

丙环唑和醚菌酯药液浓度、雾滴密度与其对小麦白粉病防效的关系

孔 肖, 闫晓静, 杨代斌, 袁会珠*

(中国农业科学院 植物保护研究所, 农业部作物有害生物综合治理综合性重点实验室, 北京 100193)

摘 要: 采用室内生物测定和田间试验相结合的方法, 研究了丙环唑和醚菌酯的药液浓度及雾滴密度与其对小麦白粉病防效的关系, 首次提出了杀菌剂雾滴抑制中密度 (即达到 50% 抑制率时所对应的雾滴密度, EN_{50}) 这一概念。结果表明: 1) 室内喷施丙环唑及醚菌酯药液, 当丙环唑质量浓度从 0.01 g/L 提高到 1.0 g/L 时, 对应的 EN_{50} 值从 18.7 cm^{-2} 下降至 5.1 cm^{-2} , EN_{90} 值从 755.8 cm^{-2} 下降至 92.8 cm^{-2} , 雾滴杀伤半径 (r_{50}) 从 0.92 mm 增大到 1.77 mm; 当醚菌酯质量浓度从 0.01 g/L 提高到 1.0 g/L 时, 对应的 EN_{50} 值从 227.1 cm^{-2} 下降至 1.0 cm^{-2} , EN_{90} 值从 596.1 cm^{-2} 下降至 26.9 cm^{-2} , 雾滴杀伤半径从 0.27 mm 增大到 4.00 mm。2) 田间使用 MG-1S 植保无人机和背负式电动喷雾器喷施丙环唑和醚菌酯防治小麦白粉病, 无人机施药液量为 15.0 L/hm^2 , 药液质量浓度为 5.0 g/L 时, 在小麦旗叶及倒二叶的雾滴密度分别为 29.7 和 9.5 cm^{-2} , 喷施丙环唑和醚菌酯 3、5、7 d 后, 对小麦白粉病的防效分别为 41.9%、80.7%、90.2% 和 30.8%、67.9%、84.5%; 电动喷雾器施药液量为 450.0 L/hm^2 , 药液质量浓度为 0.17 g/L 时, 在小麦旗叶及倒二叶的雾滴密度分别为 287.9 和 204.2 cm^{-2} , 喷施丙环唑和醚菌酯 3、5、7 d 后的防效分别为 42.1%、85.3%、94.3% 和 28.5%、80.1%、90.5%。研究表明, 田间施用丙环唑和醚菌酯时, 无需把叶片全部喷湿, 只需达到一定雾滴密度即可; 运用植保无人机进行高浓度、低容量喷雾时, $10\sim 30\text{ cm}^{-2}$ 雾滴量即可达到理想的防治效果。

关键词: 丙环唑; 醚菌酯; 雾滴密度; 药液浓度; 小麦白粉病; 植保无人机; 防治效果

中图分类号: S482.2; S252.3 文献标志码: A 文章编号: 1008-7303(2018)03-0301-08

Effects of concentration, droplet density of propiconazole and kresoxim-methyl on the efficacy against wheat powdery mildew

KONG Xiao, YAN Xiaojing, YANG Daibin, YUAN Huizhu*

(Key Laboratory of Integrated Pest Management in Crops, Ministry of Agriculture, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: The effects of concentration, droplet density of propiconazole and kresoxim-methyl on the control efficacy against wheat powdery mildew were investigated using a combination of indoor bioassay and field experiments. In this study, a new concept, inhibited medium density (EN_{50}) was

收稿日期: 2018-02-05; 录用日期: 2018-05-03.

基金项目: 农药雾滴的杀伤半径与最佳沉积密度模型 (31371969); 农药减施增效技术效果监测与评估研究 (2016YFD0201305); 农业航空低空低容量喷雾技术 (2016YFD0200703).

作者简介: 孔肖, 男, 硕士研究生, E-mail: takongxiao@163.com; *袁会珠, 通信作者 (Author for correspondence), 男, 博士, 研究员, 主要从事农药使用技术研究, E-mail: hzhyuan@ippcaas.cn

defined as the density of droplet that achieve 50% inhibition rate. The results showed that: 1) In terms of the indoor propiconazole spraying tests, with the spraying concentration increased from 0.01 g/L to 1.0 g/L, the corresponding EN_{50} value decreased from 18.7 cm^{-2} to 5.1 cm^{-2} , the EN_{90} value decreased from 755.8 cm^{-2} to 92.8 cm^{-2} , and the biocide radius increased from 0.92 mm to 1.77 mm. With regards to indoor kresoxim-methyl spraying tests, when the spraying concentration increased from 0.01 g/L to 1.0 g/L, the corresponding EN_{50} value decreased from 227.1 cm^{-2} to 1.0 cm^{-2} , the EN_{90} value decreased from 596.1 cm^{-2} to 26.9 cm^{-2} , and the biocide radius increased from 0.27 mm to 4.00 mm. 2) The field spraying test of propiconazole and kresoxim-methyl against wheat powdery mildew were conducted using MG-1S UAV(unmanned aerial vehicle) and knapsack sprayer. When tested with the spray volume of 15.0 L/hm^2 for UAV at the concentration of 5.0 g/L, the droplet density on flag and 2nd top leaf was 29.7 cm^{-2} and 9.5 cm^{-2} , respectively. After 3 d, 5 d and 7 d, the control efficacy was 41.9%, 80.7%, 90.2% for propiconazole, respectively, and 30.8%, 67.9%, 84.5% for kresoxim-methyl, respectively. When tested with the spray volume of 450.0 L/hm^2 for knapsack sprayer at the concentration of 0.17 g/L, the droplet density on flag and 2nd top leaf was 287.9 cm^{-2} and 204.2 cm^{-2} , respectively. After 3 d, 5 d and 7 d, the control efficacy was 42.1%, 85.3%, 94.3% for propiconazole, respectively, and 28.5%, 80.1%, 90.5% for kresoxim-methyl, respectively. Therefore, droplet density of a certain concentration is enough to achieve good efficient spraying of fungicides. And it is not necessary to wet all the leaves. Using UAV low volume spray, 10-30 cm^{-2} droplets can achieve the ideal control efficacy.

Keywords: propiconazole; kresoxim-methyl; droplet density; concentration; wheat powdery mildew; unmanned aerial vehicle (UAV); efficacy

小麦是主要的粮食作物。由布氏白粉菌 *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* 引起的小麦白粉病 (wheat powdery mildew) 会严重降低小麦品质、影响其产量^[1]。目前生产上防治小麦白粉病的药剂以三唑类杀菌剂为主^[2], 另有报道醚菌酯对小麦白粉病也有很好的防效^[3]。喷雾法是小麦及其他多数作物病虫害防治中最普遍、应用最广泛的方法, 但农民常用的大容量喷雾法有效利用率低, 不仅大量浪费农药, 而且易污染环境。因此制定简单、可行的喷雾技术标准, 对于指导农民科学合理用药, 提高农药利用率, 减少农药浪费和污染均具有重要意义^[4]。近年来, 航空植保技术特别是小型农用无人机得到了快速的发展, 提高了作业效率, 降低了防治成本^[5], 但其在作物上的雾滴沉积、药效及可行性等均有待进一步研究和验证。

农药喷雾时的雾滴大小、雾滴密度及药液浓度对病虫害的防治效果均有很大影响^[6-7]。Fisher 等^[8]采用“等高线法”研究了不同大小的三氯杀螨醇雾滴与其对红叶螨防效的关系, 发现一定的雾滴密度即可达到较理想的防效; Alm 等^[9]研究发现, 联苯菊酯密度为 41 cm^{-2} 、粒径为 $120\text{ }\mu\text{m}$ 的

雾滴或密度为 18 cm^{-2} 、粒径为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的雾滴对二斑叶螨虫卵的致死率均可达 80%; Bryant 等^[10]研究发现, 当苏云金芽孢杆菌雾滴密度为 $5\sim 10\text{ cm}^{-2}$ 时, 舞毒蛾 2、3 龄幼虫的死亡率超过 90%; 曹源等^[4]研究了甲氨基阿维菌素苯甲酸盐药液浓度、雾滴密度及施药液量对小菜蛾防效的影响; 王国宾^[6]研究了几种杀虫剂雾滴大小、雾滴密度及药液浓度与其对小麦蚜虫防效的影响; 朱玉坤等^[11]研究了喷雾方式及喷药液量对吡蚜酮和啉虫脒在棉田的沉积分布及对棉蚜防治效果的影响。以上研究均表明, 雾滴的沉积结构对其防效具有显著影响, 同时不难发现, 目前关于杀虫剂雾滴沉积结构对防效影响的研究报道较多, 对杀菌剂的相关研究则鲜有报道。因此, 笔者根据杀虫剂研究中雾滴致死中密度 (LN_{50}) 概念, 首次提出了杀菌剂的雾滴抑制中密度 (即达到 50% 抑制率时所对应的雾滴密度, inhibited medium density, EN_{50}) 这一概念, 并据此开展了杀菌剂药液浓度及雾滴密度与防效之间关系的研究。

笔者通过室内与田间试验相结合的方式, 室内采用小麦离体叶段法研究了丙环唑和醚菌酯

药液浓度、雾滴密度与其对小麦白粉病菌抑制率之间的关系, 同时比较了两种药剂的活性差异, 并通过田间分别选用植保无人机和电动喷雾器喷施丙环唑和醚菌酯两种处理方式加以验证, 研究了低容量与常量喷雾时雾滴的沉积分布及其对小麦白粉病的防治效果, 以期对小麦白粉病的高效防治及植保无人机的使用等提供一定的参考和指导。

1 材料与方法

1.1 材料和仪器

1.1.1 供试药剂和指示剂 250 g/L 丙环唑乳油(propiconazole EC, 瑞士先正达作物保护有限公司生产); 50% 醚菌酯水分散粒剂[kresoxim-methyl WG, 巴斯夫(中国)有限公司]; 诱惑红 85 (浙江吉高德色素科技有限公司)。

1.1.2 主要仪器设备 ASS-4 行走式喷雾塔(国家农业信息化工程技术研究中心); Teejet11001vs 喷头(美国 Teejet 公司); 3WBD-16 型电动喷雾器(新乡市牧野区创兴喷雾器厂); MG-1S 植保无人机(深圳市大疆创新科技有限公司); Synergy4 型多功能酶标仪(美国 BioTek 公司); 风速仪(北京中西远大科技有限公司); 温湿度仪(深圳市华图电气有限公司); DP-02 型喷雾粒度分析仪(珠海欧美克仪器有限公司); 扫描仪(上海中晶科技有限公司); 卡罗米特纸卡; Deposit scan 软件(美国农业部开发)。

1.2 供试小麦及菌种

小麦品种为京双 16, 小麦种子及小麦白粉病菌 *Blumeria graminis* 均由中国农业科学院植物保护研究所提供。

1.3 室内生物测定

参考马志强等及刁亚梅等所用的小麦离体叶段法^[12-14]。将京双 16 麦种种植在直径 10 cm、高 11 cm 的塑质培养盆中, 每盆 50 株左右, 室温培养(白天 25 ℃, 夜间 18 ℃)。待叶片长到 10 cm 左右时, 采用孢子抖落法接菌。接菌 24 h 后将小麦叶片剪成 7 cm 左右的叶段, 贴于 0.5% 琼脂培养基(含 0.06 g/L 苯并咪唑)上, 待喷雾处理。采用 ASS-4 行走式喷雾塔(搭载 Teejet11001vs 喷头)喷雾。丙环唑和醚菌酯药剂浓度分别设置为 0.01、0.05、0.1、0.5 及 1.0 g/L。ASS-4 行走式喷雾塔可通过变化行走速度而实现不同的雾滴密

度, 行走速度与雾滴密度间具有良好的线性关系。将处理后小麦离体叶段置于白天 18 ℃、夜间 16 ℃ 环境中培养, 待对照组长出大量孢子堆时调查 2 种药剂不同浓度对小麦白粉病菌的抑制率, 调查方式参考《农药室内生物测定试验准则——防治小麦白粉病试验(盆栽法)》^[15]。

1.4 田间药效试验

1.4.1 施药机具及试验条件 田间试验在中国农业科学院新乡综合试验基地开展, 喷雾时间为 2017 年 5 月 14 日, 平均风速 1.08 m/s, 平均相对湿度 43.0%, 温度 29.8 ℃。

施药机具分别为大疆 MG-1S 植保无人机和 3WBD-16 型电动喷雾器。无人机装有 4 个 Teejet11001vs 喷头, 机臂展开外形尺寸为 1 460 mm × 1 460 mm × 578 mm, 载药量 10.0 L, 作业时飞行高度 1.5 m, 飞行速度 4.0 m/s, 施药液量 15.0 L/hm²。背负式电动喷雾器配有一个空心圆锥雾喷头, 施药液量 450.0 L/hm²。

1.4.2 低容量与常量喷雾的雾滴沉积分布测定

采用 DP-02 型喷雾粒度分析仪分别测定 Teejet11001vs 喷头及电动喷雾器所载圆锥雾喷头的雾滴粒径。使用两种施药机具分别喷洒诱惑红溶液, 施用量为 125.0 g/hm²。在垂直于喷雾方向布放 3 排测试杆, 每排设 9 个测试点, 用万向夹将卡罗米特纸卡和试验滤纸夹放在与小麦旗叶及倒二叶同一高度水平处, 喷雾结束后收集卡罗米特纸卡及试验滤纸。用 Deposit scan 软件计算卡罗米特纸卡上的雾滴密度及覆盖率; 待滤纸片干燥后收集至自封袋中, 在实验室用蒸馏水洗脱滤纸片上的诱惑红, 在 514 nm^[16]处测定洗涤液的吸光度值, 根据标准曲线计算洗涤液中诱惑红的浓度, 按公式(1)计算诱惑红的沉积量(D)。

$$D = (\varphi \times V \times 1\,000) / S \tag{1}$$

式中, D 为沉积量, μg/cm²; φ 为洗涤液中诱惑红的质量浓度, mg/L; V 为洗涤液体积, L; S 为滤纸片面积, cm²。

1.4.3 低容量与常量喷施两种药剂对小麦白粉病的防效调查 分别采用 MG-1S 植保无人机和电动喷雾器喷施两种药剂, 丙环唑和醚菌酯有效成分用量均为 75.0 g/hm², 换算后无人机施药浓度为 5.0 g/L, 电动喷雾器施药浓度为 0.17 g/L。每小区设 3 次重复, 于施药 3、5、7 d 后调查, 按公式(2)和(3)分别计算病情指数(X)和防治效果(P)。

$$X = \frac{\sum (N_i \times i)}{N \times 9} \times 100 \quad (2)$$

式中： N_i —各级病叶数； i —相对级数； N —调查总叶数。

$$P/\% = \left(1 - \frac{X_{CK} - X_{PT}}{X_{CK}}\right) \times 100 \quad (3)$$

式中： X_{CK} —空白对照区病情指数； X_{PT} —药剂处理区病情指数。

白粉病分级标准^[17]：0级，无病；1级，病斑面积占整片叶面积的5%以下；3级，病斑面积占整片叶面积的6%~15%；5级，病斑面积占整片叶面积的15%~25%；7级，病斑面积占整片叶面积的26%~50%；9级，病斑面积占整片叶面积的50%以上。

1.5 诱惑红标准曲线绘制

参考崔丽等^[18]的方法，准确称取诱惑红（精确至0.000 2 g）于10 mL容量瓶中，用蒸馏水定容，配制成质量浓度分别为0.5、1.0、5.0、10.0和20.0 mg/L的诱惑红标准溶液。于波长514 nm处分别测定其吸光度值，每个浓度连续测定3次，取吸光度平均值对诱惑红标准溶液质量浓度作标准曲线。

1.6 数据分析

采用Microsoft Excel 2013计算雾滴密度、覆

盖率、沉积量、防效的平均值及标准差；采用SPSS 20.0软件进行数据统计分析；药剂和施药机具对防效的影响采用双因素方差分析，并用Duncan's 新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 诱惑红的标准曲线

在诱惑红的最大吸收波长(514 nm)下，其标准溶液质量浓度 ρ 与吸光度 A 之间具有很好的相关性，回归方程为 $A = 0.044 7\rho + 0.022 7$ ，相关系数 $r = 0.996 9$ ，表明本试验中以诱惑红作为喷雾指示剂检测雾滴沉积分布是可行的。

2.2 室内试验结果

2.2.1 药液浓度及雾滴密度与其室内对小麦白粉病菌抑制率的关系 室内研究(图1)表明，药液浓度及雾滴密度均可显著影响药剂对小麦白粉病菌的抑制率。当丙环唑和醚菌酯质量浓度为0.01 g/L、雾滴密度为328 cm⁻²时，抑制率<80%；当药剂质量浓度为0.05 g/L、雾滴密度达到224 cm⁻²时，抑制率>80%；当药剂质量浓度 ≥ 0.1 g/L、雾滴密度为92 cm⁻²时，抑制率均>80%。当两种药剂处于低浓度(≤ 0.05 g/L)时，雾滴密度对其对小麦白粉病菌的抑制率影响显著；高浓度(≥ 0.1 g/L)时，则雾滴密度对抑制率影响不显著。

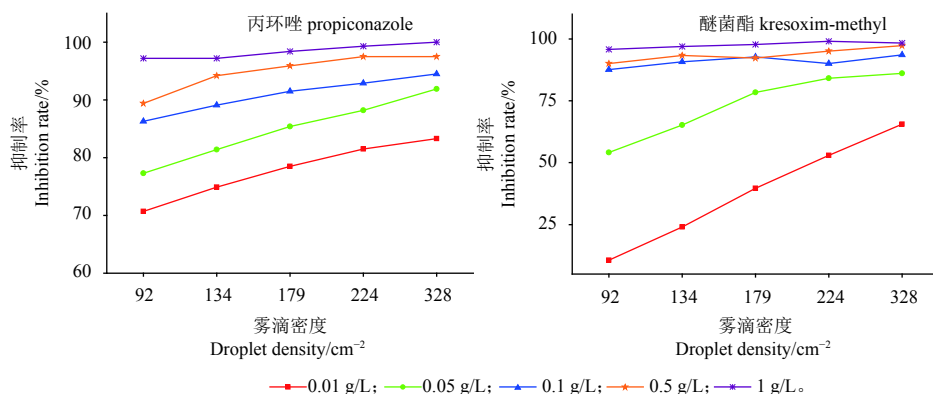


图1 药液浓度及雾滴密度与丙环唑和醚菌酯对小麦白粉病菌抑制率的关系

Fig. 1 Effects of propiconazole and kresoxim-methyl concentration, droplet density on the wheat powdery mildew inhibition rate

5种不同浓度条件下，随着雾滴密度的增大，丙环唑和醚菌酯对小麦白粉病菌的毒力均逐渐增强，但当雾滴密度增大到一定值时则表现出“饱和效应”，即此时抑制率不再继续增大；对比毒力测定结果可知，低浓度(≤ 0.05 g/L)时丙环唑对小麦白粉病菌的抑制率更高，高浓度(≥ 0.1 g/L)

时则2种药剂的抑制率相当。分析其原因可能是由于丙环唑对小麦白粉病同时具有保护、治疗和抗产孢作用，而醚菌酯则主要表现为治疗作用，因而两种药剂在低浓度时呈现出毒力差异。

2.2.2 不同药液浓度下丙环唑和醚菌酯的雾滴抑制密度及杀伤半径 室内采用Teejet11001vs喷头

喷施丙环唑和醚菌酯，就药剂对小麦白粉病菌抑制率和雾滴密度的相关性进行回归分析，求得抑制率达 50% 时的雾滴密度 (EN₅₀ 值) 和抑制率达 90% 时的雾滴密度 (EN₉₀ 值)。结果 (表 1 及表 2) 表明：喷施低浓度 (≤ 0.05 g/L) 两种药液时，EN₉₀ 值 ≥ 270.0 cm⁻²，而喷施高浓度 (≥ 0.1 g/L) 的两种药液时，EN₉₀ 值 < 150 cm⁻²。

不同药液浓度下丙环唑和醚菌酯喷雾雾滴的杀伤半径见图 2。随着药液浓度升高，雾滴的杀伤半径增大，当药液质量浓度从 0.01 g/L 增大到 1.0 g/L

时，丙环唑雾滴的杀伤半径增大了 1.92 倍，醚菌酯增大了 14.81 倍；当药液质量浓度分别为 0.01、0.05 及 0.1 g/L 时，丙环唑雾滴的杀伤半径分别是醚菌酯的 3.48、1.85 和 1.56 倍；当药液质量浓度分别为 0.5 和 1.0 g/L 时，醚菌酯雾滴的杀伤半径分别是丙环唑的 1.21 和 2.26 倍，即低浓度下丙环唑表现出更好的抑菌活性。同时可以推想，无人机低容量喷雾时由于药液浓度是常规喷雾的十倍甚至几十倍，其雾滴杀伤半径极大，因此单位面积内喷施较少量雾滴理应可以取得同样理想的防效。

表 1 丙环唑不同浓度下的雾滴抑制密度及杀伤半径

Table 1 Inhibited droplet density and biocide radius at different concentrations of propiconazole					
质量浓度 Concentration/(g/L)	回归方程 Regression equation	R ²	EN ₅₀ /cm ⁻²	EN ₉₀ /cm ⁻²	杀伤半径 Biocide radius/mm
0.01	y = 3.984 + 0.798x	0.991	18.7	755.8	0.92
0.05	y = 3.378 + 1.194x	0.997	22.8	269.8	0.84
0.1	y = 4.257 + 0.935x	0.998	6.2	146.4	1.60
0.5	y = 3.661 + 1.354x	0.954	9.8	86.3	1.30
1.0	y = 3.784 + 5.116x	0.820	5.1	92.8	1.77

注：表中 y 为抑制率几率值，x 为雾滴密度对数值；EN₅₀ 和 EN₉₀ 分别代表抑制率达到 50% 和 90% 时对应的雾滴密度。
Note: y in the table indicates the probability value of inhibition rate, x indicates the logarithm value of droplet density; EN₅₀ and EN₉₀ indicate the droplet density that achieve 50% and 90% inhibition rate, respectively.

表 2 醚菌酯不同浓度下的雾滴抑制密度及杀伤半径

Table 2 Inhibited droplet density and biocide radius at different concentrations of kresoxim-methyl					
质量浓度 Concentration/(g/L)	回归方程 Regression equation	R ²	EN ₅₀ /cm ⁻²	EN ₉₀ /cm ⁻²	杀伤半径 Biocide radius/mm
0.01	y = 2.205 + 3.058x	0.994	227.1	596.1	0.27
0.05	y = 1.373 + 1.918x	0.970	77.8	362.7	0.45
0.1	y = 5.142 + 0.537x	0.796	15.0	132.1	1.03
0.5	y = 4.130 + 1.083x	0.932	6.4	97.9	1.58
1.0	y = 4.997 + 0.898x	0.821	1.0	26.9	4.00

注：表中 y 为抑制率几率值，x 为雾滴密度对数值；EN₅₀ 和 EN₉₀ 分别代表抑制率达到 50% 和 90% 时对应的雾滴密度。
Note: y in the table indicates the probability value of inhibition rate, x indicates the logarithm value of droplet density; EN₅₀ and EN₉₀ indicate the droplet density that achieve 50% and 90% inhibition rate, respectively.

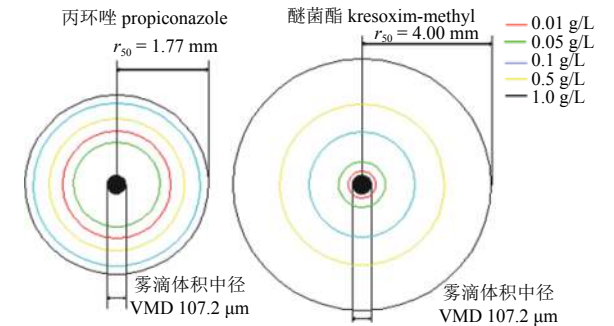


图 2 使用 Teejet11001vs 喷头喷施丙环唑和醚菌酯时的雾滴杀伤半径
Fig. 2 Biocide radius of propiconazole and kresoxim-methyl sprayed by Teejet11001vs nozzle

2.3 田间低容量与常量喷雾时雾滴的沉积分布及防治效果

2.3.1 低容量与常量喷雾时雾滴的沉积分布 在喷雾压力均为 0.3 MPa 条件下，植保无人机喷雾雾滴的体积中径 (VMD) 为 (107.2 ± 4.9) μm，背负式电动喷雾器的 VMD 值为 (188.3 ± 10.2) μm。田间采用两种机具分别喷施诱惑红溶液后，其雾滴沉积分布情况如表 3 和图 3 所示。其中，无人机施药液量为电动喷雾器的 3.3%，其沉积在小麦旗叶及倒二叶的雾滴密度分别为电动喷雾器的 10.3% 和 4.7%，覆盖率分别为电动喷雾器的

表 3 低容量及常量喷雾的雾滴沉积分布

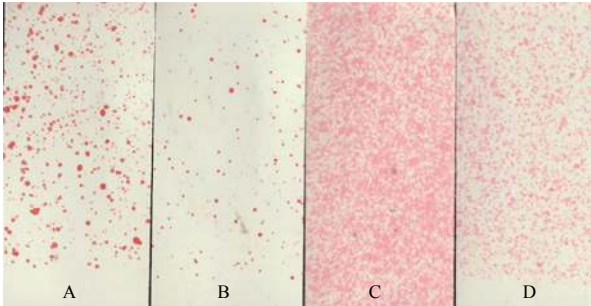
Table 3 Droplets distribution and deposition of low and medium volume spraying

施药机具 Sprayer	施药液量 Spray volume/(L/hm ²)	雾滴密度 Droplet density/cm ⁻²		覆盖率 Coverage rate/%		沉积量 Deposition/(μg/cm ²)	
		旗叶 Flag leaf	倒二叶 2 nd top leaf	旗叶 Flag leaf	倒二叶 2 nd top leaf	旗叶 Flag leaf	倒二叶 2 nd top leaf
植保无人机 UAV	15.0	29.7 ± 23.3b	9.5 ± 6.7b	4.6 ± 4.0b	1.6 ± 1.0b	0.39 ± 0.33b	0.17 ± 0.13b
电动喷雾器 Knapsack sprayer	450.0	287.9 ± 48.5a	204.2 ± 68.1a	49.3 ± 19.0a	33.6 ± 20.8a	0.51 ± 0.25a	0.26 ± 0.14a

注：同列数据后不同小写字母表示经 Duncan's 新复极差法检验在 $\alpha < 0.05$ 水平差异显著。
Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at $\alpha < 0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

9.3% 和 4.8%，沉积量分别为电动喷雾器的 76.5% 和 65.4%。由此可见，尽管植保无人机施药

药液量极少，雾滴很细，雾滴密度显著低于电动喷雾器，但其同样具有较优的沉积量分布。



注：A—低容量-旗叶；B—低容量-倒二叶；C—常量-旗叶；D—常量-倒二叶。

Note: A—flag leaf of UAV; B—2nd top leaf of UAV; C—flag leaf of knapsack sprayer; D—2nd top leaf of knapsack sprayer.

图 3 不同施药液量下小麦旗叶和倒二叶处雾滴密度及覆盖率对比

Fig. 3 Comparison on the droplet density and coverage rate under different spray volumes

2.3.2 低容量及常量喷雾对小麦白粉病的田间防效 由表 4 可知，采用两种机具喷施两种药剂，防治效果均随着施药后时间的延长而升高，在第 7 天时达到最佳防效。其中，药剂对防效影响显著，除施药后第 3 天外，施药机具对防效的影响也显著，但药剂和施药机具间未表现出交互关系。就施药机具而言，电动喷雾器的防治效果优于植保无人机，这与两者雾滴沉积分布的差异相吻合，但施药 5 d 后，植保无人机的防治效果也基本可达到 80% 及以上。尽管采用植保无人机施药时药液在小麦旗叶部的雾滴密度仅有 9.5 cm⁻²，但由于其药液浓度高，雾滴杀伤半径大，因此同样可以有效地控制小麦白粉病的发生及蔓延。就药剂比较而言，丙环唑的防效优于醚菌酯。

表 4 低容量及常量喷施丙环唑和醚菌酯对小麦白粉病的田间防治效果

Table 4 The wheat powdery mildew control efficacy using low and medium volume spraying

药剂 Fungicide	施药机具 Sprayer	施药液量 Spray volume/(L/hm ²)	防治效果 Efficacy/%		
			3 d	5 d	7 d
丙环唑 propiconazole	植保无人机 UAV	15.0	41.9 ± 3.5Aa	80.7 ± 7.1Ba	90.2 ± 2.3Ba
	电动喷雾器 Knapsack sprayer	450.0	42.1 ± 3.4Aa	85.3 ± 3.2Aa	94.3 ± 1.0Aa
醚菌酯 kresoxim-methyl	植保无人机 UAV	15.0	30.8 ± 3.0Bb	67.9 ± 4.4Bb	84.5 ± 3.0Bb
	电动喷雾器 Knapsack sprayer	450.0	28.5 ± 3.9Bb	80.1 ± 1.2Ab	90.5 ± 0.1Ab
药剂 Fungicide			**	**	**
施药机具 Sprayer			Ns	**	**
药剂 × 施药机具 Fungicide × sprayer			Ns	Ns	Ns

注：同列数据后不同大、小写字母分别表示相同药剂不同机具、相同机具不同药剂经 Duncan's 新复极差法和 *t* 检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。
**表示在 $P < 0.01$ 水平差异显著，Ns 表示差异不显著。

Note: Different uppercase or lowercase letters in the same column indicate significant difference with different sprayers using the same fungicide or using different fungicide with the same sprayer at $P < 0.05$ level by Duncan's new multiple range test and by *t* test, respectively. ** Indicate significant difference at $P < 0.01$ level and Ns indicate no significant difference.

3 结论与讨论

药液浓度、雾滴大小及雾滴密度均与药剂的防治效果密切相关。由于农药雾滴在植物表面具有渗透和扩散作用, 单个雾滴即可在植物表面形成有效的杀伤半径^[19]。本研究表明, 一个体积中径 (VMD) 为 107.2 μm 的丙环唑雾滴, 当其质量浓度为 0.01 g/L 时, 杀伤半径为 0.92 mm, 是其本身半径的 17.2 倍; 而当其质量浓度为 1.0 g/L 时, 杀伤半径更可达 1.77 mm, 是其本身半径的 33.0 倍。可见, 农药雾滴的杀伤半径远大于其本身半径, 因此生产上完全不必将叶片全部喷湿喷透, 只需达到一定的雾滴密度即可。Washington 等^[20]通过研究百菌清和代森锰锌在不同雾滴大小及密度条件下对香蕉黑条叶斑病的防治效果, 发现当两种药剂雾滴密度为 30 cm^{-2} 、VMD 为 250 μm 时黑条叶斑病菌的萌发率均小于 1%; 秦维彩^[21]使用 N-3 型植保无人机和电动喷雾器喷施氰烯菌酯防治小麦白粉病, 施药 7 和 10 d 后的防效分别为 55.13%、45.60% 和 67.88%、72.93%; 杨帅等^[22]研究了八旋翼无人机喷施戊唑醇对小麦白粉病的防治效果, 发现药液在小麦上、中、下部的雾滴密度分别为 24.9、11.2 和 7.6 cm^{-2} , 防效可达 70.9%。本文田间试验部分研究成果与杨帅等的研究较为一致。

本研究首次提出了杀菌剂雾滴抑制中密度 (EN_{50}) 这一概念, 并通过小麦离体叶段法明确了丙环唑和醚菌酯在不同浓度下的 EN_{50} 和 EN_{90} 值, 并涵盖了常量和低容量喷雾两种不同场景。所得结果可为杀菌剂雾滴沉积结构对诸如小麦白粉病菌等专性寄生菌药效的影响提供研究思路, 同时可指导田间科学合理喷雾施药。

本研究表明, 采用传统大容量喷雾法喷施丙环唑和醚菌酯防治小麦白粉病, 130~150 cm^{-2} 的雾滴密度即可达到 90% 以上的防效, 此外使用无人机低容量喷雾时, 在小麦旗叶和倒二叶分别达到 30 和 10 cm^{-2} 的雾滴密度也可取得较好防效。因此生产上建议减少用水量以避免农药浪费, 提高利用率, 并推荐尽可能使用无人机等低容量喷雾方法。但由于本研究仅以小麦离体叶段为试验对象, 未进行活体试验, 所得结果可能存在一定偏差, 因此后续对于小麦白粉病菌以外的非专性寄生菌的研究, 可尝试采用平皿法等手段进一步

开展, 而针对小麦白粉病菌等专性寄生菌, 后续应深入研究不同雾滴沉积结构对病原菌孢子萌发、附着胞形成及菌落发育等的影响, 从细胞结构进一步明确杀菌剂药液浓度、雾滴密度与药效之间的关系。

参考文献 (Reference):

[1] 杨美娟, 黄坤艳, 韩庆典. 小麦白粉病及其抗性研究进展[J]. 分子植物育种, 2016, 14(5): 1244-1254.
YANG M J, HUANG K Y, HAN Q D. Research progresses on wheat powdery mildew and its resistance[J]. Mol Plant Breed, 2016, 14(5): 1244-1254.

[2] 曹学仁, 赵文娟, 周益林, 等. 2007 年我国部分麦区小麦白粉菌对三唑酮的抗性监测[J]. 植物保护, 2008, 34(6): 74-77.
CAO X R, ZHAO W J, ZHOU Y L, et al. Monitoring of resistance of *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* isolates to triadimefon in 2007[J]. Plant Prot, 2008, 34(6): 74-77.

[3] 黄付根, 朱其林, 陈兰道, 等. 不同药剂及施药技术对小麦白粉病的防治效果研究[J]. 现代农药, 2017, 16(2): 49-51.
HUANG F G, ZHU Q L, CHEN L D, et al. Study on fungicides and application technology against wheat powdery mildew[J]. Mod Agrochem, 2017, 16(2): 49-51.

[4] 曹源, 邓维, 李永平, 等. 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐药液浓度、雾滴密度及施药量对小菜蛾防治效果的影响[J]. 农药学报, 2014, 16(1): 54-60.
CAO Y, DENG W, LI Y P, et al. Effects of concentration, droplet density and spraying volume on efficacy of emamectin benzoate against *Plutella xylostella* L.[J]. Chin J Pestic Sci, 2014, 16(1): 54-60.

[5] 张东彦, 兰玉彬, 陈立平, 等. 中国农业航空施药技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 53-59.
ZHANG D Y, LAN Y B, CHEN L P, et al. Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China[J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2014, 45(10): 53-59.

[6] 王国宾. 杀虫剂雾滴大小及覆盖密度与麦蚜防效关系研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
WANG G B. Study on pesticide droplet size and deposition density with the control effect of wheat aphids[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.

[7] 袁会珠, 王国宾. 雾滴大小和覆盖密度与农药防治效果的关系[J]. 植物保护, 2015, 41(6): 9-16.
YUAN H Z, WANG G B. Effects of droplet size and deposition density on field efficacy of pesticides[J]. Plant Prot, 2015, 41(6): 9-16.

[8] FISHER R W, MENZIES D R, HERNE D C, et al. Parameters of dicofol spray deposit in relation to mortality of European red mite[J]. J Econ Entomol, 1974, 67(1): 124-126.

[9] ALM S R, REICHARD D L, HALL F R. Effects of spray drop size

and distribution of drops containing bifenthrin on *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae)[J]. J Econom Entomol, 1987, 80(2): 517-520.

[10] BRYANT J E, YENDOL W G. Evaluation of the influence of droplet size and density of *Bacillus thuringiensis* against gypsy moth larvae (Lepidoptera: Lymantriidae)[J]. J Econom Entomol, 1988, 81(1): 130-134.

[11] 朱玉坤, 郑岩明, 王杰, 等. 喷雾方式及喷液量对吡蚜酮和啉虫脒在棉田的沉积分布及棉蚜防治效果的影响[J]. 昆虫学报, 2013, 56(5): 530-536.

ZHU Y K, ZHENG Y M, WANG J, et al. Influences of spray method and volume on the deposition of acetamiprid and pymetrozine and their efficacy against cotton aphids in cotton fields[J]. Acta Entomologica Sinica, 2013, 56(5): 530-536.

[12] 马志强, 刘国镨, 严乐恩, 等. 小麦白粉病菌对三唑酮的抗性测定方法的研究[J]. 华北农学报, 1996, 11(1): 93-96.

MA Z Q, LIU G R, YAN L E, et al. Methods for monitoring the sensitivity of wheat powdery mildew to triadimefon[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1996, 11(1): 93-96.

[13] 毕秋艳, 马志强, 韩秀英, 等. 离体叶段喷雾法建立小麦白粉病菌对三唑酮的敏感基线及其监测技术[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(9): 1287-1291.

BI Q Y, MA Z Q, HAN X Y, et al. Study on sensitivity and monitoring technology of *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* to triadimefon by spraying on leaf segments *in vitro*[J]. J Trit Crops, 2014, 34(9): 1287-1291.

[14] 刁亚梅, 栗寒, 李捷, 等. 小麦白粉病离体叶段筛选方法初探[J]. 浙江化工, 2000(S1): 78-79.

DIAO Y M, LI H, LI J, et al. Preliminary study on method for screening agents against wheat powdery mildew on wheat leaves *in vitro*[J]. Zhejiang Chem Ind, 2000(S1): 78-79.

[15] 农药室内生物测定试验准则 杀菌剂 第 4 部分: 防治小麦白粉病试验 盆栽法: NY/T 1156.4—2006[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.

Pesticides guidelines for laboratory bioactivity tests part 4: potted plant test for fungicide control of powdery mildew on wheat: NY/T 1156.4—2006[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.

[16] 邱占奎, 袁会珠, 楼少巍, 等. 水溶性染色剂诱惑红和丽春红-G 作为农药沉积分布的示踪剂研究[J]. 农药, 2007, 46(5): 323-325.

QIU Z K, YUAN H Z, LOU S W, et al. The research of water soluble dyes of allura red and ponceau-G as tracers for determining pesticide spray distribution[J]. Agrochemicals, 2007, 46(5): 323-325.

[17] 农药田间药效试验准则(一) 杀菌剂防治禾谷类白粉病: GB/T 17980.22—2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000: 91-93.

Pesticide-guidelines for the field efficacy trials(I)—fungicides against cereal powdery mildew: GB/T 17980.22—2000[S]. Beijing: Standards Press of China, 2000: 91-93.

[18] 崔丽, 王金凤, 秦维彩, 等. 机动弥雾法施用 70% 吡虫啉水分散粒剂防治小麦蚜虫的雾滴沉积密度与防效的关系[J]. 农药学报, 2010, 12(3): 313-318.

CUI L, WANG J F, QIN W C, et al. Relationship between droplet density and field efficacy when applying imidacloprid 70% WG against wheat aphids with knapsack mist-blower[J]. Chin J Pestic Sci, 2010, 12(3): 313-318.

[19] MUNTHALI D C, WYATT I J. Factors affecting the biological efficiency of small pesticide droplets against *Tetranychus urticae* eggs[J]. Pest Sci, 1986, 17(2): 155-164.

[20] WASHINGTON J R. Relationship between the spray droplet density of two protectant fungicides and the germination of *Mycosphaerella fijiensis* ascospores on banana leaf surfaces[J]. Pest Sci, 1997, 50(3): 233-239.

[21] 秦维彩. 单旋翼植保无人机喷雾参数优化研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017: 103-108.

QIN W C. Research on spraying parameters optimization for single-rotor plant protection UAV[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017: 103-108.

[22] 杨帅, 李学辉, 王国宾, 等. 飞行高度对八旋翼无人机喷雾防治小麦白粉病影响初探[C]//“创新驱动与现代植保”——中国植物保护学会第十一次全国会员代表大会暨 2013 年学术年会论文集. 青岛: 中国植物保护学会, 2013: 251-254.

YANG S, LI X H, WANG G B, et al. Effect of flight height on the control of wheat powdery mildew by spraying with eight rotor UAV[C]// Innovation driven and modern plant protection—China Society of Plant Protection the eleventh national congress of members and 2013 academic year will proceedings. Qingdao: China Society of Plant Protection, 2013: 251-254.

(责任编辑: 唐 静)