

分类号:

密 级: 公开

学 号: 20222010033

单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



新疆膜下滴灌棉花根际高效解钾菌筛选鉴定及 促生效果研究

学 位 申 请 人	赵越
指 导 教 师	王振华 教授
申请学位门类级别	工学硕士
学科、专业名称	农业工程
研 究 方 向	农业水土工程
所 在 学 院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2025 年 5 月

分类号:

密 级: 公开

学 号: 20222010033

单位代码: 10759

石河子大学

硕 士 学 位 论 文



新疆膜下滴灌棉花根际高效解钾菌筛选鉴定及 促生效果研究

学 位 申 请 人	赵越
指 导 教 师	王振华 教授
申请学位门类级别	工学硕士
学 科、专 业 名 称	农业工程
研 究 方 向	农业水土工程
所 在 学 院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2025 年 5 月

Screening, Identification, and Growth-Promoting Effects of High-Efficiency Potassium-Solubilizing Bacteria in Cotton Fields under Mulch Drip Irrigation in Xinjiang

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Zhao Yue

(Agricultural Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Wang Zhenhua

May, 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

本人所呈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：赵越

时间：2025年5月18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：赵越

时间：2025年5月18日

导师签名：

时间：2025年5月18日

赵越

摘要

目的:棉花是全球纺织业的关键原料,对钾高度敏感。土壤盐碱化通过钠钾离子竞争和矿物钾固定双重作用,显著降低土壤钾的生物有效性,导致棉花钾吸收受阻。新疆棉田速效钾含量衰减,已成为区域棉花产能提升的关键限制因子。解钾菌可以将不可溶的钾转化为植物可利用的有效钾,为增加盐胁迫土壤中的可溶性钾提供了可持续的途径。本研究从新疆膜下滴灌棉田根际土壤分离解钾菌并筛选鉴定优势菌株,明确其解钾机制,解析解钾菌调控土壤钾形态转化、增强棉花耐盐性及提高产量品质的协同作用,为解钾细菌在新疆棉花生产中的应用奠定理论基础。

方法:本研究采集新疆棉田根际土样,开展微生物试验对解钾菌株进行分离、筛选、纯化、保存和16S rDNA测序鉴定,探求适应新疆棉田盐碱环境的高效解钾菌种,通过对解钾菌解钾过程中的菌液和产物进行酸碱性和液相色谱检测,探讨解钾菌的解钾机理。选择铜绿假单胞菌 A10 为试验菌株,于 2024 年开展棉花盆栽试验和大田试验,研究解钾细菌对土壤理化性质、根际土壤微生物群落结构,及棉花的生理生长、产量、品质的影响,阐明解钾菌对盐碱环境的影响和对棉花的促生作用机制,以期了解钾菌肥在新疆棉花产业的应用提供科学合理的理论依据。

结果:(1) 探明了新疆棉花根际解钾优势菌种及其解钾机制。从新疆棉花的根际土壤中分离出 23 株具有高钾增溶指数的解钾细菌,其中菌株 A10 表现出最强的钾增溶能力(21.78 ppm),并在盐碱环境中表现出较好的生存能力和钾增溶能力,这归因于其分泌乳酸、柠檬酸、乙酸、琥珀酸等有机酸降低环境 pH,从而促进钾的释放。16S rDNA 测序鉴定菌株 A10 为 *Pseudomonas aeruginosa*。

(2) 阐明了解钾菌对盐碱土壤的影响和提升棉花耐盐性的路径。耐盐解钾菌 A10 显著提高了盐胁迫下棉花种子活力。盆栽试验结果表明,与未接种处理相比,在不同程度的盐胁迫的条件下接种 A10 的棉花幼苗,株高提高了 22.28%-37.55%,相对叶绿素含量增加了 20.60%-23.62%。此外,地上部和根部的鲜重也显著增加,根系体积和表面积增长,平均根径减小,显示出棉花形成了更长、更细的根系结构。土壤分析显示,接种 A10 后,土壤水溶性钾、非特殊吸附钾和特殊吸附钾的含量显著增加,而非交换性钾和矿物钾含量减少。此外,棉花植株内的钾钠比显著提高,过氧化物酶、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和脯氨酸含量显著增加,叶片内的丙二醛和超氧阴离子含量显著降低。

(3) 明确了解钾菌对膜下滴灌棉田土壤钾的有效性、微生物群落结构及棉花产量品质的影响。大田试验结果表明,解钾菌显著改善了棉田土壤的理化性质,与未接种处理相比,提升了土壤中水溶性钾、非特殊吸附钾和特殊吸附钾的含量,增幅分别为 13.02%-58.63%、17.68%-65.5%和 11.87%-57.21%,有效降低了电导率 EC 和土壤 pH,降幅分别为 2.52%-8.33%和 0.40%-3.77%,改变了棉田土壤微生物群落组成与多样性,增加了棉田土壤假单胞菌属的相对丰度,提升了棉田土壤的 ACE 指数和 Chao1 指数。提升了棉花产量和纤维品质,籽棉产量提升了 2.99%-3.72%。

结论:膜下滴灌棉花根际土壤中筛选出的高效解钾菌 *Pseudomonas aeruginosa* A10 通过酸解提高土壤钾有效性,并优化土壤微生物群落结构,促进了棉花根系发育及对钾离子的吸收利用,有效维持了棉花钾钠平衡,降低活性氧积累并提升抗氧化酶活性,从而增强棉花的耐盐性,促进棉花生长发育和干物质积累,并最终提升膜下滴灌棉花产量和纤维品质。

关键词:解钾菌;棉花;耐盐碱;有效钾;有机酸

Abstract

Object: Cotton is a key raw material for the global textile industry and is highly sensitive to potassium. Soil salinization significantly reduced the bioavailability of soil potassium through the dual effects of sodium-potassium ion competition and mineral potassium fixation, resulting in the inhibition of cotton potassium absorption. The attenuation of available potassium content in cotton fields in Xinjiang has become a key limiting factor for the improvement of regional cotton production capacity. Potassium-solubilizing bacteria can convert insoluble potassium into available potassium available to plants, providing a sustainable way to increase soluble potassium in salt-stressed soil. In this study, potassium-solubilizing bacteria were isolated from the rhizosphere soil of cotton field under mulched drip irrigation in Xinjiang, and the dominant strains were screened and identified. The mechanism of potassium-solubilizing bacteria was clarified, and the synergistic effect of potassium-solubilizing bacteria on regulating soil potassium transformation, enhancing cotton salt tolerance and improving yield and quality was analyzed, which laid a theoretical foundation for the application of potassium-solubilizing bacteria in cotton production in Xinjiang.

Methods: In this study, rhizosphere soil samples were collected from cotton fields in Xinjiang, and microbial tests were carried out to isolate, screen, purify, preserve and identify potassium-solubilizing strains by 16S rDNA sequencing. The efficient potassium-solubilizing strains adapted to the saline-alkali environment of cotton fields in Xinjiang were explored. The mechanism of potassium-solubilizing bacteria was discussed by detecting the acidity and alkalinity of the bacterial solution and products in the process of potassium-solubilizing bacteria and liquid chromatography. *Pseudomonas aeruginosa* A10 was selected as the test strain to carry out cotton pot experiment and field experiment in 2024. The effects of potassium-solubilizing bacteria on the physiological growth, yield and quality of cotton, as well as the physical and chemical properties of soil and the microbial community structure of rhizosphere soil were studied. The effects of potassium-solubilizing bacteria on saline-alkali environment and the growth-promoting mechanism of cotton were clarified, in order to provide scientific and reasonable theoretical basis for the application of potassium-solubilizing bacteria fertilizer in Xinjiang cotton industry.

Results: (1) The dominant strains of potassium-solubilizing bacteria in cotton rhizosphere in Xinjiang and their potassium-solubilizing mechanism were explored. A total of 23 strains of potassium-solubilizing bacteria with high potassium solubilization index were isolated from the rhizosphere soil of cotton in Xinjiang. Among them, strain A10 showed the strongest potassium solubilization ability (21.78 ppm), and showed good viability and potassium solubilization ability in saline-alkali environment, which was attributed to its secretion of lactic acid, citric acid, acetic acid, succinic acid and other organic acids to reduce the pH of the environment, thereby promoting the release of potassium. It was identified as *Pseudomonas aeruginosa* by 16S rDNA sequencing.

(2) To clarify the effect of potassium bacteria on saline-alkali soil and the path of improving salt tolerance of cotton. Salt-tolerant potassium-solubilizing bacteria A10 significantly increased cotton seed vigor under salt stress. The results of pot experiment showed that the plant height of cotton seedlings

inoculated with A10 increased by 22.28%-37.55% and the relative chlorophyll content increased by 20.60%-23.62% under salt stress. In addition, the fresh weight of shoots and roots also increased significantly, the root volume and surface area increased, and the average root diameter decreased, indicating that cotton formed a longer and finer root structure. Soil analysis showed that after inoculation with *Pseudomonas aeruginosa* A10, the contents of water-soluble potassium, non-specifically adsorbed potassium and specifically adsorbed potassium in soil increased significantly, while the contents of non-exchangeable potassium and mineral potassium decreased. In addition, the ratio of potassium to sodium in cotton plants was significantly increased, the contents of peroxidase, superoxide dismutase, catalase and proline were significantly increased, and the contents of malondialdehyde and superoxide anion in leaves were significantly decreased.

(3) The effects of potassium bacteria on soil potassium availability, microbial community structure and cotton yield and quality in drip-irrigated cotton fields under mulch were clearly understood. Potassium-solubilizing bacteria significantly improved the physical and chemical properties of cotton field soil, and increased the content of water-soluble potassium, non-specifically adsorbed potassium and specifically adsorbed potassium in soil, with an increase of 13.02%-58.63%, 17.68%-65.5% and 11.87%-57.21%, respectively. It effectively reduced soil pH and EC, with a decrease of 4.55%-24.89% and 0.40%-3.77%, respectively. It changed the composition and diversity of soil microbial community in cotton field, increased the relative abundance of *Pseudomonas* in cotton field soil, and increased the ACE index and Chao1 index of cotton field soil. Significantly increased cotton yield and fiber quality, seed cotton yield increased by 2.99%-3.72%.

Conclusion: The efficient potassium-solubilizing bacteria *Pseudomonas aeruginosa* A10 screened from cotton rhizosphere soil under mulched drip irrigation improved soil potassium availability by acid hydrolysis, and optimized soil microbial community structure, promoted cotton root development and absorption and utilization of potassium ions, effectively maintained the balance of potassium and sodium in cotton, reduced the accumulation of reactive oxygen species and increased the activity of antioxidant enzymes, thereby enhancing the salt tolerance of cotton, promoting the growth and development of cotton and dry matter accumulation, and ultimately improving the yield and fiber quality of cotton under mulched drip irrigation.

Key words: potassium-solubilizing bacteria; cotton; salt-alkali tolerance; available potassium; organic acids

目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 棉田钾素有效性现状及增产潜力.....	2
1.2.2 土壤盐碱化危害.....	3
1.2.3 解钾菌与解钾机制.....	4
1.2.4 存在的问题.....	5
1.3 研究内容及目标.....	5
1.3.1 研究内容.....	5
1.3.2 研究目标.....	6
1.3.3 技术路线.....	6
第 2 章 研究区概况与研究方法.....	7
2.1 棉花根际解钾菌的筛选与鉴定.....	7
2.1.1 研究区概况.....	7
2.1.2 矿物材料处理和培养基.....	7
2.1.3 土壤样品采集.....	8
2.1.4 土壤性质分析.....	8
2.1.5 解钾菌分离与初筛.....	8
2.1.6 解钾菌复筛.....	9
2.1.7 解钾菌鉴定.....	9
2.1.8 有机酸和酶的测定.....	9
2.1.9 数据分析.....	10
2.2 解钾菌耐盐性及盆栽试验.....	10
2.2.1 微生物的选择与培养.....	10
2.2.2 解钾量.....	11
2.2.3 生长曲线.....	11
2.2.4 有机酸的种类和含量.....	11
2.2.5 棉花种子萌芽试验.....	11
2.2.6 棉花盆栽试验.....	12
2.2.7 棉花植株钾钠比.....	12
2.2.8 棉花叶片氧化应激参数.....	13

2.2.9 土壤钾素形态及其有效性.....	13
2.2.10 统计分析.....	13
2.3 棉花大田试验.....	14
2.3.1 试验地概况.....	14
2.3.2 试验设计.....	15
2.3.3 测定项目及方法.....	16
2.3.4 数据处理与分析.....	17
第3章 解钾菌的分离筛选与耐盐碱特性研究.....	18
3.1 棉花根际解钾菌的分离和筛选.....	18
3.1.1 平板初筛.....	18
3.1.2 摇瓶复筛.....	20
3.2 解钾菌的耐盐碱特性评价.....	22
3.2.1 碱胁迫对 KSR 细菌生长的影响.....	22
3.2.2 盐胁迫对 KSR 细菌生长的影响.....	23
3.3 高效 KSR 菌株的分子鉴定.....	24
3.3.1 16S rDNA 鉴定.....	24
3.3.2 有机酸和酶种类和含量的测定.....	24
3.4 讨论.....	25
3.4.1 KSR 的分离鉴定及释钾能力评价.....	25
3.4.2 KSR 培养液的 pH 动态和解钾机制.....	26
3.4.3 KSR 在盐碱胁迫下的生存能力.....	26
3.5 本章小结.....	27
第4章 解钾菌对棉花耐盐性的调控机制.....	28
4.1 解钾菌耐盐性及对种子萌发的影响.....	28
4.2 解钾菌对盐胁迫下棉花生长的调控.....	30
4.2.1 棉花地上部.....	30
4.2.2 棉花根部.....	31
4.3 解钾菌对土壤钾素有效性及棉花抗逆性的影响.....	32
4.3.1 土壤钾素形态和棉花植株钾钠比.....	32
4.3.2 棉花氧化应激指标.....	34
4.4 相关性分析.....	35
4.5 讨论.....	36
4.5.1 盐胁迫与解钾菌的应用.....	36
4.5.2 盐胁迫下解钾菌对棉花植株生长的影响.....	37
4.5.3 盐胁迫下解钾菌对棉花抗氧化系统的影响.....	38
4.6 本章小结.....	38

第 5 章 解钾菌的棉花增产提质作用及土壤微生态效应研究.....	39
5.1 解钾菌对棉田土壤理化性质的影响.....	39
5.2 解钾菌对棉田土壤微生物群落的影响.....	42
5.3 解钾菌对棉花产量品质的影响.....	46
5.4 讨论.....	48
5.4.1 解钾菌对棉花产量和纤维品质的影响.....	48
5.4.2 解钾菌对土壤理化性质的改善.....	48
5.4.3 解钾菌对土壤微生物群落结构的影响.....	49
5.5 本章小结.....	49
第 6 章 结论与展望.....	51
6.1 结论.....	51
6.2 展望.....	52
参考文献.....	53
致谢.....	61
作者简介.....	62

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

钾是一种必需的常量营养素，在作物的生长和逆境反应中扮演着关键角色^[1]。钾离子在植物细胞中参与调节酶活性、蛋白质合成和细胞渗透压平衡等生理和代谢过程^[2]。棉花根系稀疏，钾离子吸收效率相对较低，因此被认为是一种钾敏感作物^[3]。棉花在生长过程中缺钾会抑制根叶呼吸和光合作用，抑制根系伸长，进而抑制棉花吸收养分，导致株高、叶面积减小，全株生物量降低^[4]。棉花钾敏感的生理特性，使其即使种植在不缺钾的土壤中，也经常处于轻度缺钾状态^[5]。提高土壤钾素含量可以有效提高棉花功能叶生物量，改善叶片碳代谢，增加籽棉产量^[6]。因此，探索和开发有效的策略来提高土壤中可利用钾的含量，对确保棉花健康生长及其生产力的至关重要。

20 世纪 90 年代以来，由于粮棉矛盾突出，中国棉花种植区西移，同时新疆在棉花生产中大范围推广使用膜下滴灌技术，种植面积和产量持续增长，至今中国已成为世界上最大的原棉生产国之一^[7]，中国西北部的新疆成为全球优质棉花的重要来源和中国的主要产棉区^[8]，贡献了中国 80%和全球 20%棉花产量，并具有 71%的增产潜力^[9]。新疆被认为是土壤供钾能力较强的地区^[10]，但最近的研究显示，该地区的土壤全钾损失严重，速效钾含量正在下降^[11]，这种变化被认为是影响土壤肥力和棉花产量的关键因素^[12]。另外，新疆由于其降水少蒸发大的特殊气候形成典型的内陆盐碱区^[13]，是制约新疆棉花生产的主要因素之一^[14]。施用钾肥可以缓解盐胁迫对棉花产量的负面影响^[15,16]。但是，中国作为全球化工钾肥消耗量最大的国家，其化学钾肥严重依赖进口，进口率高达 50%^[17]。钾肥的施用存在使用量大、利用效率低的问题，并伴随着温室气体排放、地下水污染、土壤结构失衡和经济成本增加等问题^[18,19]。

接种根际微生物已被证明可以有效改善土壤质量，促进作物生长并提高产量品质^[20,21]。许多研究证实了植物促生菌通过酸化^[22]、螯合^[23]、生物固氮^[24]和分泌植物生长调节剂^[25]等机制活化养分，改善植物的营养吸收，还可以提高植物对病原体的耐受性^[12]和对逆境（酸化，盐碱化，重金属等）的耐受性^[26]。解钾细菌在农业生产中展现了显著的潜力，尤其是作为一种生态友好的解决方案来缓解根际钾困境^[27]。这些 KSR 菌株通过酸解、络合、螯合等多种生物化学过程将云母、钾长石等含钾矿物中固定形式钾溶解为有

效钾，从而直接供植物吸收利用^[28,29]。这种机制显著减少了对化学钾肥的依赖，对环境持续性产生了积极影响，为全球农业的可持续发展提供了一种切实可行的策略。同时，解钾菌也是被证实能在植物遭受生物和非生物胁迫时，促进植物生长的有效补救措施^[22]。而且，重新引入本土微生物而非引入外来物种更容易被作物根系招募并占据稳定的生态位，是开发微生物产品的一种更为安全和可持续的方法^[30]。因此，作为根际钾管理方案在促进钾的高效利用和作物增产方面展现了巨大的应用潜力。但目前关于解钾菌于盐碱棉田的应用报道较少，其盐碱改良和棉花增产提质机理尚不明确。

1.1.2 研究意义

基于新疆棉花对钾素的需求及在盐碱环境下的生长压力，本研究旨在发掘新疆本土棉花根际解钾菌，并探究其解钾能力、解钾机制和对棉田土壤特性及棉花生长的影响。试验采集棉花根际土壤，分离筛选高效解钾菌，对其进行分子鉴定，并进一步探讨其解钾机制和对棉花幼苗生长的影响。此外，为探究解钾菌提升棉花耐盐性的应用潜力，检测了解钾菌对盐胁迫条件下土壤钾素有效性和棉花抗氧化系统的影响。最后开展大田试验，检测施用解钾菌对棉花产量与纤维品质对解钾菌的影响，评估其对土壤理化性质的影响，同时分析微生物群落结构对解钾菌的响应。本研究将为减少化学肥料的使用，降低环境负荷，丰富解钾微生物资源库和新疆棉花的可持续发展提供技术支持和科学依据。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 棉田钾素有效性现状及增产潜力

目前，在我国的农田中，全钾含量大约为 0.5%-2%，比总氮和总磷的含量更高，但在全钾中约有 95%为钾长石、钾矿等难溶性钾盐，约有 3%为在一定条件下才能缓慢释放钾的缓效钾，其余的则为速效钾，只有速效钾才能被植物直接吸收利用^[31,32]。研究表明，我国 56%的耕地处于缺钾状态，随着我国农业的进一步发展，农作物的种类产量的增加以及土壤的重复性耕种，土壤中的钾素消耗过大，呈现供不应求的状态，因此，土壤对钾素的需求也逐渐增加^[33]。据世界化肥行业协会（IFA）统计，目前国内每年农业生产所用钾肥含量在 700 万吨以上，在 2024 年度，我国的钾肥的需求量在 1500 万吨以上，然而，国内生产钾肥占比远低于进口量，国内产能已无法满足日益增长的市场需求^[34]。如能增加难溶性钾的使用率，将极大降低国内对有效钾的依赖度，进而解决有效钾的短缺问题。故而寻找一种新的方式将土壤中的难溶性钾分解成速效钾是目前研究的热

点之一。

钾在棉花中起着重要作用,钾素营养对棉花产量和纤维品质的形成起着关键作用^[35]。研究表明,钾是棉花生长的必需元素,需求量较高,其氮钾比在棉花不同发育阶段约为1:1^[36]。赵娜等^[37]通过不同施钾水平试验发现,钾素能促进棉株干物质积累,提高气孔导度和蒸腾作用。此外,王晓茹等^[38]报道,在水培条件下,钾高效品种根系表现出干物质质量大、根长而细、总吸收面积和比表面积大、根系活力强等特点,且 K^+ 最大吸收速率高、最小临界浓度低,耐低钾能力强。Hu等^[39]研究发现,土壤缺钾会提高棉花早花率,促进早熟,但增加脱落率和黄叶率,同时减少叶片数、叶面积、单株成铃数、种子单铃重和衣分。此外,综合多组学分析,施钾可以维持棉花根部激素和离子的稳态以及促进活性氧的清除,减轻盐胁迫对棉花的伤害,提高对盐分的适应性^[40],钾还可以调节纤维渗透压和 K^+/Na^+ 稳态,改善棉铃叶片的离子稳态、光合能力和碳水化合物代谢,提高籽棉产量^[41]。

1.2.2 土壤盐碱化危害

土地盐碱化是一个全球性问题,严重影响着粮食安全和农业的可持续发展^[42]。据统计,全球受盐渍化影响的土地广泛分布于干旱、半干旱及沿海地区,总面积超过 $1 \times 10^9 \text{ hm}^2$,且正以每年 $(1.5 - 2.0) \times 10^7 \text{ hm}^2$ 的速度扩张^[21]。盐碱化不仅导致耕地边缘化,还使全球约三分之一的可耕种土地被废弃,全球约有11亿公顷的土地受到盐碱化的影响,盐分通过降低土地利用效率和抑制作物生长,同时造成粮食产量大幅下降,对农业生产造成了显著威胁,严重威胁全球粮食安全^[43]。我国是土壤盐碱化问题较为突出的国家之一,盐渍化耕地面积约占全国耕地面积的6.62%^[44]。盐碱地作为我国重要的后备耕地资源,其开发利用对于保障粮食安全、稳定耕地面积以及实现粮食基本自给具有重要的战略意义^[45]。

我国是全球最大的棉花生产国,产量占全球20%以上。新疆棉花种植面积已达 $278.8 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占全国种植面积85%,是我国最大的棉花种植区^[46]。然而,新疆棉花产业在快速发展中也面临诸多挑战。棉花种植多集中于退耕还林地或新开荒地,这些区域通常位于绿洲与荒漠的过渡带,长期不合理的灌溉措施和高蒸发量加剧了土壤次生盐渍化,严重制约了棉花的产量和品质^[47, 48]。为应对我国经济快速发展和绿色农业的需求,亟需探索一种高效、便捷且可持续的改良途径,以缓解盐碱化对农业生产的压力。

此外,由于水合离子半径的相似性,土壤中高浓度的钠离子(Na^+)通过竞争性抑制机制,占据了植物根系细胞膜上的钾离子(K^+)通道和结合位点^[49]。这种竞争性吸收导致植物根细胞摄取钾的效率显著下降。当钾钠比降低时,细胞内的离子平衡被打破,导致一系列生理紊乱,包括细胞离子毒性、钾缺乏和代谢失调^[50]。钾离子的缺乏还会影响

植物的光合作用和糖代谢,进一步削弱植物的生长和产量^[15]。因此,提高土壤钾钠比和钾饱和度是缓解植物盐分胁迫的有效途径^[49]。

1.2.3 解钾菌与解钾机制

近年来,随着生态环境意识的提高和全球持续推行可持续发展战略,微生物菌剂逐渐成为一种备受关注的研究领域^[51]。解钾细菌在农业生产中展现了显著的潜力,尤其是作为一种生态友好解决方案来缓解根际钾困境^[27]。这些解钾细菌菌株通过酸解、络合、螯合等多种生物化学过程将云母、钾长石等含钾矿物中固定形式钾溶解为有效钾,从而直接供植物吸收利用^[52]。这种机制显著减少了对化学钾肥的依赖,对环境持续性产生了积极影响。在全球范围内,解钾细菌的研究和应用逐渐受到重视,分离鉴定出一些解钾细菌。例如,玉米、香蕉等雨季作物土壤中的 *Agrobacterium tumefaciens species*, *Rhizobium pusense*, *Flavobacterium anhuiense clade* and *Rhizobium rosettiformans*^[53], 以及薇甘菊根际土壤中的 *Burkholderia genus*、*Streptomyces rochei* and *Streptomyces sundarbansensis*^[54, 55]。 *Bacillus aryabhatai* strain SK1-7 被发现在不溶性钾源培养下会分泌更多的有机酸和多糖,并增加对钾增溶相关基因的表达,以实现钾的增溶^[56]。因此,解钾细菌作为提升土壤钾可用性的自然途径,不仅有助于减轻对化学钾肥的依赖,还为全球农业的可持续发展提供了一种切实可行的策略。

随着解钾细菌研究的深入,这些微生物在实际应用中展示了显著的效果。多项研究表明,解钾细菌能显著提高土壤中速效钾含量,直接反映在作物产量的提升上。例如,Yaghoubi 等人将从水稻根际土壤中分离出的三种解钾细菌 *Pantoea agglomerans*, *Rahnella aquatilis* 和 *Pseudomonas orientalis* 接种于土壤中,均提高了水稻的籽粒产量和钾利用效率^[57]; Sarikhani 等人在盆栽试验中添加白云母并接种 *Pseudomonas sp.* S19-1 增强了植株根对钾的吸收,盆栽产量比对照提高了 12.5%^[58]。同时,解钾菌也是被证实能在植物遭受非生物胁迫时,促进植物生长的有效补救措施^[22]。例如,在盐胁迫条件下, *Enterobacter hormaechei*, *Citrobacter braakii*, *Pseudomonas putida*, *Erwinia iniecta* 和 *Pantoea agglomerans* 可显著提高水稻胞质 K^+/Na^+ 比值,促进水稻生长和产量的增加^[59], 吴江利等^[60]在干旱条件下对棉花种子施加解钾菌液,结果显示解钾菌可以缩短种子发芽时间,显著提高种子的发芽率,陈腊等^[61]在减少 50%氮肥的条件下对玉米施用解钾菌,发现解钾菌在肥料充足和营养受限的条件下都能为玉米提供必要养分,促进玉米生长,显著提升玉米产量。

1.2.4 存在的问题

新疆作为我国最大的优质棉生产基地，棉田土壤全钾含量丰富，但有效钾含量在长期连作下持续降低。这种“高钾储量-低有效钾”的矛盾导致棉花生育期钾素供需失衡，严重制约产量提升。同时，次生盐渍化加剧进一步通过 Na^+ 竞争抑制棉花根系对 K^+ 的吸收。为突破上述双重限制，本研究聚焦棉花根际解钾菌资源开发，重点解决以下关键问题：

(1) 新疆棉田土壤钾有效性的限制严重阻碍了棉花产业的发展，拟通过盐碱土壤中解钾菌株的分离、筛选、纯化、保存和鉴定，探究解钾细菌对盐碱胁迫环境的适应能力，探求适应新疆棉田盐碱环境的优势菌种。

(2) 在上述试验的基础上，通过开展盆栽试验和大田试验，探索解钾优势菌株对土壤钾有效性、土壤理化性质、根际土壤微生物群落结构的影响，探究解钾菌对棉花的促生效果和增产提质作用，以期了解钾菌在新疆棉花产业的应用提供科学合理的理论依据。

1.3 研究内容及目标

1.3.1 研究内容

棉花作为全球纺织业的关键原料对钾高度敏感。新疆是中国最大的棉花生产基地，目前普遍面临棉田土壤速效钾含量降低的问题，这对棉花的产量和质量构成了严峻挑战。解钾细菌可以将不可溶的钾转化为植物可利用形式，为绿色农业提供了可持续发展的解决方案。本研究拟从新疆棉花根际土壤筛选高效解钾细菌，通过微生物培养试验和盆栽试验研究解钾菌应用于新疆膜下滴灌棉田土壤的可行性，探讨解钾菌的解钾机制和提升棉花耐盐性的潜在机制。通过棉花大田试验，将菌剂通过滴灌应用到膜下滴灌棉田中，研究其棉花促生作用机制和对棉田土壤质量和土壤微生物群落的影响。本研究针对研究目标，具体设计以下三个研究内容：

(1) 新疆膜下滴灌棉花根际解钾菌株的筛选与鉴定

采集新疆棉田根际土样，开展解钾细菌定性试验和定量试验，测定其解钾量从而筛选出高效解钾细菌，纯化、保存高效解钾细菌，进行分子生物学鉴定，探索解钾菌解钾机制，探究解钾细菌对盐碱胁迫环境的适应能力，探明适应新疆膜下滴灌棉田环境的高效解钾菌株。

(2) 新疆膜下滴灌棉花根际解钾菌株提升棉花耐盐性研究

对解钾菌耐盐性进行验证，通过盆栽试验测定盐胁迫下棉花的生长指标（如株高、

根系指标、叶绿素含量等)、生物量分配(包括根、茎、叶的干物质积累)以及棉花的抗氧化系统(抗氧化酶活性、抗氧化物质含量)的变化,研究耐盐解钾菌在盐胁迫下对棉花生长的促进作用,测定土壤钾有效性,棉花植株钠钾含量,探讨解钾菌通过提高钾的有效性调节棉花钾吸收和提升棉花耐盐性的潜在途径。

(3) 解钾细菌对棉田土壤微环境和棉花产量品质的影响

通过对土壤理化性质(pH、土壤电导率、钾素形态)、土壤微生物群落结构、棉花产量、棉花品质(纤维长度、纤维强度、整齐度、马克隆值、伸长率)的测定,研究解钾菌株对棉田土壤理化性质和棉花产量品质的影响,揭示解钾细菌对新疆膜下滴灌棉田土壤环境的影响及对棉花的促生作用机制。

1.3.2 研究目标

本研究的核心目标是围绕新疆绿洲棉田土壤的盐碱化问题和缺钾现象,从新疆棉田土壤筛选鉴定适应新疆盐碱环境的强解优势解钾菌种,阐明解钾细菌对棉田土壤环境及棉花产量品质的促生作用机制,为解钾细菌在新疆棉花生产中的实际应用提供科学依据和理论支持,推动新疆棉花产业的可持续发展。

1.3.3 技术路线

技术路线图如图 1-1 所示:

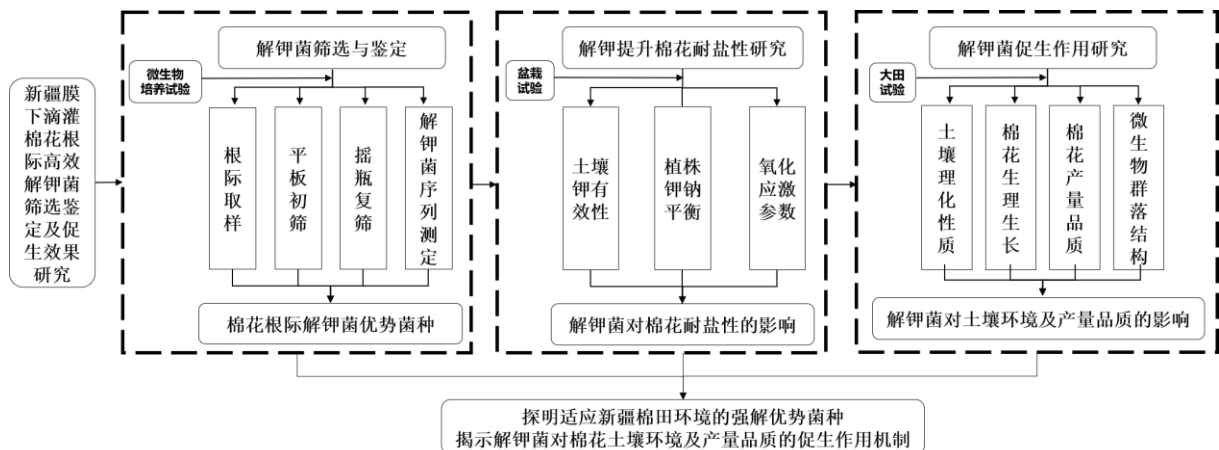


图 1-1 技术路线图

Fig. 1-1 Technology roadmap