

目次

疫情期间人为源减排对城市大气氧化性的影响	朱剑蓝, 秦墨梅, 朱嫣红, 胡建林 (617)
不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析	秦阳, 胡建林, 孔海江 (626)
不同方法判定南京臭氧生成敏感区的差异	陈柑羽, 李勋, 李琳, 秦墨梅, 谢鸣捷, 王鸣, 李婧伟, 胡建林 (635)
2006~2021年夏半年上海臭氧浓度特征及其大气环流背景分析	郑庆峰, 梁萍, 段玉森, 林燕芬, 张宋嘉, 徐卫忠 (645)
基于大气成分观测网的山西省近地面O ₃ 体积分数分布特征	李莹, 王淑敏, 裴坤宁, 闫世明, 孙鸿博, 张逢生, 高兴艾 (655)
伊宁市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	王文婷, 谷超, 李丽明, 李新琪, 郑镇森, 耿春梅, 王晓丽, 杨文 (668)
运城市四季VOCs特征、来源及臭氧形成敏感物种	阴世杰, 刘新翌, 刘亚非, 李晨露, 张晨, 张欢, 王正, 程强 (678)
郑州市秋冬季污染过程中大气VOCs污染特征、来源解析及活性分析	赖梦洁, 张栋, 于世杰, 宋鑫帅, 李晓, 张瑞芹 (689)
郑州市PM _{2.5} 中有机酸的污染特征、来源解析及二次生成	李子涵, 董喆, 尚瑞琪, 孔梓涵, 李晓, 张瑞芹 (700)
中国三大城市群PM _{2.5} 浓度非线性变化分析	吴舒祺, 顾杨旸, 张天岳, 赵文吉 (709)
基于LEAP模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析	吴琼, 马昊, 任洪波, 郭明星, 陈鹏, 李琦芬 (721)
碳交易背景下中国华北地区碳代谢格局变化	郑宏媚, 沈方, 许光耀, 关欣 (732)
考虑区域特点和车型差异的氢燃料电池汽车全生命周期减碳预测分析	马菁, 蔡旭, 张春梅, 兰利波, 陈轶嵩, 付佩 (744)
我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析	韦英怀, 胡敏鹏, 陈丁江 (755)
不同时空尺度下土地利用结构与空间格局对苏州河水质的影响	谭娟, 熊丽君, 王卿, 任志文, 朱丹丹, 王敏 (768)
深圳市2015~2021年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应	韦必颖, 成建梅, 苏晓煜, 程天舜 (780)
河南黄河改道区浅层地下水化学特征与主控污染源解析	王帅, 任宇, 郭红, 曹文庚, 李祥志, 肖舜禹 (792)
北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析	郭高轩, 代垠东, 许亮, 朱琳, 欧志亮, 戚琦, 辛宝东 (802)
店埠河流域地表水-地下水水化学特征及其成因分析	郑涛, 秦先燕, 吴剑雄 (813)
张家口地区枯水期地下水水化学特征及其成因机制分析	金爱芳, 殷秀兰, 李长青, 李文娟, 庞菊梅, 金晓媚 (826)
黄河中下游典型抗性细菌及抗性基因污染分布	闵威, 高明昌, 孙绍芳, 宋茜茜, 邱立平 (837)
制药废水中抗生素抗性的污染特征、检测手段和控制方法	彭安萍, 高虎, 张新波 (844)
水体组分对聚苯乙烯纳米颗粒聚沉行为的影响	汤端阳, 郑文丽, 陈关潼一, 陈思莉, 陈尧, 赵晓丽, 汪浩 (854)
富磷废弃钙基生物炭对水体中铅的去除	刘天, 吕思璐, 杜兴国, 程敏, 谢燕华 (862)
壳聚糖改性生物炭的制备及其对水溶液中Cd ²⁺ 的吸附机制	姜凌, 安靖玥, 岳小琼, 李亚雄, 夏秋乐, 祝婷文佳, 柴丽红 (873)
硼掺杂介孔炭吸附四环素的效能与机制	邹震, 许路, 乔伟, 唐茂森, 金鹏康 (885)
磁性含磷油茶壳生物炭对水中磺胺甲噁唑的吸附特性	韩帅鹏, 唐李文, 刘勤, 林家亮, 李晓慢, 程建华, 胡勇有 (898)
广东省高分辨率温室气体排放清单及特征	卢清, 唐明双, 廖彤, 黄志炯, 钟庄敏, 宋佩珊, 沈劲, 张智胜, 梁小明, 孙家仁, 陈来国 (909)
辽河口“退塘还湿”修复区生态系统CO ₂ 交换及其环境调控	刘思琪, 陈虹, 邢庆会, 程浩, 韩建波, 徐雪梅 (920)
生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤N ₂ O和CH ₄ 排放的影响	胡煜杰, 唐瑞杰, 胡天怡, 陈琦琦, 汤水荣, 阮延正, 孟磊 (929)
生物炭改良盐碱地研究与应用进展	魏盈, 焦乐, 张鹏, 刘福德, 肖辉, 董昱辰, 代红文 (940)
免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta分析	徐艺萍, 饶越悦, 孟艳, 温媛, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (952)
黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测: 以普定县为例	李月, 罗红芬 (961)
不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响	李越, 徐曼, 谢永红, 王颖, 黄容, 谢军, 王子芳, 高明 (974)
Ca改性生物炭对土壤磷赋存形态影响及稳定化机制	张超, 翟付杰, 单保庆 (983)
秦岭中段不同恢复阶段弃耕农田植物多样性变化及其驱动因素	闫成龙, 薛悦, 王艺菲, 康海斌, 王得祥 (992)
我国典型制药厂污染场地中抗生素的污染特征及生态风险	杨炳彬, 黄争, 赵建亮, 何良英, 刘有胜, 胡立新, 石义静, 应光国 (1004)
广州市土壤多环芳烃污染特征及风险评估	邹子航, 陈莲, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (1015)
基于源导向的土壤重金属风险评价及管控因子分析	潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (1026)
基于Monte-Carlo模拟的湖南省典型工厂周边农田土壤重金属区域潜在生态风险特征及来源解析	罗豪杰, 潘俊, 陈小霞, 张敏, 沈良辰, 李歆, 丁平, 蔡丹, 蔡立梅, 胡国成 (1038)
基于参数优化和蒙特卡罗模拟的砷污染地块健康风险评估	袁贝, 刘虎鹏, 杜平, 陈娟, 张云慧, 张昊 (1049)
基于APCS-MLR和PMF模型的赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染源解析	沈智杰, 李杰芹, 李彩霞, 廖泽源, 梅楠, 罗程钟, 王定勇, 张成 (1058)
PE-Cd复合污染土壤中Cd释放迁移特征及机制	王迪, 徐绍辉, 邵明艳, 林青 (1069)
氯代乙烯的厌氧微生物还原脱氯特性	李伟, 刘贵平, 刘峻, 吕良华, 乔文静, 余欣, 张晓旻, 蒋建东 (1080)
昭通市农田土壤和蔬菜重金属污染评价及相关性分析	张好, 董春雨, 杨海婵, 孙思静, 韩宇, 黄祖志, 张乃明, 包立 (1090)
钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果	王晓晶, 张东明, 曹阳, 吕家琰, 代允超 (1098)
氧化石墨烯负载铁锰复合材料对镉污染土壤的钝化修复	袁婧, 吴骥子, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣, 赵科理 (1107)
关键生育期施加外源灌溉水对水稻镉吸收转运的影响	周霞, 胡雨丹, 周航, 陈琼, 谭文韬, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (1118)
外源锌对镉胁迫下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响	张辉红, 魏畅, 柳海涛, 张静静, 刘芳, 赵颖, 张雪海, 李鸽子, 姜瑛 (1128)
稀土元素铈对镉胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应	张静静, 徐正阳, 焦秋娟, 范丽娜, 刘芳, 赵颖, 宋佳, 化党领, 李鸽子, 柳海涛 (1141)
根施伯克氏菌对小麦镉吸收转运的两段式阻控作用	郭佳佳, 王常荣, 刘仲齐, 黄青青, 张长波, 黄永春, 薛卫杰, 孙约兵 (1150)
高密度聚乙烯微塑料与氯噻磺隆对大豆生长和根际细菌群落的复合胁迫效应	胡晓玥, 滑紫微, 姚伦广, 杜丽, 牛秋红, 李玉英, 闫路, 陈兆进, 张浩 (1161)
微塑料的人体富集及毒性机制研究进展	包亚博, 王成尘, 彭吾光, 依代倩, 向萍 (1173)
机器学习在微塑料识别与环境风险评估中的应用研究进展	白润昊, 范瑞琪, 刘琪, 刘勤, 严昌荣, 崔吉晓, 何文清 (1185)
微塑料与农田土壤中典型污染物的复合污染研究进展	侯宇晴, 李冰, 王金花, 宋文慧, 王兰君, 王军, 朱鲁生 (1196)
水中微/纳塑料电化学检测及去除的研究进展	郑伟康, 刘振中, 项晓方 (1210)
基于分布式认知理论的农户面源污染治理支付意愿影响因素	郭晨浩, 李林霏, 夏显力 (1222)

不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响

李越¹, 徐曼¹, 谢永红², 王颖³, 黄容⁴, 谢军¹, 王子芳¹, 高明^{1*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆农科院果树所, 重庆 401329; 3. 重庆市规划与自然资源局, 重庆 401147; 4. 四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘要: 研究不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳变化特征的影响, 为酸性紫色土修复提供科学依据。以紫色土为研究对象, 设置不施肥(CK)、单施化肥(F)、化肥配施石灰(SF)、化肥配施有机肥(OM)、化肥配施生物炭(BF)和化肥配施酒糟灰渣(JZ)共6个处理。比较不同改良剂施用下酸性紫色土的团聚体组成情况, 以及各粒级团聚体有机碳分布规律, 结合团聚体稳定性指标, 明确不同改良剂对酸化紫色土团聚体结构的影响。结果表明, 施肥处理均显著提高土壤pH, 以JZ处理效果最显著, 施肥均显著提高土壤有机质含量, 以OM处理效果最好, BF和OM处理显著降低土壤容重, 同时SF和BF处理显著提高土壤含水率($P < 0.05$); 各处理均以 < 0.25 mm粒级团聚体为优势粒级, 施肥能显著提高大团聚体(直径 > 0.25 mm的团聚状结构单位)的含量, 同时施肥处理均显著提高了土壤几何平均直径(GMD)、平均重量直径(MWD)和 $R_{0.25}$ 值(> 0.25 mm团聚体含量), 降低分形维数(D)和团聚体破坏率(PAD)值($P < 0.05$), 促进了土壤团聚体的团聚化和稳定性, 以OM处理效果最好; 与CK处理相比, 施肥能显著提高土壤有机碳含量31.71%~209.67%, 其中以OM处理最显著; 不同处理土壤有机碳主要分布在大团聚体中, 与CK处理相比, 各处理显著提高大团聚体中有机碳贡献率为19.34%~47.76%, 其中OM处理效果最为显著($P < 0.05$)。综合来看, 化肥配施有机肥能促进酸性紫色土大团聚体的形成, 提高土壤团聚体稳定性, 增加土壤有机碳含量, 是改善酸性紫色土土壤结构和提升土壤质量的有效措施。

关键词: 改良剂; 紫色土; 土壤酸化; 土壤团聚体; 土壤有机碳

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)02-0974-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202303246

Effects of Different Modifiers on Aggregates and Organic Carbon in Acidic Purple Soil

LI Yue¹, XU Man¹, XIE Yong-hong², WANG Ying³, HUANG Rong⁴, XIE Jun¹, WANG Zi-fang¹, GAO Ming^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Fruit Tree Institute of Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China; 3. Chongqing Planning and Natural Resources Bureau, Chongqing 401147, China; 4. School of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: The aim of this study was to examine the effects of different modifiers on the changes in aggregates and organic carbon in acidic purple soil, providing a scientific basis for the remediation of acidic purple soil. Using purple soil as the research object, a total of six treatments were set up, including no fertilization (CK), single fertilization (F), fertilization with lime (SF), fertilization with organic fertilizer (OM), fertilization with biochar (BF), and fertilization with distiller's grains ash (JZ). We compared the composition of aggregates in acidic purple soil under the application of different modifiers, as well as the distribution pattern of organic carbon in aggregates of different particle sizes. Combined with the stability indicators of aggregates, we sought to clarify the impact of different modifiers on the structure of aggregates in acidic purple soil. The results showed that fertilization significantly increased the soil pH, with the JZ treatment being the most effective. Fertilization significantly increased soil organic matter content, with the OM treatment showing the largest increase. The BF and OM treatments significantly reduced soil bulk density, whereas the SF and BF treatments significantly increased soil moisture content ($P < 0.05$). All treatments used < 0.25 mm aggregates as the dominant particle size. Fertilization could significantly increase the content of large aggregates (aggregate structure units with diameter > 0.25 mm). At the same time, fertilization treatments significantly increased the soil geometric mean diameter (GMD), average weight diameter (MWD), and $R_{0.25}$ value (> 0.25 mm aggregate content) and reduced the fractal cone number (D) and aggregate destruction rate (PAD) values ($P < 0.05$). Fertilization also promoted the aggregation and stability of soil aggregates, with the OM treatment having the greatest effect. Compared with that in the CK treatment, fertilization could significantly increase soil organic carbon content by 31.71%~209.67%, with the OM treatment showing the most significant change. Different treatments of soil organic carbon were mainly distributed in large aggregates. Compared with that in the CK treatment, each treatment significantly increased the contribution rate of organic carbon in large aggregates by 19.34%~47.76%, with the OM treatment having the most significant effect ($P < 0.05$). In general, chemical fertilizer combined with organic fertilizer could promote the formation of large aggregates in acidic purple soil, improve the stability of soil aggregates, and increase the content of soil organic carbon, which is an effective measure to improve the soil structure and improve the quality of acidic purple soil.

Key words: modifier; purple soil; soil acidification; soil aggregate; soil organic carbon

土壤结构对于维持土壤生态功能有着举足轻重的作用, 团聚体间结构、团聚体内部结构和团聚体这三部分共同构成土壤结构整体^[1], 因此团聚体常用于评价土壤结构好坏。土壤团聚体是在土壤矿物颗粒和有机质相互作用下形成的基本结构单元^[2], 其分布特征与土壤中水分迁移、养分循环和物质交换、微生物活动等一系列物理化学生物过程密切相关, 而

这些因素是决定土壤碳库变化的重要因子。团聚体通过包裹土壤有机碳对其起到保护作用, 提高土壤

收稿日期: 2023-03-28; 修订日期: 2023-04-28

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(cstc2019jscx-tjsbX0001); 四川省自然科学基金项目(2022NSFSC0100)

作者简介: 李越(1999~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤质量与团聚体稳定特征, E-mail: ly417375272@163.com

* 通信作者, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

的碳固存能力,阻止土壤碳流失^[3,4];同时,有学者研究发现,团聚体的周转与碳动力学有关^[5,6],土壤有机质是促进土壤团聚体形成的粘合剂,促进土壤团聚体的团聚化^[7-9].有研究表明,土壤酸化后不仅会影响土壤表面的组分电荷和某些营养元素的有效性^[10],还会降低土壤有机质含量,有机质在促进黏粒形成和提高团聚体稳定性方面具有关键作用^[11],土壤酸化后导致土壤水稳性团聚体结构遭到破坏,造成土壤板结和物理性状变差^[12],影响作物正常生长.

利用石灰、酒糟灰渣、有机肥和生物炭等材料可修复酸化土壤,改善土壤物理结构.石灰常用于改良酸性土壤,Aye等^[13]研究发现,施用石灰在改善农田土壤酸度的同时能增强团聚体稳定性,Chan等^[14]研究表明石灰能够阻止土壤结皮的形成,提高土壤持水能力和团聚体的稳定性.对于酒糟的利用而言,已有的研究大多是酒糟基质化和饲料化方面,以酒糟为原材料生产的生物质灰渣应用于土壤改良修复的研究还鲜见报道.有机物的输入对土壤有机碳和土壤结构有重要影响,Alagöz等^[15]研究发现施用有机肥可以促进大团聚体形成和提高团聚体稳定性.生物炭拥有较多的表面官能团和丰富的孔隙结构,通过影响土壤微生物活性、土壤孔隙度和有机碳含量来促进土壤团聚体的形成.生物质灰渣呈碱性,具有容重小和疏松多孔等特性,这些特性使得其对土壤的团粒结构及透气保湿性有一定的影响.有研究表明,生物质灰渣施入土壤后对土壤中大团聚体数量和团聚体稳定性有正向影响,阻止土壤物理结构退化^[16,17].然而针对紫色土的酸化特征,不同改良剂对土壤结构的影响及有机碳的贡献尚不十分清楚.因此,本文以酸化紫色土为研究对象,探究不同改良剂下对酸化土壤团聚体组成和稳定性以及各粒级团聚体有机碳分布的影响,以期改善土壤物理结构、增强土壤抗侵蚀能力、提高土壤耕地质量和开展农田修复工作提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验地位于重庆市江津区慈云镇刁家(E106°13'03",N29°07'13"),海拔320 m,地处江津区中部.主要地形为低丘,属北半球亚热带季风湿润气候区,全年气候温和,年平均气温18.4℃,四季分明,雨量充沛,日照尚足.年平均日照时数1300 h以上,年降雨量930 mm,无霜期341 d,太阳总辐射量3375.5 MJ·m⁻².

1.2 供试材料

供试土壤为紫色土.初始土壤的基本理化性质

为:pH 4.35, ω [有机质(SOM)]12.89 g·kg⁻¹, ω [全氮(TN)]1.15 g·kg⁻¹, ω [全磷(TN)]0.88 g·kg⁻¹, ω [全钾(TK)]10.31 g·kg⁻¹, ω [碱解氮(AN)]171.93 mg·kg⁻¹, ω [有效磷(AP)]90.67 mg·kg⁻¹, ω [速效钾(AK)]485.4 mg·kg⁻¹.

供试花椒品种为九叶青花椒,树龄3 a左右,种植密度为2 m×3 m.供试改良剂中酒糟来源于江小白酒厂,经过高温限氧条件下燃烧后得到酒糟灰渣,基本性质为:pH 12.6,电导率(EC)4.81 mS·cm⁻¹, ω (TN)0.08%, ω (P₂O₅)0.8%.生物炭是由稻壳在400~500℃条件下热解得到,基本性质为:pH 7.28,EC 6.39 mS·cm⁻¹, ω (TN)0.5%, ω (P₂O₅)0.1%.有机肥购自史坦纳生物动力农业有限公司,主要由羊粪发酵而来,基本性质为:pH 8.09,EC 2.37 mS·cm⁻¹, ω (TN)0.57%, ω (P₂O₅)1.29%.石灰为生石灰,pH 12.59,EC 77.9 μ S·cm⁻¹.

1.3 试验设计

本试验开展时间是2021年5月至2022年6月,设置6个处理:①不施肥(CK)、②常规施肥(F)、③化肥配施石灰(SF)、④化肥配施有机肥(OM)、⑤化肥配施生物炭(BF)和⑥化肥配施酒糟灰渣(JZ),各处理选取树冠和树势相近的5株花椒树作为供试植株,每个处理均设置3个重复,随机区组排列.

整个试验期一共施肥4次,施肥时间根据当地施肥习惯确定,第1次下枝肥,于2021年5月10日施用,所有改良剂均一次性施入土壤;2021年5月20日施用化肥,沟施,保证各处理N-P₂O₅-K₂O养分分别占总养分50%-35%-35%.第2次秋基肥于2021年10月24日施用,沟施,各处理N-P₂O₅-K₂O养分分别占总养分15%-45%-15%.第3次促花肥于2022年1月12日施用,沟施,各处理N-P₂O₅-K₂O养分分别占总养分18%-10%-15%.第4次壮果肥于2022年3月7日施用,沟施,各处理N-P₂O₅-K₂O养分分别占总养分17%-10%-35%.试验施用的氮、磷、钾肥分别为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12%)和硫酸钾(K₂O 52%),除CK处理外,其余施肥处理遵循“等氮等磷”原则,具体施用量见表1.

1.4 测定方法

分别于2021年5月10日、2021年10月24日、2022年3月7日和2022年6月11日采集土样,每次采样后均测定土壤pH.第一次采集的土壤用于测定土壤的基本理化性质,第三次是在每0~20 cm耕层土壤上用环刀进行取样,用于测定土壤容重和含水率,第4次是试验后土样采集,每个处理3个重复,共15棵树,各个重复取坡上、坡中和坡下的花椒树左右两侧的土混合,3个重复均是如此.

表 1 各处理单株花椒施肥量¹⁾
Table 1 Fertilization amount per plant of *Zanthoxylum bungeanum* in each treatment

处理	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	石灰	有机肥	生物炭	酒糟灰渣
CK	—	—	—	—	—	—	—
F	0.3	0.18	0.24	—	—	—	—
SF	0.3	0.18	0.24	1	—	—	—
OM	0.26	0.09	0.24	—	7	—	—
BF	0.25	0.17	0.24	—	—	10	—
JZ	0.29	0.1	0.24	—	—	—	—

1)“—”表示没有该项肥料;数值单位为 kg·株⁻¹

1.4.1 土壤基本理化性质的测定

土壤容重和含水率采用环刀法;土壤 pH 采用 DMP-2 mV 酸度计测定,土水比为 1:2.5;SOM 采用重铬酸钾容量法(K₂Cr₂O₇-H₂SO₄法);TN 采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,蒸馏滴定法测定;AN 采用碱解扩散法;NO₃⁻-N 采用 KCl 溶液浸提,紫外分光光度法测定;NH₄⁺-N 采用 KCl 溶液浸提,靛酚蓝比色法测定;TP 采用 NaOH 熔融法前处理,钼蓝比色法测定;AP 采用 Olsen 法;TK 采用 NaOH 熔融法前处理,火焰光度法测定;AK 采用 NH₄Ac 溶液浸提,火焰光度法测定^[18]。

1.4.2 土壤团聚体分析

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%^[19];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 K₂Cr₂O₇-H₂SO₄ 外加热法测定各粒级团聚体有机碳。

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

本试验数据用 Excel 2019 进行整理,所有数据结果均用 3 次重复的平均值表示。用 IBM SPSS Statistics 26 进行统计分析和 Origin 2022b 软件进行图表绘制,用邓肯(Duncan)法进行不同处理平均数之间的多重比较($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同改良剂对酸性紫色土 pH、有机质、容重和含水率的影响

如图 1 所示,对比 3 次采集土样的 pH 发现,与 CK 处理相比,施肥处理均显著提高土壤 pH,且呈现上升后,10 月至次年 3 月 pH 显著降低,3~6 月 pH 小幅度下降,趋于稳定,其中 3 次 pH 均为 JZ 处理效果最显

1.5 数据分析

土壤水稳性团聚体稳定性用平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、>0.25 mm 团聚体含量($R_{0.25}$)、分形维数(D)和团聚体破坏率(PAD)指标进行评价^[20],计算公式如下:

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

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

$$R_{0.25} = 1 - \frac{M_{x < 0.25}}{M_T}$$
 (3)

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

$$PAD = \frac{DR_{0.25} - WR_{0.25}}{DR_{0.25}} \times 100\%$$
 (5)

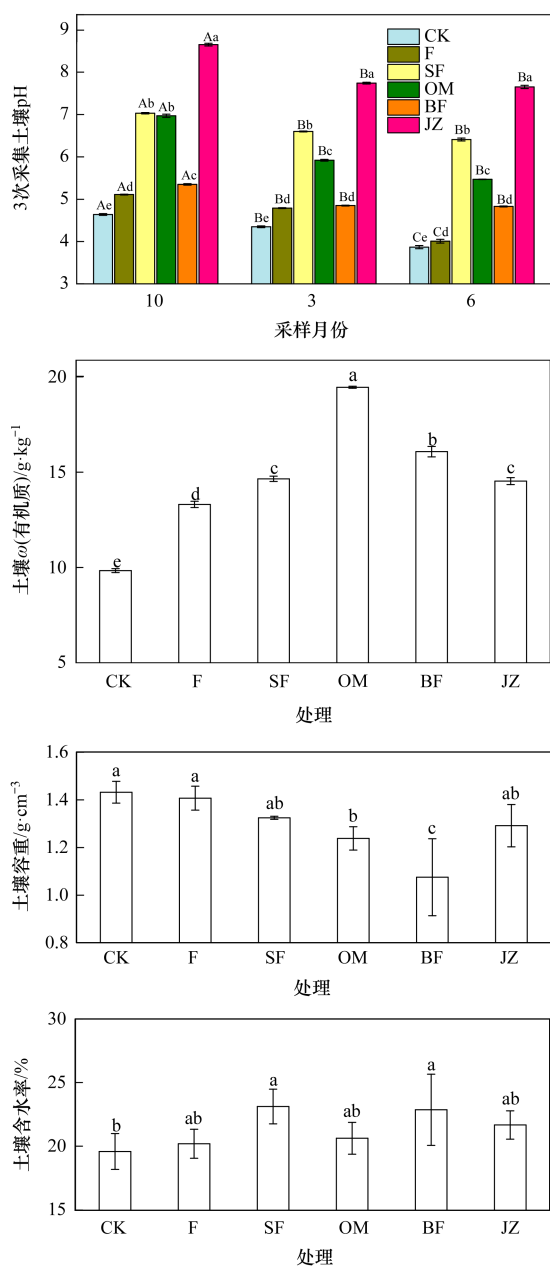
式中, n 为粒径分组的组数, $\bar{x}_i$ 为*i*粒级分组团聚体的平均直径; W_i 为第*i*级团聚体的质量; $M_{x < 0.25}$ 为<0.25 mm 团聚体的质量; M_T 为团聚体总质量, $x_{\max}$ 为最大团聚体平均直径, $DR_{0.25}$ 为>0.25 mm 机械性稳定性团聚体质量分数, $WR_{0.25}$ 为>0.25 mm 水稳性团聚体质量分数。

各粒级团聚体有机碳贡献率计算如公式(6):

著。F、SF、OM、BF 和 JZ 处理相较于 CK 处理均显著提高了土壤有机质含量 35.26%~97.66%,其中 OM 处理提高幅度最大。对不同处理下土壤容重进行测定发现,与 CK 相比,所有施肥处理均降低了土壤容重,BF 处理的降幅最为明显,相较于 CK 处理降低了 24.90%。与 CK 处理相比,SF 和 BF 处理分别显著提高土壤含水率 18.04% 和 16.76%,其余 3 个处理无显著差异。

2.2 不同改良剂对酸性紫色土团聚体粒径分布的影响

由图 2 可知,不同处理土壤水稳性团聚体粒径组成大致呈“V”型趋势,其中各处理团聚体占比最大的粒级均是<0.25 mm,约占 31.66%~49.32%,占比最

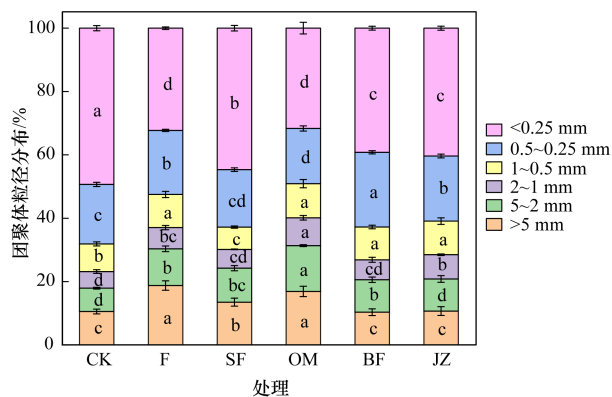


不同大写字母表示不同采样时期同一施肥处理之间差异显著,不同小写字母表示不同施肥处理之间差异显著($P < 0.05$); CK: 不施肥, F: 常规施肥, SF: 化肥+石灰, OM: 化肥+有机肥, BF: 化肥+生物炭, JZ: 化肥+酒糟灰渣, 下同

图1 不同改良剂对土壤pH、有机质、容重和含水率的影响
Fig. 1 Effects of different modifiers on soil pH, organic matter, bulk density, and water content

小的粒级均是2~1 mm, 约占5.24%~8.80%。其中CK、BF和JZ处理各粒级团聚体分布规律一致。与CK处理相比, F处理均显著提高了>5、5~2、2~1、1~0.5和0.5~0.25 mm粒级团聚体含量, SF处理显著提高了>5和5~2 mm粒级团聚体的含量, OM处理显著提高了>5、5~2、2~1和1~0.5 mm粒级团聚体的含量, BF处理显著提高了5~2、1~0.5和0.5~0.25 mm粒级团聚体含量, JZ处理显著提高了5~2、2~1、1~0.5和0.5~0.25 mm粒级团聚体含

量。可见, 施肥均提高了土壤大中团聚体含量, 减少了微团聚体的含量。



不同小写字母表示不同施肥处理之间差异显著($P < 0.05$), 下同
图2 不同处理土壤团聚体粒径分布特征

Fig. 2 Particle size distribution characteristics of soil aggregates under different treatments

2.3 不同改良剂对有机碳含量和酸性紫色土团聚体稳定性的影响

不同改良剂对土壤有机碳的影响如图3所示, 不同处理土壤ω(有机碳)范围为5.71~11.28 g·kg⁻¹, 其中OM处理土壤ω(有机碳)最高, 为11.28 g·kg⁻¹, 显著高于其他处理; CK处理土壤ω(有机碳)最低, 为5.71 g·kg⁻¹, F、SF、OM、BF和JZ处理的土壤有机碳含量分别是CK处理的1.35、1.49、1.98、1.63和1.48倍, 其中SF和JZ处理之间没有显著差异。总的来说, 施肥均能显著提高土壤有机碳含量。

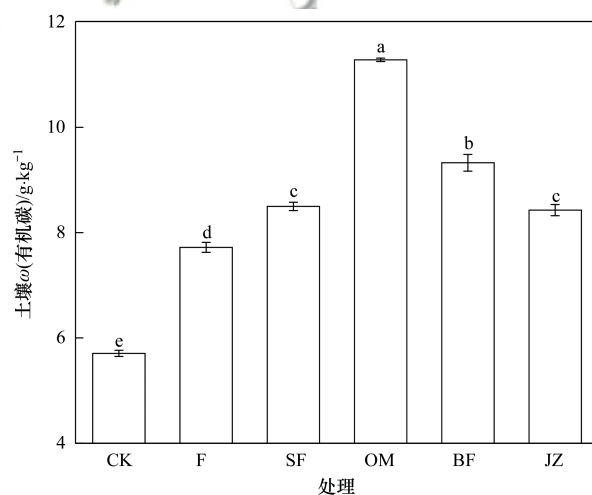


图3 不同改良剂对土壤有机碳含量的影响

Fig. 3 Effects of different modifiers on soil organic carbon

表2为不同处理对土壤团聚体稳定性的影响, 从中可知, 与CK相比, 各处理显著提高了土壤几何平均直径(GMD)23.08%~82.05%和平均质量直径(MWD)10.26%~57.26%, 其中OM处理增幅最显著; 各处理显著增加土壤团聚体含量($R_{0.25}$)9.21%~33.64%, 其中F处理增幅最显著; 各施肥处理显著降

低了分形维数(D) 1.41% ~ 4.59% 和团聚体破坏率 (PAD) 9.39% ~ 15.33%, 其中 F 处理降幅最显著. 整体而言, 施肥处理提高了土壤 GMD、MWD 和 $R_{0.25}$ 的

值, 降低了 D 和 PAD 的值, 即相较于不施肥处理, 施肥处理增加了土壤团聚体稳定性, 其中化肥配施有机肥处理的效果最佳.

表 2 不同处理对土壤团聚体稳定性的影响¹⁾
Table 2 Effect of different treatments on soil aggregate stability

处理	GMD/mm	MWD/mm	$R_{0.25}/\%$	D	PAD
CK	0.39±0.01c	1.17±0.04d	50.68±0.83d	2.83±0.00a	29.94±1.14a
F	0.68±0.01a	1.83±0.07a	67.73±0.40a	2.71±0.00c	15.33±0.50d
SF	0.48±0.01b	1.45±0.05b	55.35±0.89c	2.79±0.01b	26.21±1.18b
OM	0.71±0.05a	1.84±0.10a	68.34±1.84a	2.70±0.02c	16.73±2.25d
BF	0.48±0.00b	1.29±0.02c	60.82±0.60b	2.79±0.00b	27.13±0.72b
JZ	0.49±0.01b	1.32±0.05c	58.65±0.64b	2.78±0.00b	20.59±0.86c

1) 数据为 3 次重复的平均值±标准误; 组间不同小写字母表示不同处理下土壤养分差异显著 ($P < 0.05$), 下同

2.4 不同施肥处理对酸性紫色土团聚体有机碳含量及有机碳贡献率的影响

不同处理对土壤团聚体有机碳分布的影响如表 3 所示, 从中可知, 除 CK 处理外, 随着团聚体粒径增大, 各处理团聚体有机碳分布大致呈倒“V”型趋势, 其中 F、SF、OM 和 BF 处理均是 2 ~ 1 mm 粒级团聚体有机碳含量最高, 而 JZ 处理则是 1 ~ 0.5 mm 粒级团聚体有机碳含量最高. 与 CK 处理相比, F 处理显著增加了 5 ~ 2、2 ~ 1、1 ~ 0.5、0.5 ~ 0.25 和 < 0.25 mm 粒级团聚体有机碳含量, SF、OM、BF 和 JZ 处理

则增加了各粒级团聚体有机碳含量, SF 处理增加了 7.41% ~ 118.79%, OM 处理增加了 31.71% ~ 209.67%, BF 处理增加了 21.95% ~ 191.28%, JZ 处理增加了 7.51% ~ 170.84%. 与 F 处理相比, OM 和 BF 处理显著增加了各粒级团聚体有机碳含量, JZ 处理增加了除 2 ~ 1 mm 粒级团聚体外其余粒级团聚体的有机碳含量. 可见, 配施有机肥及生物炭和酒糟灰渣还田相较于单施化肥对提高土壤各粒级团聚体有机碳含量的效果更好, 其中以化肥配施有机肥处理效果最好.

表 3 不同处理各粒级团聚体有机碳含量
Table 3 Organic carbon content of aggregates of different particle sizes under different treatments

处理	土壤 ω (有机碳) / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$					
	> 5 mm	5 ~ 2 mm	2 ~ 1 mm	1 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 0.25 mm	< 0.25 mm
CK	6.08±0.29c	10.79±0.80b	9.41±0.38d	6.31±1.18e	3.30±0.44d	5.33±0.29d
F	5.46±1.29c	10.93±0.23b	18.33±0.33b	12.35±0.31d	5.04±0.51c	5.96±0.12c
SF	7.79±0.33b	11.59±1.09b	18.64±0.01b	11.73±0.32d	7.22±0.30a	6.70±0.22ab
OM	10.20±0.29a	14.93±0.05a	20.50±0.18a	19.54±0.86a	7.74±0.27a	7.02±0.48a
BF	7.93±0.29b	14.18±0.38a	20.08±0.30a	18.38±0.40b	5.93±0.28b	6.50±0.05b
JZ	7.99±0.14b	11.60±0.12b	12.66±0.86c	17.09±0.90c	5.67±0.59b	6.04±0.12c

如图 4 所示, 不同处理土壤有机碳主要分布在 > 0.25 mm 粒级团聚体中, 贡献率为 54.40% ~ 80.38%. 与 CK 处理相比, 各处理均提高了大团聚体 (> 2 mm) 中有机碳贡献率, 增幅为 19.34% ~ 47.76%, 其中 OM 处理效果最为显著. 各处理土壤团聚体有机碳最低贡献率分布的粒级则无明显规律, CK 处理团聚体有机碳贡献率以 2 ~ 1 mm 粒级最低, F、BF 和 JZ 处理团聚体有机碳贡献率以 > 5 mm 粒级最低, SF 处理团聚体有机碳贡献率以 1 ~ 0.5 mm 粒级最低, OM 处理团聚体有机碳贡献率以 0.5 ~ 0.25 mm 粒级最低. 与 CK 处理相比, 施肥处理提高了 5 ~ 2、2 ~ 1 和 0.5 ~ 0.25 mm 粒级团聚体的有机碳贡献

率, 其中以 2 ~ 1 mm 粒级效果最为显著.

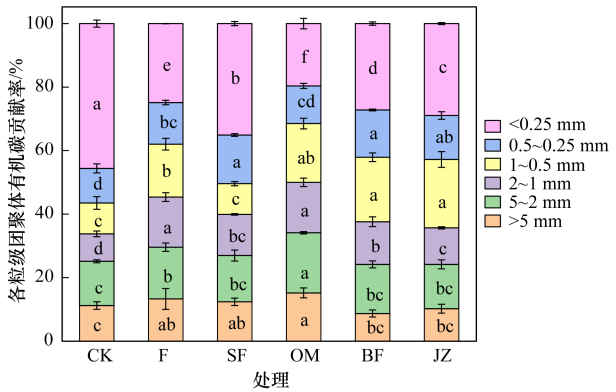


图 4 不同处理各粒级团聚体有机碳贡献率

Fig. 4 Effects of different treatments on soil organic carbon

3 讨论

3.1 不同改良剂对土壤 pH、有机质、容重和含水量的影响

本研究中生物炭施用量较大,而石灰施用量较小,但石灰处理对土壤 pH 的提升效果要远远好于生物炭处理。一方面,本试验施用生石灰的主要成分为 CaO,能直接中和土壤中的 H^+ 且生石灰溶于土壤溶液后会大幅增加土壤中的钙离子,钙离子置换土壤胶体吸附的氢离子和铝离子而降低 pH。另一方面,本研究采用的是稻壳生物炭,粒径较大,导致生物炭中的碱性物质难以释放^[21]。同时酒糟灰渣在改良土壤酸化方面的效果最好,这是因为酒糟灰渣自身 pH 值为 12.63,还田后灰渣中的碱性物质直接中和土壤中的酸,同时酒糟灰渣含有丰富的钙、镁和硫等矿质元素,这些阳离子能与铝离子竞争交换位点,降低土壤中的潜性酸,起到减轻铝毒的作用^[22]。本研究发现,相较于 CK 处理,施肥处理在一定程度上均降低了土壤容重,施用改良剂处理的土壤容重低于单施化肥处理和不施肥处理,与李玮等^[23]和周橡棋^[24]研究的结果一致。其中 BF 处理降幅最大,说明生物炭降低土壤容重的效果最好,这是因为生物炭相较于其他改良剂具有生物化学稳定性的特点,施入土壤中发挥作用时间长,且其本身及腐解后形成的腐殖质疏松多孔,有利于增加土壤孔隙度^[25]。在本研究中,施用石灰和生物炭对土壤含水率的效果较好,这是因为石灰自身呈强碱性,还田后改善土壤酸化,减弱土壤的板结作用,增强土壤的持水力;在土壤中施用具有多孔结构、亲水性的生物炭后,增加了土壤水分累积渗入量和渗入速率,提高土壤的保水持水能力^[26]。

3.2 不同改良剂对土壤团聚体组成及其稳定性的影响

土壤团聚体的粒径分布和稳定性是衡量土壤质量的重要指标。本研究结果表明单施化肥、化肥配施有机肥、化肥配施生物炭和化肥配施酒糟灰渣可以提高土壤大中团聚体含量,减少微团聚体的含量,这与刘新梅^[27]研究的结果相似,他们研究发现在复垦土壤中施用腐殖酸和泥炭,会增加土壤中大中团聚体含量,而微团聚体的含量会相应减少,这可能是因为施用化肥会增加土壤中的胶结物质,有利于微团聚体胶结形成大中团聚体,同时微团聚体也会被有机物质胶结成大团聚体,从而导致土壤中大中团聚体的增加和微团聚体的减少^[28]。生物炭和酒糟灰渣拥有较大的比表面积,且富含有机质,具有很强的吸附整合能力,有利于团聚体的形成。本研究结果还

发现,化肥配施石灰也能促使大中团聚体的增加和微团聚体的减少,这与吴海勇等^[29]关于土壤改良剂(腐殖酸钾、熟石灰)的施用能增加大水稳性团聚体数量的研究结果一致,这可能是因为施肥能为土壤微生物提供丰富的养分,这与施用石灰能够改良酸化土壤 pH 和土壤微生物环境形成了积极的正面效应^[22]。

本试验结果发现施肥均能提高土壤团聚体稳定性,其中以化肥配施有机肥的效果最佳,这与吴宪等^[30]研究的结果一致,他们研究发现化肥配施秸秆和有机肥可以提高土壤团聚体稳定性。这是因为有机肥与化肥配施能够为土壤提供丰富的外源有机质,直接向土壤中补充大量的活性有机物质,这些有机物质在微生物的分解下为团聚体的形成提供了所需的有机无机胶结物质,同时还会激发土壤生物活性,从而使小粒级团聚体胶结形成大团聚体,提高了土壤的团聚程度,进而提高大团聚体含量,并增强其稳定性^[31]。

土壤 GMD、MWD 和 $R_{0.25}$ 是土壤团聚体稳定性的关键指标,它们的值越高,土壤对侵蚀和耕作抵抗力越好^[32]。在本研究中,与 CK 处理相比,各施肥处理均显著提高 GMD、MWD 和 $R_{0.25}$,显著降低 D 和 PAD。其中有机肥配施化肥处理在提高团聚体稳定性方面效果最为显著,这是因为随着有机质的添加,促进了土壤中大团聚体的形成,这也反过来增强了土壤大团聚体对有机碳的物理保护作用^[33]。同时大团聚体的形成与土壤微生物在分解过程中产生的有机酸和多糖有关,而有机肥施入后会促进微生物活动,且其本身含有大量的有机酸,进而促进了土壤大团聚体的形成^[34-36]。

3.3 不同改良剂对土壤有机碳的影响

本研究结果表明, SF、OM、BF 和 JZ 处理较 F 处理均能显著提高土壤有机碳含量, OM 处理的效果最好,说明化肥配施有机、无机物料均能提高土壤有机碳含量,以有机肥处理的效果最好,其次是生物炭处理,施用有机肥和生物炭直接增加了土壤的碳投入,此外,有机肥相较于其他处理显著提高了土壤中大团聚体含量, Feng 等^[37]研究表明大团聚体对有机碳形成物理保护降低土壤微生物对碳的分解。生物炭通过促进腐殖质及碳水化合物等有机大分子的形成提高有机碳含量^[38], 另外有研究表明,生物炭的输入可有效降低紫色土因土壤侵蚀流失的有机碳含量^[39]。在本研究中,各施肥处理均能提高各粒级团聚体有机碳含量,大致规律是:随着团聚体粒级的减小,团聚体有机碳含量呈现倒“V”趋势,即先增加后减小。比较同一施肥处理下不同粒级的团聚体含量

发现,F、SF、OM和BF处理均是2~1 mm粒级团聚体有机碳含量最高,而JZ处理则是1~0.5 mm粒级,这是因为酒糟灰渣质轻、粒径小,且自身碳含量较高,还田后多与土壤小颗粒结合^[40]。除OM处理外,其余处理0.5~0.25 mm粒级团聚体有机碳含量最低,这可能与不同粒级团聚体有机碳来源不同及改良剂还田后激发的土壤效应有关^[41]。

本研究表明各处理有机碳主要集中在>0.25 mm粒级团聚体中,贡献率为54.40%~80.38%。通过分析不同处理各粒级团聚体有机碳贡献率发现,各处理土壤团聚体有机碳最低贡献率的分布粒级无明显规律,这是因为不同有机、无机物料在土壤中的分解速率和残留量存在差异,且不同施肥下作物生物量、根系残茬的影响不同而使得碳输入水平不同,导致不同施肥措施下各粒级团聚体的有机碳贡献率不同^[42,43]。分析各粒级团聚体有机碳含量和贡献率发现,各处理<0.25 mm粒级的团聚体有机碳含量最低,但是该粒级团聚体有机碳贡献率最高,这与冯秋苹等^[44]研究结果不同,他们在以碳酸盐黑钙土为试验土壤的研究中发现,不同处理以>2 mm粒级的团聚体有机碳贡献率最高。一方面是因为该粒级团聚体有机碳的贡献率是由团聚体含量和该团聚体有机碳含量共同决定。另一方面,成土母质、试验区气候和耕作措施等的不同也会造成团聚体有机碳贡献率的差异^[45]。

4 结论

(1)施肥处理均显著提高土壤pH($P<0.05$),以化肥配施酒糟灰渣效果最显著;施肥均显著提高了土壤有机质含量($P<0.05$),以化肥配施有机肥效果最好;化肥配施生物炭和有机肥能显著降低土壤容重($P<0.05$);化肥配施石灰和生物炭能显著提高土壤含水率($P<0.05$)。

(2)施肥处理均能促进土壤团聚体的团聚化和稳定性,具体表现为各施肥处理均显著提高了土壤大团聚体(>0.25 mm)的含量,显著提高GMD、MWD和 $R_{0.25}$ 值,显著降低D和PAD值($P<0.05$),以OM处理效果最显著。

(3)随着团聚体粒径增大,各施肥处理团聚体有机碳分布大致呈倒“V”型趋势,不同处理土壤有机碳主要分布在大团聚体(>0.25 mm)中,贡献率为54.40%~80.38%。

(4)综合来看,化肥配施有机肥能提高酸性紫色土团聚体稳定性、增加有机碳含量和改善土壤结构,是修复酸化紫色土和提高耕地质量的有效途径。

参考文献:

- [1] 罗晓虹,王子芳,陆畅,等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3816-3824.
Luo X H, Wang Z F, Lu C, *et al.* Effects of land use type on the content and stability of organic carbon in soil aggregates [J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3816-3824.
- [2] Yin Y, Liang C H, Pei Z J. Effect of greenhouse soil management on soil aggregation and organic matter in northeast China [J]. CATENA, 2015, 133: 412-419.
- [3] Das B, Chakraborty D, Singh V K, *et al.* Effect of integrated nutrient management practice on soil aggregate properties, its stability and aggregate-associated carbon content in an intensive rice-wheat system [J]. Soil and Tillage Research, 2014, 136: 9-18.
- [4] Duan Q N, Lee J, Liu Y S, *et al.* Distribution of heavy metal pollution in surface soil samples in China: A graphical review [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2016, 97(3): 303-309.
- [5] Balesdent J, Chenu C, Balabane M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage [J]. Soil and Tillage Research, 2000, 53(3-4): 215-230.
- [6] Six J, Elliott E T, Paustian K, *et al.* Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(5): 1367-1377.
- [7] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141-163.
- [8] Six J, Conant R T, Paul E A, *et al.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils [J]. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155-176.
- [9] Sollins P, Homann P, Caldwell B A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls [J]. Geoderma, 1996, 74(1-2): 65-105.
- [10] 张辉,宋琳,陈晓琳,等. 土壤退化的原因与修复作用研究[J]. 海洋科学, 2020, 44(8): 147-161.
Zhang H, Song L, Chen X L, *et al.* Study on the causes and remediation of soil degradation [J]. Marine Science, 2020, 44(8): 147-161.
- [11] 冷暖. 南亚热带赤红壤团聚体稳定性及其降雨溅蚀响应[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
Leng N. Aggregate stability of lateritic red soil and its response to rain fall splash erosion south subtropical zone [D]. Nanning: Guangxi University, 2022.
- [12] 苏有健. 皖南茶园土壤酸化特征及其调控机制的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
Su Y J. Study on soil acidification characteristics and regulation mechanism of tea gardens in southern Anhui province [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [13] Aye N S, Sale P W G, Tang C X. The impact of long-term liming on soil organic carbon and aggregate stability in low-input acid soils [J]. Biology and Fertility of Soils, 2016, 52(5): 697-709.
- [14] Chan K Y, Conyers M K, Scott B J. Improved structural stability of an acidic hardsetting soil attributable to lime application [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2007, 38(15-16): 2163-2175.
- [15] Alagöz Z, Yilmaz E. Effects of different sources of organic matter on soil aggregate formation and stability: A laboratory study on a Lithic Rhodoxeralf from Turkey [J]. Soil and Tillage Research,

- 2009, **103**(2): 419-424.
- [16] 代文才, 钱盛, 高明, 等. 施用生物质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.
- [17] 邓华, 高明, 龙翼, 等. 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[J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5481-5490.
- Deng H, Gao M, Long Y, *et al.* Effects of Biochar and straw return on soil aggregate and organic carbon on purple soil dry slope land[J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5481-5490.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [19] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, **58**(1): 123-130.
- [20] 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.
- [21] 刘洋. 田间试验下石灰与生物质炭施用对雷竹林酸化土壤的改良效应研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021.
- Liu Y. The amelioration effects of lime and Biochar on an acidified bamboo (*Phyllostachys praecox*) plantation soil: a field study[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2021.
- [22] Bolan N, Sarmah A K, Bordoloi S, *et al.* Soil acidification and the liming potential of biochar[J]. Environmental Pollution, 2023, **317**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.120632.
- [23] 李玮, 孔令聪, 张存岭, 等. 长期不同施肥模式下砂姜黑土的固碳效应分析[J]. 土壤学报, 2015, **52**(4): 943-949.
- Li W, Kong L C, Zhang C L, *et al.* Effect of long-term fertilization on carbon sequestration in lime concretion black soil relative to fertilization pattern[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, **52**(4): 943-949.
- [24] 周稼棋. 不同养分管理措施对华中地区4种典型轮作制度的土壤物理性质影响初探[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- Zhou X Q. Preliminary study on the effects of different nutrient management measures on soil physical properties of four typical crop rotation systems in central China[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
- [25] 张雨萌, 郭艳杰, 张丽娟, 等. 生物炭配合深松对土壤团聚体及有机碳的影响[J]. 水土保持通报, 2022, **42**(5): 368-375, 385.
- Zhang Y M, Guo Y J, Zhang L J, *et al.* Effects of Biochar combined with subsoiling on soil aggregates and organic carbon[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, **42**(5): 368-375, 385.
- [26] 魏永霞, 王鹤, 刘慧, 等. 生物炭对黑土区土壤水分及其入渗性能的影响[J]. 农业机械学报, 2019, **50**(9): 290-299.
- Wei Y X, Wang H, Liu H, *et al.* Effect of Biochar on Soil moisture and its infiltration performance in black soil AREA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, **50**(9): 290-299.
- [27] 刘新梅. 改良剂对复垦土壤团聚体分布及有机碳组成和含量的影响[D]. 晋中: 山西农业大学, 2021.
- Liu X M. Effects of amendments on the distribution of soil aggregates and organic carbon component and content in reclaimed soil[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2021.
- [28] 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.
- [29] 吴海勇, 李明德, 刘琼峰, 等. 不同土壤改良剂在红壤旱地上的应用效果[J]. 湖南农业科学, 2010, (11): 45-47, 50.
- Wu H Y, Li M D, Liu Q F, *et al.* Effects of applying different soil amendments to red soil dry-land[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2010, (11): 45-47, 50.
- [30] 吴宪, 张婷, 王蕊, 等. 化肥减量配施有机肥和秸秆对华北潮土团聚体分布及稳定性的影响[J]. 生态环境学报, 2020, **29**(5): 933-941.
- Wu X, Zhang T, Wang R, *et al.* Effects of chemical fertilizer reduction combined with application of organic fertilizer and straw on fluvo-aquic soil aggregate distribution and stability in North China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, **29**(5): 933-941.
- [31] Zhang J J, Wei Y X, Liu J Z, *et al.* Effects of maize straw and its biochar application on organic and humic carbon in water-stable aggregates of a mollisol in Northeast China: A five-year field experiment[J]. Soil and Tillage Research, 2019, **190**: 1-9.
- [32] Zhang Q Q, Song Y F, Wu Z, *et al.* Effects of six-year biochar amendment on soil aggregation, crop growth, and nitrogen and phosphorus use efficiencies in a rice-wheat rotation[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **242**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118435.
- [33] Du Z L, Wu W L, Zhang Q D, *et al.* Long-term manure amendments enhance soil aggregation and carbon saturation of stable pools in north China plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, **13**(10): 2276-2285.
- [34] Li T T, Zhang Y L, Bei S K, *et al.* Contrasting impacts of manure and inorganic fertilizer applications for nine years on soil organic carbon and its labile fractions in bulk soil and soil aggregates[J]. CATENA, 2020, **194**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104739.
- [35] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review[J]. Geoderma, 2005, **124**(1-2): 3-22.
- [36] Yu H Y, Ding W X, Luo J F, *et al.* Effects of long-term compost and fertilizer application on stability of aggregate-associated organic carbon in an intensively cultivated sandy loam soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, **48**(3): 325-336.
- [37] Feng X, Xia X, Chen S T, *et al.* Amendment of crop residue in different forms shifted micro-pore system structure and potential functionality of macroaggregates while changed their mass proportion and carbon storage of paddy topsoil[J]. Geoderma, 2022, **409**, doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115643.
- [38] 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.
- [39] 毛霞丽, 陆扣萍, 何丽芝, 等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 土壤学报, 2015, **52**(4): 828-838.
- Mao X L, Lu K P, He L Z, *et al.* Effect of long-term fertilizer application on distribution of aggregates and aggregate-associated organic carbon in paddy soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, **52**(4): 828-838.
- [40] 张健乐, 曾小英, 史东梅, 等. 生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性

- 耕层土壤有机碳的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 2209-2218.
- Zhang J L, Zeng X Y, Shi D M, *et al.* Effects of Biochar on soil organic carbon of eroded cultivated layer of slope farmland in Purple Hilly Area[J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 2209-2218.
- [41] 高鸣慧, 李娜, 彭靖, 等. 秸秆和生物炭还田对棕壤团聚体分布及有机碳含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, **26**(11): 1978-1986.
- Gao M H, Li N, Peng J, *et al.* Effects of straw and biochar returning on soil aggregates distribution and organic carbon content in brown soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, **26**(11): 1978-1986.
- [42] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J]. 土壤学报, 2006, **45**(3): 422-429.
- Li H X, Yuan Y H, Huang Q R, *et al.* Effects of fertilization on soil organic carbon distribution in various aggregates of Red Paddy Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, **45**(3): 422-429.
- [43] 徐阳春, 沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中 C、N、P 含量与分配的影响[J]. 中国农业科学, 2000, **33**(5): 65-71.
- Xu Y C, Shen Q R. Influence of long-term application of manure on the contents and distribution of Organic C, Total N and P in soil particle-sizes [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000, **33**(5): 65-71.
- [44] 冯秋苹, 刘玉涛, 郭勇智, 等. 不同秸秆还田方式对土壤团聚体稳定性及有机碳含量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2023, **45**(5): 564-571.
- Feng Q P, Liu Y T, Guo Y Z, *et al.* Effects of different straw returning to fields methods on the stability of soil aggregates and organic carbon[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2023, **45**(5): 564-571.
- [45] 朱锐恒, 段良霞, 李元辰, 等. 土壤团聚体有机碳研究进展[J]. 中国农学通报, 2021, **37**(21): 86-90.
- Zhu K H, Duan L X, Li Y C, *et al.* Research progress of organic carbon in soil aggregates [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, **37**(21): 86-90.

环境科学

CONTENTS

Impacts of Anthropogenic Emission Reduction on Urban Atmospheric Oxidizing Capacity During the COVID-19 Lockdown	ZHU Jian-lan, QIN Mo-mei, ZHU Yan-hong, <i>et al.</i> (617)
Transport and Potential Sources Regions of Double High Pollution in Nanjing by Different Synoptic Situations	QIN Yang, HU Jian-lin, KONG Hai-jiang (626)
Differences of Three Methods in Determining Ozone Sensitivity in Nanjing	CHEN Gan-yu, LI Xun, LI Lin, <i>et al.</i> (635)
Characteristics of Ozone Concentration in Shanghai and Its Associated Atmospheric Circulation Background During Summer Half-years from 2006 to 2021	ZHENG Qing-feng, LIANG Ping, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (645)
Distribution Characteristics of Near Surface Ozone Volume Fraction in Shanxi Province Based on Atmospheric Composition Observation Network	LI Ying, WANG Shu-min, PEI Kun-ning, <i>et al.</i> (655)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in Yining City	WANG Wen-ting, GU Chao, LI Li-ming, <i>et al.</i> (668)
Characteristics, Sources, and Ozone-sensitive Species of VOCs in Four Seasons in Yuncheng	YIN Shi-jie, LIU Xin-gang, LIU Ya-fei, <i>et al.</i> (678)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Activity Analysis of Atmospheric VOCs During Winter and Summer Pollution in Zhengzhou	LAI Meng-jie, ZHANG Dong, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (689)
Pollution Characteristics, Sources, and Secondary Generation of Organic Acids in PM _{2.5} in Zhengzhou	LI Zi-han, DONG Zhe, SHANG Lu-qi, <i>et al.</i> (700)
Nonlinear Variations in PM _{2.5} Concentration in the Three Major Urban Agglomerations in China	WU Shu-qi, GU Yang-yang, ZHANG Tian-yue, <i>et al.</i> (709)
Medium and Long-term Carbon Emission Projections and Emission Reduction Potential Analysis of the Lingang Special Area Based on the LEAP Model	WU Qiong, MA Hao, REN Hong-bo, <i>et al.</i> (721)
Dynamic Analysis on Carbon Metabolism of the Northern Region of China Under the Background of Carbon Emission Trading Policy	ZHENG Hong-mei, SHEN Fang, XU Guang-yao, <i>et al.</i> (732)
Carbon Reduction Analysis of Life Cycle Prediction Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Considering Regional Features and Vehicle Type Differences	MA Jing, CAI Xu, ZHANG Chun-mei, <i>et al.</i> (744)
Nitrate Pollution Characteristics and Its Quantitative Source Identification of Major River Systems in China	WEI Ying-huai, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (755)
Effects of Land Use Structure and Spatial Pattern at Different Temporal and Spatial Scales on Water Quality in Suzhou Creek	TAN Juan, XIONG Li-jun, WANG Qing, <i>et al.</i> (768)
Spatial-temporal Variation in Water Quality of Rain-source Rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and Its Response to Rainfall	WEI Bi-ying, CHENG Jian-mei, SU Xiao-yu, <i>et al.</i> (780)
Chemical Characteristics of Shallow Groundwater in the Yellow River Diversion Area of Henan Province and Identification of Main Control Pollution Sources	WANG Shuai, REN Yu, GUO Hong, <i>et al.</i> (792)
Chemical Characteristics and Genetic Analysis of Karst Groundwater in the Beijing Xishan Area	GUO Gao-xuan, DAI Yin-dong, XU Liang, <i>et al.</i> (802)
Hydrochemical Characteristics and Its Origin of Surface Water and Groundwater in Dianbu River Basin	ZHENG Tao, QIN Xian-yan, WU Jian-xiong (813)
Hydrochemical Characteristics and Genesis Mechanism of Groundwater in the Dry Period in the Zhangjiakou Area	JIN Ai-fang, YIN Xiu-lan, LI Chang-qing, <i>et al.</i> (826)
Distribution of Typical Resistant Bacteria and Resistance Genes in Source Water of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River	MIN Wei, GAO Ming-chang, SUN Shao-fang, <i>et al.</i> (837)
Contamination Characteristics, Detection Methods, and Control Methods of Antibiotic Resistance in Pharmaceutical Wastewater	PENG An-ping, GAO Hu, ZHANG Xin-bo (844)
Effect of Water Components on Aggregation and Sedimentation of Polystyrene Nano-plastics	TANG Duan-yang, ZHENG Wen-li, CHEN Guan-tong-yi, <i>et al.</i> (854)
Lead Removal from Water by Calcium-containing Biochar with Saturated Phosphate	LIU Tian, LÜ Si-lu, DU Xing-guo, <i>et al.</i> (862)
Preparation of Chitosan-modified Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺ in Aqueous Solution	JIANG Ling, AN Jing-yue, YUE Xiao-qiong, <i>et al.</i> (873)
Efficacy and Mechanism of Tetracycline Adsorption by Boron-doped Mesoporous Carbon	ZOU Zhen, XU Lu, QIAO Wei, <i>et al.</i> (885)
Adsorption Properties of Magnetic Phosphorous Camellia Oleifera Shells Biochar to Sulfamethoxazole in Water	HAN Shuai-peng, TANG Li-wen, LIU Qin, <i>et al.</i> (898)
High Resolution Emission Inventory of Greenhouse Gas and Its Characteristics in Guangdong, China	LU Qing, TANG Ming-shuang, LIAO Tong, <i>et al.</i> (909)
Ecosystem CO ₂ Exchange and Its Environmental Regulation of a Restored Wetland in the Liaohe River Estuary	LIU Si-qi, CHEN Hong, XING Qing-hui, <i>et al.</i> (920)
Effects of Biochar Application Two Years Later on N ₂ O and CH ₄ Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region of China	HU Yu-jie, TANG Rui-jie, HU Tian-yi, <i>et al.</i> (929)
Research and Application Progress of Biochar in Amelioration of Saline-Alkali Soil	WEI Ying, JIAO Le, ZHANG Peng, <i>et al.</i> (940)
Effect of No-tillage on Soil Aggregates in Farmland: A Meta Analysis	XU Yi-ping, RAO Yue-yue, MENG Yan, <i>et al.</i> (952)
Spatio-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation of Carbon Storage in Karst Regions of Central Guizhou Province: Taking Puding County as An Example	LI Yue, LUO Hong-fen (961)
Effects of Different Modifiers on Aggregates and Organic Carbon in Acidic Purple Soil	LI Yue, XU Man, XIE Yong-hong, <i>et al.</i> (974)
Effect of Ca Modified Biochar on the Chemical Speciation of Soil Phosphorus and Its Stabilization Mechanism	ZHANG Chao, ZHAI Fu-jie, SHAN Bao-qing (983)
Plant Diversity Changes and Its Driving Factors of Abandoned Land at Different Restoration Stages in the Middle of the Qinling Mountains	YAN Cheng-long, XUE Yue, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (992)
Contamination Characteristics and Ecological Risk of Antibiotics in Contaminated Sites of Typical Pharmaceutical Factories in China	YANG Jiong-bin, HUANG Zheng, ZHAO Jian-liang, <i>et al.</i> (1004)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Guangzhou	ZOU Zi-hang, CHEN Lian, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i> (1015)
Quantifying the Contribution of Soil Heavy Metals to Ecological and Health Risk Sources	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (1026)
Potential Ecological Risk Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils around Typical Factories in Hunan Province Based on Monte-Carlo Simulation	LUO Hao-jie, PAN Jun, CHEN Xiao-xia, <i>et al.</i> (1038)
Health Risk Assessment for an Arsenic-contaminated Site Based on Monte Carlo Simulation and Parameters Optimization	YUAN Bei, LIU Hu-peng, DU Ping, <i>et al.</i> (1049)
Pollution Source Apportionment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around a Red Mud Yard Based on APCS-MLR and PMF Models	SHEN Zhi-jie, LI Jie-qin, LI Cai-xia, <i>et al.</i> (1058)
Characteristics and Mechanism of Cd Release and Transport in Soil Contaminated with PE-Cd	WANG Di, XU Shao-hui, SHAO Ming-yan, <i>et al.</i> (1069)
Characterization of Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethylenes by Anaerobic Consortium	LI Wei, LIU Gui-ping, LIU Jun, <i>et al.</i> (1080)
Analysis of Heavy Metal Pollution Evaluation and Correlation of Farmland Soil and Vegetables in Zhaotong City	ZHANG Hao, DONG Chun-yu, YANG Hai-chan, <i>et al.</i> (1090)
Safe Utilization Effect of Passivator on Mild to Moderate Cadmium Contaminated Farmland	WANG Xiao-jing, ZHANG Dong-ming, CAO Yang, <i>et al.</i> (1098)
Simultaneous Immobilization of Cadmium and Arsenic in Paddy Soils with Novel Fe-Mn Combined Graphene Oxide	YUAN Jing, WU Ji-zi, LIAN Bin, <i>et al.</i> (1107)
Effects of the Application of Irrigation Water Containing Zn at the Key Growth Period on the Uptake and Transport of Cd in Rice	ZHOU Xia, HU Yu-dan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (1118)
Effects of Exogenous Zinc on Growth and Root Architecture Classification of Maize Seedlings Under Cadmium Stress	ZHANG Hui-hong, WEI Chang, LIU Hai-tao, <i>et al.</i> (1128)
Mitigative Effect of Rare Earth Element Cerium on the Growth of Zinc-stressed Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) Seedlings	ZHANG Jing-jing, XU Zheng-yang, JIAO Qiu-juan, <i>et al.</i> (1141)
Two-stage Inhibition Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 Application on Cadmium Uptake and Transport in Wheat	GUO Jia-jia, WANG Chang-rong, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (1150)
Effects of Combined Stress of High Density Polyethylene Microplastics and Chlorimuron-ethyl on Soybean Growth and Rhizosphere Bacterial Community	HU Xiao-yue, HUA Zi-wei, YAO Lun-guang, <i>et al.</i> (1161)
Human Accumulation and Toxic Effects of Microplastics: A Critical Review	BAO Ya-bo, WANG Cheng-chen, PENG Wu-guang, <i>et al.</i> (1173)
Overview of the Application of Machine Learning for Identification and Environmental Risk Assessment of Microplastics	BAI Run-hao, FAN Rui-qi, LIU Qi, <i>et al.</i> (1185)
Research Process on the Combined Pollution of Microplastics and Typical Pollutants in Agricultural Soils	HOU Yu-qing, LI Bing, WANG Jin-hua, <i>et al.</i> (1196)
Research Progress in Electrochemical Detection and Removal of Micro/Nano Plastics in Water	ZHENG Wei-kang, LIU Zhen-zhong, XIANG Xiao-fang (1210)
Factors Influencing Willingness of Farmers to Pay for Agricultural Non-point Source Pollution Control Based on Distributed Cognitive Theory	GUO Chen-hao, LI Lin-fei, XIA Xian-li (1222)