

◆ 专论:智慧农药(特约稿) ◆

植物保护施药技术创新与装备智能化的研究现状与展望

魏 鹏,闫晓静,徐 军,杨代斌,袁会珠*

(中国农业科学院植物保护研究所,北京 100193)

摘要:为把握植保施药技术及其装备的发展现状,以植保施药技术创新与药械装备智能化两方面为切入点,深入分析和总结了植物保护领域国内外的研究成果。针对植保施药技术的创新性发展,重点剖析了精准变量施药技术,精准在线混药技术,精准对靶施药技术,物理场辅助施药技术,喷雾飘移控制技术以及植保用药、施药的多元化发展等六个方面;针对植保药械装备的智能化发展,总结了智能农机的自主作业轨迹规划与导航、自主避障运行和远程在线监管三方面的研究成果。在此基础上,提出植物保护领域存在的突出问题及发展展望,为进一步促进我国现代农业植物保护领域的快速发展提供支撑。

关键词:施药技术;药械装备;技术创新;智能化;植物保护

中图分类号:S-1;S4 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-5284.2023.05.001

Research Status and Prospects of Innovation in Plant Protection Pesticide Spraying Technology and Intellectualization of Pesticide Spraying Equipment

WEI Peng, YAN Xiaojing, XU Jun, YANG Daibin, YUAN Huizhu*

(Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: In order to grasp the current development status of plant protection pesticide spraying technology and its equipment, this article takes the innovation of plant protection pesticide spraying technology and the intelligence of pesticide spraying equipment as the starting point and deeply analyzes and summarizes the research results in this field at home and abroad. Regarding the innovative development of plant protection pesticide spraying technology, the article focuses on analyzing six aspects: precise variable rate spraying and fertilizing technology, precise online pesticide mixing technology, precise target spraying technology, physical field-assisted spraying technology, drift control technology for droplets, and the diversified development of pesticide application in plant protection. Regarding the intelligent development of plant protection equipment, the article mainly summarizes three aspects: autonomous operation trajectory planning and navigation of intelligent agricultural machinery, autonomous obstacle avoidance operation, and remote online supervision. In order to further promote the rapid development of modern agriculture in the field of plant protection in China, the article concludes with corresponding prospects for the prominent issues in this field.

Key words: plant protection pesticide spraying technology; pesticide spraying equipment; technological innovation; intelligence; plant protection

收稿日期:2023-09-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD02001402)

作者简介:魏鹏(1998—),男,山东诸城人,博士研究生,主要从事精准农业航空施药技术研究。E-mail: pangu1998@163.com

通信作者:袁会珠(1967—),男,河北藁城人,博士,研究员,主要从事农药使用技术研究。E-mail: hzhyuan@ippcaas.cn

2021年中国农业农村部等六部委印发的《“十四五”全国农业绿色发展规划》指出,我国主要农作物的农药利用率到2025年需要从2020年的40.6%提升至43%。2023年2月,中共中央国务院发布《关于做好2023年全面推进乡村振兴重点工作的意见》,进一步指出,要加快建设农业强国,推进农业绿色发展,加快农业投入品减量增效技术的推广应用。由此可见,人们对健康美好生活的不断向往和社会的发展对农药施用等提出了更高的要求,但目前我国大部分地区仍旧采用大面积、大容量的植保施药方法,施药量不合理等问题导致的环境污染与农药残留超标等问题十分严峻。

随着精准农业理念(图1)的提出与实践^[1],人工智能等各种数字化技术不断涌现,植保技术与装备均得到了极大的发展。其中,植保施药技术的创新及其装备的智能化已成为实现农药减施增效的重要途径^[2]。本文以植保施药技术的创新与药械装备的智能化两个方面作为切入点,分析国内外学者在该领域的研究现状,并对其存在的难题和未来的发展进行探讨。

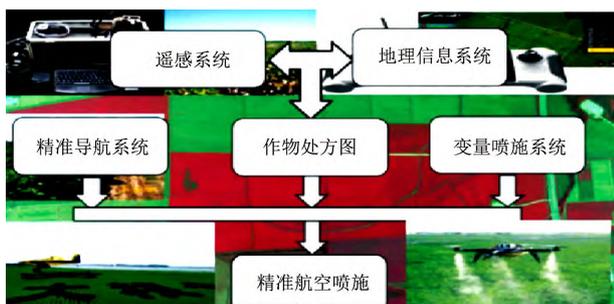


图 1 精准农业架构

1 植保施药技术的创新

植保施药技术的创新旨在实现农药的减施增效,即降低成本、减少环境污染和药物残留的目的。目前,该技术领域的创新涉及用药量、混药、施用过程等各环节的优化,主要包括精准变量施药技术、精准在线混药技术、精准对靶施药技术、物理场辅助施药技术和喷雾飘移控制技术。此外,植保用药与生物防控技术的多元化发展,也在不断推动植保技术的相应进步。

1.1 精准变量施药技术

精准变量施药技术是按照作物病虫害的发生程度和生长状况,将已获取的田间信息处理生成用药决策,并通过调节施药控制系统参数实现变量施药的方法。该技术的实现主要分为施药决策的生

成与决策执行两个方面。前者主要分为建立融合地理信息的处方图和传感器信息的实时解译两部分;后者主要在于施药系统的传感器类型、变量施药控制方法与算法上的差异。该技术的具体分类与内容如表1所示。

表 1 精准变量施药技术

技术核心	技术分类	技术内容
决策生成	建立融合地理信息的处方图	通过航空遥感等方法获取带有地理信息的农田数据,结合病虫害发生的严重程度或生长状况、根据作业机具的工作参数建立施药栅格处方图等 ^[3-5]
	传感器信息的实时解译	使用相机、雷达、超声波和红外设备等传感器获取作业对象数据并实时解译转化为对施药参数的控制等 ^[6-9]
决策执行	变量施药控制方法	调节施药压力、调节施药浓度和脉宽调制施药频率等 ^[6,10-12]
	变量施药控制算法	模糊控制算法、BP神经网络算法、PID控制算法等 ^[13-16]

精准变量施药技术按需用药的理念有效降低了农药的使用量,进一步减少了资源的浪费和环境的污染。闫春雨等^[3]使用无人机搭载多光谱相机获取喷施棉花脱叶剂前后4次的田间数据建立最优监测模型,分别生成作业处方图指导施药(图2),节约农药7.39%;Nan等^[4]使用CMAC-PID仿形跟踪算法建立了基于树冠体积与叶面积密度的喷施流量计算方法,与常规室外喷施相比,该方法可使冠层内外喷雾变异系数分别降低25.9%和21.9%,地面沉积覆盖率平均值降低20.2%。

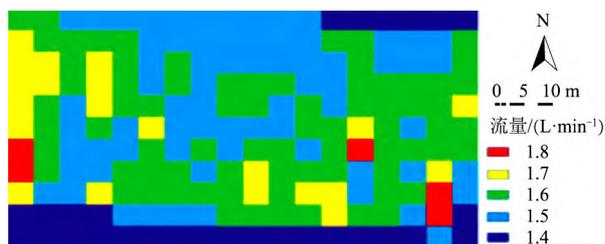


图 2 精准变量施药处方图

尽管精准变量施药技术已经有了长足的发展,但在实际应用中仍存在部分难题有待解决。在施用量决策生成方面,获取的农田信息会存在偏差,造成处理和分析的结果误判,同时缺少用于处方图建立与施药量解译的病虫害发生程度量化判别的统一标准;决策执行方面存在变量控制延时、工作参数不稳定等问题。

1.2 精准在线混药技术

精准在线混药技术是将药剂与水独立存放,在

施药作业时按照用药所需浓度实时在线混配后施用的方法^[17]。现有的混药方式主要有直注式、旋动式和射流式3种,如表2所示。

表2 在线混药方式

混药方式	内容
直注式	药剂和水通过支流管路分别加压注入施药主管路混合后喷施 ^[11]
旋动式	在直注式混药的基础上,增加起旋器、螺旋收缩管等结构部件提高混药效率和均匀性 ^[18-19]
射流式	高压清水流经喷嘴时,形成文丘里效应,在压力的作用下吸走药液,两者混合后喷施 ^[20-21]

精确在线混药技术可解决预混式配药的混药不均、用药浓度无法根据变量施药需求实时改变等问题,减少了施药人员与农药的直接接触。混药方式和混药器的设计与优化是影响混药配比效率、质量的关键。理论方面,房开拓等^[20]以非弹性介质的动量计算为切入点,通过理论推导、仿真与试验相结合的方法,总结出一组用于射流式混药器设计分析的特性方程;结构方面,宋海潮等^[21]通过优化混药器内部继旋器、收缩管、扩散管、分流器等结构(图3),实现了脂溶性农药与水的均匀混合。

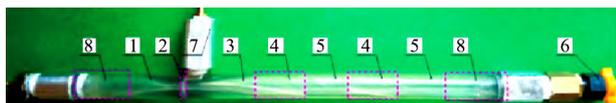


图3 3D打印制作的混药器

目前精准在线混药技术存在实时变量施药与在线混药之间的延时、不同类型药剂在混药器中混药效果有差异等问题,需要进一步优化混药结构,改进混药工作参数,提高混药效果。

1.3 精准对靶施药技术

精准对靶施药技术是精准变量施药技术的基础。变量施药前,农机需要准确获取施药靶点或区域,然后根据病虫害的发生程度进行变量施药。精准对靶施药技术的关键在于目标物的检测,目前已有红外线、超声波、激光雷达、机器视觉、光谱成像和多传感器融合等检测方法^[22],如表3所示。

精准对靶施药技术进一步减少了药剂的用量,Partel等^[23]使用多传感器融合检测施药靶标并分类、变量喷施,有效减少了28%的施药量。图4为作业机具对靶变量喷施的施药处方图与作业轨迹^[23]。但该技术对靶识别方面仍需要进一步提高传感器识别效率、减少施药延时、提升检测准确性以及提高对靶定位精度等。

表3 目标物对靶检测方法

方法	特点
红外线检测	可靠性好、响应速度快、成本低,但易受作物叶片和光照等影响,适合近距离作业 ^[8,24]
微波、超声波检测	相较于红外检测,其探测距离更远、复杂性更低,且不受光照影响 ^[25-27]
激光雷达检测	相较于微波、超声波检测,其响应速度更快,探测距离更远,获取的目标物信息更丰富,但复杂性和成本也更高 ^[6,28-29]
机器视觉检测	相较于激光雷达检测,其可获取目标物更多的色彩信息,结合机器学习、深度学习等算法,可实现靶标的快速提取,但易受遮挡和光照等的影响 ^[22-23,30]
光谱成像检测	相较于普通的可见光相机,多光谱、高光谱相机可以获取目标物更多的光谱信息,用于构建植被指数,利于病虫害的早期检测、程度判别与防治 ^[31-34]
多传感器融合检测	各传感器之间结合应用,可实现更加精准的对靶施药 ^[23]

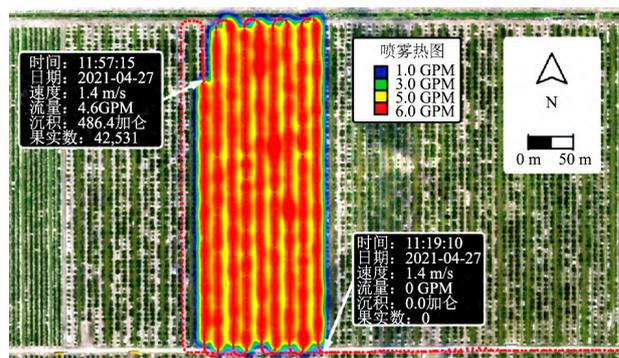


图4 多传感器融合检测对靶变量喷施作业轨迹与处方图

1.4 物理场辅助施药技术

物理场辅助施药技术是通过在施药机具与靶标之间建立特定的物理场以进一步优化施药效果的方法。用于辅助施药技术的物理场主要包括磁场、电场、热场、风场、超声场^[35],其特点和优势如表4所示。

表4 辅助施药的物理场

物理场	特点
磁场	改变水或药液的物化性质,改变雾滴性能,减少雾滴飘移、增加沉积量 ^[36-38]
电场	促使雾滴、粉剂颗粒等荷电,改变雾滴、颗粒的物理特性,减少药剂飘移,增加沉积量 ^[39-44]
热场	通过温度场改变雾滴的温度、粒径等物理特性,促进雾滴扩散、沉积 ^[45-47]
风场	优化雾滴输送通道,改变雾滴输送路径,提升雾滴沉积效果 ^[48-49]
超声场	使用超声频率震动或超声速气流改善雾化效果,生成的雾滴小而均匀 ^[50-52]
多物理场	多种物理场介入雾化过程,综合改善雾滴性能,增加雾滴沉积量 ^[53-54]

物理场介入药剂喷施过程可进一步改善药剂雾滴、颗粒的性能,提升沉积量。Zhao等^[39]设计了应用于航空植保施药的静电雾化喷施系统(图5),使得靶标正面的液滴沉积密度增加了16.7%,靶标背面的液滴沉积量提升约4倍;Mucha-Pelzer等^[55]通过不同的方法施用硅粉药剂进行黑叶螺、菜粉蝶防控效果影响试验,结果发现,静电辅助喷施AL-06-109粉剂的效果最佳,与传统手动施药方式相比提升了54%;Moges等^[36]使用安装磁化系统的TeeJetXR110015型喷嘴喷雾器开展甘蔗田施药试验,与常规喷施结果相比,磁化辅助施药可大幅减少雾滴飘移,作物顶部的沉积量可增加12.1%~41.5%,中部可增加40.6%~65.0%。



图5 无人机载静电施药系统

物理场辅助施药技术的推广应用仍存在较多难题,主要在于物理场对雾滴生成、沉降和沉积过程的影响机理不清晰,物理场调控雾化喷施雾滴物化性质的工作参数不明确,田间试验的可重复性与普适性较差。

1.5 喷雾飘移控制技术

飘移是指向靶标沉降的农药雾滴受环境气流影响而向非靶标区域运动的现象。影响雾滴飘移的因素主要分为两方面,一方面为自然风与作业机具风场耦合的环境气流,另一方面是药滴粒径、动量等自身特性^[17]。目前,喷雾飘移控制技术主要有改进喷嘴结构、优化喷施风场、防飘助剂研发、建立飘移风险预测和控制模型等方法。

喷嘴结构改进方面,研究集中于设计使用防飘喷头的方法,主要包括气吸型、文丘里型等^[17]。冯玉茹等^[56]使用文丘里防飘喷头开展了水稻纹枯病的防治效率检测试验,与常规扇形喷头相比,防治效果提升30%;Homer等^[57]在葡萄园多年生杂草的防治试验中对比使用了多款防飘移喷嘴,与AI (air injection) 型相比,DG (drift guard) 型防飘喷嘴不仅可以产生

更小的雾滴,而且飘移量更少。

喷施风场优化方面,研究集中于设计使用强制风场和风幕的方法。刘昶希等^[48]开展了使用锥形风场式防飘喷施装置的强制辅助气流防飘移特性研究,通过建立单雾滴运动模型和CFD仿真分析优化了防飘装置,使得多因素正交试验建立的竖直和水平方向总雾滴飘移量占比的数学模型显著性较高($P < 0.05$, R^2 分别为0.934、0.945);梁昭^[58]结合模糊控制策略、双峰分布雾滴飘移沉积模型,使用最小二乘支持向量机对风速均值进行预测,建立了基于风幕防飘系统的智能控制系统,与传统风幕系统相比,在模拟横向自然风的条件下,其风幕系统的沉积量可提高29.53%。

防飘助剂研发方面,研究集中于开发能够辅助生成减少风场胁迫,分布均匀性更好且具有更高覆盖密度、沉积量雾滴群的药剂。张海艳等^[59]以雾滴在作物叶片表面的碰撞模型和雾滴拦截模型为基础,建立了用于植保无人机施药雾滴黏附量分析预测的模型,并开展了助剂对药液性质、雾化效果、雾滴沉积特征的影响试验,与清水相比,添加1%迈飞与0.5%迈图Target助剂溶液可使得每公顷水稻田的雾滴黏附量分别增加800.78%和1 051.49%。为分析助剂对药液防治效果的影响,郑发娇等^[60]通过开展4.5%联苯菊酯水乳剂1 000、1 500、2 000倍液分别添加0.1%有机硅表面活性剂Silwet 408、矿物油、渗透剂JFC-2助剂的室内外试验发现,与未添加助剂相比,各浓度的4.5%联苯菊酯水乳剂添加助剂后的田间药液持留量增加了15.22%~41.96%,田间防效增加了5.26%~30.03%。

飘移风险模型探索方面,主要集中于飘移风险预测和控制模型的探究。邹雄等^[61]以多相流理论与质点运动学方法为基础,分析了雾滴直径、初始速度,风速与无人机飞行高度、速度对雾滴飘移的影响,证明雾滴的飘移距离与喷施雾滴的初始速度角度呈二次函数分布,特定条件下,雾滴初始速度角度为20°时的雾滴飘移距离最短。倪佳胜等^[62]结合CFD仿真模拟与风动试验数据,建立了气流速度、喷施高度和雾滴粒径对雾滴飘移距离影响的多元线性回归模型,该模型对雾滴飘移量的预测精度可达83.9%;孙道宗等^[63]开展了不同风速和喷头倾斜角度下喷雾雾滴飘移影响的试验(图6),通过分析水平、垂直两维度上的雾滴质量分布与变异系数,建立了侧风风速与喷施角度对雾滴飘移影响的模型,并计算了不同风速下的最佳补偿喷施倾斜角度。



图6 雾滴飘移补偿试验

1.6 施药的多元化发展

除农药施用方法外,农药制剂产品的质量和性能也会直接决定病虫害的防治效果。随着人们对农产品质量和生态环境要求的不断提高,农药的发展正在加速步入高效、低毒、绿色的新阶段;农药制剂产品的研发更加多元化、精细化和功能化^[64]。多元化方面,农药制剂根据分散程度可分为均相与非均相体系。前者主要包括可溶剂、微乳剂、可分散液剂和乳油等;后者主要包括悬浮剂、水乳剂和纳米乳剂等。精细化方面,为优化药剂在雾化、沉积和传输等过程中的性能,相应地研发出配套的表面活性剂、增稠剂和各类油剂等农药助剂。功能化方面,为进一步提升不同施药场景下农药应用的需求,已研发出种衣剂、微囊缓控释制剂、纳米制剂、省力化制剂和药肥等^[64-66]。

农作物病虫害的绿色防治是农业可持续发展的重要途径。绿色防治技术主要包括生物天敌防控技术、诱捕诱杀技术等。Nayak等^[67]在苦瓜田采用害虫综合诱杀方法进行连续3年的果蝇防控试验,结果发现,综合虫害管理可有效减少约76%的虫害损失。刘万才等^[68]根据水稻田二化螟发育进度,使用植保无人机分次集中投放赤眼蜂进行生物防控,结果显示稻螟赤眼蜂与螟黄赤眼蜂的防控效果分别达83.22%、80.05%,在不施药的情况下实现了水稻二化螟的有效控制。

为满足农药制剂与绿色防控技术多元化发展带来的植保施药需求,施药器械也在不断创新与改进。例如,为满足赤眼蜂的精准投放,大量学者对投放平台、投放器和投放方法不断进行优化,进一步促进了生物防控技术在植保领域的推广应用^[69];为满足颗粒类药肥载体、包覆种衣剂的作物种子等固

体的精准变量撒播,大量学者通过优化控制算法、控制机构、监测方法等不断改进条播、离心撒播等设备及其性能,提升颗粒撒施过程中的沉积分布效果^[70-71]。

2 农业植保装备的智能化

农业植保施药作业分为人工施药、机械化施药、自动化施药和智能化施药4个发展阶段。随着人工智能等新兴技术的迅速发展,农机装备的智能化、智慧化程度得到显著提升,降低农业劳动力成本的同时,进一步提高了农业植保施药的效率和安全性^[72-73]。现阶段,农业植保施药装备的智能化主要集中于智能农机的自主作业轨迹规划与导航、自主避障运行与远程在线监管三方面。

2.1 自主作业轨迹规划与导航

传统的农业植保施药方式不仅劳动成本高,而且对工作人员存在着巨大的暴露风险^[74]。智能农机装备的开发与应用进一步提高了农业的管理效率与安全性^[75]。智能农机自主作业轨迹规划主要分为全区域覆盖植保施药与目标识别对靶精准导航施药作业两种。前者主要应用于小麦、玉米等大面积、高密度种植农田的植保施药;后者主要应用于丘陵果园、温室等种植场景。王伟等^[75]通过作业区域划分、改进蚁群算法确定区域遍历顺序与简化广度优先搜索(breadth first search, BFS)算法确定区域遍历衔接路径的方法优化了农田全区域覆盖作业的效率,路径重复率相较于传统的蚁群与BFS算法降低了44%;Chen等^[30]结合无人机遥感、嵌入式硬件开发和边缘计算等技术,设计了应用于丘陵果树精准对靶喷施的植保系统,规划所得施药航线相较于基于海拔规划的航线可减少19%的航程。

农机自主导航作业主要通过机器视觉、激光雷达和卫星定位等方法实现。机器视觉方面,主要通过地面斜向视角和航空全局视角提取农机导航参考数据;激光雷达方面,主要通过SLAM等方法建立农机导航作业环境;卫星定位方面,主要通过卫星以数据无线传输方法向联网农机传递地理信息完成导航。张彦斐等^[76]对比使用多种机器学习算法提取无人机搭载多光谱相机获取的果树影像,并使用感兴趣区域划分与特征点拟合的方法提取果树行导航线,与人工拟合参考线相比,平均角度偏差仅为0.5975°;Gasparino等^[77]使用UTM30-LX激光扫描仪和惯性传感器采集玉米田三维点云数据,处理得到的玉米田导航车道宽度64.02%在0.05 m误差

范围内;吴才聪等^[78]通过在农机装备上安装北斗终端、制定数据传输协议的方法构建了基于北斗的农机作业大数据系统(图7),该系统可准确记录、

获取农机工作时长、行驶里程和作业面积等工作参数,为农机作业大数据动态监测与数据分析提供服务。

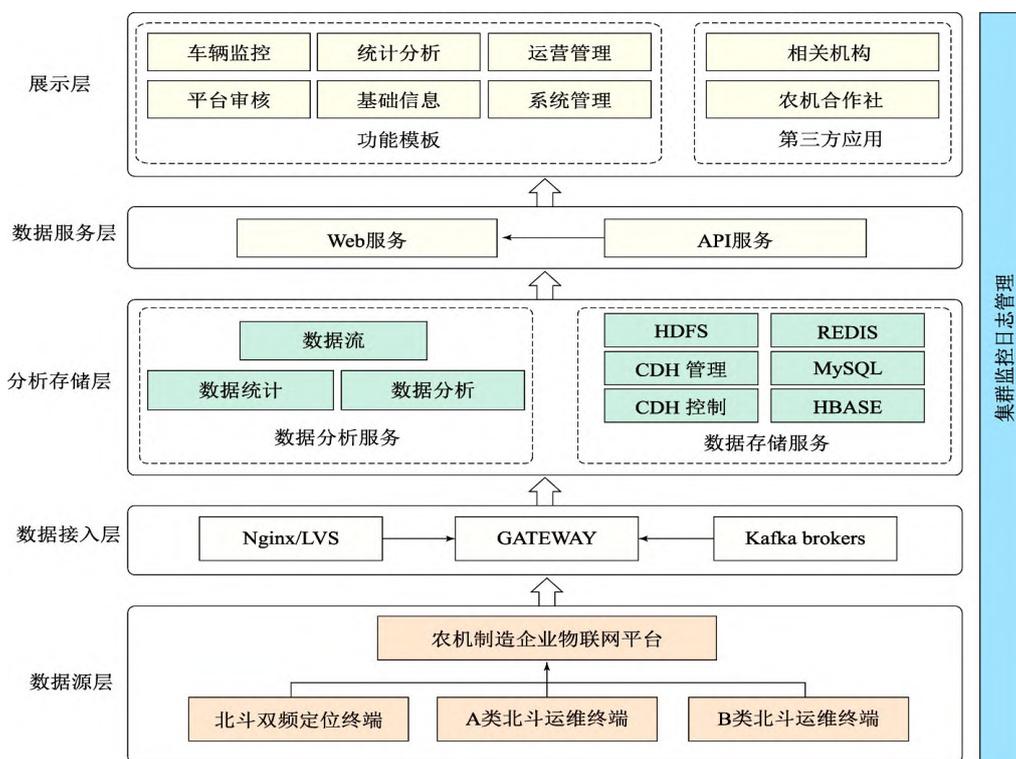


图 7 农机作业大数据系统平台

2.2 自主避障运行

智能农机按照作业轨迹运行过程中最重要的是安全性,具体实现主要依靠自主避障功能。目前的智能农机自主避障功能主要通过机器视觉、激光雷达识别、超声测距等方法实现。视觉避障方面,Dang等^[79]使用语义分割算法从单目相机获取的图像中提取障碍物特征并计算其位置和距离,通过增强A*算法优化作业路径,实现静态与动态障碍物避让与高效、低角度变化的作业转向,转向角度变化仅为2 rad。超声测距避障方面,吴春玉^[80]以超声测距、机器视觉结合的方法,设计了农用飞行器的避障控制系统,实现了飞行器的高效快速避障响应,距离障碍物5 m、飞行速度1 m/s时的响应时间均在0.5 ms左右。激光雷达避障方面,杨洋等^[81]构建了使用三阶贝塞尔曲线在多边界条件约束下路径簇中规划曲率最小的避障路径算法,基于激光雷达、工控机等开发了用于作业动态识别区内障碍物信息获取与避让的新型农机(图8),路径跟踪试验中最大和平均横向误差分别为0.12 m、0.057 m,较传统算法分别减少36.8%和28.8%。



图 8 自主避障农机

2.3 远程在线监管

智能农机远程在线监管是实现农机智能化发展的重要环节。已有的农机远程在线监管方法主要通过建立网页端和手机APP平台实现。网页端农机远程监管平台主要应用于农机数据的收集、分析与可视化,农机作业管理与调度等;手机端农机监管APP主要应用于农机作业数据的采集与功能执行等。刘洋洋等^[82]使用单片机处理多源数据的方法构建了航空变量施药实时监控系,可实现作业轨迹、高度、速度、施药流量等数据的实时监测,其对航迹、施药流量监测的平均偏差分别为0.98 m、3.57%,对流量控制的最大误差为9.26%;兰玉彬

等^[1]通过构建实现天空地一体化农情信息获取、地空无人农机协同作业决策与远程监控的生态无人农场云端平台(图9),为智慧农业、精准农业的发展提供了探索经验。



图9 生态无人农场云端远程监控平台

3 讨论与展望

农业植保施药技术与装备的创新发展进一步实现了我国农药施用的减量增效,降低了植保作业的成本与风险,提高了作业效率,但与发达国家和长远目标相比仍存在较大差距。主要存在以下突出问题:

(1) 植保作业技术与装备的创新、集成、应用与示范推广程度较低。

(2) 技术理论的基础研究与硬件设备等的创新能力相对薄弱。农机产品的控制系统、控制算法、控制设备等核心软硬件的自主创新程度较低。

针对上述问题,对我国植保施药技术与装备的未来发展提出以下展望:

(1) 先进植保技术与装备的创新仍停留在探索阶段,新型农机产品的性能稳定性与适应性需要进一步提升与突破,应加快技术集成,缩短研发周期,加快产品落地、应用与推广。

(2) 加大基础技术理论与设备的研究投入,进一步促进如高效控制算法、高精度控制系统、高灵敏度传感器等软硬件的自主创新。

(3) 为满足精准农业、智慧农业的技术需求,应深入促进多学科融合建设发展,注重交叉学科人才的培养。

参考文献

- [1] 兰玉彬,赵德楠,张彦斐,等.生态无人农场模式探索及发展展望[J].农业工程学报,2021,37(9):312-327.
- [2] 闫晓静,褚世海,杨代斌,等.给农业插上科技的翅膀:植保无人飞机低容量喷雾技术助力农药减施增效[J].植物保护学报,2021,48(3):469-476.
- [3] 闫春雨,黎文华,兰玉彬,等.基于无人机多光谱遥感的棉花脱叶

效果监测及处方图生成研究[J].南京农业大学学报,2022,45(4):799-808.

- [4] NAN Y L, ZHANG H C, ZHANG J Q, et al. Low-volume precision spray for plant pest control using profile variable rate spraying and ultrasonic detection[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 13(10): 1042769.
- [5] 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飞机精准施肥[J].农业工程学报,2020,36(15):103-110.
- [6] 乔白羽,何雄奎,王志翀,等.基于LiDAR扫描的高地隙宽幅喷雾机变量施药系统研制[J].农业工程学报,2020,36(14):89-95.
- [7] 刘理民.基于果树冠层探测的变量喷雾技术研究及试验[D].济南:山东农业大学,2019.
- [8] 刘金龙,郑泽锋,丁为民,等.对靶喷雾红外探测器的设计与探测距离测试[J].江苏农业科学,2013,41(7):368-370.
- [9] 王万章,洪添胜,陆永超,等.基于超声波传感器和DGPS的果树冠径检测[J].农业工程学报,2006(8):158-161.
- [10] 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.
- [11] 胡开群,周舟,祁力钧,等.直注式变量喷雾机设计与喷雾性能试验[J].农业机械学报,2010,41(6):70-74.
- [12] 史岩,祁力钧,傅泽田,等.压力式变量喷雾系统建模与仿真[J].农业工程学报,2004(5):118-121.
- [13] 王新东,徐艳蕾,孟笑天,等.基于BAS-PID控制的精准变量施药系统仿真与试验[J].中国农机化学报,2020,41(3):62-66.
- [14] 孙文峰,刘海洋,王润涛,等.基于神经网络整定的PID控制变量施药系统设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(12):55-64.
- [15] 张敏,范龙,代祥,等.基于BP神经网络的变量喷雾供药系统研究[J].林业工程学报,2017,2(2):133-137.
- [16] 邵陆寿,戴之祥,崔怀雷,等.基于模糊控制的变量施药控制系统[J].农业机械学报,2005(11):116-118.
- [17] 王果,张晓,陈晓,等.农药精准施用技术与装备研究现状及展望[J].中国农机化学报,2023,44(6):68-73.
- [18] 代祥,徐幼林,宋海潮,等.混药器混合均匀性分析方法与在线混合变工况试验[J].农业机械学报,2018,49(10):172-179.
- [19] 宋海潮,徐幼林,郑加强,等.脂溶性农药旋动射流混合机理与混药器流场数值模拟[J].农业机械学报,2016,47(9):79-84.
- [20] 房开拓,邱威,周良富.基于模型与CFD辅助的射流式混药器设计[J].中国农机化学报,2023,44(4):65-70.
- [21] 宋海潮,徐幼林,郑加强,等.脂溶性农药旋动射流混药器结构分析与混合均匀性试验[J].农业工程学报,2016,32(23):86-92.
- [22] ABBAS I, LIU J, FAHEEM M, et al. Different sensor based intelligent spraying systems in agriculture[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 316: 112265.
- [23] PARTEL V, COSTA L, AMPATZIDIS Y. Smart tree crop sprayer utilizing sensor fusion and artificial intelligence[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 191: 106556.

- [24] 李丽, 李恒, 何雄奎, 等. 红外靶标自动探测器的研制及试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 159-163.
- [25] 汪小志, 吴东明. 基于微波探测的植株对靶精确施药机研制[J]. 农机化研究, 2017, 39(1): 127-131.
- [26] 刘雪美, 李扬, 李明, 等. 喷杆喷雾机精确对靶施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 37-44.
- [27] 高斌. 基于超声探测的果园对靶变量施药系统设计[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [28] 杨征鹤. 基于LiDAR的温室对靶喷雾机器人设计与试验 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
- [29] 蔡吉晨. 基于二维激光雷达的果树在线探测方法及对靶变量喷药技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [30] CHEN C J, HUANG Y Y, LI Y S, et al. Identification of fruit tree pests with deep learning on embedded drone to achieve accurate pesticide spraying[J]. IEEE Access, 2021, 9: 21986-21997.
- [31] 刘帅兵, 金秀良, 冯海宽, 等. 病害胁迫下玉米LAI遥感反演研究 [J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 246-258.
- [32] 赵晋陵, 金玉, 叶回春, 等. 基于无人机多光谱影像的槟榔黄化病遥感监测[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 54-61.
- [33] 张凝, 杨贵军, 赵春江, 等. 作物病虫害高光谱遥感进展与展望 [J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 403-422.
- [34] 陈晓凯, 李粉玲, 王玉娜, 等. 无人机高光谱遥感估算冬小麦叶面积指数[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 40-49.
- [35] 魏鹏, 宫金良, 张彦斐. 物理场辅助农业雾化施药技术的研究现状与展望[J]. 现代农业装备, 2023, 44(3): 31-38.
- [36] MOGES G, MCDONNELL K, DELELE M. Backpack magnetic sprayer: off-target drift and on-target deposition uniformity in a sugarcane plantation[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(6): 27-36.
- [37] 王云超, 翟华博, 宫金良, 等. 磁场对异丙甲草胺除草剂溶液表面张力与雾滴粒径的影响规律[J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(2): 324-332.
- [38] ZANDE J C, ELLIS C B, DOUZALS J P, et al. Spray drift reduction of the MagGrow spray system [R]. Wageningen: Wageningen University & Research, 2017.
- [39] ZHAO D, LAN Y, SHEN W, et al. Development of a charge transfer space loop to improve adsorption performance in aerial electrostatic spray[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(5): 50-55.
- [40] 张亚莉, 黄鑫荣, 王林琳, 等. 国外农业航空静电喷雾技术研究进展与借鉴[J]. 农业工程学报, 2021, 37(6): 50-59.
- [41] 兰玉彬, 张海艳, 文晟, 等. 静电喷嘴雾化特性与沉积效果试验分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 130-139.
- [42] 辛登科, 张纪宁. 静电喷粉技术在喷洒农药中的应用[J]. 西北林学院学报, 2004(4): 116-118.
- [43] 舒朝然, 熊惠龙, 陈国发, 等. 静电喷药技术应用研究的现状与发展[J]. 沈阳农业大学学报, 2002(3): 211-214.
- [44] 周浩生, 罗惕乾, 高良润. 静电喷粉颗粒沉积过程数值模拟与实验研究[J]. 农业机械学报, 1998(4): 62-66.
- [45] 吕建华, 张豫麒, 康宇龙. 高温控温处理防治害虫的研究及应用进展[J]. 植物保护, 2022, 48(1): 1-6.
- [46] 刘立超, 孙可可, 张千伟, 等. 玉米植保无人机热雾喷施系统设计与雾滴分布特性试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 80-88.
- [47] 李学辉, 王国宾, 孔德龙, 等. 热烟雾法喷施苯醚甲环唑防治黄瓜白粉病的研究[J]. 中国植保导刊, 2014, 34(10): 62-64.
- [48] 刘昶希, 胡军, 李宇飞, 等. 锥形风场式防飘喷雾装置内流道优化与防飘特性[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 11-20.
- [49] 魏新华, 邵菁, 解禄观, 等. 棉花分行冠内冠上组合风送式喷杆喷雾机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 101-107.
- [50] 高建民, 马俊龙. 带阶梯型谐振腔的Hartmann低频超声雾化喷嘴设计及试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 66-73.
- [51] 陈波, 高殿荣, 杨超, 等. 基于PDPA的双流体撞击式喷嘴雾化特性研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 362-369.
- [52] 张建桃, 李晟华, 文晟, 等. 农用超声雾化换能器参数优化设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 8-15.
- [53] 张京, 宫帅, 宋坚利, 等. 气液两相感应式静电喷头性能试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(12): 107-110.
- [54] PATEL M K, SAHOO H K, GHANSHYAM C. High voltage generation for charging of liquid sprays in air-assisted electrostatic Nozzle system[J]. IETE Journal of Research, 2016, 62(3): 424-431.
- [55] MUCHA-PELZER T, BAUER R, SCOBEL E, et al. Insecticidal effects of different application techniques for silica dusts in plant protection on *Phaedon cochleariae* Fab and *Pieris brassicae* L [J]. HortScience, 2010, 45(9): 1349-1356.
- [56] 冯玉茹, 王香, 徐少卿, 等. 防飘喷头在植保无人飞机水稻病害防治应用研究[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(9): 195-203.
- [57] HOMER I, PRIETO M, DIAZ V. Use of anti drift nozzles in control of perennial weeds in vineyard nurseries[J]. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo, 2020, 52(2): 337-348.
- [58] 梁昭. 基于双峰分布飘移沉积模型的风幕系统优化与智能控制策略研究[D]. 济南: 山东农业大学, 2020.
- [59] 张海艳, 兰玉彬, 文晟, 等. 无人机旋翼风场作用下雾滴在水稻植株上的黏附量模型构建[J]. 农业工程学报, 2022, 38(18): 40-50.
- [60] 郑发娇, 李香菊, 金平国, 等. 添加助剂对4.5%联苯菊酯水乳剂防治柑桔木虱的增效作用[J]. 中国南方果树, 2021, 50(4): 18-21.
- [61] 邹雄, 徐让书, 李景春, 等. 植保无人机喷洒作业雾滴飘移的质点运动学分析[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(11): 1177-1181.
- [62] 倪佳胜, 茹煜, 王水金, 等. 雾滴飘移预测试验研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(10): 152-157.
- [63] 孙道宗, 占旭锐, 刘伟康, 等. 侧风影响下喷头倾斜角度对雾滴飘移补偿[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 80-89.
- [64] 马剑剑, 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]. 农药学报, 2022, 24(5): 1080-1098.
- [65] DUBEY R. Microencapsulation technology and applications [J]. Defence Science Journal, 2009, 59(1): 82.
- [66] KUMAR S, BHANJANA G, SHARMA A, et al. Synthesis, characterization and on field evaluation of pesticide loaded sodium alginate nanoparticles [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 101: 1061-1067.

(下转第27页)

- thermoresponsive β -cyclodextrin-based star polymers[J]. *Journal of Polymer Science*, 2020, 58(24): 3402-3410.
- [36] JIANG M Q, YIN Y H, CAI W Q, et al. UV/enzyme dual responsive photosensitizer-loaded 4-(phenylazo) benzoic acid-mPEG nanosystem for enhanced photodynamic insecticide efficacy [J/OL]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138 (30): 50731. DOI: 10.1002/app.50731.
- [37] LIANG W L, XIE Z G, CHENG J L, et al. A light-triggered pH-responsive metal-organic framework for smart delivery of fungicide to control sclerotinia diseases of oilseed rape[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(4): 6987-6997.
- [38] 赵义平, 陈莉, 张玉欣, 等. 光-温度双重响应凝胶的制备及温敏性能研究[J]. *功能材料*, 2011, 42(1): 161-163; 170.
- [39] BIAN S S, ZHENG J, YANG W L, et al. Dual stimuli-responsive microgels based on photolabile crosslinker: temperature sensitivity and light-induced degradation[J]. *Journal of Polymer Science Part a-Polymer Chemistry*, 2014, 52(12): 1676-1685.
- [40] LIU B, ZHANG J CHEN C W, et al. Infrared-light-responsive controlled-release pesticide using hollow carbon microspheres@polyethylene glycol/ α -cyclodextrin gel[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(25): 6981-6988.
- [41] KALHAPURE R S, RENUKUNTLA J. Thermo- and pH dual responsive polymeric micelles and nanoparticles [J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2018, 295: 20-37.
- [42] XU, C L, CAO L D, ZHAO P Y, et al. Synthesis and characterization of stimuli-responsive poly(2-dimethylamino-ethylmethacrylate)-grafted chitosan microcapsule for controlled pyraclostrobin release[J/OL]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(3): 854. DOI: 10.3390/ijms/9030854.
- [43] SHIEH Y T, LIN Y T, CHENG C C. CO₂-switchable behavior of chitosan-g-poly[(2-dimethylamino)ethyl methacrylate] as an emulsifier[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 170: 281-288.
- [44] ZHANG Q, DU Y, YU M L, et al. Controlled release of dinotefuran with temperature/pH-responsive chitosan-gelatin microspheres to reduce leaching risk during application[J/OL]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 277: 118880. DOI: 10.1016/j.carbpol.2021.118880.
- [45] LIANG Y, GAO Y H, WANG W C, et al. Fabrication of smart stimuli-responsive mesoporous organosilica nano-vehicles for targeted pesticide delivery[J/OL]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 389: 122075. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122075.
- [46] FAN C, GUO M C, LIANG Y, et al. Pectin-conjugated silica microcapsules as dual-responsive carriers for increasing the stability and antimicrobial efficacy of kasugamycin[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 172: 322-331.
- [47] ZHAO M, CHEN Z, HAO L, et al. CMC based microcapsules for smart delivery of pesticides with reduced risks to the environment [J/OL]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 300: 120260. DOI: 10.1016/j.carbpol.2022.120260.
- [48] SHAN P, LU Y, LIU H, et al. Rational design of multi-stimuli-responsive polymeric nanoparticles as a 'Trojan horse' for targeted pesticide delivery[J/OL]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 193: 116182. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.116182.
- [49] LI X S, HAN J Y, WANG X, et al. A triple-stimuli responsive hormone delivery system equipped with pillararene magnetic nanovalves[J]. *Materials Chemistry Frontiers*, 2019, 3(1): 103-110.

(责任编辑: 金兰)

(上接第8页)

- [67] NAYAK U, MAHAPATRA S. Efficacy of integrated pest management (IPM) modules against fruit fly (*Bactrocera cucurbitae* C) in bitter melon [J]. *Vegetable Science*, 2020, 47(1): 127-130.
- [68] 刘万才, 张政兵, 贺平均, 等. 植保无人机释放赤眼蜂防治二化螟的效果[J]. *中国植保导刊*, 2022, 42(4): 44-47.
- [69] 赵玲丽, 周志艳, 宋灿灿, 等. 基于无人机精准投放赤眼蜂的探讨[J]. *农机化研究*, 2022, 44(10): 1-6.
- [70] 张季琴, 刘刚, 张东峰, 等. 固体颗粒肥变量撒施控制技术研究现状与展望[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(20): 69-77.
- [71] 宋灿灿, 王国宾, 赵静, 等. 颗粒肥撒施过程中的沉积分布模式研究进展[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(14): 59-70.
- [72] 周长建, 宋佳, 向文胜. 人工智能在农药精准施药应用中的研究进展[J]. *农药学报*, 2022, 24(5): 1099-1107.
- [73] 兰玉彬, 闫瑜, 王宝聚, 等. 智能施药机器人关键技术研究现状及发展趋势[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(20): 30-40.
- [74] 刘晓慧, 袁亮亮, 石鑫, 等. 植保施药机械喷雾雾滴飘移研究进展[J]. *农药学报*, 2022, 24(2): 232-247.
- [75] 王伟, 张彦斐, 宫金良. 基于蚁群-BFS算法的复杂环境下农业机器人全区域覆盖研究[J]. *华南农业大学学报*, 2021, 42(3): 119-125.
- [76] 张彦斐, 魏鹏, 宫金良, 等. 复杂环境中苹果树识别与导航线提取方法[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(10): 220-227.
- [77] GASPARINO M V, HIGUTI V A H, VELASQUEZ A E B, et al. Improved localization in a corn crop row using a rotated laser rangefinder for three-dimensional data acquisition[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, 42(11): 592.
- [78] 吴才聪, 陈瑛, 杨卫中, 等. 基于北斗的农机作业大数据系统构建[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(5): 1-8.
- [79] DANG T V, BUI N T. Obstacle avoidance strategy for mobile robot based on monocular camera [J]. *Electronics*, 2023, 12(8): 1932.
- [80] 吴春玉. 农用四轴飞行器避障控制系统设计: 基于机器视觉和超声波测距[J]. *农机化研究*, 2022, 44(4): 110-114.
- [81] 杨洋, 温兴, 马强龙, 等. 基于贝塞尔曲线的动态识别区农机避障路径实时规划[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(6): 34-43.
- [82] 刘洋洋, 茹煜, 陈青, 等. 无人机变量施药实时监控系统设计及试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(7): 91-99.

(责任编辑: 胡新宇)