

植保无人机与人工作业施药对板栗上主要害虫的防效及成本效益比较



王海荣 田寿乐 孙晓莉 孙瑞红 李颖芳 叶甜甜
王金平 沈广宁*

(山东省果树研究所, 农业农村部黄淮设施园艺工程重点实验室, 泰安 271000)

摘要: 为大面积板栗种植园提供精准的防治手段和高适配性的技术方案, 2024年5月15日于山东省果树研究所万吉山板栗基地进行试验, 采用植保无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)和人工作业两种施药方式对板栗树喷药, 测定喷药后板栗上主要害虫栗大蚜 *Lachus tropicalis* 和针叶小爪螨 *Oligonychus ununguis* 的虫口减退率和防效, 并比较这两种施药方式的作业小时生产率、有效运营成本等成本效益指标。结果显示: 人工作业喷施30% 氟啶虫酰胺·烯啶虫胺水分散粒剂后3 d, 对栗大蚜的防效可达91.14%, 优于植保UAV的防效(70.99%); 人工作业喷施22% 阿维·螺螨酯悬浮剂6 000倍液后3、7和14 d, 对针叶小爪螨的防效分别为77.74%、86.34%和91.47%, 与植保UAV喷施450 mL/hm² 22% 阿维·螺螨酯悬浮剂的防效差异不显著(分别为75.59%、84.64%、89.82%); 人工作业施药方式的有效运营成本为539.82元/hm², 是植保UAV的1.02倍; 植保UAV的作业小时生产率为1.78 hm²/h, 而人工作业施药的作业小时生产率仅为0.06 hm²/h, 前者较后者的作业效率提高了28.67%。

关键词: 植保无人机; 人工作业; 板栗; 栗大蚜; 针叶小爪螨; 防效; 成本效益

Comparative analysis of control efficacy and cost-effectiveness between plant protection unmanned aerial vehicle spraying and manual application for major pests in chestnut orchards

Wang Hairong Tian Shoule Sun Xiaoli Sun Ruihong Li Yingfang Ye Tiantian
Wang Jinping Shen Guangning*

(Key Laboratory of Facility Horticulture Engineering in the Huanghuai Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Shandong Institute of Pomology, Tai'an 271000, Shandong Province, China)

Abstract: To provide precise control strategies and highly adaptable technical solutions for large-scale chestnut orchards, a field experiment was conducted on May 15, 2024, at the Wanjishan Chestnut Base of the Shandong Institute of Pomology. Two application methods—plant protection unmanned aerial vehicle (UAV) spraying and manual application—were compared in terms of their control efficacy against the two major chestnut pests large chestnut aphid *Lachnus tropicalis* and spruce spider mite *Oligonychus ununguis*. Pest population reduction rate and pest control efficacy were evaluated after application, and cost-effectiveness indicators, including productivity per effective working hour and effective operating cost, were also analyzed and compared between the two application methods. The experimen-

tal results demonstrated that manual application of 30% flonicamid·nitenpyram water-dispersible granules achieved a control efficacy of 91.14% against *L. tropicalis* at 3 days after treatment, which was higher than that achieved by plant protection UAV spraying (70.99%). Moreover, manual spraying of a 22% abamectin·spirodiclofen suspension at a dilution ratio of 6 000:1 yielded control efficacies of 77.74%, 86.34%, and 91.47% against *O. ununguis* at 3, 7 and 14 d after application, respectively. These values were not significantly different from those obtained with plant protection UAV spraying at an application rate of 450 mL/hm² (75.59%, 84.64%, and 89.82%, respectively). The effective operating cost of manual application was 539.82 yuan/hm², which was 1.02 times that of plant protection UAV spraying. The productivity per effective working hour of plant protection UAV reached 1.78 hm²/h, whereas that of manual application was only 0.06 hm²/h, reflecting a 28.67% improvement in operational efficiency for plant protection UAV.

Key words: plant protection UAV; manual pesticide application; chestnut; *Lachus tropicalis*; *Oligonychus ununguis*; control efficacy; cost-effectiveness

板栗 *Castanea mollissima* 属壳斗科栗属 *Castanea*, 是我国特色干果之一, 年总产量约 300 万 t。山东省是我国板栗的主产区之一, 其中泰安市板栗种植面积约 1.7 万 hm², 但管理较粗放, 尤其是土肥水管理较少, 病虫害发生严重。栗大蚜 *Lachnus tropicalis* 和针叶小爪螨 *Oligonychus ununguis* 分别是板栗枝干和叶片上的主要虫害, 年发生世代多, 有世代重叠现象, 近几年来愈发严重, 导致板栗产量增长缓慢。此外, 板栗大多种植在山地或坡地上, 费时费力, 管理成本高。

与传统人工作业相比, 植保无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 凭借作业效率高、节约资源、操作安全、地形适应性强和环保等核心优势成为现代农业的重复工具, 被广泛用于播种、施肥、喷药、除草 4 个方面。近些年, 植保 UAV 被用于防控葡萄 *Vitis vinifera* (Sarri et al., 2019)、桃 *Prunus persica* (Meng et al., 2020)、菠萝 *Ananas comosus* (Wang et al., 2020)、柑橘 *Citrus reticulata* (Martinez-Guanter et al., 2020; Meng et al., 2022)、火龙果 *Hylocereus undatus* (潘波等, 2021)、杏 *Prunus armeniaca* (Li et al., 2021)、苹果 *Malus pumila* (Wang et al., 2022)、梨 *Pyrus prifolia* (Qi et al., 2023) 和木瓜 *Carica papaya* (Ribeiro et al., 2023) 等果树上害虫。目前关于植保 UAV 的报道多集中在喷雾液滴在树冠中分布、密度、覆盖率等沉积特性以及比较不同喷雾量、飞行速度、高度等喷雾条件下的效果。例如, 植保 UAV 飞行较慢、喷雾量较大时, 更多的雾滴会沉积到桃树和梨树上 (Meng et al., 2020; Qi et al., 2023); 植保 UAV 飞行越高, 喷洒的液滴越容易随侧风发生飘移 (Wang et al., 2020); Zhang et al. (2016) 通过试验发现植保 UAV 在 1.0 m 高度工作时可获得较好的液滴

分布, 此时液滴的覆盖率更高, 沉积密度更大, 变异系数更小, 进而液滴分布更均匀, 且中心开放形的柑橘树型比圆形树冠更能显著增加液滴分布; 姜莉莉等 (2020) 研究结果显示在一定范围内增加飞防弥雾机的喷液量可以增加雾滴在板栗冠层的沉积, 当喷雾量为 75 L/hm² 时, 板栗冠层的雾滴密度较大, 覆盖率较高, 沉积量较大, 防效较好, 均优于其他喷雾量; Meng et al. (2022) 研究结果表明在喷洒覆盖率方面, 载荷能力为 30 L 的大疆 T30 植保 UAV 优于载荷能力为 20 L 的 T20 植保 UAV, 尤其是在柑橘树冠层内; 魏源等 (2023) 通过喷洒试验发现当飞行高度 2 m、飞行速度 1 m/s、喷幅 7 m 时, 大疆 T30 植保 UAV 对板栗树的飞防效果最佳, 优于大疆 T16 和 T20。植保 UAV 虽然在农业中广泛应用, 但 UAV 是否可以用于防治板栗树上主要害虫, 其对板栗树上主要害虫的防效如何, 其在有效运营成本、作业效率等方面与人工作业施药的差异如何均不清楚。

为大面积板栗种植园提供精准的防治手段和高适配性的技术方案, 2024 年 5 月 15 日于山东省果树研究所万吉山板栗基地进行试验, 采用植保 UAV 和人工作业两种施药方式对板栗树喷药, 测定喷药后板栗上主要害虫栗大蚜和针叶小爪螨的虫口减退率和防效, 并比较这两种施药方式的作业小时生产率、有效成本等成本效益指标, 以期为板栗种植园制订高适配性的防控技术方案提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

供试药剂和飞防助剂: 22% 阿维·螺螨酯 (2% abamectin·20% spirodiclofen) 悬浮剂, 上海沪联生物

药业(夏邑)股份有限公司;30% 氟啶虫酰胺·烯啶虫胺(10% flonicamid·20% nitenpyram)水分散粒剂,吴桥农药有限公司。聚醚改性硅氧烷表面活性剂,山东省泰安市泰山现代农业科技有限公司。

供试仪器和设备:3WBD-20型人工背负式电动喷雾器,台州市路桥喷雾器厂;T60农业无人飞机,施药时飞行速度约6 m/s,距树冠2.5 m,离心喷头,喷液量为75 L/hm²,深圳市大疆创新科技有限公司。

1.2 方法

1.2.1 板栗园不同施药方式试验

2024年5月15日在山东省果树研究所万吉山板栗基地进行试验。该试验基地位于山坡上,呈梯田水平排列,种植品种为黄棚,种植面积约1 hm²。树龄13年左右,株距2.0 m,行距2.5 m,板栗树平均高3.5 m,采用低干、矮冠、多主枝、开心形的修剪方式。施药时间为5月15日06:00—08:00,板栗正值初花期,于施药前1 d的15:00—18:00调查板栗基地虫害发生情况。施药当天,气温为15~20℃,相对湿度为60%~70%,风速≤2m/s,符合作业条件。试验共设3个处理,每个处理3个小区,每个小区长约30 m,宽约20 m,随机区组排列。本试验采用30% 氟啶虫酰胺·烯啶虫胺防治栗大蚜,采用22%阿维·螺螨酯防治针叶小爪螨,均采用混施的方式。

在防治柑橘树等果树上的针叶小爪螨时,22%阿维·螺螨酯悬浮剂规定用药量为5 500~7 333倍液,因此人工施药时,30% 氟啶虫酰胺·烯啶虫胺的喷施剂量为150 g/hm²,22%阿维·螺螨酯的喷施浓度为6 000倍液,喷施剂量为187.5 g/hm²,将这两种杀虫剂桶混喷施,不添加飞防助剂;考虑到植保UAV施药时雾滴飘移特性,植保UAV作业时的用药量在安全用药区间上下等差设置,因此植保UAV施药时,30% 氟啶虫酰胺·烯啶虫胺的喷施剂量为150 g/hm²,22%阿维·螺螨酯的喷施剂量分别为150、300和450 g/hm²,两种杀虫剂混配施用,同时添加150 mL/hm²的飞防助剂,每个浓度由1架UAV完成施药,共3个架次;均以喷施清水为对照。喷药开始前,分别在每个小区选取3株板栗树,每株板栗树在东、南、西、北4个方位各选取1个枝条,施药前挂牌固定枝条,调查针叶小爪螨和栗大蚜的虫口数量,施药后3、7、14 d各调查1次标记枝条虫口数量,计算每个处理的虫口减退率和防效。虫口减退率=(施药前虫口数-施药后虫口数)/施药前虫口数×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%。

1.2.2 两种施药方式的成本效益确定

根据《农业机械 生产试验方法》(GB/T 5667—2008),以两人配置完成板栗树施药作业,以1 hm²面积为样方,分别监测植保UAV和人工作业施药的工作效率、防治效果、有效运营成本等,比较植保UAV与人作业的作业小时生产率。作业小时生产率=生产考核期间的班次作业量/生产考核期间的班次作业时间。每公顷植保UAV和人工作业时间分别为0.56 h和16.88 h。计算植保UAV药剂费用时,以防治针叶小爪螨效果较好的处理(450 g/hm²)为例进行对比;植保UAV的租赁费用是300元/hm²;药剂费用和水费按照当地市场价格来换算;有效运营成本是指在实施喷药作业中支出的水费、劳动力费用、药剂费用的总和。

1.3 数据分析

采用SPSS 19.0软件对试验数据进行统计分析,三者及以上应用Duncan氏新复极差法进行差异显著性检验,两者之间采用独立样本 t 检验法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同施药方式对栗大蚜的防效

人工作业喷施30% 氟啶虫酰胺·烯啶虫胺后3 d,栗大蚜的虫口减退率和防效最高,分别为91.14%和91.61%,显著高于植保UAV的虫口减退率(70.99%)($P<0.05$)和防效(72.33%)($P<0.01$);人工作业喷施30% 氟啶虫酰胺·烯啶虫胺后7 d,栗大蚜的虫口减退率和防效有所下降,分别为85.91%和89.30%,仍显著高于植保UAV的虫口减退率(43.92%)($P<0.05$)和防效(57.36%)($P<0.001$);人工作业喷施和植保UAV喷施30% 氟啶虫酰胺·烯啶虫胺后14 d,栗大蚜的虫口减退率和防效均降到最低,虫口减退率分别为38.32%和63.93%,且两种施药方式下栗大蚜的虫口减退率之间差异不显著,但防效仍差异显著($P<0.05$,表1)。

2.2 不同施药方式对针叶小爪螨的防效

人工作业喷施22%阿维·螺螨酯悬浮剂6 000倍液后3、7和14 d,针叶小爪螨的虫口减退率分别为73.73%、82.97%和85.52%,防效分别为77.74%、86.34%和91.47%。植保UAV喷施450 g/hm² 22%阿维·螺螨酯悬浮剂后3、7和14 d,针叶小爪螨的虫口减退率分别为76.01%、81.07%和82.64%,防效分别为75.59%、84.64%和89.82%,与人工作业施药差异不显著;植保UAV喷施150 g/hm² 22%阿维·螺螨

酯悬浮剂后 3、7 和 14 d, 针叶小爪螨的虫口减退率分别为 42.73%、55.25% 和 52.49%, 防效分别为 51.36%、63.90% 和 71.80%, 均显著低于人工作业施药和植保 UAV 喷施 450 g/hm² 22% 阿维·螺螨酯悬浮剂的虫口减退率和防效 ($P<0.05$); 植保 UAV 喷施 300 g/hm²

22% 阿维·螺螨酯悬浮剂后 3、7 和 14 d, 针叶小爪螨的虫口减退率分别为 54.19%、61.29% 和 28.94%, 防效分别为 61.00%、68.90% 和 58.35%, 均显著低于人工作业施药和植保 UAV 喷施 450 g/hm² 22% 阿维·螺螨酯悬浮剂的虫口减退率和防效 ($P<0.05$, 表 2)。

表 1 不同施药方式对栗大蚜的防效

Table 1 Control efficacy of different application methods against *Lachnus tropicalis*

%

施药方式 Application method	药剂和剂量 Pesticide treatment and application rate	施药后 3 d 3 days after application		施药后 7 d 7 days after application		施药后 14 d 14 days after application	
		虫口减退率 Population reduction rate	防效 Control efficacy	虫口减退率 Population reduction rate	防效 Control efficacy	虫口减退率 Population reduction rate	防效 Control efficacy
		对照 CK		-5.51±1.58 c		-32.12±2.76 c	
人工作业 Manual application	150 g/hm ² 30% 氟啶虫酰胺·烯啶虫胺 150 g/hm ² of 30% flonicamid·nitenpyram	91.14±1.87 a	91.61±1.67**	85.91±2.91 a	89.30±2.41***	38.32±3.94 a	63.93±1.15*
植保无人机 Plant protection UAV	150 g/hm ² 30% 氟啶虫酰胺·烯啶虫胺 150 g/hm ² of 30% flonicamid·nitenpyram	70.99±7.76 b	72.33±7.32	43.92±6.81 b	57.36±4.17	19.26±9.64 a	51.07±6.65

表中数据为平均数±标准差。同列不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验差异显著 ($P<0.05$)。*, **, *** 表示两个处理之间经独立样本 t 检验法检验差异显著 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$ 或 $P<0.001$)。Data are mean±SD. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences based on Duncan's new multiple range test ($P<0.05$). *, **, *** indicates significant differences between two treatments based on an independent sample t test at $P<0.05$ or $P<0.01$ or $P<0.001$, respectively.

2.3 不同施药方式的成本效益比较

在板栗园人工作业施药方式中, 人工投入时间为 7.50 h/hm², 用水量为 1 125.00 kg/hm², 分别是植保 UAV 的 13.33 倍和 10.00 倍; 人工作业施药的每公顷药剂费用虽然低于植保 UAV, 但每公顷水费和劳动力费用远高于植保 UAV, 最终致使人工作业施药方式的有效运营成本较高, 为 539.82 元/hm², 是植保 UAV 的 1.02 倍 (表 3); 两种施药方式施药 14 d 后对针叶小爪螨的防效差异不显著, 分别为 89.92% 和 91.47% (表 2); 植保 UAV 的作业小时生产率为 1.78 hm²/h, 而人工作业施药的作业小时生产率仅为 0.06 hm²/h, 前者较后者的作业效率提高了 28.67% (表 3)。

3 讨论

本研究结果显示用 30% 氟啶虫酰胺·烯啶虫胺水分散粒剂 (剂量为 150 mg/hm²) 防治栗大蚜时, 人工作业的防治效果优于植保 UAV。栗大蚜是板栗枝干上的重要害虫, 可造成嫩枝顶芽弯曲, 枝干表皮失水变褐, 甚至枯死, 但植物 UAV 的防治效果较差, 这意味着在枝干上植保 UAV 的雾滴沉积效果并不

理想。植保 UAV 的雾滴沉积效果与植保 UAV 类型、飞行高度、飞行速度、树形、冠层位置、农药剂型和助剂等因素有关 (蒙艳华等, 2021; 潘波等, 2021; Chen et al., 2022)。下一步将结合枝干害虫的关键防治时期, 深入优化植保 UAV 的综合参数设置, 提高植保 UAV 对枝干害虫的防效。

针叶小爪螨多以成螨和幼若螨在叶片正面刺吸汁液, 造成叶片焦枯及早落。针叶小爪螨的发生与为害受天气影响较大, 高温利于种群增长, 降雨可显著降低种群数量, 因此在其卵孵化盛期可采用植保 UAV 进行化学防治, 防治时需考虑天气情况。阿维·螺螨酯对害螨有触杀和胃毒作用, 且长残效性, 施用 7 d 内随处理时间的延长防效逐渐增加。本研究结果显示植保 UAV 喷施剂量 450 g/hm² 阿维·螺螨酯 14 d 后可有效控制针叶小爪螨, 并且与人工作业喷施剂量 187.5 g/hm² 阿维·螺螨酯的田间防效相当。植保 UAV 作业时经常添加飞防助剂聚醚改性硅氧烷表面活性剂以提高叶片表面雾滴覆盖率和黏附性, 进而提高防效, 但植保 UAV 的喷洒性能对叶片表面雾滴覆盖率和黏附性也有重要影响 (宫新泰, 2025; 王坤春等, 2025)。

表2 不同施药方式对针叶小爪螨的防效

Table 2 Control efficacy of different application methods against *Oligonychus ununguis*

%

施药方式 Application method	药剂和剂量 Pesticide treatment and application rate	药后 3 d 3 days after application		药后 7 d 7 days after application		药后 14 d 14 days after application	
		虫口减退率 Population reduction rate	防效 Control efficacy	虫口减退率 Population reduction rate	防效 Control efficacy	虫口减退率 Population reduction rate	防效 Control efficacy
		对照 CK	-17.75±4.77 d	—	-24.78±10.79 c	—	-71.01±7.32 d
人工作业 Manual application	22% 阿维·螺螨酯 悬浮剂 6 000 倍 22% abamectin·spirodiclofen suspension diluted 6 000-fold	73.73±5.69 a	77.74±4.22 a	82.97±1.78 a	86.34±1.09 a	85.52±3.09 a	91.47±2.18 a
植保无人机 Plant protection UAV	150 g/hm ² 22% 阿维·螺螨酯悬浮剂 150 g/hm ² of 22% abamectin·spirodiclofen	42.73±2.48 c	51.36±0.89 c	55.25±2.26 b	63.90±4.78 b	52.49±2.05 b	71.80±1.35 b
	300 g/hm ² 22% 阿维·螺螨酯悬浮剂 300 g/hm ² of 22% abamectin·spirodiclofen	54.19±2.62 b	61.00±3.70 b	61.29±1.12 b	68.90±1.91 b	28.94±3.08 c	58.35±3.58 c
	450 g/hm ² 22% 阿维·螺螨酯悬浮剂 450 g/hm ² of 22% abamectin·spirodiclofen	76.01±1.60 a	75.59±1.68 a	81.07±3.75 a	84.64±3.97 a	82.64±1.31 a	89.82±1.19 a

表中数据为平均数±标准差。同列不同字母表示经Duncan氏新复极差法检验差异显著($P<0.05$)。Data are mean±SD. Different letters within the same column indicate significant differences as determined by Duncan's new multiple range test ($P<0.05$).

表3 板栗园不同施药方式的成本效益比较

Table 3 Cost-effectiveness comparison of different pesticide application methods in chestnut orchards

施药方式 Application method	人工投入时间 Labor input time/(h/hm ²)	用水量 Water consumption/(kg/hm ²)	有效运营成本 Effective operating cost/(yuan/hm ²)				作业小时生产率 Productivity per effective working hour/(hm ² /h)
			水费 Water cost	劳动力费用 Labor cost	药剂费用 Pesticide cost	合计 Total	
植保无人机 Plant protection UAV	0.56	112.50	4.69	300.00	222.19	526.88	1.78
人工作业 Manual application	7.50	1 125.00	46.88	360.00	132.94	539.82	0.06

本研究在进行成本效益比较时,植保UAV以防治针叶小爪螨效果较好且与人工施药剂量 187.5 g/hm² 防效无显著差异的剂量 450 g/hm² 为例进行分析,人工作业的有效成本要稍高于植保UAV,主要体现在劳动力费用和水费上,人工作业施药需要大量的水和长时间的人力,作业小时生产率为 0.06 hm²/h,而植保UAV的作业小时生产率是人工作业的 30 倍,作业效率提高了 28.67%。同时,植保UAV喷洒作业可以节省 90% 的用水量,解决了果园缺少自然水源的问题。所以植保UAV非常适合针叶小爪螨这种叶片上为害的昆虫,既节省了有效成本,又提高了作业效率,这与王建华等(2023)的研究结果一致。总之,植保UAV施药不仅能有效降低劳动力,节约水

资源,提高作业效率,防效较好,而且可以远距离遥控操作,可以避免作业人员近距离长时间接触农药,降低农药中毒或意外损伤的风险。但植保UAV设备要比传统人工作业喷雾设备昂贵,建议农户以租赁的形式进行大面积喷雾,同时需要结合病虫害的发生特点,在最佳防治时期选择适宜的农药和剂量进行精准化学防治。下一步将结合板栗的树形和病虫害种类,优化植保UAV飞行参数,实现一树(形)一虫(病)一方案,减少农药的使用量,提高作业效率,从而提高板栗产值。

参 考 文 献 (References)

Chen PC, Douzals JP, Lan YB, Cotteux E, Delpuech X, Pouxviel G,

- Zhan YL. 2022. Characteristics of unmanned aerial spraying systems and related spray drift: a review. *Frontiers in Plant Science*, 13: 870956
- Gong XT. 2025. Research on the influence of downwash wind field of multi-rotor agricultural plant protection unmanned aerial vehicle on the deposition characteristics of charged droplets. Master thesis. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University (in Chinese) [宫新泰. 2025. 多旋翼植保无人机下洗气流场对荷电雾滴沉积特性影响研究. 硕士学位论文. 大庆: 黑龙江八一农垦大学]
- Jiang LL, Wang M, Han P, Li C, Sun RH. 2020. Droplet deposition of mist sprayer in chestnut canopy and the control effect on *Lachnus tropicalis* and spider mites. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 50(4): 1–5, 12 (in Chinese) [姜莉莉, 王明, 韩鹏, 李超, 孙瑞红. 2020. 弥雾机在板栗冠层的雾滴沉积分布及对栗大蚜和红蜘蛛的防效. 山东林业科技, 50(4): 1–5, 12]
- Li X, Giles DK, Niederholzer FJ, Andaloro JT, Lang EB, Watson LJ. 2021. Evaluation of an unmanned aerial vehicle as a new method of pesticide application for almond crop protection. *Pest Management Science*, 77(1): 527–537
- Martinez-Guanter J, Agüera P, Agüera J, Pérez-Ruiz M. 2020. Spray and economics assessment of a UAV-based ultra-low-volume application in olive and citrus orchards. *Precision Agriculture*, 21(1): 226–243
- Meng YH, Su JY, Song JL, Chen WH, Lan YB. 2020. Experimental evaluation of UAV spraying for peach trees of different shapes: effects of operational parameters on droplet distribution. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170: 105282
- Meng YH, Wang MM, Yao WX. 2021. Effect of flight speed on spraying efficiency of drones on main trunk-shaped fruit tree. *South China Fruits*, 50(1): 96–99 (in Chinese) [蒙艳华, 王美美, 姚伟祥. 2021. 植保无人机飞行速度对主干形果树喷雾作业效果的影响. 中国南方果树, 50(1): 96–99]
- Meng YH, Zhong WQ, Liu CJ, Su JY, Su JY, Lan YB, Wang ZG, Wang MM. 2022. UAV spraying on citrus crop: impact of tank-mix adjuvant on the contact angle and droplet distribution. *PeerJ*, 10: e13064
- Pan B, Wang BJ, Jiang L, Lin Y. 2021. Optimization of the operational parameters of two types of plant protection unmanned aerial vehicles (UAVs) application to the pitaya canopy. *Journal of Plant Protection*, 48(3): 528–536 (in Chinese) [潘波, 王冰洁, 姜蕾, 林勇. 2021. 两种植保无人机对火龙果冠层的作业参数优化. 植物保护学报, 48(3): 528–536]
- Qi P, Zhang LT, Wang ZC, Han H, Müller J, Li T, Wang CL, Huang Z, He M, Liu YJ, et al. 2023. Effect of operational parameters of unmanned aerial vehicle (UAV) on droplet deposition in trellised pear orchard. *Drones*, 7(1): 57
- Ribeiro LFO, da Vitória EL, Soprani Júnior GG, Chen PC, Lan YB. 2023. Impact of operational parameters on droplet distribution using an unmanned aerial vehicle in a papaya orchard. *Agronomy*, 13(4): 1138
- Sarri D, Martelloni L, Rimediotti M, Lisci R, Lombardo S, Vieri M. 2019. Testing a multi-rotor unmanned aerial vehicle for spray application in high slope terraced vineyard. *Journal of Agricultural Engineering*, 50(1): 38–47
- 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 J, Lan YB, Wen S, Hewitt AJ, Yao WX, Chen PC. 2020. Meteorological and flight altitude effects on deposition, penetration, and drift in pineapple aerial spraying. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 15(1): e2382
- Wang JH, Wen XL, Li JN, Guo SR, Zhao CM, Mu SF, Zhao DX, Qi HX. 2023. Field control efficacy and cost analysis of different spraying methods for control of *Oligonychus ununguis* (Jacobi). *Journal of Agricultural Science and Technology*, 25(5): 139–146 (in Chinese) [王建华, 温晓蕾, 栗佳宁, 郭思柔, 赵春明, 母时风, 赵德轩, 齐慧霞. 2023. 不同施药方式对板栗红蜘蛛田间防效和效益分析. 中国农业科技导报, 25(5): 139–146]
- Wang KC, Kong LB, Wang GB, Zhao S, Wang HZ, Wang SL. 2025. Control effect of spraying pesticides with UAV against *Spodoptera exigua* in maize-soybean intercropping field. *Plant Protection*, 51(3): 388–396 (in Chinese) [王坤春, 孔令标, 王国宾, 赵硕, 王会征, 王士龙. 2025. 大豆玉米带状复合种植下植保无人机喷药防治大豆甜菜夜蛾. 植物保护, 51(3): 388–396]
- Wei Y, Su Q, Zeng YJ, Du JJ, Qi YS, Wang DS. 2023. Study on flying defense effect of chestnut based on multi-rotor plant protection UAV. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 44(6): 82–88, 113 (in Chinese) [魏源, 苏强, 曾扬鹃, 杜菁菁, 齐永顺, 王东升. 2023. 基于多旋翼植保无人机的板栗飞防效果研究. 中国农业化学报, 44(6): 82–88, 113]
- 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

(责任编辑:张俊芳)