

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区 O ₃ 浓度变化	王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)
南京北郊黑碳气溶胶的来源解析	肖思略, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)
电镀厂周边大气 PM ₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价	赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)
广西玉林市大气 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析	黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)
青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征	张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)
大气环境分区管理: 以广东省为例	杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)
基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例	温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁萧蕾, 苗松 (57)
基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ ¹⁵ N 和 δ ¹⁸ O 模拟	王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)
程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策	陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)
陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)
天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价	张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)
西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响	王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖 (109)
北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)
黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险	姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)
淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征	周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)
磷酸盐对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响	卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)
K ₂ S ₂ O ₈ 强化 g-C ₃ N ₄ 薄膜电极光电催化降解 Cu(CN) ₂ ⁻ 并同步回收 Cu	党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)
以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B	蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)
氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能	马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)
铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除	曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)
水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态	马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)
阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响	任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)
典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征	赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)
水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响	许雯佳, 成小英 (202)
环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性	戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)
AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟	曹特特, 王林, 李咏梅 (219)
磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)
碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)
容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响	吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)
DNBF-O ₃ -GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物	钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)
交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)
纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响	周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)
高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用	韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)
浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析	刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)
去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气	卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)
污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价	王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)
初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH ₄ 和 N ₂ O 通量日变化特征	杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)
3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响	武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)
有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N ₂ O 排放的影响	侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)
拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³ C-CO ₂ 脉冲标记	陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)
陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征	兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)
不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窈君, 王向前, 刘扬 (348)
秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响	徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)
县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估	李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)
基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测	曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)
沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析	李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)
磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤	赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)
控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响	封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)
典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异	李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)
松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征	张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)
硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响	代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)
长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响	王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)
海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较	张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈烨, 付璐璐, 王勋功 (438)
鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系	袁丽娟, 廖旦根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)
畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征	张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)
烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧灰性质的影响	章骅, 于思源, 邵立明, 何晶晶 (467)

秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响

徐国鑫, 王子芳*, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 揭示秸秆与生物炭还田对团聚体有机碳含量、分布、稳定性以及相对贡献率的影响, 有利于明确秸秆与生物炭还田下土壤碳库的稳定性及其保护机制。采用田间试验方法研究了油菜/玉米轮作模式下, 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响。结果表明: ① 秸秆与生物炭还田各处理均能提高土壤有机碳含量, 其中生物炭还田(BC、 $16.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、秸秆+生物炭还田(CSBC、 $17.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)效果优于秸秆还田(CS、 $13.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和秸秆+速腐剂还田(CSD、 $14.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。② 与对照(CK)处理相比, CS、CSD处理能显著地提高大团聚体($>2 \text{ mm}$)含量, 增加率为 $94.00\% \sim 117.78\%$, 同时显著提高了水稳性团聚体的平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、 $R_{0.25}$, 降低了分形维数(D), 提高了团聚体稳定性($P < 0.05$)。③ 随着团聚体粒径的增大, 团聚体有机碳含量呈现先降低再增高然后再降低, 且粉黏粒($<0.053 \text{ mm}$)对土壤有机碳贡献率最高($29.61\% \sim 42.18\%$), 大团聚体有机碳贡献率最低($9.19\% \sim 17.81\%$)。除CSD处理外, CS、BC、CSBC处理降低了较大团聚体($2 \sim 0.25 \text{ mm}$)和微团聚体($0.25 \sim 0.053 \text{ mm}$)有机碳贡献率。秸秆还田促进土壤团聚作用效果优于生物炭还田, 而生物炭还田提高团聚体有机碳含量效果优于秸秆还田, 秸秆新碳主要向大团聚体内分配, 秸秆+速腐剂还田还能促进较大团聚体内不同组分结合新碳, 生物炭、秸秆+生物炭还田主要向微团聚体中富集。

关键词: 秸秆; 生物炭; 土壤团聚体; 固碳; 贡献率

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0355-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201705217

Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration

XU Guo-xin, WANG Zi-fang*, GAO Ming, TIAN Dong, HUANG Rong, LIU Jiang, LI Jia-cheng

(College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The aim of this work is to understand the effects of straw and biochar return in soil on the content, distribution, stability, and relative contribution rate of organic carbon for soil aggregates, which could be used to better understanding the stability of the soil carbon pool and the protection mechanisms under straw and biochar return. In this study, a field experiment was conducted to study the effects of straw and biochar return on soil aggregates and carbon sequestration characteristics in a rape-maize rotation planting system. Five treatments, including a control (no organic material added, CK), straw (CS), straw and microorganism (CSD), Biochar (BC), half straw and half biochar (CSBC), were used. The results indicated that ① Straw and biochar could improve the content of soil organic carbon, and the BC and CSBC treatments increased it by $16.88\text{--}17.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, values higher than those with the CS and CSD treatments ($13.76\text{--}14.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$); ② Compared with the CK treatment, CS and CSD treatments could increase the stability of the aggregates through significantly increasing the content of macro-aggregate by $94.00\%\text{--}117.78\%$ and significantly increasing the mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), and $R_{0.25}$ of water stable aggregates, but reducing the D value ($P < 0.05$); and ③ With the increase in aggregate particle size, the content of organic carbon in the aggregates decreased first and then increased. The contribution rate of soil organic carbon in silt and clay was the highest ($29.61\%\text{--}42.18\%$), and the contribution rate of organic carbon in the macro-aggregate was the lowest ($9.19\%\text{--}17.81\%$). In addition to the CSD treatment, the CS, BC, and CSBC treatments reduced the contribution of larger aggregates ($2\text{--}0.25 \text{ mm}$) and micro-aggregates ($0.25\text{--}0.053 \text{ mm}$). In general, the benefit of straw return was better than that of biochar in promoting soil aggregation. However, the application of biochar was better than straw in improving the aggregates organic carbon content. The newly generated carbon from straw degradation was mainly distributed in large aggregates. Straw with microorganisms could promote the combination of carbon by different components in the larger aggregates. The carbon from biochar and straw with biochar treatments were mainly concentrated in micro-aggregates.

Key words: straw; biochar; soil aggregates; carbon sequestration; contribution rate

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其结构组成和分布是指示良好土壤团粒结构的重要指标。土壤团聚体的大小分布和稳定性决定着土壤养分物质的循环和微生物活动,从而影响着土壤生物地球化学反应^[1]。有机碳是土壤团聚体形成的重要胶结物质,其数量提升有利于土壤团聚体的形成及其稳定性的

提高,而土壤团聚体对有机碳的物理保护作用被认为是土壤碳固定和稳定的主要机制^[2]。可见,团聚体和

收稿日期: 2017-05-22; 修订日期: 2017-08-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800101)

作者简介: 徐国鑫(1994~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤质量与环境, E-mail: 1491860140@qq.com

* 通信作者, E-mail: zifangw@126.com

有机碳关系密切,前者是后者存在的场所,后者是前者存在的胶结物质^[3]. 通过团聚体的形成提高土壤碳库可以有效缓解温室效应. 因此,促进团聚体形成和提高土壤对有机碳固持具有重要意义^[4].

农田土壤是受人类活动影响最为频繁的土壤类型之一,近年来国内外对土壤团聚体稳定性及其有机碳的研究开展得较多,但主要集中于农田管理措施,包括耕作方式、种植模式、施肥以及秸秆还田等方面^[5~8]. 有机物质的输入可以促进团聚体的形成,增强土壤的团聚化作用,从而改变土壤团聚体有机碳含量和分配比例,最终影响团聚体有机碳的周转及土壤有机碳的固定^[9]. 不同农业管理措施对土壤固碳的影响主要体现在土壤团聚体更新与转化速度的改变,从而使有机碳的保护机制发生变化^[10]. 秸秆还田不仅可以提高土壤有机碳含量、改善土壤结构及理化性质,还可以显著提高土壤水稳性大团聚体含量. 生物炭施入土壤被认为有巨大的固碳增汇潜力,不少学者已证实生物炭能改善土壤理化性质和土壤结构、提高作物产量和品质、增强土壤“碳汇”功能和减少温室气体排放,但关于生物炭施入土壤对土壤团聚体及其稳定性的研究相对较少且研究结果存在争议. 叶丽丽等^[11]通过室内培养试验发现生物炭添加到红壤中不能提高大团聚体含量,甚至降低了土壤团聚体的稳定性,但也有研究认为生物炭能显著提高团聚体的稳定性^[12]. 侯晓娜等^[13]对砂姜黑土的盆栽试验表明,单施生物炭对土壤大团聚体含量和稳定性的影响不显著,而生物炭与秸秆配合效果明显. 以往的研究主要集中多为盆栽试验或模拟试验,而对油菜/玉米轮作系统下施用生物炭及秸秆还田对土壤团聚体组成及其固碳特征影响的研究还鲜有报道. 因此,本文以紫色土为研究对象,通过田间试验,分析了油菜/玉米轮作下秸秆与生物炭还田处理的土壤团聚体及其有机碳分布特征,有利于阐明秸秆与生物炭还田下土壤碳库的稳定性及其保护机制. 本研究结果对认识土壤碳固定机制和指导紫色土培肥改良、选择合理的秸秆还田方式具有一定的指导作用.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验设在重庆市北碚区西南大学试验农场内,海拔 266.3 m,年平均气温 18.3℃. 最高气温 7 月平均 28.7℃,最低气温 1 月平均 7.7℃,≥10℃积温 6 006℃,年降雨量 1 086.6 mm,年日照时数

1 276.7 h,属于亚热带季风气候. 试验土壤为侏罗纪沙溪庙组紫色泥页岩发育形成的紫色土,中性紫色土亚类,灰棕紫泥土属,是重庆四川紫色土区分布最广的一种土壤. 其基本理化性质为:有机碳含量 9.98 g·kg⁻¹,碱解氮 135.65 mg·kg⁻¹,速效磷 17.38 mg·kg⁻¹,速效钾 206.32 mg·kg⁻¹,pH 为 6.7.

1.2 供试材料

试验所用生物炭由四川省久晟农业有限责任公司提供,以油菜秸秆为原料在 500℃ 高温厌氧条件下热解 2 h 烧制,其碳含量为 625.80 g·kg⁻¹,C/N 为 45.52,pH 为 8.9. 秸秆速腐剂购自康源绿洲生物科技有限公司,产品形态为液体,有效活菌数 ≥ 200 × 10⁸ cfu·mL⁻¹. 水稻秸秆为干样,含水量为 24.53%,有机碳含量为 412.50 g·kg⁻¹,C/N 为 47.74;油菜秸秆为鲜样,含水量为 83.55%,有机碳含量为 392.05 g·kg⁻¹,C/N 为 41.56.

1.3 试验设计

本试验以“等碳量”原则还入秸秆或生物炭,各处理施肥量相同,共设置 5 个处理(见表 1),3 次重复,随机区组排列在 15 个 2 m × 1 m 能独立排灌的微区内,各个微区的水肥管理均相同.

试验种植模式采用“油玉两熟”制,本试验于 2015 年 10 月 11 日开始,2016 年 8 月 1 日结束,各作物的氮、磷、钾、硼养分用量根据文献^[14]来确定,各季作物栽培方式和田间管理措施按照当地习惯进行. 其中油菜(96v44,密度 8 万株·hm⁻²)于 2015 年 10 月 11 日育苗,2015 年 11 月 3 日移栽,2016 年 4 月 19 日收获. 玉米(中豪 9 号,密度 4 万株·hm⁻²)于 2016 年 4 月 9 日育苗,4 月 20 日移栽,8 月 1 日收获. 油菜季的氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)肥和硼肥用量分别为 150、90、90 和 15 kg·hm⁻². 氮肥分基肥和基肥两次施用(基肥占 70%),磷钾硼肥做基肥一次性施用. 基肥和基肥分别于 2015 年 11 月 1 日和 2016 年 2 月 20 日施用,施用方法为小雨前后撒施. 玉米季各处理的氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)肥分别为 180、60、90 kg·hm⁻²,全部作为基肥在玉米移栽时施入. 氮、磷、钾和硼肥品种分别为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12%)、硫酸钾(K₂O 51%)和硼砂(含 B 12%).

2016 年 8 月玉米收获后采集 0~20 cm 层原状土,每个微区采集 5 点,将 5 点土样混合成一个样品,装入袋中运回实验室. 在室内剔除石砾、肉眼可见的植物残体及根系等杂质,用手将大土块沿土体自然裂隙轻轻掰碎,过 10 mm 筛,风干,留待团聚体分析.

表 1 试验处理描述

Table 1 Treatment design in the study

代码	处理	物料还田量/kg·hm ⁻²	具体措施
CK	无物料还田	0	
CS	秸秆还田	8 000	油菜季还水稻秸秆,玉米季还油菜秸秆;生物炭由油菜秸秆制成;将秸秆粉碎成 2 cm 左右,生物炭过 10 mm 筛,移栽作物前 3 d 将秸秆或生物炭均匀覆盖于地表,然后进行 10 cm 深翻耕
CSD	秸秆 + 速腐剂还田	8 000 + 16	
BC	生物炭还田	5 274	
CSBC	秸秆 + 生物炭还田	4 000 + 2 637	

1.4 测验方法

参照 Elliott 等^[15]的湿筛方法:称取过 10 mm 风干土 50 g 置于 2、0.25、0.053 mm 的套筛上,将套筛放入水桶中浸泡 5 min 后,手动上下振荡 2 min (振幅 3 cm,频率 30 次·min⁻¹),按次序收集各级孔筛及桶中土样于铝盒中,依次分别为大团聚体(LM: >2 mm)、较大团聚体(SM: 0.25 ~ 2 mm)、微团聚体(MA: 0.053 ~ 0.25 mm)和黏粉粒组分(S + C: < 0.053 mm),然后 60℃ 烘干称重,磨细过 0.25 mm 筛,室温下保存,采用重铬酸钾-浓硫酸外加加热法测定其有机碳含量^[16]。

土壤团聚体稳定性指标采用平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、0.25 mm 的团聚体含量($R_{>0.25}$)和分形维数 D 来描述。计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i W_i \quad (1)$$

$$GWD = \exp\left(\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{x}_i\right) \quad (2)$$

$$R_{>0.25} = \left[1 - \frac{M_{x<0.25}}{M_T}\right] \quad (3)$$

分形维数 D 的计算采用杨培岭等^[17]推导的公式:

$$\frac{M_{r<\bar{x}_i}}{M_T} = \left[\frac{\bar{x}_i}{x_{\max}}\right]^{3-D} \quad (4)$$

利用公式(4),通过数据拟合,可求得 D 。

各粒级团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率采用下式计算:

$$\begin{aligned} &\text{贡献率} = \\ &\frac{\text{该级团聚体中有机碳含量} \times \text{该级团聚体含量}}{\text{土壤有机碳含量}} \\ &\times 100\% \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\bar{x}_i$ 为某级团聚体平均直径[本研究中各级团聚体平均直径取值分别为大团聚体(6 mm)、较大团聚体(1.125 mm)、微团聚体(0.151 5 mm)、黏粉粒组分(0.026 5 mm)], W_i 为第 i 级团聚体的质量, $M_{r<\bar{x}_i}$ 为粒径小于 $\bar{x}_i$ 的团聚体的质量分数, $M_{r<0.25}$ 为粒径 <

0.25 mm 团聚体的质量, M_T 为团聚体总质量, $x_{\max}$ 为团聚体的最大粒径,本研究中其值为 10 mm。

1.5 数据处理

采用 SPSS 17.0 和 Excel 2003 软件进行数据处理、绘图制表。所有的结果均用 3 次测定结果的平均值表示。不同处理之间的多重比较采用 LSD 最小显著差数法($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 秸秆与生物炭还田对土壤各粒级团聚体含量分布的影响

秸秆与生物炭还田下各粒级团聚体的分布表现出相同的规律(见表 2),各粒级团聚体含量随着粒径减小大致呈现先增加后减小的变化趋势,除 CSD 处理外,其它处理的 0.25 ~ 0.053 mm 团聚体含量占优势支配地位(最高)。与 CK 处理相比,CS、CSD 处理能显著地提高 >2 mm 团聚体含量($P < 0.05$),分别提高 117.78% 和 94.00%,而 BC、CSBC 处理仅提高 27.41% 和 17.99%。秸秆与生物炭处理降低了 <0.25 mm 团聚体含量,其中显著降低了 <0.053 mm 团聚体含量($P < 0.05$)。CSD 较 CK 处理能显著地促进 2 ~ 0.25 mm 团聚体形成,提高了 21.27% ($P < 0.05$),而 CS 处理的 2 ~ 0.25 mm 团聚体含量反而降低,但差异不显著。

2.2 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体稳定性的影响

从表 3 可以看出,各处理水稳性团聚体的 MWD 大小顺序为:CS > CSD > BC > CSBC > CK,其中 CS、CSD 处理较 CK 处理分别显著提高 66.08%、61.11% ($P < 0.05$),BC、CSBC 比 CK 处理提高了 17.23%、15.89%,但差异不显著。与 CK 相比,各处理水稳性团聚体的 GMD 均增加,其中 CS、CSD、BC、CSBC 分别提高了 56.91%、65.58%、17.24%、21.58%。CSD 处理能显著提高 $R_{0.25}$,提高 38.92% ($P < 0.05$)。秸秆与生物炭还田处理较 CK 均降低了分形维数 D 值,其中 CS 处理降低了 2.06%,差异显著,其余 3 个处理与 CK 差异不显著。

表 2 秸秆与生物炭还田对各级土壤团聚体含量的影响¹⁾

处理	各粒级团聚体含量/%			
	> 2 mm	2 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.053 mm	< 0.053 mm
CK	8.52 ± 3.46Cb	26.59 ± 2.53Bb	34.44 ± 2.75Aa	30.44 ± 3.29ABa
CS	18.56 ± 2.02Ba	24.32 ± 1.61Bb	34.29 ± 4.77Aa	22.83 ± 3.19Bb
CSD	16.53 ± 2.93Ca	32.25 ± 3.71Aa	26.86 ± 1.46Bb	24.36 ± 0.54Bb
BC	10.86 ± 2.80Bb	27.52 ± 3.16Aab	34.19 ± 4.8 Aa	27.44 ± 3.65Aab
CSBC	10.05 ± 0.54Bb	31.09 ± 1.84Aab	31.70 ± 4.12Aab	27.15 ± 4.10Aab

1) 数据均以平均值 ± 标准差表示,同一列的不同小写字母表示同一团聚体粒级下不同处理间的差异显著 ($P < 0.05$); 同一行的不同大写字母表示同一处理下不同团聚体粒级组分之间的差异显著 ($P < 0.05$),下同

表 3 秸秆与生物炭还田对土壤水稳性团聚体稳定性的影响

处理	MWD/mm	GMD/mm	$R_{0.25}/\%$	D
CK	0.87 ± 0.20Bb	0.21 ± 0.04Bb	35.11 ± 4.26Ab	2.68 ± 0.03Aa
CS	1.44 ± 0.13Aa	0.33 ± 0.04ABa	42.88 ± 3.62Aab	2.62 ± 0.04Ab
CSD	1.40 ± 0.14ABa	0.35 ± 0.02ABa	48.78 ± 1.33Aa	2.63 ± 0.00Aab
BC	1.02 ± 0.19Bb	0.25 ± 0.05Bb	38.37 ± 5.65Ab	2.66 ± 0.03Aab
CSBC	1.01 ± 0.02Bb	0.26 ± 0.02Bb	41.15 ± 1.31Ab	2.65 ± 0.04Aab

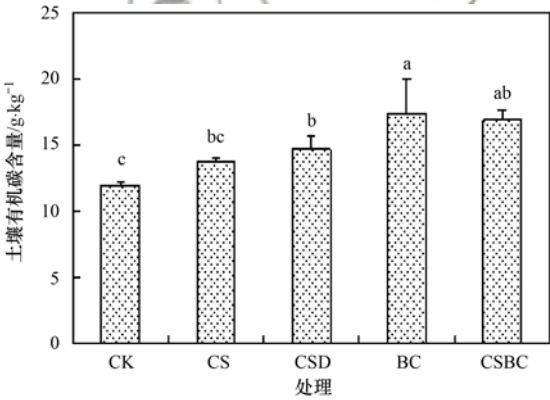
2.3 秸秆与生物炭还田对土壤有机碳的影响

2.3.1 秸秆与生物炭还田对土壤有机碳总量的影响

由图 1 可知,秸秆与生物炭还田均能提高土壤有机碳含量,其中 BC 处理的有机碳含量最高,较 CK 显著提高了 45.55% ($P < 0.05$),其次依次为 CSBC、CSD、CS 处理,分别提高了 41.48%、23.04%、15.30%。添加不同物料的处理之间也存在显著差异,BC 处理比 CS、CSD 处理分别高 26.24%、18.30% ($P < 0.05$)。

2.3.2 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体有机碳含量的影响

向土壤中施入有机物料能增加土壤有机碳含量,但新碳与各粒级团聚体结合能力有差异(表 4)。



柱上不同小写字母表示不同处理差异达显著水平 ($P < 0.05$)

图 1 秸秆与生物炭还田下土壤有机碳含量

Fig. 1 Total soil organic carbon content with application of straw or biochar

表 4 秸秆与生物炭还田下土壤团聚体有机碳含量

处理	团聚体有机碳含量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$			
	> 2 mm	2 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.053 mm	< 0.053 mm
CK	13.16 ± 0.50Ba	16.49 ± 1.44Ab	7.52 ± 0.42Cb	12.16 ± 1.54Bb
CS	15.70 ± 2.70Aa	16.30 ± 0.90ABb	8.58 ± 0.40Cb	19.47 ± 3.43Aab
CSD	16.18 ± 2.64Aa	16.87 ± 1.03Ab	9.07 ± 0.82Bb	17.96 ± 5.44Ab
BC	17.43 ± 3.78Aa	20.32 ± 0.99Aa	12.12 ± 2.60Ba	21.20 ± 6.71Aab
CSBC	15.44 ± 2.36Ba	16.79 ± 1.30Bb	9.43 ± 0.53Cb	26.42 ± 2.34Aa

结果表明,随着团聚体粒径的增大,团聚体有机碳含量呈现先降低后增高再降低的趋势,大体呈“V”形变化。各添加物料的处理均在 < 0.053 mm 团聚体中有机碳含量最高,而 0.25 ~ 0.053 mm 团聚体中有机碳含量最低,显著低于其它粒级的团聚体有机碳含量

($P < 0.05$)。与 CK 处理相比,秸秆与生物炭还田均能增加各粒级团聚体有机碳含量,其中提高幅度最大的为 < 0.053 mm,增幅为 47.70% ~ 117.31%,但其(除 CSBC 外)有机碳含量与 CK 无显著差异;其次为 0.25 ~ 0.053 mm,增幅为 14.12% ~ 61.11%。BC 处

理 2 ~0.25 mm、0.25 ~0.053 mm 粒级团聚体有机碳含量均显著高于其它处理,较 CK 分别增加了 23.23%、61.11% ($P<0.05$); CS 和 CSD 处理各粒级团聚体有机碳含量与 CK 处理的差异不显著,而 CSBC 处理仅在 <0.053 mm 粒级团聚体有机碳含量显著高于 CK 处理($P<0.05$),其它各粒级团聚体有机碳含量与 CK 均无显著差异。

2.3.3 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体有机碳的相对贡献率的影响

通过计算各粒级团聚体贡献率发现(表 5),土壤有机碳主要分布在 <0.053 mm、2 ~0.25 mm,其次为 0.25 ~0.053 mm, >2 mm 粒级团聚体分布最低,且 <0.053 mm、2 ~0.25 mm 粒级团聚体有机碳

贡献率显著高于 0.25 ~0.053 mm 和 >2 mm ($P<0.05$),表明有机碳主要分布在 <2 mm 粒级团聚体上。从表 5 可以看出,与 CK 处理相比,CS 和 CSD 处理提高了 >2 mm 团聚体有机碳贡献率,增幅为 53.51% 和 42.92%,而 BC 和 CSBC 处理则降低了 >2mm 团聚体有机碳贡献率,降幅为 8.01% 和 20.74%; CS、BC、CSBC 处理较 CK 处理,降低了 2 ~0.25 mm 和 0.25 ~0.053 mm 粒级团聚体有机碳贡献率,分别降低了 18.22%、7.12%、12.64% 和 1.53%、23.18%、18.27%,而 CSD 处理则分别提高了 5.06% 和 9.42%。与 CK 处理比较,其它处理(除 CSD 外)均增加了 <0.053 mm 粒级团聚体有机碳贡献率。

表 5 秸秆与生物炭还田下土壤团聚体有机碳的相对贡献率

Table 5 Relative contributions of organic carbon in aggregates after straw or biochar application

处理	团聚体有机碳相对贡献率/%			
	>2 mm	2 ~0.25 mm	0.25 ~0.053 mm	<0.053 mm
CK	11.60 ± 5.89Cab	35.32 ± 4.72Aa	21.74 ± 2.48Bab	31.34 ± 7.24ABb
CS	17.81 ± 2.68Ba	28.88 ± 3.51Aa	21.41 ± 3.27Bab	31.90 ± 3.72Aab
CSD	16.58 ± 4.77Bab	37.11 ± 4.84Aa	16.70 ± 2.65Bb	29.61 ± 7.97Ab
BC	10.67 ± 1.86Bb	32.81 ± 7.56Aa	23.79 ± 4.61Aa	32.73 ± 4.79Aab
CSBC	9.19 ± 1.47Db	30.85 ± 0.82Ba	17.77 ± 2.97Cb	42.18 ± 3.36Aa

3 讨论

3.1 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体形成和稳定性的影响

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其结构组成和分布是指示良好土壤团粒结构的重要指标。保护性耕作^[18]、有机肥与无机肥配施^[6]、秸秆与生物炭混施^[13]均能增加土壤大团聚体含量并提高团聚体稳定性。本研究结果显示,CS 和 CSD 处理显著提高了 >2mm 和 2 ~0.25 mm 团聚体含量,显著降低了 <0.053 mm 团聚体含量($P<0.05$)。这是由于秸秆还田后分解产生如多糖、蛋白质等有机质以及由于土壤中微生物活性提高而形成的腐殖物,这些重要的有机胶结质对大团聚体的形成及稳定性产生了积极影响^[19];同时,Jastrow^[20]认为植物残体输入土壤能促进真菌菌丝体生长和微生物的分泌液将土壤微团聚体、土壤矿物质和粗颗粒有机物胶结为大团聚体。添加秸秆速腐剂可以加快秸秆的分解速率,促进大团聚体的形成^[21],这与本研究中的 CSD 处理的结果相一致。本研究中,CSD 处理的 >0.25mm 团聚体含量显著高于其他处理,可见,秸秆+速腐剂还田促进土壤团聚化效果最明显。此外,本研究结

果还显示 BC 处理并未显著提高土壤大团聚体的含量,这与侯晓娜等^[13]的研究结果一致。这是因为高温制备的生物炭高度羧酸酯化和稳定的芳香化结构,以惰性碳为主,难以被微生物分解利用^[22],同时,生物炭对土壤酶的吸附降低了与有机碳周转相关酶的活性^[23]。

平均重量直径 MWD、平均几何直径 GMD 和 $R_{0.25}$ 常作为反映土壤团聚体的大小分布状况的指标,且表征土壤团聚体稳定性具有一致性,大团聚体含量越高,值越大,团聚体越稳定^[24]。本研究发现,秸秆、秸秆+速腐剂还田显著提高了土壤 MWD、GWD、 $R_{0.25}$,而生物炭、秸秆+生物炭则无显著影响(表 3),这与 Glaser 等^[25]发现生物炭施用促进土壤大团聚体的形成,进而显著提高土壤团聚体稳定性的结果不一致,这可能与生物炭制备原料、土壤类型以及施用时间等因素有关^[26]。土壤团聚体分形维数 D 能较好地反映土壤团聚体组成和稳定性,其值越小表明土壤团聚体分布和稳定性越好。本试验中,各处理均能降低土壤的分形维数,其中 CS 处理最低。综上所述,秸秆和秸秆+速腐剂还田促进团聚体形成、改良土壤结构和显著提高土壤团聚体稳定性的效果优于生物炭和秸秆+生物炭还田。

3.2 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体有机碳含量和分配的影响

与 CK 相比,秸秆与生物炭还田各处理的土壤有机碳含量显著增加了 15.30% ~ 45.55%,且 BC、CSBC 处理显著高于 CS、CSD 处理($P < 0.05$),这与安婉丽等^[8]和侯晓娜等^[13]的研究结果类似。这是因为秸秆还田后腐解,为农田土壤提供大量的外源有机碳输入,从而提高土壤微生物量及其活性,进而增加土壤有机碳含量^[27];生物炭施入土壤中,会促进土壤腐殖质的形成,有助于碳水化合物、芳香烃等有机大分子的形成,进而提高有机碳的含量^[28]。虽然秸秆与生物炭还田均能显著增加土壤总有机碳含量,但提高程度存在差异,秸秆含有大量新鲜易分解碳,秸秆还田的碳通过土壤呼吸作用损失较多,而生物炭具有极强的生物化学稳定性,施入土壤后显著降低了土壤呼吸^[29],因此秸秆还田下土壤有机碳含量低于生物炭还田。

Tisdall 等^[30]的研究表明土壤团聚体有机碳含量随着粒径增大而增大,大团聚体能吸存更多碳素,但本研究结果表明,各处理随着粒径的增大,团聚体有机碳含量呈现先降低后增大的“V”型变化趋势,其中 < 0.053 mm 团聚体有机碳提高幅度最大(47.70% ~ 117.31%),2 ~ 0.25 mm 增幅最低,这与侯晓娜等^[13]、Yu 等^[31]的研究结果一致。这是因为在本试验中常规耕作频繁地进行机械翻耕使大团聚体破碎暴露受到微生物攻击,导致其组分内的养分消耗,而胡敏酸和富啡酸等腐质化程度较高的胶体组分相对富集在 < 0.053 mm 团聚体内^[32],同时,腐质化程度较高的新碳或难以被微生物利用的芳香碳被粉黏矿物包裹结合稳定储存起来^[33]。

通过分析各粒径团聚体有机碳分配比例的变化,可以表现了解外源新碳在团聚体中的去向分布及对团聚体稳定性的影响,有助于深入揭示土壤有机碳吸存保护机制。本研究中,土壤有机碳主要分布在 < 0.053 mm 粒径团聚体上,其贡献率为 29.61% ~ 42.18%, > 2 mm 团聚体有机碳贡献率较小,仅为 9.19% ~ 17.81%,这与徐江兵等^[34]的研究结果类似。土壤团聚体有机碳的分布与土壤团聚体组成有一定不同,如本研究中土壤团聚体占优势比例的是 0.25 ~ 0.053 mm 粒径团聚体,而其(除 BC 处理外)有机碳贡献率却显著低于 2 ~ 0.25 mm 和 < 0.053 mm 粒径团聚体,这是由于团聚体有机碳贡献率由团聚体比例和团聚体有机碳含量共同决定,而 0.25 ~ 0.053 mm 粒径团聚体有机碳含量显著低

于其它粒径。本试验条件下,CS、CSD 处理提高了 > 2 mm 团聚体有机碳贡献率,而 BC、CSBC 处理则表现出与之相反的变化,表现为显著提高了 < 0.053 mm 粒径团聚体有机碳贡献率($P < 0.05$)。这是因为秸秆还田后分解的有机物质更多地进入大团聚体中,外源新碳在土壤团聚体中的分配均呈现团聚体越粗,分配越多的趋势^[35],说明向土壤中添加的秸秆新碳主要向大团聚体内分配,秸秆 + 速腐剂还能促进较大团聚体内不同组分结合新碳,生物炭、秸秆 + 生物炭的新碳主要向微团聚体富集。由于本研究仅开展了两个作物生长季,周期短,土壤团聚体对秸秆与生物炭的响应与还田时间密切相关,因此,还需长期田间试验来进一步验证和揭示秸秆与生物炭还田下紫色土团聚体特征和固碳机制,为该地区选择科学合理的物料还田方式提供更有力的实践依据。

4 结论

(1) CS、CSD 处理显著提高了水稳性团聚体的 MWD、GMD、 $R_{0.25}$,降低了 D 值,而 BC、CSBC 对土壤大团聚体和团聚体稳定性的影响不显著,秸秆、秸秆 + 速腐剂还田提高团聚体对土壤有机碳的物理保护,促进团聚体长时期固存有机碳。

(2) 秸秆与生物炭还田各处理均能提高土壤有机碳含量 15.30% ~ 45.55%,生物炭、秸秆 + 生物炭还田(16.88 ~ 17.37 g·kg⁻¹)效果优于秸秆和秸秆 + 速腐剂还田(13.76 ~ 14.68 g·kg⁻¹)。

(3) 随着团聚体粒径的增大,团聚体有机碳含量呈现先降低再增高然后再降低,大体呈“V”形变化,其中 < 0.053 mm 最高,且 < 0.053 mm 团聚体对土壤有机碳贡献率最高(29.61% ~ 42.18%), > 2 mm 团聚体有机碳贡献率最低(仅 9.19% ~ 17.81%)。秸秆与生物炭还田更有利本身有机碳含量较高的小粒径团聚体有机碳含量的提高,其中生物炭还田提高团聚体有机碳含量效果优于秸秆还田。

参考文献:

- [1] Peth S, Horn R, Beckmann F, et al. Three-dimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based microtomography [J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(4): 897-907.
- [2] 李睿, 江长胜, 郝庆菊. 缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3429-3437.
- Li R, Jiang C S, Hao Q J. Impact of land utilization pattern on distributing characters of labile organic carbon in soil aggregates

- in Jinyun mountain[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3429-3437.
- [3] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. *土壤学报*, 2011, **48**(2): 412-418.
- Dou S, Li K, Guan S. A review on organic matter in soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, **48**(2): 412-418.
- [4] Blanco-Canqui H, Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2004, **23**(6): 481-504.
- [5] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4695-4704.
- Li J L, Jiang C S, Hao Q J. Impact of land use type on stability and organic carbon of soil aggregates in Jinyun mountain[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4695-4704.
- [6] 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.
- [7] 李文军, 杨基峰, 彭保发, 等. 施肥对洞庭湖平原水稻土团聚体特征及其有机碳分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, **47**(20): 4007-4015.
- Li W J, Yang J F, Peng B F, *et al.* Effects of fertilization on aggregate characteristics and organic carbon distribution in a paddy soil in Dongting lake plain of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, **47**(20): 4007-4015.
- [8] 安婉丽, 高灯州, 潘婷, 等. 水稻秸秆还田对福州平原稻田土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(5): 1833-1840.
- An W L, Gao D Z, Pan T, *et al.* Effect of rice straw returning on paddy soil water-stable aggregate distribution and stability in the paddy field of Fuzhou plain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(5): 1833-1840.
- [9] Six J, Bossuyt H, Degryse S, *et al.* A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, **79**(1): 7-31.
- [10] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家粮食安全[J]. *地球科学进展*, 2005, **20**(4): 384-393.
- Pan G X, Zhao Q G. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of china: facing the challenge of global change and food security[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2005, **20**(4): 384-393.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- Hou X N, Li H, Zhu L B, *et al.* Effects of biochar and straw additions on lime concretion black soil aggregate composition and organic carbon distribution[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, **48**(4): 705-712.
- [14] 张福锁, 陈新平, 陈清, 等. 中国主要作物施肥指南[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
- [15] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, **50**(3): 627-633.
- [16] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- Yang J H, Wang C L, Dai H L. Agrochemical soil analysis and environmental monitoring[M]. Beijing: China Land Press, 2008.
- [17] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993, **38**(20): 1896-1899.
- [18] 李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, **21**(2): 378-386.
- Li J, Wu H J, Wu X P, *et al.* Impact of long-term conservation tillage on soil aggregate formation and aggregate organic carbon contents[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, **21**(2): 378-386.
- [19] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, **103**(2): 412-418.
- [20] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, **28**(4-5): 665-676.
- [21] 胡诚, 陈云峰, 乔艳, 等. 秸秆还田配施腐熟剂对低产黄泥田的改良作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, **22**(1): 59-66.
- Hu C, Chen Y F, Qiao Y, *et al.* Effect of returning straw added with straw-decomposing inoculants on soil melioration in low-yielding yellow clayey soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, **22**(1): 59-66.
- [22] Kuzyakov Y, Bogomolova I, Glaser B. Biochar stability in soil: decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific ^{14}C analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **70**: 229-236.
- [23] Prayogo C, Jones J E, Baeyens J, *et al.* Impact of biochar on mineralisation of C and N from soil and willow litter and its relationship with microbial community biomass and structure[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, **50**(4): 695-702.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Peng X, Ye L L, Wang C H, *et al.* Temperature-and duration-

- dependent rice straw-derived biochar: characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, **112**(2): 159-166.
- [27] 郭瑞华, 靳红梅, 常志州, 等. 秸秆还田模式对土壤有机碳及腐植酸含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(4): 727-733.
- Guo R H, Jin H M, Chang Z Z, *et al.* Effects of returning patterns of straw to field on soil organic carbon and soil humus composition in rice-wheat double cropping systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(4): 727-733.
- [28] 花莉, 金素素, 洛晶晶. 生物质炭输入对土壤微域特征及土壤腐殖质的作用效应研究[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(11): 1795-1799.
- Hua L, Jin S S, Luo J J. Effect of bio-char on the micro-environment characteristics and humus in soil [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2012, **21**(11): 1795-1799.
- [29] 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.
- [30] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, **33**(2): 141-163.
- [31] Yu H Y, Ding W X, Luo J F, *et al.* Long-term application of organic manure and mineral fertilizers on aggregation and aggregate-associated carbon in a sandy loam soil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, **124**: 170-177.
- [32] Chaney K, Swift R S. Studies on aggregate stability. 11. The effect of humic substances on the stability of re-formed soil aggregates[J]. *European Journal of Soil Science*, 1986, **37**(2): 337-343.
- [33] 郭景恒, 朴河春, 刘启明. 碳水化合物在土壤中的分布特征及其环境意义[J]. *地质地球化学*, 2000, **28**(3): 59-64.
- Guo J H, Piao H C, Liu Q M. The distribution and environmental effect of carbohydrate in soil [J]. *Geology-Geochemistry*, 2000, **28**(3): 59-64.
- [34] 徐江兵, 李成亮, 何园球, 等. 不同施肥处理对旱地红壤团聚体中有机碳含量及其组分的影响[J]. *土壤学报*, 2007, **44**(4): 675-682.
- Xu J B, Li C L, He Y Q, *et al.* Effect of fertilization on organic carbon content and fractionation of aggregates in upland red soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, **44**(4): 675-682.
- [35] 吕元春, 薛丽佳, 尹云锋, 等. 外源新碳在不同类型土壤团聚体中的分配规律[J]. *土壤学报*, 2013, **50**(3): 534-539.
- Lü Y C, Xue L J, Yin Y F, *et al.* Distribution of fresh carbon in aggregate fractions of different soil types [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, **50**(3): 534-539.

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i>	(1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i>	(18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i>	(27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i>	(49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i>	(57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i>	(68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i>	(77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i>	(89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i>	(109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i>	(117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i>	(123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i>	(130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i>	(137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i>	(145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i>	(152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i>	(161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i>	(170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i>	(179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i>	(187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i>	(195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i>	(202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i>	(212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i>	(219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i>	(232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i>	(239)
Combined Process of DNB-F ₂ O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i>	(247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i>	(256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i>	(269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i>	(276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i>	(284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i>	(292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i>	(310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i>	(321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i>	(331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i>	(348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i>	(355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i>	(363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i>	(371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i>	(389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i>	(399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i>	(406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapiougou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i>	(415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i>	(438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i>	(450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i>	(460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i>	(467)