

功能性盐土改良肥对河西走廊草甸盐土的改土效应

谢晓蓉¹, 刘金荣², 王引权¹, 耿广琴¹, 王惠珍¹

(1. 甘肃中医药大学, 甘肃 兰州 730020; 2. 兰州大学 草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020)

摘要: [目的] 解决河西走廊盐土存在的“旱、涝、盐、瘦”等疑难问题, 为改良河西走廊盐土提供理论依据。[方法] 采用酸碱中和原理、离子交换原理、土壤结构改良方法, 将自主研发的盐碱调控剂、有机活性肥和甘草专用肥按比例合成功能性盐土改良肥, 进行田间验证试验, 以便对功能性盐土改良肥的改土效应作出科学的评价。[结果] 功能性盐土改良肥最佳配方组合为: 盐碱调控剂: 有机活性肥: 甘草专用肥为 0.072 4: 0.905 1: 0.022 5。功能性盐土改良肥施用量与草甸盐土总孔隙度、团聚体、持水量、阳离子交换能力(CEC)、有机质、速效氮磷钾、甘草农艺性状和根鲜重呈显著正相关关系, 与容重、pH 值和全盐含量呈显著的负相关关系。功能性盐土改良肥最佳施用量为 24.95 t/hm², 甘草鲜根理论产量(y)为 13.45 t/hm²。不同种类盐碱土改良剂对草甸盐土容重、pH 值、全盐和真菌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>功能性盐土改良肥; 总孔隙度、团聚体、细菌、放线菌和酶活性由大到小的变化顺序依次为: 功能性盐土改良肥>抗盐丰盐碱土改良剂>沃丰隆盐碱土改良剂>对照。施用功能性盐土改良肥与对照比较, 容重、pH 值、全盐和真菌分别降低 13.38%, 7.91%, 39.82% 和 55.56%; 总孔隙度、团聚体和甘草根鲜重增加 15.42%, 56.36% 和 21.62%; 细菌、放线菌、蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和多酚氧化酶分别增加 60.26%, 84.62%, 65.23%, 79.52%, 68.42% 和 69.35%。[结论] 在甘肃省河西走廊草甸盐土上施用功能性盐土改良肥, 可以有效改善草甸盐土理化性质和生物学性质, 提高土壤酶活性和持水量。

关键词: 功能性盐土改良肥; 草甸盐土; 改土效应

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)03-0067-08

中图分类号: SI56.4⁺2, SI56.2

文献参数: 谢晓蓉, 刘金荣, 王引权, 等. 功能性盐土改良肥对河西走廊草甸盐土的改土效应[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 67-74. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.00.012; Xie Xiaorong, Liu Jinrong, Wang Yinquan, et al. Effect of functional solonchak improvement fertilizer on saline soil improvement in meadow of Hexi Corridor[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 67-74. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.012

Effect of Functional Solonchak Improvement Fertilizer on Saline Soil Improvement in Meadow of Hexi Corridor

XIE Xiaorong¹, LIU Jinrong², WANG Yinquan¹, GENG Guangqin¹, WANG Huizhen¹

(1. University of Chinese Medicine in Gansu Lanzhou, Gansu Province, 730020, China;

2. Grassland Agricultural Science and Technology College of Lanzhou University, Lanzhou, Gansu Province, 730020, China)

Abstract: [Objective] To solve problems of drought, waterlogging, salination and infertility in salt soil and provide theoretical basis for the improvement of the saline soil in Hexi Corridor. [Method] Based on the principle of acid and alkali neutralization, ion exchange and the soil structure improvement method, we mixed in proportion of self-developed saline control agent, organic fertilizer and special fertilizer for liquorice, and carried out the field test experiments, evaluated the effect of mixed fertilizer on saline soil improvement. [Results] The fertilizer formula with the best functional improvement to saline soil was in the weight ratio: 0.072 4: 0.905 1: 0.022 5 for salinity control agent, organic fertilizer, and special fertilizer for liquorice, respectively. The application amount of the functional improvement fertilizer was significantly and positively

收稿日期: 2016-05-28

修回日期: 2016-07-11

资助项目: 甘肃中医药大学引进人才科研启动项目“甘草在旱盐交叉胁迫下的适应机理研究”(2305137503); 甘肃省自然科学基金项目(1506RJZA047)

第一作者: 谢晓蓉(1967—), 女(汉族), 甘肃省张掖市人, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为植物抗性与生态生理。E-mail: gszyxxr@163.com。

related to the total porosity of the meadow solonchak, the aggregate, water holding capacities, cation exchange capacity(CEC), organic matters, available NPK, licorice agronomic characters and the fresh weight of root and were negatively related to the bulk density, pH value and the salt content. The best application amount was 24.95 t/hm², the theoretical yield of the licorice fresh root(y) was 13.45 t/hm². The effect of different saline soil conditioners on bulk density, pH value, total salt and fungal changed as control>Wofenglong saline soil improver>salt abundant saline soil improvement fertilizer>functional improvement fertilizer. The effects on the total porosity, the aggregate, bacteria, actinomyces and enzyme activity changes as follows: functional improvement fertilizer>salt abundant saline soil improver>Wofenglong saline soil improver>control. Compared with the control, the functional improvement fertilizer reduced bulk density, pH value, total salt and fungi respectively by 13.38%, 7.91%, 39.82% and 55.56%, and increased the total porosity, the aggregate and liquorice root fresh weight respectively by 15.42%, 56.36% and 21.62%. Bacteria, actinomyces, sucrase, urease, phosphatase and polyphenol oxidase increased by 60.26%, 84.62%, 65.23%, 79.52%, 68.42% and 69.35%, respectively. [Conclusion] The application of functional improvement fertilizer in the meadow solonchak could effectively improve the physical, chemical and biological properties, and increase the soil enzyme activity and the water holding capacity of the meadow solonchak on the Hexi Corridor in Gansu Province.

Keywords: functional solonchak improved fertilizer; meadow solonchak; soil amelioration effect

甘肃河西走廊盐土分布面积为 1.21×10^6 hm², 主要分布在武威、张掖、酒泉的冲积平原低洼带、河阶地和低洼碟形凹地上^[1-2], 盐土类型是有草甸盐土、沼泽盐土、干旱盐土和残余盐土^[3], 盐分类型是 NaCl, CaCl₂, MgCl₂, Na₂SO₄, CaSO₄, MgSO₄, NaHCO₃, Ca(HCO₃)₂, Mg(HCO₃)₂, Na₂CO₃, CaCO₃, MgCO₃, 各种盐类对植物的毒害效应依次为 Na₂CO₃>NaHCO₃>NaCl>CaCl₂>MgSO₄>Na₂SO₄。目前, 随着人口逐渐增多, 土地日趋减少, 开发利用荒芜的盐碱地资源, 不仅可以拓宽作物栽培领域, 改善生态环境条件, 而且可以提高粮食总产量, 缓解粮食危机。有关盐碱土改良剂的研究前人做了大量的工作^[5-12], 但功能性盐土改良肥对河西走廊草甸盐土改土效应研究尚未见文献报道, 因此, 研究开发具有本区特色的盐土改良肥, 对于保障国家耕地面积和粮食安全生产具有十分重要的意义。本文拟针对河西走廊盐土存在的“旱、涝、盐、瘦”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, 将自主研发的盐碱调控剂、有机活性肥和甘草专用肥按比例合成功能性盐土改良肥, 进行田间验证试验, 以便对功能性盐土改良肥的改土效应作出科学的评价。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

1.1.1 试验地概况 试验于 2010—2015 年在甘肃省酒泉市肃州区铎尖乡漫水滩村进行, 土壤类型是草甸盐土, 成土母质是冲积物, 地下水埋藏深度为 0.8~1.20 m, 其剖面形态特征是: 0—20 cm 草根层, 棕灰色,

轻壤质土, 小块状结构; 20—35 cm 灰棕色, 轻壤质土, 片状结构; 35—68 cm 柱状结构, 有大量黄棕色锈纹锈斑, 土壤潮湿。0—20 cm 土层含有机质 10.33 g/kg, 碱解氮 28.64 mg/kg, 速效磷 5.12 mg/kg, 速效钾 132.41 mg/kg, 有效锌 0.42 mg/kg, 有效铜 0.10 mg/kg, pH 值 8.34, 全盐 3.30 g/kg, 代表性盐生植物是: 碱蓬(*Suaeda glauca*)、盐角草(*Salicorcia europaeal*)、花花柴(*Karelinia Caspica*)、盐蒿(*Artemisia Halodendrom*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、罗布麻(*Apocynum Venetum*)、碱茅草(*Puccinellia distans*)。

1.1.2 试验材料 CO(NH₂)₂, 含 N 46%; (NH₄)₂HPO₄, 含 N 18%, P₂O₅ 46%; K₂SO₄, 含 K₂O 50%; ZnSO₄·7 H₂O, 含 Zn 23%; 腐熟牛粪, 含有机质 24.35%, 全氮 0.32%, 全磷 0.25%, 全钾 0.16%, 粒径 1~2 mm; 生物菌肥有效活菌数 ≥ 20 亿个/g, 粒径 1~2 mm; 硫酸铝(Al₂(SO₄)₃), 含 Al₂O₃ 15.90%; 硫磺, 含 S 95%; 石膏粉, 含 Ca 22.50%, S 20.70%; 盐碱调控剂(自制), 硫酸铝、硫磺、石膏粉重量比按 0.445 3 : 0.504 2 : 0.050 5 混合, 含 Al₂O₃ 7.08%, S 47.90%, Ca 1.14%。有机活性肥(自制): 腐熟牛粪、生物菌肥重量比按 0.998 6 : 0.001 4 混合, 含有机质 24.32%, 有效活菌数 ≥ 2.80 × 10⁶ 个/g。甘草专用肥(自制): CO(NH₂)₂, (NH₄)₂HPO₄, K₂SO₄, ZnSO₄·7 H₂O 重量比按 0.120 0 : 0.666 7 : 0.160 0 : 0.053 3 混合, 含 N 17.52%, P₂O₅ 30.67%, K₂O 8.00%; Zn 1.23%; 沃丰隆盐碱土改良剂, 河北德强生物科技有限公司; 抗盐丰盐碱土改良剂, 北京禾源草业开发有限公司产品。

1.2 试验方法

1.2.1 试验处理 试验 1:功能性盐土改良肥最佳配方筛选。2010—2011 年 4 月 30 日选择盐碱调控剂、有机活性肥、甘草专用肥为 3 个因素,选择正交表 $L_9(3^3)$ 设计试验^[13],则每个因素有 3 个水平,共 9 个处理(表 1),按表 1 中用量制成 9 种功能性盐土改良肥。

表 1 $L_9(3^3)$ 正交试验设计表

试验处理	A (盐碱调控剂)	B (有机活性肥)	C (甘草专用肥)
1	1(0.60)	2(45.00)	1(0.28)
2	2(1.20)	1(22.50)	3(0.84)
3	3(1.80)	3(67.50)	2(0.56)
4	1(0.60)	1(22.50)	2(0.56)
5	2(1.20)	3(67.50)	3(0.84)
6	3(1.80)	2(45.00)	1(0.28)
7	1(0.60)	3(67.50)	3(0.81)
8	2(1.20)	2(45.00)	1(0.28)
9	3(1.80)	1(22.50)	2(0.56)

注:括号内数据是施用量(t/hm^2);括号外数据是正交试验编码值。下同。

试验 2:功能性盐土改良肥最佳施用量研究。2012—2013 年 4 月 30 日,根据试验 1 筛选的最佳功能性盐土改良肥配方,将盐碱调控剂、有机活性肥、甘草专用肥重量比按 0.072 4 : 0.905 1 : 0.022 5 混合,经室内化验分析,含有机质 00.04%,含 N 0.39%, P_2O_5 0.69%, K_2O 0.18%;Zn 0.03%, Al_2O_3 0.54%,S 3.47%,Ca 0.08%,有效活菌数 ≥ 253.42 万个/g。将功能性盐土改良肥施用量梯度设计为 0(CK),5,10,15,20,25,30,35 t/hm^2 8 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。

试验 3:不同种类盐碱土改良剂改土效应比较试验。2014—2015 年 4 月 30 日,在投入成本相等的条件下(5 544 元/ hm^2),试验共设计 4 个处理:处理 1,对照(不施改良剂);处理 2,沃丰隆盐碱土改良剂施用量 3.50 t/hm^2 ;处理 3,抗盐丰盐碱土改良剂施用量为 3.00 t/hm^2 ;处理 4,功能性盐土改良肥施用量为 25 t/hm^2 。每个试验处理重复 3 次,随机区组排列。

1.2.2 种植方法 试验小区面积为 36.40 m^2 (8 m \times 3.3 m),小区四周筑埂,埂宽 30 cm,高 35 cm,每个试验处理的功能性盐土改良肥在甘草种植前施入 0—20 cm 土层,灌水第 7 d 后浅耕种植,种植时间为 2 010~2 015 每年的 4 月 30 日,将直径 1.5 cm 的根茎截成 10—15 cm 的小段,每段 1~2 个芽,按株距 30 cm,行距 40 cm,深度 15 cm 开沟,将剪好的根茎

节平摆沟底覆土压实,每个小区种植 6 行,每小区保苗 160 株,定植后分别在每年的 6 月 30 日和 7 月 30 日结合灌水追施尿素 0.30 t/hm^2 。定植后每隔 30 d 灌水 1 次,每个小区灌水量相等。

1.2.3 测定指标与方法 甘草收获时在试验小区内按照对角线采样方法,确定 5 个样品采集点,每个点连续采集 10 株,共采集 50 株测定甘草主根长、主根粗、单株根鲜重和根鲜重。茎粗采用游标卡尺法。每个试验小区单独收获,将小区根鲜重折合成 hm^2 产草量进行统计分析。甘草收获后,分别在试验小区内按对角线布置 5 个点,每个点采集 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(土壤容重、田间持水量和微生物测定用环刀采用原状土,未进行风干)。土壤容重测定采用环刀法;孔隙度测定采用计算法; > 0.25 mm 团聚体测定采用干筛法;田间持水量测定采用威尔科克斯法;全盐测定采用电导法^[14];有机质测定采用重铬酸钾法;碱解氮测定采用扩散法;速效磷测定采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法;速效钾测定采用火焰光度计法;pH 值测定采用 5 : 1 水土比浸提,用 pH-2F 数字 pH 计测定;总持水量按公式(土壤总持水量 = 面积 \times 总孔隙度 \times 土层深度)求得^[15];微生物数量测定采用稀释平板法;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];边际产量按公式(每增加一个单位肥料用量时所得到的产量减前一个处理的产量)求得;边际产值按公式(边际产量 \times 产品价格)求得;边际成本按公式(边际施肥量 \times 肥料价格)求得;边际利润按公式(边际产值减边际成本)求得;边际施肥量按公式(后一个处理施肥量减前一个处理施肥量)求得^[17]。

1.2.4 数据处理方法 土壤理化性质、有机质和速效养分、甘草主根长、主根粗、单株根鲜重和根鲜重采用相关分析法;差异显著性采用 DPS 10.0 统计软件分析,多重比较,LSR 检验法。依据最佳施用量计算公式 $x_0 = [(p_x/p_y) - b]/2c$ 求得功能性盐土改良肥最佳施用量(x_0)^[18-19],依据 $y = a + bx + cx^2$ 回归方程,求得功能性盐土改良肥最佳施用量时的甘草产草量(y)^[20]。

2 结果与分析

2.1 功能性盐土改良肥最佳配方筛选

2.1.1 功能性盐土改良肥因素间的(R)效应 连续定点试验 2 a 后,于 2011 年 9 月 30 日甘草收获后测

定数据采用正交试验分析可知,不同因素对甘草根鲜重的效应(R)是: $A>C>B$,说明影响甘草根鲜重效应依次是:盐碱调控剂($R=12.04$)>甘草专用肥($R=8.68$)>有机活性肥($R=7.40$)。

2.1.2 功能性盐土改良肥各因素不同水平的 T 值效应 比较各因素不同水平的 T 值可以看出, $T_{A_3}>T_{A_2}>T_{A_1}$,说明随着盐碱调控剂施用量梯度的增加,甘草根鲜重在增加,盐碱调控剂适宜用量一般为 1.80 t/hm^2 ; $T_{B_1}>T_{B_2}>T_{B_3}$,说明有机活性肥最大施用量不要超过 22.50 t/hm^2 ; $T_{C_2}>T_{C_1}>T_{C_3}$,说明甘草根鲜重随着甘草专用肥施用量梯度的增大而增加,当甘草专用肥施用量超过 0.56 t/hm^2 ,甘草根鲜重又随着甘草专用肥施用量梯度的增大而降低。

2.1.3 功能性盐土改良肥原料最佳组合 从各因素的 T 值可以看出,因素间最佳组合是: $A_3B_1C_2$ (即盐碱调控剂 1.80 t/hm^2 ;有机活性肥 22.50 t/hm^2 ;甘草专用肥 0.56 t/hm^2),将盐碱调控剂、有机活性肥、甘草专用肥重量比按 $0.072\ 4:0.905\ 1:0.022\ 5$ 混合,得到功能性盐土改良肥配方(表 2)。

2.2 功能性盐土改良肥施用量对草甸盐土理化性质和持水量的影响

2.2.1 对容重和总孔隙度的影响 于 2013 年 9 月 30 日甘草收获后测定数据进行回归分析可知,功能性盐土改良肥施用量与草甸盐土容重呈负相关,与总孔隙度呈正相关,相关系数(R)分别为 $-0.978\ 8, 0.978\ 9$ 。功能性盐土改良肥施用量 35.00 t/hm^2 ,与对照(CK)比较,容重降低 17.48% ,总孔隙度增加 20.51% ,差异极显著($p<0.01$)。究其原因是功能性盐土改良肥中的有机活性肥含有丰富的有机质,使草甸盐土疏松,降低了容重,增大了孔隙度(表 3)。

表 3 功能性盐土改良肥施用量对草甸盐土物理性质和持水量的影响

功能性盐土改良肥施用量/($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	容重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	总孔隙度/%	>0.25 mm 团聚体/%	总持水量/($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	田间持水量/%
0	1.43 ^{aD}	46.03 ^{hB}	20.01 ^{eC}	920.75 ^{hB}	12.78 ^{gB}
5	1.39 ^{bC}	47.55 ^{gB}	20.36 ^{eC}	951.00 ^{gB}	14.20 ^{fA}
10	1.34 ^{cC}	49.43 ^{fB}	22.87 ^{fC}	988.60 ^{fB}	15.10 ^{eA}
15	1.31 ^{dC}	50.57 ^{eB}	25.42 ^{eB}	1011.40 ^{eB}	16.42 ^{dA}
20	1.25 ^{eB}	52.83 ^{dA}	28.61 ^{dA}	1056.60 ^{dA}	17.10 ^{cA}
25	1.22 ^{fB}	53.96 ^{cA}	30.52 ^{cA}	1078.20 ^{cA}	18.03 ^{bA}
30	1.20 ^{gB}	54.72 ^{bA}	32.52 ^{bA}	1094.40 ^{bA}	18.55 ^{bA}
35	1.18 ^{hA}	55.47 ^{aA}	34.21 ^{aA}	1109.40 ^{aA}	19.54 ^{aA}

2.2.3 对 pH 值及全盐和 CEC 的影响 由表 4 可知,功能性盐土改良肥施用量与草甸盐土 pH 值和

表 2 正交试验分析结果

试验处理	A (盐碱调控剂)	B (有机活性肥)	C (甘草专用肥)	甘草根鲜重 (t/hm^2)
1	1(0.60)	2(45.00)	1(0.28)	9.67 ^{cB}
2	2(1.20)	1(22.50)	3(0.84)	12.09 ^{dA}
3	3(1.80)	3(67.50)	2(0.56)	12.73 ^{bA}
4	1(0.60)	1(22.50)	2(0.56)	11.84 ^b
5	2(1.20)	3(67.50)	3(0.84)	12.36 ^{bA}
6	3(1.80)	2(45.00)	1(0.28)	12.26 ^{bA}
7	1(0.60)	3(67.50)	3(0.81)	5.00 ^{dC}
8	2(1.20)	2(45.00)	1(0.28)	11.57 ^{bA}
9	3(1.80)	1(22.50)	2(0.56)	13.56 ^{aA}
T_1	26.51	37.49	33.50	
T_2	36.02	33.50	38.13	(T)107.54
T_3	38.55	30.09	29.45	
极差(R)	12.04	7.40	8.68	
主次顺序		A>C>B		
最优水平	A ₃	B ₁	C ₂	
最优组合		A ₃ B ₁ C ₂		

注:同列大写英文字母不同表示处理间差异达到 $p<0.01$ 显著水平,小写英文字母不同表示处理间差异达到 $p<0.05$ 显著水平。下同。

2.2.2 对团聚体和持水量的影响 由表 3 可知,功能性盐土改良肥施用量与草甸盐土团聚体及总持水量和田间持水量呈正相关,相关系数(R)分别为 $0.991\ 9, 0.979\ 4, 0.986\ 2$ 。

功能性盐土改良肥施用量 35.00 t/hm^2 ,与对照(CK)比较,团聚体及总持水量和田间持水量分别增加 70.96% , 20.48% 和 52.89% ,差异极显著($p<0.01$)。究其原因功能性盐土改良肥中的有机活性肥,在土壤中合成腐殖质,腐殖质的最大吸水率可以超过 500% [21],因而提高了草甸盐土持水量(表 3)。

全盐呈负相关,相关系数(R)分别为 $-0.982\ 76$ 和 $-9\ 871$ 。功能性盐土改良肥施用量 35.00 t/hm^2 ,与

对照(CK)比较, pH 降低 9.17%, 差异显著 ($p < 0.05$)。究其原因一是功能性盐土改良肥中的有机活性肥在分解过程中产生了部分的有机酸, 二是功能性盐土改良肥中的硫磺是一种极强酸性物质, 因而降低了草甸盐土的酸碱度。功能性盐土改良肥施用量 35.00 t/hm², 与对照(CK)比较, 全盐降低 49.70%, 差异极显著 ($p < 0.01$)。分析这一结果产生的原因是功能性盐土改良肥中的高价 Al³⁺ 置换了土壤胶体吸附的盐基离子, 使其处于游离状态随灌溉水将盐分淋溶。功能性盐土改良肥施用量与草甸盐土 CEC 呈正相关, 相关系数(R)为 0.860 0。功能性盐土改良肥施用量 35.00 t/hm², 与对照(CK)比较, CEC 增加 64.17%, 差异极显著 ($p < 0.01$)。分析这一结果产生的原因, 是功能性盐土改良肥中的有机活性肥在土壤中合成腐殖质, 腐殖质的官能团 COOH 解离出 H⁺ 离子和 COO⁻ 离子^[22], COO⁻ 离子吸附了土壤中的阳离子, 而提高了草甸盐土的 CEC(表 4)。

2.3 功能性盐土改良肥施用量对草甸盐土有机质和速效氮磷钾的影响

由表 4 可知, 功能性盐土改良肥施用量与草甸盐土有机质和速效氮磷钾呈正相关, 相关系数(R)为分

别 0.996 39, 0.994 0, 0.997 7, 0.998 2。功能性盐土改良肥施用量 35.00 t/hm², 与对照(CK)比较, 有机质增加 14.13%, 差异极显著 ($p < 0.01$)。究其原因一是功能性盐土改良肥含有丰富的有机物, 因而提升了草甸盐土有机质含量。功能性盐土改良肥施用量 35.00 t/hm², 与对照(CK)比较, 碱解氮和速效磷和速效钾分别增加 95.64%, 89.63%, 387.30% 和 10.88%, 差异极显著 ($p < 0.01$)。究其原因二是功能性盐土改良肥含有氮磷钾, 因而提高了草甸盐土速效养分含量(表 4)。

2.4 功能性盐土改良肥施用量对甘草农艺性状和根鲜重的影响

连续定点试验 2 a 后, 于 2014 年 9 月 10 日甘草收获后测定数据可知, 功能性盐土改良肥施用量与甘草主根长、主根粗、单株根鲜重和根鲜重呈正相关, 相关系数(R)分别为 0.870 6, 0.729 0, 0.873 8, 和 0.876 9。

功能性盐土改良肥施用量 35.00 t/hm², 与对照(CK)比较, 主根长、主根粗、单株根鲜重和根鲜重分别增加 82.79%, 41.24%, 29.28% 和 25.41%, 差异极显著 ($p < 0.01$)(表 5)。

表 4 功能性盐土改良肥施用量对草甸盐土化学性质及有机质和速效氮磷钾的影响

功能性盐土改良肥施用量/(t·hm ⁻²)	pH 值	全盐/(g·kg ⁻¹)	CEC/(cmol·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)	脱盐率/%
0(CK)	8.34 ^{aA}	3.30 ^{aA}	11.36 ^{IC}	10.33 ^{hE}	28.64 ^{eD}	5.12 ^{eF}	132.41 ^{bB}	
5	8.21 ^{bA}	3.12 ^{aA}	13.45 ^{eB}	11.72 ^{gD}	32.31 ^{dC}	7.95 ^{fE}	134.15 ^{bB}	5.45
10	8.10 ^{cA}	2.89 ^{bB}	15.62 ^{dA}	13.12 ^{fC}	36.94 ^{cC}	10.78 ^{eD}	136.07 ^{bB}	12.42
15	7.94 ^{dA}	2.64 ^{bB}	16.47 ^{cA}	14.60 ^{eC}	41.04 ^{bB}	13.90 ^{dC}	138.24 ^{bB}	20.00
20	7.79 ^{eA}	2.45 ^{bB}	17.86 ^{bA}	15.96 ^{dC}	45.10 ^{bB}	17.38 ^{cB}	140.13 ^{aA}	25.75
25	7.68 ^{fA}	2.01 ^{bB}	18.08 ^{aA}	17.34 ^{cB}	48.49 ^{bB}	19.98 ^{bB}	142.74 ^{aA}	39.09
30	7.58 ^{gA}	1.98 ^{cC}	18.13 ^{aA}	18.15 ^{bB}	51.59 ^{aA}	22.45 ^{aA}	144.80 ^{aA}	40.00
35	7.55 ^{gA}	1.66 ^{cC}	18.65 ^{aA}	20.21 ^{aA}	54.31 ^{aA}	24.95 ^{aA}	146.82 ^{aA}	59.70

表 5 功能性盐土改良肥施用量对甘草农艺性状和根鲜重的影响

功能性盐土改良肥施用量/(t·hm ⁻²)	主根长/cm	主根粗/mm	单株根鲜重/(g/株)	根鲜重/(t·hm ⁻²)
0(CK)	52.05 ^{gE}	13.41 ^{dC}	129.20 ^{hD}	11.10 ^{hC}
5	65.08 ^{fD}	16.77 ^{cB}	143.40 ^{gC}	11.95 ^{gC}
10	76.55 ^{eC}	17.29 ^{bB}	150.60 ^{fB}	12.55 ^{fB}
15	85.05 ^{dB}	17.83 ^{bB}	155.75 ^{eB}	12.98 ^{eB}
20	89.53 ^{cB}	18.19 ^{aA}	159.36 ^{dB}	13.28 ^{dA}
25	92.30 ^{bA}	18.37 ^{aA}	162.12 ^{cA}	13.51 ^{cA}
30	94.18 ^{aA}	18.75 ^{aA}	164.64 ^{bA}	13.72 ^{bA}
35	95.14 ^{aA}	18.94 ^{aA}	167.04 ^{aA}	13.92 ^{aA}

2.5 功能性盐土改良肥最佳施用量的确定

由表 6 可知, 随着功能性盐土改良肥施用量梯度的增加, 甘草边际产量由最初的 0.85 t/hm², 递减到 0.20 t/hm²。从经济效益变化来看, 随着功能性盐土改良肥施用量梯度的增加, 边际利润由最初的 3 142.20 元/hm², 递减到 -108.80 元/hm²。功能性盐土改良肥施用量在 25 t/hm² 的基础上, 再继续增加施用量, 边际利润出现负值。由此可见, 功能性盐土改良肥适宜施用量一般为 25 t/hm² 时, 甘草经济效益较好(表 6)。

将表 6 功能性盐土改良肥不同梯度施用量与甘草根鲜重间的关系, 采用肥料效应回归方程

$y=a+bx+cx^2$ 拟合,得到的线性回归方程为:

$$y=11.10+0.1442x-0.0020x^2 \quad (1)$$

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。功能性盐土改良肥价格(P_x)为 221.76 元/t,2013—2014 年甘草地下鲜根市场收购价格平均为(P_y)为 5 000 元/t,将(P_x),(P_y),回归方程的参数

b 和 c ,代入最佳施用量计算公式:

$$(x_0)=[(P_x/P_y)-b]/2c$$

求得功能性盐土改良肥最佳施用量(x_0)为 24.95 t/hm²,将 x_0 代入(1)式,可求得甘草鲜根理论产量(y)为 13.45 t/hm²,统计分析结果与田间试验处理 6 基本吻合(表 6)。

表 6 功能性盐土改良肥施用量对甘草经济效益的影响

功能性盐土改良肥施用量/(t·hm ⁻²)	鲜根重/(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)	11.10 ^{hC}	—	—	—	—
5	11.95 ^{eC}	0.85	4 250.00	1 108.80	3 142.20
10	12.55 ^{fB}	0.60	3 000.00	1 108.80	1 891.20
15	12.98 ^{eB}	0.43	2 150.00	1 108.80	1 041.20
20	13.28 ^{dA}	0.30	1 500.00	1 108.80	391.20
25	13.51 ^{cA}	0.23	1 150.00	1 108.80	41.20
30	13.72 ^{bA}	0.21	1 050.00	1 108.80	-58.80
35	13.92 ^{aA}	0.20	1 000.00	1 108.80	-108.80

2.6 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

2.6.1 对草甸盐土物理性质的影响 连续定点试验 2 a 后,于 2015 年 9 月 30 日甘草收获后采集耕作层 0—20 cm 土样测定结果可知,不同种类盐碱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>功能性盐土改良肥,总孔隙度和团聚体由大到小的变化顺序依次为:功能性盐土改良肥>抗盐丰盐碱土改良剂>沃丰隆盐碱土改良剂>对照。施用功能性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,容重分别降低 3.91%和 8.21%,差异显著($p<0.05$),与对照比较,容重降低 13.38%,差异极显著($p<0.01$)。施用功能性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,总孔隙度分别增加 3.64%和 8.40%,差异显著($p<0.05$),与对照比较,总孔隙度增加 15.42%,差异极显著($p<0.01$)。施用功能性盐土改良肥与抗盐丰盐碱土改良剂比较,团聚体增加 5.29%,差异显著($p<0.05$),与

沃丰隆盐碱土改良剂和对照比较,团聚体分别增加 17.00%和 56.36%,差异极显著($p<0.01$)(表 7)。

2.6.2 对草甸盐土化学性质的影响 由表 7 可知,不同种类盐碱土改良剂对草甸盐土 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>功能性盐土改良肥。施用功能性盐土改良肥与抗盐丰盐碱土改良剂比较,pH 值降低 2.04%,差异不显著($p>0.05$),与沃丰隆盐碱土改良剂比较,pH 值降低 4.24%,差异显著($p<0.05$),与对照比较,pH 降低 7.91%,差异极显著($p<0.01$)。施用功能性盐土改良肥与抗盐丰盐碱土改良剂比较,全盐降低 2.94%,差异不显著($p>0.05$),与沃丰隆盐碱土改良剂和对照比较,全盐分别降低 15.74%和 39.82%,差异极显著($p<0.01$)。不同种类盐碱土改良剂对草甸盐土脱盐率由大到小的变化顺序依次为:功能性盐土改良肥>抗盐丰盐碱土改良剂>沃丰隆盐碱土改良剂。功能性盐土改良肥脱盐率为 39.81%,与抗盐丰盐碱土改良剂和沃丰隆盐碱土改良剂比较,脱盐率分别增加 4.79%和 39.34%(表 7)。

表 7 不同种类改良剂对草甸盐土理化性质的影响

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/%
1. 对照(不施改良剂)	1.42 ^{aA}	46.42 ^{dB}	19.98 ^{dC}	8.33 ^{aB}	3.29 ^{aA}	—
2. 沃丰隆盐碱土改良	1.34 ^{dB}	49.43 ^{cA}	26.70 ^{eB}	8.01 ^{bA}	2.35 ^{bB}	28.57
3. 抗盐丰盐碱土改良剂	1.28 ^{cB}	51.70 ^{bA}	29.67 ^{bA}	7.83 ^{cA}	2.04 ^{cC}	37.99
4. 功能性盐土改良肥	1.23 ^{dB}	53.58 ^{aA}	31.24 ^{aA}	7.67 ^{cA}	1.98 ^{cC}	39.81

2.6.3 对草甸盐土微生物的影响 从表8可知,不同种类盐碱土改良剂对草甸盐土真菌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>功能性盐土改良肥,细菌和放线菌由大到小的变化顺序依次为:功能性盐土改良肥>抗盐丰盐碱土改良剂>沃丰隆盐碱土改良剂>对照。施用功能性盐土改良肥与抗盐丰盐碱土改良剂比较,真菌降低1.89%,差异不显著($p>0.05$),与沃丰隆盐碱土改良剂和对照比较,真菌分别降低52.51%和55.56%,差异极显著($p<0.01$)。施用功能性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,细菌分别增加5.93%和12.61%,差异显著($p<0.05$),与对照比较,细菌增加60.26%,差异极显著($p<0.01$)。施用功能性盐土改良肥与抗盐丰盐碱土改良剂、沃丰隆盐碱土改良剂和对照比较,放线菌分别增加28.00%、35.21%和84.62%,差异极显著($p<0.01$)(表8)。

2.6.4 对草甸盐土酶活性的影响 从表8可知,不同种类盐碱土改良剂对草甸盐土酶活性由大到小的变化顺序依次为:功能性盐土改良肥>抗盐丰盐碱土改良剂>沃丰隆盐碱土改良剂>对照。

施用功能性盐土改良肥与抗盐丰盐碱土改良剂比较,蔗糖酶增加2.17%,差异不显著($p>0.05$),与沃丰隆盐碱土改良剂和对照比较,蔗糖酶分别增加15.89%和65.23%,差异极显著($p<0.01$)。施用功能性盐土改良肥与抗盐丰盐碱土改良剂、沃丰隆盐碱土改良剂和对照比较,脲酶分别增加11.19%、16.41%和79.52%;磷酸酶分别增加10.35%、52.39%和68.42%,差异极显著($p<0.01$)。施用功能性盐土改良肥与抗盐丰盐碱土改良剂比较,多酚氧化酶增加2.94%,差异不显著($p>0.05$),与沃丰隆盐碱土改良剂和对照比较,多酚氧化酶分别增加15.39%和69.35%,差异极显著($p<0.01$)(表8)。

表8 不同种类改良剂对草甸盐土微生物和酶活性的影响

试验处理	真菌/ (10^4 g^{-1})	细菌/ (10^7 g^{-1})	放线菌/ (10^7 g^{-1})	蔗糖酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	脲酶/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	磷酸酶/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	多酚氧化酶/ ($\text{ml} \cdot \text{g}^{-1}$)
1. 对照(不施改良剂)	2.34 ^{aA}	0.78 ^{dB}	0.52 ^{cC}	2.56 ^{cC}	0.83 ^{dD}	0.19 ^{dD}	0.62 ^{cC}
2. 沃丰隆盐碱土改良	2.19 ^{bB}	1.11 ^A	0.71 ^{cB}	3.65 ^{bB}	1.28 ^{cC}	0.21 ^{cC}	0.91 ^{bB}
3. 抗盐丰盐碱土改良剂	1.06 ^{cC}	1.18 ^{bA}	0.75 ^{bB}	4.14 ^{aA}	1.34 ^{bB}	0.29 ^{bB}	1.02 ^{aA}
4. 功能性盐土改良肥	1.04 ^{cC}	1.25 ^{aA}	0.96 ^{aA}	4.23 ^{aA}	1.49 ^{aA}	0.32 ^{aA}	1.05 ^{aA}

3 讨论与结论

将自主研发的盐碱调控剂、有机活性肥和甘草专用肥按比例合成功能性盐土改良肥,利用盐碱调控剂中的硫磺释放出的 SO_4^{2-} 可以中和草甸盐土的碱性,改善草甸盐土环境条件,降低pH值,最终达到改良土壤的目的;盐碱调控剂中的硫酸铝和石膏中的 Al^{3+} 和 Ca^{2+} 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,迅速解除盐分对植物根系的毒害作用,有机活性肥在分解过程中产生的有机酸,可以降低草甸盐土pH值,施用功能性盐土改良肥后pH和全盐也呈下降趋势。功能性盐土改良肥中的有机活性肥含有丰富的碳水化合物(糖类、纤维素和半纤维素),施用功能性盐土改良肥后改善了草甸盐土的物理性状,容重下降,孔隙度增大;有机活性肥在分解过程中产生的有机酸(葡萄糖、柠檬酸、酒石酸、草酸),降低了草甸盐土的pH值;有机活性肥在土壤微生物的作用下合成土壤腐殖质,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,施用功能性盐土改良肥后

持水量随之增大;有机活性肥是含有植物生长发育必需的碳、氢、氧、氮、磷、钾、钙、镁、硫和微量元素,促进了草甸盐土微生物和甘草的生长发育,提高了土壤酶的活性。功能性盐土改良肥中的甘草专用肥是按照甘草对养分的吸收比例和草甸盐土的供肥水平配制的,不但供给甘草生长发育必需的营养,而且解决了草甸盐土营养元素含量低的问题。将盐碱调控剂、有机活性肥和甘草专用肥按比例组合成功能性盐土改良肥,将盐碱调控剂的调控作用,有机活性肥的改土作用,甘草专用肥的营养作用融为一体,利用有机活性肥粘结土壤颗粒,形成团粒结构,使盐碱土水肥气热得到协调;利用专用肥提供营养,促进植物生长,提高植物的抗逆性;利用硫磺降低盐碱土pH值,利用硫酸铝和石膏中的 Al^{3+} 和 Ca^{2+} 置换盐碱土胶体表面吸附的 Na^+ ,使 Na^+ 随灌溉水带到土壤深处,迅速解除盐分对植物根系的毒害作用,达到改土培肥的目的。

研究结果表明功能性盐土改良肥最佳配方组合为:盐碱调控剂:有机活性肥:甘草专用肥=0.0724:0.9051:0.0225。功能性盐土改良肥施用量与草甸盐土容重、pH值和全盐呈负相关;与总孔隙度、团聚

体、持水量、CEC 值、有机质、速效氮磷钾、甘草农艺性状和根鲜重呈正相关。功能性盐土改良肥最佳施用量为 24.95 t/hm^2 , 甘草鲜根理论产量(y)为 13.45 t/hm^2 。不同种类盐碱土改良剂对草甸盐土容重、pH 值、全盐和真菌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 > 功能性盐土改良肥; 总孔隙度、团聚体、细菌、放线菌和酶活性由大到小的变化顺序依次为: 功能性盐土改良肥 > 抗盐丰盐碱土改良剂 > 沃丰隆盐碱土改良剂 > 对照。在甘肃省河西走廊草甸盐土上施用功能性盐土改良肥, 有效的改善了草甸盐土理化性质和生物学性质, 提高了土壤酶活性和持水量。

[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(1): 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] 赵秋, 高贤彪, 宁晓光, 等. 适用于滨海盐碱土改良剂的应用研究[J]. 西北农业学报, 2014, 23(3): 107-111.
- [7] 单德鑫, 黄河, 柳羽丰, 等. 改良剂组合对盐碱土的改良效果研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(35): 12491-12493.
- [8] 石万普, 俞仁培, 苗春蓬, 等. 不同物料改良碱化土壤作
- 用的比较[J]. 土壤学报, 1997, 34(2): 221-224.
- [9] 王睿彤, 陆兆华, 孙景宽, 等. 土壤改良剂对黄河三角洲滨海盐碱土的改良效应[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 239-244.
- [10] 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.
- [11] 安东, 李新平, 张永宏, 等. 不同土壤改良剂对碱积盐成土改良效果研究[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 26(4): 239-244.
- [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] 陕西省农林学校. 土壤肥科学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1987: 227-228.
- [20] 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.
- [21] 陆欣. 土壤肥科学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2004: 50-52.
- [22] 陕西省农林学校. 土壤肥科学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1987: 26-27.
- [13] 钟卫, 孔纪名, 杨涛. 植被沙障对近地表风沙流特征影响的风洞试验[J]. 干旱区研究, 2009, 26(6): 944-948.
- [14] 唐艳, 刘连友, 屈志强, 等. 植物阻沙能力研究进展[J]. 中国沙漠, 2011, 31(1): 44-48.
- [15] 黄富祥, 王明星, 王跃思, 等. 植被覆盖对风蚀地表保护作用研究的某些研究进展[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 627-633.
- [16] 黄富祥, 高琼, 毛乌素沙地不同防风材料降低风速效益的比较[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 27-31.
- [17] 董治宝, 陈渭南. 植被对风沙土风蚀作用的影响[J]. 环境科学学报, 1996, 20(4): 437-443.
- [18] 马瑞, 王继和, 刘虎俊, 等. 不同密度梭梭林对风速的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 249-252.
- [19] 李建刚, 王继和, 蒋志荣, 等. 民勤县主要治沙造林树种空间结构及其防风作用[J]. 水土保持研究, 2008, 15(3): 121-124.
- [20] 杨文斌, 卢琦, 吴波. 低覆盖度不同配置灌丛内风沙流结构与防风效果的风洞试验[J]. 中国沙漠, 2007, 27(5): 791-796.

(上接第 66 页)