植保无人飞机低空低容量喷雾技术应用与展望

袁会珠[1]， 薛新宇[2]， 闫晓静[1]， 秦维彩[2]，
孔 肖[1]， 周洋洋[1]， 王 明[1]， 高赛超[1]

（1. 中国农业科学院植物保护研究所，北京 100193；2. 农业农村部南京农业机械化研究所，南京 210014）

摘要 近十年来，我国植保无人飞机迅猛发展，应用的农作物范围越来越广，不仅在水稻、小麦、玉米等主要粮食作物得到了应用，在橡胶、槟榔等高大植株的病虫害防治中更有其独特优势，已经初步形成了我国植保无人飞机低空低容量喷雾的喷头配置、配套药剂、飞防助剂、作业参数等技术体系，对于重要农作物病虫害如稻纵卷叶螟、水稻纹枯病、小麦蚜虫、玉米黏虫等防治效果均在 80%以上，在各地病虫害防控中发挥了重要作用。但是，植保无人飞机喷雾作业过程中，还存在炸机或失控、雾滴飘移药害、药液分层结块、防治效果不稳定等问题。通过汇总分析植保无人飞机在重要病虫草害防治工作的成功经验和安全事故，本文提出植保无人飞机低容量喷雾技术将会得到更广泛的应用，植保无人飞机专用药剂和配套助剂、变量施药、多传感器数据融合、多机协同、精准施药、施药标准和规范等都将得到长足的发展，为现代农业和智慧农业发展提供技术支持。

关键词 植保无人飞机； 低容量喷雾； 防治效果； 安全风险； 应用与展望

中图分类号： S 252.3 **文献标识码**： A **DOI**： 10.16688/j.zwbh.2018307

Applications and prospects in the unmanned aerial system for low-altitude and low-volume spray in crop protection

YUAN Huizhu[1]， XUE Xinyu[2]， YAN Xiaojing[1]， QIN Weicai[2]，
KONG Xiao[1]， ZHOU Yangyang[1]， WANG Ming[1]， GAO Saichao[1]

（1. *Institute of Plant Protection*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Beijing* 100193, *China*;
2. *Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Nanjing* 210014, *China*）

Abstract Over the past ten years, the unmanned aerial system (UAS) for crop protection has been developing rapidly in China and has been used for more and more crops. It has been applied not only to primary food crops such as rice, wheat, corn and so on, but also to long-stalk plants such as rubber and areca for controlling diseases and insect pests. The low-volume application technology of UAS for crop protection has been initially formed in China such as nozzles setup, pesticide products, spray adjuvants, flight parameters. The control effects on diseases and insect pests, including rice leaf roller, rice sheath blight, wheat aphid and corn armyworm, are more than 80%. The UAS plays an important role in the control of diseases and insect pests in different provinces. However, during the spray application of UAS for crop protection, there are still some problems such as the UAS crash, phytotoxicity by droplet drifting, pesticide solution separation and precipitation, and control efficiency instability. Through summarizing and analyzing the successful experience and safety accidents of UAS for plant protection in the control of important diseases, pests and weeds, this paper proposes that the low-volume spray technology of UAS will be more widely applied and it will make great progress in the unmanned aerial vehicle (UAV) in terms of special agents and auxiliary agents, variable dosage, multisensor data fusion, multiple machine synergy, precise application, pesticide product standard and so on. It will provide technical support for the development of modern agriculture and intelligent agriculture.

Key words unmanned aerial system (UAS) for crop protection; low-volume spray; control effect; risk; application and prospect

收稿日期： 2018-07-12 **修订日期**： 2018-09-17
基金项目： 国家重点研发计划(2016YFD0200703)
联系方式 E-mail:hzhyuan@ippcaas.cn

化学防治能够快速控制病虫草害,在可预见的历史时期内,施用农药仍将是农业生产中防病治虫的重要技术措施。“工欲善其事,必先利其器”,传统的人工背负植保机械喷雾作业效率低、劳动强度大,无法满足现代农业生产的需要;现代的植保装备可以显著提高农药利用率,减轻农民的劳动强度,提高工作效率,是现代农业生产的保障。

农用航空植保最早开始于 1911 年德国人提出的用飞机喷洒农药控制森林害虫的计划。1949 年美国开始研制专门用于农业的农用飞机,航空喷雾技术也有了很大的进步,从喷洒量大于 30 L/hm^2 的常规喷洒,发展到 5～30 L/hm^2 的低量喷洒,再到小于 5 L/hm^2 的超低量喷洒。1987 年,日本最先研制成功农用无人直升机,Yamaha 公司研制出载药量 20 kg 的喷药无人直升机 RMAX-50,经过 20 多年的发展,据 2015 年统计数据,日本已经拥有 2 799 架农用无人机,操作人员超过 1 万人,植保无人飞机广泛应用于水稻、森林等病虫害防治,已经成为日本最重要的植保技术措施。

我国航空植保始于 20 世纪 50 年代初期至 60 年代中期,1958 年,南昌飞机制造厂生产的运-5 投入使用,对我国农业航空的发展壮大做出了重大贡献。1963 年在小麦病虫草害的防治上开始采用航空植保作业。到了 20 世纪 90 年代出现了专门为轻型飞机如海燕等配套设计的农药喷洒设备,可广泛用于小麦、棉花等大田农作物的病虫害防治、化学除草、草原灭蝗、森林害虫防治以及喷洒植物生长调节剂、叶面施肥、棉花落叶剂等。

我国在“863”项目支持下,2008 年开始植保无人飞机在农业应用的科研工作,研制出我国第一架“Z-3N”型农用植保无人飞机,并在江苏省进行小规模试验。十年来,我国植保无人飞机迅猛发展,安阳全丰、深圳大疆、广州极飞、北京天途等一大批新型农业航空企业高歌猛进,植保无人飞机正式进入农业生产。2014 年开始,植保无人飞机开始纳入国家农机补贴试点,服务作业量剧增,大量投资开始涌入植保无人飞机市场,已经形成生产-销售-服务的产业链。2017 年,我国植保无人飞机保有量达到 13 340架,远超日本,成为世界第一,植保作业面积从 2013 年的不足 6.67 万 hm^2 增长到 2017 年超过 467 万 hm^2 次,农用无人飞机生产企业从 2010 年的不足 10 家增至 2017 年的 260 余家。植保无人飞机产品按照动力类型分为油动、电动、油电混合三种,其中电动的又分为电动六旋翼、电动八旋翼、电动异形等多种类型;按有效载药液量可分为载荷 5、8、10、12、15、16、18、20、25、30、40 L 和 45 L,其中,70%的无人机载荷在 10 L 左右。植保无人飞机低容量喷雾防治农作物病虫草害已经成为推动统防统治和社会化服务的重要措施[1]。

1　植保无人飞机喷雾技术研究回顾

早在 2001 年,北京一家公司曾引进日本雅马哈公司生产的 RMAX 植保无人飞机,笔者当时应邀观看了该油动植保无人飞机在北京市昌平区的飞行喷雾演示,植保无人飞机开始引起国内科研部门的关注。2008 年,农业部南京农业机械化研究所承担了国家“863”项目,研制出我国第一架“Z-3N”型农用植保无人飞机,开始了我国植保无人飞机在农业应用的研究工作。2009 年至 2012 年,农业部南京农业机械化研究所、中国农业科学院植物保护研究所、中国农业大学等单位开始了植保无人飞机在水稻、小麦等作物上病虫害防治的试验探索,为我国植保无人飞机发展奠定了基础。自 2013 年开始,我国学术期刊开始发表有关植保无人飞机的研究论文。

1.1　植保无人飞机喷雾技术研究论文的时间和地域分析

植保无人飞机喷雾技术研究文献的发展随着无人机的发展开始出现。自 2013 年始,《植物保护》《植物保护学报》《作物杂志》等专业学术期刊先后发表了三篇植保无人飞机成功防治小麦吸浆虫、稻纵卷叶螟、小麦蚜虫的研究论文。从 2015 年起,我国植保无人飞机呈井喷式发展,相关研究文献及报道也逐年递增。从时间维度上看,笔者统计的相关文献中,2013－2015 年度平均每年有 2～3 篇报道,2016 年有 6 篇报道,到 2017 年则快速增加到 33 篇(图 1),呈现出相关研究文献的跨越式发展。从地域维度上看,植保无人飞机喷雾技术研究主要集中在新疆、江苏、江西、河南、安徽、广东等省份(图 1),与当地典型作物的分布密不可分,这些研究论文主要依托于当地大中院校及科研院所。

1.2　植保无人飞机喷雾技术研究文献涉及作物及病虫害分布

植保无人飞机喷雾技术研究主要集中在主粮作物。其中,水稻研究占 28.57%,小麦占 25.00%,玉

米占 10.71%，棉花作为我国主要的经济作物，相关研究也占据 19.64%。其他作物主要包括柑橘、辣椒、甘蔗、油菜等蔬菜、果树和糖料作物等；从防治对象看，目前研究多集中于水稻、棉花、小麦和玉米相关病虫害，涉及其常见典型病虫害，主要有稻飞虱、水稻纹枯病、稻纵卷叶螟、棉蚜、麦蚜、小麦赤霉病、玉米螟等，另外还用于喷洒棉花脱叶剂和麦田除草等（图 2）。

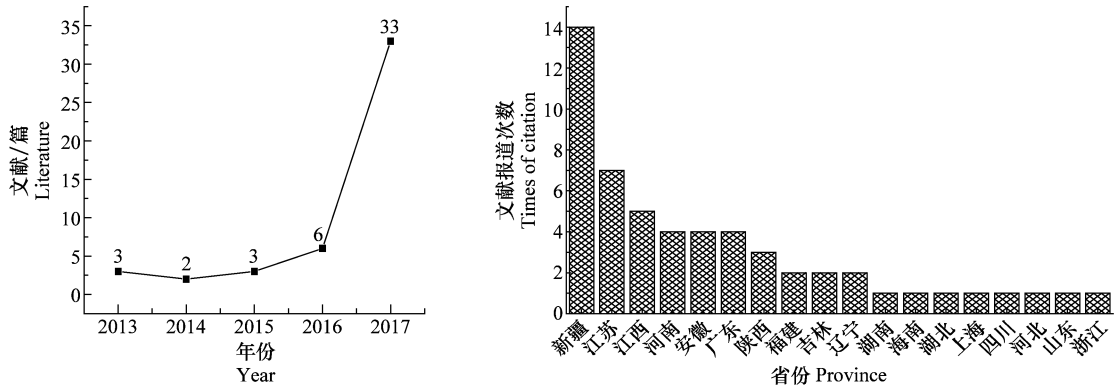


图 1 植保无人飞机喷雾技术研究文献发表时间和地域分布

Fig. 1 Published time and regions distribution of literatures about UAV spray technology

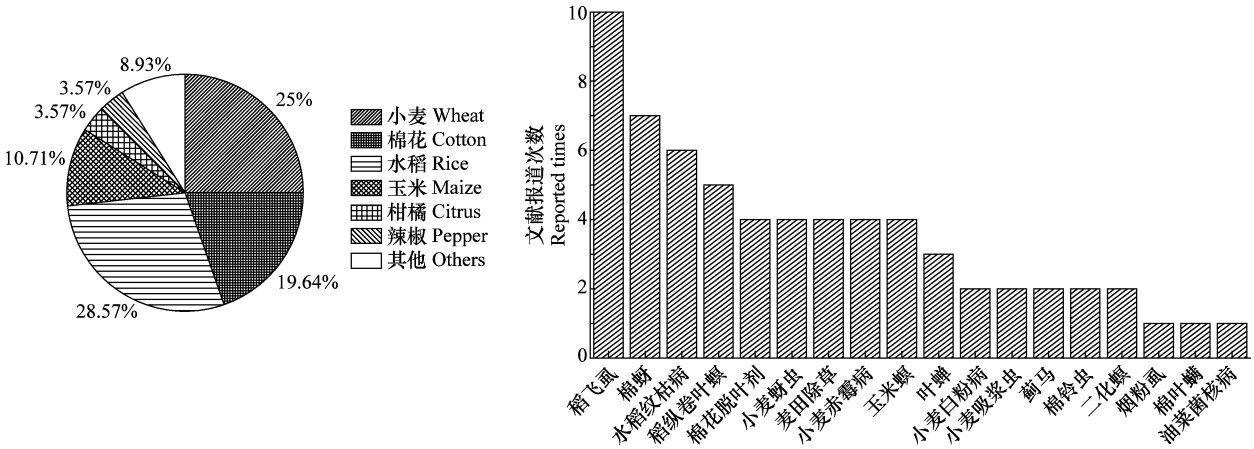


图 2 植保无人飞机喷雾技术研究文献涉及的作物和病虫害分布

Fig. 2 Crops and diseases and pests distribution in literatures about UAS spray technology

1.3 植保无人飞机喷雾技术研究用到的农药剂型分析

无人飞机植保作业的制剂要求环境友好、抗蒸发、抗飘移且对作物安全。目前登记的超低容量液剂仅有 12 种，田间无人飞机植保作业仍大量使用传统剂型。据统计发表的植保无人飞机研究论文，悬浮剂（SC）的使用比例最大，占 37.74%，乳油（EC）为 22.64%，水分散粒剂（WG）和可湿性粉剂（WP）分别占 13.21% 和 11.32%，超低容量液剂（UL）仅占 5.66%（图 3），其他剂型如水剂（AS）、微乳剂（ME）、水乳剂（EW）占 9.43%。从以上数据分析，植保无人飞机喷雾所使用的农药制剂以液态剂型（SC、EC）为主，固态剂型（WP 和 WG）较少。

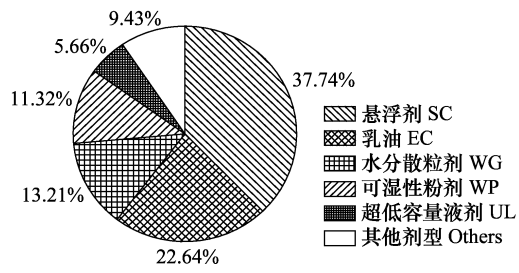


图 3 植保无人飞机低容量喷雾用到的农药剂型

Fig. 3 Pesticide formulations used in UAS low-volume spray for crop protection

1.4 植保无人飞机喷雾技术对不同病虫害的防治效果

前已述及，植保无人飞机的防治对象集中于主粮作物及棉花等作物的典型病虫害。其中，对水稻

病虫害如稻飞虱、稻纵卷叶螟、纹枯病、稻曲病等的防效在 80%～90%,对小麦病虫害如麦蚜、吸浆虫、白粉病、赤霉病的防效在 55%～85%,对玉米螟的防效在 80%左右,对棉蚜的综合防效可达 90%以上,对其他病虫害如蓟马、叶蝉、烟粉虱、烟蚜等防效同样可达 80%～90%。综合来看,应用无人机喷雾,基本可满足生产上病虫害的防治要求,取得较理想的防治效果,具有良好的应用基础和应用前景。

表 1　植保无人飞机喷雾技术对不同病虫害的防治效果

Table 1　The control effect using UAV spray technology

病虫害 Plant disease and pests	防治效果/% Control effect
稻飞虱 Rice plant hopper	91.0[2];85.6～94.2[3];81.9～87.7[4];74.0～92.0[5];84.1[6];81.8～88.7[7];76.7[8];96.9[9];86.9[10]
稻纵卷叶螟 Rice leaf folder	97.0[2];63.3[9];72.7[6];81.2[11]
水稻纹枯病 Rice sheath blight	91.2[2];84.2[12];89.1[6];78.0～86.0[7];73.4[8]
稻曲病 Rice false smut	83.5[6]
麦蚜 Wheat aphid	75.8～89.4[13];87.4～99.2[14];80.8～81.3[11]
小麦白粉病 Wheat powdery mildew	70.3[15]
小麦吸浆虫 Wheat blossom midge	81.6[16]
小麦赤霉病 Wheat scab	55.8～56.1[11]
麦田杂草 Wheat weed	98.0～100.0[17];79.9～80.9[11]
玉米螟 Corn borer	83.3[18];80.7[19];53.4～89.6[20];83.0[21]
棉蚜 Cotton aphid	69.3～93.6[22];96.3～97.1[23];97.5[24];89.7[25]
蓟马 Thrips	54.8～91.9[26];83.6[27]
叶蝉 Leafhopper	93.2[25];83.3～90.4[28]
烟粉虱 Tobacco whitefly	90.4[25]
烟蚜 Peach-potato aphid	79.5[29]

2　植保无人飞机飞行参数对防治效果的影响分析

植保无人飞机区别于地面植保机具的显著特征是具有旋翼,旋翼的存在使其比其他农用机械具有一定的优势。同时也令无人机在作业时附带有一种特殊参数——旋翼流场。植保无人飞机的旋翼下洗流场(以下简称旋翼流场)呈非常复杂的空间涡系分布,其作业参数和沉积规律与其他施药机械有很大区别。以衡量非靶标区雾滴沉积的关键指标——飘移缓冲区距离为例,地面植保机械的缓冲区距离在 10 m 至 30 m 之间[30-31],固定翼航空喷雾的缓冲区距离达 3 km[32],而旋翼无人机在 15 m 至 50 m 之间[33],差异显著。此外,旋翼无人机复杂的流场分布对其雾滴沉积分布有很大影响,有研究显示,单旋翼无人机两侧的雾滴沉积覆盖率相差超过 20%,雾滴沉积密度的变异系数超过 40%[34],比较而言,手动和机动喷雾机的雾滴沉积密度变异系数在 10%以下[35]。

近 30 年来,为提高固定翼航空和地面植保机械的喷雾施药效果,减少飘移,业内持续开发了 FSCBG、AGDISP 和 AgDRIFT 等雾滴沉积预测模型,取得了良好效果和广泛应用[36]。但目前有关植保旋翼无人机的沉积规律研究还不多,现有的模型不适用于其沉积预测,还有待更多的基础性研究[37]。

雾滴沉积特性(均匀性和穿透性)一直是施药技术研究领域的重要课题。国内外相关研究结果表明,农药雾滴的沉积特性受施药技术及装备、作物、环境等共同影响,具体影响因素主要包括:气象条件、叶面积指数、靶标作物冠层结构、雾滴群的特性(释放高度、释放速度、施药液量、雾滴粒径谱)等[38-45]。Diepenbrock 等指出植株叶片大小、叶倾角、披垂度及空间的排列形式等多方面性状,对作物冠层结构内的组成数量和分布质量产生影响,进而影响雾滴的穿透沉积[46]。宋坚利等研究发现改变雾滴的初速度会增加药液在水平靶标和垂直靶标上的沉积量[47]。在植保无人飞机喷洒中,研究较多的是不同机型飞行高度、飞行速度等因素对雾滴沉积和飘移的影响程度。邱白晶等在大田条件下,采用正交试验方法研究无人直升机不同飞行高度和飞行速度下的雾滴沉积分布规律,并建立了沉积浓度、沉积均匀性与飞行速度、飞行高度及两因素间交互作用的关系模型,该模型可以为喷雾作业参数优化提供参考[48]。陈盛德等在大田环境下,研究了单旋翼电动无人机喷施雾滴在水稻冠层沉积分布规律,结果显示,飞行高度和飞行速度对靶区内采集点上雾滴平均沉积量影响均显著,对雾滴沉积均匀性影响并不显著[49]。王昌陵等在大田环境下,研究了单旋翼油动无人机和多旋翼电动无人机在相同作业高度和作业速度下对雾滴在不同方向上的沉积分布比例,指出无人机下旋气流是影响雾滴沉积分布的重要因素[50]。王玲等利用风洞的可控多风速环境,研

究了航空喷嘴 PWM 占空比、喷孔直径、电动离心喷头转速等变量对雾滴沉积规律的影响，指出风速是影响雾滴沉积效果的最显著因素，其次是雾滴粒径[51]。何玲等研究了喷液量和助剂对植保无人飞机喷雾雾滴在水稻冠层沉积分布的影响，结果表明，添加助剂可以显著改变药液的理化性质，能有效地提高药液在水稻冠层的铺展，避免药液的流失，同时表明喷液量并不是越大越好，施药量为 13.5 L/hm^2 且添加 1.0%喷雾助剂时得到的农药利用率最高[52]。目前，植保无人飞机用于田间病虫害防治的新闻报道很多，已从原来的演示示范向真正的田间喷洒转变。喷洒参数与防治效果之间的相关性报道已逐渐增多，在已有的研究中，高圆圆等研究了小型植保无人飞机喷洒雾滴沉积分布规律以及对小麦吸浆虫的防治效果，试验结果表明，植保无人飞机喷药对于吸浆虫具有较为显著的效果[16]。薛新宇等以 N-3 型植保无人飞机为作业平台，开展了不同作业参数下稻飞虱和稻纵卷叶螟田间药效试验研究，指出与人工背负式施药作业相比，植保无人飞机作业效率可提高 60 倍、药液有效成分可减少 20%～30%[9]。Qin 等在大田环境下，针对水稻抽穗期稻飞虱初次应用了 HyB-15L 型农用无人直升机进行低空喷洒农药，在不同作业高度和不同作业速度条件下，对雾滴在水稻不同冠层的沉积分布状况和防治效果进行了研究和分析，并以地面常规机具担架式喷雾机的防治效果为对照，得出在一定范围内（高度 0.8～1.5 m，速度 3～5 m/s），随着喷洒高度和喷洒速度的增加，水稻下层的雾滴覆盖率也随之增加，多喷幅搭接时雾滴分布均匀性增加，重喷和漏喷现象明显减少；另外，喷洒高度对雾滴沉积分布的均匀性有较大的影响，喷洒速度对雾滴覆盖率有较大的影响，尤其是对水稻下层的覆盖率；最后指出，在对稻飞虱防治试验中，植保无人飞机喷洒防治稻飞虱的杀虫效果优于常担架式喷雾机施药效果，特别是在作业高度为 1.5 m、作业速度为 5 m/s 时，效果更为明显，并且施药 5 d、10 d 后仍能保持较高防治效果，说明低容量、高浓度喷洒方式能提高药剂的持效期[5]。

3 植保无人飞机喷雾技术存在的问题分析

植保无人飞机是一把“双刃剑”，随着植保无人飞机施药配套装备与技术的发展，植保无人飞机在农作物病虫害防治中高效、节水和节约劳动力的优势越发凸显。然而在无人机进行植保作业过程中还是存在一些问题，归纳为：

1）植保无人飞机产品质量参差不齐。一是部分植保无人飞机产品无标牌、无标识、无机壳，制造粗糙；二是飞行技术参数标准随意性大，跟实际使用时差距大；三是飞行姿态不稳、作业精度不够，满载飞行仍有炸机、失控现象；四是喷洒装置不合理，出现液泵吸不上药、喷雾断断续续，作业过程中药液泄漏，重喷、漏喷现象严重。

2）药剂选择无标准，安全风险高。植保无人飞机低空低容量喷雾，是一种高浓度药液喷雾方式，相比地面常规喷雾，安全风险高。植保无人飞机作业药剂应选择低毒或微毒农药，同时要兼顾其环境毒性。如水稻田或者近水源的农田要特别注意药剂对水生生物的毒性。2018 年 5 月，广西柳州多个县区遭遇大规模桑蚕不吐丝事故，虽然事故原因尚无定论，但还是提醒我们在航空喷雾作业技术中，需要考虑当地具体生产环境，例如在植保无人飞机飞防作业周边有养殖桑蚕、蜜蜂、或者水产等环境下，一定要选择对环境生物安全的药剂。

3）农药剂型选择不当，造成喷头堵塞、药剂结块或者不同剂型药剂混合过程出现破乳结块从而影响防治效果。植保无人飞机作业时，农户习惯于几种农药制剂混用，实现“一喷多防”的目的，但是，目前农业生产中使用的农药制剂，多是针对地面植保机械常规喷雾而研制的，其稀释倍数多在几百倍、甚至几千倍，在这样低浓度稀释体系下，几种农药制剂混用后，药液表现稳定；但是，植保无人飞机低容量喷雾技术的农药制剂的稀释倍数很低，几种制剂混用稀释后，容易出现分层、结块等问题。

4）农药雾滴飘移严重，药害风险大。植保无人飞机喷雾是一种低容量喷雾技术，与地面常规喷雾相比，雾滴更细，再加上无人机喷雾作业喷头距离作物冠层高度大，雾滴飘移风险明显增加。2016 年，湖南省益阳市某农户用植保无人飞机对所承包地块做灭生性除草处理，一周后，周边地块的莲藕、水稻均出现药害，引起一场诉讼官司。

5）喷雾均匀性差，影响防治效果。据测定，植保无人飞机喷雾作业时，农药雾滴在作物冠层沉积的纵向（飞行方向）变异系数高达 80%，横向变异系数高达 70%，与地面喷杆喷雾技术有明显差距，这

就导致其对病虫草害防治效果不稳定,虽然大部分用户已经认可了植保无人飞机喷雾的防治效果,但由于操作人员和天气原因,有少数用户对植保无人飞机喷雾的防治效果仍持怀疑态度。

6)飞行速度、高度和喷幅等飞行参数选择不当造成防治效果降低。多个试验研究表明,植保无人飞机飞行速度太快、或者飞行高度过高等都会影响防治效果,因此,飞手培训、作业标准和规范研究、作业质量监控等对于保证植保无人飞机低空低容量喷雾技术发展均非常重要。

4　植保无人飞机低容量喷雾技术的发展趋势

植保无人飞机以其高效、智能、防效好等优势越来越受到各方面的关注,农业农村部 2018 年 6 月 28 日再次表明:农业农村部将会同有关部门,进一步加大财政支持力度,强化技术研发,加快人才培养,为我国农业航空植保事业发展提供科技支撑,大规模推进农业航空植保统防统治服务作业。在政策引导、市场推动下,可以预期,我国植保无人飞机喷雾技术将会得到更广泛的应用。随着智慧农业的兴起,植保无人飞机低空低容量喷雾技术将实现如下突破:

4.1　配套专用药剂

植保无人飞机只是一种农药喷洒工具,必须有配套的药剂才可能有效防控农作物病虫草害。日本、韩国针对植保无人飞机低容量喷雾的特点,研制了适合的专用药剂,并且需要经过药效评价试验,获得登记许可后,才能进入大田应用。目前,我国植保无人飞机低容量喷雾所使用的农药均为地面常规喷雾研制生产,不完全适合植保无人飞机低容量喷雾技术要求。借鉴国外经验,我国应该逐步建立植保无人飞机施药专用药剂和制剂的选择准则及专用助剂的评价方法,选择低毒或微毒农药,同时要兼顾其环境毒性,以便做出正确选择(如水稻田或者近水源的农田要特别注意药剂对水生生物的毒性);同时,研发配伍性好、分散度高、耐蒸发的农药制剂或喷雾助剂,提高农药制剂配制药液的稳定性,有效减少植保无人飞机喷雾作业中雾滴飘移和雾滴萎缩,提高农药剂量传递效率。

4.2　变量喷施技术

变量喷施技术是实现精确航空施药的核心,现有的商业变量喷施技术(variable-rate technology, VRT)系统因成本高、操作困难,导致应用范围有限。需要一个经济的、面向用户的、并且可以处理空间分布信息的系统,仅在有病虫害的区域根据病虫害的严重程度喷施适量的农药量,实现农药的高效喷施以及将对环境的损害最小化。

4.3　多传感器数据融合

农业航空精准喷施系统成功的一个关键步骤在于创建用于航空施药的精准处方图。处方图需要利用地理信息技术(GIS),融合多传感器、多光谱、多时相、甚至多分辨率的数据来创建。不同数据类型之间的融合是难点,实现异构数据之间的融合需要以新的方法为基础,并通过地理信息技术(GIS)全面集成到农业航空精准喷施系统中。

4.4　多机协同技术

多机协同作业是以单架飞机作业为基础,组成包含多机的智能网络,网络中的每架飞机都需要能够针对任务进行整体协调,以便有效地覆盖一个大的区域同时在协作的过程中进行信息交互。随着互联网与大数据技术的进步,多机协同作业将在很大程度上节省劳动力成本和提高精准农业航空作业效率。

4.5　精准施药技术

研发无人机静电喷嘴、雾滴粒径和喷洒量可调的喷嘴等;完善植保无人飞机低空低量施药技术体系,并集成开发商品化的关键系统、部件;通过多学科的交叉,研究和熟化高精度导航定位技术、多传感器融合技术、多机协同技术、自动避障技术、仿地飞行控制技术等,为航空精准施药提供必要的辅助技术支撑。同时,开发新型的传感器、测试装置,研究新型检测方法等,以实现航空施药质量和效果快速有效检测和评价为目标,实现航空施药作业前指导、作业中监测、作业后评估,保证安全施药。

4.6　植保无人飞机施药标准与安全监管体系

根据我国现有植保无人飞机目前行业发展的技术水平以及发展趋势,尽快制定包括针对植保无人飞机本体的安全技术要求、针对施药环节的操作规范、针对植保无人飞机使用的监管方法,构建完善的标准与安全监管体系。

参考文献

[1]　中国植物保护学会. 2016 - 2017 植物保护学学科发展报告[M]. 北京:中国科学技术出版社,2018.

[2] 荀栋,张兢,何可佳,等. TH80-1 植保无人机施药对水稻主要病虫害的防治效果研究[J]. 湖南农业科学,2015(8):39-42.

[3] 张莉,李国清,娄兵,等. 极飞 P20 植保无人机防治稻飞虱田间药效试验[J]. 湖北植保,2018(2):9-10.

[4] 刘慧强,董雪娟,费朝品,等. 小型植保无人机施药防治稻飞虱的田间效果[J]. 中国植保导刊,2014,34(S1):45-46.

[5] QIN Weicai, QIU Baijing, XUE Xinyu, 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.

[6] 宁国云,许琴芳,柏超. 植保无人机施药防治水稻病虫害试验[J]. 浙江农业科学,2018(5):765-766.

[7] 卢小平,肖冬芽,甘贱根,等. 4 种施药器械对水稻基部病虫害的防效比较及经济效益分析[J]. 江西农业学报,2018,30(5):61-64.

[8] 张玉,王风良,郑玉涛,等. 新型药械与助剂结合在稻田农药减量控害中的应用初探[J]. 中国植保导刊,2017,37(6):73-75.

[9] 薛新宇,秦维彩,孙竹,等. N-3 型无人直升机施药方式对稻飞虱和稻纵卷叶螟防治效果的影响[J]. 植物保护学报,2013,40(3):273-278.

[10] 董雪娟,许中怀,刘慧强. 小型植保无人机在水稻全程病虫害防治中的应用[J]. 中国植保导刊,2014,34(S1):47-48.

[11] 韩彦会,张毅. 航空施药器械防治小麦病虫草害防效研究[J]. 陕西农业科学,2017,63(2):38-39.

[12] 兰波,刘方义,徐善忠,等. 植保无人机超低容量喷施技术防治水稻纹枯病的药效评价[J]. 江西农业学报,2017,29(11):55-58.

[13] 蒙艳华,兰玉彬,李继宇,等. 单旋翼油动植保无人机防治小麦蚜虫参数优选[J]. 中国植保导刊,2017,37(12):66-71.

[14] 张龙,陈树茂,马金龙,等. 多旋翼植保无人机在小麦田的雾滴分布及对小麦蚜虫的防治效果初探[J]. 农药科学与管理,2018,39(2):46-52.

[15] 郑广永,孙晓计,李寿义,等. 小麦后期减量控害不同植保器械施药效果研究[J]. 河北农业,2017(3):35-36.

[16] 高圆圆,张玉涛,张宁,等. 小型无人机低空喷洒在小麦田的雾滴沉积分布及对小麦吸浆虫的防治效果初探[J]. 作物杂志,2013(2):139-142.

[17] 朱德慧. 植保无人机在麦田化学除草上的应用效果试验[J]. 安徽农学通报,2016,22(12):74-75.

[18] 杨帅,王国宾,杨代斌,等. 无人机低空喷施苯氧威防治亚洲玉米螟初探[J]. 中国植保导刊,2015,35(2):59-62.

[19] 高圆圆,张玉涛,赵西城,等. 小型无人机低空喷洒在玉米田的雾滴沉积分布及对玉米螟的防治效果初探[J]. 植物保护,2013,39(2):152-157.

[20] 丁新华,王娜,王小武,等. 小型无人机超低量喷雾防治玉米螟田间药效评价[J]. 新疆农业科学,2017,54(3):479-488.

[21] 邵统响,夏中卫,魏颖,等. 无人机防治鲜食玉米灌浆期病虫害效果初探[J]. 现代农药,2018,17(2):51-53.

[22] 沙帅帅,王喆,肖海兵,等. P20 植保无人机作业参数优化及其施药对棉蚜防效评价[J]. 中国棉花,2018,45(1):6-8.

[23] 赵冰梅,张强,朱玉永,等. 多旋翼植保无人机在棉蚜防治中的应用效果[J]. 中国植保导刊,2017,37(2):61-63.

[24] 安楠. 植保无人机飞防棉花蚜虫试验初报[J]. 新疆农业科技,2017(4):49-50.

[25] 王元桃,江武,匡小红,等. 植保无人机统防统治棉花虫害的应用探讨[J]. 棉花科学,2017,39(5):42-44.

[26] 王龙江,刘伟玲,潘志萍,等. 农药助剂对无人机施用甲维盐微乳剂的雾滴特性及蓟马防效的影响[J]. 环境昆虫学报,2017,39(4):940-944.

[27] 袁伟方,陈川峰,李祖莅,等. 植保无人机防治冬春季豇豆蓟马试验初报[J]. 中国热带农业,2017(5):60-61.

[28] 王明. 植保无人机低空低容量喷雾在茶园的雾滴沉积分布探讨及对茶小绿叶蝉的防效研究[C]// 中国植物保护学会. 绿色生态可持续发展与植物保护——中国植物保护学会第十二次全国会员代表大会暨学术年会论文集. 北京:中国农业科学技术出版社,2017:2.

[29] 裴洲洋,李世金,刘国侠,等. 智能植保无人机防治烟蚜试验分析[J]. 安徽农学通报,2017,23(22):72.

[30] DUNN A M, JULIEN G, ERNST W R. Evaluation of buffer zone effectiveness in mitigating the risks associated with agricultural runoff in Prince Edward Island [J]. Science of the Total Environment, 2011,409:868-882.

[31] CRAIG I P. The GDS model-a rapid computational technique for the calculation of aircraft spray drift buffer distances[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 43(4):235-250.

[32] ROBINSON R C, PARSONS R G. Drift control and buffer zones for helicopter spraying of bracken (*Pteridium aquilinum*)[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2009,79(2):215-231.

[33] KANG T G, LEE C S, CHOI D K, et al. Development of aerial application system attachable to unmanned helicopter-basic spraying characteristics for application system[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2010,35(4): 215-223.

[34] 秦维彩,薛新宇,周立新,等. 无人直升机喷雾参数对玉米冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 农业工程学报,2014,30(5):50-56.

[35] LEBEAU F, VERSTRAETE A. RTDrift: A real time model for estimating spray drift from ground applications[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2012,77(2):161-174.

[36] XUE Xinyu, TU Kang, QIN Weicai, et al. Drift and deposition of ultra-low altitude and low volume application in paddy field [J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering,2014, 7(4): 23-28.

[37] 张京,宋坚利,何雄奎. 小麦冠层结构对雾滴沉积分布影响的试验研究[C]// 第二届植保机械与施药技术国际学术研讨会论文集,2010:282-286.

[38] 胡红岩,任相亮,姜伟丽,等. 植保无人飞机飞行高度与方向对棉田雾滴沉积分布的影响[J]. 中国棉花,2017,44(12):16-19.

[39] 陈盛德,兰玉彬,周志艳,等. 小型植保无人飞机喷雾参数对橘树冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 华南农业大学学报,2017,38(5):97-102.

(下转 180 页)

synergistic action of oxalic acid and polygalacturonase during pathogenesis by *Sclerotinia rolfsii* [J]. Phytopathology, 1965, 55: 204 - 211.

[4] HANCOCK J C. Degradation of pectic substances associated with pathogenesis by *Sclerotinia sclerotiorum* in sunflower and tomato stems [J]. Phytopathology, 1966, 56: 975 - 979.

[5] RIOU C, FREYSSINET G, FEVRE M. Production of cell wall-degrading enzymes by the phytopathogenic fungus *Sclerotinia sclerotiorum* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1991, 57(5): 1478 - 1484.

[6] 李秀丽,高智谋. 核盘菌(*Sclerotinia sclerotiorum*)致病分子机理研究进展[J]. 安徽农业科学,2013,40(2):266 - 272.

[7] GOVRIN E M, LEVINE A. The hypersensitive response facilitates plant infection by the necrotrophic pathogen *Botrytis cinerea* [J]. Current Biology, 2000, 10(13): 751 - 757.

[8] KIM H J, CHEN C, KABBAGE M. Identification and characterization of *Sclerotinia sclerotiorum* NADPH oxidases [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, 77(21): 7721 - 7729.

[9] GUYON K, BALAGUE C, ROBY D, et al. Secretome analysis reveals effector candidates associated with broad host range necrotrophy in the fungal plant pathogen *Sclerotinia sclerotiorum* [J]. BMC Genomics, 2015, 15: 336 - 354.

[10] LYU Xueliang, SHEN Cuicui, FU Yanping, et al. A small secreted virulence-related protein is essential for the necrotrophic interactions of *Sclerotinia sclerotiorum* with its host plants [J]. PLoS Pathogens, 2016, 12(2):1 - 28.

[11] WANG Xinyu, LI Qian, NIU Xiaowei, et al. Characterization of a canola C2 domain gene that interacts with PG, an effector of the necrotrophic fungus *Sclerotinia sclerotiorum* [J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60(9): 2613 - 2620.

[12] ZHU Wenjun, WEI Wei, FU Yanping, et al. A secretory protein of necrotrophic fungus *Sclerotinia sclerotiorum* that suppresses host resistance [J]. PLoS ONE, 2013, 8(1):1 - 19.

[13] ZHAO Peibao, REN Aizhi, XU Houjuan, et al. The Gene fpk1, Encoding a cAMP-dependent protein kinase catalytic subunit homolog, is required for hyphal growth, spore germination, and plant infection in *Fusarium verticillioides* [J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2010, 20(1): 208 - 216.

[14] ROMERO R M, ROBERTS M F, PHILLIPSON J D. Chorismate mutase in microorganisms and plants [J]. Phytochemistry, 1995, 40(4):1015 - 1025.

[15] 丁丽娜,杨国兴. 植物抗病机制及信号转导的研究进展[J]. 生物技术通报,2016, 32(10):1 - 9.

[16] YANG Youxin, AHAMMED G J, WU Caijun, et al. Crosstalk among jasmonate, salicylate and ethylene signaling pathways in plant disease and immune responses [J]. Current Protein and Peptide Science, 2015, 16(5):450 - 461.

[17] STRACK D. Phenolic metabolism [M]// DEY P M, HARBORNE J B. Plant Biochemistry. San Diego: Academic Press, 1997:387 - 416.

[18] DEWICK P M. The biosynthesis of shikimate metabolites [J]. Natural Product Reports, 1998, 15:17 - 18.

[19] ARMIN D, KERSTIN S, MATTHIAS M, et al. Metabolic priming by a secreted fungal effector [J]. Nature, 2011, 478: 394 - 398.

(责任编辑:杨明丽)

(上接 158 页)

[40] 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.

[41] 杨知伦,葛鲁振,祁力钧,等. 植保无人机旋翼下洗气流对喷幅的影响研究[J]. 农业机械学报,2018,49(1):116 - 122.

[42] HEWITT A J. Droplet size spectra classification categories in aerial application scenarios [J]. Crop Protection, 2008, 27(9): 1284 - 1288.

[43] HUANG Y, HOFFMANN W C, LAN Y, et al. Development of a spray system for an unmanned aerial vehicle platform[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, 25(6): 803 - 809.

[44] GASKIN R E, STEELE K D, FOSTER W A. characterizing plant surfaces for spray adhesion and retention [J]. New Zealand Plant Protection, 2009, 58: 179 - 183.

[45] 朱金文,周国军,曹亚波,等. 氟虫腈药液在水稻叶片上的沉积特性研究[J]. 农药学学报,2009,11(2):250 - 254.

[46] DIEPENBROCK W. Yield analysis of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A review [J]. Field Crops Research, 2000, 67:35 - 49.

[47] 宋坚利,何雄奎,杨雪玲. 喷杆式喷雾机雾流方向角对药液沉积影响的试验研究[J]. 农业工程学报,2006,22(6):96 - 99.

[48] 邱白晶,王立伟,蔡东林,等. 无人直升机作业高度与速度对喷雾沉积分布的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(24):25 - 32.

[49] 陈盛德,兰玉彬,李继宇,等. 小型无人直升机喷雾参数对杂交水稻冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(17):40 - 46.

[50] 王昌陵,何雄奎,王潇楠,等. 无人植保机施药雾滴空间质量平衡测试方法[J]. 农业工程学报,2016,32(11):54 - 61.

[51] 王玲,兰玉彬,HOFFMANN W C,等. 微型无人机低空变量喷药系统设计与雾滴沉积规律[J]. 农业机械学报,2016,47(1):1 - 8.

[52] 何玲,王国宾,胡韬,等. 喷雾助剂及施液量对植保无人飞机喷雾雾滴在水稻冠层沉积分布的影响[J]. 植物保护学报,2017,44(6):1046 - 1052.

(责任编辑:田 喆)