

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲 PM _{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征	徐建辉, 江洪 (3119)
宁波市 PM _{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算	杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)
青岛大气中酸碱气体及 PM _{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系	周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)
北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征	胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)
2015 年春节北京市空气质量分析	程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)
上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系	王红丽 (3159)
生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究	陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)
一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型	郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘阁, 王旭东, 张思敏 (3175)
巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素	叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张玫琪, 周阳 (3186)
河北洺河溶解性有机物光谱学特性	虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)
东山岛地下水“三氮”空间分布特征	吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)
重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)
硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响	黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)
阆中市思依镇水化学特征及其成因分析	张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)
东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动	陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)
水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响	胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)
溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟	杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)
坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果	李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)
典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估	李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)
南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比	张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)
臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响	刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)
含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响	吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)
厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究	王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永峰 (3298)
印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究	申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)
螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征	覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)
两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究	税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)
农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析	孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)
四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析	张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)
从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化	刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)
提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响	刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀良 (3352)
常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究: 以长江中下游地区夏玉米季为例	桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)
水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响	傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)
厌氧条件下砂壤水稻土 N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和 CH ₄ 排放特征	曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)
黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征	陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)
生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响	郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)
宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征	倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)
石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究	胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)
江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例	王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)
缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征	李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)
西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应	聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)
电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评价	郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)
典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性	刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)
紫色土对硫丹的吸附与解吸特征	赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)
紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响	焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)
4 株外生菌根真菌对 Al ³⁺ 吸收与吸附的研究	王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)
长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价	于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)
北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律	宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)
城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响	吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)
V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英	任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)
基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析	林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)
我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨	江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)
异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响	司友斌, 王娟 (3533)
《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)	

生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响

郭艳亮¹, 王丹丹¹, 郑纪勇^{1,2*}, 赵世伟^{1,2}, 张兴昌^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 为确定生物炭添加对半干旱地区农田土壤温室气体释放的影响, 采用小区定位试验, 利用锯末(J)和槐树皮(H)及3种添加比例(1%、3%、5%, 质量百分比), 研究了生物炭添加6个月内表层土壤CO₂、CH₄和N₂O等3种温室气体排放的动态变化。结果表明, 与对照相比, 各处理土壤CO₂排放通量随生物炭的添加呈现增加的趋势, 锯末和槐树皮等两种生物炭处理的土壤CO₂平均排放通量分别增加了1.89%和3.34%, 但差异不显著。CH₄排放随着生物炭添加量的增加而降低, 各生物炭处理的土壤表层CH₄排放量平均降幅分别为: J1: 1.17%、J3: 2.55%、J5: 4.32%、H1: 2.35%、H3: 5.83%、H5: 7.32%。其中, 锯末生物炭仅在5%添加量时较对照差异显著($P < 0.05$), 而槐树皮生物炭处理在3%和5%的添加量与对照差异均达显著水平($P < 0.05$)。生物炭对N₂O的排放影响没有明显规律性。研究表明, 生物炭在短期内对半干旱地区农田土壤CO₂和N₂O的排放没有显著影响, 而对CH₄排放则影响显著($P < 0.05$)。就生物炭类型而言, 槐树皮生物炭在抑制CH₄排放方面优于锯末生物炭, 差异显著($P = 0.048$)。

关键词: 半干旱区; 生物炭; 土壤呼吸; 温室气体; 定位研究

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3393-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.09.035

Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region

GUO Yan-liang¹, WANG Dan-dan¹, ZHENG Ji-yong^{1,2*}, ZHAO Shi-wei^{1,2}, ZHANG Xing-chang^{1,2}

(1. College of Natural Environment and Resources, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of biochar addition on the emission of greenhouse gases from farmland soil in semi-arid region. Through an in-situ experiments, the influence of sawdust biochar(J) and locust tree skin biochar(H) at three doses (1%, 3%, and 5% of quality percentage) on CO₂, CH₄ and N₂O emissions were studied within the six months in the south of Ningxia province. The results indicated that soil CO₂ emission flux was slightly increased with the addition doses for both biochars, and the averaged CO₂ emission flux for sawdust and locust tree skin biochar was enhanced by 1.89% and 3.34% compared to the control, but the difference between treatments was not statistically significant. The soil CH₄ emission was decreased with the increasing of biochar doses, by 1.17%, 2.55%, 4.32% for J1, J3, J5 and 2.35%, 5.83%, 7.32% for H1, H3, H5, respectively. However, the difference was statistically significant only for J5, H3 and H5 treatments ($P < 0.05$). Across addition doses, there was no apparent effect on soil N₂O emission. Our study indicated that the biochar has no significant influence on soil CO₂ and N₂O emissions within six months in semi-arid region and can significantly influence soil CH₄ emissions ($P < 0.05$). As for biochar type, the locust tree skin biochar is significantly better than the sawdust biochar in terms of restraining CH₄ emission ($P = 0.048$).

Key words: semi-arid region; biochar; soil respiration; greenhouse gases; positioning study

温室气体不断增加是引起全球气候变暖的主要原因, 减少大气温室气体浓度, 已成为全球人类亟待解决的问题^[1]。农田土壤作为温室气体的主要排放源^[2], 对大气中3种温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)浓度的影响不容忽视。因此, 减少土壤温室气体排放, 是缓解全球气候变暖的有效措施。生物炭是生物有机材料(农林废弃物、作物秸秆、厨余垃圾、养殖业废弃物等有机资源)在缺氧或无氧环境中经高温裂解后产生的一种固体物质^[3~5]。一方面, 由于生物炭的物理化学稳定性和生物化学抗分解性使其通过碳封存技术而切实具有锁定和降低大气中CO₂的

作用, 另一方面生物炭的多孔性、巨大的比表面积以及高C/N比, 使其能够改善土壤通气状况, 增加土壤营养元素的有效性, 营造更好的微生物生存环境, 促进某些特殊类群微生物的繁衍与扩张以及土壤团聚体的形成^[6,7]。所以, 生物炭还田目前被广泛认为是缓解气候变暖的一种可能的有效工程措施。

向土壤中施加生物炭对土壤温室气体排放的影响

收稿日期: 2015-01-04; 修订日期: 2015-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(31470523); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050504)

作者简介: 郭艳亮(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态环境效应, E-mail: yanliangguox@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhjy@ms.iswc.ac.cn

响是当前国际生物炭研究的前沿领域,也是关乎废弃有机物资源能否实现生物炭还田的关键^[4]. 目前,关于生物炭添加对土壤温室气体排放影响的研究较多,但是由于不同学者所选用的研究材料和研究方法不同,所得出的结论也不尽相同. Saarnio 等^[8]对热带以及温带地区和实验室内的研究均表明,施入农田土壤中的生物炭可以通过单位面积增产、减少 N₂O 释放并增加土壤 C 储存等途径来缓解气候变暖. Shenbagavalli 等^[9]在研究生物炭对土壤中碳氮动态变化影响的试验中发现,生物炭能够减少土壤温室气体的释放,尤其是 CO₂ 和 N₂O. Karhu 等^[10]的田间试验研究发现,添加生物炭使土壤 CH₄ 的平均累积吸收量较对照增加了 96%,但是对土壤 CO₂ 和 N₂O 排放没有显著的影响作用,其研究结果表明,生物炭能够通过增加生物质碳储存、促进土壤对 CH₄ 的吸收等途径来缓解气候变暖. Bruun 等^[11]的实验室研究发现,将快速分解的生物炭单独施入土壤后促进了 N₂O 的释放,若将高低两种添加比例(3% 和 1%)的生物炭分别与厌氧消化污泥混合后施入土壤,则高生物炭添加量(3%)的土壤 N₂O 释放较低添加量的减少了 47%. 他们认为,这与生物炭和污泥混合处理提高了土壤微生物活动性和增加氮素的不可移动性有关. Zheng 等^[12]通过分别向两种中性土壤(干旱和湿润)中添加生物炭和氮肥的室内培养试验研究发现,有外加氮源的条件下,N₂O 是土壤温室气体的主要成分,生物炭添加使土壤 N₂O 的释放量减少 3%~60%,CO₂ 释放增加 10%~21%,CH₄ 释放增加 5%~70%,而无外加氮源条件下,CO₂ 是土壤温室气体的主要组成部分,生物炭对土壤可提取 NO₃⁻、NH₄⁺ 或 N₂O 的释放无显著影响,其研究结果表明,施用生物炭是减少土壤 N 淋溶和温室气体释放的有效管理措施,尤其对于高 N 含量的中性至酸性土壤. Stewart 等^[13]的室内培养试验

研究发现,随着生物炭添加量的增加,CO₂ 释放呈线性增加,N₂O 呈指数减少. 柯跃进等^[14]的为期 130 d 的室内培养试验研究发现,在整个培养期内,生物炭与耕地土壤混合处理能够减少土壤 CO₂ 的排放,且减排率最高可达 41.5%. 因此,对于某一特定区域内土壤添加生物炭,必须要经过本地化验证,方可确定生物炭添加对当地土壤 3 种温室气体排放的影响程度. 本研究基于野外小区定位试验,分析了向土壤中添加锯末(J)和槐树皮(H)及不同比例(1%、3%、5%,质量百分比)的生物炭后,土壤中 3 种温室气体排放量的变化情况,以期为该地区农田生态系统中生物炭调节土壤温室气体排放,缓解当前气候变暖提供一定的理论依据和数据支撑.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点设在中国科学院固原生态试验站原州区站内的长期定位试验场,属黄土高原宽谷梁状丘陵区. 该区平均海拔 1750 m,气候属温凉半干旱地带,冬春麦过渡区. 年平均气温 6.2℃,最高月(7 月)平均气温 18.9℃,最低月(1 月)平均气温(8.3℃. 极端最高气温 34.6℃,极端最低气温(28.1℃,>0℃积温 3100℃,年均日照时数 2 518 h,年降雨量 472 mm,无霜期 152 d. 年平均径流深为 53 mm,径流系数 9.4%,地下水深 150~200 m. 土壤以黑垆土和镶黄土为主,植被由灌丛草原向半干旱典型草原过渡.

1.2 供试材料

本试验选取以锯末、槐树皮为原材料经高温(550℃)无氧裂解而生成的生物炭为供试材料,粉碎,过 2 mm 筛备用. 两种生物炭均由陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司提供. 生物炭的基本理化性质如表 1 所示.

表 1 生物炭的基本理化性质

Table 1 Characteristics of tested biochar

类型	热解温度 /℃	比表面积 /m ² ·g ⁻¹	pH	电导率 /μS·cm ⁻¹	阳离子交换量 /cmol·kg ⁻¹	有机质 /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	硝态氮 /mg·L ⁻¹	铵态氮 /mg·L ⁻¹
锯末生物炭	550	0.082 4	9.34	684.0	13.16	742.82	5.46	0.890	— ¹⁾
槐树皮生物炭	550	0.094 9	9.52	808.0	20.14	866.25	8.77	1.140	—

1) “—”表示生物炭中不含铵态氮

锯末和槐树皮生物炭材料的表面物理结构采用 JSM-6360LV 扫描电镜(SEM,日本电子公司)观察分析. 扫描电镜照片如图 1 所示.

1.3 试验设计

锯末生物炭(J)和槐树皮生物炭(H)均设置 3 个添加比例(1%、3%、5%,质量百分比),共 6 个

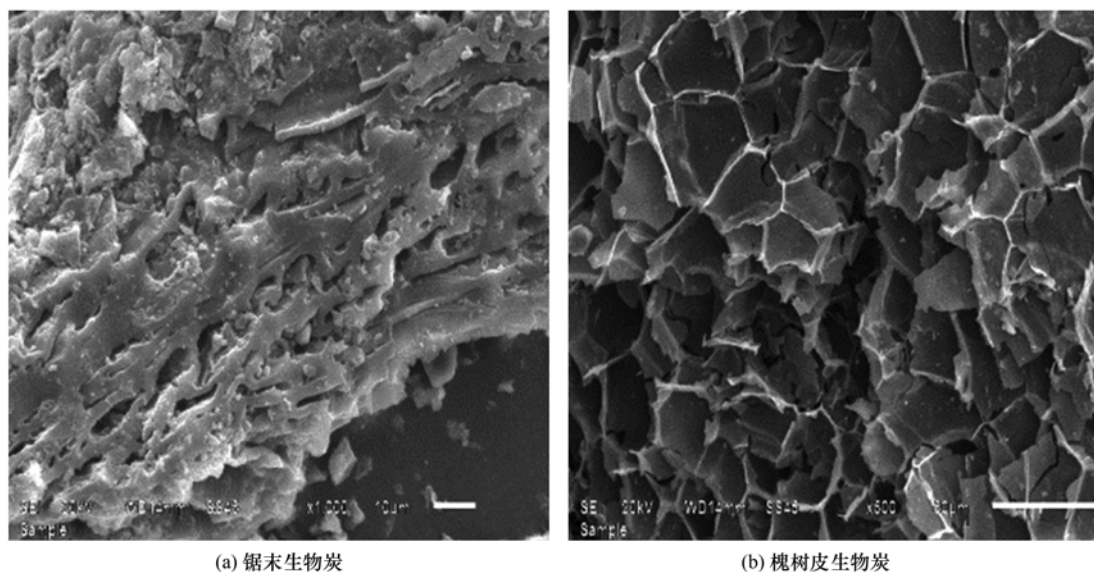


图1 生物炭扫描电镜(SEM)照片

Fig. 1 Scanning electron microscopy (SEM) photos of biochar

试验处理及1个空白对照(无生物炭添加),依次记为J1、J3、J5、H1、H3、H5和CK,重复3次.添加比例按照生物炭与土壤的质量百分比进行控制.共设21个试验小区,每个小区规格为 $2.4\text{ m} \times 2.4\text{ m}$.为消除系统误差,各小区采用完全随机区组设计,每个小区内设土壤呼吸仪测定基座1个.

生物炭添加采用完全混合方式添加,即分别将表层20 cm深的土壤剥离,将生物炭按照设定的添加比例与剥离的土壤分别充分混合,然后将混合后的土壤回填到原位.为减少作物生长等因素对生物炭温室效应的影响,试验小区定期清理地表杂草,整个试验期间保持裸地状态.

1.4 分析方法

在每个小区中心设置一个土壤监测点,在监测点埋入1个高度13 cm、直径20 cm的有机玻璃柱作为呼吸环,上端露出地面3 cm,土壤呼吸速率测定用Li-8100(Li-COR, Lincoln, NE, USA).小区布设后6个月内,选取晴朗无风日,对各小区土壤呼吸进行监测,监测时间为上午10:00,监测频率为10 d一次.在监测土壤呼吸过程中,借助8100-664(美国Li-COR公司)用20 mL注射器采集气体样本20 mL于色谱瓶中.气相色谱仪选用Agilent GC7890A(美国Agilent公司),检测器包括FID(火焰离子化检测器)和ECD(电子俘获检测器),分析柱为Porapak·Q填充柱(美国Agilent公司). CO_2 的检测:样品中 CO_2 在 375°C 通入 H_2 先经Ni催化转化为 CH_4 后再进入检测器分析.检测器工作温度为 300°C ,柱温

60°C ,载气为氮气,燃气为高纯氢和空气. CH_4 的检测:采用FID检测器直接进行检测. N_2O 的检测:采用ECD检测器进行检测.气相色谱仪工作前采用由国家标准物质中心提供的标准气体进行校准,变异系数控制在3%以内.

1.5 数据处理及分析

试验数据采用Microsoft Excel 2010软件进行整理并作图,不同处理间差异采用SPSS 20.0统计分析软件进行多因素方差分析,LSD法进行显著性检验($P=0.05$).

2 结果与分析

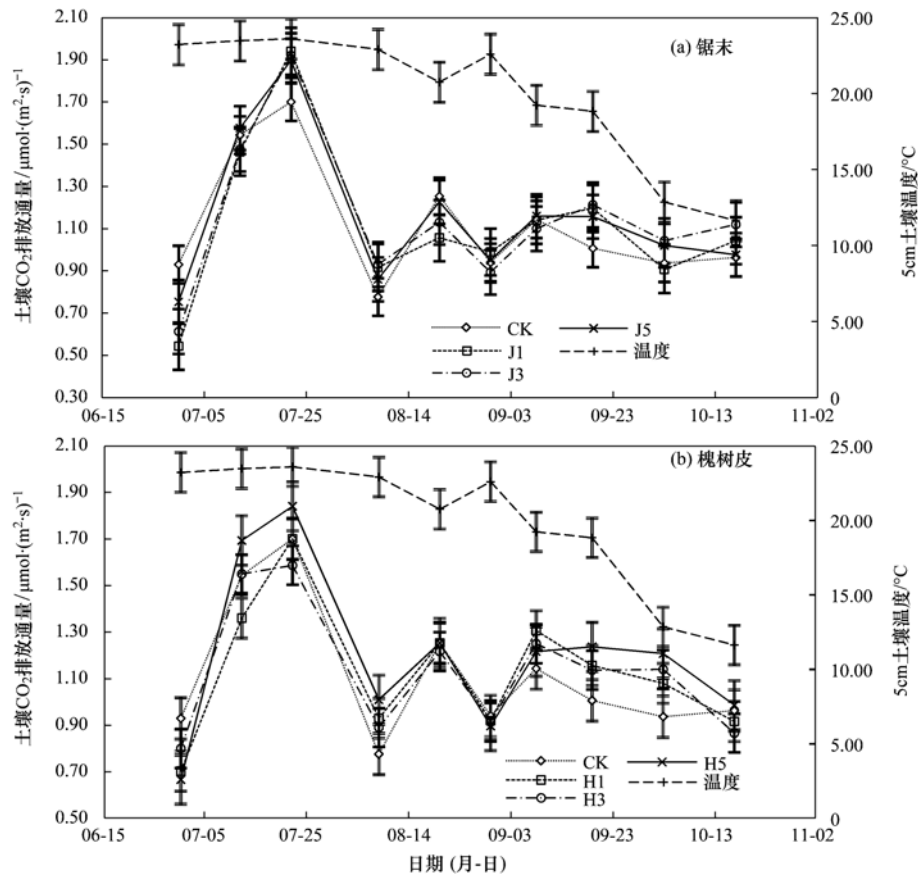
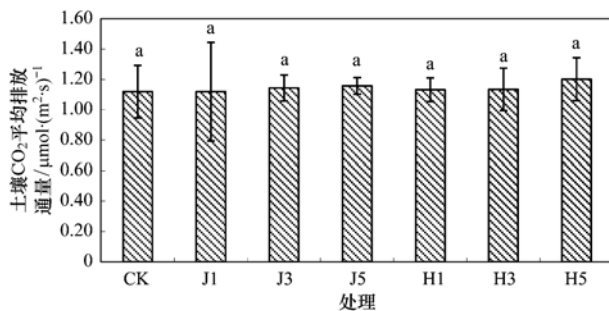
2.1 生物炭对土壤 CO_2 排放通量的影响

如图2所示,添加两种生物炭均促进了土壤 CO_2 的排放.与对照相比,H5的 CO_2 排放量增加表现最明显.在整个监测期间,各处理不同采样时期土壤表层 CO_2 排放量具有明显的季节变化规律,夏季较高,秋季则较低,整体上呈现先上升后下降的单峰势态.

添加生物炭各处理的土壤表层 CO_2 平均排放通量均高于CK(图3),J1、J3、J5、H1、H3和H5依次较CK增加了0.06%、2.23%、3.46%、1.22%、1.46%和7.42%,处理间差异不显著.显著性分析发现,锯末($P=0.788$)和槐树皮($P=0.637$)两种生物炭对土壤 CO_2 平均排放通量影响差异不显著.

2.2 生物炭对土壤 CH_4 排放的影响

整个监测期内,锯末生物炭和槐树皮生物炭对

图2 生物炭添加对土壤 CO₂ 排放通量的影响Fig. 2 Effect of biochar addition on soil CO₂ emission flux图3 生物炭添加对土壤 CO₂ 平均排放通量的影响 ($P=0.05$)Fig. 3 Effect of biochar addition on soil average CO₂ emission flux ($P=0.05$)

土壤 CH₄ 的排放均表现出明显的抑制效应(图4)。对于同种生物炭而言,土壤表层 CH₄ 的排放量随着生物炭添加量的增加而降低。在相同添加比例下,槐树皮生物炭对土壤表层 CH₄ 排放量降低的作用效果较锯末生物炭的更明显,差异达显著水平($P=0.048$)。

整个试验期间,添加不同比例的两种生物炭后,土壤 CH₄ 的平均排放情况如图5所示,与对照相比,锯末生物炭3个添加比例的土壤 CH₄ 平均排放

量依次降低了1.17%(J1)、2.55%(J3)和4.32%(J5),对土壤 CH₄ 排放影响差异达显著水平($P=0.03$);槐树皮生物炭不同添加比例的土壤 CH₄ 平均排放量依次降低了2.35%(H1)、5.83%(H3)和7.32%(H5),差异达极显著水平($P<0.001$)。

2.3 生物炭对土壤 N₂O 排放的影响

土壤 N₂O 释放的缓解,有助于减轻大气温室效应。不同处理的土壤 N₂O 在监测期间的排放情况如图6所示。

与对照相比,两种生物炭的不同添加比例对土壤 N₂O 释放质量浓度的影响均无明显规律性,差异不显著。

图7显示,两种生物炭对土壤 N₂O 平均排放质量浓度影响差异不显著。将两种生物炭处理的土壤 N₂O 平均排放质量浓度与CK做差值处理,结果如下:CK-J1: -0.001、CK-J3: -0.002、CK-J5: 0.002、CK-H1: 0.001、CK-H3: 0.000、CK-H5: 0.001。显著性分析发现,锯末($P=0.663$)和槐树皮($P=0.248$)两种生物炭的施入对土壤 N₂O 的平均排放量无显著地影响作用。

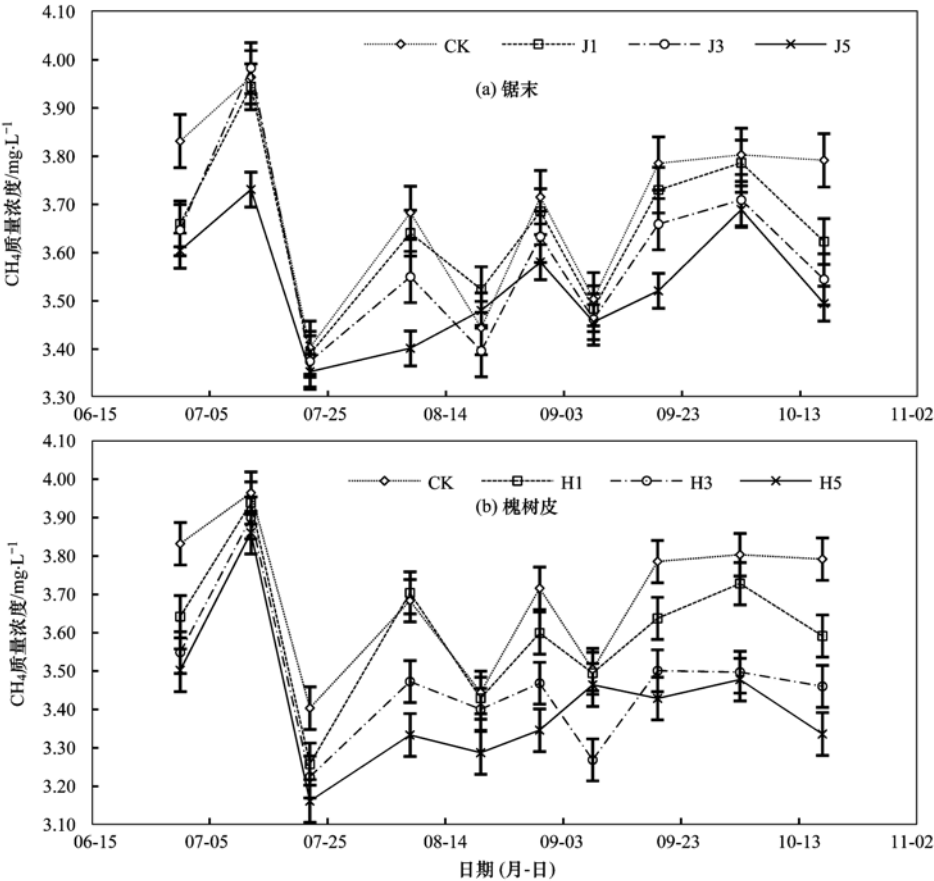


图 4 生物炭添加对土壤 CH₄ 排放的影响

Fig. 4 Effect of biochar addition on soil CH₄ emission

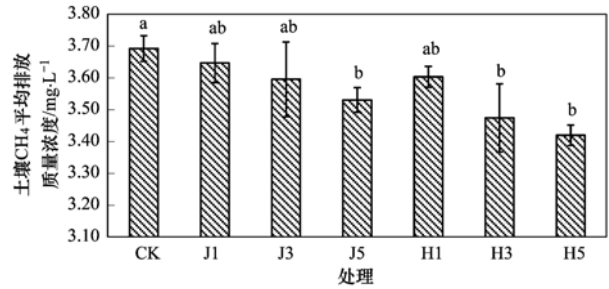


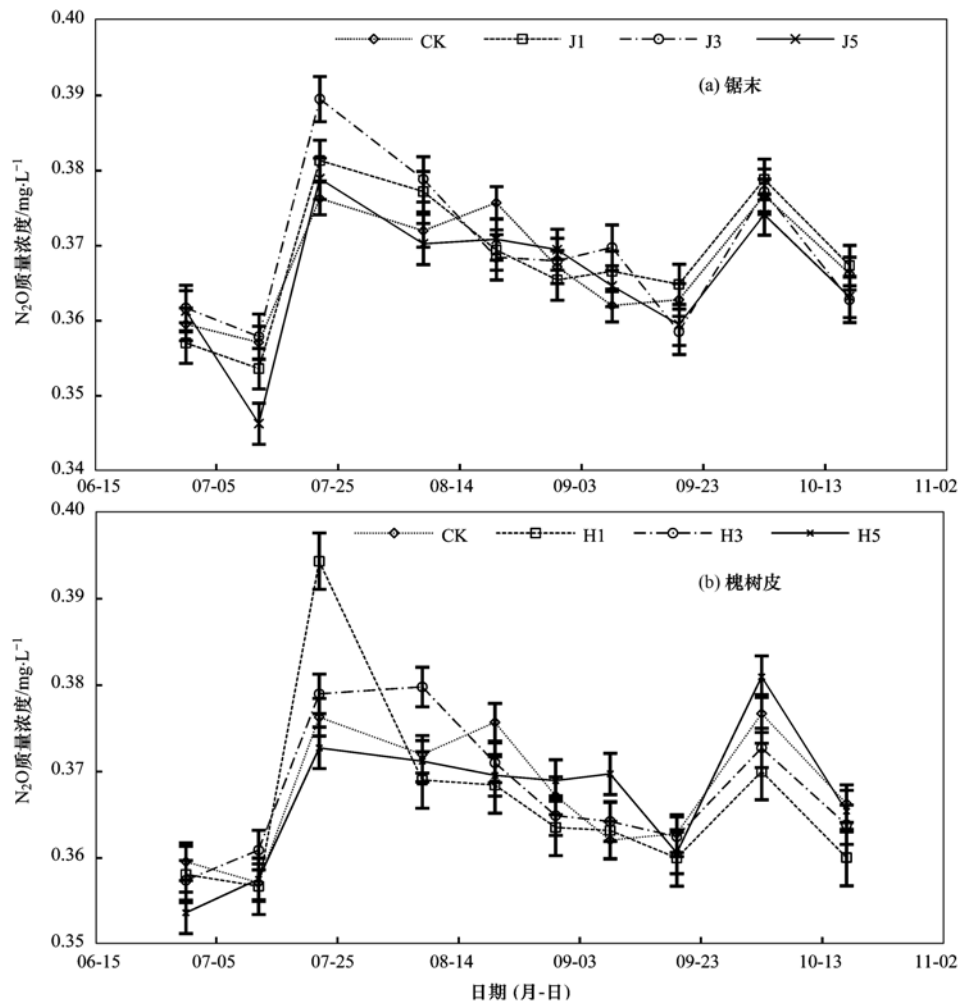
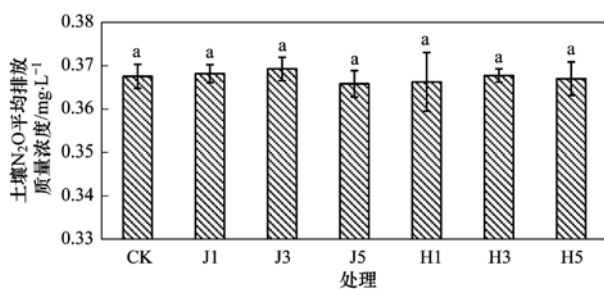
图 5 生物炭添加对土壤 CH₄ 平均排放量的影响 ($P=0.05$)

Fig. 5 Effect of biochar addition on soil average CH₄ emissions ($P=0.05$)

3 讨论

生物炭施入土壤后,均不同程度地促进了 CO₂ 的排放. 其中7月中下旬(7月22日)土壤 CO₂ 的排放量最高,这是因为该时期大气温度和土壤温度较高,土壤微生物活性较强,土壤呼吸强度大. 有研究表明,土壤呼吸对温度具有一定的敏感性,且与温度具有正相关性^[15,16]. 而6月30日的 CO₂ 排放量较低,这可能由于小区建成初期,生物炭的初始施入

对于土壤微生物的生存环境干扰比较大,土壤呼吸减弱,因此具有比较低的 CO₂ 排放通量. 除7月12日和7月22日两次 CO₂ 释放变化较大外,其他时间差异不大,尽管温度逐渐降低(图2). 由此可以看出:土壤本身贫瘠,控制土壤呼吸强度的主要因素应该是呼吸底物——土壤有机质含量较低,尤其是易被利用有机质贫瘠;7月12日和7月22日的土壤 CO₂ 排放通量在温度没有变化背景下突然升高,这应该是生物炭加入后生物炭所携带的易被利用有机质对土壤呼吸的激发效应. 生物炭添加土壤后,会改变土壤的理化性状如孔隙状况、含水量等,影响温室气体的排放^[17],也会改变参与土壤 CO₂ 产生过程的功能微生物活性,影响土壤 CO₂ 的排放通量^[18]. 本研究中,对于同一种生物炭而言,随着生物炭添加量增加,土壤表层 CO₂ 平均排放通量随之增加,这很可能是因为生物炭的多孔性及其巨大的比表面积,将其施入土壤后,能够改善黄土高原地区土壤的水、肥、气、热等状况,营造更加适合微生物种群生存繁殖的生活环境^[19,20],从而使生物炭处理小区土壤呼吸较对照有所提高. 在同一添加比例

图6 生物炭添加对土壤 N_2O 排放的影响Fig. 6 Effect of biochar addition on soil N_2O emission图7 生物炭添加对土壤 N_2O 平均排放量的影响 ($P=0.05$)Fig. 7 Effect of biochar addition on soil average N_2O emissions ($P=0.05$)

下,槐树皮生物炭促进土壤 CO_2 排放的作用强于锯末生物炭。原因在于槐树皮生物炭较锯末生物炭的比表面积大(表1),施入土壤后,较锯末生物炭处理的土壤通气性能好,土壤微生物活性强,从而导致土壤呼吸强度增大,释放出更多 CO_2 。Major 等^[21]在其研究中证实生物炭的添加能提高土壤有机碳呼吸量

和土壤总呼吸量。随着生物炭添加量增大,土壤的通气状况和营养状况得到进一步改善,土壤呼吸也随着加强。花梨等^[22]将椰壳生物炭(600℃)施入土壤的室内试验研究发现,施炭量在1%~5%的范围内,土壤 CO_2 释放量呈现随着生物炭添加量增加而增加的趋势,本研究结果与此一致。

生物炭添加土壤后, CH_4 的释放均受到不同程度的抑制作用。生物炭对土壤 CH_4 排放的影响可通过改变土壤微生物种群结构多样性及微生物(如产甲烷菌和甲烷氧化菌)活性、土壤理化性质(如容重、pH、氧化还原电位、持水性)等途径来实现,另外也与生物炭自身的物理化学性质有密切的关系,生物炭的比表面积、孔隙度等关系到其对温室气体的吸附性^[4],因此生物炭对土壤表层 CH_4 排放量的影响因生物炭的种类和添加比例不同而异。

生物炭施入土壤后,可以提高小区土壤有机质的含量。Neue 等^[23]在国际水稻研究所研究结果表

明,土壤中产甲烷菌的重要底物为土壤有机质,且有机质含量的增加可以降低土壤氧化还原电位,加速土壤 CH_4 的产生,有利于 CH_4 的释放. 在本研究中,土壤 CH_4 的产生和排放却随着生物炭的添加表现出明显的被抑制现象. 究其原因,一方面可能因为生物炭本身具有很强的化学稳定性和生物稳定性,土壤中的产甲烷菌无法迅速利用生物炭. 另一方面,生物炭拥有巨大的比表面积和发达的孔隙结构,能够吸附土壤中的有机物,进入生物炭表面孔隙中的有机物被保护起来,不易被外界微生物所分解,从而减少了土壤有机碳的矿化^[24]. 因此生物炭添加虽然提高了土壤有机质,但是并没有促进 CH_4 的产生和排放,反而抑制了 CH_4 的释放. 生物炭对土壤 CH_4 产生和排放的抑制作用的另一个原因是生物炭的“碳库效应”. Karhu 等^[10]在田间试验研究中证实,生物炭的添加促进了 96% 的 CH_4 吸收,其结果表明生物炭通过增加土壤生物质碳储存来抑制 CH_4 的释放. 锯末生物炭和槐树皮生物炭,两种生物炭随其施用量的增加,土壤中活性有机碳量占总有机碳量的百分比降低^[22],从而增加了土壤中惰性

碳的比例,提升了土壤碳的稳定性,因此达到了对土壤 CH_4 排放的抑制作用随之增强的效果. 两种生物炭相比,槐树皮生物炭抑制土壤 CH_4 排放的作用效果优于锯末生物炭,这可能与槐树皮生物炭孔隙结构较锯末生物炭的发达(图 1)有关,孔隙结构发达的生物炭对土壤通气性改良效果好,减少了土壤厌氧环境.

土壤 pH 作为一个重要的土壤化学参数,是影响微生物生命活动中新陈代谢过程的一个关键因素之一. 甲烷氧化菌在酸性环境中活性较强,而产甲烷菌则适合生活在中性或稍碱性环境中,且对 pH 变化很敏感. 在本研究中,由表 1 可知,锯末生物炭和槐树皮生物炭的 pH 值均高于 9.0,施入后土壤的 pH 值在 8.54 ~ 8.76 之间,显著提高了土壤的 pH (表 2),从土壤 pH 变化影响产甲烷菌活性这个角度来讲,生物炭添加会促进土壤 CH_4 的释放^[25],但是,生物炭增加土壤通气性和孔隙度,能够提高甲烷氧化菌的活性,从而减少了土壤 CH_4 的释放^[26]. 可能甲烷氧化菌活性增强的程度比产甲烷菌的更大一些,因此使土壤 CH_4 的最终释放量减小.

表 2 生物炭对土壤 pH 的影响 ($P=0.05$)

Table 2 Effect of biochar on soil pH ($P=0.05$)

项目	CK	J1	J3	J5	H1	H3	H5
pH	8.43 ± 0.02e	8.54 ± 0.02d	8.59 ± 0.02c	8.68 ± 0.01b	8.56 ± 0.02d	8.66 ± 0.03b	8.76 ± 0.03a

硝化作用和反硝化作用是土壤产生并释放 N_2O 的两种重要的机制^[2,27],相关微生物如硝化菌和反硝化菌等是硝化作用和反硝化作用进行的驱动者. 反硝化作用是在无氧条件下 NO_3^- 被反硝化菌还原成 N_2 的过程,在此过程中会有中间产物 NO 、 N_2O ^[4]. 硝化作用产生 N_2O 的途径有两种:一是氨氧化成亚硝酸阶段,有副产物 N_2O 产生;二是亚硝酸被氧化为硝酸阶段,在氧气不足的条件发生歧化反应产生 N_2O ^[4]. 土壤反硝化作用过程中产生的 NO 、 N_2O 和 N_2 的相对量依赖于土壤 pH、通气状况和有机质含量等^[2],生物炭本身含有多种碱性成分,施入土壤后能提高土壤的 pH (表 2),会影响参与反硝化过程相关酶活性. 同时,反硝化作用进行还需要微生物可利用碳源和末端电子受体(如 NO_3^-),生物炭可以直接或间接影响反硝化过程^[9]. 硝化过程中生物炭会吸附土壤中铵态氮从而减少硝化作用所需要的能源底物,从而减少 N_2O 的释放^[9]. 但是,也有研究发现,在没有外加氮源的情况下,生物炭添加会降低 N_2O 的释放,但无差异显著

性($P<0.05$)^[28],也会对 N_2O 的释放不产生显著影响^[12],甚至会促进 N_2O 的释放^[11]. Saarnio 等^[8]的中型控制试验研究发现生物炭添加在干旱和湿润条件下都会刺激 N_2O 的释放,表明生物炭可通过对土壤湿度和植物 N 吸收来控制 N_2O 的流失.

本研究中,生物炭添加对土壤 N_2O 释放的影响没有规律性,且处理间差异没有达到显著水平,这可能与小区土壤本身比较贫瘠,又缺乏外加氮源的补充,土壤微生物所能利用的氮源较少有关,土壤微生物硝化和反硝化作用进行的比较缓慢,从而使生物炭对土壤 N_2O 释放的调节作用没能表现出明显的规律性.

4 结论

(1) 与对照相比,在整个监测期内各生物炭处理土壤表面 CO_2 排放通量基本呈现增加的潜势. 不同生物炭处理土壤 CO_2 排放通量随添加量增加呈现增加趋势,槐树皮生物炭促进土壤表层 CO_2 排放作用强于锯末生物炭,但差异均不显著.

(2)与对照相比,锯末($P=0.03$)和槐树皮($P<0.001$)两种生物炭对土壤 CH_4 排放的抑制作用影响差异显著,且槐树皮生物炭对土壤 CH_4 排放量的降低作用效果优于锯末生物炭,差异达显著水平($P=0.048$)。 CH_4 的排放量随着生物炭的添加量的增加而减少,处理间差异不显著。

(3)整体而言,两种生物炭对土壤 N_2O 排放的影响与 CK 之间差异甚小,对土壤表层 N_2O 的产生是促进作用还是抑制作用没有明显的规律性,各处理间差异不显著。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: Synthesis Report [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 31-33.
- [2] 张玉铭,胡春胜,张佳宝,等. 农田土壤主要温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, **19**(4): 966-975.
- [3] 齐瑞鹏,张磊,颜永毫,等. 定容重条件下生物炭对半干旱区土壤水分入渗特征的影响[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(8): 2281-2288.
- [4] 颜永毫,王丹丹,郑纪勇,等. 生物炭对土壤 N_2O 和 CH_4 排放影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, **29**(8): 140-146.
- [5] 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.
- [6] Brodowski S, Amelung W, Haumaier L, *et al.* Morphological and chemical properties of black carbon in physical soil fractions as revealed by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy [J]. Geoderma, 2005, **128**(1-2): 116-129.
- [7] Xiao B H, Yu Z Q, Huang W L, *et al.* Black carbon and kerogen in soils and sediments. 2. Their roles in equilibrium sorption of less-polar organic pollutants [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(22): 5842-5852.
- [8] Saario S, Heimonen K, Kettunen R. Biochar addition indirectly affects N_2O emissions via soil moisture and plant N uptake [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, **58**: 99-106.
- [9] Shenbagavalli S, Mahimairaja S. Characterization and effect of biochar on nitrogen and carbon dynamics in soil [J]. International Journal of Advanced Biological Research, 2012, **2**(2): 249-255.
- [10] Karhu K, Mattila T, Bergström I, *et al.* Biochar addition to agricultural soil increased CH_4 uptake and water holding capacity-Results from a short-term pilot field study [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, **140**(1-2): 309-313.
- [11] Bruun E W, Müller-Stöver D, Ambus P, *et al.* Application of biochar to soil and N_2O emissions: potential effects of blending fast-pyrolysis biochar with anaerobically digested slurry [J]. European Journal of Soil Science, 2011, **62**(4): 581-589.
- [12] Zheng J Y, Stewart C E, Cotrufo M F. Biochar and nitrogen fertilizer alters soil nitrogen dynamics and greenhouse gas fluxes from two temperate soils [J]. Journal of Environmental Quality, 2012, **41**(5): 1361-1370.
- [13] Stewart C E, Zheng J Y, Botte J, *et al.* Co-generated fast pyrolysis biochar mitigates green-house gas emissions and increases carbon sequestration in temperate soils [J]. Global Change Biology Bioenergy, 2013, **5**(2): 153-164.
- [14] 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 CO_2 释放的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 93-99.
- [15] 刘艳. 模拟增温对农田土壤呼吸、硝化及反硝化作用的影响[D]. 南京:南京信息工程大学, 2013.
- [16] 寇太记,朱建国,谢祖彬,等. 大气 CO_2 体积分数升高环境温度与土壤水分对农田土壤呼吸的影响[J]. 生态环境, 2008, **17**(3): 950-956.
- [17] Bagreev A, Bashkova S, Locke D C, *et al.* Sewage sludge-derived materials as efficient adsorbents for removal of hydrogen sulfide [J]. Environmental Science & Technology, 2001, **35**(7): 1537-1543.
- [18] 邱虎森,王翠红,盛浩,等. 生物质炭对土壤温室气体排放影响机制探讨[J]. 湖南农业科学, 2012, (11): 49-52.
- [19] 张忠河,林振衡,付娅琦,等. 生物炭在农业上的应用[J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(22): 11880-11882.
- [20] Fowles M. Black carbon sequestration as an alternative to bioenergy [J]. Biomass and Bioenergy, 2007, **31**(6): 426-432.
- [21] Major J, Lehmann J, Rondon M, *et al.* Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration [J]. Global Change Biology, 2010, **16**(4): 1366-1379.
- [22] 花莉,金素素,唐志刚. 生物质炭输入对土壤 CO_2 释放影响的研究[J]. 安徽农业科学, 2012, **40**(11): 6501-6503, 6540.
- [23] Neue H U, Wassmann R, Lantin R S, *et al.* Factors affecting methane emission from rice fields [J]. Atmospheric Environment, 1996, **30**(10-11): 1751-1754.
- [24] Liang B Q, Lehmann J, Sohi S P, *et al.* Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil [J]. Organic Geochemistry, 2010, **41**(2): 206-213.
- [25] Spokas K A, Reicosky D C. Impacts of sixteen different biochars on soil greenhouse gas production [J]. Annals of Environmental Science, 2009, **3**: 179-193.
- [26] Troy S M, Lawlor P G, O'Flynn C J, *et al.* Impact of biochar addition to soil on greenhouse gas emissions following pig manure application [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, **60**: 173-181.
- [27] 朱永官,王晓辉,杨小茹,等. 农田土壤 N_2O 产生的关键微生物过程及减排措施[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 792-800.
- [28] Wang J Y, Pan X J, Liu Y L, *et al.* Effects of biochar amendment in two soils on greenhouse gas emissions and crop production [J]. Plant and Soil, 2012, **360**(1-2): 287-298.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i> (3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i> (3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i> (3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li (3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i> (3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i> (3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i> (3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i> (3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i> (3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i> (3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i> (3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i> (3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i> (3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i> (3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i> (3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i> (3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i> (3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i> (3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i> (3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i> (3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i> (3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i> (3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i> (3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i> (3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i> (3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i> (3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i> (3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i> (3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i> (3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i> (3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i> (3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i> (3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i> (3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan (3533)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行