

植保无人机喷雾参数对药液在花椒叶面沉积及防治蚜虫效果的影响

皇甫佳一¹ 郭璐璐¹ 李平¹ 高冬梅¹ 况觅² 郭萧^{1*}

(1. 重庆市农业科学院, 九龙坡 401329; 2. 重庆市农业技术推广总站, 两江新区 401120)

摘要: 为提升植保无人机在花椒蚜虫防治中的应用效能, 基于水敏纸雾滴沉积采样技术系统评估飞行高度(3.0~5.0 m)、飞行速度(2~6 m/s)及施药流量(13.5~21.6 L/min)对药液雾滴覆盖密度、沉积量和分布均匀度的影响, 并通过田间试验对比无人机与背负式手动喷雾器施药对花椒蚜虫的防治效果。结果表明: 飞行高度、飞行速度及施药流量均显著影响雾滴覆盖密度与沉积量; 飞行速度与施药流量对雾滴分布均匀度也有显著影响; 当无人机飞行高度为3 m、飞行速度为2 m/s、施药流量为18.0 L/min时雾滴沉积特性达到最优。在该最优喷雾参数下, 无人机施药后7 d对花椒蚜虫的防治效果达84.95%, 较背负式手动喷雾处理显著提高了10.60%。表明本研究优化的植保无人机喷雾参数可用于田间花椒蚜虫的精准防控。

关键词: 植保无人机; 花椒; 喷雾参数; 雾滴沉积特性

Effects of UAV spray parameters on pesticide deposition on *Zanthoxylum bungeanum* leaves and aphid control efficacy

Huangfu Jiayi¹ Guo Lulu¹ Li Ping¹ Gao Dongmei¹ Kuang Mi² Guo Xiao^{1*}

(1. Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Jiulongpo 401329, Chongqing, China;

2. Chongqing Agricultural Technology Extension Station, Liangjiang New District 401120, Chongqing, China)

Abstract: To enhance the effectiveness of unmanned aerial vehicle (UAV) application for aphid control on *Zanthoxylum bungeanum*, the effects of flight height (3.0–5.0 m), flight speed (2–6 m/s), and spray flow rate (13.5–21.6 L/min) on pesticide droplet coverage density, deposition and distribution uniformity were systematically evaluated using water-sensitive paper sampling. Field experiments were also conducted to compare the control efficacy of UAV spraying with that of a knapsack manual sprayer against the aphids. Results showed that flight height, flight speed, and flow rate significantly influenced droplet coverage density and deposition, while flight speed and flow rate significantly affected droplet uniformity. Optimal droplet deposition characteristics were achieved when the UAV operated at a flight height of 3 m, a flight speed of 2 m/s, and a flow rate of 18.0 L/min. Under these optimized parameters, UAV application achieved an aphid control efficacy of 84.95% at 7 days after treatment, which was significantly higher by 10.60% compared with the knapsack manual spraying treatment. The findings indicate that the optimized UAV spraying parameters identified in this study can be applied for precise field control of *Zanthoxylum bungeanum* aphids.

Key words: plant protection UAV; *Zanthoxylum bungeanum*; spray parameter; droplet deposition char-

acteristics

花椒 *Zanthoxylum bungeanum* 为芸香科花椒属多年生落叶灌木或小乔木,是我国栽培历史悠久的香料、油料树种(罗友进等,2025)。然而,在栽培过程中,花椒面临多达190种病虫害的威胁,严重影响其产量与品质(朱建义等,2024)。其中,花椒蚜虫是主要害虫之一,蚜虫通过刺吸花椒嫩梢的汁液,导致叶片卷曲畸形,光合作用效率降低,并可能引发煤污病,进而导致果实品质下降。此外,蚜虫还是多种病毒病的重要传播媒介,严重影响花椒的产量和品质(王毛等,2023)。目前,防治花椒蚜虫主要依靠化学农药。据中国农药信息网(<http://www.icama.org.cn/>)数据显示,截至2025年6月,农业农村部批准登记用于防控花椒蚜虫的农药共有22种,均为喷施性农药。人工喷施农药具有作业强度大、效率低、耗时长、成本高、农药利用率低的特点,且农药残留高,对土壤和水体污染严重。对比国内外装备技术水平,植保技术将更加聚焦于低喷量、精喷洒、低污染的施药技术,系列化与专业化的装备部件,以及高效化、自动化和智能化的作业模式(何雄奎,2022;孙竹等,2024)。在这一背景下,以植保无人机为代表的自动化精准施药技术,正日益成为推动现代农业发展的关键力量(袁会珠等,2011;郭建等,2024)。

相比于传统的喷洒方式,植保无人机更具灵活性、高效性、安全性和便捷性。此外,其对耕地的破坏较低,无需跑道起降,特别适用于田块小且分散的区域以及杂草密集的农业区(Wang B et al., 2022)。凭借其旋翼下洗气流增强雾滴穿透性、作业效率高及喷雾精度高等优势,植保无人机已成为突破传统防治困境的创新解决方案(蒋玮,2025;李仁凤等,2025)。雾滴的分布均匀性和沉积量是评价植保机械作业质量的关键指标(廖娟等,2015)。无人机施药效果受多因素耦合作用影响,包括无人机机型、喷头类型、环境条件、作物冠层结构、作业参数等都会影响雾滴沉积特性(马钰等,2021;Qin & Chen, 2023;资乐等,2023)。Meng et al. (2022)研究了单旋翼和四旋翼2种类型无人机对药液雾滴沉积的影响,发现在相同作业参数下四旋翼无人机施药的上层雾滴沉积量优于单旋翼无人机施药;无人机运行方向对单旋翼无人机施药效果影响显著。徐敏等(2024)揭示了温度、相对湿度、风速等气象因子对无人机喷雾防治小麦赤霉病过程中药液雾滴沉积的影

响规律,并基于气象因子构建了沉积量与覆盖率的影响模型。作业参数对雾滴沉积和漂移的影响已经得到了广泛研究。Guo et al. (2021)探讨了飞行参数、雾滴尺寸及作物表型对水稻田药液雾滴沉积量和沉积均匀性的影响,发现飞行参数对雾滴沉积量和均匀性的影响最显著;Chen et al. (2020)发现降低无人机飞行高度、增加施药量和雾滴粒径均能提升药液雾滴在棉花冠层底部的分布效果;刘枫等(2024)在正交试验中优化了喷头流量、飞行高度和飞行速度,明确了作业高度对树冠上、中两层的药液雾滴沉积密度和覆盖率的影响最大。此外,农药种类、剂型及是否添加助剂等因素也会对无人机施药效果产生影响(Shan et al., 2024;臧禹等,2024;Zee-shan et al., 2024)。当前,针对无人机作业参数的研究主要集中在其对雾滴沉积特性的影响,而对比无人机作业与背负式喷雾作业防效的研究则较匮乏,特别是无人机作业参数对药液在花椒冠层的雾滴分布特性及其对花椒蚜虫防治效果的影响尚未见研究报道。

本研究采用三因素三水平的正交试验设计分析飞行高度、飞行速度和施药流量对药液在花椒叶片正、背面的雾滴覆盖密度、沉积量及分布均匀度的影响,以确定无人机施药参数的最优组合,在此基础上选用啉虫脒作为供试药剂,比较分析无人机与人工背负式电动喷雾器施用后其对花椒蚜虫的防治效果,综合评估无人机喷雾施药的应用效能,以期为花椒病虫害的规模化防治提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试花椒:于重庆市江津区现代农业园区选择4年生九叶青花椒树供试,平均株高2.2 m,株间距2 m,行间距4 m,试验田共计27列,每列40株。南北行向,树势良好且生长一致。

药剂和器械:70%啉虫脒(acetamiprid)水分散粒剂,上海沪联生物药业(夏邑)股份有限公司。大疆T50植保无人机,深圳市大疆创新科技有限公司;3WBD-20L人工背负式电动喷雾器,安徽阜阳明辉塑胶科技有限公司;雾滴测定卡,重庆六六山下植保科技有限公司;FileScan 1860XL Plus扫描仪,上海中晶科技有限公司。

1.2 方法

1.2.1 无人机喷雾参数试验设计

利用大疆 T50 植保无人机开展清水喷雾作业。无人机喷雾参数包括 A 飞行高度(作业距离距树冠顶部高度,包括 3、4、5 m 三水平)、B 飞行速度(包括 2、4、6 m/s 三水平)及 C 施药流量(包括 13.5、18.0、21.6 L/min 三水平)。参照刘枫等(2024)方法开展三因素三水平正交试验设计,共设 9 个处理,分别为 A2B1C2、A3B1C3、A1B3C2、A2B3C3、A1B1C1、A2B2C1、A1B2C3、A3B3C1 和 A3B2C2,每个处理为 1 个小区,每个小区为 1 列花椒树,每列间隔两株选择 1 株花椒树布置雾滴采样点,每列设 10 个采样点。为避免小区间的相互干扰,不同处理间隔 2 列保护列。在无人机施药前,将雾滴测定卡分别布置在采样点花椒树冠层的上层和下层,每层东、西、南、北 4 个方位各选择 1 片花椒叶,在叶正面和背面各布置 1 张雾滴测定卡,并做好位置标记,用回形针固定在叶片上。于 2025 年 4 月 14 日 10:00—11:00,在每个处理小区正上方利用大疆 T50 植保无人机按照上述正交试验参数进行喷雾,当天温度 16~28 ℃,风速 1.6~3.3 m/s。喷雾完成后 2 h,待雾滴测定卡完全晾干后将其装入自封袋,带回实验室利用扫描仪进行灰度 600 dpi 扫描成像。

利用 DepositScan 软件分析每张雾滴测定卡的雾滴覆盖密度和雾滴沉积量,计算雾滴沉积量变异系数作为评价雾滴分布均匀度的指标(廖娟等,2015)。

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}, SD = \sqrt{\frac{\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}}{n-1}}, CV = \frac{SD}{\bar{X}} \times 100\%$$

式中: \bar{X} 为雾滴平均沉积量; X_i 为每个采样点雾滴沉积量观测值; n 为采样点个数; SD 为样本标准差; CV 为雾滴沉积量变异系数,变异系数越小,雾滴分布越均匀。

1.2.2 无人机及人工喷雾施药对蚜虫的防治效果测定

基于 1.2.1 试验结果,确定飞行高度 3 m、飞行速度 2 m/s、施药流量 18.0 L/min 为最佳施药参数,以 70% 啉虫脒水分散粒剂为供试药剂,利用大疆 T50 植保无人机进行喷雾处理,以人工背负式电动喷雾器喷雾 70% 啉虫脒水分散粒剂为人工对照,以人工喷雾清水处理为空白对照。无人机施药时选择 4 列,每列含 40 株花椒树,总用水量 40 L,总用药量 50 g;人工施药时选择 5 列,每列含 12 株花椒树,总用水量 80 L,总用药量 20 g;空白对照采用人工喷雾清水,选择 5 列,每列含 12 株花椒树,总用水量 80 L。各处

理区间隔至少 5 m。依据《农药田间药效试验准则 第 51 部分:杀虫剂防治柑橘树蚜虫》(NY/T 1464.51—2014)对花椒蚜虫的防治效果进行评估。分别在施药前、施药后 3 d 和 7 d 调查 2 个处理区及空白对照区的活蚜虫数量,采用五点取样法进行调查,每个取样点调查 3 株,每株按东、南、西、北、中 5 个方位固定 1 个被害嫩梢,统计嫩梢上的活蚜虫数量,并计算虫口减退率和防治效果。虫口减退率=(施药前活虫数-施药后活虫数)/施药前活虫数×100%;防治效果=(处理区虫口减退率-对照区虫口减退率)/(100-对照区虫口减退率)×100%。

1.3 数据分析

采用 SPSS 22.0 数据处理系统进行数据统计分析。利用多因素方差分析法分析施药参数对雾滴覆盖密度、雾滴沉积量及雾滴分布均匀度的影响(邓振伟等,2009)。利用独立样本 t 检验法比较叶片正、背面的雾滴覆盖密度、雾滴沉积量和雾滴分布均匀度。采用单因素方差分析法比较不同处理间的雾滴覆盖密度、雾滴沉积量及雾滴分布均匀度,方差齐性时使用 Duncan 氏新复极差法进行差异显著性检验,方差不齐时则采用 Games-Howell 检验法进行差异显著性检验。

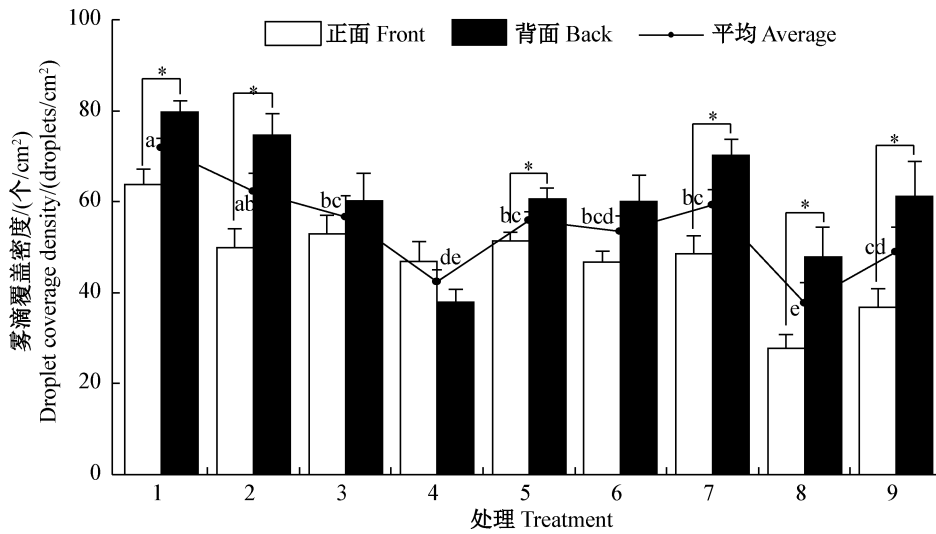
2 结果与分析

2.1 无人机喷雾参数对雾滴覆盖密度的影响

无人机不同喷雾方式下花椒叶面上的雾滴平均覆盖密度存在显著差异,其中,处理 1(A2B1C2)的雾滴平均覆盖密度最高,而处理 8(A3B3C1)的最小;此外,花椒叶片正面和背面的雾滴覆盖密度也存在显著差异,处理 1(A2B1C2)、2(A3B1C3)、5(A1B1C1)、7(A1B2C3)、8(A3B3C1)和 9(A3B2C2)在花椒叶片背面的雾滴覆盖密度显著高于叶片正面(图 1)。

对不同处理下的雾滴覆盖密度进行正交方差分析,发现飞行高度、飞行速度和施药流量对雾滴覆盖密度均有显著影响,但影响程度不同,其影响程度依次为飞行速度>施药流量>飞行高度(表 1)。其中,飞行高度对于雾滴覆盖密度的影响程度排序为 A1(3 m)≥A2(4 m)≥A3(5 m),即飞行高度越低,雾滴覆盖密度越高;飞行速度对于雾滴覆盖密度的影响程度排序是 B1(2 m/s)>B2(4 m/s)>B3(6 m/s),即飞行速度越低,雾滴覆盖密度越高;施药流量对于雾滴覆盖密度的影响程度排序是 C2(18.0 L/min)≥C3(21.6 L/min)≥C1(13.5 L/min),即在一定范围内,施药流量越大,雾滴覆盖密度越高(表 2)。综上所述,在 A1B1C2 条件

下雾滴覆盖密度最大,即飞行高度为3 m、飞行速度为2 m/s、施药流量为18.0 L/min时为最优组合。



1~9为不同喷雾参数组合,涵盖A飞行高度(3、4、5 m三水平)、B飞行速度(2、4、6 m/s三水平)及C施药流量(13.5、18.0、21.6 L/min三水平),对应参数组合依次为A2B1C2、A3B1C3、A1B3C2、A2B3C3、A1B1C1、A2B2C1、A1B2C3、A3B3C1和A3B2C2。1-9 represent different UAV spray parameter combinations, including A flight height (3, 4, 5 m), B flight speed (2, 4, 6 m/s), and C flow rate (13.5, 18.0, 21.6 L/min). The corresponding parameter combinations are A2B1C2, A3B1C3, A1B3C2, A2B3C3, A1B1C1, A2B2C1, A1B2C3, A3B3C1 and A3B2C2, respectively.

图1 无人机不同喷雾参数下花椒叶面上的雾滴覆盖密度

Fig. 1 Droplet coverage density on *Zanthoxylum bungeanum* leaf surfaces under different UAV spray parameter treatments

图中数据为平均数±标准误。*表示经独立样本t检验法检验同一处理叶片正面及背面的测定值差异显著(P<0.05)。不同小写字母表示不同处理间平均测定值经Games-Howell检验法检验差异显著(P<0.05)。Data are mean±SE. * indicates a significant difference between measurements on the adaxial (front) and abaxial (back) leaf surfaces within the same treatment based on an independent-sample t test (P<0.05). Different lowercase letters indicate significant differences in the average measurements among different treatments according to the Games-Howell test (P<0.05).

表1 无人机喷雾参数对雾滴沉积特性影响的方差分析

Table 1 Analysis of variance of UAV spray parameters on droplet deposition characteristics

喷雾参数 Spray parameter	雾滴覆盖密度 Droplet coverage density				雾滴沉积量 Droplet deposition				雾滴分布均匀度 Droplet uniformity			
	离均差平方和 Sum of squares	均方差 Mean square	F	P	离均差平方和 Sum of squares	均方差 Mean square	F	P	离均差平方和 Sum of squares	均方差 Mean square	F	P
飞行高度 Flight height	961.357	480.679	3.239	0.044	0.052	0.026	12.421	<0.001	1 390.892	695.446	2.125	0.126
飞行速度 Flight speed	4 603.603	2 301.801	15.509	<0.001	0.242	0.121	57.891	<0.001	9 976.889	4 988.445	15.241	<0.001
施药流量 Flow rate	1 487.819	743.910	5.012	0.009	0.046	0.023	10.954	<0.001	3 518.481	1 759.240	5.375	<0.001
误差Error	12 170.524	148.421			0.171	0.002			26 838.071	327.294		

2.2 无人机喷雾参数对雾滴沉积量的影响

无人机不同喷雾参数对雾滴平均沉积量产生了显著影响,其中,处理1(A2B1C2)的雾滴平均沉积量最高,而处理8(A3B3C1)的则最低;比较花

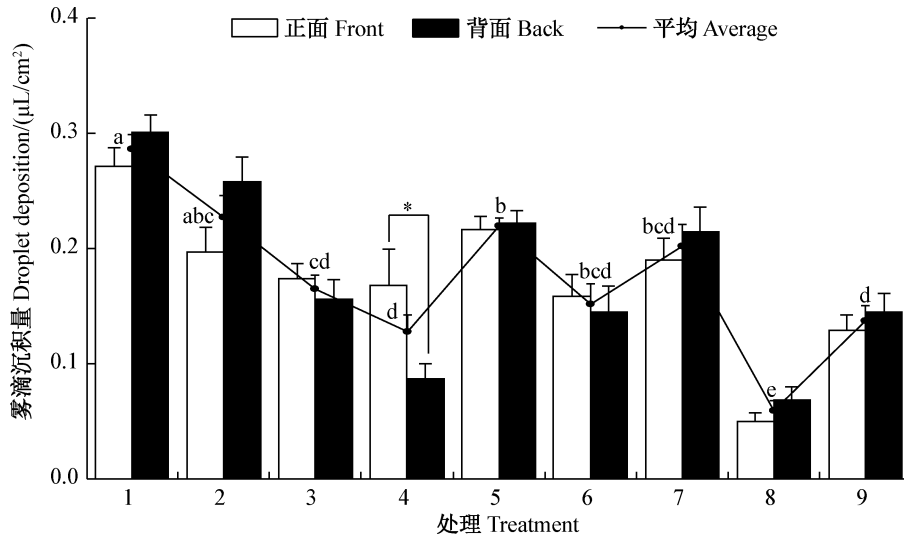
椒叶片正面和背面的雾滴沉积量,发现除了处理4(A2B3C3)叶片正面的雾滴沉积量显著高于背面外,其余处理下叶片正、背面之间的雾滴沉积量均无显著差异(图2)。

表 2 无人机不同喷雾参数水平下的雾滴沉积特性

Table 2 Droplet deposition characteristics under different UAV spray parameter levels

参数水平 Parameter level	雾滴覆盖密度/(个/cm ²) Droplet coverage density/(droplets/cm ²)	雾滴沉积量 Droplet deposition/(μL/cm ²)	雾滴分布均匀度 Droplet uniformity/%
飞行高度 Flight height	A1 (3 m)	57.284±2.224 a	0.195±0.008 a
	A2 (4 m)	55.796±2.264 ab	0.188±0.008 a
	A3 (5 m)	49.719±2.224 b	0.141±0.008 b
飞行速度 Flight speed	B1 (2 m/s)	63.275±2.264 a	0.244±0.008 a
	B2 (4 m/s)	53.922±2.224 b	0.164±0.008 b
	B3 (6 m/s)	45.603±2.224 c	0.117±0.008 c
施药流量 Flow rate	C1 (13.5 L/min)	49.045±2.224 b	0.143±0.008 b
	C2 (18.0 L/min)	59.058±2.264 a	0.196±0.008 a
	C3 (21.6 L/min)	54.697±2.224 ab	0.186±0.008 a

表中数据为平均数±标准误。同列数据后不同字母表示经多因素方差分析法检验差异显著($P<0.05$)。Data are mean±SE. Different letters within the same column indicate significant differences based on multi-way analysis of variance test ($P<0.05$).



1~9为不同喷雾参数组合,涵盖A飞行高度(3、4、5 m三水平)、B飞行速度(2、4、6 m/s三水平)及C施药流量(13.5、18.0、21.6 L/min三水平),对应参数组合依次为A2B1C2、A3B1C3、A1B3C2、A2B3C3、A1B1C1、A2B2C1、A1B2C3、A3B3C1和A3B2C2。1~9 represent different UAV spray parameter combinations, including A flight height (3, 4, 5 m), B flight speed (2, 4, 6 m/s), and C flow rate (13.5, 18.0, 21.6 L/min). The corresponding parameter combinations are A2B1C2, A3B1C3, A1B3C2, A2B3C3, A1B1C1, A2B2C1, A1B2C3, A3B3C1 and A3B2C2, respectively.

图 2 无人机不同喷雾参数下花椒叶面上的雾滴沉积量

Fig. 2 Droplet deposition on *Zanthoxylum bungeanum* leaf surfaces under different UAV spray parameter treatments

图中数据为平均数±标准误。*表示经独立样本 t 检验法检验同一处理叶片正面及背面的测定值差异显著($P<0.05$)。不同小写字母表示不同处理间平均测定值经 Games-Howell 检验法检验差异显著($P<0.05$)。Data are mean±SE. * indicates a significant difference between measurements on the adaxial (front) and abaxial (back) leaf surfaces within the same treatment based on an independent-sample t test ($P<0.05$). Different lowercase letters indicate significant differences in the average measurements among different treatments according to the Games-Howell test ($P<0.05$).

对不同喷雾参数下的雾滴沉积量进行正交方差分析,发现飞行高度、飞行速度和施药流量对雾滴沉积量均有极显著影响,对雾滴沉积量的影响程度排序为飞行速度>飞行高度>施药流量(表1)。其中,飞行高度对雾滴沉积量的影响程度排序为A1(3 m)≥

A2(4 m)>A3(5 m),即飞行高度越低,雾滴沉积量越高;飞行速度对雾滴沉积量的影响程度排序为B1(2 m/s)>B2(4 m/s)>B3(6 m/s),即飞行速度越低,雾滴沉积量越高;施药流量对雾滴沉积量的影响程度排序为C2(18.0 L/min)≥C3(21.6 L/min)>C1

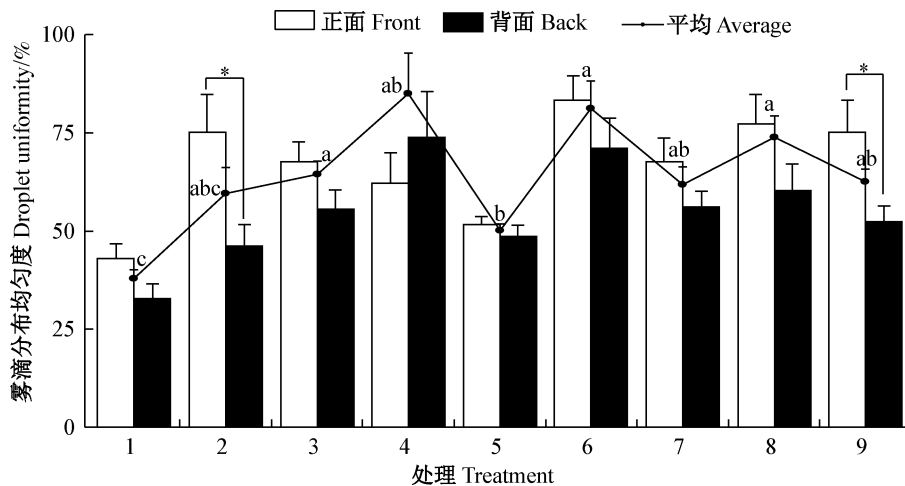
(13.5 L/min),即一定范围内,施药流量越大,雾滴沉积量越高(表2)。综上所述,在A1B1C2条件下雾滴沉积量达到最大,即飞行高度为3 m、飞行速度为2 m/s、施药流量为18.0 L/min时为最优组合。

2.3 无人机喷雾参数对雾滴分布均匀度的影响

无人机不同喷雾参数对雾滴平均分布均匀度产生了显著影响,处理1(A2B1C2)的雾滴平均分布均匀度最佳,其次为处理5(A1B1C1);另外,除了处理2(A3B1C3)和处理9(A3B2C2)的叶片背面雾滴分布均匀度显著高于正面外,其余各处理叶片正、背面之间的雾滴分布均匀度均无显著差异(图3)。

对不同喷雾参数下的雾滴分布均匀度进行正交

方差分析,发现飞行速度和施药流量对雾滴分布均匀度的影响均极显著,二者对雾滴分布均匀度的影响程度排序为飞行速度>施药流量(表1)。其中,飞行速度对雾滴分布均匀度的影响程度排序为B1(2 m/s)>B2(4 m/s)≥B3(6 m/s),即飞行速度越低,雾滴分布均匀度越好;施药流量对雾滴分布均匀度的影响程度排序为C2(18.0 L/min)>C1(13.5 L/min)≥C3(21.6 L/min),在最适施药流量下,雾滴分布均匀度最好,过高或过低都会降低其均匀性(表2)。综上所述,在A1B1C2条件下雾滴分布均匀度最佳,即飞行高度为3 m、飞行速度为2 m/s、施药流量为18.0 L/min时为最优组合。



1~9为不同喷雾参数组合,涵盖A飞行高度(3、4、5 m三水平)、B飞行速度(2、4、6 m/s三水平)及C施药流量(13.5、18.0、21.6 L/min三水平),对应参数组合依次为A2B1C2、A3B1C3、A1B3C2、A2B3C3、A1B1C1、A2B2C1、A1B2C3、A3B3C1和A3B2C2。1-9 represent different UAV spray parameter combinations, including A flight height (3, 4, 5 m), B flight speed (2, 4, 6 m/s), and C flow rate (13.5, 18.0, 21.6 L/min). The corresponding parameter combinations are A2B1C2, A3B1C3, A1B3C2, A2B3C3, A1B1C1, A2B2C1, A1B2C3, A3B3C1 and A3B2C2, respectively.

图3 无人机不同喷雾参数下花椒叶面上的雾滴分布均匀度

Fig. 3 Droplet uniformity on *Zanthoxylum bungeanum* leaf surfaces under different UAV spray parameter treatments

图中数据为平均数±标准误。*表示经独立样本 t 检验法检验同一处理叶片正面及背面的测定值差异显著($P<0.05$)。不同小写字母表示不同处理间平均测定值经Games-Howell检验法检验差异显著($P<0.05$)。Data are mean±SE. * indicates a significant difference between measurements on the adaxial (front) and abaxial (back) leaf surfaces within the same treatment based on an independent-sample t test ($P<0.05$). Different lowercase letters indicate significant differences in the average measurements among different treatments according to the Games-Howell test ($P<0.05$).

2.4 无人机施药与常规施药对花椒蚜虫的防治效果

施药后3 d,无人机施药对花椒蚜虫的防治效果为78.25%,而人工背负式电动喷雾器施药的防治效果为68.45%,两者差异不显著;施药后7 d,无人机施药的防治效果达到84.95%,较背负式手动喷雾作业的防效显著提高了10.60%(表3),表明在最优喷雾参数下无人机施药对花椒蚜虫的防治效果更佳。

3 讨论

本研究通过大疆T50植保无人机进行花椒施药作业参数优化,深入分析了花椒冠层雾滴沉积规律,发现飞行高度、飞行速度和施药流量均显著影响雾滴覆盖密度和沉积量,飞行速度和施药流量对雾滴分布均匀性有显著影响。其中,飞行速度对无人机作业质量影响最大,降低飞行速度能显著提高雾滴

覆盖密度和雾滴沉积量,并使雾滴分布更加均匀,其中飞行速度为2 m/s时雾滴沉积效果最佳。Li et al. (2022)研究发现在最适飞行速度2 m/s下,桃园作物冠层雾滴沉积量和雾滴均匀性最高,同时冠层下方的药液地面损失较低,这与本研究结果一致。雾滴沉积分布通过与无人机旋翼产生的下洗流场相互作用,利用下洗气流加速雾滴沉积(陈盛德等,2017)。飞行速度会影响无人机在目标区域上方的停留时间

和下洗气流强度,从而决定雾滴的输送范围和覆盖效果。过高的飞行速度使得下洗风场没有足够时间穿透树冠,导致雾滴难以到达冠层下方,有效沉积量和雾滴沉积均匀性显著降低(秦维彩等,2024;陈菁等,2025)。飞行速度过低不仅降低作业效率,还会因药液飘移和过度沉积造成浪费。因此,适宜的飞行速度是实现精准喷洒、保证药效并减少环境污染的关键。

表3 不同处理对花椒蚜虫的虫口减退率和防治效果

Table 3 Insect population reduction rate and control efficacy of pepper aphids under different treatments %

处理 Treatment	药后3 d 3 d after application		药后7 d 7 d after application	
	虫口减退率	防治效果	虫口减退率	防治效果
	Insect population reduction rate	Control efficacy	Insect population reduction rate	Control efficacy
无人机施药 UAV spraying	75.88±3.36 a	78.25±3.03 a	82.51±1.29 a	84.95±1.11 a
背负式手动喷雾器施药 Knapsack sprayer spraying	65.01±7.36 a	68.45±6.64 a	73.05±2.55 b	76.81±2.19 b

表中数据为平均数±标准误。同列数据后不同字母表示经独立样本 t 检验法检验差异显著($P<0.05$)。Data are mean±SE. Different letters within the same column indicate significant differences based on independent-sample t test ($P<0.05$).

飞行高度对花椒树冠层的雾滴密度和沉积量有显著影响。本研究结果表明,较低的飞行高度与适中的施药流量下,雾滴的沉积效果最佳,尤其是在飞行高度为3 m、施药流量为18.0 L/min时,花椒冠层的雾滴沉积特性最优。张强等(2023)利用大疆T20型植保无人机喷施球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 制剂时,发现飞行高度对单位面积内制剂的沉积量有显著影响。飞行高度决定了雾滴的沉降距离,也影响风场干扰程度和雾滴覆盖面积。飞行高度过高时会削弱冠层上方的垂直风场,导致雾滴沉降速度减慢且漂移风险增大,而较低的飞行高度能在一定范围内优化风场(Lan et al., 2021)。此外,本研究发现施药流量对花椒冠层雾滴分布也有显著影响。Wang CL et al. (2022)利用电动六旋翼无人机进行苹果园喷雾施药,发现施药量对苹果园雾滴覆盖率和沉积密度有显著影响。陈功等(2025)通过四旋翼植保无人机进行柑橘树冠层雾滴沉积分布试验,发现施药量显著影响冠层雾滴沉积密度和树冠上层雾滴覆盖率。施药流量在一定范围内与雾滴覆盖率和雾滴体积中径成正相关,适当提高施药流量可增加雾滴覆盖率和雾滴沉积量,但流量过大将导致雾滴沉积不均匀,影响附着效果(高雪晴等,2023)。

目前,化学防治仍然是作物病虫害防控的主要手段。无人机施药在防控玉米田中草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*、亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 等方面已有成功应用实例(王潇楠等,2023;臧禹

等,2024)。Lou et al. (2018)研究了无人机对棉蚜 *Aphis gossypii* 和叶螨的控制效果,发现无人机施药对棉蚜及叶螨的防治效果达60%以上。本研究结果表明,无人机施药后3 d对蚜虫的防治效果为78.25%,7 d后可达84.95%,显著优于人工背负式电动喷雾器施药。此外,雾滴沉积试验也证明,无人机施药后花椒叶片背面的雾滴覆盖密度高于正面,且叶片正、背面的雾滴沉积量和分布均匀度均无显著差异,而传统施药模式因缺乏气流作用,雾滴难以到达叶片背面。药剂与靶标接触的概率越高,防治效果越好(张路生等,2025)。由于蚜虫主要集中在叶片背面,无人机施药能够增加与蚜虫的接触概率,从而提高防治效果。

小型植保无人机因其优越的地形适应能力和低空喷洒能力,在农业生产中展现出广阔的应用前景。本研究结果显示,飞行高度、飞行速度和施药流量对无人机喷雾在花椒冠层的雾滴沉积特性均有显著影响,在最优参数下进行花椒蚜虫防治试验,药后7 d防治效果可达84.95%,显著优于人工背负式电动喷雾器施药。这表明无人机在农业病虫害防治中具有显著的优势和潜力。未来,无人机将与物联网、人工智能、大数据等技术进一步深度融合,通过集成变量施药、处方信息处理、对靶喷雾等精准施药技术,以及自动导航与自主避障等智能控制装备,构建智能精准化无人机施药体系,共同推动农业生产从粗放式、经验式管理向精细化、智能化现代管理模式

转变,为保障粮食安全、促进农业可持续发展提供关键技术支持与创新动力(Saleh et al., 2022, Raouhi et al., 2023)。

参考文献 (References)

- Chen G, Liao K, Xiao T, Guo KF, Zhou YY, Jin CZ, Ni XZ. 2025. Effects of operating parameters of plant protection UAV on deposition and distribution of droplets in citrus canopy. *China Plant Protection*, 45(2): 74–78 (in Chinese) [陈功, 廖凯, 肖焜, 郭开发, 周芸芸, 金晨钟, 倪弦之. 2025. 植保无人机作业参数对雾滴在柑橘树冠层沉积分布的影响. *中国植保导刊*, 45(2): 74–78]
- Chen J, He XK, Shan HD, Han L, Su WB, Zhang X. 2025. Research progress on the deposition effect of plant protection UAV droplets. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, (3): 67–68 (in Chinese) [陈菁, 何雄奎, 山弘道, 韩雷, 苏文博, 张旭. 2025. 植保无人机雾滴沉积效果研究进展. *农业科技与装备*, (3): 67–68]
- Chen SD, Lan YB, Bradley KF, Li JY, Liu AM, Mao YD. 2017. Effect of wind field below rotor on distribution of aerial spraying droplet deposition by using multi-rotor UAV. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 48(8): 105–113 (in Chinese) [陈盛德, 兰玉彬, Bradley KF, 李继宇, 刘爱民, 毛越东. 2017. 多旋翼无人机旋翼下方风场对航空喷施雾滴沉积的影响. *农业机械学报*, 48(8): 105–113]
- Chen SD, Lan YB, Zhou ZY, Ouyang F, Wang GB, Huang XY, Deng XL, Cheng SN. 2020. Effect of droplet size parameters on droplet deposition and drift of aerial spraying by using plant protection UAV. *Agronomy*, 10(2): 195
- Deng ZW, Yu P, Chen L. 2009. Application of SPSS software in orthogonal design and result analysis. *Computer Study*, (5): 15–17 (in Chinese) [邓振伟, 于萍, 陈玲. 2009. SPSS软件在正交试验设计、结果分析中的应用. *电脑学习*, (5): 15–17]
- Gao XQ, Wang D, Li XD, Chen GP, Jiang ZL. 2023. Structure optimization and droplet deposition characteristics of centrifugal atomizing nozzles. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 41(7): 749–756 (in Chinese) [高雪晴, 王玓, 李鑫德, 陈国鹏, 姜兆亮. 2023. 离心雾化喷头结构优化及雾滴沉积特性. *排灌机械工程学报*, 41(7): 749–756]
- Guo J, Liu CM, Hou QQ, Wang XM, Shan SL, He JZ, Yang YG, Long YS, Huang K, Yan XJ. 2024. Effects of aircraft type and flight parameters on tobacco plant under pesticide spraying scenario by plant protection UAV. *Plant Protection*, 50(4): 283–288, 309 (in Chinese) [郭建, 刘春明, 侯秋强, 王晓萌, 单双吕, 何建忠, 杨永刚, 龙云生, 黄坤, 闫晓静. 2024. 不同类型植保无人飞机施药作业对烟草植株的影响. *植物保护*, 50(4): 283–288, 309]
- Guo S, Li JY, Yao WX, Hu XD, Wei X, Long B, Wu H, Li HF. 2021. Optimization of the factors affecting droplet deposition in rice fields by rotary unmanned aerial vehicles (UAVs). *Precision Agriculture*, 22(6): 1918–1935
- He XK. 2022. Research and development of efficient plant protection equipment and precision spraying technology in China: a review. *Journal of Plant Protection*, 49(1): 389–397 (in Chinese) [何雄奎. 2022. 高效植保机械与精准施药技术进展. *植物保护学报*, 49(1): 389–397]
- Jiang W. 2025. Analysis of research progress and influencing factors of plant protection UAV in China. *China Agricultural Machinery Equipment*, (6): 123–125 (in Chinese) [蒋玮. 2025. 中国植保无人机研究进展及影响因素分析. *中国农机装备*, (6): 123–125]
- Lan YB, Qian SC, Chen SD, Zhao YJ, Deng XL, Wang GB, Zang Y, Wang J, Qiu XY. 2021. Influence of the downwash wind field of plant protection UAV on droplet deposition distribution characteristics at different flight heights. *Agronomy*, 11(12): 2399
- Li LL, Hu ZH, Liu QJ, Yi TC, Han P, Zhang RR, Pan LG. 2022. Effect of flight velocity on droplet deposition and drift of combined pesticides sprayed using an unmanned aerial vehicle sprayer in a peach orchard. *Frontiers in Plant Science*, 13: 981494
- Li RF, Han SK, Su Y, Zhang X, Li JF. 2025. Research on the downwash flow field and spray droplet distribution of single-rotor plant protection drone. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 42(2): 264–270 (in Chinese) [李仁凤, 韩顺凯, 苏毅, 张翔, 栗俊芬. 2025. 单旋翼植保无人机下洗流场与喷药雾滴分布研究. *计算力学学报*, 42(2): 264–270]
- Liao J, Zang Y, Zhou ZY, Luo XW. 2015. Quality evaluation method and optimization of operating parameters in crop aerial spraying technology. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(Suppl.2): 38–46 (in Chinese) [廖娟, 臧英, 周志艳, 罗锡文. 2015. 作物航空喷施作业质量评价及参数优选方法. *农业工程学报*, 31(增刊2): 38–46]
- Liu F, He YC, Zhang JP, Li DS, Zhao BJ. 2024. Study on the influence of operation parameters of plant protection drones on the distribution of droplets deposition in walnut canopy. *China Fruits*, (12): 102–106 (in Chinese) [刘枫, 贺有超, 张俊佩, 李冬生, 赵宝军. 2024. 植保无人机作业参数对雾滴在核桃冠层沉积分布的影响研究. *中国果树*, (12): 102–106]
- Lou ZX, Xin F, Han XQ, Lan YB, Duan TZ, Fu W. 2018. Effect of unmanned aerial vehicle flight height on droplet distribution, drift and control of cotton aphids and spider mites. *Agronomy*, 8(9): 187
- Luo YJ, Chen X, Wu CQ, Hu JY, Zhang YG, Cheng YQ, Huang M, Xie YH. 2025. Differential analysis on heavy metal cadmium accumulation of *Zanthoxylum armatum* germplasm resources. *Journal of Southern Agriculture*, 56(2): 343–354 (in Chinese) [罗友进, 陈霞, 吴纯清, 胡佳羽, 张义刚, 程玥晴, 黄明, 谢永红. 2025. 青花椒种质资源重金属镉积累的差异分析. *南方农业学报*, 56(2): 343–354]
- 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 (in Chinese) [马钰, 贡常委, 张韞政, 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]
- Meng YH, Ma Y, Wang ZG, Hu HY. 2022. Droplet distribution in cotton canopy using single-rotor and four-rotor unmanned aerial

- vehicles. PeerJ, 10: e13572
- Qin WC, Chen PY. 2023. Analysis of the research progress on the deposition and drift of spray droplets by plant protection UAVs. Scientific Reports, 13: 14935
- Qin WC, Chen PY, Yan XJ. 2024. Effect of spray parameters of a large-load oil-operated plant protection UAV on the distribution of droplet deposition in the palm canopy. Plant Protection, 50(3): 227–233 (in Chinese) [秦维彩, 陈盼阳, 闫晓静. 2024. 大载荷油动植保无人机喷雾参数对棕榈树冠层雾滴沉积分布的影响. 植物保护, 50(3): 227–233]
- Raouhi EM, Lachgar M, Hrimech H, Kartit A. 2023. Unmanned aerial vehicle-based applications in smart farming: a systematic review. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 14(6): 1150–1165
- Saleh A, Joshi P, Rathore RS, Sengar SS. 2022. Trust-aware routing mechanism through an edge node for IoT-enabled sensor networks. Sensors, 22(20): 7820
- Shan CF, Xue C, Zhang LC, Song CC, Kaousar R, Wang GB, Lan YB. 2024. Effects of different spray parameters of plant protection UAV on the deposition characteristics of droplets in apple trees. Crop Protection, 184: 106835
- Sun Z, Gu W, Cui LF, Cai C, Chen C, Zhou QQ, Ding SM, Lan YB, Xue XY. 2024. Research status and development trends of key technologies for intelligent plant protection equipment. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization (in Chinese and English), 5(4): 1–23 (in Chinese) [孙竹, 顾伟, 崔龙飞, 蔡晨, 陈晨, 周晴晴, 丁素明, 兰玉彬, 薛新宇. 2024. 智能植保装备关键技术研究现状与发展趋势. 智能化农业装备学报(中英文), 5(4): 1–23]
- Wang B, Zhang Y, Wang CS, Teng GF. 2022. Droplet deposition distribution prediction method for a six-rotor plant protection UAV based on inverse distance weighting. Sensors, 22(19): 7425
- Wang CL, Liu Y, Zhang ZH, Han L, Li YF, Zhang H, Wongsuk S, Li YY, Wu XM, He XK. 2022. Spray performance evaluation of a six-rotor unmanned aerial vehicle sprayer for pesticide application using an orchard operation mode in apple orchards. Pest Management Science, 78(6): 2449–2466
- Wang M, Wei ZZ, Guo JW, Xiao M, Dai Y, Yuan FK, He C, Tang MS, Chen QD, Liu X. 2023. Harm of Sichuan pepper aphid and its control countermeasures. Sichuan Agricultural Science and Technology, (6): 41–43 (in Chinese) [王毛, 魏真真, 郭静微, 肖敏, 代英, 袁方柯, 何川, 唐明双, 陈庆东, 刘旭. 2023. 花椒蚜虫的危害及防治对策. 四川农业科技, (6): 41–43]
- Wang XN, Wang SW, Lei CM, Liu YP, Chang H, Xiao Y, Li ZY. 2023. The effect of flight parameters and nozzle type on the efficacy of spraying chlorantraniliprole from an unmanned aerial vehicle to control *Spodoptera frugiperda*. Chinese Journal of Applied Entomology, 60(4): 1244–1253 (in Chinese) [王潇楠, 王思威, 雷春媚, 刘艳萍, 常虹, 肖勇, 李振宇. 2023. 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. 应用昆虫学报, 60(4): 1244–1253]
- Xu M, Zhou QQ, Yang RM, Xu YF, Gao P. 2024. Analysis of meteorological factors affecting the droplets deposition in the prevention and control of wheat scab by unmanned aerial vehicle and construction of deposition prediction models. Plant Protection, 50(3): 70–79, 87 (in Chinese) [徐敏, 周晴晴, 杨荣明, 徐忆菲, 高苹. 2024. 植保无人机喷雾防治小麦赤霉病雾滴沉积量的气象影响因子分析及预报模型构建. 植物保护, 50(3): 70–79, 87]
- Yuan HZ, Yang DB, Yan XJ, Zhang LN. 2011. Pesticide efficiency and the way to optimize the spray application. Plant Protection, 37(5): 14–20 (in Chinese) [袁会珠, 杨代斌, 闫晓静, 张琳娜. 2011. 农药有效利用率与喷雾技术优化. 植物保护, 37(5): 14–20]
- Zang Y, Gu XY, Lin SQ, Zi L, Li CL, Chen QL, Zang Y. 2024. Effects of mode of operating agricultural unmanned aerial vehicles on deposition of droplet and prevention and control of corn borer. Journal of Huazhong Agricultural University, 43(6): 325–332 (in Chinese) [臧禹, 谷秀艳, 林树青, 资乐, 李长龙, 陈其龙, 臧英. 2024. 植保无人机作业方式对玉米螟防治的雾滴沉积和防治效果影响. 华中农业大学学报, 43(6): 325–332]
- Zeeshan M, Li HR, Yousaf G, Ren H, Liu YP, Arshad M, Dou ZC, Han XQ. 2024. Effect of formulations and adjuvants on the properties of acetamiprid solution and droplet deposition characteristics sprayed by UAV. Frontiers in Plant Science, 15: 1441193
- Zhang LS, Yu XQ, Shao YL, Jin ZT, Zhou JM, Chang HH, Xie YJ, Han XW, He C, Tian XH. 2025. Droplets deposition of herbicide by plant-protection UAV and control effect in soybean-maize strip intercropping after sowing and before seedling. Plant Protection, 51(1): 327–333 (in Chinese) [张路生, 于晓庆, 邵玉丽, 金宗亭, 周江明, 常慧红, 谢英杰, 韩小伟, 何川, 田雪慧. 2025. 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. 植物保护, 51(1): 327–333]
- Zhang Q, Zhu XM, He SC, Gao Y, Li QY, Tian ZL. 2023. Screening of flight parameters of plant protection UAV spraying *Beauveria bassiana* formulation to control *Chilo suppressalis* (Walker). Chinese Journal of Biological Control, 39(4): 789–796 (in Chinese) [张强, 朱晓敏, 赫思聪, 高悦, 李启云, 田志来. 2023. 植保无人机喷施球孢白僵菌制剂防治水稻二化螟飞行参数筛选. 中国生物防治学报, 39(4): 789–796]
- Zhu JY, Hu RP, Xu XT, Fan ZH, Chen S, Chen QH. 2024. Research progress on green control technologies for diseases and pests in *Zanthoxylum bungeanum*. South-Central Agricultural Science and Technology, 45(1): 241–244 (in Chinese) [朱建义, 胡容平, 徐湘婷, 范中茵, 陈松, 陈庆华. 2024. 花椒病虫害绿色防控技术研究进展. 中南农业科技, 45(1): 241–244]
- Zi L, Zang Y, Huang JH, Bao RF, Zhou ZY. 2023. Influence of adjuvants and pesticides on the control efficacy against rice caseworm *Cnaphalocrocis medinalis* using crop protection unmanned aircraft system. Journal of Plant Protection, 50(2): 538–544 (in Chinese) [资乐, 臧禹, 黄俊浩, 包瑞峰, 周志艳. 2023. 植保无人机飞防助剂与杀虫剂配伍方式对其防治稻纵卷叶螟效果的影响. 植物保护学报, 50(2): 538–544]

(责任编辑:李美娟)