

4年单季生物炭与秸秆还田对潮土 土壤团聚体及有机碳影响

马新雨, 刘子剑, 孙树臣*, 田晓飞, 翟胜, 李婷婷
(聊城大学地理与环境学院, 山东 聊城 252000)

摘要:【目的】阐明连续单季秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及有机碳的影响, 对于秸秆资源更加合理地应用于农田土壤改良及土壤质量提升至关重要。【方法】以鲁西平原冬小麦-夏玉米轮作土壤为研究对象, 以不添加秸秆与生物炭为对照(CK), 研究2019—2023年冬小麦单季0.5倍(S0.5, 3.80 t/hm²)、1.0倍(S1.0, 7.60 t/hm²)、1.5倍(S1.5, 11.40 t/hm²)和2.0倍(S2.0, 15.20 t/hm²)玉米秸秆与同倍数玉米秸秆炭化还田(B0.5、B1.0、B1.5、B2.0, 生物炭量分别为1.14、2.28、3.42、4.56 t/hm²)对冬小麦季耕层土壤团聚体及有机碳影响。【结果】生物炭与秸秆还田均可降低土壤体积质量, 0~10 cm土层B2.0处理及10~20 cm土层B1.5处理土壤体积质量较CK对应土层降低最多, 分别显著降低9.08%和7.97%。2种秸秆还田方式均在一定程度上促进了土壤团聚体的增加, 对>5 mm粒级土壤团聚体改善效果最佳, 而1~2 mm粒级土壤团聚体最差。与CK相比, 0~10 cm土层中B1.0处理>5 mm粒级土壤团聚体增加最多, 显著增加107.35%, 10~20 cm土层中S1.5处理>5 mm粒级土壤团聚体增加最多, 显著增加106.63%。除S1.5、B0.5处理分别降低了0~10 cm土层<0.25 mm粒级、10~20 cm土层1~2 mm粒级团聚体土壤有机碳量(SOC)外, 其余生物炭与秸秆还田均促进了SOC的增加, 且SOC大致随秸秆及生物炭还田量的增加而增加。【结论】单季玉米秸秆及玉米秸秆炭化还田均可降低耕层土壤体积质量, 提高各粒级水稳性团聚体及有机碳量。综合考虑, 建议冬小麦季单季采用1.5~2.0倍(3.42~4.56 t/hm²)的玉米秸秆炭化还田是该区提升土壤质量较为合理的秸秆还田方式。

关键词: 生物炭; 秸秆还田; 土壤团聚体; 有机碳

中图分类号: S158

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2024195

马新雨, 刘子剑, 孙树臣, 等. 4年单季生物炭与秸秆还田对潮土土壤团聚体及有机碳影响[J]. 灌溉排水学报, 2025, 44(1): 74-81, 88.

MA Xinyu, LIU Zijian, SUN Shuchen, et al. Enhanced soil aggregation and soil organic carbon in fluvo-aquic soil through continuous application of biochar and straws[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(1): 74-81, 88.

0 引言

【研究意义】良好的土壤结构与肥力状况是保证粮食安全与农业可持续发展的关键。土壤团聚体作为土壤结构与功能的基本单元, 其稳定性与分布在保证土壤功能与肥力调控等方面起关键作用^[1-4]。土壤团聚体与有机碳密切相关, 表层土壤中近90%的土壤有机碳储存于团聚体中^[5]。土壤有机碳不仅是团聚体形成的重要胶结物质, 同时也依赖于团聚体的物理保护, 二者在调节土壤肥力及土壤碳源汇功能等方面发挥重要作用^[5-7]。秸秆与生物炭等外源

有机碳的输入在改善土壤团聚体及有机碳方面具有重要作用, 有利于土壤团聚体稳定性及有机碳量增加^[4,8-9]。然而, 秸秆与生物炭等外源有机物的输入也会产生一些不利影响, 造成土壤生产力下降^[10-11]。因此, 探究如何在避免不利影响条件下合理利用农作物秸秆资源提高土壤团聚体稳定性及其有机碳量, 不仅是实现秸秆资源化利用的有效途径, 同时也对改善土壤结构、提升土壤生产能力及实现农业可持续发展具有重要意义。

【研究进展】秸秆直接还田与炭化还田(生物炭)均有利于改善土壤结构, 提高土壤团聚体稳定性及其有机碳量^[7,9,12-14]。如 Zhao 等^[8]在陕西关中地区研究表明, 秸秆还田显著提高了土壤团聚体有机碳量, 中国东北半干旱区土壤团聚体有机碳量增加65.51%^[15]。李怡燃等^[7]研究发现, 秸秆还田对土壤团聚体有机碳量的影响在华北地区最低(2.0%~10.8%), 而西南地区最高(26.5%~43.4%), 秸秆还

收稿日期: 2024-05-15 修回日期: 2024-09-05

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2023MD091, ZR2020QE234); 聊城大学科研基金项目(318012114); 聊城大学博士基金项目(318051748)

作者简介: 马新雨(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为资源利用与生态安全。E-mail: 1814081907@qq.com

通信作者: 孙树臣(1984—), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 研究方向为土壤物理、农业废弃物资源利用。E-mail: sunshuchen@luc.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

田方式、还田年限及地理区域等是影响土壤团聚体有机碳的重要因素。除秸秆直接还田外,生物炭还田近年来受到了众多领域研究者的广泛关注。生物炭因其较小的比重、巨大的比表面积和孔隙结构及丰富的营养元素(C、H、O、N)等优良特性,还田后可有效降低土壤体积质量,增加土壤孔隙度及养分,促进土壤团聚体形成及有机碳增加^[16-19]。袁晶晶等^[20]研究发现,生物炭可提高土壤大团聚体及有机碳量,在较为贫瘠的热带表层(0~20 cm)土壤添加生物炭 10 个月后,土壤团聚体量提高了 33%^[16]。刘欣萌等^[13]通过 12 a 的潮土定位试验研究发现,生物炭结合优化施氮对土壤有机碳的提升效果最明显,并使>0.25 mm 粒级土壤团聚体显著增加 132.44%。棕壤土添加生物炭后,0~20、20~40 cm 土层土壤有机碳分别增加 6.81%~41.62%和 92.36%~123.25%,且团聚体稳定性明显增加^[6]。但也有研究^[11,21]指出,秸秆或生物炭添加对土壤团聚体及有机碳的影响不显著,甚至产生负面影响。究其原因主要是受秸秆与生物炭类型、还田量及土壤类型等条件差异的影响,从而导致秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及有机碳的影响尚存在一定的争议。因此,探明不同土壤类型及地理区域下合理的秸秆资源还田方式以实现农业废弃物资源的绿色循环再利用及土壤质量提升与农业可持续发展至关重要。

鲁西平原作为黄河流域生态保护与高质量发展国家重大战略的重要组成部分,是我国重要的粮食生产区,潮土是该区广泛分布的土壤类型。然而,由于长期高强度的集约化生产及“高水、高肥、高农药”等不合理的农业措施,导致该区农田土壤结构变差、生产力降低^[22-23]。因此,改善土壤结构、提升土地生产力已成为该区域亟须解决的重要问题。秸秆与生物炭还田在改善土壤结构及提升土壤质量方面发挥了重要优势,然而受试验条件及地理区域等共同影响,秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及有机碳量的影响结论不一,极大地限制了秸秆资源的绿色循环再利用。【切入点】当前研究大多针对单一的秸秆或生物炭还田,而秸秆与等量秸秆炭化还田对土壤团聚体及有机碳影响的研究报道较少,特别是秸秆与等量秸秆炭化还田对潮土土壤团聚体及其有机碳的影响尚不清楚。【拟解决的关键问题】基于此,依托 2019—2023 年田间定位试验,对比分析冬小麦季单季玉米秸秆与等量玉米秸秆炭化还田对鲁西平原潮土土壤团聚体及有机碳的影响,旨在为秸秆资源更加合理地应用于农田土壤改良及土壤质量提升提供理论依据,同时对促进黄河流域生态保护与高质量发展国家重大战略具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于山东省聊城市聊城大学土壤生态环境教学科研基地(36°43'N, 116°01'E),地处鲁西平原,是黄河流域生态保护与高质量发展国家重大战略的重要组成部分,该区农业系统类型为典型的冬小麦-夏玉米轮作系统。气候类型属温带大陆性季风气候,多年平均气温为 13.5 °C,降水量为 504.4 mm,受季风气候影响,年际和年内降水分布不均,主要集中在夏季。土壤为石灰性潮土,初始土壤理化性质为:pH 值为 8.81,土壤体积质量为 1.48 g/cm³,土壤孔隙率为 44.15%,土壤有机质量为 10.87 g/kg,土壤全氮量为 0.72 g/kg,土壤有效磷量和土壤速效钾量分别为 18.50、100.44 mg/kg^[24]。

1.2 试验设计

田间定位小区试验于 2019 年 10 月冬小麦季开始。试验采用冬小麦季单季玉米秸秆炭化(生物炭)还田与玉米秸秆直接还田 2 种方式,以不添加生物炭与秸秆为对照(CK)。玉米秸秆还田量依据大田实际玉米秸秆平均干物质质量的 0.5(S0.5)、1.0(S1.0)、1.5(S1.5)、2.0(S2.0)倍进行还田,生物炭还田量采用等量玉米秸秆经 450 °C 炭化后还田,生物炭密度为 0.34 g/cm³。玉米秸秆还田量分别为 3.80(S0.5)、7.60(S1.0)、11.40(S1.5)、15.20(S2.0) t/hm²,生物炭还田量分别为 1.14(B0.5)、2.28(B1.0)、3.42(B1.5)、4.56(B2.0) t/hm²,共计 9 个处理,每个处理 3 次重复,共 27 个小区,小区随机排列,每个小区面积为 8 m²(规格 4 m×2 m)。生物炭(<2 mm)和玉米秸秆(粉碎<5 cm)均于每季冬小麦播种前均匀撒施在土壤表面,并与化肥一同翻入耕层(0~20 cm)土壤。2019—2023 年平均玉米秸秆中有机碳量为 40.19%、全氮量为 0.71%、全磷量为 0.22%、全钾量为 1.49%;生物炭中有机碳量为 58.1%、全氮量为 1.50%、全磷量为 0.42%、全钾量为 2.46%。

试验期内供试小麦品种为“济麦 22”,播种量为 150 kg/hm²;玉米品种为“郑单 958”,播种密度为 8 万株/hm²。冬小麦季 N、P₂O₅、K₂O 施用量分别为 225、125、90 kg/hm²,夏玉米季 N、P₂O₅、K₂O 施用量分别为 225、150、150 kg/hm²,氮肥为尿素(ω (N)=46%),钾肥为氯化钾(ω (K₂O)=51%),磷肥为磷酸二胺(ω (P₂O₅)=42%, ω (N)=15%)。其中,全部的钾肥和磷肥、50%的氮肥(112.5 kg/hm²)均在每季冬小麦和夏玉米播种前作为底肥一次性施入,50%的氮肥(112.5 kg/hm²)作为追肥分别在每季冬小麦和夏玉米拔节期施用。除生物炭

与秸秆还田处理外, 灌水及其他田间管理措施同当地大田。2019—2023 年每季的灌溉与田间管理较为一致, 灌溉方式为畦灌, 灌水量通过水表控制。其中冬小麦在越冬期、返青期、拔节期、灌浆期的灌水量分别为 100、80、80、80 mm; 夏玉米在播种后灌水 80 mm 以保证玉米正常出苗, 之后随着研究区雨季(7—9 月)的来临, 降水丰富, 天然降水可满足夏玉米的正常生长。

1.3 土壤样品采集与测定

于 2023 年 5 月 30 日冬小麦收获后通过“S”形取样法采集每个小区土壤样品并进行土壤团聚体及有机碳的测定。土壤体积质量采用环刀法测定^[25], 用环刀分层采集 0~10、10~20 cm 土层土壤样品, 每层 3 次重复。同时分层采集土壤样品, 将同一土层土壤样品混匀为 1 个样品, 剔除土壤中的石块、动植物残体及根系等, 沿土壤自然纹理掰成小块, 于室内干燥阴凉处自然风干备用。土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体分别采用干筛法和湿筛法^[26]; 土壤有机碳采用重铬酸钾-浓硫酸外加加热法测定^[25]。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 处理数据及作图, 使用 SPSS 22.0 进行方差分析与显著性检验 ($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 生物炭与秸秆还田对土壤体积质量的影响

表 1 为玉米秸秆直接还田与玉米秸秆炭化还田对土壤体积质量的影响。与 CK 相比, 生物炭与秸秆还田均导致 0~10、10~20 cm 土层土壤体积质量不同程度的降低。0~10 cm 土层中, S0.5、B0.5、B1.5、B2.0 处理土壤体积质量分别较 CK 显著降低 4.90%、8.87%、6.22%、9.08% ($p < 0.05$), 其他处理虽不同程度地降低了土壤体积质量, 但与 CK 差异不显著。对比秸秆直接还田与等量秸秆炭化还田发现, 除 B1.0 处理外, 其余 3 种添加量下均表现为秸秆炭化还田对土壤体积质量的降低效果优于秸秆直接还田, 且 B2.0 处理土壤体积质量较 S2.0 处理显著降低 6.39%。10~20 cm 土层中, B1.5 处理土壤体积质量显著降低 7.97%, 其他处理与 CK 相比均无显著性差异; 除 B0.5 处理外, 其余 3 种秸秆炭化还田处理土壤体积质量均低于秸秆直接还田处理, 但各处理间差异不显著。整体上, 秸秆炭化还田对 0~10、10~20 cm 土层土壤体积质量的改善效果优于秸秆直接还田, 特别是 0~10 cm 土层。

表 1 各处理 0~10、10~20 cm 土层土壤体积质量

Tab.1 Soil bulk density of 0-10 cm and 10-20 cm under different treatments

土层深度/cm	CK	B0.5 处理	B1.0 处理	B1.5 处理	B2.0 处理	S0.5 处理	S1.0 处理	S1.5 处理	S2.0 处理
0~10	1.41±0.05a	1.28±0.03cd	1.35±0.02ab	1.32±0.03bcd	1.28±0.05d	1.34±0.01bcd	1.34±0.06abcd	1.34±0.03abc	1.36±0.03ab
10~20	1.40±0.04a	1.36±0.06ab	1.35±0.07ab	1.29±0.05b	1.32±0.08ab	1.35±0.05ab	1.39±0.01a	1.37±0.02ab	1.38±0.06a

注 同行不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($p < 0.05$)。

2.2 生物炭和秸秆还田对土壤团聚体量的影响

图 1 为各处理 0~10 cm 土层各粒级土壤团聚体量, 图 1 中不同小写字母表示同一土层不同处理在 $p < 0.05$ 水平差异显著, 下同。秸秆直接还田与秸秆炭化还田均导致 0~10 cm 土层各粒级土壤团聚体量增加(图 1), 其中又以 >5 mm 粒级土壤团聚体量变化最为明显, 而对 1~2 mm 粒级土壤团聚体量的影响最小。>5、2~5、1~2 mm 粒级土壤团聚体量随生物炭添加量的增加表现为先增加后降低的趋势,

0.5~1.0 mm 粒级土壤团聚体量的变化趋势为先降低后升高, 而 0.25~0.50 mm 粒级土壤团聚体量则表现为先降低后增加再降低的变化趋势。秸秆直接还田条件下, >5、2~5、0.5~1.0 mm 粒级土壤团聚体量则表现为随秸秆还田量的增加呈先升高后降低再增加的变化趋势, 1~2 mm 粒级土壤团聚体表现出先降低后增加的变化趋势, 而 0.25~0.50 mm 粒级土壤团聚体则表现为先增加后降低。

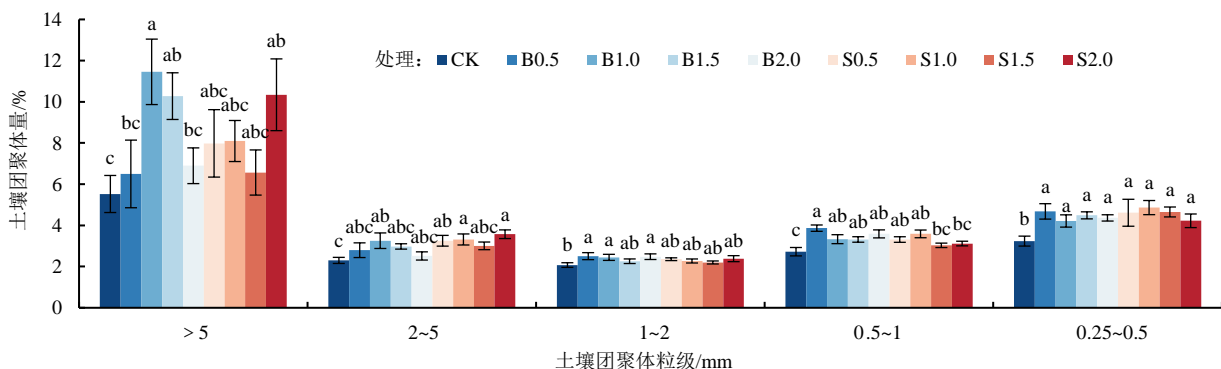


图 1 各处理 0~10 cm 土层各粒级土壤团聚体量

Fig.1 Soil aggregate content of each grain level in 0-10 cm soil layers under different treatments

与 CK 相比, B1.0、B1.5、S2.0 处理 >5 mm 粒级土壤团聚体量分别显著增加 107.35%、86.02%、87.21%。相同秸秆添加量下, B0.5、B2.0 处理对 >5 mm 粒级土壤团聚体的增加效果低于秸秆直接还田处理, 而 B1.0、B1.5 处理对 >5 mm 粒级土壤团聚体的增加效果则高于秸秆直接还田处理。与 CK 相比, B1.0、S0.5、S1.0、S2.0 处理 2~5 mm 粒级土壤团聚体量分别显著提高 41.74%、41.30%、44.35%、55.22%, 其他处理虽促进 2~5 mm 粒级土壤团聚体量的增加, 但与 CK 相比差异不显著, 且秸秆直接还田处理与秸秆炭化还田处理间亦无显著差异。相同添加量下, 秸秆炭化还田处理对 2~5 mm 粒级土壤团聚体量的增加效果均低于秸秆直接还田处理。B0.5、B1.0、B2.0 处理 1~2 mm 粒级土壤团聚体量分别较 CK 显著增加 21.26%、18.36%、19.80%, 相同添加量下秸秆炭化还田处理效果均略优于秸秆直接还田处理。B0.5、B1.0、B1.5、B2.0、S0.5、S1.0 处理 0.5~1.0 mm 粒级土壤团聚体量分别较 CK 显著增加 42.28%、22.43%、22.06%、31.99%、21.69%、31.99%。除 B1.0 处理对 0.5~1.0 mm 粒级土壤团聚体量的增加效果低于 S1.0 处理外, 其余 3 种秸秆炭化还田处理对 0.5~1.0 mm 粒级土壤团聚体量的增加效果均高于秸秆直接还田处理。与 CK 相比, 各处

理 0.25~0.50 mm 粒级土壤团聚体量显著增加, S1.0 处理效果最好。除 B0.5、B2.0 处理略高于秸秆直接还田处理外, 其余 2 种秸秆炭化还田处理均低于秸秆直接还田处理, 但秸秆直接还田处理与秸秆炭化还田处理间差异均不显著。

图 2 为各处理 10~20 cm 土层各粒级土壤团聚体量。秸秆直接还田与秸秆炭化还田均在一定程度上促进 10~20 cm 土层各粒级土壤团聚体量增加 (图 2), 对 >5 mm 粒级土壤团聚体量改善效果最佳, 1~2 mm 粒级土壤团聚体改良效果最差。随秸秆直接还田与秸秆炭化还田量的增加, 10~20 cm 土层各粒级土壤团聚体量的变化趋势与 0~10 cm 土层差异较大。10~20 cm 土层, >5、1~2 mm 粒级土壤团聚体量随秸秆炭化还田量的增加呈先升高后降低的变化趋势, 而 2~5、0.5~1.0、0.25~0.50 mm 粒级土壤团聚体量则表现为先降低后升高再降低的变化趋势。秸秆直接还田处理 >5、2~5 mm 粒级土壤团聚体量随秸秆还田量的增加呈先升高后降低的变化趋势, 0.25~0.50 mm 粒级土壤团聚体量随秸秆还田量的增加表现为先降低后升高的变化趋势, 1~2 mm 粒级土壤团聚体量随秸秆还田量的增加表现为先升高后降低再增加的变化趋势, 而 0.5~1.0 mm 粒级土壤团聚体量则表现为随秸秆还田量的增加呈先增加再降低的变化趋势。

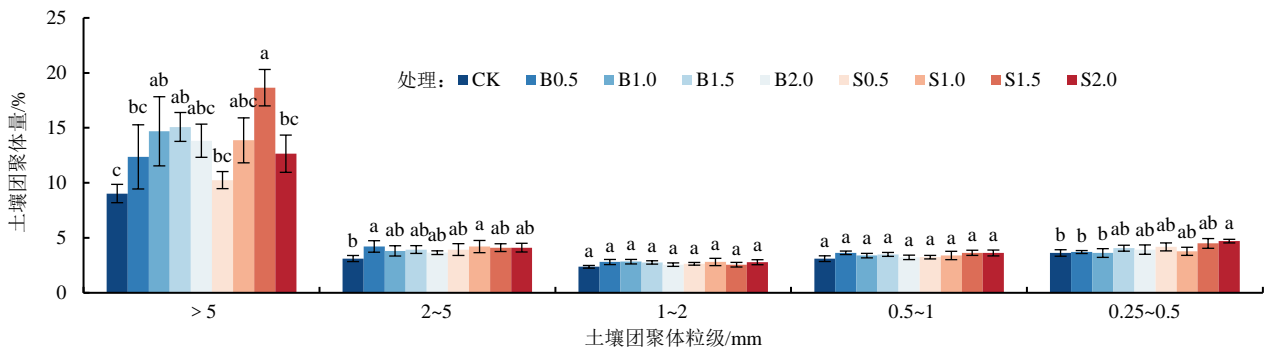


图 2 各处理 10~20 cm 土层各粒级土壤团聚体量

Fig.2 Soil aggregate content of each grain level in 10-20 cm soil layers under different treatments

与 CK 相比, 除 B1.0、B1.5、S1.5、B0.5、S1.0、S2.0 处理分别显著提高 10~20 cm 土层 >5 mm (62.66%)、>5 mm (67.07%)、>5 mm (106.63%)、2~5 mm (35.18%)、2~5 mm (34.87%)、0.25~0.50 mm (29.75%) 粒级土壤团聚体量外, 其余各处理对 10~20 cm 土层各粒级土壤团聚体量的增加效果均未达到显著水平。对比秸秆直接还田处理与秸秆炭化还田处理发现, 除 0.25~0.50 mm 粒级土壤团聚体外, B0.5 处理对 10~20 cm 土层各粒级土壤团聚体的提升效果均优于 S0.5 处理。B1.0 处理对 >5、1~2 mm 粒级土壤团聚体提升效果优于 S1.0 处理; 除 1~2 mm 粒级土壤团聚体外, S1.5 处理对其余粒级土壤团聚体提升效果优于 B1.5 处理; S2.0 处理对各粒级土壤

团聚体的改善效果亦优于 B2.0 处理 (>5 mm 粒级土壤团聚体除外)。整体上相同添加量下 B0.5 处理对 10~20 cm 土层各粒级土壤团聚体的提升效果优于 S0.5 处理; 而 S1.0、S1.5、S2.0 处理对 10~20 cm 土层各粒级土壤团聚体的提升效果则优于 B1.0、B1.5、B2.0 处理。

2.3 生物炭与秸秆还田对土壤有机碳的影响

图 3 为各处理 0~10 cm 土层各粒级土壤团聚体有机碳量。0~10 cm 土层, 除 >5 mm 粒级土壤团聚体外, 各粒级土壤团聚体有机碳 (SOC) 量均随秸秆炭化还田量的增加而增加; 秸秆直接还田处理除 1~2 mm 粒级土壤团聚体外 SOC 则随秸秆还田量的增加呈先增加后降低再升高的变化趋势 (图 3)。除 S1.5 处理降

低<0.25 mm 粒级土壤团聚体 SOC 外, 其余秸秆炭化还田处理与秸秆直接还田处理均不同程度促进 0~10 cm 土层土壤 SOC 量增加, 且秸秆炭化还田处理对各粒级土壤 SOC 量的提高达显著水平 (<0.25 mm 粒级土壤团聚体 B0.5 处理除外), B2.0 处理各粒级土壤团

聚体 SOC 量增幅最大 (79.04%~102.82%)。除 0.25~0.50 mm 粒级土壤团聚体 S0.5 处理、<0.25 mm 粒级土壤团聚体 S1.5 处理外, 其余秸秆还田处理亦使各粒级土壤团聚体 SOC 量显著提高。

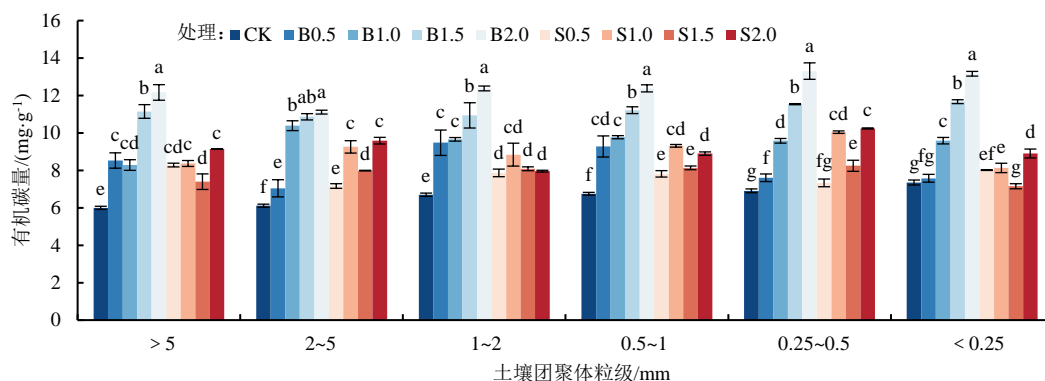


图 3 各处理 0~10 cm 土层各粒级土壤团聚体有机碳量

Fig.3 Organic carbon content of each grain level in 0-10 cm soil layers under different treatments

相同添加量下, B1.5、B2.0 处理对 0~10 cm 土层各粒级土壤团聚体 SOC 量的提升效果均显著高于 S1.5、S2.0 处理。B0.5 处理对 2~5、<0.25 mm 粒级土壤团聚体 SOC 量的增加效果低于 S0.5 处理; 而 B1.0 处理>5、0.25~0.50 mm 粒级土壤团聚体 SOC 量低于 S1.0 处理。整体上 B1.5、B2.0 处理对 0~10 cm 土层各粒级土壤团聚体 SOC 量的提升效果最佳, B0.5、B1.0 处理对 0~10 cm 土层各粒级土壤团聚体 SOC 量的提升效果较弱。

图 4 为不同秸秆直接还田及秸秆炭化还田量对 10~20 cm 土层各粒级土壤团聚体有机碳量的影响。随着秸秆炭化还田量的增加, 2~5、0.5~1.0、0.25~0.50、<0.25 mm 粒级土壤团聚体 SOC 量均呈增加趋势, >5 mm 粒级土壤团聚体 SOC 量表现为先增加后

降低趋势, 而 1~2 mm 粒级土壤团聚体 SOC 量则表现为先增加后降低再增加的趋势。除 B0.5 处理降低 1~2 mm 粒级土壤团聚体 SOC 量外, 其余秸秆炭化还田处理均不同程度地促进 10~20 cm 土层各粒级土壤团聚体 SOC 量的增加。而随着秸秆还田量的增加, >5、2~5、0.5~1.0、0.25~0.50 mm 粒级土壤团聚体 SOC 量表现为先降低后升高的趋势, 而 1~2 mm 粒级土壤团聚体 SOC 量则呈先降低后升高再降低的趋势, <0.25 mm 粒级土壤团聚体 SOC 量则呈升高趋势。秸秆直接还田处理下, 除 S1.0 处理 0.5~1.0 mm 粒级土壤团聚体与 S0.5、S1.0 处理 0.25~0.50 mm 粒级土壤团聚体 SOC 量表现为降低外, 其余秸秆还田处理均促进各粒级土壤团聚体 SOC 量的增加。

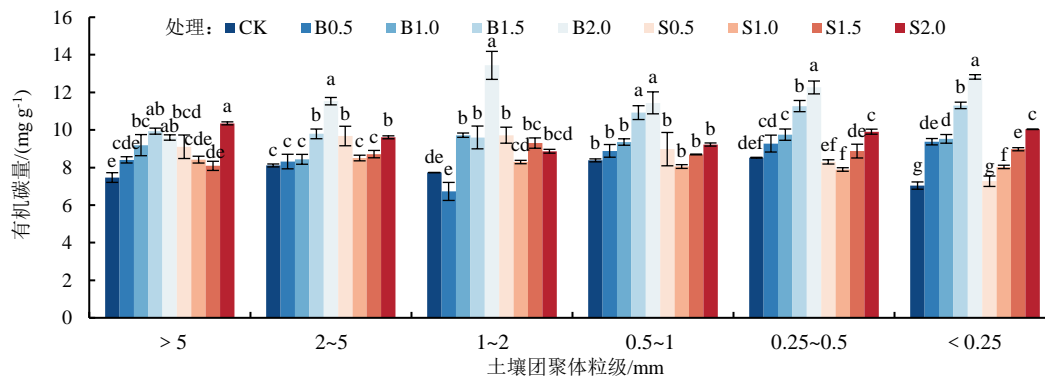


图 4 各处理 10~20 cm 土层各粒级土壤团聚体有机碳量

Fig.4 Organic carbon content of each grain level in 10-20 cm soil layers under different treatments

与 CK 相比, B1.0、B1.5、B2.0、S0.5、S2.0 处理均显著提高>5 mm 粒级土壤团聚体 SOC 量, 分别提高 23.10%、33.07%、28.54%、21.95%、38.63%。B2.0 处理对 2~5、1~2、0.5~1.0、0.25~0.50、<0.25 mm 粒级土壤团聚体 SOC 量增加最为显著, 分别较

CK 提高 42.20%、73.78%、36.53%、43.89%、82.16%。除 B0.5 处理>5、2~5、1~2、0.5~1.0 mm 粒级土壤团聚体与 B1.0 处理 2~5 mm 粒级土壤团聚体及 B2.0 处理>5 mm 粒级土壤团聚体外, 其余各处理团聚体有机碳量均表现为秸秆炭化还田处理优于秸秆直接还

田处理。综上, 整体上相同添加量下, 秸秆炭化还田处理对 0~10、10~20 cm 土层各粒级土壤团聚体 SOC 量的提升效果优于秸秆直接还田处理, 且 B1.5、B2.0 处理效果较好。

3 讨论

土壤体积质量是反映土壤结构及肥力的重要指标, 适宜的土壤体积质量有利于调节土壤水、肥、气、热, 有机质量高、土壤体积质量低的土壤能够带来较好的农业效益和土壤环境效益^[27-28], 过高或过低的土壤体积质量均不利于耕作。本研究表明, 秸秆直接还田与秸秆炭化还田均能不同程度降低耕层土壤体积质量, 这与前人^[29-31]研究较为一致。秸秆炭化还田处理对土壤体积质量的改善效果优于秸秆直接还田处理, 2 种还田方式均表现为对 0~10 cm 土层的改善效果优于 10~20 cm 土层。这是由于秸秆和生物炭不仅密度小且含有丰富的有机质, 施入土壤后使土壤孔隙增大, 土壤通气性增强, 有效改善土壤结构, 提高土壤团聚体量及其稳定性, 从而有利于降低土壤体积质量^[32-33]。生物炭密度较秸秆低, 添加到土壤后对土壤体积质量的降低效果优于秸秆直接还田。但秸秆直接还田对 10~20 cm 土层土壤体积质量的改善效果较弱。其原因一方面是由于秸秆还田后旋耕深度只有 13~15 cm, 10~20 cm 土层土壤不能被完全旋耕, 机械压实也在一定程度上加剧了 10~20 cm 土层土壤紧实程度^[27,34]; 另一方面, 秸秆还田后冬小麦季较低的水热条件不利于秸秆的完全腐解也会限制秸秆还田对土壤结构的改善效果^[27]。

土壤团聚体是土壤结构形成的基础, 其粒级分布是反应土壤质量的重要因素^[9]。本研究表明, 秸秆与生物炭还田均在一定程度上促进耕层 >0.25 mm 各粒级土壤团聚体量的增加, 前人^[13,29,35]亦得出类似结果。其原因是秸秆及生物炭等有机物料含有丰富的有机质, 施入土壤后在降低土壤体积质量的同时还能增加土壤有机质量, 有机质又是促进土壤团聚体形成的黏合剂, 有利于促进土壤团聚体的团聚化, 可将土粒和小级别团聚体胶结形成大团聚体^[15,36-37]。另一方面连续的秸秆直接还田及秸秆炭化还田促进有机质积累, 同时有机质在分解过程中也会形成有机无机胶结物质, 激发生物活性, 进一步促进了小团聚体向大团聚体的转化并增强其稳定性^[37-38]。秸秆直接还田及秸秆炭化还田还能改变土壤交换性阳离子量进而促进大团聚体的形成^[13]。本研究发现, 秸秆直接还田与秸秆炭化还田均表现出对 >5 mm 粒级土壤团聚体的改善效果较好, 而对 1~2 mm 粒级土壤团聚体的改善效果较差, 且 1~2 mm 粒级土壤

团聚体在各粒级团聚体中占比最低, 这与李越等^[9]研究结果较为一致。其原因可能是由于土壤团聚体中形成的以有机质为主的胶结物质, 促进 1~2 mm 粒级土壤团聚体与土壤颗粒向 >2 mm 粒级土壤团聚体的胶结^[37]。虽然秸秆还田与秸秆炭化还田均促进各粒级土壤团聚体量增加, 但秸秆炭化还田与秸秆直接还田对耕层土壤团聚体的影响表现出一定的复杂性, 规律性较弱。这与王钰皓等^[39]研究结论不一致。秸秆炭化还田对土壤团聚体的影响效果弱于秸秆直接还田的原因是由于高温环境下由秸秆转化而成的生物炭是一种稳定的固态物质, 拥有高度的羧酸酯化特性和稳固的芳香性结构, 这种结构让生物炭比原始秸秆更难被微生物分解和利用, 生物炭与 >0.25 mm 粒级土壤团聚体的结合能力较秸秆弱^[40]。秸秆炭化还田效果优于秸秆直接还田的原因是因为耕层土壤是根系分布的主要区域, 添加生物炭后土质较秸秆直接还田疏松, 有效促进作物根系生长, 根系间相互缠绕使小团聚体间相互作用, 从而使土壤大粒级团聚体量增加^[41]。此外, 也可能与本研究中生物炭与秸秆添加量较低有关, 使本研究与前人^[14,39]研究结果不同。因此, 秸秆直接还田与秸秆炭化还田对耕层土壤团聚体的影响仍需要进一步深入研究。

土壤团聚体是土壤有机碳的重要载体^[15], 土壤表层中近 90% 的有机碳储存于土壤团聚体中^[5]。一方面土壤团聚体对有机碳的固定起到保护及稳定作用, 促进有机碳的固定; 另一方面土壤有机碳不仅能促进土壤团聚体形成, 还能显著增加土壤团聚体稳定性^[5,7,15]。本研究发现, 秸秆直接还田与秸秆炭化还田整体上促进各粒级土壤团聚体有机碳量的增加。这是因为秸秆及生物炭等外源有机物料自身含有丰富的有机碳, 还田后可增加土壤有机碳量, 且外源有机碳的输入还可以提高微生物量及其活性, 进而增加 SOC 量^[27,37,42]。秸秆或生物炭施入土壤后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, 促进团聚体形成及固碳能力提升, 提高土壤有机碳量^[27,43-44], 且有机碳量随生物炭添加量的增加而增加^[45], 本研究亦得出类似结论, B2.0 处理对提高各粒级土壤团聚体有机碳量效果最佳。S2.0 处理对各粒级土壤团聚体有机碳量的增加效果优于其他秸秆还田处理, 但其作用效果弱于 B2.0 处理。其原因是由于秸秆还田后大量易于分解的新鲜碳组分被分解消耗, 秸秆直接还田的碳投入量在田间仅能维持 10%~20%^[46]; 生物炭其含碳量较多且不易分解, 田间可固持 50% 以上的碳^[46], 其独特的物理特性 (较大的比表面积

和多孔结构等)对有机碳的生物可利用性起到隔离或减缓的效果,阻碍吸附于其表面有机碳的进一步分解,有助于提升土壤有机碳量^[47]。

4 结论

1) 秸秆直接还田及秸秆炭化还田均有效降低冬小麦耕层土壤体积质量, B2.0 处理 0~10 cm 土层及 B1.5 处理 10~20 cm 土层土壤体积质量较 CK 降低最多,分别显著降低 9.08%和 7.97%。2 种还田方式对 0~10 cm 土层土壤体积质量的降低效果优于 10~20 cm 土层,且秸秆炭化还田处理优于秸秆直接还田处理。

2) 秸秆炭化还田与秸秆直接还田均可提高 >0.25 mm 粒级土壤团聚体量及土壤有机碳量。相同添加量下秸秆炭化还田的作用效果优于秸秆直接还田, B1.5、B2.0 处理效果更佳。

3) 综合考虑,鲁西平原潮土区冬小麦季单季还田模式下建议施用 3.42~4.56 t/hm² 的玉米秸秆炭化还田,有利于土壤结构改善及有机碳积累的有效秸秆利用方式。

然而,土壤团聚体及有机碳量受多种因素的共同影响,本研究仅对冬小麦季单季玉米秸秆还田与秸秆炭化还田对土壤团聚体及有机碳量的影响进行分析。未来还应结合作物产量、土壤养分状况等对秸秆直接还田及秸秆炭化还田的综合效应进行深入探讨,以期筛选出最佳的秸秆资源利用方式,为更好地服务于黄河流域生态保护与高质量发展国家重大战略及土壤质量提升与农业可持续发展提供助力。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

[1] YUDINA A, KUZYAKOV Y. Saving the face of soil aggregates[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(11): 3 574-3 577.

[2] ZHANG H J, WANG S J, ZHANG J X, et al. Biochar application enhances microbial interactions in mega-aggregates of farmland black soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213: 105 145.

[3] 李彩霞,陈津赛,付媛媛,等.施氮和灌溉管理对麦田土壤团聚体组成及有机碳的影响[J].灌溉排水学报,2022,41(12): 59-64, 80. LI Caixia, CHEN Jinsai, FU Yuanyuan, et al. Effects of nitrogen fertilization and irrigation on soil aggregation and soil organic carbon in winter wheat field[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(12): 59-64, 80.

[4] 李毅,梁嘉平,王小芳,等.改善土壤理化性质和作物出苗率的最佳生物质炭施用量[J].土壤学报,2024,61(1): 64-76. LI Yi, LIANG Jiaping, WANG Xiaofang, et al. The most appropriate biochar application rate for improving soil physicochemical properties and crop germination rates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(1): 64-76.

[5] SARKER T C, INCERTI G, SPACCINI R, et al. Linking organic matter chemistry with soil aggregate stability: Insight from ¹³C NMR spectroscopy[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 117: 175-184.

[6] 孙强,杨旭,孟军,等.生物炭对棕壤团聚体空间分布及有机碳的影响[J].农业环境科学学报,2022,41(11): 2 515-2 524.

SUN Qiang, YANG Xu, MENG Jun, et al. Effects of biochar on soil aggregate spatial distribution and soil organic carbon in brown earth soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(11): 2 515-2 524.

[7] 李怡然,王秀薪,梁耀文,等.农田土壤团聚体有机碳对秸秆还田响应的 Meta 分析[J].中国生态农业学报(中英文),2024,32(1): 41-52. LI Yiran, WANG Xiuxin, LIANG Yaowen, et al. Response of farmland soil aggregate-associated organic carbon to straw return: A meta-analysis[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(1): 41-52.

[8] ZHAO H L, SHAR A G, LI S, et al. Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize-wheat double cropping system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 178-186.

[9] 李越,徐曼,谢永红,等.不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响[J].环境科学,2024,45(2): 974-982. LI Yue, XU Man, XIE Yonghong, et al. Effects of different modifiers on aggregates and organic carbon in acidic purple soil[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(2): 974-982.

[10] QI Y Z, ZHEN W C, LI H Y. Allelopathy of decomposed maize straw products on three soil-borne diseases of wheat and the analysis by GC-MS[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(1): 88-97.

[11] HEIKKINEN J, KESKINEN R, SOINNE H, et al. Possibilities to improve soil aggregate stability using biochars derived from various biomasses through slow pyrolysis, hydrothermal carbonization, or torrefaction[J]. *Geoderma*, 2019, 344: 40-49.

[12] GAN J W, QIU C, HAN X Z, et al. Effects of 10 years of the return of corn straw on soil aggregates and the distribution of organic carbon in a mollisol[J]. *Agronomy*, 2022, 12(10): 2 374.

[13] 刘欣萌,姜涵,魏文良,等.秸秆与秸秆生物炭还田对石灰性潮土有机碳固定的影响[J].土壤通报,2023,54(6): 1 316-1 325. LIU Ximeng, JIANG Han, WEI Wenliang, et al. Effects of straw and straw biochar returning on soil organic carbon sequestration in calcareous fluvo-aquic soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(6): 1 316-1 325.

[14] 陈盛,黄达,张力,等.秸秆还田对土壤理化性质及水肥状况影响的研究进展[J].灌溉排水学报,2022,41(6): 1-11. CHEN Sheng, HUANG Da, ZHANG Li, et al. The effects of straw incorporation on physicochemical properties of soil: A review[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(6): 1-11.

[15] 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 Qiuping, LIU Yutao, GUO Yongzhi, et al. Effects of different straw returning methods on soil aggregate stability and organic carbon content[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2023, 45(5): 564-571.

[16] PARKER N, CORNELIS W M, FRIMPONG K A, et al. Short-term effects of rice straw biochar on hydraulic properties and aggregate stability of an Acrisol[J]. *Soil Research*, 2021, 59(8): 854-862.

[17] DAYOUB E B, TÓTH Z, ANDA A. Biochar and its effects on soil properties and evapotranspiration: A sustainable solution for plant growth[J]. *Cogent Food & Agriculture*, 2023, 9(1): 2 256 136.

[18] 杜臻杰,樊向阳,吴海卿,等.施用生物质炭和猪场沼液对潮土团聚体及氮素形态影响研究[J].灌溉排水学报,2015,34(9): 20-23, 27. DU Zhenjie, FAN Xiangyang, WU Haiqing, et al. Effect of biochar and piggery biogas slurry on distribution of nitrogen pools and aquatic soil aggregates[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(9): 20-23, 27.

[19] 王娟,黄成真,冯绍元,等.生物炭对滨海滩涂区土壤理化特性的影响[J].灌溉排水学报,2022,41(10): 125-130, 138. WANG Juan, HUANG Chengzhen, FENG Shaoyuan, et al. Using biochar amendment to improve the physicochemical properties of soil in coastal tidal area[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(10): 125-130, 138.

[20] 袁晶晶,齐学斌,赵京,等.生物炭配施沼液对土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J].灌溉排水学报,2022,41(1): 80-86.

- YUAN Jingjing, QI Xuebin, ZHAO Jing, et al. The effect of biochar amendment and slurry application on soil aggregation and organic carbon distribution[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(1): 80-86.
- [21] RAHMAN M T, ZHU Q H, ZHANG Z B, et al. The roles of organic amendments and microbial community in the improvement of soil structure of a Vertisol[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 111: 84-93.
- [22] CUI Z L, ZHANG H Y, CHEN X P, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers[J]. *Nature*, 2018, 555(7 696): 363-366.
- [23] YU X J, TIAN X F, LU Y Y, et al. Combined effects of straw-derived biochar and bio-based polymer-coated urea on nitrogen use efficiency and cotton yield[J]. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 2018, 30(1): 112-122.
- [24] 郑云珠, 孙树臣. 单季施用生物炭提高土壤肥力及小麦玉米轮作周年产量[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(20): 257-264.
- ZHENG Yunzhu, SUN Shuchen. Single-season biochar application improves soil fertility and annual yield of wheat-maize rotation[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(20): 257-264.
- [25] 鲍士旦. 土壤化学分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shidan. *Soil and agricultural chemistry analysis*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [26] 杨卫君, 惠超, 陈雨欣, 等. 生物质炭施用下灌溉农田土壤团聚体稳定性及分型特征[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(6): 323-329.
- YANG Weijun, HUI Chao, CHEN Yuxin, et al. Stability and fractal features of soil aggregate in irrigated farmland under biochar application[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6): 323-329.
- [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 Ruihua, JIN Hongmei, CHANG Zhizhou, 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] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(1): 68-79.
- WU Yu, XU Gang, LYU Yingchun, et al. Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: Current status and knowledge gaps[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(1): 68-79.
- [29] 孟维山, 朱芳妮, 张博文, 等. 玉米秸秆及其生物炭还田对黑土理化性质及玉米产量的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2024, 46(5): 721-730.
- MENG Weishan, ZHU Fangni, ZHANG Bowen, et al. Effects of returning corn straw and its biochar on physicochemical properties of black soil and corn yield[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2024, 46(5): 721-730.
- [30] 陈军豪, 杨生茂, 汪玉瑛, 等. 盐胁迫下生物炭添加对紫苏生长及根际微生物群落的影响[J/OL]. *农业环境科学学报*, 1-18[2024-08-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20240415.1050.003.html>.
- CHEN Junhao, YANG Shengmao, WANG Yuying, et al. Effects of biochar addition on perilla growth and the rhizosphere microbial community under salt stress[J/OL]. *Journal of Agro-Environment Science*, 1-18[2024-08-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20240415.1050.003.html>.
- [31] AGBEDE T M, OYEWUMI A, ADEKIYA A O, et al. Assessing the synergistic impacts of poultry manure and biochar on nutrient-depleted sand and sandy loam soil properties and sweet potato growth and yield[J]. *Experimental Agriculture*, 2022, 58: e54.
- [32] 桂利权, 张永利, 王焯军. 生物炭对土壤肥力及作物产量和品质的影响研究进展[J]. *现代农业科技*, 2020(16): 136-139, 141.
- GUI Liqun, ZHANG Yongli, WANG Yejun. Research advance on effects of biochar on soil fertility and crop's yield and quality[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2020(16): 136-139, 141.
- [33] 蔡德宝, 田文凤, 李珂, 等. 复合肥与生物炭配施对土壤含水量及磷有效性影响[J]. *新疆农垦科技*, 2020, 43(12): 33-36.
- [34] 刘学彤, 郑春莲, 曹彩云, 等. 长期秸秆还田对潮土水稳性团聚体的影响[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(24): 215-220.
- LIU Xuetong, ZHENG Chunlian, CAO Caiyun, et al. Effects of long-term straw returning on water-stable aggregates in fluvo-aquic soil[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(24): 215-220.
- [35] ZHANG M, CHENG G, FENG H, et al. Effects of straw and biochar amendments on aggregate stability, soil organic carbon, and enzyme activities in the Loess Plateau, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24(11): 10 108-10 120.
- [36] 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.
- [37] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2 099-2 103.
- [38] 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.
- [39] 王钰皓, 庞津雯, 卫婷, 等. 旱作农田覆膜和秸秆碳投入对土壤团聚特性及作物产量的影响[J]. *土壤学报*, 2024, 61(1): 272-284.
- WANG Yuhao, PANG Jinwen, WEI Ting, et al. Coupled effects of film mulching and straw-derived carbon inputs on soil aggregate characteristics and crop yields in semiarid areas[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(1): 272-284.
- [40] 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.
- [41] 张星, 刘杏认, 张晴雯, 等. 生物炭和秸秆还田对华北农田玉米生育期土壤微生物量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(10): 1 943-1 950.
- ZHANG Xing, LIU Xingren, ZHANG Qingwen, et al. Effects of biochar and straw direct return on soil microbial biomass during maize growth season in North China Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(10): 1 943-1 950.
- [42] WEI W L, HUANGFU C H, JIA Z Y, et al. Long-term organic amendments improved soil carbon sequestration to support crop production[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2021, 184(6): 678-687.
- [43] 王富华, 黄容, 高明, 等. 生物质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 Fuhua, HUANG Rong, GAO Ming, 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.
- [44] 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: 104 618.
- [45] 丁苏雅, 马姜明, 覃云斌, 等. 生物炭对毛竹林土壤有机碳组分及碳库管理指数的影响[J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 42(1): 180-190.
- DING Suya, MA Jiangming, QIN Yunbin, et al. Effects of biochar on soil organic carbon composition and carbon pool management index of Moso bamboo forests[J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2024, 42(1): 180-190.
- [46] LEHMANN J, GAUNT J, RONDON M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2): 403-427.
- [47] ZIMMERMAN A R, GAO B, AHN M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(6): 1 169-1 179.