



石精涛,曹建敏,丁应福,韩小斌,刘建阳,李喆,赵栋霖,张成省,林伟,徐康文.拮抗灰葡萄孢木霉菌的鉴定及其防病作用[J].中国农业大学学报,2025,30(08):38-49.

SHI Jingtao, CAO Jianmin, DING Yingfu, HAN Xiaobin, LIU Jianyang, LI Zhe, ZHAO Donglin, ZHANG Chengsheng, LIN Wei, XU Kangwen. Identification of *Trichoderma* antagonizing *Botrytis cinerea* and its disease prevention effect[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(08): 38-49.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.08.04

拮抗灰葡萄孢木霉菌的鉴定及其防病作用

石精涛¹ 曹建敏¹ 丁应福² 韩小斌³ 刘建阳² 李喆¹ 赵栋霖¹
张成省¹ 林伟^{2*} 徐康文^{1*}

(1. 中国农业科学院烟草研究所, 山东 青岛 266101;

2. 福建省烟草公司南平市公司, 福建 南平 353000;

3. 贵州省烟草公司遵义市公司, 贵州 遵义 563100)

摘要 为鉴定健康葡萄果实中筛选出对灰葡萄孢具有拮抗作用的木霉菌,探究其发挥抑制效果的关键化合物以及对葡萄灰霉病的防治效果,利用平板对峙及对扣法筛选出目标木霉菌后,通过形态学观察和多基因系统发育分析对目标菌株进行菌种鉴定,后采用扫描(SEM)和透射电镜(TEM)观察木霉菌产生的挥发性有机物(VOCs)对灰葡萄孢菌丝形态的影响,并利用气相色谱-质谱联用法(GC-MS)对木霉菌 VOCs 进行组分分析。最后通过熏蒸法对鉴定出的 VOCs 进行抑菌活性评估、半抑制浓度测定以及对葡萄灰霉病的防效试验。结果表明:1)本研究筛选得到的目标木霉菌 GUI12 菌株被鉴定为柠檬绿木霉(*Trichoderma citrinoviride*);2)与平板对峙相比,对扣培养时 GUI12 对灰葡萄孢的抑制效果较好,抑制率可达 89.63%;3)SEM 与 TEM 观察结果显示 GUI12 产生的 VOCs 会导致灰葡萄孢菌丝变粗、褶皱、塌陷,并使包括细胞核、线粒体及液泡等在内的细胞器轮廓模糊,甚至溶解和消失;4)离体葡萄抗病测定结果显示, VOCs 能够有效抑制葡萄果实病斑的扩展,对葡萄灰霉病斑扩展的抑制率为 53.56%;5)GC-MS 分析结果显示 GUI12 产生乙酸异丁酯、2,3-丁二酮、苯乙醇等 19 种 VOCs。它们在 100 μ L/L 的浓度下均能不同程度地抑制灰葡萄孢的菌丝生长,其中 2,3-丁二酮、苯乙醇的抑制率均为 100%;6)2,3-丁二酮在 EC_{50} (14.97 μ L/L)浓度下对葡萄灰霉病的防效为 100%;苯乙醇也能够在 $2 \times EC_{50}$ (95.38 μ L/L)浓度下对葡萄灰霉病的防效达到 100%。综上,本研究筛选得到的木霉菌 GUI12 产生的 VOCs 能够抑制灰葡萄孢菌丝生长,造成细胞器损伤,有效抑制葡萄灰霉病斑的扩散。其中,2,3-丁二酮、苯乙醇对葡萄灰霉病的防治效果较好,具有进一步研究与开发的潜力。

关键词 柠檬绿木霉;灰葡萄孢;挥发性有机化合物;气相色谱-质谱联用法;生物防治

中图分类号 S476

文章编号 1007-4333(2025)08-0038-12

文献标志码 A

Identification of *Trichoderma* antagonizing *Botrytis cinerea* and its disease prevention effect

SHI Jingtao¹, CAO Jianmin¹, DING Yingfu², HAN Xiaobin³, LIU Jianyang², LI Zhe¹,
ZHAO Donglin¹, ZHANG Chengsheng¹, LIN Wei^{2*}, XU Kangwen^{1*}

(1. Chinese Academy of Agricultural Sciences, Tobacco Research Institute, Qingdao 266101, China;

2. Fujian Tobacco Company Nanping Company, Nanping 35300, China;

3. Guizhou Tobacco Company Zunyi Company, Zunyi 563100, China)

收稿日期: 2024-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(32302448);山东省自然科学基金项目(ZR2024QC002);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610232023025);烟草常用生物农药新型增效剂的研究及应用(NYK2025-02-03);中国烟草总公司重大科技项目(110202101057(LS-17))

第一作者: 石精涛(ORCID:0009-0003-6238-9728),硕士研究生,E-mail:sjthnsmx@163.com

通讯作者: 林伟(ORCID:0009-0009-394-6526),主要从事挥发物鉴定与功能研究,E-mail:lw160718@163.com

徐康文(ORCID:0000-0003-0557-0590),主要从事生物防治研究,E-mail:xukangwen@caas.cn

Abstract The aims of this study were to identify the *Trichoderma* strains with antagonistic action against *Botrytis cinerea* from healthy grape berries and explore the key compounds that exert inhibitory effects and the control effect on grape gray mold. By plate confrontation and buckle method, the target strain was identified by morphological observation and multi-gene phylogenetic analysis. The impact of volatile organic compounds (VOCs) emitted by *Trichoderma* spp. on the morphological alterations of *B. cinerea* mycelium was examined using scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM). The components of *Trichoderma* VOCs were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). Finally, the antibacterial activity evaluation, semi-inhibitory concentration determination, and control effect test on grape gray mold of the identified VOCs were carried out using the fumigation method. The results showed that: 1) The target *Trichoderma* strain GUI12 screened in this study was identified as *Trichoderma citrinoviride*; 2) Compared with the plate confrontation, the inhibition effect of GUI12 on *B. cinerea* was better in the buckle culture, and the inhibition rate could reach 89.63%. 3) SEM and TEM observation results showed that the VOCs produced by GUI12 could cause the mycelium of *B. cinerea* to become thicker, wrinkled and collapsed, and blur the outline of organelles including nucleus, mitochondria and vacuoles, even dissolve and disappear. 4) The result of the *in vitro* grape disease resistance test showed that VOCs could effectively inhibit the expansion of grapefruit lesions, and the inhibition rate of grape gray mold lesion expansion was 53.56%. 5) GC-MS analysis showed that GUI12 produced 19 types VOCs, such as isobutyl acetate, 2,3-butanedione, phenylethyl alcohol, etc. They could inhibit the mycelial growth of *B. cinerea* in different degrees at the concentration of 100 $\mu\text{L/L}$, and the inhibition rates of 2,3-butanedione and Phenylethyl alcohol were 100%. 6) The control effect of 2,3-butanedione on grape gray mold was 100% at EC_{50} (14.97 $\mu\text{L/L}$). Phenethyl alcohol also achieved a 100% control effect on grape gray mold at $2 \times \text{EC}_{50}$ (95.38 $\mu\text{L/L}$). In summary, the VOCs produced by GUI12 can inhibit the growth of *B. cinerea* hyphae, cause organelle damage, and effectively inhibit the spread of grape gray mold lesions. Among them, 2,3-butanedione and phenylethyl alcohol have better control effects on grape gray mold and have the potential for further research and development.

Keywords *Trichoderma citrinoviride*; *Botrytis cinerea*; VOCs; GC-MS; biocontrol resources

灰霉病是由葡萄孢属(*Botrytis* spp.)真菌引起的一种重要的世界性病害。目前已知葡萄孢属真菌包含30多个种属^[1],其中灰葡萄孢的寄主范围十分广泛,能侵染包括番茄、黄瓜、茄子、葡萄和烟草等在内的200多种经济作物。除此之外,灰葡萄孢在作物的储藏、运输期间也会造成巨大的产量和经济损失^[2-4]。目前,由于缺乏有效的商业化抗病品种,灰霉病的防治仍主要依赖喷施化学杀菌剂。化学杀菌剂在使用过程中普遍存在过量喷施,容易造成药物残留及环境污染等问题^[5-7]。

利用有益微生物进行作物病害防治是绿色防控的重要发展方向之一^[8]。研究表明,木霉菌(*Trichoderma* spp.)、酵母菌(*Saccharomyces* spp.)、芽孢杆菌(*Bacillus* spp.)、链霉菌(*Streptomyces* spp.)等在抑制病原真菌和细菌上具有良好的效果^[9-10]。生防菌株的作用机制主要包括抗生作用,定殖位点、营养或矿物质的竞争,寄生和噬菌体,其中通过分泌抗真菌代谢物质(Antifungal Metabo-

lites, AFMs)来发挥对病原真菌的抗生作用是最常见的策略,目前研究较多的抗真菌代谢物质主要有抗生素、酶和挥发物^[11]。挥发性有机化合物是一种低分子量含碳化合物,易扩散到土壤孔隙、液体及大气中,是一种理想的化学介质,目前已被应用于植物病害防治。木霉菌作为研究最多,并且在商业实践中应用最广泛的一种生防真菌,具有广谱性高、适应性强和多机制等特点,且能够分泌大量具有抗菌作用的次生代谢产物^[12]。在这些抗菌物质中,挥发性有机化合物因其高效的抗菌活性和低环境残留性成为研究热点。围绕木霉菌属产生挥发物的抗菌活性已开展了广泛的研究,20世纪70年代,Colins等^[13]已开始研究木霉菌气体挥发物的成分,近来又陆续有文献报道了木霉菌产生的挥发性有机化合物在防治植物真菌病害中的应用;张铭等^[14]报道了森吉木霉(*Trichoderma songyi*)M75产生的VOCs可以有效抑制松球壳孢菌(*Sphaeropsis sapinea*)的生长,经过气相色谱-质谱联用法(GC-

MS)分析,以及各挥发物纯品的体外菌丝生长抑制试验结果显示,挥发性物质中的芳樟醇的抑菌效果最好,其可以抑制金黄壳囊菌(*Cytospora chrysosperma*)、栗疫菌(*Cryphonectria parastica*)和链格孢(*Alternaria* sp)等多种病原真菌。

前期研究在健康葡萄果实(青岛胶州采摘)中分离得到一株对灰葡萄孢有较强拮抗作用的木霉菌,命名为GUI12,其发挥抑菌作用的关键代谢产物和对灰霉病的防治效果尚未明确。因此,本研究拟以GUI12菌株为研究对象,采用形态学及分子生物学对菌株进行鉴定,并研究其在不同时间产生的VOCs对灰葡萄孢的抑制情况,以及VOCs对灰葡萄孢形态和结构的影响及其对灰霉病害的防治效果,分析GUI12产生的VOCs的组成成分以及对灰葡萄孢的有效抑菌物质,并针对有效抑菌物质开展药效试验,验证其实际应用效果,以期为该菌株应用于灰霉病的防治提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及主要仪器

试验于2023年11月—2024年9月完成于中国农业科学院烟草研究所。供试病原真菌灰葡萄孢菌株0201,生防真菌菌株GUI12均保藏于中国农业科学院烟草研究所。所用PDA及PDB培养基,购自北京索莱宝科技有限公司(中国)。培养箱为上海一恒LRH-250生化培养箱,振荡培养箱型号为上海知楚ZQZY-CF9.9振荡培养箱(中国),气相色谱质谱仪型号为安捷伦7890B-5975C气相色谱质谱仪(美国)。

1.2 试验方法

1.2.1 GUI12菌株和灰葡萄孢菌0201对扣培养

参照Kong等^[12]的平板对扣方法并略加修改:选取活化状态良好的GUI12菌株以及0201菌株,利用无菌打孔器($\Phi=5$ mm)在其菌丝边缘处打孔,分别接种于预先制备好的2个PDA培养基(90 mm $\times$ 15 mm的培养皿中加入15 mL的PDA)中央,随后将这2个培养基去盖对扣,用Parafilm封口膜进行密封,接种GUI12菌株的培养基置下,接种0201菌株的培养基置上,以未接种GUI12菌饼的PDA培养基对扣0201培养基作为对照,每个处理重复3次。置于25℃恒温培养箱中黑暗培养,并在接种后24、48、72、96 h时使用游标卡尺精确测量0201菌株

菌落的直径(mm)。抑菌率计算公式如下:

$$\text{抑菌率} = (1 - [(\text{处理组菌落直径} - 5) / (\text{对照组菌落直径} - 5)]) \times 100\%$$

1.2.2 GUI12菌株的鉴定

GUI12菌株的形态学鉴定:用打孔器($\Phi=5$ mm)取菌饼倒置于PDA培养基将GUI菌株活化后,28℃培养3 d,待长出菌落后,用接种针挑取菌丝置于载玻片上,在显微镜下观察菌丝形态特征,并对其进行初步鉴定。

GUI12菌株的分子生物学鉴定:菌株GUI12 ITS1/ITS4基因扩增及测序采用CTAB法进行基因组总DNA提取。PCR扩增体系为50 μ L:模板DNA(36 ng/ μ L) 2 μ L,引物ITS1(5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3')和ITS4(5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3') (10 μ mol/L)各2 μ L, 10 $\times$ Phanta Flash Mix(Dye Plus) 2 μ L,双蒸水19 μ L。PCR扩增程序:95℃ 5 min, 95℃ 15 s, 56℃ 15 s, 72℃ 2 min, 34个循环; 72℃ 10 min。将PCR产物送交北京擎科生物技术有限公司进行测序。测序结果查询GenBank数据库,采用BLAST在线工具与数据库的序列进行同源性比较,利用MEGA X软件,使用邻接法构建系统发育树。

1.2.3 扫描电镜(SEM)及透射电镜(TEM)观察GUI12菌株和灰葡萄孢菌0201菌丝形态影响

参照1.2.1的方法,将GUI12菌株与0201菌株对扣培养3 d,以未接种GUI12菌饼的PDA培养基对扣0201培养基作为对照。收集的菌丝体用2.5% Gluta 固定液固定(4℃),送往青岛大学医学部进行SEM和TEM观察。

1.2.4 GUI12菌株挥发性物质在离体葡萄上的抑制作用

灰葡萄孢分生孢子液制备:以0201菌株为材料,在PDA平板上25℃培养10 d。无菌水冲洗,使用8层纱布过滤菌丝,吸取上清,用血球计数板在显微镜下确定灰葡萄孢孢子液浓度。无菌水稀释成 1×10^5 个/mL孢子悬浮液。

在组培瓶(600 mL)中加入100 mL PDA后灭菌,在处理组中放入GUI12菌饼,对照为空白PDA。将新鲜葡萄果实,浸泡在2%次氯酸钠溶液中2 min,用无菌水冲洗3次后晾干,采用无菌针头于果实上刺1个伤口(3 mm $\times$ 3 mm),然后将5 μ L灰葡萄孢孢子悬浮液加入伤口。每个组培瓶放置5个接种后的果实,快

速盖上组培瓶盖,用Parafilm封口膜进行密封。在25℃下培养3 d后,观察并测量病斑直径(mm),根据病斑直径计算抑制率。每个处理设置3个重复。病斑生长抑制率具体计算公式如下:

$$\text{病斑生长抑制率} = \frac{\text{对照病斑直径} - \text{处理病斑直径}}{\text{对照病斑直径}} \times 100\%$$

1.2.5 GUI12菌株挥发性物质的收集和其组分分析

挥发性物质的制备:将这2个活化状态良好的GUI12菌饼($\Phi=5$ mm)放置于150 mL的PDA培养瓶中,用Parafilm封口膜进行密封,在28℃条件下培养3 d,以未接种菌块的PDA为对照,每个处理设置3个重复。

挥发性物质的吸附:将培养3 d后的培养瓶置于40℃水浴30 min,之后将SPME针插入培养瓶瓶1/3处,然后推出萃取头,顶空吸附45 min后样品采集结束。

挥发性物质的分析方法:色谱分析采用氦气作为载气,流速设定为1 mL/min,SPME针在220℃下解吸5 min。色谱柱为RTX-5MS柱(3 m长,内径0.25 mm,膜厚0.25 mm),初始温度设定为35℃,持续3 min后以10℃/min的速率升至180℃,再以4℃/min的速率升至240℃,并保持5 min。质谱仪在电子电离模式下运行,能量设定为70 eV,温度220℃,扫描范围50~500 m/z。利用安捷伦MassHunter(B.05.02)软件进行色谱图的获取与分析。挥发性物质的检测结果通过与安捷伦NIST数据库进行比对,结合Kovats保留指数的计算与匹配,对解析出的VOC峰进行鉴定。当化合物的质谱图与数据库中的匹配度超过800,且保留指数(retention index, RI)的差值 ≤ 5 时,该化合物即被确认为已鉴定。

1.2.6 GC-MS分析鉴定的挥发性化合物的抗菌活性评估

购买通过GC-MS分析鉴定的挥发性有机化合物,并采取熏蒸法评估其对0201菌株的抗菌活性。参照1.2.1的方法接种0201菌株,之后在培养皿盖内部中央贴上10 mm $\times$ 10 mm灭菌滤纸,并在滤纸上滴加6.5 μ L的挥发性化合物(终浓度100 μ L/L),快速盖上培养皿盖,用Parafilm封口膜进行密封,以不加挥发性化合物的滤纸片作为对照。每个处理设置3个重复。置于25℃恒温培养箱中黑暗培养3 d,使用游标卡尺精

确测量0201菌株菌落的直径(mm)。通过计算,得到抑菌率。

1.2.7 挥发物2,3-butanedione(2,3-丁二酮)、Phenylethyl Alcohol(苯乙醇)对灰葡萄孢0201的有效抑制中浓度(EC₅₀)

参照1.2.6的方法,接种0201菌株并在培养皿盖上的滤纸上滴加0.325、0.650、0.975、1.300、1.625 μ L的2,3-丁二酮将培养皿中空气中2,3-丁二酮的浓度控制在5、10、15、20、25 μ L/L。在培养皿盖上的滤纸上滴加0.650、1.625、3.250、4.875、6.500 μ L的苯乙醇,将培养皿空气中的苯乙醇的终浓度控制在10、25、50、75、100 μ L/L;快速盖上培养皿盖,用Parafilm封口膜进行密封,以不加挥发性化合物的滤纸片作为对照。每个处理重复3次。置于25℃恒温培养箱中黑暗培养3 d,使用游标卡尺精确测量0201菌株菌落的直径(mm),并分别计算不同浓度苯乙醇、2,3-丁二酮对0201菌株的抑制率及EC₅₀。

1.2.8 气体挥发物2,3-丁二酮和苯乙醇在离体葡萄上的抑制作用

参照1.2.4的方法完成灰葡萄孢分生孢子液制备及在葡萄果实上接种灰葡萄孢分生孢子液。在组培瓶(600 mL)底部空白位置放置灭菌滤纸,并分别滴加不同量的2,3-丁二酮、苯乙醇使组培瓶中的2,3-丁二酮、苯乙醇浓度达到各自对于0201菌株的EC₅₀及2 $\times$ EC₅₀。每个组培瓶放置5个接种后的果实,快速盖上组培瓶盖,用Parafilm封口膜进行密封。在25℃下培养3 d后,观察并测量病斑直径(mm),根据病斑直径计算抑制率。每个处理设置3个重复。

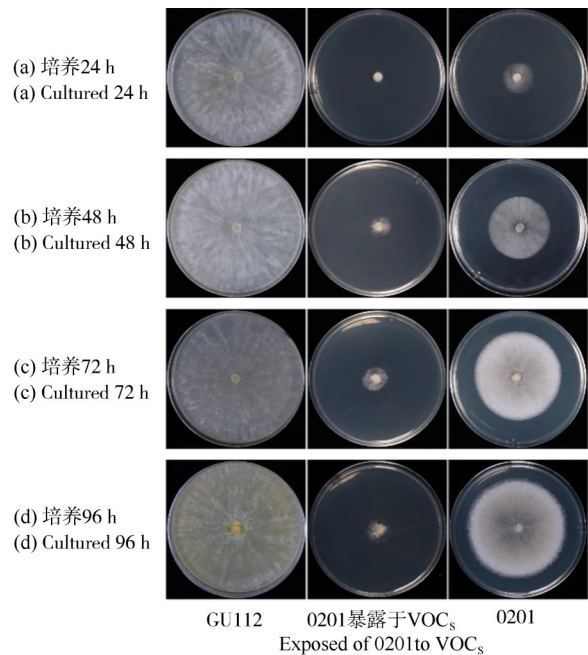
1.3 统计分析

使用Microsoft Office Excel 2019和SPSS 18.0进行数据统计分析,使用GraphPad Prism 2020作图。

2 结果与分析

2.1 GUI12产生的VOCs对灰葡萄孢生长的影响

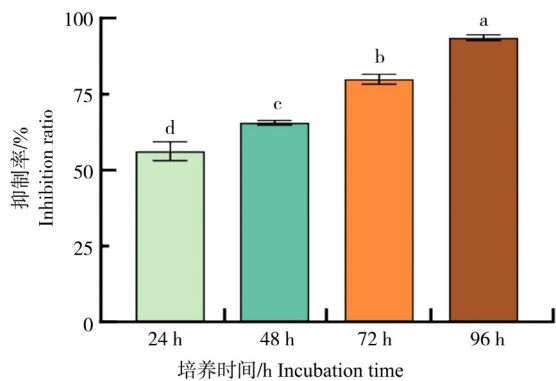
本研究获得的GUI12菌株与灰葡萄孢对扣试验以及对其菌丝抑制效果及抑制率分别见图1及图2。由图1可见:随着对扣培养时间的增长,与GUI12菌株对扣的灰葡萄孢与正常培养的灰葡萄孢菌落直径差距逐渐增大。由图2可见:对扣培养24 h、48 h、72 h、96 h时,与正常培养的灰葡萄孢相比,GUI12菌株对扣对灰葡萄孢菌落扩展的抑制率分别为66.67%、68.75%、79.94%和89.63%。结果表明GUI12菌株产生的VOCs能够有效抑制灰葡萄孢菌丝的生长。



GUI12为木霉菌;0201为灰葡萄孢菌;0201暴露的VOCs为对扣培养时GUI12菌株产生的VOCs。下同。
GUI12 represents the strain of *Trichoderma* spp. . 0201 represents the strain of *B. cinerea*. the VOCs exposed to 0201 are the VOCs produced by the GUI12 strain during confrontation culture. The same applies below.

图1 GUI12菌株分泌的VOCs在不同时间对灰葡萄孢的抑制情况

Fig. 1 The inhibitory effects of VOCs produced by GUI12 strain on *Botrytis cinerea* at different time poin



不同小字母表示差异达显著水平($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$). The same applies below.

图2 与GUI12菌株对扣培养对灰葡萄孢的抑制率随时间的变化

Fig. 2 The changes in the inhibition rate of *B. cinerea* by confrontation culture with the GUI12 strain over time

2.2 GUI12菌株的鉴定

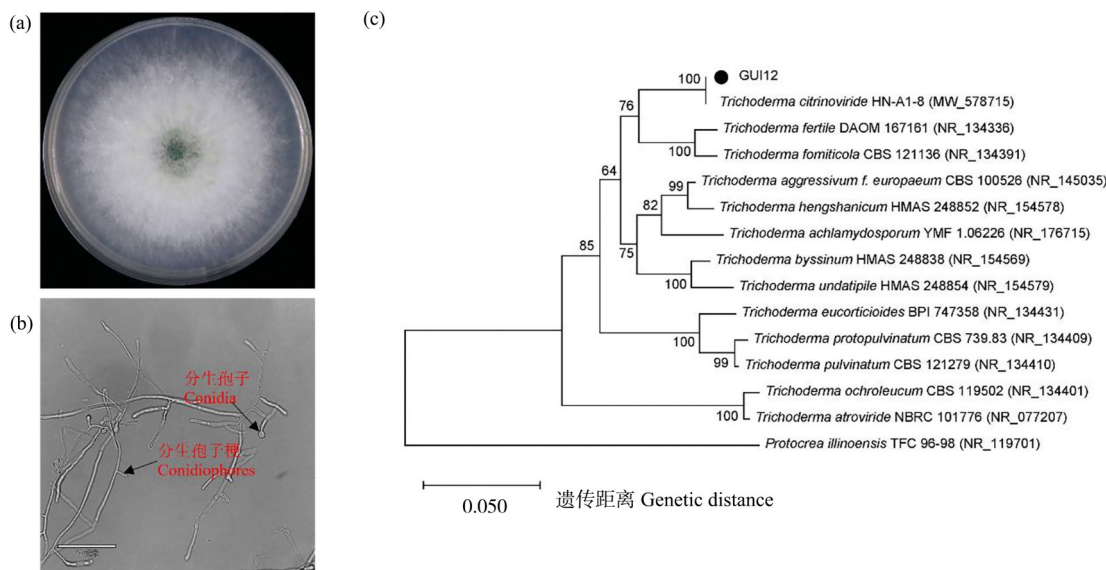
通过形态学及分子生物学鉴定GUI12菌株,结果见图3。由图3(a)可见:GUI12菌株培养3 d时,呈现出清晰的透明菌落和典型的气生菌丝,菌饼周围菌丝变绿,菌落直径为75~80 mm。

由图3(b)可见GUI12菌株分生孢子梗从菌丝伸出,部分形成分生孢子,分生孢子呈亚球形至球形。由图3(c)可见将得到的GUI12菌株ITS测序结果与NCBI数据库中的序列进行BLAST比对,初

步鉴定为木霉菌。提取同源性较高的不同菌种的序列与GUI12菌株序列,通过MEGA X采用邻接法联合构建系统发育树。结果表明,GUI12与*Trichoderma citrinoviride*(柠檬绿木霉)在同一分支。结合形态学鉴定结果,GUI12鉴定为*T. citrinoviride*。

2.3 GUI12菌株产生的VOCs对灰葡萄孢的细胞形态及结构的影响

细胞形态和结构对于病原菌侵染植物至关重



(a)为PDA培养基上GUI12菌株菌落的正面形态;(b)为GUI12菌株的分生孢子及分生孢子梗;(c)为基于ITS基因序列采用邻接法构建的GUI12菌株系统发育树。

(a) shows the top view of the colony morphology of the GUI12 strain on PDA medium. (b) shows the conidia and conidiophores of the GUI12 strain. (c) is the phylogenetic tree of the GUI12 strain constructed using the neighbor-joining method based on the ITS gene sequence.

图 3 GUI12 菌株鉴定

Fig. 3 Identification of GUI12 strain

要,形态的改变会导致菌体无法正常增殖、识别以及结合,而结构的改变则会导致菌丝功能丧失。

将与GUI12菌株对扣培养及正常培养3 d的灰葡萄孢分别在扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)下观察菌体表面形态以及结构变化,结果见图4。由图4(a)可见:正常培养的灰葡萄孢菌丝

形态正常,呈现出光滑且饱满圆润的状态;细胞结构正常,细胞壁及细胞膜完整,细胞核、线粒体、液泡均清晰可见。由图4(b)可见:与GUI12对扣培养的灰葡萄孢菌丝呈现出变粗、褶皱、塌陷的现象;其细胞核、线粒体及液泡等细胞器呈现出轮廓模糊,甚至溶解和消失的现象。结果表明,GUI12菌株产生的VOCs可能引起细胞器损伤,最终导

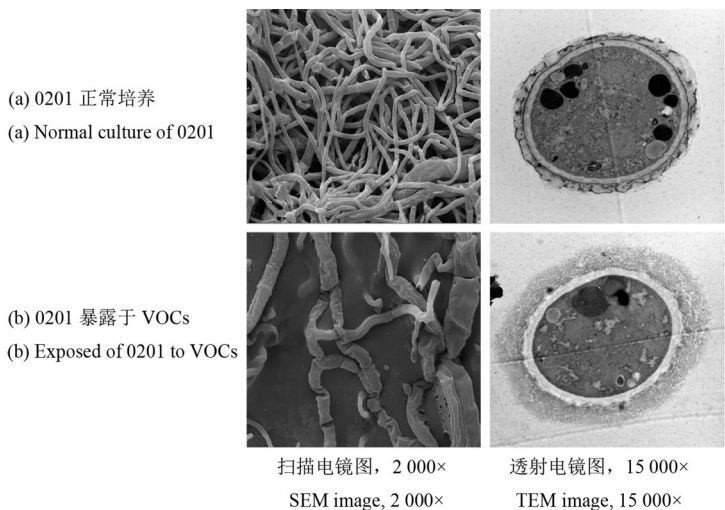


图 4 GUI 菌株产 VOCs 对灰葡萄孢 0201 菌丝超微结构的影响

Fig. 4 Effect of VOCs produced by GUI12 strain on the ultrastructure of *B. cinerea* 0201 mycelium

致菌体死亡。

2.4 GUI12菌株产生的VOCs对葡萄灰霉病的防效验证

GUI12菌株产生的VOCs对葡萄灰霉病的防治效果见表1。可见:对照组病斑平均直径为17.80 mm,经GUI12菌株产生的VOCs处理后的葡萄果实病斑平均直径为8.27 mm,病斑扩展相对缓慢,GUI12菌株产生的VOCs对葡萄灰霉病斑扩展具有一定的抑制作用,抑制率为53.56%。

表1 GUI12菌株分泌的VOCs对葡萄灰霉病的防治效果
Table 1 Control effect of VOCs secreted by GUI12 strain on grape gray mold

处理 Treatment	病斑直径/mm Lesion diameter	发病率/% Incidence	抑制率/% Inhibition rate
CK	17.80	100.00	
VOCs	8.27	100.00	53.56

2.5 GUI12菌株产生的VOCs成分鉴定及活性筛选

利用GC-MS技术对培养3 d的GUI12菌株产生的VOCs进行成分分析,鉴定结果见表2。共鉴定出19种VOCs,这些化合物包括酮类、醇类、烷烃类、吡喃类、酯类。

测定可购买到的GUI12菌株产生的12种VOCs(乙酸异丁酯、2,3-丁二酮、丁酸乙酯、2-甲基丁基乙酸酯、巴豆酸乙酯、2-甲基丁醇、异戊醇、惕各酸乙酯、3-乙酰氧基丁酸乙酯、 γ -戊内酯、苯甲酸乙酯、苯乙醇)对灰葡萄孢的抑制率结果见图5(a)。可见:12种VOCs在100 μ L/L的浓度下均能够不同程度地抑制灰葡萄孢菌落扩展,其中2,3-丁二酮及苯乙醇对灰葡萄孢的抑制效果较为显著,抑制率均为100%。

不同浓度的2,3-丁二酮及苯乙醇对灰葡萄孢抑制率结果见图5(b)及图5(c)。由图5(b)可见2,3-丁二酮对灰葡萄孢的毒力回归方程为 $y=4.84x-22.47$, EC_{50} 为14.97 μ L/L。由图5(c)可见苯乙醇对灰葡萄孢的毒力回归方程为 $y=0.97x+3.24$,其 EC_{50} 为48.21 μ L/L。

2.6 2,3-丁二酮及苯乙醇对葡萄灰霉病的防效验证

2,3-丁二酮和苯乙醇对葡萄灰霉病的防治效果见表3。可见:接菌培养3 d后,对照组葡萄的病斑

发病率为100.00%,病斑直径为18.20 mm。与之相比,2,3-丁二酮在 EC_{50} 及 $2\times EC_{50}$ 浓度下均未发病,且无病斑出现,对葡萄灰霉病斑扩展的抑制率为100.00%;苯乙醇在 EC_{50} 及 $2\times EC_{50}$ 浓度下的发病率分别为86.67%、0.00%,病斑直径分别为4.73 mm、0.00 mm,对葡萄灰霉病斑扩展的抑制率分别为74.00%、100.00%。

3 讨论

生防菌及其代谢产物等生物防治剂的开发和应用,为植物病原真菌的生物防治提供了一种有前途的替代方案。本研究发现柠檬绿木霉GUI12菌株产生的VOCs能够有效抑制灰葡萄孢的菌丝生长,抑制效果并未随着时间的延长而减弱。目前已报道木霉菌属的一些物种产生的VOCs具有抗真菌活性,如康宁木霉(*T. koningii*) T2^[15]、哈茨木霉(*T. harzianum*)^[16]、哈马图木霉(*T. hamatum*)^[17]、棘孢木霉(*T. asperellum*) T1^[18]等产生的VOCs能够抑制植物病原真菌菌丝的体外生长、孢子形成,导致病原菌菌丝畸形、顶端膨大、分支增多、细胞质外渗等。Hu等^[16]发现哈茨木霉VOCs处理会导致马铃薯晚疫病菌(*Phytophthora infestans*)细胞壁和细胞膜变形、塌陷以及细胞器的退化并导致细胞质材料泄漏。本研究中GUI12菌株产生的VOCs能够导致灰葡萄孢的菌丝呈现出变粗、褶皱、塌陷的现象,并使包括细胞核、线粒体及液泡等在内的细胞器呈现出模糊现象,且能够抑制葡萄果实上灰霉病病斑的生长,对葡萄灰霉病斑扩展的抑制率为53.56%。

具有生物活性的微生物VOCs由于不同的化学基团被分为烯烃、醇类、酮类、苯类、吡嗪类、硫化物和萜烯类等^[19]。Abdenaceur等^[20]研究发现粗糙木霉(*T. asperellum*)产生的主要VOCs异丁醇、3-戊酮和1-戊烯-3-醇对大丽轮枝菌(*Verticillium dahliae*)表现出明显的抑菌活性;Rao^[21]等报道橘绿木霉(*T. atroviride*) LZ42产生的2-庚酮、2-戊基呋喃及 β -榄香烯能有效抑制尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*),对GUI12菌株产生的VOCs进行分析,共鉴定出包括酮类、醇类、烷烃类、吡喃类、酯类在内的19种VOCs。与复杂的VOCs组分相比,纯化合物具有清晰的结构特性,易于生产和合成,未来可能具有实际应用价值^[22]。本研究依据GUI12

表 2 气相色谱-质谱联用技术检测 GUI12 菌株产生的挥发性有机化合物

Table 2 Detection of VOCs produced by GUI12 strain by GC-MS

峰编号 Peak number	保留时间/min Retention time	名称 Name	分子式 Molecular formula	CAS 编号 CAS number	计算保留指数 Calculation RI	文献保留指数 Reference RI
1	10.705	乙酸异丁酯 Isobutyl acetate	C ₆ H ₁₂ O ₂	110-19-0	1 026	1 024
2	10.132	2,3-丁二酮 2,3-butanedione	C ₄ H ₆ O ₂	431-03-8	993	990
3	11.139	丁酸乙酯 Ethyl butyrate	C ₆ H ₁₂ O ₂	105-54-4	1 050	1 051
4	12.101	异丁醇 2-methyl-1-propanol	C ₄ H ₁₀ O	78-83-1	1 104	1 102
5	12.703	2-甲基丁基乙酸酯 2-methylbutyl acetate	C ₇ H ₁₄ O ₂	624-41-9	1 137	1 135
6	13.640	巴豆酸乙酯 Ethyl crotonate	C ₆ H ₁₀ O ₂	623-70-1	1 188	1 190
7	14.161	2-甲基丁醇 2-methylbutanol	C ₅ H ₁₂ O	137-32-6	1 217	1 217
8	14.190	异戊醇 3-methylbutanol	C ₅ H ₁₂ O	123-51-3	1 219	1 218
9	14.988	惕各酸乙酯 Ethyl tiglate	C ₇ H ₁₂ O ₂	5 837-78-5	1 264	1 260
10	16.074	3-羟基-2-丁酮 3-hydroxy-2-oxobutane	C ₄ H ₈ O ₂	513-86-0	1 326	1 327
11	16.500	乙酸 3-辛酯 3-octylacetat	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	4 864-61-3	1 351	1 349
12	18.418	1-庚醇 1-heptanol	C ₇ H ₁₆ O	111-70-6	1 468	1 467
13	19.678	3-羟基丁酸乙酯 Ethyl 3-hydroxybutyrate	C ₆ H ₁₂ O ₃	5 405-41-4	1 550	1 553
14	20.449	3-乙酰氧基丁酸乙酯 Ethyl 3-acetoxybutyrate	C ₈ H ₁₄ O ₄	27 846-49-7	1 600	1 602
15	21.406	2-糠酸乙酯 Ethyl 2-furoate	C ₇ H ₈ O ₃	614-99-3	1 667	1 665
16	21.710	γ-戊内酯 γ-valerolactone	C ₅ H ₈ O ₂	108-29-2	1 688	1 687
17	22.065	γ-丁内酯 γ-butyrolactone	C ₄ H ₆ O ₂	96-48-0	1 713	1 712
18	22.249	苯甲酸乙酯 Ethyl benzoate	C ₉ H ₁₀ O ₂	93-89-0	1 727	1 728
19	25.423	苯乙醇 Phenylethyl alcohol	C ₈ H ₁₀ O	60-12-8	1 969	1 968

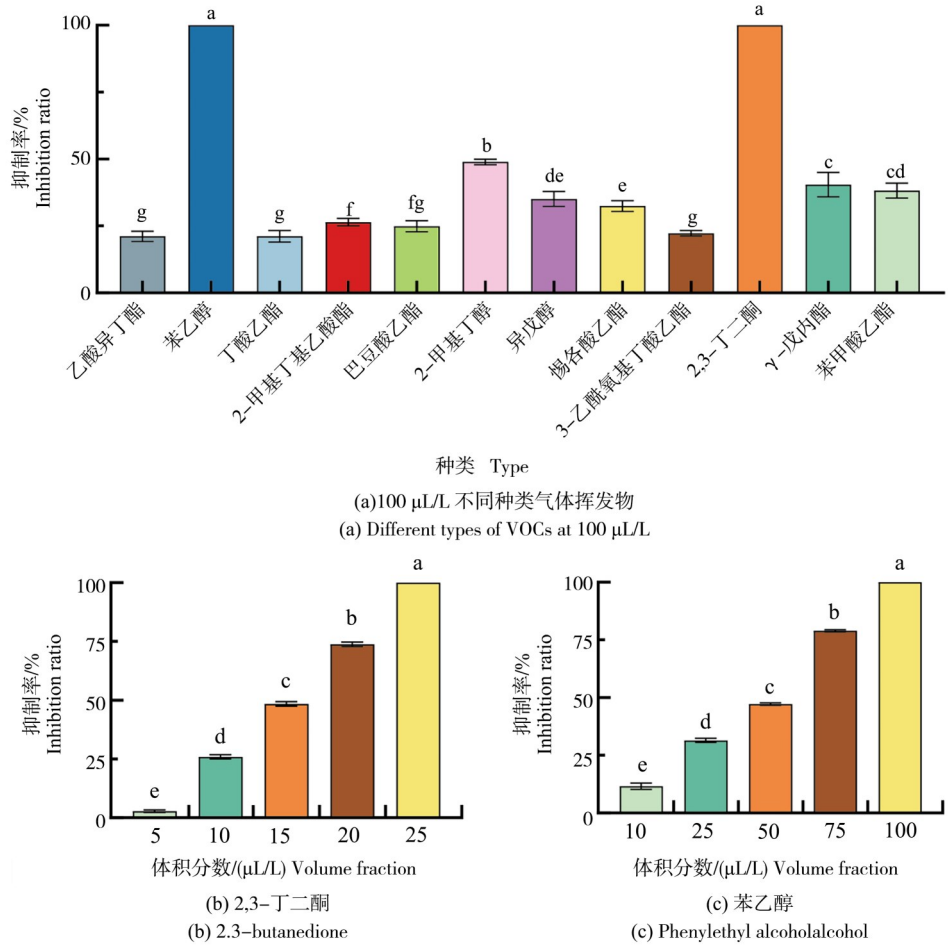


图 5 GUI12 菌株产生的 12 种气体挥发物对灰葡萄孢的抑制作用
Fig. 5 The inhibitory effect of single VOCs identified by GC-MS analysis on *B. cinerea*.

表 3 2,3 丁二酮、苯乙醇对葡萄灰霉病的防治效果

Table 3 The control effects of 2,3-butanedione and phenylethyl alcohol on grape gray mold

化学名称 Chemical name	处理 Treatment	病斑直径/mm Lesion diameter	发病率/% Incidence	抑制率/% Inhibition rate
2,3 丁二酮 2,3-Butanedione	CK	18.20	100.00	
	EC ₅₀	0.00	0.00	100.00
	2×EC ₅₀	0.00	0.00	100.00
苯乙醇 Phenylethyl alcohol	EC ₅₀	4.73	86.67	74.00
	2×EC ₅₀	0.00	0.00	100.00

菌株产生的 VOCs,筛选出 12 种在市面上可购买到的 VOCs 纯品并进行抑菌活性测定,发现其在 100 $\mu\text{L/L}$ 的浓度下均能够不同程度地抑制灰葡萄孢的菌丝的生长,其中 2,3-丁二酮、苯乙醇对灰葡萄孢的抑制效果较为显著,抑制率均达到 100%。本研究部分 VOCs 抑菌效果较差可能与所选的浓度有关,一些抗真菌化合物在低浓度下表现出弱活性或

无效^[23]。但高浓度的抗真菌物质会影响人体健康,难以在农业生产中应用,因此本研究中没有选择高浓度。

2,3-丁二酮是一种天然存在、安全且可食用的挥发性 α -二酮,因其良好的风味而常用于食品添加剂和香料中。Gergolet 等^[24]发现 2,3-丁二酮对轮枝镰刀菌 (*F. verticillioides*) 的菌丝生长具有强烈的

抑制作用。Calvo等^[25]研究发现,20 $\mu\text{L/L}$ 的2,3-丁二酮可以完全控制葡萄灰霉病,并减少60%的柑橘灰霉病害。Ling等^[22]发现贝莱斯芽孢杆菌(*B. velezensis*)L1产生的2,3-丁二酮能够显著抑制灰霉菌丝生长,并降低枸杞果实的灰霉病的病情指数;苯乙醇是一种芳香醇类化合物,通常用作食品和化妆品中的防腐剂,但也有广泛研究证明其对多种微生物具有抗菌活性。Boukaew等^[26]发现棘孢木霉(*T. asperellum*)能够产生苯乙醇,对苯乙醇进行熏蒸发现其能够减少2种产黄曲霉毒素的真菌黄曲霉(*Aspergillus flavus*)和寄生曲霉(*Aspergillus parasiticus*)在大豆种子上的发病率。Xu等^[27]发现金黄色葡萄球菌(*Arcopilus aureus*)YZXR菌株产生的苯乙醇能够有效抑制藤仓镰刀菌(*F. fujikuroi*)本研究测量2,3-丁二酮、苯乙醇在不同浓度下的对灰葡萄孢菌丝的抑制情况,发现2,3-丁二酮及苯乙醇对灰葡萄孢的 EC_{50} 分别为14.97 $\mu\text{L/L}$ 和48.21 $\mu\text{L/L}$ 。进一步对2,3-丁二酮及苯乙醇进行葡萄防治效试验,发现2,3-丁二酮在 EC_{50} 、 $2\times\text{EC}_{50}$ 浓度下均能够完全抑制葡萄灰霉病发生;苯乙醇也能够完全抑制葡萄灰霉病发生,但在 EC_{50} 浓度下其发病率则为86.67%,对葡萄灰霉病斑扩展的抑制率为74%。上述研究结果表明2,3-丁二酮及苯乙醇有望应用于水果采后储存期防治灰霉病。此外,正如GC-MS技术分析结果一样,微生物产生的VOCs的成分复杂,其抑制作用通常不依赖于单一的活性成分^[28]。少有研究调查VOCs组合的最佳应用和活性,因此,这些VOCs中的主要成分是否协同参与抗真菌作用值得进一步研究。另一方面,本研究专注于研究木霉菌产生的VOCs的抗菌作用,但木霉菌也能够产生如胶霉毒素、Sohirnonones A^[29]和Sorbicillin^[30]等具有抑菌活性的次级代谢产物。GUI12菌株能否产生具有抑菌活性的非挥发性代谢产物值得进一步的研究。

4 结 论

为了对能够绿色防控灰霉病的生物防治剂提供科学依据和技术支持,本研究以GUI12菌株为研究对象,探究了其对灰葡萄孢的抑制效果、挥发性有机物(VOCs)的组成及其对灰葡萄孢菌丝形态和结构的影响,以及VOCs对葡萄灰霉病的防治效果。主要结论如下:

1)GUI12菌株被鉴定为柠檬绿木霉(*Trichoderma citrinoviride*),其产生的VOCs对灰葡萄孢菌丝生长具有显著抑制作用,抑制率最高可达89.63%,且对葡萄灰霉病斑扩展的抑制率为53.56%。

2)通过SEM和TEM观察发现,GUI12产生的VOCs能够导致灰葡萄孢菌丝变粗、褶皱、塌陷,并使细胞器轮廓模糊甚至溶解消失,说明VOCs可造成细胞器损伤,从而抑制灰葡萄孢的生长。

3)GC-MS分析鉴定出GUI12产生19种VOCs,其中2,3-丁二酮和苯乙醇在100 $\mu\text{L/L}$ 浓度下对灰葡萄孢的抑制率为100%。2,3-丁二酮在 EC_{50} (14.97 $\mu\text{L/L}$)浓度下对葡萄灰霉病的防效为100%,苯乙醇在 $2\times\text{EC}_{50}$ (95.38 $\mu\text{L/L}$)浓度下防效也达到100%,表明这2种化合物对灰葡萄孢和葡萄灰霉病具有显著的防治效果。

参考文献 References

- [1] Fillinger S, Elad Y. *Botrytis - the Fungus, the Pathogen and Its Management in Agricultural Systems*[M]. Cham: Springer International Publishing, 2016
- [2] 肖婷, 钱荣明, 张富荣, 周斌, 吴惠秋, 季森, 宋俊贤, 庄义庆, 杨敬辉. 江苏省城草霉灰霉病菌种群多药剂抗性检测[J]. 中国农学通报, 2022, 38(14): 110-117
Xiao T, Qian R M, Zhang F R, Zhou B, Wu H Q, Ji S, Song J X, Zhuang Y Q, Yang J H. Multidrug resistance detection of strawberry gray mold strains in Jiangsu province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(14): 110-117 (in Chinese)
- [3] 焦甜甜, 沈凤英, 王娇, 刘晓宁, 李星, 李亚宁. 咯菌腈与解淀粉芽孢杆菌X-119复配对葡萄灰霉病的防效[J]. 植物保护学报, 2024, 51(3): 698-708
Jiao T T, Shen F Y, Wang J, Liu X Y, Li X, Li Y N. The control effect of fludioxonil combined with *Bacillus amyloliquefaciens* X-119 on grape gray mold[J]. *Journal of Plant Protection*, 2024, 51(3): 698-708 (in Chinese)
- [4] Dean R, Van kan J A, Pretorius Z A, Hammond-kosack K E, Di pietro A, Spanu P D, Rudd J J, Dickman M, Kahmann R, Ellis J, Foster G D. The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology[J]. *Molecular Plant Pathology*, 2012, 13(4): 414-430.
- [5] 赵建江, 路粉, 吴杰, 毕秋艳, 刘翔宇, 韩秀英, 王文桥. 中国防治果蔬灰霉病的杀菌剂应用及防控关键技术[J]. 现代农药, 2024, 23(2): 33-38
Zhao J J, Lu F, Wu J, Bi Q Y, Liu X Y, Han X Y, Wang W Q. Application of fungicides and key technologies for controlling gray mold on fruit and vegetable in China[J]. *Modern Agrochemicals*, 2024, 23(2): 33-38 (in Chinese)
- [6] Rupp S, Weber R W S, Rieger D, Detzel P, Hahn M. Spread of *Botrytis cinerea* strains with multiple fungicide resistance in German horticulture[J]. *Frontiers in microbiology*, 2017, 7: 2075
- [7] 田秀, 周连柱, 黄晓庆, 孔繁芳, 王忠跃, 甄志先, 张昊. 我国葡萄灰霉病

- 菌对四霉素和啮酰菌胺的敏感性测定[J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(4): 868-873
- Tian X, Zhou L Z, Huang X Q, Kong F F, Wang Z Y, Zhen Z X, Zhang H. Sensitivity of *Botrytis cinerea* to tetracycline and boscalid in China[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2022, 38(4): 868-873 (in Chinese)
- [8] 李玥, 罗丽芬, 王炬东, 李梦琪, 朱书生, 杨敏. 三七根际耐皂苷木霉菌的分离鉴定及其拮抗促生活性评价[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(8): 133-143
- Li Y, Luo L F, Wang X D, Li M Q, Zhu S S, Yang M. Isolation and identification of ginsenosides-tolerant *Trichoderma* strains from rhizosphere of *Panax notoginseng* and evaluation of their effect on antagonistic and growth promotion activity [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(8): 133-143 (in Chinese)
- [9] O'Brien P A. Biological control of plant diseases[J]. *Australasian Plant Pathology*, 2017, 46(4): 293-304
- [10] Barratt B I P, Moran V C, Bigler F, van Lenteren J C. The status of biological control and recommendations for improving uptake for the future[J]. *BioControl*, 2018, 63(1): 155-167
- [11] 王静, 曹建敏, 陈德鑫, 邱军, 王晓强, 冯超, 王文静. 短小芽孢杆菌 AR03 挥发性有机物的抑菌活性及其组分分析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(10): 1908-1919
- Wang J, Cao J M, Chen D X, Qiu J, Wang X Q, Feng C, Wang W J. Antimicrobial effect and components analysis of volatile organic compounds from *Bacillus pumilus* AR03[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(10): 1908-1919 (in Chinese)
- [12] 高游慧, 郑泽慧, 张越, 胡跃高, 王小芬. 根际微生态防治作物土传真菌病害的机制研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(6): 100-113
- Gao Y H, Zheng Z H, Zhang Y, Hu Y G, Wang X F. Mechanism of rhizosphere micro-ecology in controlling soil-borne fungal diseases: A review[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(6): 100-113 (in Chinese)
- [13] Collins R P, Halim A F. Characterization of the major aroma constituent of the fungus *Trichoderma viride*[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1972, 20(2): 437-438
- [14] 张铭, 朱帆, 张辉, 程元, 谢宪, 张星耀, 梁军. 生防菌株森吉木霉 M75 挥发性气体的抑菌活性分析[J]. 林业科学研究, 2024, 37(4): 127-135
- Zhang M, Zhu F, Zhang H, Cheng Y, Xie X, Zhang X Y, Liang J. Analysis of antifungal activity of volatile gas from biocontrol strain *Trichoderma songyi* M75[J]. *Forest Research*, 2024, 37(4): 127-135 (in Chinese)
- [15] Kong W L, Ni H, Wang W Y, Wu X Q. Antifungal effects of volatile organic compounds produced by *Trichoderma koningiopsis* T2 against *Verticillium dahliae*[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 1013468
- [16] Hu X, Shi H, Zhang Z, Bai C. Antifungal effects of volatile organic compounds produced by *Trichoderma hamatum* against *Neocosmospora solani*[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2024, 77(7): ova063
- [17] Kumar M, Kumar V, Rana M. Effect of volatile and non volatile compounds of *Trichoderma* spp against *Fusarium isolates* causing chickpea wilt in punjab[J]. *Plant Archives*, 2019, 19(1): 159-162
- [18] Wonglom P, Ito S I, Sunpapao A. Volatile organic compounds emitted from endophytic fungus *Trichoderma asperellum* T1 mediate antifungal activity, defense response and promote plant growth in lettuce (*Lactuca sativa*) [J]. *Fungal Ecology*. 2020, 43: 100867
- [19] Gao Z F, Zhang B J, Liu H P, Han J C, Zhang Y J. Identification of endophytic *Bacillus velezensis* ZSY-1 strain and antifungal activity of its volatile compounds against *Alternaria solani* and *Botrytis cinerea* [J]. *Biological Control*, 2017, 105: 27-39
- [20] Abdenaceur R, Farida B T, Fatma S H. Volatile organic compounds activities of *Trichoderma* species isolated from olive grove soil against the wilt pathogen, *Verticillium dahliae*[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2024, 170(4): 789-803
- [21] Rao Y X, Zeng L Z, Jiang H, Mei L, Wang Y J. *Trichoderma atroviride* LZ42 releases volatile organic compounds promoting plant growth and suppressing *Fusarium* wilt disease in tomato seedlings [J]. *BMC Microbiology*. 2022, 22(1): 88
- [22] Ling L J, Luo H, Yang C Y, Wang Y Y, Cheng W T, Pang M M, Jiang K L. Volatile organic compounds produced by *Bacillus velezensis* L1 as a potential biocontrol agent against postharvest diseases of wolfberry [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 987844
- [23] Zhong T, Wang Z R, Zhang M, Wei X, Kan J Q, Zaldn Z, Wang K T, Du M Y. Volatile organic compounds produced by *Pseudomonas fluorescens* ZX as potential biological fumigants against gray mold on postharvest grapes[J]. *Biological Control*, 2021, 163: 104754
- [24] Gergolet Diaz D G, Pizzolito R P, Vázquez C, Usseglio V L, Zunino M P, Dambolena J S, Zygodlo J A, Merlo C. Effects of the volatile organic compounds produced by *Enterococcus* spp strains isolated from maize grain silos on *Fusarium verticillioides* growth and fumonisin B1 production[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2021, 93: 101825
- [25] Calvo H, Mendiara I, Arias E, Gracia A P, Blanco D, Venturini M E. Antifungal activity of the volatile organic compounds produced by *Bacillus velezensis* strains against postharvest fungal pathogens [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 166: 111208
- [26] Boukaew S, Prasertsan P. Inhibitory effects of acetophenone or phenylethyl alcohol as fumigant to protect soybean seeds against two aflatoxin-producing fungi[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55(12): 5123-5132
- [27] Xu R, Song S Q, Wu G C, Hu B S, Xie J, Wang X J, Xia Y Q, Zheng S X, Peng S W, Yuan Y, Cao L, Song R, Huang Y N. Biocontrol ability of *Arcopilus aureus* YZXR against *Fusarium fujikuroi* causing leaf spot on *Polygonatum odoratum*[J]. *Phytopathology Research*, 2024, 6(1): 68
- [28] Wang F, Xiao J, Zhang Y Z, Li R Y, Liu L, Deng J. Biocontrol ability and action mechanism of *Bacillus halotolerans* against *Botrytis cinerea* causing grey mould in postharvest strawberry fruit [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 174: 111456
- [29] 华丽霞, 孙佩, 蒋秋平, 曾华兰, 叶鹏盛, 何炼, 曾静, 王明娟, 张敏, 罗飞, 杨晓丫, 何晓敏, 刘勇. 绿木霉(*Trichoderma virens*) T23 甲基转移酶基因 gltN-T 对胶毒素合成的调控研究[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(6): 75-81
- Hua L X, Sun P, Jiang Q P, Zeng H L, Ye P S, He L, Zeng J, Wang M J, Zhang M, Luo F, Yang X Y, He X M, Liu Y. Regulation effect of methyltransferase gene gltN-T on the gliotoxin synthesis regulation in *Trichoderma virens* T23[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(6): 75-81 (in Chinese)
- [30] 黄瑞环, 韩小斌, 刘京, 祝乾湘, 张远淑, 王丹, 张成省, 赵栋霖. 海洋曲霉和海洋木霉抗植物病原菌活性次级代谢产物研究进展[J]. 江苏农业学报,

2020, 36(5): 1332-1341

Huang R H, Han X B, Liu J, Zhu Q X, Zhang Y S, Wang D, Zhang C
S, Zhao D L. Research progress on secondary metabolites with anti-
phytopathogenic activities of marine-derived *Aspergillus* sp and

Trichoderma spp[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 36
(5): 1332-1341 (in Chinese)

责任编辑:杨爱东



第一作者简介: 石精涛, 硕士研究生, 2022年9月至今就读于新疆农业大学农业资源与环境专业。参加国家自然科学基金一项; 2024年获得新疆维吾尔自治区奖学金。



通讯作者简介: 林伟, 福建省烟草公司南平市公司农艺师。长期从事挥发物鉴定与功能研究相关工作。先后参与中国烟草总公司等烟草农业科研项目 20 余项, 主持市级科研项目 6 项。获地厅级奖励 7 项, 授权专利 12 项, 第一作者或通讯作者发表论文 10 余篇。



通讯作者简介: 徐康文, 博士, 助理研究员。主要致力于农业微生物和烟草病害防控研究。主持国家自然科学基金项目、山东省自然科学基金等研究课题共 4 项; 以第一或通讯作者在 *Journal of Agricultural and Food Chemistry*、*npj Biofilms and Microbiomes*、*Molecular Plant Pathology* 等微生物和植物保护主流期刊发表论文共 6 篇。