

耐盐菌联合化学复合改良剂协同改良 黄河三角洲盐碱土壤的效果

王悦¹, 陈爽¹, 曹锐¹, 郑灵韵¹, 王强³,
薛鹏飞³, 李先平¹, 胡锋¹, 李辉信^{1,2}

(1.南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095;

2.江苏省有机固体废物资源化协同创新中心, 南京 210095; 3.山东博华高效生态农业科技有限公司, 山东 滨州 256500)

摘要: 为探究生物和化学方法联用对黄河三角洲地区盐碱土的改良效果, 首先进行粉煤灰的改性和土著耐盐菌的筛选, 选取其中 2 株耐盐菌(BY-4、BY-8)与化学复合改良剂(改性粉煤灰+脱硫石膏+腐殖酸(FSZ))通过联合配施的方法开展室内土柱淋溶试验, 研究渗滤液和土壤中盐基阳离子、可溶性有机碳(DOC)、土壤钠吸附比(SAR)以及土壤有机质等的变化规律。结果表明: BY-4 和 BY-8 除具有明显的耐盐和产吲哚乙酸能力, 还分别具有较高的溶磷与解钾能力; 与对照(CK)处理相比, 添加化学复合改良剂(FSZ)能显著促进水溶性 Na⁺ 的淋洗, 降低土壤中水溶性 Na⁺ 的总含量和 SAR 值, 提高土壤中 DOC 和有机质含量, 且耐盐菌 BY-8 联合化学复合改良剂的处理(FSZ8)效果最好; 与 CK 相比, FSZ8 处理下土壤水溶性 Na⁺ 总量下降 33.30%, 耕层土壤 SAR 下降 79.76%, DOC 淋溶损失下降 34.60%, 耕层土壤有机质含量上升 79.47%。研究结果有助于理解耐盐菌在改良盐碱土壤中的作用, 并可为生物和化学复合改良剂的研发和利用提供理论和数据参考。

关键词: 盐碱土; 耐盐菌; 化学复合改良剂; 土柱淋溶; 协同改良

中图分类号: S154.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)01-0354-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.045

Effects of Salt-tolerant Bacteria Combined with Chemical Compound Amendment on Improving Saline-alkali Soil in the Yellow River Delta

WANG Yue¹, CHEN Shuang¹, CAO Rui¹, ZHENG Lingyun¹, WANG Qiang³,
XUE Pengfei³, LI Xianping¹, HU Feng¹, LI Huixin^{1,2}

(1.College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095;

2.Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing 210095;

3.Shandong Bohua High Efficiency Ecological Agriculture Science & Technology Co., Ltd., Binzhou, Shandong 256500)

Abstract: In order to explore the improvement effects of the combined application of biological and chemical methods on saline-alkali soil in the Yellow River Delta, we first modified fly ash and isolated indigenous salt-tolerant bacteria, and then selected two strains of salt tolerant bacteria (BY-4 and BY-8) to carry out an indoor soil column leaching experiment in combination with a chemical compound amendment (i.e., modified fly ash + desulfurization gypsum + humic acid (FSZ)). The changes of base cations, dissolved organic carbon (DOC), sodium adsorption ratio (SAR) and soil organic matter in leachate and/or soil were studied. The results showed that the two strains BY-4 and BY-8 were salt tolerant and had the abilities to produce indole acetic acid and to solubilize phosphate or potassium. In compared with the treatment (CK), treatments with chemical compound amendments (FSZ) significantly promote the leaching of water-soluble Na⁺, reduced the total amount of water-soluble Na⁺ and SAR in soil, and increased the contents of DOC and

收稿日期: 2022-06-15

资助项目: 山东省重点研发计划项目(2019JZZY020614)

第一作者: 王悦(1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事盐碱地改良研究。E-mail: 2019103013@njau.edu.cn

通信作者: 李辉信(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤生态研究。E-mail: huixinli@njau.edu.cn

organic matter in soil. The treatment of BY-8 combined with chemical compound amendment (FSZ8) performed the best. Compared with CK, soil total water-soluble Na^+ under FSZ8 treatment decreased by 33.30%, SAR of arable soil decreased by 79.76%, DOC leaching loss decreased by 34.60% and organic matter content of arable soil increased by 79.47%. These findings were helpful to understand the role of salt-tolerant bacteria in soil improvement, and would provide theoretical and data reference for the development and utilization of biological and chemical composite amendments in the future.

Keywords: saline-alkali soil; salt-tolerant bacteria; chemical compound amendments; soil column leaching; collaborative improvement

黄河三角洲地区是我国东部沿海后备土地资源最多、开发潜力最大的冲积平原^[1]。然而,由于受到黄河水泛滥、灌溉以及干旱等因素的影响,该地区近 50% 的土地为不同程度的盐碱土壤,表现为土壤含盐量高、有机质低、养分贫瘠等特点^[2-3],造成适生植物种类偏少,农作物产量与品质相对较低等问题,严重阻碍当地农业的可持续性发展^[4-6]。因此,科学合理地改良黄河三角洲盐碱土具有重要的现实意义。

目前国内外学者针对盐碱土壤改良提出包括水利、物理、化学以及生物等一系列改良措施。其中,化学改良技术最为常用,其主要是通过盐基离子的交换、钠离子的吸附以及酸碱中和作用等来调节土壤酸碱度、盐基离子和养分含量等^[7]。常用的化学改良剂包括粉煤灰、脱硫石膏和腐殖酸等。粉煤灰是一种燃煤热电厂废弃物,其孔隙发达,具有较大的比表面积,可通过提高土壤保水保肥的方式缓解盐碱化程度。有研究^[8]表明,酸改性过的粉煤灰能很好地吸附磷酸盐,但其对盐碱土中盐离子的吸附能力尚不清楚。脱硫石膏是燃煤烟气脱硫过程中产生的副产物,其溶解释放的 Ca^{2+} 可以置换土壤胶体所吸附的 Na^+ ,促进土体中水溶性 Na^+ 的淋洗,从而达到降盐效果^[9]。腐殖酸是一种重要的有机改良剂,其不仅能够直接提高土壤有机质含量,还可通过释放有机酸降低土壤 pH。实践中,通常将多种改良剂混合施用,以提高改良效果^[10-12]。

与传统化学改良技术相比,以微生物改良为代表的生物改良措施具有高效、安全、环保等优点,逐渐成为当前研究的重点。其中耐盐促生菌不仅能够促进植物生长,增强植物的抗逆性,而且与化学改良剂联用时能够促进改良剂释放更多的有机酸,降低土壤 pH 和盐分含量,同时提高土壤速效氮、磷、钾与有机质含量,改善土壤团粒结构,体现出巨大的应用潜力^[13-18]。然而,微生物菌种资源的稀缺性,功能的单一性,定殖的困难性,以及改良效果的不稳定性等限制化学改良剂与耐盐菌剂联用技术的开发和利用。因此,当前亟需筛选合适的多功能耐盐微生物,并在此基础上开展化学和生物联用措施的机制和应用研究,以实现高效环保的盐碱土改良目标。

通过前期室内土壤培养试验发现,改性粉煤灰、脱硫石膏与腐殖酸三者配施后对钠盐的降低效果显著优于单施,因此,本文将三者混合作为一种复合改良剂。同时,本研究还以当地土壤筛选的两株耐盐菌为生物改良材料,采用模拟当地降雨量的土柱淋溶试验探讨生物改良剂与化学复合改良剂联用对黄河三角洲盐碱土的协同改良效果,研究结果将为盐碱土的综合改良提供一套有效的方案。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤于 2020 年 10 月采集自山东省滨州市博兴县博华高效生态农业科技有限公司蔡寨基地(37°20'38"N,118°09'36"E)。该地区靠近黄河,土壤盐碱化程度较高。当地属于温带大陆性气候类型,年降水量 530~630 mm,主要集中在 6—8 月,年均气温 13.6 °C,主要种植玉米、小麦、棉花等,种植制度为轮作。试验地土壤 pH 为 8.43,电导率为 4.25 dS/m,钠吸附比为 17.86,水溶性盐总量为 10.80 g/kg,水溶性 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 含量分别为 28.75、3.46、0.17、1.52 mmol/L,有机质含量为 5.56 g/kg。

供试改良材料为改性粉煤灰、脱硫石膏、腐殖酸与 2 株土著耐盐菌株。本研究预先通过设置不同的硫酸和硝酸配比进行粉煤灰改性(2 mol/L H_2SO_4 、1 mol/L HNO_3 与混酸($V_{\text{H}_2\text{SO}_4} : V_{\text{HNO}_3} = 1 : 1$)3 种处理)。具体步骤为称取 50 g 粉煤灰与 100 mL 酸液于搅拌器,室温改性 6 h 后,蒸馏水洗至中性,105 °C 烘干,通过测定与比较改性材料的扫描电子显微镜图、比表面积以及 Zeta 电位等来评价改性材料^[19-20]。原始粉煤灰来自于宁夏宁东能源化工基地。

脱硫石膏来自宁夏宁东能源化工基地,EC 为 6.01 dS/m,水溶性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 含量分别为 12.47、28.05、0.23、7.97 mmol/L,SAR 为 1.77。腐殖酸来自山东农大肥业科技有限公司,EC 为 14.19 dS/m,全钾含量为 8.20 g/kg,有机质含量为 727.05 g/kg。

耐盐菌株分离自该供试盐碱土,具体筛选过程如下。耐盐菌筛选培养基^[21]为:柠檬酸钠 3 g、无水氯化钙 0.2 g、七水硫酸镁 20 g、氯化钾 2 g、氯化钠(分

别根据浓度梯度 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% 添加)、蛋白胨 10 g、琼脂 20 g、水 1 L, 在初步筛选得到的耐盐菌中再分别通过定性、定量测定筛选能够产生吲哚乙酸(IAA)的细菌^[22], 继续将得到的产 IAA 耐盐菌分别进行溶磷与解钾能力的测定^[23], 分别挑选出具有较高溶磷与解钾能力的植物促生细菌, 最后获得 BY-4 和 BY-8 高效菌株。

1.2 试验设计与装置

本试验设计 4 个处理, 分别为 FSZ(改性粉煤灰+脱硫石膏+腐殖酸)、FSZ4(FSZ+菌株 BY-4)、FSZ8(FSZ+菌株 BY-8)、CK(不添加改良剂和菌剂), 每个处理 3 个重复。其中改性粉煤灰、脱硫石膏和腐殖酸的用量分别为 5, 5, 1.7 g/kg, 土著耐盐菌株的用量为 2.7 mL/kg, 其浓度为 10^8 CFU/mL。土柱试验为模拟当地降雨量的室内土柱淋溶试验, 于 2021 年 7 月 17 日至 9 月 15 日在南京农业大学资源与环境科学学院温室进行。按照土壤容重 1.30 g/cm^3 装填土柱, PVC 有机玻璃柱直径为 15 cm, 高 90 cm, 底部装有 5 cm 厚的石英砂过滤层, 并设有 1 个小孔用于接取淋溶渗滤液, 土壤填充高度为 60 cm, 每 20 cm 为 1 个土层, 用纱布与滤纸隔开, 共 3 层。顶层 0—20 cm 土层分别与改良剂和菌剂混合均匀后装入, 不添加改良剂作为空白对照(CK), 土柱模拟装置见图 1。装柱完成后加水 4 L 润湿土体, 土柱静置 48 h 后开始第 1 次淋溶, 淋溶 6 天后采集滤液瓶中的渗滤液, 收集完滤液继续进行下 1 次淋溶, 过程与第 1 次淋溶相同。共淋溶 10 次, 淋溶时间为 2 个月, 其中第 1~5 次淋溶水量为 350 mL(模拟滨州 7 月降水量 100 mm), 第 6~10 次淋溶水量为 700 mL(模拟滨州 8 月降水量 200 mm)。

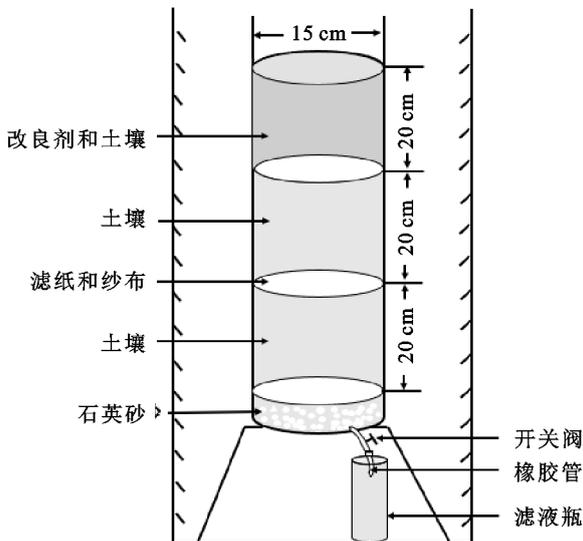


图 1 土柱试验模拟装置示意

1.3 测定指标与方法

渗滤液经 $0.45 \mu\text{m}$ 水相滤膜过滤后, 测定水溶性

Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 含量与可溶性有机碳(DOC)含量, 共测定十次。模拟降雨淋溶结束后各层土壤采用土钻法钻取, 在室温条件下风干、研磨、过筛, 分别测定 0—20, 20—40, 40—60 cm 土壤水溶性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 含量, DOC 含量和有机质含量, 并计算钠吸附比(SAR)。

土壤 pH 采用 pH 计测定(水土比 5 : 1); 土壤水溶性盐总量采用电导法测定; 土壤水溶性阳离子含量采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-OES, Agilent 710)法测定; 土壤 DOC 含量采用碳氮元素分析仪(muti N/C 3100)法测定; 土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法—外加热法^[24]测定。

钠吸附比计算公式为:

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\frac{\sqrt{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})}}{2}}$$

式中: Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 为溶液中的离子浓度(mmol/L)。

1.4 统计分析

试验数据采用 IBM SPSS Statistics 20 软件进行单因素 ANOVA 方差分析与多重比较(Duncan 检验)。定义 $p < 0.05$ 条件下具有显著性差异。绘图采用 Origin 2022 软件完成。

2 结果与分析

2.1 改性粉煤灰的制备和耐盐菌的筛选

扫描电子显微镜图(图 2)显示, 在混酸($\text{V}_{\text{H}_2\text{SO}_4} : \text{V}_{\text{HNO}_3} = 1 : 1$)改性条件下, 观察到粉煤灰出现空洞的现象, 此时其比表面积增大, 与离子接触充分, 具有较强的吸附潜力。表 1 结果显示, 3 种方式改性 6 h 后的粉煤灰比表面积和 Zeta 电位的负电荷均增大, 尤其是混酸($\text{V}_{\text{H}_2\text{SO}_4} : \text{V}_{\text{HNO}_3} = 1 : 1$)的处理, Zeta 电位负电荷较原始粉煤灰增加 1.45 倍, Zeta 电位负电荷越大, 则说明其对于阳离子的吸附效果越好, 越有利于盐碱土壤中游离盐基阳离子的吸附。因此, 本研究最终选择该改性材料开展后续的土柱淋溶试验。

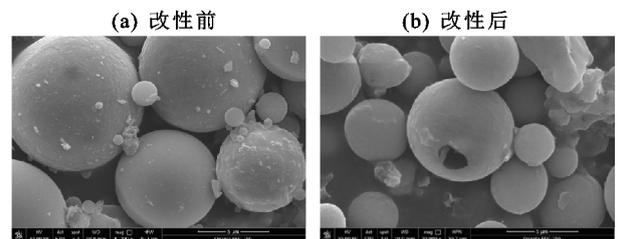


图 2 混酸($\text{V}_{\text{H}_2\text{SO}_4} : \text{V}_{\text{HNO}_3} = 1 : 1$)改性前后粉煤灰显微结构

共分离得到 2 株具有促生功能的耐盐芽孢杆菌, 其中 BY-4 能够耐受 4% NaCl 浓度, 并且能够产 IAA 4.19 mg/L , 溶磷能力为 70.03%, 形态见图 3a; BY-8 能够耐受 8% NaCl 浓度, 并且能够产 IAA 6.28 mg/L , 解

钾能力为 44.29%,形态见图 3b。菌株 BY-4 与 BY-8 的最适生长温度为 30 ℃、pH 为 6~9、碳源为葡萄糖、氮源为蛋白胨,BY-4 的最适盐浓度为 0~3%,而 BY-8 的最适盐浓度为 0~6%。

表 1 原始与改性粉煤灰的比表面积与 Zeta 电位

指标	改性 6 h 粉煤灰			
	原始粉煤灰	H ₂ SO ₄	HNO ₃	混酸 (V _{H₂SO₄} :V _{HNO₃} =1:1)
比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	2.24	4.56	3.38	3.38
Zeta 电位/mV	-8.21	-14.20	-16.00	-20.10

2.2 渗滤液及土壤中盐基阳离子浓度变化

与对照相比,添加改良剂能够促进水溶性 Na⁺ 的淋洗。由图 4 可知,渗滤液中水溶性 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺ 含量均随淋溶次数的增加而下降,最终在淋溶至第 7 次开始趋于稳定。模拟降雨淋溶结束后,FSZ8 处理渗滤液中 K⁺ 与 Mg²⁺ 溶出总含量分别为

11.63,166.54 mmol/L,显著低于 CK 处理;FSZ8 处理渗滤液中 Na⁺ 溶出总含量达 3 853.72 mmol/L,显著高于 CK 处理和 FSZ 处理;各处理渗滤液中 Ca²⁺ 的溶出总含量无显著差异。表明模拟降雨淋溶条件下添加耐盐菌 BY-8 与化学复合改良剂能够有效去除盐碱土壤中的水溶性 Na⁺。

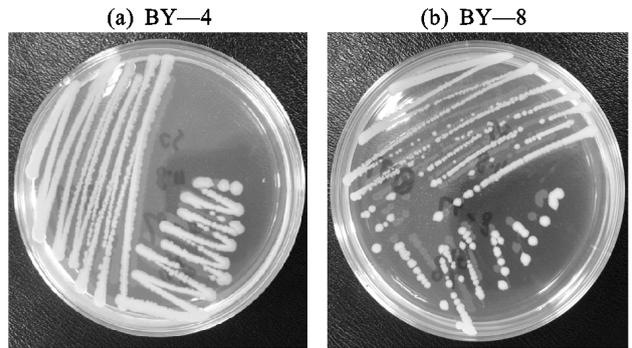
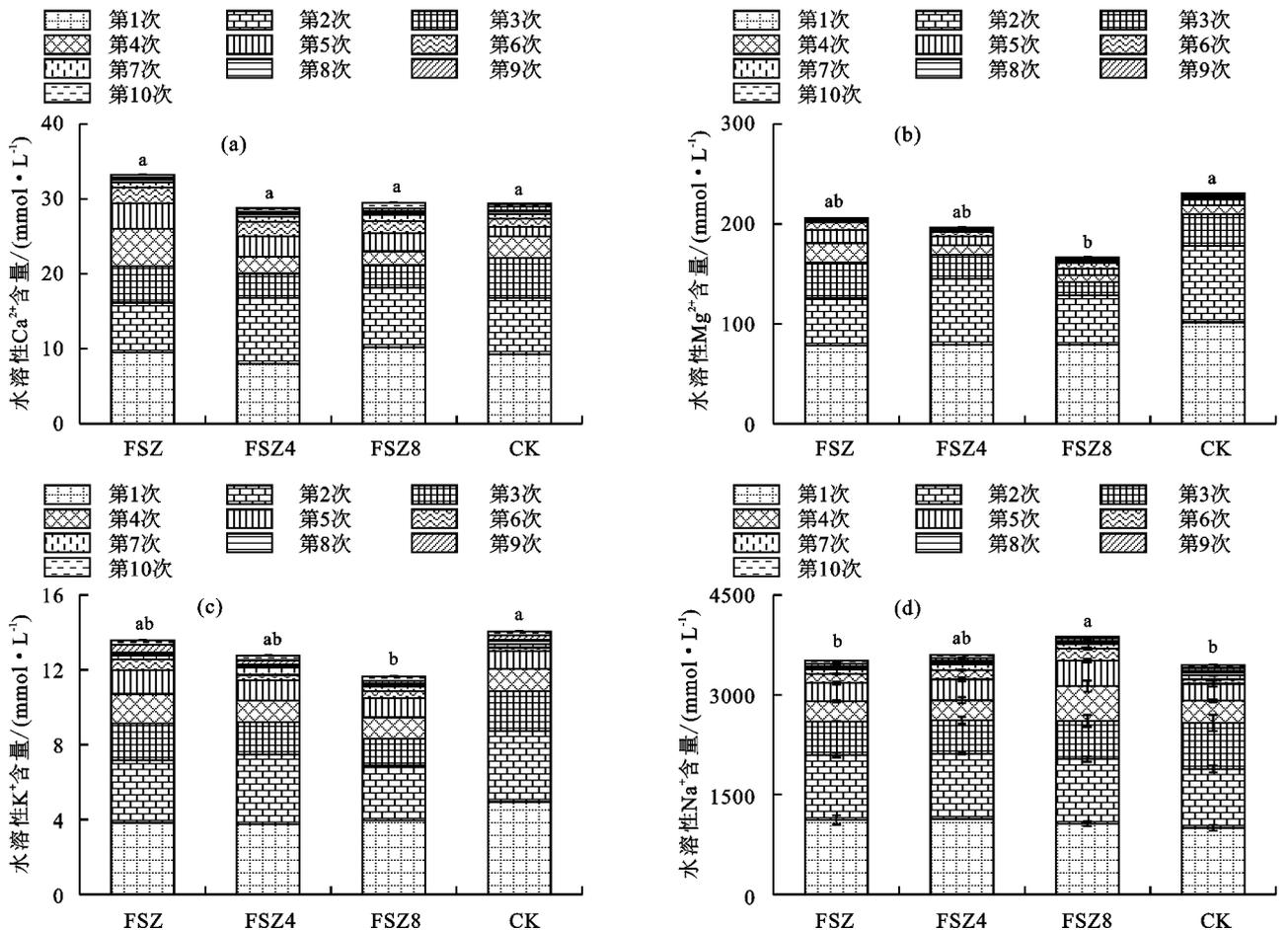


图 3 耐盐菌 BY-4 与 BY-8 的形态



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

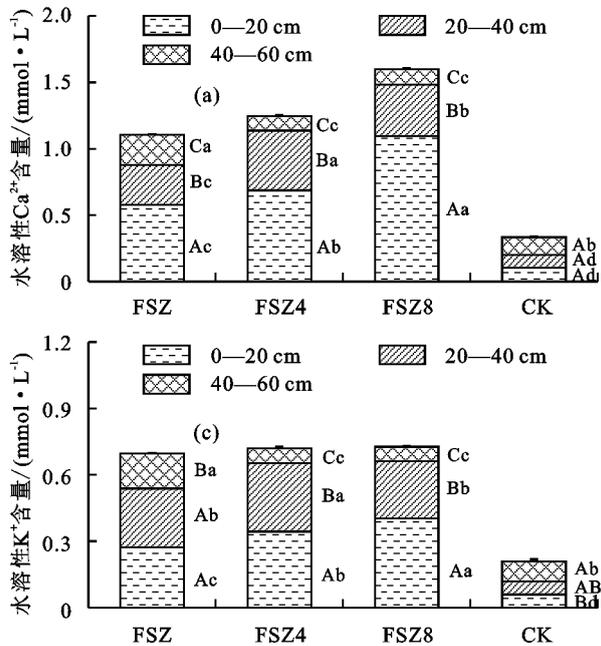
图 4 不同改良措施下淋滤液中水溶性盐基阳离子的累积量变化

本试验发现,土壤中水溶性 Na⁺ 含量随土层加深而逐层增加,但改良剂的添加能够显著降低各土层的水溶性 Na⁺ 含量。与对照相比,FSZ、FSZ4 和 FSZ8 在 0—60 cm 各土层的 Na⁺ 含量分别降低 20.41%~25.68%, 10.10%~34.00%, 22.92%~46.96%(图 5)。水溶性 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺ 含量的变化规律大体呈现相反的趋势,

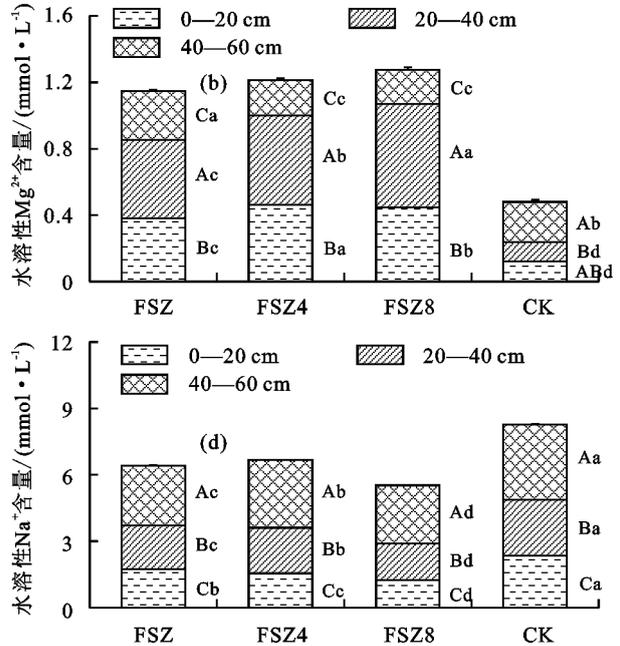
即随土层加深而逐层降低,改良剂的添加会提高 0—20,20—40 cm 土层的阳离子含量(与对照相比)。其中 FSZ8 处理最为明显,其在 0—20 cm 土层水溶性 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺ 含量分别较 CK 处理提高 9.7、2.6、5.9 倍,在 20—40 cm 土层则分别提高 3.0、4.5、3.2 倍。然而,40—60 cm 土层,FSZ8 处理下土壤水溶性 Ca²⁺、

Mg^{2+} 、 K^+ 含量均最低,表明其钙镁钾等营养元素的淋失最少(图 5)。

土壤中不同水溶性阳离子的累计含量(0—60 cm)差异较大,FSZ8 处理下土壤水溶性 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 含



量最高,分别为 1.60,1.28,0.73 mmol/L,而 CK 处理最低,只有 0.33,0.48,0.21 mmol/L。同时,FSZ8 处理土壤水溶性 Na^+ 含量(5.52 mmol/L)却是所有处理中最低的,与 CK(8.28 mmol/L)相比下降幅度达到 33.30%。



注:图中不同小写字母表示不同处理间差异显著性($p < 0.05$);不同大写字母表示同一处理不同土层间差异显著性($p < 0.05$)。下同。

图 5 模拟降雨淋溶结束后不同改良措施对各土层盐基阳离子含量的影响

2.3 土壤 SAR 的变化

改良剂的添加能降低各土层的钠吸附比,与 CK 相比,FSZ、FSZ4、FSZ8 处理 SAR 在 0—20,20—40 cm 土层下降明显,下降幅度在 59.66%~79.76%,其中 FSZ8 处理下降最为明显,分别达到 79.76%(0—20 cm)和 70.23%(20—40 cm)。40—60 cm 土层,FSZ、FSZ4、FSZ8 处理 SAR 下降幅度相对较小,分别下降 32.30%,2.74%,16.16%(图 6)。此外,随着土层深度的增加,土壤 SAR 也随之增加,其中 FSZ4 和 FSZ8 在 40—60 cm 层相较于 20—40 cm 土层增加的尤为明显,分别增加 1.58,1.80 倍。

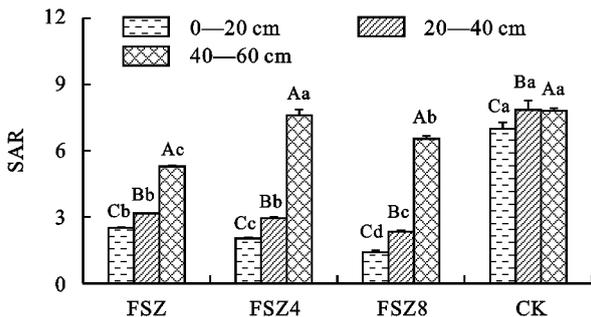


图 6 模拟降雨淋溶结束后不同改良措施对土壤 SAR 的影响

2.4 渗滤液 DOC 含量及土壤中 DOC、有机质含量变

改良剂的添加能有效降低盐碱土壤中有机碳的损失。由图 7 可知,随着淋溶次数的增加,渗滤液中 DOC 含量整体呈下降趋势。淋溶 10 次后,添加改良

剂的各处理渗滤液 DOC 累计总量显著低于 CK 处理,且 FSZ8 处理渗滤液 DOC 累计总量也显著低于 FSZ 处理。各处理渗滤液 DOC 累计总量的大小顺序为:CK>FSZ>FSZ4>FSZ8,其中 CK 为 4 270 mg/L,而 FSZ8 为 2792.46 mg/L。与 CK 相比,FSZ8 处理下 DOC 淋溶损失下降 34.60%。

淋溶结束后,FSZ、FSZ4、FSZ8 处理土壤 DOC 含量在 0—20,20—40 cm 土层显著高于 CK 处理对应土层,增幅分别为 19.90%~45.22%,40.42%~64.75%,93.96%~122.06%;而在 40—60 cm 土层却显著低于 CK 处理(图 7)。此外,试验发现土壤 DOC 含量会随着土层的加深而呈现上升趋势(除了 FSZ8),其中 CK 处理上升幅度最大,表明随着淋溶的进行,DOC 明显向下层土壤移动并积累。然而,FSZ8 在 40—60 cm 土层的 DOC 含量与 0—20 cm 相当,都低于 20—40 cm 土层。从 DOC 总量(0—60 cm)来看,FSZ8 处理最高为 140.22 mg/kg,CK 处理最低为 103.52 mg/kg,其他处理介于两者之间。

改良剂的添加有利于各土层有机质的提升(图 8)。在 0—20 cm 土层中,添加改良剂的处理有机质含量均显著高于 CK 处理,FSZ、FSZ4、FSZ8 处理有机质含量分别较 CK 处理提高 48.26%,49.43%,79.47%;而在相同处理下的不同土层中,随着土层的加深,土壤有机质含量呈现出下降趋势。

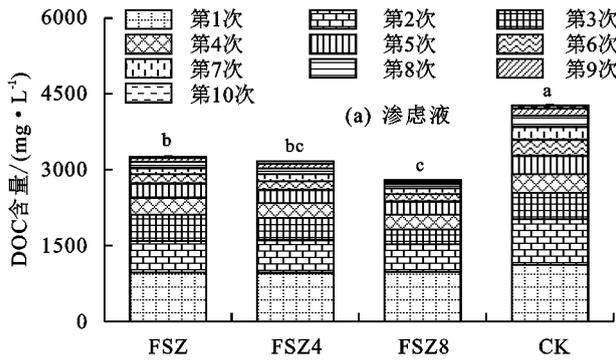


图 7 不同改良措施对渗滤液和土壤 DOC 含量的影响

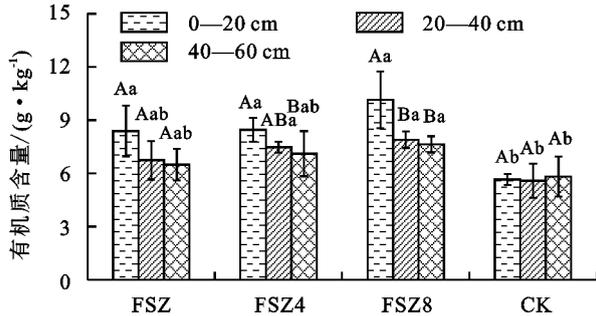
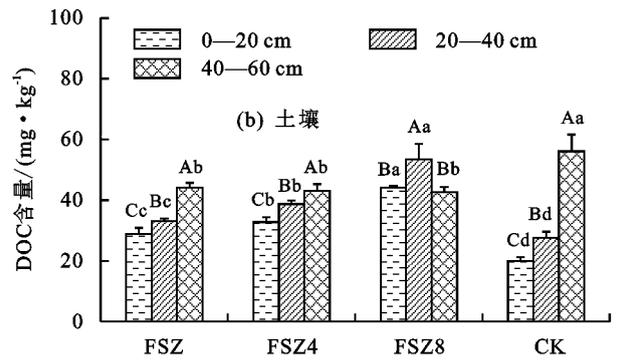


图 8 模拟降雨淋溶结束后不同改良措施对土壤有机质含量的影响

3 讨论

3.1 耐盐菌与化学复合改良剂联用对盐碱土水溶性阳离子及 SAR 的影响

本研究分析渗滤液和土壤中水溶性盐基阳离子的变化规律及分布特征,结果显示,添加改良剂能提高渗滤液 Na^+ 溶出总量,尤其是 FSZ8 处理。该现象的原因有 2 个方面:首先,脱硫石膏含有丰富的 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} ,在淋溶过程中能置换出土壤胶体中的 Na^+ ,具有明显的降碱排盐作用;其次,耐盐微生物能够释放有机酸溶解难溶性 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$,导致更多的 Ca^{2+} 被释放,进而置换出更多土壤胶体所吸附的 Na^+ ,并且通过淋溶排出土体^[25-26]。研究结果还表明,添加改良剂后,土壤中水溶性 Na^+ 含量显著降低。由于腐殖酸与改性粉煤灰具有较强的吸附能力,它们能够吸附并固定未被淋溶排出的 Na^+ ,从而促进土壤中可溶性 Na^+ 含量的降低^[27]。

本研究还发现,模拟降雨淋溶结束后,添加耐盐菌与化学复合改良剂的处理中,水溶性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 在土壤中的保留量显著高于 CK 处理。一方面电厂产生的脱硫石膏主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,并携带有 Mg^{2+} ,施入土壤中导致这些离子含量的上升^[28];另一方面,微生物可以促进土壤中难溶性钾向可溶性钾元素转变,使其在土壤中的含量上升,尤其是具有解钾能力的微生物^[29];此外,有研究^[30]表明,腐殖酸的添加也增加淋溶后土壤中 K^+ 的含量。钠吸附比指数综合反映复合改良剂的添加对土壤水溶性阳离子的影响。本

研究发现,添加耐盐菌与化学复合改良剂能同时增加土壤水溶性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的含量,并显著降低 Na^+ 的含量,进而促进 SAR 的大幅度下降,有助于缓解土壤盐碱化,从而改善土壤性状^[31]。

3.2 耐盐菌与化学复合改良剂联用对盐碱土有机碳的影响

通过比较渗滤液中 DOC 的损失量、土壤中 DOC 与有机质的含量,本研究发现,耐盐菌与化学复合改良剂的添加显著降低 DOC 的损失,提高耕层土壤 DOC 与有机质含量。土壤有机质含量的增加与腐殖酸添加有关。腐殖酸具有丰富的有机质,添加至土壤中能够显著提高有机质含量^[32]。再者,腐殖酸与促生芽孢杆菌的添加可能进一步提高土壤的生物活性,促进有机质的转化^[33]。此外,土壤中有有机、无机与微生物间的相互作用受到土壤表面电荷的影响,微生物代谢增强,从而促进土壤中有机碳的迁移。本研究发现,添加 BY-8 菌株的处理在提升有机质方面的效果优于添加 BY-4 的处理,原因可能在于前者对盐分的耐受程度大于后者,从而促进有机质的转化和形成^[34]。

4 结论

通过筛选耐盐菌,并将其与化学复合改良剂(改性粉煤灰+脱硫石膏+腐殖酸)联用改良盐碱土,本研究发现添加复合改良剂能改良盐碱土壤,其中包含微生物菌剂的处理相对较好,尤其是 FSZ8 处理效果最佳。与 CK 相比,FSZ8 能明显促进土壤中水溶性 Na^+ 的淋出;降低土壤水溶性 Na^+ 总含量与耕层 SAR;减少土壤可溶性有机碳的损失;提高耕层土壤有机质含量。本研究提供一种利用耐盐菌(BY-8)联合化学复合改良剂改良盐碱土壤的具体可行方案。

参考文献:

- [1] Lin J X, Yu D F, Shi Y J, et al. Salt-alkali tolerance during germination and establishment of *Leymus chinensis* in the Songnen Grassland of China[J]. Ecological Engineering, 2016, 95: 763-769.
- [2] Qadir M, Noble A D, Chartres C. Adapting to climate

- change by improving water productivity of soils in dry areas[J]. *Land Degradation and Development*, 2013, 24(1):12-21.
- [3] 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(3):939-953.
- [4] Rozema J, Flowers T. Crops for a salinized world[J]. *Science*, 2008, 322(5907):1478-1480.
- [5] Xie X F, Pu L J, Zhu M, et al. Linkage between soil salinization indicators and physicochemical properties in a long-term intensive agricultural coastal reclamation area, Eastern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(11):3699-3707.
- [6] Li J G, Pu L J, Han M F, et al. Soil salinization research in China: Advances and prospects[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(5):943-960.
- [7] 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.
- [8] 余荣台, 杨勇, 马湘, 等. 酸改性粉煤灰去除废水中磷酸盐的机理解析[J]. *陶瓷学报*, 2017, 38(1):82-86.
- [9] 赵永敢, 王淑娟, 李彦, 等. 脱硫石膏改良盐碱土技术发展历程与展望[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(4):735-745.
- [10] Nan J K, Chen X M, Chen C, et al. Impact of flue gas desulfurization gypsum and lignite humic acid application on soil organic matter and physical properties of a saline-sodic farmland soil in Eastern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(9):2175-2185.
- [11] 孙在金, 黄占斌, 陆兆华. 不同环境材料对黄河三角洲滨海盐碱化土壤的改良效应[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4):186-190.
- [12] 高惠敏, 王相平, 屈忠义, 等. 脱硫石膏与有机物料配施对河套灌区土壤改良及向日葵生长的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(8):85-92.
- [13] 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.
- [14] 皮婧婧, 肖兰, 赵硕祎, 等. 腐殖酸辅助解盐促生菌改良克拉玛依盐碱地土壤技术[J]. *浙江农业科学*, 2021, 62(3):600-602.
- [15] 王巍琦, 杨磊, 程志博, 等. 干旱区不同类型盐碱地土壤微生物碳源代谢活性研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(6):158-166.
- [16] Adnan M, Fahad S, Zamin M, et al. Coupling phosphate-solubilizing bacteria with phosphorus supplements improve maize phosphorus acquisition and growth under lime induced salinity stress[J]. *Plants*, 2020, 9(7):e900.
- [17] Yadav A N, Saxena A K. Biodiversity and biotechnological applications of halophilic microbes for sustainable agriculture[J]. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*, 2018, 6(1):48-55.
- [18] 姜焕焕. 耐盐碱解磷菌与磷石膏联用改良盐碱土的效果与机制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [19] 高宏. 粉煤灰微珠的硫酸改性及铅锌选矿废水吸附研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- [20] 彭喜花, 费学宁, 李汉印. 天津津河水水质分析[J]. *江南大学学报*, 2006, 5(3):345-348.
- [21] 刘萧湘. 具有植物促生活性的耐盐菌的筛选及微生物法改良盐渍化土壤初探[D]. 上海: 上海师范大学, 2016.
- [22] 周铭典, 蔡冠竟, 宁静, 等. 一株产吡啶乙酸菌的筛选、鉴定及培养条件优化[J]. *生物学杂志*, 2021, 38(2):65-69.
- [23] 崔晓亮. 核桃根际解磷、解钾、固氮菌株的筛选及分布特征研究[D]. 四川 雅安: 四川农业大学, 2009.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [25] Chaganti V N, Crohn D M. Evaluating the relative contribution of physicochemical and biological factors in ameliorating a saline-sodic soil amended with composts and biochar and leached with reclaimed water[J]. *Geoderma*, 2015, 259:45-55.
- [26] 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.
- [27] Tahir M M, Khurshid M, Khan M Z, et al. Lignite-derived humic acid effect on growth of wheat plants in different soils[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(1):124-131.
- [28] Mao Y, Li X, Dick W A, et al. Remediation of saline-sodic soil with flue gas desulfurization gypsum in a reclaimed tidal flat of southeast China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 45:224-232.
- [29] 沙月霞, 李明洋, 伍顺华, 等. 微生物菌剂拌土对盐碱地玉米茎基腐病的预防及促生效果[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(5):75-82.
- [30] 郝会军, 蔡朝阳, 张溪, 等. 腐殖酸及有机肥对土壤中钾淋溶规律的影响[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(11):197-201.
- [31] Awan S, Ippolito J A, Ullman J L. et al. Biochars reduce irrigation water sodium adsorption ratio[J]. *Biochar*, 2021, 3(1):77-87.
- [32] 韩剑宏, 孙一博, 张连科, 等. 生物炭与腐殖酸配施对盐碱土理化性质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(6):121-127.
- [33] 曾仟, 徐雪婷, 张亚见, 等. 腐殖酸和植物促生芽孢杆菌对黑麦草抗逆性及砒砂岩土壤性状的影响[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(2):208-214.
- [34] Liu M L, Wang CH, Liu X L, et al. Saline-alkali soil applied with vermicompost and humic acid fertilizer improved macroaggregate microstructure to enhance salt leaching and inhibit nitrogen losses[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 156:e103705.