

盐胁迫下内生真菌对多枝柽柳生长的影响

李婧婧*, 马志鹏, 秦瑞坪, 玛依拉·吐尔地别克[#]

¹伊犁师范大学生物科学与技术学院, 新疆 伊宁

²新疆伊犁河谷资源植物保护与利用重点实验室, 新疆 伊宁

收稿日期: 2025年5月8日; 录用日期: 2025年6月4日; 发布日期: 2025年6月12日

摘要

近年来盐生植物多枝柽柳抗盐机理的研究主要聚焦于植物自身适应性机制, 而内生菌介导的抗盐机制研究相对薄弱。基于此, 本文主要综述了内生真菌的多样性及在盐胁迫条件下内生真菌提高盐生生物耐盐性的机制研究进展、发展前景和存在问题, 为发掘和利用内生真菌增强植物耐盐性的相关研究提供参考, 同时为新疆盐渍地区生物改良和耐盐育种提供科学依据。

关键词

内生真菌, 多枝柽柳, 耐盐性, 生物改良

The Influence of Endophytic Fungi on the Growth of *Tamarix ramosissima* under Salt Stress

Jingjing Li*, Zhipeng Ma, Ruiping Qin, Mayila Tuerdibieke[#]

¹College of Biological Sciences and Technology, Yili Normal University, Yining Xinjiang

²Key Laboratory of Plant Resources Protection and Utilization in Xinjiang Yili Valley, Yining Xinjiang

Received: May 8th, 2025; accepted: Jun. 4th, 2025; published: Jun. 12th, 2025

Abstract

In recent years, research on the salt tolerance mechanism of the halophyte *Tamarix ramosissima* has mainly focused on the plant's own adaptive mechanisms, while studies on the salt tolerance

*第一作者。

[#]通讯作者。

文章引用: 李婧婧, 马志鹏, 秦瑞坪, 玛依拉·吐尔地别克. 盐胁迫下内生真菌对多枝柽柳生长的影响[J]. 生物过程, 2025, 15(2): 177-183. DOI: 10.12677/bp.2025.152024

mechanism mediated by endophytes are relatively weak. Based on this, this paper mainly reviews the diversity of endophytic fungi and the research progress, development prospects, and existing problems of the mechanism by which endophytic fungi improve the salt tolerance of halophytes under salt stress conditions. It provides a reference for the related research on enhancing plant salt tolerance by exploring and utilizing endophytic fungi, and also provides a scientific basis for the biological improvement and salt-tolerant breeding in the saline-alkali areas of Xinjiang.

Keywords

Endophytic Fungi, *Tamarix ramosissima*, Salt Tolerance, Biological Improvement

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

盐碱土也称为盐渍土,是盐土和碱土的统称,指含盐量在 0.2%以上,或者土壤胶体吸附一定数量的交换性钠,碱化度在 20%以上,对作物正常生长直接造成抑制作用或危害的土壤。我国盐碱地面积约为 $9.91 \times 10^7 \text{ hm}^2$,其中新疆盐碱地面积达到全国盐碱地面积的 1/3,面积约为 $2.81 \times 10^7 \text{ hm}^2$ [1]。随着人口的增加,耕地面积的不断扩大,水资源严重短缺,同时人们大量使用化肥,导致盐渍化问题日益突出,土壤盐碱化程度不断加剧,预计到 2050 年,我国将有超过 50%的耕地会变得盐碱化,土壤盐碱化是影响新疆生态、经济可持续发展的主要因素之一。治理盐碱化、改良土壤是整个农、林、牧、水业关心的问题。

内生真菌是指那些生活在植物体内并与植物建立共生关系的真菌,其与植物协同进化,相互影响,在宿主的生长发育和环境适应中产生诸多效应。滕天欣等通过探究不同盐浓度胁迫对大麦内生真菌的菌落形态的影响,系统地了解到大麦内生真菌的耐盐性[2]。内生真菌可以产生与宿主相同或相似的次生代谢产物,对维持植物稳态、并增强对极端生境的适应。

2. 多枝柽柳的研究现状

多枝柽柳是柽柳科柽柳属的灌木或小乔木状植物,分布于中国西藏、新疆、青海、甘肃、内蒙古、宁夏等省地,俄罗斯、伊朗、阿富汗等国家。其喜光,较耐寒耐热,较耐干旱耐水湿。大量研究表明,废水中的盐分和重金属会对植物造成毒害作用,从而抑制植物的生物量,甚至造成植物死亡。在廖明晶[3]等研究中,无论是持续的水淹还是干旱状态下,多枝柽柳都能存活下来并对污染物有一定的去除。基于此,多枝柽柳作为一种优良的防风固沙,水土保持,可再生的速生能源植物在保护和改良生态环境方面发挥不可替代的作用。

《中华本草》记载柽柳属植物的化学成分多以脂肪酸、醚类化合物为主。到目前为止,柽柳属植物已分离鉴定的主要化学成分有黄酮类、三萜类、苯丙酸类、甾体类、有机酸等[4]。

王响元等首次从柽柳属植物中提取、分离和鉴定了 4 个查尔酮、3 个黄烷酮、1 个黄烷和 1 个紫檀烯类化合物[5]。毛竹君等研究指出多枝柽柳乙酸乙酯部位有较强的抗炎、镇痛、抗氧化活性[6]。宋丽丽[7]等首次从柽柳中提取和分离纯化获得了 4 种多糖纯化组分,其中 1 种纯化组分有突出抗氧化和免疫活性。常星[8]等首次从多枝柽柳中分离得到 7, 4'-二甲氧基山奈酚具有很好的抗氧化活性($\text{IC}_{50} = 14.64 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)和抑制 α -葡萄糖苷酶活性($\text{IC}_{50} = 22.83 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$),为多枝柽柳的活性成分。这些活性成分让多枝柽柳具有

抗炎、抗衰老、增加免疫力等药用价值，在医药应用方面有广阔的发展前景。

3. 盐生植物的抗盐机制

3.1. 植物自身系统耐盐性

盐生植物是一类能够在高盐环境中生长发育的植物，通常能在含盐量高达 3%~4% 的土壤中生存，可积累相对多量盐分。有研究表明，种植盐生植物后盐渍土壤 Na^+ 盐降低、土壤肥力和微生物数量增加[9]。通过渗透调节、抗氧化防御和分子信号调控等三类系统协同提高细胞耐盐性。

3.2. 根际微生物介导

盐生植物根际土壤微生物通过诱导有关渗透调节、内源激素释放和抗氧化防御等物质的生成，以保证盐生植物在盐碱胁迫下正常的生长发育，并增强对极端高盐碱生境的适应[10]。

3.3. 内生真菌 - 宿主协同抗盐机制

目前已表明内生真菌可提高共生体耐盐、耐酸碱、耐涝、耐干旱、抗老化以及抗虫、抑菌等能力，并促进宿主生长，提高生物量[11]，其中研究抗盐机制较多。盐生植物抗盐机理的研究主要聚焦于植物自身适应性机制，而内生菌介导的抗盐机制研究相对薄弱。内生菌 - 宿主协同抗盐机制的研究不仅可揭示盐生植物适应极端环境的“第二套策略”，还可为盐碱地生态修复提供新思路。

3.3.1. 提高宿主渗透调节能力

内生真菌在盐胁迫条件下会积累小分子有机物质(如脯氨酸、甘糖醇、海藻糖、甜菜碱等)，这些物质作为渗透保护剂，维持细胞渗透平衡，防止水分流失。任安芝等研究发现在高盐浓度下，内生真菌感染可导致黑麦草叶内的脯氨酸含量显著增加[12]。陈水红等研究发现，在盐处理下，内生真菌感染可导致高羊茅茎叶中还原糖含量增加[13]。

3.3.2. 增强抗氧化系统

盐胁迫导致活性氧(ROS)的产生，而活性氧造成植物膜质过氧化进而影响植物生长[14]。内生真菌通过增强抗氧化酶，如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)的活性，以及合成谷胱甘肽、抗坏血酸等非酶抗氧化剂，激活并增强植物体内活性氧酶类保护系统，从而减轻氧化损伤。尤虹[15]等分析发现感染内生真菌的小花棘豆植株的过氧化物酶随盐胁迫浓度升高而升高。魏玮[16]分析发现在内生真菌侵染水稻种子后，水稻幼苗叶片的 SOD、POD 及 CAT 活性均增强。陈文倩[17]等检测到植物内生菌一菌株的组分对过氧化氢诱导氧化损伤的保护作用。王旭航等通过研究表明，多枝桤柳体内的 POD 活性随着土壤含水率的降低先升高后减低[18]。盐胁迫下，ROS 积累导致膜脂过氧化加剧，MDA 含量升高，也是植物氧化应激的重要指标。随着土壤含盐量的升高，桤柳幼苗叶片内 MDA 含量呈先升高后降低趋势[19]。

3.3.3. 调控基因表达

对于盐胁迫，植物体会调控相关基因适应环境生长发育。植物内生真菌诱导植物相关基因表达，涉及代谢、信号传导、离子渗透和转运等诸多通路的相关基因，从而来抵御盐胁迫。单晓亮[20]等通过实验发现与病原镰刀菌相比，2 株内生镰刀菌经历了基因家族的趋同进化，在全基因组层面发生了显著的结构变异，导致其丧失毒力的同时与细胞壁有关的水解酶基因、信号转导和生物膜相关基因受到强烈的正向选择，这些基因对于该内生真菌与杨树共生关系的维持十分重要。陈亚辉等研究表明高盐胁迫下多枝桤柳的 MAPK 信号转导途径被激活，通过多种途径调节相关转录因子基因表达响应盐胁迫[21]。基因内

部的简单重复序列(Genic-SSR)可在植物适应环境变化中发挥重要作用。张雅楠[22]等发现多枝怪柳的多态 Genic-SSR 信息较为丰富,说明其可能具有较高的遗传多样性,其中大量基因富集分布在与怪柳植物适应生境和逆境应答密切相关的细胞过程和代谢通路中。

3.3.4. 保持离子平衡

盐胁迫条件下的离子胁迫主要是 Na^+ 和 Cl^- 浓度升高,以及平衡植物体内的 P 和 S 的减少。内生真菌可激活植物细胞膜上的离子转运蛋白,促进 Na^+ 的外排或将其区隔化到液泡中,减少细胞质中的 Na^+ 毒害。内生真菌增加了醉马草叶片钾(K)、钙(Ca)、铁(Fe, $P < 0.01$)和根钾、钙、钠(Na , $P < 0.05$)、镁(Mg)、铁含量,降低了叶片的镁含量,改变了金属元素在醉马草体内的分配[23]。内生真菌参与调控液泡膜 H^+ -ATPase 酶活性,来增强液泡膜中 Na^+/H^+ 交换能力[24]。

3.3.5. 稳定光合作用

盐胁迫对植物光合作用的影响既有气孔和叶肉的扩散限制光合代谢,也有固碳酶减少使光合作用降低以及多重胁迫叠加产生的氧化胁迫。盐胁迫还会加速叶绿素的降解、降低类囊体膜稳定性、降低叶绿体对光能的吸收、影响光能在 2 个光系统之间的合理分配,最终导致光合速率的降低[25]。水分的缺乏间接影响了光合作用的下降,怪柳属于耐盐旱的植物种属,适度的盐旱环境会使其能够迅速地适应生境变化,获得更好的生长竞争优势,对生态适应能力更强[26]。

3.3.6. 调整代谢水平并分泌次级代谢产物

盐胁迫会使植物体内的激素水平发生变化,内生真菌能刺激宿主分泌激素的腺体“多减少补”。感染内生真菌的醉马草种的萌发率、可溶性糖、吲哚乙酸、赤霉素含量均提高,其脱落酸含量降低[27]。内生真菌显著($P < 0.05$)提高了航天诱变植株的生长素(IAA)并显著降低了诱变植株的 CTK,显著提高了非诱变植株的脱落酸,降低了非诱变植株的 CTK [28]。

另外,内生真菌也能通过自身产生的次生代谢物保护植物,使宿主免受外界环境胁迫的危害。陈文倩[17]研究发现植物内生真菌菌株代谢产物中抑制乙酰胆碱酯酶的有效成分,而乙酰胆碱酯酶抑制剂是治疗阿尔茨海默症最常用的药物。

4. 盐碱地的改良方法

4.1. 水利改良技术

水利工程改良技术的核心是“盐随水来,盐随水去”,主要通过灌、排、引、蓄、用相结合的综合水利措施调节水资源。涂超等[29]提出通过水动力学模拟模型与水利工程措施相结合,以发挥水利工程最大效果,促进盐碱地改良。陈旭[30]选择“吸水管一级暗管”排盐模式和“吸水管 + 集水管”两级暗管排盐模式相结合的排盐方案,具有经济合理、改碱速度快、效果好、节约土地的优点,为新疆盐碱地治理研究提供了借鉴。

4.2. 物理改良技术

物理改良主要是从物理层面对盐碱地的基本情况进行改良,包括土地平整,使地块成方连片,有效避免因地势低洼而导致水和盐分积累。符崇梅等[31]研究了 3 种耕作方式对土壤盐分、养分和作物产量的影响,结果说明了适度耕作对作物产量的形成有利。贾苏卿等[32]研究表明秋深松 + 秋施肥 + 秋旋耕 + 中黑炭(黑炭施入量 $14,999 \text{ kg/hm}^2$)模式可以有效降低土壤中可溶性盐分含量,促进植株生长发育,显著提高作物产量。

4.3. 化学改良技术

化学改良技术主要是通过人为干预,向土壤中施加酸性盐类物质与碱性离子发生化学反应,进而调节土壤酸碱度,降低土壤碱分,同时提高土壤中微生物与酶的活性,改善土壤肥力,促进植物根系生长。王成刚等[33]以乌鲁木齐市天山公园盐碱地作为研究对象,脱硫石膏和腐植酸对改良盐碱地 pH 值和碱化度都显著降低,含盐量有显著变化,同时两者互补差异使得植物的生长率提高。李泽霖等[34]在赤峰地区盐碱地栽植马铃薯时,施用磷石膏改良剂可提高其产量,且每 667 m² 最适施用量为 800 kg。

4.4. 生物改良技术

生物改良技术是通过种植适应性作物,移除根系部分盐分或改变土壤微生物群落多样性等,从而提升土壤质量,使盐碱地具有生态平衡性和长期稳定性。阿曼姑·艾麦尔艾力[35]等在南疆种植中科甜 438 号饲用甜高粱不仅可以收获高产的饲草,还能降低土壤中的部分离子改善土壤理化性质。

水利工程治理措施费用和养护成本均高,且要求具备丰富的水源和完善的排灌技术;农业改良措施工作量很大,生产成本也较高,易对地面土壤产生损害,且操作不善易对自然环境产生不良影响;化学改良措施成本也较高,不适宜较大范围内应用,且过量施用化学改良剂会造成土壤二次污染;生物改良措施经济成本低,其中耐盐植物可以促进土壤微生物活性[36]。

5. 结束语

内生真菌可以从提高植物渗透调节能力、增强抗氧化系统、调控基因表达、保持离子平衡、稳定植物光合作用、调整代谢等方面来保证盐生植物在盐碱胁迫下正常的生长发育,并增强对极端高盐碱生境的适应。在盐渍地的建设中,选择抗逆性和适应力强的植物树种尤为关键,我国西北干旱盐碱区是典型的生态脆弱区。种植抗逆强、生长稳定的物种是水土保持与防风固沙最为经济有效的措施。

在基因水平上对内生真菌进行改造,将抗逆基因与内生真菌相结合,提高其抗逆性,创造新型优良菌。从而使内生真菌-多枝桤柳共生体更好地适应胁迫,进一步改良盐碱地。目前对多枝桤柳抗逆基因的相关研究较少,但已经足够说明基因对提高抗性具有重要意义,内生真菌的介导对其抗逆性起积极作用,而内生真菌与基因相结合对多枝桤柳抗性的研究报道甚少,应充分利用二者优势,挖掘内生真菌提高多枝桤柳耐受性的基因,推进内生真菌-多枝桤柳共生体的研究进程。

多枝桤柳适应性,耐盐能力强,在保护和改良生态环境发挥不可替代的作用,可优先作为碱地造林绿化树种或抗逆育种的主要材料。因此开展桤柳植株耐盐性机制方面的研究具有重要意义,内生菌-宿主协同抗盐机制为发掘和利用内生真菌增强植物耐盐性的相关研究提供参考。同时多枝桤柳也具有重要的药用,饲用价值等,在改良盐碱地的同时也可以实现当地的经济可持续发展。

基金项目

伊犁哈萨克自治州科技计划项目《黄花苜蓿内生真菌的分离鉴定与次级代谢产物研究》(2024HGYB03)。

参考文献

- [1] 张万银, 郑旭, 李斌, 等. 基于 CNKI 数据库对新疆盐碱地治理研究现状与分析[J]. 农业与技术, 2020, 40(9): 96-97.
- [2] 滕天欣, 张恩会, 高军, 等. 6 株布顿大麦内生真菌耐盐性研究[J]. 饲料研究, 2024, 47(6): 70-78.
- [3] 廖明晶. 盐胁迫下多枝桤柳对 TN、TP、Pb 和 Cd 的去除研究[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.

- [4] 余世望, 肖小年, 范青生. 60 种药食两用植物抗氧化作用研究[J]. 食品科学, 1995, 16(11): 3-5.
- [5] 王响元, 刘珍伶, 马志刚, 等. 多枝桤柳中的查尔酮和黄烷酮类化学成分研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2015, 51(4): 587-590.
- [6] 毛竹君, 齐方洲, 熊耀康, 等. 多枝桤柳抗炎、镇痛、抗氧化作用活性部位的筛选[J]. 中国中医药科技, 2013, 20(4): 363-364.
- [7] 宋丽丽. 桤柳多糖提取分离、结构表征及初步活性研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2020.
- [8] 常星. 多枝桤柳和杏叶茴芹活性成分研究[D]: [硕士学位论文]. 开封: 河南大学, 2011.
- [9] 赵可夫, 范海, 江行玉, 等. 盐生植物在盐渍土壤改良中的作用[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(1): 31-35.
- [10] 张旭萍, 刘强, 王锦, 等. 盐碱胁迫下盐生植物与根际土壤微生物交互作用机制研究进展[J]. 土壤通报, 2024, 55(4): 1191-1200.
- [11] 张茜, 陈振江, 李春杰. 野大麦内生真菌共生体研究进展[J]. 草业科学, 2020, 37(8): 1475-1487.
- [12] 任安芝, 高玉葆, 章瑾, 等. 内生真菌感染对黑麦草抗盐性的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 1750-1757.
- [13] 陈水红, 崔小杰, 张剑云. 盐胁迫下内生真菌感染对高羊茅生理指标和产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2015(5): 187-189.
- [14] Chool Boo, Y. and Jung, J. (1999) Water Deficit—Induced Oxidative Stress and Antioxidative Defenses in Rice Plants. *Journal of Plant Physiology*, **155**, 255-261. [https://doi.org/10.1016/s0176-1617\(99\)80016-9](https://doi.org/10.1016/s0176-1617(99)80016-9)
- [15] 尤虹, 陈水红, 冯川川, 等. 内生真菌与宿主小花棘豆抗盐性的关系研究[J]. 现代农业科技, 2014(13): 287-289.
- [16] 魏玮. 植物内生真菌对镉和盐胁迫下水稻幼苗缓解作用的研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2017.
- [17] 陈文倩. 植物内生真菌代谢产物抑制乙酰胆碱酯酶和抗氧化活性的研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [18] 王旭航. 额济纳多枝桤柳体内抗氧化酶和植物多酚含量的生态意义研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [19] 朱金方, 刘京涛, 陆兆华, 等. 盐胁迫对中国桤柳幼苗生理特性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5140-5146.
- [20] 单晓亮. 2 株内生镰刀菌促进杨树生长和耐盐性及比较基因组分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国林业科学研究院, 2021.
- [21] 陈亚辉, 张师, 杨庆山, 等. 多枝桤柳叶片响应 NaCl 胁迫的转录组分析[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(5): 1188-1202.
- [22] 张雅楠, 黄蕾, 李佳彬, 等. 基于转录组的阿拉善地区多枝桤柳多态 Genic-SSRs 的识别与开发[J]. 植物学报, 2021, 56(4): 433-442.
- [23] 程晨. *Epichloë gansuensis* 内生真菌调控醉马草低氮响应的分子机制研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [24] 龙凤. *Epichloë bromicola* 内生真菌对碱胁迫下布顿大麦生长及离子平衡的影响[D]: [硕士学位论文]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2023.
- [25] 李娥, 胡华冉, 李蛟男, 杜光辉, 刘飞虎. 内生真菌提高植物抵御盐胁迫的研究进展[J]. 生物技术通报, 2019, 35(11): 169-178.
- [26] 徐文海. 水盐梯度下博斯腾湖多枝桤柳光合作用特征研究[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2015.
- [27] 陈雅琦. 醉马草内生真菌共生体种子耐盐碱性与施氮对种子产量的影响[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- [28] 马碧花. 水杨酸、航天诱变和内生真菌对多年生黑麦草抗逆性的影响[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [29] 涂超, 戴玮. 水动力学模拟模型在盐碱地改良中的应用[J]. 水利规划与设计, 2018(9): 28-30.
- [30] 陈旭. 库勒勒基垦区暗管改良盐碱地方案探析[J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52(2): 134-136.
- [31] 符崇梅, 李娟, 韩建峰, 等. 酒泉市典型绿洲区不同耕作方式对土壤盐分和作物产量的影响[J]. 现代农业科技, 2017(24): 164-166, 175.
- [32] 贾苏卿, 李彦良, 焦雄飞, 等. 以深松为基础的忻定盆地盐碱地土壤耕层改良[J]. 山西农业科学, 2016, 44(2): 209-211.
- [33] 王成刚, 李燕, 陈文鹏, 等. 脱硫石膏与腐植酸对改良盐碱地的研究[J]. 新疆农业科技, 2020(5): 25-27.

-
- [34] 李泽霖, 郝永丽, 高博, 等. 磷石膏改良剂对赤峰地区盐碱地马铃薯生长的影响[J]. 乡村科技, 2024, 15(15): 95-97.
- [35] 阿曼姑·艾麦尔艾力, 乃比·阿不来提, 艾比布拉·伊马木, 等. 南疆盐碱地种植饲用甜高粱对土壤改良效果和生产性能的影响[J]. 华北农学报, 2024, 39(S1): 159-166.
- [36] 朱生堡, 乌尔古丽·托尔逊, 唐光木, 等. 新疆盐碱地变化及其治理措施研究进展[J]. 山东农业科学, 2023, 55(3): 158-165.