

盐胁迫对植物生长的影响 及其生理调控 机制综述

刘红运^{1,2*}, 单成方³, 吴 挡³, 杜 芮^{1,2}, 何蕾淑^{1,2}, 石亚芬^{1,2}

¹安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

²深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽 淮南

³河南能源集团库车县榆树岭煤矿有限公司, 新疆 库车

收稿日期: 2025年12月18日; 录用日期: 2026年1月6日; 发布日期: 2026年1月20日

摘 要

土壤盐渍化是制约农业生产和生态环境可持续发展的主要环境问题。日益严重的土壤盐碱化威胁植物的生长发育, 影响生态系统多样性与稳定性。本文系统综述了盐胁迫对植物种子萌发和幼苗生长的影响, 从渗透调节、离子稳态、抗氧化防御系统层面, 探讨植物为应对盐胁迫的主要生理适应机制。基于当前研究现状, 对未来盐胁迫研究的方向和应用前景进行了展望, 旨在为植物耐盐性遗传改良和盐碱地农业实践提供理论参考。

关键词

盐胁迫, 幼苗生长, 渗透调节, 离子稳态

A Review of the Effects of Salt Stress on Plant Growth and Its Physiological Regulation Mechanisms

Hongyun Liu^{1,2*}, Chengfang Shan³, Dang Wu³, Rui Du^{1,2}, Leishu He^{1,2}, Yafen Shi^{1,2}

¹School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

²State Key Laboratory for Safe Mining of Deep Coal Resources and Environment Protection, Huainan Anhui

³Kuga Yushuling Coal Mine Co., Ltd., Henan Energy Group Co. Ltd., Kuqa Xinjiang

Received: December 18, 2025; accepted: January 6, 2026; published: January 20, 2026

*通讯作者。

文章引用: 刘红运, 单成方, 吴挡, 杜芮, 何蕾淑, 石亚芬. 盐胁迫对植物生长的影响及其生理调控机制综述[J]. 植物学研究, 2026, 15(1): 45-50. DOI: 10.12677/br.2026.151006

Abstract

Soil salinization is a major environmental issue that constrains agricultural production and threatens sustainable development. The increasing severity of soil salinization impairs plant growth and development, thereby compromising ecosystem diversity and stability. This article systematically reviews the effects of salt stress on seed germination and seedling growth in plants. It further discusses the key physiological adaptation mechanisms, encompassing osmotic regulation, ion homeostasis, and the antioxidant defense system. Based on the current state of research, future directions and application prospects in this field are outlined, aiming to provide a theoretical foundation for the genetic enhancement of plant salt tolerance and for practical agricultural management in saline-alkali lands.

Keywords

Salt Stress, Seedling Growth, Osmotic Adjustment, Ion Homeostasis

Copyright © 2026 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

土壤盐渍化是全球范围内最普遍的环境问题之一，严重制约农业的可持续发展[1]。盐渍土壤中过量的可溶性盐分(主要成分为 NaCl、Na₂SO₄)主要通过渗透胁迫、离子毒害、营养失衡等多重途径，严重抑制植物生长发育，降低作物产量与品质，威胁生态系统多样性及粮食安全[2]。因此，明晰盐胁迫对植物生长的影响，阐明植物抗逆生理机制，对于培育耐盐植物品种、综合利用盐碱地资源具有重要的理论和实践意义。

盐胁迫对植物的影响是一个始于土壤根系界面、逐步向细胞与分子层面传递的复杂过程。高盐环境急剧降低土壤溶液的水势，使植物根系吸水困难，造成生理干旱，即渗透胁迫[3]。这导致细胞膨压丧失，抑制细胞分裂与扩展，植株生长迟缓。随着胁迫持续，Na⁺和 Cl⁻等毒性离子在植物体内过量积累，对细胞膜系统、酶蛋白活性及代谢过程产生毒害作用，即离子毒性[4]。高浓度 Na⁺会竞争性抑制 K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺等必需矿质元素的吸收与转运，破坏细胞离子稳态，引发营养失衡。此外，盐胁迫还会干扰光合电子传递与能量代谢，导致活性氧(ROS)大量产生，若超出细胞清除能力，便会引发氧化损伤，破坏生物大分子结构与功能[5]。这些生理过程相互关联，最终导致植物生长受阻、生物量下降，甚至死亡。

面对生存环境的变化，植物在漫长的进化过程中形成了独特的适应机制以应对盐胁迫。这些机制主要包括渗透调节、离子稳态调控、抗氧化防御等。本综述旨在系统梳理盐胁迫对植物种子发芽率、幼苗生长的影响，阐述植物在生理水平上的适应性响应机制，对盐碱地资源综合利用、保障粮食安全具有重要的理论和实践意义。

2. 盐胁迫对植物种子萌发及幼苗生长的影响

2.1. 对种子萌发的影响

植物种子萌发情况是反映植物抗盐能力的重要依据之一。从植物种子萌发到植株成熟的生长过程中，种子萌发最易遭受盐害[6]。在低盐浓度范围内，随着盐浓度的增加可以促进种子发芽，提高发芽率，随

着盐浓度的升高,植物种子发芽率、根冠比会下降,此时的盐分浓度可以作为判定植物种子发芽率的耐盐阈值的重要依据[7]。

吸胀是高盐环境下的首要限制环节,介质水势降低严重阻碍种子吸水,导致萌发延迟、速率减缓及最终萌发率下降[8]。伴随吸水过程, Na^+ 和 Cl^- 进入种子内部,过量积累会直接损伤细胞膜结构,破坏酶活性,并抑制呼吸作用及贮藏物质(淀粉、蛋白质、脂肪)的分解转化,从而切断胚生长所需的能量与物质供应。此外,盐胁迫会显著扰乱种子内源激素平衡,表现为促进萌发的赤霉素含量下降,而抑制萌发的脱落酸(ABA)含量上升[9]。

2.2. 对幼苗生长的影响

盐胁迫对幼苗的影响首先作用于根系,主要表现为主根伸长受到强烈抑制,而侧根的发生则被相对促进[10]。这种“抑主根、促侧根”的方式导致根系整体变得浅层化和密集化,是植物为探索更有利的生长环境而采取的一种“避盐”策略[11]。然而,这种形态调整的代价是根系整体生物量的下降和活力的衰退。高盐环境会破坏根细胞的膜结构,为了限制有毒离子向地上部运输而消耗大量能量,最终削弱其锚定和吸收水肥的核心功能。

植物根系功能的受损直接影响地上部,幼苗普遍出现植株矮化、叶片黄化、叶面积减小等现象[12]。在盐胁迫环境下,一方面,植物为减少水分蒸腾,气孔被迫部分关闭,阻碍了二氧化碳进入叶肉细胞,减弱光合作用。另一方面,高盐环境使植物叶绿体结构受损、叶绿素含量下降以及光合关键酶活性被抑制,直接减弱光合作用速率[13]。植物光合作用能力减弱,植物叶片常常出现叶尖和叶缘焦枯的“盐灼伤”症状,这主要是因为钠离子等有害物质在老叶中过量积累,最终导致细胞死亡。

3. 盐胁迫下植物生理适应机制

3.1. 渗透胁迫: 渗透调节物质的主动积累

盐胁迫对植物的伤害呈现多维度、渐进式特征,主要表现在渗透胁迫、离子毒害和氧化应激三个方面[14]。高盐环境会急剧降低土壤水势,形成跨根系的渗透压差,阻碍植物根系对水分的主动吸收,最终引发植株生理性干旱。钠离子和氯离子等有害离子会大量涌入植物体内,不仅干扰钾离子等必需营养元素的吸收与转运平衡,还会破坏细胞内酶的空间构象与活性,损伤生物膜的完整性与选择透过性。此外,盐胁迫信号还会诱导植物细胞内活性氧爆发,引发氧化应激反应,对蛋白质、脂质等生物大分子及DNA遗传物质造成氧化损伤,影响细胞正常生理功能。

为应对盐胁迫导致的渗透失衡,植物会主动启动渗透调节机制,通过积累可溶性物质降低细胞液水势,维持细胞膨压与吸水能力。这些渗透调节物质主要包括脯氨酸、甜菜碱等小分子有机化合物,以及蔗糖、甘露醇等糖类,其积累过程受基因表达与激素信号的协同调控[15]。脯氨酸作为最常见的调节物质,兼具渗透调节、抗氧化及蛋白质保护功能,其含量变化依赖合成关键酶的激活与降解酶的抑制,ABA信号可通过调控转录因子结合相关基因启动子促进其合成[16]。甜菜碱因化学性质稳定成为耐盐植物的重要调节物质,类黄酮则作为新兴调节相关物质,兼具渗透调节与抗氧化的双重功能,可通过调控离子平衡增强植物耐盐性。

3.2. 离子毒性: 离子稳态的精准调控

盐胁迫会严重破坏植物的离子稳态,主要表现为钠离子的过量积累和钾离子的吸收受阻,导致细胞内的 Na^+/K^+ 比值失衡,引发离子毒害[17]。植物应对盐胁迫的核心在于通过多层次、协同作用的离子稳态调控系统,抵御以钠离子和氯离子为主的离子毒害。其主要包括四大精准策略:首先是外部拒盐,根系

通过内皮层凯氏带等结构屏障及高选择性离子转运蛋白(如 HKT1), 限制过量盐离子进入并维持木质部汁液中较高的钾钠比[18]。对于已进入细胞的盐离子, 则启动液泡区隔化, 利用液泡膜上的 Na^+/H^+ 逆向转运蛋白和 Cl^- 通道, 将有毒离子隔离储存于液泡中, 从而达到减弱离子毒性的作用。植物通过主动外排机制, 如由 SOS 信号通路调控的质膜 Na^+/H^+ 逆向转运蛋白(SOS1), 将细胞质内的 Na^+ 泵出细胞。这些生理过程共同构成了防御离子毒性的重要策略[19]。

植物在盐胁迫下的生存依赖于中央信号网络对多重生理响应的整合与协同作用。该网络以盐胁迫触发的特异性钙信号为起始, 被钙传感蛋白及其激酶解码, 进而激活核心的 SOS 信号通路等下游反应。在此过程中, 多种植物激素与作为信号分子的活性氧深度参与, 形成一个复杂的调控网络, 全局协调着从离子转运、渗透平衡到氧化防御在内的所有耐盐适应机制[20]。

3.3. 氧化胁迫: ROS 动态平衡的协同维持

植物在盐胁迫下的核心挑战之一是活性氧(ROS)过量积累。盐分通过干扰电子传递链、抑制光合与呼吸作用等途径, 诱导超氧阴离子、过氧化氢等 ROS 产生, 这些物质会引发氧化损伤, 破坏蛋白质、脂质和 DNA 的稳定性。为应对这种环境压力, 一方面植物依靠酶促与非酶促抗氧化系统协同清除 ROS, 维持其动态平衡以减轻损伤[21]; 另一方面将 ROS 转化为关键信号分子, 激活下游耐盐适应机制。因此, ROS 在植物体内兼具“毒性物质”与“信号信使”双重身份, 其作用取决于浓度、产生部位及细胞的清除调控能力。抗氧化防御系统是抵御氧化胁迫的主体, 酶促系统中, 超氧化物歧化酶(SOD)作为第一道防线, 将超氧阴离子歧化为过氧化氢, 随后过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)直接分解过氧化氢[22], 抗坏血酸过氧化物酶(APX)则通过抗坏血酸-谷胱甘肽循环清除特定区域的过氧化氢; 非酶促系统中, 抗坏血酸、谷胱甘肽通过直接清除 ROS 和循环再生维持还原势, 类胡萝卜素则猝灭激发态氧分子保护光合系统, 两大系统紧密协同, 如 APX 活性依赖抗坏血酸供应, 共同构建动态清除网络[23]。

植物对氧化胁迫的响应是信号网络的主动适应过程, ROS 作为信号分子, 可激活丝裂原活化蛋白激酶级联等通路, 调控转录因子以促进 SOD、APX 等抗氧化酶基因表达, 形成正向反馈循环。植物激素如脱落酸, 通过激活特定蛋白激酶增强抗氧化相关基因转录活性, 实现防御机制的精准调控。这种由 ROS 信号、激素信号和转录调控网络构成的整合系统[24], 不仅协调抗氧化系统活性, 更将氧化应激信号与离子稳态调节、渗透物质合成等耐盐生理过程关联, 提升植物适应能力, 实现胁迫下的生存与稳态维持。

4. 研究展望

目前关于对植物盐胁迫响应机制的研究已取得显著进展, 形成了从胁迫感知到生理适应的基本体系。但由于植物生理调控机制的复杂性, 在植物生长不同阶段植物如何应对盐胁迫, 不同植物耐盐阈值的差异性, 这些重要问题仍有待研究。未来植物耐盐性研究可能聚焦于以下几个具体且前沿的方向:

1) 盐碱复合胁迫的生理机制与植物响应阈值研究

当前对中性盐胁迫的感知机制已有初步认识, 但对盐碱复合胁迫及特定离子的感知途径仍不清楚。未来需系统阐明单一与复合盐碱胁迫对植物生长及生理的影响特征, 明确影响典型植物生长、生理的关键环境因子, 确定植物生长的盐分阈值。

2) 盐分泌相关基因在作物中的异源应用与工程化改造

多数农作物缺乏天然排盐结构, 而盐生植物(如滨藜、柽柳)则具有高效的盐腺排盐系统。研究可聚焦于盐腺发育与功能的关键调控基因, 利用合成生物学策略, 在主要粮食作物中尝试构建“人工盐腺”或增强耐盐基因表达, 提升作物的离子外排效率。

3) 多组学整合与耐盐调控网络的系统解析

通过整合基因组、转录组、蛋白质组、代谢组及表型组等多维度数据,构建盐胁迫下植物应答的动态调控网络。结合盐碱胁迫下植物的生长与生理特征,解析其应对胁迫的主要代谢途径与关键耐盐基因,挖掘原生境植物耐盐基因,借助基因编辑技术实现多耐盐位点的精准聚合,培育高产、高耐盐性的种质资源。

基金项目

河南能源集团库车榆树岭煤矿有限公司科研项目(高海拔石质荒漠区矿山生态环境修复治理技术研究与应用)资助。

参考文献

- [1] 范王涛. 土壤盐碱化危害及改良方法研究[J]. 农业与技术, 2020, 40(23): 114-116.
- [2] 刘铎, 王拯, 娄鸿耀, 等. 小麦幼苗对 NaCl 和 Na₂SO₄ 胁迫响应差异机制研究[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(14): 70-78.
- [3] 潘晶, 王磊, 黄翠华, 等. 盐胁迫对干旱区植物能量代谢过程的影响综述[J]. 中国沙漠, 2024, 44(1): 111-118.
- [4] 王宇超, 王得祥, 彭少兵, 等. 盐胁迫对木本滨藜植物细胞膜透性及生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007(4): 225-229.
- [5] 齐琪, 马书荣, 徐维东. 盐胁迫对植物生长的影响及耐盐生理机制研究进展[J]. 分子植物育种, 2020, 18(8): 2741-2746.
- [6] 郭文婷, 王国华, 缙倩倩. 钠盐胁迫对藜科一年生草本植物种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2023, 32(3): 128-141.
- [7] 亓雯雯, 李亚晓, 马红媛, 等. 盐胁迫下羊草种子萌发特性的种内变异及其影响因素[J]. 生态学报, 2025, 45(11): 5481-5496.
- [8] 胡娟, 张洁, 盛洲, 等. 盐生植物萌发期对盐胁迫的适应研究进展[J]. 盐湖研究, 2022, 30(1): 95-100.
- [9] 张钰, 陈慧, 王改萍. 外源 ABA 对楸树幼苗 NaCl 胁迫的缓解效应及其生长生理响应特征[J]. 西北植物学报, 2023, 43(6): 996-1005.
- [10] 王明睿, 杨升, 刘星, 等. 盐胁迫下植物根系特征及其微生物的互作关系[J]. 世界林业研究, 2023, 36(4): 22-27.
- [11] 王子强, 刘树泽, 崔宝明, 等. 盐分对玉米根系生长的胁迫效应[J]. 中南农业科技, 2023, 44(8): 12-16.
- [12] 乃国栋, 马福钦, 张玉娟, 等. 盐胁迫对鹰嘴紫云英幼苗光合特性及糖代谢的影响[J]. 中国草地学报, 2025, 47(9): 26-36.
- [13] 莫晓燕, 张佳睿, 宋炜, 等. CO₂ 浓度和 NaCl 胁迫对玉米光合性能和水分利用效率的影响[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(13): 55-64.
- [14] 潘晶, 黄翠华, 罗君, 等. 盐胁迫对植物的影响及 AMF 提高植物耐盐性的机制[J]. 地球科学进展, 2018, 33(4): 361-372.
- [15] 王正颢. 盐胁迫下甜土植物生理生化的响应机制的研究[D]: [硕士学位论文]. 佛山: 佛山科学技术学院, 2024.
- [16] 虞新磊. 龙须菜中脯氨酸代谢对高盐和高温胁迫的响应及鸟氨酸氨基转移酶的研究[D]: [硕士学位论文]. 宁波: 宁波大学, 2022.
- [17] 刘佳欣, 张会龙, 邹荣松, 等. 不同类型盐生植物适应盐胁迫的生理生长机制及 Na⁺逆向转运研究进展[J]. 生物技术通报, 2023, 39(1): 59-71.
- [18] 王大江, 刘昭, 路翔, 等. 植物耐盐机制研究进展及展望[J]. 华北农学报, 2024, 39(5): 80-92.
- [19] 韩佩尧, 赵烨, 田彦挺, 等. 植物耐盐机制及耐盐基因在杨树育种中的应用[J]. 分子植物育种, 2021, 19(23): 7977-7983.
- [20] 马祥, 李中兴, 杨荣尘, 等. 盐胁迫对不同耐盐性燕麦糖类及内源激素含量变化的影响[J/OL]. 草业学报, 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/62.1105.S.20250910.1258.004>, 2025-12-11.
- [21] 余如刚, 杨改梅, 韦英铭, 等. 盐胁迫下紫花苜蓿活性氧清除相关酶基因的鉴定与分析[J]. 中国草地学报, 2025, 47(9): 1-15.
- [22] 艾力江·麦麦提. NaCl 胁迫下三种胡颓子属植物苗期活性氧清除酶、渗透调节及离子吸收、分配特性研究[D]: [硕

- 士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2008.
- [23] 鲁琳, 杨尚谕, 刘维东, 等. 基于转录组测序花烟草响应盐胁迫活性氧清除相关基因的挖掘[J]. 生物技术通报, 2020, 36(12): 42-53.
- [24] 刘富远, 肖瑶, 徐雨青, 等. 水稻耐盐碱的分子机制和遗传改良研究进展[J/OL]. 生物工程学报, 1-34. <https://doi.org/10.13345/j.cjb.250511>, 2025-12-11.