不同生物炭对南疆盐渍土盐分离子淋洗效果的影响

孔芊芊，朱连勇，朱 珠，罗 奇，张 磊，姚宝林

（塔里木大学水利与建筑工程学院，新疆 阿拉尔 843300）

摘要：为探究不同生物炭添加对盐渍化土壤盐分及离子淋洗效果的影响。采用室内土柱模拟试验，在土壤表层（0—10 cm）添加比例为 0.5%的猪粪（PMB）、棉秆（CSB）和玉米秸秆（MSB）生物炭，淋洗过程分为急降（P1）、缓降（P2）和稳定（P3）3 个阶段，通过测定淋洗速率、流量、累积浸出阴阳离子浓度、土壤剖面含水率和土壤剩余可溶性离子的含量来探究不同生物炭对南疆盐渍土盐分离子的淋洗效果。结果表明：与未添加生物炭处理（CK）相比，生物炭的施用能提高各阶段淋洗液的流量和淋洗速率，在电导率快速下降阶段 CSB 处理流量提高 20%，PMB 处理淋洗速率提高 29%，MSB 处理最先使 *EC* 值降低到 5 mS/cm，但对离子的去除能力提升较小。生物炭的施用对各阶段离子淋出先后顺序有一定影响，即促进 Ca^{2+}、Na^{+}、SO_4^{2-} 和 Cl^{-} 淋出，抑制 K^{+} 淋出。淋洗结束时，生物炭均能显著降低土壤残余含盐量。CSB 处理可提高表层土壤保水能力，使得钠吸附比（SAR）始终保持较低水平且对土壤中残余阴离子洗脱效果最好。表明 CSB 处理是一种非常有潜力的土壤改良剂。研究结果可为南疆盐渍化土壤改良提供理论参考。

关键词：盐渍土；生物炭；电导率；离子淋洗

中图分类号：S152.7 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2023)06-0325-08

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.06.041

Evaluation of the Effectiveness of Different Biochar in Leaching Salt Ions from Saline Soil in Southern Xinjiang

KONG Qianqian, ZHU Lianyong, ZHU Zhu, LUO Qi, ZHANG Lei, YAO Baolin

(*College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Tarim University, Alaer, Xinjiang* 843300)

Abstract: To explore the differences and characteristics of the effects of different biochar additions on salinity and ion leaching in saline soil. This study used indoor soil column simulation experiments to add 0.5% of pig manure (PMB), cotton straw (CSB), and maize straw (MSB) biochar to the soil surface (0－10 cm), the leaching process was divided into three stages: rapid descent (P1), slow descent (P2), and stable descent (P3). To investigate the leaching effect of different biochar on salt ions in saline soil of southern Xinjiang, the infiltration rate, flow rate, cumulative leaching concentration of anions and cations, soil profile moisture content, and residual soluble ion content were measured. The results showed that compared to the treatment without adding biochar (CK), the application of biochar could improve the flow rate and infiltration rate of the leachate at each stage. During the rapid decline in electrical conductivity stage, the flow rate of CSB treatment increased by 20%, and the infiltration rate of PMB treatment increased by 29%. MSB treatment first reduced the EC value to 5 mS/cm, but the improvement in ion removal ability was small. The application of biochar had a certain impact on the sequence of ion leaching at each stage, that was, it promoted the leaching of Ca^{2+}, Na^{+}, SO_4^{2-}, and Cl^{-}, and inhibited the leaching of K^{+}. At the end of leaching, biochar can significantly reduce the residual salt content of soil. CSB treatment can improve the water retention capacity of topsoil, keeping the sodium adsorption ratio (SAR) always at a low level and providing the best elution effect for residual anions in the soil. This shows that CSB treatment is a potential soil conditioner. The results provide theoretical reference for salinized soil improvement in southern Xinjiang.

Keywords: saline soil; biochar; electrical conductivity; ion leaching

收稿日期：2023-05-06

资助项目：国家自然科学基金项目(51969028)；兵团重大科技项目(2018AA003)

第一作者：孔芊芊(1998—)，女，河南洛阳人，硕士研究生，主要从事高效节水灌溉研究。E-mail：kqq972547154@163.com

通信作者：朱连勇(1970—)，男，山东文登人，教授，博士，硕士生导师，主要从事水资源高效应用研究。E-mail：150255519@qq.com

土壤盐渍化是指较高浓度的可溶性盐分离子在土壤中积聚,导致土壤呈现不良特性的过程[1]。新疆土壤盐渍化面积较大,其盐渍土面积占总面积的6.61%,是耕地面积2.71倍,远高于全国平均水平[2]。盐渍化使土壤理化性质变差,降低土壤碳的可用性和微生物活动[3],盐度超过一定水平,降低土壤生产力,甚至使其荒芜,因此,解决土壤盐渍化问题是提高新疆农业生产力的关键举措之一。我国有机废弃物产量巨大,近10年来,典型有机废弃物(秸秆、畜禽粪便、农村人粪尿、污泥和生活有机垃圾)平均总量(干重)为12.9亿t[4]。生物炭是由农业废弃物等生物有机物质在缺氧或低氧条件下高温裂解的固体产物,具有比表面积大、离子交换能力强、多孔性等理化性质[5-6],将南疆广泛的有机废弃物(棉秆,玉米秸秆和猪粪)转化成新型生物炭改良剂,以废制废将生物炭施加到土壤中,对盐渍化土壤环境生态修复具有一定的应用潜力。

有研究[7]发现,将生物炭作为改良剂混掺在黄河泥沙土中,3%添加量可有效降低土壤盐分。生物炭对缓解高矿化度微咸水灌溉条件下土壤盐分表聚现象效果尤为显著,还具有减轻玉米遭受盐胁迫危害的作用[8]。唐珺瑶等[9]通过在不同盐碱程度的水稻土中添加生物炭发现,生物炭能够促进碳酸盐的溶出,且溶出量随生物炭施用量的增加而增加。添加生物炭可以有效改善受盐渍化影响的土壤物理、化学和生物特性[10-11]。生物炭良好的孔隙结构和大比表面积可以增加土壤孔隙率和入渗速率,从而在灌溉过程中增强盐浸出量[12]。由于生物炭本身含有Ca^{2+},还能够通过其与土壤溶液中的Na^{+}交换来调节离子组成并减轻土壤盐分对植物生长的负面影响[13-14]。生物炭添加引起的离子迁移和盐分离子淋出量增加在盐渍土壤的修复过程中至关重要,可以显著降低可溶性盐分含量和土壤盐分指标[15]。Chaganti等[16]在盐渍土壤添加木屑生物炭,增加阳离子的累积淋洗液浓度,改善团聚体稳定性,并增加土壤交换复合体上的Ca^{2+}饱和度。Xiao等[15]在中国盐渍土壤上施用柽柳生物炭后,得出类似结果。

综上所述,生物炭可以促进土壤中盐分离子的浸出,然而不同种类生物炭对土壤盐分离子淋洗效果均有异同,且不同盐分离子浸出量增加会引起人们对土壤养分流失的担忧。鲜有研究针对土壤中不同离子淋出状况做对比,因此,在盐渍化土壤中添加不同种类生物炭,对比不同生物炭在改良盐渍化土壤过程中盐分离子淋出顺序及淋出量的异同,对南疆盐渍土改良具有现实指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

供试土壤剖面(0—20 cm)取自塔里木大学水利与建筑工程学院节水灌溉试验基地(40°20′47″—41°47′18″N,79°22′33″—81°53′45″E),该地区气候干燥,降水稀少,全年蒸发高达2 110.5 mm属暖温带极端大陆性干旱荒漠气候,土壤质地为砂质壤土,属氯化物—硫酸盐类土。其中土壤剖面(0—20 cm)颗粒组成质量分数为黏粒(<0.002 mm)3.99%~4.05%,粉粒(0.002~0.02 mm)28.97%~29.63%,砂粒(2~0.02 mm)66.32%~67.04%[17],土壤电导率1.52 mS/cm,Ca^{2+},Mg^{2+},Na^{+},K^{+},Cl^{-},SO_4^{2-}和HCO_3^{-}分别为1.62,0.91,0.72,0.17,0.18,1.56,0.44 g/kg。土样避光风干后,使用2 mm筛网将其筛分。

3种生物炭原材料分别为棉花秸秆、玉米秸秆和猪粪,经过马弗炉600 ℃高温热解2 h制成。所有生物炭研磨后过筛(0.25 mm孔径)。猪粪、棉秆和玉米秸秆生物炭比表面积分别为43.85,190.50,29.84 m^2/g,基本化学性质见表1。

表1 不同种类生物炭的离子含量

单位:mg/kg

生物炭种类	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	HCO_3^{-}
猪粪	8.25	2.70	13.95	28.21	2.32	5.94	0.38
棉秆	12.50	6.67	9.57	37.92	2.05	6.84	1.10
玉米秸秆	3.12	2.20	3.20	10.52	4.40	5.16	0.19

1.2 试验设计

基本装置:土壤盐分淋洗试验装置包含马氏瓶和土柱,试验在内径d=10 cm,高度h=45 cm的透明玻璃柱中进行淋洗试验。采用马氏瓶持续供水,水头保持在2 cm,淋洗水源为实验室制备去离子水。为降低界面效应和减少土样流失,装土前土柱底部放置1 cm厚石英砂(<2 mm)和2层纱布。管壁周围均匀涂抹1层凡士林,防止优势流的产生。底部保留直径2 mm小孔保持土柱通气性,中部留直径2 cm圆孔连接硬塑管,下方放置250 mL烧杯承接淋洗液(图1)。

装填过程:根据前期预试验,将土样按照容重1.4 g/cm^3,每5 cm分层装入土柱,分层界面处进行磨毛,装土深度为40 cm。将猪粪、棉秆和玉米秸秆为原料的3种生物炭按0.5%混掺量与土样混合均匀施用在0—10 cm土层土壤中,由于生物炭与土壤均匀混合会降低土壤容重,因此该试验将按照生物炭和土壤混合后的容重装填(表2)。各处理分别记为PMB(猪粪生物炭)、CSB(棉秆生物炭)、MSB(玉米秸秆生物炭)。

试验过程:试验于2022年6—8月进行。装土完成后,土柱静置24 h。每处理3次重复,以去离子水不掺任何物质(CK)做对照,记录淋洗液出现时间,参考Yue

等[18]研究具体方法,按照先密后疏原则记录淋洗液电导率和第 1 次出现淋洗液的电导率值相对比,降低 60%与 90%时间将淋洗过程分为急降(P1)缓降(P2)与稳定(P3)3 阶段,当淋洗液电导率下降至 5 mS/cm(总盐含量约为 3 g/L)且相邻值趋于稳定时停止试验。试验结束后测得淋洗速率、流量、淋洗液电导率、3 阶段淋洗液离子含量、淋洗后土壤剖面含水率、土层离子含量,并分析混掺生物炭后土壤的盐分淋洗效果。

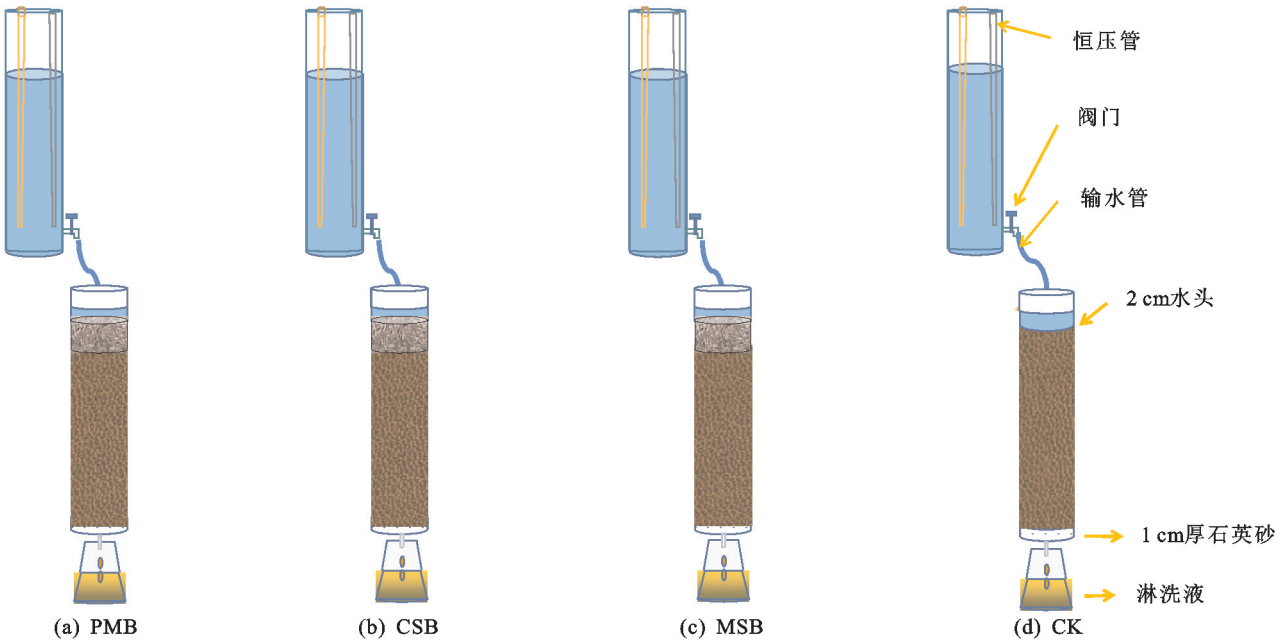


图 1　试验装置

表 2　生物炭处理混合土层容重

单位:g/cm³

处理	容重	容重变化
CK	1.40	0
PMB	1.39	0.01
CSB	1.37	0.03
MSB	1.38	0.02

1.3　测定方法

淋出液电导率采用电导率仪直接测定,土壤电导率采用 5∶1 的水土比浸提液测定,土壤与浸出液 K^+、Na^+ 采用火焰光度法测定;Ca^{2+}、Mg^{2+} 采用 EDTA 络合滴定法测定;HCO_3^- 采用中和滴定法测定;SO_4^{2-} 采用 EDTA 间接滴定法测定;Cl^- 采用硝酸银滴定法测定[19]。

淋洗速率(V)计算公式为:

$$V=Q/A \tag{1}$$

式中:Q 为流速(L/h);A 为土柱横截面积(785 000 mm²)。

流速(Q)计算公式为:

$$Q=L/t \tag{2}$$

式中:L 为淋出液体积(L);t 为淋洗时间(h)。

脱盐速率($V_{脱}$)计算公式为:

$$V_{脱}=(m_1-m_2)/t \tag{3}$$

式中:m_1 为土柱滤液初始浓度(g/L);m_2 为土柱滤液最终脱盐浓度(g/L);t 为脱盐经历时间(h)。

1.4　数据处理

所有数据为各土柱淋洗试验 3 次重复的平均值,采用 Excel 2010 软件进行数据处理,Origin 2021 软件作图,DPS 7.05 软件单因素(one-way ANOVA)方差分析进行差异显著性检验,用最小显著性差异法(least significant difference method,LSD)进行显著性检验($p<0.05$)。

2　结果与分析

2.1　添加生物炭对淋洗速率和流量影响

由表 3 可知,与 CK 处理相比,生物炭的添加均提高淋洗液流速(Q)和淋洗速率(V)。在急降(P1)阶段,淋洗时间缩短 0.50～1.01 h,生物炭的添加使 Q 和 V 比 CK 提高 3.00%～28.00%。其中,CSB 处理在 P1 阶段淋出离子量最多且含量提高 31.48%,说明 CSB 处理在 P1 阶段随水流带走大量离子。在缓降 P2 阶段,各处理间淋洗时间均无差异;PMB 和 MSB 均将 Q 和 V 提高 16.00%～25.00%,随水流淋出离子含量提高 27.84%和 22.72%,CSB 处理在该阶段虽对 Q 和 V 无明显促进作用,但淋洗液中的离子含量最大,分别高出 PMB 和 MSB 处理 25.03%和 30.00%。在 P3 阶段,添加生物炭处理对 Q 和 V 提升不明显,均<10.00%。

2.2　不同生物炭对淋洗液电导率影响

淋洗液从土柱底部流出即土壤盐分淡化的开始,直到淋洗液电导率下降至 5 mS/cm(总盐含量约为 3 g/L)结束该脱盐过程,表明大部分盐分均被淋洗出土壤。除 MSB 处理外,其他 2 种生物炭处理均延长盐分首次淋出土柱时间(图 2)。与 CK 处理相比,PMB 和 CSB

首次析出时间分别增加 0.5,2.8 h。经 PMB 和 CSB 调节的土柱淋洗液电导率降低到 5 mS/cm 以下时间分别比 CK 处理延长 1,4.5 h,而 MSB 处理比 CK 缩短 5.5 h 即可达到该标准。

从 P1 到 P3 阶段,CK 脱盐速率为 1.16 g/(L·h),PMB、CSB 和 MSB 分别为 1.57,1.38,1.36 g/(L·h)。不同生物炭处理的脱盐速率均大于 CK,说明添加生物炭可提升土壤脱盐速率。

表 3 不同阶段淋洗液特征

类别	淋洗速率/(mm·h^{-1})			流速/(mm^3·h^{-1})			淋洗时间/h			淋洗液累积离子/(mg·L^{-1})		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
CK	0.258	0.229	0.388	0.020	0.018	0.030	3.500	2.000	21.000	33688	20298	4704
PMB	0.333	0.287	0.412	0.021	0.021	0.031	2.490	2.000	21.000	47728	29792	7672
CSB	0.310	0.230	0.414	0.024	0.018	0.033	3.000	2.000	28.000	52008	39738	6538
MSB	0.268	0.268	0.394	0.020	0.021	0.031	3.000	2.000	22.000	44377	27817	7647

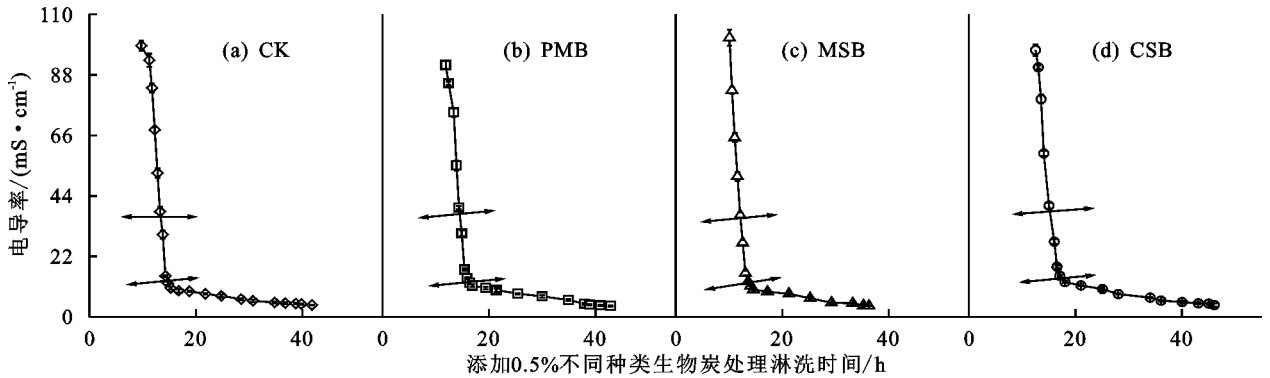


图 2 淋洗液电导率变化

2.3 不同生物炭处理对淋洗液离子的影响

2.3.1 *不同生物炭处理下淋洗液阳离子变化* 由图 3 可知,不同生物炭处理淋洗液主要阳离子(Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^+、K^+)。与 CK 相比,生物炭显著增加 Ca^{2+} 淋出,且处理间存在显著差异。P1、P2 阶段均为 CSB>PMB>MSB>CK,P1 阶段 Ca^{2+} 浓度较高,CSB 的 P2 比 P1 阶段下降 6.96%,PMB 和 MSB 下降的浓度与 CSB 相比高达 10 倍。Mg^{2+} 在 P3 阶段不同处理间下降浓度相差较大,CSB 下降 33.34%,MSB 下降 76.49%。不同处理 Na^+ 和 K^+ 浓度在 P2 和 P3 阶段有一定差异,其中,MSB 和 PMB2 阶段对 Na^+ 淋出液浓度影响相似,淋洗效果均低于 CSB,而 CSB 和 MSB 分别在 P2 和 P3 阶段对 K^+ 洗脱效果最差,分别下降 5.17%,36.70%。

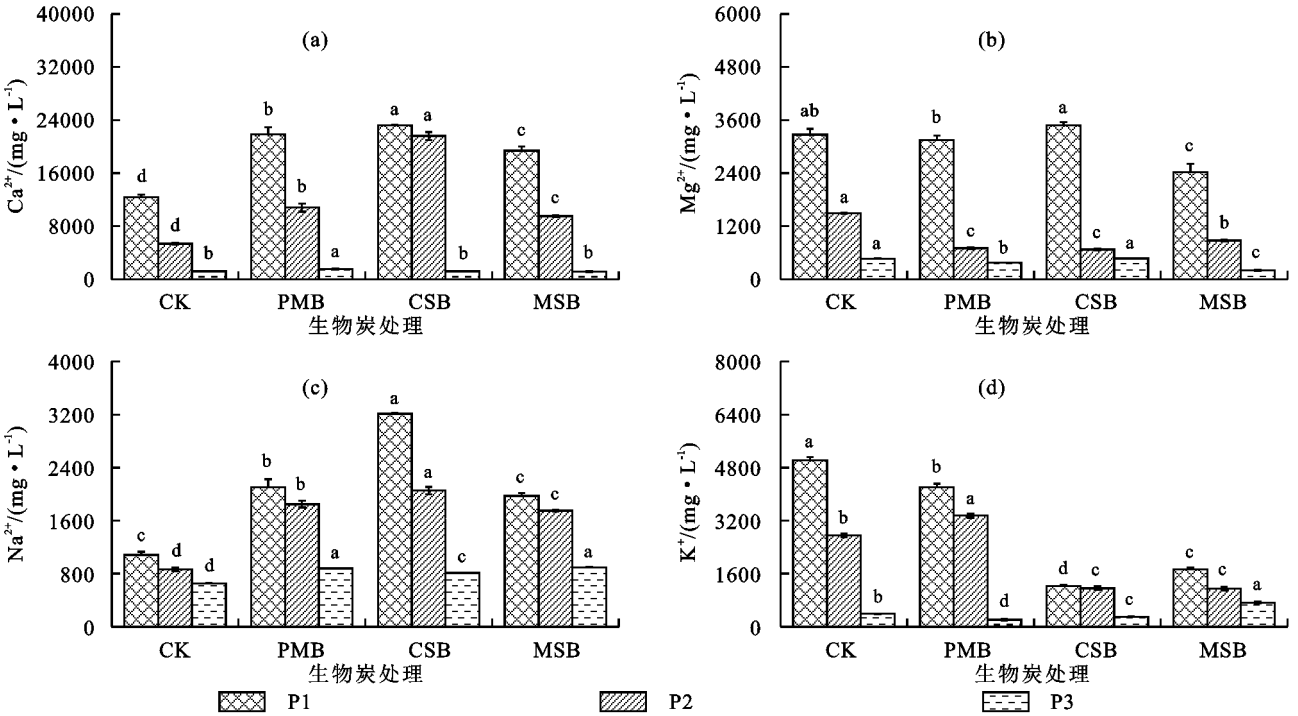
P1 阶段 CSB 的 Ca^{2+} 浓度较 PMB 和 MSB 分别显著增加 7.67%,18.41%,P2 阶段分别显著增加 9.49%,18.22%,2 阶段 CSB 处理较 CK 分别显著增加 45.57%,46.29%。生物炭处理的 Na^+ 和 K^+ 浓度在不同阶段均有一定程度的减小,其中 CSB 的 Na^+ 浓度在 P3 与 P2 阶段相差最大为 60.58%,PMB 的 K^+ 在 P3 阶段急剧下降 94.26%。综上所述,生物炭的添加对各阶段阳离子(Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^+、K^+)淋出先后顺序有一定影响,且促进 Ca^{2+} 和 Na^+ 淋出,抑制 Mg^{2+} 和 K^+ 淋出。

2.3.2 *不同生物炭处理下淋洗液阴离子变化* 不同生物炭处理的淋洗液阴离子变化见图 4。SO_4^{2-} 为不同处理的主要阴离子,其次是 Cl^- 和 HCO_3^-,说明供试土壤类型为硫酸盐类盐渍土。CSB 和 MSB 在 P2 阶段淋洗液中 SO_4^{2-} 和 Cl^- 浓度影响相似,较 P1 阶段分别下降 22.68%~31.30%,24.91%~32.84%,而 PMB 在 P2 阶段淋洗液中 SO_4^{2-} 和 Cl^- 浓度分别下降 6.17%,52.87%。在 P3 阶段,各处理 SO_4^{2-} 和 Cl^- 浓度相差不大,较 P2 阶段分别下降 61.37%~69.38%,96.78%~97.47%。MSB 在 P2 阶段 HCO_3^- 浓度下降 24.83%,但在 P3 阶段增加 7.10%。PMB 和 CSB 淋洗液中 HCO_3^- 浓度都随着电导率下降而减少,在 P2 和 P3 阶段分别下降 52.21%,43.03%和 13.87%,32.75%。与 CK 相比,生物炭处理在各阶段均显著促进 SO_4^{2-} 淋出,且在 P1 阶段 HCO_3^- 浓度显著增加,P1 和 P2 阶段 Cl^- 浓度显著增加。由图 4 可知,淋洗结束后各处理间 Cl^- 数值最小,且同 P1 阶段相比最多可减少 98.81%的盐分离子浓度。综上所述,不同生物炭对各阶段淋出离子的先后顺序有一定影响,可一定程度促进阴离子淋出,减少有害离子在土壤中的积聚。

2.4 淋洗结束后土壤水分再分布

淋洗试验结束后,不同种类生物炭对土壤水分再分布影响见图 5。由图 5a 可知,土壤剖面含水率随着土层深度的增加而不断减小。表层 0—10 cm 含水率最高,由大到小依次为 CSB、MSB、PMB,与 CK 相比分别提高 17.08%,14.74%,12.13%,说明添加生物炭可以提高 0—10 cm 土层土壤含水率,其中 CSB 对表层含水率提升最明显。在 10—30 cm 土层,MSB 处理含水

率迅速下降,但含水率较 CK 处理下降量减少 2.23%,说明添加生物炭对土壤保水能力有一定的改善。由图 5b 可知,CSB 和 MSB 处理土壤平均含水率明显高于 PMB 处理,与 CK 相比提高 13.37%～15.74%。



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间显著性差异($p<0.05$)。下同。

图 3　各阶段淋洗液主要阳离子浓度

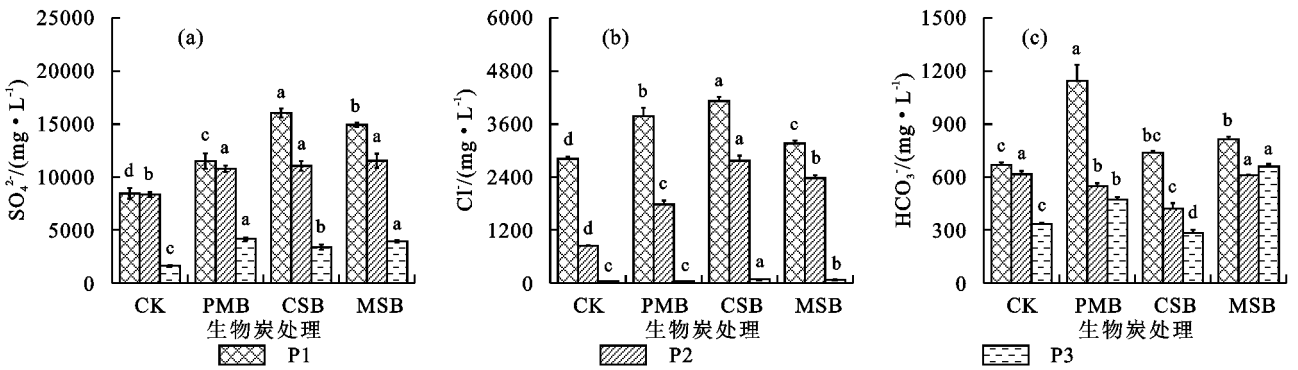


图 4　各阶段淋洗液阴离子浓度

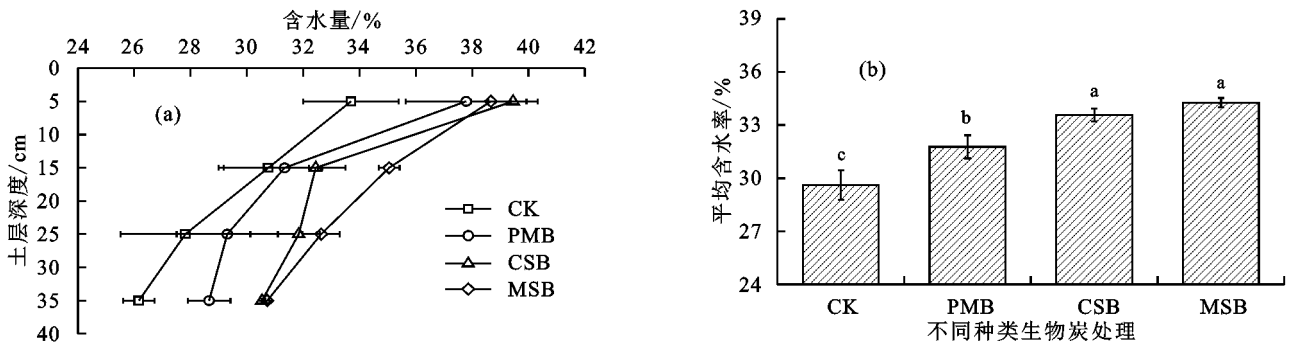


图 5　不同种类生物炭处理下土壤水分再分布情况

2.5　土壤剖面盐分离子变化特征

淋洗结束后,无论是否添加生物炭,与 CK 相比不同处理土壤中的含盐量均呈下降趋势。由图 6 可知,各生物炭处理除 K^{+} 含量逐渐上升,其余各离子含量在不同土层均小于 CK,说明淋洗后大量盐分离子随水流进入淋洗液中。其中,Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^{+} 较 CK 分别减少 3.71%～39.72%,4.10%～65.97%,1.53%～40.04%;K^{+} 较 CK 增加 13.00%～77.55%。

由图 7 可知,添加生物炭对 HCO_3^{-} 无明显影响,但均降低各土层 SO_4^{2-} 和 Cl^{-} 离子含量,较 CK 分别减少 11.38%～48.26%,6.84%～38.54%。

由表 4 可知,淋洗结束后土柱各土层脱盐率随土层

深度增加而逐渐减弱。以最弱的脱盐层(30—40 cm)为例,脱盐率仍可达 4.79%～26.83%。添加生物炭处理的总盐含量在各土层均显著低于 CK,说明生物炭添加可促进盐分离子洗脱,在 0—30 cm 土层 MSB 处理下总盐含量最小,30—40 cm 土层 PMB 处理下总盐含量最小。在 0—40 cm 土层中仅 CSB 处理下 SAR 值小于 CK,说明该生物炭对 SAR 最为有效。

按照盐分类型划分[20],淋洗前土壤为氯化物—硫酸盐类盐渍土,淋洗结束后 0—20 cm 土层均转变成硫酸盐盐渍土。而在 20—30 cm 土层仅 CSB 从硫酸盐盐渍土转变为氯化物—硫酸盐类盐渍土,30—40 cm 土层再次转变为硫酸盐盐渍土,其余生物炭处理以及 CK 淋洗后各土层均保持硫酸盐盐渍土。淋洗后 PMB、CSB、MSB 不同生物炭处理的土壤盐分离子从大到小分别为 $Ca^{2+}>SO_4^{2-}>Na^+>Mg^{2+}>HCO_3^->Cl^->K^+$,$Ca^{2+}>Mg^{2+}>SO_4^{2-}>Na^+>HCO_3^->Cl^->K^+$,$Ca^{2+}>SO_4^{2-}>Na^+>Mg^{2+}>HCO_3^->Cl^->K^+$,说明 PMB 和 MSB 对不同离子的淋洗效果趋势相同。

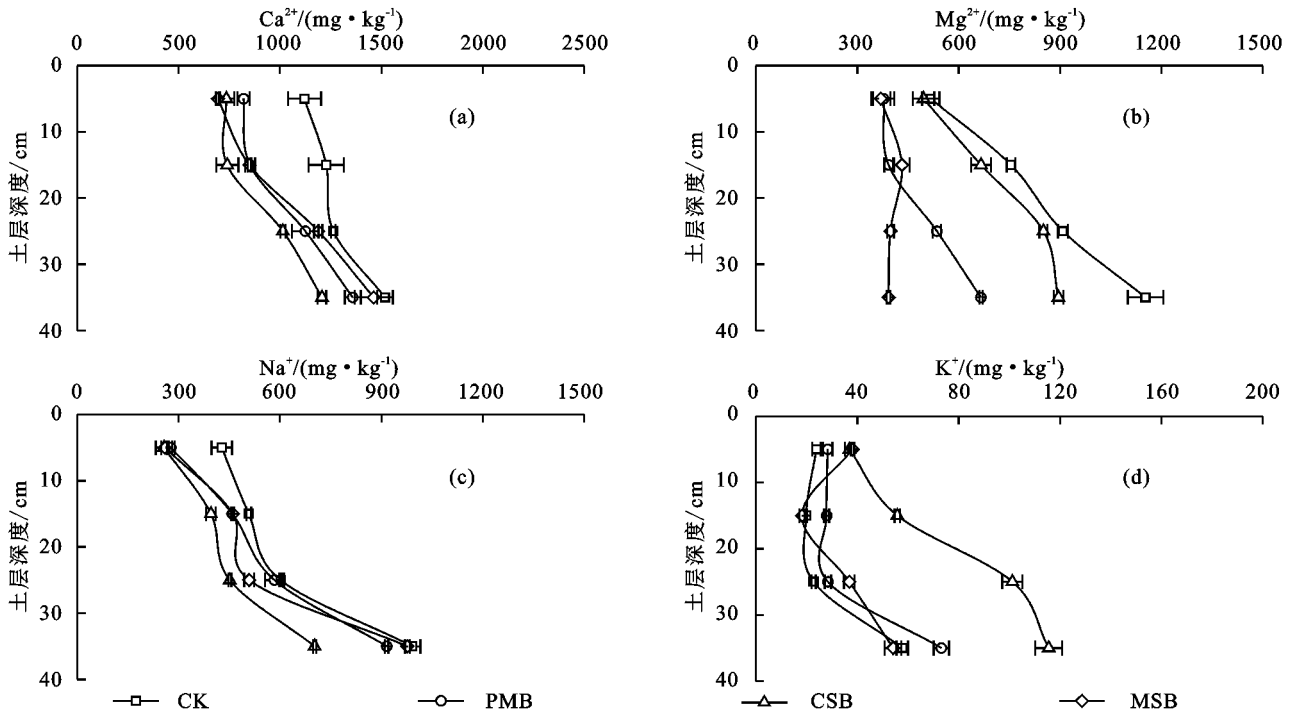


图 6 不同生物炭处理试验土柱剖面阳离子迁移趋势

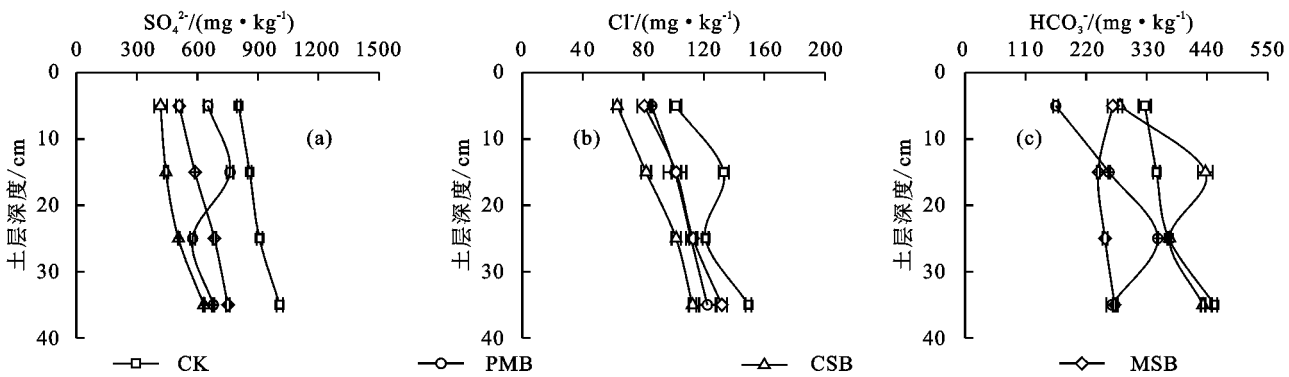


图 7 不同生物炭处理试验土柱剖面阴离子迁移趋势

3 讨 论

施用生物炭可提高 Q 和 V,进而增加盐分离子浸出,该结论与 Dos Santos 等[21]研究结果一致。本研究表明,当土壤水分饱和时,盐分离子浸出量增加,由于生物炭多孔结构和大比表面积将盐分离子吸附在孔隙中进而降低土壤总盐含量,促进盐分离子的洗脱[15]。同时,生物炭携带的 Ca^{2+}、Mg^{2+} 能够置换盐渍土中 Na^+,其强大的吸附作用还可以将盐渍土中 Na^+ 固定在固态聚合物中减缓其对土壤结构的破坏[8],并且生物炭在淋洗过程中释放酸性基团,在与土壤阳离子的静电吸引中改善离子在土壤中的分布[22]。

本研究主要探讨土壤(0—40 cm)盐分特征,研究区土壤盐分的阳离子主要以 Na^+ 和 Ca^{2+} 为主。根据不同土壤盐分类型分类,淋洗前土壤均为氯化物—硫酸盐盐渍土,淋洗结束后除 CSB 在 20—30 cm 土层由硫酸盐盐渍土转变为氯化物硫酸盐盐渍土,其余各处理淋洗结束后土层全部变为硫酸盐盐渍土,是由于在土壤表层 SO_4^{2-} 随水流向下转移导致下层土壤

盐分含量增加。MSB 的 Mg^{2+} 在土壤中残留较多仅次于 Ca^{2+},与该生物炭中本身含有较多 Mg^{2+} 有关。CSB 的 SO_4^{2-} 含量较 MSB 和 PMB 生物炭处理较低,与 CSB 淋洗液中 SO_4^{2-} 含量较多有关,土壤中 SO_4^{2-} 随水流淋入淋洗液中,进而减少该离子在土壤中的残留。土壤中 K^+ 残余量虽然和其他离子相比最小,但 K^+ 呈现持续增加态势,从淋洗液各阶段的浓度可发现,生物炭对 K^+ 的淋洗有一定抑制作用,因为生物炭本身含有较多 K^+,土壤中 K^+ 残余量持续递增。淋洗后,土壤中添加生物炭处理的 SAR 仅在表层 0—10 cm 完全低于 CK,其余土层除 CSB,其他处理均在 CK 范围上下波动(表 4),与淋洗过程中土壤 Na^+ 向下层运移使得其空间分布不均有关,SAR 值<4 表示土壤不受碱化威胁[23]。淋洗结束后,CSB 处理 HCO_3^- 积聚在 0—20 cm 土层土壤,甚至超过 CK 的 HCO_3^- 含量,可能与土壤离子吸附与交换平衡有关[24];另一方面,可能关系到 $CaCO_3$ 的沉淀与溶解平衡。

表 4　不同生物炭处理试验土柱剖面的钠吸附比(SAR)、总盐和脱盐率

处理	土层深度/cm	SAR	总盐/(g·kg^{-1})	脱盐率/%
CK	0—10	0.84±0.08a	3.32±0.06a	40.71
PMB		0.63±0.04b	2.40±0.04b	57.14
CSB		0.57±0.04b	2.29±0.04c	59.11
MSB		0.63±0.05b	2.22±0.05c	60.36
CK	10—20	0.89±0.01b	3.85±0.10a	31.25
PMB		1.03±0.02a	2.86±0.03b	48.93
CSB		0.80±0.05c	2.82±0.03b	49.64
MSB		1.01±0.02a	2.69±0.02c	51.96
CK	20—30	1.00±0.01b	4.20±0.04a	25.00
PMB		0.98±0.02a	3.31±0.09b	40.89
CSB		0.80±0.01c	3.40±0.03b	39.29
MSB		1.03±0.01b	3.18±0.01c	43.21
CK	30—40	1.48±0.06c	5.33±0.08a	4.82
PMB		1.61±0.01b	3.93±0.03b	29.82
CSB		1.18±0.02d	4.10±0.04b	26.79
MSB		1.82±0.03a	4.11±0.10b	26.61

去除土壤中的盐分离子是改善盐渍土壤的关键步骤,但大多数阳离子是促进植物生长发育的植物营养物质(Ca^{2+}、Mg^{2+} 和 K^+),需要保持在交换复合体上的平衡浓度,否则将不利于植物生长。大多数农业土壤中,Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+ 的规定值分别为 0.80,0.12,0.06 g/kg,在本研究中,生物炭能有效促进阳离子的去除,同时保持阳离子的浓度高于植物生长所需规定值[21]。针对南疆土壤表层盐分状况,不仅要注重降低主要土壤盐分 SO_4^{2-} 含量,也要加强对其他盐分离子含量的控制。随着土壤中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 不断减少,为保持土壤中电荷的平衡,比较丰富的碳酸盐类矿物可能解离[25]。CSB 的 SAR 均小于各个土层其他生物炭处理,与 CSB 的大比表面积有关,使其能够充分吸附盐渍土中的 Na^+,从而显著减少植物对 Na^+ 的吸收并减轻对植物造成的伤害[10],进而改善盐渍土盐分分布。

淋洗结束后,添加生物炭处理的土壤剖面含水率均高于 CK,CSB 对土壤表层含水率提升最大,MSB 对土壤平均含水量提升最为显著,与生物炭具有羧基、羟基、脂族双键等亲水基结构有关,且生物炭本身多孔隙结构和大比表面积可以提升土壤的吸附和持水能力。MSB 土壤水分主要集中在 0—30 cm 土层,说明与其他 2 种生物炭处理相比,MSB 更有利于根系层水分的保持,该结论和王娟等[26]研究结果一致。

生物炭处理显著降低土壤剖面总盐含量,但是不同处理对不同土层的总盐含量无明显规律性,与淋洗过程中土壤盐分离子呈不同运移规律有关。由于土壤中适量的阳离子对植物生长有益,CSB 处理在脱盐率均低于 CK 前提下将残留在土壤中的有害阴离子淋出的总量最多,说明 CSB 对有毒阴离子洗脱效果最为明显。本研究结果表明,0—40 cm 土层土壤平均脱盐率 MSB 最高,另外 2 种生物炭处理脱盐率略低,与土壤 K^+ 和 Mg^{2+} 增多有关,单从阴离子去除效果来看,CSB 对 SO_4^{2-}、Cl^- 和 HCO_3^- 洗脱效果最好(表 4)。

尽管生物炭给盐渍化土壤带来少许盐分,但通过淋洗速率、脱盐速率、淋出液盐分离子含量,洗盐后土壤残留盐分离子含量等指标进行多维度衡量,综合得出,生物炭对盐分的淋洗效果优于不加生物炭处理。因此,在盐渍土中添加 0.5%生物炭对土壤的影响利大于弊。

生物炭作为新兴土壤改良剂,可调节土壤盐分,缓解过高盐分对作物产生不良影响[27],在改良或修复盐渍化土壤方面有着不可替代的作用。针对我国南疆盐渍土占地面积广的特点,改良盐渍化农田对促进南疆地区农业可持续发展有着十分重要的意义。还需要进一步研究生物炭对不同质地盐渍土壤的影响,并同当地灌溉用水制度相结合改良耕种模式。

4　结 论

添加生物炭能显著促进土壤盐分的洗脱和脱盐速率的提高。生物炭添加促进 Ca^{2+}、Na^+、SO_4^{2-} 和 Cl^- 淋出,抑制 K^+ 淋出。淋洗结束后,添加生物炭处理均可提高 0—10 cm 土层土壤含水率,其中,CSB 处理对该层含水率提升最明显,且对土壤残留有害阴离子洗脱效果最好,各土层 SAR 值均小于 CK。综合来看,CSB 能提高脱盐效率和增强保水能力,可将

土壤中有害阴离子洗脱，还适当保留对土壤有营养价值的 Ca^{2+}、Mg^{2+} 和 K^{+}，表明 CSB 对南疆盐渍土的改良效果最好。

参考文献：

[1] 杨劲松.中国盐渍土研究的发展历程与展望[J].土壤学报，2008，45(5)：837-845.

[2] 杨真，王宝山.中国盐渍土资源现状及改良利用对策[J].山东农业科学，2015(4)：125-130.

[3] Wong V N L, Dalal R C, Greene R S B. Salinity and sodicity effects on respiration and microbial biomass of soil[J].Biology and Fertility of Soils，2008，44(7)：943-953.

[4] 徐少奇，陈文杰，解林奇，等.我国有机废弃物资源总量及养分利用潜力[J].植物营养与肥料学报，2022，28(8)：1341-1352.

[5] Yuan J H, Xu R K, Wang N, et al. Amendment of acid soils with crop residues and biochars[J]. Pedosphere, 2011，21(3)：302-308.

[6] 杨懋，李燕妮，孙军娜，等.泥炭和生物炭深埋对滨海盐渍土水分入渗特性的影响[J].鲁东大学学报(自然科学版)，2021，37(3)：267-272.

[7] 李争争，屈忠义，王丽萍，等.絮凝黄河泥沙复配生物炭对盐碱土水盐运移及水力特征参数影响[J].水土保持学报，2020，34(3)：326-331.

[8] 朱成立，吕雯，黄明逸，等.生物炭对咸淡轮灌下盐渍土盐分分布和玉米生长的影响[J].农业机械学报，2019，50(1)：226-234.

[9] 唐珺瑶，赵永杰，曲东，等.生物炭对减弱土壤盐渍化的贡献及其机理探讨[J].西北农业学报，2017，26(2)：294-303.

[10] Dahlawi S, Naeem A, Rengel Z, et al. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities[J]. Science of the Total Environment, 2018, 625: 320-335.

[11] 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：e103674.

[12] Di Lonardo S, Baronti S, Vaccari F P, et al. Biochar-based nursery substrates: The effect of peat substitution on reduced salinity[J].Urban Forestry and Urban Greening，2017，23：27-34.

[13] Lashari M S, Ye Y X, Ji H S, et al. Biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution alleviated salt stress and improved leaf bioactivity of maize in a saline soil from central China: A 2-year field experiment[J].Journal of the Science of Food and Agriculture，2015，95(6)：1321-1327.

[14] Zheng H, Wang X A, Chen L, et al. Enhanced growth of halophyte plants in biochar-amended coastal soil: Roles of nutrient availability and rhizosphere microbial modulation[J]. Plant, Cell and Environment，2018，41(3)：517-532.

[15] Xiao L A, Meng F D. Evaluating the effect of biochar on salt leaching and nutrient retention of Yellow River Delta soil[J].Soil Use and Management, 2020，36(4)：740-750.

[16] Chaganti V N, Crohn D M. Evaluating the relative contribution of physiochemical and biological factors in ameliorating a saline-sodic soil amended with composts and biochar and leached with reclaimed water[J]. Geoderma，2015，259/260：45-55.

[17] 姚宝林.南疆免冬春灌棉田土壤水热盐时空迁移规律与调控研究[D].北京：中国农业大学，2017.

[18] Yue Y, Guo W N, Lin Q M, et al. Improving salt leaching in a simulated saline soil column by three biochars derived from rice straw (*Oryza sativa* L.), sunflower straw (*Helianthus annuus*), and cow manure[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016，71(6)：467-475.

[19] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京：中国农业出版社，2000.

[20] 梁飞，李智强，张磊.盐碱地改良技术实用问答及案例分析[M].北京：中国农业出版社，2018.

[21] Dos Santos W M, Gonzaga M I S, Da Silva A J, et al. Improved water and ions dynamics in a clayey soil amended with different types of agro-industrial waste biochar[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 223: e105482.

[22] 赵海成，郑桂萍，靳明峰，等.连年秸秆与生物炭还田对盐碱土理化性状及水稻产量的影响[J].西南农业学报，2018，31(9)：1836-1844.

[23] 孟昭甫.预防土壤次生碱化的钠吸附比指标[J].农业管理科学，1998，15(1)：26-28.

[24] 李韵珠，李保国.土壤溶质运移[M].北京：科学出版社，1998.

[25] 岳燕，郭维娜，林启美，等.加入不同量生物质炭盐渍化土壤盐分淋洗的差异与特征[J].土壤学报，2014，51(4)：914-919.

[26] 王娟，陈安全，宋文瑾，等.生物炭种类与施量对新复垦区土壤水分入渗过程的影响[J].农业机械学报，2022，53(11)：388-394.

[27] 李毅，冯浩，梁嘉平，等.土壤属性和作物生长对生物炭施用的响应和反馈研究进展[J].水土保持学报，2022，36(5)：9-16.