

从传统农业到智慧农业：低空经济赋能发展的理论机制与实证检验

张军伟¹, 杜建军²

(1. 曲阜师范大学 管理学院, 山东 日照 276800; 2. 上海政法学院 政府管理学院, 上海 201701)

摘要: 智慧农业是农业现代化的重要着力点,也是建设农业强国的战略制高点。文章基于2007—2024年省级面板数据,实证检验了低空经济对智慧农业的赋能作用。研究表明,低空经济对智慧农业有显著促进作用,且经过一系列稳健性检验后结论依然成立。在影响机制方面,低空经济有利于扩大生产规模、提升技术效率、优化产业结构,进而促进智慧农业发展。异质性分析表明,在政策支持力度大的低空空域管理改革试点区域和中东部区域,低空经济对智慧农业的促进作用更显著。拓展性分析表明,低空经济对智慧农业的影响,在空间维度具有正向溢出效应,在时间维度具有长期持续效应。研究结论为科学评估低空经济的效益、优化低空经济赋能智慧农业发展的政策设计、推动智慧农业高效发展提供重要的理论依据与实践参考。

关键词: 低空经济; 智慧农业; 规模经济; 技术效率; 产业结构

中图分类号: F320.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0150(2025)06-0107-15

一、引言

智慧农业作为推进农业现代化的动力引擎,依托物联网、大数据、人工智能技术重塑农业生产全链条,实现农业生产的精准化、智能化和高效化,对提高农业生产效率、保障农产品质量安全、优化资源配置以及促进农业可持续发展具有深远意义。2025年中央一号文件指出,支持发展智慧农业,拓展人工智能、大数据、低空等技术应用场景。然而,智慧农业在发展过程中面临着一系列挑战。在自然禀赋适应方面,我国丘陵山地占耕地面积34%,因地形地势限制农业机械面临作业可及性低的困境,制约了现代农业技术装备的渗透率和覆盖率。在数据精准获取方面,卫星遥感影像时空分辨率低,地面传感器部署成本高昂,难以全面、实时、精准地获取农业生产多维数据,影响农情实时决策。

在此背景下,低空经济作为战略性新兴产业,逐渐崭露头角并展现出对智慧农业的强大赋能潜力。低空经济以低空空域资源为载体,以无人机技术为核心工具,以飞行器设计、飞行控制、数据通信等方面的技术突破为核心特征。近年来,国家密集出台多项顶层设计,将低空经济提升至战略高度。继2021年首次纳入《国家综合立体交通网规划纲要》后,其作为战略性新兴产业被写入2023年中央经济工作会议,并连续两年出现在国务院政府工作报告中。根据《“十五

收稿日期: 2025-09-08

基金项目: 山东省社会科学规划研究一般项目(23CGLJ16); 国家社会科学基金一般项目(22BJL012)。

作者简介: 张军伟(1980—),男,山东济宁人,曲阜师范大学管理学院副教授、硕士生导师;

杜建军(1977—),男,山东淄博人,上海政法学院政府管理学院教授、硕士生导师(通信作者)。

五”低空经济产业发展规划(2026—2030年)》,未来五年将是低空经济从试点探索迈向全国规模化发展的关键跃升期,预示着其产业规模与技术发展将实现前所未有的突破。

在农业现代化领域,低空经济的推广为智慧农业发展注入了新动力。根据国际无人机系统协会(AUVSI)的数据,在不久的将来,80%的无人机将在各种农业领域应用。2024年全国植保无人机保有量已达25.1万架,年作业面积突破26.7亿亩,覆盖全国1/3的耕地(谢愚,2025)。低空技术通过无人机遥感测绘、多光谱成像等三维立体感知系统实现农田生态系统的全息监测与数据闭环管理(庄茁,2024),显著提升病虫害防治与精准施肥(徐政,2025)。在复杂地貌区,其依托垂直起降与路径避障算法(岳立等,2025)展现出独特作业优势,为山地智慧农业发展提供新的破解路径。此外,低空物流的发展还能有效解决农产品运输“最后一公里”难题,提高农产品流通效率,保障农产品的新鲜度和品质。例如,浙江仙居的杨梅通过无人机运输,下山时间从30分钟缩短至3分钟^①。低空经济以其高度集成化、自动化和智能化的技术特征,正在深刻影响农业的各环节,成为加速智慧农业从概念走向大规模应用的关键力量。

低空经济赋能智慧农业作为一个新兴的交叉研究领域,已引发学术界与政策界的广泛关注。通过对现有文献的梳理,本文发现相关研究主要沿以下路径展开。

第一,在国外学术研究层面,学者们较早关注了无人机等低空技术在农业中的应用。早期研究多集中于技术验证与场景探索,如Caputti等(2025)分析了无人机在精准施药、变量施肥方面的效率优势;Aslan等(2022)综述了无人机在露天农田与温室中的各类应用。随着技术发展,研究视角逐渐转向系统集成与数据驱动,El Alaoui等(2024)构建了无人机与物联网、人工智能融合的智慧农业框架,Belcore等(2021)则重点探讨了农业无人机数据在“感知—分析—决策”闭环中的核心价值。这些研究为本文明晰低空经济的技术赋能路径提供了重要的理论借鉴,但其结论多是基于欧美大规模农场的实践,在中国中小农户仍占较大比例、地形复杂多样的情境下,其理论是否适用本土仍需进一步检验。

第二,在国内学术研究层面,虽然相关研究起步较晚,但研究进展较为迅速。已有研究可大致归纳为两类:一类是聚焦典型案例的质性分析,例如,范贝贝和李瑾(2025)对三个典型实践进行多案例分析,揭示智慧农业新质生产力发展的内在机制;庄茁(2024)、徐政(2025)等从理论视角出发,解析低空经济在智能灌溉、病虫害防护等关键环节的应用场景,探讨低空经济推进智慧农业发展的逻辑与路径。另一类是聚焦宏观政策与产业发展的探讨,例如,吕人力(2024)对国际和国内低空经济的创新战略和市场路径进行深入剖析,沈映春和赵雨涵(2024)从学理层面对其核心内涵与产业发展模式给出清晰界定。这些丰富的研究成果,为深入理解低空经济与智慧农业融合发展提供了极具价值的参考依据。

现有文献对本领域研究提供了有益探索,但仍存在局限性。首先,多数讨论集中于低空经济在智慧农业某一特定环节的应用,未能从整体性视角系统剖析其内在的赋能机制,难以描绘整体图景。其次,对于可能的中介变量,现有研究虽有提及,但尚未形成完整的中介变量体系,缺乏对各中介变量传导路径系统性探讨。再次,在研究方法上,现有研究多依赖于典型案例分析(范贝贝和李瑾,2025)或理论分析,缺乏从宏观层面出发对大样本量化数据的系统采集与深度分析。最后,在研究语境上,国外学界已有相关实证研究(Boursianis等,2022; Maddikunta等,2021),但其结论在中国情境下的适用性有限;而立足于本土的实证分析则较为稀缺。基于此,本文旨在弥补上述不足,并由此确立本文的切入点。

基于以上背景,本文旨在深入研究低空经济对智慧农业发展的赋能机制,系统梳理关键中

^①来自低空产业圈:<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1834501198538490843&wfr=spider&for=pc>。

介变量及其作用机制,通过理论分析与实证研究相结合的方法,全面剖析低空经济对智慧农业的赋能作用,弥补现有研究的不足。具体而言,本文将从以下几方面展开研究:一是深入剖析低空经济对智慧农业的赋能机制,从农业生产要素赋能、全产业链赋能两个维度构建理论分析框架;二是通过文献梳理和实证分析,识别并验证影响低空经济赋能智慧农业的关键中介变量,明确其作用机制和传导路径;三是基于空间和时间两重维度分析低空经济影响智慧农业的空间溢出效应和长期持续效应。本文丰富了低空经济与智慧农业融合发展的研究,为低空经济政策制定和智慧农业实践提供有益借鉴,助力我国农业实现高质量、智慧化发展。

二、理论机制与研究假说

(一)低空经济与智慧农业:直接赋能

低空经济以低空空域资源为载体,以无人机技术为核心工具,通过空间突破与技术融合为智慧农业提供全新解决方案,推动农业生产从经验驱动向数据驱动转型。本部分从要素赋能、产业链赋能两大层面构建理论分析框架。

1.低空经济对生产要素赋能。低空经济对智慧农业的影响首先表现为对生产要素的数智化赋能与升级。(1)推动土地要素从经验对象向数字资产转变。低空经济突破传统地面观测的空间局限,构建起“空天地”一体化监测感知网络。这些数据经云端AI处理生成农田“数字孪生”模型,将土地转化为可量化、可预测、可调控的数字化资产。基于该模型的精准作业,为智能农机、智慧生产提供科学指令(庄苗, 2024)。(2)推动劳动力要素从体力依赖到智力主导的转型。植保无人机、巡检无人机等低空智能装备将传统农业劳动力从高强度、重复性的田间作业中解放出来,劳动力转变为无人化装备的操控者、管理者与数据分析者,为智慧农业提供重要的人力资本支撑(顾冬冬和毕洁颖, 2025)。(3)推动信息要素高效精准获取。低空经济依托先进传感器技术(光谱、激光雷达)和智能平台(自主避障),推动农业感知方式从传统的离散静态向连续动态转型,对养分分布、病虫害灾情、作物株高等信息实现高时空分辨、低成本采集,为智慧农业的决策和执行提供关键数据支撑(欧阳日辉, 2025)。

2.低空经济为农业产业链赋能。低空经济以其核心的无人飞行器技术与空基信息平台,正逐渐渗透至农业产业链各环节,通过对生产环节、管理环节与服务环节进行系统性升级,驱动传统农业向智慧农业转型。(1)推动生产环节从粗放化向精准化转型。传统地面农机作业模式难以克服丘陵山区等地形限制,多采用均匀撒施的粗放方式。低空经济实现了厘米级精度的按需变量作业,使得农药、化肥、种子等农资投放从“面状覆盖”转向“点状定位”,大幅提升作业效率与地形适应性(樊振伟, 2025)。(2)推动管理环节从被动应对向主动干预转型。低空经济带来的农业生产的全息感知,使得农业管理(如灌溉、病害防治)从依赖经验的滞后判断,转变为基于数据的科学诊断与风险预警,实现了从“被动应对”到“主动干预”的管理范式升级,显著提升风险管控能力(杜佳信等, 2025)。(3)推动服务环节的社会化和平台化。低空经济催生了专业的无人机服务等新型农业服务业态,通过共享经济模式,中小农户得以低成本、高效率地享受先进的智慧农业服务,有效突破其自有资本与技术能力的限制,加速了智慧农业的推广普及。

综上,低空经济对智慧农业的影响,一方面通过要素赋能推动劳动力要素的智力跃迁,为智慧农业生产提供人力资本支撑;通过注入高价值数据要素,奠定智慧农业的发展基石。另一方面通过产业链赋能:在生产端,通过精准操作执行,直接提升了作业效率与资源利用率;在管理端,通过空基数据驱动,全面革新了农业管理的决策模式;在服务端,通过培育社会化新业态,构建了智慧农业技术普惠推广的有效通道。基于此,本文提出假说H1:

H1: 低空经济对智慧农业有显著促进作用。

(二) 低空经济与智慧农业: 渠道机制

1. 低空经济、规模化与智慧农业。根据马克思生产工具理论, 生产工具革新直接扩展人类改造自然的能力, 经济边界将获得实质性扩展。低空经济促进农业生产规模化表现在以下几方面。第一, 低空经济通过提高作业能力促进农业规模化。无人机作为一种可以大范围长时间工作的机器人, 具有作业持续性、广域覆盖性、快速响应性、空间自由性等特征, 提高了农业生产规模化程度 (Aslan等, 2022)。第二, 低空物流技术实现农产品跨区域、短时间通达, 大幅度扩展销售半径, 有力支撑产地规模化集聚。第三, 低空遥感平台以厘米级分辨率生成农田数字孪生体, 为千亩级农场提供统一墒情监测、病虫害预警及产量预估, 降低规模化管理的边际成本 (Tsouros等, 2019)。这种作业能力、流通半径与管理精度的三重突破, 推动了土地集约化率大幅度提升。

农业规模化对智慧农业发展奠定了规模经济基础。首先, 连片经营形成的标准化农田, 使多光谱监测、变量施肥等精准技术的单位部署成本显著降低, 解决智慧农业技术小规模不经济困境 (杨骞和金华丽, 2025); 其次, 规模化生产产生的海量农业数据流, 为机器学习模型训练提供高质量样本, 驱动决策算法准确率大幅度提升; 更关键的是, 规模化经营主体具备资本实力引进智能灌溉系统、农业机器人等智慧设施, 其智慧技术采纳率是散户的7.8倍 (世界银行2023年报告)。

2. 低空经济、技术效率与智慧农业。低空经济对农业技术效率的赋能作用体现在以下几方面: 第一, 提升作业效率。低空经济通过无人机、低空遥感平台等智能化载体, 显著提升了农业生产的技术效率。在生产作业层面, 农业无人机实现植保作业效率指数级提升; 在物流配送方面, 低空经济突破山区、海岛等地形复杂约束, 高效率完成易腐生鲜农产品的快速递送 (邱超奕, 2024)。第二, 提升数据效率。搭载多光谱/高光谱传感器的低空平台, 以米级分辨率、小时级更新频次动态获取农作物生理参数、土壤墒情及病虫害信息, 数据获取成本较卫星遥感显著降低 (Tsouros等, 2019)。第三, 提升决策效率。边缘计算与AI算法对实时数据的即时处理, 使施肥、精准灌溉等决策响应周期大幅度减少, 构建起“感知—分析—执行”的高效闭环, 实现从“靠天吃饭”到“知天而作”的转变。低空经济带来了作业执行、数据采集与决策响应的三重效率大幅度提升。

技术效率的提升驱动智慧农业发展。其一, 作业效率的几何级增长使精准农艺措施 (如以平方米为单位的变量施药) 具备经济可行性, 推动智能农机装备规模化落地, 为智慧农业提供经济基础 (Maddikunta等, 2021)。其二, 根据西蒙决策理论中“有限理性向程序理性”的进化路径, 得益于数据效率提升, 高频高精度的低空数据流破解了农业数字化的基础瓶颈, 满足大田作物生长建模、灾害预测等算法模型对数据的需求, 为智慧农业提供数据基础。其三, 决策执行闭环将传统“经验驱动”的农事管理升级为“数据驱动”的智能调控。智慧决策触发灌溉、施肥等智能技术合约, 降低合同执行成本 (Boursianis等, 2022)。这种威廉姆森契约治理机制突破了我国小农社会的“差序格局”约束, 为智慧农业提供算法信任基础。

3. 低空经济、产业结构与智慧农业。产业结构演进理论认为, 技术创新是推动产业结构从低级向高级演进的核心动力, 通过拓展产业边界和重构价值链, 实现产业结构的迭代升级。低空经济作为一种以低空飞行器、遥感技术为核心的技术集群, 正成为引领产业结构升级的新生力量 (钟成林和胡雪萍, 2025)。低空经济对农业产业结构的影响, 主要体现在低空技术不仅服务于传统的田间生产环节 (如精准植保、作物监测、播种施肥), 而且还迅速向产业链的上下游

延伸。在上游,无人机高效完成农资(种子、化肥、农药)的精准投放与运输;在下游,无人机物流打通农产品从田间到市场的“最后一公里”,实现生鲜农产品的快速、低损耗流通(刘乐艺, 2025)。同时,低空数据采集(如高光谱成像、多维度环境感知)为农产品加工、仓储、质量安全追溯提供了关键信息支撑。这种拓展,实质上是将低空技术及其产生的海量数据深度融入农业产前、产中、产后全链条,打破了传统农业环节间的壁垒,实现了资源与信息的更高效协同。

产业结构优化全方位驱动智慧农业从概念走向大规模落地应用。一方面,产业结构优化吸纳了智慧农业所需的资本与人才。产业结构优化增加了农业附加值,吸引社会资本和人力资源不断涌入农业生产,这些生产要素的注入有效缓解了智慧农业门槛高的困境。另一方面,产业结构优化为智慧农业提供了集成应用的一体化场景,涵盖研发、制造、应用、服务等各环节。在上游,装备智造企业与农业科研机构联合攻关,推出高性价比本土化的农业智慧设备;在中游,农业企业、合作社、规模农户为农业提供科学种植、智能管理等应用场景(Krishna, 2019);在下游,物流电商平台与智慧农业对接,实现农产品从田间到餐桌的高效流通。产业结构优化加速了智慧农业从概念到落地应用的进程。

综上所述,本文提出假说H2:

H2: 低空经济通过促进生产规模化、提升技术效率、优化产业结构,进而正向影响智慧农业发展。

基于上述研究假说,本文构建低空经济对智慧农业影响的逻辑分析框架(见图1)。

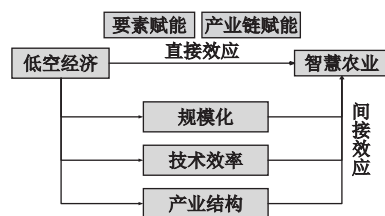


图1 低空经济对智慧农业影响机制

三、研究设计

(一) 模型设定

为了进一步实证考察低空经济对智慧农业发展的促进作用,本文设定基准模型如下:

$$SmartAgr_{it} = \alpha + \beta LowAir_{it} + \gamma Control_{it} + \lambda_i + \mu_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中,被解释变量 $SmartAgr_{it}$ 为第 i 个省(市、自治区)在第 t 年的智慧农业发展水平;核心解释变量 $LowAir_{it}$ 表示低空经济发展水平, $Control_{it}$ 代表一系列控制变量, λ_i 和 μ_t 表示个体固定效应和时间固定效应, ε_{it} 表示随机误差项, α 、 β 和 γ 表示回归系数。

(二) 变量设定

1.被解释变量:智慧农业。为系统衡量其发展水平,本文参考欧定余和廖纤(2024)、牟少岩等(2022)、殷浩栋等(2021)等的研究,基于其内在的技术逻辑与系统构成,从基础支撑、生产经营与发展动力三个层面出发,构建了包含3个一级指标、22个二级指标的综合评价体系(见表1)。

该指标体系既吸纳已有研究的经验,又考虑了与低空经济赋能路径的对应关系。其中,基础支撑层面包含信息、资金、人力和技术等方面。在信息方面,纳入了“长途光缆线路密度”等指标,因为低空无人机产生的高频、海量遥感数据需要稳定、高速的网络进行传输,该指标能有效衡量低空数据流转所需的基础设施支撑水平。在技术方面,纳入了“智慧农业相关专利数量”等指标,契合低空无人机作为新型智能农机装备的核心定位。在生产经营层面,引入了电子商务、龙头企业等指标,旨在捕捉低空物流对农产品流通体系变革,以及低空技术服务催生新型农业经营模式的潜在影响。该指标体系不仅反映了智慧农业的普遍特征,还能体现出因低空技术渗透而带来的智慧农业水平变化,进而确保其在本文研究情境下的适用性与针对性。

表 1 智慧农业发展水平指标体系

一级指标	二级指标	单位	属性
智慧农业 基础支撑	每百万人农业气象观测业务站数	个/百万人	正
	每百人农村互联网宽带接入户数	户/百人	正
	每百户农村移动电话拥有量	台/百户	正
	每百平方公里长途光缆线路密度	km/km ²	正
	每万人农村信息传输、计算机服务和软件业固定资产投资额	万元/万人	正
	每万人农村科学研究、技术服务和地质勘查业固定资产投资	万元/万人	正
	每万人财政农林水事务支出	万元/万人	正
	每百人农村大专以上学历劳动力数量	人/百人	正
	每百万人拥有农业大学数量	个/百万人	正
	每百万人企事业单位农业技术人员数量	个/百万人	正
	每万人联合收获机数量	台/万人	正
	每万人机动脱粒机数量	部/万人	正
	每万人节水灌溉类机械数量	套/万人	正
	每万人智慧农业相关专利数量	项数/万人	正
智慧农业 生产经营	每百万人淘宝村数量	个/百万人	正
	每万人电子商务销售额	亿元/万人	正
	每万人电子商务采购额	亿元/万人	正
	每万人农业产业化重点龙头企业数	个/万人	正
	每万人农业合作社数	个/万人	正
	每万人智慧农业上市公司资产数	万元/万人	正
智慧农业 发展动力	政府工作报告提及智慧农业频率	指数	正
	智慧农业百度搜索指数	指数	正

2.核心解释变量：低空经济。本研究的低空经济变量，其核心是衡量一个地区在发展低空经济上的“综合基础与产业潜力”，而不仅限于当期的应用规模。为全面衡量其发展水平，本文参考刘松林等(2025)、吕人力(2024)、沈映春和赵雨涵(2024)的研究，遵循“产业—政府—市场”的分析框架，利用熵权法构建包含3个一级指标、14个二级指标的评价体系(见表2)。

在选择指标时，注重突出低空经济的“技术驱动”和“产业融合”特征，以确保其能有效表征对智慧农业的赋能潜力。“产业”维度的指标，如“经营范围/专利包含无人机的企业数量”，直接反映了低空经济的技术供给能力与产业活跃度，这是智慧农业获得先进无人机装备、传感器与算法服务的源头保障。“政府”维度的指标，如“颁证机场数量”、“政府工作报告提及次数”，衡量了低空飞行所必需的基础设施保障和政策环境支持，直接决定了低空经济在农业领域应用的可行性与广度。“市场”维度的指标，通过产业链上中下游企业数量，刻画了低空经济的市场生态成熟度与产业协同能力，因为健全的产业链是低空技术得以在农业领域规模化、经济化应用的前提。本指标体系的构建既借鉴了已有文献的研究经验，又紧密结合本研究的核心问题，为实证检验提供高效度的变量测度。

3.中介变量。农业生产规模化在理论上指的是农业生产要素的集中程度和经营规模的扩大，参考李文明等(2015)、徐志刚等(2024)研究，采用户均种植面积来衡量规模化程度。利用数据包络分析(Data Envelopment Analysis, 简称DEA)方法计算农业“技术效率”。其中，投入要素为劳动力、土地、化肥、农药、农业机械、水资源，产出为农业生产总值。参考王力等(2025)和马玉

表 2 低空经济发展水平指标体系

一级指标	二级指标	单位	属性
产业	经营范围是无人机的企业数量	家	正
	专利包含无人机的企业数量	家	正
	经营范围是无人机的专精特新企业数量	家	正
	专利包含无人机的专精特新企业数量	家	正
	经营范围是无人机的高新技术企业数量	家	正
	专利包含无人机的高新技术企业数量	家	正
	植保无人机数量	架	正
政府	颁证机场数量	座	正
	政府工作报告提及次数	次	正
	高空气象探测站	个	正
市场	低空经济产业链上游企业	家	正
	低空经济产业链中游企业	家	正
	低空经济产业链下游企业	家	正
	航空运输业就业人数	人	正

婷等(2023)研究,产业结构优化很大程度上依靠产业结构高级化。本部分使用“农林牧渔服务业产值占农林牧渔总产值之比”来衡量农业产业结构高级化程度。

4.控制变量。控制变量主要包括两类:第一类是各地区的经济水平变量,包括财政支农强度(农林水事务支出/地方公共财政收入)、农业发展基础(农林牧渔增加值/GDP)和农村居民人均可支配收入(万元);第二类是各地区自然禀赋和人力资源变量,包括受灾比例、农村人口平均受教育年限(年)。

(三)数据来源与描述性统计

本文使用2007—2024年中国30个省(市、自治区)的面板数据,探究低空经济与智慧农业之间的关系,囿于数据可得性,不包含西藏和港澳台地区。数据来源于《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《从统计看民航》《全国通用机场数据简报》《上市公司年报》《中国农业机械工业年鉴》、incoPat专利网、国泰安数据库、Wind数据库和网页爬虫等。为了保证数据的完整性,部分缺失值采用插值法补充。各变量描述性统计如表3所示。

表 3 描述性统计

变量	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
智慧农业	540	0.1328	0.0861	0.0319	0.5419
低空经济	540	0.1453	0.0877	0.0013	0.5072
规模化	540	4.7832	3.3908	0.4522	22.7970
技术效率	540	1.0154	0.3235	0.9610	1.0334
产业结构	540	0.5174	0.0865	0.3211	0.7323
财政支农强度	540	0.3350	0.2359	0.0423	2.3114
农业发展基础	540	0.0970	0.0533	0.0020	0.2576
农村居民人均可支配收入	540	1.5014	0.6639	0.4825	4.2991
受灾比例	540	0.1269	0.1017	0.0000	0.6963
农村人均受教育年限	540	7.8650	0.6294	5.6451	10.3022

四、实证分析

(一) 基准回归结果

本部分采用逐步回归法分析低空经济对智慧农业的影响。[表4](#)汇报了低空经济对智慧农业的影响,其中第(1)列报告了低空经济单独对智慧农业的影响,第(2)列报告了加入各地区经济水平作为控制变量的回归结果,第(3)列报告了再加入各地区自然禀赋和人力资本作为控制变量的回归结果。根据第(3)列的结果可知,核心解释变量“低空经济”在1%的统计水平上显著,且估计系数为0.1198。上述结果表明低空经济对智慧农业有明显的促进效应,这也证明了假说H1。

表 4 基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)
低空经济	0.1317*** (0.0144)	0.1275*** (0.0151)	0.1198*** (0.0147)
经济水平	否	是	是
自然禀赋	否	否	是
人力资本			
时间个体固定	是	是	是
观测值	540	540	540
R ²	0.1160	0.1241	0.1332

注:***、**、*分别表示1%、5%、10%的显著性水平,括号内为稳健标准误,下同。

(二) 稳健性检验

1.重新测度智慧农业。参考[孙学涛和张丽娟 \(2025\)](#)的研究方法,对智慧农业选用两种方法测度:一是智慧农业绝对水平,用各省农业智慧公司注册资本均值(万元)表示;二是智慧农业相对水平,用各省农业智慧公司注册资本均值与全国农业智慧公司注册资本均值之比表示。[表5](#)第(1)列和第(2)列分别报告了智慧农业绝对水平和相对水平作为被解释变量的回归结果。在重新测度智慧农业后,系数估计值分别为0.2326和0.1489,且在1%置信水平上显著,验证了基准回归结果的稳健性。

表 5 稳健性检验 (一)

变量	(1)	(2)	(3)
低空经济	0.2326*** (0.0361)	0.1489*** (0.0295)	0.1677*** (0.0414)
控制变量	控制	控制	控制
时间个体固定	是	是	是
观测值	540	540	540
R ²	0.1095	0.1445	0.1419

2.重新测度低空经济。本部分继续选用基于指标相关性与冲突性进行客观权重赋权多指标综合评价方法(Criteria Importance Through Intercriteria Correlation,简称CRITIC),对核心变量低空经济重新测度。该方法通过量化指标的对比强度和指标间的相关性来确定客观权重,能够有效反映数据本身的特点,确保评估结果的客观性([李龙跃等, 2025](#); [Fan等, 2022](#))。[表5](#)第(3)列报告了选用CRITIC方法重新测度低空经济进行回归的结果,显示低空经济仍然显著正向促进智慧农业发展,且在1%的水平上显著。进一步验证了基准回归结论的稳健性。

3.Bootstrap抽样。Bootstrap的优势在于其灵活性和稳健性,能够避免分布假设,适用于非正

态、非线性或复杂模型, 提高小样本推断的准确性。为确保研究结论的可靠性, 本部分继续使用Bootstrap方法进行1000次有放回抽样。表6第(1)列报告了回归的结果, 显示低空经济对智慧农业的影响保持稳定的正向关系, 进一步验证了研究结论的稳健性。

表 6 稳健性检验 (二)

变量	(1)	(2)	(3)
低空经济	0.1175*** (0.0324)		0.2077*** (0.0515)
低空政策×时间		0.1379*** (0.0251)	
控制变量	控制	控制	控制
时间个体固定	是	是	是
观测值	540	540	468
R ²	0.1689	0.1025	0.1246

4.多期双重差分法。参考Zhao等(2025)研究, 依据《关于深化我国低空空域管理改革的意见》《国家综合立体交通网规划纲要》等文件, 我国低空政策试点从2010年开始陆续试点, 本部分采用多期双重差分法考察低空经济对智慧农业的影响, 样本通过平行趋势等检验。表6第(2)列报告了回归的结果, 回归结果与基准回归在方向和显著性水平保持一致, 验证了结论的稳健性。

5.剔除直辖市。直辖市在我国有着特殊的地位, 其基础设施、财政收入、科学技术发展水平等指标远高于大多数省份, 直接全样本回归可能导致估计偏误, 剔除直辖市可避免极端高值对回归结果的过度影响。表6第(3)列报告了回归的结果, 与前文结论保持一致, 再次证明结论的稳健性。

(三) 内生性问题

1. 工具变量法。为缓解因遗漏变量产生的内生性问题, 参考Sheard(2014)研究, 使用1990年各地区民用航空(颁证)机场数量与时间趋势交互项构造工具变量。主要基于以下考虑: 一方面, 历史航空基础设施会通过“路径依赖”影响当前低空经济发展, 如起降点改造、航空产业集聚等, 满足与核心解释变量相关性要求; 另一方面, 历史航空机场与国家战略、早期交通规划有关, 与智慧农业发展水平无关, 满足外生性要求。表7前两列报告了采用两阶段最小二乘法回归的结果。其中第(1)列报告了工具变量对低空经济回归的结果。Kleibergen-Paap rk LM统计量拒绝工具变量识别不足的原假设; Cragg-Donald Wald F统计量也拒绝了弱工具变量的原假设, 证实工具变量的有效性。第(2)列报告了第二阶段回归结果, 显示低空经济对智慧农业的回归系数为0.0694, 且在1%水平上显著, 再次印证核心结论的可靠性。

2. SYS-GMM方法。SYS-GMM通过吸收内生要素, 有效缓解内生性问题(詹妹珂等, 2025)。表7第(3)列报告了采用SYS-GMM方法回归所得结果。模型AR(1)检验P值表明扰动项存在一阶自相关, AR(2)检验P值表明不存在二阶序列相关, 验证了模型的有效性。在缓解内生性问题后, 回归结果显示低空经济依然正向影响智慧农业, 再次证明了假说H1的稳健性。

(四) 异质性分析

低空空域管理改革作为国家推动低空经济发展的核心政策工具, 有助于降低制度成本, 开放适飞空域释放资源价值, 构建基础设施网络支撑规模化运行, 促进低空应用场景规模化落地。自2020年起, 我国陆续公布了低空空域管理改革试点(拓展)省份, 如湖南、江西、安徽等。本部分进一步分析低空经济对智慧农业的影响在试点区域和非试点区域的异质性。表8第(1)和(2)列分别报告了试点区域和非试点区域回归结果。结果显示前者回归系数显著大于后者, 说明国家支持政策有利于释放低空经济对智慧农业的赋能潜力, 这也凸显了国家支持政策的重要性。

表 7 工具变量检验

变量	(1)	(2)	(3)
	低空经济	智慧农业	智慧农业
工具变量	0.0553 ^{***} (0.0117)		
低空经济		0.0694 ^{***} (0.0216)	0.1353 ^{***} (0.0368)
控制变量	控制	控制	控制
时间个体固定	是	是	是
Cragg-Donald Wald F 统计量	67.1320		
Kleibergen-Paap rk LM统计量	51.4490		
AR(1)			0.0029
AR(2)			0.1347
Hansen			0.2461
观测值	540	540	540
R ²	0.1147	0.1415	0.1560

表 8 异质性检验

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
低空经济	0.1225 ^{***} (0.0157)	0.0891 ^{***} (0.0129)	0.1419 ^{***} (0.0385)	0.0653 [*] (0.0285)
控制变量	控制	控制	控制	控制
时间个体固定	是	是	是	是
观测值	54	486	342	198
R ²	0.1463	0.1203	0.1504	0.0899
组间差异 系数p值	0.0245		0.0131	

我国低空经济和智慧农业的发展水平,在不同地理区域可能存在显著差异。[表8](#)第(3)和(4)列分别报告了在中东部地区和西部地区低空经济对智慧农业的影响。结果显示,中东部区域影响效应显著大于西部区域。可能的原因是,在东部沿海与中部省份,无人机技术专利集中,政策响应快,形成研发、应用有效衔接。西部欠发达地区,技术渗透率低,受限于基础设施(如网络覆盖弱)及人才短缺,促进效应发挥不明显。

(五) 机制分析

理论分析揭示,低空经济驱动智慧农业发展的机制在于:扩大经营规模、提高技术效率以及优化产业结构。为检验这些机制,本文参考[江艇\(2022\)](#)提出的因果推断原则,选取与被解释变量存在清晰因果联系的中介变量,着重探讨核心解释变量如何影响中介变量,从而验证研究假说H2。

1.规模化机制检验。根据前文理论基础的逻辑,低空经济在生产领域通过无人机技术扩大农业生产规模,降低规模化经营的边际成本,推动户均种植面积扩大或规模化经营主体占比提高,规模化经营使得智慧农业部署平均成本降低,解决智慧农业“小规模不经济”困境,从而促进智慧农业发展。本部分使用“户均种植面积”来衡量农户规模化程度,揭示低空经济有助于提高规模化程度,进而促进智慧农业发展。实证结果如[表9](#)第(1)列所示,低空经济对规模化的系数为0.2541,且在5%水平上显著。这表明,低空经济确实通过推动规模化经营推动智慧农业发展。

表 9 作用机制检验

变量	(1)	(2)	(3)
	规模化	技术效率	产业结构
低空经济	0.2541*** (0.0629)	0.1513*** (0.0411)	0.1154*** (0.0247)
控制变量	控制	控制	控制
时间个体固定	是	是	是
观测值	540	540	540
R ²	0.2355	0.3514	0.1419

2.技术效率机制检验。低空经济依靠无人机技术可以实现对农情数据的实时动态感知;依靠信息技术加持,助力农业决策精准化、敏捷化和智慧化;有效解决作业盲区多、人力依赖强等问题,提升技术效率。本部分利用DEA方法计算“技术效率”,揭示低空经济通过提高技术效率提升智慧农业发展水平的中介路径。实证结果如表9第(2)列所示,低空经济对技术效率的系数为0.1513,且在1%水平上显著。这表明,低空经济有助于提升农业生产的技术效率,进而促进智慧农业发展。

3.产业结构机制检验。低空经济通过技术渗透推动农业产业结构从“单一生产”向“产业链”升级(非智慧农业发展带来的结构变革):上游延伸至无人机、传感器等农资研发,中游拓展至低空监测、精准作业等生产性服务,下游贯通农产品低空物流等流通环节,促进产业链纵向整合。同时低空经济带来低空观光农业兴起,出现无人机表演+农田景观打造新型旅游业态,促进产业链横向联合。本部分使用“农林牧渔服务业产值占农林牧渔总产值之比”来衡量农业产业结构高级化程度,实证结果如表9第(3)列所示,低空经济对农业产业结构高级化的回归系数为正,且在1%水平上显著。这表明,低空经济有助于优化农业产业结构,进而促进智慧农业发展。

五、进一步讨论

本文继续从空间溢出效应和时间持续效应两方面探讨低空经济对智慧农业的影响。

(一)空间溢出效应

为进一步检验低空经济影响智慧农业的空间溢出效应,构建空间邻接矩阵、地理距离矩阵和经济距离矩阵,利用空间杜宾模型(SDM)对直接效应和间接效应进行研究。表10汇报了回归结果,第(1)到(3)列分别呈现空间邻接矩阵、地理距离矩阵和经济距离矩阵的回归系数。结果显示,低空经济对智慧农业的空间溢出效应显著为正,表明低空经济具有较强的空间溢出性,其不仅能够促进区域内的智慧农业发展,还能通过技术扩散、产业链协同、基础设施网络外部性等途径带来区域间发展的“联动效应”。

$$SmartAgr_{it} = \alpha + \rho W SmartAgr_{it} + \beta_1 W LowAir_{it} + \beta_2 LowAir_{it} + \gamma Control_{it} + \lambda_i + \mu_t + \varepsilon_{it}$$

(2)

(二)时间持续效应

公众对低空经济的评估经常呈现“近视效应”:过度聚焦短期应用效能,忽视长期影响潜能(吕人力, 2024)。由于低空空域管理改革试点政策的多时点性,本部分选用动态多期DID模型进行回归。图2展示了低空经济政策效应的动态变化。结果显示:在政策时点之前,估计系数在零值附近波动且不显著,表明实验组和参照组满足平行趋势假设;政策实施后,系数持续显著为正,表明低空经济政策对智慧农业的促进效应具有长效性特征。因此,对低空经济的评价不能只关注即时,还要考虑低空经济政策效果的滞后性对智慧农业的长期持续促进作用。

表 10 空间溢出效应检验

变量	(1)	(2)	(3)
	邻接距离	地理距离	经济距离
低空经济	0.0789*** (0.0203)	0.0734** (0.0355)	0.0801*** (0.0249)
W低空经济	0.0313*** (0.0097)	0.0306*** (0.0092)	0.0324*** (0.0098)
ρ	0.0635** (0.0313)	0.0653** (0.0304)	0.0750*** (0.0236)
直接效应	0.0859*** (0.0171)	0.0876*** (0.0223)	0.0894*** (0.0245)
间接效应	0.0446*** (0.0113)	0.0415** (0.0137)	0.0421*** (0.0101)
总效应	0.1305*** (0.0326)	0.1291*** (0.0281)	0.1315*** (0.0387)
控制变量	控制	控制	控制
时间个体固定	是	是	是
观测值	540	540	540
R^2	0.0987	0.1049	0.1185

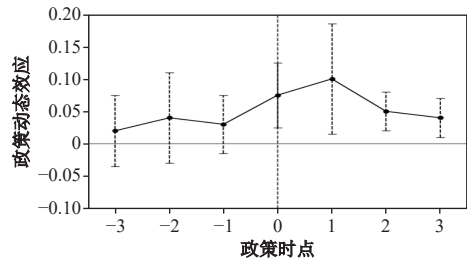


图 2 低空经济政策动态效应

六、研究结论与政策建议

在现代农业体系建构中，智慧农业兼具基础性支撑功能与战略性引领价值，直接关联农业现代化质量与强国建设高度。文章基于2007—2024年省级面板数据，实证分析了低空经济对智慧农业的影响。研究表明，低空经济对智慧农业有显著促进作用，多种形式检验证明结论具有良好稳健性。从影响机制来看，低空经济有利于扩大生产规模、提升技术效率、优化产业结构，进而促进智慧农业发展。异质性分析表明，在政策支持力度大的低空空域管理改革试点区域和中东部区域，低空经济对智慧农业的促进作用更显著。拓展分析表明，低空经济对智慧农业的影响，在空间维度具有正向溢出效应，在时间维度具有长期可持续效应。研究结论为科学评估低空经济的效益、优化低空经济赋能智慧农业发展的政策设计，以及推动智慧农业高效发展提供重要的理论依据和实践参考。

基于上述研究结论，为充分释放低空经济对智慧农业的驱动潜能，提出以下政策启示。第一，打好基础、破除障碍。大力改革低空空域管理，简化无人机农业飞行的审批，并在重点区域（如改革试点区和中东部）先行先试，同时建设好无人机起降点、充电桩和专用网络等基础设施。第二，鉴于低空经济在政策支持力度大的试点区域效果更佳，应进一步深化低空空域管理改革，在全国范围内扩大试点范围，完善配套政策，提升空域资源配置效率。第三，考虑到区域异质性，中东部地区可结合自身经济与科技优势，打造低空经济与智慧农业融合发展示范区，发挥示范引领作用；西部地区则应通过政策倾斜，吸引外部资源，加强基础设施建设，逐步缩小与中东部地区差距。第四，为充分发挥低空经济对智慧农业的空间溢出效应，需加强区域间

合作交流,搭建信息共享平台,促进低空技术赋能智慧农业经验传播;同时,制定长期发展规划,保障低空经济赋能智慧农业的可持续性,助力农业强国建设。

尽管本文构建并验证了低空经济赋能智慧农业的理论机制,但在数据层面仍存在一定局限性,这主要缘于研究条件与数据可得性的制约。首先,本研究主要基于省级宏观数据展开分析,受限于更细粒度的市县级数据获取难度,未能从更微观的层面剖析低空经济对智慧农业的影响。其次,针对规模农户、家庭农场等微观主体的长期追踪数据较为匮乏,对相关主体采纳智慧农业的意愿机制尚未能深入探讨。上述数据层面的局限性,也构成了未来进一步拓展的研究方向。

主要参考文献:

- [1] 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,(8).
- [2] 范贝贝,李瑾.智慧农业新质生产力何以形成——基于融合分析框架的多案例研究[J].当代经济管理,2025,(11).
- [3] 樊振伟.低空经济助力农民农村共同富裕:内在逻辑与创新路径[J].西北农林科技大学学报(社会科学版),网络首发地址:<https://link.cnki.net/urlid/61.1376.C.20251015.1359.002>.
- [4] 顾冬冬,毕洁颖.低空经济驱动农业新质生产力:作用机理、现实瓶颈与路径设计[J].西北农林科技大学学报(社会科学版),网络首发地址:<https://link.cnki.net/urlid/61.1376.c.20250929.1532.002>.
- [5] 江艇.因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J].中国工业经济,2022,(5).
- [6] 李龙跃,皮雳,王舒琦,等.基于G1-CRITIC-PIVW的效能评估指标动态自适应赋权方法研究[J].系统工程理论与实践,网络首发地址:<https://link.cnki.net/urlid/11.2267.N.20250609.2043.002>.
- [7] 李文明,罗丹,陈洁,等.农业适度规模经营:规模效益、产出水平与生产成本——基于1552个水稻种植户的调查数据[J].中国农村经济,2015,(3).
- [8] 刘乐艺.5G-A加速落地,带来哪些改变?[N].人民日报海外版,2025-07-01(05).
- [9] 刘松林,张虹,杨青龙,等.低空经济现代化水平的统计测度与时空特征[J].统计与决策,2025,(5).
- [10] 吕人力.低空经济的背景、内涵与全球格局[J].人民论坛·学术前沿,2024,(15).
- [11] 马玉婷,高强,杨旭丹.农村劳动力老龄化与农业产业结构升级:理论机制与实证检验[J].华中农业大学学报(社会科学版),2023,(2).
- [12] 牟少岩,丁慧媛,郑满生,等.智慧农业革命影响及对策研究[J].农业经济问题,2022,(9).
- [13] 欧定余,廖纤.智慧农业发展水平测度及驱动力比较——基于产业融合的视角[J].湘潭大学学报(哲学社会科学版),2024,(2).
- [14] 欧阳日辉.低空经济助推新质生产力的运行机理与路径选择[J].新疆师范大学学报(哲学社会科学版),2025,(1).
- [15] 邱超奕.低空经济“振翅高飞”[N].人民日报,2024-04-01(06).
- [16] 沈映春,赵雨涵.低空经济[M].北京:中信出版集团,2024.
- [17] 孙学涛,张丽娟.高标准农田建设对智慧农业的影响研究[J].现代经济探讨,2025,(3).
- [18] 王力,辛雨,靳小涵.人口老龄化、农业新质生产力与农民农村共同富裕[J].管理学报,2025,(3).
- [19] 谢愚.低空经济未来可期[N].金融时报,2025-05-23(05).
- [20] 徐政.低空经济赋能中国式现代化的内在机理与实践进路[J].新疆师范大学学报(哲学社会科学版),网络首发地址:<https://doi.org/10.14100/j.cnki.65-1039/g4.20250524.001>.
- [21] 徐志刚,章丹,程宝栋.中国粮食安全保障的农地规模经营逻辑——基于农户与地块双重规模经济的分析视角[J].管理世界,2024,(5).
- [22] 杨骞,金华丽.智慧农业与粮食全要素生产率——“赋能”和资源配置的视角[J].农村经济,2025,(1).
- [23] 殷浩栋,霍鹏,肖荣美,等.智慧农业发展的底层逻辑、现实约束与突破路径[J].改革,2021,(11).

- [24] 岳立, 于新媛, 潘均柏. 大科学装置集聚能使低空经济技术量质齐升吗[J]. 科学学研究, 网络首发地址: <https://doi.org/10.16192/j.cnki.1003-2053.20250702.001>.
- [25] 詹姝珂, 王仁曾, 危仁义, 等. 数字金融如何助力统一消费市场建设——基于双区域消费系统理论框架的研究[J]. 经济学动态, 2025, (6).
- [26] 钟成林, 胡雪萍. 低空经济应用场景孵化: 实现进路、瓶颈障碍与纾解对策[J]. 苏州大学学报(哲学社会科学版), 2025, (4).
- [27] 庄茁. 人工智能赋能低空经济: 应用场景与未来方向[J]. 人民论坛·学术前沿, 2024, (15).
- [28] Aslan M F, Durdu A, Sabanci K, et al. A comprehensive survey of the recent studies with UAV for precision agriculture in open fields and greenhouses [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(3): 1047.
- [29] Belcore E, Angeli S, Colucci E, et al. Precision agriculture workflow, from data collection to data management using FOSS tools: An application in northern Italy vineyard [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(4): 236.
- [30] Boursianis A D, Papadopoulou M S, Diamantoulakis P, et al. Internet of Things (IoT) and Agricultural Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in smart farming: A comprehensive review [J]. *Internet of Things*, 2022, 18: 100187.
- [31] Caputti T, de Oliveira L P, Rodrigues C, et al. Flight parameters for spray deposition efficiency of unmanned aerial application systems (UAASs) [J]. *Drones*, 2025, 9(7): 461.
- [32] El Alaoui M, El Amraoui K, Masmoudi L, et al. Unleashing the potential of IoT, Artificial Intelligence, and UAVs in contemporary agriculture: A comprehensive review [J]. *Journal of Terramechanics*, 2024, 115: 100986.
- [33] Fan W C, Xu Z M, Wu B, et al. Structural multi-objective topology optimization and application based on the criteria importance through intercriteria correlation method [J]. *Engineering Optimization*, 2022, 54(5): 830–846.
- [34] Krishna K R. Unmanned aerial vehicle systems in crop production: A compendium[M]. New York: Apple Academic Press, 2019.
- [35] Maddikunta P K R, Hakak S, Alazab M, et al. Unmanned aerial vehicles in smart agriculture: Applications, requirements, and challenges [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(16): 17608–17619.
- [36] Sheard N. Airports and urban sectoral employment [J]. *Journal of Urban Economics*, 2014, 80: 133–152.
- [37] Tsouros D C, Bibi S, Sarigiannidis P G. A review on UAV-based applications for precision agriculture [J]. *Information*, 2019, 10(11): 349.
- [38] Zhao L N, Chen Y R, Wahab M I M. The impact of low-altitude airspace opening policy on aviation manufacturing innovation: A double machine learning approach [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2025, 200: 104660.

From Traditional Agriculture to Smart Agriculture: Theoretical Mechanisms and Empirical Examination of the Low-altitude Economy Empowering Development

Zhang Junwei¹, Du Jianjun²

(1. School of Management, Qufu Normal University, Shandong Rizhao 276800, China; 2. Government Administration School, Shanghai University of Political Science and Law, Shanghai 201701, China)

Summary: Smart agriculture represents a critical driver of agricultural modernization and a

strategic imperative for building a nationally competitive agricultural sector. Nevertheless, its advancement is constrained by practical limitations, including restricted machinery accessibility in complex terrains and elevated costs associated with data acquisition. Within this context, the low-altitude economy, centered around unmanned aerial vehicle (UAV) technology, emerges as a transformative force with substantial potential to advance smart agriculture. Drawing on provincial panel data from 2007 to 2024, this paper systematically investigates the enabling mechanism and spatiotemporal effect of the low-altitude economy on smart agriculture. The results indicate a statistically significant positive impact of the low-altitude economy on smart agriculture. The analysis identifies three principal mediating paths through which the low-altitude economy facilitates smart agriculture development: First, by enhancing operational capabilities, expanding logistical reach, and lowering managerial costs, it promotes the scaling-up of agriculture and establishes a foundation for economies of scale in the adoption of smart technologies. Second, through improvements in operation, data, and decision-making efficiency, it elevates technical efficiency in agriculture while furnishing essential economic, informational, and algorithmic trustworthiness required for smart systems. Third, by extending industrial chains both upstream and downstream and spurring new business models, it contributes to structural upgrading within the agricultural sector, thereby attracting funds and talents and accelerating the transition of smart agriculture from conceptualization to implementation. Heterogeneity analysis reveals that the promoting effect of the low-altitude economy is more pronounced in regions characterized by robust policy support—such as low-altitude airspace management reform pilot zones and central-eastern regions—underscoring the vital role of institutional backing and regional foundational conditions. Expansion analysis demonstrates that the enabling function of the low-altitude economy exhibits a positive spillover effect in the spatial dimension, benefiting not only local but also neighboring regions' smart agriculture development; and it displays a sustained long-term effect in the time dimension, affirming its enduring potential as an enabling vector for agricultural transformation. This paper offers theoretical underpinnings and practical insights for scientifically evaluating the integrated benefits of the low-altitude economy and refining policy frameworks to harness its role in empowering smart agriculture.

Key words: low-altitude economy; smart agriculture; economies of scale; technical efficiency; industrial structure

(责任编辑: 倪建文)