

引文格式: 胡红岩, 陈宇楠, 宋贤鹏, 等. 植保无人机喷施纳米农药对棉花蚜虫的防治效果研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(1): 54–60. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202106023](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202106023)

植保无人机喷施纳米农药对棉花蚜虫的防治效果研究*

胡红岩, 陈宇楠, 宋贤鹏, 任相亮, 马小艳, 马亚杰, 王 丹, 马 艳**
(中国农业科学院 棉花研究所, 棉花生物学国家重点实验室, 河南 安阳 455000)

摘要: 【目的】通过植保无人机在棉花苗期喷雾, 探讨纳米农药在棉田的沉积分布及对棉蚜的防治效果。【方法】采用安阳全丰 3WQF120-12 型植保无人机在 2 个飞行高度 (1.5 和 2.5 m) 下喷施纳米农药 (3.5% 啉虫脒·高效氯氟氰菊酯水性制剂) 和常规农药 (5% 啉虫脒+2.5% 高效氯氟氰菊酯), 以诱惑红为雾滴沉积和农药利用率测定的指示剂, 采用 Image J 软件分析雾滴密度和雾滴覆盖率。【结果】植保无人机在 1.5 和 2.5 m 飞行高度下喷施常规农药或纳米农药, 在棉花上的雾滴沉积密度和覆盖率均无显著差异 ($P>0.05$), 但纳米农药的雾滴密度 (73.84~95.12 个/cm²) 和覆盖率 (1.92%~3.22%) 低于常规农药的雾滴密度 (108.57~116.59 个/cm²) 和覆盖率 (3.86%~4.08%); 喷施纳米农药的利用率 (2.39%~2.75%) 低于常规农药 (3.89%~4.09%); 纳米农药的雾滴粒径更小, 施药后 7 d 的防效 (89.79%~95.23%) 显著高于常规农药的防效 (70.52%~79.01%) ($P<0.05$), 且在 1.5 m 高度下对棉蚜的防效达到人工喷雾水平。【结论】在棉花苗期采用植保无人机在 1.5 m 飞行高度下喷施 3.5% 啉虫脒·高效氯氟氰菊酯纳米农药可以有效防治棉蚜, 可在棉田大面积推广应用。

关键词: 植保无人机; 纳米农药; 飞行高度; 棉蚜; 防治效果

中图分类号: S252+.3 文献标志码: A 文章编号: 1004-390X(2022) 01-0054-07

Control Effect on Cotton Aphids of Nanopesticide Sprayed with Plant Protection Unmanned Aerial Vehicles in Cotton Field

HU Hongyan, CHEN Yunan, SONG Xianpeng, REN Xiangliang, MA Xiaoyan,
MA Yajie, WANG Dan, MA Yan

(State Key Laboratory of Cotton Biology, Institute of Cotton Research, Chinese Academy of
Agricultural Sciences, Anyang 455000, China)

Abstract: [Purpose] To explore droplet deposition and control effect of nanopesticide on cotton aphids, spray tests were carried out by plant protection unmanned aerial vehicle (UAV) in cotton field (seedling stage). [Methods] Nanopesticide (3.5% acetamiprid) and conventional pesticide (5% acetamiprid and 2.5% lambda-cyhalothrin) were sprayed by Anyang Quanfeng 3WQF120-12 UAV under two flight heights (1.5 and 2.5 m). Allura red was used as a tracer in determination of droplet deposition and pesticide utilization. The droplet density and coverage rate were analyzed by image

收稿日期: 2021-06-25 修回日期: 2021-09-16 网络首发日期: 2022-01-07

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (31801751); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (1610162021029); 中国农业科学院科技创新工程。

作者简介: 胡红岩 (1986—), 女, 河南安阳人, 博士, 副研究员, 主要从事昆虫分子生态学研究。

E-mail: huhongyan1986@163.com

**通信作者 Corresponding author: 马艳 (1970—), 女, 河南安阳人, 学士, 研究员, 主要从事植物保护及农药应用技术研究。E-mail: aymayan@126.com

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.s.20220105.1137.001.html>



processing software Image J. [Results] There was no significant difference in droplet deposition density and coverage rate on cotton when conventional pesticide or nanopesticide sprayed by UAV at flight height of 1.5 m and 2.5 m ($P>0.05$). The droplet density ($73.84\text{--}95.12\text{ cm}^{-2}$) and coverage rate ($1.92\%\text{--}3.22\%$) of nanopesticide were lower than those of conventional pesticide ($108.57\text{--}116.59\text{ cm}^{-2}$ and $3.86\%\text{--}4.08\%$). The utilization rate ($2.39\%\text{--}2.75\%$) of nanopesticide spraying was lower than that of conventional pesticide ($3.89\%\text{--}4.09\%$). Nanopesticide droplets had smaller particle size, and seven days after application, the efficacies of nanopesticide sprayed by UAV ($89.79\%\text{--}95.23\%$) were significantly higher than those of conventional pesticide ($70.52\%\text{--}79.01\%$) ($P<0.05$). The control effect of cotton aphid reached the level of manual spray at the height of 1.5 m. [Conclusion] In the seedling stage of cotton, 3.5% acetamiamidine-beta-cyhalothrin nanometer pesticide sprayed by UAV at a height of 1.5 m can effectively control cotton aphid, which can be widely applied in the field.

Keywords: plant protection unmanned aerial vehicle; nanopesticide; flight height; cotton aphid; control effect

棉花是中国主要的经济作物之一,总种植面积约占中国经济作物的1/3。棉花病虫害种类繁多,高达300多种,常见的害虫有30多种,病害有20多种;棉花常年受病虫害威胁,造成的经济损失达15%~20%^[1]。棉蚜是棉花苗期的重要害虫之一,习惯聚集于棉花嫩头或叶片背部刺吸棉花汁液,造成棉花植株矮小、叶片卷曲和萎缩,蚜虫排泄的蜜露容易滋生霉菌,造成煤污病,影响棉花正常生长,严重时造成棉花减产甚至死亡^[2]。棉花蚜虫发生频繁,已成为制约棉花生产的重要因素。提高农药对棉蚜的防治效果尤为重要。

长期以来,棉花蚜虫的化学防治主要依赖传统的施药器械,如人工背负式喷雾器和喷杆喷雾机等地面机械,存在劳动强度大、作业成本高和作业效率低等问题。棉蚜属于暴发性害虫,采用传统植保技术施药难以在短期内达到普遍防治的要求^[3]。近年来,中国农业航空产业发展迅速,植保无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)航空施药成为新型植保作业方式^[4]。植保无人机属于低空低量施药,旋翼产生的下压风场有利于增加药液雾滴对作物的穿透性及均匀性,作业效果优于手动植保机械^[5-6]。目前,植保无人机施药技术在小麦、玉米和水稻等作物得到了广泛应用,在橡胶、槟榔和柑橘等高大植株的病虫害防治中也发挥了重要作用^[7-11]。

大量作业实践结果证明:植保无人机作业效果与无人机机型、作业参数和作物长势等因素有关^[12-14],同时还受药剂类型和助剂等影响^[15-16]。植保无人机多采用离心和雾化喷头,喷出的雾滴直

径细小;而传统剂型农药分子粒径过大、溶解性差且杂质较多,容易堵塞喷头,不适合植保无人机使用。因此,急需开发粒径更小、渗透更强、适应植保无人机作业的新型农药剂型。纳米农药粒径范围小,具有水溶性好、渗透性强、持效性好、沉降速度快和飘移小等特点^[17-18],适宜植保无人机作业。肖汉祥等^[19]分别在水稻分蘖期和破口期采用广州极飞P20植保无人机喷施南京善思航空专用纳米农药,发现纳米农药对水稻稻飞虱和稻纵卷叶螟的防效均在90%以上,明显优于常规药剂;赵莲英^[20]使用大疆MG-1S植保无人机在水稻田喷施杀虫剂防治水稻病虫害,发现纳米农药水性制剂组合对病虫害的总体防效优于常规药剂组合,对水稻具有一定的增产效果。但在棉花蚜虫植保无人机防治方面,仍以传统农药及助剂的筛选为主^[21-22],目前尚无无人机喷施纳米农药在棉蚜防治方面的报道。本研究通过植保无人机喷施常规药剂和纳米药剂,分析不同类型药剂在棉田的雾滴沉积分布和药液利用情况,验证纳米农药对棉蚜的防治效果,以期对纳米农药的大面积推广应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试药剂

药剂:纳米药剂为3.5%啉虫脒·高效氯氟氰菊酯水性制剂,由南京善思生物科技有限公司提供;常规药剂由5%啉虫脒和2.5%高效氯氟氰菊酯混配而成,其中5%啉虫脒由安阳全丰生物科技有限公司提供,2.5%高效氯氟氰菊酯由济南

绿霸农药有限公司提供。采用食品染色剂诱惑红(西安依诺进出口贸易有限公司生产)作为雾滴沉积分布的指示剂。

1.2 供试设备

3WQF120-12 型智能油动单旋翼农用植保无人机由安阳全丰生物科技有限公司提供, 喷头型号为德国 LECHLER 公司的 LU120-015, 无人机主要性能参数如表 1 所示。人工背负式喷雾器为“没得比 (Matabi)”16 型喷雾器, 由西班牙 GO-izPER 喷雾器有限公司生产。

1.3 试验地概况

试验地设在中国农业科学院棉花研究所试验农场(河南省安阳县)。棉花品种为中棉所 79, 种植密度为 5.5 万株/hm², 行距 0.8 m。棉花处于苗期, 平均株高 0.1 m。施药期间天气晴朗, 南向微风,

表 1 全丰 3WQF120-12 植保无人机主要参数
Tab. 1 Main parameters of Quanfeng 3WQF120-12 UAV

主要参数 main parameter	数值 value
整机尺寸/m overall size	2.13×0.70×0.67
整机质量/kg overall weight	30
药箱容量/L pesticide tank capacity	12
喷洒流量/(L·min ⁻¹) spraying flow	0.8~1.6
飞行高度/m flight height	1~3
有效喷幅/m spraying swath	4~6
飞行速度/(m·s ⁻¹) flight velocity	2~6

平均风速 1.6 m/s, 温度 27.6 ℃, 相对湿度 42.9%。

1.4 试验方法

1.4.1 试验设计与处理

试验共设 7 个处理(表 2), 每处理小区长 50 m, 宽 16.8 m, 面积 840.0 m²。为避免各小区相互干扰, 小区之间设置 4 m 宽隔离带。

表 2 试验设计
Tab. 2 Test design

处理 treatment	施药方式 spray method	药剂 pesticide	飞行高度/m flight height
1	植保无人机喷雾 plant protection UAV spray	常规农药 conventional pesticide	1.5
2		常规农药 conventional pesticide	2.5
3		纳米农药 nanopesticide	1.5
4		纳米农药 nanopesticide	2.5
5	人工喷雾 manual spray	常规农药 conventional pesticide	—
6		纳米农药 nanopesticide	—
7 (CK)	—	不施药 no pesticide application	—

常规药剂和纳米药剂处理中啉虫脒有效成分为 30 g/hm², 高效氯氟氰菊酯有效成分为 22.5 g/hm², 各处理药液中添加 150 g/hm² 的诱惑红。前期植保无人机喷雾试验^[23-24]结果表明: 无人机飞行高度和喷雾量是影响雾滴沉积分布的重要因素, 为提高雾滴在棉花叶片上的有效沉积, 本研究植保无人机在 5 m/s 的飞行速度下, 采用 18 L/hm² 的喷液量进行喷雾。为评估飞行高度对植保无人机喷雾效果的影响, 设置飞行高度为 1.5 和 2.5 m。人工喷雾处理喷雾量为 450 L/hm²。

1.4.2 雾滴沉积分布的测试布点和测定

以水敏纸为雾滴采集卡, 并在无人机喷雾小区内横向 15 株棉花上进行布设(图 1), 每株棉花选取 1 个叶片用回行针将水敏纸固定到棉花叶片上, 每排间距为 10 m。喷雾结束后, 收集每个采样点的水敏纸, 并依次标记各采样点位置(-7、-6、-5、-4、-3、-2、-1、0、1、2、3、4、5、6、7), 带回室内用扫描仪(Epson Perfection V850 Pro, 爱

普生中国有限公司生产)扫描, 扫描后的图片用 Image J 1.38X 图像分析软件进行分析, 得到覆盖密度和雾滴覆盖率等雾滴沉积分布参数。以雾滴体积累计分布为 50% 的雾滴直径, 即雾滴体积中径 ($D_{v0.5}$) 比较分析不同处理的雾滴粒径大小。

1.4.3 农药沉积利用率测定

参照石鑫等^[25]的方法利用诱惑红作为示

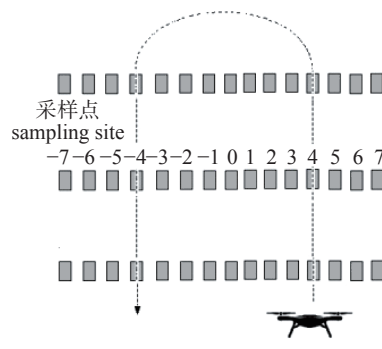


图 1 采样点布置示意图
Fig. 1 Sampling site layout diagram

踪剂测定农药利用率。喷雾结束后, 在布置雾滴测试卡的棉株附近取样, 每点取 1 株棉花, 放入自封袋中, 带回室内用蒸馏水进行洗涤, 总体积为 20 mL, 振荡洗涤时间为 5 min, 洗涤液用 0.45 μm 水系过滤膜过滤后留取 5 mL, 用酶标仪 (Bio-tek SynergyHT 型, 美国伯腾仪器有限公司生产) 测定诱惑红的质量浓度, 根据公式计算农药利用率 (pesticide utilization, PU); 以农药利用率的变异系数 (variable coefficient, VC) 衡量无人机喷洒的均匀性, 变异系数越小表示药液沉积越均匀。

$$\text{PU} = \frac{\rho \times V \times n}{S \times L} \times 100\%;$$

$$\text{VC} = \frac{\text{PU}_{\text{SD}}}{\text{PU}_{\text{mean}}} \times 100\%。$$

式中: ρ 为洗涤液诱惑红质量浓度, V 为洗涤液总体积, n 为小区棉花株数, S 为小区面积, L 为单位面积诱惑红施用量, PU_{SD} 为农药利用率标准差, PU_{mean} 为农药利用率平均值。

1.4.4 棉蚜防效调查

施药前在每小区随机 5 点取样, 每点标记 12 株棉花, 调查每株棉花上的蚜虫数量, 分别于施药后 1、3 和 7 d 调查各小区蚜虫的数量, 计算各处理棉花蚜虫的防效 (control efficacy, CE)。

$$\text{CE} = \frac{1 - (C_1 \times T_2)}{C_2 \times T_1} \times 100\%。$$

式中: C_1 和 C_2 分别为空白对照区药前和药后虫数, T_1 和 T_2 分别为药剂处理区药前和药后虫数。

1.5 数据处理与分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2016 进行整理, 通过 SPSS 20.0 单因素方差分析, 选择 Duncan 氏新复极差法进行差异显著性检验。

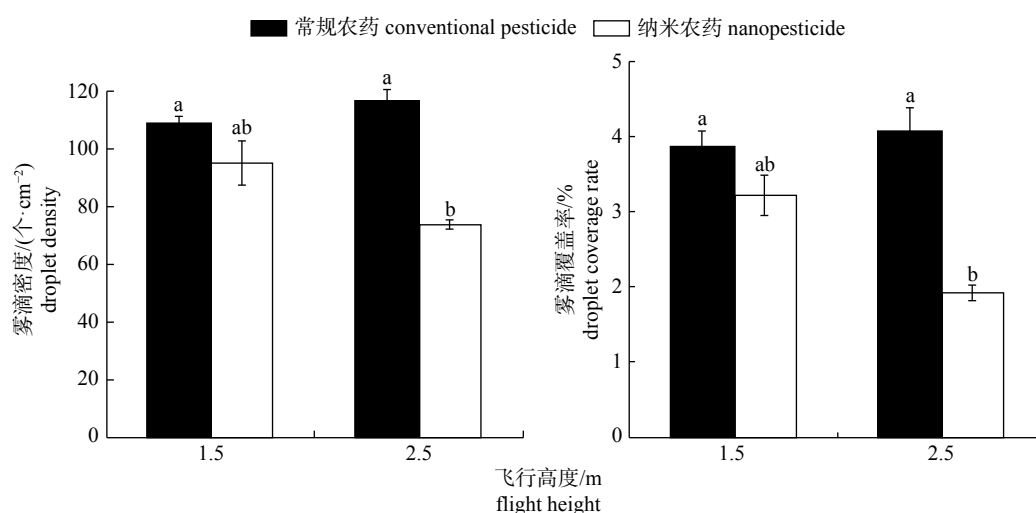
2 结果与分析

2.1 雾滴密度及雾滴覆盖率

由图 2 可知: 飞行高度为 1.5 和 2.5 m 时, 植保无人机喷施常规农药的雾滴密度分别为 108.57 和 116.59 个/ cm^2 , 覆盖率分别为 3.86% 和 4.08%, 两处理间差异不显著 ($P>0.05$); 植保无人机喷施纳米农药时, 1.5 和 2.5 m 飞行高度下雾滴密度分别为 95.12 和 73.84 个/ cm^2 , 覆盖率分别为 3.22% 和 1.92%, 两处理间差异也不显著 ($P>0.05$)。说明无人机喷施同种农药制剂时, 飞行高度对雾滴密度和雾滴覆盖率的影响不明显。飞行高度为 1.5 m 时, 常规农药与纳米农药的雾滴密度及覆盖率差异不显著; 但当飞行高度上升到 2.5 m 时, 常规农药喷雾的雾滴密度和覆盖率均显著大于纳米农药 ($P<0.05$)。

2.2 雾滴粒径分布

由图 3 可知: 飞行高度为 1.5 m 时, 植保无人机喷施常规农药和纳米农药在各个采样点的雾滴粒径变化趋势一致, 均表现为在航线下方 (采



注: 不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$); 下同。

Note: Different lowercase letters mean significant difference ($P<0.05$); the same as below.

图 2 雾滴密度和雾滴覆盖率

Fig. 2 Droplet density and droplet coverage rate

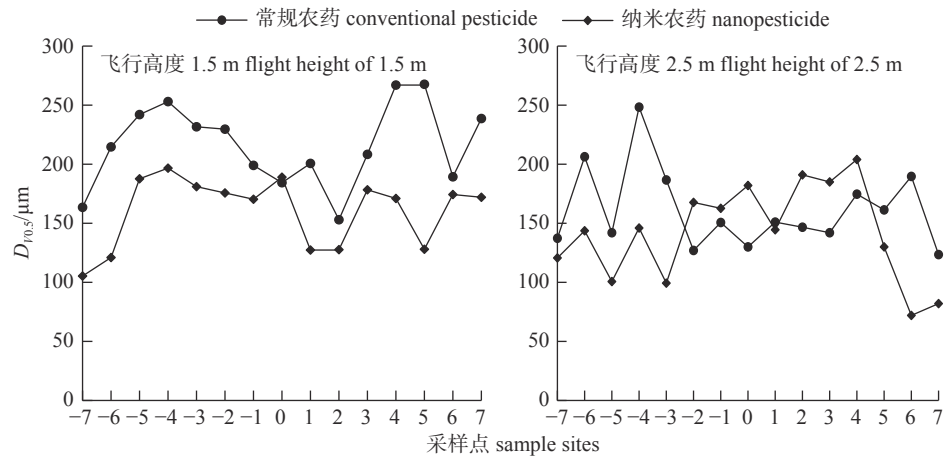


图 3 雾滴粒径分布

Fig. 3 Droplet size distribution

样点-4 和采样点 4) 雾滴粒径较大, 远离航线的两侧雾滴粒径较小。总体来看, 喷施常规农药的雾滴粒径较大, $D_{10.5}$ 变化范围是 150~238 μm ; 喷施纳米农药的雾滴粒径较小, $D_{10.5}$ 变化范围在 105~197 μm 。飞行高度增加至 2.5 m 时, 无人机喷施 2 种类型药剂后多数采样点雾滴 $D_{10.5}$ 在 150 μm 上下浮动。喷施常规农药的雾滴 $D_{10.5}$ 变化范围为 123~248 μm , 平均为 161 μm ; 纳米农药的雾滴 $D_{10.5}$ 变化范围为 72~204 μm , 平均为 142 μm 。

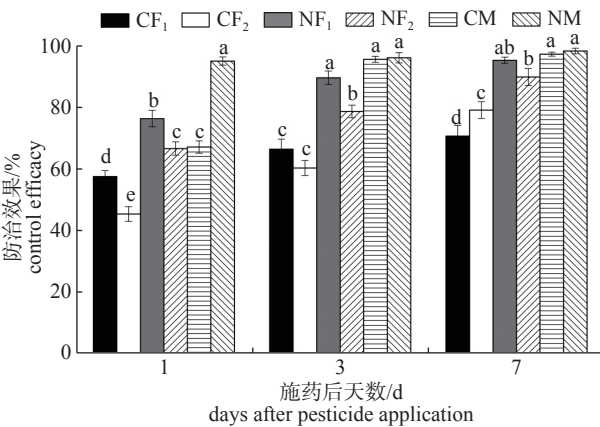
2.3 农药沉积利用率

由表 3 可知: 2 种飞行高度下植保无人机喷施常规农药的利用率分别为 3.89% 和 4.09%, 两者利用率相当且与人工喷雾 (处理 5) 的利用率 (5.40%) 差异不显著 ($P>0.05$); 2 种飞行高度下喷施纳米农药的利用率分别为 2.39% 和 2.75%, 两者间无显著差异 ($P>0.05$), 但均显著低于人工喷雾 (处理 6, 6.28%) ($P<0.05$)。飞行高度为 1.5 和

2.5 m 时, 常规农药处理的利用率均显著高于纳米农药处理 ($P<0.05$)。

2.4 棉蚜防治效果

由图 4 可知: 施药后 1 d, 各处理对棉蚜表现出较好的防治效果, 在 1.5 和 2.5 m 飞行高度下, 植保无人机喷施常规农药对棉蚜的防效分别为 57.36% 和 45.17%, 喷施纳米农药的防效达到 76.24% 和 66.49%, 显著高于喷施常规农药处理的防效, 但均显著低于人工喷施纳米农药的防效 ($P<0.05$)。施药后 3 和 7 d, 各处理对棉蚜的防效上升, 植保无人机在 1.5 和 2.5 m 飞行高度下喷



注: 图例 CF₁ 和 CF₂ 分别为植保无人机 (UAV) 在飞行高度 1.5 和 2.5 m 时喷施常规农药; NF₁ 和 NF₂ 分别为 UAV 在飞行高度 1.5 和 2.5 m 时喷施纳米农药; CM 和 NM 分别为人工喷施常规农药和纳米农药。
Note: Legend CF₁ and CF₂ mean plant protection unmanned aerial vehicles (UAV) spray conventional pesticide at flight height 1.5 and 2.5 m, respectively; NF₁ and NF₂ mean UAV spray nanopesticide at flight height 1.5 and 2.5 m, respectively; CM and NM mean manual spray conventional pesticide and nanopesticide, respectively.

图 4 棉蚜的防治效果

Fig. 4 Control efficacy on cotton aphids

表 3 不同处理的农药利用率		
Tab. 3 Pesticide utilization of different treatments		
处理 treatment	农药利用率/% pesticide utilization	变异系数/% variable coefficient
1	3.89±0.68 bc	38.83
2	4.09±0.50 b	27.36
3	2.39±0.50 d	46.74
4	2.75±0.41 cd	33.00
5	5.40±0.47 ab	19.62
6	6.28±0.21 a	7.64

注: 不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters mean significant difference ($P<0.05$).

施纳米农药的防效均显著高于喷施常规制剂处理的防效 ($P<0.05$), 其中, 在 1.5 m 高度下喷施纳米农药的防效最高, 与人工喷雾防效相当。

3 讨论

本研究中, 在棉花叶片正面布设了雾滴测试卡, 分析不同施药参数下的雾滴沉积分布情况, 结果显示: 植保无人机在 1.5 和 2.5 m 飞行高度下喷施常规农药或纳米农药, 在棉花上的雾滴沉积密度和覆盖率均无显著差异, 表明在喷施药剂相同时, 飞行高度对雾滴沉积的影响不大。课题组前期研究了 3WQFTX-10 电动植保无人机在棉花苗期施药, 结果表明: 无人机飞行高度影响棉花叶片背面的雾滴沉积, 而对叶片正面的雾滴沉积影响较小^[24], 与本研究结果一致。

雾滴粒径是评价喷雾效果的指标之一, 其大小影响雾滴沉积及漂移^[26]。本研究表明: 飞行高度为 1.5 m 时, 植保无人机喷施常规农药与纳米农药的雾滴密度及覆盖率差异不大; 而飞行高度为 2.5 m 时, 纳米农药的雾滴密度和覆盖率均低于常规农药。这可能是由于纳米农药雾滴粒径更小, 随着飞行高度的增加, 其更容易受环境风速的影响而发生漂移^[27], 减少药液在棉花植株上的有效沉积。

施药技术是影响农药利用率的重要因素。常规施药器械采用大容量和大雾滴喷雾技术, 往往造成农药流失严重和利用率低; 植保无人机施药采用低容量和细雾滴喷雾技术, 有利于提高农药雾滴分布均匀性及农药利用率^[28]。作物生育期和植株冠层结构也是影响农药利用率的因素之一, 研究认为作物苗期所施农药的利用率低于其他生育期^[29]。本研究结果显示: 无论采用哪种施药器械施药, 棉花苗期对农药的利用率均较低 (不足 7%), 且植保无人机喷施的农药利用率低于人工背负式喷雾器施药, 这可能与棉花生育期及 2 种施药器械的喷雾方式有关。本研究在棉花苗期进行, 棉花植株小、叶面积覆盖度低、地面裸露大, 无人机喷雾属于全覆盖式喷雾, 施药过程中大量药液沉积在地面上, 造成药液流失严重, 而人工喷雾是对准棉苗进行喷雾, 因此, 其农药利用率略高于无人机喷雾。另外, 植保无人机喷雾雾滴粒径小, 作业过程中更易受到环境风速的影响而发生漂移^[27], 这也可能是造成农药利用率偏低的原因之一。

与传统农药制剂相比, 纳米农药制剂有利于改善难溶农药的分散性, 提高活性成分的生物活性, 同时具有较强的抗雨水冲刷能力, 可以延长在作物上的持效期, 且对作物安全^[19-20]。本研究中植保无人机无论在何种飞行高度下作业, 喷施纳米农药对棉蚜的防治效果均高于常规农药, 其原因可能是纳米农药粒径较传统农药更小, 具有更大的分散度, 提高了啉虫脒和高效氯氟氰菊酯的生物活性, 因此, 其对棉蚜的防治效果比常规农药更高。

4 结论

棉花苗期植保无人机喷施同种农药制剂时, 飞行高度对雾滴沉积分布及农药利用率的影响不明显; 1.5 m 飞行高度下, 植保无人机喷施常规农药与纳米农药雾滴在棉花上沉积密度和覆盖率差异不明显, 但纳米农药的雾滴粒径更小; 纳米农药的利用率低于常规农药, 但对棉蚜的防治效果优于常规农药。植保无人机喷施 3.5% 啉虫脒·高效氯氟氰菊酯纳米农药可以有效防治棉蚜, 因此可在棉花苗期大面积推广应用。

[参考文献]

- [1] 马小艳, 王志国, 姜伟丽, 等. 无人机飞防技术现状及在我国棉田应用前景分析[J]. 中国棉花, 2016, 43(6): 7. DOI: 10.11963/issn.1000-632X.201606002.
- [2] 焦雨轩, 薛新宇, 丁素明, 等. 不同植保机械施药对棉蚜防效的影响[J]. 农机化研究, 2022, 44(3): 159. DOI: 10.13427/j.cnki.njyi.2022.03.029.
- [3] 袁会珠, 王中群, 孙瑞红, 等. 喷洒部件及喷雾助剂对担架式喷雾机在田园喷雾中的雾滴沉积分布的影响[J]. 植物保护, 2010, 36(1): 106. DOI: 10.3969/j.issn.0529-1542.2010.01.024.
- [4] 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. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.009.
- [5] 陈盛德, 兰玉彬, BRADLEY K F, 等. 多旋翼无人机旋翼下方风场对航空喷施雾滴沉积的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 105. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.011.
- [6] 刘德江, 龚艳, 王果, 等. 果园航空喷雾的农药沉积分布比较[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(6): 207. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2018.06.054.
- [7] WANG G B, LAN Y B, YUAN H Z, et al. Comparison of spray deposition, control efficacy on wheat aphids and working efficiency in the wheat field of the unmanned aerial vehicle with boom sprayer and two conventional knapsack sprayers[J]. Applied Sciences, 2019, 9(2): 218. DOI: 10.3390/app9020218.
- [8] 秦维彩, 薛新宇, 周立新, 等. 无人直升机喷雾参数对玉米冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 农业工程学报, 2014,

- 3(5): 50. DOI: [10.3969/j.issn.1002-6819.2014.05.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2014.05.007).
- [9] QIN W C, QIU B J, XUE X Y, et al. Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers[J]. *Crop Protection*, 2016, 85: 79. DOI: [10.1016/j.cropro.2016.03.018](https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.03.018).
- [10] TANG Y, HOU C J, LUO S M, et al. Effects of operation height and tree shape on droplet deposition in citrus trees using an unmanned aerial vehicle[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 148: 1. DOI: [10.1016/j.compag.2018.02.026](https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.026).
- [11] 袁会珠, 薛新宇, 闫晓静, 等. 植保无人机低空低容量喷雾技术应用与展望[J]. *植物保护*, 2018, 44(5): 152. DOI: [10.16688/j.zwbh.2018307](https://doi.org/10.16688/j.zwbh.2018307).
- [12] 陈鹏超. 植保无人机机型和喷头对雾滴沉积效果的试验研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.
- [13] 陈晓, 刘德江, 王果, 等. 喷雾参数及助剂类型对植保无人机在棉花中期喷雾雾滴沉积分布的影响[J]. *农药学报*, 2020, 22(2): 347. DOI: [10.16801/j.issn.1008-7303.2020.0051](https://doi.org/10.16801/j.issn.1008-7303.2020.0051).
- [14] LIAO J, ZANG Y, LUO X W, et al. The relations of leaf area index with the spray quality and efficacy of cotton defoliant spraying using unmanned aerial systems (UASs)[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 169: 105228. DOI: [10.1016/j.compag.2020.105228](https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105228).
- [15] 吴金龙, 冯宏祖, 马小艳, 等. 棉田棉蚜飞防药剂筛选及农药减量增效药效分析[J]. *新疆农业科学*, 2020, 57(1): 167. DOI: [10.6048/j.issn.1001-4330.2020.01.019](https://doi.org/10.6048/j.issn.1001-4330.2020.01.019).
- [16] 韩鹏, 崔宗胤, 闫晓静, 等. 三类喷雾助剂在植保无人机精准果树作业模式下对丘陵柑橘雾滴沉积分布的影响[J]. *农药学报*, 2020, 22(6): 1076. DOI: [10.16801/j.issn.1008-7303.2020.0115](https://doi.org/10.16801/j.issn.1008-7303.2020.0115).
- [17] 郭勇飞, 张小军. 纳米农药研究进展[J]. *世界农药*, 2021, 43(4): 1.
- [18] GAO Y H, LI D L, LI D Y, et al. Efficacy of an adhesive nanopesticide on insect pests of rice in field trials[J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2020, 23(4): 1222. DOI: [10.1016/J.ASPEN.2020.08.013](https://doi.org/10.1016/J.ASPEN.2020.08.013).
- [19] 肖汉祥, 周振标, 陆世忠, 等. 植保无人机喷施纳米农药防治水稻稻飞虱和稻纵卷叶螟示范试验[J]. *现代农业科技*, 2019(22): 58.
- [20] 赵莲英. 植保无人机喷施纳米农药防治水稻主要病虫害的药效评价[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(14): 144. DOI: [10.3969/j.issn.0517-6611.2020.14.040](https://doi.org/10.3969/j.issn.0517-6611.2020.14.040).
- [21] 刘明云, 魏书艳, 纪莲莲, 等. 无人机喷雾防治棉蚜药剂筛选及助剂增效作用研究[J]. *中国棉花*, 2020, 47(2): 9. DOI: [10.11963/1000-632X.lmylmy.20200205](https://doi.org/10.11963/1000-632X.lmylmy.20200205).
- [22] 王喆, 冯宏祖, 马小艳, 等. 无人机施药对棉蚜的防治效果及经济效益分析[J]. *农药学报*, 2019, 21(3): 366. DOI: [10.16801/j.issn.1008-7303.2019.0043](https://doi.org/10.16801/j.issn.1008-7303.2019.0043).
- [23] 胡红岩, 任相亮, 姜伟丽, 等. 植保无人机棉田喷洒农药沉积分布研究[J]. *华中农业大学学报*, 2018, 37(5): 59. DOI: [10.13300/j.cnki.hnlkxb.20180622.007](https://doi.org/10.13300/j.cnki.hnlkxb.20180622.007).
- [24] HU H Y, REN X L, MA X Y, et al. Control effect on cotton aphids of insecticides sprayed with unmanned aerial vehicles under different flight heights and spray volumes[J]. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*, 2021, 4(1): 44. DOI: [10.33440/j.ijpaa.20210401.161](https://doi.org/10.33440/j.ijpaa.20210401.161).
- [25] 石鑫, 高赛超, 杨代斌, 等. 农药沉积利用率喷雾指示剂诱惑红的酶标仪测定方法[J]. *现代农药*, 2021, 20(1): 35. DOI: [10.3969/j.issn.1671-5284.2021.01.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-5284.2021.01.007).
- [26] 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. DOI: [10.3969/j.issn.0529-1542.2015.06.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.0529-1542.2015.06.002).
- [27] 陈吟, 齐浩亮, 张龙, 等. 大田环境中不同助剂和喷头对无人机喷洒雾滴分布和漂移的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2020, 41(6): 50. DOI: [10.7671/j.issn.1001-411X.202007037](https://doi.org/10.7671/j.issn.1001-411X.202007037).
- [28] 袁会珠, 郭永旺, 薛新宇, 等. 植保无人飞机的推广应用对于提高我国农药利用率的作用[J]. *农业工程技术*, 2018, 38(9): 46. DOI: [10.16815/j.cnki.11-5436/s.2018.09.008](https://doi.org/10.16815/j.cnki.11-5436/s.2018.09.008).
- [29] 王浩祺, 王萌, 罗兰, 等. 白菜田不同药械的雾滴分布与农药利用率[J]. *农业技术与装备*, 2021(1): 46. DOI: [10.3969/j.issn.1673-887X.2021.01.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-887X.2021.01.019).

责任编辑: 何馨成