doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.03.016

寒地玉米弯孢菌叶斑病无人机应急喷施防治方法与性能试验

姚伟祥[1]　刘钰周[1]　常　宇[1]　刘长亮[1]　陈春玲[1]　郭　爽[2]
刘　洋[3]　HAQ Muhammad Zia Ui[4]

(1. 沈阳农业大学信息与电气工程学院, 沈阳 110866; 2. 沈阳大学智能科学与信息工程学院, 沈阳 110044;
3. 辽宁省植保植检总站(辽宁省农药检定站), 沈阳 110034; 4. 费萨拉巴德农业大学农学系, 费萨拉巴德 38040)

摘要: 玉米弯孢菌叶斑病会严重威胁寒地玉米产量,当前针对该病爆发中后期的无人机应急喷施研究较少,且缺乏沉积特性与延续产量的分析。本研究旨在明确药剂类型、喷头类型及助剂添加等典型因素对玉米弯孢菌叶斑病中后期患病植株冠层的雾滴沉积效果及后续防治效果(以产量表征),以期为相关病害大规模爆发应急防治提供技术指导。以植保无人机为喷施平台,包含 13 个处理(含空白对照 CK)。研究具体设置了药剂(扬彩、法砣、中保颖收)、喷头(XR80015、IDK90015)、是否加助剂(利飞 D)3 类变量,精准测定了玉米植株冠层各层易患病处的雾滴覆盖率、沉积密度及粒径等喷施沉积数据,并在后续玉米成熟后持续追踪测定了各处理的产量。使用扬彩(悬乳剂)进行喷施防治的平均沉积密度(20.77 drops/cm^2)和覆盖率(2.63%)显著优于法砣(悬浮剂)与中保颖收(悬浮剂)($P<0.05$),但其在沉积均匀性方面略显不足;基于上述药剂使用,助剂(利飞 D)的添加未能有效改善雾滴沉积,部分处理的沉积效果反而有所下降;研究还发现,XR 喷头雾滴粒径较小、平均沉积密度较高(19.63 drops/cm^2),IDK 喷头雾滴粒径相对偏大,虽具有防飘功能但实测有效沉积较少。对于应急防治后玉米产量,经统计一半处理(6 个处理)产量高于空白对照组产量(11 313.0 kg/hm^2),但是由于病害发展至中后期已经对产量造成影响,仅 4 个处理产量能达到正常水平(12 750.0 kg/hm^2)。综合而言,在本试验条件下,使用药剂扬彩,不添加助剂,使用 XR 喷头的喷施沉积效果最佳。但具体的无人机喷施策略,尤其是药剂选择还需考虑实际防治产量情况,本研究中使用药剂法砣的两个处理(T6 和 T8)虽雾滴沉积效果并非最优,却取得了最高的产量。

关键词: 玉米弯孢菌叶斑病; 植保无人机; 雾滴沉积; 喷施剂型; 喷头

中图分类号: S252　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1000-1298(2026)03-0164-12　　**OSID:**

Emergency Spraying Method and Performance Testing for Controlling Curvularia Leaf Spot by Unmanned Aerial Vehicle on Cold Region Corn

YAO Weixiang[1]　LIU Yuzhou[1]　CHANG Yu[1]　LIU Changliang[1]　CHEN Chunling[1]　GUO Shuang[2]
LIU Yang[3]　HAQ Muhammad Zia Ui[4]

(1. *College of Information and Electrical Engineering*, *Shenyang Agricultural University*, *Shenyang* 110866, *China*
2. *School of Intelligent Science and Information Engineering*, *Shenyang University*, *Shenyang* 110044, *China*
3. *Liaoning Provincial Plant Protection and Plant Inspection Station* (*Liaoning Pesticide Inspection Station*), *Shenyang* 110034, *China*
4. *Department of Agronomy*, *University of Agriculture Faisalabad*, *Faisalabad* 38040, *Pakistan*)

Abstract: Curvularia leaf spot of maize severely threatens corn yield in cold regions. However, research on emergency UAV spraying during the mid-to-late stages of disease outbreaks remains limited, with insufficient analysis of deposition characteristics and yield. Aiming to clarify the effects of typical factors including pesticide type, nozzle type, and adjuvant addition on droplet deposition within the canopy of mid-to-late stage infected corn plants and subsequent control efficacy (as measured by yield), thereby providing technical guidance for emergency management during large-scale disease outbreaks. Using agricultural UAV as the spraying platform, incorporating 13 treatments, including a blank control CK.

收稿日期: 2025-10-30　修回日期: 2025-11-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD1501503)、辽宁省教育厅基本科研项目(LJ212511035010)和辽宁省教育厅平台项目(JYTPT2024002)

作者简介: 姚伟祥(1993—),男,讲师,博士,主要从事植保无人机喷施应用研究,E-mail: yaoweixiang@syau.edu.cn

通信作者: 郭爽(1996—),女,讲师,博士,主要从事精准农业航空技术研究,E-mail: guos@syu.edu.cn

Three variables: pesticide (Yangcai Propiconazole azoxystrobin (PA), DuPont ® FaTuo ® Fungicide (DF), and Pyraclostrobin Tebuconazole (PT)), nozzles (XR80015, IDK90015), and adjuvant addition (FlyWin D) were specifically designed. Precise measurements of spray deposition data, including droplet coverage rate, deposition density, and droplet size were taken at susceptible locations across corn canopy layers. Yields were continuously monitored and measured for each treatment at corn maturity. PA (suspo-emulsion) demonstrated significantly superior average deposition density (20.77 drops/cm^2) and coverage (2.63%) compared with DF (suspension concentrate) and PT (suspension concentrate) ($P < 0.05$), though its deposition uniformity was slightly inferior. Based on the above pesticide applications, the addition of the adjuvant (FlyWin D) failed to effectively improve droplet deposition, with deposition efficiency actually decreasing in some treatments. It was also found that the XR nozzle produced smaller droplet sizes and higher average deposition density (19.63 drops/cm^2), while the IDK nozzle produced relatively larger droplets. Although it possessed anti-drift capabilities, its measured effective deposition was lower. Regarding corn yield after emergency control, statistical analysis showed that half of the treatments (six treatments) yielded higher than the blank control group (11 313.0 kg/hm^2). However, since the disease had progressed to the mid-to-late stages, affecting yield, only four treatments achieved normal yield levels (12 750.0 kg/hm^2). In summary, under the experimental conditions, the best deposition effect was achieved by using the pesticide PA without adjuvants and the XR nozzle. However, specific UAV spraying strategies, particularly pesticide selection, should consider actual yield outcomes. The two treatments (T6 and T8) using the pesticide DF achieved the highest yields despite not having the optimal droplet deposition effect.

Key words: corn curvularia leaf spot; plant protection UAV; droplet deposition; spray dosage form; nozzle

0　引言

寒地玉米是东北地区主要粮食、饲料和工业原料作物，在农业种植中具有十分重要的价值。但受玉米灰斑病、大斑病及茎腐病等病害影响，每年有10% ~15%的产量因病害而损失[1]。近年来，在进行主要病害情况调查时，发现辽宁省的局部地区出现了玉米弯孢菌叶斑病。该病发病后会导致玉米植株叶片上出现大小不等、中央苍白且边缘带有棕色条带的斑点，发病中后期玉米叶片整体变黄干枯。同时，该病具有发病快、传播广等特点，潜伏期弯孢菌以菌丝或分生孢子形式存在，湿润的玉米叶片会促进分生孢子的萌发和初浸染，并随着风雨进行传播快速扩展至邻近植株和田块，一个月内可随风扩展 250 m，从而导致玉米大面积减产[2]。受气候条件影响，该病主要分布于热带、亚热带国家和地区，而在东北等寒地地区的发病情况较少，对应的防治措施相对较为缺乏[3]。

对玉米弯孢菌叶斑病的主要防控措施包括抗病品种选育、生物防治以及化学防治。其中，抗病品种的选育虽被认为是未来最具潜力的控制手段，但现有品种普遍抗病性不佳，且多数仍处于试验阶段[4]；生物防治主要依靠植物内生菌、次生代谢产物或植物源活性产物抑制病原菌，具有安全性高、对病原菌抗药性风险低等优点。但现有研究大多停留在实验室阶段，与大规模应用尚存在一定差距[5-6]；化学防治为目前最有效的防控手段，市场上吡唑醚菌酯和丙环唑等对弯孢菌均能进行有效防治[7]。当前，化学防治多采用植保无人机进行，因其喷施效果好，作业效率高，已在中国、美国及日本等多个国家和地区得到广泛应用[8-11]。

近年来，植保无人机已广泛用于玉米等大田作物的日常管理及常见病虫害防治，并引起了众多学者的关注与研究[12]。如臧禹等[13]针对玉米螟防治，发现农药类型对玉米螟的防治具有显著差异，其中所筛选的最优药剂施药后 7 d 防效可达 72%。此外，在实际操作中，药剂的配伍方式对于无人机喷施后的药液沉积及药效也具有不同的影响。ZANG 等[14]发现在农药中添加 Po2 助剂后表面张力降低 37.41%，叶片覆盖率提高 100%，由此表明助剂会影响药液的理化性质进而影响喷施时雾滴的产生。而作为雾滴的起源，无人机喷头同样发挥着重要的作用，不仅影响雾滴的沉积特性更影响雾滴粒径。LIU 等[15]通过对比两种喷头之间的沉积差异，发现 XR110015VS 喷头相较于 XR11001VS 喷头在玉米喷施过程中具有更好的沉积密度和覆盖率，证实了不同型号喷头之间的表现存在差异。喷头同样决定着雾滴粒径分布特性[16]，姚伟祥等[17]针对植保无人机所适配的典型扇形喷头的雾化性能进行研究，发现喷头类型对喷雾羽流纵向雾滴粒径分布具有较大的影响，进一步验证了喷头研究的重要性。

目前，针对无人机玉米喷施的研究主要集中于

玉米各生长期所进行的常规管理过程,对于突发性病害爆发,尤其是在病害中后期叶片部分干枯变黄、性质发生改变后的喷施沉积效果的研究仍相对缺乏[18]。针对玉米病害的研究则多集中于常见病虫害早期防治,对于东北地区寒地玉米少见病害的应急防治的相关研究较少,尤其是缺乏实际使用杀菌药剂的研究[19]。此外,现有玉米病虫害防治研究多为单独的沉积效果或短期防治效果研究,缺乏沉积效果与最终产量测定相结合的系统性研究[20]。

基于前期研究成果及现有问题的分析,本研究优选 3 个典型影响因素作为研究变量,并结合测产结果开展防治效果调查。最终,以弯孢菌叶斑病爆发中后期的玉米为主要防治对象。探究无人机作业典型因素(药剂、助剂、喷头)对患病玉米冠层航空喷施的雾滴沉积效果;以产量为评价指标,评估无人机对玉米弯孢菌叶斑病(爆发中后期)的应急防治效果。

1 材料与方法

本研究由两部分组成:玉米喷施沉积试验和无人机作业防治效果试验。

1.1 试验场地与条件

试验地点位于辽宁省阜新市彰武县五峰镇大有亨村(42°17′20″N,122°22′40″E),如图 1a 所示。试验随机选取 13 块遭受弯孢菌叶斑病病害的玉米试验田(单块试验田平均面积约为 0.32 hm^2)。所用玉米品种为杂交种北育 288,属于耐密型品种,平均株距 33 cm,行距 56 cm,种植密度为 52 500 株/hm^2。据调查,在正常生长条件下,该品种的平均产量约为 12 750 kg/hm^2[21]。在试验期间,一台 Kestrel 5500 Link 微型气象站(Nielsen-Kellerman 公司,美国)放置于距离试验场地 20 m 的位置用于记录气象条件,数据采集间隔为 5 s。试验于 8 月底开展,试验时,气温为(31.0±1.4)℃,盛行风为西南风,风速集中于 1~2 m/s(图 1b)。由于试验前连续多日的降雨,环境相对湿度达到了(67.7±6.1)%。整体来看,试验期间气象条件较为稳定,适宜开展喷施作业。

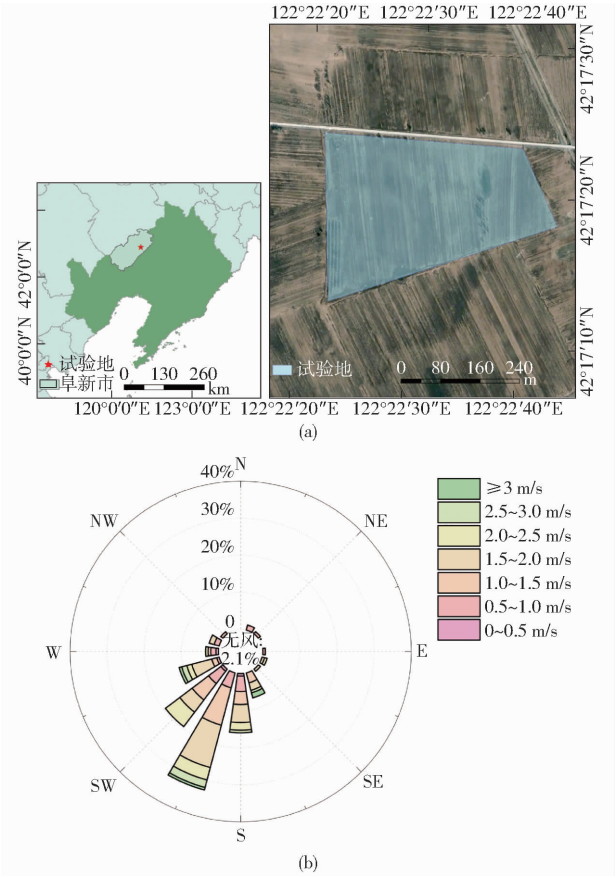


图 1 试验地及现场气象

Fig. 1 Test site and meteorological conditions

1.2 试验设计

1.2.1 喷施剂型

本次试验使用的 3 种药剂均为市售广谱杀菌剂,对于玉米弯孢菌具有较好的防治效果。具体包括:扬彩丙环唑嘧菌酯(先正达南通作物保护有限公司)、杜邦法砣杀菌剂(科迪华农业科技有限责任公司)以及中保颖收唑醚·戊唑醇(北京中保绿农科技集团有限公司)。飞防助剂为利飞 D(迈润斯(北京)农业科技发展有限公司)。各药剂和助剂详细信息见表 1。药剂扬彩丙环唑嘧菌酯、杜邦法砣杀菌剂、中保颖收唑醚·戊唑醇在下文分别简称为扬彩(PA)、法砣(DF)、中保颖收(PT)。

表 1 药剂和助剂相关参数

Tab. 1 Relevant parameters of pesticides and adjuvant

类别	商品名称	品牌	有效成分及含量	剂型	建议用量
杀菌剂	扬彩丙环唑嘧菌酯	先正达	11.7% 丙环唑+7% 嘧菌酯	悬乳剂	1 050 g/hm^2
	杜邦法砣杀菌剂	科迪华	12% 丙环唑+7% 啶氧菌酯	悬浮剂	1 050 g/hm^2
	中保颖收唑醚·戊唑醇	中保	30% 戊唑醇+10% 吡唑醚菌酯	悬浮剂	375 g/hm^2
助剂	利飞 D	迈润斯	植物油+有机硅	多功能聚合物水剂	1∶150(稀释体积比)

1.2.2 喷施设备

大疆 T20 植保无人机(深圳大疆创新科技有限公司)用于发病玉米喷施试验。该机型是一种广泛使用的商业植保无人机(图 2),配备完整的喷施系

统，包括水泵、导管、药箱和压力喷头等部件。8 个喷头方向朝下，分布在机身两侧，采用四通道电磁流量计确保各喷头喷洒效果一致。此外，本试验还选取了 2 种具有显著特征差异的航空喷头，即 XR80015（Spraying System 公司，美国）和 IDK90015（Lechler 公司，德国）。下文中，喷头 XR80015 简称 XR，属于加长型扁平扇形喷头；IDK90015 简称 IDK，属于空气诱导防飘喷头。



图 2　试验场景及大疆 T20 无人机

Fig. 2　Test scenario and DJI T20 UAV

1.2.3　试验方案

本研究主要围绕药剂类型、是否添加助剂和喷头类型对雾滴沉积的影响，以及病害爆发后应急防治对产量的影响展开。3 种药剂分别为扬彩（PA）、法砣（DF）和中保颖收（PT）。添加助剂和未添加助剂被设定为 2 种不同处理，所用助剂为利飞 D，体积配比浓度为 1∶150。为减少其他因素对试验结果的干扰，各个处理仅针对单一因素进行设置，每个处理重复 3 次，试验设置如表 2 所示。

表 2　各处理设置

Tab. 2　Settings of each treatment

处理编号	药剂	助剂	喷头型号
T1	扬彩	无	XR80015
T2		无	IDK90015
T3		利飞 D	XR80015
T4		利飞 D	IDK90015
T5	法砣	无	XR80015
T6		无	IDK90015
T7		利飞 D	XR80015
T8		利飞 D	IDK90015
T9	中保颖收	无	XR80015
T10		无	IDK90015
T11		利飞 D	XR80015
T12		利飞 D	IDK90015
CK			

本研究共设置了 13 个处理（T1 ~ T12，CK），分别对 3 种药剂、有无助剂和 2 种喷头进行组合（T1 ~ T12），同时设置空白处理（CK，无重复设置）仅进行产量测定。受限于试验体量及病害爆发防治的突发性等问题，本研究仅就一种助剂的添加进行了试验。

如图 3 所示，各处理单块试验田大约为 40 m × 80 m。为避免雾滴飘移影响试验结果，各处理田块四周均间隔设置了 10 m 的缓冲区域。试验时，T20 无人机沿着航线在试验田进行往复式飞行，航线间距 6 m。按照五点采样法随机选择 5 个采样点，在各采样点使用水敏纸（26 mm × 76 mm，先正达作物保护公司，瑞士）进行雾滴采集工作。为了分析药剂、助剂和喷头对雾滴沉积的影响，结合实际病虫害发生情况与防治经验[22]，在各个采样点的玉米冠层设置了上、中、下 3 层采样位置。因试验地植株均受到弯孢菌侵害，已无完全健康植株，故随机选取不同植株，其中上层采样位置为顶部第 2 片叶处，距离地面平均高度为 2.05 m；中层采样位置为棒尖苞叶处，距离地面平均高度为 1.35 m；下层采样位置为底部倒数第 2 片叶处，距离地面平均高度为 0.75 m。试验结束后，使用信封收集水敏纸，将信封进行干燥保存，用于后续数据处理。

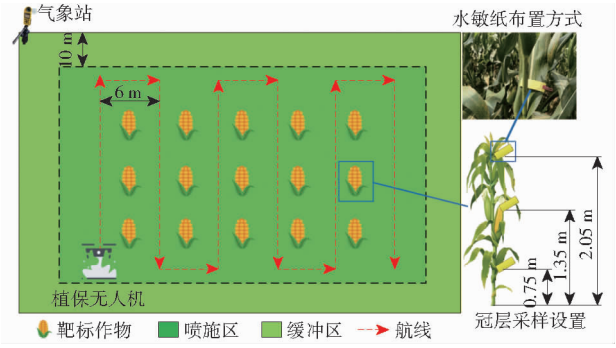


图 3　试验方案示意图

Fig. 3　Schematic of test program

1.3　数据处理

1.3.1　沉积量数据处理

收集到的水敏纸使用 Epson Perfection V19 扫描仪（爱普生（中国）有限公司）扫描成 600 dpi 的灰度图像。随后，使用图像处理软件 DepositScan 对水敏纸图像进行处理分析。DepositScan 是一种扫描程序，可以快速分析水敏纸等采样器上雾滴沉积分布，以用于计算沉积均匀性、穿透率和沉积水平。还可以计算雾滴覆盖率、雾滴沉积密度、雾滴粒径、雾滴分布跨度（Relative span，RS）等参数，以及用于表征雾滴尺寸的 3 个重要参数 $Dv_{0.1}$、$Dv_{0.5}$ 和 $Dv_{0.9}$，代表着 10%、50% 和 90% 的雾滴体积包含在该直径或小于该直径的雾滴中[23]。RS 是表示喷雾雾滴粒径谱均匀性的无量纲值。雾滴沉积的均匀性由变异系数（Coefficient of variation，CV）表征。CV 越小，表明雾滴沉积的均匀性越好。

为进一步详细描述完整航空喷施作业各粒径雾滴在测试区域分布情况，将雾滴粒径分为 0 ~ 100 μm、101 ~ 200 μm、201 ~ 300 μm、301 ~ 400 μm、401 ~ 500 μm、

501 ~ 600 μm 和 ≥601 μm 共 7 个粒径谱区间,并对区域内各采样点进行沉积密度统计。

1.3.2 玉米产量调查

由于玉米弯孢菌叶斑病发病突然且发展迅速,在试验开展时叶子病情已处于中后期阶段,施药后叶片已经难以恢复至正常状态,因此不再具备叶片病情评估的条件。综合考虑试验的可行性与防治效果的可量化性,以玉米产量作为评价指标,用于评估植保无人机施药后的防效表现。在玉米的成熟收获阶段,在各处理组及额外设立的对照组总计 13 块试验田进行了产量测定。各试验田中,划定了平均面积为 28.8 m^2 的测产小区。对于每个测产小区内的玉米,采用随机抽样的方法,选取了 5 个果穗作为样本,并对这 5 个果穗的总质量和脱粒后的质量分别进行了称量,出籽率计算公式为[24]

$$K = \frac{K_Z}{K_S} \times 100\% \tag{1}$$

式中 K——玉米出籽率,%

K_Z——5 个果穗籽粒质量,由人工脱粒称量,kg

K_S——5 个果穗质量,直接称量,kg

此外,还进一步对 13 块试验田的单位面积产量进行了测量。产量变化率计算公式为

$$Q = \frac{g - G}{G} \times 100\% \tag{2}$$

式中 Q——产量变化率,%

g——无人机施药处理组产量,kg

G——空白对照组产量,kg

本次试验所在地平均降雨量比常年同期偏多 7 成,超过夏季降水总量,往年未发生相关病害的爆发故未进行预防,环境及前期预防缺失是造成本次病害大规模爆发的关键因素。由于施药期间病害已在田间大面积爆发,为了更全面地评估无人机施药的效果,将试验田的产量数据与正常年份的产量进行了对比分析,以量化无人机施药对玉米保产效果的具体影响。

1.4 数据分析

使用 Excel(微软公司,美国)对采集到的所有试验数据进行整理,使用 Origin 2022(OriginLab 公司,美国)、Visio(微软公司,美国)对所分析的试验数据进行绘图。所有统计分析均使用 IBM SPSS Statistics 26(IBM 公司,美国)进行。针对总体沉积密度、覆盖率,由于样本数量大于 50,故在检验中使用柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫检验(Kolmogorov - Smirnov test, K - S)对数据进行正态性分析,针对分层沉积密度、覆盖率,由于样本数量小于 50,使用夏皮罗维尔克检验(Shapiro - Wilk, S - W)进行正态性分析后,发现总体和分层沉积密度、覆盖率均不符合正态分布。故使用克鲁斯卡尔沃利斯检验(Kruskal - Wallis, K - W)对不同药剂,不同喷头、是否添加助剂下的沉积密度、覆盖率进行检验。对于不同层位、喷头、药剂及助剂对雾滴 $Dv_{0.5}$ 和 RS 的影响,冠层位置被设为主体内因子,喷头、药剂和助剂被设为主体间因子。使用莫奇来球形度检验(Mauchly's Test of Sphericity)。所有检验及分析对差异显著的因素进一步进行事后比较,采用最小显著差异法(Least significant difference, LSD)进行多重比较。所有检验及分析中 $p < 0.05$ 被认为具有统计学意义。

2 结果

2.1 无人机航空喷施影响因素分析

2.1.1 药剂类型

图 4 展示了不同药剂在患病玉米冠层各层的沉积密度和覆盖率分布情况,分层分析结果表明,药剂扬彩在上、中、下层的沉积密度分别为 27.31、23.30、11.72 drops/cm^2;药剂法砣分别为 11.87、10.72、8.35 drops/cm^2;药剂中保颖收分别为 12.92、6.87、6.34 drops/cm^2。可以发现,药剂扬彩在冠层上层的沉积密度分别为药剂法砣的 2.30 倍和药剂中保颖收的 2.10 倍。3 种药剂的沉积密度分布均呈现由大到小为上层、中层、下层的规律,这可能与玉米冠层叶片的遮挡效应密切相关。进一步分析覆盖率可知,扬彩在上、中层的覆盖率分别为 4.07%(上层)和 3.50%(中层),均高于法砣(2.29%、2.62%)和中保颖收(2.68%、1.08%),但下层覆盖率略低于法砣。综合沉积密度与覆盖率结果可知,药剂扬彩在玉米冠层各层均能实现较高的雾滴沉积密度与覆盖效果,喷施效果优于药剂法砣和药剂中保颖收。相比之下,法砣与中保颖收虽沉积和覆盖较为均衡,但整体水平偏低,喷施效果相对较弱。

2.1.2 添加助剂

飞防助剂通常具有改善雾滴沉积与附着性能的作用。本试验结果表明,助剂的添加对雾滴沉积密度与覆盖率均产生了一定影响(图 5)。未添加助剂时,玉米冠层的上、中、下层平均沉积密度分别为 21.29、14.64、11.51 drops/cm^2;添加助剂后,分别下降至 13.44、12.61、6.08 drops/cm^2,降幅依次为 7.84、2.03、5.43 drops/cm^2。由图 5 可见,未添加助剂组上层沉积密度分布左偏,中位数接近 Q1;而添加助剂后各层数据分布更集中、异常值减少,说明药

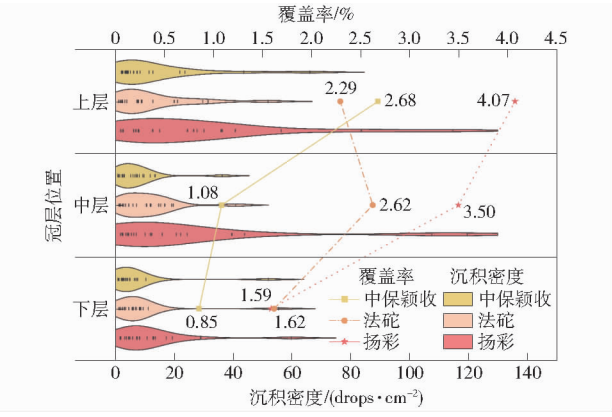


图 4　3 种药剂在各层的沉积密度及覆盖率

Fig. 4　Deposition density and coverage of three pesticides in each layers

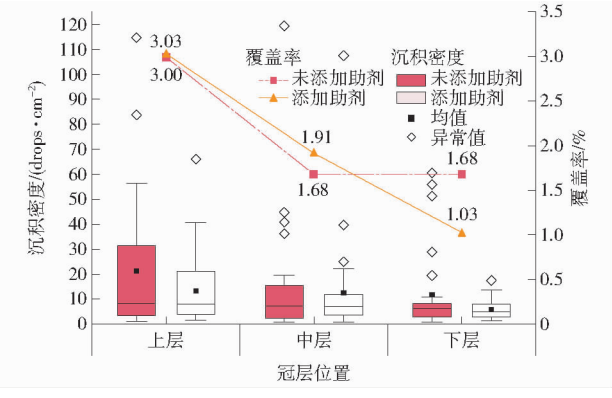


图 5　有无助剂的覆盖率及沉积密度

Fig. 5　Influence of adjuvant on coverage and deposition density

液在植株冠层中的分布更加均匀。从覆盖率变化来看，未添加助剂时玉米冠层上、中、下层的叶片覆盖率分别为 3.00%、1.68% 和 1.68%；添加助剂后分别变为 3.03%、1.91% 和 1.03%。其中，上层和中层覆盖率略有提升（分别增加 0.03% 和 0.23%），但下层覆盖率明显下降（降低 0.65%）。总体而言，在本试验条件下，助剂的使用未能显著提升雾滴在玉米冠层内的沉积效果，反而在一定程度上削弱了覆盖率的均匀性。

2.1.3　喷头类型

喷头是航空植保系统中影响喷施效果的关键部件，其雾化特性直接决定雾滴粒径及在作物冠层内的沉积分布特征。雾滴的沉积密度与覆盖率是评价喷头雾化性能的重要指标，直接影响喷施的均匀性与防治效果。本研究选取 XR80015 喷头作为普通扇形喷头代表，其产生的雾滴粒径较小、数量较多，喷雾分布较为均匀，沉积密度较高；同时选取 IDK90015 喷头作为防飘型喷头代表，该喷头具有防飘设计，能够产生粒径较大的雾滴，从而有效减少飘移并提高单滴覆盖能力。两种喷头在玉米植株上的沉积效果对比分析如表 3 所示。

表 3 结果显示，在各药剂与助剂处理下，IDK 喷头的沉积密度（2.69 ~ 9.65 drops/cm²）均低于 XR 喷头（10.83 ~ 41.03 drops/cm²）。其中，6 个处理组合中有 4 个处理组合（N/PA、N/DF、N/PT 和 Y/PA）测得 XR 喷头的沉积密度显著高于 IDK 喷头

表 3　各处理组的雾滴覆盖率、沉积密度分布

Tab. 3　Distribution of coverage, deposition density by each treatment

处理组合	覆盖率/%		沉积密度/(drops·cm⁻²)	
	XR80015	IDK90015	XR80015	IDK90015
N/PA	(3.04 ± 2.65)ᵃ	(2.11 ± 1.99)ᵃ	(41.03 ± 33.29)ᵃ	(8.73 ± 8.43)ᵇ
N/DF	(2.45 ± 2.27)ᵃ	(3.29 ± 2.69)ᵃ	(21.30 ± 16.89)ᵃ	(6.17 ± 3.88)ᵇ
N/PT	(1.74 ± 1.34)ᵃ	(1.21 ± 1.18)ᵃ	(14.96 ± 16.65)ᵃ	(2.69 ± 1.50)ᵇ
Y/PA	(2.42 ± 1.74)ᵃ	(3.34 ± 4.84)ᵃ	(17.15 ± 10.21)ᵃ	(9.65 ± 11.99)ᵇ
Y/DF	(1.36 ± 0.74)ᵃ	(1.60 ± 1.29)ᵃ	(10.83 ± 4.96)ᵃ	(2.93 ± 1.48)ᵃ
Y/PT	(0.98 ± 0.94)ᵃ	(2.22 ± 3.73)ᵃ	(12.48 ± 15.57)ᵃ	(4.70 ± 3.61)ᵃ

注：N 表示未添加助剂，Y 表示添加助剂；PA、DF、PT 分别为药剂扬彩丙环唑嘧菌酯、杜邦法砣杀菌剂、中保颖收唑醚·戊唑醇；覆盖率两列数值、沉积密度数据格式为均值 ± 标准差，两列数值同行数字后不同小写字母表示差异性显著。下同。

（$P<0.05$），仅处理组合 Y/DF 和 Y/PT 由于 XR 喷头的组内差异大而没有显著差异（$P>0.05$）。而覆盖率则未呈现一致规律，且各处理组合中两喷头覆盖率没有显著差异，覆盖率整体处于 0.98% ~ 3.34% 的范围内。

2.1.4　总体显著性分析

为进一步探究药剂、助剂及喷头类型对雾滴沉积效果的影响，对沉积密度和覆盖率进行了显著性分析，P 值如表 4 所示。

表 4　各作业参数对于沉积效果的显著性分析

Tab. 4　Significance analysis of various treatment parameters on deposition effect

因素	P	
	沉积密度	覆盖率
药剂	<0.001 ***	0.002 ***
助剂	0.472	0.312
喷头	<0.001 ***	0.927

注：取显著性水平 $\alpha=0.05$，*** 表示因素对试验结果有极显著影响。

表 4 结果表明,在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下,药剂类型对喷施沉积密度和覆盖率均具有极显著影响。喷头类型对沉积密度的影响亦极显著,但对覆盖率的影响不显著。此外,助剂的添加对沉积密度和覆盖率均未产生显著影响。

表 5 为整体沉积密度及覆盖率显著性分析结果。根据表 5 结果,药剂类型对玉米冠层内药液的沉积分布具有显著作用。总体来看,药剂扬彩在各层的雾滴沉积密度均极显著高于药剂法砣和药剂中保颖收。其平均沉积密度为 20.77 drops/cm^2,分别比药剂法砣和药剂中保颖收高出 10.46 drops/cm^2 和 12.06 drops/cm^2。在覆盖率方面,药剂扬彩的平均覆盖率最高为 2.63%,其次为药剂法砣的 2.05%,而药剂中保颖收最低,为 1.48%。

表 5 各影响因素下沉积密度及覆盖率均值

Tab.5 Average deposition density and coverage under each factor

评价参数	药剂			助剂		喷头类型	
	扬彩	法砣	中保颖收	未添加助剂	添加助剂	XR80015	IDK90015
沉积密度/(drops·cm^{-2})	(20.77±27.04)^a	(10.31±11.25)^b	(8.71±8.49)^b	(15.81±22.45)^a	(10.71±14.53)^a	(19.63±22.07)^a	(6.9±12.62)^b
沉积密度变异系数/%	130.15	109.12	142.46	141.97	135.63	112.46	182.93
覆盖率/%	(2.63±3.03)^a	(2.05±2.04)^b	(1.48±2.13)^b	(2.12±2.19)^a	(1.99±2.73)^a	(1.81±1.84)^a	(2.30±2.96)^a
覆盖率变异系数/%	115.17	99.54	143.26	103.52	137.32	101.66	128.70

注:各单独影响因素同行数字后不同小写字母表示差异性显著。

在喷头方面,XR 喷头的平均沉积密度为 19.63 drops/cm^2,显著高于 IDK 喷头的 6.90 drops/cm^2,约为其 2.85 倍;平均覆盖率分别为 1.81%(XR 喷头)和 2.30%(IDK 喷头),虽存在差异但未达到显著水平。此外,IDK 喷头与 XR 喷头在沉积密度上的变异系数分别为 182.93% 和 112.46%,前者高出约 70.47%,表明 IDK 喷头的喷雾均匀性较差,尽管其覆盖率略高于 XR 喷头,但组内差异较大,未达到显著水平。

对于助剂方面,添加助剂后沉积密度平均下降了 5.10 drops/cm^2,说明助剂在一定程度上抑制了雾滴在叶片表面的沉积密度。在覆盖率方面,添加助剂后整体平均覆盖率下降了 0.13%,呈现轻微负效应。同时,覆盖率的变异系数由 103.52%(未添加助剂)升至 137.32%(添加助剂),提升了 33.80 个百分点,由此表明总体上助剂的加入在一定程度上降低了雾滴覆盖率的均匀性。

2.2 粒径

2.2.1 雾滴粒径谱

雾滴粒径是表征雾滴沉积效果的重要参数之一。为分析不同处理条件下的雾滴特性,对各处理的雾滴粒径分布进行了统计分析,结果如图 6 所示。

从各雾滴粒径谱区间雾滴数量的占比分布来看,各处理所产生的雾滴中,超过 50% 雾滴的粒径集中于 0 ~ 200 μm 的范围内,占比最小的是使用 IDK 喷头并添加助剂的处理 T8(51.4%,图 6e),占比最大的是使用 XR 喷头并添加助剂的处理 T11(80.0%,图 6c)。

总体而言,使用 IDK 喷头时(图 6d、6e、6f),0 ~ 200 μm 范围内雾滴占比相较 XR 喷头(图 6a、6b、6c)平均降低约 10 个百分点,由 69.4% 降至 59.4%。研究还发现,该规律在 201 ~ 300 μm 的范围具有同样表现,IDK 喷头占比为 14.4%,相较于 XR 喷头的 18.8% 降低 4.4 个百分点。在 301 ~ 400 μm 范围内,两种喷头的占比接近差异较小,IDK 喷头和 XR 喷头分别是 7.3% 和 7.6%,而在 401 μm 以上的各雾滴粒径谱区间内,IDK 喷头为 18.8%,而 XR 喷头仅占比为 4.2%,相差 14.6 个百分点。在 601 μm 以上的范围内,IDK 喷头的雾滴数量甚至呈现上升趋势。

不难发现,IDK 喷头作为防飘型喷头,在其他条件一致的情况下产生粒径更大的雾滴,这预示着其能够有效减少飘移。在助剂的影响方面,无助剂和有助剂处理在各粒径区间的雾滴数量分布差异较小。对于 0 ~ 200 μm 的粒径范围,无助剂处理的雾滴占比(64.13%)略低于有助剂处理(64.74%),说明助剂的使用对整体雾滴粒径影响有限,未显著改变雾滴的粒径分布特征。从药剂类型来看,3 种药剂在雾滴粒径分布上表现不同。其中,药剂扬彩(图 6a、6d)在 0 ~ 200 μm 范围内的雾滴占比最高(68.5%),其次为中保颖收(65.0%,图 6c、6f),最低为法砣(59.9%,图 6b、6e)。总体而言,药剂扬彩的物化性质促使喷施过程中倾向于形成相对更细的雾滴,而药剂法砣相反,促使形成粒径相对较大的雾滴。

进一步分析发现,对于 IDK 喷头,添加助剂后在 0 ~ 200 μm、201 ~ 300 μm、301 ~ 400 μm 和 >400 μm 这4 个粒径区间内的雾滴数量变化分别为 -0.2%、1.3%、-1.8% 和 0.7%;而 XR 喷头的

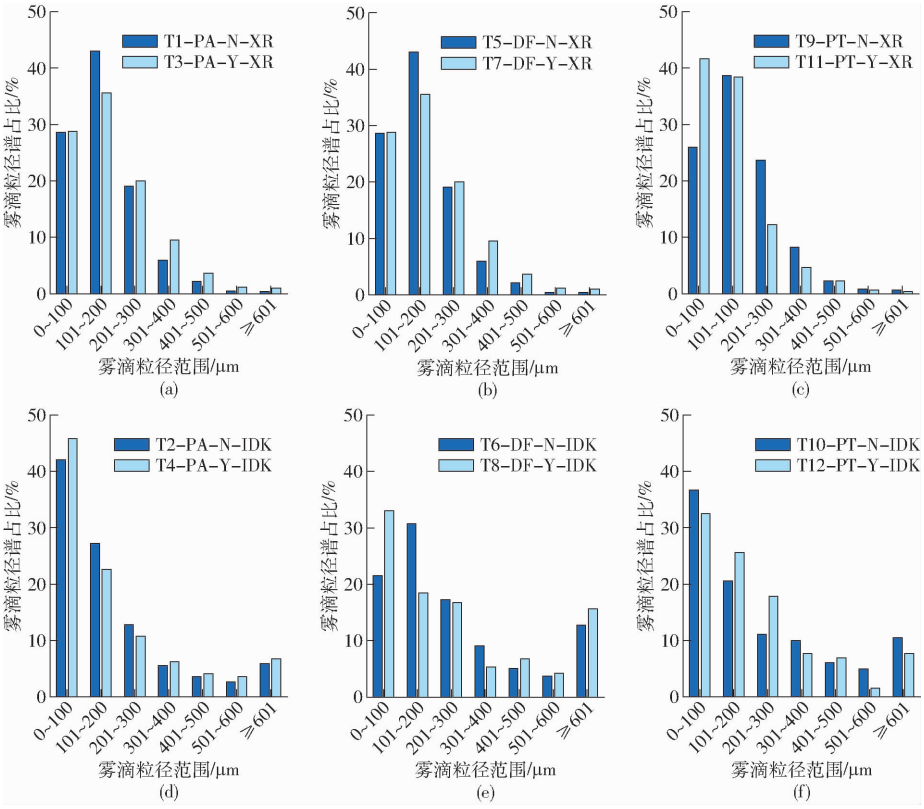


图 6　不同处理组的雾滴粒径谱

Fig. 6　Differences in droplet size spectrum between different treatment groups

变化分别为 1.4%、-3.9%、1.5% 和 1.0%。由此可见，添加助剂对两种喷头的雾滴粒径分布影响均较小，并未显著改变雾滴粒径及其在各区间的占比。不同药剂在助剂作用下的响应存在差异。药剂扬彩和法砣在添加助剂后，0 ~ 200 μm 范围内的雾滴数量占比下降了 0.8 ~ 7.3 个百分点；而药剂中保颖收则相反，添加助剂后该范围内的雾滴数量增加了 0.9% ~ 15.5%。这表明不同剂型药剂，在助剂作用下的雾化特性存在差异，助剂与药剂间的配伍性可能是影响雾滴粒径分布变化的关键因素。

2.2.2　$Dv_{0.5}$ 及 RS

不同喷头、药剂及助剂组合对雾滴粒径特征的影响如表 6 所示。雾滴中值直径（Dv0.5）分析结果表明，层位与喷头类型对 $Dv_{0.5}$ 影响显著，其中层位的显著性水平为 $P = 0.014$，喷头的显著性水平为 $P < 0.001$；而药剂和助剂处理对 $Dv_{0.5}$ 的影响均不显著（$P > 0.05$）。雾滴粒径跨度（RS）反映了喷雾雾滴粒径分布的均匀程度，研究发现仅喷头类型对 RS 的影响显著（$P = 0.038 < 0.05$），其余因素（层位、药剂及助剂）差异均不显著（$P = 0.230$，$P = 0.783$，$P = 0.970 > 0.05$）。

从不同层位来看，$Dv_{0.5}$ 由上层（553.0 μm）和中层（539.3 μm）向下层（451.0 μm）呈下降趋势，其中上、中层显著高于下层，表明雾滴在穿透冠层过程中粒径有所减小。这主要与雾滴在冠层穿透过程中受到叶片阻挡、分裂及蒸发损失有关，下层雾滴粒径较小说明其在冠层下部的穿透能力减弱。喷头类型对 $Dv_{0.5}$ 的影响极显著（$P < 0.001$）。IDK 喷头的平均 $Dv_{0.5}$ 为 662.8 μm，显著高于 XR 喷头的 366.0 μm，表明 IDK 喷头产生的雾滴粒径较大，而 XR 喷头产生的雾滴粒径较小。由于 IDK 喷头具有防飘移设计，喷出雾滴粒径偏大，有助于提高雾滴沉积密度；而 XR 喷头雾化性能较强，形成细雾较多，更有利于药液的扩散与覆盖。不同药剂（扬彩、法砣、中保颖收）及助剂处理间 $Dv_{0.5}$ 差异均不显著（$P > 0.05$），在相同喷头下，本研究涉及的药剂及助剂添加对雾

表 6　不同处理下的雾滴 $Dv_{0.5}$ 和 RS

Tab. 6　$Dv_{0.5}$ and RS under different treatments

类别		$Dv_{0.5}$/μm	雾滴粒径跨度
层位	上层	553.0^{a}	0.87^{a}
	中层	539.3^{a}	0.87^{a}
	下层	451.0^{b}	0.84^{a}
药剂	扬彩	496.5^{a}	0.89^{a}
	法砣	590.7^{a}	0.87^{a}
	中保颖收	456.1^{a}	0.83^{a}
助剂	无	531.2^{a}	0.88^{a}
	有	497.6^{a}	0.85^{a}
喷头类型	XR80015	366.0^{b}	0.93^{a}
	IDK90015	662.8^{a}	0.79^{b}

注：同列数字后不同小写字母表示差异显著。

滴粒径的影响相对较小。不同层位间 RS 均值相近(0.84 ~ 0.87),表明冠层上下各层雾滴分布均较均匀。从喷头类型来看,XR 喷头的 RS 值(0.93)显著高于 IDK 喷头(0.79),说明 XR 喷头产生的雾滴粒径分布更宽,雾滴大小差异更明显;而 IDK 喷头的雾滴分布更集中,雾化均匀性较好。这与两种喷头的雾化结构差异密切相关:XR 喷头为加长型扁平扇形喷头,雾滴受气流干扰较大;IDK 喷头则具防飘移气室,形成的雾滴较大,粒径分布集中。

2.3 产量测定

在玉米弯孢菌叶斑病病害爆发后,尽管进行了紧急药剂喷洒,但由于病害发展速度快且爆发面积大,产量仍受到影响,本次喷洒措施主要起到延缓病情发展的作用。

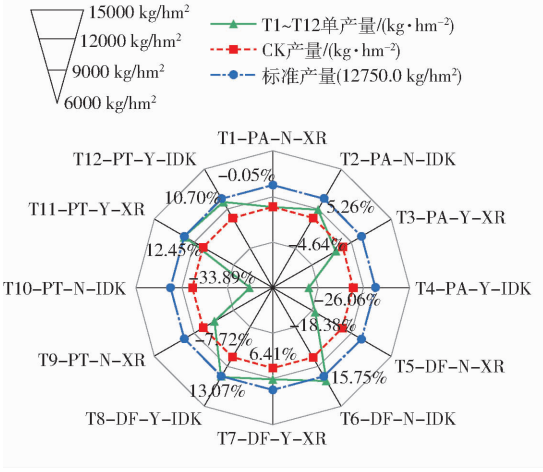
含水率是影响机械化收获效果的重要因素。玉米收获时,籽粒含水率仍处于较高水平(表 7),各处理整体的平均含水率为 28.6%。收获后,每个处理随机抽取 5 个果穗进行称量,测定 5 个果穗质量和 5 个果穗籽粒质量,并据此计算出籽率。T1 ~ T12 处理的平均出籽率为 81.77%,其中最高为处理 T4(83.87%),最低为处理 T7(79.27%)。该品种的正常出籽率为 88.5%,空白对照 CK 组在病害影响下的出籽率为 82.14%。施药后,仅处理 T4 和处理 T12 的出籽率高于空白对照组,其余处理未表现出明显的提升或改善。

表 7 含水率及出籽率

Tab.7 Moisture content and seed yield of corn

处理	含水率/%	K_S/kg	K_Z/kg	K/%
T1	29.8	1.76	1.40	79.55
T2	27.7	1.72	1.38	80.20
T3	28.0	1.48	1.20	81.08
T4	29.1	1.24	1.04	83.87
T5	28.4	1.34	1.08	80.60
T6	26.9	1.70	1.38	81.18
T7	28.3	1.64	1.30	79.27
T8	29.7	1.92	1.54	80.21
T9	27.5	1.48	1.20	81.08
T10	30.2	1.18	0.94	79.66
T11	28.0	1.56	1.24	79.49
T12	28.9	1.82	1.50	82.42
CK	29.2	1.68	1.38	82.14

最终测定各处理的单位面积产量如图 7 所示。结果显示,T2、T6、T7、T8、T11 及 T12 处理的产量(产量范围为 11 907.8 ~ 13 904.3 kg/hm^2)均高于空白对照 CK 组(11 313.0 kg/hm^2),产量变化率超出空白对照范围可达 5.26% ~ 15.75%,表明喷施防控措施对产量具有一定积极作用。然而,T2 及 T7 处理的产量仍未达到正常水平。相反,T3、T4、T5、T9 及 T10 处理的产量仅为 7 479.0 ~ 10 439.3 kg/hm^2,低于空白对照组 2.61% ~ 32.48%,说明喷施效果存在差异。总体来看,单产最高的处理为使用药剂法砣的 T6 处理和 T8 处理。



处理及设置	单产量/(kg·hm⁻²)
T1-PA-N-XR	11307.8
T2-PA-N-IDK	11907.8
T3-PA-Y-XR	10788.0
T4-PA-Y-IDK	8364.8
T5-DF-N-XR	9234.0
T6-DF-N-IDK	13094.3
T7-DF-Y-XR	12038.3
T8-DF-Y-IDK	12792.0
T9-PT-N-XR	10439.3
T10-PT-N-IDK	7479.0
T11-PT-Y-XR	12721.5
T12-PT-Y-IDK	12523.5
T13-CK	11313.0

图 7 各处理组试验后的产量

Fig.7 Output of each treatment after each test

3 讨论

无人机喷施过程中,沉积密度与覆盖率是评价喷施效果的重要指标,也是衡量药液沉积效果的关键依据。药剂的正确沉积是确保防治效果的前提。本研究利用控制变量法,就药剂剂型、喷头类型及是否添加助剂 3 类变量对无人机喷施效果影响进行了对照分析。结果表明,不同药剂剂型对于药液的沉积有着显著影响,可能是由于不同药剂本身的物化性质影响喷施时雾滴分散效果,在进行喷施时对产生的雾滴数量造成影响,进而影响雾滴沉积密度[25]。其中,药剂扬彩作为悬乳剂剂型具有较低表面张力[26],在喷施过程中可使液体雾化程度更高,产生更多雾滴,从而在玉米叶片表面形成较高的雾

滴沉积密度并高于其他两种药剂。药剂法砣和中保颖收均为悬浮剂剂型，表面张力较高，雾滴沉积密度整体较小，且各层间差异不明显[27]。根据各采样点的沉积密度，可能由于喷施设备压力波动等原因，造成各采样点间数据离散性较大，导致在上层沉积密度虽高于其他药剂，却存在雾滴分布不均匀的现象。

助剂主要为表面活性剂，在本研究中使用的是飞防专用助剂利飞 D 作为添加用助剂，主要成分为植物油和有机硅，两种不同的成分均会对药液物化性质产生影响[14]。在无人机喷施过程中对药液的物化性质的改变一般会影响无人机喷施效果，但在本研究中添加助剂后的沉积效果没有明显的提升和改善[28]，甚至部分处理的雾滴沉积表现相较于未添加助剂发生了下降，这与一般的研究结果存在差异，其中可能存在着包括水敏纸布置位置的影响、环境因素、冠层遮挡或者助剂和药剂间发生的拮抗作用等因素。差异的产生可能还存在多种原因，未来可进一步研究助剂对药液物化性质的影响，以及其对雾滴喷施效果的作用机制。

无人机在使用压力喷头进行喷施时首先形成扇形液膜，于破裂区经过不规则撕裂，最终形成雾滴[29]。不同喷头为喷施需求设计了多种结构，XR 作为加长型扁平扇形喷头在无人机喷施过程中形成扇形喷雾区域，并且能产生较为细小的雾滴颗粒，而 IDK 是专门设计的空气诱导型防飘喷头[30]，在设计上增加了空气室，使药液与空气混合形成小型气泡结构，进而在后续雾滴形成区域提高雾滴粒径，产生中等大小雾滴颗粒，减少飘移。在本研究中，由于喷施量未改变，IDK 喷施后部分处理的覆盖率虽然高于 XR 喷头，但整体结果并不显著，而产生更大的雾滴整体雾滴数量就会减少，IDK 喷头的沉积密度显著低于 XR 喷头产生的沉积密度。

植保无人机在玉米这种密植高秆作物的施药过程中，由于其复杂的冠层结构，药液在冠层间的有效沉积较低，进一步限制了雾滴的穿透性，难以在植株下层形成良好的沉积效果[22]。总体来看，层位与喷头是影响雾滴粒径特性的主要因素，这一结论与已有研究结果一致[31]，层位差异表明玉米冠层结构对雾滴穿透与沉积过程具有明显影响，上层和中层显著高于下层；喷头差异则体现了雾化性能对雾滴粒径及分布均匀性的主导作用。相比之下，药剂类型与助剂添加对雾滴特性影响不显著，说明在相同喷施条件下，喷头选择对喷施效果的影响远大于药剂物理性质的差异。因此，未来应针对无人机喷施进行技术优化，包括采用能够产生更多雾滴的离心喷头、适当增加施药量及改善喷头布局，以提升药液在玉米冠层的穿透性和沉积均匀度，从而实现更高效的病虫害防治效果。

产量方面，本试验是病害发生后的紧急防治措施，在玉米弯孢菌叶斑病病害爆发前，试验区域曾遭受大面积的水灾。且本研究试验在 13:00—15:00 时间段进行，该时段试验地仍较为潮湿，平均相对湿度达到了 67%，这也可能为玉米弯孢菌叶斑病的大面积快速爆发和传播提供了有利条件。由于病害的快速爆发，错过了病害初期的最佳控制时机，在进行空中无人机药剂喷洒防治期间，大量病斑已经在部分玉米植株的叶片上扩展蔓延，杀菌剂难以修复已受损的叶组织，部分区域出现了明显的产量下降。根据相关研究，病害爆发后期作物受到的损失在进行处理后无法恢复正常水平[32]。因此，本试验中超过一半处理低于该品种的标准产量，但 12 个处理中有 6 个处理后产量高于空白对照组，证明了当发生恶劣天气后，无人机可以快速进入受灾场地，进行紧急喷施作业并起到一定防控作用。

在具体防治效果上，由于叶片均发生病害且受损部位已无法恢复，常规药效检测方法已无法实施。通过调查，在本次试验进行的试验田土地状况相对一致，前期包括播种施肥等的管理中也均保持一致，故对产量影响的结果虽无法完全归因于药剂效果，但对于药剂的防治效果仍能进行一个相对客观的表征。使用药剂法砣的 4 个处理中的 2 个处理（T6 和 T8）位于单产排名第 1 位和第 2 位，但是在对沉积效果进行分析时显著低于使用药剂扬彩，这可能是由于丙环唑和啶氧菌酯的搭配后效果要高于同嘧菌酯的搭配效果。单产排名第 3 位的是使用药剂中保颖收的处理（T11），产量结果排名前 3 位的均为使用悬浮剂剂型的处理，这可能是由于悬浮剂具有更好的滞留性。此外，也存在药剂扬彩沉积效果过佳导致轻微药害的可能性，这些因素的具体作用机制值得在后续研究中进一步探讨。

4　结论

（1）当无人机使用不同药液时，药液性质对于喷施会造成影响，药剂剂型为悬乳剂药剂扬彩的雾滴沉积效果要高于悬浮剂药剂法砣和中保颖收，但在添加助剂后雾滴的沉积效果不一定能显著提升（$P = 0.472 > 0.05$）。

（2）喷头类型对于沉积效果有极显著（$P < 0.001$）的影响，XR 喷头相较于 IDK 喷头产生更多的雾滴，有着更好的沉积密度表现和更低的雾滴粒径。当风速等气象条件影响较小时可以考虑使用普通扇形喷头，能有效提高覆盖均匀性和避免药液聚

集带来的药害风险。

(3)雾滴沉积效果与实际防效之间存在一定差异,即沉积效果好并非必然对应最高的产量。在实际喷施管理中,应综合考虑病害发生程度、分布规律及药剂特性,科学选择针对性药剂,以优化防控效果并提高药液利用效率。

参 考 文 献

[1] 梁兵兵,王丽娟,康丽晶,等. 东北春玉米成熟期主要病害发生情况调查[J]. 中国植保导刊, 2025, 45(7):31 - 36.
LIANG Bingbing, WANG Lijuan, KANG Lijing, et al. Investigation on the occurrence of major diseases during the maturity stage of spring corn in Northeast China[J]. China Plant Protection, 2025, 45(7):31 - 36. (in Chinese)

[2] WANG Shaoqing, LU Zhixiang, LANG Bo, et al. Curvularia lunata and curvularia leaf spot of maize in China[J]. ACS Omega, 2022, 7(51):47462 - 47470.

[3] MANZAR N, KASHYAP A S, SHARMA P K, et al. First report of leaf spot of maize caused by curvularia geniculata in India[J]. Plant Disease, 2021, 105(12):4155.

[4] 曾庆东,吴建辉,刘胜杰,等. 我国主要粮食作物抗病性及病害绿色防控[J]. 植物保护, 2025,51(5):74 - 86,130.
ZENG Qingdong, WU Jianhui, LIU Shengjie, et al. Disease resistance and eco-friendly control of major food crops in China[J]. Plant Protection, 2025, 51(5):74 - 86,130. (in Chinese)

[5] 王欢,刘彦群,董辉,等. 昆虫病原线虫共生菌对玉米弯孢菌的抑菌活性及其抗逆性[J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 42(3):325 - 328.
WANG Huan, LIU Yanqun, DONG Hui, et al. Antibiotic activities of the entomopathogenic nematodes bacteria to curvularia lunata waker and the adversity resistance[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2011, 42(3):325 - 328. (in Chinese)

[6] MOURÃO D S C, PEREIRA T F S, SOUZA D J, et al. Essential oil of cymbopogon citratus on the control of the curvularia leaf spot disease on maize[J]. Medicines, 2017, 4(3):62.

[7] HAO Junjie, ZHU Weiling, LI Yongqiang, et al. Efficacy and profitability of fungicide use to manage curvularia leaf spot of maize[J]. Crop Protection, 2020, 132:105126.

[8] 张智泓,曾荣壕,赖庆辉,等. 小型植保无人机下洗气流场影响雾滴运动特性规律研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9):208 - 216,226.
ZHANG Zhihong, ZENG Ronghao, LAI Qinghui, et al. Investigation of effects of downwash airflow field on droplet motion characteristics of small plant protection unmanned aerial vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9):208 - 216,226. (in Chinese)

[9] GAO Jinye, BO Ping, LAN Yubin, et al. Study on droplet deposition characteristics and application of small and medium crown garden plants sprayed by UAV sprayer[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15:1343793.

[10] PRAVEEN K R M, SAQIB H, MAMOUN A, et al. Unmanned aerial vehicles in smart agriculture: applications, requirements, and challenges[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(16): 17608 - 17619.

[11] KHARIM M N A, WAYAYOK A, SHARIFF A R M, et al. Droplet deposition density of organic liquid fertilizer at low altitude UAV aerial spraying in rice cultivation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 167: 105045.

[12] YAN Yongwei, SONG Fa, SUN Jiyu. The application of UAV technology in maize crop protection strategies: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 237:110679.

[13] 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 Yu, GU Xiuyan, LIN Shuqing, 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. (in Chinese)

[14] ZANG Yu, ZHOU Zhiyan, ZANG Ying, et al. Optimization of aviation adjuvants based on wettability analysis for insecticide application on maize using UAV[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(5):11 - 18.

[15] LIU Ying, LIANG Xiao, WU Chunling, et al. Optimization of spray operation parameters of unmanned aerial vehicle confers adequate levels of control of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*)[J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16: 1581367.

[16] 刘雪美,马旻睿,侯献伟,等. 气液两相流喷头研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2025, 56(6):296 - 318.
LIU Xuemei, MA Minrui, HOU Xianwei, et al. Research progress and trend analysis of gas-liquid twin-fluid nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6):296 - 318. (in Chinese)

[17] 姚伟祥,王明亮,刘益含,等. 基于激光测量的典型扇形航空喷头喷雾羽流雾滴粒径空间分布研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2023, 54(3):305 - 317.
YAO Weixiang, WANG Mingliang, LIU Yihan, et al. Study on spatial distribution of droplet size of a typical fan-shaped aerial nozzle spray plume based on laser measurements[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2023, 54(3):305 - 317. (in Chinese)

[18] ZHAN Yilong, CHEN Pengchao, XU Weicheng, et al. Influence of the downwash airflow distribution characteristics of a plant

protection UAV on spray deposit distribution[J]. Biosystems Engineering, 2022, 216:32 – 45.

[19] 亓文哲,王菲菲,孟臻,等.我国植保无人机应用现状[J]. 农药, 2018, 57(4):247 – 254.
QI Wenzhe, WANG Feifei, MENG Zhen, et al. Application status of unmanned aerial vehicle for plant protection in China [J]. Agrochemicals, 2018, 57(4):247 – 254. (in Chinese)

[20] 许童羽,于丰华,曹英丽,等.粳稻多旋翼植保无人机雾滴沉积垂直分布研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10):101 – 107.
XU Tongyu, YU Fenghua, CAO Yingli, et al. Vertical distribution of spray droplet deposition of plant protection multi rotor UAV for japonica rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10):101 – 107. (in Chinese)

[21] 张伟.玉米新品种北育 288 的高产栽培技术[J]. 农业科技通讯, 2011(7):147 – 148.
ZHANG Wei. High-yield cultivation techniques for the new corn variety beiyu 288[J]. Agricultural Science and Technology Communication, 2011(7):147 – 148. (in Chinese)

[22] 郭爽,兰玉彬,许童羽,等.寒地玉米植保无人机航空施药雾滴沉积效果研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2021, 52(4):451 – 459,382.
GUO Shuang, LAN Yubin, XU Tongyu, et al. Droplet deposition effectiveness of plant protection UAV aerial application on corn in cold region[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2021, 52(4):451 – 459,382. (in Chinese)

[23] YU Ziqi, LI Mingyang, XING Boli, et al. Aerial spray droplet deposition determination based on fluorescence correction: exploring the combination of a chemical colorant and water-sensitive paper[J]. Agriculture, 2025, 15(9): 931.

[24] 詹鹏麟,张扬,林建新,等.3 个优质甜玉米品种幼苗及田间耐寒性分析[J]. 福建农业学报, 2024, 39(3):243 – 250.
ZHAN Penglin, ZHANG Yang, LIN Jianxin, et al. The cold tolerance analysis of three sweet maize cultivars in seedlings and field[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2024, 39(3):243 – 250. (in Chinese)

[25] 王一庚.防控玉米南方锈病高效药剂筛选及防病机理初探[D]. 泰安:山东农业大学, 2025.
WANG Yigeng. Screening of high-efficiency fungicides against southern corn rust and preliminary study on its mechanism[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2025. (in Chinese)

[26] 闫欣欣,沈娜,刘俊志,等.22% 丙硫菌唑·寡聚酸碘悬乳剂的研制及其对小麦白粉病的防治效果[J]. 农药, 2023, 62(4):252 – 255,262.
YAN Xinxin, SHEN Na, LIU Junzhi, et al. Preparation of prothioconazole·iodine oligosaccharideacids 22% suspo-emulsion and its control efficiency on wheat powdery mildew[J]. Agrochemicals, 2023, 62(4):252 – 255,262. (in Chinese)

[27] 张贵森,靳茸雁,任家科,等.功能助剂对噻虫·高氯氟药液物理性状的影响及对苹果黄蚜防效的增效作用[J]. 植物保护学报, 2025, 52(3):754 – 762
ZHANG Guisen, JIN Rongyan, REN Jiake, et al. Effects of functional adjuvants on the physicochemical properties of thiamethoxam·lambda-cyhalothrin formulation and their synergistic activity against spirea aphid aphis spiraecola[J]. Journal of Plant Protection, 2025, 52(3):754 – 762. (in Chinese)

[28] MICHAIL S, DAINIUS S, AURELIJA K, et al. Optimizing UAV spraying for sustainability: different system spray drift control and adjuvant performance[J]. Sustainability, 2025, 17(5):2083.

[29] 谢晨,何雄奎,宋坚利,等.两类扇形雾喷头雾化过程比较研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5):25 – 30.
XIE Chen, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Comparative research of two kinds of flat fan nozzle atomization process[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(5):25 – 30. (in Chinese)

[30] GUO Shuang, YAO Weixiang, XU Tongyu, et al. Assessing the application of spot spray in nanguo pear orchards: effect of nozzle type, spray volume rate and adjuvant[J]. Pest Management Science, 2022, 78(8):3564 – 3575.

[31] 刘立超,孙可可,张千伟,等.玉米植保无人机热雾喷施系统设计与雾滴分布特性试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12):80 – 88.
LIU Lichao, SUN Keke, ZHANG Qianwei, et al. Thermal spray system design and droplet distribution characteristics test of maize plant protection UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12):80 – 88. (in Chinese)

[32] YAO Weixiang, GUO Shuang, WANG Juan, et al. Droplet deposition and pest control efficacy on pine trees from aerial application[J]. Pest Management Science, 2022, 78(8):3324 – 3336.