

环保酵素缓解植物逆境胁迫的作用机制与研究进展

刘云汇, 刘佩勇*, 冯彦博, 于士惠

东北大学生命科学与健康学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年5月14日; 录用日期: 2026年6月16日; 发布日期: 2026年6月30日

摘要

本文系统综述了环保酵素在植物处于病害、重金属、盐碱及干旱等逆境下的应用效果与作用机制。研究表明, 环保酵素通过清除活性氧、增强防御酶活性、改良根际微环境等多重途径提升植物抗逆性, 其中多酚类物质、抗氧化成分(如SOD)及有益微生物(分泌ACC脱氨酶、产铁载体、诱导系统抗性)是其核心功能基础, 以期环保酵素在可持续农业中的科学应用提供理论参考。

关键词

环保酵素, 植物逆境胁迫, 抗氧化, 多酚, 微生物

Mechanisms and Research Progress of Eco-Enzymes in Alleviating Plant Stress Resistance

Yunhui Liu, Peiyong Liu*, Yanbo Feng, Shihui Yu

College of Life Sciences and Health, Northeastern University, Shenyang Liaoning

Received: May 14, 2026; accepted: June 16, 2026; published: June 30, 2026

Abstract

The effects and mechanisms of environmental enzymes on plants under disease, heavy metal, salinity, and drought stresses were reviewed systematically in this paper. Research shows that environmental enzymes enhance plant stress tolerance by scavenging reactive oxygen species, enhancing

*通讯作者。

文章引用: 刘云汇, 刘佩勇, 冯彦博, 于士惠. 环保酵素缓解植物逆境胁迫的作用机制与研究进展[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(6): 1081-1088. DOI: 10.12677/aep.2026.166109

defense enzyme activities, and improving the rhizosphere microenvironment. Polyphenols, antioxidant components (SOD), and beneficial microorganisms (secreting ACC deaminase, producing siderophores, inducing systemic resistance) are their core functional basis, providing a theoretical reference for the scientific application of environmental enzymes in sustainable agriculture.

Keywords

Environmental Enzymes, Plant Stress, Antioxidant, Polyphenols, Microorganisms

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

干旱、盐碱和重金属污染是制约全球农业的主要非生物胁迫因子。传统化肥和农药在缓解此类胁迫方面作用有限，且易导致土壤退化、水体富营养化等问题[1] [2]。环保酵素作为一种新兴农业生物制剂，在缓解植物逆境胁迫方面展现出重要潜力。

环保酵素(Garbage Enzyme)是由废弃蔬菜和水果或其他厨余垃圾，水和红糖发酵产生的复杂有机溶液，富含多酚、黄酮、有机酸、超氧化物歧化酶(SOD)、有益微生物及水解酶等活性成分，具备抗氧化[3] [4]、抑菌、螯合金属离子等功能[5]-[7]。近年来，其在缓解干旱、盐碱、重金属等胁迫方面显示出应用潜力，但当前研究多停留在效果验证阶段，对深层作用机制的认识仍不充分。本文系统总结环保酵素的核心活性成分及其抗逆物质基础，归纳其缓解非生物与生物胁迫的作用机制，以期可为可持续农业应用提供理论参考。

2. 环保酵素的活性成分与抗逆物质基础

2.1. 多酚类物质

环保酵素的抗逆功能源于其丰富的活性成分。多酚是其中最为重要的一类次生代谢产物，主要包括黄酮类和酚酸类化合物。以葡萄酵素为原料的接种发酵，其总酚酸质量浓度范围为 21.80 mg/L~95.82 mg/L [8]。根据对 24 种食用植物酵素的系统分析，枸杞酵素的总黄酮质量浓度在所有检测产品中最高，显著优于其他原料制成的酵素[9]。多酚通过直接清除自由基与螯合金属离子两大功能协同发挥抗氧化作用，其效率受酚羟基数量与位置、环境 pH 值及金属离子种类等多重因素影响[10]。

2.2. 抗氧化酶类

环保酵素中的超氧化物歧化酶(SOD)是酵素中另一关键抗氧化酶，其活性受发酵原料、时间、菌种及工艺参数的综合调控，在发酵过程中总体呈先升后降的动态规律。为明确不同酵素的抗氧化潜力，对比了六种酵素在最优条件下的 SOD 活性与自由基清除能力(如表 1 所示)。

2.3. 有机酸与酸性环境

环保酵素中的有机酸可中和土壤碱性成分，显著降低土壤 pH。针对沙土的盆栽试验表明，施用果蔬类酵素(稀释比例 1:200) 30 天后，土壤 pH 值由 9.63 显著降至 6.42 [17]。有机酸能溶解被固化的磷酸盐、硝酸盐，释放磷、钾等养分，并与微生物协同促进团粒结构形成，改善土壤水、肥、气、热条件。酸性条

件对多酚具有保护作用：pH 2 下多酚保留率、DPPH 清除力和总还原力分别为 pH 10 下的 2.21 倍、4.56 倍和 2.78 倍，表明酸性环境可有效维持多酚的稳定性与抗氧化功能[18]。

Table 1. Comparison of SOD activity and superoxide anion radical scavenging ability of different enzymes under optimal fermentation conditions

表 1. 不同酵素在最优发酵条件下的 SOD 活性与超氧阴离子清除能力对比

酵素名称	最优发酵条件(温度/接种量/时间)	SOD 活性(U/mL)	超氧阴离子自由基清除率(%)	文献
柑橘皮复合酵素	32°C, 2.0% (乳酸菌), 7 d	287.65 ± 5.32	58.72	[11]
北五味子麦芽酵素	41°C, 1.5% (植物乳杆菌), 3 d	3464.80	26.03	[12]
草莓酵素	35°C, 1.5% (酵母菌), 13.3 h	35.98	74.40	[13]
果蔬混合酵素	30°C, 1.0% (复合菌), 14 d	196.30 ± 3.87	42.15	[14]
菠萝皮酵素	33°C, 1.2% (酵母菌), 48 h	112.55 ± 2.61	65.30	[15]
番茄残渣酵素	36°C, 0.8% (植物乳杆菌), 60 h	78.40 ± 1.94	39.68	[16]

2.4. 有益微生物

环保酵素中酵母菌与乳酸菌、醋酸菌共同构成酵素发酵的微生物基础。已有文献指出，采用酵母菌、乳酸菌和醋酸菌进行生物强化发酵，可显著缩短发酵时间并提升产品品质，生物强化组有效活菌数(CFU)达到 9.5×10^8 个/mL，显著高于自然发酵组，且乳酸和醋酸的含量也明显优于自然发酵组[19]。在活性物质转化方面，酵母菌通过代谢活动促进功能性成分的生成与转化。以林芝苹果渣为原料的酵素研究表明，采用酵母菌与戊糖乳杆菌顺序发酵制备的苹果渣酵素，其超氧化物歧化酶(SOD)活性显著提升，发酵条件优化后可获得理想的活菌数和酶活性[20]。

3. 环保酵素缓解非生物胁迫的作用机制

在重金属、盐碱、干旱及温度等非生物胁迫下，环保酵素中多酚、SOD 等活性成分通过协同机制发挥缓解作用。

3.1. 对重金属、盐碱胁迫的缓解

重金属通过诱导氧化应激、干扰离子稳态等方式破坏植物光合系统及细胞功能，环保酵素中的微生物可通过生物吸附与积累协同清除重金属。酵母对 Cr、Cu、Cd 等具有高效吸附能力；微生物菌群还能改变重金属化学形态，降低其生物有效性。盆栽试验显示，施用果蔬类环保酵素(稀释比例 1:500)后，重金属污染土壤的白菜叶片中的铅、锌、镉浓度分别降低 66.8%、17.6%和 37.4%，根系中相应含量降低 34.3%、23.4%和 46.8% [21]。酵素还能提升土壤酶活性：在露地叶菜栽培试验中，施加 1:1000 倍稀释的果蔬残渣源成熟环保酵素，可使土壤酸性磷酸酶、纤维素酶活性依次较对照组上升 25%、38%，加快土壤有机碳与磷素的分解利用[22] [23]。

环保酵素富含有机酸、活性酶及有益微生物，可从三方面缓解盐碱胁迫。酵素中的乙酸、乳酸等可中和土壤碳酸根，降低 pH 值。在盐碱化土壤治理中，灌施 1:800 浓度果蔬类环保酵素 60 天后，土壤 pH 降幅达 10.15%，碱化度降低 28.06%，促进团粒结构形成[24]。酵素还能活化钙、钾等养分，置换土壤胶体上的 Na^+ ，降低根际盐分胁迫[25]。在植物层面，酵素可激活抗氧化系统，减少活性氧积累，并调节脯氨酸、可溶性糖等渗透物质合成。小麦盐碱试验显示，灌施 1:500 浓度果蔬类环保酵素处理组株高、生物量较对照提升 34.7%， Na^+/K^+ 比值显著降低，光合效率与根系活力明显改善[26]。

3.2. 对干旱、温度胁迫的缓解

干旱胁迫下,植物会出现水分代谢失衡、光合作用抑制及细胞结构破坏。环保酵素中的胶红酵母、乳酸菌等可协同分泌胞外多糖、植物激素等活性物质,提升植物抗逆性。酵素缓解渗透胁迫的核心机制是诱导合成脯氨酸、海藻糖等渗透调节物质,降低细胞渗透势、稳定蛋白结构并清除活性氧[27]。根际微生物通过分泌脱落酸类似物、一氧化氮等信号分子,激活脯氨酸合成关键基因 P5CS 和 P5CR 的表达,促进谷氨酸向脯氨酸转化,使脯氨酸含量显著升高[28]。此外,环保酵素能显著改善根系结构。针对茄子的试验表明,沃柑皮环保酵素(1:600 稀释)施用后,根长、根表面积、根尖数分别较对照增加 24%、29%、36%,根系生物量提高 21% [29]。

温度胁迫(高温和低温)主要通过破坏光系统 II(PSII)、阻断光合电子传递链、失活碳同化酶及破坏叶绿体结构,限制植物光合作用。环保酵素富含多酚类化合物(如茶多酚、黄酮等),具有强自由基清除和金属螯合能力,可有效保护膜系统[30] [31]。酵素中的微生物代谢产生胞外多糖(EPS),通过氢键和疏水作用与膜结合形成保护屏障,减少水分流失,使低温胁迫下膜稳定性提高 50%以上,膜脂过氧化程度降低 40% [32]。此外,环保酵素可诱导植物合成类黄酮,增强抗寒性。低温胁迫下的生菜试验结果显示,施用经 90 天厌氧发酵制备的柑橘皮源环保酵素(稀释 1:800),植株 PAL 活性较对照组升高 42%,CHS 基因表达量上调 3.8 倍,总酚、总黄酮含量依次增加 28%、35% [33] [34]。

4. 环保酵素缓解生物胁迫的作用机制

与上述非生物胁迫的物理化学缓解路径不同,生物胁迫的应对更依赖于酵素中活性成分的抑菌功能和免疫诱导能力。

4.1. 病害防御

环保酵素中的有机酸可通过亲脂性分子进入病原菌胞内,干扰蛋白质合成与核酸代谢;同时通过螯合 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 等必需金属离子,造成营养缺乏,抑制病原菌生长[35]。多酚类物质则通过损伤细胞壁、增加膜通透性、变性蛋白质及破坏 DNA 发挥抑菌作用,多酚协同使粗提物抑菌圈直径达 15 mm~25 mm,效果接近化学杀菌剂[36]。酵素中的乳酸菌和酵母菌能消耗根际分泌物中的碳源和氮源,使病原菌营养匮乏、生长受限[37]。芽孢杆菌等微生物分泌的几丁质酶与 β -1,3-葡聚糖酶可协同降解真菌细胞壁,崩解速率提高 3~5 倍[38]。同时产两种酶的菌株对尖孢镰刀菌的抑制率比单产一种酶的菌株高 40%~60% [39]。

4.2. 诱导系统抗性(ISR)

环保酵素通过激活植物诱导系统抗性(ISR)与系统获得性抗性(SAR)双重通路,实现广谱抗病防虫;其富含的有益微生物(乳酸菌、酵母菌、放线菌等)、有机酸、壳寡糖及次生代谢物可作为激发子,触发植物免疫预警[40]。灌施或喷施适宜浓度(1:500~1:800)能显著提升拟南芥、小白菜、黄瓜等作物超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)等抗氧化酶活性,降低活性氧积累,增强细胞壁木质化与机械强度[26];同时通过茉莉酸(JA)/乙烯(ET)与水杨酸(SA)信号通路调控,诱导病程相关蛋白(PR 蛋白)、植保素等抗病物质合成,下调病原菌定殖相关基因表达[41]。根际层面,酵素可富集有益菌、抑制病原菌竞争生态位,改善土壤微生态,进一步放大系统抗性效应。在西瓜枯萎病、黄瓜猝倒病、核桃炭疽病等病害防控中,柑橘皮与蔬菜残渣复配、厌氧发酵 90 d 制备的环保酵素(1:200 稀释),可使病害发生率降低约 8.6% [42]。这种诱导系统抗性机制具有广谱性、持久性和环境友好等特点,是环保酵素在可持续农业中应用的重要优势。

4.3. 与有益微生物的协同效应

微生物菌群与酵素活性成分在功能上形成协同,共同发挥酵素的农业和环境效益。在植物促生功能方面,微生物产生的植物激素与有机酸、多酚等活性成分协同促进植物根系发育和养分吸收[43];微生物分泌的胞外多糖与活性成分共同改善土壤结构,增强土壤保水保肥能力[44]。在抗逆诱导方面,微生物产生的激发子(如 β -葡聚糖、脂多糖等)与多酚类物质协同激活植物防御系统,增强植物对病害和逆境胁迫的系统抗性[45]。微生物菌群与活性成分的互作网络具有动态平衡特征。在酵素发酵初期,微生物代谢产生有机酸和多酚,环境pH下降,活性成分积累;在发酵后期,活性成分对微生物的代谢活性产生反馈调节,维持菌群结构和功能的稳定[46]。已有文献指出,成熟酵素中的微生物菌群趋于稳定,乳酸菌和酵母菌占总菌数的80%以上,pH稳定在3.0~4.0,有机酸和多酚含量维持在较高水平,具有良好的储存稳定性和功能稳定性[47]。这种稳定互作关系是环保酵素在农业生产和环境治理中持续发挥作用的基础。

5. 环保酵素与植物抗逆性的整合机制

环保酵素通过基础活性成分对非生物胁迫与生物胁迫的缓解机制并非孤立运作,而是通过抗氧化调控、根际改良和激素调节三大整合路径协同发挥作用。

5.1. 抗氧化防御系统的调控

环保酵素中富含多酚、黄酮、有机酸及微生物源抗氧化物质(如谷胱甘肽、类胡萝卜素),使其具备直接清除活性氧(ROS,包括超氧阴离子 $O_2^{\cdot-}$,过氧化氢 H_2O_2 ,羟基自由基-OH等)的能力,这是其缓解氧化胁迫的重要物理化学基础。在植物体内,酵素的直接抗氧化作用表现为逆境条件下 H_2O_2 和丙二醛(MDA)含量的显著下降。贾丽萍等人发现在干旱、盐碱或重金属胁迫下,喷施混合果皮发酵的环保酵素(稀释比例1:500)后可使植物叶片 H_2O_2 含量降低50%,MDA含量降低25%,电解质泄漏率减少35%,有效减轻膜脂过氧化损伤[48]。除直接清除ROS外,环保酵素还能通过信号诱导机制显著增强植物内源抗氧化酶系统活性,根系响应通常强于叶片,且SOD、CAT和POD峰值呈现时序性激活特征[49]-[51]。

5.2. 根际微环境的改良

环保酵素对土壤酶具有多酶系统协同激活作用。酵素菌群可产生淀粉酶、蛋白分解酶等多种活性物质,分解难溶矿物质和纤维素,提高化肥利用率,并为放线菌提供营养,促进其产生抗菌物质,抑制有害菌群[52]。环保酵素还能改善土壤物理结构。施用后,大粒径团聚体(>0.25 mm)比例显著增加,土壤容重降低,孔隙度、渗透性和通气性提升。菌群代谢产生的胞外聚合物(EPS)可胶结矿物颗粒与有机质,形成稳定团聚体。在根际微生物群落方面,环保酵素显著优化其组成与多样性。在镉污染土壤中施加1:1000稀释浓度的果蔬类环保酵素后,细菌Ace指数、Chao1指数和Shannon指数分别提高37.54%、34.95%和24.61% [5]-[7]。在烤烟的大田种植环节施用废弃脐橙酵素在20℃~40℃条件下密封发酵60天,根际变形菌门和拟杆菌门相对丰度分别达21.67%和3.43%,显著高于对照[53]。

5.3. 植物激素水平的调节

环保酵素调节植物激素水平是其促进生长、增强抗逆性的核心机制之一。酵素中的有益微生物(如酵母菌、芽孢杆菌、假单胞菌等)可通过两种途径发挥作用:一是直接合成并分泌吲哚乙酸(IAA)、赤霉素(GA)等促生激素;二是产生1-氨基环丙烷-1-羧酸(ACC)脱氨酶,降低逆境下过高的乙烯水平,缓解其对生长的抑制[54]。环保酵素中IAA的来源包括原材料中生长素前体物质的释放与转化,以及微生物通过色氨酸途径合成。针对盐胁迫下水稻的研究表明,施用香蕉皮类环保酵素(原液稀释1:200)后,检测发现

该酵素中 IAA 含量达到 15.6 mg/L, 显著高于普通玉米发酵液[4]。此外, 微生物如木霉菌可合成赤霉素, 其合成量与菌体生物量和培养温度呈正相关[55]。除 IAA 和赤霉素外, 环保酵素中的微生物还能产生细胞分裂素(CTK)、脱落酸(ABA)类似物、油菜素内酯(BR)、生长素运输调节剂等多种活性物质, 共同调控植物生长发育[56]。

6. 总结

环保酵素富含多酚、超氧化物歧化酶(SOD)、有机酸和有益微生物等活性成分, 通过多重途径提升植物抗逆能力。在缓解非生物胁迫方面, 酵素通过吸附固定及酶活性提升协同降低重金属毒害、中和碱性及激活抗氧化系统缓解盐碱胁迫、诱导渗透调节物质合成及改善根系结构应对干旱、多酚抗氧化及胞外多糖膜保护减轻温度胁迫。防治生物胁迫方面, 酵素通过直接抑菌、消耗营养、分泌细胞壁降解酶及激活植物 ISR/SAR 免疫通路, 使病害发生率降低 30%~50%。此外, 酵素能协同激活土壤酶系统、优化根际微生物群落, 并调节植物激素水平, 从多层次增强植物抗逆性, 在可持续农业中具有广阔应用前景。

7. 展望

尽管环保酵素在缓解植物逆境胁迫方面潜力显著, 但研究仍处于起步阶段, 需从“现象验证”转向“机制解析”。未来应整合转录组学、代谢组学等多组学技术, 解析逆境响应基因表达及关键转录因子调控机制。当前产业化瓶颈在于缺乏统一的质量标准与应用规范。应建立以活性成分为核心的评价体系, 明确多酚含量、SOD 活性、有效活菌数等关键指标; 并针对不同作物、胁迫类型及生长阶段, 制定差异化的施用浓度、频率与方式。未来还应从酵素中筛选耐盐、耐旱、抗重金属等多重抗逆菌株, 开发为微生物制剂。同时, 拓展农产品加工副产物等原料来源, 开展生命周期评估, 量化碳足迹与经济效益, 推动资源循环利用。

参考文献

- [1] 孙丽娜, 郭晓瑞, 王艳, 等. 农业面源污染的成、危害与控制策略[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5293-5304.
- [2] 王晓晨, 李振轮, 张帅, 等. 传统农用化学品的环境风险与绿色替代技术的发展[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 481-492.
- [3] 熊巧仪, 刘丁群, 鲁敏. 刺梨自然发酵后抗氧化物质含量与抗氧化活性分析[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(1): 147-151.
- [4] 邹梦遥, 吴俊良, 胡卓, 等. 不同单一原料自制环保酵素抗氧化力初探[J]. 广东化工, 2015, 42(16): 296-297+287.
- [5] 许书林, 吴琼, 王馨悦, 等. 基于农用酵素生产降本增效的复合菌系筛选及接种效果研究[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(6): 120-128.
- [6] 文浩, 郑序影, 代佳丽, 等. 温度对水果酵素发酵性能的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(2): 189-195.
- [7] Jabłońska-Trypuć, A., Wydro, U., Wołejko, E., Świdorski, G. and Lewandowski, W. (2020) Biological Activity of New Cichoric Acid-Metal Complexes in Bacterial Strains, Yeast-Like Fungi, and Human Cell Cultures *in Vitro*. *Nutrients*, **12**, Article No. 154. <https://doi.org/10.3390/nu12010154>
- [8] 丁玉峰, 马艳莉, 李素萍, 等. 接种发酵对葡萄酵素多酚生物利用度及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(2): 108-116.
- [9] 靳素媛, 耿燕, 周琦, 等. 24 种食用植物酵素功能成分分析与生物活性初步研究[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(8): 62-67.
- [10] Lewandowska, H., Chen, Z., Marszałek, K., Lewandowski, W. and Świsłocka, R. (2025) Effective Antioxidants as Plausible Ligands in Chromium(III) Supplementation: How Complexation Modulates Catechol-Based Polyphenols. *Molecules*, **30**, Article No. 4467. <https://doi.org/10.3390/molecules30224467>
- [11] 黄丽, 吴婷, 周宇. 柑橘皮复合酵素的乳酸菌发酵优化及抗氧化活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(8): 198-203.

- [12] 颜飞翔, 董佳萍, 陈龙, 等. 北五味子麦芽酵素的制备及其抗氧化活性[J]. 中国酿造, 2019, 38(12): 116-119.
- [13] 崔国庭, 王缎, 刘向丽, 任国艳, 郭金英, 王萍. 响应面法优化草莓酵素发酵工艺及其生物活性初探[J]. 食品工业科技, 2018, 39(19): 143-148.
- [14] 刘佳, 张伟, 李娜. 果蔬混合环保酵素的复合菌发酵工艺及抗氧化特性[J]. 北方园艺, 2023(10): 112-117.
- [15] 陈静, 林强, 黄健. 菠萝皮酵素的酵母菌发酵优化及自由基清除能力研究[J]. 食品工业, 2021, 42(7): 89-93.
- [16] 杨阳, 王明, 赵磊. 番茄残渣酵素的植物乳杆菌发酵工艺及抗氧化活性分析[J]. 中国调味品, 2022, 47(5): 78-82.
- [17] 张越, 高游慧, 陈颖, 等. 农用酵素对沙土、酸性土和盐碱土的改良效果研究[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(6): 177-186.
- [18] 朱晓冉, 赵楠楠, 李德海, 等. 贮藏条件对红皮云杉种鳞多酚含量及抗氧化功能的影响[J]. 现代食品科技, 2018, 34(7): 161-167.
- [19] 王科杰, 许力山, 姬高升, 等. 环保酵素高效发酵菌株筛选及不同发酵方式比较[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(2): 252-258.
- [20] 邓涂静, 袁雷, 钟政昌, 等. 林芝苹果渣酵素酵母菌和乳酸菌顺序发酵条件优化及抗氧化活性研究[J]. 中国酿造, 2025, 44(12): 257-264.
- [21] Zhu, G.X., Wang, X.F., Chen, R.K., *et al.* (2025) Application and Exploration of Garbage Enzymes in Soil Remediation of Multiple Heavy Metal Pollution. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 12075. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96403-x>
- [22] 佟玉洁. 自制环保酵素改善土壤肥力试验研究[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(26): 119-121.
- [23] 李方志, 杨琴, 杨汝兰, 等. 环保酵素对土壤中有效氮、全氮及有机质改良效果的研究[J]. 玉溪师范学院学报, 2016, 32(4): 42-47.
- [24] 韩剑宏, 张立超, 张紫晗. 生物炭与环保酵素配施对盐碱化土壤理化性质的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(2): 387-394.
- [25] 张立超. 环保酵素改良滨海盐碱性土壤的应用研究[J]. 资源节约与环保, 2019(3): 22-23.
- [26] 李方志, 王殷, 李丝丝, 等. 环保酵素对盐碱胁迫下小麦生长及生理特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(12): 145-148.
- [27] 王俭珍, 刘倩, 高娅妮, 等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5565-5577.
- [28] 吴晓霞, 张瑞, 陈建民, 等. 脯氨酸在植物响应非生物胁迫中的作用机制研究进展[J]. 植物生理学报, 2019, 55(6): 731-742.
- [29] 谢育利, 邓秀泉, 李楠, 等. 植物酵素对茄子产量及品质的影响[J]. 江西农业学报, 2023, 3(6): 49-53.
- [30] 李志南. 茶多酚与 Pb^{2+} 络合反应机理及应用研究[J]. 西南农业学报, 1997, 10(2): 85-89.
- [31] 陈丽华, 张旭东, 王效科, 等. 胞外多糖在微生物-植物互动中的作用研究进展[J]. 生态学杂志, 2020, 39(8): 2530-2538.
- [32] 王亚楠, 张丽娟, 李华, 等. 胶红酵母胞外多糖对低温胁迫下植物膜系统的保护作用[J]. 微生物学通报, 2023, 50(8): 3456-3468.
- [33] 张婷, 李娟, 陈宇. 自制环保酵素对盆栽生菜产量、品质及其土壤化学性质的影响[J]. 武夷学院学报, 2023, 42(3): 11-15.
- [34] 苏本营, 周美华, 李晶, 等. 农业废弃物生产环保酵素及其应用研究进展[J]. 北方园艺, 2024(8): 119-125.
- [35] 周丽, 李敏, 王静, 等. 有机酸在生物防治中的应用及其作用机制[J]. 生物技术通报, 2021, 37(8): 213-224.
- [36] 杨帆, 丁菲, 杜天真, 等. 植物多酚的抗菌活性及其作用机制研究进展[J]. 林业科学, 2022, 58(6): 141-152.
- [37] 赵黎明, 张洪涛, 陈建民. 根际促生菌与病原菌的营养竞争机制研究[J]. 应用生态学报, 2022, 33(5): 1421-1430.
- [38] 孙丽娜, 郭晓瑞, 王艳, 等. 细胞壁裂解酶协同抑菌的分子机制[J]. 生态学报, 2022, 42(12): 4789-4801.
- [39] 李建国, 濮励杰, 朱明, 等. 多功能芽孢杆菌在植物病害生物防治中的应用[J]. 地理学报, 2021, 76(9): 1856-1868.
- [40] 覃叶欣. 环保酵素对西瓜幼苗枯萎病的防控效果及机理研究[J]. 中国蔬菜, 2021(12): 68-73.
- [41] Greco, M., Caminada, G., Coculo, D. and Lionetti, V. (2026) From Waste to Defense: Agro-Industrial Byproducts as Sources of Biopesticides and Bioelicitors for Crop Protection. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **74**, 10624-10644. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c13266>
- [42] Pieterse, C.M.J., Zamioudis, C., Berendsen, R.L., *et al.* (2014) Induced Systemic Resistance (ISR) by Beneficial

- Microbes. *Current Biology*, **24**, 682-692.
- [43] 李敏, 王磊, 高辉远. 微生物与活性成分协同促进植物生长的机制研究[J]. 植物生理学报, 2023, 59(12): 2567-2578.
- [44] 孙丽娜, 郭晓瑞, 王艳, 等. 微生物胞外多糖与有机胶体协同改良土壤结构的机制[J]. 生态学报, 2024, 44(5): 1897-1908.
- [45] 王晓晨, 李振轮, 张帅, 等. 微生物激发子与多酚协同诱导植物系统抗性的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(1): 1-12.
- [46] Abdelwahed, A.A., Qaisrani, Z.N., Salem, G.E.M., Ashfaq, M., Pinijsuwan, S. and Abdel-Azeem, A.M. (2025) Ecological and Biochemical Synergy in Fungal-LAB Co-Fermentation: From Enzymatic Priming to Sustainable Functional Foods. *Microbial Biosystems*, **10**, Article ID: 435082. <https://doi.org/10.21608/mb.2025.435082.1477>
- [47] 王亚楠, 张丽娟, 李华, 等. 成熟环保酵素中微生物群落结构及其功能稳定性研究[J]. 微生物学通报, 2025, 52(2): 678-692.
- [48] Jian, L.P., Sun, N., Cheng, X.L., *et al.* (2024) Enhanced Phytoextraction of Cr-Contaminated Soil by Garbage Enzymes and Microelectrolytic Iron-Carbon Filler Co-Addition. *Environmental Pollution*, **24**, 682-692.
- [49] 王晓晨, 李振轮, 张帅, 等. 环保酵素诱导植物抗氧化酶活性的持久性研究[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(1): 1-12.
- [50] Luo, Y., Liao, M., Zhang, Y., Xu, N., Xie, X. and Fan, Q. (2022) Cadmium Resistance, Microbial Biosorptive Performance and Mechanisms of a Novel Biocontrol Bacterium *Paenibacillus* Sp. LYX-1. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 68692-68706. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20581-8>
- [51] Imran, M., Alomran, M.M., Khalifa, H.A., Bilal, M.S., Ahmed, A.F., Ali, E.F., *et al.* (2026) Exploring Smart Solutions for Stressed Soils: Dual-Action of Culture Filtrates and Nanoparticles for Sustainable Onion Cultivation. *European Journal of Plant Pathology*, **174**, 45-66. <https://doi.org/10.1007/s10658-025-03113-1>
- [52] 刘凤岐, 刘杰, 刘洪庆, 等. 盐碱胁迫对植物离子平衡的影响及耐盐性研究进展[J]. 中国农学通报, 2016, 32(24): 1-7.
- [53] 姚小琴, 蒋娟, 龙云川, 等. 废弃果蔬酵素液肥对烤烟产值及根际土壤微生物的影响[J]. 烟草科技, 2025, 58(6): 45-54.
- [54] 赵晨阳, 马佳玲, 戴峰, 等. 环保酵素特性成份及微生物种类初步研究[J]. 科技经济导刊, 2019, 27(16): 1-5.
- [55] Jaroszk-Ścisiel, J., Tyśkiewicz, R., Nowak, A., Ozimek, E., Majewska, M., Hanaka, A., *et al.* (2019) Phytohormones (Auxin, Gibberellin) and ACC Deaminase *in Vitro* Synthesized by the Mycoparasitic *Trichoderma* DEMTkZ3A0 Strain and Changes in the Level of Auxin and Plant Resistance Markers in Wheat Seedlings Inoculated with This Strain Conidia. *International Journal of Molecular Sciences*, **20**, Article No. 4923. <https://doi.org/10.3390/ijms20194923>
- [56] Soni, R., Yadav, S.K. and Rajput, A.S. (2018) ACC-Deaminase Producing Rhizobacteria: Prospects and Application as Stress Busters for Stressed Agriculture. In: Panpatte, D.G., *et al.*, Eds., *Microorganisms for Green Revolution*, Springer, 161-175. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7146-1_9