文章编号:1000-7601(2025)06-0206-09 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.06.20

生物炭介导的盐碱土改良对棉花生长调控效应研究

朱 冰[1],王钰婷[2],耿诗怡[2],赵青青[2]

(1.河南省海河流域水利事务中心,河南 新乡 453002; 2.中国农业科学院农田灌溉研究所,河南 新乡 453002)

摘 要:为探讨生物炭对盐碱土壤理化性质和棉花生长的调控效应,设置 0%(BC0)、1%(BC1)、3%(BC3)、5%(BC5)四种生物炭添加量,研究不同生物炭添加量对土壤盐分、pH、养分以及盐敏感(SS)和耐盐(ST)型棉花生长的影响。2021—2022 年结果表明:生物炭添加对土壤盐分分布具有显著影响,0~20 cm 土层盐分显著降低,降幅最高达 51.60%,从而导致 20~40 cm 土层盐分累积;生物炭添加对土壤 pH 无显著影响,而全氮、有效磷和有效钾含量则随生物炭用量增加而显著增大;生物炭对不同棉花品种间盐碱土理化性质的影响不显著;棉花生长指标随生物炭添加的变化而变化,BC1 处理中生物炭在苗期促进株高、茎粗和生物量增长,而 BC3 和 BC5 处理中生物炭表现出抑制作用,BC1 处理棉花株高、茎粗、生物量较 BC3 和 BC5 处理分别增加了 4.65%~48.89%、3.29%~42.62%、3.42%~245.82%。综上,生物炭添加量为 1%时可有效改良盐碱土并促进棉花生长。

关键词:棉花;生物炭;盐碱土;土壤理化性质

中图分类号:S156.4;S562 **文献标志码**:A

Regulatory effects of biochar-mediated saline-alkali soil improvement on cotton growth

ZHU Bing[1], WANG Yuting[2], GENG Shiyi[2], ZHAO Qingqing[2]

(1. *Henan Haihe River Basin Water Resources Affairs Center*, *Xinxiang*, *Henan* 453002, *China*;
2. *Institute of Farmland Irrigation*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Xinxiang*, *Henan* 453002, *China*)

Abstract: To investigate the regulatory effects of biochar on the physicochemical properties of saline-alkali soil and cotton growth, four biochar application rates were tested: 0% (BC0, control), 1% (BC1), 3% (BC3), and 5% (BC5). Soil salinity, pH, nutrient availability, and growth parameters of salt-sensitive (SS) and salt-tolerant (ST) cotton varieties were analyzed under these treatments. Field experiments conducted during 2021-2022 demonstrated that biochar significantly altered soil salinity distribution: salinity in the 0~20 cm layer decreased by up to 51.60%, but accumulated in the 20~40 cm layer. Biochar had no significant impact on soil pH and markedly increased total nitrogen, available phosphorus, and available potassium contents in a dose-dependent manner. Notably, biochar effects on soil properties did not differ significantly between cotton genotypes. Biochar application exerted contrasting effects on cotton growth: BC1 enhanced plant height, stem diameter, and biomass during the seedling stage, whereas BC3 and BC5 exhibited inhibitory effects. Compared to BC3 and BC5, BC1 increased plant height, stem diameter, and biomass by 4.65%~48.89%, 3.29%~42.62%, and 3.42%~245.82%, respectively. These findings highlight that a 1% biochar application rate optimally ameliorates saline-alkali soil and promotes cotton growth.

Keywords: cotton; biochar; saline-alkali soil; soil physicochemical property

棉花是我国西北干旱半干旱地区的主要经济作物,尤其在新疆地区更是当地农户经济收入的重要来源。新疆地处我国西北干旱地区,干旱少雨的气候、成土母质含盐、灌水含盐量高和灌排技术不

收稿日期:2025-04-21 **修回日期**:2025-07-11

基金项目:中国农业科学院科技创新工程

作者简介:朱冰(1988-),女,河南封丘人,工程师,主要从事灌排管理研究。E-mail:zhubing_0309@qq.com

通信作者:赵青青(1991-),女,河南新乡人,研究实习员,主要从事农田排水理论与新技术研究。E-mail:82101211060@caas.cn

匹配等原因导致新疆地区盐碱土类型众多且分布广泛,据统计,新疆盐碱地面积占全国盐碱地总面积的 36.8%,在 1991—2020 年,全疆盐碱耕地面积增加超过 200 万 hm^2,年增长约 7.86 万 hm^2[1]。因此,探讨改良措施对盐碱地调控效果及棉花生长的影响对保障我国耕地面积和粮食安全都有重要的经济效益和战略意义。

生物炭自身含有 K、Ca、Mg 等多种矿质元素,可与土壤胶体中的 Na^+ 发生离子交换反应进而将盐分从土壤中浸出,实现降低盐碱土壤含盐量的目的[2]。生物炭作为一种多孔性土壤改良剂,可通过降低土壤容重、增加土壤渗透性提高降水和灌溉对土壤盐分的淋洗效率[3-4]。针对不同类型盐碱地,生物炭的调控效果并不一致。刘易等[5]指出,对于轻中度盐碱地,1%、2%和 4%的生物炭添加量可降低土壤 pH 和电导率,而 8%的生物炭添加量则增加土壤 pH 和电导率;对于重度盐碱地,土壤 pH 随生物炭用量增加而增加。在碱性土壤中施用过量生物炭可能会增加土壤 pH 和电导率。此外,土壤盐碱化导致有机质含量降低以及低氮、磷、钾,使土壤贫瘠,矿化速率慢,土壤养分淋失快且有效性低[2]。生物炭能够增加盐碱土壤的有机质、速效磷、速效钾、全氮、全磷和全钾含量[6-7],有利于土壤养分的保留[8]。生物炭对土壤养分的影响与施用量密切相关,2.0%和 2.5%的生物炭添加量可以增加土壤硝态氮含量进而加速氮循环,而 5%和 10%的生物炭添加量则会引起氮固化[9],同时高添加量的生物炭可能会引起土壤 pH 值升高,从而导致土壤磷吸附或沉淀,降低盐碱土壤中磷的有效性[10]。因此,生物炭对盐碱土壤特性的影响及其合理用量需要进一步探索和完善,以便对土壤环境产生积极影响。

生物炭可直接或间接影响作物生长,直接作用是生物炭本身具有大量的矿质营养元素,可供植物吸收利用,间接作用是生物炭通过影响土壤物理、化学、生物特性进而影响植物生长[11-12]。另外,生物炭提高盐碱地作物产量也归因于盐胁迫的减轻,这从植物和土壤中盐浓度的降低可以明显看出[13]。刘易等[5]通过室内盆栽玉米的模拟试验发现,种子发芽率、发芽势和发芽指数与土壤盐胁迫程度呈负相关关系,添加生物炭能够提高种子发芽率、发芽势和发芽指数,且随生物炭用量增加而增加。大量研究表明,生物炭能够显著提高盐碱土中作物的叶绿素、净光合速率、根系活力等生理指标[14]以及株高、茎粗、叶面积、生物量等生长指标[15],并增加作物抗逆性,提升抗病性[16-17]。然而,生物炭也可能导致作物减产,Haider 等[12]指出产量下降可能是由于生物炭对土壤氮素有固化作用,导致作物氮缺乏;高水平生物炭抑制酶活性,使土壤养分转化效率降低,导致作物减产[18]。王洁等[19]研究表明,施入低棉秆炭量的地块棉花产量高于施入高棉秆炭量的地块。高含量碱性生物炭对酸性土壤具有较好的改良效果,对碱性土壤的改良效果仍然具有很多不确定性,尤其是生物炭的改良效果受施用量以及施用年限的影响很大,在盐碱地改良的应用方面,需要进行更加深入且系统性的研究以明确盐碱土壤的改良效果及合理用量。因此,本研究通过 2 年的桶栽试验,研究不同生物炭添加量对土壤盐分、pH、氮磷钾含量及棉花株高、茎粗、叶面积及干物质等指标的影响,揭示生物炭添加对盐碱土理化性质、土壤养分及棉花生长的影响,以期为生物炭在盐碱地改良应用方面提供科学依据和数据支撑。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验在中国农业科学院农田灌溉研究所新乡综合实验基地进行(113°54′E,35°18′N),属于暖温带大陆性季风气候,多年平均气温 14℃,多年平均降水量 582 mm,降雨主要集中在 7—9 月(占年降水量的 70%~80%以上),无霜期为 210 d,多年平均蒸发量 2 000 mm。试验土壤选自新疆阿拉尔市新疆生产建设兵团第一师第十六团(80°30′~81°58′E,40°22′~40°57′N)的膜下滴灌棉田,取土深度为 0~20 cm,土壤类型属砂壤土。本试验选用玉米秸秆生物炭,从河南立泽环保科技有限公司购买,在 500~600℃的高温条件下缺氧裂解炭化制得。供试土壤的 pH 为 8.6,含盐量 4.30 $g \cdot kg^{-1}$,有机碳 4.54 $g \cdot kg^{-1}$,全氮、全磷、全钾含量分别为 0.130、0.043、13.040 $g \cdot kg^{-1}$,黏粒、粉粒、砂粒含量分别为 12.48%、31.67%、55.85%,田间持水率为 21.29%(体积);生物炭的 pH 为 9.0,有机碳 410.90 $g \cdot kg^{-1}$,全氮、全磷、全钾含量分别为8.354、2.327、30.594 $g \cdot kg^{-1}$。

1.2　试验设计

试验于 2021—2022 年 6—10 月进行,设置生物炭添加量和棉花品种两个因素,采用完全随机排列试验设计。生物炭添加量为 0%(对照,BC0)、1%(BC1)、3%(BC3)和 5%(BC5)。棉花品种为‘中 S9612’和‘中 9807’,分别为盐敏感型(SS)和耐盐型(ST)。共计 8 个处理,每个处理 15 个桶。

桶栽规格为内径 20 cm、高 50 cm,采用分层装土的方式,每桶装土均为(20±0.5) kg,装土深度均

为(40±3) cm。生物炭施于 0~20 cm 土层并与土壤混合均匀,在每个处理中埋入 Teros 12 传感器,实时观测土壤水分和盐分变化,探头安置深度为 5、15、25 cm。

1.3 栽培管理

试验分别于 2021 年 6 月 14 日和 2022 年 6 月 10 日播种,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。其中,2021 年度分别于棉花苗期、蕾期、花铃期、吐絮期对土壤和植物进行取样;2022 年度分别于棉花苗期和花铃期对土壤和植物取样。2022 年试验在 2021 年试验的基础上设置了高盐分梯度处理,即一半通过灌盐来提高试验桶中土壤的含盐量(盐分太高,抑制了棉花种子发芽),一半延用 2021 年的试验桶,所以 2022 年试验只能选择棉花的两个生育时期取样。棉花整个生育期前期是以营养生长为主,在现蕾后一个月是棉花从营养生长进入到生殖生长的转折时期,到盛花期生殖生长开始强于营养生长。基于此,本试验在 2022 年选择了苗期(以营养生长为主)和花铃期(以生殖生长为主)两时期进行取样。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^{-1},通过称重法计算灌水量,使土壤质量含水率保持在田间持水率的 75%~90%。每 3~4 d 称重一次,根据实际情况决定是否需要灌水,如遇降雨天气及时关闭防雨棚。取样时间分别为 2021 年 7 月 23 日(苗期)、2021 年 9 月 6 日(花铃期)、2022 年 7 月 19 日(苗期)和 2022 年 9 月 15 日(花铃期)。

肥料施用种类和大田一致,但由于土培作物根系养分吸收区域小,所以其用量应为大田的 2~3 倍。氮肥用量为纯氮 0.15 g·kg^{-1},N∶P_2O_5∶K_2O=5∶3∶4,化肥类型为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 16%)、硫酸钾(含 K_2O 50%)。化肥具体用量为:尿素 0.326 g·kg^{-1}、过磷酸钙 0.563 g·kg^{-1}、硫酸钾 0.240 g·kg^{-1},其中尿素分三次施用,比例为 4∶3∶3,40%氮肥作为基肥施用、30%氮肥在蕾期追肥、30%氮肥在花铃期随水施入;磷肥和钾肥均作为基肥一次性施用。所有基肥均以固体形式与土壤混合均匀后施入;根据实际情况进行除草和打药。

1.4 样品采集

棉花株高(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;叶面积(m^2)用万深 LA-S 叶面积仪测定。取棉花植株,将各部位分别剪下、洗净,放置于烘箱,在 105℃下杀青 30 min 后 75℃烘干至恒重,测定地上部干物质量。试验使用直径 2 mm 土钻在每桶采用三点取样法随机取土,混合、过 2 mm 筛、去除根系等杂质后作为一个复合样品处理。每个处理 3 次重复,即每次取 3 桶,取土深度 0~20 cm。风干后测定土壤基本理化指标。

1.5 土壤理化指标测定

使用 Teros 12 传感器实时监测土壤盐分的变化并用 Em50 采集器收集数据,数据读取周期为 6 h。采集器收集的电导率(x,mS·cm^{-1})用干燥残渣法(水土比为 5∶1)标定其与土壤含盐量(y,g·kg^{-1})的关系,2021 年和 2022 年二者关系式分别为 $y=1.2531x+2.6259$($R^2=0.8622$)和 $y=0.8982x+2.2227$($R^2=0.8734$)。

土壤基本理化性质参照常规方法进行测定[20]。土壤含盐量(TSC)采用质量法;使用 pH 计测试土壤 pH 值;土壤全氮(TN)采用开氏消煮法;土壤有效磷(AP)采用钼锑抗比色法;土壤有效钾(AK)采用火焰光度法。

1.6 数据统计及分析

土壤理化指标和棉花生长指标使用 Excel 2010 和 R 4.0.2 进行处理和统计分析,用 Origin 2019 进行绘图,采用双因素方差分析和 Tukey's HSD 多重比较法进行差异显著性检验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 生物炭添加对土壤盐分分布的影响

生物炭显著改善了棉花土壤盐分的分布特征。如图 1 所示,对于耐盐品种,在 2021 年的苗期和花铃期,与 BC0 处理相比,BC1 处理 0~20 cm 和 20~30 cm 土层的土壤含盐量分别降低了 12.43%、18.11%和-1.87%、-4.94%;BC3 处理 0~20 cm 和 20~30 cm 土层的土壤含盐量分别降低了 12.75%、25.46%和 6.79%、-20.88%;而 BC5 处理中棉花苗期 0~20 cm 土层含盐量降低了 17.64%。在 2022 年的苗期和花铃期,与 BC0 处理相比,BC1 处理 0~20 cm 和 30~40 cm 土层的土壤含盐量分别降低了 25.70%、40.55%和-36.13%、-20.81%;BC3 处理 0~20 cm 和 30~40 cm 土层的土壤含盐量分别降低了 34.84%、51.60%和-18.74%、-7.82%;BC5 处理 0~20 cm 和 30~40 cm 土层的土壤含盐量分别降低了 14.71%、28.57%和-16.61%、-6.89%。

对于盐敏感品种,2021 年各时期,与 BC0 处理相比,BC1 处理 0~20 cm 和 20~30 cm 土层的土壤

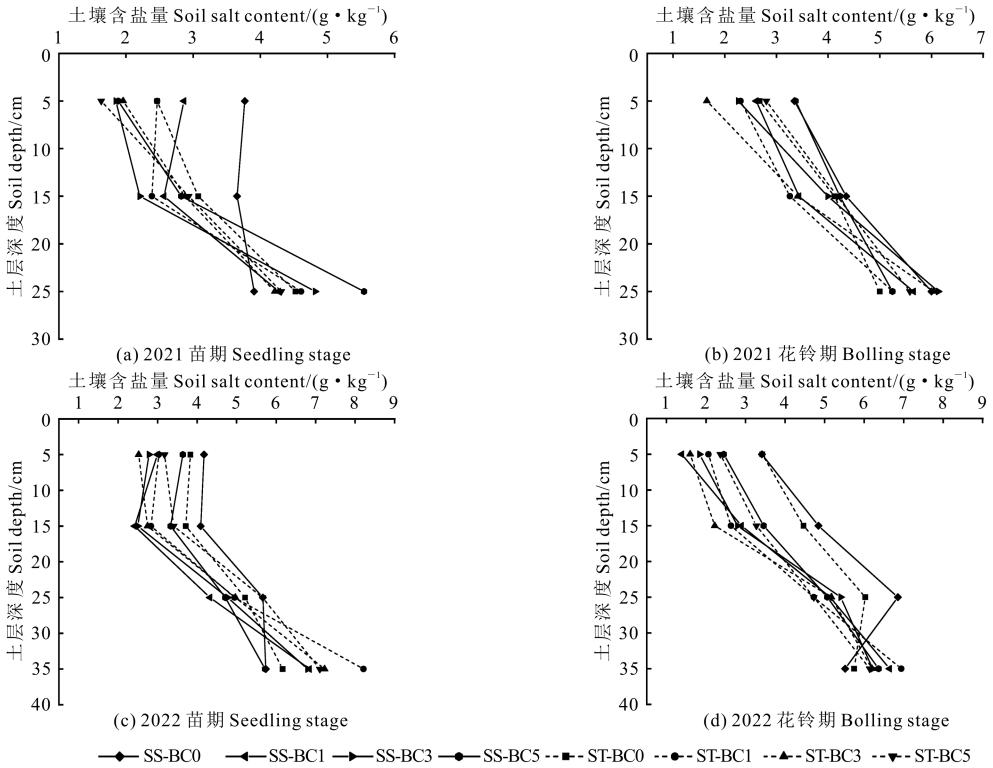


图 1　2021—2022 年土壤盐分变化

Fig.1　Changes of soil salinity in 2021-2022

盐分含量分别降低了 26.85%、21.48%和-9.36%、5.80%;BC3 处理 0~20 cm 和 20~30 cm 土层的土壤盐分含量分别降低了 45.38%、18.77%和-23.24%、-2.18%;但 BC5 处理只降低了 0~20 cm 土层的土壤含盐量,降低幅度分别为 36.59%和 1.29%。2022 年各时期,与 BC0 处理相比,BC1 处理 0~20 cm 和 30~40 cm 土层的土壤盐含量分别降低了 39.25%、48.19%和-21.12%、-20.38%;BC3 处理 0~20 cm 和 30~40 cm 土层的土壤盐含量分别降低了 41.07%、43.92%和-20.16%、-12.63%;BC5 处理 0~20 cm 和 30~40 cm 土层的土壤盐含量分别降低了 17.86%、28.48%和 0.30%、-15.37%。说明生物炭可提高盐分淋洗效率,显著降低表层土壤盐分含量。

2.2　生物炭添加对土壤 pH 值分布的影响

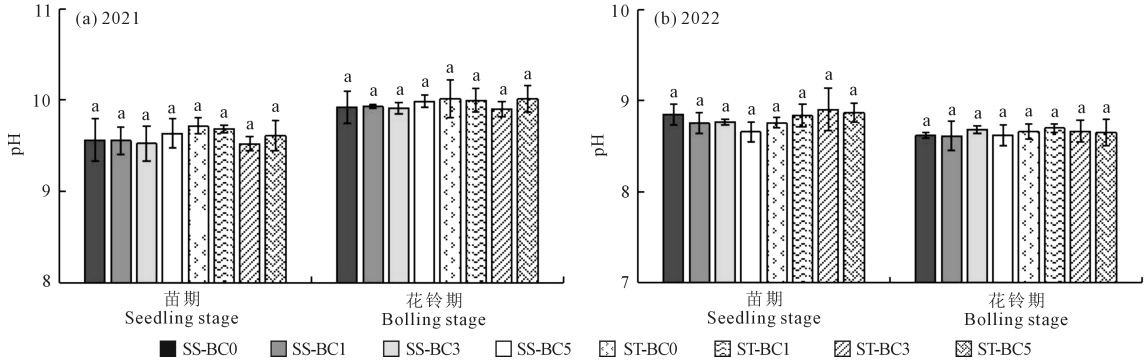
如图 2 所示,与未添加生物炭(BC0)相比,各生物炭添加量(BC1、BC3 和 BC5)在各时期对土壤 pH 均无显著影响,且两棉花品种之间的土壤 pH 值也无显著差异。

2.3　生物炭添加对土壤养分分布的影响

如图 3 所示,添加生物炭显著增加了土壤全氮含量,但两棉花品种之间无显著差异。2021 年苗期,与 BC0 处理相比,BC1 处理对土壤全氮含量无显著影响,BC3 和 BC5 处理土壤全氮无明显差异,较 BC0 处理分别显著提高 112.41%~126.58%和 185.18%~169.74%;花铃期各生物炭处理下土壤全氮含量差异明显,与 BC0 处理相比,BC1、BC3、BC5 处理土壤全氮含量分别增加 22.56%~28.62%、48.82%~62.34%、53.69%~61.53%。2022 年,不同棉花品种中土壤全氮含量基本表现为随生物炭添加而增加,对于盐敏感品种,苗期中与 BC0 处理相比,BC3 和 BC5 处理土壤全氮含量分别显著增加 163.39%和 241.92%;对于耐盐品种,苗期和花铃期中 BC3 处理土壤全氮含量较 BC0 和 BC1 处理显著增加 87.65%~99.70%,BC5 处理土壤全氮含量较 BC0 和 BC1 处理显著增加 80.95%~98.70%。

从图 4 可知,2021 年各生物炭处理对苗期土壤有效磷含量均无显著影响,而各生物炭处理下花铃期土壤有效磷含量表现为 BC5=BC3>BC1>BC0,与 BC0 处理相比,BC1、BC3、BC5 处理土壤有效磷含量分别增加 60.74%~72.14%、73.30%~115.83%、92.13%~114.43%。2022 年中苗期和花铃期各生物炭处理对土壤有效磷含量均无显著影响。

从图 5 可知,2021 年中,与 BC0 处理相比,BC1 处理苗期土壤有效钾含量无显著变化,但 BC3 和 BC5 处理土壤有效钾含量分别显著增加 97.60%~141.50%和 148.35%~198.98%;而在花铃期,BC1、BC3、BC5 处理土壤有效钾含量分别增加 52.96%~64.77%、231.99%~298.26%、399.21%~438.85%。2022



注:不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05),下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments (P<0.05), the same below.

图 2 2021—2022 年棉花生育时期各处理土壤 pH

Fig.2 Soil pH at cotton growth stages of each treatment in 2021-2022

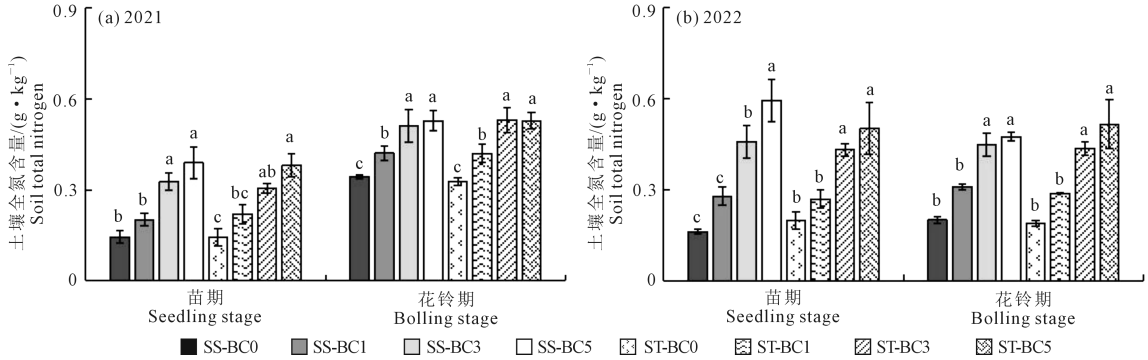


图 3 2021—2022 年棉花生育时期各处理土壤全氮含量

Fig.3 Soil total nitrogen content at cotton growth stages of each treatment in 2021-2022

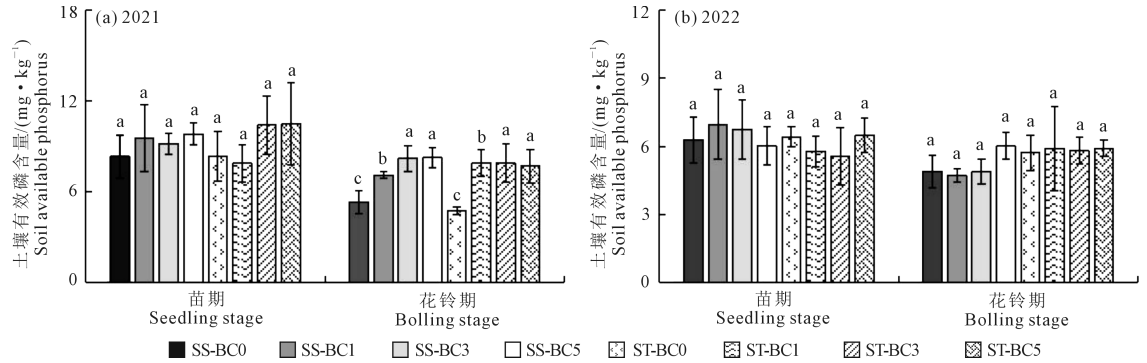


图 4 2021—2022 年棉花生育时期各处理土壤有效磷含量

Fig.4 Soil phosphorus content at cotton growth stages of each treatment in 2021-2022

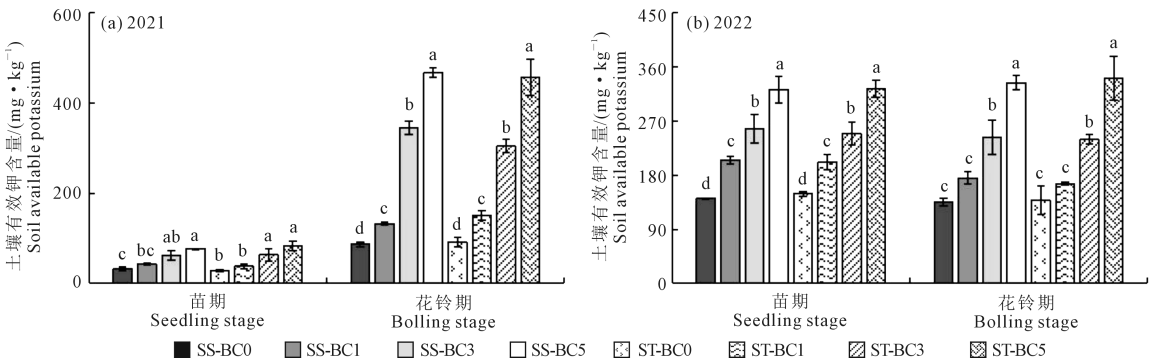


图 5 2021—2022 年棉花生育时期各处理土壤有效钾含量

Fig.5 Soil potassium content at cotton growth stages of each treatment in 2021-2022

年中,土壤有效钾含量随生物炭添加量的增加而增加,BC1、BC3、BC5 处理下土壤有效钾含量分别增加 35.36% ~ 45.52%、67.18% ~ 82.37%、116.88% ~ 127.97%;在花铃期,BC3 处理的土壤有效钾含量较 BC0 和 BC1 处理增加了 56.66% ~ 57.51%,而 BC5 处理的土壤有效钾含量较 BC0 和 BC1 处理增加了 115.35% ~ 124.33%。

2.4　生物炭添加对棉花株高的影响

生物炭添加显著影响了棉花株高(图 6),在 2021 年的苗期,与 BC0 处理相比,BC1 与 BC3 处理对株高无显著影响,但 BC5 处理显著降低了棉花株高,此外,BC3 处理下的棉花株高显著低于 BC1 处理;在花铃期,与 BC0 处理相比,BC1 处理对棉花株高无显著影响,BC3 和 BC5 处理显著降低了棉花株高,降低幅度分别为 12.87% ~ 15.31% 和 23.63% ~ 24.35%。在 2022 年,与 BC0 处理相比,BC1 和 BC3 处理显著增加了棉花苗期株高,增加幅度分别为 26.42% ~ 29.65% 和 12.31% ~ 17.95%,且 BC1 处理的棉花株高显著高于 BC3 处理,但 BC5 处理对株高无显著影响;在花铃期,与 BC0 处理相比,BC1 和 BC3 处理对棉花株高无显著影响,但 BC5 处理显著降低了棉花株高,降低幅度为 6.22% ~ 10.51%。

2.5　生物炭添加对棉花茎粗的影响

从图 7 可知,与 BC0 处理相比,BC1 和 BC3 处理对茎粗无显著影响,BC5 处理显著降低了棉花茎粗,降低幅度为 39.81% ~ 42.70%;在花铃期,与 BC0 处理相比,BC1 处理对茎粗无显著影响,但 BC3 和 BC5 处理显著降低了棉花茎粗,降低幅度分别为 12.57% ~ 18.98% 和 16.18% ~ 21.67%,且 BC5 处理抑制作用更明显。在 2022 年花铃期,与 BC0 处理相比,BC1 处理棉花茎粗显著增加了 19.63% ~ 27.56%,BC3 和 BC5 处理对茎粗无显著影响。

2.6　生物炭添加对棉花叶面积的影响

从图 8 可知,与 BC0 处理相比,2021 年 BC1 处理对棉花叶面积无显著影响,但 BC3 和 BC5 处理显著降低了棉花叶面积,降低幅度分别为 19.48% ~ 39.07% 和 50.71% ~ 83.67%。在 2022 年苗期,与 BC0 处理相比,BC1 处理棉花叶面积显著增加了 24.58% ~ 28.31%,而 BC3 和 BC5 处理无显著影响;在花铃期,BC1 和 BC3 处理显著增加了棉花叶面积,增加幅度分别为 72.07% ~ 89.69% 和 29.15% ~ 38.08%,BC5 处理对棉花叶面积无显著影响。

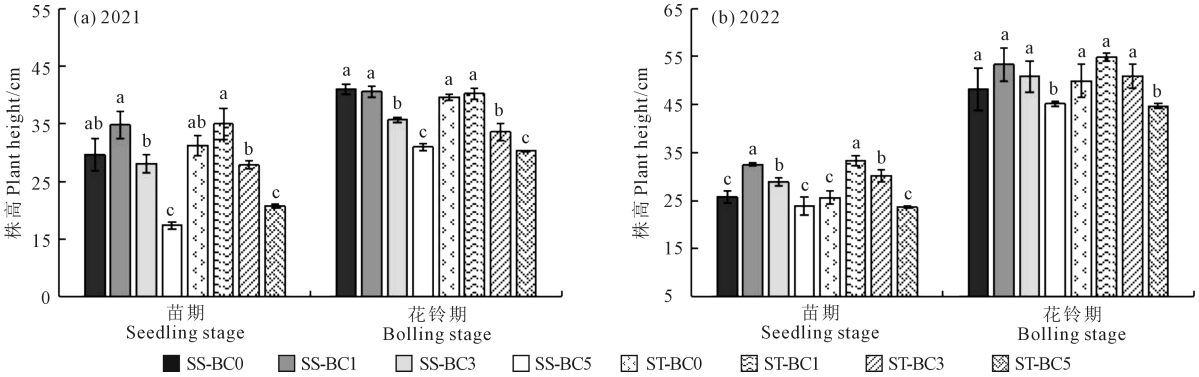


图 6　2021—2022 年棉花生育时期各处理株高

Fig.6　Plant height at cotton growth stages of each treatment in 2021-2022

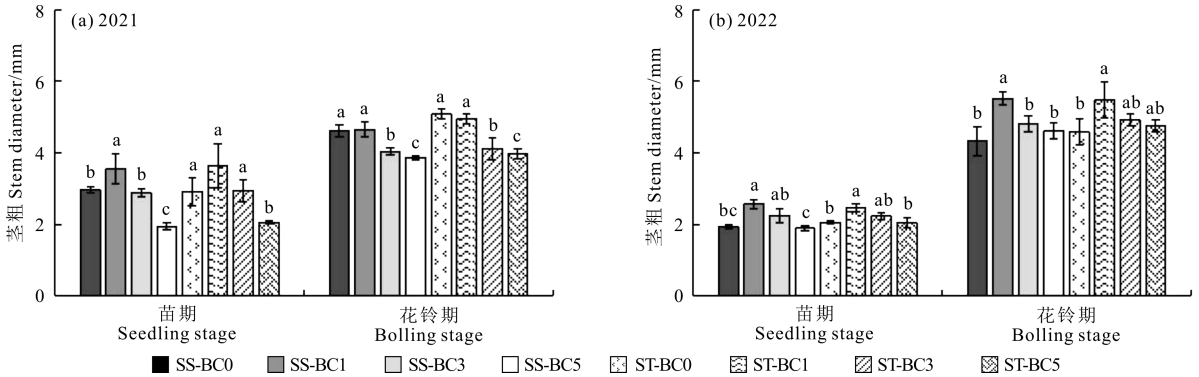


图 7　2021—2022 年棉花生育时期各处理茎粗

Fig.7　Stem diameter at cotton growth stages of each treatment in 2021-2022

2.7 生物炭添加对棉花干物质的影响

生物炭添加显著影响了棉花地上部生物量(图9),在 2021 年苗期,与 BC0 处理相比,BC1 处理显著增加了地上部生物量,BC3 处理对地上部生物量无显著影响,但 BC5 处理显著降低了地上部生物量;在花铃期,与 BC0 处理相比,BC1 处理对棉花地上部生物量无显著影响,但 BC3 和 BC5 处理显著降低了棉花地上部生物量,降低幅度分别为 32.34%~64.18%和 61.76%~62.26%。在 2022 年,与 BC0 处理相比,BC1 和 BC3 处理棉花地上部生物量分别增加了 18.30%~52.21%和 10.06%~42.86%,BC5 处理对棉花地上部生物量无显著影响。

3 讨 论

3.1 生物炭添加对土壤理化性质的影响

添加生物炭能够有效降低盐碱土中盐分含量,改善土壤结构并调节 pH,从而提高养分有效性。本研究表明生物炭添加显著降低了土壤含盐量,可能是因为生物炭的高比表面积和孔隙度能够吸附土壤中的 Na^+和 Cl^-等盐分离子,减少其活性,缓解盐胁迫[13];同时,土壤电导率和碱化度随着生物炭施用年限的增加而显著降低[14]。生物炭的保水性能在很大程度上取决于原料来源、合成技术、润湿特性和粒径[21]。当生物炭应用于土壤时,热解过程中的温度会显著影响水文特性[22]。据报道,在较高温度(400~600℃)下生成的酸功能化生物炭中发现了最有利的水文品质,持水量比对照处理提高18.45%~22.45%。这种保水能力的激增可能是由于高表面积和孔隙空间以及有助于功能化生物炭的更多亲水官能团的结果[23]。纤维素和半纤维素含量较高的原料(如甘蔗渣)通常会产生含氧官能团(-COOH、-OH和-CHO)含量较高的生物炭,富含木质素的生物质原料(如棕榈壳)产生的生物炭具有更多的孔隙结构、芳香度和较低的 pH 值,在土壤固碳、改善土壤质量和支持植物生长方面更为有效[16]。此外,生物炭通过增强土壤阳离子交换量促进 K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}等养分的保留,减少淋溶损失[17]。在黄河三角洲盐碱土壤治理中,施用生物炭可提升土壤肥力,显著增加土壤中可溶性氮、磷含量[19]。然而长期施用高剂量生物炭可能导致土壤 pH 过度升高,影响微量元素(如 Fe、Zn)的有效性[24]。

3.2 生物炭添加对土壤养分的影响

生物炭中丰富的碳和矿物质有利于提高土壤矿质营养元素含量[25-26]。本研究表明,生物炭显著

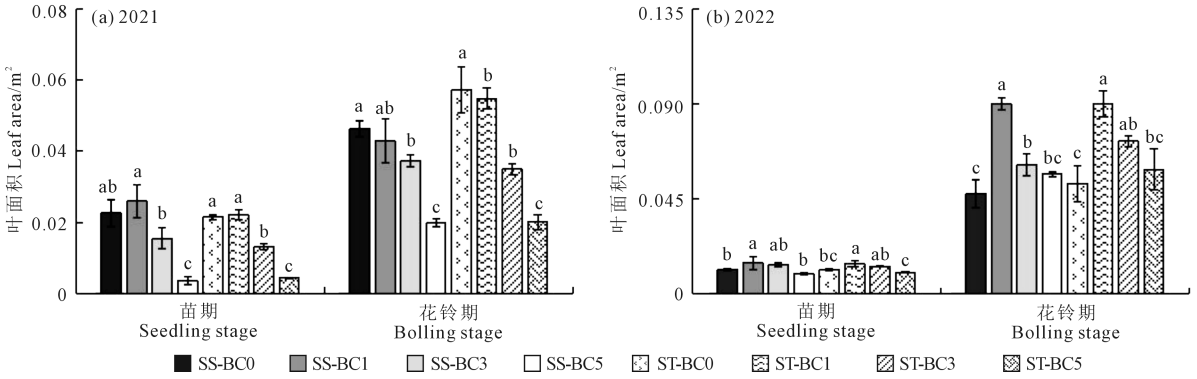


图 8 2021—2022 年棉花生育时期各处理叶面积

Fig.8 Leaf area at cotton growth stages of each treatment in 2021-2022

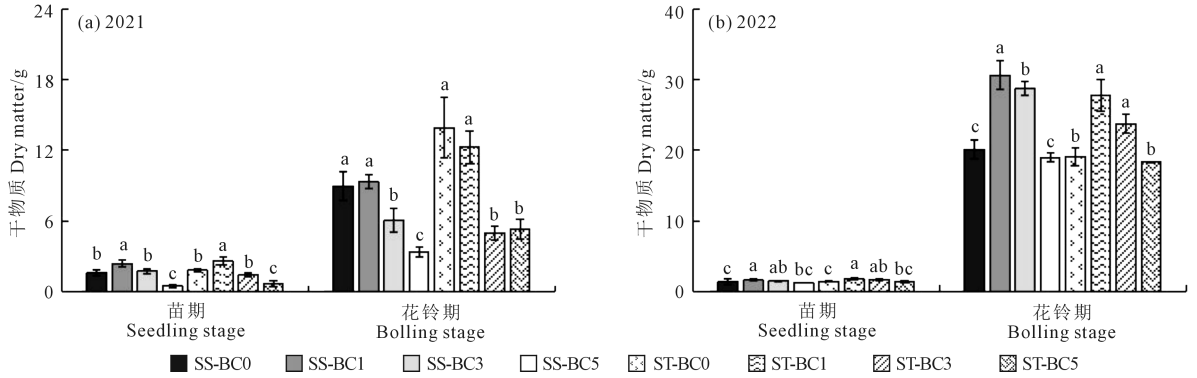


图 9 2021—2022 年棉花生育时期各处理干物质

Fig.9 Dry matter weight at cotton growth stages of each treatment in 2021-2022

增加了土壤全氮、有效磷和有效钾含量,且随着时间推移生物炭对土壤养分含量的影响更大。Glaser 等[27]研究表明生物炭施用对盐碱土壤(pH>7.5)的磷有效性没有产生显著影响。生物炭独特的表面特性不仅对土壤中的营养元素有很强的吸附作用,从而避免养分淋失[2,8],而且还可以作为土壤营养元素的缓释载体,持续缓慢地释放营养物质[28]。此外,生物炭的养分释放能力随生物炭的性质而变化,生物炭在土壤中会发生一系列的生物化学反应,这可能增加生物炭的养分释放能力[29];随着时间的推移,土壤与生物炭融合更加充分,使生物炭能够保留更多的土壤养分。有研究表明,土壤腐殖质的释放会刺激土壤有效磷的形成[30],在当前的研究中,棉花生长后期形成了更复杂的土壤细菌群落,这有利于土壤腐殖质的形成,从而刺激土壤有效磷形成。也有研究表明,生物炭会对土壤性质产生负面影响,如生物炭中的高碳氮比,大量添加反而会降低土壤的矿化度,不利于土壤中有机物质的分解和矿质营养物质的形成[31]。Farrell 等[32]研究表明,生物炭增加了土壤 pH 值,导致土壤中的磷沉淀或磷吸附,降低了磷在土壤中的有效性。由此可见,生物炭对土壤养分的影响主要与生物炭用量及土壤类型有关,为了获得最佳的土壤养分效益,在实际生产应用中需要科学合理地确定生物炭用量。

3.3　生物炭添加对棉花生长的影响

在盐渍土中添加生物炭影响土壤理化性质和养分分布状况进而影响棉花生长,这些影响取决于生物炭添加量和棉花生长阶段。本研究表明,1%的生物炭添加量对棉花生长有促进作用,这与黄英梅等[33]的研究结果一致,1%的生物炭添加量可显著提升绿地土壤中绣球花的光合效率和生长,可能归因于生物炭因其多孔结构和高比表面积,能够显著改善盐碱地土壤结构,降低容重并增加孔隙度,从而增强土壤保水透气性[34]。这种物理改良对棉花根系的延伸和水分及养分吸收尤为关键,尤其在盐胁迫环境下,生物炭的孔隙可作为水分和养分的缓释库,缓解渗透胁迫[35];此外,生物炭表面富含的含氧官能团(如羧基、酚羟基)通过离子交换和静电吸附固定 Na^+,降低土壤溶液中的 Na^+/K^+ 比值,从而降低土壤盐渍化程度[36];从微生物角度而言,生物炭为土壤微生物提供了栖息地和碳源,促进耐盐菌群的增殖,提高植物的养分利用效率,进而促进作物生长[37]。3%和 5%的生物炭添加量对棉花生长无明显促进作用甚至在某些时期会抑制棉花生长,这可能是因为高温裂解(600~800℃)的生物炭含氮量和挥发性碳量降低,固定碳量增加,且比表面积和孔隙度增大,吸附性增强[30]。本试验所用生物炭是在 500~600℃的高温条件下裂解产生的,过量添加导致营养物质固化和稳定性碳增加,这不利于有机碳降解和作物吸收营养[38],这也是 5%生物炭添加量抑制棉花生长的原因。

4　结　论

1)添加生物炭处理均在一定程度上降低了表层土壤含盐量(0~20 cm),但增加了 20~30 cm 或 30~40 cm 土层土壤含盐量,说明生物炭能减少表层土壤盐分含量,促进盐分淋洗。

2)在棉花各生育时期,添加生物炭对土壤 pH 无显著影响,却显著增加了土壤全氮、有效磷和有效钾含量,并且增幅基本随着生物炭添加量的增加而增加;此外,棉花品种对土壤 pH、全氮、有效磷和有效钾含量的影响无显著差异。

3)生物炭添加显著增加了棉花株高、茎粗、叶面积和地上部生物量等生长指标。1%生物炭添加量有利于棉花生长,而当生物炭添加量为 3%和 5%时,棉花生长受到抑制;此外,生物炭在棉花苗期更容易影响棉花生长指标。

参 考 文 献:

[1] 冯起, 尹鑫卫, 朱猛, 等. 统筹推进西北地区盐碱地综合治理利用: 现状、挑战与对策建议[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(12): 2060-2073.
FENG Q, YIN X W, ZHU M, et al. Overall promotion of integrated management and utilization of saline-alkali land in Northwest China: conditions, challenges, and recommendations[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(12): 2060-2073.

[2] AMINI S, GHADIRI H, CHEN C R, et al. Salt-affected soils, reclamation, carbon dynamics, and biochar: a review[J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16: 939-953.

[3] 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.

[4] 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 J, YANG J S, YAO R J, 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.

[5] 刘易, 孟阿静, 黄建, 等. 生物质炭输入对盐胁迫下玉米植株生物学性状的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 16-22, 249.
LIU Y, MENG A J, HUANG J, et al. Effect of biomass carbon input on corn biological index cultivated under saline stress[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(2): 16-22, 249.

[6] 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 X Q, WEI J M, CHANG G W, 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.

[7] 赵铁民, 李渊博, 陈为峰, 等. 生物炭对滨海盐渍土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 T M, LI Y B, CHEN W F, 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.

[8] 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, 2017, 24: 12700-12712.

[9] HE K, HE G, WANG C P, et al. Biochar amendment ameliorates soil properties and promotes Miscanthus growth in a coastal saline-alkali soil[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 155: 103674.

[10] XU G, ZHANG Y, SUN J, 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.

[11] AKHTAR S S, ANDERSEN M N, LIU F. Biochar mitigates salinity stress in potato[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2015, 201(5): 368-378.

[12] 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.

[13] 陈斐杰, 夏会娟, 刘福德, 等. 生物质炭特性及其对土壤性质的影响与作用机制[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(1): 161-172.
CHEN F J, XIA H J, LIU F D, et al. Characteristics of biochar and its effects and mechanism on soil properties[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(1): 161-172.

[14] JIN F, PIAO J L, MIAO S H, et al. Long-term effects of biochar one-off application on soil physicochemical properties, salt concentration, nutrient availability, enzyme activity, and rice yield of highly saline-alkali paddy soils: based on a 6-year field experiment[J]. Biochar, 2024, 6(1): 40.

[15] 魏盈, 焦乐, 张鹏, 等. 生物炭改良盐碱地研究与应用进展[J]. 环境科学, 2024, 45(2): 940-951.
WEI Y, JIAO L, ZHANG P, et al. Research and application progress of biochar in amelioration of saline-alkali soil[J]. Environmental Science, 2024, 45(2): 940-951.

[16] NGUYEN X, DO T. Optimizing biochar production: a review of recent progress in lignocellulosic biomass pyrolysis[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2025, 12(1): 148-172.

[17] 冉继伟, 齐昕, 武栋, 等. 施用生物炭对土壤养分有效性和离子交换性能影响的整合分析[J]. 中国生态农业学报, 2023, 31(9): 1449-1459.
RAN J W, QI X, WU D, et al. Impacts of biochar application on soil nutrient availability and exchangeable based cations: a meta-analysis [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(9): 1449-1459.

[18] 张楠海, 叶旭, 刘高祥, 等. 施用生物炭对中国农田土壤有机碳含量的影响--基于 Meta 分析[J]. 土壤通报, 2024, 55(2): 532-542.
ZHANG N H, YE X, LIU G X, et al. Effects of biochar application on soil organic carbon content in Chinese farmland: a meta-analysis [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(2): 532-542.

[19] 王洁, 单燕, 马兰, 等. 秸秆/生物质炭协同还田措施对黄河三角洲盐碱土壤的改良效果研究[J]. 生态环境学报, 2023, 32(1): 90-98.
WANG J, SHAN Y, MA L, et al. Effects of straw and biochar synergistic returning on the improvement of salt-affected soil in the yellow river delta[J]. Ecology and Environment Sciences, 2023, 32(1): 90-98.

[20] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京:中国农业出社版, 2008.
BAO S D. Soil agr-chemical analysis (3rd Edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008.

[21] SHAABAN A, SE S M, MITAN N M M, et al. Characterization of biochar derived from rubber wood sawdust through slow pyrolysis on surface porosities and functional groups[J]. Procedia Engineering, 2013, 68: 365-371.

[22] KIGOZI M, KALI R, BELLO A, et al. Modified activation process for supercapacitor electrode materials from African maize cob[J]. Materials, 2020, 13(23): 5412.

[23] GŁAB T, PALMOWSKA J, ZALESKI T, et al. Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil[J]. Geoderma, 2016, 281: 11-20.

[24] ZHANG C, ZENG G M, HUANG D L, et al. Biochar for environmental management: mitigating greenhouse gas emissions, contaminant treatment, and potential negative impacts[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 373: 902-922.

[25] SIAL T A, SHAHEEN S M, LAN Z, et al. Addition of walnut shells biochar to alkaline arable soil caused contradictory effects on CO_2 and N_2O emissions, nutrients availability, and enzymes activity [J]. Chemosphere, 2022, 293: 133476.

[26] 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.

[27] GLASER B, LEHR V I. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 9338.

[28] MARCINCZYK M, OLESZCZUK P. Biochar and engineered biochar as slow-and controlled-release fertilizers[J]. Journal of Cleaner Production, 339: 130685.

[29] EL-NAGGAR A, EL-NAGGAR A H, SHAHEEN S M. Biochar composition-dependent impacts on soil nutrient release, carbon mineralization, and potential environmental risk [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 241: 458-467.

[30] SAIFULLAH, DAHLAWI S, NAEEM A, et al. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: challenges and opportunities [J]. Science of the Total Environment, 2018, 625: 320-335.

(下转第 270 页)