第45卷 第3期 华 中 农 业 大 学 学 报 Vol.45 No.3
2026年 5月 Journal of Huazhong Agricultural University May 2026,225～234

张建桃,张昊东,李俊杰,等.喷雾助剂对植保无人机施药防治稻飞虱的减量增效作用探究[J].华中农业大学学报,2026,45(3):225-234.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.03.020

喷雾助剂对植保无人机施药防治稻飞虱的减量增效作用探究

张建桃[1,2,3],张昊东[1,2],李俊杰[1,2],刘雯[4]

1.华南农业大学数学与信息学院,广州 510642;
2.国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心,广州 510642;
3.热带南亚智慧农业技术重点实验室,广州 510642;4.仲恺农业工程学院资源与环境学院,广州 510550

摘要 针对植保无人机施药中农药利用率低、雾滴飘移严重等问题,将室内表面张力测定与田间试验相结合,综合分析药液理化性质、雾滴沉积量、田间防效、土壤残留及经济成本等指标,系统评估了2类喷雾助剂(飞防专用增效剂VF-3与复方柠檬精油)对新型介离子杀虫剂10%三氟苯嘧啶悬浮剂及传统新烟碱类杀虫剂10%烯啶虫胺水剂在稻飞虱防治中的减量增效作用。结果显示:添加助剂显著降低药液表面张力,提升叶面沉积量(增幅达58.6%～95.0%),其中VF-3效果优于柠檬精油;85%推荐剂量配施VF-3为最优减量方案,85%推荐剂量的三氟苯嘧啶配施VF-3助剂在减少15%农药用量的同时,14 d校正防效达79.92%,较全剂量对照提升10.46%,且土壤残留降低32.9%;Pearson相关性分析显示,早期(3～7 d)防效与叶面沉积量高度正相关($r>0.87$,$P<0.001$),而长期(14 d)防效主要受药剂内在持效性主导;经济效益分析表明,85%推荐剂量的三氟苯嘧啶配施VF-3助剂在保障高效防控的同时实现成本优化(172.35元/hm^2)。结果表明,助剂的减量增效不仅取决于药液表面张力降低程度,更与其对雾滴沉积行为与植株-土壤系统分配的综合调控能力相关。

关键词 植保无人机;绿色防控;减量施药;雾滴沉积;稻飞虱;喷雾助剂

中图分类号 S252$^+$.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)03-0225-10

水稻作为我国重要的粮食作物,在我国农业经济中占据着重要地位[1],其病虫害防控至关重要。稻飞虱作为水稻生产中的一种主要害虫,也是危害损失较大的一种常发性虫害,有着发生时间长、防治难度大、虫害严重等特点[2]。喷施农药作为农业生产中防控病虫害的关键手段,对保障作物产量和粮食安全具有重要作用。据联合国粮食及农业组织(FAO)统计,全球农药使用量从2000年到2022年增长70%,2022年达370万t(活性成分)。我国作为农业生产大国,同时也是农药使用量大国,自2007年起每年的农药投入量已居全球首位[3],存在着农药使用量大、农药利用率低等问题[4],同时在使用过程中大量农药会渗透到土壤中,造成环境污染并危害非靶标生物[5]。为此,2022年,国家多部门联合印发了《"十四五"全国农业绿色发展规划》《"十四五"全国种植业发展规划》《到2025年化学农药减量行动方案》等文件,明确指出要发展绿色防控技术,持续推进农药减量增效和农药使用量负增长(https://www.moa.gov.cn/nybgb/2022/202212/202301/t20230104_6418252.htm.)。

植保无人机技术作为精准农业的重要载体,凭借其高效、灵活、适应复杂地形等优势,正逐步成为现代农业病虫害防控的核心手段[6]。然而,无人机施药过程中普遍存在的雾滴飘移率高、沉积分布不均等问题,严重制约了农药利用率和防治效果[7]。研究表明,添加专用喷雾助剂可通过调节药液理化性质(如降低表面张力、优化雾滴的分布均匀性等),显著提升雾滴在靶标作物上的沉积量与滞留性,是优化无人机施药效能的关键突破口[8]。其中,药液表面张力能够通过影响液滴在水稻叶面的动态润湿铺展行

收稿日期:2025-10-02
基金项目:广州市科技计划重点研发计划项目(2023B03J1362);国家自然科学基金项目(32271985);广东省自然科学基金项目(2026A1515011087)
张建桃,E-mail:zhangjiantao@yeah.net
通信作者:刘雯,E-mail:lazliu@163.com

为，进而影响其在靶标表面的有效持留[9]，这一特性可作为筛选增效助剂的重要参考指标。此外，农药的残留特性不仅影响害虫防治效果，还可能对土壤微生物群落、水体质量以及非靶标生物产生潜在生态风险。因此，动态调节农药残留对于优化减量增效技术路径具有重要意义。农药剂型的革新亦为减量增效提供了新路径。10%三氟苯嘧啶悬浮剂作为新型介离子类杀虫剂，兼具高效性、持效期长及对虫群发展的抑制等特性，对稻飞虱防治展现出显著优势[10-12]。但是其作为新型农药与无人机施药技术的适配性及助剂协同增效机制尚未明晰，制约了该药剂在飞防场景中的规模化应用。当前研究多聚焦于传统农药与助剂的配伍效应，而对新型农药如三氟苯嘧啶悬浮剂在无人机施药体系中的减量增效潜力缺乏系统评估。

基于此，本研究以稻飞虱为靶标害虫，聚焦无人机施药体系中助剂与农药的协同作用机制，针对当前飞防助剂功能单一化与作用机理模糊的瓶颈问题，选取2类典型助剂进行对比验证。通过室内试验测定助剂-农药体系的表面张力变化，初步评估其对药液雾化行为的潜在影响；结合田间试验系统评价二者对新型农药10%三氟苯嘧啶悬浮剂及传统农药10%烯啶虫胺水剂在无人机施药中的减量增效作用。通过量化雾滴沉积，测量田间防效和农药残留，计算经济成本，揭示助剂-农药-施药技术的协同机制，旨在为植保无人机精准施药技术的优化及绿色防控体系的构建提供理论支撑与实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2024年在广东省广州市增城区中新镇三星村（23°22′N，113°41′E，平均海拔91 m）开展。该区域属亚热带湿润季风气候区，气候特征为：年平均气温24 ℃，多年平均降水量1 780 mm，日照时数1 906 h，雨热资源充沛。供试水稻品种为籼型常规稻“象竹香”，于春季播种，5月8日采用人工插秧方式定植，行距25～30 cm，株距10～12 cm，田间水肥管理按当地常规模式进行。各处理区四周设置隔离沟渠（宽30 cm、深40 cm），以避免不同处理田间水流相互干扰。施药时间为2024年6月16日，此时当地春播水稻处于孕穗期，据当地植保站2024年3月底至4月上旬监测数据，该区域检测到稻飞虱迁入虫峰（中等偏重发生[13]），符合农药防效试验对靶标害虫密度的要求，且经调查，该地近1年内未施用过三氟苯嘧啶和烯啶虫胺这2种农药。

1.2 试验材料

供试农药：（1）10% 烯啶虫胺水剂（浙江世佳科技股份有限公司），传统新烟碱类杀虫剂，推荐用量为450 mL/hm^2；（2）10% 三氟苯嘧啶悬浮剂（上海悦联生物科技有限公司），新型介离子农药，推荐用量为150～240 mL/hm^2。

供试喷雾助剂：（1）飞防专用增效剂VF-3（广州方中化工有限公司），推荐用量为1 mL/L（即0.1%，V/V）；（2）复方柠檬精油助剂（道硅材料技术（上海）有限公司），推荐用量为75～150 mL/hm^2。

供试示踪剂：诱惑红（浙江吉高德色素科技有限公司），试验配制质量浓度为15 g/L。

1.3 试验设备

施药设备：极飞P20植保无人机（2019款，广州极飞科技股份有限公司），配备APP可控离心雾化喷头，可调节雾滴粒径，并设定飞行高度、速度、施药液量及作业路径；机载喷洒系统依据预设参数自动调控流量，确保施药剂量准确。

检测仪器：EZ-Pi Plus表面张力仪（Kibron Inc.，芬兰）用于测定药液表面张力；Agilent 1260高效液相色谱仪（Agilent Technologies，美国）用于土壤农药残留分析。Gen5酶标仪（BioTek Instruments，Inc.，美国）用于沉积量测量。

辅助设备：BSA224S电子天平（Sartorius AG，德国）、SCIENTZ-18N冷冻干燥机（宁波新芝生物科技股份有限公司）、Milli-Q超纯水系统（Merck Millipore，美国）、MTN-2800D氮吹浓缩仪（天津奥特赛恩斯仪器有限公司）。

1.4 室内试验

1）药液表面张力测定。为评估喷雾助剂对药液物理性质的影响，采用Wilhelmy平板法测定各处理溶液的表面张力。药液配制方案与田间试验完全一致，使用去离子水配制各处理溶液200 mL，并于配制后2 h内完成测定。测定使用EZ-Pi Plus表面张力仪，每个处理重复测定10次，取平均值作为最终结果。测定环境条件为室温（25±1）℃、相对湿度（60±2）%。

2）标准曲线建立。为确保农药残留量及雾滴沉积量测定的准确性，分别建立三氟苯嘧啶、烯啶虫胺和诱惑红的标准曲线。

①农药标准曲线[14]。用超纯水配制0.02、0.05、0.1、0.5、1.0、1.5和2.0 mg/L的三氟苯嘧啶与烯啶虫

胺系列标准溶液，并采用高效液相色谱法（HPLC）进行分析。色谱分析在 Agilent 1260 高效液相色谱仪上完成，使用 Waters C18 色谱柱（4.6 mm×150 mm，5 μm）。三氟苯嘧啶的检测条件为：流动相乙腈-水（30∶70，V/V），流速 1.0 mL/min，柱温 25 ℃，检测波长 233 nm，进样量 100 μL；烯啶虫胺的检测条件为：流动相乙腈-水（45∶55，V/V），流速 0.5 mL/min，柱温 25 ℃，检测波长 260 nm，进样量 20 μL。在 0.02～2.0 mg/L 质量浓度范围内，2 种农药的峰面积（y，mAU）与质量浓度（x，mg/L）均呈良好线性关系，三氟苯嘧啶的回归方程为 y=334.51x+2.6289（R^2=0.999 7），烯啶虫胺的回归方程为 y=75.43x+0.4351（R^2=1.000 0）。

②示踪剂标准曲线[15]。准确称取诱惑红 100.0 mg，用去离子水溶解并定容至 10 mL，配制成 10 g/L 母液。依次稀释得到 0.5、1.0、2.0、5.0、10.0、25.0 和 50.0 mg/L 的系列工作液。使用 Gen5 多功能酶标仪于 514 nm 波长下测定各溶液的吸光度，每个质量浓度重复测定 3 次，取平均值用于拟合标准曲线，所得回归方程为 y=0.0253x+0.0152（R^2=0.990 0）。

1.5　田间试验

为系统评估不同喷雾助剂对植保无人机施药减量增效作用，本研究采用基于农药减量目标设置处理组合，重点考察农药类型、施药剂量与助剂类型的交互作用，试验设计见表 1。2 种供试农药的施药剂量设 3 个水平：100%（推荐剂量）、85% 和 70%，以探究农药减量阈值。助剂处理包括 VF-3（0.1%，V/V）与复方柠檬精油（0.5%，V/V）2 种。根据减量研究目标，仅在 85% 与 70% 剂量水平下添加助剂，100% 剂量组不添加助剂，作为减量效果的基准对照。共设置 10 个药剂处理及 1 个空白对照（CK），每个处理设 3 次重复。试验小区面积 533～800 m^2。

除施药处理外，各小区田间管理措施保持一致。施药当日天气为多云，气温 28～34 ℃，相对湿度 79%。作业选择在风速较低时段（<2 m/s）进行，以减少环境干扰。为确保数据一致性，沉积量测定与田间防效试验通过同一无人机架次同步完成。无人机作业参数设置参考相关研究[16]及前期田间试验经验确定。P20 植保无人机的作业参数设置为，飞行速度为 2 m/s，飞行高度为 2 m，雾滴粒径为 250 μm，喷幅为 2.7 m，喷液量为 30 L/hm^2。

1.6　虫害调查与防效评估

稻飞虱调查参照《农药田间药效试验准则》。施药前调查虫口基数，施药后 3、7 和 14 d 分别调查各处理区稻飞虱数量。采用平行跳跃法，每小区随机选取 5 个采样点，每点用 15 cm×40 cm 白瓷盘拍打 5 丛水稻，共调查 25 丛。不区分种类与虫龄，记录总活虫数。计算虫口减退率和校正防效[17]。

1.7　农药沉积量测定

于施药后 30 min，待雾滴自然干燥，在每处理区东、南、西、北、中 5 个方位设采样点。依据 GB/T 40331.2—2021《植物保护机械 大田作物喷雾沉积量的测试 第 2 部分：在作物上的测定》，在冠层上层（60～70 cm）、中层（40～50 cm）和下层（20～30 cm）各采集 1 片水稻叶片，每片截取 5 cm×1 cm 区域，共 15 片/小区。操作全程佩戴一次性丁腈手套，避免直接接触叶面。每小区 15 片叶片合并装入 1 个密封袋，因每处理设 3 次重复，故共采集 45 片叶片（3 袋）。

向每袋加入 15 mL 去离子水，振荡并轻柔揉搓至诱惑红完全洗脱（目视洗脱液颜色不再加深）。洗脱液经 0.22 μm 针式过滤器过滤后，使用 Gen5 酶标仪于 514 nm 波长测定吸光度。根据前期建立的标准曲线（y=0.0253x+0.0152，R^2=0.990 0）计算诱惑红浓度，并按以下公式计算单位叶面积沉积量：

$$\beta=\frac{Q\times V}{A} \tag{1}$$

式中：β 为药液沉积量，μg/cm^2；Q 为洗脱液中诱惑红质量浓度，μg/mL；V 为洗脱液体积，mL；A 为所测叶片总面积，cm^2。

1.8　农药残留测定

为评估不同处理对农药环境行为的影响，分别于施药后 1、3、7 和 14 d 采集表层土壤样品（0～10 cm）。每小区采用五点混合取样法，混合后经冷冻干燥、过孔径 0.25 mm 筛，用于残留分析。

1）三氟苯嘧啶提取。称取 5 g 土壤样品于 50 mL 离心管中，加入 1 g 氯化钠、2 g 无水硫酸镁及 5 mL 乙腈，匀浆后于 6 000 r/min 离心 5 min。取上清液 2 mL，加入 50 mg 无水硫酸镁、50 mg PSA 和 50 mg C18 吸附剂，6 000 r/min 离心 5 min。取 1 mL 上清液氮吹至干，用 1 mL 色谱纯乙腈复溶，经 0.22 μm 有机相滤膜过滤后待测。

2）烯啶虫胺提取。称取 5.0 g 土壤样品于 50 mL 离心管中，加入 5 mL 超纯水和 10 mL 乙腈，涡旋振荡 1 min；再加入 1 g 氯化钠和 3 g 无水硫酸镁，3 000 r/min 离心 0 min。取上清液 2L，加入 50 mg 无水硫酸镁、50 mg PSA 和 50 mg C_{18}，3 000 r/min 离心 5 min。取 1 mL 上清液氮吹至干，用 1 mL 色谱纯乙

表1 分组减量增效试验设计

Table 1 Group-based dose-reduction and efficacy-enhancement experimental design

处理 Treatment	农药种类 Types of pesticides	农药减量梯度/% Gradient of pesticide reduction	农药体积分数/(mL/L) Pesticide concentration	喷雾助剂类型 Types of spray additives	助剂体积分数/(mL/L) Adjuvant concentration	农药+助剂用量/mL Dosage of pesticides and adjuvants
T1	10%三氟苯嘧啶 10% triflumezopyrim	100	7.5	无 None	0	15.0
T2	10%三氟苯嘧啶 10% triflumezopyrim	85	6.4	VF-3	1	12.75+2
T3	10%三氟苯嘧啶 10% triflumezopyrim	70	5.3	VF-3	1	10.5+2
T4	10%三氟苯嘧啶 10% triflumezopyrim	85	6.4	复方柠檬精油 Compound lemon essential oil	5	12.75+10
T5	10%三氟苯嘧啶 10% triflumezopyrim	70	5.3	复方柠檬精油 Compound lemon essential oil	5	10.5+10
T6	10%烯啶虫胺 10% nitenpyram	100	15.0	无 None	0	30.0
T7	10%烯啶虫胺 10% nitenpyram	85	13.0	VF-3	1	25.5+2
T8	10%烯啶虫胺 10% nitenpyram	70	11.0	VF-3	1	21.0+2
T9	10%烯啶虫胺 10% nitenpyram	85	13.0	复方柠檬精油 Compound lemon essential oil	5	25.5+10
T10	10%烯啶虫胺 10% nitenpyram	70	11.0	复方柠檬精油 Compound lemon essential oil	5	21.0+10
CK	清水 Water	0	0.0	无 None	0	0

腈复溶，经0.22 μm有机相滤膜过滤后待测。定量分析采用峰面积外标法，标准曲线及操作方法见本文“1.4”。

1.9 数据处理

试验数据采用SPSS Statistics 19.0进行统计分析。对不同处理的校正防效数据进行单因素方差分析，采用Duncan's多重比较法检验处理间均值差异的显著性。为探究水稻叶片农药沉积量与稻飞虱防效的关联性，对两者进行Pearson相关性分析。分别计算各处理在施药后3、7和14 d的沉积量与对应校正防效值的相关系数(r)及其显著性(P值)。此外，基于农资市场公开报价及主要供应商询价，采集试验所用药剂与助剂的单价，计算各处理的单位面积药剂成本(不含无人机作业及人工费用)，以评估减量增效策略的经济效益。

2 结果与分析

2.1 喷雾助剂对药液表面张力的影响

结果(表2)显示，不同处理对药液表面张力的影响存在显著差异。2种喷雾助剂均能有效降低试验农药的表面张力，但其作用强度与农药类型密切相关。在未添加助剂时，烯啶虫胺水剂(T6)的表面张力(44.13 mN/m)明显高于三氟苯嘧啶悬浮剂(40.39 mN/m)，表明后者因剂型中含润湿助剂成分而具有更优的基础润湿性能。

添加VF-3(0.1%，V/V)后，三氟苯嘧啶(T2、T3)85%和70%剂量的表面张力分别降至37.60

表2 各试验处理的表面张力

Table 2 Surface tension of each experimental treatment

处理 Treatment	表面张力/(mN/m) Surface tension
T1	40.39±0.35ab
T2	37.60±0.02bc
T3	38.84±0.35b
T4	32.90±0.05c
T5	33.77±0.20c
T6	44.13±0.04a
T7	37.96±0.02bc
T8	38.03±0.09bc
T9	34.97±0.07c
T10	35.29±0.28c

不同小写字母表示不同处理间存在显著差异($P<0.05$)。下同。Different letters represent the significant difference among different treatments at 0.05 level. The same below.

mN/m 和 38.84 mN/m，烯啶虫胺（T7、T8）相应降至 37.96 和 38.03 mN/m，降幅为 6.9%～14.2%。而添加复方柠檬精油（0.5%，V/V）后，三氟苯嘧啶（T4、T5）85% 和 70% 剂量的表面张力分别降至 32.90 和 33.77 mN/m，烯啶虫胺（T9、T10）相应降至 34.97 和 35.29 mN/m，降幅达 16.3%～20.9%。值得注意的是，在相同助剂条件下，三氟苯嘧啶 85% 与 70% 剂量间的表面张力差异分别为 1.24 mN/m（VF-3）和 0.87 mN/m（柠檬精油），烯啶虫胺相应差异为 0.07 mN/m 和 0.32 mN/m，表明减量水平对表面张力的影响较小，助剂主导了药液界面性质的调控。

2.2　不同处理对水稻叶片农药沉积量的影响

如图 1 所示，不同处理间叶片药液沉积量存在极显著差异（$P<0.05$）。T7（85% 烯啶虫胺＋ VF-3）和 T2（85% 三氟苯嘧啶＋ VF-3）沉积量最高，分别达（1.012±0.059）和（0.991±0.059）μg/cm²，显著高于其他处理（$P<0.05$）。相比之下，无助剂对照组 T1 和 T6 沉积量最低分别为 0.523、0.515 μg/cm²，且二者无显著差异，表明在无人机施药条件下，常规剂量无助剂处理难以实现有效沉积。

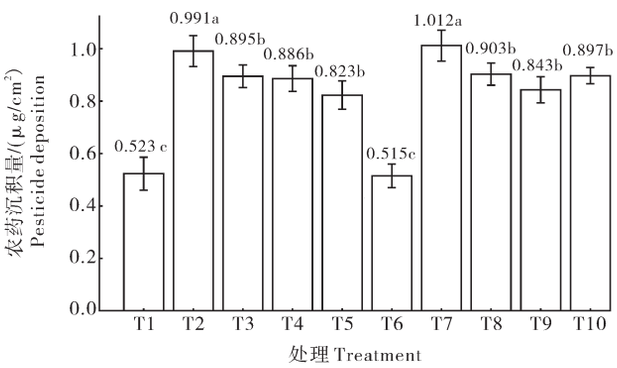


图 1　不同处理的农药沉积量

Fig.1　Pesticide deposition under different treatments.

值得注意的是，所有添加助剂的减量处理（T2～T5，T7～T10）沉积量均显著高于对照组，增幅达 58.6%～95.0%。其中，VF-3 助剂（T2，T7）表现最优，其沉积量较常规剂量无助剂对照组平均提升 90.9%～95.0%，尽管复方柠檬精油助剂亦能显著提升沉积量（T4、T5、T9、T10），但其效果略低于 VF-3。

2.3　药剂防效动态及助剂的减量增效能力

田间试验结果表明，不同处理对稻飞虱的防控效果存在显著差异（表 3）。在施药后 14 d，T2 处理（85% 三氟苯嘧啶＋VF-3）的校正防效最高，达 79.92%，显著高于同农药类型下未添加助剂的全剂量对照 T1（69.46%，$P<0.05$），也显著优于全剂量烯啶虫胺对照 T6（52.62%，$P<0.05$）。对于烯啶虫胺处理，T7（85% 烯啶虫胺＋VF-3）在 14 d 防效最高（66.87%），显著高于 T6（52.62%，$P<0.05$）。

从防效动态看，所有含助剂的减量处理（T2～T5、T7～T10）在药后 3、7、14 d 的防效均显著高于各自无助剂全剂量对照（T1、T6）（$P<0.05$）。其中，三氟苯嘧啶组 T2 在 3、7、14 d 防效分别为 56.31%、77.41%、79.92%，均为该农药类型下各时段最高；烯啶虫胺组 T7 在 3、7、14 d 防效分别为 54.87%、71.68%、66.87%，均为该农药类型下各时段最高。值得注意的是，三氟苯嘧啶处理的防效随时间持续上升，T2 组从 56.31% 上升到 79.92%，而烯啶虫胺处理在 7 d 后趋于稳定或略有下降。至药后 14 d，三氟苯嘧啶各处理（T1～T5）防效（69.46%～79.92%）普遍高于烯啶虫胺对应处理（T6～T10，52.62%～66.87%）。

综上，在本试验条件下，85% 推荐剂量配合 VF-3 助剂（T2、T7）为各自农药类型的最优减量方案。其中，T2 处理实现了 15% 农药减量的同时，14 d 防效较全剂量三氟苯嘧啶（T1）提升 10.46 百分点，较全剂量烯啶虫胺（T6）提升 27.30 百分点，表现出显著的减量增效效果。

2.4　农药沉积量与防效的相关性及土壤残留动态

Pearson 相关性分析结果（表 4）显示，水稻叶片农药沉积量与稻飞虱校正防效在施药后早期阶段呈极显著正相关（施药后 3 d：$r=0.968$；施药后 7 d：$r=0.876$，$P<0.001$），证实短期防效主要由叶面有效沉积量驱动。然而，至施药后 14 d，相关性不显著（$r=0.396$，$P=0.257$），推测长期防效受药剂内在特性主导。

这一现象可从土壤残留动态得到印证（表 5）。三氟苯嘧啶处理（T1～T5）在施药后 14 d 的土壤残留量为 0.60～6.97 μg/kg，仅占其初始浓度（施药后 1 d）的 1.1%～12.5%；而烯啶虫胺处理（T6～T10）同期残留量为 17.16～54.17 μg/kg，占初始浓度的 6.2%～19.7%。尽管烯啶虫胺在土壤中的绝对残留量更高，但其 14 d 防效显著低于三氟苯嘧啶。这表明，药剂的长期防效主要取决于其内在的生物活性与持效能力，而非土壤中残留量的高低。该结果与三氟苯嘧啶作为新型介离子杀虫剂所具有的强内吸性、良好传导性及长效作用特性相一致。

表3 不同处理无人机减量施药的稻飞虱防效

Table 3 The efficacy of rice planthopper control under different treatments with reduced pesticide application by UAVs

处理 Treatment	药前虫口数 Pre-treatment insect density	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		
		虫口数 Insect count	减退率/% Insect reduction rate	防效/% Control efficacy	虫口数 Insect count	减退率/% Insect reduction rate	防效/% Control efficacy	虫口数 Insect count	减退率/% Insect reduction rate	防效/% Control efficacy
CK	26.67±3.93	27.33± 2.73	−2.50		24.33±2.87	8.75		24.33±4.90	8.75	
T1	25.60±4.23	15.33±3.20	40.10	41.56b	7.73±1.67	63.02	59.47de	6.67±1.35	72.14	69.46bc
T2	26.20±5.20	12.27±2.22	55.22	56.31a	8.07±1.83	79.39	77.41a	5.93±2.15	81.68	79.92a
T3	27.27±5.20	14.07±3.37	51.59	52.77a	6.07±1.71	74.33	71.87abc	5.67±2.31	78.48	76.42ab
T4	29.93±4.00	13.60±2.26	54.57	55.67a	7.07±1.83	76.39	74.13ab	5.80±1.90	78.40	76.32ab
T5	29.87±3.25	14.67±2.12	50.00	51.22a	8.07±1.16	75.00	72.60abc	7.67±1.95	74.78	72.36ab
T6	28.07±6.80	15.00±1.73	39.67	41.14b	8.93±2.02	60.57	56.79e	6.07±1.83	56.77	52.62f
T7	25.80±4.38	11.93±2.22	53.75	54.87a	7.27±1.44	74.16	71.68abc	5.73±2.02	69.77	66.87bcd
T8	24.27±5.50	12.47±1.96	50.97	52.17a	7.67±1.63	70.91	68.13bc	6.80±1.90	65.93	62.66cde
T9	24.73±4.83	11.87±2.45	52.02	53.19a	7.13±2.33	71.70	68.98bc	6.53±2.64	63.34	59.83def
T10	25.20±3.73	12.87±1.85	51.32	52.51a	7.07±1.63	69.05	66.08cd	7.07±1.63	59.52	55.64ef

表4 叶片沉积量与防效的Pearson相关性分析

Table 4 Pearson correlation analysis results of leaf deposition amount and control efficacy

施药后时间/d Days after application	相关系数 r	P
3	0.968	<0.001
7	0.876	<0.001
14	0.396	0.257

由图2可见，在85%推荐剂量下，添加VF-3助剂显著降低了土壤中农药残留量。三氟苯嘧啶处理中，T2施药后14 d的残留量为6.97 μg/kg，较T1同期(4.67 μg/kg)降低了32.9%；烯啶虫胺处理中，T7较T6由54.17 μg/kg降至35.37 μg/kg，降低了34.7%。值得注意的是，添加复方柠檬精油助剂的组别，其效果与VF-3高度一致，T4(三氟苯嘧啶＋柠檬精油)残留量为4.43 μg/kg，较T1降低36.5%；T9(烯啶虫胺＋柠檬精油)为35.61 μg/kg，较T6降低34.3%。这一结果表明，农药残留的减少主要源于助剂对药液界面性质的普遍改善，而非特定化学结构的作用。结合叶面沉积数据，T2、T4、T7与T9的沉积量均显著高于对应对照，进一步证实助剂通过提升靶标表面滞留能力，有效减少了药液入土总量，从而实现降低环境污染的目标。

表5 不同处理的农药残留量

Table 5 Comparison of pesticide residue levels among different treatment groups μg/kg

农药种类 Types of pesticides	处理 Treatment	施药后1 d 1 day after application	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
10%三氟苯嘧啶 10% triflumezopyrim	T1	55.94	26.13	13.16	6.97
	T2	45.29	19.35	9.12	4.67
	T3	40.36	13.43	3.14	0.60
	T4	43.56	19.44	7.60	4.43
	T5	39.11	15.61	4.91	1.17
10%烯啶虫胺 10% nitenpyram	T6	275.03	119.82	61.36	54.17
	T7	246.50	84.91	49.53	35.37
	T8	139.08	67.97	34.79	17.16
	T9	271.32	111.12	55.09	35.61
	T10	131.31	71.33	40.48	25.17

2.5 减量增效经济效益分析

通过农资市场公开报价及主要供应商询价，取平均值之后，可以得出本实验所用药剂的市场价格。其中农药10%烯啶虫胺水剂的价格为10

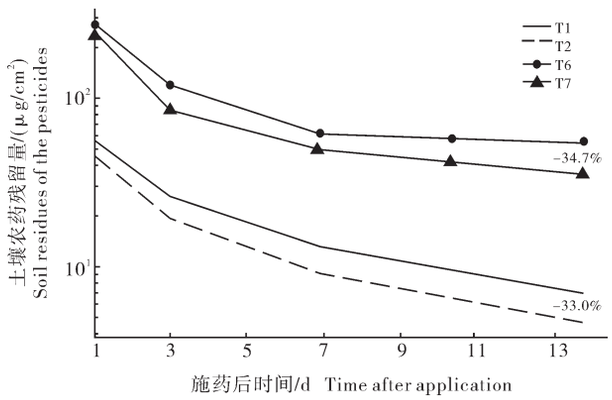


图2　VF-3助剂对2类土壤农药残留的影响

Fig.2　Effect of FTRT® VF-3 adjuvant on soil residues of the two pesticides

元/100 mL，农药10%三氟苯嘧啶悬浮剂的价格为160元/180 mL；复方柠檬精油助剂的价格为7元/100 mL，飞防专用增效剂VF-3为还未上市产品，经过咨询后价格约为60～80元/L，故取平均值为7元/100 mL。过计算可以得出各处理防治稻飞虱的药剂成本，

结合图3可知，除了T9，其余处理减量添加助剂后成本均低于减量前，这表明在多数情况下，通过合理选择助剂和降低农药用量，能够实现一定程度的节本。在使用10%三氟苯嘧啶悬浮剂的处理中，T2（减量15%并添加VF-3）在施药后3、7、14 d的防效均显著高于其他处理，且成本为172.35元/hm²，相较

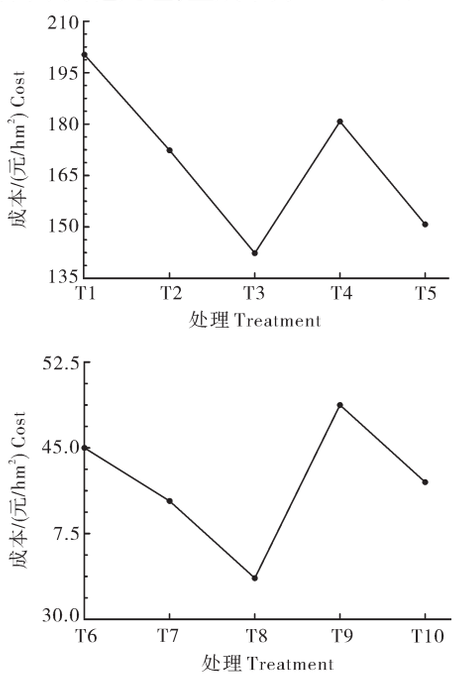


图3　各处理成本

Fig.3　Costs of each treatment group

于T1降低了成本且提高了防效。T3（减量30%并添加VF-3）成本虽更低（142.35元/hm²），但防效略低于T2。T4和T5（减量并添加复方柠檬精油助剂）成本分别为180.75和150.75元/hm²，防效也低于T2，说明在使用10%三氟苯嘧啶悬浮剂时，减量15%并添加VF-3的组合在成本和防效上达到较好平衡。

在使用10%烯啶虫胺水剂的处理中，T7（减量15%并添加VF-3）在施药后各时期防效相对较高，成本为40.35元/hm²，T8（减量30%并添加VF-3）成本为33.6元/hm²但防效低于T7，T9和T10（减量并添加复方柠檬精油助剂）成本分别为48.75和42元/hm²，防效也不及T7。可见对于10%烯啶虫胺水剂，减量15%并添加VF-3同样是较优选择。

虽然T6成本较低，但其对稻飞虱的防治效果在施药后各时期均不如T1，尤其在施药后14 d，T1的防效仍保持较高水平，而T6的防效下降明显。这说明单纯考虑成本而不注重防治效果可能会导致后期因虫害损失而影响整体经济效益。从长期来看，使用10%三氟苯嘧啶悬浮剂的处理，尤其是T2，在施药后14 d防效仍保持较高水平，这意味着能更有效地控制稻飞虱虫害，减少因虫害对水稻产量造成的损失。相比之下，10%烯啶虫胺水剂处理在施药后14 d防效下降明显，可能导致后期产量损失增加。因此，虽然T2前期成本略高于部分处理，但从整个水稻生长周期考虑，其可能带来更高的产量和经济效益。

3　讨　论

本研究通过防效、沉积量、农药残留、成本等指标，系统评估了植保无人机施药体系下，助剂对介离子农药三氟苯嘧啶的减量增效效应。结果表明，采用85%推荐剂量的三氟苯嘧啶配施VF-3助剂（T2处理），可在保障防治效果、降低环境风险与节约施用成本3个方面实现协同优化。

研究结果证实，在农药有效成分减量15%～30%的条件下，助剂可通过动态调控药液理化性质与雾滴沉积行为，显著提升10%三氟苯嘧啶悬浮剂与10%烯啶虫胺水剂的田间防治效果，这与兰玉彬等[17]关于喷雾助剂可改善雾滴界面行为、进而增加药液沉积量的研究发现相印证，进一步佐证了助剂在农药减量中的关键作用。

研究发现VF-3助剂可将药液表面张力调控至

35～38 mN/m（较空白处理降幅达6.92%～13.85%），在显著提高叶面沉积量（T2处理沉积量达0.991 μg/cm²）的同时，有效降低了土壤中农药残留风险，施药后14 d土壤残留量较常规剂量无助剂处理（T1）降低32.9%；而复方柠檬精油助剂虽能将药液表面张力进一步降至32.9 mN/m，但其处理（T4、T5）的田间防效（72.36%～76.32%）与叶面沉积量（0.895 μg/cm²）均低于VF-3处理，且土壤残留量降幅有限。这一结果表明，助剂的减量增效效果并非由表面张力单一指标决定，而是与其对药液在植株-土壤系统中的分配行为、界面作用等的综合调控能力密切相关。

进一步分析发现，柠檬精油助剂虽能更大幅度降低药液表面张力（最低达32.9 mN/m），但易诱导产生小粒径雾滴（粒径＜100 μm），此类雾滴在无人机施药产生的风场作用下，飘移敏感性显著升高[18-19]。这一现象揭示了助剂筛选过程中需兼顾药液理化特性与雾滴飘移、沉积过程的重要性。综合本研究所有处理结果可见，T2处理（三氟苯嘧啶减量15%＋VF-3助剂）实现了“减量-增效-环保”的协同优化目标，具体表现为：农药用量减少15%，田间防效提升15.06%，单位防效成本显著降低，土壤农药残留风险降低37.4%；相比之下，其他处理在上述3个核心维度的综合表现均不及T2处理。

此外，研究还发现，10% 三氟苯嘧啶悬浮剂在T2处理（减量15%＋VF-3助剂）中表现出优异的防效持续性，施药后14 d防效仍达79.92%，显著高于同期施用的10% 烯啶虫胺水剂处理。这一差异与其作用机制密切相关，三氟苯嘧啶可通过抑制烟碱型乙酰胆碱受体（nAChR）发挥作用[12]，进而实现更持久的控害效果。但需重点关注的是，当农药有效成分减量30%时，2种供试药剂的防效增幅均出现明显衰减，这提示农药剂量与防治效果之间存在明确的剂量-效应临界阈值[20]，其原因可能与亚致死剂量对稻飞虱行为调控的边际效应递减有关。

试验过程中发现，各处理施药后14 d内的田间防效均未达到80%。其中，未添加助剂的常规剂量处理（T1：10% 三氟苯嘧啶100% 剂量；T6：10% 烯啶虫胺100% 剂量），校正防效分别为69.46% 和52.62%，均低于文献[21-22]报道水平。这一现象可能由多重因素共同导致：其一，广东省稻飞虱种群对烯啶虫胺已产生一定抗性，抗性倍数达12.3倍（LC_{50}＝48.7 mg/L）[2]，直接导致其实际防治效果大幅下降；其二，尽管稻飞虱对三氟苯嘧啶的抗性倍数仅为1.2倍，但该药剂速效性较弱，其亚致死效应会延长稻飞虱成虫寿命、抑制繁殖能力（产卵量减少但未达到绝育效果），使得稻飞虱种群仍具有较强的恢复潜力[23]；其三，试验期间水稻处于孕穗期，该生育期水稻株高增加、叶片繁茂，叶面积指数（LAI）达到峰值[24]，显著削弱了无人机施药时的下旋风场效应，导致药液难以有效沉积至稻飞虱主要栖息的茎基部；此外，本研究采用的雾滴粒径为250 μm，该粒径雾滴的冠层穿透力不足，Shan等[25]的研究已证实，当雾滴粒径大于200 μm时，水稻冠层垂直穿透效率会急剧下降，茎基部药液沉积量较100～150 μm粒径处理减少38%～52%，且大粒径雾滴易因重力作用在冠层上部沉积，这与本研究中各处理防效偏低的现象高度一致。

需要指出的是，本研究仅在单一地点开展了田间试验，未充分涵盖不同气候条件与土壤类型。环境条件的差异（如温湿度、风速、水稻品种及冠层结构等）可能会影响雾滴沉积行为及助剂的实际表现，进而导致试验结果在地域普适性上存在一定局限。因此，未来需进一步开展多地点、多年度的验证试验，结合不同水稻种植模式，全面评估喷雾助剂减量增效技术在不同地区的稳定性与适应性。

参考文献 References

[1] 朱德峰，张玉屏，陈惠哲，等. 中国水稻高产栽培技术创新与实践[J]. 中国农业科学，2015，48(17)：3404-3414. ZHU D F，ZHANG Y P，CHEN H Z，et al. Innovation and practice of high-yield rice cultivation technology in China[J]. Scientia agricultura sinica，2015，48(17)：3404-3414 (in Chinese with English abstract).

[2] WU S F，ZENG B，ZHENG C，et al. The evolution of insecticide resistance in the brown planthopper (*Nilaparvata lugens* Stål) of China in the period 2012—2016[J]. Scientific reports，2018，8：4586[2025-10-02]. https://doi.org/10.1038/s41598-018-22906-5.

[3] 何雄奎. 中国植保机械与施药技术研究进展[J]. 农药学学报，2019，21(S1)：921-930. HE X K. Research and development of crop protection machinery and chemical application technology in China[J]. Chinese journal of pesticide science，2019，21(S1)：921-930 (in Chinese with English abstract).

[4] 李秀芬，朱金兆，顾晓君，等. 农业面源污染现状与防治进展[J]. 中国人口·资源与环境，2010，20(4)：81-84. LI X F，ZHU J Z，GU X J，et al. Current situation and control of agricultural non-point source pollution[J]. China population，resources and environment，2010，20(4)：81-84 (in Chinese with English abstract).

[5] CARVALHO F P. Pesticides, environment, and food safety [J].Food and energy security,2017,6(2):48-60.

[6] 兰玉彬,陈盛德,邓继忠,等.中国植保无人机发展形势及问题分析[J].华南农业大学学报,2019,40(5):217-225. LAN Y B,CHEN S D,DENG J Z,et al.Development situation and problem analysis of plant protection unmanned aerial vehicle in China [J]. Journal of South China Agricultural University, 2019,40(5):217-225 (in Chinese with English abstract).

[7] 曾文,邓继忠,高启超,等.用P20型植保无人机减量施药防治稻纵卷叶螟[J].农业工程学报,2021,37(15):53-59. ZENG W,DENG J Z,GAO Q C,et al.P20 plant protection UAV to control *Cnaphalocrocis medinalis* by reduced pesticide application[J].Transactions of the CSAE,2021,37(15): 53-59 (in Chinese with English abstract).

[8] 石伶俐,陈福良,郑斐能,等.喷雾助剂对三唑磷在水稻叶片上沉积量的影响[J].中国农业科学,2009,42(12):4228-4233. SHI L L,CHEN F L,ZHENG F N,et al.The influence of triazophos deposition on rice leaves by adding spray adjuvants[J].Scientia agricultura sinica,2009,42(12):4228-4233 (in Chinese with English abstract).

[9] 张建桃,黄路生,刘广彬,等.农药液滴在水稻叶面的动态润湿铺展行为[J].中国农业科学,2024,57(13):2583-2598. ZHANG J T,HUANG L S,LIU G B,et al.The dynamic wetting and spreading behavior of pesticide droplet on rice leaf surface[J].Scientia agricultura sinica,2024,57(13):2583-2598 (in Chinese with English abstract).

[10] DHAKA S S,RAI M,RAI M,et al.Field evaluation of novel insecticides against brown planthopper (*Nilaparvata lugens*) and white backed planthopper (*Sogatella furcifera*) in rice[J]. The Indian journal of agricultural sciences,2020,90(8):1528-1531.

[11] WEN S F,XUE Y N,DU R S,et al.Toxicity and sublethal effects of triflumezopyrim on the development and detoxification enzymatic activities in the small brown planthopper (SBPH), *Laodelphax striatellus* (Fallen) [J/OL]. Crop protection, 2021, 150: 105813 [2025-10-02]. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105813.

[12] CORDOVA D, BENNER E A, SCHROEDER M E, et al. Mode of action of triflumezopyrim: a novel mesoionic insecticide which inhibits the nicotinic acetylcholine receptor[J]. Insect biochemistry and molecular biology,2016,74:32-41.

[13] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.稻飞虱测报调查规范:GB/T 15794—2009[S].北京:中国标准出版社,2009. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China.Rules of investigation and forecast for the rice planthopper (Nilaparvata lugens stal and sogatalla furcifera horvath): GB/T 15794—2009 [S]. Beijing: Standards Press of China,2009(in Chinese).

[14] GAO S C, WANG G B, ZHOU Y Y, et al. Water-soluble food dye of Allura Red as a tracer to determine the spray deposition of pesticide on target crops[J]. Pest management science,2019,75(10):2592-2597.

[15] 王国宾,韩鑫,宋灿灿,等.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[J].智慧农业(中英文),2021,3(3):38-51. WANG G B,HAN X,SONG C C,et al.Evaluation of droplet size and drift distribution of herbicide sprayed by plant protection unmanned aerial vehicle in winter wheat field[J].Smart agriculture,2021,3(3):38-51 (in Chinese with English abstract).

[16] 徐德进,徐广春,许小龙,等.喷头和施药液量对水稻植株上农药沉积和药剂防治效果的影响[J].植物保护学报,2019, 46(2):409-416. XU D J,XU G C,XU X L,et al.Influence of spray nozzle and spray volume on pesticide deposition and control effect in rice[J].Journal of plant protection,2019,46(2): 409-416 (in Chinese with English abstract).

[17] 兰玉彬,单常峰,王庆雨,等.不同喷雾助剂在植保无人机喷施作业中对雾滴沉积特性的影响[J].农业工程学报,2021, 37(16):31-38. LAN Y B,SHAN C F,WANG Q Y,et al.Effects of different spray additives on droplet deposition characteristics during plant protection UAV spraying operations[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(16): 31-38 (in Chinese with English abstract).

[18] BZDEK B R,REID J P,MALILA J,et al.The surface tension of surfactant-containing, finite volume droplets [J]. PNAS, 2020,117(15):8335-8343.

[19] 张海艳,兰玉彬,文晟,等.植保无人机旋翼风场模型与雾滴运动机理研究进展[J].农业工程学报,2020,36(22):1-12. ZHANG H Y,LAN Y B,WEN S,et al.Research progress in rotor airflow model of plant protection UAV and droplet motion mechanism[J].Transactions of the CSAE,2020,36(22): 1-12 (in Chinese with English abstract).

[20] 顾中言,徐德进,徐广春.论农药雾滴的剂量及分布对害虫防治效果的影响及其与农药损失的关系[J].农药学学报, 2020,22(2):193-204. GU Z Y,XU D J,XU G C.Effects of dose and distribution of pesticide droplets on pests control efficiency and its relationship with pesticide losses [J]. Chinese journal of pesticide science,2020,22(2):193-204 (in Chinese with English abstract).

[21] 朱友理,何东兵,曹书培,等.三氟苯嘧啶对稻飞虱的防效及对天敌的安全性[J].中国植保导刊,2018,38(8):71-74. ZHU Y L,HE D B,CAO S P,et al.Controlling efficiency of Trifluorobenzidine against rice plant hopper and its safety to natural enemy[J].China plant protection,2018,38(8):71-74 (in Chinese with English abstract).

[22] 梁锋,谭德锦,韩凌云,等.19% 三氟苯嘧啶·氯虫苯甲酰胺悬浮剂对水稻主要害虫的田间防治效果及对两种天敌的影响[J].南方农业学报,2017,48(10):1824-1831. LIANG F, TAN D J,HAN L Y,et al.Control effects of 19% triflumezopyrim·chlorantraniliprole SC against main rice pests and its influence on two natural enemies[J].Journal of southern agriculture, 2017, 48(10): 1824-1831 (in Chinese with English abstract).

[23] WEN S F, XUE Y N, DU R S, et al. Toxicity and sublethal effects of triflumezopyrim on the development and detoxification enzymatic activities in the small brown planthopper (SBPH), *Laodelphax striatellus* (Fallen) [J/OL]. Crop protection, 2021, 150: 105813 [2025-10-02]. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105813.

[24] PRABHAKAR M, GOPINATH K A, RAVI KUMAR N, et al. Mapping leaf area index at various rice growth stages in southern India using airborne hyperspectral remote sensing [J/OL]. Remote sensing, 2024, 16 (6): 954 [2025-10-02]. https://doi.org/10.3390/rs16060954.

[25] SHAN C F, WANG G B, WANG H H, et al. Effects of droplet size and spray volume parameters on droplet deposition of wheat herbicide application by using UAV [J]. International journal of agricultural and biological engineering, 2021, 14(1): 74-81.

Dose-reduction and efficacy-enhancement effects of spray adjuvants on controlling rice planthopper in plant protection drone spraying

ZHANG Jiantao[1,2,3], ZHANG Haodong[1,2], LI Junjie[1,2], LIU Wen[4]

1. *College of Mathematics and Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;*
2. *National Center for International Collaboration Research on Precision Agricultural Aviation Pesticides Spraying Technology, Guangzhou 510642, China;*
3. *Key Laboratory of Smart Agricultural Technology in Tropical South China, Guangzhou 510642, China;*
4. *College of Resources and Environment, Zhongkai Agricultural Engineering College, Guangzhou 510550, China*

Abstract Indoor measurement of surface tension was combined with field experiments to solve the problems including the low utilization of pesticide and severe drift of droplet in the application of crop protection drone spraying. A comprehensive analysis was conducted on indexes including the physical and chemical properties of the pesticide solution, deposition of droplet, control efficacy in field, residue in soil, and economic costs. The dose -reduction and efficacy-enhancement effects of two spray adjuvants-FTRT® VF-3 (a specialized adjuvant for drone spraying) and a compound lemon essential oil-on the novel mesoionic insecticide 10% triflumezopyrim suspension concentrate and the conventional neonicotinoid 10% nitenpyram aqueous solution for rice planthopper control were systematically evaluated. Results showed that both adjuvants significantly reduced solution surface tension and enhanced leaf deposition (the increase ranging from 58.6% to 95.0%), with VF-3 outperforming lemon essential oil. The optimal dose-reduction strategy was achieved at 85% of the recommended dose combined with VF-3: treatment T2 (triflumezopyrim+VF-3) and T7 (nitenpyram+VF-3). T2 reduced application of pesticide by 15% while achieving a 14-day corrected control efficacy of 79.92%, representing a 10.46% improvement over the full-dose control and a 32.9% reduction of residue in soil. The result of Pearson correlation analysis showed that there was a strong positive relationship between early-stage efficacy (3-7 days post-application) and deposition of droplet ($r>0.87$, $P<0.001$), whereas long-term efficacy (14 days) was primarily governed by the intrinsic persistence of the active ingredient. Economic analysis confirmed that T2 offered an optimal balance, achieving high efficacy at a cost of ¥172.35 yuan/hm^2. The efficacy of adjuvants was not solely determined by the reduction of surface tension but rather by their integrated effects on the deposition of droplet and the partitioning of pesticide within the plant-soil system. It will provide both theoretical insights and a practical, scalable approach for the precision application of drone spraying and the green reduction of pesticide in rice production.

Keywords plant protection drone; green prevention and control; reduced application of pesticide; droplet deposition; rice planthopper; spray adjuvants

(责任编辑:张志钰)