DOI:10.16861/j.cnki.zggc.2026.0575

冬荪 Phd01 发酵液对辣椒采后灰霉病的生防效果

朱晓琴[1],刘静月[1],贾陆逊[1],刘冬梅[1],裴冬丽[1],韩 霜[1],
张庆琛[1],郭 蓓[2],王家才[2],利金站[3]

(1.商丘师范学院生物与食品学院 河南商丘 476000; 2.商丘市农林科学院 河南商丘 476000;
3.河南金隆菇业有限公司 河南虞城 476300)

摘 要:为开发防治辣椒灰霉病的生物源制剂,以冬荪发酵液为材料,采用平板拮抗法测定发酵液对病原菌菌丝生长的抑制效果,并在辣椒离体果实上进行活体防效验证,同时测定果实防御酶活性及氧自由基清除能力。结果表明,冬荪发酵液对灰葡萄孢菌丝生长表现出显著抑制作用,抑菌率达 77.4%;活体试验证实其能有效减轻辣椒果实灰霉病症状;发酵液处理可显著提高辣椒过氧化物酶和苯丙氨酸解氨酶活性,增强辣椒抗氧化能力。综上,冬荪发酵液兼具直接抑菌和诱导寄主防御响应的双重作用机制,通过抑制病原菌生长、激活防御酶系统及提升活性氧清除效率,显著降低辣椒病害发生程度,可为辣椒采后灰霉病绿色生防菌剂开发提供理论依据与菌种资源。

关键词:辣椒采后灰霉病;灰葡萄孢;冬荪 Phd01 发酵液;抑菌活性;生防效果

中图分类号:S641.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-2871(2026)10-216-07

Biological control effects of postharvest pepper gray mold by *Phallus dongsun* Phd01 fermentation broth

Zhu Xiaoqin[1], Liu Jingyue[1], Jia Luxun[1], Liu Dongmei[1], Pei Dongli[1], Han Shuang[1], Zhang Qingchen[1], Guo Bei[2], Wang Jiacai[2], Li Jinzhan[3]

(*1. College of Biology and Food, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, Henan, China; 2. Shangqiu Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shangqiu 476000, Henan, China; 3. Henan Jinlong Mushroom Industry Co., Ltd., Yucheng 476300, Henan, China*)

Abstract: To explore biocontrol agents for managing gray mold of pepper , this study evaluated the antifungal activity and host defense-inducing effects of *Phallus dongsun* Phd01 fermentation broth against *Botrytis cinerea*. The inhibitory effect on mycelial growth was assessed using a plate confrontation assay, while *in vivo* efficacy was verified on detached pepper fruits. Additionally, the activities of defense-related enzymes in fruits were measured. The results showed that *P. dongsun* Phd01 fermentation broth significantly suppressed mycelial growth of *B. cinerea*, with an inhibition rate of 77.4%. *In vivo* experiments confirmed that the broth effectively alleviated gray mold symptoms on pepper fruits. Physiological assays revealed that the fermentation broth significantly increased the activities of peroxidase(POD)and phenylalanine ammonia-lyase(PAL), and enhanced total antioxidant capacity. Collectively, *P. dongsun* Phd01 fermentation broth exhibits dual mechanisms of direct antifungal action and induced host defense responses. By inhibiting pathogen growth, activating defense enzymes, and improving total antioxidant capacity, it effectively reduced fruit decay, demonstrating promising potential for development as a biocontrol agent against pepper gray mold.

Key words: Postharvest pepper gray mold; *Botrytis cinerea*; *Phallus dongsun* Phd01 fermentation broth; Antagonism; Biological control effects

辣椒(*Capsicum annuum*)是我国重要的经济作物,在蔬菜产业中占有重要地位[1]。然而,随着辣椒种植规模的不断扩大及连作年限的增加,辣椒病虫害问题逐渐凸显,对辣椒产量和品质构成严重威胁[2]。辣椒常见病害可分为真菌性、细菌性和病毒性三类。这些病害的暴发不仅导致产量锐减,还显著降低果实品质,造成经济损失。其中真菌性病害因传播途径广、环境适应性强,在实际生产中造成

收稿日期:2026-08-02;**修回日期:**2026-08-27

基金项目:河南省科技攻关项目(262102111065,262102110182);河南省教育厅重点科研项目(26B180010,25A210027,26B210018);河南省自然科学基金(262300421512)

作者简介:朱晓琴,女,副教授,主要从事食用菌资源开发与应用工作。E-mail:zhuxq320@126.com

的经济损失尤为严重。辣椒常见真菌性病害主要包括疫病、枯萎病、炭疽病和灰霉病[3]，分别由疫霉菌、尖孢镰刀菌、炭疽菌和灰葡萄孢引起。其中辣椒疫病、枯萎病属土传病害[4-5]，辣椒炭疽病、灰霉病属气传病害[6]。气传病害主要通过空气扩散，具有传播速度快、易暴发和难防控的特性。

辣椒灰霉病作为典型的气传真菌性病害，是最具破坏性的辣椒病害之一。辣椒灰霉病易在温度20~25 ℃或相对湿度90%以上的环境下发生，主要危害幼苗、叶片、茎枝和果实等部位[7]。灰霉病传播速度快，对辣椒危害严重，常使用农业防治和化学防治。农业防治主要通过改善栽培环境，包括通风透光、控制湿度、加强管理、合理调控氮肥用量、适当增加磷钾肥比例等有效增强植株抗病性。化学防治虽能有效控制病害，但长期使用杀菌剂会导致病原菌产生抗药性[8]，同时造成环境污染。为了生态环境的可持续发展，利用生物学方法替代化学试剂进行生物防治，是当前的研究热点。丝瓜伤流液可有效抑制辣椒灰霉病菌丝生长[9]；竹焦油能明显降低果实发病率[10]；枯草芽孢杆菌可有效抑制灰葡萄孢菌丝生长[11]。黄伟等[12]研究发现，放线菌A89及其挥发性物质对灰霉病具有良好的抑制效果。绿色木霉在辣椒灰霉病病害的防治方面表现出较好效果[13]。

值得注意的是，灰霉病病害不仅危害辣椒生长期，在采后贮藏、运输及销售环节同样构成严重威胁。灰霉病和炭疽病是辣椒采后最主要的病害类型，在果实采收后仍可继续侵染，尤其在冷链流通和货架期过程中，因温湿度条件适宜，病斑扩展迅速，导致果实腐烂、失水、霉变，严重缩短贮藏寿命和货架期。研究表明，辣椒采后因病害造成的腐烂损耗率可高达60%，已成为制约冷链物流效率和产业经济效益的关键因素之一。因此，加强对辣椒采后贮存期病害的防控研究，对减少产后损失、保障市场供应和提升产业竞争力具有重要的现实意义。

大型真菌分布广泛，其活性成分可有效抑制植物病原真菌，是重要的生物防治资源[14]。硫磺菌和白乳菇的子实体提取物能有效防治小麦赤霉病[15]；卷边桩菇的香豆素衍生物可抑制茄病镰刀菌和灰葡萄孢霉菌[16]；猴头菇发酵液对黄瓜褐斑菌有明显的抑制作用[17]。这些研究结果表明，大型真菌的活性物质具有生物防治的重要功效，为绿色农业病虫害防控提供了新途径。

冬荪（*Phallus dongsun*）是一种珍稀的食药两用大型真菌，学名白鬼笔（*Phallus impudicus*），属于担子菌亚门腹菌纲鬼笔目鬼笔科鬼笔属（*Phallus*）[18]。目前冬荪已商业化生产，不仅在烹饪中以其脆嫩口感和独特风味备受推崇，更在营养、药用及抑菌方面展现出较高价值[19]。冬荪富含蛋白质、多糖、粗纤维、黄酮及16种氨基酸，并且富含镁、钙等微量元素[20-21]。卯晓岚[22]在《中国大型真菌》中记载，冬荪（白鬼笔）具有活血止痛、祛风除湿的功效，其煎汁可作为食品的短期防腐剂。据此推测，冬荪含有抑菌活性物质，但目前对冬荪的研究还多停留在营养成分分析方面，对冬荪活性物质的应用研究报道较少，尤其抑菌活性亟待解析。冬荪是天然食药用真菌资源，因此对植物性病菌的防治具有环境友好、安全性高、可持续性发展、受国家政策支持的优点，具备重要的研究价值与应用前景。

鉴于此，笔者通过分离鉴定辣椒采后灰霉病致病菌；评价冬荪Phd01发酵液体外抑菌活性与离体辣椒果实防病效果；并从防御酶活性、抗氧化能力层面初步揭示冬荪发酵液的生防作用机制，以期为辣椒采后灰霉病绿色防控提供理论参考与生防资源。

1　材料与方法

1.1　材料

供试辣椒灰霉病病原菌于2023年夏季在商丘师范学院特色微生物重点实验室分离自市售发病大牛角椒辣椒果实，以马铃薯葡萄糖琼脂（PDA）培养基纯化培养，经形态学与分子生物学鉴定后，命名该菌株为Q-01，保存于−20 ℃冰箱中备用。广谱测试中的病原菌包括假禾谷镰刀菌（*Fusarium pseudograminearum*）、胶孢炭疽菌（*Colletotrichum gloeosporioides*）、层出镰刀菌（*F. proliferatum*）、草莓炭疽菌（*C. fragariae*）、瓜果腐霉菌（*Pythium aphanidermatum*），均由商丘师范学院特色微生物重点实验室保存和提供。冬荪菌株Phd01于2023年秋季采自驻马店确山县石滚河镇附近山林中，采后带回实验室经组织分离纯化获得，鉴定后保存在4 ℃冰箱中备用。

供试辣椒为市售健康、大小均匀的大牛角椒。

培养基及配方：PDA培养基含马铃薯200 g、葡萄糖20 g、琼脂粉20 g，加水定容至1000 mL；液体培养基（PDB）除不加琼脂外，其他成分与PDA相同。

1.2　方法

1.2.1　病原菌的分离纯化与鉴定　发病辣椒记录

拍照后，在超净工作台内，用 75%乙醇擦拭辣椒果实表面，然后用无菌水冲洗 3 次，最后剪开辣椒，用镊子夹取病健处辣椒果肉放入 PDA 培养基中，28 ℃培养至菌丝萌发，挑取菌丝转接到新的 PDA 平板上，待产生孢子后单孢涂布进行纯化，获得单孢菌落。纯化后根据柯赫氏法则进行致病性检验。

病原菌鉴定[23]：采用 2% CTAB 法从病原菌的菌丝中提取 DNA，选用 ITS1F、ITS4 真菌鉴定常用引物对目的 DNA 进行 PCR 扩增，将扩增条带测序结果与 NCBI 数据库中的序列进行比对，采用 MEGA11 以邻接法构建系统发育树；同时进行显微形态观察。

1.2.2 冬荪菌种的分离与发酵液制备 在超净工作台中，用 75%乙醇对冬荪菌蕾消毒且无菌水冲洗，用无菌刀切开菌蕾，夹取子实体幼体 5 mm 大小的组织块，接种于 PDA 培养基上，25 ℃恒温倒置培养。当接种冬荪的培养基长出白色菌丝时，在超净工作台上用接种环挑取菌丝转入下一个 PDA 培养基中，重复以上操作 3 次，得到纯化的单一菌株。夹取 6 个 7 mm 的菌饼放入 300 mL 的 PDA 液体培养基，在 25 ℃、180 r·min^{-1} 下培养 4 周，冬荪菌丝球直径约 3 mm，密度 15~25 个•mL^{-1}，获得冬荪发酵液，此时抑菌活性最高。

1.2.3 冬荪发酵液对病原菌抑菌率的测定 冬荪发酵液以 8000 r·min^{-1} 离心 10 min 获得冬荪上清液。在超净工作台中收集冬荪发酵上清液，经 0.22 μm 微孔滤膜过滤除菌，制备无菌发酵液。采用混合平板法测定冬荪发酵液对辣椒果腐病病原菌的抑菌率，将灭菌后的 PDA 培养基冷却至约 50 ℃备用，同时将冬荪无菌发酵液置于 42 ℃水浴锅中恒温预热。在超净工作台上，将灭菌 PDA 培养基与冬荪无菌发酵液进行不同比例混匀，迅速分装到培养皿中，分别制得含有冬荪发酵液 20%、30%、40%、50%的培养基，待平板凝固后，使用灭菌打孔器从病原菌培养皿中制取直径 7 mm 的菌饼，用无菌镊子接种于平板中央。以等体积无菌水与 PDA 配制的平板作为对照。不同浓度冬荪发酵液抑菌测试所用指示菌相同，为试验材料中的病原菌菌株，28 ℃倒置培养，待对照菌落长满培养皿后，测定菌落直径，每个处理重复 3 次[24]。抑菌率/%=（对照组菌落直径−处理组菌落直径）/对照组菌落直径×100。

1.2.4 冬荪发酵液对辣椒果实灰霉病防效的测定 选取大小一致健康的辣椒果实，使用 75%的乙醇溶液擦拭表面消毒，然后用无菌水冲洗 3 次，晾干后备用。本试验设置 3 个处理组，每个处理组 10 个重复。对照组：辣椒果实浸泡在无菌水中 20 min，在辣椒上接种 3 个直径为 7 mm 空白 PDA。灰葡萄孢组：辣椒果实浸泡在无菌水中 20 min，在辣椒上接种 3 个直径为 7 mm 的灰葡萄孢菌饼。Phd01＋灰葡萄孢组：辣椒果实放置在冬荪发酵液中浸泡 20 min，晾干后在辣椒上接种直径为 7 mm 的 3 个灰葡萄孢菌饼。辣椒放置在一次性保鲜盒中，25 ℃培养，每天拍照，7 d 后统计发病情况，计算病情指数及防效。辣椒果实病害的分级标准如下[25]：0 级：健康无病症；1 级：病斑长度＜5 mm；2 级：病斑长度介于 5 mm 至果梗总长的 1/2 之间；3 级：病斑超过果梗总长的 1/2 或蔓延至萼片；4 级：病斑面积占果实表面积＜20%；5 级：病斑面积占果实表面积≥20%。

病情指数=100 × Σ（各病级果数×对应级值）/（调查总果数×最高级值）；

防治效果/%=（对照组病情指数−处理组病情指数）/ 对照组病情指数×100。

1.2.5 辣椒果实防御性酶活性测定及 DPPH 氧自由基清除率的计算 采用愈创木酚法测定过氧化物酶（POD）活性，基于 PAL 催化 *L*-苯丙氨酸生成反式肉桂酸的特性，测定苯丙氨酸解氨酶（PAL）活性[24]。DPPH 氧自由基清除率的计算是基于 DPPH（1，1-二苯基-2-三硝基苯肼）自由基清除原理：DPPH 在乙醇溶液中呈紫色，在 517 nm 处有特征吸收峰；当抗氧化物质与 DPPH 反应时，会提供氢原子使其还原，导致溶液褪色，吸光度降低，其降低程度与样品的自由基清除能力成正比，通过测定反应前后吸光度的变化即可计算样品的抗氧化活性[26]。每个处理重复 5 次。

1.3 数据统计与分析

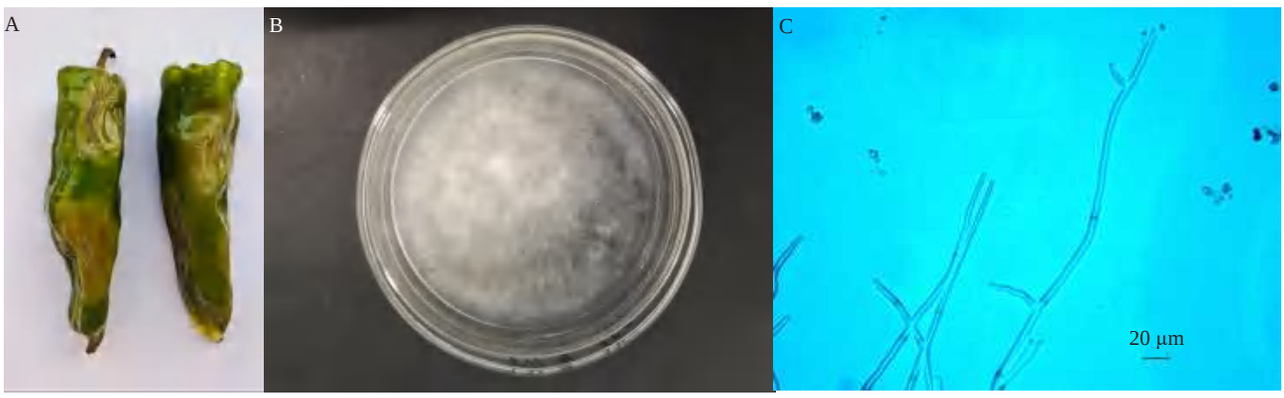
采用 Excel 统计与整理试验数据，采用 SPSS 26.0 对数据进行单因素方差分析，采用 Duncan 氏新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 病原菌的分离纯化与鉴定

发病初期辣椒表面出现水渍状斑点，颜色较浅。中期病斑继续扩大形成不规则褐斑或灰褐色病斑，病斑部位开始腐烂，表面出现皱纹，潮湿条件下表面形成灰白色或灰褐色霉层。后期病斑继续扩展，导致整个果实腐烂（图 1-A）。纯化后的菌落 Q-01 早期为白色，逐渐生长变为灰色或灰褐色，菌丝疏松，呈绒毛状或棉絮状，菌落边缘整齐（图

1-B）。菌丝有隔膜将其分成多个细胞，菌丝通过顶端延伸和分支扩展（图 1-C）。通过 rDNA 的 ITS 区段测序，获得病原菌 Q-01 长度为 514 bp 的目标序列，借助 BLAST 工具开展同源比对，测序序列与 NCBI 数据库内灰葡萄孢 *B. cinerea*（OP622939）序列同源性超过 99%，进一步构建系统进化树完成亲缘关系验证，确定病原菌为灰葡萄孢（*B. cinerea*）（图 2）。纯化培养后的灰葡萄孢致病性试验显示，第 4 天时接菌部位长出丝绒状菌丝，并在接菌部位周围辣椒呈水渍状，在接菌 7 d 后辣椒发病部位菌丝长得更多，水渍状面积更大，符合灰葡萄孢病原菌发病情况。



注：A. 发病辣椒；B. 病原菌菌落；C. 病原菌显微图。

Note: A. Diseased pepper; B. Colony of the pathogenic isolate; C. Microscopic morphology of the pathogen.

图 1　辣椒灰霉病病原菌 Q-01 形态特征

Fig. 1　Morphological characteristics of the pathogen Q-01 causing pepper gray mold

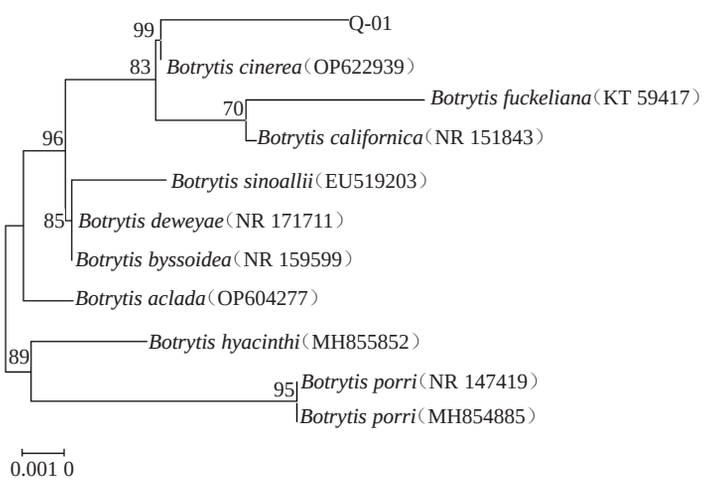


图 2　基于病原菌 Q-01 的 ITS 序列以邻接法构建的进化树

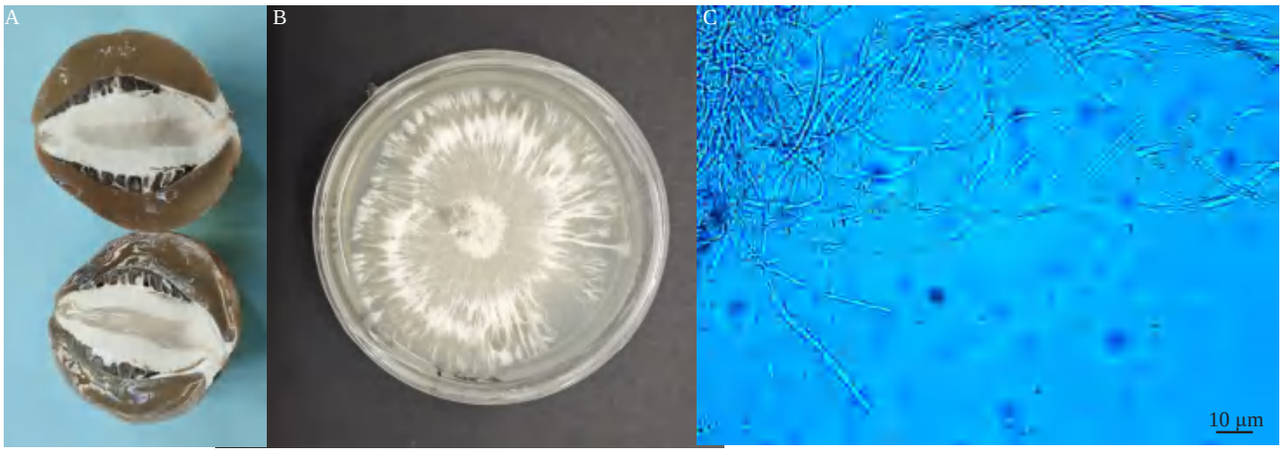
Fig. 2　Phylogenetic tree based on ITS sequence of strain Q-01 generated by neighbor-joining analysis

2.2　冬荪的分离与发酵液的制备

冬荪子实体幼体即冬荪菌蕾，又称为冬荪蛋，椭圆形，切开看到即将长出的子实体，菌盖呈钟形，菌柄中空，洁白（图 3-A）；组织分离培养得到冬荪 Phd01 菌株，菌丝颜色为白色，呈丝状（图 3-B）；显微观察发现，冬荪菌丝有明显的锁状联合结构（图 3-C）。

2.3　冬荪发酵液对病原菌抑菌率的测定

预试验设置培养基中冬荪发酵液不同比例，结果显示，50%浓度的抑菌活性最好，因此选择 50%添加浓度开展后续离体防效试验。50% 的冬荪 Phd01 无菌发酵液对灰葡萄孢 Q-01 具有明显的抑制作用，抑菌率为 77.4%，菌丝团聚一起，不向四周延伸生长。冬荪 Phd01 无菌发酵液对多种植物病原菌也有明显抑制效果，对假禾谷镰刀菌、胶孢炭疽菌、层出镰刀菌、草莓炭疽菌、瓜果腐霉菌抑菌率分别为 41.7%、46.2%、31.2%、33.3%、64.2%（图 4）。



注：A. 冬荪子实体幼体；B. 冬荪菌落；C. 冬荪菌丝显微观察及锁状联合。

Note：A. Fruiting egg of *P. dongsun*; B. Colony of *P. dongsun*; C. Microscopic observation of mycelia and lock association.

图 3　冬荪菌株 Phd01 的形态特征

Fig. 3　Morphological characters of *P. dongsun* Phd01

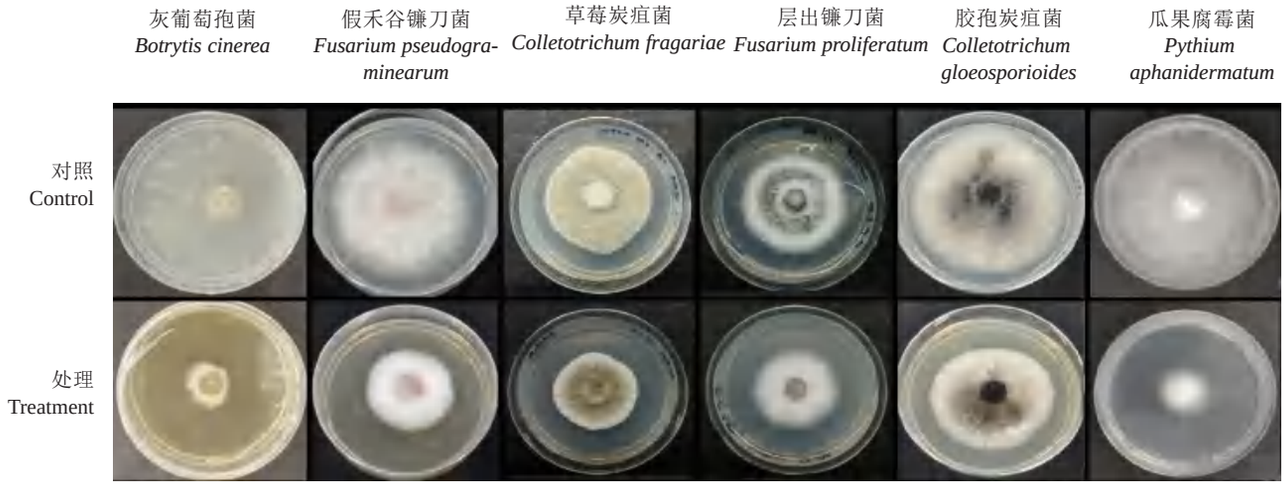


图 4　50%冬荪 Phd01 发酵液对灰葡萄孢 Q-01 及其他植物病原菌的抑制作用

Fig. 4　Inhibitory effect of 50% *P. dongsun* Phd01 fermentation broth on *B. cinerea* Q-01 and other plant pathogenic fungi

2.4　冬荪 Phd01 发酵液对辣椒果实灰霉病的防效

50%冬荪发酵液防治辣椒果实灰霉病的试验结果（图 5）显示，对照组无菌水浸泡，观察 7 d 后辣椒果实不发病，加灰葡萄孢组接种病原菌，第 4 天开始发病，直到第 7 天发病严重，发病处连接到一起，长出茂密菌丝，辣椒果实腐烂严重。灰葡萄孢＋Phd01 组为病原菌加冬荪发酵液处理，接种后第 4 天轻微发病，到第 7 天小部分菌丝长出，腐烂面积增大。与病原菌处理组对比得出，冬荪发酵液对病原菌有明显防效。病原菌处理组病情指数为 86.67，灰葡萄孢＋Phd01 组病情指数为 50.00，相对防效为 42.31%，表明 50%冬荪 Phd01 发酵液能明显抑制辣椒灰霉病发生（表 1）。

2.5　辣椒果实防御性酶活性测定及 DPPH 氧自由基清除率的计算

由表 2 可知，50%冬荪 Phd01 与其他处理组相比，可显著提高 POD、PAL 活性，提高氧自由基的清除能力。经冬荪发酵液处理后，辣椒的 POD、PAL 活性分别为 341.94、59.46 $U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$，较灰葡萄孢处理组分别显著提高了 55.3%和 145.1%；DPPH 清除率为 55.26%，较灰葡萄孢处理组显著提高了 11.19 百分点。

3　讨论与结论

笔者从市售发病辣椒样本中分离、纯化得到一株致病菌，结合菌落表型特征、显微形态观察及 rD-

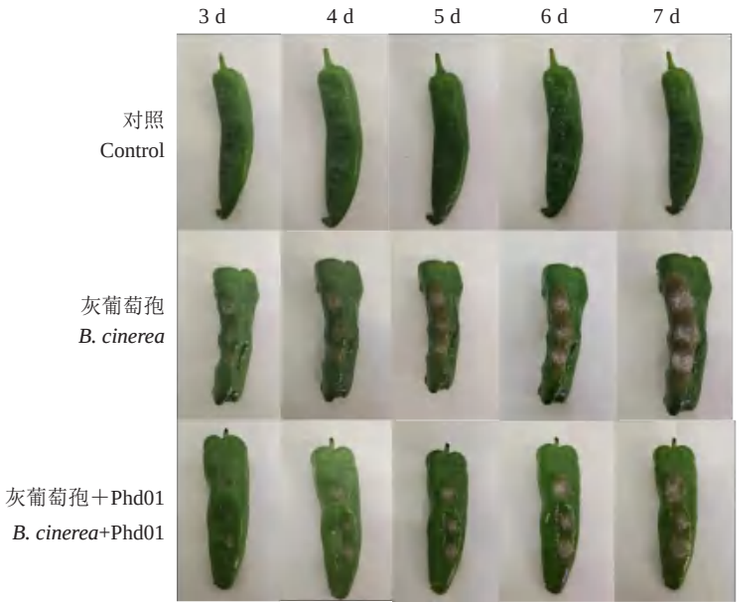


图 5　50%冬荪 Phd01 发酵液对辣椒果实灰霉病的防效

Fig. 5　Control efficacy of 50% *P. dongsun* Phd01 fermentation broth against *B. cinerea* on pepper fruits

表 1　不同处理组辣椒灰霉病的发病程度及相对防治效果

Table 1　Disease severity and relative control efficacy of different treatments against *Botrytis cinerea* in pepper fruits

处理 Treatment	病情指数 Disease index	相对防治效果 Relative control efficacy/%
对照 Control	0	
灰葡萄孢 *B. cinerea*	86.67	
Phd01+灰葡萄孢 Phd01+*B. cinerea*	50.00	42.31

NA 序列比对鉴定，确定该病原菌为灰葡萄孢（*B. cinerea*），命名为菌株 Q-01。当前辣椒灰霉病的防控仍以化学农药防治为主，但长期、单一施用化学药剂易诱导灰葡萄孢产生耐药性，导致防效逐年下降，同时农药残留会引发土壤、水体环境污染问题，且存在危害人体健康的潜在风险。已有研究证实，多株木霉菌株对灰葡萄孢具有显著的拮抗抑制作用[27]，证实利用有益微生物开展生物防控是解决灰霉病防治难题、实现绿色植保的新途径。

本试验通过平板混合拮抗试验表明，50%浓度冬荪发酵液对灰葡萄孢 Q-01 具有较好的体外抑菌效果，抑菌率可达 77.4%。为进一步验证其活体防病效果，本研究开展辣椒果实病原菌回接试验，连续观测 7 d 并统计病情指数与相对防效。结果显示，单独接种灰葡萄孢的对照组辣椒果实病情指数高达 86.67，而冬荪发酵液与灰葡萄孢共同处理组的辣椒病情指数降至 50.00，相对防治效果达 42.31%。综合体外抑菌与活体防病结果可初步证实，冬荪发酵液的抑菌活性、辣椒果实防腐保鲜效果均与其浓度密切相关，后续可进一步探究不同浓度冬荪发酵液中核心活性物质的含量差异与作用规律，明确其浓度效应机制。

表 2　不同处理辣椒酶活性及 DPPH 氧自由基清除率

Table 2　Enzyme activity and DPPH radical scavenging rate in pepper fruits under different treatments

处理 Treatment	POD 活性 POD activity/（U·g^{-1}·min^{-1}）	PAL 活性 PAL activity/（U·g^{-1}·min^{-1}）	DPPH 氧自由基清除率 DPPH radical scavenging rate/%
对照 Control	207.22±1.74 c	16.53±1.22 c	24.49±1.00 c
灰葡萄孢 *B. cinerea*	220.19±1.85 b	24.26±2.31 b	44.07±1.48 b
Phd01＋灰葡萄孢 Phd01+*B. cinerea*	341.94±3.61 a	59.46±2.44 a	55.26±0.86 a

注：同列不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference among different treatments at 0.05 level.

冬荪隶属于鬼笔属真菌，与竹荪亲缘关系相近，无裙竹荪常被民间称作冬荪，二者的营养组分

与生物活性物质种类具有高度相似性[21]，其富含的多糖、多酚、麦角硫因等活性成分兼具抑菌活性与成膜保护功能。现有研究表明，红托竹荪多酚提取物对黑曲霉、橘青霉等多种植物病原真菌具有良好的抑制作用[28]；竹荪提取物可缓解病原菌侵染引发的植株氧化应激损伤，通过提升机体抗氧化能力实现病害防控[29]，且这类真菌活性物质可激活植株防御酶系统，增强活性氧（ROS）清除能力，从生理层面提升植物抗病性[30]。本试验生理指标测定结果与现有研究结论一致，冬荪发酵液可显著提升辣椒果实体内防御酶活性，其中过氧化物酶（POD）活性提升121.75 $U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$，苯丙氨酸解氨酶（PAL）活性提升35.2 $U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$，同时显著提高辣椒果实的氧自由基清除能力，通过调控植株抗氧化与防御体系发挥生防作用。推测其作用机制为：冬荪发酵培养过程中产生的多糖、酚类化合物、胞外酶等活性物质，可通过破坏灰葡萄孢细胞壁结构，阻碍病原菌营养吸收与正常生长繁殖，有效抑制辣椒果实灰霉病的发生与腐烂变质，从而延长辣椒采后贮藏保鲜时间。

综上所述，冬荪发酵液对灰葡萄孢菌丝生长表现出明显抑制作用，抑菌率达77.4%；活体试验证实其能有效减轻辣椒果实灰霉病症状；发酵液处理可显著提高辣椒过氧化物酶和苯丙氨酸解氨酶活性，增强辣椒抗氧化能力。冬荪及其胞外分泌活性物质具备优良的抑菌、保鲜与抗病调控功能，具有较大的开发潜力与较高的应用价值，可进一步研发为防控辣椒灰霉病的绿色生物菌剂。

参考文献

[1] 邹学校，马艳青，戴雄泽，等.辣椒在中国的传播与产业发展[J].园艺学报，2020，47（9）：1715-1726.

[2] 卯婷婷，陶刚，赵兴丽，等.4种微生物菌剂对辣椒主要病害的生物防治作用[J].中国生物防治学报，2020，36（2）：258-264.

[3] 陈小均，陈文，谭清群，等.贵州省主要辣椒病害的诊断及综合防治[J].现代农业科技，2014（17）：163-164.

[4] 祝文慧，秦溥，赵岩，等.两种芽孢杆菌对苗期土传辣椒疫病的防控作用[J].中国生物防治学报，2023，39（5）：1235-1243.

[5] 赵志祥，王殿东，周亚林，等.枯草芽孢杆菌Ya-1对辣椒枯萎病的防治及其对根际真菌群落的影响[J].生物技术通报，2023，39（9）：213-224.

[6] 王莹莹，张自心，谢学文，等.李宝聚博士诊病手记（七十六）辣椒炭疽病的诊断与防治[J].中国蔬菜，2014（11）：74-76.

[7] Kapetas D，Kalogeropoulou E，Christakakis P，et al. Comparative evaluation of AI- based multi- spectral imaging and PCR-based assays for early detection of *Botrytis cinerea* infection on pepper plants[J]. Agriculture，2025，15（2）：164.

[8] 乔广行，严红，么奕清，等.北京地区番茄灰霉病菌的多重抗药性检测[J].植物保护，2011，37（5）：176-180.

[9] 刘微，朱小平，王之岭，等.丝瓜伤流液对果蔬几种病菌的抑制活性[J].中国农学通报，2004，20（3）：224-226.

[10] 倪春耕.竹醋液抑菌活性及应用技术研究[D].合肥：安徽农业大学，2006.

[11] 谷会，朱世江，詹儒林，等.辣椒采后灰霉病拮抗细菌的分离及生防效果[J].热带作物学报，2011，32（11）：2118-2122.

[12] 黄伟，王宁，张苗苗，等.拮抗放线菌A89的鉴定及其挥发性物质对葡萄采后灰霉病的抑制效果[J].食品工业科技，2025，46（20）：172-181.

[13] Kabeto E G，Ayana G. *In vitro* evaluation of some fungicides against *Fusarium oxysporum* the causal of wilt disease of hot pepper（*Capsicum annum* L.）in Ethiopia[J]. Advances in Crop Science and Technology，2020，8（2）：443.

[14] 彭思源，贺建，江国政，等.桑黄真菌学、化学成分、生物活性及其发酵工艺调控研究进展[J].中国中药杂志，2024，49（24）：6635-6659.

[15] 刘晓凤，卢玉君，王孝先，等.林芝11种大型真菌子实体粗提取物的抑菌作用研究[J].中国食用菌，2020，39（10）：77-81.

[16] 吕建华.卷边桩菇和红托竹荪的化学成分及抗真菌活性研究[D].长春：吉林农业大学，2022.

[17] 郑素月，张庆桥，刘贵巧，等.几种大型食用真菌子实体粗提物的抗菌活性[J].江苏农业科学，2010（1）：340-341.

[18] Li T，Li T，Deng W，et al. *Phallus dongsun* and *P. lutescens*，two new species of Phallaceae（*Basidiomycota*）from China[J]. Phytotaxa，2020，443（1）：19-37.

[19] Shihao Q，Guangdi W，Meiling L，et al. A new monocyclic monoterpene derivative from volva of *Phallus dongsun*[J]. Natural Product Research，2024，38（15）：1-8.

[20] 首坤秀，王山立，林灵，等.冬荪及其蛋托的成分分析和抗氧化活性研究[J].食品科技，2020，45（2）：264-271.

[21] 董慧，赵晓燕，李晓贝，等.贵州红托竹荪和冬荪的品质评价[J].食品科学，2024，45（20）：198-205.

[22] 卯晓岚.中国大型真菌[M].郑州：河南科学技术出版社，2000.

[23] 朱晓琴，宋自力，裴冬丽.河南省商丘市草莓根腐病病原菌的分离和鉴定[J].植物保护学报，2017，44（2）：349-350.

[24] 朱晓琴，方树贤，刘冬梅，等.辣椒炭疽病生防菌株的筛选、鉴定及其抑菌机理[J].植物保护学报，2023，50（4）：913-922.

[25] 谷会，张鲁斌，朱世江，等.冷激处理对辣椒品质及其抗氧化防御系统的影响[J].食品科学，2011，32（18）：333-338.

[26] Li L L，Sun H N，Zhang M，et al. Fungal communities，nutritional，physiological and sensory characteristics of sweet potato under three Chinese representative storages[J]. Postharvest Biology and Technology，2023，201：112366.

[27] 左春柳，张丽，郭新月，等.拮抗灰霉病菌的低温型木霉菌株的分离鉴定[J].河北师范大学学报（自然科学版），2023，47（2）：169-176.

[28] 朱炜，俞婷婷，陈康康，等.竹荪蛋多酚提取工艺及抗氧化活性[J].中国食用菌，2021，40（7）：58-64.

[29] 刘范，刘嘉鹏，项蕾蕾，等.竹荪粗提物对香蕉枯萎病菌Foc-TR4的抑制效果[J].福建农业学报，2018，33（11）：1167-1171.

[30] Edirisinghe M，Ali A，Maqbool M，et al. Chitosan controls postharvest anthracnose in bell pepper by activating defense-related enzymes[J]. Journal of Food Science and Technology，2014，51（12）：4078-4083.