

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

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

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 排放测量	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子轲, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)
黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合	陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)
沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)
南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析	秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)
太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征	曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)
2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)
机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成	袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)
DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响	楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)
紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附	李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)
三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征	江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)
三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)
高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例	孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)
不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应	季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)
丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估	赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)
滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价	王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)
粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险	阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)
鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应	刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)
周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响	贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)
溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响	王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)
微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响	李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)
城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响	唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)
两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究	孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)
巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II)	谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)
改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征	唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)
UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性	任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)
对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究	王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)
高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性	牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)
硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响	周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)
单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响	马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)
钛盐混凝剂调对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制	王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)
城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律	孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)
低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析	信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆峰 (2259)
微丝菌 (<i>Microthrix parvicella</i>) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化	王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)
基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响	吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)
1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性	黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)
长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)
有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响	张名豪, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)
生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响	张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘恩新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)
多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源	孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)
苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征	陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)
河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)
杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价	龚梦丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)
土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力	田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)
添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响	陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)
应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响	尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽蛟, 孙国新, 崔岩山 (2353)
不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系	辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)
花胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响	潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚阗, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)
维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化	徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)
苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素	许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)
g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO	张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)
海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价	耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)
《环境科学》征订启事 (2130) 《环境科学》征稿简则 (2251) 信息 (2178, 2344)	

生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响

张婷¹, 王旭东^{1,2*}, 逢萌雯¹, 刘恩新¹, 白如霞¹, 黎妮¹, 王钰莹¹

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

摘要: 为探讨生物质炭和秸秆碳输入对土壤碳构成和转化的影响, 通过室内培养试验, 研究了单施生物质炭、秸秆及两者配合施入土壤二氧化碳的释放特征以及土壤微生物碳和有机碳的变化。结果表明, 秸秆有机碳在土壤中的矿化率为 21.50% (2% 添加水平), 远大于等量生物质炭的矿化率 (8.09%); 施用等量 (占 4% 土重) 生物质炭和秸秆, 培养 200 d 后土壤有机碳含量分别为 24.40 g·kg⁻¹、17.40 g·kg⁻¹, 表明生物质炭对有机碳的提升作用大于秸秆的。施用生物质炭对土壤固有有机碳有一定的保护作用, 生物质炭与秸秆配合施用促进了秸秆的矿化, 对有机碳矿化影响的交互效应为正值。施用秸秆能大幅度增加土壤微生物碳, 而生物质炭对土壤微生物碳影响小; 秸秆和生物质炭配合也增加了土壤微生物碳, 但其交互效应与培养时间、施用量等有关, 可正可负。

关键词: 秸秆; 生物质炭; 土壤有机碳; 碳矿化; 黑垆土

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2298-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.06.038

Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation

ZHANG Ting¹, WANG Xu-dong^{1,2*}, PANG Meng-wen¹, LIU En-xin¹, BAI Ru-xia¹, LI Ni¹, WANG Yu-ying¹

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

Abstract: To explore the effects of biochar and straw application on soil carbon constitution and transformation, an incubation experiment was conducted to study the characteristics of the release of carbon dioxide, as well as the changes in microbial biomass carbon and organic carbon in soil after applying biochar or straw only, or biochar plus straw. The results showed that the straw mineralization rate of organic carbon in soil was 21.50% at 2% application level, which was much higher than that of biochar (8.09%). With the same addition amount of biochar and straw at 4% level for 200 days incubation, the soil organic carbon content was 24.40 and 17.40 g·kg⁻¹, respectively. It suggested that the positive impact of biochar application on improving soil organic carbon was greater than that of straw. The application of biochar had protective function on soil original organic carbon. Biochar promoted the straw mineralization and resulted in positive interaction effect between biochar and straw on mineralization of soil organic carbon. The application of straw increased soil microbial biomass carbon (MBC) greatly, while biochar had less impact on MBC. The application of straw and biochar also increased soil microbial biomass carbon, but the interaction effect could be positive or negative, which was dependent on the incubation time or application rate.

Key words: straw; biochar; soil organic carbon; organic carbon mineralization; dark loessial soil

联合国政府间气候变化专门委员会第四次评估报告已正式提交, 以全球变暖为主要表现的全球气候急剧变化及其与不断增加的大气温室气体的关系已成为无可非议的事实, 为此, 控制并减少温室气体排放和增加碳汇成为缓解其气候变化的首要任务^[1]。农田是温室气体重要排放源, 由于人类活动的影响, 其温室气体年总排放达到 5.1 ~ 6.1 Pg CO₂-eq (二氧化碳当量) (1 Pg = 10¹⁵ g), 占全球温室气体总排放量的 10% ~ 12%, 因此, 降低农田温室气体排放对减缓全球气候变化具有重要意义^[2]。

我国多数土壤的有机质含量和基础肥力偏低, 秸秆还田是一些地区普遍推广的土壤培肥措施之一^[3]。已有不少学者探讨了秸秆在土壤中的腐解特征^[4-6]、秸秆对土壤有机质^[7]、微生物碳^[8]以及土

壤性质的影响^[9,10]等, 发现秸秆直接还田在土壤中的矿化率高, 提高土壤有机质需要很长时间, 且在不同的生态环境条件下秸秆还田提升土壤有机碳的效果不一样, 有的地区虽然秸秆还田进行了很多年, 但土壤有机质没有明显增加。调控秸秆在土壤中的矿化和腐殖化过程, 既涉及到秸秆中养分的释放, 又涉及到土壤有机碳的固定, 在土壤养分供应和有机碳固定方面具有重要意义。

生物质炭是由植物等生物质材料在完全或部分

收稿日期: 2015-11-03; 修订日期: 2016-01-22

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2012BAD14B11); 农业公益性行业科研专项 (201503116); 大学生科创项目

作者简介: 张婷 (1990 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤化学及生物质炭与秸秆应用, E-mail: 843919100@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: wangxudong01@126.com

缺氧的情况下经热解炭化产生的一类高度芳香化难熔性固态物质^[11],其中的有机碳具有较高的稳定性,在土壤中矿化速率低,可以有效地提高土壤有机质含量^[12]. 因其含碳量高、难于分解、比表面积大、疏松多孔等特性,已成为研究农田固碳减排措施中的热点^[2],也对全球碳的生物地球化学循环和缓解全球气候变化有着不可忽视的作用^[13]. 但是从秸秆等原材料制备成生物质炭的过程中有机碳会有一定程度的损失,释放出的一些挥发性物质对环境有一定危害^[14]. 因此,在现实生产中大量秸秆也只有部分用来转化为生物质炭在农业中利用.

矿化是土壤中有机碳周转的重要过程,是在微生物参与下分解和利用土壤中的活性有机组分并释放出 CO₂ 的过程^[15]. 已有研究表明秸秆可促进土壤有机碳的矿化^[16],生物质炭可减缓土壤有机碳的矿化^[17],但还不清楚两者之间的交互作用如何. 为此,本文通过培养试验,研究了单施不同水平(分别占土重 2% 和 4%)生物质炭和秸秆、或生物质炭和秸秆配合施用对土壤二氧化碳释放、土壤微生物碳和有机碳含量的影响,以期对秸秆还田的有效实施和土壤有机质的调控提供理论和技术指导.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤系采自渭北高原的黑垆土. 土壤有机碳含量为 9.56 g·kg⁻¹. 土壤风干后,过 2 mm 网筛. 生物质炭的氮、碳、氢含量分别为 1.07%、59.40%、2.51%. 秸秆的氮、碳、氢含量分别为 1.50%、40.43%、6.29%. 两种样品经过粉碎过 2 mm 筛后按试验设计水平与土壤充分混合施用.

1.2 试验设计

该试验为二因素三水平完全随机设计,设 9 个处理,参考章明奎等^[18]培养有机碳含量为 17.40 g·kg⁻¹的壤土时,秸秆和生物质炭的添加量为 0、1%、2%,由于本试验所用的土壤为渭北高原的黑垆土. 土壤有机碳含量为 9.56 g·kg⁻¹,故本试验秸秆(小麦秆)和生物质炭的添加量设计为 0、2%、4% 这 3 个水平,各处理如表 1.

采用室内培养试验,将秸秆、生物质炭按上述比例添加到过 2 mm 筛的土壤样品中,置于聚乙烯广口瓶中(带密封盖),调节含水量为田间持水量的 70%,在 20℃ 下培养 200 d,每个处理重复 3 次.

1.3 样品采集与指标测定方法

土壤呼吸采用静态碱液吸收,酸液滴定的方

表 1 试验设计

Table 1 Experiment design

处理代码	秸秆添加量/%	生物质炭添加量/%
S0B0	0	0
S0B1	0	2
S0B2	0	4
S1B0	2	0
S1B1	2	2
S1B2	2	4
S2B0	4	0
S2B1	4	2
S2B2	4	4

法^[19]. 分别于第 1、3、6、10、20、30、40、60、80、120、160、200 d 更换碱液并滴定,同时通入新鲜空气;称重计算土壤水分状况,并进行调节.

分别于第 6、20、40、80、120、160、200 d 采集土样,测定土壤有机碳和土壤微生物碳含量,前者用重铬酸钾容量法^[20],后者用氯仿熏蒸法^[21].

1.4 数据处理

采用 Originpro 9 和 SAS 统计软件进行数据的统计和方差分析.

2 结果与分析

2.1 二氧化碳释放规律

2.1.1 二氧化碳释放量

在培养过程中,各处理二氧化碳累积释放量均随培养时间延长而增加(见图 1). 与对照相比,施用 2% 生物质炭处理的二氧化碳累积释放量与对照接近,而施用 4% 生物质炭的处理在培养 80 d 后低于对照. 施用秸秆的二氧化碳累积释放量明显大于施用生物质炭的,且随着秸秆量的增加而增加.

秸秆和生物质炭配合施用,在施用等量秸秆的

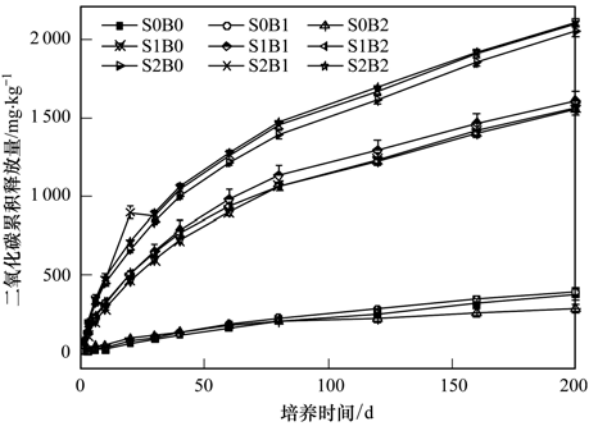


图 1 不同培养时间二氧化碳累积释放曲线

Fig. 1 Cumulative releasing carbon dioxide rate curve at different incubation time

情况下,当生物质炭的加入量较低时促进了二氧化碳的释放,但当加入生物质炭水平较高时,表观上看促进效应减小(S1B2 略低于 S1B1);这与 S0B2 处理二氧化碳释放量较低有关.在施用等量生物质炭的情况下,配施秸秆使二氧化碳的释放量大幅度增加,且随着配施秸秆量的增加而增加.

在 200 d 培养周期内,不同处理二氧化碳的累积释放量(见图 2),与对照(S0B0)相比,添加 2%、4% 的秸秆处理,二氧化碳的累积释放量远高于对照,平均是对照的 4.18、5.48 倍;添加 4% 的秸秆处理和 2% 的相比,二氧化碳累积释放量增加了 31.05%.说明土壤二氧化碳累积释放量主要取决于秸秆的添加量大小.与对照(S0B0)相比,添加 2% 生物质炭的处理,土壤有机碳的累积矿化量与对照相当;而添加 4% 生物质炭的处理,土壤有机碳的累积释放量下降了 23.03%,差异达显著水平.秸秆和生物质炭配合施用,土壤二氧化碳累积释放量的交互作用均为正值,分别为 27.22 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (S1B1)、77.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (S1B2)、32.81 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (S2B1)、143.42 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (S2B2).说明生物质炭与秸秆混合施用对秸秆有机碳的矿化表现出促进作用,且随着生物质炭施用量的增加而促进作用越大.

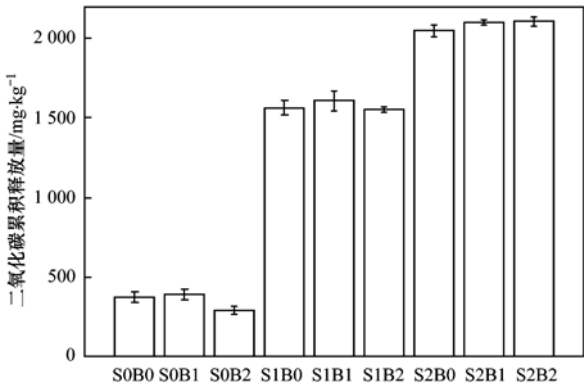


图 2 培养 200 d 土壤二氧化碳累积释放量

Fig. 2 Cumulative releasing carbon dioxide amount on 200th day

2.1.2 二氧化碳释放速率

各处理土壤有机碳矿化速率变化趋势呈现出比较明显的阶段性(见表 2):第一阶段从培养开始到培养 30 d,二氧化碳的释放速率从初始最高后迅速下降,这个阶段的持续时间短,但是矿化量大;第二阶段从 30 d 起直至培养结束,二氧化碳释放速率减少,持续时间长.与对照相比,施用秸秆的处理二氧化碳释放速率大,且随着秸秆添加量的增加而增大,尤其是在培养初期更为明显.秸秆配施生物质炭使释放速率有增加的趋势,但仅表现在培养初期.在

表 2 施用秸秆和生物质炭下的黑垆土二氧化碳释放速率/ $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$

Table 2 Releasing carbon dioxide rate of dark loessial soil with straw and biochar application/ $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$

培养时间/d	S0B0	S0B1	S0B2	S1B0	S1B1	S1B2	S2B0	S2B1	S2B2
1	8.46	11.13	21.82	52.40	55.74	65.40	74.57	83.57	83.34
3	1.83	2.11	4.88	3.16	36.24	37.04	53.45	54.62	58.37
6	3.66	4.50	4.79	29.54	33.90	33.07	47.62	48.88	48.78
10	0.38	0.98	1.38	20.24	20.83	21.85	30.62	32.12	33.61
20	4.26	4.47	4.32	17.92	19.33	18.57	21.75	23.14	23.13
30	2.47	2.36	1.90	13.32	14.30	13.06	17.05	17.60	17.90
40	2.65	2.96	2.37	12.47	13.91	12.25	16.69	17.05	17.18
60	2.30	2.90	2.15	8.75	9.45	8.39	10.70	10.77	10.81
80	2.10	1.89	1.26	8.36	7.57	6.69	8.84	9.41	9.57
120	1.17	1.45	0.45	4.19	4.02	3.83	5.53	5.55	5.56
160	1.73	1.53	0.90	4.58	4.41	4.50	5.95	5.89	5.57
200	1.29	1.14	0.70	3.71	3.54	3.90	4.94	4.81	4.77

培养的前 30 d,施用生物质炭的处理土壤二氧化碳释放速率大于对照,且随生物质炭添加量的增加而升高;从培养第 30 d 直至培养结束,与对照接近.

2.2 土壤微生物碳变化

在培养过程中,各处理微生物碳含量呈现上下波动变化(见图 3).和对照相比,单独施用秸秆土壤微生物碳含量明显升高,且随施秸秆量的增加而增加.单独施用生物质炭对微生物碳含量总体看来无显著影响.

由表 3 可知,当培养到 20 d 时,秸秆和生物质炭配合施用,对土壤中微生物碳含量的交互作用分别为 $-100.80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (S1B1)、 $-147.62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (S2B1)、 $42.39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (S1B2)、 $100.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (S2B2),表明生物质炭配施量高(4%)时呈现出正交互效应,配施量低(2%)时呈现出负交互效应;当培养到 80 d 时,配合施用秸秆和生物质炭对土壤中微生物碳含量的交互作用分别为: $17.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (S1B1)、 $89.83 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (S1B2)、 $-112.85 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

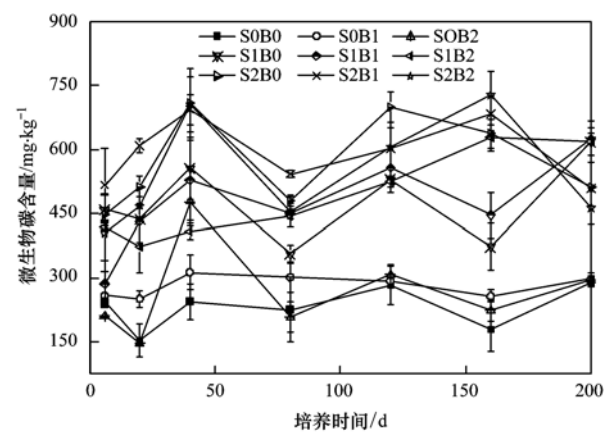


图3 施用秸秆和生物质炭下的微生物碳含量
Fig. 3 Microbial biomass carbon content of soil with straw and biochar application

(S2B1)、 $-31.45\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (S2B2),说明高量秸秆(4%)与生物质炭的配施对微生物碳的影响为负交互效应,而低量秸秆(2%)与生物质炭配施表现出正激发效应.在培养200 d时,秸秆和生物质炭配合施用对土壤中微生物碳含量的交互作用均为负值(S1B1: $-1.75\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、S1B2: $-5.47\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、S2B1: $-11.81\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、S2B2: $-54.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),说明培养一定时间后,秸秆和生物质炭配合施用没有促进微生物碳的增加.

表3 施用秸秆和生物质炭对黑垆土微生物碳影响的交互效应/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 3 Interaction effect on MBC of dark loessial soil with application of straw and biochar/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$				
培养时间/d	S1B1	S1B2	S2B1	S2B2
6	-187.41	179.78	-219.63	240.14
20	-100.80	42.39	-147.62	100.38
40	-95.13	-285.35	222.37	11.94
80	17.24	89.83	-112.85	-31.45
120	18.35	-48.40	-45.32	-127.24
160	-6.08	217.89	-140.79	-27.62
200	-1.75	-5.47	-11.81	-54.12

2.3 土壤有机碳变化

随着培养时间的延长,土壤中的有机碳含量逐渐减少(见图4).在培养初期,添加秸秆或生物质炭均可提高土壤有机碳含量,且随着秸秆、生物质炭加入量的增加而增加;在等量条件下添加生物质炭的土壤有机碳含量大于添加秸秆的.其中对照土壤(即S0B0)在200 d的培养中,有机碳矿化了2.13%.添加生物质炭的土壤,有机碳分别矿化了8.09%(2%处理)和9.55%(4%处理);添加秸秆的土壤有机碳分别矿化了21.50%(2%处理)和

28.95%(4%处理);不论是生物质炭还是秸秆,均随添加量增加而矿化率增大.秸秆和生物质炭配合施用,在等量秸秆情况下,随着生物质炭配施量的增加,土壤有机碳矿化率有升高趋势(S1B1、S1B2两个处理分别矿化了26.00%、27.90%,S2B1、S2B2两个处理分别矿化了33.88%、36.88%);和单施秸秆的相比,秸秆和生物质炭配合施用矿化率更高.

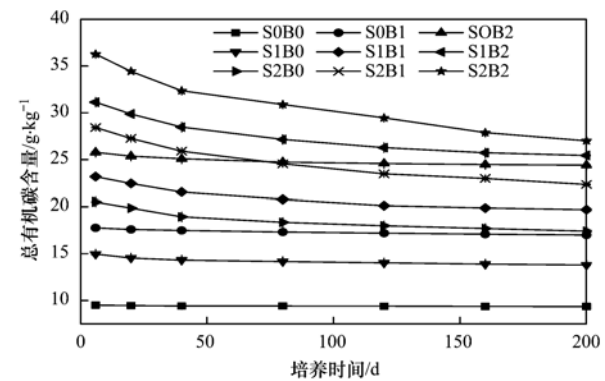


图4 施用秸秆和生物质炭下的有机碳含量
Fig. 4 Organic carbon content in soil with straw and biochar application

如表4所示,秸秆和生物质炭配合施用对土壤有机碳含量影响的交互作用均为负值,说明秸秆和生物质炭配合施用促进了有机碳的矿化;且随着培养时间的增长,负交互效应逐步加剧.

表4 施用秸秆和生物质炭对有机碳影响的交互效应/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Interaction effect on TOC with application of straw and biochar/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$				
培养时间/d	S1B1	S1B2	S2B1	S2B2
6	-0.03	-0.09	-0.34	-0.50
20	-0.24	-0.59	-0.75	-1.36
40	-0.85	-1.53	-1.12	-2.26
80	-1.29	-2.32	-1.69	-2.76
120	-1.71	-2.94	-2.32	-3.72
160	-1.72	-3.26	-2.43	-4.92
200	-1.74	-3.41	-2.70	-5.44

3 讨论

3.1 生物质炭和秸秆配合施用对二氧化碳释放的影响

本研究表明,单独施用生物质炭,尤其是较高用量时(4%),在培养过程中可降低土壤二氧化碳的累积释放量,意味着土壤固有有机碳矿化降低.匡崇婷的研究也证实了这一点^[17].这与生物质炭自身的结构特征有关:生物质炭是有大量孔隙结构的惰性芳香环型缩聚类物质,具有较大的比表面,通过包封作用或吸附保护作用与土壤固有有机质结

合^[22],降低土壤有机质被微生物分解的概率,起到对土壤有机质的保护作用^[23,24].这种作用大小与生物质炭的用量有关,低量时保护效应小,高量时保护作用才得以体现.所以,生物质炭在4%施用水平时表现出抑制土壤有机碳分解的作用,而在2%水平时无抑制作用.秸秆和生物质炭配合施用,在施用等量秸秆的情况下,当生物质炭的加入量较低时促进了二氧化碳的释放(S1B1和S1B0相比),但当加入生物质炭水平较高时,没有促进二氧化碳的释放(S1B2略低于S1B1而高于S1B0).这一方面与生物质炭施入土壤后,土壤的孔隙状况得到改善,土壤微生物的活性增强、数量增多有关^[20];另一方面,是因为对秸秆碳的保护作用,因此,随着生物质炭施用量提高,矿化率并没有增加(S1B2和S1B1相比).综合分析说明,添加生物质炭对土壤固有有机碳和外源秸秆碳的影响存在差异.

3.2 生物质炭和秸秆配合施用对土壤微生物碳的影响

微生物碳的高低一般可以反映出微生物数量的多少.土壤施用秸秆、生物质炭后微生物的数量变化受到有机碳源和营养元素的反馈作用,常常存在一定的上下波动变化^[25].输入秸秆碳使土壤微生物碳含量增加,且输入量越大,土壤微生物碳含量越大.这与郭成藏等^[26]的研究结果一致.原因是输入秸秆碳增加了土壤碳量,为微生物提供了碳源.生物质炭的碳源为惰性碳源,因此添加后不能显著促进微生物的繁殖,因此没有增加微生物碳.秸秆和生物质炭配合施用对微生物碳的影响情况较复杂,在培养初期(20d),秸秆与高量生物质炭配合对微生物碳的影响表现出正交互作用,进一步促进了微生物的繁殖.说明在施用秸秆增加微生物的同时,如果再配以一定量的生物质炭,可以进一步促进微生物的数量增加.当然随着秸秆有机碳的分解、消耗,这种交互效应只能保持一定的时间,到培养200d时,秸秆与生物质炭配合对微生物碳的影响表现出的交互效应均为负值,没有促进微生物数量的进一步增加.这可能与前期的正交互效应导致底物过度消耗所致.具体原因需要进一步研究.

3.3 生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳的影响

土壤中输入秸秆或生物质炭均可提高土壤有机碳含量,且输入量越大,土壤有机碳含量越高.这与Novak等^[27]的结论一致.随着培养时间的延长,添加秸秆的土壤有机碳的下降幅度比添加生物质炭的大很多.这跟生物质炭本身所含有机碳的稳定性高

有关^[18].就有机碳残留量而言,添加生物质炭的效果比添加秸秆的好.秸秆和生物质炭配合施用,联合增碳表现出负交互效应,说明秸秆与生物质炭配合后促进了外源有机碳(秸秆碳)的分解,没有促进有机碳在土壤中的固定.这可能与生物质炭的施用改善了土壤的物理性状(孔隙状况、通气状况等)有关,从而有利于外源碳的分解.

3.4 微生物量碳、土壤呼吸和有机碳储量之间的关系

矿化是在微生物参与下分解和利用土壤中的活性有机组分并释放出CO₂的过程^[15],而微生物量碳是土壤有机碳库中的活性部分,其高低可部分反映微生物活动的强弱^[28,29],故二氧化碳释放量与微生物量碳关系甚密.本试验结果表明,施用秸秆加速了土壤呼吸、提高了微生物碳含量,且两者都是随秸秆添加量的增加而增加.这说明土壤呼吸与微生物碳之间存在正相关关系.土壤呼吸程度和有机碳含量之间呈负相关关系,有机碳的矿化速率加快,总矿化量变大,说明二氧化碳释放量变大、有机碳含量变低.本试验结果显示,添加秸秆与添加生物质炭相比,在土壤中的矿化量大,矿化速率高,土壤有机碳增加得少.

4 结论

(1)秸秆在土壤中的矿化量大,矿化速率高,而生物质炭则矿化量小、矿化速率低.添加生物质炭可降低土壤固有有机碳的矿化速率和矿化量.秸秆和一定量的生物质炭配合施用,对土壤有机碳影响的交互作用为负值,促进了秸秆的矿化.

(2)单独添加秸秆可显著提高土壤微生物碳,而单独添加生物质炭对微生物碳影响较小.生物质炭和秸秆配合施用对土壤微生物碳的影响与培养时间、生物质炭或秸秆的添加水平等有关,可以是正交互效应也可以是负交互效应.不能一概而论,需要具体情况具体分析.

(3)添加秸秆和生物质炭均可提高土壤有机碳含量,等量生物质炭的增碳作用大于秸秆的,但是两者配合施用,其增碳效应的交互效应均为负值.

参考文献:

- [1] 郑聚锋,程琨,潘根兴,等.关于中国土壤碳库及固碳潜力研究的若干问题[J].科学通报,2011,56(26):2162-2173.
- [2] 刘杰云,沈健林,邱虎森,等.生物质炭添加对农田温室气体净排放的影响综述[J].农业环境科学学报,2015,34(2):205-212.
- [3] 张晓文,赵改宾,杨仁全,等.农作物秸秆在循环经济中的

- 综合利用[J]. 农业工程学报, 2006, **22**(S1): 107-109.
- [4] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 等. 不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(2): 565-575.
- [5] 南雄雄, 田霄鸿, 张琳, 等. 小麦和玉米秸秆腐解特点及对土壤中碳、氮含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16**(3): 626-633.
- [6] 李成芳, 寇志奎, 张枝盛, 等. 秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(11): 2362-1367.
- [7] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(5): 526-535.
- [8] 刘军, 唐志敏, 刘建国, 等. 长期连作及秸秆还田对棉田土壤微生物量及种群结构的影响[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(8): 1418-1422.
- [9] 戴锋平. 免耕与秸秆还田对土壤理化性质和小麦生长的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2013. 22-29.
- [10] 崔新卫, 张杨珠, 吴金水, 等. 秸秆还田对土壤质量与作物生长的影响研究进展[J]. 土壤通报, 2014, **45**(6): 1527-1532.
- [11] Shrestha G, Traina S J, Swanston C W. Black carbon's properties and role in the environment: a comprehensive review[J]. Sustainability, 2010, **2**(1): 294-320.
- [12] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(4): 779-785.
- [13] 刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 等. 土壤生物质炭环境行为与环境效应[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(4): 977-982.
- [14] 李保强, 刘钧, 李瑞阳, 等. 生物质炭的制备及其在能源与环境领域中的应用[J]. 生物质化学工程, 2012, **46**(1): 34-38.
- [15] 李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系[J]. 生态学报, 2010, **30**(5): 1217-1226.
- [16] 马力, 杨林章, 肖和艾, 等. 长期施肥和秸秆还田对红壤水稻土氮素分布和矿化特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, **17**(4): 898-905.
- [17] 匡崇婷, 江春玉, 李忠佩, 等. 添加生物质炭对红壤水稻土有机碳矿化和微生物生物量的影响[J]. 土壤, 2012, **44**(4): 570-575.
- [18] 章明奎, Bayou W D, 唐红娟. 生物质炭对土壤有机质活性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(2): 127-131, 137.
- [19] 闫美杰, 时伟宇, 杜盛. 土壤呼吸测定方法述评与展望[J]. 水土保持研究, 2010, **17**(6): 148-152, 157.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 30-34.
- [21] 孙凯, 刘娟, 凌婉婷. 土壤微生物量测定方法及其利弊分析[J]. 土壤通报, 2013, **44**(4): 1010-1016.
- [22] Kaiser K, Guggenberger G. The role of DOM sorption to mineral surfaces in the preservation of organic matter in soils[J]. Organic Geochemistry, 2000, **31**(7-8): 711-725.
- [23] Zimmerman A R, Chorover J, Goeyne K W, *et al.* Protection of mesopore-adsorbed organic matter from enzymatic degradation[J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(17): 4542-4548.
- [24] Cheng H F, Reinhard M. The rate of 2, 2-dichloropropane transformation in mineral micropores: implications of sorptive preservation for fate and transport of organic contaminants in the subsurface[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(8): 2879-2885.
- [25] 张鹏, 李涵, 贾志宽, 等. 秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(12): 2518-2525.
- [26] 郭成藏, 李鲁华, 黄金花, 等. 秸秆还田对长期连作棉田土壤微生物量碳氮磷的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, **32**(3): 296-304.
- [27] Novak J M, Busscher W J, Watts D W, *et al.* Short-term CO₂ mineralization after additions of biochar and switchgrass to a Typic Kandicudult[J]. Geoderma, 2010, **154**(3-4): 281-288.
- [28] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26 年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2015, **35**(5): 1445-1451.
- [29] 李忠佩, 吴晓晨, 陈碧云. 不同利用方式下土壤有机碳转化及微生物群落功能多样性变化[J]. 中国农业科学, 2007, **40**(8): 1712-1721.

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Flocs	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《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6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 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