



【大国“三农”问题】

从“田间”到“云端”：低空技术重塑农业绿色产业链的机制与路径

于法稳 林 珊 张 蔚

【摘 要】在推进农业现代化、建设农业强国的时代背景下，实现农业全面绿色转型是破解资源数量质量双重约束、改善农业生产环境、提升农业生态产品供给能力的关键举措。重构农业绿色产业链是实现农业绿色转型的核心环节，低空技术的出现为农业产业链绿色重构提供了新的技术方向。产业融合、要素配置与循环经济等理论，为低空技术与农业绿色产业链的适配逻辑提供了理论支撑，构建起“要素重构—流程再造—价值增值”三维赋能机制，并剖析了技术应用面临的现实难题及其根源。要解决这些难题需要构建绿色导向的低空技术体系、完善绿色协同的产业生态体系以及健全适配的制度保障体系。

【关键词】低空技术；农业绿色产业链；要素重构；流程再造；价值增值

【基金项目】中国社会科学院创新工程项目（2026NFSB06）

【作者简介】于法稳，中国社会科学院大学应用经济学院教授；林珊，青岛市社会科学院农业农村研究所助理研究员；张蔚，中国社会科学院大学应用经济学院博士研究生。

【中图分类号】F323.3 【文献标识码】A 【文章编号】1001-6198（2026）04-0172-14

一、引言

当前，在数字技术持续创新的同时，其应用场景得到不断拓展，为低空经济的发展提供了机遇，使其成为继陆地、海洋、天空之后的“第四空间经济”。凭借其灵活、高效、广覆盖的技术特点，低空经济已逐渐成为推动产业转型升级、培育经济新增长点的重要力量。^[1]2021年2月，低空经济被写入《国家综合立体交通网规划纲要》；2023年12月，中央经济工作会议首次明确将低空经济列为战略性新兴产业；2024年3月，低空经济首次被写入国务院政府工作报告，标志着其发展

上升为国家战略。这些顶层设计为低空技术与农业融合发展明确了战略导向。农业绿色转型作为落实“绿水青山就是金山银山”新发展理念的关键抓手，既是保障国家粮食安全的重要支撑，也是守护生态安全的战略选择。^[2]从农业发展历程看，我国农业正处于从传统粗放型向绿色低碳转型的关键期，面临日益严峻的资源约束、环境污染、生产效率偏低等现实挑战，亟须通过突破性技术手段破解发展瓶颈、摆脱发展困境。^[3]低空技术在精准植保、低碳流通、生态监测等具体场景的应用，与农业绿色生产需求高度契合，直击农业绿色产业链中的核心痛点，推动农业生产方



式从资源依赖型向技术驱动型转变，最终实现农业绿色低碳、高质量发展。^[4]

尽管我国农业绿色产业链已初步形成，但在实践中仍存在一些结构性痛点，成为影响农业绿色转型进程及效率的重要因素，在生产、流通、监管三个环节体现得较为明显。生产环节表现为化肥、农药的低效利用。根据农业农村部2025年年度报告数据，我国水稻、小麦、玉米三大粮食作物的化肥利用率为43.3%，农药利用率预计超过43%。^①这与发达国家60%以上的利用率水平还存在明显差距，由此导致的面源污染严重影响了耕地土壤健康水平。^[5]流通环节表现为较高的农产品流通损耗率。《中国农产品产地冷链物流发展报告（2024）》数据显示，2023年我国蔬菜平均损耗率为6.47%，水果平均损耗率为7.03%，生鲜农产品贮藏平均损失率为7.1%。上述指标均高于发达国家5%的产后损耗率水平。^[6]这不仅直接影响农业生产的经济效益，导致农业经营主体利益受损，还会增加农产品流通中的碳排放。监管环节则表现为农业面源污染监测体系的不完善。《全国农业面源污染监测评估实施方案（2022—2025年）》预计，到2025年底，我国农业面源污染监测点位仅覆盖国家重点生态功能区中36.7%的县域，监测覆盖范围有限。此外，现有监测数据还存在时效性差、精准度不足的问题，难以全面、及时地反映农业面源污染的动态变化，无法为生态环境分区管控提供有力的技术支撑。因此，研究低空技术重塑农业绿色产业链问题，具有重要的理论和现实意义。

二、文献梳理及问题的提出

基于上述分析及研究的需要，本研究从低空技术应用、农业绿色产业链理论实践、绿色产业链核心逻辑与优化方向等方面，对已有文献进行系统梳理，以探究拟研究的关键问题。

一是低空技术在农业领域的应用研究。这一领域的研究呈现明显的阶段性特征，早期阶段（2010年前），研究主要是对无人机植保的初步探

索，聚焦于单一技术的作业效率提升，如无人机喷雾均匀性、作业覆盖率等具体问题；^[7]中期阶段（2011—2018年），随着物联网技术的逐步普及，低空技术与农业生产的融合程度不断深化，研究内容扩展到精准灌溉、病虫害监测等多个应用场景，同时开始关注技术对农业资源节约的影响；^[8]近期阶段（2019年至今），随着低空经济概念的提出，研究热点转向低空技术与农业产业链的深度融合，重点关注技术对农业生产、流通、监管全环节的赋能作用，绿色低碳也日益成为重要的研究方向，但仍存在研究视角分散、系统性不足的问题。^[9]

二是农业绿色产业链的理论与实践研究。农业绿色产业链是一项将绿色发展理念贯穿从田间生产到终端消费全过程的系统工程，其核心在于实现产业融合与绿色转型的有机结合。^[10]从实践环节看，生产端的绿色转型需要多方面的支撑，其中农业保险的风险保障^[11]、绿色技术的推广应用^[12]以及农业服务的专业化支持^[13]等是关键因素；流通环节则重点推进加工减损与低碳物流衔接，通过“订单农业—集中收储—冷链物流”一体化运营模式，提升农产品流通效率；^[14]全链条监管通过构建统一标准和完善追溯体系，保障绿色农产品的品质与可信度；^[15]同时，消费市场对绿色产品的认知水平和选择意愿不断提升，成为驱动整个绿色产业链条向更环保、更优质、更高效方向发展的核心动力。^[16]

三是绿色产业链的核心逻辑与优化方向研究。农业绿色产业链发展主要依靠政策与市场双重驱动，其核心目标在于推动农业全面绿色转型，实现高质量协调发展。具体而言，政府层面的顶层政策设计，如绿色补贴、生态补偿、标准制定等，与市场层面的供需机制相互配合，共同为农业绿色转型创造良好的外部条件。^[17]这些外部条件通过影响农户、企业、消费者等微观主体的认知，驱动其主动采纳绿色技术和绿色生产方式，形成推动绿色产业链优化的内在动力^[18]，最终实现农业增效、生态友好与价值提升等多重目标的协同

①《农业农村部 国家发展改革委 科技部 自然资源部 生态环境部 国家林草局关于印发〈“十四五”全国农业绿色发展规划〉的通知》，2021年8月23日，https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/07/content_5635867.htm，2026年1月27日；《“十四五”期间我国三大粮食作物化肥利用率稳步提升——农业农村部种植业管理司、全国农业技术推广服务中心负责人就三大粮食作物化肥利用情况答记者问》，2026年1月6日，https://zzys.moa.gov.cn/tzgg/202601/t20260106_6480464.htm，2026年1月27日。



发展。当前,完善农业绿色产业链仍面临诸多现实难题,如绿色生产效率不高、流通成本居高不下、监管能力明显落后等,直接导致生产端与消费端对接不畅。^[19]对此,有学者提出将低空技术引入绿色农业产业链,推动其在生产、物流、监管等多个领域广泛应用^[20],不仅为绿色农业生产智慧化、物流服务规模化、监管手段与内容精确化提供了有力支撑,也为生产端与消费端搭建了高效互通的桥梁。^[21]

从上述梳理可以看出,已有研究一方面清晰地将技术发展划分为单一植保效率提升、多场景资源节约、全产业链绿色融合三个阶段,并指出技术正从单点工具向系统赋能升级;另一方面明确了生产、流通、监管、消费全链条绿色属性,提炼出政策与市场双重驱动、多主体协同的核心逻辑。此外,已有研究普遍认可低空技术对产业链的支撑作用,明确了当前效率、成本、监管等方面存在的现实难题。然而,已有研究也存在明显的不足之处:一是机理研究碎片化,缺乏低空技术如何作用于农业绿色产业链的内在机制研究,且理论深度不够;二是困境及成因分析不深入,对低空技术赋能农业绿色产业链发展的困境与成因分析多停留在表面描述,从而影响对策建议的精准性、可操作性;三是研究视角不聚焦,没有把低空技术与农业绿色产业链作为耦合系统研究,缺乏适配性分析与全链条重塑框架;四是实践导向不强,缺少对小农户、农业企业等经营主体的差异化适配分析。

基于上述研究不足,本研究拟回答以下三个关键问题。一是低空技术与农业绿色产业链的适配逻辑问题。本研究从产业融合、要素配置、循环经济理论出发,找准二者在技术特征、产业需求、主体需求上的契合点,为研究奠定理论基础。二是低空技术如何重塑农业绿色产业链问题。构建要素重构、流程再造、价值增值三维机制,以揭示技术推动生产要素绿色升级、全链条绿色协同、产业边界拓展的内在作用机理。三是低空技术赋能农业绿色产业链过程中面临的瓶颈及优化路径。本研究通过识别技术、产业、制度等方面存在的实践瓶颈,并剖析问题成因,提出技术绿色化、产业协同化、制度精准化的可行路径,为解决低空技术重塑绿色产业链过程中的突出现实

问题提供参考。

三、低空技术与农业绿色产业链的理论解析

本研究涉及低空技术、农业绿色产业链两大核心概念,在明确二者内涵的基础上,结合产业融合、要素配置、循环经济三大理论,分析其对低空技术与农业绿色产业链融合发展的支撑作用。

(一) 核心概念界定及内涵特征

1. 低空技术的内涵、特征与农业适配性

低空技术是指在距离地面0—1000米的低空领域,整合无人机、遥感监测、物联网、大数据分析、通信等现代技术,实现低空空间资源开发利用的技术体系。^[22]低空技术具有四大核心特征。一是灵活性强,打破了空间限制,能有效适应平原、山区、丘陵等不同地形地貌条件,以及农田、果园、茶园等作业场景;^[23]二是精准度高,依托导航定位与遥感探测技术,可实现厘米级精准作业与监测,满足农业绿色生产的精准化需求;^[24]三是效率高,相较于传统人工与地面机械作业,低空技术能大幅提升作业效率,如无人机植保作业效率是人工的30倍;^[25]四是低碳环保,作业过程能耗低、碳排放少,同时提高化肥农药利用率,减少农业面源污染。^[26]

从生产、产业、主体三个维度看,低空技术与农业绿色生产具有高度适配性。在生产维度上,农业绿色生产追求资源节约、污染减排、生态保护,低空技术的精准化作业可减少化肥农药的使用量,遥感监测能实时掌握生态环境状况,与绿色生产的核心需求高度契合;在产业维度上,农业生产具有分散性、区域性、季节性特点,低空技术的灵活性、高效性、广覆盖性能有效适应农业绿色生产的需求;在主体维度上,小农户面临劳动力短缺、技术水平不高等现实困境,新型农业经营主体则追求规模化、集约化发展,低空技术轻量化、易操作的特点适合小农户使用,而规模化作业能力则契合新型经营主体的发展需求。

2. 农业绿色产业链的理论内核与核心环节

农业绿色产业链以绿色发展理念为核心、循环经济理论为指引,贯穿“生产—流通—监管—消费”全流程,是推动农业生产与生态环境保护协同发展的产业系统。其理论核心是通过产业链



各环节的绿色化转型与协同优化,实现资源投入减量化、生产过程清洁化、废弃物资源化、产品供给绿色化,进而实现经济效益、社会效益与生态效益的有机统一。

农业绿色产业链包含四个核心环节。一是绿色生产环节。作为产业链起点,核心是采用绿色生产技术,减少化肥、农药、兽药等化学投入品的使用,推广生态种植、养殖模式,保障农产品生产过程绿色化。^[27]二是绿色流通环节。通过构建低碳高效流通体系,减少流通环节的损耗与碳排放,保障农产品从田间到餐桌全程绿色安全。^[28]三是绿色监管环节。通过建立全链条生态环境监测与农产品质量追溯体系,对农业生产、流通、消费各环节实施动态监管,确保绿色标准落实。^[29]四是绿色消费环节。以绿色农产品需求为导向,引导消费者树立绿色消费理念,形成“生态消费倒逼绿色生产”的良性循环。^[30]

(二) 低空技术重塑农业绿色产业链的理论支撑

1. 产业融合理论的适配性分析

产业融合理论源于20世纪70年代的产业组织研究,是低空技术与农业绿色产业链融合发展的核心理论支撑。该理论的核心观点是技术创新与制度变革可以逐渐消除不同产业的边界。通过技术、业务、市场多元融合,实现产业升级与效率提升。^[31]这种融合模式能推动低空技术与农业绿色产业链深度对接,构建新型产业生态,实现农业绿色产业链的系统性重塑。

一是从技术融合来看,低空技术作为跨领域的综合技术,与农业生产、生态环保、物流配送等技术深度融合,催生了精准植保、低空物流、生态监测等新型农业技术,突破了传统农业技术的局限性,为农业绿色产业链的技术升级提供动力。二是从业务融合来看,低空技术使得农业生产、流通、监管等环节的边界逐渐模糊,例如无人机企业不仅提供植保服务,还通过数据采集与分析为农户提供生产决策支持,实现生产服务与信息服务的融合,拓展了农业绿色产业链的业务范围。三是从市场融合来看,低空技术使农业市场与低空经济市场相互渗透,形成了农业低空服务市场这一新型市场形态,吸引了更多社会资本进入农业领域,为农业绿色产业链发展提供资金

支撑。

2. 要素配置理论的延伸应用

要素配置理论为解析低空技术对农业绿色产业链的要素重构作用提供了理论依据。其核心观点是,生产要素的合理配置是提高生产效率、推动产业升级的关键。通过优化要素在不同部门、不同区域、不同主体间的配置,实现资源利用效率最大化。^[32]

将上述理论延伸到农业领域,低空技术通过与传统生产要素融合,实现了要素重构与优化配置,为农业绿色产业链升级提供支撑。传统农业生产要素主要以土地、劳动力、资本为主,粗放型的配置方式导致土地利用效率、劳动力生产率、资本投入回报率偏低等问题。低空技术通过引入技术要素,优化传统要素配置,提升农业绿色生产效率。

一是从土地要素维度看,低空遥感监测与精准控制技术可实现土地资源数字化管控,依据土壤肥力、作物长势等数据实施差异化作业,提高土地利用效率;二是从劳动力要素维度看,低空技术的自动化、智能化作业可替代传统人工操作,推动劳动力从体力劳动向技术操作、数据管理等新型岗位转型,优化劳动力结构;三是从资本要素维度看,低空技术投入能够引导资本向绿色技术、绿色产业聚集,推动技术高端化,提高资本投入的绿色回报率。

3. 循环经济理论的实践映射

循环经济理论的核心是打破“资源—产品—废弃物”的线性发展模式,遵循减量化、再利用、资源化原则,通过物质循环流动与能量高效利用,建立“资源—产品—再生资源”闭环发展体系,实现经济发展与生态环境保护的协同推进。这为低空技术推动农业产业链的绿色转型提供了理论指导。^[33]低空技术通过全链条赋能,实现上述闭环模式从理论走向实践。

低空技术对农业循环经济闭环的支撑作用体现在对全流程的精准赋能以及对各环节的高效衔接。一是在资源输入环节,低空精准遥感技术通过对土壤肥力、水分含量等核心数据的实时监测,为生产资料的科学投入提供依据,减少化肥农药使用量、节约水资源,实现农业生产投入减量化。二是在产品生产环节,低空技术可实现农作物生



长全周期动态管控,依托所采集的农业生产、生态环境等数据,构建完善的农产品溯源体系,实现生产环节与再生资源利用环节的有效衔接。三是在再生资源利用环节,低空遥感监测技术能够精准识别秸秆、畜禽粪便等农业废弃物的分布范围与数量规模,为其资源化利用提供数据支撑,推动农业废弃物转化为有机肥、清洁能源等再生资源,真正实现废弃物资源化。

综上所述,低空技术通过对农业循环全链条赋能,有效解决了闭环运行中精准化不足、环节衔接不畅等问题,体现了循环经济的核心理念,为农业绿色可持续发展提供了有力的技术与理论支撑。

四、低空技术重塑农业绿色产业链的内在机制分析

前文的理论分析表明,低空技术对农业绿色产业链的重塑,依托要素重构、流程再造、价值增值三大核心机制协同赋能。三者并非孤立存在,而是相互关联,呈现基础支撑、过程赋能、结果升华的递进逻辑。要素重构是底层前提,为全链条改造提供资源与主体条件;流程再造依托重构后的新型要素,实现生产、流通、监管全链条绿色化重构;价值增值则是要素优化与流程再造的落地成果,同时反向倒逼要素持续升级、流程迭代优化,从而形成闭环,这些机制共同支撑农业绿色产业链系统性、整体性升级。

(一)低空技术驱动生产要素绿色升级的重构机制

1.土地资源的数字化与精细化管控

土地是农业生产的基本要素,传统农业的土地利用模式易导致土地生产能力低、农业面源污染严重、农产品质量差等问题。^[34]低空技术借助遥感监测、导航定位、大数据分析等手段,实现土地资源的数字化管控与精细化利用,推动土地要素绿色升级。

一是在土地信息数字化层面,低空遥感监测技术可以快速获取土地利用、土壤墒情、作物生长等高分辨率数据,结合GIS技术搭建土地数字化管

理平台,实现土地资源的动态监测与精准评估。^[35]

二是在土地利用精细化层面,依托土地数字化信息,运用低空精准作业技术有效实现差异化生产管控,提高土地的利用效率。同时,低空遥感监测技术可精准核实土地流转面积、跟踪监测土地流转后的利用状况,规范流转秩序、保障双方合法权益,引导土地向新型农业经营主体适度集中,助推土地规模化、集约化经营,为农业绿色生产技术的规模化应用提供场景。

2.劳动力结构的智能化转型

劳动力是农业新质生产力培育的核心主体。随着我国城镇化与工业化的持续推进,农村劳动力不断外流,随之而来的“谁来种地”问题逐渐成为各级政府和学术界关注的焦点之一。当前,农业劳动力老龄化问题日益凸显,且受教育程度限制,新技术接受意愿与应用能力不足,在一定程度上制约了农业绿色产业链的发展。^[36]低空技术凭借自动化、智能化优势,替代农业生产中的人工投入,倒逼并引领农业劳动力结构转型升级。

一是在农业生产层面,低空无人机已广泛应用于播种、施肥、植保、灌溉、收割等农业生产全环节,大幅降低了其对人工的依赖,一些智慧农场完全实现了无人化作业。研究表明,一台植保无人机每天可完成500亩农田作业,相当于60名劳动力的工作量。精准喷洒技术还可实现农药使用量减少15%—20%,在提升产量的同时保护了生态环境。^①二是在技能结构层面,低空技术的广泛应用有效推动了农业劳动者从传统体力劳动岗位,向无人机操作、数据研判与管理、智能设备运维等新型技术岗位转型,由此催生了新型职业农民培训需求。通过对新型职业农民进行系统化技能培训,提升农户数智技术应用与设备实操能力,更好地适配智慧农业发展的需求。三是在业态分工层面,低空技术有效促进了农业生产的专业化分工,催生了无人机飞防服务、农业数据服务等专业化农业新业态,推动农业社会化服务不断走向成熟,吸引一批具备信息素养、现代化认知的青年劳动力返乡创业就业,从而实现了农业劳动力年龄结构与知识结构的优化,为农业绿色

^①《曲靖市罗平县:无人机赋能多元场景 低空经济激活高质量发展新动能》,2025年11月21日,https://nync.yn.gov.cn/html/2025/zhoushilianbo-new_1121/1422829.html,2026年1月27日。



产业链的发展注入新的活力。

3. 资本技术构成的高端化演进

资本是农业技术创新与产业升级的关键支撑，传统农业资本投入的技术构成偏低，难以适配农业绿色转型的需求。^[37] 低空技术的迭代拓展了农业投资领域，推动资本投向技术密集型领域，实现资本的技术构成向高端化演进。

一是在资本投入方向上，随着农业强国建设战略的实施，面向农业现代化的低空设备制造、技术研发、服务运营等领域，在“十五五”乃至更长时期内将成为农业资本投入的热点。一方面，农业经营主体主动加大低空无人机、遥感设备、数据平台等硬件投入，提升生产装备智能化水平；另一方面，政府将与社会资本合作，设立专项研发基金，赋能低空技术创新落地，夯实产业资金保障基础。二是在资本产出效率层面，低空技术投入可显著提高资本的绿色回报率。笔者课题组调研发现，农业经营主体购置低空无人机、遥感监测设备等，构建精准农业生产体系，推动农业生产的精准化、绿色化，能够提升土地单位面积收益，资本回报率显著高于传统农业生产模式。此外，低空技术采集的农业生产经营数据，为金融机构产品创新提供支撑，推动农业资本与金融资本深度融合，为农业绿色发展拓宽融资渠道。

(二) 低空技术驱动产业链全链条绿色协同的流程再造机制

1. 生产环节的精准化与绿色模式重构

生产环节是农业绿色产业链的核心环节。传统生产方式依靠水肥的大量投入实现产能水平提升，资源利用效率低，导致农业面源污染、耕地土壤健康水平下降。^[38] 低空技术以其精准化优势嵌入绿色生产体系，重构种植业、养殖业及种养循环全流程的绿色作业。

一是种植业领域，低空无人机结合遥感监测技术与精准控制技术，实现精准播种、施肥、植保、灌溉等作业。精准播种技术可依据土壤肥力、作物品种等因素，精准调整播种量与播种深度，提高种子出苗率；精准施肥技术通过无人机实现肥料的精准输送，减少肥料损失，提高肥料利用率；精准植保技术雾化效果均匀、附着率高，在减少农药使用量的同时能规避人工踩踏损伤；精准灌溉技术基于土壤墒情监测数据按需灌溉，提

高了水资源利用效率，节约了水资源。二是在养殖业领域，无人机等低空设备可以搭载温湿度、空气质量等多类传感器，实时监测养殖场的温湿度、氨气、硫化氢等环境指标，及时预警异常情况；通过红外热成像技术，快速甄别畜禽体温变化，预判疫病风险，降低疫病传播风险与兽药滥用概率。三是在种养循环领域，低空遥感监测技术可以科学规划种植区域与养殖区域的空间布局，统筹农作物秸秆、畜禽粪污等废弃物资源化利用，构建循环型生态农业模式，既减少对化肥的依赖，又消除养殖废弃物的污染隐患。

2. 流通环节的低碳化与协同化

流通是衔接生产与消费的关键环节，传统农产品流通中存在环节多、运输距离长、保鲜技术落后等突出问题，导致流通过程中损耗高、碳排放大，影响农业全产业链的绿色发展水平。^[39] 低空技术能够有效整合低空物流与信息化手段，实现流通环节的低碳化、协同化升级。

一是在流通模式方面，低空物流实现了“田间—仓储—市场—终端”的直达式流通，减少中间分销环节，有效提高了配送效率。针对偏远山区及交通不便地区，低空物流可以突破地理阻隔，实现农产品的快速直达。二是在保鲜协同方面，无人机装配环境传感器，全程实时监控储运温湿度，出现异常情况时便自动联动冷库进行冷链调控；通过大数据优化运输路径，有效缩减运输时间，降低农产品损耗率，保障农产品新鲜度。三是在信息协同方面，低空技术与物联网技术、区块链技术结合，构建全流程可追溯体系，将生产、流通等环节采集的数据上传至区块链平台，实现从田间到餐桌全程可追溯。该机制一方面增强消费者对绿色农产品的认可度，另一方面便于流通主体优化库存调度，减少资源闲置与浪费。

3. 监管环节的动态化生态管控

监管是农业绿色产业链规范运行的重要保障。以往人工巡查、抽样检测模式的覆盖范围有限、数据滞后、效率低，难以满足全链条绿色监管需求。低空技术通过遥感监测、实时监控、大数据研判，构建动态化、全覆盖的生态监管体系。^[40]

一是在面源污染管控层面，无人机搭载多光谱传感器与高清成像设备，精准识别化肥农药流失、畜禽粪污排放、秸秆露天焚烧等污染源，并



测算污染范围与强度；通过周期性动态监测，跟踪污染演变趋势，为精准治理提供数据支撑。二是在质量安全监管层面，低空技术与快速检测技术结合，实现生产流通全流程实时抽检、数据实时上传，检出不合格产品可及时启动溯源召回程序；结合区块链技术，压实生产经营者主体责任，筑牢农产品质量安全底线。三是在生态环境管护层面，低空遥感全域监测农田生物多样性、土壤侵蚀、水土流失等生态指标，为生态保护修复提供数据支撑；实时监控违法开发、生态破坏等行为，并及时对其进行干预，保障农业生态安全。

（三）低空技术拓展绿色产业边界的价值增值机制

1. 生态价值的量化与转化

农业生产作为一个自然生产过程，具备碳汇、水土保持、生物多样性保护等多元生态价值，但传统模式下生态价值难以量化与定价，无法通过市场机制实现价值转化。^[41]低空技术结合遥感监测、大数据分析等技术，可精准核算农业生态价值，并通过碳交易、生态补偿等路径实现价值转化。

一是低空遥感技术能够精准测量农田、林地、草地等植被的覆盖面积与生物量，结合碳汇系数实现农业碳汇量的精准核算，助力农业经营主体参与碳交易，将农业生态存量转化为经济收益。二是政府根据低空监测的生态环境本底数据，制定差异化的生态补偿政策，对绿色生产成效突出的农业经营主体给予政策补贴，畅通生态价值实现渠道。三是低空技术赋能生态旅游、休闲农业发展，依托低空遥感技术对农业生态景观进行科学规划与布局；借助无人机航拍技术打造文旅宣传IP，推动休闲农业、生态观光等产业发展，并带动农产品销售及餐饮、住宿等配套产业，拓宽生态价值实现路径。

2. 产业融合的价值延伸

低空技术打破产业边界，推动农业与信息、物流、文旅、康养等产业深度融合，催生新产业新业态，延伸农业绿色产业链的价值链条，实现多维价值增值。^[42]

一是在农业与信息技术融合层面，低空技术加速智慧农业转型，催生农业数据服务、技术咨询、线上运维等新业态。专业机构依托低空技术采集的农业生产数据、生态环境数据，为农业生产经营主体提供决策研判、技术指导、市场预测等增值服务，以及数字化工具运维、无人机操作技能等培训课程，形成新的盈利空间。二是在农业与物流产业融合层面，以低空物流重构农产品配送体系。物流主体搭建低空物流配送网络，并拓展农产品预冷、分拣、包装等配套服务，提升农产品附加值。三是在农业与文旅产业融合层面，低空技术催生低空观光、科普教育等新业态。依托无人机空中观景，乡村旅游业实现从平面观光到空中体验的跃升；农业科普基地利用低空技术展示绿色生产技术，挖掘农业休闲价值与文化教育价值。四是在农业与康养产业融合层面，以低空技术保障绿色农产品品质。依托溯源体系，消费者对品质的信任度显著提升；基于康养理念，融合康养食疗、体验品鉴等场景，农业康养价值内涵得以延伸，实现多元价值叠加增值。

五、低空技术重塑农业绿色产业链的实践瓶颈与理论归因

低空技术对农业绿色产业链具有显著的赋能价值，但在推广应用中仍面临诸多瓶颈。这些瓶颈的形成源于技术、产业、制度等多维度的结构性因素。

（一）技术层面的瓶颈与理论归因

1. 核心技术的绿色适配性不足

近年来，低空技术逐渐应用于农业领域，并取得了一定成效，也积累了一定经验。但核心技术与农业绿色发展需求适配性不足，已成为未来大规模推广的主要瓶颈。此外，该技术对规模化农场与小农户的影响存在显著差异。

一是低空设备绿色性能短板突出。现有农业无人机多依赖锂电池，单次作业续航大多超过40分钟。^①对规模化农场而言，作业面积大、航线长，需频繁更换电池，影响作业效率，增加时间与人工成本；对小农户而言，地块分散、单次作

^①《锂硫电池用于无人机续航更持久》，2025年4月17日，szjj.china.com.cn/2025-04/17/content_43085302.html，2026年1月28日。



业量小,续航短板影响相对有限,但电池购置、充电与更换仍会抬高作业门槛。同时,燃油机型会产生碳排放与噪声污染,与绿色发展理念相悖。此外,废旧低空设备回收利用体系缺失。规模化农场设备淘汰量大、二次污染风险更高,小农户设备存量小,但同样面临回收渠道缺失问题。^[43]

二是精准作业技术绿色化程度有限。当前,无人机植保技术仍以化学农药喷施为主,尽管可以减少部分农药使用量,但仍存在农药残留风险;精准施肥技术偏重化肥施用,有机肥、生物菌肥等配套精准施用技术研发滞后,难以匹配农业绿色生产对肥料绿色化的需求。^[44]对规模化农场而言,绿色认证、品质管控要求高,对化学投入品的过度依赖制约了绿色生产与品牌溢价,难以适配标准化绿色种植体系;对小农户而言,绿色生产意识与投入能力较弱,技术短板直接影响农产品安全,且缺乏低成本绿色替代方案。

三是农业数据绿色应用水平不高。对低空技术采集的海量农业数据进行存储与分析,能耗高、碳排放量大,加之数据共享机制不完善,导致数据资源浪费,降低了数据利用的绿色效率。^[45]对规模化农场而言,数据采集密度高、算力需求大,能耗与碳成本问题突出,数据孤岛导致监测、决策、作业闭环难以形成;小农户基本不具备数据处理能力,无法从低空数据中获益,数字鸿沟进一步扩大。

核心技术绿色适配性不足的根源在于,技术创新的路径依赖与市场需求的导向偏差。从技术层面来看,低空技术起源于军工、消费电子领域,其研发多侧重作业效率、续航能力等基础性能,忽视了农业绿色生产的特殊诉求,导致技术跨界适配存在先天不足;行业多固守现有技术框架,缺乏绿色技术突破性研发动力。从市场层面来看,当前农业低空技术需求集中于提高生产效率、降低劳动成本,绿色性能尚未转化为有效的市场拉动力。此外,绿色技术研发投入大、回收周期长、市场风险高,进一步抑制了研发主体的绿色技术创新意愿。

2. 技术集成的协同性不足

低空技术是融合多门类技术的综合体系,需要无人机平台、遥感监测、精准控制、数据处理及通信传输等技术的协同联动,才能赋能农业绿

色产业链的所有环节。当前,各类技术相互割裂,存在信息孤岛与技术壁垒,整体赋能效果难以实现。^[46]一是硬件设备兼容性差。不同厂商无人机、遥感传感器、数据采集设备的接口标准不统一,难以实现数据互通与协同作业。二是软件系统自成体系。数据处理、作业控制、平台管理等软件缺乏统一规范与交互协议。无人机采集的田间数据需要反复转换格式才能导入数据处理软件。这一过程不仅操作烦琐,而且容易造成数据丢失,导致信息流转效率偏低。三是技术场景融合度低。现有低空技术多为通用型技术,没有充分考虑作物品种、地形条件、生产模式等差异,缺乏个性化集成方案,实际落地效果受限。

技术集成协同性不足,根本原因在于行业技术标准缺失与创新主体联动不足。从标准层面来看,农业低空技术仍处于发展初期,硬件接口、数据格式、作业规范等统一标准体系还未建立,且标准制定往往滞后于技术创新速度,无法形成有效的规范约束。从创新主体层面来看,当前低空技术研发主体以科技企业、科研机构为主,农业经营主体参与度低,导致技术研发供给与农业生产需求错位。不同创新主体缺乏协同创新机制,研发、转化、推广应用等环节相互割裂,难以形成技术集成合力。

(二) 产业层面的瓶颈与理论归因

1. 产业链绿色协同失衡

农业绿色产业链具有整体性特征,依赖生产、流通、监管各环节的协同。当前,各环节绿色发展水平不均衡、衔接不畅,影响了全链条的绿色运行效率。一是生产与流通环节协同不足。采取绿色种植技术生产的农产品缺乏配套的绿色低碳流通体系,储运损耗与碳排放量偏高,抵消了生产端的绿色成效。^[47]二是生产与监管环节联动滞后。监管监测数据难以及时反馈至生产端,绿色生产调整存在滞后性;生产端绿色信息透明度不够,制约了监管部门动态监管的实施与绿色标准落地。^[48]三是流通与监管环节衔接不畅。农产品全流程追溯体系不完善,监管难以实现全覆盖,导致部分非绿色农产品流入市场,扰乱了市场秩序。^[49]

产业链绿色协同失衡的根本原因在于,利益联结机制不完善与绿色价值传导通道不畅。从利



益联结机制来看,农业绿色产业链的参与主体各自追求收益最大化,但缺乏长效稳定的共赢机制,导致生产主体压缩绿色投入以降低生产成本;流通端降低保鲜标准等逐利行为直接削弱了全链条的绿色效率。从价值传导机制来看,绿色农产品生态价值难以充分市场化定价,消费者溢价购买意愿不足;产业链成本分摊与利益分配失衡,生产端承担绿色投入成本,但收益偏低,其绿色生产积极性受到影响,进一步加剧了环节间的协同失衡。

2. 产业生态绿色赋能作用不足

农业绿色产业链升级离不开技术、金融、人才、市场等配套服务的支撑,当前农业绿色产业链生态不完善,对低空技术推广应用与产业链绿色升级的赋能作用偏弱。^[50]一是技术服务体系存在短板。技术推广服务机构缺失,农户在设备操作、技术应用、故障维修等方面缺乏指导;技术培训与实际需求错位,农户低空技术应用能力难以提升。二是金融服务支撑乏力。农业专业无人机的价格相对较高,远超小农户的承受能力;^①涉农绿色信贷门槛高、利率偏高,缺少低空技术应用专项金融产品,农业经营主体资金压力大。三是复合型人才供给缺口大。当前,兼具低空技术素养与农业生产经验的专业人才稀缺,乡村人才吸引力不足,高端技术人才留存难度大,在一定程度上制约了技术研发与推广。四是市场服务体系不健全。绿色农产品专用流通渠道、交易平台建设滞后;绿色农产品认证体系不规范、市场监管不到位,造成伪绿色农产品泛滥,影响消费者的信任度与购买意愿。

产业生态绿色赋能作用不足,主要源于生态构建主体协同乏力与配套政策支持偏弱。从主体层面来看,政府、企业、科研机构、行业协会等主体各司其职,但协同联动不足。政府的政策引导、企业的市场主导、科研机构的技术支撑、行业协会的桥梁纽带等作用没有形成合力,政策资源多集中于技术研发,而推广、金融、人才等配套领域被忽视。从政策层面来看,适配农业绿色产业链生态的政策体系尚不完善。针对小农户的

技术培训、破解融资难题的金融扶持、整治伪绿色农产品的市场监管等政策精准性不足;政策执行力度不够,部分政策流于形式,难以发挥支撑作用。

(三) 制度层面的瓶颈与理论归因

1. 政策法规适配性不足

政策法规是低空技术应用于农业领域的制度保障,现有制度条款与行业发展、绿色生产需求适配性不足,难以提供有效护航。一是低空空域管控机制不灵活。农业无人机飞行空域与作业飞行计划审批流程烦琐、周期长,直接影响作业效率;空域划设精细化不足,无专属农业低空作业空域规划,容易与其他低空飞行活动产生冲突。^[51]二是政策体系缺乏联动。农业绿色生产政策多聚焦化肥农药减量、废弃物资源化利用,对低空技术等绿色创新手段支持不足;低空产业通用政策也未与农业绿色生产政策有效衔接,难以形成政策合力。^[52]三是知识产权保护机制不完善。农业低空技术创新成果面临较高的侵权风险,保护力度不足容易抑制企业投入研发的积极性;知识产权交易市场发育滞后,创新成果的转化效率低。^[53]

政策法规适配性不足的根本原因在于,政策法规的制定滞后于技术创新与产业发展,以及政策制定的协同性不足。从政策制定的滞后性来看,低空技术在农业领域的应用发展迅速,政策法规制定周期长、迭代慢,难以适应低空技术发展态势,且政策制定部门对行业发展趋势、农业绿色生产实际需求的研判不深入,政策法规针对性与前瞻性不足。从政策制定的协同性来看,跨部门政策协同缺失。空域管控、农业发展、生态监管分属不同的主管部门,部门间缺乏有效的协同机制。政策存在交叉重复或空白漏洞,且对利益相关者调研不充分,导致可操作性不强。

2. 标准体系不完善

统一标准是规范低空技术应用、农业绿色产业链运行的基础。当前,行业存在标准缺失、口径不一、执行不规范等问题,制约低空技术的推广应用与全链条绿色升级。^[54]一是低空技术应用标准缺失。农业无人机作业安全规范、操作准则、

^①《铜川市印台区红土镇人民政府2025年印台区植保农业机械购置项目招标公告》,2025年8月24日, http://www.ccgp.gov.cn/cggg/dfgg/gkzb/202508/t20250824_25222065.htm, 2026年1月28日。



性能指标不统一,遥感监测数据质量、共享流通标准缺位,影响数据的可靠性与可用性。二是农业绿色生产标准在地域、部门间口径不一。绿色农产品认证、生产技术标准存在差异,产品品质参差不齐;绿色生产标准与低空技术应用标准缺乏有效衔接,难以通过低空技术实现绿色生产标准的精准落实。三是标准落地监管约束力不足,缺乏常态化监督检查机制。经营主体依规作业、按照标准生产的自觉性不强;专业检测设备与技术短缺,难以精准核验标准执行情况,再加上违规处罚力度偏弱,标准易流于形式。

标准体系不完善的根本原因是标准制定主体单一与实施保障机制不健全。从标准制定层面来看,当前相关标准制定多由政府部门主导,企业、行业协会等市场主体参与度低,标准与产业实际、技术前沿配置错位;缺乏跨区域、跨部门的标准协同制定机制,不同地区、不同部门、不同行业标准自成体系,难以形成统一规范。从标准实施保障机制来看,缺乏有效的标准推广机制,对标准的普及宣传不到位,市场主体认知度与接受度有限;监督检查机制不健全、专业监督检查队伍不足,难以开展日常监督检查;此外,对标准违规的处罚力度不够,无法倒逼经营主体主动遵守企业标准。

六、低空技术赋能农业绿色产业链的优化路径与对策建议

根据实践瓶颈与理论归因,结合要素重构、流程再造、价值增值三维理论框架,本文从技术、产业、制度三个维度,针对不同经营主体,提出具有针对性的系统性优化路径与对策建议。

(一) 构建绿色导向的低空技术体系

1. 核心技术的绿色化升级

针对核心技术绿色适配性不足问题,应以绿色发展理念为导向,聚焦不同主体需求,加大低空技术绿色化研发投入,提升技术的绿色性能。一是提升低空设备的绿色性能。研发长续航、低能耗的无人机电池技术,推广太阳能、氢能等新型清洁能源,降低作业碳排放;建立低空设备回收利用体系,减少废旧设备造成的环境污染;优化无人机设计,降低作业噪声,减少生态影响。二是研发绿色化的精准作业技术。针对小农户对

低成本技术的需求,应开发简易型绿色投入品精准施用设备,提高生物农药、有机肥利用率;针对合作社、农业企业规模化作业的需求,应研发病虫害绿色防控与精准节水灌溉集成技术,减少化学农药使用量和水资源浪费。三是推动数据处理技术绿色应用。搭建轻量化数据共享平台,适配小农户的简易操作需求,优化边缘计算、云计算等技术的应用,满足合作社、农业企业高效处理数据的需求,降低能耗及碳排放,避免数据浪费。

为此,应采取以下保障措施。一是政府设立低空技术绿色化创新专项基金。对小农户购买绿色低空设备给予等额补贴,对合作社、农业企业研发投入给予税收减免。二是建立“产学研用”一体化的绿色技术创新联盟。针对小农户适配技术开展专项攻关,为合作社、农业企业提供定制化技术研发服务。三是通过政府采购、绿色产品认证等方式,引导市场的绿色技术需求,激发企业研发绿色技术的积极性。

2. 技术集成的协同化升级

针对技术集成协同性不足问题,应充分考虑不同主体的生产模式,构建适配农业绿色生产场景的技术集成体系。一是开发一体化的软件系统。整合数据处理、作业控制等功能,简化操作界面,以适应小农户的使用习惯;强化系统精准度,满足合作社、农业企业规模化作业需求。二是打造个性化场景方案。针对粮食作物、经济作物、果蔬等不同作物品种,根据平原、山区、丘陵等不同地形条件,为小农户提供适合分散种植的简易集成方案,为合作社提供粮油、果蔬规模化种植集成方案,为农业企业定制种养结合、跨区域作业的高端集成方案。

为此,应采取以下措施。一是建立政府、企业、科研机构、行业协会等多方参与机制。充分听取各方面意见与建议,增强技术的适配性与场景的适用性。二是建设低空技术集成示范基地。针对小农户、合作社、农业企业展示适配方案;开展分层技术培训,提高农户与农业企业的技术应用能力。三是对技术集成创新企业给予奖励,鼓励企业推出适配不同主体需求的集成产品。

(二) 完善绿色协同的产业生态体系

1. 产业链各环节的绿色协同强化

针对产业链各环节绿色协同失衡问题,应结



合不同主体在产业链中的定位,强化生产、流通、监管协同,构建全链条绿色发展体系。^[55]一是强化生产与流通协同,引导农业企业牵头,合作社组织小农户,建立绿色农产品生产与流通的对接机制;推广低空冷链物流技术,为小农户提供集中配送服务,为合作社、农业企业搭建规模化流通网络,降低农产品流通损耗与碳排放。二是强化生产与监管协同,向小农户推送简易监管指引,为合作社、农业企业提供监管、生产数据共享服务,指导其调整生产行为;推动合作社、农业企业建立绿色生产信息追溯体系,将小农户纳入追溯网络,接受监管部门的动态监管。三是强化流通与监管协同,完善农产品流通追溯体系,实现全链条可追溯;加强流通监管,打击“伪绿色”行为,维护不同主体的合法权益。

为此,应采取以下措施。一是完善利益联结机制。推广“企业+合作社+农户”模式,通过利润分红、股份合作,保障小农户收益,兼顾合作社、农业企业利益,实现风险共担、利益共享。二是搭建统一的农业绿色产业链信息共享平台。为小农户提供产销信息,为合作社、农业企业提供全链条数据服务,用区块链技术保障信息的真实性与安全性。三是加大政策支持力度。对产业链协同效果好的主体给予财政补贴、税收优惠等支持,协调解决协同发展中的问题。

2. 产业服务体系的绿色化转型

针对产业生态绿色赋能不足问题,应聚焦不同主体的服务需求,加快产业服务体系绿色转型,为这些主体提供全方位的服务支撑。一是健全技术服务体系。为小农户提供设备租赁、上门维修、简易操作培训服务;为合作社提供技术指导、批量设备维修服务;为农业企业提供定制化技术咨询、全流程技术支持。创新“线上+线下”相结合的服务模式,以适配不同主体的需求。二是完善金融服务体系。降低小农户贷款门槛,为其提供小额信贷支持;为合作社提供批量设备信贷、联合担保服务;为农业企业推出无人机融资租赁、绿色农业保险等专项产品,满足其多样化需求。三是加强人才培养。建立低空技术与农业绿色生产复合型人才培养体系,在高校与职业院校开设相关专业,培养专业技术人才;为小农户开展简易操作培训,为合作社、企业培养复合型技术与

管理人才,并引进高端人才。四是完善市场服务体系。拓宽小农户销售渠道,为合作社、企业搭建电商平台与交易市场;健全绿色农产品认证体系,加强宣传与推广,引导绿色消费。

为此,应采取以下措施。一是政府制定产业服务体系发展规划。加大公共服务平台投入,提升服务能力。二是激发市场主体活力。鼓励社会资本参与产业服务体系建设,培育一批专业化的服务企业,形成政府引导、市场主导、社会参与的服务体系建设格局。同时加强对服务企业的监管,规范服务行为,提高服务质量。三是行业协会发挥桥梁纽带作用。协调服务主体之间的关系,制定行业规范与服务标准,推动行业自律与健康发展。

(三) 健全适配的制度保障体系

1. 政策法规的精准化完善

针对政策法规适配性不足问题,结合不同主体特点,精准完善政策法规。一是优化低空空域管控。简化小农户农业无人机作业审批流程,推行即时审批;为合作社、农业企业开辟规模化低空作业专用空域,明确作业规范;建立农业无人机作业安全监管机制,保障作业安全。二是加强政策协同。将低空技术应用纳入农业绿色生产政策支持范围,对小农户给予设备补贴,对合作社、农业企业给予财政补贴、税收优惠等支持;制定专项协同政策,形成政策合力。三是完善知识产权保护。加大对低空技术创新成果的知识产权保护力度,打击侵权行为;健全交易机制,促进创新成果转化,为企业、合作社提供技术支撑,间接惠及小农户。

为此,应采取以下措施。一是深入调研不同主体需求,广泛听取农户、农业企业、科研机构等主体的意见与建议,提高政策的针对性;同时根据低空技术、农业绿色产业链发展趋势,制定具有前瞻性的政策法规。二是建立跨部门协同机制,避免政策冲突、交叉与重复;同时加强跨部门政策执行监督。三是多渠道宣传政策,为小农户提供通俗解读,为合作社、农业企业提供专项指导;同时建立政策反馈机制,对政策进行动态优化调整。

2. 标准体系的系统化构建

针对标准体系不完善问题,结合不同主体执



行能力,构建系统化的标准体系,规范低空技术在农业绿色产业链发展中的应用。一是健全低空技术应用标准。制定简易的操作规范以适配小农户需求,制定规模化作业标准以适配合作社、农业企业需求;规范数据质量、设备检测标准,保障技术应用效果。二是制定统一的技术标准,明确低空设备接口、数据格式、作业规范,实现设备兼容与数据互通;制定技术集成评价标准,规范技术集成行为。三是统一农业绿色生产标准。整合不同地区、不同部门制定的绿色农产品认证标准、生产技术标准等,建立统一的全国性绿色生产标准体系;加强绿色生产标准与低空技术应用标准的衔接,引导小农户、合作社、农业企业按照标准从事农业生产。

为此,应采取以下措施。一是建立多方参与的标准制定机制。充分发挥政府、企业、科研机构、行业协会等的作用,在借鉴国际经验的基础上,结合不同主体实际制定标准。二是建立标准的动态更新机制。根据技术进步与产业发展需要,及时修订与完善标准,以保障标准的时效性与适用性。三是将标准纳入相关培训内容,在项目申报、产品认证中强化标准考核,推动标准的全面落实。

七、研究结论与未来展望

(一) 研究结论

本文基于产业融合、要素配置与循环经济理论,构建了低空技术重塑农业绿色产业链的三维理论框架,深入分析了低空技术应用的实践瓶颈与理论归因,并提出技术、产业、制度三位一体的优化路径及相应的对策建议。主要研究结论如下。

一是低空技术与农业绿色产业链具有高度适配性。低空技术具有灵活性强、精准度高、效率突出、碳排放低等核心特征,能够有效破解农业绿色产业链的资源约束、环境污染、效率偏低等痛点,为农业绿色转型提供技术支撑;农业绿色产业链的生产、流通、监管全环节对精准化、低碳化、动态化的技术需求,与低空技术的功能高度契合,为低空技术应用提供了广阔的场景。

二是低空技术通过三维机制重塑农业绿色产业链。在要素重构方面,低空技术推动土地资源

数字化与精细化管控、劳动力结构智能化转型、资本技术构成高端化演进,实现生产要素绿色升级。在流程再造方面,低空技术驱动生产环节精准化与绿色作业模式重构、流通环节低碳化与协同化、监管环节动态化管控,推动全链条绿色协同体系的构建。在价值增值方面,以低空技术实现生态价值的量化与转化,推动农业与二三产业深度融合,拓展绿色产业边界,实现农业绿色产业链的价值增值。

三是低空技术重塑农业绿色产业链面临多重瓶颈。在技术层面,核心技术绿色适配性、技术集成协同性不足,制约了技术赋能效果。在产业层面,产业链各环节绿色协同失衡、产业生态绿色赋能不足,影响了全链条的绿色效率。在制度层面,政策法规适配性不足,标准体系不完善,缺乏有效的制度保障。这些瓶颈的形成源于技术创新存在路径依赖、市场需求导向偏离、利益联结机制不完善、政策制定协同性不足等因素。

四是破解瓶颈需要构建技术、产业、制度三位一体的优化体系。在技术层面,需推进核心技术绿色化升级与技术集成协同优化,构建绿色导向的低空技术体系。在产业层面,要强化产业链各环节绿色协同发展,推动产业服务体系绿色化转型,完善绿色协同的产业生态。在制度层面,需完善政策法规体系,构建系统化的标准体系,为低空技术重塑农业绿色产业链提供有力的制度保障。

(二) 研究展望

未来可从以下方面开展理论研究。一是深化对技术赋能机制的量化研究。构建更精准的计量模型,量化分析要素重构、流程再造、价值增值各机制对农业绿色产业链的影响程度与交互效应。二是拓展主体异质性研究。深入分析不同规模经营主体、不同区域农户对低空技术的适配差异与赋能路径,丰富主体层面的理论研究。三是加强制度与技术、产业协同机制的研究。构建技术、产业、制度协同理论模型,揭示三者协同作用发挥的内在规律。四是探索数字经济背景下农业绿色产业链的新形态与新规律。分析低空技术与人工智能、区块链、元宇宙等新兴技术融合对农业绿色产业链的影响,拓展理论研究的边界。



〔参考文献〕

〔1〕周钰哲:《低空经济发展的理论逻辑、要素分析与实现路径》,《东南学术》2024年第4期。

〔2〕卢泓钢、丁永鹏、吴伟光:《农业绿色发展先行区政策的效果评估——基于浙江省县域样本的实证研究》,《研究与发展管理》2024年第4期。

〔3〕许源源、门焱:《新质生产力赋能乡村产业振兴:现实依据、关键任务与系统框架》,《求索》2025年第6期。

〔4〕侯冠宇、余镐:《天空下的“新蓝海”:低空经济赋能乡村全面振兴》,《湖南社会科学》2025年第3期。

〔5〕宋莉莉、张瑞涛:《我国粮食生产变化趋势及风险研判》,《中国农业科技导报》2023年第2期。

〔6〕阮海波:《大食物观下种粮小农户迈向共同富裕的路径探赜——基于优势视角的分析》,《当代经济管理》2024年第3期。

〔7〕Rao Mogili U. M., Deepak B. B. V. L., “Review on Application of Drone Systems in Precision Agriculture,” *Procedia Computer Science*, vol.133, (2018), pp.502-509.

〔8〕赵德楠、兰玉彬:《植保无人机静电喷雾技术研究现状与展望》,《农业工程学报》2025年第12期。

〔9〕Michels M., Cord-Fried V. F., Oliver M., “A Trans-Theoretical Model for the Adoption of Drones by Large-Scale German Farmers,” *Journal of Rural Studies*, vol. 75, (2020) pp.80-88.

〔10〕朱齐超、李亚娟、申建波等:《我国农业全产业链绿色发展路径与对策研究》,《中国工程科学》2022年第1期。

〔11〕周月书、尹梓鉴:《农业保险是否促进了中国农业绿色发展?》,《华中农业大学学报(社会科学版)》2024年第1期。

〔12〕Adnan N., Nordin S. M., Bahrudin M. A., Tareq A. H., “A State-of-the-Art Review on Facilitating Sustainable Agriculture through Green Fertilizer Technology Adoption: Assessing Farmers Behavior,” *Trends in Food Science & Technology*, vol.86, (2019), pp.439-452.

〔13〕李翠霞、许佳彬、王洋:《农业绿色生产社会化服务能提高农业绿色生产率吗?》,《农业技术经济》2021年第9期。

〔14〕宋瑛、付俊治、张驰:《数字技术创新能否提升农业供应链韧性——来自涉农上市企业的经验证据》,《中国农村经济》2025年第11期。

〔15〕徐晓鹏、刘慢慢:《社交电商中多元信息源信任对消费者绿色农产品购买行为的影响》,《中国流通经济》2025年第8期。

〔16〕黄毅祥、吴梓敏、赵敏娟:《品质认证、礼盒包装与农产品线上消费溢价——基于京东平台苹果产品的数据挖掘分析》,《南开管理评论》2025年第9期。

〔17〕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》,《农业经济问题》2025年第2期。

〔18〕王建华、周瑾:《农业绿色生产转型的内在动力——基于微观主体实践与外部结构性因素的影响分析》,《农村经济》2022年第12期。

〔19〕管辉、雷娟利:《数据要素赋能农业现代化:机理、挑战与对策》,《中国流通经济》2022年第6期。

〔20〕薛领、孙欣彤、潘苏:《我国低空经济的基础支撑、关键领域与发展重点》,《社会科学辑刊》2025年第2期。

〔21〕文雁兵、周艳、汪寿阳:《农业如何借“数智”提“新质”从传统走向现代?——基于青莲食品全产业链数字化平台的案例研究》,《管理世界》2025年第7期。

〔22〕钟成林、胡雪萍:《低空经济高质量发展的新质生产力逻辑与提升路径》,《深圳大学学报(人文社会科学版)》2024年第5期。

〔23〕李晓华:《政府引导、产业生态构建与低空经济发展》,《改革》2025年第2期。

〔24〕〔38〕Akdoğan C., Özer T., Oğuz Y., “Design and Implementation of an AI-Controlled Spraying Drone for Agricultural Applications Using Advanced Image Preprocessing Techniques,” *Robotic Intelligence and Automation*, vol. 44, no. 1 (2024), pp.131-151.

〔25〕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》,《中国农业大学学报》2022年第1期。

〔26〕王宝义:《我国低空经济的技术经济范式分析与发展对策》,《中国流通经济》2024年第9期。

〔27〕Qiu H., Wesenbeeck C. F. A., Veen W. C. M., “Greening Chinese Agriculture: Can China Use the EU Experience?” *China Agricultural Economic Review*, vol.13, no.1(2020), pp.96-123.

〔28〕陈洁、王广振:《新发展格局下我国农业新质生产力发展的推进方略》,《理论探索》2025年第2期。

〔29〕陈雪婧、刘雨航:《互动、认知与制度:绿色农业中的消费者信任建构机制——基于皖南Q县茶产业的案例考察》,《华中师范大学学报(人文社会科学版)》2025年第6期。

〔30〕Mungkung R., Sorakon K., Sitthikitpanya S., Gheewala S. H., “Analysis of Green Product Procurement and Ecolabels Towards Sustainable Consumption and Production in Thailand,” *Sustainable Production and Consumption*, vol. 28, no. 5 (2021), pp.11-20.

〔31〕Pfeffer J., “Size and Composition of Corporate Boards of Directors: The Organization and Its Environment,” *Administrative Science Quarterly*, vol.17, no.2(1972), pp.218-228.

〔32〕Restuccia D., Rogerson R., “Policy distortions and Aggregate Productivity with Heterogeneous Establishments,” *Re-*



view of Economic Dynamics, vol.11, no.4(2008), pp.707-720.

[33] M. Yaqot, B. C. Menezes and T. Al-Ansari, "Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture Towards Circular Economy: A Process System Engineering (PSE) Assessment," in M. Türkay and R. Gani, eds., *Computer Aided Chemical Engineering*, Netherlands: Elsevier, 2021, p.1559.

[34] 彭长生、刘阳、钟钰:《高标准农田建设政策实施对粮食生产气候韧性的影响》,《中国农村经济》2025年第11期。

[35] 高玥、胡梅君:《有机茶园装上“智慧大脑”》,《云南日报》2024年10月30日,第6版。

[36] 姜长云:《农业新质生产力:内涵特征、发展重点、面临制约和政策建议》,《南京农业大学学报(社会科学版)》2024年第3期。

[37] 王建华、吴雨娇、钊露露:《资本禀赋、农业绿色补贴对农户绿色农业技术采纳行为的影响——基于感知价值的遮掩效应》,《南京农业大学学报(社会科学版)》2025年第2期。

[39] 张军伟、杜建军:《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》,《上海财经大学学报》2025年第6期。

[40] 邹晓蔓、张成鹏、涂圣伟:《农业新质生产力的生成逻辑、典型场景和推进方略》,《农村经济》2026年第1期。

[41] 于法稳:《农业领域新质生产力的生态内涵及发展方式》,《人民论坛·学术前沿》2024年第10期。

[42] 郑吉伟、初传凯:《低空经济的空间生产逻辑——基于马克思主义政治经济学的阐释》,《内蒙古社会科学》2025年第5期。

[43] 陈超凡、康欣慰:《全链条塑造绿色低空产业》,《经济日报》2025年12月8日,第5版。

[44] 刘春山、李梦月、陈思羽等:《精准施肥技术的研究现状及发展趋势》,《农机化研究》2025年第7期。

[45] 张远新、张文羽:《数字技术赋能中国式农业现代化的必然逻辑、现实难题及推进重点》,《西安财经大学学报》2025年第1期。

[46] 龙卫球:《我国低空经济发展引入技术规制的语境和内涵——以创新技术经济认识论为出发》,《中国法律评论》2025年第3期。

[47] 高国生、叶林祥、支海兵:《我国农产品流通效率时空演变、地区差异与收敛性》,《经济问题》2025年第1期。

[48] 代立、杨汉升、杨钢桥、魏威:《政策干预下农业生产性服务的碳减排路径与异化效应研究》,《自然资源学报》2025年第10期。

[49] 轩轶轲:《农业数字化转型背景下农业绿色发展:逻辑、挑战与路径整合》,《世界农业》2025年第12期。

[50] 高静、周吉:《合作社高质量发展促进农业绿色生产率提高的机理与实效》,《中国农业资源与区划》2024年第5期。

[51] 樊一江、卢恺、张颖:《借鉴类空资源管理经验加快建立健全低空空域权属制度体系》,《宏观经济管理》2025年第12期。

[52] 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》,《资源科学》2025年第8期。

[53] 杨峰、周建超:《我国低空经济发展的法治保障路径研究》,《江西师范大学学报(哲学社会科学版)》2025年第4期。

[54] 沈映春:《低空经济“管得住才能放得开”》,《人民论坛》2026年第1期。

[55] 于法稳:《新质生产力赋能农业绿色转型:理论逻辑、现实挑战与全产业链优化路径》,《农村经济》2026年第2期。

【责任编辑:王晓凌】



学人风采



杜传忠，南开大学经济与社会发展研究院教授、博士生导师，产业经济研究所所长，南开大学英才教授。兼任中国工业经济学会常务理事，工业经济史专业委员会副主任。主要研究领域为产业经济、智能经济。独立或作为第一作者发表学术论文200余篇，多篇文章被《新华文摘》《中国社会科学文摘》、人大复印报刊资料全文转载。独立撰写或作为第一作者撰写学术著作4部，合著10余部。主持完成国家社会科学基金重大项目2项、国家社会科学基金重点项目3项。另外，还主持完成国家发展和改革委员会、教育部、科技部等中央部委和地方政府委托的研究项目30余项。研究成果有2项获得高等学校科学研究优秀成果二等奖（人文社会科学）、2项获得天津市社会科学优秀成果一等奖（含独立或合作成果）。在省部级内参发表咨政报告20余篇，其中多篇咨政报告获得省部级领导肯定性批示。



于法稳，中国社会科学院长城学者、二级研究员，享受国务院政府特殊津贴专家，中国社会科学院农村发展研究所生态经济研究室主任，中国社会科学院生态环境经济研究中心主任，中国社会科学院大学应用经济学院教授、农业农村绿色发展方向博士生导师，《生态经济》副主编、编委会主任。研究方向：生态经济理论与方法、资源管理、生态治理和农业农村绿色发展等。在《中国农村经济》《中国人口·资源与环境》《中国软科学》等权威期刊，以及《人民日报》《光明日报》《经济日报》等国家级报纸发表论文400余篇，出版专著40余部（含合著、参编）；作为副主编出版《生态经济建设大辞典》《英汉生态经济词典》等大型工具书。



曹辛华，上海大学二级教授、博士生导师、博士后合作导师，上海大学中华诗词创作研究院院长、现当代旧体文学研究所所长；南昌大学特聘研究员、南昌大学中华诗词教育传播研究院院长、现当代旧体文学研究院院长。兼任中华诗词学会副会长、现当代诗词研究工作委员会主任、中国文章学会副会长兼秘书长、中国韵文学会常务理事、中国词学研究会常务理事、中国近代文学会理事、宋代文学研究会理事。主编《民国旧体文学研究》，出版著作《唐宋诗词的文体观照》《民国词史考论》《全民国词·第一辑》等。主持并完成国家社会科学基金重大项目“民国词集编年叙录与提要”等，成果入选国家哲学社会科学成果文库。近年发表论文20多篇，其中被《中国社会科学文摘》《新华文摘》转载多篇。

