DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2026.02.004

丘陵山区低空飞行农业装备应用场景、发展现状及对策建议——以四川省为例

李秋实[1,2], 江启峰[1], 刘环宇[1*], 唐立[1], 杜海[1], 郎方年[1], 陶智[2]

(1. 西华大学,四川成都,610039; 2. 北京航空航天大学,北京市,100191)

摘要:低空飞行农业装备作为低空经济与农业农村融合发展的关键载体,对打造农业新质生产力、构建现代农业生产体系、保障国家粮食安全具有重要战略意义。系统梳理低空飞行农业装备在四川丘陵山区的应用场景与存在问题,阐述四川丘陵山区多种低空农业装备及其配套动力、智能控制与管理技术体系,分析智能植保与精准施药、低空遥感与农情监测、农资与农产品转运、播种施肥与授粉作业、应急保障与物流配送等应用场景,重点剖析其在丘陵山区装备研发制造、智能化作业技术、作业运维等3方面所面临的问题与挑战。从关键技术攻关层面,提出开展全程机械化、智能化作业体系模式与成套装备作业平台集成验证,创制"空天地"一体丘陵山区农机协同作业系统试验验证方法;从智能、绿色、安全3个方面进一步明确低空飞行农业装备技术的发展要求;从优化创新生态体系层面,提出健全人才引进培养机制,构建"平台支撑—人才保障—产业协同"三位一体的产学研发展体系,形成良性循环的低空农业装备产业创新体系,全面提升丘陵山区农机装备科技水平和产业竞争力。通过在四川等典型丘陵山区布局建立全程机械化示范区,开展装备试验验证与技术熟化,加强基层操作人员培训,为形成可复制推广的丘陵山区农业机械化整体解决方案提供方向指南。

关键词:丘陵山区;低空经济;低空飞行农业装备;人工智能;应用场景

中图分类号:S251;S252 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-7217(2026)02-0037-14

李秋实, 江启峰, 刘环宇, 唐立, 杜海, 郎方年, 陶智. 丘陵山区低空飞行农业装备应用场景、发展现状及对策建议——以四川省为例[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2026, 7(2): 37-50

Li Qiushi, Jiang Qifeng, Liu Huanyu, Tang Li, Du Hai, Lang Fangnian, Tao Zhi. Application scenarios, development status, and countermeasures for low-altitude aerial agricultural equipment in hilly region: a case study of Sichuan Province [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2026, 7(2): 37-50

0 引言

2025年4月,中共中央、国务院印发了《加快建设农业强国规划(2024—2035年)》,进一步明确了农业强国的总体要求和实施路径,为农业农村现代化擘画了蓝图[1]。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》把"丘陵山区农业生产高效专用农机"作为制造业核心竞争力提升的重点内容[2]。丘陵山区是我国粮食和特色农产品的重要生产基地,其耕地面积占全国的三分之一,涉及农业人口近3亿人[3]。但丘陵山区耕地呈地块小、形状不规则、坡耕地、高台地、分布零散、基础设施弱等特征,构成了以"小、短、陡、弯、碎"为典型的地貌特质。同时,现代农业机械化体系在丘陵山区耕地应用存在严重"水土不服""农机上山下田难""作业效率低"等问题,导致丘陵山区耕地普遍存在"无好机用、有机难用"[4]。四川作为中国粮食主产区和特色农产品优势区,其农业机械化的发展与国家粮食安全战略息息相关[5],农资上山与农产品下山均严重依赖人力背负,物流成本高,这种"无好机用"的困境,不仅导致了农业生产效率低下、竞争力不足,威胁着区域粮食安全和特色农业的可持续发展。

近年来,以低空空域为载体的"低空经济"迅速发展,已成为新质生产力赋能农业农村现代化的关键引擎[6]。其核心形态在于综合利用低空空域(通常指地面以上300 m以下)及相关航空技术,对传统农业生产、管理与服务体系进行系统性优化与重构[7]。据中国民航局预测,2035年全国低空经济市场规模有望突

收稿日期:2026-01-14 修回日期:2026-03-09

基金项目:国家自然科学基金区域联合基金项目(U24A20141);国家自然科学基金项目(32501805,52102384)

第一作者:李秋实,男,1970年生,重庆人,博士,教授;研究方向为航空发动机气动力学、低空飞行农业装备。E-mail: liqs@xhu.edu.cn

*通信作者:刘环宇,男,1990年生,黑龙江哈尔滨人,博士,副教授;研究方向为低空飞行农业装备、农机自主作业关键技术。E-mail: liuhy0528@163.com

破3.5万亿元。在此背景下,将低空经济与农业农村领域深度融合,是构建现代化农业体系、提升农业综合竞争力、保障国家粮食安全的重要支撑[8]。在此过程中,低空飞行农业装备作为低空经济与农业新质生产力融合的关键载体,凭借其三维空间作业能力与厘米级精准管控技术,正在系统性重构传统农业的生产流程与管理范式[9]。当前,农业无人机作为典型代表,其产业生态日趋成熟。截至2025年6月,全球农业无人机保有量突破50万架,其中中国保有量超30万架,在规模与应用面积上均居世界首位[10]。通过农业无人机与农机作业装备的协同耦合,低空飞行农业装备正成为突破地形地貌限制的技术关键,可实现农机、农资与农产品快速转运及空地一体化作业,在农事作业、物资运输与乡村服务3大领域展现出显著效能,为破解丘陵山区"有机难用"困境提供了创新方案。因此,系统梳理与分析丘陵山区农业作业的现有技术与存在问题,探索适配四川丘陵山区特殊农情的低空飞行农业装备发展模式,具有重要的现实紧迫性。

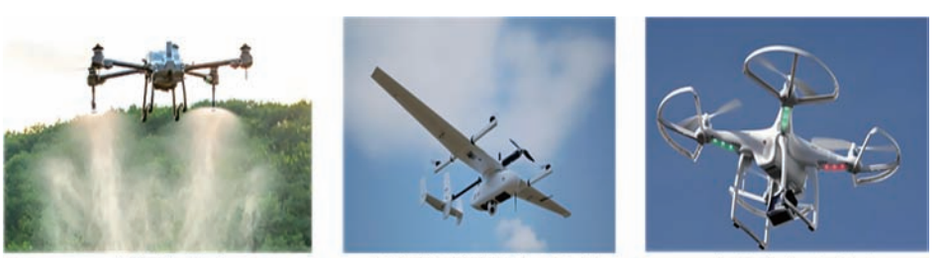
1 丘陵山区低空飞行农业装备关键技术

1.1 低空载运平台适用机型

丘陵山区坡度陡峭、地块细碎分散的自然特征,导致大型、重型农业机械难以进入田间作业,进而造成农业生产效率低和人工成本高。为应对这一挑战,适应四川丘陵山区的专用无人机应运而生,主要包括多旋翼无人机、固定翼与旋翼混合型无人机以及轻量化特种无人机,共同构成了应对多样化地形与农艺需求的立体化装备体系[11],如图1所示。

在精准作业领域,多旋翼无人机是当前应用主力。凭借垂直起降与空中悬停能力,成为陡坡、梯田及零碎地块精准作业的首选,高机动性与厘米级定位精度可高效完成施药与播撒,特别适用于柑橘、茶叶等经济作物的植保,效率较人工作业提升数十倍且安全性高[12]。固定翼与旋翼混合型无人机适用于连绵梯田或大面积缓坡的快速测绘、大范围巡查与应急作业[13]。此外,轻量化特种无人机专注于果园、茶园等高附加值经济作物,通过超低空仿形飞行实现药剂、花粉等的精准投放,代表了精准农业在微观尺度的深化应用[14]。

在作业保障方面,大载重超短距固定翼无人机具备在简易场地极短距起降的能力,在农机具、农资的中远距离快速运输中起到不可替代的作用。目前,载荷100 kg级以下的多旋翼无人机已在水果运输等场景取得成效并逐步推广。但大载重(200~1 000 kg)、长航时(≥2 h)、抗大风(7级风)的低空载运装备的缺失,仍是阻碍在丘陵山区大规模开展农机、农产品、农资转运应用的主要瓶颈。



(a) 多旋翼无人机 (b) 固定翼与旋翼混合型无人机 (c) 轻量化小型无人机

图1 丘陵山区专用无人机分类

Figure 1 Classification of specialized UAV for hilly regions

1.2 低空载运平台动力技术

四川丘陵山区地形起伏剧烈,海拔变化显著,动力系统是决定无人机在丘陵山区任务效能、经济性与可靠性的关键。当前,应用于丘陵山区的无人机动力技术主要围绕电动、油动以及混合动力3大路径发展,如图2所示。

电动机扭矩响应快、调速精度高,使无人机灵敏抵御山地复杂气流,实现精准悬停、稳航线与复杂仿地飞行,是精细化与变量作业的基础。以高能量密度锂电池、无刷电机与智能电调为核心的电动系统,已成为丘陵山区短距、精细化作业(如植保、测绘)中应用最广的动力形式,且结构简单、模块化高、维护便捷。但在丘区严苛环境下,电动系统短板明显:电池续航有限,高端专用锂电池在实验室理想条件下的最大续航约为40~60 min[15],丘区频繁升降与稳姿态控制会大幅消耗电池动力,最终导致有效作业时间与覆盖面积显著下降,效率与成本矛盾突出。

与电动系统相比,活塞式油动系统在长航时、大载荷任务中优势显著。凭借燃料高能量密度,搭载该系统的固定翼无人机续航可超10 h,可携带光电吊舱、合成孔径雷达等重型载荷,在丘陵山区的测绘、灾情评估、边境巡逻及应急投送中具备不可替代的价值[16-18]。但丘陵山区环境下其弊端同样凸显:运行时噪音与振动显著,干扰高分辨率相机、激光雷达等精密传感器的数据采集质量;且系统维护复杂,依赖高品质燃油、润滑油,在偏远地区难以及时获得技术支撑与物资补给。

针对上述问题，混合动力系统应运而生，通过串联、并联等构型，有效融合了电动机的快速响应与内燃机的高能量密度优势，尤其适配丘陵山区跨越山谷、作业点分散且地面保障不足的复杂任务场景。油电混合动力复合翼无人机既保留了垂直起降的灵活性，又兼具固定翼长航时、高速巡航的能力，其续航表现显著优于纯电动平台，同时在载重、场地适应性及全生命周期成本等方面展现出更强的综合竞争力。因此，混合动力正逐渐成为在丘陵山区实现大载重、长航时、低成本等多目标协同优化的关键技术路径。综上，丘陵山区复杂的作业环境决定了低空载运平台动力技术的选择，并非单一技术的最优比拼，而是需基于具体任务需求、经济约束与保障条件，在性能、成本与可靠性之间进行系统权衡的决策过程。

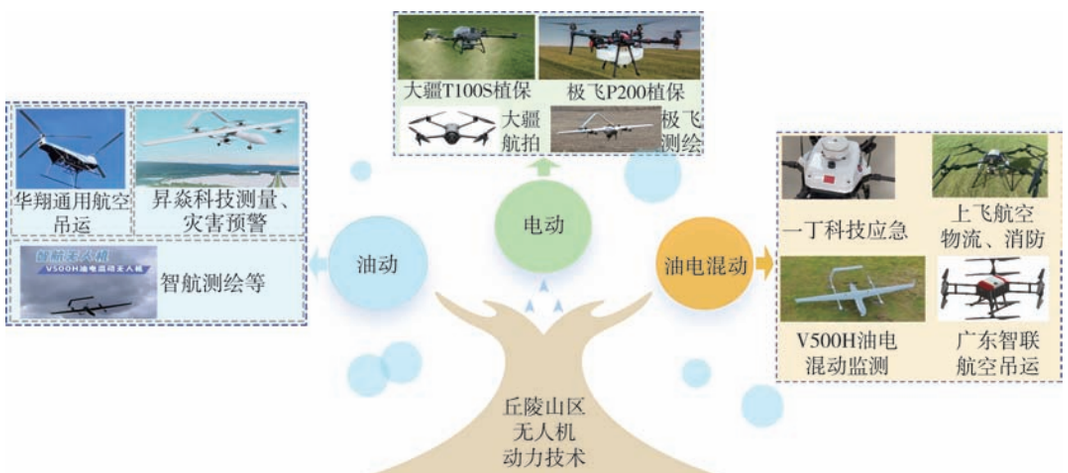


图 2　丘陵山区低空载运平台动力技术

Figure 2　Power technologies of low-altitude carrier platforms in hilly region

1.3　智能控制与管理技术

面对丘陵山区高落差、强阵风扰动及地块高度分散等复杂作业环境，低空飞行农业装备的智能控制与协同管理是维持系统高效安全运行的核心支撑，如图 3 所示。该技术体系主要包括单机智能飞行控制和面向多机集群协同的系统级管控 2 个维度。

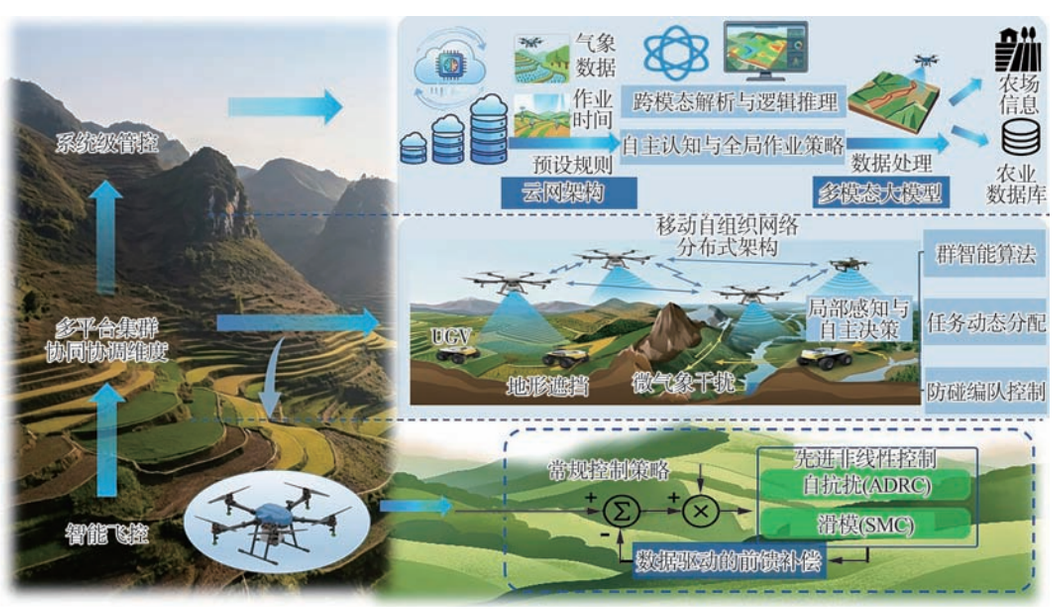


图 3　丘陵山区低空飞行农业装备智能控制与管理技术

Figure 3　Intelligent control and management technologies for low-altitude aerial agricultural equipment in hilly regions

现有低空飞行农业装备的控制主要建立在确定性动力学模型与反馈调节机制之上。随着丘陵山区作业环境复杂度的提升，面对山区气象扰动及载荷变质量效应，常规控制策略在动态响应与抗扰动能力上面临新的挑战。为此，相关技术正逐步向自抗扰、滑模等先进非线性控制理论拓展[19-20]，并引入数据驱动的前馈补偿机制[21]，以提升装备在多源动态扰动下的飞行控制能力。

面对丘陵山区地块细碎且高低起伏的复杂作业需求,单一装备作业效能受限,多平台集群协同作业成为必然趋势。为克服山区地形遮挡与微气象干扰带来的管控瓶颈,集群协同机制正依托移动自组织网络向分布式架构演进。在此框架下,集群装备利用增强的局部感知与自主决策能力,通过群智能算法统筹集群状态实现任务的动态分配,并在多重地形约束下自主完成三维航迹寻优与防碰编队控制[22-24],从而保障复杂作业面上的高效覆盖与飞行安全。然而,山区复杂的微气象与农时需求,使传统基于预设规则的管控模式在决策时效与泛化能力上凸显局限。为此,将多模态大模型技术融入管控中枢正成为本领域的热点,其借助其跨模态解析与逻辑推理能力,使系统有望实现对多维农业场景的自主认知与全局作业策略的动态生成,推动低空管控向认知型自主决策系统跨越[25-28]。

2 丘陵山区低空飞行农业装备应用场景

2.1 智能植保与精准施药

低空植保技术自动化与无人化发展已经成为缓解农村劳动力短缺、实现农药减量增效的关键路径,助力推动现代农业体系转型升级。以四川丘陵山区为例,低空智能植保与精准施药技术的演进并非简单的工具替代,而是一场深刻的系统性创新。总体发展轨迹为3个跃迁阶段。初期(约2015—2018年)以多旋翼无人机平台引入为标志。核心目标是实现从“人背机械”到“机械换人”的跨越,解决丘陵山区“下地难”的基本作业可达性问题,此阶段的研究聚焦于飞行平台稳定性与基础喷洒功能[29]。中期(约2019—2022年)伴随高精度导航、仿地飞行与变量喷洒控制系统的成熟,技术进入精准化与自动化阶段[30]。研究与应用重点转向适应复杂微地形与小气候。通过集成多源传感器生成变量施药处方图,实现了从“均匀喷洒”到“按需喷洒”的质变,显著提升了农药利用率[31]。当前正步入系统智能化与网络化阶段,其特征是构建“感知—决策—执行”一体化闭环。无人机作为空中移动智能节点,借助高光谱、激光雷达实现病虫害早期诊断,依托边缘计算与人工智能算法进行实时决策,并通过5G网络支撑多机集群协同作业,从“单点工具”升级为“智慧农业系统核心组件”。

在技术层面,植保无人机技术应用从单一喷防拓展至实时监测与变量喷施的精准施药技术,重点聚焦于多机协同自主作业系统[32-36]、基于人工智能的病虫害实时识别与变量喷施,以及无人机遥感与农业大数据的深度融合,如图4所示。

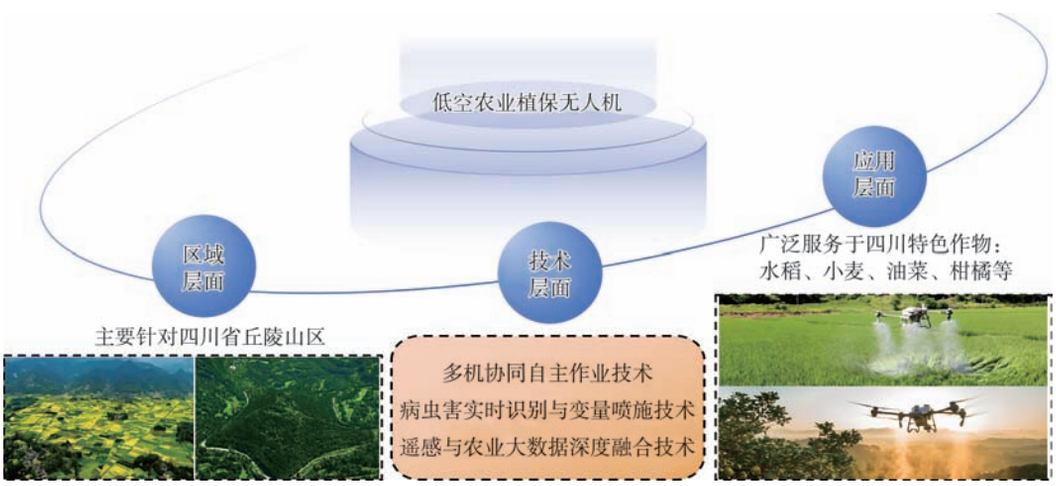


图4 智能植保与精准施药

Figure 4 Intelligent plant protection and precision application

在区域层面,针对其复杂的丘陵与盆地地形,四川开展了广泛的本土化实践与研究[37]。重点集中于适应复杂地形的仿地飞行与智能避障技术[38-40],以及融合精准喷施与绿色防控模式[41],为西南地区乃至全国相似地形的农业现代化提供了重要技术范本。

植保无人机凭借高效、均匀、安全的技术优势,已成为四川农林植保关键装备,峨边马铃薯现代农业园应用无人机植保可节约农药20%~30%[42]。四川多县已实现植保无人机常态化作业,取得防控增效与面源污染控制双重效益,形成以专业化服务组织为主体的“统防统治”等多元生态推广模式,解决了小农户应用难题[43]。大型现代农业园区或合作社的“自营”模式,如眉山市丹橙现代农业园区,实现了植保环节与精准农艺的深度内化融合[44];政府购买的“应急防控”公共服务模式,在应对迁飞性、暴发性病虫害中发挥了不可替代的作用[45]。这些模式的应用产生了显著的综合效益,既降本增效、缓解用工与农时矛盾,又减少农药施用与农业面源污染,助力长江上游生态安全与农业绿

色发展，还解放高危劳动力、催生新型职业（无人机飞手等），支撑乡村人才振兴。

2.2　低空遥感与农情监测

低空遥感与农情监测技术通过搭载多光谱、高光谱及热红外等传感器的无人机平台，已实现地块尺度作物长势[46-47]、病虫害发生动态[48-49]、土壤墒情及养分分布等农情信息的快速、精准获取[50-51]。当前，该领域研究正从单一信息采集向多源数据融合与智能诊断决策方向深入，尤其是在作物表型组学、非生物胁迫早期预警与产量预测等方面展现出重要价值。

全国范围内，技术发展趋势集中于高分辨率遥感影像与人工智能分析的深度融合。利用时序多光谱数据反演叶面积指数、叶绿素含量等关键生理参数，并借助深度学习算法实现病虫害的自动识别与等级评估[52]。此外，无人机遥感与卫星、地面传感网的数据协同，正推动构建“空天地”一体化的农情监测体系，显著提升了大范围、连续性监测的能力与精度，如图 5 所示。

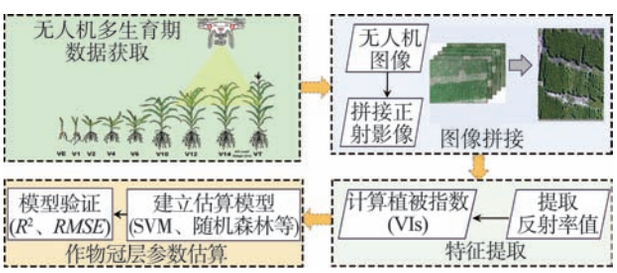


图 5　低空遥感与农情监测

Figure 5　Low-altitude remote sensing and agricultural condition monitoring

在四川盆地丘陵区，利用无人机多光谱遥感技术成功实现了水稻氮素营养的实时监测与精准追肥推荐，以及小麦条锈病的早期识别与发生中心定位[53-54]。近年来，研究进一步拓展至油菜、茶叶、柑橘等特色经济作物，通过构建适应复杂地形的低空遥感技术方案，开展了作物干旱胁迫评估、冠层结构与生物量估算等研究[55-57]，不仅为精细化田间管理提供了依据，也为西南丘陵地区发展智慧农业形成了重要的技术支撑与示范模式。

2.3　农资与农产品转运

在四川丘陵山区，农产品转运长期受困于“地形复杂、道路崎岖”的地形制约，面临田间转运效率低[58]，人力搬运劳动强度大的双重困境[59]。低空飞行农业装备通过“点对点”运输模式，以精准的航线规划与稳定的飞行姿态，突破地理限制，显著提升转运效率，为丘陵山区农产品转运提供了突破性解决方案。目前，市场成熟产品以载荷 100 kg 以下的农用无人机为主。如大疆 T 系列旗舰产品 T100 采用共轴双旋翼设计，最大起飞重量 149.9 kg，吊运能力 85 kg，并具备自动消摆、自动飞往装卸点及重量检测等功能，适应各类农用运输场景；极飞科技 P 系列则通过智能化轨迹录制和精准作业功能，实现两点往返吊运作业，保证作业过程中持续锁定，不脱钩，确保运输过程安全稳定。大载荷无人机正沿电动高精度吊运与混合动力高效载运两条技术路径发展，成为山区农机设备精准吊装与高效运输的重要载体。在电动精准吊运方面，以西华大学研发的 XHU-400 型垂直起降无人机为代表[60]。该机型具备稳定的两点往返吊运能力，作业过程中可实现持续目标锁定与防脱钩，显著提升了农机吊装与短途转运的安全性与作业效率。在混合动力高效载运方面，天目山实验室创制的混动载运无人机是典型代表。其基于动力吹升技术，采用分布式推进短距起降设计，并通过油电混合等多样化能源策略，在实现大载重、长航时运输的同时，兼顾了高能效与低碳排放，为丘陵山区大宗农资与农产品运输提供了新的技术解决方案，如图 6 所示。



(a) 大疆T100无人机　(b) 极飞P150Ultra无人机　(c) 西华大学创制载运无人机XHU-400　(d) 天目山实验室创制混动载运无人机

图 6　低空转运方面应用情况

Figure 6　Application of low-altitude transportation

2.4　播种施肥与授粉作业

飞播技术在四川主要农业产区的应用正处于从示范推广向精准化升级的关键阶段。无人机播种适用于山区陡坡地、零碎地块的油菜、牧草播种[61-62]，如图 7 所示。2020 年，四川农机化技术推广总站联合多部门在成都市温江区首次开展无人机飞播油菜试验演示，通过无人机高效完成 0.17 hm^2 田块的播种施肥，用时不到 2 min，有效解决了湿田作业难题，且播种质量和效率均优于传统机具[63]；2025 年，乐山市夹江县配套 60 余台无人机进行飞播、施肥作业，全县油菜播面 7.07

khm²,其节本增效达20%[64]。推广应用表明飞播技术可破解丘陵山区田块分散、机械下田难的现实困境,为小地块规模化种植提供了技术解决方案。

飞施技术在大田作物与复杂地形区域展现出显著优势,其应用范围涵盖水稻、小麦、玉米等大田作物的追肥作业,以及茶园、果园等地形复杂区域的精准施肥管理。如绵阳三台县永明镇利用无人机开展水稻追肥作业,其作业效率可达5 hm²/h,显著降低生产成本[65],该技术有效避免了传统施肥方式对作物的机械损伤,实现了节本增效与生态保护的双重目标。



图7 播种施肥与授粉作业

Figure 7 Seeding, fertilization, and pollination operations

授粉技术在杂交水稻制种领域,正逐渐成为四川地区的重要创新实践。在四川攀西地区,无人机辅助杂交水稻授粉已取得初步成效,提高了授粉均匀性[66-67]。林金平团队针对水稻制种环节开展专项研究,验证了无人机授粉在提升田间植株整齐度与结实均匀性方面的显著优势,其整体效果优于传统人工辅助授粉模式[68]。何勇课题组进一步在绵阳市3个国家级水稻制种基地县(区)推进技术落地,通过实施“杂交水稻制种全程机械化技术百亩方示范”项目,系统集成无人机施药、喷施植物生长调节剂“920”及辅助授粉等关键环节,构建了机械化制种技术体系[69]。2024年,作为国家级首批水稻制种基地县的梓潼县,率先规模化应用无人机授粉技术,累计投入数百架无人机完成2.2 khm²杂交水稻制种田的授粉作业。实践表明,单台无人机可完成2.7 hm²/h的授粉任务,作业效率相当于20名熟练工人的协同工作量。技术应用不仅显著提升了花粉分布均匀性,使花粉利用率提高,有效促进结实率提升,通过规模化作业实现成本节约,经测算可降低制种成本约1 080元/hm²[70]。

2.5 应急保障与物流配送

低空服务正以创新姿态深度融入乡村生产生活多维度场景,构建起覆盖环境治理、应急保障与物流配送的立体化服务网络,逐步形成“治理+应急+服务”三位一体的综合应用体系,为乡村发展注入新动能,如图8所示。



图8 低空服务类应用情况

Figure 8 Application of low-altitude service-oriented functions

在环境监测领域,低空服务通过无人机的高空视角与高效巡查能力,深度参与秸秆禁烧动态监控、垃圾堆放智能识别、污水排放实时巡查等关键环节,显著提升环境治理精度与效率。“低空+治理”模式已在四川多个县市推广,逐步构建起“空中巡查—数据回传—地面整治”的立体化监管新机制,为乡村环境治理提供了有力保障。

在应急保障领域,搭载照明与监测任务载荷的低空航空器在山区夜间抢险、电力故障排查等应急场景中,可快速飞抵复杂地形区域,提供照明与实时画面回传,显著提升应急响应能力与作业安全水平,这些应用共同构建起四川丘陵山区“低空+农村”的综合服务网络,为提升乡村治理现代化水平提供了重要技术支撑。无人机快速勘灾定损,提升农业保险理赔效率,四川暴雨、冰雹多发区,利用无人机进行灾后作物损失评估,实现快速定损与理赔[71-72]。

低空物流作为农村低空经济发展的关键应用场景,正系统性破解丘陵山区末端配送的“最后一公里”瓶颈。四川通过科学配置多旋翼、垂直起降固定翼及超短距固定翼等差异化无人机机型,已在复杂地形区域初步构建起多机型协同、高适应性的智能低空物流网络。以成都邛崃市南宝山镇桃花社区的常态化运行为例,该模式已展现出显著效能:无人机可直接跨越11 km山区、近1 500 m的海拔高差,将传统车辆22 km、耗时漫长的蜿蜒路径,压缩为10 min的直线航程,单次快递配送仅需约5 min[73]。不仅极大提升了偏远

村落居民获取物资的时效性与便利性，更以可验证的运营数据，为丘陵山区提供了一套经济可行、可复制推广的智慧物流解决方案。

3　存在的问题

尽管低空飞行农业装备在四川丘陵山区展现出广阔的应用前景，但其在规模化、智能化发展进程中，仍面临一系列亟待攻克的技术与产业瓶颈。

3.1　低空飞行农业装备研发短板

当前四川丘陵山区低空飞行农业装备研发面临显著短板，尤其在载荷能力、续航性能及混合动力系统等关键领域，制约了其在复杂农田中的应用。首先，载荷能力不足直接限制了单次作业效能。市场上主流的中小型多旋翼植保无人机载重有限，导致单架次作业面积小、周期延长、综合成本高，难以满足大规模农田高效作业需求。亟需从飞行器构型上实现突破：一方面，重点发展大载重多旋翼平台，提升单位架次的肥料或药液携载量；另一方面，应结合丘陵山区地形复杂、地块零散的特点，加快布局超短距起降固定翼及复合翼大载重飞行器。此类机型可兼顾垂直起降的灵活性与固定翼长航程、大载重的优势，实现田间精准作业与区域高效转运的功能互补。其次，续航性能缺陷严重影响了作业的连续性与经济性。受限于当前电池能量密度，无人机在持续高负载飞行时，有效作业时间普遍难以突破 15～20 min[74]，作业半径与覆盖面积因而被大幅压缩。在复杂地形或大面积作业中，频繁的充电或换电不仅推高了运营成本，也引入了额外的安全风险与作业中断，削弱了其在偏远、基础设施薄弱地区的适用潜力。从根本上解决续航短板，关键在于动力系统的技术革新。发展混合动力系统是明确的技术方向，其核心在于攻克高效增程器、多源能量动态管理、耦合控制等关键技术，形成可靠的“燃油发电＋电池驱动”方案，从而在载重、航时与成本之间达成更优平衡。此外，面向丘陵山区规模化作业的实际需求，空地一体智能作业能力同样滞后，当前装备多孤立运行，缺乏与地面装备、田间设施的高效协同。为此，需突破智能管控关键技术，构建适应复杂地形的机群协同作业架构、空地任务动态分配与路径规划算法，以及基于边缘计算的实时决策系统，实现从单机作业向“空地一体、多机协同、云边联动”的智能化作业模式转变，全面提升复杂农田环境下的作业效率与安全保障能力。

3.2　低空飞行农业装备制造短板

当前，大载重、长航时工业级无人机的整机制造成本高昂，与农业生产对经济性的严苛要求形成显著矛盾，严重制约了其在丘陵山区的规模化推广应用。聚焦至四川无人机装备制造业在产业层面主要存在以下 3 方面短板：产业链协同弱，上游关键环节受制于人。高端芯片、高精度传感器、高能量密度电池、特种复合材料等核心部件仍依赖省外或国外供应，本地配套能力不足。这不仅降低了产业链的响应速度与成本控制能力，也制约了“四川造”无人机整体竞争力的提升。企业梯队结构不优，龙头带动效应不足。省内既缺乏如大疆般的消费级巨头，国家级专精特新企业数量也偏少，且部分企业能级有限，辐射带动力不强。产业生态因此呈现“多而不强、散而不聚”的特点，尚未形成“龙头引领、中小微企业协同共进”的良性发展格局。商业化应用生态不成熟，需求牵引力偏弱。现有场景多集中于测试与示范，在物流、城市管理等规模化、常态化商用领域与领先地区存在明显差距（例如，深圳已开通超过 150 条常态化无人机航线）。应用端拉动不足，导致企业产品迭代与商业模式创新缺乏持续、有效的市场反馈，难以形成“研发—应用—反馈—升级”的闭环。

3.3　低空飞行农业装备作业维护短板

低空飞行农业装备在作业维护环节存在的短板体现在配套保障及维护服务体系等。首先，配套设施与地面维护保障体系薄弱。现有投入多集中于起降场地等“硬件”，而对于保障持续作业的“软设施”如通信、气象监测及区域数据共享平台等投入不足，尤其在偏远山区，4G/5G 网络覆盖不稳定，农业低空气象监测体系尚未形成有效支撑，导致作业调度、电池更换、故障诊断等维护环节效率低下。其次，专业维护服务与人才支撑缺失。农业低空领域缺乏完善的公益性服务与鉴定推广机构，既懂农林技术又具备低空装备操作、维修保养能力的复合型人才严重短缺，全国相关人才缺口高达百万，使得装备的日常保养、故障排除与升级优化难以得到专业技术支持，影响装备可靠运行与作业效率提升。这些短板共同制约了低空飞行农业装备在复杂场景下的作业连续性、安全性与经济性。

3.4　低空飞行农业装备智能化技术短板

四川丘陵山区复杂地形起伏与多变微气象环境对低空飞行农业装备的智能化控制与协同技术提出了严峻挑战。在单机飞控层面，装备的自主感知与决策能力尚显薄弱，现有系统难以有效实现高精度轨迹跟踪与精细仿地、变质量与多源扰动下的鲁棒自适应控制以及毫秒级动态避障与局部规划，制约了丘陵山区场景下飞行安全与作业精度。在系统级管控与集群协同层面，底层三维空间解析与多机调度能力欠缺：一方面，针对山区农田的高精度三维地图与数字孪生场景搭建成本高、难度大，限制了贴合山地高差的精细化空

域划设;另一方面,面对丘陵山区破碎且不连续的作业地块,机群在时空资源动态分配、分布式任务协同与全局交叉防碰撞等集群控制算法上支撑不足,导致多机联合作业的三维智能航路规划难以有效落地。此外,上述智能化技术的实现高度依赖可靠的通信保障,而山区地形的物理遮挡与多径效应导致传统无线网络信号衰减严重、盲区频发,“云—边—端”交互链路的脆弱性直接阻碍了高分辨率三维数据下发与关键控制指令的实时传输。

4 发展建议

4.1 加强关键技术攻关

针对难以进行宜机化改造的丘陵山区“无路可走”、农机转田难、农产品下山难等农机研发、应用难题,面向南方丘陵山区主要粮油作物和大宗特色经济作物,开展大载重低空飞行农业装备,围绕丘陵山区玉米等主要粮食作物和大宗特色经济作物适度规模生产全程机械化推进,开展全程机械化、智能化作业体系模式与成套装备作业平台集成验证,创制“空天地”一体丘陵山区农机协同作业系统试验验证方法,突破大载重低空飞行平台气动布局与结构完整性技术、高功重比升力风扇与高效螺旋桨技术、低成本高功重比电机/发电机技术、高功重比混合电推进技术、轻量化山区智能农机技术、丘陵山区机群组网安全作业管控技术、低空风切变下高安全多冗余智能控制技术、复杂地形地貌下自动精准吊装技术、低空飞行农业装备精准作业技术、低空飞行农业装备轻质材料与快速制造技术,实现“空天地”一体化作业,如图9所示。

在智能化层面,应着力构建“精准感知、智能决策、协同控制”的闭环技术体系。以北斗和新一代通信技术为底座,重点攻克复杂地形下的三维路径规划[75-76]、仿地飞行及多机集群协同控制技术[77-78],实现装备的自主避障与精准变量作业,并同步研发标准化适应川渝丘陵地形的专用雷达与飞行控制算法。同时,需集成多光谱遥感、激光雷达与AI图像识别等农情感知技术,动态获取作物长势与病虫害信息,进而构建农田数字孪生系统,为作业与农艺管理提供高保真数字底盘。此外,必须筑牢关键基础设施与标准,包括建设覆盖全川的省级低空农业高精度地理信息库以统一空间数据基底,以及规划设计基于5G-A/6G的低空专用感知通信网络覆盖方案[79],确保数据实时回传与指令可靠下行,从而支撑大规模机群的协同作业。在绿色化方面,着力研发高能量密度电池、轻量化氢燃料电池及可再生能源辅助供能系统,推动能源高效利用与清洁动力技术革新,为长续航、大载重作业提供动力支撑。在安全化领域,需完善低空飞行农业装备适航审定、安全运行及数据管理标准,构建覆盖研发、制造、作业、监管的全链条标准化体系。

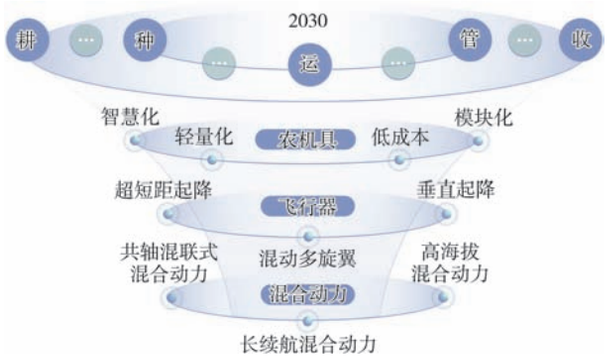


图9 “空天地”一体化高效作业

Figure 9 Integrated “air-space-ground” efficient operation

4.2 优化创新生态体系

在推进农业机械化发展的进程中,四川创新构建“需求牵引+目标导向”双轮驱动工作体系。需求侧维度,深入研究分区域、分产业、分作物、分环节的农机化发展任务,精准识别重点产业和作物的机械化短板,形成清晰的需求清单;目标侧维度,建立“研发—制造—推广—应用”全链条协同机制,组建跨领域联合攻关团队,实施“边研发边熟化”的迭代式新流程。同时,创新科研投入模式,积极探索政府出资揭榜、企业投入合作和科研机构自筹等多元化科研模式,运用数字化设计、虚拟样机等先进研发手段提升研发效率,并通过深化科技创新体制改革,完善政策法规和服务平台建设,促进科研成果与农业生产实际需求紧密结合。

加强高层次农机科技创新人才培养,整合各方资源构建产学研用推协同创新平台。通过设立农机科技创新专项,加大科研经费投入,支持科研平台和企业技术中心建设,针对不同地区农业生产特点开展关键技术攻关。健全人才引进培养机制,明确成果转化收益分配,激发科研人员创新活力,形成良性循环的农机装备产业创新体系,全面提升农机装备科技水平和产业竞争力。

4.3 推动产学研推用融合

为系统推进低空飞行农业装备发展,构建“平台支撑—人才保障—产业协同”三位一体的产学研发展体系。在平台建设方面,需构建“国家级引领、省部级协同、产学研用融合”的创新平台体系,组建低空飞行农业装备国家级创新平台,重点突破大载重、长续航、抗大风等核心技术;增大中央财政年均投入,通过省部共建机制推动技术跨区域转化,力争将研发到落地的周期缩短至两年以内。人才保障方面,则需构建“学历教育+职业培训”双轨体系,支持高校设立“低空农业工程”交叉学科,贯通本硕博培养体系;在职业院校增设

低空飞行农业装备技术专业，重点培养操控、维修、数据分析等技能型人才，同时完善职业资格认证制度，建立农用无人机操作人员准入机制。

产业协同方面，应加大整合高校、科研院所与企业资源，构建“需求—研发—制造—推广—服务”一体化创新链条，通过深化产教融合，推进校企联合精准育才，并借助职业技能竞赛提升从业人员专业水平。鼓励与中国航空学会、中国航空器拥有者及驾驶员协会等专业机构合作，拓展培训内容，创新培训方式，确保培训质量。这一创新体系将有效促进科技成果转化应用，为低空飞行农业装备高质量发展提供全方位支撑，加快实现从技术研发到产业落地的完整闭环。

4.4　完善政策与服务保障

为系统推进低空经济在农业农村领域高质量发展，构建“政策引领—资源整合—创新驱动”三位一体的发展体系。整合现有资源，统筹制定低空经济在农业农村领域发展政策体系，推进低空飞行农业装备及其相关基础设施建设。建立低空飞行农业装备重点项目数据库，实施差异化扶持政策，对具有重大发展潜力和创新优势的项目给予重点资助和优先支持。选择有条件的地区设立政策先行示范区，创新政策补贴和扶持制度，形成可复制推广的区域经验。同时完善金融支持体系，鼓励开发针对性保险产品，构建多元化融资渠道，为低空飞行农业装备及其重点场景发展提供全方位政策保障。加速针对低空飞行农业装备的专项立法进程，深入调研论证，推动出台相关法律，并细化飞行审批、空域精细化管理、作业行为规范、事故调查与处理等核心环节的实施细则与标准。在低空飞行农业装备应用较好或特色农业发展需求迫切区域，选择性划设低空飞行农业装备综合改革试验区。重点围绕飞行许可审批流程优化、数据共享平台搭建、专属保险与高效理赔机制构建等方面进行先行先试。同步建立健全试点成效动态评估与反馈机制，形成“实践探索—评估修正—规范定型—全国推广”的制度创新闭环。通过在四川等典型丘陵山区布局发展示范区，建立全程机械化示范区，开展装备试验验证与技术熟化，加强基层操作人员培训，最终形成可复制推广的国家丘陵山区农业机械化整体解决方案。

参　考　文　献

[1] 邹一南，吴晓宇，张焕.《加快建设农业强国规划(2024—2035年)》搭建统领“三农”工作的战略总纲[J]. 农村金融研究，2025(5)：3－14.
Zou Yinan, Wu Xiaoyu, Zhang Huan. "Plan to Accelerate Building Up China′s Strength in Agriculture (2024－2035)": a strategic framework for coordinating issues relating to agriculture, rural areas, and farmers [J]. Rural Finance Research, 2025(5): 3－14.

[2] 崔思远，曹蕾，陈聪，等. 基于应用场景的丘陵山区农业机械化发展路径研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2024，5(2)：1－8.
Cui Siyuan, Cao Lei, Chen Cong, et al. Path research on the agricultural mechanization development in hilly and mountainous areas based on application scenarios [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(2): 1－8.

[3] 达州市人民政府. 全国丘陵山区现代农机产业投资推介会(四川·达州)暨智能制造产业项目集中签约仪式[EB/OL]. (2024－08－26) [2025－12－19]. https://www.dazhou.gov.cn/news－show－256010.html.

[4] 贵州省人民政府. 关于政协第十四届全国委员会第二次会议第02892号(农业水利类209号)提案会办意见的函[EB/OL]. (2024－10－22) [2025－12－19]. https://www.guizhou.gov.cn/ztzl/jyta/blfw/qgjyta/2024n/qgzxta/202410/t20241022_85965707.html.

[5] 胡志超，张萌，罗伟文，等. 加快中国丘陵山区农机化发展的思考与对策[J]. 农业工程学报，2025，41(14)：39－50.
Hu Zhichao, Zhang Meng, Luo Weiwen, et al. Advancing agricultural mechanization in China′s hilly and mountainous areas: key strategies and technological focus [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(14): 39－50.

[6] 王健，张辉，沈玉君，等. 中国循环农业发展实践与推进路径探究[J]. 农业工程学报，2024，40(22)：12－21.
Wang Jian, Zhang Hui, Shen Yujun, et al. Development practice and promotion route of circular agriculture in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(22): 12－21.

[7] 倪鼎文，康辉，赵世界，等. 农业新质生产力赋能农业绿色生产效率的内在机理与实证检验[J]. 福建农林大学学报(哲学社会科学版)，2025，28(6)：36－53.
Ni Dingwen, Kang Hui, Zhao Shijie, et al. The internal mechanism and empirical test of new quality productive forces empowering agricultural green production efficiency [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Philosophy and Social Sciences), 2025, 28(6): 36－53.

[8] 周昊天，段小梅. 中国式现代化视域下农业新质生产力：理论审视、价值意蕴与未来进路[J]. 重庆工商大学学报(社会科学版)，2025，42(1)：54－64.
Zhou Haotian, Duan Xiaomei. New quality agricultural productive forces in the perspective of Chinese-style modernization: theoretical review, value implication, and future pathway [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Social Science Edition), 2025, 42(1):

54－64.

[9] 闫全涛, 李丽霞, 邱权, 等. 小型农田原状土样采集机器人系统研发与测试[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2024, 5(1): 12－22.
Yan Quantao, Li Lixia, Qiu Quan, et al. Development and test of a small robotic system for in field undisturbed soil sampling [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(1): 12－22.

[10] 中国新闻网. 中国农用无人机保有量超30万架[EB/OL]. (2025－12－31)[2026－01－11]. https://www.chinanews.com/cj/2025/12－31/10543750.shtml.

[11] 张辉洋. 油电混动倾转旋翼无人机PWM整流器研究与设计[D]. 海口: 海南大学, 2023.
Zhang Huiyang. Research and design of PWM rectifier for oil-electric hybrid tilting rotor UAV [D]. Haikou: Hainan University, 2023.

[12] 北大荒集团七星农场有限公司. 无人机夏管作业实现水稻精准化管护[N/OL]. 中国农业机械化信息网, 2025－07－21. http://www.amic.agri.cn/secondLevelPage/info/218/206905.

[13] Walkera. 载物无人机厂家, 大载重长续航无人机品牌[EB/OL]. (2024－04－25)[2026－01－11]. https://entrance.walkera.com/index.php?id=2097.

[14] 魏堂伟, 张津诚, 王晶, 等. 基于改进YOLOv7的茶叶嫩芽识别模型研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2024, 5(2): 42－50.
Wei Tangwei, Zhang Jincheng, Wang Jing, et al. Study of tea buds recognition and detection based on improved YOLOv7 model [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(2): 42－50.

[15] 头豹研究院. 低空耕者——农业无人机重塑智慧农耕的新范式与未来图景[R/OL]. [2025－11－13]. https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202511191784411203_1.pdf?1763581726000.

[16] 车海威, 张成成, 赵树言. 无人机动力系统综合控制研究[J]. 现代电子技术, 2023, 46(6): 111－117.
Che Haiwei, Zhang Chengcheng, Zhao Shuyan. Research on integrated control of UAV propulsion system [J]. Modern Electronics Technique, 2023, 46(6): 111－117.

[17] Cirigliano D, Frisch A M, Liu F, et al. Diesel, spark-ignition, and turboprop engines for long-duration unmanned air flights [J]. Journal of Propulsion and Power, 2018, 34(4): 878－892.

[18] 中国气象局. 在希望的田野上丨透过三个田间故事—看四川气象为农服务新风向[EB/OL]. (2025－04－02)[2025－12－19]. https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/202504/t20250402_6970252.html.

[19] Hua L, Zhang J, Li D, et al. Fault-tolerant active disturbance rejection control of plant protection of unmanned aerial vehicles based on a spatio-temporal RBF neural network [J]. Applied Sciences, 2021, 11(9): 4084.

[20] Zhu C, Wang Z, Zhang D, et al. Prescribed time backstepping sliding mode control for attitude stabilization of plant-protection UAVs under wind and motor disturbances [J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16: 1689665.

[21] Chen Z, Liu C, Su H, et al. A hybrid disturbance observer for delivery drone′s oscillation suppression [J]. Mechatronics, 2022, 88: 102907.

[22] Liu X, Li G, Yang H, et al. Agricultural UAV trajectory planning by incorporating multi-mechanism improved grey wolf optimization algorithm [J]. Expert Systems with Applications, 2023, 233: 120946.

[23] Liu X, Shao P, Li G, et al. Complex hilly terrain agricultural UAV trajectory planning driven by grey wolf optimizer with interference model [J]. Applied Soft Computing, 2024, 160: 111710.

[24] Arshid K, Krayani A, Marcenaro L, et al. Toward autonomous UAV swarm navigation: a review of trajectory design paradigms [J]. Sensors, 2025, 25(18): 5877.

[25] 郭旺, 杨雨森, 吴华瑞, 等. 农业大模型: 关键技术、应用分析与发展方向[J]. 智慧农业(中英文), 2024, 6(2): 1－13.
Guo Wang, Yang Yusen, Wu Huarui, et al. Big models in agriculture: key technologies, application and future directions [J]. Smart Agriculture, 2024, 6(2): 1－13.

[26] Zhang W, Cai M, Zhang T, et al. EarthMarker: a visual prompting multimodal large language model for remote sensing [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 63: 1－19.

[27] Meng S, Wang Y, Yang C F, et al. Llm-a*: large language model enhanced incremental heuristic search on path planning [C]// Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP 2024, 2024: 1087－1102.

[28] Han S, Wan P, Lian Z, et al. Research on the construction and resource optimization of a UAV command information system based on large language models [J]. Drones, 2025, 9(9): 639.

[29] 孙竹, 顾伟, 崔龙飞, 等. 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, et al. Research status and development trends of key technologies for intelligent plant protection equipment [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(4): 1－23.

[30] 李董, 汤启国, 王红波, 等. 农作物重大病虫害预警与应急防控技术研究现状与趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2025, 6(1): 25－40.

Li Dong, Tang Qiguo, Wang Hongbo, et al. Current status and trends of research on early warning and emergency control technology for major crop pests and diseases [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(1): 25－40.

[31] 谭亮华, 庞嘉, 莫勇, 等. 湖南攸县杂交水稻全程机械化制种关键技术示范与效果[J]. 杂交水稻, 2024, 39(1): 88－92.
Tan Lianghua, Pang Jia, Mo Yong, et al. Demonstration and results of key techniques for whole-process mechanized seed production of hybrid rice in Youxian, Hunan [J]. Hybrid Rice, 2024, 39(1): 88－92.

[32] Guo L, Shu X, Zhu Y. Smart farming with swarm intelligence: hybrid algorithm for optimal multi drone plant protection paths [J]. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2025, 62(2): 215－225.

[33] Wang B, Du X, Wang Y, et al. Multi-machine collaboration realization conditions and precise and efficient production mode of intelligent agricultural machinery [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024, 17(2): 27－36.

[34] Hu P, Zhang R, Yang J, et al. Development status and key technologies of plant protection UAVs in China: a review [J]. Drones, 2022, 6(11): 354.

[35] Li J, Ren W. A multi-machine cooperation full coverage path planning method in agriculture [C]// 2023 4th International Seminar on Artificial Intelligence, Networking and Information Technology (AINIT), IEEE, 2023: 713－716.

[36] Zhou D. Swarm intelligence-based Multi-UAV cooperative coverage and path planning for precision pesticide spraying in irregular farmlands [C]// 2025 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Automation Control (AIAC), IEEE, 2025: 395－398.

[37] 四川省农业农村厅. 聚焦四大领域发力 四川加快农业领域低空经济发展[EB/OL]. (2025－04－22)[2026－01－11]. https://nynct.sc.gov.cn/nynct/c100630/2025/4/22/af1aacfa257f453383051a339c7440d1.shtml.

[38] Wang L, Lan Y, Zhang Y, et al. Applications and prospects of agricultural unmanned aerial vehicle obstacle avoidance technology in China [J]. Sensors, 2019, 19(3): 642.

[39] Wang D, Li W, Liu X, et al. UAV environmental perception and autonomous obstacle avoidance: a deep learning and depth camera combined solution [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 175: 105523.

[40] Li J, Xiong X, Yan Y, et al. A survey of indoor uav obstacle avoidance research [J]. IEEE Access, 2023, 11: 51861－51891.

[41] Wang Y, Jia W, Ou M, et al. A review of orchard canopy perception technologies for variable-rate spraying [J]. Sensors, 2025, 25(16): 4898.

[42] 四川省农业农村厅. 宜宾市江安县统防统治力促高粱丰收[EB/OL]. (2025－07－18)[2025－12－15]. https://nynct.sc.gov.cn//nynct/c100632/2025/7/18/bf811227a11542589505065c0cbcb8f7.shtml.

[43] 四川省农业农村厅. 乐山市峨边县“保卫”马铃薯 无人机飞防尽显科技范[EB/OL]. (2024－05－07)[2025－11－05]. https://nynct.sc.gov.cn//nynct/c100632/2024/5/7/e2ea3ee629fe42ce8ef4e579ac72128c.shtml.

[44] 四川省农业农村厅. 眉山市丹棱县：无人机飞防作业 助力丹棱农业现代化[EB/OL]. (2020－06－10)[2025－11－05]. https://nynct.sc.gov.cn//nynct/c100632/2020/6/10/5926a29263a140a5a1e2675e1c89b3f8.shtml.

[45] 四川省农业农村厅. 自贡市贡井区打出“病虫防控＋灌溉保障＋技术服务”组合拳力保水稻丰产丰收[EB/OL]. (2025－06－10)[2025－12－11]. https://nynct.sc.gov.cn//nynct/c100632/2025/6/10/c775191f343144d09647b646dfe3b3f8.shtml.

[46] Liu Y, Feng H, Fan Y, et al. Utilizing UAV-based hyperspectral remote sensing combined with various agronomic traits to monitor potato growth and estimate yield [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 231: 109984.

[47] Yang X, Chen J, Lu X, et al. Advances in UAV remote sensing for monitoring crop water and nutrient status: modeling methods, influencing factors, and challenges [J]. Plants, 2025, 14(16): 2544.

[48] Aziz D, Rafiq S, Saini P, et al. Remote sensing and artificial intelligence: revolutionizing pest management in agriculture [J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2025, 9: 1551460.

[49] Mpisane K, Kganyago M, Munghemezulu C, et al. A systematic review of remote sensing technologies and techniques for agricultural insect pest monitoring: lessons for locustana pardalina (Brown Locust) control in South Africa [J]. Frontiers in remote sensing, 2025, 6: 1571149.

[50] Harani P, Gautam S, Joshi S K, et al. Advancements in soil moisture estimation through integration of remote sensing and artificial intelligence techniques [J]. Science of The Total Environment, 2025, 1001: 180503.

[51] Montzka C, Brocca L, Chen H, et al. AI in soil moisture remote sensing [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2025, 146: 105011.

[52] Zhang C, Yi Y, Zhang S, et al. Quantitative analysis of vertical and temporal variations in the chlorophyll content of winter wheat leaves via proximal multispectral remote

sensing and deep transfer learning [J]. Agriculture, 2024, 14(10): 1685.

[53] 李世隆, 许辰一, 王楠, 等. 基于BWO-ELM的水稻氮素无人机高光谱反演研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2024, 5(3): 14-21.
Li Shilong, Xu Chenyi, Wang Nan, et al. Research on rice nitrogen unmanned aerial vehicle hyperspectral inversion based on BWO-ELM [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(3): 14-21.

[54] 马锃宏, 岳佳文, 殷程, 等. 基于不同拍摄角度多幅图像的果园视觉导航[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2024, 5(4): 51-65.
Ma Zenghong, Yue Jiawen, Yin Cheng, et al. Visual navigation in orchard based on multiple images at different shooting angles [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(4): 51-65.

[55] 王天一, 路梦源, 贺刚, 等. 融合植被三维结构与光谱特征的草原地上生物量估算模型[J]. 农业机械学报, 2025, 56(11): 76-83.
Wang Tianyi, Lu Mengyuan, He Gang, et al. Estimation model of grassland above ground biomass integrating three-dimensional structure and spectral characteristics of vegetation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(11): 76-83.

[56] 杜瑞麒. 基于低空遥感数据和过程模型的冬油菜生长和水氮监测方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
Du Ruiqi. Monitoring winter canola growth and water-nitrogen with low-altitude remote sensing and process-based model [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024.

[57] 江永成, 吕蕴娴, 胡根生. 基于无人机遥感图像的茶叶枯病病斑半监督检测方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(11): 441-452.
Jiang Yongcheng, Lü Yunxian, Hu Gensheng. Semi-supervised object detection method for spots of tea leaf blight based on UAV remote sensing images [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(11): 441-452.

[58] 王铁山, 黎丽莎. 丘陵山区农业机械化发展困境与对策: 以贵州省遵义市播州区为例[J]. 农业工程, 2022, 12(10): 17-21.
Wang Tieshan, Li Lisha. Predicament and countermeasures of agricultural mechanization development in hills and mountainous areas taking Bozhou District, Zunyi City, Guizhou Province as an example [J]. Agricultural Engineering, 2022, 12(10): 17-21.

[59] 人民网. 眉山市彭山区:柑橘"搭上"无人机 科技助农庆丰收[EB/OL]. (2025-01-13)[2025-11-05]. http://sc.people.com.cn/n2/2025/0113/c407319-41106623.html.

[60] 西华大学. 自主研发! 西华大学大载重低空飞行平台亮相全国现场会![EB/OL]. (2025-10-10)[2025-11-05]. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MjM5MTAwODkwMA==&mid=2652618969&idx=1&sn=31d5860c9c7697e373620add592f8c45&chksm=bc8eb1bfbd1c9e43d32d7e70e195244e611f5ae64fe7fbcc49f647332367576607 51a467d714&scene=27.

[61] 陶玥玥, 黄萌, 朱赟德, 等. 水田和旱地无人机飞播油菜适宜缓释肥用量[J]. 农业工程学报, 2025, 41(2): 94-102.
Tao Yueyue, Huang Meng, Zhu Yunde, et al. Appropriate amount of the controlled-release fertilizer for aerial-sown rapeseed in paddy and upland field [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(2): 94-102.

[62] 张青松, 张恺, 廖庆喜, 等. 油菜无人机飞播装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 138-147.
Zhang Qingsong, Zhang Kai, Liao Qingxi, et al. Design and experiment of rapeseed aerial seeding device used for UAV [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(14): 138-147.

[63] 四川省农业农村厅. 无人机飞播油菜在成都温江区试飞成功 [EB/OL]. (2020-10-16) [2025-11-05]. https://nynct.sc.gov.cn//nynct/c100632/2020/10/16/51681aaff64c49d29c608dc63fa109f6.shtml.

[64] 四川省农业农村厅. 乐山市夹江县开启数字化种田模式激活农业新质生产力[EB/OL]. (2025-05-30)[2025-11-05]. http://nynct.sc.gov.cn//nynct/c100632/2025/5/30/df9f2d1658054ef19d3b351fdf62aa28.shtml.

[65] 四川省农业农村厅. 绵阳三台植保无人机"飞"进稻田助农增收 [EB/OL]. (2025-08-07) [2025-11-05]. http://nynct.sc.gov.cn/nynct/c100632/2025/8/7/d537aa3b187146b597cf231e66c5c2f2.shtml.

[66] 胡淑芬, 曹昕奕, 邓勇杰, 等. 植保无人机飞行参数对油茶授粉雾滴分布及坐果率的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(20): 92-100.
Hu Shufen, Cao Xinyi, Deng Yongjie, et al. Effects of the flight parameters of plant protection drone on the distribution of pollination droplets and the fruit setting rate of camellia [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(20): 92-100.

[67] 刘爱民, 张海清, 廖翠猛, 等. 单旋翼农用无人机辅助杂交水稻制种授粉效果研究[J]. 杂交水稻, 2016, 31(6): 19-23.
Liu Aimin, Zhang Haiqing, Liao Cuimeng, et al. Effects of supplementary pollination by single-rotor agricultural unmanned aerial vehicle in hybrid rice seed production [J]. Hybrid Rice, 2016, 31(6): 19-23.

[68] 林金平, 任万军, 冯燕, 等. 机械育插秧和无人机技术在

正优 538 制种中的应用[J]. 种子，2020，39(8)：164－166.
Lin Jinping，Ren Wanjun，Feng Yan，et al. Application of mechanical transplanting and unmanned aerial vehicle (UAV) technology in the seed production of rice variety Zhengyou 538 [J]. Seed，2020，39(8)：164－166.

[69] 文民操，朱孔志，谭宜国，等. 杂交水稻全程机械化制种技术在荃优 607 上的应用研究[J]. 杂交水稻，2023，38(4)：109－113.
Wen Mincao，Zhu Kongzhi，Tan Yiguo，et al. Application of whole-process mechanized hybrid rice seed production technology in Quanyou 607 [J]. Hybrid Rice，2023，38(4)：109－113.

[70] 绵阳市农业农村局. 无人机当“红娘”赶花授粉效率高[EB/OL]. (2024－07－23)[2026－01－11]. https://nyncj.my.gov.cn/mysnyncj/c101318/202407/a7747d9706a544948bb425d2d3525ea8.shtml.

[71] 陈进，吴瑕玉，王浩，等. 无人机在四川水稻生产中的应用研究[J]. 四川农业与农机，2025(1)：19－21.

[72] Jozi S D. UAV-based post-disaster damage assessment of buildings using image processing [D]. Edmonton：University of Alberta，2024.

[73] 四川省交通运输厅道路运输管理局. 央视聚焦 | 邛崃：无人机寄递业务助力快递进村[EB/OL]. (2025－05－20)[2026－01－11]. https://jtt.sc.gov.cn/jtt/c102020/2025/5/20/497d585bd2554047b37c35c4892afb04.shtml.

[74] 太平洋科技. 植保无人机续航怎么解决[EB/OL]. (2025－10－15)[2026－01－11]. https://www.pconline.com.cn/zhizao/1996/19964647.html.

[75] Yang D，Liu H. 3D path optimization of UAV based on improved RRT algorithm and artificial potential field method [C]// 2024 7th International Conference on Mechatronics and Computer Technology Engineering (MCTE)，Guangzhou，China，2024：789－792.

[76] Ma X，Gong H，Liu Z，et al. Simulation research on dynamic UAV real-time obstacle avoidance based on interfered fluid dynamical system algorithm [C]// 2025 8th International Conference on Robotics，Control and Automation Engineering (RCAE)，IEEE，2025：386－390.

[77] Sheng J，Chai J，Geng R. Research on autonomous obstacle avoidance algorithm of forest fire reconnaissance UAV based on improved DWA algorithm [C]// 2025 5th International Conference on Artificial Intelligence，Big Data and Algorithms (CAIBDA)，IEEE，2025：1616－1621.

[78] Keyu L，Yonggen L，Yanchi Z. Dynamic obstacle avoidance path planning of UAV Based on improved APF [C]// 2020 5th International Conference on Communication，Image and Signal Processing (CCISP)，IEEE，2020：159－163.

[79] Chen R，Sun Y，Liang L，et al. Joint power allocation and placement scheme for UAV-assisted IoT with QoS guarantee [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology，2021，71(1)：1066－1071.

Application scenarios，development status，and countermeasures for low-altitude aerial agricultural equipment in hilly region：a case study of Sichuan Province

Li Qiushi[1，2]，Jiang Qifeng[1]，Liu Huanyu[1*]，Tang Li[1]，Du Hai[1]，Lang Fangnian[1]，Tao Zhi[2]

(1. *Xihua University*，*Chengdu* 610039，*China*；2. *Beihang University*，*Beijing* 100191，*China*)

Abstract: The deep integration of the low-altitude economy with agricultural and rural development is of strategic importance for enhancing comprehensive competitiveness，building a modern agricultural production system，and strengthening national food security. This study systematically reviews the application scenarios and existing challenges of low-altitude aircraft in the hilly and mountainous regions of Sichuan Province. It elaborates on the various low-altitude carrier platforms and their supporting power systems，as well as the intelligent control and management technology systems deployed in these regions. The study analyzes application scenarios including intelligent plant protection and precision pesticide application，low-altitude

remote sensing and agricultural condition monitoring, transportation of agricultural inputs and products, seeding, fertilization, and pollination operations, as well as emergency support and logistics distribution. Furthermore, it identifies the issues and challenges faced by low-altitude carrier platforms in the hilly regions across three key aspects: equipment R&D and manufacturing, intelligent operational technologies, and operation and maintenance. From the perspective of critical technology breakthroughs, it proposes conducting integrated validation of models for full-process mechanized and intelligent systems alongside complete equipment sets. It also suggests developing a testing and validation method for "air-space-ground" integrated collaborative operation system for agricultural machinery in hilly regions. From the three dimensions of intelligence, greenness, and safety, it further clarifies the development requirements for low-altitude agricultural aviation equipment technology. From the perspective of optimizing the innovation ecosystem, it proposes improving mechanisms for talent introduction and cultivation, establishing a "platform support-talent guarantee-industry collaboration" trinity industry-university-research development system, and forming a virtuous-cycle innovation system for the low-altitude agricultural equipment industry. This approach aims to comprehensively enhance the technological level and industrial competitiveness of agricultural machinery in hilly regions. By establishing full-process mechanization demonstration zones in typical hilly regions such as Sichuan Province, conducting equipment validation and technology maturation, and strengthening training for grassroots operators, it provides directional guidance for developing replicable and scalable integrated solutions for agricultural mechanization in hilly regions.

Keywords: hilly region; low-altitude economy; low-altitude aerial agricultural equipment; artificial intelligence; application scenarios

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Joint Fund Project, U24A20141); National Natural Science Foundation of China (32501805, 52102384)

First Author: Li Qiushi, E-mail: liqs@mail. xhu. edu. cn

* **Corresponding Author:** Liu Huanyu, E-mail: liuhy0528@163. com