

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0335

高鹏, 刘琳, 刘昀鑫, 魏江铭, 李瑶, 赵祥. 不同作用机制杀菌剂对燕麦炭疽病菌的室内毒力测定. 草业科学, 2021, 38(9): 1737-1744.

GAO P, LIU L, LIU Y X, WEI J M, LI Y, ZHAO Y. Toxicity testing of different fungicides for *Colletotrichum cereale* on oat anthracnose. Pratacultural Science, 2021, 38(9): 1737-1744.

## 不同作用机制杀菌剂对燕麦炭疽病菌的 室内毒力测定

高 鹏, 刘 琳, 刘 昀 鑫, 魏 江 铭, 李 瑶, 赵 祥

(山西农业大学草业学院, 山西 太谷 030801)

**摘要:** 禾谷炭疽菌 (*Colletotrichum cereale*) 引致的炭疽病是山西晋北地区燕麦 (*Avena sativa*) 生产的主要限制因素, 但目前尚未开展化学杀菌剂防治燕麦炭疽病的研究。为明确不同作用机制杀菌剂对燕麦炭疽病菌的抑制效果, 本研究选取 6 类 10 种杀菌剂, 使用菌丝生长速率法和液滴法对其抑菌效果进行测定。结果表明: 多菌灵 50% 可湿性粉剂、丙环唑 25% 乳油、啮菌酯 25% 悬浮剂和吡唑醚菌酯 25% 悬浮剂对禾谷炭疽菌菌丝生长的抑制作用较强, 有效中浓度 (EC<sub>50</sub>) 分别为 0.092 1、0.877 4、0.118 0 和 0.002 9 mg·L<sup>-1</sup>; 百菌清 75% 可湿性粉剂、多菌灵 50% 可湿性粉剂、啮菌酯 25% 悬浮剂和吡唑醚菌酯 25% 悬浮剂对禾谷炭疽菌孢子萌发具有较好的抑制效果, 其中百菌清 75% 可湿性粉剂浓度 ≥ 0.80 mg·L<sup>-1</sup> 时, 孢子萌发抑制率均为 100%, 多菌灵 50% 可湿性粉剂、啮菌酯 25% 悬浮剂和吡唑醚菌酯 25% 悬浮剂的 EC<sub>50</sub> 分别为 0.112 4、0.118 4 和 0.005 9 mg·L<sup>-1</sup>。根据作用机制的不同, 建议百菌清 75% 可湿性粉剂在炭疽病发生前作为保护性杀菌剂使用, 多菌灵 50% 可湿性粉剂、啮菌酯 25% 悬浮剂和吡唑醚菌酯 25% 悬浮剂作为保护和治疗性杀菌剂使用。此外, 生产者应及时轮换采用不同作用机制的化学杀菌剂防控病害, 同时改善种植条件, 引进和选育抗病品种, 保证燕麦的可持续生产。

**关键词:** 燕麦; 炭疽病; 杀菌剂; 作用机制; 抑菌效果; 有效中浓度; 化学防治

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2021)09-1737-08

### Toxicity testing of different fungicides for *Colletotrichum cereale* on oat anthracnose

GAO Peng, LIU Lin, LIU Yunxin, WEI Jiangming, LI Yao, ZHAO Xiang

(College of Grassland Science, Shanxi Agricultural University, Taigu, 030801, Shanxi, China)

**Abstract:** Anthracnose caused by *Colletotrichum cereale* is the main limiting factor in the production of oats (*Avena sativa*) in the northern Shanxi Province; however, no research has been carried out on the prevention and control of oat anthracnose using chemical fungicides. To clarify the inhibitory effects of fungicides with different mechanisms of action on oat anthracnose, 10 fungicides from six categories were selected and studied, and their antifungal effects were measured using the hyphae growth rate method and the droplet method. The results showed that carbendazim (50% wettable powder, WP), propiconazole (50% WP), azoxystrobin (25% suspension concentrates, SC), and pyraclostrobin (25% SC) had strong inhibitory effects on the growth of *C. cereale* hyphae, with EC<sub>50</sub> (50% effective concentration) values of 0.092 1, 0.877 4, 0.118 0, and 0.002 9 mg·L<sup>-1</sup>, respectively. Chlorothalonil (75% WP), carbendazim (50% WP), azoxystrobin (25% SC), and pyraclostrobin (25% SC) had a strong inhibitory effect on the germination of *C. cereale* spores. For chlorothalonil (75%

收稿日期: 2021-05-29 接受日期: 2021-07-28

基金项目: 山西省重点研发项目 (201903D211012); 山西农业大学科技创新基金项目 (2018YJ37)

通信作者: 高鹏 (1986-), 男, 甘肃渭源人, 讲师, 博士, 研究方向为牧草病理学。E-mail: zyjt\_721@163.com

WP), when the concentration was  $\geq 0.80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , the spore germination inhibition rate was 100%, and the  $\text{EC}_{50}$  of carbendazim (50% WP), azoxystrobin (25% SC), and pyraclostrobin (25% SC) were 0.1124, 0.1184, and  $0.0059 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Based on the different mechanisms of action, it is recommended that chlorothalonil (75% WP) be used as a protective fungicide before anthracnose occurs, whereas carbendazim (50% WP), azoxystrobin (25% SC), and pyraclostrobin (25% SC) should be used as protective and therapeutic fungicides. In addition, producers should promptly rotate chemical fungicides with different mechanisms of action to prevent and control diseases, improve planting conditions, introduce and select disease-resistant varieties, and ensure the sustainable production of oats.

**Keywords:** *Avena sativa*; *Colletotrichum cereale*; fungicide; mechanism; inhibitory effect;  $\text{EC}_{50}$ ; chemical control

**Corresponding author:** GAO Peng E-mail: [zyjt\\_721@163.com](mailto:zyjt_721@163.com)

燕麦 (*Avena sativa*) 是世界范围内广泛种植的粮饲兼用植物。随着我国推动粮经饲统筹和草牧业的快速发展, 燕麦种植面积逐年扩大, 但病害问题成为限制其生产的瓶颈<sup>[1]</sup>。山西晋北地区是我国饲用燕麦的主产区之一, 2018 – 2020年, 本研究通过对该地区燕麦病害调查发现, 由禾谷炭疽菌 (*Colletotrichum cereale*) 引致的炭疽病呈现持续暴发流行的特点, 病田率和病株率高达 100%, 导致大量叶片枯黄, 严重时引起植株早衰, 造成严重减产<sup>[2-3]</sup>。

炭疽菌属 (*Colletotrichum*) 亦称刺盘孢属, 为半知菌类真菌, 其无性态可产生大量直或弯曲的分生孢子。目前已发现部分种的有性态为子囊菌门 (Ascomycota) 小丛壳科 (Glomerellaceae) 小丛壳属 (*Glomerella*) 真菌<sup>[4]</sup>。禾谷炭疽菌的分生孢子呈镰刀形, 次生分生孢子部分变直, 其有性态尚不清楚。在大于 90% 的空气湿度或水滴中, 分生孢子可萌发产生黑褐色、卵圆形或近圆形的附着胞<sup>[2]</sup>, 然后发展形成侵染钉侵入寄主角质层或皮层, 通过初生菌丝和次生菌丝在寄主叶肉细胞内扩展, 同时分泌细胞壁降解酶, 杀死寄主细胞获取营养, 最后在叶表产生分生孢子盘和分生孢子, 借助风雨进行侵染循环<sup>[5-6]</sup>。

禾谷炭疽菌引致的炭疽病是燕麦的主要病害之一, 除山西省, 在美国、巴西和加拿大以及中国的内蒙古自治区和甘肃省等燕麦主产区均有报道<sup>[1, 7]</sup>。传统控制植物病害的方法包括抗病品种选育、生物防治、改善农业措施和化学防治等。不同防治方法各有利弊, 化学防治具有见效快、防效显著、操作简便和成本较低等特点, 但也容易使病原菌产生抗药性, 对环境和食品安全造成一定危害<sup>[8]</sup>。因此, 掌握杀菌剂的安全用药方法, 科学、合理地选择多种作

用机制的杀菌剂, 是有效防治病害的关键<sup>[9]</sup>。

19 世纪七八十年代, 铜制剂和硫磺等无机和金属类杀菌剂问世以来, 取代苯类、二硫代氨基甲酸酯类、苯并咪唑类、三唑类、甲氧基丙烯酸酯类和酰胺类等不同作用机制的有机杀菌剂相继创制<sup>[10]</sup>, 在防控作物病害、提高全球作物产量、改善人类食品安全和健康状况等方面发挥重要作用<sup>[8]</sup>。但目前尚未见对燕麦产区炭疽病采取防治措施, 和关于化学杀菌剂防治燕麦炭疽病的相关报道。鉴于此, 本研究通过前期试验初步分析了 7 大类 12 种杀菌剂对禾谷炭疽菌的抑菌效果, 发现除腐霉利和异菌脲等酰胺类杀菌剂外, 其余 6 大类 10 种杀菌剂均有显著防效, 本研究将进一步对其抑制菌落生长和孢子萌发的效果进行测定, 以期筛选出不同作用机制的高效低毒杀菌剂, 为燕麦炭疽病的田间防治提供理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验材料

供试培养基和菌种: 马铃薯葡萄糖琼脂 (potato dextrose agar, PDA) 培养基, 马铃薯 200 g、葡萄糖 20 g、琼脂粉 17 g, 蒸馏水定容到 1 L。禾谷炭疽菌菌种分离自山西省大同市天镇县的燕麦炭疽病病株, 使用单孢分离法纯化后于 4 °C 冰箱中保存, 菌落及分生孢子萌发特征如图 1 所示。在 PDA 培养基上活化 30 皿并置于 23 °C 培养箱中黑暗培养 7 d, 用于接种和制备孢子悬浮液。

供试杀菌剂: 供试的 10 种杀菌剂均为农资市场购买, 杀菌剂类型根据杀菌剂抗性行动委员会 (FRAC) 2010 年分类目认定<sup>[11]</sup>, 各杀菌剂的剂型、类型、生产厂家如表 1 所列。

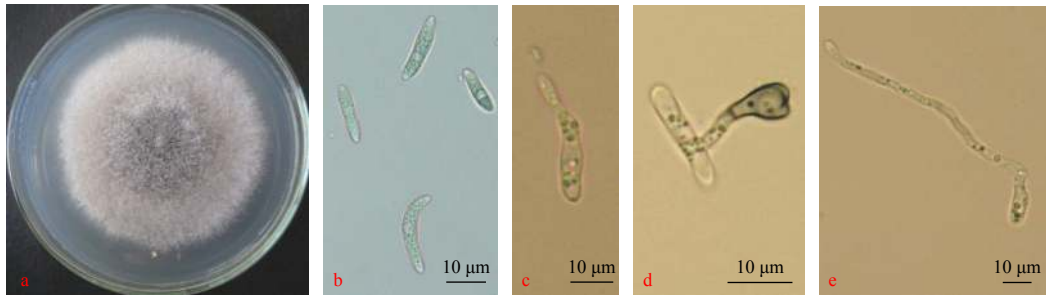


图 1 燕麦炭疽病菌菌落 (a)、分生孢子 (b)、芽管 (c)、附着胞 (d) 和菌丝 (e)  
 Figure 1 The colony (a), conidium (b), germ tube (c), appressorium (d), and hypha (e) of *Colletotrichum cereale* on oat anthracnose

表 1 供试杀菌剂的基本信息  
 Table 1 Information on the fungicides used in this study

杀菌剂 Fungicide	剂型 Formulation	类型 Type	生产厂家 Manufacturer
百菌清 Chlorothalonil	75%可湿性粉剂 75% WP	取代苯基类 Substituted phenyls	利民化工 Limin
代森锰锌 Mancozeb	80%可湿性粉剂 80% WP	二硫代氨基甲酸类 Aminodithioformic acid	济南一农 Jinan Yinong
福美双 Thiram	50%可湿性粉剂 50% WP		河北赞峰 Hebei Zanfeng
多菌灵 Carbendazim	50%可湿性粉剂 50% WP	苯并咪唑类 Benzimidazoles	江苏三山 jiangsu Sanshan
甲基硫菌灵 Thiophanate-methyl	70%可湿性粉剂 70% WP		济南泰禾 Jinan Taihe
溴菌晴 Bromothalonil	25%可湿性粉剂 25% WP	其他有机杀菌剂 Other types	江苏托球 Jiangsu Tuoqiu
戊唑醇 Tebuconazole	43%悬浮剂 43% SC	三唑类 Triazoles	拜耳(中国) Bayer
丙环唑 Propiconazole	25%乳油 25% EC		潍坊双星 Weifang Shuangxing
嘧菌酯 Azoxystrobin	25%悬浮剂 25% SC	甲氧基丙烯酸酯类 Methyl 3-methoxyacrylate	先正达(苏州) Syngenta
吡唑醚菌酯 Pyraclostrobin	25%悬浮剂 25% SC		河北中保绿农 Hebei Green Agricultural

WP: 可湿性粉剂; SC: 悬浮剂; EC: 乳油; 下表同。

WP: wettable powder; SC: suspension concentrates; EC: emulsifiable concentrates; this is applicable for the following tables as well.

分别采用菌丝生长速率法和液滴法, 在预试验的基础上, 确定各杀菌剂抑制菌丝生长和孢子萌发的供试浓度, 每种杀菌剂设置 5 个梯度供试浓度 (表 2)。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 含药培养基的制备

在超净工作台中, 使用微量电子天平或移液器称量对应质量或体积的杀菌剂放入灭菌锥形瓶中, 使用灭菌量筒量取无菌水, 将各杀菌剂配制成最大供试浓度的 10 倍液, 然后将 10 倍液依次按 1/2 倍稀释, 获得供试浓度的 10 倍液。充分摇晃锥形瓶, 使药剂混匀。使用灭菌移液器分别量取 1 mL 供试浓度的 10 倍液加入 9 mL 约 50 °C 的 PDA 培养基中充

分混匀。每个浓度设 4 个重复, 以等量无菌水处理作为对照。

### 1.2.2 接种和菌落测量

用直径为 5 mm 的打孔器在培养 7 d 的禾谷炭疽菌菌落边缘打孔, 菌丝一面向下放置在制备好的含药培养基中央, 每皿接种一个菌饼, 置于 23 °C 恒温黑暗培养箱中培养。培养至第 6 天时, 采用交叉法测量菌落直径, 计算菌丝生长抑制率。

菌丝生长抑制率 = [(对照菌落直径 - 处理菌落直径) / (对照菌落直径 - 菌饼直径)] × 100%。

### 1.2.3 孢子悬浮液的制备

选择培养 7 d 的禾谷炭疽菌菌落, 用灭菌毛笔将培养基表面的菌丝轻轻刮下, 无菌水冲洗 3 次,

表2 供试杀菌剂抑制菌丝生长和孢子萌发的梯度供试浓度  
**Table 2 Fungicide concentrations for sensitivity assays with mycelial growth and spore germination of *Colletotrichum cereale* on oat anthracnose**

杀菌剂 Fungicide	抑制菌丝生长的梯度供试浓度 Concentrations for sensitivity assays of mycelial growth/(mg·L <sup>-1</sup> )	抑制孢子萌发的梯度供试浓度 Concentrations for sensitivity assays of spore germination/(mg·L <sup>-1</sup> )
百菌清75%可湿性粉剂 Chlorothalonil 75% WP	0.800 0、1.600 0、3.200 0、6.400 0、12.800 0	0.050 0~12.800 0
代森锰锌80%可湿性粉剂 Mancozeb 80% WP	1.000 0、2.000 0、4.000 0、8.000 0、16.000 0	1.000 0、2.000 0、4.000 0、8.000 0、10.000 0
福美双50%可湿性粉剂 Thiram 50% WP	4.000 0、8.000 0、16.000 0、32.000 0、64.000 0	0.125 0、0.250 0、0.500 0、1.000 0、2.000 0
多菌灵50%可湿性粉剂 Carbendazim 50% WP	0.040 0、0.080 0、0.160 0、0.320 0、0.640 0	0.040 0、0.080 0、0.160 0、0.320 0、0.640 0
甲基硫菌灵70%可湿性粉剂 Thiophanate-methyl 70% WP	0.800 0、1.600 0、3.200 0、6.400 0、12.800 0	0.800 0、1.600 0、3.200 0、6.400 0、12.800 0
溴菌晴25%可湿性粉剂 Bromothalonil 25% WP	1.200 0、2.400 0、4.800 0、9.600 0、19.200 0	0.300 0、0.600 0、1.200 0、2.400 0、4.800 0
戊唑醇43%悬浮剂 Tebuconazole 43% SC	0.028 8、0.057 6、0.115 2、0.230 4、0.460 8	0.028 8~8.000 0
丙环唑25%乳油 Propiconazole 25% EC	0.028 8、0.057 6、0.115 2、0.230 4、0.460 8	0.028 8~8.000 0
啞菌酯25%悬浮剂 Azoxystrobin 25% SC	0.008 0、0.016 0、0.032 0、0.064 0、0.128 0	0.016 0、0.032 0、0.064 0、0.128 0、0.256 0
吡唑醚菌酯25%悬浮剂 Pyraclostrobin 25% SC	0.003 6、0.007 2、0.014 4、0.028 8、0.057 6	0.003 6、0.007 2、0.014 4、0.028 8、0.057 6

5层无菌纱布过滤,用血球计数器将孢子浓度调至 $1 \times 10^5$ 个·mL<sup>-1</sup>。

#### 1.2.4 孢子萌发的测量

将长×宽×高为7.5 cm×2.5 cm×0.5 cm、中央凹孔直径1.6 cm、深度0.2 cm的灭菌单凹载玻片放入底部平铺2张灭菌滤纸,并放入用5 mL无菌水浸透的培养皿中。使用灭菌移液器吸取0.09 mL孢子悬浮液和0.01 mL供试浓度的10倍液,置于单凹载玻片凹槽中充分混匀,将培养皿封口并置于23℃培养箱中黑暗培养。在培养12 h时,在显微镜下观察分生孢子的萌发情况。随机观察100个孢子,统计萌发的孢子总数,当芽管或菌丝长度超过孢子直径的1/2,或产生附着胞时视为萌发(图1)。计算孢子萌发率和孢子萌发抑制率。每个浓度设4个重复,以等量无菌水处理作为对照。

孢子萌发率=(萌发的孢子数/孢子总数)×100%;

孢子萌发抑制率=[(对照孢子萌发率-处理孢子萌发率)/对照孢子萌发率]×100%;

#### 1.3 统计分析

采用SPSS 23.0进行数据统计分析。将抑制率转换为机率值,以各杀菌剂供试浓度的对数为自变量,对应的抑制率机率值为因变量,进行线性回归,获得毒力回归方程并计算有效中浓度(EC<sub>50</sub>)。使用每种杀菌剂的毒力回归方程计算抑制率实测值对应的预测值,并进行 $\chi^2$ 检验,获得相关参数,评估实测值和预测值之间的差异显著性。

## 2 结果与分析

6大类10种杀菌剂对燕麦炭疽病菌菌丝生长均有一定抑制作用,通过对毒力回归方程进行拟合,经 $\chi^2$ 检验,发现抑制率的预测值和实测值之间差异显著( $P > 0.05$ ),因此对EC<sub>50</sub>的估测值具有统计学意义。其中,50%多菌灵可湿性粉剂、25%丙环唑乳油、25%啞菌酯悬浮剂和25%吡唑醚菌酯悬浮剂对禾谷炭疽病菌菌丝生长的抑制作用最强,EC<sub>50</sub>分别为0.092 1、0.877 4、0.118 0和0.002 9 mg·L<sup>-1</sup>;70%甲基

硫菌灵可湿性粉剂、75% 百菌清可湿性粉剂和 43% 戊唑醇悬浮剂的抑制作用次之,  $EC_{50}$  分别为 1.755 1、2.576 9 和 1.537 1  $mg \cdot L^{-1}$ ; 80% 代森锰锌可湿性粉剂、50% 福美双可湿性粉剂和 25% 溴菌晴可湿性粉剂的抑制作用较弱,  $EC_{50}$  分别为 10.690 5、4.753 4 和 5.628 6  $mg \cdot L^{-1}$  (表 3)。

当 75% 百菌清可湿性粉剂浓度大于 0.800 0  $mg \cdot L^{-1}$  时, 孢子萌发抑制率均为 100%; 小于 0.800 0  $mg \cdot L^{-1}$  时, 对孢子萌发无显著抑制作用。43% 戊唑醇悬浮剂和 25% 丙环唑乳油对孢子萌发均无显著抑制作用。对其余 7 种杀菌剂的毒力回归方程进行拟合,

经  $\chi^2$  检验, 所得抑菌率的预测值和实测值之间差异显著 ( $P > 0.05$ ), 因此对  $EC_{50}$  的估测值具有统计学意义。其中, 50% 多菌灵可湿性粉剂、25% 啉菌酯悬浮剂和 25% 吡唑醚菌酯悬浮剂对禾谷炭疽菌孢子萌发的抑制作用最强,  $EC_{50}$  分别为 0.112 4、0.118 4 和 0.005 9  $mg \cdot L^{-1}$ ; 80% 代森锰锌可湿性粉剂和 50% 福美双可湿性粉剂的抑制作用次之,  $EC_{50}$  分别为 0.755 3 和 0.792 9  $mg \cdot L^{-1}$ ; 70% 甲基硫菌灵可湿性粉剂和 25% 溴菌晴可湿性粉剂的抑制作用较弱,  $EC_{50}$  分别为 3.188 6 和 2.185 8  $mg \cdot L^{-1}$  (表 4)。

表 3 不同类型杀菌剂对燕麦炭疽病菌菌丝生长的毒力测定

Table 3 Indoor toxicity tests of various fungicides against mycelial growth of *Colletotrichum cereale* on oat anthracnose

杀菌剂 Fungicide	斜率 ± 标准误 Slope ± SE	$EC_{50}/$ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	卡方值 Chi-square value	<i>P</i>
百菌清75%可湿性粉剂 Chlorothalonil 75% WP	1.286 5 ± 0.169 7	2.576 9	0.058 3	0.999 6
代森锰锌80%可湿性粉剂 Mancozeb 80% WP	1.162 0 ± 0.083 5	10.690 5	0.061 6	0.999 5
福美双50%可湿性粉剂 Thiram 50% WP	1.651 3 ± 0.135 3	4.753 4	0.073 5	0.999 3
多菌灵50%可湿性粉剂 Carbendazim 50% WP	2.020 9 ± 0.215 5	0.092 1	0.128 4	0.998 0
甲基硫菌灵70%可湿性粉剂 Thiophanate-methyl 70% WP	1.959 8 ± 0.130 8	1.755 1	0.119 3	0.998 3
溴菌晴25%可湿性粉剂 Bromothalonil 25% WP	1.335 0 ± 0.048 1	5.628 6	0.068 6	0.999 4
戊唑醇43%悬浮剂 Tebuconazole 43% SC	0.888 2 ± 0.145 8	1.537 1	0.039 8	0.999 8
丙环唑25%乳油 Propiconazole 25% EC	1.147 0 ± 0.100 5	0.877 4	0.064 9	0.999 5
啉菌酯25%悬浮剂 Azoxystrobin 25% SC	0.879 2 ± 0.035 4	0.118 0	0.031 2	0.999 9
吡唑醚菌酯25%悬浮剂 Pyraclostrobin 25% SC	0.921 8 ± 0.087 3	0.002 9	0.885 1	0.999 9

表 4 不同类型杀菌剂对燕麦炭疽病菌孢子萌发的毒力测定

Table 4 Indoor toxicity tests of various fungicides against spore germination of *Colletotrichum cereale* on oat anthracnose

杀菌剂 Fungicide	斜率 ± 标准误 Slope ± SE	$EC_{50}/$ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	卡方值 Chi-square value	<i>P</i>
代森锰锌80%可湿性粉剂 Mancozeb 80% WP	2.186 4 ± 0.332 3	0.755 3	0.083 5	0.999 2
福美双50%可湿性粉剂 Thiram 50% WP	1.661 0 ± 0.134 4	0.792 9	0.119 5	0.998 3
多菌灵50%可湿性粉剂 Carbendazim 50% WP	1.405 4 ± 0.196 2	0.112 4	0.067 3	0.999 4
甲基硫菌灵70%可湿性粉剂 Thiophanate-methyl 70% WP	1.138 3 ± 0.188 1	3.188 6	0.047 7	0.999 7
溴菌晴25%可湿性粉剂 Bromothalonil 25% WP	1.223 7 ± 0.114 9	2.185 8	0.063 3	0.999 5
啉菌酯25%悬浮剂 Azoxystrobin 25% SC	1.079 8 ± 0.181 9	0.118 4	0.048 4	0.999 7
吡唑醚菌酯25%悬浮剂 Pyraclostrobin 5% SC	1.199 6 ± 0.136 0	0.005 9	0.056 6	0.999 6

### 3 讨论

百菌清通过抑制病原菌胞内三磷酸甘油醛脱氢酶 (glyceraldehyde 3-phosphate) 的活性, 导致谷胱甘肽 (glutathione) 及下游蛋白的合成受阻<sup>[12]</sup>。代森锰

锌和福美双则对含有巯基 (-SH) 或含有金属的酶活性具有抑制作用<sup>[13]</sup>。这 3 种杀菌剂均具有多位点接触活性且产生耐药性风险较低等优点, 是作物和经济植物病害防治中普遍使用的保护性杀菌剂<sup>[14]</sup>。本



研究表明,百菌清、代森锰锌和福美双均对燕麦炭疽病菌菌丝生长有显著抑制作用,其中百菌清的 $EC_{50}$ 最低,为 $2.5769\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,且远低于对胶孢炭疽菌(*Colletotrichum gloeosporioides*)和尖孢炭疽菌(*Colletotrichum acutatum*)的 $EC_{50}$ ( $173.3410$ 、 $151.4410\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[15]</sup>。但作为保护性杀菌剂,更需要关注对孢子萌发的抑制效果<sup>[13]</sup>。本研究未得到百菌清浓度和孢子萌发抑制率的回归方程,但发现当有效浓度 $\geq 0.8000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,对孢子萌发的抑制率达100%。代森锰锌和福美双抑制孢子萌发的 $EC_{50}$ 相近,分别为 $0.7553$ 和 $0.7929\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。可见,在相同防效下,百菌清用药量更低。因此在燕麦炭疽病发生前,百菌清可作为防治燕麦炭疽病的保护性杀菌剂。

多菌灵和甲基硫菌灵是以苯丙咪唑环为母体的一类有机杀菌剂,通过与真菌菌丝和孢子芽管中的 $\beta$ 微管蛋白( $\beta$ -tubulin protein)结合抑制病菌有丝分裂<sup>[16]</sup>,兼具内吸治疗和保护作用,是较早用于防治植物炭疽病的杀菌剂之一。多菌灵抑制燕麦炭疽病菌菌丝生长的 $EC_{50}$ 为 $0.0921\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,低于对禾生炭疽菌(*Colletotrichum graminicola*)、亚麻刺盘孢(*Colletotrichum linicola*)和胶孢炭疽菌(*C. gloeosporioides*)的 $EC_{50}$ ( $0.9569$ 、 $0.5109$ 和 $0.1740\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[15, 17-18]</sup>,也低于联合国粮食及农业组织允许的最高限量( $0.1000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[19]</sup>,表明该病原尚未对多菌灵产生抗性。此外,多菌灵对孢子萌发也有显著抑制效果,但孢子对其敏感性较菌丝要低,因此喷施浓度要与孢子抑制浓度相一致,才能同时发挥内吸治疗和保护作用。甲基硫菌灵对燕麦炭疽病菌也具有显著防效,但其 $EC_{50}$ 明显要高,因此多菌灵更适合用于防治燕麦炭疽病。

戊唑醇和丙环唑为甾醇脱甲基作用抑制剂(sterol demethylation inhibitors, DMIs),通过干扰或阻断病原菌甾醇生物合成发挥抗菌作用,是目前应用最为广泛的内吸性杀菌剂,对子囊菌和担子菌等真菌引起的多种病害具有显著防效<sup>[20]</sup>。DMIs也是目前唯一报道用于防治禾谷炭疽菌(*C. cereale*)引致多种禾草炭疽病的一类杀菌剂。在美国加州,通过分析禾谷炭疽菌对DMIs的敏感性,发现戊唑醇和丙环唑抑制菌丝生长的 $EC_{50}$ 均值分别为 $0.0820$ 和 $0.1400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[21]</sup>,是本研究结果的18.7和6.2倍。而该研究同时分析了长期使用DMIs对禾谷炭疽菌

产生抗药性的影响,结果表明, $EC_{50}$ 值显著提高了6.5倍<sup>[21]</sup>。由此可见,晋北地区燕麦炭疽病菌可能对DMIs产生了一定的抗药性,在病害防治中应慎重使用。

喹菌酯和吡唑醚菌酯是近年来创制的一类新型的醌外抑制剂(quinone outside inhibitors, QoIs),其杀菌作用与真菌细胞色素(cytochrome b, Cytb)BC1酶复合物Qo位点的结合密切相关,可抑制线粒体的呼吸及能量释放<sup>[22]</sup>。孢子萌发是一种高度依赖能量的生理过程,因此大多数分生孢子的线粒体被分配到芽管里<sup>[15]</sup>,这可能是燕麦炭疽病菌孢子对喹菌酯和吡唑醚菌酯高度敏感的原因。所有供试杀菌剂中,吡唑醚菌酯是抑制菌丝生长和孢子萌发最有效的杀菌剂,兼具保护和治疗作用,且与已报道对胶孢炭疽菌和平头炭疽菌(*Colletotrichum truncatum*)的 $EC_{50}$ 相近<sup>[14, 23]</sup>,尚未产生抗性,因此在燕麦炭疽病的防治中优先使用。

本研究供试的燕麦炭疽菌种分离自晋北地区大同市天镇县的燕麦种植田,对该地区其他市(县)燕麦病害调查发现炭疽病均有发生,但上述地区均未采用喷施杀菌剂防治病害,这可能是导致病菌对供试的大多数杀菌剂尚未产生明显抗性的原因。此外,室内测定结果与田间实际使用防效可能存在差异,有待进一步通过田间试验验证杀菌剂的实际防效。随着该地区燕麦生产规模扩大和种植年限的增加,病害防控形式将愈发严重,建议生产者高度重视炭疽病的流调工作,及时轮换采用不同作用机制的化学杀菌剂防控病害,同时改善种植条件,引进和选育抗病品种,保证燕麦的可持续生产。

#### 4 结论

本研究通过对6大类10种杀菌剂抑制菌落生长和孢子萌发效果的测定,证实对燕麦炭疽病菌均具有显著防效,但不同杀菌剂和浓度之间以及对菌丝生长和孢子萌发的抑制效果存在差异。其中多菌灵、丙环唑、喹菌酯和吡唑醚菌酯对禾谷炭疽菌菌丝生长的抑制作用较强;百菌清、多菌灵、喹菌酯和吡唑醚菌酯对禾谷炭疽菌孢子萌发的抑制作用较强。根据作用机制的不同,建议百菌清在炭疽病发生前优先作为保护性杀菌剂使用,多菌灵、喹菌酯和吡唑醚菌酯作为保护和治疗性杀菌剂使用。

## 参考文献 References:

- [1] 李春杰, 陈泰祥, 赵桂琴, 南志标. 燕麦病害研究进展. *草业学报*, 2017, 26(12): 203-222.  
LI C J, CHEN T X, ZHAO G Q, NAN Z B. Progress in research on diseases of *Avena sativa*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(12): 203-222.
- [2] 高鹏, 魏江铭, 李瑶, 张丽红, 赵祥, 杜利霞, 韩伟. 山西省大同市早播饲用燕麦叶部真菌病害病原鉴定及影响因素分析. *草业学报*, 2021, 30(6): 82-93.  
GAO P, WEI J M, LI Y, ZHANG L H, ZHAO X, DU L X, HAN W. Identification and influencing factors analysis of oat (*Avena sativa*) fungal diseases in Datong of Shanxi Province, China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(6): 82-93.
- [3] 高鹏, 刘琳, 李瑶, 张丽红, 魏江铭, 赵祥, 杜利霞, 韩伟. 炭疽病对山西晋北饲用燕麦地上部碳氮磷化学计量学特征的影响. *应用生态学报*, 2021, 32(7): 2477-2484.  
GAO P, LIU L, LI Y, ZHANG L H, WEI J M, ZHAO X, DU L X, HAN W. Effects of anthracnose on C, N and P stoichiometry of forage oat aboveground parts in north Shanxi Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(7): 2477-2484.
- [4] HYDE K D, CAI L, CANNON P F, CROUCH J A, CROUS P W, DAMM U, GOODWIN P H, CHEN H, JOHNSTON P R, JONES E B G, LIU Z Y, MCKENZIE E H C, MORIWAKI J, NOIREUNG P, PENNYCOOK S R, PFENNING L H, PRIHASTUTI H, SATO T, SHIVAS R G, TAN Y P, TAYLOR P W J, WEIR B S, YANG Y L, ZHANG J Z. *Colletotrichum*-names in current use. *Fungal Diversity*, 2009, 39: 147-182.
- [5] WHARTON P S, SCHILDER A C. Novel infection strategies of *Colletotrichum acutatum* on ripe blueberry fruit. *Plant Pathology*, 2008, 57(1): 122-134.
- [6] O'CONNELL R J, THON M R, HACQUARD S, AMYOTTE S G, KLEEMANN J, TORRES M F, DAMM U, BUIATE E A, EPSTEIN L, ALKAN N, ALTMÜLLER J, ALVARADO-BALDERRAMA L, BAUSER C A, BECKER C, BIRREN B W, CHEN Z, CHOI J, CROUCH J A, DUVICK J P, FARMAN M A, GAN P, HEIMAN D, HENRISSAT B, HOWARD R J, KABBAGE M, KOCH C, KRACHER B, KUBO Y, LAW A D, LEBRUN M H, LEE Y H, MIYARA I, MOORE N, NEUMANN U, NORDSTRÖM K, PANACCIONE D G, PANSTRUGA R, PLACE M, PROCTOR R H, PRUSKY D, RECH G, REINHARDT R, ROLLINS J A, ROUNSLEY S, SCHARDL C L, SCHWARTZ D C, SHENOY N, SHIRASU K, SIKHAKOLLI U R, STÜBER K, SUKNO S A, SWEIGARD J A, TAKANO Y, TAKAHARA H, TRAIL F, CHARLOTTE VAN DER DOES H, VOLL L M, WILL I, YOUNG S, ZENG Q D, ZHANG J Z, ZHOU S G, DICKMAN M B, SCHULZE-LEFERT P, THEMAAT E V, MA L J, VAILLANCOURT L J. Lifestyle transitions in plant pathogenic *Colletotrichum* fungi deciphered by genome and transcriptome analyses. *Nature Genetics*, 2012, 44: 1060-1065.
- [7] 南志标, 李春杰. 中国牧草真菌病害名录. *草业科学*, 1994, 11(S1): 3-30.  
NAN Z B, LI C J. Fungal diseases of pasture plants recorded in China—a check list. *Pratacultural Science*, 1994, 11(S1): 3-30.
- [8] LAMICHHANE J R, DACHBRODT-SAAAYDEH S, KUDSK P, MESSEAN A. Toward a reduced reliance on conventional pesticides in european agriculture. *Plant Disease*, 2015, 100(1): 10-24.
- [9] 李兴龙, 李彦忠. 5 种杀菌剂对沙打旺黄矮根腐病菌的室内毒力测定. *草业科学*, 2013, 30(10): 1523-1530.  
LI X L, LI Y Z. Efficacy testing of five fungicides against the pathogen of yellow stunt and root rot of *Astragalus adsurgens* in laboratory. *Pratacultural Science*, 2013, 30(10): 1523-1530.
- [10] 张一宾. 全球主要作物主要杀菌剂品种及市场进展. *世界农药*, 2015, 37(6): 1-6.  
ZHANG Y B. Main fungicis and the their market for important crops in the world. *World Pesticides*, 2015, 37(6): 1-6.
- [11] Fungicide Resistance Action Committee (FRAC). FRAC code list 2010. (2010-12-31) [2021-05-29]. <http://www.frac.info/>
- [12] TILLMAN R W, SIEGELM R, LONG J W. Mechanism of action and fate of the fungicide chlorothalonil (2, 4, 5, 6-tetrachloroisophthalonitrile) in biological systems: I. Reactions with cells and subcellular components of *Saccharomyces pastorianus*. *Pesticide Biochemistry Physiology*, 1973(3): 160-167.
- [13] MOREIRA R R, HAMADA N A, PERES N A, MAY DE MIO L L. Sensitivity of the *Colletotrichum acutatum* species complex from apple trees in Brazil to dithiocarbamates, methyl benzimidazole carbamates, and quinone outside inhibitor fungicides. *Plant Disease*, 2019, 103(10): 2569-2576.
- [14] RAMPERSAD S N, TEELUCKSINGH L D. Differential responses of *Colletotrichum gloeosporioides* and *C. truncatum* isolates from different hosts to multiple fungicides based on two assays. *Plant Disease*, 2012, 96(10): 1526-1536.
- [15] CAO X R, XU X M, CHE H Y, WEST J S, LUO D Q. Distribution and fungicide sensitivity of *Colletotrichum* species complexes

- from rubber tree in Hainan, China. *Plant Disease*, 2017, 101(10): 1774-1780.
- [16] SU Z H, ZHNG X, ZHAO J J, WANG W Q, SHANG L, MA S N, ADZAVON Y M, LU F, WENG M T, HAN X Y, YANG L, ZHAO Q H, ZHAO P X, XIE F, MA X M. Combination of suspension array and mycelial growth assay for detecting multiple-fungicide resistance in *Botrytis cinerea* in Hebei Province in China. *Plant Disease*, 2019: 1213-1219.
- [17] 马甲强, 袁庆华, 王瑜, 苗丽宏, 辛宝宝. 苜蓿炭疽病防治药剂的筛选. *中国草地学报*, 2016, 38(3): 84-90.  
MA J Q, YUAN Q H, WANG Y, MIAO L H, XIN B B. Screening of chemical fungicides for controlling alfalfa anthracnose caused by *Colletotrichum linicola*. *Chinese Journal of Grassland*, 2016, 38(3): 84-90.
- [18] 文克俭, 罗天琼, 张莉, 陈燕萍, 周玉锋, 龙忠富, 吴佳海, 苏生. 6种杀菌剂对3种禾草病害的防治研究. *草业学报*, 2013, 22(3): 124-131.  
WEN K J, LUO T Q, ZHANG L, CHEN Y P, ZHOU Y F, LONG Z F, WU J H, SU S. Control efficacy of 6 fungicides against 3 pathogens of turfgrass diseases. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(3): 124-131.
- [19] 陈伟, 朱盈蕊, 刘红彦, 倪云霞, 高向阳. 苯并咪唑类杀菌剂残留分析方法研究进展. *浙江农业科学*, 2011, 3: 623-629.  
CHEN W, ZHU Y Y, LIU H Y, NI Y X, GAO X Y. Research progress on analysis methods of benzimidazole fungicides residues. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2011, 3: 623-629.
- [20] 叶滔, 马志强, 毕秋艳, 牛芳胜, 韩秀英, 张小凤, 王文桥, 张利辉. 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. *农药学报*, 2012, 14(1): 1-16.  
YE T, MA Z Q, BI Q Y, NIU F S, HAN X Y, ZHANG X F, WANG W Q, ZHANG L H. Research advances on the resistance of plant pathogenic fungi to SBIs fungicides. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2012, 14(1): 1-16.
- [21] WONG F P, MIDLAND S L. Sensitivity distributions of california populations of *Colletotrichum cereale* to the DMI fungicides propiconazole, myclobutanil, tebuconazole, and triadimefon. *Plant Disease*, 2007, 91(12): 1547-1555.
- [22] YOSHIMI A, KOJIMA K, TAKANO Y, TANAKA C. Group III histidine kinase is a positive regulator of hog1-type mitogen-activated protein kinase in filamentous fungi, Eukaryot. *Cell*, 2005, 4: 1820-1828.
- [23] 郑金龙, 李秋洁, 易克贤, 刁金根, 高建明, 张世清, 陈河龙, 贺春萍, 吴伟怀, 刘巧莲. 9种杀菌剂对柱花草胶孢炭疽病菌的室内毒力测定. *热带农业科学*, 2015, 35(2): 65-69.  
ZHENG J L, LI Q J, YI K X, XI J G, GAO J M, ZHANG S Q, CHEN H L, HE C P, WU W H, LIU Q L. Toxicity test of nine kinds of fungicides for *Collectotrichum gloeosporioides* on stylosanthes anthracnose in laboratory. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2015, 35(2): 65-69.

(执行编辑 苟燕妮)

## 2021年第9期《草业科学》审稿专家

安沙舟 曹文侠 曹阳春 常生华 陈 骥 陈雪峰 崔 霞 丁西朋 高永恒  
花立民 侯扶江 贾婷婷 李惠英 李曼莉 李胜利 李万宏 李文金 李秀璋  
李彦忠 李耀明 李永宏 刘克思 刘 苗 刘兴元 刘志鹏 罗庆洲 马红彬  
米见对 尚占环 孙 建 孙小琴 王金牛 武全香 谢文刚 许立新 鄢 燕  
于应文 鱼小军 张 程 张德罡 张 静 张乃锋

承蒙以上专家对《草业科学》期刊稿件的审阅, 特此表示衷心的感谢!