



## 改良剂对盐化草甸土不同土层理化性质及大豆产量的影响

石礼文<sup>1</sup>, 王承昊<sup>1</sup>, 周伟<sup>2</sup>, 杜吉到<sup>1,3</sup>, 吴耀坤<sup>4</sup>, 张玉先<sup>1</sup>, 张明聪<sup>1,3</sup>, 张红梅<sup>1,3</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学 农学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 大庆市启隆农业科技有限公司, 黑龙江 大庆 163711; 3. 黑龙江省盐碱地改良工程技术研究中心, 黑龙江 大庆 163319; 4. 黑龙江省农业科学院 大庆分院, 黑龙江 大庆 163316)

**摘要:**为解决苏打盐化草甸土大豆种植产量低的问题,实现效益最大化和盐碱土可持续利用,本研究采用大田对比法,设置 CK、T1、T2 和 T3 4 个处理,每个处理在常规施肥基础上,分别增施改良剂 0、30、60 和 120 kg·hm<sup>-2</sup>,测定土壤相关理化性质和大豆产量,以期明确土壤改良剂对大豆田盐化草甸土的改良效果。研究结果表明:与当地常规施肥处理(CK)相比,T3 处理 10~40 cm 土层容重降幅为 3.17%~3.39%,T2 和 T3 处理 10~40 cm 土层 pH 降幅分别为 1.46%~1.83% 和 1.59%~2.19%,T2 和 T3 处理 0~30 cm 土壤交换性钠含量降幅分别为 3.08%~4.45% 和 3.61%~3.98%,T2 和 T3 处理 0~30 cm 土层电导率、各级别水稳性团聚体百分数和 MWD 均显著增加,T1、T2 和 T3 处理产量分别增加 4.77%、21.94% 和 25.68%,效益分别增收 176.7、953.8 和 892.5 元·hm<sup>-2</sup>。综合改良效果及效益,针对本次供试土壤盐渍化程度,改良剂最优用量为 60 kg·hm<sup>-2</sup>。

**关键词:**苏打盐化草甸土;土壤改良剂;大豆;土壤;产量

## Effects of a Soil Ameliorants on Soil Physicochemical Properties with Different Depth Soil Layers and Yield of Soybean in Saline Meadow Soil

SHI Li-wen<sup>1</sup>, WANG Cheng-hao<sup>1</sup>, ZHOU Wei<sup>2</sup>, DU Ji-dao<sup>1,3</sup>, WU Yao-kun<sup>4</sup>, ZHANG Yu-xian<sup>1</sup>, ZHANG Ming-cong<sup>1,3</sup>, ZHANG Hong-mei<sup>1,3</sup>

(1. College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 2. Daqing Qilong Agricultural Science and Technology Limited Company, Daqing 163711, China; 3. Research Center of Saline and Alkali Land improvement Engineering Technology in Heilongjiang Province, Daqing 163319, China; 4. Daqing Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Daqing 163316, China)

**Abstract:** In order to investigate the effects of the soil ameliorants on soil physicochemical properties with different soil layers and yield of soybean in saline meadow soil, we conducted a field experiment, four ameliorants application levels as 0, 30, 60, 120 kg·ha<sup>-1</sup>, defined as CK, T1, T2, T3, respectively, and the amount of fertilizer applied with the those treatments were the same as the local conventional fertilization treatment. We compared the results of the field experiment with that of CK. T3 substantially reduced soil bulk density of 10–40 cm soil layer by 3.17%–3.39%, pH of 10–40 cm soil layer of T2 and T3 reduced by 1.46%–1.83% and 1.59%–2.19%, respectively. Exchangeable sodium content of 0–30 cm soil layer of T2 and T3 reduced by 3.08%–4.45% and 3.61%–3.98%. However, compared with CK, T2 and T3 substantially enhanced the electrical conductivity, the proportion of different water stable aggregate size and the mean weight diameter (MWD). T1, T2 and T3 increased yield of soybean by 4.77%, 21.94% and 25.68%, and the benefit increased by 176.7, 953.8 and 892.5 yuan·ha<sup>-1</sup>, respectively. Overall, we comprehensively the effect of soil ameliorants on the soda salinized meadow soil and benefit analysis, the optimum application rate for the degree of soil salinization in this experiment was proposed as 60 kg·ha<sup>-1</sup>. The results provide theoretical basis for the improvement of soda salinized meadow soil.

**Keywords:** Soda saline-alkali soil; Soil ameliorants; Soybean; Soil; Yield

松嫩平原是世界三大苏打盐碱土分布区之一<sup>[1]</sup>,由于自然和人为原因使土壤富盐碱,盐碱类型以苏打型为主,总盐含量不高,但 Na<sup>+</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量高,对作物危害大<sup>[2]</sup>。大量研究已证实碱性盐对作物萌发及根系生长的抑制作用显著大于中性盐<sup>[3-5]</sup>,使得苏打盐渍土生产能力低,土地资源难以得到充分利用,出现不少的斑状光板地,造成大量土地资源浪费<sup>[6]</sup>。近年来,施用改良材料已

被证实是行之有效改良盐碱土的方法之一,李焕珍等<sup>[7]</sup>研究的脱硫副产物和石膏、朱孟龙等<sup>[8]</sup>研究的硫酸铝改良剂、闫治斌等<sup>[9]</sup>研究的糠醛渣和腐殖酸等在进行盐碱土改良中均具有一定应用前景,主要原理是通过同晶置换作用降低土壤胶体吸附的 Na<sup>+</sup> 离子,但针对苏打盐渍土的土壤粘重、颗粒分散、不透水、≥0.25 mm 团聚体数量少的最大特点,通过同晶置换交换出的 Na<sup>+</sup> 离子无法随水淋洗,而仍存在

收稿日期:2019-09-17

基金项目:黑龙江省大学生创新创业训练计划(201810223039);黑龙江八一农垦大学博士科研启动基金(XYB2014-04);黑龙江省农垦总局重点科研计划(HKKY190206-01);现代农业产业技术体系建设专项(CARS-04-01A)。

第一作者简介:石礼文(1995-),学士,主要从事土壤改良及土壤肥力研究。E-mail: 280750808@qq.com。

通讯作者:张明聪(1983-),男,博士,讲师,主要从事土壤改良相关研究。E-mail: zhangmingcong@163.com。

于土壤表层,影响作物后期生长的问题。针对此问题高金花等<sup>[10]</sup>通过膜下滴管结合暗管技术、侯毛毛等<sup>[11]</sup>通过铺设暗管结合生物有机肥进行排水洗盐,均取得较好效果,但此工程投资成本高,不适宜于普通种植户应用,另一方面苏打盐渍土主要分布在地势低洼地区,很难通过流水达到洗盐的目的。因此,松嫩平原苏打盐渍土改良的关键是关注作物生长发育后期土壤 pH、盐含量、水分入渗量和土壤团聚体数量等理化指标是否满足作物生长发育需求。作物生长后期正值作物生长的关键期,也是该地区高温少雨季节,蒸发量远高于降雨量,由于松嫩平原地下水位浅,土壤盐分表聚现象十分普遍,使作物生长发育后期根系因无法吸收养分和水分而逐渐凋亡;王文杰等<sup>[12]</sup>用聚马来酸酐和聚丙烯酸作为降盐碱剂对早期作物生长有较好的促进作用,但后期由于天气因素造成土壤次生盐渍化现象而降低作物生长力。因此,为解决松嫩平原旱作农业次生盐渍化现象,课题组结合松嫩平原苏打盐渍土的特点,研发了一种新型盐碱土壤改良剂(已申请发明

专利),以硫酸铵和凹凸棒土为载体,加入生物炭基肥、褪黑素、柠檬酸、硫酸铝、硫酸锌、硫酸亚铁及高分子有机复合物等成分按一定比例和方法合成复合型盐碱土壤改良剂,通过前期预备试验证明,在改良剂施用层次具有较好的降盐和 pH 的效果。因此本研究应用自主研发的土壤改良剂,研究不同改良剂用量对大豆收获期 0~40 cm 土层理化性质及产量的影响,明确土壤改良剂改善土壤环境和提高大豆产量的生理基础,为大庆地区盐碱地治理提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试大豆品种为抗线 8 号,亚有限结荚习性,生育期 120 d 左右。

供试改良剂为鑫锐禾牌盐碱土壤改良剂(大庆市启隆农业科技有限公司生产),为颗粒型,采用挤压造粒工艺。盐碱改良剂改良土壤效果如图 1 所示。



左右两图为相同的苏打盐化草甸土和相同的灌水量;左图为洗灌自来水处理;右图为自来水添加改良剂处理。

The left and right pictures are the treatments of the same sodic saline meadow soil and the same amount of irrigation water; The left picture shows the treatment of water irrigated; The right picture shows the treatment of the water added the modifier.

图 1 盐碱改良剂改良土壤效果

Fig. 1 Effects of a soil ameliorants on improvement of soda salinized meadow soil

1.2 试验地概况

试验于 2018 年在黑龙江省大庆市大同区林源镇对喜村大豆种植田进行,前茬玉米,供试土壤类型为苏打盐化草甸土,地势较为平坦,蒸发量较大,位于季节性冻土区,冻融作用较为强烈,盐碱地分布广泛,原生土壤多为盐化草甸土,盐分组成以碳酸盐为主,土壤盐分呈现明显的表聚性,按卡庆斯基分类制分类方法,该土壤为粉质黏壤土。播种前 0~20 cm 土壤有机质 15.8 g·kg<sup>-1</sup>,速效磷和速效钾分别为 15.6 和 142.1 mg·kg<sup>-1</sup>,pH9.25,电导率 1 124 μS·cm<sup>-1</sup>,交换性 Na<sup>+</sup> 含量 2.71 g·kg<sup>-1</sup>。

1.3 试验设计

试验采用大区对比法,设置 4 个处理:CK(当地常规施肥处理)、T1(当地常规施肥处理+30 kg·hm<sup>-2</sup>土壤改良剂)、T2(当地常规施肥处理+60 kg·hm<sup>-2</sup>土壤改良剂)和 T3(当地常规施肥处理+120 kg·hm<sup>-2</sup>土壤改良剂)。当地常规施肥处理氮磷钾和改良剂均于基肥一次施入,施于种下 10~15 cm,施用氮(N)60 kg·hm<sup>-2</sup>、磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)45 kg·hm<sup>-2</sup>和钾(K<sub>2</sub>O)35 kg·hm<sup>-2</sup>,折合成尿素(N 46%)130.43 kg·hm<sup>-2</sup>、重过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%)97.83 kg·hm<sup>-2</sup>和硫酸钾(K<sub>2</sub>O 50%)70 kg·hm<sup>-2</sup>。采用垄上双行精量播种

机播种,播种深度 3 ~ 5 cm,全生育期无灌水。5 月 10 日播种,9 月 27 日收获。每个处理 24 垄,垄宽 0.65 m,长 50 m,播种密度 30 万株·hm<sup>-2</sup>。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 相关理化指标 于大豆收获期分别测定0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 和 30 ~ 40 cm 土层土壤理化性质<sup>[13]</sup>。采用环刀法测定土壤容重及土壤孔隙度;采用 pH 计(Sartorius PB-10)测定土壤 pH(水土比 5:1);使用电导率仪(雷磁 DDS-307)测定土壤电导率(水土比 5:1);采用烘干法测定土壤含水量;采用 NH<sub>4</sub>OAc - NH<sub>4</sub>OH 火焰光度法测定土壤交换性钠含量。

1.4.2 水稳性团聚体 采用湿筛法测定<sup>[14]</sup>;不同级别水稳性团聚体的质量百分含量计算公式为:  
$$W_i(\%) = \frac{W_{wi}}{100} \times 100$$
式中,  $W_i$  为某级水稳性团聚体的质量分数(%),  $W_{wi}$  为该级水稳性团聚体的质量(g)。

平均重量直径(mean weight diameter, MWD) 计算公式为:
$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i w_i$$
式中,  $MWD$  为平均重量(mm),  $w_i$  为对应于  $x_i$  的团聚体的重量百分比,  $x_i$  为各级别的平均直径(mm)。

几何平均直径(geometric mean diameter, GMD) 计算公式为:
$$GMD = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right]$$
式中,  $GMD$  为

几何平均直径,  $w_i$  为对应于  $x_i$  的团聚体的重量百分比,  $x_i$  为各级别的平均直径。

1.4.3 收获测产 每小区取有代表性的 2 m<sup>2</sup>植株进行考种测产。

1.5 数据分析

采用 Excel 2013 进行原始数据的处理,采用 Origin 2018 进行图例绘制,采用 SPSS 17.0 进行相关数据统计分析,使用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异(LSD)法比较不同处理间的差异。

2 结果与分析

2.1 改良剂对土壤容重和孔隙度的影响

容重可表示土壤疏松程度,施用改良剂处理均可一定程度上降低土壤容重。研究结果表明:T1 处理土壤容重低于 CK 处理,但未达到显著水平,T2 和 T3 处理除 0 ~ 10 cm 土层外均低于 CK 处理,其中 T3 处理 10 ~ 20、20 ~ 30 和 30 ~ 40 cm 土层较 CK 相比分别降低 3.51%、3.39% 和 3.17% ( $P < 0.05$ ) (图 2A);10 ~ 40 cm 土层土壤孔隙度随改良剂施用量的增加呈递增趋势,T2 和 T3 处理较 CK 相比分别增幅 2.04% ~ 2.96% 和 2.72% ~ 2.96%,表明施用改良剂可降低土壤容重,增加土壤疏松度和土壤孔隙(图 2B)。

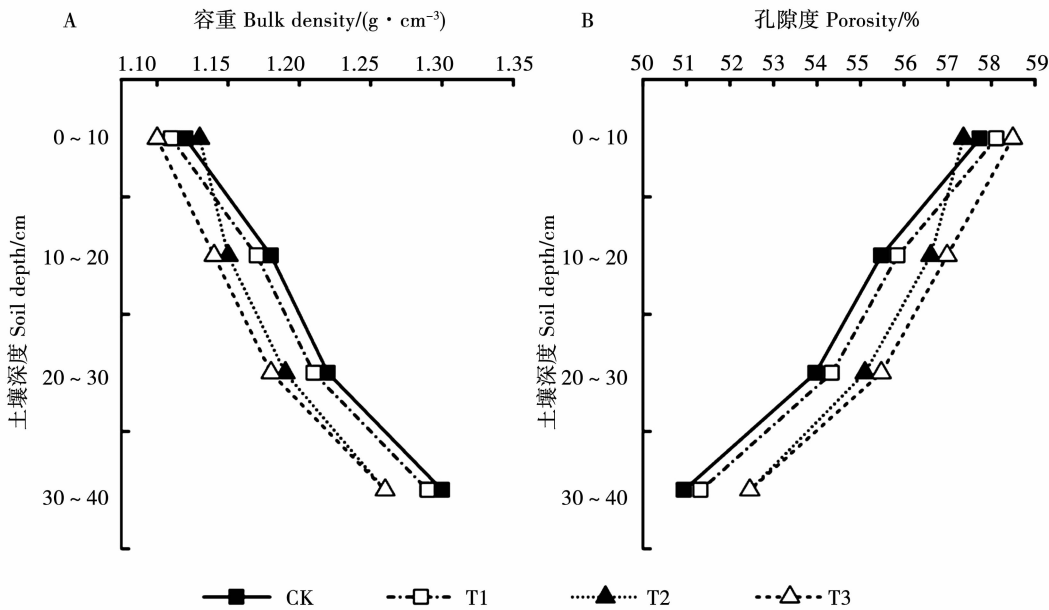


图 2 改良剂对土壤容重和孔隙度的影响

Fig. 2 Effects of a soil ameliorants on bulk density and porosity

2.2 改良剂对土壤 pH 和土壤质量含水量的影响

土壤 pH 随改良剂用量的增加而降低,T1 处理不同土层 pH 均低于 CK 处理,但未达显著水平,而

T2 和 T3 处理 10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40 cm 较 CK 相比分别降低 1.48%、1.83%、1.46% 和 1.59%、2.19%、1.80% ( $P < 0.05$ ) (图 3A)。较 CK 相比,10 ~

20 cm 土层 T2 和 T3 处理质量含水量分别增加 0.78% 和 0.83%, 20 ~ 30 cm 土层 T2 和 T3 处理质

量含水量分别增加 1.05% 和 1.09% (图 3B), 表明施用改良剂土壤保水蓄水能力增强。

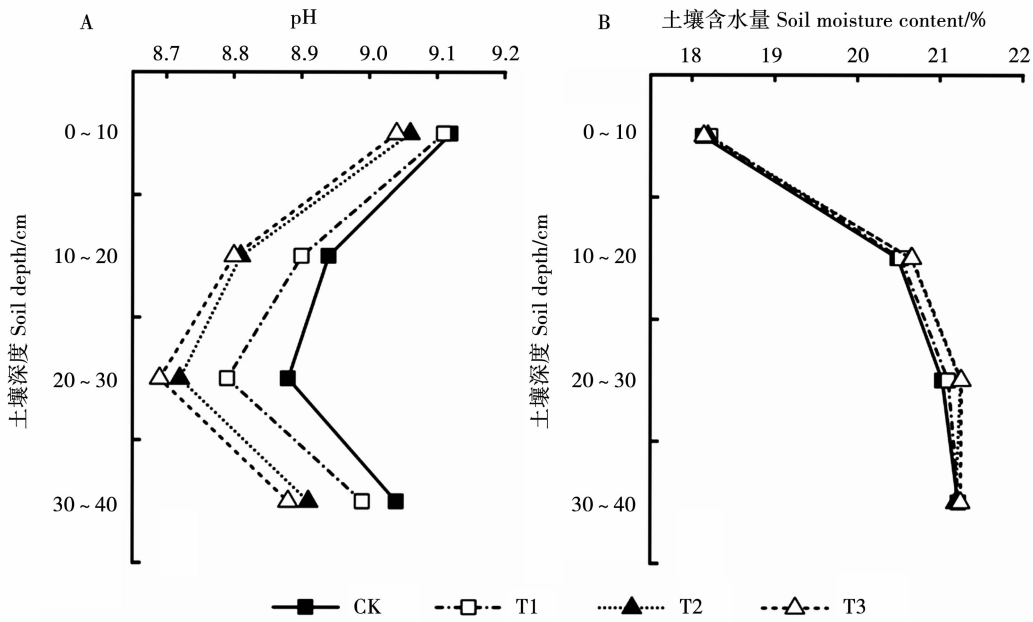


图 3 改良剂对土壤 pH 和土壤质量含水量的影响

Fig. 3 Effects of the soil ameliorants on pH and soil moisture content

2.3 改良剂对土壤交换性钠和电导率的影响

0 ~ 30 cm 土层表现出随改良剂施用量的增加土壤交换性钠含量降低趋势, 其中 T2 和 T3 处理 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 cm 较 CK 相比土壤交换性钠含量分别降低 3.08%、3.98%、4.45% 和 3.88%、3.98%、3.61% ( $P < 0.05$ ), 而 30 ~ 40 cm 表现为施用改良剂处理土壤交换性钠含量高于 CK 处理, 其中 T2 和 T3 处理较 CK 相比分别增加 3.08% 和 3.46% ( $P < 0.05$ ), 表明施用改良剂处理可降低 0 ~

30 cm 土层土壤交换性钠含量, 使土壤交换性钠随降雨淋洗至 30 ~ 40 cm (图 4A)。土壤 0 ~ 30 cm 电导率与土壤交换性钠含量变化趋势基本相同, 均表现出随改良剂用量的增加电导率下降趋势, T1 处理 10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 较 CK 分别增加 9.69% 和 10.33% ( $P < 0.05$ ), T2 和 T3 处理 0 ~ 30 cm 不同土层均显著高于 CK 处理, 增幅分别为 15.0% ~ 25.3% 和 19.7% ~ 27.4% ( $P < 0.05$ ) (图 4B)。

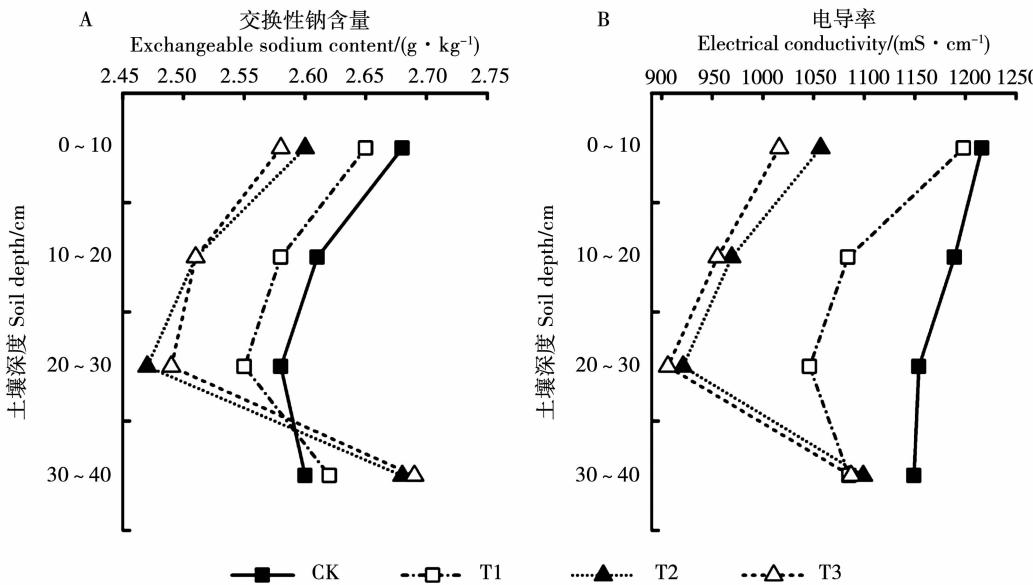


图 4 改良剂对土壤交换性钠和电导率的影响

Fig. 4 Effects of the soil ameliorants on exchangeable sodium content and electrical conductivity

2.4 改良剂对土壤水稳性团聚体含量的影响

土壤水稳性团聚体含量反映了土壤的持水性和抗侵蚀的能力,对土壤结构的稳定性有重要的作用<sup>[15]</sup>。研究表明:施用不同用量改良剂对大豆田不同深度土层水稳性团聚体影响较大,0~10 cm 表现为施用改良剂处理≥0.25 mm 水稳性团聚体的百分数均高于 CK 处理,其中 T2 和 T3 处理各级别水稳性团聚体百分数均显著高于 CK 处理,增幅分别达到 9.74%~53.72% 和 7.11%~58.4% ( $P <$

0.05);由于改良剂施入 10~20 cm 左右,T2 和 T3 处理此层各级别水稳性团聚体百分数与 CK 相比,增幅分别为 32.81%~69.9% 和 34.5%~63.2% ( $P <$  0.05),增幅远高于 0~10 cm,而 T1 处理各级别水稳性团聚体百分数与 CK 相比未达显著水平;20~30 cm 土层表现与 0~20 cm 相类似的规律,T2 和 T3 处理显著高于 CK,T1 与 CK 相比未达显著水平;30~40 cm 土层各处理间未达显著差异(表 1)。

表 1 改良剂对土壤水稳性团聚体含量的影响

Table 1 Effects of the soil ameliorants on water stable aggregate ( % )

土层深度 Soil depth /cm	处理 Treatment	水稳性团聚体级别 Size of water stable aggregate					
		>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1.0 mm	0.25~0.50 mm	≤0.25 mm
0~10	CK	7.26±0.41 c	5.88±0.86 c	6.36±0.55 b	8.01±0.33 b	9.21±0.53 c	36.72±4.69 b
	T1	8.11±0.51 b	6.31±0.43 b	5.21±0.69 b	8.51±0.29 ab	9.39±0.46 c	37.53±4.01 b
	T2	11.16±1.03 a	7.46±0.36 a	8.01±0.59 a	8.79±0.30 a	10.11±0.39 b	45.53±4.88 a
	T3	11.50±1.23 a	7.53±0.26 a	8.21±0.64 a	8.58±0.49 ab	11.76±0.51 a	47.58±5.03 a
10~20	CK	6.55±0.66 b	4.89±0.46 b	7.01±0.36 b	7.88±0.46 b	6.31±0.68 b	32.64±4.59 b
	T1	7.36±0.79 b	5.22±0.36 b	6.36±0.43 b	8.67±0.36 b	7.32±0.26 b	34.93±3.16 b
	T2	10.46±1.01 a	8.31±0.46 a	9.31±0.69 a	11.03±0.56 a	9.97±0.89 a	49.08±3.06 a
	T3	10.69±0.66 a	8.44±0.51 a	9.43±0.88 a	11.11±0.79 a	10.21±1.03 a	49.88±4.36 a
20~30	CK	5.49±0.49 b	3.22±0.34 b	5.55±0.55 b	4.26±0.55 b	4.98±0.47 b	23.50±3.34 b
	T1	5.89±0.35 b	3.59±0.29 b	4.24±0.46 b	5.49±0.69 b	5.69±0.55 b	24.90±3.59 b
	T2	7.23±0.67 a	4.38±0.57 a	6.39±0.47 a	7.22±0.64 a	8.01±0.67 a	33.23±4.11 a
	T3	8.01±0.44 a	4.44±0.36 a	6.44±0.33 a	7.36±0.76 a	8.14±0.59 a	34.39±3.29 a
30~40	CK	3.16±0.26 a	2.99±0.36 a	4.89±0.33 a	3.99±0.37 a	4.26±0.52 a	19.29±1.79 a
	T1	3.33±0.19 a	3.03±0.42 a	4.44±0.56 a	4.03±0.49 a	4.39±0.43 a	19.22±2.11 a
	T2	3.49±0.14 a	3.26±0.19 a	4.79±0.54 a	4.11±0.36 a	4.41±0.64 a	20.06±2.64 a
	T3	3.55±0.27 a	3.38±0.28 a	4.95±0.39 a	4.10±0.54 a	4.40±0.55 a	20.38±1.03 a

2.5 改良剂对土壤 MWD 和 GMD 的影响

MWD 随改良剂施用量的增加呈递增趋势,与 CK 相比,0~10、10~20 和 20~30 cm 土层 T2 和 T3 处理分别增加 28.69%、40.40%、20.84% 和 25.16%、35.16%、22.84% ( $P <$  0.05),而 T1 处理与 CK 相比差异不显著;30~40 cm 土层各处理未达显著水平(图 5A)。GMD 随改良剂施用无规律性变化,0~10 cm 表现为 T2 处理最高,显著高于 CK 和 T1 处理,分别增加 12.93% 和 10.26% ( $P <$  0.05),10~20 cm 土层各处理未达显著差别,20~30 cm 表

现为 CK 处理最高,较 T2 增加 9.77% ( $P <$  0.05),而 30~40 cm 土层各处理未达显著水平(图 5B)。

2.6 改良剂对大豆产量及产量构成的影响

不同改良剂对大豆产量如表 2 所示:各处理株高无显著性差异,不同改良剂处理单株荚数、单株粒数和产量均高于 CK 处理,其中,T2 和 T3 处理单株荚数和单株粒数显著高于 CK,分别高 15.68%、15.98% 和 22.93%、27.39% ( $P <$  0.05),T1、T2 和 T3 较 CK 相比产量分别增加 4.77%、21.94% 和 25.68% ( $P <$  0.05)。

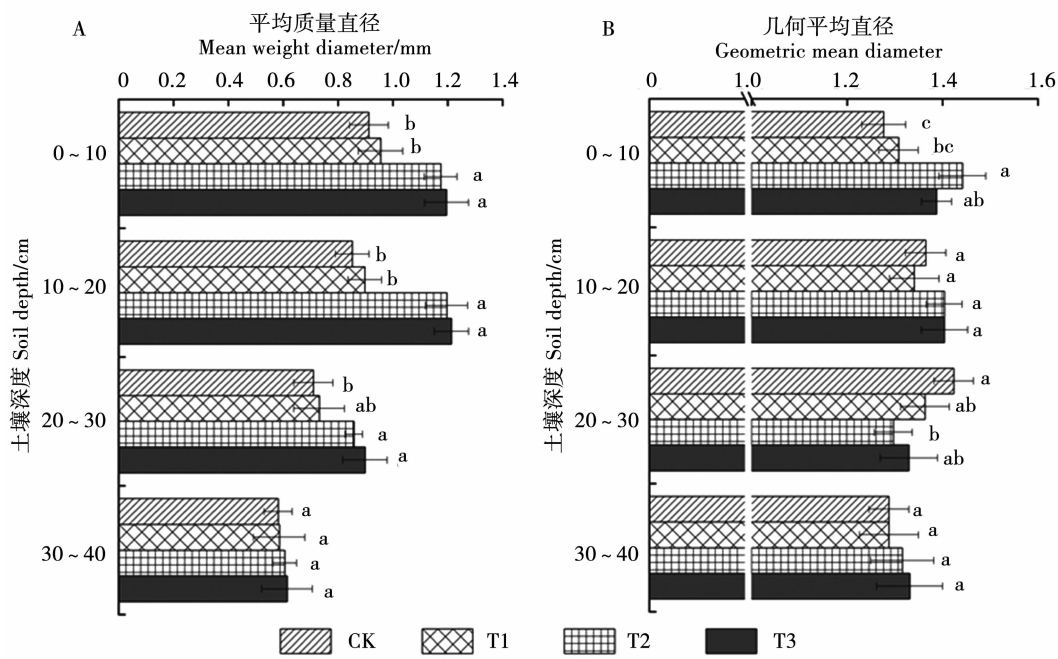


图 5 改良剂对土壤 MWD 和 GMD 的影响  
Fig. 5 Effects of a soil ameliorants on MWD and GMD

表 2 改良剂对大豆产量及产量构成的影响  
Table 2 Effects of the soil ameliorants on yield and yield components of soybean

处理 Treatment	株高 Plant height /cm	单株荚数 Pods number per plant	单株粒数 Seeds number per plant	百粒重 100-seed weight/g	产量 Yield /(kg·hm <sup>-2</sup> )
CK	66.28 ± 3.45 a	16.65 ± 1.16 b	29.17 ± 2.16 b	19.03 ± 0.03 a	1666.1 ± 39.47 c
T1	66.91 ± 4.33 a	17.13 ± 1.09 b	30.99 ± 2.33 b	19.01 ± 0.02 a	1768.2 ± 45.28 b
T2	67.40 ± 3.69 a	19.26 ± 1.11a	35.86 ± 1.98 a	19.12 ± 0.04 a	2058.0 ± 43.16 a
T3	67.58 ± 4.48 a	19.31 ± 0.99 a	37.16 ± 1.57 a	19.12 ± 0.04 a	2132.6 ± 40.32 a

2.7 大豆田效益分析

由于盐化草甸土耕层苏打含量和所处的特殊气候条件,该土壤改良剂需年年施用;根据不同处理大豆产量,计算增产和增效量,依据改良剂价格(5元·kg<sup>-1</sup>),计算公顷增收,由表3可以看出知,与

CK相比,T1处理增产102.1 kg·km<sup>-2</sup>,大豆收购价格按3.2元·kg<sup>-1</sup>,T1处理增收176.7元·kg<sup>-1</sup>,而T2和T3增产391.8和466.4 kg·km<sup>-2</sup>,T2和T3分别增收953.8和892.5元·km<sup>-2</sup>,可见从经济效益进行分析,T2处理要优于其它处理。

表 3 效益分析  
Table 3 Benefit analysis

处理 Treatment	产量 Yield/(kg·hm <sup>-2</sup> )	增产 Increase yield /(kg·hm <sup>-2</sup> )	增效 Increase benefit /(yuan·hm <sup>-2</sup> )	改良剂用量 The amount of soil ameliorant /(kg·hm <sup>-2</sup> )	改良剂费用 Cost of soil ameliorant /(yuan·hm <sup>-2</sup> )	增收 Increase income /(yuan·hm <sup>-2</sup> )
CK	1666.10 ± 39.47 c	—	—	0	0	—
T1	1768.20 ± 45.28 b	102.1	326.7	30	150	176.7
T2	2058.00 ± 43.16 a	391.8	1253.8	60	300	953.8
T3	2132.60 ± 40.32 a	466.4	1492.5	120	600	892.5

3 讨 论

松嫩平原大陆性季风气候特征明显,土壤次生盐渍化显著<sup>[16]</sup>。施用改良材料已被证实是改良苏打盐渍土行之有效的的方法之一,主要作用机理在于改变土壤胶体上吸附离子成分,进而改善土壤的理化性状<sup>[17]</sup>。本研究中施用改良剂后大豆收获期 10 ~ 40 cm 土层土壤孔隙增加,容重降低,其中 T1 处理与 CK 相比无显著差异,而 T2 和 T3 处理与 CK 相比差别显著,表明随着改良剂施用量的增加土壤疏松度变高,易于水分通过土壤毛管下渗。一般认为  $\geq 0.25$  mm 的团聚体被称为土壤团粒结构体,  $\geq 0.25$  mm 级别团聚体的质量百分比可以衡量土壤结构的优劣,其值越高,土壤透水性和稳定性越强<sup>[18]</sup>,本研究中施用改良剂处理可提高 0 ~ 30 cm 土层的  $\geq 0.25$  mm 各级别水稳性团聚体数量,其中, T1 与 CK 相比各级别水稳性团聚体无显著差别,但 0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 土层 T2 和 T3 处理与 CK 相比各级别水稳性团聚体均显著提高,说明适宜改良剂用量可增强土壤蓄水、透水和通气能力,土壤多级孔隙增多,易于增强大豆根系的呼吸作用。本研究也证实施用改良剂处理 (T2 和 T3) 10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 土层土壤含水量高于 CK,表明改良剂通过改善土壤结构,增大土壤孔隙度,增加土壤团聚体数量,进而增强水分淋洗能力。

大量研究已证实,施用含  $\text{Ca}^{2+}$  的硫酸钙肥料<sup>[19-20]</sup>或含  $\text{Al}^{3+}$  的硫酸铝肥料<sup>[19-21]</sup>可有效置换出土壤中钠离子,但如何将置换出的盐分通过水分洗脱是当前苏打盐化土改良的关键<sup>[22]</sup>。本研究与 CK 相比,施用改良剂处理 (T2 和 T3) 可以显著降低 0 ~ 30 cm 土层交换  $\text{Na}^+$  含量和盐基离子 (图 4),而 30 ~ 40 cm 土层交换  $\text{Na}^+$  含量显著增加,说明施用改良剂在增强水分淋洗能力的同时,降低大豆根系活跃层 (0 ~ 30 cm) 交换  $\text{Na}^+$  含量和盐基离子,也降低土壤分散程度,而使交换  $\text{Na}^+$  含量和盐基离子淋洗至 30 ~ 40 cm,利于大豆根系对土壤养分及水分的吸收,改善根系生长活跃土层的生态环境,利大豆获得高产,与赵金星等<sup>[23]</sup>关于改良剂可以改善土壤结构及盐碱性状的研究结果相一致。

水稳定性团聚体的 MWD 和 GMD 是反映土壤团聚体稳定性的常用指标,值越大则表示团聚体的团聚程度越高<sup>[14]</sup>。本研究中 MWD 结果与前人研究的结果相一致<sup>[14-15,24]</sup>,施用改良剂处理 (T2 和 T3) 0 ~ 30 cm 土层获得较大的 MWD,因此具有相对稳定的土壤结构;而 GMD 结果与前人研究结果不完全一致<sup>[14-15,24]</sup>,这可能与苏打盐化草甸土土壤含

钠离子高,质地黏重有关,本研究中 0 ~ 10 cm GMD 表现出改良剂施用处理, T2 和 T3 显著高于 CK 处理,而 20 ~ 30 cm 表现改良剂施用处理 (T3) 低于 CK,主要的原因是与 CK 相比,施用改良剂后 0.5 ~ 1.0 和 0.25 ~ 0.50 mm 水稳性团聚体数量增加率高于 1.0 mm 以上的水稳性团聚体数量,通过 GMD 公式计算后降低了 GMD 值,因而使得 CK 处理 GMD 值有高于施用改良剂处理的趋势。

本研究应用土壤改良剂初步明确苏打盐化草甸土改良的应用效果,由于 2018 年大庆地区 5 ~ 10 月降雨量较往年有较大的提高,改良剂施用处理在改善土壤结构的同时,得到更多雨水淋洗,取得较好改良效果,下一步也将开展大豆田不同盐渍化程度的盐渍土长期定位改良试验,验证改良剂在苏打盐渍土的改良效果,并对改良后的盐分组成、水盐运移规律及大豆根际相关养分进行全面分析,也将试探增加种肥中改良剂的施用比例,以适应大庆地区干旱少雨的气候条件,为大庆地区盐碱地改良提供理论参考。

4 结 论

大田对比试验条件下,在大豆成熟期,与常规施肥相比 (CK),供试苏打盐化草甸土中于基肥加入适量改良剂,可降低 10 ~ 40 cm 土层土壤容重,增加 10 ~ 40 cm 土壤疏松程度,降低 10 ~ 40 cm 土壤 pH 和 0 ~ 30 cm 土壤交换性钠含量,提高 0 ~ 30 cm 土层电导率,增加各级别水稳性团聚体百分数和 MWD, T1、T2 和 T3 处理产量分别增加 4.77%、21.94% 和 25.68% ( $P < 0.05$ ),效益分别增收 176.7、953.8 和 892.5 元  $\cdot \text{km}^{-2}$ 。综合改良效果及效益,针对本次供试土壤盐渍化程度,改良剂最优用量为 60  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

参考文献

[1] 孙兆军. 中国北方典型盐碱地生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2017. (Sun Z J. Ecological restoration of typical saline-alkali land in northern China[M]. Beijing: Science Press, 2017. )

[2] 俞仁培, 陈德明. 我国盐渍土资源及其开发利用[J]. 土壤通报, 1999, 30(4): 158-159. (Yu R P, Chen D M. Development and utilization of saline soil resources in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1999, 30(4): 158-159. )

[3] 孔祥清, 韦建明, 常国伟. 生物炭对盐碱土理化性质及大豆产量的影响[J]. 大豆科学, 2018, 37(4): 647-651. (Kong X Q, Wei J M, Chang G W, et al. Effect of biochar on the physical and chemical properties of saline-alkali soil and soybean yield[J]. Soybean Science, 2018, 37(4): 647-651. )

[4] Wang Z M, Song K S, Zhang B, et al. Shrinkage and fragmentation of grasslands in the west Songnen Plain, China[J]. Agricul-



ture, Ecosystems and Environment, 2009, 129 (1-3): 315-324.

[5] 黄立华, 梁正伟, 马红媛. 不同盐分对羊草种子萌发和根芽生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 1974-1979. (Huang L H, Liang Z W, Ma H Y. Effects of different salts on seed germination and growth of *leymus chinensis*[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(5): 1974-1979.)

[6] 王春裕, 王汝镛, 张素君, 等. 东北苏打盐渍土的性质与改良[J]. 土壤通报, 1987, 18(20): 57-59. (Wang C Y, Wang R Y, Zhang S J, et al. Properties and improvement of soda saline soil in northeast China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1987, 18(20): 57-59.)

[7] 李焕珍, 徐玉佩, 杨伟奇, 等. 脱硫石膏改良强度苏打盐渍土效果的研究[J]. 生态学杂志, 1999, 18(1): 25-29. (Li H Z, Xu Y P, Yang W Q, et al. Study on effect of using sulfur-remaral gypsum as an amendment to the heavy soda saline-alkali soil [J]. Chinese Journal of Ecology, 1999, 18(1): 25-29.)

[8] 朱孟龙, 赵兰坡, 赵兴敏, 等. 稻草和硫酸铝添加对苏打盐碱土活性有机碳及有机无机复合体的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 284-288. (Zhu M L, Zhao L P, Zhao X M, et al. Effects of rice straw and aluminum sulfate on labile organic carbon and organo-mineral complexes in soda saline-alkaline soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29 (4): 284-288.)

[9] 闫治斌, 秦嘉海, 王爱勤, 等. 盐碱土改良材料对草甸盐土理化性质与玉米生产效益的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 31(2): 122-127. (Yan Z B, Qin J H, Wang A Q, et al. Effect of improvement materials on meadow saline soil properties and corn productive benefits[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(2): 122-127.)

[10] 高金花, 张礼绍, 廉冀宁, 等. 膜下滴灌结合暗管技术土壤水盐特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(9): 76-82. (Gao J H, Zhang L S, Lian J N, et al. Research on the soil water and salt change characteristics of drip irrigation under film combined with drainage technology of underground pipeline[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(9): 76-82.)

[11] 侯毛毛, 陈竞楠, 杨祁, 等. 暗管排水和有机肥施用下滨海设施土壤氮素行为特征[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 259-266. (Hou M M, Chen J N, Yang Q, et al. Behavior of coastal greenhouse soil nitrogen as influenced by subsurface drainage and organic fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 259-266.)

[12] 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): 2835-2844. (Wang W J, Guan Y, Zu Y G, et al. The dynamics of soil alkali-salinity and growth status of several herbal plants after krillium addition in heavy soda saline-alkali soil in field [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 2835-2844.)

[13] 鲍士旦, 土壤农化分析(第三版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. (Bao S D. Soil analysis in agricultural chemistry(3rd Edition) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.)

[14] 张明聪, 战英策, 杨栗恒, 等. 表土处理对大豆田不同耕层土壤温湿度和水稳性团聚体的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2018, 30(6): 8-12. (Zhang M C, Zhan Y C, Yang L H, et al. Effects of topsoil processing on soil humiture and water stable aggregate of different tilth of soybean field [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2018, 30(6): 8-12.)

[15] 何松榆, 刘建生, 张明聪, 等. 表土处理对大豆田土壤团聚体特征及产量的影响[J]. 大豆科学, 2018, 37(2): 251-257. (He S Y, Liu J S, Zhang M C, et al. Effect of topsoil treatment on characteristics of soil aggregates of soybean field and soybean yield [J]. Soybean Science, 2018, 37(2): 251-257.)

[16] 赵兰坡, 尚庆昌, 李春林. 松辽平原苏打盐碱土改良利用研究现状及问题[J]. 吉林农业大学学报, 2000, 22(S1): 79-83, 85. (Zhao L P, Shang Q C, Li C L. Research status and problems of improvement and utilization of soda saline-alkali soil in Songliao Plain [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2000, 22(S1): 79-83, 85.)

[17] 王德领. 不同改良材料对滨海盐碱土理化性质及盆栽玉米产量的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017: 35-36. (Wang D L. Effect of different modified materials on physical and chemical properties of coastal saline soil and potted maize yield [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2017: 35-36.)

[18] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2010. (Huang C Y, Xu J M. Soil science [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010.)

[19] 李杰, 姬景红, 李玉影, 等. 施用改良剂对大庆盐碱土的改良效果研究[J]. 中国土壤与肥料, 2016(2): 50-54. (Li J, Ji Y H, Li Y Y, et al. The improving effect of applying different ameliorants on saline soil in Daqing [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016(2): 50-54.)

[20] 赵兰坡. 松嫩平原盐碱地改良利用 [M]. 北京: 科学出版社, 2013. (Zhao L P. Improvement and utilization of saline and alkali land in Songnen Plain [M]. Beijing: Science Press, 2013.)

[21] 张鑫, 赵兰坡, 赵兴敏, 等. 秸秆和硫酸铝改良剂对苏打盐碱土吸附腐殖酸性能的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 308-314. (Zhang X, Zhao L P, Zhao X M, et al. Effects of straw and aluminum sulfate on the adsorption of humic acids on soda saline-alkali soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 308-314.)

[22] 李卓然, 虎胆·吐马尔白, 由国栋. 基于 HYDRUS-2D 滴灌棉田不同深度排盐沟土壤水盐运移的试验及模拟[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2018, 36(3): 376-384. (Li Z R, Hudang·T M E B, You G D. Experiment and simulation on salt removing of dripirrigation under the film in cotton field [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science Edition), 2018, 36(3): 376-384.)

[23] 赵金星, 周伟, 战英策, 等. 土壤改良剂对盐化草甸土物理性质及水稻产量的影响[J]. 作物杂志, 2018(6): 138-143. (Zhao J X, Zhou W, Zhan Y C, et al. Effects of a new soil ameliorants on soil physical properties and yield of rice in saline meadow soil [J]. Crops, 2018(6): 138-143.)

[24] 程乙, 任昊, 刘鹏, 等. 不同栽培管理模式对农田土壤团聚体组成及其碳、氮分布的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3521-3528. (Chen Y, Ren H, Liu P, et al. Effects of different cultivation practices on composition, carbon and nitrogen distribution of soil aggregates in farmlands [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(11): 3521-3528.)