

◆ 药效与应用 ◆

氟唑菌酰胺及其复配剂对假禾谷镰孢菌的 抑菌活性及对小麦茎基腐病的防效

段雪莲^{1,2}, 张毅凯^{1,2}, 李慧鸣^{1,2}, 郝同昱^{1,2}, 姜佳^{1,2}, 钱乐^{1,2}, 刘圣明^{1,2*}

(1. 河南科技大学园艺与植物保护学院 河南洛阳 471023 2. 河南省绿色植保工程技术研究中心 河南洛阳 471023)

摘要:由假禾谷镰孢菌(*Fusarium pseudograminearum*)引起的茎基腐病是小麦生产上的重要病害之一。本研究评估了氟唑菌酰胺及其复配组合物对假禾谷镰孢菌的抑制率,并测定了其对小麦茎基腐病的室内防效。结果显示,氟唑菌酰胺对不同发育阶段的假禾谷镰孢菌均表现出显著的抑制活性,其对分生孢子产生、菌丝生长及孢子萌发的 EC_{50} 分别为 $0.038\ 7\ \mu\text{g/mL}$ 、 $0.021\ 7\ \mu\text{g/mL}$ 、 $0.021\ 4\ \mu\text{g/mL}$ 。氟唑菌酰胺对281株假禾谷镰孢菌的 EC_{50} 为 $0.005\ 8\sim 0.056\ 6\ \mu\text{g/mL}$,平均值为 $(0.020\ 2\pm 0.009\ 4)\ \mu\text{g/mL}$ 。氟唑菌酰胺与丙硫菌唑、咯菌腈、叶菌唑、多菌灵、氰烯菌酯复配,表现出相加作用或增效作用,增效系数为 $0.72\sim 5.31$ 。室内试验结果表明,氟唑菌酰胺与氰烯菌酯质量比为1:5时对小麦茎基腐病的防效优于各单剂处理。该研究结果可为小麦茎基腐病的科学防控提供理论依据和数据支持。

关键词:假禾谷镰孢菌;氟唑菌酰胺;杀菌剂复配;抑菌活性;防治效果

中图分类号:S 481+.3 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-5284.2025.05.015

Inhibitory activity of pydiflumetofen and its mixtures against *Fusarium pseudograminearum* and its control efficacy on Fusarium crown rot

DUAN Xuelian^{1,2}, ZHANG Yikai^{1,2}, LI Huiming^{1,2}, HAO Tongyu^{1,2}, JIANG Jia^{1,2}, QIAN Le^{1,2}, LIU Shengming^{1,2*}

(1. College of Horticulture and Plant Protection, Henan University of Science and Technology, Henan Luoyang 471023, China; 2. Henan Province Engineering Technology Research Center of Green Plant Protection, Henan Luoyang 471023, China)

Abstract: Fusarium crown rot (FCR), caused by *Fusarium pseudograminearum*, is one of the most important destructive diseases in wheat. In this study, the inhibitory activities of pydiflumetofen and its mixtures against *F. pseudograminearum* isolates were evaluated, and the indoor control efficacies were determined. The results showed that pydiflumetofen had significant inhibitory effects on the different developmental stages of *F. pseudograminearum*, with the EC_{50} values of $0.038\ 7\ \mu\text{g/mL}$ against sporulation, $0.021\ 7\ \mu\text{g/mL}$ against mycelium growth, and $0.021\ 4\ \mu\text{g/mL}$ against conidial germination, respectively. The EC_{50} values of pydiflumetofen against 281 strains of *F. pseudograminearum* ranged from $0.005\ 8$ to $0.056\ 6\ \mu\text{g/mL}$, with an average EC_{50} value of $(0.020\ 2\pm 0.009\ 4)\ \mu\text{g/mL}$. The synergistic ratios (SR) of the mixtures of pydiflumetofen with prothioconazole, fludioxonil, metconazole, carbendazim, phenamacril were $0.72\sim 5.31$, indicating additive or synergistic effects. The results of indoor control efficacy showed that the mixtures of pydiflumetofen and phenamacril at the mass ratio of 1:5 had better control efficacy compared to single fungicides. The research could provide theoretical basis and technical support for the prevention and control of FCR.

Key words: *Fusarium pseudograminearum*; pydiflumetofen; fungicide mixture; inhibitory activity; control efficacy

收稿日期:2025-02-15

基金项目:河南省科技研发计划联合基金(232301420122) 洛阳市公益性行业科研专项(2302032A) 河南科技大学博士科研启动基金项目(13480075)

作者简介:段雪莲(1998—) 河南洛阳人,硕士研究生,主要研究方向为植物病害化学防治。E-mail:15225443903@163.com

通信作者:刘圣明(1981—) 河南商丘人,博士,教授,主要从事植物病害化学防治、杀菌剂毒理及抗药性研究。E-mail:liushengmingzb@163.com

由镰孢菌引起的小麦茎基腐病(*Fusarium crown rot*)是一种世界性病害,美国、澳大利亚、意大利等多个国家相继报道了该病害的发生^[1-2]。茎基腐病是小麦、玉米以及经济作物上最具破坏性的土传病害之一^[3]。引起小麦茎基腐病的主要病原菌有假禾谷镰孢菌(*Fusarium pseudograminearum*)、禾谷镰孢菌(*F. graminearum*)和黄色镰孢菌(*F. culmorum*)等^[4-5]。在大多数小麦主产区,由于假禾谷镰孢菌致病性强、传播速度快,其已成为小麦茎基腐病的主要致病真菌^[4-6]。

2012年,河南省首次发现由假禾谷镰孢菌引起的小麦茎基腐病^[7-8]。该病害在小麦整个生育期均可发生。生长前期表现为烂种、烂芽、死苗,苗期表现为茎基部褐变,成熟期则表现为枯白穗等^[9-10]。小麦茎基腐病可导致小麦平均减产9%~35%,发病严重地区小麦减产70%以上^[11]。2017—2021年,河南省因小麦茎基腐病平均每年造成的小麦损失在3.6万吨,最高损失达4.4万吨^[12]。

由于生产中缺乏抗茎基腐病的小麦品种,对小麦茎基腐病的防治仍以化学防治为主^[13]。截至2025年2月,登记用于防治小麦茎基腐病的药剂产品仅有6个,包括200 g/L三氟吡啶胺种子处理悬浮剂、25 g/L咯菌腈悬浮种衣剂、40%丙硫菌唑·戊唑醇悬浮剂、13%苯甲醚·咯菌腈·噻虫胺种子处理悬浮剂、33%咯菌·噻虫胺悬浮种衣剂以及27%戊唑·噻霉酮水乳剂(<http://www.chinapesticide.org.cn/>)。因此,生产上迫切需要引进和开发有效的化学杀菌剂及其复配剂,以实现小麦茎基腐病的可持续管理。

氟唑菌酰胺(pydiflumetofen)是先正达公司开发的琥珀酸脱氢酶抑制剂(SDHI)类杀菌剂^[14]。其通过干扰病原菌呼吸电子传递链复合体,破坏线粒体的功能,阻断能量合成,从而抑制病原菌生长并最终导致死亡^[15-16]。氟唑菌酰胺能有效防治由核盘菌(*Sclerotinia* spp.)和葡萄孢菌(*Botrytis* spp.)等引起的多种病害^[17-18]。目前,其已在柑橘、苹果、西瓜、香蕉、马铃薯、黄瓜等多种作物上取得登记,但尚未登记用于防治小麦茎基腐病。本研究拟测定氟唑菌酰胺对假禾谷镰孢菌不同发育阶段的抑制作用,建立河南省假禾谷镰孢菌对氟唑菌酰胺的敏感性基线,在此基础上测定氟唑菌酰胺与丙硫菌唑、咯菌腈、叶菌唑、多菌灵、氰烯菌酯等5种杀菌剂及其复配剂的联合毒力,以及对小麦茎基腐病的离体防效。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试菌株

假禾谷镰孢菌菌株,于2021—2023年从河南省鹤壁、济源、开封、南阳、平顶山、许昌、漯河、洛阳等8个地区采集。经分离和特异性分子鉴定(Fpg-F, 5'-CGGGGTAGTTTCACATTTCCG-3'/Fpg-R, 5'-GAG AATGTGATGACGACAATA-3', 扩增长度520 bp),从中随机挑选出281株假禾谷镰孢菌供试。

1.1.2 供试药剂

98%氟唑菌酰胺(pydiflumetofen)、98%咯菌腈(fludioxonil)原药,瑞士先正达作物保护有限公司;95%丙硫菌唑(prothioconazole)原药,山东海利尔化工有限公司;98%多菌灵(carbendazim)原药,江苏龙灯化学有限公司;95%叶菌唑(metconazole)原药,安道麦辉丰(江苏)有限公司;95%氰烯菌酯(phenamacril)原药,江苏省农药研究所股份有限公司。多菌灵原药预溶于0.1 mol/L稀盐酸,氟唑菌酰胺、丙硫菌唑、叶菌唑、氰烯菌酯、咯菌腈原药用丙酮溶解。所有药剂配制为质量浓度为10 mg/mL的母液,于4℃冰箱中保存。

200 g/L氟唑菌酰胺悬浮剂,先正达南通作物保护有限公司;50%多菌灵悬浮剂,安徽广信农化股份有限公司;25%氰烯菌酯悬浮剂,江苏农药研究所有限公司。制剂产品用于室内防效测定。

1.1.3 供试培养基

酵母蛋白胨培养基(YBA) 酵母提取物10 g、细菌蛋白胨10 g、琼脂15 g、乙酸钠20 g,去离子水定容至1 L。马铃薯蔗糖琼脂培养基(PSA) 琼脂15 g、蔗糖20 g、马铃薯200 g,去离子水定容至1 L。其用于测定丙硫菌唑及其复配对假禾谷镰孢菌的敏感性。绿豆汤培养基 绿豆30 g,去离子水定容至1 L。水琼脂培养基(WA) 琼脂15 g,去离子水定容至1 L。

1.2 试验方法

1.2.1 氟唑菌酰胺对假禾谷镰孢菌KF2208不同发育阶段的抑制活性

菌丝生长 采用菌丝生长速率法测定^[19]。将氟唑菌酰胺母液稀释,按照一定比例添加到已灭菌的YBA中,培养基温度以55℃为宜,制成氟唑菌酰胺系列质量浓度分别为0.005、0.015、0.045、0.135、0.405 μg/mL的YBA平板,以不加药剂的YBA平板为对照。将供试菌株转入YBA平板,在25℃、黑暗条件

下培养3 d后 ,采用十字交叉法测量菌落直径。每个浓度重复3次 ,试验重复3次。按照公式(1)计算各药剂处理下的菌丝生长抑制率(I %) ,并根据药剂浓度对数与抑制率几率值之间的线性回归 ,求出毒力回归方程、有效抑制中浓度(EC_{50})^[20-21]。

$$I/\%=\frac{D_{CK}-D_t}{D_{CK}-0.5}\times 100$$

(1)

式中 D_{CK} 为对照菌落直径 μm ; D_t 为处理菌落直径 μm 。

分生孢子产生 :在无菌条件下 ,每100 mL绿豆汤培养基中接种10个菌饼 ,于25℃、150 r/min、12 h (光照)/12 h (黑暗)交替条件下培养5 d。向培养基中加入氟唑菌酰胺 ,梯度质量浓度为0.005、0.015、0.045、0.135、0.405 $\mu\text{g/mL}$,以不加药剂的绿豆汤培养基作为对照。继续振荡培养2 d后 ,在无菌条件下将培养液过滤至50 mL离心管中 , $6\ 000\ \text{r/min}$ 离心10 min ,弃去上清液 ,用无菌水重悬沉淀。采用血球计数板观察分生孢子数量。每个浓度重复3次 ,试验重复3次。按公式(2)计算各浓度下分生孢子产生的抑制率。采用DPS软件 ,求出有效抑制中浓度(EC_{50})。

孢子萌发 :采用孢子萌发法^[22]。按上述方法制备分生孢子悬浮液 ,孢子浓度为 1×10^5 个/mL ,每个平板中加入100 μL 分生孢子悬浮液。按照一定比例将药液加至WA培养基中 ,制成质量浓度为0.006 25、0.012 5、0.025、0.05、0.1 $\mu\text{g/mL}$ 的含药WA平板 ,以不加药剂的WA平板为对照。于25℃培养8 h ,计算其萌发率。按公式(2)计算分生孢子萌发抑制率。采用DPS软件 ,求出有效抑制中浓度(EC_{50})。

$$Ri/\%=\frac{N_c-N_t}{N_c}\times 100$$

(2)

式中 Ri 为抑制率或防效 ; N_c 为对照产孢量、孢

子萌发数或病斑长度 ; N_t 为处理产孢量、孢子萌发数或病斑长度。

1.2.2 假禾谷镰孢菌对氟唑菌酰胺敏感性测定

按照1.2.1中菌丝生长速率法测定8个地区281株假禾谷镰孢菌的敏感性。将 EC_{50} 由低到高分为6个区间 ,统计每个区间的菌株分布频率 ,以 EC_{50} 为横坐标 ,分布频率为纵坐标 ,建立假禾谷镰孢菌对氟唑菌酰胺的敏感性基线。

1.2.3 氟唑菌酰胺与5种杀菌剂及其复配剂对假禾谷镰孢菌的毒力测定

采用菌丝生长速率法测定氟唑菌酰胺、多菌灵、氰烯菌酯、丙硫菌唑、叶菌唑、咯菌腈6种杀菌剂 ,及氟唑菌酰胺分别与其他5种药剂按质量比5 : 1、3 : 1、1 : 1、1 : 3、1 : 5复配剂对假禾谷镰孢菌KF2208的毒力。用打孔器在KF2208菌株边缘打孔 ,并将其接种于含有不同药剂浓度的YBA培养基平板中心(质量浓度见表1) ,以不加药剂的YBA平板为对照。25℃培养3 d ,十字交叉法测量菌落直径。计算各单剂及氟唑菌酰胺复配剂的 EC_{50} ,并利用公式(3)计算复配剂的理论抑制中浓度[EC_{50} (Exp)] ,采用公式(4)计算增效系数(SR)。当SR大于1.5时 ,为增效作用 ;在0.5~1.5时 ,为相加作用 ;小于0.5时 ,为拮抗作用^[23]。

$$EC_{50}(\text{Exp})=\frac{a+b}{\frac{a}{EC_{50}(A)}+\frac{b}{EC_{50}(B)}}$$

(3)

$$SR=\frac{EC_{50}(\text{Exp})}{EC_{50}(\text{Obs})}$$

(4)

式中 A 、 B 分别表示2种药剂 ; a 、 b 为药剂 A 、 B 在复配剂中所占的比例 ; $EC_{50}(\text{Exp})$ 为理论抑制中浓度 , $\mu\text{g/mL}$; $EC_{50}(\text{Obs})$ 为实际测量抑制中浓度 , $\mu\text{g/mL}$ 。

表 1 氟唑菌酰胺与 5 种杀菌剂及其不同配比复配剂的试验质量浓度

杀菌剂	质量比	质量浓度/(mg/L)				
氟唑菌酰胺(YBA)		0.005 0	0.015 0	0.045 0	0.135 0	0.405 0
氟唑菌酰胺(PSA)		0.005 0	0.015 0	0.045 0	0.135 0	0.405 0
丙硫菌唑(PSA)		0.400 0	0.800 0	1.200 0	1.400 0	2.000 0
叶菌唑(YBA)		0.010 0	0.020 0	0.030 0	0.040 0	0.050 0
多菌灵(YBA)		0.300 0	0.500 0	0.700 0	0.900 0	1.100 0
咯菌腈(YBA)		0.006 3	0.012 5	0.025 0	0.050 0	0.100 0
氰烯菌酯(YBA)		0.100 0	0.200 0	0.300 0	0.400 0	0.500 0
氟唑菌酰胺 : 丙硫菌唑 (PSA)	5 : 1	0.025 0	0.050 0	0.100 0	0.200 0	0.400 0
	3 : 1	0.025 0	0.050 0	0.100 0	0.200 0	0.400 0
	1 : 1	0.025 0	0.050 0	0.100 0	0.200 0	0.400 0

(续表 1)

杀菌剂	质量比	质量浓度 /(mg/L)				
氟唑菌酰胺：丙硫菌唑 (PSA)	1 : 3	0.025 0	0.050 0	0.100 0	0.200 0	0.400 0
	1 : 5	0.050 0	0.100 0	0.200 0	0.400 0	0.800 0
氟唑菌酰胺：叶菌唑 (YBA)	5 : 1	0.002 0	0.004 0	0.008 0	0.016 0	0.032 0
	3 : 1	0.002 0	0.004 0	0.008 0	0.016 0	0.032 0
	1 : 1	0.002 0	0.002 0	0.004 0	0.008 0	0.016 0
	1 : 3	0.004 0	0.008 0	0.016 0	0.032 0	0.064 0
	1 : 5	0.004 0	0.008 0	0.016 0	0.032 0	0.064 0
氟唑菌酰胺：叶菌唑 (YBA)	5 : 1	0.006 3	0.012 5	0.025 0	0.050 0	0.100 0
	3 : 1	0.006 3	0.012 5	0.025 0	0.050 0	0.100 0
	1 : 1	0.006 3	0.012 5	0.025 0	0.050 0	0.100 0
	1 : 3	0.006 3	0.012 5	0.025 0	0.050 0	0.100 0
	1 : 5	0.006 3	0.012 5	0.025 0	0.050 0	0.100 0
氟唑菌酰胺：咯菌腈 (YBA)	5 : 1	0.006 3	0.012 5	0.025 0	0.050 0	0.100 0
	3 : 1	0.006 3	0.012 5	0.025 0	0.050 0	0.100 0
	1 : 1	0.006 3	0.012 5	0.025 0	0.050 0	0.100 0
	1 : 3	0.006 3	0.012 5	0.025 0	0.050 0	0.100 0
	1 : 5	0.006 3	0.012 5	0.025 0	0.050 0	0.100 0
氟唑菌酰胺：氟烯菌酯 (YBA)	5 : 1	0.004 0	0.008 0	0.016 0	0.032 0	0.064 0
	3 : 1	0.004 0	0.008 0	0.016 0	0.032 0	0.064 0
	1 : 1	0.006 3	0.012 5	0.025 0	0.050 0	0.100 0
	1 : 3	0.006 3	0.012 5	0.025 0	0.050 0	0.100 0
	1 : 5	0.006 3	0.012 5	0.025 0	0.050 0	0.100 0

1.2.4 离体防效测定

供试小麦品种为津春6号。采用胚芽鞘接种法分别测定多菌灵、氟烯菌酯、氟唑菌酰胺和增效系数最大的复配剂对假禾谷镰孢菌的防治效果^[24]。按1.2.1制备分生孢子悬浮液,用于接种。种子消毒后使麦粒腹沟朝下,12 h光照/12 h黑暗条件下培养3 d,待胚芽鞘长出2~3 cm时,喷施不同浓度的药液,另设清水对照。2 d后剪去胚芽鞘叶尖,在伤口处接种3 μL孢子悬浮液。每个浓度重复3次,试验设3次重复。按照公式(2)计算防治效果。

1.3 数据处理

利用DPS统计软件分析处理数据^[25]。得出药剂抑制菌丝生长的毒力回归方程、相关系数 r 和 EC_{50} ,采用最小显著差异法(Least-significant difference, LSD, $P<0.05$)进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 氟唑菌酰胺对假禾谷镰孢菌不同发育阶段的影响

结果显示(图1),氟唑菌酰胺对假禾谷镰孢菌KF2208的不同发育阶段均有较强的抑制作用。其

中,对分生孢子萌发阶段的抑制作用最高,其次为菌丝生长和分生孢子产生阶段, EC_{50} 分别为0.021 4 μg/mL、0.021 7 μg/mL、0.038 7 μg/mL。

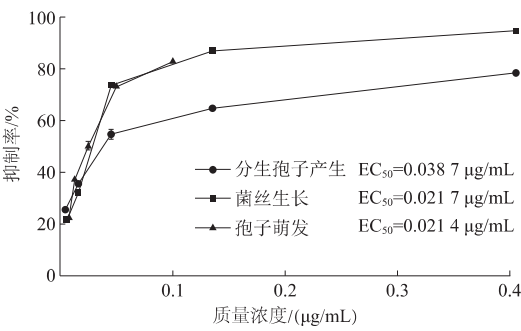


图1 氟唑菌酰胺对假禾谷镰孢菌不同发育阶段的抑制作用

2.2 假禾谷镰孢菌对氟唑菌酰胺的敏感性

2021—2023年,从河南省各地采集分离得到的281株假禾谷镰孢菌对氟唑菌酰胺的敏感性测定结果显示(图2):氟唑菌酰胺对菌株的 EC_{50} 为0.005 8~0.056 6 μg/mL,最大值为最小值的9.76倍, EC_{50} 平均值为 $(0.020\ 2\pm0.009\ 4)\mu\text{g/mL}$;敏感性曲线呈单峰曲线分布,表明目前尚未发现田间抗药性

群体。氟唑菌酰胺对假禾谷镰孢菌菌丝生长具有较强抑制活性,可将 $(0.020\ 2\pm0.009\ 4)\mu\text{g/mL}$ 作为河南省假禾谷镰孢菌菌株对氟唑菌酰胺的敏感性基线。由表2可知,河南省不同地区假禾谷镰孢菌对氟唑菌酰胺的敏感性存在差异,其中鹤壁地区的菌株最敏感, EC_{50} 平均值为 $(0.016\ 8\pm0.009\ 2)\mu\text{g/mL}$,平顶山地区的菌株最不敏感, EC_{50} 平均值为 $(0.023\ 3\pm0.008\ 7)\mu\text{g/mL}$ 。济源地区菌株敏感性差异最大, EC_{50} 最大值是最小值的9.62倍,洛阳地区菌株敏感性差异最小, EC_{50} 最大值是最小值的3.22倍。

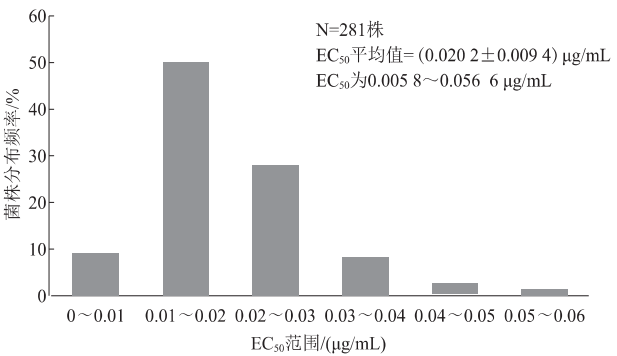


图2 氟唑菌酰胺对281株假禾谷镰孢菌的EC₅₀分布

表2 河南省不同地区假禾谷镰孢菌菌株对氟唑菌酰胺的敏感性

地区	菌株数/株	EC ₅₀ /(μg/mL)	
		范围	平均值±标准差
鹤壁	40	0.005 8~0.055 8	0.016 8±0.009 2b
济源	38	0.008 0~0.056 6	0.022 5±0.012 3a
开封	37	0.009 7~0.042 9	0.020 1±0.008 0ab
南阳	28	0.007 9~0.053 8	0.020 2±0.008 9ab
平顶山	42	0.010 0~0.043 4	0.023 3±0.008 7a
许昌	29	0.008 3~0.045 5	0.022 0±0.009 2a
漯河	25	0.006 4~0.035 5	0.017 0±0.008 0b
洛阳	33	0.010 0~0.032 2	0.017 2±0.005 8b

注:表中同列数据后不同小写字母表示经LSD法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。

2.3 氟唑菌酰胺及其复配剂对假禾谷镰孢菌的毒力

毒力测定结果表明(表3):氟唑菌酰胺、丙硫菌唑、叶菌唑、多菌灵、咯菌腈、氰烯菌酯等6种杀菌剂对菌株KF2208的 EC_{50} 在 $0.021\ 7\sim0.792\ 5\mu\text{g/mL}$ 。6种药剂对假禾谷镰孢菌菌丝生长均具有良好的抑制效果。

表3 氟唑菌酰胺及其复配剂对假禾谷镰孢菌的毒力

杀菌剂	质量比	毒力回归方程	<i>r</i>	实测EC ₅₀ /(μg/mL)	理论EC ₅₀ /(μg/mL)	增效系数SR
氟唑菌酰胺(YBA)		$y=7.220\ 0+1.334\ 8x$	0.985 6	0.021 7		
氟唑菌酰胺(PSA)		$y=6.123\ 1+0.815\ 6x$	0.966 2	0.042 0		
丙硫菌唑(PSA)		$y=5.237\ 4+2.349\ 9x$	0.998 9	0.792 5		
叶菌唑(YBA)		$y=8.571\ 6+2.353\ 4x$	0.988 2	0.030 4		
多菌灵(YBA)		$y=6.386\ 6+5.144\ 8x$	0.910 6	0.537 6		
咯菌腈(YBA)		$y=7.598\ 9+1.668\ 2x$	0.983 6	0.027 7		
氰烯菌酯(YBA)		$y=6.786\ 7+2.931\ 8x$	0.976 2	0.245 8		
氟唑菌酰胺:丙硫菌唑(PSA)	5:1	$y=6.477\ 2+1.230\ 7x$	0.976 7	0.063 1	0.049 9	0.79
	3:1	$y=6.327\ 3+1.185\ 7x$	0.964 9	0.076 0	0.055 0	0.72
	1:1	$y=6.058\ 2+1.023\ 9x$	0.993 7	0.092 6	0.079 8	0.86
	1:3	$y=6.120\ 6+1.142\ 5x$	0.992 1	0.104 5	0.145 0	1.39
	1:5	$y=5.864\ 5+1.154\ 5x$	0.989 6	0.178 3	0.199 2	1.12
氟唑菌酰胺:叶菌唑(YBA)	5:1	$y=8.391\ 5+1.481\ 8x$	0.977 5	0.005 1	0.022 8	4.47
	3:1	$y=9.322\ 5+1.899\ 6x$	0.981 6	0.005 3	0.023 4	4.41
	1:1	$y=7.380\ 4+1.182\ 3x$	0.983 0	0.009 7	0.025 3	2.61
	1:3	$y=8.431\ 7+1.752\ 6x$	0.958 6	0.011 0	0.027 6	2.51
	1:5	$y=7.464\ 1+1.252\ 7x$	0.991 6	0.010 8	0.028 5	2.64
氟唑菌酰胺:多菌灵(YBA)	5:1	$y=8.423\ 8+1.637\ 1x$	0.990 4	0.008 1	0.025 8	3.19
	3:1	$y=8.385\ 5+1.650\ 9x$	0.996 0	0.008 9	0.028 5	3.21
	1:1	$y=8.922\ 2+2.175\ 7x$	0.994 2	0.015 7	0.041 7	2.66
	1:3	$y=8.429\ 0+2.183\ 0x$	0.966 0	0.026 9	0.077 4	2.88
	1:5	$y=7.672\ 3+1.932\ 5x$	0.984 7	0.041 4	0.108 3	2.62
氟唑菌酰胺:咯菌腈(YBA)	5:1	$y=7.272\ 9+1.190\ 7x$	0.996 4	0.012 3	0.022 5	1.83

(续表 3)

杀菌剂	质量比	毒力回归方程	<i>r</i>	实测EC ₅₀ /(μg/mL)	理论EC ₅₀ /(μg/mL)	增效系数SR
氟唑菌酰胺：咯菌腈(YBA)	3：1	y=9.137 4+2.231 7x	0.987 0	0.014 0	0.022 9	1.64
	1：1	y=9.234 6+2.327 5x	0.983 3	0.015 2	0.024 3	1.60
	1：3	y=8.598 4+2.164 0x	0.976 5	0.021 7	0.025 9	1.19
	1：5	y=7.929 7+1.923 0x	0.985 5	0.030 0	0.026 5	0.88
氟唑菌酰胺：氟烯菌酯(YBA)	5：1	y=9.249 1+2.272 3x	0.998 5	0.013 5	0.025 8	1.91
	3：1	y=8.928 2+2.015 2x	0.992 9	0.011 2	0.028 5	2.55
	1：1	y=9.758 0+2.492 6x	0.990 8	0.012 3	0.039 9	3.24
	1：3	y=8.690 1+1.965 2x	0.954 1	0.013 3	0.068 6	5.16
	1：5	y=8.412 2+1.929 5x	0.976 4	0.017 0	0.090 3	5.31

氟唑菌酰胺与丙硫菌唑、叶菌唑、多菌灵、咯菌腈、氟烯菌酯不同配比复配剂对假禾谷镰孢菌的毒力不同,增效系数为0.72~5.31,表现出相加作用或增效作用。其中,氟唑菌酰胺、氟烯菌酯质量比1：5复配剂的SR为5.31,增效作用最强。

2.4 氟唑菌酰胺及其复配剂对小麦茎基腐病的离体防效

胚芽鞘接种法测定结果显示(表4):各杀菌剂对小麦茎基腐病均有一定的防效,随着药剂质量浓度

的升高,防效也随之增大。氟唑菌酰胺与氟烯菌酯质量比1：5复配剂的防效高于各单剂处理的防效。多菌灵、氟烯菌酯在质量浓度160 μg/mL时,防效分别为95.94%和97.76%,而在质量浓度9 μg/mL时,氟唑菌酰胺与氟烯菌酯质量比1：5复配剂的防效达到100%。由4种药剂对小麦胚芽鞘上假禾谷镰孢菌的毒力可知(表5):药剂的毒力依次为氟唑菌酰胺(0.086 3 μg/mL)>复配剂(0.145 1 μg/mL)>氟烯菌酯(24.486 3 μg/mL)>多菌灵(25.784 1 μg/mL)。

表 4 4 种药剂对小麦茎基腐病的防治效果

多菌灵		氟烯菌酯		氟唑菌酰胺		复配剂	
质量浓度/(μg/mL)	防治效果/%	质量浓度/(μg/mL)	防治效果/%	质量浓度/(μg/mL)	防治效果/%	质量浓度/(μg/mL)	防治效果/%
20	34.90d	20	40.10d	0.1	37.54d	0.1	42.20d
40	60.39c	40	67.75c	0.3	61.79c	0.3	69.05c
60	74.51b	60	77.84b	1.0	77.64b	1.0	81.98b
80	87.23a	80	92.75a	3.0	94.74a	3.0	95.48a
160	95.94a	160	97.76a	9.0	98.69a	9.0	100.00a

注:表中同列数据后不同小写字母表示经LSD法检验在*P*<0.05水平差异显著。复配剂为氟唑菌酰胺、氟烯菌酯按质量比1：5复配,下同。

表 5 4 种药剂对小麦胚芽鞘上假禾谷镰孢菌的毒力

药剂	毒力回归方程	<i>r</i>	EC ₅₀ /(μg/mL)	a	b
多菌灵	y=1.864 1+2.221 9x	0.993 5	25.784 1	1.864 1	2.221 9
氟烯菌酯	y=1.526 0+2.501 2x	0.987 0	24.486 3	1.526 0	2.501 2
氟唑菌酰胺	y=6.151 7+1.082 3x	0.979 8	0.086 3	6.151 7	1.082 3
复配剂	y=6.790 3+2.135 9x	0.873 5	0.145 1	6.790 3	2.135 9

3 结论与讨论

氟唑菌酰胺是新型SDHI类杀菌剂,为广谱、高效、内吸性杀菌剂,具有保护和治疗作用。本研究通过测定其对假禾谷镰孢菌不同发育阶段的影响,发现其对孢子萌发最敏感,其次为菌丝生长和分生孢子产生,EC₅₀分别为0.021 4 μg/mL、0.021 7 μg/mL、0.038 7 μg/mL。由于氟唑菌酰胺为病原菌呼吸抑

制剂,而孢子萌发过程需要消耗能量,因此其对孢子萌发过程最为敏感。

氟唑菌酰胺及其与不同杀菌剂复配剂对假禾谷镰孢菌的敏感性测定结果显示:不同地区采集的假禾谷镰孢菌菌株对氟唑菌酰胺的敏感性存在显著差异,鹤壁地区菌株表现最敏感,平顶山地区的菌株表现最不敏感。由于对采样地区的用药历史不了解,推断不同地区间的敏感性差异可能与各

地区茎基腐病流行及发生程度、土壤耕作制度、用药次数及用药量等有关^[26]。向礼波等^[27]采用菌丝生长速率法测定了湖北省6个地区采集的106株野生型小麦赤霉病菌株对氟唑菌酰胺的敏感性,其 EC_{50} 为0.018 0~0.209 0 mg/L,平均值为(0.072 8±0.025 9) mg/L, EC_{50} 频率分布呈单峰曲线。Hou等^[28]采用菌丝生长速率法测定了5个省份116株亚洲镰孢菌对氟唑菌酰胺的敏感性,其 EC_{50} 为0.019 0~0.208 4 mg/mL,平均值为(0.074 5±0.036 7)mg/mL, EC_{50} 分布呈单峰曲线。本研究发现氟唑菌酰胺对河南省8个地区的小麦假禾谷镰孢菌的 EC_{50} 范围在0.005 8~0.056 6 μ g/mL, EC_{50} 平均值为(0.020 2±0.009 4) μ g/mL, EC_{50} 分布为单峰曲线。从 EC_{50} 看,几个省份田间均未出现抗性群体。本研究所采集的小麦田块未使用过氟唑菌酰胺,因此 EC_{50} 平均值(0.020 2±0.009 4) μ g/mL可以作为河南省假禾谷镰孢菌对氟唑菌酰胺的敏感性基线,为河南省小麦茎基腐病对氟唑菌酰胺的抗性监测奠定基础。

由于作用位点单一,SDHI类杀菌剂的抗性风险被国际杀菌剂抗性行动委员会(FRAC)确定为中等至高风险^[29]。因此,在使用该类药剂过程中,须注意用药方式和用药量。比如,将SDHI类药剂与其他作用机理的药剂轮换使用或复配使用,控制用药次数,避免连续使用等。为了延缓假禾谷镰孢菌对氟唑菌酰胺抗性产生,本研究采取氟唑菌酰胺与不同作用机理的杀菌剂进行二元复配。联合毒力测定结果表明,不同作用机理的杀菌剂与氟唑菌酰胺复配均表现出相加或增效作用,其中氟唑菌酰胺与氰烯菌酯复配效果较好,可作为防治小麦茎基腐病的潜在药剂。刘云霞等^[30]采用菌丝生长速率法测定了叶菌唑与氟唑菌酰胺对小麦赤霉病菌的联合毒力,发现在质量比为1.5:1时,增效系数最大,为2.43。窦君霞等^[31]研究发现,氟唑菌酰胺与戊唑醇的5个不同配比复配剂对假禾谷镰孢菌表现出相加或增效作用,当体积比为1:6时,增效作用最强,增效系数最大,为1.98。李梦雨等^[32]发现,己唑醇与氟唑菌酰胺的5个不同比例复配剂对禾谷镰孢菌均表现出相加或增效作用。当质量比为1:5时,增效系数最大,达到3.73,增效作用最强。研究结果与本研究氟唑菌酰胺与三唑类杀菌剂复配结果一致,均表现出相加或增效作用。本研究采用小麦胚芽鞘接种法测定了杀菌剂的室内防效,与氟唑菌酰胺、多菌灵、氰烯菌酯相比,复配剂防治效果更为显著。因此,推荐氟唑菌酰胺与氰烯菌酯按质量

比1:5复配防治小麦茎基腐病,以提升防治效果,达到延缓抗性发展的目的。

综上所述,氟唑菌酰胺对假禾谷镰孢菌的生长具有较强的抑制作用,未发现敏感性下降的亚群体。氟唑菌酰胺与丙硫菌唑、叶菌唑、氰烯菌酯、多菌灵、咯菌腈等5种杀菌剂的复配剂对小麦茎基腐病菌均为相加或增效作用。本论文的研究结果可为假禾谷镰孢菌的抗性监测和小麦茎基腐病的防控提供理论依据。

参考文献

- [1] KAZAN K, GARDINER D M. Fusarium crown rot caused by *Fusarium pseudograminearum* in cereal crops: recent progress and future prospects[J]. Molecular Plant Pathology, 2018, 19(7): 1547-1562.
- [2] YANG X, PAN Y, SINGH P K, et al. Investigation and genome-wide association study for Fusarium crown rot resistance in Chinese common wheat[J]. BMC Plant Biology, 2019, 19: 1-14.
- [3] PAULITZ T C, SMILEY R W, COOK R J. Insights into the prevalence and management of soilborne cereal pathogens under direct seeding in the Pacific Northwest, USA[J]. Canadian Journal of Plant Pathology, 2002, 24(4): 416-428.
- [4] MOYA-ELIZONDO E A, REW L J, JACOBSEN B J, et al. Distribution and prevalence of Fusarium crown rot and common root rot pathogens of wheat in Montana[J]. Plant Disease, 2011, 95(9): 1099-1108.
- [5] ZHOU H F, HE X L, WANG S, et al. Diversity of the *Fusarium* pathogens associated with crown rot in the Huanghuai wheat-growing region of China[J]. Environmental Microbiology, 2019, 21(8): 2740-2754.
- [6] WEI J Q, GUO X H, JIANG J, et al. Resistance risk assessment of *Fusarium pseudograminearum* from wheat to prothioconazole[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2023, 191: 105346.
- [7] LI H L, YUAN H X, FU B, et al. First report of *Fusarium pseudograminearum* causing crown rot of wheat in Henan, China[J]. Plant Disease, 2012, 96(7): 1065.
- [8] BECHER R, WIRSEL S G. Fungal cytochrome P450 sterol 14 α -demethylase (CYP51) and azole resistance in plant and human pathogens[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2012, 95: 825-840.
- [9] SCHERM B, BALMAS V, SPANU F, et al. *Fusarium culmorum*: causal agent of foot and root rot and head blight on wheat[J]. Molecular Plant Pathology, 2013, 14(4): 323-341.
- [10] SMILEY R W, PATTERSON L M. Pathogenic fungi associated

- with *Fusarium* foot rot of winter wheat in the semiarid Pacific Northwest[J]. *Phytopathology*, 1996, 86: 1273-1279.
- [11] CHEN W C, WEI L L, ZHAO W C, et al. Resistance risk assessment for a novel succinate dehydrogenase inhibitor pydiflumetofen in *Fusarium asiaticum*[J]. *Pest Management Science*, 2021, 77(1): 538-547.
- [12] ZHOU F, JIAO Y, HAN A H, et al. Survey of prothioconazole sensitivity in *Fusarium pseudograminearum* isolates from Henan Province, China, and characterization of resistant laboratory mutants[J]. *BMC Plant Biology*, 2024, 24(1): 29.
- [13] LIU C J, OGBONNAYA F C. Resistance to *Fusarium* crown rot in wheat and barley: a review[J]. *Plant Breeding*, 2015, 134(4): 365-372.
- [14] ARENA M, AUTERI D, BRANCATO A, et al. Peer review of the pesticide risk assessment of the active substance pydiflumetofen[J]. *EFSA Journal*, 2019, 17(10): e05821.
- [15] AVENOT H F, MICHAILIDES T J. Progress in understanding molecular mechanisms and evolution of resistance to succinate dehydrogenase inhibiting (SDHI) fungicides in phytopathogenic fungi[J]. *Crop Protection*, 2010, 29(7): 643-651.
- [16] DURING P C. Structural and computational analysis of the quinone-binding site of complex (succinate-ubiquinone oxidoreductase)[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2006, 281(11): 7309-7316.
- [17] POPKOJR J T, SANG H, LEE J, et al. Resistance of *Sclerotinia homoeocarpa* field isolates to succinate dehydrogenase inhibitor fungicides[J]. *Plant Disease*, 2018, 102(12): 2625-2631.
- [18] FERNANDEZ-ORTUNO D, PEREZ-GARCIA A, CHAMORRO M, et al. Resistance to the SDHI fungicides boscalid, fluopyram, fluxapyroxad, and penthiopyrad in *Botrytis cinerea* from commercial strawberry fields in Spain[J]. *Plant Disease*, 2017, 101(7): 1306-1313.
- [19] LIU S M, FU L Y, HAI F, et al. Sensitivity to boscalid in field isolates of *Sclerotinia sclerotiorum* from rapeseed in Henan Province, China[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2018, 166(4): 227-232.
- [20] THOMULKA K, ABBAS C, YOUNG D, et al. Evaluating median effective concentrations of chemicals with bioluminescent bacteria [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1996, 56: 446-452.
- [21] LIU S M, FU L Y, CHEN J P, et al. Baseline sensitivity and control efficacy of epoxiconazole against *Fusarium graminearum* in Henan Province, China[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2020, 157: 825-833.
- [22] 陈雨, 张文芝, 周明国. 氰烯菌酯对禾谷镰孢菌分生孢子萌发及菌丝生长的影响[J]. *农药学学报*, 2007, 9(3): 235-239.
- [23] 李路怡, 苗淑斐, 钱乐, 等. 河南省油菜菌核病菌对氯氟联苯吡菌胺及其复配剂的敏感性(英文)[J]. *农药学学报*, 2023, 25(4): 946-953.
- [24] WU L Y, WU Z W, ZHAO F F, et al. Activity and cell toxicology of fluazinam on *Fusarium graminearum*[J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2022, 188: 105253.
- [25] TANG Q Y, ZHANG C X. Data processing system (DPS) software with experimental design, statistical analysis and data mining developed for use in entomological research[J]. *Insect Science*, 2013, 20(2): 254-260.
- [26] 谭欢欢, 姜佳, 刘金亮, 等. 河南省禾谷镰孢菌对丙硫菌唑的敏感性[J]. *农药学学报*, 2023, 25(2): 474-478.
- [27] 向礼波, 杨立军, 薛敏峰, 等. 禾谷镰孢菌对氟唑菌酰胺敏感性基线的建立及药剂田间防效[J]. *农药学学报*, 2018, 20(4): 445-451.
- [28] HOU Y P, MAO X W, WANG J X, et al. Sensitivity of *Fusarium asiaticum* to a novel succinate dehydrogenase inhibitor fungicide pydiflumetofen[J]. *Crop Protection*, 2017, 96: 237-244.
- [29] 赵平, 白雪婧, 邓云艳, 等. 琥珀酸脱氢酶抑制剂(SDHI)类杀菌剂抗性机制研究进展[J]. *农药*, 2022, 61(6): 391-395.
- [30] 刘云霞, 张凯皓, 马建斌, 等. 叶菌唑与氟唑菌酰胺对小麦赤霉病的复配增效研究[J]. *西北农业学报*, 2024, 33(2): 287-291.
- [31] 窦君霞, 耿忠义, 赵京岚, 等. 氟唑菌酰胺和戊唑醇对假禾谷镰刀菌联合毒力测定[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(13): 136-139.
- [32] 李梦雨, 高续恒, 钱乐, 等. 己唑醇及其复配剂对河南省禾谷镰孢菌的抑制活性及对小麦赤霉病的室内防效[J]. *农药学学报*, 2024, 26(3): 540-548.

(编辑: 顾林玲)

(上接第72页)

- 933-936.
- [8] 中华人民共和国农业农村部. 农药田间药效试验准则 第76部分 植物生长调节剂促进花生生长: NY/T 1464.76—2018[S]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [9] 王庆峰, 高华援, 凤桐, 等. 不同植物生长调节剂在花生栽培上的试验与示范研究[J]. *现代农业科技*, 2011(24): 202; 207.
- [10] 兰刚, 夏芝, 杨六六, 等. 4种植物生长调节剂在花生上的应用效

果研究[J]. *现代农业科技*, 2023(6): 1-3.

- [11] 王振军, 刘艳, 李梦姣. 植物生长调节剂在花生上的应用研究进展[J]. *农业科技通讯*, 2017(1): 15-18.
- [12] 孙陈铭, 蔡岩, 苗志伟. 新型绿色植物生长调节剂——芸苔素内酯的研究进展[J]. *化学教育(中英文)*, 2022, 43(6): 1-8.
- [13] 冯渊, 刘林业. 芸苔素内酯在花生上的应用效果研究[J]. *现代农业科技*, 2017(12): 127-128.

(编辑: 顾林玲)