中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

# 复合改良物料对滨海盐土的改土降盐效果与综合评价

张晓东， 李兵， 刘广明， 孙建平， 鲁雪林， 王秀萍

引用本文:
张晓东, 李兵, 刘广明, 等. 复合改良物料对滨海盐土的改土降盐效果与综合评价[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(11): 1744−1754.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190001

---

**您可能感兴趣的其他文章**

Articles you may be interested in

盐地碱蓬生长对滨海重盐碱地的改土效应

Soil improving effect of Suaeda salsa on heavy coastal saline−alkaline land

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(10): 1578−1586 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190178

环渤海缺水区盐碱地改良利用技术研究

Reclamation and utilization of saline soils in water−scarce regions of Bohai Sea

中国生态农业学报. 2018, 26(10): 1521−1527 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180725

咸水结冰灌溉改良盐碱地的研究进展及展望

Advances and expectations of researches on saline soil reclamation by freezing saline water irrigation

中国生态农业学报. 2016, 24(8): 1016−1024 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160108

木霉制剂改良滨海盐渍土台田生态效应

Ecological effect of Trichoderma agent on platform field soil improvement in saline coastal area

中国生态农业学报. 2016(1): 90−97 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150599

轮作绿肥对盐碱地土壤性质、后作青贮玉米产量及品质的影响

Effects of green manure rotation on soil properties and yield and quality of silage maize in saline−alkali soils

中国生态农业学报. 2018, 26(6): 856−864 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170952

**DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190001**

张晓东, 李兵, 刘广明, 孙建平, 鲁雪林, 王秀萍. 复合改良物料对滨海盐土的改土降盐效果与综合评价[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(11): 1744−1754
ZHANG X D, LI B, LIU G M, SUN J P, LU X L, WANG X P. Effect of composite soil improvement agents on soil amendment and salt reduction in coastal saline soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(11): 1744−1754

# 复合改良物料对滨海盐土的改土降盐效果与综合评价*

张晓东[1], 李 兵[2], 刘广明[2], 孙建平[1], 鲁雪林[1], 王秀萍[1**]

(1. 河北省农林科学院滨海农业研究所 唐山 063200; 2. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室/中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

**摘 要:** 为实现泥质滨海盐土低成本快速脱盐后种植经济作物, 本研究以磷石膏、牛粪、腐殖酸和玉米秸秆为复合改良物料的原料, 利用了“深翻耕、浅改良、高垄作、少滴灌”农艺措施和耐盐植物梯次种植的生物措施, 采取 $L_{16}(4^5)$正交设计开展试验研究, 系统分析了不同复合改良物料对泥质滨海重盐土的改土降盐和对经济作物黄蜀葵的增产效果; 应用模糊数学评判原理与方法, 综合评价了各复合改良物料的改土降盐与增产效应, 确定出适合滨海泥质盐土应用的优选复合改良物料。结果表明: 在“翻耕 40 cm, 改良 30 cm, 起垄 15 cm, 滴灌土壤基质势控制在−10 kPa, 前茬种植田菁”的综合农艺措施条件下, 本研究中物料成本在 2.55~6.01 元·m$^{-2}$ 的各复合改良物料对泥质滨海盐土均有显著的改土降盐效果, 0~10 cm 土层土壤盐分含量均由 10.86 g·kg$^{-1}$ 下降到 2.0 g·kg$^{-1}$ 以下, 10~20 cm 土层土壤盐分含量下降到 2.5 g·kg$^{-1}$ 以下; 0~10 cm 土层土壤有机质增加到 12 g·kg$^{-1}$ 以上, 土壤碱解氮和有效磷含量提升明显, 土壤大团聚体含量增加 2.41~7.62 倍。以土壤盐分含量、pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、微团聚体为评价指标, 结合物料成本, 筛选出适宜于滨海泥质重盐渍土的最优复合改良物料: 22 500 kg·hm$^{-2}$ 磷石膏+105 m$^3$·hm$^{-2}$ 有机肥+3 750 kg·hm$^{-2}$ 腐殖酸+45 m$^3$·hm$^{-2}$ 玉米秸秆, 该最优复合物料应用两年后, 土壤有机质、碱解氮含量最高, 与对照相比分别增加 181.87%和 130.52%, 物料施用成本仅 4.05 元·m$^{-2}$。

**关键词:** 滨海盐土; 复合改良物料; 农艺措施; 耐盐植物; 土壤含盐量; 土壤养分; 盐碱地改良

**中图分类号:** S156.4

**文章编号:** 2096-6237(2019)11-1744-11 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

# Effect of composite soil improvement agents on soil amendment and salt reduction in coastal saline soil*

ZHANG Xiaodong[1], LI Bing[2], LIU Guangming[2], SUN Jianping[1], LU Xuelin[1], WANG Xiuping[1**]

(1. Institute of Coast Agriculture, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Tangshan, 063200, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture / Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** The aim of this study was to develop a rapid, low-cost method to desalinate muddy coastal saline soil to facilitate its use for economic crops. We used composite improvers (phosphogypsum, dung, humic acid, and corn straw), comprehensive agronomic measures (deep tillage, shallow soil improvement, high ridge cultivation, and drip irrigation), biological measures

* 河北省科技厅项目(152776122D)、河北省创新工程项目和江苏省重点研发计划项目(BE2017389, BE2018759)资助

** 通信作者: 王秀萍, 主要研究方向为滨海盐碱地改良与农业高效利用。E-mail: bhswxp@163.com
张晓东, 主要研究方向为盐碱地高效利用。E-mail: nkybhszxd@163.com

收稿日期: 2019-01-01 接受日期: 2019-04-18

* This study was supported by the Hebei Provincial Research Project of China (152776122D), the Hebei Provincial Innovation Project of China and the Key R&D Project of Jiangsu Province of China (BE2017389, BE2018759).

** Corresponding author, E-mail: bhswxp@163.com

Received Jan. 1, 2019; accepted Apr. 18, 2019

(step planting of salt-tolerant plants), and adopted $L_{16}(4^5)$ orthogonal design, and fuzzy mathematic evaluation to systematically analyze the effects of composite improvers on soil amelioration, salt reduction, and *Abelmoschus manihot* (L.) Medic yield. The total effect of each composite improver was comprehensively evaluated, and the preferred improvers suitable for application on coastal muddy saline soil were determined. Results showed that composite improvers with a capital cost of 2.55–6.01 ¥·m$^{-2}$ significantly reduced soil salt content when used with comprehensive agronomic measures consisting of 40 cm of tillage, 30 cm of soil improvement, 15 cm of ridge, drip irrigation controlled to −10 kPa of soil potential, and *Sesbania cannabina* (Retz.) Poir used as the fore-rotating plant. Soil salt content decreased from 10.86 g·kg$^{-1}$ to <2.0 g·kg$^{-1}$ in the 0–10 cm soil layer and to <2.5 g·kg$^{-1}$ in 10–20 cm layer. Soil organic matter content increased to >12 g·kg$^{-1}$; there were significant increases in alkali-hydrolyzed nitrogen and available phosphorus, and the soil macroaggregate content was 2.41–7.62 times higher than that of the control. The proper combinations of composite improvers for heavy saline silt soil were screened based on the comprehensive evaluation of soil salt content, pH, organic matter, alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus, available potassium, and micro-aggregates. A combination of 22 500 kg·hm$^{-2}$ phosphogypsum + 105 m$^3$·hm$^{-2}$ organic fertilizer + 3 750 kg·hm$^{-2}$ humic acid + 45 m$^3$·hm$^{-2}$ maize straw provided the optimum effect on the improvement of coastal saline soil. Soil organic matter and alkali-hydrolyzed nitrogen increased by 181.87% and 130.52%, respectively, whereas the capital cost was only 4.05 ¥·m$^{-2}$. Two other combinations provided suboptimal results: 15 000 kg·hm$^{-2}$ phosphogypsum + 75 m$^3$·hm$^{-2}$ organic fertilizer + 3 750 kg·hm$^{-2}$ humic acid + 135 m$^3$·hm$^{-2}$ maize straw (capital cost 4.48 ¥·m$^{-2}$); and 30 000 kg·hm$^{-2}$ phosphogypsum + 5 m$^3$·hm$^{-2}$ organic fertilizer + 2 250 kg·hm$^{-2}$ humic acid + 135 m$^3$·hm$^{-2}$ maize straw (capital cost 5.02 ¥·m$^{-2}$).

**Keywords:** Coastal saline soil; Composite soil improvement agent; Agronomic measure; Salt tolerant plant; Soil salinity; Soil nutrient; Saline land improvement

环渤海地区由于重要的区位优势, 在京津冀一体化协同发展中具有重要地位。该区濒临渤海, 受陆海交替作用, 分布有大面积的淤泥质滨海盐土, 盐害造成土壤性质恶劣, 土壤钠吸附比(SAR)高, 土壤结构性差、透水性低, 有机质含量低, 植物无法正常生长[1-2]。迫切需要加速滨海盐土改良以满足区域农业发展和生态环境改善的需求。

针对滨海地区盐碱地改良、高效利用面临的一系列问题, 国内外开展了大量实质性的研究与应用, 目前盐碱地改良措施主要包括物理改良、化学改良、生物改良及综合措施等[3]。土壤施用物理、化学物料能取得一定的改良效果, 在一定程度上增加作物产量[4-6]。磷石膏富含植物生长所必须的 P、Mn、S、Zn、Si 等元素和土壤改良所需的 $Ca^{2+}$和 $SO_4^{2-}$, 提高土壤中植物所需的养分含量, 降低土壤 pH, 优化土壤盐分组成[7]; 腐植酸类物质对盐碱土的理化性质改良效果明显[8]; 秸秆还田能够降低土壤盐分含量, 增加土壤养分含量[9]; 施用有机肥能够显著提高土壤有机质含量, 提高土壤速效养分含量, 促进团聚体形成, 并且对作物产量提高有明显的作用[10-13]。同时, 改良物料配合施用可提高改土降盐效果, 加速盐碱地地力提升, 促进作物生长。磷石膏和有机肥配合施用具有很好的压盐降盐效果, 可以显著降低土壤容重, 增强土壤透性[14]; 在滨海盐碱地上施用化学肥料添加腐植酸能够改善土壤的性状, 促进作物生长[15]; 脱硫石膏与腐植酸配施对滨海盐碱土的改良效果最显著, 能够显著改善土壤理化性能, 调节土壤离子平衡, 减少单盐毒害和生理干旱[16]; 无机-有机复合改良剂能够较好地改良滨海盐碱地[17]。因此, 以改良物料配合掺拌为主要措施, 以农艺、工程措施、耐盐植物利用相结合的综合改良技术以其优良的改良效果, 在植被恢复中广泛应用。河北省农林科学院滨海农业研究所研究人员采用滴灌与田间工程措施、复合物料改良措施以及耐盐植物利用相结合, 建立了滨海重盐碱地绿化技术模式[18-19]。但已有该类技术模式因物料用量大、成本高, 限制了现有技术的推广应用, 尤其适用于泥质滨海重盐碱地治理与农业开发利用方面的快速高效、简单实用的改良技术更为匮乏。

为了降低泥质滨海盐土改良成本, 提高改土脱盐效果, 达到经济作物利用的目的, 本研究以磷石膏、牛粪、腐植酸、玉米秸秆为复合改良物料原料, 筛选改土降盐效果好、作物产量高的复合改良物料, 与“深翻耕、浅改良、高垄作、少滴灌”综合农艺措施、耐盐经济作物田菁(*Sesbania cannabina* Retz. Poir)-黄蜀葵[*Abelmoschus manihot* (L.) Medic]梯次种植的生物措施相结合, 构建滨海重盐土农业利用优化技术模式, 为滨海盐土快速高效改良和规模化利用提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地基本情况

试验地位于河北省曹妃甸海水养殖基地的氯-钠型重度滨海盐碱地(39.23°N, 118.57°E), 土壤盐渍化程度高, 0~20 cm 的土壤盐分含量为 10.86 $g·kg^{-1}$, 地下水位 1.0~1.5 m, 地下水矿化度 15~20 $g·L^{-1}$, 土壤有机质、碱解氮严重匮乏, 土质黏重, 土壤结构性极差, 有机质、碱解氮严重缺乏。试验地土壤容重为 1.69 $g·cm^{-3}$, 有机质 4.51 $g·kg^{-1}$, 有效磷 31.09 $mg·kg^{-1}$, 碱解氮 46.08 $mg·kg^{-1}$, 速效钾 333.96 $mg·kg^{-1}$, 电导率 4.87 $dS·m^{-1}$, pH 8.62。试验于 2016—2017 年进行, 试验期间该区域平均日照时数为 2 845.1 h; 年平均≥10 ℃积温 4 535.6 ℃; 年平均降雨量为 546.2 mm。降水主要集中在 6、7、8 月(图 1)。

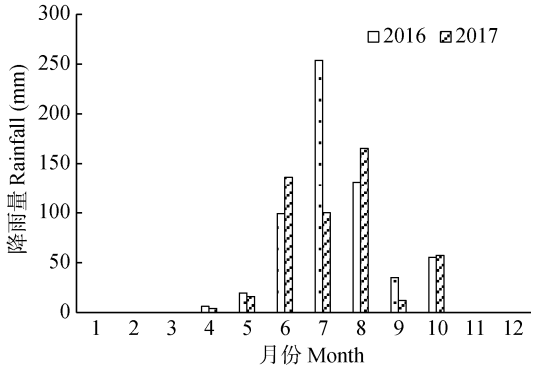


图 1 试验区 **2016—2017** 年的月降雨量
Fig. 1 Monthly rainfalls in experiment area from 2016 to 2017

### 1.2 供试材料

供试改良物料主要有磷石膏、腐熟牛粪、玉米秸秆和腐殖酸。磷石膏由秦皇岛华瀛磷酸有限公司提供, 为工业废料, 主要成分 $CaSO_4$; 腐熟牛粪为干牛粪, 有机质含量≥56%, 由玉田聚源养殖场提供; 腐植酸由唐山铁中腐殖酸厂提供; 玉米秸秆为当地生产玉米秸秆, 粉碎为 2~3 cm 长。供试作物黄蜀葵由河北清竹农业科技有限公司提供。

### 1.3 试验设计

改良物料种类及用量如表1所示。试验采用正交设计[20], 根据4因素、4水平选择$L_{16}(4^5)$正交表, 具体试验设计如表2所示。其中, 对照编号为“0”, 为不施用任何物料。本文中所有试验均采用等氮磷处理, 折合施纯氮225 $kg·hm^{-2}$(基追比为6∶4)和$P_2O_5$ 120 $kg·hm^{-2}$(作为基肥一次性施入)。

试验开始于2016年4月, 结束于2017年11月。土地平整后, 翻耕40 cm, 依次均匀撒施各种复合土壤改良物料, 然后浅耕20~30 cm。每个处理3次重复, 随机区组排列, 每个小区面积为 12 $m^2$(3 m×4 m)。2016 年种植耐盐性较强的经济饲草作物田菁, 成熟后的田菁全部刈割, 并运出大田; 2017 年种植耐盐性较弱的经济作物黄蜀葵。

种植方式采取垄作, 垄高 15 cm, 垄上宽 40 cm, 下宽 60~80 cm[21], 垄间距 60 cm。黄蜀葵采取单垄种植, 穴播, 每穴 4 粒, 穴距 40 cm。灌溉方式为滴灌, 作物生长前期(封垄前), 利用真空负压计(在滴灌带附近)监测滴头正下方 20 cm 深度土壤基质势以确定灌溉时间, 土壤基质势控制阈值为–10 kPa[22]。滨海重盐碱地“深翻耕、浅改良、垄作、滴灌”农艺措施模式见图 2(A 为翻耕与改良示意图; B 为垄作+滴灌示意图)。根据作物的需水规律, 盛花期滴灌 1~2 次。

表 1 供试土壤复合改良物料的原料种类及其用量
Table 1 Type and dosage of ingredients of composite soil improvement agents used in the experiment

| 原料 Ingredient | 施用水平 Application level | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 磷石膏 Phosphorusgypsum ($kg·hm^{-2}$) | 7 500 | 15 000 | 22 500 | 30 000 |
| 有机肥 Organic fertilizer ($m^3·hm^{-2}$) | 45 | 75 | 105 | 135 |
| 腐殖酸 Humic acid ($kg·hm^{-2}$) | 1 500 | 2 250 | 3 000 | 3 750 |
| 玉米秸秆 Maize straw ($m^3·hm^{-2}$) | 45 | 75 | 105 | 135 |

表 2 基于 $L_{16}(4^5)$的土壤复合物料正交试验设计
Table 2 Orthogonal design of composite soil improvement agents for this experiment based on $L_{16}(4^5)$

| 处理编号 Treatment | 磷石膏 Phosphorusgypsum | 有机肥 Organic fertilizer | 腐殖酸 Humic acid | 玉米秸秆 Maize straw |
|---|---|---|---|---|
| 0 (CK) | — | — | — | — |
| 1 | 1 | 2 | 3 | 3 |
| 2 | 2 | 4 | 1 | 2 |
| 3 | 3 | 4 | 3 | 4 |
| 4 | 4 | 2 | 1 | 1 |
| 5 | 1 | 3 | 1 | 4 |
| 6 | 2 | 1 | 3 | 1 |
| 7 | 3 | 1 | 1 | 3 |
| 8 | 4 | 3 | 3 | 2 |
| 9 | 1 | 1 | 4 | 2 |
| 10 | 2 | 3 | 2 | 3 |
| 11 | 3 | 3 | 4 | 1 |
| 12 | 4 | 1 | 2 | 4 |
| 13 | 1 | 4 | 2 | 1 |
| 14 | 2 | 2 | 4 | 4 |
| 15 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| 16 | 4 | 4 | 4 | 3 |

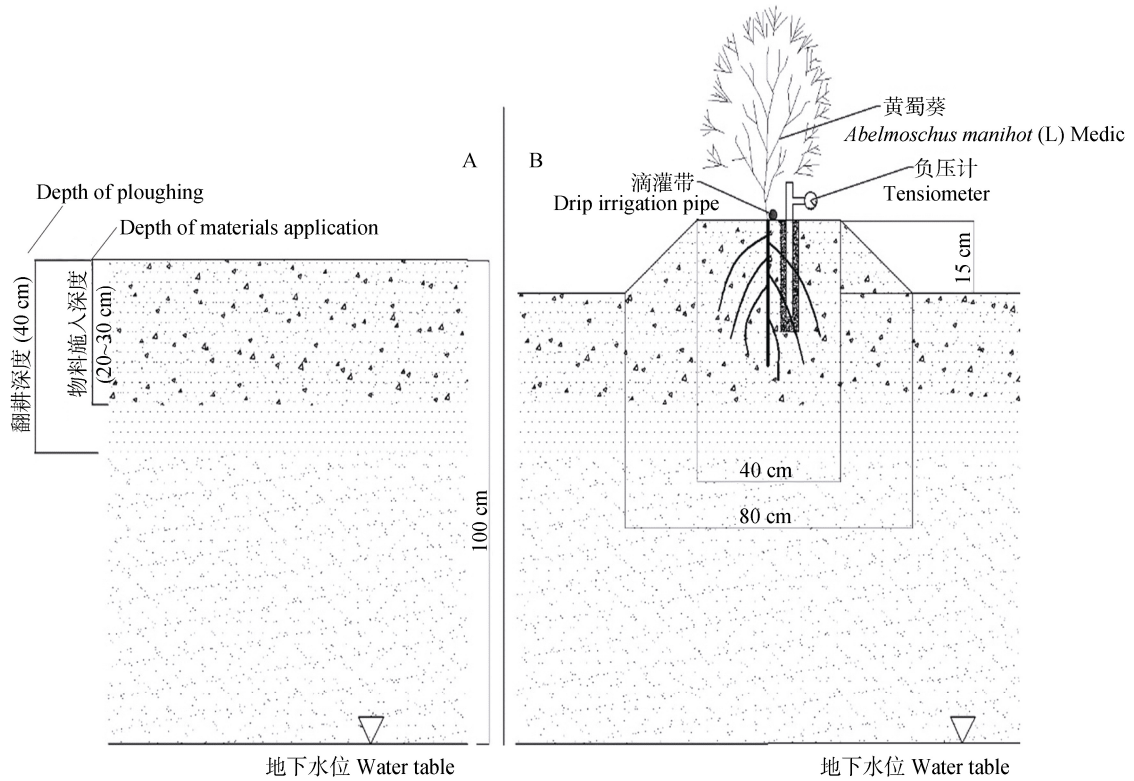


**图 2**　滨海重盐碱地深翻耕、浅改良**(A)**和垄作+滴灌**(B)**技术模式

Fig. 2　Technology mode of deep tillage, shallow soil improvement (A) and ridge + drip irrigation (B) in coastal saline soil

### 1.4　样品采集与测试指标方法

#### 1.4.1　土壤采集与处理

试验开始前采集土壤样品以获得初始土壤属性数据，作物收获后采集土壤样品。采用土钻法分层取样，取样深度分别为 0~10 cm、10~20 cm。按照 S 型取样法，每个小区取 5 个点混合均匀作为一个土样，晾晒风干，按照当前常用土壤指标分析方法[23]研磨、过筛。

#### 1.4.2　产量测定

2017 年 11 月按小区收获黄蜀葵，风干后收取种子，烘干后测定种子质量。

#### 1.4.3　指标测定方法

土壤全盐含量利用烘干残渣法测定，pH 利用电位法测定，土壤有机质利用浓硫酸-重铬酸钾外加热氧化法测定，土壤碱解氮利用碱解扩散法测定，土壤有效磷利用 $NaHCO_3$ 浸提-钼锑抗比色法测定，土壤速效钾利用 $NH_4OAc$ 浸提-火焰光度法测定，土壤团聚体利用湿筛法测定。

土壤养分含量所处级别根据全国第 2 次土壤普查中土壤养分分级标准[24]来确定。

### 1.5　土壤各指标的评价方法

盐渍土壤各属性具有不确定性，复合土壤改良物料对土壤各指标的影响各不相同，为了明确复合土壤改良物料对土壤的综合改良效果，采用模糊评判法[25]对各改良物料进行应用效应综合评价。

基于模糊评判法，复合土壤改良物料对土壤各指标的综合评价值 $F$ 采用下列公式来计算：

$$F=\sum(n_i\times w_i) \tag{1}$$

式中：$n_i$ 为第 $i$ 个指标的归一化值，$w_i$ 为第 $i$ 个土壤指标的权重。$F$ 值在 0.1~1.0 之间，值越大，表明该物料的土壤改良效果越好。

权重表示土壤各指标对综合评价的贡献度。确定权重系数的方法主要有经验法、主成分分析法、相关系数法、逐步回归分析法、层次分析法、聚类分析法、灰色关联度法等[26]。本研究采用主成分分析法确定土壤各指标的权重系数，采用 SPSS 19.0 进行数据分析，计算出各指标的公因子方差，公因子方差表示该指标对样本总体变异系数的贡献度。根据公因子方差计算各项指标的权重系数：将公因子方差求和，然后以该指标的公因子方差与此和的比值作为该指标的权重系数。

由于土壤各指标量纲不同，为实现数据之间的可比性，对数据进行归一化处理。具体数据利用下列公式计算。

$$N=(X-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min}) \tag{2}$$

式中：$N$ 表示归一化值，$X$ 表示指标的测定值，$X_{\min}$ 表

示指标最小测定值, $X_{max}$ 表示指标的最大测定值。

### 1.6 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 和 SPSS 19.0 进行统计分析, 采用新复极差法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 复合改良物料对土壤盐分和 pH 的影响

不同复合改良物料施用 2 年后, 所有处理均表现出明显的降盐效果, 而复合改良物料处理较对照处理表现出良好的脱盐效果(图 3A)。在 0~20 cm 土层, 盐分由改良前原土初始的 10.86 g·kg$^{-1}$ 下降至 1.0~3.0 g·kg$^{-1}$, 已适合耐盐作物生长。0~10 cm 土层, 除处理 7、9、14 的土壤盐分在 2~2.5 g·kg$^{-1}$, 属于中度盐渍土以外, 其余各处理的土壤盐分含量均处于 2 g·kg$^{-1}$ 以下, 属于轻度盐渍土; 在 10~20 cm 土层, 各处理土壤盐分含量在 1.5~2.5 g·kg$^{-1}$, 属于轻、中度盐渍土, 适合耐盐作物的生长。对照处理的土壤盐分在 3.48~4.42 g·kg$^{-1}$, 也表现出了明显的降盐效果, 然而盐分下降幅度小于各改良物料处理, 说明复合改良物料处理具有极显著的降盐效果。

施用复合改良物料后土壤 pH 呈现出不同程度的降低, 由原土初始 8.62 降低至 7.2~8.1(图 3B), 属于中性偏碱水平。在 0~10 cm 土层, 除处理 1、2、3、4、5 和 10 之外, 其余各处理与对照之间土壤 pH 差异不显著, 但复合物料处理 9、10、11、13、14、15、16 的土壤 pH 与原土初始 pH 相比分别下降 14.85%、13.69%、14.43%、13.30%、16.13%、15.66%、14.23%, 且上述复合改良物料处理的土壤 pH 比对照处理的土壤 pH 分别下降 1.96%、0.62%、1.47%、0.18%、3.43%、2.89%、1.25%, 说明上述复合土壤改良物料处理在 10 cm 土层内可能具有更好的改土效果。在 10~20 cm 土层, 各处理的土壤 pH 均低于初始土壤 pH; 除了复合改良物料处理 1、2、3、5、6、7、10 外, 其余处理的土壤 pH 较对照处理的土壤 pH 显著降低, 说明其余的复合改良物料处理在 10~20 cm 土层内可能具有更好的改土效果。

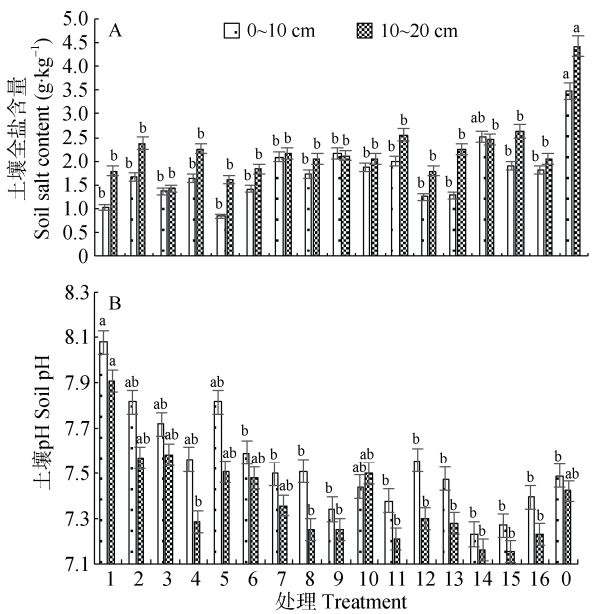


**图 3 不同复合土壤改良物料处理对滨海重盐碱地土壤盐分含量(A)和 pH(B)的影响**

Fig. 3 Effect of different composite soil improvement agents on soil salinity (A) and pH (B) in coastal saline field

原始土样盐分含量为 10.86 g·kg$^{-1}$, 处理编号如表 3 所示。不同小写字母表示不同处理在 $P$<0.05 水平差异显著。The salt content of the original soil was 10.86 g·kg$^{-1}$. The meanings of treatment numbers in the figure are shown in the table 3. Different lowercase letters in the figure represent significant differences among treatments at $P$ < 0.05.

### 2.2 复合改良物料对土壤养分的影响

施用复合改良物料, 滨海盐碱地土壤耕层有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量变化如图所示。复合改良物料能显著提高 0~20 cm 土层有机质、碱解氮、有效磷和速效钾等含量, 但不同处理间差异不显著; 0~10 cm 土层土壤有机质、碱解氮、有效磷含量均高于 10~20 cm 土层。

在 0~10 cm 土层, 各处理土壤有机质含量与对照相比增加 77.5%~181.87%, 与初始值相比(4.51 g·kg$^{-1}$)增加 137.32%~276.87%; 0~20 cm 土壤有机质由初始值提升到 10.06~14.08 g·kg$^{-1}$; 与初始值相比, 土壤有机质增加显著。由土壤养分分级标准可知: 经过 2 年的改良后, 0~10 cm 土层土壤有机质含量由很缺乏变得缺乏, 10~20 cm 土层土壤有机质含量仍然很缺乏(图 4A)。

处理 8、11、12、13、14 的土壤碱解氮含量比对照分别增加 94.81%、130.52%、124.68%、89.61%、82.47%; 处理 2、6 和对照的土壤碱解氮较初始值(46.08 mg·kg$^{-1}$)分别下降 0.28 g·kg$^{-1}$、3.79 g·kg$^{-1}$ 和 1.16 g·kg$^{-1}$。根据土壤养分分级标准, 在 0~10 cm 土层, 处理 7、8、9、10、11、12、13、14 的土壤碱解氮含量由很缺乏变为缺乏, 其他处理的土壤碱解氮含量有所提升但仍属于很缺乏; 10~20 cm 土层, 土壤碱解氮含量处于很缺乏状态(图 4B)。

处理 7、8、11、13、14、16 土壤有效磷含量 0~10 cm 较对照分别增加 57.80%、55.56%、68.78%、68.11%、76.45%、63.68%, 较初始值增加 23.57%、21.89%、32.25%、31.73%、38.26%、28.25%。总体而言, 处理 8、11、13、14 具有良好的土壤养分提升效应(图 4C)。

在 0~10 cm 土层, 除处理 14 外, 其余复合改良物料处理土壤速效钾含量均低于对照处理, 其中处

理 4 和 8 与对照之间差异显著, 其余复合改良物料处理与对照之间无显著差异; 在 10~20 cm 土层, 土壤速效钾含量变化趋势与 0~10 cm 类似, 除处理 3、4、6、7 和 14 外, 其余处理之间无明显差异。总体上, 在 0~20 cm 土层中, 处理 14 的土壤速效钾含量最高, 较初始值(333.96 g·kg$^{-1}$)增加 43.1%, 而处理 4 含量最低, 较初始值降低 6.50%(图 4D)。综上, 土壤有效磷和速效钾含量分别高于 150 mg·kg$^{-1}$ 和 200 mg·kg$^{-1}$, 根据土壤养分分级标准可知, 土壤有效磷和速效钾均处于很丰富状态。

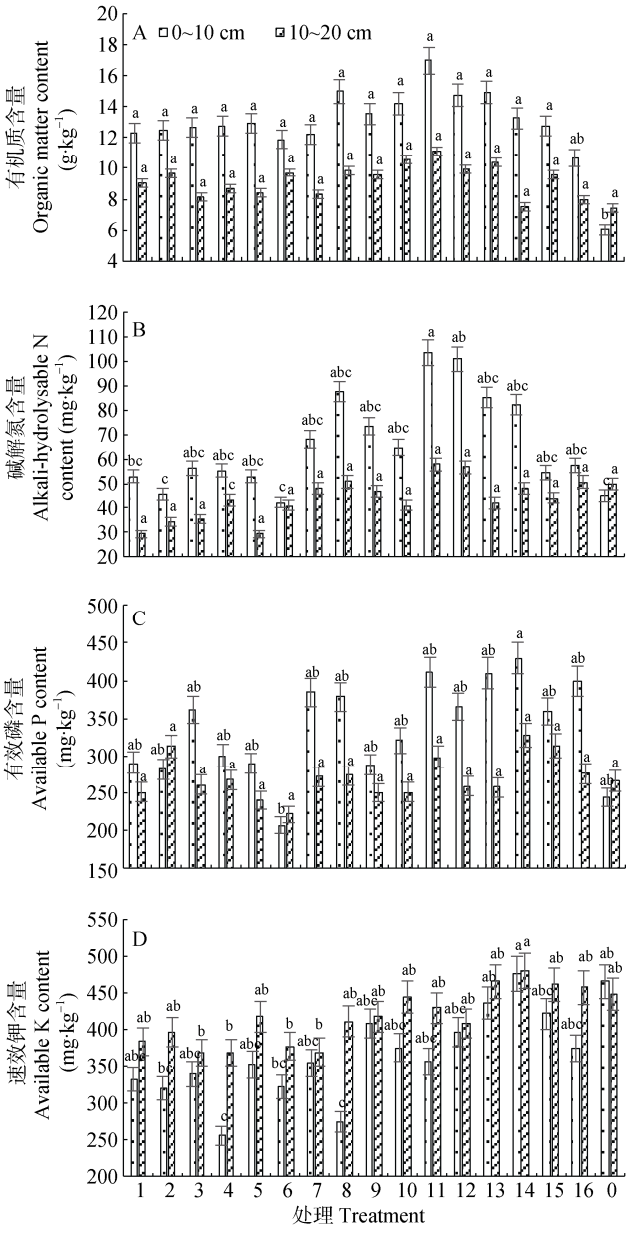


**图 4　不同复合土壤改良物料处理对滨海重盐碱地土壤有机质(A)、碱解氮(B)、速效磷(C)和速效钾的影响**

Fig. 4　Effect of composite soil improvement agents on soil contents of organic matter (A), alkaline N (B), available P (C) and available K (D) in coastal saline field

处理编号如表 3 所示。不同小写字母表示不同处理在 $P$<0.05 水平差异显著。The meanings of treatment numbers in the figure are shown in the table 3. Different lowercase letters in the figure represent significant differences among treatments at $P$ < 0.05.

## 2.3　复合改良物料对土壤团聚体的影响

土壤团聚体是土壤中各种物理、化学和生物要素共同作用的结果, 是土壤结构构成的基础, 影响土壤各种理化性质。图 5 表示 0~10 cm 土层土壤中大团聚体(>0.25 mm)和微团聚体(<0.25 mm)在土体中的百分含量。从图 5 可知, 土体中 95%以上的团聚体为微团聚体。对照的大团聚体含量为 0.89%, 比原土的初始大团聚体含量(0.83%)略微增加。尽管改良后土壤的大团聚体含量仍然低于 5%, 但处理 1、2、3、4、12 和 14 较对照有明显增加, 增加幅度分别为 4.40 倍、4.23 倍、7.62 倍、4.10 倍、4.10 倍和 3.89 倍, 其中处理 3 下大团聚体增加效果最多, 大团聚体含量为 7.70%。

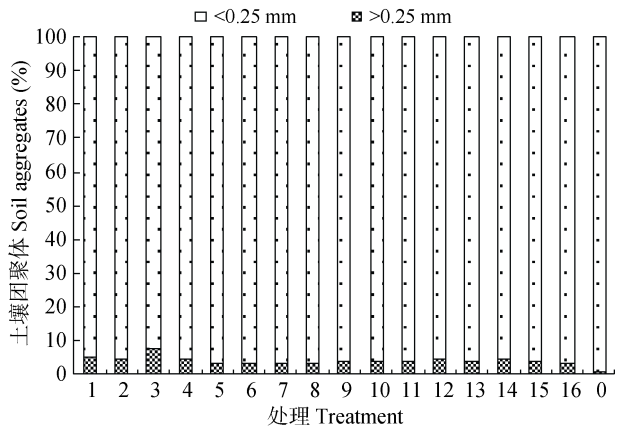


**图 5　不同复合土壤改良物料处理对滨海重盐碱地 0~10 cm 土层土壤团聚体组成的影响**

Fig. 5　Effect of composite soil improvement agents on soil aggregate composition in the 0–10 cm layer in coastal saline field

处理编号如表 3 所示。The meanings of treatment numbers in the figure are shown in the table 3.

## 2.4　复合改良物料对黄蜀葵产量的影响

如图 6 所示, 不同处理间黄蜀葵产量差异较大, 处理 5、6、8、10、11 和 16 产量显著高于对照, 与对照相比分别增产 46.91%、45.36%、51.03%、40.72%、41.24%和 39.18%, 其中处理 8 的增产效果最好, 为 813.89 kg·hm$^{-2}$, 处理 5、6 的产量分别为 791.67 kg·hm$^{-2}$ 和 783.33 kg·hm$^{-2}$。

## 2.5　基于模糊评判法的复合改良物料优选

基于模糊评判法的复合改良物料综合评价, 需要明确各指标的权重系数与归一化值。本研究利用主成分分析法确定土壤各指标的权重系数(表 3), 并对各处理的综合改良效果进行评价(表 4)。

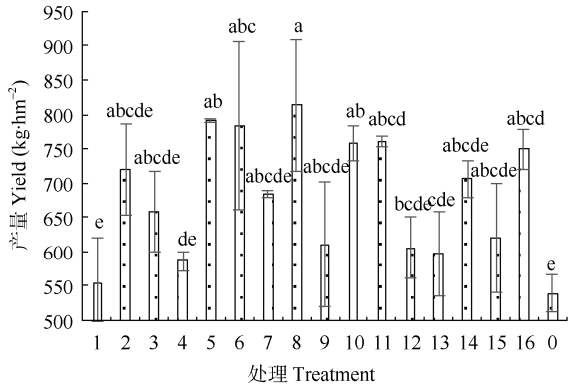


**图 6** 不同复合土壤改良物料处理下滨海重盐碱地黄蜀葵产量

Fig. 6 Yield of *Abelmoschus manihot* (L.) Medic in coastal saline field with different composite soil improvement agents

处理编号如表 3 所示。不同小写字母表示不同处理在 $P<0.05$ 水平差异显著。The meanings of treatment numbers in the figure are shown in the table 3. Different lowercase letters in the figure represent significant differences among treatments at $P < 0.05$.

**表 3** 滨海重盐碱地土壤各指标的公因子方差和权重

Table 3 Common factor variance and weight coefficient of soil indexes of coastal saline soil

| 指标 Index | 公因子方差 Common factor variance | 权重系数 Weight |
|---|---|---|
| 全盐 Soil salinity | 0.819 7 | 0.161 4 |
| pH | 0.774 2 | 0.152 4 |
| 有机质 Organic matter | 0.625 6 | 0.123 2 |
| 碱解氮 Alkali-hydrolysable N | 0.756 5 | 0.149 0 |
| 有效磷 Available P | 0.798 6 | 0.157 2 |
| 速效钾 Available K | 0.684 6 | 0.134 8 |
| 微团聚体 Micro aggregate | 0.619 5 | 0.122 0 |

由表 4 可知: 在 0~10 cm 土层, 各处理的综合效果评价值均低于 0.618 7, 不同处理间差异明显; 除处理 4、5、6 之外, 其余各处理的评价值均高于对照。处理 11 的评价值最高, 为 0.618 7, 表明该处理的土壤改良综合效果最优; 处理 14 次之; 评价值前 5 个的处理排序为 11>14>12>13>8。

根据物料采购价格(包括运费), 磷石膏 70 元·t$^{-1}$, 有机肥 160 元·m$^{-3}$, 腐殖酸 200 元·t$^{-1}$, 玉米秸秆 160 元·m$^{-3}$, 改土降盐效果好的复合物料处理 11、14、12、13、8 物料成本价格(元·m$^{-2}$)分别为 4.05、4.48、5.02、3.45 和 5.04。成本最低的处理为 11 和 13, 但处理 11 评价值最高, 因此认定处理 11 对应的物料组合(22 500 kg·hm$^{-2}$ 磷石膏+105 m$^3$·hm$^{-2}$ 有机肥+3 750 kg·hm$^{-2}$ 腐殖酸+45 m$^3$·hm$^{-2}$ 玉米秸秆)为改土降盐效果最优的节本复合物料。

## 3 讨论与结论

在盐碱土改良过程中, 对土体进行脱盐是一个难点问题。用化学改良剂进行脱盐是目前比较快速的脱盐方法, 常用的改良剂为含钙类物质和酸性物质[27], 但是化学改良剂成本较高, 且大多为工业废弃物, 容易造成二次污染。而生物改良剂的改良效果较慢, 一般不单独使用。本研究利用生物、物理和化学改良剂的优点结合农艺措施降盐实现了低成本快速降盐和培肥地力的目的。改良物料为由磷石膏、腐殖酸、牛粪和玉米秸秆形成的复合改良物料, 复合改良物料对盐碱地改土、降盐、培肥、增产作用优于其单一组分。磷石膏可在土体中溶解产生 $Ca^{2+}$, 置换土壤胶体中的 $Na^+$, 从而减轻 $Na^+$对植物的离子毒害[17]; 腐殖酸在土壤中带负电荷, 可以与土壤中 $Cl^-$发生交换; 其次腐殖酸显酸性, 能够降低土壤 pH; 腐殖酸与石膏配施对盐渍土的改良效果良好[28]。施用有机肥能够显著提高土壤有机质含量, 提高土壤中速效养分含量, 促进团聚体形成, 并且显著提高作物产量[10-13]; 磷石膏和有机肥配施对作物的增产效果优于单施磷石膏和单施有机肥[29]。玉米秸秆可提高土壤渗透性, 而且能有效增加土壤有机质含量, 提高土壤可用氮素的含量[30]。泥质滨海盐土容重高达 1.69 g·cm$^{-3}$, 渗透性差, 是土壤脱盐重要的障碍因子。根据多年的实践经验, 改良当年施用秸秆可以有效降低土壤容重、增强土壤渗透能力, 加速土壤脱盐; 随着持续施用年限的增加, 秸秆腐烂增加土壤有机质和促进团粒结构形成的作用逐渐明显。本研究中, 在应用复合改良物料及田菁-黄蜀葵梯次种植模式、降盐脱盐农艺措施等综合技术模式条件下, 复合改良物料施用当年, 田菁正常生长, 达到了“泥质滨海重盐碱地当年改良, 当年高产”的目的; 复合物料持续施用 2 年后, 各复合改良物料的脱盐效果均显著, 0~10 cm 土层土壤盐分含量由 10.86 g·kg$^{-1}$ 下降至 2 g·kg$^{-1}$ 以下, 10~20 cm 土层土壤盐分含量降至 2.5 g·kg$^{-1}$ 以下, 0~20 cm 土层土壤盐分含量由试验前的 10.86 g·kg$^{-1}$ 下降至 1.0~3.0 g·kg$^{-1}$, 土壤盐分含量降至低于一般耐盐作物的耐盐阈值。

土壤盐分含量和 pH 是衡量盐碱土改良效果最直观的指标。土壤 pH 受到多种因素的影响, 在改良初期会有所下降, 但随着施用年限增加土壤 pH 可能会有所恢复, 但滨海盐碱地的土壤 pH 并不是明显制约植物生长的因子。

土壤团聚体是土壤良好结构的基础, 对土壤肥力有重要作用。在本研究中, 试验区土壤初始微团聚体含量达 95%以上, 土壤质地黏重, 透性差, 而改良 2 年后的土壤大团聚体含量增加明显, 最高比对照增加 7.62 倍, 显著改善了土壤结构。这与马献

表 4　不同复合土壤改良物料处理对滨海重盐碱地 0~10 cm 土层各土壤因子改良效果和综合效果的评价
Table 4　Evaluation of effects of different composite soil improvement agents on 0–10 cm soil indexes and comprehensive soil improving effects in the coastal saline field

| 处理 Treatment | 全盐 Salinity | pH | 微团聚体 Micro aggregate | 有机质 Organic matter | 碱解氮 Alkali-hydrolysable N | 有效磷 Available K | 速效钾 Available P | 综合效果 Comprehensive effect |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.067 5 | 1.000 0 | 0.577 6 | 0.537 5 | 0.028 7 | 0.342 1 | 0.276 5 | 0.398 9 |
| 2 | 0.291 4 | 0.621 3 | 0.554 6 | 0.589 5 | 0.000 0 | 0.506 1 | 0.273 6 | 0.399 5 |
| 3 | 0.061 3 | 0.571 1 | 1.000 0 | 0.498 6 | 0.143 4 | 0.587 2 | 0.250 0 | 0.426 6 |
| 4 | 0.263 8 | 0.286 6 | 0.510 0 | 0.545 9 | 0.225 8 | 0.423 9 | 0.000 0 | 0.323 0 |
| 5 | 0.000 0 | 0.583 7 | 0.375 4 | 0.537 2 | 0.028 7 | 0.306 9 | 0.440 6 | 0.314 9 |
| 6 | 0.144 2 | 0.424 7 | 0.382 3 | 0.552 9 | 0.043 0 | 0.000 0 | 0.225 5 | 0.251 7 |
| 7 | 0.328 2 | 0.290 8 | 0.351 0 | 0.479 6 | 0.440 9 | 0.689 7 | 0.298 7 | 0.410 7 |
| 8 | 0.242 3 | 0.230 1 | 0.317 2 | 0.776 6 | 0.716 8 | 0.678 9 | 0.184 6 | 0.455 7 |
| 9 | 0.334 4 | 0.125 5 | 0.464 5 | 0.658 7 | 0.494 6 | 0.330 5 | 0.605 8 | 0.424 7 |
| 10 | 0.266 9 | 0.343 1 | 0.407 2 | 0.768 4 | 0.317 3 | 0.433 9 | 0.589 0 | 0.440 2 |
| 11 | 0.383 4 | 0.123 4 | 0.467 4 | 1.000 0 | 1.000 0 | 0.853 2 | 0.485 2 | 0.618 7 |
| 12 | 0.107 4 | 0.292 9 | 0.537 4 | 0.765 7 | 0.953 4 | 0.593 0 | 0.542 6 | 0.538 3 |
| 13 | 0.196 3 | 0.228 0 | 0.403 3 | 0.805 6 | 0.580 6 | 0.723 9 | 0.833 7 | 0.526 7 |
| 14 | 0.460 1 | 0.000 0 | 0.513 0 | 0.500 0 | 0.616 5 | 1.000 0 | 1.000 0 | 0.565 6 |
| 15 | 0.380 4 | 0.020 9 | 0.422 4 | 0.599 5 | 0.227 7 | 0.743 5 | 0.780 8 | 0.437 2 |
| 16 | 0.257 7 | 0.146 4 | 0.343 1 | 0.355 8 | 0.344 1 | 0.749 1 | 0.627 5 | 0.390 8 |
| 0 | 1.000 0 | 0.324 3 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.179 2 | 0.245 4 | 0.871 4 | 0.378 4 |

处理编号如表 3 所示。The meanings of treatment numbers in the figure are shown in the table 3.

发等[31]和李旭霖等[14]的研究结果相似。

复合改良物料能够显著提高耕层土壤有机质、碱解氮、有效磷, 这与王福友等[15]的腐植酸和菌肥能够增加土壤有效磷和有机质含量的研究结果一致。秸秆还田能提高土壤水土保持能力, 从而截留氮磷损失, 同时, 秸秆自身含有的碳氮元素也能增加土壤养分含量[32]。土壤有机质是土壤中各种营养元素, 尤其是氮、磷的重要来源; 它能吸附较多的阳离子, 使土壤具有保肥性和缓冲性; 能疏松土壤, 改善土壤的物理性状; 也是土壤微生物必不可少的碳源。土壤碱解氮为速效氮, 易被作物吸收, 与作物生长关系密切, 反映土壤近期氮素供应情况。牛粪中有机质含量≥56%, 腐解后转化为速效的氮磷钾, 除一部分被当季作物吸收利用外, 尚有部分残留土中, 从而改善了土壤养分状况; 磷石膏含有机物质和 $P_2O_5$, 转化后增加了土壤有机质和有效磷含量[10]。玉米秸秆随着改良年限的增加逐渐转变为有机肥料。施用复合改良物料 2 年后, 试验区 0~20 cm 土壤有机质由 4.51 $g\cdot kg^{-1}$ 提升到 10.06~14.08 $g\cdot kg^{-1}$; 处理 8、11、12、13、14 的土壤碱解氮含量分别增加 94.81%、130.52%、124.68%、89.61%、82.47%; 土壤有效磷和速效钾含量有所增加, 处于较高水平。

盐碱地治理成本对技术的推广至关重要。本研究针对泥质滨海重盐碱地, 综合利用了“深翻耕、浅改良、高垄作、少滴灌”农艺措施、不同耐盐能力植物梯次种植循序渐进的生物措施以及控制滴头正下方 20 cm 深度处土壤基质势的水盐调控方法[21], 显著增强了改土降盐效果, 降低了土壤改良成本, 复合改良物料施用成本控制在可以接受的范围(2.55~6.01 元$\cdot m^{-2}$), 技术应用 2 年后, 不仅土壤盐分含量降低至可以种植耐盐植物的范围, 土壤肥力也显著提高, 形成了肥沃的低盐耕层。本研究中, 先深翻耕 40 cm, 构建了淋盐层, 改善了根层土壤的渗透性, 再施入改良物料浅旋耕 20 cm, 然后起垄 15 cm, 这可以加深耕作层的相对深度、改善浅根系作物生长前期根系活动层的土壤盐渍化环境, 同时也减少物料施用量, 节约了物料成本。

针对泥质滨海盐碱地土壤水饱和, 易造成土壤颗粒分解, 土壤颗粒膨胀导致孔隙关闭, 从而影响植物种子萌发和生长的现实问题, 采用非饱和淋盐理论, 开展“深翻耕、浅改良、高垄作、少滴灌”模式, 控制滴头正下方 20 cm 深度处土壤基质势在–10 kPa, 土壤耕层盐分降低, 盐分淋洗效果好[23]。耐盐植物种植是盐碱地改良利用的主要生物措施[33], 本研究采用不同耐盐能力植物梯次种植的方法, 在土壤盐分高的改良当年, 先种耐盐性较强、改土效果好的

田菁, 次年再种耐盐性较低、经济价值高的作物黄蜀葵[34]。田菁根系发达, 促进土壤孔隙的生成, 同时具有生物固氮作用; 研究证明, 种植田菁同时施用磷石膏是一种快速提升重度盐渍化土壤肥力的有效方法[35]。本研究中在改良初期种植田菁不仅能够显著降低重度盐渍化土壤的盐分含量、容重, 且可以提高土壤速效氮、速效钾、有机质及土壤大团聚体含量。因此, 生物改良和化学改良措施综合应用, 可以显著降低改良物料的施用量, 节约土壤改良成本。

各种物料对土壤改良效果的作用不尽相同, 其改土培肥效果的差异较大, 4 种物料经过优化配合可以增强降盐、培肥、改土、增产的能力。根据对 0~20 cm 土壤改土降盐效果的分析, 4 种物料对盐分影响的顺序为磷石膏>腐植酸>有机肥>秸秆; 对 pH 影响顺序为磷石膏>腐植酸>秸秆>有机肥[23], 对于含盐量高、地力差、渗透性差的滨海重盐土, 施用单一物料不可能达到多种障碍因子协同消减的效应, 因此, 有必要应用复合物料、对多种土壤性状的改良效果进行综合评价, 筛选获得滨海盐碱土壤复合改良物料的最优配比。本研究通过 4 因素 4 水平物料配制组成的 16 种复合物料对滨海泥质重盐土土壤的盐分含量、pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、微团聚体等共 7 个因子的综合评价, 结合产量性状和成本分析, 筛选出适宜于滨海泥质重盐渍土多个障碍因子协同消减的最优复合改良物料: 22 500 kg·hm$^{-2}$ 磷石膏+105 m$^3$·hm$^{-2}$ 牛粪+3 750 kg·hm$^{-2}$ 腐殖酸+45 m$^3$·hm$^{-2}$ 玉米秸秆, 该复合物料应用条件下的土壤有机质、碱解氮的含量最高, 与对照相比分别增加 181.87%和 130.52%。该最优复合改良物料中磷石膏、牛粪、腐殖酸的施用量均较高, 体现了该 3 种物料在改土降盐培肥中的重要作用, 与之前的研究结果[18]一致, 且其他学者的类似研究结果也证明了这一点[16,28-29]。玉米秸秆的使用量虽然较其他物料少, 但是少量施用可以显著提高土壤渗透性, 增强盐分的淋洗。同时, 由于本研究采用了深翻耕、垄作加深耕作层, 也增强了对盐分的淋融作用, 相对减弱了对应用秸秆提升土壤渗透性的依赖性。根据多年实践经验, 随着持续施用年限的增加, 改良物料的增加有机质、促进土壤团粒结构形成的效应会越来越凸显。

## 参考文献 References


[1] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993
WANG Z Q, ZHU S Q, YU R P, et al. Salt-Affected Soils in China[M]. Beijing: Science Press, 1993

[2] SINGH K, SINGH B, SINGH R R. Changes in physico-chemical, microbial and enzymatic activities during restoration of degraded sodic land: Ecological suitability of mixed forest over monoculture plantation[J]. CATENA, 2012, 96: 57–67

[3] 牛东玲, 王启基. 盐碱地治理研究进展[J]. 土壤通报, 2002, 33(6): 449–455
NIU D L, WANG Q J. Research progress on saline-alkali field control[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(6): 449–455

[4] BAGAYOKO M, TANGARA B, DICKO M. Combination of flushing, organic amendment and soil tillage as an effective technical package for reclamation of saline/alkaline soils of the office du Niger in Mali[J]. Journal of Research in Environmental Science and Toxicology, 2012, 1(12): 317–327

[5] 王晓洋, 陈效民, 李孝良, 等. 不同肥料与石膏配施对滨海盐渍土养分的培肥效果评价[J]. 土壤通报, 2013, 44(1): 149–154
WANG X Y, CHEN X M, LI X L, et al. The fertilizing effect evaluation of different fertilizers combined with gypsum application on coastal saline soil nutrients[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(1): 149–154

[6] RASHAD M, DULTZ S, GUGGENBERGER G. Dissolved organic matter release and retention in an alkaline soil from the Nile River Delta in relation to surface charge and electrolyte type[J]. Geoderma, 2010, 158(3/4): 385–391

[7] 吴洪生, 陈小青, 周晓冬, 等. 磷石膏改良剂对江苏如东滨海盐土理化性状及小麦生长的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1262–1266
WU H S, CHEN X Q, ZHOU X D, et al. Effects of soil amendment phosphogypsum on physical and chemical properties of and wheat growth in coastal saline soil in Rudong, Jiangsu[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(6): 1262–1266

[8] 邢尚军, 刘方春, 杜振宇, 等. 腐殖酸肥料对杨树生长及土壤性质的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 126–129
XING S J, LIU F C, DU Z Y, et al. Effects of humic acid fertilizer on the poplar growth and soil properties[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(4): 126–129

[9] 张玉文, 毛伟兵, 刘鸿敏, 等. 秸秆还田对滨海粘质盐土物理性状和棉花产量的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(6): 75–80
ZHANG Y W, MAO W B, LIU H M, et al. Effects of straw turnover on physical properties of coastal saline clay and cotton yield[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(6): 75–80

[10] LÓPEZ-VALDEZ F, FERNÁNDEZ-LUQUEÑO F, LUNA-GUIDO M L, et al. Microorganisms in sewage sludge added to an extreme alkaline saline soil affect carbon and nitrogen dynamics[J]. Applied Soil Ecology, 2010, 45(3): 225–231

[11] WU Y P, LI Y F, ZHENG C Y, et al. Organic amendment application influence soil organism abundance in saline alkali soil[J]. European Journal of Soil Biology, 2013, 54: 32–40

[12] 张金柱, 张兴, 郭春景, 等. 生物有机肥对轻度盐碱土理化性质影响的研究[J]. 生物技术, 2007, 17(6): 73–75
ZHANG J Z, ZHANG X, GUO C J, et al. Improving effect of

microbial organic fertilizer on physical and chemical properties of saline-alkaline soil[J]. Biotechnology, 2007, 17(6): 73–75

[13] 谷思玉, 聂艳龙, 何鑫, 等. 生物有机肥对盐渍土改良效果评价[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(8): 38–43
GU S Y, NIE Y L, HE X, et al. Evaluate effect of different ratio of bio-organic fertilizer on saline-alkali soil improvement[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2015, 46(8): 38–43

[14] 李旭霖, 刘庆花, 柳新伟, 等. 不同改良剂对滨海盐碱地的改良效果[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 219–224
LI X L, LIU Q H, LIU X W, et al. Improving effect of different amendment treatments in coastal saline-alkali soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(2): 219–224

[15] 王福友, 王冲, 刘全清, 等. 腐植酸、蚯蚓粪及蚯蚓蛋白肥料对滨海盐碱土壤的改良效应[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(5): 89–94
WANG F Y, WANG C, LIU Q Q, et al. Improved effect of humic acid, earthworm protein fertilizer and vermicompost on coastal saline soils[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(5): 89–94

[16] 孙在金. 脱硫石膏与腐植酸改良滨海盐碱土的效应及机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013: 81–82
SUN Z J. Research on effects and the mechanism of desulfurization gypsum and humic acid on coastal saline-alkali soil improvement[D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2013: 81–82

[17] 张乐, 徐平平, 李素艳, 等. 有机-无机复合改良剂对滨海盐碱地的改良效应研究[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(2): 92–99
ZHANG L, XU P P, LI S Y, et al. Amelioration effects of organic-inorganic compound amendment on coastal saline-alkali soil[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(2): 92–99

[18] 刘雅辉, 王秀萍, 李强, 等. 淤泥质滨海重盐土低成本快速脱盐技术研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 168–171
LIU Y H, WANG X P, LI Q, et al. Study on rapid desalting of muddy coastal heavy solonchack with low cost[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(1): 168–171

[19] 王秀萍, 王文成, 李可晔. 河北省滨海重盐碱地原土改良与绿化技术[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2013
WANG X P, WANG W C, LI K Y. Soil Improvement and Greening Techniques of Coastal Heavy Saline-Alkali Land in Hebei Province[M]. Shijiazhuang: Hebei Science & Technology Press, 2013

[20] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 52–55
LIU R J, ZHANG Y W, WEN C W, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9): 52–55

[21] LI X B, KANG Y H, WAN S Q, et al. Effect of ridge planting on reclamation of coastal saline soil using drip-irrigation with saline water[J]. CATENA, 2017, 150: 24–31

[22] WANG X P, XUE Z Z, LU X L, et al. Salt leaching of heavy coastal saline silty soil by controlling the soil matric potential[J]. Soil and Water Research, 2019, 14(3): 132–137

[23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 638
LU R K. Analysis Method of Soil Agrochemistry[M]. Beijing: China Agriculture Science Press, 2000: 638

[24] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 356
National Soil Census Office. Soil of China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998: 356

[25] 刘广明, 杨劲松, 何丽丹, 等. 基于模糊综合评判法的新疆典型干旱区土壤盐漠退化风险评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 1–5
LIU G M, YANG J S, HE L D, et al. Fuzzy comprehensive evaluation based assessment of soil alkaline desertification in typical arid area of Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 1–5

[26] 姚荣江, 杨劲松, 陈小兵, 等. 苏北海涂围垦区土壤质量模糊综合评价[J]. 中国农业科学, 2009, 42(6): 2019–2027
YAO R J, YANG J S, CHEN X B, et al. Fuzzy synthetic evaluation of soil quality in coastal reclamation region of north Jiangsu Province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(6): 2019–2027

[27] 李金彪, 陈金林, 刘广明, 等. 滨海盐碱地绿化理论技术研究进展[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 246–251
LI J B, CHEN J L, LIU G M, et al. Progress of greening theory and technology for coastal saline land[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(1): 246–251

[28] 刘祖香, 陈效民, 李孝良, 等. 不同改良剂与石膏配施对滨海盐渍土离子组成的影响[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(3): 83–88
LIU Z X, CHEN X M, LI X L, et al. Effect of different amendments combined with gypsum application on ion composition in coastal saline soil[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2012, 35(3): 83–88

[29] 张盼盼, 高立城, 李晓敏, 等. 磷石膏和有机肥对盐碱地糜子产量和叶片生理特性的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(15): 26–32
ZHANG P P, GAO L C, LI X M, et al. Phosphogypsum and organic fertilizer: Effects on yield and leaf physiological characteristics of broomcorn millet in saline-alkali soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(15): 26–32

[30] 韩瑞芸, 陈哲, 杨世琦. 秸秆还田对土壤氮磷及水土的影响研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(9): 148–154
HAN R Y, CHEN Z, YANG S Q. Effect of straw-returning on nitrogen and phosphorus and water of soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(9): 148–154

[31] 马献发, 李世龙, 于志民, 等. 腐植酸类物质对大庆盐碱土地区草场改良效果的研究[J]. 腐植酸, 2004, (3): 26–29
MA X F, LI S L, YU Z M, et al. Modifying effect of humic substances to salt-alkaline soil Daqing grassland[J]. Humic Acid, 2004, (3): 26–29

[32] 李茜, 孙兆军, 秦萍, 等. 燃煤烟气脱硫废弃物和糠醛渣对盐碱土的改良效应[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(4): 70–73
LI Q, SUN Z J, QIN P, et al. Amelioration of saline-sodic soil with the by-product of flue gas desulphurization (BFGD) and furfural residue[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(4): 70–73

[33] 刘小京. 环渤海缺水区盐碱地改良利用技术研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1521–1527
LIU X J. Reclamation and utilization of saline soils in water-scarce regions of Bohai Sea[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1521–1527

[34] 张晓倩, 王康才, 王雅男, 等. 盐胁迫对黄蜀葵生长及金丝桃苷含量的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2013, 40(3): 510–513
ZHANG X Q, WANG K C, WANG Y N, et al. Effects of salt stress on growth and hyperin content of *Abelmoschus manihot* (L.) medic[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2013, 40(3): 510–513

[35] 谢文军, 王济世, 靳祥旭, 等. 田菁改良重度盐渍化土壤的效果分析[J]. 中国农学通报, 2016, 32(6): 119–123
XIE W J, WANG J S, JIN X X, et al. Effect of *Sesbania cannabina* cultivation on severe salinity soil fertility improvement[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(6): 119–123


# 欢迎订阅 2020 年《中国草地学报》

《中国草地学报》是由中国农业科学院草原研究所和中国草学会共同主办的国家级草学学术期刊, 主要报道中国草学研究领域的新理论与重要成果, 介绍新进展与发展动态, 内容以草学基础理论研究和应用理论研究为主, 兼纳高新技术研究和直接产生生态效益、经济效益的开发性研究, 主要包括草原学、牧草学、草地学和草坪学等学科领域内有关草地与牧草资源、牧草遗传育种与引种栽培、草地经营管理与改良利用、牧草生理生化、草地建设与生态保护、草地生产与饲草料加工调制、草坪绿地、草业经济与可持续发展战略等。栏目主要有“研究报告” “综述与专论” “研究简报”等。

本刊为中国草业领域创办最早的科技期刊, 自 1979 年创刊以来先后荣获内蒙古、中国农业科学院、华北地区和全国农业等优秀期刊或优秀科技期刊奖 9 次, 现为中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国农业核心期刊、RCCSE 中国核心学术期刊、中国科学引文数据库来源期刊, 并被《中国知网》、《中国期刊网》、《中国核心期刊(遴选)数据库》、《万方数据—数字化期刊群》、《中文电子期刊资料服务库》、《中国科技论文与引文数据库》等多种数据库及二次文献收录。2018 年复合影响因子 1.716, 综合影响因子为 1.373, 居草业学科期刊的第二位。

本刊为双月刊, 大 16 开 A4 版本, 180 页, 国内外公开发行, 每册定价 20.00 元, 全年共 120.00 元。国内统一刊号 CN15－1344/S, 国内邮发代号 16－32, 全国各地邮局(所)均可订阅, 错过订期可直接向本刊编辑部补订。

地址: 内蒙古呼和浩特市乌兰察布东街 120 号; 邮编: 010010

电话: 0471－4928361　电子信箱: zgcdxb@126.com

在线投稿网址: http://zgcd.cbpt.cnki.net(请认准官网字样)