

盐土改良肥对草甸盐土的改良效果和对甜菜经济效益的影响

王君华

(山丹县农业技术推广中心, 甘肃 张掖 734000)

摘要: [目的] 研究甘肃省河西走廊盐土改良肥对草甸盐土改良效果和甜菜经济效益的影响, 为该区甜菜产业可持续发展提供技术支撑。[方法] 选择甘肃省酒泉市肃州区铎尖乡草甸盐土, 采用田间试验方法开展研究。[结果] 影响甜菜产量的原料依次是: 盐土调控剂 > 甜菜专用肥 > 有机碳肥。盐土改良肥配方组合为: 甜菜专用肥 0.0586; 盐土调控剂 0.0623; 有机碳肥 0.8791。盐土改良肥施用量与草甸盐土孔隙度、团聚体、持水量、有机质、速效氮磷钾、甜菜农艺性状、经济性状和产量之间呈显著的正相关关系, 与容重、pH 值、全盐含量之间呈显著的负相关关系。经回归统计分析, 盐土改良肥经济效益最佳施用量为 39.64 t/hm², 甜菜块根理论产量为 96.68 t/hm²。施用盐土改良肥与传统的抗盐丰盐碱土改良剂和沃丰隆盐碱土改良剂比较, 施肥利润分别增加 414.48, 946.10 元/hm²。[结论] 施用盐土改良肥, 可以改善草甸盐土理化性质, 提高酶活性和甜菜产量。

关键词: 盐土改良肥; 草甸盐土; 改土效果; 甜菜

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)05-0302-07

中图分类号: S156.4⁺2, S156.2

文献参数: 王君华. 盐土改良肥对草甸盐土的改良效果和对甜菜经济效益的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 302-308. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.051; WANG Junhua. Effects of applying solonchak-improved fertilizer to meadow solonchaks and economic efficiency of sugar beet[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 302-308. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.051

Effects of Applying Solonchak-improved Fertilizer to Meadow Solonchaks and Economic Efficiency of Sugar Beet

WANG Junhua

(*Extension Centre of Agricultural Technology in Shandan County, Zhangye, Gansu 734000, China*)

Abstract: [Objective] The effects of solonchak-improved fertilizer on meadow solonchak and economic benefit of sugar beet was researched by applying it in Hexi corridor of Gansu Province, in order to provide technical support for the sustainable development of beet industry in this area. [Methods] The study was conducted on the meadow solonchak in Huajian Town, Suzhou District, Jiuquan City, Gansu Province through field experiment. [Results] The order of raw materials impacting sugar beet yield were solonchak agent, special fertilizer of sugar beet, organic carbon fertilizer. The formula components of solonchak amendment fertilizer were as following, the special fertilizer of sugar beet was 0.0586, solonchak agent was 0.0623, organic carbon fertilizer was 0.8791. The amount of solonchak-improved fertilizer was positively correlated with indices of porosity, aggregate, water holding, organic matter, available nitrogen, phosphorus and potassium, sugar beet agronomic trait, economic trait and yield; and was negatively related with soil bulk density, pH value and total salt content. Statistical regression showed that the optimum application amount for economic benefit was 39.64 t/hm², at that application level, yield of sugar beet roots would be 96.68 t/hm². The benefits from solonchak-improved fertilizer got 414.48, 946.10 yuan/hm² increases as compared with the benefits from two traditional ameliorants named Kangyanfeng and Wofenglong. [Conclusion] The application

of solonchak-improved fertilizer can improve the physical and chemical properties of the meadow solonchaks and increase the soil enzyme activity and the yield of beet.

Keywords: solonchak amendment fertilizer; meadow solonchak; effects of meliorate soil; sugar beet

甘肃河西走廊的盐渍土分布面积为 1.21×10^6 hm^2 , 主要分布在酒泉、张掖和武威冲积平原低洼地带^[1-3]。盐渍土由于含盐量较高, 一般作物不能生长发育, 是世界上公认的荒芜土壤, 如何改良盐渍土, 这是国内外迫切需要解决的重大难题。采取科学有效的方法改良盐渍土, 可以提高盐渍土区域土地和光照资源利用率, 拓宽作物栽培领域, 改善区域生态环境条件, 保障国家粮食安全生产。有关盐渍土改良利用, 前人做了大量的研究工作。欧、美、日本、埃及等国家采取暗管排水, 降低地下水临界深度, 脱盐率达到 85% 以上。澳大利亚、美国等国家, 在于旱缺雨和水源不足的地区, 采用喷灌或滴灌的办法, 使土壤保持适宜的水分, 以稀释土壤中的盐分, 抑制土壤返盐, 防止地下水位上升, 结果作物生长良好。匈牙利在地表施用化学药品和深翻以打破紧实的碱土层, 用少量钙盐与种子混播, 提高了出苗率^[4]。国内学者张丹等^[5]、谷思玉等^[6]、杨宇等^[7]、高玉山等^[8]、王宇等^[9]采用生物废弃物、生物有机肥、生化黄腐酸、石膏、硫酸铝等化学措施改良盐渍土, 秦嘉海等^[10-11]采取生物措施种植碱茅草和鲁梅克斯改良盐渍土, 取得了明显的改土效果。有关盐土改良肥对甘肃河西走廊草甸盐土改良效果的研究未见文献报道。作者拟针对河西走廊盐土存在的含盐量高, 有机质和大量元素及微量元素含量低, 土壤板结, 通透性能差等特性, 采用酸碱中和原理、离子交换原理、土壤结构改良原理和平衡施肥原理, 将自主研发的甜菜专用肥、盐土调控剂和有机碳肥按比例合成盐土改良肥, 进行田间验证试验, 以期对盐土改良肥的改土效果作出科学的评价。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

1.1.1 试验地概况 试验于 2012—2016 年在甘肃省酒泉市肃州区铎尖乡漫水滩村草甸盐土上进行^[12], 地下水埋藏深度为 1.62 m, 其剖面形态特征是: 0—20 cm 耕作层, 棕灰色, 轻壤质土, 小块状结构; 20—35 cm 犁底层, 灰棕色, 轻壤, 片状结构, 有煤屑, 碎砖片等侵入体; 35—68 cm 心土层, 黄灰色, 中壤质土, 块状结构; 68—112 cm 底土层, 黄棕色, 重壤质土, 柱状结构, 有大量黄棕色锈纹锈斑, 0—20 cm 土层含有机质 10.12 g/kg, 碱解氮 28.07 mg/kg, 速效磷 5.02 mg/kg, 速效钾 129.76 mg/kg, 有效锌 0.42 mg/kg, pH 值 8.34, 全盐 3.24 g/kg。代表性

盐生植物是: 冰草 (*Agropyron cristatum*)、芨芨草 (*Achnatherum splendens*)、盐爪爪 (*Kalidium foliatum*)、盐角草 (*Salicornia europaea*)、花花柴 (*Karelinia caspica*)、盐蒿 (*Artemisia halodendron*)、怪柳 (*Tamarix chinensis*)、滨藜 (*Atriplex fera*)、盐生草 (*Halogeton glomeratus*)、罗布麻 (*Apocynum venetum*)。

1.1.2 参试材料 尿素 (N 46%) ; 磷酸二铵 (N 18%, P_2O_5 46%) ; 硫酸钾 (K_2O 50%) ; 硫酸锌 (Zn 23%) ; 硼酸 (B 17.50%) ; 钼酸铵 (MO 54.30%) ; 石膏粉 (Ca 22.50%, S 20.70%) ; 硫磺 (S 95%) ; 硫酸亚铁 (Fe 19.00%) ; 硫酸铝 (Al_2O_3 15.90%) ; 腐熟牛粪 (有机质 36.00%, 全氮 0.32%, 全磷 0.25%, 全钾 0.16%, 粒径 1~5 mm) ; 腐熟羊粪 (有机质 38.30%, 全氮 0.01%, 全磷 0.22%, 全钾 0.53%, 粒径 1~5 mm) ; 腐熟鸡粪 (有机质 42.77%, 全氮 1.031%, 全磷 0.41%, 全钾 0.72%, 粒径 1~5 mm) ; 沼渣 (有机质 26.42%, 全氮 1.25%, 全磷 1.90%, 全钾 1.33%, 粒径 1~5 mm) ; 生物菌肥 (有效活菌数 10 亿个/g) ; 甜菜专用肥 (硫酸钾、尿素、磷酸二铵、硫酸锌、硼酸、钼酸铵风干重量比按 0.507 5 : 0.308 2 : 0.151 1 : 0.024 2 : 0.006 0 : 0.003 0 混合, 含 N 14.52%, P_2O_5 6.95%, K_2O 25.38%, B 0.11%, Zn 0.56%, MO 0.16%) ; 生物有机碳肥 (腐熟牛粪、腐熟羊粪、沼渣、腐熟鸡粪、生物菌肥风干重量比按 0.400 0 : 0.320 0 : 0.200 0 : 0.078 0 : 0.002 0 混合, 含有机质 38.64%, N 0.79%, P_2O_5 0.44%, K_2O 1.14%, 粒径 1~5 mm) ; 盐土调控剂 (石膏粉、硫磺、硫酸亚铁、硫酸铝风干重量比按 0.920 2 : 0.036 8 : 0.024 0 : 0.018 0 混合, 含 Ca 20.71%, S 22.56%, Fe 0.46%, Al_2O_3 0.29%) ; 沃丰隆盐碱土改良剂 (N 0.23%, K_2O 4.32%, Ca 18.32%, Fe 2.56%, 河北德强生物科技有限公司产品) ; 抗盐丰盐碱土改良剂 (N 1.32%, P_2O_5 2.47%, K_2O 1.64%, Ca 35.42%, S 15.34%, Fe 0.78%, 北京禾源草业开发有限公司产品) ; 盐土改良肥 (甜菜专用肥、盐土调控剂、有机碳肥风干重量比按 0.058 6 : 0.062 3 : 0.879 1 混合, 含有机质 34.58%, N 1.61%, P_2O_5 0.80%, K_2O 0.24%, B 0.006%, Zn 0.03%, MO 0.009%, Ca 1.24%, S 1.20%, Fe 0.03%, Al_2O_3 0.02%) ; 甜菜品种为张甜 201, 由甘肃省张掖市农业科学研究院选育。

1.2 试验方法

1.2.1 试验处理

(1) 盐土改良肥配方筛选。2012年5月8日选择甜菜专用肥、盐土调控剂和有机碳肥为3种原料,每种原料设计3个梯度施用量,按正交表 $L_9(3^4)$ 设计9种盐土改良肥^[13](表1),按表1称取括号内各种原料混合均匀,按试验小区面积分别称好每个处理施用量,撒施地表灌水后浅耕,每个小区单独收获,将小区产量折合成 hm^2 产量,采用正交试验分析原料间的极差(R)和 T 值,确定盐土改良肥配方。

(2) 盐土改良肥改土效果研究。①盐土改良肥最佳施用量研究。2013—2014年5月8日,依据试验一筛选的配方,将甜菜专用肥、盐土调控剂和有机碳肥风干重量比按0.0587:0.0612:0.8801合成盐土改良肥,将合成的盐土改良肥施用量梯度设计为0.00(CK),10.00,20.00,30.00,40.00,50.00,60.00 t/hm^2 共7个处理,以处理1为CK(对照),每个处理重复3次,随机区组排列。②不同种类盐碱土改良剂改土效果对比试验。2015—2016年5月8日,在投入成本相等的条件下(12 014.00元/ hm^2),试验共设计4个处理:处理1,对照(不施任何改良剂);处理2,沃丰隆盐碱土改良剂施用量7.59 t/hm^2 ;处理3,抗盐丰盐碱土改良剂施用量为6.50 t/hm^2 ;处理4,盐土改良肥施用量40.00 t/hm^2 。每个处理重复3次,随机区组排列。

1.2.2 种植方法 小区面积32 m^2 (8 $\text{m}\times$ 4 m),小区四周筑埂,埂宽30 cm ,高35 cm ,盐碱土改良剂、盐土改良肥在播种前撒施地表,灌水浅耕,2011—2016每年的5月8日播种,播种深度1.5 cm ,株距24 cm ,行距50 cm ,每个小区保苗267株。

1.2.3 灌水方法 每个试验小区为一个支管单元,在支管单元入口安装闸阀、压力表和水表,在甜菜沟内安装1条薄壁滴灌带,滴头间距24 cm ,流量4.65 $\text{L}/(\text{m}\cdot\text{h})$,每个支管单元压力控制在4 903 MPa ,分别在甜菜播种后、播种15 d 后、生长盛期、块根膨大期各滴灌1次,每个小区灌水量相等,每次灌水2.36 m^3 。

1.2.4 样品采集方法 甜菜收获时,在试验小区中间4行按顺序连续采集30株,测定叶丛高度、根体长度、根直径和单株块根重,取平均数进行统计分析,每个试验小区单独收获,将小区产量折合成 hm^2 产量进行统计分析。甜菜收获后在试验小区内按对角线布置5个样品采集点,采集0—20 cm 耕作层土样5 kg ,用四分法带回1 kg 混合土样,风干15 d ,过1 mm 筛供室内化验分析,其中土壤容重、土壤团聚体用环刀采集原状土,未进行风干。

1.2.5 测定指标与方法 甜菜根直径采用游标卡尺法测定。土壤容重采用环刀法测定;孔隙度采用计算法求得; $>0.25\text{mm}$ 团聚体测定采用干筛法(具体方法是:采集长10 cm ,宽10 cm ,厚度20 cm 的土柱,剥离受采样刀具影响的土柱边面,放在饭盒内运回室内,沿土壤的自然结构将原状土剥成小土块,并剔去粗根和小石块,土样摊平风干15 d ,称取100 g 风干土5份,放置在孔径0.25 mm 的土筛中,人工筛1 min 后,采用天平称取 $>0.25\text{mm}$ 团聚体质量,每个样品重复6次,取平均数);有机质采用重铬酸钾法;碱解氮采用扩散法测定;速效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定;速效钾采用火焰光度计法测定;全盐测定采用电导法(具体方法是:在室内将分析纯氯化钠配制为0.01,0.05,0.10,0.15,0.20,0.25,0.30,0.35,0.40,0.45,0.50,0.55,0.60,0.65,0.70,0.75,0.80,0.85,0.90,1.00%系列浓度,用DDS-11型电导仪测定电导率,以盐浓度为纵坐标,电导率为横坐标,绘制标准曲线,将测定的样品电导率在标准曲线查得盐浓度,再乘样品稀释倍数得到样品全盐含量); pH 值采用电位法(5:1水土比浸提);饱和持水量按公式=(面积 \times 总孔隙度 \times 土层深度)求得;微生物数量采用稀释平板法^[14-15];脲酶测定采用靛酚比色法;蔗糖酶测定采用3,5-二硝基水杨酸比色法;磷酸酶测定采用磷酸苯二钠比色法;过氧化氢酶测定采用滴定法;多酚氧化酶测定采用碘量滴定法^[16]。

1.2.6 数据处理方法 差异显著性采用DPS 10.0统计软件分析,多重比较,LSR检验法。依据经济效益最佳施用量计算公式 $x_0 = [(p_x/p_y) - b]/2c$ 求得盐土改良肥最佳施用量(x_0)^[17-18],依据肥料效应回归方程式 $y = a + bx + cx^2$,求得盐土改良肥最佳施用量时的甜菜理论产量(y)^[19]。

2 结果与分析

2.1 盐土改良肥配方筛选

2012年9月30日甜菜收获后测定数据可以看出(表1),盐土改良肥原料间的效应(R)是 $B > A > C$,说明影响甜菜产量的原料依次是:盐土调控剂($R = 92.89$) $>$ 甜菜专用肥($R = 83.83$) $>$ 有机碳肥($R = 43.36$)。比较各原料不同水平的 T 值可以看出, $T_{A1} > T_{A3} > T_{A2}$,说明甜菜专用肥不要超过2.40 t/hm^2 ; $T_{B3} > T_{B2} > T_{B1}$,说明随着盐土调控剂施用量梯度的增加,甜菜产量增加,盐土调控剂适宜施用量一般为2.55 t/hm^2 ; $T_{C3} > T_{C1}$ 和 T_{C2} ,说明随着有机碳肥施用量梯度的增加,甜菜产量在增加,有机碳肥适宜施用量为36.00 t/hm^2 。从各原料的 T 值可以看出,原

料间最佳组合为 A₁ 甜菜专用肥 2.40 t/hm², B₃ 盐土调控剂 2.55 t/hm², C₃ 有机碳肥 36.00 t/hm², 即甜菜专用肥、盐土调控剂和有机碳肥风干重量比按 0.058 6 : 0.062 3 : 0.879 1 混合, 得到盐土改良肥。

表 1 L₉(3³) 正交试验分析

试验处理	A(甜菜专用肥)	B(盐土调控剂)	C(有机碳肥)	产量/(t·hm ⁻²)
1	(2.40)1	(0.85)1	(12.00)1	70.21 ^{bb}
2	(2.40)1	(1.70)2	(24.00)2	66.13 ^{cb}
3	(2.40)1	(2.55)3	(36.00)3	96.57 ^{aa}
4	(4.80)2	(0.85)1	(24.00)2	23.21 ^{ee}
5	(4.80)2	(1.70)2	(36.00)3	55.27 ^{dc}
6	(5.80)2	(2.55)3	(12.00)1	70.60 ^{bb}
7	(7.20)3	(0.85)1	(36.00)3	52.03 ^{cc}
8	(7.20)3	(1.70)2	(12.00)1	48.94 ^{dd}
9	(7.20)3	(2.55)3	(24.00)2	71.17 ^{bb}
T ₁	232.91	145.45	189.75	—
T ₂	149.08	170.34	160.51	554.13(T)
T ₃	172.14	238.34	203.87	—
R	83.83	92.89	43.36	—

注:括号内数据为试验设计施肥量(t/hm²);括号外数据为正交试验编码值。

2.2 不同剂量盐土改良肥对草甸盐土改土效果和甜菜效益的影响

2.2.1 对物理性质和饱和持水量的影响 连续定点

试验 2 a 后,于 2014 年 9 月 30 日甜菜收获后采集耕作层 0—20 cm 土样测定结果可以看出,随着盐土改良肥施用量梯度的增加,草甸盐土容重在降低,总孔隙度、团聚体和饱和持水量在递增(表 2)。

盐土改良肥施用量 60 t/hm²,与 CK 比较,容重降低 18.12%,差异极显著($p < 0.01$);总孔隙度、团聚体和饱和持水量分别增加 18.88%,28.17%和 23.28%,差异极显著($p < 0.01$)。经相关分析,盐土改良肥施用量与容重之间呈显著的负相关关系,与总孔隙度、团聚体和饱和持水量之间呈显著的正相关关系,相关系数(R)分别为-0.978 8,0.978 8,0.995 3,0.979 0。

2.2.2 对化学性质及有机质和速效养分影响

随着盐土改良肥施用量梯度的增加,草甸盐土 pH 值和全盐在降低,有机质和速效氮磷钾在递增(表 2)。盐土改良肥施用量 60 t/hm²,与 CK 比较,pH 值降低 8.73%,差异显著($p < 0.05$);全盐降低 38.21%,差异极显著($p < 0.01$);有机质、碱解氮、速效磷和速效钾分别增加 61.98%,45.06%,76.64%和 30.61%,差异极显著($p < 0.01$)。经相关分析,盐土改良肥施用量与 pH 值和全盐之间呈显著的负相关关系,与有机质、碱解氮、速效磷和速效钾之间呈显著的正相关关系,相关系数(R)分别为-0.990 2,-0.953 0,0.943 6,0.988 1,0.977 1,0.984 5。

表 2 不同剂量盐土改良肥对草甸盐土理化性质和有机质及速效氮磷钾的影响

盐土改良肥施用量/(t·hm ⁻²)	容重/(g·cm ⁻³)	总孔隙度/%	>0.25 mm 团聚体/%	饱和持水量/(t·hm ⁻²)	pH 值	全盐/(g·kg ⁻¹)	有机质/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)
0(CK)	1.49 ^{aA}	43.77 ^{eB}	27.87 ^{eE}	875.40 ^{cC}	8.48 ^{aA}	28.87 ^{aA}	15.36 ^{gD}	39.32 ^{dD}	7.15 ^{eE}	124.21 ^{gC}
10.00	1.45 ^{aA}	45.28 ^{dB}	29.09 ^{dD}	905.60 ^{bB}	8.34 ^{bA}	26.83 ^{bA}	17.71 ^{fC}	45.21 ^{cC}	7.54 ^{eE}	134.93 ^{fB}
20.00	1.42 ^{aB}	46.42 ^{dB}	30.51 ^{dD}	928.40 ^{bB}	8.23 ^{cA}	25.22 ^{bA}	19.38 ^{eC}	47.76 ^{dC}	8.18 ^{dD}	139.45 ^{eB}
30.00	1.34 ^{bB}	49.43 ^{cB}	32.86 ^{cC}	988.60 ^{bB}	8.16 ^{dA}	22.95 ^{cB}	20.43 ^{dB}	49.96 ^{dB}	9.03 ^{cC}	143.17 ^{dB}
40.00	1.28 ^{cC}	51.69 ^{bA}	32.95 ^{cC}	1033.80 ^{aA}	8.04 ^{eA}	19.19 ^{dB}	21.97 ^{cB}	51.62 ^{cB}	9.37 ^{cC}	151.87 ^{cA}
50.00	1.24 ^{cC}	53.21 ^{aA}	34.02 ^{bB}	1064.20 ^{aA}	7.89 ^{fA}	17.16 ^{eB}	23.86 ^{bA}	55.41 ^{bA}	10.14 ^{bB}	158.19 ^{bA}
60.00	1.22 ^{cC}	53.96 ^{aA}	36.58 ^{aA}	1079.20 ^{aA}	7.74 ^{gA}	17.84 ^{eB}	24.88 ^{aA}	57.04 ^{aA}	12.63 ^{aA}	162.23 ^{aA}

注:同列数据不同大小写字母分别表示在 0.01 和 0.05 水平上差异显著。下同。

2.2.3 对农艺性状及经济性状和产量的影响 连续定点

试验 2 a 后,于 2014 年 9 月 30 日甜菜收获后测定数据可知,随着盐土改良肥施用量梯度的增加,甜菜农艺性状及经济性状和产量在递增(表 3)。盐土改良肥施用量 60 t/hm²,与 CK 比较,叶丛高度、根体长度、根直径、单株块根重和块根产量分别增加 35.89%,54.69%,63.14%,60.81%和 60.88%,差异极显著($p < 0.01$)。经相关分析,盐土改良肥施用量与叶丛高度、根体长度、根直径、单株块根重和块根产量之间呈显著的正相关关系,相关系数(R)分别为

0.807 3,0.892 8,0.920 4,0.925 8,0.925 6。

2.2.4 盐土改良肥经济效益最佳施用量的确定

随着盐土改良肥施用量梯度的增加,边际利润在递增(表 3)。盐土改良肥施用量 40 t/hm² 时,边际利润为 94.00 元/hm²,当盐土改良肥施用量超过 40 t/hm² 时,边际利润出现负值。将表 3 盐土改良肥施用量与甜菜块根产量间的关系采用肥料效应回归方程 $y = a + bx + cx^2$ 拟合,得到的回归方程是:

$$y = 61.560 0 + 0.913 6 x - 0.000 7 x^2 \quad (1)$$

对回归方程进行显著性测验的结果表明回归方

程拟合良好。盐土改良肥价格(P_x)为 300.35 元/t, 2013—2014 年甜菜块根市场平均收购价(P_y)为 350.00 元/t, 将(P_x)、(P_y)、回归方程的系数 b 和 c , 代入经济效益最佳施用量计算公式 $x_0 = [(P_x/P_y) - b]/2c$,

求得盐土改良肥经济效益最佳施用量(x_0)为 39.64 t/hm², 将 x_0 代入(1)式, 求得甜菜块根理论产量(y)为 96.68 t/hm², 回归分析结果与田间试验处理 5 盐土改良肥施用量 40 t/hm² 基本吻合(表 3)。

表 3 不同剂量盐土改良肥对甜菜农艺性状及经济性状和经济效益的影响

盐土改良肥施用量/(t·hm ⁻²)	叶丛高度/cm	根体长度/cm	根直径/cm	单株块根重(kg/株)	块根产量/(t·hm ⁻²)	边际产量/(t·hm ⁻²)	边际产值/(元·hm ⁻²)	边际成本/(元·hm ⁻²)	边际利润/(元·hm ⁻²)
0(CK)	41.71 ^{eB}	17.17 ^{eE}	5.29 ^{dB}	0.74 ^{eE}	61.56 ^{eE}	—	—	—	—
10.00	49.07 ^{dA}	20.20 ^{dD}	6.37 ^{cB}	0.85 ^{dD}	70.75 ^{dD}	9.19	3 216.50	3 003.50	213.00
20.00	52.21 ^{cA}	22.45 ^{cC}	7.08 ^{bB}	0.96 ^{cC}	79.84 ^{cC}	9.09	3 181.50	3 003.50	178.00
30.00	54.37 ^{bA}	24.66 ^{bB}	7.78 ^{bB}	1.07 ^{bB}	88.75 ^{bB}	8.91	3 118.50	3 003.50	115.00
40.00	56.05 ^{aA}	26.24 ^{aA}	8.37 ^{aA}	1.17 ^{aA}	97.60 ^{aA}	8.85	3 097.50	3 003.50	94.00
50.00	56.11 ^{aA}	26.29 ^{aA}	8.54 ^{aA}	1.19 ^{aA}	98.83 ^{aA}	1.23	430.50	3 003.50	-2 573.00
60.00	56.68 ^{aA}	26.56 ^{aA}	8.63 ^{aA}	1.19 ^{aA}	99.04 ^{aA}	0.21	73.50	3 003.50	-2 930.00

注:价格(元/t);尿素 2 000;磷酸二铵 4 000;硫酸钾 3 500;硫酸锌 4 000;硼酸 4 000;钼酸铵 5 000;牛粪 40;羊粪 60;沼渣 40;鸡粪 80;生物菌肥 4 000;石膏粉 1 000;硫磺 1 100;硫酸亚铁 3 500;硫酸铝 1 050;甜菜专用肥 3 132.85(硫酸钾、尿素、磷酸二铵、硫酸锌、硼酸、钼酸铵风干重量比按 0.507 5 : 0.308 2 : 0.151 1 : 0.024 2 : 0.006 0 : 0.003 0 混合)盐土调控剂 1 063.58(石膏粉、硫磺、硫酸亚铁和硫酸铝风干重量比按 0.920 2 : 0.036 8 : 0.024 0 : 0.018 0 混合);有机碳肥 57.44(腐熟牛粪、腐熟羊粪、沼渣、腐熟鸡粪和生物菌肥风干重量比按 0.400 0 : 0.320 0 : 0.200 0 : 0.078 0 : 0.002 0 混合)盐土改良肥 300.35(甜菜专用肥、盐土调控剂和有机碳肥风干重量比按 0.058 6 : 0.062 3 : 0.879 1 混合);2013—2014 年甜菜块根市场平均收购价 350。

2.3 不同种类盐土改良剂对草甸盐土性质和经济效益的影响

2.3.1 对物理性质的影响

连续定点试验 2 a 后,于 2016 年 9 月 30 日甜菜收获后采集耕作层 0—20 cm 土样测定结果可知,不同种类盐土改良剂对草甸盐土容重由大到小的变化顺序依次为:对照>沃丰隆盐碱土改良剂>抗盐丰盐碱土改良剂>盐土改良肥,总孔隙度和团聚体由大到小的变化顺序依次为:盐土改良肥>抗盐丰盐碱土改良剂>沃丰隆盐碱土改良剂(表 4)。施用盐土改良肥与抗盐丰盐碱土改良剂比较,容重降低 2.33%,差异不显著($p>0.05$);与沃丰隆盐碱土改良剂比较,容重降低 8.69%,差异显著($p<0.05$)。施用盐土改良肥与抗盐丰盐碱土改良剂比较,总孔隙度增加 2.20%,差异不显著($p>0.05$);与沃丰隆盐碱土改良剂比较,总孔隙度增加 9.45%,差异显著($p<0.05$)。施用盐土改良肥与抗盐丰盐碱土改良剂比较,团聚体增加 6.38%,差异显著($p<0.05$),与沃丰隆盐碱土改良剂比较,团聚体增加 27.98%,差异极显著($p<0.01$)。

2.3.2 对化学性质的影响

不同种类盐土改良剂对草甸盐土 pH 值和全盐由大到小的变化顺序与容重变化一致(表 4)。施用盐土改良肥与抗盐丰盐碱土改良剂和沃丰隆盐碱土改良剂比较, pH 值分别降 1.46%和 2.52%,差异不显著($p>0.05$)。施用盐土改良肥与抗盐丰盐碱土改良剂比较,全盐降低 5.50%,差异显著($p<0.05$);与沃丰隆盐碱土改良剂

比较,全盐降低 28.97%,差异极显著($p<0.01$)。不同种类盐土改良剂对草甸盐土脱盐率由大到小的变化顺序依次为:盐土改良肥>抗盐丰盐碱土改良剂>沃丰隆盐碱土改良剂。盐土改良剂脱盐率为 35.71%,与抗盐丰盐碱土改良剂和沃丰隆盐碱土改良剂比较,脱盐率分别增大 1.12, 3.76 倍。

2.3.3 对微生物数量的影响

不同种类盐土改良剂对草甸盐土细菌和放线菌由大到小的变化顺序依次为:盐土改良肥>抗盐丰盐碱土改良剂>沃丰隆盐碱土改良剂(表 4)。施用盐土改良肥与抗盐丰盐碱土改良剂比较,细菌增加 6.60%,差异显著($p<0.05$);与沃丰隆盐碱土改良剂比较,细菌增加 14.14%,差异极显著($p<0.01$)。施用盐土改良肥与抗盐丰盐碱土改良剂和沃丰隆盐碱土改良剂比较,放线菌分别增加 26.47%和 34.38%,差异极显著($p<0.01$)。

2.3.4 对酶活性的影响

不同种类盐土改良剂对草甸盐土酶活性由大到小的变化顺序与微生物数量变化一致(表 4)。施用盐土改良肥与抗盐丰盐碱土改良剂比较,蔗糖酶增加 2.14%,差异不显著($p>0.05$),与沃丰隆盐碱土改良剂比较,蔗糖酶增加 15.81%,差异极显著($p<0.01$)。施用盐土改良肥与抗盐丰盐碱土改良剂和沃丰隆盐碱土改良剂比较,脲酶分别增加 10.74%和 16.52%;磷酸酶分别增加 11.54%和 52.63%,差异极显著($p<0.01$)。施用盐土改良肥与抗盐丰盐碱土改良剂比较,多酚氧化酶增加 3.26%,差异不显著($p>0.05$),与沃丰隆盐碱土改良剂比较,多酚氧化酶增加 15.85%,差异极显著($p<0.01$)。

表 4 不同种类改良剂对草甸盐土理化性质及微生物和酶活性的影响

试验处理	容重/ (g·cm ⁻³)	总孔隙 度/%	>0.25 mm 团聚体/%	pH 值	全盐/ (mg·kg ⁻¹)	脱盐率/ %	细菌/ (10 ⁷ ·g ⁻¹)	放线菌/ (10 ⁷ ·g ⁻¹)	蔗糖酶/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	脲酶/ (mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)	磷酸酶/ (g·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	多酚氧化酶/ (ml·g ⁻¹)
对照(不施改良剂)	1.49 ^{aA}	43.77 ^{cC}	16.87 ^{dC}	8.48 ^{aA}	28.87 ^{aA}	—	0.70 ^{dB}	0.47 ^{dC}	2.30 ^{cC}	0.75 ^{dD}	0.17 ^{dD}	0.56 ^{cC}
沃丰隆盐碱土改良	1.38 ^{bB}	47.92 ^{bB}	24.23 ^{cB}	8.31 ^{bA}	26.13 ^{bB}	9.49	0.99 ^A	0.64 ^{cB}	3.29 ^{bB}	1.15 ^{cC}	0.19 ^{cC}	0.82 ^{bB}
抗盐丰盐碱土改良剂	1.29 ^{cC}	51.32 ^{aA}	29.15 ^{bA}	8.22 ^{cA}	19.64 ^{cC}	31.97	1.06 ^{bA}	0.68 ^{bB}	3.73 ^{aA}	1.21 ^{bB}	0.26 ^{bB}	0.92 ^{aA}
盐土改良肥	1.26 ^{cC}	52.45 ^{aA}	31.01 ^{aA}	8.10 ^{dA}	18.56 ^{dC}	35.71	1.13 ^{aA}	0.86 ^{aA}	3.81 ^{aA}	1.34 ^{aA}	0.29 ^{aA}	0.95 ^{aA}

2.3.5 对甜菜经济效益的影响 2016年9月30日甜菜收获时测定结果可知,不同处理甜菜块根产量由大到小的变化顺序依次为:盐土改良肥>抗盐丰盐碱土改良剂>沃丰隆盐碱土改良剂>对照(表5)。施用

盐土改良肥与抗盐丰盐碱土改良剂和沃丰隆盐碱土改良剂比较,甜菜块根产量分别增加 1.43% 和 3.33%;施肥利润分别增加 414.48,946.10 元/hm²,肥料投资效率分别增加 0.02 和 0.07 元/元。

表 5 不同种类改良剂对甜菜经济效益的影响

试验处理	块根产量/ (t·hm ⁻²)	增产量/ (t·hm ⁻²)	增产值/ (元·hm ⁻²)	施肥成本/ (元·hm ⁻²)	施肥利润/ (元·hm ⁻²)	肥料投资效率 (元/元)
对照(不施改良剂)	51.84	—	—	—	—	—
沃丰隆盐碱土改良	94.68	42.84	12 866.99	12 014.00	852.99	0.07
抗盐丰盐碱土改良剂	96.45	44.61	13 398.61	12 014.00	1 384.61	0.12
盐土改良肥	97.83	45.99	13 813.09	12 014.00	1 799.09	0.14

注:价格(元/t),沃丰隆盐碱土改良 1 584.00;抗盐丰盐碱土改良剂 1 848.00;盐土改良肥 300.35(甜菜专用肥、盐土调控剂和有机碳肥风干重量比按 0.058 6 : 0.062 3 : 0.879 1 混合);2015—2016 年甜菜块根市场平均收购价 300.35。

3 讨论与结论

将自主研发的甜菜专用肥、盐土调控剂和有机碳肥按比例合成盐土改良肥,利用盐土调控剂中的硫磺、硫酸亚铁、硫酸铝释放出的 SO₄²⁻ 中和草甸盐土的碱性,降低 pH 值;盐土调控剂中的硫酸铝和石膏中的 Al³⁺ 和 Ca⁺ 置换草甸盐土胶体表面吸附的 Na⁺,使 Na⁺ 随灌溉水带到土壤深处,迅速解除 Na⁺ 对植物根系的毒害作用。盐土改良肥中的有机碳肥含有丰富的有机质,施用盐土改良肥后,疏松了土壤,增大了孔隙度,降低了容重,有效的改善了盐土的物理性质。有机碳肥在土壤微生物的作用下合成土壤腐殖质^[20],促进了草甸盐土团粒结构的形成,对协调土壤水肥气热具有重要的意义,腐殖质的吸水率大,施用盐土改良肥后持水量随之增大;有机碳肥含有植物生长发育必需的氮、磷、钾、锌、硼和钼元素,促进了草甸盐土微生物和甜菜的生长发育,提高了草甸盐土酶的活性。盐土改良肥中的甜菜专用肥是按照甜菜对养分的吸收比例和草甸盐土的供肥水平配制的,解决了草甸盐土氮、磷、钾、锌、硼和钼元素含量低的疑难问题。将甜菜专用肥、盐土调控剂和有机碳肥按比例合成的盐土改良肥,将盐土调控剂的调控作用,有机碳肥的改土作用,甜菜专用肥的营养作用融为一体,有效的解决了河西走廊草甸盐土含盐量高,有机质和营养元素

含量低,土壤板结,通透性能差,作物产量低而不稳的瓶颈问题。在甘肃省河西走廊的草甸盐土上,连续 2 a 施用盐土改良肥,没有对土壤产生不良的影响,而是有效的改善了草甸盐土理化性质和生物学性质,提高了草甸盐土酶活性和甜菜的产量。

研究表明:不同剂量的盐土改良肥施用量与草甸盐土孔隙度、团聚体、持水量、有机质、速效氮磷钾、甜菜农艺性状、经济性状和产量呈显著的正相关关系,与草甸盐土容重、pH 值、全盐含量呈显著的负相关关系,经回归统计分析,盐土改良肥经济效益最佳施用量为 39.64 t/hm²,甜菜理论产量为 96.68 t/hm²。不同种类盐碱土改良剂对草甸盐土容重、pH 值和全盐由大到小的变化顺序依次为:对照>沃丰隆盐碱土改良剂>抗盐丰盐碱土改良剂>盐土改良肥;孔隙度、团聚体、细菌、放线菌、酶活性和甜菜块根产量由大到小的变化顺序依次为:盐土改良肥>抗盐丰盐碱土改良剂>沃丰隆盐碱土改良剂>对照。在投入成本相等的条件下,施用盐土改良肥与抗盐丰盐碱土改良剂和沃丰隆盐碱土改良剂比较,施肥利润分别增加 414.48,946.10 元/hm²,肥料投资效率分别增加 0.02 和 0.07 元/元。

[参 考 文 献]

[1] 金自学,张芬琴.河西走廊水资源变化对环境生态的影

- 响[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 37-40.
- [2] 赵松乔. 中国干旱半干旱地区自然资源研究[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 89-95.
- [3] 秦嘉海, 吕彪. 河西土壤与合理施肥[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2001.
- [4] 王晓洋, 陈效民, 李孝良, 等. 不同改良剂与石膏配施对滨海盐渍土的改良效果研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 128-132.
- [5] 张丹, 王力华, 孔涛, 等. 生物废弃物对滨海盐碱土改良效果[J]. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3289-3296.
- [6] 谷思玉, 耿泽铭, 汪睿, 等. 不同配比生物有机肥对盐渍土改良效果的分析[J]. 东北农业大学学报, 2014, 45(7): 26-30.
- [7] 杨宇, 金强, 卢国政, 等. 生化黄腐酸土壤改良剂对菜田盐碱土壤理化性质的影响[J]. 北方园艺, 2010(5): 45-46.
- [8] 高玉山, 朱知运, 毕亚莉. 石膏改良苏打盐碱上田间定位试验研究[J]. 吉林农业科学, 2003, 28(6): 26-31.
- [9] 王宇, 韩兴, 赵兰坡, 等. 硫酸铝对苏打盐碱上的改良作用研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 50-53.
- [10] 秦嘉海, 吕彪. 种植碱茅草改良河西走廊草甸盐土的研究[J], 土壤通报, 1990, 21(2): 57-59.
- [11] 秦嘉海. 鲁梅克斯对草甸盐土改土培肥效应研究[J]. 草业科学, 2004, 21(6): 25-27.
- [12] 秦嘉海, 吕彪. 河西土壤与合理施肥[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2001: 150-155.
- [13] 明道绪. 田间试验与统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 185-188.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 科学技术出版社, 1978: 110-218.
- [15] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析法[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 106-208.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [17] 浙江农业大学. 植物营养与肥料[M]. 北京: 中国农业出版社, 1988: 268-269.
- [18] 陈伦寿, 李仁岗. 农田施肥原理与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 1983: 185-186.
- [19] 于秀林, 任雪松. 多元统计分析[M]. 北京: 中国统计出版社, 1999: 166-170.
- [20] 陆欣. 土壤肥科学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2004: 50-52.

(上接第 301 页)

- [5] 环境保护部. HJ610-2016, 环境影响评价技术导则: 地下水环境[S]. 环境保护部, 2016.
- [6] 孙从军, 韩振波, 赵振, 等. 地下水数值模拟的研究与应用进展[J]. 环境工程, 2013, 31(5): 9-13, 17.
- [7] 董亮, 朱荫湄, 胡勤海, 等. 应用 DRASTIC 模型评价西湖流域地下水污染风险[J]. 应用生态学报, 2002, 13(2): 217-220.
- [8] Sophocleous M, Ma Tainshing. A decision support model to assess vulnerability to salt water intrusion in the great bend prairie aquifer of Kansas[J]. Groundwater, 1998, 36(3): 476-483.
- [9] Napolitano P. GIS for aquifer vulnerability assessment in the Piana Campana, Southern Italy, using the DRASTIC and SINTACS methods[D]. Netherlands: ITC, Enschede, 1995: 172.
- [10] Rosén L, Wladis D, Ramaekers D. Risk and decision analysis of groundwater protection alternatives on the European scale with emphasis on nitrate and aluminium contamination from diffuse sources [J]. Journal of Hazardous Materials, 1998, 61(1): 329-336.
- [11] Blumberga M. Risk assessment of the skede landfill in Liepaja, Latvia Stockholm[J]. Waste Management & Research, 2000, 89(6): 458-466.
- [12] 王建飞, 纪华. 非正规垃圾填埋场地下水污染风险评价分级方法研究[J]. 工程勘察, 2010(S1): 791-796.
- [13] 王俊杰, 何江涛, 陆燕, 等. 地下水污染风险评价中特征污染物量化方法探讨[J]. 环境科学, 2012, 33(3): 771-776.
- [14] 杨彦, 于云江, 王宗庆, 等. 区域地下水污染风险评价方法研究[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 653-661.
- [15] 中华人民共和国地质矿产部. GB/T14848-93, 地下水质量标准[S]. 地质矿产部地质环境管理司, 1993.
- [16] 姚文锋. 基于过程模拟的地下水脆弱性研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
- [17] 刘增超. 简易垃圾填埋场地下水污染风险评价方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [18] 刘增超, 董军, 何连生, 等. 基于过程模拟的地下水污染风险评价方法研究[J]. 中国环境科学, 2013, 33(6): 1120-1126.
- [19] 张韵, 龚继文, 程艳茹, 等. 基于 Visual Modflow 的某化工园区地下水污染预测[J]. 地下水, 2016, 38(2): 88-90.