DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2024.04.001

智能植保装备关键技术研究现状与发展趋势

孙竹[1,2]，顾伟[1,2]，崔龙飞[1,2]，蔡晨[1,2]，陈晨[1,2]，周晴晴[1,2]，丁素明[1,2]，兰玉彬[3,4]，薛新宇[1,2,4*]

(1. 农业农村部南京农业机械化研究所，江苏南京，210014；2. 农业农村部现代农业装备重点实验室，江苏南京，210014；3. 华南农业大学电子工程学院/人工智能学院，广东广州，510642；4. 农业农村部航空植保重点实验室，河南安阳，455100)

摘要：植保机械是农业综合生产力的重要组成部分，先进的植保装备有利于提高农药利用率、提升粮食品质，保障农业可持续发展。从世界范围来看，美国、西欧、日本的施药装备在国际上处于领先水平，相关产品自动化和智能化程度高，作业效率和效果普遍优于国产水平，他们占据了绝大多数的市场份额，我国仅在植保无人机上具有一定的技术优势。为了准确把握植保机械的研究现状和未来发展方向，本研究整理了国内外地面、航空、田间管理机器人等典型植保装备的发展历程，根据大田和果园病虫害防治需求和特点，将植保机械细分为施药、部件及智能化3个技术分支。对变量施药、对靶施药、静电喷雾、风幕风送等施药技术方法进行了总结，对底盘、喷杆平衡、机器人驱动等装备技术原理进行了分析，对无人驾驶、对行行走、视觉导航等智能化技术应用进行了阐述，还从远程管理的角度阐述包括作业规划、调度决策、作业评价以及数字化平台的智能化构建。通过国内外装备技术水平的对比，认为未来植保机械技术发展的重点在于低量精准的施药方式、系列化专业化的装备部件以及无人化和智能化的作业模式。随着人工智能技术的不断发展，具有智能感知、分析决策和自主作业的智能化植保装备将成为未来主流的发展方向。

关键词：植保机械；智能化；精准施药；田间管理机器人；植保无人机

中图分类号：S24 **文献标识码**：A **文章编号**：2096-7217(2024)04-0001-23

孙竹，顾伟，崔龙飞，蔡晨，陈晨，周晴晴，丁素明，兰玉彬，薛新宇. 智能植保装备关键技术研究现状与发展趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2024，5(4)：1－23

SUN Zhu, GU Wei, CUI Longfei, CAI Chen, CHEN Chen, ZHOU Qingqing, DING Suming, LAN Yubin, XUE Xinyu. Research status and development trends of key technologies for intelligent plant protection equipment [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(4): 1－23

0 引言

植保装备是用于防治作物的病、虫、草害各类机械和工具的总称，也是保护农作物健康生长、提高农业生产效率的重要工具[1]。据统计，全国范围内农作物病虫草害发生种类高达1 700多种，可造成严重危害的有100多种，全国农作物病虫害防治面积约5亿hm^2。根据联合国粮农组织(FAO)自然损失率30%以上测算，在不采取防控措施的情况下，每年会给我国粮食产量造成1 500亿kg损失[2]，病虫害防控的好坏直接影响粮食的产量与质量，防控技术水平直接反映农业现代化物质装备水平[3]。从世界植保技术发展趋势来看，化学防治是农作物防治病虫草害的主要方法，工作原理是将农药制剂喷洒在作物上，保护其免受昆虫、真菌、细菌、病毒等生物危害[4]。但化学农药在控制病虫草害发生的同时，若使用不当也会对环境、农产品造成污染，并会危及施药作业人员的人身安全[5-7]。

国外植保机械早在19世纪中叶出现，欧洲开始使用喷雾法防治葡萄病虫害。1860年，美国开始制造手动喷雾器产品在加利福尼亚、纽约、明尼苏达等州用于防治植物病虫害；1887年，出现了马拉地轮驱动喷雾机；1895年，俄亥俄州的W. R. 门罗创制了带风机的手动喷粉器；1900年，出现了以汽油机为动力的喷雾机[8]；1918年，在美国开始使用飞机喷撒农药来防治森林害虫[9]；1925年，中耕型拖拉机问世后，开始应用拖拉机牵引式喷雾机[10]；1940年，风送式喷雾机最早出

收稿日期：2024-10-09 修回日期：2024-11-01

基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFD2000200)；国家重点研发计划青年科学家项目(2022YFD2000700)

第一作者：孙竹，男，1983年生，吉林长春人，副研究员；研究方向为植保机械工程技术。E-mail：johnson_niam@qq.com

*通信作者：薛新宇，女，1969年生，江苏苏州人，博士，研究员；研究方向为植保机械工程技术。E-mail：xuexynj@qq.com

现在欧美葡萄种植园[11];1945年,二战后大量过剩的小型飞机纷纷转用到农业上来,农用固定翼有人飞机开始大面积应用[12];1966年,静电喷雾技术在美国的喷杆喷雾机和农用飞机上应用[13];1970年后,随着大农场为主的规模化经营,大型悬挂式、自走式喷雾机在欧美发达得到全面迅速的发展[10];1985年,日本YAMAHA公司率先推出世界第一架植保无人机用于农药的喷洒[14]。此后西方国家形成了以大型植保机械和有人飞机为主体的植保装备体系,自动化、智能化的植保机械不断涌现,并表现出了与各国农业生产特点相适应的不同之处。其中,美国农业以种植旱田作物和果树为主,水稻种植面积相对较小,农户经营面积大,施药装备以大功率拖拉机配套的宽幅喷杆喷雾机、果园喷雾机和大型固定翼农用航空施药装备为主;西欧各国基本上种植旱田作物和果树,水稻种植面积很少,农户经营面积较大,施药装备以大中功率拖拉机配套的喷杆喷雾机、果园喷雾机为主,航空施药装备较少。日本农业以兼业农户比重大(占农户总数的84%)为特点,粮食作物以水稻为主,种植规模较小,施药装备以小型机动喷雾机和直升飞机航空喷雾设备为主。

我国植保机械起源于20世纪30年代[15]。1934年南京中央农业实验所(现农业农村部南京农业机械化研究所)设置了喷雾器制造实验室,于1936年成功研制出自动喷雾器和双管喷雾器,生产能力最高达月产600架,行销到江苏、浙江等23个省市。1949年后我国手动植保机械数量快速增加,至1958年绝大多数省、自治区、直辖市都有了植保机械专业生产厂,80年代末累计生产了20多个品种,70多个型号的植保机械,包含单管喷雾器、手摇喷粉器、压缩喷雾器、背负式喷雾器、机动担架式喷雾机、背负式弥雾喷粉机等[16]。2010年以前,我国植保机械长期以小型为主,只出现了部分喷杆喷雾机和少数有人驾驶飞机,主要在新疆和东北地区应用。2008年,农业农村部南京农业机械化研究所研制了第一台自主飞行植保无人机,此后植保无人机发展迅速,在很大程度上替代了小型植保机械,截至2022年底,全国的植保无人机保有量已达到14万台,占我国病虫害防治面积的20%左右。

随着农业生产的发展和社会对食品安全及环境保护意识的提高,21世纪以来,利用先进的传感器、物联网、人工智能等技术,进行精准施药作业的智能植保装备逐步发展[17](图1)。

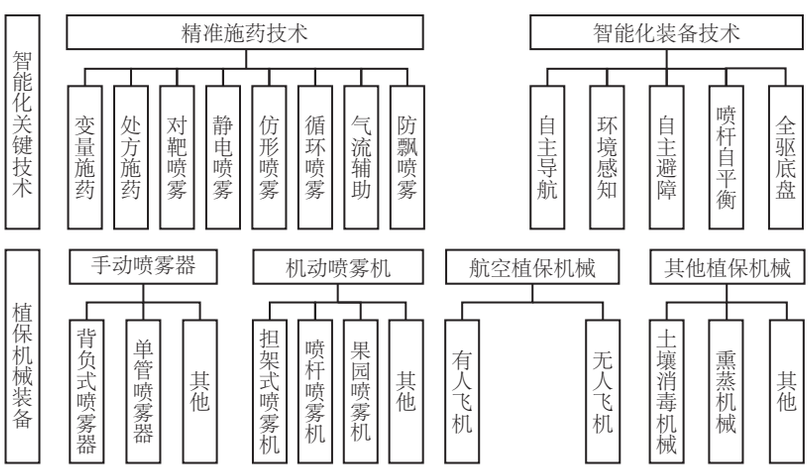


图1 植保机械和关键技术

Figure 1 Crop protection machinery and key technologies

2024年10月,农业农村部发布《农业农村部关于大力发展智慧农业的指导意见》(农市发〔2024〕3号),提出需大幅提升农业智能化水平,而目前植保机械行业发展呈现出以下几个特点:(1)低喷量、精喷洒和少污染的施药技术[18],如基于防治对象自动识别的对靶喷雾技术,提高雾滴穿透减少飘移的气流辅助防飘喷雾技术,利用电场力增强雾滴附着的静电喷雾技术,满足不同防治对象要求的可控雾滴技术,适合于果树的循环喷雾技术等,有效提高农药利用率、减少农药使用量;(2)系列化、专业化关键部件和系统[19],如根据作业速度和作业密度自动调节喷量的智能喷施系统,药剂自动注入装置,喷杆减振自平衡系统,全液压驱动、高性能底盘,机电液一体化控制系统,作业场景和施用靶标实时感知等系统,使得施药装备的感知决策和控制水平不断提升;(3)高效化、自动化和智能化的施药装备[20-21],如高地隙自走式喷杆喷雾机,果园送风式喷雾机,果园仿形喷雾机,风送远射程喷雾机,植保无人机,作业信息智能管控平台等,实现高质量的植保作业,并逐步向无人化全自主作业发展。本研究围绕植保机械智能化关键技术和装备的发展趋势进行阐述。

1 国内外整机装备应用情况

从世界范围来看,美国、西欧、日本的施药装备在

国际上处于领先水平，相关产品自动化和智能化程度高，作业效率和效果普遍优于国产水平，他们占据了绝大多数的市场份额，我国仅在植保无人机上具有一定的技术优势。

1.1　喷杆喷雾机

国外知名喷杆喷雾机生产厂商约翰迪尔（John Deere）、阿玛松（Amazone）、哈滴（HARDI）、Agrifac、凯斯（CNH）、爱科（AGCO）等，生产的喷杆喷雾机作业幅宽超过 50 m，大型、智能、高效是其主要特点，整体技术基本上趋于成熟[22]（图 2）。相关科研机构与企业在技术突破与产品开发过程中越来越注重与生态环境相结合。目前在大田植保领域，大型喷杆喷雾机不可或缺，近年来随着普通大型喷杆喷雾机的产品日益增多，大型喷杆喷雾机械的研究重点逐步开始向在线混药、精准喷雾、高效作业、苗带识别等方向转移，大型喷杆喷雾机械从基本功能实现向多功能、智能化方面转型升级[23]。



(a) Amazone Pantera系列　(b) Agrifac Condor系列　(c) HARDI COMMANDER系列　(d) John Deere R4140系列

图 2　国外喷杆喷雾机

Figure 2　Foreign boom spray equipment

国内相关研究起步较晚，植保机械企业及科研院所等对大型高端喷杆喷雾机的研究也在不断深入，中国农业机械化科学研究院下属现代农装科技股份有限公司研发出的 3WZG-3000A 大型高地隙自走式喷杆喷雾机，如图 3（a）所示，均填补了国内高端喷杆喷雾机产品的空白，整机采用全液压动力输出，药箱容积达 3 000 L，最大作业幅宽为 27 m，集成配备有四轮转向、轮距可调、独立式空气悬架系统、风幕式变量喷雾等技术[24]。山东华盛中天机械集团股份有限公司生产华盛泰山 3WP 1300G 喷雾机，如图 3（b）所示，喷杆采用钢管焊接三角形立体桁架结构，具有自动液压调平功能，喷臂设有防碰撞自动保护装置；中农丰茂植保机械有限公司生产的 3WP 1800G 高地隙自走式喷雾机，如图 3（c）所示，喷幅为 18～24 m，喷杆采用平面或三角形立体桁架结构并配有电子液压控制系统，能控制喷杆的左右平衡和喷雾作业[25-26]。



(a) 3WPZ-3000A高地隙自走式喷雾机　(b) 3WP 1300G高地隙自走式喷雾机　(c) 3WP 1800G高地隙自走式喷雾机

图 3　国产喷杆喷雾机

Figure 3　Domestic boom spray equipment

1.2　果园喷雾机

美国、欧洲等发达国家果园种植农艺更加规范化，农产品质量监管严格，法律法规健全，果园建设标准化程度较高。果园施药装备具有研发起步早、技术成熟度高、先进技术融合度高、市场化应用广等特点。在装备上体现为形式丰富、智能化程度高、适用性广、作业效率高、农药有效利用率高、节药省水显著、环境友好等。普遍采用基于 GIS、边缘信息、作业处方等的气液耦合变量施药技术，多传感器融合的机具状态、作业质量监控技术，普遍可搭载基于 ISOBUS 协议的作业控制系统。意大利 Ideal 公司 Bioair 系列和澳大利亚 Pastro 公司 LAD 系列喷雾机采用线性流道气雾控制技术，能够对果树冠层仿形并联流道的气流场进行精准调节。意大利 Caffini、波兰 Weremczuk 公司循环喷雾机采用高压喷雾与回收技术，可减少 80%～90% 的雾滴飘移量。法国 Kuhn 公司 Arbo 系列、意大利 Martignani 公司 Turbo 系列、Florida 公司 T2G 喷雾机，采用低容量施药技术，最高可节省 95% 的用水量。法国 Berthoud 公司和意大利 Martignani 的吊杆式高地隙果园喷雾机，采用全液压柔性变距仿形作业技术，对不同种植模式下密植果园具有较强适应性。意大利 Martignani 公司、Maschio Gaspardo 公司的系列化产品采用了静电喷雾技术。此外，还有更多的新技术得到了商业化的应用。意大利 Bargam 公司的 Jet Air 喷雾机，采用反桨可变螺距双风叶技术，基于超声冠层特征探测，可快速响应实时调节风量。意大利 Vicar 公司系列产品，采用涡轮风送仿形喷雾技术，兼具大风量与高风压，搭配模块化扩展功能，使其能够轻松应对不同作

业环境。意大利Carrarospray公司Zen Eco Bliss,具备单喷嘴独立位姿控制能力,配置文丘里在线混药系统,采用基于康达效应的环状气帘防飘结构,可减少95%的雾滴飘移(图4)。



图4 国外果园喷雾机

Figure 4 Foreign orchard spray equipment

我国果园病虫害防治综合机械化水平不到10%,依然以背负式、担架式和手推式喷雾机为主。国内对于果园风送式喷雾装备的研究开始于20世纪70—80年代,1980年农业部南京农业机械化研究所与苏州农业药械厂共同研制了我国首台半悬挂式果园风送喷雾机[27]。随后中国农机研究院、山东农业大学、郑州果树所等单位陆续研制了配套大、中型拖拉机的悬挂或牵引式果园风送喷雾机等[28]。农业部南京农业机械化研究所、江苏大学、南京林业大学先后研制了高射程喷雾机(雾炮机)。中国农业大学研制了果园自动对靶静电喷雾机[29]和循环喷雾机[27],开始了风送喷雾、静电喷雾、对靶施药、雾滴拦截回收等技术的集成研究。农业部南京农业机械化研究所[30-31]、南京林业大学、南京农业大学[32]、山东农业大学[33]相继研发出自走式果园风送喷雾机。随着农业机器人的提出,西北农林科技大学[34]、安徽农业大学[35]、华南农业大学[36]分别开展了遥控果园喷雾机的研制。农业农村部南京农业机械化研究所、西北农林科技大学[37]分别研发了基于LiDAR实时果树冠层探测,并且能够分层对靶变量施药的智能果园喷雾机(图5)。虽然我国研究内容与方向上与国际先进水平的差距正在缩小,但距离实际推广应用还有较长的距离。



图5 国内果园喷雾机

Figure 5 Domestic orchard spray equipment

1.3 田间管理机器人

田间管理机器人是指通过场景感知与自主导航、视觉识别定位和精准作业控制完成施药、除草、数据采集等田间管理作业的智能农机装备[38]。与工业机器人不同,田间管理机器人处于非结构化、不确定性作业环境,且作业任务复杂、处理对象多样、底盘对行行走难。过去10年来,传感器技术、信息技术和控制技术的进步加速了农业机器人的设计和开发,国际上传统农机公司与机器人研究机构、初创公司之间广泛开展跨学科合作,机器人技术已被引入农业领域并成功用于无人化田间管理,德国Bosch和阿玛松(AMAZONE)农机率先联合开发了BoniRob系列多功能田间管理机器人平台,用于大豆、甜菜、胡萝卜等的杂草自动控制、作物表型信息探测、土壤检测等[39]。导航系统采用陀螺仪、卫星定位系统、多线激光雷达等传感器,用于感知作业环境、识别作物行,可携带150 kg的任务载荷。约翰迪尔公司收购机器人初创公司蓝河科技(Blue River Technology),生产的视觉对靶施药系统,使用机器视觉来识别作业靶标,然后对靶喷洒农药或除草剂等,主要被用于棉花、生菜,以及其他特色蔬菜[40]。还有许多初创公司开发了用于施药、除草的田间管理机器人,例如,法国Carré公司研发的ANATIS机器人、德国AGROINTELLI公司研发的Robotti机器人和Adigo公司研发的Asterix对靶施药机器人。瑞士Ecorobotix公司开发了对靶除草的机器人,法国Naïo technologies公司开发了一系列田间管理机器人(型号如OZ、TED和DINO)。

田间管理机器人逐渐成为高校的研究热点,主要有瓦格宁根大学、昆士兰科技大学、悉尼大学、奥斯纳布鲁克大学[41]。昆士兰科技大学开发了AgBot Ⅱ机器人,用于自动施肥、杂草检测和分类以及机械或化学杂草控制,采用数据驱动的决策方法,机器人能够使用在线杂草检测算法来确定最佳的杂草剔除方法,杂草检测和分类的成功率超过90%[42]。挪威生命科学大学研制了Thorvald Ⅱ模块化农业机器人,提出了一种轮式机器人模块化设计方法,通过底盘的快速充配置

满足各种农场环境(如温室和大田)中作业所需的物理特性(车轮宽度、功率要求、离地间隙等)[43]。奥斯纳布吕克应用技术大学开发的一款名为 Autonome Robote 除草机器人,奥尔胡斯大学开发了名为 Hortibot 的多功能田间管理机器人,可以安装各种杂草检测和除草机具,如喷杆和除草铲;悉尼大学开发的一款名为 RIPPA 的田间管理机器人,利用太阳能发电,用于农田环境智能感知和精确施药[44](图 6)。田间管理机器人已经被用于施药/施肥、土壤检测、机械/化学杂草控制、作物表型信息采集等任务,通过不断收集各种作物的生长信息,以帮助农民更好地掌握农田的情况,其核心技术包括移动底盘技术、定位与导航技术、精确作业技术等,但大多数田间管理机器人平台尚未完全商业化。

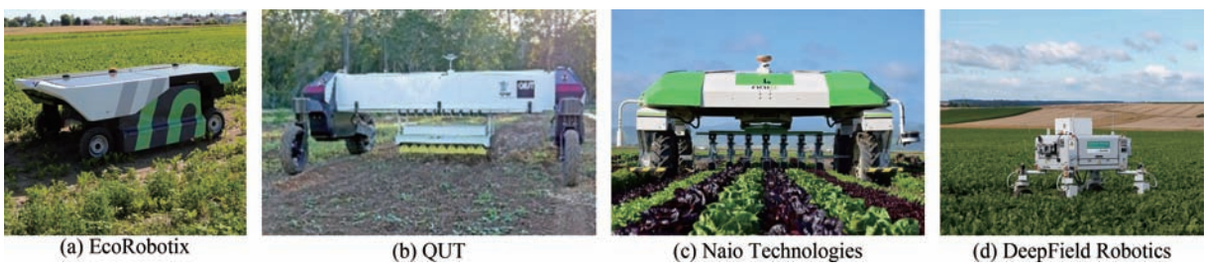


图 6　国外田间管理机器人产品

Figure 6　Foreign field management robot products

我国在田间管理机器人研发方面取得了显著进展,许多高校和科研机构积极进行机器人技术的研究,包括农业机器人在精准播种、施肥、除草和病虫害监测等方面的应用[45]。农业农村部南京农业机械化研究所等机构和企业发明了系列轮式田间管理机器人平台(图 7),在大田、果园、温室环境开展了施药、除草、信息采集试验,攻克了基于多传感器信息融合的机器人场景感知与自主导航控制、精准施药、病虫害诊断、作业状态监测等关键技术[46]。中国农业大学研发了作业目标信息获取农业机器人,华南农业大学研发了电动轮式移动机器人,中国农业大学和中国农业机械化科学研究院联合研发了一种农用四轮驱动液压机器人平台,苏州博田研制了用于果园植保的系列履带式施药机器人[47]。

近年来,随着我国农业现代化的推进,市场上涌现出多种类型的田间管理机器人,如智能无人驾驶拖拉机、施药机器人等。这些机器人能够提高作业效率,降低劳动成本,减轻农民的负担。2021年,中华人民共和国工业和信息化部等十五部门联合印发《“十四五”机器人产业发展规划》,强调重点研制除草、精准植保、采摘收获、畜禽喂料、淤泥清理等农业机器人[48]。研究田间机器人协助农民高效、安全、可靠地完成施药、施肥、除草等任务,将具有重大的现实意义。



图 7　国内田间管理机器人设备

Figure 7　Domestic field management robot equipment

我国田间管理机器人的研究还处于起步阶段,尚没有形成完善的智能、自主的导航控制系统。机器人导航控制系统较为复杂,现有研究多以单片机等嵌入式导航控制系统为主,并不能满足无人驾驶系统多个软件模块实时运行,基于 ROS 的分布式多进程机器人开发框架值得被研究者关注;农业生产具有高度多样性,现有底盘大多数不具备良好的扩展性和柔性作业能力,导致功能单一,成本偏高,导航系统正在由辅助导航向场景感知与自主导航过渡。

1.4　植保无人机

国外植保无人机研发和应用最成熟的是日本 YAMAHA 公司,1985 年研制第一台油动植保无人机 YAMAHA-R50,其有效载荷为 20 kg,主要用于农药的喷洒[49]。经过 10 年的作业实践和改进,1997 年日本研发出了具有飞行姿态控制系统的 RMAX 新机型出现,性能大幅提升的;至 2017 年,最新投入市场的 FAZERR G2 型无人直升机,载药质量为 40 kg,续航距离为 90 km。2015 年的统计数据显示,日本植保无人直升机保有量为 2 668 台,日本农用无人直升机作业面

积为963 khm²/年,占水稻种植面积的50%~60%[50],其中YAMAHA公司在日本植保无人机市场占有率达90%。近年来,欧美国家也开始了电动植保无人机研发,如YAMAHA公司的电动六旋翼Nile-JZ与Guardian Agriculture公司电动四旋翼植保无人机SC1等(图8)。



图8 国外植保无人机

Figure 8 Foreign crop protection UAS

我国植保无人机起步较晚,2008年农业部南京农业机械化研究所在主持"水田超低空低量施药技术研究与装备创制"863课题,研制了世界首台具有自主飞行能力的N-3植保无人机[51],有效载荷25 kg,自主飞行和喷洒的作业模式,开启植保无人机自主飞行的时代[52]。2010—2012年,我国市场涌现出大量植保无人机产品,多采用半自主飞行,有一定的操控难度,载药量在10 kg左右,代表机型有QF80、CD-15、谷上飞等;2015年开始,市场上的植保无人机农田适应性有了较大提升,操控方式上已经实现全自主起降飞行,部分具备遇障悬停能力,代表机型有P30、MG-1、CE-20、Z-3N,载药量20 kg左右。2017年,在政府、科研单位、高校、企业以及服务组织的探索下,植保无人机作业技术发展迅速,整机质量和智能化水平得到大幅提升,代表机型有电动:大疆T50载药量40 kg/装料量50 kg,起飞重量103 kg;极飞P100 Pro载药量50 kg,起飞重量96 kg;油动:全丰T2000,载药量20 kg,起飞重量50 kg;总参60所的Z-3N载药量35 kg,起飞重量100 kg[53](图9)。其中极飞、大疆、全丰市场占有率达90%,行业规模已居世界领先,产品出口世界。截至2022年,全国的植保无人机保有量已达到14万台,作业面积1.06亿hm²,占我国病虫害防治面积的20%左右[54]。



图9 我国植保无人机技术进化

Figure 9 The evolution of plant protection drone technology in China

2 技术发展情况

2.1 变量施药技术

变量喷雾技术通过采集作物数据信息,从而调节作业参数实现精准施药[55],包含基于处方图和基于实时传感器两种技术[56]。前者利用GIS、GPS、RS、GNSS等系统进行精确定位和管理,通过数据采集和处理形成数据地图指导喷药;后者通过传感器探测作物信息并动态调节喷雾量,实现按需喷药[17]。

在基于处方图的变量施药系统研究领域,LUCK等[57]开发了基于处方图的喷杆喷雾机分段控制系统,最高可节省农药17.5%;陈志刚等[58]研制了基于北斗定位技术的农田变量处方变量喷雾机,处方图解译时间小于1 s,网格判别误差小于0.75 m;王金峰等[59]设计了基于处方图的变量施肥控制系统,试验结果表明处方图定位信息有效率达99.99%,平均施肥量误差为4.23%。

在基于实时传感器的变量施药系统研究领域,University of Illinois[60]开发了基于多个CCD相机组合实时图像处理的精准除草喷雾机,将采集的图片分割为0.508×0.61 m²的控制区域,以杂草密度和面积作

为单个喷嘴的控制信号，可有效减少农药52%～71%。该成果推动了基于传感器实时数据处理的智能施药系统的研究热潮。随后基于其他传感器的变量施药系统相继被研发出来，如红外探测控制系统、激光对靶施药系统、超声波传感器施药系统、LiDAR变量施药系统等[37, 61-62]。

与基于处方图的变量施药系统相比，实时传感器变量施药系统自动化程度高、空间分辨率高、决策及时高效，是今后研究的热点。变量施药系统的关键技术主要包括信息识别、决策方法、变量技术和控制系统。下面将从这4个关键技术对国内外精准施药技术进行分析。

2.1.1　信息识别

作物和病虫害识别：利用光谱成像技术和机器视觉技术进行作物及病害识别。光谱成像通过分析作物在不同波长的光谱反射或透射来评估植被生物量和健康状态[63]。无人机搭载高光谱相机，在可见光无法探测的植物检疫方面具有更高的灵敏度[64]。ISHIDA等[65]采用无人机的高光谱成像系统，测量了14种不同地物的光谱反射率，采用支持向量机模型进行分类，分类准确率达到了94.5%。机器视觉则根据形状、纹理、颜色等的变化运用图像处理算法进行分类。深度学习模型能自动提取图像特征，准确度高，但需要大量标注数据，且在复杂环境中的实时性和鲁棒性有待提升。DAPHAL等[66]构建了甘蔗锈病、红腐病、黄叶病和花叶病的小型数据库，采用基于学习率衰减策略的MobileNet-V2模型进行分类，有效地缓解过度拟合、提高了分类精度。对于图片模糊、光线不佳的照片，HU等[67]比较了3种神经网络模型（Faster R-CNN、Mask R-CNN和deeplab-v3）的识别效果，认为deeplab-v3模型的兼容性更好。GENZE等[68]根据无人机采集运动模糊图像，利用深度学习方法对高粱田进行杂草检测和分割，并指出对于作物的不同生长阶段，需要重新训练模型以提高模型的鲁棒性。

作物冠层探测与重构：冠层结构探测技术中，超声波传感、机器视觉和LIDAR技术应用广泛且前景良好[69]。超声波传感器通过声波时间差测量冠层尺寸，但受角度发散影响精度，可通过调整安装方式改善[70]。机器视觉法利用数码摄影和立体视觉转换光学图像为数字信号，但需提升数据实时处理速度。PENG等[71]开发了一种基于运动状态下双目视觉获取植物冠层参数的方法：通过图像特征提取和匹配来估计相邻图像之间的空间关系，根据立体视觉获得像素的3D坐标，构建植物的3D模型。获得的冠层高度、冠层直径等尺寸的平均误差均小于2%。激光雷达（LiDAR）技术采用激光—时间飞行原理及多重回波技术，能够获取冠层内部的信息，但高叶面积指数造成的阴影效应对影响了该方法的精度。LUO等[72]构建了无人机LiDAR系统用于获取棉花冠层参数，对比了alpha形状算法、切片形状算法和基于体素算法的性能，结果表明alpha形状算法与真实的棉花冠层体积吻合较好。

2.1.2　决策方法

对靶开关决策模型：根据作物病虫草害的识别结果，设定传感器输出阈值，通过控制各个电磁阀的开关实现对靶喷雾。FAN等[73]将基于图像的棉花田杂草检测模型应用于喷洒机器人，田间试验表明杂草的漏喷率小于2%。

作物冠层结构决策模型：施药量计算模型包括基于作物面积（ground area，GA）的计算模型、基于冠层面积（leaf wall area，LWA）的计算模型、基于冠层体积（tree row volume，TRV）的计算模型和最佳覆盖密度（optimal coverage method，OCM）的计算模型[74-76]。根据作物冠层的探测结果，选择合适的施药量计算模型，输出流量。ZHOU等[77]研究了不同施药模型在冠层沉积特性，结果表明TRV模型能够满足常量喷洒的质量要求，OCM模型能够满足低量喷洒的质量要求。

2.1.3　变量技术

喷雾量调节的3种主要方法包括：(1)压力调节，改变喷雾压力来调节喷雾量，但存在调节范围小和非线性等问题，且压力变化会影响雾滴谱和药液沉积均匀性[78]。(2)喷口截面调节，如美国SprayTarget公司的VariTarget系列等，通过楔形结构和弹簧预紧力调整喷口开度，实现喷雾量的在线调节[79]。(3)PWM调节，采用脉冲宽度调制，通过调节占空比来控制喷雾量，是目前广泛应用的流量调节方式[80]。对于风送喷雾系统，还需调节风量，可通过改变风机转速或调节出风口截面积来实现。果园喷雾机中则研究了基于果树冠层三维模型的喷雾位置调控系统以实现仿形喷雾[81]。

2.1.4　控制系统

控制系统是农药变量喷雾系统的中枢，集成传感器、执行部件、控制芯片与电路及软件程序[82]。传感器实时监测机具速度、药液流量和喷雾压力。执行部件包括电动阀、电磁阀和电机，根据系统指令调节药液流动和喷雾动作。控制芯片处理数据并发出决策，控制电路保障信号与电力供应。软件程序负责数据采集和施药量自动调整。各组件协同工作，实时优化喷雾参数，确保精准施药，提升效率并减少环境污染。

2.2　静电喷雾技术

随着农业技术的不断发展以及人们对环保意识的提升，植保施药方式逐渐向高效、精准和环保方向转变。静电喷雾技术通过在雾滴中引入电荷，在电场作用下使雾滴更精准地沉积在作物表面，有效提升了农

药的利用率,减少了飘移损失和环境污染。

静电喷雾系统通过高压静电发生装置使雾滴带电,借助电场力将雾滴定向输送到作物靶标表面,从而改善附着效果,提高农药利用率[83]。静电喷雾技术可应用于大部分植保机械装备。即使应用于背负式喷雾器,也可显著提高沉积率,背负式静电喷雾器可显著提高沉积率,降低农药在土壤的流失[84-85]。ASSUNCAO等[86]在喷杆喷雾机上应用静电喷雾技术,试验表明玉米冠层的沉积量显著提高。江苏大学设计了风幕式喷杆喷雾机,并研究其静电喷雾沉积特性,结果表明静电喷雾在气力辅助下能进一步抑制雾滴飘移且雾滴分布更加均匀[87-88]。周良富等[31]和PATEL等[89]分别研究了气流辅助果园喷雾机的喷雾沉积特性,均发现静电喷雾方式能有效提高叶片反面的雾滴沉积密度。近年来,无人机技术已成为我国植保作业中的重要工具。王军锋等[90]验证了大载荷无人直升机静电喷雾技术在提升农药利用率方面的优势,研究显示,静电喷雾可以将单位面积的沉积量增加1.17倍,同时减少药液飘移。ZHANG等[91]指出无人机静电喷雾在田间作业中不仅提升了精准性,还减少了环境污染。

2.2.1 静电喷雾性能

静电喷雾系统的性能受多种因素影响,其中荷电方式、电极结构、充电电压是主要的技术要素,直接影响雾滴的荷电量及喷雾效果。

荷电方式:在农用静电喷雾系统中,荷电方式大多分为感应荷电、接触荷电和电晕荷电3种,其中感应荷电利用电场使液体荷电,广泛应用于农业航空和地面植保领域。近年来,国内外研究中多采用感应荷电技术,显著提升了作物叶片上的雾滴沉积效果[92-94]。相比之下,接触荷电方式通过直接将电极置于液体中,使液体在喷雾过程中荷电。王士林等[95]的研究采用双极性接触式静电喷雾系统,通过接触荷电方式使液体分别带上正负电荷,从而大幅提高了雾滴的沉积效果。刘建河等[96]研究了多针接触式荷电方式下,不同喷针布局下的雾化性能。

电极结构:电极设计对于静电喷雾系统中的荷电效率起着重要作用。不锈钢、镍和铜由于其优良的导电性和耐腐蚀性,广泛应用于电极设计。LAW[97]通过设计嵌入电极的感应荷电喷嘴,有效地提高了喷雾系统的荷电效率,这一创新为现代静电喷雾技术的应用奠定了理论基础。周良富等[98]的研究指出,使用导电性能良好的电极材料能够提高喷雾系统的荷电效率,进而改善静电喷雾的雾滴沉积效果。电极形状方面,周宏平等[99]在其航空静电喷雾装置中使用不锈钢电极,通过优化电极形状,显著提升了荷电效率和雾滴沉积率。张玲等[100]设计了锥台形电极并采用内外双风道风送雾化方式,有效提升了荷电效率和喷雾射程。贾卫东等[88]则在风幕式静电喷杆系统中设计了双平板电极,增强了雾滴的荷电效率,使其沉积效果更加均匀。ZHOU等[101]采用环形铜电极设计,显著提升了荷质比,增幅达127.8%。

充电电压:是决定静电喷雾系统荷电效果的重要参数。一般来说,电压越高,液体荷电能力越强,但过高的电压可能导致电荷饱和并增加能耗。LIN等[94]发现充电电压并非越高越好,在10 kV或15 kV雾滴沉积率达到最高水平,但当电压继续升高时,沉积率逐渐趋于平稳。而目前也有认为采用20 kV及以上的高电压[95, 102]能进一步改善雾滴沉积,但电压过高可能导致电荷损耗增加,因此需要根据具体作业情况进行优化。

2.2.2 静电喷雾外部影响

静电喷雾质量除了由静电喷雾系统性能决定,还受作业参数、环境条件和靶标特性等外部因素影响,通过对相关因素的研究,可进一步优化喷雾效率和沉积效果[103]。

作业参数:喷雾速度:喷雾速度决定了雾滴的输送范围和覆盖效果。MAMIDI等[104]指出,在速度为0.5~1.0 m/s的条件下,雾滴的沉积均匀性和覆盖效果最佳,而超过该速度则可能导致雾滴在到达靶标前失去部分电荷。周良富等[98]认为较高的喷雾速度在大田作业中可能导致农药飘移的增加。

喷雾高度:喷雾高度决定了雾滴的沉积均匀性和覆盖范围。LAW[97]研究表明,在1~1.5 m的喷雾高度下,静电喷雾系统可以达到最佳沉积效果;而超过2 m时,雾滴飘移和覆盖不均的现象显著增加。卢佳节等[105]的研究也表明,静电喷雾系统在1.5 m的喷雾高度下,沉积量和均匀性达到最佳效果。

系统压力:系统压力影响雾滴的雾化效果,有助于形成均匀覆盖。POST等[106]指出较小的液滴更容易携带电荷,但同时也更容易发生飘移,这对喷雾沉积效果带来挑战。林甄等[102]在实验中也验证了在设计的喷雾系统最高压力0.5 MPa下,雾滴的沉积效果和喷雾效率最佳。

喷雾流量:喷雾流量决定了雾滴的分布密度和覆盖范围。LAW[97]研究发现当流量控制在10~15 L/min范围内,能够确保雾滴覆盖效果,同时飘移抑制效果较好。POST等[106]指出高流量会降低液滴在感应区停留时间,导致液滴积累的电荷变少,影响附着效果。

温度:直接影响雾滴的蒸发速率和电荷保持能力。高温条件下,雾滴可能在到达靶标前部分蒸发,导致荷电量降低,进而影响沉积效果。LAW[97]研究指出,高

温情况下需增加电压来补偿雾滴的电荷损失。此外，GAN-MOR等[107]研究了气流速度在不同温度下对荷电效果的影响，发现10 m/s的气流速度在适当温度条件下荷电效果最佳。MAMIDI等[104]也指出，在高于30 ℃的环境下，静电喷雾效果可能会减弱，建议在高温条件下调节电压或降低喷雾速度。

湿度：水平显著影响雾滴在空气中的荷电保持能力。在高湿度条件下，雾滴可以稳定吸附在叶片表面，而低湿度可能导致雾滴的荷电量快速流失。MA等[108]发现，在湿度低于50%时，雾滴荷电效率下降了约12%，沉积效果明显减弱。贾卫东等[88]指出，在低湿度下，应通过调节雾滴粒径和喷雾参数来维持沉积效果。

环境风速：在静电喷雾系统中起到双重作用。适度的风速有助于增加雾滴的输送范围和穿透力，使雾滴更均匀地分布在靶标上，但过高的风速会增加飘移。PATEL等[89]发现，当风速控制在1～3 m/s时，沉积效果和均匀性最佳；而风速超过5 m/s时，飘移量增加了20%以上。赵德楠等[92]通过实验发现在1.5～3 m/s风速范围内，静电喷雾系统的雾滴沉积效果提升显著。

靶标特性：叶片的角度会显著影响雾滴的沉积量。MAMIDI等[104]的研究发现，当叶片倾角在30°～45°之间时，雾滴的沉积效果最佳。赵德楠等[92]的实验也发现，在叶片倾角为30°左右时，雾滴在叶片背面的沉积效果最为显著。叶片的材质（如蜡质层厚度）和表面粗糙度对雾滴的附着有直接影响。GUO等[109]发现表面纹理显著影响电黏附力：光滑表面产生更强的电黏附力，而复杂或粗糙的纹理降低了电场分布的均匀性和电荷密度，从而减弱了黏附效果。PATEL等[89]在果树应用中，通过调整喷雾角度和距离，优化了雾滴在复杂结构上的附着效果。叶片含水量对雾滴的吸附有直接影响。MA等[108]指出，当叶片的含水量高于50%时，雾滴的沉积率提升了约7.3%。MAMIDI等[104]研究发现湿润叶片在提高雾滴附着效率方面的作用。贾卫东等的试验也表明，在湿润叶片上，雾滴的附着效果优于干燥叶片。

2.3　大型喷杆平衡悬架技术

在农业植保中，宽幅喷杆式喷雾机因其作业幅宽而易受地形起伏影响，若不对喷杆姿态进行有效控制，喷杆末端倾斜易造成伤苗或喷洒不均，因此使用主动/被动悬架系统保持喷杆在理想作业高度尤为重要[110]。研究主要集中在喷杆悬架系统的设计和控制优化，涉及喷杆动态行为对喷雾效果的影响、喷杆悬架建模、悬架参数优化与控制等方面[111]。

喷杆结构设计：喷杆结构设计对喷雾作业的精度和效率具有至关重要的影响。当前，喷杆设计研究主要集中在减震、稳定性、轻量化以及智能控制等方面[112]。传统刚性喷杆在田间作业中易受地形和机械振动的影响，导致喷雾不均，甚至出现伤苗问题。为此，研究者通过引入主被动悬架系统，如钟摆式被动悬架，来缓解喷杆的高频振动，并实现喷杆稳定高度的自动调节，以确保喷雾高度始终符合理想参数。有限元分析（FEA）和模态分析等技术用于优化喷杆的轻量化和结构强度，确保在高负载和复杂地形条件下维持结构完整性。智能控制技术方面，通过超声波或激光传感器实时监测喷杆的高度与角度，再利用PID或自适应鲁棒控制算法进行动态调整，提升了作业稳定性与精度[110]。

喷杆动态行为建模：DEPREZ等[113]最早研究了喷杆梯形被动悬架系统的动态模型，分析滚转和横摆输入对喷杆运动行为的影响，结合实验证实了其对振动的隔离效果。比利时鲁汶大学针对39 m喷杆的钟摆被动悬架进行了建模和参数优化，但该类研究通常将喷杆视为刚体，未考虑弹性变形等复杂因素。崔龙飞等在28 m喷杆的被动悬架设计上取得进展，通过模型优化提升了悬架动态响应，设计了载荷达2 000 kg的喷杆悬架测试平台，并通过模态分析优化喷杆尺寸，有效减轻了喷杆重量[114]。

喷杆两臂高度控制：国内学者采用超声波传感器对喷杆两端的距离进行监测，并结合GPS定位系统获取喷杆的姿态信息，研制了喷杆高度调节系统，可以实时调整喷杆的高度和角度，以应对不同地形和作物高度的变化，确保喷杆始终保持在理想的喷洒高度[115]。江苏大学和西北农林科技大学等团队基于PID控制开发了喷杆高度控制系统，适用于24 m以下喷杆[116-118]。然而，传统PID控制方式难以适应更宽幅喷杆的动态扰动，限制了其在复杂田间环境中的适用性。

喷杆主被动悬架非线性自适应控制：为提升宽幅喷杆系统对不确定性和非线性干扰的应对能力，自适应鲁棒控制方法得到了广泛应用[119]。崔龙飞等[120-122]引入有限时间干扰观测器，融合非线性鲁棒控制设计，通过干扰观测器分别对匹配干扰和不匹配干扰同时在线观测，并以前馈方式对其进行补偿，主被动悬架系统存在的干扰得到了较大改善。

为进一步提高喷杆悬架系统的控制性能，当前的研究聚焦于复合控制算法，如自适应控制与神经网络融合[123]。由于宽幅喷杆的液压伺服系统通常无法安装全面的传感器，设计中面临状态信息不足的挑战，亟须高性能非线性控制方法。未来研究方向应聚焦于将复合控制策略应用于喷杆悬架系统中，通过智能控制实现更为精准的动态稳定性控制，以适应宽幅喷杆在复杂农业环境中的作业需求。

2.4 喷雾机底盘技术

国外在解决喷杆喷雾机底盘的通过性与稳定性均有较深入的研究[124]。多家国外大型农机企业所生产的喷雾机高地隙底盘通过采用先进的驱动技术与液压技术的组合,并配合各类驱动防滑以及机身稳定系统等方面技术,其作业时的通过性方面均较为优异;国外生产的大型高地隙底盘多数采用充气轮胎,且多用于旱地作业,此类高地隙底盘均已实现了成功的产业化[125]。国外大型喷杆喷雾机通过采用先进的控制技术,通常可根据底盘运动参数实现喷杆系统实时调整,大型喷杆喷雾机作业时可根据地形条件匹配调整喷杆姿态[126]。

为了提升整机作业的稳定性、舒适性、安全性,国外先进喷雾机底盘采用先进的悬架系统和电液控制技术[127]。悬架普遍采用以压缩空气为弹性来源的空气悬架或者油气悬架等一类非线性悬架系统。空气弹簧本身质量轻,承载量大,伸缩行程大,且便于调节,如Miller公司生产的NitroCondirG75型,JohnDeere的4830系列喷雾机,悬架系统采用空气悬架,除了约束车身的平面运动,保证空气弹簧只受垂向力,还加大了车身的垂向裕度,使得悬架动行程增大。油气悬架在工程车辆中运用广泛,其承受载重大,稳定性好,丰富了车辆功能,在工作过程中具有更高的安全性,整机性能得到提高[128]。如AGCO公司生产Challenger RG600系列装备油气悬架,其悬架系统分为两种工作模式,当喷雾机侧倾度未超过所设定阈值,平稳行驶时,电磁阀闭合;当喷雾机侧倾度超过所设定阈值时,电磁阀开启,左右油缸联通,此时侧倾力增加,防止喷雾机发生侧倾[129]。底盘悬架已由原来的结构参数优化,发展到依靠电液伺服控制技术获得理想减振性能的主动悬架系统[130]。底盘主动悬架能够根据系统实际工作路况,通过减振控制策略调节悬架以获得最优的减振效果,使车辆稳定性、平顺性和舒适性等综合性能得到显著提高[131]。

国内所研发的喷雾机底盘以刚性车架和机械传动为主[132]。如亿田、青州泰达生产的喷雾机,车架为刚性结构,依靠车身与轮胎来缓和由路面引起的振动,进行植保作业,或者通过螺旋弹簧进行减振,其减振行程短,承载能力弱,不适用于载重较大的高地隙自走式喷雾机[133]。目前国内外针对高地隙自走式喷雾机悬架系统研究较少,且由于高地隙自走式喷雾机满载重量可达30 t,喷杆幅宽可达到50 m,离地间隙高达2 m,而且喷雾机植保作业时,载重量不断变化,运行工况复杂。因此,针对高地隙自走式喷雾机植保作业特点,为提升喷雾机植保作业性能,行驶过程中采用全液压驱动,需防止轮胎滑移和对田间路面造成较大破坏。当高地隙自走式喷雾机遇到田间地垄等坡度较大路况时,需调低悬架,降低喷雾机重心,防止侧翻,增加喷雾机稳定性。因此,设计减振行程大、结构简单、独立的悬架是解决问题之一。为提升高地隙自走式喷雾机植保作业的均匀性,迫切需要开展悬架系统电液伺服控制策略的研究,建立能准确反映高地隙自走式喷雾机悬架系统特性的非线性动力学模型与控制方法。

2.5 植保装备智能导航技术

植保装备的无人驾驶技术主要用于精准农业中的自动化喷洒作业,具备高度智能化和精确性。其核心集中在自动驾驶、精准喷洒、环境感知与自主导航等方面[134]。随着农业生产规模扩大和对资源利用效率要求的提高,植保装备的无人驾驶技术也得到了广泛关注和发展。导航关键技术包括导航位姿信息获取、导航路径规划和导航控制等[135]。无人驾驶喷杆喷雾机需要具备高精度的定位与导航能力,以确保在田间大范围或复杂环境中准确执行喷洒任务。导航系统通过实时接收RTK/GPS差分信号修正位置误差,确保喷杆喷雾机能够沿预定的路线行驶,减少作业重叠或遗漏[136]。结合农田地形数据和作物分布,导航系统能够自动生成最优作业路线,并根据实际作业环境进行动态调整。导航系统能够根据地块形状、田间障碍物等,规划出高效的喷洒路径[137]。在部分卫星信号较弱的区域,视觉SLAM技术通过摄像头和其他传感器(如激光雷达)实时采集环境信息,构建田间作业区域的地图,从而实现自主导航和避障[138]。

许多国际企业在植保装备的导航技术的研发中,已经实现了大规模的商业化应用,其设备广泛应用于美国、欧洲、中国等农业生产集约化程度较高的地区。美国John Deere在自动驾驶农业设备领域处于全球领先地位,其喷杆喷雾机配备了先进的GNSS导航和RTK系统,结合变量喷洒和精准控制技术,可以自主完成大规模农田的喷洒作业,该公司的“Exact Apply”技术提供了独立喷嘴控制功能,能够通过车载传感器动态调整喷洒量,减少药剂浪费[139]。Trimble主要在高精度定位和精准农业方面有较强的技术优势,开发了适用于喷杆喷雾机的自动驾驶与精准导航系统[140]。通过集成多种传感器,Trimble的系统可以实现喷洒作业的自动化和高精度变量控制。意大利CNH Industrial公司推出的无人驾驶喷杆喷雾机系统集成了高精度GPS、自动避障传感器和变量喷洒技术,能够根据实时作物数据进行自主作业,减少环境影响,提升农业生产效率[141]。

中国的无人驾驶喷杆喷雾机研发相对起步较晚,但近年来,随着智能农业和机械自动化技术的发展,国内已经涌现出一批优秀的科研机构和企业在这一领域

进行探索和应用[142]。科研院所研究如中国农业大学、南京农业大学等高校和研究机构正在进行无人驾驶喷杆喷雾机的研究，重点包括精准导航、变量喷洒、环境感知与避障技术等[143]。例如，中国农业大学基于北斗导航系统的高精度无人驾驶喷杆喷雾机已经投入实验，解决了大面积农田精准喷洒的难题。科技企业大疆作为国内领先的无人机及智能设备供应商，推出的农业无人机已经广泛应用于喷洒作业领域。丰疆智能正在推进喷杆喷雾机的自动化改造，结合其在导航和控制系统中的优势，开发适应大面积农田的无人驾驶喷雾设备。联适导航、华测导航等企业正在推动无人驾驶喷杆喷雾机的产业化应用，特别是在结合北斗导航和智能喷洒技术方面取得了进展，设备已经在国内部分大田作业中得到应用[144]。它们利用自主研发的单北斗导航系统，结合视觉避障和环境感知技术，显著提高了无人驾驶喷雾机的精度和智能化水平。

2.6　无人机技术

植保无人机技术发展分为3个阶段。第1阶段为1985年开始的手动遥控植保无人机，代表机型为日本的YAMAHA-R50，机体平台采用油动直升机构型，操控人员须配合旗手完成飞行任务，附属作业部件的喷头沿用了地面喷雾装置[145]。第2阶段为2008的自主飞行阶段，最早的机型是由农业农村部南京农业机械化研究所牵头的“863”计划课题“水田超低空低量施药技术研究与装备创制”的N-3型植保无人机，采用GPS导航的方式替代遥控操作[146]，开创了“航路规划、自主飞行、定点喷洒、断点续喷”的新型作业模式，附属作业部件使用超低量离心雾化喷头，雾滴可调有效减少航空施药飘移，有效解决了飞不准、飞不稳、飞不低的问题，自此开启了我国植保无人机的研发技术路线。第3阶段为2017年开始的智能化作业阶段，在国家智能农机专项支持下，农业农村部南京农业机械化研究所、华南农大、浙江大学、广州极飞等对自主避障、仿地飞行、能源载荷匹配、发动机增寿等关键技术联合攻关，制定了首部行业标准和农机补贴建议[147]，使得植保无人机质量和智能化水平得到大幅提升[148-150]，行业产品真正开始了大面积应用[151-153]，目前国内市场已拥有一批操作简单、稳定性高、可靠性高、作业效果较为理想的植保无人机产品，适合我国不同农业生产区经营模式和地貌特点。比如，适合丘陵和小规模植保与辅助授粉作业的电动单旋翼无人机、适合复杂地形植保与遥感作业的电动多旋翼无人机、适合平原大规模种植区植保作业的大载荷油动无人机、适合多种作物混植区植保作业的轻型油动无人机。随着国内多家科研院所与企业的联合攻关，在机体平台、飞行控制和附属作业部件方面形成了多项关键技术发展。

机体平台技术：重点加强了无人机超低空飞行能效和模块化、工业化设计制造能力，其中具代表性的有：(1)机—发(电机)—桨组合分析方法和高能效构型技术，通过螺旋桨弹性气动布局和翼间干扰解构，实现了超低空、低速、多转弯、变载荷农田作业工况的减阻提效[154-155]。(2)高效电池技术，通过高能量密度电池、电驱调速、电池管理和能源载荷匹配等关键技术环节，提高了航电载荷动力能力、充电速度，水冷和散热加持延长整机使用寿命和耐用度[156]。(3)整机模块化技术，使得农业无人机框架强度提高30%，田间作业能够通过易损配件更换快速修复，抗风险能力提升[157]。(4)防水技术：机身采用防水密隔舱设计，最高整机防水等级达IP67，实现了全身水洗[158]。

飞行控制技术：全面实施“航路规划、自主飞行、定点喷洒、断点续喷”自主飞行作业模式，融合GNSS-RTK(全球定位导航—载波相位差分)，围绕复杂农田环境，发展出了变载荷姿态控制[159]、动态自主避障[160-162]、环坡仿地及冠层仿形飞行控制方法[163-164]，将植保无人机从“遥控”作业转变为“自主”作业，有效降低重喷与漏喷率，提高作业效率与作业质量。近年来，植保无人飞机的智能化水平进一步提高，在机具端部分企业开发出了4D雷达成像、全自主作业决策、多机协同、夜间飞行、快速装药等技术[165-166]，使机具的田间适应性增强，操控简单化。

附属作业部件技术：针对植保无人机施药可能造成的环境污染问题，国内学者构建了植保专用风洞、流场专用模拟平台，对喷洒雾滴的运动进行了定量描述，以用于植保无人机施药系统布局优化[167]。并创制了植保无人机专用的窄雾滴谱的喷头，实现了雾滴量精确可调、沉积均匀与飘移可控；探索了面向不同作物的喷施作业精量化参数，解决了无人飞机施药技术与病虫害防治不匹配的难题[168-170]。2020年起，植保无人机的变量喷洒系统得到广泛的应用，作业对象也从传统的大田作物延伸至果园、蔬菜及茶园等经济作物，作业类型也从植保施药延伸至授粉、播种、施肥、投料等[171-172]。

3　农机农艺融合的数字化管理

植保机械管控主要涉及的内容包括作业规划、调度决策、药剂使用、作业评价以及数字化平台等。

3.1　在作业规划方面

植保装备的作业规划的目的是在确定作业田块的位置与形状，综合考虑机具作业喷幅与性能参数，规划全覆盖喷施作业与非作业路径，保证作业效果与效率，避免重复与遗漏喷施作业。面向大田作业环境，目前

的机具的非作业路径的规划,通常采用传统的路径导航算法,包括Dijkstra算法、A-Star算法等;植保全覆盖作业主要采用牛耕往复法的作业模式,国内外学者系统研究聚焦于不规则形状、内涵障碍物等复杂作业条件下的规划问题[159]。面向地面植保机械或机器人,OKSANEN等[173]基于梯形分解法,提出了一种田块复杂边界条件下的全覆盖作业规划方法,减少转弯次数以减少能耗损失;徐博[174]分析了凹凸形状田块的分解合并机理,基于深度优化遍历法与Floyd算法,构建了复杂田块的路径规划机制,提升喷施覆盖率并减少作业能耗;黄小毛等[175]面向田块凸/凹多边形、带孔洞多边形、多个多边形等各种复杂边界的约束,实现了作业路线的规划决策。面向果园的结构化的作业环境,植保作业路径规划的关键在于兼顾机具的作业性能与种植条件。BOCHTIS等[176]提出了一种果树行内—行外的路径规划算法,完成植保装备的B-形的果园全覆盖作业;SUN等[177]基于深度神经网络与A-Star算法,提出了一种果园果树行识别与作业规划模型;TIAN等[178]通过改进蚁群算法,设计了果树全覆盖无人机喷施规划模型。

3.2 在调度决策方面

植保装备的调度决策主要分为两个方面,一是考虑病虫害程度与作业订单需求,调度装备到不同防护区域,完成人—机—药的统筹与管理;二是协同多个装备进行一定范围的集群作业,提升生产率与经济性。面向规模化统筹防治,曹光乔等[179]基于NSGA-Ⅱ算法,提出了多目标优化的飞防队作业调度;杨昊天等[180]提出了基于区块链的农机跨区域调度机制,以充分调用农机资源。面向一定范围内的植保作业,徐正伟等[181]提出了一种基于改进遗传算法的多植保无人机任务分配方法,实现了整体作业时间的优化;阚平等[182]提出了一种基于改进粒子群优化的多植保无人机协同作业算法,考虑无人机补给时长的影响,完成了补给次数和总耗时等多目标的优化。徐阳等[162, 165-166]系统研究了不同作业规模下,植保无人机集群任务调度与决策机制,并耦合车辆导航关系,实现千公顷规划下车—机协同。

3.3 在药剂使用方面

农药制剂的管理与登记是作业数字化管理的重要手段。精细化、功能化以及高效利用已成为农药制剂研究的主要方向。纳米农药、省力化制剂、飞防助剂等迅速发展,农药剂型的种类、功能和研发不断丰富[183]。纳米材料的小尺寸效应、大比表面积、高反应活性以及量子效应等特性,有利于提高农药有效成分的稳定性、控制释放速率、延长有效期等;省力型农药制剂包括颗粒剂、包衣剂等,使用便携,兼顾环保、高效的特点;飞防助剂主要是用来调节雾滴谱宽,降低蒸发与飘移,提升飞防效果。宋倩等[184]系统总结了可控缓释纳米农药制剂及其研究进;唐伟等[185]在采用机插秧移栽水稻过程中,同步施用噁草酮—复合肥缓释颗粒剂;兰玉彬等[186]分析了不同喷雾助剂在植保无人机喷施作业中对雾滴沉积特性的影响。

3.4 在作业评价方面

植保装备的作业评价主要聚焦于喷施效果评价,主要分为田间试验评估与在线解析。田间试验评估(如作业喷幅测定)可以用于优化药剂选型与配比、植保器械对作物的喷施参数,包括喷施压力与流量、喷施速度与高度等。在田间试验评估方面,薛新宇等[169]分析了无人直升机施药方式对稻飞虱和稻纵卷叶螟防治效果;WANG等[170]分析了植保无人机喷雾漂移和环境影响进行现场评估。作业在线评价是直观评价植保装备的运行与喷施与规划状态的偏移情况,包括行走的准确性、喷施的有效性等。陈盛德等[187]采用微轻型机载北斗导航定位系统,对植保无人机航空喷施飞行质量进行了评价;徐阳等[188-189]基于Android手机,开展了植保无人机施药效果在线评估技术,分析作业面积、效率、重喷漏喷效果等。

3.5 在数字化平台方面

植保装备的数字化平台,是集成作业规划、调度决策、药剂使用登记以及作业评价追溯等功能,完成面向田块的植保作业综合管理。针对地面植保机械的数字化管理,John Deere公司的作业平台可实现植保装备的设备性能数据、田块产量信息的数字化管理,以及作业规划、调度决策等功能。针对无人机的施药管理,国外仅日本YAMAHA公司构建的Yamaha Motor Smart Agriculture Platform(YSAP)无人机数据处理平台,进行农作物生长、田间土壤、喷洒与撒播作业的数据处理与模型融合。国内极飞与大疆等科技公司具有自主开发的无人机监管平台,可以融合遥测处方解析与喷撒作业决策,以及药害预警等模型。

4 存在问题

农药、施药装备和施药技术是3个密不可分的组成部分,既互相依赖,又互相促进。目前,我国农药技术发展迅速,新品种创制、新剂型开发的投入力度大,推广应用快,高效低毒农药、低残留农药、生物农药和环境相容性农药等农药新品种及微颗粒剂、缓释剂等农药新剂型不断得到应用,对施药技术提出了低量喷雾、超低量喷雾、穿透性喷雾、可控雾滴喷雾、循环喷雾、静电喷雾等新的要求。但目前我国施药装备品种

少，病虫草害监测技术研究刚刚起步，与发达国家还有很大差距。新型植保机械研究及成果产业化脱节，针对性的专业化施药作业水平尚显不足，同时还存在机械化施药技术规范、防治效果测定及评价体系研究工作薄弱、先进施药技术的推广培训人员缺乏的问题。

5　发展趋势

1)向智能化无人化方向发展。目前，我国相当一部分植保机械已经能够实现基于路径规划的自动导航、自主施药。随着传感器技术、信息技术和控制技术的进步，各类感知、识别、寻路、导航的轻量化网络模型和高性能芯片日趋完善，在人工智能的加持下，未来植保机械通过物联网和大数据进行状态监测、环境分析和自主决策，实现无规划全自主作业、集群作业、协同作业，进一步提升作物田间管理和病虫害防治效率。

2)向专业化集成化方向发展。多功能集成化趋势将推动植保机械集成作物监测、数据采集、病虫害诊断，信息交互将更加频繁和高效，传统的点对点信息采集，将转向端—边—云信息汇聚，决策系统和作业装备深度融合，防治处方和喷施部件联动作业，针对作物长势、病虫害和营养状况，完成智能高效的精准施药，推动植保机械向更专业化水平进步。

3)向绿色环保方向发展。把农药更精量、更准确地施撒到作物上，提高农药的有效利用率，是现代植保机械长期追求的目标。当前植保机械的变量喷洒技术，正从整体同步控制迈向单个喷嘴独立控制，同时仿形喷雾、对靶喷雾、回收喷雾等高效施药技术日趋完善，将进一步减少农药浪费，降低对环境的影响。

参　考　文　献

[1] 杨学军，严荷荣，徐赛章，等. 植保机械的研究现状及发展趋势[J]. 农业机械学报，2002，33(6)：129－131，137.
YANG Xuejun，YAN Herong，XU Saizhang，et al. Current situation and development trend of equipment for crop protection [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2002，33(6)：129－131，137.

[2] 聂弯，谢彦明. 农药使用强度对农作物病虫害发生面积的影响——基于随机效应面板模型的实证分析[J]. 广东农业科学，2018，45(1)：135－142.
NIE Wan，XIE Yanming. Impact of pesticide use intensity on the occurrence area of crop diseases and insect pests—Empirical analysis based on the random effects model [J]. Guangdong Agricultural Sciences，2018，45(1)：135－142.

[3] 谢晋. 农业植保机械技术应用现状及发展趋势探讨[J]. 农村实用技术，2024(7)：102－103.

[4] 金芳，丁志新. 不同植保机械对小麦病虫害防治效果的影响[J]. 南方农机，2024，55(1)：47－49.

[5] 陈万权. 小麦重大病虫害综合防治技术体系[J]. 植物保护，2013，39(5)：16－24.
CHEN Wanquan. Integrated management of diseases and insect pests on wheat [J]. Plant Protection，2013，39(5)：16－24.

[6] 蒋金平. 水稻种植技术与病虫害防治要点的研究[J]. 种子科技，2024，42(12)：118－120.

[7] 任培富. 油菜种植及病虫害防治技术[J]. 现代农村科技，2023(12)：27－28.

[8] 中国农业机械化科学研究院七室. 国内外植保机械发展概述[J]. 农业机械学报，1966(2)：149－152.

[9] 中国大百科全书总编辑委员会. 中国大百科全书:航空 航天[M]. 北京：中国大百科全书出版社，1985.

[10] KEPNER R A，BAINER R，BARGER E L. Principles of farm machinery [M]. AVI Publishing，1972.

[11] ZHU H，DERKSEN R C，OZKAN H E. Spray technology for perennial crops [M]. St. Joseph，MI：ASABE，2004.

[12] PERRY T. History of agricultural aviation in the United States [M]. Agricultural Aviation Academy，1989.

[13] LAW S E. Agricultural electrostatic spray application：A review of engineering principles and operational practices [J]. Journal of Agricultural Engineering Research，1978，23(3)：243－256.

[14] FUKUDA T，NAGAI M. Development of UAV in agriculture in Japan [C]//Proceedings of IEEE International Workshop on Advanced Motion Control，2006.

[15] 何雄奎. 中国植保机械与施药技术研究进展[J]. 农药学学报，2019，21(S1)：921－930.

[16] 王文. 田间管理机具[J]. 江苏农机化，2002(5)：37－38.

[17] 刘政，金诚谦，冯玉岗，等. 植保机械智能化技术研究现状与趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2024，5(1)：40－50.
LIU Zheng，JIN Chengqian，FENG Yugang，et al. Research status and trends of intelligent technology in plant protection machinery [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization，2024，5(1)：40－50.

[18] 张凯，陈彦宾，张昭，等. “十三五”化学农药减施增效综合技术研发成效与标志性成果[J]. 植物保护，2021，47(1)：1－7，14.
ZHANG Kai，CHEN Yanbin，ZHANG Zhao，et al. The landmark achievements in comprehensive technology development for reduction and efficiency enhancement of chemical pesticide application during the 13th Five-Year Plan [J]. Plant Protection，2021，47(1)：1－7，14.

[19] 郑加强，徐幼林，张慧春，等. 国内外植保机械发展及智能化有害生物综合治理系统展望[J]. 中国植保导刊，

2022, 42(3): 20－28.
ZHENG Jiaqiang, XU Youlin, ZHANG Huichun, et al. Development of domestic and abroad plant protection machinery and prospects of intelligent integrated pest management system [J]. China Plant Protection, 2022, 42(3): 20－28.

[20] 王强强, 王凤娟, 王保国, 等. 无人化AI控制技术在农业机械中的应用[J]. 黑龙江科学, 2021, 12(8): 104－105.
WANG Qiangqiang, WANG Fengjuan, WANG Baoguo, et al. Application of unmanned AI control technology in agricultural machinery [J]. Heilongjiang Science, 2021, 12(8): 104－105.

[21] 陈强. 浅析植保机械的发展趋势[J]. 科技风, 2010(24): 137.

[22] 庄腾飞, 杨学军, 董祥, 等. 大型自走式喷雾机喷杆研究现状及发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(S1): 189－198.
ZHUANG Tengfei, YANG Xuejun, DONG Xiang, et al. Research status and development trend of large self-propelled sprayer booms [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(S1): 189－198.

[23] 付磊, 杜岳峰, 娄秀华, 等. 大型高地隙喷雾机喷杆设计及有限元分析[J]. 农机化研究, 2023, 45(11): 27－35.
FU Lei, DU Yuefeng, LOU Xiuhua, et al. Design and finite element analysis of the spray bar of large-scale high ground clearance sprayer [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(11): 27－35.

[24] 乔白羽, 丁素明, 薛新宇, 等. 喷雾机喷杆有限元模态分析与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(4): 30－36.
QIAO Baiyu, DING Suming, XUE Xinyu, et al. Finite element modal analysis and experiment of sprayer boom [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(4): 30－36.

[25] 崔龙飞, 薛新宇, 乐飞翔, 等. 大型喷杆喷雾机钟摆式主被动悬架自适应鲁棒控制研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 130－141.
CUI Longfei, XUE Xinyu, LE Feixiang, et al. Adaptive robust control of active and passive pendulum suspension for large boom sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 130－141.

[26] 崔龙飞, 薛新宇, 乐飞翔, 等. 喷杆运动与喷雾沉积分布变异系数关系试验研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(6): 169－174.
CUI Longfei, XUE Xinyu, LE Feixiang, et al. Experimental study on relationship between spray boom movement and spray deposition distribution variation coefficient [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(6): 169－174.

[27] 傅锡敏, 吕晓兰, 丁为民, 等. 我国果园植保机械现状与技术需求[J]. 中国农机化, 2009, 30(6): 10－13, 17.
FU Ximin, LÜ Xiaolan, DING Weimin, et al. Present state and technical requirement about orchard plant protection machinery in China [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2009, 30(6): 10－13, 17.

[28] 张晓辉, 郭清南, 李法德, 等. 3MG-30型果园弥雾机的研制与试验[J]. 农业机械学报, 2002, 33(3): 30－33.
ZHANG Xiaohui, GUO Qingnan, LI Fade, et al. Development of 3MG-30 orchard mist sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(3): 30－33.

[29] 何雄奎, 严苛荣, 储金宇, 等. 果园自动对靶静电喷雾机设计与试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 78－80.
HE Xiongkui, YAN Kerong, CHU Jinyu, et al. Design and testing of the automatic target detecting electrostatic air assisted orchard sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(6): 78－80.

[30] 丁素明, 傅锡敏, 薛新宇, 等. 低矮果园自走式风送喷雾机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 18－25.
DING Suming, FU Ximin, XUE Xinyu, et al. Design and experiment of self-propelled air-assisted sprayer in orchard with dwarf culture [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(15): 18－25.

[31] 周良富, 张玲, 薛新宇, 等. 3WQ-400型双气流辅助静电果园喷雾机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 45－53.
ZHOU Liangfu, ZHANG Ling, XUE Xinyu, et al. Design and experiment of 3WQ-400 double air-assisted electrostatic orchard sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(16): 45－53.

[32] 邱威, 丁为民, 汪小昱, 等. 3WZ-700型自走式果园风送定向喷雾机[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 26－30, 44.
QIU Wei, DING Weimin, WANG Xiaochan, et al. 3WZ-700 self-propelled air-blowing orchard sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 26－30, 44.

[33] 张晓辉, 姜宗月, 范国强, 等. 履带自走式果园定向风送喷雾机[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 117－122, 247.
ZHANG Xiaohui, JIANG Zongyue, FAN Guoqiang, et al. Self-propelled crawler directional air-blowing orchard sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 117－122, 247.

[34] 杨鹏. 郁闭型果园遥控弥雾机的研制与试验[D]. 杨凌:

西北农林科技大学，2016.

[35] 曹玮鑫，张金砖，李东坤，等．远程遥控式智能果园喷药机器人的设计[J]．湖北农业科学，2018，57(8)：114－116，122.
CAO Weixin，ZHANG Jinzhuan，LI Dongkun，et al. Design on remote control orchard spraying robot [J]. Hubei Agricultural Sciences，2018，57 (8)：114－116，122.

[36] 张健，秦庆国，张智刚，等．电动遥控履带式果园喷药车的设计[J]．农机化研究，2020，42(3)：249－253.
ZHANG Jian，QIN Qingguo，ZHANG Zhigang，et al. Design of electric radio-controlled caterpillar spraying vehicle for orchard [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2020，42(3)：249－253.

[37] 窦汉杰，翟长远，王秀，等．基于LiDAR的果园对靶变量喷药控制系统设计与试验[J]．农业工程学报，2022，38(3)：11－21.
DOU Hanjie，ZHAI Changyuan，WANG Xiu，et al. Design and experiment of the orchard target variable spraying control system based on LiDAR [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2022，38(3)：11－21.

[38] AHMADI A，NARDI L，CHEBROLU N，et al. Visual servoing-based navigation for monitoring row-crop fields [C]//2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway，New Jersey：IEEE，2020：4920－4926.

[39] AHMADI A，HALSTEAD M，MCCOOL C. Towards autonomous visual navigation in arable fields [C]//2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Piscataway，New Jersey：IEEE，2022：6585－6592.

[40] BOGUE R. Robots poised to revolutionise agriculture [J]. Industrial Robot，2016，43(5)：450－456.

[41] BECHAR A，VIGNEAULT C. Agricultural robots for field operations：Concepts and components [J]. Biosystems Engineering，2016，149：94－111.

[42] FOX D，BURGARD W，THRUN S. The dynamic window approach to collision avoidance [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine，1997，4(1)：23－33.

[43] GRIMSTAD L，FROM P J. Thorvald Ⅱ-a modular and re-configurable agricultural robot [J]. IFAC-PapersOnLine，2017，50(1)：4588－4593.

[44] GREEN O，SCHMIDT T，PIETRZKOWSKI R P，et al. Commercial autonomous agricultural platform-kongskilde robotti [C]//Proceedings of the Second International Conference on Robotics，Associated High-Technologies and Equipment for Agriculture and Forestry-RHEA 2014：New trends in mobile robotics，perception and actuation for agriculture and forestry. 2014：351－356.

[45] 邢钦淞，丁素明，薛新宇，等．智能田间除草机器人发展现状研究[J]．中国农机化学报，2022，43(8)：173－181.
XING Qinsong，DING Suming，XUE Xinyu，et al. Research on the development status of intelligent field weeding robot [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2022，43(8)：173－181.

[46] CUI L F，LE F X，XUE X Y，et al. Design and experiment of an agricultural field management robot and its navigation control system [J]. Agronomy，2024，14 (4)：654.

[47] LI G X，LE F X，SI S N，et al. Image segmentation-based oilseed rape row detection for infield navigation of agri-robot [J]. Agronomy，2024，14(9)：1886.

[48] SUN T，CUI L F，ZONG L X，et al. Weed recognition at soybean seedling stage based on YOLOV8nGP＋NExG algorithm [J]. Agronomy，2024，14(4)：657.

[49] 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.
YIN Xuanchun，LAN Yubin，WEN Sheng，et al. The development of Japan agricultural aviation technology and its enlightenment for China [J]. Journal of South China Agricultural University，2018，39(2)：1－8.

[50] 何雄奎，JANE BONDS，ANDREAS HERBST，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.

[51] 邓巍，陈立平，张瑞瑞，等．无人机精准施药关键技术综述[J]．农业工程，2020，10(4)：1－10.
DENG Wei，CHEN Liping，ZHANG Ruirui，et al. Review on key technologies for UAV precision agro-chemical application [J]. Agricultural Engineering，2020，10(4)：1－10.

[52] 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.
XUE Xinyu，LAN Yubin. Agricultural aviation applications in USA [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2013，44 (5)：194－201.

[53] 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.

[54] 王家辉，王国宾，张同升，等．植保无人机的应用与发展前景[J]．山东农机化，2024(3)：42－43.

[55] 邱白晶，闫润，马靖，等．变量喷雾技术研究进展分析[J]．农业机械学报，2015，46(3)：59－72.
QIU Baijing，YAN Run，MA Jing，et al. Research progress analysis of variable rate sprayer technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2015，46(3)：59－72.

[56] 冯耀宁，裴亮，陈晓，等．变量施药关键技术综述[J]．中

国农机化学报, 2021, 42(12): 65－71.
FENG Yaoning, PEI Liang, CHEN Xiao, et al. Summary of the key technology of variable rate application [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(12): 65－71.

[57] LUCK J D, PITLA S K, SHEARER S A, et al. Potential for pesticide and nutrient savings via map-based automatic boom section control of spray nozzles [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 70(1): 19－26.

[58] 陈志刚, 陈梦溪, 魏新华, 等. 基于北斗定位的农田变量处方施药喷雾系统[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(11): 965－970.
CHEN Zhigang, CHEN Mengxi, WEI Xinhua, et al. Variable prescription pesticide spraying system for farmland based on the Beidou navigation satellite system [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(11): 965－970.

[59] 王金峰, 吕振阳, 赵敏义, 等. 基于处方图的水稻侧深变量施肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 151－162.
WANG Jinfeng, LÜ Zhenyang, ZHAO Minyi, et al. Design and experiment of rice side-deep variable rate fertilization control system based on prescription diagrams [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 151－162.

[60] TIAN L. Development of a sensor-based precision herbicide application system [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 36(2/3): 133－149.

[61] 邓巍, 何雄奎, 张录达, 等. 自动对靶喷雾靶标红外探测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(10): 2285－2289.
DENG Wei, HE Xiongkui, ZHANG Luda, et al. Target infrared detection in target spray [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(10): 2285－2289.

[62] GIL E, LLORENS J, LLOP J, et al. Variable rate sprayer. Part 2-Vineyard prototype: Design, implementation, and validation [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 95: 136－150.

[63] MULLA D J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps [J]. Biosystems Engineering, 2013, 114(4): 358－371.

[64] ADÃO T, HRUŠKA J, PÁDUA L, et al. Hyperspectral imaging: A review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry [J]. Remote Sensing, 2017, 9(11): 1110.

[65] ISHIDA T, KURIHARA J, VIRAY F A, et al. A novel approach for vegetation classification using UAV-based hyperspectral imaging [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 144: 80－85.

[66] DAPHAL S D, KOLI S M. Enhanced classification of sugarcane diseases through a modified learning rate policy in deep learning [J]. Traitement du Signal, 2024, 41(1): 441－449.

[67] HU C S, SAPKOTA B B, THOMASSON J A, et al. Influence of image quality and light consistency on the performance of convolutional neural networks for weed mapping [J]. Remote Sensing, 2021, 13(11): 2140.

[68] GENZE N, AJEKWE R, GÜRELI Z, et al. Deep learning-based early weed segmentation using motion blurred UAV images of sorghum fields [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 202: 107388.

[69] 周良富, 薛新宇, 周立新, 等. 果园变量喷雾技术研究现状与前景分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 80－92.
ZHOU Liangfu, XUE Xinyu, ZHOU Lixin, et al. Research situation and progress analysis on orchard variable rate spraying technology [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(23): 80－92.

[70] ESCOLÀ A, PLANAS S, ROSELL J R, et al. Performance of an ultrasonic ranging sensor in apple tree canopies [J]. Sensors, 2011, 11(3): 2459－2477.

[71] PENG Z, JUN C. Weed recognition using image blur information [J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(2): 198－205.

[72] LUO S Y, WEN S, ZHANG L, et al. Extraction of crop canopy features and decision-making for variable spraying based on unmanned aerial vehicle LiDAR data [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 224: 109197.

[73] FAN X P, CHAI X J, ZHOU J P, et al. Deep learning based weed detection and target spraying robot system at seedling stage of cotton field [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 214: 108317.

[74] WEISSER P, KOCH H. Expression of dose rate with respect to orchard sprayer function [J]. Aspects of Applied Biology, 2002, 66(2): 353－358.

[75] FURNESS G O, MAGAREY P A, MILLER P M, et al. Fruit tree and vine sprayer calibration based on canopy size and length of row: Unit canopy row method [J]. Crop Protection, 1998, 17(8): 639－644.

[76] GIL E, ESCOLÀ A. Design of a decision support method to determine volume rate for vineyard spraying [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, 25(2): 145－151.

[77] ZHOU Q Q, XUE X Y, CHEN C, et al. Canopy

deposition characteristics of different orchard pesticide dose models [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023, 16(3): 1－6.

[78] GONZALEZ R, PAWLOWSKI A, RODRIGUEZ C, et al. Design and implementation of an automatic pressure-control system for a mobile sprayer for greenhouse applications [J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2012, 10(4): 939－949.

[79] WOMAC A R, BUI Q D. Design and tests of a variable-flow fan nozzle [J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(2): 287.

[80] LIU H, ZHU H P, SHEN Y, et al. Development of digital flow control system for multi-channel variable-rate sprayers [J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(1): 273－281.

[81] OSTERMAN A, GODEŠA T, HOČEVAR M, et al. Real-time positioning algorithm for variable-geometry air-assisted orchard sprayer [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 98: 175－182.

[82] 齐闯. 喷雾机变量施药控制系统研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学, 2021.

[83] LAW S E. Electrostatic pesticide spraying: Concepts and practice [J]. IEEE transactions on Industry Applications, 1983(2): 160－168.

[84] TAVARES R M, CUNHA J P, ALVES T C, et al. Electrostatic spraying in the chemical control of *Triozoida limbata* (enderlein)(Hemiptera: Triozidae) in guava trees (*Psidium guajava* L.) [J]. Pest Management Science, 2017, 73(6): 1148－1153.

[85] 李宇飞, 胡军, 刘崇林, 等. 背负式静电喷雾机喷雾沉积性能试验研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2021, 33(1): 76－82, 121.
LI Yufei, HU Jun, LIU Chonglin, et al. Experimental study on the spray deposition performance of backpack electrostatic sprayer [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2021, 33(1): 76－82, 121.

[86] DE ASSUNÇÃO H H T, DA CUNHA J P A R, SILVA S M, et al. Spray deposition on maize using an electrostatic sprayer [J]. Engenharia Agrícola, 2020, 40(4): 503－510.

[87] 王军锋, 张娟娟, 王贞涛, 等. 风幕式气力辅助静电喷雾沉积特性[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 61－65.
WANG Junfeng, ZHANG Juanjuan, WANG Zhentao, et al. Deposition and distribution characteristics of air-assisted electrostatic spraying by wind-curtain [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 61－65.

[88] 贾卫东, 胡化超, 陈龙, 等. 风幕式静电喷杆喷雾喷头雾化与雾滴沉积性能试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 53－59.
JIA Weidong, HU Huachao, CHEN Long, et al. Performance experiment on spray atomization and droplets deposition of wind-curtain electrostatic boom spray [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(7): 53－59.

[89] PATEL M K, PRAVEEN B, SAHOO H K, et al. An advance air-induced air-assisted electrostatic nozzle with enhanced performance [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 135: 280－288.

[90] 王军锋, 卜佳振, 王晓英, 等. 大载荷无人直升机静电喷雾沉积特性试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(12): 1239－1244.
WANG Junfeng, BU Jiazhen, WANG Xiaoying, et al. Experimental study on electrostatic spray deposition characteristics of large-load unmanned aerial vehicle [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(12): 1239－1244.

[91] ZHANG Y L, HUANG X R, LAN Y B, et al. Development and prospect of UAV-based aerial electrostatic spray technology in China [J]. Applied Sciences, 2021, 11(9): 4071.

[92] 赵德楠, 兰玉彬, 沈为国. 航空静电喷雾系统构建与雾滴沉积效果影响因素探究[J]. 农机化研究, 2021, 43(8): 204－207, 213.
ZHAO Denan, LAN Yubin, SHEN Weiguo. Building of aerial electrostatic spraying system and exploration on the influencing factors of droplet deposition effect [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(8): 204－207, 213.

[93] 董文浩, 郭林杰, 马旭, 等. 多喷头静电喷雾的稳定性和均匀性试验研究[J]. 农机化研究, 2023, 45(9): 171－176.
DONG Wenhao, GUO Linjie, MA Xu, et al. Experimental research on the stability and uniformity of multi-nozzle electrostatic spray [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(9): 171－176.

[94] LIN Z, XIE J Y, TIAN S, et al. Research and experiment of electrostatic spraying system for agricultural plant protection unmanned vehicle [J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2023, 11: 1138180.

[95] 王士林, 何雄奎, 宋坚利, 等. 双极性接触式航空机载静电喷雾系统荷电与喷雾效果试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 82－89.
WANG Shilin, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Charging and spraying performance test of bipolar contact electrostatic spraying system for unmanned aerial vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(7): 82－89.

[96] 刘建河，石亮，闫晨阳，等. 静电雾化喷头喷针布局方式的分析与优化[J]. 排灌机械工程学报，2021，39(9)：917－922.
LIU Jianhe，SHI Liang，YAN Chenyang，et al. Analysis and optimization of needle layout for electrostatic atomization nozzle [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering，2021，39(9)：917－922.

[97] LAW S E. Embedded-electrode electrostatic-induction spray-charging nozzle：theoretical and engineering design [J]. Transactions of the ASAE，1978，21(6)：1096－1104.

[98] 周良富，张玲，薛新宇，等. 农药静电喷雾技术研究进展及应用现状分析[J]. 农业工程学报，2018，34(18)：1－11.
ZHOU Liangfu，ZHANG Ling，XUE Xinyu，et al. Research progress and application status of electrostatic pesticide spray technology [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2018，34(18)：1－11.

[99] 周宏平，茹煜，舒朝然，等. 航空静电喷雾装置的改进及效果试验[J]. 农业工程学报，2012，28(12)：7－12.
ZHOU Hongping，RU Yu，SHU Chaoran，et al. Improvement and experiment of aerial electrostatic spray device [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2012，28(12)：7－12.

[100] 张玲，周良富，孙竹，等. 双风道风送静电喷雾系统试验研究[J]. 中国农机化学报，2014，35(6)：65－68，93.
ZHANG Ling，ZHOU Liangfu，SUN Zhu，et al. Experimental study on a double duct air assisted electrostatic spraying system [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2014，35(6)：65－68，93.

[101] ZHOU H T，OU M X，DONG X，et al. Spraying performance and deposition characteristics of an improved air-assisted nozzle with induction charging [J]. Frontiers in Plant Science，2024，15：1309088.

[102] 林甄，梁盛开，谢金冶，等. 植保静电喷雾系统参数性能研究[J]. 东北农业大学学报，2021，52(4)：77－87.
LIN Zhen，LIANG Shengkai，XIE Jinye，et al. Study on parameter performance of plant protection electrostatic spray system [J]. Journal of Northeast Agricultural University，2021，52(4)：77－87.

[103] APPAH S，WANG P，OU M X，et al. Review of electrostatic system parameters，charged droplets characteristics and substrate impact behavior from pesticides spraying [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering，2019，12(2)：1－9.

[104] MAMIDI V R，GHANSHYAM C，KUMAR P M，et al. Electrostatic hand pressure knapsack spray system with enhanced performance for small scale farms [J]. Journal of Electrostatics，2013，71(4)：785－790.

[105] 卢佳节，陈家兑，吴扬东，等. 农用航空静电喷雾系统喷雾性能的研究[J]. 农机化研究，2019，41(12)：174－179.
LU Jiajie，CHEN Jiadui，WU Yangdong，et al. Agricultural aviation research aeronautical electrostatic spray system performance [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2019，41(12)：174－179.

[106] POST S L，ROTEN R L. A review of the effects of droplet size and flow rate on the chargeability of spray droplets in electrostatic agricultural sprays [J]. Transactions of the ASABE，2018，61(4)：1243－1248.

[107] GAN-MOR S，RONEN B，OHALIAV K. The effect of air velocity and proximity on the charging of sprays from conventional hydraulic nozzles [J]. Biosystems Engineering，2014，121：200－208.

[108] MA J，LIU K，CHEN C G，et al. Influence of plant leaf moisture content on retention of electrostatic-induced droplets [J]. Sustainability，2021，13(21)：11685.

[109] GUO J，TAILOR M，BAMBER T，et al. Investigation of relationship between interfacial electroadhesive force and surface texture [J]. Journal of Physics D：Applied Physics，2016，49(3)：035303.

[110] 崔龙飞，薛新宇，丁素明，等. 双钟摆主被动悬架式大型喷雾机喷杆动力学仿真与试验[J]. 农业机械学报，2017，48(2)：82－90.
CUI Longfei，XUE Xinyu，DING Suming，et al. Modeling and simulation of dynamic behavior of large spray boom with active and passive pendulum suspension [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(2)：82－90.

[111] BAYAT A，İTMEÇ M，ÖZLÜOYMAK Ö B. Development and assessment of a novel servo-controlled spraying system for real time adjustment of the orientation angle of the nozzles of a boom sprayer [J]. Pest Management Science，2023，79(11)：4439－4450.

[112] CUI L F，MAO H P，XUE X Y，et al. Optimized design and test for a pendulum suspension of the crop spray boom in dynamic conditions based on a six DOF motion simulator [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering，2018，11(3)：76－85.

[113] DEPREZ K，ANTHONIS J，RAMON H，et al. PM-Power and Machinery：Development of a slow active suspension for stabilizing the roll of spray booms，Part 1：Hybrid modeling [J]. Biosystems Engineering，2002，81(2)：185－191.

[114] 陈金成，张校康，温浩军，等. 喷杆喷雾机悬架负载敏感液压系统仿真分析[J]. 液压与气动，2022，46(2)：24－30.

CHEN Jincheng, ZHANG Xiaokang, WEN Haojun, et al. Simulation analysis of load-sensitive hydraulic system for suspension of boom sprayer [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2022, 46(2): 24－30.

[115] KALINIEWICZ Z, LIPIŃSKI A, MARKOWSKI P, et al. A new system for measuring boom displacement in a field crop sprayer [J]. Measurement, 2023, 222: 113594.

[116] 谭昊然，窦汉杰，翟长远，等. 喷杆式喷药机喷杆高度调控系统设计与试验[J]. 农机化研究，2021，43(6)：156－160.
TAN Haoran, DOU Hanjie, ZHAI Changyuan, et al. Design and test of boom height control system for boom sprayer [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(6): 156－160.

[117] 孙星，杨学军，董祥，等. 基于专家控制的喷杆高度智能调节系统研究[J]. 农业机械学报，2020，51(S2)：275－282.
SUN Xing, YANG Xuejun, DONG Xiang, et al. Spray boom height intelligent adjustment system based on expert control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S2): 275－282.

[118] 魏新华，邵菁，缪丹丹，等. 喷杆式喷雾机喷杆高度及平衡在线调控系统[J]. 农业机械学报，2015，46(8)：66－71.
WEI Xinhua, SHAO Jing, MIAO Dandan, et al. Online control system of spray boom height and balance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 66－71.

[119] KALINIEWICZ Z, LIPIŃSKI A, MARKOWSKI P, et al. The influence of selected operating parameters of a field sprayer on boom stability [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 219: 108787.

[120] CUI L F, XUE X Y, LE F X. Adaptive robust precision control of an active spray boom suspension with disturbance estimation [J]. Journal of Vibration and Control, 2023, 29(3/4): 925－941.

[121] 崔龙飞，薛新宇，乐飞翔，等. 大型喷杆悬架系统测试平台设计与评价方法研究[J]. 农业工程学报，2019，35(16)：23－31.
CUI Longfei, XUE Xinyu, LE Feixiang, et al. Design and evaluation method of testing bench for spray boom suspension systems [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 23－31.

[122] CUI L F, XUE X Y, DING S M, et al. Development of a DSP-based electronic control system for the active spray boom suspension [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 166: 105024.

[123] DOU H J, ZHAI C Y, CHEN L P, et al. Field variation characteristics of sprayer boom height using a newly designed boom height detection system [J]. IEEE Access, 2021, 9: 17148－17160.

[124] 李中祥，温浩军，王国良，等. 高地隙自走式喷雾机底盘悬架减振特性分析[J]. 新疆农业科学，2021，58(12)：2250－2255.
LI Zhongxiang, WEN Haojun, WANG Guoliang, et al. Test and analysis of vibration reduction characteristics of chassis suspension of highland clearance self-propelled sprayer [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(12): 2250－2255.

[125] 陈庚，罗亚辉，蒋蘋，等. 基于主动气囊的高地隙底盘调平系统设计与试验[J]. 农机化研究，2024，46(5)：45－52.
CHEN Geng, LUO Yahui, JIANG Pin, et al. Design and test of high clearance chassis leveling system based on active airbag [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(5): 45－52.

[126] 顾伟，丁素明，乐飞翔，等. 遥控喷杆喷雾机设计与试验[J]. 中国农机化学报，2022，43(8)：62－67.
GU Wei, DING Suming, LE Feixiang, et al. Design and analysis of remote control boom sprayer [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(8): 62－67.

[127] 杨方飞，韩小进，段垚奇，等. 高地隙喷杆喷雾机底盘可靠性试验[J]. 农业机械学报，2014，45(10)：73－77，72.
YANG Fangfei, HAN Xiaojin, DUAN Yaoqi, et al. Reliability experiment on high clearance boom sprayer chassis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 73－77, 72.

[128] 周海燕，刘树民，杨学军，等. 大田蔬菜高地隙自走式喷杆喷雾机的研制[J]. 农机化研究，2011，33(6)：70－72.
ZHOU Haiyan, LIU Shumin, YANG Xuejun, et al. Development on field vegetables high clearance self-propelled boom sprayer [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(6): 70－72.

[129] 乐飞翔. 基于平顺性的自走式喷杆喷雾机油气悬架的仿真与试验[D]. 合肥：安徽农业大学，2017.

[130] 常飞龙. 大型喷杆喷雾机平衡底盘设计与运动仿真[D]. 北京：中国农业科学院，2016.

[131] 薛涛，李伟，杜岳峰，等. 大型高地隙喷雾机喷杆主动悬架自适应模糊滑模控制[J]. 农业工程学报，2018，34(21)：47－56.
XUE Tao, LI Wei, DU Yuefeng, et al. Adaptive fuzzy sliding mode control of spray boom active suspension for large high clearance sprayer [J]. Transactions of the

Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(21): 47−56.

[132] 毛罕平, 倪静, 韩绿化, 等. 高地隙液压四轮驱动喷雾机转向防滑控制系统[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 58−62.
MAO Hanping, NI Jing, HAN Lühua. Turning anti-slip control system of hydraulic four-wheel drive high clearance sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 58−62.

[133] 曾山, 刘竣, 罗锡文, 等. 水田高地隙喷雾机轮履复合动力底盘的设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 14−22.
ZENG Shan, LIU Jun, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of wheel-track compound power chassis for high clearance sprayer in paddy field [J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5): 14−22.

[134] 魏鹏, 闫晓静, 徐军, 等. 植物保护施药技术创新与装备智能化的研究现状与展望[J]. 现代农药, 2023, 22(5): 1−8, 27.
WEI Peng, YAN Xiaojing, XU Jun, et al. Research status and prospects of innovation in plant protection pesticide spraying technology and intellectualization of pesticide spraying equipment [J]. Modern Agrochemicals, 2023, 22(5): 1−8, 27.

[135] 崔冰波, 吉峰, 孙宇, 等. 高斯过程改进的鲁棒容积卡尔曼滤波及其组合导航应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(9): 34−40.
CUI Bingbo, JI Feng, SUN Yu, et al. Gaussian process enhanced robust cubature Kalman filter and application in integrated navigation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(9): 34−40.

[136] 李丹丹, 史云, 李会宾, 等. 农业机器人研究进展评述[J]. 中国农业信息, 2018, 30(6): 1−17.
LI Dandan, SHI Yun, LI Huibin, et al. Review on the progress of agricultural robot research [J]. China Agricultural Informatics, 2018, 30(6): 1−17.

[137] 林洪振. 水田植保施肥装备自动驾驶与无人自主作业系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2021.

[138] XIA X M, AI C S, DU Y C. Automatic driving system of plant protection robot based on differential GPS [M]// Automatic Control, Mechatronics and Industrial Engineering. Boca Raton: CRC Press, 2019: 23−29.

[139] HE C X, CHEN Q T, MIAO Z H, et al. Extracting the navigation path of an agricultural plant protection robot based on machine vision [C]//2021 40th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2021: 3576−3581.

[140] GALATI R, REINA G, MESSINA A, et al. Survey and navigation in agricultural environments using robotic technologies [C]//2017 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS). IEEE, 2017: 1−6.

[141] 李寒, 钟涛, 张可意, 等. 基于WebGIS的农机多机协同导航服务平台设计[J]. 农业机械学报, 2022, 53(S1): 28−35.
LI Han, ZHONG Tao, ZHANG Keyi, et al. Design of agricultural machinery multi-machine cooperative navigation service platform based on WebGIS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S1): 28−35.

[142] 李玫瑾, 魏新华. 四轮驱动四轮转向自动驾驶底盘的电控系统设计[J]. 农机化研究, 2016, 38(3): 115−118, 123.
LI Meijin, WEI Xinhua. Design of the automatic four-wheel driving and four-wheel steering chassis′s electric control system [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(3): 115−118, 123.

[143] 王宁, 韩雨晓, 王雅萱, 等. 农业机器人全覆盖作业规划研究进展[J]. 农业机械学报, 2022, 53(S1): 1−19.
WANG Ning, HAN Yuxiao, WANG Yaxuan, et al. Research progress of agricultural robot full coverage operation planning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S1): 1−19.

[144] 何雄奎. 高效植保机械与精准施药技术进展[J]. 植物保护学报, 2022, 49(1): 389−397.
HE Xiongkui. Research and development of efficient plant protection equipment and precision spraying technology in China: A review [J]. Journal of Plant Protection, 2022, 49(1): 389−397.

[145] 郭永旺, 袁会珠, 何雄奎, 等. 我国农业航空植保发展概况与前景分析[J]. 中国植保导刊, 2014, 34(10): 78−82.

[146] 兰玉彬. 精准农业航空技术现状及未来展望[J]. 农业工程技术, 2017, 37(30): 27−30.

[147] 顾伟, 薛新宇, 孙竹. 植保无人飞机标准现状与制定建议[J]. 农业工程技术, 2018, 38(9): 55−58.

[148] 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.

[149] SHAN C F, WU J J, SONG C C, et al. Control efficacy and deposition characteristics of an unmanned aerial spray system low-volume application on corn fall armyworm Spodoptera frugiperda [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 900939.

[150] CHEN P C, XU W C, ZHAN Y L, et al. Determining

application volume of unmanned aerial spraying systems for cotton defoliation using remote sensing images [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 196: 106912.

[151] ZHANG S C, CAI C, LI J Q, et al. The airflow field characteristics of the unmanned agricultural aerial system on oilseed rape (Brassica napus) canopy for supplementary pollination [J]. Agronomy, 2021, 11(10): 2035.

[152] WANG C L, HERBST A, ZENG A J, et al. Assessment of spray deposition, drift and mass balance from unmanned aerial vehicle sprayer using an artificial vineyard [J]. Science of the Total Environment, 2021, 777: 146181.

[153] GUO S, YAO W X, XU T Y, 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.

[154] 吕佳, 刘知杰, 林尤鑫, 等. 增升增效倾转翼农用植保无人机的设计与仿真[J]. 华南农业大学学报, 2022, 43(4): 125－132.
LÜ Jia, LIU Zhijie, LIN Youxin, et al. Design and simulation of agricultural plant protection UAV with tilt-rotor of increased lift and efficiency [J]. Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(4): 125－132.

[155] 陈明. 四旋翼植保无人机的总体设计及其气动特性分析[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.

[156] 林晋立. 多旋翼农用无人机能源载荷匹配技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.

[157] 李鹏, 石永康, 郭稳敏, 等. 四旋翼植保无人机机臂折叠机构轻量化设计[J]. 农机化研究, 2024, 46(6): 116－121.
LI Peng, SHI Yongkang, GUO Wenmin, et al. Lightweight design of arm folding mechanism of quad-rotor plant protection UAV [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(6): 116－121.

[158] 顾瑾. 从工业设计看中国植保无人机的发展[J]. 湖北植保, 2018(3): 60－62.
GU Jin. On development of Chinese plant protection drone from industrial design [J]. Hubei Plant Protection, 2018(3): 60－62.

[159] 曹光乔, 李亦白, 南风, 等. 植保无人机飞控系统与航线规划研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 1－16.
CAO Guangqiao, LI Yibai, NAN Feng, et al. Development and analysis of plant protection UAV flight control system and route planning research [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 1－16.

[160] 刘璐, 沈小伟, 葛超, 等. 基于改进蚁群算法的植保无人机路径规划[J]. 计算机仿真, 2024, 41(1): 39－43.
LIU Lu, SHEN Xiaowei, GE Chao, et al. Path planning of plant protection UAV based on improved ant colony algorithm [J]. Computer Simulation, 2024, 41(1): 39－43.

[161] 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.
SUN Ke, WU Kaihua, WANG Yatao, et al. Research on obstacle avoidance system of plant protection UAV based on millimeter wave radar [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(6): 73－76.

[162] XU Y, SUN Z, XUE X Y, et al. A hybrid algorithm based on MOSFLA and GA for multi-UAVs plant protection task assignment and sequencing optimization [J]. Applied Soft Computing, 2020, 96: 106623.

[163] 刘慧, 施志翔, 沈亚运, 等. 基于改进ESKF的植保无人机时延位姿补偿算法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2): 315－324.
LIU Hui, SHI Zhixiang, SHEN Yayun, et al. Time delay and attitude compensation algorithm for plant protection UAV based on the improved ESKF [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 315－324.

[164] 沈跃, 张念, 孙志伟, 等. 基于多速率卡尔曼滤波的植保无人机仿地飞行方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 190－197.
SHEN Yue, ZHANG Nian, SUN Zhiwei, et al. Terrain following flight for plant protection UAV based on multi-rate Kalman filter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 190－197.

[165] XU Y, XUE X Y, SUN Z, et al. Joint path planning and scheduling for vehicle-assisted multiple unmanned aerial systems plant protection operation [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 200: 107221.

[166] XU Y, HAN Y X, SUN Z, et al. Path planning optimization with multiple pesticide and power loading bases using several unmanned aerial systems on segmented agricultural fields [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(3): 1882－1894.

[167] XUE X Y, KANG T, QIN W C, et al. Drift and deposition of ultra-low altitude and low volume application in paddy field [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014, 4(7): 23－28.

[168] 张宋超, 薛新宇, 秦维彩, 等. N-3型农用无人直升机航空施药飘移模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31

(3): 87－93.
ZHANG Songchao, XUE Xinyu, QIN Weicai, et al. Simulation and experimental verification of aerial spraying drift on N-3 unmanned spraying helicopter [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(3): 87－93.

[169] 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.
XUE Xinyu, QIN Weicai, SUN Zhu, et al. Effects of N-3 UAV spraying methods on the efficiency of insecticides against planthoppers and Cnaphalocrocis medinalis [J]. Acta Phytophylacica Sinica, 2013, 40(3): 273－278.

[170] WANG G B, HAN Y X, LI X, et al. Field evaluation of spray drift and environmental impact using an agricultural unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer [J]. Science of the Total Environment, 2020, 737: 139793.

[171] SUN Z, GUO X Y, XU Y, et al. Image recognition of male oilseed rape (Brassica napus) plants based on convolutional neural network for UAAS navigation applications on supplementary pollination and aerial spraying [J]. Agriculture, 2022, 12(1): 62.

[172] 徐华治. 带播种装置的植保无人机推广应用分析[J]. 江苏农机化, 2021(3): 35－36.

[173] OKSANEN T, VISALA A. Coverage path planning algorithms for agricultural field machines [J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(8): 651－668.

[174] 徐博. 植保无人机航线规划方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.

[175] 黄小毛, 张垒, TANG Lie, 等. 复杂边界田块旋翼无人机自主作业路径规划[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 34－42.
HUANG Xiaomao, ZHANG Lei, TANG Lie, et al. Path planning for autonomous operation of drone in fields with complex boundaries [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (3): 34－42.

[176] BOCHTIS D, GRIEPENTROG H W, VOUGIOUKAS S, et al. Route planning for orchard operations [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 113: 51－60.

[177] SUN Q L, ZHANG R R, CHEN L P, et al. Semantic segmentation and path planning for orchards based on UAV images [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 200: 107222.

[178] TIAN H X, MO Z J, MA C Y, et al. Design and validation of a multi-objective waypoint planning algorithm for UAV spraying in orchards based on improved ant colony algorithm [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1101828.

[179] 曹光乔, 张庆凯, 陈聪, 等. 基于多目标优化的飞防队作业调度模型研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 92－101.
CAO Guangqiao, ZHANG Qingkai, CHEN Cong, et al. Scheduling model of UAV plant protection team based on multi-objective optimization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50 (11): 92－101.

[180] 杨昊天, 王良民, 刘路, 等. 基于区块链的农机跨区域调度模型构建与应用[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 31－40.
YANG Haotian, WANG Liangmin, LIU Lu, et al. Model construction and application of agricultural machinery cross-region scheduling based on blockchain [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(11): 31－40.

[181] 徐正伟, 张亮, 马芳. 基于改进遗传算法的多植保无人机任务分配研究[J]. 工业控制计算机, 2019, 32(6): 43－44, 46.
XU Zhengwei, ZHANG Liang, MA Fang. Task assignment of multi-plant protection UAVs based on improved genetic algorithm [J]. Industrial Control Computer, 2019, 32(6): 43－44, 46.

[182] 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): 260－270.

[183] 马英剑, 甄硕, 孙喆, 等. 农药制剂研发的精细化、功能化与农业生产高效利用[J]. 农药学学报, 2022, 24(5): 1080－1098.
MA Yingjian, ZHEN Shuo, SUN Zhe, et al. Refinement and functionalization of pesticide formulation research and development and efficient utilization in agricultural production [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2022, 24(5): 1080－1098.

[184] 宋倩, 黄啟良, 袁会珠, 等. 可控缓释纳米农药制剂及其研究进展[C]//中国植物保护学会. 植物保护科技创新与发展——中国植物保护学会2008年学术年会论文集. 中国农业科学院植物保护研究所植物病虫害生物学国家重点实验室, 2008: 4.

[185] 唐伟, 张建萍, 杨永杰, 等. 机插秧同步施用噁草酮－复合肥缓释颗粒剂的研制及其田间应用[J]. 农药学学报, 2021, 23(3): 515－522.
TANG Wei, ZHANG Jianping, YANG Yongjie, et al. Development and application of oxadiazon-fertilizer slow-release granule for synchronous application in mechanical transplanting rice [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2021, 23(3): 515－522.

[186] 兰玉彬, 单常峰, 王庆雨, 等. 不同喷雾助剂在植保无人机喷施作业中对雾滴沉积特性的影响[J]. 农业工程学

报，2021，37(16)：31－38.
LAN Yubin，SHAN Changfeng，WANG Qingyu，et al. Effects of different spray additives on droplet deposition characteristics during plant protection UAV spraying operations [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2021，37(16)：31－38.
[187] 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.
CHEN Shengde，LAN Yubin，ZHOU Zhiyan，et al. Test and evaluation for flight quality of aerial spraying of plant protection UAV [J]. Journal of South China Agricultural University，2019，40(3)：89－96.
[188] XU Y，XUE X Y，SUN Z，et al. Online spraying quality assessment system of plant protection unmanned aerial vehicle based on Android client [J]. Computers and Electronics in Agriculture，2019，166：104938.
[189] XU Y，XUE X Y，SUN Z，et al. Non-intrusive flowrate measurement and monitoring system of plant-protection unmanned aircraft systems based on pump voice analysis [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering，2021，14(3)：58－65.

Research status and development trends of key technologies for intelligent plant protection equipment

SUN Zhu[1，2]，GU Wei[1，2]，CUI Longfei[1，2]，CAI Chen[1，2]，CHEN Chen[1，2]，ZHOU Qingqing[1，2]，DING Suming[1，2]，LAN Yubin[3，4]，XUE Xinyu[1，2，4*]

(1. *Nanjing Institute of Agricultural Mechanization*，*Ministry of Agriculture and Rural Affairs*，*Nanjing* 210014，*China*；2. *Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment*，*Ministry of Agriculture and Rural Affairs*，*Nanjing* 210014，*China*；3. *College of Electronic Engineering & College of Artificial Intelligence*，*South China Agricultural University*，*Guangzhou* 510642，*China*；4. *Key Laboratory of Aviation Plant Protection*，*Ministry of Agriculture and Rural Affairs*，*Anyang* 455100，*China*)

Abstract: Crop protection machinery plays a crucial role in modern agricultural production. Advanced plant protection machinery is conducive to optimizing pesticide utilization，improving food quality，and supporting sustainable agricultural practices. Globally，pesticide application products from the United States，Western Europe，and Japan are at the leading level internationally. The relevant products have a high degree of automation and intelligence，and the operation efficiency and effect are generally better than the domestic level. They occupy the vast majority of the market share. By comparison，China demonstrates technical advantages primarily in crop protection drones. To accurately capture the current research status and future directions of crop protection machinery，this article reviews the development history of prominent crop protection equipment，including ground，aerial，and field management robots，both at home and abroad. According to the needs and characteristics of field and orchard pest control，plant protection machinery is subdivided into three technical branches：pesticide application，components，and intelligence. The application technology methods such as variable pesticide application，target pesticide application，electrostatic spray，and wind curtain air delivery are summarized，the technical principles of equipment such as chassis，spray boom balance，and robot drive are analyzed，and the application of intelligent technologies such as drone driving，line walking，and visual navigation are explained. From the perspective of remote management，it also explains the intelligent construction of operation planning，scheduling decision-making，operation evaluation，and digital platform. Comparison of domestic and international technology levels suggests that the future development of plant protection machinery should focus on low-volume，precise pesticide application methods，specialized equipment components，and autonomous，intelligent operation modes. As artificial intelligence continues to advance，plant protection equipment with capabilities for intelligent perception，analysis，decision-making，and automation is expected to dominate future development.

Keywords: crop protection machinery；intelligent；precise-spraying；field management robot；crop protection UAS