

# 不同改良材料对苏打盐碱化耕地土壤 化学特性及甜菜生长的影响

田露, 郭晓霞, 苏文斌, 黄春燕, 李智, 菅彩媛, 韩康, 薛春雷

(内蒙古自治区农牧业科学院, 内蒙古呼和浩特 010031)

**摘要:** [目的] 筛选出适宜内蒙古西辽河平原区苏打盐碱化耕地的土壤改良材料, 为该区域盐碱地综合开发利用和农业可持续发展提供理论依据。[方法] 选取目前应用效果较好的有机硅肥、腐植酸肥和微生物菌肥 3 种土壤改良材料, 分析其对苏打盐碱化耕地土壤 pH 值、碱化度、全盐含量、有机质含量及甜菜生长和产量和质量的影响。[结果] ① 3 种土壤改良材料均能不同程度改善苏打盐碱化耕地土壤化学性状, 具体表现为能有效地降低土壤 pH 值、碱化度和全盐含量, 提高有机质含量。不同处理和对照的土壤 pH 值、碱化度、全盐含量和有机质含量均表现为 10—20 cm 土层大于 0—10 cm 土层; 与对照相比, 3 种土壤改良材料对土壤 pH 值、碱化度的降低幅度和对有机质的提高幅度 10—20 cm 土层大于 0—10 cm 土层, 而对土壤全盐含量的降低幅度则 0—10 cm 土层大于 10—20 cm 土层; 3 种土壤改良材料中, 以有机硅肥对土壤 pH 值、碱化度、全盐含量和有机质含量的改善效果最佳。② 与对照相比, 3 种土壤改良材料均可显著提高甜菜出苗率和存活率, 促进甜菜株高、叶面积指数和全株鲜重等生长指标的提高, 进而提高甜菜产量和质量, 其中以有机硅肥处理效果最佳; 3 种土壤改良材料虽然都不同程度地增加了甜菜的产值, 但仅有机硅肥经济效益高于对照。③ 影响苏打盐碱化耕地甜菜出苗、存活、生长、产量和质量指标的主要因子是土壤 pH 值、碱化度、全盐含量和有机质等化学特性指标。通过施用土壤改良材料, 能够对土壤化学特性起到直接调控作用, 从而有效地保证甜菜生长发育, 提高产量和质量。[结论] 综合考虑土壤特性、甜菜生长、产量和质量以及经济效益等指标, 施用有机硅肥较其他 2 种材料对苏打盐碱化耕地的改良和甜菜栽培具有较好效果。

**关键词:** 苏打盐碱化耕地; 土壤化学特性; 土壤改良材料; 甜菜; 西辽河平原

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2022)05-0008-08

**中图分类号:** S156.2, S566.3

**文献参数:** 田露, 郭晓霞, 苏文斌, 等. 不同改良材料对苏打盐碱化耕地土壤化学特性及甜菜生长的影响 [J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 8-15. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.002; Tian Lu, Guo Xiaoxia, Su Wenbin, et al. Effects of different soil amendments on soil chemical characteristics and sugar beet growth in soda salinized cultivated land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 8-15.

## Effects of Different Soil Amendments on Soil Chemical Characteristics and Sugar Beet Growth in Soda Salinized Cultivated Land

Tian Lu, Guo Xiaoxia, Su Wenbin, Huang Chunyan, Li Zhi, Jian Caiyuan, Han Kang, Xue Chunlei  
(Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Husbandry Science, Hohhot, Inner Mongolia 010031, China)

**Abstract:** [Objective] The suitable soil amendments applied to soda saline alkali cultivated land in the Xiliaohe Plain of Inner Mongolia were screened in order to provide a theoretical basis for the comprehensive development and utilization of saline alkali land and the sustainable development of agriculture in this area. [Methods] Three soil amendments (i.e., organic silicon fertilizer, humic acid fertilizer, and microbial fertilizer) were selected to analyze their effects on soil pH value, alkalinity, total salt content, organic matter content, sugar beet growth, yield, and quality of soda salinized cultivated land. [Results] ① The three soil amendments improved the soil chemical properties of soda salinized cultivated land to varying degrees. Specifically, they

**收稿日期:** 2021-12-03

**修回日期:** 2022-03-25

**资助项目:** 内蒙古自治区主席基金项目“通辽市科左中旗苏打盐碱化耕地改良技术模式研究与监测评价: 适宜盐碱地的粮食与经济作物鉴定及耐盐增产种植技术研究”(202076); 内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0060); 现代农业产业技术体系项目(CARS-170207); 内蒙古自治区草原英才工程项目

**第一作者:** 田露(1988—), 女(汉族), 山西省朔州市人, 硕士, 助理研究员, 从事作物耕作学与栽培学研究。Email: tltltl\_hi@126.com。

**通信作者:** 郭晓霞(1983—), 女(汉族), 内蒙古自治区通辽市人, 博士, 研究员, 从事作物栽培学与耕作学研究。Email: guoxiaoxia2008@126.com。

effectively reduced soil pH value, alkalinity, and total salt content, and increased organic matter content. Soil pH value, alkalinity, total salt content, and organic matter content of different treatments in the 10—20 cm soil layer were greater than that in the 0—10 cm soil layer. Compared with the control, the reduction range of soil pH value and alkalinity, and increase range of organic matter content of the three soil amendments in 10—20 cm soil layer were greater than in the 0—10 cm soil layer, while the reduction range of soil total salt content in the 0—10 cm soil layer was greater than in the 10—20 cm layer. Among the three soil amendments, organic silicon fertilizer had the greatest effect on increasing soil pH value, alkalinity, total salt content, and organic matter content. ② Compared with the control, the three soil amendments significantly increased emergence rate and survival rate of sugar beet, and increased growth indexes such as plant height, leaf area index, and whole plant fresh weight of sugar beet, thereby improving sugar beet yield and quality, and the organic silicon fertilizer showed the best effects. The three soil amendments increased the output value of sugar beet, but the economic benefit of only organic silicon fertilizer was higher than that of the control. ③ The main factors affecting the emergence, survival, growth, yield, and quality of sugar beet in soda saline alkali cultivated land were soil pH value, alkalinity, total salt content, and organic matter content. The application of soil amendments can directly regulate soil chemical characteristics, thereby effectively ensuring sugar beet growth and development, and increasing yield and quality. [Conclusion] From the comprehensive consideration of soil characteristics, sugar beet growth, yield, quality, and economic benefits, the organic silicon fertilizer was more effective in improving of soda saline alkali cultivated land and sugar beet cultivation compared with the other two soil amendments.

**Keywords:** soda salinized cultivated land; soil chemical characteristics; soil amendments; sugar beet; Xiliaohe Plain

土壤盐渍化是全世界土地治理面临的重大难题之一<sup>[1-2]</sup>。内蒙古自治区盐碱土面积占耕地面积的23.8%<sup>[3]</sup>,其中西辽河平原区盐碱化耕地面积达到 $2.61 \times 10^5$  hm<sup>2</sup>,主要分布在赤峰市、通辽市、兴安盟3个地区。该区域内盐渍化土壤类型以苏打盐碱土为主,盐分组成主要为Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaHCO<sub>3</sub>, Na<sup>+</sup>含量高,土壤胶体含量丰富,土壤盐化的过程中伴随着碱化的过程,农田土壤肥力低下<sup>[4-5]</sup>,严重制约着该区域农业生产的发展。因此,如何改良该区域苏打盐碱化耕地已成为亟待解决的问题。

近年来,国内外学者在盐碱地改良方面进行了大量研究。例如,施用改良材料调控土壤中离子的分布与组成来降低土壤pH值和碱化度、改善土壤结构、增大孔隙度从而促进作物根系对土壤中水分和养分的利用来增加作物产量<sup>[6-8]</sup>。硅元素被认为是氮、磷、钾之后的第四大元素,研究表明,有机硅肥能够促进作物生长和改善土壤环境,具有提高植物对盐胁迫的耐性<sup>[9-10]</sup>,提高植物对磷、钾等养分的利用率<sup>[11-13]</sup>,但目前关于有机硅肥的研究大都集中于其对重金属污染的调控<sup>[14-15]</sup>,对植物病害的调控等<sup>[16-17]</sup>;利用微生物菌肥治理改良盐碱地的研究不断增多,研究表明,微生物菌肥在盐碱地改良中能够有效降低土壤pH值和全盐含量<sup>[18]</sup>,增加土壤有机质含量<sup>[19]</sup>,实现土

壤质量的改善,促进作物的生长;腐植酸类物质是目前众多盐碱地改良材料中的一种,研究表明,腐植酸能够促进土壤团粒结构的形成,增加土壤通透性<sup>[20]</sup>,而且其本身作为有机肥能够增加土壤肥力<sup>[21]</sup>,活化土壤养分,提高养分利用率<sup>[22]</sup>,调控根系发育。

本文针对西辽河平原区苏打盐碱化耕地特点,选取目前应用效果和前景较好的改良材料,探究其对苏打盐碱化耕地土壤化学特性、甜菜生长以及产量和质量的影响,以期筛选出适宜的土壤改良材料,为该区域盐碱地综合开发利用和农业可持续发展提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于内蒙古自治区通辽市科左中旗三家子村(122.20 E, 43.62 N)。近20 a气象资料显示,试验地年平均气温5.5℃,最高气温40.9℃,最低气温-33.9℃。年平均降水量370 mm,降水年内分配不均,降雨量集中在7—9月,年际变化大;年平均蒸发量为2 027 mm。土壤类型以苏打盐碱土为主,0—20 cm土壤pH值9.77,碱化度21.86%,土壤全盐含量1.59 g/kg,有机质含量12.70 g/kg,有效磷含量5.63 mg/kg,速效钾含量103.25 mg/kg,土壤碱解氮55.36 mg/kg。

## 1.2 试验材料与试验设计

### 1.2.1 试验材料

①微生物菌肥:有效活菌数 $\geq 1.00 \times 10^8$  g,总养分 $\geq 15\%$ ,总N $\geq 12.0\%$ ,有机质 $\geq 20\%$ ,水分 $\leq 3.0\%$ ,选购于内蒙古阜丰生物科技有限公司。

②有机硅肥: $\text{SiO}_2$ 含量 $\geq 50\%$ ,选购于河北硅谷肥业有限责任公司。

③腐植酸肥:主要成分为腐植酸钾,选购于黑龙江丰亨生物科技有限公司。

④甜菜品种:KWS2314。

⑤种肥:甜菜专用肥(N:P:K=12%:18%:15%)。

1.2.2 试验设计 试验于2021年5—10月期间进行,采用随机区组设计,3次重复,12个小区,每个小区面积108 m<sup>2</sup>。试验设微生物菌肥(MF)、有机硅肥(SF)和腐植酸(HF)3个处理和1个对照(不施用改良材料,CK)。其中微生物菌肥施用量为1500 kg/hm<sup>2</sup>,有机硅肥施用量为750 kg/hm<sup>2</sup>,腐植酸肥施用量为1500 kg/hm<sup>2</sup>。微生物菌肥、有机硅肥和腐植酸均在播种前与种肥进行混合后撒施,旋耕入土壤,旋耕深度15—20 cm;种肥施用量为900 kg/hm<sup>2</sup>。甜菜采用手推式播种器人工播种,株距20 cm,行距60 cm,保苗密度82500株/hm<sup>2</sup>。2021年5月10日进行播种,10月4日收获。试验区的田间管理方式采用常规方式。

### 1.2.3 测定指标与方法

(1)土壤取样及理化指标的测定。甜菜收获后,按照“S”形取样法取土样。每个小区取5个点,每个点取0—10,10—20 cm 2个层次,将5个点分层混合后带回实验室阴干。

土壤pH值测定采用电位法(土水比为1:5);土壤 $\text{CO}_3^{2-}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 离子测定采用双指示剂中和滴定法;土壤 $\text{Cl}^-$ 离子测定采用硝酸银滴定法;土壤 $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{SO}_4^{2-}$ 离子测定采用EDTA滴定法;土壤 $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ 离子测定采用火焰光度计法;阳离子交换量的测定采用乙酸钠浸提火焰光度计法;交换性钠的测定用乙酸铵浸提火焰光度计法;有机质的测定采用重铬酸钾外加热法。

土壤全盐量(g/kg)为8个盐分离子质量分数(g/kg)之和。

土壤碱化度=交换性钠/阳离子交换量 $\times 100\%$

(2)甜菜出苗率和存活率的调查与统计。甜菜出苗稳定后,按照小区统计出苗数,计算出苗率。出苗率=出苗株数/播种量 $\times 100\%$ 。甜菜收获时,按照小区统计存活株数,计算成活率。成活率=存活株数/出苗株数 $\times 100\%$ 。

(3)甜菜株高、叶面积指数、植株鲜重测定。苗期、叶丛快速生长期、块根及糖分增长期、糖分积累期、收获期分别进行测定。每个小区取3个点,每个点取甜菜3株。

①株高:用卷尺测量最长叶片的高度。

②叶面积指数:以叶片基部第一个侧脉发出点作为叶片和叶柄的分界处,选每个样本有代表性的大、中、小叶片各10片,用直径4 cm的环刀在叶片尖端中脉三分之一处钻孔取样,称鲜重计算得到叶面积指数。

③植株鲜重:将甜菜植株分为叶片、叶柄、块根3个部分,称重测定鲜重。

(4)甜菜含糖率、产量和产糖量。

①含糖率:甜菜收获时,每个小区随机取15株甜菜块根,采用日本产Atago Refractometer PAL-1数字手持折射仪测定块根锤度,折算其含糖率,含糖率=PAL-1测定的锤度 $\times 80\%$ 。

②产量:每个小区选取10 m<sup>2</sup>,重复3次,采用称重法测定块根产量。

③产糖量:产糖量=产量 $\times$ 含糖率。

## 1.3 数据分析

采用Excel 2019进行数据处理和作图;采用SPASS 25.0软件进行显著性和相关性分析,其中的显著性检验使用LSD最小显著性差异法进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同改良材料对苏打盐碱化耕地土壤化学特性的影响

由表1可知,与对照相比,3种改良材料对苏打盐碱化耕地土壤化学特性均有调控作用,无论是0—10 cm还是10—20 cm土层的土壤pH值、碱化度和全盐含量均有不同程度下降,有机质含量均有不同程度增加。3种土壤改良材料中,以有机硅肥(处理SF)对土壤化学性质的改善作用最为明显,在不同层次与对照相比均表现了显著性差异( $p < 0.05$ )。

从土壤pH值看,0—10 cm和10—20 cm土层均以对照(CK)的值为最大。在0—10 cm土层,处理间表现为:MF>HF>SF,与对照相比,处理SF, HF和MF土壤pH值分别降低2.65%,1.80%和1.76%,其中处理SF与对照差异显著( $p < 0.05$ );在10—20 cm土层,处理间表现为:HF>MF>SF,与对照相比,处理SF, MF和HF的土壤pH值分别降低3.17%,2.66%和2.04%,其中处理SF和MF均与对照差异显著( $p < 0.05$ )。

从土壤碱化度看,0—10 cm和10—20 cm土层

均表现为:CK>MF>HF>SF。与对照相比,在 0—10 cm 土层,处理 SF, HF 和 MF 土壤碱化度分别降低 12.19%, 5.95% 和 3.03%, 其中处理 SF 与对照差

异显著 ( $p<0.05$ ); 在 10—20 cm 土层, SF, HF 和 MF 土壤碱化度分别降低 14.22%, 10.21% 和 6.20%, 且均与对照差异显著 ( $p<0.05$ )。

表 1 不同改良材料下苏打盐碱化耕地土壤化学特性变化

指 标	土层/cm	处 理			
		CK	MF	SF	HF
pH 值	0—10	9.45±0.10 <sup>a</sup>	9.34±0.1 <sup>ab</sup>	9.2±0.17 <sup>b</sup>	9.28±0.1 <sup>ab</sup>
	10—20	9.77±0.15 <sup>a</sup>	9.51±0.15 <sup>b</sup>	9.46±0.08 <sup>b</sup>	9.57±0.1 <sup>ab</sup>
碱化度/%	0—10	17.48±0.68 <sup>a</sup>	16.95±0.6 <sup>a</sup>	15.35±0.4 <sup>a</sup>	16.44±0.6 <sup>ab</sup>
	10—20	26.94±1.58 <sup>a</sup>	25.27±0.66 <sup>ab</sup>	23.11±0.23 <sup>b</sup>	24.19±0.35 <sup>b</sup>
全盐含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	0—10	1.46±0.08 <sup>a</sup>	1.32±0.08 <sup>ab</sup>	1.21±0.01 <sup>b</sup>	1.24±0.03 <sup>b</sup>
	10—20	1.71±0.08 <sup>a</sup>	1.69±0.09 <sup>a</sup>	1.48±0.07 <sup>b</sup>	1.58±0.03 <sup>a</sup>
有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	0—10	12.15±0.23 <sup>c</sup>	13.14±0.25 <sup>b</sup>	13.88±0.22 <sup>a</sup>	13.33±0.29 <sup>b</sup>
	10—20	14.35±0.26 <sup>c</sup>	15.77±0.29 <sup>b</sup>	16.45±0.32 <sup>a</sup>	15.87±0.28 <sup>b</sup>

注:①CK 为对照; MF 为微生物菌肥; SF 为有机硅肥; HF 为腐植酸; ②表中同一行不同小写字母表示差异达 0.05 显著水平。下同。

从土壤全盐含量看, 0—10 cm 和 10—20 cm 土层的变化趋势与土壤碱化度基本一致, 均表现为:CK>MF>HF>SF。与对照相比, 在 0—10 cm 土层, 处理 SF, HF 和 MF 土壤全盐含量分别降低 17.12%, 15.07% 和 9.59%, 其中 SF 和 HF 与对照差异显著 ( $p<0.05$ ); 在 10—20 cm 土层, SF, HF 和 MF 土壤全盐含量分别降低 13.45%, 7.60% 和 1.17%, 其中 SF 与对照差异显著 ( $p<0.05$ )。

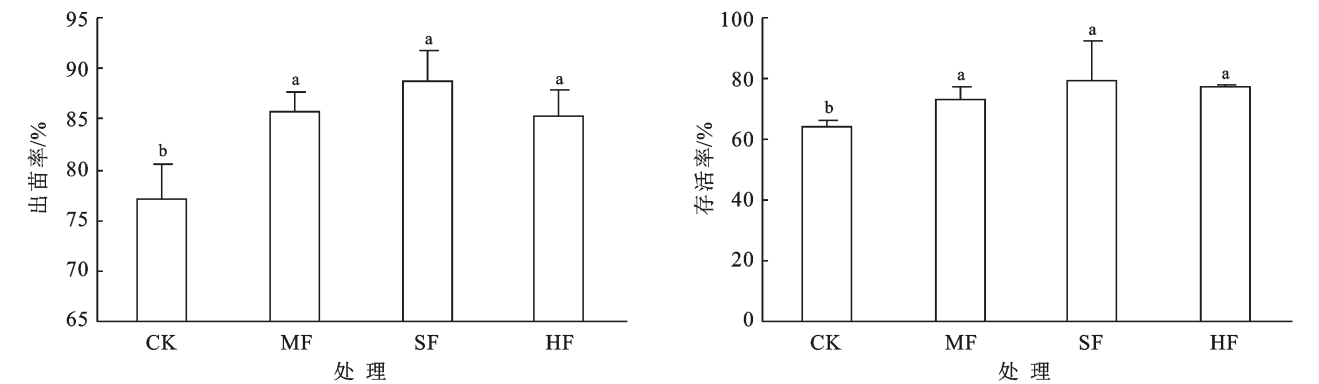
从土壤有机质含量看, 0—10 cm 和 10—20 cm 土层的变化趋势与土壤碱化度和全盐含量相反, 均表现为:SF>HF>MF>CK。与对照相比, 在 0—10 cm 土层, SF, HF 和 MF 土壤有机质含量分别提高 14.24%, 9.74% 和 8.15%, 且均与对照差异显著 ( $p<0.05$ ); 在 10—20 cm 土层, SF, HF 和 MF 土壤有机质含量分别提高了 14.63%, 10.59% 和 9.90%, 且均与对照差异显著 ( $p<0.05$ )。

不同处理和对照的土壤 pH 值、碱化度、全盐含量和有机质含量均表现为 10—20 cm 土层大于 0—10 cm

土层。与对照相比, 3 种土壤改良材料对土壤 pH 值、碱化度的降低程度和对有机质含量的提高幅度以 10—20 cm 土层大于 0—10 cm 土层, 而对土壤全盐含量的降低幅度则以 0—10 cm 土层大于 10—20 cm 土层。这是由于在甜菜整个生育期内, 随着灌溉、降雨以及甜菜根系的生长, 促使盐分和养分向下移动, 而改良材料施用后加速了该作用。

2.2 不同改良材料对苏打盐碱化耕地甜菜出苗率和存活率的影响

由图 1 可知, 与对照相比, 施用 3 种土壤改良材料后苏打盐碱地的甜菜出苗率和存活率上均得到不同程度的提高。甜菜出苗率和存活率均表现为:SF>MF>HF>CK, 3 种改良材料间差异不显著 ( $p>0.05$ )。与对照相比, 3 者出苗率和存活率分别显著 ( $p<0.05$ ) 提高了 11.67% 和 15.33%, 8.67% 和 13.00%, 8.33% 和 9.33%。可见, 有机硅肥、微生物菌肥和腐植酸肥的施用对苏打盐碱地甜菜保苗和生育期存活具有重要作用, 为提升苏打盐碱地甜菜产量和质量奠定了基础。



注:图中不同小写字母表示不同处理的差异显著。

图 1 不同处理甜菜出苗率和存活率变化



2.3 不同改良材料对苏打盐碱化耕地甜菜生长的影响

由表 2 可知,与对照相比,施用 3 种土壤改良材料后苏打盐碱地的甜菜生长状况得到了不同程度改善。各处理甜菜各个生长指标均表现为:SF>HF>MF>CK。与对照相比,处理 SF 和 MF 各生长指标均显著( $p<0.05$ )提高,甜菜株高、叶面积指数、全株鲜重、叶片鲜重、叶柄鲜重、块根鲜重分别提高了 25.61%,39.74%,32.61%,33.86%,62.65,28.56%

和 12.28%,19.43%,12.15%,18.11%,13.25%,11.40%;处理 MF 则显著提高( $p<0.05$ )了株高、全株鲜重和叶片的鲜重,分别提高了 8.30%,4.48%和 10.24%,对叶面积指数、叶柄鲜重和块根鲜重则无显著影响( $p>0.05$ )。可见,有机硅肥、微生物菌肥和腐植酸肥的施用对苏打盐碱地甜菜生长发育起到促进作用,其中以有机硅肥(处理 SF)后的效果表现更加优秀。

表 2 不同土壤改良材料施用后甜菜收获期生长指标变化

处理	株高/cm	叶面积指数	鲜重/(g·株 <sup>-1</sup> )			
			全株	叶片	叶柄	块根
CK	47.5±1.64 <sup>c</sup>	1.34±0.08 <sup>c</sup>	1 737.78±57.55 <sup>c</sup>	141.11±5.09 <sup>c</sup>	184.44±9.18 <sup>c</sup>	1 412.22±50.92 <sup>c</sup>
MF	51.44±0.84 <sup>b</sup>	1.53±0.12 <sup>bc</sup>	1 815.56±48.6 <sup>b</sup>	155.56±5.85 <sup>b</sup>	193.33±8.33 <sup>bc</sup>	1 466.67±46.67 <sup>c</sup>
SF	59.67±2 <sup>a</sup>	1.87±0.1 <sup>a</sup>	2 304.44±28.74 <sup>a</sup>	188.89±11.71 <sup>a</sup>	300±5.77 <sup>a</sup>	1 815.56±25.24 <sup>a</sup>
HF	53.33±1.53 <sup>b</sup>	1.6±0.16 <sup>b</sup>	1 948.89±60.65 <sup>b</sup>	166.67±11.79 <sup>b</sup>	208.89±8.39 <sup>b</sup>	1 573.33±41.63 <sup>b</sup>

2.4 不同改良材料对苏打盐碱化耕地甜菜产量、质量及经济效益的影响

由表 3 可知,3 种改良材料对苏打盐碱化耕地甜菜产量和质量存在不同程度的影响。甜菜含糖率表现为:SF>HF>MF>CK,与对照相比,处理 SF, HF, MF 含糖率分别显著( $p<0.05$ )提高 2.70%,1.92%,1.60%,且处理 SF 显著高于 MF 和 HF,处理 MF 和 HF 间差异不显著。甜菜产量表现为:SF>

HF>MF>CK,处理 SF, HF 显著高于对照,处理 MF 和对照间差异不显著,与对照相比,甜菜产量处理 SF, HF, MF 产量分别提高 29.54%,10.21%,7.95%,且处理 SF 显著高于处理 MF 和 HF,处理 MF 和 HF 间差异不显著。甜菜产糖量表现为:SF>HF>MF>CK,与对照相比,处理 SF, HF, MF 产产糖量分别显著提高 58.30%,27.60%,22.15%,且处理 SF 显著高于 MF 和 HF,处理 MF 和 HF 间差异不显著。

表 3 不同土壤改良材料处理苏打盐碱化耕地后甜菜产量、质量及经济效益

处理	含糖率/%	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	产糖量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	产值/(元·hm <sup>-2</sup> )	成本/(元·hm <sup>-2</sup> )	经济效益/(元·hm <sup>-2</sup> )
CK	12.17±0.38 <sup>c</sup>	53 671.27±1 947.29 <sup>c</sup>	6 531.64±360.18 <sup>c</sup>	28 445.77	18 000	10 445.77
MF	13.77±0.15 <sup>b</sup>	57 940.07±2 535.67 <sup>bc</sup>	7 978.61±427.78 <sup>b</sup>	30 708.24	21 000	9 708.24
SF	14.87±0.21 <sup>a</sup>	69 528.08±2 604.57 <sup>a</sup>	10 339.6±519.43 <sup>a</sup>	36 849.88	20 250	16 599.88
HF	14.08±0.68 <sup>b</sup>	59 149.56±2 621.60 <sup>b</sup>	8 334.07±616.31 <sup>b</sup>	31 349.27	21 000	10 349.27

注:成本计算中有有机硅肥、生物微生物菌肥和腐植酸肥价格为 2 元/kg。甜菜收购价格 530 元/t。

3 种改良材料在增加产量的同时亦使甜菜产值得到增加。处理 SF, HF 和 MF 产值分别较对照增加了 29.54%,10.21%和 7.95%,但从经济效益考虑,则仅有处理 SF 高于对照,这是由于处理 MF 和 HF 虽然增加了甜菜产量和产值,但因成本过高,导致其经济效益低于对照。由此可见,从农田种植效益的角度考虑,对土壤改良材料的选用,以施用有机硅肥(处理 SF)为最佳。

2.5 苏打盐碱化耕地土壤化学特性与甜菜生长、产量和质量指标之间相关性分析

由表 4 可知,甜菜出苗率与土壤 pH 值、碱化度、全盐含量存在显著( $p<0.05$ )负相关,与土壤有机质含量无相关关系。可见影响苏打盐碱化耕地甜菜出

苗的主要为土壤 pH 值、碱化度和全盐含量,施用改良材料通过降低土壤 pH 值、碱化度和全盐含量实现苏打盐碱化耕地出苗。甜菜存活率与土壤碱化度、全盐含量存在显著( $p<0.05$ )负相关,与甜菜产量呈极显( $p<0.01$ )著正相关,与有机质含量和甜菜含糖率呈显著( $p<0.05$ )正相关。可见,影响甜菜存活的为土壤碱化度、全盐含量和有机质含量,甜菜作为单株块根产量作物,存活率对产量和质量的贡献较大,通过施用改良材料调节土壤盐碱特性,对提高苏打盐碱化耕地甜菜产量具有重要作用。

土壤 pH 值、碱化度和全盐含量 3 个指标与甜菜株高、叶面积指数、单株叶鲜重、单株叶柄鲜重和单株块根鲜重 5 个生长指标及产量和质量指标之间存在显著

( $p<0.05$ )或极显著( $p<0.01$ )负相关关系;而土壤有机质含量则相反,与甜菜生长指标以及产量和质量指标存在显著( $p<0.05$ )或极显著( $p<0.01$ )正相关关系。

可见,苏打盐碱化耕地通过施用有机硅肥、腐植酸肥、微生物菌肥,能够对土壤化学特性起到直接调控作用,从而影响甜菜生长发育以及产量和质量的形成。

表 4 土壤化学特性与甜菜生长、产量和质量之间相关性分析

指标	ER	SR	PH	LI	LW	SW	RW	SP	SB	SS	SO	RY	SC
ER	1	0.362	0.523	0.447	0.412	0.194	0.309	-0.669 *	-0.630 *	-0.633 *	0.521	0.359	0.308
SR		1	0.483	0.414	0.468	0.534	0.561	-0.569	-0.704 *	-0.603 *	0.670 *	0.716 **	0.627 *
PH			1	0.862 **	0.929 **	0.892 **	0.937 **	-0.539	-0.763 **	-0.731 **	0.868 **	0.913 **	0.840 **
LI				1	0.782 **	0.830 **	0.839 **	-0.676 *	-0.793 **	-0.794 **	0.725 **	0.780 **	0.760 **
LW					1	0.862 **	0.898 **	-0.511	-0.827 **	-0.729 **	0.841 **	0.846 **	0.801 **
SW						1	0.967 **	-0.496	-0.774 **	-0.786 **	0.694 *	0.947 **	0.740 **
RW							1	-0.504	-0.821 **	-0.810 **	0.755 **	0.969 **	0.824 **
SP								1	0.787 **	0.766 **	-0.543	-0.533	-0.617 *
SB									1	0.865 **	-0.738 **	-0.792 **	-0.803 **
SS										1	-0.505	-0.742 **	-0.655 *
SO											1	0.775 **	0.912 **
RY												1	0.838 **
SC													1

注:ER,SR,PH,LI,LW,SW,RW,SP,SB,SS,SO,SC,RY 分别代表出苗率、成活率、株高、叶面积指数、单株叶鲜重、单株叶柄鲜重、单株块根鲜重、土壤 pH 值、土壤碱化度、土壤全盐含量、土壤有机质含量、含糖率、产量。\* \* 代表 0.01 水平极显著相关,\* 代表 0.05 水平显著相关。

3 讨论

3.1 土壤改良材料对苏打盐碱化耕地土壤化学特性的影响

前人关于硅肥、微生物菌肥和腐植酸肥对土壤 pH 值影响做了大量研究。李园星露等<sup>[23]</sup>研究表明,有机硅肥属于碱性物质,在酸性土壤中能够提高土壤 pH 值,但叶秀娟等<sup>[24]</sup>研究表明,将有机硅肥应用于土壤 pH 值为 8.2 的甜菜栽培中,土壤 pH 值在 2 a 时间平均降低 0.95 个单位。本研究结果表明,施用有机硅肥能够显著降低 0—20 cm 土层的 pH 值,这与叶秀娟等<sup>[24]</sup>研究结果相一致,但与李园星露等<sup>[23]</sup>研究结果不一致,这可能是由于施用土壤环境不一致,有机硅肥在偏酸性土壤中发挥碱性特性,产生酸碱中和反应,提高土壤 pH 值,但在碱性土壤中,能够通过 对离子的吸附作用降低土壤 pH 值。微生物菌肥和腐植酸肥属于酸性物质,施入土壤后能够发生酸碱中和反应,调节土壤酸碱度。有研究认为腐植酸肥中的腐植酸属于一种有机酸,能够起到调节土壤酸碱度的作用<sup>[25]</sup>;微生物菌肥中含有大量功能微生物,在其生命过程中能够分泌有机酸,中和土壤中碱成分,降低土壤 pH 值。本研究中施用微生物菌肥显著降低了 10—20 cm 土层土壤 pH 值,与前人研究结果相吻合,但施用腐植酸肥降低土壤 pH 值的效果不显著,这可能是由于试验周期较短导致。

土壤碱化度和全盐含量是反映盐碱特性的重要

指标。前人研究表明,有机硅肥、微生物菌肥、腐植酸肥都能不同程度地降低土壤全盐含量和土壤碱化度。研究表明硅具有通过化合或络合反应吸附土壤中部分元素的作用<sup>[26-27]</sup>,但目前关于硅降低土壤碱化度和全盐含量的报道较少,其是否是由于吸附了土壤中盐分离子而达到降低全盐含量还有待于进一步探究;腐植酸本身是一种大分子酸性有机物质,具有较强络合能力<sup>[28]</sup>,能够吸附一价阳离子,通过交换作用减少盐碱土壤中交换性钠离子含量,进而降低土壤碱化度和全盐含量<sup>[29]</sup>;微生物菌肥中微生物在生命过程中的部分次级代谢物能够与盐碱土壤中的离子进行耦合,从而降低全盐含量和碱化度<sup>[29]</sup>。本研究中,施用有机硅肥、腐植酸肥和微生物菌肥均能不同程度地降低土壤碱化度和土壤全盐含量,与前人研究结果相吻合。

苏打盐碱化耕地土壤肥力较贫瘠,有机质含量的提升是土壤改良的重要途径<sup>[30]</sup>,土壤有机质含量与土壤阳离子交换量呈正相关关系,增加有机质含量对促进土壤脱盐和抑制其返盐具有较好的效果。前人研究表明,有机硅肥、微生物菌肥、腐植酸肥施用后都能改善土壤养分状况,不同程度地提高土壤有机质含量,其中有机硅肥和腐植酸肥本身含有碳源,一方面能够直接提升有机质水平,另一方面可以激发土壤自身碳源的分解<sup>[31]</sup>;微生物菌肥中含有大量功能微生物,这些微生物能够改善土壤结构,丰富土壤中微生物群落,能够增加土壤碳、氮代谢,促进养分转化,合成部分有机成分,进而提高土壤有机质水平<sup>[32-34]</sup>。本

研究中,施用有机硅肥、腐植酸肥和微生物菌肥均能不同程度地提高土壤有机质含量,且 3 种材料均表现显著效应,这与前人研究结果相吻合,其中有机硅肥效果优于腐植酸肥和微生物菌肥。

### 3.2 土壤改良材料对苏打盐碱化耕地甜菜生长、产量和质量的影响

作物生长发育与土壤环境密切相关,苏打盐碱化耕地的显著特点是土壤中碳酸钠和碳酸氢钠的含量较高,使得土壤 pH 值、交换性钠离子含量和碱化度偏高,严重危害作物的生长。大量关于有机硅肥、腐植酸肥和微生物菌肥对作物生长发育影响的研究表明,其施用后能够促进作物根系发育<sup>[6]</sup>,进而提高光合能力,增加作物干物质积累,最终实现产量的增加和品质的提高<sup>[35-37]</sup>。关于有机硅肥、腐植酸肥和微生物菌肥在苏打盐碱地作物栽培中应用的报道中,崔曾杰等<sup>[38]</sup>研究表明苏打盐碱耕地中施用微生物菌肥能够提高水稻叶面积指数,促进光合产物的增加,进而提高产量;王倩姿等<sup>[39]</sup>研究表明在盐碱地养分投入量相同时,增施腐植酸材料可以提高玉米干物质累积量,进而提高产量;对有机硅肥的研究表明,其能够改善盐碱土玉米光合作用<sup>[40]</sup>,促进盐碱土壤中野豌豆的生长、产量和生物化学性能<sup>[41]</sup>。本研究结果表明,施用有机硅肥、腐植酸肥、微生物菌肥均能不同程度实现苏打盐碱化耕地甜菜出苗率和存活率的提高,调节甜菜出苗期和生长期内的土壤盐碱程度,降低了盐渍化对作物生长的影响,最终促进甜菜产量的增加。这与前人将有机硅肥<sup>[24]</sup>、腐植酸肥<sup>[42]</sup>和微生物菌肥<sup>[43]</sup>应用于甜菜栽培的研究结果一致。

## 4 结论

(1) 3 种土壤改良材料能不同程度地改善苏打盐碱化耕地土壤化学特性,具体表现为降低土壤 pH 值、碱化度和全盐含量,提高有机质含量。不同处理和对照的土壤 pH 值、碱化度、全盐含量和有机质含量均表现为 10—20 cm 土层大于 0—10 cm 土层。与对照相比,3 种土壤改良材料对土壤 pH 值、碱化度的降低幅度和对有机质含量的提高幅度,10—20 cm 土层大于 0—10 cm 土层,而对土壤全盐含量的降低幅度则以 0—10 cm 土层大于 10—20 cm 土层。3 种土壤改良材料中,对土壤 pH 值、碱化度、全盐含量和有机质含量的改善效果均以有机硅肥为最佳。

(2) 与对照相比,3 种土壤改良材料均可显著提高甜菜出苗率和存活率,提高甜菜株高、叶面积指数和全株鲜重等生长指标,以有机硅肥处理的效果最佳。

(3) 与对照相比,3 种土壤改良材料均能不同程

度地提高苏打盐碱化耕地甜菜产量和质量,尤其是有机硅肥的效果更佳;3 种改良材料在增加甜菜产量的同时亦使甜菜产值得到增加,但在经济效益指标上,则仅有处理 SF 大于对照。

(4) 相关分析表明,影响苏打盐碱化耕地甜菜出苗、存活、甜菜生长、产量和质量指标的主要因子是土壤 pH 值、碱化度、全盐含量和有机质等化学特性指标,通过施用有机硅肥、腐植酸肥和微生物菌肥,能够对土壤化学特性起到直接调控作用,从而有效地保证甜菜生长发育,提高产量和质量。

综合考虑土壤特性、甜菜生长、甜菜产量和质量水平以及经济效益,苏打盐碱化耕地甜菜栽培中,选用有机硅肥作为土壤改良材料具有较好效果。

### [参 考 文 献]

- [1] Kohler J, Hernández J A, Caravaca F, et al. Induction of antioxidant enzymes is involved in the greater effectiveness of a PGPR versus AM fungi with respect to increasing the tolerance of lettuce to severe salt stress [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 65 (2/3):245-252.
- [2] Xun Feifei, Xie Baoming, Liu Shasha, et al. Effect of plant growth-promoting bacteria (PGPR) and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation on oats in saline-alkali soil contaminated by petroleum to enhance phytoremediation [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(1):598-608.
- [3] 樊自立,马英杰,马映军.中国西部地区的盐渍土及其改良利用[J].干旱区研究,2001,18(3):1-6.
- [4] 徐子棋,许晓鸿,松嫩平原苏打盐碱地成因、特点及治理措施研究进展[J].中国水土保持,2018(2):54-59.
- [5] 张磊,侯云鹏,王立春.盐碱胁迫对植物的影响及提高植物耐盐碱性的方法[J].东北农业科学,2018,43(4):11-16.
- [6] Zandonadi D B, Canellas L P, Facanha A R. Indolacetic and humic acids induce lateral root development through a concerted plasmalemma and tonoplast  $H^+$  pumps activation [J]. *Planta*, 2007, 225(6):1583-1595.
- [7] Clark R B, Baligar V C. Growth of forage legumes and grasses in acidic soil amended with flue gas desulfurization products [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2003, 34(1/2):157-180.
- [8] 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.
- [9] 顾跃,赵云,姬承东.硅肥对盐胁迫下狗牙根生理生化特征的影响[J].中国草地学报,2019,41(3):30-37.
- [10] 贺月.硅对桃苗盐胁迫的缓解作用及桃园施硅效果评价

- [D]. 山东 泰安:山东农业大学,2019.
- [11] Struyf E, Conley D J. Silica: an essential nutrient in wetland biogeochemistry [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009,7(2):88-94.
- [12] Jesus L R, Batista B L, Silva Lobato A K. Silicon reduces aluminum accumulation and mitigates toxic effects in cowpea plants [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2017,39(6):1-14.
- [13] 娄金华,陈猛猛,张士荣,等.磷硅肥配施对盐渍土壤水稻生长及养分吸收的影响[J].*水土保持学报*,2020,34(4):263-269.
- [14] 彭鸥,刘玉玲,铁柏清,等.施硅对镉胁迫下水稻镉吸收和转运的调控效应[J].*生态学杂志*,2019,38(4):1049-1056.
- [15] 陈喆,铁柏清,段真玥,等.降雨和微肥在油菜环境下对重金属淋失的影响[J].*水土保持学报*,2013,27(1):141-145.
- [16] 张佑宏,张国斌,王治虎,等.施用硅肥锌肥作基肥对稻瘟病发生的影响[J].*中国农学通报*,2018,34(8):90-94.
- [17] 杨克泽,马金慧,吴之涛,等.硅肥与18%吡啶醚菌酯SC混喷对玉米茎基腐病及产量的影响[J].*农药*,2019,58(7):527-531.
- [18] 卢培娜,刘景辉,张丰屹.菌肥及腐熟秸秆还田对盐碱地燕麦土壤特性的影响[J].*北方农业学报*,2017,45(5):37-42.
- [19] 卢建男,张琼,刘铁军,等.不同改良剂对盐碱地土壤及草地早熟禾生长的影响[J].*草业科学*,2017,34(6):1141-1148.
- [20] Calvo P, Nelson L, Kloepper J W. Agricultural uses of plant biostimulants [J]. *Plant and Soil*, 2014,383(1/2):3-41.
- [21] 杨海波,陈运,侯宪文.生物腐植酸对土壤碳组分的影响[J].*中国农学通报*,2015,31(20):137-141.
- [22] Turgay O C, Karaca A, Unver S, et al. Effects of coal-derived humic substance on some soil properties and bread wheat yield [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2011,42(9):1050-1070.
- [23] 李园星露,叶长城,刘玉玲,等.硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积阻控[J].*环境科学*,2018,39(2):944-952.
- [24] 叶秀娟,孔建平,苗雨,等.新疆昌吉地区硅肥在甜菜试验中的应用[J].*农业科技通讯*,2018(5):144-147.
- [25] 曾维爱,曾敏,周航,等.腐植酸和硫酸铁配施改良偏碱烟田土壤的研究[J].*水土保持学报*,2013,27(3):170-173.
- [26] Savant N K, Korndörfer G H, Datnoff L E, et al. Silicon nutrition and sugarcane production: A review [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1999,22(12):1853-1903.
- [27] 顾明华,黎晓峰.硅对减轻水稻的铝胁迫效应及其机理研究[J].*植物营养与肥料学报*,2002,8(3):360-366.
- [28] 柴晓彤,顾金凤,毛亮,等.微生物菌肥对盐渍化土壤中盐离子及有机质含量的影响[J].*上海交通大学学报(农业科学版)*,2017,35(1):78-84.
- [29] 闫淑霞,刘春花,梁岩.腐殖酸的结构特性与应用研究进展[J].*天然产物研究与开发*,2017,29(3):511-516.
- [30] 顾鑫,任翠梅,王丽娜,等.施用腐植酸改良大庆苏打盐碱土的效应[J].*中国土壤与肥料*,2021(4):77-82.
- [31] 王训,闫飞,王永敏,等.秸秆改良剂对沙质土有机质和阳离子交换量的影响[J].*中国农学通报*,2010,26(23):224-228.
- [32] 吕殿青,张树兰,杨学云.外加碳、氮对黄绵土有机质矿化与激发效应的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2007,13(3):423-429.
- [33] Sardans J, Peñuelas J. Plant-soil interactions in Mediterranean forest and shrublands: Impacts of climatic change [J]. *Plant and Soil*, 2013,365(1/2):1-33.
- [34] 段洪斌,赵冬青,姚拓,等.施用生物菌肥对饲用玉米生长和土壤微生物数量的影响[J].*草原与草坪*,2015,35(2):54-58.
- [35] Chen Chen, Zhang Jianan, Lu Min, et al. Microbial communities of an arable soil treated for 8years with organic and inorganic fertilizers [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016,52(4):455-467.
- [36] Ijaz Ahmad, Safdar Ali, Khalid Saifullah Khan, 等.煤炭腐植酸作为土壤改良剂对土壤物理性质和小麦产量的影响[J].*腐植酸*,2016(3):26-32.
- [37] 周丽平,袁亮,赵秉强,等.不同用量风化煤腐殖酸对玉米根系的影响[J].*中国农业科学*,2019,52(2):285-292.
- [38] 崔曾杰,耿艳秋,范丽丽,等.生物菌肥对盐碱地水稻生长发育及产量的影响[J].*吉林农业科学*,2013,38(5):32-35.
- [39] 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.
- [40] Xie Zhiming, Song Ri, Shao Hongbo, et al. Silicon improves maize photosynthesis in saline-alkaline soils [J]. *The Scientific World Journal*, 2015,2015:245072.
- [41] Kumar V, Kumar P, Khan A. Optimization of PGPR and silicon fertilization using response surface methodology for enhanced growth, yield and biochemical parameters of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under saline stress [J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2020,23:101463.
- [42] 崔瑜,白如霄,李金明,等.腐植酸肥在甜菜应用效果的研究[J].*中国糖料*,2018,40(6):50-52.
- [43] 邵华伟,崔磊,许咏梅,等.滴施改良剂对新疆盐碱土改良及甜菜产量的影响[J].*中国土壤与肥料*,2018(2):49-53.