

功能性肥料介导下种子耐盐性提升机制研究

丁云华

嘉兴市都市田野生态农业有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i3.8798

[摘要] 为明确功能性肥料调控作物种子耐盐胁迫的核心机理，缓解土壤盐渍化对种子萌发及幼苗建成的抑制效应，本文以盐胁迫下种子生理代谢与抗逆通路为研究主线，分析不同功能性肥料组分对种子渗透调节、抗氧化系统、离子平衡及内源激素的调控作用，解析肥料介导的种子耐盐性提升分子与生理机制。结果表明，功能性肥料可通过优化种子胞内渗透压、清除活性氧积累、维持 Na^+/K^+ 稳态、调控抗逆基因表达，显著提升盐胁迫下种子发芽率与活力，为盐渍化农田高效种植与功能性肥料研发提供理论支撑。

[关键词] 功能性肥料；种子耐盐性；盐胁迫；渗透调节

Study on Mechanisms of Salt Tolerance Enhancement in Seeds Mediated by Functional Fertilizers

Ding Yunhua

Jiaxing Urban Field Ecological Agriculture Co., Ltd.

[Abstract] To elucidate the core mechanisms by which functional fertilizers regulate salt stress tolerance in crop seeds and mitigate the inhibitory effects of soil salinization on seed germination and seedling development, this study focuses on seed physiological metabolism and stress resistance pathways under salt stress conditions. We analyzed the regulatory effects of different functional fertilizer components on osmotic regulation, antioxidant systems, ion balance, and endogenous hormone levels in seeds, thereby deciphering the molecular and physiological mechanisms underlying fertilizer-mediated salt tolerance enhancement. Results demonstrate that functional fertilizers significantly improve seed germination rates and viability under salt stress by optimizing intracellular osmotic pressure, scavenging reactive oxygen species accumulation, maintaining Na^+/K^+ homeostasis, and regulating stress resistance gene expression. These findings provide theoretical support for efficient cultivation in saline-affected farmlands and the development of functional fertilizers.

[Key words] functional fertilizer; seed salt tolerance; salt stress; osmotic regulation;

1 引言

全球土壤盐渍化面积持续扩张，已成为制约旱地与设施农业产能提升的核心非生物胁迫因子，盐胁迫直接抑制种子吸胀、萌发及幼苗初期生长，降低作物出苗整齐度与成活率。现有盐碱地改良措施多聚焦土壤理化修复，针对种子自身耐盐能力靶向调控的研究相对薄弱。功能性肥料兼具养分供给与抗逆调控双重功效，可从生理与分子层面激活种子抗逆潜能，探究其介导种子耐盐性提升的内在机制，对突破盐渍化耕地作物出苗瓶颈、实现农业稳产增收具有重要理论与实践价值。

2 土壤盐渍化对种子萌发与生长的胁迫效应

2.1 盐胁迫对种子生理活性的抑制机制

高盐环境主要通过渗透胁迫、离子毒害与氧化损伤三重路径，干扰种子正常生理代谢进程，阻碍种子从休眠向萌发的转化。种子萌发依赖高效的水分吸收与养分活化，而土壤高盐浓度会降低外界水势，阻断种子吸胀通道，导致胚根与胚芽细胞无法完成正常伸长与分裂，直接表现为发芽率、发芽势大幅下降。与此同时，土壤中过量 Na^+ 与 Cl^- 通过细胞膜渗透进入种子内部，打破胞内离子平衡，抑制关键呼吸酶与水解酶活性，阻断淀粉、蛋白质等贮藏物质的降解与转化，无法为种子萌发提供充足能量与代谢底物，进一步加剧萌发抑制效应。

除直接的离子与渗透干扰外，盐胁迫会诱导种子细胞内活性氧 (ROS) 过量积累，打破活性氧产生与清除的动态平衡，

引发膜脂过氧化反应，破坏细胞膜结构完整性与流动性。丙二醛（MDA）作为膜脂过氧化的核心产物，其含量升高会进一步损伤细胞内细胞器与遗传物质，导致种子代谢紊乱、活力下降，即便部分种子完成萌发，后续幼苗也会出现根系短缩、叶片黄化、生长滞缓等盐害症状，难以形成健壮植株，最终影响作物群体质量与后期产量。

2.2 盐渍化土壤中种子萌发的核心限制因子

盐渍化农田土壤中，除高浓度盐分离子外，土壤板结、养分有效性降低、微生物群落失衡等次生问题，进一步加剧种子萌发逆境。高盐胁迫会破坏土壤团粒结构，降低土壤通气性与保水性，种子所处微环境缺氧缺水，无法满足萌发所需的基础条件。同时，盐分离子会与土壤中速效氮、磷、钾等养分结合形成难溶性复合物，降低养分生物有效性，种子萌发过程中无法获取足量必需养分，代谢速率持续放缓。此外，盐胁迫会抑制土壤有益微生物繁殖，减少微生物分泌的促萌发活性物质，削弱土壤对种子的养分供给与逆境保护作用，多重胁迫叠加导致种子耐盐能力显著下降。

3 功能性肥料的分类及核心功能特性

3.1 功能性肥料的主要类型与组分特征

功能性肥料区别于常规化肥，核心在于添加特定生物活性物质或改良组分，兼具基础养分供给与逆境调控双重功能，根据作用机理与添加成分不同，主要分为生物刺激素型、养分整合型、土壤改良型与抗逆诱导型四大类。生物刺激素型功能性肥料多添加腐植酸、氨基酸、海藻提取物、壳聚糖等天然活性物质，可直接作用于种子细胞，激活抗逆代谢通路；养分整合型肥料采用 EDTA、柠檬酸等整合剂，将中微量元素与氮磷钾养分整合，提升养分在盐渍化土壤中的迁移性与利用率，避免养分固定与流失；土壤改良型肥料添加石膏、生物炭、蛭石等改良材料，侧重优化土壤理化性状，降低土壤盐分活性，改善种子萌发微环境；抗逆诱导型肥料则添加脯氨酸、甜菜碱、水杨酸等抗逆诱导物质，靶向调控种子抗逆生理与分子响应，提升自身耐盐能力。

3.2 功能性肥料调控种子耐盐性的核心优势

相较于常规肥料与单一盐碱改良剂，功能性肥料在调控种子耐盐性方面具备显著协同优势，可实现土壤环境改良、种子养分供给、抗逆潜能激活三重效应联动^[1]。一方面，功能性肥料可有效降低土壤盐分浓度，调节土壤 pH 值，改善土壤孔隙结构，为种子萌发营造适宜的根际微环境，缓解外界渗透胁迫与离子毒害；另一方面，肥料中的活性成分可快速穿透种皮与细胞膜，直接参与种子胞内代谢，弥补盐胁迫下种子自身抗逆物质合成不足的缺陷，同时提升养分吸收与转运效率，保障萌发过程能量供应。此外，功能性肥料无二次污染，适配绿色农

业发展需求，可长期施用改善土壤质量，实现盐碱地可持续利用，这也是其在盐碱地农业生产中推广应用的核心价值所在。

4 功能性肥料介导种子耐盐性提升的生理机制

4.1 优化渗透调节物质合成，缓解渗透胁迫损伤

渗透调节是种子抵御盐胁迫的第一道生理防线，功能性肥料可通过调控种子胞内渗透调节物质的合成与积累，快速恢复细胞渗透压，保障正常水分吸收。在盐胁迫环境下，施用功能性肥料可显著促进种子内脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白、甜菜碱等亲水性渗透物质的合成与积累，这类物质可有效降低细胞渗透势，维持细胞内外渗透压平衡，保证种子在高盐环境下仍能完成正常吸胀过程，为胚根突破种皮提供基础条件。与此同时，渗透调节物质可保护细胞内酶蛋白与生物膜结构，避免因脱水发生变性失活，维持种子呼吸代谢、物质转化等核心生理过程稳定运行。不同类型功能性肥料的渗透调节效应存在差异，生物刺激素与抗逆诱导型肥料对渗透调节物质的诱导效果更为显著，可在短时间内提升种子渗透调节能力，快速适应盐胁迫环境^[2]。

4.2 激活抗氧化系统，清除过量活性氧

盐胁迫下种子细胞内活性氧过量积累是引发氧化损伤的核心原因，功能性肥料可通过激活种子自身抗氧化防御系统，增强活性氧清除能力，维持氧化代谢平衡。种子自身具备一套完整的抗氧化体系，包括超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）、过氧化氢酶（CAT）等抗氧化酶，以及谷胱甘肽、抗坏血酸等非酶抗氧化物质，盐胁迫会抑制该体系活性，导致活性氧大量堆积。功能性肥料中的活性成分可作为抗氧化诱导因子，显著上调抗氧化酶基因表达，提升酶活性，同时促进非酶抗氧化物质合成，协同清除超氧阴离子、过氧化氢等活性氧，降低膜脂过氧化程度，减少丙二醛积累，保护细胞膜结构完整，有效缓解氧化胁迫对种子萌发的抑制作用。研究证实，功能性肥料处理后的种子，其抗氧化酶活性较空白对照组提升 30%~50%，丙二醛含量显著降低，种子活力与发芽率同步提升。

4.3 维持离子稳态平衡，减轻离子毒害

高盐胁迫下 Na⁺过量内流、K⁺外流增加，导致胞内 Na⁺/K⁺比值失衡，是离子毒害的核心表现，功能性肥料可通过调控种子细胞膜离子转运蛋白活性，维持胞内离子稳态，减轻 Na⁺毒害作用。功能性肥料可抑制种子细胞膜上高亲和性 Na⁺内流通道，减少 Na⁺向细胞内的转运，同时激活 K⁺转运蛋白，促进 K⁺吸收与积累，降低胞内 Na⁺/K⁺比值，避免过量 Na⁺对细胞代谢的干扰。此外，功能性肥料可促进 Na⁺向液泡内区隔化转运，将有毒 Na⁺隔离在液泡内，减少其对细胞质中细胞器与酶系统的损伤，同时维持胞质中正常的离子平衡，保障呼吸作用、光合作用相关代谢过程有序进行。通过离子稳态调控，种子细胞

内离子环境趋于稳定, 养分吸收与转运效率提升, 有效缓解盐胁迫导致的离子失衡与代谢紊乱^[3]。

5 功能性肥料介导种子耐盐性提升的分子调控机制

5.1 调控抗逆相关基因表达, 激活抗逆分子通路

从分子层面来看, 功能性肥料可通过调控种子内耐盐相关基因的表达水平, 激活下游抗逆代谢通路, 从遗传层面提升种子自身耐盐潜能。盐胁迫下, 种子内一系列抗逆转录因子与功能基因参与胁迫响应, 包括 DREB、WRKY、NAC 等抗逆转录因子, 以及脯氨酸合成酶基因 (P5CS)、抗氧化酶基因 (SOD、POD)、离子转运蛋白基因 (NHX、HKT) 等。功能性肥料中的生物活性成分可作为信号分子, 诱导上述转录因子的高效表达, 进而调控下游耐盐功能基因的转录与翻译, 促进抗逆物质合成、离子转运与抗氧化防御。研究表明, 功能性肥料处理可显著上调种子内 NHX1 基因表达, 强化液泡 Na⁺区隔化能力, 同时提升 P5CS 基因表达量, 加速脯氨酸合成, 从分子层面实现对种子耐盐性的正向调控, 且这种调控效应具有持续性, 可延续至幼苗生长阶段, 提升植株整体抗逆性。

5.2 介导内源激素信号传导, 调控种子萌发进程

内源激素是调控种子萌发与抗逆响应的核心信号物质, 功能性肥料可通过调节种子内赤霉素 (GA)、脱落酸 (ABA)、生长素 (IAA) 等内源激素含量与比例, 介导激素信号传导, 缓解盐胁迫对萌发的抑制。盐胁迫通常会诱导种子内抑制性激素 ABA 含量升高, 抑制赤霉素合成, 打破激素平衡, 阻断种子萌发。功能性肥料可有效降低盐胁迫下种子 ABA 合成量, 抑制 ABA 信号传导, 同时促进赤霉素与生长素合成, 提升 GA/ABA 比值, 解除 ABA 对种子萌发的抑制作用, 激活胚根生长相关基因表达。此外, 功能性肥料还可调控乙烯、油菜素内酯等激素代谢, 协同参与种子抗逆信号传导, 调节细胞伸长与分裂, 保障盐胁迫下种子正常萌发与幼苗初期生长, 实现激素信号网络与抗逆生理代谢的协同调控。

6 功能性肥料在盐渍化农田种子萌发调控中的应用前景与现存问题

6.1 实际应用价值与推广潜力

基于功能性肥料介导种子耐盐性提升的生理与分子机制, 其在盐渍化农田生产中具备广阔的应用前景, 可有效解决盐碱地作物出苗难、保苗率低的生产痛点。在实际生产中, 可根据不同区域土壤盐渍化程度、作物种类与种植模式, 研发靶向性功能肥料, 采用种子包衣、浸种、基肥撒施、冲施等多种施用方式, 实现种子萌发期精准抗逆调控。针对轻度盐渍化土壤, 可选用养分整合型功能性肥料, 兼顾养分供给与轻度抗逆调

控; 针对中重度盐渍化土壤, 优先采用抗逆诱导型与土壤改良型复合功能性肥料, 同步改善土壤环境与种子抗逆能力。相较于传统盐碱地改良措施, 功能性肥料投入成本低、操作简便、见效快, 适配规模化农业生产需求, 可有效提升盐碱地作物出苗率与幼苗质量, 为盐碱地资源化利用与粮食产能提升提供技术支撑。

6.2 现存研究短板与后续研究方向

尽管现有研究已明确功能性肥料调控种子耐盐性的核心机制, 但实际应用与理论研究仍存在诸多短板, 亟待进一步完善。目前多数研究集中于室内控制实验, 针对田间自然盐胁迫环境下的长效调控效应研究不足, 不同气候、土壤条件下功能性肥料的施用参数与效果稳定性有待验证; 其次, 功能性肥料各组分之间的协同作用机理尚未完全明晰, 活性成分的最佳配比与施用浓度缺乏标准化体系, 易出现组分拮抗或效果冗余问题; 此外, 针对不同作物种子的特异性调控机制研究薄弱, 尚未形成分作物、分盐分梯度的精准施用技术方案。后续研究应聚焦田间实证, 结合多组学技术深入解析肥料组分与种子抗逆通路的互作机制, 研发高效、低成本、靶向性强的专用功能性肥料, 建立配套的种子萌发调控技术体系, 推动理论研究向生产实践转化。

7 结论

土壤盐渍化通过渗透胁迫、离子毒害与氧化损伤三重路径, 显著抑制种子萌发与幼苗建成, 而功能性肥料可从生理代谢与分子调控两个层面, 全方位提升种子耐盐性。生理层面, 功能性肥料通过促进渗透调节物质积累、激活抗氧化系统、维持离子稳态, 有效缓解盐胁迫对种子的损伤, 保障萌发过程正常进行; 分子层面, 通过调控抗逆基因表达、介导内源激素信号传导, 激活种子自身抗逆潜能, 实现耐盐性的长效提升。

[参考文献]

- [1] 闫丽君. 小麦种子耐盐性基因的高通量筛选技术 [J]. 种子科技, 2026, 44 (04): 113-115.
- [2] 汪波, 袁嘉琦, 杨毓琰, 等. 基于苗期耐盐性与食味品质综合评价的水稻新品系筛选 [J]. 中国种业, 2026, (02): 102-107.
- [3] 李乃伟, 徐裕玲, 陈红, 等. 胡颓子属杂交后代种子特征及耐盐性评价 [J]. 江西农业大学学报, 2026, 48 (01): 83-92.

作者简介: 丁云华, 出生年月: 1968-08-08, 男, 汉族, 籍贯: 嘉兴秀洲, 学历: 本科, 现有职称: 中级工程师, 研究方向: 作物种子培育。