

木霉 FJ059 非挥发性代谢产物拮抗油茶白绢病菌的潜在抑菌成分筛选与活性分析

蒲景洁¹, 胡言佟¹, 刘 铜¹, 王伟伟^{1,2*}

1. 海南大学热带农林学院（农业农村学院、乡村振兴学院），海南海口 570228；2. 海南省热带特色花木资源生物学重点实验室，海南海口 570228

摘 要：油茶（*Camellia oleifera*）是中国南方地区重要的木本油料作物，油茶抗病能力普遍较弱，受多种病害侵袭，油茶白绢病为影响油茶生产的主要病害之一。本研究对木霉 FJ059 固体发酵产物中对油茶白绢病菌具有拮抗作用的非挥发性代谢产物及其潜在抑菌活性成分进行了系统分析与筛选。采用生长速率法比较不同固体发酵培养基下木霉 FJ059 非挥发性代谢产物的抑菌率，结果显示大米为培养基质的代谢产物的抑菌率最高，达到 99.61%；使用不同提取溶剂对大米固体发酵物进行提取，乙酸乙酯提取物的抑菌活性显著高于相同浓度的水相提取物，当浓度为 500 $\mu\text{g/mL}$ 时抑制率分别为 98.84% 和 44.18%，表明不同的溶剂对有效抑菌活性成分的提取有重要影响。通过 LC-MS 分析鉴定，发现乙酸乙酯提取物中，努特卡酮、石竹素、法呢醇、吡咯-2-羧酸和阿魏酸等化合物对油茶白绢病菌具有显著抑制作用，其中 200 $\mu\text{g/mL}$ 努特卡酮和 300 $\mu\text{g/mL}$ 石竹素的抑菌率达到 100%，浓度 400 $\mu\text{g/mL}$ 的法呢醇、吡咯-2-羧酸和阿魏酸抑菌率分别为 78.30%、69.38%、69.77%。结果表明，木霉 FJ059 固体发酵乙酸乙酯提取物中检测到的中等极性或疏水性的小分子化合物与抑菌活性密切相关，提示乙酸乙酯提取物可能富集部分具有抑菌潜力的化合物，为油茶白绢病开发新型高效生防菌剂提供新的理论依据和活性物质资源。

关键词：木霉；固体发酵；非挥发性代谢产物；油茶；白绢病；生物防治

中图分类号：S476 文献标志码：A

Component Analysis and Potential Antifungal Active Compound Screening of Non-volatile Metabolites of *Trichoderma* FJ059 Against Southern Blight in *Camellia oleifera*

PU Jingjie¹, HU Yantong¹, LIU Tong¹, WANG Weiwei^{1,2*}

1. School of Tropical Agriculture and Forestry (School of Agricultural and Rural, School of Rural Revitalization), Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Key Laboratory of Germplasm Resources of Tropical Special Ornamental Plants of Hainan Province, Haikou, Hainan 570228, China

Abstract: *Camellia oleifera* is an important woody oil crop in southern China. Due to its generally weak disease resistance, it is susceptible to various diseases, among which southern stem blight is one of the major threats to its production. This study systematically screened and analyzed the non-volatile metabolites produced by *Trichoderma semiorbis* FJ059 with antagonistic activity against *Sclerotium rolfsii*, the causal agent of southern blight in *C. oleifera*, and identified the potential antifungal components. The antagonistic effects of non-volatile metabolites produced in different solid-state fermentation media were compared using the growth rate method of mycelia. Results indicated that rice was the optimal substrate, yielding the highest antagonistic effect (99.61%). The solid-state fermentation products in rice media were extracted using different solvents. The ethyl acetate extract exhibited significantly higher inhibition activity than the

收稿日期 2025-08-05；接受日期 2025-08-28

基金项目 国家自然科学基金地区科学基金项目（No. 32560674）。

作者简介 蒲景洁（2001—），女，硕士研究生，研究方向：油茶白绢病生物防治。*通信作者（Corresponding author）：王伟伟（WANG Weiwei），E-mail: wvivi2@163.com。

aqueous extract. When the concentration was 500 $\mu\text{g/mL}$, the inhibition rates was 98.84% and 44.18%, respectively, indicating that the solvent selection play a vital role in the extraction of active compounds. LC-MS analysis identified several key active substances in the ethyl acetate extract, including nootkatone, caryophyllene oxide, farnesol, pyrrole-2-carboxylic acid, and trans-ferulic acid, all of which demonstrated significant antagonistic effects against *S. rolfsii*. Notably, the inhibition rate of 200 $\mu\text{g/mL}$ nootkatone and 300 $\mu\text{g/mL}$ caryophyllene oxide were both 100%, while 400 $\mu\text{g/mL}$ farnesol, 400 $\mu\text{g/mL}$ pyrrole-2-carboxylic acid, and 400 $\mu\text{g/mL}$ trans-ferulic acid were 78.30%, 69.38% and 69.77%, respectively. The results indicated that medium-polarity or hydrophobic small molecules in the solid-state fermentation products of *T. semiorbis* FJ059 were potential antifungal components. The results indicated that the medium-polarity or hydrophobic small molecules detected in the ethyl acetate extract of solid-state fermented *T. semiorbis* FJ059 were closely associated with antifungal activity, suggesting that the ethyl acetate extract may enrich certain compounds with antifungal potential. The findings would provide new theoretical support and bioactive compound resources for the development of novel and efficient biocontrol agents against southern blight in *C. oleifera*.

Keywords: *Trichoderma* spp.; solid-state fermentation; non-volatile metabolites; *Camellia oleifera*; southern blight; biological control

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.12.016

油茶白绢病是一种由齐整小核菌 (*Sclerotium rolfsii* Sacc.) 引起的真菌性病害^[1], 主要危害苗木的茎基部或根颈部^[2], 该真菌性病害在我国南方油茶种植区的发病率较高, 染病苗木平均死亡率为 22.6%, 严重时苗木死亡率最高可达 50.0%^[3]。目前化学农药仍是有效的病害防治措施, 但长此以往导致环境质量恶化、病原菌抗药性增强以及农药残留超标等问题^[4]。生物防治优先选用天然微生物和生物制剂, 有效遏制病原菌的扩散与危害, 是当前农业绿色发展的重要方向之一^[5]。

木霉菌是生物防治常用的生防菌, 广泛存在于土壤和植物根际, 能够有效地定殖于植物根部及其周围组织, 木霉菌能够产生多种具有抑菌活性的非挥发性代谢产物, 如聚酮类、生物碱、萜类化合物等, 有效抵抗病原菌^[6], 并通过竞争、重寄生等作用, 直接抑制病原菌的生长, 还可以诱导植物的系统性抗病^[7]。*T. semiorbis* FJ059 是南瓜根际分离获得的生防菌株, 对荔枝霜霉病原菌表现出较强的拮抗活性^[8]。长枝木霉菌株 T6 发酵液的代谢产物, 能显著抑制立枯丝核菌的生长, 抑菌效果随浓度增加而增强, 在 600 $\mu\text{g/mL}$ 浓度下抑制率达 71.92%^[9]。

目前大量关于木霉拮抗真菌活性的研究, 多停留在菌株层面的拮抗评价, 但对于其中非挥发性代谢物的具体成分分析与活性评估较少。本研究以油茶白绢病为对象, 对拮抗木霉 FJ059 非挥发性代谢产物进行研究。通过固体发酵培养木霉 FJ059, 采用液相色谱-质谱联用技术 (LC-MS) 系统分析其非挥发性代谢产物的组成, 对代谢产

物进行了潜在抑菌活性成分的筛选与评估, 结果发现部分代谢产物对白绢病菌具有强拮抗作用, 揭示木霉 FJ059 在油茶白绢病生物防治中的应用潜力, 为复合生防菌剂的开发奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试验菌株 木霉 (*T. semiorbis*) 菌株 FJ059 为前期分离、保存, 油茶白绢病菌 (*S. rolfsii* Sacc.) 由海南省绿色农用生物制剂工程研究中心提供。木霉 FJ059、油茶白绢病菌于 28 $^{\circ}\text{C}$ 恒温培养, 木霉 FJ059 用 25% 液体甘油保存于 -20 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中, 油茶白绢病菌使用斜面试管保存于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱内。

1.1.2 供试培养基 固体发酵所需培养基质为大米、燕麦粉、小麦秸秆、玉米秸秆、玉米粉、麦麸、稻壳和黄豆粉, 均购自农贸市场, 于室温储藏备用。

PDA 培养基: 取去皮马铃薯 200 g, 加入 1 mL 去离子水, 煮 30 min, 过滤出浸出液, 加入葡萄糖 20 g, 琼脂粉 20 g, 用去离子水定容至 1 L 后灭菌。

PD 培养基: 取去皮马铃薯 200 g, 加入 1 mL 去离子水, 煮 30 min, 过滤出浸出液, 加入葡萄糖 20 g, 用去离子水定容至 1 L 后灭菌。

供试固体发酵培养基: 分别取大米、燕麦粉、小麦秸秆、玉米秸秆、玉米粉、麦麸、稻壳和黄豆粉培养基质 15 g 于 240 mL 玻璃发酵瓶, 加入 10 mL 去离子水搅拌后灭菌。

1.1.3 主要试剂 乙酸乙酯、乙醇均购自西陇科学股份有限公司, 阿魏酸、4-羟基苯甲酸、3,4-

二羟基苯甲醛、秦皮乙素、青蒿素、石竹素、小檗碱、法呢醇、羟基酪醇、烟酰胺、吡咯-2-羧酸和 2-(4-羟基苯基)乙醇均购自上海麦克林生化科技有限公司, 努特卡酮和甜菜碱均购自罗恩试剂公司, 咖啡酸购自上海阿达玛斯试剂有限公司。所有化学药品和溶剂均为分析纯或色谱级。

1.2 方法

1.2.1 不同固体发酵培养基下木霉 FJ059 的非挥发性代谢产物抑菌率测定 将木霉 FJ059 菌丝接种于 PDA 培养基中, 28 °C 恒温培养 3 d, 于菌丝边缘取直径为 5 mm 菌饼, 置于 100 mL 灭菌 PDA 培养基中, 28 °C、180 r/min 震荡培养 7 d, 过滤菌丝, 8000×g 离心 10 min, 用无菌去离子水重悬孢子, 并将孢子浓度调整为 10^7 个/mL, 保存于 4 °C 备用。分别称取供试固体培养基 15 g, 于 240 mL 玻璃发酵瓶中, 分别加入 10 mL 无菌去离子水搅拌均匀, 每瓶接种 1 mL 孢子浓度为 10^7 个/mL 的孢子悬浮液, 以不接种木霉 FJ059 的固体发酵培养基为空白对照 (CK), 置于 28 °C 恒温培养箱发酵 7 d, 测定不同固体发酵培养基下的非挥发性代谢产物抑菌率, 每个处理组设置 3 个重复。

测定非挥发性代谢产物抑菌率方法: 利用可透过小分子代谢产物、但阻隔菌丝生长的玻璃纸作为介质, 将玻璃纸剪裁成直径约 10 cm 圆形, 灭菌 30 min。玻璃纸平铺于 PDA 平板表面, 称取每个固体发酵物 5 g, 平铺在垫有玻璃纸的 PDA 上, 置于 28 °C 恒温培养箱 2 d, 用镊子将固体发酵物以及玻璃纸移除, 制成含木霉 FJ059 固体发酵非挥发性代谢产物培养基。

木霉 FJ059 在 28 °C 恒温培养 3 d 后打取菌饼, 置于垫有玻璃纸的 PDA 上, 置于 28 °C 恒温培养箱 2 d, 移除木霉菌饼以及玻璃纸, 制成含不经发酵处理的木霉 FJ059 非挥发性代谢产物培养基。

把 5 mm 的油茶白绢病菌菌饼长满菌丝的一面贴在含木霉 FJ059 固体发酵非挥发性代谢产物培养基以及不经发酵处理的木霉 FJ059 非挥发性代谢产物培养基的中心处, 在 28 °C 恒温培养箱内倒置培养。以不接种木霉 FJ059 的固体发酵基为空白对照 (CK), 每个处理重复 3 次。当菌丝在 PDA 上生长至铺满平板时, 采用十字交叉法, 使用游标卡尺分别沿菌落中心的两条垂直轴线, 测定菌丝生长至最外缘的直径。根据下述公式计算菌丝生长的抑制率 (I): $I = (D_C - D_T) / D_C \times 100\%$, 其中, I 为菌丝生长抑制率 (%); D_C 为对照菌丝直

径 (cm), D_T 为处理菌丝直径 (cm)。

1.2.2 不同提取溶剂对木霉 FJ059 大米固体发酵的代谢产物抑菌活性的影响 用无菌去离子水提取木霉 FJ059 大米固体发酵物中的水溶性代谢产物。木霉 FJ059 接种于大米固体发酵培养基中, 28 °C 恒温发酵 7 d, 称取 15 g 发酵物与预冷后的无菌去离子水按照 1 : 5 的比例混合, 置于超声波清洗仪中, 频率 40 kHz, 温度控制在 25 °C, 超声时间为 1 h, 使用无菌纱布过滤, 重复 2 次, 8000×g, 离心 10 min, 收集水相提取液, 用 0.22 μm 滤膜进行过滤, 收集无菌水相提取液, 装入旋转蒸发仪中浓缩, 得到水相提取物。称取 0.1 g 浓缩干燥后水相提取物, 用无菌去离子水进行溶解稀释后与约 55 °C 的熔融状态固体 PDA 培养基混合, 倒平板待其凝固, 使最终浓度分别为 50、100、200、300、400、500 μg/mL, 以加入同体积的无菌去离子水为空白对照 (CK), 每个处理重复 3 次, 28 °C 恒温培养箱倒置培养 3 d。

用乙酸乙酯提取木霉 FJ059 在大米固体发酵过程中产生的脂溶性或中性代谢产物, 方法同上, 得到有机相提取物。分别称取 0.1 g 浓缩干燥后乙酸乙酯提取物溶于 2.5 mL 无水乙醇中, 配成浓度为 40 000 μg/mL 的母液, 用无菌去离子水进行稀释后与 PDA 培养基混合, 并使最终浓度分别为 50、100、200、300、400、500 μg/mL, 将油茶白绢病菌接种至含代谢提取物培养基中, 在 28 °C 恒温培养 3 d, 以未加代谢提取物的 PDA 培养基作为空白对照 (CK), 加入与试验组相同浓度的乙醇为阴性对照 (NC), 每个处理重复 3 次。根据 1.2.1 的方法计算抑菌率。使用 SPSS 26.0 软件, 基于 Logit 回归 (logistic regression) 模型对不同化合物的浓度-抑菌率数据进行拟合, 计算出毒力回归方程, 以及半最大效应浓度 (EC_{50}) 和 90% 有效浓度 (EC_{90})。

1.2.3 木霉 FJ059 大米固体发酵乙酸乙酯提取物 LC-MS 非靶向代谢组学分析 将 1.2.2 得到的乙酸乙酯提取物进行 LC-MS 非靶向代谢组学分析, 得到乙酸乙酯提取物的化合物成分数据。由北京诺禾致源科技股份有限公司完成分析, 使用 R Studio 软件对代谢组学数据进行统计分析。

1.2.4 木霉 FJ059 代谢物成分对油茶白绢病菌的抑制作用 根据 1.2.3 数据分析后得到的结果, 购入标准品努特卡酮、阿魏酸、4-羟基苯甲酸、3,4-二羟基苯甲醛、秦皮乙素、青蒿素、石竹素、小檗碱、法呢醇、羟基酪醇、烟酰胺、吡咯-2-羧酸、

2-(4-羟苯基)乙醇、甜菜碱和咖啡酸。用无水乙醇将上述化合物溶解，稀释倒平板，使化合物终浓度分别为 25、50、100、200、300、400 $\mu\text{g/mL}$ 。将油茶白绢病菌接种至含不同浓度化合物的培养基中，在 28 $^{\circ}\text{C}$ 恒温培养箱内倒置培养 3 d，以不含化合物的 PDA 培养基作为空白对照 (CK)，以加入与试验组相同浓度的无水乙醇为阴性对照 (NC)，每个处理重复 3 次。根据 1.2.1 的方法计算抑菌率。采用 SPSS 26.0 软件对数据进行回归分析，得到 EC_{50} 和 EC_{90} 。

1.3 数据处理

使用软件 IBM SPSS Statistics 26.0 软件和 GraphPad Prism 8.0.2 软件对数据进行单因素方差分析，采用 Duncan 多重范围检验 ($P < 0.05$) 进行差异性分析，使用 R Studio 软件对代谢组学数据进行统计分析。

2 结果与分析

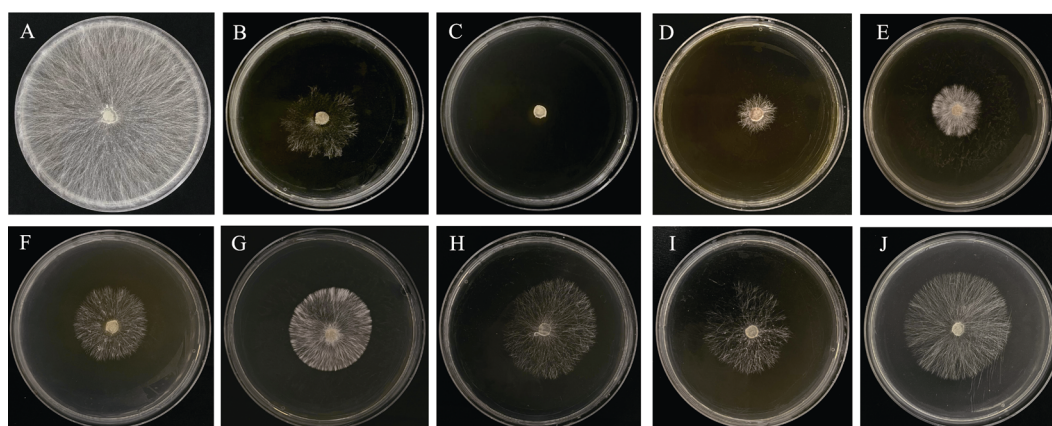
2.1 木霉 FJ059 不同固体发酵培养基下的非挥发性代谢产物抑菌率测定

木霉 FJ059 在所有供试固体培养基中发酵 7 d 后，在大米固体培养基发酵后产生的非挥发性代谢产物的抑菌效果最为显著 (图 1)，抑菌率高达 99.61%，其次是燕麦粉和麦麸，抑菌率分别为 82.62% 和 68.33%，小麦秸秆抑菌率为 60.99%，未经发酵的木霉 FJ059 产生的非挥发性代谢产物抑菌率为 56.74%，而经玉米粉、黄豆粉、玉米秸秆等固体发酵培养基的抑菌率均低于未经发酵的木霉 FJ059 产生非挥发性代谢产物的抑菌率 (表

1)。结果表明，木霉 FJ059 在大米固体培养基发酵过程中能够产生更具有抑菌效果的非挥发性代谢物，增强了对油茶白绢病菌的拮抗能力，因此选择大米固体培养基进行下一步非挥发性代谢产物的分析。

2.2 木霉 FJ059 固体发酵的不同提取方法对代谢产物抑菌活性的影响

木霉 FJ059 大米固体发酵水相提取物对油茶白绢病菌的抑菌活性整体较低 (图 2)，50~400 $\mu\text{g/mL}$ 时抑菌率均低于 22.00%，500 $\mu\text{g/mL}$ 时为 44.18%，仍未超过 50.00% (表 2)。说明水相提取物虽含潜在抑菌成分，但效果有限，难以有效抑制白绢病菌生长。在乙酸乙酯提取物浓度升高的过程中，抑菌率呈显著上升趋势 (图 3)。在 100 $\mu\text{g/mL}$ 浓度下，抑菌率达到 15.89%。当浓度提高至 200 $\mu\text{g/mL}$ 后，抑菌率上升至 53.87%。浓度达到 300 $\mu\text{g/mL}$ 时，抑菌率已达 72.48%，而在 400 $\mu\text{g/mL}$ 和 500 $\mu\text{g/mL}$ 时，抑菌率分别高达 86.04% 和 98.84% (表 3)，在同浓度下乙酸乙酯提取物比水相提取物抑菌活性更强。通过 Logit 回归分析得到乙酸乙酯提取物毒力回归方程 $y = 6.8211x - 15.6296$ ($r^2 = 0.881$)，其 $\text{EC}_{50} = 195.593$ $\mu\text{g/mL}$ ， $\text{EC}_{90} = 410.652$ $\mu\text{g/mL}$ 。水相提取物毒力回归方程为 $y = 1.2568x - 4.6044$ ($r^2 = 0.928$)，其 $\text{EC}_{50} = 4609.079$ $\mu\text{g/mL}$ ， $\text{EC}_{90} = 258\ 158.446$ $\mu\text{g/mL}$ ，其中 y 代表响应率的 Logit 变换值， x 代表对数剂量。结果表明，有机溶剂乙酸乙酯相较于水相溶剂去离子水，乙酸乙酯对木霉 FJ059 非挥发性代谢产物的提取效率更高，能富集更多潜在抑菌活性成



A: CK; B: 未经发酵的木霉 FJ059; C: 大米; D: 燕麦粉; E: 麦麸; F: 小麦秸秆; G: 黄豆粉; H: 玉米秸秆; I: 稻壳; J: 玉米粉。
A: CK; B: Unfermented *Trichoderma* FJ059; C: Rice; D: Oat flour; E: Wheat bran; F: Wheat straw; G: Soybean flour; H: Corn straw; I: Rice husk; J: Corn flour.

图 1 不同固体发酵培养基下木霉 FJ059 的非挥发性代谢产物抑菌试验

Fig. 1 Antifungal activity assay of non-volatile metabolites from *Trichoderma* FJ059 under different solid-state fermentation media

表 1 不同固体发酵培养基下木霉 FJ059 的非挥发性代谢产物抑菌率

Tab. 1 Inhibition rates of non-volatile metabolites from *Trichoderma* FJ059 under different solid-state fermentation media

培养基 Medium	菌落直径 Colony diameter/cm	抑菌率 Inhibition rate/%	培养基 Medium	菌落直径 Colony diameter/cm	抑菌率 Inhibition rate/%
CK	8.57±0.03		小麦秸秆	3.37±0.07 ^d	60.99±0.77 ^d
未经发酵的木霉 FJ059	3.73±0.03 ^{de}	56.74±0.39 ^{de}	黄豆粉	4.10±0.06 ^e	52.49±0.67 ^e
大米	0.03±0.03 ^a	99.61±0.39 ^a	玉米秸秆	4.63±0.18 ^{ef}	46.31±2.15 ^{ef}
燕麦粉	1.50±0.06 ^b	82.62±0.67 ^b	稻壳	4.80±0.15 ^f	44.38±1.77 ^f
麦麸	2.73±0.18 ^c	68.33±2.15 ^c	玉米粉	4.93±0.17 ^f	42.84±1.93 ^f

注：不同小写字母表示差异显著（*P*<0.05）。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference (*P*<0.05).

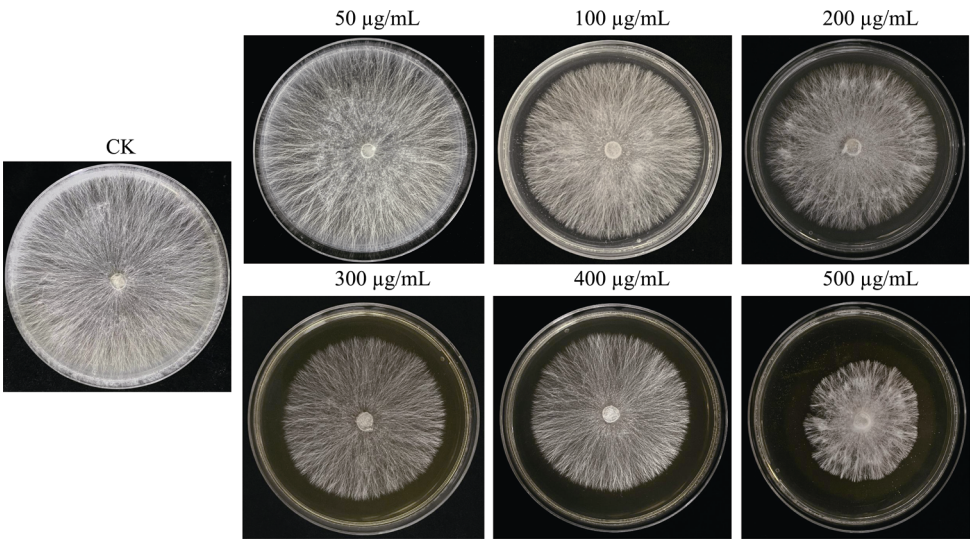


图 2 木霉 FJ059 大米固体发酵水相提取物对白绢病菌的抑制作用

Fig. 2 Inhibitory effect of aqueous extracts from rice solid-state fermentation of *Trichoderma* FJ059 against *S. rolfsii*

表 2 木霉 FJ059 大米固体发酵水相提取物对白绢病菌的抑菌率

Tab. 2 Inhibition rate of aqueous extracts from rice solid-state fermentation of *Trichoderma* FJ059 against *S. rolfsii*

浓度 Concentration (µg·mL ⁻¹)	菌落直径 Colony diameter/cm	抑菌率 Inhibition rate/%	浓度 Concentration (µg·mL ⁻¹)	菌落直径 Colony diameter/cm	抑菌率 Inhibition rate/%
CK	8.60±0.00		300	6.90±0.13 ^b	19.38±1.15 ^b
50	8.60±0.00 ^c	0.00±0.00 ^c	400	6.74±0.03 ^b	21.70±0.39 ^b
100	7.70±0.03 ^c	10.85±0.39 ^c	500	4.80±0.06 ^a	44.18±0.67 ^a
200	7.50±0.15 ^c	12.78±1.78 ^c			

注：不同小写字母表示差异显著（*P*<0.05）。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference (*P*<0.05).

分，对油茶白绢病菌有明显的抑制效果。由此推测木霉 FJ059 固体发酵后的潜在抑菌活性成分可能为中等极性或疏水性的小分子化合物

2.3 木霉 FJ059 大米固体发酵乙酸乙酯提取物 LC-MS 非靶向代谢组学分析

采用 LC-MS 非靶向代谢组学技术对木霉 FJ059 乙酸乙酯提取物进行分析，经数据库比对后共鉴定出 3234 种物质。依据代谢物的化学特性，对鉴定结果按一级（super class）、二级（class）、三级（sub

class）分别进行分类，分类结果显示，一级分类共涉及 17 类物质，主要包括：脂质及类脂分子、苯丙素和类聚酮类、生物碱及有机酸等。二级分类物质共 216 类，三级分类物质共 315 类。代谢物一级分类在负离子模式下，脂类化合物占相对百分含量的 25.95%，有机杂环化合物占相对百分含量的 16.17%，在正离子模式下，最多的是有机杂环化合物，占相对百分含量的 23.96%，有机酸和脂类化合物分别占相对百分含量的 21.21%和 17.12%（图 4）。

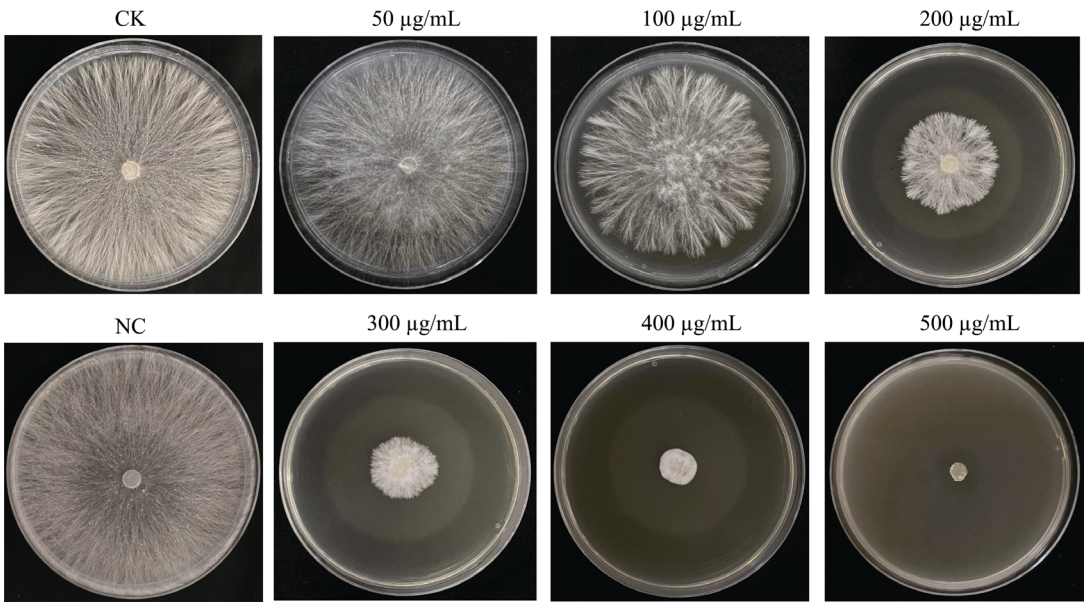


图 3 木霉 FJ059 大米固体发酵乙酸乙酯提取物对油茶白绢病菌的抑制作用

Fig. 3 Inhibitory effect of ethyl acetate extracts from rice solid-state fermentation of *Trichoderma* FJ059 against *S. rolfsii*

表 3 木霉 FJ059 大米固体发酵乙酸乙酯提取物对油茶白绢病菌的抑菌率

Tab. 3 Inhibition rate of ethyl acetate extracts from rice solid-state fermentation of *Trichoderma* FJ059 against *S. rolfsii*

浓度 Concentration/ ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	菌落直径 Colony diameter/cm	抑菌率 Inhibition rate/%
CK	8.60±0.00	
NC	8.60±0.00	
50	8.60±0.00 ^f	0.00±0.00 ^f
100	7.23±0.09 ^e	15.89±1.02 ^e
200	3.97±0.07 ^d	53.87±0.83 ^d
300	2.37±0.07 ^c	72.48±0.76 ^c
400	1.20±0.06 ^b	86.04±0.69 ^b
500	0.10±0.10 ^a	98.84±1.44 ^a

注：不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).

根据定性打分值 (score) ≥ 0.8 、鉴定等级 (level) ≥ 1 以及相对物质丰度值 $\geq 100\ 000$ 等为指标筛选标准,结合文献资料和化合物功能检索,选取 15 种具有潜在抑菌活性的物质为石竹素、努特卡酮、法呢醇、吡咯-2-羧酸、阿魏酸、2-(4-羟苯基)乙醇、4-羟基苯甲酸、烟酰胺、咖啡酸、甜菜碱、小檗碱、3,4-二羟基苯甲醛、秦皮乙素、青蒿素和羟基酪醇 (表 4)。

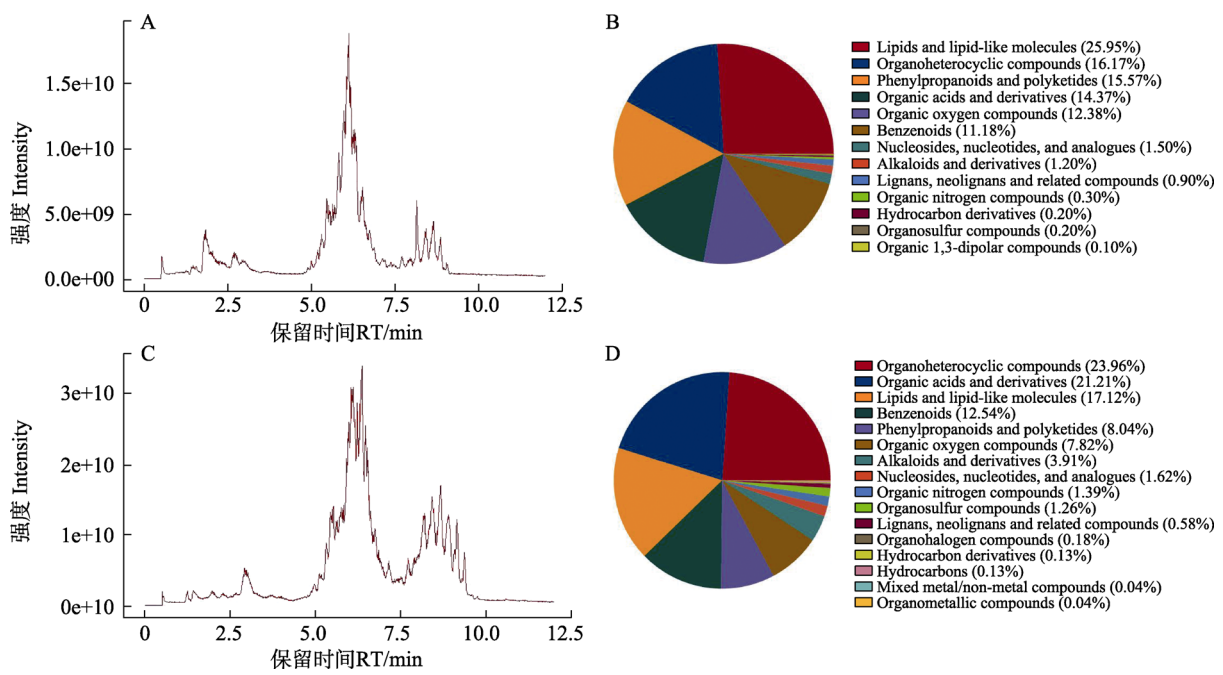
2.4 木霉 FJ059 的非挥发性代谢产物标准品对油茶白绢病菌的抑制作用

木霉 FJ059 乙酸乙酯提取物及 LC-MS 筛选的 15

种具有潜在抑菌活性化合物 (浓度为 400 $\mu\text{g}/\text{mL}$) 对油茶白绢病菌的抑菌作用如图 5 所示。石竹素和努特卡酮对白绢病菌菌丝生长的抑菌率达到 100.00%。乙酸乙酯提取物的抑菌率为 86.04%,远低于 CK。法呢醇、吡咯-2-羧酸和阿魏酸同表现出较强的抑菌活性,抑菌率分别为 80.19%、69.34%、64.73%。其余化合物的抑菌效果较弱,2-(4-羟苯基)乙醇、4-羟基苯甲酸、烟酰胺、咖啡酸、3,4-二羟基苯甲醛、甜菜碱和小檗碱等,抑菌率均低于 35.00% (表 5)。

进一步研究拮抗化合物的抑菌活性,对在 400 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 浓度下抑菌率大于 60%的拮抗化合物 (石竹素、努特卡酮、法呢醇、吡咯-2-羧酸、阿魏酸) 进行不同浓度梯度的抗菌活性测定 (图 6),化合物梯度浓度为 400、300、200、100、50、25 $\mu\text{g}/\text{mL}$,对数据进行基于 Logit 回归分析得到各个化合物的毒力回归方程以及 EC_{50} 和 EC_{90} (表 6)。

在 25 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时,法呢醇的平均抑菌率为 11.63%,为所有化合物中最高,努特卡酮、石竹素和阿魏酸的抑菌率分别为 8.14%、1.94%和 3.49%,其余化合物无明显抑菌效果。当浓度升至 50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时,努特卡酮和石竹素抑菌率分别上升至 16.67%和 13.18%,法呢醇的抑菌率提升至 14.34%,阿魏酸的抑菌率为 11.63%,吡咯-2-羧酸抑菌率仅为 1.16%,乙酸乙酯提取物仍无明显抑菌效果。



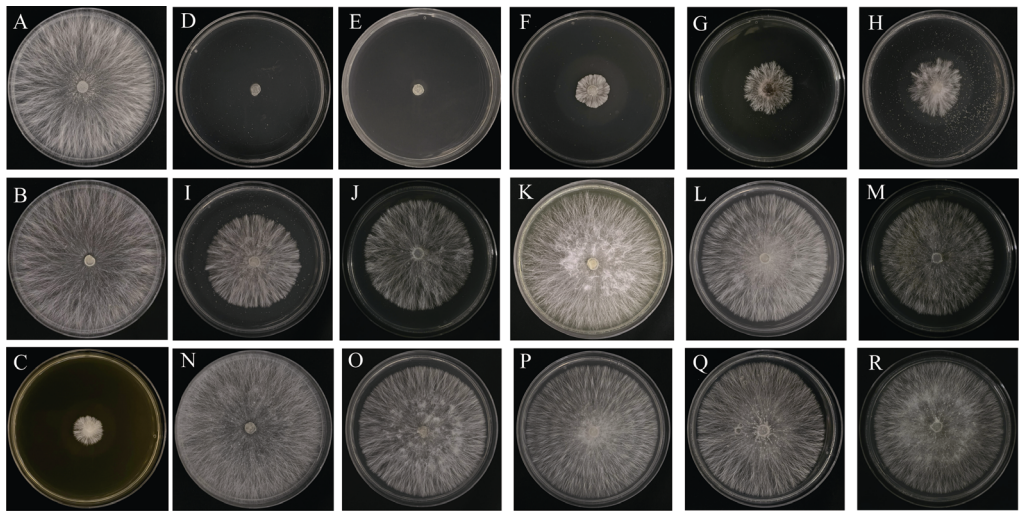
A、B：负离子模式；C、D：正离子模式。
A, B: Negative ion mode; C, D: Positive ion mode.
图 4 木霉 FJ059 乙酸乙酯提取物在 LC-MS 正负离子模式的总离子流图和一级分类饼图
Fig. 4 TIC and super class distribution pie chart of *Trichoderma* FJ059 ethyl acetate extract under positive and negative ion modes

表 4 15 种具有潜在抑菌活性的化合物
Tab. 4 Fifteen compounds with potential antimicrobial activity

化合物 Compound	分子式 Formula	质荷比 m/z	质量误差 Mass error ($\times 10^{-6}$)	保留时间 RT/min	分类 Super class	峰面积值 Peak area
石竹素	C ₁₅ H ₂₄ O	221.190	0.103	7.449	Lipids and lipid-like molecules	214 295 703.50
努特卡酮	C ₁₅ H ₂₂ O	219.174	0.030	6.658	Lipids and lipid-like molecules	61 978 074.16
法呢醇	C ₁₅ H ₂₆ O	205.195	0.808	6.972	Lipids and lipid-like molecules	1 860 034 561.00
吡咯-2-羧酸	C ₅ H ₅ NO ₂	110.025	3.207	5.436	Organoheterocyclic compounds	99 486 504.05
阿魏酸	C ₁₀ H ₁₀ O ₄	177.055	0.530	5.695	Phenylpropanoids and polyketides	1 485 024 613.00
青蒿素	C ₁₅ H ₂₂ O ₅	265.143	0.419	6.252	Lipids and lipid-like molecules	6 537 138 865.00
2-(4-羟苯基)乙醇	C ₈ H ₁₀ O ₂	183.067	2.278	5.683	Benzenoids	233 128 862.90
小檗碱	C ₂₀ H ₁₈ NO ₄ ⁺	336.123	0.969	5.660	Alkaloids and derivatives	59 563 960.30
秦皮乙素	C ₉ H ₆ O ₄	177.020	2.760	5.485	Phenylpropanoids and polyketides	2 195 125 394.00
3,4-二羟基苯甲醛	C ₇ H ₆ O ₃	137.025	3.192	5.400	Organic oxygen compounds	469 268 600.60
甜菜碱	C ₅ H ₁₂ NO ₂	140.068	0.090	1.455	Organic acids and derivatives	67 149 190.77
烟酰胺	C ₆ H ₆ N ₂ O	123.055	0.930	2.000	Organoheterocyclic compounds	2 135 293 339.00
羟基酪醇	C ₈ H ₁₀ O ₃	153.056	3.219	5.214	Benzenoids	874 783 452.90
咖啡酸	C ₉ H ₈ O ₄	179.035	2.409	5.529	Phenylpropanoids and polyketides	338 501 898.40
4-羟基苯甲酸	C ₇ H ₆ O ₃	137.025	2.622	6.089	Benzenoids	265 357 296.80

浓度提升至 100 $\mu\text{g/mL}$ ，努特卡酮抑菌率上升至 30.62%，法呢醇、石竹素、阿魏酸的抑菌率分别为 25.97%、22.87%、27.52%，乙酸乙酯提取物抑菌率达到 15.89%，吡咯-2-羧酸的抑菌率提升至 5.81%，但仍低于其他活性化合物。
当浓度增至 200 $\mu\text{g/mL}$ 时，努特卡酮的抑菌

率达到 100%，石竹素抑菌率上升至 62.40%，法呢醇抑菌率提升至 44.96%，阿魏酸和吡咯-2-羧酸分别提升至 58.53%和 39.15%，乙酸乙酯提取物抑菌率达到 53.87%。



A: 空白对照; B: 阴性对照; C: 乙酸乙酯提取物; D: 石竹素; E: 努特卡酮; F: 法呢醇; G: 吡咯-2-羧酸; H: 阿魏酸; I: 青蒿素; J: 2-(4-羟基苯基)乙醇; K: 小檗碱; L: 烟酰胺; M: 4-羟基苯甲酸; N: 甜菜碱; O: 秦皮乙素; P: 3,4-二羟基苯甲醛; Q: 咖啡酸; R: 羟基酪醇。
A: CK; B: NC; C: Ethyl acetate extract; D: Caryophyllene oxide; E: Nootkatone; F: Farnesol; G: Pyrrole-2-carboxylic acid; H: Trans-ferulic acid; I: Artemisinin; J: Tyrosol; K: Berberine; L: Nicotinamide; M: 4-Hydroxybenzoic acid; N: Betaine; O: Esculetin; P: Protocatechualdehyde; Q: Caffeate; R: Hydroxytyrosol.

图 5 15 种化合物对白绢病菌的抑制作用

Fig. 5 Inhibitory effects of fifteen compounds against *S. rolfsii*

表 5 15 种化合物对油茶白绢病菌的抑制率
Tab. 5 Inhibitory rate of fifteen compounds against *S. rolfsii*

化合物 Compound	菌落直径 Colony diameter/cm	抑菌率 Inhibition rate/%
CK	8.60±0.00	
NC	8.60±0.03	
乙酸乙酯提取物	1.20±0.06 ^{ab}	86.04±0.67 ^{ab}
石竹素	0.00±0.00 ^a	100.00±0.00 ^a
努特卡酮	0.00±0.00 ^a	100.00±0.00 ^a
法呢醇	1.70±0.31 ^b	80.19±3.57 ^b
吡咯-2-羧酸	2.64±0.24 ^{bc}	69.34±2.84 ^{bc}
阿魏酸	3.03±0.37 ^c	64.73±4.32 ^c
青蒿素	5.80±0.51 ^d	32.50±5.93 ^d
2-(4-羟基苯基)乙醇	6.44±0.09 ^{de}	25.16±1.02 ^{de}
4-羟基苯甲酸	6.87±0.22 ^{de}	20.08±2.51 ^{de}
烟酰胺	7.62±0.33 ^e	11.36±3.92 ^e
咖啡酸	7.64±0.03 ^e	11.12±0.39 ^e
秦皮乙素	7.68±0.32 ^e	10.74±3.70 ^e
羟基酪醇	7.74±0.12 ^e	10.00±1.42 ^e
3,4-二羟基苯甲醛	7.98±0.12 ^e	7.21±1.36 ^e
甜菜碱	8.30±0.10 ^e	3.53±1.20 ^e
小檗碱	8.47±0.03 ^e	1.48±0.43 ^e

注：不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).

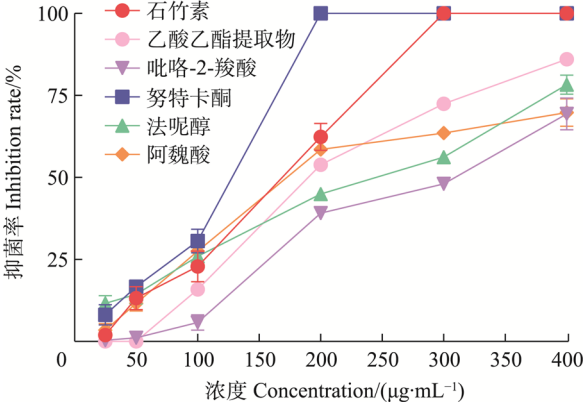


图 6 拮抗化合物不同浓度对白绢病菌的抑制作用

Fig. 6 Inhibitory effects of different concentrations of antagonistic compounds on *S. rolfsii*

浓度继续提升至 300 $\mu\text{g/mL}$ 与 400 $\mu\text{g/mL}$ 时，石竹素与努特卡酮可完全抑制油茶白绢病菌生长。乙酸乙酯提取物在浓度为 300 $\mu\text{g/mL}$ 时，抑菌率达到 72.48%，在浓度为 400 $\mu\text{g/mL}$ ，抑菌率增至 86.04%。法呢醇的抑菌率依次上升至 56.20% 与 78.30%，吡咯-2-羧酸分别为 48.06% 与 69.38%，阿魏酸分别为 63.57% 和 69.77%，但均未达到完全抑菌效果。结果表明，石竹素与努特卡酮在较低浓度下可实现对白绢病菌的完全抑制，抑菌活性高于乙酸乙酯提取物和其他化合物。

表 6 拮抗化合物的 Logit 回归方程及毒力参数
Tab. 6 Logit regression equations and toxicity parameters of antagonistic compounds

化合物 Compound	回归方程 Regression equation	决定系数 r^2	半最大效应浓度 $EC_{50}/(\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$	90%有效浓度 $EC_{90}/(\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$
乙酸乙酯提取物	$y=6.8211x-15.6296$	0.881	195.593	410.652
石竹素	$y=6.5041x-13.8121$	0.968	132.923	289.349
努特卡酮	$y=6.9526x-13.7289$	1.000	94.324	195.276
法呢醇	$y=2.7538x-6.3741$	0.931	206.382	1295.869
吡咯-2-羧酸	$y=5.3947x-13.2199$	0.987	282.177	720.799
阿魏酸	$y=3.3423x-7.6540$	0.985	194.995	885.966

3 讨论

由齐整小核菌引起的油茶白绢病，是油茶在亚热带和热带地区种植时常见的一种真菌性病害。目前来看，化学防治在病虫害控制中长期占据主导地位^[10]，过度依赖化学药剂导致了严重的环境污染问题，且部分病原菌在长期接触化学药剂后逐渐产生抗药性，导致防治效果下降。因此，迫切需要寻找一种环保、绿色且高效的替代防治手段^[11]。生物防治作为一种环保高效的防治技术^[12-14]，利用有益微生物或其代谢产物抑制病原菌生长^[15-16]。木霉作为生防菌，其生防机制主要包括营养竞争、寄生作用、诱导植物抗性以及合成多种次级代谢产物，有效抑制多种植物病原菌的生长^[17]。*T. semiorbis* FJ059 对白绢病菌菌核表现出显著的重寄生活性，通过产生几丁质酶和葡聚糖酶分解菌核细胞，从而杀死菌核，在温室试验中，其病害防治效果优于戊唑醇^[18]。研究表明，从木霉非挥发性次级代谢产物中鉴定出大约 390 种化合物，这些化合物来自 20 个已知物种和几个未鉴定的物种，体现木霉代谢物生物活性多样化以及木霉作为生防菌剂的潜力^[19]。

本文旨在研究木霉 FJ059 固体发酵产物中非挥发性代谢物对油茶白绢病菌的拮抗活性，筛选并鉴定出多种具有潜在抑菌活性作用的小分子化合物。结果表明，固体发酵基质的选择对木霉 FJ059 非挥发性代谢产物的抑菌活性具有显著影响，木霉 FJ059 在大米固体发酵培养基中的非挥发性代谢产物抑菌率达到 99.61%，其次是燕麦，抑菌率为 82.62%，未经发酵的木霉 FJ059 的非挥发性代谢产物抑菌率为 56.74%，抑菌效果高于其他固体发酵培养基。固体基质在为微生物提供必需的碳源、氮源、无机盐和水等营养成分，在此基础上为其生长和代谢过程提供载体^[20]，在大

米等碳氮源充足、营养较为均衡的基质，可能更有利于抑菌活性物质的合成与分泌。因此选择对大米固体发酵培养基的非挥发性代谢产物进行提取。

木霉 FJ059 大米固体发酵乙酸乙酯提取物在 500 $\mu\text{g/mL}$ 对白绢病菌的抑制率高达 98.84%，显著优于水相提取物，表明不同的溶剂对木霉有效抑菌活性物质的提取有着明显影响^[21]，木霉 FJ059 大米固体发酵中等极性疏水性小分子为潜在抑菌活性成分的主要富集形式。通过正丁醇、乙酸乙酯、石油醚和氯仿 4 种有机溶剂对多孢木霉 HZ-31 菌株发酵产物进行分离后，正丁醇相对野燕麦和油菜种子的萌发抑制效果最强，多孢木霉 HZ-31 菌株的除草活性物质主要富集于正丁醇萃取相^[22]。从棘孢木霉 CBS 433.97 的乙酸乙酯萃取物中分离到了一种甾醇类化合物，鉴定为麦角甾醇，在病原胁迫下，麦角甾醇提高小麦的防御酶活性，清除活性氧，减轻细胞损伤，提高小麦植株的抗病性^[23]。

对木霉 FJ059 大米固体发酵培养基的乙酸乙酯提取物进行 LC-MS 技术分析，物质以脂类、有机杂环化合物、有机酸及其衍生物为主^[24]，筛选出相对含量较高的拮抗油茶白绢病化合物包括努特卡酮、石竹素、法呢醇、吡咯-2-羧酸和阿魏酸等。努特卡酮是芳香型倍半萜类化合物，具备抗菌、抗氧化、抗炎和抗肿瘤等多种功能^[25]。天然双环倍半萜氧化物石竹素，通过调控组蛋白去乙酰化、抑制核糖体生物合成，从而有效抑制真菌生长的抗真菌活性物质^[26]。法呢醇是多种草本植物中存在的一种倍半萜醇，具有多种抗真菌活性^[27]。吡咯-2-羧酸对番茄灰霉病菌、苹果轮纹病菌和玉米小斑病菌等具有一定的抑制作用^[28]。阿魏酸是广泛分布于果蔬表皮等部位的酚酸，具有抑菌消炎等作用^[29]。抑菌试验结果显示，200 $\mu\text{g/mL}$ 努特卡酮的抑菌率达到 100.00%，浓度达到 300 $\mu\text{g/mL}$ 的

石竹素与努特卡酮均可完全抑制油茶白绢病菌生长, 抑菌活性显著高于同等浓度下的乙酸乙酯提取物、法呢醇、吡咯-2-羧酸和阿魏酸。在浓度为 400 $\mu\text{g/mL}$ 时, 青蒿素、4-羟基苯甲酸、烟酰胺、咖啡酸、3,4-二羟基苯甲醛、甜菜碱和小檗碱等化合物, 抑菌率均低于 35.00%。

综上所述, 木霉 FJ059 菌株作为一种具有高效生防潜力的真菌, 可应用于油茶白绢病的防治, 本研究在乙酸乙酯提取物中检测到的具有潜在抑菌活性化合物, 如低剂量的努特卡酮和石竹素等化合物对油茶白绢病菌有着显著的抑制作用, 揭示乙酸乙酯有利于潜在抑菌组分的富集, 为油茶等经济作物土传病害的生物防治开发新型高效生防菌剂提供理论依据和新的科学思路。鉴于未进一步对各提取物中活性成分在整体抑菌活性中的具体作用及相对贡献进行系统研究, 尚不能完全明确这些小分子化合物是否为抑菌作用的主导成分、其具体抑菌协同机制及其应用的安全性和稳定性。

参考文献

- [1] 何伟, 罗文芳, 周军辉, 宋素琴, 许建军, 苗昊翠. 不同种衣剂对花生根腐病和白绢病病原菌抑菌效果及田间药效试验[J]. 农药, 2024, 63(8): 609-614.
HE W, LUO W F, ZHOU J H, SONG S Q, XU J J, MIAO H C. Inhibitory ability and field efficacy trials of seed coating agents against pathogenic fungi causing peanut root rot and white silk disease[J]. Agrochemicals, 2024, 63(8): 609-614. (in Chinese)
- [2] AYED F, JABNOUN-KHIAREDDINE H, AYDI-BEN ABDALLAH R, DAAMI-REMADI M. Effect of different carbon and nitrogen sources on *Sclerotium rolfsii* Sacc. mycelial growth and sclerotial development[J]. International Journal of Phytopathology, 2020, 9(1): 17-27.
- [3] 滕建华. 油茶白绢病的发生及防治措施[J]. 园艺与种苗, 2024, 44(5): 69-70, 86.
TENG J H. Occurrence and control measures of camellia *Sclerotium* blight[J]. Horticulture & Seed, 2024, 44(5): 69-70, 86. (in Chinese)
- [4] 许帅, 谢学文, 张昀, 石延霞, 柴阿丽, 李磊, 李宝聚. 马铃薯枯萎病生防芽孢杆菌筛选及生防效果研究[J]. 中国生物防治学报, 2020, 36(5): 761-770.
XU S, XIE X W, ZHANG Y, SHI Y X, CHAI A L, LI L, LI B J. Screening of biocontrol *Bacillus* isolate against potato *Fusarium* wilt and its biocontrol effect[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2020, 36(5): 761-770. (in Chinese)
- [5] SCHAFFNER U, HEIMPEL G E, MILLS N J, MURIITHI B W, THOMAS M B, GC Y D, WYCKHUYS K A G. Biological control for one health[J]. Science of The Total Environment, 2024, 951: 175800.
- [6] LUO N, JIAO Y, LING J, LI Z Y, ZHANG W W, ZHAO J L, LI Y, XIE Z C. Synergistic effect of two peptaibols from biocontrol fungus *Trichoderma longibrachiatum* strain 40418 on CO-induced plant resistance[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(38): 20763-20774.
- [7] 潘群胜. 木霉菌在植物病害生物防治中的作用[J]. 现代化农业, 2023(6): 8-10.
PAN Q S. Role of *Trichoderma* in biological control of plant diseases[J]. Modernizing Agriculture, 2023(6): 8-10. (in Chinese)
- [8] LI Z, LIU T. The highly contiguous genome resource of *Trichoderma semiorbis* FJ059, a biological control agent for litchi downy blight[J]. Phytopathology, 2022, 112(6): 1391-1395.
- [9] 李昕冉, 景涛, 孙晨曦, 郭彩苹, 马耀杰, 徐秉良, 张树武. 生防菌长枝木霉菌株 T6 及其代谢产物对立枯丝核菌拮抗作用[J]. 西北农业学报, 2023, 32(7): 1131-1137.
LI X R, JING T, SUN C X, GUO C P, MA Y J, XU B L, ZHANG S W. Antagonism of *Trichoderma longibrachiatum* isolate T6 and its metabolites to *Rhizoctonia solani*[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2023, 32(7): 1131-1137. (in Chinese)
- [10] ZHANG X K, LI B Q, ZHANG Z Q, CHEN Y, TIAN S P. Antagonistic yeasts: a promising alternative to chemical fungicides for controlling postharvest decay of fruit[J]. Journal of Fungi, 2020, 6(3): 158.
- [11] 蔺忙碌. 植物病害防治中的生物防治技术研究[J]. 农业灾害研究, 2023, 13(10): 13-15.
LIN M L. Research on biological control technology in plant disease control[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2023, 13(10): 13-15. (in Chinese)
- [12] 杨金睿, 吉泽, 李俊逸, 姚遥, 祝春月, 王文倩, 肖关丽. 马铃薯叶片内生细菌的分离鉴定及其对马铃薯块茎蛾的毒力研究[J]. 南方农业学报, 2022, 53(11): 3147-3156.
YANG J R, JI Z, LI J Y, YAO Y, ZHU C Y, WANG W Q, XIAO G L. Isolation and identification of endophytic bacteria in potato leaves and their virulence to *Phthorimaea operculella*[J]. Journal of Southern Agriculture, 2022, 53(11): 3147-3156. (in Chinese)
- [13] 冯玉衡. 马铃薯黑痣病和枯萎病病菌拮抗菌株的筛选与鉴定[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
FENG Y H. Screening and identification of antagonistic strains against potato black scurf and *Fusarium* wilt[D]. Huhehaote: Inner Mongolia Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [14] 郝玉凡, 沈硕. 抑制马铃薯干腐病菌的活性酒糟菌筛选、鉴定及抑菌活性测定[J]. 南方农业学报, 2022, 53(2):

- 486-496.
- HAO Y F, SHEN S. Screening, identification and anti-microbial activity of antagonistic strains against potato dry rot[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2022, 53(2): 486-496. (in Chinese)
- [15] BENEDUZI A, AMBROSINI A, PASSAGLIA L M P. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): their potential as antagonists and biocontrol agents[J]. *Genetics and Molecular Biology*, 2012, 35: 1044-1051.
- [16] 王艺茹, 潘培培, 沈虎生, 张林林, 王润东, 何梦茜, 申顺善. 番茄疫霉根腐病菌拮抗细菌 HP8-1 的鉴定及生物防治潜力[J]. *河南农业大学学报*, 2024, 58(1): 78-86.
- WANG Y R, PAN P P, SHEN H S, ZHANG L L, WANG R D, HE M H, SHEN S S. Identification and biocontrol potential of antagonist bacteria HP8-1 against *Phytophthora* root rot of tomato[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2024, 58(1): 78-86. (in Chinese)
- [17] GUZMÁN-GUZMÁN P, KUMAR A, DE LOS SANTOS-VILLALOBOS S, PARRA-COTA F I, OROZCO-MOSQUEDA M C, FADIJI A E, HYDER S, BABALOLA O O, SANTOYO G. *Trichoderma* species: our best fungal allies in the biocontrol of plant diseases—a review[J]. *Plants*, 2023, 12(3): 432.
- [18] LIU Y P, CHEN P W, SONG X Q, WANG W W, LIU T. A novel *Trichoderma semiorbis* strain FJ059 exhibiting sclerotium - mycoparasitic ability and biocontrol potential to southern blight caused by *Sclerotium rolfsii*[J]. *Plant Pathology*, 2025, 74(5): 1256-1265.
- [19] LI M F, LI G H, ZHANG K Q. Non-volatile metabolites from *Trichoderma* spp.[J]. *Metabolites*, 2019, 9(3): 58.
- [20] 倪敏姿, 陈涛, 崔峰, 陈杰. 棘孢木霉 TCS007 菌株固体发酵产孢条件优化及其抑菌活性[J]. *农药学报*, 2025, 27(1): 69-79.
- NI M Z, CHEN T, CUI F, CHEN J. Optimization of solid-state fermentation for spore production of *Trichoderma asperellum* TCS007 strain and its antifungal activity[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2025, 27(1): 69-79. (in Chinese)
- [21] 赵晓彤, 王桂清. SMF2 和 T39 代谢产物对国槐根茎腐烂病致病镰刀菌的抑菌活性[J]. *四川农业大学学报*, 2023, 41(4): 658-664, 754.
- ZHAO X T, WANG G Q. Bacteriostatic activity of metabolites SMF2 and T39 against pathogenic *Fusarium* of root rot disease on *Sophora japonica*[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2023, 41(4): 658-664, 754. (in Chinese)
- [22] 朱海霞, 蔺泽荣, 马永强. 多孢木霉 HZ-31 菌株活性物质的初步分离及除草活性研究[J]. *西北农业学报*, 2021, 30(7): 1071-1076.
- ZHU H X, LIN Z R, MA Y Q. Preliminary isolation and herbicidal activity of active substances from *Trichoderma polysporum* HZ-31[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2021, 30(7): 1071-1076. (in Chinese)
- [23] 宋昊跃, 刘畅, 庞丽, 吴长景, 张慧芳, 赵怀松, 张建夫, 张福丽. 棘孢木霉次级代谢产物麦角甾醇防治小麦赤霉病潜能分析[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(22): 133-139.
- SONG H Y, LIU C, PANG L, WU C J, ZHANG H F, ZHAO H S, ZHANG J F, ZHANG F L. Study on potential of ergosterol, secondary metabolite of *Trichoderma asperellum*, to control wheat scab disease[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(22): 133-139. (in Chinese)
- [24] 张泽, 艾力扎提·艾尼瓦尔, 李慧玲, 王光辉, 王子晴, 王志清. 2 株拮抗细菌核盘菌的木霉代谢物成分分析及抑菌物质筛选[J]. *特产研究*, 2024, 46(4): 1-7, 11.
- ZHANG Z, AILIZHATI A, LI H L, WANG G H, WANG Z Q, WANG Z Q. Analysis of metabolites of *Trichoderma* against *Sclerotinia asari* and screening of bacteriostatic substances[J]. *Special Wild Economic Animal and Plant Research*, 2024, 46(4): 1-7, 11. (in Chinese)
- [25] OLIVEIRA-TINTINO C D M, SANTANA J E G, ALENCAR G G, SIQUEIRA G M, GONÇALVES S A, TINTINO S R, MENEZES I R A, RODRIGUES J P V, GONÇALVES V B P, NICOLETE R, RIBEIRO-FILHO J, SILVA T G, COUTINHO H D M. Valencene, nootkatone and their liposomal nanoformulations as potential inhibitors of NorA, Tet (K), MsrA, and MepA efflux pumps in *Staphylococcus aureus* strains[J]. *Pharmaceutics*, 2023, 15(10): 2400.
- [26] LIAO H X, YANG J, WEN J R, NIE H Y, ZHAO J, XU F R, LIU X Y, DONG X. β -caryophyllene oxide inhibits lysine acetylation of histones in *Fusarium proliferatum* to block ribosomal biosynthesis and function[J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2024, 206: 106213.
- [27] ONDER S, OZ Y. *In vitro* effects of farnesol alone and in combination with antifungal drugs against *Aspergillus* clinical isolates[J]. *Medical Mycology Journal*, 2021, 62(1): 5-10.
- [28] 韦秋合, 施李鸣, 葛蓓亭, 张维, 杨森冷, 吕朝阳, 张克诚. 武夷菌素高产基因工程菌株 *Streptomyces albulus* OoWysR 活性成分的分离鉴定[J]. *微生物学通报*, 2022, 49(5): 1774-1785.
- WEI Q H, SHI L M, GE B B, ZHANG W, YANG M L, LYU Z Y, ZHANG K C. Isolation and identification of active ingredients from high wuyiencin-producing genetically engineered strain *Streptomyces albulus* OoWysR[J]. *Microbiology China*, 2022, 49(5): 1774-1785. (in Chinese)
- [29] 温承坤, 李琴, 蔡开云, 陈萍, 郭婷婷, 陈茂彬. 阿魏酸酯酶功能特性及应用概述[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(2): 292-297.
- WEN C K, LI Q, CAI K Y, CHEN P, GUO T T, CHEN M B. The functional characteristics and application of ferulic acid esterase[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(2): 292-297. (in Chinese)