

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

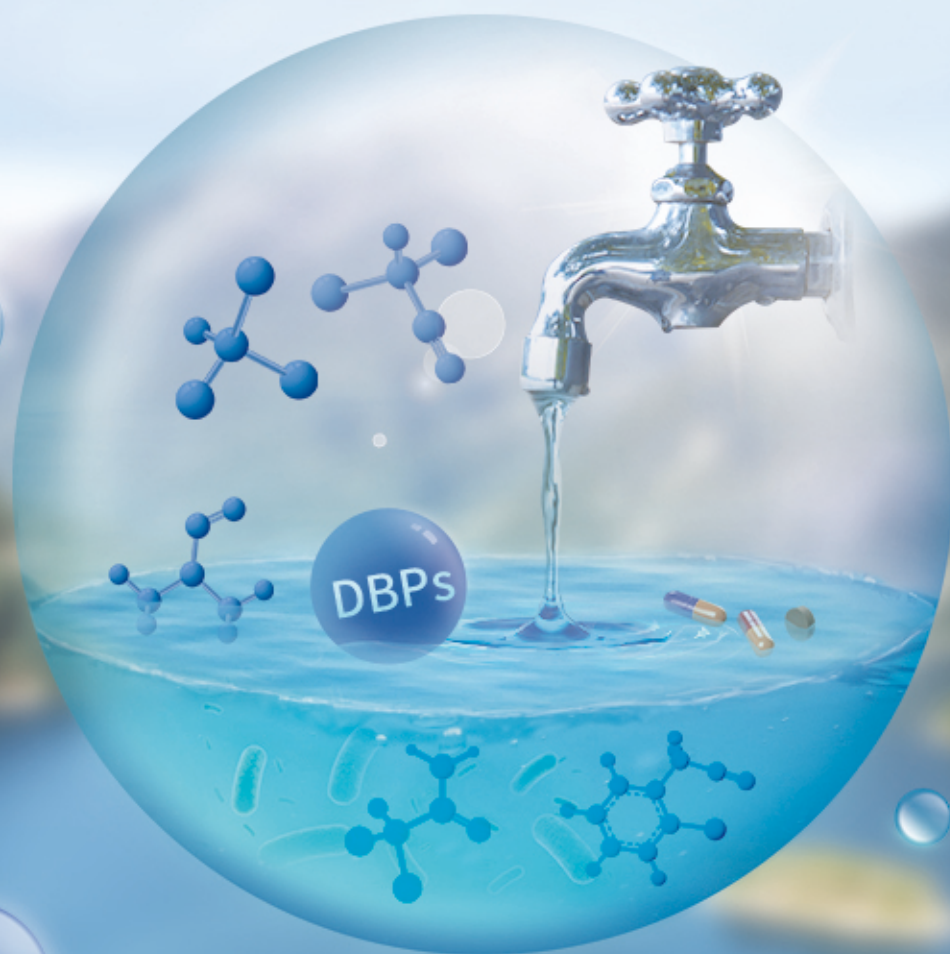
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略

楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期
Vol.42 No.11

目次

综述与专论

- 饮用水中的消毒副产物及其控制策略 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华 (5059)
生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹 (5086)

研究报告

- 1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布的影响 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑 (5100)
COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (5109)
汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铖, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华 (5122)
石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇 (5131)
天津市冬季空气湿度对 $PM_{2.5}$ 和能见度的影响 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹 (5143)
承德市 $PM_{2.5}$ 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升 (5152)
中国生活源挥发性有机物排放清单 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍 (5162)
2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (5169)
基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华 (5180)
典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润 (5193)
沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 库盈盈, 任万辉, 苏枫帆, 于兴娜 (5201)
天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强 (5210)
郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙 (5220)
基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O_3 浓度变化的影响 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超 (5228)
长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月 (5239)
河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞吟, 张馨童, 姚波, 崔建升 (5250)
城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋 (5264)
北京城市河流河水和沉积物中微塑料的组成与分布 胡嘉敏, 左剑恶, 李颀, 谢珍雯, 陈磊 (5275)
太湖西岸地表水中极性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯 (5284)
河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧 (5294)
白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升 (5303)
雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊 (5312)
基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南 (5322)
千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮 (5333)
巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠 (5346)
洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 瞿鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞 (5355)
成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛 (5364)
雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰 (5375)
粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布 董斯齐, 黄翀 (5384)
红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇 (5394)
减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璇骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲 (5405)
互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞 (5414)
基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 彭柯, 董志, 邱琰茗, 郭道宇 (5424)
硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 赵敏, 张小平, 王梁嵘 (5433)
高锰酸钾改性松木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹄, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华 (5440)
混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤 (5450)
负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟 (5460)
一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送 (5472)
生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳 (5481)
紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳 (5491)
南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京 (5500)
城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君 (5510)
我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平 (5519)
典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平 (5526)
稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区: 以重庆市某区为例 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠 (5535)
镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 彭杰, 李佳欣, 陈文清 (5545)
纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮 (5554)
《环境科学》征订启事 (5108) 《环境科学》征稿简则 (5151) 信息 (5249, 5263, 5283)

生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响

邓华¹, 高明¹, 龙翼², 赖佳鑫¹, 王莹燕¹, 王子芳^{1*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要: 明确生物炭和秸秆还田对未利用的新垦紫色土旱坡地土壤团聚体和有机碳的影响, 为三峡库区土壤改良提供科学依据. 采用田间试验方法, 分析不施肥(CK)、常规施肥(NPK)、优化施肥(GNPK)、化肥减量配施秸秆(RSD)和化肥减量配施生物炭(BC)处理对不同粒径土壤团聚体含量及其有机碳贡献率的影响. 结果表明, 施肥可提高土壤养分含量水平, 尤以 RSD 和 BC 处理最为显著; 各处理以 <0.25 mm 粒级团聚体为优势粒级, 施肥能显著增加 $5 \sim 0.5$ mm 粒级团聚体含量, 提高平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和 $R_{0.25}$ (>0.25 mm 团聚体含量)值, 降低分形维数(D)和土壤结构体破坏率($PAD_{0.25}$)值($P < 0.05$); 施肥能显著提高土壤有机碳含量, 其中 BC ($6.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 RSD ($5.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 效果显著优于 NPK ($5.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 GNPK ($3.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$); <0.25 mm 团聚体有机碳贡献率最高 ($34.92\% \sim 59.49\%$), >5 mm 团聚体有机碳贡献率最低 ($1.55\% \sim 6.01\%$), BC 处理显著提高了 $5 \sim 2$ mm 和 $2 \sim 1$ mm 粒级团聚体有机碳贡献率($P < 0.05$), 而 NPK、RSD 和 GNPK 在 $0.5 \sim 0.25$ mm 贡献率提升最为显著($P < 0.05$); 各施肥处理均能提高油菜和玉米产量, 年际间差异较大, 但处理间差异不显著; 土壤团聚体稳定性和作物产量随土壤有机碳的增加呈上升趋势. 生物炭和秸秆还田能促进土壤中, 大、中团聚体形成, 有效提高土壤团聚体稳定性, 增加土壤有机碳含量, 促进作物增产, 是改良紫色土土壤结构、提升土壤质量的有效措施.

关键词: 土壤团聚体; 生物炭; 秸秆; 紫色土; 旱坡地

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5481-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202103257

Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land

DENG Hua¹, GAO Ming¹, LONG Yi², LAI Jia-xin¹, WANG Ying-yan¹, WANG Zi-fang^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: The aim of the study was to understand the impact of biochar and straw return on soil aggregates and organic carbon for soil improvement of the newly cultivated purple soil dry slope land in the Three Gorges Reservoir area. In this study, a field test was used to set five treatment pairs with regards to soil aggregate composition and organic carbon distribution: no fertilization (CK), conventional fertilization (NPK), optimized fertilization (GNPK), chemical fertilizer reduction combined with straw (RSD), and chemical fertilizer reduction combined with biochar (BC). The results showed that fertilization can improve the level of soil fertility, especially with the RSD and BC treatments. The soil aggregates of each fertilization treatment were <0.25 mm in size. Compared with the CK, each treatment significantly increased the aggregate content of $0.5 \sim 5$ mm particles, and the values of MWD, GMD, and $R_{0.25}$. Further, the treatments significantly reduced the value of D and $PAD_{0.25}$ ($P < 0.05$), and each fertilization treatment significantly increased the soil organic carbon content, of which BC ($6.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and RSD ($5.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) were significantly better than NPK ($5.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and GNPK ($3.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). The <0.25 mm aggregates had the highest contribution rate of organic carbon ($34.92\% \sim 59.49\%$), while the >5 mm aggregates had the lowest contribution rate of organic carbon ($1.55\% \sim 6.01\%$). The BC treatment significantly increased the organic carbon contribution rate of $5 \sim 2$ mm and $2 \sim 1$ mm agglomerates ($P < 0.05$), while the contribution rate of NPK, RSD, and GNPK was the most significant for $0.5 \sim 0.25$ mm ($P < 0.05$). Each fertilization treatment increased the yield of rapeseed and corn, with large inter-annual differences, but the overall difference between treatments was not significant. The stability of soil aggregates and crop yields showed an upward trend with the increase of soil organic carbon. Biochar and straw returning to the field may promote the formation of large and medium aggregates in soil, effectively improve the stability of aggregates, increase organic carbon content, and promote crop yields. It is therefore an effective measure to improve the soil structure of purple soil and improve soil quality.

Key words: soil aggregate; biochar; straw; purple soil; dry slope

土壤团聚体作为土壤结构的基础单元^[1], 既是土壤肥力的综合反映, 也是决定土壤肥力的最主要因素之一, 土壤团聚体的粒度组成和稳定性调控着土壤三相(固相、液相、气相)平衡和孔隙性状等. 土壤有机碳作为土壤养分转化和质量演变的核心, 影响着土壤养分循环和土壤微生物活性等^[2]. 同时, 其作为评价土壤地力的重要指标, 与土壤团聚体相互作用、相辅相成, 共同影响着土

壤理化性质^[3~5]. 玉米秸秆是西南地区主要的农业废弃物, 采用直接焚烧的处理方式会对环境造成污染, 若利用其有机质含量高的特点, 施入土壤,

收稿日期: 2021-03-29; 修订日期: 2021-04-26

基金项目: 重庆市技术创新与应用示范专项 (cstc2018jszx-zdyfmx0014); 重庆市研究生科研创新项目 (CYS20111); 国家重点研发计划项目 (2017YFD0800101)

作者简介: 邓华(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤质量与环境, E-mail: 1094466980@qq.com

* 通信作者, E-mail: zifangw@126.com

则有保持土壤质量和促进资源循环的作用^[6~8]；而生物炭是一种富含碳元素的高度羧酸酯芳香有机物，其丰富的孔隙结构与巨大的比表面积和表面能，促进了微生物活动，现常应用于土壤改良^[9,10]。了解生物炭和秸秆还田对土壤团聚体和有机碳的影响，对改良土壤结构和提升土壤质量具有重要意义。

目前国内外学者关于生物炭和秸秆还田对土壤理化性状的影响进行了大量研究。Huang 等^[11]通过长期定位试验研究得出，生物炭和秸秆还田促进了 $>0.25\text{ mm}$ 大中团聚体的形成，显著增加了土壤有机碳含量；Qi 等^[12]在紫色土上的研究表明，生物炭施用可减少蔬菜对化肥的需求，且能有效抑制碳排放，增加土壤有机碳储量；高洪军等^[3]在黑钙土上的试验结果表明，土壤有机碳含量随秸秆还田量增加而增加，且主要固持在大团聚体中；张红雪等^[13]在红壤上的试验结果表明，生物炭可提高红壤大团聚体含量与稳定性以及土壤碳氮含量。新垦紫色土因缺少长期培肥过程，存在耕作层浅薄、肥力水平低下和土壤结构不良等诸多问题^[14]，与多年耕作的熟化土壤有显著差异，而国内外学者关于生物炭和秸秆还田对土壤团聚体和有机碳的影响主要集中在多年耕作的熟化土壤，

对新垦紫色土添加生物炭和秸秆还田是否可以快速改良土壤团聚体结构和增加碳的储量尚不清楚。因此，本文依托于中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所三峡库区水土保持和环境研究试验站，以 2017 年新垦紫色土旱坡地为研究对象，通过观测不同施肥处理下土壤团聚体组成与结构和有机碳含量特征，通过明确生物炭和秸秆还田对新垦紫色土旱坡地不同粒径土壤团聚体含量及其有机碳贡献率的影响，以期制定生物炭和秸秆还田的农业管理措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

如图 1 所示，研究区位于重庆市忠县石宝镇 ($108^{\circ}08' \sim 108^{\circ}12' \text{E}$, $30^{\circ}24' \sim 30^{\circ}30' \text{N}$)，属三峡库区腹心地带，区域内丘陵、阶地、河谷等相间分布，属典型丘陵地貌，土壤为侏罗系沙溪庙组 (J_2S) 沙泥岩形成的中性紫色土。研究区属中亚热带湿润季风气候，年均温 18.2°C ，降雨量约 $1\,100\text{ mm}$ ，无霜期约 320 d。成库前为坡耕地，该区域自然植被主要有柏树、桑树等，种植作物主要有柑橘、水稻、小麦、玉米和油菜，其中油菜-玉米轮作为旱地常见的种植模式。

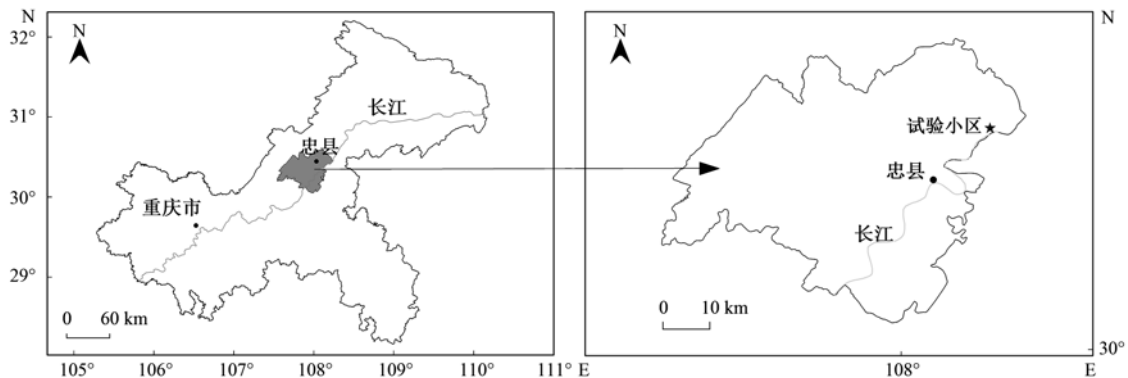


图 1 研究区位置示意

Fig. 1 Location of the study area

1.2 供试材料

本试验以标准径流小区的形式进行，装填土壤为试验区周边未利用的新垦紫色土，是三峡库区最为典型土壤之一。2015 年建成后，进行 2 a 的匀种试验，于 2017 年 10 月 21 日开始本试验处理，供试土壤基本理化性质为：pH 8.33、有机质 $7.56\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.35\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全钾 $32.31\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $25.71\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $9.16\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和速效钾 $0.10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

本试验所用生物炭由勤丰众成生物质新材料

(南京)有限公司提供，其全氮、全磷和有机碳的含量分别为 0.8077 、 1.754 和 $238.52\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，C/N 为 295；玉米秸秆由当地农户提供，其有机碳含量为 ($207.53\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)，C/N 比为 35.78。

1.3 试验设计

本研究试验时间为 2017 年 10 月至 2020 年 10 月，试验小区坡度 10° ，各小区投影面积为 100 m^2 ($20\text{ m}\times 5\text{ m}$) 底面以及四周均为混凝土修筑，试验共设置 5 个处理，3 次重复，分别为不施肥处理 (CK)、常规施肥处理 (NPK)、优化施肥处理 (GNPK)、化肥减量配施秸秆 (RSD) 和化肥减量配

施生物炭(BC),其中优化施肥(GNPK)由当地农业部门提供的优化施肥方案,秸秆和生物炭在油菜种植前2 d 均匀覆盖于地表;种植模式为油菜-玉米轮作,油菜和玉米种植方式均为育苗移栽,种植密度分别为8 万株·hm⁻²和4 万株·hm⁻². 具体各处理施肥量与种收时间如表1 所示.

表1 各处理施肥量及作物田间管理

Table 1 Fertilization amount of each treatment and crop field management								
作物	处理	有机物料种类及用量/t·hm ⁻²	施肥量/kg·hm ⁻²				具体措施	种植日期 (年·月·日)
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	硼肥		
油菜	CK	—	—	—	—	—		
	NPK	—	150	90	90	15		2017-10-23
	GNPK	—	120	75	75	15	油菜季氮肥分基肥(70%)和基肥(30%)	2018-10-15
	RSD	4.5(秸秆)	102	63.75	63.75	15	两次施用,磷、钾、硼肥作基肥一次性施用;玉米季氮、磷、钾肥作为基肥在移栽时施用	2019-11-01
	BC	10(生物炭)	102	63.75	63.75	15		2020-04-27
玉米	CK	—	—	—	—	—		
	NPK	—	300	150	135	—		2018-04-13
	GNPK	—	270	120	105	—		2019-04-10
	RSD	—	229.5	102	89.25	—		2020-04-09
	BC	—	229.5	102	89.25	—		2020-07-26

1.4 土样采集与分析

土壤样品于2020年8月2日玉米收获后采集,以对角线五点取样法在各小区0~20 cm 土层进行取样,土样在剥离植物根系、碎屑和大石块后混合均匀,以四分法取适量土壤,风干后进行指标测定.

土壤基本理化性质的测定主要参照文献[15]中的常用方法,土壤pH 采用梅特勒-托利多便携式pH 计测定,水土比为1.5:1;土壤容重采用环刀法.机械性团聚体和水稳性团聚体采用萨维诺夫干筛法和湿筛法,分离出:>5、5~2、2~1、1~0.5、0.5~0.25 和<0.25 mm 粒级的团聚体,优势粒级为该处理土壤团聚体含量最高粒级,且满足该粒级高于其他粒级2%,劣势粒级为该处理土壤团聚体含量最低粒级,且满足该粒级低于其他粒级2%;将湿筛法获得的各粒级土样研磨过0.25 mm 的筛,于室温下保存,采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定各粒级团聚体有机碳.

1.5 评价指标

土壤团聚体稳定性采用平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、>0.25 mm 团聚体含量(R_{0.25})、分形维数D^[16]和土壤结构体破坏率(PAD_{0.25})指标进行描述,计算公式如下:

MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i W_i \tag{1}

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

R_{0.25} = 1 - \frac{M_{x < 0.25}}{M_T} \tag{3}

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

式中, $\bar{x}_i$ 为第*i*级团聚体平均直径,本研究各粒级团聚体平均直径取该粒径上下标平均值,>5 mm 取6 mm 和<0.25 mm 取0.125 mm;W_{*i*} 为第*i*级团聚体的质量;M_{*x*<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} 为最大团聚体平均直径.

PAD_{0.25} = (W_d - W_s) / W_d \times 100\% \tag{5}

式中,W_d 为粒径>0.25 mm 的力稳性团聚体质量分数;W_s 为粒径>0.25 mm 的水稳性团聚体质量分数.

各粒级团聚体有机碳的贡献率计算公式如下:

某粒级团聚体有机碳贡献率 = 100% \times \frac{\text{该粒级团聚体有机碳含量} \times \text{该粒级团聚体含量}}{\text{土壤总有机碳含量}} \tag{6}

1.6 数据处理

数据基于 Excel 2016 进行统计与计算;采用 SPSS 21.0 进行方差分析和 Pearson 相关性分析,其中处理间差异采用 Duncan 多重比较法;采用 Origin 9.0 进行图表绘制.

2 结果与分析

2.1 生物炭和秸秆还田对土壤性状的影响

由表2 可知,不同处理间土壤全氮具体表现为:BC>RSD>GNPK>NPK>CK(P<0.05),其中BC 处理全氮增幅高达71.01%;与CK 相比,各施肥处理全磷含量均显著增加,但各施肥处理间差异不显著;速效磷具体表现为:RSD>BC>GNPK>NPK>CK,其中RSD 处理显著高于其他处理(27.23%~139.50%);与CK 相比,各施肥处理硝态氮和铵态氮含量均显著增加(P<0.05),其中NPK、BC 和RSD 处理硝态氮含量显著高于GNPK 和CK 处理,

而铵态氮具体表现为: BC > RSD > NPK > GNPK > CK; 各处理间 pH 差异不显著. 总体来看,各施肥处

理能不同程度提高土壤养分含量,提高土壤肥力水平,尤以生物炭和秸秆还田效果最好.

表 2 不同施肥处理对土壤 pH 和养分含量的影响¹⁾

Table 2 Effects of different fertilization treatments on soil pH and nutrient content

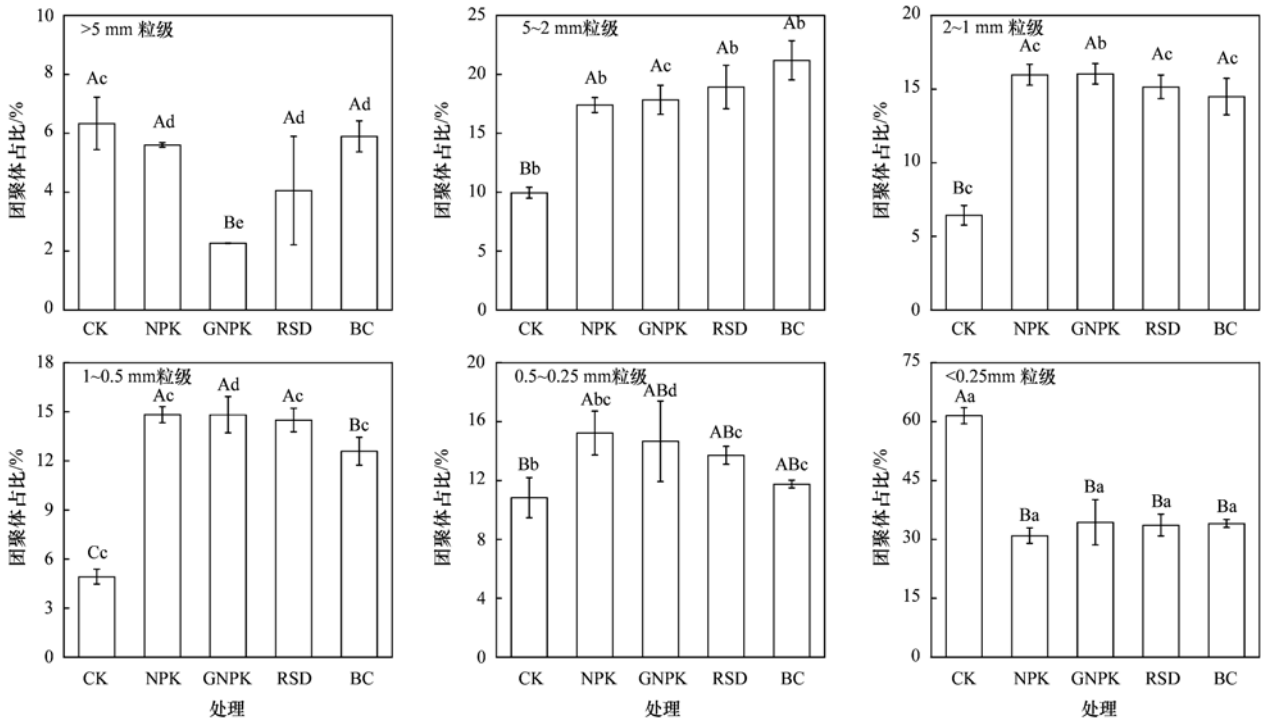
处理	全氮 /g·kg ⁻¹	全磷 /g·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	硝态氮 /mg·kg ⁻¹	铵态氮 /mg·kg ⁻¹	pH
CK	0.42 ± 0.01d	0.21 ± 0.01b	3.10 ± 0.01d	1.97 ± 0.58c	2.67 ± 0.22d	8.63 ± 0.06a
NPK	0.53 ± 0.01c	0.29 ± 0.01a	4.43 ± 0.20c	6.25 ± 0.07a	3.49 ± 0.11c	8.58 ± 0.17a
GNPK	0.53 ± 0.01c	0.29 ± 0.01a	4.53 ± 0.29c	3.57 ± 0.12b	3.13 ± 0.07c	8.79 ± 0.08a
RSD	0.56 ± 0.01b	0.29 ± 0.01a	7.33 ± 0.04a	5.57 ± 0.26a	4.41 ± 0.20b	8.68 ± 0.06a
BC	0.72 ± 0.01a	0.29 ± 0.01a	5.76 ± 0.57b	6.19 ± 0.21a	4.93 ± 0.18a	8.70 ± 0.07a

1) 数据表示为平均值 ± 标准差, 同列不同小写字母表示不同处理之间在 $P < 0.05$ 水平差异显著

2.2 生物炭与秸秆还田对土壤团聚体组成的影响

如图 2 所示,各处理优势粒级均为 <0.25 mm, 除 CK 无次优势粒级和劣势粒级外,其他处理次优势粒级均为 5~2 mm,劣势粒级均为 >5 mm. 与 CK 处理相比,NPK、GNPK、RSD 和 BC 处理均能促进 5~2、2~1、1~0.5 和 0.5~0.25 mm 粒级团聚体的形成,其中显著提高了 5~2、2~1 和 1~0.5 mm 粒级团聚体的占比($P < 0.05$); NPK、GNPK、RSD 和 BC 处理显著降低了 <0.25 mm 粒级团聚体的占比

($P < 0.05$). 与 GNPK 处理相比,RSD 和 BC 处理促进了 >5 mm 和 5~2 mm 粒级团聚体的形成,其中显著提高了 >5 mm 粒级土壤水稳性团聚体的占比($P < 0.05$),增幅分别为 78.68% 和 159.88%,此外 BC 处理显著降低了 1~0.5 mm 土壤水稳性团聚体的占比($P < 0.05$). 可见,施肥能不同程度促进 >0.25 mm 粒级的大中团聚体的形成,而生物炭和秸秆还田对促进 >2 mm 粒级的大团聚体形成效果最好.



竖线表示标准差,不同大写字母表示同一粒级不同处理间差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示同一处理不同粒级间差异显著($P < 0.05$)

图 2 不同施肥处理各粒径土壤团聚体占比

Fig. 2 Percentages of different size soil aggregates under different fertilization treatments

2.3 生物炭与秸秆还田对土壤团聚体稳定性的影响

如表 3 所示,施肥能显著提高土壤水稳性团聚体的 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 的值,显著降低 D 和 $PAD_{0.25}$ 的值. 各处理团聚体 MWD 大小顺序为: BC > NPK > RSD > GNPK > CK,与 CK 相比,各处理 MWD 显著提

高了 30.18%~57.55% ($P < 0.05$). 团聚体 GMD 大小顺序为: BC > NPK > RSD > GNPK > CK,各处理较 CK 均显著提高了 78.13%~103.13% ($P < 0.05$). 与 CK 相比,各处理 $R_{0.25}$ 均显著提高、 D 均显著降低,但各处理间差异不显著. 各处理团聚体 $PAD_{0.25}$ 均有显著

差异,其大小顺序为: CK > BC > RSD > NPK > GNPK ($P<0.05$). 团聚体 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 的值越大, D 和 $PAD_{0.25}$ 的值越小代表团聚度越高、稳定性越强,总

体来看,化肥减量配施生物炭(BC)对提高土壤团聚体稳定性效果最显著,而秸秆还田(RSD)和常规施肥(NPK)的效果优于优化施肥(GNPK)效果.

表 3 不同施肥处理土壤团聚体稳定性¹⁾

Table 3 Stability of soil water-stable aggregates under different fertilization treatments					
处理	MWD/mm	GMD/mm	$R_{0.25}/\%$	D	$PAD_{0.25}$
CK	1.06 ± 0.16c	0.32 ± 0.01c	38.48 ± 2.06c	2.87 ± 0.01a	49.53 ± 0.17a
NPK	1.56 ± 0.01a	0.64 ± 0.01a	68.20 ± 2.77a	2.69 ± 0.01b	19.48 ± 0.66d
GNPK	1.38 ± 0.01bc	0.57 ± 0.01b	65.64 ± 5.76a	2.69 ± 0.10b	18.14 ± 0.29e
RSD	1.51 ± 16ab	0.61 ± 0.03ab	66.35 ± 2.77a	2.70 ± 0.01b	20.60 ± 0.60c
BC	1.67 ± 0.07a	0.65 ± 0.06a	65.94 ± 1.01a	2.71 ± 0.11b	23.22 ± 0.55b

1) 数据表示平均值 ± 标准差,不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)

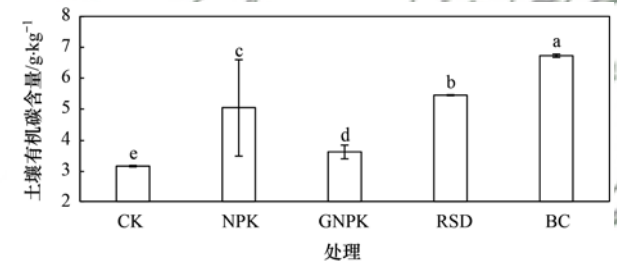
2.4 生物炭与秸秆还田对土壤有机碳的影响

如图 3 所示,各施肥处理均能提高土壤有机碳含量,SOC 含量大小顺序为: BC > RSD > NPK > GNPK > CK,与 CK 处理相比,NPK、GNPK、RSD 和 BC 处理 SOC 含量显著提高了 59.17%、12.22%、71.83% 和 112.22% ($P<0.05$). 不同施肥处理间也存在显著差异,其中 BC 处理土壤有机碳含量最高,较 NPK、GNPK 和 RSD 显著提高了 33.33%、85.31% 和 23.51% ($P<0.05$).

如图4所示,随团聚体粒径增大,除GNPK处理

外,各处理 SOC 含量呈先升高再降低的趋势. 与 CK 处理相比,RSD 和 BC 能显著增加各粒级团聚体 SOC 含量,RSD 增加了 36.19%~126.75%, BC 增加了 75.28%~206.13%; NPK 显著增加了 1~0.5 mm 和 <0.25 mm 粒级团聚体 SOC 含量,GNPK 仅显著增加了 <0.25 mm 粒级团聚体 SOC 含量 ($P<0.05$). 与 GNPK 处理相比,RSD 和 BC 显著增加了各粒级团聚体 SOC 含量,RSD 增加了 30.93%~65.75%, BC 增加了 33.54%~192.98% ($P<0.05$). 此外,BC 处理在 >5、5~2 和 2~1 mm 粒级相较于其他处理增幅最为明显,增幅高达 29.61%~206.13%,总体来看,BC 处理对提高土壤团聚体有机碳含量效果较佳.

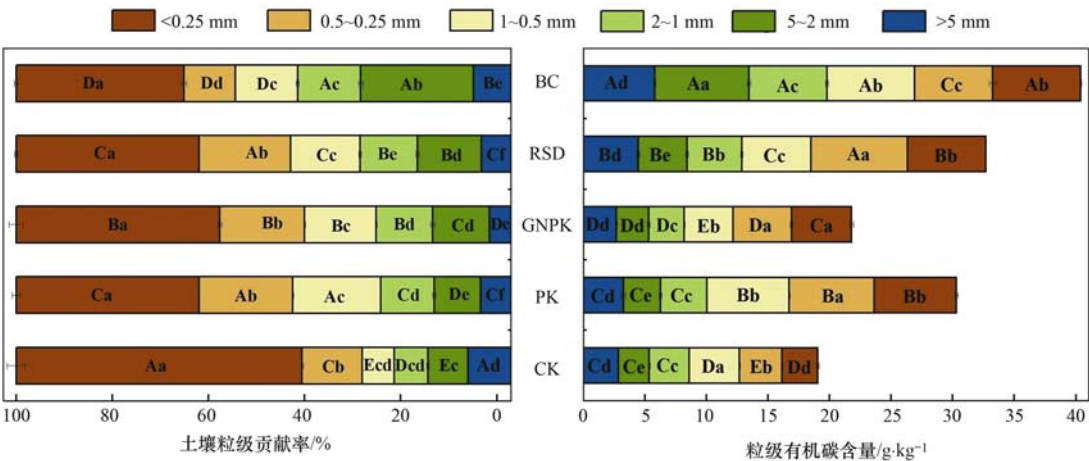
各处理土壤团聚体 SOC 贡献率主要分布在 <0.25 mm 粒级团聚体中,且显著高于其它各粒级贡献率 ($P<0.05$), >5 mm 粒级团聚体 SOC 贡献率最小,其它粒级分布规律不明显. 与 CK 处理相比,各处理均显著提高了 5~2、2~1 和 1~0.5 mm 粒级团聚体的 SOC 贡献率,其中 NPK、GNPK 和 RSD 还显著提高了 0.5~0.25 mm 粒级团聚体的 SOC 贡



竖线表示标准差,不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)

图 3 不同施肥处理土壤有机碳含量

Fig. 3 Soil total organic carbon under different fertilization treatments



横线表示标准差,不同大写字母表示同一粒级不同处理间差异显著 ($P<0.05$),不同小写字母表示同一处理不同粒级间差异显著 ($P<0.05$)

图 4 不同施肥处理下各粒级团聚体有机碳含量与贡献率

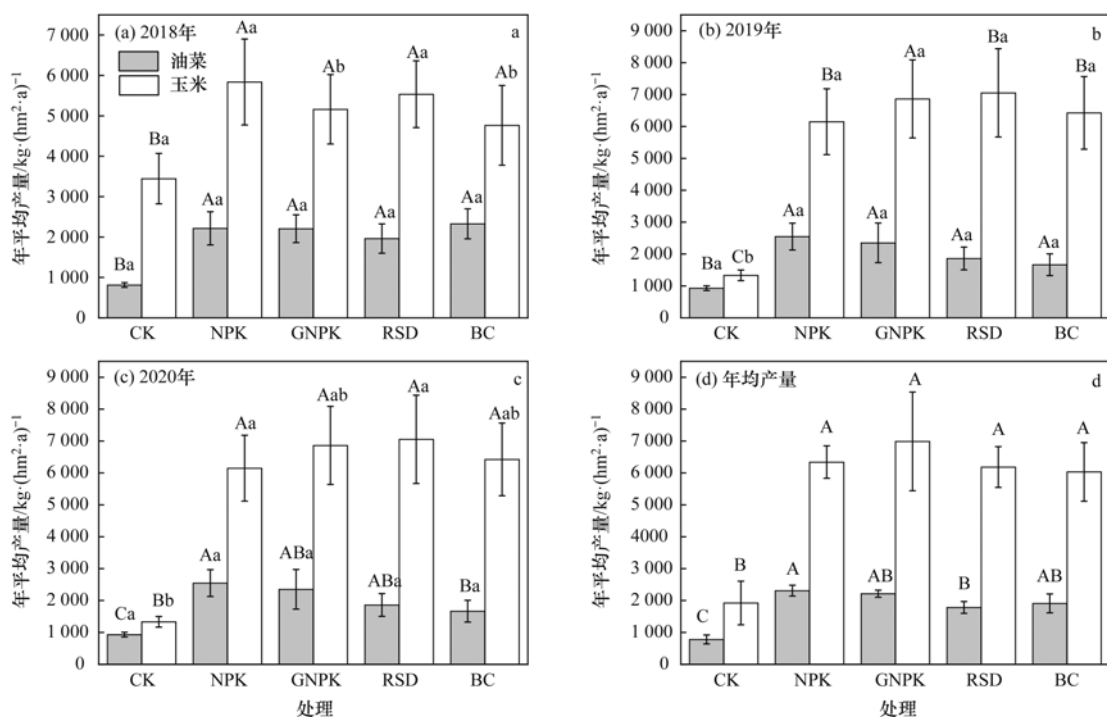
Fig. 4 Organic carbon and contribution rate of soil aggregates under different fertilization treatments

献率,增幅分别为 55.88%、41.16% 和 57.47% ($P < 0.05$);此外,各处理均显著降低了 $>5\text{ mm}$ 和 $<0.25\text{ mm}$ 粒级团聚体的 SOC 贡献率 ($P < 0.05$). 与 GNPK 处理相比,生物炭和秸秆还田 (RSD 和 BC) 提高了 $>5\text{ mm}$ 和 $5\sim 2\text{ mm}$ 粒级团聚体的 SOC 贡献率,其中 RSD 还显著提高了 $0.5\sim 0.25\text{ mm}$ 粒级团聚体的 SOC 贡献率,增幅为 8.01%,而 BC 还显著提高了 $2\sim 1\text{ mm}$ 粒级团聚体的 SOC 贡献率,增幅为 12.09% ($P < 0.05$).

2.5 生物炭与秸秆还田对作物产量的影响

图 5 所示,各年份不同施肥处理均能显著提高作物产量 ($P < 0.05$). 由图 5(d) 可知,各处理油菜

产量大小依次为: $\text{NPK} > \text{GNPK} > \text{BC} > \text{RSD} > \text{CK}$, 与 CK 处理相比, NPK、GNPK、RSD 和 BC 产量显著提高了 196.30%、183.95%、128.90% 和 145.25% ($P < 0.05$); 各处理玉米产量大小依次为: $\text{GNPK} > \text{NPK} > \text{RSD} > \text{BC} > \text{CK}$, 与 CK 处理相比, NPK、GNPK、RSD 和 BC 产量显著提高了 229.71%、263.39%、221.57% 和 213.69% ($P < 0.05$). 与 GNPK 处理相比, RSD 和 BC 两作物产量略有降低,但差异不显著. 从不同年份来看,各处理间油菜产量有所变化,但差异不显著; 玉米产量随试验年限增加呈上升趋势,但仅有 2019 年 GNPK 和 BC 处理的玉米产量显著高于 2018 年 ($P < 0.05$).



竖线表示标准差,不同大写字母表示同一年份同一作物不同处理间差异显著 ($P < 0.05$),

不同小写字母表示同一处理同一作物不同年份差异显著 ($P < 0.05$)

图 5 不同施肥处理各年份作物产量

Fig. 5 Annual crop yield under different fertilization treatments

3 讨论

3.1 生物炭和秸秆还田可提高土壤肥力水平和土壤结构稳定性

本研究结果表明,生物炭和秸秆还田处理提高了土壤养分含量,以速效养分速效磷、硝态氮和铵态氮效果尤其显著 ($P < 0.05$). 但全国第二次土壤普查养分分级表明,当土壤中全氮低于 $0.75\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷低于 $0.40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和速效磷低于 $10.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为低肥力水平,詹江渝^[17]的研究统计重庆市五大土类耕层土壤养分含量的结果表明,紫色土全氮、全磷和速效磷平均值分别为 $0.98\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、

$0.76\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $17.80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而本研究各施肥处理土壤全氮、全磷和速效磷平均含量分别为 $0.59\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.29\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $5.15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 故本研究土壤养分综合而言为低水平.

本研究表明,各施肥处理均能不同程度促进土壤团聚体的形成,与 CK 相比,生物炭和秸秆还田能显著提高 $5\sim 2$ 、 $2\sim 1$ 和 $1\sim 0.5\text{ mm}$ 粒级团聚体的含量 ($P > 0.05$),可见生物炭和秸秆还田有利于大团聚体的形成,进而提高土壤结构稳定性^[18],这一结果与侯晓娜等^[18]的研究结果相似,这可能是因为秸秆还田增加了新鲜残茬有机碳含量,促进了有机质的胶结作用,进而提高了大团聚的含量^[3]; 而生

物炭较高的 CEC 和巨大比表面积等物理性质促进了作物根系的发育、激发土壤微生物的活性,间接提高了非稳定性胶结剂(真菌菌丝、根系、植物源的多糖等)的含量,促进了团聚体胶结凝聚,进而提升了团聚体的稳定性^[19~21]。虽然本试验各施肥处理均增加了土壤大团聚体的含量,但土壤团聚体均主要集中在 $<0.25\text{ mm}$ 粒级,这与林洪羽等^[22]在紫色土上的研究结果不同,这可能是由于新垦紫色土土壤风化程度浅和养分贫瘠的缘故。RSD 和 BC 处理 $>5\text{ mm}$ 粒级的团聚体含量比 CK 略低,其中 RSD 处理结果可能与秸秆的施入时间和颗粒大小有关,因此在实际应用中秸秆还田应选择适当时间与较小颗粒秸秆,以促进秸秆吸水膨胀,加快秸秆腐殖化过程^[23];而 BC 处理结果可能是因为生物炭分解过程中无法产生黏液以促进团聚体的形成^[22,24]。

MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 、 D 和 $PAD_{0.25}$ 常用来表明土壤团聚体的稳定性^[1,25~27]。本研究结果表明,生物炭和秸秆还田能显著提高各粒级团聚体的含量和土壤 MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 的值,显著降低 D 和 $PAD_{0.25}$ 值 ($P<0.05$),即化肥减量配施秸秆和生物炭处理下土壤团聚体稳定性更好,这一结果与李传哲等^[28]的研究结果相似。

3.2 生物炭和秸秆还田可增加土壤有机碳和各粒级团聚体有机碳含量

本研究结果表明,各施肥处理均能显著提高土壤有机碳含量,这与安艳等^[26]的研究结果相似,这是因为秸秆还田后经腐解过程,增加了外源有机碳的输入,激发了土壤微生物的活性,促进了秸秆中碳在土壤中的积累^[7,29];而生物炭施入土壤可促进富里酸和腐殖酸等土壤腐殖质以及土壤碳水化合物和芳烃等有机大分子的形成,进而提高土壤有机碳含量^[30,31]。RSD 处理土壤 SOC 显著低于 BC 处理 ($P<0.05$),这是因为秸秆含有大量新鲜易分解碳,其通过土壤呼吸进行分解的过程碳损失较多,而生物炭具有极强的生物化学稳定性,施入土壤可抑制土壤呼吸,故尽管两处理均能显著提高土壤有机碳,但提高程度存在差异^[32],这一结果还可能与土壤性质、秸秆类型等因素影响秸秆还田后土壤激发效应有关^[33]。与徐国鑫等^[34]在紫色土上的研究不同的是,本研究中 NPK 处理有机碳含量显著高于 GNPk 处理,且与 RSD 处理之间没有差异,这主要是因为新垦紫色土作为浅风化土壤,地力低下,而较高的氮、磷和钾肥施用量为作物生长提供了必要的营养物质,同时也促进了土壤的熟化过程,提高了土壤有机碳的含量^[35]。与侯晓娜等^[18]的研究结果不同的是,本研究土壤有机碳含量总体较低 ($3.17 \sim 6.73$

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$),这主要是因为常年耕作的土壤因肥料的施用,加快了耕层有机质的积累^[36],而本研究供试土壤为新垦紫色土,缺少长期培肥过程。而有机碳作为团聚体的重要胶结剂,可促进土壤中矿物和黏粒胶结形成大团聚体,即土壤团聚体稳定性增加常伴随着土壤有机碳的增加^[4],这与本研究得出生物炭和秸秆还田可促进土壤团聚体形成和提高其稳定性的结果相符^[30,37]。但与代文才等^[38]在熟化紫色土上的研究结果比较,本研究生物炭和秸秆还田处理后新垦紫色土团聚体的稳定性较低,这可能与本研究供试土壤有机碳含量仅为 $4.38\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 有关。因此,对于新垦紫色土而言,增加土壤有机碳含量既是提高土壤养分含量的途径,也是改良土壤结构的重要措施。

本研究中,BC 处理对提高土壤团聚体有机碳含量效果最佳,这与王富华等^[30]的研究结果一致,这一结果也表明,生物炭不仅是改良紫色土的途径,同样也是培肥新垦紫色土的手段。除 BC 处理外,各处理 $5 \sim 2\text{ mm}$ 粒级团聚体 SOC 含量最低,且显著低于微小团聚体,这可能与不同粒级团聚体 SOC 来源和耕作措施等因素有关。首先,大团聚体 SOC 主要来源为植物残体与活性较高的有机质,易被微生物分解,而微小团聚体中有机碳主要来源为更稳定的有机质,如微生物残体和腐殖质,不易被微生物分解^[33,39,40];其次,本试验的油菜-玉米轮作过程中进行的机械翻耕措施,会使大团聚体破碎暴露,更容易被微生物分解利用,致其组分内 SOC 消耗^[41]。各处理 $<0.25\text{ mm}$ 粒级团聚体 SOC 贡献率最高,这是因为微小团聚体中黏粒与粉粒具有比表面积和表面电荷较大的特点,使得其能够与 SOC 紧密结合为有机-无机复合体,达到极为稳定的状态^[30]。对于各粒级团聚体 SOC 含量高低,与其对土壤 SOC 的贡献率大小不匹配的情况,这是因为团聚体 SOC 贡献率是由某粒级团聚体含量与该粒级团聚体 SOC 含量共同决定^[30,34]。土壤团聚体和有机碳含量还与作物根系和土壤微生物有关^[42],但本研究缺少相关分析,故后续试验应进一步探索作物根系和土壤微生物对土壤结构的影响。

提高土壤养分和改良土壤结构是实现作物增产的重要手段。本研究结果表明,化肥减量配施生物炭和秸秆相比于常规施肥和优化施肥呈稳产的现象。张涛等^[43]的研究发现,化肥减量配施有机肥增加了作物根系细菌和放线菌的数量,可使黄瓜和辣椒达到稳产至增产的效果,这与本研究结果相似。可见,化肥减量配施生物炭和秸秆可实现资源投入降低、低环境代价和作物稳产的多重目标。

4 结论

(1)生物炭和秸秆还田可增加土壤养分含量、促进土壤大团聚体形成,有效提高土壤团聚体稳定性,具体表现为各施肥处理均能显著增加 5~0.5 mm 粒级团聚体含量,显著提高 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 值,显著降低 D 和 $PAD_{0.25}$ 值($P < 0.05$)。

(2)土壤有机碳含量随团聚体稳定性增加而增加,各施肥处理中尤以生物炭效果最为显著,而土壤团聚体有机碳贡献率主要分布在 < 0.25 mm 粒级团聚体中,且显著高于其它各粒级贡献率($P < 0.05$)。

(3)综合考虑,生物炭和秸秆还田能提高新垦紫色土旱坡地土壤团聚体稳定性、增加土壤有机碳含量和改良土壤结构,是培肥新垦紫色土、提高土壤质量的有效途径。

参考文献:

- [1] 于文竹,魏霞,赵恒策,等. 青藏高原高寒草原草甸土壤团聚体及养分因子变化特征[J]. 水土保持学报, 2020, **34**(6): 301-308, 317.
Yu W Z, Wei X, Zhao H C, et al. Changes of soil aggregates and nutrient factors in alpine grassland and alpine meadow of Qinghai Tibet plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, **34**(6): 301-308, 317.
- [2] 周泉,王龙昌,邢毅,等. 秸秆覆盖条件下紫云英间作油菜的土壤团聚体及有机碳特征[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(4): 1235-1242.
Zhou Q, Wang L C, Xing Y, et al. Effects of Chinese milk vetch intercropped with rape under straw mulching on soil aggregate and organic carbon character [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, **30**(4): 1235-1242.
- [3] 高洪军,彭畅,张秀芝,等. 秸秆还田量对黑土区土壤及团聚体有机碳变化特征和固碳效率的影响[J]. 中国农业科学, 2020, **53**(22): 4613-4622.
Gao H J, Peng C, Zhang X Z, et al. Effects of corn straw returning amounts on carbon sequestration efficiency and organic carbon change of soil and aggregate in the black soil area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, **53**(22): 4613-4622.
- [4] 郑凤君,王雪,李生平,等. 免耕覆盖下土壤水分、团聚体稳定性及其有机碳分布对小麦产量的协同效应[J]. 中国农业科学, 2021, **54**(3): 596-607.
Zheng F J, Wang X, Li S P, et al. Synergistic effects of soil moisture, aggregate stability and organic carbon distribution on wheat yield under no-tillage practice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, **54**(3): 596-607.
- [5] 孙彤,付宇童,李可,等. 锰基改性生物炭对弱碱性 Cd 污染土壤团聚体结构以及 Cd 含量特征的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3426-3433.
Sun T, Fu Y T, Li K, et al. Effect of mn-modified biochar on the characteristics of aggregate structure and the content of Cd in weakly alkaline Cd-contaminated soil [J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3426-3433.
- [6] Mo F, Zhang Y Y, Liu Y, et al. Microbial carbon-use efficiency and straw-induced priming effect within soil aggregates are regulated by tillage history and balanced nutrient supply[J]. Biology and Fertility of Soils, 2021, **57**(3): 409-420.
- [7] 王碧胜,于维水,武雪萍,等. 不同耕作措施下添加秸秆对土壤有机碳及其相关因素的影响[J]. 中国农业科学, 2021, **54**(6): 1176-1187.
Wang B S, Yu W S, Wu X P, et al. Effects of straw addition on soil organic carbon and related factors under different tillage practices[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, **54**(6): 1176-1187.
- [8] Huang R, Tian D, Liu J, et al. Responses of soil carbon pool and soil aggregates associated organic carbon to straw and straw-derived biochar addition in a dryland cropping mesocosm system [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, **265**: 576-586.
- [9] Arthur E, Oppong Danso E, Beiranvand M, et al. Rice straw biochar effects on Atterberg limits and aggregate characteristics of an Acrisol in Ghana[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2020, **66**(13): 1861-1872.
- [10] 黄明逸,张展羽,翟亚明,等. 咸淡交替灌溉下生物炭对滨海盐渍土及玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, **36**(21): 88-96.
Huang M Y, Zhang Z Y, Zhai Y M, et al. Effects of biochar on coastal saline soil and maize yield under alternate irrigation with brackish and freshwater[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, **36**(21): 88-96.
- [11] Huang R, Gao X S, Wang F H, et al. Effects of biochar incorporation and fertilizations on nitrogen and phosphorus losses through surface and subsurface flows in a sloping farmland of Entisol [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, **300**, doi: 10.1016/j.agee.2020.106988.
- [12] Qi L, Pokharel P, Chang S X, et al. Biochar application increased methane emission, soil carbon storage and net ecosystem carbon budget in a 2-year vegetable-rice rotation[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, **292**, doi: 10.1016/j.agee.2020.106831.
- [13] 张红雪,赵壮,王晓朋,等. 生物炭对亚热带红壤水稳性团聚体及其碳、氮分布的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020, (6): 27-33.
Zhang H X, Zhao Z, Wang X P, et al. Effect of biochar on water stable aggregate and distribution of carbon and nitrogen in subtropical red soil [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020, (6): 27-33.
- [14] 严建立,章明奎,王道泽. 不同调理剂改良低丘新垦耕地土壤物理性状的效果[J]. 中国农学通报, 2021, **37**(2): 67-73.
Yan J L, Zhang M K, Wang D Z. Different amendments: effect on soil physical properties of newly reclaimed land in low hilly region [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, **37**(2): 67-73.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 詹江渝. 重庆农地土壤基本状况及肥力特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
Zhan J Y. Study on the basic condition of Chongqing farmland and the main characteristics of fertility [D]. Chongqing: Southwest University, 2014.
- [18] 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.
- [19] 张进红, 吴波, 王国良, 等. 生物炭对盐渍土理化性质和紫花苜蓿生长的影响[J]. 农业机械学报, 2020, **51**(8): 285-294.
- Zhang J H, Wu B, Wang G L, *et al.* Effects and evaluation of biochar on physical-chemical properties of coastal saline soil and alfalfa growth [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, **51**(8): 285-294.
- [20] Ascough P L, Sturrock C J, Bird M I. Investigation of growth responses in saprophytic fungi to charred biomass[J]. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2010, **46**(1): 64-77.
- [21] Chan K Y, van Zwieten L, Meszaros I, *et al.* Using poultry litter biochars as soil amendments [J]. Australian Journal of Soil Research, 2008, **46**(5): 437-444.
- [22] 林洪羽, 周明华, 张博文, 等. 生物炭及秸秆长期施用对紫色土坡耕地土壤团聚体有机碳的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, **28**(1): 96-103.
- Lin H Y, Zhou M H, Zhang B W, *et al.* Effect of long-term application of biochar and straw on soil organic carbon in purple soil aggregates of sloping uplands[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, **28**(1): 96-103.
- [23] 丛萍, 逢焕成, 王婧, 等. 粉碎与颗粒秸秆高量还田对黑土亚耕层土壤有机碳的提升效应[J]. 土壤学报, 2020, **57**(4): 811-823.
- Cong P, Pang H C, Wang J, *et al.* Effect of returning chopped and pelletized straw at a high rate enhancing soil organic carbon in subsoil of farmlands of black soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, **57**(4): 811-823.
- [24] 叶丽丽, 王翠红, 周虎, 等. 添加生物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.
- [25] 戴显庆, 冀晓东, 杨茂林, 等. 天然沸石对黑土团聚体含量及稳定性的影响[J]. 中国水土保持, 2016, (5): 38-41.
- Dai X Q, Ji X D, Yang M L, *et al.* Influence of natural zeolite to aggregate content and stability of black soil[J]. Soil and Water Conservation in China, 2016, (5): 38-41.
- [26] 安艳, 姬强, 赵世翔, 等. 生物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.
- [27] 焦敏娜, 周鹏, 孙权, 等. 不同改性生物炭及施用量对风沙土土壤团聚体及牧草产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020, (6): 34-40.
- Jiao M N, Zhou P, Sun Q, *et al.* Effects of different modified biochars and application rates on soil aggregates and forage yield in aeolian sandy soil[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2020, (6): 34-40.
- [28] 李传哲, 章欢, 姚文静, 等. 生物炭施氮肥对典型黄河故道区土壤理化性质和冬小麦产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(10): 3424-3432.
- Li C Z, Zhang H, Yao W J, *et al.* Effects of biochar application combined with nitrogen fertilizer on soil physicochemical properties and winter wheat yield in the typical ancient region of Yellow river, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, **31**(10): 3424-3432.
- [29] 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.
- [30] 王富华, 黄容, 高明, 等. 生物炭与秸秆配施对紫色土团聚体中有机碳含量的影响[J]. 土壤学报, 2019, **56**(4): 929-939.
- Wang F H, Huang R, Gao M, *et al.* Effect of combined application of biochar and straw on organic carbon content in purple soil aggregates [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, **56**(4): 929-939.
- [31] Liu S H, Kong F L, Li Y, *et al.* Mineral-ions modified biochars enhance the stability of soil aggregate and soil carbon sequestration in a coastal wetland soil [J]. CATENA, 2020, **193**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104618.
- [32] 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**: 2988-2999.
- [33] 曹彬彬, 李雨诺, 朱熠辉, 等. 添加秸秆对长期不同碳氮管理土壤各粒级团聚体激发效应的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, **49**(5): 56-64, 73.
- Cao B B, Li Y N, Zhu Y H, *et al.* Priming effect of straw addition on different particle-size fractions of soil aggregates under long-term carbon and nitrogen managements [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2021, **49**(5): 56-64, 73.
- [34] 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.
- [35] Zou C M, Li Y, Huang W, *et al.* Rotation and manure amendment increase soil macro-aggregates and associated carbon and nitrogen stocks in flue-cured tobacco production [J]. Geoderma, 2018, **325**: 49-58.
- [36] 王玄德. 紫色土耕地质量变化研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2004.
- [37] 熊佰炼, 高扬, 彭韬, 等. 喀斯特坡地浅层岩溶裂隙土壤团聚体稳定性与养分垂向变化特征[J]. 土壤学报, 2021, doi: 10.11766/trxb202006300351.
- Xiong B L, Gao Y, Peng T, *et al.* Characteristics of vertical variation of soil aggregates stability and nutrients in shallow karst fissures of karst sloping fields [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, doi: 10.11766/trxb202006300351.
- [38] 代文才, 钱盛, 高明, 等. 施用生物炭灰渣对柑橘园土壤团聚体及有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2016, **30**(2): 260-265, 271.
- Dai W C, Qian S, Gao M, *et al.* Effects of biomass ash application on soil aggregates and organic carbon distributions of citrus orchard soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, **30**(2): 260-265, 271.
- [39] 毛霞丽, 邱志腾, 张爽, 等. 不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2842-2851.
- Mao X L, Qiu Z T, Zhang S, *et al.* Response of aggregate distribution to input straw and their linkages to organic carbon

- mineralization in soils developed from five different parent materials[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2842-2851.
- [40] Fontaine S, Henault C, Aamor A, *et al.* Fungi mediate long term sequestration of carbon and nitrogen in soil through their priming effect[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(1): 86-96.
- [41] 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.
- [42] 张方博, 侯玉雪, 敖园园, 等. 土壤紧实胁迫下根系-土壤的相互作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, **27**(3): 531-543.
- Zhang F B, Hou Y X, Ao Y Y, *et al.* Root-soil interaction under soil compaction[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, **27**(3): 531-543.
- [43] 张涛, 刘勇鹏, 朱广权, 等. 定位化肥牛粪配施对设施蔬菜产量和土壤肥力的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021, (1): 161-168.
- Zhang T, Liu Y P, Zhu G Q, *et al.* Effect of combined application of fertilizer and cow manure on yield and soil fertility of protected vegetable [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2021, (1): 161-168.



CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies: A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i> (5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i> (5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i> (5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOW Wei, <i>et al.</i> (5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i> (5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Air Humidity on PM _{2.5} Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i> (5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i> (5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i> (5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i> (5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i> (5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i> (5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i> (5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i> (5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i> (5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O ₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i> (5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i> (5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i> (5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i> (5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i> (5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i> (5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i> (5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i> (5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i> (5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i> (5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i> (5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i> (5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i> (5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DONG Si-qí, HUANG Chong (5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in A Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i> (5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i> (5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong (5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i> (5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i> (5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i> (5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i> (5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i> (5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i> (5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i> (5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i> (5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i> (5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i> (5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i> (5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i> (5554)