

唐菖蒲伯克霍尔德菌 H02 与噻呋酰胺联用对花生白绢病的防控效果

黄依蕊¹, 朱哲远², 王颢², 刘璐², 周勇³, 杨斌², 彭迪^{1,2*}, 肖姬玲^{2*}

- 1 湖南大学 隆平农学院, 湖南 长沙
2 湖南省微生物研究所, 湖南 长沙
3 湖南省植物保护研究所, 湖南 长沙

黄依蕊, 朱哲远, 王颢, 刘璐, 周勇, 杨斌, 彭迪, 肖姬玲. 唐菖蒲伯克霍尔德菌 H02 与噻呋酰胺联用对花生白绢病的防控效果[J]. 微生物学报, 2026, 66(7): 3610-3624.

HUANG Yirui, ZHU Zheyuan, WANG Jie, LIU Lu, ZHOU Yong, YANG Bin, PENG Di, XIAO Jiling. Control effect of *Burkholderia gladioli* H02 combined with thifluzamide on peanut southern blight[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2026, 66(7): 3610-3624.

摘要:【目的】由齐整小核菌(*Sclerotium rolfsii* Sacc.)侵染引起的白绢病是制约花生生产的重要土传病害。当前防控主要依赖化学药剂, 为提高田间防效、降低农药用量、减少花生农药残留, 本研究筛选了齐整小核菌的拮抗微生物, 并探索了其与化学药剂协同防控花生白绢病的效果, 以期为该病害的绿色防控提供技术支持。【方法】通过平板筛选实验获得对齐整小核菌拮抗活性强且与常用真菌杀菌剂相容性好的生防菌株; 经药剂筛选实验获得对齐整小核菌抑制效果显著且不影响生防菌株生长的防控药剂; 通过室内联合毒力测定实验, 在含有不同浓度噻呋酰胺(0.15 $\mu\text{g/mL}$ 、0.30 $\mu\text{g/mL}$)、10% H02 无菌发酵液或其复合物的 PDA 平板上接种病原菌, 观察菌丝生长并计算抑制率与抑制比率(inhibition ratio, IR), 评价二者联用的相互作用类型。通过盆栽试验, 比较菌液、全剂量药剂(田间推荐用量)及菌液与半剂量药剂联用对花生白绢病的防治效果。【结果】筛选获得一株拮抗活性高、与杀菌剂相容性良好的唐菖蒲伯克霍尔德菌(*Burkholderia gladioli*) H02, 其平板抑制率为 76.03%。同时, 筛选获得对齐整小核菌抑制效果显著(EC_{50} 为 0.151 3 $\mu\text{g/mL}$)且不影响 H02 生长的药剂噻呋酰胺。室内联合毒力测定结果表明, H02 无菌发酵液与噻呋酰胺复配处理组的 IR 均大于 1, 表现为协同作用类型; 且减半浓度噻呋酰胺与发酵液联用对菌丝和菌核的抑制率(分别为 74.91% 和 95.58%)显著高于全浓度噻呋酰胺单剂处理(分别为 68.04% 和 83.67%)。盆栽结果显示, H02 菌液与半剂量噻呋酰胺联用的防效(68.94%)与全剂量噻呋酰胺(66.63%)防效相当, 分别为 68.94% 与 66.63%, 单施 H02 菌液的防效为 61.17%。【结论】唐菖蒲伯克霍尔德菌

资助项目: 国家重点研发计划(2023YFD1400905); 国家自然科学基金青年(C类) (32402331)

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2023YFD1400905) and the National Natural Science Foundation of China for Young Scholars (Category C) (32402331).

*Corresponding authors. E-mail: PENG Di, smileadi@126.com; XIAO Jiling, jilingxiao@hunaas.cn

Received: 2026-01-13; Accepted: 2026-03-04; Published online: 2026-03-23

H02 与噻呋酰胺联用可发挥协同防治作用, 在维持防治效果的同时减少化学药剂用量, 展现出良好的应用潜力。

关键词: 花生白绢病; 菌药协同; 伯克霍尔德菌 H02; 噻呋酰胺

Control effect of *Burkholderia gladioli* H02 combined with thifluzamide on peanut southern blight

HUANG Yirui¹, ZHU Zheyuan², WANG Jie², LIU Lu², ZHOU Yong³, YANG Bin², PENG Di^{1,2*}, XIAO Jiling^{2*}

¹ Longping Agricultural College, Hunan University, Changsha, Hunan, China

² Hunan Institute of Microbiology, Changsha, Hunan, China

³ Hunan Institute of Plant Protection, Changsha, Hunan, China

Abstract: [Objective] Southern blight, caused by *Sclerotium rolfsii* Sacc., is a major soil-borne disease that limits peanut production. At present, its management relies mainly on chemical fungicides. To improve the field control efficacy, reduce fungicide application rates, and lower pesticide residues in peanuts, this study screened antagonistic microorganisms against *S. rolfsii* and evaluated their synergistic effects with chemical fungicides in the control of peanut southern blight. The results are expected to provide technical support for the green and sustainable management of this disease. [Methods] This study first used a plate-based screening assay to obtain biocontrol strains showing strong antagonistic activity against *S. rolfsii* and high compatibility with commonly used fungicides. Next, a fungicide screening assay was conducted to identify control agents that effectively inhibited *S. rolfsii* without adversely affecting the growth of the biocontrol strains. Subsequently, an *in vitro* combined toxicity assay was performed. The pathogen was inoculated onto PDA plates containing different concentrations of thifluzamide (0.15 and 0.30 $\mu\text{g/mL}$), sterile 10% fermentation broth of H02, or their mixtures. Fungal growth was observed, and the inhibition rate and inhibition ratio (IR) were calculated to evaluate the interaction type of the combined treatment. Finally, a pot experiment was carried out to compare the control efficacy against peanut southern blight among the fermentation broth, the full-dose fungicide (recommended field rate), and the combination of fermentation broth with a half-dose fungicide. [Results] A *Burkholderia gladioli* strain H02 with high antagonistic activity and good fungicide compatibility was screened out, exhibiting an inhibition rate of 76.03%. Concurrently, thifluzamide was identified as a fungicide with strong inhibitory activity against *S. rolfsii* and no negative impact on the growth of strain H02, exhibiting an EC_{50} of 0.151 3 $\mu\text{g/mL}$. Results from the *in vitro* combined toxicity assay indicated that the combination of the H02 fermentation broth and thifluzamide showed an IR greater than 1, exhibiting a synergistic effect. Moreover, the combination of half the concentration of thifluzamide with the fermentation broth significantly demonstrated higher inhibition rates against pathogen mycelia and sclerotia (74.91% and 95.58%, respectively) than the full

concentration of thifluzamide alone (68.04% and 83.67%, respectively). Pot experiment results showed that the combination of H02 fermentation broth and half dosage of thifluzamide had the control efficacy comparable to that of the full dosage of thifluzamide (68.94% vs. 66.63%), whereas the single application of H02 fermentation broth provided the control efficacy of 61.17%. **[Conclusion]** The combined application of *B. gladioli* H02 and thifluzamide can achieve synergistic control of peanut southern blight and reduce chemical fungicide usage while maintaining effective disease control, thus showing promising potential for practical application.

Keywords: peanut southern blight; cooperation between microbial agents and fungicides; *Burkholderia gladioli* H02; thifluzamide

花生(*Arachis hypogaea* L.)是重要的油料与经济作物,近年来由齐整小核菌(*Sclerotium rolfsii* Sacc.)侵染所致花生白绢病在我国主要花生产区严重发生,已成为制约花生产业可持续发展的重要病害^[1]。病原菌主要侵染花生茎基部、根部和果荚,并可实现全生育期侵染。田间一般病株率为10%–30%,严重时病株率可达50%以上,甚至引起绝产^[2]。目前,花生白绢病的田间防控高度依赖化学杀菌剂^[3],但长期使用化学杀菌剂不仅对生态系统和环境安全存在潜在威胁,还容易导致病原菌产生抗药性,从而降低防治效果。早在1998年就有研究表明,格鲁吉亚地区的白绢病菌已对氟酰胺产生了抗药性^[4]。相比之下,生物防治具有生态兼容、成本可控和防效持久等优点。木霉、芽孢杆菌、链霉菌等生防菌均被证实对花生白绢病具有良好的防控潜力^[5–9],但在实际应用中仍存在防效滞后、稳定性不足及环境适应性有限等技术瓶颈。在此背景下,将生防菌与低剂量化学农药科学配施的“菌药协同”防控策略应运而生。该策略既可利用化学药剂快速抑制早期菌源,又能发挥生防菌持久抑菌与生态调节功能,实现优势互补。菌药协同防控不仅能提升防治效果、减少农药用量,还可延缓抗药性发展、维护生态安全,符合农业绿色高质量发展的政策导向与产业需求^[10–12]。因此,开展菌药协同防控花生白绢病的技术研究具有重要的理论意义与应用价值。

伯克霍尔德氏菌属为革兰氏阴性菌,在自然界中分布广泛^[13]。该菌在代谢过程中能产生吩嗪类化合物、藤黄绿脓菌素及硝吡咯菌素等多种广谱抑菌活性物质,展现出良好的生防潜力^[14–18]。现有研究表明,伯克霍尔德氏菌与噻唑膦联用可协同增强对黄瓜根结线虫的防治效果,但目前尚未见将其与杀菌剂协同用于防控花生白绢病的相关报道^[19–20]。本研究通过平板对峙法筛选对花生白绢病菌具有高拮抗活性且与常用商品真菌杀菌剂相容性良好的生防菌株,并系统评价其与杀菌剂协同防治白绢病的效果,以期为该病害的田间绿色防控提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试菌株

病原菌:齐整小核菌分离自湖南省常德市石门县叶家坪村花生地中具典型白绢病病症的花生病株,保存于湖南省微生物研究所。

生防菌株:H02、20-5-2及21-2-1分离自湖南省郴州市桂东县松林土壤样品;B-001分离自湖南省长沙市宁乡市严重枯萎病烟草田中的健康烟草植株样本;HR2C分离自湖南省岳阳市华容县油菜地土壤样本。上述菌株均保存于湖南省微生物研究所。

1.1.2 供试化学杀菌剂

96.2%噻唑酰胺(thifluzamide)TC、98%吡

唑醚菌酯(pyraclostrobin) TC、95% 丙硫菌唑(prothioconazole) TC、24% 噁唑酰胺(thifluzamide) SC、80% 乙蒜素(ethylin) EC、50% 咯菌腈(fludioxonil) WP、8% 宁南霉素(ningnanmycin) AS、30% 噁霉灵(hymexazol) AS、75% 百菌清(chlorothalonil) WP、50% 多菌灵(carbendazim) WP, 以上化学杀菌剂均购自北京中保绿农科技集团有限公司。

1.1.3 供试花生品种

所用花生品种为‘白沙 1016’。

1.2 齐整小核菌生防菌株的筛选

将保存备用菌株划线接种在 LB 平板上, 28 °C 培养。通过平板对峙法评估活化菌株对齐整小核菌的拮抗效果。将活化菌株分别接种至 LB 液体培养基, 28 °C、180 r/min 培养 24 h。取直径 5 mm 的齐整小核菌菌饼接种于 PDA 培养基中央, 距菌饼 25 mm 处四周各放置滤纸片, 分别吸取 10 μL 菌液至滤纸片上, 以无菌水作对照, 每处理 3 次重复, 28 °C 培养, 观察齐整小核菌生长情况, 72 h 后测量各处理菌落直径, 并按公式(1)计算抑制率。

$$\text{抑制率} = \frac{\text{对照菌落直径(mm)} - \text{处理菌落直径(mm)}}{\text{对照菌落直径(mm)} - 5 \text{ (mm)}} \times 100\% \quad (1)$$

生防菌株与常见杀菌剂的相容性测定: 分别配制含田间推荐浓度化学杀菌剂的 LB 平板, 在平板上接种拮抗效果较好的备选生防菌株, 24 h 后观察各生防菌株在含药平板上的生长情况, 以此初步判定备选生防菌株与供试杀菌剂的相容性。

1.3 H02 的分子生物学鉴定

分别利用 16S rRNA 基因及 *gyrB*、*recA* 基因的特异性引物(表 1)对生防菌株 H02 的基因组进行 PCR 扩增^[21-22], 扩增产物送至生工生物工程(上海)股份有限公司进行测序。测序结果在 NCBI 数据库中进行 BLAST 比对, 用 MEGA 11 软件以邻接法构建系统发育树, 从而确定 H02

表1 16S rRNA、*gyrB*和*recA*基因的引物信息

Table 1 Primer information for 16S rRNA, *gyrB*, and *recA* gene

Primer names	Primer sequences (5'→3')
27F	AGAGTTTGATCCTGGCTCAG
1492R	GGTTACCTTGTTACGACTT
<i>gyrB</i> F	CTCGATCTCCATCACCGACA
<i>gyrB</i> R	TCAGATACCGCTCGTCCTTC
<i>recA</i> F	ATGGAAGATAGCAAGAAAGGCGC
<i>recA</i> R	TCACTCTTCTTCGTCCAGGATCT

菌株的分类地位。

1.4 H02 的安全性评估

通过植物致病性检测和体外溶血活性检测评估 H02 菌株的安全性。植物致病性检测: 取株高约 15 cm、长势一致的花生幼苗 10 盆, 随机分为 2 组, 处理组于植株根茎部灌施 20 mL H02 菌悬液(1×10^8 CFU/mL)^[23-24], 对照组灌施等量无菌水, 置于 28 °C、光周期 10 h 光照/14 h 黑暗条件下培养, 连续观察 14 d, 记录植株是否出现变色、坏死、萎蔫等症状, 统计处理组与对照组的株高(茎基部至顶端的长度)、鲜重(拔出后洗净的质量)及根长(茎基部至主根根尖的长度)。体外溶血活性检测: 于 Columbia 和 Mueller-Hinton 血琼脂平板上划线接种待测菌株 H02 和阴性对照菌株大肠杆菌 DH5α, 28 °C 培养 48 h 后观察菌落周围有无溶血环形成^[25-26]。

1.5 齐整小核菌防治杀菌剂的初步筛选与毒力测定

采用菌落生长速率法对杀菌剂进行初筛。分别制备含不同浓度噁唑酰胺、吡唑醚菌酯和丙硫菌唑原药(100、25、5 μg/mL)及市售常见商品杀菌剂(田间推荐浓度及其半量浓度)的 PDA 平板, 将齐整小核菌菌饼接种于含药平板中央, 每处理 3 次重复, 置于 28 °C 恒温培养箱中培养 3 d, 定期观察记录菌丝生长情况, 计算抑制率, 初步筛选出抑制效果较好的杀菌剂。

对初筛所得杀菌剂进行室内毒力测定。基

于初筛结果, 设置各杀菌剂的一系列浓度梯度并制备相应的含药 PDA 平板, 平板中央接种齐整小核菌, 培养 3 d 后计算抑制率, 确定完全抑制菌丝生长的最低浓度。在该浓度范围内选取 5 个梯度浓度, 进一步测定对齐整小核菌的抑制率。最后采用 DPS 数据处理系统获得杀菌剂的回归方程、 EC_{50} 值及相关系数 R 。

1.6 杀菌剂与 H02 的相容性测定

参考 Peng 等^[27]的方法并略作改进。挑取 H02 单菌落接种于 LB 液体培养基中, 28 °C、180 r/min 培养 12 h 作为种子液。种子液按 1:100 的比例接种于 20 mL 含系列浓度梯度的咯菌腈或噻呋酰胺(0、50、100、150 $\mu\text{g/mL}$)的 LB 液体培养基中, 接种后置于 28 °C、180 r/min 培养。分别于培养 0、6、12、18、24 h 时, 利用分光光度计测定各处理菌液在 600 nm 波长下的光密度(OD_{600}), 同时吸取 1 mL 菌液进行系列稀释, 取 100 μL 稀释液涂布于 LB 平板, 24 h 后统计菌落数目, 计算菌液浓度。

1.7 噻呋酰胺与 H02 无菌发酵液对齐整小核菌的室内联合毒力测定

将 H02 接种于 LB 液体培养基中, 28 °C、180 r/min 培养 24 h, 8 000 r/min 离心 10 min 后收集上清液, 用 0.22 μm 微孔滤膜过滤去除上清中残存的菌体, 制得 H02 无菌发酵液。分别制备含噻呋酰胺(0.15、0.30 $\mu\text{g/mL}$)、10% H02 无菌发酵液及含噻呋酰胺(0.15、0.30 $\mu\text{g/mL}$)+10% H02 无菌发酵液的复合 PDA 平板, 平板上接种齐整小核菌饼或菌核, 3 d 后观察并采用公式(2)、(3)分别计算抑制率 I 及抑制比率(inhibition ratio, IR)。IR<1 为拮抗作用, IR $\geq$ 1 为加和作用。

$$I(th) = \frac{(a+b)-ab}{100} \quad (2)$$

$$IR = \frac{I(ob)}{I(th)} \quad (3)$$

式中: $I(ob)$ 为复配剂对病原菌的实际抑制率, $I(th)$ 为复配剂对病原菌的理论抑制率, a 、 b 分别为杀菌剂与无菌发酵液以复配剂中的浓度单

独使用时的抑制率。

1.8 H02 菌液与噻呋酰胺复配剂对花生白绢病盆栽防效测定

选取株高约 15 cm、长势一致的花生幼苗(盆栽规格: 30 cm $\times$ 20 cm, 每盆 8 株), 随机分为 5 组。除阴性对照外, 其余各组均需在距茎基部 1 cm 处接种病原菌饼(2 个/株)。具体处理如下: 阴性对照实验过程中不进行任何处理; 阳性对照仅接种病原菌; 处理 1 先灌施 20 mL H02 菌液(1×10^8 CFU/mL), 12 h 后接种病原菌, 接种病原菌 24 h 后再灌施 20 mL 噻呋酰胺(60 $\mu\text{g/mL}$); 处理 2 仅在接种病原菌 24 h 后灌施 20 mL 噻呋酰胺(120 $\mu\text{g/mL}$); 处理 3 仅灌施 20 mL H02 菌液(1×10^8 CFU/mL), 12 h 后接种病原菌。处理后 15 d 按公式(4)、(5)分别计算植株的病情指数和防治效果。

$$\text{病情指数} = \frac{\sum(\text{各级病株数} \times \text{各级代表值})}{\text{调查总株数} \times \text{最高级代表值}} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{防治效果} = \frac{\text{对照病情指数} - \text{处理病情指数}}{\text{对照病情指数}} \times 100\% \quad (5)$$

参考李爽等^[28]的病害分级标准进行分级: 0 级, 全株无病斑; 1 级, 茎基部出现病斑, 茎部病斑不超过植株的 1/3; 3 级, 茎基部出现缢缩, 茎部病斑不超过植株的 1/2, 或侧枝枯死; 5 级, 茎部病斑超过植株的 1/2, 或半数以上叶片轻度凋萎; 7 级, 茎部病斑蔓延至整株, 或 2/3 以上叶片凋萎; 9 级, 病株全部叶片凋萎或枯死。

2 结果与分析

2.1 生防菌株的筛选

通过平板对峙法评估生防菌株对齐整小核菌的拮抗效果, 结果显示 H02、HR2C、B-001、21-2-1 及 20-5-2 均对齐整小核菌表现出较佳拮抗效果(图 1), 其中 H02、B-001、21-2-1、20-5-2 及 HR2C 对齐整小核菌的抑制率分别为 76.03%、71.18%、68.82%、49.88% 和 44.12%。将以上菌

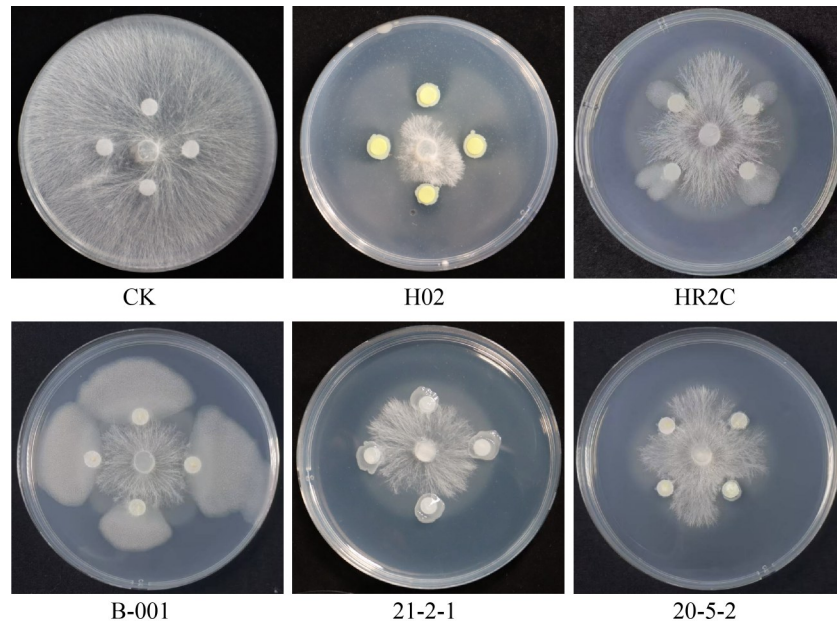


图1 生防菌株对齐整小核菌的拮抗情况

Figure 1 The antagonistic activity of biocontrol strains against *Sclerotium rolfsii* Sacc.

株分别接种至含供试杀菌剂的 LB 平板上进行相容性测定, 结果显示 H02 在所有供试含药平板上均能正常生长(表 2), 表明其与上述杀菌剂具有较好的相容性。

2.2 H02 的分子生物学鉴定

为明确 H02 的分类地位, 利用 16S rRNA 基因及 *gyrB*、*recA* 基因的特异性引物对其基因

组进行 PCR 扩增与测序, 并将所得序列在 NCBI 数据库中进行 BLAST 比对。结果显示, H02 的 16S rRNA (登录号为 PX930850)、*gyrB* (登录号为 PX961912)、*recA* (登录号为 PX970354) 基因序列与唐菖蒲伯克霍尔德菌(*Burkholderia gladioli*) 的相应参考序列比对率最高, 相似性均达 100.00%。基于上述基因序列构建的系统发育树显示, H02 与 2 株 *Burkholderia gladioli* 菌株聚类于同一分支(图 2)。因此, 将菌株 H02 鉴定为唐菖蒲伯克霍尔德菌。

2.3 H02 的安全性评估

花生植株经 20 mL 浓度为 1×10^8 CFU/mL 的 H02 菌液灌根处理后, 在连续 14 d 的观察期内未表现出任何病理性症状, 处理组与对照组的株高、鲜重、根长均无显著差异(表 3, 图 3A), 表明在供试条件下 H02 菌株对花生植株无致病性。体外溶血活性检测结果(图 3B)显示, H02 在 Columbia 与 Mueller-Hinton 血琼脂平板上划线培养 48 h 后菌落周围未形成溶血环, 表明其不具备产溶血素能力, 对人体相对安全。综合

表2 生防菌与杀菌剂的相容性测定结果

Table 2 Results of the compatibility assay between biocontrol strains and fungicides

Fungicide	H02	HR2C	B-001	21-2-1	20-5-2
Thiifluzamide	+	+	+	+	+
Pyraclostrobin	+	+	+	+	+
Prothioconazole	+	+	+	+	+
Ethylcin	+	-	-	-	-
Fludioxonil	+	+	+	+	+
Ningnanmycin	+	+	+	+	+
Hymexazol	+	+	+	+	+
Chlorothalonil	+	-	-	+	+
Carbendazim	+	+	+	+	+

+ indicates growth; - indicates no growth.

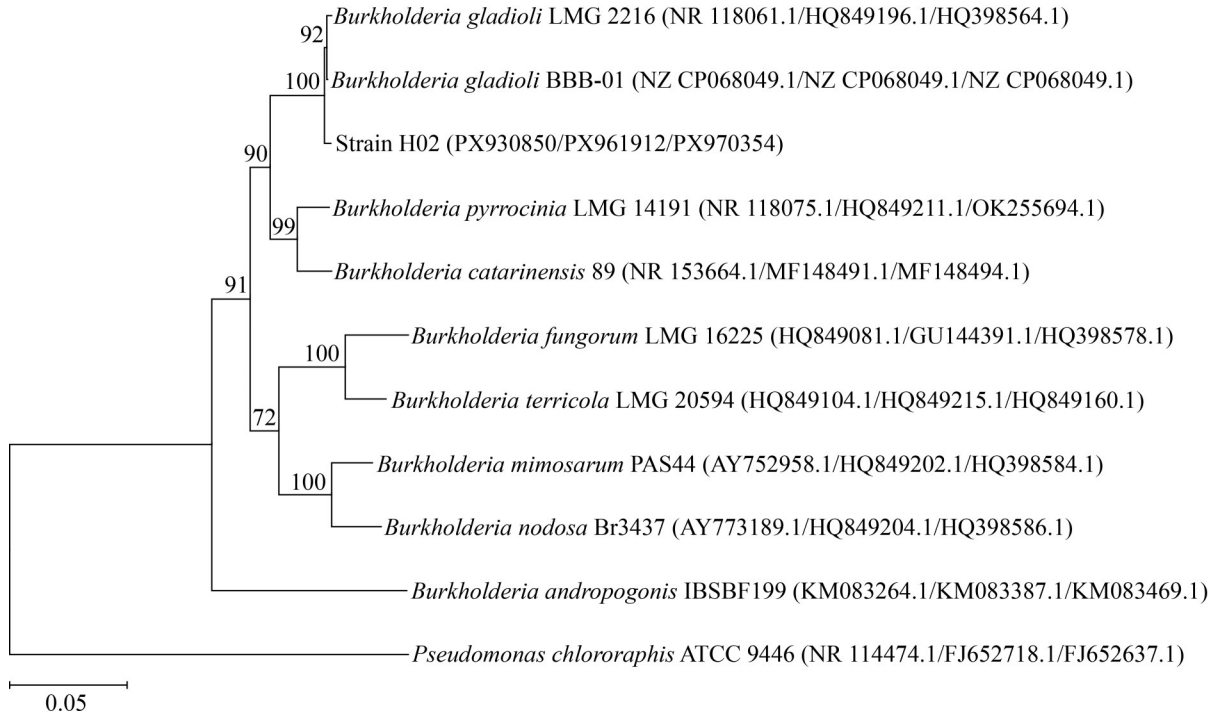


图2 基于16S rRNA、*gyrB*和*recA*基因序列构建的菌株H02系统发育树

Figure 2 Phylogenetic tree of strain H02 based on concatenated sequences of 16S rRNA, *gyrB* and *recA* genes sequence. The serial numbers are GenBank accession numbers; Branch numbers are bootstrap values; The scale bar in the lower left corner indicates genetic distance.

表3 H02菌液处理对花生植株株高、鲜重及根长的影响

Table 3 Effects of H02 fermentation broth treatment on plant height, fresh weight, and root length of peanut plants

Group	Plant height/cm	Fresh weight/g	Root length/cm
Control	29.80±1.68a	13.90±1.20a	9.20±0.93a
H02	30.78±2.33a	13.55±1.91a	10.45±0.91a

Values followed by the same letter indicate no significant difference ($P>0.05$).

植物致病性检测与体外溶血活性检测结果，初步判定 H02 在本研究体系中安全性良好。

2.4 杀菌剂的初步筛选与毒力测定

采用菌丝生长速率法对齐整小核菌进行杀菌剂的初步筛选，结果显示噻呋酰胺、乙蒜素、咯菌腈在供试浓度下对齐整小核菌的抑制率均

达 100.0% (表 4)，表现出较好的杀菌作用。进一步对上述 3 种药剂进行室内毒力测定，计算 EC_{50} 值。结果显示，噻呋酰胺和咯菌腈的 EC_{50} 值均低于 1.000 $\mu\text{g/mL}$ ，分别为 0.151 3 $\mu\text{g/mL}$ 和 0.083 7 $\mu\text{g/mL}$ ，而乙蒜素的 EC_{50} 值最高，为 6.944 1 $\mu\text{g/mL}$ (图 4，表 5)。因此，选取 EC_{50} 值较小的噻呋酰胺和咯菌腈分别与 H02 进行相容性试验。

2.5 噻呋酰胺、咯菌腈与 H02 的相容性测定

测定了 H02 菌液在含梯度浓度(50、100、150 $\mu\text{g/mL}$)噻呋酰胺或咯菌腈的 LB 培养基中的生长情况，以不加药剂组为对照，评估其相容性。结果显示(图 5)，培养至 6 h 和 12 h 时各处理组与对照组的菌液浓度均无显著差异；培养至 18 h 时，150 $\mu\text{g/mL}$ 咯菌腈处理组菌液浓度

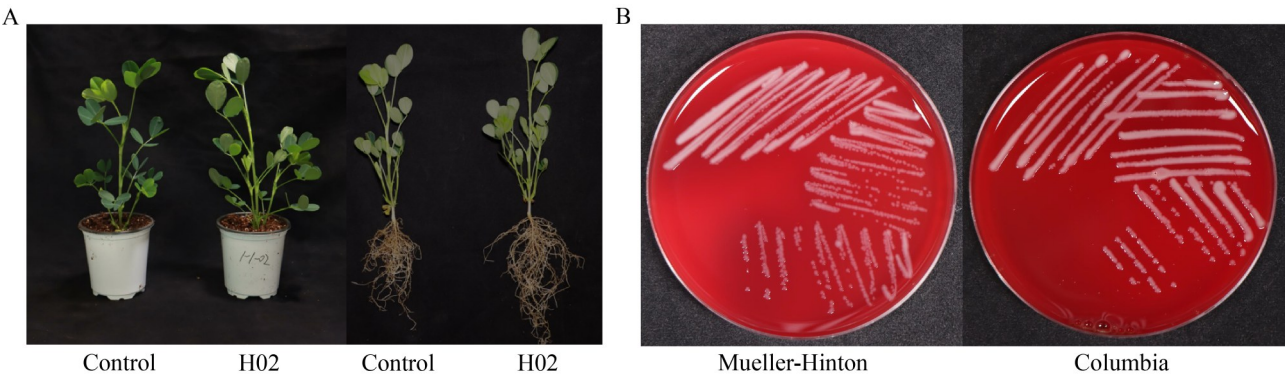


图3 H02的安全性评估

Figure 3 Safety assessment of H02. A: Pathogenicity assay of H02 on peanut plants; B: *In vitro* hemolysis activity assay of H02.

表4 供试杀菌剂对齐整小核菌的抑制率

Table 4 Inhibition rates of different fungicides against *Sclerotium rolfsii* Sacc.

Fungicide	Active content/%	Formulation	Treatment concentration/(μg/mL)	Inhibition rate/%
Thiﬂuzamide	96.2	TC	100	100.0
			25	100.0
			5	100.0
Pyraclostrobin	98.0	TC	100	100.0
			25	75.8
			5	52.1
Prothioconazole	95.0	TC	100	100.0
			25	77.8
			5	51.6
Ethylicin 100	80.0	EC	160	100.0
			80	100.0
Fludioxonil	500.0	WP	100	100.0
			200	100.0
Ningnanmycin	8.0	AS	80	100.0
			40	83.5
Hymexazol	30.0	AS	200	52.6
			100	15.4
Chlorothalonil	75.0	WP	1 250	100.0
			625	81.1
Carbendazim	50.0	WP	500	49.6
			250	10.2

TC: Technical material; EC: Emulsifiable concentrate; WP: Wettable powder; AS: Aqueous solution.

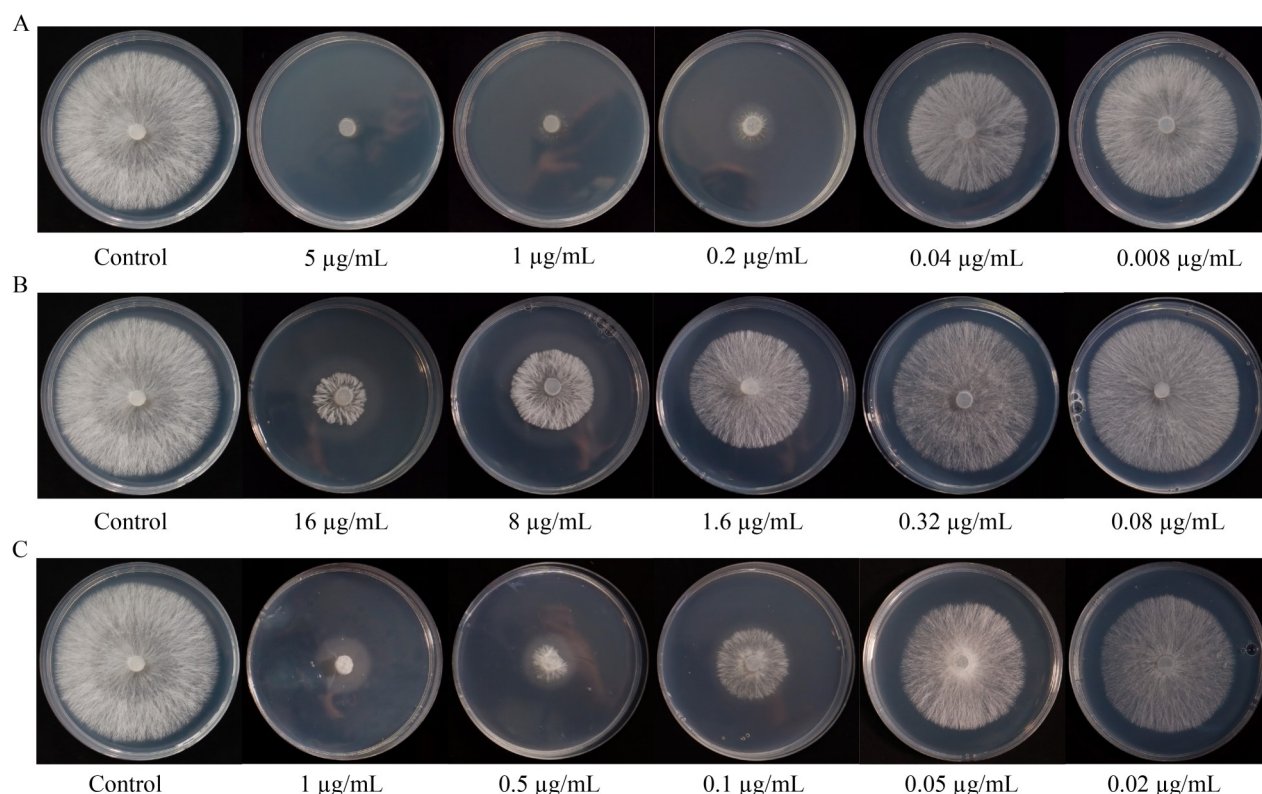


图4 三种杀菌剂对齐整小核菌的室内毒力测定结果

Figure 4 Results of *in vitro* toxicity assays of three fungicides against *Sclerotium rolfii* Sacc. A: Growth of *S. rolfii* on PDA plates containing different concentrations of thifluzamide; B: Growth of *S. rolfii* on PDA plates containing different concentrations of ethylcin; C: Growth of *S. rolfii* on PDA plates containing different concentrations of fludioxonil.

表5 三种杀菌剂对齐整小核菌的室内毒力回归方程及 EC_{50} 值

Table 5 Toxicity regression equations and EC_{50} values of three fungicides against *Sclerotium rolfii* Sacc.

Fungicide	Toxicity regression equation	$EC_{50}/(\mu\text{g/mL})$	Correlation coefficient	95% confidence interval
Thifluzamide	$y=0.911\ 8x+5.747\ 8$	0.151\ 3	0.977\ 2	0.084\ 4–0.271\ 3
Ethylcin	$y=0.974\ 3x+4.180\ 0$	6.944\ 1	0.988\ 7	4.486\ 6–10.747\ 6
Fludioxonil	$y=3.314\ 1x+8.569\ 9$	0.083\ 7	0.915\ 6	0.036\ 7–0.191\ 2

显著低于对照；培养至 24 h 时，100 $\mu\text{g/mL}$ 和 150 $\mu\text{g/mL}$ 咯菌腈处理组菌液浓度均显著降低，而各浓度噻呋酰胺处理组与对照组相比仍无显著差异。上述结果表明，随培养时间延长，较高浓度(100 $\mu\text{g/mL}$ 和 150 $\mu\text{g/mL}$)的咯菌腈对 H02 菌体生长具有抑制作用，而噻呋酰胺在实验浓度范围内对 H02 的生长均无显著影响。因此，选择噻呋酰胺与 H02 进行下一步复配试验。

2.6 噻呋酰胺与 H02 无菌发酵液对齐整小核菌的室内联合毒力测定

室内联合毒力测定结果显示，H02 无菌发酵液与 0.15 $\mu\text{g/mL}$ 或 0.30 $\mu\text{g/mL}$ 噻呋酰胺复配后对齐整小核菌菌丝生长及菌核萌发的抑制效果均优于相应浓度的单剂处理。所有复配组合的抑制比率(IR)均大于 1，表现为加和作用，且

0.15 $\mu\text{g/mL}$ 噻呋酰胺与无菌发酵液复配后的抑制率(菌丝 74.91%、菌核 95.58%)显著高于 0.30 $\mu\text{g/mL}$ 噻呋酰胺单剂处理(菌丝 68.04%、菌核 83.67%) (表 6, 图 6)。上述结果表明, H02 无菌发酵液适于与噻呋酰胺联合使用, 在保障防治效果的同时能有效降低噻呋酰胺的施用量。

2.7 复配剂对花生白绢病的盆栽防效测定

盆栽试验结果(图 7, 图 8)表明, H02 菌液、噻呋酰胺及复配剂处理均显著降低了花生白绢病的病情指数。阳性对照组病情指数达 60.36, 先施用 H02 菌液后补施半剂量噻呋酰胺的复配处理组病情指数最低(18.75), 防效最佳, 达

68.94%; 单独施用全剂量噻呋酰胺与单独施用 H02 菌液的处理组病情指数分别为 20.14 和 23.44, 防效分别为 66.63% 和 61.17%。上述结果表明, H02 菌株本身具有较强的生防潜力, 将其与半剂量噻呋酰胺复配使用可达到与全剂量噻呋酰胺相当的防控效果。

3 讨论与结论

齐整小核菌寄主范围广泛, 可侵染 500 多种植物, 涵盖 100 多科, 其菌丝分化形成的菌核抗逆性极强, 可在土壤耕作层中存活长达 3–5 年, 单一的防控手段难以实现对该病害的有效治理^[29]。采用生防菌与低剂量化学农药协同

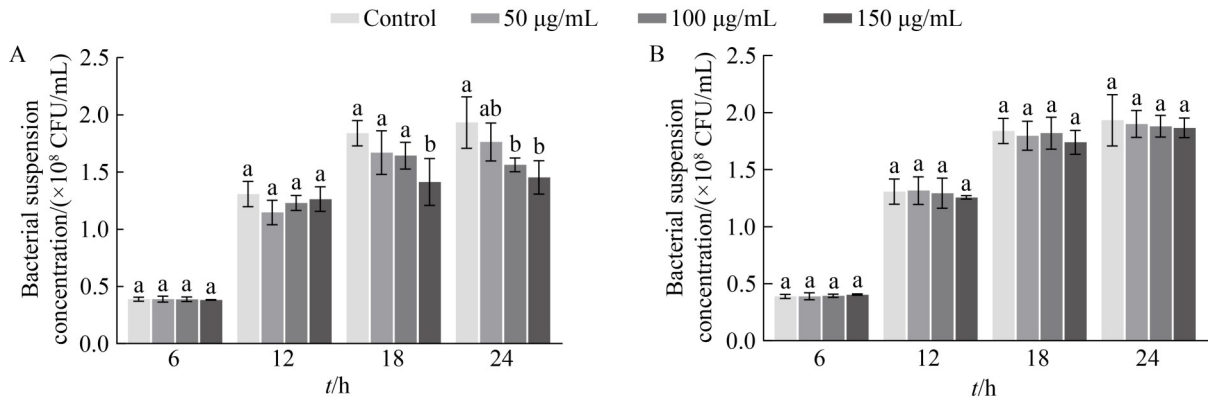


图5 H02在含梯度浓度咯菌腈或噻呋酰胺LB培养基中的生长动态
Figure 5 Growth dynamics of H02 in LB medium supplemented with different concentrations of fludioxonil or thifluzamide. A: Fludioxonil; B: Thifluzamide. Different lowercase letters indicate significant differences between treatment groups ($P<0.05$).

表6 噻呋酰胺(TFNA)与无菌发酵液(SFB)的抑制比率

Treatment	Mycelial plug			Sclerotium		
	Actual inhibition rate/%	Theoretical inhibition rate/%	IR	Actual inhibition rate/%	Theoretical inhibition rate/%	IR
SFB	17.59±0.97e	–	–	26.74±8.89d	–	–
0.15 $\mu\text{g/mL}$ TFNA	53.98±0.69d	–	–	72.90±4.28c	–	–
0.30 $\mu\text{g/mL}$ TFNA	68.04±0.55c	–	–	83.67±1.69b	–	–
0.15 $\mu\text{g/mL}$ TFNA+SFB	74.91±4.49b	62.08	1.21	95.58±7.66a	80.15	1.19
0.30 $\mu\text{g/mL}$ TFNA+SFB	87.92±2.40a	73.66	1.19	100.00±0.00a	88.04	1.14

Different lowercase letters indicate significant differences between treatment groups ($P<0.05$); – indicates no data available.

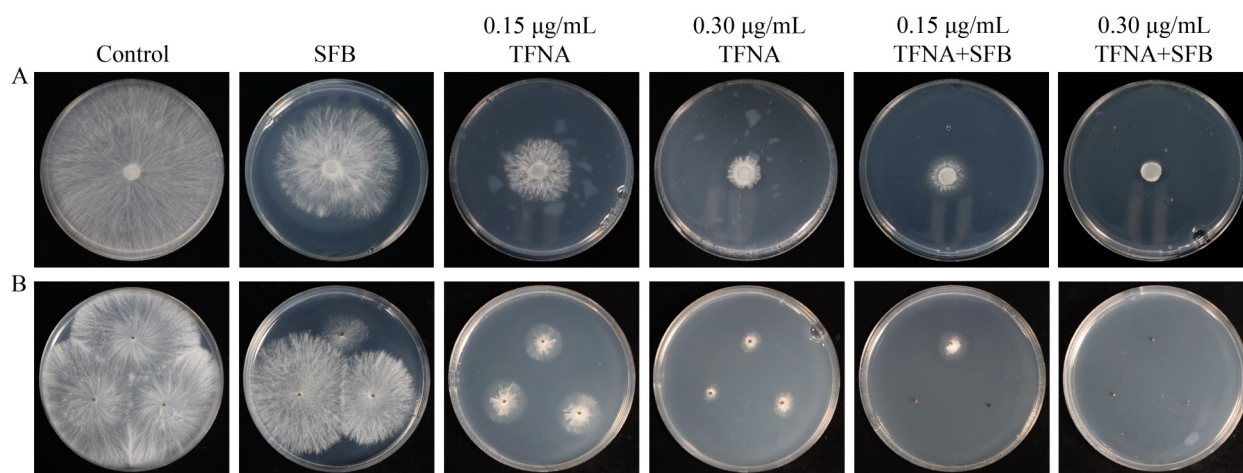


图6 噻呋酰胺(TFNA)与无菌发酵液(SFB)对齐整小核菌的室内联合毒力测定结果

Figure 6 *In vitro* combined toxicity assay results of thifluzamide (TFNA) and sterile fermentation broth (SFB) against *Sclerotium rolfsii* Sacc. A: Growth of mycelial plugs under different treatments; B: Germination of sclerotia under different treatments.

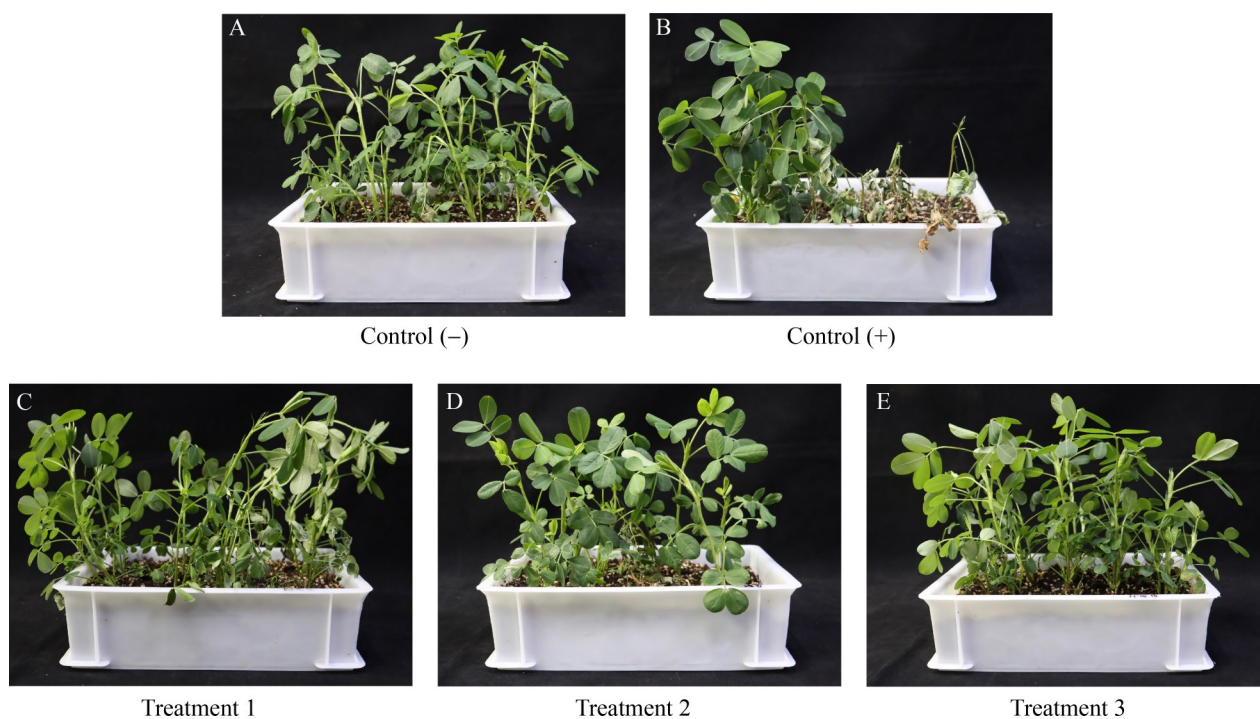


图7 不同处理对花生白绢病的盆栽防治效果

Figure 7 Control efficacy of different treatments against peanut southern blight in pot experiments. A: Control (-): Negative control without pathogen inoculation; B: Control (+): Positive control with pathogen inoculation; C: Treatment 1: Soil drench with H02 bacterial suspension, followed by a half-rate thifluzamide drench after pathogen inoculation; D: Treatment 2: Pathogen inoculation followed by a full-rate thifluzamide soil drench; E: Treatment 3: Soil drench with H02 bacterial suspension prior to pathogen inoculation.

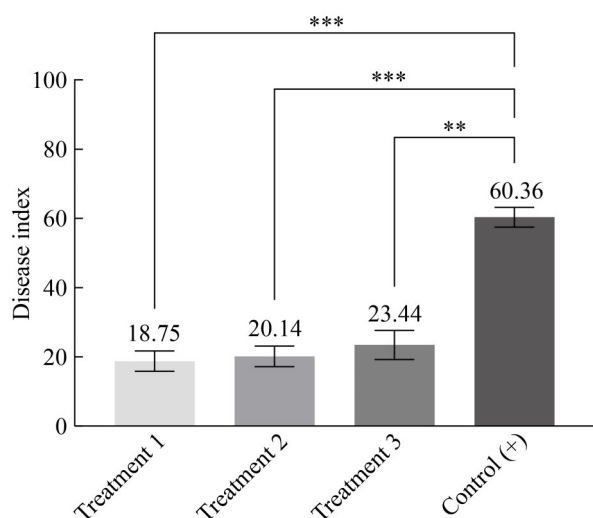


图8 花生白绢病病情指数统计

Figure 8 Disease index of peanut southern blight. ***: $P < 0.001$, indicating extremely significant differences; **: $P < 0.01$, indicating highly significant differences.

的综合防控策略,既能增强生防菌的定殖与适应能力,又能减少化学农药用量,延缓病原菌抗药性的发展,实现可持续的防控目标^[30-31]。已有研究证实,将生防菌与特定杀菌剂复配可提高对植物白绢病的防治效果,且其协同抑菌效果多优于单一施用生防菌或杀菌剂。例如,贺字典等^[32]的研究表明,噻呋酰胺与棘孢木霉或深绿木霉协同施用对北苍术白绢病的田间防效分别达 80.76% 和 78.82%,较单一施用噻呋酰胺分别提升 13.36% 和 10.64%。伍贤进等^[33]报道,将 250 $\mu\text{g/mL}$ 三唑酮溶液与 30 g/m^2 哈茨木霉孢子粉联合施用可显著降低鱼腥草白绢病的发病率并延缓病害发生时间。何俊焯等^[34]研究表明,哈茨木霉与啉氧菌酯联用对橡胶榕白绢病菌具显著的协同增效作用。然而,目前相关研究多集中于木霉属真菌与杀菌剂的协同防控,关于其他类型生防菌与杀菌剂协同防治植物白绢病的研究较少。

伯克霍尔德菌属作为一类重要的生防菌,

主要通过竞争、拮抗以及诱导植物抗病性等机制发挥防病作用,如吡咯伯克霍尔德菌 WY6-5 产生的挥发性抑菌物质二甲基二硫可抑制多种植物病原真菌的生长^[16];双向伯克霍尔德氏菌 XN08 产生的强效抗真菌化合物 pyrrolnitrin 对小麦纹枯病原真菌禾谷丝核菌(*Rhizoctonia cerealis*)具有拮抗活性^[17];唐菖蒲伯克霍尔德氏菌 KRS027 可通过激活水杨酸、茉莉酸和乙烯依赖的信号通路,诱导植物系统抗性(induced systemic resistance, ISR)^[25]。除生物防治功能外,伯克霍尔德菌还被报道具有促生潜力,如伯克霍尔德菌 CR318 携带编码高亲和力无机磷酸盐转运系统的 *pstSCAB* 基因簇,赋予了其较强的溶磷、解钾能力,经该菌株浸种处理后玉米的生长指标与根系发育均得到显著提升^[35]。基于其在促生与生防方面的双重功能,伯克霍尔德菌在菌药协同防控体系中显示出良好的应用潜力。已有研究表明,部分伯克霍尔德菌对常用化学农药具有较高耐受性,为其与药剂复配提供了可行性。Pratiksha 等^[36]报道伯克霍尔德菌 I-38 对多菌灵等常用农药具有较强耐受性;Omar 等^[37]发现洋葱伯克霍尔德菌 C91 与极低浓度多菌灵 (1 $\mu\text{g/mL}$) 复配对番茄根腐病的防效提升至 46%,显著优于单一处理;扈进冬等^[20]将越南伯克霍尔德氏菌 B418 与噻唑膦复配可明显降低黄瓜根结线虫病情指数,提高噻唑膦对黄瓜根结线虫病的防效。

本研究筛选获得的生防菌株唐菖蒲伯克霍尔德菌 H02 对白绢病菌表现出良好的拮抗作用,抑制率为 76.03%。相容性测定结果表明, H02 对多种杀菌剂均表现出较好的耐受性,且能在高浓度噻呋酰胺(150 $\mu\text{g/mL}$)中正常生长,这为其协同应用提供了重要依据。室内联合毒力测定与盆栽试验均证实, H02 与半剂量噻呋酰胺联用可保持良好防效,支持了伯克霍尔德菌 H02 与噻呋酰胺协同防控白绢病的可行性。然

而, 目前关于伯克霍尔德菌与杀菌剂的相容性尚无规律可循, 协同增效机理研究较为空白, 后续研究需深入解析其协同增效的分子机制, 同时优化并推广田间施用技术, 促进该策略的应用与实践, 为植物病害综合治理提供新的技术路径。

作者贡献声明

黄依蕊: 实验设计、数据分析、文章撰写; 朱哲远: 样品采集与管理; 王颀: 生防菌的筛选、数据统计; 刘璐: 杀菌剂的筛选、数据统计; 周勇: 研究构思、材料收集; 杨斌: 材料收集、植株管理; 彭迪: 实验设计、文章审阅; 肖姬玲: 实验指导、文章审阅与修订。

作者利益冲突公开声明

作者声明不存在任何可能会影响本文所报告工作的已知经济利益或个人关系。

参考文献

- [1] 张霞, 许曼琳, 郭志青, 于静, 吴菊香, 于建垒, 刘同金, 李新国, 迟玉成, 万书波. 暹罗芽孢杆菌 ZHX-10 的分离鉴定及其对花生白绢病的生防效果[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(4): 674-680.
Zhang X, Xu ML, Guo ZQ, Yu J, Wu JX, Yu JL, Liu TJ, Li XG, Chi YC, Wan SB. Isolation and identification of *Bacillus sinensis* ZHX-10 and analysis on its biological control activities against *Sclerotium rolfsii*[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2020, 42(4): 674-680 (in Chinese).
- [2] 张国彦, 徐永伟, 李好海, 周琳, 崔莹钧, 张如意. 2013–2022 年河南省花生病虫害发生特点、原因与防控对策[J]. 中国植保导刊, 2024, 44(5): 30-35.
Zhang GY, Xu YW, Li HH, Zhou L, Cui YJ, Zhang YR. Occurrence characteristics, cause analysis and control countermeasures of peanut pests and diseases in Henan Province from 2013 to 2022[J]. China Plant Protection, 2024, 44(5): 30-35 (in Chinese).
- [3] 宋万朵, 晏立英, 于东洋, 康彦平, 王前前, 陈玉宁, 淮东欣, 王志慧, 王欣, 雷永, 廖伯寿. 花生白绢病防治药剂的筛选[J]. 中国油料作物学报, 2024, 46(5): 1113-1119.
Song WD, Yan LY, Yu DY, Kang YP, Wang QQ, Chen YN, Huai DX, Wang ZH, Wang X, Lei Y, Liao BS. Screening of fungicides for the control of peanut stem rot[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2024, 46(5): 1113-1119 (in Chinese).
- [4] Franke MD, Brenneman TB, Stevenson KL, Padgett GB. Sensitivity of isolates of *Sclerotium rolfsii* from peanut in Georgia to selected fungicides[J]. Plant Disease, 1998, 82(5): 578-583.
- [5] 李亮亮, 李磊, 甄静, 陈国参, 杨文玲, 雷高, 王继雯. 贝莱斯芽孢杆菌 HYN-9 的分离、鉴定及其对花生白绢病的生防作用[J]. 花生学报, 2024, 53(2): 55-62.
Li LL, Li L, Zhen J, Chen GC, Yang WL, Lei G, Wang JW. Isolation and identification of *Bacillus velezensis* HYN-9 and its biocontrol efficacy against *Sclerotium rolfsii*[J]. Journal of Peanut Science, 2024, 53(2): 55-62 (in Chinese).
- [6] Jia S, Song C, Dong H, Yang XJ, Li XH, Ji MS, Chu J. Evaluation of efficacy and mechanism of *Bacillus velezensis* CB13 for controlling peanut stem rot caused by *Sclerotium rolfsii*[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1111965.
- [7] 谢久凤, 陈梦晓, 王勃, 裴亚欣, 张继冉, 陈红歌, 杨森. 贝莱斯芽孢杆菌 EEAM 10B 对花生白绢病的防治效果及全基因组测序分析[J]. 中国生物防治学报, 2025, 41(2): 347-361.
Xie JF, Chen MX, Wang B, Pei YX, Zhang JR, Chen HG, Yang S. Effect of *Bacillus velezensis* EEAM 10B on peanut southern blight and whole genome sequencing analysis[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2025, 41(2): 347-361 (in Chinese).
- [8] 职永玺, 何海荣, 周琳, 高飞, 何磊鸣, 赵特, 杜鹏强. 防控花生白绢病的根际放线菌分离鉴定及防效评价[J]. 农药学报, 2024, 26(1): 101-113.
Zhi YX, He HR, Zhou L, Gao F, He LM, Zhao T, Du PQ. Isolation, identification and evaluation of rhizosphere actinomycetes for control of peanut southern blight[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2024, 26(1): 101-113 (in Chinese).
- [9] 李佳昕, 蔡晨亮, 王琰, 张茹琴, 王志奎, 鄢洪海. 棘孢木霉菌鉴定及其对花生白绢病生防机制的研究[J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(6): 1534-1544.
Li JX, Cai CL, Wang Y, Zhang RQ, Wang ZK, Yan HH. Identification of *Trichoderma asperellum* and its biocontrol mechanisms against peanut southern blight[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2022, 38(6): 1534-1544 (in Chinese).
- [10] Peng D, Luo K, Jiang HD, Deng YN, Bai LY, Zhou XM. Combined use of *Bacillus subtilis* strain B-001 and bactericide for the control of tomato bacterial wilt[J]. Pest Management Science, 2017, 73(6): 1253-1257.
- [11] Ji MX, Yao KB, Li GP, Wu X, Chen HZ, Zhuang YQ. Control effects of *Bacillus subtilis* DJ-6 and pyraclostrobin alone and in combination against *Fusarium oxysporum*[J]. Agricultural Science & Technology, 2014, 15(11): 2020-2025.
- [12] Xu XM, Wang YQ, Lei T, Sohail MA, Wang J, Wang HY. Synergistic effects of *Bacillus amyloliquefaciens*

- SDTB009 and difenoconazole on *Fusarium* wilt of tomato[J]. Plant Disease, 2022, 106(8): 2165-2171.
- [13] Manna M, Park I, Seo YS. Genomic features and insights into the taxonomy, virulence, and benevolence of plant-associated *Burkholderia* species[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(1): 121.
- [14] Parke JL, Gurian-Sherman D. Diversity of the *Burkholderia cepacia* complex and implications for risk assessment of biological control strains[J]. Annual Review of Phytopathology, 2001, 39: 225-258.
- [15] Wang C, Henkes LM, Doughty LB, He M, Wang DF, Meyer-Almes FJ, Cheng YQ. Thailandepsins: bacterial products with potent histone deacetylase inhibitory activities and broad-spectrum antiproliferative activities[J]. Journal of Natural Products, 2011, 74(10): 2031-2038.
- [16] 宫安东, 朱梓钰, 路亚南, 万海燕, 吴楠楠, Cheelo Dimuna, 龚双军, 文淑婷, 侯晓. 吡咯伯克霍尔德菌 WY6-5 的溶磷、抑菌与促玉米生长作用研究[J]. 中国农业科学, 2019, 52(9): 1574-1586.
- Gong AD, Zhu ZY, Lu YN, Wan HY, Wu NN, Dimuna C, Gong SJ, Wen ST, Hou X. Functional analysis of *Burkholderia pyrrhocina* WY6-5 on phosphate solubilizing, antifungal and growth-promoting activity of maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(9): 1574-1586 (in Chinese).
- [17] An C, Ma SJ, Liu C, Ding H, Xue WJ. *Burkholderia ambifaria* XN08: a plant growth-promoting endophytic bacterium with biocontrol potential against sharp eyespot in wheat[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 906724.
- [18] Wang XQ, Liu AX, Guerrero A, Liu J, Yu XQ, Deng P, Ma L, Baird SM, Smith L, Li XD, Lu SE. Occidiofungin is an important component responsible for the antifungal activity of *Burkholderia pyrrhocina* strain Lyc2[J]. Journal of Applied Microbiology, 2016, 120(3): 607-618.
- [19] 王俊凯, 邓勋, 邵鹏, 宋小双, 宋瑞清. 绿木霉与双向伯克霍尔德氏菌离体互作机制[J]. 防护林科技, 2022(4): 1-7.
- Wang JK, Deng X, Shao P, Song XS, Song RQ. Interaction mechanism between *Trichoderma virens* and *Burkholderia ambifaria* in vitro[J]. Protection Forest Science and Technology, 2022(4): 1-7 (in Chinese).
- [20] 扈进冬, 魏艳丽, 王贻莲, 刘宝军, 李纪顺. 越南伯克霍尔德氏菌 B418 配合噻唑膦提高对黄瓜根结线虫的防控效果[J]. 中国蔬菜, 2022(3): 94-99.
- Hu JD, Wei YL, Wang YL, Liu BJ, Li JS. Enhancing control effect of *Burkholderia vietnamiensis* B418 combined with fosthiazate against cucumber root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*) [J]. China Vegetables, 2022(3): 94-99 (in Chinese).
- [21] 卫鑫辰, 王巧, 石彬, 谢学文, 石延霞, 柴阿丽, 李宝聚, 李磊. 新洋葱伯克霍尔德氏菌 YM12 的分离鉴定及其对黄瓜软腐病的防治效果[J]. 中国生物防治学报, 2024, 40(5): 1088-1098.
- Wei XC, Wang Q, Shi B, Xie XW, Shi YX, Chai AL, Li BJ, Li L. Isolation and identification of *Burkholderia cenocepacia* YM12 and its control effect on cucumber soft rot disease[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2024, 40(5): 1088-1098 (in Chinese).
- [22] 朱杰, 郑利乐, 钟鸣鸾, 童灵洁, 李洁玲, 李华平, 李云锋, 聂燕芳. 洋葱伯克霍尔德菌 GD1-1 的分离鉴定及对香蕉枯萎病的生防潜力[J]. 华南农业大学学报, 2025, 46(1): 72-80.
- Zhu J, Zheng LL, Zhong ML, Tong LJ, Li JL, Li HP, Li YF, Nie YF. Isolation and identification of *Burkholderia contaminans* strain GD1-1 and its bio-control potential against *Fusarium* wilt of banana[J]. Journal of South China Agricultural University, 2025, 46(1): 72-80 (in Chinese).
- [23] 史晓梦, 申红妙, 王亚聪, 冉隆贤. 葡萄生单轴霉菌围可培养微生物多样性及潜在生防菌研究[J]. 微生物学报, 2024, 64(5): 1626-1640.
- Shi XM, Shen HM, Wang YC, Ran LX. Diversity of culturable microorganisms in pathosphere of *Plasmopara viticola* and screening of potential biocontrol strains[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2024, 64(5): 1626-1640 (in Chinese).
- [24] 梁赛玉, 何斌泉, 艾彩霞, 龚智浩, 陈诗琦, 李逸彤, 单体江. 猕猴桃细菌性溃疡病原鉴定及室内防治药剂筛选[J]. 南方农业学报, 2025, 56(12): 3761-3772.
- Liang SY, He BX, Ai CX, Gong ZH, Chen SQ, Li YT, Shan TJ. Pathogen identification of kiwifruit bacterial canker and screening of indoor control agents[J]. Journal of Southern Agriculture, 2025, 56(12): 3761-3772 (in Chinese).
- [25] Wang D, Luo WZ, Zhang DD, Li R, Kong ZQ, Song J, Dai XF, Alkan N, Chen JY. Insights into the biocontrol function of a *Burkholderia gladioli* strain against *Botrytis cinerea* [J]. Microbiology Spectrum, 2023, 11(2): e04805-22.
- [26] 吴慧芳, 蒙耀, 石晖琴, 魏琳, 沈硕. 一株马铃薯干腐病生防菌的鉴定及其抑菌活性研究[J]. 植物保护, 2024, 50(3): 111-120.
- Wu HF, Meng Y, Shi HQ, Wei L, Shen S. Identification of a biocontrol bacterium against potato dry rot and its antibacterial activity[J]. Plant Protection, 2024, 50(3): 111-120 (in Chinese).
- [27] Peng D, Li SD, Chen CJ, Zhou MG. Combined application of *Bacillus subtilis* NJ-18 with fungicides for control of sharp eyespot of wheat[J]. Biological Control, 2014, 70: 28-34.
- [28] 李爽, 张志钊, 高飞, 赵特, 杜鹏强, 周琳. 花生白绢病菌拮抗细菌的分离鉴定及其温室抑菌促生效果[J]. 农药学报, 2024, 26(2): 337-347.
- Li S, Zhang ZF, Gao F, Zhao T, Du PQ, Zhou L. Isolation and identification of antagonistic bacteria against *Sclerotium rolfsii* causing peanut southern blight and its inhibitory effect on *S. rolfsii* and growth-promotion to peanut in greenhouse[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2024, 26(2): 337-347 (in Chinese).
- [29] Rabinal C, Bhat S. Identification of differentially

- expressed genes in *Trichoderma koningii* IABT1252 during its interaction with *Sclerotium rolfsii*[J]. *Current Microbiology*, 2020, 77(3): 396-404.
- [30] 刘继红, 甘良, 蓝星杰, 张秋丽, 王阳, 宗兆锋. 生防菌与化肥和杀菌剂混用对棉花枯萎病的防病促生作用[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(7): 165-172.
- Liu JH, Gan L, Lan XJ, Zhang QL, Wang Y, Zong ZF. Disease preventing and growth promoting effects of mixed fungicides, biocontrol agents and fertilizers on cotton *Fusarium* wilt[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2016, 44(7): 165-172 (in Chinese).
- [31] 宁俊琪. 辣椒内生细菌 LY7 与咪鲜胺协同防治辣椒炭疽病研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2022.
- Ning JQ. Study on the synergistic control of pepper anthracnose with endophytic bacteria LY7 and prochloraz[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2022 (in Chinese).
- [32] 贺字典, 韩亚梅, 金歌, 高玉峰, 闵康. 木霉菌协同杀菌剂防治北苍术白绢病的增效作用[J]. *中国生物防治学报*, 2023, 39(5): 1244-1252.
- He ZD, Han YM, Jin G, Gao YF, Min K. Synergistic effect of *Trichoderma* and fungicides on *Atractylodes chinensis* southern blight caused by *Sclerotium rolfsii*[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2023, 39(5): 1244-1252 (in Chinese).
- [33] 伍贤进, 牛友芽, 周烜, 魏林, 李胜华, 魏麟. 化学抗菌剂对哈茨木霉防治鱼腥草白绢病的协同作用[J]. *怀化学院学报*, 2014, 33(11): 1-5.
- Wu XJ, Niu YY, Zhou T, Wei L, Li SH, Wei L. Synergistic effect of chemical antibacterial and *Trichoderma harzianum* on *Houttuynia cordata* southern blight disease caused by *Sclerotium rolfsii*[J]. *Journal of Huaihua University*, 2014, 33(11): 1-5 (in Chinese).
- [34] 何俊焱, 吴卓慧, 程东美. 木霉和杀菌剂联用对橡胶榕白绢病菌的抑制作用[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2021, 47(3): 312-316.
- He JL, Wu ZH, Cheng DM. Inhibitory effects of *Trichoderma* and fungicides on southern blight disease of *Ficus elastica* caused by *Sclerotium rolfsii*[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2021, 47(3): 312-316 (in Chinese).
- [35] You M, Fang SM, MacDonald J, Xu JP, Yuan ZC. Isolation and characterization of *Burkholderia cenocepacia* CR318, a phosphate solubilizing bacterium promoting corn growth[J]. *Microbiological Research*, 2020, 233: 126395.
- [36] Pratiksha P, Harish DS, Krunal M, Paresh P, Mrugesh K. Multiple plant growth promoting activities of *Burkholderia lata* I-38, a bacterium from sugarcane field[J]. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 2024, 8(10): 1457-1463.
- [37] Omar I, O'Neill TM, Rossall S. Biological control of *Fusarium* crown and root rot of tomato with antagonistic bacteria and integrated control when combined with the fungicide carbendazim[J]. *Plant Pathology*, 2006, 55(1): 92-99.