

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.2
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响	李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)
珠三角地区利用 PM _{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)
广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性	范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)
扬州市 PM _{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估	董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)
博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源	宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)
某集约化肉鸡饲养场 PM _{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征	刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)
水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响	胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)
滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献	任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)
基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)
湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响	余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)
异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险	李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 王荣, 沈吉 (614)
珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素	杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)
北运河粪源微生物分布特征及健康风险评价	陈磊, 李蕾芳, 邱晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)
氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律	郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)
磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响	王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)
钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响	赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)
NH ₄ ⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响	郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)
3 种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较	吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)
硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制	代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 邵超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)
ZnTiO ₂ -TiO ₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)
高指数晶面 TiO ₂ 对铬的吸附及光催化去除	钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)
Fe ⁰ /海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B	张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)
不同滤料滤池启动期对铁锰离子的去除机制	蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)
SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能	张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)
一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制	薛文静, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺处理高盐废水及膜污染分析	王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)
多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除	刘淑惠, 周伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)
微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程	刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)
从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水	窦文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)
夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法	宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)
硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性	于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)
乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性	毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)
DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性	杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建国, 张帆, 吕廷廷 (791)
间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷	赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)
ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行	韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)
进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响	都叶奇, 于德爽, 甄建国, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)
ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性	李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)
不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响	李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)
调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)
C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响	张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)
基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性	王杨, 朱斌, 童俊, 白晓慧 (853)
黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征	姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)
基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化	祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)
硝化作用对盐碱湿地 N ₂ O 排放的影响及其环境因子分析	杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)
长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N ₂ O 和 NO 排放的影响	聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)
地膜覆盖和施氮对菜地 N ₂ O 排放的影响	倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)
双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系	肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)
多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响	李亚森, 丁松爽, 殷全玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)
桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征	丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)
工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析	李峰, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)
膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响	林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)
缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征	陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)
复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献	张彦军, 郭胜利 (961)
不同水平外源碳在稻田土壤中转化与分配的微生物响应特征	王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓扬悟, 葛体达, 吴金水 (970)
宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价	张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)
生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响	周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)
污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响	袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)
热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜禽粪混合物料及其甲烷高值化条件	卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)
《环境科学》征订启事 (547)	
《环境科学》征稿简则 (828)	
信息 (581, 933, 952)	

多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响

李亚森, 丁松爽, 殷全玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺*

(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)

摘要:为探究生物炭施用对土壤呼吸的影响, 采用5 a定位试验(2013~2017年)研究了不施生物炭(CK)、施用 $1.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭(T1)、施用 $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭(T2)、施用 $45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭(T3)这4种处理下土壤呼吸及土壤水热因子的动态变化规律。结果表明:①在土壤中连续5a施入中剂量生物炭(T2; $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)显著降低了烤烟生长季土壤呼吸速率, 降幅为25.89%;当施入量增至 $45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T3)时土壤呼吸速率显著增加, 增幅为21.48% ($P<0.05$)。②长期中剂量生物炭的添加显著降低了土壤异养呼吸速率和自养呼吸速率, 降幅分别为29.80%和28.75%;大剂量生物炭(T3; $45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)的施入显著增加了土壤异养呼吸速率, 增幅为28.88%。低剂量生物炭(T1; $1.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)和中剂量生物炭均显著增加土壤呼吸中自养呼吸的比例, 大剂量生物炭的施入显著增加了异养呼吸的比例($P<0.05$)。③低剂量生物炭显著降低了烤烟生长季土壤5 cm温度;大剂量生物炭显著降低了土壤5 cm湿度。土壤呼吸与土壤5 cm温度之间呈显著指数相关, 与土壤5 cm湿度之间未表现出显著相关($P<0.05$)。综上, 连续5a低剂量生物炭的施用对土壤呼吸无影响, 适量生物炭的施用具有固碳减排效应, 大剂量生物炭施用则会适得其反, 建议生物炭施用范围应控制在 $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以内。

关键词:生物炭; 土地呼吸; 土壤呼吸组分; 水热因子; 固碳减排

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0915-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201805157

Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province

LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, LI Jia-yi, ZHOU Di, LIU Guo-shun*

(Key Laboratory for Tobacco Cultivation of Tobacco Industry, College of Tobacco Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: A five year (2013-2017) experiment was conducted to explore the effects of biochar application on the dynamic changes in soil respiration, soil water, and heat factors under four treatments: CK (without biochar), T1 (with $1.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ biochar), T2 (with $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ biochar), and T3 (with $45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ biochar). The results showed that: ① the soil respiration rate in the growing season of flue-cured tobacco was significantly reduced by 25.89% under the five year application of medium-dose biochar (T2; $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) in soil, while it was significantly increased by 21.48% when the applied dose increased to $45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T3) ($P<0.05$). ② The long-term application of medium-dose biochar in the soil significantly reduced the soil heterotrophic respiration and autotrophic respiration rates by 29.80% and 28.75%, respectively. Meanwhile, the application of high-dose biochar (T3; $45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) significantly increased the heterotrophic respiration rate by 28.88%. In addition, the application of low-dose biochar (T1; $1.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) and medium-dose biochar significantly increased the proportion of autotrophic respiration, whereas the high-dose biochar application significantly increased the proportion of heterotrophic respiration ($P<0.05$). ③ The addition of low-dose biochar to the soil significantly reduced the soil temperature at 5 cm in the growing season of flue-cured tobacco, while the high-dose application significantly reduced the soil humidity. There was a significant index correlation between soil respiration and soil temperature at 5 cm but no significant correlation with soil humidity at 5 cm ($P<0.05$). Ultimately, the application of low-dose biochar for five years in soil had no effect on soil respiration, and the application of the proper amount of biochar had a carbon sequestration effect. Additionally, large-dose biochar application may be counterproductive. It is recommended that the application range of biochar should be controlled within $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$.

Key words: biochar; soil respiration; soil respiration components; hydrothermal factor; carbon sequestration and emission reduction

全球气候变暖和粮食安全是目前国际社会备受关注的课题,也是地球和人类所面临的严峻挑战,如何有效地实现固碳减排已成为目前科学研究相关领域的热点^[1]。土壤碳库是陆地生态系统碳库的重要组成部分,据统计,全球陆地土壤碳库碳储量约为1 500 Pg(以C计),占陆地生态系统总碳储量的67%^[2,3]。土壤呼吸在广义上的定义即由土壤表面向大气中释放CO₂的过程,其总量可占生物圈陆地生态系统呼吸总量的60%以上,甚至可达90%,对

全球的气候变化和碳循环起着关键的调控作用^[2,4]。因此,对土壤呼吸的研究和调控对土壤固碳减排和全球碳循环至关重要。

收稿日期: 2018-05-18; 修订日期: 2018-08-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200808); 中国烟叶公司技改项目(3401302); 河南中烟工业有限责任公司项目(ZW2014005)

作者简介: 李亚森(1994~),女,硕士研究生,主要研究方向为烟草栽培生理生化与土壤微生态, E-mail: 935720849@qq.com

* 通信作者, E-mail: liugsh1851@163.com

生物炭是指农业废弃物、林业废弃物、水生生物、人类及动物排泄物、工业废弃物等有机废弃物,在 250~700℃ 缺氧或低氧条件下,热解炭化而成的一类孔隙结构发达、含碳量高、比表面积大、吸附性能较强和抗分解能力极强的高度芳香化的含碳物质^[5-8]。已有大量研究表明生物炭是一种经济、环境友好型的土壤改良剂^[5,9-12],并在土壤固碳减排^[5,13-16]方面表现出巨大的潜力。同时,也有研究表明在土壤中施用生物炭对土壤固碳减排无显著影响甚至促进了温室气体的排放^[15,17]。因此,生物炭作为一种新型材料在大量施用于农田之前,还需对其生态环境效益做更多深入的研究^[18]。截止目前,有关生物炭施入土壤后的长期生态效益的研究还十分缺乏,探究长期生物炭输入对土壤碳通量的影响,对于认识生物炭对土壤碳库和生态环境的作用有重要指导意义。本研究拟通过河南烟叶种植区田间长期定位试验原位监测施用生物炭后土壤呼吸、土壤温度和湿度的变化,探究生物炭对土壤碳通量、土壤呼吸组分及水热因子的影响,以期生物炭的固碳减排效应提供科学依据和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

定位试验在河南农业大学许昌校区进行(东经 113°81', 北纬 34°14')。研究区属暖温带亚湿润季风气候,四季分明,雨热同期。年平均气温 15℃ 左右,全年日照时数 2280 h,年降水量约 700 mm,无霜期 217 d。供试土壤为褐土,土壤质地为砂壤土,试验前植烟土壤 0~20 cm 土层基本理化性质为:有机质 20.17 g·kg⁻¹,碱解氮 81.6 mg·kg⁻¹,速效磷 18.3 mg·kg⁻¹,速效钾 61.19 mg·kg⁻¹,pH 7.95。试验所用生物炭为在 400℃ 条件下限氧、炭化 30 min,粉碎后过 2 mm 筛制成的花生壳炭,由河南省生物炭技术工程实验室提供。其基本理化指标为:pH 8,全碳 51.44%,全氮 1.23%,C/N 41.82,氢 2.76%,氧 2.76%,比表面积 1.89 m²·g⁻¹,阳离子交换量 16.2 cmol·kg⁻¹。烤烟品种为 K326。

1.2 试验方法

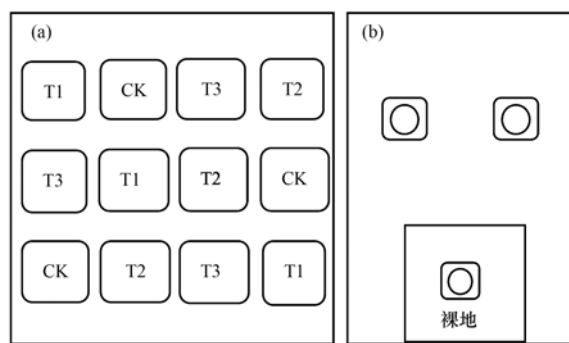
定位试验始于 2013 年,采用随机区组设计,共设 4 个生物炭水平:施用化肥(CK);化肥 + 1.5 t·hm⁻²生物炭(T1);化肥 + 15 t·hm⁻²生物炭(T2);化肥 + 45 t·hm⁻²生物炭(T3)。生物炭于每年翻耕时(烤烟移栽前一周)一次性撒施,并与表层土壤(0~20 cm)均匀混合。试验所用化肥分别为硝酸铵、磷酸二氢钾、硫酸钾,各试验小区化肥氮素施

用量为 45 kg·hm⁻²,氮、磷、钾施用比例为 1:1:3,根据当地施肥习惯,70% 的化肥于整地后移栽前条施,30% 的化肥于移栽时穴施。每个处理设 3 次重复,共计 12 个小区,小区面积为 6 m × 18 m。种植体系为一年一茬,烤烟于每年 5 月 1 日移栽,田间栽培管理措施严格按照当地优质烟叶生产管理要求进行。

1.3 土壤呼吸、温度和水分的测定

土壤呼吸采用 LI-8100 闭路式土壤碳通量测量系统(LI-COR, Lincoln, USA)测定。为避免误差,在初次测量土壤呼吸速率的前 24 h 安装好 PVC 环,每个小区内设置 2 个 PVC 环,在各小区设置相应裸地(3 m × 3 m),每个裸地内设置 1 个 PVC 环,共计 36 个 PVC 环(图 1),裸地施肥和灌溉措施与各处理烟田相同。PVC 环顶端距离地面为 3 cm,安装好的 PVC 环留在试验小区内,直至测量结束。试验期间及时清除裸地及 PVC 环内所有地上植物,每个 PVC 环测量时间为 90 s,在 2017 年烤烟生长季(5 月 1 日至 10 月 1 日)于测定日的 08:30~11:30 之间进行土壤呼吸测定,代表本日土壤呼吸平均值,土壤呼吸测定频率为每 10 d 测定一次,雨天除外。为剔除土壤呼吸日变化对测量结果的影响,每次测量时均按照不同的顺序对观测点进行测定,并将裸地测得的土壤呼吸值视为土壤异养呼吸(R_s),将农田垄上呼吸与垄间呼吸的均值视为土壤总呼吸(R_t),将土壤总呼吸与裸地土壤呼吸的差值视为土壤自养呼吸(R_m)。

土壤温、湿度分别由 LI-8100 土壤碳通量测量系统自带的温、湿度探针测得,测定深度为 5 cm,用于分析土壤温、湿度对土壤呼吸的影响。



(a) 样方示意; (b) PVC 土壤呼吸环示意

图 1 生物炭定位试验设计示意

Fig. 1 Experimental design of biochar location test site

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 23.0 统计软件进行数据处理和制图。不同处理间差异显著性用 LSD 最小显著差数法进行检验($P < 0.05$)。采用

SPSS 软件进行土壤呼吸与环境因子的 Pearson 相关分析。

土壤呼吸与土壤温度之间的关系用经验指数方程模拟:

$$R_t = ae^{bT} \quad (1)$$

式中, R_t 为测得的土壤总呼吸 [以 CO_2 计, $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], T 为土壤表层 5 cm 温度 ($^{\circ}\text{C}$), a 、 b 为拟合参数。

温度敏感系数:

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (2)$$

式中, Q_{10} 为温度敏感系数, 含义是温度每升高 10°C , 土壤呼吸增加的倍数。

土壤呼吸与土壤 5 cm 温度和湿度之间的关系采用对数变换后的方程拟合:

$$\ln R_t = c_1 + c_2 T + c_3 W + c_4 TW$$

式中, R_t 和 T 同式(1), W 为土壤含水量 (%), c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 为拟合参数。

2 结果与分析

2.1 多年施用生物炭对土壤总呼吸季节变化的影响

在烤烟的整个生长季中, 烟田土壤总呼吸存在明显的季节格局(图 2), 各处理土壤总呼吸速率均呈先增加后降低的趋势, 在 8 月初达到一个峰值。方差分析结果显示, 在烤烟生长季, 不同处理间土壤总呼吸速率存在显著性差异。总体来看(图 3), 在烤烟整个生育期内, 各处理土壤总呼吸速率依次表现为 $T3 > CK > T1 > T2$, $T1$ 处理的土壤总呼吸较 CK 处理有所降低, 降幅为 6.88%, 但未表现出具有统计学意义的差异, $T2$ 处理的土壤总呼吸较 CK 处理显著降低 ($P < 0.05$), 降幅为 25.89%; $T3$ 处理的土壤总呼吸较 CK 处理则显著增加 ($P < 0.05$), 增幅为 21.48%。从图 8 可知, 不同生物炭施用量对烤烟生长季土壤总呼吸存在显著影响, 较不施生物炭, 施用 $1.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物炭均可降低烤烟生长季土壤总呼吸速率, 且 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的施用量的降幅达到显著水平, 而施用 $45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物炭显著增加了烤烟生长季土壤总呼吸速率。

方差分析结果显示(图 4), 在烤烟的不同生育期, 不同处理间土壤总呼吸速率均存在差异。从总体上看, 除还苗期外, 在其他 3 个时期, 各处理土壤呼吸速率之间的关系均表现为 $T3 > CK > T1 > T2$ 。在烤烟还苗期, 施用生物炭处理较 CK 处理均增加了土壤呼吸速率, 增幅分别为 0.74%、5.78% 和 64.73%, 且 $T3$ 处理的增幅达到了显著水平 ($P < 0.05$)。在烤烟伸根期, $T1$ 和 $T2$ 处理土壤呼吸速率相较于 CK 处理均有所降低, 降幅分别为

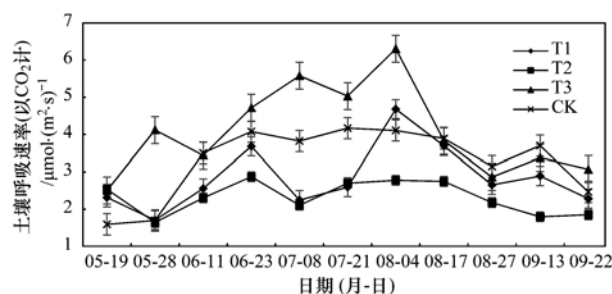


图 2 连续 5 a 施用生物炭下烤烟生长季土壤呼吸的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of soil respiration in the growing season of flue-cured tobacco during the five-year application of biochar

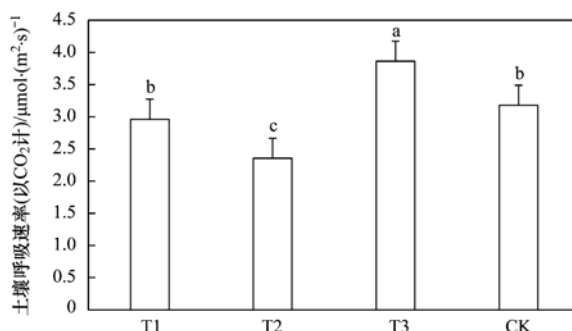


图 3 连续 5 a 施用生物炭对烤烟生长季土壤呼吸的影响

Fig. 3 Soil respiration in flue-cured tobacco growing season during the five-year application of biochar

13.20% 和 21.09%, 且 $T2$ 处理显著降低了烤烟伸根期土壤呼吸速率 ($P < 0.05$); $T3$ 处理较 CK 处理则显著增加了土壤呼吸速率 ($P < 0.05$)。在烤烟旺长期, $T1$ 和 $T2$ 处理土壤呼吸速率较 CK 处理有所降低, 降幅分别为 6.14% 和 29.69%, 但均未达到显著水平; $T3$ 处理土壤呼吸速率较 CK 处理有所增加, 增幅为 28.14%, 但未表现出具有统计学意义的差异。在烤烟成熟期, $T1$ 和 $T2$ 处理较 CK 处理均在一定程度上降低了土壤呼吸速率, 降幅分别为 1.64% 和 31.34%, 且 $T2$ 处理的降幅达到显著水平 ($P < 0.05$); $T3$ 处理的土壤呼吸速率较 CK 处理有所增加, 增幅为 11.10%, 未达到显著水平。从中可

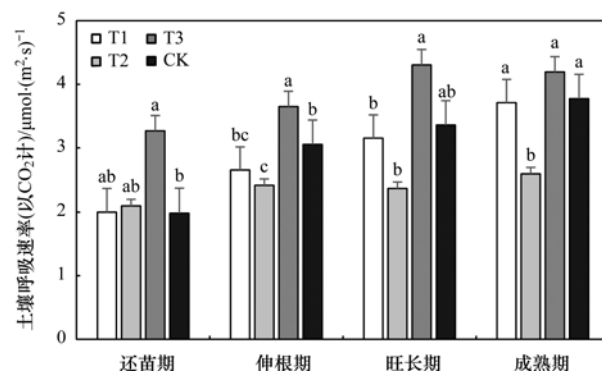


图 4 连续 5 a 生物炭施用对烤烟不同生育期土壤呼吸的影响

Fig. 4 Soil respiration in different growth stages of flue-cured tobacco during the five-year application of biochar

知,施用生物炭处理在烤烟生长季初期较常规施肥明显促进了土壤呼吸速率,但随着时间推移,该效应消失, $1.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的施入量对土壤呼吸呈现出抑制效应,且 T2 处理达到了显著水平.

2.2 多年施用生物炭对土壤呼吸组分的影响

2.2.1 多年施用生物炭对土壤异养呼吸的影响

不同处理烤烟生长季的土壤异养呼吸存在明显的季节格局(图 5),总体呈先增加后降低的趋势,在 8 月初达到一个峰值. 方差分析结果显示,在烤烟生长季,不同处理间的土壤异养呼吸存在显著差异. 从整体上看(图 6),在烤烟整个生育期内,各处理土壤异养呼吸速率依次表现为 $\text{T3} > \text{CK} > \text{T1} > \text{T2}$. T1 处理的平均土壤异养呼吸相较于 CK 有所降低,降幅为 11.76%,但差异未达到显著水平. T2 处理的土壤异养呼吸比 CK 处理显著降低了 29.80% ($P < 0.05$). T3 处理的土壤异养呼吸比 CK 处理显著增加了 28.88% ($P < 0.05$). 各处理土壤异养呼吸占土壤总呼吸的比例分别为 58.46%、58.44%、65.45% 和 61.69%. 方差分析结果显示, T1 和 T2 处理较 CK 处理显著降低了土壤呼吸中异养呼吸的比例($P < 0.05$),而 T3 处理较 CK 处理则显著增加了异养呼吸的比例($P < 0.05$). 从中可知, $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物炭施用量较不施生物炭可显著降低烤烟生长季土壤异养呼吸速率,并显著降低了土壤异养呼吸占土壤总呼吸的比重. 而 $45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物炭施用量较不施生物炭则显著促进了烤烟生长季土壤异养呼吸,同时也显著增加了土壤异养呼吸占总呼吸的比例.

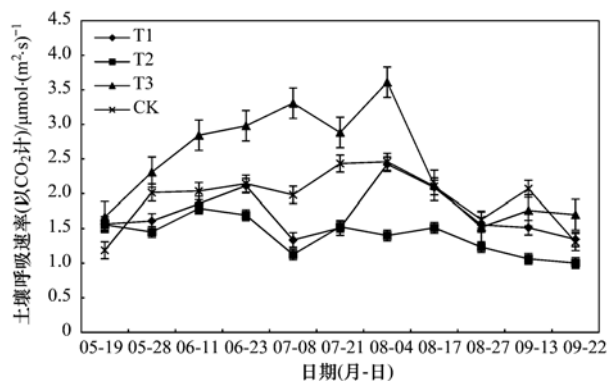


图 5 连续 5 a 施用生物炭下烤烟生长季土壤异养呼吸的动态变化

Fig. 5 Dynamic changes in soil heterotrophic respiration in the growing season of flue-cured tobacco during the five-year application of biochar

2.2.2 多年施用生物炭对土壤自养呼吸的影响

多年施用生物炭对烤烟生长季土壤自养呼吸的影响如图 7 所示,整个烤烟生长季各处理土壤自养呼吸的变化趋势基本相同,即总体上都呈现出先增

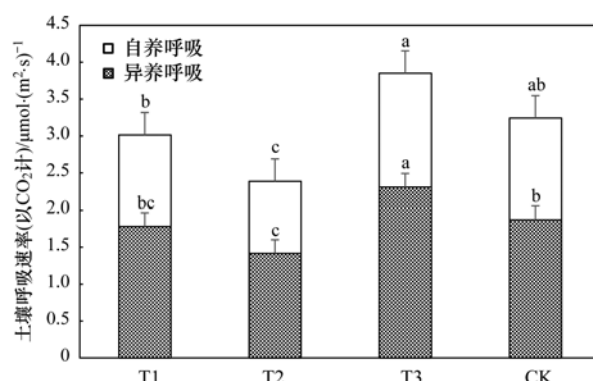


图 6 连续 5 a 施用生物炭对烤烟生长季土壤呼吸组分的影响

Fig. 6 Soil respiration components in flue-cured tobacco growing season during the five-year application of biochar

加后降低的趋势,还苗期和伸根期土壤自养呼吸速率最低,随着温度升高和植株生长在 8 月烤烟旺长期时达到峰值,再伴随温度的降低和烟叶的成熟缓慢降低. 同时,方差分析结果显示(图 6),不同处理间土壤自养呼吸存在显著性差异,整体上看,表现为 $\text{T3} > \text{CK} > \text{T1} > \text{T2}$. 其中, T1 处理土壤自养呼吸相较于 CK 处理有小幅降低,降幅为 7.27%,但未达到显著水平. T2 处理土壤自养呼吸比 CK 处理显著降低了 28.75% ($P < 0.05$). T3 处理土壤自养呼吸较 CK 处理有所增加,增幅为 16.65%,但未表现出具有统计学意义的差异. 各处理土壤自养呼吸对总呼吸的贡献分别为 41.54%、41.56%、34.55% 和 38.31%,方差分析结果显示,相较于 CK 处理, T1 和 T2 处理土壤自养呼吸占总呼吸的比例显著增加($P < 0.05$),而 T3 处理则显著降低了土壤自养呼吸对土壤总呼吸的贡献($P < 0.05$).

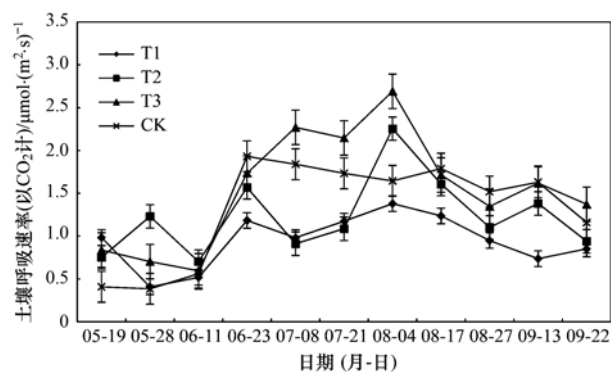


图 7 连续 5 a 施用生物炭下烤烟生长季土壤自养呼吸的动态变化

Fig. 7 Dynamic changes in soil autotrophic respiration in the growing season of flue-cured tobacco during the five-year application of biochar

2.3 多年施用生物炭对土壤水热因子的影响

2.3.1 多年施用生物炭对土壤温度、水分的影响

各处理土壤 5 cm 温度具有相似的变化趋势,总体呈先上升再下降的趋势,在 8 月初达到一个峰

值(图 8)。烤烟旺长期各处理土层温度达到最高值,4 个处理最高温度分别为 30.74、30.88、31.37 和 30.29℃。5 cm 土层温度最低值出现在烤烟成熟期,各处理分别为 21.74、21.48、23.42 和 24.25℃。方差分析结果显示,不同处理间土壤 5 cm 温度存在显著性差异。从整体上看,不同处理间土壤平均温度大小依次为 CK > T3 > T2 > T1。其中, T1 处理土壤温度比 CK 处理显著降低了 4.24% ($P < 0.05$); T2 和 T3 处理土壤温度较 CK 处理有所降低,降幅分别为 2.98% 和 1.40%,但差异均未达到显著水平。从图 8 可知, $1.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物炭施用量较不施生物炭可显著降低土壤 5cm 温度,而 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物炭施用量较不施生物炭对土壤 5 cm 温度并无显著影响。

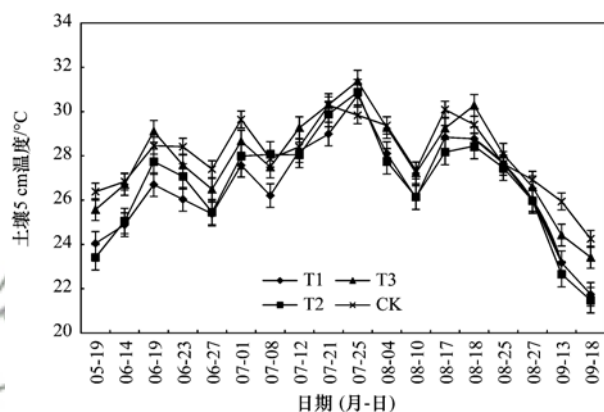


图 8 连续 5 a 生物炭施用下烤烟生长季土壤 5 cm 温度的动态变化

Fig. 8 Dynamic changes in soil temperature at 5 cm in the growing season of flue-cured tobacco during the five-year application of biochar

土壤含水率主要受降雨和农田灌溉的影响,在烤烟生长季,各处理间土壤 5 cm 湿度具有相似的变化趋势,总体呈波动变化,未呈现出明显的季节格局(图 9)。方差分析结果显示,烤烟生长季不同处理间土壤 5 cm 湿度存在显著性差异,其中, T1 处理较 CK 处理降低了 2.96%, T2 处理较 CK 处理增加了 3.75%,均未表现出具有统计学意义的差异, T3 处理比 CK 处理显著降低了 9.93% ($P < 0.05$)。从中可知, $1.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物炭施用量对土壤湿度并无显著影响,而连续多年 $45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物炭施用量可显著降低土壤含水量。

2.3.2 土壤呼吸与土壤温度、湿度之间的关系

土壤温度和土壤湿度是影响土壤呼吸速率的主要因素。目前已有许多关于土壤呼吸与土壤温度和土壤湿度的相关性研究^[19,20],其结果显示土壤温度与土壤呼吸之间呈指数相关,而土壤湿度对土壤呼吸的影响通常较为复杂,表现为在不同程度上与土

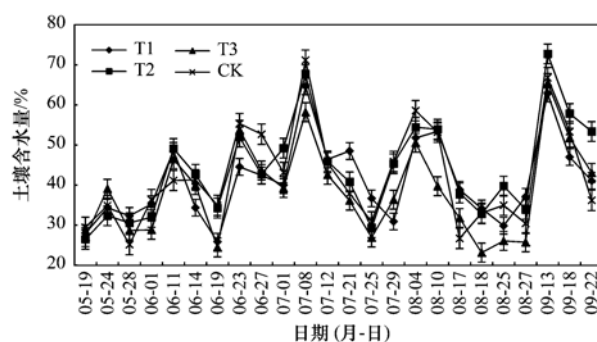


图 9 连续 5 a 生物炭施用下烤烟生长季土壤 5 cm 湿度的动态变化

Fig. 9 Dynamic changes in soil humidity at 5 cm depth in the growing season of flue-cured tobacco during the five year application of biochar

壤温度相互协调共同作用于土壤呼吸。本研究结果发现土壤呼吸与土壤 5 cm 温度呈极显著相关($P < 0.01$),单独分析土壤呼吸与土壤湿度的关系时,两者之间并未表现出明显的相关关系(表 1)。对土壤呼吸和土壤温度之间的关系通过指数方程进行模拟,结果如表 2,发现土壤温度与呼吸之间存在很好的指数相关关系,其中土壤温度对土壤呼吸的影响可达 55% ~ 65%。 Q_{10} 值为土壤温度敏感性指数,代表温度每升高 10℃ 时土壤呼吸速率的增加倍数,其值越高表示土壤温度对土壤呼吸的影响越大。本试验中,各处理 Q_{10} 值分别如表 2 所示,总体呈现为 $T3 > CK > T1 > T2$ 。其中 T1 和 T2 较 CK 显著降低($P < 0.05$),降幅分别为 29.36% 和 38.30%, T3 相较于 CK 显著增加($P < 0.05$),增幅为 16.06%。表示生物炭的施用可影响土壤呼吸温度敏感性, $1.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的施用量可使土壤呼吸温度敏感性降低,而 $45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物炭施用量可增加土壤呼吸温度敏感性。通过双因素拟合研究土壤呼吸与土壤水热因子之间的关系(表 3),结果显示水热因子对土壤呼吸的影响达到了极显著水平($P < 0.001$),且各处理对水热因子的响应程度表现为 $T3 > T2 > CK > T1$,与上述土壤 5 cm 温度单因素拟合结果一致,再次说明该试验中土壤 5 cm 湿度与土壤呼吸的关系并不明显。

表 1 不同处理土壤呼吸与土壤水热因子相关性分析¹⁾

Table 1 Correlation analysis of soil respiration and soil hydrothermal factors under different treatments

	5 cm 土壤温度	5 cm 土壤湿度
T1	0.833 **	0.339
T2	0.792 **	0.274
T3	0.753 **	0.411
CK	0.814 **	0.341

1) * 表示显著相关 $P < 0.05$, ** 表示极显著相关 $P < 0.01$

表2 土壤呼吸与5 cm土壤温度的拟合方程
Table 2 Fitted equations of soil respiration and soil temperature at 5 cm soil depth

处理	拟合方程	R^2	P	Q_{10} 值
T1	$R_t = 0.41e^{0.1125T}$	0.55	<0.01	3.08
T2	$R_t = 0.47e^{0.1125T}$	0.63	<0.01	2.69
T3	$R_t = 0.23e^{0.1125T}$	0.65	<0.01	5.06
CK	$R_t = 0.34e^{0.1125T}$	0.58	<0.01	4.36

表3 土壤呼吸与5 cm土壤温度(T)、湿度(W)的双因素拟合方程
Table 3 Composite model derived for the combined influence of soil temperature (T) and soil moisture (W) at 5 cm soil depth on soil respiration

处理	拟合方程	R^2	P
T1	$R_t = -1.237 + 0.115T + 0.024W$	0.542	<0.001
T2	$R_t = -2.104 + 0.093T + 0.009W$	0.634	<0.001
T3	$R_t = -2.718 + 0.14T - 0.037W + 0.001TW$	0.649	<0.001
CK	$R_t = -1.583 + 0.086T + 0.002W$	0.582	<0.001

3 讨论

3.1 多年施用生物炭对土壤呼吸的影响

在烤烟生长季内植烟土壤呼吸速率呈现出先增加后降低的变化趋势,在烤烟还苗期和伸根期,由于烤烟根系弱小,且温度较低,根系呼吸和微生物呼吸都处于微弱水平,所以土壤呼吸速率较低.随着土壤温度的升高及烤烟根系的发育,微生物呼吸和根系呼吸相应增强,使烤烟旺长期(8月)的土壤呼吸速率达到峰值.在烤烟成熟期,伴随根系呼吸的减弱以及温度的下降,土壤呼吸速率又出现缓慢降低的趋势.本研究发现,多年施用生物炭较单施化肥显著影响了烤烟生长季土壤呼吸速率,当生物炭施用量为 $1.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时均可降低土壤呼吸速率,但当施用量增至 $45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时却增加了土壤呼吸速率.即土壤呼吸速率并非与生物炭施用量呈完全负相关或正相关关系,而是在一定阈值内的生物炭施用可抑制土壤呼吸,达到固碳减排的效果,并在该范围内随着生物炭施用量的增加,固碳减排效果越好.但超过一定阈值,土壤呼吸速率则会随着生物炭施用量的增加而增加,从而促进烤烟生长季土壤呼吸,不利于农田生态系统的固碳减排.田冬等^[21]在油菜/玉米轮作农田土壤呼吸对生物炭还田的响应的研究中发现, $5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物炭施用量可显著降低土壤呼吸,较不施生物炭降低幅度可达31.14%,该用量在本研究结果适用范围内.Kim等^[22]的研究也显示不添加生物炭的处理土壤碳排放显著高于添加生物炭处理.但Liu等^[23]在生物炭对中国农田土壤呼吸的影响的研究中发现,生物炭对土壤呼吸并无显著性影响,这可能与其生物

炭材料、生物炭用量、土壤类型、作物种类和试验时间的长短有一定关系,需要根据不同情况进一步分析.同时,本研究发现生物炭在施入土壤后的不同时期作用效果存在显著差异,不同生物炭施用量在施入土壤前期(一个月左右)较常规施肥明显增加了土壤呼吸,而随着时间的推移T1和T2逐渐呈现出抑制呼吸的效果,这与Smith等^[24]的研究结果相似.对这一现象,有研究解释其原因为生物炭的施入改善了土壤的微环境并增加了土壤中易分解有机质的含量,从而导致短期内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^[25,26].

3.2 多年施用生物炭对土壤呼吸组分的影响

根据土壤呼吸底物来源的不同,可将土壤呼吸分为自养呼吸和异养呼吸两大类.研究各呼吸组分对土壤总呼吸的贡献对明确土壤呼吸机理及农田生态系统土壤固碳减排具有重要意义.本研究结果显示在烤烟生长季,自养呼吸对土壤总呼吸的贡献率可达34.55%~41.56%,Kuzakov等^[27]采用¹⁴C同位素示踪法对土壤呼吸各组分贡献率的研究中发现,根系呼吸对总呼吸的贡献在15%~60%间,与本研究结果相近.同时本研究发现生物炭对土壤呼吸各组分对土壤总呼吸的贡献有显著影响,其中 $1.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物炭施用量显著增加了土壤自养呼吸的比例,可能该梯度的生物炭用量在一定程度上提高了土壤持水性能^[28,29]和阳离子交换量^[30,31],增加了土壤活性有机碳含量^[32~34]和养分吸持^[35,36],促进了烤烟根系的发育,从而促使土壤自养呼吸速率增加.但是,由于在本研究中采取设置裸地的方法来区分土壤呼吸各组分,用垄内土壤总呼吸与裸地呼吸的差值代表根系呼吸,而未考虑植被覆盖对土壤微生态的影响,导致研究结果与严格意义上的根系呼吸有一定差异,所以在今后的研究中应尽量保证裸地与垄内的土壤微环境一致,减少对各呼吸组分的估算误差.

3.3 多年施用生物炭下土壤呼吸与水热因子之间的关系

土壤温、湿度是土壤呼吸的重要影响因子,在本研究中,施用生物炭显著影响了土壤5 cm温、湿度.温度不仅可以改变土壤微生物与酶活性,也会对植物根系生长、光合碳的积累和分配产生影响,所以,土壤温度与土壤微生物呼吸和根系呼吸均密切相关^[21].本研究表明,土壤呼吸与土壤温度的变化趋势基本一致,且土壤呼吸与土壤5 cm温度之间存在显著的指数相关性,土壤温度可解释土壤呼吸变化的55%~65%,不同生物炭施用量均明显降

低了土壤 5 cm 温度, 这与张阳阳等^[18]的研究结果相似, 生物炭施用会造成裸地和作物灌层结构发展较弱条件下的地表反照率降低, 但由于烤烟的叶面积指数增长速度较快, 很大程度上掩盖了生物炭引起的地表颜色变化, 因此减小了生物炭处理与对照处理之间地表反照率的差异. 同时有研究表明, 生物炭对土壤温度有“削高填低”的作用, 即可有效地平缓土壤温度的剧烈变化^[37], 烤烟生长季土壤日均温较高, 生物炭的施用可能在一定程度上缓冲了土壤温度的变化. 本试验测得的 Q_{10} 值范围为 2.69 ~ 5.06, 这与 Zheng 等^[38]测定的农田生态系统 Q_{10} 范围(1.28 ~ 4.75)相接近. 本研究结果显示, 1.5 t·hm⁻²和 15 t·hm⁻²的生物炭施用量显著降低了土壤呼吸温度敏感性, 而 45 t·hm⁻²显著增加了土壤呼吸温度敏感性, 这一方面是因为生物炭本身对土壤温度的“削高填低”作用, 另一方面是因为低剂量和中剂量的生物炭施用抑制了土壤呼吸, 而大剂量的生物炭施用促进了土壤呼吸, 所以导致在相同的温度波动水平下, 不同处理间土壤呼吸的波动水平也产生差异. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素有很多, 可能来源于土壤有机碳组分的温度敏感性差异, 也可能来源于土壤生物群落温度敏感性的差异^[39]. 张阳阳等^[18]的研究发现, 施用生物炭可降低土壤呼吸温度敏感系数 Q_{10} 值; 也有研究发现生物炭的施用显著增加了 Q_{10} ^[19]. 因此, 关于生物炭的输入对 Q_{10} 的影响有待进一步研究. 同时, 本试验研究结果发现土壤呼吸与土壤湿度之间并无显著相关关系, 这与李虎等^[40]和张宇等^[41]的研究结果相似. 土壤湿度与土壤呼吸之间的关系存在极大的复杂性和不确定性^[41]. 相关研究显示土壤温度与土壤湿度之间呈现密切相关关系^[42], 也有研究发现土壤湿度对土壤呼吸的影响取决于与土壤温度之间的相互协调情况^[43~45], 而单独分析土壤湿度对土壤呼吸的影响时, 发现两者之间并不呈现显著相关^[21], 所以, 土壤呼吸对土壤湿度的响应关系有待深入研究.

4 结论

(1) 连续多年施用生物炭显著影响了烤烟生长季土壤呼吸, 不同生物炭施用量对土壤呼吸的影响存在巨大差异. 适量的生物炭施用可显著抑制烤烟生长季土壤呼吸, 具有明显的土壤减排效应.

(2) 生物炭的施用显著影响了土壤呼吸组分. 连续多年施用低剂量和中剂量的生物炭显著增加了土壤自养呼吸的比例, 大剂量生物炭的施用显著降低了土壤自养呼吸的比例.

(3) 施用生物炭显著影响了土壤 5 cm 温、湿度和土壤呼吸温度敏感系数 Q_{10} , 且不同生物炭施用量的影响效果存在差异. 土壤呼吸与土壤 5 cm 温度呈显著指数相关, 与土壤 5 cm 湿度间相关关系并不显著.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 陈泮勤, 黄耀, 于贵瑞. 地球系统碳循环[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [3] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. Science, 1994, **263**(5144): 185-190.
- [4] Giais P, Tans P P, Trolier M, *et al.* A large northern hemisphere terrestrial CO₂ sink indicated by the ¹³C/¹²C ratio of atmospheric CO₂ [J]. Science, 1995, **269**(5227): 1098-1102.
- [5] Colantoni A, Evic N, Lord R, *et al.* Characterization of biochars produced from pyrolysis of pelletized agricultural residues [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, **64**: 187-194.
- [6] Jin J, Kang M J, Sun K, *et al.* Properties of biochar-amended soils and their sorption of imidacloprid, isoproturon, and atrazine [J]. Science of the Total Environment, 2016, **550**: 504-513.
- [7] Ren X H, Sun H W, Wang F, *et al.* The changes in biochar properties and sorption capacities after being cultured with wheat for 3 months [J]. Chemosphere, 2016, **144**: 2257-2263.
- [8] Han Y T, Cao X, Ouyang X, *et al.* Adsorption kinetics of magnetic biochar derived from peanut hull on removal of Cr (VI) from aqueous solution: Effects of production conditions and particle size [J]. Chemosphere, 2016, **145**: 336-341.
- [9] Tan X F, Liu Y G, Gu Y L, *et al.* Biochar-based nanocomposites for the decontamination of wastewater: a review [J]. Bioresource Technology, 2016, **212**: 318-333.
- [10] Liu Y X, Lu H H, Yang S M, *et al.* Impacts of biochar addition on rice yield and soil properties in a cold waterlogged paddy for two crop seasons [J]. Field Crops Research, 2016, **191**(3): 161-167.
- [11] Mohamed B A, Ellis N, Kim C S, *et al.* Engineered biochar from microwave-assisted catalytic pyrolysis of switchgrass for increasing water-holding capacity and fertility of sandy soil [J]. Science of the Total Environment, 2016, **566-567**: 387-397.
- [12] Bass A M, Bird M I, Kay G, *et al.* Soil properties, greenhouse gas emissions and crop yield under compost, biochar and co-composted biochar in two tropical agronomic systems [J]. Science of the Total Environment, 2016, **550**: 459-470.
- [13] Purakayastha T J, Das K C, Gaskin J, *et al.* Effect of pyrolysis temperatures on stability and priming effects of C₃ and C₄ biochars applied to two different soils [J]. Soil and Tillage Research, 2016, **155**(4): 107-115.
- [14] Plaza C, Giannetta B, Fernández J M, *et al.* Response of different soil organic matter pools to biochar and organic fertilizers [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, **225**: 150-159.
- [15] Xu X Y, Kan Y, Zhao L, *et al.* Chemical transformation of CO₂

- during its capture by waste biomass derived biochars [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **213**: 533-540.
- [16] Wu M X, Han X G, Zhong T, *et al.* Soil organic carbon content affects the stability of biochar in paddy soil [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, **223**: 59-66.
- [17] Subedi R, Taupe N, Pelissetti S, *et al.* Greenhouse gas emissions and soil properties following amendment with manure-derived biochars: Influence of pyrolysis temperature and feedstock type [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **166**: 73-83.
- [18] 张阳阳, 胡学玉, 邹娟, 等. 生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38** (4): 1622-1632.
- Zhang Y Y, Hu X Y, Zou J, *et al.* Effects of biochar on surface albedo and soil respiration in suburban agricultural soil [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1622-1632.
- [19] Reth S, Reichstein M, Falge E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO₂ efflux-A modified model [J]. *Plant and Soil*, 2005, **268**(1): 21-33.
- [20] 张丁辰, 蔡典雄, 代快, 等. 旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应[J]. *生态学报*, 2013, **33**(6): 1916-1925.
- Zhang D C, Cai D X, Dai K, *et al.* Soil respiration and its responses to soil moisture and temperature under different tillage systems in dryland maize fields [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(6): 1916-1925.
- [21] 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.
- [22] Kim Y S, Makoto K, Takakai F, *et al.* Greenhouse gas emissions after a prescribed fire in white birch-dwarf bamboo stands in northern Japan, focusing on the role of charcoal [J]. *European Journal of Forest Research*, 2011, **130**(6): 1031-1044.
- [23] Liu X Y, Zheng J F, Zhang D X, *et al.* Biochar has no effect on soil respiration across Chinese agricultural soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **554-555**: 259-265.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Jones D L, Murphy D V, Khalid M, *et al.* Short-term biochar-induced increase in soil CO₂ release is both biotically and abiotically mediated [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(8): 1723-1731.
- [27] Kuzyakov Y, Ehrensberger H, Stahr K. Carbon partitioning and below-ground translocation by *Lolium perenne* [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**(1): 61-74.
- [28] 王丹丹, 郑纪勇, 颜永毫, 等. 生物炭对宁南山区土壤持水性能影响的定位研究[J]. *水土保持学报*, 2013, **27**(2): 101-104, 109.
- Wang D D, Zheng J Y, Yan Y H, *et al.* Effect of biochar application on soil water holding capacity in the southern region of Ningxia [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, **27** (2): 101-104, 109.
- [29] 颜永毫, 郑纪勇, 张兴昌, 等. 生物炭添加对黄土高原典型土壤田间持水量的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, **27**(4): 120-124, 190.
- Yan Y H, Zhen J Y, Zhang X C, *et al.* Impact of biochar addition into typical soils on field capacity in Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, **27**(4): 120-124, 190.
- [30] 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(11): 2930-2934.
- Chen H X, Du Z L, Guo W, *et al.* Effects of biochar amendment on cropland soil bulk density, cation exchange capacity, and particulate organic matter content in the North China Plain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22** (11): 2930-2934.
- [31] 刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 等. 土壤生物炭环境行为与环境效应[J]. *应用生态学报*, 2009, **20**(4): 977-982.
- Liu Y X, Liu W, Wu W X, *et al.* Environmental behavior and effect of biomass-derived black carbon in soil: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(4): 977-982.
- [32] 张祥, 王典, 姜存仓, 等. 生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, **21**(8): 979-984.
- Zhang X, Wang D, Jiang C C, *et al.* Effect of biochar on physicochemical properties of red and yellow brown soils in the south China region [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, **21**(8): 979-984.
- [33] 刘玉学, 王耀锋, 吕豪豪, 等. 不同稻秆炭和竹炭施用水平对小青菜产量、品质以及土壤理化性质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, **19**(6): 1438-1444.
- Liu Y X, Wang Y F, Lv H H, *et al.* Effects of different application rates of rice straw biochar and bamboo biochar on yield and quality of greengrocery (*Brassica chinensis*) and soil properties [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, **19**(6): 1438-1444.
- [34] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. *生态学报*, 2013, **33**(20): 6534-6542.
- Chen X X, He X S, Geng Z C, *et al.* Effects of biochar on selected soil chemical properties and on wheat and millet yield [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(20): 6534-6542.
- [35] 周志红, 李心清, 邢英, 等. 生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用[J]. *地球与环境*, 2011, **39**(2): 278-284.
- Zhou Z H, Li X Q, Xing Y, *et al.* Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in soil [J]. *Earth and Environment*, 2011, **39**(2): 278-284.
- [36] Liang B, Lehmann J, Solomon D, *et al.* Black carbon increases cation exchange capacity in soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, **70**(5): 1719-1730.
- [37] Zhang Q Z, Wang Y D, Wu Y F, *et al.* Effects of biochar amendment on soil thermal conductivity, reflectance, and temperature [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, **77**(5): 1478-1487.
- [38] 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.
- [39] Pang X Y, Zhu B, Lü X T, *et al.* Labile substrate availability controls temperature sensitivity of organic carbon decomposition at different soil depths [J]. *Biogeochemistry*, 2015, **126**(1-2):

- 85-98.
- [40] 李虎, 邱建军, 王立刚. 农田土壤呼吸特征及根呼吸贡献的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2008, **24**(4): 14-20.
- Li H, Qiu J J, Wang L G. Characterization of farmland soil respiration and modeling analysis of contribution of root respiration [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, **24**(4): 14-20.
- [41] 张宇, 张海林, 陈继康, 等. 耕作措施对华北农田 CO₂ 排放影响及水热关系分析[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(4): 47-53.
- Zhang Y, Zhang H L, Chen J K, *et al.* Effects of different tillage practices on CO₂ emission fluxes from farmland in North China Plain and the analysis of soil temperature and moisture [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, **25**(4): 47-53.
- [42] Hidetoshi A, Benjamink S, Haeferlem S, *et al.* Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. Field Crops Research, 2009, **111**(1-2): 81-84.
- [43] 杨平, 杜宝华. 国外土壤二氧化碳释放问题的研究动态[J]. 中国农业气象, 1996, **3**(1): 100-103.
- Yang P, Du B H. The study of CO₂ releasing from the soil in agro-economical system[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 1996, **3**(1): 100-103.
- [44] 王立刚, 邱建军, 李维炯. 黄淮海平原地区夏玉米农田土壤呼吸的动态研究[J]. 土壤肥料, 2002, (6): 13-17.
- Wang L G, Qiu J J, Li W J. Study on the dynamics of soil respiration in the field of summer-corn in Huanghuaihai region in China[J]. Soil and Fertilizer, 2002, (6): 13-17.
- [45] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J]. 生态学报, 1997, **17**(5): 469-476.
- Liu S H, Fang J Y. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale[J]. Acta Ecological Sinica, 1997, **17**(5): 469-476.

环境科学

CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i> (532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i> (540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaohe City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i> (558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i> (567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i> (573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading ...	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i> (603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i> (625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i> (633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i> (658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i> (669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i> (677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i> (685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i> (701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i> (724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Juan, <i>et al.</i> (730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i> (738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i> (747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i> (754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i> (761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i> (783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i> (791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i> (799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i> (816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i> (823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrification System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i> (845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i> (853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i> (859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i> (869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i> (876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i> (885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i> (904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i> (915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i> (934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i> (945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i> (953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i> (978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i> (987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i> (994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1003)