植保无人机喷施氯虫苯甲酰胺在玉米冠层中沉积分布及对草地贪夜蛾的防治效果*

王潇楠[1**] 王思威[1] 雷春媚[1,2] 刘艳萍[1] 常 虹[1] 肖 勇[1***] 李振宇[1***]

（1. 广东省农业科学院植物保护研究所，农业农村部华南果蔬绿色防控重点实验室，广东省植物保护新技术重点实验室，广州 510640；2. 吉林农业大学生物防治研究所生物防治技术工程研究中心，长春 130118）

摘 要 **【目的】** 比较植保无人机不同飞行参数和喷头类型对作业质量和草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 田间防治效果的影响，为防控草地贪夜蛾提供科学依据。**【方法】** 采用植保无人机喷雾法，对小喇叭口期玉米施用 200 g/L 氯虫苯甲酰胺悬浮剂和 1%飞防助剂“易滴滴-A”混合药剂，分析不同飞行参数和喷头类型对雾滴沉积、雾滴密度、雾滴覆盖率等参数的影响，以及药后 3 和 7 d 对玉米上草地贪夜蛾的虫口减退率和防治效果。**【结果】** 当飞行速度为 4 m/s，高度为 2.5 m，喷头型号为 SX110015VS 时，雾滴归一化平均沉积量最高，为 0.47 μL/cm^2；当无人机飞行速度为 4 m/s，高度为 1.5 m，喷头型号为 SX11001VS 时，雾滴密度平均值最高，为 79.39 个/cm^2；当无人机飞行速度为 5 m/s，高度为 1.5 m，喷头型号为 SX110015VS 时，雾滴平均覆盖率最高，为 9.35%。**【结论】** 飞行高度和飞行速度对植保无人机喷施农药雾滴在玉米冠层沉积量均有显著影响。当无人机飞行速度为 4 m/s，飞行高度为 2.5 m，喷头型号为 SX110015VS 时，雾滴沉积量最高且施药后 3 d 和 7 d 的校正防效均在 85%以上。

关键词 草地贪夜蛾；植保无人机；氯虫苯甲酰胺；雾滴沉积分布；防治效果

The effect of flight parameters and nozzle type on the efficacy of spraying chlorantraniliprole from an unmanned aerial vehicle to control *Spodoptera frugiperda*

WANG Xiao-Nan[1**] WANG Si-Wei[1] LEI Chun-Mei[1,2] LIU Yan-Ping[1]
CHANG Hong[1] XIAO Yong[1***] LI Zhen-Yu[1***]

(1. Institute of Plant Protection, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Green Prevention and Control on Fruits and Vegetables in South China Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Provincial Key Laboratory of High Technology for Plant Protection, Guangzhou 510640, China; 2. Biological Control Technology Engineering Research Center, Institute of Biological Control, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract **[Objectives]** To clarify the effects of different flight parameters and nozzle types of an unmanned aerial vehicle (UAV) on chlorantraniliprole droplet deposition, and the resultant the efficacy of *Spodoptera frugiperda* control. **[Methods]** A UAV was used to spray 200 g/L chlorantraniliprole suspension concentrate (SC) mixed with the spray adjuvant Yididi-A’on maize plants at the whorl stage. The effects of flight parameters and nozzle type on droplet deposition, droplet density and droplet coverage were analyzed. In addition, the effects of the above variables on the control of *S. frugiperda* were measured 3 and 7 days after treatment. **[Results]** Using a SX110015VS nozzle at a flight velocity of 4 m/s and at a flight height of 2.5 m above the maize canopy, the maximum, normalized, average droplet density was 0.47 μL/cm^2. However, using a SX11001VS nozzle at a flight velocity of 4 m/s and a flight height of 1.5 m the maximum average droplet density was 79.39 m/cm^2. Average droplet coverage was the highest using a SX110015VS nozzle at a flight velocity of 5 m/s at a flight height of 1.5 m.

*资助项目 Supported projects：国家重点研发计划（2021YFD1400704）；
**第一作者 First author，E-mail：404694775@qq.com
***共同通讯作者 Co-corresponding authors，E-mail：xiaoyong@gdaas.cn; lizhenyu@gdaas.cn
收稿日期 Received：2022-09-23；接受日期 Accepted：2023-04-09

[Conclusion] Flight velocity and height significantly affected the deposition of pesticide droplets sprayed from a UAV over a maize canopy. Droplet deposition was best using a SX110015VS nozzle at flight velocities < 4 m/s at a flight height of 2.5 m. With this spraying regime, the corrected control effect was > 85% 3 and 7 days after application.

Key words *Spodoptera frugiperda*; UAV; chlorantraniliprole; droplet deposition; control efficacy

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*，又名秋粘虫，是入侵我国的一种重要的多食性害虫，主要为害玉米、小麦和高粱等农作物。草地贪夜蛾原产于美洲国家（Clark *et al.*，2007），2019 年首次在我国云南发现，随后入侵了除新疆、青海和中国东北以外的 26 个不同省（直辖市、自治区）（郭井菲等，2019；陈辉等，2020；Jing *et al.*，2020）。到目前为止，已经广泛分布在美洲、非洲和亚洲等地区的国家（Li *et al.*，2020；Sun *et al.*，2021；）。草地贪夜蛾食性杂、食量大，其寄主植物多达 353 种，涵盖禾本科、豆科等 76 个科（Montezano *et al.*，2018）；草地贪夜蛾繁殖能力强，雌成虫可多次交配，平均每头雌虫产卵 1 000 粒左右（金涛等，2020）；其迁飞扩散范围广，成虫每晚可借助风力定向迁飞 100 km 以上（Day *et al.*，2017）。草地贪夜蛾入侵我国的时间较短，国内针对该虫化学防治经验不足，尤其是缺乏针对规模化玉米产区的统防统治技术支撑。

目前，利用植保无人机的喷雾施药已成为病虫害统防统治的一种重要作业模式（袁会珠等，2018）。无人机施药技术具有高效省时、节水省药、节本省工和全地形作业等优势，已经得到我国农业从业者的广泛应用和高度认可。无人机施药在水稻、小麦等粮食作物上的研究应用相对较多（马钰等，2021；王国宾等，2021a；陈奕璇等，2022），在玉米、棉花、枣树和核桃等经济作物上也取得了较理想的防治效果（朱晓锋等，2020；王国宾等，2021b；徐兵强等，2021）。植保无人机施药与地面常规喷雾方式有所不同，无人机作业质量受到其飞行速度、高度等飞行参数的影响。包斐等（2021）研究了大疆 MG-1S 多旋翼植保无人机不同飞行速度下在鲜食玉米上的雾滴沉积效果，结果表明，设置飞行速度为 3.0-3.8 m/s 时，能取得较好的沉积效果和防效。而在核桃园中，无人机的最优速度为 2.2-3.0 m/s（朱晓锋等，2020）。对无人机飞行高度的研究发现，无人机距玉米植株冠层顶部 1.0 m 时，雾滴粒径和喷雾沉积量等作业指标均为最高，对玉米螟的 7 d 防效可达 93.3%（张梅等，2021）。喷头类型也会影响农药的沉积分布和防治效果。马钰等（2021）发现使用 IDK120-01 型喷头可以有效降低农药在水稻上的雾滴漂移，增加有效沉积率，从而提高防效。此外，作物不同生长期的无人机作业质量也不尽相同。卢辉等（2021）发现在玉米苗期和小喇叭口期大疆 T20 无人机飞行参数设为高度 2 m、速度 3 m/s 时施药效果最佳，7 d 防效分别为 94.3%和 91.3%，显著高于大喇叭口期和抽雄期。

随着植保无人机硬件的不断更新完善，无人机施药技术快速发展。本研究基于目前在玉米中应用广泛的 DJI AGRAS T20 植保无人机，以氯虫苯甲酰胺为试验药剂，通过研究雾滴沉积、雾滴密度、雾滴覆盖率等参数系统分析不同飞行参数和喷头类型对无人机作业质量的影响，并调查其对田间草地贪夜蛾的防治效果，筛选出最佳参数组合，为植保无人机施药技术在防治玉米草地贪夜蛾的应用推广提供技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验材料与设备

本次喷雾作业使用 DJI AGRAS T20 植保无人机（中国深圳大疆科技有限公司），无人机整机重量 21.1 kg（不含电池），配置容量为 20 L 快速拔插的药箱，8 个平面扇形雾喷头（SX11001VS、SX110015VS、XR11002VS）。在田间测试作业时，可根据作业要求对植保无人机的飞行高度、飞行速度及喷液量等参数进行设定，具体参数如表 1 所示。该植保无人机具有自主飞行的功能，

采用实时动态（Real-time kinematic，RTK）差分定位技术，可实现厘米级定位。试验药剂为 200 g/L 氯虫苯甲酰胺悬浮剂（SC，美国杜邦公司）、体积浓度为 1%的无人机飞防专用喷雾助剂“易滴滴-A”（甲基化植物油、非离子表面活性剂，美国迈图高新材料有限公司）、5 g/L 诱惑红（狮头牌，上海染料研究所）作为示踪剂。采用铜版纸卡（55 mm×90 mm）测试玉米叶片上雾滴沉积量，采用水敏纸雾滴测试卡（26 mm×76 mm）测试雾滴密度、覆盖率和沉积密度。

1.2 试验方法

试验于 2022 年 5 月 6 日在广东省广州市白云区钟落潭玉米试验基地（经度：113°42′6993″E，纬度：23°39′1266″N）进行（图 1：A），玉米品种为广良甜 27 号，生育期选择小喇叭口期。种植行距 50 cm、株距 20 cm，玉米植株高度（0.4±0.1） m。在试验进行时，用温湿度表和风速仪测量并记录环境参数：平均温度 34.1 ℃，相对湿度 43%-58%，风速 0.1-1.2 m/s。施药试验共设 7 个飞防处理，每处理重复 3 次，随机区组排列。试验小区总面积 1 500 m^2（100 m×15 m），每个试验小区面积 100 m^2（10 m×10 m），各小区之间设置 4 m 宽的隔离带（图 1：B）；不施药空白对照面积 100 m^2。结合所用无人机生产厂家推荐作业参数，设置施药液量 3 L/667 m^2，将飞行速度设置为 3 个水平，分别为 4、5 和 6 m/s，距离地面绝对飞行高度分别设置为 1.5、2.5 和 3.5 m，在飞行速度、飞行作业高度（距玉米植株冠层顶部）和喷头类型 3 个方面进行对比。具体设定见表 2。采用荧光示踪法和水敏纸法获取植

表 1 大疆 T20 植保无人机主要参数

Table 1 Main parameters of DJI T20 plant protection UAV

主要参数 Main parameter	数值或类型 Values or type
外形尺寸(mm×mm×mm) Dimensions (mm×mm×mm)	2 509×2 213× 732（机臂展开，桨叶展开） 2 509×2 213× 732 Unfolded arm and blade
药箱容量(L) Max loading capacity (L)	20
最大作业飞行速度($m·s^{-1}$) Max flight speed ($m·s^{-1}$)	7
喷幅宽度(m) Spraying width (m)	4-7
喷头类型 Nozzle	SX11001VS、SX110015VS、XR11002VS
喷头数量 Nozzle number	8

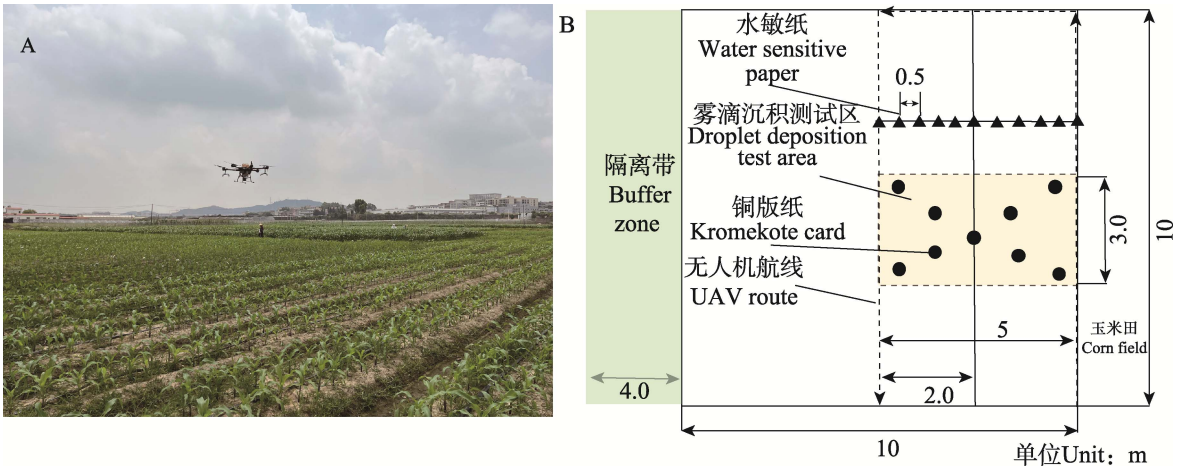

图 1 植保无人机在玉米冠层沉积分布试验

Fig. 1 Spray deposition distribution of plant protection UAV in maize canopy

A. 试验测试现场；B. 试验布置示意图。

A. Test site; B. Schematic diagram of test arrangement.

表 2　试验设计

Table 2　Experiment design

处理 Treatment	施药液量（L） Spray volume (L)	作业面积（667 m^2） Operating filed area (667 m^2)	喷头类型 Nozzle type	作业高度（m） Flight altitude (m)	飞行速度（$m \cdot s^{-1}$） Flight velocity ($m \cdot s^{-1}$)
A	1.2	0.4	SX110015VS	1.5	4
B	1.8	0.6	SX110015VS	2.5	4
C	1.5	0.5	SX110015VS	3.5	4
D	1.2	0.4	SX110015VS	1.5	5
E	1	0.3	SX110015VS	1.5	6
F	0.9	0.3	SX11001VS	1.5	4
G	0.5	0.2	XR11002VS	1.5	4

保无人机不同施药参数下雾滴在玉米冠层的沉积分布情况，其中，荧光示踪法采用离散布样方式，水敏纸法采用连续布样方式。荧光示踪法试验在每个小区内随机布置 9 个采样点，每个采样点分别将 55 mm× 90 mm 铜版纸卡布置在玉米冠层上、下两层（分别距地面 0.4 和 0.1 m）。水敏纸法试验根据植保无人机的作业喷幅设置采样点，采样线上布置 11 个采样点，每个采样点间隔 0.5 m，总长度为 5 m，在每个采样点将 26 mm×76 mm 水敏纸水平固定在测试杆上(采样位置与玉米上部冠层等高)，以获取雾滴在玉米上的沉积情况。试验完成后分别将铜版纸和水敏纸按照序号收集，并逐一放入相对应的密封袋中，带回实验室进行数据处理。

1.3　数据处理

1.3.1　沉积量　用去离子水作为洗脱液，每个样品中加入 5 mL 水对铜版纸卡进行洗脱处理，使用 UV-1800 型紫外可见分光光度计（上海美谱达仪器有限公司）在波长 501 nm 处测定诱惑红洗脱液的吸光度，根据公式（1）计算靶标沉积量 V_S；根据铜版纸卡面积，求得单位面积雾滴沉积量 d（公式 2）。

$$V_S = \frac{V_W \cdot FL_S}{N \cdot FL_a} \times 10^3 \quad (1)$$

$$d = \frac{V_S}{S} \quad (2)$$

式中，V_S 为沉积量（μL）；V_W 为所加洗脱液的体积（mL）；FL_S 为洗脱液测得的荧光值；FL_a 为标定液的荧光值；N 为诱惑红母液的稀释倍数；S 为铜版纸面积（cm^2）；d 为单位面积沉积量（μL/cm^2）。

1.3.2　归一化沉积量　由于 7 个飞防处理每次施药面积和施药量不同，需要找到一个合适的评价指标来反映每次作业的喷雾质量，本研究参考 Cross 等（2001）的计算方法对玉米冠层沉积量进行归一化处理，详见公式（3）和（4），该方法常被用于比较不同施药机械或施药技术的工作效率（Gil *et al.*，2007；李龙龙等，2017）。

$$d_t = d \cdot T_{CS} \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$d_n = \frac{d_t \times 10^5}{V \cdot T_{CS}} \quad (4)$$

式中，d_t 为单位面积沉积量（μg/cm^2）；T_{CS} 为药箱内示踪剂浓度（mg/L）；d_n 为归一化单位面积沉积量；V 为施药量（L/hm^2）。

1.3.3　沉积均匀性　利用 Bizhub287 型扫描仪（柯尼卡美能达有限公司，分辨率为 300×300 dpi）对水敏纸样品逐一进行扫描，通过 DepositScan 软件（美国农业部研制）获取水敏纸表面雾滴沉积参数，计算分析不同飞行参数下水敏纸样品雾滴沉积覆盖率（%）。雾滴覆盖率为雾滴的覆盖面积与水敏试纸采样面积的比值。试验中各个采集点之间雾滴沉积均匀性通过变异系数（Coefficient of variation，CV）评估，变异系数越小说明雾滴沉积分布均匀性越好，计算公式见（5）和（6）。

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\% \quad (5)$$

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})}{n-1}} \quad (6)$$

式中，CV 为变异系数，%；S 为标准差；X_i 为第 i 次测量值；$\bar{X}$ 为测量值的平均值；n 为样本数目。

1.3.4 药效分析 植保无人机喷施试验完成后，参照国家标准 GB／T 17980. 6-2000 杀虫剂防治玉米螟进行防效调查。试验采用定点调查方式，每小区采用对角线五点取样法，共调查 100 株玉米，统计被害株率，剥查受害株的活虫数，与对照区相比计算相对防效。试验前害虫大部分处于 1-2 龄期，分别于施药后第 3 天和第 7 天调查活虫数，按公式（7）和公式（8）计算虫口减退率（P，%）和校正防效（E_c，%）。

$$P(\%)=\frac{N_{CK}-N_t}{N_{CK}}\times 100 \quad (7)$$

$$E_c(\%)=\frac{P_t-P_{CK}}{100-P_{CK}}\times 100 \quad (8)$$

式中，N_{CK} 为药前活虫数；N_t 为药后活虫数；P_t 为处理组虫口减退率（%）；P_{CK} 为对照组虫口减退率（%）。

1.3.5 方差分析 试验数据采用 SPSS 软件（IBM 公司，美国）进行单因素方差分析，平均值比较采用 Tukey's HSD 检验（α=0.05）。

2 结果与分析

2.1 冠层内雾滴沉积量与归一化沉积量

根据公式（1）和（2）分别计算玉米不同冠层内各样品单位面积雾滴沉积量，根据公式（3）和（4）计算归一化沉积量，不同飞行参数雾滴沉积分布情况如表 3 所示。当飞行速度为 4 m/s，高度为 2.5 m，喷头型号为 SX110015VS 时，雾滴归一化平均沉积量最高，为 0.47 μL/cm^2（上层为 0.49 μL/cm^2，下层为 0.44 μL/cm^2）；当飞行速度为 6 m/s，高度为 1.5 m，喷头型号为 SX110015VS 时，雾滴归一化平均沉积量最低，为 0.29 μL/cm^2（上层为 0.27 μL/cm^2，下层为 0.30 μL/cm^2）。

当无人机飞行速度为 4 m/s 时，不同飞行高度中高度为 2.5 m 时雾滴归一化平均沉积量为 0.47 μL/cm^2，显著高于高度 1.5 m 和 3.5 m；当飞行高度为 1.5 m 时，不同飞行速度（试验组 A、D 和 E）中速度为 5 m/s 时雾滴归一化平均沉积量最高，为 0.35 μL/cm^2。其中，飞行速度为 4 m/s 和 5 m/s 时雾滴归一化平均沉积量没有显著性差异，但上层和下层归一化沉积量均有显著性差异，飞行速度为 4 m/s 时雾滴沉积均匀性优于 5 m/s；当飞行高度和飞行速度一定时，不同喷头型号（试验组 A、F、G）中喷头型号为 XR11002VS

表 3 玉米冠层雾滴实际沉积和归一化沉积分布

Table 3 Spray droplet deposition (actual and normalized) distribution in maize canopy

处理 Treatment	实际沉积量 d (μL·cm^2) Actual deposit (μL·cm^2)			归一化沉积量 d_n (μL·cm^2) Normalized deposit (μL·cm^2)		
	冠层上层 Upper layer	冠层下层 Lower layer	平均值 Average	冠层上层 Upper layer	冠层下层 Lower layer	平均值 Average
A	0.14 b	0.14 b	0.14 b	0.34 c	0.33 c	0.34 c
B	0.16 ab	0.15 b	0.16 ab	0.49 a	0.44 a	0.47 a
C	0.19 a	0.20 a	0.20 a	0.39 b	0.41 ab	0.40 b
D	0.12 b	0.18 ab	0.15 b	0.28 d	0.41 ab	0.35 c
E	0.13 b	0.15 b	0.14 b	0.27 d	0.30 c	0.29 d
F	0.15 b	0.19 a	0.17 ab	0.34 c	0.42 ab	0.38 b
G	0.19 a	0.16 b	0.18 ab	0.43 b	0.37 b	0.40 b

同列数据后不同小写字母表示差异显著（P<0.05, Tukey's HSD 检验）。下表同。

Data followed by the different lowercase letters among the same column indicate significant differences (P < 0.05) by Tukey's HSD test. The same as below.

时雾滴归一化平均沉积量最高，为 0.40 μL/cm^2。

2.2　冠层内雾滴密度与雾滴覆盖率

植保无人机不同飞行参数对雾滴密度和覆盖率的影响见表 4。雾滴密度平均值为 21.07-79.39 个/cm^2。当无人机飞行速度为 4 m/s，高度为 1.5 m，喷头型号为 SX11001VS 时，雾滴密度平均值最高，为 79.39 个/cm^2；当无人机飞行速度为 5 m/s，高度为 1.5 m，喷头型号为 SX110015VS 时，雾滴平均覆盖率最高，为 9.35%；当飞行速度为 4 m/s，高度为 3.5 m，喷头型号为 SX110015VS 时，雾滴密度平均值和雾滴平均覆盖率均最低，分别为 21.07 个/cm^2 和 2.77%，显著低于其他试验组。

当无人机飞行速度为 4 m/s 时，不同飞行高度（试验组 A、B 和 C）中高度为 2.5 m 时雾滴密度平均值最高为 52.14 个/cm^2，雾滴平均覆盖率为 5.99%，飞行高度 2.5 与 1.5 m 雾滴密度平均值和雾滴平均覆盖率均没有显著性差异（P>0.05）。但当飞行高度为 3.5 m 时，由于飞行高度增大，雾滴密度平均值和雾滴平均覆盖率显著降低，飞行高度 3.5 m 相较于 2.5 m 时雾滴密度和覆盖率分别降低了 147.46%和 116.24%；当飞行高度为 1.5 m 时，不同飞行速度（试验组 A、D 和 E）中速度为 5 m/s 时雾滴平均覆盖率显著高于其他 2 个飞行速度，为 9.35%，雾滴密度平均值为 62.84 个/cm^2，飞行速度为 6 m/s 相较于 5 m/s 时雾滴密度和覆盖率均显著降低，分别降低了 25.10%和 26.35%，说明飞行速度过大会导致有效沉积到靶标冠层叶片表面的雾滴数减少。上述 2 组对照组（同一飞行速度不同飞行高度和同一飞行高度不同飞行速度）雾滴密度、覆盖率结果均与 2.1 中雾滴归一化沉积量结果吻合。

当无人机飞行高度和飞行速度一定时，不同喷头型号（试验组 A、F 和 G）中喷头型号为 SX11001VS 时雾滴密度平均值和雾滴平均覆盖率最高，分别为 79.39 个/cm^2 和 6.32%，与喷头型号为 XR11002VS 无显著性差异，但 SX11001VS 喷头雾滴覆盖率的变异系数为 XR11002VS 喷头的 3.5 倍。

结果表明，大疆 T20 型植保无人机喷头型号为 SX110015VS，飞行速度 4 m/s，飞行高度 2.5 m 时雾滴在靶标冠层的沉积量最多；飞行速度 5 m/s，飞行高度 1.5 m 时雾滴的覆盖率更高。

植保无人机喷施氯虫苯甲酰胺防治草地贪夜蛾的田间药效结果详见表 5，结果表明，施药后 3 d，植保无人机不同飞行参数对草地贪夜蛾的校正防效为 65.09%-86.43%，施药后 7 d，校正防效为 51.05%-86.46%。当飞行速度为 4 m/s，高度为 2.5 m，喷头型号为 SX110015VS 时，施药后 3 d 和 7 d 的校正防效均为最高；当飞行速度为 4 m/s，高度为 1.5 m，喷头型号为 XR11002VS 时，施药后 3 d 和 7 d 的校正防效均为最低。

表 4　玉米冠层雾滴密度和覆盖率

Table 4　Density and coverage of droplets in maize canopy

处理 Treatment	雾滴密度 Droplet density			雾滴覆盖率 Droplet coverage		
	平均值（个·cm^{-2}） Average (droplet·cm^{-2})	标准差 Standard deviation	变异系数（%） Coefficient of variation (%)	平均值（%） Average (%)	标准差 Standard deviation	变异系数（%） Coefficient of variation (%)
A	48.57 c	50.47	103.92	5.75 c	3.99	69.47
B	52.14 c	64.78	124.24	5.99 c	4.71	78.57
C	21.07 d	26.58	126.18	2.77 d	1.47	52.99
D	62.84 b	52.06	82.85	9.35 a	10.60	113.36
E	50.23 c	59.82	119.08	7.40 b	5.33	71.97
F	79.39 a	105.18	132.48	6.32 bc	7.73	122.29
G	78.10 a	81.34	104.15	6.25 bc	2.16	34.59

表 5 田间药效试验结果
Table 5 Result of field trial test

处理 Treatment	3 d		7 d	
	虫口减退率（%） Demoralization rate (%)	校正防效（%） Correcting effect (%)	虫口减退率（%） Demoralization rate (%)	校正防效（%） Correcting effect (%)
CK	- 46.67±13.08 c	0	- 15.24±6.54 d	0
A	50.39±10.90 b	65.90±8.25 b	57.52±8.03 ab	63.20±6.09 bc
B	80.82±10.84 a	86.43±8.66 a	84.38±2.11 a	86.46±1.42 a
C	71.08±6.58 ab	80.40±3.01 ab	66.04±8.57 abc	70.33±8.61 abc
D	75.48±12.78 ab	83.55±7.45 ab	69.76±7.84 ab	73.53±8.05 ab
E	79.22±9.23 a	86.10±5.49 a	79.66±8.27 ab	82.40±7.16 ab
F	62.62±10.84 ab	73.96±9.68 ab	75.95±7.15 ab	79.14±6.26 ab
G	48.37±14.02 b	65.09±6.89 b	43.88±10.29 c	51.05±10.69 c

当无人机飞行速度为 4 m/s 时，不同飞行高度（试验组 A、B 和 C）中高度为 2.5 m 时无人机喷洒氯虫苯甲酰胺对草地贪夜蛾施药后 3 和 7 d 校正防效均显著高于 1.5 m 时的校正防效，而与 3.5 m 时无显著性差异（P>0.05）；当飞行高度为 1.5 m 时，不同飞行速度（试验组 A、D 和 E）中速度为 6 m/s 时施药后 3 和 7 d 校正防效最高，分别为 86.10%和 82.40%，与飞行速度 5 m/s 无显著性差异（P>0.05）；当飞行高度和飞行速度一定时，不同喷头型号（试验组 A、F 和 G）中喷头型号为 XR11001VS 时施药后 3 和 7 d 校正防效最高，分别为 73.96%和 79.14%。综上所述，大疆 T20 型植保无人机飞行速度 4 m/s，飞行高度为 2.5 m 时，施药后 3 和 7 d 的校正防效均在 85%以上，施用氯虫苯甲酰胺防治草地贪夜蛾田间试验效果较为理想。

3 结论与讨论

植保无人机飞行高度、飞行速度和雾滴粒径均是影响农药雾滴沉积特性的主要因素，以往研究结果表明，植保无人机飞行高度 1-3 m，作业速度 5-7 m/s 时雾滴沉积效果相对较好（Hewitt，2008；秦维彩等，2014；石鑫等，2021）。Zhang 等（2016）研究多旋翼植保无人机不同飞行高度对雾滴在柑橘冠层沉积分布的影响，结果表明飞行高度对雾滴分布影响较大，最佳施药高度为 1 m。朱航等（2019）对 NJY-1206 型植保无人机在不同旋翼转速、喷雾高度、离心喷头转速情况下的雾滴沉积分布进行了测试研究并对数据进行回归分析，结果表明喷雾高度对沉积量影响极显著。本研究中，飞行速度一定的情况下，不同飞行高度在玉米冠层沉积量差异显著，与上述研究结果相符。当植保无人机飞行高度过高，旋翼风场气流运动方向由垂直变为水平，靶标冠层上方风场减弱导致雾滴动能下降难以穿透冠层（潘波等，2021）；随着飞行高度增加，雾滴在空中的运动时间和距离相应增加，雾滴飘移的风险增加，导致靶标上雾滴沉积减少。当无人机飞行高度过低时，旋翼引起的下压风场会导致玉米植株倒伏，影响雾滴在叶片上的沉积。因此，对于玉米、甘蔗等高杆作物，应综合考虑飞行安全和沉积质量等因素，设定适宜的飞行高度（张瑞瑞等，2020）。

飞行速度对雾滴覆盖率影响显著，当无人机飞行高度为 1.5 m 的情况下，飞行速度 5 m/s 时雾滴覆盖率最高为 9.35%，且施药后 3 d 校正防效可达 80 %以上。邱白晶等（2013）研究了无人直升机飞行速度、飞行高度及两因素间的交互作用对沉积浓度和沉积均匀性的影响，结果表明飞行高度和飞行速度对雾滴沉积均匀性影响极显著。王昌陵等（2020）研究表明，植保无人机飞行速度过快，无人机旋翼下方风场对冠层的作用时间过短，风场未对作物冠层产生有效作用

力；雾滴易受旋翼气流和环境风场共同作用蒸发或飘移，当飞行速度加快至 6 m/s，气流场对雾滴沉积的促进作用逐步消失。本研究中当飞行速度为 6 m/s 与 5 m/s 时沉积量和雾滴覆盖率均差异显著，飞行速度 6.0 m/s 相较于 5 m/s 分别减少 20.69%和 26.35%。

植保无人机采用低容量或超低量喷雾技术，配置的扇形雾喷头雾滴粒径体积中径较小，一般为 100-200 μm（王昌陵等，2017）。本研究中，当飞行速度和飞行高度一定时，喷头型号为 SX11001VS 时雾滴密度平均值最高为 79.39 个/cm^2，施药后 7 d 防效接近 80 %，说明增加单位面积上雾滴密度可以增加氯虫苯甲酰胺在玉米叶片上的沉积量，同时提高与草地贪夜蛾等有害生物接触的概率。本研究在 667 m^2 施药量相同的条件下，达到最大雾滴沉积量与最佳防效的飞行参数一致，但与达到最大雾滴密度或覆盖度时的飞行参数不一致，其原因在于平均值不能完全反应沉积分布的真实情况，均值大但可能与其他组没有显著性差异，且理论上冠层中雾滴密度平均值和雾滴平均覆盖率最高，但实际上雾滴粒径越小越容易受无人机旋翼风场胁迫产生雾滴飘移，导致沉积在靶标冠层上的沉积均匀性较差（王潇楠等，2017；Creech *et al.*，2018）。

综上所述，本研究探讨了大疆 T20 型植保无人机不同飞行参数下（飞行速度 4-6 m/s、飞行高度 1.5-3.5 m 和喷头型号 SX11001VS、SX110015VS、XR11002VS）喷施 200 g/L 氯虫苯甲酰胺悬浮剂和浓度 1%易滴滴-A 飞防助剂混合药剂（施药液量 3 L/667 m^2）在玉米冠层上的沉积分布以及对草地贪夜蛾的田间防治效果。试验结果表明，飞行高度和飞行速度对植保无人机喷施农药雾滴在玉米冠层沉积量均有显著影响。当无人机飞行速度为 4 m/s，飞行高度为 2.5 m，喷头型号为 SX110015VS 时，雾滴沉积量最大且施药后 3 d 和 7 d 的校正防效均在 85%以上。研究结果可为植保无人机喷施农药防治玉米草地贪夜蛾提供一定的数据支撑和参考价值。

参考文献 (References)

Bao F, Han HL, Xu HX, Chen B, Lv ZX, Wang GY, Zhao FC, 2021. Effect of spray parameter combination of plant protection UAV on the prevention effect of fresh corn *Spodoptera frugiperda*. *China Plant Protection*, 41(10): 51–56. [包斐, 韩海亮, 徐红星, 陈斌, 吕仲贤, 王桂跃, 赵福成, 2021. 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. 中国植保导刊, 41(10): 51–56.]

Chen H, Yang XL, Chen AD, Li YC, Wang DH, Liu J, Hu G, 2020. Immigration timing and origin of the first fall armyworms (*Spodoptera frugiperda*) detected in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(6): 1270–1278. [陈辉, 杨学礼, 谌爱东, 李永川, 王德海, 刘杰, 胡高, 2020, 我国最早发现为害地草地贪夜蛾的入侵时间及其虫源分布. 应用昆虫学报, 57(6): 1270–1278.]

Chen YX, Qin GL, Zhou XX, Huang JJ, Meng Q, Wu JH, Yan XJ, Yuan HZ, 2022. Deposition and distribution of droplets sprayed by different plant protection machinery in rice canopy and comparison of control effects on diseases and pests. *Chinese Journal of Rice Science*, 36(2): 207–214. [陈奕璇, 覃贵亮, 周晓欣, 黄军军, 蒙全, 吴俊辉, 闫晓静, 袁会珠, 2022. 不同植保机械喷施雾滴在水稻冠层沉积分布规律及对病虫害防效比较. 中国水稻科学, 36(2): 207–214.]

Clark PL, Molina-Ochoa J, Martinelli S, Skoda SR, Isenhour DJ, Lee DJ, Krumm JT, Foster JE, 2007. Population variation of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, in the western hemisphere. *Journal of Insect Science*, 7(1): 5.

Creech CF, Henry RS, Hewitt AJ, Kruger GR, 2018. Herbicide spray penetration into corn and soybean canopies using air-induction nozzles and a drift control adjuvant. *Weed Technology*, 32(1): 72–79.

Cross JV, Walklate PJ, Murray RA, Richardson GM, 2001. Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer: 1. effects of spray liquid flow rate. *Crop Protection*, 20(1): 13–30.

Day R, Abrahams P, Bateman M, Beale T, Clottey V, Cock M, Colmenarez Y, Corniani N, Early R, Godwin J, Gomez J, Moreno PG, Murphy ST, Oppong-Mensah B, Phiri N, Pratt C, Silvestri S, Witt A, 2017. Fall armyworm: Impacts and implications for Africa. *Outlooks on Pest Management*, 28(5): 196–201.

Gil E, Escolà A, Rosell JR, Planas S, Val L, 2007. Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors. *Crop Protection*, 26(8): 1287–1297.

Guo JF, He KL, Wang ZY, 2019. Biological characteristics, trend of fall armyworm *Spodoptera frugiperda*, and the strategy for management of the pest. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(3): 361–369. [郭井菲, 何康来, 王振营, 2019. 草地贪夜蛾

的生物学特性、发展趋势及防控对策. 应用昆虫学报, 56(3): 361–369.]

Hewitt AJ, 2008. Droplet size spectra classification categories in aerial application scenarios. *Crop Protection*, 27(9): 1284–1288.

Jin T, Lin YY, Ma GC, Xiang KP, Chu XQ, Peng ZQ, Yi KX, 2020. Oviposition rhythms of *Spodoptera frugiperda* and its oviposition preferences to different medium. *Plant Protection*, 46(3): 99–103. [金涛, 林玉英, 马光昌, 向凯萍, 楚小强, 彭正强, 易克贤, 2020. 草地贪夜蛾的产卵节律及其对不同介质的产卵选择性. 植物保护, 46(3): 99–103.]

Jing DP, Guo JF, Jiang YY, Zhao JZ, Sethi A, He KL, Wang ZY, 2020. Initial detections and spread of invasive *Spodoptera frugiperda* in China and comparisons with other noctuid larvae in cornfields using molecular techniques. *Insect Science*, 27(4): 780–790.

Li LL, He XK, Song JL, Liu Y, Wang ZC, Li JY, Yia XM, Liu ZX, 2017. Comparative experimental study on profile variable rate spray and conventional air assisted spray in orchards. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33(16): 56–63. [李龙龙, 何雄奎, 宋坚利, 刘杨, 王志翀, 李进耀, 贾晓铭, 刘志雄, 2017. 果园仿形变量喷雾与常规风送喷雾性能对比试验. 农业工程学报, 33(16): 56–63.]

Li XJ, Wu MF, Ma J, Gao BY, Wu QL, Chen AD, Liu J, Jiang YY, Zhai BP, Early R, Chapman JW, Hu G, 2020. Prediction of migratory routes of the invasive fall armyworm in eastern China using a trajectory analytical approach. *Pest Management Science*, 76(2): 454–463.

Lu H, Fu RX, Tang JH, Zhu XM, Tang ZZ, Lv BQ, 2021. Preliminary study on the effect of *Spodoptera frugiperda* in the breeding area of the annual breeding area of unmanned aerial vehicle prevention and control. *China Plant Protection*, 41(2): 83–86. [卢辉, 符瑞学, 唐继洪, 朱晓明, 唐真正, 吕宝乾, 2021. 无人机防控周年繁殖区草地贪夜蛾效果初探. 中国植保导刊, 41(2): 83–86.]

Ma Y, Gong CW, Zhang YZ, Li B, Wang XG, 2021. Effects of spray nozzles and spray adjuvant on the deposition of droplets of plant protection unmanned aerial vehicle (UAV) in paddy fields and the control efficacy against Asiatic rice borer *Chilo suppressalis*. *Journal of Plant Protection*, 48(3): 518–527. [马钰, 贡常委, 张韫政, 李彬, 王学贵, 2021. 喷头类型对植保无人机低容量喷雾雾滴在稻田冠层沉积分布及防治效果的影响. 植物保护学报, 48(3): 518–527.]

Montezano DG, Sosa-Gomez DR, Specht A, Roque-Specht VF, Sousa-Silva JC, Paula-Moraes SV, Peterson JA, Hunt TE, 2018. Host plants of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas. *African Entomology*, 26(2): 286–300.

Pan B, Jiang L, Wang BJ, Liang JQ, Zhu HY, Bai XQ, Lin Y, 2021. Effects of flight parameters of diesel six-rotor UAV on deposition distribution of fogdrops in litchi tree canopy. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 42(1): 213–219. [潘波, 姜蕾, 王冰洁, 梁敬崎, 朱宏宇, 白先权, 林勇, 2021. 飞行参数对六旋翼植保无人机雾滴在荔枝树冠层沉积分布的影响. 热带作物学报, 42(1): 213–219.]

Qin WC, Xue XY, Zhou LX, Zhang SC, Sun Z, Kong W, Wang BK, 2014. Effects of spraying parameters of unmanned aerial vehicle on droplets deposition distribution of maize canopies. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30(5): 50–56. [秦维彩, 薛新宇, 周立新, 张宋超, 孙竹, 孔伟, 王宝坤, 2014. 无人直升机喷雾参数对玉米冠层雾滴沉积分布的影响. 农业工程学报, 30(5): 50–56.]

Qiu BJ, Wang LW, Cai DL, Wu JH, Ding GR, Guan XP, 2013. Effects of flight altitude and speed of unmanned helicopter on spray deposition uniform. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29(24): 25–32. [邱白晶, 王立伟, 蔡东林, 吴建浩, 丁国荣, 管贤平, 2013. 无人直升机飞行高度与速度对喷雾沉积分布的影响. 农业工程学报, 29(24): 25–32.]

Shi X, Chen YX, Du YH, Liu XH, Yang DB, Yuan HZ, Yan XJ, 2021. The influences of wind speed and flight parameters on droplet drift characteristics of multi-rotor plant protection unmanned aerial vehicle. *Journal of Plant Protection*, 48(3): 546–553. [石鑫, 陈奕璇, 杜亚辉, 刘晓慧, 杨代斌, 袁会珠, 闫晓静, 2021. 环境风速及飞行参数对多旋翼植保无人机雾滴飘移特性的影响. 植物保护学报, 48(3): 546–553.]

Sun XX, Hu CX, Jia HR, Wu QL, Shen XJ, Zhao SY, Jiang YY, Wu KM, 2021. Case study on the first immigration of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* invading into China. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(3): 664–672.

Wang CL, He XK, Jane B, Qi P, Yang Y, Gao WL, 2020. Effect of downwash airflow field of 8-rotor unmanned aerial vehicle on spray deposition distribution characteristics under different flight parameters. *Smart Agriculture*, 2(4): 124–136. [王昌陵, 何雄奎, Jane BONDS, 齐鹏, 杨苡, 高万林, 2020. 不同飞行参数下八旋翼植保无人机下洗气流场对雾滴沉积分布特性的影响. 智慧农业, 2(4): 124–136.]

Wang CL, Song JL, He XK, Wang ZC, Wang SL, Meng YH, 2017. Effect of flight parameters on distribution characteristics of pesticide spraying droplets deposition of plant-protection unmanned aerial vehicle. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33(23): 109–116. [王昌陵, 宋坚利, 何雄奎, 王志翀, 王士林, 蒙艳华, 2017. 植保无人机飞行参数对施药雾滴沉积分布特性的影响. 农业工程学报, 33(23): 109–116.]

Wang GB, Han X, Song CC, Yin LL, Lu WX, Lan YB, 2021a. Evaluation of droplet size and drift distribution of herbicide sprayed by plant protection unmanned aerial vehicle in winter wheat field. *Smart Agriculture*, 3(3): 38–51. [王国宾, 韩鑫, 宋灿灿, 伊丽丽, 鲁文霞, 兰玉彬, 2021a. 冬小麦田植保无人飞机喷施除草剂雾滴粒径及沉积飘移分布特性评估. 智慧农业(中英文), 3(3): 38–51.]

Wang GB, Wang SZ, Chen PC, Han XQ, Shan CF, Chen SD, Lan YB, 2021b. Effect of spraying droplet size with drones on deposition, penetration, and cotton harvest-aid efficacy. *Journal of Plant Protection*, 48(3): 493–500. [王国宾, 王十周, 陈鹏超, 韩小强, 单常峰, 陈盛德, 兰玉彬, 2021b. 植保无人机喷施不同雾滴粒径药剂对其在棉花冠层沉积、穿透及脱叶催熟效果的影响. 植物保护学报, 48(3): 493–500.]

Wang XN, He XK, Wang CL, Wang ZC, Li LL, Wang SL, Bonds J, Herbst A, Wang ZG, 2017. Spray drift characteristics of fuel powered single-rotor UAV for plant protection. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33(1): 117–123. [王潇楠, 何雄奎, 王昌陵, 王志翀, 李龙龙, 王士林, Jane Bonds, Andreas Herbst, 王志国, 2017. 油动单旋翼植保无人机雾滴飘移分布特性. 农业工程学报, 33(1): 117–123.]

Xu BQ, Song B, Xiong JM, Gao GR, Yan XJ, Fan DY, Zhu XF, 2021. Field evaluation of unmanned aerial vehicle (UAV) as sprayer for chemical control of the main pests in jujube orchard. *Journal of Environmental Entomology*, 43(1): 245–252. [徐兵强, 宋博, 熊金铭, 高冠荣, 闫晓静, 樊丁宇, 朱晓锋, 2021. 植保无人机喷雾对枣树主要害虫防治效果评价. 环境昆虫学报, 43(1): 245–252.]

Yuan HZ, Guo YW, Xue XY, Yan XJ, Chen C, Kong X, Wang M, Zhou Y, 2018. The promotion and application of plant protection unmanned aircraft plays a role in improving the utilization rate of pesticides in China. *Agricultural Engineering Technology*, 38(9): 46–50. [袁会珠, 郭永旺, 薛新宇, 闫晓静, 陈昶, 孔肖, 王明, 周洋, 2018. 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. 农业工程技术, 38(9): 46–50.]

Zhang M, Li TJ, Luo WZ, Pu P, Wang C, Zhu XB, 2021. The quality of plant protection UAV operations and the evaluation of the control of *Pyrausta nubilalis*. *China Plant Protection*, 41(6): 66–69, 108. [张梅, 李天娇, 罗伍周, 蒲颇, 王聪, 朱小波, 2021. 植保无人机作业质量及其对玉米螟防效评价. 中国植保导刊, 41(6): 66–69, 108.]

Zhang P, Deng L, Lyu Q, He SL, Yi SL, Liu YD, Yu YX, Pan HY, 2016. Effects of citrus tree-shape and spraying height of small unmanned aerial vehicle on droplet distribution. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 9(4): 45–52.

Zhang RR, Li LL, Wen Y, Chen LP, Tang Q, Yi TC, Song JX, 2020. Fluorescence tracer method for analysis of droplet deposition pattern characteristics of the sprays applied via unmanned aerial vehicle. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 36(6): 47–55. [张瑞瑞, 李龙龙, 文瑶, 陈立平, 唐青, 伊铜川, 宋佳星, 2020. 植保无人机喷施雾滴沉积特性的荧光示踪分析. 农业工程学报, 36(6): 47–55.]

Zhu H, Li HZ, Huang Y, Yu HT, Dong YZ, Li JX, 2019. Effects of technical operation parameters on spray characteristics of rotor plant protection UAV. *Smart Agriculture*, 1(3): 113–122. [朱航, 李宏泽, 黄钰, 于海涛, 董云哲, 李君兴, 2019. 施药技术参数对旋翼植保无人机喷雾特性的影响. 智慧农业, 1(3): 113–122.]

Zhu XF, Wang M, Xu BQ, Song B, Yan XJ, Yang S, Yuan HZ, 2020. Optimization of unmanned aerial vehicle (UAV) operation parameters in walnut orchards. *Plant Protection*, 46(4): 25–32. [朱晓锋, 王明, 徐兵强, 宋博, 闫晓静, 杨森, 袁会珠, 2020. 核桃园植保无人机作业参数优选. 植物保护, 46(4): 25–32.]