



刘庚炜,高雅琪,邵泽璇,等.土壤盐渍化修复技术研究进展[J].黑龙江农业科学,2024(1):99-107.

# 土壤盐渍化修复技术研究进展

刘庚炜,高雅琪,邵泽璇,戴长雷

(黑龙江大学 水利电力学院/黑龙江大学 寒区地下水研究所/黑龙江省寒区水文与水利工程联合实验室(国际合作),黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**土壤盐渍化不但会阻碍植物根系对水分的吸收,而且严重影响植物生长发育和产量,还会导致土壤的理化性质变差。对土壤盐渍化进行有效治理及开发利用有助于提高耕后备耕地的储备量等。通过梳理近年来国内外土壤盐渍化修复技术相关研究进展,总结现有盐渍土改良技术的研究成果,并得出(1)农艺措施改良盐渍土主要研究方向是优化灌溉模式与完善灌溉技术,阻止地下水位升高,减少土壤返盐;(2)水利工程改良技术目前研究比较成熟,其主要研究方向是通过完善排水设施来降低地下水位,进而减少土壤中盐分含量,改良盐渍土;(3)物理改良技术目前研究比较成熟,研究方向是改善土壤结构、打破犁地层、提高土壤的持水性能,进而降低土壤中的含盐量;(4)化学改良技术目前主要的研究方向是将化学物质直接或间接施入盐渍土中,并测定其对于土壤理化性质的影响;(5)目前生物改良主要的研究方向是选择、培育和种植耐盐碱作物以及筛选耐盐碱促生菌,运用耐盐碱植物与耐盐碱促生菌相配合的方式改良盐渍土。目前对于盐渍土多选择两种或多种技术结合的方法进行改良,改良技术的选择还需要依据盐渍区的具体情况而综合选定。

**关键词:**盐渍化;改良技术;进展;土壤改良剂;耐盐碱作物

根据联合国教科文组织和粮农组织发布的数据,在全球范围内,盐渍土的总面积为 9.543 8 亿  $\text{hm}^2$ <sup>[1]</sup>,盐渍化土地的治理一直都是一个世界性的难题。

中国是一个盐渍土分布广、治理困难的国家之一,我国盐渍土总面积约为 1 亿  $\text{hm}^2$ ,其中具有农业利用前景的盐渍土总面积近 666.67 万  $\text{hm}^2$ <sup>[2]</sup>,在内

收稿日期:2023-05-25

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划子课题(2014BAD12-B01-03)。

第一作者:刘庚炜(2000—),男,硕士研究生,从事冻土水文地质与雪冰工程研究。E-mail:hss\_liugengwei@126.com。

通信作者:戴长雷(1978—),男,博士,教授,从事寒区地下水及国际河流研究。E-mail:daichanglei@126.com。

## Research Status and Development Prospect of Rice Direct Seeding in Heilongjiang Province

WANG Song<sup>1,2</sup>, SUN Haofeng<sup>3</sup>, SHANG Quanyu<sup>1,2</sup>, LIU Anjin<sup>1,2</sup>, BEN Ziyue<sup>1,2</sup>, LAI Yongcai<sup>4</sup>, LIU Kai<sup>4</sup>, FAN Xiaobing<sup>2</sup>

(1. Heihe Branch, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Heihe 164300, China; 2. Sanya National Center of Technology Innovation for Saline-Alkali Tolerant Rice, Sanya 57200, China; 3. College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110000, China; 4. Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences/Northeast Branch of National Center of Technology Innovation for Saline-Alkali Tolerant Rice, Harbin 150086, China)

**Abstract:** Heilongjiang Province is the most important commodity grain production base in our country. Under the background of high yield and harvest in successive years, combining with the structural reform of agricultural supply side, it has an important strategic significance to ensure the stability and sustainable development of rice production to solve the problems of high cost and low yield of rice planting through light and simplified cultivation technology of rice live streaming. Based on the types of direct seeding and its influence on the growth process of rice in Heilongjiang Province, this paper put forward some solutions, such as breeding early maturing varieties with high quality, improving the quality of land preparation and applying scientific and reasonable field management techniques, aiming at the existing problems. The development trend of rice direct seeding technology was also prospected.

**Keywords:** rice; Heilongjiang Province; research status; direct seeding

陆区盐渍土主要分布于宁夏、新疆及松嫩平原等地区,盐渍土的大面积分布对作物生长及生态环境都造成了十分不利的影响,尤其是在我国耕地面积短缺的状况下,盐渍土的大面积分布更是限制我国内陆农业发展的主要问题之一。盐渍土的治理对于改善我国生态环境,促进区域农业经济、社会和生态的绿色可持续发展具有重要意义。我国盐渍土多为盐化与碱化伴生的复合型结构,且不同地区的盐渍土成分各异,程度也各异,针对于盐渍土的成因及利用问题现阶段已取得了一些十分显著的成果。盐渍土是自然因素与人为因素共同作用的结果,对于自然因素,首先是土壤母质含盐量过高,例如我国的滨海盐渍区,泥沙在河流入海口所形成的陆地,由于海水长时间的浸渍导致大量盐分在土壤中累积,最终形成盐渍土;其次是气候问题,在我国甘新青盐渍区,年降水量低于年蒸发量,从而导致土壤水分蒸发,盐分留在土壤中最终形成盐渍土;最后是由于地势低洼,排水不畅引起地下水位过高,最终导致盐渍土的形成,例如我国东北盐渍区、河流的闭流区以及我国西北内流的盆地。对于人为因素,主要是由于水利设施的不完善,例如灌溉排水设施退化,以及采用不合理的农业措施,长期使用含盐漫灌的方式灌溉作物而导致的地下水位升高等。近年来随着对盐渍土进一步的开发与利用,越来越多的改良方法被提出。本文通过梳理近几年盐渍土的改良技术及研究成果,从盐渍土的农艺、水利、物理、化学以及生物修复技术的角度出发,整理出盐渍土的主要改良方法,为构建盐渍土资源合理利用的长效机制,以及促进盐渍土有序开发和综合利用提供参考。

## 1 土壤盐渍化危害

盐渍土由于其特殊的理化性质,例如土壤板结化、较高的含盐量,以及土壤通透性差会对植物造成严重的破坏<sup>[3]</sup>。首先,过量的可交换钠离子进入植物体内会使得营养离子吸收减少甚至是吸收不上<sup>[4]</sup>,扰乱了正常的离子平衡,从而引起植物的离子毒害;其次,盐碱胁迫会导致植物中活性氧的过度累积,使植物受到氧化性损伤<sup>[5]</sup>;再次,土壤盐渍化还会导致土壤的理化性质出现恶化,在盐渍化土壤中,超量的盐将加快土壤磷素失活以及氮素损失,降低土壤肥力;最后,由于土壤团聚体成分以有机质为主,盐渍土中有机质的含量相对较少,这就使得土壤中团聚体数量减少,从而破

坏土壤结构。

## 2 土壤盐渍化修复技术进展

本文将以农艺措施改良、水利工程改良、物理手段改良、化学手段改良和生物手段改良 5 个方面来分别介绍土壤盐渍化技术修复进展。

### 2.1 农艺措施改良盐渍土

农业措施是指用过各种农业技术包括覆膜滴灌、喷灌洗盐,以及优化灌溉制度等方式来减少土壤的含盐量,目前通过农艺措施改良盐渍土主要有以下 3 种。

2.1.1 喷灌洗盐技术 喷灌洗盐技术是治理盐渍化土壤的传统技术,喷灌洗盐的方式仅用于大棚或部分田地灌溉使用,其主要机理是通过向土壤中喷水,运用水流使土体耕层中的盐分与碱分从土壤孔隙、裂缝向底层土体运移,从而使表层土壤中的盐分降低。但这种技术耗费淡水量较大,排灌工程量大,建设成本、运行、管理和维护费用高,且排出的高矿化度水容易对研究区造成二次污染<sup>[6]</sup>。

2.1.2 膜下滴灌技术 膜下滴灌是将滴灌技术与成本低廉、应用效果较好的覆膜技术二者有效结合的农业技术,盐渍土膜下滴灌后,土壤中的盐分会随水分向下渗透,并向更深层的土壤移动,覆盖地膜既可以防止水分的蒸发,又可以防止地底返盐,从而为农作物的生长发育创造有利的条件,但地膜作为一种人工高分子化合物,在自然条件下不易分解或降解,因容易老化以及田间活动而破损残留在土壤中,此外如果地膜残留在植物根部还会阻碍植物对养分的吸收,影响植物生长发育,因此地膜污染对于生态环境安全是一个很大的问题。目前对膜下滴灌蒸发蒸腾的研究以模型和理论研究为主,实施膜下滴灌植物的施肥、浇水工序不需要单独进行,植株水肥需求可以一次性得到满足,工作量会显著降低。居雯雯等<sup>[7]</sup>通过覆膜地面灌溉及覆膜滴灌条件下的田间试验得出灌溉施肥模式对土壤氮素含量有明显影响,提高了植物对氮素的利用效率。Du 等<sup>[8]</sup>通过 Meta 分析方法比较了不同灌溉方式对作物产量的影响,得出了膜下滴灌能够显著提高作物产量,但是膜下滴灌也会引发环境问题,如地膜的残留会破坏土壤环境,且不同的植物品种也应依据实验结果制定不同的灌溉制度,目前玉米、棉花及花生的膜下灌溉制度已十分完备。Wang 等<sup>[9]</sup>研究使用微咸地下水进行覆膜滴灌(Mulched Drip Irrigation,

MDI)对土壤和地下水环境的影响,得出了膜下微咸水滴灌会使土壤水分和盐分降低。

2.1.3 合理灌溉技术 合理的灌溉是防止土壤盐渍化的根本性措施,依据地区实际情况的不同,灌溉模式也应该做出相应改变。Feng 等<sup>[10]</sup>通过微咸水滴灌的方式对滨海盐渍土壤盐分淋洗效果的研究,得出了滨海盐渍土的灌溉治理方案,即在灌溉时增加灌溉定额,以加强对土壤中盐分的淋洗,Li 等<sup>[11]</sup>通过对季节性冻融干旱区不同盐渍化程度棉田冬季适宜灌水量进行试验研究,得出了季节性冻融干旱区的灌溉制度,但需要注意的是过高的灌水量也会削弱土壤的脱盐效果。

## 2.2 水利工程改良盐渍土进展

“盐随水来,盐随水去”是水盐运动的基本规律,土壤含盐量增多、理化性质恶化以及结构被破坏都与地下水的水位有关,目前利用水利措施来改良土壤盐渍化的方式主要有以下 3 种。

2.2.1 咸水结冰灌溉融水技术 咸水结冰灌溉融水的主要方法是在冬天通过从盐渍土区抽取地下水降低地下水位,然后用冻土覆盖的方式来减少地下水的蒸发,这种方式可以有效地解决地下水水位过高造成的土壤盐渍化,到了春季由于土壤表面有一层冰层,还可以减少土壤水分的蒸发。Guo 等<sup>[12]</sup>在中国河套灌区进行了为期 3 年的田间试验,研究了冬季冻结盐水灌溉下重盐渍土的水分及盐碱度变化规律,得出了在冻结盐水灌溉的条件下土壤盐分显著降低、团聚体中颗粒较大的组分有所增加,增强了团聚体的稳定性。但在国内咸水结冰灌溉目前仍处于初步发展阶段,且多在 NaCl 型盐渍土的分布区展开试验,例如中国的滨海区,而对于苏打型盐渍土,例如松嫩平原咸水灌溉结冰技术研究比较少<sup>[13]</sup>。

2.2.2 竖井排灌技术 竖井排灌是一种能兼顾灌溉与排盐的水利措施,其方法是抽取地下水进行灌溉。抽取地下水会促进土壤水盐垂直往下运移,随着地下水位的持续下降,土壤中的盐分就不会因为潜水的蒸发而逐渐积聚到地表。闫少锋等<sup>[14]</sup>通过对江苏沿海地区进行竖井排灌试验,得出了竖井排灌能够有效减缓地表返盐,减缓了土壤的盐渍化,但竖井排灌的脱盐范围还需要依据具体试验确定,且竖井排灌土壤盐分的排泄通路单一,容易滞留在包气带中下层,一旦外部条件发生变化,易造成土壤次生盐渍化和水质恶化现象。目前竖井排灌技术的主要应用方向为明管、暗管

以及竖井排灌的有机结合。

2.2.3 排水技术 排水工程的任务是依据盐渍土特殊的“盐随水来,盐随水走”的水盐动态规律通过排降地下水位到临界返盐深度以下,使得在排水井周围形成一个地下水位下降漏斗,毛管水就不易上升到地面,盐分不会在地表积累,从而降低土壤中对植物有害的盐分,提供植物生长发育所需要的供养条件。Jia 等<sup>[15]</sup>指出,不适当排水管理的灌溉方式引发盐的过度积累,是次生盐碱化的主要原因。

明沟排水是在田中每隔一定的距离就挖取一定深度的沟渠来起到排除土壤盐分的作用。任晓磊等<sup>[16]</sup>通过室内砂槽试验得出了明沟排水及暗管排水积水消退的规律。耿其明等<sup>[17]</sup>分析了黄骅市盐渍土开发工程前、明沟排水工程和暗管排水工程对土壤理化性质的影响,得出明沟排水相较于暗管排水,排水速度快、排水效果好,对土体中氮、磷、钾及其他有机质含量影响也优于暗管排水工程,但是明沟排水的工程量大,占地面积较大,而且沟坡易坍塌,对施工区域交通以及农业都有很大的影响。

暗管排是通过迅速降低地下水的水位到临界值以下,达到土壤脱盐和防止次生盐渍化的目的,排出大量的矿化水,加速地下水的淡化,降低硝酸盐和磷的损失,增加土壤孔隙率。Takeshima 等<sup>[18]</sup>通过田间试验得出,暗管排盐能够减少过量水分或涝渍胁迫对水田改旱田荞麦产量的不利影响,从而促进作物稳产高产。胡玲玲等<sup>[19]</sup>指出暗管的滤层结构及外包材料会对暗管排盐的效率及使用寿命有很大的影响。近年来我国也公布了多部与暗管排盐相关的规范<sup>[20-21]</sup>,为工程的实施提供了指导。暗管排盐有很多不利的影响,如造成土壤中的氮及磷的流失,排出盐水的处理也是一个重难点问题,此外暗管的铺设也需要配套的、一体的机械设备。丁新军等<sup>[22]</sup>通过 VOSiwer 对国内外暗管排水研究文献进行了科学叠加与可视化分析,得出了我国的暗管排水研究领域正处于引进吸收与发展的状态,目前排水设施的主要研究集中于多元化因素的排水管理。在工程技术上,田间排水源头可采用建立反硝化除氮生物反应池改善排水水质;农艺措施上,非耕作期进行覆盖作物种植研究,气候变化与暗管排水研究耦合也将成为研究热点。



## 2.3 物理手段改良盐渍土技术

由于连续多年浅层翻耕或旋耕等传统的耕作方式会造成土壤结构的破坏及肥力的流失,甚至引起土壤盐渍化,运用物理手段来改良盐渍土的原理大多都是疏松土壤、改良土壤结构、打破犁底层,目前利用物理来改良土壤盐渍化的方式主要有以下3种。

**2.3.1 振动深松技术** 振动深松技术是指把土层深处已经板结化的土壤进行人为松动,它的特征是只松动土,不翻动土层,保持土壤原来的结构和层次,是一种局部松动耕层和耕层之下土壤的耕作技术。郝新宇等<sup>[23]</sup>采用振动深松技术对松嫩平原盐渍土进行了改良,得出了振动深松可以疏松土壤、打破犁地层、增加土壤阳离子交换量、改善耕层结构和降低土壤 pH。高盼等<sup>[24]</sup>通过振动深松的对比试验,得出了振动深松对于增强土壤蓄水保墒能力、增加土壤碱解氮和有机质含量以及抗旱排涝能力有很大的作用。滕云等<sup>[25]</sup>通过对黑龙江省常见的5种土壤进行振动深松试验,得出了振动深松能显著提高土壤的持水性能,其中提高较多的为苏打盐渍、黑土和黑钙土。目前对于振动深松的研究方向主要集中于以降低深松阻力为目的的工程装备的研制<sup>[26]</sup>,以及配合化学改良剂的方式研究<sup>[27-28]</sup>。

**2.3.2 垄沟耕作技术** 垄沟耕作是一种特殊的耕作方式,通过深挖成沟,筑土为垄,加大了土壤的暴露面积,提高土壤入渗并减少蒸发<sup>[29]</sup>。垄沟耕作还可以加厚熟土层,加快土壤的熟化,选择深挖的方式还可以深施肥料,提高肥料的利用率。张光君<sup>[30]</sup>利用坡耕地野外原型观测试验,得出了垄沟耕作能够减少植物氮的流失,确定了滦河上游坡耕地的最优垄沟布局,选用垄和沟的耕作方式也可以灵活地进行排水及储水。张绪成等<sup>[31]</sup>通过田间试验比较不同耕作方式对旱地全膜双垄播玉米产量及水分利用的影响,得出了垄沟具有极佳的集水效果可有效利用降水,减少土壤返盐。目前对于垄沟耕作的研究方向主要是与覆膜技术结合使用的情况下对植物产量、肥料流失的影响<sup>[32]</sup>,以及对耕作布局的优化等。

**2.3.3 客土改盐技术** “客土改盐”是用质地优良的土质(通常是沙壤土)或者人工培植的土质替代原有土质,以改善盐渍土,客土改盐是改良盐渍土的重要措施之一,客土改盐技术可以很好地改善原生土的理化性质、增强土壤肥力,还能改善土

壤的通气性和透水性,减轻由于土壤盐分的移动而对植物造成的危害<sup>[33]</sup>。王成宝等<sup>[34]</sup>采用塑料地膜、细沙、秸秆3种覆盖材料,研究了不同地面覆盖方式对新垦盐碱荒地的抑盐、脱盐和玉米的增产效果,得出了全覆地膜是改良盐渍土最有效的措施,而麦草和沙子是农村常见且比较经济的材料。

## 2.4 化学手段改良盐渍土技术

化学改良方法是一种非常重要的技术手段,土壤盐分主要由  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  等组成,当这些离子浓度达到足以危害到植物正常生长时,就造成了土壤的盐渍化,在我国滨海及黄淮海盐渍区,盐渍土的盐分主要以氯离子及硫酸根为主,在我国东北以及甘新青盐渍区盐渍土的盐分主要以碳酸根及碳酸氢根为主,目前常用的土壤改良剂主要有含钙物质、酸性物质以及有机类改良剂。

**2.4.1 运用含钙物质改良盐渍土** 含钙物质如石膏、磷石膏等,其主要作用机理如图1所示。运用含钙物质中的  $\text{Ca}^{2+}$  去置换土壤中的  $\text{Na}^+$ ,置换出的  $\text{Na}^+$  会随着水流转移,从而使土壤脱盐,改善土壤性状。目前常见的含钙物质改良剂共有两种:脱硫石膏和磷石膏。

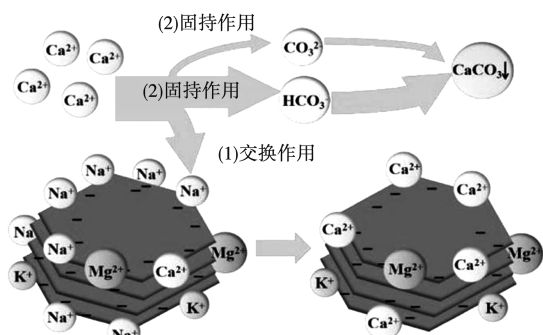


图1 石膏改良盐渍土机理示意图<sup>[35]</sup>

脱硫石膏由于其价格低廉且改良效果好,目前已成为主要的土壤改良剂之一。脱硫石膏主要成分是  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,其有效成分含量大约为93%。根据施用的脱硫石膏的量,土壤总碱度、碱度和pH的降低值有所差异,但过量施加脱硫石膏会抑制作物的出苗和生长,脱硫石膏的施用量可依据公式(1)~(4)进行计算。Wang等<sup>[36]</sup>通过对中国2568个脱硫石膏在盐渍土应用效果的数据分析,得出了脱硫石膏能显著改善土壤的盐碱性及pH,提高作物产量。

$$W = [86.07 \times \text{CEC} \times (\text{ESP} - 5\%) + 86.04 \times$$

$$ZEP - 28.22] \times H \times D / (R \times \eta) \quad (1)$$

$$W' = 0.5n_{Ex-Na^+} + n_{Ex-Mg^{2+}} + Mg(HCO_3)_2 + Na_2CO_3 + 0.5NaHCO_3 \quad (2)$$

$$W = 1.11 \times 86.1 \times H \times D \times (n_{Ex-Na^+} - k \times n_{Ex-Na^+}) \quad (3)$$

$$W = (0.08728 \times ESP + 0.4412) \times H \times D / (\eta \times 10) \quad (4)$$

式中,  $W$  与  $W'$  为脱硫石膏的使用量(单位分别为  $kg \cdot hm^{-2}$  和  $mmol \cdot kg^{-1}$ );  $CEC$  是阳离子的交换量( $cmol \cdot kg^{-1}$ );  $ESP$  为碱化度, 用占原有土壤的百分比来表示;  $ZEP$  为总碱度( $cmol \cdot kg^{-1}$ );  $H$  为土层深度( $cm$ );  $D$  为土壤的容重( $g \cdot cm^{-3}$ );  $n_{Ex-}$  为土壤中阳离子种类的交换量( $mmol \cdot kg^{-1}$ );  $R$  为脱硫石膏的利用率;  $\eta$  为  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  中石膏的含量。

磷石膏指的是在磷酸生产过程中, 用磷酸处理磷矿时产生的固体废渣, 它的主要成分除了  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  之外, 还含有有机磷、硫氟类化合物, 磷石膏可以提高土壤渗透性以及保水性, 降低土壤的 pH。Zhao 等<sup>[37]</sup> 通过测定土壤施用石膏后 17 年的交换性钠及氮的含量, 得出了石膏还可以为土壤提供有效磷及氮的输出, 但磷石膏的用量还需要依靠实验测定<sup>[38]</sup>。目前含钙物质经常与有机肥以一定的比例混合使用以提高改良效果<sup>[39]</sup>, 如 Zhao 等<sup>[40]</sup> 利用密集秸秆层配以适量的脱硫石膏, 显著改善了盐渍土的盐性及碱性。Huang 等<sup>[41]</sup> 利用磷石膏和农家肥混用显著提高了土壤肥力及有机质含量。

**2.4.2 运用酸性物质改良盐渍土** 向盐渍土中施用酸性物质可以显著降低盐渍土的 pH, 从而促进钙质土中的钙、镁的溶解, 并增加土壤中有效钙、镁的含量, 为替代土壤中的可交换性钠创造条件<sup>[42]</sup>, 但需要注意的是, 土壤酸化后会引发土壤重金属离子的活化及其在作物中的富集作用。目前改良盐渍土的酸性物质只有两种: 磷酸脲和硫酸铝。

磷酸脲又称尿素磷酸盐, 主要成分是  $[CO(NH_2)_2 \cdot H_3PO_4]$ , 磷酸脲进入土壤后就分解为尿素和磷酸, 还会释放出少量的  $CO_2$  及  $NH_3$  等不稳定复合物<sup>[43]</sup>。刘翔毓等<sup>[44]</sup> 通过不同梯度试验得出了磷酸脲不仅可以降低土壤 pH, 提高钙、镁等碳酸盐及氢氧化物的溶解率, 还能使土壤胶体中吸附的钠离子进入土壤溶液中再通过降雨等方式淋洗掉。

硫酸铝为白色斜方晶系结晶粉末, 马玉涛等<sup>[45]</sup> 通过使用不同浓度的硫酸铝田间试验得出了硫酸铝进入土壤后会对盐渍土胶体有凝聚作用, 随着硫酸铝用量的增加, 水土界面的分化也越来越明显, 是快速改良和培肥苏打盐渍土的有效方式。除此之外, Luo 等<sup>[46]</sup> 通过田间试验对比不同无机聚合物改良盐渍土的效果, 得出了硫酸铝能显著降低土壤 pH, 使土壤结构得到明显改善, 还能使土壤水分渗透速率增大、透水性增强。

**2.4.3 运用有机类改良剂改良盐渍土** 有机类改良剂指的是各种有机物, 包括肥料、草炭等传统的腐殖质类, 还包括了工业合成改良剂和工业废弃物等, 不同改良剂对土壤的影响机制也各不相同。盐渍化土壤由于有机质含量较低致使其保水以及肥能力较弱, 在盐渍土中增加有机质能够黏结土壤细颗粒, 改善土壤理化性质。有机类改良剂主要分为有机废弃物、腐殖酸类改良剂、合成土壤改良剂以及生物炭等, 有机废弃物一般为农业有机废弃物(秸秆、粪便等), 关于农业废弃物的使用目前一般采用秸秆还田技术, 秸秆是一种综合利用价值很大的可再生资源, 秸秆还田是将秸秆直接还田或堆积腐熟后施入土壤中, 不同秸秆还田方式在农田的应用效果见表 1。葛选良等<sup>[47]</sup> 通过田间试验得出了不同秸秆还田模式玉米耕层土壤物理性质和产量的特征。王秋月等<sup>[48]</sup> 通过田间试验探究了秸秆全量还田与氮肥减施对土壤理化性质的影响, 得出了秸秆直接还田不仅可以促进植物增产、改善土壤理化性质、减少土壤水分蒸发, 还可以提高土壤细菌及真菌多样性、减轻土壤盐渍化程度。秸秆间接还田是将秸秆碾碎或是深埋。Fei 等<sup>[49]</sup> 通过设计 4 种对比试验, 得出了秸秆间接还田与施用生物炭相比, 秸秆更有效地增加了一些贮磷细菌的丰度, 为作物提供了氮、磷、钾等养分, 在一定程度上降低化肥的消耗, 其效果比直接还田更为显著, 但其劳动强度大且耗时长、成本高。腐殖酸如泥炭、风化碳等, 是指动植物的残骸经过微生物分解和转化而积累的有机物质。腐殖酸的主要成分包括了碳、氢、氧、氮、硫、磷等营养元素, 将腐殖酸施到盐渍土中, 首先腐殖酸会与其他辅助剂中的钙、铁离子相结合, 促进 20~30 cm 的细颗粒土壤中的大颗粒团粒结构的形成, 降低土壤水分蒸发, 从而减轻盐渍化程度<sup>[50]</sup>; 其次腐殖酸类具有弱酸性, 可以降低土壤 pH, 提高土壤缓冲性; 最后腐殖酸会促进团聚体

的形成,增强土壤保水保肥能力,改良土壤理化性质以及土壤结构,减小土壤重金属污染。合成土壤改良剂是一种由人工合成的高分子有机聚合物。Yuan 等<sup>[51]</sup>通过研究聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP)两种常用高分子材料在不同粒径和剂量下对盐渍土土壤性质和微生物群落的影响,得出了高分子材料能够影响土壤微生物及酶的活性。生物炭是近几年来土壤学等领域研究的热点之一,生物炭指的是农林废弃物等生物质在缺氧环境下热裂解而形成的富碳产物<sup>[52]</sup>,常见的生物炭有木

炭、竹炭、秸秆碳和稻壳炭等。邓旭<sup>[53]</sup>通过室内填装土柱的微咸水淋洗试验,得出了生物炭对于降低土壤容重改善土壤理化性质具有明显作用。Zhang 等<sup>[54]</sup>通过球磨和红磷负载制备了一种新型生物炭,能够提高滨海盐渍土有机碳含量、阳离子交换能力、土壤养分(如 N、P、K)以及土壤酶活性,改善了土壤质量和肥力。生物炭不仅能使土壤的田间持水量倍增<sup>[55]</sup>,还能增加土壤的保肥能力<sup>[56]</sup>、降低土壤 pH、提高土壤微生物及酶的活性<sup>[57]</sup>。

表 1 我国典型区域盐渍土治理秸秆还田技术及配套技术<sup>[58]</sup>

典型区域	秸秆还田方式	配套技术
内蒙古引黄灌区、河套灌区盐渍土	秸秆翻耕或覆盖还田	灌排结合(膜下滴灌、暗管排盐)+耐盐碱性植物种植
东北苏打盐渍土(松嫩平原西部)	秸秆深翻还田	化学调理剂+灌溉排水工程+生物措施
滨海盐渍区	秸秆覆盖还田	起高垄+压沙+节水灌溉+耐盐植物培育与种植

2.5 生物手段改良盐渍土技术进展

2.5.1 运用耐盐碱植物改良盐渍土 运用耐盐碱植物来改良盐渍土,其主要原理是利用耐盐碱植物的生长发育,来改变土壤的理化性质以及清除环境污染物。首先,耐盐碱植物在生长发育的过程中需要吸收土壤中的盐离子来保证渗透压平衡<sup>[59]</sup>,根系将土壤中的盐分吸收至地上部再通过人类收获或动物进食等方式来降低土壤中盐分的含量;其次,耐盐碱植物在生长发育过程中其根部的伸展作用能够改善土壤板结化,增加土壤的通透性<sup>[60]</sup>;再次,植物根部及土壤中的微生物会通过呼吸作用产生 CO<sub>2</sub>,CO<sub>2</sub> 会与土壤中的水分结合形成 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 进而降低土壤 pH<sup>[61]</sup>;最后,根系植物能够通过分泌相关分泌物或酶来促进和激发微生物和真菌,微生物在分解过程中产生的 CO<sub>2</sub> 不仅能够与土壤中水分结合生成 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 降低土壤 pH,还能够促进土壤中碳酸盐的分解,这其中碳酸钙分解产生的钙离子会置换中土壤中的可交换性钠减少钠离子对土壤的毒害作用,植物与微生物的共同作用能够明显增强土壤的修复效果<sup>[62]</sup>。

2.5.2 运用耐盐碱促生菌改良盐渍土 将耐盐碱促生菌种植在盐渍土中,首先耐盐碱促生菌会分泌胞外聚合物(EPS),这种物质能够通过范德华力和静电引力与土壤颗粒形成土壤团聚体,从而增加土壤的透气性<sup>[63]</sup>;其次耐盐碱促生菌还能够植物生长激素来缓解植物的盐胁迫<sup>[64]</sup>;最后耐盐碱促生菌能够释放土壤中的营养物质促进植物

根系的生长<sup>[65]</sup>。目前生物改良主要的研究方向是选择、培育和驯化耐盐植物以及筛选耐盐碱促生菌,如 Zhang 等<sup>[66]</sup>利用镰刀菌-黑麦草复合处理修复盐渍土,王杰等<sup>[67]</sup>对盐渍地区观赏性植物进行了总结,Pankaj 等<sup>[68]</sup>利用从盐渍土中筛选出的促生菌配合本地耐盐植物来改良盐渍土,大幅度降低了土壤中的含盐量,改善了土壤的理化性质。对于苏打盐渍土的生物改良技术一般为种稻压盐,例如黑龙江省农业科学院所选育的寒地耐盐碱水稻<sup>[69]</sup>,这也是促进农民增收、农业增效及改善生态环境的最佳途径。目前常用地面覆盖物或微生物+种植耐盐碱植物的方式来改良土壤盐渍化<sup>[70]</sup>。

3 结语

土壤盐渍化改良技术目前可分为五大类:农艺、水利、物理、化学以及生物。农艺措施改良盐渍土主要是通过淋洗直接降低土壤含盐量,以及通过节水灌溉来阻止地下水位继续升高减少土壤返盐。目前主要研究方向是优化灌溉模式与完善灌溉制度,以提高水资源利用率。水利工程改良技术目前研究比较成熟,其主要目的是通过工程措施降低地下水位到临界返盐深度以下,进而减少土壤中盐分的含量。目前主要研究方向是完善排水设施的方式来降低地下水位,进而减少土壤返盐。这种技术虽可以缓解供



水矛盾、达到节水目标、提高作物产量,但缺点是大多投资成本过大,且容易因排水而将土壤中的营养物质及有机质流失。

物理改良技术目前研究比较成熟其主要原理是改善土壤结构、打破犁地层、提高土壤的持水性能,进而改善土壤盐渍化程度。但缺点是工程量过大、投入较高,且容易引发水土流失。

化学改良技术目前主要的研究方向是将不同化学物质直接或间接施入盐渍土中,并测定土壤理化性质的变化。化学改良剂能够降低土壤盐渍化程度、调节土壤 pH,且在短期内见效明显。但对于改良剂的选择十分严格、用量也需要通过实际试验测得,且极易引发二次污染。

目前生物改良主要的研究方向是选择、培育和驯化耐盐植物以及筛选耐盐碱促生菌,运用耐盐碱植物与耐盐碱促生菌相配合的方式改良盐渍土,这种方法能够发挥植物的生态功能,增加盐渍区的生物多样性,但是其见效慢、植物生长周期长。

目前对于改良盐渍土多选择两种或多种技术结合的方法进行,改良技术的选择还需要依据盐渍区的具体情况而综合选定。

## 参考文献:

- [1] 云雪雪,陈雨生.国际盐碱地开发动态及其对我国的启示[J].国土与自然资源研究,2020(1):84-87.
- [2] WU C, YIN Y L, YANG X M, et al. A Markov-based model for predicting the development trend of soil microbial communities in saline-alkali land in Wudi County [J]. Concurrency and Computation-Practice & Experience, 2019, 31(10): e4754.
- [3] 韩笑,马文东,王桂玲,等.水稻耐盐碱生理与遗传机制研究进展[J].黑龙江农业科学,2022(8):62-67.
- [4] GUPTA S, SCHILLACI M, WALKER R, et al. Alleviation of salinity stress in plants by endophytic plant-fungal symbiosis: Current knowledge, perspectives and future directions[J]. Plant and Soil, 2021, 461(1): 219-244.
- [5] 李冬莹.松嫩平原耐盐碱促生菌的筛选鉴定及其植物促生作用研究[D].哈尔滨:黑龙江大学,2022.
- [6] 高亮,孟宪东,潘修强.苏打盐碱地水稻种植洗盐压盐技术探讨[J].现代农业科技,2022(6):29-31.
- [7] 居雯雯,邵梦璇,刘海军.地面灌溉和滴灌下覆膜对土壤盐分和氮素空间分布的影响[J].农业工程学报,2022, 38(S1):68-75.
- [8] DU Y Q, LIU X F, ZHANG L, et al. Drip irrigation in agricultural saline-alkali land controls soil salinity and improves crop yield: evidence from a global meta-analysis[J]. Science of The Total Environment, 2023, 880: 163226.

- [9] WANG Z M, LI Z F, ZHAN H B, et al. Effect of long-term saline mulched drip irrigation on soil-groundwater environment in arid Northwest China[J]. Science of The Total Environment, 2022, 820: 153222.
- [10] FENG D, NING S R, SUN X A, et al. Agricultural use of deserted saline land through an optimized drip irrigation system with mild salinized water[J]. Agricultural Water Management, 2023, 281: 108261.
- [11] LI L, LIU H G, GONG P, et al. Multi-objective optimization of winter irrigation for cotton fields in salinized freeze-thaw areas[J]. European Journal of Agronomy, 2023, 143: 126715.
- [12] GUO K, LIU X J. Reclamation effect of freezing saline water irrigation on heavy saline-alkali soil in the Hetao Irrigation District of North China[J]. CATEND, 2021, 204: 105420.
- [13] 张璐,杨帆,王志春.咸水结冰灌溉融水淋盐改良盐渍土研究进展[J].土壤与作物,2021,10(2):202-212.
- [14] 闫少锋,吴玉柏,俞双恩,等.江苏沿海地区竖井排盐试验研究[J].节水灌溉,2014(8):42-44.
- [15] JIA Y X, WU J L, CHENG M Y, et al. Global transfer of salinization on irrigated land: Complex network and endogenous structure [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 336: 117592.
- [16] 任晓磊,王少丽,杨培岭,等.农田不同排水措施地下排水效果模拟试验研究[J].排灌机械工程学报,2023,41(3):253-260.
- [17] 耿其明,闫慧慧,杨金泽,等.明沟与暗管排水工程对盐碱地开发的土壤改良效果评价[J].土壤通报,2019,50(3):617-624.
- [18] TAKEISHIMA R, MURAKAMI S, FUJIWARA Y, et al. Subsurface drainage and raised-bed planting reduce excess water stress and increase yield in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) [J]. Field Crops Research, 2023, 297: 108935.
- [19] 胡玲玲,杨树青,梁志航,等.河套灌区下游排水暗管外包料筛选试验研究[J].灌溉排水学报,2022,41(4):141-148.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部.灌溉与排水工程设计标准:GB 50288—2018[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [21] 中华人民共和国水利部.2020 中国水利发展报告[S].北京:中国水利水电出版社,2020.
- [22] 丁新军,田军仓,朱和.国内外暗管排水研究知识图谱可视化分析[J].灌溉排水学报,2020,39(3):91-99,109.
- [23] 郝新宇,滕云,黄彦.振动深松改良苏打盐碱土效果研究[J].现代农业科技,2012(22):211-212,215.
- [24] 高盼,徐莹莹,王宇先,等.深松对松嫩平原苏打盐碱地土壤理化性质和玉米产量的影响[J].黑龙江农业科学,2022(7):20-24.
- [25] 滕云,张忠学,司振江,等.振动深松耕作对不同类型土壤水分特征曲线影响研究[J].灌溉排水学报,2017,36(5):52-58.
- [26] ZHANG L, ZHAI Y B, WU C Y, et al. Modeling the interaction between a new four-bar subsoiling mechanism and red soil using

- the improved differential evolution algorithm and DEM [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 208:107783.
- [27] 翟明振,胡恒宇,宁堂原,等. 盐碱地玉米产量及土壤硝态氮对深松耕作和秸秆还田的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(1):64-73.
- [28] 李健,郭颖杰,王景立. 深松技术与化学改良剂在苏打盐碱地土壤改良中的应用[J]. 吉林农业大学学报, 2020, 42(6):699-702.
- [29] 邢子强,刘姗姗,吕振豫. 垄沟耕作对雨养农田水循环过程影响及其布局优化研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2021(5):1-5.
- [30] 张光君. 垄沟布局对滦河上游坡耕地产流氮素流失的影响研究[D]. 郑州:郑州大学, 2021.
- [31] 张绪成,马一凡,王红丽,等. 不同耕作方式对旱地全膜双垄沟播玉米产量和水分利用的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(9):3603-3611.
- [32] 刘高远. 保护性耕作及优化施肥对渭北旱地土壤肥力的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.
- [33] 张蓉蓉. 土壤盐碱化的危害及改良方法[J]. 现代农业科技, 2019(21):178-179.
- [34] 王成宝,杨思存,霍琳,等. 地面覆盖方式对新垦盐碱地的抑盐和增产效果研究[J]. 甘肃农业科技, 2014(11):42-45.
- [35] 金明姬,周妍宏,文波龙,等. 石膏改良盐碱土研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(2):1-8.
- [36] WANG Y G, WANG Z F, LIANG F, et al. Application of flue gas desulfurization gypsum improves multiple functions of saline-sodic soils across China [J]. Chemosphere, 2021, 277:130345.
- [37] ZHAO Y G, WANG S J, LIU J, et al. Fertility and biochemical activity in sodic soils 17 years after reclamation with flue gas desulfurization gypsum[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(12):3312-3322.
- [38] 周黎明,王海霞,曹恒,等. 磷石膏改良盐碱棉田应用效果[J]. 农村科技, 2017(11):21-22.
- [39] 王舒华,陈爽,王悦,等. 有机改良剂配施磷石膏的盐碱土改良效果研究[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(11):227-233.
- [40] ZHAO Y G, WANG S J, LI Y, et al. Effects of straw layer and flue gas desulfurization gypsum treatments on soil salinity and sodicity in relation to sunflower yield[J]. Geoderma, 2019, 352:13-21.
- [41] HUANG L H, LIU Y, FERREIRA J F S, et al. Long-term combined effects of tillage and rice cultivation with phosphogypsum or farmyard manure on the concentration of salts, minerals, and heavy metals of saline-sodic paddy fields in Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 215:105222.
- [42] SUN Z W, GE J M, LI C, et al. Enhanced improvement of soda saline-alkali soil by in-situ formation of super-stable mineralization structure based on CaFe layered double hydroxide and its large-scale application [J]. Chemosphere, 2022, 300:134543.
- [43] 杨贵婷. 磷酸脲基复合肥制备工艺优化及其在滨海盐渍土中的磷素增效机制[D]. 泰安:山东农业大学, 2021.
- [44] 刘翔毓,王丽群,王鸿斌,等. 硫酸铝和有机物料对盐碱土有机碳组成及复合体的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(5):387-392.
- [45] 马玉涛,苑佰飞,张鹏,等. 硫酸铝对新开垦苏打盐碱水田的快速改良和培肥效果[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2):325-330, 339.
- [46] LUO J Q, WANG L L, LI Q S, et al. Improvement of hard saline-sodic soils using polymeric aluminum ferric sulfate (PAFS) [J]. Soil & Tillage Research, 2015, 149:12-20.
- [47] 葛逸良,钱春荣,张锋,等. 不同秸秆还田模式玉米产量和耕层土壤物理特性的研究[J]. 东北农业科学, 2022, 47(3):88-93.
- [48] 王秋月,王晨光,魏灵,等. 油菜秸秆还田对土壤性质及高粱产量的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(4):73-81.
- [49] FEI C, ZHANG S R, ZHANG L, et al. Straw is more effective than biochar in mobilizing soil organic phosphorus mineralization in saline-alkali paddy soil [J]. Applied Soil Ecology, 2023, 186:104848.
- [50] 聂朝阳. 腐殖酸基有机物料对苏打盐碱化耕地土壤改良效应研究[D]. 哈尔滨:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2022.
- [51] YUAN Y D, ZU M T, LI R Z, et al. Soil properties, microbial diversity, and changes in the functionality of saline-alkali soil are driven by microplastics [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 446:130712.
- [52] 王丽娜,杨瑛,杜苏. 生物炭施入对盐碱土壤影响的研究现状[J]. 中国农学通报, 2022, 38(8):81-87.
- [53] 邓旭. 生物炭对苏打盐碱土土壤结构及微生物特性的影响[D]. 延吉:延边大学, 2022.
- [54] ZHANG P, BING X, JIAO L, et al. Amelioration effects of coastal saline-alkali soil by ball-milled red phosphorus-loaded biochar [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 431:133904.
- [55] XIAO L, YUAN G D, FENG L R, et al. Soil properties and the growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) and maize (*Zea mays* L.) in response to reed (*Phragmites communis*) biochar use in a salt-affected soil in the Yellow River Delta [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 303:107124.
- [56] CUI L Q, LIU Y M, YAN J L, et al. Revitalizing coastal saline-alkali soil with biochar application for improved crop growth[J]. Ecological Engineering, 2022, 179:106594.
- [57] ZHANG C, GARCÍA, MEZA J V G, ZHOU K Q, et al. Superabsorbent polymer used for saline-alkali soil water retention[J]. Journal of The Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2023, 145:104830.
- [58] 张秀敏,高日平,康文钦,等. 秸秆还田对盐碱地改良的研究进展[J]. 北方农业学报, 2021, 49(5):85-92.
- [59] 王宁,赵振勇,张心怡,等. 几种藜科盐生植物吸盐能力及生态学意义[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(6):



- 1104-1112.
- [60] LIU Y, LIU Y, CUI Z, et al. Influence of soil moisture and plant roots on the soil infiltration capacity at different stages in arid grasslands of China[J]. *Catena: An Interdisciplinary Journal of Soil Science Hydrology-Geomorphology Focusing on Geoecology and Landscape Evolution*, 2019, 182: 104147.
- [61] JIN J, TANG C X, SALE P. The impact of elevated carbon dioxide on the phosphorus nutrition of plants: a review[J]. *Annals of Botany*, 2015, 116(6): 987-999.
- [62] KHAN N, BANO A, ZANDI P M. Effects of exogenously applied plant growth regulators in combination with PGPR on the physiology and root growth of chickpea (*Cicer arietinum*) and their role in drought tolerance[J]. *Journal of Plant Interactions*, 2018, 13(1): 239-247.
- [63] 姜焕焕, 王通, 陈娜, 等. 根际促生菌提高植物抗盐碱性的研究进展[J]. *生物技术通报*, 2019, 35(10): 189-197.
- [64] 王培培. 拟南芥磷脂酶 D 调控生长素信号转导和应答盐胁迫的分子机理[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- [65] LIU Z, SHANG H G, HAN F, et al. Improvement of nitrogen and phosphorus availability by *Pseudoalteromonas* sp. during salt-washing in saline-alkali soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 168: 104117.
- [66] ZHANG J X, FAN X D, WANG X Q, et al. Bioremediation of a saline-alkali soil polluted with Zn using ryegrass associated with *Fusarium incarnatum* [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 312: 119929.
- [67] 王杰, 刘晓威, 王长娜, 等. 我国盐碱地区观赏植物应用分析[J]. *北方园艺*, 2019(18): 73-78.
- [68] PANKAJ U, SINGH D N, MISHRA P, et al. Autochthonous halotolerant plant growth-promoting rhizobacteria promote bacoside a yield of *Bacopa monnieri* (L.) Nash and phytoextraction of salt-affected soil[J]. *Pedosphere*, 2020, 30(5): 671-683.
- [69] 孙羽, 王麒, 宋秋来等. 寒地水稻对盐碱胁迫的响应及耐盐碱生理机制研究进展[J]. *黑龙江农业科学*, 2022(8): 57-61.
- [70] ZHOU L X, LIU W, DUAN H J, et al. Improved effects of combined application of nitrogen-fixing bacteria *Azotobacter beijerinckii* and microalgae *Chlorella pyrenoidosa* on wheat growth and saline-alkali soil quality [J]. *Chemosphere*, 2023, 313: 137409.

## Research Progress of Soil Salinization-Alkalization Remediation Technology

LIU Gengwei, GAO Yaqi, SHAO Zexuan, DAI Changlei

(School of Hydraulic and Electric Power, Heilongjiang University / Institute of Groundwater Cold Region / International Joint Laboratory of Hydrology and Hydraulic Engineering in Cold Regions of Heilongjiang Province, Harbin 150080, China)

**Abstract:** Soil salinization will not only hinder the absorption of water by plant roots, seriously affect plant growth and yield, but also lead to the deterioration of soil physical and chemical properties. Effective treatment and exploitation of soil salinization was helpful to increase the area of effective cultivated land and increase the reserve of reserve cultivated land. By reviewing the research progress of soil salinization remediation technology at home and abroad in recent years, the existing research results of salinized soil improvement technology were summarized, and it was concluded that, (1) the main research direction of agronomic measures to improve salinized soil was to optimize irrigation mode and improve irrigation technology, prevent the rise of groundwater level and reduce soil salinity; (2) The current research on the improvement technology of hydraulic engineering was relatively mature, and its main research direction was to reduce the groundwater level by improving the drainage facilities, and then reduce the salt content in the soil and improve the saline soil; (3) The current research on physical improvement technology was relatively mature, and the research direction was to improve the soil structure, break the plough layer, improve the soil water retention, and then reduce the salt content in the soil; (4) At present, the main research direction of chemical improvement technology was to apply chemical substances directly or indirectly to saline soil, and to determine their effects on soil physical and chemical properties; (5) At present, the main research direction of bioimprovement was to select, cultivate and plant saline-alkali tolerant crops, screen saline-alkali tolerant growth promoters, and improve saline soil by using saline-alkali tolerant plants and saline-alkali tolerant growth promoters. At present, the saline soil was improved by the combination of two or more technologies, and the selection of the improved technology also needs to be comprehensively selected according to the specific situation of the saline area.

**Keywords:** salinization; improved technology; progress; soil amendments; salt alkali tolerant crops