北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

山梨醇诱导宁夏枸杞对腐皮镰刀菌抗性机制

王清华 李博 佘萍 李梓菡 果雪洁 卫俊玲 岳思君 郑蕊

Mechanisms of sorbitol-induced resistance to *Fusarium solani* in *Lycium barbarum*

Wang Qinghua, Li Bo, She Ping, Li Zihan, Guo Xuejie, Wei Junling, Yue Sijun, Zheng Rui

引用本文:
王清华, 李博, 佘萍, 李梓菡, 果雪洁, 卫俊玲, 岳思君, 郑蕊. 山梨醇诱导宁夏枸杞对腐皮镰刀菌抗性机制[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(10):137-146. doi: 10.12171/j.1000-1522.20250487
Wang Qinghua, Li Bo, She Ping, Li Zihan, Guo Xuejie, Wei Junling, Yue Sijun, Zheng Rui. Mechanisms of sorbitol-induced resistance to *Fusarium solani* in *Lycium barbarum*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(10):137-146. doi: 10.12171/j.1000-1522.20250487

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20250487

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

致病性腐皮镰刀菌筛选鉴定及其对‘宁杞1号’和‘宁杞5号’枸杞的致病性差异

Screening and identification of pathogenic *Fusarium solani* and its differential pathogenicity on *Lycium barbarum* ‘Ningqi-1’ and ‘Ningqi-5’

北京林业大学学报, 2026, 48(1): 62-72. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20250298

枸杞 *SnRK*基因家族鉴定及表达分析

Identification and expression analysis of *SnRK* gene family in *Lycium barbarum*

北京林业大学学报, 2025, 47(11): 96-108. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20250274

原位聚合酯化改性欧洲赤松的尺寸稳定性

Dimensional stability of Scots pine modified by in-situ polymerization esterification

北京林业大学学报, 2022, 44(3): 129-139. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20210271

油莎豆的抗旱性评价及抗旱生理机制研究

Evaluation of drought resistant ability and physiological mechanism in drought resistance of *Cyperus esculentus* var. *sativus*

北京林业大学学报, 2022, 44(4): 107-115. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20210378

亚洲百合部分品种灰霉病抗性评价及抗病生理响应

Evaluation of resistance to *Botrytis elliptica* and the physiological response of some Asian lily varieties

北京林业大学学报, 2023, 45(3): 104-112. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20210254

脱落酸和乙烯利对白桦丛生苗三萜积累及其合成途径基因的调控作用

Effects of abscisic acid and ethephon on triterpenoid accumulation and biosynthetic pathway genes in *Betula platyphylla*

北京林业大学学报, 2026, 48(6): 130-141. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20250447

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250487

山梨醇诱导宁夏枸杞对腐皮镰刀菌抗性机制

王清华[1] 李 博[1] 佘 萍[1] 李梓菡[1] 果雪洁[1] 卫俊玲[1] 岳思君[1] 郑 蕊[1,2]
（1. 宁夏大学生命科学学院，宁夏 银川 750021；2. 西部特色生物资源保护与利用教育部重点实验室，林木资源高效生产全国重点实验室，优势特色作物现代分子育种宁夏重点实验室，宁夏大学，宁夏 银川 750021）

摘要:【目的】山梨醇是一种重要的六碳糖醇，在植物生长发育及逆境响应中扮演关键角色。本研究旨在探究山梨醇对宁夏枸杞抵抗腐皮镰刀菌的诱导抗病效果及其生理与分子机制，为枸杞根腐病的绿色防控提供理论依据。**【方法】**首先测定病原菌侵染后不同时间点枸杞根系中山梨醇的含量，明确其含量变化规律及与病原菌侵染的关联。随后通过不同浓度山梨醇的抑菌实验、离体叶片接种及盆栽接种试验，结合活性氧荧光检测、抗氧化酶（POD、PPO、SOD）活性测定以及茉莉酸信号通路关键基因（*LOX*3.1、*AOS*1）表达分析，系统评估外源山梨醇对枸杞抗根腐病的影响及调控机制。**【结果】**（1）病原菌侵染可诱导枸杞根系内源山梨醇含量在 24 ~ 72 h 内显著上升，推测山梨醇可能作为早期响应分子参与枸杞对病原菌侵染的抗性反应。（2）在本研究的 0 ~ 20 μmol/L 浓度范围内，山梨醇对腐皮镰刀菌菌丝生长不具备直接的抑制作用，其抗病性依赖于对植物内源防御反应的激活。（3）5 μmol/L 山梨醇处理为本研究最佳诱导浓度，能显著抑制叶片病斑扩展与根系根腐症状，能促进活性氧适度积累，提高 POD、PPO、SOD 抗氧化酶活性，并上调 *LOX*3.1 和 *AOS*1 基因表达，从而系统增强枸杞的抗病性。**【结论】**腐皮镰刀菌侵染可诱导枸杞根系山梨醇的积累，外源施用适宜浓度山梨醇可通过激活植株活性氧信号，增强抗氧化酶活性并协同调控茉莉酸通路，显著增强枸杞对腐皮镰刀菌的抗病性。本研究初步揭示了山梨醇诱导枸杞抗根腐病的核心调控生理与分子机制，将为开发新型生物源免疫诱导剂及构建枸杞病害绿色防控技术体系提供重要理论基础和实践参考。

关键词：宁夏枸杞；腐皮镰刀菌；山梨醇；诱导抗病性；茉莉酸信号；抗氧化酶；绿色防控；生物源免疫诱导剂
中图分类号： S435.671；S763.7 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000−1522(2026)10−0137−10
引文格式： 王清华，李博，佘萍，等. 山梨醇诱导宁夏枸杞对腐皮镰刀菌抗性机制［J］. 北京林业大学学报，2026，48(10)：137−146. Wang Qinghua, Li Bo, She Ping, et al. Mechanisms of sorbitol-induced resistance to *Fusarium solani* in *Lycium barbarum*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(10): 137−146.

Mechanisms of sorbitol-induced resistance to *Fusarium solani* in *Lycium barbarum*

Wang Qinghua[1] Li Bo[1] She Ping[1] Li Zihan[1] Guo Xuejie[1]
Wei Junling[1] Yue Sijun[1] Zheng Rui[1,2]
(1. School of Life Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;
2. Key Laboratory of Ministry of Education for Protection and Utilization of Special Biological Resources in Western China, State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Key Laboratory of Modern Molecular Breeding for Dominant and Special Crops in Ningxia, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: ［**Objective**］Sorbitol, an important hexitol, plays a significant regulatory role in plant growth, development, and stress responses. This study aimed to elucidate the effect and underlying physiological and molecular mechanisms of sorbitol-induced resistance in *Lycium barbarum* against *Fusarium solani*, thereby

收稿日期: 2025−12−02 **修回日期:** 2026−03−19
基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目（2025BBF02004），国家自然科学基金项目（32460098），2025 年大学生创新创业训练计划国家级、自治区级项目（G202510749022，S202510749059）。
第一作者: 王清华。主要研究方向：植物抗病响应。Email：3311310085@qq.com 地址：750021 宁夏回族自治区银川市西夏区贺兰山西路 539 号宁夏大学生命科学学院。
责任作者: 岳思君，教授。主要研究方向：微生物资源开发与利用。Email：sijunyue@126.com 地址：同上。郑蕊，教授，博士生导师。主要研究方向：植物调控重要性状的功能基因组学。Email：xlzheng@126.com 地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

providing a theoretical foundation for the green prevention and control of *Lycium barbarum* root rot. ［**Method**］First, sorbitol content in *Lycium barbarum* roots was quantified at various time points post-infection to determine its dynamic changes and correlation with pathogen infection. The effects and underlying mechanisms of exogenous sorbitol were then systematically evaluated using a multifaceted approach, including: antifungal activity assays at different concentrations; disease assessment via both in vitro leaf and in vivo pot inoculation; detection of reactive oxygen species (ROS) burst; measurement of peroxidase (POD), polyphenol oxidase (PPO), and superoxide dismutase (SOD) activities; and expression analysis of key jasmonic acid (JA) signaling pathway genes (*LOX*3.1, *AOS*1). ［**Result**］(1) Infection by *Fusarium solani* induced a significant accumulation of endogenous sorbitol in the roots of *Lycium barbarum* at 24−72 h post-infection, suggesting that sorbitol may serve as an early response molecule involved in *Lycium barbarum* resistance to this pathogen. (2) In vitro antifungal assays showed that sorbitol at concentrations of 0−20 μmol/L exhibited no direct inhibitory effect on the mycelial growth of *Fusarium solani*, indicating that its disease resistance function relies on the activation of endogenous defense responses in host plants. (3) In this study, 5 μmol/L sorbitol was determined as the optimal induction concentration, which significantly suppressed leaf lesion expansion and root rot development, promoted moderate ROS accumulation, enhanced the activities of antioxidant enzymes (POD, PPO, and SOD), and upregulated the expression of *LOX*3.1 and *AOS*1 genes, thereby systemically boosting disease resistance in *Lycium barbarum*. ［**Conclusion**］*Fusarium solani* infection induces sorbitol accumulation in *Lycium barbarum* roots. Exogenous application of sorbitol at appropriate concentrations significantly enhances the resistance of *Lycium barbarum* to *Fusarium solani* by activating plant ROS signaling, increasing antioxidant enzyme activities, and synergistically regulating the JA pathway. This study preliminarily reveals the core physiological and molecular regulatory mechanisms of sorbitol-induced resistance to root rot in *Lycium barbarum*, and will provide an important theoretical basis and practical reference for the development of novel biogenic immune elicitors and the construction of a green prevention and control technology system for *Lycium barbarum* diseases.

Key words: *Lycium barbarum*; *Fusarium solani*; sorbitol; induced disease resistance; jasmonic acid signaling; antioxidant enzymes; green prevention and control; biogenic immune elicitors

宁夏枸杞（*Lycium barbarum*）是我国传统药食两用植物，具有悠久的药用历史与广泛的栽培分布，在宁夏、甘肃、青海、新疆等地均有种植。其果、叶、花、根均具较好的药用和保健价值，是中医药中常用的药材之一。现代研究[1]表明，枸杞的主要活性成分包括类胡萝卜素、黄酮类、多酚类及多糖等，此外还含有维生素 C、多种氨基酸以及 K、Na、Ca、Mg 等微量元素，具有调节免疫、抗氧化、延缓衰老、缓解视疲劳等多重生理功能。目前，宁夏枸杞品种资源丰富，但其果实品质参差不齐。其中‘宁杞 1 号’（*Lycium barbarum*‘Ningqi 1’）枸杞是由宁夏农林科学院选育的高产、优质、适应性强的枸杞优良品种，多年来一直是宁夏及周边省区的主栽品种，也是支撑我国枸杞产业高质量发展的核心品种之一[2]。然而，随着枸杞产业集约化、规模化栽培模式的快速普及，连作障碍问题日益凸显，由此引发的土传病害频发，已成为制约枸杞产量与品质提升、阻碍产业可持续发展的关键瓶颈。

其中，枸杞根腐病是宁夏枸杞常见的土传病害之一，其发病率随种植年限增加呈逐年上升趋势，一般年份发病率为 15%，严重时可达 50% 以上[3]。该病害具有传播迅速、连年发生的特点，常导致植株根系腐烂、地上部萎蔫、叶片黄化瘦小、果实稀疏瘦小，严重影响枸杞的产量与品质。病原学研究[4]显示，尖孢镰刀菌（*Fusarium oxysporum* ）和腐皮镰刀菌（*Fusarium solani*）为该病的优势病原菌。目前防治仍以化学药剂为主，但长期使用易导致病原菌产生抗药性，进而引发病害防控困难、化学农药污染环境及农产品中农药残留超标等问题。有研究[5]通过市场抽样检测发现，枸杞干果含有苯醚甲环唑、吡唑醚菌酯、多菌灵等 17 种农药，且超过 30% 的样品中同时存在 3 种以上农药残留，反映出当前枸杞产品中农药多残留问题较为突出。因此，亟需研发适用于枸杞产业的低毒、高效、环境友好型绿色防控技术，以应对生产端面临的实际挑战，保障产业的健康与可持续发展。在此背景下，筛选天然安全的植物源

诱抗剂，具有重要的现实意义和应用前景。

天然来源的小分子诱抗剂因环境友好、无残留、不易诱发病原菌抗药性等优势，已成为替代化学药剂的核心研究方向，其中天然糖醇类物质的抗逆调控潜力备受关注。山梨醇（sorbitol，$C_6H_{14}O_6$）是一种六碳糖醇，为山梨糖的还原产物，天然以 D−构型存在。作为植物光合作用产生的小分子糖醇，山梨醇易被叶片吸收[6]，不仅可作为信号分子参与调节糖代谢、雄蕊发育和花粉管生长等生理过程[7−8]，还广泛参与植物对逆境胁迫的响应[9]。在非生物胁迫响应中，山梨醇是重要的渗透调节物质，可帮助植物维持水分平衡，缓解干旱或盐害造成的损伤[10]。近年研究表明，山梨醇在植物应对生物胁迫中也发挥重要作用，其机制主要涉及对活性氧（reactive oxygen species，ROS）代谢、抗氧化酶系统及茉莉酸（jasmonic acid，JA）信号通路的调控。ROS 是植物防御反应中的关键信号分子：一方面，山梨醇可诱导 ROS 的适度积累，从而启动防御信号[11]；另一方面，它也能通过增强包括过氧化物酶（peroxidase，POD）在内的抗氧化酶活性来维持氧化还原稳态[12]。此外，山梨醇亦能激活 JA 信号通路，该通路在植物抵抗死体营养型病原侵染中具有核心调控作用[13]。研究[11]证实，外源山梨醇处理可诱导感染灰霉病的番茄（*Solanum lycopersicum*）叶片中 ROS 积累，并上调 *AOC*、*MYC*2 等 JA 通路基因的表达，从而增强番茄对灰霉病的抗性。这些结果表明，山梨醇可能通过整合调控 ROS 代谢与 JA 信号通路来增强植物的系统抗性。

然而，山梨醇在枸杞抗病中的功能与机制尚不明晰。前期的代谢组与转录组联合分析发现，在枸杞响应腐皮镰刀菌侵染过程中，山梨醇含量显著上升，且其积累趋势与 JA 合成通路的核心正调控基因 *LOX*3.1 及 *AOS*1 的表达呈正相关[14−15]。这一结果提示山梨醇可能通过调控 JA 信号通路参与枸杞对根腐病的防御反应，但该推测尚缺乏系统的实验验证，山梨醇在枸杞抗病防御中的功能及其调控机制仍未明确。

为此，本研究拟通过抑菌实验、离体叶片接种与盆栽接种等多元实验体系，结合山梨醇含量动态监测、ROS 荧光检测、抗氧化酶活性分析及 JA 通路相关基因表达测定，系统探讨山梨醇诱导宁夏枸杞对根腐病的抗性效果及生理与分子调控机制。研究旨在明确山梨醇在枸杞免疫应答中的信号功能，筛选其最佳诱导浓度，为枸杞病害绿色防控与新型生物农药研发提供理论支持，助力枸杞产业实现绿色、优质与可持续发展。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试材料为 3 年生宁夏枸杞‘宁杞 1 号’植株，由宁夏杞鑫种业有限公司提供，于智能温室中进行盆栽培养。营养基质由草炭、蛭石与沙土以体积比 1∶1∶1 充分混合，经高压灭菌后使用。培养条件为温度（24 ± 2）℃，光照强度 1 000 ~ 3 000 lx。腐皮镰刀菌菌株 F7-11 由本实验室从患有根腐病的枸杞根部组织中分离、鉴定并保存。山梨醇试剂购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2　研究方法

1.2.1　腐皮镰刀菌的活化及菌悬液的制备

将腐皮镰刀菌菌块接种于 PDA 平板，28 ℃ 恒温培养 7 d，待菌丝长满平板后，切取菌块用于根系接种。另刮取菌丝接入 PDB 液体培养基中富集培养，采用无菌水调整孢子浓度，使用血球计数板将其调整为 1×10^8 个/mL，用于后续离体叶片接种。

1.2.2　枸杞根系内源山梨醇含量检测

选取生长健壮的‘宁杞 1 号’植株，设置接菌处理组与空白对照组。2 组均于根部制造 1.5 cm × 1.0 cm 的创口，处理组挑取 1 cm^2 活化后的腐皮镰刀菌菌饼贴附于创口处，对照组仅做创口处理但不接菌，以无菌棉包裹创口部位后，隔离后回埋培养。分别于接菌后 0 h、24 h、72 h 采集根系样品，采用北京索莱宝科技有限公司生产的山梨醇含量检测试剂盒测定山梨醇含量。

1.2.3　外源山梨醇抑菌实验

前期实验表明，腐皮镰刀菌侵染可诱导枸杞根系山梨醇含量显著上升。为探究此种内源积累的山梨醇是否通过直接抑制病原菌生长发挥作用，本研究开展外源山梨醇平板抑菌实验。具体方法为配制山梨醇浓度为 0、0.5、1、5、10、20 μmol/L 的 PDA 培养基，灭菌后冷却至约 50 ℃ 时倒平板，凝固后备用。用打孔器取活化腐皮镰刀菌菌饼（直径约为 8 mm），接种于平板中央，28 ℃ 培养，分别于接种后 0、3、5、7 d 测量菌落直径，计算菌丝生长抑制率（对照菌落直径与处理菌落直径差值与对照菌落直径的百分比）。

1.2.4　外源山梨醇诱导浓度的筛选与抗性验证

1.2.4.1　离体叶片接菌实验

为初步验证外源山梨醇的诱导抗性效果并筛选最适浓度，选取健康‘宁杞 1 号’叶片，分别喷施 0、0.5、1、5、10、20 μmol/L 山梨醇溶液，每 10 min 处理一次，共 3 次，全部处理完毕后静置 4 h，确保叶片充分吸收。随后于超净工作台内完成叶片表面无菌消毒：依次经 75% 乙醇浸泡 30 s，1% 次氯酸钠溶液消

毒 10 min，无菌水冲洗 4 次（每次 2 min），无菌滤纸吸干叶片表面水分。对叶片进行标准化创伤处理后，吸取 2 μL 腐皮镰刀菌菌悬液接种于伤口处完成接菌。接菌后置于 28 ℃ 恒温避光条件下培养 3 d，观察叶片发病表型并测量病斑直径，以平均菌斑直径为筛选标准，平均菌斑直径越小，抗性结果越好，此时对应的为山梨醇的最适诱导浓度，用于后续试验。

1.2.4.2 盆栽接菌实验

为在整株水平进一步验证山梨醇的诱导抗性效果，采用上述确定的最适诱导浓度（5 μmol/L）进行盆栽接菌实验。选取生长一致的‘宁杞 1 号’植株，分为对照组和实验组。实验组每 3 d 灌施 5 μmol/L 山梨醇溶液 500 mL，共处理 3 次，对照组施以等量清水。处理后，参照 1.2.2 的方法进行根系接菌。分别于接菌后 0、3、7、14 d 观察根部病变情况，并于接菌后 0、12、24、72 h 采集根系样品，液氮速冻后存于−80 ℃ 超低温冰箱，用于后续生理生化及分子生物学指标检测。

1.2.5 枸杞叶片 ROS 检测及根系保护酶活性测定

为探究外源山梨醇诱导抗性过程中 ROS 信号的作用，并分析其对枸杞氧化还原稳态的调控，本研究从 ROS 的产生与清除 2 个维度分别进行 ROS 荧光检测及相关保护酶活性测定。

参照胡海涛等[16]方法，采用 H_2DCFDA 荧光探针（福州飞净科技有限公司）检测叶片 ROS 水平。设 3 组处理：处理组（5 μmol/L 山梨醇处理 + 接菌）、空白对照组（仅接菌）、阳性对照组（活性氧阳性试剂处理）。接菌 24 h 后，剪取 1 cm^2 叶片浸入 10 μmol/L H_2DCFDA 溶液中，抽真空（60 kPa，5 min）后室温避光孵育 30 min，蒸馏水冲洗去除残留探针。于荧光显微镜下使用 GFP 滤片观察 DCF 绿色荧光，通过相对荧光强度分析 ROS 积累水平。采用北京索莱宝科技有限公司试剂盒，对 1.2.4.2 中 0、12、24、72 h 根系样品进行 PPO、POD、SOD 酶活力测定。

1.2.6 JA 通路基因 qRT-PCR 分析

基于前期组学分析发现的山梨醇积累与 JA 合成关键基因 *LOX*3.1、*AOS*1 表达呈正相关的核心线索结果（课题组成果尚未发表），为探究外源山梨醇是否通过 JA 信号通路诱导枸杞对腐皮镰刀菌的抗病性，本研究使用植物总 RNA 提取试剂盒（天根生化科技有限公司）提取接菌后 0、12、24、72 h 根系总 RNA，采用 RK20429 反转录试剂盒（爱博泰克）合成 cDNA。自 NCBI 获取 *LOX*3.1、*AOS*1 基因序列，使用 Primer Premier 5 设计引物，经 BLAST 验证特异性（引物序列见表 1）。以 2 × Universal SYBR Green Fast qPCR Mix（ABclonal）为检测试剂，于德国耶拿荧光定量 PCR 仪上进行定量检测。反应体系（20 μL）包括 2 × Mix 10 μL，上、下游引物各 0.4 μL，模板 1 μL，ddH_2O 8.2 μL。以枸杞 *LbActin*（登录号为 HQ415754.1）为内参，设 3 次生物学重复，采用 $2^{-\Delta\Delta Ct}$ 法计算基因相对表达量，并以 0 h 对照组为基准进行标准化。

1.3 统计分析

所有数据均表示为 3 次生物学重复平均值 ± 标准差，使用 Microsoft Excel 2021 进行数据整理，SPSS 26.0 用于不同浓度梯度处理的单因素方差分析及处理−时间试验的双因素方差分析，利用 Image J 软件进行荧光强度定量分析，并采用 *t*-检验进行统计学比较。利用 GraphPad Prism 8 以及 Origin 2024 完成图表绘制。

2 结果与分析

2.1 病原菌侵染对枸杞根系山梨醇含量的影响

为探究腐皮镰刀菌侵染对枸杞根系山梨醇代谢的影响，本研究测定了接种后 0、24、72 h 山梨醇含量。结果显示：在接种初期（0 h），接菌组与对照根系山梨醇含量无显著差异；接种 24 h 后，接菌组山梨醇含量开始极显著高于对照，且该差异持续至 72 h，达到峰值 2.27 mg/g（图 1）。上述结果表明，腐皮镰刀菌侵染可诱导枸杞根系山梨醇的积累，推测山梨醇可能作为早期响应分子参与枸杞对病原菌侵染的防御反应。

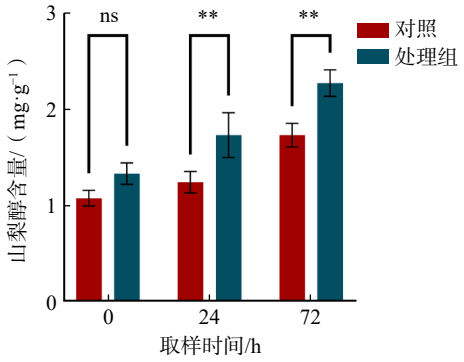
2.2 山梨醇对腐皮镰刀菌菌丝生长的影响

基于患病周期中枸杞根系山梨醇含量显著上升的实验结果，为探究山梨醇对腐皮镰刀菌的生长是否有直接影响，本研究分析了不同浓度山梨醇（0 ~ 20 μmol/L）对腐皮镰刀菌菌丝生长的影响。结果（图 2）表明，各处理组与对照组间的菌落直径无显著差异，计算得到的菌丝生长抑制率趋近于 0，且所有组别的菌丝形态与生长密度均较为一致。以上结

表 1 实时荧光定量 PCR 引物序列

Tab. 1 Primer sequences for real-time quantitative PCR

基因名称	正向引物（5′—3′）	反向引物（5′—3′）
*LOX*3.1	CCCCGACGAGAATGATCCTG	ACGGCCATGAACTTTGTTGC
*AOS*1	TTCACGTGAGGAGGCTTGTC	AGCTAGTTCGCTGTGCAGTT



**为差异极显著（$p < 0.01$），ns 为无显著差异（$p \geqslant 0.05$）。下同。

图 1　腐皮镰刀菌接种后‘宁杞 1 号’枸杞根系山梨醇含量的动态变化

Fig. 1　Dynamic changes of sorbitol content in the roots of *Lycium barbarum*‘Ningqi 1’ following *Fusarium solani* inoculation

果表明，在实验浓度范围内，山梨醇对腐皮镰刀菌的菌丝生长未表现出直接的抑制或促进作用。

2.3　山梨醇诱导枸杞抗腐皮镰刀菌的表型验证

2.3.1　山梨醇对枸杞离体叶片抗腐皮镰刀菌侵染的影响

为初步探究山梨醇是否可诱导枸杞对腐皮镰刀菌的抗性，本研究进行了离体叶片接菌实验，结果（图 3A）显示，接菌 2 d 后叶片开始出现病斑并伴生白色菌丝；至第 3 d，病斑扩展加速，菌丝生长旺盛。对不同山梨醇浓度处理下病斑直径的统计分析（图 3B）表明，接菌 3 d 后，5 μmol/L 处理组的抑制效果最为显著，其平均菌斑直径最小（3.65 mm），较 0 μmol/L（6.48 mm）、0.5 μmol/L（4.77 mm）和 1 μmol/L（4.47 mm）处理组分别降低了 43.67%、23.48% 和 18.34%。然而，当山梨醇浓度进一步提高至 10 μmol/L 和 20 μmol/L 时，平均病斑直径较 5 μmol/L 处理组分别增加了 32.60% 和 49.32%，抑制效果减

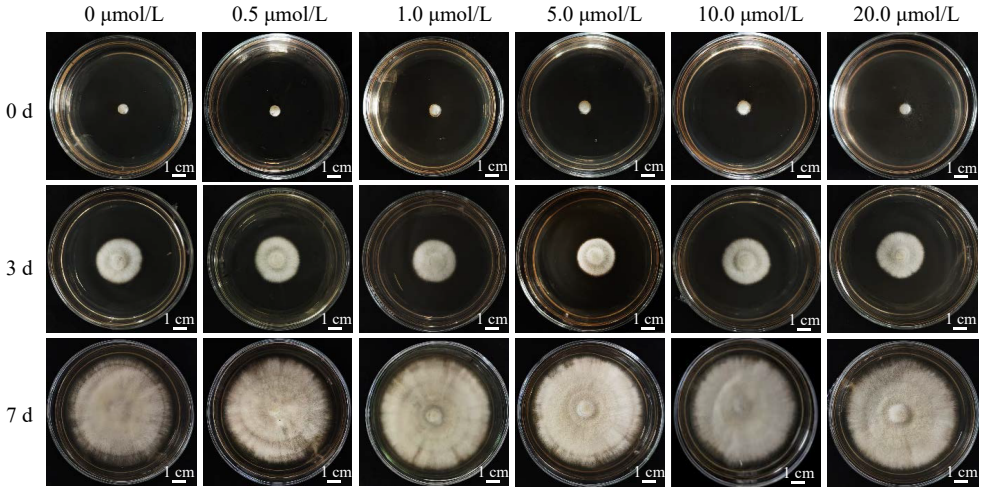
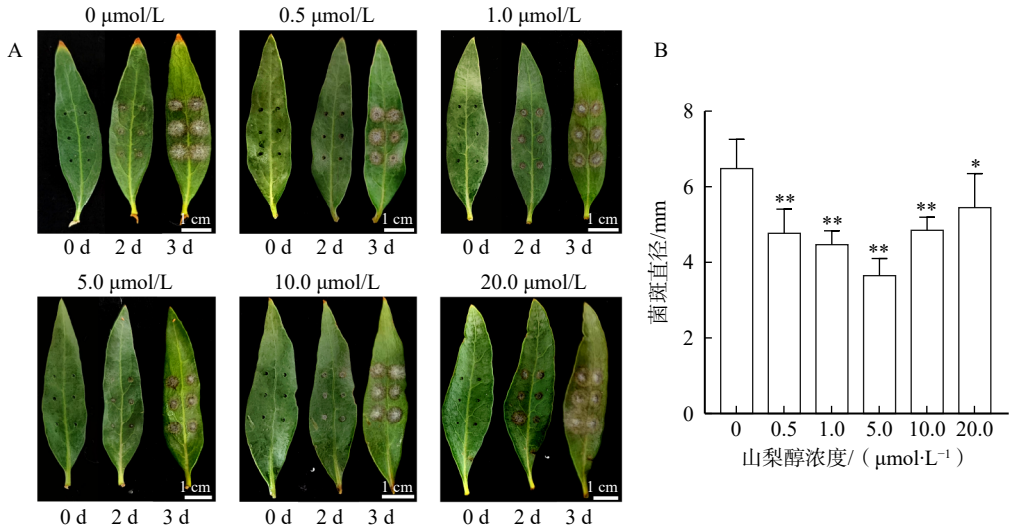


图 2　不同浓度山梨醇对腐皮镰刀菌菌丝生长的影响

Fig. 2　Effect of different sorbitol concentrations on the mycelial growth of *Fusarium solani*



A.不同浓度山梨醇处理叶片接菌后的表型 B.接菌 3 d 后各处理组叶片病斑直径。*为与山梨醇浓度0 μmol/L 相比差异显著（$p < 0.05$），**为差异极显著（$p < 0.01$）。下同。

图 3　山梨醇处理对‘宁杞 1 号’离体叶片抗腐皮镰刀菌侵染的影响

Fig. 3　Effect of sorbitol treatment on the resistance of *Lycium barbarum* ‘Ningqi 1’ detached leaves to *Fusarium solani* infection

弱。上述结果说明，山梨醇在适宜浓度下可有效诱导增强枸杞离体叶片对腐皮镰刀菌的抗性，其中 5 μmol/L 为最佳诱导浓度，浓度过高或过低均导致抗性诱导效果下降。因此，后续实验均选定 5 μmol/L 浓度进行抗性影响机制研究。

2.3.2 山梨醇对枸杞盆栽植株抗腐皮镰刀菌侵染的影响

基于离体叶片接菌实验确定的 5 μmol/L 最适浓度，进一步进行盆栽接菌实验，结果如图 4 所示。对照组植株的发病程度随接菌时间推移持续加重：接菌后 3 d，创口处开始出现浅褐色病斑并伴水渍状腐烂；7 d 时病斑迅速扩展，腐烂加深，病健交界模糊；至 14 d，接菌部位几乎完全褐变腐烂，病害向周围组织大面积蔓延，界限不清晰。相比之下，经 5 μmol/L 山梨醇处理的植株发病进程显著延缓；接菌后 3 d，创口处整体状态良好、色泽明亮，仅见局部轻微褐变；7 d 时病斑扩展缓慢，腐烂程度较轻，病健界限仍较清晰；直至 14 d，其病斑面积与腐烂深度仍显著小于对照组，部分健康组织未受侵蚀。该结果进一步证实，外源施加 5 μmol/L 山梨醇能够有效激活并增强枸杞植株对腐皮镰刀菌的抗性。

2.4 山梨醇处理对枸杞 ROS 积累的影响

为探究山梨醇是否通过调控 ROS 信号以诱导抗病性，本研究利用 H_2DCFDA 荧光探针检测不同处理下枸杞叶片的 ROS 积累情况。结果显示，阳性对照组呈现密集的绿色荧光，表明 ROS 大量产生（图 5A）；空白对照组荧光信号微弱，ROS 水平较低（图 5B）；而 5 μmol/L 山梨醇处理组的荧光强度介于两者之间（图 5C），与空白对照相比，其相对荧光强度提高较显著（图 5D），表明该处理可诱导枸杞叶片产生适度的 ROS 积累。ROS 是植物免疫信号通路中的关键信使，它能对病原菌的细胞膜造成破坏，其适度积累可激活下游防御反应。本研究结果提示，山梨醇可能通过促进枸杞体内 ROS 的适度积累，进而参与其对腐皮镰刀菌的抗性诱导过程。

2.5 山梨醇处理对枸杞保护酶活性的影响

ROS 的稳态积累有赖于产生与清除系统的动态平衡，进一步从 ROS 的清除系统维度测定了枸杞接菌后 0、12、24、72 h 的保护酶活性变化。结果表明，各处理组的 POD、PPO 与 SOD 活性随处理时间增加均呈总体上升趋势。在接菌初期（0 h，12 h），5 μmol/L 山梨醇处理组与对照组之间 3 种酶活性均无显著差异。随着接菌时间的延长，山梨醇处理组的酶活性被显著诱导。具体而言：POD 活性在 72 h 达到峰值，处理组极显著高于对照组，增幅达 80.27%（图 6A）；PPO 活性在 24 h 即达到峰值，处理组较对照组极显著增加 27.45%，并在整个观测期间维持较高水平（图 6B）；SOD 活性在 0～24 h 内处理组与对照无显著差异，而在 72 h 时处理组显著高于对照组，增幅为 25.08%（图 6C）。上述结果说明，5 μmol/L 山梨醇处理在接菌中后期能有效激活枸杞体内 POD、PPO 和 SOD 的活性，揭示山梨醇可能通过增强保护酶系统清除活性氧的能力，减少活性氧对细胞的损伤，进而参与枸杞对腐皮镰刀菌的抗性诱导。

2.6 山梨醇对枸杞 JA 信号通路关键基因表达的影响

基于前期组学分析提示山梨醇代谢可能与 JA 通路相关，为验证山梨醇是否调控 JA 信号以诱导增强抗性，本研究分析了接菌后 JA 合成关键基因 *LOX*3.1 与 *AOS*1 的表达动态。结果显示，在接菌初期（0 h），对照组与 5 μmol/L 山梨醇处理组间 *LOX*3.1 和 *AOS*1 的相对表达量均无显著差异。随着接菌进程的推进，山梨醇处理对 JA 通路基因表现出激活作用（图 7）：在接菌后 12 h，*LOX*3.1 的表达在处理组中

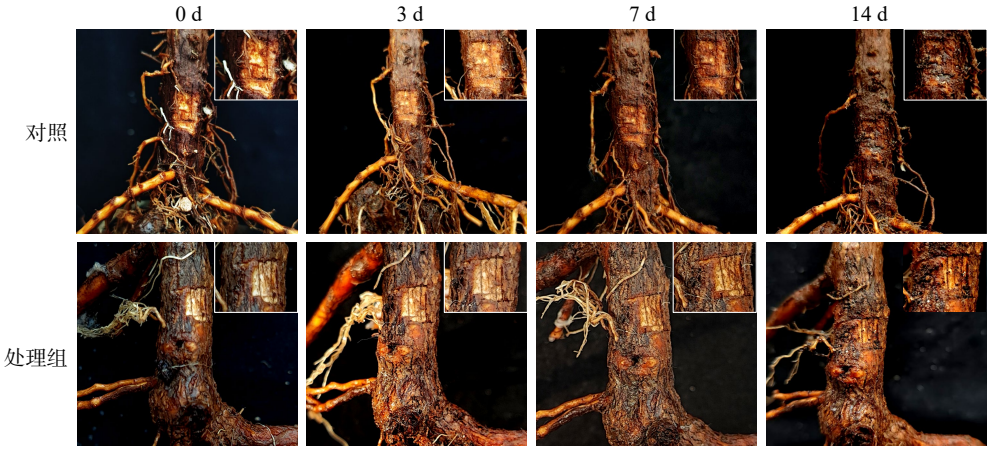
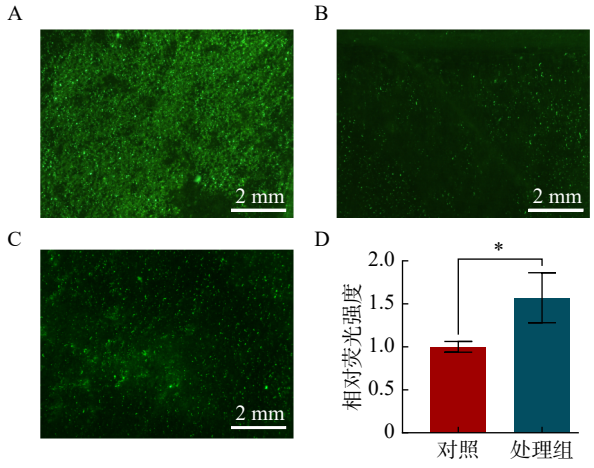


图 4 山梨醇处理对‘宁杞 1 号’盆栽植株根系抗腐皮镰刀菌侵染的影响

Fig. 4 Effect of sorbitol treatment on the resistance of *Lycium barbarum* ‘Ningqi 1’ potted plant roots to *Fusarium solani* infection



A. 阳性对照；B. 空白对照；C. 5 μmol/L 山梨醇处理；D. 相对荧光强度对比分析

图 5　H_2DCFDA 荧光探针检测不同处理组枸杞叶片的 ROS 积累

Fig. 5　Detection of reactive oxygen species accumulation in *Lycium barbarum* leaves from different treatment groups using H_2DCFDA fluorescent probe

虽较 0 h 有所下降，但仍较显著高于对照组；*AOS*1 的表达在处理组中则极显著上调，为对照组的 1.59 倍。随后，在 24 h 时，处理组 *AOS*1 的表达水平回落，但仍较显著高于对照组；*LOX*3.1 的表达水平相对稳定，处理组与对照组无显著性差异。至 72 h 时，处理组 *LOX*3.1 的相对表达量升高，达到对照组的 1.55 倍；*AOS*1 的表达较 24 h 有所回升，极显著高于对照组的表达水平。上述结果表明，5 μmol/L 山梨醇能够激活枸杞 JA 信号通路中 *LOX*3.1 与 *AOS*1 基因的表达，这可能是山梨醇调控 JA 信号诱导枸杞系统抗性的重要分子机制之一。

3　讨　　论

宁夏枸杞是我国重要的药食两用经济作物，由腐皮镰刀菌等病原引发的根腐病已成为制约其产业可持续发展的关键瓶颈。传统化学防治面临病原菌

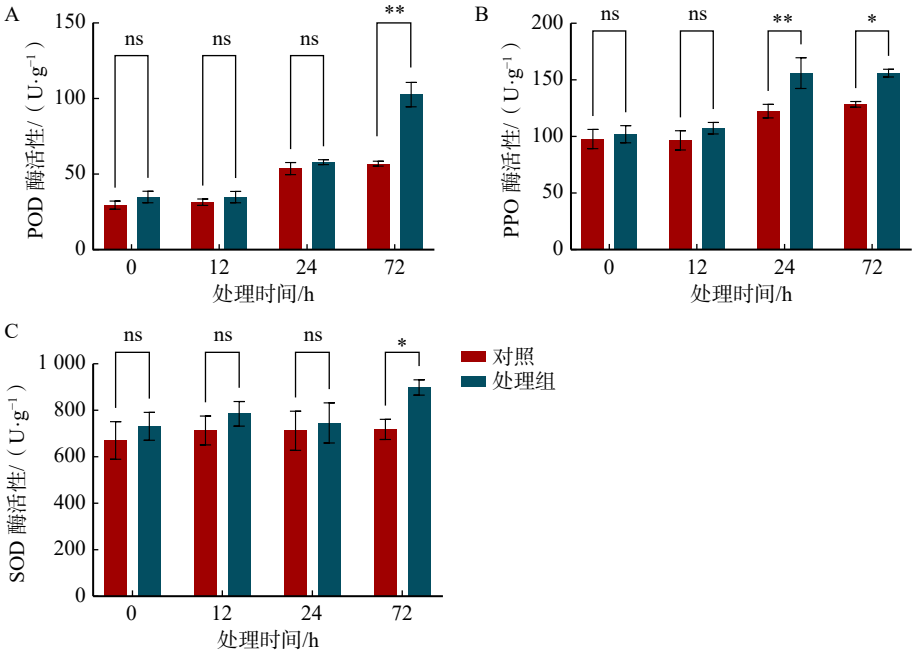


图 6　山梨醇处理对‘宁杞 1 号’保护酶活性的影响

Fig. 6　Effect of sorbitol treatment on the activities of protective enzymes in *Lycium barbarum* ‘Ningqi 1’

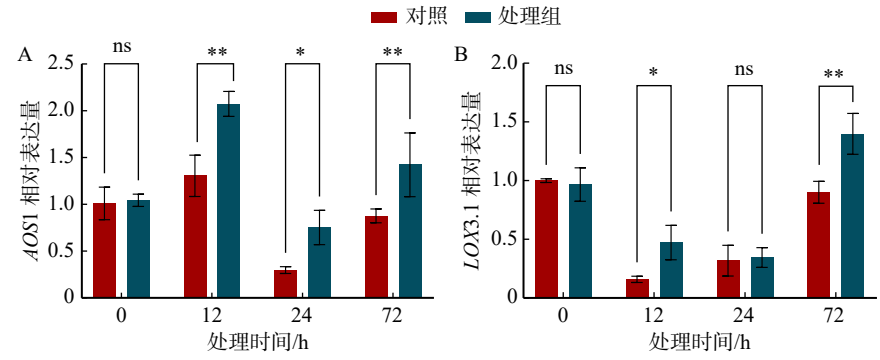


图 7　山梨醇处理对枸杞 JA 合成通路关键基因表达的影响

Fig. 7　Effect of sorbitol on the expression of JA pathway genes in *Lycium barbarum*

抗药性、农药残留及环境污染等多重风险，发掘安全高效的植物免疫诱导物质迫在眉睫。山梨醇作为天然糖醇，已被证实参与植物生物胁迫响应，但其在枸杞–腐皮镰刀菌互作体系中的抗病功能与调控机制尚未明确。本研究系统验证了外源山梨醇对枸杞抗根腐病的诱导效果，初步探究了其潜在的生理与分子调控机制，研究结果为解析山梨醇在枸杞中的抗病功能、开发糖醇类抗根腐病新型植物免疫诱导剂奠定了重要的理论基础。

3.1 山梨醇的早期积累：一种潜在的枸杞抗病启动信号

本研究发现，腐皮镰刀菌侵染可迅速诱导根系山梨醇的积累（图 1），其动态早于典型病害症状的出现。这一时序特征强烈提示，山梨醇的积累并非仅仅是胁迫导致的被动结果，而更可能是植物主动防御程序的一部分。与前人研究在番茄[11]、苹果（*Malus domestica*）[17]中发现的糖醇含量的上升与防御信号激活同步，糖醇代谢在病原菌感知与信号传递中具有重要作用的结果一致。据此推测，病原菌侵染激活了宁夏枸杞山梨醇的合成与转运通路，使其从服务于碳分配与渗透平衡的代谢物，转变为参与系统信号放大或防御物质前体供应的免疫信号，提示糖醇代谢可能在枸杞病害信号感知与防御中发挥关键作用。

3.2 山梨醇不具直接抑菌作用，但可诱导植物防御反应

抑菌实验排除了山梨醇对腐皮镰刀菌的抑菌活性（图 2），而植物离体与活体实验均证实其具有显著的病害减轻效果（图 3、图 4），这与于一鸣[11]、孟慧[17]在不同植物–病原菌互作体系中的研究结论一致，暗示山梨醇作为糖醇类的植物免疫诱导剂，其防护功能依赖于激活植物的诱导免疫系统。值得关注的是，本研究发现其诱抗活性存在一个明确的最适浓度（5 μmol/L），并表现出典型的“钟形曲线”剂量效应，这是许多生物源或化学诱导剂的典型剂量效应特征[18–19]。高浓度山梨醇诱抗效果减弱的现象，可能与植物细胞渗透压稳态的轻微扰动有关。本研究浓度区间已排除高渗胁迫对病原菌的直接影响，进一步佐证了其作用的核心在于调控植物内源防御反应，这一特性使其在绿色可持续植保领域中具有良好的应用潜力。

3.3 山梨醇可诱导 ROS 产生与保护酶系统活化

山梨醇诱导的抗病性与其对 ROS 稳态的精密调控密切相关。与直接引发毒性氧爆发不同，5 μmol/L 山梨醇处理诱导了适度且可控的 ROS 积累（图 5），这更符合其作为防御信号分子的功能特征[11]，提示同为茄科植物番茄、枸杞可能通过相似的 ROS 介导防御途径产生共性响应。尤为关键的是，山梨醇处理同步激活了 SOD、POD 和 PPO 等核心抗氧化酶的活性（图 6），表明山梨醇在宁夏枸杞抗病反应中的作用已超越了单纯的渗透调节[20]，而是展现出作为免疫信号分子，主动协调氧化还原平衡的更深层功能。这为理解枸杞–腐皮镰刀菌互作提供了新的视角。病原菌侵染并未显著激活对照组的抗氧化酶系统，与冯睿等[21]的研究结果相似，且与某些根腐病的潜隐侵染策略[22]相符，推测病原菌可能通过分泌效应子来抑制植物的早期免疫输出，干扰抗氧化酶的激活，以利于其初始定殖。而外源山梨醇的加入，则可能克服或绕过了病原菌的免疫抑制，或提供了一个更强的信号输入，从而诱导了枸杞固有的、但被病原菌抑制的抗氧化酶系统激活潜能。

3.4 山梨醇通过激活 JA 信号通路增强枸杞对腐皮镰刀菌的抗性

山梨醇对 JA 生物合成通路表现出时序性调控。qRT-PCR 结果（图 7）显示，5 μmol/L 山梨醇处理可显著调控 JA 生物合成途径中 2 个关键基因 *AOS*1 与 *LOX*3.1 的表达，为山梨醇通过调控 JA 合成影响抗病性提供了分子证据。其中，*AOS*1 呈现早期快速激活、中期相对回落、后期持续上调的表达特征。而 *LOX*3.1 表现出前期受抑、后期显著激活的时序模式。2 个基因表达模式的分化，可能与二者在 JA 生物合成途径中的功能位置及调控层级密切相关。LOX 作为 JA 生物合成的起始酶，其表达和活性水平对脂质代谢稳态及氧化应激具有重要影响，因此在病原侵染初期往往受到更为严格的调控。相较之下，AOS 位于 JA 合成通路的后续步骤，其转录激活更可能反映通路整体被启动的趋势。因此，在侵染早期出现 *AOS*1 上调而 *LOX*3.1 暂时受抑的现象，可能是一种在保证防御响应灵敏性的同时避免 JA 过早大量合成的调控策略。这种表达模式与邵琪等[23]在研究甜瓜（*Cucumis melo*）根部 *LOX*05 对枯萎病菌侵染响应时的变化趋势一致，反映了植物在侵染初期与后期防御调控的差异。而两者在侵染中期（24 h）表达水平的回落，可能源于植物对防御反应的精细协调。植物早期快速免疫应答可能更依赖于水杨酸（SA）途径或丝裂原活化蛋白激酶（MAPK）级联等信号，导致部分 JA 生物合成基因的转录受到可逆性抑制[24]。随着胁迫进程的持续，植物的防御策略逐步从局部快速反应转向以 JA 信号为主导的系统性抗性建立。此外，不排除病原菌在侵染初期分泌相关物质干扰宿主早期防御，但随着胁迫进程推进，相关防御基因表达重新上调，以增强抗病能力。在此过

程中，外源山梨醇处理可能通过协同增强 JA 通路的正向调控或缓解其早期抑制，促进防御状态完成稳定、系统的抗性过渡。

本研究首次在枸杞−腐皮镰刀菌互作体系中证实外源山梨醇可作为一种有效的植物免疫诱导剂增强枸杞对根腐病的系统抗性，这为深入理解糖醇介导的植物免疫机制提供了新见解，也为开发基于山梨醇的枸杞绿色防控技术提供了重要的理论基础。然而，本研究对山梨醇感知与信号转导的上游机制、山梨醇介导的信号与 SA 等其他防御通路的互作关系尚未阐明，山梨醇调控 JA 合成与抗氧化酶活性的直接分子靶点亦有待解析。未来需要在分子和通路水平深入解析其完整的信号网络，并系统评估其田间应用效果，以推动该诱导剂从机理研究走向生产实践。

4　结　　论

本研究基于前期组学分析发现的山梨醇积累与 JA 抗病信号通路响应高度关联的核心线索，针对枸杞根腐病绿色防控的产业迫切需求以及外源山梨醇诱导枸杞抗病性的调控机制尚未解析的研究空缺，综合离体抑菌评价、活体接菌验证、生理生化与分子生物学检测等多水平实验，系统探究了外源山梨醇介导枸杞抵御腐皮镰刀菌侵染的调控效应与作用路径。主要结论如下。

（1）腐皮镰刀菌侵染可诱导枸杞根系山梨醇在 24 ~ 72 h 显著积累，外源施加 5 μmol/L 山梨醇能够有效减轻枸杞叶片和根部的病害程度。

（2）山梨醇在 0 ~ 20 μmol/L 浓度范围内对腐皮镰刀菌菌丝生长无直接抑制作用，其抗病功能主要源于对植物自身免疫反应的激活。

（3）山梨醇处理可诱导枸杞体内 ROS 适度积累，并显著提高 POD、PPO 和 SOD 等保护酶活性，从而增强植株的氧化信号调控与抗氧化防御能力。

（4）在分子层面，山梨醇通过上调 JA 信号通路相关基因 *LOX*3.1 和 *AOS*1 的表达，激活 JA 介导的系统性抗病反应。

研究结果不仅为解析枸杞抗病机制提供了新的证据，也为糖醇类绿色生物源诱抗剂的开发提供新的理论参考。未来可进一步开展山梨醇在田间复杂环境下的诱导稳定性与防效验证，并探索其与其他诱导剂的协同效应，以促进其产业化应用。

参　考　文　献

[1] 王长江, 岳明霞, 王德贵, 等. 枸杞叶总黄酮抗抑郁作用初步研究 [J]. 宁夏大学学报 (自然科学版中英文), 2015, 36(3): 261−266.
Wang C J, Yue M X, Wang D G, et al. Preliminary study on antidepressant effect of total flavonoids of *Lycium barbarum* leaves [J]. Journal of Ningxia University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2015, 36(3): 261−266.

[2] 刘雪霞, 范文强, 焦慧慧, 等. 基于转录组测序的宁夏枸杞不同品种果实活性成分合成差异表达基因分析 [J]. 生物工程学报, 2023, 39(7): 3015−3036.
Liu X X, Fan W Q, Jiao H H, et al. Comparative analysis of differentially expressed genes for biosynthesis of active ingredients in fruits of different cultivars of *Lycium barbarum* L. based on transcriptome sequencing [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(7): 3015−3036.

[3] 陈思杰, 杜娟, 张涛, 等. 宁夏枸杞根腐病病原研究 [J]. 农业科学研究, 2021, 42(4): 7−11.
Chen S J, Du J, Zhang T, et al. Studies on the pathogen of root rot of *Lycium barbarum* in Ningxia [J]. Journal of Agricultural Sciences, 2021, 42(4): 7−11.

[4] 纪嵩岩, 邵长琪, 齐文康, 等. 枸杞根腐病病原鉴定及拮抗菌筛选 [J]. 浙江农业学报, 2024, 36(10): 2283−2297.
Ji S Y, Shao C Q, Qi W K, et al. Identification of *Lycium barbarum* root rot disease pathogens and biocontrol fungi against root rot disease [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2024, 36(10): 2283−2297.

[5] 苟春林, 杨静, 张静, 等. 宁夏枸杞中农药多残留风险评估 [J]. 宁夏农林科技, 2023, 64(7): 31−35.
Gou C L, Yang J, Zhang J, et al. Risk assessment of multiple pesticide residues in Ningxia Wolfberry [J]. Journal of Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology, 2023, 64(7): 31−35.

[6] 赵瑞芬, 焦晓燕, 杨治平. 叶面施用山梨糖醇对缺硼绿豆体内硼运输的影响 [J]. 天津农业科学, 2020, 26(6): 7−11.
Zhao R F, Jiao X Y, Yang Z P. Effect of foliar application of sorbitol on boron Transportation in boron deficiency *Phaseolus aureus* [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2020, 26(6): 7−11.

[7] Meng D, He M, Bai Y, et al. Decreased sorbitol synthesis leads to abnormal stamen development and reduced pollen tube growth via an MYB transcription factor, MdMYB39L, in apple (*Malus domestica*) [J]. New Phytologist, 2018, 217(2): 641−656.

[8] 周平, 郭瑞, 颜少宾, 等. 外源山梨醇影响桃叶片和果实糖代谢的分子机制研究 [J]. 园艺学报, 2023, 50(5): 959−971.
Zhou P, Guo R, Yan S B, et al. Molecular mechanism study of exogenous sorbitol effects on sugar metabolism in peach leaves and fruits [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2023, 50(5): 959−971.

[9] 任艺华, 何宛珣, 杜莹, 等. 外源山梨醇对低温胁迫下枇杷幼苗生理特性的影响 [J]. 四川农业大学学报, 2025, 43(6): 1416−1423.
Ren Y H, He W X, Du Y, et al. Effects of exogenous sorbitol on the physiological characteristics of loquat seedlings under low temperature stress [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2025, 43(6): 1416−1423.

[10] 杨光, 李玲玉, 黄明丽, 等. 山梨醇对植株抗逆性作用的研究进展 [J]. 土壤, 2018, 50(3): 446−454.

Yang G, Li L Y, Huang M L, et al. Progresses in study on sorbitol effect on plants resistance [J]. Soils, 2018, 50(3): 446−454.

[11] 于一鸣. 山梨醇诱导番茄对灰霉病抗性的机理解析 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2024.
Yu Y M. Mechanism analysis of tomato resistance to gray mold induced by sorbitol[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2024.

[12] 杨洪兵, 杨世平. 甘露醇和山梨醇对荞麦幼苗耐盐性的效应 [J]. 湖北农业科学, 2014, 53(2): 274−276.
Yang H B, Yang S P. Effects of mannitol and sorbitol on salt tolerance of buckwheat seedlings [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2014, 53(2): 274−276.

[13] Li C, Xu M, Cai X, et al. Jasmonate signaling pathway modulates plant defense, growth, and their trade-offs [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(7): 3945.

[14] Su S, Tang P, Zuo R, et al. Exogenous jasmonic acid alleviates blast resistance reduction caused by *LOX*3 knockout in rice [J]. Biomolecules, 2023, 13(8): 1197.

[15] 解军辉, 寇艳君, 沈祥陵, 等. 水稻茉莉酸合成基因 *OsAOS1* 在稻瘟病抗性中的功能分析 [J]. 分子植物育种, 2022, 20(20): 6631−6637.
Xie J H, Kou Y J, Shen X L, et al. Functional analysis of rice jasmonic acid synthesis gene *OsAOS*1 in rice blast resistance [J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(20): 6631−6637.

[16] 胡海涛, 钱婷婷, 杨玲. 基于 H_2DCFDA 荧光探针的植物活性氧检测方法 [J]. 植物学报, 2022, 57(3): 320−326.
Hu H T, Qian T T, Yang L. Detection of reactive oxygen species using H_2DCFDA probe in plant [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2022, 57(3): 320−326.

[17] 孟慧. 山梨醇在苹果抗轮纹病方面的功能及应用 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
Meng H. The function and application of sorbitol on the resistance to apple ring rot[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022.

[18] 吴增林, 陈钟吼, 税思哲, 等. 多花黄精须根多糖诱导小麦白粉病抗性 [J]. 西南农业学报, 2025, 38(10): 2209−2217.
Wu Z L, Chen Z H, Shui S Z, et al. Induction of resistance to wheat powdery mildew by polysaccharides from fibrous roots of *Polygonatum cyrtonema* Hua [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2025, 38(10): 2209−2217.

[19] 高妍婷, 赵文清, 石菁, 等. 萘乙酸诱导玉米瘤黑粉病抗性的生理机制 [J]. 江苏农业学报, 2025, 41(2): 242−250.
Gao Y T, Zhao W Q, Shi J, et al. Physiological mechanism of naphthylacetic acid-induced resistance to common smut in maize [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2025, 41(2): 242−250.

[20] Li J, Zhao M, Liu L, et al. Exogenous sorbitol application confers drought tolerance to maize seedlings through up-regulating antioxidant system and endogenous sorbitol biosynthesis [J]. Plants-Basel, 2023, 12(13): 2456.

[21] 冯睿, 刘璇, 兰航, 等. 植物免疫诱抗剂对枸杞生长及根腐病抗性的影响 [J]. 南方农业学报, 2025, 56(7): 2239−2248.
Feng R, Liu X, Lan H, et al. Effects of the plant immune inducer on growth and resistance to root rot disease in *Lycium barbarum* L. [J]. Journal of Southern Agriculture, 2025, 56(7): 2239−2248.

[22] 王飞, 杨瑾, 赵莹, 等. 丹参根腐病优势病原的分离鉴定及其在丹参根部的侵染过程观察 [J]. 河南农业科学, 2025, 54(12): 101−109.
Wang F, Yang J, Zhao Y, et al. Isolation and identification of the dominant pathogen of *Salvia* miltiorrhiza root rot and observation of its infection process in *S. miltiorrhiza* roots [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2025, 54(12): 101−109.

[23] 邵琪, 解群杰, 刘贺娟, 等. 接种枯萎病菌对甜瓜脂氧合酶活性及基因表达的影响 [J]. 植物生理学报, 2016, 52(04): 479−486.
Shao Q, Xie Q J, Liu H J, et al. Effects of LOX activity and gene expression of *Cucumis melo* var. makuwa inoculated by *Fusarium oxysporum* [J]. Plant Physiology Journal, 2016, 52(04): 479−486.

[24] Tian H, Xu L, Li X, et al. Salicylic acid: the roles in plant immunity and crosstalk with other hormones [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2025, 67(3): 773−785.

（责任编辑 赵田芸
责任编委 戴玉成）