

分类号：
学号：20222107050

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



聚丙烯酸复合材料的制备及其对盐碱地改良的 性能研究

学位申请人	戚凯飞
指导教师	孟桂花（教授）
申请学位类别	材料与化工硕士
专业名称	材料与化工
研究领域	功能复合材料
所在学院	化学化工学院

中国·新疆·石河子

2025年11月

分类号：
学号：20222107050

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



聚丙烯酸复合材料的制备及其对盐碱地改良的 性能研究

学位申请人	戚凯飞
指导教师	孟桂花（教授）
申请学位类别	材料与化工硕士
专业名称	材料与化工
研究领域	功能复合材料
所在学院	化学化工学院

中国·新疆·石河子

2025年11月

Preparation of Polyacrylic Acid Composite and Its Performance

Research on the Improvement of Saline-Alkali Soil

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Kaifei Qi

(Functional Materials)

Dissertation Supervisor: Prof. Meng Gui-hua

November, 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：威凯

时间：2025年11月27日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：威凯

时间：2025年11月27日

导师签名：王桂华

时间：2025年11月27日

摘要

盐碱地作为全球范围内分布广泛的障碍性土地，其高盐分和高碱度严重限制了土壤肥力的提升与农作物的正常生长，已成为制约农业可持续发展的突出问题。长期以来，盐碱地的改良依赖于暗管排盐，旋耕以及施用改良剂等方式，虽然在一定程度上改善了土壤结构，但存在技术要求高、效果不稳定以及造成土壤板结等问题。因此，探索绿色、高效、可持续的新型改良材料具有重要意义。本论文围绕盐碱地理化环境改良需求，设计并制备了三种新型高分子复合材料，并对其改良盐碱地的性能进行了研究。论文的主要研究内容如下：

(1) 以丙烯酸(AA)和丙烯酰胺(AM)为共聚单体，以羧甲基纤维素钠(CMC)为高分子引发剂，通过自由基聚合技术制备了 CMC-g-P(AA-co-AM)共聚物材料，并引入棉秆生物炭(BC)，制备了 CMC-g-P(AA-co-AM)/BC 复合材料。结果表明，该材料在优化配比条件下具有优异的吸水保水性能($Q_{eq}=1024\text{ g/g}$)，且在室温下 14 h 仍保持 95%以上的含水率。室内土柱实验结果显示，在施用量为 6 g/kg 的条件下，该材料有效的提升了土壤团聚体稳定性和最大持水量，土壤表层 pH 由 9.9 下降至 7.8、电导率由 5.3 ms/cm 下降至 1.9 ms/cm，水溶盐总量下降 61%，阳离子交换量提升 62.8%，碱化度下降 83.5%，有机质含量提升 56.6%。通过材料与细菌共孵育实验，表明其对枯草芽孢杆菌等微生物无显著抑制作用。通过施用 CMC-g-P(AA-co-AM)/BC 复合材料，优化了土壤的水分保持能力与土壤性质，提高了土壤的保水性和土壤质量。

(2) 以丙烯酸(AA)与 2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)为共聚单体，以羧甲基纤维素(CMC)为高分子引发剂，通过自由基聚合技术制备了 CMC-g-P(AA-co-AMPS)(IPNAM)，通过滴注法制备了海藻酸钠-腐殖酸凝胶球(SA@HA)，并通过喷涂法将 CMC-g-P(AA-co-AMPS)负载于海藻酸钠-腐殖酸缓释凝胶球表面，构建了 pH 响应微球(IPNAM@SA@HA)。实验结果研究表明，该复合材料在 pH 4-11 条件下具有典型的 pH 响应特征。同时土柱实验结果表明，土壤表层 pH 由 9.9 下降至 8.0，电导率由 5.3 ms/cm 下降至 2.8 ms/cm，水溶盐总量下降 53.6%，阳离子交换量提升 80.3%，碱化度下降 88%，有机质含量提升 59.2%。通过施用 IPNAM@SA@HA，优化了土壤结构与性质，有效改善了土壤的保水和持肥能力。

(3) 结合新疆盐碱地农业实践，选择丙烯酸(AA)以及马来酸(MA)为原料开发了适用于水肥一体化的液体土壤改良剂，在 AA:MA 比值为 1:2，柠檬酸添加量 12 wt%，表面活性剂添加量 4 wt% 的配比下，能够在降低土壤 pH 和 EC 的同时，兼顾优良的渗透性能。通过土柱渗透实验得到稀释 10 倍的改良剂改善效果最优，土壤 pH 由 9.8 降至 6.5，电导率由 5.8 ms/cm 降至 3.8 ms/cm，最大持水量提升 6.9 g/kg，阳离子交换量增加 10%以上，碱化度下降超过 20%。模拟田间试验表明，亩施 20 kg 的改良剂能显著降低土壤盐分，显示出良好的实用性和推广价值，并且在将实验规模放大到 100 kg 所制备的产品理化指标均符合国家标准，验证了产业化的可行性。

关键词：盐碱地改良；聚丙烯酸；接枝共聚；高分子改良剂；一维土柱渗透

Abstract

Saline-alkali land, as a globally distributed problematic soil with high salinity and alkalinity, severely restricts the improvement of soil fertility and normal crop growth. It has become a critical issue limiting sustainable agricultural development. For a long time, the reclamation of saline-alkali land has relied on methods such as subsurface drainage for salt removal, rotary tillage, and the application of ameliorants. Although these approaches have improved soil structure to some extent, they face challenges including high technical requirements, unstable effectiveness, and issues like soil compaction. Therefore, exploring green, efficient, and sustainable new amelioration materials is of great significance. This study focuses on the physical and chemical environmental improvement needs of saline-alkali land, designing and preparing three novel polymer composite materials, and investigating their performance in improving saline-alkali land. The main research contents are as follows:

(1) Using acrylic acid (AA) and acrylamide (AM) as copolymer monomers and sodium carboxymethyl cellulose (CMC) as a polymeric initiator, CMC-g-P(AA-co-AM) copolymer material was prepared via free radical polymerization technology. Cotton stalk biochar (BC) was introduced to prepare the CMC-g-P(AA-co-AM)/BC composite material. Results showed that this material exhibited excellent water absorption and retention properties under optimized ratio conditions ($Q_{eq} = 1024 \text{ g/g}$), maintaining over 95% moisture content after 14 hours at room temperature. Indoor soil column experiments demonstrated that, at an application rate of 6 g/kg, the material effectively enhanced soil aggregate stability and maximum water-holding capacity. Soil surface pH decreased from 9.9 to 7.8, electrical conductivity dropped from 5.3 mS/cm to 1.9 mS/cm, total water-soluble salts reduced by 61%, cation exchange capacity increased by 62.8%, alkalization degree decreased by 83.5%, and organic matter content rose by 56.6%. Co-incubation experiments with microorganisms indicated no significant inhibitory effects on *Bacillus subtilis* or other microbes. Application of CMC-g-P(AA-co-AM)/BC composite material optimized soil water retention capacity and properties, thereby improving soil quality.

(2) Using acrylic acid (AA) and 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid (AMPS) as copolymer monomers and carboxymethyl cellulose (CMC) as a polymeric initiator, CMC-g-P(AA-co-AMPS) (IPNAM) was synthesized via free radical polymerization. Sodium alginate-humic acid gel spheres (SA@HA) were prepared through dripping methods, and CMC-g-P(AA-co-AMPS) was loaded onto the surface of sodium alginate-humic acid slow-release gel

spheres using spraying techniques to construct pH-responsive microspheres (IPNAM@SA@HA). Experimental results revealed typical pH-responsive characteristics under pH 4–11 conditions. Soil column experiments showed that soil surface pH decreased from 9.9 to 8.0, electrical conductivity dropped from 5.3 mS/cm to 2.8 mS/cm, total water-soluble salts reduced by 53.6%, cation exchange capacity increased by 80.3%, alkalization degree decreased by 88%, and organic matter content rose by 59.2%. Application of IPNAM@SA@HA optimized soil structure and properties, effectively improving soil water retention and fertilizer-holding capacity.

(3) Based on agricultural practices in Xinjiang's saline-alkali regions, liquid soil ameliorants suitable for integrated water and fertilizer management were developed using acrylic acid (AA) and maleic acid (MA) as raw materials. Under the optimal ratio of AA:MA = 1:2, with 12 wt% citric acid addition and 4 wt% surfactant addition, the ameliorant achieved both reduced soil pH and EC while maintaining excellent penetration performance. Soil column permeability experiments demonstrated that a 10-fold dilution of the ameliorant yielded optimal improvement effects, reducing soil pH from 9.8 to 6.5, electrical conductivity from 5.8 mS/cm to 3.8 mS/cm, increasing maximum water-holding capacity by 6.9 g/kg, enhancing cation exchange capacity by over 10%, and decreasing alkalization degree by more than 20%. Field simulation trials showed that applying 20 kg/mu of the ameliorant significantly reduced soil salinity, demonstrating good practical applicability and promotion value. Furthermore, scaling up production to 100 kg confirmed compliance with national standards for all physicochemical indicators, validating the feasibility of industrialization.

Key words: saline-alkali soil improvement; polyacrylic acid; graft copolymerization; polymer modifier; one-dimensional soil column infiltration

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
目录.....	IV
第 1 章 文献综述.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 盐碱地改良的技术现状.....	4
1.2.1 水利工程改良.....	5
1.2.2 农业改良.....	6
1.2.3 生物改良.....	7
1.2.4 化学改良.....	7
1.3 化学改良法改良盐碱地的技术研究现状.....	8
1.3.1 石膏类材料应用于盐碱地改良.....	8
1.3.2 生物炭类材料应用于盐碱地改良.....	9
1.3.3 聚合物类材料应用于盐碱地改良.....	10
1.4 本论文的研究意义及研究内容.....	12
1.4.1 研究意义.....	12
1.4.2 研究内容.....	13
1.4.3 技术路线图.....	14
第 2 章 实验材料及仪器.....	15
2.1 实验材料.....	15
2.2 实验设备及仪器.....	16
2.3 材料的表征手段.....	17
2.3.1 扫描电子显微镜(SEM).....	17
2.3.2 红外光谱测试 (FTIR).....	17
2.3.3 热重测试(TG).....	17
2.3.4 X 射线衍射测试(XRD).....	17
2.3.5 氮气吸附脱附测试(BET).....	17
2.4 细菌存活率测试.....	17
2.5 盐碱地改良性能研究.....	18

2.5.1 土壤最大持水量.....	18
2.5.2 一维土柱渗透实验.....	18
2.5.3 土壤理化性质的测定.....	18
第 3 章 CMC-g-P(AA-co-AM)/BC 复合材料的制备及其对盐碱地改良的性能研究.....	21
3.1 本章引言	21
3.2 实验部分	22
3.2.1 棉秆生物炭的制备.....	22
3.2.2 CMC-g-P(AA-co-AM)/BC 复合材料的制备	22
3.2.3 CMC-g-P(AA-co-AM)/BC 复合材料的溶胀行为	23
3.2.4 CMC-g-P(AA-co-AM)/BC 复合材料的溶胀动力学分析	24
3.2.5 CMC-g-P(AA-co-AM)/BC 复合材料的保水性	24
3.2.6 CMC-g-P(AA-co-AM)/BC 复合材料的细菌存活率分析	24
3.2.7 CMC-g-P(AA-co-AM)/BC 复合材料改良盐碱地的性能研究	24
3.3 结果与讨论	25
3.3.1 材料的 SEM 分析.....	25
3.3.2 材料的 FTIR 分析	26
3.3.3 材料的 TG 分析	27
3.3.4 材料的 XRD 分析	28
3.3.5 材料的吸水性分析.....	29
3.3.6 材料的保水性和溶胀动力学分析.....	30
3.3.7 材料的细菌存活率分析.....	32
3.3.8 改良盐碱地的性能研究.....	33
3.4 本章小结	36
第 4 章 IPNAM@SA@HA 复合材料的制备及其对盐碱地改良的性能研究.....	37
4.1 本章引言	37
4.2 实验部分	38
4.2.1 CMC-g-P(AA-co-AMPS) (IPNAM)的制备.....	38
4.2.2 SA@HA 的制备	38
4.2.3 IPNAM@SA@HA 复合材料的制备.....	38
4.2.4 IPNAM 的溶胀行为及溶胀动力学分析	39
4.2.5 IPNAM@SA@HA 复合材料的缓释性能.....	39
4.2.6 IPNAM@SA@HA 复合材料的缓释动力学模拟.....	39
4.2.7 IPNAM@SA@HA 复合材料的细菌存活率实验.....	39
4.2.8 IPNAM@SA@HA 复合材料改良盐碱地的性能研究.....	39

4.3 结果与讨论	40
4.3.1 材料的 SEM 分析.....	40
4.3.2 材料的 FTIR 分析	41
4.3.3 材料的 TG 分析	42
4.3.4 材料的 BET 分析	42
4.3.5 材料的溶胀行为及溶胀动力学分析.....	44
4.3.6 材料的缓释行为及缓释动力学分析.....	46
4.3.7 材料对细菌存活率的影响.....	49
4.3.8 材料改良盐碱地的性能研究.....	50
4.4 本章小结	53
第 5 章 P(AA-co-MA)液体土壤改良的制备及其对盐碱地改良的性能研究.....	54
5.1 本章前言	54
5.2 实验部分	54
5.2.1 P(AA-co-MA)的制备	54
5.2.2 P(AA-co-MA)液体土壤改良剂的制备	55
5.2.3 P(AA-co-MA)液体土壤改良对细菌存活率的影响	55
5.2.4 P(AA-co-MA)液体土壤改良改良盐碱地的性能研究	55
5.2.5 P(AA-co-MA)液体土壤改良的模拟田间实验	55
5.3 结果与讨论	56
5.3.1 P(AA-co-MA)液体土壤改良的配比探究	56
5.3.2 P(AA-co-MA)液体土壤细菌存活率分析	59
5.3.3 P(AA-co-MA)液体土壤改良改良盐碱地的性能研究	60
5.3.4 P(AA-co-MA)液体土壤改良的田间模拟实验分析	64
5.3.5 P(AA-co-MA)液态盐碱地土壤改良剂的放大实验	65
5.4 本章小结	67
第 6 章 结论与展望.....	68
6.1 结论	68
6.2 展望	69
参考文献.....	70
致谢.....	81
作者简介.....	83

第1章 文献综述

1.1 前言

盐碱地指因盐分过量富集而退化的障碍性土地(含盐土、碱土),其典型特征是含盐量大于 0.1%~0.2%且碱化度在 15%~20%之间^[1]。全球盐碱地面积巨大,据估计约 9.6×10^8 公顷,占陆地总面积的 9.4%,并正以每年 $1.0 \times 10^6 \sim 1.5 \times 10^6$ 公顷的速度增加^[2]。其分布遍及全球六大洲的 100 余个国家^[3]。其中中国的盐碱地总面积约 1.0×10^8 公顷,居世界第三位^[4]。

在盐碱化土壤的分级过程中,各个国家采用的指标有所不同^[5]。美国采用碱化度(ESP)大于 15%,测定 pH 高于 8.5 的土壤定为盐碱土,ESP 为 5%~15%的土壤则为盐碱化土壤^[6];我国则把 ESP 大于 30%,表层含盐量小于 0.5%,且 pH 大于 9.0 的土壤归为碱土,并根据 ESP 的不同,将碱土分为轻度碱化土壤、中度碱化土壤及强度碱化土壤^[7]。此外,我国学者研究了从不同角度以不同方法对盐碱土进行评价和分类^[8]。我国松辽平原的盐碱土盐分组成以 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 为主,并含少量的硫酸盐和氮化物,所以兼有不同程度的盐化和碱化的特性,基本属于内陆苏打盐碱型^[9]。根据土壤盐化和碱化的程度,主要分为草甸盐土、草甸碱土、盐碱化土壤三个类型,其中盐碱化土壤按土壤表层含盐量又可划分为轻度、中度及重度盐碱土壤^[10]。刘志明等^[11]根据植被、土壤类型和碱斑面积比例作为盐碱土盐碱化程度的评价指标,把盐碱土分为轻度、中度及重度盐碱化土地。新疆土壤盐渍化程度一般以碱化度 ESP(即土壤中交换性 Na 的含量占阳离子交换量的百分数)和按表层土壤含盐量来分类^[12]。

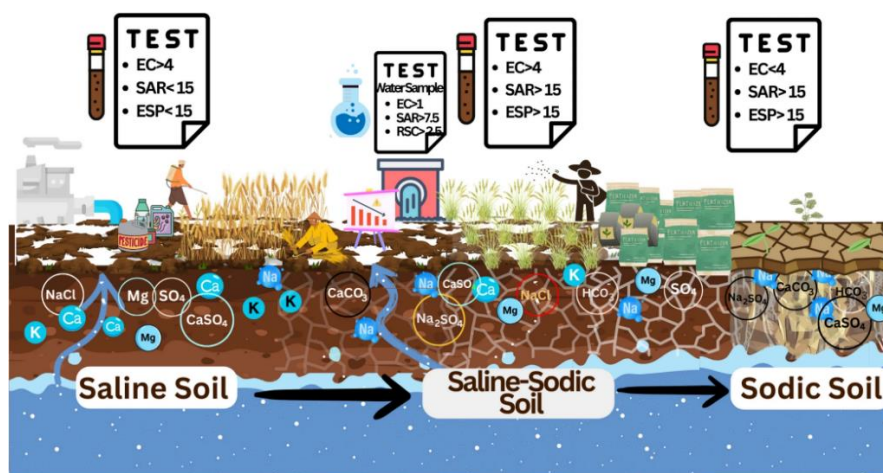


图 1-1 不同类型盐渍土壤形成背后的过程。EC = 电导率, SAR = 钠吸附比, ESP = 碱化度^[13]

Figure 1-1 The processes behind the formation of different types of saline soils. EC = Electrical Conductivity, SAR = Sodium Adsorption Ratio, ESP = Exchangeable Sodium Percentage^[13]

表 1-1 新疆土壤盐渍化程度划分指标(按 0~30cm 盐分含量 g/kg)

Table 1-1 Classification Indicators of Soil Salinization Degree in Xinjiang (Based on Salt Content in 0-30 cm Depth, g/kg)

盐分类型含量 (总盐)	非盐渍化	轻度盐渍化	中度盐渍化	重度盐渍化	盐土
硫酸盐-氯化物	<7	7~9	9~13	13~16	>16
氯化物-硫酸盐	<8	8~10	10~15	15~20	>20
苏打碱化 (总盐)	<3.5	3.5~5.0	5.0~6.0	6.0~8.5	>8.5
pH	<8.5	8.5~9.0	9.0~9.5	9.5~10	>10
耐盐作物生长情况	正常, 不受抑制	一般, 不受抑制	受抑制, 明显减产	严重抑制, 减产	死亡, 无收

表 1-2 新疆碱化土壤分级指标(%)

Table 1-2 Grading Indicators for Alkalized Soils in Xinjiang (%)

碱化度	非碱化	轻碱化	中度碱化	强度碱化	碱土
钠碱化度	<10%	10%~20%	20%~30%	30%~40%	>40%
pH	<8.5	8.5~9.0	9.0~9.5	9.5~10	>10

表 1-3 新疆土壤盐渍化类型划分指标(按 0~30cm)

Table 1-3 Classification Indicators for Soil Salinization Types in Xinjiang (Based on 0 - 30 cm)

阴离子	毫克当量比值	盐分组成命名
$\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- / \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$	>4	纯苏打盐土
$\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- / \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$	1~4	苏打盐渍化土
$\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$	≥ 4	氯化物盐渍化土
$\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$	1~4	硫酸盐-氯化物盐渍化土
$\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$	0.2~1	氯化物-硫酸盐盐渍化土
$\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$	<2	硫酸盐盐渍化土

中国盐碱地总面积占据国土面积的 10.3%，广泛分布于西北干旱区、东北平原、黄淮海平原及滨海地带，形成“三区一带”格局^[14]。西北内陆区为核心分布区，以新疆、甘肃河西走廊、青海柴达木盆地为主，占全国盐碱地面积的 45%，多为原生盐碱土，受干旱气候（蒸发/降水比大于 20）和封闭盆地地形控制，盐分组成以硫酸盐-氯化物为主，新疆盐碱化耕地占全区耕地 31.1%，甚至新疆部分地区的土地盐碱化面积甚至超过了 50%^[14-16]。东北平原区集中于松嫩平原西侧，以苏打型盐碱土为特征黄淮海平原区主要分布于河北、山东、河南的灌溉农业带（占全国 15%），属次生盐渍化，由地下水深度

较浅（小于 2.5 米）与不合理灌溉引发，呈斑块状分布^[17-19]。滨海盐碱带包括辽宁至广西 11 个沿海省份，尤以环渤海区域最为集中，受海水倒灌与高潮位顶托影响，形成氯化钠主导的盐土，面积约 380 万公顷^[20]。此外，青藏高原内陆湖盆（如羌塘盆地）存在零星分布，但农业影响较小^[21]。我国整体盐碱地呈现出“西多东少、北重南轻”的空间特征，且西北原生型与东部次生型盐碱化机制差异显著，前者受自然本质主导，后者与人类活动关联密切^[22]。

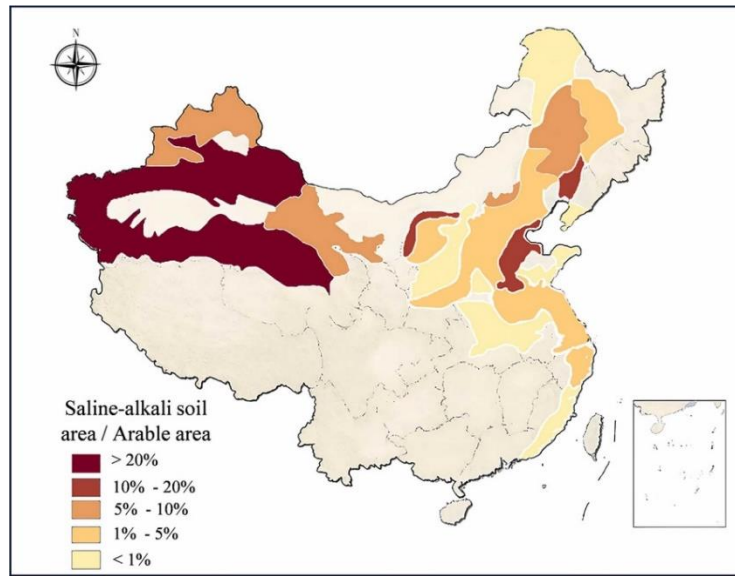


图 1-2 中国土壤盐渍化分布图^[23]

Figure 1-2 Distribution Map of Soil Salinization in China^[23]

新疆作为中国盐碱化最严重的区域之一，其土地退化过程是干旱区自然性质与人类活动叠加作用的典型结果^[24]。首先，极端干旱气候导致水盐运移失衡—全区年均降水量不足 150 mm，其中塔里木盆地的年降水量小于 50 mm，而蒸发量却高达 2000-3000 mm，强烈的蒸发势能使地下水中的盐分随毛细作用持续向地表富集，且缺乏降水淋溶使盐分形成永久性表聚^[25,26]。其次，封闭性地形加剧盐分累积：塔里木、准噶尔等内陆盆地无外流河道排盐，地表水与地下水向洼地汇集过程中溶解地层盐分，形成矿化度 3-10 g/L 的高盐地下水体，局部地区大于 50 g/L 毛细作用向土壤输送盐离子^[27-29]。再者，富盐地质背景提供物质来源：古地中海沉积遗留的含盐地层(如石膏、岩盐)风化释盐，加之河流冲积物初始含盐量达 0.5%-1.5%。人类的农业劳动则加速了土地盐碱化的进程：传统大水漫灌导致地下水位抬升至临界深度，毛细作用将盐分输入根层^[30]；排水系统缺失或失效阻碍盐分排出，明沟淤积更使脱盐率降低 50%以上^[31]；大规模土地开垦清除原生耐盐植被，削弱生物排水能力，加之河流中上游水库截留 80%径流导致尾闾湖干涸，引发盐尘暴扩散盐分（年均输入 50-200 t/ha）^[32]；粗放耕作中化肥过量施用引入外源盐离子（Cl⁻、SO₄²⁻），连作模式缺乏休耕淋盐进一步促进盐分表聚^[33]。同时区域特异性机制强化盐化效应^[34]：季节性冻融使北疆春季解冻期土壤盐分随水分蒸发快速向地表聚集（“盐

霜”现象);干涸湖盆盐壳经风力侵蚀迁移覆盖农田;冰川融水占供水70%的脆弱性使气候变化通过影响水资源加剧水盐失衡,短期融水增加抬升地下水位,长期退缩则限制淋盐用水^[35]。

土壤盐碱化对土壤的物理化学性质产生了严重的负面影响^[3],严重阻碍了植物生长和农业发展^[36],并对生态环境和工程施工造成威胁^[37]。土壤盐碱化会破坏土壤结构^[38],导致土壤各项理化性质变差,例如土壤板结,孔隙度减小,透水透气性降低,土壤容重增加^[39]。盐碱地pH值升高,抑制了土壤酶活性^[4],同时破坏了土壤微生物群落^[40],影响有机质分解和养分循环,导致有机质含量、养分利用率和土壤肥力均下降^[41],从而导致土地退化,破坏生态环境,使生物多样性降低^[42]。同时盐碱地的高盐量导致土壤溶液渗透压远高于正常值,影响植物根系对水分和养分的吸收,进而严重影响植物的发芽和正常生长^[43]。高浓度的 Na^+ 对土壤团聚体,土壤透气性和土壤pH有较大副作用^[44]。此外, Na^+ 还会与土壤中其他阳离子,如钾(K)、镁(Mg)、铁(Fe)等关键营养元素,产生竞争吸附,导致植物吸收的营养物质减少,也阻碍了植物的正常生长^[45]。盐碱地还会直接毒害植物细胞,造成植物生长不良甚至死亡,影响植物的产量和品质^[46]。因此,盐碱地的单位面积作物产量降低,严重影响了农业的可持续发展^[47]。

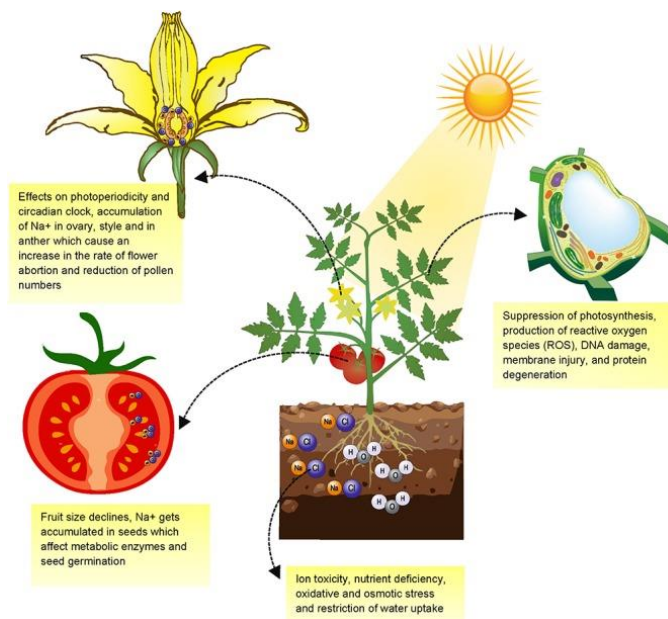


图 1-3 盐碱胁迫对植物生长的影响^[48]

Figure 1-3 The Effects of Saline-Sodic Stress on Plant Growth^[48]

1.2 盐碱地改良的技术现状

盐碱地的广泛分布及其带来的生态环境问题,已成为制约土地利用和农业发展的重要因素。其影响不仅体现在土壤肥力的下降,还严重制约了植物的生长与农业生产的持续性。因此,盐碱地的治理显得尤为迫切和重要。针对盐碱地的复杂性和多样性,学术

界和实践中提出了多种治理手段，主要包括水利措施、农业措施、生物措施以及化学措施等。这些治理方法从不同角度入手，通过综合应用，可以有效改善盐碱地的土壤性质，恢复其生态功能，进而推动土地的可持续利用。

1.2.1 水利工程改良

水利工程主要通过排水降盐、灌溉洗盐、调控地下水位等方式，来改善土壤盐碱化的状况^[49]。盐碱地排水降盐系统主要采用两种工程措施：明沟排水系统^[50]和暗管排水系统^[51]。明沟排水是土地开发整理中一项重要的盐碱土改良措施，其核心原理是通过人工开挖深度低于地下水位的明沟，结合排灌系统，利用水力作用使土壤中的盐分随降水或灌溉水下渗或侧渗进入沟渠，最终排出农田，同时调控地下水位至安全深度，从而阻断土壤返盐通道，实现耕层脱盐^[52]。暗管排水技术是采用地下管道排水体系，有效调控地下水位至不引起盐渍化的安全深度，最终达成土壤脱盐的目标^[50]。该技术通过在地下特定深度埋设透水管网，利用降水或滴灌过程，使土壤中的盐分随着水流渗入管网，再借助重力作用或辅助抽排的方式将含盐的废水排出^[53]。这种方式不仅能及时带走土壤中的盐分，起到降盐洗盐的效果，还能将地下水位稳定控制在合理区间，从根源上抑制了高盐度地下水向上的迁移，显著的减轻土壤盐渍化程度^[54]。此外，暗管排水系统运行后，土壤含水量得到合理调节，原本因积水导致的缺氧环境得以改善，通气性显著增强^[55]。良好的通气条件为土壤微生物创造了适宜的生存环境，促进其新陈代谢与分解活动，加速土壤中有机物的转化与分解，在提升土壤肥力的同时也增加了微生物的含量，从而达到减少土壤板结，增强根系发育能力，增加作物质量与产量的目的^[56]。

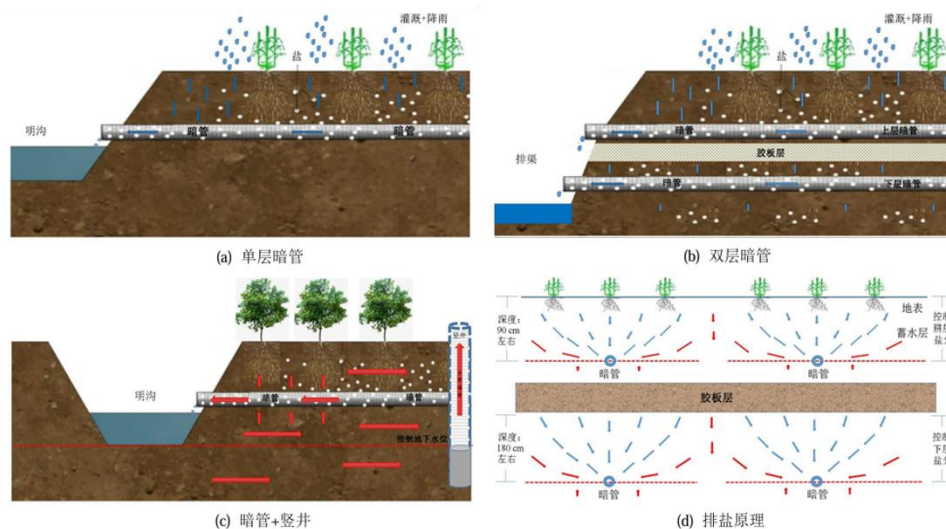


图 1-4 工程排盐示意图^[57]

Figure 1-4 Schematic Diagram of Engineering Salt Drainage^[57]

明沟排水施工简单，仅需开挖沟渠，无需铺设管道^[58]。在降低土壤盐渍化程度的同时，还能够维持土壤养分，避免因水土流失而致使土壤肥力下降。但明沟排水会占用较

大耕地面积,沟渠宽度通常 1~3 米,会极大减少有效种植面积,从而使生产效益降低^[58]。而且其排水效率低,依赖自然蒸发和渗透,脱盐速度缓慢,需要长期持续的排水才能见效。还易受到降雨影响,会产生沟渠淤塞或坍塌等问题^[59]。而暗管排水虽然可以有效减少占地面积,且其排盐效果更加显著,可以达到迅速脱盐的目的^[60],但是它的投资成本高,施工复杂,需要专业设计(如埋深、间距计算)和机械施工,因此其并不适合大面积推广。

1.2.2 农业改良

农业改良是盐碱地治理的传统核心手段之一,通过翻耕、覆盖措施、耐盐作物种植等,结合水利工程,可实现盐碱地的可持续利用。

传统耕作实践,如深耕、旋耕和汾长垄深耕(FT),通过破碎压实层并将富盐表层土与更深层混合来改善土壤性质^[61]。这稀释了表层盐分,促进了更深层的盐分浸出。FT 是一种将深耕和旋耕结合到 40-60 cm 深度的方法,可增强 30%-50%的雨水入渗,加速盐分浸出,并减少表层盐分积累^[62]。此外,FT 破坏了土壤毛细管,防止盐分通过蒸发重新堆积,同时改善了土壤结构,调动了盐晶体,并激活了土壤养分和微生物^[63]。新疆盐碱棉田的研究表明,与传统耕作相比,FT 显著提高了土壤质量和棉花产量^[64]。Li 等^[65]指出,FT 增加了甘蔗的生物量产量和株高,与传统耕作相比,总生物量分别增加了 9.1% 和 21.7%。然而,FT 的有效性可能因土壤质地和机械效率而异。

地表覆盖是盐碱地改良中普遍采用的农艺方法,通过地表物理覆盖来调节水盐运动,以达到抑制返盐并改善土壤环境的目的^[66]。主要有地膜覆盖和沙土覆盖。据研究表明,地膜对土壤有保水控盐的效果。其阻断土壤毛细管的上升通道,减少水分蒸发量并抑制盐分随水分上移,使地表盐分积累降低。

农业措施普遍成本较低,操作便利,适用范围较广,各类盐碱地都能适用,但是作用时间较短,通常只能适用于短期的种植需求。

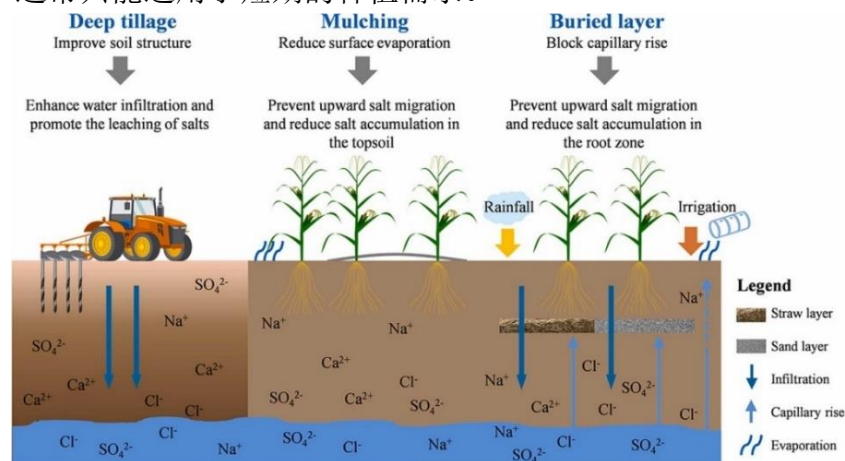


图 1-5 盐碱地改良的典型农艺措施^[67]

Figure 1-5 Typical agronomic practices to improve the quality of saline-alkali soils^[67]