得的生物质炭过 2 mm 筛,装袋备用. 生物质炭的基本性质:碳 575 g·kg⁻¹,氮 11 g·kg⁻¹,无机碳 0.798 g·kg⁻¹,pH 9.91 (水炭比 10:1),灰分 205 g·kg⁻¹,钙 4.348 g·kg⁻¹,镁 0.694 g·kg⁻¹.

1.3 试验设计

本试验为室内恒温培养试验,设置双因子:不同生物质炭添加量和不同耕作措施土壤.其中生物质炭添加量分为 0、5 和 20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (分别相当于 0、11.25 和 45 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$),分别记为 B0、WB5 和 WB20;土壤耕作类型为免耕土壤(N)和翻耕土壤(C),2×3 设计共计 6 个处理,分别为 NB0、NWB5、NWB20、CB0、CWB5 和 CWB20.

取相当于 200 g 烘干土的风干土预培养 7 d(室温 25℃,调节至田间持水量 70%),预培养结束后,按照上述用量添加生物质炭,并使生物质炭和土壤混合均匀,之后放入 250 mL 的塑料瓶中,并用塑料膜封口,在塑料膜上均匀地扎上小孔,以保持空气流通,并且每 3 d 称重补水一次,用于培养期间土壤性质的分析.另外,将上述混合均匀的土壤与生物质炭分别放入 500 mL 的广口瓶中,并用橡胶塞密封广口瓶,橡胶塞中间打孔并插入玻璃管,并用橡胶管连接玻璃管和三通阀,用于分析 CO_2 排放量,每个处理设置 3 个重复.

1.4 样品的采集与测定

气体的采集与测定:在培养的第 0.25、0.5、1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13、14、15、16、17、18、19、20、21、22、23、24、25、27、29、31、33、35、37、39、43、51、60、67、73、81、88 和 95 d 采集气样.采样时,用 20 mL 注射器连接广口瓶上的三通阀,连续向瓶内抽打数次混匀瓶内气体,然后从瓶内抽取气体 20 mL,并注入 20 mL 真空瓶内保存,采集的样品在 24 h 内用气相色谱仪(安捷伦 7890B)测定 CO_2 的气体浓度.

土壤样品的采集与测定:在培养的第 2、7、26、51 和 83 d,进行破坏性采集土壤样品,每个处理采集 3 个重复.土壤有机碳用重铬酸钾外加热法测定;可溶性有机碳用水土比为 5:1 去离子水振荡离心,TOC 仪测定(岛津 TOC-VCPH);微生物生物量碳用氯仿熏蒸- K_2SO_4 浸提法;无机碳用气量法测定;易氧化有机碳用 333 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 高锰酸钾-比色法测定(岛津 UV-2450);水溶性 Ca 和 Mg 用原子吸收分光光度法测定(PinAAclic 900F);pH 用 pH 计(梅特勒-托利多 FE20)测定(水土比 2.5:1).

1.5 数据的计算与统计分析

CO_2 排放通量的计算公式为:

$$F = \rho \times \frac{dc}{dt} \times \frac{273 \times V}{(273 + T) \times W}$$

式中, F 为 CO_2 的排放速率 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$]; ρ 为标准状态下 CO_2 的密度 ($1.977 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$); dc/dt 为单位时间内培养瓶内气体浓度的增加量 ($\times 10^{-6} \cdot$

h^{-1}); V 为培养瓶内气体的有效体积 (m^3); W 为培养瓶内烘干土质量 (kg); T 为培养温度 ($^{\circ}\text{C}$).

气体的累积排放计算公式为:

$$S = \sum \frac{F_i + F_{i+1}}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times 24$$

式中, S 为 CO_2 气体的累积排放量 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, F_i 为 CO_2 气体的排放速率 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$]; t_i 为取样时的培养天数 (d).

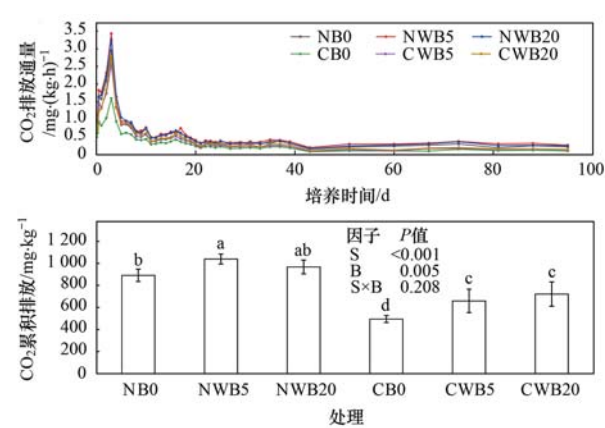
数据统计采用 SPSS 23 进行各指标不同处理间的单因素方差分析和相关性分析,统计显著性水平为 $P < 0.05$ 或 $P < 0.01$.使用 Origin 2018 进行作图.

2 结果与分析

2.1 土壤 CO_2 排放通量和累积排放量的变化

如图 1(a)所示,在培养期内,各处理的 CO_2 排放通量均呈现先快速升高达到峰值后急剧下降,最后趋于平稳的趋势.在培养的第 3 d 各处理的 CO_2 排放通量达到最大值,其中 NWB5 处理 CO_2 排放速率高于其他处理,达到 $3.43 \text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$,免耕处理的土壤,与对照 NB0 相比,NWB5 和 NWB20 处理 CO_2 的排放速率分别增加 16.2% 和 10.5%;翻耕处理的土壤,与对照 CB0 相比,CWB5 和 CWB20 处理 CO_2 的排放速率分别增加 60.8% 和 73.7%;而在相同生物质炭施用量下,免耕土壤排放通量高于翻耕土壤排放通量,NWB5 处理 CO_2 排放通量比 CWB5 处理 CO_2 排放通量高 33.5%,NWB20 处理 CO_2 排放通量比 CWB20 处理高 17.6%.

整个培养期内 CO_2 累积排放量如图 1(b),生物质炭添加处理 CO_2 累积排放量高于未添加生物质炭的处理,不同耕作土壤对 CO_2 累积排放量具有显著影响 ($P < 0.001$),生物质炭施用量对 CO_2 累积排放量具有显著影响 ($P < 0.01$),但是二者交互效应对 CO_2 累积排放量没有显著影响 ($P > 0.05$).免耕条件下,与对照相比,用量为 $5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的生物质炭添加处理, CO_2 累积排放量增加 16.6%,但是 $20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物质炭添加处理下, CO_2 累积排放量没有显著性差异.翻耕条件下,与对照相比,用量为 $5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的生物质炭添加处理, CO_2 累积排放量分别增加 33.2% 和 45.7%.在相同生物质炭添加量条件下,免耕土壤处理 CO_2 累积排放量均显著 ($P < 0.05$) 高于对应的翻耕土壤处理,生物质炭用量为 $5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,免耕土壤处理 CO_2 累积排放量与翻耕土壤处理 CO_2 累积排放量相比,分别增加 57.5% 和 34.2%.其中 NWB5 处理 CO_2 累积排放量最大,最大值为 $1039 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.



S表示不同耕作土壤,B表示生物质炭施用量,
S×B表示不同耕作土壤和生物质炭施用量的交互效应,下同;
不同小写字母表示不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著

图1 施用生物质炭对CO₂排放通量和累积排放量的影响

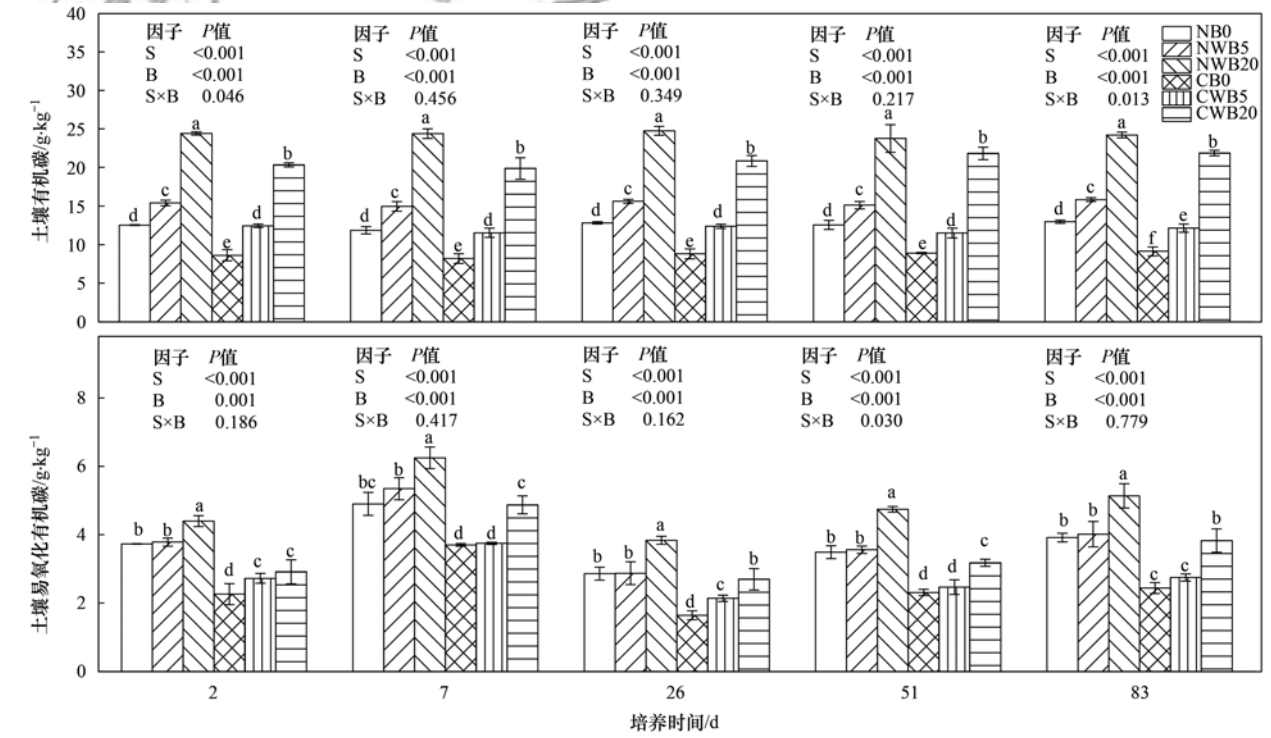
Fig. 1 Effects of biochar on CO₂ flux and cumulative

2.2 土壤有机碳和活性有机碳组分的变化

整个培养期间,各处理土壤有机碳含量随时间变化不大(图2),生物质炭添加提高了土壤有机碳的含量,不同耕作土壤对土壤有机碳含量具有显著影响($P<0.001$),生物质炭施用量对土壤有机碳含量具有显著影响($P<0.001$),二者交互效应除第2和83 d外,其余时间没有显著性影响($P>0.05$).免耕处理条件下,与对照相比,用量为 $5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理土壤有机碳的含量分别增加 $20.3\%\sim 26.0\%$ 和 $86.6\%\sim 105.6\%$.翻耕处理条件下,与对

照相比,用量为 $5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理土壤有机碳的含量分别增加 $29.2\%\sim 44.4\%$ 和 $135.9\%\sim 145.1\%$.在相同生物质炭添加量条件下,免耕土壤有机碳含量高于翻耕土壤,生物质炭施用量 $5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下,免耕土壤比翻耕土壤有机碳含量分别增加 $23.8\%\sim 31.3\%$ 和 $8.9\%\sim 22.8\%$.

整个培养期内,土壤易氧化有机碳含量随时间变化呈现先增加后下降,最后又逐渐升高的趋势(图2),土壤类型对土壤易氧化有机碳含量有显著性影响($P<0.001$);生物质炭施用量对土壤易氧化有机碳含量具有显著影响($P<0.001$),但是二者交互效应对土壤易氧化有机碳含量除第51 d外,其余时间没有显著性影响($P>0.05$).免耕处理条件下,与对照相比,生物质炭用量为 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理,土壤易氧化有机碳含量增加 $17.9\%\sim 35.0\%$,但是 $5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物质炭处理对土壤易氧化有机碳含量影响不显著.翻耕条件下,与对照相比,生物质炭用量为 $5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理,在培养的第2和26 d土壤易氧化有机碳含量分别增加 38.8% 和 34.3% ,其他时间差异不显著,生物质炭用量为 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理,土壤易氧化有机碳含量增加 $28.9\%\sim 63.9\%$.相同生物质炭施用量条件下,免耕土壤高于翻耕土壤易氧化有机碳含量,生物质炭施用量 $5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下,免耕土壤比翻耕土壤易氧化有机碳含量分别提



不同小写字母表示同一时期不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著,下同

图2 小麦生物质炭对土壤有机碳和土壤易氧化有机碳的影响

Fig. 2 Effect of biochar on soil organic carbon and soil readily oxidized organic carbon

高 34.3%~46.0% 和 28.2%~50.9%。

在整个培养期内,土壤可溶性有机碳含量随时间变化呈下降趋势(图 3),不同耕作土壤对土壤可溶性有机碳含量具有显著影响($P < 0.001$),生物质炭施用量对土壤可溶性有机碳含量具有显著效应($P < 0.01$),但是二者交互效应对土壤可溶性有机碳含量影响不显著($P > 0.05$)。在免耕土壤处理中,与对照相比,生物质炭用量为 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下,土壤可溶性有机碳含量差异不显著,生物质炭用量为 20

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下,土壤可溶性有机碳含量增加 15.3%~30.5%。在翻耕土壤条件下,与对照相比,生物质炭用量为 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下,土壤可溶性有机碳含量差异不显著,生物质炭用量为 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下,土壤可溶性有机碳含量增加 29.5%~55.6%。相同生物质炭施用量条件下,生物质炭施用 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理,免耕土壤可溶性有机碳含量比翻耕土壤可溶性有机碳含量分别提高 49.5%~78.4% 和 40.4%~62.3%。

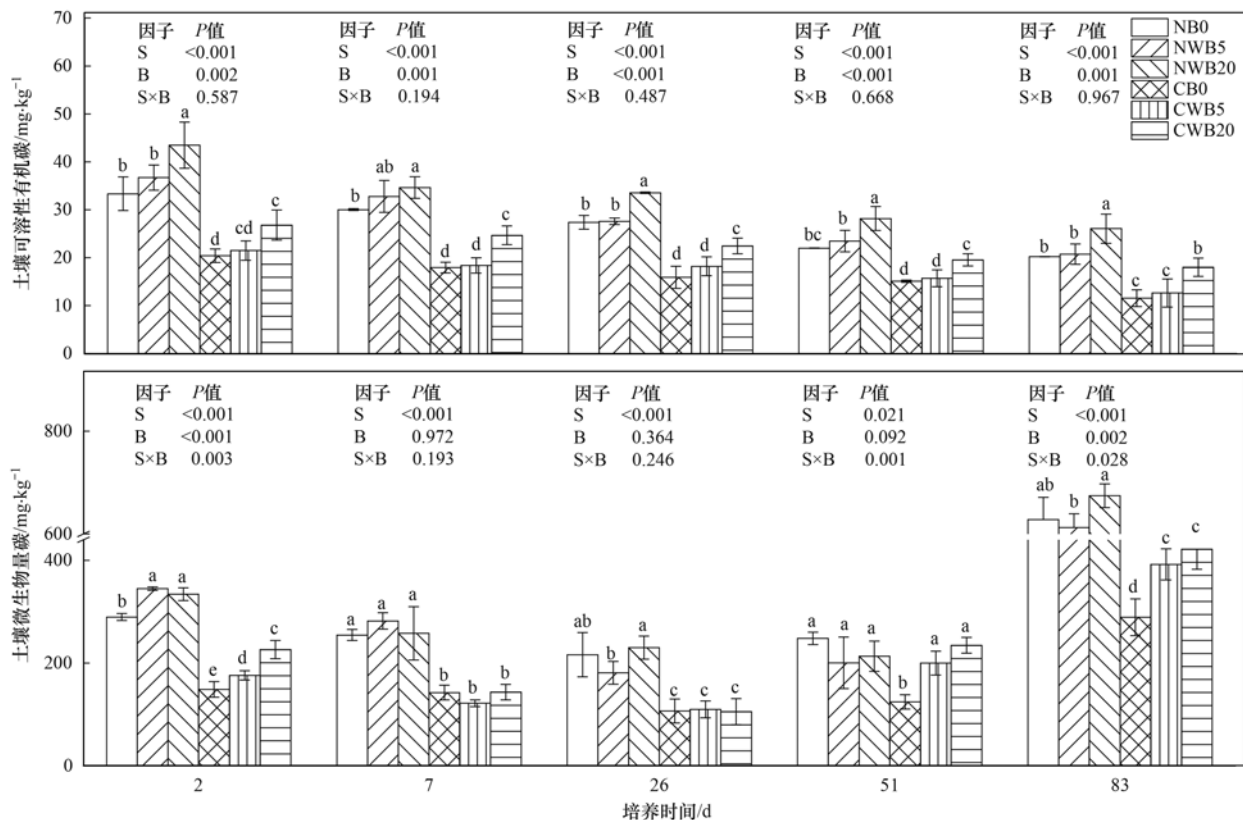


图 3 小麦生物质炭对可溶性有机碳和土壤微生物生物量碳的影响

Fig. 3 Effect of biochar on soil dissolved organic carbon and soil microbial biomass carbon

在培养期内,土壤微生物生物量碳呈现先下降后上升的趋势(图 3),不同耕作土壤对土壤微生物生物量碳具有显著影响($P < 0.05$),生物质炭施用量对土壤微生物生物量碳除第 2 和 83 d 外,其余时间影响不显著($P > 0.05$),二者交互效应对土壤微生物生物量碳除培养的第 2、51 和 83 d 外其余时间影响不显著($P > 0.05$)。免耕土壤处理,在培养的第 2 d,与对照相比, $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 生物质炭添加处理微生物生物量碳含量分别增加 19.0% 和 15.3%,培养的其它时期差异不显著。翻耕土壤处理,在培养的第 2、51 和 83 d,与对照相比, $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 生物质炭添加处理微生物生物量碳含量分别增加 18.2%~60.6% 和 45.7%~88.5%,其它时间差异不显著。相同施用生物质炭施用量下,培养的第 2、7、26 和 83 d, $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 生物质

炭处理,免耕土壤微生物生物量碳比翻耕土壤微生物生物量碳分别提高 56.2%~131.7% 和 47.6%~117.9%。

2.3 土壤 pH、无机碳、钙和镁含量的变化

在整个培养期内,土壤 pH 值变化不大(图 4),不同耕作土壤对土壤 pH 具有显著影响($P < 0.001$),生物质炭施用量对土壤 pH 除第 51 和 83 d 外,其余时间没有显著影响($P > 0.05$),二者交互效应对土壤 pH 除第 83 d 外,其余时间没有显著影响($P > 0.05$)。在免耕处理中,与对照相比,培养的第 83 d, $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 生物质炭添加处理土壤 pH 值分别减少 0.06 和 0.14,培养的其它时期差异不显著。在翻耕处理中,与对照相比, $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 生物质炭施用量条件下,培养的第 51 和 83 d, pH 分别增加 0.08 和 0.03; $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 生物质炭施用量条件

下,培养的第83d, pH降低0.12,培养的其它时期, pH差异不显著. $5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物质炭施用量下,免耕土壤比翻耕土壤pH值分别降低0.08~0.17和0.08~0.12.

土壤无机碳含量随着培养时间的增加而逐渐降低,至培养结束呈现稳定的趋势(图4),不同耕作土壤对土壤无机碳含量具有显著影响($P<0.05$),生物质炭施用量除第2和7d外,其余时间影响不显著($P>0.05$),二者的交互效应对土壤无机碳含量除第2d外,其余时间影响不显著($P>0.05$).在免耕土壤处理中,与对照相比, $5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物质炭

处理,土壤无机碳含量差异不显著; $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物质炭处理,培养的第2d,土壤无机碳含量降低6.5%,其它时期差异不显著.翻耕处理中,与对照相比, $5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物质炭处理,培养的第7d,土壤无机碳含量降低3.8%,其他时间差异不显著, $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物质炭处理,培养的第7和26d,土壤无机碳含量分别降低4.8%和2.7%,其它时间差异不显著.培养的第2、7、26和51d, $5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物质炭处理,免耕处理无机碳含量与翻耕处理无机碳含量相比分别减少5.3%~7.8%和4.9%~14.0%.

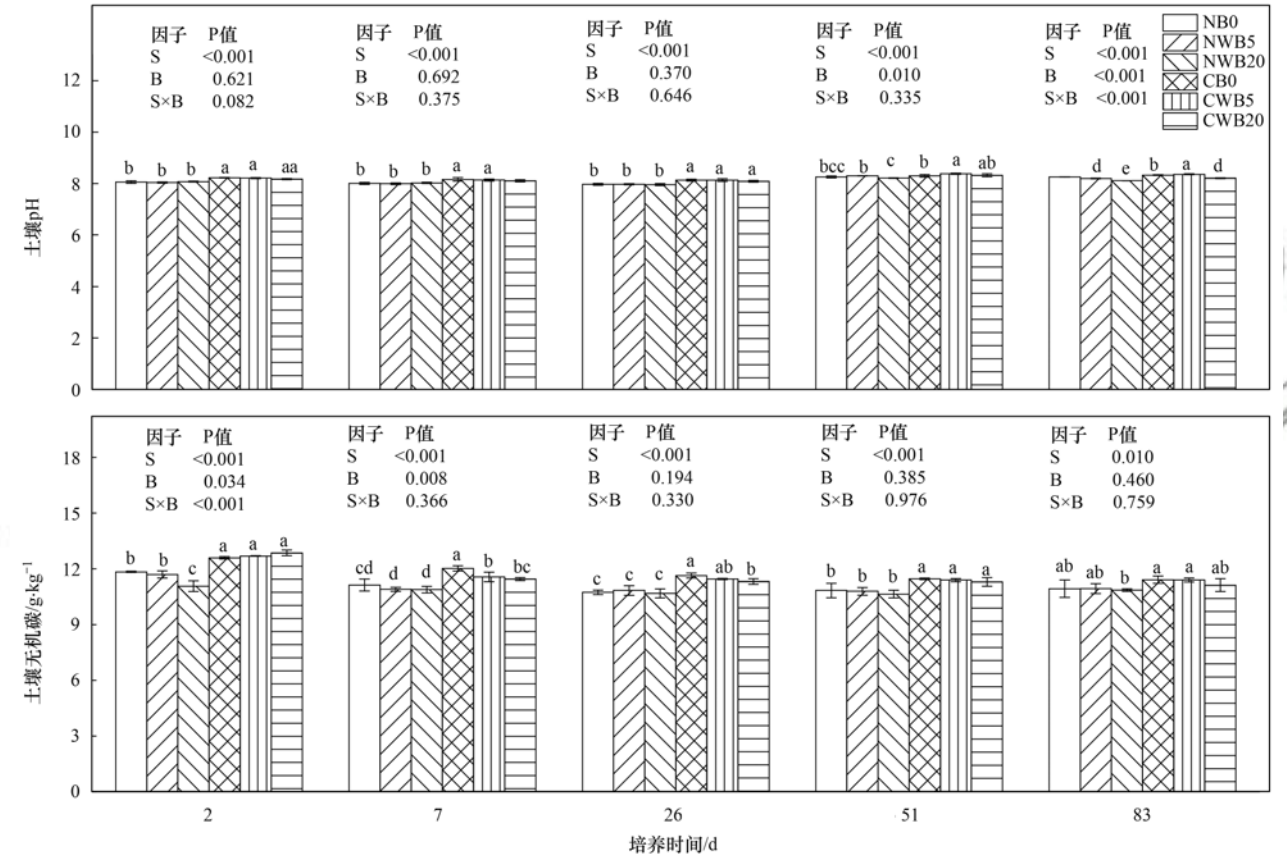


图4 小麦生物质炭施用对pH值和无机碳的影响
Fig. 4 Effects of biochar on pH and soil inorganic carbon

各处理土壤水溶性钙含量在培养期间总体保持稳定(图5),土壤水溶性钙含量随着生物质炭施用量增大而增加,不同耕作土壤对水溶性钙含量具有显著性的影响($P<0.05$),生物质炭施用量对土壤水溶性钙含量也具有显著性的影响($P<0.001$);但是二者的交互效应对土壤水溶性钙含量除第2d外,其余时间没有显著性的影响($P>0.05$).免耕条件下,与对照相比,培养的第2d, $5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物质炭添加处理土壤水溶性钙含量增加10.9%,其它时间差异不显著, $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物质炭添加处理,土壤水溶性钙含量增加26.5%~42.3%.翻耕条件下,与对照相比,培养的第2d, $5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物质炭添加处理

土壤水溶性钙含量增加29.4%,其它时间差异不显著; $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物质炭添加处理,土壤水溶性钙含量增加22.3%~89.8%;相同生物质炭施用量下, $5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物质炭添加处理,在培养的第2和51d,免耕土壤水溶性钙含量比翻耕土壤水溶性钙含量分别提高11.3%和21.7%; $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物质炭添加处理,培养的第7、26、51和83d,免耕土壤水溶性钙含量比翻耕土壤水溶性钙含量增加8.7%~39.8%,但是在培养的第2d,免耕土壤的水溶性钙含量比翻耕土壤水溶性钙含量降低了7.1%.

各处理土壤水溶性镁含量在培养期间总体保持稳定,土壤水溶性镁的含量随着生物质炭施用量增

加而增大(图5),不同耕作土壤对土壤水溶性镁含量具有显著效应($P < 0.05$),生物质炭施用量对土壤水溶性镁含量具有显著效应($P < 0.001$),但是二者的交互效应对土壤水溶性镁含量除第7 d外,其余时间影响不显著($P > 0.05$).免耕土壤处理中,与对照相比,20 g·kg⁻¹生物质炭添加处理土壤水溶性镁含量增加56.1%~75.2%,但是5 g·kg⁻¹生物质炭添加对土壤水溶性镁含量没有显著性的影响.翻耕

处理下,与对照相比,培养的第7、26和83 d,5 g·kg⁻¹和20 g·kg⁻¹生物质炭添加处理土壤水溶性镁含量分别提高25.8%~69.1%和70.5%~150.5%.与翻耕土壤相比,培养的第51和83 d,5 g·kg⁻¹生物质炭添加处理,免耕土壤水溶性镁含量增加27.4%~42.1%,其他时期差异不显著;培养的第26、51和83 d,20 g·kg⁻¹生物质炭添加处理,免耕土壤水溶性镁含量增加9.9%~37.2%.

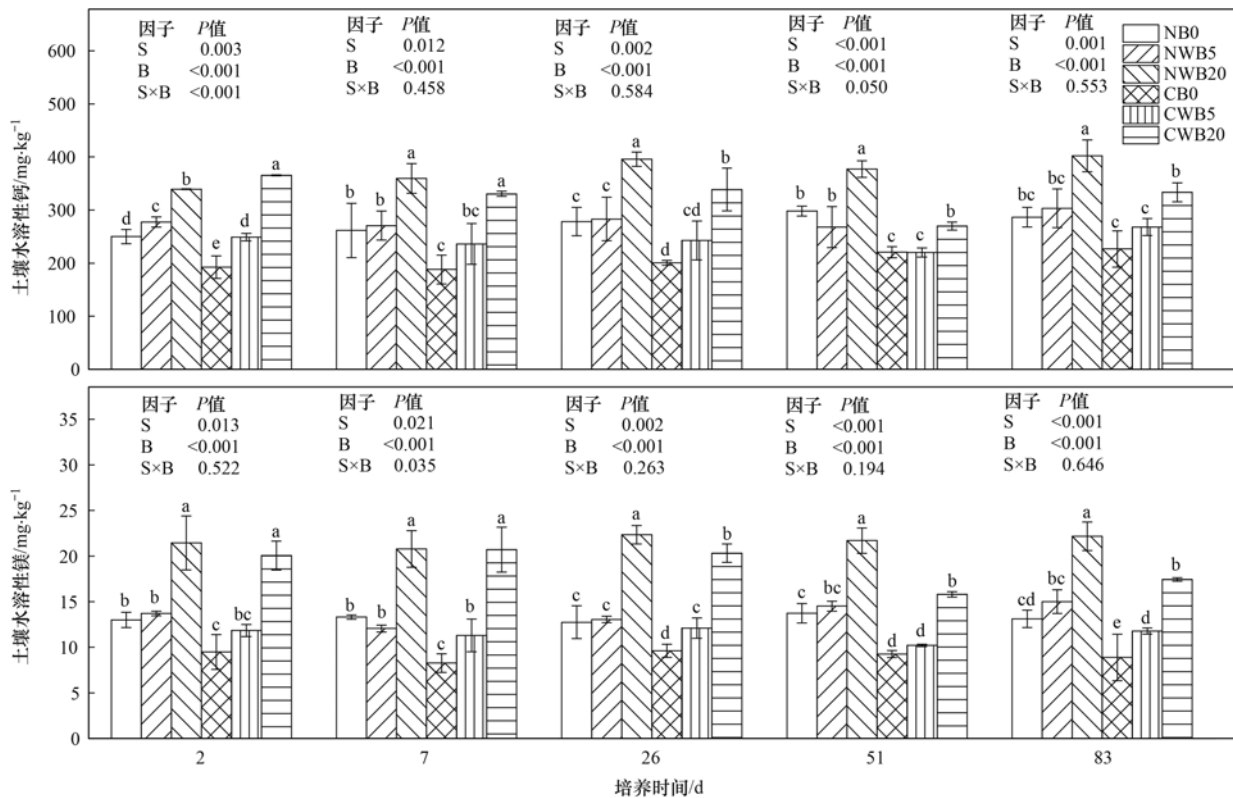


图5 生物质炭施用对土壤水溶性钙和镁的影响

Fig. 5 Effects of biochar on soil water soluble calcium and magnesium

3 讨论

3.1 生物质炭对土壤有机碳和活性有机碳的影响

添加生物质炭处理土壤有机碳含量显著高于未添加生物质炭处理,且随着生物质炭施用量增大而增加,这与赵世翔等^[20]的研究结果一致.这一方面是因为生物质炭是一类具有稳定芳香结构且碳元素含量丰富的含碳物质^[21],施入土壤后直接增加了土壤有机碳含量;另一方面生物质炭施用土壤后,一部分生物质炭与土壤矿质颗粒形成有机无机复合体,从而形成对有机碳的保护,有利于土壤有机碳的积累^[22].张霞等^[23]的研究发现与连年翻耕相比,连年免耕显著增加土壤有机碳含量,这与本研究结果一致.翻耕对土壤的扰动较大,增加了土壤透气性,促进了土壤有机碳的矿化.另外免耕措施有利于增加土壤团聚体的稳定性,而稳定的团聚体对土壤有

机碳具有保护作用^[24].

土壤可溶性有机碳和易氧化有机碳是土壤活性碳库的重要组成部分,同时也是土壤微生物生长重要的物质和能量来源^[25].本研究培养初期可溶性有机碳含量迅速下降,后期可溶性有机碳含量则下降比较平缓,土壤易氧化有机碳含量随着培养时间的延长呈现先增加后下降的趋势,这是因为生物质炭自身含有可溶性有机碳和易氧化有机碳^[26],添加生物质炭可以提高土壤可溶性有机碳和易氧化有机碳含量^[27],由于前期土壤可溶性有机碳和易氧化有机碳含量的增加,为土壤微生物的生长和繁殖提供了充足的底物和能源,使得培养的第2 d生物质炭的添加都显著地增加了土壤微生物生物量.而随着培养时间延长,微生物对易氧化有机碳和可溶性有机碳分解和利用,导致各处理土壤可溶性有机碳和易氧化有机碳含量降低,微生物可利用的碳源降低,土壤

微生物生物量也随之下降. 本试验的相关性分析(表 2)也表明,易氧化有机碳和土壤微生物生物量碳含量呈极显著正相关关系. 在培养的后期,由于生

物质炭降解,土壤易氧化有机碳含量增加,微生物可以利用的碳源增加,土壤微生物生物量也随之增加^[28].

表 2 土壤理化性质与不同土壤碳含量和 CO₂ 排放之间的相关关系¹⁾
Table 2 Correlation of soil physical and chemical properties and CO₂ emissions

	CO ₂	SOC	ROC	DOC	MBC	pH	SIC	Ca	Mg
CO ₂	1								
SOC	0.112	1							
ROC	0.203	0.567 **	1						
DOC	0.635 **	0.544 **	0.590 **	1					
MBC	-0.039	0.273 **	0.396 **	0.104	1				
pH	-0.364 **	-0.293 **	-0.397 **	-0.693 **	0.071	1			
SIC	0.474 **	-0.364 **	-0.407 **	-0.224 *	-0.309 **	0.196	1		
Ca	0.062	0.860 **	0.523 **	0.475 **	0.367 **	-0.337 **	-0.403 **	1	
Mg	0.145	0.924 **	0.545 **	0.521 **	0.242 *	-0.338 **	-0.314 **	0.915 **	1

1) * 表示相关性在 $P < 0.05$ 水平显著, ** 表示相关性在 $P < 0.01$ 水平显著, $n = 150$

3.2 生物质炭添加对土壤无机碳的影响

土壤无机碳作为土壤碳库重要的组成部分,对全球碳循环具有不可忽视的作用^[29]. 在相同的生物质炭添加量下,翻耕土壤的无机碳含量显著高于免耕土壤无机碳含量. 由于培养期间免耕土壤的 pH 值显著低于翻耕土壤,导致土壤碳酸盐的溶解. Ramnarine 等^[30]的研究发现,土壤有机物质在分解过程中会释放有机酸,而这些释放的有机酸可能会使土壤碳酸盐溶解. 由于免耕处理的土壤有机碳、水溶性有机碳以及易氧化有机碳含量高于翻耕处理,土壤有机碳有可能在降解的过程产生有机酸,降低了土壤 pH 值,促进了土壤无机碳酸盐的溶解. 另外,由于翻耕措施有利于土壤气体与大气进行湍流交换^[31],造成大气中的 CO₂ 可能较多地溶于土壤溶液中^[32],并且与土壤溶液中的钙镁离子结合,形成土壤次生碳酸盐^[33,34],从而增加了翻耕土壤无机碳含量,本试验中土壤水溶性钙镁的含量和土壤无机碳含量也达到极显著相关(表 2),翻耕土壤的水溶性钙镁由于与碳酸根或者碳酸氢根结合形成次生碳酸盐,从而使翻耕土壤的水溶性钙镁含量低于对应的免耕处理(图 5). 董心亮^[16]的研究发现生物质炭施用提高了土壤无机碳含量,与本研究结果存在差异. 这可能与生物质炭以及供试土壤的无机碳含量有关. 本研究免耕土壤和翻耕土壤无机碳含量分别为 10.3 g·kg⁻¹和 11.4 g·kg⁻¹,远高于生物质炭的无机碳含量 0.798 g·kg⁻¹,因此本试验生物质炭添加对土壤无机碳含量没有显著性的影响.

3.3 生物质炭对 CO₂ 排放的影响

生物质炭施用增加了土壤 CO₂ 累积排放量,这与何甜甜等^[35]的研究结果一致,生物质炭本身含有丰富的有机碳、易氧化有机碳、可溶性有机碳等活

性碳组分^[20],施入土壤后土壤活性有机碳含量增加,为微生物提供了充足的碳源,另一方面由于生物质炭疏松多孔的特性,施入土壤后改善了土壤的结构和通气状况^[36],提高了微生物的活性^[37],从而促进土壤有机碳的分解,增加土壤 CO₂ 的排放. 在相同生物质炭添加量下,免耕土壤 CO₂ 累积排放量显著高于翻耕土壤 CO₂ 累积排放量,这可能是因为免耕土壤有机碳、可溶性有机碳和易氧化有机碳含量较高,为微生物的生长提供了丰富的碳源,增强了微生物呼吸作用,促进有机质的分解,使得免耕土壤 CO₂ 排放量高. 韩佳乐等^[38]在研究果园和麦田 CO₂ 排放中发现,有机质含量较高的土壤,CO₂ 累积排放量也高,这与本研究结果一致. 免耕土壤中,添加 5 g·kg⁻¹生物质炭促进了 CO₂ 的排放,但是 20 g·kg⁻¹生物质炭添加对于 CO₂ 的累积排放量并没有显著性的影响. 这可能是因为生物质炭施入土壤后,提高了土壤可溶性有机碳和易氧化有机碳的含量,这些活性有机碳的增加促进了土壤微生物的生长,提高了微生物活性,从而增加土壤矿化,CO₂ 排放量增加,而随着生物质炭施用量的增大,土壤的 C/N 提高,土壤氮素供应不足,从而使微生物活性减弱,土壤矿化速率也随之减小,降低了 CO₂ 累积排放量^[39]. 而对于翻耕土壤,生物质炭添加促进了土壤 CO₂ 的排放,且随着生物质炭添加量的增加而增大. 这可能是因为翻耕土壤有机碳含量较低,生物质炭添加提高了土壤有机质含量,增加了土壤活性有机碳组分,提高了微生物活性,且随着生物质炭添加,活性有机碳含量也增加,微生物活性和数量也随着增加,导致更多的有机碳分解,从而使 CO₂ 排放量增大.

4 结论

(1) 生物质炭添加能够提高两种耕作类型土壤有机碳含量、可溶性有机碳含量、易氧化有机碳含量、微生物生物量碳含量、水溶性钙和镁含量,且随着生物质炭施用量增加而增大。

(2) 不同用量的生物质炭对土壤 CO₂ 的排放总量存在差异,可能与不同耕作措施下土壤有机碳含量的本底值有关。

(3) 生物质炭添加增加了土壤水溶性钙和镁的含量,但是对土壤无机碳含量没有显著性的影响,翻耕土壤无机碳含量高于免耕土壤无机碳含量。

参考文献:

- [1] 李忠徽,魏彬萌,刘丹,等. 黄绵土中碳酸钙含量和有机肥施用对土壤有机碳组分及 CO₂ 排放的影响[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(6): 2498-2505.
- Li Z H, Wei B M, Liu D, *et al.* Effect of calcium carbonate content and composted manure application on soil organic carbon fractions and CO₂ emissions in loessal soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(6): 2498-2505.
- [2] 张晓玲,陈效民,陶朋闯,等. 施用生物质炭对旱地红壤有机碳矿化及碳库的影响[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(2): 191-196.
- Zhang X L, Chen X M, Tao P C, *et al.* Effects of biochar on soil organic carbon mineralization and carbon pool in upland red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31**(2): 191-196.
- [3] 蓝兴福,王晓彤,许旭萍,等. 炉渣与生物炭施加对稻田土壤碳库及微生物的影响[J]. 生态学报, 2019, **39**(21): 7968-7976.
- Lan X F, Wang X T, Xu X P, *et al.* Subsequent effects of slag and biochar application on soil carbon pools and soil microorganisms in paddy fields[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(21): 7968-7976.
- [4] 张旭博,李雄,徐梦,等. 不同土地利用方式下我国北方土壤有机、无机碳库的变化趋势及原因分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, **26**(8): 1440-1450.
- Zhang X B, Li X, Xu M, *et al.* Vertical distribution of soil organic and inorganic carbon pools in soils of northern China and their relationship under different land use types[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, **26**(8): 1440-1450.
- [5] 张霞,张育林,刘丹,等. 种植方式和耕作措施对土壤结构与水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2019, **50**(3): 250-261.
- Zhang X, Zhang Y L, Liu D, *et al.* Effects of planting methods and tillage systems on soil structure and water use efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, **50**(3): 250-261.
- [6] 王旭东,张霞,王彦丽,等. 不同耕作方式对黄土高原黑垆土有机碳库组成的影响[J]. 农业机械学报, 2017, **48**(11): 229-237.
- Wang X D, Zhang X, Wang Y L, *et al.* Effects of different tillage methods on soil organic carbon pool composition in dark loessial soil on loess plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, **48**(11): 229-237.
- [7] 叶新新,王冰清,刘少君,等. 耕作方式和秸秆还田对砂姜黑土碳库及玉米小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(14): 112-118.
- Ye X X, Wang B Q, Liu S J, *et al.* Influence of tillage and straw retention on soil carbon pool and maize-wheat yield in Shajiang black soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(14): 112-118.
- [8] 李佳轶,刘文,任天宝,等. 植烟土壤物理特性及碳库对不同粒径生物质炭的动态响应[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (2): 14-23.
- Li J Y, Liu W, Ren T B, *et al.* Dynamic response of tobacco planting soil physical properties and carbon pool to different biochar particle sizes[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019, (2): 14-23.
- [9] 朱孟涛,刘秀霞,王佳盟,等. 生物质炭对水稻土团聚体微生物多样性的影响[J]. 生态学报, 2020, **40**(5): 1505-1516.
- Zhu M T, Liu X X, Wang J M, *et al.* Effects of biochar application on soil microbial diversity in soil aggregates from paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(5): 1505-1516.
- [10] Aller D, Mazur R, Moore K, *et al.* Biochar age and crop rotation impacts on soil quality[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, **81**(5): 1157-1167.
- [11] Blanco-Canqui H, Laird D A, Heaton E A, *et al.* Soil carbon increased by twice the amount of biochar carbon applied after 6 years: field evidence of negative priming[J]. *GCB Bioenergy*, 2020, **12**(4): 240-251.
- [12] 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.
- [13] Sultan S, Khan K S, Akmal M, *et al.* Carbon mineralization in subtropical dryland soil amended with different biochar sources[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, **12**(15), doi: 10.1007/s12517-019-4618-3.
- [14] Luo Y, Durenkamp M, de Nobili M, *et al.* Short term soil priming effects and the mineralisation of biochar following its incorporation to soils of different pH[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(11): 2304-2314.
- [15] 石小霞,赵诣,张琳,等. 华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 301-308.
- Shi X X, Zhao Y, Zhang L, *et al.* Effects of different agricultural practices on soil carbon pool in north China plain[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 301-308.
- [16] 董心亮. 长期施用生物质炭对潮土碳库及作物产量的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2017. 11-21.
- Dong X L. Long-term effects of biochar application on fluvo-aquic soil carbon pool and crop yields[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. 11-21.
- [17] Dong X L, Singh B P, Li G T, *et al.* Biochar increased field soil inorganic carbon content five years after application[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, **186**: 36-41.
- [18] Dong X L, Singh B P, Li G T, *et al.* Biochar application constrained native soil organic carbon accumulation from wheat residue inputs in a long-term wheat-maize cropping system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, **252**: 200-207.
- [19] Han L F, Sun K, Yang Y, *et al.* Biochar's stability and effect on the content, composition and turnover of soil organic carbon[J]. *Geoderma*, 2020, **364**, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114184.
- [20] 赵世翔,于小玲,李忠徽,等. 不同温度制备的生物炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 333-342.

- Zhao S X, Yu X L, Li Z H, *et al.* Effects of biochar pyrolyzed at varying temperatures on soil organic carbon and its components: influence on the soil active organic carbon [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 333-342.
- [21] 王富华, 黄容, 高明, 等. 生物质炭与秸秆配施对紫色土团聚体中有机碳含量的影响[J]. *土壤学报*, 2019, **56**(4): 929-939.
- Wang F H, Huang R, Gao M, *et al.* Effect of combined application of biochar and straw on organic carbon content in purple soil aggregates [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, **56**(4): 929-939.
- [22] 贾俊香, 谢英荷, 李廷亮, 等. 秸秆与秸秆生物炭对采煤塌陷复垦区土壤活性有机碳的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2016, **22**(5): 787-792.
- Jia J X, Xie Y H, Li T L, *et al.* Effect of the straw and its biochar on active organic carbon in reclaimed mine soils [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2016, **22**(5): 787-792.
- [23] 张霞, 杜昊辉, 王旭东, 等. 不同耕作措施对渭北旱塬土壤碳库管理指数及其构成的影响[J]. *自然资源学报*, 2018, **33**(12): 2223-2237.
- Zhang X, Du H H, Wang X D, *et al.* Effects of different tillage methods on soil organic carbon pool management index and its composition in weibei highland [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, **33**(12): 2223-2237.
- [24] 刘丹, 张霞, 李军, 等. 渭北旱塬农田不同耕作模式对土壤性状、玉米产量和水分利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, **29**(2): 573-582.
- Liu D, Zhang, X, Li J, *et al.* Effects of different tillage patterns on soil properties, maize yield and water use efficiency in Weibei Highland, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(2): 573-582.
- [25] 丁晋利, 武继承, 杨永辉, 等. 免耕对农田土壤有机碳及可溶性有机碳的影响[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2020, **43**(3): 27-31.
- Ding J L, Wu J C, Yang Y H, *et al.* Impacts of no-tillage on soil organic carbon and soil dissolved organic carbon in farmland [J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2020, **43**(3): 27-31.
- [26] 刘岩, 尹云锋, 陈智伟, 等. 不同生物质炭对土壤有机碳矿化及其活性碳的影响[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2016, **11**(4): 9-14, 36.
- Liu Y, Yin Y F, Chen Z W, *et al.* Impacts of biochars on soil organic carbon mineralization and labile carbon [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2016, **11**(4): 9-14, 36.
- [27] 袁颖红, 张文锋, 周际海, 等. 改良剂对旱地红壤活性有机碳及土壤酶活性的影响[J]. *土壤*, 2017, **49**(5): 909-918.
- Yuan Y H, Zhang W F, Zhou J H, *et al.* Effects of amendments on labile organic carbon and soil enzymes activities in upland red soil [J]. *Soils*, 2017, **49**(5): 909-918.
- [28] 周际海, 陈晏敏, 袁颖红, 等. 秸秆与生物质炭施用对土壤温室气体排放的影响差异[J]. *水土保持学报*, 2019, **33**(4): 248-254.
- Zhou J H, Chen Y M, Yuan Y H, *et al.* Effects of biochar and wheat straw returning on soil greenhouse gases emission [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(4): 248-254.
- [29] 曾骏, 董博, 张东伟, 等. 不同施肥方式对灌漠土土壤有机碳、无机碳和微生物量碳的影响[J]. *水土保持通报*, 2013, **33**(2): 35-38.
- Zeng J, Dong B, Zhang W D, *et al.* Effect of long-term fertilization on organic, inorganic and microbial biomass carbon in irrigated desert soils [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, **33**(2): 35-38.
- [30] Ramnarine R, Wagner-Riddle C, Dunfield K E, *et al.* Contributions of carbonates to soil CO₂ emissions [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2012, **92**(4): 599-607.
- [31] 张林, 孙向阳, 高程达, 等. 荒漠草原土壤次生碳酸盐形成和周转过程中固存 CO₂ 的研究 [J]. *土壤学报*, 2011, **48**(3): 578-586.
- Zhang L, Sun X Y, Gao C D, *et al.* CO₂ sequestration in formation and turnover of pedogenic carbonates in soil of desert steppe, Inner Mongolia, China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, **48**(3): 578-586.
- [32] 姜学兵, 侯瑞星, 李运生, 等. 免耕对华北地区潮土碳库特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, **26**(4): 153-158, 162.
- Jiang X B, Hou R X, Li Y S, *et al.* Effect of no-tillage on Fluor-Aquic soil carbon pool in north China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26**(4): 153-158, 162.
- [33] 雒琼, 王玉刚, 邓彩云, 等. 不同农业土地利用年限干旱区土壤剖面碳存储动态变化[J]. *农业工程学报*, 2017, **33**(19): 287-294.
- Luo Q, Wang Y G, Deng C Y, *et al.* Dynamics of soil carbon storage under different land use years in arid agriculture [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, **33**(19): 287-294.
- [34] 邓彩云, 王玉刚, 牛子儒, 等. 开垦年限对干旱区土壤理化性质及剖面无机碳的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, **31**(1): 254-259.
- Deng C Y, Wang Y G, Niu Z R, *et al.* Effect of land reclamation age on soil physicochemical properties and inorganic carbon in arid areas [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31**(1): 254-259.
- [35] 何甜甜, 王静, 符云鹏, 等. 等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物生物量碳氮的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 450-458.
- He T T, Wang J, Fu Y P, *et al.* Effects of adding straw and biochar with equal carbon content on soil respiration and microbial biomass carbon and nitrogen [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 450-458.
- [36] 刘志鹏, 徐杰男, 余冬立, 等. 添加生物质炭对土壤热性质影响机理研究[J]. *土壤学报*, 2018, **55**(4): 933-944.
- Liu Z P, Xu J N, She D L, *et al.* Effects of biochar addition on thermal properties of loamy soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, **55**(4): 933-944.
- [37] 刘杏认, 张星, 张晴雯, 等. 施用生物炭和秸秆还田对华北农田 CO₂、N₂O 排放的影响[J]. *生态学报*, 2017, **37**(20): 6700-6711.
- Liu X R, Zhang X, Zhang Q W, *et al.* Effects of biochar and straw return on CO₂ and N₂O emissions from farmland in the north China plain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(20): 6700-6711.
- [38] 韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 等. 黄土高原地区两种土地利用方式 CO₂ 和 N₂O 排放特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 5164-5172.
- Han J L, Hao S, Liu Z J, *et al.* Characteristics of CO₂ and N₂O emissions under two land use types in the loess plateau of China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 5164-5172.
- [39] 匡崇婷, 江春玉, 李忠佩, 等. 添加生物质炭对红壤水稻土有机碳矿化和微生物生物量的影响[J]. *土壤*, 2012, **44**(4): 570-575.
- Kuang C T, Jiang C Y, Li Z P, *et al.* Effects of biochar amendments on soil organic carbon mineralization and microbial biomass in red paddy soils [J]. *Soils*, 2012, **44**(4): 570-575.

CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i> (2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i> (2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i> (2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i> (2595)
MAIAC AOD and PM _{2.5} Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i> (2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM _{2.5} in Tianjin	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i> (2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} of Nanjing, China	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i> (2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i> (2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i> (2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i> (2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i> (2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O ₃ and NO ₂ in Shijiazhuang	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i> (2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i> (2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i> (2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan (2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i> (2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i> (2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i> (2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model	WANG Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i> (2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui (2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i> (2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang (2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i> (2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i> (2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua (2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i> (2875)
CDs-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i> (2885)
Preparation of pg-C ₃ N ₄ /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i> (2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-jun, <i>et al.</i> (2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Functionalized Materials	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i> (2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i> (2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yan, <i>et al.</i> (2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i> (2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i> (3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i> (3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i> (3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i> (3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO ₂ on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i> (3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i>	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i> (3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i> (3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i>	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i> (3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long (3084)