

DOI:10.12171/j.1000-1522.20230274

杨棒盘孢菌对不同杀菌剂及其复配剂的敏感性

唐秀丽^{1,2} 杨建敏¹ 冯军^{1,2} 石瑛³ 燕平梅^{1,2}

(1. 太原师范学院生物科学与技术学院, 山西 晋中 030619; 2. 汾河流域地表过程与资源生态安全山西省重点实验室, 山西 晋中 030619; 3. 山西工程技术学院, 山西 阳泉 045000)

摘要:【目的】杨棒盘孢菌引起的灰斑病是杨树生产上重要的真菌病害。测定病菌对杀菌剂的敏感性,旨在为筛选高效杀菌剂及复配药剂,防治杨树灰斑病提供数据支持。【方法】采用菌丝生长速率法和孢子萌发法,测定杨棒盘孢菌对5种杀菌剂(多菌灵、代森锰锌、戊唑醇、百菌清、咪鲜胺)和3类复配剂(戊唑醇+百菌清、多菌灵+百菌清、多菌灵+咪鲜胺)的敏感性,并通过显微镜观察药剂作用后病菌菌丝和孢子萌发的形态变化。【结果】5种杀菌剂中,戊唑醇对病菌菌丝生长抑制作用最强(有效抑制中浓度 EC_{50} 为 $0.025\ \mu\text{g/mL}$),多菌灵次之(EC_{50} 为 $0.048\ \mu\text{g/mL}$)。百菌清对分生孢子萌发抑制作用最强(EC_{50} 为 $95.13\ \mu\text{g/mL}$),咪鲜胺次之(EC_{50} 为 $100.67\ \mu\text{g/mL}$)。复配剂中,多菌灵:咪鲜胺(4:1)对病菌菌丝生长的抑菌活性最强, EC_{50} 为 $0.038\ \mu\text{g/mL}$,共毒系数(C_{CT})值150.75,两者表现为增效作用;戊唑醇:百菌清(1:4)对分生孢子萌发抑菌活性最强(EC_{50} 为 $132.31\ \mu\text{g/mL}$), C_{CT} 值83.72,两者表现为相加作用。显微观察显示,戊唑醇处理后,菌丝生长缓慢、表面粗糙,分支处膨大,不产孢;分生孢子不萌发或出现分支,芽管从孢子顶端、基部或中间多个部位产生,顶端轻微肿胀且不伸长。【结论】戊唑醇搭配百菌清或咪鲜胺,多菌灵:咪鲜胺(4:1)搭配百菌清或咪鲜胺使用是防治杨树灰斑病的推荐方案,药剂间应交叉使用,以延缓病菌产生抗药性。

关键词: 杨棒盘孢菌; 杀菌剂; 敏感性; 复配剂; 增效; 灰斑病

中图分类号: S763.15 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2025)02-0066-13

引文格式: 唐秀丽, 杨建敏, 冯军, 等. 杨棒盘孢菌对不同杀菌剂及其复配剂的敏感性 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(2): 66-78. Tang Xiuli, Yang Jianmin, Feng Jun, et al. Susceptibility of *Coryneum populinum* to different fungicides and their compounds [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(2): 66-78.

Susceptibility of *Coryneum populinum* to different fungicides and their compounds

Tang Xiuli^{1,2} Yang Jianmin¹ Feng Jun^{1,2} Shi Ying³ Yan Pingmei^{1,2}

(1. College of Biological Sciences and Technology, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology Security in Fenhe River Basin, Jinzhong 030619, Shanxi, China;

3. Shanxi Institute of Technology, Yangquan 045000, Shanxi, China)

Abstract: [Objective] Poplar gray leaf spot caused by *Coryneum populinum* is an important fungal disease of poplar. Evaluating the susceptibility of *C. populinum* to fungicides will provide data support for the screening of high-efficiency fungicides and compounds for the prevention and control of poplar gray leaf spot. [Method] The susceptibility of *C. populinum* to 5 fungicides (carbendazim, mancozeb, tebuconazole, chlorothalonil and prochloraz) and 3 compounds (tebuconazole : chlorothalonil, carbendazim : chlorothalonil and carbendazim : prochloraz) was determined by mycelium growth rate method and spore germination method, and the microscopic morphology of mycelium and spore germination were observed.

收稿日期: 2023-10-17 修回日期: 2024-06-03

基金项目: 山西省基础研究计划(202303021212251), 山西省三区科技人才支持计划, 河北省土传病害绿色绿色防控技术创新中心项目(Z2023Z01)。

第一作者: 唐秀丽, 副教授。主要研究方向: 植物病害防治。Email: tangxiuli003@126.com 地址: 030619 山西省晋中市榆次区大学街 319 号太原师范学院生物科学与技术学院。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

[**Result**] Tebuconazole and carbendazim had the strongest inhibitory effect on mycelial growth with EC_{50} (median effect concentration) of 0.025 and 0.048 $\mu\text{g/mL}$, respectively. Chlorothalonil and prochloraz were the strongest inhibitor to spore germination with EC_{50} of 95.13 and 100.67 $\mu\text{g/mL}$, respectively. The compounds of carbendazim : prochloraz (4:1) had a synergistic effect with co-toxicity coefficient (C_{CT}) of 150.75, and the most virulent with EC_{50} value of 0.038 $\mu\text{g/mL}$ to mycelial growth. The compounds of tebuconazole : chlorothalonil (1:4) had an additive effect with C_{CT} of 83.72, and the most virulent with EC_{50} value of 132.31 $\mu\text{g/mL}$ to spore germination. The hyphal surface of *C. populinum* became rough with enlarged branches after tebuconazole treated. The conidial germination was severely malformed with branching or without germination. Germ tubes were produced from the top, base or middle sites of conidia. The top of germ tubes was slightly swollen or without elongation. [**Conclusion**] The combination of tebuconazole with chlorothalonil or prochloraz, and carbendazim : prochloraz (4:1) with chlorothalonil or prochloraz were recommended agents for preventing poplar gray spot. Alternate use of fungicides could delay the development of pathogen resistance.

Key words: *Coryneum populinum*; fungicide; susceptibility; compounds; synergistic effect; gray leaf spot

由杨棒盘孢菌(*Coryneum populinum*)引起的杨树灰斑病是杨树(*Populus spp.*)苗圃常见且严重的病害之一。病菌体表寄生,通过气孔或表皮细胞侵入寄主,主要危害叶片和嫩枝。严重时造成叶片空洞或干枯脱落,顶梢枯死或多顶苗,肿茎,枝干溃疡,幼苗死亡,生长量降低,移栽成活率下降^[1-3]。该病在我国东北、华北、西北和华东地区普遍发生,主要危害北京杨(*P. Beijingensis*)、小青杨(*P. pseudo-simonii*)、黑杨(*P. deltoides*)、小叶杨(*P. simonii*)、青杨(*P. cathayana*)、箭杆杨(*P. nigra var. thevestina*)、小黑杨(*P. simonii* × *P. nigra*)等多种杨树,其病害程度受温度、湿度等环境因子的显著影响。杨树灰斑病对苗圃生产和造林构成极大威胁,轻则导致产量下降 16%,严重时可达 60%^[4]。

目前生产上主要采用化学药剂防治杨树灰斑病。研究发现,发病前喷施甲基硫菌灵^[5]、代森锌^[5]或波尔多液^[3],可有效预防病害发生;发病初期喷施赛力散^[6]、代森锰锌^[7]、啞菌酯^[8]、咪鲜胺、腐霉利、异菌脲,均表现出一定防效^[9-10];病害严重时用多菌灵、甲基托布津、百菌清喷雾防治^[3]。然而,现有防治方案存在农药品种结构老化、同质化严重、抗药性上升、药效降低及用药量增加等问题。同时,农药残留和环境风险日益突出,亟需加快农药的更新换代,淘汰高毒高风险农药^[11]。针对这些问题,有效防治杨树灰斑病,筛选对杨树灰斑病菌高效低毒的杀菌剂,优化药剂的混配和轮换使用,已成为林业部门关注的重点研究方向。

多菌灵、戊唑醇和咪鲜胺是一类对子囊菌活性较高的杀菌剂,兼具保护和铲除作用^[12];而代森锰锌和百菌清是一类抑制真菌孢子萌发和芽管伸长的保护性与治疗性杀菌剂^[12-13]。本研究以杨棒盘孢菌为

研究对象,从菌丝生长和分生孢子萌发两个阶段出发,采用菌丝生长速率法和孢子萌发法测定病菌对上述 5 种杀菌剂的敏感性,筛选出高效药剂。同时,根据杀菌剂的不同抑菌机理,研究混剂(戊唑醇 + 百菌清、多菌灵 + 百菌清、多菌灵 + 咪鲜胺)的室内毒力,以期提高杀菌效果,拓展杀菌剂的作用谱,并减缓抗药性的发展,为杨树灰斑病的综合治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试菌种

杨棒盘孢菌由太原师范学院生物科学与技术学院植物病理室保存、提供。

1.1.2 供试杀菌剂

多菌灵(98%)、代森锰锌(90%)购自上海麦克林生化科技有限公司,戊唑醇(97%)、百菌清(99%)、咪鲜胺(98%)购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司。将上述 5 种杀菌剂原药配置成质量浓度为 $1 \times 10^4 \mu\text{g/mL}$ 的母液,备用。多菌灵、代森锰锌、戊唑醇用二甲基亚砷溶解,百菌清、咪鲜胺用丙酮溶解。用于溶解原药的二甲基亚砷和丙酮在培养基中的使用浓度低于 0.1%,在预试验中对杨棒盘孢菌生长的影响在统计误差范围内可忽略不计。

1.1.3 供试培养基

PDA 培养基: 去皮马铃薯 200 g,无水葡萄糖 20 g,琼脂 15 g,加蒸馏水定容至 1 000 mL,121 °C 高温灭菌 20 min。

产孢培养基^[2]: 去皮马铃薯 200 g,蛋白胨 0.5 g,磷酸二氢钾 3 g,硫酸镁 1.5 g,琼脂 20 g,加蒸馏水定容至 1 000 mL,121 °C 高温灭菌 20 min。

1.2 试验方法

1.2.1 菌饼及孢子悬浮液的制备

将供试菌株接种至 PDA 培养基中, 20 °C(12 h 光照/12 h 黑暗)条件下培养 15 d, 用打孔器在菌落边缘打取菌饼(直径为 0.6 cm); 将菌株接种至产孢培养基上, 20 °C(12 h 光照/12 h 黑暗)下培养 5 d, 刮取菌落表面分生孢子并用无菌水冲洗至 20 mL 离心管中, 在涡旋振荡器上振荡, 使分生孢子均匀散开, 制得孢子悬浮液并调整含量为 1×10^5 个/mL。

1.2.2 杨棒盘孢菌对单剂的敏感性测定

采用菌丝生长速率法^[14]测定 5 种杀菌剂对杨棒盘孢菌菌丝生长的抑菌活性。先用无菌水将药剂母液稀释成试验所需质量浓度的 10 倍, 再将其与 50 °C 左右的 PDA 培养基(1:9)混合^[15]。充分摇匀后, 倒入直径为 7.5 cm 玻璃培养皿中, 参照 Yin 等^[12]的方法, 配制成不同质量浓度药剂的 PDA 平板。将菌饼接种于平板中央, 倒置放于 20 °C 恒温培养箱中(12 h 光照/12 h 黑暗)培养 10 d, 采用十字交叉法测量菌落直径, 计算菌丝生长抑制率。每处理重复 3 次, 以无菌水中加入相同体积的二甲基亚砷或丙酮处理作为空白对照^[16]。

$$I_F = (D_C - D_T) / (D_C - 0.6) \times 100\%$$

式中: I_F 为菌丝生长抑制率(%), D_C 表示空白对照组菌落直径(cm), D_T 表示药物培养基菌落直径(cm)。

采用孢子萌发法^[17]测定 5 种杀菌剂对杨棒盘孢菌分生孢子萌发的抑菌活性。用移液器吸取 200 μ L 制备好的孢子悬浮液均匀涂布于含药剂 PDA 平板上, 置于 20 °C 恒温培养箱黑暗培养, 12 h 后观察孢子萌发情况。每质量浓度的供试杀菌剂处理重复 3 次, 以在平板上加等量无菌水作对照。芽管长度大于等于孢子长度一半时视为萌发, 在显微镜下计数, 共计 100 个孢子, 每个处理重复 3 次, 计算孢子萌发率及孢子萌发抑制率^[18]。

$$I_S = (G_C - G_T) / G_C \times 100\%$$

式中: I_S 为孢子萌发抑制率(%), G_C 表示空白对照组孢子萌发率(%), G_T 表示药物培养基孢子萌发率(%)。

以杀菌剂质量浓度对数值为横坐标(x), 菌丝生长或孢子萌发抑制率所对应的机率值为纵坐标(y), 得到毒力回归方程($y = ax + b$), $y = 50\%$ 时, 计算有效抑制中浓度(EC_{50})。

1.2.3 杨棒盘孢菌对复配药剂的敏感性测定

基于 5 种杀菌剂的抑菌活性和杀菌机理, 选取戊唑醇 + 百菌清、多菌灵 + 百菌清、多菌灵 + 咪鲜胺进行复配。用无菌水将各单剂母液稀释成试验设置浓度的 10 倍, 参照刘程程等^[19]和苗淑斐等^[20]的方

法, 取相同浓度的两种药液按体积比 4:1、3:2、1:1、2:3、1:4 进行复配, 再与 PDA 培养基按 1:9 的体积比混合, 得到不同浓度的含药培养基^[21]。采用菌丝生长速率法和孢子萌发法测定病菌对复配药剂的敏感性, 测定方法同 1.2.2。每处理设 3 个重复, 以无菌水中加入相同体积的二甲基亚砷或丙酮处理作为菌丝生长抑制试验的对照, 以等量无菌水作为分生孢子萌发抑制试验的对照。参照孙云沛等^[22]的方法计算复配药剂毒力指数(toxicity index, I_T)、理论毒力指数(theoretical toxicity index, I_{TT})、实际毒力指数(active toxicity index, I_{AT})及共毒系数(co-toxicity coefficient, C_{CT}), 并基于共毒系数评价药剂复配的增效作用。

$$I_T = S_{EC50} / T_{EC50}; I_{AT} = S_{EC50} / M_{EC50};$$

$$I_{TT} = I_{T(A)} \times P_A + I_{T(B)} \times P_B$$

式中: S_{EC50} 是标准药剂的 EC_{50} , T_{EC50} 是供试药剂的 EC_{50} , M_{EC50} 是复配药剂的 EC_{50} , $I_{T(A)}$ 和 $I_{T(B)}$ 分别是单剂 A 和 B 的毒力指数, P_A 和 P_B 分别是单剂 A、B 在混剂中所占的体积百分含量。

$$C_{CT} = I_{AT} / I_{TT} \times 100\%$$

当 $C_{CT} \geq 120$ 时, 两种药剂间表现为增效作用; $80 < C_{CT} < 120$, 2 种药剂间表现为相加作用; $C_{CT} \leq 80$, 两种药剂间表现为拮抗作用。

1.2.4 杨棒盘孢菌形态学观察

接种杨棒盘孢菌于含药剂(0.2 μ g/mL 戊唑醇) PDA 培养基上, 于 20 °C(12 h 光照/12 h 黑暗)培养, 第 10 天记录菌落形状、颜色; 在光学显微镜下(Olympus BX53)观察菌丝形态并拍照, 以不含药剂处理作为对照。用移液器吸取 200 μ L 孢子悬浮液均匀涂布于附有药剂(350 μ g/mL 戊唑醇)PDA 培养基的载玻片上, 20 °C 黑暗培养 12 h, 在光学显微镜下观察分生孢子萌发并拍照, 以不含药剂为对照。

1.3 数据处理

采用 SPSS 25.0 对不同药剂处理后病菌菌落生长直径和孢子萌发率进行单因素方差分析, 并采用 Tukey's 法进行差异显著性分析, 采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据处理及计算。

2 结果与分析

2.1 杨棒盘孢菌对 5 种杀菌剂的敏感性测定结果

2.1.1 5 种杀菌剂对杨棒盘孢菌菌丝生长的抑制作用

不同杀菌剂对杨棒盘孢菌菌丝生长的毒力回归方程的相关系数 $r > 0.95$, 试验结果可信度较高。5 种杀菌剂对病菌菌丝生长均具有不同程度的抑制作用, 不同质量浓度的同一种药剂处理后病菌菌落

直径存在显著差异($P < 0.05$)。戊唑醇的 EC_{50} 值为 $0.025 \mu\text{g/mL}$, 对病菌菌丝生长的抑菌活性最强; 多菌灵、咪鲜胺、百菌清抑制效果次之, EC_{50} 值分别为 0.048 、 0.240 、 $0.640 \mu\text{g/mL}$; 代森锰锌对病菌菌丝生长的抑制作用最弱($EC_{50} = 11.600 \mu\text{g/mL}$)(表 1)。

2.1.2 5 种杀菌剂对杨棒盘孢菌分生孢子萌发的抑制作用

不同杀菌剂对杨棒盘孢菌分生孢子萌发抑制率的毒力回归方程的相关系数 $r > 0.97$, 试验结果具有较高可信度。5 种杀菌剂对病菌孢子萌发的抑制效果存在差异, 同一种药剂不同质量浓度对孢子萌发抑制率不同。百菌清的抑制效果显著, EC_{50} 值为 $95.13 \mu\text{g/mL}$; 咪鲜胺毒力次之, EC_{50} 值为 $100.67 \mu\text{g/mL}$; 代森锰锌和多菌灵的 EC_{50} 值分别为 110.16 、 $255.29 \mu\text{g/mL}$, 对孢子萌发的抑制作用相对较差; 戊唑醇的毒力最弱, EC_{50} 值为 $323.33 \mu\text{g/mL}$ (表 2)。

2.2 杨棒盘孢菌对 3 类复配药剂的敏感性

2.2.1 3 类复配药剂对杨棒盘孢菌菌丝生长的抑制作用

不同复配剂对杨棒盘孢菌菌丝生长的抑制作用

存在差异。根据构建的毒力回归方程相关系数 r 值, 试验结果具有较高可信度。戊唑醇与百菌清复配剂的 EC_{50} 值为 $0.06 \sim 0.40 \mu\text{g/mL}$, 均小于单剂百菌清的 EC_{50} 值($0.640 \mu\text{g/mL}$), 但大于单剂戊唑醇的 EC_{50} 值($0.025 \mu\text{g/mL}$), C_{CT} 为 $23.46 \sim 51.87$, 戊唑醇与百菌清两者之间表现为拮抗作用(表 3)。多菌灵与百菌清复配剂对菌丝生长均表现为较强的室内毒力, EC_{50} 值为 $0.039 \sim 0.230 \mu\text{g/mL}$, 两者体积比 $4:1$ 、 $3:2$ 时, EC_{50} 为 0.039 和 $0.046 \mu\text{g/mL}$, 均小于 2 种单剂的 EC_{50} 值(多菌灵 $0.048 \mu\text{g/mL}$ 、百菌清 $0.640 \mu\text{g/mL}$), 表现为增效作用; 两者体积比 $1:1$ 、 $2:3$ 时, EC_{50} 为 0.055 和 $0.079 \mu\text{g/mL}$, 位于两单剂 EC_{50} 值之间, 表现为增效作用; 体积比 $1:4$, EC_{50} 值为 $0.23 \mu\text{g/mL}$, $C_{CT} = 78.70 (< 80)$, 表现为拮抗作用(表 4)。多菌灵与咪鲜胺复配剂 EC_{50} 值为 $0.038 \sim 0.081 \mu\text{g/mL}$, 均表现为增效作用($C_{CT} > 120$), 体积比 $2:3$ 时, 增效作用最为明显($C_{CT} = 213.20$)。体积比 $4:1$ 、 $3:2$ 、 $1:1$ 和 $2:3$ 时, EC_{50} 值小于 2 种单剂的 EC_{50} (多菌灵 $0.048 \mu\text{g/mL}$ 、咪鲜胺 $0.240 \mu\text{g/mL}$), 体积比 $1:4$ 时, EC_{50} 值为 $0.081 \mu\text{g/mL}$, 位于两单剂

表 1 5 种杀菌剂对杨棒盘孢菌菌丝生长的抑制作用

Tab. 1 Inhibitory effects of 5 fungicides on mycelial growth of *Coryneum populinum*

杀菌剂	质量浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	处理菌落直径/cm	对照菌落直径/cm	毒力回归方程	相关系数(r)	$EC_{50}/(\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$
多菌灵	0.08	0.68 ± 0.031	$1.73 \pm 0.06\text{bcd}$	$y = 6.419 7x + 13.469 0$	0.996	0.048
	0.07	$0.78 \pm 0.03\text{jk}$	$1.70 \pm 0.00\text{bcde}$			
	0.06	$0.85 \pm 0.05\text{ij}$	$1.67 \pm 0.03\text{de}$			
	0.05	$1.13 \pm 0.06\text{f}$	$1.73 \pm 0.06\text{bcd}$			
	0.04	$1.38 \pm 0.03\text{c}$	$1.73 \pm 0.06\text{bcd}$			
戊唑醇	0.200 0	0.68 ± 0.031	$1.68 \pm 0.03\text{cde}$	$y = 1.394 4x + 7.227 3$	0.977	0.025
	0.100 0	$0.87 \pm 0.06\text{i}$	$1.72 \pm 0.08\text{bcde}$			
	0.050 0	$1.03 \pm 0.06\text{gh}$	$1.68 \pm 0.03\text{cde}$			
	0.025 0	$1.15 \pm 0.05\text{f}$	$1.68 \pm 0.03\text{cde}$			
	0.012 5	$1.28 \pm 0.03\text{de}$	$1.70 \pm 0.00\text{bcde}$			
代森锰锌	12	$1.10 \pm 0.00\text{fg}$	$1.78 \pm 0.03\text{ab}$	$y = 5.347 2x - 0.691 0$	0.957	11.600
	11	$1.23 \pm 0.06\text{e}$	$1.63 \pm 0.06\text{e}$			
	10	$1.33 \pm 0.06\text{cd}$	$1.73 \pm 0.06\text{bcd}$			
	9	$1.33 \pm 0.06\text{cd}$	$1.67 \pm 0.03\text{de}$			
	8	$1.47 \pm 0.06\text{b}$	$1.67 \pm 0.06\text{de}$			
咪鲜胺	2.000	$0.80 \pm 0.00\text{ijk}$	$1.72 \pm 0.03\text{bcde}$	$y = 0.855 8x + 5.523 4$	0.966	0.240
	1.000	$1.00 \pm 0.00\text{h}$	$1.73 \pm 0.06\text{bcd}$			
	0.500	$1.07 \pm 0.06\text{fgh}$	$1.72 \pm 0.03\text{bcde}$			
	0.250	$1.13 \pm 0.06\text{f}$	$1.68 \pm 0.03\text{cde}$			
	0.125	$1.23 \pm 0.03\text{e}$	$1.70 \pm 0.00\text{bcde}$			
百菌清	2.000	$0.77 \pm 0.03\text{k}$	$1.68 \pm 0.03\text{cde}$	$y = 1.570 9x + 5.305 1$	0.961	0.640
	1.000	$1.08 \pm 0.08\text{fg}$	$1.72 \pm 0.03\text{bcde}$			
	0.500	$1.38 \pm 0.03\text{c}$	$1.77 \pm 0.06\text{abc}$			
	0.250	$1.47 \pm 0.06\text{b}$	$1.77 \pm 0.06\text{abc}$			
	0.125	$1.62 \pm 0.06\text{a}$	$1.83 \pm 0.08\text{a}$			

注: EC_{50} 表示有效抑制中浓度。不同小写字母表示不同药剂不同质量浓度处理之间差异显著($P < 0.05$)。数据均为平均值 \pm 标准差($n = 3$)。下同。

表2 5种杀菌剂对杨棒盘孢菌孢子萌发的抑制作用

Tab. 2 Inhibitory effects of 5 fungicides on spore germination of *Coryneum populinum*

杀菌剂	质量浓度/($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	孢子萌发率/%	毒力回归方程	r	$\text{EC}_{50}/(\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$
对照		79.00 ± 2.00a			
多菌灵	350	28.00 ± 1.00n	$y = 2.7300x - 1.5712$	0.9958	255.29
	300	34.33 ± 3.51l			
	250	40.33 ± 2.31k			
	200	46.67 ± 1.53i			
	150	59.00 ± 1.00cd			
戊唑醇	350	34.33 ± 0.58l	$y = 2.0630x - 0.1774$	0.9720	323.33
	300	43.00 ± 1.00j			
	250	49.33 ± 0.58h			
	200	53.00 ± 1.00g			
	150	58.33 ± 1.53cde			
代森锰锌	120	34.67 ± 0.58l	$y = 2.7017x - 0.5169$	0.9909	110.16
	100	45.00 ± 1.73ij			
	80	51.67 ± 0.58gh			
	70	55.33 ± 1.53f			
	60	59.67 ± 1.15c			
咪鲜胺	120	30.67 ± 1.53m	$y = 3.6687x - 2.3481$	0.9992	100.67
	100	40.00 ± 1.00k			
	80	51.33 ± 1.15gh			
	70	56.00 ± 1.00ef			
	60	63.00 ± 1.00b			
百菌清	100	34.33 ± 0.58l	$y = 4.2836x - 3.4743$	0.9876	95.13
	90	43.67 ± 1.15j			
	80	51.67 ± 0.58gh			
	70	57.00 ± 1.00def			
	60	62.33 ± 1.15b			

表3 戊唑醇和百菌清复配对杨棒盘孢菌菌丝生长的抑制作用

Tab. 3 Inhibitory effects of compounds of tebuconazole and chlorothalonil on mycelial growth of *Coryneum populinum*

戊唑醇:百菌清 (体积比)	质量浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	处理菌落 直径/cm	对照菌落 直径/cm	毒力回归方程	r	$\text{EC}_{50}/$ ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	I_{AT}	I_{TT}	C_{CT}	效果
4:1	1.000	0.78 ± 0.03m	1.65 ± 0.05a	$y = 0.7573x + 5.9236$	0.9736	0.06	41.91	80.79	51.87	拮抗
	0.500	0.88 ± 0.03jkl	1.68 ± 0.08a							
	0.250	0.93 ± 0.06hij	1.68 ± 0.08a							
	0.125	1.00 ± 0.00ghi	1.68 ± 0.03a							
	0.100	1.12 ± 0.03ef	1.70 ± 0.00a							
3:2	1.000	0.83 ± 0.06klm	1.68 ± 0.10a	$y = 1.1378x + 5.8727$	0.9313	0.17	14.78	61.58	24.00	拮抗
	0.500	0.92 ± 0.08ijk	1.67 ± 0.12a							
	0.250	1.02 ± 0.03gh	1.70 ± 0.00a							
	0.125	1.12 ± 0.03ef	1.68 ± 0.03a							
	0.100	1.35 ± 0.05abc	1.67 ± 0.06a							
1:1	1.000	0.82 ± 0.03lm	1.70 ± 0.00a	$y = 1.1110x + 5.8837$	0.9886	0.16	15.78	51.98	30.36	拮抗
	0.500	0.92 ± 0.03ijk	1.70 ± 0.00a							
	0.250	1.03 ± 0.06fg	1.68 ± 0.10a							
	0.125	1.13 ± 0.06e	1.63 ± 0.06a							
	0.100	1.25 ± 0.05d	1.63 ± 0.06a							

表 3(续)
Tab.3 (continued)

戊唑醇:百菌清 (体积比)	质量浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	处理菌落 直径/cm	对照菌落 直径/cm	毒力回归方程	r	$\text{EC}_{50}/$ ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	I_{AT}	I_{TT}	C_{CT}	效果
2:3	1.000	$0.88 \pm 0.03\text{kl}$	$1.70 \pm 0.00\text{a}$	$y = 1.1346x + 5.6748$	0.9923	0.25	9.94	42.37	23.46	拮抗
	0.500	$1.00 \pm 0.00\text{ghi}$	$1.68 \pm 0.03\text{a}$							
	0.250	$1.12 \pm 0.03\text{ef}$	$1.67 \pm 0.06\text{a}$							
	0.125	$1.27 \pm 0.12\text{cd}$	$1.68 \pm 0.10\text{a}$							
	0.100	$1.37 \pm 0.06\text{ab}$	$1.68 \pm 0.03\text{a}$							
1:4	1.000	$1.00 \pm 0.00\text{ghi}$	$1.68 \pm 0.08\text{a}$	$y = 0.9177x + 5.3648$	0.9952	0.40	6.31	23.16	27.25	拮抗
	0.500	$1.08 \pm 0.08\text{efg}$	$1.67 \pm 0.06\text{a}$							
	0.250	$1.23 \pm 0.06\text{d}$	$1.72 \pm 0.03\text{a}$							
	0.125	$1.30 \pm 0.00\text{bcd}$	$1.65 \pm 0.05\text{a}$							
	0.100	$1.40 \pm 0.10\text{a}$	$1.70 \pm 0.10\text{a}$							

注: 不同小写字母表示药剂不同配比不同浓度处理之间差异显著($P < 0.05$)。数据均为平均值 \pm 标准差($n = 3$)。 I_{AT} : 实际毒力指数; I_{TT} : 理论毒力指数; C_{CT} : 共毒系数。下同。

表 4 多菌灵和百菌清复配对杨棒盘孢菌菌丝生长的抑制作用

Tab. 4 Inhibitory effects of compounds of carbendazim and chlorothalonil on mycelial growth of *Coryneum populinum*

多菌灵:百菌清 (体积比)	质量浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	处理菌落 直径/cm	对照菌落 直径/cm	毒力回归方程	r	$\text{EC}_{50}/$ ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	I_{AT}	I_{TT}	C_{CT}	效果
4:1	0.250	$0.75 \pm 0.05\text{lm}$	$1.72 \pm 0.03\text{a}$	$y = 1.4800x + 7.0900$	0.9909	0.039	123.86	81.50	151.98	增效
	0.125	$0.82 \pm 0.03\text{kl}$	$1.72 \pm 0.03\text{a}$							
	0.100	$0.88 \pm 0.03\text{ij}$	$1.70 \pm 0.00\text{a}$							
	0.050	$1.08 \pm 0.03\text{ef}$	$1.68 \pm 0.03\text{a}$							
	0.025	$1.28 \pm 0.03\text{b}$	$1.70 \pm 0.00\text{a}$							
3:2	0.250	$0.73 \pm 0.03\text{m}$	$1.70 \pm 0.00\text{a}$	$y = 1.5030x + 7.0097$	0.9660	0.046	104.21	63.00	165.41	增效
	0.125	$0.85 \pm 0.05\text{ij}$	$1.75 \pm 0.05\text{a}$							
	0.100	$1.02 \pm 0.03\text{fg}$	$1.70 \pm 0.00\text{a}$							
	0.050	$1.18 \pm 0.03\text{d}$	$1.70 \pm 0.00\text{a}$							
	0.025	$1.27 \pm 0.03\text{bc}$	$1.70 \pm 0.00\text{a}$							
1:1	0.250	$0.73 \pm 0.06\text{m}$	$1.70 \pm 0.13\text{a}$	$y = 1.3758x + 6.7382$	0.9106	0.055	87.94	53.75	163.61	增效
	0.125	$0.98 \pm 0.03\text{gh}$	$1.70 \pm 0.00\text{a}$							
	0.100	$1.13 \pm 0.06\text{de}$	$1.68 \pm 0.03\text{a}$							
	0.050	$1.17 \pm 0.06\text{d}$	$1.70 \pm 0.00\text{a}$							
	0.025	$1.28 \pm 0.03\text{b}$	$1.70 \pm 0.00\text{a}$							
2:3	0.250	$0.77 \pm 0.03\text{klm}$	$1.70 \pm 0.00\text{a}$	$y = 1.5720x + 6.7302$	0.9472	0.079	60.45	44.50	135.85	增效
	0.125	$1.07 \pm 0.06\text{ef}$	$1.70 \pm 0.00\text{a}$							
	0.100	$1.20 \pm 0.05\text{cd}$	$1.70 \pm 0.00\text{a}$							
	0.050	$1.28 \pm 0.03\text{b}$	$1.70 \pm 0.00\text{a}$							
	0.025	$1.42 \pm 0.03\text{a}$	$1.70 \pm 0.00\text{a}$							
1:4	1.000	$0.83 \pm 0.06\text{jk}$	$1.70 \pm 0.00\text{a}$	$y = 1.4089x + 5.8878$	0.9864	0.230	20.46	26.00	78.70	拮抗
	0.500	$0.92 \pm 0.08\text{hi}$	$1.70 \pm 0.00\text{a}$							
	0.250	$1.13 \pm 0.06\text{de}$	$1.73 \pm 0.06\text{a}$							
	0.125	$1.28 \pm 0.03\text{b}$	$1.70 \pm 0.00\text{a}$							
	0.100	$1.40 \pm 0.00\text{a}$	$1.68 \pm 0.03\text{a}$							

EC₅₀ 值之间(表 5)。

2.2.2 3 类复配药剂对杨棒盘孢菌孢子萌发的抑制作用

根据混剂对病菌孢子萌发的毒力回归方程(相关系数 $r > 0.92$), 试验结果较可靠。戊唑醇与百菌清复配剂对孢子萌发 EC₅₀ 值为 132.31 ~ 198.39 μg/mL, 低于戊唑醇 EC₅₀ 值(323.33 μg/mL), 高于百菌清 EC₅₀ 值(95.13 μg/mL); 两者体积比 2:3 时, C_{CT} = 75.38(< 80), 表现为拮抗作用; 体积比 4:1、3:2、1:1 及 1:4 时, C_{CT} 分别为 110.14、91.23、104.16 和 83.72, 戊唑醇与百菌清两者间表现为相加作用(表 6)。多菌灵与百菌清复配剂对孢子萌发的 EC₅₀ 为 144.31 ~ 189.86 μg/mL, 位于两种单剂 EC₅₀ 值(百菌清 95.13 μg/mL、多菌灵 255.29 μg/mL)之间; 体积比 2:3 和 1:4 时, C_{CT} 均 < 80, 表现为拮抗作用; 体积比为 4:1、3:2 及 1:1 时, C_{CT} 为 100.59、83.80 和

92.05, 药剂间表现为相加作用(表 7)。多菌灵与咪鲜胺复配剂 EC₅₀ 值为 171.34 ~ 187.39 μg/mL, 位于咪鲜胺单剂(100.67 μg/mL)与多菌灵单剂(255.29 μg/mL)之间。体积比 4:1、3:2 时, C_{CT} 为 113.99 和 84.39, 表现为相加作用; 体积比 1:1、2:3 及 1:4 时, C_{CT} 分别为 78.34、73.69 和 66.49, 药剂间呈拮抗作用(表 8)。

2.3 戊唑醇对杨棒盘孢菌菌丝生长及孢子萌发形态的影响

戊唑醇(0.2 μg/mL)处理后, 杨棒盘孢菌菌落直径较对对照明显减小, 对照中菌落边缘光滑, 中间灰黑色, 边缘灰白色; 药剂作用后, 菌落边缘偏白色(图 1A ~ D)。对照中菌丝表面光滑, 分支与产孢正常; 戊唑醇处理后, 菌丝表面变得粗糙, 分支处出现膨大现象(图 1E、F)。对照中分生孢子从顶端、末端或者两端萌发产生芽管; 戊唑醇(350 μg/mL)处理后, 杨棒盘

表 5 多菌灵和咪鲜胺复配对杨棒盘孢菌菌丝生长的抑制作用

Tab. 5 Inhibitory effects of compounds of carbendazim and prochloraz on mycelial growth of *Coryneum populinum*

多菌灵:咪鲜胺 (体积比)	质量浓度/ (μg·mL ⁻¹)	处理菌落 直径/cm	对照菌落 直径/cm	毒力回归方程	r	EC ₅₀ / (μg·mL ⁻¹)	I _{AT}	I _{TT}	C _{CT}	效果
4:1	0.250	0.70 ± 0.001	1.72 ± 0.03ab	$y = 1.542 0x + 7.191 7$	0.982 9	0.038	126.51	83.92	150.75	增效
	0.125	0.82 ± 0.03jk	1.70 ± 0.00ab							
	0.100	0.93 ± 0.06ghi	1.68 ± 0.03ab							
	0.050	1.10 ± 0.00de	1.68 ± 0.03ab							
	0.025	1.22 ± 0.03bc	1.68 ± 0.03ab							
3:2	0.250	0.73 ± 0.06l	1.70 ± 0.00ab	$y = 1.285 9x + 6.798 6$	0.970 4	0.040	120.08	67.84	177.01	增效
	0.125	0.92 ± 0.03hi	1.70 ± 0.00ab							
	0.100	1.00 ± 0.05fg	1.70 ± 0.00ab							
	0.050	1.08 ± 0.03de	1.70 ± 0.00ab							
	0.025	1.23 ± 0.06b	1.70 ± 0.00ab							
1:1	0.250	0.75 ± 0.00kl	1.73 ± 0.06a	$y = 1.440 6x + 6.941 0$	0.985 3	0.045	106.69	59.80	178.41	增效
	0.125	0.87 ± 0.06ij	1.70 ± 0.00ab							
	0.100	1.00 ± 0.00fg	1.68 ± 0.03ab							
	0.050	1.10 ± 0.00de	1.72 ± 0.03ab							
	0.025	1.32 ± 0.03a	1.72 ± 0.03ab							
2:3	0.250	0.73 ± 0.06l	1.73 ± 0.06a	$y = 1.375 3x + 6.873 2$	0.963 0	0.043	110.36	51.76	213.20	增效
	0.125	0.88 ± 0.03hij	1.65 ± 0.05b							
	0.100	1.03 ± 0.06ef	1.75 ± 0.05a							
	0.050	1.15 ± 0.09cd	1.68 ± 0.10ab							
	0.025	1.25 ± 0.05ab	1.73 ± 0.06a							
1:4	0.500	0.73 ± 0.06l	1.72 ± 0.08ab	$y = 1.380 7x + 6.507 7$	0.973 6	0.081	59.26	35.68	166.07	增效
	0.250	0.95 ± 0.05gh	1.70 ± 0.00ab							
	0.125	1.00 ± 0.00fg	1.72 ± 0.03ab							
	0.100	1.08 ± 0.03de	1.70 ± 0.00ab							
	0.050	1.28 ± 0.03ab	1.70 ± 0.00ab							

表 6 戊唑醇和百菌清复配对杨棒盘孢菌孢子萌发的抑制作用

Tab. 6 Inhibitory effects of compounds of tebuconazole and chlorothalonil on spore germination of *Coryneum populinum*

复配剂	体积比	质量浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	孢子萌发率/%	毒力回归方程	r	$\text{EC}_{50}/$ ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	I_{AT}	I_{TT}	C_{CT}	效果
对照			79.00 ± 2.00a							
戊唑醇: 百菌清	4:1	300	21.67 ± 1.53lm	$y = 2.4715x - 0.6783$	0.9601	198.39	162.98	147.98	110.14	相加
		250	32.67 ± 2.08j							
		200	44.00 ± 1.73fg							
		150	51.67 ± 1.53d							
		100	57.67 ± 1.53c							
	3:2	300	17.33 ± 0.58no	$y = 3.4045x - 2.6852$	0.9996	180.87	178.76	195.95	91.23	相加
		250	25.33 ± 0.58k							
		200	35.33 ± 1.15i							
		150	48.33 ± 1.53e							
		100	63.67 ± 1.53b							
	1:1	300	19.67 ± 0.58mn	$y = 1.8821x + 0.9542$	0.9752	141.13	229.10	219.94	104.16	相加
		250	25.33 ± 0.58k							
		200	31.33 ± 1.15j							
		150	41.67 ± 0.58gh							
		100	45.67 ± 1.53f							
	2:3	300	17.33 ± 0.58no	$y = 2.9400x - 1.6007$	0.9592	175.85	183.87	243.93	75.38	拮抗
		250	23.00 ± 1.00kl							
		200	40.00 ± 2.00h							
		150	51.00 ± 2.00d							
		100	56.33 ± 0.58c							
1:4	300	16.67 ± 1.53o	$y = 1.9913x + 0.7753$	0.9497	132.31	244.38	291.91	83.72	相加	
	250	21.67 ± 1.15lm								
	200	33.00 ± 0.00j								
	150	39.67 ± 2.31h								
	100	43.33 ± 1.53fg								

孢菌部分分生孢子形态异常, 孢子出现分支, 萌发率显著降低; 芽管从分生孢子顶端、基部或中间等多个部位生出, 且有轻微肿胀现象, 芽管不伸长(图 1G、H)。

3 讨 论

植物病原真菌侵入寄主并定殖生长, 是病害发生和扩展的先决条件, 菌丝和分生孢子是病原菌感染与传播的关键^[23]。杨树灰斑病菌以分生孢子器在病落叶、病梢和枝干病斑处越冬, 翌年春季温度回升后分生孢子萌发感染寄主^[10]。本研究测定了 5 种杀菌剂和 3 类复配剂对杨棒盘孢菌菌丝及分生孢子的室内毒力, 为田间化学药剂的合理使用提供了科学依据。戊唑醇是一种三唑类杀菌剂, 通过干扰或阻碍真菌麦角甾醇的生物合成过程, 抑制病原菌的生长^[24-25], 具有高效、杀菌谱广等特点, 对多种病原真

菌如 *Alternaria alternata* f. sp. *mali* 及 *Colletotrichum panacicola* 具有较强的抑制作用^[26-28]。本研究发现, 戊唑醇对杨棒盘孢菌菌丝生长抑制作用最强, 建议其作为田间防治杨树灰斑病的首选药剂。然而, 戊唑醇对杨棒盘孢菌分生孢子萌发的抑菌活性较差, 这可能与该类杀菌剂作用机理有关。有研究表明, 麦角甾醇生物抑制剂对病菌菌丝生长具有显著影响, 但对孢子萌发的作用有限^[29]。Yin 等^[12]研究表明, 戊唑醇对 *Ascochyta caulina* 菌丝生长的抑制作用最强 ($\text{EC}_{50} = 0.034 \mu\text{g}/\text{mL}$), 与本研究结果相似。代森锰锌对 *A. caulina* 孢子萌发的抑制作用最强 ($\text{EC}_{50} = 5.426 \mu\text{g}/\text{mL}$), 但对杨棒盘孢菌孢子萌发的抑制作用较弱 ($\text{EC}_{50} = 110.16 \mu\text{g}/\text{mL}$), 表明杀菌剂对不同病菌具有毒力选择性。5 种杀菌剂中, 百菌清对杨棒盘孢菌孢子萌发的抑制作用最强。百菌清通过

表7 多菌灵和百菌清复配对杨棒盘孢菌孢子萌发的抑制作用

Tab. 7 Inhibitory effects of compounds of carbendazim and chlorothalonil on spore germination of *Coryneum populinum*

复配剂	体积比	质量浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	孢子萌发率/%	毒力回归方程	r	$\text{EC}_{50}/$ ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	I_{AT}	I_{TT}	C_{CT}	效果
对照			79.00 ± 2.00a							
多菌灵: 百菌清	4:1	300	25.67 ± 1.15k	$y = 2.317 2x - 0.279 6$	0.993 4	189.86	134.46	133.67	100.59	相加
		250	30.67 ± 1.15j							
		200	36.33 ± 1.53i							
		150	49.33 ± 1.15ef							
		100	57.67 ± 1.53b							
	3:2	300	26.67 ± 1.15k	$y = 2.050 1x + 0.366 4$	0.991 1	182.05	140.23	167.34	83.80	相加
		250	29.33 ± 2.08j							
		200	36.00 ± 0.00i							
		150	47.33 ± 1.53f							
		100	54.67 ± 0.58c							
	1:1	300	13.33 ± 1.53n	$y = 2.463 6x - 0.365 1$	0.926 8	150.57	169.55	184.18	92.05	相加
		250	24.67 ± 0.58k							
		200	36.00 ± 1.73i							
		150	44.33 ± 0.58g							
		100	47.67 ± 1.53f							
	2:3	300	22.33 ± 0.58l	$y = 2.101 1x + 0.226 2$	0.942 3	187.09	136.45	201.02	67.88	拮抗
		250	31.33 ± 1.15j							
		200	42.00 ± 1.00h							
		150	50.00 ± 0.00e							
		100	52.67 ± 1.15d							
1:4	300	19.33 ± 0.58m	$y = 1.621 6x + 1.498 5$	0.923 4	144.31	176.91	234.69	75.38	拮抗	
	250	30.67 ± 0.58j								
	200	35.67 ± 1.15i								
	150	40.33 ± 0.58h								
	100	44.67 ± 1.53g								

作用于真菌细胞中的三磷酸甘油醛脱氢酶,破坏其新陈代谢,从而导致真菌失去生命力。由于百菌清在植物体表具有良好的黏着性,药效期较长,建议将其作为保护剂在杨树灰斑病的早期预防中使用^[30-31]。

长期频繁使用单一药剂会增加病原菌产生抗药性的风险。合理复配杀菌剂不仅可以克服或延缓病菌抗药性的产生^[32-33],还能够提高药效、减少用药频率和降低成本等^[34]。本研究在测定单剂对病菌毒力的基础上,选用抑制效果显著且作用机制不同的杀菌剂进行复配(戊唑醇:百菌清、多菌灵:百菌清和多菌灵:咪鲜胺)。咪鲜胺和戊唑醇属于甾醇脱甲基抑制剂类杀菌剂,这类杀菌剂能够阻碍细胞壁甾醇的生物合成过程,影响真菌的生长^[35]。多菌灵为苯并咪唑类杀菌剂,该类药剂通过与纺锤丝的微管蛋白质相结合,干扰真菌有丝分裂,从而抑制病原菌的生

长和增殖^[36-37]。代森锰锌和百菌清为保护性杀菌剂,此类药剂不会进入植物体内,而是通过遗留在植物体表面的有效活性成分与植物病原菌接触发挥作用,从而阻碍病原菌初步侵染^[12,29]。在复配药剂试验中,每一类混剂均设置5种不同的单剂体积比。结果表明,不同单剂间的复配效果表现为增效、相加和拮抗3种类型。说明复配药剂的抑菌效果与药剂种类及配比密切相关^[38]。例如,多菌灵与百菌清的复配组合中,不同比例对杨棒盘孢菌的抑菌效果存在显著差异。当复配比4:1、3:2、1:1、2:3时,表现为增效作用,复配比为1:4时,表现为拮抗。多菌灵:咪鲜胺(4:1)对菌丝生长的抑制作用最强,两者间表现为增效。有研究发现,多菌灵:咪鲜胺(99.9:0.1)对尖孢炭疽菌(*Colletotrichum acutatum*)及胶孢炭疽菌(*C. gloeosporioides*)菌丝也具有较强的抑制作用,均

表 8 多菌灵和咪鲜胺复配对杨棒盘孢菌孢子萌发的抑制作用

Tab. 8 Inhibitory effects of compounds of carbendazim and prochloraz on spore germination of *Coryneum populinum*

复配剂	体积比	质量浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	孢子萌发率/%	毒力回归方程	r	$\text{EC}_{50}/$ ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	I_{AT}	I_{TT}	C_{CT}	效果
对照			79.00 ± 2.00a							
多菌灵: 咪鲜胺	4:1	300	20.33 ± 1.53p	$y = 2.715 0x - 1.064 9$	0.995 5	171.34	149.00	130.72	113.99	相加
		250	27.33 ± 1.15lm							
		200	31.33 ± 1.53j							
		150	44.67 ± 1.15g							
		100	58.67 ± 1.53c							
	3:2	300	24.67 ± 1.15n	$y = 2.342 4x - 0.323 7$	0.971 6	187.39	136.23	161.43	84.39	相加
		250	28.67 ± 1.53kl							
		200	37.00 ± 0.00h							
		150	52.00 ± 1.00e							
		100	55.67 ± 1.15d							
	1:1	300	22.00 ± 1.00op	$y = 2.726 2x - 1.176 4$	0.981 5	184.32	138.50	176.79	78.34	拮抗
		250	28.67 ± 0.58kl							
		200	33.67 ± 0.58i							
		150	52.00 ± 1.00e							
		100	58.67 ± 1.53c							
	2:3	300	20.33 ± 1.53p	$y = 3.000 8x - 1.769 7$	0.998 7	180.29	141.60	192.15	73.69	拮抗
		250	25.33 ± 0.58mn							
		200	35.67 ± 0.58hi							
		150	48.00 ± 2.00f							
		100	61.00 ± 1.00b							
1:4	300	23.67 ± 1.53no	$y = 2.122 8x + 0.252 9$	0.998 0	172.28	148.18	222.86	66.49	拮抗	
	250	29.67 ± 1.53jk								
	200	34.33 ± 0.58i								
	150	44.33 ± 1.53g								
	100	54.33 ± 1.15d								

表现为增效作用^[39]。戊唑醇:百菌清(1:4)对分生孢子抑制作用最强,两者间表现为相加作用。综上,在对菌落生长的抑制方面,戊唑醇毒力最强,其次为多菌灵:咪鲜胺(4:1);而对分生孢子萌发的抑制方面,百菌清毒力最强,咪鲜胺次之。

由于用药方式和用药环境不同,室内毒力测定结果与田间试验结果往往存在差异。本试验排除了寄主植物和环境条件的影响,仅考虑药剂与靶标病原菌的相互作用,因此测定的结果反映了药剂对病原菌潜在的直接毒力作用^[40]。然而,室内试验结果并不能完全代表田间应用效果。为了进一步验证室内筛选的高效药剂是否适用于田间条件,还需结合田间药效试验,综合考虑药剂的防治效果、农药残留水平和抗药性因素。田间防治杨树灰斑病时,应根据田间病害监测结果,在发病前期或发病初期及时

施药,而发病后期喷药效果不理想。药剂的选择应兼顾防治效果及持效期,选用药效好且持效期长的药剂,以降低人工成本,减少环境污染^[41]。为避免产生抗药性,建议在杨树灰斑病发病初期交替轮换使用不同作用机制的百菌清、戊唑醇:百菌清、恶醚唑^[42]等杀菌剂;发病初期交替轮换使用恶醚唑^[42]、戊唑醇、多菌灵、多菌灵:百菌清、多菌灵:咪鲜胺等杀菌剂。此外,同一种药剂对杨棒盘孢菌菌丝生长和孢子萌发的 EC_{50} 值不同,说明了病菌的不同形态对药剂的敏感度不同。因此,应根据杨树灰斑病的发病阶段,合理调整药剂的喷施浓度。

Yin 等^[12]发现,戊唑醇作用导致 *A. caulina* 分生孢子轻度变形,芽管的基部或顶端出现轻微肿胀现象。本研究发现,经戊唑醇处理后,杨棒盘孢菌菌丝形态异常(表面粗糙、分支处明显膨大),分生孢子不

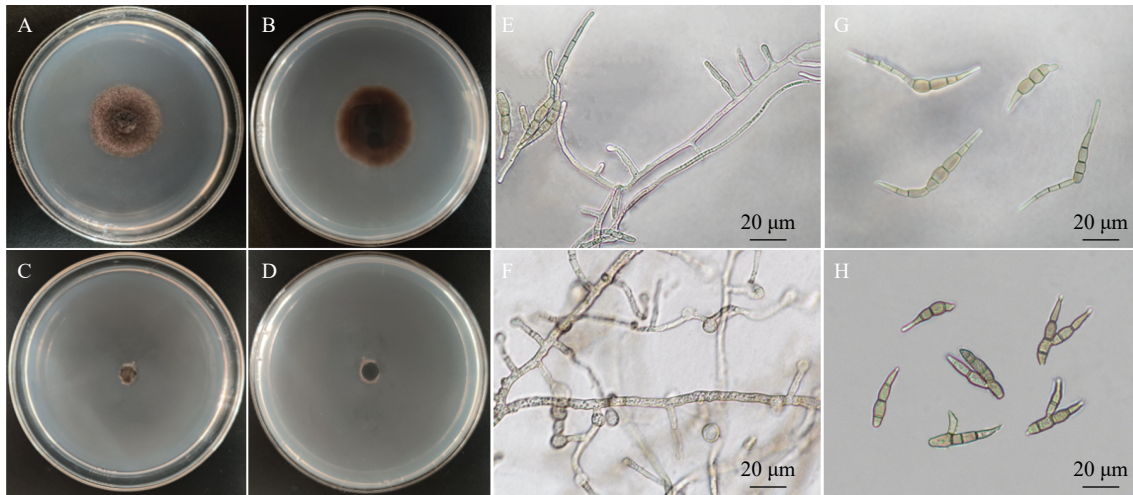


图1 戊唑醇作用后杨棒盘孢菌菌丝形态及孢子萌发变化

Fig. 1 Changes in mycelial morphology and spore germination of *Coryneum populinum* after being treated with tebuconazole

萌发或出现分支,芽管从孢子顶端、基部或中间等多个部位产生,芽管顶端轻微肿胀但不伸长,较恶醚唑作用杨棒盘孢菌后菌丝和分生孢子形态变化轻微^[42]。这些结果为进一步揭示杀菌作用机理提供了理论依据。

4 结 论

采用菌丝生长速率法和孢子萌发法测定杨棒盘孢菌对5种杀菌剂及其复配剂的敏感性。在单剂中,戊唑醇对杨棒盘孢菌菌丝生长抑制作用最强,而百菌清对孢子萌发抑制作用最强。在复配剂中,多菌灵:咪鲜胺(4:1)对病菌菌丝生长的抑菌活性最强,且两者间表现增效作用;而戊唑醇:百菌清(1:4)对孢子萌发抑菌活性最强,两者间表现相加作用。戊唑醇处理后,病菌菌丝生长明显减缓,表面粗糙,分支处膨大,并停止产孢;分生孢子不萌发或出现分支现象。芽管从孢子顶端、基部或中间多个部位产生,顶端轻微肿胀,且不伸长。

参 考 文 献

- [1] Schmutzenhofer H, Mielke M E, Lou Y Q, et al. Field guide/manual on the identification and management of poplar pests and diseases in the area of the "Three North 009 Project" (North-Eastern China)[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1996.
- [2] 刘雪英. 杨树灰斑病拮抗放线菌的筛选、鉴定及防治效果评价的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
Liu X Y. Screening, identification and evaluation of potential biocontrol actinomycetes endophytes against *Sporocadus populinus*[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.
- [3] 杨帆, 张林浩, 李红霞, 等. 杨树灰斑病的发生与防治[J]. 吉林农业, 2016(2): 97.

Yang F, Zhang L H, Li H X, et al. Occurrence and control of poplar gray spot disease[J]. Agriculture of Jilin, 2016(2): 97.

- [4] 李清华, 邢月红, 董建霞, 等. 浅谈杨树灰斑病的防治[J]. 中国农业信息, 2016, 189(12): 134-135.
Li Q H, Xing Y H, Dong J X, et al. Prevention of poplar gray spot disease[J]. China Agricultural Information, 2016, 189(12): 134-135.
- [5] 施伟, 朱晨华, 丁建领. 杨树育苗常见病防治技术[J]. 安徽农学通报, 2015, 21(10): 130-131.
Shi W, Zhu C H, Ding J L. Poplar seedling common disease prevention and control technology[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2015, 21(10): 130-131.
- [6] 鞠国柱, 徐素琴, 张连寿, 等. 杨树灰斑病的研究[J]. 林业科学, 1965, 10(4): 41-46.
Ju G Z, Xu S Q, Zhang L S, et al. Study on poplar grey spot disease[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1965, 10(4): 41-46.
- [7] 蔡有柱. 杨树灰斑病的防治试验[J]. 青海农林科技, 2012(3): 67-68.
Cai Y Z. Test on control *Coryneum populinum*[J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2012(3): 67-68.
- [8] 程坤. 杨树主要病害及防治技术[J]. 吉林农业, 2017, 408(15): 67.
Cheng K. Poplar main diseases and control technology[J]. Agriculture of Jilin, 2017, 408(15): 67.
- [9] 项存梯, 何秉章, 刘萍. 杨树肿茎溃疡病菌有性型的研究[J]. 东北林业大学学报, 1988, 16(4): 8-11.
Xiang C T, He B Z, Liu P. Study on teleomorph of fungus causing cryneum swollen stem canker of poplars[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1988, 16(4): 8-11.
- [10] 赵金秀. 菏泽平原农区杨树灰斑病发生规律和防控技术研究[J]. 生物灾害科学, 2021, 44(3): 288-293.
Zhao J X. Study on the occurrence regularity and control technology of grey leaf-spot of poplar in the plain agricultural

- area of Heze City[J]. *Biological Disaster Science*, 2021, 44(3): 288–293.
- [11] 徐超, 陈宏州, 吴雨琦, 等. 2017年—2021年江苏省小麦赤霉病菌群体对4种杀菌剂的抗药性监测[J]. *植物保护*, 2022, 48(6): 341–345, 367.
- Xu C, Chen H Z, Wu Y Q, et al. Resistance of *Fusarium asiaticum* to four fungicides in Jiangsu Province from 2017 to 2021[J]. *Plant Protection*, 2022, 48(6): 341–345, 367.
- [12] Yin H, Zhou J B, Lü H, et al. Identification, pathogenicity, and fungicide sensitivity of *Ascochyta caulina* (Teleomorph: *Neocamarosporium calvescens*) associated with black stem on quinoa in China[J]. *Plant Disease*, 2020, 104(10): 2585–2597.
- [13] 吕红, 秦楠, 田淼, 等. 7种杀菌剂对藜麦叶斑病菌的室内毒力测定及其分生孢子萌发形态的影响[J]. *山西农业科学*, 2023, 51(10): 1203–1209.
- Lü H, Qin N, Tian M, et al. Toxicity determination of seven fungicides against quinoa leaf spot pathogen and the effect on conidial germination morphology[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2023, 51(10): 1203–1209.
- [14] 王飞, 杨瑾, 李雪梦, 等. 丹参茎基腐病病原鉴定及防治药剂筛选[J]. *植物病理学报*, 2022, 52(6): 950–958.
- Wang F, Yang J, Li X M, et al. Identification of basal stem rot causal pathogen in *Salvia miltiorrhiza* and evaluation of fungicides on the inhibition of mycelial growth in laboratory[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2022, 52(6): 950–958.
- [15] 窦涛, 范安阳, 崔广林, 等. 佛手叶部褐斑病病原菌鉴定及防治药剂筛选[J]. *植物病理学报*, 2023, 53(5): 769–778.
- Dou T, Fan A Y, Cui G L, et al. Identification of the pathogen causing leaf brown spot on *Citrus medica* var. *sarcodactylis* and screening of fungicides for the control of the disease[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2023, 53(5): 769–778.
- [16] 吴皓, 喻婷婷, 袁迎春, 等. 陕西省华中五味子根腐病病原鉴定与防治药剂筛选[J]. *植物病理学报*, 2023, 53(3): 491–497.
- Wu H, Yu T T, Yuan Z C, et al. Pathogen identification and effective fungicides screening of root of *Schisandra sphenanthera* in Shaanxi Province[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2023, 53(3): 491–497.
- [17] 孙广宇, 宗兆峰. 植物病理学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- Sun G Y, Zong Z F. Experimental techniques of plant pathology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002.
- [18] Fang Y L, Zhou Y Y, Li X, et al. Histological characterization of the early stage infection events of *Setosphaeria turcica* in maize[J]. *Plant Pathology*, 2022, 71(2): 251–261.
- [19] 刘程程, 孙海燕, 张雯婷, 等. 叶菌唑与4种杀菌剂复配对小麦赤霉病的毒力及防效[J]. *植物保护*, 2020, 46(4): 248–252.
- Liu C C, Sun H Y, Zhang W T, et al. Synergistic toxicity and field control effects of metconazole mixed with four fungicides against *Fusarium graminearum* on wheat[J]. *Plant Protection*, 2020, 46(4): 248–252.
- [20] 苗淑斐, 李路怡, 钱乐, 等. 河南省油菜菌核病菌对氟吡菌酰胺及其复配剂的敏感性[J]. *农药学报*, 2023, 25(3): 748–754.
- Miao S F, Li L Y, Qian L, et al. Sensitivity of *Sclerotinia sclerotiorum* to fluopyram and its mixtures in Henan Province[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2023, 25(3): 748–754.
- [21] 李聪聪, 吴玉星, 王亚娇, 等. 咯菌腈和戊唑醇复配对象禾镰孢菌丝生长及所致病害的影响[J]. *植物病理学报*, 2023, 53(3): 498–507.
- Li C C, Wu Y X, Wang Y J, et al. Effects of fludioxonil and tebuconazole mixtures on mycelial growth and disease of *Fusarium crown rot*[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2023, 53(3): 498–507.
- [22] Sun Y P, Johnson E R. Analysis of joint action of insecticides against house flies[J]. *Journal of Economic Entomology*, 1960, 53(5): 887–892.
- [23] 郑玲, 吴小芹. 植物病原真菌感染结构研究进展[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2007, 31(1): 90–94.
- Zheng L, Wu X Q. Advances on infection structures of plant pathogenic fungi[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2007, 31(1): 90–94.
- [24] 华乃震. 杀菌剂戊唑醇的剂型与应用[J]. *农药*, 2013, 52(11): 781–786, 809.
- Hua N Z. Formulation and application of fungicide tebuconazole[J]. *Agrochemicals*, 2013, 52(11): 781–786, 809.
- [25] Bolton M D, Ebert M K, Faino L, et al. RNA-sequencing of *Cercospora beticola* DMI-sensitive and-resistant isolates after treatment with tetraconazole identifies common and contrasting pathway induction[J]. *Fungal Genetics and Biology*, 2016, 92: 1–13.
- [26] 叶滔, 马志强, 毕秋艳, 等. 植物病原真菌对甾醇生物合成抑制剂类(SBIs)杀菌剂的抗药性研究进展[J]. *农药学报*, 2012, 14(1): 1–16.
- Ye T, Ma Z Q, Bi Q Y, et al. Research advances on the resistance of plant pathogenic fungi to SBIs fungicides[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2012, 14(1): 1–16.
- [27] 任璐, 史晓晶, 姚众, 等. 苹果斑点落叶病菌对戊唑醇敏感基线建立及抗性突变体适合度[J]. *植物病理学报*, 2017, 47(3): 380–388.
- Ren L, Shi X J, Yao Z, et al. Baseline sensitivity of *Alternaria alternata* f. sp. *mali* to tebuconazole and fitness of resistant mutants[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2017, 47(3): 380–388.
- [28] 张琳, 占浩鑫, 冯志伟, 等. 人参炭疽菌(*Colletotrichum panacicola*)和线列炭疽菌(*C. lineola*)的生物学特性及其对不同杀菌剂的敏感性研究[J]. *植物病理学报*, 2022, 52(4): 648–657.
- Zhang L, Zhan H X, Feng Z W, et al. Biological characteristics and fungicide sensitivity of *Colletotrichum panacicola* and *C. lineola* causing anthracnose on ginseng[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2022, 52(4): 648–657.
- [29] Siegel M R. Sterol-inhibiting fungicides: effects on sterol biosynthesis and sites of action[J]. *Plant Disease*, 1981, 65(12): 986–989.
- [30] Schwinn F J, Margot P. *Phytophthora infestans*, the cause of late blight of potato: control with chemicals[J]. *Advances in Plant*

- Pathology, 1991, 7: 225–261.
- [31] Fernandez E N, Navia O, Gandarillas A. Basis of strategies for chemical control of potato late blight developed by PROINP in Bolivia[J]. Fitopatologia, 2000, 35(3): 137–149.
- [32] Cools H J, Hawkins N J, Fraaije B A. Constraints on the evolution of azole resistance in plant pathogenic fungi[J]. Plant Pathology, 2013, 62: 36–42.
- [33] Karaoglanidis G S, Loannidis P M, Thanassouloupoulos C C. Changes in sensitivity of *Cercospora beticola* populations to sterol-demethylation-inhibiting fungicides during a 4-year period in northern Greece[J]. Plant Pathology, 2002, 51(1): 55–62.
- [34] 曾鑫, 郑树仁, 常翠莲, 等. 生物源杀菌剂及其与戊唑醇复配对苹果主要炭疽菌的室内活性评价分析 [J]. 中国果树, 2023(1): 72–77.
- Zeng X, Zheng S R, Chang C L, et al. Laboratory activity evaluation of biological fungicides and their combination with tebuconazole to major species from *Colletotrichum* spp. causing apple bitter rot[J]. China Fruits, 2023(1): 72–77.
- [35] 冯爱卿, 朱小源, 汪聪颖, 等. 13 种杀菌剂对水稻胡麻叶斑病防效研究 [J]. 植物保护, 2022, 48(5): 352–360.
- Feng A Q, Zhu X Y, Wang C Y, et al. Efficacy of thirteen fungicides for controlling rice brown spot disease[J]. Plant Protection, 2022, 48(5): 352–360.
- [36] Verro R, Finizio A, Otto S, et al. Predicting pesticide environmental risk in intensive agricultural areas (I): screening level risk assessment of individual chemicals in surface waters[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(2): 522–529.
- [37] 魏中华, 徐娟, 郭明霞, 等. 国内多菌灵的研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2015, 43(3): 125–127, 141.
- Wei Z H, Xu J, Guo M X, et al. Research progress of carbendazim in China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(3): 125–127, 141.
- [38] 刘朋飞, 王岩, 王泓力, 等. 6 种杀菌剂对梨火疫病菌的室内毒力测定和混配试验 [J]. 植物保护, 2022, 48(6): 98–104.
- Liu P F, Wang Y, Wang H L, et al. Laboratory toxicity tests and mixture experiments of six fungicides against pear fire blight[J]. Plant Protection, 2022, 48(6): 98–104.
- [39] 彭好翌. 常用杀菌剂及其组合剂对辣椒两种炭疽病菌的离体抑制效果研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2010.
- Peng H Y. Individual and combinative inhibition of 12 fungicides on *Colletotrichum acutatum* and *C. gloeosporioides* on pepper[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2010.
- [40] 周明国. 杀菌剂毒力及其生物测定 [J]. 农药学学报, 2022, 24(5): 904–920.
- Zhou M G. Fungicide toxicity and its bioassay[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2022, 24(5): 904–920.
- [41] 王泓力, 王岩, 吴曰福, 等. 12 种杀菌剂对杜梨苗梨火疫病的预防与治疗效果测定 [J]. 植物保护, 2022, 48(6): 111–117, 178.
- Wang H L, Wang Y, Wu Y F, et al. Prevention and control efficacies of 12 bactericides on fire blight of *Pyrus betulifolia* seedlings[J]. Plant Protection, 2022, 48(6): 111–117, 178.
- [42] 唐秀丽, 杨建敏, 孟志龙, 等. 杨树灰斑病菌 (*Coryneum populinum* Bres.) 对 5 种杀菌剂的敏感性 [J]. 林业科学研究, 2023, 36(5): 1–9.
- Tang X L, Yang J M, Meng Z L, et al. Sensitivity of *Coryneum populinum* Bres. to five fungicides[J]. Forest Research, 2023, 36(5): 1–9.

(责任编辑 范娟
责任编辑 张星耀)