

盐碱地土壤改良剂施用对种子萌发和生长的影响

贺海升, 王文杰, 朱 虹, 祖元刚*, 张衷华, 关 宇, 许慧男, 于兴洋

(东北林业大学森林植物生态学教育部重点实验室, 哈尔滨 150040)

摘要:我国是盐碱地大国, 如何改良盐碱地一直是研究热点。选择 17 种盐碱地改良剂施加于重度盐碱土, 以白菜种子萌发指标和改良土壤电导率及 pH 值为评价指标, 筛选出适宜盐碱地改良的土壤改良剂及其比例配比, 为盐碱地治理改良提供理论依据。结果表明, (1) 与对照盐碱土相比, 11 种有效改良剂(聚马来酸酐、石膏、羟基乙叉二膦酸、丙烯酸-丙烯酸羟丙酯共聚物、多氨基多醚基甲叉膦酸、聚马来酸酐-丙烯酸共聚物、氨基三甲叉膦酸、丙烯酸-2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸多元共聚、聚丙烯酸、木炭、双 1,6-亚己基三胺五甲叉膦酸)不仅使白菜种子发芽, 对降低 pH 有显著作用, 对电导率降低影响不明显; 其中聚马来酸酐(HPMA)的改良效果最佳, 种子发芽各项指标均较高, 具有较强的种子生活力, 其发芽率、发芽指数、活力指数的活力指标分别达到 72.5%, 36.2, 1.2; 种子发芽率, 发芽势和发芽指数与土壤 pH 值有密切关系($p < 0.05$), 但与土壤电导率无关($p > 0.05$), 从而说明不同土壤改良剂的效果主要显现在调节 pH 的功能上。(2) 在施加钙源石膏辅助下, 9 种改良剂(聚马来酸酐, 聚丙烯酸, 木炭, 木醋液, 乙二胺四乙酸, 732 型阳离子交换吸附树脂(H^+ 型), 柠檬酸, 柠檬酸钙, 氨三乙酸)改良效果有明显提升, 改良剂改良后的盐碱土在种子发芽率、发芽指数、活力指数等指标均有所上升, 说明外施钙源有助于其它改良剂效果的发挥。(3) 不同浓度梯度筛选中, 42.8L/m³聚马来酸酐、25kg/m³石膏改良效果最佳, 能够有效降低土壤电导率和 pH 值, 改良后盐碱土的种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数均最接近壤土种子发芽率、发芽指数等各项指标, 但二者单独施用改良盐碱土其发芽率高于二者混合施用的发芽率, 不存在协同效应, 故二者不宜混合施用。同时, 野外进行改良应该考虑多次少量施用或增加改良剂浓度的方法来增强改良效果。

关键词:盐碱土改良; 土壤改良剂; 种子萌发相关指标; 土壤 pH 值; 土壤电导率

文章编号: 1000-0933(2008)11-5338-09 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Influences on the seed germination and growth with addition of kriliiums in saline-alkali soil

HE Hai-Sheng, WANG Wen-Jie, ZHU Hong, ZU Yuan-Gang*, ZHANG Zhong-Hua, GUAN Yu, XU Hui-Nan, YU Xing-Yang

Key Laboratory of Forest Plant Ecology, Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5338 ~ 5346.

Abstract: China is one of the largest countries with huge amount of alkaline-alkali soil, how to ameliorate these lands is a hotspot. 17 kinds of Kriliium were added to test soil for evaluating their effect on amelioration of heavy soda saline-alkali soil. We measured soil pH, soil electrical conductance and germination parameters of cabbage seeds as screening means to

基金项目: 国家十一五科技支撑计划资助项目(2006BAD03A0306)

收稿日期: 2008-01-29; 修订日期: 2008-07-02

作者简介: 贺海升(1982~), 男, 内蒙古额尔古纳人, 硕士生, 主要从事植物生理生态学、恢复生态学研究. E-mail: hhs_007@163.com

* 通讯作者 Correspondence author. E-mail: zygorl@vip.hl.cn

Foundation item: The project was financially supported by National eleven-five science and technology supporting program of China (No. 2006BAD03A0306)

Received date: 2008-01-29; **Accepted date:** 2008-07-22

Biography: HE Hai-Sheng, Master candidate, mainly engaged in plant ecophysiology, restoration ecology. E-mail: hhs_007@163.com

screen out the proper kriliium and their proportioning for effectively ameliorating alkaline soil. These data may provide methodological basis for ameliorating alkaline soil in this region. Our result showed that: 1) Among 17 kinds of kriliium, 11 (HPMA、Gypsum、HEDP、T225、PAPEMP、MA-AA、ATMP、AA/AMPS、PAA、Charcoal、BHMTMPMA) of them were effective agents and could effectively induce seed germination with respecting to the no any germination phenomena at the control saline-alkali soil. These effective agents played a remarkable role to reduce the pH, but slightly change the electrical conductance of soil solution. HPMA was the best one in ameliorating saline-alkali soil, which has been manifested by the various index of seed germination. For example, the germination ratio, germination index, germination vigour index were respectively 72.5%, 36.2, 1.2. Soil pH value significantly correlated with the seed germination ratio, germination potential and germination index ($p < 0.05$), but soil electrical conductance did not correlated with any one of the seed germination parameters ($p > 0.05$), showing the important function of pH in explaining the effectiveness of different kriliium. 2) Addition of gypsum together with other organic agents could strongly increase the ameliorating effectiveness, which has manifested by the data of 9 agent of HPMA, PAA, charcoal, wood vinegar, EDTA, H + resin, citrate acid, citrate calcium and NTA. The seed germination ratio, germination index, and germination vigour index has largely increased, showing the plus effect of gypsum. 3) gradient experiment of mixing addition of HPMA and gypsum showed that the protocol of HPMA ($42.8\text{L}/\text{m}^3$) and gypsum ($25\text{kg}/\text{m}^3$) was the most effective one for the amelioration practice. These various indexes were relative close to the corresponding indexes at control normal loam, mixed application is not suitable. We should consider that multiple addition or increase concentration of Kriliium in field practice may strength the effectiveness of soil amelioration.

Key Words: kriliium; saline and alkaline land amelioration; seed germination parameters; soil pH; soil electrical conductance

松嫩平原西部碳酸钠型盐碱地面积达到 $3.0 \times 10^6 \text{hm}^2$, 是世界上三大片苏打盐渍土集中分布区之一。由于受到苏打危害致使农作物单产低下, 严重制约了农业、牧业和林业生产的发展, 为此对盐碱化土壤进行有效治理已迫在眉睫。在众多的盐碱地改良措施中寻找适宜苏打盐碱地改良方法成为关键。以往采用传统物理化学改良, 其化学改良剂主要是石膏, 施用石膏, 加大土壤钙离子含量, 置换土壤胶体上吸附的钠离子和镁离子, 使钠质亲水胶体变为钙质疏水胶体, 从而改善土壤结构和通透性, 起到了脱盐和抑制返盐的作用。石膏处理后, 盐碱土化学性质有明显改变, 碳酸氢钠含量明显降低, 使钠质胶体变为钙质胶体, 改善盐碱土的钙质营养条件, 起到了离子代换作用^[1]。此外石膏是一种钙肥, 能提高植物的抗旱能力^[2], 但由于松嫩平原盐碱土中大量 NaHCO_3 的存在, pH 值高, CaCO_3 溶解度变小, 易产生沉积, 影响代换和改土的效果^[3]。近年来, 用聚合有机改良剂改良土壤成为土壤改良研究的热门话题, 其在一定程度上能够松土、保湿、改良土壤理化性状, 促进植物对水分和养分的吸收, 其应用前景得到了国内外的广泛关注^[4~9]。有研究报道, 将高聚物土壤改良剂应用于盐碱地改良改善了土壤结构, 加速排盐效果, 提高了盐碱地的生产能力^[10]。在此研究领域中, 还有许多问题尚未清晰: (1) 在众多有机聚合物中那些聚合物更具有改良重度碳酸钠型盐碱地的效果, (2) 这些聚合物改良剂与外施钙源石膏是否存在协同效应, (3) 聚合物改良后野外长期实验的结果如何。本文将 17 种土壤改良剂应用于盐碱地改良, 利用石膏为外施钙源, 以种子萌发指标和土壤电导率及 pH 值为盐碱地改良效果衡量指标, 筛选出适宜盐碱地改良的土壤改良剂及其比例配比, 为盐碱地治理改良措施提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

供试白菜品种选自东北农业大学园艺学院培育的东农 906, 将此白菜种子用放入 30°C 温水中浸泡 25min, 以选择优质种子, 再浸入 1% 的高锰酸钾溶液中浸 15min, 然后用清水冲洗干净, 消毒, 备用。供试盐碱土采自于大庆市双榆树乡植物不能生长的碱斑, pH 为 10.2 ~ 10.9 左右, 电导率为 $2310 \sim 2870 \mu\text{S}/\text{cm}$, 实测容重为

1.43 g/cm³。

改良剂选用常见具有弱酸性土壤改良剂,包括 3 种天然高聚物土壤改良剂(木炭、木醋液、732 型阳离子交换吸附树脂(H⁺型))、1 种外施钙源(石膏 Gypsum)和 13 种有机聚合物(聚马来酸酐 HPMA、聚丙烯酸 PAA、丙烯酸-丙烯酸羟丙酯共聚物 T225、丙烯酸-2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸多元共聚 AA/AMPS、聚马来酸酐-丙烯酸共聚物 MA-AA、氨基三甲叉磷酸 ATMP、双 1,6-亚己基三胺五甲叉磷酸 BHMTMPA、羟基乙叉二磷酸 HEDP、多氨基多醚基甲叉磷酸 PAPEMP、乙二胺四乙酸 EDTA、柠檬酸(Citric Acid CA)、柠檬酸钙(Citric Calcium CC)、氨三乙酸 NTA)。13 种聚合物的选择原则是:以往报道具有改良土壤功能的聚合物,如 HPMA、PAA、T225、AA/AMPS、MAA-AA,与这些聚合物具有相似功能的发散剂聚合物,如 ATMP、BHMTMPA、HEDP、PAPEMP,与上述聚合物具有类似螯合功能、具有潜在螯合溶解土壤中不溶解钙盐(如碳酸钙)能力的有机酸及其盐,如 EDTA、CA、CC、NTA。

1.2 土壤盐碱度的测定方法

土壤 pH 值与电导率测定采用 pH 计(Sartorius PB-10)和电导率仪(雷磁 DDS-307)测定。水土比 5:1 测定。

1.3 种子萌发实验方法

将筛选消毒后的白菜种子冲洗干净,取 30 粒种子,均匀铺洒碱土与改良剂充分混合的穴盘上,每穴为 1 个重复,设置 3 次重复,以正常壤土、无改良剂施加的盐碱土为对照。在室内实验采用 ml/g、g/g 进行计算,方便操作;但为考虑野外实践改良时,ml/g、g/g 计算存在一定复杂性,故针对本实验土壤取自黑龙江省大庆市大同区双榆树乡盐碱土,测量其土壤容重为 1.43 g/cm³,将室内实验结果 ml/g、g/g 换算为 L/m³、kg/m³。改良剂浓度及其盐碱土配比如下表(文中均以盐碱土体积表示土壤改良剂用量进行讨论)。

表 1 17 种改良剂浓度及其与盐碱土混合用量表
Table 1 17 Krillium concentration & the amount with saline and alkaline soil

全称 Name	浓度(%) Concentration	与盐碱土混合施用量比例 (以盐碱土质量表示) The proportion of mixed amount with saline and alkaline soil (represented by weight of saline and alkaline soil)	与盐碱土混合施用量比例 (以盐碱土体积表示) The proportion of mixed amount with saline and alkaline soil (represented by volume of saline and alkaline soil)
聚马来酸酐 HPMA	50	30ml/kg	42.8L/m ³
石膏 Gypsum	80 ~ 90	7g/kg	10kg/m ³
羟基乙叉二磷酸 HEDP	50	30ml/kg	42.8L/m ³
丙烯酸-丙烯酸羟丙酯共聚物 T225	28.5	30ml/kg	42.8L/m ³
多氨基多醚基甲叉磷酸 PAPEMP	45	30ml/kg	42.8L/m ³
聚马来酸酐-丙烯酸共聚物 MA-AA	50	30ml/kg	42.8L/m ³
氨基三甲叉磷酸 ATMP	50	30ml/kg	42.8L/m ³
丙烯酸-2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸多元共聚 AA/AMPS	30	30ml/kg	42.8L/m ³
聚丙烯酸 PAA	40	30ml/kg	42.8L/m ³
木炭 Charcoal	85	100g/kg	142.9kg/m ³
双 1,6-亚己基三胺五甲叉磷酸 BHMTMPA	43 ~ 48	30ml/kg	42.8L/m ³
木醋液 Wood vinegar	10	30ml/kg	42.8L/m ³
乙二胺四乙酸 EDTA	AR	3g/kg	4.28kg/m ³
732 型阳离子交换吸附树脂(H ⁺ 型) H ⁺ Resin	一级品,吸附量 ≥4mmol/g	30g/kg	42.8L/m ³
柠檬酸 CA	AR	3g/kg	4.28kg/m ³
柠檬酸钙 CC	AR	3g/kg	4.28kg/m ³
氨三乙酸 NTA	AR	3g/kg	4.28kg/m ³

如表 1 所示,钙源(石膏)施用量比例为 $10\text{kg}/\text{m}^3$; EDTA、CA、CC、NTA 具有螯合功能有机酸类用量为 $4.28\text{kg}/\text{m}^3$; 732 型阳离子交换吸附树脂(H^+ 型)为 $42.8\text{L}/\text{m}^3$ 、木炭施用量为 $142.9\text{kg}/\text{m}^3$; 木醋液、HPMA、PAA、T225、AA/AMPS、MA-AA、ATMP、BHMTMPMA、HEDP、PAPEMP 施用量为 $42.8\text{L}/\text{m}^3$ 。

2. 将高聚物改良剂(HPMA、PAA)、具有螯合功能有机酸(EDTA、CA、CC、NTA)、732 型阳离子交换吸附树脂(H^+ 型)、木炭与石膏混合比例如下:

高聚物改良剂(HPMA、PAA) $21.4\text{L}/\text{m}^3$ + 石膏 $10\text{kg}/\text{m}^3$

具有螯合功能有机酸(EDTA、CA、CC、NTA) $2.14\text{kg}/\text{m}^3$ + 石膏 $10\text{kg}/\text{m}^3$

732 型阳离子交换吸附树脂(H^+ 型) $21.4\text{L}/\text{m}^3$ + 石膏 $10\text{kg}/\text{m}^3$

木炭 $142.9\text{kg}/\text{m}^3$ + 石膏 $10\text{kg}/\text{m}^3$

1.4 数据处理及分析

每日定时统计发芽种子数,并适当补水。发芽以展开子叶为标准。第 11 天结束发芽,并用电子分析天平测定幼苗的鲜重,参照郑光华^[11]的方法计算种子发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数。计算方法为:发芽率 = 11d 内发芽的种子数/供试种子数 $\times 100\%$; 发芽势 = 5d 内发芽的种子数/供试种子数 $\times 100\%$; 发芽指数 (G_i) = $\sum G_t/D_t$ (式中 G_t 为在第 t 天种子的发芽数, D_t 为相应的发芽日数); 活力指数 (V_i) = $G_i \times S$ (式中 S 为幼苗平均鲜重)。将数据利用 spss13.0 进行统计分析。

1.5 野外高聚物改良试验

试验在黑龙江省大庆市($\text{N}45^\circ 59.928'$, $\text{E}124^\circ 29.795'$)的重度盐碱地——碱斑上进行。设置 3 个重复,每个样方面积为 1m^2 ($1\text{m} \times 1\text{m}$),施工深度为 30cm 。将取出的盐碱土,先用阻盐碱剂对样方四周和底部进行喷施,将取出的盐碱土和草炭土按照 3 份草炭土:3 盐碱土的比例进行混和,回填。在土壤表层喷施 25L 聚马来酸降低盐碱度,之后散播上白菜在种子表面附上混合土,种子密度为 2500 粒/ m^2 。试验时间从 7~9 月份,每 7d 测定叶片大小(投影法)、根茎和株高,共测 8 次,并拟合其与实验天数的关系,来确定改良效果。

2 结果分析与讨论

2.1 17 种土壤改良剂中有效和无效改良剂的筛选

种子生活力的表征指标主要有发芽率、发芽势、活力指数、发芽指数等指标。通常生活力高的种子不仅发芽指数高,而且幼苗生长量较大,适应外界不良环境能力强^[12,13]。有研究表明,在盐胁迫下,种子生活力 3 项指标受抑制强度均依次为:活力指数 > 发芽指数 > 发芽率,说明发芽活力指数是最敏感的指标^[14]。一般认为发芽指数和活力指数是表示种子活力高低的指标,活力高的种子不仅发芽率高、发芽速度快,而且幼苗生长量大,说明改良后的盐碱地更加适应于植物生长。本试验选择白菜种子进行室内和野外试验的原因是:白菜是一种对外界土壤环境要求非常严格的物种,很多他感研究均用白菜种子发芽进行,如果改良后能够使白菜发芽并生长的话,说明改良效果明显,否则效果不显著。

通过各种土壤改良剂对比(表 2),从发芽率可以看出,壤土的种子发芽率达到 93.3% 、发芽指数为 63.4% 、活力指数为 3.7 ,施用的 17 中改良剂当中有 11 种改良剂(HPMA、Gypsum、HEDP、T-225、PAPEMP、MA-AA、ATMP、AA/AMPS、PAA、Charcoal、BHMTMPMA)有一定效果,6 种改良剂(Wood vinegar、EDTA、H + Resin 732、CA、CC、NTA)没有使种子发芽。与碱土对照相比,施用改良剂后使碱土种子发芽率等各项指标均有所提高,按发芽率从高至低排列可以看出,施用聚马来酸酐后种子活力指数、发芽指数、发芽率、发芽势均高于其他 10 种有效土壤改良剂。通过聚马来酸酐改良后的盐碱土发芽率与发芽势达 72.5% ,发芽指数较高达到 36.2 ,活力指数达到 1.2 ,在 17 中改良剂改良效果与壤土最为接近,说明高聚物改良剂聚马来酸酐在改良盐碱地有一定成效;同时,石膏、HEDP、T225、PAPEMP、MA-AA、ATMP 发芽率各项指标较为接近,从发芽活力指数上来看,石膏改良效果较明显,活力指数达到 1.0 ;而 AA/AMPS、PAA、木炭、BHMTMPMA 等效果不明显,发芽各项指标均较低。

从 pH 值与盐分可以看出,壤土 pH 值为 6.9 ,电导率为 $978\mu\text{S}/\text{cm}$,碱土 pH 值约为 10.6 左右。在 11 种有

效改良剂改良下,对盐分抑制并不明显,但对盐碱土 pH 值降低有显著作用(除木炭以外),pH 最低可降至 4.5。同比之下,无效改良剂 pH 值均未明显降低,pH 值最低降至 8.7。说明在改良剂处理后使碱土 pH 降低,可能是导致种子发芽的主要因素(图 1)。电导率与发芽各相关指标的线性相关均未达到显著水平($p > 0.05$),说明盐分改变在改良过程中对于种子发芽起到相对次要的作用。

表 2 17 种土壤改良剂改良盐碱土效果的比较

Table 2 The contrast of 17 Krilium on the effectiveness of amelioration of saline-alkali soil

土壤改良剂 Soil krilium	电导率 Electrical conductance ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	发芽率 Germination ratio (%)	发芽势 Germination potential(%)	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index
壤土 Normal soil(对照)	978(26.2)	6.9(0.1)	93.3(7.6)	90.0(7.6)	63.4(7.9)	3.7
盐碱土 Saline-alkali soil(对照)	2510(272.3)	10.7(0.2)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0
HPMA	2660(330.2)	6.1(0.2)	72.5(4.8)	72.5(4.8)	36.2(8.3)	1.2
Gypsum	1570(184.3)	7.7(0.1)	27.5(7.5)	27.5(7.5)	12.6(3.6)	1.0
HEDP	1401(128.2)	5.9(0.3)	26.7(13.2)	26.7(13.2)	15.3(10.4)	0.8
T-225	1657(112.6)	7.9(0.2)	23.3(9.2)	23.3(9.2)	12.6(5.9)	0.7
PAPEMP	2530(222.4)	6.0(0.1)	23.3(23.1)	13.3(11.1)	12.0(6.1)	0.4
MA-AA	2860(232.1)	4.5(0.1)	23.3(20.2)	16.7(22.4)	14.8(12.4)	0.4
ATMP	2290(130.2)	6.1(0.2)	23.3(7.5)	23.3(7.5)	13.1(5.0)	0.3
AA/AMPS	1830(93.9)	7.6(0.1)	16.7(12.4)	16.7(12.4)	11.8(10.0)	0.5
PAA	1070(59.9)	6.7(0.1)	10.0(6.3)	3.3(7.1)	2.6(1.5)	0.1
Charcoal	5700(297.3)	10.4(0.2)	10.0(6.3)	10.0(6.3)	5.1(3.1)	0.5
BHMTMPMA	2680(13.5)	6.1(0.1)	10.0(9.5)	0.00(0.0)	1.67(1.5)	0.1
Wood vinegar	978(24.3)	8.7(0.2)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0
EDTA	670(33.3)	9.7(0.2)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0
H ⁺ Resin 732	740(46.5)	10.0(0.3)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0
CA	8200(373.2)	10.2(0.1)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0
CC	2120(206.4)	9.3(0.2)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0
NTA	903(59.6)	9.1(0.1)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0

括号内为标准误 Data in parenthesis is the standard error of the data

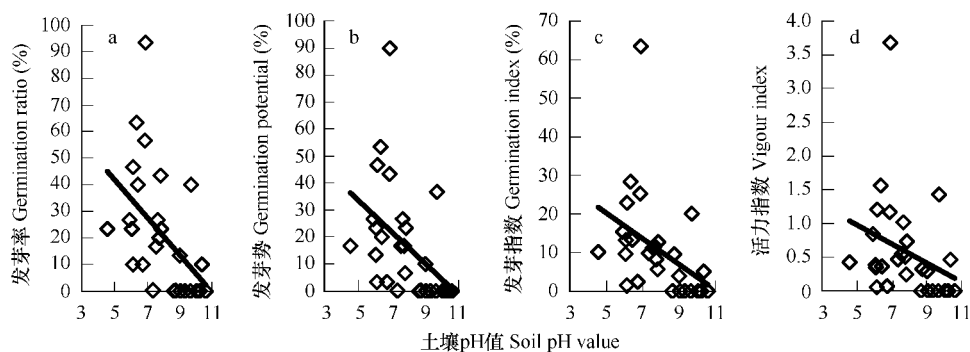


图 1 土壤 pH 值和白菜种子发芽指标的相关性

Fig. 1 Correlation between soil pH value and seed germination parameters

(a) 发芽率 Germination ratio, $y = -7.03x + 76.9$, $R^2 = 0.25$, $p < 0.05$, $n = 46$; (b) 发芽势 Germination potential, $y = -5.87x + 63.0$, $R^2 = 0.20$, $p < 0.05$, $n = 46$; (c) 发芽指数 Germination index, $y = -3.31x + 36.8$, $R^2 = 0.17$, $p < 0.05$, $n = 46$; (d) 活力指数 Germination vigour index, $y = -0.14x + 1.67$, $R^2 = 0.09$, $p = 0.11$, $n = 46$

2.2 土壤改良剂与外施钙源石膏的协同效应分析

将 3 种有效改良剂(聚马来酸酐、聚丙烯酸、木炭)和 6 种无效改良剂(木醋液、EDTA、阳离子交换树脂(H^+ 型)、柠檬酸、柠檬酸钙、氨三乙酸)与外施钙源(石膏)混合,结果如表 3 所示。从发芽率等各项指标对比

表 3 土壤改良剂与外施钙源共同施加的改良效果对比表

Table 3 Effect of different kriliium and gypsum addition on soil saline-alkali and seed germination

土壤改良剂 Soil kriliium	电导率 Electrical conductance ($\mu S/cm$)	pH pH value	发芽率 Germination ratio (%)	发芽势 Germination potential(%)	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index
施加钙源 Gypsum addition						
对照碱土 control saline-alkali soil	2510(272.3)	10.7(0.2)	0.0(0.0)a	0.0(0.0)a	0.0(0.0)a	0.0
+ Gypsum	1570(184.3)	7.7(0.1)	27.5(7.5)b	27.5(7.5)b	12.6(3.6)b	1.0
+ 施加聚马来酸酐、钙源 HPMA and gypsum addition						
+ Gypsum	1570(184.3)	7.7(0.1)	27.5(7.5)a	27.5(7.5)a	12.6(3.6)a	1.0
+ HPMA	2660(330.2)	6.1(0.2)	72.5(4.8)b	72.5(4.8)b	36.2(8.3)b	1.2
+ HPMA + Gypsum	2250(189.2)	6.3(0.1)	63.0(9.2)b	53.3(15.2)b	28.3(4.2)ab	1.6
施加聚丙烯酸、钙源 PAA and gypsum addition						
+ Gypsum	1570(184.3)	7.7(0.1)	27.5(7.5)a	27.5(7.5)a	12.6(3.6)ab	1.0
+ PAA	1070(59.9)	6.7(0.1)	10.0(6.3)a	3.3(7.1)a	2.6(1.5)a	0.1
+ PAA + Gypsum	2060(233.2)	6.4(0.1)	40.0(12.3)a	20.0(6.35)a	13.3(4.24)b	0.4
施加木炭、钙源 Charcoal and gypsum addition						
+ Gypsum	1570(184.3)	7.7(0.1)	27.5(7.5)ab	27.5(7.5)ab	12.6(3.6)a	1.0
+ Charcoal	5700(297.3)	10.4(0.2)	10.0(6.3)a	10.0(6.3)a	5.1(3.1)a	0.5
+ Charcoal + Gypsum	1270(134.5)	9.7(0.1)	40.0(6.1)b	36.7(3.1)b	21.1(2.3)b	1.4
施加聚木醋液、钙源 Woody vinegar and gypsum addition						
+ Gypsum	1570(184.3)	7.7(0.1)	27.5(7.5)b	27.5(7.5)a	12.6(3.6)b	1.0
+ Wood vinegar	978(24.3)	8.7(0.2)	0.0(0.0)a	0.0(0.0)a	0.0(0.0)a	0.0
+ Wood vinegar + Gypsum	2120(275.4)	7.8(0.1)	43.3(9.3)b	6.7(2.1)a	5.6(1.5)ab	0.2
施加 EDTA、钙源 HPMA and gypsum addition						
+ Gypsum	1570(184.3)	7.7(0.1)	27.5(7.5)b	27.5(7.5)b	12.6(3.6)b	1.0
+ EDTA	670(33.3)	9.7(0.2)	0.0(0.0)a	0.0(0.0)a	0.0(0.0)a	0.0
+ EDTA + Gypsum	2090(213.4)	7.8(0.2)	20.0(21.3)b	16.7(17.2)b	8.2(1.3)ab	0.5
施加 732 型阳离子交换树脂(H^+ 型)、钙源 H^+ resin and gypsum addition						
+ Gypsum	1570(184.3)	7.7(0.1)	27.5(7.5)b	27.5(7.5)b	12.6(3.6)b	1.0
+ H + resin 732	740(46.5)	10.0(0.3)	0.0(0.0)a	0.0(0.0)a	0.0(0.0)a	0.0
+ H + resin 732 + gypsum	1650(127.2)	9.0(0.2)	13.3(3.4)ab	10.0(11.2)ab	3.9(1.8)ab	0.3
施加柠檬酸、钙源 Citric acid and gypsum addition						
+ Gypsum	1570(184.3)	7.7(0.1)	27.5(7.5)ab	27.5(7.5)ab	12.6(3.6)ab	1.0
+ CA	8200(373.2)	10.2(0.1)	0.0(0.0)a	0.0(0.0)a	0.0(0.0)a	0.0
+ CA + Gypsum	2170(232.1)	6.9(0.1)	53.(13.3)b	53.3(13.3)b	25.3(7.0)b	1.2
施加柠檬酸钙、钙源 Calcium citrate and gypsum addition						
+ Gypsum	1570(184.3)	7.7(0.1)	27.5(7.5)b	27.5(7.5)b	12.6(3.6)b	1.0
+ CC	2120(206.4)	9.3(0.2)	0.0(0.0)a	0.0(0.0)a	0.0(0.0)a	0.0
+ CC + Gypsum	2280(262.3)	8.7(0.2)	0.3(0.1)b	0.3(0.1)b	10.1(4.4)ab	0.3
施加氨三乙酸、钙源 NTA and gypsum addition						
+ Gypsum	1570(184.3)	7.7(0.1)	27.5(7.5)b	27.5(7.5)a	12.6(3.6)b	1.0
+ NTA	903(59.6)	9.1(0.1)	0.0(0.0)a	0.0(0.0)a	0.0(0.0)a	0.0
+ NTA + Gypsum	2060(113.4)	7.3(0.2)	0.3(0.1)b	0.2(0.1)a	7.5(2.7)ab	0.5

括号内为标准误;纵行相同字母代表差异不显著($p > 0.05$),不同字母代表差异显著($p < 0.05$) Data in parenthesis are the standard error of the mean value; Different letters in the longitudinal row indicate the difference between the two treatment is significant ($p < 0.05$), or else the different is not significant ($p > 0.05$)

可以看出,以石膏为外施钙源与碱土及9种土壤改良剂相混合,可以发现碱土对照在无钙源条件下,种子活力各项指标均为0。而施钙源后种子各项指标均显著提高($p < 0.05$),发芽率与发芽势达到27.5%,发芽指数达到12.6,活力指数达到1.0。在3种有效改良剂中,木炭施加钙源后,与单独施用木炭改良后的发芽率等各项指标有所提高,并达到显著差异,但木炭和外施钙源混合与单独外施钙源处理相比,改良效果不明显,无明显差异。聚丙烯酸施钙前后没有明显变化,改良效果不显著。聚马来酸酐($42.8\text{L}/\text{m}^3$)与石膏($10\text{kg}/\text{m}^3$)混合处理后其种子发芽率等各项指标均低于单独施用聚马来酸酐种子发芽各项指标,与单独石膏($10\text{kg}/\text{m}^3$)处理相比种子发芽率等各项指标均达到显著水平($p < 0.05$)。在6种无效土壤改良剂中,木醋液、乙二醇四乙酸、732型阳离子交换吸附树脂(H^+ 型)、柠檬酸、柠檬酸钙、氨三乙酸在未加钙源时种子活力各项指标均为0。施钙源混合后种子发芽率等各项指标均有所提升,除阳离子交换树脂(H^+ 型)外均达到显著差异($p < 0.05$),但二者混合后的发芽率等各项指标与单独施用施钙源相比,略低,甚至达到显著差异。这说明无论是有效改良剂还是无效改良剂与外施钙源混合后,对种子的发芽没有产生协同效应。

从电导率和pH施钙前后变化可以看出,施加钙源后对pH值变化影响很大,无论是有效改良剂还是无效改良剂施加钙源后(除HPMA外),改良盐碱土的pH值均低于单独施用改良剂的pH值,其中柠檬酸施用钙源后变化最大,pH值由施钙前10.2变为施钙后的6.9,而9种与钙源混合的改良剂电导率没有统一的变化趋势。造成施钙后无效改良剂改良的土壤种子发芽率各项指标有所加,是由于无效改良剂施钙后pH值降低,导致种子发芽胁迫程度减轻造成。3种有效改良剂与外施钙源混合改良没有产生协同效应的原因是,有效改良剂单独施用其pH值已经适合种子发芽的条件下,施加钙源后没有起到降低pH值的作用,致使土壤钙源过剩所致。同时,也印证了盐碱土种子发芽pH的高低起着至关重要的作用,盐分是影响发芽率高低的次要因素。

2.3 有效土壤改良剂最佳聚合物HPMA和外施钙源石膏的配比实验

通过对表2分析可以看出9种土壤改良剂中聚马来酸酐与石膏改良效果较好,通过表3可以看出,施加外源钙后,可以使有效改良剂和无效改良剂种子活力各项指标均有明显提高,大大减低了盐碱对种子萌发的抑制。为了进一步应用于实践筛选改良剂最佳配比设置单位体积盐碱土混合石膏比例梯度为:10、25、50、100、 $150\text{kg}/\text{m}^3$;加入聚马来酸酐量为14.3、42.8、 $85.6\text{L}/\text{m}^3$,实验结果如表3所示。

如表4所示,pH值随着钙量增加,呈下降趋势,这与孙毅^[2]等研究结果相一致;而盐分则呈上升趋势。发芽各项指标可以看出(如表3),当钙量从 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 增加至 $25\text{kg}/\text{m}^3$ 时各项指标呈上升趋势。当超过 $25\text{kg}/\text{m}^3$ 时,各项指标出现明显下降,这可能是由于当钙量逐渐增加,游离脯氨酸含量随盐胁迫的强度增加而增加,且对钙的浓度的依赖性也逐渐增强;当含钙量超过需求的钙量时,促进了膜质过氧化物丙二醛(MDA)产生,破坏了细胞膜透性,导致生物量有所下降,活力指数降低。在钙梯度中施钙量为 $25\text{kg}/\text{m}^3$ 的各项指标均为最高,且发芽指数与其他梯度相比达到显著差异($p < 0.05$),使改良后的盐碱土发芽具有较高的一致性,幼苗生长量较高。由此可见,在石膏梯度筛选中 $25\text{kg}/\text{m}^3$ 施加后改良效果最好,按耕作层0.2m计算,即盐碱地改良石膏用量为 $50\text{t}/\text{hm}^2$ 。高玉山等研究^[15],表明 $2.0\text{kg}/\text{m}^2$ 施用石膏改良效果最佳,即在盐碱地中施钙量为 $40\text{t}/\text{hm}^2$ (耕作层0.2m计算)。也有报道提出^[16]干旱半干旱地区,维持土壤适宜入渗能力的石膏用量5~ $10\text{t}/\text{hm}^2$,当用量为 $50\text{t}/\text{hm}^2$ 石膏施用量深翻,改良效果显著高于其他改良剂。这与本研究结果相一致。

在3个聚马来酸酐梯度中可以看出pH值与盐分变化趋势与钙梯度变化趋势相同,聚马来酸酐 $42.8\text{L}/\text{m}^3$ 改良的盐碱土中个生长指标较高,与14.3、 $85.6\text{L}/\text{m}^3$ 相比,各项发芽指标均达到显著差异($p < 0.05$)。当出超过 $42.8\text{L}/\text{m}^3$ 时,发芽各项指标成下降趋势,可能是由于过量聚马来酸酐对种子有一定的毒害作用,导致发芽率减少,活力指数降低。

通过外源钙和聚马来酸酐混合施用的效果实验对比可以发现(如表4),外源钙($25\text{kg}/\text{m}^3$)与聚马来酸酐($42.8\text{L}/\text{m}^3$)混合后,其各生长指标为发芽率为63.33%、发芽势达到53.33%、发芽指数为27.34、活力指数2.51,使碱土的pH值由原来的10.6降低为6.32,但各项pH值、电导率、发芽率等各项指标均未超出单独施

用外源钙或聚马来酸酐各项指标,未达到显著差异($p > 0.05$),没有产生协同效应。产生的原因可能在于:由于聚马来酸酐不仅是高聚物土壤改良剂,也是高效除垢剂,与外施钙源微溶性石膏反应,影响聚马来酸酐的土壤改良效果,同时降低了外施钙源的土壤交换作用,降低了钙对植物的保护作用。

表 4 土壤改良剂(聚马来酸酐)梯度与钙源梯度改良效果对比表

Table 4 Gradient experiment of HPMA and gypsum addition on effectiveness of saline-alkali soil amelioration

土壤改良剂 (用量)	电导率 Electrical conductance ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH value	发芽率 Germination ratio (%)	发芽势 Germination potential (%)	发芽指数 Germination index	活力指数 Germination vigor index
外源钙 Gypsum addition (kg/m^3)						
10	2180(322.3)	9.7(0.1)	33.3(13.3)ab	33.3(13.3)ab	15.5(7.5)ab	1.0
25	3390(351.7)	8.9(0.1)	70.0(6.3)b	70.0(6.3)b	48.9(3.2)c	2.9
50	4060(365.2)	8.8(0.1)	46.7(19.2)ab	43.3(17.7)ab	31.1(15.7)b	2.1
100	4655(364.4)	8.1(0.2)	30.0(2.3)ab	30.0(2.3)ab	13.4(7.9)abc	0.5
150	4370(264.5)	8.0(0.2)	10.0(10.0)a	3.3(3.3)a	3.9(2.6)a	0.3
聚马来酸酐 HPMA addition (L/m^3)						
14.3	1637(142.6)	8.0(0.1)	13.3(9.2)a	13.3(9.2)a	9.1(6.3)a	0.5
42.8	2630(332.3)	6.2(0.1)	76.7(13.2)b	63.3(13.6)b	47.5(14.6)b	2.8
85.6	3820(333.2)	4.8(0.1)	23.3(9.2)a	23.3(9.2)a	13.6(4.5)a	0.6
外源钙和聚马来酸酐 Addition of HPMA (L/m^3) and gypsum (kg/m^3)						
42.8	2630(332.3)	6.2(0.1)	76.7(3.1)a	63.3(3.3)a	47.5(14.6)a	2.8
25	3390(351.7)	8.9(0.1)	70.0(6.2)a	70.0(6.2)a	48.9(3.2)a	2.9
42.8 + 25	2160(254.1)	6.3(0.1)	63.3(6.2)a	53.3(3.4)a	27.3(1.1)a	2.5

括号内为标准误;字母表示同一处理组不同处理时间之间的差异水平,相同字母代表差异不显著($p > 0.05$),不同字母代表差异显著($p < 0.05$)。Data in parenthesis are the standard error of the mean value; Different letters in the same row indicate the difference between the two treatment is significant ($p < 0.05$), or else the different is not significant ($p > 0.05$)

2.4 有效土壤改良剂最佳聚合物 HPMA 的野外长期实验结果

通过上述分析可以得知,室内试验表明 HPMA 对于改良盐碱地具有良好的效果。但是在野外条件下如何表现,尚需要试验证明。经过 HPMA 处理后的盐碱地,前 35d 白菜平均株高、平均基茎和平均叶片面积都有明显增长,生长速率(拟合直线的斜率)均表现为正值,而 35d 以后叶片开始出现萎蔫,群落平均株高和叶面积表现为缩小,生长速率(拟合直线的斜率)均表现为负值。这说明 HPMA 的改良效果至多能够保持 1 个月左右,之后土壤盐碱度升高导致白菜萎蔫衰亡。如果使用 HPMA 进行盐碱地改良的话,应该多次施加,可能效果会更好。

表 5 野外施加 HPMA 种植白菜后白菜生长情况

Table 5 Influences HPMA-addition on the growth of cabbage seedlings

指标 Parameters	对照 Control	施加聚马来酸酐 Addition of HPMA
叶大小(a, cm^2)与生长日期(x)	没有发芽	$x < 35\text{d}; y = 0.2401x - 1.4152; R^2 = 0.85$
Leaf size (cm^2) and growing period	No sprouting	$x > 35\text{d}; y = -0.2421x + 15.465; R^2 = 0.79$
株高(y)与生长日期(x)	没有发芽	$x < 35\text{d}; y = 0.05x - 0.8; R^2 = 0.84$
Height cm and growing period	No sprouting	$x > 35\text{d}; y = -0.03x + 0.93; R^2 = 0.78$
基径(y)与生长日期(x)	没有发芽	$y = 0.006x + 0.1407; R^2 = 0.75$
Diameter mm and growing period	No sprouting	

3 结论

(1) 利用以白菜种子发芽率等各项指标为衡量标准,对 17 中改良剂的筛选可以看出,有 11 种为有效改良剂,与碱土相比具有较高的发芽指标,对改良土壤 pH 值降低有着明显作用,但对盐分抑制作用不明显,其中聚马来酸酐在改良盐碱过程中具有较好的作用,提高盐碱胁迫下的发芽率、发芽指数、活力指数分别达到

72.5%, 36.2, 1.2, 将 pH 值控制在 6.13。有 6 种为无效改良剂其各项发芽指标均为 0, 对改良土壤 pH 值没有起到的降低作用。pH、土壤电导率与种子发芽率进行相关比较发现, 改良后种子发芽能力与改良土壤的 pH 值相关性更大。由此可见, 在盐碱土种子发芽 pH 的高低起着至关重要的作用, 盐分是影响发芽率高低的次要因素。

(2) 通过 3 种有效改良剂和 6 种无效改良剂与钙源混合后发现, 无论是有效改良剂还是无效改良剂与钙源混合后没有产生协同效应, 但施加钙源后 pH 值均也有所下降, 是无效改良剂改良的盐碱土种子发芽率提高, 说明外施钙源缓解盐碱土中的碱胁迫有一定作用, 能够缓解盐碱土对种子的毒害作用, 为种子发芽提供适宜的环境。

(3) 通过设置聚马来酸酐与石膏的不同梯度筛选最佳配比, 通过种子发芽率、发芽指数、活力指数等指标可以明显看出在不同配比中, 单独施用 $42.8\text{L}/\text{m}^3$ 聚马来酸酐或 $25\text{kg}/\text{m}^3$ 石膏为最佳比例, 二者单独施用改良盐碱土其发芽率高于二者混合施用的发芽率, 不存在协同效应, 故二者不宜混合施用。同时, 通过野外试验表明, $25\text{L}/\text{m}^3$ 聚马来酸酐可以使白菜在 1 个月左右的时间内保持增长, 之后开始萎缩死亡。因此, 野外进行改良应该考虑多次少量施用或适当增加浓度的方法来增强改良效果。

References:

- [1] Gupta RK, MS Zia. Reclamation and management of alkaline soils. In: Resource book. Rice - Wheat Consortium of Indo - Gangetic Plains, New Delhi, India, 2002. 194 - 198.
- [2] Sun Y, Gao Y S, Yan X G, *et al.* The study of gypsum ameliorating soda alkaline soil. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(s1): 97 - 101.
- [3] Wang Z Q, *et al.* Saline Soil in China. Beijing: Science Press. 1993. 470 - 483.
- [4] Zhang L M, Deng W G. Research on the soil corrective and its current application. Journal of South China University of Tropical Agriculture, 2005, 11(2): 32 - 34.
- [5] Liu B D, Wang Y, Liang Q L. Effect of Soil Ameliorant on Soda Saline-Alkali Soils and Germination Percentage of Pasture Species. Journal of Northeast Forestry University, 2006, 34(3): 52 - 53.
- [6] Kazanskii K S, *et al.* chemistry and physics of agricultural hydrogels. Adv. Polym. Sci, 1992, 104: 97 - 133.
- [7] Bicerano J. Predicting key polymer properties to reduce erosion in irrigated soil. Soil Sci, 1994, 158(4): 255 - 266.
- [8] Bouranis D L, *et al.* Designing synthetic polymers as soil conditioner. Commun soi soc. Plant Anal, 1995, 21(9-10): 1455 - 1480.
- [9] Sertain J B. Effects of clay and polymer amendments on the physical and chemical properties of soil. Journal of Turfgrass Management 1(2): 1 - 18.
- [10] Long M J, Zheng F S. Review on the study of polymer soil amendments. Chinese Journal of Soil Science, 2000, 5(31): 199 - 202.
- [11] Zheng G H, ed. The study of seed physiology. Beijing: Science Press, 2004. 623 - 624.
- [12] Shi L R, Cui X G, Liu Z H, *et al.* Effects of complex saline-alkali stress on the seed germination of upland rice. Seed, 2006, 2(2): 25 - 27.
- [13] Wang X W. The effects of different concentrations of salt on potato plantlets in vitro. Chinese Potato, 1998, 12(4): 203 - 207.
- [14] Zhu Z H, Hu R H, *et al.* The salty coercion the influence which sprouts to the different wheat variety seed. Crop Genetic Resources, 1996, 4: 25 - 29.
- [15] Gao Y S, Zhu Z Y, *et al.* Researches on application of gypsum for the improvement of soda saline and alkaline soil. Jilin Agricultural Sciences, 2003, 28(6): 26 - 31.
- [16] Li F H, ed. Physics and chemistry of Soil. Beijing: Chemistry and Industry Press, 2006. 294 - 311.

参考文献:

- [2] 孙毅, 高玉山, 闫孝贡, 等. 石膏改良苏打盐碱土研究. 土壤通报, 2001, 32: 97 - 101.
- [3] 王遵亲, 等. 中国盐渍土. 北京: 科学出版社, 1993. 470 - 483.
- [4] 张黎明, 邓万刚. 土壤改良剂的研究与应用现状. 华南热带农业大学学报, 2005, 11(2): 32 - 34.
- [5] 刘宝东, 王跃, 梁绮兰. 土壤改良剂对苏打盐碱土改良效果和对牧草发芽率的影响. 东北林业大学学报, 2006, 34(3): 52 - 53.
- [10] 龙明杰, 曾繁森. 高聚物土壤改良剂的研究进展. 土壤通报, 2000, 5(31): 199 - 202.
- [11] 郑光华主编. 种子生理研究. 北京: 科学出版社, 2004. 623 - 624.
- [12] 时丽冉, 崔兴国, 刘志华, 等. 混合盐碱胁迫对旱稻种子萌发的影响. 种子, 2006, 2(2): 25 - 27.
- [13] 王新伟. 不同盐浓度对马铃薯试管苗的胁迫效应. 马铃薯杂志, 1998, 12(4): 203 - 207.
- [14] 朱志华, 胡荣海, 宋景芝, 等. 盐胁迫对不同小麦品种种子萌发的影响. 中国种业, 1996, 4: 25 - 29.
- [15] 高玉山, 朱知运, 等. 石膏改良苏打盐碱土田间定位试验研究. 吉林农业科学, 2003, 28(6): 26 - 31.
- [16] 李法虎主编. 土壤物理化学. 北京: 化学工业出版社, 2006. 294 - 311.