

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

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

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析 包良满,刘江峰,雷前涛,李晓林,张桂林,李燕 (1)

中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平 林海涛,李琦路,张干,李军 (10)

广州城区秋冬季大气颗粒物中WSOC吸光性研究 黄欢,毕新慧,彭龙,王新明,盛国英,傅家谟 (16)

南京地区大气PM_{2.5}潜在污染源硫碳同位素组成特征 石磊,郭照冰,姜文娟,芮茂凌,曾钢 (22)

青奥会前后南京PM_{2.5}重金属污染水平与健康风险评估 张恒,周自强,赵海燕,熊正琴 (28)

南昌市秋季大气PM_{2.5}中金属元素富集特征及来源分析 林晓辉,赵阳,樊孝俊,胡恭任,于瑞莲 (35)

南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究 马佳,于兴娜,安俊琳,朱彬,于超,朱俊,夏航 (41)

边界层低空急流导致北京PM_{2.5}迅速下降及其形成机制的个例分析 廖晓农,孙兆彬,何娜,赵普生,马志强 (51)

电厂燃煤烟尘PM_{2.5}中化学组分特征 王毓秀,彭林,王燕,张腾,刘海利,牟玲 (60)

2014年APEC期间北京市空气质量改善分析 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,孙峰,李令军,李金香,周一鸣,杨妍妍,姜磊 (66)

APEC会议期间北京机动车排放控制效果评估 樊守彬,田灵娣,张东旭,郭津津 (74)

晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析 王燕,彭林,李丽娟,王毓秀,张腾,刘海利,牟玲 (82)

北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究 薛亦峰,周震,钟连红,闫静,曲松,黄玉虎,田贺忠,潘涛 (88)

长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征 尤翔宇,刘湛,张青梅,漆燕,向仁军,苏艳蓉 (94)

长春城市水体夏秋季温室气体排放特征 温志丹,宋开山,赵莹,邵田田,李思佳 (102)

查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和CDOM吸收特性 李思佳,宋开山,赵莹,穆光熠,邵田田,马建行 (112)

不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究:以广西大溶江、灵渠流域为例 孙平安,于爽,莫付珍,何师意,陆菊芳,原雅琼 (123)

大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价 黄允优,曾焯,刘守江,马永红,胥晓 (132)

西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征 杨帆,蒋秩锋,王翠翠,黄晓楠,吴芝斌,陈琳 (141)

合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析 樊慧慧,李如忠,裴婷婷,张瑞钢 (148)

辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征 王维契,周俊丽,裴淑玮,刘征涛 (156)

水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价 黄廷林,刘飞,史建超 (166)

低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响 游蕊,梁丽,覃蔡清,邓晗,王定勇 (173)

北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态 王馨慧,单保庆,唐文忠,张超,王闯 (180)

紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨 王文东,张轲,许洪斌,刘国旗 (187)

二氧化钛光催化氧化阿散酸 许文泽,杨春风,李静,李建斐,刘会芳,胡承志 (193)

紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能 段伦超,王凤贺,赵斌,陈亚君 (198)

氢氧化镧-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用 林建伟,王虹,詹艳慧,陈冬梅 (208)

纳米TiO₂吸附HgCl₂水溶液中Hg(II) 周雄,张金洋,王定勇,覃蔡清,徐凤,罗程钟,杨熹 (220)

好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建 周林军,刘济宁,石利利,冯洁,徐炎华 (228)

3种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性 古文,周林军,刘济宁,陈国松,石利利,徐炎华 (240)

Fe(II)活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水 朱松梅,周振,顾凌云,蒋海涛,任佳懿,王罗春 (247)

长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源 李静雅,吴迪,许芸松,李向东,王喜龙,曾超华,付晓芳,刘文新 (253)

直链烷基苯指示城市化过程初步研究 徐特,曾辉,倪宏刚 (262)

龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征 刘硕,吴泉源,曹学江,王集宁,张龙龙,蔡东全,周历媛,刘娜 (270)

水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响 吴杨周,陈健,胡正华,谢燕,陈书涛,张雪松,申双和,陈曦 (280)

中水浇灌对土壤重金属污染的影响 周益奇,刘云霞,傅慧敏 (288)

生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响 安艳,姬强,赵世翔,王旭东 (293)

3种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响 彭禧柱,杨胜香,李凤梅,曹建兵,彭清静 (301)

丛枝菌根真菌对铈污染土壤上玉米生长和铈吸收的影响 王芳,郭伟,马朋坤,潘亮,张君 (309)

珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染分布特征 李彬,吴山,梁金明,邓杰帆,王珂,梁文立,曾彩明,彭四清,张天彬,杨国义 (317)

三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响 韦丽丽,周琼,谢从新,王军,李君 (325)

起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较 靳振江,曾鸿鹄,李强,程亚平,汤华峰,李敏,黄炳富 (335)

序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (342)

铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果 杨婷婷,朱能武,芦昱,吴平霄 (350)

运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究 邓欢,蔡旅程,姜允斌,钟文辉 (359)

通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响 齐鲁,魏源送,张俊亚,赵晨阳,才兴,张媛丽,邵春岩,李洪枚 (366)

高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究 陈文和,邓明佳,罗辉,丁文杰,李琳,林坚,刘俊新 (377)

应用FCM-qPCR方法定量检测水中常见病原体 王明星,柏耀辉,梁金松,霍咏,杨婷婷,袁林江 (384)

乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响 娄雪宁,周丽萍,宋丹,杨荣,龙峰 (391)

废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响 楼子墨,王卓行,周晓馨,傅瑞琪,刘榆,徐新华 (397)

《环境科学》征订启事(9) 《环境科学》征稿简则(15) 信息(50, 165, 186, 287)

生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响

安艳¹, 姬强¹, 赵世翔¹, 王旭东^{1,2*}

(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: 向土壤中施用生物质炭是增加碳吸存和改善土壤理化性质的一种重要途径. 利用干筛法获得土壤不同级别团聚体, 探究了果园施用不同水平、不同性质生物质炭对土壤团聚体分布及其有机碳含量、土壤孔隙度和田间持水量的影响. 结果表明, 与不施生物质炭的处理 (CK) 相比, 施用生物质炭在 0~10 cm 土层主要减少了土壤 5~8 mm、<0.25 mm 团聚体含量, 增加了 1~2 mm、2~5 mm 级别团聚体含量, 其中 1~2 mm 团聚体随生物质炭施用量增加而显著增加. 施用生物质炭使 0~10 cm 土层土壤团聚体的平均质量直径有所减小, 稳定性降低. 与 CK 相比, 添加生物质炭显著增加了土壤团聚体中有机碳含量, 其中 1~2 mm 团聚体有机碳提高幅度最大, 达 70% 以上. 施用生物质炭显著提高了 <1 mm 级别团聚体的吸湿系数, 增加了土壤总孔隙度和田间持水量.

关键词: 生物质炭; 土壤团聚体; 土壤有机碳; 黑垆土; 保水性

中图分类号: X825 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0293-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.01.038

Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil

AN Yan¹, JI Qiang¹, ZHAO Shi-xiang¹, WANG Xu-dong^{1,2*}

(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: Applying biochar to soil has been considered to be one of the important practices in improving soil properties and increasing carbon sequestration. In order to investigate the effects of biochar application on soil aggregates distribution and its organic matter content and soil moisture constant in different size aggregates, various particle-size fractions of soil aggregates were obtained with the dry-screening method. The results showed that, compared to the treatment without biochar (CK), the application of biochar reduced the mass content of 5-8 mm and <0.25 mm soil aggregates at 0-10 cm soil horizon, while increased the content of 1-2 mm and 2-5 mm soil aggregates at this horizon, and the content of 1-2 mm aggregates significantly increased along with the rates of biochar application. The mean diameter of soil aggregates was reduced by biochar application at 0-10 cm soil horizon. However, the effect of biochar application on the mean diameter of soil aggregates at 10-20 cm soil horizon was not significant. Compared to CK, biochar application significantly increased soil organic carbon content in aggregates, especially in 1-2 mm aggregates which was increased by >70% compared to CK. Both the water holding capacity and soil porosity were significantly increased by biochar application. Furthermore, the neutral biochar was more effective than alkaline biochar in increasing soil moisture.

Key words: biochar; soil aggregates; soil organic carbon; dark loessial soil; water retention

生物质炭是指有机物料(秸秆、树干或其枝条、粪肥、生活垃圾等)在完全或部分缺氧的条件下经热解炭化产生的一类高度芳香化难溶性固态物质^[1,2], 添加土壤后因其稳定性高可以存留上千年^[3]. 因此, 土壤中施用生物质炭被看作是很好的固碳措施之一^[4]. 而且, 生物质炭由于其较大的比表面积和较多的官能团(酸性官能团和碱性官能团)可以改善土壤的物理性质(孔隙状况)和化学性质(离子代换量、保肥性、缓冲性等)^[5-7], 进而也影响着土壤的生物学性质(微生物的数量和活性). 目前关于生物质炭进入土壤后对土壤物理性质影响方面诸如孔隙度等已有一些研究^[5,8], 但对土壤团聚体分布的影响研究较少. 有机物是土壤团聚体形成的重要胶结物质^[9], 可以促进土壤团聚体的形

成. 良好的土壤团聚体一方面能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^[10], 对农业生产以及土壤水土保持等具有重要的作用. 另一方面, 土壤矿物质和有机质结合形成团聚体, 可以提高有机碳的稳定性, 是增加土壤碳固定的重要机制, 对土壤有机碳库具有很好的物理保护作用^[11]. 通过团聚体的固碳机制可以缓解温室效应的加剧^[12]. 目前关于土壤有机质对土壤团聚体的形成和影响已经基本明确, 但关于生物质炭对土壤

收稿日期: 2015-07-05; 修订日期: 2015-08-21

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD14B11); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2011AA100504)

作者简介: 安艳(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤化学与生物质炭应用, E-mail: anyan9128@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: wangxudong01@126.com

团聚体影响方面的研究较少且结论不一. 吴鹏豹等^[13]及 Biswas 等^[14]的研究发现,施用生物质炭可增加水稳性大团聚体的含量,特别是 >1mm 级别的水稳性团聚体;但也有研究认为,生物质炭属于惰性固体材料,胶结作用小,对团聚体大小和数量没有显著影响^[15]. 有研究者分析认为,出现不同观点的原因与土壤类型和生物质炭施用水平等条件有关^[16].

黄土高原地区土壤有机质含量低、土壤结构体稳定性差,存在严重的水蚀和风蚀现象^[17]. 改善土壤结构在黄土高原这样既干旱又存在严重侵蚀的地区显得至关重要. 施用秸秆和有机肥等虽然在土壤结构改善方面有效果,但有机物料在该地区土壤中存在矿化快的特点,短时间施用或少量施用很难实现土壤有机碳含量的显著提高和土壤结构的明显改善. 如何在这一地区快速提高土壤有机碳和加强土壤结构体的稳定性,是大家非常关注的问题. 黄土高原地区是苹果的适生区^[19],因苹果大面积种植导致每年产生大量的苹果枝条,将这部分枝条制备为

生物质炭进行农田和果园利用是苹果树枝条循环利用的途径之一. 但以苹果枝条制备的生物质炭施用后对土壤结构的影响还不清楚. 为此,本试验以苹果枝条制备的生物质炭为材料,研究了生物质炭不同施用水平对黄土高原黑垆土的土壤团聚体分布及其有机碳分布和保水特征的影响,通过揭示生物质炭在黄土区对土壤结构和性质的影响,旨在为生物质炭在该地区的科学应用和效果评价提供理论依据,也为苹果枝条的农业循环利用提供理论支撑.

1 材料与方法

1.1 试验地自然条件

试验设于铜川市耀州区苹果园,地处陕西省中部长关平原与陕北黄土高原过渡地带,东经 108°51',北纬 34°51',海拔 1 097 m,属暖温带大陆性半湿润易干旱气候区. 多年平均气温 10.6℃,1 月平均气温 -3.0℃,7 月平均气温 23.0℃,平均气温年较差 26.0℃,年平均降水量 582.5 mm,降雨量集中在每年 7~9 月. 供试土壤为黑垆土,理化性质见表 1.

表 1 供试黑垆土表层(0~15 cm)土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of surface dark loessial soil(0-15 cm)

pH	有机碳 /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	全磷 /g·kg ⁻¹	全钾 /g·kg ⁻¹	土壤质地
8.0	14.2	0.83	0.63	1.92	中壤土

1.2 生物质炭

生物质炭是以苹果枝条为原料制备,由陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司提供,制备工艺为干燥除水→挤压成形→装釜充氮气→加热至 550℃(6~8 h)→停火冷却,将制备的生物质炭研磨通过 2 mm 筛. 考虑到生物质炭的 pH 较高(pH = 10.3),在

石灰性土壤上可能带来一些不利因素,试验所用的生物质炭为两种类型,一种为苹果枝条直接制备的生物质炭,一种为用稀硫酸(酸:水 = 1:6)对生物质炭 pH 进行调整,由原来的 pH 10.3 调整为 pH 7.2,分别表示为碱性生物炭(ABC)和中性生物质炭(NBC). 它们的元素构成等见表 2.

表 2 供试生物质炭的元素构成

Table 2 Element content and surface functional groups of the test biochars

生物质炭	元素/%				官能团含量/mmol·g ⁻¹		
	C	H	N	O	羧基	内酯基	酚羟基
ABC	79.5	2.71	1.27	15.94	0.28	0.16	0.14
NBC	78.8	2.82	1.28	16.26	0.31	0.15	0.12

1.3 试验处理

试验于 2013 年 4 月中旬布置于一个面积为 0.66 hm² 的苹果园中,果园土壤质地、肥力均一,果树树龄为 20a,常年以施用化肥为主,树体长势较一致. 试验共设 7 个处理,两种性质的生物质炭添加比例分别为 10、20、30 t·hm⁻²(分别标记为 ABC₁₀、ABC₂₀、ABC₃₀以及 NBC₁₀、NBC₂₀、NBC₃₀),以及不添加生物质炭的对照处理(CK). 每个处理选择 30

颗树(每 10 颗树为一个重复). 以树干为中心将生物质炭均匀施于树冠投影下(半径为 1.5 m),并用锄头将生物质炭与耕层 10 cm 土壤混匀.

1.4 土样采集

采样时间为 2014 年 4 月中旬,按照东南西北 4 个方向于距试验果树树干 100 cm 处用铲刀采集 0~10 cm 和 10~20 cm 两个土层原状土,装于硬质塑料盒带回,在室内自然风干,沿土块自然裂隙掰

开,全部通过 8 mm 筛,保存备用。

1.5 分析方法

土壤团聚体分离方法依据彭新华等^[20]、Mendes 等^[21]的方法略作修改:取通过 8 mm 筛的各处理土样 500 g,利用 8411 型电动振筛机将 500 g 土样分成 5~8、2~5、1~2、0.5~1、0.25~0.5 以及 <0.25 mm 这 6 个级别,分别对各级别土壤称重。采用 $H_2SO_4 + K_2Cr_2O_7$ 外加热法测定各级别土壤有机碳含量。土壤田间持水量采用环刀法测定^[22]。

生物质炭样品的元素含量(C、H、N、O)采用元素分析仪(德国,Vario EL III)测定,表面官能团采用 Boehm 滴定法测定^[23]。

土壤团聚体的最大吸湿系数采用 10% 硫酸法,将已分级的团聚体放入盛有 10% 硫酸的密闭干燥器中(此浓度下的空气相对湿度为 98%)平衡吸附水汽 24 h,然后称重,利用前后质量差得到最大吸湿系数。

1.6 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 软件对数据进行初步处理和绘图统计分析,采用 SAS 9.1 统计分析软件对数据进行方差分析及差异显著性检验(LSD 法)。

团聚体稳定性采用平均质量直径(MWD)表示:

$$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i \quad (1)$$

式中, r_i 是第 i 个筛子孔径(mm), $r_0 = r_1$, $r_n = r_{n+1}$, m_i 为第 i 个筛子的破碎团聚体质量分数。

各级团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率采用式(2)进行计算:

$$\text{贡献率} = \frac{\text{该级别团聚体中有机碳含量} \times \text{该团聚体含量}(\%)}{\text{耕层土壤中有机碳含量}} \times 100\% \quad (2)$$

土壤总孔隙度采用式(3)计算:

$$\text{土壤总孔隙度} = \left(1 - \frac{\text{容重}}{\text{比重}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

2 结果与分析

2.1 添加生物质炭对土壤团聚体分布的影响

在同一土层中,施用生物质炭的处理土壤团聚体的分布趋势表现出相同的规律(见表 3),即各级别团聚体含量从高到低的顺序为 2~5、5~8、1~2、0.5~1、0~0.25、0.25~0.5 mm,差异均达到显著水平($P < 0.05$)。对照处理(CK)团聚体的分布趋势与生物质炭的处理有所不同,5~8 mm 的团聚体含量最多,其次为 2~5 mm 团聚体,其余级别团聚体的顺序与生物质炭处理的相同。说明添加生物质炭减少了 5~8 mm 的团聚体数量。将不同处理团聚体的分布比较后发现,添加生物质炭使 0~10 cm 土层 1~2 mm 和 2~5 mm 土壤团聚体的含量显著增加,而对照(CK)处理在该土层中,土壤结构出现分异大的现象,即大团聚体(5~8 mm)和微团聚体(<0.25 mm)较多。在 10~20 cm 土层,施用生物质炭主要增加了 0.25~0.5 mm 团聚体含量,而对其他级别团聚体含量无显著影响(见表 3)。

表 3 不同生物质炭水平下土壤各级别团聚体的含量

Table 3 Distribution of soil aggregates in different soil horizons of the orchard soils under different levels of biochar application

土层/cm	处理	团聚体百分含量/%					
		5~8 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
0~10	ABC ₁₀	24.38 ± 1.23bB ¹⁾	33.41 ± 1.84abA	17.78 ± 1.19bcC	11.45 ± 0.42dD	3.93 ± 0.13dE	9.05 ± 0.28bcD
	ABC ₂₀	20.78 ± 1.00d ²⁾ B	32.63 ± 1.80abA	18.34 ± 1.15bC	12.23 ± 0.52cD	6.30 ± 1.98bF	9.63 ± 0.54bE
	ABC ₃₀	18.42 ± 0.92eC	30.14 ± 1.71bA	19.63 ± 1.10aB	15.18 ± 0.55aD	6.84 ± 0.25aE	9.79 ± 0.27bE
	NBC ₁₀	23.84 ± 1.17bcB	34.94 ± 1.23aA	15.79 ± 0.74cdC	11.96 ± 0.65cdD	4.88 ± 0.18cF	8.09 ± 0.45eE
	NBC ₂₀	21.38 ± 1.07cdB	32.71 ± 1.16abA	15.58 ± 0.86cdC	13.28 ± 0.89bcD	5.29 ± 0.20bcF	8.76 ± 0.44dE
	NBC ₃₀	20.78 ± 1.05dB	31.88 ± 1.16abA	16.85 ± 0.93bcB	15.05 ± 0.89aC	6.70 ± 0.31aD	9.38 ± 0.16bcE
	CK	30.01 ± 1.51aA	23.13 ± 0.82cB	14.72 ± 0.40eD	14.06 ± 0.64bcCD	5.21 ± 0.28bcE	12.87 ± 0.69aC
10~20	ABC ₁₀	27.29 ± 1.54aB	31.05 ± 1.44aA	13.30 ± 0.89cC	12.12 ± 0.45cCD	6.47 ± 0.19deE	9.77 ± 0.30dD
	ABC ₂₀	27.02 ± 1.56abB	30.04 ± 1.41aA	13.63 ± 0.91bcC	12.52 ± 0.47cC	6.83 ± 0.21cdD	9.86 ± 0.49cdD
	ABC ₃₀	23.40 ± 1.33bA	25.32 ± 1.19bA	15.28 ± 0.71abB	15.71 ± 0.58aB	7.82 ± 0.30abD	12.47 ± 0.69aC
	NBC ₁₀	27.08 ± 1.53aA	26.91 ± 1.29bA	13.62 ± 0.64bcB	13.60 ± 0.69cB	7.34 ± 0.28bcC	11.45 ± 0.64abB
	NBC ₂₀	26.69 ± 1.51abA	26.82 ± 1.29bA	13.97 ± 0.65abcB	13.41 ± 0.68cB	7.20 ± 0.27bcdC	11.91 ± 0.60abB
	NBC ₃₀	24.54 ± 1.39abA	25.62 ± 1.23bA	14.23 ± 0.68abcB	15.44 ± 0.86aB	8.12 ± 0.45aD	12.05 ± 0.47aC
	CK	26.78 ± 1.51abA	25.51 ± 1.23bA	15.48 ± 0.48aB	15.21 ± 0.69bB	5.54 ± 0.33cdE	11.98 ± 0.5abC

1) 同一行中不同大写字母表示同一处理不同级别团聚体间的差异水平达 0.05; 2) 同一列中不同小写字母表示同一级别团聚体不同处理间的差异水平达 0.05

生物质炭的施用水平对土壤团聚体的分布有一定的影响(见表3)。随着生物质炭施用量的增加,两个土层5~8 mm和2~5 mm团聚体含量均减少,而其它级别团聚体含量则增加,且差异都达到显著水平($P < 0.05$)。说明生物质炭添加比例越大,越有利于耕层土壤中 < 2 mm团聚体的积累。中性生物质炭和碱性生物质炭对团聚体分布的影响差异不显著。

平均质量直径(MWD)是反映土壤团聚体稳定性的常用指标,MWD值越大,表示团聚度越高,稳定性越强^[24]。由图1可知,对照处理(CK)0~10 cm土层土壤的平均质量直径大于10~20 cm土层;在0~10 cm土层,大量施用生物质炭(20 t·hm⁻²、30 t·hm⁻²)后,MWD较对照(CK)有所下降;而在10~20 cm土壤中,生物质炭施用水平为10 t·hm⁻²、20 t·hm⁻²时,MWD大于对照,施用水平为30 t·hm⁻²时,MWD小于对照;总体看来,随着生物质炭施用量的增加,土壤MWD呈减小趋势。

2.2 添加生物质炭对团聚体中有机碳含量的影响

不同级别土壤团聚体中有机碳含量是土壤有机质矿化与平衡的微观表征^[25]。试验结果表明,随着团聚体级别的减小(除 < 0.25 mm的团聚体外),有机碳含量呈增加趋势,在0.25~0.5 mm的团聚体中有机碳含量最高且达到62.82 g·kg⁻¹。与CK相比,添加生物质炭可以显著($P < 0.05$)提高团聚体中有机碳含量,且随着施用量的增加而增加。在施用量为30 t·hm⁻²情况下,两个土层均以1~2 mm

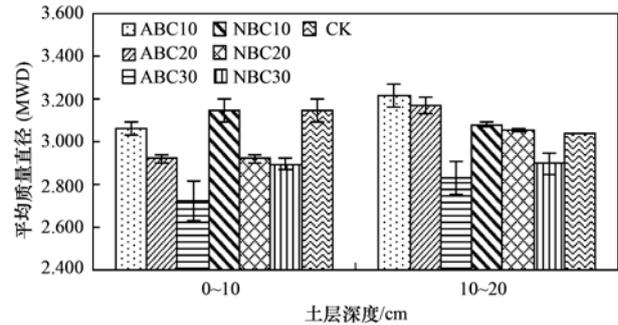


图1 不同生物质炭水平对土壤团聚体平均质量直径(MWD)的影响

Fig. 1 Effect of different levels of biochar on MWD of aggregates in orchard soil

团聚体有机碳含量提高幅度最大,其中0~10 cm土层提高了74.84%(碱性生物质炭)和71.65%(中性生物质炭),10~20 cm土层增加幅度高达92.43%(碱性生物质炭)和95.25%(中性生物质炭)。两种生物质炭比较发现,在0~10 cm土层,碱性生物质炭更利于提高土壤各级别团聚体有机碳含量(与中性生物质炭相比),相反在10~20 cm土层,中性生物质炭更利于提高土壤各级别团聚体有机碳的含量($P < 0.05$),见图2。

2.3 各级别团聚体中有机碳对土壤有机碳的贡献率

表4显示,在0~10 cm土层,添加生物质炭的处理2~5 mm团聚体有机碳对土壤有机碳含量的贡献率最高,达40%以上,其次是5~8 mm和1~2 mm团聚体的,分别达到22.91%~29.25%、

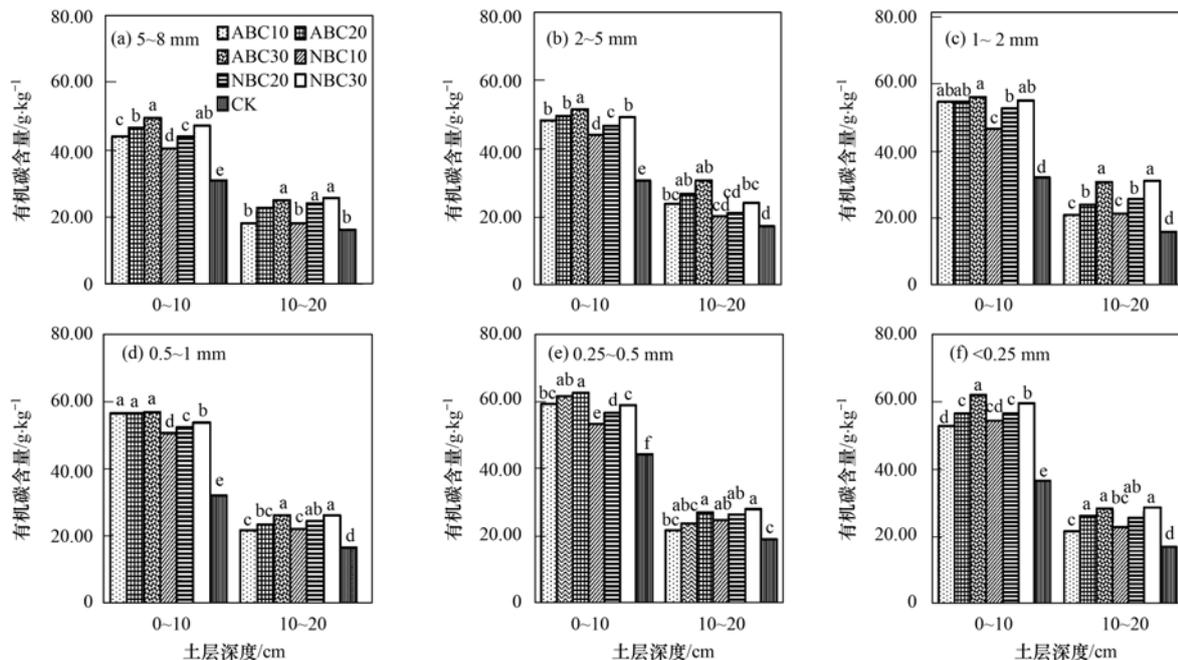


图2 不同处理土壤团聚体有机碳含量

Fig. 2 Effect of different levels of biochar on SOC content of aggregates in different horizons of orchard soil

22.15% ~ 33.36%。CK 处理 5 ~ 8 mm 团聚体碳对土壤有机碳含量的贡献率最高, 达 39.40%, 其次是 2 ~ 5 mm 和 < 0.25 mm 团聚体的, 分别达到 29.97%、23.07%。说明添加生物质炭主要提高了 0 ~ 10 cm 土层 2 ~ 5 mm 和 1 ~ 2 mm 团聚体碳对全

土有机碳的贡献率。在 10 ~ 20 cm 土层, 添加生物质炭对团聚体碳有机碳的贡献率提高不明显。上述结果表明, 果园土壤表层施用生物质炭在 1 a 的时间内对土壤团聚体有机碳贡献率的影响主要表现在 0 ~ 10 cm 土层。

表 4 不同级别团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率

Table 4 Contribution of carbon in different size aggregates to soil organic carbon

土层/cm	处理	有机碳贡献率/%					
		5~8 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
0~10	ABC ₁₀	29.25	43.91	26.44	17.65	6.35	12.99
	ABC ₂₀	24.05	41.95	24.48	20.84	10.04	14.08
	ABC ₃₀	22.91	40.52	33.36	21.79	10.81	7.50
	NBC ₁₀	28.38	46.08	22.15	19.54	7.79	13.21
	NBC ₂₀	26.54	42.98	27.69	19.59	8.45	13.96
	NBC ₃₀	26.74	43.90	29.70	25.55	9.13	5.40
	CK	39.40	29.97	17.27	19.13	9.74	23.07
10~20	ABC ₁₀	19.11	28.26	10.67	10.09	5.36	8.15
	ABC ₂₀	22.21	28.53	11.46	10.45	5.79	8.16
	ABC ₃₀	18.02	23.68	14.34	12.60	6.44	10.74
	NBC ₁₀	19.30	21.07	11.31	11.62	7.04	10.11
	NBC ₂₀	24.31	21.29	13.32	12.26	7.06	11.34
	NBC ₃₀	22.44	21.88	16.25	16.00	8.12	10.21
	CK	20.49	21.52	12.10	12.49	5.55	9.27

2.4 施用生物质炭对团聚体水分常数和土壤孔隙度的影响

最大吸湿系数是指土壤在大气湿度饱和的情况下土壤所吸附气态水的最大量, 反映土壤颗粒的基膜特性。图 3 显示, 随着团聚体级别的减小, 土壤最大吸湿水增加。与 CK 相比较, 添加生物质炭可以增加 < 1 mm 团聚体的最大吸湿水含量, 而对 > 1 mm 的团聚体的无显著影响。生物质炭调节

pH 与否对团聚体的最大吸湿系数无明显影响。与 CK 相比较, 添加生物质炭可以增加土壤田间持水量和总孔隙度。随着生物质炭用量增大, 土壤田间持水量和土壤总孔隙度均增大, 且在两个土层表现一致, 生物质炭改性与否对土壤田间持水量和总孔隙度无显著影响。可见, 生物质炭不仅可以改变团聚体的分布, 而且还对团聚体的保水性能产生影响。

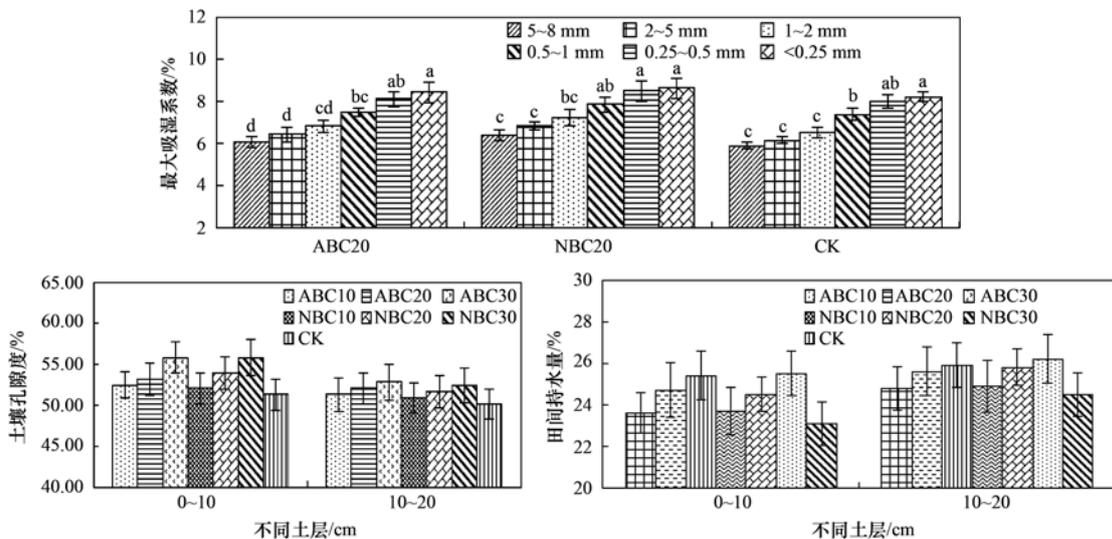


图 3 不同生物质炭水平对土壤团聚体水分常数及孔隙度的影响

Fig. 3 Effect of different levels of biochar on soil moisture content of aggregates and soil porosity in orchard soil

3 讨论

3.1 生物质炭与土壤团聚体的形成和稳定性

黑垆土有机质含量较低,土壤矿物以 2:1 型伊利石为主^[26],土壤团聚体分布常出现较大的分异现象,尤其是在土壤表层,即一方面黏粒之间相互团聚形成大团聚体,另一方面团聚体的稳定性差,易崩解破坏形成微团聚体. 土壤结构体过大会影响到土壤耕性,而过小则影响到水分入渗等. 因此,黑垆土常对土壤耕性和水分入渗产生不良影响. 外源物质输入[如秸秆还田、PAM(Polyacrylamide 聚丙烯酰胺)等土壤改良剂]、耕作方式的改变等都会对土壤结构状况和物理性质产生影响^[27]. 本研究表明,施用生物质炭后 0~10 cm 土层的大团聚体(5~8 mm)减少,且随着生物质炭施用量的增加,减少幅度越大;同时增加了中级团聚体(2~5 mm、1~2 mm)的含量,减少了微团聚体(<0.25 mm)含量,这与其他学者研究结果相似^[13,28]. 其原因在于生物质炭本身具有较大的比表面积,且含有有机大分子等结构^[29],具有胶结和团聚作用^[30],能促进微团聚体(<0.25 mm)向 0.25~0.5 mm、0.5~1 mm 团聚体转化,从而使 0.25~1 mm 团聚体随生物质炭施用量提高有一定程度的增加. 另一方面,土壤表层的大团聚体(5~8 mm)多为黏粒直接胶结团聚而形成,在施用生物质炭的情况下,生物炭可以通过氢键、表面库仑力、分子间的范德华力等吸附在黏粒表面,阻碍了黏粒之间的直接胶结,从而使大团聚体(5~8 mm)减少,中级团聚体增加. 另外,有研究表明,生物质炭施入土壤中提高了土壤微生物量和微生物活性,从而产生了更多的有机分泌物,促进土壤颗粒的相互团聚^[31].

目前关于生物质炭对土壤团聚体稳定性影响方面研究较少且结论不一. 叶丽丽等^[32]通过室内培养试验,认为生物质炭添加到红壤中不能提高、甚至降低了土壤团聚体的稳定性^[33];但也有一些研究认为生物质炭能显著提高团聚体的稳定性^[13,34]. 本研究采用干筛法进行土壤团聚体分级,发现 0~10 cm 土层施用生物质炭后团聚体的平均直径减小,稳定性下降. 这与生物质炭的进入阻碍了黏粒之间的直接相互胶结,从而不利于大团聚体(5~8 mm)的形成有关. 意味着施用生物质炭使耕层土壤结构体的力稳定性降低,这对于质地偏黏的黑垆土而言有利于提高其耕性. 而 10~20 cm 土层的团聚体平均直径在施用 10~20 t·hm⁻²量时有所增大(与

CK 相比),在施用 30 t·hm⁻²量时又有所减小. 因此,施用生物质炭对亚表层土壤团聚体稳定性的影响较复杂,有待进一步研究. 当然,本试验仅以 1 a 的结果为基础,施用生物质炭对土壤表层和亚表层团聚体大小和稳定性的长期影响还需要进一步深入研究.

3.2 生物质炭对团聚体中有机碳含量的影响

施用生物质炭可以显著提高耕层土壤中各级别团聚体中的有机碳含量^[35],有机碳含量随着施用量的增加而增加. 本研究结果显示,两个土层的团聚体有机碳含量均在 1~2 mm 提高幅度最大,可能原因是生物质炭是该级别团聚体形成的主要胶结物质,通过生物质炭将土壤颗粒、较小级别团聚体胶结而形成 1~2 mm 团聚体. 与 CK 相比,施用生物质炭增加了 2~5 mm、1~2 mm 团聚体有机碳贡献率,且 1~2 mm 团聚体有机碳贡献率随着生物质炭施用量的增加而增加;这是生物质炭作用下 1~2 mm 团聚体的形成(数量增加)和有机碳含量提高双重作用的结果. 当然,生物质炭的有机碳和土壤本身存在的有机碳在性质、功能上的差异以及施用生物质炭对土壤固有有机碳矿化和固定的影响,还需要进一步深入研究.

3.3 添加生物质炭对土壤孔隙状况和保水性的影响

不同大小结构体由于胶结方式不同,导致其内部孔隙状况不同,从而影响其保水性质^[36]. 本研究发现,施用生物质炭增大了 1~2 mm 团聚体的最大吸湿系数,且增加了土壤的孔隙度和土壤田间持水量. 其原因在于生物质炭自身具有多孔隙的空间结构,有较强的保水性能. 这与他人研究生物质炭施用后土壤保水性增强的结论一致^[37]. 相关分析表明,在 0~10 cm 土层,土壤总孔隙度、田间持水量与 5~8 mm、<0.25 mm 团聚体均达显著或极显著负相关,与 1~2 mm 团聚体达显著正相关(表 5). 添加生物质炭正是由于显著增加了 1~2 mm 团聚体含量,减少了 5~8 mm、<0.25 mm 团聚体含量,从而使土壤总孔隙度、田间持水量增加(表 3). 在 10~20 cm 土层,土壤总孔隙度、田间持水量与 0.25~0.5 mm 团聚体含量有较高的相关性(表 5),添加生物质炭通过增加 0.25~0.5 mm 团聚体数量(表 3)而提高了田间持水量. 在两个土层,田间持水量与多数级别团聚体的有机碳均达极显著或显著相关(表 5),施用生物质炭后,生物质炭与土壤颗粒胶结进入土壤团聚体,提高了土壤团聚体的有机碳含量,进而提高了土壤田间持水量. 这与生物质炭本身有巨大

的比表面积、多孔结构及吸附能力有关^[38]。

有研究表明, 添加生物质炭后土壤容重降低^[39], 这也是生物质炭改变土壤孔隙度的重要原因。原因在于生物质炭密度较低, 施入土壤后对土壤有一定的稀释作用, 改变了原土壤的孔隙状况, 使其容重减小, 孔隙度增大, 进而增大土壤持水性能。

表5 耕层土壤团聚体分布及其有机碳含量与土壤总孔隙度和田间持水量的关系¹⁾

Table 5 Relation between the content and SOC of soil aggregates and the soil properties and the field moisture capacity in the top layer of soil

因子	团聚体大小/mm	孔隙度		田间持水量	
		0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
团聚体分布	5~8	-0.803*	-0.683	-0.882**	-0.636
	2~5	0.336	-0.054	0.399	-0.252
	1~2	0.907**	0.043	0.859*	0.108
	0.5~1	0.718	0.305	0.737	0.438
	0.25~0.5	0.633	0.811*	0.726	0.852*
	<0.25	-0.876**	0.009	-0.851*	0.067
团聚体有机碳	5~8	0.809*	0.921**	0.854*	0.993*
	2~5	0.711	0.893**	0.759*	0.635
	1~2	0.704	0.949**	0.739	0.948**
	0.5~1	0.588	0.946**	0.643	0.928**
	0.25~0.5	0.699	0.852*	0.756*	0.909**
	<0.25	0.800*	0.962**	0.839*	0.951**

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

4 结论

(1) 一年的果园试验表明, 施用由苹果枝条制备的生物质炭主要减少了黑垆土 5~8 mm、<0.25 mm 团聚体含量, 增加了 1~2 mm、2~5 mm 团聚体含量, 其中 1~2 mm 团聚体含量增加幅度最大, 且随着生物质炭的用量显著增加。生物质炭调节 pH 与否对土壤团聚体含量影响不显著。

(2) 与不施生物质炭相比, 添加生物质炭显著增加黑垆土土壤团聚体中有机碳含量, 其中对 1~2 mm 团聚体有机碳提高幅度最大。碱性生物质炭有利于 0~10 cm 土层团聚体有机碳积累, 中性生物质炭有利于 10~20 cm 土层团聚体有机碳积累。

(3) 在 0~10 cm 土层, 添加生物质炭通过增加 1~2 mm 团聚体含量、减少 5~8 mm 和 <0.25 mm 团聚体含量来提高黑垆土土壤孔隙度和田间持水量; 在 10~20 cm 土层, 通过增加 0.25~0.5 mm 团聚体数量来提高土壤孔隙度和田间持水量。

参考文献:

- [1] 何绪生, 耿增超, 余雕, 等. 生物质炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 1-7.
- [2] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物质炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3324-3333.
- [3] Pessenda L R, Gouveia S M, Aravena R. Radiocarbon dating of total soil organic matter and humin fraction and its comparison

关于生物质炭自身的酸碱性对土壤水分的影响方面的研究较少。本研究发现, 中性生物质炭更有利于黑垆土中土壤团聚体保水性能的提高, 可能原因是 pH 影响了生物质炭的表面官能团的解离和质子化, 进而影响到生物质炭表面的亲水性所致。具体原因还有待进一步深入研究。

with ¹⁴C ages of fossil charcoal [J]. Radiocarbon, 2001, 43 (2B): 595-601.

- [4] 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.
- [5] Downie A, Crosky A, Munroe P. Physical properties of biochar [A]. In: Lehmann J, Joseph S. Biochar for Environmental Management: Science and Technology [M]. London: Earthscan, 2009. 13-32.
- [6] 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.
- [7] Xu G, Lv Y C, Sun J N, et al. Recent advances in biochar applications in agriculture soils: Benefits and environmental implications [J]. Clean-Soil, Air, Water, 2012, 40 (10): 1093-1098.
- [8] Cornelissen G, Gustafsson Ö, Bucheli T D, et al. Extensive sorption of organic compounds to black carbon, coal, and kerogen in sediments and soils: mechanisms and consequences for distribution, bioaccumulation, and biodegradation [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39 (18): 6881-6895.
- [9] Tisdall J M, Oades J M. The effect of crop rotation on aggregation in a red-brow earth [J]. Australian Journal of Soil Research, 1980, 18(4): 423-433.
- [10] 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.
- [11] 莫艳华, 汤佳, 张仁铎, 等. 外加营养源作用下微生物黏结剂对土壤团聚体的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(3): 952-

- 957.
- [12] 陈威, 胡学玉, 陆海楠. 生物炭输入对土壤本体有机碳矿化的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 2300-2305.
- [13] 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.
- [14] Biswas A K, Monhanty M, Hati K M, *et al.* Distillery effluents effect on soil organic carbon and aggregate stability of a vertisol in India[J]. Soil and Tillage Research, 2009, **104**(2): 241-246.
- [15] 柯跃进, 胡学玉, 易卿, 等. 水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO₂ 释放的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 93-99.
- [16] Busscher W J, Novak J M, Evans D E, *et al.* Influence of pecan biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand[J]. Soil Science, 2010, **175**(1): 10-14.
- [17] 李鑫, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 1084-1091.
- [18] 杜华栋, 焦菊英, 寇萌, 等. 黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀环境下芽库的季节动态及垂直分布[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(5): 1269-1276.
- [19] 袁景军, 赵政阳, 张林森, 等. 黄土高原地区老龄苹果园地面蹲靠嫁接技术研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, **35**(10): 55-60
- [20] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报, 2003, **23**(10): 2176-2183.
- [21] Mendes I C, Bandick A K, Dick R P, *et al.* Microbial biomass and activities in soil aggregates affected by winter cover crops [J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, **63**(4): 873-881.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] Boehm H P. Some aspects of the surface chemistry of carbon blacks and other carbons[J]. Carbon, 1994, **32**(5): 759-769.
- [24] Nimmo J R, Perkim K S. Methods of soil analysis, part4-physical methods[M]. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, 2002. 317-328.
- [25] 张旭辉, 李恋卿, 潘根兴. 不同轮作制度对淮北白浆土团聚体及其有机碳的积累与分布的影响[J]. 生态学杂志, 2001, **20**(2): 16-19.
- [26] 朱显谟. 黄土高原土壤与农业[M]. 北京: 农业出版社, 1989. 85-88.
- [27] 韩凤朋, 郑纪勇, 李占斌, 等. PAM 对土壤物理性状以及水分分布的影响[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(4): 70-74.
- [28] Liu X H, Han F P, Zhang X C. Effect of biochar on soil aggregates in the Loess Plateau: results from Incubation experiments [J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2012, **6**(14): 975-979.
- [29] 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]. 应用生态报, 2015, **26**(7): 1969-1976.
- [30] Brodowski S, John B, Flessa H, *et al.* Aggregate-occluded black carbon in soil[J]. European Journal of Soil Science, 2006, **57**(4): 539-546.
- [31] Piccolo A, Pietramellara G, Mbagwu J S C. Use of humic substances as soil conditioners to increase aggregate stability[J]. Geoderma, 1997, **75**(3-4): 267-277.
- [32] 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.
- [33] 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(11): 2930-2934. .
- [34] 史奕, 陈欣, 沈善敏. 土壤团聚体的稳定机制及人类活动的影响[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(11): 1491-1494.
- [35] 侯晓娜, 李慧, 朱刘兵, 等. 生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响[J]. 中国农业科学, 2015, **48**(4): 705-712.
- [36] Adams W A. The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils [J]. European Journal of Soil Science, 1973, **24**(1), 10-17.
- [37] 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.
- [38] Liang B, Lehmann J, Solomon D, *et al.* Black carbon increases cation exchange capacity in soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, **70**(5): 1719-1730.
- [39] 齐瑞鹏, 张磊, 颜永毫, 等. 定容重条件下生物炭对半干旱区土壤水分入渗特征的影响[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(8): 2281-2288.

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shu-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行