

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2026.01.027

张洲, 李富忠, 张吴平, 等. 无人机技术在智慧农业中的应用现状和发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2026, 47(1): 192-200

Zhang Zhou, Li Fuzhong, Zhang Wuping, et al. Current application situation and development trend of drone technology in smart agriculture [J]. Journal of Chinese Agriculture Mechanization, 2026, 47(1): 192-200

# 无人机技术在智慧农业中的应用现状和发展趋势<sup>\*</sup>

张洲<sup>1</sup>, 李富忠<sup>2</sup>, 张吴平<sup>2</sup>, 邓林强<sup>2</sup>, 李世龙<sup>3</sup>, Pavlova Svitlana<sup>2</sup>

(1. 山西农业大学农业工程学院, 山西太谷, 030801; 2. 山西农业大学软件学院, 太原市, 030000;  
3. 山西农业大学资源环境学院, 山西太谷, 030801)

**摘要:**智慧农业作为我国乡村振兴战略的重要支撑,将数字农业与精准农业有机联系为一个整体,深度融合现代通信技术和智能装备,是现代农业的发展趋势。以无人机为代表的智能装备是智慧农业生产应用的重要载体和内容。系统地阐述无人机技术的基本概况及平台构成,总结无人机技术在作物灌溉喷洒、表型监测、无人机授粉、航测绘图及三维建模等智慧农业场景中的融合现状和应用优势,并对无人机技术的发展应用进行展望,包括增强续航能力、自主避障与系统智能化水平,构建基于省—市—县行政区划的遥感多源数据库,优化多无人机协同作业的路径规划算法,以及建立健全的行业监管框架与作业标准。针对当前存在无人机性能不足、大量作业数据处理不稳定、技术标准不完善等问题,提出加快无人机综合性能增强、推动多源信息融合与系统规范建设等建议,以期为无人机在智慧农业中的精准应用提供理论依据,推动无人机技术在智慧农业中的进一步发展。

**关键词:**无人机技术;智慧农业;遥感技术;精准农业;可持续发展

**中图分类号:**S252 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553(2026)01-0192-09

## Current application situation and development trend of drone technology in smart agriculture

Zhang Zhou<sup>1</sup>, Li Fuzhong<sup>2</sup>, Zhang Wuping<sup>2</sup>, Deng Linqiang<sup>2</sup>, Li Shilong<sup>3</sup>, Pavlova Svitlana<sup>2</sup>

(1. College of Agricultural Engineering, Shanxi Agricultural University, Taigu, 030801, China;

2. College of Software, Shanxi Agricultural University, Taiyuan, 030000, China; 3. College of

Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, 030801, China)

**Abstract:** As an important support for promoting rural revitalization strategy in China, smart agriculture organically links digital agriculture and precision agriculture into a whole, and deeply integrates modern communication technology and intelligent equipment. It is the development trend of modern agriculture. Intelligent equipment represented by unmanned aerial vehicles (UAVs) is an important carrier and content of smart agricultural production applications. This paper systematically elucidates the basic overview and platform composition of UAV technology, summarizes the integration status and application advantages of UAV technology in smart agriculture scenarios such as crop irrigation spraying, crop phenotype monitoring, drone pollination aerial mapping and three-dimensional modeling, and it also presents an outlook into the further development and applications of drone technology in smart agriculture, including enhancing endurance, autonomous obstacle avoidance and system intelligence, building a remote sensing multi-source database based on provincial-municipal-county administrative divisions, optimizing path planning algorithms for multi-UAV collaborative operations, and establishing a sound industry regulatory framework and operating standards. In view of the current problems of insufficient UAV performance, unstable processing of large amounts of operation data, and imperfect technical standards, this paper proposes suggestions such as accelerating the enhancement of UAV comprehensive performance, promoting multi-source information fusion and system

收稿日期:2024年9月6日 修回日期:2025年5月7日

<sup>\*</sup> 基金项目:国家外国专家引进计划(G2022004004L);山西省重点研发计划项目(202202140601021);“特”“优”农业高质量发展科技支撑工程项目(TYGC24-65)

第一作者:张洲,男,2001年生,山西大同人,博士研究生;研究方向为农业航空技术应用。E-mail: sxauer@163.com

通讯作者:Pavlova Svitlana,女,1966年生,乌克兰基辅人,博士,教授;研究方向为智慧农业系统工程及农业无人机应用。E-mail: pavlova\_2020@ukr.net

standardization construction, etc., so as to provide a theoretical basis for the precise application of UAVs in smart agriculture and promote the further development of drone technology in smart agriculture.

**Keywords:** drone technology; smart agriculture; remote sensing technology; precision agriculture; sustainable development

## 0 引言

2024 年中央一号文件中明确指出,持续发展智慧农业,坚持产业兴农、质量兴农和绿色兴农,把农业建成现代大产业。随着新一轮千亿斤粮食产能提升行动全面实施,乡村全面振兴有力有效推动,农业综合生产能力将继续稳步提升,粮食和重要农产品稳定安全供给能力总体上继续增强,但农业设施水平有限与农业高质量发展更高要求的矛盾没有改变,亟须扩大完善农业现代化基础设施体系并加快农业绿色转型。随着农业智能装备的迭代提升和不断升级,无人机技术在现代农业的广泛应用增强了农业生产对自然环境的适应能力,进而改善农业生态环境,促进智慧农业新业态的发展,为解决我国人地矛盾突出、农业劳动力大幅减少的问题提供新导向<sup>[1]</sup>,其作为智慧农业发展大潮中的关键潮头,不断发展成为新质生产力,为现代农业的发展注入新动力。

智慧农业作为推动我国农业现代化和乡村振兴战略的重要途径,无人机技术这一重要组成部分在作物灌溉喷洒、表型监测及数据采集等方面展现出显著优势,逐步成为提升农业效率与智能化水平的关键装备。当前,国内外在农业无人机平台构型、导航控制、传感器集成等方面已取得多项进展,推动了其在农业各环节的深入应用。然而,现阶段农业无人机的性能仍存在续航性能有限、作业数据处理稳定性差以及多无人机系统协同效率低等问题,同时行业技术标准尚未完全统一,亟须在无人机综合性能增强、多源遥感数据融

合以及多无人机系统任务协同等方面进行系统性研究。本文通过梳理农业无人机技术基本概况和发展历史背景,综述其在智慧农业主要应用场景中的发展现状,以期为我国农业无人机精准应用于智慧农业提供新思路和新方向。

## 1 农业无人机技术基本概况

### 1.1 农业无人机概念及特征

农业无人机,其中最为典型的一类是植保无人机,是用于农林植物保护作业的无人驾驶飞机。植保无人机由飞行平台(固定翼、旋转翼和混合垂直起降)、导航飞控和喷洒机构 3 个部分构成,通过地面遥控或导航飞控实现喷洒作业,包括喷洒药剂、种子和粉剂等。随着无人机技术高速发展,更具广泛意义的“农业无人机”逐步替代“植保无人机”,农业无人机不仅用于喷洒施药,还能进行农田监测和撒肥播种等多种工作,满足农户多样化需求,提高生产效率。截至 2023 年,我国农业无人机保有量超 20 万架,作业面积约  $1.42 \times 10^5$  km<sup>2</sup>。多家无人机公司正在积极探索基于无人机技术的农业解决方案,共同推动全球农业的发展革新和进步。

农业无人机相比于传统农业设备具备很多优势,其显著提高了农业作业效率,覆盖更广面积,并在多角度监测农田的同时全面获取农田相关数据,达到科学管理农田的效果。农业无人机可以适应平原、山地和丘陵等多种复杂地形下的作业环境,大大降低劳动强度和作业成本,减少人力需求,迎合市场基本现状。具体对比详见表 1。

表 1 农业无人机和传统农业设备的功能比较

Tab. 1 Comparison of functional advantages of agricultural UAV compared with traditional agricultural equipment

功能优势类别	传统农业设备	农业无人机
作业效率	低效、速度慢、覆盖面积有限	显著提高,作业速度快,覆盖面积广
农田监测	人力监测、数据获取有限	全方位、多角度监测,实时获取农田相关数据
农田管理	依赖人工经验,管理不科学	科学管理农田,提高农作物抗病虫害能力
地形适应性	主要适用于平原,对山地、丘陵适应性差	可适应平原、山地、丘陵等多种复杂地形和作业环境
恶劣天气作业	受天气影响大,恶劣天气下难以作业	能在恶劣天气条件下正常工作
人力需求	人力需求大,劳动强度高	降低劳动强度和作业成本,大幅减少人力需求
市场适应性	不符合当前市场劳动力短缺现状	迎合市场基本现状,减少人力成本

### 1.2 农业无人机发展历史背景

无人机的研究可追溯到 20 世纪末,最早应用于军事领域,随着无人机技术高速发展,无人机逐渐应用于民用领域,欧美国家在 20 世纪 70 年代率先开始了农

业信息化、智能化的应用研究。早在 1987 年,日本生产的 Yamaha R-50 是世界上第一款专为农业而设计的商用无人直升机<sup>[2]</sup>,开启了农业无人机的新篇章。随后很多国家加入农业无人机的研发,例如,加拿大研

发的多旋翼无人机 Draganflyer X6 在 2006 年正式推出<sup>[3]</sup>,在早期多应用于农田监测和影像采集,为后来的农业无人机多领域应用奠定基础。2007 年,我国的植保无人机开始发展,无锡生产的 3CD-10 型单旋翼油动植保无人机首次在“2010 年全国农机博览会”上亮相<sup>[4,5]</sup>,代表着中国农业无人机商业化的第一步。大疆农业与极飞农业于 2015 年双双发布首款植保无人机,国内外许多厂商纷纷投入农业无人机的研发,均瞄准该领域的巨大潜力(表 2),根据国际无人机系统协会(AUVSI)预测,未来 80% 的商用无人机市场将被农用无人机占据。近年来,随着国内智慧农业的快速发展,农业无人机的市场规模不断扩张,2021 年,我国农业无人机市场规模达 116.34 亿元,随着乡村振兴战略的持续推进,我国农业无人机行业产值在未来几年内有望继续保持规模增长态势。自 2019 年,中国无人机行业陆续出台了《促进民用无人驾驶航空发展的指导意见》《推动民航新型基础设施建设五年行动方案》《“十四五”民用航空发展规划》等政策,全面促进低空经济健康发展和管理体系的逐渐完善,此外也颁发了首张无人驾驶载人航空器生产许可证,将进一步推动低空经济战略性新兴产业发展,相信在不久后会利好农业无人机的发展并迸发新质生产力。

表 2 全球主要农业无人机研制企业及其产品类型

Tab. 2 Major global agricultural drone manufacturers and their product types

国家	企业	成立年份	代表产品
中国	大疆农业	2015 年	T25P
	极飞农业	2015 年	P150
	无锡汉和航空技术	2008 年	金星 30
	全丰航空	2012 年	全球鹰 QF-120
美国	AgEagle Aerial Systems	2010 年	AgEagle RX60
美国	PrecisionHawk	2010 年	Lancaster5
日本	Yamaha	1887 年	Yamaha RMAX
法国	Parrot	1994 年	Parrot Disco-Pro AG
瑞士	SenseFly	2009 年	eBee SQ

注:根据互联网相关资料整理绘制。

## 2 农业无人机平台

农业无人机平台集遥感、导航、控制和数据处理等技术于一体,能够进行作物表型监测、喷洒农药和播种施肥等作业,为农业生产提供了全新的解决方案,是智慧农业发展的重要工具。

### 2.1 机构类型

无人机类型主要有 3 种类型:固定翼、旋转翼和混合垂直起降(Vertical Take-off and Landing)。固定翼无人机通过机翼产生升力飞行,其机翼设计与常规飞

机类似。旋转翼无人机分为多旋翼型和单旋翼型,多旋翼无人机根据旋翼数量命名,常见的有四旋翼、六旋翼、八旋翼。3 种不同类型无人机的优缺点详见表 3。

表 3 不同类型无人机优缺点

Tab. 3 Advantages and disadvantages of different drone types

无人机类型	优点	缺点
固定翼无人机	飞行稳定,载荷能力强,速度快,航程远	不能悬停,复杂地形适应能力有限,起降需要跑道或弹射装置
多旋翼无人机	垂直起降,悬停能力强,对起降场地要求低,复杂地形适应能力强	续航时间短,受风力影响较大,飞行速度相对较慢,载荷能力相对较小
混合垂直起降无人机	灵活性和适应性高,垂直起降和长航时能力,适用于多种地形和环境,兼具固定翼和旋转翼的优点	成本较高,技术成熟度较低,维护修理相对复杂,结构和控制相对复杂

### 2.2 搭载组件

在农业作业中,无人机所搭载的板载计算平台主要有 Raspberry Pi、Arduino、Orange Pi、Odroid 以及 NVIDIA Jetson 等,这些平台在不同应用场景中功能各不相同。Raspberry Pi 擅长图像处理 and 计算,也可用于简单的飞行控制任务;Arduino 可以实现基本控制功能,作为连接和管理各种传感器的接口;Orange Pi 可以处理机器学习、目标检测等较为复杂的任务,也可用于实时视频传输与处理;Odroid 适用于一些需要快速调整的无人机,具有较强的数据处理能力;NVIDIA Jetson 能够在较短时间内进行复杂的神经网络推断,具有较高的实时性能,不同的计算平台在不同的无人机应用中满足特定需求<sup>[6-10]</sup>。除此之外,集成到农业无人机上常用的硬件传感器是相机和激光雷达。相机主要有多光谱、高光谱及热红外 3 种技术,激光雷达可以实现三维映射,在表型监测和农田测绘中发挥重要作用。此外也会用到其他类型的传感器,如位置、电化学和温湿度等类型传感器。

### 2.3 通信

农业无人机平台通信是一套标准化的通信规则和数据格式,MAVLink 是一种轻量级、低带宽的无人机通信协议,它的发展始于 2009 年,现已成为无人机领域的主流通信协议之一,在无人机系统的开发、集成和控制中被广泛采用,如 PX4、ArduPilot、DJI、Parrot<sup>[11]</sup>等。MAVLink 作为一个开源项目,其开发和维护由社区用户共同完成,该协议允许无人机(Unmanned Aerial Vehicle)与地面控制站(Ground Control Station)通信的消息交换,其能够传输无人机的方向、

GNSS(Global Navigation Satellite Systems)位置和速度。农业无人机与地面基站间通过 ZigBee、Radio Frequency Identification Devices(RFID)和其他发射机等物理通信系统配合完成作业过程,通信距离的增加由多个通信频段或更高功率的无线电发射器完成<sup>[12]</sup>,这样更有利于高清农田图像的绘制,显著提高了农业作业的效率,为精准农业保驾护航。

### 3 农业无人机在智慧农业中的应用

近年来,随着无人机技术在智慧农业应用的不断推广,加快了现代农业向智慧农业迈进。无人机云系统数据显示,植保无人机运行量占比较高,2023 年度实现农田数字化约  $3.7734 \times 10^7$  km<sup>2</sup><sup>[13]</sup>,凸显了农业领域对无人机技术的强烈需求。农业无人机突破了传统农业机械的限制,具有降低劳动成本、作业效率高以及复杂地形适应性强等优势,在作物灌溉与喷洒、作物表型监测、航测绘图及三维建模、作物产量品质预测、牲畜管理及牧场分析、无人机授粉和多无人机系统等应用场景中被广泛采用(图 1),为现代农业带来了极大便捷。

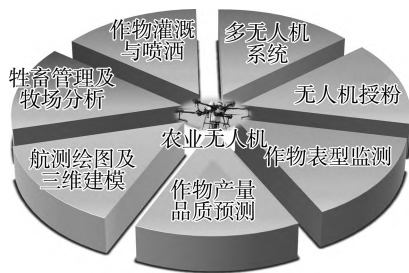


图 1 农业无人机应用领域

Fig. 1 Agricultural UAV application fields

#### 3.1 作物灌溉与喷洒

农业无人机相比于传统灌溉方式可控速率,能够降低投入成本、提高作业效率,因此备受国内外学者关注,例如,Tang 等<sup>[14]</sup>利用无人机遥感技术建立了灌溉调度的模式识别模型,以实现最佳的灌溉管理与最大化节水策略,美国加州地区为种植者提供优化灌溉时间服务,为农民减少了田间作业负担<sup>[15]</sup>。张海艳等<sup>[16]</sup>分析了植保无人机旋翼风场等对雾滴沉降速度的影响,利用雾滴黏附量预测模型准确评估雾滴在水稻植株上的黏附量,为实际灌溉作业提供高效方案。Yan 等<sup>[17]</sup>探讨了不同喷雾量下柑橘冠层内液滴沉积的特征,以达到最好的液滴沉积效果和最佳的病虫害预防工作水平。大疆 T50 植保无人机农田喷洒载重 40 kg,叶背药液附着率高,作业效果优质<sup>[18]</sup>,成为国内市场领军机型,美国 Airboard Agro 和 Skyx 农业无人机的喷雾系统均注重精确均匀覆盖喷洒<sup>[19]</sup>,降低了农药喷洒量从而为精准农业带来了优质效果。据我国农业农

村部 2023 年统计,水稻、玉米等主要作物病虫害呈重发态势,因此采取农业无人机等科学防控技术,依照作物和土地的空间变异喷洒农药,保障粮食安全。在作业过程中不断调整喷洒策略以实现最大程度化的精准农业,Freitas 等<sup>[20]</sup>则是从 2 个角度对无人机系统的喷洒过程进行优化:(1)提出基于粒子群 PSO(Particle Swarm Optimization)的农田喷洒控制方法,无人机为每块农田作出个性化的决策,减少农药的飘移;(2)提出自主适应无人机控制的系统,保持农药在目标区域的精准沉积,减少对环境的破坏。FluroSat 和 FarmShots 等海外公司专注于分析无人机图像,为种植者提供喷洒建议以辅助其决策<sup>[21, 22]</sup>。

农业无人机可以控制灌溉速率,精准投入成本并提高作业效率,提高资源利用率,为灌溉提供科学依据,达成高水平的精准农业实践,自动化的工作方式不仅能降低农民直接与农药接触的伤害,还能有效减少病虫害对作物的威胁,确保农业可持续发展和作物高产优质,保障农田生态健康。

#### 3.2 作物表型监测

现阶段无人机技术在作物表型监测领域应用也很广泛,根据所监测作物的状况作出及时反馈并跟进调整农业策略。在实际应用中,通过无人机图像跟踪作物生长阶段,周敏姑等<sup>[23]</sup>利用多旋翼无人机采集冬小麦不同时段的影像,建立具有良好的预测精度(SPAD 值)的反演模型,为作物长势监测提供技术依据。其用来检测影响作物表型的疾病、压力等因素,无人机应用 VIPtero<sup>[24]</sup>可根据 Normalized Difference Vegetation Index(NDVI)分析作物健康并评估葡萄园作物的状态,其还能获得多种植被指数以评判农业生态系统的趋势和潜力<sup>[25, 26]</sup>。无人机技术在作物监测方面的应用改变了农民目测作物形势的传统方法,例如,Che 等<sup>[27]</sup>提出了一种基于无人机系统拍摄的 RGB 图像估算大豆叶面积指数 LAI 的新方法;Nebiker 团队通过对农艺区作物的监测,判断出洋葱与马铃薯侵染的原始斑点<sup>[28]</sup>;赵晋陵等<sup>[29]</sup>通过对比不同槟榔监测模型的效果,能够为农作者提供精准的植物表型信息,同时也为其他作物表型监测提供案例研究。万亮等<sup>[30]</sup>分析不同氮肥梯度和生长时期对稻穗表型的影响,利用农业无人机多元图谱数据改善水稻稻穗表型监测的准确率,为作物精准管理和智慧育种提供决策支持。

农业无人机以其高空视角和精准定位能力实时获取全面信息,它的高效性和灵活性能够适应不同农作物的表型监测需求,大大提高农业产量和质量,帮助农民制定精准农业方案,助力智慧农业可持续发展。

### 3.3 航测绘图及三维建模

农业无人机可应用于农田航测领域,其能提高测绘工作的效率和安全性。该领域通常利用无人机倾斜摄影和创建正射影像图,在单个实例中捕获整个图像和航拍视频,相关的应用还有热红外相机、多光谱相机、高光谱相机等<sup>[31]</sup>。李梅等<sup>[32]</sup>通过搭载 RGB/多光谱相机的无人机摄影系统,结合三维重建算法呈现精确土壤制图和植被农林等具体模型。无人机捕获高分辨率图像的显著优势体现了其在精准农业中的巨大应用潜力,兰玉彬等<sup>[33]</sup>通过鉴别无人机获取的低空柑橘果园的高光谱图像进行 HLB 的遥感监测,Goffart 等<sup>[34]</sup>利用无人机航拍图像判别作物光谱,配合处方图让作物保持良好生长环境,无人机技术成为代替卫星遥感的最佳选择。无人机捕获的影像还可用作基于地理信息系统(Geographic Information System)数据图层制作数字地图,美国 PrecisionHawk Lancaster5 固定翼农业无人机具有出色的 DataMapper 数据分析管理和三维建模方案,能够准确地将 2D 和 3D 地图生成为地理参考的镶嵌图<sup>[35]</sup>。通过无人机技术获得的正射影像和数字高程模型(Digital Elevation Models)可以绘制地形状况<sup>[36]</sup>,为当地耕地资源规划献力增益。还有我国新疆的极飞超级农田,利用无人机遥感技术完成高精度测绘,系统地分析了农田地势以实现平整化耕地<sup>[37]</sup>。

农业无人机可以实现农田图像的智能化采集、传输和处理,提供详细的农田信息,这种精细化管理优化了土地利用结构,同步提升农业生产的稳定性和可持续性。

### 3.4 作物产量品质预测

无人机在作物产量预测方面的应用日益广泛,其精准高效地收集数据,帮助农民分析产量、质量和成熟度,并能预测恰当的收获时间,目前棉花、水稻和大豆等多种农作物受益于全面准确的数据支持。赵胜利等<sup>[38]</sup>通过多元线性回归、随机森林及人工神经网络方法分析无人机遥感图像筛选的植被指数,在开花生长阶段或收获前准确估计棉花产量,为农业生产提供了强有力的技术支撑。严海军等<sup>[39]</sup>分别捕获苜蓿在分枝期、现蕾期和初花期的无人机图像数据,输入不同变量组合以不断提高产量预测模型精度。周元琦等<sup>[40]</sup>将小麦孕穗期和开花期的 RGB 图像处理后获取多种指数,在小麦收获后测定实际产量,体现出无人机技术具有显著的经济效益和社会效益。向友珍等<sup>[41]</sup>采用无人机多光谱遥感数据构建大豆产量估算模型,这些实例研究为作物产量的快速估算提供应用参考,也为其他作物的精细化管理提供案例分析。除此之外,无人机在作物品质估测方面也起到建设性作用,彭显龙

等<sup>[42]</sup>在对水稻分蘖期、拔节期、抽穗期和成熟期冠层的多光谱数据分析后,进而建立多元回归模型,其不仅能够满足对稻米品质估测的精度,也能让农作者提前发现稻田潜在问题。郭阳<sup>[43]</sup>利用无人机遥感技术获取哈密瓜作物生长期的冠层图像,解析相对叶绿素含量、叶片含水率及可溶性固形物等数据,并确定出最优相关系数的预测模型,证明其能够准确预测哈密瓜的品质,有利于推动智慧农业发展,也为保证和提高哈密瓜品质提供了理论支撑和研究方法。王聪颖<sup>[44]</sup>基于获取的无偏振及偏振光谱数据与理化指标构建了红枣品质预测模型,达到高检测精度的目的,为果园品质可视化从而指导果园产量预测提供依据手段,也对农产品无损品质检测提供了新思路,促进农业可持续发展。

无人机技术为农业作物产量品质预测提供更为全面、准确的数据支持,它具备快速覆盖大面积农田的能力,可以在不同的时间、高度及角度对作物数据进行全面收集,并通过算法模型进行快速分析,提高作业产量品质预测的精度,该技术对于推动现代农业生产向更高水平迈进具有重要意义。

### 3.5 牲畜管理及牧场分析

对于畜牧业而言,无人机能够以高频率来监视动物随时间推移的位置、状态和运动,美国某公司通过无人机上的高分辨率红外摄像机传输的热信号迅速检测出患病动物,及时将其与畜群分开并提供早期治疗<sup>[45]</sup>,无人机技术也被用于母牛孕检,分析母牛背部、腹部和泌乳器的身体状况以判断母牛是否受孕,大大提高了工作效率,还利用无人机上的红外摄像机识别驱逐夜间庄稼里的动物,使田地免受动物伤害,这种方法比人类警卫更安全有效。在牧场分析方面,无人机也被广泛应用,孙强<sup>[46]</sup>使用无人机技术构建牛羊图像数据集,利用改进的 CenterNet 算法实现牛羊分类计数,对牛羊的分类检测和计数的精度提升效果明显,减少人力和物力的浪费。当利用无人机技术对牧场地形进行分析时,农民可以快速了解地貌、水源等实时情况,为牧场管理提供精准的决策支持,Cao 等<sup>[47]</sup>在研究过程中提出开创性系统策略,通过无人机技术捕获信息训练集,确定周期性放牧方案后得到最优放牧路径,形成闭环智能放牧系统,此方案可在我国内蒙古及东北等地区落实投入建设,提高畜牧业的智能化水平。汪传健等<sup>[48]</sup>利用无人机技术评估天然草地生物量,判断出各区域草地的利用情况,实现划区轮牧,促进智慧农业健康发展。

无人机技术在牲畜管理和牧场分析领域具有较好的应用前景,凸显出全天候、低成本和高效精准的显著优势,但该领域仍需进一步研究,利用无人机在牧场粪

便处理及能源再利用方面创造实际价值,提高高分辨率图像的捕获率,推动无人机技术在智慧农业领域发挥更加重要的作用。

### 3.6 无人机授粉

在当今智慧农业新兴发展的时代,无人机授粉作为一种创新应用备受关注,为解决传统农业问题提供新的实践方案。无人机技术在授粉领域的应用价值颇高,以我国新疆地区的香梨产业为例,传统授粉方式效率低下,特别是在南疆地区面临梨树花期短且常伴随沙尘天气的现状,无人机授粉技术的应用为当地果农解决了授粉难题,带来经济效益的同时也实现了生态环境保护。羊坚等<sup>[49]</sup>探索了库尔勒香梨无人机辅助液体授粉最佳花粉液参数组合,为梨园无人机液体授粉技术应用提供依据。王璐<sup>[50]</sup>通过试验探究出无人机液体辅助库尔勒香梨授粉最佳作业参数,促使该种无人机液体辅助授粉技术的可行性推广。王雨晴等<sup>[51]</sup>通过探究田间授粉验证试验表明,将无人机调制到授粉作业最优参数后,雾滴沉积效果极佳,库尔勒香梨授粉无人机技术正演绎着智慧农业种植新模式。翁晓星等<sup>[52]</sup>采用无人机辅助籼粳杂交稻制种授粉,结果表明,农业无人机辅助授粉的结实率和效率更高,目前杉木<sup>[53]</sup>、核桃<sup>[54]</sup>等多种作物已经受益,大幅提高作业效率。

无人机授粉极大地改变了传统授粉方式,能够实现大规模自动化作业,促进制种全程机械化,提高了农作物的授粉效率,它的高成功率提高了农业生产效益。其次,无人机授粉不受天气影响进行作业,并能轻松完成难度较大的丘陵山区农田作业,推动了智慧农业全覆盖与可持续发展,助力乡村振兴。

### 3.7 多无人机系统

据预测,到 2050 年世界人口预计增长约 25%,将达到 97 亿,粮食产量必须增加 70% 才能应对人口的增势,利用无人机系统能够加快解决农业粮食短缺问题的进程,像欧洲的 Swarm Robotics for Agriculture Applications 项目正借助多无人机系统构建精准农业体系<sup>[55]</sup>。将多无人机系统引入智慧农业还能够有效解决人地矛盾,也是解决多旋翼无人机飞行时间短的一种思路,Rejeb 等<sup>[56]</sup>通过试验证明了农业多无人机系统的性能优于单无人机系统,减少了人工控制量和工作时间。此方法也是解决无人机系统有效载荷不足的有效途径。Hegde 等<sup>[57]</sup>通过试验证明了多无人机负荷运输系统的控制算法的稳定性,保证了对田间作物区域的全覆盖喷洒。Li 等<sup>[58]</sup>开发了一种基于多无人机使用的作物保护系统以执行高效喷洒作业。Zhai 等<sup>[59]</sup>提出了解决多无人机系统的任务规划算法 MP—PSOGA,可以带来显著的经济改善,但该系统还需引入一种有效

的任务重新规划机制,以增强系统的鲁棒性。

相较于无人机技术在其他领域的应用来讲,多无人机系统拓展的深远性还有待提升,但显著提高了农业工作效率并大大减少了劳动力需求,它的突出优势体现在农业应用上的广阔前景。未来仍需进一步研究多无人机系统的飞行稳定性和共享数据处理,并在协同作业技术上进行更多的研究,以推动多无人机系统在智慧农业领域的可持续发展。

## 4 展望

当前,智慧农业已成为世界现代农业发展的大趋势,通过将无人机技术与物联网、大数据、云计算和人工智能等现代信息技术深度融合,实现传统农业向现代农业的转型。无人机技术具有遥感全面覆盖、实时监测和数据分析等诸多优点,在作物喷洒灌溉、表型监测、产量品质预测、牲畜管理和无人机授粉等应用场景中被广泛应用,其在智慧农业中的广泛应用大幅提升农业生产效率,解决传统人工作业中的一系列问题,为乡村振兴提供新引擎。同时,无人机技术有利于保护生态环境,能够实现高效的生产和资源的可持续利用,它的强劲发展潜力和广阔应用场景全面展露。但是,目前无人机技术在智慧农业中的应用也存在一些问题,例如,符合农业市场主流的无人机飞行续航时间相对有限、空地信号强度易受干扰、农业无人机技术的统一性能标准和植保标准不完善,有效分析处理农业无人机在作业过程所产生的大量数据也是一个关键挑战。除此之外,无人机的使用需要遵守相关的法律法规和行业规范标准,涉及空管区域报备、飞行安全性和隐私保护等方面,因此需要有关部门及行业协会建立更加健全的管理制度和规范标准,形成完善的无人机行业体系,促进农业无人机技术的应用推广。基于以上综述与分析,进一步对无人机技术在智慧农业中的发展及应用进行展望。

### 4.1 利用新兴技术增强农业无人机的综合性能

当前新兴技术飞速发展,利用新兴技术提高无人机的综合性能,可以使其更好地应用于智慧农业。首先是加快高续航电池元件的研发,优化材料能量密度与电池结构,利用太阳能和氢能源等资源推动混动电池技术衍生;再者是增强无人机避障策略和自主学习能力,在起飞点上空有电线等障碍物时,应自动预警并取消任务命令;其次是实现无人机系统版本更新,升级版本的同时系统功能随之优化,减缓产品的淘汰速度,降低农业成本;最后是接收信号强度的增加,优化硬件或升级遥控器固件(加装信号增强器),提升数据传输稳定性和飞行安全性。

#### 4.2 建立以省—市—县(区)行政区域划分的农田遥感多源数据库

建立以行政区域划分的遥感多源数据库,以便农民能够更好地利用现代化智慧农业的发展成果。政府要牵头与农民共建农田遥感信息数据库,将无人机技术与卫星遥感和大数据等技术相结合,为农户备份各自耕地详细情况(土壤、水分和肥料等情况);将农业生产期各阶段数据集合建立评估模型,翌年可在翻耕土壤前进行遥感监测并结合信息数据库中往年各阶段耕地状况及年产量,完成选种选肥、产量预估及效益评估等农业工作,有效推进乡村全面振兴迈向更高水平。

#### 4.3 优化多无人机系统协同作业路径规划算法

优化多无人机系统协同作业路径规划算法,以便更好地应对世界农业粮食问题。针对传统的路径算法进行改进,如对 A\* 算法改变其节点扩展方式或引入约束条件优化系统性能;或者设计混合路径规划算法,根据环境变化和任务要求完成实时路径规划及动态调整,例如先使用全局搜索算法择定方位,再使用局部优化算法精细调整,促进不同算法优势互补;也可以借助蚁群算法或者鸟群算法优化实现多无人机系统的协同作业,模拟鸟群的行为使多无人机系统在飞行作业过程中保持一定状态。通过优化路径规划算法提高机群协作调度技术,进而提高多无人机系统的鲁棒性,同时提高其作业效率和任务完成质量,推动世界粮食短缺这一农业问题的更快解决。

#### 4.4 完善监管框架和使用标准

建立无人机系统的监管框架和使用标准,以便无人机技术更加高效精准地应用于智慧农业。(1)有关部门应积极讨论无人机技术的使用场景和使用范围,及时填补相关法律条例空白,为其合理、安全地使用提供系统的行业标准和法律依据;(2)为提高生产效率,农业相关部门、无人机研发企业、高校及研究院共同合作,因地制宜,根据不同类型农作物的特点和生长状况,制定相应的作业标准,使无人机技术能够长期有效地应用在智慧农业中。

#### 参 考 文 献

[1] 赵春江,李瑾,冯献. 面向 2035 年智慧农业发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 1-9.  
 [2] Velusamy P, Rajendran S, Mahendran R K, et al. Unmanned aerial vehicles (UAV) in precision agriculture: Applications and challenges [J]. Energies, 2021, 15(1): 217.  
 [3] Maddikunta P K R, Hakak S, Alazab M, et al. Unmanned aerial vehicles in smart agriculture: Applications, requirements, and challenges [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(16): 17608-17619.

[4] 张虎,许晓燕,赵晓艳,等. 我国智慧农业的发展现状与建议[J]. 现代农业装备, 2020, 41(3): 21-23, 37.  
 [5] 黄传鹏,毛鹏军,李鹏举,等. 农用无人机自主飞行技术研究趋势[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(11): 162-170. Huang Chuanpeng, Mao Pengjun, Li Pengju, et al. Research and trend of autonomous flight technology of agricultural UAV [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(11): 162-170.  
 [6] Aslan M F, Durdu A, Sabanci K, et al. A comprehensive survey of the recent studies with UAV for precision agriculture in open fields and greenhouses [J]. Applied Sciences, 2022, 12(3): 1047.  
 [7] Pungavi R, Praveenkumar C. Unmanned aerial vehicles (UAV) for smart agriculture [M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024.  
 [8] Mistry C, Basak A. Applications of IoT and UAV in smart agriculture [M]. Florida: Apple Academic Press, 2023.  
 [9] Mammarella M, Comba L, Biglia A, et al. Cooperation of unmanned systems for agricultural applications: A theoretical framework [J]. Biosystems Engineering, 2022, 223: 61-80.  
 [10] Qu C, Boubin J, Gafurov D, et al. UAV swarms in smart agriculture: Experiences and opportunities [C]. 2022 IEEE 18th International Conference on e-Science, 2022: 148-158.  
 [11] Ibiev G Z, Savoskina O A, Chebanenko S I, et al. Unmanned aerial vehicles (UAVs)—One of the digitalization and effective development segments of agricultural production in modern conditions [C]. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2022, 2661(1): 070007.  
 [12] Kumar S P, Subeesh A, Jyoti B, et al. Applications of drones in smart agriculture [M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023.  
 [13] 黄益敬. 无人机在现代智慧农业发展中的应用研究[J]. 南方农机, 2022, 53(15): 86-89.  
 [14] Tang Z, Jin Y, Alsina M M, et al. Vine water status mapping with multispectral UAV imagery and machine learning [J]. Irrigation Science, 2022, 40(4): 715-730.  
 [15] Boursianis A D, Papadopoulou M S, Diamantoulakis P, et al. Internet of Things (IoT) and agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) in smart farming: A comprehensive review [J]. Internet of Things, 2022, 18: 100187.  
 [16] 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. Zhang Haiyan, Lan Yubin, Wen Sheng, et al. Modelling approach of spray retention on rice in plant protection using unmanned aerial vehicle [J].

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(18): 40–50.
- [17] Yan Y, Lan Y, Wang G, et al. Evaluation of the deposition and distribution of spray droplets in citrus orchards by plant protection drones [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1303669.
- [18] 何雄奎. 中国精准施药技术和装备研究现状及发展建议[J]. *智慧农业(中英文)*, 2020, 2(1): 133–146.
- [19] Radoglou-Grammatikis P, Sarigiannidis P, Lagkas T, et al. A compilation of UAV applications for precision agriculture [J]. *Computer Networks*, 2020, 172: 107148.
- [20] Freitas H, Façal B S, e Silva A V C, et al. Use of UAVs for an efficient capsule distribution and smart path planning for biological pest control [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 173: 105387.
- [21] Jasim A N, Fourati L C. Agriculture 4.0 from IoT, artificial intelligence, drone, & blockchain perspectives [C]. 2023 15th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE), 2023: 262–267.
- [22] Mustafa S, Sabir R M, Sarwar A, et al. Precision agriculture and unmanned aerial vehicles (UAVs) [M]. *Agriculture and Aquaculture Applications of Biosensors and Bioelectronics*. IGI Global, 2024: 83–108.
- [23] 周敏姑, 邵国敏, 张立元, 等. 无人机多光谱遥感反演冬小麦 SPAD 值 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(20): 125–133.
- Zhou Mingu, Shao Guomin, Zhang Liyuan, et al. Inversion of SPAD value of winter wheat by multispectral remote sensing of unmanned aerial vehicles [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(20): 125–133.
- [24] Hafeez A, Husain M A, Singh S P, et al. Implementation of drone technology for farm monitoring & pesticide spraying: A review [J]. *Information Processing in Agriculture*, 2023, 10(2): 192–203.
- [25] Gautam V, Sarkar S. Smart agriculture: The age of drones in agriculture [C]. *Proceedings of UASG 2019: Unmanned Aerial System in Geomatics*. Springer International Publishing, 2020: 415–424.
- [26] Haider S A, Ahmad K M, Khan A A. Efficient unmanned aerial vehicle-based data collection for IoT smart farming [J]. *Internet of Things*, 2024, 26: 101184.
- [27] Che Y, Wang Q, Xie Z, et al. Estimation of maize plant height and leaf area index dynamics using an unmanned aerial vehicle with oblique and nadir photography [J]. *Annals of Botany*, 2020, 126(4): 765–773.
- [28] Kouadio L, El Jarroudi M, Belabess Z, et al. A review on UAV-based applications for plant disease detection and monitoring [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(17): 4273.
- [29] 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.
- Zhao Jinling, Jin Yu, Ye Huichun, et al. Remote sensing monitoring of areca yellow leaf disease based on UAV multi-spectral images [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(8): 54–61.
- [30] 万亮, 杜晓月, 陈硕博, 等. 基于无人机多源图谱融合的水稻稻穗表型监测 [J]. *农业工程学报*, 2022, 38(9): 162–170.
- Wan Liang, Du Xiaoyue, Chen Shuobo, et al. Rice panicle phenotyping using UAV-based multi-source spectral image data fusion [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(9): 162–170.
- [31] Messina G, Modica G. Applications of UAV thermal imagery in precision agriculture: State of the art and future research outlook [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(9): 1491.
- [32] 李梅, 刘清旺, 冯益明, 等. 无人机激光雷达人工林林分高估测模型分析 [J]. *遥感学报*, 2022, 26(12): 2665–2678.
- [33] 兰玉彬, 朱梓豪, 邓小玲, 等. 基于无人机高光谱遥感的柑橘黄龙病植株的监测与分类 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(3): 92–100.
- Lan Yubin, Zhu Zihao, Deng Xiaoling, et al. Monitoring and classification of citrus Huanglongbing based on UAV hyperspectral remote sensing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(3): 92–100.
- [34] Goffart D, Dvorakova K, Crucil G, et al. UAV remote sensing for detecting within-field spatial variation of winter wheat growth and links to soil properties and historical management practices: A case study on belgian loamy soil [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(12): 2806.
- [35] Kim J, Kim S, Ju C, et al. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 105100–105115.
- [36] Phang S K, Chiang T H A, Happonen A, et al. From satellite to uav-based remote sensing: A review on precision agriculture [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 127057–127076.
- [37] Toscano F, Fiorentino C, Capece N, et al. Unmanned aerial vehicle for precision agriculture: A review [J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 69188–69205.
- [38] 赵胜利, 王国宾, 胡连祺, 等. 基于无人机多光谱遥感的棉花生长参数和产量估算 [J]. *中国农机化学报*, 2024,

- 45(2): 227–234.  
Zhao Shengli, Wang Guobin, Hu Lianbin, et al. Estimation of cotton growth parameters and yield based on UAV multi-spectral remote sensing [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2024, 45 (2): 227–234.
- [39] 严海军, 卓越, 李茂娜, 等. 基于机器学习和无人机多光谱遥感的苜蓿产量预测[J]. *农业工程学报*, 2022, 38 (11): 64–71.  
Yan Haijun, Zhuo Yue, Li Maona, et al. Alfalfa yield prediction using machine learning and UAV multispectral remote sensing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38 (11): 64–71.
- [40] 周元琦, 王敦亮, 陈晨, 等. 基于无人机RGB图像颜色及纹理特征指数的小麦产量预测[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2021, 42(3): 110–116.
- [41] 向友珍, 安嘉琪, 赵笑, 等. 基于无人机多光谱遥感的大豆生长参数和产量估算[J]. *农业机械学报*, 2023, 54 (8): 230–239.  
Xiang Youzhen, An Jiaqi, Zhao Xiao, et al. Soybean growth parameters and yield estimation based on UAV multispectral remote sensing [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(8): 230–239.
- [42] 彭显龙, 武文字, 董强, 等. 基于无人机多光谱影像的寒地水稻品质估测[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30 (1): 12–26.  
Peng Xianlong, Wu Wenyu, Dong Qiang, et al. Rapid and accurate estimation of rice quality in northeast China based on UAV multispectral images [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(1): 12–26.
- [43] 郭阳. 新疆哈密瓜作物冠层图像光谱监测与果实品质分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.
- [44] 王聪颖. 无人机近地面多角度与偏振探测的红枣品质检测研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2023.
- [45] Moradi S, Bokani A, Hassan J. UAV-based smart agriculture: A review of UAV sensing and applications [C]. 2022 32nd International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC). IEEE, 2022: 181–184.
- [46] 孙强. 基于无人机机器视觉的放牧牲畜牛羊识别和计数研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [47] Cao Y, Chen T, Zhang Z, et al. An intelligent grazing development strategy for unmanned animal husbandry in China [J]. *Drones*, 2023, 7(9): 542.
- [48] 汪传建, 赵庆展, 马永建, 等. 基于卷积神经网络的无人机遥感农作物分类[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(11): 161–168.  
Wang Chuanjian, Zhao Qingzhan, Ma Yongjian, et al. Crop identification of drone remote sensing based on convolutional neural network [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50 (11): 161–168.
- [49] 羊坚, 杨慧鹏, 谢伟, 等. 库尔勒香梨无人机辅助液体授粉花粉液参数优选及经济效益分析[J]. *果树学报*, 2021, 38(10): 1691–1698.
- [50] 王璐. 图木舒克市密植香梨园不同时期无人机作业参数及效果研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2022.
- [51] 王雨晴, 苏永峰, 全绍文, 等. 库尔勒香梨无人机授粉不同喷施量雾滴沉积分布研究[J]. *中国果树*, 2022(12): 20–25.  
Wang Yuqing, Su Yongfeng, Quan Shaowen, et al. Study on the deposition distribution of ‘Korla fragrant pear’ by UAV pollination with different spraying volume [J]. *China Fruits*, 2022(12): 20–25.
- [52] 翁晓星, 徐锦大, 赵晋, 等. 多旋翼无人机辅助籼粳杂交稻制种授粉研究[J]. *中国农机化学报*, 2022, 43(9): 24–29.  
Weng Xiaoxing, Xu Jinda, Zhao Jin, et al. Study on seed production and pollination of Indica-japonica hybrid rice assisted by multi-rotor UAV [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(9): 24–29.
- [53] 王邦富, 黄云鹏, 范繁荣, 等. 杉木种子园无人机辅助授粉效果分析[J]. *福建林业科技*, 2019, 46(2): 35–38.  
Wang Bangfu, Huang Yunpeng, Fan Fanrong, et al. Assisted pollination of Chinese fir seed orchard UAV effect analysis [J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2019, 46(2): 35–38.
- [54] Koşar D A, Sönmez E, Argaç A, et al. An unmanned aerial vehicle based artificial pollination in a frost-affected walnut (*Juglans regia* L.) orchard [J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 29(3): 765–776.
- [55] Muchiri G N, Kimathi S. A review of applications and potential applications of UAV [C]. *Proceedings of the Sustainable Research and Innovation Conference*, 2022: 280–283.
- [56] Rejeb A, Abdollahi A, Rejeb K, et al. Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 198: 107017.
- [57] Hegde A, Ghose D. Multi-UAV distributed control for load transportation in precision agriculture [C]. *AIAA Scitech 2020 Forum*, 2020: 2068.
- [58] Li Y, Wu Y, Xue X, et al. Efficiency-first spraying mission arrangement optimization with multiple UAVs in heterogeneous farmland with varying pesticide requirements [J]. *Information Processing in Agriculture*, 2024, 11(2): 237–248.
- [59] Zhai Z, Martínez J F, Beltran V, et al. Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 170: 105256.