

◆ 药效与应用 ◆

丙硫菌唑与5种常用杀菌剂复配对水稻、 小麦纹枯病菌的联合毒力

丁 涛¹, 张 坤², 杨 进¹, 陆佩玲¹, 陈 宸², 贺 振², 陈夕军^{2*}

(1. 扬州市植保植检站, 江苏扬州 225101 2. 扬州大学园艺与植物保护学院, 江苏扬州 225009)

摘要:为明确丙硫菌唑与5种常用药剂的复配潜力,笔者采用菌落生长抑制法,测定丙硫菌唑与各杀菌剂不同配比对水稻、小麦纹枯病菌的联合毒力。结果表明,丙硫菌唑单剂对水稻、小麦纹枯病菌的 EC_{50} 值分别为 $2.202\ 5\ \mu\text{g/mL}$ 和 $3.416\ 2\ \mu\text{g/mL}$,其他几种杀菌剂单剂的 EC_{50} 值则在 $0.034\ 7\sim 1.792\ 2\ \mu\text{g/mL}$ 和 $0.067\ 0\sim 1.446\ 3\ \mu\text{g/mL}$ 。将丙硫菌唑与各药剂分别按3:1、2:1、1:1、1:2和1:3的比例复配后,对于小麦纹枯病菌来说,以丙硫菌唑与氟环唑复配增效最为明显,2:1配比下最大SR值可达6.69;对于水稻纹枯病菌,则以丙硫菌唑与吡唑醚菌酯3:1复配联合毒力最强,SR值为1.92;丙硫菌唑与咯菌腈复配效果最差,各配比下对水稻、小麦纹枯病菌的SR值均小于1.0,说明除咯菌腈外,丙硫菌唑具有与多种杀菌剂复配,并进一步研发成制剂的潜力。

关键词:丙硫菌唑;常用杀菌剂;联合毒力;水稻纹枯病菌;小麦纹枯病菌

中图分类号:S 482.2 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-5284.2021.04.012

Combined Virulence of the Mixtures of Prothioconazole with Five Kinds of Commonly Used Fungicides to *Rhizoctonia solani* and *Rhizoctonia cerealis*

DING Tao¹, ZHANG Kun², YANG Jin¹, LU Peiling¹, CHEN Chen², HE Zhen², CHEN Xijun^{2*}

(1. Plant Protection and Plant Quarantine Station of Yangzhou City, Jiangsu Yangzhou 225101, China; 2. College of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Jiangsu Yangzhou 225009, China)

Abstract: In order to determine the mixing potentiality of prothioconazole with five kinds of fungicides used to control rice sheath blight and wheat sharp eyespot in field, EC_{50} values of these mixtures were tested by the colony growth inhibition method. Results showed that the EC_{50} values of prothioconazole for *R. solani* and *R. cerealis* were $2.202\ 5\ \mu\text{g/mL}$ and $3.416\ 2\ \mu\text{g/mL}$, while other fungicides for *R. solani* and *R. cerealis* were from $0.034\ 7\ \mu\text{g/mL}$ to $1.792\ 2\ \mu\text{g/mL}$ and from $0.067\ 0\ \mu\text{g/mL}$ to $1.446\ 3\ \mu\text{g/mL}$, respectively. When prothioconazole was mixed with each fungicide at the ratios of 3:1, 2:1, 1:1, 1:2 and 1:3, the mixtures of prothioconazole and epoxiconazole had the highest combined virulence and showed obvious synergistic effect at each ratio, and the maximum SR value reached 6.69 at the ratio of 2:1. When prothioconazole and pyraclostrobin were mixed at the ratio 3:1, the mixture had the highest combined virulence to *R. solani* and the SR value was 1.92. The mixtures of prothioconazole and fludioxonil had lower virulence to *R. solani* and *R. cerealis*, and all the SR values were less than 1.0. All above showed that prothioconazole could be used to mix with several fungicides and these mixtures had the potential to be further developed into formulations.

Key words: prothioconazole; commonly used fungicides; combined virulence; *Rhizoctonia solani*, *Rhizoctonia cerealis*

收稿日期:2020-10-23

基金项目:江苏省重点研发计划(现代农业)项目(BE2020319) 江苏省现代农业产业发展项目(2020-SJ-003-YD07)

作者简介:丁涛(1980—)女,江苏泰州人,硕士,高级农艺师,主要从事农作物病害综合防控研究。E-mail:jsyzzbz@126.com

通信作者:陈夕军(1974—)男,江苏盐城人,博士,副教授,主要从事农作物病害综合防控研究。E-mail:xcjchen@yzu.edu.cn

丙硫菌唑是一种新型的三唑硫酮类杀菌剂,主要用于防治麦类白粉病、赤霉病、锈病和豆类的枯萎病、叶斑病、菌核病、网斑病等。与传统三唑类杀菌剂相比,丙硫菌唑具有更广泛的防治谱,且增产作用明显^[1-4]。但与其他杀菌剂一样,长期单一、过量、过频地施用丙硫菌唑,也有使各种病原菌对其产生抗性的风险^[5],而将不同化学药剂进行复配使用,是延缓病原菌对单剂产生抗药性的方法之一。目前,不同研究者将丙硫菌唑与多种杀菌剂进行了复配或混合使用,如将丙硫菌唑与戊唑醇、烯肟菌酯、腈苯唑或苯锈啶复配来防治花生叶斑病、小麦赤霉病、小麦锈病和玉米叶枯病等^[6-9]。在国外,自2004年以来,丙硫菌唑已在德国、美国、加拿大等多个国家登记和使用,但在我国,目前登记的丙硫菌唑原药或制剂(单剂或复配剂)只有5种,防治对象也仅限于小麦赤霉病、白粉病和锈病(中国农药信息网, www.icama.org.cn/hysj/index.jhtml)。关于丙硫菌唑与其他杀菌剂复配或混合施用防治纹枯病,特别是水稻纹枯病的研究尚且不多。

纹枯病是水稻、小麦生产中的重要病害之一。目前生产上防治水稻、小麦纹枯病的常用药剂为噻呋酰胺、戊唑醇和氟环唑等,近几年吡唑醚菌酯和咯菌腈在部分地区亦有应用。其中,以噻呋酰胺、戊唑醇、氟环唑为单剂或复配剂用于防治水稻、小麦纹枯病的药剂分别有189种、117种和68种各类剂型的登记产品,以吡唑醚菌酯和咯菌腈为单剂或复配剂的则分别有5种和10种。为延长这些化学药剂的使用寿命,同时扩大丙硫菌唑的防治谱,笔者将这些药剂与丙硫菌唑进行复配,测定各种药剂不同配比对水稻、小麦纹枯病菌的联合毒力,筛选最佳配方,研发新的复配药剂。该研究对于延展丙硫菌唑的应用范围和持续高效控制水稻、小麦纹枯病具有重要参考意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试药剂:所有原药均购自各农药生产企业或由企业惠赠,详细信息见表1。

供试菌株:水稻纹枯病菌YN-7(*Rhizoctonia solani*)和小麦纹枯病菌CAG-1(*Rhizoctonia cerealis*)由扬州大学植物病理学实验室分离自江苏水稻和小麦纹枯病病株,并经形态与分子生物学鉴定后,备用。

表1 供试药剂信息

药剂名称	含量	来源
丙硫菌唑	97%	安徽久易农业股份有限公司
戊唑醇	98%	江苏龙灯化学有限公司
氟环唑	95%	济南绿霸农药有限公司
噻呋酰胺	97%	常熟恒耀新材料有限公司
吡唑醚菌酯	96%	江苏利民化工股份有限公司
咯菌腈	98%	济南绿霸农药有限公司

1.2 单剂的毒力测定

按预实验结果,将丙硫菌唑、戊唑醇、噻呋酰胺、氟环唑、吡唑醚菌酯、咯菌腈分别加入到马铃薯葡萄糖琼脂(PDA)培养基中,制成梯度浓度的含药培养基。各含药培养基中药剂的终浓度为:戊唑醇0.25、0.5、1、2.5、5 $\mu\text{g/mL}$;丙硫菌唑0.5、1、2.5、5、10 $\mu\text{g/mL}$;吡唑醚菌酯0.125、0.25、1、2、4 $\mu\text{g/mL}$;氟环唑0.5、1、2.5、5、10 $\mu\text{g/mL}$;噻呋酰胺0.025、0.05、0.1、0.5、1 $\mu\text{g/mL}$;咯菌腈0.025、0.05、0.1、0.2、0.4 $\mu\text{g/mL}$ 。

根据药剂对病菌菌丝生长速率的抑制率测定其室内毒力。将冰箱保存的病原菌移至PDA平板,28℃培养2 d后,在菌落边缘打孔($\Phi 6\text{ mm}$),随后分别移1块菌饼至各含药培养基平板中央。接菌后的培养皿于28℃条件下恒温培养,当对照菌落直径近满平板时,十字交叉测量菌落直径,根据式(1)计算各药剂对菌丝生长的抑制率。每处理3次重复,以不加药剂的PDA平板作对照。数据结果使用DPS软件进行分析,计算各药剂的毒力回归方程和 EC_{50} 值。

$$\text{菌落生长抑率}/\% = \frac{\text{对照菌落直径} - \text{处理菌落直径}}{\text{对照菌落直径} - 6} \times 100 \quad (1)$$

1.3 不同配比复配剂的联合毒力测定

在测定单剂毒力的基础上,根据1.2确定的各单剂的抑菌浓度区间和其 EC_{50} 值将丙硫菌唑与各药剂配成5个配比,丙硫菌唑与其他药剂的配比分别为3:1、2:1、1:1、1:2和1:3,并设定5个浓度梯度。其中,丙硫菌唑+戊唑醇和丙硫菌唑+氟环唑的5个浓度分别为0.1、0.5、1.0、2.0、4.0 $\mu\text{g/mL}$,丙硫菌唑+吡唑醚菌酯为0.05、0.1、0.5、1.0、2.0 $\mu\text{g/mL}$,丙硫菌唑+噻呋酰胺和丙硫菌唑+咯菌腈为0.025、0.05、0.1、0.5、1.0 $\mu\text{g/mL}$,以不含药培养基作对照,测定各配比对水稻和小麦纹枯病菌的联合毒力,根据式(2)、(3)计算增效比(SR值)。

$$\text{EC}(\text{th})_{50} = \frac{a+b}{\frac{a}{\text{EC}(\text{A})_{50}} + \frac{b}{\text{EC}(\text{B})_{50}}} \quad (2)$$

$$SR=\frac{EC(th)_{50}}{EC(ob)_{50}} \tag{3}$$

式中 A和B分别表示丙硫菌唑和其他某一药剂；a和b分别表示二者的混配比例，EC(th)₅₀和EC(ob)₅₀分别表示理论EC₅₀值和实测EC₅₀值，SR为增效比。

根据增效比(SR)做出联合作用综合评价。SR>1.5为增效作用，0.5≤SR≤1.5为相加作用，SR<0.5为拮抗作用。

1.4 数据处理与分析

毒力回归方程与相关系数的计算均采用DPS 7.05软件处理。

2 结果与分析

2.1 几种杀菌剂单剂对水稻、小麦纹枯病菌的毒力

根据病菌在不同浓度含药培养基上生长结果表明，几种常用杀菌剂对水稻和小麦纹枯病菌均有很强的抑制作用。EC₅₀值在0.034 7 μg/mL~2.202 5

μg/mL和0.067 0 μg/mL~3.416 2 μg/mL。新型三唑硫酮类药剂丙硫菌唑相比其他药剂毒力较弱，其对水稻、小麦纹枯病菌的EC₅₀值分别为2.202 5 μg/mL和3.416 2 μg/mL，说明若将丙硫菌唑用于在生产上对水稻和小麦纹枯病的防治，必须与其他杀菌剂进行复配，以便减少化学农药使用量，延缓抗药性产生，提高药效(表2)。

2.2 丙硫菌唑与各药剂的不同配比对水稻、小麦纹枯病菌的联合毒力

当丙硫菌唑和戊唑醇按3：1、2：1、1：1、1：2和1：3配比时，2：1和1：1的配比对水稻纹枯病菌的联合毒力较高，增效比(SR)值分别为1.91和1.73，3：1和2：1的配比则对小麦纹枯病菌毒力较大，SR值分别为1.88和1.92。这几种配比对水稻纹枯病菌和小麦纹枯病菌的SR值都大于1.5，说明将丙硫菌唑和戊唑醇按这些配比复配后可增加其对水稻和小麦纹枯病菌的联合毒力，有增效作用。其他几种配比的SR值在0.5~1.5，说明其为相加作用(表3)。

表 2 几种杀菌剂单剂对水稻、小麦纹枯病菌的毒力

杀菌剂	水稻纹枯病菌			小麦纹枯病菌		
	毒力回归方程	相关系数	EC ₅₀ 值/(μg·mL ⁻¹)	毒力回归方程	相关系数	EC ₅₀ 值/(μg·mL ⁻¹)
丙硫菌唑	y=0.361 6 x+0.376 0	0.978 4	2.202 5	y=0.169 4 x+0.327 6	0.945 1	3.416 2
戊唑醇	y=0.344 9 x+0.412 6	0.973 3	1.792 2	y=0.325 5 x+0.522 5	0.968 9	0.852 8
氟环唑	y=0.234 3 x+0.615 8	0.983 6	0.320 4	y=0.767 4 x+0.377 0	0.943 9	1.446 3
吡唑醚菌酯	y=0.191 2 x+0.693 0	0.992 7	0.097 8	y=0.328 9 x+0.532 0	0.991 2	0.799 3
噻呋酰胺	y=0.210 4 x+0.798 9	0.966 7	0.034 7	y=0.327 7 x+0.884 5	0.924 3	0.067 0
咯菌腈	y=0.460 0 x+1.145 5	0.994 2	0.039 5	y=0.478 4 x+0.960 4	0.988 0	0.109 5

表 3 丙硫菌唑与戊唑醇不同配比对水稻、小麦纹枯病菌的联合毒力

杀菌剂	配比	病原菌	毒力回归方程	相关系数	EC ₅₀ (th)/(μg·mL ⁻¹)	EC ₅₀ (ob)/(μg·mL ⁻¹)	SR值
丙硫菌唑：戊唑醇	3：1	水稻纹枯病菌	y=0.389 6 x+0.396 9	0.975 0	2.083 3	1.839 2	1.13
	2：1		y=0.504 6 x+0.484 4	0.959 5	2.046 3	1.073 7	1.91
	1：1		y=0.429 1 x+0.475 4	0.970 3	1.976 3	1.141 1	1.73
	1：2		y=0.318 4 x+0.413 7	0.986 2	1.910 8	1.866 5	1.02
	1：3		y=0.326 5 x+0.389 3	0.998 2	1.879 7	2.182 9	0.86
	3：1	小麦纹枯病菌	y=0.212 6 x+0.465 4	0.981 8	2.739 7	1.454 6	1.88
	2：1		y=0.305 6 x+0.482 4	0.965 3	2.199 4	1.141 8	1.92
	1：1		y=0.289 0 x+0.470 0	0.962 0	1.577 2	1.270 0	1.24
	1：2		y=0.318 9 x+0.439 1	0.940 9	0.852 9	1.552 2	0.55
	1：3		y=0.347 4 x+0.465 4	0.929 2	0.768 2	1.265 2	0.61

将丙硫菌唑与氟环唑分别按3：1、2：1、1：1、1：2和1：3配比进行复配，仅当配比为1：3时对水稻纹枯病菌联合毒力的SR值大于1.5，表现为增效作用，其他几种配比的SR值均处于0.5~1.5，表现为相加作用；所有配比对小麦纹枯病菌联合毒力的SR值均大于1.5，均表现为增效作用，其中配比为2：1时

的SR值最高达6.69(表4)。

当丙硫菌唑与噻呋酰胺按3：1、2：1、1：1、1：2和1：3配比时，除1：2配比对小麦纹枯病菌联合毒力表现为增效作用(SR值为1.63)外，其他所有配比对水稻、小麦纹枯病菌联合毒力的SR值都在0.5~1.5，说明其为相加作用(表5)。

表 4 丙硫菌唑与氟环唑不同配比对水稻、小麦纹枯病菌的联合毒力

杀菌剂	配比	病原菌	毒力回归方程	相关系数	EC ₅₀ (th)/(μg·mL ⁻¹)	EC ₅₀ (ob)/(μg·mL ⁻¹)	SR 值
丙硫菌唑：氟环唑	3：1	水稻纹枯病菌	y=0.338 4 x+0.495 6	0.992 4	0.921 5	1.024 1	0.89
	2：1		y=0.346 1 x+0.515 7	0.995 7	0.775 5	0.900 8	0.86
	1：1		y=0.283 0 x+0.544 3	0.966 9	0.572 1	0.697 3	0.82
	1：2		y=0.325 7 x+0.577 0	0.982 8	0.453 6	0.580 2	0.78
	1：3		y=0.210 4 x+0.638 4	0.965 3	0.416 9	0.219 8	1.87
	3：1	小麦纹枯病菌	y=0.382 9 x+0.505 2	0.924 6	2.564 1	0.969 2	2.67
	2：1		y=0.241 7 x+0.610 6	0.988 2	2.343 7	0.348 6	6.69
	1：1		y=0.304 1 x+0.472 2	0.977 9	2.040 8	1.234 2	1.66
	1：2		y=0.278 5 x+0.623 2	0.984 0	1.796 4	0.361 1	4.97
	1：3		y=0.392 4 x+0.606 8	0.992 8	1.694 9	0.534 3	3.19

表 5 丙硫菌唑与噻呋酰胺不同配比对水稻、小麦纹枯病菌的联合毒力

杀菌剂	配比	病原菌	毒力回归方程	相关系数	EC ₅₀ (th)/(μg·mL ⁻¹)	EC ₅₀ (ob)/(μg·mL ⁻¹)	SR 值
丙硫菌唑：噻呋酰胺	3：1	水稻纹枯病菌	y=0.374 3 x+0.808 3	0.995 2	0.116 2	0.150 1	0.77
	2：1		y=0.383 9 x+0.850 7	0.988 6	0.117 5	0.122 0	0.96
	1：1		y=0.326 2 x+0.882 1	0.973 9	0.059 4	0.067 3	0.88
	1：2		y=0.289 9 x+0.889 4	0.974 5	0.044 7	0.045 3	0.98
	1：3		y=0.252 2 x+0.894 1	0.977 7	0.039 8	0.027 3	1.45
	3：1	小麦纹枯病菌	y=0.322 5 x+0.744 4	0.994 9	0.224 7	0.174 6	1.32
	2：1		y=0.365 9 x+0.810 4	0.999 8	0.172 8	0.141 8	1.22
	1：1		y=0.357 5 x+0.852 5	0.982 8	0.117 8	0.103 2	1.14
	1：2		y=0.284 2 x+0.858 8	0.995 3	0.089 0	0.054 6	1.63
	1：3		y=0.308 2 x+0.891 9	0.987 6	0.079 3	0.053 5	1.48

当丙硫菌唑与吡唑醚菌酯按3：1、2：1、1：1、1：2和1：3进行配比时，3：1、2：1、1：3配比对水稻纹枯病菌的联合毒力较高，SR值大于1.5；当配比为3：1、2：1、1：1、1：2时，对小麦纹枯病菌联合

毒力的SR值大于1.5，说明这些配比分别对水稻、小麦纹枯病菌表现增效作用；其他几种配比对水稻、小麦纹枯病菌的SR值均处于0.5～1.5，说明其为相加作用(表6)。

表 6 丙硫菌唑与吡唑醚菌酯不同配比对水稻、小麦纹枯病菌的联合毒力

杀菌剂	配比	病原菌	毒力回归方程	相关系数	EC ₅₀ (th)/(μg·mL ⁻¹)	EC ₅₀ (ob)/(μg·mL ⁻¹)	SR 值
丙硫菌唑：吡唑醚菌酯	3：1	水稻纹枯病菌	y=0.299 7 x+0.732 1	0.978 5	0.323 0	0.168 0	1.92
	2：1		y=0.280 8 x+0.735 8	0.992 2	0.257 2	0.144 6	1.78
	1：1		y=0.251 5 x+0.726 3	0.968 9	0.182 7	0.125 9	1.45
	1：2		y=0.241 8 x+0.735 1	0.995 8	0.141 7	0.106 5	1.33
	1：3		y=0.217 9 x+0.740 2	0.995 4	0.127 4	0.079 0	1.61
	3：1	小麦纹枯病菌	y=0.285 7 x+0.568 3	0.989 8	2.061 8	0.576 7	3.58
	2：1		y=0.358 8 x+0.561 2	0.975 9	1.754 4	0.675 2	2.60
	1：1		y=0.279 0 x+0.623 0	0.996 6	1.351 4	0.362 4	3.73
	1：2		y=0.308 9 x+0.542 1	0.970 9	1.098 9	0.730 6	1.52
	1：3		y=0.285 7 x+0.542 3	0.994 1	1.005 0	0.711 1	1.41

当丙硫菌唑与咯菌腈按3：1、2：1、1：1、1：2和1：3进行配比时，除1：3配比对水稻纹枯病菌的联合毒力较低，SR值小于0.5，表现拮抗作用外，其他配比对水稻、小麦纹枯病菌均表现相加作用(表7)。

3 讨 论

一般情况下，杀菌剂的复配主要是将不同类型

不同作用方式、不同作用机理、不同作用时效、作用于病菌不同生化位点或生长阶段的杀菌剂进行复配，同类型的杀菌剂一般不用来进行复配^[10-11]。丙硫菌唑和戊唑醇、氟环唑均属于三唑类杀菌剂，但传统的三唑类杀菌剂相比，丙硫菌唑为一种新型的三唑硫酮类杀菌剂，其有更长的持效期、更广的杀菌谱，且具有良好的保绿防衰效果^[1,12]。

表 7 丙硫菌唑与咯菌腈不同配比对水稻、小麦纹枯病菌的联合毒力

杀菌剂	配比	病原菌	毒力回归方程	相关系数	EC ₅₀ (th)/(μg·mL ⁻¹)	EC ₅₀ (ob)/(μg·mL ⁻¹)	SR 值
丙硫菌唑：咯菌腈	3：1	水稻纹枯病菌	y=0.368 7 x+0.757 0	0.973 8	0.142 5	0.200 9	0.71
	2：1		y=0.355 4 x+0.809 0	0.993 2	0.110 5	0.135 1	0.82
	1：1		y=0.3488 x+0.831 0	0.954 4	0.076 2	0.112 5	0.68
	1：2		y=0.3588 x+0.906 0	0.992 9	0.058 2	0.073 9	0.79
	1：3		y=0.4186 x+0.900 0	0.959 2	0.052 0	0.110 8	0.47
	3：1	小麦纹枯病菌	y=0.4755 x+0.648 7	0.976 1	0.389 2	0.486 7	0.79
	2：1		y=0.494 9 x+0.749 1	0.993 3	0.303 1	0.313 8	0.96
	1：1		y=0.469 7 x+0.777 5	0.996 7	0.210 2	0.256 5	0.82
	1：2		y=0.391 4 x+0.795 3	0.988 2	0.160 8	0.176 0	0.91
	1：3		y=0.445 8 x+0.862 6	0.996 5	0.146 0	0.156 3	0.93

三唑类杀菌剂主要通过抑制真菌细胞色素 P450 甾醇 14α-甲基化酶(CYP51)活性,从而抑制甾醇的生物合成^[13],但丙硫菌唑与真菌 CYP51 的作用与其他三唑类杀菌剂不同。氟环唑、戊唑醇和三唑醇与禾生球腔菌的 MgCYP51 结合均有经典的特征峰,即形成低自旋的 6 配基复合物,而丙硫菌唑与 MgCYP51 结合则有不同的吸收峰,且丙硫菌唑与 MgCYP51 的结合能力比氟环唑与 MgCYP51 的结合能力低 800 倍,属于与底物结合的竞争性抑制剂^[14-15]。分子中电子的量子理论分析结果亦显示,丙硫菌唑的三唑类代谢物硫酮菌唑与 CYP51 的结合力要显著强于丙硫菌唑^[16]。因此,将丙硫菌唑与其他三唑类杀菌剂复配,在一定程度上可以扩大药剂的杀菌谱和提高药剂的杀菌效果。将之与三唑类杀菌剂戊唑醇、氟环唑复配后,在适当配比下也确有增效作用,特别是当丙硫菌唑与氟环唑按 1：2 复配后,复配剂对小麦纹枯病菌的联合毒力的 SR 值达 6.69,远高于其他配比。

噻唑酰胺、吡唑醚菌酯和咯菌腈分别属于噻唑酰胺类、甲氧基丙烯酸酯类和苯基吡咯类杀菌剂,其作用机理分别为抑制三羧酸循环中的琥珀酸脱氢酶、抑制细胞色素 b 和 c1 之间的电子传递,以及抑制与葡萄糖磷酸化有关的电子转移^[17-18]。因作用机理不同,丙硫菌唑与这些药剂复配后,可提高其抑菌效果、扩大抑菌谱、延缓病菌抗药性的产生,且丙硫菌唑与这些杀菌剂复配后,除丙硫菌唑：咯菌腈(1：3)有轻微拮抗作用外,其他配比均为相加或增效作用,说明将丙硫菌唑与上述几种药剂进行复配,有进一步研发成新配方复配剂的潜力,可为田间水稻、小麦纹枯病的防治提供更多的药剂选择。

参考文献

[1] 张爱萍,李勇. 新型三唑硫酮类杀菌剂丙硫菌唑的研究进展[J].

[2] Mill N F, STANDISH J, QUESADE-OCAMPO L M. Sensitivity of *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum* to prothioconazole and pydiflumetofen *in vitro* and efficacy for fusarium wilt management in watermelon[J]. Plant Health Progress, 2020, 21(1): 13-18.

[3] LIMAY-RIOS V, SCHAAFSMA A W. Effect of prothioconazole application timing on *Fusarium* mycotoxin content in maize grain [J].Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66 (19): 4809-4819.

[4] HAIDUKOWSKI M, VISCONTI A, PERRONE G, et al. Effect of prothioconazole-base fungicides on Fusarium head blight, grain yield and deoxynivalenol accumulation in wheat under field conditions[J]. Phytopathologia Mediterranea, 2012, 51(1): 236-246.

[5] PETKAR A, LANGSTON D B, BUCK J W, et al. Sensitivity of *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum* to prothioconazole and thiophanate-methyl and gene mutation conferring resistance to thiophanate-methyl[J]. Plant Disease, 2017, 101(2): 366-371.

[6] CULBREATH A K, KEMERAIT R C, BRENNEMAN T. Management of leaf spot disease of peanut with prothioconazole applied alone or in combination with tebuconazole or trifloxystrobin [J]. Peanut Science, 2008, 35(2): 149-158.

[7] 王斌,赵杰,司乃国,等. 烯肟菌酯与丙硫菌唑混配在防治禾谷类作物病害上的应用[J]. 农药, 2017, 56(3): 231-234.

[8] FERRIGO D, MONDIN M, SCOPEL C, et al. Effects of a prothioconazole- and tebuconazole-based fungicide on *Aspergillus flavus* development under laboratory and field conditions[J]. European Journal of Plant Pathology, 2019, 155: 151-161.

[9] AMMERMAN E, STIERL R, LORENZ G, et al. Fungicidal mixtures based on prothioconazole: US, 9179677 [P]. 2003-02-26.

[10] 赵留记,赵卫. 农药混配与产品质量规范[J]. 河南科技, 1996, 2: 14.

[11] 毕秋艳,马志强. 杀菌剂复配存在的主要问题及发展趋势[J]. 河北农业科学, 2010, 14(8): 64-66.

[12] 张茂九. 防治小麦赤霉病新药成分之丙硫菌唑综述[J]. 农药市场信息, 2019, 7: 6-9.

[13] 钱恒伟,迟梦宇,赵颖,等. 禾谷镰刀菌 CYP51A 基因对五种三唑类杀菌剂敏感性的影响[J]. 植物保护学报, 2018, 45(6): 1381-1388.

[14] PARKER J E, WARRILOW A G S, COOLS H J, et al. Mechanism of binding of prothioconazole of *Mycosphaerella graminicola*

参考文献

- [1] 毛勇, 谭志琼, 阮云泽, 等. 豇豆茎基腐烂病原鉴定及其生物学特性[J]. 中国农学通报, 2011(16): 172-175.
- [2] FAJOLA A O, ALASOADURA S O. Antagonistic effects of *Trichoderma harzianum* on *Pythium aphanidermatum* causing the damping-off disease of tobacco in Nigeria[J]. Mycopathologia, 1975, 57(1): 47-52.
- [3] HARMAN G E, BRAVERMAN S W, WATERS E C. *Pythium aphanidermatum* seedborne on squash: a cause of seed and seedling rot[J]. Journal of Seed Technology, 1976, 1(1): 55-59.
- [4] BOLTON A T. Sudden wilting of poinsettia (*Euphorbia pulcherrima*) caused by *Pythium aphanidermatum*[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1978, 58(2): 569-570.
- [5] MOTOAKI T, SHOHEI M, MOTOKI T, et al. Morphological and molecular identification of *Pythium aphanidermatum* causing root rot of tomato in a hydroponic substrate culture in the south western region of Japan[J]. Annual Report of The Kansai Plant Protection Society, 2013, 55: 57.
- [6] HERRERO M L, HERMANSEN A, ELEN O N. Occurrence of *Pythium* spp. and *Phytophthora* spp. in norwegian greenhouses and their pathogenicity on cucumber seedlings[J]. Journal of Phytopathology, 2003, 151(1): 36-41.
- [7] ZHANG R Y, TAN Z Q, CHENG S Y. First report of leaf rot caused by *Fusarium oxysporum* and *Pythium aphanidermatum* on *Aechmea fasciata* in Hainan province, China[J]. Plant Disease, 2003, 87(5): 599.
- [8] KOJI T, MOTOAKI T, HIROTAKA D. Pythium rot of chingensai (*Brassica campestris* L. chinensis group) caused by *Pythium ultimum* var. *ultimum* and *Pythium aphanidermatum*[J]. Journal of General Plant Pathology, 2004, 71: 188-191.
- [9] TOJO M, SHIGEMATSU T, MORITA H, et al. Pythium rot of Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. subsp. *pekinensis*) caused by *Pythium aphanidermatum*[J]. Journal of General Plant Pathology, 2005, 71: 384-386.
- [10] SERRANO Y, GUIRADO M L, CARMONA M P. First report of root and crown necrosis of bean caused by *Pythium aphanidermatum* in Spain[J]. Plant Disease, 2008, 92(1): 174.
- [11] 杨翠云, 胡亚萍, 李春华. 上海地区一品红根腐病原菌和药剂筛选研究[J]. 上海农业学报, 2003, 3: 87-89.
- [12] 陈志敏, 吴昊鑫, 曾慧芳, 等. 烟田瓜果腐霉的分离鉴定及其拮抗木霉菌株的筛选[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2009, 1: 11-15.
- [13] PUNJA Z K, YIP R. Biological control of damping-off and root rot caused by *Pythium aphanidermatum* on greenhouse cucumbers[J]. Canadian Journal of Plant Pathology, 2003, 25(4): 411-417.
- [14] WANG S Y, NG T B, CHEN T B, et al. First report of a novel plant lysozyme with both antifungal and antibacterial activities[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2005, 327(3): 820-827.
- [15] ABBASI P A, LAZAROVITS G. Seed treatment with phosphonate (AG3) suppresses pythium damping-off of cucumber seedlings[J]. Plant Disease, 2006, 90(4): 459-464.
- [16] MUTHUKUMAR A, ESWARAN A, NAKKEERAN S, et al. Efficacy of plant extracts and biocontrol agents against *Pythium aphanidermatum* inciting chilli damping-off[J]. Crop Protection, 2010, 29(12): 1483-1488.
- [17] ZOUARI I, JLAIEL L, TOUNSI S, et al. Biocontrol activity of the endophytic *Bacillus amyloliquefaciens* strain CEIZ-11 against *Pythium aphanidermatum* and purification of its bioactive compounds[J]. Biological Control, 2016, 100: 54-62.
- [18] 李良孔, 袁善奎, 严清平, 等. 辛菌胺对15种植物病原菌的离体抗菌活性研究[J]. 农药科学与管理, 2010, 7: 32-34.
- [19] 何永新. 1.8%辛菌胺醋酸盐等4种药剂防治柑橘溃疡病药效试验[J]. 南方园艺, 2017, 2: 31-32.
- [20] 张磊, 吕坤. 1.8%辛菌胺醋酸盐水剂防治辣椒病毒病田间药效试验[J]. 湖北植保, 2012, 5: 10-11.
- [21] 吴永官, 陆少峰, 黄思良, 等. 华南地区瓜类疫霉对甲霜灵的田间抗性[J]. 微生物学报, 2011, 51: 1078-1086.
- [22] REUVENI M, EYAL H, COHEN Y. Development of resistance to metalaxyl in *Pseudoperonospora cubensis*[J]. Plant Disease, 1980, 64: 1108-1109.
- [23] BRUCK R, GOODING G V, MAIN C E. Evidence of resistance to metalaxyl in isolates of *Peronospora tabacina*[J]. Plant Disease, 1981, 71: 558.
- [24] CRUTE I, HARRISON J M. Studies on the inheritance of resistance to metalaxyl in *Bremia lactucae* and on the stability and fitness of field isolates[J]. Plant Pathology, 1988, 37: 231-250.
- [25] DARVAS J M, BECKER O. Failure to control *Phytophthora cinnamomic* and *Pythium splendens* with metalaxyl after its prolonged use[J]. Citrus and Subtropical Fruit Journal, 1984, 603: 9-11.
- [26] LOCKE T, SCRACE J, PEACE J M. Resistance of *Phytophthora porri* to metalaxyl[J]. Pesticide Science, 1997, 51: 371-374.
- [27] SANDERS P L, SOIKA M D. Metalaxyl resistance frequency in overwintering populations of *Pythium aphanidermatum* from metalaxyl control failure sites[J]. Phytopathology, 1988, 78: 1510.

(责任编辑:徐娟)

(上接第 60 页)

CYP51 differs from that of other azole antifungals[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, 77(4): 1460-1465.

- [15] FAN J R, URBAN M, PARKER J E, et al. Characterization of the sterol 14 α -demethylases of *Fusarium graminearum* identifies a novel genus-specific CYP51 function[J]. New Phytologist, 2013, 198: 821-835.

(16) BECK M E, NEGRONI J, MATTHIJSSEN S, et al. A binding mode hypothesis for prothioconazole binding to CYP51 derived from first principles quantum chemistry[J]. Journal of Computer-Aided Molecular Design, 2021, 35: 493-503.

[17] 朱致翔. 七种呼吸抑制剂类杀菌剂生物活性比较[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.

- [18] 闫潇敏, 宁斌科, 王列平, 等. 新型杀菌剂氟啶菌腈及其研究开发进展[J]. 世界农药, 2010, 32(3): 36-38.

(责任编辑:高蕾)