

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估	张玉欣, 安俊琳, 林旭, 王俊秀, 师远哲, 刘静达 (1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布	蒋磊, 汤莉莉, 潘良宝, 刘丹彤, 花艳, 张运江, 周宏仓, 崔玉航 (13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM _{2.5} 浓度变化的影响	贺祥, 林振山 (22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散	李双德, 徐俊波, 莫胜鹏, 李文辉, 高佳佳, 曹亚裙, 陈运法 (33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量	赵佳玉, 张弥, 肖薇, 王伟, 吴红艳, 张圳, 肖启涛, 胡诚, 于洲, 曹正达, 徐敬争, 刘寿东, 李旭辉 (41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH ₄ 与 CO ₂ 浓度日动态	谭立山, 杨平, 何露露, 黄佳芳, 胡智强, 全川 (52)
河南鸡冠洞 CO ₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较	张萍, 杨琰, 孙喆, 梁沙, 张娜, 田宁, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质 (FDOM) 荧光光谱特征	陈俊伊, 王书航, 姜霞, 黄晓峰, 赵丽 (70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析	韩秀秀, 黄晓虎, 余丽燕, 杨浩, 黄昌春, 黄涛, 余艳红, 罗玉 (78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化	张维, 唐翔宇, 鲜青松 (87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应	祁闯, 王国祥, 吴馨婷, 许晓光, 韩睿明, 吴松峻 (95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性: 以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例	杨朝辉, 苏群, 陈志辉, 白俊武, 钱新强, 张志敏 (104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征	陈小华, 李小平, 钱晓雍, 胡双庆 (113)
深水型水库藻形态功能组 (MBFG) 的季节演替特征	杨毓, 卢金锁, 张颖 (121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素	范志伟, 郝庆菊, 黄哲, 柴雪思, 江长胜 (129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征	华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 崔超, 刘宏斌, 任天志, 张富林, 雷秋良 (138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析: 以羊圈沟为例	贾珺杰, 高扬, 陈维梁, 郝卓, 汪亚峰, 陈利顶 (147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较	金树权, 周金波, 包薇红, 陈君, 李丹丹, 李洋 (156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估	张芹, 张圣虎, 汪贞, 郭敏, 刘济宁, 石利利, 古文 (162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价	张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 郑煌, 张丽, 占长林, 刘红霞, 肖文胜, 祁士华 (170)
pH 和络合剂对五价锑在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响	王华伟, 李晓月, 李卫华, 孙英杰 (180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制	王文东, 王昌鑫, 刘荟, 韩雨 (188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响	艾扬, 孔东东, 于畅, 沈扬, 李剑 (195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证	高婷婷, 杜鹏, 徐泽琼, 杨军, 张华方, 李喜青 (201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯	赵纯, 张帅, 周宇, 李琨, 周炜, 黎鹏宇, 杨广, 孙志华, 郑怀礼 (212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究	王利颖, 石洁, 王凯伦, 关羽琪, 郭瑾 (220)
曝气生物滤池 (Fe ²⁺) - 臭氧组合工艺强化处理石化二级出水	徐敏, 吴昌永, 周岳溪, 郭明昆, 王翼 (229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整梯烷脂的特异性	王晗, 方芳, 李凯, 邢晖, 郭劲松, 陈猷鹏, 曾前松 (238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析	张超, 陶华强, 宋圆圆, 逯彩彩, 郭延凯, 廉静, 郭建博 (247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征	刘竹寒, 岳秀, 于广平, 金腊华, 唐嘉丽, 吉世明 (253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制	季民, 刘灵婕, 翟洪艳, 刘京, 苏晓 (260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响	王书永, 钱飞跃, 王建芳, 沈耀良 (269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程	郑莹, 潘杨, 周晓华, 廖炬弘, 孟璇, 夏健伟 (276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制: 基于增强回归树分析	吴雁雯, 张金池, 郭晓平, 刘鑫 (283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响	史广宇, 程媛媛, 施维林 (294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响	石小霞, 赵诣, 张琳, 吴文良, 孟凡乔 (301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸 (PLFAs) 及酶活性的季节变化特征	李南洁, 曾清苹, 何丙辉, 周飞 (309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性	刘晋仙, 李鑫, 景炬辉, 贾彤, 刘兴港, 王小云, 柴宝峰 (318)
安徽省部分城市土壤中全氯化物空间分布及来源解析	李法松, 倪卉, 黄涵宇, 徐志兵, 张倩, 李长霞, 黄文秀, 金陶胜 (327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤活性有机碳的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 刘丹, 王旭东, 张阿凤 (333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响	田桃, 曾敏, 周航, 徐珺, 杨文强, 辜娇峰, 邹佳玲, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (343)
砒、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制	陈欣瑶, 杨惠子, 李敏, 牛晓丛, 苏雨轩, 张园 (352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响	高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 郭光光, 李晚, 胡红青 (361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测	李培中, 吕晓健, 王海见, 杨苏才, 魏文侠, 宋云 (368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力	黄辉, 宁西翠, 郭瞻宇, 郭堤, 张增强, 李荣华, 王力, Ali Amjad (374)
卤系阻燃剂在东江鱼体中的生物富集	何明靖, 杨婷, 李琦, 王登祥, 赵佳渊 (382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价	陈志良, 黄玲, 周存宇, 钟松雄, 王欣, 戴玉, 蒋晓璐 (389)
蔬菜镉 (Cd) 富集因子变化特征及其影响因素	杨阳, 李艳玲, 陈卫平, 王美娥, 彭驰 (399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响	余亚伟, 杨雨滢, 张成, 易建婷, 安思危, 王定勇 (405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局	赵辉, 郑有飞, 曹嘉晨, 徐静馨, 黄积庆, 袁月 (412)
《环境科学》征稿简则 (12)	《环境科学》征订启事 (194)
信息 (21, 51)	

不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响:对土壤活性有机碳的影响

赵世翔¹, 于小玲¹, 李忠徽¹, 杨艳¹, 刘丹¹, 王旭东^{1,2*}, 张阿凤^{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: 土壤活性有机碳作为土壤有机碳中活跃的化学组分, 在全球碳循环中起着非常重要的作用。为了探究生物质炭输入对土壤活性有机碳的影响, 以苹果枝条为原料, 在 300 ~ 600℃ 条件下制备生物质炭, 在研究生物质炭基本理化性质的基础上, 通过室内培养试验研究生物质炭输入对土壤活性有机碳的影响。结果表明: 高温制备的生物质炭碳(C)的质量分数增加, 而氢(H)和氧(O)质量分数下降, H/C 及 O/C 比下降; 生物质炭的脂肪族结构减弱, 芳香性增强, 稳定性升高; 生物质炭输入可以显著增加土壤有机碳(SOC)含量($P < 0.05$), 且随着添加比例的增加而增加, 其中以 500℃ 制备的生物质炭对土壤有机碳库的提升效果最为明显; 与对照相比, 低温($\leq 400^\circ\text{C}$)制备的生物质炭在培养期间增加了土壤微生物量碳(MBC)、水溶性有机碳(WSOC)以及易氧化有机碳(ROC)的含量, 且随着添加比例的增加而增加, 培养 360 d 后, BC300 处理平均分别增加了 38.25%、82.09% 和 63.53%; BC400 处理平均分别增加了 26.07%、65.61% 和 48.09%, 且差异均达到显著水平($P < 0.05$); 高温($> 400^\circ\text{C}$)制备的生物质炭在培养初期($< 40 \sim 60$ d)增加了土壤 MBC、WSOC 及 ROC 含量, 且随着添加比例的增加而增加, 而在培养后期则减少了土壤 MBC、WSOC、ROC 含量, 且随着添加比例的增加而减少, 培养 360 d 后, BC500 处理平均分别减少了 0.27%、13.48% 和 14.67%, BC600 处理平均减少 7.80%、14.66% 和 15.79%, 且差异达到显著水平(BC500 处理 MBC 含量除外)($P < 0.05$); 生物质炭输入降低了土壤有机碳中 ROC 的比例, 并且随着热解温度的升高以及添加比例的增加而降低。从提升土壤有机碳库及生物活性等方面考虑, 在黄土高原塬区, 500℃ 条件下制备生物质炭, 既能保证有机碳具有较高的稳定性, 又不至于引起土壤活性碳库的过度降低, 是生物质炭在农田土壤利用的最佳制备温度。

关键词: 生物质炭; 有机碳; 活性有机碳; 水溶性有机碳; 易氧化有机碳; 微生物量碳

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0333-10 DOI: 10.13227/j.hjks.201604058

Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Soil Active Organic Carbon

ZHAO Shi-xiang¹, YU Xiao-ling¹, LI Zhong-hui¹, YANG Yan¹, LIU Dan¹, WANG Xu-dong^{1,2*}, ZHANG A-feng^{1*}

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

Abstract: Soil active organic carbon is the most important carbon pool and a good indicator in ecosystem management due to its great significance in soil carbon cycling and soil quality. In order to investigate the effect of biochar (BC) addition on soil organic matter fractions, apple tree twigs were used to produce BC at 300, 400, 500 and 600℃, respectively. Elemental analysis and Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy were used to determine the characteristics of BC. Four kinds of BC were added into soils at five application rates (0, 0.5%, 1%, 2% and 3%) and incubated at 25℃ in lab for over 360 days. Soil organic carbon (SOC), microbial biomass carbon (MBC), water soluble organic carbon (WSOC) and readily oxidized organic carbon (ROC) were measured during the incubation. The mass fraction of carbon (C) in the generated BC ranged from 62.20% - 80.01%, while hydrogen (H) ranged from 2.72% - 5.18% and Oxygen (O) ranged from 15.98% - 30.92%. The increasing temperature increased the mass fraction of C, while decreased the O and H mass content, as well as the ratio of H/C and O/C. The addition of BC significantly increased SOC, and the treatments amended with BC500 had the highest increments. Compared with the control treatment (CK), the addition of BC produced at temperatures below 400℃ increased the contents of MBC, WSOC and ROC during the incubation, at the end of the incubation, BC300 treatments significantly increased the contents by 38.25%, 82.09% and 63.53% ($P < 0.05$), respectively; BC400 treatments significantly increased the contents by 26.07%, 65.61% and 48.09% ($P < 0.05$), respectively; while lower contents of MBC, WSOC and ROC were found in the treatments amended with BC produced at temperatures above 400℃ after 40-60 d incubation. After 360 d of incubation, the contents of MBC, WSOC and ROC were significantly decreased by 0.27%, 13.48% and

收稿日期: 2016-04-08; 修订日期: 2016-08-10

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD14B11); 农业部公益性行业科研专项(201503116); 国家自然科学基金项目(41301305); 西北农林科技大学基本科研业务费专项(2014YB062, 2452015355)

作者简介: 赵世翔(1989 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为生物质炭环境效应, E-mail: zhaoshixiang1989@126.com

* 通信作者, E-mail: wangxudong01@126.com; zhangafeng@nwsuaf.edu.cn

14.67% in BC500 treatments and 7.80%, 14.66% and 15.79% in BC600 treatments (except for the MBC in BC500 treatment) ($P < 0.05$). The relative contents of ROC ranged from 3.39% to 15.65%, BC application decreased the relative content of ROC, suggesting that the increase was in proportion to the stability of organic carbon in the soil. Considering the content and quality of SOC, when the BC products were applied to the Loutu soil, 500°C was the optimal temperature for preparing apple-derived BC due to its significant increase of the soil organic carbon and a slight decrease of the relative content of soil active organic carbon.

Key words: biochar; organic carbon; active organic carbon; water soluble organic carbon; readily oxidized organic carbon; microbial biomass carbon

土壤有机碳(SOC)是全球碳循环中重要的碳库,不仅对土壤物理、化学和生物特性的改善起着至关重要的作用^[1],而且影响土壤与大气之间的碳素平衡^[2]. 土壤有机碳由不同稳定性成分组成,可划分为活性和惰性有机碳库^[3]. 土壤活性有机碳库包括水溶性有机碳(WSOC)、微生物量碳(MBC)和易氧化有机碳(ROC)等. 土壤活性有机碳库的稳定性较低,矿化速率较快(< 5 a),通过影响有效养分的供应和周转,从而影响土壤微生物活性和土壤肥力^[4]. 虽然活性有机碳只占SOC总量的较小部分,但它可以更灵敏地反映土壤微小变化^[5,6],可作为土壤有机碳有效性和土壤质量的早期指标^[7]. 土壤活性碳库易矿化,是产生温室气体的源. 因此,土壤活性有机碳库无论从土壤肥力、还是从环境的角度均引起人们极大关注.

通过增加碳沉降来减缓气候变化已获得全球共识. Lehmann^[8]指出,植物通过光合作用吸收CO₂,合成并转化成碳水化合物储存在植物体内,可以在无氧或缺氧条件下将这些植物体热解处理,炭化后(即生物质炭)可重新施入并封存于土壤中,具有很强的碳封存作用,可以起到固碳减排的作用^[9~11]. 生物质炭是由生物质在完全或部分缺氧的情况下经热解炭化产生的一类多孔富碳、高度芳香化、难降解、类似活性炭的物质^[12]. 生物质热裂解是一个十分复杂的热化学反应,包括分子键的断裂、异化和小分子的聚合等多个反应过程. 其固体产物成分主要包括有羟基、酚羟基、羧基等芳香结构大分子物质^[13],包含有碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N)等元素^[14]. 生物质炭的理化性质及结构因生物质材料、热解温度不同而有较大的差异^[15,16]. 一般来说,裂解温度越高,制备的生物质炭芳香化碳比例越高. 除稳定芳香化结构外,生物质炭还包含许多具有异质化学特性的脂肪族和氧化态碳结构物质^[17],其中的脂肪族碳能够快速被土壤微生物分解利用^[18],促进微生物的繁殖^[19]. 在热解过程中同时生成了小分子的有机物,可吸附到生物质炭表面,随着生物质炭进入土壤,不仅可以直接增加土壤WSOC的含

量^[14],还可以促进土壤特定微生物的繁殖,提高土壤MBC的含量^[19]. 生物质炭中含有活性有机碳成分及含量因热解温度及生物质材料不同而有较大的差异^[13,20],输入土壤后对土壤活性有机碳库的影响有较大的差异.

目前,国内外学者就不同生物质、不同热解条件下制备的生物质炭的基本特性以及应用效果展开了不少研究^[21~23]. 生物质炭输入可以增加土壤有机碳含量^[24],改善土壤理化性状^[25,26],促进作物生长^[27],有效吸附固定重金属以及农药等污染物^[28~30]. 生物质炭被看作是惰性碳材料,施用生物质炭对土壤活性有机碳的影响还很不明了,特别是不同热解温度制备的生物质炭对土壤活性有机碳的动态变化研究较少. 为此,本研究利用苹果树枝条在300~600°C下制备生物质炭,通过室内培养试验分析了生物质炭的热解温度及施用量对土壤活性有机碳动态变化的影响,以期为生物质炭在农田土壤中的应用以及土壤有机碳的调控提供理论支撑.

1 材料与方法

1.1 生物质炭的制备

在黄土高原南部的礼泉县收集苹果园树枝,洗净、晾干后磨细过2 mm筛. 在马弗炉中(日本, Yamato FO410C)采用间歇热裂解工艺进行热裂解,升温速率为10°C·min⁻¹,目标温度分别为300、400、500、600°C,加热前用N₂气驱赶炉内的空气,形成N₂气环境,在升温至目标温度后,仍热解2 h 10 min,热解时间结束后,裂解炉自动停止加热,温度随之下降,降至室温后,取出热裂解产物即得到不同温度下制备的生物质炭,分别标记为BC300、BC400、BC500和BC600.

1.2 生物质炭理化性质及结构分析

采用元素分析仪(德国, Vario EL III)对生物质炭样品进行C、H、N等元素分析,并计算元素比;采用物理化学吸附仪(美国, ASAP 2020M)测定其比表面积;采用傅里叶变换红外光谱仪(德国, Tensor27)对生物质炭傅里叶红外光谱特征(fourier

transform infrared, FTIR) 进行测定。

1.3 生物质炭输入对土壤有机碳及其组分的影响

1.3.1 供试土壤

采用杨凌的塿土(土垫旱耕人为土)作为试验土壤,土壤质地为重壤,显微碱性(pH 为 7.85)。土壤有机碳含量为 $7.24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $0.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $0.79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $0.61 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $0.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $0.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.3.2 设计与分析方法

生物质炭输入土壤后培养试验:取 1 L 的塑料瓶,装相当于烘干土重 1.2 kg 的风干土,添加 4 个温度生物质炭的处理,生物质炭/土壤质量比分别为 0、0.5%、1%、2% 和 3%,每个处理设 3 个重复。土壤与生物质炭充分混匀,调节水分使达到田间持水量的 75%,25℃ 下在培养箱中进行密闭培养(培养期间,塑料瓶敞口放置于培养箱中)。培养 1、3、6、10、20、40、60、90、120、180、240、300 和 360 d 时采集土壤样品,为了最大限度地减少对土壤样品的扰动,采集表层土壤 100 g 左右进行分析测定,同时测定土壤含水量并通过称重法补充剩余土壤样品水分含量使剩余土壤水分含量达到田间持水量的 75%(培养期间每 5 d 补充一次水分,不足 5 d,以采样时间补充土壤水分)。

土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法进行测定。

土壤 WSOC 测定方法如下^[31]:称取过 2 mm 筛的新鲜土样 5 g 于 100 mL 离心管中,按水土比 10:1 加入适量蒸馏水,25℃ 下振荡 30 min,然后 4 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min,取上清液过 0.45 μm 滤膜,吸取 5 mL 用 TOC 仪测定浸提液有机碳质量浓度,得到 WSOC 含量。

土壤 MBC 采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 提取方法^[32]。简要过程如下:称取过 2 mm 筛的新鲜土样(相当于干土 5.0 g)3 份分别放入 3 个 100 mL 烧杯中,用无醇氯仿熏蒸 24 h。熏蒸结束后,将土壤全部转移到 250 mL 三角瓶中,加入 20 mL $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ K}_2\text{SO}_4$ 溶液,在振荡机上振荡 30 min(25℃),过滤。熏蒸开始时,称取等量土壤 3 份,同上用 K_2SO_4 溶液浸提。浸提液立即测定,同时做不加土壤的空白对照。浸出液用 TOC(Jena Multi N/C 2100)分析测定。土壤 MBC 含量以熏蒸和未熏蒸土样含碳量之差除以系数得到,即:

$$\text{MBC} = \text{EC}/0.45$$

式中,EC 为熏蒸与未熏蒸土样浸提测定的碳含量之差,0.45 为 MBC 的换算系数。

土壤 ROC 依据 Blair 等^[33]和 Lefroy 等^[34]采用的 333 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 高锰酸钾氧化法测定。具体步骤为:称取 2 g 左右待测风干土壤样品,加入 333 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KMnO}_4$ 溶液 25 mL,空白试验同时进行,3 次重复。振荡 1 h 后,4 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 5 min,取上清液用去离子水稀释 250 倍,然后利用分光光度计在 565 nm 波长处进行测定,同时设置空白样品并用同样的方法配置标准曲线。按消耗 1 mmol KMnO_4 溶液相当于氧化 9 mg 碳计算 ROC 含量,同时计算土壤 ROC 的相对含量。土壤 ROC 相对含量为 ROC 占 SOC 的比例,即:

$$\text{ROC}\% = \text{ROC}/\text{SOC} \times 100$$

式中,ROC 指土壤易氧化有机碳含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),SOC 指土壤有机碳含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

1.4 数据处理与分析

所有数据经 Excel 2010(Microsoft,美国)进行预整理,然后利用 SAS 9.1.2 进行单因素方差分析(LSD-*t* 检验, $P = 0.05$),不同字母代表差异显著,Origin 软件作图。

2 结果与分析

2.1 热解温度对生物质炭性质及结构特征的影响

不同温度制备的生物质炭,当温度从 300℃ 升高到 600℃ 时,C 的质量分数从 62.20% 升高到 80.01%(见表 1),差异达到显著水平;H 和 O 的质量分数均随着热解温度的升高而呈现显著下降的趋势;N 的质量分数随着温度的变化呈现先增加后降低的现象,400℃ 制备的 N 的质量分数最高。总体看来,N 的质量分数变化幅度较 C、H、O 的变化幅度小。Keiluweit 等^[35]曾用 H/C、O/C 等原子比来表征生物质炭的芳香性和极性的大小,H/C 越小则芳香性越高,O/C 比值越大则极性越大。随着热解温度的升高,生物质炭的 H/C、O/C 原子比均呈现下降的趋势(表 1),这说明高温制备的生物质炭具有较高的芳香性,极性则较弱。随着热解温度的升高,生物质炭的比表面积呈显著增加的趋势(表 1),当温度从 300℃ 增加到 600℃ 时,生物质炭比表面积从 $2.35 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 增加到 $107.76 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。其中,温度从 500℃ 增加到 600℃ 时,生物质炭的比表面积出现最大增幅,增加幅度达到 942.17%。

红外扫描光谱显示(见图 1),不同温度制备的生物质炭具有相同的分子结构特点。在 3 200 ~ 3 500 cm^{-1} 出现酚羟基或醇羟基的伸缩振动宽峰,在 2 935 cm^{-1} 出现脂肪族 C—H 伸缩振动峰,在 800

~1 600 cm⁻¹ 出现芳香族 C—H、C=O 以及 C=C 伸缩振动峰. 在1 614 cm⁻¹和1 437 cm⁻¹出现C=O 或者芳香骨架的伸缩振动, 在1 317 cm⁻¹出现芳香

族 C—C 伸缩振动峰以及 885 cm⁻¹出现芳香族 C—H 伸缩振动峰,说明生物质炭是以芳香骨架为主,可能含有羟基、芳香醚等官能团.

表1 不同温度制备的生物质炭基本理化性质¹⁾

Table 1 Characterization of biochars produced at different temperatures					
项目	BC300	BC400	BC500	BC600	
元素质量分数/%	C	62.20 ± 0.85d	71.13 ± 2.39c	74.88 ± 2.11b	80.01 ± 4.58a
	H	5.18 ± 0.19a	4.03 ± 0.21b	2.88 ± 0.08c	2.72 ± 0.14c
	N	1.69 ± 0.08c	1.94 ± 0.06a	1.77 ± 0.08b	1.28 ± 0.06d
	O	30.93 ± 0.64a	22.90 ± 2.38b	20.47 ± 1.98b	15.99 ± 4.76c
H/C	1.00 ± 0.05a	0.68 ± 0.04b	0.46 ± 0.03c	0.41 ± 0.00d	
O/C	0.29 ± 0.01a	0.16 ± 0.03b	0.10 ± 0.02c	0.06 ± 0.05d	
比表面积 / m ² · g ⁻¹	2.35 ± 0.12d	7.25 ± 0.25c	10.43 ± 0.80b	107.76 ± 4.11a	

1) 表中同行不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

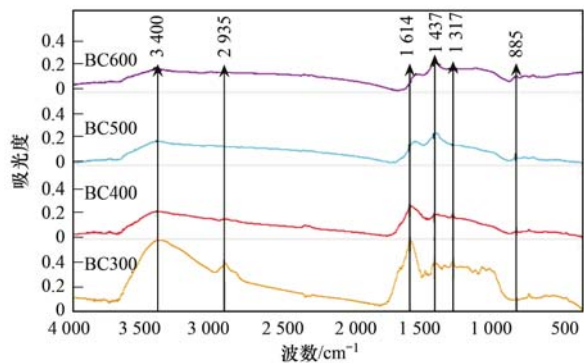


图1 不同温度制备生物质炭的红外扫描图

Fig. 1 FTIR spectra of biochars produced at different temperatures

2.2 生物质炭输入对土壤有机碳的影响

生物质炭输入对土壤有机碳的影响如图 2 所示. 从中可以看出, 生物质炭输入可以显著增加土

壤有机碳含量, 且随着生物质炭添加量的增加而呈现显著增加的趋势. 不同制备温度间相比, 随着热解温度的升高, 土壤有机碳表现为先增加后降低的趋势, BC500 处理土壤有机碳含量最高. 从培养时间来看, 土壤有机碳均随着培养时间的进行呈现下降的趋势, 其中在培养前 60 d, 各处理的土壤有机碳含量下降较快, 占整个培养期间有机碳损失的 59.45% ~ 79.45%; 培养 60 d 后, 土壤有机碳表现为缓慢下降的趋势. 培养 360 d 后 BC300、BC400、BC500 和 BC600 其有机碳含量平均比对照 (5.95 g · kg⁻¹) 增加了 125.70%、162.26%、192.96% 和 165.75%.

2.3 生物质炭输入对土壤微生物量碳(MBC)的影响

图 3 为培养期间土壤 MBC 含量的变化. 土壤

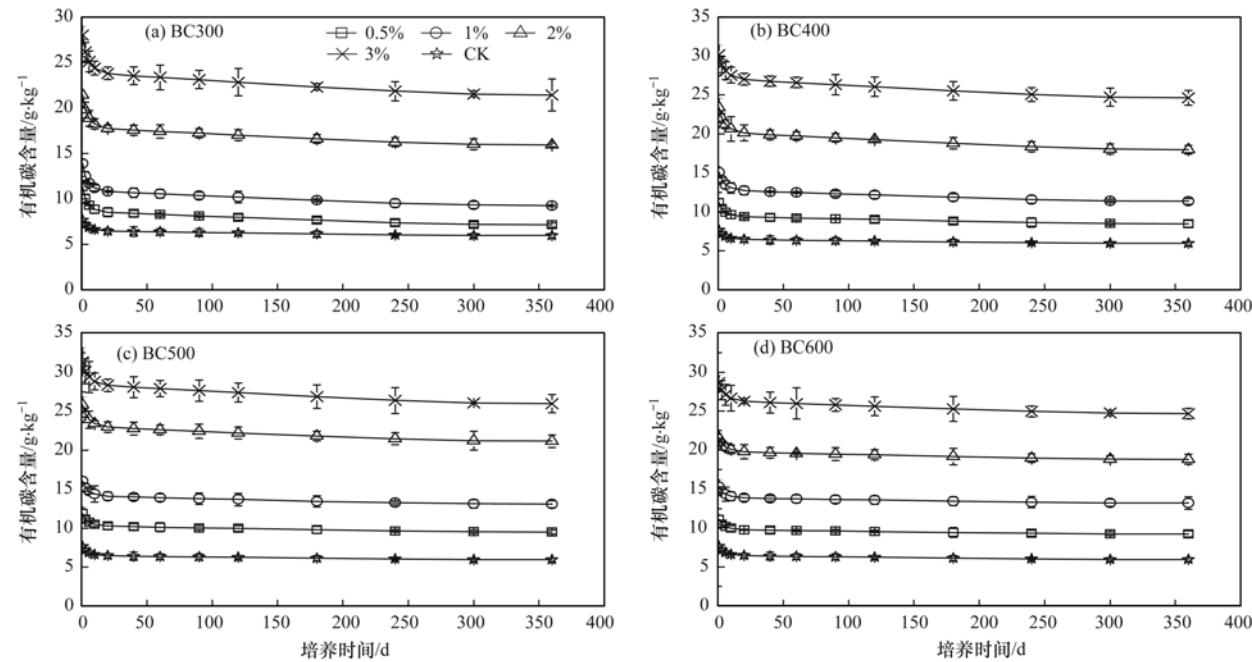


图2 生物质炭输入对土壤有机碳(SOC)的影响

Fig. 2 Effect of biochar addition on soil organic carbon(SOC)

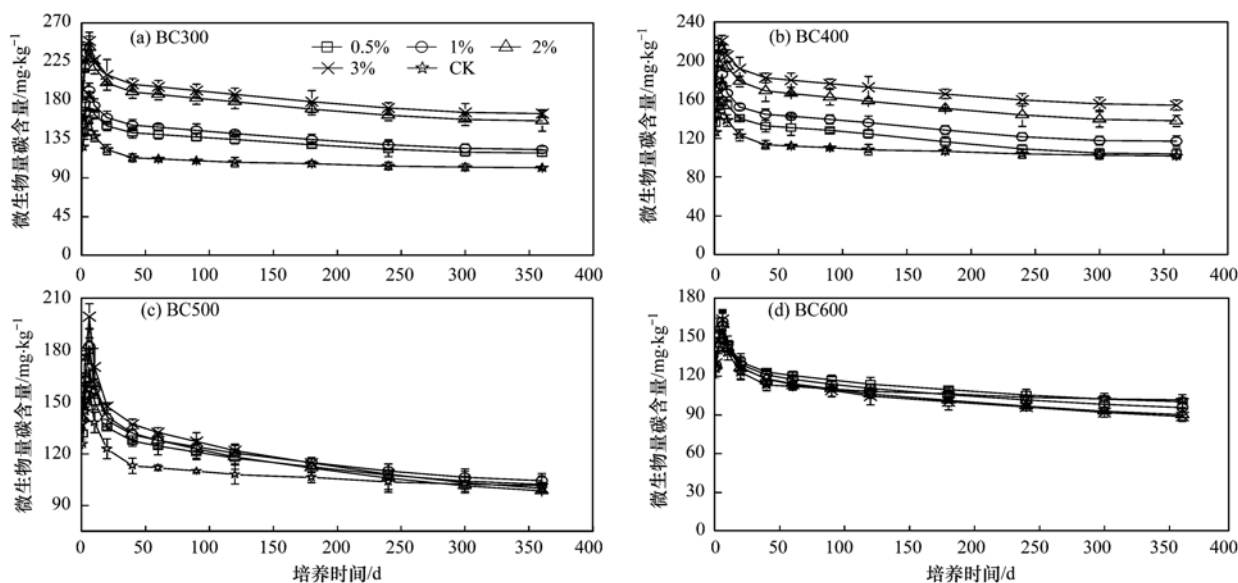


图3 生物质炭输入对微生物量碳(MBC)的影响

Fig. 3 Effect of biochar addition on soil microbial biomass carbon (MBC)

MBC 的动态变化可表明土壤微生物的强度. 从图3中可以看出,所有处理土壤 MBC 均表现为先增高而后降低的趋势,在培养第3~6 d 土壤 MBC 达到最大值. 与对照相比,相对低温($\leq 400^{\circ}\text{C}$)制备的生物质炭在整个培养期间均显著增加了土壤 MBC 含量,随着生物质炭添加比例的增加而增加,至培养结束时,BC300 和 BC400 处理 MBC 平均含量增加了38.25%和26.07%;相对高温($>400^{\circ}\text{C}$)制备的生物质炭在培养前期($<240\sim300\text{ d}$)增加了土壤 MBC 的含量,且随着添加比例的增加而增加,而在

培养后期则降低了土壤 MBC 的含量,但各个添加比例之间差异并不显著,培养结束时和对照相比,BC500 和 BC600 处理 MBC 平均含量和对照相比降低了0.27%和7.80%.

2.4 生物质炭输入对土壤水溶性有机碳(WSOC)的影响

图4为培养期间土壤 WSOC 含量的变化. 从培养时间来看,土壤 WSOC 均随着培养时间的进行呈现下降的趋势. 与对照相比,相对低温($\leq 400^{\circ}\text{C}$)制备的生物质炭在整个培养期间均显著增加了土壤

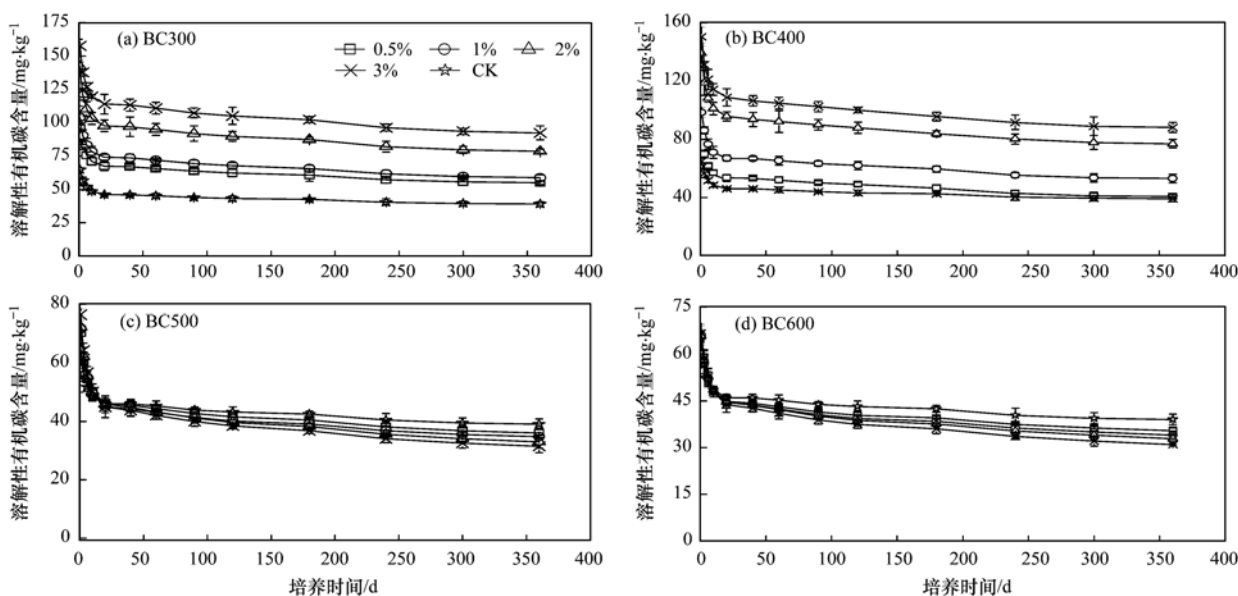


图4 生物质炭输入对水溶性有机碳(WSOC)的影响

Fig. 4 Effect of biochar addition on soil dissolved organic carbon (WSOC)

WSOC 的含量,随着生物质炭随着添加比例的增加而增加,至培养结束时,BC300 和 BC400 处理 WSOC 平均含量增加了 82.09% 和 65.61%; 相对高温 ($>400^{\circ}\text{C}$) 制备的生物质炭在培养前期 ($<40 \sim 60$ d) 增加了土壤 WSOC 的含量,且随着添加比例的增加而增加,而在培养后期则降低了土壤 WSOC 的含量,但各个添加比例之间差异并不显著,培养结束时和对照相比,BC500 和 BC600 处理 WSOC 平均含量和对照相比降低了 13.48% 和 14.66%. 同一添加比例不同温度生物质炭的处理,在培养期间则表现为 BC300 $>$ BC400 $>$ BC500 $>$ BC600.

2.5 生物质炭输入对土壤易氧化有机碳(ROC)的影响

图 5 为培养期间土壤 ROC 含量的变化. 从培养时间来看,土壤 ROC 均随着培养时间的进行呈现下降的趋势. 与对照相比,相对低温 ($\leq 400^{\circ}\text{C}$) 制备的生物质炭在整个培养期间均显著增加了土壤 ROC 的含量,随着生物质炭随着添加比例的增加而

增加,至培养结束时,BC300 和 BC400 处理 ROC 平均含量增加了 63.53% 和 48.09%; 相对高温 ($>400^{\circ}\text{C}$) 制备的生物质炭在培养前期 ($<40 \sim 60$ d) 增加了土壤 ROC 的含量,且随着添加比例的增加而增加,而在培养后期则降低了土壤 ROC 的含量,但各个添加比例之间差异并不显著,至培养结束时,BC500 和 BC600 处理 ROC 平均含量和对照相比降低了 14.67% 和 15.79%. 同一添加比例不同温度生物质炭的处理,在培养期间则表现为 BC300 $>$ BC400 $>$ BC500 $>$ BC600. 不同温度制备的生物质炭输入均降低了土壤 ROC 的相对含量(表 2),且随着添加比例及热解温度的增加而降低. 从培养时间来看,各处理 ROC 相对含量均随着培养时间进行呈现逐渐下降的趋势. 这一方面表明施用生物质炭对非易氧化有机碳的增幅高于 ROC 的增幅,另一方面表明随着培养时间的进行,土壤 ROC 逐渐被土壤微生物利用、矿化,土壤有机碳呈现逐渐稳定的趋势.

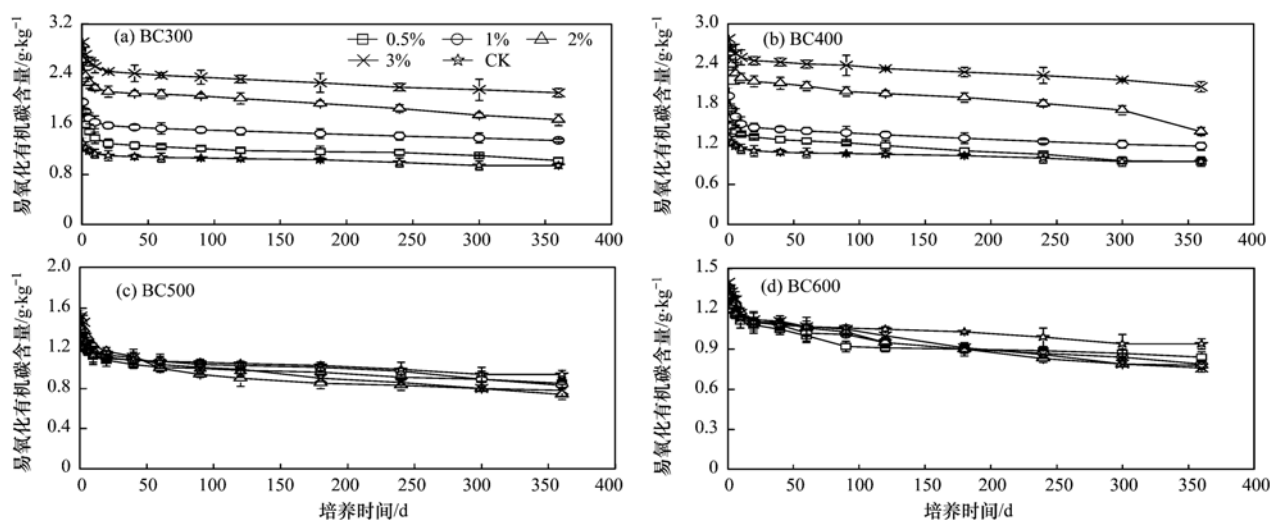


图 5 生物质炭输入对易氧化有机碳(ROC)的影响

Fig. 5 Effect of biochar addition on soil readily oxidized organic carbon (ROC)

3 讨论

3.1 热解温度对生物质炭理化性质的影响

生物质炭一般被视为纤维素、羧酸及其衍生物、呋喃、吡喃以及脱水糖、苯酚、烷属烃及烯属烃类的衍生物等成分复杂各异的含碳物质构成,其主元素组成主要包括碳、氢、氧等,其次是灰分^[12,14]. 生物质炭的元素组成比例由炭化温度及生物质来源所决定,本研究表明,随着炭化温度的升高,碳的质量分数增加,氢和氧的则降低(见表 1),H/C 及 O/C 原子比呈现下降的趋势(见图 1). 这

与 Claoston 等^[36]的研究结论一致. Cantrell 等^[37]认为,随着制备温度的升高,生物质炭表面极性官能团逐渐裂解消失,形成稳定性更高的芳香化结构,从而使 H/C 及 O/C 下降. 生物质炭的红外光谱随着制备温度升高在 2935 cm^{-1} 处吸收峰减弱,而在 1614 cm^{-1} 、 1437 cm^{-1} 处吸收峰增强,进一步证实了其结构的脂肪族碳减少,而芳香化结构增多(见图 1). Uchimiya 等^[38]发现生物质炭发生脱水、脱羧等反应是造成生物质炭芳香化程度加剧的原因之一. 生物质炭的比表面积随制备温度升高增加,这一方面可能是因为随着生物质中纤维素、半纤维素以及木

表 2 生物质炭对土壤易氧化有机碳(ROC)相对含量的影响¹⁾/ %
Table 2 Effect of biochar addition on the relative content of soil readily oxidized organic carbon/ %

添加比例/ %		培养时间/ d						
		1	3	6	10	20	40	60
BC300	0.5	15.61 ± 0.71b	15.91 ± 0.80b	15.86 ± 0.34b	15.53 ± 0.21b	15.19 ± 1.63b	15.02 ± 1.38b	15.00 ± 0.58b
	1	14.02 ± 0.45cd	14.45 ± 0.74c	14.40 ± 0.68c	14.54 ± 1.09bc	14.62 ± 0.55bc	14.54 ± 1.07bc	14.48 ± 0.21bc
	2	12.26 ± 0.66ef	12.02 ± 0.18d	12.01 ± 1.00d	11.99 ± 0.61d	11.95 ± 0.70d	11.94 ± 0.27d	11.93 ± 0.18d
	3	10.41 ± 0.26gh	10.38 ± 0.80f	10.36 ± 0.77e	10.32 ± 0.12f	10.26 ± 0.30f	10.25 ± 0.27ef	10.24 ± 0.69ef
BC400	0.5	14.20 ± 0.71cd	14.19 ± 1.00c	14.03 ± 0.70c	14.00 ± 0.17c	13.92 ± 0.21c	13.66 ± 0.55c	13.52 ± 0.49c
	1	12.78 ± 1.43de	12.19 ± 0.39d	11.92 ± 0.80d	11.54 ± 1.45de	11.38 ± 0.90def	11.31 ± 0.32de	11.25 ± 0.44de
	2	10.99 ± 0.18fg	10.88 ± 0.63ef	10.63 ± 0.49e	10.65 ± 0.71ef	10.61 ± 0.14ef	10.60 ± 0.39e	10.50 ± 0.64ef
	3	9.21 ± 0.44hi	9.12 ± 0.23g	9.14 ± 0.86f	9.09 ± 0.71g	9.08 ± 0.41g	9.07 ± 0.36fg	9.04 ± 0.26gh
BC500	0.5	12.00 ± 1.00ef	12.04 ± 0.43d	11.86 ± 0.33d	11.64 ± 0.51de	11.47 ± 0.30de	11.25 ± 0.83de	10.96 ± 0.80de
	1	9.38 ± 1.17hi	9.05 ± 0.38g	8.91 ± 0.02f	8.73 ± 0.19gh	8.57 ± 0.32gh	8.42 ± 0.35gh	8.43 ± 0.53h
	2	6.18 ± 0.48j	6.06 ± 0.33hi	5.90 ± 0.37g	5.69 ± 0.13i	5.53 ± 0.02i	5.37 ± 0.51i	4.85 ± 0.23jk
	3	5.19 ± 0.48jk	5.21 ± 0.50ij	4.62 ± 0.51h	4.45 ± 0.14j	4.32 ± 0.11jk	4.32 ± 0.35ij	4.09 ± 0.19k
BC600	0.5	11.80 ± 0.44ef	11.57 ± 0.20de	11.20 ± 0.22de	10.86 ± 0.88ef	10.63 ± 0.27ef	10.36 ± 0.53e	9.83 ± 0.58fg
	1	8.78 ± 0.63i	8.61 ± 0.33g	8.56 ± 0.87f	7.94 ± 0.23h	7.72 ± 0.10h	7.55 ± 0.43h	7.06 ± 0.35i
	2	6.38 ± 0.38j	6.15 ± 0.20h	5.97 ± 0.17g	5.74 ± 0.22i	5.39 ± 0.28ij	5.36 ± 0.31i	5.17 ± 0.22j
	3	4.89 ± 0.46k	4.78 ± 0.34j	4.62 ± 0.47h	4.29 ± 0.28j	4.13 ± 0.21k	4.09 ± 0.28j	3.96 ± 0.32k
CK		16.96 ± 1.51a	17.01 ± 0.87a	17.04 ± 0.74a	17.03 ± 0.87a	17.03 ± 1.83a	16.96 ± 2.07a	16.90 ± 1.87a

添加比例/ %		培养时间/ d					
		90	120	180	240	300	360
BC300	0.5	14.91 ± 0.79b	14.83 ± 1.13b	15.19 ± 1.70b	15.60 ± 0.79ab	15.25 ± 0.71ab	14.35 ± 0.13b
	1	14.54 ± 0.51b	14.64 ± 1.35b	14.69 ± 0.62b	14.83 ± 0.82b	14.80 ± 0.57b	14.49 ± 0.36b
	2	11.90 ± 0.43d	11.81 ± 0.76d	11.64 ± 0.42cd	11.39 ± 0.53cd	10.89 ± 0.48cd	10.51 ± 0.59cd
	3	10.18 ± 0.54f	10.17 ± 0.44e	10.13 ± 0.77ef	10.04 ± 0.24ef	10.01 ± 0.88de	9.84 ± 0.79d
BC400	0.5	13.39 ± 0.32c	13.11 ± 0.44c	12.52 ± 0.64c	12.19 ± 1.29c	11.19 ± 0.22c	11.07 ± 0.43c
	1	11.12 ± 0.60de	10.97 ± 0.48de	10.85 ± 0.70de	10.69 ± 0.69de	10.54 ± 0.30cd	10.31 ± 0.86cd
	2	10.24 ± 0.59f	10.19 ± 0.31e	10.10 ± 0.09efg	9.89 ± 0.58ef	9.47 ± 0.74ef	7.75 ± 0.49ef
	3	9.02 ± 0.15g	8.97 ± 0.37f	8.94 ± 0.42gh	8.93 ± 0.66fg	8.75 ± 0.44f	8.37 ± 0.46e
BC500	0.5	10.91 ± 0.16ef	10.82 ± 0.68e	10.78 ± 0.42de	10.47 ± 0.14de	10.36 ± 0.81cde	9.77 ± 0.59d
	1	8.27 ± 0.77g	8.26 ± 0.33f	8.26 ± 0.85h	8.10 ± 0.10g	7.54 ± 0.11g	7.08 ± 0.19f
	2	4.63 ± 0.04ij	4.48 ± 0.20hi	4.36 ± 0.22j	4.32 ± 0.28i	4.27 ± 0.38i	3.99 ± 0.10h
	3	4.04 ± 0.46j	3.98 ± 0.35hi	3.73 ± 0.20j	3.64 ± 0.25i	3.46 ± 0.12ij	3.38 ± 0.28hi
BC600	0.5	9.09 ± 0.28g	9.04 ± 0.35f	9.08 ± 1.12fgh	8.98 ± 0.61fg	8.84 ± 0.54f	8.56 ± 0.76e
	1	7.04 ± 0.20h	6.59 ± 0.01g	6.35 ± 0.12i	6.17 ± 0.56h	5.95 ± 0.23h	5.59 ± 0.26g
	2	5.06 ± 0.28i	4.67 ± 0.29h	4.46 ± 0.16j	4.10 ± 0.22i	3.94 ± 0.10i	3.86 ± 0.28h
	3	3.88 ± 0.15j	3.70 ± 0.08i	3.40 ± 0.11j	3.23 ± 0.13i	2.98 ± 0.12j	2.86 ± 0.13i
CK		16.82 ± 1.18a	16.73 ± 0.40a	16.77 ± 1.02a	16.37 ± 1.50a	15.79 ± 1.06a	15.79 ± 1.20a

1) 表中同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

质素的分解,产生大量的 H_2 和 CH_4 引起生物质炭的内部结构发生变化,另一方面高温下引起生物质炭芳香结构进一步压缩,从而造成生物质炭内部形成大量的孔隙^[39],导致生物质炭比表面积的增加。

3.2 生物质炭输入对土壤有机碳及其组分的影响

近年来,生物质炭在增加土壤有机碳含量方面的特殊作用深受关注,有关生物质炭施用对土壤有机碳含量及其组分的影响研究也受到了人们的重视。本研究发现,生物质炭输入可明显增加 SOC 含量(见图 2),并且随着添加比例的增加而增加,这和 Laird 等^[40]的研究结果类似。这可能是由于外源有机碳的输入直接增加了土壤有机碳的含量,另外,生

物质炭是一种化学及生物“惰性”物质,不易被矿化^[18],因此可在较长时间内提高土壤有机碳含量。Hamer 等^[41]以生物质炭(玉米秸秆、黑麦秸秆和木材)为材料进行培养试验,发现在培养 60 d 后加入生物质炭的分解率小于 1%,即大部分残留在土壤中。而生物质炭对土壤有机碳的增加并不是随着热解温度的增加而持续增高的,结果显示,500℃ 制备的生物质炭对土壤有机碳的提升效果最佳。由于生物质炭是由成分复杂各异的含碳物质构成,输入到土壤中可直接影响土壤中有机碳组成的变化,尤其是土壤活性有机碳组分。研究结果表明培养初期(1 ~ 60 d)培养生物质炭输入均提高了土壤 MBC、

WSOC 以及 ROC 的含量(见图 3~5),且随着热解温度的升高而降低,随着添加比例的增加而增加. 这一方面是由于生物质炭在制备过程中可形成一定数量的活性有机碳,且随着热解温度的升高而降低^[42],Laird 等^[40]指出,在培养初期,生物质炭可释放出各种有机分子,这是影响土壤 WSOC 的重要原因. 另一方面生物质炭输入可提高土壤 pH^[43],pH 值的增加可能导致 WSOC 中弱酸性官能团的去质子化,这增加了活性有机碳的亲水性和电荷密度,从而增加了土壤 WSOC 的溶解性^[44]. 土壤 WSOC 含量的增加,可以作为微生物生长的碳源和能源,从而促进了土壤微生物的繁殖. 生物质炭除了稳定的芳香族结构外,还含有一定数量的脂肪族和氧化态碳,能够快速被微生物分解利用,另外,生物质炭输入改善了土壤微生物的生存环境,促进了微生物的浸染能力,从而提高微生物的数量及活性^[45]. 因此,生物质炭输入在培养前期增加了土壤 MBC 和 ROC 的含量,这和付琳琳等^[46]和章明奎等^[47]的研究结果类似. 培养后期,不同温度制备的生物质炭对土壤活性有机碳的影响因生物质炭热解温度及添加比例不同而有较大的差异. 与对照相比,相对低温($\leq 400^{\circ}\text{C}$)制备的生物质炭输入依然增加了土壤活性有机碳的含量,并且随着添加比例的增加而增加;而相对高温($> 400^{\circ}\text{C}$)制备的生物质炭则降低了土壤 MBC、WSOC 以及 ROC 的含量,且随着添加比例的增加而降低(见图 3~5). 这一方面是由于低温制备的生物质炭芳香化程度较低,保留了较多的脂肪族结构及其他活性有机碳成分,而高温制备的生物质炭芳香化程度较高,脂肪族碳及其他活性有机碳成分较低,因此低温制备($\leq 400^{\circ}\text{C}$)的生物质炭可在相对较长的时间内提高土壤活性有机碳的含量,尤其是在相对较高的施用量的条件下. 低温制备($\leq 400^{\circ}\text{C}$)的生物质炭在 $2\,935\text{ cm}^{-1}$ 处具有较强的吸收峰以及较高的 H/C 及 O/C 比均证实了其含有大量的脂肪族及其他活性有机碳组分. 另一方面,生物质炭可以吸附土壤 WSOC 及其他小分子有机物到其孔隙内或外表面上,前者被称为包封作用,能有效隔离微生物及其产生的胞外酶与孔隙内有机质的接触;后者被称为吸附保护作用,且两者均被证实能强烈抑制被吸附有机质的可利用性^[48]. 高温制备的生物质炭具有较大的比表面积(见表 1),Kasozzi 等^[49]研究证实生物质炭比表面积是决定生物质炭吸附力的关键因素,并且其对小分子有机物的吸附是缓慢的扩散运动,这也说明了为何仅在培

养后期高温制备的生物质炭降低了土壤活性有机碳,且随着热解温度的升高及添加比例的增加而降低. 此外,生物质炭输入可以改善土壤的团聚体分布并显著增加团聚体中有机碳的含量^[50],包闭于团聚体内的有机碳,减少了与微生物的接触面,这也可能导致培养后期土壤活性有机碳尤其是 MBC 含量的下降. 生物质炭因热解温度及添加比例不同而对土壤活性有机碳的影响有较大的差异,但生物质炭输入均降低了土壤 ROC 占总有机碳的比例(表 2),并且随着热解温度的升高和添加比例的增加而降低,说明通过生物质炭输入可以改变土壤有机碳的组成比例,朝着“惰性化”方向发展. 这有利于土壤有机碳的固定和封存. 但从农田土壤肥力和生物活性等方面考虑,过低的土壤活性有机碳可能存在不利于土壤肥力品质提升的风险,综合两方面考虑,在黄土高原塬土地区建议以 500°C 制备生物质炭,既能保证有机碳具有较高的稳定性,又不至于引起土壤活性碳库的过度降低,从而维持土壤正常的微生物活性.

4 结论

(1)由苹果枝条制备生物质炭,随着热解温度的升高,生物质炭的含碳量及比表面积呈增加趋势;而 O、H、N、H/C 及 O/C 则随着热解温度的升高而降低,生物质炭的芳构化加强.

(2)生物质炭输入可显著增加土壤有机碳含量,在 $300\sim 600^{\circ}\text{C}$ 的制备温度范围内,以 500°C 制备的生物质炭对土壤有机碳库的提升效果最为明显,培养 360 d 后其有机碳含量平均比对照 ($5.95\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)增加了 192.96%.

(3)与对照相比,相对低温($\leq 400^{\circ}\text{C}$)制备的生物质炭在培养期间可增加土壤 MBC、WSOC 及 ROC 含量,而相对高温($> 400^{\circ}\text{C}$)制备的生物质炭仅在培养前期($< 40\sim 60\text{ d}$)增加了土壤 MBC、WSOC 和 ROC 含量.

(4)生物质炭输入降低了土壤有机碳中 ROC 的比例,降低了有机碳的活性,并且随着热解温度及添加比例的增加而降低. 在黄土高原塬土地区,在 500°C 下制备的生物质炭,既能保证有机碳具有较高的稳定性,又不至于引起土壤活性碳库的过度降低,是生物质炭在农田土壤利用的最佳制备温度.

参考文献:

- [1] Brandão M, Canals L M I, Clift R. Soil organic carbon changes in the cultivation of energy crops: Implications for GHG balances

- and soil quality for use in LCA [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, **35**(6): 2323-2336.
- [2] Harris Z M, Spake R, Taylor G. Land use change to bioenergy: a meta-analysis of soil carbon and GHG emissions[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2015, **82**: 27-39.
- [3] Mclauchlan K K, Hobbie S E. Comparison of labile soil organic matter fractionation techniques [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, **68**(5): 1616-1625.
- [4] 王苑, 宋新山, 王君, 等. 干湿交替对土壤碳库和有机碳矿化的影响[J]. *土壤学报*, 2014, **51**(2): 342-350.
Wang Y, Song X S, Wang J, *et al.* Effect of drying-rewetting alternation on soil carbon pool and mineralization of soil organic carbon[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, **51**(2): 342-350.
- [5] Sheng H, Zhou P, Zhang Y Z, *et al.* Loss of labile organic carbon from subsoil due to land-use changes in subtropical China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **88**: 148-157.
- [6] Wander M M, Traina S J, Stinner B R, *et al.* Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, **58**(4): 1130-1139.
- [7] Gregorich E G, Monreal C M, Carter M R, *et al.* Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1994, **74**(4): 367-385.
- [8] Lehmann J. A handful of carbon [J]. *Nature*, 2007, **447** (7141): 143-144.
- [9] Fang Y, Singh B, Singh B P, *et al.* Biochar carbon stability in four contrasting soils [J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, **65**(1): 60-71.
- [10] Purakayastha T J, Kumari S, Pathak H. Characterisation, stability, and microbial effects of four biochars produced from crop residues[J]. *Geoderma*, 2015, **239-240**: 293-303.
- [11] 赵世翔, 姬强, 李忠徽, 等. 热解温度对生物质炭性质及其在土壤中矿化的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, **46**(6): 183-192, 200.
Zhao S X, Ji Q, Li Z H, *et al.* Characteristics and mineralization in soil of apple-derived biochar produced at different temperatures [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, **46**(6): 183-192, 200.
- [12] Antal Jr M J, Grønli M. The Art, Science, and Technology of Charcoal Production [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2003, **42**(8): 1619-1640.
- [13] Lin Y, Munroe P, Joseph S, *et al.* Water extractable organic carbon in untreated and chemical treated biochars [J]. *Chemosphere*, 2012, **87**(2): 151-157.
- [14] Liang B, Lehmann J, Solomon D, *et al.* Black carbon increases cation exchange capacity in soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, **70**(5): 1719-1730.
- [15] Usman A R A, Abduljabbar A, Vithanage M, *et al.* Biochar production from date palm waste: charring temperature induced changes in composition and surface chemistry [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2015, **115**: 392-400.
- [16] Mcbeath A V, Wurster C M, Bird M I. Influence of feedstock properties and pyrolysis conditions on biochar carbon stability as determined by hydrogen pyrolysis[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2015, **73**: 155-173.
- [17] Webber J B W, Corbett P, Semple K T, *et al.* An NMR study of porous rock and biochar containing organic material [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2013, **178**: 94-98.
- [18] Cheng C H, Lehmann J, Thies J E, *et al.* Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes [J]. *Organic Geochemistry*, 2006, **37**(11): 1477-1488.
- [19] Durenkamp M, Luo Y, Brookes P C. Impact of black carbon addition to soil on the determination of soil microbial biomass by fumigation extraction[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(11): 2026-2029.
- [20] Uchimiya M, Ohno T, He Z Q. Pyrolysis temperature-dependent release of dissolved organic carbon from plant, manure, and biorefinery wastes [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013, **104**: 84-94.
- [21] Roberts D A, de N R. The effects of feedstock pre-treatment and pyrolysis temperature on the production of biochar from the green seaweed *Ulva*[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **169**: 253-260.
- [22] Suliman W, Harsh J B, Abu-Lail N I, *et al.* Influence of feedstock source and pyrolysis temperature on biochar bulk and surface properties[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2016, **84**: 37-48.
- [23] 李坤权, 李烨, 郑正, 等. 高比表面生物质炭的制备、表征及吸附性能[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 328-335.
Li K Q, Li Y, Zheng Z, *et al.* Preparation, characterization and adsorption performance of high surface area biomass-based activated carbons [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 328-335.
- [24] Hansen V, Müller-Stöver D, Munkholm L J, *et al.* The effect of straw and wood gasification biochar on carbon sequestration, selected soil fertility indicators and functional groups in soil: an incubation study[J]. *Geoderma*, 2016, **269**: 99-107.
- [25] Hardie M, Clothier B, Bound S, *et al.* Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? [J]. *Plant and Soil*, 2014, **376**(1-2): 347-361.
- [26] 卢再亮, 李九玉, 姜军, 等. 生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险[J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3585-3591.
Lu Z L, Li J Y, Jiang J, *et al.* Amelioration effects of wastewater sludge biochars on red soil acidity and their environmental risk [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(10): 3585-3591.
- [27] Laghari M, Hu Z Q, Mirjat M S, *et al.* Fast pyrolysis biochar from sawdust improves the quality of desert soils and enhances plant growth[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, **96**(1): 199-206.
- [28] 张阳阳, 胡学玉, 余忠, 等. Cd胁迫下城郊农业土壤微生物活性对生物炭输入响应[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(6): 936-942.
Zhang Y Y, Hu X Y, Yu Z, *et al.* Responses of agricultural soil microbial activity to biochar under cadmium stress[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(6): 936-942.
- [29] Rees F, Simonnot M O, Morel J L. Short-term effects of biochar on soil heavy metal mobility are controlled by intra-particle diffusion and soil pH increase [J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, **65**(1): 149-161.
- [30] 王廷廷, 余向阳, 沈燕, 等. 生物质炭施用对土壤中氯虫苯甲酰胺吸附及消解行为的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1339-1345.

- Wang T T, Yu X Y, Shen Y, *et al.* Impact of biochar amendment on the sorption and dissipation of chlorantraniliprole in soils[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(4): 1339-1345.
- [31] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(9): 1231-1243.
- [32] Wu J, O'donnell A G, He Z L, *et al.* Fumigation-extraction method for the measurement of soil microbial biomass-S[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, **26**(1): 117-125.
- [33] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, **46**(7): 1459-1466.
- [34] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ¹³C natural isotope abundance[J]. *Plant and Soil*, 1993, **155-156**(1): 399-402.
- [35] Keiluweit M, Nico P S, Johnson M G, *et al.* Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (Biochar) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(4): 1247-1253.
- [36] Claoston N, Samsuri A W, Ahmad Husni M H, *et al.* Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of empty fruit bunch and rice husk biochars [J]. *Waste Management & Research*, 2014, **32**(4): 331-339.
- [37] Cantrell K B, Hunt P G, Uchimiya M, *et al.* Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **107**: 419-428.
- [38] Uchimiya M, Wartelle L H, Klasson K T, *et al.* Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, **59**(6): 2501-2510.
- [39] Sharma R K, Wooten J B, Baliga V L, *et al.* Characterization of chars from pyrolysis of lignin [J]. *Fuel*, 2004, **83**(11-12): 1469-1482.
- [40] Laird D A, Fleming P, Davis D D, *et al.* Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, **158**(3-4): 443-449.
- [41] Hamer U, Marschner B, Brodowski S, *et al.* Interactive priming of black carbon and glucose mineralisation [J]. *Organic Geochemistry*, 2004, **35**(7): 823-830.
- [42] Qu X L, Fu H Y, Mao J D, *et al.* Chemical and structural properties of dissolved black carbon released from biochars[J]. *Carbon*, 2016, **96**: 759-767.
- [43] Smebye A, Alling V, Vogt R D, *et al.* Biochar amendment to soil changes dissolved organic matter content and composition [J]. *Chemosphere*, 2016, **142**: 100-105.
- [44] de Wit H A, Groeth T, Mulder J. Predicting aluminum and soil organic matter solubility using the mechanistic equilibrium model WHAM[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, **65**(4): 1089-1100.
- [45] Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(6): 1301-1310.
- [46] 付琳琳, 蔺海红, 李恋卿, 等. 生物质炭对稻田土壤有机碳组分的持效影响[J]. *土壤通报*, 2013, **44**(6): 1379-1384.
- Fu L L, Lin H H, Li L Q, *et al.* Persistent effects of biochar application on organic carbon fractions of paddy soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, **44**(6): 1379-1384.
- [47] 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.
- Zhang M K, Bayou W D, Tang H J. Effects of biochar's application on active organic carbon fractions in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26**(2): 127-131, 137.
- [48] Zimmerman A R, Gao B, Ahn M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(6): 1169-1179.
- [49] Kasozi G N, Zimmerman A R, Nkediakizza P, *et al.* Catechol and humic acid sorption onto a range of laboratory-produced black carbons (Biochars) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(16): 6189-6195.
- [50] 安艳, 姬强, 赵世翔, 等. 生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 293-300.
- An Y, Ji Q, Zhao S X, *et al.* Effect of biochar application on soil aggregates distribution and moisture retention in orchard soil [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 293-300.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibaohe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Jun-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172