

李慧,王莉,韩佳,等.肉桂酸对兰州百合(*Lilium davidii* var. *unicolor*)枯萎病病原菌致病性的调控机制[J].中国沙漠,2026,46(3):362-370.

肉桂酸对兰州百合(*Lilium davidii* var. *unicolor*) 枯萎病病原菌致病性的调控机制

李慧,王莉,韩佳,杜文科,管凤凤,杨博,杨宏羽,师桂英

(甘肃农业大学 园艺学院,甘肃 兰州 730070)

摘要: 探究外源肉桂酸对尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)增殖生长、侵染能力及关键致病因子的调控效应,以期解析肉桂酸介导的尖孢镰刀菌引起的兰州百合枯萎病病原性连作障碍的防控提供理论依据。采用离体培养方法,设置0、0.24、2.40、24.00 mg·L⁻¹肉桂酸浓度梯度,分析尖孢镰刀菌增殖侵染的生长生理指标及*FochsV*、*FUBT*等关键致病基因在转录水平上的表达量。肉桂酸对尖孢镰刀菌表现出“低促高抑”的化感效应:0.24 mg·L⁻¹肉桂酸显著促进了菌落生长、增加了产孢量,同时显著提升4种细胞壁降解酶(几丁质酶、纤维素酶、木聚糖酶和果胶酶)活性;*FochsV*基因的表达量随着处理时间的推移呈现低浓度促进、高浓度抑制的趋势,而*FUBT*基因的表达在第7天时出现差异,表现为高浓度促进、低浓度抑制,菌体抗氧化还原酶活性整体呈现低浓度促进、高浓度抑制的特征;24.00 mg·L⁻¹肉桂酸则显著抑制菌株生长、酶活性及关键致病基因表达。根据兰州百合长期连作土壤中(0~9年)肉桂酸含量的积累特点,推断肉桂酸的积累是加重该蔬菜作物枯萎病发生的关键土壤化学调控因子。

关键词: 尖孢镰刀菌;肉桂酸;抗氧化酶;细胞壁降解酶;基因表达分析

文章编号: 1000-694X(2026)03-362-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00044

中图分类号: Q93

文献标志码: A

0 引言

兰州百合(*Lilium davidii* var. *unicolor*)是中国唯一的甜百合,仅适合甘肃兰州以南的二阴山区栽培,是极具盛名的甘肃特色蔬菜^[1],因其狭域分布,多年生栽培,产区连作障碍严重,土传病害频发,其中百合枯萎病发生最为严重。在百合主产区,该病害于5月下旬左右开始发病,6月降雨多时发病严重,植株根部腐烂,地上部黄化、枯萎死亡,造成大幅度的减产^[2]。镰刀菌(*Fusarium*)的积累是兰州百合连作障碍的重要原因^[3],其中尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)是兰州百合主产区枯萎病最重要的病原菌^[4]。以镰刀菌作为主要研究对象,揭示兰州百合枯萎病的发病机制,对于百合土传病害的防治十分重要。

肉桂酸是广泛存在于作物根际土壤的模式自毒酚酸物质,兼具碳源供给与化感调控的双重特性,是介导作物连作障碍与土传病害发生的关键土壤化学因子^[5]。一方面,肉桂酸可作为腐生性真菌的优质碳源,在一定的浓度范围内促进腐生性真菌的增殖,使其数量显著增加,从而加重病害的发生,这种效应已在蚕豆、花生、三七的研究中得到证实^[6-8];另一方面,肉桂酸的积累是诱发植物自毒胁迫、加剧连作障碍的重要诱因,前人在人参、西洋参等^[9]药用植物及花生^[10]的连作研究中,均已明确肉桂酸等酚酸类物质的积累是连作障碍发生的重要原因。在兰州百合连作土壤中已检测出肉桂酸、乌头酸、邻苯二甲酸等多种酚酸类成分,其中肉桂酸含量随着连作年限的增加而显著增加(在0、3、6、9年的兰州百合连作田中,其含量为0.18、0.24、0.27、

收稿日期:2025-08-06; 改回日期:2026-03-31

资助项目:甘肃省重点研发计划项目(22YF7NA108, 24ZD7NA006);国家自然科学基金项目(31860549);兰州市科技计划项目(2025-3-040);甘肃省农业农村厅科技支撑项目(KJZC-20259)

作者简介:李慧(1994—),女,甘肃靖远人,博士研究生,研究方向为蔬菜栽培和生物技术。E-mail: 1767788979@qq.com

通信作者:师桂英(E-mail: shigy@gsau.edu.cn)

0.28 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 干土,相当于 0.27、0.36、0.405、0.42 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[11];而化肥减量配施微生物菌剂可显著降低植株根际土壤肉桂酸含量,有效缓解兰州百合连作障碍^[12]。尽管肉桂酸与连作障碍、病原菌增殖的关联已在多种作物中被揭示,但针对该酚酸类物质对百合枯萎病的化感效应研究未见报道,这也为本研究的开展提供了切入点。

病原菌侵染对寄主植物的致病性,既取决于初侵染时的种群数量,也与其侵染能力密切相关,细胞壁降解酶协助其侵入植物组织并为自身提供养分^[13]。尖孢镰刀菌在侵染宿主植物的过程中,会分泌几丁质酶、果胶酶、木聚糖酶和纤维素酶、蛋白酶等^[14-15]细胞壁降解酶,其在降解植物细胞壁及宿主与病原体相互作用中起着核心作用^[16-17];此外,尖孢镰刀菌在感染过程中还会分泌与致病相关的真菌毒素,以促进侵染能力并抑制宿主防御反应,镰刀菌酸(Fusaric acid, FA)是其中重要的致病毒素,该毒素的合成和分泌受关键基因的调控。镰刀菌几丁质合成酶相关致病基因 *FochsV* 的表达量对菌株致病能力具有关键作用^[18],该基因的缺失几乎会导致菌株致病能力丧失^[19-20];镰刀菌 MFS(Major Facilitator Superfamil, 主要促进因子超家族)转运蛋白相关基因 *FUBT* 可以促进镰刀菌酸(FA)的分泌, *FUBT* 敲除会导致 FA 产量降低^[21]。目前,已有研究报告酚酸类物质可调控镰刀菌细胞壁降解酶和真菌毒素,酚酸类物质可调控镰刀菌的致病因子,如邻苯二甲酸可刺激兰州百合镰刀菌产生 FA,并提升蛋白酶、果胶酶、纤维素酶和淀粉酶等水解酶的活性,进而促进百合枯萎病的发生^[22];肉桂酸、芥子酸等也能刺激尖孢镰刀菌西瓜专化型(*F.oxysporum* f. *sp.niveum*)FA 的产生^[23]。但是,关于肉桂酸对镰刀菌百合专化型菌丝体细胞壁降解酶及 FA 调控相关基因表达影响的研究未见报道。

根据上述研究背景,测定菌落生长指标、产孢量、菌丝体水解酶及抗氧化酶活性,以期探明肉桂酸对镰刀菌数量增殖及侵染能力的影响,同时通过测定镰刀菌酸合成(*FUBT*)相关基因的表达特点,为上述化感作用的调控提供分子生物学证据。本研究目标:(1)确定肉桂酸对尖孢镰刀菌影响的化感浓度范围;(2)在肉桂酸的作用下,尖孢镰刀菌的数量变化是否会影响病害的发生,研究结果最终为阐明肉桂酸介导的尖孢镰刀菌引起的病原性连

作障碍的防治提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试菌种为百合枯萎病病原菌——尖孢镰刀菌,分离纯化保存于甘肃农业大学园艺学院实验室 4℃冰箱中。肉桂酸购自上海麦克林生化科技有限公司,纯度为 99.50%。

1.2 试验设计及方法

1.2.1 试验设计

肉桂酸的浓度设置参考本课题组前期研究结果进行。前期研究发现,在兰州百合 0~9 年的连作系统中,根际土壤中肉桂酸的累积浓度为 0.27~0.42 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[11]。为系统探究肉桂酸对尖孢镰刀菌影响的剂量-效应关系,并模拟长期连作可能导致的酚酸类物质根际富集效应,本研究设置了 4 个浓度梯度。对照(0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$):基础培养基;田间实际低浓度(0.24 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),接近自然连作土壤中的实测值下限;根际富集浓度(2.40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),模拟根系分泌在根际土壤产生的局部高浓度(10 倍于土壤背景值);胁迫预警浓度(24.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),作为探究肉桂酸胁迫极限潜力的处理,用于明确高浓度下病原菌生理响应的临界值。

综上,所选浓度梯度覆盖了从田间实测值到潜在富集阈值,旨在全面揭示肉桂酸调控尖孢镰刀菌生长的浓度效应规律。

本研究以加等体积 dd H₂O 为对照组,加不同浓度肉桂酸为处理组。在配置马铃薯葡萄糖琼脂(PDA)培养基时将肉桂酸浓度设为 0.24、2.40、24.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 分别加入 PDA 培养基中,PDA 培养基于室温凝固后接种等量的尖孢镰刀菌。

1.2.2 试验方法和指标测定

尖孢镰刀菌菌落生长指标测定:将尖孢镰刀菌菌饼($\Phi=5$ mm)接种于不同浓度肉桂酸的 PDA 培养基上,于 28℃下恒温培养 7 d。培养第 3 d 时开始测定菌落的直径,每隔 24 h 测定 1 次。菌落直径采用游标卡尺(宁波旗辰仪器有限公司)测定。

根据所测数据,按照王娜等^[24]的方法计算化感效应指数(RI):

$$RI = 1 - C/T \cdots (T \geq C) \quad (1)$$

$$RI = T/C - 1 \dots (T < C) \quad (2)$$

式中: C 为对照值; T 为处理值。

尖孢镰刀菌孢子数和化感指数的测定: 培养第8 d用血球计数板测量尖孢镰刀菌的孢子数, 孢子数的测定参照王文珠等^[25]的方法。孢子数(个/mL) = (测量所得孢子数/80) × 400 × 10 000 × 稀释倍数。根据所测数据, 计算孢子数化感指数。

称取等质量在处理第3、5、7 d收集的菌丝, 提取酶液用于细胞壁降解酶活性的测定。几丁质酶、纤维素酶、木聚糖酶、果胶酶采用3,5-二硝基水杨酸(DNS)法测定^[26]。

称取等质量在处理第3、5、7 d收集的菌丝, 提取酶液用于抗氧化酶活性的测定。SOD用氮蓝四唑光还原法测定, CAT用碘量法活性测定, POD活性采用愈创木酚法测定^[27-29]。

选择4个关键基因——几丁质合成酶(*Fochs V*)基因、镰刀菌酸合成(*FUBT*)相关基因、过氧化物酶(POD)基因、超氧化物歧化酶(SOD)基因测定基因相对表达量。

DL2000 DNA marker、RNA提取试剂盒、AMV反转录酶、Taq酶、dNTP均采购自TaKaRa公司(Japan)。试验操作按试剂盒说明书进行。以RNA为模板, 反转录获得cDNA, 反转录反应体系(10 μL)为: 5'gDNA Eraser Buffer 2.0 μL, gDNA Eraser 1.0 μL, 总RNA 1.0 μL, RNase Free dH₂O 10.0 μL。

以尖孢镰刀菌cDNA为模板扩增关键基因, q-PCR反应体系为: Taq酶12.5 μL, cDNA模板2.0 μL, 上、下游引物(10 μmol·L⁻¹)各1.0 μL, ddH₂O 25.0 μL。PCR反应条件为: 95 °C, 持续30 s; 39个循环, 变性步骤: 95 °C变性0.5 s。60 °C退火和延伸30 s; 95 °C再次变性0.5 s, 60 °C退火持续0.3 s; 接着是溶解曲线过程: 从65 °C开始到95 °C, 温度每增加0.5 °C, 持续0.5 s。使用1%琼脂糖凝胶电泳检测PCR产物, 胶回收后置于-20 °C冰箱备用。从NCBI中检索关键基因序列, 使用Primer design and other tools在线网站设计引物(表1)。

1.3 数据分析

使用Excel进行数据整理和初步处理, 使用DPS 7.5统计软件进行分析, 利用LSD多重比较法进行差异显著性检测($P < 0.05$)。

表1 尖孢镰刀菌q-PCR引物

Table 1 *Fusarium oxysporum* q-PCR primer list

| 引物名称 | 引物序列(5'-3') |
|-------------------|-----------------------|
| Actin-F | CCGAGGCTCCCATCAACC |
| Actin-R | GGCGAAACCCCTCGTAAATGG |
| SOD-F | GGTCCTCACTTCAACCCTCA |
| SOD-R | AGTCGGTGACAGAGCCCTTA |
| POD-F | TGAAACATCCCACCTTAC |
| POD-R | TATTACCACAACATCCTC |
| <i>Fochs V</i> -F | TCTTTTCCCATCCAAGTGTCT |
| <i>Fochs V</i> -R | GTGATGTTGGTGTTCGGTTGT |
| <i>FUBT</i> -F | GGAGCCTGAAGACAGATTGC |
| <i>FUBT</i> -R | CCGATAATAGGGACGATCCA |

2 结果与分析

2.1 肉桂酸对尖孢镰刀菌生长增殖的影响

2.1.1 肉桂酸对尖孢镰刀菌生长的影响

不同处理下, 第3~7 d尖孢镰刀菌菌落的大小如图1所示。随着肉桂酸浓度的增加, 菌落直径呈先增大后减小的趋势; 肉桂酸浓度为0.24、2.40 mg·L⁻¹时的生长速率均高于对照(肉桂酸浓度为0), 肉桂酸浓度为24.00 mg·L⁻¹时的生长速率均低于对照。这说明肉桂酸浓度在0~2.40 mg·L⁻¹时促进尖孢镰刀菌的生长, 当浓度增至24.00 mg·L⁻¹时抑制尖孢镰刀菌的生长。肉桂酸浓度为0.24、2.40 mg·L⁻¹时尖孢镰刀菌的化感指数均为正值, 肉桂酸浓度为24.00 mg·L⁻¹时尖孢镰刀菌的化感指数均为负值, 且肉桂酸浓度为0.24、2.40 mg·L⁻¹时的化感指数均显著大于浓度为24.00 mg·L⁻¹时的化感指数。这说明肉桂酸浓度为0.24、2.40 mg·L⁻¹时能显著促进尖孢镰刀菌的生长, 肉桂酸浓度为24.00 mg·L⁻¹时显著抑制尖孢镰刀菌的生长。

2.1.2 肉桂酸对尖孢镰刀菌孢子数及化感指数的影响

由于第7 d菌落已经长至培养皿边缘, 故本研究将试验周期定为7 d, 同时对各处理第8 d时尖孢镰刀菌的孢子数进行统计(图2)。肉桂酸浓度为0.24 mg·L⁻¹的处理在试验第8 d的孢子数显著高于其他处理, 24.00 mg·L⁻¹处理的孢子数显著低于其他处理。尖孢镰刀菌在试验第8 d的产孢数再次表明浓度0~2.40 mg·L⁻¹的肉桂酸对尖孢镰刀菌的生

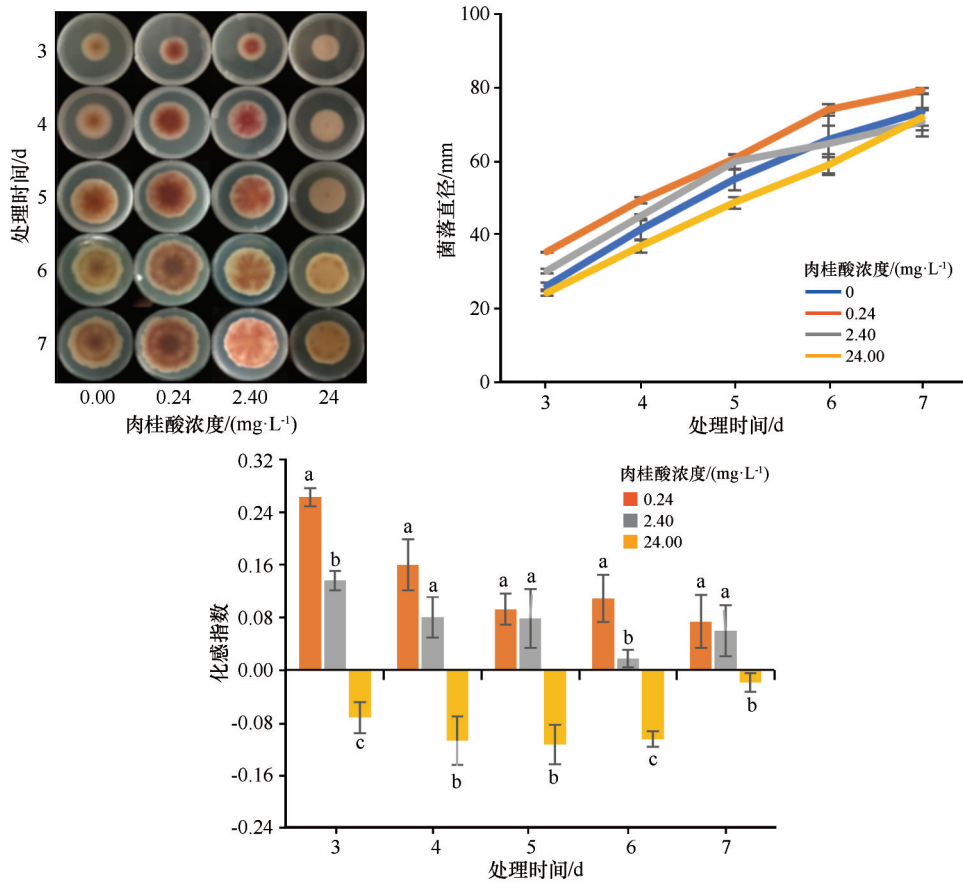
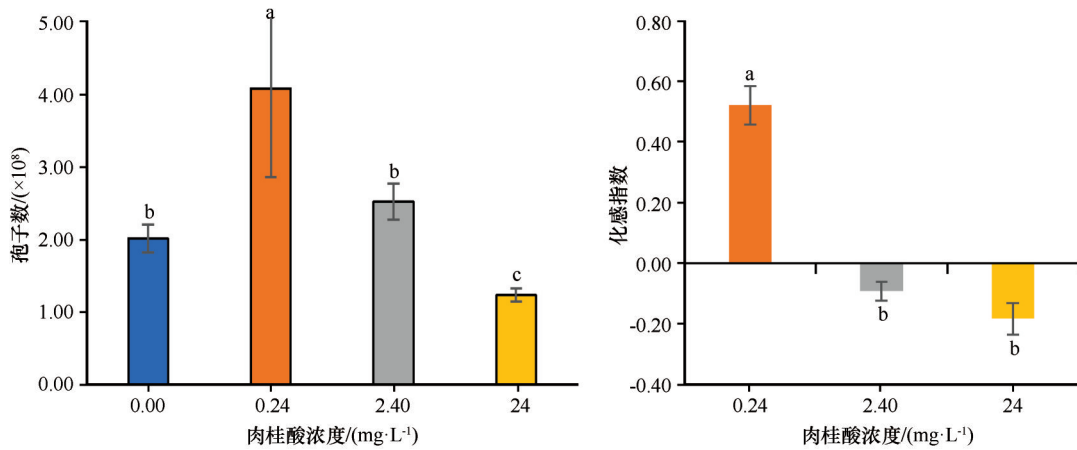


图1 肉桂酸处理下尖孢镰刀菌的菌落直径和化感指数
Fig.1 Colony diagram colony diameter and allelopathic index of *Fusarium oxysporum* under cinnamic acid treatment



选择试验第8天时PDA培养基上的菌丝进行测定

图2 肉桂酸处理下尖孢镰刀菌的孢子数和化感指数

Fig.2 Spore number and allelopathic index of *Fusarium oxysporum* under cinnamic acid treatment Note: Select the hyphae on the PDA medium on the 8th day of the experiment for measurement

长有促进作用,浓度为 24.00 mg·L⁻¹ 的肉桂酸对尖孢镰刀菌的生长有抑制作用。肉桂酸浓度为 0.24 mg·L⁻¹ 时的化感指数为正值,2.40、24.00 mg·L⁻¹ 时化感指数均为负值。

2.2 肉桂酸对尖孢镰刀菌细胞壁降解酶活性的影响

细胞壁降解酶活性整体以 0.24 mg·L⁻¹ 肉桂酸处理组最高,且随培养时间呈现明显动态变化(图3)。

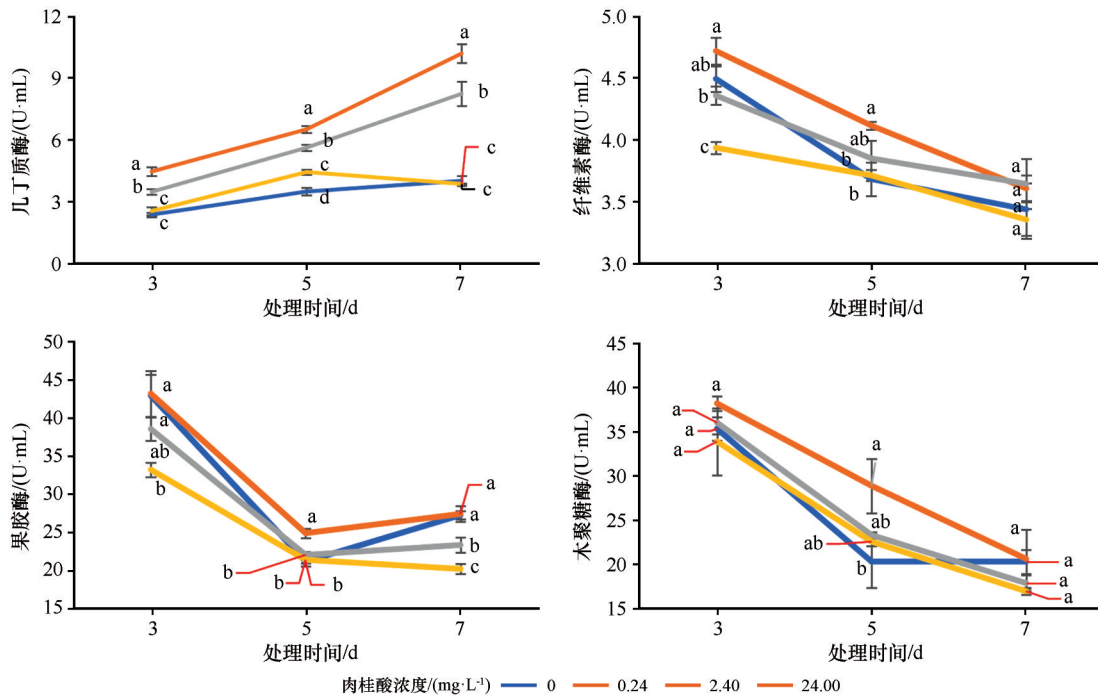


图3 肉桂酸对尖孢镰刀菌细胞壁降解酶活性的影响

Fig.3 Effect of cinnamic acid on the activity of cell wall degrading enzymes of *Fusarium oxysporum*

第3 d病原菌处于生长初期,菌丝量较少,几丁质酶活性 $0.24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 2.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 24.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 纤维素酶与果胶酶活性 $0.24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 2.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 24.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 木聚糖酶活性 $0.24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 2.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 24.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 处理间已出现差异,但整体效应较弱。第5 d菌丝进入快速生长与代谢旺盛期,处理间差异最为显著,一致表现为 $0.24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 2.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 24.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 低浓度肉桂酸对细胞壁降解酶的诱导效应最突出。第7 d菌丝生长趋于稳定, $0.24, 2.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组的几丁质酶、纤维素酶活性仍高于 $0, 24.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组 ($P < 0.05$), 果胶酶与木聚糖酶活性 $0.24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 2.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 24.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

上述时间动态表明,肉桂酸对尖孢镰刀菌细胞壁降解酶的调控具有明显时间依赖性,第5天为化感调控效应最显著的关键时期,因此以该时间点为代表进行重点分析。

2.3 肉桂酸对尖孢镰刀菌抗氧化还原酶活性的影响

试验第3~7 d尖孢镰刀菌SOD、POD、CAT活性随肉桂酸浓度与处理时间同样呈现明显的时间依赖性变化(图4)。SOD活性:第3天 $0.24, 24.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组活性显著高于其他处理;第5 d处理间差异最显著, $0.24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 2.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 24.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} >$

$0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;第7 d各处理组的活性均显著下降。CAT活性:第3 d $0.24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组显著高于其他处理组;第5 d与第7 d差异稳定,均为 $0.24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 2.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 24.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。POD活性在整个培养期间均表现为 $0.24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 2.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 24.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,且第5 d各组间差异最明显。

上述结果表明,低浓度肉桂酸($0.24\sim 2.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)可显著提高尖孢镰刀菌抗氧化酶活性,且这种促进作用在病原菌快速生长阶段(第5 d)表现最为显著,与其生长繁殖及侵染潜力密切相关。

2.4 肉桂酸对尖孢镰刀菌关键基因转录的影响

几丁质合成酶(*Fochs V*)基因和镰刀菌酸合成(*FUBT*)相关基因表达水平如图5所示,*Fochs V*的表达在第5~7 d出现显著性差异,第5 d肉桂酸的施加显著促进了*Fochs V*的表达: $0.24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 2.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 24.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} > 0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,到第7 d肉桂酸的施加反而抑制了*Fochs V*的表达,且肉桂酸浓度越高,抑制的程度越深;*FUBT*的表达在第7 d出现显著性差异: $24.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组显著高于其他处理组,说明随着时间的推移,高浓度肉桂酸促进了尖孢镰刀菌*FUBT*的表达,低浓度则抑制。

抗氧化还原酶基因SOD的表达在第5~7 d出现差异,均表现为 $24.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组显著高于其他

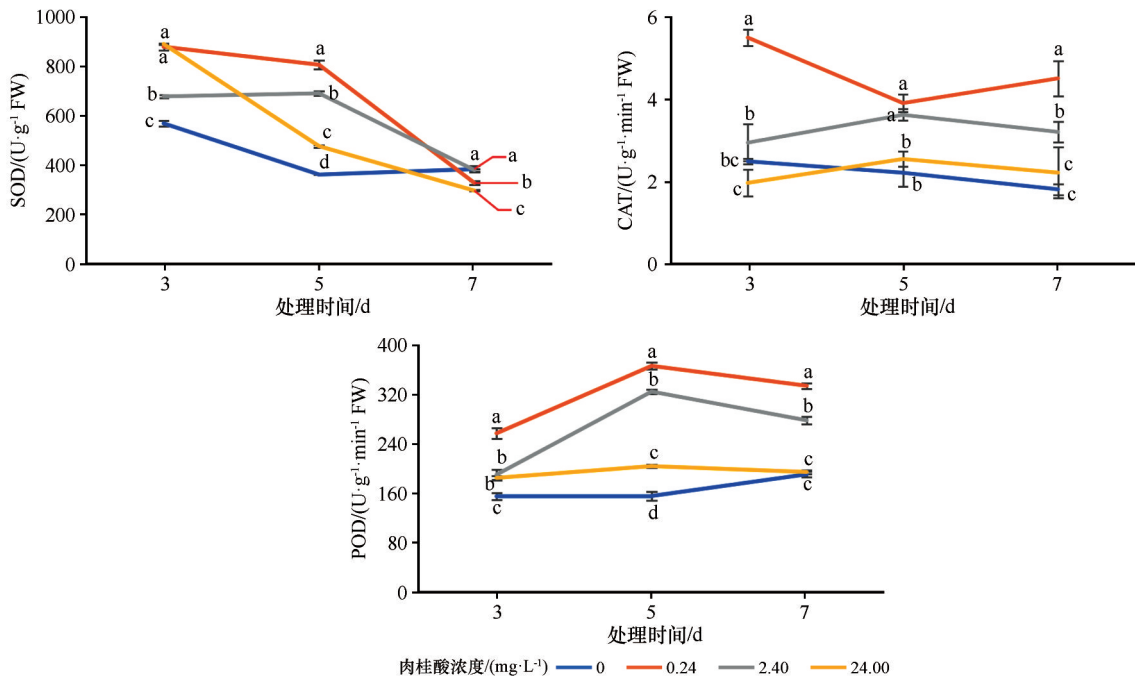


图4 肉桂酸对尖孢镰刀菌氧化还原酶活性的影响

Fig.4 Effect of cinnamic acid on oxidoreductase activities of *Fusarium oxysporum*

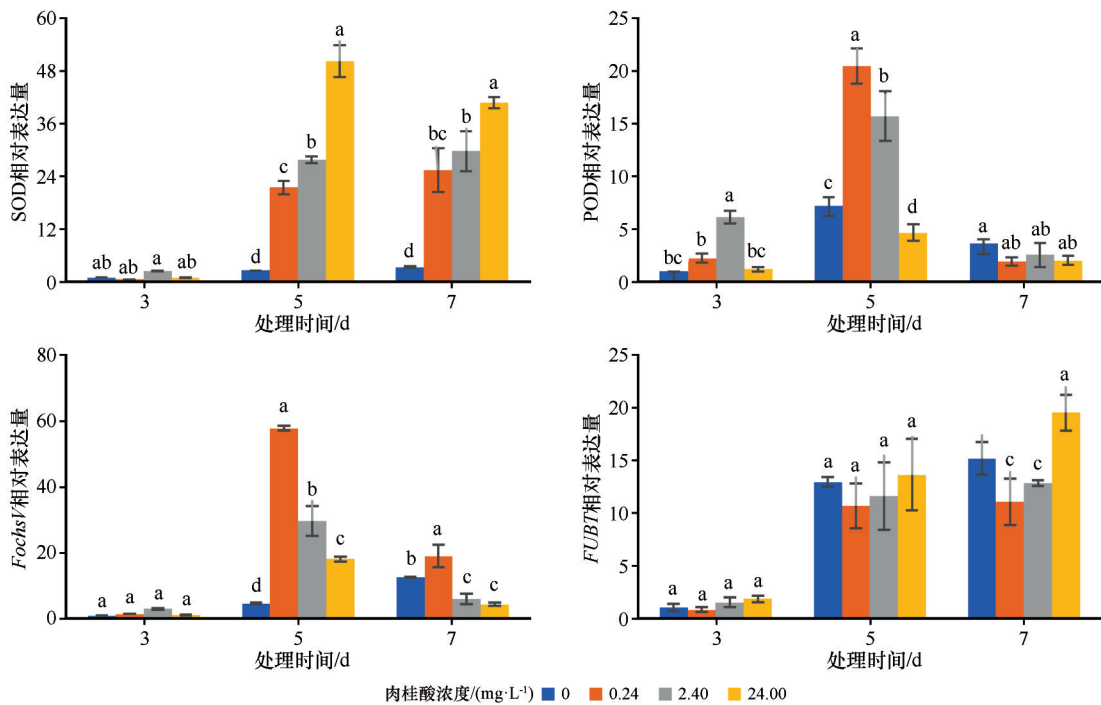


图5 肉桂酸对尖孢镰刀菌关键基因转录的影响

Fig.5 Effect of cinnamic acid on the transcription of key genes in *Fusarium oxysporum*

处理组,且各肉桂酸处理组均显著高于0 mg/L处理组,24.00 mg·L⁻¹>2.40 mg·L⁻¹>0.24 mg·L⁻¹>0 mg·L⁻¹; POD的表达在不同时间和不同浓度处理下具有动态变化:在第3 d,2.40 mg·L⁻¹浓度组的表达显著高于其他处理组;第5 d,各处理组之间差异显著,且

0.24 mg·L⁻¹浓度组表达最高;而到第7 d,各处理组间无显著差异。

3 讨论

肉桂酸对尖孢镰刀菌的增殖表现出低浓度

(0.24、2.40 mg·L⁻¹)促进、高浓度(24.00 mg·L⁻¹)抑制的化感效应。这一浓度依赖性效应在酚酸类物质的生物学研究中具有普遍性。李庆凯等^[30]在花生连作障碍研究中发现,肉桂酸等酚酸类物质在低浓度(15 mg·kg⁻¹干土)时对土壤微生物量、酶活性略有促进,而高浓度(≥30 mg·kg⁻¹干土)则产生显著抑制。本研究设置的浓度梯度(0.24~24.00 mg·L⁻¹)完整覆盖了从促进作用到抑制作用的阈值区间,为揭示肉桂酸的双重生态效应提供了实验依据。

关于“低促高抑”现象的作用机制,推测可能与以下几方面相关:首先,从碳源利用角度,低浓度肉桂酸可作为尖孢镰刀菌生长所需的额外碳源,为其代谢活动提供能量支撑,进而促进其菌落的生长增殖;而高浓度肉桂酸则可能破坏菌丝细胞膜结构完整性,导致细胞内物质渗漏和代谢紊乱,最终抑制生长。孙会军^[31]证实,肉桂酸处理可增加根细胞膜透性,且效应随浓度升高而增强。其次,从氧化应激角度,本研究中抗氧化酶(SOD、POD、CAT)活性及相应基因表达的变化表明,高浓度肉桂酸诱导尖孢镰刀菌产生氧化应激反应,过量活性氧的积累对其核酸、蛋白质等生物大分子造成损伤,从而抑制其生长。类似地,吴凤芝等^[32]在黄瓜上的研究表明,低浓度酚酸可提高SOD活性,高浓度则导致酶活性下降,呈现出与本研究一致的双重效应模式。最后,从解毒机制角度看,病原菌在低浓度肉桂酸下可通过自身的解毒系统正常应对甚至利用该物质,而高浓度时解毒系统超负荷,无法及时清除有害物质,毒性效应显现。

本研究首次系统揭示了肉桂酸对尖孢镰刀菌细胞壁降解酶的调控作用。0.24 mg·L⁻¹处理组中几丁质酶、纤维素酶、木聚糖酶和果胶酶活性均显著高于其他处理,表明低浓度肉桂酸可能通过增强病原菌的细胞壁降解能力,间接提升其对寄主植物的侵染能力。这一发现与对羟基苯甲酸三七黑斑病菌(人参链格孢 *Altemaria panax* Whetzel)的研究结果符合^[33],三七黑斑病菌在2.5~5.0 mmol·L⁻¹对羟基苯甲酸浓度下,其果胶酶、纤维素酶活性显著升高,证实低浓度酚酸类物质对病原真菌水解酶系统的激活效应具有普遍性。从生产实践角度,这一发现提示连作初期根际低浓度酚酸的累积可能是枯萎病暴发的潜在风险因子。

值得关注的是,本研究中,低浓度肉桂酸处理下,尖孢镰刀菌SOD、POD、CAT活性整体高于高浓

度组,而SOD、POD基因表达呈现浓度与时间依赖性动态变化,表明不同浓度肉桂酸可通过调控病原菌抗氧化系统,影响其生长、应激与致病能力。

基因表达层面的分析为上述结论提供了分子证据。高浓度肉桂酸处理后,几丁质合成酶基因 *FochsV* 基因的表达被抑制,与菌株致病力下降的表型一致^[18-20]。然而,镰刀菌酸合成相关基因 *FUBT* 的表达模式出现了意外:第7 d时24.00 mg·L⁻¹处理组表达量显著高于其他处理,与低浓度下的抑制效应形成鲜明对比。推测其原因可能是:高浓度肉桂酸胁迫后期,病原菌启动应激防御机制,上调毒素合成相关基因以应对不利环境;而低浓度下病原菌处于适宜生长状态,毒素合成需求较低。*FUBT* 基因在棉花尖孢镰刀菌中已被证实正调控镰刀菌酸合成^[21],其在百合专化型中的功能及对肉桂酸的响应机制有待深入研究。

肉桂酸作为植物根系分泌的典型酚酸类物质,在连作障碍中具有双重生态效应:一方面,作为自毒物质直接抑制植物生长;另一方面,通过调控病原菌的增殖与侵染能力,间接影响土传病害的发生。本研究通过单因素试验,揭示了肉桂酸对尖孢镰刀菌的直接调控效应及其浓度依赖性规律,为理解百合连作系统中枯萎病爆发的微生态机制提供了新视角。然而,本研究基于离体培养条件,未能完全模拟根际复杂的多物种互作环境。肉桂酸在土壤中与微生物群落、植物根系的多方互作效应,及其通过调控病原菌致病力与自毒作用的协同机制,尚需通过盆栽和大田试验进一步验证。

4 结论

0~24.00 mg·L⁻¹肉桂酸对镰刀菌的生长、产孢量、细胞壁降解酶及关键基因的表达产生了“低促高抑”的化感效应,其中低浓度肉桂酸(0.24 mg·L⁻¹),可以显著促进菌丝的增殖及侵染能力,增加菌株的致病性。根据兰州百合长期连作土壤中(0~9年)肉桂酸含量的积累特点,本研究认为肉桂酸的积累是加重该蔬菜作物枯萎病发生的关键土壤化学调控因子。

参考文献:

- [1] Louws J F, Rivard L C, Kubota C. Grafting fruiting vegetables to manage soilborne pathogens, foliar pathogens, arthropods and weeds[J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 127(2): 127-146.
- [2] 严慧丽, 杨利娟, 裴毅, 等. 兰州百合枯萎病原鉴定及防治

- 药剂筛选[J/OL].分子植物育种,1-16[2024-12-26].
- [3] Shi G Y, Sun H Q, Alejandro C, et al. Soil fungal diversity loss and appearance of specific fungal pathogenic communities associated with the consecutive replant problem (CRP) in Lily [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11:1649.
- [4] 牟晓玲,李潇潇,师桂英,等.兰州百合枯萎病病原菌鉴定及罹病组织超微结构观察[J].植物保护学报,2022,49(04):1111-1118.
- [5] Ye S F, Yu J Q, Peng Y H, et al. Incidence of *Fusarium wilt* in *Cucumis sativus* L. is promoted by cinnamic acid, an autotoxin in root exudates [J]. *Plant and Soil*, 2004, 263(1/2):143-150.
- [6] 董艳,董坤,杨智仙,等.肉桂酸对蚕豆枯萎病发生的影响及间作缓解机制[J].土壤学报,2017,54(2):503-515.
- [7] 李培栋,王兴祥,李奕林,等.连作花生土壤中酚酸类物质的检测及其对花生的化感作用[J].生态学报,2010,30(8):2128-2134.
- [8] 陈金苗,保丽美,刘雨艳,等.三七根际酚酸自毒物质对两种根腐病致病真菌的化感效应[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2024,49(2):91-103.
- [9] 李丽,蒋景龙.西洋参化感自毒作用与连作障碍研究进展[J].分子植物育种,2018,16(13):4436-4443.
- [10] 刘苹,赵海军,唐朝辉,等.连作对不同抗性花生品种根系分泌物和土壤中化感物质含量的影响[J].中国油料作物学报,2015,37(04):467-474.
- [11] 孙鸿强.连作对兰州百合生理特性及土壤环境效应的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2017.
- [12] Han J, Li Y P, Li H, et al. Phenolic acids alleviated consecutive replant problems in lily by regulating its allelopathy on rhizosphere microorganism under chemical fertiliser reduction with microbial agents in conjunction with organic fertiliser application [J]. *Applied Soil Ecology*, 2025, 205:105780-105780.
- [13] Eleonora G K, Alberto R H, Maria T A. Contribution of cell wall degrading enzymes to pathogenesis of *Fusarium graminearum*: a review [J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2009, 49(3):231-241.
- [14] Lemos P, Ruiz-Roldán C, Hera C. Role of the phosphatase Ptc1 in stress responses mediated by CWI and HOG pathways in *Fusarium oxysporum* [J]. *Fungal Genetics and Biology*, 2018, 118:10-20.
- [15] 李英,杜春梅.致病性尖孢镰刀菌毒力因子的研究进展[J].中国农学通报,2021,37(12):92-97.
- [16] Caffall H K, Mohnen D. The structure, function, and biosynthesis of plant cell wall pectic polysaccharides [J]. *Carbohydrate Research*, 2009, 344(14):1879-1900.
- [17] Glass L N, Schmoll M, Cate H D J, et al. Plant cell wall deconstruction by ascomycete fungi [J]. *Annual Review of Microbiology*, 2013, 67(1):477-498.
- [18] Marie-Christine S, Claude P, Annie P, et al. Botrytis cinerea virulence is drastically reduced after disruption of chitin synthase class III gene (Bcchs3a) [J]. *Cellular microbiology*, 2006, 8(8):1310-1321.
- [19] P M M, Antonio P D, G I M R. Class V chitin synthase determines pathogenesis in the vascular wilt fungus *Fusarium oxysporum* and mediates resistance to plant defence compounds [J]. *Molecular microbiology*, 2003, 47(1):257-266.
- [20] Magdalena M U, P M M, G I M R. Role of chitin synthase genes in *Fusarium oxysporum* [J]. *Microbiology*, 2004, 150(10):3175-3187.
- [21] K F C, Liu J G, S L P, et al. FUBT, a putative MFS transporter, promotes secretion of fusaric acid in the cotton pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *vasinfectum* [J]. *Microbiology*, 2015, 161(4):875-883.
- [22] Wu Z J, Yang L, Wang R Y, et al. In vitro study of the growth, development and pathogenicity responses of *Fusarium oxysporum* to phthalic acid, an autotoxin from Lanzhou lily [J]. *World journal of microbiology & biotechnology*, 2015, 31(8):1227-1234.
- [23] Wu Z J, Xie Z K, Yang L, et al. Identification of autotoxins from root exudates of Lanzhou lily (*Lilium davidii* var. *unicolor*) [J]. *Allelopathy Journal*, 2015, 35(1):35-48.
- [24] 王娜,马绍英,马蕾,等.肉桂酸和棕榈酸对豌豆种子萌发和幼苗生长的化感效应[J].植物生理学报,2021,57(8):1657-1667.
- [25] 王文珠,师桂英,苏国礼,等.乌头酸对尖孢镰刀菌百合专化型抑制作用分析[J].西北农业学报,2022,31(2):224-232.
- [26] 赵丽娜,谢焱焱,贺子康,等.荒漠生土壤结皮碳降解菌株的筛选鉴定及特性分析[J].中国沙漠,2025,45(3):185-190.
- [27] 周大梁,石薇,蒋紫薇,等.沟壑集雨下密度和施氮对黄土高原青贮玉米叶片酶活性及水氮利用的影响[J].草业学报,2022,31(8):126-143.
- [28] Farhangi-Abriz S, Torabian S. Antioxidant enzyme and osmotic adjustment changes in bean seedlings as affected by biochar under salt stress [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 137:64-13770.
- [29] Salwa J, Moez J, Férid L, et al. Changes in ascorbate peroxidase, catalase, guaiacol peroxidase and superoxide dismutase activities in common bean (*Phaseolus vulgaris*) nodules under salt stress [J]. *Journal of plant physiology*, 2005, 162(8):929-936.
- [30] 李庆凯,郭峰,唐朝辉,等.三种酚酸类物质在花生连作障碍中的生态效应分析[J].中国油料作物学报,2019,41(1):53-63.
- [31] 孙会军.自毒物质对西瓜根系形态结构及细胞保护酶的影响[D].北京:中国农业大学,2003.
- [32] 吴凤芝,黄彩红,赵凤艳.酚酸类物质对黄瓜幼苗生长及保护酶活性的影响[J].中国农业科学,2002(7):821-825.
- [33] 胡光玉,杨善武,周彬,等.对羟基苯甲酸对三七黑斑病致病性因素的影响研究[J].安徽农业科学,2023,51(13):163-165.

Regulatory mechanism of cinnamic acid on the pathogenicity of Lanzhou lily wilt pathogen

Li Hui, Wang Li, Han Jia, Du Wenke, Guan Fengfeng, Yang Bo, Yang Hongyu, Shi Guiying
(College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: This study aims to investigate the regulatory effects of exogenous cinnamic acid on the proliferation, growth, infectivity and key pathogenic factors of *Fusarium oxysporum*, in order to provide a theoretical foundation for understanding the mechanisms underlying cinnamic acid-mediated consecutive replant problems caused by *F. oxysporum* of Lanzhou lily wilt and for developing control strategies. The in vitro culture method was employed, with cinnamic acid concentration gradients set at 0 mg·L⁻¹, 0.24 mg·L⁻¹, 2.40 mg·L⁻¹, and 24.00 mg·L⁻¹, to analyze the physiological growth indicators related to the proliferation and infection of *F. oxysporum*, as well as the transcriptional expression levels of key pathogenic genes such as *FochsV* and *FUBT*. The results indicated that low concentrations (0.24 mg·L⁻¹, 2.40 mg·L⁻¹) of cinnamic acid promoted the growth and high concentrations (24.00 mg·L⁻¹) of cinnamic acid inhibited the growth of *F. oxysporum*: 0.24 mg·L⁻¹ cinnamic acid significantly promoted colony growth and increased sporulation and markedly enhanced the activities of four cell wall-degrading enzymes (chitinase, cellulase, xylanase and pectinase). The expression of *FochsV* gene showed a trend of promotion at low concentrations and inhibition at high concentrations over time, while the expression of *FUBT* gene displayed difference on the 7th day, showing promotion at high concentrations and inhibition at low concentrations. The overall activity of antioxidant reductase in the fungal cells were promoted at low concentrations and inhibited at high concentrations. In contrast, at 24.00 mg·L⁻¹ cinnamic acid significantly inhibited fungal growth, enzyme activities, and the expression of key pathogenic genes. Based on the accumulation characteristics of cinnamic acid in the soil under long-term consecutive replant of Lanzhou lily (0–9 years), it is inferred that the accumulation of cinnamic acid is a key soil chemical regulatory factor exacerbating the incidence of wilt in this vegetable crop.

Key words: *Fusarium oxysporum*; cinnamic acid; antioxidant enzyme; cell wall degrading enzyme; gene expression analysis