

孙乐鑫,陈 兵,赵 静,等. 无人机施药技术在农业生产中的应用研究现状及展望[J]. 江苏农业科学,2022,50(15):31-42.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.15.005

无人机施药技术在农业生产中的应用研究现状及展望

孙乐鑫^{1,2}, 陈 兵¹, 赵 静¹, 王 琮¹, 王 静³, 宋 勇¹, 陈子杰^{1,2}, 韩焕勇¹, 王方永¹, 傅积海¹

(1. 新疆农垦科学院棉花研究所,新疆石河子 832003; 2. 石河子大学农学院,新疆石河子 832003;

3. 新疆石河子职业技术学院水建分院,新疆石河子 832003)

摘要:在农业生产中,药剂调控作物生长和药剂防控作物病虫害一直是重要的农业措施。随着农业中农药使用量逐年增加,传统施药器械和技术的弊端日渐凸显,无人机作为一种新型的施药器械应运而生。近年来,无人机施药技术在我国发展迅速,逐渐成为主要的施药方式,大有替代传统农机施药的趋势。本研究从无人机基本构造入手,介绍农业无人机在各国农业大国中的发展概况,总结农业无人机在实际发展中的优势,从路径规划、不同控制方式喷洒效果、避障技术、精准施药、雾滴沉积、夜视功能等 6 个方面阐明无人机施药的关键技术,汇总农业无人机在作业过程中的影响因子,对无人机喷施不同药剂(脱叶剂、杀虫剂、杀菌剂、除草剂、植物生长调节剂)以及撒播技术进行梳理总结,分析无人机施药发展过程中面临的主要问题:续航能力弱、标准规程不健全、配套药剂研发不足、推广培训局限等,并针对以上问题提出相应措施。此外,还阐述了大数据施药专家系统、生物防治、多机合作、一机多能、公共场所消杀等未来发展大趋势,以为无人机施药技术在农业中的应用提供借鉴和参考。

关键词:无人机;发展概况;施药关键技术;影响因素;应用情况;发展趋势

中图分类号:S252⁺.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)15-0031-12

我国是一个拥有 1.2 亿 hm^2 耕地的农业大国,在现代农业生产过程中,作物的生长时好时坏,病虫害时有发生。作物生长不好,病虫害发生均会对作物的生长造成负面影响,降低作物产量和品质,严重时会使作物绝产,对农业生产造成巨大损失。因此,提高作物产量和品质,做好作物的生长调控和病虫害的防治工作尤为重要。作物的生长调控措施主要是水肥调控和化学药剂调控,病虫害的防治措施主要有农业防治、物理防治、化学防治及生物防治等,常规生产中化学防治最多^[1]。据统计,农用化学品可防治高达 45% 的世界粮食供应损失^[2]。目前我国大部分地区仍然采用大容量、粗雾滴的传统喷雾方式(背式喷雾器、担架式喷雾机、大型机车等)进行作物的生长调控和病虫害的防治,喷洒出去的生长调控剂不能完全被作物吸收,部分进入土壤,产生了药剂残留;喷出的病虫害

害防控药剂也只有 20% ~ 30% 能够有效作用于病虫害部位^[3],大多数农药被浪费,不仅污染了水土资源,还对环境造成了极大破坏。为了能够更加高效环保地实现作物生长调控和病虫害的防治,无人机作为一种新型施药机械应运而生。由于无人机与传统植保器械相比具有安全性高、省水、省药、灵活度高、喷施效率高、无损等特点,自 2010 年至今,无人机在农业领域的应用逐渐增多,已经贯穿了作物生长的全过程^[4]。随着无人机技术的不断发展,无人机的应用面积越来越广,已成为作物生长调控和防治病虫害的主要手段^[5],但仍存在市场乱、操作复杂、续航差、浓度大易产生药害、缺乏行业标准、配套药剂研发力度不够等不足。

本文对国内外无人机的发展历程和关键技术进行梳理总结,分析无人机快速发展的原因,综述无人机喷施药剂的应用情况,阐述无人机施药发展过程中存在的不足,并展望无人机未来发展的几大趋势,以为从事无人机施药工作的相关人员提供技术支撑。

1 无人机施药发展概况

1.1 农业无人机介绍

无人机是一种用于农林喷洒农药药剂的无人

收稿日期:2021-10-08

基金项目:国家自然科学基金(编号:41961054);兵团领军人才计划(编号:2019CB018);新疆兵团英才项目。

作者简介:孙乐鑫(1997—),男,山东潍坊人,硕士研究生,从事作物栽培生理与农业遥感应用研究。E-mail:934158356@qq.com。

通信作者:陈 兵,博士,研究员,从事作物栽培生理与农业遥感应用研究。E-mail:zyrcb@126.com。

驾驶飞行器^[6]。一套完整的无人机具备机械、动力及控制三大功能^[7]。无人机的工作原理是借助于电机的旋转,使螺旋桨产生升力,进而飞离地面^[8]。按照不同平台构型来分,主要有固定翼、直升机、多旋翼三大类。根据动力系统的来源不同,可分为电动、油动、油电混动三大类。无人机的载药量大多为 10 ~ 45 kg,最大载药量为 80 kg(例如 TDN - 01)^[9]。他的喷洒系统主要包括药箱、水泵、软管和喷头。药箱是喷洒均匀的关键^[10],材质要求防震荡、耐腐蚀、耐磨损。水泵通常分为蠕动泵、齿轮泵和高压泵,要避免使用浓稠度较大的药剂,以免水泵内残留药渣影响其正常工作。软管是连接水泵和喷头的装置,可根据需要调节长短。喷头性能是影响药效的关键^[11],主要有扇形压力喷头和离心喷头。

1.2 国内外农业无人机发展的历程

1.2.1 国外农业无人机的发展历程 纵观全球,农业航空较发达的国家主要有日本、美国、俄罗斯、韩国、澳大利亚、巴西、加拿大等,但由于自然地理、人文政策不一,无人机的发展现状各不一样。

1.2.1.1 日本 日本种植面积最大的农作物是水稻,对农用机械的要求很高,加之日本人口老龄化现象比较严重^[12],所以农业无人机在日本起步较早,发展比较完善,主要应用在农业领域。由表 1 可知,1983 年日本农林水产省(隶属日本中央省厅)委托雅马哈公司率先开始农用无人施药作业器械的研究。经过 4 年的研究探索,1987 年世界上第 1 台无人直升机 R50 问世^[13],主要应用于农药喷洒。1991 年,日本农林水产省出台了“推广植保无人机在稻田中应用”的政策,无人机企业如雨后春笋般出现^[14]。1997 年研制出 RMAX 机型,长为 3.63 m、高为 1.08 m、作业载荷为 28 kg,配有水平对置双缸发动机、全球定位系统(GPS)导航功能和雅马哈姿态控制系统,能够以恒定的速度飞行,同时保持机身的稳定,成为日本应用最广的植保无人机。如今全球有 2 500 多架雅马哈 RMAX 直升机在运行,用于大米、小麦、大豆和蔬菜等许多作物的喷洒作业。2017 年推出了一款 FAZER R 多马达无人机,可以喷洒 4 kg。2018 年 YMR - 01 多马达无人机投入市场,YMR - 01 的机体四周有 6 根旋转轴,机身碳纤维材料,体型要比普通的无人机大一些。作为领军企业的日本雅马哈,市场占有率达到 60%^[15],出口韩国、美国、澳大利亚、新西兰、泰国等国家。日

本无人机的蓬勃发展离不开政府的管理体系和协会的协同管理。早在 1962 年就成立了“农林水产航空协会”,负责小型无人机作业的协同管理。2017 年由日本农林水产省消费安全局发布了无人机农药配施利用技术指导准则^[16],制定了航空植保专用药剂行业标准。2019 年日本农林水产省首次制定了农业领域普及小型无人机计划,该计划称,到 2022 年要将无人机喷洒农药的面积从目前的 2 万 hm² 扩大至 100 万 hm²。日本农林水产省还敲定了大幅增加果树和蔬菜可用农药数量的目标。目前,日本是无人机飞防最成熟,规模最大的国家。

表 1 日本农业无人机发展历程

年份	日本植保无人机发展历程
1962	成立“农林水产航空协会” ^[13]
1983	进行农用无人植保作业器械的研究
1987	世界上第 1 台无人直升机 R50 问世 ^[13]
1991	出台了“推广植保无人机在稻田中应用”政策 ^[14]
1997	经典的 RMAX 系列诞生
2017	发布了无人机植保农药配施利用技术指导准则、制定了航空植保专用药剂行业标准 ^[15]
2018	YMR - 01 多马达无人机投入市场
2019	首次制定了农业领域普及小型无人机计划

1.2.1.2 美国 美国是世界上农业航空技术最先进,应用最广泛的国家^[17],至今已有 110 多年的历史。美国的农业无人机技术在世界上处于领先水平,主要应用于军事方面,在农业方面应用较少。由于美国法律法规的限制,美国的无人机发展规模不及日本^[18],航空施药主要以有人驾驶的固定翼飞机为主,约占到 88%^[19]。2016 年,美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration,简称 FAA)正式颁布了《小型无人机系统的运行和审定》^[20],这一政策促进了无人机在美国农业中的应用,尤其是在农业发达的加州地区。在无人机领域中,比较著名的美国企业主要有 PrecisionHawk、Agribotix、DroneDeploy 等。美国国会通过了免除农用飞机 100 美元单次起降费议案,2014 年美国针对该议案又投入了 73 亿美元^[21]。美国的农场占地范围比较大,对于有人驾驶的大载量固定翼飞机的需求大于农业无人机^[22]。近些年,随着政府的监管放宽,农业无人机行业稳步发展。但在航空配药发展过程中,仍以有人驾驶的航空飞机为主,农业无人机为辅。

1.2.1.3 俄罗斯 俄罗斯地广人稀,是一个农业航

空大国,与美国类似,农业无人机主要应用于军事方面,农业主要以有人驾驶固定翼飞机为主,无人机发展缓慢。在 2016 年,俄罗斯中央流体和空气动力研究院(TsAGI)完成了由俄联邦鞑靼斯坦共和国 Aviaresheniya 设计局设计的农用无人机的初始风洞试验。研制的 FLYP 植保无人机,商载可达 50 ~ 100 kg,飞行速度可达 40 ~ 70 km/h。

1.2.1.4 其他国家 韩国耕地较少,以种植水稻为主,机械化水平较高,农业无人机施药技术与日本类似。目前韩国应用的无人机依赖于中国和日本出口,本地基本上不生产无人机,但其市场开放,接受程度较好,政策规定较美国宽松,无人机发展较稳定。此外,澳大利亚、巴西、加拿大等国家农业航空也较为发达,他们的发展模式与美国相似,以有人驾驶的固定翼飞机和旋翼直升机为主^[23]。

1.2.2 国内农业无人机的发展历程 农业无人机在我国国内发展起步较晚,但发展迅速^[24]。由表 2 可知,在 2005—2006 年,中国农业大学、中国农业机械化研究院等科研机构向有关部门申报提议进行植保无人机的研究工作。2008 年由农业部南京农业机械化研究所、中国农业大学等单位共同承担的国家“863”计划项目《水田超低空低量施药技术研究》与《装备创制》正式实施,这标志着国内科研机构正式进入无人机施药技术的探索阶段^[25]。该项目成功研制出基于 Z-3 飞行平台的油动单旋翼植保无人机。2010 年,我国第 1 架自主研发的施药无人机成功问世^[26]。2012 年,国内第 1 款电动单旋翼植保无人机问世。2014 年,中央一号文件中指出要“加快农用航空建设”^[27],促进生态友好型农业发展。自 2012 年开始,由知网的关注度指数分析可以看出,我国对无人机的学术关注度也不断提升。2015 年,农业农村部制定了《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》和《到 2020 年农药使用量零增长行动方案》,新型无人机施药方式开始迅速发展。同年,个别省份出台了地方性补贴政策。2017 年,农业农村部首次将农业无人机纳入农机补贴。经过短短十几年的发展,如今农业无人机的市场保有量已经超过日本。2020 年我国的农业无人机产业逐渐朝着产学研相互合作的方向快速发展,诞生了很多代表性的农业无人机品牌,例如大疆创新、极飞科技、汉和、辽宁壮龙等。2020 年 12 月 21 日,民航局适航司在深圳市向深圳市大疆创新科技有限公司颁发国内首个农业无人机系统设计生产批准

函,这有利于推进农业无人机产业高质量发展。2020 年,大疆农业发布了 T30、T10 等 2 款全新的农业无人机,T30 的载荷量达到了 30 kg;2021 年,极飞科技发布了 P40、P80、V40 2021 款,其中,P80 2021 款农用无人机载量达到 40 kg,搭载全新的 SUPERX4 智能控制系统,结合极飞睿喷、睿播、睿图模块,测绘效率更高、雾化效果更好。极飞 V40 2021 款农业无人机采用行业首创的倾转双旋翼结构,刷新了人们对旋翼无人机外形的认知。我国农业无人机的自主研发和创新达到了一个新的高度,但是与一些发达国家相比还有较大的提升空间^[31]。目前,我国已然成为全球农业无人机作业面积最大的国家,2020 年全国作业面积达到 6 670 万 hm^2 (图 1)。

表 2 我国农业无人机发展历程

年份	我国植保无人机发展历程
2005—2006	中国农业大学、中国农业机械化研究院等科研机构向有关部门申报提议进行植保无人机的研究工作
2008	“863”计划项目正式实施 The “863”
2010	我国第 1 架植保无人机研发成功 ^[26]
2012	国内第 1 款电动单旋翼植保无人机问世
2014	中央发布的一号文件中指出要“加快农用航空建设” ^[27]
2015	个别省份出台了植保无人机地方性补贴政策
2017	农业农村部首次将植保无人机纳入农机补贴、全国投入使用的植保无人机的数量达到 1.4 万架,防治面积约 667 万 hm^2 ^[28]
2018	全国投入使用的植保无人机的数量达到 3.15 万架,作业面积约 1 780 万 hm^2 ^[29]
2019	全国投入使用的植保无人机的数量达到 5 万架,作业面积约 3 000 ~ 3 334 万 hm^2 ^[30]
2020	全国投入使用的植保无人机保有量预计已达 11 万台,作业面积 10 亿亩次(1 hm^2 = 15 亩)

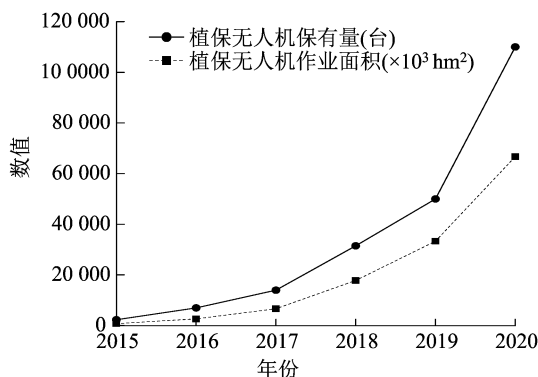


图1 2015—2020 年我国农业无人机发展趋势

综上所述,近年来亚洲地区的农业无人机使用量逐年上升,其他地区的农业无人机基本稳定。由于中日韩 3 国的耕地相对分散、经营规模较小、生产条件相对比较复杂等因素,中日韩 3 国的农业无人

机施药技术比较接近。在 2012—2013 年中日韩 3 国还展开过无人机施药技术研究的国际合作。而美国、澳大利亚、巴西、俄罗斯等国家地广人稀,多是农场主经济,与农业无人机相比,有人驾驶的固定翼飞机是更好的选择。

2 无人机施药技术在农业中快速发展的原因

2.1 农业无人机优点较多

由表 3 可知,农业无人机优点主要有以下 6 点:

2.1.1 安全性高 据统计,每年因农业无人机作业中毒人数高达 10 万、中毒致死率高达 20%。农业无人机在喷雾安全性方面具有很大优势,能够满足人体药物分离的要求^[32],使农业工作者免受农药的直接、间接伤害。

2.1.2 省水、省药、环保 农业无人机与传统的人力机械喷雾相比,可以节省 30% 的杀虫剂^[33],节省 30~40 倍水量,不但降低了对周围环境的污染,还减少了农产品的农药残留。

2.1.3 穿透性强 多旋翼农业无人机在作业时会产生旋翼气流,喷洒出来的雾滴随着气流沉积到作物的冠层上^[34],气流吹动叶片,使雾滴均匀地附着在叶片的正反面,也能将雾滴带到作物的中下部,较小型手动、背负式喷雾器穿透性强。

2.1.4 灵活度高,适应性广 据统计,山脉、高原和丘陵占全国总面积的 69%^[35],由于特殊的地形地势,传统农业器械进地作业比较困难。而农业无人机体积小,作业时不需要跑道,可以垂直升降,不受地形地势和作物长势的制约,适应性比较广。

2.1.5 喷施效率高 有效载荷为 20 kg 的农业无人直升机的效率是拖拉机安装喷雾器的 3~4 倍,是手动喷雾器的 30 倍^[36]。农业无人机施药对于大面积病虫害的爆发有很好的防治效果。

2.1.6 无损 传统的农业机械如小型手动、背负式、担架式喷雾器和机车喷雾机械都需要进入田块进行作业,不仅会对作物造成机械损伤,还会压实土壤,改变土壤的物理性状,不利于作物的后期生长。而农业无人机施药则是超低空施药,不会与作物进行直接接触,避免了机械损伤。

2.2 农业劳动力短缺劳务费居高不下

在我国,超过 88% 的农药喷雾机是人工操作的^[37]。早期我国经济发展缓慢,农村人口众多,大部分地区以自给自足的家庭经营为主。在这样的背景下,对于新型农业器械(农业无人机等)并无迫

表 3 传统农业器械与农业无人机的比较

传统农业器械存在的弊端	农业无人机的优点
中毒致死率高	安全性高
费水、费药、污染环境	省水、省药、环保
穿透性较弱	穿透性强
易受地形地势影响	灵活度高
喷施效率低	喷施效率高
对作物或土壤造成一定程度的破坏	无损

切的需求。随着工业化和城镇化的快速发展,大量的青壮年进城务工,从事农业的人员严重不足。农村劳动力短缺加之人工劳作的环节和时间越来越少,导致劳务费越来越高,农业用工的压力越来越大,很多地方用不起工的现象日益突出,而农业无人机具有劳动强度低、劳动力投入少的特点^[38],受到广大农民的青睐。

2.3 土地流转规模加大

农村大量劳力外流,加快了土地的流转。随着土地流转新政策的实施和国家大力发展农业规模经营,规模化的防治成为一种趋势,施药的效率要求越来越高,为农业无人机施药提供了良好的沃土。

2.4 农业无人机购机补贴政策不断完善

2017 年我国就开始实行无人机购机试点补贴,目前大部分省、市和地区已经把农业无人机纳入到农机购置补贴里^[39]。随着无人机购机补贴政策的不断完善,田间地头的农业无人机将会越来越多。

综上所述,当前我国从事农业的人口正在走向老龄化,从事农业的劳动力不足,而农业无人机高效、省时省力的特点正好契合了实际。随着农业无人机技术的日渐成熟,作业成本也会下降。当前的整个大趋势有利于农业无人机不断发展,预计未来几年内,农业无人机还有更大的发展前景。

3 无人机施药的关键技术及其施药流程

3.1 农业无人机路径规划方法

农业无人机施药时,首先要进行路线规划,路线规划主要有标准航线、定点航线、自由航线等。标准航线多为固定区域规划,只需规划固定区域边界即可,自动生成施药航线,进行面上作业;定点航线为了满足个性化需要,靶向喷雾,针对需要施药的个别点进行规划,进行点上作业;自由航线是为了满足特殊区域需求,可以规划直线曲线等航线,进行线上作业。当作业区域面积较大时,需要返回

保障点进行药液和电池的更换,而返回的途中为非施药作业。为提高作业效率尽可能地缩短返回途中非施药作业的时间,王宇等提出了基于 Grid - GSA 算法的路径规划方法,此方法相比于简单规划与未规划情况,往返距离总和分别缩短了 14%、68%^[40],非施药作业时间分别减少了 21%、36%。另外,当作业区域面积较大时,单机配药作业耗时长、效率有限。为了实现多机协同作业,阚平等提出了一种基于改进粒子群算法的多农业无人机协同路径规划解决方案,实现了对各农业无人机返航顺序和返航点位置的寻优,大大提高了防治效率^[41]。徐博等研究了一种多架次返航路线规划算法,使其能耗达到最小值,通过该算法进行航线规划,能耗节省率达到了 12.89%^[42]。针对不规则作业田块,严炜等提出了基于差分量子退火算法的路径规划算法,降低了作业过程的药耗和能耗^[43]。我国丘陵山地居多,针对农业无人机在丘陵山地上的作业情况,范叶满等提出了一种基于模拟退火算法的路径规划,使农业无人机在山地作业时能耗达到最优^[44]。表 4 列出了农业无人机路径规划方式的用途,不同规划方式适用范围不同。

表 4 农业无人机路径规划方式的用途

路线规划方式	用途
标准航线	主要适用于成片规模种植、密度较高的大田作物,如水稻、小麦、玉米等
定点航线	可以实现定点悬停喷洒,适用于果树等种植间隔较大的作物,如苹果、梨等
自由航线	可以根据作物的种植走向自由规划航线,如茶树、葡萄等

3.2 不同类型不同控制方式下农业无人机的喷洒效果

农业无人机飞行质量的好坏对于喷洒效果有着至关重要的作用。近些年随着农业无人机领域

的快速发展,市场上涌现了各式各样的农业无人机。它们的飞行性能良莠不齐,防治效果也各不相同。为了能够筛选出飞行性能高、防治效果好的农业无人机,陈盛德等选取了不同机型以及不同控制方式(半自主和全自主)的农业无人机进行飞行试验,采用微轻型机载北斗导航定位系统,将不同类型获取到的飞行参数与规划参数进行对比分析,得出全自主控制方式下的四旋翼植保无人机飞行质量最高,为有意购买者提供了借鉴^[45]。

3.3 农业无人机避障技术

避障技术,顾名思义就是无人机自主躲避障碍物的智能技术。初期的避障方法主要是靠飞手目测障碍物进行躲避,但当障碍物与飞手相距较远时,安全性就难以保证。农业无人机在田间作业时环境比较复杂,难免会碰到一些障碍物如输电铁塔、电线杆、大树等。现阶段农业无人机的空中冲击主要是由于其避障能力有限^[33]。因此,对于农业无人机自主避障的研究迫在眉睫^[46]。吴开华等基于结构光视觉技术提出了一种障碍物检测新方法,当作业过程中前方存在障碍物时,该方法通过光路的变化能够准确检测出障碍物的距离、角度、宽度,从而作出相应的飞行动作^[47]。孙柯等设计了一款基于双毫米波雷达的避障系统,该系统通过毫米波雷达回波中心与障碍物之间参数的变化特点得出障碍物前方距离、侧方距离、宽度^[48]。明宇提出了一种基于视觉的避障方法,该方法通过在农业无人机上搭载一个拍摄设备,对收集到的图像处理分析来进行避障^[49]。由表 5 可知,不同避障技术各有优缺点,需要根据具体的环境选择合适的避障方法。

3.4 农业无人机精准施药技术

在农田实际生产中,作物生长和病虫害的分布、严重度不是均匀的,变量施药、精准施药尤为重要,可以大量节省农药,提高利用率。准确的高度

表 5 避障方法优缺点对比

避障方法	优点	缺点
红外避障	不受可见光影响,角度灵敏度高,结构简单,成本低,可以快速感知物体的存在	不能获取三维信息,受环境影响很大(物体颜色、方向、环境光线),测量精度低
超声波避障	成本低、实现方法简单,技术成熟	不能获取三维信息,感应速度和精度,容易受环境影响,如温度、风速等,且不可检测吸声材料
激光避障	精度、反馈速度、抗干扰能力和有效范围都要明显优于红外和超声波	不能获取三维信息,体积庞大,价格昂贵
视觉避障	可以获取三维信息	精度随着距离的增加逐渐降低

控制是精准施药的前提,在作业过程中药箱质量不断变化,会对高度的控制造成影响。郝学晟等提出了一种神经网络与重力补偿 PD 控制器相结合的控制方法,从模拟仿真结果看,可以有效提高控制精度^[50]。精准施药离不开实时监测技术,段立蹄等提出了一种基于多信息融合的监测技术,可以将飞行过程中的飞行参数及药箱参数融合起来,大大提高了监测的实时性,为精准施药保驾护航^[51]。王大帅等针对此问题设计了一款基于 LabVIEW 的地面控制软件,可以在作业过程中实现飞行速度和施药流量的动态匹配,实际与理论流量平均偏差仅为 1.9%^[52]。在极飞 2021 年的新品系列里,发布了 AI 处方图技术,在这张处方图上能看到作物长势、施药情况等,为变量施药指引了方向,可以实现哪里需要喷哪里。

3.5 农业无人机雾滴沉积分布

雾滴沉积分布特征一直是一个研究热点,对于调整作业参数至关重要。漆海霞等对不同机型、不同喷头类型施药特点的研究发现,单旋翼农业无人机比多旋翼农业无人机有效喷幅更大,离心式喷头比液力式喷头发射的雾滴粒径更小,具有更佳的穿透性^[53]。许童羽等研究了水稻垂直空间上的雾滴分布规律,在有效范围内旋翼下方的覆盖率最好,远离旋翼的位置覆盖率次之^[54]。王昌陵等研究了单旋翼农业无人机不同因素对雾滴沉积的影响,就沉积效果来讲,机尾朝前要优于机头朝前,且侧风速越大,雾滴越集中于下风向处^[55]。

3.6 农业无人机夜视功能

大部分病虫害均发生在雨热同期的夏季,较白天高温高湿的环境,夜间更适合农业无人机作业。目前市面上大部分农业无人机都还不具备夜视功能,近年极飞发布了一款天目无人机视觉系统,具备主动近红外照射技术,该技术通过机身主动发射近红外光线,然后接收目标返回的红外信号反馈,经过计算处理后,感知障碍物并实现夜间避障。夜视功能打破了施药作业的时间限制,显著提升了施药效果和安全性能。

综上所述,植保无人机技术比较新颖又比较复杂,加强对关键技术的研究是缩小我国与发达国家差距的必经之路,精准施药技术的研究能最大程度地提高农业生产力,引领农业向精准化发展。路径规划的研究可以降低能耗,节约资源。避障技术的研究会提高植保无人机运行的安全性、稳定性。夜

视功能的研究打破了植保无人机作业的时间限制。要想解决卡脖子现象,就要不断学习和借鉴国外的先进技术,把对关键技术的研发放在首位,同时还需要不断创新,开发适合国内的特色技术要求成果。

4 无人机施药技术在农业中应用的影响因素

4.1 环境条件

影响无人机施药的环境条件主要包括气象条件、障碍物、不宜飞行区等。气象条件有风速、温度、光照、湿度、露水、降水等。其中,风速对雾滴沉降影响最显著,当风速达于 3 m/s 时,不同粒径的雾滴均会发生飘移^[56]。大风条件下会使药液发生较大飘移,从而造成作物受药不均。即使在风力较弱时喷洒,也要预留出飘移缓冲区域。当光照强烈、温度较高时,药剂的蒸发会变得强烈,悬浮颗粒的乱流增强,不利于药剂发挥作用。雨露天气时,空气湿度过大,雾滴会沉积到地面,增加雾滴的流失^[57]。障碍物包括无人机喷施作业区域及附近出现的高压线塔、电杆、树木、建筑物等影响无人机作业的物体,或妨碍无人机操控人员视线的其他物体。不宜实施飞防作业的区域包括蜂、鸟、鱼、蚕、畜等养殖场,公路、铁路、学校、医院、居民生活区附近,以及水源地、草地、生态敏感区等。

4.2 药剂的物理性质

药剂的物理性质包括黏度、表面张力、粒径、蒸发率等^[58]。药剂经过喷嘴喷洒出来,物理性质会发生改变,添加飞防助剂和辅剂会改变喷嘴的雾化性能,尤其对雾滴的表面张力有显著影响^[59]。

4.3 作业参数

农业无人机的作业参数主要包括飞行高度、飞行速度、喷液量、喷嘴类型等。植保无人机在田间作业时,为使药物喷洒得均匀,应使无人机保持一定的高度飞行。陶波等针对此问题的研究表明:随着飞行高度升高,农药雾滴的沉积量降低,飘移量增加;当喷液流量较大时,农药雾滴的沉积量增加,飘移量降低^[60]。当然过大的喷液量也是不可取的,会使部分农作物发生药害。常见的喷嘴有穿透性强的压力式,雾化性强的离心式等 2 种,针对不同的需求选取不同的喷嘴进行作业。机型不同施药效果也不一致,与多旋翼无人机相比,单旋翼农业无人机在作业过程中会产生翼尖涡流,造成雾滴的飘移,影响施药效果^[61]。当单旋翼农业无人机在田间作业时,尾部可能会产生异常振动,从而造成农药

的少喷复喷^[62]。

4.4 喷施对象的形态指标

农业无人机广泛应用于多种农作物,由于不同农作物或者同一农作物不同株型和冠层参数不同,施药效果也参差不齐。如农业无人机喷施玉米时,下部受药较小,发生在下部的病虫害得不到缓解,施药效果较差。农业无人机的防治效果受多种因素影响,所以在田间作业时要尽量选择专业飞手,在无风弱光的多云天气,使用飞防专用药剂以及飞防助剂,针对不同的作物选择不同的机型、设置合适的飞行参数,从而达到较好的作业质量。除了气象条件不能改变之外,其余影响因素均可以通过加强对飞手的培训、加强对专用药剂的研究、无人机软硬件的升级、施药专家系统的推荐等方式进行人为控制。

4.5 飞手的熟练程度

目前,关于避障技术尚不完全成熟,虽然多数无人机已经完全可以实现自主作业,由于各种影响因素,比如不规则地块、地块边界、特殊需求等使得农业无人机多数情况下仍然离不开飞手的手动操作。当在飞行过程中遇到突发状况时,不熟练的飞手可能会由于紧张造成一些失误,使部分农田喷洒不到农药或造成“炸机”^[63]。而熟练的飞手田间经验丰富,处理突发事件冷静,使飞行比较平稳,施药比较均匀,无人机保持完好。

5 无人机施药技术在作物生产中的应用

5.1 农业无人机喷施脱叶剂

棉花在成熟前需要进行脱叶,这有利于棉花的集中吐絮^[64]。近些年来,利用农业无人机喷施脱叶剂已经越来越普遍,尤其是高机械化的新疆兵团地区。张荣等对比了农业无人机和机车对棉花的脱叶效果,认为农业无人机喷施 2 次脱叶剂效果最佳,机车施药 1 遍和 2 遍棉花脱叶效果相当,但会降低棉花产量^[65]。胡红岩等研究认为,施药后 5 d,农业无人机脱叶效果较差,30 d 后,农业无人机脱叶效果与人工背负式喷雾器相当^[66]。王喆等研究认为,农业无人机喷施脱吐隆效果好于逸采和瑞脱龙^[67]。付凯研究发现,农业无人机脱叶与传统机车相比,经济效益增加,成本较低^[68]。农业无人机作业前应提前了解近期气象情况,选取适当作业时期,设置好最佳作业参数,选取合适的脱叶剂,配合飞防助剂和辅剂效果更佳。作业完要注意观察,在漏喷区

进行二次喷施,以免造成损失。

5.2 农业无人机喷施杀虫剂

作物虫害传统施药防治的方式主要是机车施药,存在剂量大、损伤高等特点,无人机施药可实现自主施药,定向喷雾,用量少,无损伤,近年来已经成为机车施药的有益补充。王喆等应用农业无人机进行棉蚜防治,认为 22% 氟啶虫胺脒悬浮剂(SC)防治效果最好,作业效率提升了 3 倍,省药,成本大大降低,与机车效果相当^[69]。娄朝霞等应用农业无人机进行棉蚜和叶螨防治,对比机车棉蚜防治效果要更好一些,叶螨防治效果略差一些^[70]。田志伟等对昼夜条件下农业无人机的防效研究表明,夜间更有利于棉蚜的防治,药液雾滴的穿透性更好^[71]。龚恒亮等对甘蔗棉蚜的防治表明,农业无人机施药最佳组合为 ALV-1502+SPA-01,飞行速度越快防治效果越差^[72]。Wang 等利用不同农业器械对小麦麦蚜的综合防治结果表明,农业无人机的防治效果与悬臂式和背负式喷雾器相当,效率高几倍,但穿透性和沉积均匀性较差^[73]。王小武等利用农业无人机进行稻田稻水象甲防治试验,其中不同机型对于防治稻水象甲差异不明显,添加助剂后防效显著提升^[74]。王佐乾等利用不同农业器械探究稻飞虱综合防治效果,施药后 7 d,不同农业器械防治效果无显著差异,14 d 后,自走式喷雾机防治效果优于农业无人机,但农业无人机防治成本最低^[75]。蔺乔仙等应用农业无人机进行蓟马、螟虫防治,其中选用 33% 氯氟·吡虫啉颗粒剂(GR)240 mL/hm² 效果较好,在虫害初期防治效果更佳^[76]。

5.3 农业无人机喷施杀菌剂

作物病害传统施药防治的方式与虫害类似,近年来关于无人机施药防治病害也开展了一些研究。程应德等利用不同农业器械探究水稻纹枯病综合防治效果,农业无人机比常规人工喷雾防效更佳,且省水省药^[77]。淦城等应用农业无人机进行油菜菌核病防治,认为农业无人机防治油菜菌核病与电动喷雾器无显著差异,但其大大降低了劳动强度,且油菜千粒质量和荚粒数有小幅提升^[78]。屈天元等应用农业无人机进行小麦赤霉病防治,结果表明农业无人机施药的小麦平均病穗率显著低于自走式喷杆植保机以及对照组,防治效果较好^[79]。李艳朋等利用不同机型的无人机对小麦赤霉病综合防治效果进行对比,认为极飞 P20 和大疆 T16 防治效果最好,添加助剂防治效果会更好,且未造成药

害^[80]。胡中泽等进行农业无人机防治赤霉病的减量研究,发现添加助剂防治效果更佳^[81]。随着药剂用量的减少,防治效果也越来越差,农业无人机减量 25% 药剂处理与普通喷雾器防治效果相当。

5.4 农业无人机喷施生长调节剂

生长调节剂对作物生长具有很好的调节作用,多采用叶面喷施的方式,为减少叶面喷施造成的机械损伤,学者们也开始尝试利用无人机喷施生长调节剂。由于棉花存在无限生长的习性,通常需要棉花生长的不同时期喷施调节剂缩节胺来调节棉花生长。例如赵静等对比了不同农业器械化控效果,认为农业无人机与机车喷施缩节胺对棉花株高的抑制率差别不大,但在提高棉花成铃率方面要好于机车^[82]。张亚林等应用农业无人机喷施缩节胺表明飞行高度为 1.5 m、飞行速度为 4 m/s 时,调控效果最好且优于机车^[83]。

5.5 农业无人机喷施除草剂

由于除草剂喷施易产生药害,通常在播种前使用较多,作物生长季节除草剂喷施面积和次数都较少,无人机在除草剂喷施方面的研究较少。邵国民等将农业无人机应用于水稻直播防治杂草,其中农业无人机与担架式喷雾机防治效果旗鼓相当,但农业无人机效率更高,大大节省了农药,有利于大面积应用^[84]。张宋超等应用农业无人机进行看麦娘防治,施药后 10 d,农业无人机防治看麦娘效果不如人工背负式喷雾机^[85]。张小秋等应用农业无人机防治甘蔗杂草,与对照组相比,无人机总杂草株防效在 89% 以上,鲜质量防效在 96% 以上且甘蔗无药害症状,持效期较长,喷施效率较高,防除效果较好^[86]。在使用农业无人机作业时,应尽可能加大流量,以小雾滴作业来提高药液的沉积密度,提高防治效果。

5.6 农业无人机撒播技术

随着农业无人机在农业中的参与度不断提高,授粉、播种、施肥等过程不断向机械化、智能化发展,农业无人机撒播技术逐渐走向成熟。2020 年,中国农业科学院在新疆示范基地应用无人机对库尔勒香梨授粉,当年果品品质明显提升,产量也较往年增加^[87]。程建斌等应用农业无人机进行薄壳山核桃授粉,在单位面积产量、品质方面较对对照明显提升,且授粉效率极高^[88]。刁友等应用农业无人机进行水稻直播,效率与地走式直播机相比大幅提升,大大降低了成本且产量较稳定,提高了水稻种

植的机械化水平^[89]。于丰华等利用水稻的光谱特征构建了处方图,进而使用农业无人机进行精准追肥,氮肥追施量减少 27.34%,且最终产量较常规追肥大致相同^[90]。

现如今农业无人机应用越来越广泛,无论是大田作物还是园艺植物都有涉及,并且它的农业效果与其他传统器械相比有明显优势。农业无人机在喷施杀菌剂、杀虫剂、除草剂、脱叶剂方面研究应用越发普遍,在喷施缩节胺等生长调节剂方面也越来越多,无人机打顶也是未来应用的方向。随着农业无人机撒播技术的普及,授粉、播种、施肥已成为其重要组成成分。

6 无人机施药技术在农业生产中应用的不足及展望

6.1 无人机施药技术在农业生产中应用的不足

6.1.1 电池容量技术受限,电动农业无人机的续航能力有待提高 农业无人机在大规模田地上植保作业时,需要频繁升降更换电池,大大降低了作业效率和安全性。目前无人机电池技术原理层面的研究不够,使得电池容量受到了限制^[91-92]。无人机电池包括普通无人机电池和高倍率无人机电池。目前电池容量主要有 5 000、10 000、12 000、14 000、16 000、22 000、32 000 mAh 等。现阶段提高续航能力需要从 2 个方面着手,一方面需要国家加大力度对农业无人机电池技术原理层面进行研究,加大补贴力度,培养专业型人才;另一方面从寻找新能源角度出发。徐伟诚等提出一种基于太阳能的农业无人机续航方案,该方案通过与锂电池连接一块硅太阳能电池板来实现对无人机共同供电,提高了续航能力^[93]。经试验验证,飞行时间平均提高了 70 s。虽然飞行时间提升的不多,但是这个方向是可行的,还有很大的提升空间。

6.1.2 农业无人机行业标准体系不健全,政策规程需要完善 近年来,农业无人机在我国得到迅猛发展,但植保无人机的制造和作业标准规范不完善,相关部门监管困难^[94]。这就导致行业内泥沙俱下,轻则降低农作物产量,重则危及植保人员的人身安全。为此,部分省份陆续采取了措施。2016 年重庆市出台了我国第 1 个农业无人机的地方标准 DB50T 638—2015《农用航空器电动多旋翼植保无人机》。2017 年《江西省农业植保无人机地方标准》在江西省正式实施。2018 年我国首个国字号农业无人机

行业标准诞生——NY/T 3213—2018《植保无人飞机质量评价技术规范》。2019 年江苏省南通市出台了 2 个农业无人机团体标准。2020 年浙江启飞智能主导制定的多旋翼农业无人机“浙江制造”标准发布。当前国家标准并不完善,缺少作业规范和作业质量标准。我国应该继续完善农业无人机行业标准体系和政策规程,规范市场秩序,加强市场监管,为广大农民的根本利益保驾护航。

6.1.3 飞防专用药剂研发不足,缺乏对周围环境和生物影响性研究 农业无人机作为一种超低空施药器械,与传统地面农业器械所需药剂不同,所用药剂要考虑雾滴的防飘性、耐蒸发性^[95]。飞防专用药剂存在低毒、高效、抗飘移、沉降好、耐蒸发、对农业无人机损害小等特点,但目前农业无人机田间作业仍大量使用传统剂型,这不完全适合农业无人机施药技术要求^[96],不仅会堵塞喷嘴,还会对环境造成负面影响。吴海霞等采用不同农业器械配合不同药剂对比对小麦赤霉病的防治效果发现无人机喷施专用药剂的防治效果最高,达 83.73%^[97];常规电动喷雾器喷施传统药剂防效次之,达 78.47%。说明农业器械与药剂门当户对才会使防治效果达到最佳。目前我国飞防专用药剂登记进程较慢,但国外尤其是日本针对飞防专用药剂的研究相当成熟,要借鉴国外经验,逐步建立起飞防专用药剂标准准则,加大对专用药剂的研发。农业无人机施药作为一种超低空施药方式,产生的药液雾滴有着独特的物理特性。一般在田间试验或作业时,人们往往关注作物的防治效果,而忽略了施药后对生态的影响。虽然农业无人机喷施量小,但其喷施浓度较高,也会对周围环境产生影响。应在每次喷施后对临近作物、水源、养殖场等周边环境进行跟踪性监测研究,得出的结果可以为作业参数的制定提供参考,从而更加系统地权衡农业无人机的利弊。

6.1.4 大部分地区对农业无人机的培训服务力度不够 农业无人机作为一种现代科技的产物,与传统器械相比,拥有众多优点。但由于推广力度不够,农户对于农业无人机的认识度不足,很多农民仍然以传统施药方式为主,对于农业无人机的防效、成本还处于半信半疑的状态。这就需要实地考察给农民朋友宣传讲座,打消疑虑。甚至有部分农户购买了农业无人机,怕损坏机器,闲置率高,不会操作,不敢操作。这就需要无人机公司拥有较好的售后服务,派专业飞手进行培训,积极探索新的推

广模式,更好地融入市场。针对价格不满意的用户,可以采取租赁的形式。

6.2 农业无人机施药技术展望

6.2.1 大数据支持下的施药专家系统开发 2019 年,我国进入了 5G 商用时代,5G 具有高速率、低时延、大带宽等优点。2020 年,北方天途航空技术发展(北京)有限公司推出一款 5G 植保无人机 M4E,实现了 5G 技术在农业无人机领域的应用。农业无人机与 5G 技术的结合将大大提高施药作业的效率,提高飞行稳定性、安全性,大大提高了数据上传处理速度。农业无人机在不同气象条件下对不同作物进行田间作业时,飞行参数、机型、药剂药量不同防效也大不一样。随着农业无人机的广泛应用,不同机型的农业无人机在不同地形地势、风向、风力、温湿度下的飞行参数以及用药量汇聚成大数据,且随着作业量的增加不断完善。基于此,施药专家系统成为了可能,用户在施药作业时只需要输入气象环境条件、作物种类就可以得到最佳的飞行参数、推荐药剂药量以及合适机型,提高了使用人的专业素质,这不仅会提高农业无人机的使用频率,还会显著增加有效植保面积。随着智慧农业的不断发展,未来 5G 技术在农业无人机领域中的应用将会更加普遍,自动化、智能化水平不断提高,向着“互联网+农业”发展。无人机施药专家系统的开发利用是将来的发展方向。

6.2.2 农业无人机生物防治技术 将农业无人机应用于生物防治,例如利用农业无人机在水稻田投放被赤眼蜂寄生了的米蛾卵,赤眼蜂孵化之后可以从小孔中飞出并且主动寻找螟虫的卵进行寄生,最终杀死螟虫的卵从而达到生物防治的效果^[98]。另外,巴西近一半的甘蔗田种植区都采用了赤眼蜂来防治虫害,其中 98% 都是通过无人机释放的^[99]。在未来可以应用于豆类、玉米、小麦以及瓜果类等作物的生物防治。无人机施药生物防治的应用前景广阔。

6.2.3 多机合作或一机多能进行田间作业技术 传统的作物长势监测和病虫草害监测主要是靠农业技术人员在田间进行调查,费时费力,而近些年利用无人机遥感监测作物长势和作物病虫害成为一种重要的监测手段。它采集信息迅速,覆盖率比较广。在农业无人机作业前,同一无人机或不同无人机先在该地段飞一遍,例如极飞 P40、P80、大疆 T30 等,通过采集作物的光谱信息,经过分析获取作

物长势和病虫害处方图,从而为农业无人机作业提供精准定位。这样可以实现按需给药,节约成本。既响应了国家减药的政策,又迎合了大众对绿色安全食品的追求。随着精准农业的发展,多机合作成为未来农业作业的一种新趋势,增加了各种技术的关联性。无人机综合监测施药技术前景广阔。

6.2.4 公共场所的无人机杀菌消毒 农业无人机不仅服务于农业方面,也与人们的公共生活息息相关。2019 年 12 月暴发了新冠疫情,切断传播途径至关重要。为此,全国上下开始对各种公共场所进行消杀,主要是采用穿戴厚重的防护服人工消杀。该方法存在效率低、用工多,容易造成消杀人员感染等问题。2020 年 1 月 31 日,极飞科技正式宣布启动“春雷行动”,投入 500 万元人民币,设立防疫消杀专项基金,为全国极飞用户义务防疫消杀作业保驾护航。据统计,数千架极飞农业无人机参与了消杀工作。采用农业无人机搭载消毒药剂进行消杀,专业飞手可以在操作室远距离遥控农业无人机进行作业。该方式会大大提高消杀速率,同时避免了人直接和药、病毒接触。这将为未来大面积消杀传染类病毒细菌提供很好的借鉴作用。

当前全球农业正在经历第 4 次革命,即智能革命时代,机械化、智能化是未来农业发展的方向。农业无人机的应用对提高我国植物病虫害防治机械化水平,增强农业抗风险能力具有重要意义^[100]。尽管目前无人机施药技术与发达国家还存在差距,但是我国近年来不断加强创新能力和对核心技术的攻关,并增大资金的投入,与几年前相比,关于农业无人机作业的标准规范也逐渐多了起来,各大农药公司也加紧了对飞防药剂的研发,无人机施药势必会成为我国农业作物生长调控和病虫害防控的重要方式。

参考文献:

- [1]贾志宽. 农学概论[M]. 北京:中国农业出版社,2010:262-270.
- [2]Oerke E C. Crop losses to pests[J]. The Journal of Agricultural Science,2006,144(1):31-43.
- [3]周奋启,董红刚,陈银凤,等. 不同植保机械喷雾雾滴沉积分布对小麦病害的防治效果[J]. 湖北农业科学,2017,56(12):2275-2279.
- [4]Xie K, Xu J, Pan Z W. Research and application of anti-offset wireless charging plant protection UAV[J]. Electrical Engineering, 2020,102(4):2529-2537.
- [5]娄尚易,薛新宇,顾伟,等. 农用植保无人机的研究现状及趋势[J]. 农机化研究,2017,39(12):1-6,31.
- [6]王军,邹学庆,卢蓓蓓,等. 基于 nRF24L01 植保无人机无线数据传输系统设计[J]. 中国农机化学报,2018,39(6):52-55.
- [7]周俊平. 农用无人植保机远程控制系统操作终端设计[J]. 农机化研究,2020,42(12):101-106.
- [8]崔永明. 农业植保无人机的结构原理和使用方法[J]. 农机使用与维修,2018(7):29-30.
- [9]于金友,尚德林,兰玉彬,等. 植保无人机药箱防晃性能检测试验台设计与试验[J]. 中国农机化学报,2021,42(6):60-66.
- [10]吴开华,孙学超,张竞成,等. 基于高度融合的植保无人机仿地飞行方法研究[J]. 农业机械学报,2018,49(6):17-23.
- [11]王艳萍,蔡永生,杨岚,等. 植保无人机喷头设计与仿真[J]. 机械研究与应用,2019,32(5):51-53,58.
- [12]Enderle B. Commercial applications of UAV's in Japanese agriculture[C]//Proceeding of the AIAA 1st UAV Conference. Portsmouth, Virginia:UAV Conference, 2002.
- [13]尹选春,兰玉彬,文晟,等. 日本农业航空技术发展及对我国的启示[J]. 华南农业大学学报,2018,39(2):1-8.
- [14]杨亚飞,金濯,祝戴乐,等. 农用植保无人机发展研究现状[J]. 南方农机,2019,50(9):22,36.
- [15]张希颖,胡睿. 从美国、日本经验浅评中国植保无人机的发展[J]. 对外经贸实务,2018(2):26-29.
- [16]空中散布等における無人航空機利用技術指導指針[S]//平成 28 年 5 月 31 日付 28 消安第 1118 号. 日本农业水产省消费安全局,2016.
- [17]薛新宇,兰玉彬. 美国农业航空技术现状和发展趋势分析[J]. 农业机械学报,2013,44(5):194-201.
- [18]吴智洋. 单旋翼植保无人机技术浅析[J]. 中国植保导刊,2014,34(S1):40-41,18.
- [19]Kelemen D. The future of unmanned aircraft systems: is there a niche in aerial application[J]. Agricultural Aviation,2013,40(5):14-21.
- [20]农业部贸促中心. 小型无人机“进军”美国农业市场[J]. 农产品市场周刊,2016(39):62.
- [21]何龙,甄世婵,张成. 植保无人机发展现状[J]. 农业工程,2020,10(9):12-16.
- [22]蔡良孜,李昆,王林萍. 美、日、中航空植保产业发展的比较与启示[J]. 中国植保导刊,2019,39(7):60-63.
- [23]刘开新. 俄日韩等国家农业航空产业发展现状[J]. 时代农机,2015,42(7):169.
- [24]何雄奎,Bonds J,Herbst A,等. 亚洲农用植保无人机发展与应用[J]. 中国农业文摘(农业工程),2017,29(6):5-12.
- [25]曹光乔,李亦白,南凤,等. 植保无人机飞控系统航线规划研究进展分析[J]. 农业机械学报,2020,51(8):1-16.
- [26]冷志杰,蒋天宇,刘飞,等. 植保无人机的农业服务公司推广模式研究[J]. 农机化研究,2017,39(1):6-9.
- [27]李俏. 农业社会化服务体系研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2012:26-35.
- [28]兰玉彬,王国宾. 中国植保无人机的行业发展概况和发展前景[J]. 农业工程技术,2018,38(9):17-27.
- [29]阳湘林. 中国植保无人机产业发展探析[J]. 中国植保导刊,

- 2020,40(5):67–71,78.
- [30]康平. 我国植保无人机突破 5 万架 2020 年将迎来新机遇[J]. 农药市场信息,2020(2):1.
- [31]刘泽峰,唐宇,骆少明,等. 多旋翼植保无人机变量喷洒系统设计[J]. 农机化研究,2018,40(12):47–54.
- [32]Yang S L, Yang X B, Mo J Y. The application of unmanned aircraft systems to plant protection in China[J]. Precision Agriculture, 2018,19(2):278–292.
- [33]Wang S B, Han Y, Chen J, et al. Flight safety strategy analysis of the plant protection UAV[J]. IFAC – PapersOnLine, 2018, 51(17):262–267.
- [34]李继宇,兰玉彬,施叶茵. 旋翼无人机气流特征及大田施药作业研究进展[J]. 农业工程学报,2018,34(12):104–118.
- [35]Yang A M, Wang H, Tang K W, et al. Soil erosion characteristics and control measures in China[C]. Beijing:12th ISCO Conference, 2002.
- [36]刘剑君,贾世通,杜新武,等. 无人机低空施药技术发展现状与趋势[J]. 农业工程,2014,4(5):10–14.
- [37]中国农业年鉴编委会. 2015 年中国农业年鉴[M]. 北京:中国农业出版社:37–56.
- [38]金奎奎,薛新宇,秦维彩,等. 电动单旋翼植保无人机性能试验[J]. 中国农机化学报,2019,40(3):56–61.
- [39]冯焕萍. 农用植保无人机作业市场分析[J]. 中国农机化学报, 2018,39(8):54–57.
- [40]王宇,陈海涛,李煜,等. 基于 Grid–GSA 算法的植保无人机路径规划方法[J]. 农业机械学报,2017,48(7):29–37.
- [41]阚平,姜兆亮,刘玉浩,等. 多植保无人机协同路径规划[J]. 航空学报,2020,41(4):255–265.
- [42]徐博,陈立平,谭彧,等. 多架次作业植保无人机最小能耗航迹规划算法研究[J]. 农业机械学报,2015,46(11):36–42.
- [43]严炜,龙长江,李善军. 基于差分量子退火算法的农用无人机路径规划方法[J]. 华中农业大学学报,2020,39(1):180–186.
- [44]范叶满,沈楷程,王东,等. 基于模拟退火算法的无人机山地作业能耗最优路径规划[J]. 农业机械学报,2020,51(10):34–41.
- [45]陈盛德,兰玉彬,周志艳,等. 植保无人机航空喷施飞行质量的试验与评价[J]. 华南农业大学学报,2019,40(3):89–96.
- [46]李继辉,白越,裴信彪,等. 基于深度学习的农用无人机自主避障研究[J]. 农机化研究,2021,43(3):1–7.
- [47]吴开华,王文杰. 植保无人机结构光视觉的障碍物检测方法[J]. 光电工程,2018,45(4):32–40.
- [48]孙柯,吴开华,王亚涛,等. 基于毫米波雷达的植保无人机避障系统研究[J]. 传感器与微系统,2020,39(6):73–76.
- [49]明宇. 一种基于视觉的植保无人机避障[J]. 电子世界,2018(22):141–142.
- [50]郝学晨,周国平. 基于神经网络与重力补偿的植保机高度控制[J]. 农机化研究,2020,42(8):31–34,40.
- [51]段立踬,刘洋洋,茹煜. 植保无人机变量施药监测技术研究发展与展望[J]. 中国农机化学报,2018,39(6):108–113
- [52]王大帅,张俊雄,李伟,等. 植保无人机动态变量施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(5):86–93.
- [53]漆海霞,陈鹏超,兰玉彬,等. 不同电动植保无人机稻田雾滴沉积分布试验研究[J]. 农机化研究,2019,41(9):147–151.
- [54]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.
- [55]王昌陵,何雄奎,王满楠,等. 基于空间质量平衡法的植保无人机施药雾滴沉积分布特性测试[J]. 农业工程学报,2016,32(24):89–97.
- [56]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研究[J]. 农业机械学报,2016,47(1):15–22.
- [57]林正平,洪峰,刘鹤,等. 浅析影响植保无人机作业效果的主要因素[J]. 中国植保导刊,2019,39(4):70–72,85.
- [58]田志伟,薛新宇,李林,等. 植保无人机施药技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报,2019,40(1):37–45.
- [59]王军锋,罗博韬,霍元平,等. 助剂影响大载荷植保无人机喷洒沉积特性的试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2019,37(12):1044–1049.
- [60]陶波,孔令伟. 无人机喷雾雾滴分布研究[J]. 东北农业大学学报,2018,49(8):64–72.
- [61]文晟,韩杰,兰玉彬,等. 单旋翼植保无人机翼尖涡流对雾滴飘移的影响[J]. 农业机械学报,2018,49(8):127–137,160.
- [62]谷振兵,赵丽芳,李岩舟,等. 单旋翼植保无人机尾翼振动的试验研究[J]. 农机化研究,2020,42(3):164–168,174.
- [63]王水满. 基于激光雷达的植保无人机自主避障技术研究[D]. 唐山:华北理工大学,2020:6–13.
- [64]胡红岩,任相亮,马小艳,等. 棉花脱叶剂的植保无人机喷施技术[J]. 中国棉花,2018,45(11):43–44.
- [65]张荣,陈兵,唐小军,等. 棉田植保无人机喷施脱叶剂的应用效果研究[J]. 绿洲农业科学与工程,2019(4):21–24.
- [66]胡红岩,任相亮,马小艳,等. 无人机喷施与人工喷施棉花脱叶剂效果对比[J]. 中国棉花,2018,45(7):13–15,19.
- [67]王喆,冯宏祖,王兰,等. MG–1S 型无人机喷施不同棉花脱叶剂的田间效果对比[J]. 中国棉花,2018,45(1):27–28,46.
- [68]付凯. 植保无人机在奎屯垦区喷施棉花脱叶剂的应用效果研究[D]. 石河子:石河子大学,2019:13–22.
- [69]王喆,冯宏祖,马小艳,等. 无人机施药对棉蚜的防治效果及经济效益分析[J]. 农药学报,2019,21(3):366–371.
- [70]娄朝霞,温浩军,张斌,等. 多旋翼植保无人机棉花飞防作业效果[J]. 新疆农业科学,2019,56(3):537–543.
- [71]田志伟,薛新宇,崔龙飞,等. 植保无人机昼夜作业的雾滴沉积特性及棉蚜防效对比[J]. 农业工程学报,2020,36(5):69–77.
- [72]龚恒亮,孙东磊,陈立君,等. 多旋翼无人机施药防治甘蔗绵蚜的研究[J]. 环境昆虫学报,2017,39(3):687–693.
- [73]Wang G, Lan Y, Yuan H, et al. Comparison of spray deposition, control efficacy on wheat aphids and working efficiency in the wheat field of the unmanned aerial vehicle with boom sprayer and two conventional knapsack sprayers[J]. Applied Sciences, 2019, 9

- (2):218.
- [74]王小武,丁新华,付开赞,等. 小型植保无人机超低量喷雾防治稻水象甲[J]. 生物安全学报,2018,27(3):216–223.
- [75]王佐乾,吴婧莲,吴 涛,等. 不同植保机械在湖北稻田病虫害防治中的效能评价[J]. 河南农业科学,2021,50(2):89–95.
- [76]蔺乔仙,杨世常,夏银果,等. 植保无人机在甘蔗害虫防治上的应用效果[J]. 甘蔗糖业,2020(1):23–27.
- [77]程应德,郑在武,张 超,等. 植保无人机结合飞防助剂施药防治水稻纹枯病的效果[J]. 中国植保导刊,2019,39(6):74–75.
- [78]淦 城,肖明徽,梁声荣,等. 六旋翼植保无人机防治油菜菌核病效果探析[J]. 中国植保导刊,2018,38(11):69–71,75.
- [79]屈天元,李艳朋,李东洋. 大疆 MG–1P 植保无人机防治小麦赤霉病药效试验[J]. 现代农业科技,2020(9):98–99.
- [80]李艳朋,李 猛,李秀钰. 植保无人机与飞防助剂在小麦赤霉病防治上的应用效果[J]. 浙江农业科学,2020,61(3):445–447.
- [81]胡中泽,王 安,钱 巍,等. 植保无人机结合助剂在小麦赤霉病防治中的农药减量研究[J]. 金陵科技学院学报,2019,35(2):53–56.
- [82]赵 静,辛 芳,周月婷,等. 多旋翼植保无人机与常规喷施缩节胺对棉花生长调控效应比较[J]. 新疆农业科学,2018,55(11):2096–2104.
- [83]张亚林,黄 群,马小艳,等. 无人机飞防对棉花生长调控效果研究[J]. 中国棉花,2019,46(1):26–28.
- [84]邵国民,骆 琴,何信富,等. 植保无人机防除水稻直播田杂草效果评价[J]. 中国稻米,2019,25(6):89–92.
- [85]张宋超,薛新宇,孙 涛,等. 植保无人飞机油菜杂草防治与效果评估研究[J]. 中国农机化学报,2019,40(9):48–53,59.
- [86]张小秋,宋修鹏,梁永检,等. 植保无人机在蔗田化学除草上的应用效果[J]. 中国糖料,2020,42(1):61–65.
- [87]中国农业科学院. 无人机安全高效授粉技术成功破解库尔勒香梨生产难题[J]. 中国食品学报,2020,20(9):101.
- [88]程建斌,汪继斌,王年金,等. 无人机辅助授薄壳山核桃花粉对山核桃的结实效应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(4):199–202.
- [89]刁 友,朱从桦,任丹华,等. 水稻无人机直播技术要点及展望[J]. 中国稻米,2020,26(5):22–25.
- [90]于丰华,曹英丽,许童羽,等. 基于高光谱遥感处方图的寒地分蘖期水稻无人机精准施肥[J]. 农业工程学报,2020,36(15):103–110.
- [91]刘小涵,刘希军,高丽霞,等. 混合动力植保无人机能量管理策略[J]. 电源技术,2019,43(6):1034–1038.
- [92]张晓瑛. 锂电池在植保无人机中的应用研究[J]. 当代农机,2017(5):73–75.
- [93]徐伟诚,陈 凯,张 铭,等. 基于太阳能的植保无人机续航提升方案[J]. 中国农业科技导报,2018,20(11):62–68.
- [94]邱小雷,张 羽,张小虎,等. 从植保无人机经验探析我国精确农业发展路径[J]. 江苏农业科学,2019,47(16):30–33.
- [95]宋 睿,沈国清,张永涛,等. 植保无人机飞防助剂的筛选及其性能评价[J]. 江苏农业学报,2021,37(2):333–339.
- [96]袁会珠,薛新宇,闫晓静,等. 植保无人飞机低空低容量喷雾技术应用与展望[J]. 植物保护,2018,44(5):152–158,180.
- [97]吴海霞,张杰峰,崔家华,等. 航空植保专用药剂对小麦赤霉病的防治效果研究[J]. 安徽农学通报,2020,26(9):101–102,114.
- [98]朱 航,黄 钰,李宏泽,等. 一种投放赤眼蜂进行生物防治的无人机:CN209454998U[P]. 2019–10–01.
- [99]黄 敏. 巴西生物防治领域无人机应用广泛[J]. 中国农资,2020(2):8.
- [100]Chen S D, Lan Y B, Li J Y, et al. Evaluation and test of effective spraying width of aerial spraying on plant protection UAV[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(7):82–90.