

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.04.037

CSTR:32310.14.stbxb.2025.04.037

王效涵,孙池涛,许加一,等.水炭运筹对黄河三角洲钠质盐土降盐效果[J].水土保持学报,2025,39(4):295-303.

WANG Xiaohan, SUN Chitao, XU Jiayi, et al. Effects of water and biochar management on salt reduction effect in sodic saline soil of the Yellow River delta[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4):295-303.

水炭运筹对黄河三角洲钠质盐土降盐效果

王效涵¹, 孙池涛¹, 许加一¹, 朱海¹, 张俊鹏¹,

冯国艺², 傅建国³, 鲍建平³, 申洪亮⁴

(1. 山东农业大学水利土木工程学院/山东省农业节水技术与装备重点实验室, 山东 泰安 271000;

2. 河北省农林科学院棉花研究所, 石家庄 050000; 3. 滨州市引黄灌溉服务中心,

山东 滨州 256600; 4. 泰安市天平街道办事处, 山东 泰安 271000)

摘要: [目的] 为明确生物炭施加量和灌水量对黄河三角洲地区钠质盐土的降盐效果。 [方法] 采用二因子五水平正交旋转组合设计, 通过土柱试验, 模拟灌水量(以土壤饱和水分体积分数(θ_s)的 1.00、1.07、1.25、1.43、1.50 倍)和生物炭施加量(以 0~20 cm 土层土壤质量(S_w)的 1.00%、1.59%、3.00%、4.41%、5.00%)对钠质盐土土壤质量含水率、电导率、pH 及离子质量分数的影响, 并通过层次分析法和多元回归方程综合确定最优水炭组合配比。 [结果] 1) 4.41% S_w 与 1.43 θ_s 组合处理的土壤质量含水率与 pH 最大, 分别为 31.71%、8.50。 3.00% S_w 与 1.25 θ_s 组合处理的电导率、 Na^+ 质量分数和钠吸附比降低幅度最为显著 ($p < 0.05$), 分别较原土降低 82.05%、89.71%、86.43%; 2) 水、炭协同影响钠质盐化土壤降盐效果综合评价价值, 且灌水量对其影响大于生物炭施加量, 综合评价价值随水、炭用量增加均呈先升后降趋势, 当灌水量为 1.37 θ_s , 施炭量为 3.45% S_w 时, 钠质盐化土壤降盐效果综合评价价值最高, 达到 0.72。 [结论] 以提高黄河三角洲地区钠质盐土的土壤质量为目标, 3.45% S_w 生物炭量与 1.37 θ_s 协同使用时对盐碱土土壤降盐效果最好, 研究结果可为盐碱土改良提供理论参考。

关键词: 钠质盐土; 生物炭; 土柱模拟; 盐分淋洗

中图分类号: S156.4

文献标识码: A

文章编号 1009-2242(2025)04-0295-09

Effects of Water and Biochar Management on Salt Reduction Effect in Sodic Saline Soil of the Yellow River Delta

WANG Xiaohan¹, SUN Chitao¹, XU Jiayi¹, ZHU Hai¹, ZHANG Junpeng¹,

FENG Guoyi², FU Jianguo³, BAO Jianping³, SHEN Hongliang⁴

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University/Shandong Key Laboratory of Agricultural Water-Saving Technology and Equipment, Taian, Shandong 271000, China; 2. Institute of Cotton, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050000, China; 3. Binzhou Yellow River Diversion Irrigation Service Center, Binzhou, Shandong 256600, China; 4. Tianping Sub-District Office, Taian, Shandong 271000, China)

Abstract: [Objective] To clarify the effects of biochar application rate and irrigation volume on the salt reduction in sodic saline soil of the Yellow River Delta and to identify the optimal ratio between the two. [Methods] A two-factor five-level orthogonal rotation combination design was employed in soil column experiments to simulate the effects of irrigation volume (1.00, 1.07, 1.25, 1.43 and 1.50 times the saturated soil moisture content, θ_s) and biochar application rates (1.00%, 1.59%, 3.00%, 4.41% and 5.00% of soil mass in the 0~20 cm layer, S_w) on soil volumetric moisture content, electrical conductivity, pH, and ion mass fraction in sodic saline soil. The optimal water-biochar combination ratio was determined using the analytic hierarchy process and multiple

收稿日期: 2025-04-03

修回日期: 2025-04-29

录用日期: 2025-05-13

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-06-03

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1902600); 国家自然科学基金项目(52109059); 山东省教育厅青创团队项目(2023KJ162); 山东省重点研发计划项目(2024SFGC0403); 国家棉花产业技术体系项目(CARS-15-18)

第一作者: 王效涵(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事农田土壤溶质运移理论及模拟研究。E-mail: 757528591@qq.com

通信作者: 孙池涛(1987—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事农田土壤溶质运移理论及模拟研究。E-mail: sunchitao@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

regression equations. [Results] 1) The treatment with 4.41% S_w and 1.43 θ_s achieved the highest soil volumetric moisture content (31.71%) and pH (8.50). In contrast, the treatment with 3.00% S_w and 1.25 θ_s showed the most significant reductions ($p < 0.05$) in electrical conductivity, Na^+ mass fraction, and sodium adsorption ratio (SAR) compared to the untreated soil, with decreases of 82.05%, 89.71% and 86.43%, respectively. 2) Both water and biochar synergistically affected the comprehensive evaluation index of salt reduction effect in sodic saline soil, with irrigation having greater influence than biochar application. The comprehensive evaluation index initially increased but subsequently decreased with the increasing application rates of both factors. The maximum evaluation index (0.72) for salt reduction in sodic saline soil was obtained at an irrigation level of 1.37 θ_s combined with a biochar application rate of 3.45% S_w . [Conclusion] To enhance sodic saline soil quality in the Yellow River Delta, the synergistic combination of 3.45% S_w biochar application and 1.37 θ_s irrigation is the most effective strategy for salt reduction in saline-alkali soil. The research results provide a theoretical basis for saline-alkali soil remediation.

Keywords: sodic saline soil; biochar; soil column simulation; salt leaching

Received: 2025-04-03

Revised: 2025-04-29

Accepted: 2025-05-13

Online(www.cnki.net): 2025-06-03

在全球农业发展进程中,盐碱地作为农业生产中的重要耕地储备资源,具有很高的潜在利用价值。黄河三角洲盐渍化土壤面积为 $4.429 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占全区总面积的 1/2 以上^[1], 该区域土壤盐分主要以 $NaCl$ 和 Na_2SO_4 为主, 为典型的钠质盐化土壤^[2]。钠质盐化土壤因其中过多的 Na^+ 可取代颗粒表面的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子, 导致土壤颗粒分散, 团粒结构破坏^[3], 影响土壤中气体交换和水分运动, 引起土壤板结、肥力差等问题, 严重阻碍作物的正常生长发育^[4]。

为治理和改善盐渍土, 国内外学者^[5-7] 提出包括灌溉淋洗、暗管排水系统、土壤改良剂的施用、作物秸秆覆盖等多种方法。其中, 灌溉淋洗对于改善盐渍土环境, 降低土壤盐分质量分数具有关键作用^[8], 李奇霏等^[9] 研究发现, 淋洗能降低土壤可溶性离子质量分数, 但对土壤中 Na^+ 降幅并不明显。生物炭作为土壤改良剂, 具有比表面积大、离子交换能力强、多孔性等理化性质^[10-11], 被广泛用于盐碱地改良。刘慧等^[12] 研究发现, 施加生物炭不仅能提高土壤的持水能力, 还可促进土壤盐分淋洗^[13]。生物炭自身含有的无机物成分(如 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等)可替换盐碱土壤中交换性 Na^+ , 降低土壤中可溶性 Na^+ 的质量分数^[14-15]。已有研究^[16-18] 发现, 水炭协同作用可解决单独灌水淋洗对 Na^+ 去除效果差的问题, 且可避免土壤胶体因 Na^+ 过度积累而分散, 缓解土壤盐害对作物的影响。目前, 关于灌水洗盐和生物炭改良盐碱地的研究多集中于单一变量和双变量的随机组合情况, 郭祥林等^[19] 仅对水炭结合进行随机组合研究得出, 二者对盐碱土改良效果最佳组合配置, 缺乏对水炭用量的系统调配。为优化水炭协同的土壤降盐效果, 明确生物炭施加量和灌水量适

宜配比。本研究以黄河三角洲地区钠质盐化土壤为研究对象, 通过一维垂直入渗试验, 利用二次正交旋转试验全面探究灌水量与生物炭施加量对土壤盐分淋洗的影响, 并结合层次分析法^[20] 得到各指标权重, 确定水、炭用量对降盐效果的综合评价, 揭示多因素的协同机制, 进而探索最佳水炭施用组合, 旨在为盐碱地的有效治理提供科学、可靠的依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2024 年 5 月在滨州市沾化区小开河试验站($37^\circ 41' N$, $117^\circ 45' E$) 进行(图 1), 试验土壤取自试验站周边盐荒地 0~50 cm 土层, 土壤混合均匀并风干后过 2 mm 筛备用。土壤体积质量为 1.39 g/cm^3 , 田间持水量为 27.34%, 饱和水分体积分数为 30.29%。通过 BT-9300S 激光粒度分析仪对土样颗粒分析, 土壤黏粒($< 0.002 \text{ mm}$)、粉粒($0.002 \sim 0.05 \text{ mm}$)、砂粒($0.05 \sim 2 \text{ mm}$) 占比分别为 4.97%、71.84%、23.19%, 根据美国农业部的地质三角形图确定土壤为粉壤土。本实验土壤 ESP 为 29.73%^[21], 依据《中国土壤系统分类》中分类标准^[22], 供试土壤为钠质盐化土壤。试验所用生物炭由玉米秸秆在 $500^\circ C$ 热解而成(吉林宏源嘉廉禾生物质能源有限公司)。供试土壤、灌溉水及生物炭基础理化指标及各主要阳离子质量分数见表 1。

1.2 试验设计

本研究采用正交旋转组合设计, 设置生物炭施用量、灌水量 2 因子各 5 水平, T1~T4 处理为二水平试验, T5~T8 处理为星号试验, T9~T16 为零水平试验, 各处理重复 3 次, 具体设计方案见表 2。参考国

内外相关研究^[23-24],本研究中生物炭施加量范围选择 0~20 cm 土柱土壤质量分数的 1%~5%;灌水量为 1.0~1.5 倍饱和水分体积分数(θ_s)。试验用有机玻璃柱高 60 cm,内径 14 cm,设计土壤质量分数为 1.4 g/cm³,装土柱前由烘干法测定风干土质量含水率,分别计算并称重各处理所需生物炭量和风干土质量,按照 10 cm 分层均匀填充有机玻璃柱,实际装土高度为 50 cm,其中混施生物炭土层高度为 20 cm,土柱上方预留 7 cm 空隙,以便灌水。为构建有效的反滤结构,在柱底依次铺设 2 层滤纸及 3 cm 厚的纯净石英砂作为反滤层并搭建 5 cm 高的底座用于排水排

气,试验土柱示意图 2。

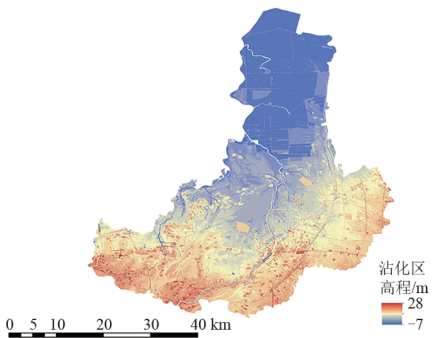


图 1 试验地示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental site

表 1 各试验材料理化性质

Table 1 Physicochemical properties of experimental materials

试验材料	电导率/(dS·m ⁻¹)	pH	Na ⁺ /(mmol·L ⁻¹)	K ⁺ /(mmol·L ⁻¹)	Ca ²⁺ /(mmol·L ⁻¹)	Mg ²⁺ /(mmol·L ⁻¹)	SAR/(mmol·L ⁻¹) ^{1/2}
供试土壤	3.12	8.43	14.39	0.17	1.36	1.63	8.33
灌溉水	1.09	7.61	4.89	0.38	0.87	1.18	3.42
生物炭	3.14	7.29	4.97	12.48	5.84	2.80	1.69

表 2 土柱试验方案设计

Table 2 Experimental design of soil column trials

处理	编码组合	施加量(S_w)/%	灌水量(θ_s)/%
T1	(1,1)	4.41	1.43
T2	(1,-1)	4.41	1.07
T3	(-1,1)	1.59	1.43
T4	(-1,-1)	1.59	1.07
T5	(1.414,0)	5.00	1.25
T6	(-1.414,0)	1.00	1.25
T7	(0,1.414)	3.00	1.50
T8	(0,-1.414)	3.00	1.00
T9	(0,0)	3.00	1.25
T10	(0,0)	3.00	1.25
T11	(0,0)	3.00	1.25
T12	(0,0)	3.00	1.25
T13	(0,0)	3.00	1.25
T14	(0,0)	3.00	1.25
T15	(0,0)	3.00	1.25
T16	(0,0)	3.00	1.25

注: θ_s 为饱和水分体积分数,%; S_w 为 0~20 cm 土壤质量,g。

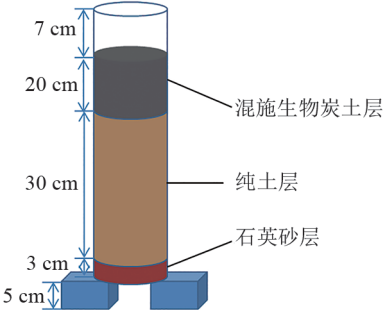


图 2 土柱模型示意

Fig. 2 Schematic diagram of soil column

1.3 测定指标及方法

灌水结束 24 h 后按 10 cm 每层测定 0~50 cm 土层土壤质量含水率、电导率、pH、阳离子质量分数等指标,并计算平均值,其中,土壤质量含水率采用烘干法^[25]测定。取土壤置于已称重的铝盒中,称量其总质量,随即将其放入 105 ℃ 的烘箱中烘干 12 h,取出后称量总质量,计算土壤质量含水率;将风干土样碾碎后过 1 mm 筛,按土水比 1:5 进行混合,充分振荡后静置,提取上清液使用电导率仪(上海雷磁 DDS-307 A)测定土壤电导率($EC_{1:5}$);使用 pH 计(上海雷磁 PHS-3 E)测定 pH;土壤阳离子质量分数及钠吸附比采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-OES)测定,Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺质量分数,钠吸附比 SAR(sodium adsorption ratio)计算公式为:

$$SAR = \frac{[Na^+]}{([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}])^{1/2}}$$

(1)

式中:Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺为钠、钙、镁离子质量分数,mmol/L;SAR 为土壤钠吸附比,(mmol/L)^{1/2}。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件计算各指标的综合评价值,IBM SPSS 26 软件进行方差分析和显著性检验,通过 DPS V9.01 软件进行二次回归正交旋转试验设计及模拟寻优,运用 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同水炭用量对 0~50 cm 土层平均土壤质量含水率、电导率和 pH 的影响

不同生物炭施加量及灌水量对 0~50 cm 平均土壤水分、电导率和 pH 影响显著(表 3)。T1 处理土壤质

量含水率最大,为 31.71%,显著高于 T2、T3、T4、T6、T7、T8、T9、T11、T12、T13、T14、T15 处理($p<0.05$), T8 处理最低,为 30.19%,表明充足的灌水量与生物炭施加量,能够优化盐碱土的水分保持状况。T8 处理土壤 EC 及 pH 最大,分别为 1.44 dS/m 和 8.69,其 EC 值显著高于除 T2 外的其他处理($p<0.05$), T11 处理最小,为 0.56 dS/m,较灌水前初始 EC 降低 82.05%; T1 处理 pH 为 8.50,显著低于其他处理($p<0.05$),但各处理间差值较小。

表 3 不同水炭用量对 0~50 cm 土层平均土壤质量含水率、电导率和 pH 的影响

Table 3 Effects of different water-biochar application rates on average soil moisture content, electrical conductivity, and pH at 0—50 cm depth

处理	质量含水率/%	电导率/(dS·m ⁻¹)	pH
T1	31.71±0.24a	0.60±0.01d	8.50±0.02f
T2	30.99±0.08bc	1.17±0.14ab	8.53±0.01ef
T3	30.47±0.02cdef	0.69±0.10cd	8.52±0.08ef
T4	30.56±0.05cdef	1.01±0.20bc	8.59±0.01bcd
T5	31.28±0.02ab	0.71±0.11cd	8.55±0.02def
T6	30.36±0.39def	0.85±0.02bcd	8.63±0.01abc
T7	30.34±0.18def	0.69±0.07cd	8.58±0.01bcd
T8	30.19±0.52f	1.44±0.36a	8.69±0.03a
T9	30.96±0.06bc	0.59±0.01d	8.60±0.01bcd
T10	31.34±0.24ab	0.61±0.02d	8.55±0.06def
T11	30.86±0.26bcde	0.56±0.02d	8.57±0.03cde
T12	30.30±0.06ef	0.67±0.02d	8.62±0.02bc
T13	30.96±0.60bc	0.58±0.01d	8.61±0.01bcd
T14	31.02±0.31bc	0.65±0.06d	8.64±0.02ab
T15	30.87±0.04bcd	0.60±0.02d	8.59±0.04bcd
T16	31.21±0.39ab	0.59±0.08d	8.64±0.01ab

注:表中数据均为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2 不同水炭用量对 0~50 cm 土壤平均阳离子及 SAR 的影响

不同生物炭施加量及灌水量对 0~50 cm 土层平均土壤离子特征指标影响显著(表 4)。其中, T10 处理土壤中 Na⁺ 质量分数最低,为 1.48 mmol/L,较灌水前降低 89.71%; T8 处理最高,为 4.71 mmol/L,显著高于其他处理($p<0.05$),较灌水前降低 67.27%;高灌水量(1.43θ_s)条件下,采用高炭处理(T1)的 Na⁺ 质量分数比低炭处理(T3)降低 11.15%;而高生物炭施加量(4.41% S_w)条件下,采用高水处理(T1)的 Na⁺ 质量分数较低水处理(T2)降低 17.70%。实际生产过程中,为实现节水与降低土壤 Na⁺ 质量分数的双重目标, T9~T16 处理展现出独特优势,其在有效削减

土壤中 Na⁺ 质量分数的同时,所需灌溉水量较少,达成节水与降钠的理想成效。土壤中 K⁺ 质量分数较低, T5 处理 K⁺ 质量分数最高,为 0.31 mmol/L,显著高于其他处理($p<0.05$),除 T5 处理外,其他处理间 K⁺ 质量分数差异不显著($p>0.05$)。Ca²⁺ 质量分数最大为 2.13 mmol/L(T2),显著高于除 T7 外的其他处理($p<0.05$); Ca²⁺ 质量分数最小为 1.29 mmol/L(T10)。Mg²⁺ 质量分数最高为 1.03 mmol/L(T8),显著高于除 T7 外的其他处理($p<0.05$); T10 处理的 Mg²⁺ 质量分数最低,为 0.39 mmol/L。SAR 反映土壤碱化程度, T8 处理的 SAR 最大,为 3.42 (mmol/L)^{1/2},显著高于其他处理($p<0.05$); T10 处理的 SAR 最小,为 1.13 (mmol/L)^{1/2},较灌水前 SAR 降低 86.43%。通过调节生物炭施加量与灌水量来降低 SAR,对改良钠质盐化土壤意义重大。

2.3 不同水炭用量对钠质盐化土壤降盐效果综合评价分析

2.3.1 综合评价值确立 由于影响钠质盐土基础理化性质和离子特征指标的最优水、炭用量各不相同,因此需要根据实际情况进行综合分析(表 5)。通过层次分析法对各层次元素进行比较和分析可知, EC 占最高权重,达到 0.276;其次为 Na⁺ 质量分数,达到 0.179; SAR 权重占 0.154; pH 权重占 0.100; Ca²⁺ 质量分数和 Mg²⁺ 质量分数权重相同,均为 0.086; K⁺ 质量分数权重最低,仅为 0.047。

2.3.2 回归模型建立 通过对不同生物炭施加量及灌水量条件下对土壤质量含水率、EC、pH 及离子特征指标的综合分析得到,淋洗后钠质盐化土壤综合评价指标的回归方程为:

$$Y = 0.667 + 0.035\ 65x_1 + 0.138\ 05x_2 -$$

$$0.056\ 06x_1^2 - 0.105\ 56x_2^2 + 0.021\ 75x_1x_2 \quad (2)$$

式中: Y 为生物炭用量和灌水量对钠质盐化土壤降盐效果的综合评价函数; x₁、x₂ 分别为生物炭用量、灌水量编码值。

对试验结果 F 值进行检验^[26]得到, F₁=0.219<F_{0.05}(3, 7)=4.35,说明方程(2)对数据的拟合程度较好,影响土壤盐分指标的主要因素均已考虑到,且显著性检验表明回归极显著;模型 F=34.322>F_{0.01}(5, 10)=5.64; P(模型)=0.000 6<0.01,模型极显著; P(x₁)=0.031 4<0.05, P(x₂)=0.000 1<0.01, x₁、x₂ 项系数显著,说明水、炭二因素对综合评价指标十分重要。

公式中 x₁、x₂ 项系数大小反映生物炭用量、灌水量对钠质盐化土壤降盐效果综合评价指标影响的大小,其正负号反映生物炭用量、灌水量对综合评价指标影响的正负效应^[27],由此可知,水、炭二因子对钠

质盐化土壤降盐效果综合评价指标具有显著促进效应,说明水、炭二因子协同促进钠质盐化土壤降盐效果,并且水的促进效应大于炭。交互项系数为正值,综合评价指标。

表 4 不同水炭用量对 0~50 cm 土层土壤平均阳离子及 SAR 的影响

Table 4 Effects of different water-biochar application rates on average soil cation content and SAR at 0—50 cm depth					
处理	Na ⁺ /(mmol·L ⁻¹)	K ⁺ /(mmol·L ⁻¹)	Ca ²⁺ /(mmol·L ⁻¹)	Mg ²⁺ /(mmol·L ⁻¹)	SAR/(mmol·L ⁻¹) ^{1/2}
T1	2.55±0.68def	0.27±0.03abc	1.94±0.27abc	0.65±0.24bcde	1.57±0.27de
T2	3.09±0.57cd	0.24±0.03bcde	2.13±0.01a	0.57±0.10cdef	1.88±0.31bcd
T3	2.87±0.37cde	0.21±0.03cdefg	1.81±0.01bcd	0.76±0.12bcd	1.79±0.27cd
T4	3.82±0.12b	0.23±0.02bcdef	1.71±0.18cde	0.75±0.13bcd	2.44±0.08b
T5	3.03±0.48cd	0.31±0.02a	2.06±0.07ab	0.67±0.01bcde	2.26±0.32bc
T6	2.09±0.08efgh	0.19±0.02efgh	1.58±0.12def	0.55±0.01def	1.44±0.01de
T7	2.59±0.83def	0.27±0.01abcd	2.06±0.06ab	0.85±0.02ab	1.51±0.48de
T8	4.71±0.24a	0.21±0.02defg	1.84±0.43abcd	1.03±0.36a	3.42±0.34a
T9	2.40±0.38defg	0.29±0.06ab	1.68±0.08cde	0.74±0.06bcd	1.55±0.29de
T10	1.48±0.63h	0.15±0.03gh	1.29±0.05f	0.39±0.10f	1.13±0.44e
T11	2.06±0.36efgh	0.25±0.01abcde	1.65±0.02cde	0.72±0.02bcd	1.34±0.25de
T12	2.73±0.33de	0.23±0.01bcde	1.94±0.05abc	0.82±0.04abc	1.65±0.23de
T13	1.58±0.22gh	0.26±0.08abcd	1.42±0.08ef	0.56±0.06def	1.12±0.12e
T14	2.46±0.22defg	0.17±0.01fgh	1.47±0.14ef	0.59±0.02cdef	1.71±0.20cd
T15	1.77±0.20fgh	0.14±0.01h	1.31±0.07f	0.43±0.03ef	1.34±0.11de
T16	2.44±0.59defg	0.22±0.01cdef	1.66±0.10cde	0.70±0.07bcd	1.58±0.33de

表 5 基于 TOPSIS 法确定的不同处理对土壤降盐效果综合评价指标的排序

Table 5 Ranking of different treatments based on TOPSIS method for comprehensive evaluation of soil desalination effects												
处理	各指标排序								d^+	d^-	C_j	排序
	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	C_{25}				
T1	0.073	0.266	0.026	0.121	0.036	0.055	0.036	0.114	0.096	0.235	0.711	2
T2	0.036	0.119	0.027	0.103	0.028	0.087	0.025	0.085	0.205	0.128	0.384	14
T3	0.009	0.238	0.025	0.104	0.020	0.044	0.051	0.093	0.139	0.187	0.573	12
T4	0.014	0.169	0.022	0.068	0.025	0.036	0.049	0.033	0.219	0.109	0.333	15
T5	0.051	0.232	0.024	0.095	0.047	0.065	0.038	0.089	0.132	0.193	0.594	11
T6	0.004	0.188	0.020	0.147	0.014	0.025	0.022	0.127	0.155	0.172	0.526	13
T7	0.003	0.238	0.022	0.119	0.036	0.065	0.063	0.119	0.114	0.212	0.651	7
T8	0.010	0.083	0.017	0.054	0.020	0.046	0.087	0.046	0.270	0.100	0.271	16
T9	0.034	0.269	0.021	0.130	0.042	0.033	0.048	0.116	0.101	0.231	0.696	4
T10	0.054	0.263	0.024	0.181	0.003	0.001	0.001	0.155	0.132	0.257	0.661	6
T11	0.029	0.279	0.023	0.149	0.031	0.031	0.045	0.135	0.092	0.250	0.730	1
T12	0.001	0.244	0.020	0.112	0.025	0.055	0.059	0.106	0.126	0.204	0.618	9
T13	0.034	0.272	0.021	0.175	0.034	0.012	0.024	0.156	0.107	0.262	0.710	3
T14	0.037	0.251	0.019	0.126	0.009	0.016	0.028	0.101	0.135	0.201	0.599	10
T15	0.030	0.266	0.022	0.165	0.001	0.003	0.006	0.135	0.136	0.239	0.638	8
T16	0.047	0.269	0.019	0.128	0.023	0.031	0.043	0.113	0.105	0.228	0.684	5
S^+	0.073	0.279	0.027	0.181	0.047	0.087	0.087	0.156				
S^-	0.001	0.083	0.017	0.054	0.001	0.001	0.001	0.033				
R^2	N.s	**	N.s	*	N.s	N.s	N.s	*				

注: C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} 、 C_{21} 、 C_{22} 、 C_{23} 、 C_{24} 、 C_{25} 分别为土壤质量含水率、土壤电导率、土壤 pH、土壤 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 质量分数、SAR; S^- 表示逆理想解, S^+ 表示理想解; d^- 为逆理想解和处理间距离, d^+ 为理想解和处理间距离; C_j 为贴合度; R^2 为各指标与综合指标的决定系数; * 表示 5% 的显著水平, ** 表示 1% 的极显著水平, N. s 表示无显著差异。

2.3.3 不同水、炭用量对钠质盐化土壤降盐效果综合评价单因素效应分析 为探究生物炭用量和灌水量单因子对钠质盐化土壤综合评价指标的影响,对上述模型降维^[28-29]得到相应的单因素效应函数式分别为:

$$Y_1 = 0.667 + 0.03565x_1 - 0.05606x_1^2 \quad (3)$$

$$Y_2 = 0.667 + 0.13805x_2 - 0.10556x_2^2 \quad (4)$$

式中: Y_1 、 Y_2 为水炭用量对钠质盐化土壤降盐效果综合评价指标影响的单因素效应函数。

分别将生物炭用量与灌水量对钠质盐化土壤降盐效果综合评价指标的影响作图(图3),综合评价指标均为开口向下的抛物线,随着水、炭用量增加,综合评价指标呈先升后降趋势,说明水、炭二因素符合报酬递减规律,当水分编码值 x_1 为 0.318,生物炭编码值 x_2 为 0.654 时,钠质盐化土壤降盐效果综合评价值最高;若水、炭用量超过此范围,钠质盐化土壤降盐效果综合评价值降低。

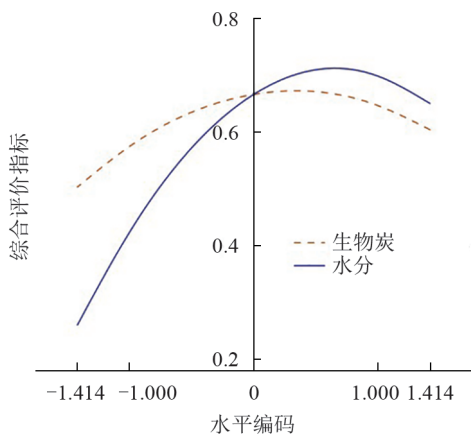


图3 水炭用量对钠质盐化土壤降盐效果综合评价单因素效应
Fig.3 Single-factor effects of water-biochar application rates on comprehensive evaluation of sodic saline soil salt reduction

2.3.4 不同水、炭用量对钠质盐化土壤降盐效果综合评价边际效应分析 通过对生物炭用量、灌水量对钠质盐化土壤综合评价单因素效应函数求导,得到生物炭用量、灌水量调控钠质盐化土壤综合评价指标的边际效应函数为:

$$Y_1' = 0.03565 - 0.11212x_1 \quad (5)$$

$$Y_2' = 0.13805 - 0.21112x_2 \quad (6)$$

式中: Y_1' 、 Y_2' 为钠质盐化土壤综合指标评价值对水炭用量的边际效应函数。

由图4可知,钠质盐化土壤降盐效果边际综合评价指标随水、炭用量的增加而降低。当生物炭编码值为 $-1.414 \sim 0.318$,水分编码值为 $-1.414 \sim 0.654$ 时,可促进综合评价指标提升;水、炭编码值超过该范围后对综合评价指标均具有抑制效果。

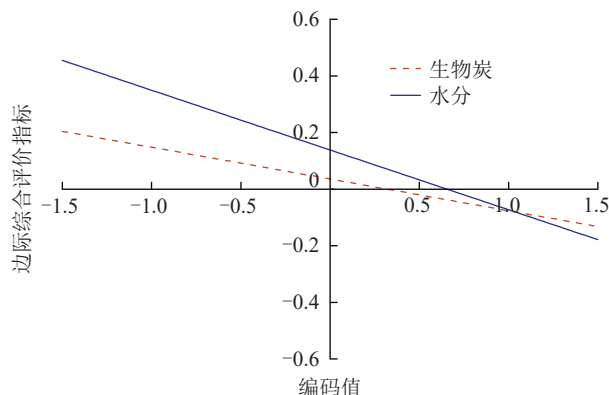


图4 水炭用量对钠质盐化土壤降盐效果综合评价边际效应
Fig.4 Marginal effects of water-biochar application rates on comprehensive evaluation of sodic saline soil salt reduction

2.4 不同水炭用量对钠质盐化土壤降盐效果综合评价模拟寻优

钠质盐化土壤降盐效果综合评价指标随水、炭施入量呈开口向下的抛物面(图5)。当灌水量不变时,随生物炭施加量增加,综合评价指标呈先升后降趋势;当施炭量不变时,随灌水量增加,综合评价指标也呈先升后降趋势。因此,中水中炭处理使综合评价指标维持在较高水平,说明水、炭用量过高或过低均不利于综合评价钠质盐化土壤的降盐效果。通过上述模型综合评价寻优得出,水、炭二因素对钠质盐化土壤降盐效果的影响,在生物炭编码值为 0.318,水分编码值为 0.654 时,即生物炭量按 3.45% 土壤质量分数,灌水量按 1.37 倍饱和质量含水量(θ_s)时,钠质盐化土壤降盐效果综合评价值最高,达到 0.72。

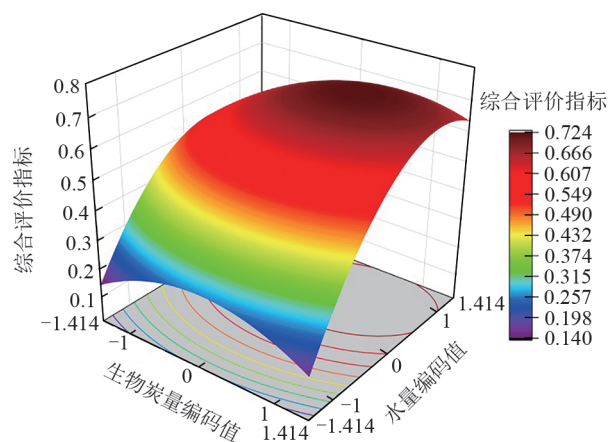


图5 水炭指标对钠质盐化土壤综合评价耦合效应
Fig.5 Coupling effects of water-biochar indices on comprehensive evaluation of sodic saline soil

3 讨论

合理的水炭比例有助于调控和改善盐碱土壤环境,本文通过设置不同水炭用量试验,探究黄河三角洲

地区钠质盐化土壤综合评价指标对水炭用量的响应特征。本研究表明,不同生物炭施加量及灌水量,对钠质盐土的基础理化性质及离子特征影响差异显著,其综合指标随生物炭施加量和灌水量的变化而改变。

施加生物炭提高滨海盐碱土的持水能力,其原因可能为生物炭自身多孔特性改变土壤的结构导致^[10-11],与CUI等^[30]研究结果一致;土壤盐分质量分数随生物炭施加量的增加呈先降低后升高趋势;依文莲等^[31]通过对不同生物炭施加量研究发现,生物炭本身具有的含盐量影响土壤盐分变化,低添加量生物炭能够降低土壤盐分质量分数,而过高添加量反而提高土壤盐分质量分数。是因为生物炭本身带有可溶性盐,施加量增大后,加入的盐分质量分数也逐渐增大,足以抵消其部分稀释和吸附作用,导致土壤盐分质量分数增大,与本研究土壤中盐分质量分数随生物炭施加量的增加呈先降低后升高趋势结果一致;YUAN等^[10]研究发现,由于选用生物炭呈碱性,施入土壤后短期内会提高土壤pH,与本研究结果一致。本研究中,土壤 Na^+ 质量分数降低效果显著,可能是生物炭中含有的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等二价离子取代交换点位上的 Na^+ ,增加 Na^+ 浸出^[32],与LASHARI等^[33]研究结论一致;此外,ALI等^[34]研究发现,施加生物炭后土壤中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 降低幅度较大,显著降低SAR,提高土壤质量,与本研究结果基本一致,但本试验选用生物炭中 K^+ 与 Ca^{2+} 质量分数过高,土壤中 K^+ 质量分数未明显降低且 Ca^{2+} 质量分数降幅较小并存在质量分数增加的现象。本研究中土壤 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 质量分数呈现出随灌水量的增加先增加后降低趋势,与胡琴等^[35]研究土壤离子浓度随灌水量的增加而降低的结论不一致,是因为本试验中使用水质为灌溉水,其中含有盐分离子,在灌水量较少时并不能充分淋洗排出,与其所用蒸馏水有很大差距。

通过正交试验对水炭运筹下各处理综合评价模拟寻优发现,中水中炭(T9~T16)处理中的盐分、 Na^+ 及SAR降幅最大,综合评价价值最高,此时盐碱土的改良效果最佳,而高水高炭(T1)处理的综合评价价值较高,但其水炭消耗量较大,不宜在田间推广应用;高炭低水(T2)处理模式可能导致生物炭无法充分发挥其降盐和保水作用,加剧土壤盐分累积;低炭高水(T3)处理模式则可能因生物炭质量分数不足,无法有效置换土壤中的 Na^+ ,造成水资源浪费。因此,生物炭施加量过高或过低,及灌水量过大或过小,均对盐碱土的改良效果产生负面影响。可能是因为生物炭与土壤中水分、盐分存在复杂的互作机制,不足或过量的生物炭破坏该平衡,导致土壤理化性质恶化^[36-37]。

4 结论

1) T1(4.41% S_w , 1.43 θ_s)处理的土壤质量含水率与pH最佳,分别为31.71%、8.50,而电导率、 Na^+ 质量分数和钠吸附比降低效果在T9~T16(3.00% S_w , 1.25 θ_s)处理中最为显著($p < 0.05$),分别较原土降低82.05%、89.71%、86.43%。

2)通过层次分析法得到土壤水分、EC、pH及离子质量分数各指标权重。EC占权重最高,达到0.276;其次为钠离子质量分数,达到0.179;SAR权重占0.154。

3)基于TOPSIS法建立水炭量化指标对钠质盐化土壤综合评价指标的回归模型,对实现黄河三角洲地区钠质盐化土壤改良方案具有指导作用。水炭用量显著影响综合评价指标,且灌水量对综合评价指标的影响大于生物炭施加量。

4)通过综合评价模拟寻优得出,水炭量化指标对土壤水分、EC、pH及离子质量分数的综合调控,当生物炭编码值为0.318,水分编码值为0.654时,即生物炭施加量按3.45% S_w 、灌水量按1.37 θ_s 时,钠质盐化土壤综合评价值最高,达到0.72。

5)水炭协同影响钠质盐化土壤综合评价指标,高水高炭、低水低炭处理下综合评价价值低于中水中炭处理下的综合评价价值,为黄河三角洲地区钠质盐化土壤降盐提质提供参考依据。

本研究主要聚焦生物炭施加量和灌水量对钠质盐土的改良效果,因不同地区盐碱土的成因、成分和理化性质差异较大,其他类型盐碱土的改良研究仍有待深入开展。

参考文献:

- [1] 于超,孙池涛,张倩,等.黄河三角洲盐渍土蒸发对土壤盐分变化的响应特征[J].排灌机械工程学报,2023,41(1):89-95.
YU C, SUN C T, ZHANG Q, et al. Response characteristics of saline soil evaporation in Yellow River Delta under different salinity levels[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(1): 89-95.
- [2] 李小刚,曹靖,李凤民.盐化及钠质化对土壤物理性质的影响[J].土壤通报,2004,35(1):64-72.
LI X G, CAO J, LI F M, et al. Influence of salinity, sodicity and organic matter on some physical properties of salt-affected soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(1): 64-72.
- [3] LIANG X Y, RENGASAMY P, SMERNIK R, et al. Does the high potassium content in recycled winery wastewater used for irrigation pose risks to soil structural stability?[J]. Agricultural Water Management, 2021, 243:

- e106422.
- [4] 侯雅琳, 韩广轩, 朱连奇, 等. 模拟降雨量变化对黄河三角洲湿地植物群落特征的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(5): 1260-1266.
- HOU Y L, HAN G X, ZHU L Q, et al. Effects of simulated precipitation changes on plant community characteristics of wetland in the Yellow River Delta, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(5): 1260-1266.
- [5] 冯根祥, 张展羽, 方国华, 等. 暗管排水条件下微咸水灌溉对土壤盐分动态及夏玉米生长的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(9): 880-885.
- FENG G X, ZHANG Z Y, FANG G H, et al. Effects of saline water irrigation on soil salinity movement and summer maize growth under subsurface drainage[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(9): 880-885.
- [6] 王倩姿, 王玉, 孙志梅, 等. 腐植酸类物质的施用对盐碱地的改良效果[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1227-1234.
- WANG Q Z, WANG Y, SUN Z M, et al. Amelioration effect of humic acid on saline-alkali soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4): 1227-1234.
- [7] 王曼华, 陈为峰, 宋希亮, 等. 秸秆双层覆盖对盐碱地水盐运动影响初步研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1395-1403.
- WANG M H, CHEN W F, SONG X L, et al. Preliminary study on effect of straw mulching and incorporation on water and salt movement in salinized soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(6): 1395-1403.
- [8] 樊丽琴, 杨建国, 尚红莺, 等. 淋洗水质和水量对宁夏龟裂碱土水盐运移的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 258-262.
- FAN L Q, YANG J G, SHANG H Y, et al. Effects of the quality and quantity of leaching water on soil water and salt movement of takyric solonchets in Ningxia [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(6): 258-262.
- [9] 李奇霏, 孔范龙, 郝敏, 等. 不同淋洗水量下胶州湾养殖池塘土壤盐分淋洗规律[J]. 生态学报, 2018, 37(4): 1127-1134.
- LI Q F, KONG F L, XI M, et al. Leaching of soil salt with different leaching water volumes in aquaculture ponds of Jiaozhou Bay [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(4): 1127-1134.
- [10] 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.
- [11] 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.
- YANG M, LI Y N, SUN J N, et al. Effects of peat and biochar application on water infiltration characteristics of coastal saline soil [J]. Journal of Ludong University (Natural Science Edition), 2021, 37(3): 267-272.
- [12] 刘慧, 焦岩, 窦婉毓, 等. 减氮配施生物炭对土壤肥力和水稻产量的补偿效应与机制[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 391-401.
- LIU H, JIAO Y, DOU W Y, et al. Compensation effect and mechanism of nitrogen reduction combined with biochar application on soil fertility and rice yield[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 391-401.
- [13] 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.
- [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.
- ZHAO W B, WANG S, LIU L L, et al. Effect of biochar amendment on saline-alkaline soil amelioration and plant growth: A literature review [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(2): 551-561.
- [15] 赵耕毛, 杨梦圆, 陈硕, 等. 我国盐碱地治理: 现状、问题与展望[J]. 南京农业大学学报, 2025, 48(1): 14-26.
- ZHAO G M, YANG M Y, CHEN S, et al. Saline-alkali land management in China: Current situation, problems and prospects [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2025, 48(1): 14-26.
- [16] YUAN Y, LIU Q, ZHENG H, et al. Biochar as a sustainable tool for improving the health of salt-affected soils [J]. Soil and Environmental Health, 2023, 1(3): e100033.
- [17] DUAN M, LIU G, ZHOU 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: 2192-2202.
- [18] 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.
- [19] 郭祥林, 高佩玲, 吴畏, 等. 微咸水灌溉下不同生物炭对盐碱土水盐运移的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(8): 98-105.
- GUO X L, GAO P L, WU W, et al. Impact of biochar amendment and brackish water irrigation on water and salt movement in saline-alkaline soil [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(8): 98-105.
- [20] ALBAYRAK E, ERENSAL Y C. Using analytic hierarchy process (AHP) to improve human performance: An application of multiple criteria decision making problem [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2004, 15(4): 491-503.
- [21] CHI C M, ZHAO C W, SUN X J, et al. Estimating exchangeable sodium percentage from sodium adsorption

- ratio of salt-affected soil in the Songnen Plain of north-east China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(2): 271-276.
- [22] 龚子同. 中国土壤系统分类: 理论·方法·实践[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- GONG Z T. Systematic classification of Chinese soils: Theory, methodology and practice[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [23] 王则玉, 马兴旺, 李杨, 等. 不同酸化生物炭用量对滴灌棉田盐碱土水盐运移的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2024, 43(3): 33-38.
- WANG Z Y, MA X W, LI Y, et al. Effects of acidified biochar amendment on water and salt movement in saline-alkali soil in drip-irrigated cotton field[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2024, 43(3): 33-38.
- [24] 孙伟娇, 黄小钰, 魏文良, 等. 不同生物炭用量对盐化潮土土壤质量与玉米生长的影响[J]. *山东农业科学*, 2025, 57(3): 125-132.
- SUN W J, HUANG X Y, WEI W L, et al. Effects of different biochar application rates on soil quality and maize growth in salinized fluvo-aquic soil[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2025, 57(3): 125-132.
- [25] 谢鹏宇, 刘泽鑫. 土壤水分测量原理与技术方法研究[J]. *现代农业科技*, 2020(23): 166-168.
- XIE P Y, LIU Z X. Study on principles and technical methods of soil moisture measurement[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2020(23): 166-168.
- [26] 刘永建. 高级生物统计学[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- LIU Y J. Advanced biostatistics[M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [27] 李建明, 潘铜华, 王玲慧, 等. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(10): 82-90.
- LI J M, PAN T H, WANG L H, et al. Effects of water-fertilizer coupling on tomato photosynthesis, yield and water use efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(10): 82-90.
- [28] 张大龙, 张中典, 李建明. 环境因子对温室甜瓜蒸腾的驱动和调控效应研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 137-144.
- ZHANG D L, ZHANG Z D, LI J M. Co-ordination of environmental factors in driving and regulating transpiration rate of greenhouse grown muskmelon[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11): 137-144.
- [29] 张中典, 张大龙, 李建明, 等. 黄瓜气孔导度、水力导度的环境响应及其调控蒸腾效应[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 139-147.
- ZHANG Z D, ZHANG D L, LI J M, et al. Environmental response of stomatal and hydraulic conductances and their effects on regulating transpiration of cucumber[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(6): 139-147.
- [30] CUI L Q, LIU Y M, YAN J L, et al. Revitalizing coastal saline-alkali soil with biochar application for improved crop growth[J]. *Ecological Engineering*, 2022, 179: e106594.
- [31] 依文莲, 邵光成, 吴世清, 等. 咸水灌溉下施加生物炭对土壤盐分分布及团粒结构的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2022(6): 154-161.
- NONG W L, SHAO G C, WU S Q, et al. Effects of biochar on soil salt distribution and aggregate structure under brackish water irrigation[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(6): 154-161.
- [32] ZHAO W, ZHOU Q, TIAN Z Z, et al. Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 722: e137428.
- [33] 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.
- [34] 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(14): 12700-12712.
- [35] 胡琴, 陈为峰, 宋希亮, 等. 不同灌水量对黄河三角洲盐碱地改良效果研究[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 305-310.
- HU Q, CHEN W F, SONG X L, et al. Study on improvement effect of different irrigation volumes on saline-alkali land in the Yellow River Delta[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6): 305-310.
- [36] 贾咏霖, 屈忠义, 丁艳宏, 等. 不同灌溉方式下施用生物炭对土壤水盐运移规律及玉米水分利用效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(8): 44-51.
- JIA Y L, QU Z Y, DING Y H, et al. The effects of soil amendment with straw biochar on water and salt dynamics as well as water use efficiency of corn under different irrigations[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(8): 44-51.
- [37] 王小芳, 李毅, 姚宁, 等. 生物炭改良棉花-甜菜间作土壤理化性质与盐分效果分析[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(4): 352-362.
- WANG X F, LI Y, YAO N, et al. Effects of biochar on soil physical and chemical properties and salt in cotton-sugarbeet intercropping field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(4): 352-362.