江西农业大学学报　2025,47(4)　　http://xuebao.jxau.edu.cn
Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis　　https://doi.org/10.3724/aauj.2025083

曾慧娟,刘雯,张建桃.植保无人机喷施三氟苯嘧啶的参数优选及稻飞虱防治效果研究[J].江西农业大学学报,2025,47(4):971-979.
ZENG H J,LIU W,ZHANG J T.Parameter optimisation of triflumezopyrim spraying by plant protection UAV and effectiveness of rice planthoppers control[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(4):971-979.

植保无人机喷施三氟苯嘧啶的参数优选及稻飞虱防治效果研究

曾慧娟[1,2],刘　雯[3],张建桃[1,2*]

(1.华南农业大学 数学与信息学院,广东 广州 510642;2.国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心,广东 广州 510642;3.仲恺农业工程学院 资源与环境学院,广东 广州 510550)

摘要:【目的】稻飞虱是危害水稻生产的主要害虫之一,传统防治方法存在效率低、农药利用率不足等问题。旨在探究植保无人机喷施三氟苯嘧啶的最佳作业参数组合,以实现最优雾滴沉积与稻飞虱防治效果,并为水稻病虫害绿色防控提供技术支持。【方法】采用飞行速度、飞行高度、雾滴粒径和助剂含量设计四因素三水平的正交试验测定了水稻叶片的雾滴沉积规律。同时测定了喷施三氟苯嘧啶对稻飞虱的防治效果。【结果】采用极飞P20植保无人机喷施10%三氟苯嘧啶,当飞行速度为1.5 m/s、飞行高度为3.5 m、雾滴粒径为150 μm、助剂含量为0.05%时,雾滴沉积量最大,达到了0.319 μL/cm^2;当飞行速度为3.5 m/s、飞行高度为2.5 m、雾滴粒径为100 μm、助剂含量为0.05%时,雾滴密度较高,达到了53.13个/cm^2。方差分析表明,雾滴沉积量与雾滴密度的影响顺序由主到次均为雾滴粒径、飞行高度、助剂含量和飞行速度;在施药后第3天,当飞行速度1.5 m/s、飞行高度2.5 m、雾滴粒径为150 μm、不添加助剂时,稻飞虱防治效果最佳,为69.25%;当飞行速度1.5 m/s、飞行高度3.5 m、雾滴粒径为150 μm、助剂含量为0.05%时,稻飞虱防治效果最佳,施药后第7天和第14天防治效果分别达81.35%、93.67%。【结论】在极飞P20植保无人机喷施10%三氟苯嘧啶时,优化飞行参数和助剂含量可显著提升雾滴沉积效果和稻飞虱防治效果。综合研究结果可知,采用飞行速度1.5 m/s、飞行高度3.5 m、雾滴粒径150 μm、助剂含量0.05%的组合参数,有望实现高效防治。研究结果为无人机精准施药技术在水稻病虫害防治中的应用提供了数据支持和技术支撑。

关键词:植保无人飞机;三氟苯嘧啶;雾滴沉积;稻飞虱防治;水稻;作业参数
中图分类号:S435.112$^+$.3;S252　　**文献标志码:**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1000-2286(2025)04-0971-09
CSTR:32399.14.aauj.2025083

Parameter optimisation of triflumezopyrim spraying by plant protection UAV and effectiveness of rice planthoppers control

ZENG Huijuan[1,2],LIU Wen[3],ZHANG Jiantao[1,2*]

收稿日期:2025-03-10　　**修回日期:**2025-04-21
基金项目:国家自然科学基金面上项目(32271985)和广东省普通高校重点领域专项(2022ZDZX4018、2022ZDZX4020)
Project supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China(32271985) and The Special Projects in Key Fields of Guangdong Provincial Universities(2022ZDZX4018,2022ZDZX4020)
作者简介:曾慧娟,硕士生,orcid.org/0009-0003-0747-9886,qianhezeng@163.com;*通信作者:张建桃,副教授,主要从事无人机精准施药研究,orcid.org/0000-0002-1646-2643,zhangjiantao@yeah.net。
©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

(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.College of Resources and Environment, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510550, China)

Abstract: [**Objective**] The rice planthopper is one of the main pests threatening rice production. Traditional control methods suffer from low efficiency and insufficient pesticide utilization. This study aims to explore the optimal operational parameter combinations for applying triflumezopyrim using plant protection drones in order to achieve the best droplet deposition and rice planthopper control efficacy, thus providing technical support for the green prevention and control of rice pests and diseases. [**Method**] A four-factor, three-level orthogonal experiment was designed, incorporating flight speed, flight altitude, droplet size, and adjuvant concentration, to measure the droplet deposition patterns on rice leaves. Additionally, the control efficacy of triflumezopyrim against rice planthoppers was evaluated. [**Result**] When applying 10% triflumezopyrim via the XAG P20 agriculturaldrone, the maximum droplet deposition of 0.319 μL/cm^2 was achieved under the following operational parameters: flight speed of 1.5 m/s, altitude of 3.5 m, droplet size of 150 μm, and adjuvant concentration of 0.05%. A higher droplet density (53.13 droplets/cm^2) was observed at a flight speed of 3.5 m/s, flight altitude of 2.5 m, droplet size of 100 μm, and adjuvant concentration of 0.05%. Variance analysis indicated that the primary-to-secondary order of factors affecting droplet deposition and density was droplet size > flight altitude > adjuvant concentration > flight speed. On the 3rd day after application, the best rice planthopper control efficacy (69.25%) was achieved at a flight speed of 1.5 m/s, flight altitude of 2.5 m, droplet size of 150 μm, and without adjuvant. On the 7th and 14th days after application, the optimal control efficacy (81.35% and 93.67%, respectively) was observed at a flight speed of 1.5 m/s, flight altitude of 3.5 m, droplet size of 150 μm, and adjuvant concentration of 0.05%. [**Conclusion**] When applying 10% triflumezopyrim using the XAG P20 plant protection drone, optimizing flight parameters and adjuvant concentration can significantly improve droplet deposition and rice planthopper control efficacy. Based on the comprehensive results, the parameter combination of flight speed at 1.5 m/s, flight altitude at 3.5 m, droplet size at 150 μm, and adjuvant concentration at 0.05% can achieve high-efficacy pest control. This study provides data support and technical guidance for the application of precision drone spraying technology in rice pest and disease control.

Keywords: unmanned aerial vehicle; triflumezopyrim; droplet deposition; planthoppers control; rice; operational

【研究意义】中国是全球重要的水稻生产国，2022年水稻种植面积约占全球水稻种植面积的17.9%，产量约占全球总产量的27.1%[1]。然而，水稻病虫害持续威胁水稻产量和品质的提升，其中稻飞虱(Planthopper)是为害水稻最严重的害虫之一[2]。稻飞虱通过刺吸水稻韧皮部汁液，导致植株枯萎，造成大面积减产[3]；此外，稻飞虱是水稻草状矮缩病毒(RGSV)等多种病毒的传播媒介，进一步加剧水稻产量的损失[4]。目前，化学防治仍是防治稻飞虱的主要手段，但传统的人工喷施方式存在作业效率低、农药利用率不足、施药不均匀等问题，难以满足现代农业对精准化和绿色化的需求[5]。【前人研究进展】随着精准农业的发展，植保无人机喷施技术因其作业效率高、施药精准和适应复杂地形等优势在农业生产中应用广泛[6-7]。研究[8-12]表明，植保无人机的施药效果受飞行参数、雾滴粒径和助剂等因素影响。Qin等[10]研究了植保无人机的飞行高度和飞行速度对农药雾滴沉积分布及稻飞虱防治效果的影响，试验结果表明，在飞行速度为5 m/s、飞行高度为1.5 m作业时，农药雾滴沉积分布最佳，施药后3~10 d内的稻飞虱防治效果可达74%~92%。Wang等[11]研究发现，添加合适的助剂可显著提高农药的有效沉积率，并且施药7 d后，稻田病虫害防治效果较对照组提高了20%以上。Chen等[12]指出，增大雾滴粒径有助于增加雾滴的沉积量、增强雾滴向水稻冠层内部的渗透力。此外，长期使用单一种类的传统化学药物容易导致稻飞虱产生抗药性[3,13]，而三氟苯嘧啶(triflumezopyrim)作为一种新型介离子类杀虫剂，能够抑制害虫的烟碱型乙酰

胆碱受体(nAChR),具有高效、低毒和环境友好等特点[14-15],为稻飞虱防治提供了新选择。

【本研究切入点】尽管植保无人机精准施药技术在农业中的应用日益广泛,但该领域对三氟苯嘧啶的作业参数优化及其对稻飞虱防治效果的研究仍较为缺乏。【拟解决的关键问题】本研究以 10% 三氟苯嘧啶为供试药剂,通过分析不同飞行速度、飞行高度、雾滴粒径和助剂含量组合下的雾滴沉积特性及其对稻飞虱的防治效果,明确作业参数对施药质量的影响规律,并筛选最佳作业参数组合,以期为植保无人机喷施三氟苯嘧啶防治稻飞虱提供数据支持和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验材料与设备

试验使用广州极飞科技有限公司生产的P20四旋翼无人机。此机型外形尺寸为1 831 mm×1 831 mm×472 mm,旋翼直径为812 mm,最大药液载量可达 10 L,每个旋翼下方配备一个离心雾化喷头。参数可调范围为飞行速度:1~6 m/s,飞行高度:1~12 m,喷头的总流量:0.8~3.2 L/min,有效喷幅:3 m。其他实验设备还包括华谊PM6252B手持式风速仪(深圳华谊智测科技股份有限公司);HP Scan Jet扫描仪(美国惠普公司)。

试验药剂为10%三氟苯嘧啶悬浮剂(科迪华农业科技有限责任公司)、迈飞助剂(北京广源益农化学有限责任公司)、罗丹明B(天津市华盛化学试剂有限公司,染色剂)。

使用铜版纸卡测试水稻叶片上雾滴沉积量、雾滴密度,尺寸为30 mm×75 mm。

1.2　试验地概况及环境情况

本次试验于2024年6月24日在广东省广州市增城区中新镇三星村丝苗种植基地进行。当地试验田土壤肥力中等,排灌方便。供试水稻品种为象竹香,种植方式为人工移栽稻,施药试验时间为早稻孕穗期,水稻平均高度为0.7~0.9 m,水稻株距13 cm,行距26 cm。试验防治对象为稻飞虱,稻飞虱种群以白背飞虱为主。试验期间,环境温度28~30 ℃,湿度69%,风速0.3~1.0 m/s。

1.3　试验方法

1.3.1　试验设计处理

本试验选取飞行速度、飞行高度、雾滴粒径和助剂含量为试验因素,设计4因素3水平的正交试验。正交试验方案设计为L9(3^4)正交表。如表1所示,共设计9个处理,分别对应9个小处理区,每个处理区400 m^2,每个处理重复3次。设置农药剂量为225 mL/hm^2。另外,为避免药液飘移的干扰影响,各处理区之间设置5 m的隔离带。

表1　试验田处理区

Tab.1　Experimental field treatment areas

处理 Treatment	速度/(m·s^{-1}) A Flight speed	高度/m B Flight height	雾滴粒径/μm C Droplet size	助剂含量/% D Additive concentration
1	1.5	1.5	100	0
2	1.5	2.5	200	0.01
3	1.5	3.5	150	0.05
4	2.5	1.5	200	0.05
5	2.5	2.5	150	0.00
6	2.5	3.5	100	0.01
7	3.5	1.5	200	0.01
8	3.5	2.5	100	0.05
9	3.5	3.5	150	0

1.3.2　采样点布置

按照图1布置试验区采样点。每条采样线上布置7个采样点,每个采样点间隔1 m。采样线总长度为7 m。在距离地面35 cm处水平放置铜版纸卡用以收集农药雾滴。航线箭头方向为植保无人机实际作

业时的飞行方向。试验完成后，按序号收集铜版纸，并逐一放入相应的密封袋中。扫描铜版纸后，使用雾滴分析软件 ImageJ for Deposit 分析铜版纸上的雾滴沉积密度与雾滴沉积量。

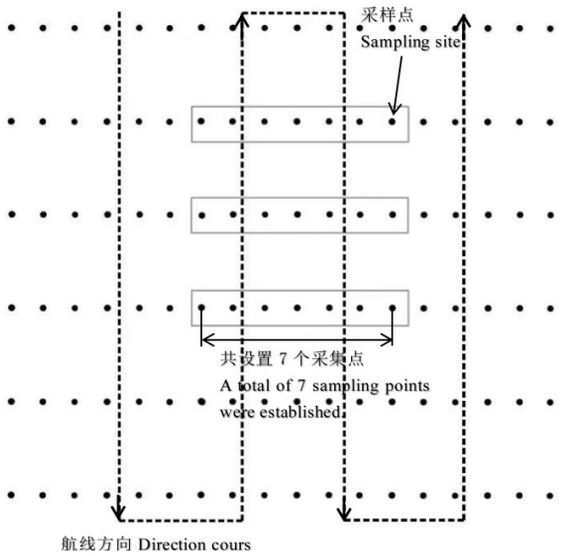


图 1 试验方案

Fig.1 Schematic representation of the test program

1.3.3 防效调查

试验参考《田间药效试验准则(一)杀虫剂防治水稻飞虱》对稻飞虱群进行了调查，并计算防治效果。该调查共进行 4 次，分别在施药前和施药后第 3 天、第 7 天和第 14 天评估稻飞虱的防治效果。调查时采用平行跳跃法，每个处理区选取 5 个小区，作为同一处理的多次重复。将一个 40.0 cm×30.0 cm 的白瓷盘以一定角度放置在水稻的中下部，迅速拍打水稻丛 2~3 次，然后立即掀起盘以计数稻飞虱。不考虑稻飞虱生长阶段，根据喷药前后各区域活虫种群数量确定总体防治效果。并依据给定公式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% (1)

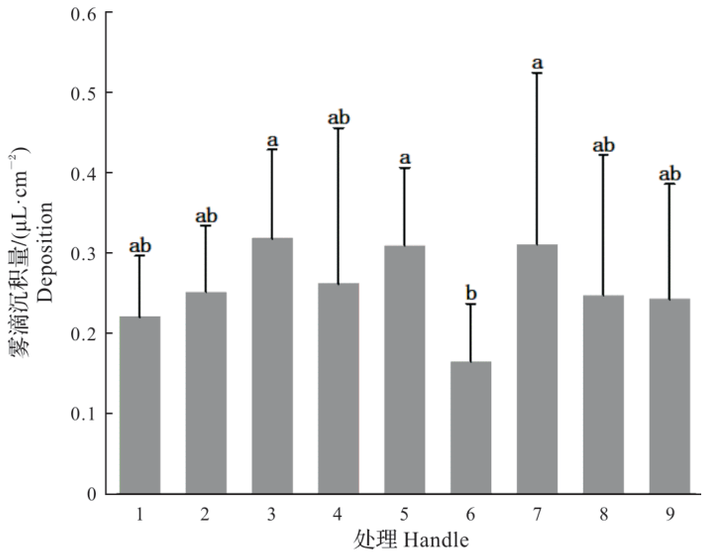
防治效果=(施药区虫口减退率−空白对照区虫口减退率)/(1−空白对照区虫口减退率)×100% (2)

2 结果与分析

2.1 不同作业参数、雾滴粒径、助剂含量下的雾滴沉积量

根据图 2 结果，在 9 个试验处理中，不同处理下的雾滴沉积量差异显著，处理 3(速度 1.5 m/s、高度 3.5 m、雾滴粒径 150 μm、助剂含量 0.05%)的雾滴沉积量最大，平均为 0.319 μL/cm^2；处理 6(速度 2.5 m/s、高度 3.5 m、雾滴粒径 100 μm、助剂含量 0.01%)的沉积量最少，平均为 0.165 μL/cm^2，较处理 3 降低了 48.28%。

方差分析(表 2)显示，雾滴粒径对沉积量的影响最为显著(P=0.00<0.05)，其次是飞行高度(P=0.00<0.05)和助剂含量(P=0.001<0.05)，而飞行速度的影响不显著(P>0.05)。最优组合为 $C_2B_2D_3A_3$，T_3($C_2B_3D_3A_1$)和 T5($C_2B_2D_1A_2$)接近最优组合，相应的雾滴沉积量为 0.319 μL/cm^2、0.31 μL/cm^2。C_1(T_1、T_6、T_8)、C_2(T_3、T_5、T_9)和 C_3(T_2、T_4、T_7)的平均沉积量分别为 0.212，0.291，0.276 μL/cm^2，其中 C_2的平均雾滴沉积量最大，C_1的平均沉积量最小。在田间实际作业中，小雾滴更容易发生蒸发和漂移，因此小雾滴沉积量显著低于其他处理。B_1(T_1、T_4、T_7)、B_2(T_2、T_5、T_8)和 B_3(T_3、T_6、T_9)的平均沉积量为 0.265，0.270，0.242 μL/cm^2。B_2的平均雾滴沉积量最大，B_1次之，B_3的雾滴沉积量最小。这一现象表明，随着飞行高度的提高，水稻冠层上方的垂直风场会逐渐减弱，从而导致靶区上的雾滴沉积量减少。D_1(T_1、T_5、T_9)、D_2(T_2、T_6、T_7)和 D_3(T_3、T_4、T_8)的平均沉积量为 0.258，0.243，0.277 μL/cm^2，当助剂含量为 0.05% 时，雾滴沉积量优于其他处理组。



图中不同小写字母表示在不同飞行高度、飞行速度、雾滴粒径和助剂含量之间经Duncan氏新复极差法检验在0.05水平上差异显著。

Different lowercase letters in the figure indicate significant differences at the 0.05 level among flight heights, flight speeds, droplet sizes, and adjuvant concentrations, as determined by Duncan's new multiple range test.

图2　不同处理的雾滴沉积量

Fig.2　Fog droplet deposition under different treatments

表2　雾滴沉积量正交试验结果

Tab.2　Orthogonal test results of droplet deposition

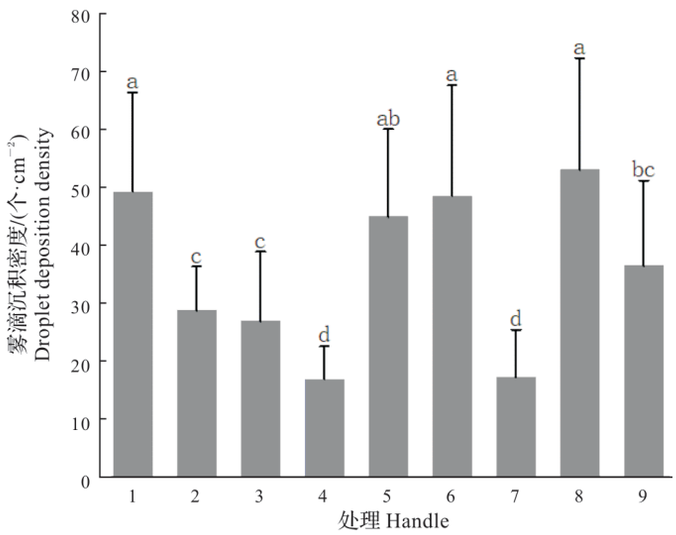
处理 Treatments	飞行速度A Operating speed	飞行高度B Working altitude	雾滴粒径C Droplets size	助剂含量D Additive concentration	平均雾滴沉积量/(μL·cm⁻²) Mean droplet deposition
T_1	A_1	B_1	C_1	D_1	0.221
T_2	A_1	B_2	C_3	D_2	0.252
T_3	A_1	B_3	C_2	D_3	0.319
T_4	A_2	B_1	C_3	D_3	0.263
T_5	A_2	B_2	C_2	D_1	0.310
T_6	A_2	B_3	C_1	D_2	0.165
T_7	A_3	B_1	C_3	D_2	0.312
T_8	A_3	B_2	C_1	D_3	0.248
T_9	A_3	B_3	C_2	D_1	0.243
F	1.696	14.102	31.963	10.167	
P	0.211	0.000	0.000	0.001	
顺序 Order	雾滴粒径>飞行高度>助剂含量>飞行速度 Droplet size > Working altitude > Adjuvant concentration > Operating speed				
最优组合 Optimal combination	$C_2B_2D_3A_3$				

2.2　不同作业参数、雾滴粒径、助剂含量下的雾滴密度

根据表3结果,在9个处理中,处理8(速度3.5 m/s、高度2.5 m、雾滴粒径100 μm、助剂含量为0.05%)的雾滴密度最多,为54.13个/cm²,相应的雾滴沉积量为0.248 μL/cm²;处理4(速度2.5 m/s、高度1.5 m、雾滴粒径200 μm、助剂含量0.05%)的沉积密度最少,为16.93个/cm²,较处理8雾滴密度减少了68.72%。

方差分析(表3)显示,雾滴密度的影响因素主次顺序为雾滴粒径>飞行高度>助剂含量>飞行速度。

其中，雾滴粒径和飞行高度对雾滴密度有显著影响（$P<0.05$）。最优组合为$C_1B_2D_1A_2$，T8（$C_1B_2D_3A_3$）与最优组合最接近，其雾滴密度为54.13个/cm²，为9个处理中的最大值。C_1（T_1、T_6、T_8）、C_2（T_3、T_5、T_9）和C_3（T_2、T_4、T_7）的平均雾滴密度分别为51.1，36.12，20.97个/cm²。C_1的雾滴密度较高，这可能是因为C_1在铜板纸上的雾滴重叠会小于雾滴粒径较大的雾滴重叠，而雾滴重叠会影响雾滴密度。B_1（T_1、T_4、T_7）、B_2（T_2、T_5、T_8）和B_3（T_3、T_6、T_9）的平均雾滴密度分别为27.8，42.42，37.50个/cm²，这表明适当的飞行高度更有利于提高雾滴密度。



图中不同小写字母表示在不同飞行高度、飞行速度、雾滴粒径和助剂含量之间经Duncan氏新复极差法检验在0.05水平上差异显著。

Different lowercase letters in the figure indicate significant differences at the 0.05 level among flight heights, flight speeds, droplet sizes, and adjuvant concentrations, as determined by Duncan's new multiple range test.

图3 不同处理的雾滴密度

Fig.3 Droplet density of different treatments

表3 雾滴密度正交试验结果

Tab.3 Orthogonal test results of droplet density

处理 Treatments	飞行速度A Operating speed	飞行高度B Working altitude	雾滴粒径C Droplets size	助剂含量D Additive concentration	平均雾滴密度/(个·cm⁻²) Mean droplet coverage density
T_1	A_1	B_1	C_1	D_1	49.26
T_2	A_1	B_2	C_3	D_2	28.76
T_3	A_1	B_3	C_2	D_3	26.93
T_4	A_2	B_1	C_3	D_3	16.93
T_5	A_2	B_2	C_2	D_1	44.94
T_6	A_2	B_3	C_1	D_2	49.61
T_7	A_3	B_1	C_3	D_2	17.23
T_8	A_3	B_2	C_1	D_3	54.13
T_9	A_3	B_3	C_2	D_1	36.49
F	1.331	11.553	59.593	2.369	
P	0.289	0.001	0.000	0.122	
主次顺序 Sequence	雾滴粒径>飞行高度>助剂含量>飞行速度 Droplet size > Working altitude > Adjuvant concentration >Operating speed				
最优组合 Optimal combination	$C_1B_2D_1A_2$				

2.3　稻飞虱防治效果

田间稻飞虱调查结果显示,施药后第3天,不同处理下的稻飞虱防治效果为55.83%~69.25%,其中,处理5($A_1B_2C_2D_1$)的防治效果最佳,达到69.25%。施药后第7天,不同处理下的稻飞虱防治效果为68.52%~81.35%,其中处理3($A_1B_3C_2D_3$)的防治效果最佳,达到81.35%。施药后第14天,不同处理下的稻飞虱防治效果为86.09%~93.67%,其中处理3($A_1B_3C_2D_3$)的防治效果最佳,达到93.67%。在使用植保无人机喷施三氟苯嘧啶时,选择合适的飞行速度、飞行高度、雾滴粒径和助剂含量对提高稻飞虱防治效果具有重要作用。综上所述,为实现最佳的稻飞虱防治效果,建议在喷施10%三氟苯嘧啶时,采用速度为1.5 m/s、高度为3.5 m、雾滴粒径为150 μm和助剂为0.05%的组合参数。

表4　施药后3,7,14 d不同处理对稻飞虱防效

Tab.4　Control efficacy of different treatments on rice planthoppers control at 3,7 and 14 days after treatment

处理 Treatments	施药后3 d防效/% Control efficacy at 3 d after treatment	施药后7 d防效/% Control efficacy at 7 d after treatment	施药后14 d防效/% Control efficacy at 14 d after treatment
1	59.73c	71.26c	89.80b
2	61.67c	74.43c	90.97b
3	68.14a	81.35a	93.67a
4	63.67b	78.04b	91.43ab
5	69.25a	79.67a	92.72a
6	55.83d	68.52d	86.09c
7	66.07b	79.01ab	92.41ab
8	64.85b	78.57b	91.62ab
9	60.22c	71.30c	89.09b

表中数据后同列不同小写字母表示差异性显著(P<0.05)。

Different lowercase letters in the same column after the data indicate significant differences(P<0.05).

3　讨论与结论

植保无人机在靶标作物上喷施农药时,雾滴的沉积效果对农作物病虫害的防治成效具有决定性作用。植保无人机喷施农药的过程中,雾滴的沉积质量受多种复杂因素共同影响[16-18]。试验研究表明,影响雾滴沉积量和沉积密度的试验因素主次顺序依次为雾滴粒径、飞行高度、助剂含量和飞行速度。当雾滴粒径取150 μm时,雾滴的平均沉积量和雾滴密度均达到较好水平,分别为0.288 μL/cm^{2}和34.26个/cm^2。较小的雾滴粒径虽能增加覆盖密度,但在雾化至靶标沉积的过程中易受漂移和蒸发的影响,导致沉积量减少;而较大粒径的雾滴虽然雾滴密度较低,但在不同作业参数下仍能保持一定的沉积量。此外,尽管部分试验组的雾滴密度较低,但由于使用了新型内吸性三氟苯嘧啶,仍实现了较高的生物防效。对于内吸性杀虫剂而言,雾滴密度与防治效果之间的相关性并不显著,同时充足的施用量足以确保有效防治,这也解释了低雾滴密度仍能取得较优的防治效果[19]。

当飞行高度设置为2.5 m时,雾滴的平均密度和沉积量分别达到42.42个/cm^{2}和0.266 μL/cm^{2}的最佳值,且施药后第14天的稻飞虱防治效果达91.77%。随着无人机飞行高度的增加,农药雾滴沉积量呈现先升高后降低的趋势,这一现象可能与飞行高度对气流的影响有关:当飞行高度过低时,较强的下洗气场会导致雾滴过度流失;而当飞行高度过高时,旋翼风场的垂直风场气流减弱,雾滴容易受到横向风干扰而漂移,二者均会降低靶标上的雾滴沉积量。

试验结果表明,当飞行速度为1.5 m/s时,雾滴的平均沉积量最大,为0.264 μL/cm^2。植保无人机的飞行速度越快,产生的下洗气流会越紊乱,同时垂直方向的气流速度也越弱,不利于雾滴沉积。然而,方差分析结果显示,飞行速度对雾滴沉积量和雾滴密度的影响并不显著,这可能是由于飞行速度对雾滴均匀

性有显著影响，进而影响了雾滴沉积分布。

添加喷雾助剂有利于增强喷嘴的雾化性能，提升农药雾滴的吸附性以及滞留性，减少农药雾滴的漂移，从而提升雾滴的沉积效果，并增强靶标植物对农药的吸收能力。试验发现，当助剂含量达到0.05%时，雾滴沉积量高于其他2个含量。因此，在未来的无人机施药作业中，可考虑进一步筛选合适的喷雾助剂。

综上所述，本研究利用植保无人机在不同作业参数（飞行速度1.5~3.5 m/s、飞行高度1.5~3.5 m和雾滴粒径100~200 μm）和不同含量喷雾助剂（0~0.05%）条件下喷施10%三氟苯嘧啶，探究了作业参数和助剂含量对雾滴沉积效果和稻飞虱的田间防治效果的影响。当飞行速度为1.5 m/s、飞行高度3.5 m、雾滴粒径为150 μm、助剂含量为0.05%时，雾滴沉积量最大，为0.319 μL/cm^2；当飞行速度为3.5 m/s、飞行高度为2.5 m、雾滴粒径100 μm、助剂含量为0.05%时，雾滴密度较大，为53.13个/cm^2；在稻飞虱的防治效果方面，施药后第3天，处理5的防治效果最佳，达到了69.25%，施药后第7天和第14天，处理3的稻飞虱防治效果最佳，分别为81.35%和93.67%。研究结果可为植保无人机喷施三氟苯嘧啶防治水稻田地稻飞虱提供一定的数据支撑和参考依据。

致谢：广州市科技计划项目重点研发计划（2023B03J1362）和广州市科技计划项目-2024年度农村科技特派员专题（2024E04J1228）同时对本研究给予了资助，谨致谢意！

参考文献 References：

[1] FAO.Food and agriculture data[EB/OL].(2023-12-23)[2025-04-24].https://www.fao.org/faostat/en/#home.

[2] 车琳，蒋沁宏，王也，等.我国水稻五大产区虫害发生及防控情况差异的比较分析[J].植物保护，2022，48(3)：233-241.
CHE L，JIANG Q H，WANG Y，et al.Comparative analysis of occurrence and control of pests in five rice producing regions in China[J].Plant protection，2022，48(3)：233-241.

[3] 张晶，段至柔，刘常权，等.寄主植物与刺吸式昆虫互作防御的研究进展[J].昆虫学报，2023，66(4)：575-590.
ZHANG J，DUAN Z R，LIU C Q，et al.Research advances on the mutual defense between host plants and piercing-sucking insects[J].Acta entomologica Sinica，2023，66(4)：575-590.

[4] ZHOU C W，LI S，ZHOU Y J，et al.A simple method for obtaining rice black-streaked dwarf virus-infected small brown planthopper nymphs[J].Journal of virological methods，2018，251：80-82.

[5] 赵景，蔡万伦，沈栎阳，等.水稻害虫绿色防控技术研究的发展现状及展望[J].华中农业大学学报，2022，41(1)：92-104.
ZHAO J，CAI W L，SHEN L Y，et al.Current situation and prospect of green rice pest control technology[J].Journal of Huazhong agricultural university，2022，41(1)：92-104.

[6] 兰玉彬，赵德楠，张彦斐，等.生态无人农场模式探索及发展展望[J].农业工程学报，2021，37(9)：312-327.
LAN Y B，ZHAO D N，ZHANG Y F，et al.Exploration and development prospect of eco-unmanned farm modes[J].Transactions of the Chinese society of agricultual engineering，2021，37(9)：312-327.

[7] GATKAL N R，NALAWADE S M，BHANAGE G B，et al.Review of UAVs for efficient agrochemical spray application[J].International journal of agricultural and biological engineering，2025，18(1)：1-9.

[8] WANG C L，LIU Y，ZHANG Z H，et al.Spray performance evaluation of a six-rotor unmanned aerial vehicle sprayer for pesticide application using an orchard operation mode in apple orchards[J].Pest management science，2022，78(6)：2449-2466.

[9] 臧禹，谷秀艳，林树青，等.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[J].华中农业大学学报，2024，43(6)：325-332.
ZANG Y，GU X Y，LIN S Q，et al.Effects of mode of operating agricultural unmanned aerial vehicles on deposition of droplet and prevention and control of corn borer [J].Journal of Huazhong agricultural university，2024，43(6)：325-332.

[10] QIN W C，QIU B J，XUE X Y，et al.Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers[J].Crop protection，2016，85：79-88.

[11] WANG L X, XIA S Y, ZHANG H, et al.Tank-mix adjuvants improved spray performance and biological efficacy in rice insecticide application with unmanned aerial vehicle sprayer[J].Pest management science, 2024, 80(9): 4371-4385.

[12] CHEN S D, LAN Y B, ZHOU Z Y, et al.Effect of droplet size parameters on droplet deposition and drift of aerial spraying by using plant protection UAV[J].Agronomy, 2020, 10(2): 195.

[13] 肖汉祥,刘明津,李燕芳,等.广东稻区褐飞虱对烯啶虫胺和呋虫胺的敏感性测定[J].环境昆虫学报,2017,39(6):1369-1373.
XIAO H X, LIU M J, LI Y F, et al.Determination of susceptibility of *Nilaparvata lugens*(Stål)to nitenpyram and dinotefuran in Guangdong[J].Journal of environmental entomology, 2017, 39(6): 1369-1373.

[14] 芦志成,杨萌,梁爽,等.新型介离子类杀虫剂研究进展[J].农药,2022,61(1):1-9.
LU Z C, YANG M, LIANG S, et al.Review of novel mesoionic insecticides[J].Agrochemicals, 2022, 61(1): 1-9.

[15] 马明勇,吴生伟,彭兆普,等.三氟苯嘧啶种衣剂对褐飞虱控制效果研究[J].应用昆虫学报,2022,59(5):1143-1150.
MA M Y, WU S W, PENG Z P, et al.Dressing seeds with triflumezopyrim controls the brown planthopper *Nilaparvata lugens*(Stål)[J].Chinese journal of applied entomology, 2022, 59(5): 1143-1150.

[16] GUO S, LI J Y, YAO W X, et al.Optimization of the factors affecting droplet deposition in rice fields by rotary unmanned aerial vehicles(UAVs)[J].Precision agriculture, 2021, 22(6): 1918-1935.

[17] SHI X, DU Y H, LIU X H, et al.Optimizing UAV spray parameters to improve precise control of tobacco pests at different growth stages[J].Pest management science, 2024, 80(11): 5809-5819.

[18] WONGSUK S, QI P, WANG C, et al.Spray performance and control efficacy against pests in paddy rice by UAV-based pesticide application: effects of atomization, UAV configuration and flight velocity[J].Pest management science, 2024, 80: 2072-2084.

[19] 崔丽,王金凤,秦维彩,等.机动弥雾法施用70%吡虫啉水分散粒剂防治小麦蚜虫的雾滴沉积密度与防效的关系[J].农药学学报,2010,12(3):313-318.
CUI L, WANG J F, QIN W C, et al.Relationship between droplet density and field efficacy when appling imidacloprid 700WG against wheat aphids with knapsack mist-blower[J].Chinese journal of pesticide science, 2010, 12(3): 313-318.

(责任编辑:张前锋)