

不同改良剂对盐渍土壤的综合改良效应研究

马馥扬^{1,2}, 曹巍巍³, 彭昊³, 姚荣江², 王秀萍⁴, 刘广明^{2*}, 张文太^{1*}

(1.新疆农业大学 新疆土壤与植物生态过程自治区级重点实验室/资源与环境学院, 乌鲁木齐 830052;

2.中国科学院 南京土壤研究所, 南京 210008; 3.江苏沿海生态科技发展有限公司, 南京 210000;

4.河北省农林科学院 滨海农业研究所, 河北 唐山 063299)

摘要:【目的】实现盐渍土壤多种障碍性状的综合改良。【方法】通过盆栽试验模拟当地水稻-油菜轮作种植模式, 在常规施肥(CK)条件下, 设置添加过磷酸钙 750 kg/hm² (G1) 和 1 500 kg/hm² (G2), 水解聚马来酸酐 900 kg/hm² (J1)、1 200 kg/hm² (J2) 和 1 500 kg/hm² (J3) 以及巨大芽孢杆菌 40 kg/hm² (W1)、60 kg/hm² (W2) 和 80 kg/hm² (W3), 共 9 个处理, 探究不同改良剂对盐渍土壤理化性状的改良效果。【结果】与 CK 相比, J2 处理土壤总孔隙度、最大持水率、田间持水率和毛管持水率分别提高 12.49%、13.60%、13.63% 和 12.41%, 土壤电导率降低 64.73%; W2 处理土壤总孔隙度、最大持水率、田间持水率和毛管持水率分别提高 8.59%、9.57%、9.01% 和 9.79%, 土壤电导率降低 55.66%; W1 处理土壤体积质量降低了 4.20%, 最大持水率、田间持水率和毛管持水率分别提高 6.58%、9.02% 和 9.69%, 土壤电导率降低 8.97%, 土壤有机质量提高 25.82%。【结论】主成分分析表明, 常规施肥条件下盐渍土壤综合改良效果前 3 的处理分别为 1 200 kg/hm² 水解聚马来酸酐、60 kg/hm² 巨大芽孢杆菌以及 40 kg/hm² 巨大芽孢杆菌。本研究结果对于盐渍土壤改良与其高效利用具有重要的理论意义和实际应用价值。

关键词: 盐渍土壤; 改良剂; 土壤持水能力; 土壤养分

中图分类号: S156.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2024088

马馥扬, 曹巍巍, 彭昊, 等. 不同改良剂对盐渍土壤的综合改良效应研究[J]. 灌溉排水学报, 2025, 44(1): 89-96.

MA Fuyang, CAO Weiwei, PENG Hao, et al. The effect of different soil amendment agents on physical and chemical properties of saline soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(1): 89-96.

0 引言

【研究意义】作为我国现阶段重要的后备土壤资源, 滨海盐渍土在渤海、黄海和东海沿岸广泛分布^[1]。该类型土壤具有土壤理化性状差, 养分有效性低和土壤生产力低下等特点, 盐分组成与海水类似均以氯化物为主^[2]。利用优质且生态友好型改良剂提高滨海盐渍土壤的养分有效性、降低土壤含盐量和提升土壤质量以实现作物生产的高产高效, 是实现我国滨海盐渍土壤资源高效利用的必要途径。【研究进展】长期以来, 国内外学者通过物理、化学、生物和工程等方法对改良盐渍土壤、提高土壤养分利用率等方面开展大量研究^[3-5]。除工程降盐和有机无机肥配施等方法

外^[6-8], 还可施用有机、无机及其复合类物料进行土壤酸碱度、可溶性盐基成分及微生物群落等的改良^[9-11], 针对秸秆、腐殖酸类物质与生物炭等物料开展了较多的研究与应用^[12-13]。【切入点】水解聚马来酸酐通过改善土壤胶体表面结构特征和矿物结晶及有机化学元素的组分, 对土壤胶体颗粒直径的增大有显著影响^[14]; 巨大芽孢杆菌作为耐盐菌种, 通过直接释放有机酸溶解磷达到解磷溶磷的作用, 在改善土壤磷素吸收方面有一定效果^[15-16], 以上 2 种物料在盐渍土壤改良中鲜有涉及。【拟解决的关键问题】本研究选用过磷酸钙、水解聚马来酸酐和巨大芽孢杆菌等 3 种物料, 探讨不同改良剂对滨海盐渍土壤理化性质和养分含量变化的影响, 以明确不同改良剂对盐渍土壤的改良效果, 筛选最优改良剂及其用量, 为滨海地区土壤盐渍障碍消减提供技术支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验所用改良剂分别是: 过磷酸钙, 有效磷量大于 12%, 为市场通用商品; 水解聚马来酸酐 (Poly maleic acid, HPMA), 由浙江三度化学有限公司提

收稿日期: 2024-03-01

修回日期: 2024-09-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD1900104); 江苏省沿海开发集团有限公司项目 (2022YHTDJB02)

作者简介: 马馥扬 (1999—), 女, 陕西宝鸡人。硕士, 主要从事盐碱地改良方面的研究。E-mail: mafuyang99@163.com

通信作者: 刘广明 (1975—), 男。副研究员, 硕士生导师, 主要从事土壤盐渍化防控管理与盐渍土资源利用方面的研究。

E-mail: gmliu@issas.ac.cn

张文太 (1984—), 男。教授, 主要从事土壤水资源与土壤改良方面的研究。

E-mail: zwt@xjau.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

供, 主要成分为 $(C_4H_4O_4)_n$, $\omega((C_4H_4O_4)_n) \geq 48\%$, 浅黄色至棕红色透明液体, pH 值为 3.8; 巨大芽孢杆菌由北海业盛旺生物科技有限公司提供, 主要成分为巨大芽孢杆菌, 每克有效活菌数 >100 亿。供试土壤

采集自江苏省东台市条子泥垦区土壤改良试验区($32^{\circ}83'N$, $120^{\circ}95'E$) 的重度盐化土壤^[15], 其基本理化性质如表 1 所示。供试水稻品种为淮稻 5 号, 油菜品种为秦优 10 号。

表 1 供试土壤的主要理化性质

Tab.1 Physicochemical characteristics of tested soil

体积质量/($g \cdot cm^{-3}$)	土壤质地	pH 值	EC 值/($\mu S \cdot cm^{-1}$)	全盐量/($g \cdot kg^{-1}$)	有机质量/($g \cdot kg^{-1}$)	碱解氮量/($mg \cdot kg^{-1}$)	有效磷量/($mg \cdot kg^{-1}$)
1.45	粉砂质黏壤土	8.58	1 437	5.74	2.82	55	14.02

1.2 研究方法

本研究采用室内盆栽试验模拟当地稻油轮作种植模式, 以常规施肥为对照(CK), 并以其为基础分别施用 3 种梯度的水解聚马来酸酐和巨大芽孢杆菌、2 种梯度的过磷酸钙, 共设计 9 个处理, 具体见表 2, 每个处理设置 3 次重复。所有处理均在等氮条件下进行。常规施肥处理为: 基肥施用 $375 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 的磷酸一铵, 追肥为前 2 次施用尿素、第 3 次为硫酸钾, 基追比为 1:1:1.5:2 (按照肥料质量计)。

表 2 土壤盆栽试验处理设计

Tab.2 Experimental treatment design of soil potting

简称	处理
CK	常规施肥
G1	过磷酸钙 $750 \text{ kg}/\text{hm}^2$
G2	过磷酸钙 $1 500 \text{ kg}/\text{hm}^2$
J1	水解聚马来酸酐 $900 \text{ kg}/\text{hm}^2$
J2	水解聚马来酸酐 $1 200 \text{ kg}/\text{hm}^2$
J3	水解聚马来酸酐 $1 500 \text{ kg}/\text{hm}^2$
W1	巨大芽孢杆菌 $40 \text{ kg}/\text{hm}^2$
W2	巨大芽孢杆菌 $60 \text{ kg}/\text{hm}^2$
W3	巨大芽孢杆菌 $80 \text{ kg}/\text{hm}^2$

试验在中国科学院南京土壤研究所温室中进行, 所用钵钵为高 40 cm, 直径 20 cm 的 PVC 盆。试验所用土壤经自然风干、磨碎后过 2 mm 筛, 按照设计用量将试验土壤与基肥磷酸一铵混合均匀备用。装填土壤体积质量为 $1.45 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。装填过程中, 将过磷酸钙按照设计用量与土样均匀混合后装填, 每 5 cm 压实 1 次并拉毛表面, 盆内土体总体高度为 30 cm。将装填完毕的纯土壤盆栽放置在平地上, 将巨大芽孢杆菌或水解聚马来酸酐各自按照每盆设计用量溶于水后均匀施入对应盆中。水稻种子在浸泡前选择晴天晒种 6~8 h, 随后放置于阴凉、干燥处, 用施保克和吡虫啉浸种杀菌, 药物浸泡 6 h 清洗后, 再用清水浸泡 24 h, 水温 $11 \sim 13 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 放入湿润的布中在温室中进行避光催芽, 温室温度为 $26 \sim 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。水稻种子发芽后, 每盆均匀播种 10~15 颗种子, 每天浇水 0.2 L, 出苗后保持每盆 8 棵水稻幼苗, 并保持上覆水 2~3 cm。水稻收获之后, 采用移栽的方式种植油菜, 于油菜幼苗 6~7 叶时移栽至盆中, 每盆保持 3 棵油菜。油菜于 2023 年 5 月 12 日收获, 并在其收获后对 0~30 cm 土壤进行破坏性取样, 并分析测试其理化性质。

1.3 样品采集与分析

试验结束后, 先用环刀进行取样, 采用环刀法测定土壤体积质量、孔隙度、最大持水率以及田间持水率^[17]。随后对盆栽土壤进行破坏性取样, 测定土壤的有机质量、有效磷量、全磷量、碱解氮量、全氮量^[18]、pH 值和 EC 值, 其中: 土壤 pH 值、EC 值采用水土比 5:1 ($V:m$) 浸提电位法测定, 土壤有机质量采用重铬酸钾容量法-外加热法进行测定, 土壤全氮采用半微量开氏法测定, 土壤全磷采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定, 土壤有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法测定。

1.4 数据处理

采用 Excel 2021 进行数据处理, 采用 R 语言和 Origin 2021 进行数据分析和作图, 采用 SPSS 26.0 软件进行数据分析 ($p < 0.05$), 不同处理之间采用 Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 改良剂对土壤理化性质的影响

2.1.1 改良剂对土壤体积质量和孔隙度的影响

表 3 为施用改良剂条件下的土壤体积质量与孔隙度。除 J1、W3 处理的土壤体积质量高于 CK 外, 其余处理的土壤体积质量均较 CK 下降 $0.70\% \sim 4.19\%$, 其中 W1 处理的土壤体积质量 ($1.37 \text{ g}/\text{cm}^3$) 最小且显著低于 CK ($p < 0.05$)。

各处理总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度分别为 $29.51\% \sim 46.11\%$ 、 $24.74\% \sim 43.42\%$ 、 $1.61\% \sim 4.77\%$ 。G1 处理和 J3 处理土壤毛管孔隙度均显著低于 CK ($p < 0.05$); J3 处理总孔隙度显著低于 CK, 其余处理总孔隙度均高于 CK ($p < 0.05$)。J2 处理总孔隙度和毛管孔隙度分别为 46.11% 和 43.42% , 与 CK 相比, 分别显著增加 12.49% 和 11.33% ($p < 0.05$)。施用水解聚马来酸酐的处理中, 除 J3 处理外其余各处理的总孔隙度均较 CK 显著增大 ($p < 0.05$)。总孔隙度与毛管孔隙度均随着改良剂用量增加呈先增大后降低。除过磷酸钙处理外, 土壤非毛管孔隙度均随着改良剂用量的增加逐渐增大。综合来看, 各改良剂的孔隙度改良效果表现为巨大芽孢杆菌 $>$ 水解聚马来酸酐 $>$ 过磷酸钙。

表 3 施用改良剂条件下的土壤体积质量和孔隙度

Tab.3 Soil bulk density and porosity under the condition of application of amendment

处理	土壤体积质量/ (g·cm ⁻³)		孔隙度/%	
	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	总孔隙度	
CK	1.43±0.005 8b	39.00±0.103 9bc	1.98±0.459 0bc	40.99±0.562 9d
G1	1.41±0.000 0b	37.21±0.508 1d	3.08±0.089 5b	40.29±0.597 6d
G2	1.42±0.008 8b	38.16±1.125 8cd	2.48±0.274 3bc	40.65±0.851 6d
J1	1.43±0.014 5b	40.67±0.577 4b	2.65±0.262 7bc	43.32±0.314 7bc
J2	1.42±0.005 8b	43.42±0.733 2a	2.69±0.049 1bc	46.11±0.684 2a
J3	1.42±0.005 8b	24.74±0.323 3e	4.77±0.900 7a	29.51±1.224 0e
W1	1.37±0.005 8c	40.52±0.052 0b	1.61±0.023 1c	42.13±0.075 1cd
W2	1.42±0.003 3b	42.45±0.453 2a	2.06±0.228 1bc	44.51±0.225 2ab
W3	1.46±0.005 8a	38.55±0.118 4cd	2.86±0.450 3bc	41.41±0.568 7cd

注 不同小写字母表示处理间差异显著 ($p<0.05$)，下同。

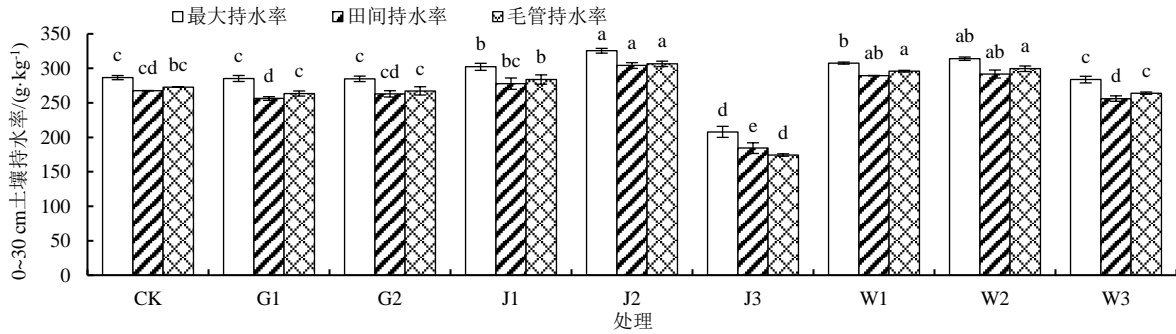


图 1 施用改良剂条件下的土壤持水率

Fig.1 Soil water holding capacity under the condition of application of amendment

2.1.3 改良剂对土壤 pH 值和 EC 值的影响

表 4 为施用改良剂条件下的土壤 pH 值和 EC 值。由表 4 可知，各处理土壤 pH 值为 8.33~8.78，G1、G2、J1、J3 处理和 W3 处理分别较 CK 降低了 0.05、0.25、0.25、0.34 和 0.09，其中 J3 处理较 CK 显著降低了 3.92% ($p<0.05$)。随着水解聚马来酸酐施用量的增加，其土壤 pH 值呈先升高后降低的趋势，表明更高用量的水解聚马来酸酐对盐渍土降低 pH 值效果较好。综合来看，降低土壤 pH 值的效果表现为水解聚马来酸酐>过磷酸钙>巨大芽孢杆菌。

表 4 施用改良剂条件下的土壤 pH 值和 EC 值

Tab.4 Soil pH and electrical conductivity under the condition of application of amendment

处理	土壤 pH 值	土壤 EC 值/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)
CK	8.67±0.023 1 ab	405.20±162.524 1 c
G1	8.62±0.115 4 ab	159.15±33.168 8 c
G2	8.42±0.052 0 cd	1 343.00±52.538 9 a
J1	8.42±0.017 3 bc	138.90±3.637 3 c
J2	8.78±0.008 7 a	142.90±10.450 0 c
J3	8.33±0.103 9 c	902.30±151.669 9 b
W1	8.75±0.002 9 a	368.85±127.854 2 c
W2	8.76±0.173 2 a	179.65±6.033 3 c
W3	8.59±0.083 7 abc	205.70±30.657 3 c

在施用改良剂后，G1、W1、W2、W3、J1 处理和 J2 处理的电导率均低于 CK，其中 J1 处理较 CK 降低 65.72%，但无显著差异。土壤电导率随着巨大

2.1.2 改良剂对土壤持水能力的影响

图 1 为施用改良剂条件下的 0~30 cm 土层土壤持水率。由图 1 可知，J2 处理的最大持水率、田间持水率和毛管持水率均显著高于 CK ($p<0.05$)。各处理中 J2 处理最大持水率最高，其次为 W2 处理。施用水解聚马来酸酐、过磷酸钙和巨大芽孢杆菌处理的土壤毛管持水率与最大持水率的比值相应分别为 0.838~0.941、0.932~0.937 和 0.928~0.961，其中施用水解聚马来酸酐的处理波动幅度最大，施用巨大芽孢杆菌的处理次之，施用过磷酸钙的处理最小，表明施用不同浓度水解聚马来酸酐的土壤供水能力差异较大。

芽孢杆菌施用量的增加表现为先降低后增加，表明中等用量的巨大芽孢杆菌处理降低土壤电导率的效果优于低用量和高用量的处理；随着水解聚马来酸酐和过磷酸钙施用量的增加而逐渐升高，说明低用量的水解聚马来酸酐和过磷酸钙可以有效降低土壤电导率。

2.2 改良剂对土壤养分的影响

2.2.1 改良剂对土壤磷素的影响

图 2 为施用改良剂条件下的土壤有效磷和全磷。由图 2 可知，各处理土壤有效磷量为 59.02~160.51 mg/kg，其中，J1 处理土壤有效磷为 160.51 mg/kg，较 CK 显著提高 45.48% ($p<0.05$)。各处理土壤全磷量为 1.23~2.11 g/kg，其中，G2 处理土壤全磷量为 2.11 g/kg，较 CK 显著提高 64.57% ($p<0.05$)，其余处理较 CK 无显著差异。同时，有效磷量与全磷量的比值可以用来表示土壤活化磷素的能力^[9]，各处理有效磷与全磷的比值为 4.35%~9.71%，比值表现为 J1 处理>CK>J3 处理>W3 处理>W2 处理>J2 处理>G1 处理>W1 处理>G2 处理，其中最高的是 J1 处理，为 9.71%，说明 J1 处理磷素有效性最高，其土壤全磷更容易向有效磷转化；G2 处理最低，表明其虽能显著增加土壤全磷量 ($p<0.05$)，但活化磷素的能力较差，不能将土壤中的磷元素转化为可被作物吸收利用的有效磷。

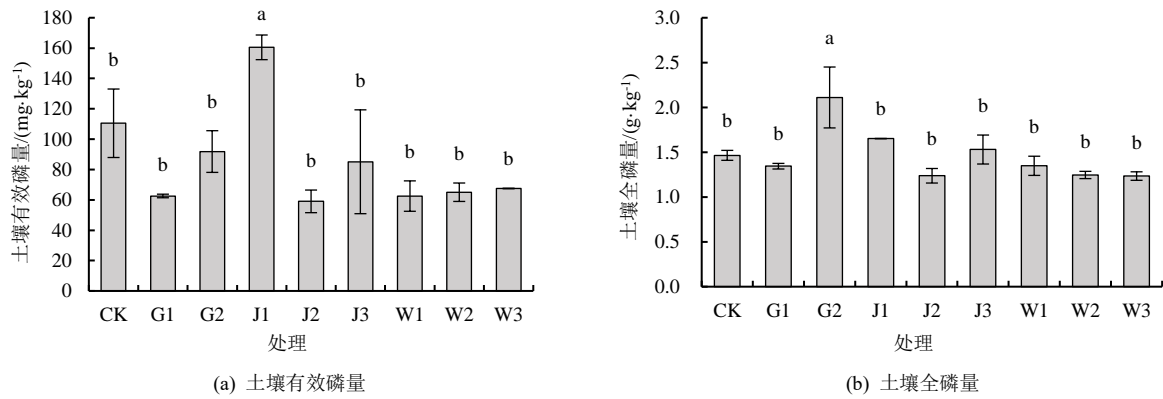


图 2 施用改良剂条件下的土壤有效磷量和全磷量

Fig.2 Soil available phosphorus and total phosphorus under the condition of application of amendment

2.2.2 改良剂对土壤有机质量的影响

图 3 是施用改良剂条件下的土壤有机质量。由图 3 可知, J3 处理土壤有机质量较 CK 显著提高 47.44% ($p<0.05$), J3 处理较 J2、J1 处理土壤有机质量分别显著提高了 88.36%、25.89% ($p<0.05$); W1 处理和 W3 处理之间差异不显著, 分别较 W2 处理显著增加了 36.61%和 34.01% ($p<0.05$); 除 J2、W2 处理低于 CK, J3 处理显著高于 CK 外, 其余处理的土壤有机质量均高于 CK, 但无显著差异。

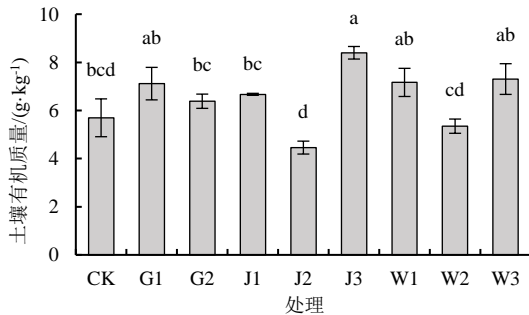
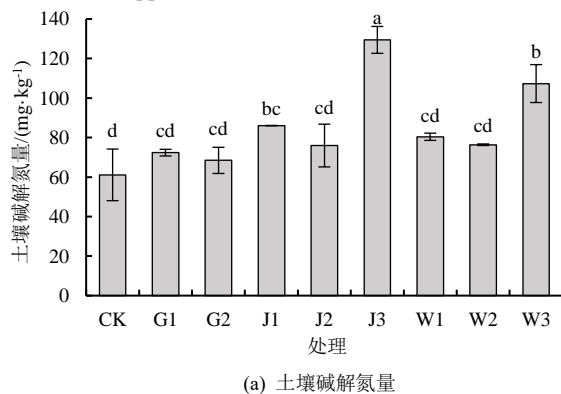
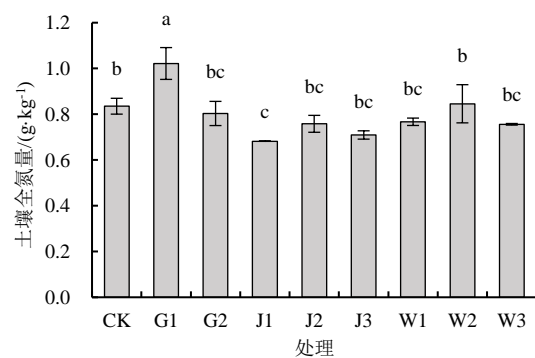


图 3 施用改良剂条件下的土壤有机质量

Fig.3 Soil organic matter under the condition of application of amendment



(a) 土壤碱解氮量



(b) 土壤全氮量

图 4 施用改良剂条件下的土壤碱解氮量和全氮量

Fig.4 Soil alkaline nitrogen decomposition and total nitrogen under condition of amendment application

2.3 基于主成分分析的土壤综合改良效应评价

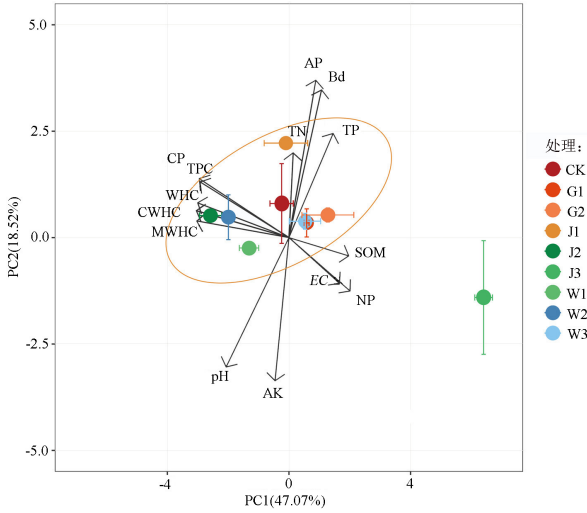
图 5 为将上述指标降维分析后的 PCA 散点图。由图 5 可知, 组间相似性较好, 组内样本可用价值高, 表明可采用主成分分析法对各指标进行综合效应评

2.2.3 对土壤氮素的影响

图 4 是施用改良剂条件下的土壤碱解氮量和全氮量。由图 4 可知, 在同一施氮水平下, J3、W3 处理和 J1 处理的土壤碱解氮量较 CK 分别显著提高了 111.93%、75.56%和 40.79% ($p<0.05$), 其余处理均较 CK 有一定程度的提高, 但差异不明显。J3 处理的土壤碱解氮量较 J2、J1 处理显著增加了 50.37%和 70.38% ($p<0.05$), W3 处理较 W2、W1 处理显著增加了 40.55%和 33.49% ($p<0.05$)。随着改良剂用量的增加, 施用水解聚马来酸酐和巨大芽孢杆菌处理的土壤碱解氮量呈先减小后增大的趋势, 说明高用量的水解聚马来酸酐和巨大芽孢杆菌较低用量可以有效提升土壤碱解氮量, 施用过磷酸钙对土壤碱解氮量提升效果不显著。与 CK 相比, G1 处理的土壤全氮量显著提高了 62.69%, J1 处理显著降低了 18.32% ($p<0.05$), 其余处理无显著差异; G1 处理显著高于其他处理, J1 处理显著低于其他处理, CK、G2、J2、J3、W1、W2、W3 处理之间不显著。

价; 有效磷对 PC2 有较大的贡献, 非毛管孔隙度对 PC1 有较大的贡献, 土壤持水率与 PC1 负相关, 土壤 pH 与 PC2 负相关; W3、CK 处理的各指标对 PC1、PC2 的贡献度都趋近于 0, 而 J3 处理的各指标与 PC1、

PC2 关联不大，表明 W3 处理、CK 和 J3 处理的综合评价效果不理想；W2、G1 处理和 J2 处理的持水率与孔隙度等指标对 PC1、PC2 的贡献度表现优异。



注 pH: 酸碱度; EC: 电导率; AP: 速效磷量; SOM: 有机质量; TN: 全氮量; TP: 全磷量; AK: 速效钾量; MWHC: 最大持水率; WHC: 田间持水率; CWHC: 毛管持水率; NP: 非毛管孔隙; CP: 毛管孔隙; TPC: 总孔隙; Bd: 体积质量。

图 5 二维 PCA 散点图

Fig.5 Two-dimensional PCA scatter plot

由表 5 可知，主成分分析将 14 个指标通过降维处理后得到 4 个主成分（F1、F2、F3、F4），其贡献率分别为 51.43%、13.66%、10.95%、8.04%，累计贡

表 6 不同改良剂的土壤综合改良效应评价主成分矩阵

Tab.6 Principal component matrix for evaluation of soil comprehensive improvement effect of different amendments

评价 指标	毛管持水率 (C ₁)	最大持水率 (C ₂)	田间持水率 (C ₃)	毛管孔隙 (C ₄)	总孔隙 (C ₅)	非毛管孔隙 (C ₆)	有机质 (C ₇)	有效磷 (C ₈)	体积质量 (C ₉)	pH 值 (C ₁₀)	全磷 (C ₁₁)	EC 值 (C ₁₂)	全氮 (C ₁₃)	碱解氮 (C ₁₄)
F1	0.983	0.974	0.972	0.970	0.954	-0.733	-0.696	-0.679	0.651	-0.566	-0.095	-0.311	-0.176	0.174
F2	0.111	0.138	0.129	0.109	0.141	-0.076	0.155	-0.456	-0.539	0.306	0.759	0.755	0.189	-0.012
F3	0.003	0.094	0.019	0.052	0.164	0.250	-0.252	0.366	-0.078	-0.318	0.403	-0.283	0.713	-0.678
F4	-0.030	0.002	-0.042	0.004	0.044	0.183	0.313	-0.132	-0.247	-0.549	0.133	-0.264	0.254	0.632

表 7 主成分因子综合得分

Tab.7 Composite score of principal component factors

处理	F1	F2	F3	F4	综合得分	综合排序
CK	0.913	0.410	-0.390	-0.190	0.187	5
G1	0.047	-0.597	1.080	0.130	0.077	6
G2	-0.830	2.023	-1.853	-1.843	-0.503	8
J1	0.370	1.683	-1.747	-0.377	0.460	4
J2	2.937	-0.733	1.647	0.440	1.617	1
J3	-6.853	-0.770	-1.453	0.363	-3.720	9
W1	1.580	-0.637	1.790	-0.733	0.867	3
W2	2.437	-0.647	1.467	0.257	1.337	2
W3	-0.603	-0.733	-0.547	1.947	-0.032	7

3 讨论

滨海盐土区地下水矿化度高，粉砂质黏壤土广泛分布，土壤结构差，通气能力与透水能力较低。添加不同改良剂可以有效改善土壤板结，含盐量高等问题，从而进一步提升土壤以及生态环境质量，是滨海盐渍

土壤主要的有效改良措施。本研究中，施用改良剂可以使得土壤体积质量显著降低，这与张雪辰等^[20]研究结果一致，说明改良剂可以较好地改善土壤结构，调节土壤蓄水、透水能力，其中 40 kg/hm² 的巨大芽孢杆菌效果最佳；施用改良剂可以显著增大土壤总孔隙度，这与高昊辰等^[21]研究结果一致，说明施用高分子化合物能够提高土壤孔隙度，其中，1 200 kg/hm² 的水解聚马来酸酐总孔隙度最高，可能是由于水解聚马来酸酐对土壤中钙离子有一定程度的螯合作用，能够活化土壤中 Ca²⁺，并取代土壤胶体表面多余的 Na⁺，使得土壤通透性更强、体积质量下降、土壤从黏重变成轻、松的土壤，有利于土壤水稳性团聚体的形成，进而增加土壤孔隙度与毛管孔隙度^[22]。毛管持水率的变化规律反映了不同处理在供给作物水分及其利用效率等方面存在差异，同时毛管持水率与最大持水率的比值波动幅度大，则说明不同处理的土壤供水能力

表 5 不同改良剂的土壤综合改良效应评价总方差

Tab.5 The total variance of the evaluation of soil comprehensive improvement effect of different amendments

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差百分比/%	累积/%	总计	方差百分比/%	累积/%
F1	6.69	51.43	51.43	6.69	51.43	51.43
F2	1.78	13.66	65.09	1.78	13.66	65.09
F3	1.42	10.95	76.04	1.42	10.95	76.04
F4	1.05	8.04	84.08	1.05	8.04	84.08

由表 6 可知，主成分 1 各评价指标数值为 0.095~0.983（绝对值），主成分 2 各评价指标数值为 0.012~0.759（绝对值），主成分 3 各评价指标为 0.003~0.713（绝对值），主成分 4 各评价指标为 0.002~0.632（绝对值）；将表 5 中各评价指标数值除以其对应主成分特征值的算术平方根，即可得到 4 个主成分各评价指标的特征向量，进而确定出 4 个主成分的表达式，计算其综合得分（表 7）。由表 7 可知，J2 处理的综合得分第 1，W2 处理的综合得分第 2，W1 处理的综合得分第 3，说明综合改良效果前 3 的分别为 J2、W2 处理和 W1 处理。

土壤主要的有效改良措施。本研究中，施用改良剂可以使得土壤体积质量显著降低，这与张雪辰等^[20]研究结果一致，说明改良剂可以较好地改善土壤结构，调节土壤蓄水、透水能力，其中 40 kg/hm² 的巨大芽孢杆菌效果最佳；施用改良剂可以显著增大土壤总孔隙度，这与高昊辰等^[21]研究结果一致，说明施用高分子化合物能够提高土壤孔隙度，其中，1 200 kg/hm² 的水解聚马来酸酐总孔隙度最高，可能是由于水解聚马来酸酐对土壤中钙离子有一定程度的螯合作用，能够活化土壤中 Ca²⁺，并取代土壤胶体表面多余的 Na⁺，使得土壤通透性更强、体积质量下降、土壤从黏重变成轻、松的土壤，有利于土壤水稳性团聚体的形成，进而增加土壤孔隙度与毛管孔隙度^[22]。毛管持水率的变化规律反映了不同处理在供给作物水分及其利用效率等方面存在差异，同时毛管持水率与最大持水率的比值波动幅度大，则说明不同处理的土壤供水能力

差异较大^[23],其中施用水解聚马来酸酐处理波动幅度最大。施用 1 200 kg/hm²的水解聚马来酸酐的土壤持水率优于其他处理,可能因为添加合适用量的水解聚马来酸酐土壤胶体颗粒的粒径增加,使土壤黏粒的吸附作用与持水能力增强^[22]。

土壤 pH 值作为衡量土壤酸碱度的重要指标,是土壤要素的基本理化性质之一,合适的土壤 pH 值可以稳定土壤中养分的形态,有助于作物生长^[24]。本研究发现,过磷酸钙、水解聚马来酸酐和巨大芽孢杆菌均能有效降低土壤 pH 值,其中施用 1 500 kg/hm²水解聚马来酸酐降低土壤 pH 值效果最好,但随着水解聚马来酸酐施用量的增加,土壤 pH 值呈先上升后下降的趋势,这与项子宸^[25]针对滨海盐碱土施用水解聚马来酸酐的研究结果一致;土壤电导率可以反映土壤含盐量的高低,本研究发现,除 G2、J3 处理外,其余处理均能有效降低土壤电导率,但差异不明显;施用 900 kg/hm²水解聚马来酸酐处理从初始的 1 437 μS/cm 降至 138.9 μS/cm,能大幅降低土壤电导率,这与王文杰等^[26]针对不同改良剂对土壤盐碱动态效果的研究结果一致;随着巨大芽孢杆菌施用量的增加土壤电导率呈现先降低后增加的趋势,说明添加中等用量的巨大芽孢杆菌降低土壤电导率效果优于低用量和高用量。

土壤有效磷、全磷、有机质、碱解氮和全氮都是衡量土壤肥力的重要指标。本研究表明,常规施肥条件下,施用 900 kg/hm²水解聚马来酸酐条件下的土壤有效磷量较 CK 显著增加,这可能是由于其构建的酸性环境导致土壤 pH 值降低,有利于难溶性磷的溶解转化并进而提升其有效性^[27],施用 1 500 kg/hm²的过磷酸钙对土壤全磷量的提升效果显著,这可能是因为施入过磷酸钙增加土壤中磷素的量。有效磷与全磷的比值代表土壤中磷素的活化能力,施用 900 kg/hm²水解聚马来酸酐处理的土壤磷素活化能力最高,虽然施用 1 500 kg/hm²的过磷酸钙可以显著提升土壤全磷量,但其有效磷与全磷的比值最低,说明其土壤磷素利用率较低。土壤有效磷量随巨大芽孢杆菌用量增加而升高,可能是因为巨大芽孢杆菌作为植物根系促生细菌可以对土壤中植物无法吸收的有机无机磷有明显的分解作用^[28]。常规施肥条件下,施用 1 500 kg/hm²水解聚马来酸酐的土壤有机质与碱解氮量显著升高,这可能是因为高用量的水解聚马来酸酐为土壤微生物提供食源,促进土壤有机质的矿化,进而增加土壤有机质^[29];水解聚马来酸酐可以提高土壤对 NH₄⁺的吸附与保持,增强土壤中氮的转化^[30],从而使土壤碱解氮量得到显著提升。同时,有机质量提升意味着土壤有机碳量提升,进而促进土壤碱解氮量的增加^[31],

因此本研究中施用改良剂后,土壤有机质与碱解氮有相同的变化规律。随着过磷酸钙施用量的增大,土壤全氮量呈降低趋势,这与徐勃^[32]对施用不同磷水平下的土壤全氮量变化的研究结论一致,施用巨大芽孢杆菌可以一定程度提高土壤全氮量,但差异不明显,这与张慧洁等^[33]的研究结果相似。

4 结论

1) 常规施肥条件下,施用巨大芽孢杆菌可以降低土壤体积质量、土壤 pH 值和 EC 值,增加土壤孔隙度、持水率、氮素以及有机质量。其中,40 kg/hm²巨大芽孢杆菌可以显著降低土壤体积质量,显著增加最大持水率和毛管持水率,60 kg/hm²巨大芽孢杆菌显著增加土壤孔隙度、最大持水率、毛管持水率以及田间持水率,80 kg/hm²巨大芽孢杆菌显著增加土壤碱解氮量。

2) 常规施肥条件下,施用水解聚马来酸酐可以降低土壤 pH 值和 EC 值,增加土壤孔隙度、持水率、磷素、有机质以及碱解氮量。其中,900 kg/hm²水解聚马来酸酐显著提高土壤有效磷量,1 200 kg/hm²水解聚马来酸酐显著提升土壤孔隙度以及持水能力,1 500 kg/hm²水解聚马来酸酐显著提高土壤碱解氮和有机质量,并且显著降低土壤 pH 值。

3) 常规施肥条件下,施用过磷酸钙可以降低土壤体积质量、pH 值和 EC 值,增加土壤全磷、有机质以及氮素量。其中,750 kg/hm²过磷酸钙可以显著提高土壤有机质和全氮,1 500 kg/hm²过磷酸钙可以显著提高土壤全磷量。

4) 主成分分析表明,常规施肥条件下滨海盐渍土壤综合改良效果排序前 3 的改良模式为:J2 处理(1 200 kg/hm²水解聚马来酸酐)>W2 处理(60 kg/hm²巨大芽孢杆菌)>W1 处理(40 kg/hm²巨大芽孢杆菌)。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 王洪义,王智慧,杨凤军,等.浅密式暗管排盐技术改良苏打盐碱地效应研究[J].水土保持研究,2013,20(3):269-272.
WANG Hongyi, WANG Zhihui, YANG Fengjun, et al. Research for the effect of shallow-tight type subsurface drain pipes on improving soda saline-alkaline land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(3): 269-272.
- [2] 邵孝候,张宇杰,常婷婷,等.生物有机肥对盐渍土壤水盐动态及番茄产量的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(2):153-160.
SHAO Xiaohou, ZHANG Yujie, CHANG Tingting, et al. Effects of different fertilizer treatments on soil water, salt and crop yield formation in saline soils[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(2): 153-160.
- [3] 陈义群,董元华.土壤改良剂的研究与应用进展[J].生态环境,2008,17(3):1 282-1 289.

- CHEN Yiqun, DONG Yuanhua. Progress of research and utilization of soil amendments[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(3): 1 282-1 289.
- [4] 张万钧, 郭育文, 王斗天, 等. 滨海海涂地区绿化及排盐工程技术探讨与研究[J]. 中国工程科学, 2001, 3(5): 79-85.
- ZHANG Wanjun, GUO Yuwen, WANG Doutian, et al. The discussion and research on the technologies of afforestation and salt draining engineering in coastal wasteland[J]. Engineering Science, 2001, 3(5): 79-85.
- [5] 李金彪, 刘广明, 陈金林, 等. 不同物料掺拌对滨海重度盐土的改良效果研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(6): 1 481-1 485.
- LI Jinbiao, LIU Guangming, CHEN Jinlin, et al. The effect of different amendments on amelioration of coastal heavy saline soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(6): 1 481-1 485.
- [6] 唐雪, 尚辉, 刘广明, 等. 复合改良剂对盐碱土改良及植物生长的影响[J]. 土壤, 2021, 53(5): 1 033-1 039.
- TANG Xue, SHANG Hui, LIU Guangming, et al. Effects of combined amendment on improvement of salinized soil and plant growth[J]. Soils, 2021, 53(5): 1 033-1 039.
- [7] 陈文涛, 郭丽琢, 刘斌, 等. 改良剂对盐碱地燕麦生长及土壤物理性状的调控效应[J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 59(5): 136-144.
- CHEN Wentao, GUO Lizhuo, YAN Bin, et al. Effects of amendments on oat growth and soil physical properties in saline-alkali soils[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2023, 59(5): 136-144.
- [8] 乔晓荣. 不同改良剂对土壤微生物生态的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- QIAO Xiaorong. Effect of different amendments on soil microbial ecology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [9] 宋纪雷, 李跃进, 王鼎, 等. 高分子吸附树脂与酸性材料配施对盐碱离子钝化效果研究[J]. 北方农业学报, 2018, 46(2): 31-36.
- SONG Jilei, LI Yuejin, WANG Ding, et al. Study on the effect of polymer adsorption resin combined with different acid materials on the passivation effect of salt and alkali[J]. Journal of Northern Agriculture, 2018, 46(2): 31-36.
- [10] 谢金宏. 野生稻根际细菌改良盐碱地及水稻促生的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2020.
- XIE Jinhong. Studies on the improvement of saline-alkali soil and rice growth promotion by wild rice rhizosphere bacteria[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2020.
- [11] 薛远赛, 师长海, 王源溪, 等. 过磷酸钙及有机肥混施对盐碱地小麦光合特性及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(20): 1-6.
- XUE Yuansai, SHI Changhai, WANG Yuanxi, et al. Mixed application of superphosphate and organic fertilizer: Effects on photosynthetic characteristics and yield of wheat in saline alkali soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(20): 1-6.
- [12] 贺园春, 罗纨, 贾忠华, 等. 添加秸秆和石膏改善滨海盐渍土盐分淋洗效果的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(10): 117-124.
- HE Yuanchun, LUO Wan, JIA Zhonghua, et al. Adding straw and gypsum to improve efficiency of remediating coastal saline soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(10): 117-124.
- [13] 郭同铠, 毛伟兵, 孙玉霞, 等. 腐殖酸对滨海黏质盐土持水性能的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(2): 32-36, 55.
- GUO Tongkai, MAO Weibing, SUN Yuxia, et al. Effects of humic acid on water holding properties of clay solonchak[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(2): 32-36, 55.
- [14] 李艳红, 王文杰, 贺海升, 等. 水解聚马来酸酐对森林暗棕壤和草地退化盐碱地土壤胶体表面结构与组成的影响[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1 181-1 191.
- LI Yanhong, WANG Wenjie, HE Haisheng, et al. HPMA effects on surface structures and colloids composition of dark-brown forest soils and degraded saline-alkali grassland soil[J]. Soils, 2015, 47(6): 1 181-1 191.
- [15] 殷小冬, 李其胜, 贾艳艳, 等. 一株巨大芽孢杆菌的促生特性及其对小麦种子发芽的影响[J]. 南方农业, 2023, 17(2): 208-210.
- YIN Xiaodong, LI Qisheng, JIA Yanyan, et al. Growth promoting characteristics of a *Bacillus megaterium* and its effect on wheat seed germination[J]. South China Agriculture, 2023, 17(2): 208-210.
- [16] 张雪辰, 陈诚, 张密密, 等. 不同改良措施下盐渍土壤的改良效果[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(S1): 61-65, 84.
- ZHANG Xuechen, CHEN Cheng, ZHANG Mimi, et al. Improvement effect of saline soil under different improvement measures[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(S1): 61-65, 84.
- [17] 国家林业和草原局. 森林土壤水分-物理性质的测定: LY/T 1215—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 陈利军, 蒋瑀霁, 王浩田, 等. 长期施用有机物料对旱地红壤磷组分及磷素有效性的影响[J]. 土壤, 2020, 52(3): 451-457.
- CHEN Lijun, JIANG Yuji, WANG Haotian, et al. Effects of long-term application of organic materials on phosphorus fractions and availability in red soil[J]. Soils, 2020, 52(3): 451-457.
- [20] 张雪辰, 陈诚, 苏里坦, 等. 聚丙烯酰胺改良盐渍土壤的适宜用量研究[J]. 土壤, 2017, 49(6): 1 216-1 220.
- ZHANG Xuechen, CHEN Cheng, SU Litan, et al. On appropriate applied amount of polyacrylamide(PAM) for saline soil improvement[J]. Soils, 2017, 49(6): 1 216-1 220.
- [21] 高昊辰, 焦爱萍, 陈诚, 等. 高分子化学地膜对盐渍土壤物理性质与水分蒸发效应[J]. 土壤, 2021, 53(5): 1 057-1 063.
- GAO Haochen, JIAO Aiping, CHEN Cheng, et al. Effects of polymer compound film on physical properties and water evaporation in saline soil[J]. Soils, 2021, 53(5): 1 057-1 063.
- [22] 王文杰, 贺海升, 祖元刚, 等. 施加改良剂对重度盐碱地盐碱动态及杨树生长的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2 272-2 278.
- WANG Wenjie, HE Haisheng, ZU Yuangang, et al. Dynamics of soil alkali-salinity and growth of poplar saplings after kriliium addition in heavy soda saline-alkali soil in field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2 272-2 278.
- [23] 赵恩辉, 吴磊, 赵生华. 黄河三角洲不同植被类型土壤水源涵养功能综合评价[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 255-263.
- ZHAO Enhui, WU Lei, ZHAO Shenghua. Comprehensive evaluation of soil water conservation function of different vegetation types in the Yellow River Delta[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 255-263.
- [24] 郭美美, 李晓彬, 万书勤, 等. 滨海重度盐渍土加酸滴灌对脱盐过程中土壤 pH 值的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(6): 72-79.
- GUO Meimei, LI Xiaobin, WAN Shuqin, et al. The efficacy of acidified drip irrigation for reducing soil pH in remediating heavy saline coastal soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(6): 72-79.
- [25] 项子宸. 土壤改良剂对滨海盐碱土及水稻生长的影响研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2020.
- XIANG Zichen. Effects of soil amendments on coastal saline-alkali soil and rice growth[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2020.
- [26] 王文杰, 关宇, 祖元刚, 等. 施加改良剂对重度盐碱地土壤盐碱动态及草本植物生长的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 2 835-2 844.
- WANG Wenjie, GUAN Yu, ZU Yuangang, et al. The dynamics of soil alkali-salinity and growth status of several herbal plants after kriliium addition in heavy soda saline-alkali soil in field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 2 835-2 844.
- [27] 潘小承, 胡海波, 王楠, 等. 马尾松根际 pH 变化及对土壤磷有效性的影响[J]. 新农业, 2018(9): 4-7.
- [28] 杨晓燕, 叶伟伟, 魏善强, 等. 一株巨大芽孢杆菌发酵培养基的优化及解磷效果研究[J]. 中国农学通报, 2022, 38(15): 105-112.
- YANG Xiaoyan, YE Weiwei, WEI Shanqiang, et al. *Bacillus megaterium*: Fermentation medium optimization and phosphate solubilization effect[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(15): 105-112.

- [29] 乔洁, 张春丹, 韩晓光. 聚马来酸酐对设施土壤微生物生物量碳、氮及土壤呼吸速率的影响[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(23): 5 877-5 880, 5 886.
QIAO Jie, ZHANG Chundan, HAN Xiaoguang. Effects of PMA on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil respiration rate in greenhouse soil[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(23): 5 877-5 880, 5 886.
- [30] 龙明杰, 张宏伟, 谢芳, 等. 高聚物土壤结构改良剂的研究 II. 高聚物对土壤肥料的作用[J]. 土壤肥料, 2000(5): 13-18.
LONG Mingjie, ZHANG Hongwei, XIE Fang, et al. Studies on polymeric soil structure amendments II effect of polymeric soil amendments on the adsorption of fertilizer on soil[J]. Soils and Fertilizers, 2000(5): 13-18.
- [31] 肖和友, 朱伟, 郑生猛, 等. 连续施用不同种类生物质炭对植烟土壤养分的影响[J]. 土壤, 2024, 56(2): 326-332.
XIAO Heyou, ZHU Wei, ZHENG Shengmeng, et al. Effects of continuous application of different biochars on tobacco-planting soil nutrients[J]. Soils, 2024, 56(2): 326-332.
- [32] 徐勃. 不同磷肥和磷形态对黄花苜蓿(*Medicago falcata* L.)叶片微观结构、氮磷吸收及产量的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.
XU Bo. Effects of different phosphorous fertilizer and phosphorus fractions on leaf micromorphology, N/P acquisition and yield of sickle lucerne(*Medicago Falcata* L.)[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2021.
- [33] 张慧洁, 刘俊琢, 吴永红. 藻、菌配合施用对水稻土磷有效性及微生物群落的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(5): 1 369-1 377.
ZHANG Huijie, LIU Junzhuo, WU Yonghong. Effects of combined application of algae and bacteria on paddy soil phosphorus availability and microbial community[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(5): 1 369-1 377.

The effect of different soil amendment agents on physical and chemical properties of saline soils

MA Fuyang^{1,2}, CAO Weiwei³, PENG Hao³, YAO Rongjiang²,
WANG Xiuping⁴, LIU Guangming^{2*}, ZHANG Wentai^{1*}

- (1. Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes/College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;
3. Jiangsu Coastal Ecological Technology Development Co., Ltd, Nanjing 210000, China;
4. Institutes of Coastal Agriculture, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Tangshan 063299, China)

Abstract: 【Objective】 Soil conditioners are commonly used to improve quality and productivity of saline soils. This paper experimentally compares the effects of different soil conditioners on the physical and chemical properties of saline soils. 【Method】 The experiment was conducted in pots to simulate a rice-oilseed rape rotational cropping system. The soil was amended with calcium superphosphate at rates of 750 kg/hm² (G1) and 1 500 kg/hm² (G2); hydrolyzed poly (maleic anhydride) at rates of 900 kg/hm² (J1), 1 200 kg/hm² (J2) and 1 500 kg/hm² (J3); and *Bacillus megaterium* at rates of 40 kg/hm² (W1), 60 kg/hm² (W2), and 80 kg/hm² (W3). The control treatment (CK) was conventional fertilization without soil amendment. In each treatment, we measured physical soil properties and electrical conductivity of soil solution. 【Result】 Compared to CK, J2 increased soil total porosity, maximum water holding capacity, field water holding capacity, and capillary water holding capacity by 12.49%, 13.60%, 13.63% and 12.41%, respectively, while reducing electrical conductivity of the soil solution by 64.73%. W2 improved total soil porosity, maximum water holding capacity, field water holding capacity, and capillary water holding capacity by 8.59%, 9.57%, 9.01%, and 9.79%, respectively, while reducing electrical conductivity of the soil solution by 55.66%. W1 reduced soil bulk density by 4.20%, enhanced maximum water holding capacity, field water holding capacity, capillary water holding capacity and soil organic matter by 6.58%, 9.02%, 9.69% and 25.82%, respectively, while reducing electrical conductivity of soil solution by 8.97%. 【Conclusion】 Principal component analysis ranked the conditioners and their application rates in terms of their efficacy the following order: 1 200 kg/hm² of hydrolyzed poly (maleic anhydride) > 60 kg/hm² of *Bacillus megaterium* > 40 kg/hm² of *Bacillus megaterium*. These findings provide a guidance for practical application of soil amendment agents to improve properties and productivity of saline soils in the studied regions.

Key words: saline soil; amendment; soil water-holding capacity; soil nutrients

责任编辑: 赵宇龙