DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2026.02.005

农业低空技术及装备现状与未来发展趋势

王国宾[1, 2, 3]，方通政[1, 2, 3]，陈盛德[4, 5]，马聪[6]，薛新宇[7]，兰玉彬[1, 2, 3, 4, 5*]

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院，山东淄博，255049；2. 山东理工大学生态无人农场研究院，山东淄博，255049；3. 国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心山东理工大学分中心，山东淄博，255049；4. 华南农业大学人工智能与低空技术学院，广东广州，510642；5. 国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心，广东广州，510642；6. 宁夏农林科学院农业经济与信息技术研究所，宁夏银川，750000；7. 农业农村部南京农业机械化研究所，江苏南京，210014)

摘要：随着低空经济被纳入国家战略性新兴产业，农业低空技术与装备在农业生产中的应用不断深化，已成为推动农业现代化与智慧农业发展的重要支撑。研究围绕农业低空技术与装备的发展现状与趋势，系统梳理我国在政策体系、关键技术及典型应用场景方面的研究进展。首先，从低空飞行平台与智能控制技术角度，总结多旋翼、单旋翼及复合翼无人机的发展现状及其在动力系统、飞控算法与导航定位等方面的关键技术演进，围绕低空通信、云端管控与多机协同，归纳农业低空智能管控技术的发展现状；其次，围绕农业低空感知与精准作业技术，重点分析无人机低空遥感在作物监测中的应用，以及精准施药与精准撒播技术的发展路径与核心技术体系，指出变量作业、智能控制已成为精准作业研究的关键方向。结合农业低空装备检测评价与标准体系建设，分析当前在作业规范、质量评价及系统化标准方面存在的不足。研究表明，农业低空技术虽在作业效率与资源利用方面展现出显著优势，但仍面临装备适配性不足、复杂环境下作业稳定性不高、多源信息融合与智能决策能力有待提升以及标准体系尚不完善等问题。未来，应重点加强多源感知融合、智能控制与数据驱动决策技术研究，完善标准与评价体系，推动农业低空技术向精准化、智能化与规模化方向发展。研究可为农业低空技术研究、装备研发及政策制定提供参考。

关键词：农业低空装备；农用无人机；低空感知；精准作业；智能管控

中图分类号：S25 **文献标识码**：A **文章编号**：2096-7217(2026)02-0051-15

王国宾，方通政，陈盛德，马聪，薛新宇，兰玉彬. 农业低空技术及装备现状与未来发展趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2026，7(2)：51－65

Wang Guobin, Fang Tongzheng, Chen Shengde, Ma Cong, Xue Xinyu, Lan Yubin. Current status and future development trends of low-altitude agricultural technology and equipment [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2026, 7(2): 51－65

0 引言

低空经济是带动产业创新与场景应用的综合性经济形态，农业农村低空经济对现代化与乡村振兴意义重大[1]。2021年低空经济被纳入国家交通战略[2]，2025年被列为“十五五”战略性新兴产业[3]，中央一号文件首次专项拓展农业低空应用场景[4]。《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》[5]放宽农用无人机空域与资质限制，《低空经济标准体系建设指南(2025年版)》[6]搭建全链条标准框架，农业低空进入政策红利期。农业低空经济聚焦粮食生产、智慧植保、农情监测、乡村物流、应急防灾，兼具普惠性与带动性。截至2025年6月，全球农用无人机保有量达50万架，节水3.3×10^8 t、减碳4.258×10^7 t，展现出巨大的生态与经济价值[7]。

尽管农业低空经济发展势头强劲、政策红利持续释放，但当前行业发展仍面临诸多现实瓶颈，制约其规模化、规范化、高质量推进。农业低空装备仍存在适配性不足、核心技术攻关滞后、区域发展不均衡以及低空空域精细化管理、作业安全管控、数据隐私保护机制尚不完善等问题[8]。本综述围绕农业低空技术与装备发展主线，系统梳理政策体系、关键技术与典型应用场景。首先归纳农用无人机在低空遥感、精准施药、精准

收稿日期：2026-04-23 修回日期：2026-05-08

基金项目：宁夏回族自治区重点研发计划项目(2024BBF01013)；国家重点研发计划项目(2023YFD2000200)

第一作者：王国宾，男，1991年生，山东莱芜人，博士，副教授；研究方向为精准农业航空技术与装备。E-mail：guobinwang@sdut.edu.cn

*通信作者：兰玉彬，男，1961年生，吉林农安人，博士，教授；研究方向为精准农业航空技术与装备。E-mail：ylan@scau.edu.cn

撒播等技术的应用进展与模式特征;其次整合国家与地方现状标准,解析标准支撑与发展导向,从技术装备、管控体系、标准评价等方面剖析制约因素及其成因;最后结合“十五五”规划与乡村振兴需求,研判发展趋势并提出对策建议,以期为相关研究、政策制定与产业实践提供参考。

1 农业低空飞行平台与智能控制技术

1.1 低空飞行平台

低空飞行平台是指在低空空域内运行,执行多样化任务的飞行载体。随着低空经济被列入战略性新兴产业,低空飞行平台正朝着无人化、数字化、电动化快速演进。

目前低空领域主要存在3大类飞行平台:传统通用航空器(GA)、无人驾驶航空器(UAV)、电动垂直起降飞行器(eVTOL),目前在农业领域以无人驾驶航空器为主,主要包括单旋翼、多旋翼、固定翼和复合翼等(表1)。低空飞行器平台的价值在于其“平台化”能力,即通过适配不同的载荷执行特定任务。在农业低空技术领域,不同的平台适配不同的农业场景。低空飞行平台通过搭载植保、测绘、播种、授粉、监测等任务载荷,实现精准、高效、规模化农田作业[9]。

表1 低空飞行平台气动布局分类

Table 1 Classification of aerodynamic configurations of low-altitude flight platforms

布局分类	示意图	起降方式	特点	载荷范围/kg
单旋翼布局		垂直	下洗气流强、载重优势明显、结构复杂、振动大、运维成本高且操作难度大	20～150
多旋翼布局		垂直	可垂直起降、空中悬停、结构简单、飞行效率低,续航时间短、飞行速度慢	30～100
固定翼布局		滑跑	飞行效率极高、航程远、巡航速度快、无法悬停、转弯半径大、不适合精细作业	5～50
复合翼布局		垂直	兼具多旋翼的场地灵活性和固定翼的长航时、高速度、载荷效能比相对较低、系统结构复杂	10～60

载荷提升会大幅增加农用无人机飞行能耗,续航短板愈发明显。针对该问题,诸多学者开展相关优化研究:陈瑜等[10]结合无人机动力与旋翼参数,提出动态能耗最优载荷配置方法,四旋翼、六旋翼、八旋翼实测能耗与理论值平均误差分别为3.22%、2.87%、2.85%,可精准确定最优载荷区间;李飞[11]搭建燃料电池与锂电池健康状态预估模型,提出基于电源退化的能量管理策略,仿真较模糊逻辑、等效耗最小策略分别省氢2.584%、0.594%,硬件实验分别省氢11.432%、7.447%,可延长续航并提升系统稳定性。清洁能源与多能源动力系统是改善续航的主流方向[12]。国外HYDrone-1800氢燃料多旋翼无人机凭借轻量化结构,具备大载重、长航程优势[13]。国内学者也围绕混动系统展开大量研究:徐楷等[14]对比两类能量管理策略,波动工况下较Rule-Based节油4.3%,平稳工况下节油8.5%,电池能量损耗显著更低,证实能量管理策略(energy management strategy,ECMS)节油效果更佳;任旭东等[15]设计有限状态机管控策略,完成混动系统功率合理分配,动力系统可满足30.09 kW峰值功率需求,电池荷电状态(state of charge,SOC)稳定维持在60%～85%,戴月领等[16]搭建半实物仿真平台,实现混动动力系统性能精准测试与优化。

综上,国内已在无人机能量调控、清洁能源应用、多能源系统优化领域形成完备研究体系,为解决农用无人机续航痛点提供有效技术路径。

1.2 智能飞控与高精度导航技术

智能飞控与高精度导航技术是决定飞行器能否在复杂低空环境中实现稳定、安全、精准的自主飞行的关键技术。飞控系统负责飞行姿态的稳定控制与任务指令的精确执行,高精度导航系统为飞行器提供厘米级乃至毫米级的实时空间位置信息,二者深度耦合,共同支撑完成精准作业任务。近年来,随着人工智能、多源传

感器融合与卫星导航增强技术的快速发展，农用无人机飞控与导航正从传统的固定参数控制、单一传感器定位向自适应智能控制与多源融合导航方向演进[17]。

飞控依托传感数据实时生成控制指令，保障飞行器沿预定轨迹飞行。传统农用无人机多采用结构简易、调试便捷的比例积分微分（proportional-integral-derivative，PID）控制[18]。然而，PID参数固定，在阵风、载荷突变以及山地果园等气流紊乱的场景中控制性能下降明显[19]。为此，自适应控制、模糊控制、滑模控制、鲁棒控制等先进方法被相继引入。自适应控制可实时调参适配变载荷植保作业[20]；模糊控制依托经验规则适配无精准建模的非线性场景[21]；滑模控制抗扰动能力强，需优化算法抑制抖振缺陷[22]。近年来，模型预测控制（model predictive control，MPC）和深度强化学习成为新的研究热点。MPC可实现带约束多目标最优飞行控制[23]，深度强化学习则使飞行器能够通过与环境交互自主习得最优控制策略，在非结构化环境中展现出较强的自适应能力[24]。飞控系统也由此从单一的姿态控制器逐步升级为集成任务规划、航迹优化与安全管理的综合智能控制平台（表2）。当前，农用无人机飞控面临的主要挑战在于复杂气动环境下的风扰动实时补偿、多机协同控制中的通信延迟与一致性保证，以及面向农业高强度作业场景的系统可靠性与故障容错能力。

表2　农用无人机飞控系统主要控制方法对比

Table 2　Comparison of main control methods for flight control systems of agricultural UAVs

控制方法	核心原理	典型优势	局限性	农业适用场景	参考文献
经典PID	基于误差的比例、积分、微分叠加	结构简单，计算量小，参数整定成熟	固定参数抗干扰差，非线性适应有限	平稳气象条件下的大田作业	[25]
自适应控制	在线辨识系统参数并自动调整增益	对质量特性变化鲁棒	辨识收敛速度受激励条件限制	载荷持续变化的植保喷施	[26]
模糊控制	基于专家经验的模糊规则推理	不依赖精确模型，对非线性适应好	规则库设计依赖经验	复杂气流下果树间作业	[27]
滑模控制	强迫系统状态沿滑模面运动	对扰动和不确定性具有强鲁棒性	存在固有抖振	强风扰动下精准航线跟踪	[28]
模型预测控制	有限时域预测＋滚动优化	可处理多约束、多目标	计算量大，依赖模型精度	多机协同路径规划与避障	[29]
深度强化学习	通过与环境交互学习最优策略	无须精确模型，自适应能力强	训练数据需求大，安全验证难	非结构化环境自主飞行决策	[30]

高精度导航定位是实现精准作业的关键前提。定位误差易造成植保作业不均，降低作业质量与资源利用率。当前农用无人机导航定位技术主要包括全球导航卫星系统（global navigation satellite system，GNSS）、惯性/卫星组合导航和视觉与激光融合导航3大路线。

全球导航卫星系统为农用无人机提供基本的全球定位能力。魏建雄等[31]从定位精度、收敛时间、连续性和完好性4个维度对北斗三号实时动态定位模块（real-time kinematic positioning，RTK）进行了系统评估，结果表明北斗三号RTK在开阔农田可达厘米级定位精度，依托星基增强、精密单点定位及多系统融合技术，还可适配无地面基站的偏远农田[32]。然而，惯性导航短时定位效果好，却存在误差累积问题，INS/GNSS组合导航可融合二者优势，借助滤波算法实现稳定连续定位[33]。Du[34]引入神经网络优化卡尔曼滤波算法，可在卫星信号中断场景下维持高精度定位，适配果园、山地等复杂作业环境在视觉与激光方面，视觉惯性里程计（visual-inertial odometry，VIO）通过同步处理相机图像和惯性数据实时估计6自由度位姿，成本低但受光照和纹理影响较大[35]；总体而言，多源异构传感器的自适应融合是提升农用无人机导航系统鲁棒性和连续性的关键。通过将卫星、惯性、视觉、激光及通信定位等信息进行智能加权融合，可在单一传感器性能退化时由其他传感器无缝补充，在树冠遮挡、建筑阴影、强电磁干扰等复杂工况下为农用无人机飞行安全和作业精度提供可靠保障。

1.3　智能低空管控技术

低空管控技术则解决“管”与“联”的问题，承担空地数据传输、多机协同调度与作业过程监管等核心职能，是农业低空作业从单机化迈向规模化的关键支撑[36]。随着低空空域管理改革推进与5G/5G-A通信技术落地，农业低空管控正从传统单机遥控向云平台智能集群管控方向演进，其技术内涵可从低空通信链路、云端管控平台与协同调度安全3个层面加以梳理。

低空通信是超视距作业与远程管控的基础。当前农业低空通信主要包括专用无线图传、蜂窝移动通信

和卫星通信3类[37]。专用图传延迟低、可靠性高,适用于视距内飞控交互,但传输距离受限[38];5G-A蜂窝通信覆盖范围广,可实现低空轨迹感知,却受乡村基站稀疏、地形遮挡限制;低轨卫星可填补通信盲区,难以满足高清数据实时传输需求。借助5G-A网络切片可实现业务分级传输[39]。

此外,无人机自组网(flying ad-hoc network,FANET)技术使编队可在蜂窝覆盖不足区域直接建立通信链路,实现信息共享与协同决策,为偏远地区多机协作提供了灵活方案[40]。针对农村基站密度不足、丘陵山地信号遮挡等现实问题,大疆农业配套推出O3图传增程方案,通过在高处架设中继站扩展信号覆盖半径,改善山地果园等复杂地形的通信连续性。黄蕊等[41]基于无线传感网络设计了无人机喷施药液沉积检测系统,通过在田间布设传感节点实现作业数据的实时采集与回传,为低功耗通信链路在农田远程监控中的应用提供了技术方案。兰玉彬等[42]在分析中国植保无人机发展形势时指出,通信链路稳定性不足是制约植保无人机超视距作业与规模化推广的关键瓶颈之一,亟须发展适应农业低空场景的专用通信技术。低空智联网研究进一步表明,以5G-A通感智算网络为底座构建低空通信体系,可有效支撑低空飞行器的广域覆盖与智能调度[43]。研究表明,农业低空通信正从单一图传向多模融合、多链路冗余方向发展,结合5G-A通感一体化、FANET自组网与中继扩展等技术手段,有望在复杂地形条件下构建更加可靠、低延迟的通信保障体系。

云端管控平台集成任务规划、飞行监控与智能决策功能于一体,是管控体系的核心软件基础设施,如图1所示。

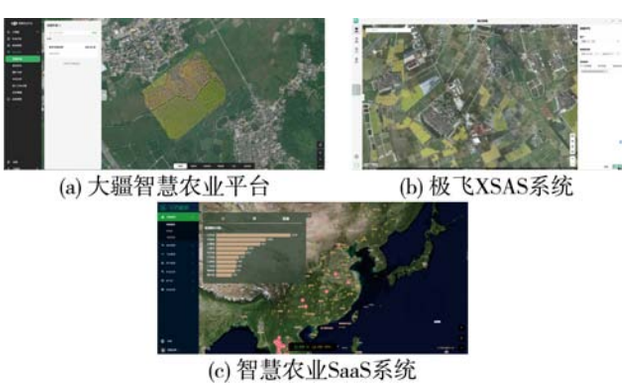


图1 农用无人机云端管控平台

Figure 1 Cloud management platform of agricultural UAVs

大疆智慧农业平台和极飞科技XSAS系统具备航线规划、实时监控与作业管理等基础功能[44],兰玉彬团队构建的"空—地—云"一体化管控架构进一步实现多机协同调度与作业数据全链路追溯。基于AI大模型的云端解析技术可实时处理多光谱、热红外遥感数据并生成精准作业处方图,推动管控从被动监管向主动决策升级[45]。然而,当前平台仍面临数据协议不统一、厂商设备互联互通困难以及农艺知识深度融合不足等短板,构建开放统一的数据接口标准与农艺模型库是未来发展的关键方向。

2 农业低空感知与精准作业技术

2.1 农业低空遥感技术

遥感技术是指利用各类传感器在非接触条件下获取地表目标信息,并对其进行处理与分析的一类技术手段,已在农业生产、生态环境监测及气象观测等领域得到广泛应用[46]。在农业领域中,遥感技术主要通过获取作物长势、病虫害发生情况、土壤水肥等信息,为农业生产管理和决策提供数据支撑。农业低空遥感主要包括无人机飞行平台、传感器系统及数据处理单元。无人机飞行平台以多旋翼与固定翼为主,其中多旋翼适用于小范围高精度监测,而固定翼更适合大尺度快速作业[47]。在传感器方面,可见光、多光谱、高光谱、热红外及激光雷达等已广泛应用于农业遥感场景(表3),不同类型传感器在信息获取能力上各具优势[48]。

表3 常用无人机机载传感器

Table 3 Common UAV onboard sensors

传感器	示意图	技术特点
可见光相机		获取影像便捷、空间分辨率高,能够直观反映作物形态与颜色信息,广泛应用于长势监测和病虫害识别,但其光谱范围有限,且易受光照条件影响。
多光谱相机		可获取红光、红边及近红外等关键波段信息构建植被指数,可实现作物长势与营养状况的定量评估,但光谱分辨率相对有限。
高光谱相机		具备连续窄波段特性,能够精细表征作物生理生化参数,在叶绿素、水分及氮含量反演中具有优势,但数据处理复杂且成本较高。
热红外相机		基于冠层温度信息反映作物水分状况,适用于干旱监测与灌溉管理,但分辨率较低且易受环境干扰。
激光雷达		通过主动获取三维结构信息,可用于株高及冠层结构提取,在生物量估算中表现突出,但设备成本高、数据处理难度较大。

2.1.1　作物病虫害监测

作物病虫害是影响农业生产安全和产量形成的重要因素，其发生具有隐蔽性强、传播速度快等特点。传统人工调查方法存在效率低、主观性强及难以大范围同步监测等问题。近年来，无人机遥感凭借高分辨率、快速响应及灵活部署等优势，在作物病虫害监测中展现出良好的应用潜力[49]，其通过获取作物冠层的光谱、纹理及结构信息，实现对病虫害发生程度及空间分布的快速识别，逐渐成为精准植保的重要技术支撑。

作物在遭受病虫害胁迫时，其叶片内部结构和生理状态会发生改变，从而引起光谱反射特征的变化。基于这一机理，无人机多光谱和高光谱遥感被广泛用于病害识别。Mahlein[50]研究表明，病害早期阶段即可在可见光及近红外波段产生响应，其中红边区域对叶绿素变化尤为敏感。进一步地，Zarco-Tejada等[51]利用无人机高光谱数据检测橄榄树病害，实现了对病害发生前期的提前识别，表明高光谱遥感在早期诊断中的优势。Guo等[52]基于无人机高光谱影像识别小麦条锈病，通过构建光谱指数模型，识别精度超过90%。Mohanty等[53]利用无人机影像提取作物冠层纹理特征，实现了对玉米虫害区域的有效识别。总体来看，遥感方法经历了从“单一波段分析”向“多波段组合及特征优化”的发展过程，但其稳定性易受光照条件和背景干扰。

2.1.2　农业生产要素监测

遥感技术不仅可用于作物长势与病虫害监测，也在土壤、水分、养分及氮素管理等农业生产要素监测中发挥重要作用。通过多光谱和高光谱传感器获取土壤和植被反射信息，可以估算土壤有机质、含水量及养分状况，实现精准施肥和水分调控。热红外传感器能够反映地表和冠层温度变化，为灌溉管理和作物水分胁迫评估提供依据。结合激光雷达获取的三维结构信息，可进一步分析作物与土壤间的相互作用，为优化播种密度、肥水管理及农田生产布局提供支持(表4)。

表4　无人机遥感在农业生产要素监测中的应用

Table 4　Applications of UAV remote sensing in monitoring agricultural production factors

监测要素	传感器类型	主要获取信息	典型应用	参考文献
土壤属性	多光谱/高光谱	土壤反射光谱、有机质、含水量	土壤养分反演、土壤质量评价	[54]
水分状况	热红外/多光谱	冠层温度、植被指数	作物水分胁迫监测、灌溉管理	[55]
氮素水平	多光谱/高光谱	NDVI、红边指数	作物氮含量估算、精准施肥	[56]
作物结构	激光雷达	三维点云、株高、冠层结构	生物量估算、群体结构分析	[57]

2.2　精准施药技术

精准施药技术是目前农业低空领域发展最为成熟的技术之一，相较于传统均匀喷施方式，农业低空精准施药通过融合环境信息、作物信息及作业参数，实现农药施用量与喷雾质量的精准调控，从而在保证防治效果的同时显著降低农药用量与非靶标污染风险[58]。目前，农业低空精准施药技术研究重点主要集中在精准变量喷施技术、喷施漂移控制技术等方面。

2.2.1　精准变量喷施技术

精准变量喷施技术的核心在于根据作物空间分布差异及施药需求变化，对喷施流量及喷雾参数进行动态调控，实现单位面积施药量与作物需求的匹配[59]。当前变量喷施技术的研究主要集中在基于作业参数调控与基于作物信息感知两类路径。

1)基于作业参数的变量喷施。该类技术主要通过建立喷施流量与作业参数之间的函数关系，实现单位面积施药量的稳定控制。Zhu等[60]将脉宽调制(PWM)技术应用于植保无人机喷施系统，通过调节电磁阀占空比实现喷施流量的连续可调，结合处方信息搭建变量喷施模型，流量调控精度较高。王玲等[61]搭建测控平台，通过调速稳压实现变速飞行下流量稳定，改善喷雾均匀性。针对无人机飞行过程中喷施流量难以随速度变化自动匹配的问题，王大帅等[62]融合多传感器数据，搭建PWM闭环控制系统，达成药流量与飞行速度自适应匹配，有效减少重喷漏喷、降低施药误差。此外，刘洋洋等[63]提出了一种航空变量施药分级控制算法，并基于该算法设计了多信息融合实时监控系统，可自适应调整喷施方案，适配复杂农田作业场景。

2)基于作物信息感知的变量喷施技术。基于作物信息感知的变量喷施更接近精准农业“按需施药”的本质要求，通过获取作物冠层结构、株高、密度或病虫害分布信息，实现喷施量的空间差异化调控。张泉勇[64]融合飞行、环境与作物信息搭建神经网络模型，预测雾滴沉积量并制定喷施策略，控制精度高且响应迅速，控制精度高且响应迅速。Qiao等[65]利用激光雷达采集作物株高数据，动态调节喷施流量，雾滴沉积预测误差<10%，变量喷施响应延迟<0.5 s，兼顾喷雾均匀性并减少农药用量。试验结果表明，该系统在不同生长阶段均能保持较好的喷雾均匀性，并有效降低农药使用量。

Vijayakumar等[66]在综述中指出,结合机器视觉与智能控制算法的变量喷施技术已成为未来发展趋势,其在杂草定点喷施和精准防控中表现出良好的应用前景。

现有研究表明精准变量喷施技术已从单一流量调节逐步发展为融合多源信息的智能控制系统,未来应进一步加强多源信息融合与智能决策方法的应用,推动变量喷施向高精度、自适应方向发展。

2.2.2 喷施漂移控制技术

喷施漂移是制约农药利用效率和影响环境安全的重要因素之一,尤其在植保无人机低空施药过程中,由于旋翼下洗气流与环境风场的耦合作用,雾滴在空间中的运动轨迹更加复杂,极易发生远距离迁移[67]。研究表明,雾滴粒径、风速、喷头类型以及作业参数是影响漂移的关键因素,其中风速与粒径对漂移距离具有显著正相关关系[68]。围绕喷施漂移控制问题,国内外学者主要从喷雾方式优化、作业参数调控以及喷头减飘技术等方面开展了大量研究。

1)静电喷雾减飘技术。该技术通过在喷头与作物之间建立电场,使雾滴带电并在电场力作用下向靶标作物定向迁移,从而提高沉积效率并降低漂移风险。茹煜等[69]针对植保无人机静电喷雾系统开展田间试验研究,结果表明,2 m作业高度下雾滴沉积达56个/cm^2,冠层、中层、下层覆盖率分别提升35.4、26、9个/cm^2,在相同作业条件下,静电喷雾可显著提高雾滴沉积密度,相较传统喷雾方式具有更好的附着性能。廉琦[70]通过室外试验分析不同工况下静电喷雾效果,结果表明静电喷雾在有效喷幅2.5 m,上部沉积密度提升13.6%,中层冠层提升32.6%,验证了其在提高沉积效率与降低漂移方面的优势。张亚莉等[71]对美国航空静电喷雾系统的发展及其在中国的应用现状进行了综述,指出航空静电喷雾在提升靶标沉积方面具有应用潜力。

2)作业参数防飘控制。通过优化飞行高度、飞行速度、雾滴粒径及喷施流量等参数,可有效降低雾滴漂移风险。皇甫佳一等[72]通过田间试验分析发现,飞行高度3 m时雾滴沉积量最优、漂移最小,较4 m、5 m高度沉积量提升38.3%,适当降低飞行高度可减少雾滴在空气中的停留时间,从而降低漂移距离。蒋三生等[73]通过对比不同喷施流量条件下的雾滴分布情况,发现喷施流量72 L/hm^{2}时覆盖率变异系数最小、均匀性最优,增大喷施流量能够降低覆盖率变异系数,提高喷施均匀性,从而间接降低漂移风险。陈盛德等[74]基于CFD数值模拟方法,分析了共轴双旋翼植保无人机旋翼下洗气流对雾滴运动的影响规律,结果表明旋翼转速2 800 r/min时雾滴漂移率最低至1.30%,合理利用下洗气流可增强雾滴向下运动趋势,提高沉积效率并减少横向漂移。李玉广[75]通过多因素试验研究指出,在较高风速条件下,小粒径雾滴更易发生远距离迁移,而增大雾滴粒径能够显著降低缓冲区距离需求,这进一步表明粒径调控在漂移控制中的重要作用。

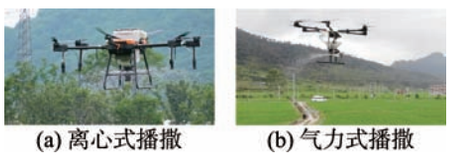
3)喷头优化防飘技术。喷头结构是影响雾滴形成及漂移行为的关键因素之一。Ferguson等[76]通过风洞试验对多种减飘喷头进行对比研究,结果表明空气诱导喷头能够显著降低细小雾滴比例,从而减少雾滴漂移距离,但同时会对覆盖均匀性产生一定影响。Wang等[77]基于风洞试验分析不同类型无人机喷头的漂移特性,发现离心喷头在相同粒径条件下漂移风险高于压力喷头,说明喷头雾化机制对漂移行为具有重要影响。Biglia等[78]通过田间试验分析不同喷头与飞行模式组合对沉积与漂移的影响,结果表明合理选择喷头类型并优化飞行路径,可有效降低地面损失与空气漂移比例。上述研究表明,喷施漂移控制技术已从单一参数调节发展为多因素耦合控制,未来应结合流场建模、数据驱动方法及智能控制技术,实现喷施漂移的主动调控与动态优化。

2.3 精准撒播技术

农用无人机精准撒播依托无人机平台集成可控播撒系统,实现种子、肥料等颗粒物料的田间高效精准投放。相较于传统地面作业方式,其在地形适应性、作业效率及土壤保护方面优势显著。精准撒播的实现依赖“装置—控制—轨迹—决策”四位一体的技术协同,为实现精准撒播,本研究从撒播装置、撒播轨迹控制与撒播作业控制与决策展开系统梳理。

2.3.1 撒播装置

前期无人机撒播装置多依赖于简单重力自流式结构,受限于下洗流场的干扰,有效播幅窄且散布均匀性较差。为实现大通量与高均匀度的精准作业,无人机撒播装置逐步转变为以转盘离心力实现宽幅抛撒的离心式撒播技术和利用高速气流输运实现定点定量的气力式撒播技术。离心式撒播利用高速旋转的拨盘将物料甩出,重点在于拨盘转速和开口大小,确保不同高度下物料的覆盖宽度和均匀性。气力式撒播是指利用高压气流将颗粒类物料吹入喷管,与离心式撒播相比,这种方式对物料颗粒的损伤更小,撒播的方向性更强,比较适用于对落点要求更高的作业场景,如图2所示。



(a) 离心式播撒 (b) 气力式播撒

图2 无人机撒播作业

Figure 2 UAV broadcast seeding operation

针对无人机低空、高航速作业环境下肥料颗粒易产生轨迹偏移与分布不均的瓶颈，相关研究者围绕作业精度提升、装置优化及技术演进开展了多项针对性研究，各项研究的核心内容与成果总结如表5所示，这些研究共同推动低空播撒从传统面散播向更精准的线型条播、点位穴播阶段演进。

表5　不同撒播装置与模型对比

Table 5　Comparison of different sowing devices and models

装备/模型名称	核心技术路线	作业特点	优点	局限性	参考文献
颗粒沉积预测模型	基于多源参数融合的智能算法补偿	解决高速、低空飞行导致的肥料轨迹偏移、分布不均	非侵入式改进，动态响应快	面漫撒模型泛化依赖样本库	[79]
气力式对行精准施肥装置	物理流道约束下的根部定向导流	解决作物生长中后期通过性差、肥效利用率低、漫天撒播浪费问题	靶向施用，变量对行追施基础好	机载风阻/惯量增加，对仿地飞行要求苛刻	[80]
多功能条播装置	基于正态概率密度函数的变量调节机构	满足成条需求，从面撒播向条播演进	理论分布可控，成条一致性强	装置田间适用性受限	[81]
可变径式排肥槽轮条施系统	行距—排量双参数机械解耦控制	解决特定作物行距固定下的条施需求	构型适应性与效率较强	装置通用性受限于无人机载重与挂载接口	[82]
单种箱多排管条播装置	基于离散元法的微观流变参数优化	提高条播排种均匀性，单箱供多管作业	流场均匀性机理明确，结构紧凑	单体仿真与飞控全链路协同待深化	[83]

2.3.2　撒播轨迹控制

撒播轨迹的形成机理因装置类型不同而存在显著差异。离心式依靠离心盘赋予物料初速，颗粒受惯性、空气阻力与旋翼下洗气流共同作用，核心通过结构与运动参数调控散布形态；气力式借助定向高速气流输送物料，轨迹由流场与出料结构决定，重点优化风道与气流组织实现精准投送。

离心式播撒装置的优化主要以提升物料分布均匀性为主。边晓东等[84]针对丘陵地区无人机撒种需求设计了槽轮与撒种盘相结合的撒种装置，基于离散元方法构建水稻种子颗粒模型，并利用EDEM软件分析排种过程运动轨迹，发现撒种盘偏角与转速显著影响种子在盘面上的分布形态，扇叶数量决定脱离盘体后的空间散布特征。

任万军等[85]以水稻穗肥撒施为对象，通过EDEM仿真系统分析了离心盘转速、落入位置角及飞行姿态对肥料分布轨迹的影响，最优参数组合下撒肥变异系数仅8.86%，作业效率为人工12.5倍，揭示了无人机俯仰角导致肥料向中部堆积、横滚角造成单侧偏移的规律。

气力式播撒装置作业效果受出料口尺寸、倾角及风道布局制约，口径不当易引发堵料或撒布不均，适宜倾角可优化播撒幅距。现有研究主要优化出料结构与气流排布，借助流场整流设计，实现高速气流定向送料，提升撒播稳定性。邓浩[86]以大疆T16六旋翼无人机为平台，模拟仿真分析了无人机前飞时旋翼气流场对稻种撒播轨迹的影响，最优结构参数下撒播横向变异系数最低23.62%，田间实测23.72%，产量与常规水平持平，揭示了旋翼风场与颗粒运动之间的耦合作用规律。Liu等[87]采用遗传算法优化的广义回归神经网络建立沉积预测模型，为多因素交互作用下的变量施肥轨迹预测提供了决策依据。

上述研究从离心盘结构参数优化与气力流场精确调控两条路径逐步深化了对颗粒运动轨迹的认知，为精准变量撒播作业提供了系统的仿真依据与设计参考。

3　农业低空标准与装备检测

3.1　农业低空作业标准现状

随着低空经济与智慧农业的推进，农业低空作业由传统农用航空逐步转向以无人机为核心的多场景应用体系，其作业类型已由单一植保喷施扩展至撒播、施肥、遥感监测及农情评估等。

相应地，标准体系也经历了由有人机航化作业向无人机作业演进的过程。总体上看，我国农业低空作业标准已形成国家标准为引领、行业标准为主体、地方标准为补充的多层级结构。

依据全国标准信息公共服务平台当前可检索的现行标准进行归纳，重点梳理与喷施、撒播施肥、平台装备及遥感监测直接相关的标准，以反映我国农业低空作业标准体系的总体构成(表6)。

我国农业低空作业标准中，喷施领域体系最完善

但缺变量、协同规范;撒播施肥体系薄弱,未覆盖颗粒播撒与变量作业关键要求;平台装备初具基础,但系统级、适航性标准不足;遥感标准较完整,却与作业决策衔接不畅。

表 6 农业低空作业相关标准

Table 6 Relevant standards for agricultural low-altitude operations

领域	标准类型	标准号	标准名称
喷施	农业行业标准	NY/T 1533—2007	农用航空器喷施技术作业规程
		NY/T 4258—2022	植保无人机 作业质量
		NY/T 4259—2022	植保无人飞机 安全施药技术规程
	民航行业标准	MH/T 1002.1—2016	农业航空作业质量技术指标 第1部分:喷洒作业
		MH/T 1026—2009	飞机施用农药规范
		MH/T 1031—2010	农用飞机喷洒设备性能检测规范
		MH/T 1008.1—2021	飞机喷施设备性能技术指标 第1部分 喷雾设备
	地方标准	DB37/T 3940—2020	植保无人飞机防治小麦病虫害作业技术规程
		DB65/T 4404—2021	植保无人飞机防治棉花病虫害作业规程
		DB14/T 3620—2025	植保无人飞机田间作业指南
		DB65/T 4958—2025	植保无人飞机农田施药作业技术规范
播撒施肥	国家标准	GB/T 15162—2018	飞播造林技术规程
	农业行业标准	NY/T 3881—2021	遥控飞行播种机 质量评价技术规范
		NY/T 1239—2006	飞播种草技术规范
	民航行业标准	MH/T 1012—2001	飞机播种牧草技术要求
		MH/T 1008.2—2021	飞机喷施设备性能技术指标 第2部分播种设备
	地方标准	DB42/T 1897—2022	农用航空器水稻播种技术规程
		DB42/T 2074—2023	农用无人航空器水稻施肥技术规程
		DB51/T 3311—2025	农用无人飞机施药施肥作业技术规程
		DB15/T4226—2025	无人机播种治沙技术规程
平台装备	国家标准	GB/T 43071—2023	植保无人飞机
	民航行业标准	MH/T 0017—1998	农业航空技术术语
		MH/T 1063—2016	飞机喷洒设备装机要求
		MH/T 1049—2012	飞机喷洒设备设计规范
	农业行业标准	NY/T 4615—2025	农用无人驾驶航空器操控员培训指南
	地方标准	DB50/T 638—2015	农用航空器 电动多旋翼植保无人机
遥感	国家标准	GB/T 41450—2022	无人机低空遥感监测的多传感器一致性检测技术规范
		GB/T 45631—2025	无人机遥感测绘飞行管理信息要求
		GB/T 45522—2025	无人机遥感测绘注册规范
	行业标准	NY/T 4151—2022	农业遥感监测无人机影像预处理技术规范
		NY/T 4377—2023	农业遥感调查通用技术农作物雹灾监测技术规范
		NY/T 4378—2023	农业遥感调查通用技术 农作物干旱监测技术规范
		NY/T 4379—2023	农业遥感调查通用技术农作物倒伏监测技术规范
	地方标准	DB34/T 4476—2023	冬小麦田间长势无人机高光谱遥感监测技术规程
		DB14/T 3586—2025	高标准农田无人机遥感监测技术规范
		DB61/T 2077—2025	松材线虫病木无人机遥感监测技术规范

3.2　农业低空装备检测评价体系

农业低空装备的检测评价与规范验证，是评判装备性能、把控作业质量、推进行业标准化的核心要点，亦是当下研究重难点。伴随各类低空作业装备快速发展，业内已搭建起包含飞行、作业、结构性能在内的多维检测评价体系[88]。与此同时，随着精准农业与智能控制技术的发展，检测评价体系正由单一性能测试向多源信息融合与全过程动态评价转变。

飞行性能测试主要用于评估无人机在复杂气动环境中的飞行稳定性与控制能力，其检测内容包括起飞与着陆性能、巡航稳定性、机动响应特性以及抗风干扰能力等关键指标[89]。在测试方法上，除传统的实地飞行试验外，风洞试验被广泛应用于模拟不同风速与气流条件，通过对气动力参数与姿态响应的测量，实现对无人机空气动力学特性及控制性能的定量评价[90]。

作业性能测试主要体现在喷施质量评价与撒播分布特性分析两个方面。在喷施测试中，通过喷雾性能测试平台结合压力传感器、水敏感纸及沉积采样装置，对喷施分布均匀性、雾滴粒径特征及沉积效率进行测量；风洞实验室也是评估喷雾的重要试验装置，华南农业大学国家精准农业航空中心建设了国内首台高低速复合风洞在雾滴粒径测定以及喷雾漂移评估领域做出了重要贡献（图 3）。吉林农业科学院也针对植保无人机作业特征建设了喷雾性能测试平台（图 4）。对于撒播作业，检测重点转向颗粒分布均匀性与落点偏移特性，通常通过布设采样器或传感阵列获取颗粒分布数据（图 5），并结合统计方法对离散度与均匀性进行评价，部分研究进一步引入离散元法（DEM）与气固两相流模型，对颗粒在气流中的运动轨迹进行模拟分析，为撒播系统结构优化与参数设计提供理论依据。



图 3　风洞实验室

Figure 3　Wind tunnel laboratory



图 4　植保无人机喷雾性能测试平台

Figure 4　Test platform for spray performance of plant protection UAVs

无人机结构性能测试是装备安全可靠性评价的重要组成部分，其检测内容主要包括结构强度、刚度、疲劳寿命及连接可靠性等方面[91]。通过静力加载试验、振动试验及冲击试验，可模拟无人机在运输、起降及田间作业过程中的复杂受力情况，从而评估其结构安全裕度。同时，结合有限元分析（FEA）等数值方法，对关键部件进行力学性能预测与结构优化设计[92]。



(a) 撒播质量评估　　(b) 喷施漂移评估

图 5　农用无人机撒施质量与喷施漂移评估试验

Figure 5　Test for spreading quality and spraying drift evaluation of agricultural UAV

4　农业低空多维现实困境与成因剖析

尽管农业低空经济在政策驱动与技术推动下快速发展，但从产业实践来看，其规模化、规范化应用仍面临多维度现实制约，这些问题具有系统性与耦合性，需从多层面系统分析。具体而言，平台性能与核心部件能力受限，当前电动多旋翼机型在续航时间与有效载荷间存在权衡，飞控、动力等核心部件在复杂环境下的可靠性与效率不足；低空遥感感知体系存在精度与应用瓶颈，多源数据融合易产生偏差，反演模型泛化能力弱，遥感信息向农艺管理措施的转化路径不明确；精准喷撒作业也面临关键技术约束，气流扰动、颗粒运动复杂及飞行与作业参数耦合等问题，影响喷施均匀性、播撒精度与变量作业的精准执行。

5　未来发展趋势

在国家低空经济战略推进与农业现代化转型的双重驱动下，农业低空技术与装备正从单一技术应用迈向系统化、集成化新阶段，呈现多技术耦合、装备与制度协同推进的特征。

未来，多源信息融合将成为农业低空感知的重要方向，无人机遥感将与卫星遥感、地面传感网络结合，构建作物全生育周期动态监测体系，为精细化决策提供支撑；人工智能技术深入应用将推动系统向“感知—分析—决策”一体化发展，提升生产管理的精细化与智能化水平；飞行平台性能将持续提升，借助动力、电池及材料技术优化，增强续航、载荷与复杂环境适应能力，多类型构型将适配不同作业需求；作业负载系统将向高性能、精准化发展，通过喷头、播撒装置及传感器的优化集成，

兼顾作业质量与效率,与飞行平台协同推进精准作业;低空管控与服务体系将不断完善,通过分类分级管理简化低风险作业审批、提高空域利用效率,同步推进数据安全制度建设,为产业长期健康发展提供保障。

参 考 文 献

[1] 何勇, 王月影, 何立文, 等. 低空经济政策和技术在农业农村的应用现状与前景[J]. 农业工程学报, 2025, 41(8): 1−16.
He Yong, Wang Yueying, He Liwen, et al. Current status and prospects of low-altitude economy policies and technologies in agriculture and rural areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(8): 1−16.

[2] 中共中央、国务院. 印发国家综合立体交通网规划纲要[N]. 人民日报, 2021−02−25(001).

[3] 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议[N]. 人民日报, 2025−10−29(001).

[4] 中共中央、国务院. 关于进一步深化农村改革扎实推进乡村全面振兴的意见[N]. 人民日报, 2025−02−24(001).

[5] 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例[N]. 人民日报, 2023−06−29(17).

[6] 十部门发布低空经济标准体系建设指南[J]. 交通企业管理, 2026, 41(2): 4.

[7] 《农业无人机行业白皮书(2024/2025)》在京发布[J]. 农村新技术, 2025(9): 48−49.

[8] 林恒毅, 麦煜炬, 施琳琳, 等. 农业低空经济应用场景拓展与技术动态[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(10): 8−20.
Lin Hengyi, Mai Yuju, Shi Linlin, et al. Expansion of application scenarios and technological developments in agricultural low-altitude economy [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(10): 8−20.

[9] 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.

[10] 陈瑜, 张植勋, 申遂愿, 等. 农用多旋翼无人机动力—载荷最优匹配与能耗验证[J]. 农业机械学报, 2025, 56(11): 339−348.
Chen Yu, Zhang Zhixun, Shen Suiyuan, et al. Optimal power-load matching and energy consumption verification of agricultural multi-rotor UAVs [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(11): 339−348.

[11] 李飞. 考虑电源退化的燃料电池多旋翼无人机能量管理策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2025: 11−20.
Li Fei. Research on energy management strategy of fuel cell multi-rotor UAV considering power degradation [D]. Changchun: Jilin University, 2025: 11−20.

[12] 李石磊, 刘增勇, 彭琪凯, 等. 无人机动力现状与展望[J]. 内燃机与配件, 2025(21): 120−124.

[13] 李伯犀, 辛树鹏. 液氢在无人机中应用展望[J]. 低温工程, 2024(5): 104−110.

[14] 徐楷, 王步宇, 帅石金. 多旋翼无人机串联混合动力系统能量管理仿真[J]. 航空动力学报, 2024, 39(6): 221−232.
Xu Kai, Wang Buyu, Shuai Shijin. Numerical investigation on the energy management strategies of a series hybrid unmanned multirotor aerial vehicle [J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(6): 221−232.

[15] 任旭东, 邓涛, 杜童, 等. 垂直起降固定翼无人机混合动力系统参数匹配[J]. 航空工程进展, 2024, 15(4): 56−63.
Ren Xudong, Deng Tao, Du Tong, et al. VTOL fixed-wing UAV hybrid system parameter matching [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(4): 56−63.

[16] 戴月领, 刘莉, 张晓辉. 燃料电池无人机动力系统半实物仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(2): 439−446.
Dai Yueling, Liu Li, Zhang Xiaohui. Hardware-in-the-loop simulation of fuel cell UAV power system [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(2): 439−446.

[17] 展义龙, 张晚霞, 张伊鹏, 等. 大载荷农用无人机关键技术与应用综述[J]. 农业机械学报, 2026, 57(3): 1−15, 37.
Zhan Yilong, Zhang Wanxia, Zhang Yipeng, et al. Review on key technologies and applications of heavy-load agricultural UAVs [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(3): 1−15, 37.

[18] 赵国良, 孟宪猛. 四旋翼无人多飞行器着陆避障轨迹PID控制方法[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(12): 154−160.

[19] Ganesh K S S, Gudipalli A. A comprehensive review on payloads of unmanned aerial vehicle [J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, 2024, 27(4): 637−644.

[20] 刘滨, 陈明维. 一种自适应控制策略在四旋翼无人机应用研究[J/OL]. 机械设计与制造, 1−8[2026−02−17]. https://doi. org/10.19356/j. cnki. 1001−3997. 20260128.024.

[21] 杜振安, 胡盛斌, 张博. 旋翼无人机模糊自适应编队控制分析[J]. 集成电路应用, 2025, 42(7): 68−69.
Du Zhen'an, Hu Shengbin, Zhang Bo. Analysis of fuzzy adaptive formation control of rotary-wing UAV [J]. Applications of IC, 2025, 42(7): 68−69.

[22] 程春, 李静. 基于积分滤波器的四旋翼无人机滑模鲁棒控制[J]. 计算机应用与软件, 2026, 43(2): 93−99.
Cheng Chun, Li Jing. Sliding mode robust control of four-

rotor UAV based on integral filter [J]. Computer Applications and Software, 2026, 43(2): 93－99.

[23] 陈向勇, 李汶洁, 马骥, 等. 低空环境下无人系统协同控制前沿进展[J/OL]. 航空学报, 1－20[2026－02－17]. https://link. cnki. net/urlid/11.1929. v. 20251216. 0901.004.

[24] 张鹏, 卓安生, 王志奕. 基于空地一体化网络的无人机集群协同控制算法研究[J]. 物联网技术, 2026, 16(2): 152－155, 158.

[25] 刘超, 张长利, 王树文, 等. 农用无人机纵向姿态控制系统设计及仿真[J]. 农机化研究, 2016, 38(10): 36－41.
Liu Chao, Zhang Changli, Wang Shuwen, et al. Longitudinal attitude control system design and simulation of agricultural unmanned aerial vehicle [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38 (10): 36－41.

[26] 贺有源, 刘栋, 郑恩辉, 等. 四旋翼无人机自适应反步滑模姿态控制器设计[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版), 2019, 39(2): 46－52.
He Youyuan, Liu Dong, Zheng Enhui, et al. Design of an adaptive backstepping sliding mode attitude controller for quadrotor helicopters [J]. Journal of Hangzhou Dianzi University (Natural Sciences), 2019, 39(2): 46－52.

[27] 苏中滨, 章宗鑫, 马晨茗, 等. 模糊PID控制无人自转旋翼机飞行姿态仿真[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(2): 63－70.
Su Zhongbin, Zhang Zongxin, Ma Chenming, et al. Simulation of fuzzy PID control on flight attitude of unmanned autogyro [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(2): 63－70.

[28] 蔡伟平, 胡越黎, 杨文荣, 等. 四旋翼双环滑模姿态控制系统设计与仿真[J]. 电子技术应用, 2015, 41(7): 151－154.

[29] 王晓海, 孟秀云, 李明辉. 基于MPC的无人机航迹跟踪控制器设计[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(1): 191－198.
Wang Xiaohai, Meng Xiuyun, Li Minghui. Design of trajectory tracking controller for UAV based on MPC [J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43 (1): 191－198.

[30] 赵启, 甄子洋, 龚华军, 等. 基于深度强化学习的无人机编队控制[J]. 电光与控制, 2022, 29(10): 29－35.
Zhao Qi, Zhen Ziyang, Gong Huajun, et al. UAV formation control based on deep reinforcement learning [J]. Electronics Optics & Control, 2022, 29 (10): 29－35.

[31] 魏建雄, 沈沂, 陈倩倩, 等. 无人机北斗RTK定位数据质量测评方法研究[J]. 计量与测试技术, 2026, 52(2): 35－39.
Wei Jianxiong, Shen Yi, Chen Qianqian, et al. Research on evaluation methods for data quality of BDS RTK positioning in UAVs [J]. Metrology & Measurement Technique, 2026, 52(2): 35－39.

[32] Colomina I, Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 92: 79－97.

[33] Groves P. Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems [M]. 2nd ed. Artech House, 2013.

[34] Du Y. Neural-Kalman GNSS/INS navigation for precision agriculture [C]// 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2023.

[35] Qin T, Li P, Shen S. VINS-Mono: a robust and versatile monocular visual-inertial state estimator [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018, 34(4): 1004－1020.

[36] 易丹. 基于物联网架构的植保无人机通信系统设计[J]. 农机化研究, 2020, 42(11): 215－218, 223.
Yi Dan. Design of plant protection UAV communication system based on Internet of Things architecture [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42 (11): 215－218, 223.

[37] Zeng Y, Zhang R, Lim T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges [J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54 (5): 36－42.

[38] Zhang Y, Mao Z, Yang S, et al. A survey of UAV communication networks: challenges, key technologies, and trends [J]. Journal of Communications and Information Networks, 2023, 8(2): 137－157.

[39] 樊明波, 张严, 李若凡. 5G-A通感一体低空通信组网策略研究[J]. 通信世界, 2024(17): 32－36.

[40] Gupta L, Jain R, Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(2): 1123－1152.

[41] 黄蕊, 郭树强, 赵红茹. 基于无线传感网络的无人机喷药沉积效果检测[J]. 农机化研究, 2019, 41(5): 219－223.
Huang Rui, Guo Shuqiang, Zhao Hongru. Detection of UAV spray deposit effect based on wireless sensor network [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(5): 219－223.

[42] 兰玉彬, 陈盛德, 王国宾, 等. 中国植保无人机发展形势及问题分析[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 217－225.
Lan Yubin, Chen Shengde, Wang Guobin, et al. Development situation and problem analysis of plant protection unmanned aerial vehicle in China [J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40 (5):

217－225.

[43] 宋杰，周建锋，王卫斌．低空智联网赋能低空经济的思考与探索[J]．信息通信技术与政策，2024，50(11)：28－32.
Song Jie，Zhou Jianfeng，Wang Weibin. Thoughts and exploration on empowering low-altitude economy with low-altitude intelligent network [J]. Information and Communications Technology and Policy，2024，50(11)：28－32.

[44] 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.

[45] 别宇辉，陈鑫，徐国威，等．智慧植保技术体系与应用现状综述[J]．植物保护学报，2026，53(1)：80－94.
Bie Yuhui，Chen Xin，Xu Guowei，et al. A review of smart plant protection technologies and their current applications [J]. Journal of Plant Protection，2026，53(1)：80－94.

[46] 殷俊．遥感技术在智慧农业中的应用研究[J]．现代化农业，2025，(6)：76－78.

[47] 杨三萍．无人机遥感技术在农业灾害调查中的应用探究[J]．农业灾害研究，2024，14(6)：323－325.

[48] Zhou X，Zheng H B，Xu X Q，et al. Predicting grain yield in rice using multi-temporal vegetation indices from UAV-based multispectral and digital imagery [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing，2017，130：246－255.

[49] Hunt E R，Hively W D，Daughtry C S，et al. Remote sensing of crop leaf area index using unmanned airborne vehicles [C]// Proceedings of the Pecora，2008，17：18－20.

[50] Mahlein A K. Plant disease detection by imaging sensors-parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping [J]. Plant Disease，2016，100(2)：241－251.

[51] Zarco-Tejada P J，Camino C，Beck P S A，et al. Previsual symptoms of *Xylella fastidiosa* infection revealed in spectral plant-trait alterations [J]. Nature Plants，2018，4(7)：432－439.

[52] Guo A，Huang W，Dong Y，et al. Wheat yellow rust detection using UAV-based hyperspectral technology [J]. Remote Sensing，2021，13(1)：123.

[53] Mohanty S P，Hughes D P，Salathé M. Using deep learning for image-based plant disease detection [J]. Frontiers in plant science，2016，7：1419.

[54] 唐华俊．农业遥感研究进展与展望[J]．中国农业文摘－农业工程，2018，30(5)：6－8，5.

[55] 王小平．基于高光谱的半干旱区作物水分胁迫及其生理参数监测模型研究[D]．兰州：兰州大学，2014：3－5.
Wang Xiaoping. Study on the crop water stress and the physiological parameters monitoring model based on canopy hyperspectral reflectance data in semi-arid region，northwest China [D]. Lanzhou：Lanzhou University，2014：3－5.

[56] 李金帅．遥感技术在农业中的应用[J]．农业与技术，2021，41(11)：61－64.

[57] 梁榆茗，樊雪艳，张木清，等．基于无人机激光雷达的高通量作物冠层叶面积指数反演模型[J]．生物工程学报，2025，41(10)：3817－3827.
Liang Yuming，Fan Xueyan，Zhang Muqing，et al. A high-throughput plant canopy leaf area index inversion model based on UAV-LiDAR [J]. Chinese Journal of Biotechnology，2025，41(10)：3817－3827.

[58] 陈盛德，廖玲君，徐小杰，等．中国植保无人机及其施药关键技术的研究现状与趋势[J]．沈阳农业大学学报，2023，54(4)：502－512.
Chen Shengde，Liao Lingjun，Xu Xiaojie，et al. Research status and trends of plant protection UAV and its key technology of spraying in China [J]. Journal of Shenyang Agricultural University，2023，54(4)：502－512.

[59] Gu C，Wang X，Wang X，et al. Research progress on variable-rate spraying technology in orchards [J]. Applied Engineering in Agriculture，2020，36(6)：927－942.

[60] Zhu H，Lan Y，Wu W，et al. Development of a PWM precision spraying controller for unmanned aerial vehicles [J]. Journal of Bionic Engineering，2010，7(3)：276－283.

[61] 王玲，兰玉彬，Hoffmann W C，等．微型无人机低空变量喷药系统设计与雾滴沉积规律研究[J]．农业机械学报，2016，47(1)：15－22.
Wang Ling，Lan Yubin，Hoffmann W C，et al. Design of variable spraying system and influencing factors on droplets deposition of small UAV [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(1)：15－22.

[62] 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.
Wang Dashuai，Zhang Junxiong，Li Wei，et al. Design and test of dynamic variable spraying system of plant protection UAV [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(5)：86－93.

[63] 刘洋洋，茹煜，陈青，等．无人机变量施药实时监控系统设计与试验[J]．农业机械学报，2020，51(7)：91－99.
Liu Yangyang，Ru Yu，Chen Qing，et al. Design and test of real-time monitoring system for UAV variable spray [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(7)：91－99.

[64] 张泉勇．植保无人机变量喷雾处方图解译与精准施药关键技术研究[D]．广州：华南农业大学，2019：10－13.
Zhang Quanyong. Research on key technologies of variable spray prescription map interpretation and precision application for plant protection UAV [D]. Guangzhou：South China Agricultural University，2019：10－13.

[65] Qiao B, Han L, Wang Z, et al. Design and testing of an intelligent variable-rate spraying system based on LiDAR-guided application [J]. Crop Protection, 2024, 184: 106874.

[66] Vijayakumar V, Yiannis A, K J S, et al. Smart spraying technologies for precision weed management: a review [J]. Smart Agricultural Technology, 2023, 6: 100337.

[67] 李继宇, 兰玉彬, 施叶茵. 旋翼无人机气流特征及大田施药作业研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 104－118.
Li Jiyu, Lan Yubin, Shi Yeyin. Research progress on airflow characteristics and field pesticide application system of rotary-wing UAV [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(12): 104－118.

[68] Wang G, Zhang T, Song C, et al. Evaluation of spray drift of plant protection drone nozzles based on wind tunnel test [J]. Agriculture, 2023, 13(3): 628.

[69] 茹煜, 金兰, 贾志成, 等. 无人机静电喷雾系统设计及试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 42－47.
Ru Yu, Jin Lan, Jia Zhicheng, et al. Design and experiment on electrostatic spraying system for unmanned aerial vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(8): 42－47.

[70] 廉琦. 多旋翼无人机静电喷雾系统的试验研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2016: 7－9.
Lian Qi. Experimental study on electrostatic spraying system of multi-rotor UAV [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2016: 7－9.

[71] 张亚莉, 兰玉彬, Fritz B K, 等. 美国航空静电喷雾系统的发展历史与中国应用现状[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 1－7.
Zhang Yali, Lan Yubin, Fritz B K, et al. Development of aerial electrostatic spraying systems in the United States and applications in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(10): 1－7.

[72] 皇甫佳一, 郭璐璐, 李平, 等. 植保无人机喷雾参数对药液在花椒叶面沉积及防治蚜虫效果的影响[J]. 植物保护学报, 2026, 53(1): 111－119.
Huangfu Jiayi, Guo Lulu, Li Ping, et al. Effects of UAV spray parameters on pesticide deposition on *Zanthoxylum bungeanum* leaves and aphid control efficacy [J]. Journal of Plant Protection, 2026, 53(1): 111－119.

[73] 蒋三生, 卜小东, 郭辉, 等. 无人机作业参数对雾滴在桃树冠层沉积分布的影响[J]. 中国农机化学报, 2026, 47(1): 147－152.
Jiang Sansheng, Bu Xiaodong, Guo Hui, et al. Effects of operation parameters of UAV on droplets deposition distribution in peach tree canopy [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2026, 47(1): 147－152.

[74] 陈盛德, 郭健洲, 徐小杰, 等. 共轴双旋翼植保无人机旋翼气流作用下雾滴沉积分布特性研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2025, 56(6): 31－44.
Chen Shengde, Guo Jianzhou, Xu Xiaojie, et al. Distribution characteristics of droplet deposition under rotor downwash airflow of coaxial dual-rotor plant protection UAV [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2025, 56(6): 31－44.

[75] 李玉广. 植保无人机施药雾滴运动规律研究及飘移预测模型构建[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2025: 9－13.
Li Yuguang. Research on dynamics of spray droplets from plant protection UAVs and development of a drift prediction model [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2025: 9－13.

[76] Ferguson J C, O′Donnell C C, Chauhan B S, et al. Determining droplet size uniformity across spray drift reducing nozzles [J]. Crop Protection, 2015, 76: 1－6.

[77] Wang G, Zhang T, Song C, et al. Evaluation of spray drift of plant protection drone nozzles [J]. Agriculture, 2023, 13(3): 628.

[78] Biglia A, Grella M, Bloise N, et al. UAV spraying in vineyards: effect on canopy deposition and drift [J]. Science of the Total Environment, 2022, 817: 154942.

[79] 刘俪恋. 多因素互作下无人机撒施颗粒肥沉积分布特性及预测模型研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2025: 8－12.
Liu Lilian. Study on the deposition distribution characteristics and prediction model of granular fertilizer spread by UAV under multi-factor interactions [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2025: 8－12.

[80] 韩玉宝, 姬江涛, 贺智涛, 等. 无人机撒施装置结构设计与试验[J]. 农机化研究, 2025, 47(6): 155－162.
Han Yubao, Ji Jiangtao, He Zhitao, et al. Structural design and experiment of UAV spreading device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(6): 155－162.

[81] 兰玉彬, 韩金钢, 张同升, 等. 正态分布规律变量调节式多功能条播装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 75－88.
Lan Yubin, Han Jingang, Zhang Tongsheng, et al. Design and testing of multifunctional strip-tillage device based on normal distribution regular variable conditioning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 75－88.

[82] 王国宾, 张同升, 兰玉彬, 等. 基于变径槽轮的无人机条施装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(7): 13－21.
Wang Guobin, Zhang Tongsheng, Lan Yubin, et al. Strip fertilization device of unmanned aerial vehicle using a variable-diameter grooved wheel [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(7):

13－21.

[83] 吴子敬，杨国平，蔡佳盛，等. 水稻无人机多排型槽式条直播排种装置设计与试验[J]. 中国农机化学报，2025，46(10)：99－106.
Wu Zijing，Yang Guoping，Cai Jiasheng，et al. Design and experiment of multi-row slot stripping direct sowing device for rice UAV [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2025，46(10)：99－106.

[84] 边晓东，樊成赛，陈长卿，等. 基于离散元的无人机撒播装置设计与优化[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2026，7(1)：136－144.
Bian Xiaodong，Fan Chengsai，Chen Changqing，et al. Design and optimization of a drone sowing device based on discrete element method [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanizationt，2026，7(1)：136－144.

[85] 任万军，吴振元，李蒙良，等. 水稻无人机撒肥系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(3)：88－98.
Ren Wanjun，Wu Zhenyuan，Li Mengliang，et al. Design and experiment of UAV fertilization spreader system for rice [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(3)：88－98.

[86] 邓浩. 基于无人机运动风场的水稻撒播装置设计与试验[D]. 成都：四川农业大学，2022：15－20.
Deng Hao. Design and experiment research of rice spreading device based on unmanned aerial vehicle wind field [D]. Chengdu：Sichuan Agricultural University，2022：15－20.

[87] Liu L，Wang G，Lan Y，et al. Predictive model of granular fertilizer spreading deposition distribution based on GA-GRNN neural network [J]. Drones，2024，9(1)：16.

[88] 朱红章，曹佳诚. 第二十二届中国航空测控技术年会论文集[C]. 北京：测控技术杂志社，2025

[89] 胡昊辉. 基于六旋翼无人机的测风系统研究[D]. 长沙：湖南大学，2020：5－8.
Hu Haohui. Research of wind measurement system based on hexcopter [D]. Changsha：Hunan University，2020：5－8.

[90] Subramaniam K，Salim W S I W. A review of experimental approaches for investigating the aerodynamic performance of drones and multicopters [J]. Journal of Advanced Research in Experimental Fluid Mechanics and Heat Transfer，2023，14(1)：1－24.

[91] Rachmawati T S N，Kim S. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) integration with digital technologies toward construction 4.0：a systematic literature review [J]. Sustainability，2022，14(9)：5708.

[92] 郭亚周，刘小川，白春玉，等. 民用轻小型无人机跌落测试试验及损伤特性研究[J]. 振动与冲击，2021，40(22)：175－181，215.
Guo Yazhou，Liu Xiaochuan，Bai Chunyu，et al. Drop test and damage characteristics of civil light and small UAVs [J]. Journal of Vibration and Shock，2021，40(22)：175－181，215.

Current status and future development trends of low-altitude agricultural technology and equipment

Wang Guobin[1, 2, 3]，Fang Tongzheng[1, 2, 3]，Chen Shengde[4, 5]，Ma Cong[6]，Xue Xinyu[7]，Lan Yubin[1, 2, 3, 4, 5*]

(1. *College of Agricultural Engineering and Food Science*，*Shandong University of Technology*，*Zibo* 255049，*China*；2. *Academy of Ecological Unmanned Farm*，*Shandong University of Technology*，*Zibo* 255049，*China*；3. *College of Artificial Intelligence and Low-Altitude Technology*，*South China Agricultural University*，*Guangzhou* 510642，*China*；4. *Shandong University of Technology Sub-center of National Center for International Collaboration Research on Precision Agricultural Aviation Pesticide Spraying Technology*，*Zibo* 255049，*China*；5. *National Center for International Collaboration Research on Precision Agriculnural Aviation Pesticide Spraying Technology*，*Guangzhou* 510642，*China*；6. *Institute of Agricultural Economy and Information Technology*，*Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences*，*Yinchuan* 750000，*China*；7. *Nanjing Institute of Agricultural Mechanization*，*Ministry of Agriculture and Rural Affairs*，*Nanjing* 210014，*China*)

Abstract: As the low-altitude economy joins the ranks of national strategic emerging industries，the integration of low-altitude agricultural technology and equipment into agricultural production continues to deepen，serving as a cornerstone for promoting

agricultural modernization and intelligent agriculture. This paper systematically evaluates the development status and future trends of low-altitude agricultural technology and equipment in China, focusing on policy frameworks, key technologies, and typical application scenarios. First, from the perspective of aerial platforms and intelligent control, the paper summarizes the current development of multi-rotor, single-rotor, and hybrid unmanned aerial vehicles (UAVs), and traces the evolution of key technologies in power systems, flight control algorithms, and navigation positioning. Concurrently, the progress of intelligent control technologies is outlined with an emphasis on low-altitude communication, cloud-based management, and multi-UAV coordination. Second, regarding low-altitude sensing and precision operations, the paper highlights the applications of UAV-based remote sensing in crop monitoring, alongside the technological pathways of precision spraying and broadcast sowing, identifying variable-rate operations and intelligent control as pivotal research frontiers. Finally, by examinging the inspection and evaluation systems and standardization frameworks of low-altitude agricultural equipment, the paper identifies existing challenges in operational specifications, quality evaluation, and systematic standards. The analysis reveals that although low-altitude agricultural technology offers significant advantages in operational efficiency and resource utilization, it remains constrained by insufficient equipment adaptability, limited operational stability in complex environments, inadequate multi-source information fusion and weak intelligent decision-making capabilities, and incomplete standard systems. Future research should prioritize multi-source sensing fusion, intelligent control, and data-driven decision-making technologies, while improving standard and evaluation systems, to promote the development of low-altitude agricultural technology toward precision, intelligence, and large-scale applications. This study provides a reference for research, equipment development, and policymaking in the field of low-altitude agriculture.

Keywords: low-altitude agricultural equipment; agricultural UAV; low-altitude sensing; precision operations; intelligent management and control

Foundation items: Ningxia Key Research and Development Plan (2024BBF01013); National Key R&D Program of China (2023YFD2000200)

First Author: Wang Guobin, E-mail: guobinwang@sdut. edu. cn

* **Corresponding Author:** Lan Yubin, E-mail: ylan@scau. edu. cn