

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

1960~2013年我国霾污染的时空变化 符传博, 唐家翔, 丹利, 何媛 (3237)

太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 王璐, 温天雪, 苗红妍, 高文康, 王跃思 (3249)

石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征 刘景云, 刘子锐, 温天雪, 魏俊龙, 黄小娟, 乔宝文, 王莉莉, 杨洋, 徐仲均, 王跃思 (3258)

南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析 吴丹, 曹双, 汤莉莉, 夏俊荣, 陆建刚, 刘刚, 杨孟, 李凤英, 盖鑫磊 (3268)

南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺 (3280)

上海崇明地区大气分形态汞污染特征 李舒, 高伟, 王书肖, 张磊, 李智坚, 王龙, 郝吉明 (3290)

三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量 王永敏, 赵铮, 孙涛, 王娅, 薛金平, 张成, 王定勇 (3300)

长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析 吴方堃, 孙杰, 余晔, 唐贵谦, 王跃思 (3308)

铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征 刘大钧, 汪家权 (3315)

祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究 贾文雄, 李宗省 (3322)

三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价 郭威, 殷淑华, 徐建新, 徐东昱, 高丽, 郝红, 高博 (3333)

太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素 车霏霏, 王大鹏, 甄卓, 颜昌宙, 王灶生 (3340)

太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险 张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (3348)

岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析 张媚, 孙玉川, 谢正兰, 余琴, 徐昕 (3356)

西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例 詹兆君, 陈峰, 杨平恒, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 蓝家程, 张宇 (3365)

不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析 李如忠, 秦如彬, 黄青飞, 耿若楠 (3375)

滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献 李乐, 王圣瑞, 焦立新, 余佑金, 丁帅, 王跃杰 (3384)

荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源 黄廷林, 方开凯, 张春华, 周石磊, 曾明正, 刘飞, 夏超, 丛海兵 (3394)

富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析 张思敏, 李云梅, 王桥, 朱利, 王旭东, 温爽 (3402)

基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例 安新丽, 陈廷廷, 赵晗, 张又弛, 侯艳伟, 蔡超 (3413)

于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系 王祖伟, 王玮玮, 侯迎迎, 包姗姗, 王子璐, 王倩倩 (3423)

人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响 刘佳, 易乃康, 熊永娇, 黄朝峰 (3430)

共生细菌对盐生小球藻富集和转化硝酸盐的影响 许平平, 刘聪, 王亚, 郑燕恒, 张春华, 葛滢 (3438)

模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响 王兵, 温春翔, 肖波 (3447)

对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为 周琦, 蒋煜峰, 孙航, 慕仲锋, 张振国, 展惠英 (3453)

多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究 尹子华, 盛晓琳, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (3460)

某微污染源自来水厂的纳滤深度处理效果研究 吴玉超, 陈吕军, 兰亚琼, 刘锐 (3466)

Fe⁰-PRB 去除Cr(VI)反应动力学及影响机制 卢欣, 李森, 唐翠梅, 辛佳, 林朋飞, 刘翔 (3473)

EDTA-nSiO₂ 纳米颗粒对 Cd²⁺ 的吸附 蒋顺成, 秦睿, 李满林, 李荣华, 张增强, Amjad Ali, 梁文 (3480)

硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征 沈伟航, 朱能武, 尹富华, 吴平霄, 张彦鸿 (3488)

人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能 崔蒙蒙, 王殿升, 黄天寅, 刘锋 (3498)

生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能 牟锐, 沈志强, 周岳溪, 陈学民, 伏小勇, 谭蕾蕾, 瞿畏 (3508)

甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系 刘东, 张小婷, 张代钧, 曾善文, 卢培利 (3518)

光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制 胡倩, 阳海, 石妮, 胡乐天, 易兵 (3524)

宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (3532)

北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价 董捷, 黄莹, 李永霞, 张厚勇, 高甫威 (3540)

红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应 贾广梅, 马玲玲, 徐殿斗, 成杭新, 周国华, 杨国胜, 罗敏, 路雨楠, 刘志明 (3547)

外源锌刺激水稻对土壤镉的累积效应 辜娇峰, 杨文骏, 周航, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (3554)

改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应 杨兰, 李冰, 王昌全, 刘倾城, 张庆沛, 肖瑞, 李一丁 (3562)

生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果 周普雄, 严颀, 余震, 王跃强, 朱艺, 周顺桂 (3575)

长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响 赵慧慧, 肖娴, 裴孟, 赵远, 梁玉婷 (3582)

应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响 曾清苹, 何丙辉 (3590)

三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化 隋心, 张荣涛, 许楠, 刘赢男, 柴春荣, 王继丰, 付晓玲, 钟海秀, 倪红伟 (3598)

外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH₄、CO₂ 排放的短期影响 胡敏杰, 任鹏, 黄佳芳, 仝川 (3606)

模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO₂ 通量变化及其影响因素 杜兰兰, 王志齐, 王蕊, 李如剑, 吴得峰, 赵慢, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (3616)

太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性 严俊霞, 郝忠, 荆雪雷, 李洪建 (3625)

生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响 王月玲, 耿增超, 王强, 尚杰, 曹胜磊, 周凤, 李鑫, 刘福义, 张萍 (3634)

氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响 辛月, 尚博, 陈兴玲, 冯兆忠 (3642)

冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响 李洪建, 杨艳, 严俊霞 (3650)

堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究 李丹, 何小松, 席北斗, 高如泰, 张慧, 黄彩红, 党秋玲 (3660)

酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响 刘寒冰, 杨兵, 薛南冬 (3670)

《环境科学》征订启事 (3517) 《环境科学》征稿简则 (3561) 信息 (3289, 3321, 3422)

生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响

王月玲¹, 耿增超^{1*}, 王强¹, 尚杰², 曹胜磊¹, 周凤¹, 李鑫¹, 刘福义¹, 张萍¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100; 2. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 西安 710075)

摘要: 通过田间小区试验, 分别向壤土土壤中添加 0、20、40、60、80 t·hm⁻² 的苹果果树枝条生物炭后, 分析了生物炭对土壤温度、土壤团聚体、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、微生物量碳以及土壤温室气体排放的影响。结果表明, 生物炭可以缓解土壤温度的变化, 增加土壤大团聚体的数量, 尤其是 >5 mm、5~2 mm 和 1~0.5 mm 的团聚体数量。与对照相比, 随着生物炭施用量的增加, 土壤 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、微生物量碳分别增加了 4.9%~33.9%、9.1%~41.1% 和 11.8%~38.5%。本研究中生物炭对土壤温室气体排放的影响主要表现为: 添加生物炭后, 土壤 CO₂ 的排放量以及 CH₄ 的吸收汇分别增加了 6.73%~23.35% 和 3.62%~14.17%; 施用 20 t·hm⁻² 和 40 t·hm⁻² 的生物炭降低了土壤 N₂O 的排放和综合增温潜势 (GWP), 而当生物炭施用量大于等于 60 t·hm⁻² 时反而增加了土壤 N₂O 的排放和综合增温潜势 (GWP)。说明生物炭作为一种土壤改良剂和碳减排剂, 能够改善土壤质量, 提高土壤肥力, 提高农田土壤增汇减排的作用, 此外, 选择合适的生物炭施用量至关重要。

关键词: 碳排放; 团聚体; 温室效应; 土壤微生物量碳; 土壤温度

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3634-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.09.047

Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil

WANG Yue-ling¹, GENG Zeng-chao^{1*}, WANG Qiang¹, SHANG Jie², CAO Sheng-lei¹, ZHOU Feng¹, LI Xin¹, LIU Fu-yi¹, ZHANG Ping¹

(1. Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Shaanxi Province Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: Biochar is known to be a good soil amendment to improve soil physical and biochemical characteristics, to increase crop yield, and to mitigate greenhouse gas emissions from soils. In this study, five addition levels of apple tree branches-derived biochar (0, 20, 40, 60, 80 t·hm⁻²) were used in field plot test. The effects of biochar on soil temperature, soil aggregates, NO₃⁻-N, NH₄⁺-N, microbial biomass carbon and greenhouse gas fluxes were investigated during the whole pepper growth season. The results showed that biochar amendment increased the temperature moderation capability of soil and increased the content of soil macro-aggregates, especially the content of aggregates with sizes >5 mm, 5-2 mm and 1-0.5 mm. As compared with the control, the contents of NO₃⁻-N, NH₄⁺-N and microbial biomass carbon increased by 4.9%-33.9%, 9.1%-41.1% and 11.8%-38.5% with the increase of biochar content respectively. Biochar amendment increased CO₂ emissions and CH₄ uptake by 6.73%-23.35% and 3.62%-14.17%, respectively. N₂O emissions and global warming potential (GWP) decreased at biochar levels of 20 and 40 t·hm⁻² and increased when the biochar levels were 60 and 80 t·hm⁻² as compared with the control. The results suggested that as a soil conditioner, biochar improved soil quality, soil fertility and function of agriculture soil on carbon sequestration and decreased emission cut. In addition, the choice of biochar level is very important.

Key words: carbon emission; soil aggregates; greenhouse effect; microbial biomass carbon; soil temperature

近年来,由温室气体排放增加导致的全球变暖以及气候变化成为了全球各界普遍关注的焦点。据估算,从 1880~2012 年,全球平均气温上升了 0.65~1.06℃^[1]。温室气体的大量增加被认为是全球变暖的主要原因^[2]。农业活动作为主要的排放源,在 2010 年,排放的 CO₂ 量占总人为活动排放 CO₂ 量的 11%,在 2012 年达到了 5.4 Gt·a⁻¹ (以 CO₂ eq 计)^[3]。农业活动对 N₂O 的贡献率大约为 60%^[2],而中国的蔬菜种植系统是其主要的排放源。科学家

预测,如果所有国家在现有排放基础上不加以控制,到本世纪末,全球气温将上升 1.4~5.8℃^[2]。因此,为了减少农业土壤温室气体的排放,调节土壤与大气之间的气体交换,急需制定出合理而有效的农田管理方式。

收稿日期: 2016-04-13; 修订日期: 2016-05-24

基金项目: 杨凌示范区科技计划项目 (2015SF-03)

作者简介: 王月玲 (1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为废弃物资源化利用及土壤养分, E-mail: wangyueling1103@163.com

* 通讯联系人, E-mail: gengzengchao@126.com

生物炭作为一种土壤改良剂^[4],不仅可以改善土壤理化性质^[5-7]、提高肥料利用率^[8]、增加作物产量^[9],还能减少农业土壤温室气体的排放^[10-12]。但是,也有一些研究表明,生物炭还田对农田土壤温室气体减排以及作物增产没有作用或有副作用^[13,14]。导致结果不一致的原因可能是生物炭性质、土壤类型、施肥方法、作物种类以及其它一些环境因素的差异^[14,15]。

目前关于生物炭减排的研究有很多,但是,关于生物炭对关中壤土温室气体减排的研究还比较少^[16]。生物炭作为一种减缓气候变化的方法以及长期的碳固存机制,应该在不同土壤类型和不同气候环境下进行研究。另外,生物炭的性质至关重要,目前大多数研究施用的生物炭是以作物秸秆和粪肥为原材料的^[10,17],以林业废弃物为原料的研究较少,并且这些研究大部分为室内培养^[12,15]。本试验采用苹果树枝条生物炭,研究其对壤土土壤理化性质以及温室气体排放的影响,以为生物炭在增汇减排方面的推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验地位于陕西省杨凌示范区西北农林科技大学试验田,北纬 34°16',东经 108°04',海拔 458.6 m。该地区属温带大陆性易旱气候区,年均日照时数 2 196 h,年均气温 11~13℃,无霜期 210 d,年均降雨量 500~700 mm。土壤类型为褐土类,壤土亚类,红油土属,黄土母质,系统分类为土垫旱耕人为土,属石灰性土壤。研究所用生物炭为陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司在裂解炉、限氧环境下(450℃)由废弃果树树干、枝条热裂解所得,磨细过 1 mm 筛,备用。供试作物选用辣椒(黑风品种)。

试验开始时土壤基础理化性质为:总有机质 12.64 g·kg⁻¹,全氮 0.71 g·kg⁻¹,全磷 0.43 g·kg⁻¹,全钾 19.64 g·kg⁻¹,硝态氮 18.20 mg·kg⁻¹,铵态氮 15.90 mg·kg⁻¹,速效磷 12.38 mg·kg⁻¹,速效钾 193.00 mg·kg⁻¹,pH 7.33(土水比为 1:2.5),容重 1.30 g·cm⁻³。生物炭基础理化性质:C 72.38%,N 1.19%,O 23.81%,H 2.62%,硝态氮 0.52 mg·kg⁻¹,铵态氮 1.86 mg·kg⁻¹,比表面积 86.70 m²·g⁻¹,pH 10.43(土水比为 1:10)。

1.2 试验设计

生物炭于 2012 年 4 月一次性撒施于土壤表层

并与耕层(0~20cm)土壤混匀,参照文献[9]以及试验团队前期的盆栽试验^[18]选择其用量为 5 个水平:对照 B0(0 t·hm⁻²)、B20(20 t·hm⁻²)、B40(40 t·hm⁻²)、B60(60 t·hm⁻²)、B80(80 t·hm⁻²),采用随机区组设计,3 次重复,小区面积为 1.35 m×3.50 m,小区之间设 0.5 m 的隔离保护带。在辣椒移栽前以及整个辣椒生长期均未做任何施肥处理,辣椒于 2015 年 4 月 25 号种植,辣椒种植密度为每公顷 52 000 株。

1.3 土壤样品的采集与测定

分别在辣椒种植前、开花期、结果期和收获后在每个小区采用随机布点的方法用土钻(直径 5 cm)采集 0~20 cm 的混合土壤样品,每个处理 3 个重复,各取 1 kg 左右新鲜土样放于冰箱中保鲜,其余风干过 1 mm 筛备用。在辣椒移栽前(4 月下旬)测定土壤水稳性团聚体,土壤水稳性团聚体用湿筛法测定;土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法;硝铵态氮含量采用 1 mol·L⁻¹ KCl 浸提-连续流动分析仪法。

1.4 气体样品的采集与测定

气体样品采用静态暗箱法采集并于当天用 Agilent7890A 气相色谱仪进行测定,CO₂ 在 375℃ 通入 H₂ 先经过 Ni 催化转化为 CH₄ 后再进入检测器分析,CH₄ 用氢火焰离子化检测器(FID)测定,N₂O 用电子捕获检测器(ECD)测定^[19]。采气箱规格为 50 cm×50 cm×50 cm,采样时间为上午 08:00~11:00,采样频率为每 10 d 一次,下雨天除外。取气前 1 min 盖上箱体并用水密封,打开风扇电源,风扇运行使箱内气体混合均匀。以此为 0 时刻,用 50 mL 医用注射器连续采集 0~10 min~20 min~30 min 共 4 针气样,然后带回实验室测定。另外,在采气的同时测定箱温、气温和土温。

1.5 数据处理

综合增温潜势(GWP)按照单位质量 CH₄ 和 N₂O 的全球增温潜势在 100 a 时间尺度上分别为 CO₂ 的 25 倍和 298 倍计算不同处理的综合增温潜势^[20],即:

$$GWP = 25R_{CH_4} + 298R_{N_2O}$$

式中,GWP 为综合增温潜势(以 CO₂-eq 计,kg·hm⁻²);R_{CH₄} 为 CH₄ 整个试验期内累积排放量(kg·hm⁻²);R_{N₂O} 为 N₂O 整个试验期内累积排放量(kg·hm⁻²)。

试验数据的整理采用 Microsoft Excel 2007,图

形的绘制采用 Origin 9.0, 单因素方差分析和多重比较(采用最小显著差法)采用 SPSS 18.0.

2 结果与讨论

2.1 生物炭对土壤温度、团聚体、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和微生物量碳的影响

土壤温度主要受大气温度的影响,在整个试验观察期内(图1),土壤最高温度和大气日平均最高温度分别为 31.9°C 和 30.0°C. 当日平均气温处于上升阶段时(4月25日~8月1日),施炭处理的温度低于对照处理;相反,当日平均气温处于下降阶段时(9月1~23日),施炭处理的温度则高于对照处理.

0~20 cm 的土壤团聚体分布如表1,从中可以看出,除了 <0.25 mm 的团聚体,生物炭的施用显著增加了土壤中 >0.25mm 的团聚体含量,尤其是 >5

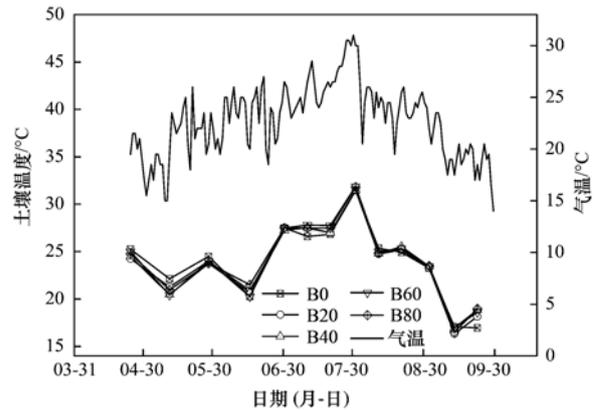


图1 施用生物炭对土壤温度的影响

Fig. 1 Effects of biochar on soil temperature

mm、5~2 mm 和 1~0.5 mm 的团聚体含量. 且土壤中 >0.25 mm 的团聚体含量与生物炭施用量呈正相关关系.

表1 不同生物炭用量对土壤水稳性团聚体的影响¹⁾/%

Table 1 Effects of different dosages of biochar on distribution of water-stable aggregates/%

处理	团聚体大小/mm					
	>5	5~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	<0.25
B0	1.58 ± 0.47c	2.95 ± 0.25c	3.29 ± 0.11b	3.99 ± 0.17c	5.01 ± 0.12b	33.29 ± 0.38a
B20	4.63 ± 0.42ab	3.69 ± 0.07b	3.37 ± 0.45b	4.94 ± 0.21b	5.28 ± 0.32ab	28.09 ± 0.48b
B40	4.24 ± 0.20b	3.68 ± 0.46b	3.06 ± 0.13b	5.47 ± 0.41a	5.47 ± 0.09a	28.09 ± 0.77b
B60	4.68 ± 0.15ab	4.34 ± 0.04a	3.40 ± 0.15b	4.84 ± 0.24b	5.28 ± 0.19ab	27.30 ± 1.47b
B80	5.34 ± 0.55ab	3.94 ± 0.32ab	4.00 ± 0.31a	4.88 ± 0.22b	4.59 ± 0.18c	27.41 ± 0.47b

1) 土层深度为 0~20 cm; 不同小写字母表示不同处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)

从图2中可以看出,在整个辣椒生长季,土壤 NO_3^- -N 含量呈下降趋势. 在辣椒种植前,施炭处理 NO_3^- -N 含量显著高于对照处理且 NO_3^- -N 含量与生物炭施用量呈正相关关系. 在辣椒开花期和辣椒结果期,当生物炭施用量大于等于 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤 NO_3^- -N 含量显著高于对照处理,在辣椒开花期,土壤 NO_3^- -N 含量与生物炭施用量呈正相关关系,而在辣椒结果期,B60 处理 NO_3^- -N 含量显著高于其他各处理. 在辣椒收获后,B20、B40 和 B60 显著高于对照处理,且 B40 效果最好. 对于土壤 NH_4^+ -N,在整个生长季均表现为施炭处理显著高于对照处理,且 B20、B40、B60 和 B80 分别比对照高 4.1%~21.1%、9.1%~27.2%、17.1%~31.9% 和 23.5%~72.9%. 另外,在辣椒结果期,各处理中土壤 NH_4^+ -N 含量均低于其他 3 个时期.

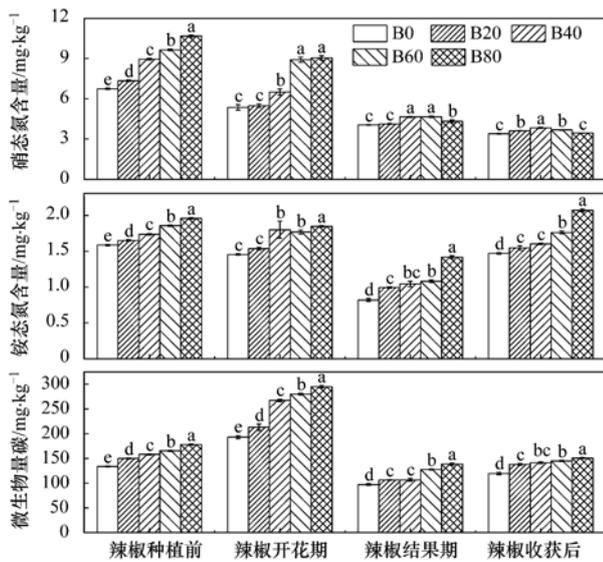
对于土壤微生物量碳,在辣椒的各生长期均表现为施炭处理显著高于对照处理,且土壤微生物量碳含量与生物炭施用量呈正相关关系,B20、B40、B60 和 B80 在整个试验期内分别增加了 9.3%~

15.5%、9.3%~38.3%、21.4%~44.9% 和 26.2%~52.6%. 这说明施用生物炭显著增加了土壤微生物的活性. 在辣椒开花期之前,土壤微生物量碳呈增加趋势,而在辣椒开花期之后,土壤微生物量碳含量显著降低. 这可能是辣椒结果之后对营养的需求量增大,作物与微生物之间对养分的竞争性增加,导致了微生物活性的降低.

2.2 生物炭对土壤温室气体排放的影响

土壤温室气体的排放是短期可变的,并且容易受耕作措施的影响. 图3为整个试验期内 CO_2 的排放动态. 从中可以看出,在辣椒盛花期之前,各处理之间 CO_2 的排放量没有差异. 而在辣椒盛果期之后,施用生物显著提高了 CO_2 排放量,与对照相比,B20、B40、B60 和 B80 在整个试验期内分别增加了 8.5%、15.0%、26.7% 和 26.9%. 在整个试验期内, CO_2 出现了 3 个排放高峰期,分别在 7 月 1 号、8 月 1 号和 8 月 21 号,且 CO_2 排放曲线与温度的变化是一致的(图1和图3).

在整个试验期内, N_2O 排放总体呈下降趋势.



不同小写字母表示不同处理间差异达到显著水平($P < 0.05$)

图2 施用生物炭对土壤硝铵态氮、微生物量碳的影响

Fig. 2 Effects of biochar on soil NO_3^- -N, NH_4^+ -N and microbial biomass carbon

N_2O 最低排放量出现在辣椒最后一次收获前, 这可能是因为辣椒对 NO_3^- -N 的吸收以及生物炭对其的吸附固定造成的. 在整个试验期内, B0、B20、B40、

B60 和 B80 的 N_2O 排放量分别在 6.81 ~ 12.98、5.24 ~ 14.71、3.55 ~ 17.65、7.04 ~ 16.22 以及 2.99 ~ 16.88 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 之间波动. 在辣椒盛花期之前, 施炭处理的 N_2O 排放量高于对照处理, 之后则相反.

对于 CH_4 , 从图 3 中可以看出, 在整个试验期内其排放值均为负值且在辣椒盛花期之后有所降低, 这就意味着壤土对 CH_4 具有汇的作用, 且这种作用受植物生长的影响. B20、B40、B60 和 B80 的平均排放通量分别为 -0.023 、 -0.024 、 -0.025 和 -0.024 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 是对照处理的 1.07、1.14、1.16 和 1.16 倍.

2.3 生物炭对温室气体累积排放量的影响

从表 2 中可以看出, 从 B0 处理的 (6976.23 ± 100) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 到 B80 处理的 (8605.51 ± 78) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 施用生物炭显著提高了 CO_2 累积排放量, 与对照相比提高了 6.73% ~ 23.35%. 另外, B20 和 B40 之间, 以及 B60 和 B80 之间均没有显著差异 ($P > 0.05$) 且排放规律一致, 但是 B60 和 B80 处理 CO_2 累积排放量显著高于 B20 和 B40 ($P < 0.05$). 这说明, 生物炭施用量越高, 对 CO_2 排放的贡献

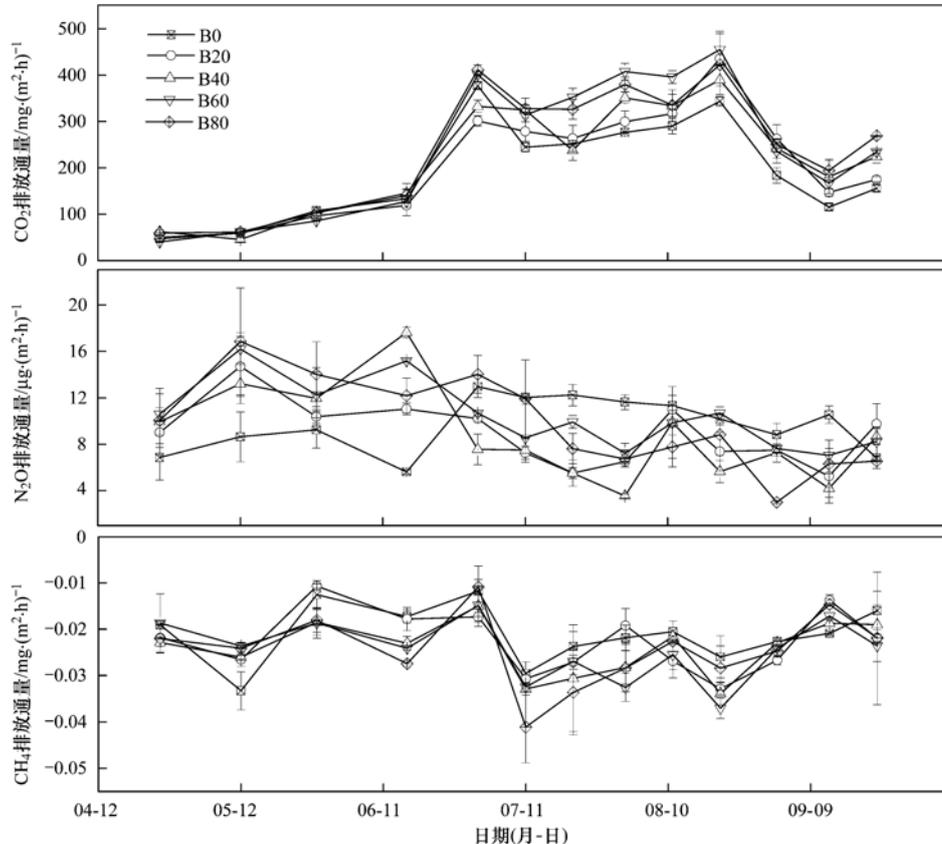


图3 施用生物炭对土壤温室气体排放通量的影响

Fig. 3 Effects of biochar on soil greenhouse gas fluxes

越大。

对于 N_2O , B20、B40、B60 和 B80 的累积排放量分别为 337.85、340.76、398.89 和 380.01 $g \cdot hm^{-2}$, 与对照之间形成了显著性差异 ($P < 0.05$)。与对照相比, B20 和 B40 的累积排放量分别降低了 4.28% 和 3.45%, 而 B60 和 B80 则分别增加了 13.02% 和 7.67%。

从表 2 中可以看出, 生物炭对 CH_4 累积排放量的影响主要表现为, 将其施入土壤后可以增加壤土

对 CH_4 汇的作用。与对照相比, 施用生物炭后, 土壤对 CH_4 的吸收增加了 3.62% ~ 14.17%。除了 B20 之外, 其他各处理与对照之间形成了显著性差异 ($P < 0.05$), 但处理之间差异不显著 ($P > 0.05$)。

从综合增温潜势可以看出, 生物炭对土壤综合增温潜势的影响与生物炭施用量有关, 与对照相比, B20 和 B40 显著降低了土壤的综合增温潜势 ($P < 0.05$), 而 B60 和 B80 则显著增加了土壤的综合增温潜势 ($P < 0.05$)。

表 2 施用生物炭对土壤温室气体累积排放量及综合增温潜势的影响¹⁾

Table 2 Effects of biochar on cumulative greenhouse gas emissions and global warming potential

处理	CO_2 累积排放量 / $kg \cdot hm^{-2}$	N_2O 累积排放量 / $g \cdot hm^{-2}$	CH_4 累积排放量 / $g \cdot hm^{-2}$	综合增温潜势(以 CO_2 -eq 计) / $kg \cdot hm^{-2}$
B0	6976.26 ± 100c	352.94 ± 3.36b	-773.47 ± 3.45b	85.84 ± 0.16b
B20	7445.66 ± 84b	337.85 ± 2.04c	-801.45 ± 3.05b	80.64 ± 0.8c
B40	7830.58 ± 82b	340.76 ± 4.91c	-873.90 ± 4.41a	79.70 ± 0.56c
B60	8590.25 ± 92a	398.89 ± 2.45a	-883.10 ± 6.36a	96.79 ± 0.71a
B80	8605.51 ± 78a	380.01 ± 3.76a	-882.10 ± 3.56a	91.19 ± 0.36a

1) 不同小写字母表示不同处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)

2.4 各指标之间的相关性分析

表 3 为各指标之间的相关性分析, 从中可以看出, 生物炭施用量、土壤 CO_2 平均排放通量、微生物量碳、硝铵态氮、土壤温度以及土壤中大团聚体含量之间均呈极显著正相关关系。这说明施用生物

炭可以改善土壤理化性质, 同时也提高了土壤中 CO_2 的排放量, 这可能与生物炭对土壤微生物的影响有关系。 CH_4 平均排放通量与 N_2O 平均排放通量和大团聚体含量之间呈显著负相关关系, 而与其它各指标之间关系不显著。

表 3 各指标之间的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficients among different indexes

	生物炭施用量	CO_2 平均排放通量	CH_4 平均排放通量	N_2O 平均排放通量	微生物量碳	硝态氮	土壤温度	铵态氮	大团聚体
生物炭施用量	1.000	0.851**	-0.489	0.120	0.982**	0.971**	0.900**	0.982**	0.764**
CO_2 平均排放通量		1.000	-0.419	-0.086	0.875**	0.829**	0.796**	0.796**	0.664**
CH_4 平均排放通量			1.000	-0.518*	-0.486	-0.468	-0.418	-0.488	-0.587*
N_2O 平均排放通量				1.000	0.043	0.164	0.109	0.143	0.289
微生物量碳					1.000	0.943**	0.884**	0.957**	0.775**
硝态氮						1.000	0.873**	0.932**	0.829**
土壤温度							1.000	0.884**	0.731**
铵态氮								1.000	0.689**
大团聚体									1.000

1) * 和 ** 分别代表差异显著 ($P < 0.05$) 和差异极显著 ($P < 0.01$)

3 讨论

3.1 生物炭对土壤温度及团聚体的影响

土壤温度对植物生长发育^[21]、微生物的活性^[22]、有机质的分解以及养分的矿化^[23] 具有重要的作用, 而植物的生长发育、微生物的活性、有机质的分解以及养分的矿化反过来影响着土壤温室气体的排放。土壤温度主要受太阳辐射、大气温度、风速、蒸散作用以及土壤性质的影响^[24]。本研究结

果表明, 生物炭可以缓解土壤温度的变化。这是由于生物炭对土壤导热率和反射比的综合作用造成的^[25]。生物炭通过改变土壤含水量、容重、土壤颜色、地表状况、有机质含量、质地和矿物成分而降低了土壤的导热率和反射比^[26,27], 从而形成对土壤温度变化的缓解作用。

本研究结果表明, 施用生物炭显著增加了土壤中大团聚体 (>0.25 mm) 的含量而降低了土壤中微团聚体 (<0.25 mm) 的比例, 这与 Liu 等^[6] 的研究

结果一致。向土壤中施加生物炭后,由于其较强的稳定性可以在很大程度上抵抗来自外界的物理、化学以及生物的影响,减少了胶粒之间的分离,增加了团聚体颗粒之间的凝聚作用^[28],从而增加了团聚体的稳定性。另外,土壤大团聚体的形成受生物因素的影响,例如:真菌菌丝、微生物合成副产物等^[29]。而生物炭能够增加土壤微生物的活性^[5],这也是生物炭增加土壤大团聚体的含量及稳定性的一个重要原因^[30]。另外,生物炭显著增加了土壤微生物类群的数量以及土壤有机质含量,其增幅与生物炭施用量呈正相关关系^[31,32],且生物炭具有与土壤颗粒形成土壤团聚体和有机无机复合体的活性功能,因此,土壤中大团聚体含量与生物炭施用量呈正相关关系。

3.2 生物炭对土壤硝铵态氮及微生物量碳的影响

NO_3^- -N 是土壤中最难被土壤颗粒所吸附的一种氮素形态,容易造成氮素淋失,导致养分损失。本研究结果表明,施用生物炭显著增加了土壤中 NO_3^- -N 的含量,这主要是因为生物炭表面具有大量正负电荷及高电荷密度的特性^[33],能吸附固定土壤中的 NO_3^- ,从而减少了 NO_3^- -N 的淋失。另外,在辣椒结果期之后土壤中 NO_3^- -N 含量显著降低,这主要是因为辣椒结果之后对氮素需求的增大以及没有后期氮肥补充的原因。在通气良好的土壤中, NH_4^+ -N 会很快通过硝化作用转化成 NO_3^- -N^[34],从而降低土壤中 NH_4^+ -N 的含量。本研究表明,施用生物炭显著提高了土壤中 NH_4^+ -N 的含量,一方面是因为,生物炭对 NH_4^+ 具有较强的吸附作用^[35],从而延缓了 NH_4^+ -N 向 NO_3^- -N 的转换;另一方面,生物炭本身含有一定量的 NH_4^+ -N,且随着生物炭施用量的增加,带入土壤中的 NH_4^+ -N 含量相应地增加。

土壤微生物量碳在一定程度上可以反映土壤中微生物的生物量及其活性。从本研究结果中可以看出,施用生物炭显著提高了土壤中微生物量碳的含量,这是因为生物炭疏松多孔的性质能够为微生物提供适应的生存环境^[7],提高了土壤中微生物的活性,增加了微生物对养分的同化作用。辣椒结果期之后,土壤中氮素含量显著降低,导致土壤中 C/N 增大,作物与微生物之间对养分的竞争性增强,从而使土壤中微生物的活性降低。

3.3 生物炭对土壤温室气体排放的影响

从本试验结果来看,施用生物炭能够增加土壤 CO_2 的排放,并且这种增加作用与生物炭施用量呈

正相关关系,这与 Spokas 等^[11]的研究结果一致。一方面,生物炭作为一种富碳材料,为微生物生长繁殖提供大量的碳源和能源,增加其对土壤有机质的分解作用;另一方面,生物炭由于其特殊结构,能够改善土壤理化性质和生物学特性^[5],增强了微生物活性,从而增加土壤 CO_2 的排放。从表 3 中可以看出,土壤 CO_2 平均排放通量与土壤中大团聚体的比例以及土壤温度呈极显著正相关关系。有研究表明,土壤呼吸对温度具有一定的敏感性,且与温度呈正相关性^[19],因此,土壤 CO_2 的排放具有明显的季节变化规律。而对于土壤团聚体,Xie 等^[30]的研究发现,土壤有机质主要贮存在微团聚体(<0.25 mm)中,但是土壤微团聚体的碳氮比显著高于土壤大团聚体(>0.25 mm)^[36],较高的碳氮比能够抑制土壤微团聚体中有机质的分解。Gunina 等^[36]的这一研究发现很好地解释了土壤 CO_2 平均排放通量与土壤中大团聚体的比例呈极显著正相关关系这一结果。

土壤 N_2O 的排放主要由土壤中氮素含量的高低决定。本研究在辣椒种植之前没有做施肥处理,因此,在整个试验期内, N_2O 的排放量均比较低。以往的研究表明,施用生物炭降低了土壤 N_2O 的排放^[10,12]。而本研究结果显示,施用相对较少的生物炭($20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)降低了土壤 N_2O 的排放,这与前人的研究结果一致,然而,施用相对较多的生物炭($60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $80\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)后,土壤 N_2O 的排放反而增加了。导致这一结果的原因可能是生物炭能够降低氮素在土壤中的移动性,另外,生物炭通过吸附土壤中的 NO_3^- 和 NH_4^+ ,抑制土壤中反硝化作用的进行^[37],因此可以降低土壤 N_2O 的排放;但是,向土壤中施入大量的生物炭后,由于生物炭中大量的活性碳以及其具有的空隙结构,使土壤中的好氧微生物大量繁殖,大量的好氧微生物导致土壤中出现了厌氧条件^[38]。另外,向土壤中施入大量生物炭能够增加其本身含有的矿物态氮的可利用性,从而刺激反硝化细菌在厌氧条件下的繁殖^[15],最终增加了土壤 N_2O 的排放。

旱地农田能够抑制 CH_4 的排放^[39]。本研究结果表明,生物炭的施用增加了这种抑制作用。从表 3 中可以看出, CH_4 平均排放通量与土壤中大团聚体的比例呈显著负相关关系。这主要是因为土壤大团聚体形成的空隙结构能够为嗜甲烷细菌的繁殖提供适宜的环境^[12,17]。施用生物炭导致土壤 CH_4 汇的增加主要是因为,生物炭施入后增加了土壤的氧化

还原电位,改善了土壤碳氮比,刺激了嗜甲烷细菌的活性^[40]。另外,生物炭对 NH_4^+ 的吸附作用降低了 NH_4^+ 对嗜甲烷细菌的竞争^[35],从而增加了 CH_4 氧化的概率。

本研究结果表明,在 100 a 时间尺度上,施用 $20 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $40 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物炭显著降低了土壤的综合增温潜势,而施用 $60 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $80 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物炭则增加了土壤的综合增温潜势,这与生物炭对土壤 N_2O 累积排放量的影响结果一致。

4 结论

(1) 本研究结果表明,生物炭可以缓解土壤温度的变化,增加土壤大团聚体的数量,尤其是 $>5 \text{ mm}$ 、 $5\sim 2 \text{ mm}$ 和 $1\sim 0.5 \text{ mm}$ 的团聚体数量。

(2) 施用生物炭能够显著提高土壤 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 以及土壤微生物量碳含量,且土壤中 NH_4^+ -N 和土壤微生物量碳含量呈正相关关系。

(3) 本研究表明施用 $20 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $40 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物炭可以降低土壤 N_2O 的排放和综合增温潜势,而当生物炭施用量大于等于 $60 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时反而增加了土壤 N_2O 的排放和综合增温潜势;另外,施用生物炭还可以增加壤土对 CH_4 的氧化作用。但是施用生物炭能够增加土壤 CO_2 的排放量且与生物炭施用量呈正相关关系。

参考文献:

- [1] Coordinating Lead Authors: Dennis L. Hartmann (USA, Stefan Brönnimann (Switzerland, Frank J. Dentener (EU/Netherlands, *et al.* IPCC (2013), Climate Change 2013, in The Physical Science Basis, Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO/UNEP, Cambridge [M]. Climate Change 2013-The Physical Science Basis Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014.
- [2] IPCC. Palaeoclimate [A]. In: Solomon S D, Qin M, Manning Z, *et al.* (Eds.). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. 434-497.
- [3] Tubiello F N, Salvatore M, Ferrara A F, *et al.* The contribution of agriculture, forestry and other land use activities to global warming, 1990-2012 [J]. Global Change Biology, 2015, **21** (7): 2655-2660.
- [4] Forbes M S, Raison R J, Skjemstad J O. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems [J]. Science of the Total Environment, 2006, **370**(1): 190-206.
- [5] Belyaeva O N, Haynes R J. Comparison of the effects of conventional organic amendments and biochar on the chemical, physical and microbial properties of coal fly ash as a plant growth medium [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, **66** (7): 1987-1997.
- [6] Liu Z X, Chen X M, Jing Y, *et al.* Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil [J]. Catena, 2014, **123**: 45-51.
- [7] Obia A, Mulder J, Martinsen V, *et al.* In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils [J]. Soil and Tillage Research, 2016, **155**: 35-44.
- [8] Huang M, Yang L, Qin H D, *et al.* Fertilizer nitrogen uptake by rice increased by biochar application [J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, **50**(6): 997-1000.
- [9] Zhang D X, Pan G X, Wu G, *et al.* Biochar helps enhance maize productivity and reduce greenhouse gas emissions under balanced fertilization in a rainfed low fertility inceptisol [J]. Chemosphere, 2016, **142**: 106-113.
- [10] Li B, Fan C H, Zhang H, *et al.* Combined effects of nitrogen fertilization and biochar on the net global warming potential, greenhouse gas intensity and net ecosystem economic budget in intensive vegetable agriculture in southeastern China [J]. Atmospheric Environment, 2015, **100**: 10-19.
- [11] Spokas K A, Koskinen W C, Baker J M, *et al.* Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil [J]. Chemosphere, 2009, **77**(4): 574-581.
- [12] Fungo B, Guereña D, Thiongo M, *et al.* N_2O and CH_4 emission from soil amended with steam-activated biochar [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2014, **177**(1): 34-38.
- [13] Nelissen V, Saha B K, Ruyschaert G, *et al.* Effect of different biochar and fertilizer types on N_2O and NO emissions [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, **70**: 244-255.
- [14] Singla A, Iwasa H, Inubushi K. Effect of biogas digested slurry based-biochar and digested liquid on N_2O , CO_2 flux and crop yield for three continuous cropping cycles of komatsuna (Brassica rapa var. perviridis) [J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, **50**(8): 1201-1209.
- [15] 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.
- [16] Schouten S, Van Groenigen J W, Oenema O, *et al.* ' Bioenergy from cattle manure? implications of anaerobic digestion and subsequent pyrolysis for carbon and nitrogen dynamics in soil ' [J]. Global Change Biology Bioenergy, 2012, **4**(6): 751-760.
- [17] Feng Y Z, Xu Y P, Yu Y C, *et al.* Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, **46**: 80-88.
- [18] 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.
- [19] 郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 等. 生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响 [J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3393-3400.

- Guo Y L, Wang D D, Zheng J Y, *et al.* Effect of biochar on soil greenhouse gas emissions in semi-arid region[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3393-3400.
- [20] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 生物黑炭对旱地土壤 CO₂、CH₄、N₂O 排放及其环境效益的影响[J]. *生态学报*, 2015, **35**(11): 3615-3624.
- Gao D C, Zhang L, Liu Q, *et al.* Effects of biochar on CO₂, CH₄, N₂O emission and its environmental benefits in dryland soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(11): 3615-3624.
- [21] Hatfield J L, Prueger J H. Temperature extremes: effect on plant growth and development [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2015, **10**: 4-10.
- [22] Barja M I, Proupin J, Núñez L. Microcalorimetric study of the effect of temperature on microbial activity in soils [J]. *Thermochimica Acta*, 1997, **303**(2): 155-159.
- [23] Koch O, Tschirko D, Kandeler E. Temperature sensitivity of microbial respiration, nitrogen mineralization, and potential soil enzyme activities in organic alpine soils [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, **21**(4): GB4017.
- [24] Mihalakakou G. On estimating soil surface temperature profiles [J]. *Energy and Buildings*, 2002, **34**(3): 251-259.
- [25] 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.
- [26] Ekwue E I, Stone R J, Bhagwat D. Thermal conductivity of some compacted trinidadian soils as affected by peat content [J]. *Biosystems Engineering*, 2006, **94**(3): 461-469.
- [27] Sinha A K. Spectral reflectance characteristics of soils and its correlation with soil properties and surface conditions[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 1986, **14**(1): 1-9.
- [28] Annabi M, Houot S, Francou C, *et al.* Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, **71**(2): 413-423.
- [29] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, **33**(2): 141-163.
- [30] Xie J Y, Xu M G, Ciren Q J, *et al.* Soil aggregation and aggregate associated organic carbon and total nitrogen under long-term contrasting soil management regimes in loess soil [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, **14**(12): 2405-2416.
- [31] 陈心想, 耿增超, 王森, 等. 施用生物炭后壤土土壤微生物及酶活性变化特征[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(4): 751-758.
- Chen X X, Geng Z C, Wang S, *et al.* Effects of biochar amendment on microbial biomass and enzyme activities in loess soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(4): 751-758.
- [32] 王月玲, 耿增超, 尚杰, 等. 施用生物炭后壤土土壤有机碳、氮及碳库管理指数的变化[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(3): 532-539.
- Wang Y L, Geng Z C, Shang J, *et al.* Soil organic carbon and nitrogen and carbon pool management index in loess soil as influenced by biochar[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(3): 532-539.
- [33] Mizuta K, Matsumoto T, Hatate Y, *et al.* Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. *Bioresource Technology*, 2004, **95**(3): 255-257.
- [34] Güereña D, Lehmann J, Hanley K, *et al.* Nitrogen dynamics following field application of biochar in a temperate North American maize-based production system [J]. *Plant and Soil*, 2013, **365**(1-2): 239-254.
- [35] Clough T J, Condon L M, Pignatello J, *et al.* Biochar and the nitrogen cycle: introduction [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, **39**(4): 1218-1223.
- [36] Gunina A, Kuzyakov Y. Pathways of litter C by formation of aggregates and SOM density fractions: implications from ¹³C natural abundance [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **71**: 95-104.
- [37] Singh B P, Hatton B J, Singh B, *et al.* Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, **39**(4): 1224-1235.
- [38] Martin S L, Clarke M L, Othman M, *et al.* Biochar-mediated reductions in greenhouse gas emissions from soil amended with anaerobic digestates[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2015, **79**: 39-49.
- [39] Wei X M, Su Y, Zhang H T, *et al.* Responses of methanotrophic activity, community and EPS production to CH₄ and O₂ concentrations in waste biocover soils [J]. *Waste Management*, 2015, **42**: 118-127.
- [40] Huang W, Zhao Y J, Wu J T, *et al.* Effects of different influent C/N ratios on the performance of various earthworm eco-filter systems: nutrient removal and greenhouse gas emission [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2014, **30**(1): 109-118.

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation of Haze Pollution over China from 1960 to 2013	FU Chuan-bo, TANG Jia-xiang, DAN Li, <i>et al.</i> (3237)
Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Aerosol Particles in Taiyuan, Shanxi	WANG Lu, WEN Tian-xue, MIAO Hong-yan, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions During a Typical Haze Pollution in the Autumn in Shijiazhuang	LIU Jing-yun, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3258)
Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing	WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, <i>et al.</i> (3268)
Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (3280)
Characteristics of Speciated Atmospheric Mercury in Chongming Island, Shanghai	LI Shu, GAO Wei, WANG Shu-xiao, <i>et al.</i> (3290)
Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir	WANG Yong-min, ZHAO Zheng, SUN Tao, <i>et al.</i> (3300)
Variation Characteristics and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Changbai Mountain Station	WU Fang-kun, SUN Jie, YU Ye, <i>et al.</i> (3308)
Characterization of Particle Size Distributions of the No-organized Lead Emission for a Lead and Zinc Smelter	LIU Da-jun, WANG Jia-quan (3315)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains	JIA Wen-xiong, LI Zong-xing (3322)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing-Yichang Section)	GUO Wei, YIN Shu-hua, XU Jian-xin, <i>et al.</i> (3333)
Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors	CHE Fei-fei, WANG Da-peng, ZHEN Zhuo, <i>et al.</i> (3340)
Spatial, Temporal Distribution Characteristics and Potential Risk of PPCPs in Surface Sediments from Taihu Lake	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3348)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in the Karst Groundwater System	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3356)
Comparison on the Hydrogeochemical Characteristics of Typical Karst Groundwater System in Southwest China, a Case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing	ZHAN Zhao-jun, CHEN Feng, YANG Ping-heng, <i>et al.</i> (3365)
Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply	LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, <i>et al.</i> (3375)
Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release	LI Le, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (3384)
Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (3394)
Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water	ZHANG Si-min, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3402)
Assessment of Ecosystem Health of Baogang Tailings Groundwater Based on Microbiome Index of Biotic Integrity (M-IBI)	AN Xin-li, CHEN Ting-ting, ZHAO Han, <i>et al.</i> (3413)
Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir	WANG Zu-wei, WANG Yi-wei, HOU Ying-ying, <i>et al.</i> (3423)
Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater	LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, <i>et al.</i> (3430)
Effects of a Symbiotic Bacterium on the Accumulation and Transformation of Arsenate by <i>Chlorella salina</i>	XU Ping-ping, LIU Cong, WANG Ya, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Nitrate in Water on the Growth of <i>Iris pseudacorus</i> L. and Its Adsorption Capacity of Nitrogen in a Simulated Experiment	WANG Bing, WEN Fen-xiang, XIAO Bo (3447)
Adsorption Behavior of <i>p</i> -hydroxy Biphenyl onto Sediment of the Yellow River in Lanzhou	ZHOU Qi, JIANG Yu-feng, SUN Hang, <i>et al.</i> (3453)
Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process	YIN Zi-hua, SHENG Xiao-lin, LIU Rui, <i>et al.</i> (3460)
Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource	WU Yu-chao, CHEN Li-jun, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3466)
Reaction Kinetics and Impacting Mechanism of Cr(VI) Removal in Fe ⁰ -PRB Systems	LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i> (3473)
Adsorption Cd ²⁺ from Solution by EDTA-modified Silicate Nanoparticles	JIANG Shun-cheng, QIN Rui, LI Man-lin, <i>et al.</i> (3480)
Analysis and Characterization of Multi-modified Anodes via Nitric Acid and PPy/AQDS in Microbial Fuel Cells	SHEN Wei-hang, ZHU Neng-wu, YIN Fu-hua, <i>et al.</i> (3488)
Adsorption Characteristics of Phosphorus Wastewater on the Synthetic Ferrihydrate	CUI Meng-meng, WANG Dian-sheng, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i> (3498)
Performance of Bio-zeolite Constructed Wetland in Dispersed Swine Wastewater Treatment	MOU Rui, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3508)
Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis by Glycerol-based Mixed Culture and Its Relation with Oxygen Uptake Rate (OUR)	LIU Dong, ZHANG Xiao-ting, ZHANG Dai-jun, <i>et al.</i> (3518)
Kinetics and Mechanistic Investigation of the Photocatalytic Degradation of Clothianidin	HU Qian, YANG Hai, SHI Ni, <i>et al.</i> (3524)
Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (3532)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China	DONG Jie, HUANG Ying, LI Yong-xia, <i>et al.</i> (3540)
Vertical Distribution of Heavy Metals and Its Response to Organic Carbon in Red Soil Profile	JIA Guang-mei, MA Ling-ling, XU Dian-dou, <i>et al.</i> (3547)
Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice	GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3554)
Effect of Modified Biochars on Soil Cadmium Stabilization in Paddy Soil Suffered from Original or Exogenous Contamination	YANG Lan, LI Bing, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3562)
Performance of Bioleaching Combined with Fenton-like Reaction in Heavy Metals Removal from Contaminated Soil	ZHOU Pu-xiong, YAN Xie, YU Zhen, <i>et al.</i> (3575)
Effect of Long-term Oil Contamination on the Microbial Molecular Ecological Networks in Saline-alkali soils	ZHAO Hui-hui, XIAO Xian, PEI Meng, <i>et al.</i> (3582)
Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui (3590)
Fungal Community Structure of Different Degeneration <i>Deyeuxia angustifolia</i> Wetlands in Sanjiang Plain	SUI Xin, ZHANG Rong-tao, XU Nan, <i>et al.</i> (3598)
Short-term Effects of Nitrogen and Sulfate Addition on CH ₄ and CO ₂ Emissions in the Tidal Marsh of Min River Estuary	HU Min-jie, REN Peng, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (3606)
Variation of Soil CO ₂ Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment	DU Lan-lan, WANG Zhi-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (3616)
Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jimci Region of Taiyuan City	YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, <i>et al.</i> (3625)
Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil	WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3634)
Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of <i>Populus cathayana</i>	XIN Yue, SHANG Bo, CHEN Xing-ling, <i>et al.</i> (3642)
Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin	LI Hong-jian, YANG Yan, YAN Jun-xia (3650)
Composition and Evolution Characteristics of Dissolved Organic Matter During Composting Process	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3660)
Effects of Acidic and Basic Modification on Activated Carbon for Adsorption of Toluene	LIU Han-bing, YANG Bing, XUE Nan-dong (3670)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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)

2016年9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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