

网络出版时间: 2026-03-16

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1359.s.20260313.1807.008>

植保无人机白天与夜间作业雾滴沉积特性及对小麦白粉病的防效

田雪慧¹, 宋德平¹, 张宇帆², 于晓庆³, 万菲菲⁴, 常慧红⁴, 韩文凤⁵,
邵玉丽⁶, 巴秀成⁴, 王小梦⁴, 金宗亭⁴, 张路生⁴

(1. 滨州市农业科学院, 山东滨州 256600; 2. 山东农业大学植物保护学院, 山东泰安 271000;

3. 山东省农业技术推广中心, 山东济南 250000; 4. 滨州市农技推广中心, 山东滨州 256600;

5. 惠民县农业技术推广中心, 山东惠民 256600; 6. 滨州市滨城区农业技术推广中心, 山东滨州 256600)

摘要: 为比较植保无人机白天和夜间作业时雾滴在小麦植株不同部位的沉积规律和对小麦白粉病田间防治效果的影响, 以 20% 苯醚甲环唑·氟吡菌酰胺 SC 为供试药剂, 开展无人机白天和夜间施药试验, 分析小麦冠层的雾滴沉积量、雾滴密度和覆盖率等参数以及药后 7 和 14 d 对小麦白粉病的防治效果。结果表明, 同一喷液量和粒径下, 白天作业雾滴沉积量和覆盖率高于夜间作业, 而雾滴密度夜间高于白天, 平均比白天高 2.27%。从小麦不同冠层的沉积效果看, 雾滴密度、雾滴覆盖率和沉积量在小麦旗叶、倒二叶、倒三叶、倒四叶依次递减, 且雾滴密度、雾滴覆盖率和沉积量均为叶片正面高于背面。20% 苯醚甲环唑·氟吡菌酰胺 SC 施用量 $600 \text{ mL} \cdot \text{hm}^{-2}$ 对小麦白粉病有较好防效, 且夜间作业防效优于白天; 当喷液量为 $45 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、粒径 $50 \mu\text{m}$ 时, 防效最高, 药后 14 d, 白天施药防效为 57.73%, 夜间施药防效为 72.10%。植保无人机作业参数可参考此结果进行合理设置, 以有效防控小麦白粉病。

关键词: 植保无人机; 雾滴沉积特性; 冠层; 小麦白粉病; 防效

中图分类号: S512.1; S435.12

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)04-0559-08

Droplet Deposition and Wheat Powdery Mildew Control Effect of Plant Protection UAV Working During the Day and Night

TIAN Xuehui¹, SONG Deping¹, ZHANG Yufan², YU Xiaoqing³, WAN Feifei⁴, CHANG Huihong⁴,
HAN Wenfeng⁵, SHAO Yuli⁶, BA Xiucheng⁴, WANG Xiaomeng⁴, JIN Zongting⁴, ZHANG Lusheng⁴

(1. Binzhou Agricultural Science Academy, Binzhou, Shandong 256600, China; 2. College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271000, China; 3. Shandong Agricultural Technology Promotion Center, Jinan, Shandong 250000, China; 4. Binzhou Agricultural Technology Promotion Center, Binzhou, Shandong 256600, China;

5. Agricultural Technology Promotion Center in Huimin District, Huimin, Shandong 256600, China; 6. Agricultural Technology Promotion Center in Bincheng District, Binzhou, Shandong 256600, China)

Abstract: To compare the deposition patterns of spray droplets on different parts of wheat plants and their impact on the field control efficacy against wheat powdery mildew during daytime and nighttime operations of agricultural drones, a 20% tebuconazole·fluopyram SC was used as the test agent to conduct daytime and nighttime drone spraying trials. Parameters such as droplet deposition amount, droplet density, and coverage in the wheat canopy, as well as the control efficacy against wheat powdery mildew 7 and 14 days after treatment, were analyzed. The results showed that under the same spray volume and droplet size, daytime operations resulted in higher droplet deposition and coverage compared to nighttime, while droplet density was higher at night than during the day, averaging

收稿日期: 2025-07-21

修回日期: 2025-10-13

第一作者 E-mail: t18864805655@163.com (田雪慧)

通讯作者 E-mail: zhanglusheng@126.com (张路生)

2.27% higher. Analysis of deposition effects across different canopy layers revealed that droplet density, coverage, and deposition amount decreased sequentially in the flag leaf, penultimate leaf, third leaf from the top, and fourth leaf from the top, with all parameters being higher on the leaf surface than the underside. A $600 \text{ mL} \cdot \text{hm}^{-2}$ application rate of 20% tebuconazole · fluopyram SC demonstrated good efficacy against wheat powdery mildew, with nighttime operations yielding better results than daytime. When the spray volume was $45 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$ and droplet size was $50 \mu\text{m}$, the efficacy reached its peak, with 57.73% control efficacy from daytime spraying and 72.10% from nighttime spraying 14 days after treatment. These findings provide references for the rational setting of agricultural drone operation parameters and scientific basis for effective control of wheat powdery mildew.

Keywords: Plant protection UAV; Droplet deposition; Canopy; Wheat powdery mildew; Control effect

小麦白粉病是由禾布氏白粉菌小麦专化型 (*Blumeria graminis* f. sp. *Tritici*) 引起的一种气传性真菌病害,其传播距离远,危害范围广,已成为制约中国小麦生产的重要病害^[1-3]。白粉病可在小麦的各个生长阶段侵染危害,严重时会造成空粒、瘪粒,甚至腐烂,一般可导致小麦减产 10%~20%,严重时甚至颗粒无收^[4-5],威胁着小麦安全生产。目前,化学药剂防治仍是小麦白粉病最直接有效的防治方法^[6]。采取合理措施提高小麦白粉病防效对实现小麦高产稳产、保障国家粮食安全有重要意义。

小麦白粉病发生时,先由脚叶逐渐向剑叶扩散,严重时蔓延至芒、穗部,造成叶片、茎秆布满霉状物,加之病原菌随气流传播,为防治带来困难^[7]。随着农业机械化的迅速发展,植保无人机以其高效、安全、农药利用率高等优点^[8-9],被广泛应用于农作物病虫害的防治^[10-16]。研究药液雾滴在靶标作物冠层的沉积分布特性是利用植保无人机进行农药减量增效的基础^[17-18]。韩冲冲等^[19]研究了植保无人机不同飞行高度下雾滴在水稻冠层的沉积分布情况,发现作业高度 2 m 时雾滴穿透性最好。余文胜等^[20]研究表明,雾滴均匀沉积在茶树叶片的条件是无人机较大的喷雾流量和较低的速度。田志伟等^[21]认为,无人机夜间作业有利于提高棉蚜防治效果。柴阿丽等^[22]的研究结果显示,防治黄瓜棒孢叶斑病的最佳施药时间为孢子大量繁殖前的傍晚或晚上。无人机不同参数下雾滴在小麦冠层的沉积分布以及夜间作业对小麦白粉病的防治效果还未见报道。

氟吡菌酰胺 (fluopyram) 为线粒体琥珀酸脱氢酶抑制剂,对灰霉病、白粉病、褐腐病以及根结线虫均具有很强的活性^[23]; 苯醚甲环唑 (difeno-

conazole) 为三唑类杀菌剂,通过抑制病菌麦角甾醇的生物合成而干扰其正常生长,对黑星病、白粉病、褐斑病均具有较好防效^[24-25]。本试验拟以 20% 苯醚甲环唑 · 氟吡菌酰胺为供试药剂,研究昼夜条件下植保无人机在 50、100、200 μm 雾滴粒径和 30.0、45.0 $\text{L} \cdot \text{hm}^{-2}$ 喷液量下药液在小麦冠层的覆盖率、密度和沉积量,分析不同参数下小麦白粉病的防效,以期能为植保无人机作业性能提升及防治小麦白粉病提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试小麦品种:中麦 573。

供试药剂:20% 苯醚甲环唑 · 氟吡菌酰胺悬浮剂(SC),山东滨农科技有限公司提供。

供试机械:大疆 T60 植保无人机,型号 3WWDZ-50A,机身编码:78KBM220030107,飞行高度 2.5 m,飞行速度 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,喷幅 5 m。

1.2 试验条件

试验于 2024 年 5 月 1 日在山东省滨州市惠民县何坊镇盖前村 ($37^{\circ}31'52''\text{N}$, $117^{\circ}31'10''\text{E}$) 进行。白天作业时间为 16:00,气温 25.5°C ,风速 $1.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,相对湿度(RH)55.0%;晚上作业时间为 21:30,气温 19.2°C ,风速 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,RH 52.5%。

1.3 试验方法

本试验 20% 苯醚甲环唑 · 氟吡菌酰胺 SC 用量 $600 \text{ mL} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。将 85% 诱惑红配制为 5‰ 的水溶液作为示踪剂,现用现配。采用裂区设计,喷液量为主区,分别为 30.0、45.0 $\text{L} \cdot \text{hm}^{-2}$;雾滴粒径为裂区,分别为 50、100、200 μm ,以清水为对照(CK),具体见表 1。小区面积 850 m^2 ($10 \text{ m} \times 85 \text{ m}$),小区间设置 $10 \text{ m} \times 85 \text{ m}$ 的隔离区。在每个

小区中间各设置采样带 3 条,相邻采样带间隔 20 m,每条采样带中间各设置 3 个采样点,相邻采样点间隔 1 m (图 1)。每个采样点固定 1 株小麦,自上而下取小麦旗叶、倒二叶、倒三叶和倒四叶 4 片叶,每片叶正面和背面各布置 1 张纸卡。夜间和白天处理一致。

将纸卡收集于自封袋中,在 600 dpi 分辨率下进行扫描,采用 DepositScan 软件进行图像处理,获取无人机施药后的雾滴密度、覆盖率、沉积量等参数。

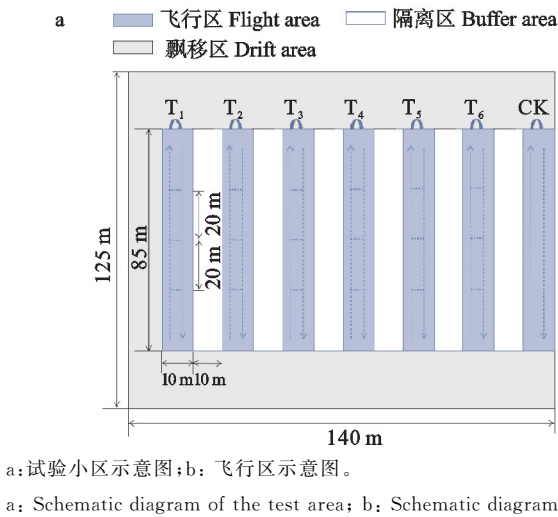


表 1 无人机作业参数		
Table 1 UAV operating parameters		
处理 Treatment	粒径 Droplet size/ μm	喷液量 Spraying volume/ $(\text{L} \cdot \text{hm}^{-2})$
T ₁	50	30.0
T ₂	100	30.0
T ₃	200	30.0
T ₄	50	45.0
T ₅	100	45.0
T ₆	200	45.0
CK	150	30.0

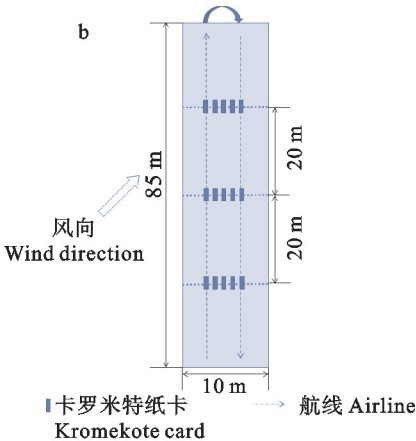


图 1 无人机喷药试验布置示意图
Fig.1 Layout diagram of UAV spraying test

1.4 测定指标与方法

1.4.1 白粉病防效

于施药前和施药后 7、14 d 参照 NY/T 613-2002 方法和分级标准定点定株调查病情,按照以下公式计算病情指数和防效:

病情指数 = $\frac{\sum(\text{各级病叶数} \times \text{相对级数值})}{\text{调查总数} \times \text{最高级别}} \times 100$

防治效果 = $\left(1 - \frac{\text{CK}_0 \times \text{PT}_1}{\text{CK}_1 \times \text{PT}_0}\right) \times 100\%$

CK₀:清水对照区施药前病情指数;CK₁:清水对照区施药后病情指数;PT₀:药剂处理区施药前病情指数;PT₁:药剂处理区施药后病情指数。

1.4.2 安全性调查

施药后 3、7、14 d 调查供试药剂对小麦生长安全性,观察是否有药害症状出现。

1.5 数据处理

试验数据采用 Excel 2021 和 SPSS 26.0 软

件进行统计分析,并应用 Duncan 氏新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 植保无人机作业时间及参数对雾滴沉积分布的影响

无人机作业时间对雾滴在小麦冠层的沉积效果存在显著影响(图 2)。总体来看,雾滴覆盖率和沉积量表现为白天作业优于夜间,而雾滴密度则夜间作业优于白天。T₆ 处理的雾滴覆盖率最大,夜间作业为 8.63%,白天为 11.17%,较夜间高 29.43%,两者间差异显著。T₄ 处理雾滴密度最大,夜间作业为 123.42 个·cm⁻²,白天为 120.68 个·cm⁻²,二者间差异不显著。T₆ 处理的沉积量最大,夜间作业为 1.20 μL·cm⁻²,白天为 1.17 μL·cm⁻²,二者间无显著差异。

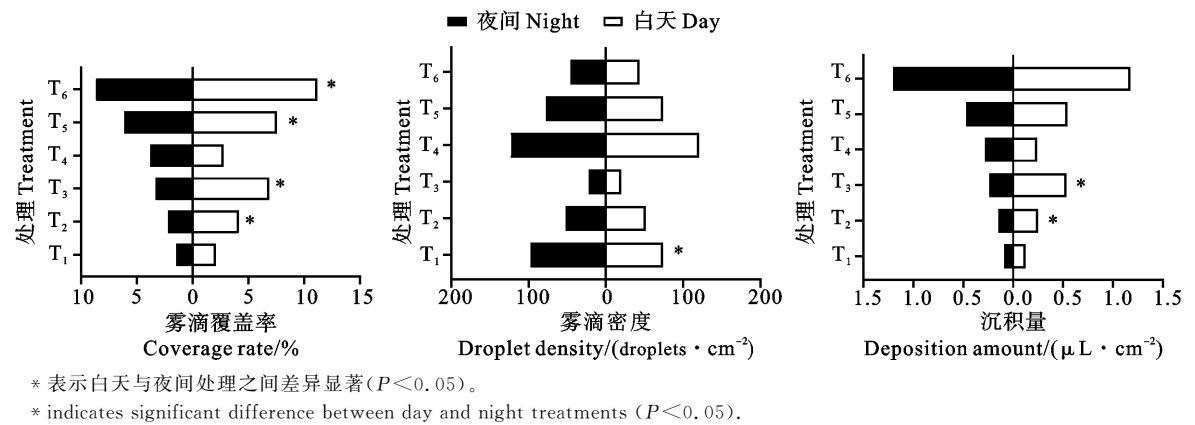


图 2 植保无人机白天和夜间施药雾滴沉积特性对比
Fig. 2 Comparison of droplets deposition after day and night spraying

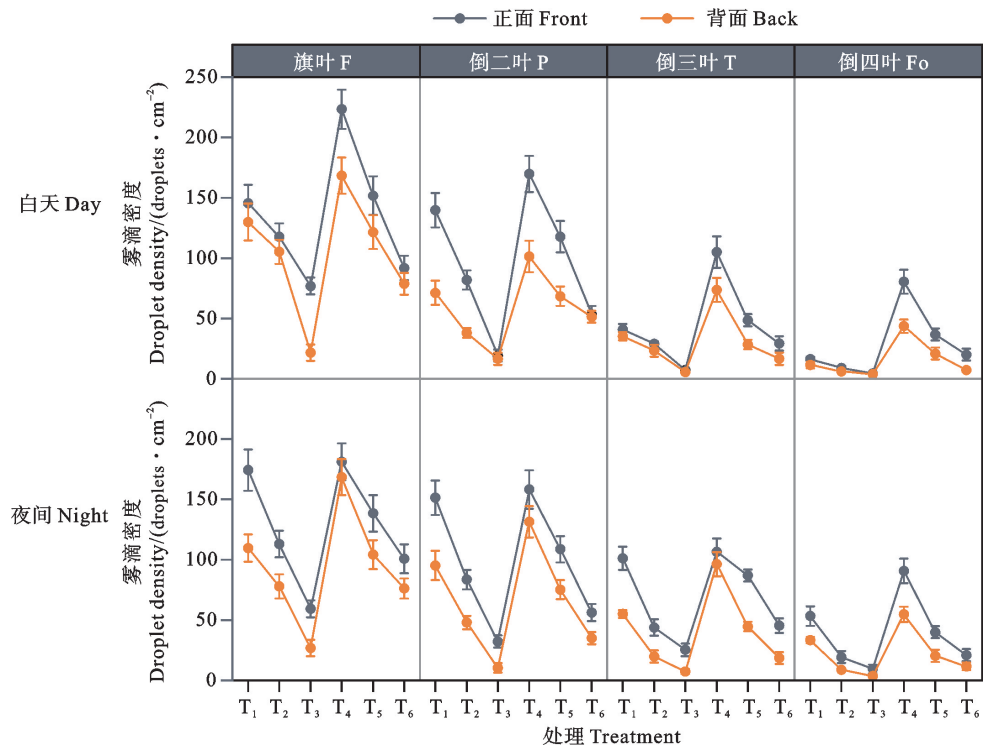
2.2 植保无人机不同作业参数对小麦冠层雾滴沉积特性的影响

植保无人机施药可使小麦冠层各部位和叶片正背两面均可着药,但不同部位和叶片正背面雾滴沉积效果有较大差异。总的来看,雾滴密度、雾滴覆盖率和沉积量在小麦旗叶、倒二叶、倒三叶、倒四叶上依次递减;叶片背面雾滴密度、雾滴覆盖率和沉积量均低于叶片正面(图 3~图 5)。

2.2.1 对小麦冠层雾滴密度的影响

喷液量相同时,雾滴密度随粒径的增大而显著减小(图 3, $P < 0.05$)。T₄ 处理雾滴密度最大,

白天施药小麦冠层由上至下四片叶正面雾滴密度依次为 223.35、169.71、105.10、80.43 个 · cm⁻²,背面依次为 168.36、101.30、73.64、43.53 个 · cm⁻²;夜间施药雾滴密度正面依次为 181.23、158.15、106.43、90.73 个 · cm⁻²,背面依次为 168.43、131.30、96.33、54.74 个 · cm⁻²。T₃ 处理雾滴密度最小,与 T₄ 处理相比,白天施药雾滴密度减少 65.59%~94.38%,夜间施药减少 67.28%~93.42%。因此无人机设置喷液量为 45 L · hm⁻²、粒径为 50 μm 时,小麦冠层的雾滴密度最大。



F: Flag leaf; P: Penultimate leaf; T: Third leaf from the top; F₀: Fourth leaf from the top. The same in figure 4 and figure 5.

图 3 不同处理下小麦冠层的雾滴密度
Fig. 3 Droplet density of wheat canopy under different treatments

2.2.2 对小麦冠层雾滴覆盖率的影响

当喷液量相同时,雾滴覆盖率随粒径的增加而增加(图 4)。其中, T_6 处理白天和夜间施药的雾滴覆盖率均显著高于其他 5 个处理($P<0.05$),白天施药叶片正面为 7.56%~23.46%,背面为 3.54%~13.33%;夜间施药叶片正面为 3.47%~21.49%,背面为 1.22%~10.47%; T_1 处理雾滴覆盖率最小,较 T_6 处理白天施药减少 67.56%~97.09%,夜间施药减少 69.47%~93.26%。因此,无人机设置喷液量为 $45\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、粒径为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 时,小麦冠层的雾滴覆盖率最大。

2.2.3 对小麦冠层沉积量的影响

由图 5 可知,喷液量相同时,沉积量随着粒径的增大而显著增加, T_6 处理白天和夜间作业的沉积量均高于其他处理,白天施药叶片正面为 $0.52\sim2.43\text{ }\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$,背面为 $0.22\sim2.21\text{ }\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$;夜间施药叶片正面为 $0.43\sim2.83\text{ }\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$,背面为 $0.18\sim1.91\text{ }\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。因此无人机设置喷液量为 $45\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、粒径为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 时,雾滴在小麦冠层的沉积量最大。

2.3 植保无人机昼夜作业及不同参数对小麦白粉病防效的影响

分析施药对小麦白粉病的防效发现,总体上,

夜间作业防效优于白天;不同喷液量和粒径对小麦白粉病的防效存在显著差异(表 2)。药后 7 d,当喷液量相同时,防效随雾滴粒径的增大而降低,当喷液量为 $45\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、粒径为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 时,对小麦白粉病的防效最高,白天施药为 51.10%,夜间施药为 70.14%,显著高于其他处理。药后 14 d,各处理的防效均有上升,不同处理的防效趋势与药后 7 d 基本一致,以喷液量 $45\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、粒径 $50\text{ }\mu\text{m}$ 防效最高,白天施药的防效为 57.73%,夜间施药的防效达 72.10%。

2.4 小麦的安全性

试验期间各处理对小麦未产生明显药害。

3 讨论

植保无人机在病虫草害防治中发挥着重要作用,其防治效果与作业参数密切相关^[26]。本研究探索了无人机喷液量、雾滴粒径与施药时间对小麦生长中后期白粉病的防治效果,结果可为无人机施药参数优化提供参考。

3.1 植保无人机昼夜作业及不同参数对小麦冠层雾滴沉积特性的影响

本研究雾滴沉积数据显示,覆盖率和沉积量整体趋势是白天作业优于夜间,而雾滴密度夜间

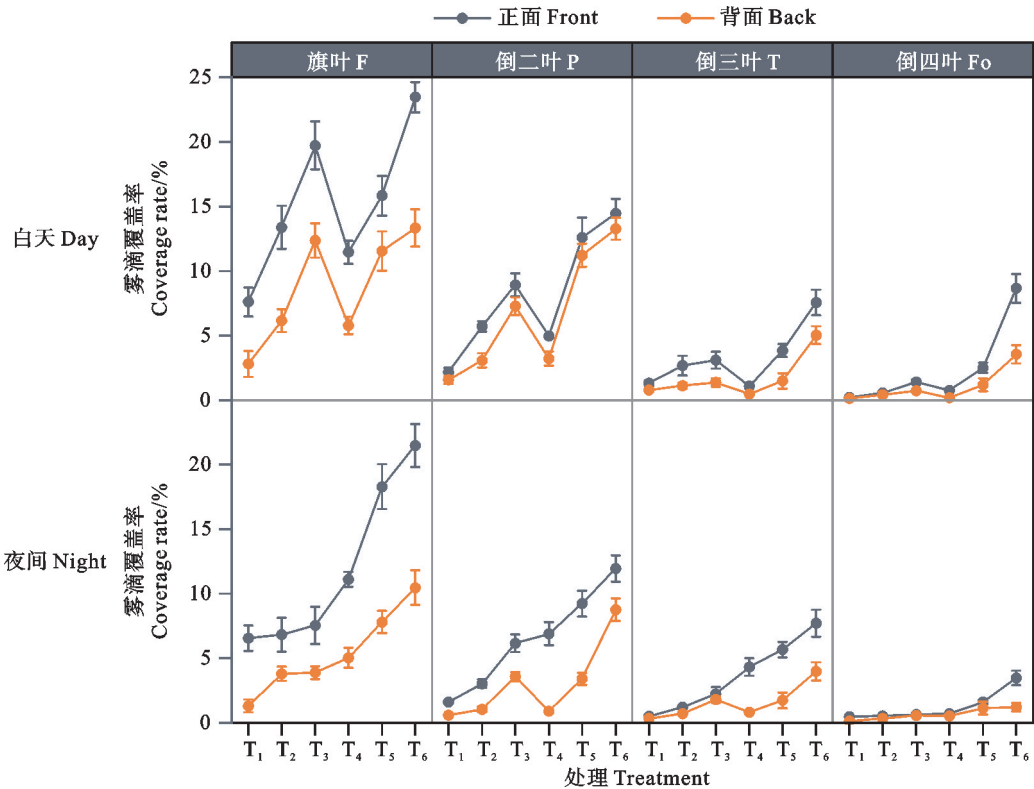


图 4 不同处理下小麦冠层的雾滴覆盖率

Fig. 4 Droplet coverage rate of wheat canopy under different treatments

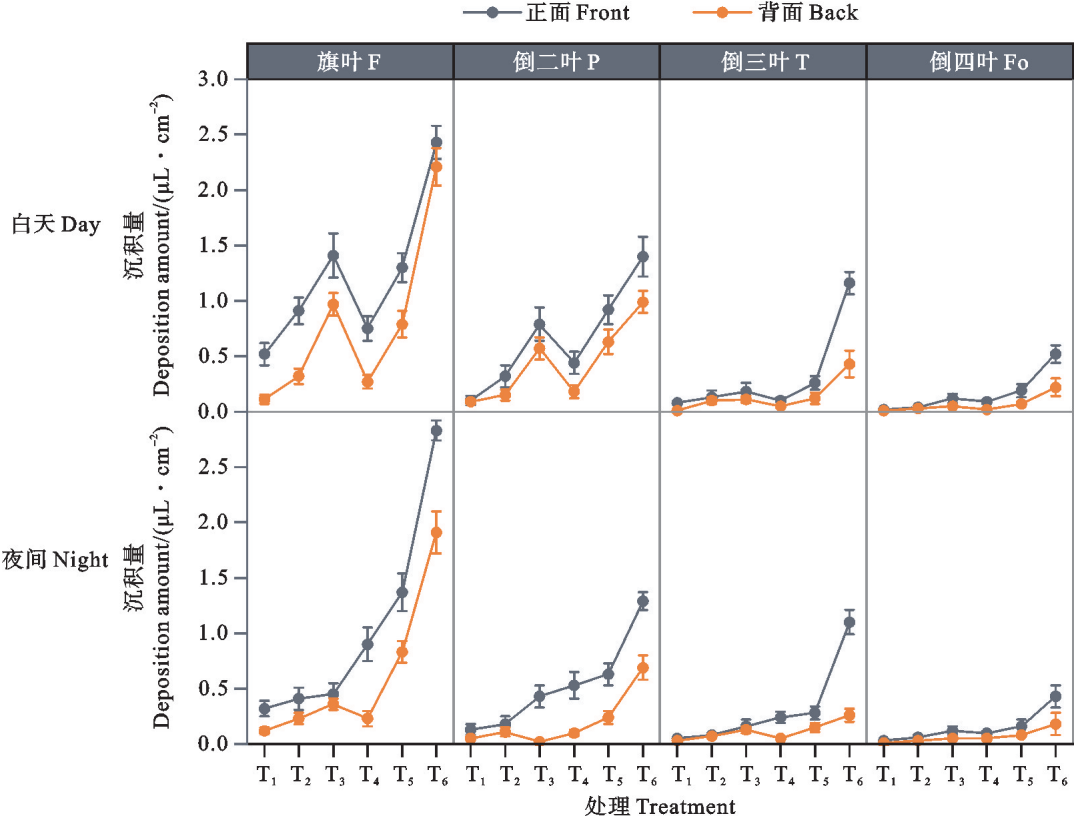


图 5 不同处理下小麦冠层的沉积量

Fig. 5 Deposition amount of wheat canopy under different treatments

表 2 植保无人机昼夜施药及不同参数对小麦白粉病的防效

Table 2 Wheat powdery mildew control effect of day and night spraying under different treatments

处理 Treatment			药后 7 d 7 days after application		药后 14 d 14 days after application	
施药时间 Spraying time	喷液量 Spray volume/ (L · hm ⁻²)	粒径 Droplet size/μm	病情指数 Disease index	防效 Control effect/%	病情指数 Disease index	防效 Control effect/%
白天 Day	30	50	0.31	48.75b	0.52	52.86abcd
		100	0.29	34.07cd	0.56	35.00cd
		200	0.30	26.55e	0.52	31.18d
	45	50	0.46	51.10b	0.48	57.73abc
		100	0.47	35.21cd	0.67	41.78bcd
		200	0.47	31.08de	0.67	40.97bcd
	CK		0.39	—	0.78	—
夜间 Night	30	50	0.53	52.80b	0.61	61.35ab
		100	1.26	50.61b	1.39	60.09ab
		200	1.33	39.44c	1.89	52.66abcd
	45	50	1.15	70.14a	0.98	72.10a
		100	2.13	51.74b	1.51	66.37a
		200	0.78	46.60b	1.36	59.34ab
	CK		2.06	—	3.22	—

同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters following data in same column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

优于白天,可能因为白天较高的温度和风速加剧了雾滴蒸发与飘移,导致雾滴密度降低。夜间低温、高湿和无风环境抑制了雾滴蒸发,使更多雾滴能够稳定附着于叶片表面,形成高密度沉积,从而提高药剂与病原菌的接触概率。这可能是夜间施药防效较高的原因,与袁会珠等^[27]提出的“雾滴密度是决定防效的关键因素”观点一致。

由于叶片的遮挡和雾滴的蒸发损失,雾滴覆盖率、沉积量和密度在小麦冠层旗叶、倒二叶、倒三叶、倒四叶依次递减,叶片正面高于背面,说明无人机施药对于集中在冠层上部和叶片正面的病害有较好防效。这主要由于无人机前进时下压风场对植株的扰动区域和雾滴沉降区域有一定的滞后效应^[21],导致叶片背面和冠层下部的沉积效果减弱,对防治集中在叶片背面、茎部甚至根部发生的病害有一定难度。

3.2 植保无人机昼夜作业及不同参数对小麦白粉病防效的影响

秦维彩^[28]使用单旋翼植保无人机喷施 44% 三唑酮 SC 防治小麦白粉病,施药 7 d 后防效达到 55.1%。本试验选用 20% 苯醚甲环唑·氟吡菌酰胺 SC 防治小麦白粉病,防效可达 70% 以上,差异原因是所用药剂和施药时间不一样。夜间施药防治效果优于白天,原因可能是夜间雾滴飘移和蒸发损失减小,药剂与靶标接触的概率越大则防效越高^[29]。通过减小粒径提高雾滴穿透性、增加喷液量可补偿冠层遮蔽效应,可在有限覆盖范围内实现关键部位的精准沉积。此策略与孔肖等^[30]提出的“靶标导向施药”理念相契合,同时避免了过大喷液量可能引发的农药浪费与环境风险。

综上,本研究条件下,昼夜作业以 20% 苯醚甲环唑·氟吡菌酰胺 SC 600 mL·hm⁻² 为供试药剂防治小麦白粉病时,植保无人机夜间施药喷雾粒径 50 μm、喷液量 45 L·hm⁻² 为较优方案,对小麦白粉病的防效最高。

参考文献:

- [1] 王晓宇,冯伟,王永华,等. 小麦白粉病严重度与植株生理性状及产量损失的关系[J]. 麦类作物学报, 2012, 32(6): 1192.
WANG X Y, FENG W, WANG Y H, et al. Relationship of physiological indexes and yield loss to severity level of wheat powdery mildew [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2012, 32(6): 1192.
- [2] 蔡荻荻,张羽,刘海燕,等. 基于成像高光谱的小麦冠层白粉病早期监测方法[J]. 中国农业科学, 2022, 55(6): 1110.
- [3] CAI W D, ZHANG Y, LIU H Y, et al. Early detection on wheat canopy powdery mildew with hyperspectral imaging [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(6): 1110.
- [4] 张眉,郭霞,辛志梅,等. 山东省小麦白粉病菌群体毒性鉴定和分析[J]. 山东农业科学, 2020, 52(7): 95.
ZHANG M, GUO X, XIN Z M, et al. Identification and analysis of population virulence of *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* in Shandong Province [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2020, 52(7): 95.
- [5] 李韬,李媛媛,李磊,等. 温室条件下小麦白粉病抗性的综合评价和高抗品种的筛选[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(4): 435.
LI T, LI Y Y, LI L, et al. Comprehensive evaluation of the resistance of 80 wheat accessions to powdery mildew disease and identification of elite resistant germplasms under greenhouse conditions [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(4): 435.
- [6] GAO H Y, HE D X, NIU J S, et al. The effect and molecular mechanism of powdery mildew on wheat grain prolamin [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2014, 152(2): 239.
- [7] 杜庆志,张建业,刘翔,等. 不同杀菌剂对小麦白粉病菌室内毒力测定及混配增效药剂筛选[J]. 植物保护, 2021, 47(6): 327.
DU Q Z, ZHANG J Y, LIU X, et al. Indoor toxicity test of different fungicides to wheat powdery mildew and screening of mixed synergistic agents [J]. *Plant Protection*, 2021, 47(6): 327.
- [8] 冯伟,李晓,刘万代,等. 白粉病对冬小麦籽粒品质性状及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(12): 1706.
FENG W, LI X, LIU W D, et al. Effects of powdery mildew infection on grain quality traits and yield of winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(12): 1706.
- [9] LAN Y B, CHEN S D. Current status and trends of plant protection UAV and its spraying technology in China [J]. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*, 2018, 1(1): 1.
- [10] 田志伟,薛新宇,李林,等. 植保无人机施药技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(1): 37.
TIAN Z W, XUE X Y, LI L, et al. Research status and prospects of spraying technology of plant-protection unmanned aerial vehicle [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2019, 40(1): 37.
- [11] 王佐乾,吴婧莲,吴涛,等. 不同植保机械在湖北稻田病虫害防治中的效能评价[J]. 河南农业科学, 2021, 50(2): 89.
WANG Z Q, WU J L, WU T, et al. Efficiency appraisal of automatic plant protection machinery controlling diseases and insect pests in Hubei paddy field [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2021, 50(2): 89.
- [12] 高兴祥,李美,李健,等. 不同喷雾因子对植保无人机防除小麦田杂草效果的影响[J]. 农药学报, 2020, 22(2): 340.
GAO X X, LI M, LI J, et al. Effect of different spray factors on weed control in wheat field by unmanned aerial vehicle [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2020, 22(2): 340.
- [13] WANG G B, LAN Y B, QI H X, et al. Field evaluation of an unmanned aerial vehicle(UAV) sprayer: Effect of spray volume on deposition and the control of pests and disease in wheat [J]. *Pest Management Science*, 2019, 75(6): 1546.
- [14] 包斐,韩海亮,徐红星,等. 植保无人机喷雾参数组合对鲜食

- 玉米草地贪夜蛾防效的影响[J]. 中国植保导刊, 2021, 41(10): 51.
- BAO F, HAN H L, XU H X, *et al.* The impact of spray parameter combinations in plant protection UAV on the efficacy against *Spodoptera frugiperda* in fresh corn [J]. *China Plant Protection*, 2021, 41(10): 51.
- [14] 王明, 王希, 何玲, 等. 植保无人机低空低容量喷雾在茶园的雾滴沉积分布及对茶小绿叶蝉的防治效果[J]. 植物保护, 2019, 45(1): 62.
- WANG M, WANG X, HE L, *et al.* Deposition distribution of pesticide droplets over the tea canopy and control efficiency against *Empoasca flavescens* sprayed by unmanned aerial vehicle(UAV) [J]. *Plant Protection*, 2019, 45(1): 62.
- [15] 徐兵强, 宋博, 熊金铭, 等. 植保无人机喷雾对枣树主要害虫防治效果评价[J]. 环境昆虫学报, 2021, 43(1): 245.
- XU B Q, SONG B, XIONG J M, *et al.* Field evaluation of unmanned aerial vehicle(UAV) as sprayer for chemical control of the main pests in jujube orchard [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2021, 43(1): 245.
- [16] 张路生, 于晓庆, 邵玉丽, 等. 植保无人机对大豆-玉米带状复合种植播后苗前喷雾的雾滴沉积特性及除草效果[J]. 植物保护, 2025, 51(1): 327.
- ZHANG L S, YU X Q, SHAO Y L, *et al.* Droplets deposition of herbicide by plant-protection UAV and control effect in soybean-maize strip intercropping after sowing and before seedling [J]. *Plant Protection*, 2025, 51(1): 327.
- [17] 康峰, 吴潇逸, 王亚雄, 等. 农药雾滴沉积特性研究进展与展望[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 1.
- KANG F, WU X Y, WANG Y X, *et al.* Research progress and prospect of pesticide droplet deposition characteristics [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(20): 1.
- [18] EBERT T A, DOWNER R A. A different look at experiments on pesticide distribution [J]. *Crop Protection*, 2006, 25(4): 299.
- [19] 韩冲冲, 李飞, 李保同, 等. 无人机喷施雾滴在水稻群体内的沉积分布及防效研究[J]. 江西农业大学学报, 2019, 41(1): 58.
- HAN C C, LI F, LI B T, *et al.* A study on deposition distribution of droplets by UAV spraying rice population and its efficacy [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2019, 41(1): 58.
- [20] 余文胜, 郑文钟, 洪一前, 等. 植保无人机作业参数对雾滴在茶树冠层沉积分布影响研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(12): 30.
- YU W S, ZHENG W Z, HONG Y Q, *et al.* Effects of operation parameters on deposition and distribution of UAV droplets in tea canopy [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(12): 30.
- [21] 田志伟, 薛新宇, 崔龙飞, 等. 植保无人机昼夜作业的雾滴沉积特性及棉蚜防效对比[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 69.
- TIAN Z W, XUE X Y, CUI L F, *et al.* Comparison of droplet deposition characteristics and cotton aphid control effect of plant protection UAV working during the day and night [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(5): 69.
- [22] 柴阿丽, 杨红敏, 王少骅, 等. 湿度调控设施黄瓜棒孢叶斑病菌产孢和释放规律及防治技术[J]. 中国农业科学, 2023, 56(15): 2907.
- CHAI A L, YANG H M, WANG S H, *et al.* Effect of humidity on sporulation and release of *Corynespora cassicola* and control technology [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(15): 2907.
- [23] 陶丽红, 李佳俊, 夏美荣, 等. 五种琥珀酸脱氢酶抑制剂类杀菌剂与灰葡萄孢琥珀酸脱氢酶的结合模式及抗性机制分析[J]. 农药学报, 2021, 23(6): 1085.
- TAO L H, LI J J, XIA M R, *et al.* Analysis of the binding modes and resistance mechanism of five succinate dehydrogenase inhibitor fungicides with *Botrytis cinerea* succinate dehydrogenase [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2021, 23(6): 1085.
- [24] 王壮. 丙环唑和苯醚甲环唑在禾花鲤体内的富集与激素干扰效应的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- WANG Z. Studies on the enrichment and hormone interference effects of propiconazole and difenoconazole in *Procypris merus*. [D]. Nanning: Guangxi University, 2021.
- [25] 陈吉荣, 李超, 李鹏飞, 等. 30% 氟吡菌酰胺·苯醚甲环唑悬浮剂的研制[J]. 农药, 2023, 62(11): 800.
- CHEN J R, LI C, LI P F, *et al.* Preparation of fluopyram·difenoconazole 30% SC [J]. *Agrochemicals*, 2023, 62(11): 800.
- [26] 郑加强, 徐幼林. 环境友好型农药喷施机械研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 1.
- ZHENG J Q, XU Y L. Development and prospect in environment-friendly pesticide sprayers [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(3): 1.
- [27] 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.
- YUAN H Z, WANG G B. Effects of droplet size and deposition density on field efficacy of pesticides [J]. *Plant Protection*, 2015, 41(6): 9.
- [28] 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.
- QIN W C. Research on spraying parameters optimization for single-rotor plant protection UAV [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.
- [29] 何勇, 吴剑坚, 方慧, 等. 植保无人机雾滴沉积效果研究综述[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2018, 44(4): 392.
- HE Y, WU J J, FANG H, *et al.* Research on deposition effect of droplets based on plant protection unmanned aerial vehicle: A review [J]. *Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences)*, 2018, 44(4): 392.
- [30] 孔肖, 闫晓静, 杨代斌, 等. 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[J]. 农药学报, 2018, 20(3): 301.
- KONG X, YAN X J, YANG D B, *et al.* Effects of concentration, droplet density of propiconazole and kresoximmethyl on the efficacy against wheat powdery mildew [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2018, 20(3): 301.