

湿筛法和干筛法下不同水肥生物质炭添加对盐碱土团聚体稳定性及有机碳分布的影响^①

薛妮^{1,8}, 张盛^{2*}, 郝兴明³, 许荣越², 张正贵⁴, 刘玉祯⁵, 刘子涵⁶, 崔红娜², 马煜卿², 夏龙龙², 魏孝荣⁷, 赵小宁^{1,8*}

(1 南京信息工程大学地理科学学院, 南京 210044; 2 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 3 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 4 中国农业科学院棉花研究所/棉花生物学国家重点实验室, 河南安阳 455000; 5 青海大学畜牧兽医科学院, 西宁 810016; 6 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 7 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西杨凌 712100; 8 陕西理工大学生物科学与工程学院, 秦巴生物资源与生态环境省部共建国家重点实验室(培育), 陕西汉中 723000)

摘要: 为阐明不同水、肥、生物质炭添加管理措施对塔里木河流域盐碱土团聚体稳定性及有机碳分布的影响, 本研究于2019—2023年以玉米为供试作物, 连续开展了5年的田间定位试验。试验设置7个水、氮(N)及生物质炭添加处理: 对照(N 0 kg/hm²+水 0 mm)、LNLW(N 100 kg/hm²+水 140 mm)、MNMW(N 200 kg/hm²+水 220 mm)、HNHW(N 300 kg/hm²+水 320 mm), 以及相应添加 10 t/hm² 生物质炭的 LNLWB、MNMWB、HNHWB 处理, 分别通过湿筛法与干筛法测定了土壤团聚体组成及其有机碳含量。结果表明: ①与对照相比, 添加生物质炭显著提升土壤团聚体稳定性, 水稳性大团聚体含量增加 117%, 机械稳定性粗大团聚体含量提高 11%, 土壤破碎率降低 8%。在未添加生物质炭处理中, 随水、氮投入水平升高土壤团聚体稳定性降低, 土壤破碎率提高; ②添加生物质炭显著促进团聚体结合态有机碳积累, 与未添加生物质炭处理相比, 水稳性大团聚体有机碳、机械稳定性粗大团聚体有机碳、全土有机碳含量分别增加 1.0~5.0、2.4~4.0、1.2~1.5 g/kg, 且随水、氮投入水平升高而增加; ③湿筛法较干筛法更能敏感表征盐碱土团聚体稳定性与有机碳的关联性, 建议作为同类研究的优选方法。本研究为干旱区盐碱土结构改良与碳固存增效的水-氮-生物质炭协同管理提供了理论依据。

关键词: 土壤团聚体; 有机碳; 干筛法; 湿筛法

中图分类号: S152.4; S156.2 **文献标志码:** A

Effects of Biochar Amendment Under Different Water and Nitrogen Regimes on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon Distribution in Saline-Alkali Soils: A Comparative Study Using Wet and Dry Sieving Methods

XUE Wei^{1,8}, ZHANG Sheng^{2*}, HAO Xingming³, XU Rongyue², ZHANG Zhenggui⁴, LIU Yuzhen⁵, LIU Zihan⁶, CUI Hongna², MA Yuqing², XIA Longlong², WEI Xiaorong⁷, ZHAO Xiaoning^{1,8*}

(1 School of Geography, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 3 Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 4 Institute of Cotton Research of the Chinese Academy of Agricultural Sciences / State Key Laboratory of Cotton Biology, Anyang, Henan 455000, China; 5 Academy of Animal Science and Veterinary Medicine, Qinghai University, Xining 810016, China; 6 School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 7 College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 8 School of Biological Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Qinba State Key Laboratory of Biological Resources and Ecological Environment (Incubation), Hanzhong, Shaanxi 723000, China)

①基金项目: 国家基金委项目(U24A20631)、陕西理工大学科研启动费(X20240141)和新疆维吾尔自治区农业科学院科技创新稳定支持农业农村部盐碱土改良与利用(干旱半干旱区盐碱地)重点实验室开放基金课题(YJDKFJJ202502)资助。

* 通信作者(szhang@issas.ac.cn; zhaoxiaoning@snut.edu.cn)

作者简介: 薛妮(1999—), 女, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要从事土壤团聚体与有机碳研究。E-mail: 1320576953@qq.com

Abstract: To elucidate the effects of biochar addition management practices under different water and fertilization on the stability of saline soil aggregates and organic carbon (SOC) in the Tarim River Basin, a five-year field experiment was conducted from 2019 to 2023 to investigate the effects of biochar combined with different irrigation and nitrogen fertilization treatments on soil aggregate structure and its SOC distribution, which included seven irrigation and nitrogen fertilizer treatments: (CK: N 0 kg/hm²+0 mm water, LNLW: N 100 kg/hm²+140 mm water, MNMW: N 200 kg/hm²+220 mm water, HNHW: N 300 kg/hm²+320 mm water), with corresponding biochar-amended treatments (LNLWB, MNMWB, HNHWB, 10 t/hm² biochar addition). Aggregate compositions and associated SOC contents were analyzed using wet and dry sieving methods. The results showed that: 1) Compared with CK, the addition of biochar significantly improved soil aggregate stability, increased water-stable macroaggregate content by 117%, increased mechanically stable large macroaggregate content by 11%, and decreased percentage of aggregate destruction (PAD) by 8%. In the treatments without biochar addition, soil aggregate stability decreased and PAD increased with increases of water and nitrogen inputs; 2) Biochar application significantly promoted SOC accumulation in aggregates, compared with non-biochar treatments, SOC in water-stable macroaggregates, mechanically stable large macroaggregates, and whole soil increased by 1.0–5.0, 2.4–4.0 and 1.2–1.5 g/kg, respectively, with amplification effects intensifying under higher water-nitrogen inputs; 3) Wet sieving demonstrated superior sensitivity in characterizing aggregate stability-SOC correlations in saline-alkali soils compared to dry sieving, recommending its prioritization in similar studies. This research offers insights into synergistic irrigation-nitrogen-biochar management strategies for enhancing saline soil structure and improving carbon sequestration efficiency in arid regions.

Key words: Soil aggregates; Organic carbon; Dry sieving; Wet sieving

干旱和半干旱地区土壤有机碳(SOC)储量约为全球土壤有机碳储量的 27%^[1],但由于土壤有机质含量低和土壤结构不稳定等问题,这些区域面临着严重的碳固存挑战^[2]。作为我国最大的内陆河流域,塔里木河流域是碳固存挑战的典型代表区域。1998—2008 年,该区域农业用地面积增加了 3 倍,虽然有效提高了当地经济水平^[3],但人类对自然资源的过度开发和不合理利用,导致流域生态系统退化、生物多样性降低及土地盐碱化加剧^[4]。土地盐碱化是影响干旱区农业生产、粮食安全及可持续发展的重大环境问题^[5]。土地盐碱化是土地退化的表现,全球盐碱化土地总面积约为 1.1×10⁹ hm²,其中我国盐碱化土地面积为 3.69×10⁷ hm²,占全国中低产田面积的 13.7%^[6]。盐碱土因含有较高浓度的可溶性盐分,不但会对土壤的物理、化学和生物过程产生不利影响,还会降低作物产量,进而威胁地区经济及生态安全^[7]。因此,盐碱土的改良对提高耕地质量与生产力、维护国家粮食安全和生态安全具有重要的意义。

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元^[8],是评估土壤结构的核心指标,其分布特征通过影响气体交换、水分运移、养分循环及微生物活性,成为土壤质量和生态功能的关键调控因子^[9-10]。研究表明,外源氮添加可通过促进大团聚体形成增强土壤结构稳定性^[11]。而生物质炭改良剂不仅能与氮素循环形成协同

效应,进一步强化团聚体稳定性,还可以使盐碱土植物生产力平均提高 29.3%^[12]。其对盐碱土的改良作用主要体现在以下两个方面:①物理结构改良:生物质炭的多孔结构可显著增加土壤的孔隙度,降低土壤容重,提高土壤持水能力,加速土壤中盐分的淋洗,降低土壤含盐量^[13-14];②化学性质调节:生物质炭可通过其强吸附作用,在氧化作用下释放酸性基团并与盐碱土的碱性基团相结合,从而降低盐碱土 pH^[14]。

湿筛法和干筛法是用于测定土壤团聚体最普遍的方法,土壤团聚体分布特征因筛分方法不同而有所不同^[7]。已有研究表明,筛分方法的不同会影响土壤的物理结构^[15]。吴林甲等^[16]对黄土高原蓄水保墒耕作方式下旱地麦田的研究表明,湿筛法更能表征黄土高原地区土壤团聚体特征。但相较于湿筛法,干筛法对土壤微生物与酶活性影响较小^[8]。然而,关于湿筛法和干筛法下盐碱土团聚体结构特征的差异尚未有明确的报道。

综上所述,在干旱区盐碱土生态系统中,制定科学的水肥管理策略以协同提升土壤团聚体稳定性、土壤固碳能力及作物产量,已成为实现农业绿色转型的迫切需求^[17]。然而,当前针对灌溉-施肥-生物质炭协同管理下,盐碱土不同粒径团聚体固碳功能的研究仍存在不足,尤其在碳库形成机制与稳定性维持方面缺乏系统性认知。为此,本研究以塔

里木河流域绿洲农田为对象，通过长期田间定位试验，探究水-氮-生物质炭配施对盐碱土团聚体结构及有机碳动态变化的影响，解析生物质炭与水、氮配施对盐碱土团聚体组成、稳定性及有机碳固持的调控效应，同时甄选适用于干旱区盐碱土团聚体稳定性与有机碳关联性研究的最优筛分方法，以为干旱区盐碱土碳库增容、水肥高效利用及可持续管理提供理论支撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试区概况

试验在中国科学院新疆生态与地理研究所阿克苏绿洲农田生态系统国家野外科学观测研究站(80°45'E, 40°37'N, 海拔 1 028 m)进行，试验周期为 5 年(2019—2023 年)^[18]。该区属于温带大陆干旱气候区，年均降水量 63 mm，年均气温 11.6 ℃，年均蒸发量 2 500 mm，蒸发量远高于降水量，过去 30 年(1986—2015 年)平均霜冻期 207 d，年日照时数 2 940 h^[4, 19]。

试验地土壤为盐碱土，土壤质地为粉质壤土。试验中使用的生物质炭是通过在限氧条件下对玉米秸秆进行缓慢热解制备的。玉米秸秆生物质炭的热解过程在 450~600 ℃立窑中进行，具有良好的资源利用潜力，能够在提高土壤质量的同时，有效实现农田废弃物的资源化利用。供试土壤和生物质炭的基本性质详见表 1。

表 1 供试土壤和生物质炭的基本性质
Table 1 Basic properties of soil and biochar tested

性质	土壤	生物质炭
0.02~2 mm 砂粒(%)	44	—
0.002~0.02 mm 粉粒(%)	50	—
<0.002 mm 黏粒(%)	6	—
全磷(g/kg)	0.83	
全钾(g/kg)	13.77	
有机碳(g/kg)	6.8	323.12
电导率(dS/m)	3.02	—
可溶性盐(g/kg)	2.1	—
土壤容重(g/cm ³)	1.41	—
填充密度(g/cm ³)	—	0.13
比表面积(m ² /g)	—	81.85
总孔隙度(cm ³ /g)	—	0.088
阳离子交换量(cmol/kg)	—	44.7

1.2 试验设计

采用完全随机区组设计，共设置 7 个处理：①对

照(CK)，为裸地，未种植任何作物；②LNLW，施用 100 kg/hm² 的氮肥(以 N 计，下同)+140 mm 灌溉量；③MNMW，施用 200 kg/hm² 的氮肥+220 mm 灌溉量；④HNHW，施用 300 kg/hm² 的氮肥+320 mm 灌溉量；⑤LNLWB，LNLW+10 t/hm² 生物质炭；⑥MNMWB，MNMW+10 t/hm² 生物质炭；⑦HNHWB，HNHW + 10 t/hm² 生物质炭。每个处理 3 个重复，小区面积为 7 m × 5 m，灌溉方式为漫灌。

供试作物为春玉米，品种为先玉 335，生育期 4—9 月，采用半膜覆盖模式种植，塑料膜宽 2.25 m，膜间距 0.7 m，行距 0.6 m，株距 0.15 m，种植密度 83 000 株/ hm²。供试氮肥为尿素，以 4：4：1 的比例分 3 次施用：基肥期(4 月底，播种前)、抽雄期(7 月中旬)及灌浆期(8 月初)。供试磷肥为过磷酸钙(Ca(H₂PO₄)₂)50 kg/hm² 和钾肥硫酸钾(K₂SO₄) 40 kg/hm² 作为基肥一次性施用。试验地在每年春季(4 月中旬)进行洗盐(灌水量 175 mm)，4 月下旬(播种前一天)将生物质炭与基肥一起施于表层，然后利用旋耕机将其与 0~20 cm 土层土壤进行混合。灌水方式为水肥一体化，各小区独立安装水表精确控制灌水量。全生育期共灌水 2 次，分别为抽雄期(7 月中旬)和灌浆期(8 月初)。依据试验设计设置 3 个灌水梯度，抽雄期灌水深度分别为 LNLW(B)85 mm、MNMW(B)145 mm、HNHW(B)205 mm；灌浆期灌水深度分别为 LNLW(B)55 mm、MNMW(B)75 mm、HNHW(B) 115 mm，折合各处理全生育期灌水总量分别为 140、220、320 mm。除灌水梯度差异外，其余灌水时期与当地常规春玉米管理保持一致(本试验通过水表控制以建立不同水分梯度)。生育期内各处理其他农事操作(除草、病虫害防治等)均同当地常规高产田管理一致。

2023 年 9 月中旬玉米收获后，在各小区采集 0~20 cm 表层土壤，每小区随机选取 5 点取样并混合为 1 个土样。剔除植物根系、石块及有机残渣后，将土样置于通风透气处风干，用于后续团聚体分级及土壤有机碳测定。

1.3 测定项目与方法

土壤有机碳含量：采用 H₂SO₄-K₂Cr₂O₇ 氧化法测定。称取 0.1~0.5 g 的土壤样品，在外部加热条件下(油浴 180 ℃，沸腾 5 min)，用移液管准确加入 0.8 mol/L(1/6K₂Cr₂O₇)标准溶液 5 mL，用注射器加入浓 H₂SO₄ 溶液 5 mL，充分氧化土壤有机质。取出试管，冷却至室温，剩余的 K₂Cr₂O₇ 用 0.2 mol/L 的 FeSO₄ 溶液滴定，直至变色，根据消耗的 K₂Cr₂O₇ 量来计算土壤有机碳含量^[20]。

干筛团聚体分级: 采用 Elliott^[21]提出的干筛法来分离土壤。首先, 称取 50 g 干燥的土壤样本(过 8 mm 粗筛去除植物根系和石砾)置于套筛顶层; 然后, 手动摇筛(30 次/min, 2 min), 依次通过孔径为 2、0.25、0.053 mm 的筛网; 最终, 得到 4 个粒径分级: 粗大团聚体(>2 mm)、细大团聚体(0.25~2 mm)、微团聚体(0.053~0.25 mm)、粉砂+黏粒团聚体(<0.053 mm)。

湿筛团聚体分级: 采用 Elliott^[21]提出的湿筛法来分离土壤。筛分时, 称取 50 g 风干土进行人工湿筛分级, 依次选用两级套筛(0.25、0.053 mm)将土壤筛分为大团聚体(>0.25 mm)、微团聚体(0.053~0.25 mm)与粉砂+黏粒团聚体(<0.053 mm)3 个粒级。土样先置于孔径 0.25 mm 筛上, 然后放入烧杯, 沿杯壁缓慢注入去离子水直至浸没土样, 静置浸润 5 min; 随后上下振动土筛(振幅 30 mm, 30 次/min, 2 min), 所得筛上残留物即为大团聚体; 将筛下悬浊液转移至 0.053 mm 筛网上继续湿筛(振幅 30 mm, 30 次/min, 2 min), 筛上部分即为微团聚体; 筛下悬浊液经离心(3 000 r/min, 3 min), 所得固相即为粉砂+黏粒团聚体。收集各粒级团聚体样品, 置于 60 °C 烘箱烘干至恒重, 冷却后称量。

1.4 数据处理与分析

土壤机械稳定性(干筛法)和水稳定性(湿筛法)大团聚体含量占比($R_{0.25}$)计算公式:

$$R_{0.25} = \frac{m_{>0.25}}{m_T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $m_{>0.25}$ 为 >0.25 mm 团聚体质量; m_T 为未筛分之前土壤总质量。

土壤机械稳定性(干筛法)和水稳定性(湿筛法)团聚体土壤平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)计算公式:

$$w_i = \frac{m_i}{m_T} \times 100\% \quad (2)$$

$$MWD = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \quad (3)$$

$$GMD = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln d_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \quad (4)$$

式中: m_i 是每个粒径分级的质量(g); w_i 是各分级所

占土壤总质量比例(%); $\bar{x}_i$ 是该粒径分级的平均直径(mm); n 为团聚体粒径分级的数量, 在湿筛法中为 3, 在干筛法中为 4。

土壤团聚体破坏率(PAD)计算公式:

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

式中: $DR_{>0.25}$ 为 >0.25 mm 机械稳定性团聚体含量(g/kg); $WR_{>0.25}$ 为 >0.25 mm 水稳定性团聚体含量(g/kg)。

团聚体有机碳对土壤总有机碳贡献量(W):

$$W = \frac{SOC_i \times m_i}{SOC \times m_T} \times SOC \quad (6)$$

式中: W 为团聚体中有机碳对土壤中有机碳的贡献量(g/kg); SOC_i 为第 i 级团聚体中有机碳含量(g/kg); m_i 为第 i 级团聚体质量(g); SOC 为土壤中总有机碳含量(g/kg)。

文中数据采用 Excel 2021 整理, 采用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析, LSD 法进行多重比较, 方差不齐时做对数转换; 采用皮尔逊相关性分析土壤团聚体与有机碳的相关关系。绘图使用 Origin 2024 完成。

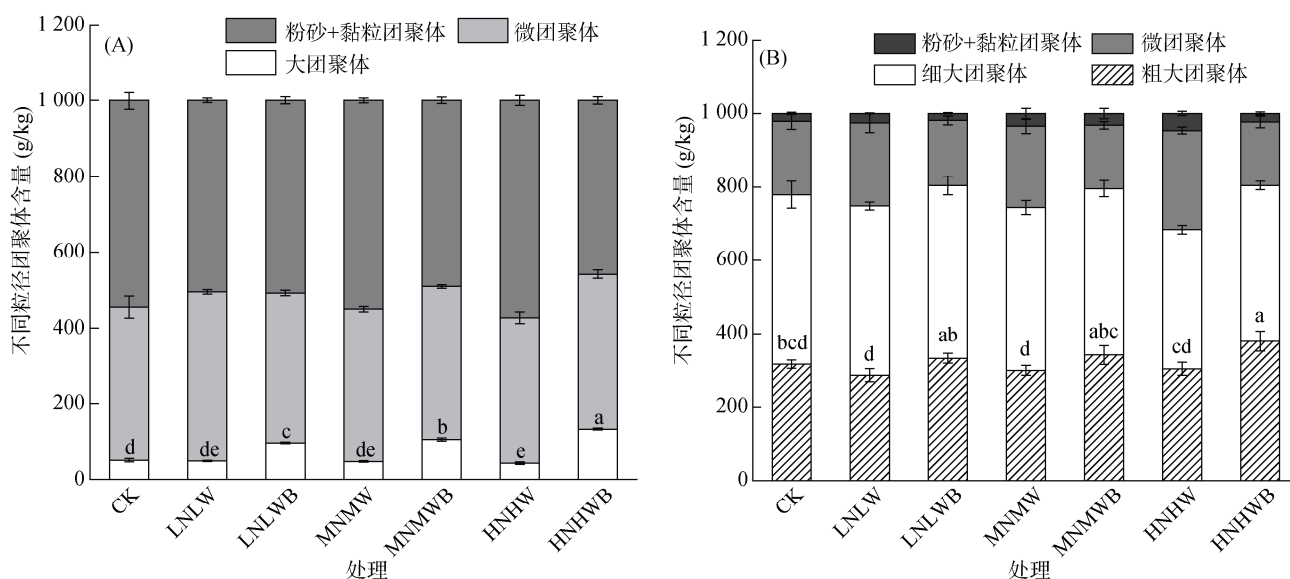
2 结果与分析

2.1 水肥生物质炭添加对土壤团聚体组成的影响

由图 1 可知, 湿筛法测定的团聚体以粉砂+黏粒团聚体为主(459~573 g/kg), 干筛法测定的团聚体以粗大团聚体和细大团聚体为主(683~804 g/kg)。湿筛法下, 相较于 CK 处理, 添加生物质炭处理增加了大团聚体含量, 平均增加 117%, 减少了粉砂+黏粒团聚体含量, 平均减少 11%。干筛法下, 相较于 CK 处理, 添加生物质炭处理增加了粗大团聚体含量, 平均增加 11%, 减少了细大团聚体含量和微团聚体含量, 分别平均减少 3% 和 16%。

2.2 水肥生物质炭添加对土壤团聚体稳定性特征的影响

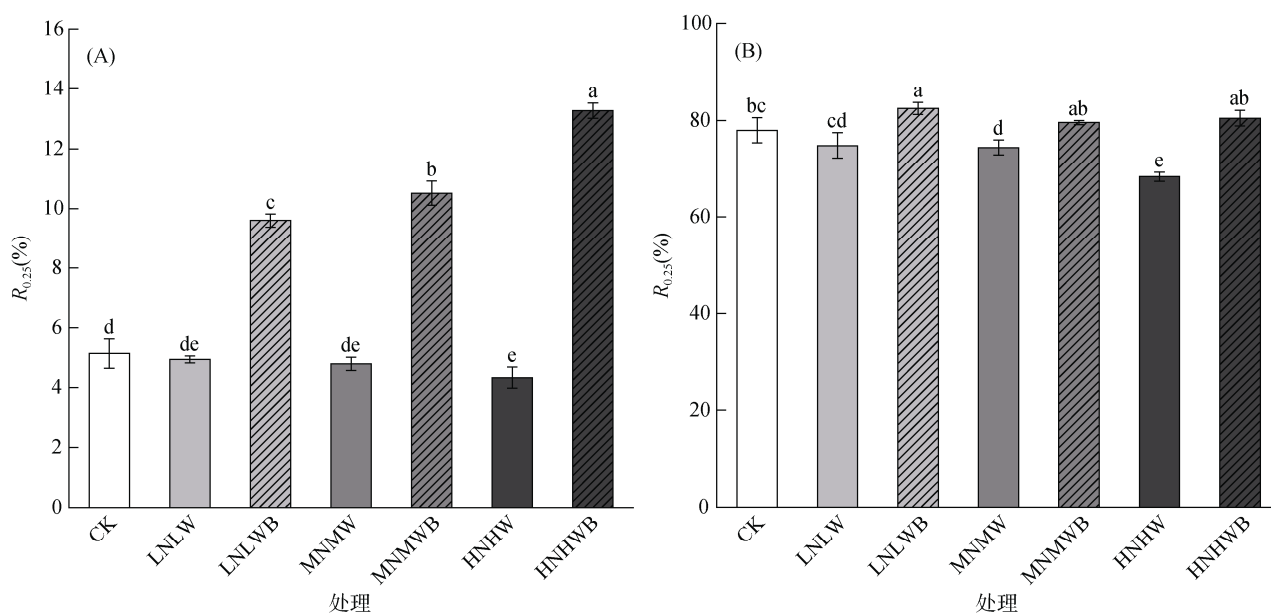
$R_{0.25}$ 、MWD、GMD 以及 PAD 是评价土壤团聚体稳定性的重要指标。从图 2 可知, 湿筛法下, 相较于 LNLW (4.9%)、MNMW(4.8%)和 HNHW(4.3%)处理, 添加生物质炭后的 LNLWB、MNMWB 和 HNHWB 处理均显著增加土壤 $R_{0.25}$, 增幅分别为 96%、119%、209%($P<0.05$)。干筛法下, 相较于 LNLW(74.8%)、MNMW(74.4%)和 HNHW(68.4%)处理, 添加生物质炭后的 LNLWB、MNMWB 和 HNHWB 处理均显著增加土壤 $R_{0.25}$, 增幅分别为



(A: 湿筛法; B: 干筛法。图中不同小写字母表示处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平, 下同)

图 1 湿筛法和干筛法下不同粒径团聚体含量

Fig. 1 Aggregate contents of different sizes under wet sieving and dry sieving



(A: 湿筛法; B: 干筛法)

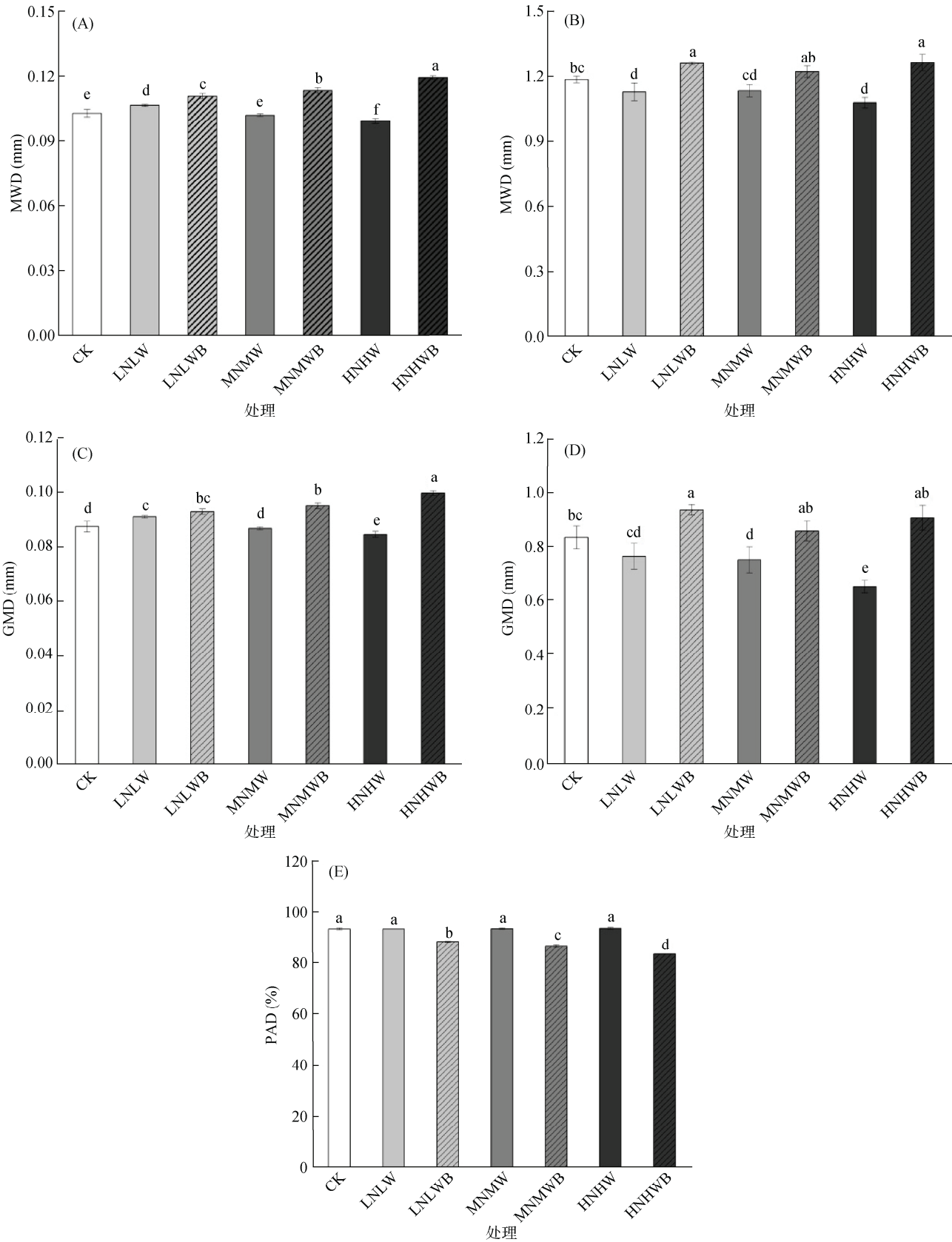
图 2 湿筛法和干筛法下团聚体 $R_{0.25}$

Fig. 2 Aggregate $R_{0.25}$ under wet sieving and dry sieving

10%、7%、18% ($P < 0.05$)。此外, 相较于未添加生物质炭处理, 添加生物质炭处理显著提高土壤团聚体 MWD 和 GMD, 湿筛法下平均提高 12% 和 10%(图 3A、3C), 干筛法下平均提高 12% 和 24%(图 3B、3D)。PAD 是表征土壤团聚体在水力作用下分散程度的指标, 其值越小表明土壤团聚体稳定性越高。本研究结果(图 3E)显示, 相较于未添加生物质炭处理, 添加生物质炭处理 PAD 降低, 平均降低 8%, 表明添加生物质炭提高了土壤团聚体稳定性。

2.3 水肥生物质炭添加对土壤有机碳分布的影响

添加生物质炭显著增加了土壤有机碳和团聚体结合态有机碳的含量(图 4、图 5)。添加生物质炭后, 土壤有机碳含量随灌水量和施氮量的增加而增加(图 4), 其中, HNHWB 处理有机碳含量(9.2 g/kg)显著高于 MNMWB(8.6 g/kg)和 LNLWB(8.3 g/kg)处理。与 HNHW(6 g/kg)、MNMW(6 g/kg)和 LNLW(5 g/kg)处理相比, 添加生物质炭的 HNHWB、MNMWB 和 LNLWB 处理分别显著增加有机碳含量 59%、55% 和 61% ($P < 0.05$)。



(A、C：湿筛法；B、D：干筛法)

图 3 湿筛法和干筛法下团聚体 MWD、GMD、PAD

Fig. 3 Aggregate MWD, GMD and PAD under wet sieving and dry sieving

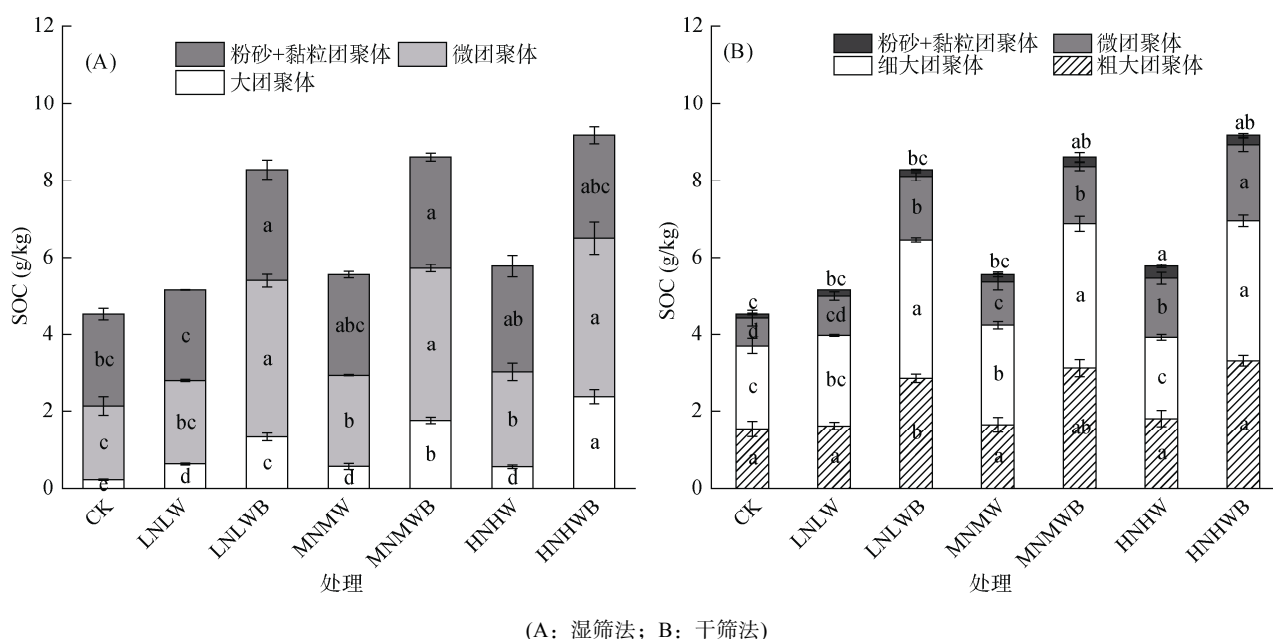


图4 湿筛法和干筛法下团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献量

Fig. 4 Contributions of aggregate organic carbon to soil organic carbon under wet sieving and dry sieving

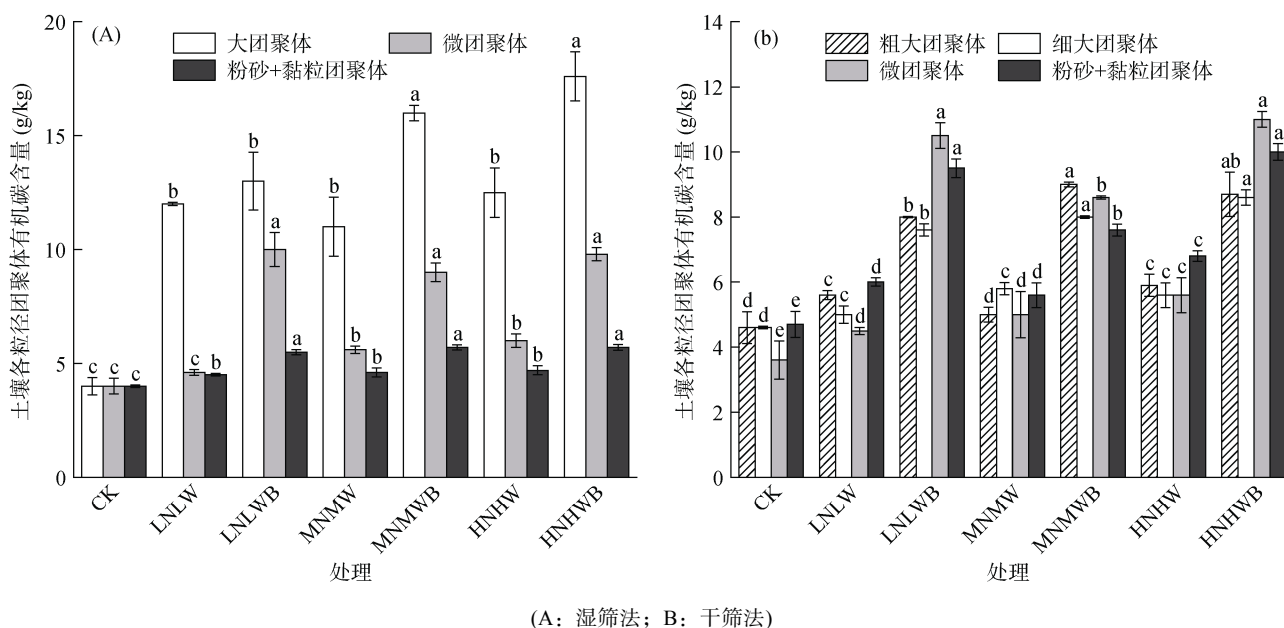


图5 湿筛法和干筛法下土壤各粒径团聚体有机碳含量

Fig. 5 Organic carbon contents in soil aggregates with different particle sizes under wet sieving and dry sieving

湿筛法下,在添加生物质炭处理中,各粒径团聚体有机碳在土壤总有机碳中的占比表现为:微团聚体(47%)>粉砂+黏粒团聚体(32%)>大团聚体(21%)(图5A)。相较于LNLW、MNMW、HNHW处理,施加生物质炭的LNLWB、MNMWB、HNHWB处理土壤总有机碳含量显著提升图(图4A);总有机碳新增量中,大团聚体有机碳增量分别贡献23%、38%、63%,微团聚体有机碳增量分别贡献61%、52%、47%,粉砂+黏粒团聚体有机碳无明显变化(图4A)。

干筛法下,各粒径团聚体有机碳在土壤总有机碳中的占比占比表现为:粗大团聚体(42%)>细大团聚体(35%)>微团聚体(20%)>粉砂+黏粒团聚体(3%)(图5B)。相较于LNLW、MNMW、HNHW处理,施加生物质炭的LNLWB、MNMWB、HNHWB处理土壤总有机碳含量显著提升(图4B);总有机碳新增量中,粗大团聚体有机碳增量分别贡献39%、48%、44%,细大团聚体有机碳增量分别贡献40%、38%、45%,微团聚体有机碳增量分别贡献020%、12%、13%。

粉砂-黏粒团聚体有机碳无明显变化(图 4B)。

3 讨论

3.1 水肥生物质炭添加对土壤团聚体组成及其稳定性的影响

作物类型、施肥和灌溉是影响土壤结构和特性的最重要因素,并对土壤团聚体的形成和破裂产生影响^[22]。Dong 等^[23]在华北平原粉质潮土上进行为期 3 年的田间试验,发现添加生物质炭增加了土壤团聚体 $R_{0.25}$ (37%),并提高了团聚体 MWD 25%。Jin 等^[24]在黑土上进行为期 3 年的田间试验,发现添加生物质炭处理相较于对照提高了土壤团聚体 $R_{0.25}$ (7%),并将土壤团聚体 MWD 提高至 0.180 mm。本研究结果表明,湿筛法测定下,与同水氮组合的处理相比,每年添加 10 t/hm² 生物质炭,5 年后土壤团聚体 $R_{0.25}$ 平均提高 6.5 个百分点,平均增幅为 142% ($P<0.05$); MWD 平均增加 0.012 mm,平均增幅为 12% ($P<0.05$); GMD 平均增加 0.014 mm,平均增幅为 9% ($P<0.05$)。干筛法测定下,土壤团聚体 $R_{0.25}$ 平均提高 24.8 个百分点,平均增幅为 11.4% ($P<0.05$),

MWD 平均增加 0.136 mm, GMD 平均增加 0.177 mm。

同时,本研究中,湿筛法下, LNLWB、MNMWB 和 HNHWB 处理的大团聚体含量以及 MWD 值均随着氮肥施用量的增加而增加,表明当生物质炭与氮肥配合使用时,大团聚体含量随着生物质炭的添加稳定增加,而微团聚体和黏土颗粒的含量则下降。这可能是因为生物质炭与黏土矿物之间的表面疏水-亲水相互作用及与土壤生物群落和活性有机碳的结合能力,有助于土壤团聚的形成^[25]。水稳性团聚体的数量和分布可反映土壤结构的稳定性和抗侵蚀能力^[26]。研究表明,对于多样化种植模式,土壤团聚体稳定性研究采用干筛法较好^[27]。黏土优选湿筛法,砂土优选干筛法,不同土壤类型需选择不同筛分方法^[28]。本研究中,湿筛法下,土壤有机碳含量与 MWD 和 GMD 呈正相关,而在干筛法下,土壤有机碳含量与 MWD 和 GMD 均无显著相关性(图 6)。新疆阿克苏地区属于干旱气候,土壤团聚体的水稳性对于农田土壤的质量、抗冲刷性和水分保持性至关重要。湿筛法能更好地模拟土壤在实际环境中的表现,尤其对于生物质炭等土壤改良剂的影响,湿筛法能提供可靠的数据。

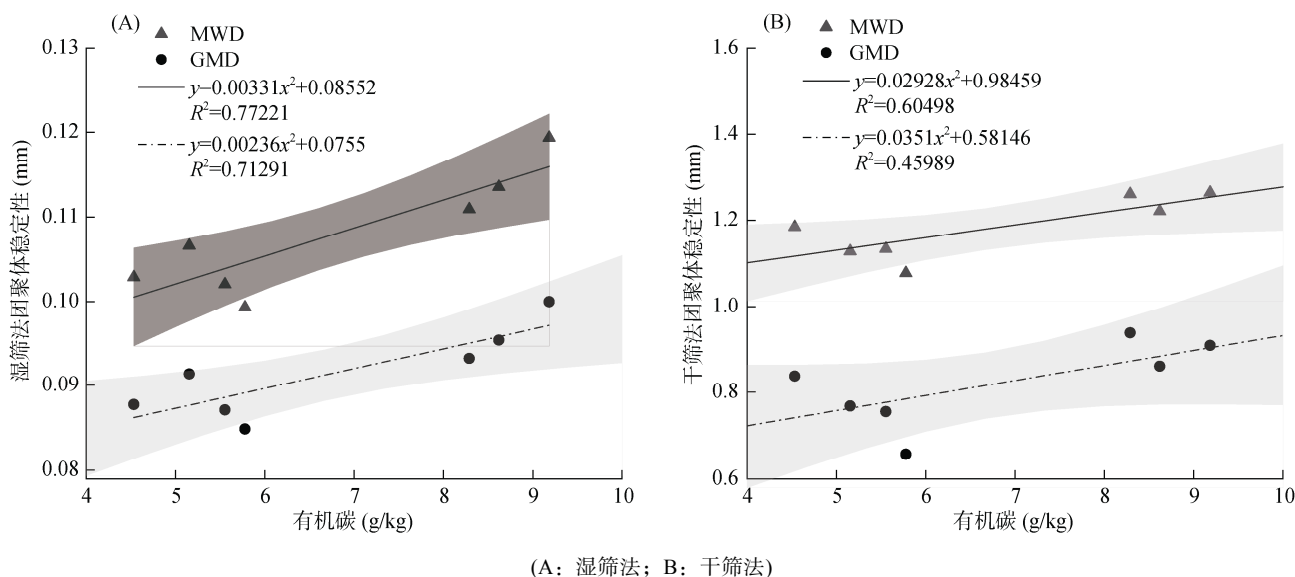


图 6 湿筛法和干筛法下添加生物质炭土壤有机碳与团聚体稳定性的关系

Fig. 6 Relationship between soil organic carbon and aggregate stability after biochar application under wet sieving and dry sieving

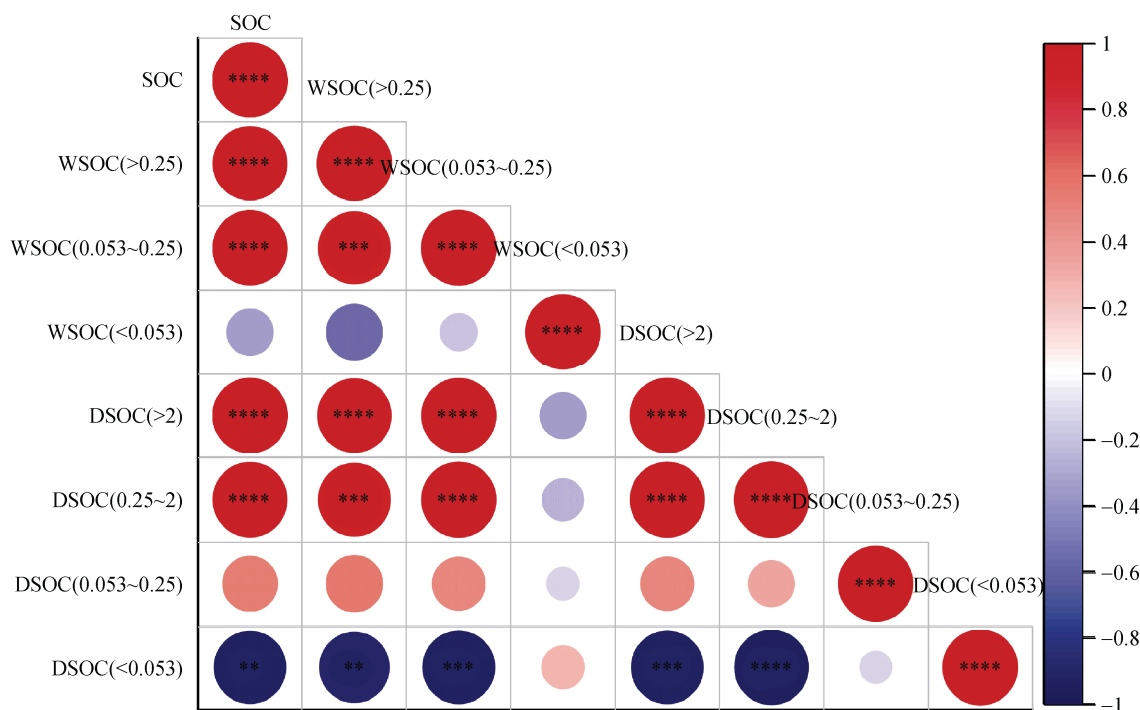
3.2 水肥生物质炭添加对土壤团聚体有机碳的影响

本研究中,湿筛法下不同粒径团聚体中的有机碳含量普遍随着团聚体粒径的增大而增加,表明土壤团聚体的形成遵循 Tisdall 和 Oades^[29]提出的分层序列模型,即随着团聚体粒径增大,有机碳含量增加。此外,湿筛法测定结果显示,以相同氮水梯度未配施生物质炭处理为参照,配施生物质炭后土壤大团聚体有

机碳贡献量相对增幅达 10%,微团聚体有机碳贡献量相对增幅为 4%,粉砂+黏粒组分有机碳贡献量则降低 14%。这与大多数研究的结果一致^[23-24]。在本课题连续 4 年的田间试验中,砂壤土大团聚体中有机碳的贡献低于试验 1 年的结果^[30],而粉砂+黏粒和微团聚体中的有机碳增量显著。在 Sun 等^[31]8 年长期定位试验中,仅添加生物质炭处理平均提高土壤有机碳含量

1.5 g/kg, 生物质炭与氮肥配施处理平均增加土壤有机碳含量 1.8 g/kg。本研究中, 干筛法测定结果显示, 以相同氮水梯度未配施生物质炭处理为参照, 配施生物质炭后土壤粗大团聚体有机碳贡献量相对增幅达 83%, 细大团聚体、微团聚体有机碳贡献量相对增幅分别为 56%、41%, 粉砂+黏粒团聚体有机碳贡献量增幅仅 6%; 相关性分析表明, 土壤有机碳含量的变化与大团聚体有机碳密切相关, 而粉砂+黏粒团聚体有机碳相关性不显著(图 7)。这表明, 生物质炭首先

在大团聚体中积累, 经过一定时间发生分解和转化, 进入粉砂+黏粒团聚体和微团聚体, 从而增加土壤及其团聚体有机碳含量^[32]。此外, 本研究中, 团聚体的分布及其有机碳含量对不同施肥和灌溉水平的响应没有显著差异, 但在添加生物质炭后显著增加, 且随着灌溉和施肥水平的增加而增加。这可能是由于本研究施用的生物质炭量为 10 t/hm², 且生物质炭在土壤中的分解速率极慢^[33], 从而导致处理间有机碳含量的差异主要来源于土壤原有活性有机碳组分的波动。



(各指标前的 W、D 分别表示湿筛法、干筛法测定结果; >2: 粗大团聚体(mm); 0.25~2: 细大团聚体(mm); 0.053~0.25: 微团聚体(mm); <0.053: 粉砂+黏粒团聚体(mm); *, **, ***, **** 分别表示在 $P \leq 0.05$ 、 $P \leq 0.01$ 、 $P \leq 0.001$ 、 $P \leq 0.0001$ 水平显著相关)

图 7 土壤有机碳含量与湿筛法和干筛法下团聚体有机碳含量的相关性

Fig. 7 Correlation of soil organic carbon with aggregate organic carbon under wet sieving and dry sieving

4 结论

1) 添加生物质炭促进了新疆塔里木河流域干旱区盐碱土壤中大团聚体(>0.25 mm)的形成, 显著提高了土壤团聚体 MWD 和 GMD。与干筛法结果相比, 湿筛法下添加生物质炭处理的大团聚体含量提升更多(96%~209%), 表明生物质炭有效优化了土壤结构, 增强了土壤的抗侵蚀能力。

2) 湿筛法下, 土壤团聚体分布与有机碳含量呈现显著正相关 ($R^2 > 0.7$), 而干筛法下, 其相关性较弱 ($R^2 \leq 0.6$), 这表明湿筛法更能敏感表征盐碱土中水稳性团聚体对有机碳的物理保护机制。因此, 湿筛法更适用于干旱区盐碱土团聚体-有机碳

关联性研究。

3) 添加生物质炭显著提高了大团聚体和微团聚体中有机碳的贡献量, 分别提高了 117%~300% 和 64%~95%。湿筛法下, 微团聚体占主导地位(47%); 干筛法下, 细大团聚体占主导地位(42%)。这些变化表明, 生物质炭通过物理屏障和化学吸附作用保护了有机碳, 减少其分解。本研究证实, 湿筛法因其对水稳性团聚体及有机碳保护潜力的精准表征, 应作为干旱区盐碱土结构-碳耦合研究的首选方法。同时, 生物质炭与水氮协同管理通过“结构改良-碳增汇”双路径, 显著提升盐碱土生态功能, 为塔里木河绿洲农田的可持续固碳提供了理论依据和技术支撑。

参考文献:

- [1] Liu X, Yang T, Wang Q, et al. Dynamics of soil carbon and nitrogen stocks after afforestation in arid and semi-arid regions: A meta-analysis[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 618: 1658–1664.
- [2] Nazir M J, Li G L, Nazir M M, et al. Harnessing soil carbon sequestration to address climate change challenges in agriculture[J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 237: 105959.
- [3] Li W W, Huang F, Shi F Z, et al. Human and climatic drivers of land and water use from 1997 to 2019 in Tarim River basin, China[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 9(4): 532–543.
- [4] 李正, 赵林. 西北干旱区山水林田湖草沙系统治理研究实践——以塔里木河重要源流区为例[J]. *中国国土资源经济*, 2022, 35(12): 13–18, 63.
- [5] Wang G Z, Ni G, Feng G, et al. Saline-alkali soil reclamation and utilization in China: Progress and prospects[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2024, 11(2): 216–228.
- [6] 李祥东, 郑彩雪, 党菲菲, 等. 秸秆添加与淋洗对盐碱土团聚体结构的影响[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(4): 84–91.
- [7] Ivushkin K, Bartholomeus H, Bregt A K, et al. Global mapping of soil salinity change[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111260.
- [8] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023, 60(3): 627–643.
- [9] Vogel H J, Balseiro-Romero M, Kravchenko A, et al. A holistic perspective on soil architecture is needed as a key to soil functions[J]. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73(1): e13152.
- [10] 郭正, 张凤宝, 黄悦, 等. 典型黄绵土团聚体稳定性变化对植被演替的响应[J]. *土壤*, 2025, 57(1): 195–203.
- [11] Lu X F, Hou E Q, Guo J Y, et al. Nitrogen addition stimulates soil aggregation and enhances carbon storage in terrestrial ecosystems of China: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(12): 2780–2792.
- [12] Liu Q, Meki K, Zheng H, et al. Biochar application in remediating salt-affected soil to achieve carbon neutrality and abate climate change[J]. *Biochar*, 2023, 5(1): 45.
- [13] 黄广志, 黄立华, 刘伯顺, 等. 基于 Meta 分析的苏打盐碱土改良效果评估[J]. *土壤学报*, 2025, 62(2): 388–399.
- [14] 赵维彬, 王松, 刘玲玲, 等. 生物炭改良盐碱地效果及其对植物生长的影响研究进展[J]. *土壤通报*, 2024, 55(2): 551–561.
- [15] Bach E M, Hofmockel K S. Soil aggregate isolation method affects measures of intra-aggregate extracellular enzyme activity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 69: 54–62.
- [16] 林甲, 祁琛, 闫秋艳, 等. 耕作方式对旱地麦田土壤团聚体及其碳氮组分分布的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(2): 193–200, 220.
- [17] Zhang S, Zamanian K, Raza S, et al. A balance among irrigation and fertilization regimes to reduce greenhouse gases emissions from saline and alkaline soils[J]. *Land Degradation & Development*, 2024, 35(1): 168–182.
- [18] Zhang S, Xue L H, Liu J, et al. One-third substitution of nitrogen with cow manure or biochar greatly reduced N_2O emission and carbon footprint in saline-alkali soils[J]. *Field Crops Research*, 2024, 316: 109517.
- [19] Zhang S, Xue L H, Liu J, et al. Biochar application reduced carbon footprint of maize production in the saline-alkali soils[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 368: 109001.
- [20] Zhang S, Liu J, Feng Y, et al. Optimized fertilization mitigated carbon and nitrogen losses in a Solonchak[J]. *European Journal of Soil Science*, 2024, 75(2): e13474.
- [21] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627–633.
- [22] 肖欣娟, 夏建国, 于正义, 等. 茶渣生物炭对茶园土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(3): 594–601.
- [23] Dong X L, Guan T Y, Li G T, et al. Long-term effects of biochar amount on the content and composition of organic matter in soil aggregates under field conditions[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(5): 1481–1497.
- [24] Jin L, Wei D, Yin D W, et al. Investigations of the effect of the amount of biochar on soil porosity and aggregation and crop yields on fertilized black soil in northern China[J]. *PLoS One*, 2020, 15(11): e0238883.
- [25] Jeffery S, Meinders M B J, Stoof C R, et al. Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil[J]. *Geoderma*, 2015, 251: 47–54.
- [26] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J]. *Agronomy Journal*, 1936, 28(5): 337–351.
- [27] Yan Z J, Zhou J, Yang L, et al. Diversified cropping systems benefit soil carbon and nitrogen stocks by increasing aggregate stability: Results of three fractionation methods[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 824: 153878.
- [28] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(4): 425–437.
- [29] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141–163.
- [30] Zhang Q Z, Du Z L, Lou Y L, et al. A one-year short-term biochar application improved carbon accumulation in large macroaggregate fractions[J]. *Catena*, 2015, 127: 26–31.
- [31] Sun J, Lu X R, Chen G S, et al. Biochar promotes soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration and regulates microbial community structures in Mollisols from Northeast China[J]. *Soil*, 2023, 9(1): 261–275.
- [32] Xu P D, Wang Q, Duan C J, et al. Biochar addition promotes soil organic carbon sequestration dominantly contributed by macro-aggregates in agricultural ecosystems of China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 359: 121042.
- [33] Wang J Y, Xiong Z Q, Kuzyakov Y. Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects[J]. *GCB Bioenergy*, 2016, 8(3): 512–523.

(责任编辑: 于 飞)