

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.7

第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)
基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟	谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)
郑州市 PM _{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析	杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)
能见度与 PM _{2.5} 浓度关系及其分布特征	王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)
基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征	白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)
太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源	李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)
办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征	王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦杏春 (3008)
南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征	张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)
黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征	张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)
基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析	王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)
李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响	徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)
水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价	王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)
银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价	田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)
人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例	谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)
漓江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析	唐金平, 张强, 胡漾, 张宇, 聂保伟 (3089)
三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因子分析	付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)
降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响	翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)
绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征	童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)
微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析	刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 彭飞, 王凯军 (3126)
钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性	张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)
基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用	唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)
N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBK5 染料废水	于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)
Cu ²⁺ 对以 NO ₃ ⁻ 为电子受体反硝化过程的影响	买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)
CANON 中试反应器启动及性能优化	孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)
好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响	徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)
有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响	刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)
不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响	吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王佳伟, 张树军 (3195)
ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性	张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)
在线 NaClO 反洗对倒置 A ² O-MBR 系统微生物群落的影响	王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)
基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价	袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)
北京市清水与再生水协同利用优化模型	张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)
N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除	柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)
北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存	周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)
贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险	杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅红 (3249)
紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征	程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)
四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响	陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)
热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归	李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)
鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响	武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)
宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制	王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)
石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)
磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度	湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)
会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较	贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)
湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析	蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)
改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响	李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)
重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应	韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)
不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异	彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)
添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N ₂ O 排放影响	孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)
渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)
不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征	鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)
西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征	廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)
生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响	李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)
《环境科学》征订启事 (3194)	《环境科学》征稿简则 (3222)
信息 (3256, 3284, 3323)	

生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响

李倩倩¹, 许晨阳¹, 耿增超^{1*}, 张久成², 陈树兰¹, 王慧玲¹, 张妍¹, 负方悦¹, 杨林¹, 董胜虎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. 汉中市农产品质量安全监测检验中心, 汉中 723000)

摘要: 通过比较生物炭施入土壤 2 a 和 5 a 的试验结果, 研究随年限的增长生物炭的添加对壤土容重和土壤团聚体含量及稳定性的影响. 采用田间定位试验和室内分析, 试验设生物炭用量为 $0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (B_0)、 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (B_{20})、 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (B_{40})、 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (B_{60}) 和 $80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (B_{80}) 这 5 个处理, 将果树树干、枝条生物炭(450℃、限氧条件下)施入土壤, 与耕层土壤混匀. 经过 5 a, 分 3 层测定 0~30 cm 土层(即 0~10、10~20 和 20~30 cm)的土壤容重、团聚体及有机碳含量. 结果表明: ①生物炭施入土壤 5 a 与施入 2 a 的结果相比, 其对 0~10 cm 和 10~20 cm 土层团聚体影响相对减弱, 对 20~30 cm 土层土壤容重和团聚体的影响显著增强. ②随着年限的增长, 在 0~10 cm 土层, 生物炭施用量为 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, $>0.25 \text{ mm}$ 团聚体的含量及团聚体稳定性显著增强, 容重显著减小; 在 10~20 cm 和 20~30 cm 土层, 生物炭施用量为 $60 \sim 80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, $>0.25 \text{ mm}$ 团聚体的含量及团聚体稳定性显著增强, 容重显著减小. ③当生物炭施用量为 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 对土壤有机碳的增加效果表现最优. 说明生物炭对土壤团聚体的影响是一个渐进的过程. 生物炭施入土壤 5 a, 其对深层土壤的影响更为显著, 20~30 cm 土层的土壤容重显著降低, $>0.25 \text{ mm}$ 团聚体的含量及团聚体稳定性显著增强. 从经济效益和改善效果综合考虑, 在耕层土壤施入 $40 \sim 60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物炭最适.

关键词: 壤土; 生物炭; 土壤容重; 土壤团聚体; 土壤有机碳

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3388-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201808094

Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil

LI Qian-qian¹, XU Chen-yang¹, GENG Zeng-chao^{1*}, ZHANG Jiu-cheng², CHEN Shu-lan¹, WANG Hui-ling¹, ZHANG Yan¹, YUN Fang-yue¹, YANG Lin¹, DONG Sheng-hu¹

(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. Hanzhong Agricultural Product Quality and Safety Monitoring and Inspection Center, Hanzhong 723000, China)

Abstract: The effect of biochar on the bulk density and aggregate stability of Lou soil was evaluated and compared after biochar was applied for 2 years and 5 years through a field-positioning experiment. Five biochar amounts were applied in this study, as follows: $0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (B_0), $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (B_{20}), $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (B_{40}), $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (B_{60}), and $80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (B_{80}). The biochar was produced by pyrolysis of stems and branches from fruit trees at the temperature of 450℃ with limited oxygen apply. At the beginning of the study, biochar was mixed thoroughly with the surface soil (0-20 cm). After 5 years, the soil bulk density and aggregate stability of 0-30 cm soil layers (0-10, 10-20, and 20-30 cm) were measured and compared with the results obtained after 2 years with the purpose of observing the long-term and persist effects of biochar application. The results showed that: ① compared with the results after 2 years of application, the effect of biochar on the aggregates at depths of 0-10 cm and 10-20 cm after 5 years were less distinct, and the effect on soil aggregates at depths of 20-30 cm was significantly enhanced; ② compared with the 2 year application, the aggregate stability and the content of the $>0.25 \text{ mm}$ aggregate size fraction were significantly increased at 0-10 cm depths after 5 years of biochar application at a rate of $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, while bulk density was significantly decreased; at 10-20 cm and 20-30 cm soil depths, the stability of aggregates and the content of the $>0.25 \text{ mm}$ aggregate size fraction was significantly increased, while the bulk density was significantly decreased after 5 years of biochar application at a rate of $60 \sim 80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; ③ when the biochar application rate was $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, the increase in soil organic carbon was the highest after 5 years. After biochar was applied for 5 years, its effect was more significant lower in the soil profile; the soil bulk density was significantly reduced, and aggregate stability and the content of $>0.25 \text{ mm}$ aggregates were significantly increased at depths of 20-30 cm. Based on a comprehensive evaluation of the improvement effects and economic benefits, the most suitable biochar application rate was found to be $40 \sim 60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. It was further concluded that the effect of biochar on soil aggregates was gradual and sustainable.

Key words: Lou soil; biochar; soil bulk density; soil aggregates; soil organic carbon

良好的土壤结构是土壤肥力保持的保证^[1], 土壤团聚体作为土壤结构的基本单元, 它的含量与分

收稿日期: 2018-08-12; 修订日期: 2019-01-25

基金项目: 农业部农业环境重点实验室开放基金项目(K4030217149); 陕西省重点研发项目(2018NY-094); 西北农林科技大学大学生创新训练计划项目(201710712037)

作者简介: 李倩倩(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为废弃生物质资源化利用, E-mail: 18404968315@163.com

* 通信作者, E-mail: gengzengchao@126.com

布影响着土壤质量^[2], 其数量多少可以反映土壤的持水性、通气性以及储存和供给养分等能力的高低^[3], 是反映土壤肥力与健康的指标之一. 它的大小分布对土壤养分的保持、供应等起着决定性的作用^[4]. 良好的土壤团聚体有效地改善土壤的耕性和透气、透水性, 增强土壤的抗侵蚀能力^[5].

生物炭是秸秆、粪便等有机物料在低氧环境下, 经过高温热解炭化产生的一种具有多孔隙、比表面积大, 富含碳元素以及有很高的生物化学稳定性的高度芳香化物质^[6~9]. 近年来, 生物炭在很多领域都得到了广泛地关注和应用, 将生物炭作为土壤改良剂应用于农业土壤是一项多赢策略^[10]. 有研究表明, 生物炭施入土壤可以显著提高土壤有机碳含量^[11], 促进土壤团聚体的形成^[12], 降低容重^[13, 14], 改良土壤结构^[15]. 但是也有研究发现, 生物炭的施入对团聚体的影响并不显著, 甚至会导致团聚体的稳定性降低^[16]. 造成这种差异的原因与生物炭和土壤种类的不同以及其他环境因素有关^[17].

目前, 关于生物炭对土壤团聚体影响的报道多为短期试验和室内盆栽试验, 长期定点的大田试验较少^[11, 18], 试验也多针对南方酸性红壤土. 并且, 生物炭对于团聚体的影响效果也存在很大的争议^[18, 19]. 陕西关中平原是我国主要的粮食产区, 其土壤类型以壤土为主, 年均降雨量偏少, 土壤有机质含量较低, 且长期大量使用化肥导致农田土壤质量降低, 生产效益下降, 而施用生物炭能否改良该

地区土壤结构的相关研究较少. 本试验为田间定位试验, 且延续时间较长, 可以更好地研究随着年限的增长生物炭对壤土土壤结构产生的影响. 本试验将在尚杰等^[11]研究的基础上, 将生物炭施入土壤 5 a 的试验结果与生物炭施入土壤 2 a 的试验结果进行比较, 探讨随着年限的延长生物炭的施入对壤土土壤容重和团聚体的含量及其稳定性的影响, 以期生物炭培肥地力和改善农田土壤结构方面提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验地位于陕西省杨凌示范区西北农林科技大学试验田, 地理坐标为北纬 34°16′, 东经 108°04′, 海拔 458.6 m. 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. 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℃, 年降水量 500 ~ 700 mm, 无霜期为 210 d.

1.2 试验材料

1.2.1 生物炭

本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, 生物炭的理化性质如表 1 所示.

1.2.2 供试土壤理化性质

本试验供试土壤的基础理化性质如表 2 所示.

表 1 生物炭理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of biochar

pH (土水比为 1:10)	比表面积 /m ² ·g ⁻¹	N /‰	O /‰	C /‰	H /‰	硝态氮 /mg·kg ⁻¹	铵态氮 /mg·kg ⁻¹
10.43	86.70	1.09	23.81	72.38	2.62	0.52	1.86

表 2 供试土壤理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of soil

pH (土水比 1:2.5)	容重 /g·cm ⁻³	全氮 /g·kg ⁻¹	全磷 /g·kg ⁻¹	全钾 /g·kg ⁻¹	硝态氮 /mg·kg ⁻¹	铵态氮 /mg·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	有机质 /g·kg ⁻¹
7.33	1.30	0.71	0.43	19.64	18.20	15.90	12.38	193.00	14.99

1.3 试验设计

本文是尚杰等^[11]的延续试验, 通过对比生物炭施入土壤 5 a 的试验结果与生物炭施入土壤 2 a^[11]的试验结果, 研究随着年限的延长生物炭的施入对壤土土壤容重和团聚体的含量及其稳定性的影响. 本试验采用随机区组设计, 根据生物炭施用量设置 5 个处理, 分别为: 对照 B₀ (0 t·hm⁻²)、B₂₀ (20 t·hm⁻²)、B₄₀ (40 t·hm⁻²)、B₆₀ (60 t·hm⁻²) 和 B₈₀ (80 t·hm⁻²), 每个处理 3 次重复, 共 15 个小

区, 小区面积为 1.35 m×3.50 m, 每个小区之间设 0.30 m 隔离带. 在前期试验中, 生物炭于 2012 年 4 月一次性均匀撒施于土壤表层并浅翻, 与耕层土壤混匀 (此后每年不再施入生物炭). 氮、磷、钾肥 (分别为尿素、磷酸二铵、硫酸钾) 均作基肥于每次种植作物前一次性施入, 用量分别为 N 225 kg·hm⁻²、P₂O₅ 180 kg·hm⁻²、K₂O 150 kg·hm⁻². 之后于 2012 年 4 月至 2014 年 10 月进行夏玉米 (“正大 12”) 和冬小麦 (“小偃 22 号”) 的轮作, 玉米播

种量为 52 500 株·hm⁻², 冬小麦播种量为 150 kg·hm⁻², 2015 年 4 月至 2015 年 10 月种植辣椒(黑风品种), 种植密度为 52 000 株·hm⁻². 2015 年 10 月至 2016 年 6 月种植冬小麦. 2016 年 6 月至 2017 年 5 月休闲. 本试验在前期试验土壤的基础上, 于 2017 年 6 月种植夏玉米(“正大 12”), 播种量为 52 500 株·hm⁻², 9 月收获.

1.4 试验方法

1.4.1 土壤容重

采用烘干法测定, 先称取干净环刀的重量, 用不锈钢环刀分层采集 0~30 cm 土层土样, 每 10 cm 为一层, 重复 3 次. 称量后置于烘箱中于 105℃ 下烘干至恒量, 称量, 通过计算单位体积环刀中的烘干土质量得到土壤容重.

1.4.2 土壤有机碳

采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定.

1.4.3 土壤团聚体

玉米收获后(2017 年 9 月下旬)采集土壤团聚体样品, 每个小区分 3 层采集 0~30 cm 土层的原状土, 每 10 cm 为一层, 重复 3 次, 分别装入盒中密封. 将采集的团聚体原状土样挑去动植物残体、根系和石块后, 沿自然结构轻轻掰成约 1 cm³ 大小的土块, 于室内干燥处自然风干, 备用. 机械稳定性团聚体和水稳性团聚体分别采用干筛法和湿筛法测定.

大于 0.25 mm 的机械稳定性团聚体含量(>0.25 mm mechanically stable aggregates, DR_{0.25})、大于 0.25 mm 的水稳性团聚体含量(>0.25 mm water stable aggregates, WR_{0.25})、平均质量直径(mean weight diameter, MWD)、团聚体破坏率(proportion of aggregate destruction, PAD)、土壤不稳定团粒指数(unstable soil aggregate index, E_{LT})分别通过下面公式计算^[11]:

$$DR_{0.25} = \sum_{i=1}^n w_i$$

$$WR_{0.25} = \sum_{i=1}^n w_i$$

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{R}_i \times w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

$$PAD = \frac{DR_{0.25} - WR_{0.25}}{DR_{0.25}} \times 100\%$$

$$E_{LT} = \frac{W_T - WR_{0.25}}{W_T} \times 100\%$$

式中, w_i 为第 i 粒级团聚体质量所占的质量分数

(%); $\bar{R}$ 某级团聚体的平均直径; W_T 为供试土壤的总质量.

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 软件进行数据整理和作图, SPSS 20.0 软件对试验数据进行统计分析. 采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)分析不同生物炭用量对土壤物理指标的影响, 采用最小显著极差法(LSD 法)进行多重比较($\alpha = 0.05$). 结果以平均值 ± 标准误表示.

2 结果与分析

2.1 生物炭对土壤团聚体的影响

2.1.1 生物炭对 > 0.25 mm 土壤团聚体含量的影响

以 0.25 mm 的界限将团聚体分为大团聚体和微团聚体^[20], 粒径 > 0.25 mm 的团聚体是较好的团聚体, 它们的保肥性、机械稳定性、水稳性、通气性均很好. 一般来说, 其含量越高, 说明土壤结构、性质越好^[21]. 本试验将采用 DR_{0.25} 和 WR_{0.25} 的质量分数(表 3)来说明团聚体在土壤中的数量和分布情况, 进而说明生物炭的不同处理对土壤团聚的影响状况.

表 3 生物炭处理下不同土层的 DR_{0.25} 和 WR_{0.25}¹⁾ / %

Table 3 DR_{0.25} and WR_{0.25} of different soil layers under different biochar treatments / %

指标	处理	土层深度/cm		
		0~10	10~20	20~30
DR _{0.25}	B ₀	87.6 ± 1.2ab	88.3 ± 2.4b	87.9 ± 2.0bc
	B ₂₀	91.4 ± 0.6a	92.0 ± 1.2ab	86.9 ± 0.3c
	B ₄₀	86.8 ± 1.5ab	88.9 ± 1.2b	91.0 ± 0.5ab
	B ₆₀	85.5 ± 1.9b	91.3 ± 1.9ab	93.0 ± 0.5a
	B ₈₀	86.1 ± 2.0b	94.2 ± 0.6a	93.0 ± 1.2a
WR _{0.25}	B ₀	44.5 ± 2.3b	46.2 ± 1.2ab	33.8 ± 1.0b
	B ₂₀	41.7 ± 1.5b	46.8 ± 1.6ab	37.8 ± 2.5b
	B ₄₀	55.8 ± 0.9a	44.5 ± 2.5b	39.0 ± 0.4b
	B ₆₀	35.6 ± 1.2c	51.1 ± 0.6a	35.9 ± 2.2b
	B ₈₀	30.8 ± 0.3d	44.4 ± 1.6b	45.4 ± 2.4a

1) 不同小写字母表示同一土层不同处理间差异达到显著水平($P < 0.05$), 下同

由表 3 可知, 生物炭施入土壤 5 a, 在表层 0~10 cm, B₂₀、B₄₀、B₆₀ 和 B₈₀ 的 DR_{0.25} 与 B₀ 相比无显著性差异; 在 10~20 cm 土层, B₈₀ 的 DR_{0.25} 较 B₀ 显著增加了 6.7%; 在 20~30 cm 土层, B₆₀ 和 B₈₀ 的 DR_{0.25} 较 B₀ 都显著增加了 5.8%. 在表层 0~10 cm, B₄₀ 的 WR_{0.25} 较 B₀ 显著增加了 25.4%, B₆₀ 和 B₈₀ 较 B₀ 分别显著减小了 20% 和 30.8%; 在 10~20 cm 土层, B₂₀、B₄₀、B₆₀ 和 B₈₀ 的 WR_{0.25} 与 B₀ 相比无显著性差异; 在 20~30 cm 土层, B₈₀ 的 WR_{0.25} 较

B₀ 显著增加了 34.3%。说明土层的深度和生物炭的施用量都会影响生物炭对土壤团聚体产生的作用。在 0~10 cm 土层, B₂₀、B₄₀、B₆₀ 和 B₈₀ 的 DR_{0.25} 与 B₀ 相比无显著性差异, 而 WR_{0.25} 在生物炭用量为 40 t·hm⁻² 时达到最高; 在 10~20 cm 土层, DR_{0.25} 在 80 t·hm⁻² 达到最高, 而 B₂₀、B₄₀、B₆₀ 和 B₈₀ 的 WR_{0.25} 与 B₀ 相比无显著性差异; 在 20~30 cm 土层, DR_{0.25} 和 WR_{0.25} 均在 80 t·hm⁻² 达到最高。

2.1.2 生物炭对 >0.25 mm 团聚体 MWD 的影响

MWD 能够反映土壤团聚体大小分布状况(表 4), 是反映团聚体稳定性的一个关键指标^[22], 其值越大表示团聚体的平均粒径团聚度越高, 稳定性越强^[23]。

表 4 生物炭处理下不同土层的 MWD				
Table 4 MWD of different soil layers under different biochar treatments				
方法	处理	土层深度/cm		
		0~10	10~20	20~30
干筛法	B ₀	4.35±0.01a	3.98±0.46ab	4.08±0.04b
	B ₂₀	4.26±0.24a	4.43±0.10ab	4.51±0.44ab
	B ₄₀	4.31±0.17a	4.06±0.06ab	5.17±0.02a
	B ₆₀	3.72±0.08b	3.79±0.20b	5.10±0.05a
	B ₈₀	3.47±0.02b	4.72±0.01a	4.18±0.08b
湿筛法	B ₀	1.45±0.06cd	1.37±0.02b	1.37±0.03b
	B ₂₀	1.84±0.07a	1.54±0.10b	1.93±0.13a
	B ₄₀	1.69±0.07ab	1.36±0.00b	1.08±0.04b
	B ₆₀	1.57±0.08bc	1.40±0.06b	1.29±0.12b
	B ₈₀	1.31±0.06d	1.92±0.01a	1.38±0.08b

由表 4 可知, 干筛下, 在 0~10 cm 的土层, B₆₀ 和 B₈₀ 的 MWD 分别较 B₀ 显著减少了 14.5% 和 20.2%; 在 10~20 cm 土层, B₂₀、B₄₀、B₆₀ 和 B₈₀ 的 MWD 与 B₀ 相比均未达到显著性差异; 在 20~30 cm 土层, B₄₀ 和 B₆₀ 分别较 B₀ 显著增加了 26.7% 和 25.0%。湿筛下, 生物炭处理的 MWD 随生物炭用量的增加先增大后减小, 在表层 0~10 cm 处表现为 B₂₀>B₄₀>B₆₀>B₀>B₈₀, B₂₀ 和 B₄₀ 的 MWD 较 B₀ 分别显著增加了 26.9% 和 16.6%; 在 10~20 cm 土层, B₈₀ 的 MWD 最高, 较 B₀ 显著增加了 40.1%; 在 20~30 cm 处, B₂₀ 的 MWD 最高, 较 B₀ 显著增加了 40.9%。说明施用生物炭 5 a, 在 0~10 cm 土层, 生物炭施用量为 20 t·hm⁻² 和 40 t·hm⁻² 时, 大于 0.25 mm 水稳性团聚体的 MWD 显著增加; 在 10~20 cm 土层, 生物炭施用量为 80 t·hm⁻² 时, 大于 0.25 mm 水稳性团聚体的 MWD 显著增加; 在 20~30 cm 土层, 生物炭施用量为 20 t·hm⁻² 时, 大于 0.25 mm 水稳性团聚体的 MWD 显著增加。而生物炭对大于 0.25 mm 机械稳定性团聚体的 MWD 的作用仅在 20~30 cm 土层中达到显著, 与施用生物炭两年后只增加 0~20 cm 土层团聚体的 MWD 不同。

因为日常的土壤管理和雨水淋洗的影响, 生物炭会向下层迁移, 逐渐对耕层以下的土壤产生影响, 对表层土壤的作用则会相对减弱。

2.1.3 生物炭对土壤团聚体稳定性的影响

PAD 和 E_{LT} 能够很好地反映土壤团聚体稳定性(表 5)。其值越大, 表示团聚体稳定性越差, 土壤退化程度越高; 其值越小, 表示土壤结构越稳定^[24]。

表 5 生物炭处理下不同土层 PAD 和 E _{LT} /%				
Table 5 PAD and E _{LT} of different soil layers under different biochar treatments/%				
指标	处理	土层深度/cm		
		0~10	10~20	20~30
PAD	B ₀	49.22±2.05c	47.4±0.64bc	61.46±1.91a
	B ₂₀	54.42±1.48b	49.09±2.04bc	56.57±2.82ab
	B ₄₀	35.77±1.31d	49.93±2.73b	57.15±0.33ab
	B ₆₀	58.44±0.58b	44.07±0.36c	61.41±2.39a
	B ₈₀	64.15±1.15a	58.12±1.43a	51.10±2.82b
E _{LT}	B ₀	81.99±0.88bc	82.37±0.89a	86.42±1.29a
	B ₂₀	83.78±1.33ab	83.04±1.58a	85.10±0.76a
	B ₄₀	79.30±0.81c	82.05±2.22a	85.51±0.67a
	B ₆₀	86.16±0.70a	78.13±1.71a	85.33±1.40a
	B ₈₀	85.84±1.01a	81.59±1.19a	80.06±1.82b

由表 5 可知, 在 0~30 cm 土层, PAD 和 E_{LT} 表现出一致的规律。具体表现为: 在表层 0~10 cm, PAD 和 E_{LT} 都先明显增加后又降低然后再升高, B₄₀ 的 PAD 和 E_{LT} 较 B₀ 都显著降低, 分别降低了 27.3% 和 5.3%, 而 B₂₀、B₆₀ 和 B₈₀ 的 PAD 较 B₀ 分别显著增加了 10.6%、18.7% 和 30.3%, B₆₀ 和 B₈₀ 的 E_{LT} 较 B₀ 分别显著增加了 5.1%、4.8%; 在 10~20 cm 土层, E_{LT} 并未达到显著性差异, B₈₀ 的 PAD 较 B₀ 显著增加了 22.6%; 在 20~30 cm 土层, B₈₀ 的 PAD 和 E_{LT} 较 B₀ 均显著降低, 分别降低 16.9% 和 7.4%。可以看出, 在 0~10 cm 土层, 生物炭用量在 40 t·hm⁻² 时土壤团聚体的稳定性最强, 除此用量外, 其余处理的团聚体稳定性明显下降; 在 10~20 cm 土层, 当生物炭用量为 80 t·hm⁻² 时, 显著降低了土壤团聚体的稳定性; 在 20~30 cm 土层, 生物炭的施用明显增强了土壤团聚体的稳定性, 当达到 80 t·hm⁻² 时, 团聚体稳定性最强。因此, 受不同土层深度的影响, 土壤团聚体稳定性对生物炭用量的响应也有所不同, 生物炭对土壤团聚体稳定性的影响还存在较大的争议^[18, 19]。

2.2 生物炭对土壤有机碳的影响

由图 1 可知, 生物炭施入土壤 5 a, 土壤有机碳显著增加。在 0~10 cm 土层, B₂₀、B₄₀、B₆₀ 和 B₈₀ 的有机碳含量较 B₀ 均显著增加, 分别显著增加了 20.6%、27.9%、75.4% 和 86.8%, 土壤有机碳含

量与生物炭施用量的变化基本一致,生物炭施用量越大,有机碳含量越高;在 10~20 cm 土层, B_{40} 、 B_{60} 和 B_{80} 的有机碳含量较 B_0 均显著增加,分别增加了 48.9%、25.7% 和 64.9%;在 20~30 cm 土层, B_{60} 的有机碳含量较 B_0 显著增加了 27.8%。总体而言,由于生物炭直接施用于土壤耕层,因此 0~10 cm 和 10~20 cm 的土壤有机碳含量明显高于其下层土壤(20~30 cm)。在 0~10 cm 土层,虽然生物炭施用量为 $80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,有机碳含量最高,但与施用量为 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时的有机碳含量相比,并没有达到显著性差异;在 10~20 cm 土层,生物炭施用量为 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时并未对土壤有机碳产生显著的影响,可能与生物炭施用量有关,低施用量生物炭对深层土壤的改良效应较弱;在 20~30 cm 土层,当生物炭施用量为 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,显著增加了土壤有机碳含量。因此综合考虑增加土壤有机碳的改良效果及经济效益来看,生物炭施用量为 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时表现最优。

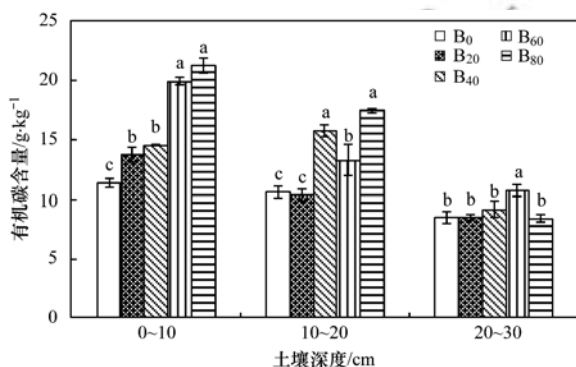


图 1 生物炭处理对不同土层土壤有机碳的影响

Fig. 1 Effect of biochar treatment on the organic carbon content of different soil layers

2.3 生物炭对土壤容重的影响

土壤容重是土壤理化性质的重要指标之一,它与土壤紧实度密切相关,能够反映土壤质量。

由图 2 可知,生物炭施用 5 a,在 0~10 cm 土层, B_{60} 的土壤容重较 B_0 显著降低了 13.2%,其余各施用量生物炭并未对土壤容重产生显著影响;在 10~20 cm 土层,在 B_{40} 、 B_{60} 的土壤容重分别较 B_0 显著降低了 12.6% 和 11.9%;在 20~30 cm 土层, B_{80} 的土壤容重与 B_0 相比,显著降低了 22.8%。说明生物炭能显著降低土壤容重^[25],且随着时间的增长,高施用量生物炭对土壤容重所产生的作用逐渐增强,是显著降低土壤容重的主要原因。在 0~10 和 10~20 cm 的耕层土壤,生物炭施用量为 40~60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤容重显著降低;在 20~30 cm 土层,生物炭施用量为 80 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤容重显著降低。

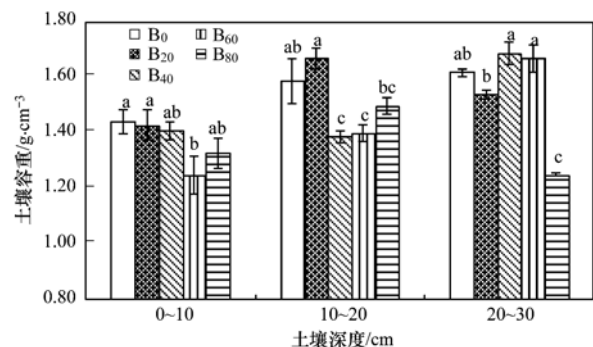


图 2 生物炭处理对不同土层土壤容重的影响

Fig. 2 Effect of biochar treatment on the soil bulk density of different soil layers

2.4 不同年限生物炭对土壤团聚体影响的比较

2.4.1 不同年限生物炭对 >0.25 mm 土壤团聚体影响的比较

由表 6 可知,干筛条件下,与生物炭施入土壤 2 a 仅对表层土壤 $DR_{0.25}$ 产生显著影响相比,施入生物炭 5 a,其对 10~20 cm 和 20~30 cm 土层团聚体均产生显著影响,而对于 0~10 cm 土层并未产生显著影响。

湿筛条件下,与生物炭施加 2 a 数据^[11]相比,生物炭施入土壤 5 a,在 0~10 cm 土层, B_{40} 较 B_0 的 $WR_{0.25}$ 增加程度减弱了 7.7%, B_{60} 和 B_{80} 显著减少了 $WR_{0.25}$;在 10~30 cm 土层,各施用量生物炭并未对 $WR_{0.25}$ 产生显著的增加作用。

2.4.2 不同年限生物炭对 >0.25 mm 团聚体 MWD 影响的比较

由表 7 可知,干筛条件下,生物炭施入土壤 2 a,在 0~10 cm 土层, B_{60} 和 B_{80} 的 MWD 较 B_0 显著增加 27.9% 和 23.1%^[11],而随着年限的增加,生物炭施入土壤 5 a, B_{60} 和 B_{80} 的 MWD 较 B_0 显著减小了 14.5% 和 20.2%。在 10~30 cm 土层,随着年限的不同,生物炭对团聚体 MWD 的影响在土层间存在差异:生物炭施入土壤 2 a,10~20 cm 土层的 B_{40} 和 B_{60} 较 B_0 都显著增加,而在 20~30 cm 土层, B_{20} 、 B_{40} 、 B_{60} 和 B_{80} 的 MWD 与 B_0 相比均未达到显著性差异;而生物炭施入土壤 5 a,在 10~20 cm 土层, B_{20} 、 B_{40} 、 B_{60} 和 B_{80} 的 MWD 与 B_0 相比未达到显著性差异,在 20~30 cm 土层, B_{40} 和 B_{60} 较 B_0 都显著增加。产生这种现象的原因是田间土壤管理对土层造成了扰动以及随着年限的增加生物炭逐渐向下层土壤迁移^[26, 27],对深层土壤团聚体产生作用。

湿筛条件下,与生物炭添加 2 a^[11]相比,生物炭施入土壤 5 a,在 0~10 cm 土层,各施用量生物炭对 MWD 的影响均有所减弱, B_{20} 、 B_{40} 和 B_{60} 分别

减弱了 20.9%、27.2% 和 52.6%；在 10~20 cm 土层，生物炭施入土壤 2 a 并未对 MWD 产生显著影响，但施入 5 a 却显著增加了 MWD。

表 6 不同年限生物炭处理下不同土层的 $DR_{0.25}$ 和 $WR_{0.25}$ ¹⁾/%

Table 6 $DR_{0.25}$ and $WR_{0.25}$ of different soil layers after 2 years' and 5 years' biochar application/%					
土壤深度/cm	处理	$DR_{0.25}$		$WR_{0.25}$	
		2 a	5 a	2 a	5 a
0~10	B_0	92.7±0.5b	87.6±1.2ab	28.7±2.7b	44.5±2.3b
	B_{20}	92.4±1.4b	91.4±0.6a	38.5±3.0ab	41.7±1.5b
	B_{40}	93.6±1.2ab	86.8±1.5ab	38.2±2.7b	55.8±0.9a
	B_{60}	96.0±0.6a	85.5±1.9b	47.3±7.1a	35.6±1.2c
	B_{80}	94.6±0.9ab	86.1±2.0b	46.8±1.7a	30.8±0.3d
10~20	B_0	94.7±0.7a	88.3±2.4b	38.2±3.4b	46.2±1.2ab
	B_{20}	95.2±0.6a	92.0±1.2ab	49.2±1.2a	46.8±1.6ab
	B_{40}	95.1±1.1a	88.9±1.2b	49.5±4.3a	44.5±2.5b
	B_{60}	96.5±1.0a	91.3±1.9ab	42.8±4.7ab	51.1±0.6a
	B_{80}	95.4±0.6a	94.2±0.6a	43.5±1.1ab	44.4±1.6b
20~30	B_0	95.9±0.8a	87.9±2.0bc	43.0±2.0b	33.8±1.0b
	B_{20}	95.5±1.1a	86.9±0.3c	51.2±3.9ab	37.8±2.5b
	B_{40}	96.1±1.1a	91.0±0.5ab	55.4±8.0a	39.0±0.4b
	B_{60}	97.0±1.0a	93.0±0.5a	51.2±3.9ab	35.9±2.2b
	B_{80}	95.8±0.4a	93.0±1.2a	40.3±3.0b	45.4±2.4a

1) 2 a 数据来自文献[11]；不同小写字母表示同一土层不同处理间差异达到显著水平， $P<0.05$ ，下同

表 7 不同年限生物炭处理下不同土层的 MWD

Table 7 MWD of different soil layers after 2 years' and 5 years' biochar application					
土壤深度/cm	处理	干筛法		湿筛法	
		2 a	5 a	2 a	5 a
0~10	B_0	4.16±0.12b	4.35±0.01a	1.38±0.05b	1.45±0.06cd
	B_{20}	4.43±0.42b	4.26±0.24a	2.04±0.10a	1.84±0.07a
	B_{40}	4.24±0.06b	4.31±0.17a	2.10±0.04a	1.69±0.07ab
	B_{60}	5.32±0.11a	3.72±0.08b	2.22±0.26a	1.57±0.08bc
	B_{80}	5.12±0.59a	3.47±0.02b	2.54±0.26	1.31±0.06d
10~20	B_0	4.16±0.43b	3.98±0.46ab	1.97±0.20b	1.37±0.02b
	B_{20}	5.26±0.32ab	4.43±0.10ab	2.57±0.24a	1.54±0.10b
	B_{40}	5.38±0.37a	4.06±0.06ab	2.32±0.15ab	1.36±0.00b
	B_{60}	5.49±0.30a	3.79±0.20b	2.48±0.18ab	1.40±0.06b
	B_{80}	4.80±0.41ab	4.72±0.01a	2.48±0.13ab	1.92±0.01a
20~30	B_0	5.36±0.27a	4.08±0.04b	2.25±0.14a	1.37±0.03b
	B_{20}	5.96±0.61a	4.51±0.44ab	2.76±0.06a	1.93±0.13a
	B_{40}	4.77±0.30a	5.17±0.02a	2.83±0.63a	1.08±0.04b
	B_{60}	4.94±0.40a	5.10±0.05a	2.44±0.4a	1.29±0.12b
	B_{80}	5.18±0.41a	4.18±0.08b	2.20±0.13a	1.38±0.08b

2.4.3 不同年限生物炭对土壤团聚体稳定性影响的比较

不同年限生物炭对土壤团聚体稳定性的影响有所不同，表 8 为生物炭施入土壤 2 a 和 5 a，不同处理下不同土层 PAD 和 E_{LT} 的比较。

由表 8 可知，生物炭施入土壤 2 a，0~30 cm 的土层各处理的 PAD 和 E_{LT} 均明显减小，说明在施入的 2 a 内生物炭显著增加了土壤团聚体的稳定性^[11]。而本研究表明生物炭施入土壤 5 a，其对土壤团聚体稳定性既有显著增强，也有显著降低，这与生物炭下移^[26, 27]有关。在 0~20 cm 土层，生物

炭施用量为 40~60 t·hm⁻² 时，显著增强土壤团聚体稳定性；当生物炭施用 80 t·hm⁻² 时，土壤团聚体稳定性显著降低。而在 20~30 cm 土层，只有在生物炭施用量为 80 t·hm⁻² 时，土壤团聚体的稳定性才会显著增强，其它处理均无显著影响。

3 讨论

本研究发现，生物炭施入土壤 2 a 和 5 a，其对 0~20 cm 土层团聚体均产生显著影响，但生物炭施加 5 a 与 2 a^[11] 的研究结果相比有所减弱；生物炭施入 5 a 对 20~30 cm 土层土壤团聚体影响显著，生

物炭施入 2 a 对 20 ~ 30 cm 土层土壤团聚体的影响并不显著. 这说明生物炭对土壤的改良作用是一个缓慢渐进的过程. 造成这种差异的原因是生物炭开始是施于土壤耕层(即 0 ~ 20 cm 土层), 因此初期其仅对耕层土壤产生作用, 对 20 ~ 30 cm 土层影响

较小^[11]; 之后, 随着时间的延长, 受雨水淋洗及日常田间管理(如深翻)等自然和人为活动的影响, 土壤中的生物炭会向下层土壤进行迁移^[26, 27], 进而对 20 ~ 30 cm 土层的团聚体产生了影响, 与此同时上层土壤所受的影响也有所减弱.

表 8 不同年限生物炭处理下不同土层 PAD 和 E_{LT} /%

Table 8 PAD and E_{LT} of different soil layers after 2 years' and 5 years' biochar application/%

土壤深度/cm	处理	PAD		E_{LT}	
		2 a	5 a	2 a	5 a
0 ~ 10	B ₀	69.72 ± 2.78a	49.22 ± 2.05c	71.33 ± 2.66a	81.99 ± 0.88bc
	B ₂₀	58.34 ± 3.19ab	54.42 ± 1.48b	61.49 ± 3.03ab	83.78 ± 1.33ab
	B ₄₀	59.15 ± 3.24ab	35.77 ± 1.31d	61.83 ± 2.65ab	79.30 ± 0.81c
	B ₆₀	50.68 ± 7.61ab	58.44 ± 0.58b	52.71 ± 7.08b	86.16 ± 0.70a
	B ₈₀	50.51 ± 1.34b	64.15 ± 1.15a	53.16 ± 1.71b	85.84 ± 1.01a
10 ~ 20	B ₀	59.67 ± 3.61a	47.4 ± 0.64bc	61.83 ± 3.42a	82.37 ± 0.89a
	B ₂₀	48.35 ± 2.17ab	49.09 ± 2.04bc	50.85 ± 1.19b	83.04 ± 1.58a
	B ₄₀	47.99 ± 4.54b	49.93 ± 2.73b	50.54 ± 4.26b	82.05 ± 2.22a
	B ₆₀	55.51 ± 9.35ab	44.07 ± 0.36c	57.46 ± 4.73ab	78.13 ± 1.71a
	B ₈₀	54.37 ± 1.29ab	58.12 ± 1.43a	56.49 ± 1.11ab	81.59 ± 1.19a
20 ~ 30	B ₀	55.2 ± 2.11a	61.46 ± 1.91a	57.04 ± 2.03a	86.42 ± 1.29a
	B ₂₀	46.48 ± 1.26ab	56.57 ± 2.82ab	48.85 ± 1.56ab	85.10 ± 0.76a
	B ₄₀	42.16 ± 8.87b	57.15 ± 0.33ab	44.58 ± 8.02b	85.51 ± 0.67a
	B ₆₀	47.19 ± 4.22ab	61.41 ± 2.39a	48.81 ± 3.90ab	85.33 ± 1.40a
	B ₈₀	57.98 ± 2.66a	51.10 ± 2.82b	59.74 ± 3.02a	80.06 ± 1.82b

本试验发现, 生物炭施入土壤 5 a, 在 0 ~ 10 cm 土层, 仍是生物炭用量为 40 t·hm⁻²时对团聚体含量及稳定性的影响表现最优, 这与尚杰等^[11]对于生物炭施入土壤两年后的研究结果相符合. 在这一土层, 当生物炭施用量为 40 t·hm⁻²时, WR_{0.25}和 MWD 显著增加, PAD 和 E_{LT} 显著降低, 明显提高了团聚体的含量和稳定性, 且此时土壤团聚体的含量和稳定性达到最大. Glaser 等^[28]的研究发现, 生物炭可以增强土壤生物活性, 使它们产生更多的分泌物, 形成土壤团聚体的胶结物质, 从而增强了团聚体的稳定性. 吴鹏豹等^[27]的研究也表明, 施入生物炭能显著提高团聚体的稳定性. 施入生物炭 5 a 与 2 a 的研究^[11]结果有所差异的是: 在 0 ~ 10 cm 土层, 当生物炭施用量为 60 ~ 80 t·hm⁻²时, WR_{0.25}和 MWD 显著减小, PAD 和 E_{LT} 显著增加, 这与叶丽丽等^[16]的研究结果一致, 他们通过室内培养试验发现添加生物炭并不能提高土壤大团聚体含量, 甚至降低了土壤团聚体的稳定性. 这主要是因为添加生物炭会增加土壤的总孔隙度, 提高土壤水分涵养能力, 且生物炭施用量的增加, 总孔隙度呈现增长趋势^[29], 采样时试验区经历了雨季, 表层(0 ~ 10 cm)土壤受降雨影响较大, 增加了土壤水分含量, 降低了土壤黏结力, 土壤易于分散, 同时生物炭比较稳定, 分解小, 分解过程中自身可能不会产生黏液团聚颗粒^[16], 因此高施用量的生物炭造成了团聚体

稳定性降低; 而在 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm 土层, 当生物炭施用量为 60 ~ 80 t·hm⁻²时, WR_{0.25}和 MWD 显著增加, PAD 和 E_{LT} 显著降低, 说明此时团聚体含量及稳定性都显著增加. 出现这一现象的原因与团聚体和生物炭随着时间向下层土壤迁移有关; 随着年限的增长, 生物炭在雨水淋洗、人为田间管理(如深耕)和土壤动物等的作用下逐渐向下层迁移^[26, 27], 对下层土壤产生更深远的影响; 低施用量生物炭的改良作用随着年限的延长逐渐减弱, 高施用量的生物炭对深层土壤的作用逐渐加强, 对深层团聚体的影响也越大; 除此之外, 在人为翻耕的影响下, 表层的团聚体也向下层迁移, 造成了下层团聚体含量显著增加, 而上层团聚体含量减少的现象.

从农学方面来讲, 不同容重的土壤带来的农业效益也不同. 一般来说, 有机质含量高的低容重土壤带来的农业效益更好^[30]. 因此, 如果土壤容重降低, 则表示土壤的结构得到改善. 本研究发现, 生物炭施入土壤 2 a 与 5 a, 土壤容重均显著降低, 且生物炭施加 5 a 与 2 a^[11]的结果相比更加显著. 生物炭施入土壤 5 a 后, 在 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土层, 当其施用量为 40 ~ 60 t·hm⁻²时, 土壤容重显著降低, 当其施用量为 80 t·hm⁻²时, 并未产生显著影响; 在 20 ~ 30 cm 土层, 当(且仅当)生物炭施用量为 80 t·hm⁻²时, 土壤容重显著降低. 而尚杰等^[11]

的研究发现, 在生物炭施入土壤 2 a, 生物炭施用量为 $40 \sim 80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 土壤容重均显著降低. 生物炭能够降低土壤容重可能有两方面原因, 一方面生物炭具有多孔结构, 密度较低, 施入土壤后能够降低土壤密度, 具有一定的稀释作用, 另一方面, 有研究表明生物炭可以增加土壤微生物量和生物活性, 增强团聚性, 从而改善土壤结构^[31].

前人研究表明, 在 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层, 当生物炭施用量为 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 在显著提高土壤活性有机碳和土壤碳库管理指数^[32], 增加壤土土壤微生物量, 提高土壤酶活性^[10] 及增加土壤含水率^[11] 等方面表现最优; 在保温方面生物炭施用量为 $40 \sim 60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时表现最好. 也有研究表明^[33], $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物炭施用量是改良砂壤土, 提高作物产量较为合适的选择. 而本研究发现, 生物炭施入土壤 5 a, 当生物炭施用量为 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 对土壤有机碳的增加效果表现最优; 在 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土层, 当其施用量为 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 团聚体的含量及稳定性表现结果相对较好, 容重显著降低; 在 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 和 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 土层, 当其施用量为 $60 \sim 80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 团聚体含量及稳定性表现结果相对较好, 容重显著降低. 因此结合前人研究与本试验研究结果, 在耕层土壤中, 生物炭施用量为 $40 \sim 60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时对土壤结构的改善效果最佳.

4 结论

(1) 生物炭对土壤团聚体的影响是一个渐进的过程, 随着年限的增加, 生物炭逐渐对深层土壤产生作用. 与生物炭施入土壤 2 a 相比, 生物炭施入 5 a, $20 \sim 30 \text{ cm}$ 土层的土壤容重显著降低, 团聚体含量和稳定性均显著增加.

(2) 从经济效益和改善效果综合考虑, 在耕层土壤施入 $40 \sim 60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物炭最适.

参考文献:

- [1] 郑学博, 樊剑波, 周静. 沼液还田对旱地红壤有机质及团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2015, **48**(16): 3201-3210.
Zheng X B, Fan J B, Zhou J. Effects of biogas slurry on soil organic matter and characteristics of soil aggregates in upland red earth[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, **48**(16): 3201-3210.
- [2] 米会珍, 朱利霞, 沈玉芳, 等. 生物炭对旱作农田土壤有机碳及氮素在团聚体中分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(8): 1550-1556.
Mi H Z, Zhu L X, Shen Y F, et al. Biochar effects on organic carbon and nitrogen in soil aggregates in semiarid farmland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(8): 1550-1556.
- [3] 王丽, 李军, 李娟, 等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(3): 759-768.
Wang L, Li J, Li J, et al. Effects of tillage rotation and fertilization on soil aggregates and organic carbon content in corn field in Weibei highland [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, **25**(3): 759-768.
- [4] 贾重建, 刘红宜, 卢瑛, 等. 土地利用方式对土壤有机碳和团聚体组分特征的影响[J]. 热带地理, 2014, **34**(5): 681-689.
Jia C J, Liu H Y, Lu Y, et al. Effects of land use patterns on soil organic carbon and aggregate fractions [J]. Tropical Geography, 2014, **34**(5): 681-689.
- [5] 邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 等. 不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 1045-1052.
Qiu X L, Zong L G, Liu Y F, et al. Effects of different cultivation patterns on soil aggregates and organic carbon fractions [J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 1045-1052.
- [6] 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.
- [7] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, **46**(16): 3324-3333.
Chen W F, Zhang W M, Meng J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, **46**(16): 3324-3333.
- [8] Sun F F, Lu S G. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2014, **177**(1): 26-33.
- [9] Gul S, Whalen J K, Thomas B W, et al. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, **206**: 46-59.
- [10] 尚杰, 耿增超, 王月玲, 等. 施用生物炭对土微生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2016, **49**(6): 1142-1151.
Shang J, Geng Z C, Wang Y L, et al. Effect of biochar amendment on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activity in Tier Soils [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, **49**(6): 1142-1151.
- [11] 尚杰, 耿增超, 赵军, 等. 生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(7): 1969-1976.
Shang J, Geng Z C, Zhao J, et al. Effects of biochar on water thermal properties and aggregate stability of Lou soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(7): 1969-1976.
- [12] 田冬, 高明, 黄容, 等. 油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2988-2999.
Tian D, Gao M, Huang R, et al. Response of soil respiration and heterotrophic respiration to returning of straw and biochar in rape-maize rotation systems [J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2988-2999.
- [13] 潘全良, 陈坤, 宋涛, 等. 生物炭及炭基肥对棕壤持水能力的影响[J]. 水土保持研究, 2017, **24**(1): 115-121.
Pan Q L, Chen K, Song T, et al. Influences of biochar and biochar-based compound fertilizer on soil water retention in brown soil [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, **24**(1): 115-121.
- [14] 赵占辉, 张丛志, 蔡太义, 等. 不同稳定性有机物料对砂姜

- 黑土理化性质及玉米产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, **23**(10): 1228-1235.
- Zhao Z H, Zhang C Z, Cai T Y, *et al.* Effects of different stable organic matters on physicochemical properties of lime concretion black soil and maize yield [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, **23**(10): 1228-1235.
- [15] 李江舟, 代快, 张立猛, 等. 施用生物炭对云南烟区红壤团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(6): 2114-2120.
- Li J Z, Dai K, Zhang L M, *et al.* Effects of biochar application on soil organic carbon distribution and soil aggregate composition of red soils in Yunnan tobacco planting area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(6): 2114-2120.
- [16] 叶丽丽, 王翠红, 周虎, 等. 添加生物质黑炭对红壤结构稳定性的影响[J]. 土壤, 2012, **44**(1): 62-66.
- Ye L L, Wang C H, Zhou H, *et al.* Effects of rice straw-derived biochar addition on soil structure stability of an ultisol[J]. Soils, 2012, **44**(1): 62-66.
- [17] 王月玲, 耿增超, 王强, 等. 生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3634-3641.
- Wang Y L, Geng Z C, Wang Q, *et al.* Influence of biochar on greenhouse gases emissions and physico-chemical properties of loess soil [J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3634-3641.
- [18] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 355-362.
- Xu G X, Wang Z F, Gao M, *et al.* Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration [J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 355-362.
- [19] Kelly C N, Benjamin J G, Calderón F C, *et al.* Incorporation of biochar carbon into stable soil aggregates: The role of clay mineralogy and other soil characteristics[J]. Pedosphere, 2017, **27**(4): 694-704.
- [20] 万毅林, 高明. 不同种植年限对菜地土壤结构的影响[J]. 中国农学通报, 2015, **31**(13): 236-243.
- Wan Y L, Gao M. Effects of different planting years on soil structure in vegetable fields [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, **31**(13): 236-243.
- [21] 蒋腊梅, 白桂芬, 吕光辉, 等. 不同管理模式对干旱区草原土壤团聚体稳定性及其理化性质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, **36**(4): 15-21, 39.
- Jiang L M, Bai G F, Lu G H, *et al.* Effects of different management modes on soil aggregate stability and physicochemical properties of grassland in arid area [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, **36**(4): 15-21, 39.
- [22] 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.
- [23] 陈超, 李娟, 李劲彬. 生物炭和秸秆施用对复配土壤物理性状及团粒结构的影响[J]. 土地开发工程研究, 2017, **2**(2): 36-40.
- Chen C, Li J, Li J B. Effects of biological carbon and straw on physical properties and aggregate structure of compound soil[J]. Land Development and Engineering Research, 2017, **2**(2): 36-40.
- [24] 裴中健, 梁成华, 尹岩. 不同栽培年限日光温室土壤团聚体的组成及稳定性[J]. 水土保持通报, 2015, **35**(6): 70-74, 80.
- Pei Z J, Liang C H, Yin Y. Size hierarchy and stability of soil aggregates in solar greenhouse soils with different planted years [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, **35**(6): 70-74, 80.
- [25] 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.
- [26] Major J, Lehmann J, Rondon M, *et al.* Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration [J]. Global Change Biology, 2010, **16**(4): 1366-1379.
- [27] 吴鹏豹, 解钰, 漆智平, 等. 生物炭对花岗岩砖红壤团聚体稳定性及其总碳分布特征的影响[J]. 草地学报, 2012, **20**(4): 643-649.
- Wu P B, Xie Y, Qi Z P, *et al.* Effects of biochar on stability and total carbon distribution of aggregates in granitic laterite[J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, **20**(4): 643-649.
- [28] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal-a review[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, **35**(4): 219-230.
- [29] 陈懿, 陈伟, 林叶春, 等. 生物炭对植烟土壤微生态和烤烟生理的影响[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(12): 3781-3787.
- Chen Y, Chen W, Lin Y C, *et al.* Effects of biochar on the micro-ecology of tobacco-planting soil and physiology of flue-cured tobacco[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(12): 3781-3787.
- [30] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, **29**(1): 68-79.
- Wu Y, Xu G, Lv Y C, *et al.* Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: current status and knowledge gaps[J]. Advances in Earth Science, 2014, **29**(1): 68-79.
- [31] 房彬, 李心清, 赵斌, 等. 生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量的影响[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(8): 1292-1297.
- Fang B, Li X Q, Zhao B, *et al.* Influence of biochar on soil physical and chemical properties and crop yields in rainfed field [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(8): 1292-1297.
- [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] 李昌见, 屈忠义, 勾芒芒, 等. 生物炭对土壤水肥利用效率与番茄生长影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(11): 2187-2193.
- Li C J, Qu Z Y, Gou M M, *et al.* Effects of biochar amendment on soil water and nutrient utilization efficiencies and tomato growth[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(11): 2187-2193.

CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)