

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

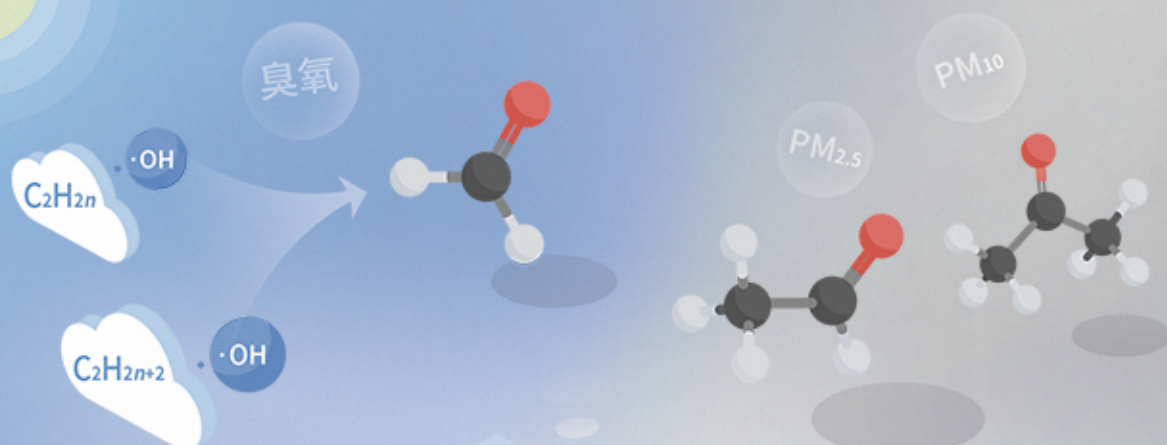
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于PMF和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析：以南京市观测为例
胡崑，王鸣，王红丽，景盛翱，陈文泰，卢兴东



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年1月

第42卷 第1期
Vol.42 No.1

目次

2019年国庆节前后北京气态氨和气溶胶铵盐浓度的同步观测	顾梦娜, 潘月鹏, 宋琳琳, 李萍, 田世丽, 武岳洋, 杨婷婷, 李浩洋, 石生伟, 吐莉尼沙, 吕雪梅, 孙倩, 方运霆 (1)
基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析	杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 史静, 唐颖潇, 姜明, 邱晓滨 (9)
中原城市群典型城市秋冬季大气 PM _{2.5} 污染特征及溯源	苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 赵孝因, 齐静文 (19)
沈阳市冬季大气 PM _{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源解析	王国祯, 任万辉, 于兴娜, 侯思宇, 张毓秀 (30)
保定地区 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	雷文凯, 李杏茹, 张兰, 徐静, 赵文吉, 刘子锐 (38)
基于 PMF 和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析:以南京市观测为例	胡崑, 王鸣, 王红丽, 景盛翔, 陈文泰, 卢兴东 (45)
2019年天津市挥发性有机物污染特征及来源	高璟贇, 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 唐邈, 杨宁, 李源, 毕温凯, 陈魁 (55)
柳州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析	刘齐, 卢星林, 曾鹏, 于爽 (65)
天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析	罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 毕晓辉, 张裕芬, 冯银厂 (75)
2017年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 李文青, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 刘益和, 王庆九, 胡建林 (88)
2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势	赵伟, 高博, 卢清, 钟志强, 梁小明, 刘明, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (97)
大型石化企业邻近区域大气沉降中多环芳烃赋存特征及源解析	李大雁, 齐晓宝, 吴健, 黄沈发, 王敏, 沙晨燕, 沈城 (106)
叶片大气颗粒物滞纳能力评估方法的定量对比	岳晨, 李广德, 席本野, 曹治国 (114)
东江流域敌敌畏的排放量估算及归趋模拟	张冰, 张芊芊, 应光国 (127)
松花江哈尔滨段及阿什河抗生素的分布规律与生态风险评估	杨尚乐, 王旭明, 王伟华, 胡雪莹, 高立伟, 孙兴滨 (136)
东北小兴凯湖沉积物 POPs 污染特征及生态风险评估	李慧, 李捷, 宋鹏, 程云轩, 焦立新, 杨亚铮 (147)
河南省地表水源中 PPCPs 分布及生态风险评估	周颖, 吴东海, 陆光华, 姚晶晶, 魏磊, 韩枫 (159)
无锡-常州地下水中内分泌干扰物的赋存特征和健康风险评估	王淑婷, 饶竹, 郭峰, 刘成海, 战楠, 王娅南, 彭洁, 杨鸿波 (166)
清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评估	刘昭, 周宏, 曹文佳, 刘伟, 兰圣涛 (175)
会仙岩溶湿地丰平枯时期地下水金属元素污染与健康风险	李军, 赵一, 邹胜章, 蓝美宁, 樊连杰, 谢浩, 秦月, 朱丹尼 (184)
三峡库区城镇化影响下河流 DOM 光谱特征季节变化	陈昭宇, 李思悦 (195)
不同植物覆盖下黄河三角洲湿地土壤中微塑料的分布	岳俊杰, 赵爽, 程昊东, 段鑫越, 石洪华, 汪磊, 端正花 (204)
基于宏基因组学探讨东平湖水库的菌群结构、耐药基因谱及其公共健康风险	张红娜, 崔娜, 申红妙 (211)
分层型水库藻类季相演替的细菌种群驱动机制	闫苗苗, 张海涵, 黄廷林, 宗容容, 刘凯文, 苗雨甜, 杨尚业, 黄鑫, 王娜 (221)
丹江口库区浮游真菌组成与功能及其影响因素	郑保海, 王晓宇, 李英军, 陈彦, 李百炼, 李玉英, 陈兆进 (234)
太湖出流河道藻颗粒变化及其水质效应	郭宇龙, 许海, 陈旭清, 郑建中, 詹旭, 朱广伟, 朱梦圆 (242)
石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量	邓华, 高明, 龙翼, 黎嘉成, 王莹燕, 王子芳 (251)
前期干旱天数对生物滞留系统除氮性能的影响	陈焱, 李欣芮, 郑爽, 刘臻, 余雪花, 程启洪 (263)
浒苔生物炭对雨水径流中氨氮的吸附特性及吸附机制	陈友媛, 李培强, 李闲驰, 孙萍, 赵新月, 李洁, 李晋, 辛至然 (274)
填料对潮汐流人工湿地中 CANON 作用强化的影响	刘冰, 郑煜铭, 秦会安, 古励 (283)
FeMnNi-LDHs 对水中 As(Ⅲ) 的吸附性能与机制	廖玉梅, 余杰, 魏世强, 蒋珍茂 (293)
硝酸钙添加和铅改性膨润土覆盖联用控制底泥中磷释放的效果及机制	张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 俞阳, 张志斌 (305)
某市污水厂抗生素和抗生素抗性基因的分布特征	颜亚玮, 於驰晟, 李菲菲, 姚鹏城, 刘宏远 (315)
不同污泥在微波预处理-厌氧消化过程中抗性基因分布及菌群结构演替	李慧莉, 武彩云, 唐安平, 佟娟, 魏源送 (323)
天然富硒土地划定的富硒阈值	王惠艳, 曾道明, 郭志娟, 成晓梦, 彭敏, 孙跃 (333)
融合自然-人为因子改进回归克里格对土壤镉空间分布预测	高中原, 肖荣波, 王鹏, 邓一荣, 戴伟杰, 刘楚藩 (343)
南方典型水稻土镉(Cd)累积规律模拟	戴雅婷, 傅开道, 杨阳, 王美娥, 陈卫平 (353)
闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险	林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 黄华斌 (359)
干湿交替灌溉制度下纳米修复材料对杂交水稻籽粒 Cd 累积及产量的影响	杨茹, 陈馨睿, 张颖, 崔俊义, 武立权, 马友华, 廖江, 何海兵 (368)
三元复合调理剂对土壤镉赋存形态和糙米镉累积的调控效应	蒋毅, 刘雅, 辜娇峰, 杨世童, 曾雄, 王轩宁, 周航, 廖柏寒 (378)
风化煤组配改良剂结合水分管理对水稻根际土壤与稻米甲基汞含量的影响	郑顺安, 吴泽赢, 杜兆林, 倪润祥, 姚启星 (386)
不同施肥措施对水稻土壤微生物拮抗性的影响	郑开凯, 马志远, 孙波, 梁玉婷 (394)
氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性	张涵, 贡璐, 刘旭, 邵康, 李昕竹, 李蕊希 (403)
黄土丘陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征	钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (411)
生物炭对土壤酶活性和细菌群落的影响及其作用机制	冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 曾强, 陈楠, 李小龙, 任天宝, 姬小明, 刘国顺 (422)
植被恢复对刺萼龙葵根际土壤细菌群落结构与功能的影响	张瑞海, 宋振, 付卫东, 郭玲玲, 高金会, 王然, 王忠辉, 张国良 (433)
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	史登林, 王小利, 刘安凯, 侯再芬, 梁国太 (443)
等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物量碳氮的影响	何甜甜, 王静, 符云鹏, 符新妍, 刘天, 李亚坤, 李建华 (450)
秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响	孙昭安, 张轩, 胡正江, 王开永, 陈清, 孟凡乔 (459)
生物炭与化肥混合对氨挥发和磷固定的影响	杨文娜, 邓正昕, 李娇, 郑杰炳, 王子芳, 高明 (467)
氮肥减投条件下膜材料使用对稻田氨挥发排放的影响	俞映惊, 王梦凡, 杨根, 何世颖, 段婧婧, 杨林章, 薛利红 (477)
微塑料对斑马鱼胚胎孵化影响及其在幼鱼肠道中的积累	赵佳, 饶本强, 郭秀梅, 高进勇 (485)
无人机热红外支持下的城市微尺度热环境模拟	阳少奇, 冯莉, 田慧慧, 刘艳霞 (492)
基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析	孙艳伟, 王润, 郭青海, 高超 (501)

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

何甜甜¹, 王静¹, 符云鹏^{1*}, 符新妍², 刘天¹, 李亚坤¹, 李建华²

(1. 河南农业大学烟草学院, 烟草行业烟草栽培重点实验室, 郑州 450002; 2. 河南省烟草公司许昌市公司, 许昌 461000)

摘要: 为探究土壤呼吸、土壤微生物生物量碳氮及水热因子对生物炭和秸秆添加的响应, 采用 LI-8100 土壤碳通量测量仪 (LI-COR, Lincoln, USA) 测定了常规施肥 (CK)、常规施肥 + 2.25 t·hm⁻² 生物炭-C (T1)、常规施肥 + 2.25 t·hm⁻² 秸秆-C (T2)、常规施肥 + 1.125 t·hm⁻² 生物炭-C + 1.125 t·hm⁻² 秸秆-C (T3) 这 4 种处理下土壤呼吸及微生物量的变化。结果表明: ① 添加生物炭和秸秆显著增加了土壤呼吸速率和 CO₂ 总排放, T3 增幅最大, T1 增幅最小; T1 对土壤呼吸的作用表现为烟草生育前期促进, 后期抑制。② 生物炭和秸秆还田均显著增加土壤微生物量碳氮以及功能菌菌落数, 其中 T1 对固氮菌的提高作用显著, T2 对真菌无显著影响, T3 表现为正交互作用; 土壤呼吸速率与土壤微生物量碳氮以及细菌、放线菌的数量显著正相关。③ T3 显著增加了 5 cm 土壤温度, 增幅为 4.53%。土壤呼吸速率与土壤温度表现出显著的指数相关性。综上所述, 等碳量添加秸秆和生物炭显著提高土壤呼吸速率及微生物生物量, 生物炭与秸秆的交互效应为正值; 与添加秸秆相比, 施用生物炭在一定程度上可以减少碳矿化, 其固碳减排效应更好。

关键词: 生物炭; 秸秆; 土壤呼吸; 土壤微生物生物量碳氮; 固碳减排

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)01-0450-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202004196

Effects of Adding Straw and Biochar with Equal Carbon Content on Soil Respiration and Microbial Biomass Carbon and Nitrogen

HE Tian-tian¹, WANG Jing¹, FU Yun-peng^{1*}, FU Xin-yan², LIU Tian¹, LI Ya-kun¹, LI Jian-hua²

(1. Key Laboratory of Tobacco Cultivation of China Tobacco Industry, College of Tobacco Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2. Xuchang Municipal Tobacco Company, Xuchang 461000, China)

Abstract: In order to investigate the response of soil respiration, soil microbial biomass carbon and nitrogen, and hydrothermal factors to the addition of biochar and straw, we used an LI-8100 soil carbon flux meter (LI-COR, Lincoln, USA) to study changes in soil respiration and microbial biomass under four treatments: conventional fertilization (CK), conventional fertilization + 2.25 t·hm⁻² biochar-C (T1), conventional fertilizer + 2.25 t·hm⁻² straw-C (T2), and conventional fertilizer + 2.25 t·hm⁻² (biochar-C + straw-C), biochar-C: straw-C = 1:1 (T3). The results showed that: ① the addition of biochar and straw significantly increased the soil respiration rate and total CO₂ emissions, with the largest increase in T3 and the smallest increase in T1. The effect of T1 on soil respiration was promoted in the early stage and later inhibited. ② The microbial biomass carbon and nitrogen and the number of functional bacterial colonies increased significantly with biochar and straw amendments. T1 had a significant promotion effect on nitrogen-fixing bacteria, while T2 had no significant effect on the number of fungi, and T3 showed a positive interaction effect. Soil respiration rates were significantly and positively related to soil microbial biomass carbon and nitrogen as well as to the number of bacteria and actinomycetes. ③ The 5 cm soil temperature of T3 significantly increased by 4.53%. The soil respiration rate and soil temperature showed a significant exponential correlation. To sum up, adding straw and biochar with equal carbon content can significantly increase the soil respiration rate and microbial biomass, and the interaction effect between biochar and straw is positive. Compared with that of the straw treatments, the application of biochar can reduce carbon mineralization to a certain extent, and the effect of carbon sequestration is better.

Key words: biochar; wheat straw; soil respiration; soil microbial biomass carbon and nitrogen; carbon sequestration and emission reduction

作为从陆地生态系统到大气的第二大碳通量, 土壤呼吸是生态系统碳循环过程中不可或缺的部分, 更是调控全球气候变化的关键过程^[1]。据估算, 1965~2012 年间全球平均土壤呼吸 (以 C 计) 达到 91 Pg·a⁻¹, 增速为 0.09 Pg·a⁻¹^[2], 这势必会影响全球变暖进程。农田土壤固碳减排是应对全球气候变化和提高土壤有机碳的有效措施之一。如何在提高土壤肥力的情况下有效提升土壤固碳能力是现代农业可持续发展的关键问题^[3]。

最近, 生物炭的添加作为一种潜在的土壤修复技术得到了越来越多的关注, 该技术不仅可以提高退化土壤的质量, 还是土壤固碳减排的有效手段^[4]。生物炭是一种由植物等生物质材料在缺氧条件下经高温裂解产生的一类含碳量高的芳香化物

收稿日期: 2020-04-23; 修订日期: 2020-06-30

作者简介: 何甜甜 (1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为烟草栽培生理, E-mail: htd0715@163.com

* 通信作者, E-mail: ypfu01@163.com

质,在土壤中可以稳定存在几百年甚至上千年^[5]. 由于生物炭自身的结构特点和理化性质,施入土壤后可改善土壤结构,提高土壤的保水保肥能力和微生物活性,已被认定为良好的土壤改良剂^[6]. 周震峰等^[7]的研究指出,添加花生壳生物炭显著提高了麦田土壤蔗糖酶和尿酶活性. Prayogo 等^[8]的研究发现,生物炭可以显著提高供试土壤中细菌和放线菌的数量. 而生物炭对土壤碳排放的影响不尽相同. Ventura 等^[9]的研究表明,生物炭施入土壤后可以与原土有机质相互作用,改变土壤有机质矿化速率,进而影响 CO₂ 的释放. 一方面,生物炭发达的孔隙结构和巨大的外表面积可以吸附和包封土壤有机质,降低有机质的矿化和碳排放^[10]. 另一方面,生物炭也可通过对土壤 CO₂ 的吸附减少与大气之间的碳通量^[11]. 然而,生物炭的减排效应经常被质疑. 有研究表明,生物炭自身的不稳定 C 输入将导致原土有机质的分解,增加微生物作用底物,促进碳排放^[12]. Song 等^[13]对 61 项研究进行荟萃分析发现,施用生物炭导致土壤二氧化碳排放量平均增加 19%. 这势必会挑战生物炭作为一种固碳减排材料在土壤中的长期应用.

秸秆还田是当前重要的土壤改良途径之一. 秸秆还田不仅可以充分利用农作物废弃资源和减少焚烧引起环境问题,还有利于土壤有机碳和活性有机碳的积累,增强农田生态系统的固碳能力^[14]. 王梦雅等^[15]的研究发现单施秸秆可以显著提高土壤活性有机碳中 DOC 和 ROC 的占比以及土壤养分含量,改善土壤有机碳库质量. 由于秸秆的施用引起土壤活性有机碳的增加,为微生物提供较多可利用 C 源^[16],微生物的数量增多,活性增强. 同时,多数研究表明秸秆还田会增强土壤呼吸作用,增加土壤温室气体排放^[17~19]. 而 Naser 等^[20]的研究认为秸秆还田能减少 CO₂ 的排放. 可见,秸秆对碳排放的影响仍存在较大分歧. 近年来的研究主要从生物炭的类型、施用量以及秸秆的还田方式、还田量对土壤呼吸和微生物的作用方面着手,等碳量投入生物炭和秸秆对土壤呼吸以及土壤微生物的作用效果却鲜有报道,而在等碳量投入外源碳的情况下研究不同有机物料的固碳减排较为准确. 同时,生物炭与秸秆的交互效应尚不清楚. 因此,本实验在等碳量添加生物炭和秸秆的基础上,增加了秸秆与生物炭混施处理,目的为:①研究生物炭和秸秆等碳量输入后土壤呼吸(碳排放)和有机碳含量的变化,评估生物炭和秸秆的固碳减排能力;②研究生物炭和秸秆对土壤水热因子和微生物量的影响;③评估生物炭和秸秆对土壤微生物和土壤呼吸的交互效应.

1 材料与方法

1.1 供试材料

本实验地点位于河南农业大学许昌校区现代农业科教园区(东经 113°85',北纬 34°14'),气候类型属于暖温带亚湿润季风气候,四季分明,雨热同期. 该地区年均气温 15℃左右,年均降雨量 700 mm. 供试土壤为褐土,0~20 cm 土壤的基础化学性质为:有机质 19.09 g·kg⁻¹、碱解氮 74.7 mg·kg⁻¹、速效磷 8.7 mg·kg⁻¹、速效钾 114.5 mg·kg⁻¹和水溶性氯 24.8 mg·kg⁻¹. 本实验中所用生物炭由河南省生物炭技术工程实验室提供,以花生壳为原料在 400~450℃限氧条件下热解 30 min 烧制. 养分含量(质量分数):TC 49.68%、TN 1.21%、C/N 为 41.06、TP 为 1.22%、TK 1.84%和 pH 8.6. 实验所用秸秆为小麦秸秆,将秸秆充分腐熟后粉碎过 2 mm 筛. 腐熟小麦秸秆养分(质量分数):pH 7.86、TC 42.32%、TN 1.41%、C/N 30.01、TP 0.96%和 TK 0.97%.

1.2 实验设计

定位实验始于 2017 年,采用随机区组设计,设 4 个处理,重复 3 次,小区面积为 0.02 hm². 处理如下:常规施肥(CK)、常规施肥 + 2.25 t·hm⁻² 生物炭-C(T1)、常规施肥 + 2.25 t·hm⁻² 秸秆-C(T2)和常规施肥 + 1.125 t·hm⁻² 生物炭-C + 1.125 t·hm⁻² 秸秆-C(T3). 生物炭和秸秆于烤烟移栽前两周施入,并与 0~20 cm 土壤充分混匀. 常规施肥按照河南烟区常用的施肥方式,即氮用量为 37.5 kg·hm⁻²,氮:磷:钾比例为 1:2:5. 基肥由烟草专用复合肥(10% N、10% P₂O₅ 和 10% K₂O)、硫酸钾(52% K₂O)和过磷酸钙(12% P₂O₅)提供,追肥由硝酸钾(13.5% N 和 44.5% K₂O)补足,基肥:追肥 = 4:1. 本实验于 2019 年 4~9 月进行,5 月 2 号移栽,田间栽培管理按照优质烟叶生产管理规范进行.

1.3 土壤呼吸测量方法

土壤呼吸采用 LI-8100 土壤碳通量测量仪(LI-COR, Lincoln, USA)测定. 烟草移栽当天在每个小区放置 3 个 PVC 环(内径 20 cm,露出地面的高度为 3 cm),以每个小区中心为中点呈三角形排列在垄上两株烟之间,PVC 环内不种任何植物(出现杂草及时清理). 除中耕培土外,PVC 环在整个生长季内不再移动. 每次测定时间为 09:00~11:30,每隔 7 d 测定一次,雨天除外(推迟 2 d 左右),整个生育期内共测定 19 次. 土壤温度由碳通量测量仪自带的温度探头测定,土壤含水率采用烘干法测定.

1.4 土壤样品采集与其他指标测定

1.4.1 土壤样品的采集

每次测定土壤呼吸的同时采集 0 ~ 15 cm 土层土壤样品,用冰盒迅速转移到实验室进行土壤水分的测定.于移栽 30、60 和 90 d 采用“S”形取样法同样采集 0 ~ 15 cm 的耕层土壤,一部分风干后过 0.15 mm 筛,用于测定有机碳含量,另一部分过 2 mm 筛保存在 4℃ 冰箱,用于土壤微生物数量以及微生物量碳氮的测定.

1.4.2 测定指标与方法

土壤有机碳采用重铬酸钾-外加热法进行测定^[21];微生物量碳氮采用氯仿熏蒸法测定^[21];微生物数量采用涂布平板法测定^[22].以上各个指标在生育期内测定 3 次,分别在移栽 30、60 和 90 d.

1.5 数据分析

采用 Excel 2010 进行数据处理和土壤呼吸与温度、水分之间的回归分析.运用 SPSS 20.0 的 one-way ANOVA 进行处理间差异分析,处理间差异显著性用 LSD 最小显著差数法进行检验 ($P < 0.05$); Pearson 相关系数分析土壤呼吸与影响因素之间的相关性.图表制作采用 Origin 2018 和 Excel 2010.

土壤呼吸日排放量:

$$R_i = R_s \times 3600 \times 24 \times 12 \times 10^{-5} \quad (1)$$

土壤 CO₂-C 总排放估算公式:

$$R_a = \sum_{i=1}^{last-1} \left(\frac{R_i + R_{i+1}}{2} \times N \right) + R_{first} \quad (2)$$

式中, R_s 为土壤呼吸速率 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], 12 为 CO₂-C 的摩尔质量 ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$), 3600 和 24 均为换算系数; R_a 为烟草生育期 CO₂ 排放总量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), R_i 和 R_{i+1} 为第 i 次和第 $i+1$ 次测定时 CO₂ 日排放量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), N 为相邻两次测量间隔天数 (d), R_{first} 表示第一次测定当天的土壤 CO₂ 排放.

土壤呼吸与土壤温度之间的关系用经验指数方程模拟:

$$R = ae^{bT} \quad (3)$$

式中, R 为测得的土壤呼吸速率 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], T 为 5 cm 土壤温度 (°C), a 和 b 为拟合参数.

温度敏感系数:

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (4)$$

式中, Q_{10} 为土壤呼吸温度敏感系数,表示是温度每升高 10℃,土壤呼吸变化的倍数.

土壤水分与土壤呼吸的关系用一元二次回归方程模拟:

$$R = aW^2 + bW + c \quad (5)$$

式中, R 为土壤呼吸速率 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], W 为土壤 15 cm 质量含水率 (%), a 、 b 和 c 均为拟合参数.

微生物生物量 C 和 N,微生物熵 (qSMBC) 计算方法为:

$$\text{SMBC} = \frac{(\text{TC}_1 - \text{IC}_1) - (\text{TC}_0 - \text{IC}_0)}{K_C} \quad (6)$$

$$\text{SMBN} = (\text{TN}_1 - \text{TN}_0) / K_N \quad (7)$$

$$\text{qSMBC} = \text{SMBC} / \text{TOC} \quad (8)$$

式中, SMBC 为微生物生物量碳, TC_1 为熏蒸后样品全碳, IC_1 为熏蒸后样品无机碳, TC_0 为未熏蒸样品全碳, IC_0 为未熏蒸样品无机碳, K_C 为微生物生物量碳转换系数 (0.45); SMBN 为微生物生物量氮, TN_1 为熏蒸样品全氮, TN_0 为未熏蒸样品全氮, K_N 为微生物生物量氮转换系数 (0.54); TOC 为土壤有机碳.

2 结果与分析

2.1 等碳量添加生物炭和秸秆对水热因子及土壤呼吸的影响

2.1.1 水热因子变化动态

生物炭和秸秆还田下 5 cm 土壤温度具有明显的季节性变化 (图 1), 夏季温度较高, 最大值出现在 7 月. 观测期间土壤温度在 20.28 ~ 29.53℃ 之间变化, 各处理均值大小顺序为: $T3 > T1 > T2 > CK$. 方差分析结果表明, $T1$ 和 $T2$ 的平均土壤温度与 CK 之间无显著差异, 而 $T3$ 处理较 CK 显著增加, 其平均土壤温度显著提高 1.11℃; 表明生物炭与秸秆混施显著升高土壤温度, 而单施秸秆和生物炭对土壤温度的影响不显著.

各处理土壤含水量变化较为复杂, 受降雨和灌

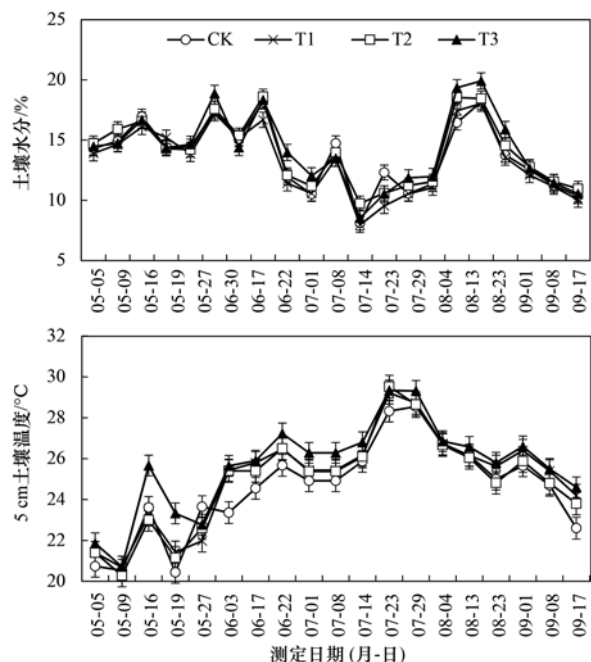


图 1 生物炭和秸秆还田下土壤温度和水分的变化动态

Fig. 1 Dynamic changes of soil temperature and moisture with biochar and straw amendments

溉的影响,表现为波动变化(图1).在连续强降雨(8月1~10日)后出现最大峰值.T2和T3处理土壤水分含量较CK增加2.35%和3.82%,T1处理较CK有所降低,降幅为2.81%,但均未达到显著差异,表明添加生物炭和秸秆对0~15 cm 土层土壤的含水率影响不显著.

2.1.2 土壤呼吸速率动态变化及总排放

生育期内各处理土壤呼吸速率呈现多峰变化(图2),与5 cm 土壤温度的变化趋势基本一致.添加秸秆和生物炭显著提高了生育前期(7月1日前)的土壤呼吸速率,表现为T3>T1>T2>CK.随着生育期的推进,T1处理土壤呼吸速率较CK显著下降,最后一个峰值出现时降幅为9.2%($P<0.05$).就生育期内平均土壤呼吸速率来看,表现为T3>T2>T1>CK,T3、T2、T1分别较CK增加28.0%、17.2%和7.6%,以T3对土壤呼吸的促进作用最显著.

由图3可以看出,整个生育期烟田土壤CO₂总排放表现为T3(7376.6 kg·hm⁻²)>T2(6807.7 kg·hm⁻²)>T1(6107.5 kg·hm⁻²)>CK(5794.3 kg·hm⁻²),且处理之间差异显著.

2.2 等碳量添加生物炭和秸秆对土壤微生物量的影响

2.2.1 SMBC、SMBN 和微生物熵

由图4可知,生育期内各处理土壤有机碳、SMBC、SMBN 及微生物熵(qSMBC)均表现为先增

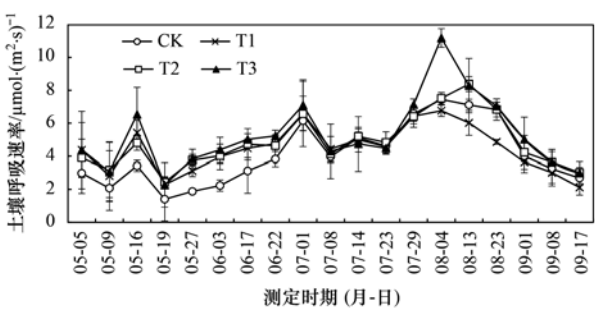
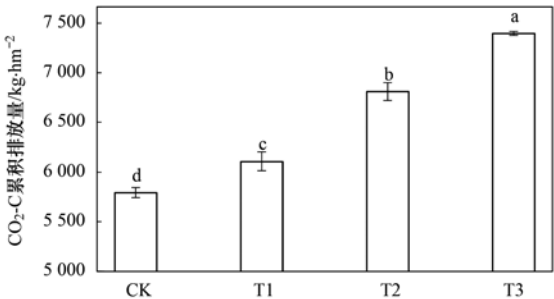


图2 烤烟生育期土壤CO₂-C累积排放量

Fig. 2 Cumulative emissions of soil CO₂-C during the growth period of flue-cured tobacco

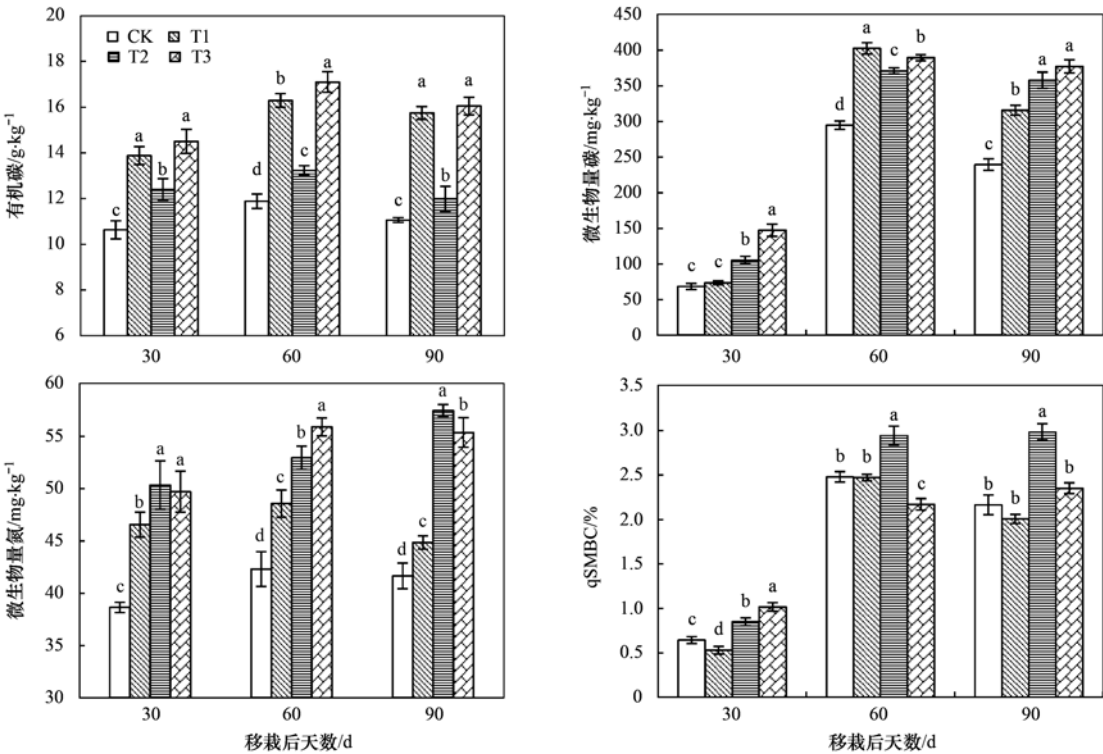


不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

图3 生物炭和秸秆还田下土壤呼吸速率动态变化

Fig. 3 Dynamic change of the soil respiration rate with biochar and straw returning to the field

加后降低,于移栽后60 d 时达到最大值.各处理土壤有机碳含量表现为T3>T1>T2>CK,说明添加生物炭更有利于提高土壤有机碳含量.SMBC和微



同一组柱形图上不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)

图4 生物炭和秸秆还田下土壤有机碳、微生物量碳氮和微生物熵变化

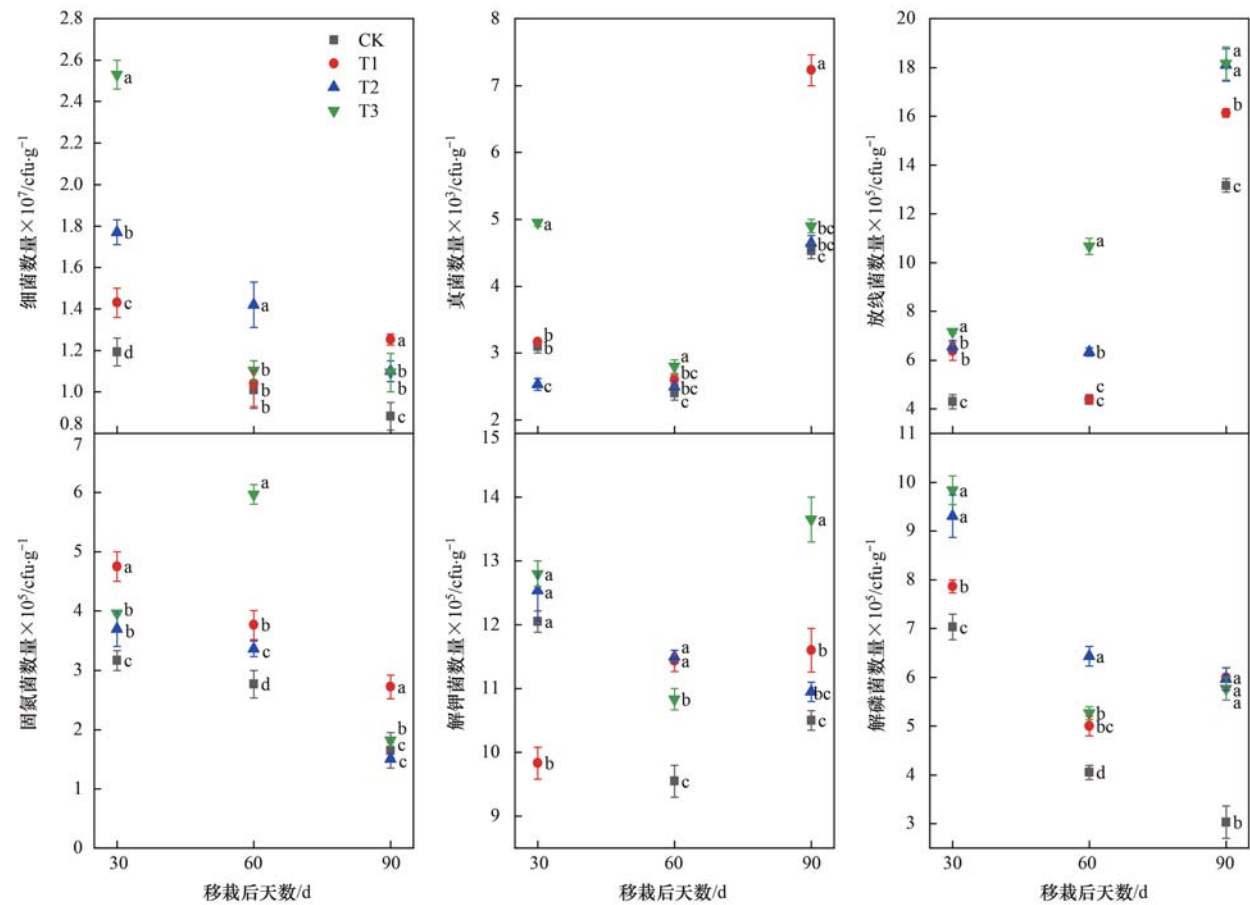
Fig. 4 Changes of soil organic carbon, microbial biomass carbon, and nitrogen and microbial entropy with biochar and straw returning to the soil

生物熵值在烟草成长过程中变化较大,移栽后 30 d 时,不同处理 SMBC 含量在 68.42 ~ 147.37 mg·kg⁻¹ 之间;而移栽 60 d 后,SMBC 升高至 294.72 ~ 489.47 mg·kg⁻¹,微生物熵亦在移栽 60 d 后迅速升高至 2.5% 左右.与 T1 相比,T2 更有利于 SMBN 和微生物熵值的提高.

2.2.2 微生物菌落数

生育期内细菌、固氮菌、解磷菌呈现降低趋势(图 5),移栽后 30 d(即 6 月 3 日)达到最大值.放线菌呈增加趋势,移栽后 90 d(即 8 月 4 日)达到峰值;真菌则呈现先降低后升高的趋势,移栽后 60 d(即 7 月 1 日)时达到最小值.各个处理解钾菌的

变化趋势不尽相同,T1 处理解钾菌呈现增加趋势,T2 呈现降低趋势,CK 和 T3 则表现为先降低后升高的趋势,T1 和 T3 均于移栽后 90 d 达到最大值.解钾菌和解磷菌的增加对提高土壤磷、钾利用率及烟叶磷和钾含量具有重要作用.添加秸秆和生物炭促进了生育期内土壤微生物数量的增长,以 T1 处理对固氮菌的促进作用最为显著;T2 和 T3 对细菌、放线菌、解钾菌和解磷菌的促进作用更显著,整体表现为 T3 > T2 > T1 > CK. T1 在移栽后 60 d 之前真菌数量较 CK 无显著差异,移栽后 90 d 较 CK 显著增加 59.6%;T2 在生育期内对真菌无显著的促进作用.



同一组散点图上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 5 生物炭和秸秆还田下微生物菌落数变化

Fig. 5 Changes in the number of microbial colonies with biochar and straw amendments

2.3 土壤呼吸对土壤温度和水分变化的响应

本实验采用指数方程拟合了土壤呼吸速率与土壤温度的关系,结果见表 1.各处理土壤呼吸速率均随着温度的升高而增加,两者之间达到显著指数相关.土壤温度可以解释土壤呼吸速率变化的 31.01%~60.58%.添加生物炭和秸秆降低了 Q_{10} ,以 T1 的 Q_{10} 最小,表明单施生物炭的土壤呼吸速率受温度变化的影响最小.

表 1 土壤呼吸速率与土壤温度之间的拟合方程

Table 1 Fitting equation between the flux rate of soil respiration and soil temperature

处理	拟合方程	R^2	Q_{10}	P
CK	$R = 0.0687e^{0.1828T}$	0.6058	5.09	<0.01
T1	$R = 0.5787e^{0.0801T}$	0.3655	2.23	<0.01
T2	$R = 0.5717e^{0.0839T}$	0.3847	2.30	<0.05
T3	$R = 0.4062e^{0.0974T}$	0.3101	2.65	<0.05

土壤呼吸速率与土壤水分之间的关系较为复

杂,本实验中土壤呼吸速率与水分之间符合二次回归模型,拟合度 R^2 在 0.013 ~ 0.33 之间(表 2),其中 CK 的拟合度最低,T3 的拟合度最高.除 T3 外,其他处理土壤呼吸速率与土壤水分之间均无显著相

表 2 土壤呼吸速率与土壤水分之间的拟合方程
Table 2 Fitting equation between the flux rate of soil respiration and soil moisture

处理	拟合方程	R^2	P
CK	$R = 0.0215W^2 - 0.5437W + 7.3717$	0.0134	>0.05
T1	$R = 0.0427W^2 - 1.0569W + 10.709$	0.079	>0.05
T2	$R = 0.06W^2 - 1.5406W + 14.155$	0.1826	>0.05
T3	$R = 0.053W^2 - 1.2094W + 11.209$	0.3343	<0.05

表 3 土壤呼吸与微生物量的皮尔森相关分析¹⁾

Table 3 Pearson correlation analysis of soil respiration and microbial biomass

	土壤呼吸	有机碳	微生物量碳	微生物量氮	微生物熵	细菌	真菌	放线菌
土壤呼吸	1							
有机碳	0.608 *	1						
微生物量碳	0.897 **	0.726 **	1					
微生物量氮	0.894 **	0.455	0.935 **	1				
微生物熵	0.413	-0.377	0.327	0.624 *	1			
细菌	0.944 *	0.635 *	0.927 **	0.935 **	0.445	1		
真菌	0.303	0.916 **	0.486	0.170	-0.642 *	0.326	1	
放线菌	0.937 **	0.651 *	0.921 **	0.904 **	0.375	0.963 **	0.369	1

1) **表示相关性在 $P < 0.01$ 水平极其显著; *表示相关性在 $P < 0.05$ 水平显著, $n = 12$

3 讨论

3.1 添加秸秆与生物炭对土壤呼吸的影响

本研究结果表明,不同处理土壤呼吸速率具有明显的时间差异,烟株移栽后 30 d(6 月 3 日)之前土壤的呼吸速率较低,主要是因为烟草刚刚移栽,根系生长缓慢,加上此阶段土壤温度较低,微生物活性较弱,因而土壤呼吸速率低.进入旺长期(移栽 40d 后),烟株根系迅速发育,根系分泌物随之增加,再加上土壤温度的升高,微生物得以大量繁殖,从而增强了土壤呼吸速率.进入成熟末期(8 月 13 日后),土壤温度有所回落,加上烟株根系衰老,土壤呼吸速率又迅速下降.

添加秸秆显著增加了烟草生育期内土壤平均呼吸速率和 CO_2 排放量,与陈静等^[23]的研究结果一致.可能是因为添加秸秆后土壤活性有机碳含量得以有效增加^[24],而活性碳组分的矿化是土壤呼吸和 CO_2 排放的主要贡献者^[15];同时本实验也发现了秸秆处理下 SMBC 的显著增加,并验证了土壤呼吸与微生物量碳之间存在显著的正相关关系(表 3).另一方面,本实验所用的秸秆腐熟后又经过粉碎,其表皮结构进一步被破坏,降低了纤维素和木质纤维素的保护作用^[25],使得秸秆中易分解物质较多地释放到土壤,为微生物提供较多的能源^[26],促进微生物

的活动和繁殖,从而增加了 CO_2 排放.与添加秸秆相比,单施生物炭显著降低了土壤 CO_2 排放,这与 Sun 等^[27]的研究结果类似.一方面可能是生物炭拥有较大的比表面积和一定含量的 CaCO_3 、 FeOH 等矿物质,对 CO_2 有较强的物理、化学固定作用,促使生物炭与土壤和有机质形成有机-无机复合体,生成更稳定的团聚体,贮存其中的有机碳不易被外界微生物分解利用,从而减少了土壤 CO_2 排放^[28];另一方面,等碳量条件下,生物炭含有较多高度稳定性的碳组分,一定程度上可以抵抗微生物对它的的分解作用,生物炭中的碳得以长期保存在土壤中,增加土壤有机碳的同时降低土壤碳矿化^[29],因此与秸秆处理相比 CO_2 排放量显著降低.此外,本实验中生物炭处理对土壤呼吸的作用效果表现为前期促进,后期抑制,这与 Smith^[30]和李亚森等^[31]的研究结果类似.生物炭在土壤中运转的典型特征是不稳定的生物炭-C 迅速耗散,然后以更稳定的高度聚缩的芳烃 C 组分缓慢矿化^[32],在此过程中增加了土壤中易分解有机质的含量,从而在短期内引起土壤碳排放的急剧增加,但随着易分解有机碳的矿化,这种激发效应逐渐消失^[33],因而出现先增加后抑制效应,抑制效应是否会延续有待进一步研究. Sun 等^[27]研究小麦秸秆及其生物炭对盐渍土壤碳矿化的影响时发现,与单施秸秆相比,生物炭 + 秸秆处理的 CO_2 释

2.4 土壤呼吸与土壤有机碳和土壤微生物的相关分析

相关性分析所用数据为生育期内各指标的平均值.由表 3 可知,土壤呼吸与有机碳和细菌数量呈显著正相关($P < 0.05$),与微生物量碳氮和放线菌数量存在极显著正相关($P < 0.01$).微生物量碳与微生物量氮之间呈显著正相关外,与土壤有机碳、细菌和放线菌数量均呈显著相关关系.微生物熵表征土壤有机碳的周转速率,其与微生物量氮和真菌之间亦呈现显著相关性.

放量较低,作者将其归因于生物炭具有对天然有机质更高的吸附性. 本实验与 Sun 等^[27]的研究结果相悖,即生物炭+秸秆显著增加了碳排放,表明生物炭与秸秆对碳排放存在正交互效应.

3.2 土壤呼吸和水热因子的相互关系

土壤温度和水分是影响土壤呼吸的重要因素. 土壤酶和微生物活性,植物的光合作用以及根系发育都随温度的改变而发生变化,因此温度变化与植物根际呼吸和微生物呼吸密切相关^[11]. 同时,生物炭矿化速率也取决于土壤温度^[34]. 本研究发现土壤呼吸速率与土壤 5 cm 温度的变化趋势一致,呈现显著指数相关性($P < 0.05$). 各处理 Q_{10} 变化范围为 2.23 ~ 5.09,与 Zheng 等^[35]测定的农田 Q_{10} (1.28 ~ 4.75) 结果较为接近. 添加生物炭和秸秆处理的 Q_{10} 明显小于对照,以单施生物炭处理的 Q_{10} 最小. 有研究表明,添加生物炭在短期内增加 Q_{10} 而在长时间内使 Q_{10} 降低^[36],本实验已经连续 3 a 施用生物炭,可能在这方面的原因. 添加秸秆处理也降低了 Q_{10} ,可能是由于秸秆还田改善了土壤水分入渗性能,增强土壤蓄水保墒能力^[37],减弱了外界环境剧烈变化对土壤温度的影响.

土壤呼吸与土壤水分之间的关系较为复杂. 张廷等^[38]的研究表明土壤呼吸与土壤水分之间存在较好的直线回归,一元二次回归以及指数相关性,土壤含水量与土壤呼吸速率混合模型可解释土壤呼吸速率变异的 82.3% ~ 96.6%. 本研究则发现土壤水分仅从较小程度上解释土壤呼吸的变化(R^2 为 0.01 ~ 0.33). 只有生物炭与秸秆混施处理的土壤水分与土壤呼吸之间有显著相关性($P < 0.05$).

3.3 添加秸秆、生物炭对微生物生物量的影响

土壤微生物参与土壤的代谢过程,是土壤中最活跃的部分. 土壤微生物量碳氮在土壤中的占比虽小,却能够很大程度上反映土壤有效养分状况和生物活性,是评价土壤肥力以及土壤微生物数量和活性的重要指标^[39]. 而土壤中细菌、真菌和放线菌可决定土壤微生物总量的分布以及有机物的分解与转化^[40]. 汤宏等^[39]的研究发现,高量或低量秸秆还田均显著提高 MBC 和 MBN 含量;慕平等^[41]在连续秸秆还田处理下观测到 0 ~ 40 cm 土层细菌、真菌、放线菌数量均有效增加;Otsuka 等^[42]的研究指出,生物炭施用后土壤细菌多样性显著增加 25%. 本实验结果与上述研究结果相似,添加秸秆和生物炭显著提高土壤微生物量碳氮含量以及微生物菌落数. 可能的原因是添加生物炭和秸秆对表层土温有“削高填低”的调节作用,为各种酶促反应提供适宜的温度条件,从而促进土壤微生物数量的增加^[43]. 然

而,本研究发现单施秸秆对土壤真菌数量的提升作用不显著,并且在烟草移栽 30d 时显著低于对照. 有研究表明,SMBC/SMBN 可以表示微生物的群落结构特征,其比值越高,群落中真菌数量越大^[44],本实验中秸秆处理的 SMBC/SMBN 较低可能是导致真菌数量较少的原因. 秸秆与生物炭配施对微生物量的促进作用最为显著,这与王梦雅^[15]和李友兵等^[45]的研究结果一致. 生物炭的多孔结构为土壤微生物提供良好的栖息地,加上秸秆腐解产生的碳氮组分又能提供微生物所需的物质和能量来源,两者混施表现出正交互作用,极大地促进土壤微生物活性^[46].

4 结论

(1) 等碳量添加秸秆和生物炭,显著增加土壤呼吸速率和 CO_2 总排放量,表现为 $T3 > T2 > T1 > \text{CK}$. 单施生物炭对土壤呼吸的作用表现为前期促进,后期抑制.

(2) 添加生物炭和秸秆均能提高土壤微生物量和有机碳的积累,生物炭与秸秆配施表现出正交互作用,促进作用最为显著. 秸秆和生物炭对功能菌群的作用不同,生物炭对固氮菌的促进作用显著,单施秸秆、秸秆与生物炭配施对细菌、放线菌、解钾菌和解磷菌的促进作用更显著.

(3) 单施生物炭和秸秆对土壤温度和水分的影响不大,而生物炭与秸秆配施显著增加 5 cm 土壤温度. 土壤呼吸与土壤温度存在极显著的指数相关性,与土壤水分的相关性不显著.

参考文献:

- [1] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record [J]. *Nature*, 2010, **464** (7288): 579-582.
- [2] Hashimoto S, Carvalhais N, Ito A, *et al.* Global spatiotemporal distribution of soil respiration modeled using a global database [J]. *Biogeosciences*, 2015, **12** (13): 4121-4132.
- [3] 潘根兴, 陆海飞, 李恋卿, 等. 土壤碳固定与生物活性: 面向可持续土壤管理的新前沿 [J]. *地球科学进展*, 2015, **30** (8): 940-951.
Pan G X, Lu H F, Li L Q, *et al.* Soil carbon sequestration with bioactivity: A new emerging frontier for sustainable soil management [J]. *Advances in Earth Science*, 2015, **30** (8): 940-951.
- [4] 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.
- [5] 包建平, 袁根生, 董方圆, 等. 生物质炭与秸秆施用对红壤有机碳组分和微生物活性的影响 [J]. *土壤学报*, 2020, **57**

- (3): 721-729.
- Bao J P, Yuan G S, Dong F Y, *et al.* Effects of biochar application and straw returning on organic carbon fractionations and microbial activities in a red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57**(3): 721-729.
- [6] 张千丰, 王光华. 生物炭理化性质及对土壤改良效果的研究进展[J]. *土壤与作物*, 2012, **1**(4): 219-226.
- Zhang Q F, Wang G H. Research progress of physiochemical properties of biochar and its effects as soil amendments[J]. *Soil and Crop*, 2012, **1**(4): 219-226.
- [7] 周震峰, 王建超, 饶潇潇. 添加生物炭对土壤酶活性的影响[J]. *江西农业学报*, 2015, **27**(6): 110-112.
- Zhou Z F, Wang J C, Rao X X. Impact of adding biochar on enzyme activity in soil[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2015, **27**(6): 110-112.
- [8] Prayogo C, Jones J E, Baeyens J, *et al.* Impact of biochar on mineralisation of C and N from soil and willow litter and its relationship with microbial community biomass and structure[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, **50**(4): 695-702.
- [9] Ventura M, Alberti G, Viger M, *et al.* Biochar mineralization and priming effect on SOM decomposition in two European short rotation coppices [J]. *GCB Bioenergy*, 2015, **7**(5): 1150-1160.
- [10] 陈颖, 刘玉学, 陈重军, 等. 生物炭对土壤有机碳矿化的激发效应及其机理研究进展[J]. *应用生态学报*, 2018, **29**(1): 314-320.
- Chen Y, Liu Y X, Chen Z J, *et al.* Priming effect of biochar on the mineralization of native soil organic carbon and the mechanisms: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(1): 314-320.
- [11] Bruun S, Clauson-Kaas S, Bobul'ská L, *et al.* Carbon dioxide emissions from biochar in soil: role of clay, microorganisms and carbonates[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, **65**(1): 52-59.
- [12] Cross A, Sohi S P. The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(10): 2127-2134.
- [13] Song X Z, Pan G X, Zhang C, *et al.* Effects of biochar application on fluxes of three biogenic greenhouse gases: a meta-analysis[J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2016, **2**(2), doi: 10.1002/ehs2.1202.
- [14] 田冬, 高明, 黄容, 等. 油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2988-2999.
- Tian D, Gao M, Huang R, *et al.* Response of soil respiration and heterotrophic respiration to returning of straw and biochar in rape-maize rotation systems[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2988-2999.
- [15] 王梦雅, 符云鹏, 黄婷婷, 等. 等碳量添加不同有机物料对土壤有机碳组分及土壤呼吸的影响[J]. *中国烟草学报*, 2018, **24**(2): 65-73.
- Wang M Y, Fu Y P, Huang T T, *et al.* Effects of organic material application on organic carbon in and respiration of soil [J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2018, **24**(2): 65-73.
- [16] 李琳, 伍芬琳, 张海林, 等. 双季稻区保护性耕作下土壤有机碳及碳库管理指数的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(1): 248-253.
- Li L, Wu F L, Zhang H L, *et al.* Organic carbon and carbon pool management index in soil under conservation tillage in two-crop paddy field area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(1): 248-253.
- [17] 李晓莎, 武宁, 刘玲, 等. 不同秸秆还田和耕作方式对夏玉米农田土壤呼吸及微生物活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(6): 1765-1771.
- Li X S, Wu N, Liu L, *et al.* Effects of different straw recycling and tillage methods on soil respiration and microbial activity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(6): 1765-1771.
- [18] 曹湛波, 王磊, 李凡, 等. 土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1908-1914.
- Cao Z B, Wang L, Li F, *et al.* Response of soil respiration and organic carbon to returning of different agricultural straws and its mechanism[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1908-1914.
- [19] 丁瑞霞, 王维钰, 张青. 两种轮作模式下秸秆还田对土壤呼吸及其温度敏感性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017, **25**(8): 1106-1118.
- Ding R X, Wang W Y, Zhang Q. Effect of straw mulching on soil respiration and its' temperature sensitivity under different crop rotation systems[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, **25**(8): 1106-1118.
- [20] Naser H M, Nagata O, Tamura S, *et al.* Methane emissions from five paddy fields with different amounts of rice straw application in central Hokkaido, Japan [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, **53**(1): 95-101.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 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. 117-141.
- Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, *et al.* Determination of soil microbial biomass and its application [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006. 117-141.
- [23] 陈静, 张建国, 赵英, 等. 秸秆和生物炭添加对关中地区玉米-小麦轮作农田温室气体排放的影响[J]. *水土保持研究*, 2018, **25**(5): 170-178.
- Chen J, Zhang J J, Zhao Y, *et al.* Effects of straw and biochar amendment on greenhouse gases emission in wheat-maize rotation cropland in Guanzhong area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, **25**(5): 170-178.
- [24] Xia L L, Wang S W, Yan X Y. Effects of long-term straw incorporation on the net global warming potential and the net economic benefit in a rice-wheat cropping system in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **197**: 118-127.
- [25] Angers D A, Recous S. Decomposition of wheat straw and rye residues as affected by particle size[J]. *Plant and Soil*, 1997, **189**(2): 197-203.
- [26] 贺美, 王立刚, 王迎春, 等. 黑土活性有机碳库与土壤酶活性对玉米秸秆还田的响应[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(9): 1942-1951.
- He M, Wang L G, Wang Y C, *et al.* Response of the active carbon pool and enzymatic activity of soils to maize straw returning[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(9): 1942-1951.
- [27] Sun J N, Wang B C, Xu G, *et al.* Effects of wheat straw biochar on carbon mineralization and guidance for large-scale soil quality improvement in the coastal wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2014, **62**: 43-47.
- [28] 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.
- [29] 徐敏, 伍钧, 张小洪, 等. 生物炭施用的固碳减排潜力及农田效应[J]. 生态学报, 2018, **38**(2): 393-404.
- Xu M, Wu J, Zhang X H, *et al.* Impact of biochar application on carbon sequestration, soil fertility and crop productivity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(2): 393-404.
- [30] Smith J L, Collins H P, Bailey V L. The effect of young biochar on soil respiration[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, **42**(12): 2345-2347.
- [31] 李亚森, 丁松爽, 殷全玉, 等. 多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 915-923.
- Li Y S, Ding S S, Yin Q Y, *et al.* Effect of long-term biochar application on soil respiration in flue-cured tobacco planting fields in Henan Province[J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 915-923.
- [32] Kuzyakov Y, Bogomolova I, Glaser B. Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific ^{14}C analysis [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, **70**: 229-236.
- [33] Ventura M, Zhang C, Baldi E, *et al.* Effect of biochar addition on soil respiration partitioning and root dynamics in an apple orchard[J]. European Journal of Soil Science, 2014, **65**(1): 186-195.
- [34] Fang Y, Singh B, Singh B P, *et al.* Biochar carbon stability in four contrasting soils [J]. European Journal of Soil Science, 2014, **65**(1): 60-71.
- [35] Zheng Z M, Yu G R, Fu Y L, *et al.* Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: a trans-China based case study[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(7): 1531-1540.
- [36] Wang X J, Chen G H, Wang S Y, *et al.* Temperature sensitivity of different soil carbon pools under biochar addition [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(4): 4130-4140.
- [37] 邱立春, 孙跃龙, 王瑞丽, 等. 秸秆深还对土壤水分转移及产量的影响[J]. 玉米科学, 2015, **23**(6): 84-91.
- Qiu L C, Sun Y L, Wang R L, *et al.* Influence of deep-buried maize stalks on soil moisture transfer and maize yield[J]. Journal of Maize Sciences, 2015, **23**(6): 84-91.
- [38] 张延, 梁爱珍, 张晓平, 等. 不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1106-1113.
- Zhang Y, Liang A Z, Zhang X P, *et al.* Priming effects of soil moisture on soil respiration under different tillage practices[J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1106-1113.
- [39] 汤宏, 沈健林, 张杨珠, 等. 秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(1): 240-246.
- Tang H, Shen J L, Zhang Y Z, *et al.* Effect of rice straw incorporation and water management on soil microbial biomass carbon, nitrogen and dissolved organic carbon, nitrogen in a rice paddy field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, **27**(1): 240-246.
- [40] 侯建伟, 邢存芳, 邓晓梅, 等. 花椒林下土壤微生物数量和酶活性对生物质炭的响应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, **48**(4): 89-96.
- Hou J W, Xing C F, Deng X M, *et al.* Effects of biochar on soil microbe numbers and enzyme activities in pepper bush [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2020, **48**(4): 89-96.
- [41] 慕平, 张恩和, 王汉宁, 等. 连续多年秸秆还田对玉米耕层土壤理化性状及微生物量的影响[J]. 水土保持学报, 2011, **25**(5): 81-85.
- Mu P, Zhang E H, Wang H N, *et al.* Effects of continuous returning straw to maize tillth soil on chemical character and microbial biomass[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, **25**(5): 81-85.
- [42] Otsuka S, Sudiana I, Komori A, *et al.* Community structure of soil bacteria in a tropical rainforest several years after fire [J]. Microbes and Environments, 2008, **23**(1): 49-56.
- [43] 路怡青, 朱安宁, 张佳宝, 等. 免耕和秸秆还田对潮土酶活性及微生物量碳氮的影响[J]. 土壤, 2013, **45**(5): 894-898.
- Lu Y Q, Zhu A N, Zhang J B, *et al.* Effects of no-tillage and straw-return on soil enzyme activities and microbial biomass[J]. Soils, 2013, **45**(5): 894-898.
- [44] 白震, 张明, 宋斗妍, 等. 不同施肥对农田黑土微生物群落的影响[J]. 生态学报, 2008, **28**(7): 3244-3253.
- Bai Z, Zhang M, Song D Y, *et al.* Effect of different fertilization on microbial community in an arable mollisol[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(7): 3244-3253.
- [45] 李有兵, 把余玲, 李硕, 等. 作物残体与其生物炭配施对土壤有机碳及其自身矿化率的提升[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, **21**(4): 943-950.
- Li Y B, Ba Y L, Li S, *et al.* Combined addition of crop residues and their biochar increase soil organic C content and mineralization rate[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, **21**(4): 943-950.
- [46] 贺美, 王立刚, 朱平, 等. 长期定位施肥下黑土碳排放特征及其碳库组分与酶活性变化[J]. 生态学报, 2017, **37**(19): 6379-6389.
- He M, Wang L G, Zhu P, *et al.* Carbon emission characteristics, carbon library components, and enzyme activity under long-term fertilization conditions of black soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(19): 6379-6389.

CONTENTS

Concurrent Collection of Ammonia Gas and Aerosol Ammonium in Urban Beijing During National Celebration Days Utilizing an Acid-Coated Honeycomb Denuder in Combination with a Filter System	GU Meng-na, PAN Yue-peng, SONG Lin-lin, <i>et al.</i>	(1)
Heavy Pollution Episode in Tianjin Based on UAV Meteorological Sounding and Numerical Model	YANG Xu, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i>	(9)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of the Central Plains Urban Agglomeration in Autumn and Winter	MIAO Qing-qing, JIANG Nan, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(19)
Characteristics and Sources of Water-soluble Ion Pollution in PM _{2.5} in Winter in Shenyang	WANG Guo-zhen, REN Wan-hui, YU Xing-na, <i>et al.</i>	(30)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Baoding	LEI Wen-kai, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i>	(38)
Source Apportionment of Ambient Carbonyl Compounds Based on a PMF and Source Tracer Ratio Method: A Case Based on Observations in Nanjing	HU Kun, WANG Ming, WANG Hong-li, <i>et al.</i>	(45)
Characterization and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Tianjin in 2019	GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, XU Hong, <i>et al.</i>	(55)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Liuzhou	LIU Qi, LU Xing-lin, ZENG Peng, <i>et al.</i>	(65)
Characteristics of Ozone and Source Apportionment of the Precursor VOCs in Tianjin Suburbs in Summer	LUO Rui-xue, LIU Bao-shuang, LIANG Dan-ni, <i>et al.</i>	(75)
Transport Influence and Potential Sources of Ozone Pollution for Nanjing During Spring and Summer in 2017	XIE Fang-jian, LU Xiao-bo, YANG Feng, <i>et al.</i>	(88)
Ozone Pollution Trend in the Pearl River Delta Region During 2006-2019	ZHAO Wei, GAO Bo, LU Qing, <i>et al.</i>	(97)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Deposition in Areas Adjacent to a Large Petrochemical Enterprise	LI Da-yan, QI Xiao-bao, WU Jian, <i>et al.</i>	(106)
Quantitative Comparison of Methods to Assess the Airborne Particulate Matter Retention Capacity of Leaves	YUE Chen, LI Guang-de, XI Ben-ye, <i>et al.</i>	(114)
Emission Estimation and Fate Simulation of Dichlorvos in the Dongjiang River Watershed	ZHANG Bing, ZHANG Qian-qian, YING Guang-guo	(127)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Songhua River Basin of the Harbin Section and Ashe River	YANG Shang-le, WANG Xu-ming, WANG Wei-hua, <i>et al.</i>	(136)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of POPs Pollution in Sediments of Xiaoxingkai Lake in the Northeast China	LI Hui, LI Jie, SONG Peng, <i>et al.</i>	(147)
Distribution and Ecological Risk Assessment of PPCPs in Drinking Water Sources of Henan Province	ZHOU Ying, WU Dong-hai, LU Guang-hua, <i>et al.</i>	(159)
Occurrence Characteristics and Health Risk Assessment of Endocrine Disrupting Chemicals in Groundwater in Wuxi-Changzhou	WANG Shu-ting, RAO Zhu, GUO Feng, <i>et al.</i>	(166)
Seasonal Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Qingjiang River	LIU Zhao, ZHOU Hong, CAO Wen-jia, <i>et al.</i>	(175)
Metal Pollutions and Human Health Risks in Groundwater from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZHAO Yi, ZOU Sheng-zhang, <i>et al.</i>	(184)
Seasonal Variation of DOM Spectral Characteristics of Rivers with Different Urbanization Levels in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue	(195)
Distribution of Micro-plastics in the Soil Covered by Different Vegetation in Yellow River Delta Wetland	YUE Jun-jie, ZHAO Shuang, CHENG Hao-dong, <i>et al.</i>	(204)
Metagenomic Analysis Provides Insights into Bacterial Communities, Antibiotic Resistomes, and Public Health Risks in the Dongping Lake Reservoir	ZHANG Hong-na, CUI Na, SHEN Hong-miao	(211)
Mechanism of Algal Community Dynamics Driven by the Seasonal Water Bacterial Community in a Stratified Drinking Water Reservoir	YAN Miao-miao, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(221)
Community Structure, Function, and Influencing Factors of Planktonic Fungi in the Danjiangkou Reservoir	ZHENG Bao-hai, WANG Xiao-yu, LI Ying-jun, <i>et al.</i>	(234)
Changes in Algal Particles and Their Water Quality Effects in the Outflow River of Taihu Lake	GUO Yu-long, XU Hai, CHEN Xu-qing, <i>et al.</i>	(242)
Characteristics of Soil Nitrogen and Phosphorus Losses Under Different Land-use Schemes in the Shipanqiu Watershed	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i>	(251)
Influence of Antecedent Dry Days on Nitrogen Removal in Bioretention Systems	CHEN Yao, LI Xin-rui, ZHENG Shuang, <i>et al.</i>	(263)
Effect of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar on the Adsorption Characteristics and Adsorption Mechanisms of Ammonia Nitrogen in Rainfall Runoff	CHEN You-yuan, LI Pei-qiang, LI Xian-chi, <i>et al.</i>	(274)
Effect of Filter Medium on the Enhancement of Complete Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Process in a Tidal Flow Constructed Wetland	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, QIN Hui-an, <i>et al.</i>	(283)
Adsorption Effect and Mechanism of Aqueous Arsenic on FeMnNi-LDHs	LIAO Yu-mei, YU Jie, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	(293)
Combined Use of Zirconium-Modified Bentonite Capping and Calcium Nitrate Addition to Control the Release of Phosphorus from Sediments	ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(305)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	XIE Ya-wei, YU Chi-sheng, LI Fei-fei, <i>et al.</i>	(315)
Occurrence of Antibiotic Resistance Genes and Bacterial Community Structure of Different Sludge Samples During Microwave Pretreatment-Anaerobic Digestion	LI Hui-li, WU Cai-yun, TANG An-ping, <i>et al.</i>	(323)
Selenium Threshold for the Delimitation of Natural Selenium-Enriched Land	WANG Hui-yan, ZENG Dao-ming, GUO Zhi-juan, <i>et al.</i>	(333)
Improved Regression Kriging Prediction of the Spatial Distribution of the Soil Cadmium by Integrating Natural and Human Factors	GAO Zhong-yuan, XIAO Rong-bo, WANG Peng, <i>et al.</i>	(343)
Simulation Cadmium (Cd) Accumulation in Typical Paddy Soils in South China	DAI Ya-ting, FU Kai-dao, YANG Yang, <i>et al.</i>	(353)
Bioaccessibility and Health Risks of the Heavy Metals in Soil-Rice System of Southwest Fujian Province	LIN Cheng-qi, CAI Yu-hao, HU Gong-ren, <i>et al.</i>	(359)
Effects of Nano Material on Cadmium Accumulation Capacity and Grain Yield of Indica Hybrid Rice Under Wetting-drying Alternation Irrigation	YANG Ru, CHEN Xin-rui, ZHANG Ying, <i>et al.</i>	(368)
Regulation Control of a Tribasic Amendment on the Chemical Fractions of Cd and As in Paddy Soil and Their Accumulation in Rice	JIANG Yi, LIU Ya, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(378)
Combined Effect of Weathered Coal Based Amendments and Soil Water Management on Methylmercury Accumulation in Paddy Soil and Rice Grains	ZHENG Shun-an, WU Ze-ying, DU Zhao-ling, <i>et al.</i>	(386)
Effects of Fertilization Strategies on the Cadmium Resistance of Paddy Soil Microorganisms	ZHENG Kai-kai, MA Zhi-yuan, SUN Bo, <i>et al.</i>	(394)
Soil Enzyme Activity in <i>Picea schrenkiana</i> and Its Relationship with Environmental Factors in the Tianshan Mountains, Xinjiang	ZHANG Han, GONG Lu, LIU Xu, <i>et al.</i>	(403)
Effects of Farmland Abandonment on Soil Enzymatic Activity and Enzymatic Stoichiometry in the Loess Hilly Region, China	ZHONG Ze-kun, YANG Gai-he, REN Cheng-jie, <i>et al.</i>	(411)
Effect of Biochar on Soil Enzyme Activity & the Bacterial Community and Its Mechanism	FENG Hui-lin, XU Chen-sheng, HE Huan-hui, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Vegetation Restoration on the Structure and Function of the Rhizosphere Soil Bacterial Community of <i>Solanum rostratum</i>	ZHANG Rui-hai, SONG Zhen, FU We-dong, <i>et al.</i>	(433)
Response of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Rice Quality in a Yellow Soil Paddy Field to Biochar Combined with Nitrogen Fertilizer	SHI Deng-lin, WANG Xiao-li, LIU An-kai, <i>et al.</i>	(443)
Effects of Adding Straw and Biochar with Equal Carbon Content on Soil Respiration and Microbial Biomass Carbon and Nitrogen	HE Tian-tian, WANG Jing, FU Yun-peng, <i>et al.</i>	(450)
How Different Ratios of Straw Incorporation to Nitrogen Fertilization Influence Endogenous and Exogenous Carbon Release from Agricultural Soils	SUN Zhao-an, ZHANG Xuan, HU Zheng-jiang, <i>et al.</i>	(459)
Effect of Biochar and Chemical Fertilizer Mixture on Ammonia Volatilization and Phosphorus Fixation	YANG Wen-na, DENG Zhen-xin, LI Jiao, <i>et al.</i>	(467)
Effects of Film Materials on Ammonia Volatilization Emissions from a Paddy System After Reducing Nitrogen Fertilizer Application	YU Ying-liang, WANG Meng-fan, YANG Bei, <i>et al.</i>	(477)
Effects of Microplastics on Embryo Hatching and Intestinal Accumulation in Larval Zebrafish <i>Danio rerio</i>	ZHAO Jia, RAO Ben-qiang, GUO Xiu-mei, <i>et al.</i>	(485)
Urban Micro-Scale Thermal Environment Simulation Supported by UAV Thermal Infrared Data	YANG Shao-qi, FENG Li, TIAN Hui-hui, <i>et al.</i>	(492)
Estimation of the Urban Heat Island Intensity Change and Its Relationships with Driving Factors Across China Based on the Human Settlement Scale	SUN Yan-wei, WANG Run, GUO Qing-hai, <i>et al.</i>	(501)