

引用格式: 杜佳信, 钟超, 郜亮亮. 低空经济推动农业现代化的路径探索: 国际经验与中国实践[J]. 资源科学, 2025, 47(8): 1718-1731. [Du J X, Zhong C, Gao L L. Pathways for advancing agricultural modernization through low-altitude economy: International experiences and China's practices[J]. Resources Science, 2025, 47(8): 1718-1731.] DOI: 10.18402/resci.2025.08.09

低空经济推动农业现代化的路径探索

——国际经验与中国实践

杜佳信¹, 钟超², 郜亮亮³

(1. 中国人民大学农业与农村发展学院, 北京 100872; 2. 中国社会科学院欧洲研究所, 北京 100732; 3. 中国社会科学院农村发展研究所, 北京 100732)

摘要:【目的】本文旨在系统识别我国农业低空经济在发展过程中所面临的核心制度障碍, 揭示其由试验性技术向系统化发展转型过程中的关键约束机制, 并借鉴国际先进经验, 为我国农业现代化政策路径构建提供理论支持与实践参考。【方法】通过内在逻辑分析与国际经验综述, 围绕农业低空经济技术应用和制度环境展开核心挑战分析, 选取欧盟、以色列、日本、美国、荷兰为典型经济体或国家, 分别分析其在空域管理、技术适配、服务制度、人才支撑与数据平台方面的政策响应路径, 提炼可供我国农业现代化借鉴的制度经验。【结果】精准生产体系重构、资源利用效率提升、技术与制度协同演化、可持续发展范式转型共同推动了农业低空经济的应用边界拓展, 以及农业现代化的多维进展。与此同时, 技术应用的结构性矛盾和制度环境的系统性障碍共同制约了我国农业低空经济的发展潜力。【结论】农业低空经济的高质量发展, 既需突破技术发展的现实瓶颈, 也需构建与之相适应的制度框架与治理体系。应立足我国现实情况, 聚焦规范技术体系建设和优化制度框架设计两个主要维度, 充分发挥低空经济在农业领域的潜力, 为农业现代化注入新动力。

关键词: 低空经济; 国际经验; 农业现代化; 无人机; 发展路径; 高质量发展

DOI: 10.18402/resci.2025.08.09

1 引言

在全球经济持续增长与科技飞速进步的时代背景下, 低空经济的战略地位愈发凸显。2021年2月, 《国家综合立体交通网规划纲要》^[1]首次将“低空经济”概念写入国家规划, 将其作为交通体系的重要组成部分^[2]。2024年政府工作报告中, 低空经济被首次列为新增长引擎, 进一步彰显了其在推动经济转型中的重要作用^[3]。与此同时, 全球气候变化与资源短缺问题日益严峻, 给农业发展带来了前所未有的挑战^[4]。气候变化引发的极端天气与频繁自然灾害, 加之耕地和淡水资源的持续紧张, 迫切需

要更高效、可持续的农业生产路径^[5]。在此背景下, 低空经济凭借其独特优势为农业现代化注入了新的活力, 推动了传统农业生产模式的转型升级。在推动低空经济与农业发展结合的实践过程中, 逐渐形成一系列成熟的发展经验^[2]。例如, 在精准农业、农业生产监测、作物保护等领域, 低空技术的应用显著提高了资源的精准投放与高效利用, 并有效促进了农业向绿色、可持续方向转型^[6]。

低空经济的深度介入, 不仅推动了农业生产力的提升, 更成为促进农业现代化发展的关键动力。当前, 我国在农业现代化建设方面取得了令人瞩目

收稿日期: 2025-03-25; 修订日期: 2025-07-23

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(22 & ZD112); 国家社会科学基金青年项目(23CJL015); 中国社会科学院智库基础研究项目(ZKJC252103)

作者简介: 杜佳信, 女, 河北邢台人, 博士研究生, 研究方向为农业经济。E-mail: dujiixin1220@ruc.edu.cn

通讯作者: 钟超, 男, 安徽阜阳人, 助理研究员, 研究方向为世界经济、绿色经济。E-mail: v_zhongchao@163.com

2025年8月

的成就,尤其在精准农业与农业信息化领域成绩斐然^[7,8]。近年来,无人机技术在我国农业领域的应用范围不断拓展,已成为提升农业生产效率的重要驱动力^[9]。无人机在农业生产各环节的广泛应用显著提高了农业生产效率,并有效降低了农业生产对环境的负面影响^[10]。我国农业长期面临人少、地碎、效低、链短的结构难题,劳动力老龄化与农业机械化边际效应递减并存^[11,12],农业高质量发展的内在压力日益增强^[13]。农业无人机及其所承载的低空经济,不仅能够在喷洒作业、播种施肥、灾害预警、农情监测等方面提供精准、高效、低成本的技术解决方案,更有望成为破解农业劳动替代、组织重构与生态转型的重要支点^[14,15]。数据显示,截至2024年底,全国植保无人机保有量超过25万架,累计服务面积超过26亿亩次^[16],低空经济在农业领域的应用已形成规模效应的雏形。

然而,与快速增长的应用需求相比,我国农业低空经济的发展仍面临一系列深层次障碍。空域制度缺位、技术设备不匹配、农村基础设施薄弱、飞手供给不足、小农经营与社会化服务脱节等问题交织共存,导致农业无人机“能飞不能用、能用难扩散”的结构困境。这一现实凸显出当前农业低空经济从初步普及走向深度融合的转型瓶颈,亟须通过系统性机制设计与政策创新加以破解。已有研究多聚焦于农业无人机的性能优化^[17]、应用场景拓展^[18,19]或单项制度政策分析^[20],尚缺乏对我国农业低

空经济推进障碍进行结构性梳理,并结合国际经验构建可行路径的系统性研究。因此,本文试图回答两个核心问题:①我国农业低空经济发展的瓶颈有哪些?②能否通过国际经验为我国建立适配本土发展的农业低空经济政策体系框架提供借鉴?为此,本文以挑战识别、经验借鉴、路径构建为主线,首先,识别我国农业低空经济的现实障碍;随后,通过对欧盟、以色列、日本、美国、荷兰等具有代表性经济体或国家的经验分析,提炼其在空域管理、技术适配、服务制度、人才支撑与数据平台方面的机制经验;最后,提出基于本土条件的路径建议,旨在推动低空经济与农业现代化的深度耦合,实现农业高质量发展与低空经济战略协同的双重目标。

2 低空经济促进农业现代化的内在逻辑

低空经济作为农业现代化进程中的新兴技术力量,正在以高效的数据获取能力和灵活的作业方式,赋能农业的智能化、精细化转型,凭借其技术集成、平台灵活和服务下沉等优势,在农业生产各环节中展现出良好的应用潜力。其在数据采集、环境监测、精准作业等方面的广泛应用,有效提升了农业生产效率和资源配置水平,成为推动农业现代化的重要支撑手段。本文概述了低空经济促进农业现代化的内在逻辑(图1),精准生产体系重构、资源利用效率提升、技术与制度协同演化、可持续发展

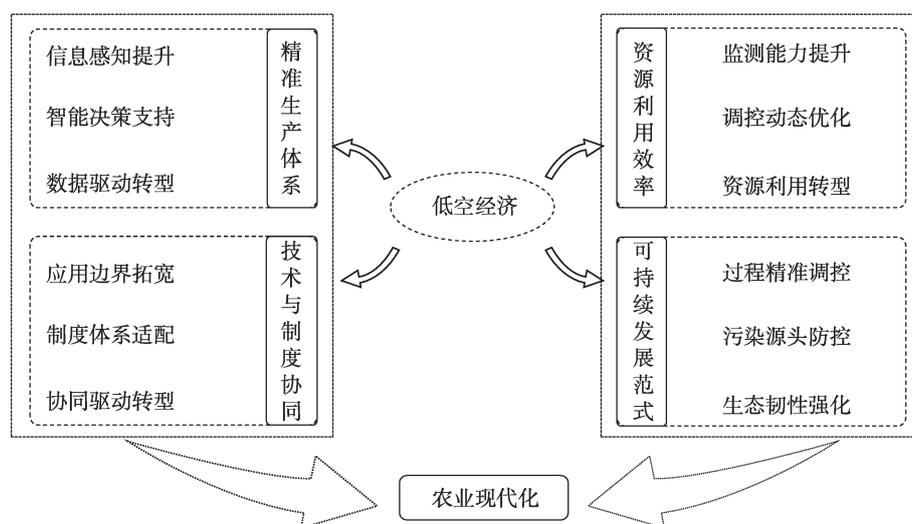


图1 低空经济促进农业现代化的内在逻辑

Figure 1 Intrinsic logic of advancing agricultural modernization through low-altitude economy

范式转型这些因素共同推动了低空经济的应用边界拓展以及农业现代化的多维进展,为相关政策制定和产业发展提供更具针对性的实践参考。

2.1 精准生产体系重构

在传统农业生产中,决策往往依赖种植者长期积累的经验,面对复杂多变的气候、土壤和病虫害环境时,这种经验驱动的方式在信息获取和判断精度上存在明显局限,限制了农业管理效率的提升。低空经济,特别是无人机技术的应用,正在深刻重构农业生产模式,构建起以精准生产体系为核心特征的现代化农业运作框架,具体体现在3个关键环节:①信息感知提升。传统依赖经验的农业生产信息获取方式存在明显局限^[21,22],而搭载多光谱、热成像、高光谱等传感器的无人机平台,能够以较高的时空分辨率获取作物生长、病虫害分布、土壤湿度等关键农情信息^[23],能够实现对农田全貌实时、多维度的精准感知,为科学决策奠定了坚实的数据基础^[24]。②智能决策支持。通过智能系统与机器学习技术^[25],对采集的海量数据进行深度分析,能够将原始数据转化为精准施肥、施药等可执行的精细化管理策略,提升决策的科学性与精准性。③数据驱动转型。信息感知与智能决策的深度整合,最终促成整个生产过程转向数据驱动模式,具体表现为整个生产流程完全依赖实时、精准的数据进行指引和优化资源配置,从而实现效率跃升与成本风险控制。

2.2 资源利用效率提升

低空经济能够驱动资源利用从传统粗放模式向精准高效转变。该转变聚焦于3个核心环节:①监测能力提升。传统农业对土壤水分、作物生长状态等关键变量的监测手段匮乏,依赖经验判断易导致资源配置失衡和投入品浪费^[26]。低空平台凭借高精度、高频次监测能力,实现了对土壤墒情、作物生长态势、生物量变化等核心资源信息动态的实时、精准采集与监测^[27],为科学决策提供了客观依据^[28]。②调控动态优化。基于高精度的动态监测数据,农业管理者能够对田块进行精准分析,这能够支撑差异化的精准作业实施,例如依据作物实际需肥状况进行变量施肥、基于病虫害分布实施靶向精准喷药^[29],这种按需供给、动态响应的资源调控机制,能有效减少肥料、农药、水资源等的无效投入,大幅提

高利用效率。③资源利用转型。低空平台赋能从根本上推动农业资源利用方式从粗放、静态、经验依赖向精准化、动态化、数据驱动转型。这种转型不仅体现在广泛的资源效能提升,还促使农业能源结构朝着更加高效、绿色的方向转型^[30]。

2.3 技术与制度协同演化

农业低空经济的深化发展,核心在于技术创新与制度创新的协同推进和动态匹配。这一过程具体体现在3个关键环节:①应用边界拓宽。技术进步是低空经济在农业中嵌入与扩展的核心驱动^[31]。关键技术的进步(如氢燃料电池提升续航能力、AI算法优化路径规划与变量喷施、eVTOL平台开发等),显著拓宽了低空技术在复杂农业场景中的实际应用边界,为农业作业提供了更高的效率、更强的环境适应能力和更广的服务覆盖范围。②制度体系适配。新型低空技术的规模化应用对现有规则体系构成挑战,亟需配套制度体系的适应性变革与创新^[32]。为应对空域准入、作业安全、数据安全与技术标准等新问题,实践中涌现出地方围绕空域使用、作业合规、数据安全与技术标准的制度探索,这些适配性的制度创新能够降低交易成本、缓解操作风险,并提升农业生产者对低空技术的接受度与信任水平^[33]。③协同驱动转型。技术应用拓展与制度适配创新并非孤立,而是深度交织、循环强化的双向互动过程。技术创新突破既创造应用机会,也提出新规则需求;而制度创新则为技术规模化应用扫清障碍、提供保障,从而催生更深层次的技术需求与应用深化。

2.4 可持续发展范式转型

低空经济为解决传统农业现代化过程中累积的资源环境压力提供了关键赋能^[34],推动农业生产从过度依赖产出效率向可持续发展范式的系统性转型。这一转型聚焦于3个核心维度的优化:①过程精准调控。低空平台提供的高精度、高频次动态监测能力支撑了基于实时数据持续优化调整的管理策略,推动农业治理从粗放的“结果治理”转向精细的“过程调控”^[35]。②污染源头防控。过度依赖化肥农药是农业面源污染的关键成因,依托低空平台获取的精准农情信息可以实现农资投入的按需供给与靶向应用,这种对污染起始链条的有效拦截,

2025年8月

是实现环境损害源头防控的关键。③生态韧性强化。低空平台增强了对早期生态风险的监测与预警能力,使得农业生产者能够更早、更准确识别潜在灾害,及时启动干预措施,这种主动、快速的响应机制有效减少了生态灾害的损失规模与蔓延速度,显著提升了农业生态系统抵抗与恢复能力,保障系统的生态韧性。在生态保护与粮食安全双重目标交织的背景下^[36],低空经济有望为农业系统赋予更强的环境适应能力与协同调控能力,推动农业范式逐步迈向可持续转型^[37]。

3 中国农业低空经济发展的核心挑战

随着低空经济上升为国家重点战略方向,农业作为其关键应用领域之一,已初步具备技术支撑基础与政策关注氛围。然而,相较于城市物流、应急响应等领域,农业低空经济的发展面临更为复杂的制度障碍与结构性制约。这些挑战不仅体现为基础设施与治理机制的滞后,还深层次地嵌入于我国农业的土地制度、组织结构与政策逻辑之中。为深入揭示其内在制约机制,本章从技术应用与制度环境两个维度切入,分别分析技术系统与农业实践之间存在的结构性矛盾,以及制度供给碎片化带来的系统性障碍,以期为后续的政策优化与机制创新提供理论支持与现实依据。

3.1 技术应用的结构性矛盾

首先,农业低空作业平台在环境适应性与作业通用性方面仍存在明显短板。尽管近年来低空技术已具备初步应用基础,农业无人机在机体设计、智能控制与变量施药等方面取得进展,具备自动航线规划与障碍规避等功能^[38],但现阶段主流机型仍难以应对我国复杂多样的农业地貌与作物结构,尤其在丘陵山区、稻作区等地,起降不稳、路径不准、喷洒控制精度不足等问题突出,严重制约其在非大田场景中的应用扩展^[39]。同时,当前机型配置普遍以大田粮食作物为主要适配对象,尚难满足果园、茶园、蔬菜等特色农业场景对空间操作灵活性、感知视角精准性与作业强度差异化的技术需求,导致作业替代率较低,系统运行效率不足^[40]。

其次,基础设施的区域不均衡进一步限制了低空技术系统的高效运行。农业低空平台在高频作业条件下,对能源补给、设备维护与信息传输依赖

程度显著提升^[41],但中西部和丘陵地区普遍存在电力基础薄弱、充电设施缺失、机电配套不足等问题^[42],影响作业平台的续航能力和跨区域调度效率。同时,低空作业系统高度依赖网络通信与空地互联平台,但农村地区通信基础设施落后,基站密度低、信号覆盖不稳,远程路径规划、数据回传与任务监控的实时性难以保障^[43],进一步加剧了技术系统与基础条件之间的错位矛盾。

此外,农业无人机数据的价值尚未有效释放,平台化转型基础薄弱。农业低空作业持续生成大量涵盖作物生长、土壤状态与作业过程的数据资源,具备重构农业信息系统的潜力。但当前数据治理能力滞后,标准体系缺失,导致不同设备和平台间数据难以互联共享,形成“信息孤岛”^[44]。同时,农业数据尚未建立完善的权限划分、资产登记与安全保障机制,权责界限模糊,数据流通、交易与增值受到严重限制^[45]。更深层的问题是,无人机企业多采用“硬件销售+作业外包”模式,缺乏平台战略布局,数据仅服务于即时作业,未形成结构化沉淀,阻碍了农业低空经济向平台型、数据驱动型经济形态的跃迁。

3.2 制度环境的系统性障碍

首先,我国农业低空经济面临的是空域治理体系的制度滞后与碎片化问题。我国现行低空空域治理体系仍延续军民共管的总体格局^[46],空域划设、飞行审批与运行监管职能分别隶属不同部门,权责边界模糊,治理体系碎片化严重^[47],导致农业作业所需的快速调度和弹性响应机制难以构建。特别是在农业无人机作业高度依赖县域临时调度的背景下^[48],地方政府缺乏法定权限与数字化平台支撑^[49],面临“无责可担、无权可行”的治理困境。同时,空域划界模糊、审批流程复杂、应急机制缺失等制度性障碍^[50],使农业作业效率长期处于低位。此外,现行空域审批机制以静态报批为主^[51],难以适应农业生产季节性与天气变化的动态需求,农业用途尚未纳入正式空域分类体系^[51],造成制度与实践间的结构性脱节。

其次,农业社会化服务体系的建设滞后,严重制约了低空技术的有效推广。我国农业长期以小规模、分散化经营为基本特征,农户普遍缺乏技术装

备投资能力与专业化作业技能,对外部服务体系存在潜在依赖^[52,53]。然而,当前制度与市场环境下,农业低空服务的组织化供给机制尚未形成稳定且可持续的运行体系。现有低空作业服务主体主要包括基层合作社、小型农业服务公司及部分无人机企业的区域运营商。这些主体普遍存在组织规模有限、服务能力波动较大、技术储备与管理水平不足等问题,作业质量难以保障,难以获得农户持续信任^[54]。同时,服务组织间缺乏统一的准入标准、操作规程与评价激励机制,服务质量和覆盖范围受限^[55]。再者,农业补贴政策主要聚焦设备购置与技术推广,尚未涵盖服务组织运行、能力建设与风险防控等关键环节,财政资源配置的精准性与激励效应明显不足,难以激发服务主体的组织化发展动力^[56]。

此外,农业低空经济的发展依赖大量具备专业技能的操作人才,尤其在无人机高强度、精细化作业的应用背景下,对飞行路径规划、变量施药调控、数据接口操作等技能的依赖程度显著提高。飞手不仅承担前端作业实施任务,还参与设备调试、参数配置与飞行监控,已成为农业低空系统中不可或缺的技术中介角色^[48]。然而,现阶段农业领域在相关人力资源的数量储备与质量保障方面均存在明显短板,成为制约其常态化运行的重要瓶颈。从劳动力结构看,农村地区长期面临操作能力与岗位技能之间的结构性错位。一方面,中老年劳动力难以胜任无人机控制、参数设定等复杂作业;另一方面,青年群体虽然具备技术学习潜力,但农业无人机相关岗位在收入保障、职业晋升路径与职业认同等方面缺乏制度支撑,导致岗位吸附力不足,从业意愿不强。具体表现为,飞手岗位职业身份不清晰、职责边界模糊、岗位稳定性差等问题,进一步削弱了人力资本的可持续供给基础。

4 国际经验与启示

在总结我国农业低空经济技术应用与制度困境的基础上,本文继而转向国际经验的分析与借鉴。考虑到各经济体或国家在农业结构、治理传统与政策体系方面存在显著差异,选取欧盟、以色列、日本、美国、荷兰作为代表性样本,并根据低空经济领域发展特色,从不同角度剖析其制度逻辑、政策机制与运行路径(表1),以期为我国农业低空经济本土化制度体系的构建提供有针对性的路径参考。

4.1 欧盟:基于平台的空域管理体系

随着低空经济的发展,欧盟各成员国在无人机运行管理中面临一系列制度性瓶颈,如空域划设标准不统一、运行审批机制滞后、跨部门协调效率低下等问题。在飞行活动密度逐年上升、空域使用需求趋于多元的背景下,原有以人工审批为主的治理模式逐渐难以适应精细化、动态化的运行管理需求。为破解上述难题,欧盟自2017年起由欧洲航空安全局(European Union Aviation Safety Agency, EASA)牵头,依托欧洲单一天空空管研究项目(Single European Sky ATM Research, SESAR)推进“U-space”体系建设,提出以统一标准、平台赋能、分级运行为核心的数字化空域管理新路径,旨在提升治理响应能力和资源调配效率^[57]。

U-space体系并不新设空域类型,而是在既有空域框架下划定特定运行区域,通过构建统一的数据接口标准与数字服务平台,实现无人机运行的全流程动态监管。该体系将运行服务能力划分为4个层级,涵盖从基础信息注册到复杂空域协同运行的多个方面,逐步推进低空运行的常态化、规范化管理。自2021年起,相关法规在欧盟范围内正式生效,部分成员国探索设立无人机专用走廊、划定灵活空域结构,并上线电子授权系统,为实现系统响应替代

表1 典型经济体或国家农业低空经济发展路径分析

Table 1 Analysis of development pathways of agricultural low-altitude economy in typical economies or countries

国家/地区	核心制度路径	关键机制要素	适应场景
欧盟	空域管理	数字化平台+差异化空域管理+风险等级划分	空域碎片化严重、监管分散地区
以色列	技术适配	无人机模块化设计+AI大数据结合	高精度作物管理、干旱地区、复杂地形的农业应用
日本	服务制度	统一采购+职业培训+责任保险+风险共担	老龄化地区、劳动力紧缺区域
美国	人才支撑	制度化门槛+市场化培训	飞手培训难、职业吸附力弱、技术供给不足地区
荷兰	数据平台	多数据源整合+数据共享+智能决策支持	精准农业、智能灌溉与作物健康监测

2025年8月

人工审批积累了实践经验^[58]。与传统低空管理体制相比,U-space模式呈现出3个方面的突出优势:①通过平台化机制实现空域资源的精细配置和动态调度,增强了区域治理的弹性与效率;②通过标准化的服务接口降低制度适配门槛,提升了多主体协同治理能力;③通过服务能力分级机制,实现了对不同运行复杂度和风险水平的差异化监管,避免了“一刀切”式审批造成的制度冗余。该体系不仅是一种空域运行管理技术方案,更体现了由审批驱动向平台驱动转型的治理范式。

对于我国而言,U-space提供了低空空域治理转型的重要参照。在当前政策推动与技术演进的双重驱动下,农业、物流、电力巡检等无人机高频应用场景日益普及,传统以审批为核心的管理模式暴露出空域划设碎片化、响应周期较长、监管能力尚未健全等结构性矛盾。借鉴U-space的制度理念,未来可在县域或农业功能区等重点区域,探索以数字化平台为基础的低空运行服务体系,推动形成统一标准、分级准入、平台协同的治理框架。通过将低空资源配置纳入现代化公共治理体系,有望构建与低空经济发展相适应的制度环境,为农业现代化注入新的治理动能。

4.2 以色列:智能化与模块化技术适配

以色列作为农业技术创新的领先国家,尽管面临干旱和水资源短缺等挑战,依然通过技术创新和精细化管理,建立了高效且可持续的农业生产体系^[59]。以色列的农业发展高度依赖于资源的高效管理和技术的应用,农业无人机在作物监测、病虫害防治、精准施肥和灌溉等方面发挥了关键作用^[60]。在此背景下,以色列的农业无人机技术展现出良好的适应性,能够有效应对多样化作物和复杂地理条件,推动了无人机技术的广泛应用。

以色列农业无人机系统的核心优势之一在于硬件与算法的动态协同能力,能够根据不同作物种类、生长阶段及环境条件自主优化作业策略。例如,Sensilize公司无人机搭载的Robin-Eye传感器通过八通道多光谱成像技术,实时捕获作物生理数据,结合Robin-Mind云端算法,可自动生成针对柑橘园、葡萄园等不同场景的3D飞行路径、变量喷洒方案^[61];Tevel Aeronautics公司的耕作无人机能够结

合高精度传感技术与人工智能,实时采集作物健康、土壤湿度等信息,并通过人工智能算法分析,为农民提供精准的农业管理决策支持^[62]。这些技术不仅提高了作物产量,还显著减少了资源浪费,推动了精准农业的全面应用^[63]。以色列的农业无人机还配备了智能飞行控制系统,通过传感器实时反馈,自动调整飞行路径,避开障碍物,确保飞行稳定性^[64]。这项技术在丘陵、果园等复杂地形中尤为重要,能够确保无人机在复杂环境中的高效作业与飞行安全。此外,将农业无人机与其他软件及技术平台联合应用,实现了农业生产的高度智能化和精准化^[62]。这些技术集成的应用案例充分展示了以色列在精准农业领域的创新和领先地位。

借鉴以色列的经验对于我国的农业低空经济发展具有重要意义。通过引入模块化设计与智能化技术,我国可以提升农业无人机在复杂作物需求和多样化地理环境中的适应性,显著提高作业精度与效率。此外,增加对农业无人机技术研发的投入,推动无人机与其他农业设备和技术平台的深度整合,将进一步提升我国农业生产的智能化和精准化水平。以色列的经验为我国农业低空经济的可持续发展提供了重要的技术支持和实施路径参考。

4.3 日本:协会主导的服务制度

在农业劳动力持续减少、耕地碎片化与农村人口老龄化等多重因素影响下,日本在农业航空服务体系建设中逐步形成了以行业协会为主导、制度化为保障、公共服务为协同基础的治理机制。其中,日本农林水产航空协会(Japan Agricultural Aviation Association, JAAA)作为核心管理主体,承担了从技术标准制定、机型认证、飞手培训到作业监测与风险保障在内的系统性职责,构建了一套高度制度化、专业化的农业低空作业服务体系^[65]。

具体而言,JAAA主导制定农业无人机的适航标准与作业规范,建立全国统一的飞手职业认证制度,通过集中培训与分级管理提升作业人员的专业能力;结合作物种类和区域特征,由具备资质的作业组织制定飞防作业计划,并实现作业轨迹、喷洒剂量与环境数据的全程数字化记录,确保飞行过程可监控、可追溯;同时,协会联合保险机构设立作业责任险制度,将飞行作业纳入制度化风险管理体

系,有效降低运行不确定性。在此基础上,JAAA与地方政府和农业协同组织,如日本农协(Japan Agricultural Cooperatives, JA),形成了稳定的服务协同机制,实现了制度供给、财政支持与服务落地之间的有效衔接^[66]。这一制度主导型服务体系通过明确的组织分工和职责边界,增强了低空作业的治理能力与服务可持续性,也展现出较强的适应性与复制潜力。

对我国而言,尤其是在中西部丘陵区、边远农业区及老龄化严重地区,面对农户组织化水平低、农业服务市场不健全等问题,可借鉴日本以协会为轴心的治理思路,推动建立区域飞防服务中心,强化无人机设备适配标准、职业飞手管理制度与作业责任保险机制,逐步构建以制度规范为核心、服务组织为支撑、平台协调为手段的低空作业治理结构,在增强作业体系韧性的同时,提升农业现代化过程中低空经济的可及性与可持续性。

4.4 美国:人才支撑体系构建

在无人机商业化快速发展的背景下,美国通过制度规范与市场机制协同推进,逐步构建了以联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)为核心的无人机监管体系。在农业应用领域,FAA制定了涵盖一般商业操作与农业专用作业的双层监管框架,分别依据《联邦法规》第14编(Title 14 of the Code of Federal Regulations)中的Part 107^[67]和Part 137^[68]进行管理。前者要求所有从事商业用途的无人机操作者必须通过远程飞行员知识考试,取得FAA颁发的远程飞行员证书;后者则针对农药喷洒、播种施肥等高风险农业作业,设立专门的农业航空作业许可制度,需接受更严格的用途审查与区域监管。这一分级制度不仅规范了农业无人机操作行为,也为农业领域的无人化作业提供了明确的制度边界与准入门槛。

在飞手培训环节,美国并未设立统一的官方培训机构,而是通过设定明确的考试标准与运行规则,引导市场主体自主开展考前辅导、实操演练与合规指导,形成了“制度设门槛、市场促培训”的职业化供给格局。该体系有效激发了多元化培训供给,提高了从业门槛与规范性水平,在劳动力紧缺背景下为农业飞防作业提供了可持续的人力支撑。

美国经验强调通过统一制度规则确立飞手的职业身份,释放市场活力以补足培训与服务资源,适用于市场机制较为完善的区域,体现了对农业无人机操作者职业化、专业化管理的重视。

随着农业低空经济的快速发展,飞手已逐步成为作业体系中的关键技术支撑力量。然而在我国农村地区,飞手队伍普遍存在专业技能不足、操作能力薄弱以及青年参与度不高等问题,制约了农业无人机作业效率与作业安全的提升。美国围绕飞手职业化所展开的制度探索,如在资质认证、培训机制与作业监管等方面形成的特色体系,为我国构建农业低空经济人才支撑机制提供了重要借鉴。

4.5 荷兰:农业数据平台建设

荷兰的农业生产高度依赖精准农业和技术创新。由于土地面积有限且水资源匮乏,荷兰特别注重高效资源利用与可持续发展,农业科技在荷兰农业中占据重要地位^[69],尤其是数字技术和数据驱动的农业管理,成为推动农业生产力提升的关键因素。荷兰在农业数据平台建设方面的经验,尤其是在将无人机、传感器、卫星数据等多种信息源集成并应用于农业生产,展示了其在精准农业方面的先进实践,为农民提供了全面的农业管理支持,从而提升了农业生产的精确度和可持续性。

AgroDataCube是由荷兰瓦赫宁根大学及研究中心(Wageningen University & Research, WUR)主导,联合荷兰空间研究所(Space Research Organization Netherlands, SRON)和多家农业科技企业共同开发的国家级农业数据平台,其最大优势之一是其强大的多数据源整合能力^[70]。通过整合无人机收集的实时作物数据、气象数据、土壤传感器数据和卫星影像等信息,荷兰的农业平台为农民提供了精准的生产决策支持。农民可以通过数据平台了解作物的生长情况、土壤湿度、气候变化等因素,并据此优化灌溉、施肥和病虫害防治策略。荷兰还注重数据的开放性与共享,推动政府、科研机构和私营企业之间的合作^[71]。通过建立标准化的数据接口,荷兰的农业数据平台促进不同农业主体之间的协作,加速农业技术的创新与应用。此外,荷兰农业数据平台注重智能化决策支持^[72]。通过人工智能和大数据分析,平台能够为农民提供精准的作物管理建

2025年8月

议,并根据实时数据调整农业管理策略。例如,平台可根据土壤湿度和气候数据预测未来几天的用水需求,帮助农民合理安排灌溉,及时发现病虫害迹象,并为农民提供精准的防治方案,避免资源浪费并提高作物产量。

对我国而言,荷兰的经验提供了重要借鉴。我国在推进农业低空经济时,应该加快农业数据平台的建设,推动无人机、传感器、卫星与气象数据等多元化信息的整合,提升农业生产的智能化和精准化水平。此外,推动数据共享与跨部门合作,将有助于加速农业数据平台的建设与应用,提升农业生产效率。荷兰的成功经验表明,通过政府、企业和科研机构的共同努力,能够实现农业数据的最大价值,推动农业低空经济的可持续发展。

5 中国农业低空经济的政策框架与发展路径

在技术应用与制度环境的双重制约下,我国农业低空经济的发展潜力尚未得到充分发挥。推动农业现代化,既需突破农业低空经济发展的现实瓶颈,也需构建与之相适应的制度框架与治理体系。本文从规范技术体系建设与加强制度框架设计两方面提出政策框架,通过“技术规范化”与“制度系统化”两个维度协同发力,旨在为构建我国特色的农业低空经济体系提供发展路径(图2)。

5.1 规范技术体系建设

规范化的技术体系是破解农业低空经济核心

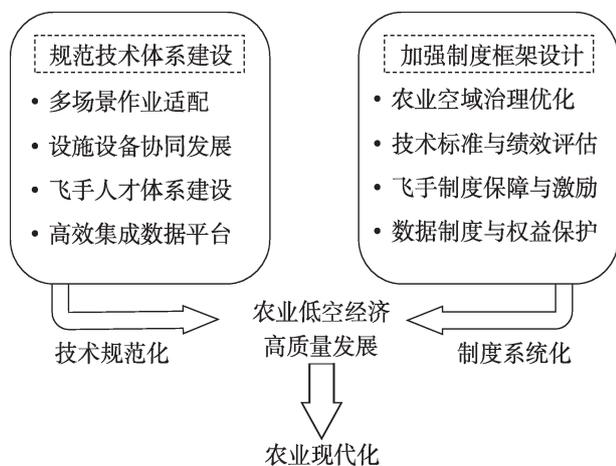


图2 农业低空经济发展路径框架图

Figure 2 Framework of development pathways for agricultural low-altitude economy

瓶颈的关键路径。通过多场景作业适配机制解决应用碎片化,通过基础设施与设备协同化解系统兼容性不足,通过标准化飞手人才体系补足人力资源短板,通过高效集成数据平台打破效能转化瓶颈,即通过四者协同构建标准化、可持续的技术框架。

(1)强化多场景作业适配机制。我国农业地域类型复杂、生产模式多样,低空经济的作业需求具有显著的空间异质性。应基于地域特征构建差异化的作业场景分类体系,推动机型设计与场景需求精准对接。具体可建立4层推进机制:①鼓励科研机构联合企业开展典型地形的机型测试与作业建模,提升设备适配能力。②由地方政府统筹农业布局,绘制县域低空作业图谱,划定重点作业区与空域敏感区。③国家层面制定农业无人机作业适配与路径规划标准,推动标准化供给。④构建涵盖效率、资源节约与生态影响的作业绩效评价机制,强化绿色导向。

(2)推动基础设施与设备协同发展。低空经济的可持续运行依赖于通信、定位、补能等基础设施与设备的协同支撑:①在设备侧,应推动场景适配型、成本可控型机型研发,解决高配置、低适配问题。②在基础设施侧,将低空经济纳入新型农村基础设施重点,优先部署5G网络、差分定位系统、气象监测站和无人机充电桩,增强作业连续性。③在技术保障层面,加快飞控系统、图像识别单元等核心模块国产替代,提升供应链自主性。④在交互支撑层面,关键部件接口与通信协议标准化,提升系统互联能力。

(3)建设标准化飞手人才体系。农业无人机的高质量发展需要稳定、专业的飞手队伍。针对当前存在培训体系不足、职业吸引力弱等问题,应从3个方面系统推进:①建立制度化的职业身份认证与职业路径,明确技能等级与岗位晋升标准。②整合县域教育资源,构建集招生、培训、考核于一体的实训基地,推动中高职教育与飞手技能接轨。③提升岗位吸引力,完善作业责任保险与绩效挂钩激励机制,构建职业安全与成长空间。

(4)搭建高效集成的数据平台。低空经济的长期价值不仅体现在作业效率,更在于其高频生成的数据资源。应推动农业数据平台建设与制度化运

营:①建立作业日志、遥感图像、喷洒路径等数据格式与接口标准,实现数据采集归集一体化。②整合卫星、地面传感与无人机信息,构建区域农情信息系统,拓展病虫害预警、耕地监管等功能。③引导服务企业开发基于数据资产的增值服务产品,释放农业数据要素价值。

5.2 加强制度框架设计

系统化的制度框架是农业低空经济高质量发展的根本保障。通过优化农业空域治理机制,保障低空飞行器有序化飞行;健全技术标准与绩效评估制度,推动农业无人机高质量应用;完善飞手制度保障与激励机制,加强飞手队伍标准化建设;构建数据制度与权益保护机制,明确数据资源规范性管理。各项机制协同联动,能够构建农业低空经济规范化、可持续的制度闭环支撑体系。

(1)优化农业空域治理机制。农业无人机高频、分散的作业特性对空域管理提出精细化要求:①县域层面明确不同高度、区域的飞行用途和限制条件,包括禁飞区、推荐通道等边界信息,避免资源浪费和空域使用冲突。②省级层面推动农业低空作业管理平台建设,实现备案、审批与飞行数据闭环管理。③依托遥感监测、北斗定位与5G通信等手段,建立全过程飞行监测与干预机制,提升安全监管能力。

(2)健全技术标准与绩效评估制度。推进低空经济规范化发展需健全统一的技术与绩效制度体系:①制定农业无人机适配性标准、路径规划规范与喷洒安全规程,提升作业合规性与生态适应性。②构建绩效评估体系,将作业效率、资源节约率、环境影响等指标纳入绿色农业发展考核,推动绩效导向机制落地。

(3)完善飞手制度保障与激励机制。飞手作为低空经济关键人力资源,其职业发展需制度性支持:①建立区域飞手档案库与作业调度平台,提升匹配效率与作业组织能力。②推动作业结果与财政补贴挂钩,提升激励效能。③加强保险备案与信用记录体系建设,强化风险保障与职业规范。

(4)构建数据制度与权益保护机制。数据作为低空经济的新型生产要素,需明确其产权归属与流通规则:①推进数据确权、授权、交易的制度建设,

构建多元主体可参与的市场机制。②制定分级使用、隐私保护与信用评估制度,提升数据要素的可信性与可交易性。③鼓励农业无人机企业向数据服务型组织转型,延展农业价值链功能。

6 结语与展望

本文系统探索了我国低空经济推动农业现代化的内在逻辑、核心挑战,以及相关国际实践经验和启示,并提出了我国特色的政策框架与发展路径。本文发现,通过精准生产体系重构、资源利用效率提升、技术与制度的协同演化、可持续发展范式转型,低空经济正深刻驱动农业现代化的高质量发展,为实现高效、智能、绿色的现代农业提供了强大动能。在深入剖析我国农业低空经济发展中存在的技术应用结构性矛盾与制度环境系统性障碍的基础上,通过借鉴欧盟、以色列、日本、美国、荷兰等经济体或国家的差异化经验,立足我国现实情况,聚焦规范技术体系建设和加强制度框架设计两个主要维度,提出了推动我国农业低空经济高效、可持续发展的综合路径。

未来研究的核心挑战在于深入探究高效协同的创新生态形成机理,揭示其如何驱动农业低空经济的产业价值释放,可重点聚焦于以下方面:

(1)深化保障性制度体系研究。具体而言:①探索服务于低空农业应用的新型保险模式与风险管理机制,为智能装备广泛应用探寻可靠风险应对方案;②聚焦农业低空经济核心技术专利保护机制与商业化转化路径,研究如何激活创新活力并推动成果转化应用;③探讨农业低空经济专项融资工具或资本运作模式,研究如何破解技术研发、示范应用及产业化资金约束的方案。

(2)协同创新网络的机制研究。具体而言:①剖析与先进国家和地区深化农业低空经济经验交流、技术协作及标准互认的发展路径,研究如何促进全球创新网络互融;②深入研究国内“产学研用”协作机制的效能,探寻科研机构、企业、经营主体与政府之间推动低空农业技术落地的实践模式;③考察多层次对接交流平台的运行机制,评估其在促进农业低空经济知识共享与实践经验扩散中的作用与优化策略。

2025年8月

参考文献(References):

- [1] 国务院. 国家综合立体交通网规划纲要[EB/OL]. (2021-02-24) [2025-05-22]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5593440.htm. [State Council of the People's Republic of China. National Comprehensive Three-dimensional Transportation Network Planning Outline[EB/OL]. (2021-02-24) [2025-05-22]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5593440.htm.]
- [2] 张晓兰, 黄伟熔. 低空经济发展的全球态势、我国现状及促进策略[J]. 经济纵横, 2024, (8): 53-62. [Zhang X L, Huang W R. Development of low-altitude economy: Global trend, China's current situation, and promotion measures[J]. Economic Review Journal, 2024, (8): 53-62.]
- [3] 沈映春. 低空经济:“飞”出新赛道[J]. 人民论坛, 2024, (8): 74-79. [Shen Y C. Low-altitude economy: Taking off on a new track[J]. People's Tribune, 2024, (8): 74-79.]
- [4] 汪阳洁, 毛小燕, 汪进贤, 等. 基于随机生产函数的农业气候风险管理效果评估方法与应用[J]. 资源科学, 2024, 46(12): 2434-2446. [Wang Y J, Mao X Y, Wang J X, et al. Stochastic production function-based assessment of the performance of climate risk management in agriculture: Methods and applications[J]. Resources Science, 2024, 46(12): 2434-2446.]
- [5] 徐玉婷, 陈晓月, 吕晓, 等. 可持续发展目标下气候智慧型农业: 概念辨析、基本议题和中国实践启示[J]. 地理研究, 2023, 42(8): 2018-2035. [Xu Y T, Chen X Y, Lv X, et al. Climate-smart agriculture under the Sustainable Development Goals: Concept discrimination, basic issues and implications from China's practice[J]. Geographical Research, 2023, 42(8): 2018-2035.]
- [6] Rejeb A, Abdollahi A, Rejeb K, et al. Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, DOI: 10.1016/j.compag.2022.107017.
- [7] 孙杰, 周力, 应瑞瑶. 精准农业技术扩散机制与政策研究: 以测土配方施肥技术为例[J]. 中国农村经济, 2019, (12): 65-84. [Sun J, Zhou L, Ying R Y. A study on the diffusion mechanisms and policies of precision agriculture technology: A case study of soil testing and formulated fertilization technology[J]. Chinese Rural Economy, 2019, (12): 65-84.]
- [8] 韩旭东, 杨慧莲, 郑风田. 乡村振兴背景下新型农业经营主体的信息化发展[J]. 改革, 2018, (10): 120-130. [Han X D, Yang H L, Zheng F T. Informatization development of new agricultural management entities under the background of rural revitalization[J]. Reform, 2018, (10): 120-130.]
- [9] 王丹, 罗章松. 低空经济赋能农业新质生产力发展: 角色扮演、现实壁垒与破解之道[J]. 农林经济管理学报, 2025, 24(2): 165-173. [Wang D, Luo Z S. Low-altitude economy empowers development of new quality productivity in agriculture: Role playing, realistic barriers and solutions[J]. Journal of Agro-Forestry Economics and Management, 2025, 24(2): 165-173.]
- [10] 曲行柱. 无人机在农业农村现代化中的应用[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(12): 159, 216. [Qu X Z. The applications of unmanned aerial vehicles in the modernization of agriculture and rural areas[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(12): 159, 216.]
- [11] 王海娟. 面向农村人口老龄化的中国农业现代化道路: 适老型农业视角[J]. 理论月刊, 2025, (3): 124-133. [Wang H J. China's path to agricultural modernization towards rural population aging: A perspective of ageing-friendly agriculture[J]. Theory Monthly, 2025, (3): 124-133.]
- [12] 彭超, 张琛. 农业机械化对农户粮食生产效率的影响[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2020, 19(5): 93-102. [Peng C, Zhang C. Assessment of agricultural mechanization on farmers' grain aggregated production efficiency[J]. Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition), 2020, 19(5): 93-102.]
- [13] 李文静, 颜廷武. 推进乡村全面振兴的中国探索与国际启示: 中国国外农业经济研究会2024年会暨学术研讨会综述[J]. 中国农村经济, 2025, (2): 175-185. [Li W J, Yan T W. China's exploration and international insights on advancing comprehensive rural revitalization: Summary of the 2024 annual conference and academic symposium of the China international association for agricultural economics[J]. Chinese Rural Economy, 2025, (2): 175-185.]
- [14] Ayamga M, Akaba S, Nyaaba A A. Multifaceted applicability of drones: A review[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2021, DOI: 10.1016/j.techfore.2021.120677.
- [15] Robinson J M, Harrison P A, Mavoja S, et al. Existing and emerging uses of drones in restoration ecology[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2022, 13(9): 1899-1911.
- [16] 农民日报. 全国植保无人飞机保有量突破25万架: 航空植保为农业插上科技“羽翼”[EB/OL]. (2024-11-27) [2025-05-22]. <https://news.cau.edu.cn/mtnidnew/d26d46e9fcf946ad9174171b9bad178a.htm>. [Farmers' Daily. National Inventory of Agricultural Plant Protection UAVs Exceeds 250,000 Units: Aviation Plant Protection Grows “Technological Wings” for Agriculture[EB/OL]. (2024-11-27) [2025-05-22]. <https://news.cau.edu.cn/mtnidnew/d26d46e9fcf946ad9174171b9bad178a.htm>.]
- [17] 屈旭涛, 庄东晔, 谢海斌. “低慢小”无人机探测方法[J]. 指挥控制与仿真, 2020, 42(2): 128-135. [Qu X T, Zhuang D Y, Xie H B. Detection methods for Low-Slow-Small (LSS) UAV[J]. Command Control & Simulation, 2020, 42(2): 128-135.]
- [18] 彭要奇, 肖颖欣, 郑永军, 等. 无人机光谱成像技术在大田中的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(5): 1356-1361. [Peng Y Q, Xiao Y X, Zheng Y J, et al. Research progress in the application of UAV spectral imaging technology in field[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(5): 1356-1361.]

- troscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(5): 1356–1361.]
- [19] 李继宇, 胡潇丹, 兰玉彬, 等. 基于文献计量学的2001–2020全球农用无人机研究进展[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 328–339. [Li J Y, Hu X D, Lan Y B, et al. Research advance on worldwide agricultural UAVs in 2001–2020 based on bibliometrics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(9): 328–339.]
- [20] 李桦, 彭思喜, 黄蝶君. 中国南方地区植保无人机补贴体系的政策效应及优化策略[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(1): 287–296. [Li H, Peng S X, Huang D J. Policy effect and optimization strategy for plant protection UAV subsidy system in southern China[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(1): 287–296.]
- [21] 陈雯, 陈诚, 高金龙. 迈向知识驱动的乡村内生发展[J]. 地理学报, 2025, 80(2): 259–271. [Chen W, Chen C, Gao J L. Towards rural neo-endogenous development driven by knowledge[J]. Acta Geographica Sinica, 2025, 80(2): 259–271.]
- [22] 辜磊, 冯应斌, 李静静, 等. 山区典型村域耕地边际化过程及驱动因素[J]. 资源科学, 2024, 46(7): 1406–1420. [Gu L, Feng Y B, Li J J, et al. Process and driving factors of farmland marginalization in typical villages in mountainous areas[J]. Resources Science, 2024, 46(7): 1406–1420.]
- [23] 王琛, 刘姗姗. 数据要素发展驱动中国式现代化建设: 赋能基础、实践困境与政策优化路径[J]. 宁夏社会科学, 2024, (6): 114–125. [Wang C, Liu S S. The development of data elements drives the construction of Chinese path to modernization: Empowerment foundation, practical dilemmas and policy optimization paths[J]. Ningxia Social Sciences, 2024, (6): 114–125.]
- [24] Dong T, Shang J, Liu J, et al. Using rapid eye imagery to identify within-field variability of crop growth and yield in Ontario, Canada [J]. Precision Agriculture, 2019, 20(6): 1231–1250.
- [25] Pérez-Ortiz M, Peña J M, Gutiérrez P A, et al. A semi-supervised system for weed mapping in sunflower crops using unmanned aerial vehicles and a crop row detection method[J]. Applied Soft Computing, 2015, 37: 533–544.
- [26] 何可, 宋洪远. 资源环境约束下的中国粮食安全: 内涵、挑战与政策取向[J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 45–57. [He K, Song H Y. China's food security under the constraints of resources and environment: Connotation, challenges and policy orientation[J]. Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition), 2021, 21(3): 45–57.]
- [27] 崔宁波. 复杂系统视角下粮食产业“三链协同”建构及优化策略[J]. 中州学刊, 2025, (1): 40–48. [Cui N B. Construction and optimization strategy of the “three-chain synergy” in the grain industry from the perspective of complex systems[J]. Academic Journal of Zhongzhou, 2025, (1): 40–48.]
- [28] Manfreda S, McCabe M F, Miller P E, et al. On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring[J]. Remote Sensing, 2018, DOI: 10.3390/rs10040641.
- [29] Vega F A, Ramírez F C, Saiz M P, et al. Multi-temporal imaging using an unmanned aerial vehicle for monitoring a sunflower crop [J]. Biosystems Engineering, 2015, 132: 19–27.
- [30] Gonzalez-Dugo V, Zarco-Tejada P J, Fereres E. Applicability and limitations of using the crop water stress index as an indicator of water deficits in citrus orchards[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 198: 94–104.
- [31] Li X, Dang A. Spatial patterns of drone adoption: Insights from communities in southern California[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2024, DOI: 10.1016/j.techfore.2024.123391.
- [32] Stöcker C, Bennett R, Koeva M, et al. Scaling up UAVs for land administration: Towards the plateau of productivity[J]. Land Use Policy, 2022, DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105930.
- [33] van der Merwe D, Burchfield D R, Witt T D, et al. Drones in agriculture[J]. Advances in Agronomy, 2020, 162: 1–30.
- [34] 仇焕广, 黄青. 农业绿色转型与高质量协调发展的理论逻辑与实践[J]. 农业经济问题, 2025, (2): 15–23. [Qiu H G, Huang Q. The green transformation of agriculture and high-quality development: Theoretical logic and practice[J]. Issues in Agricultural Economy, 2025, (2): 15–23.]
- [35] Zhang J, Hu J B, Lian J Y, et al. Seeing the forest from drones: Testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring[J]. Biological Conservation, 2016, 198: 60–69.
- [36] 张佰发, 苗长虹. 黄河流域土地利用时空格局演变及驱动力 [J]. 资源科学, 2020, 42(3): 460–473. [Zhang B F, Miao C H. Spatiotemporal changes and driving forces of land use in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(3): 460–473.]
- [37] 李道亮. 我国农业机器人技术与发展趋势[J]. 人民论坛, 2024, (24): 70–74. [Li D L. The technology and development trends of agricultural robots in China[J]. People's Tribune, 2024, (24): 70–74.]
- [38] 金诚谦, 陈钧龙, 刘政, 等. 大田作业场景中农机协同作业技术发展综述[J]. 农业工程学报, 2025, 41(14): 1–13. [Jin C Q, Chen J L, Liu Z, et al. Review of the developments of cooperative operation technologies for agricultural machinery in field operation scenarios[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(14): 1–13.]
- [39] 于少猛, 闫铭, 王鹏飞, 等. 丘陵山地果园植保无人机三维路径规划[J]. 浙江大学学报(工学版), 2025, 59(3): 635–642. [Yu S M, Yan M, Wang P F, et al. 3D path planning of plant protection UAVs in hilly mountainous orchards[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2025, 59(3): 635–642.]
- [40] 郑永军, 陈炳太, 吕昊墩, 等. 中国果园植保机械化技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 110–124. [Zheng Y J, Chen B T, Lyu H T, et al. Research progress of orchard plant protection mechanization technology and equipment in China[J].

2025年8月

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(20): 110-124.]
- [41] 阮冬燕,周晶,王娟.“创造性毁灭”:农机装备升级引发的维修服务体系重构[J].中国农业大学学报,2024,29(1):240-257. [Ruan D Y, Zhou J, Wang J. “Creative destruction”: The reconstruction of maintenance service system incurred by upgrading of agricultural equipment[J]. Journal of China Agricultural University, 2024, 29(1): 240-257.]
- [42] 吴蒙,周冯琦,程进,等.中国区域终端能源电气化与社会公平耦合协调时空格局及影响因素[J].资源科学,2024,46(9):1793-1806. [Wu M, Zhou F Q, Cheng J, et al. Spatiotemporal patterns and influence factors of coupling coordination between regional final energy electrification and social equity in China[J]. Resources Science, 2024, 46(9): 1793-1806.]
- [43] 余忠义,全春夏,方舟,等.数智农田构建关键技术装备及展望[J].农业工程学报,2024,40(23):1-14. [Yu Z Y, Quan C X, Fang Z, et al. Key technology, equipment and prospect of digital and intelligent farmland construction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(23): 1-14.]
- [44] 张学军,刘法旺,张祖耀,等.低空智能网联体系[J].北京航空航天大学学报,2025,51(6):1793-1815. [Zhang X J, Liu F W, Zhang Z Y, et al. Overview of the low-altitude intelligent networked system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(6): 1793-1815.]
- [45] 李颖明,王子彤,汪明月,等.大数据支撑现代农业产业高质量发展的内在逻辑与政策建议[J].中国科学院院刊,2025,40(1):172-180. [Li Y M, Wang Z T, Wang M Y, et al. Internal logic and policy recommendations of big data to support high-quality development of modern agricultural industry[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2025, 40(1): 172-180.]
- [46] 张兆宁,蔡庆庆.基于系统科学和协同学视角下军民航空管系统融合评价研究[J].系统科学学报,2022,30(3):45-49,66. [Zhang Z N, Qi Q Q. Research on integration evaluation between military aviation management system and civil aviation management system based on the view point of system science and synergetic[J]. Chinese Journal of Systems Science, 2022, 30(3): 45-49, 66.]
- [47] 蒋都都.中国低空经济发展的体系化法治回应:基于多部门法的协同路径[J].湘潭大学学报(哲学社会科学版),2025,49(1):79-87. [Jiang D D. The systematic legal response to the development of China’s low-altitude economy: A collaborative approach based on multiple legal branches[J]. Journal of Xiangtan University (Philosophy and Social Sciences), 2025, 49(1): 79-87.]
- [48] 梅晶哲,戴优升.农业转型过程中的技术剥离:基于稷县植保技术的推广与应用的研究[J].社会,2024,44(4):57-86. [Mei J Z, Dai Y S. Technology disembedding in the process of agricultural transformation: A study on extension and application of plant protection technology in Ji County[J]. Chinese Journal of Sociology, 2024, 44(4): 57-86.]
- [49] 高志宏.发展与安全并重理念下低空飞行安全的监管规则体系构建[J].行政法学研究,2025,(3):32-46. [Gao Z H. Construction of the regulatory rule system for low-altitude flight safety under the concept of concept of equal emphasis on development and security[J]. Administrative Law Review, 2025, (3): 32-46.]
- [50] 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 Y, Wang Y Y, He L W, 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.]
- [51] 高志宏.低空经济空域管理法建设[J].中国法律评论,2025,(4):184-195. [Gao Z H. The construction of the legal system for airspace management in low-altitude economy[J]. China Law Review, 2025, (4): 184-195.]
- [52] 陈义媛.农业生产规模化背景下的社会化服务模式转型:以农资销售模式的转型为例[J].中国农村观察,2025,(1):107-124. [Chen Y Y. Transformation of socialized service models in the context of agricultural production scaling: A case study of agricultural input sales model transformation[J]. China Rural Survey, 2025, (1): 107-124.]
- [53] 孙小宇,杨钢桥.农业社会化服务对耕地撂荒的抑制效应:理论分析与实证检验[J].资源科学,2024,46(8):1554-1569. [Sun X Y, Yang G Q. The inhibition effect of agricultural services on cropland abandonment: Theoretical analysis and empirical tests[J]. Resources Science, 2024, 46(8): 1554-1569.]
- [54] 石敏,陈风波,陈凤娟.农户信任对农业生产环节服务外包的影响:以水稻无人机植保社会化服务为例[J].中国农业大学学报,2024,29(8):314-326. [Shi M, Chen F B, Chen F X. Influence of farmers’ trust on services outsourcing during agricultural production process: Taking the socialized service of rice UAV plant protection as an example[J]. Journal of China Agricultural University, 2024, 29(8): 314-326.]
- [55] 李寅秋,郭冰,张萌.我国农机科技社会化服务体系发展现状研究[J].中国农机化学报,2023,44(3):242-248. [Li Y Q, Guo B, Zhang M. Research on the development status of Chinese agricultural machinery science and technology socialized service system[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(3): 242-248.]
- [56] 薛洲,胡凌啸,曹光乔.推动农业机械化高质量发展:农机补贴政策挑战与改革取向[J].农村经济,2025,(2):181-192. [Xue Z, Hu L X, Cao G Q. Promoting high-quality development of agricultural mechanization: Challenge and reform orientation of agricultural machinery subsidy policies[J]. Rural Economy, 2025, (2): 181-192.]

- [57] EASA. What Is U-space[EB/OL]. (2025-05-23) [2025-05-26]. <https://www.easa.europa.eu/en/what-u-space>.
- [58] Pastor S C. Governance and Control of Data and Digital Economy in the European Single Market: Legal Framework for New Digital Assets, Identities and Data Spaces[M]. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025.
- [59] 赖红兵, 鲁杏. 国外农业现代化和农村水利建设经验对我国的启示[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(11): 266-273. [Lai H B, Lu X. The enlightenment of foreign agricultural modernization and rural water conservancy construction experience in foreign countries to China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(11): 266-273.]
- [60] Gulati A, Zhou Y, Huang J, et al. From Food Scarcity to Surplus: Innovations in Indian, Chinese and Israeli Agriculture[M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2021.
- [61] Israel21c. Drones: The Future of Precision Agriculture[EB/OL]. (2015-06-21) [2025-05-28]. <https://www.israel21c.org/drones-the-future-of-precision-agriculture/>.
- [62] Dronevideos. Israel's Agriculture Drone Expertise Is Spreading Worldwide: Drone Videos & Photos[EB/OL]. (2023-10-25) [2025-05-28]. <https://dronevideos.com/israels-agriculture-drone-expertise-is-spreading-worldwide/>.
- [63] Mandel J. Israeli Technology Pioneers Using Drones, AI and BIG DATA to Farm for the Future[EB/OL]. (2023-06-09) [2025-05-28]. <https://www.timesofisrael.com/israeli-technology-pioneers-using-drones-ai-and-big-data-to-farm-for-the-future/>.
- [64] IsraelAgri. Drones for Precision Agriculture[EB/OL]. (2025-04-27) [2025-05-28]. <https://israelagri.com/drones-for-precision-agriculture/>.
- [65] 孙乐鑫, 陈兵, 赵静, 等. 无人机施药技术在农业生产中的应用研究现状及展望[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(15): 31-42. [Sun L X, Chen B, Zhao J, et al. Research status and prospect on application of UAV spray technology in agricultural production[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(15): 31-42.]
- [66] 尹选春, 兰玉彬, 文晟, 等. 日本农业航空技术发展及对我国的启示[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(2): 1-8. [Yin X C, Lan Y B, Wen S, et al. The development of Japan agricultural aviation technology and its enlightenment for China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2018, 39(2): 1-8.]
- [67] FAA. Small Unmanned Aircraft Systems (UAS) Regulations (Part 107)[EB/OL]. (2020-10-06) [2025-05-26]. <https://www.faa.gov/newsroom/small-unmanned-aircraft-systems-uas-regulations-part-107>.
- [68] FAA. Dispensing Chemicals and Agricultural Products (Part 137) with UAS[EB/OL]. (2025-05-23) [2025-05-26]. https://www.faa.gov/uas/advanced_operations/dispensing_chemicals.
- [69] 赵霞, 姜利娜. 荷兰发展现代化农业对促进中国农村一二三产业融合的启示[J]. 世界农业, 2016, (11): 21-24. [Zhao X, Jiang L N. The implications of developing modern agriculture in the Netherlands for promoting the Integration of the primary, secondary and tertiary industries in rural China[J]. World Agriculture, 2016, (11): 21-24.]
- [70] Top J, Janssen S, Boogaard H, et al. Cultivating FAIR principles for agri-food data[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, DOI: 10.1016/j.compag.2022.106909.
- [71] Spiertz J H J, Kropff M J. Adaptation of knowledge systems to changes in agriculture and society: The case of the Netherlands[J]. NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences, 2011, DOI: 10.1016/j.njas.2011.03.002.
- [72] Janssen H, Janssen S J C, Knapen M J R, et al. AgroDataCube: A Big Open Data Collection for Agri-Food Applications[EB/OL]. (2022-02-22) [2025-05-26]. <https://agrodatacube.wur.nl/>.

Pathways for advancing agricultural modernization through low-altitude economy: International experiences and China's practices

DU Jiaxin¹, ZHONG Chao², GAO Liangliang³

(1. School of Agricultural Economics and Rural Development, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2. Institute of European Studies, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100732, China; 3. Rural Development Institute, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100732, China)

Abstract: [Objective] This study aims to systematically identify the core institutional barriers hindering the development of China's agricultural low-altitude economy, reveal the key constraints during its transition from experimental technologies to systematic development, and draw on advanced international experience, thereby providing theoretical support and practical reference for constructing the policy pathways for China's agricultural modernization. [Methods] Through intrinsic logic analysis and a review of international experiences, this study conducts a core challenge analysis focusing on technological application and institutional environment in agricultural low-altitude economy. The EU, Israel, Japan, the U.S., and the Netherlands are selected as representative economies or countries. Their policy response pathways are analyzed in airspace management, technological adaptation, service systems, talent support, and data platforms. Institutional experiences that can serve as references for China's agricultural modernization are subsequently yielded. [Results] Factors including the restructuring of precision production systems, enhancement of resource utilization efficiency, co-evolution of technology and institutions, and transformation of sustainable development paradigm have jointly driven the expansion of application boundaries of the agricultural low-altitude economy and the multidimensional advancement of agricultural modernization. Meanwhile, structural contradictions in technological application and systemic barriers in the institutional environment constrain the development potential of China's agricultural low-altitude economy. [Conclusion] The high-quality development of agricultural low-altitude economy requires overcoming practical bottlenecks in technological advancement and constructing an adaptive institutional framework and governance system. Based on China's actual conditions, efforts should focus on two dimensions: standardizing the technology system and optimizing institutional framework design. This will fully harness the potential of the low-altitude economy in the agricultural sector and stimulate innovation for agricultural modernization.

Key words: low-altitude economy; international experience; agricultural modernization; unmanned aerial vehicle; development pathway; high-quality development