

生物质炭添加量对盐碱土壤特性及棉花苗期生长的影响

王钰婷^{1,2}, 田广丽¹, 田雨雨^{1,2}, 赵青青^{1,2}, 甄博¹, 李会贞¹, 周新国^{1*}

(1.中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 2.中国农业科学院研究生院, 北京 100080)

摘要:【目的】研究不同生物质炭添加量对盐碱土壤特性及棉花苗期生长的影响, 为生物质炭在盐碱地上的应用提供科学的理论依据。【方法】通过桶栽试验, 以棉花(中 S9612)为研究对象, 设置添加生物质炭量 0% (BC0)、1% (BC1)、3% (BC3) 和 5% (BC5) 4 个处理, 分析了生物质炭对盐碱土壤水盐运移、土壤基本理化指标、土壤酶活性和棉花苗期生长指标的影响。【结果】与 BC0 处理相比, 生物质炭可以提高 0~20 cm 土层质量含水率, 质量含水率的增加量与生物质炭添加量成反比, 但对 20~30 cm 土层质量含水率无显著影响; 生物质炭能够降低 0~20 cm 土层土壤含盐量; 生物质炭对土壤 pH、全磷 (TP) 和速效磷无显著影响; 对土壤有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、全钾 (TK)、速效钾、过氧化物酶 (POD) 和纤维二糖苷酶 (FTG) 有显著正影响, 且 BC1 处理的 POD 和 FTG 活性增加最显著; 但对土壤碱解氮和多酚氧化酶 (PPO) 存在显著负影响; BC1 处理显著增加苗期棉花的茎粗和地上部干物质量, 对株高无显著影响, BC3 处理对棉花株高、茎粗和地上部干物质量都无显著影响, BC5 处理显著降低了苗期棉花的株高、茎粗和地上部干物质量; 且添加生物质炭引起棉花茎叶全氮量的减少。【结论】生物质炭可以增加土壤养分, 提高土壤部分酶活性, 但只有 1% 生物质炭添加量对棉花苗期生长具有促进作用, 5% 生物质炭添加量反而会抑制作物生长。

关键词: 盐碱土壤; 生物质炭; 土壤基本理化特性; 土壤酶活性; 作物生长

中国分类号: S156.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2022168

OSID:



王钰婷, 田广丽, 田雨雨, 等. 生物质炭添加量对盐碱土壤特性及棉花苗期生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(1): 72-79.

WANG Yuting, TIAN Guangli, TIAN Yuyu, et al. Optimizing Biochar Amendment to Improve Soil Property and Cotton Seedling Growth in Saline Soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(1): 72-79.

0 引言

【研究意义】土壤盐碱化会破坏土壤理化性质, 降低土壤养分有效性, 使得土壤板结, 耕地质量下降甚至丧失耕种能力, 导致作物减产, 造成农业土地资源浪费和农业经济效益大幅下滑, 进而危害国家粮食安全。我国盐碱地分布范围广、面积大、类型多, 总面积约 1 亿 hm^2 ^[1], 其中有 80% 的盐碱土具有再生产的潜力。随着耕种面积的减少, 盐碱地作为我国重要的后备耕地资源, 对其修复治理是十分必要的。【研究进展】传统的盐碱地改良方法主要有工程措施、化学措施和综合措施^[2]。近年来, 生物质炭作为一种新兴改良剂被广泛研究并应用于农业领域中, 其不仅对土壤生产功能的健康发展具有显著的正效应^[3], 同时也实现了大量秸秆的资源化利

用, 并缓解了秸秆焚烧带来的环境问题。生物质炭通常是指用树木和作物秸秆等有机材料在限制氧或无氧条件下高温裂解炭化形成的固态物质^[4], 自身富含 C 以及多种矿质营养元素, 具有巨大的比表面积、多孔性、高吸附性以及长期稳定性。目前, 诸多研究表明生物质炭可以改善土壤理化性质^[5-7], 增加土壤养分^[8-9]和碳固存量^[10-12], 调节土壤酶活性及微生物群落结构^[13-14]。刘园等^[15]通过 2 a 的小麦-玉米轮作试验表明, 生物质炭降低了土壤质量, 增加了土壤含水率, 提高了作物产量。蒋雪洋等^[16]研究发现, 生物质炭可以提高稻田土壤团聚体稳定性, 增加土壤有机碳量、全氮量和全磷量。Lehmann 等^[17]指出, 生物质炭通过吸附 NO_3^- 和 NH_4^+ , 减少土壤的氮挥发与氮素流失, 提高氮肥利用率。Feng 等^[18]针对棉花苗期的研究发现, 施入生物质炭有利于土壤中的氨基酸代谢, 对氮素同化效率有显著影响, 可以提高田间氮素利用率。高珊等^[19]通过大麦-玉米轮作试验表明, 生物质炭提高土壤磷酸酶的活性, 显著促进土壤磷素转化, 提升土壤磷肥利用率。吴涛等^[20]研究发现, 生物质炭通过提高土壤功能菌丰度及土壤

收稿日期: 2022-03-30

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程项目 (CAAS-ZDRW202201); 水稻对高温与涝渍耦合胁迫的生理生态响应及根系解剖学机制项目 (222102110339)

作者简介: 王钰婷 (1997-), 女, 山西大同人。硕士研究生, 主要从事盐碱地改良; 排水理论与新技术。E-mail: wangyuting8516@163.com

通信作者: 周新国 (1970-), 男, 河南信阳人。研究员, 博士生导师, 主要从事农田排水技术研究。E-mail: zhouxinguo@caas.cn

碳氮等转化酶活性，从而改善土壤养分供应能力，促进作物生长。综上所述，生物质炭在土壤改良中表现出了巨大潜力，这使其在盐碱地上的应用也越来越受到关注。已有研究表明，在盐碱土壤中添加生物质炭可以增加土壤养分，减轻盐胁迫，促进作物生长^[21-23]。但也有研究指出，生物质炭导致盐碱土壤 pH 值和含盐量显著增加，降低养分有效性^[24-25]。

【切入点】由于生物质炭本身呈碱性，其对盐碱土壤的理化性质及作物生长是否具有积极效应仍需进一步探讨。棉花是耐盐作物，被喻为盐碱地种植的先锋作物^[26]，其对盐碱地的开发利用十分重要，但棉花在不同生长阶段对盐分的敏感程度不同，棉花耐盐能力随着生育进程而逐渐提高，苗期棉花对盐分最敏感^[27]，保证棉花在苗期正常生长对棉花冠层形成和后期生长具有不可忽视的作用。【拟解决的关键问题】因此，本研究通过桶栽试验，研究和揭示生物质炭对土壤理化性质、土壤酶活性及棉花苗期生长的影响，以期为生物质炭在盐碱地上的科学应用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

桶栽试验于 2021 年 6—10 月在中国农业科学院农田灌溉研究所新乡综合实验基地（35°18'N，113°54'E）的塑料避雨大棚下进行。该试验区日照时间为 2 399 h，年平均气温为 14 °C，无霜期为 220 d。供试土壤选自新疆第一师阿拉尔市第十六团（40°22'—40°57'N，80°30'—81°58'E）的膜下滴灌棉田，取土深度为 0~20 cm，土壤类型属沙壤土。经碾压、粉碎、风干、过筛（5 mm）后，在干燥条件下保存备用。土壤 pH 值为 8.6，含盐量为 4.30 g/kg，有机碳为 4.54 g/kg，铵态氮为 0.392 mg/kg，硝态氮为 19.080 mg/kg，有效磷为 6.980 mg/kg，速效钾为 29.384 mg/kg，全钾为 13.036 g/kg。试验苗期氮肥用量为纯氮 0.06 g/kg，N：P₂O₅：K₂O=2：3：4，化肥类型为尿素（含 N 46%），过磷酸钙（含 P₂O₅ 16%），硫酸钾（含 K₂O 50%）。化肥具体用量：尿素为 0.131 g/kg，过磷酸钙为 0.563 g/kg，硫酸钾为 0.240 g/kg，所有肥料均以固体形式均匀施于整桶。试验所用生物质炭在河南立泽环保科技有限公司购买，由玉米秸秆在 500~600 °C 的高温下缺氧裂解炭化制得。该生物质炭 pH 值为 9，水分系数为 1.025 5，有机碳量 410.898 g/kg，全氮量 8.354 g/kg，全磷量 2.327 g/kg，全钾量 30.594 g/kg，P₂O₅ 量 5.329 g/kg，K₂O 量 19.156 g/kg。

试验于 2021 年 6 月 14 日播种，供试棉花种子是中国农业科学院棉花研究所提供的“中 S9612”。

试验用桶规格为（内径×高）：20 cm×50 cm，采用分层装土的方式，每桶装土 20 kg，装土深度均为 40 cm。试验以 0~20 cm 土层的生物质炭添加量（占土壤干量的百分比）为试验因素，分别为不添加生物质炭（BC0）、1%生物质炭添加量（BC1）、3%生物质炭添加量（BC3）和 5%生物质炭添加量（BC5），共计 4 个处理，每个处理 15 桶。每桶播种 3 粒，待棉花生长至“两叶一心”时，定苗，即每桶各留一株长势与本处理相同的棉花幼苗。各处理灌水时间保持一致，均采用滴箭进行灌水，滴箭插于土层 5 cm 处，滴头流量为 1 L/h，通过称质量法计算灌水量，使土壤质量含水率保持在田间持水率的 75%~90%。苗期具体灌水方案见表 1。

表 1 苗期灌水方案表

处理	灌水量/(L 桶 ⁻¹)					
	0614	0617	0623	0704	0720	0730
BC0	0.30	1.06	0.87	1.62	1.60	1.14
BC1	0.30	0.80	1.08	0.90	1.39	0.80
BC3	0.30	0.57	0.49	0.75	0.81	0.67
BC5	0.30	0.48	0.15	0.57	0.59	0.47

1.2 样品采集及测定

本试验于棉花苗期（2021 年 7 月 23 日，灌水后 2 d）进行破坏性取样。株高（cm）采用直尺从土面垂直测量到棉株顶端；茎粗（mm）采用电子游标卡尺测量子节叶以上第一主茎节位中间；之后将棉花茎和叶分别剪下、洗净，放置于烘箱，在 105 °C 下，杀青 30 min，在 75 °C 烘干 48 h 至恒质量，测定茎和叶干物质积累量；将棉花干茎和干叶分别磨细，用浓 H₂SO₄ 消煮，AA3 型全自动流动分析仪测定茎叶全氮量。

试验采用 3 点取样法随机取土，取土深度分为 0~10、10~20 cm 和 20~30 cm，将各层土样分别混合均匀作为土壤样品，之后用本试验用土分层回填。一部分鲜土样品过 2 mm 筛后立即冷藏，用于测定土壤酶活性；一部分鲜土通过烘干法测定土壤质量含水率；其余土壤样品自然风干，用于测定土壤基本理化特性。土壤理化性质采用常规方法进行测定^[28]。土壤含盐量采用质量法测定；土壤 pH 值采用蒸馏水浸提（土水比 1：5），pH 计测定；土壤有机碳量（SOC）采用外加热重铬酸钾容量法测定；土壤全氮量（TN）采用开氏消煮法提取，AA3 型全自动连续流动分析仪测定；土壤全磷量（TP）采用 HClO₄-H₂SO₄ 消煮浸提，钼锑抗比色法测定；土壤全钾量（TK）采用 NaOH 熔融，火焰光度法测定；土壤碱

解氮采用碱解扩散法测定；土壤速效磷采用 NaHCO_3 浸提，钼锑抗比色法测定；土壤速效钾采用 NH_4OAc 浸提，火焰光度法测定；土壤过氧化物酶（POD）、纤维二糖苷酶（FTG）和多酚氧化酶（PPO）采用微孔板荧光法，Infinite F50 酶标分析仪测定。

1.3 数据处理

试验数据使用 Excel 2010 和 R4.0.2 进行处理和统计分析，采用 Origin 2019 进行绘图，采用单因素方差分析（one-way ANOVA）和 Tukey's HSD 多重比较法进行差异显著性检验（ $p < 0.05$ ）。相关性分析采用皮尔逊（Pearson）相关分析法并用 psych 包进行显著性检验，p-value 采用 FDR 法对其进行修正。

2 结果与分析

2.1 添加生物质炭对盐碱土壤水盐分布特征的影响

图 1 为生物质炭对 0~30 cm 土层水盐分布的影响。由图 1 可知，与 BC0 处理相比，BC1、BC3、BC5 处理 0~20 cm 土层质量含水率分别增加了 18.32%、12.10%、9.01%，说明土壤质量含水率的增加量与生物质炭添加量成反比；而生物质炭对 20~30 cm 土层质量含水率无显著影响。与 BC0 处理相比，BC1、BC3、BC5 处理 0~20 cm 土层的土壤含盐量分别降低了 26.85%、45.38%、36.59%；BC3 处理和 BC5 处理 20~30 cm 土层的土壤含盐量分别增加了 23.24% 和 41.85%，进而说明生物质炭可以促进土壤的盐分淋洗。

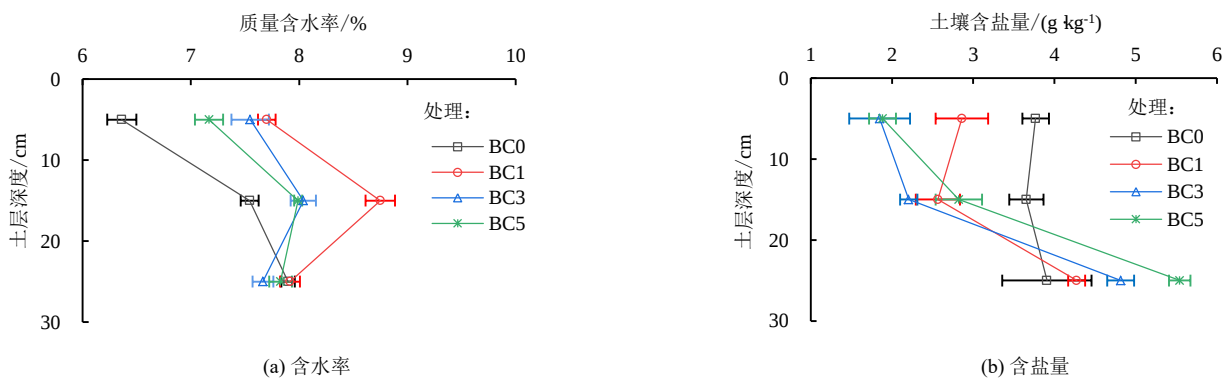


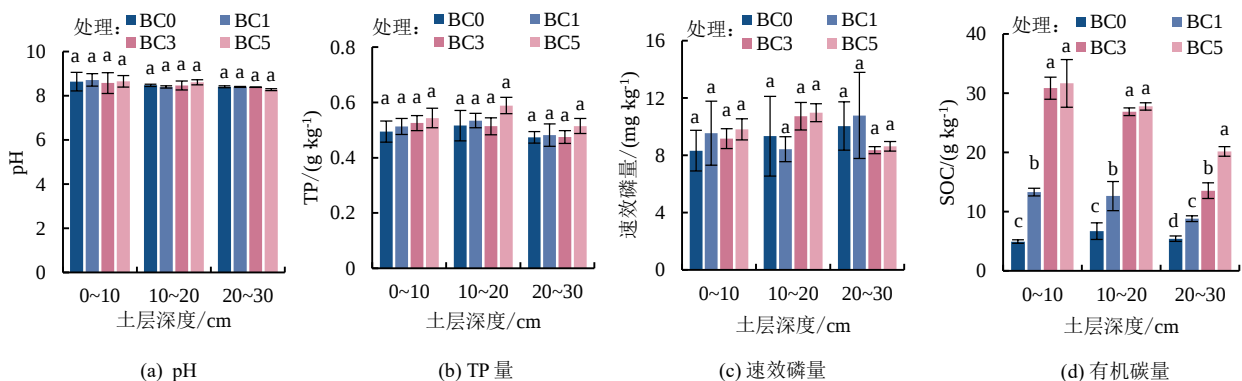
图 1 生物质炭对 0~30 cm 土层水盐分布的影响

Fig.1 Effects of biochar on water and salt distribution in 0-30 cm soil layer

2.2 添加生物质炭对盐碱土壤化学特性的影响

生物质炭对土壤 pH、全磷量和速效磷量无显著影响；对土壤有机碳量、全氮量、全钾量和速效钾量有显著正向影响，但对土壤碱解氮存在显著负向影响（图 2）。与 BC0 处理相比，BC1、BC3 处理和 BC5 处理 0~30 cm 土层的土壤有机碳量分别增加了 62.47%~169.15%、149.03%~524.25% 和 271.14%~540.85%。对于土壤全氮量而言，BC0 处理和 BC1 处理土壤全氮量无显著差异，但却显著低于 BC3 处理和 BC5 处理，BC3 处理和 BC5 处理 0~30 cm 土层全氮量分别比 BC0 处理和 BC1 处理高了

58.09%~134.71% 和 63.29%~140.34%。与 BC0 处理相比，BC1 处理和 BC3 处理各土层土壤全钾量无显著变化，而 BC5 处理显著增加 0~30 cm 土层土壤全钾量 33.68%~56.83%。与 BC0 处理相比，BC1、BC3 处理和 BC5 处理 0~30 cm 土层的土壤速效钾量分别增加了 25.27%~42.94%、87.04%~97.60% 和 133.82%~165.66%。对于碱解氮，与 BC0 处理相比，BC1、BC3 处理和 BC5 处理 0~20 cm 土层的土壤碱解氮量分别降低了 19.14%~29.99%、30.00%~38.11% 和 24.45%~40.63%；但 20~30 cm 土层的土壤碱解氮量无显著变化。



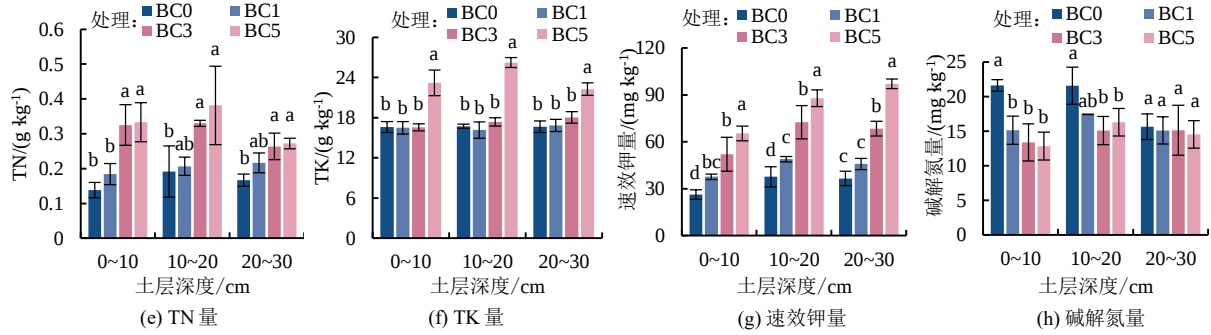


图2 生物质炭对盐碱土各层土壤化学性质的影响

Fig.2 Effects of biochar on soil chemical properties of saline-alkaline soil

2.3 添加生物质炭对盐碱土壤酶活性的影响

图 3 为生物质炭对盐碱土壤酶活性的影响。由图 3 可知，添加生物质炭可以显著提高 POD 和 FTG 的活性，且 BC1 处理的提高效果最为显著；与 BC0 处理相比，BC1 处理和 BC3 处理对 PPO 活性无显著影响，而 BC5 处理显著降低了 PPO 的活性。

2.4 生物质炭添加量与土壤特性的相关性

表 2 为生物质炭添加量与土壤特性的相关系数。由表 2 可知，生物质炭添加量与土壤 SOC、TN、TK 和速效钾显著正相关，与土壤碱解氮和 PPO 显著负相关；在各土壤特性之间，土壤 SOC 与土壤 TN、速效钾显著正相关，与土壤碱解氮显著负相关；土壤 TN 与土壤速效钾显著正相关，与土壤碱解氮呈显著负相关；土壤 TK 与速效钾显著正相关，与

土壤 PPO 极显著负相关；土壤碱解氮与速效钾显著负相关；土壤 POD 活性与 FTG 活性显著正相关。

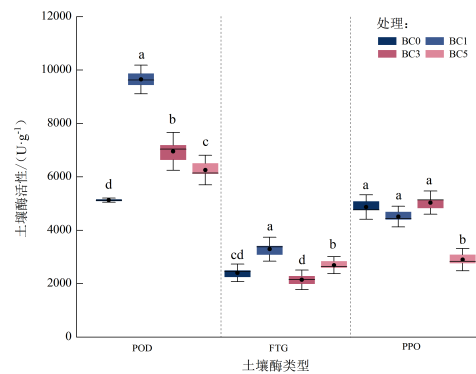


图3 生物质炭对盐碱土壤酶活性的影响

Fig.3 Effects of biochar on enzyme activity in saline-alkaline soil

表 2 生物质炭添加量与土壤特性的相关系数

Table 2 Correlation coefficient table of biochar addition and soil properties

指标	生物质炭	含盐量	含水率	SOC	TN	TK	碱解氮	速效钾	POD	FTG
含盐量	-0.46									
含水率	0.13	-0.06								
SOC	0.93***	-0.56	0.16							
TN	0.87***	-0.52	-0.02	0.92***						
TK	0.83**	-0.18	-0.03	0.61	0.65					
碱解氮	-0.76*	0.56	-0.22	-0.87***	-0.75*	-0.4				
速效钾	0.96***	-0.35	0.32	0.92***	0.82**	0.77*	-0.76*			
POD	-0.09	-0.23	0.57	0	-0.12	-0.28	-0.4	-0.04		
FTG	-0.15	-0.03	0.29	-0.27	-0.29	0.03	-0.07	-0.15	0.71*	
PPO	-0.74*	0.1	-0.09	-0.48	-0.5	-0.95***	0.36	-0.69	0.09	-0.29

注 *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$; $n = 12$ 。

2.5 添加生物质炭对苗期棉花生长指标的影响

图 4 为生物质炭对棉花苗期生长的影响。由图 4 可知，与 BC0 处理相比，BC1 处理和 BC3 处理棉花株高无显著差异，但 BC1 处理棉花茎粗和地上部干物质质量分别显著增加了 19.93%和 48.56%；而 BC5 处理棉花株高、茎粗和地上部干物质质量分别显

著降低了 41.46%、34.46%和 68.52%。另外，与 BC0 处理相比，BC1、BC3 处理和 BC5 处理棉花茎全氮量分别显著降低了 27.98%、33.35%和 53.84%；而 BC1 处理和 BC3 处理棉花叶全氮量无显著差异，仅有 BC5 处理棉花叶全氮量显著降低了 40.01%。

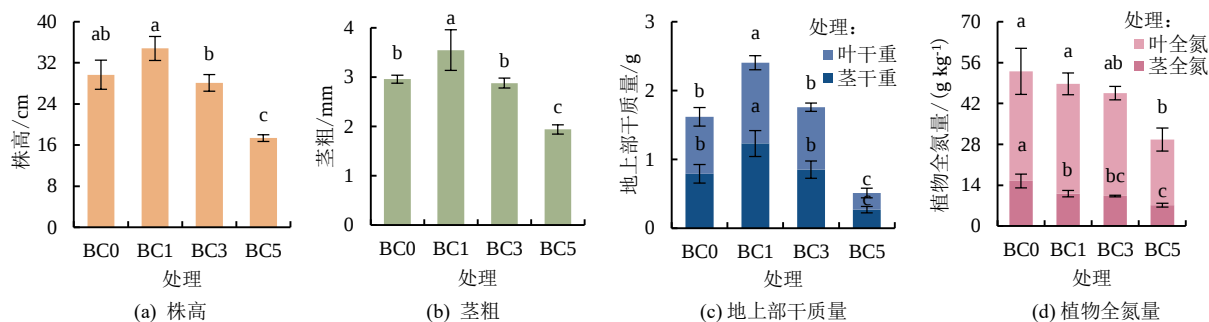


图4 生物质炭对棉花苗期生长的影响

Fig.4 Effects of biochar on growth of cotton seedling stage

3 讨论

3.1 添加生物质炭对盐碱土壤特性的影响

本研究表明, 添加生物质炭可以提高土壤含水率 (图 1), 这与 Karhu 等^[29]和 Haider 等^[30]研究结果一致。一方面, 生物质炭的多孔性和强吸附性, 使其本身具有较强持水能力; 另一方面, 生物质炭可以通过改善土壤团粒结构来增加土壤持水率, Duan 等^[31]研究表明, 土壤团粒结构与土壤持水能力显著正相关。另外, 在本研究中, 土壤含水率的增加幅度与生物质炭添加量成反比 (图 1), 这可能是由于试验所用生物质炭为粉末质地, 添加量越多, 更多较小的颗粒会堵塞土壤孔隙或与土壤无机矿物结合减少土壤孔隙^[32], 从而使得土壤含水率的增加幅度呈下降趋势。

生物质炭可以改善盐碱土壤化学性质, 增加土壤养分量, 有利于盐碱土向健康方向发展。本研究表明, 生物质炭能够降低盐碱土壤含盐量 (图 1), 但对土壤 pH 值影响不显著 (图 2), 这与韩剑宏等^[33]研究结果类似。生物质炭巨大的比表面积和较多的官能团, 使其具有高盐吸附特性, 从而降低土壤含盐量^[34]; 另外, 本试验表明生物质炭能够促进盐分淋洗, 进而降低土壤表层含盐量 (图 1), 这与高婧等^[35]研究结果相似。Lashari 等^[36]认为, 生物质炭通过降低土壤质量, 提高土壤渗透性, 来促进降水或灌溉对土壤盐分的淋洗。但也有研究表明, 生物质炭过量施用会对碱性土壤有负面影响, 这可能与生物质炭含灰量高有关^[7]。前人研究发现, 生物质炭能够增加盐碱土的有机质量、速效磷量、速效钾量、全氮量、全磷量和全钾量^[8,37], 其原因是生物质炭含有多种矿物质营养元素, 另一个原因是生物质炭表面众多官能团, 有利于土壤养分的保留^[4]。在本试验中, 添加生物质炭与土壤有机碳量、全氮量、全钾量和速效钾量显著正相关, 而对土壤全磷和速效磷量无显著影响 (图 2)。除全钾外, 有机碳量、全氮量和速效钾量的增加量与生物质炭添加量成正比, 其中, 有机碳的增加幅度最大, 这和生物质炭富含碳有关; 但有

机碳量和全氮量在 3%和 5%生物质炭添加量之间差异不显著。本试验还表明, 生物质炭显著降低了土壤碱解氮量 (图 2), 这与赵铁民等^[38]和冉成等^[39]的研究结果相似, 其中原因可能是生物质炭对矿质氮具有较强的吸附能力, 导致土壤氮素被固化^[20]。但侯艳艳等^[40]通过对碱性灰漠土的研究发现, 添加棉秆炭提高了灰漠土碱解氮量, 原因是添加棉秆炭后, 土壤碳氮比提高, 使得有效氮量降低, 从而降低土壤氮素利用率。由此可见, 生物质炭对土壤养分的影响与生物质炭种类、用量及土壤类型有直接关系。

土壤酶活性在土壤有机质分解和养分循环中起着重要作用, 被认为是土壤质量的重要指标^[41]。有研究发现, 生物质炭可以提高土壤酶活性, 进而促进土壤养分转化, 提高土壤养分利用率^[42-43]。但生物质炭对土壤酶活性的作用变异很大, 生物质炭的结构、颗粒大小、用量和施用时长以及土壤类型都会对土壤酶活性产生不同影响^[14,44]。在本试验中, 主要分析了土壤中与氧化还原反应有关的过氧化物酶、与碳转化有关的纤维二糖苷酶及与土壤环境修复有关的多酚氧化酶活性 (图 3), 研究表明, 生物质炭可以显著提高土壤过氧化物酶和纤维二糖苷酶的活性, 这可以归因于生物质炭为土壤微生物提供了大量的营养物质和良好的生长环境, 改善了土壤理化性质, 从而提高了相关酶活性^[45]。但这 2 种酶活性的增加幅度并没有随生物质炭添加量的增加而增加。对于土壤多酚氧化酶, 1%和 3%生物质炭添加量对其活性无显著影响, 5%生物质炭添加量抑制了其活性, 这与 Wang 等^[46]的研究结果相似。高水平生物质炭导致土壤酶活性增加幅度降低或者抑制土壤酶活性, 可能原因是生物质炭中的稳定性碳库, 不易分解, 从而使得高用量生物质炭大幅度增加土壤 C/N 比, 反而不易被微生物利用^[47], 或者随着用量增加, 生物质炭的吸附能力更强, 掩盖了酶活性位点, 使得土壤酶活性增加不明显或者受到抑制作用^[48]。Gul 等^[44]指出, 有较大孔隙度或者表面积的生物质炭可能会抑制土壤酶活性, 这是由于这种生

物质炭表面的官能团更倾向于结合底物或者土壤酶。

3.2 添加生物质炭对苗期棉花生长的影响

研究表明, 添加 1% 生物质炭显著增加棉花茎粗和地上部干物质量, 对株高无显著影响, 但随着添加量的增加, 生物质炭对棉花生长会产生一定的抑制作用, 5% 的添加量显著降低了棉花的株高、茎粗和地上部干物质量 (图 4), 这与秦蓓等^[37]的研究结果相似。Asai 等^[49]和 Rajkovich 等^[50]研究也分别表明, 高用量生物质炭导致早稻和玉米减产。本研究还表明, 添加生物质炭显著降低了棉花茎叶全氮含量 (图 4)。生物质炭对作物生长的影响具有矛盾性, 一方面其高吸附性, 可以保留土壤中更多水分和养分, 但另一方面也会降低部分营养物质的可用性, 如对土壤氮素有固化作用^[30]。在本试验中, 相比 3% 和 5% 生物质炭添加量, 1% 生物质炭添加量降低棉花茎全氮量幅度较小, 但其较大程度地提高了土壤含水率, 减轻了盐分对作物的胁迫效应, 且 1% 生物质炭添加量下的土壤过氧化物酶和土壤纤维二糖苷酶的活性最大, 有利于土壤腐殖质形成和碳素转化, 进而促进作物生长。也就是说, 1% 生物质炭添加量对作物生长产生的优势大于劣势。另外, 生物质炭的养分组成与其裂解温度密切相关, 高裂解温度会降低生物质炭氮量和挥发性碳量, 增加固定碳量^[22]。本试验所用生物质炭是在 500~600 °C 的高温条件下裂解产生的, 过量施用反而导致土壤矿化率低, 不利于作物生长。

由于本试验为桶栽试验, 与大田试验存在一定不同, 其结果需要在大田条件下进一步验证才能应用于实际生产中; 且本研究主要关注生物质炭对减轻幼苗盐胁迫及苗期生长的影响, 后期应结合不同生育期探讨盐碱土壤特性及棉花生长对生物质炭的响应。另外, 生物质炭的制备条件及原料对其作用的发挥影响很大, 在今后的研究中应给予重视。

4 结 论

在贫瘠的盐碱土壤中添加生物质炭能够改善其养分状况, 增加土壤有机质量、全氮量、全钾量和速效钾量; 但由于生物质炭的高吸附性, 短期添加会对土壤氮素有固化作用, 导致苗期棉花在一定程度上出现全氮量降低的状况。另外, 添加生物质炭促进盐分淋洗, 从而降低了表层土壤含盐量。生物质炭增加了土壤含水率、过氧化物酶活性和纤维二糖苷酶活性, 且相比 3% 和 5% 生物质炭量, 1% 生物质炭量对三者的促进作用最明显。由于 1% 生物质炭量对土壤产生的优势大于其劣势, 所以促进了作物生长。5% 生物质炭量抑制了多酚氧化酶活性, 且明

显导致植物氮营养供应不足, 土壤矿化率低, 抑制作物生长。综上, 生物质炭具有矛盾性, 在实际应用中, 选择适宜的添加量将其优势最大限度发挥出来, 以取得应用效果是十分重要的。

参考文献:

- [1] 李思平, 曾路生, 李旭霖, 等. 不同配方生物炭改良盐渍土对小白菜和棉花生长及光合作用的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 363-368.
LI Siping, ZENG Lusheng, LI Xulin, et al. Amelioration of saline soil with different biochar fertilization formulas and its effects on growth and photosynthesis of brassica chinensis and cotton[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 363-368.
- [2] 于宝勒. 盐碱地修复利用措施研究进展[J]. 中国农学通报, 2021, 37(7): 81-87.
YU Baole. Remediation measures of saline-alkali land: A review[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(7): 81-87.
- [3] 刘淼, 王志春, 杨福, 等. 生物炭在盐碱地改良中的应用进展[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 1-8.
LIU Miao, WANG Zhichun, YANG Fu, et al. Application progress of biochar in amelioration of saline-alkaline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 1-8.
- [4] ALI S, RIZWAN M, QAYYUM M F, et al. Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: A critical review[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24(14): 12 700-12 712.
- [5] 严陶韬, 丁子菊, 朱倩, 等. 生物质炭对黄棕壤理化性质及龙脑樟幼苗生长的影响[J]. 土壤, 2018, 50(4): 681-686.
YAN Taotao, DING Ziju, ZHU Qian, et al. Effects of biochar on physicochemical properties of yellow-brown soil and growth of cinnamomum Camphora seedlings[J]. Soils, 2018, 50(4): 681-686.
- [6] 王艳艳, 官会林, 卢俊, 等. 生物质炭施用量对旱地酸性红壤理化性质的影响[J]. 土壤, 2020, 52(3): 503-509.
WANG Kunyan, GUAN Huilin, LU Jun, et al. Effects of biochar on physicochemical properties of dry land acid red soil[J]. Soils, 2020, 52(3): 503-509.
- [7] ALBURQUERQUE J A, CALERO J M, BARRÓN V, et al. Effects of biochars produced from different feedstocks on soil properties and sunflower growth[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2014, 177(1): 16-25.
- [8] 孔祥清, 韦建明, 常国伟, 等. 生物炭对盐碱土理化性质及大豆产量的影响[J]. 大豆科学, 2018, 37(4): 647-651.
KONG Xiangqing, WEI Jianming, CHANG Guowei, et al. Effect of biochar on the physical and chemical properties of saline-alkali soil and soybean yield[J]. Soybean Science, 2018, 37(4): 647-651.
- [9] 陈芳, 张康康, 谷思诚, 等. 不同种类生物质炭及施用量对水稻生长及土壤养分的影响[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(5): 57-63.
CHEN Fang, ZHANG Kangkang, GU Sicheng, et al. Effects of kinds and application rates of biochar on rice growth and soil nutrients[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(5): 57-63.
- [10] YU K L, LAU B F, SHOW P L, et al. Recent developments on algal biochar production and characterization[J]. Bioresource Technology, 2017, 246: 2-11.
- [11] MCBEATH A V, WURSTER C M, BIRD M I. Influence of feedstock properties and pyrolysis conditions on biochar carbon stability as determined by hydrogen pyrolysis[J]. Biomass and Bioenergy, 2015, 73: 155-173.
- [12] ZHENG H, WANG X, LUO X X, et al. Biochar-induced negative carbon mineralization priming effects in a coastal wetland soil: Roles of soil aggregation and microbial modulation[J]. Science of the Total Environment, 2018, 610/611: 951-960.

- [13] 屈忠义, 孙慧慧, 杨博, 等. 不同改良剂对盐碱地土壤微生物与加工番茄产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 311-318, 350.
QU Zhongyi, SUN Huihui, YANG Bo, et al. Effects of different amendments on soil microorganisms and yield of processing tomato in saline alkali soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 311-318, 350.
- [14] LEHMANN J, RILLIG M C, THIES J, et al. Biochar effects on soil biota - A review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(9): 1 812-1 836.
- [15] 刘园, M.Jamal Khan, 靳海洋, 等. 秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 849-858.
LIU Yuan, KHAN M J, JIN Haiyang, et al. Effects of successive application of crop-straw biochar on crop yield and soil properties in cambosols[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(4): 849-858.
- [16] 蒋雪洋, 张前前, 沈浩杰, 等. 生物质炭对稻田土壤团聚体稳定性和微生物群落的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1 564-1 573.
JIANG Xueyang, ZHANG Qianqian, SHEN Haojie, et al. Effects of biochar on soil aggregate stability and microbial community in paddy field[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1 564-1 573.
- [17] LEHMANN J, DA SILVA J J P, STEINER C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon Basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. Plant and Soil, 2003, 249: 343-357.
- [18] FENG L, XU W L, TANG G M, et al. Biochar induced improvement in root system architecture enhances nutrient assimilation by cotton plant seedlings[J]. BMC Plant Biology, 2021, 21(1): 269.
- [19] 高珊, 杨劲松, 姚荣江, 等. 改良措施对苏北盐渍土盐碱障碍和作物磷素吸收的调控[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1 219-1 229.
GAO Shan, YANG Jinsong, YAO Rongjiang, et al. Effects of soil amelioration measures mitigating soil salinity and improving crop P uptake in coastal area of north Jiangsu[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1 219-1 229.
- [20] 吴涛, 冯歌林, 曾珍, 等. 生物质炭对盆栽黑麦草生长的影响及机理[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 525-534.
WU Tao, FENG Gelin, ZENG Zhen, et al. Effect of biochar addition on ryegrass growth in a pot experiment and its mechanism[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(2): 525-534.
- [21] SUN J N, HE F H, SHAO H B, et al. Effects of biochar application on Suaeda salsa growth and saline soil properties[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(8): 1-6.
- [22] SIAL T A, SHAHEEN S M, LAN Z L, et al. Addition of walnut shells biochar to alkaline arable soil caused contradictory effects on CO₂ and N₂O emissions, nutrients availability, and enzymes activity[J]. Chemosphere, 2022, 293: 133 476.
- [23] 校康, 孙亚乔, 马卫国. 添加生物炭对降低冬小麦幼苗盐害并促进其生长的效果研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(11): 22-27.
XIAO Kang, SUN Yaqiao, MA Weiguo. Effects of biochar for abating salt stress and promoting seeding growth of winter wheat in a saline soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(11): 22-27.
- [24] 代红翠, 陈源泉, 王东, 等. 生物炭对碱性砂质土壤小麦出苗及幼苗生长的影响[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(4): 1-7.
DAI Hongcui, CHEN Yuanquan, WANG Dong, et al. Effect of biochar amendment on wheat emergence and seedling growth in alkaline soil[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(4): 1-7.
- [25] XU G, ZHANG Y, SUN J N, et al. Negative interactive effects between biochar and phosphorus fertilization on phosphorus availability and plant yield in saline sodic soil[J]. Science of the Total Environment, 2016, 568: 910-915.
- [26] 林蔚, 张雷, 张国伟, 等. 滨海盐土棉田棉花水、盐遥感监测系统的设计与实现[J]. 棉花学报, 2012, 24(2): 114-119.
LIN Wei, ZHANG Lei, ZHANG Guowei, et al. Design and implementation of remote sensing monitoring system for water and salinity content of cotton in coastal saline soil[J]. Cotton Science, 2012, 24(2): 114-119.
- [27] ABDELRAHEEM A, ESMAEILI N, O'CONNELL M, et al. Progress and perspective on drought and salt stress tolerance in cotton[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 130: 118-129.
- [28] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [29] KARHU K, MATTILA T, BERGSTRÖM I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity - Results from a short-term pilot field study[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 140(1/2): 309-313.
- [30] HAIDER G, STEFFENS D, MOSER G, et al. Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 237: 80-94.
- [31] DUAN M L, LIU G H, ZHOU B B, et al. Effects of modified biochar on water and salt distribution and water-stable macro-aggregates in saline-alkaline soil[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(6): 2 192-2 202.
- [32] 董心亮, 林启美. 生物质炭对土壤物理性质影响的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(12): 1 846-1 854.
DONG Xinliang, LIN Qimei. Biochar effect on soil physical properties: A review[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(12): 1 846-1 854.
- [33] 韩剑宏, 李艳伟, 姚卫华, 等. 玉米秸秆和污泥共热解制备的生物质炭及其对盐碱土壤理化性质的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 92-98, 105.
HAN Jianhong, LI Yanwei, YAO Weihua, et al. Co-pyrolysis preparing biochar with corn straw and sewage sludge and its effects on saline soil improvement[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 92-98, 105.
- [34] AKHTAR S S, ANDERSEN M N, LIU F L. Residual effects of biochar on improving growth, physiology and yield of wheat under salt stress[J]. Agricultural Water Management, 2015, 158: 61-68.
- [35] 高婧, 杨劲松, 姚荣江, 等. 不同改良剂对滨海重度盐渍土质量和肥料利用效率的影响[J]. 土壤, 2019, 51(3): 524-529.
GAO Jing, YANG Jinsong, YAO Rongjiang, et al. Effects of different soil amendments on properties and fertilizer utilization efficiency for coastal heavily-salinized soil[J]. Soils, 2019, 51(3): 524-529.
- [36] LASHARI M S, LIU Y M, LI L Q, et al. Effects of amendment of biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution on soil quality and wheat yield of a salt-stressed cropland from Central China Great Plain[J]. Field Crops Research, 2013, 144: 113-118.
- [37] 秦蓓, 王雅琴, 唐光木, 等. 施用棉秆炭对新疆盐渍土壤理化性质及作物产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2016, 53(12): 2 290-2 298.
QIN Bei, WANG Yaqin, TANG Guangmu, et al. Effects of applying cotton stalk biochar to Xinjiang saline soil on the physical and chemical properties and crop yield[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2016, 53(12): 2 290-2 298.
- [38] 赵铁民, 李渊博, 陈为峰, 等. 生物炭对滨海盐渍土壤理化性质及玉米幼苗抗氧化系统的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 196-200.
ZHAO Tiemin, LI Yuanbo, CHEN Weifeng, et al. Effect of biochar on the physicochemical properties of coastal saline soil and the antioxidation system activity in maize seedlings[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 196-200.
- [39] 冉成, 邵玺文, 朱晶, 等. 生物炭对苏打盐碱稻田土壤养分及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(5): 46-51.
RAN Cheng, SHAO Xiwen, ZHU Jing, et al. Amending soda saline-alkali paddy soil with biochar improves soil nutrients and rice yield[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(5): 46-51.
- [40] 侯艳艳, 朱新萍, 徐万里, 等. 施用生物炭对灰漠土养分及棉花生长的影响[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(1): 24-32.

- HOU Yanyan, ZHU Xinping, XU Wanli, et al. Effects of biocar application on nutrient and cotton growth in gray desert soil[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2018, 55(1): 24-32.
- [41] YAO T X, ZHANG W T, GULAQA A, et al. Effects of peanut shell biochar on soil nutrients, soil enzyme activity, and rice yield in heavily saline-sodic paddy field[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, 21(1): 655-664.
- [42] 王相平, 杨劲松, 张胜江, 等. 改良剂施用对干旱盐碱区棉花生长及土壤性质的影响[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(4): 757-762.
- WANG Xiangping, YANG Jinsong, ZHANG Shengjiang, et al. Effects of different amendments application on cotton growth and soil properties in arid areas[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(4): 757-762.
- [43] 黄哲, 曲世华, 白岚, 等. 不同秸秆混合生物炭对盐碱土壤养分及酶活性的影响[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(4): 290-295.
- HUANG Zhe, QU Shihua, BAI Lan, et al. Effects of different straw mixing biochar on nutrient and enzyme activity of saline soil[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(4): 290-295.
- [44] GUL S, WHALEN J K, THOMAS B W, et al. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 206: 46-59.
- [45] GOMEZ J D, DENEK K, STEWART C E, et al. Biochar addition rate influences soil microbial abundance and activity in temperate soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 28-39.
- [46] WANG X B, SONG D L, LIANG G Q, et al. Maize biochar addition rate influences soil enzyme activity and microbial community composition in a fluvo-aquic soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 96: 265-272.
- [47] 韩召强, 陈效民, 曲成闯, 等. 生物质炭施用对潮土理化性状、酶活性及黄瓜产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 272-278.
- HAN Zhaoqiang, CHEN Xiaomin, QU Chengchuang, et al. Effects of biochar application on soil physicochemical properties, enzyme activities and cucumber yield[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6): 272-278.
- [48] 张帅, 成宇阳, 吴行, 等. 生物炭施用下潮土团聚体微生物量碳氮和酶活性的分布特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(3): 369-379.
- ZHANG Shuai, CHENG Yuyang, WU Hang, et al. Microbial biomass carbon, nitrogen and enzyme activities within aggregates of calcareous soil under biochar application[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(3): 369-379.
- [49] ASAI H, SAMSON B K, STEPHAN H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(1/2): 81-84.
- [50] RAJKOVICH S, ENDERS A, HANLEY K, et al. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(3): 271-284.

Optimizing Biochar Amendment to Improve Soil Property and Cotton Seedling Growth in Saline Soils

WANG Yuting^{1,2}, TIAN Guangli¹, TIAN Yuyu^{1,2}, ZHAO Qingqing^{1,2}, ZHEN Bo¹, LI Huizhen¹, ZHOU Xinguo^{1*}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: 【Background and objective】 Soil salinization is a biotic stress facing agriculture production in almost all countries. It not only destroys soil structure but also reduces bioavailable nutrients and the ability of soil to sequester carbon. Amending stalinized soil with biochar is a technology to improve soil quality and productivity, but its efficacy depends on soil texture and the amount of biochar being applied. The objective of this paper is to study the optimal biochar amendment for improving soil quality and fertility for cotton growth. **【Method】** The experiment was conducted in pots with the cultivar Medium S9612 used as the model plant. The soil was amended by biochar at ratios of 0 (CK), 1% (BC1), 1%(BC1), 3% (BC3) and 5% (BC5), respectively. In each treatment, we measured physicochemical properties, enzyme activities of the soil, as well as growth indexes of the cotton at seedling stage.

【Result】 Biochar amendment improved moisture content in the 0~20 cm soil layer, but the increase was negatively correlated with biochar amount; biochar also reduced salt content in the 0~20 cm soil layer. The amendment did not show significant effect on soil pH, total phosphorus, and available phosphorus, but increased soil organic carbon, total nitrogen, total potassium, available potassium, peroxidase (POD), and fibro two glycosidases (FTG), especially BC1 which significantly increased the activity of POD and FTG. In general, biochar reduced soil alkali-hydrolyzable nitrogen and polyphenol oxidase (PPO). BC1 increased stem diameter and above-ground dry matter accumulation of the crop, both significantly, but did not show noticeable impact on plant height. BC3 did not show significant effects on plant height, stem thickness, and above-ground dry matter, while BC5 reduced plant height, stem diameter, and above-ground dry matter. Also, addition of biochar reduced the total nitrogen content in stems and leaves.

【Conclusion】 Biochar can improve soil nutrients and enzyme activities but only when applied at an appropriate ratio. For the saline soil we studied, the optimal biochar amendment was 1%.

Key words: saline soil; biochar; soil physicochemical properties; soil enzyme activities; crop growth

责任编辑: 赵宇龙