引用格式：王勇，杨宇森，曾继民，等. 低空经济视角下低空科技对低空产业发展的影响. 中国科学院院刊，2025, 40(10): 1853-1866, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20250708005.
Wang Y, Yang Y S, Zeng J M, et al. Impact of low-altitude technology on low-altitude industry development from perspective of low-altitude economy. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2025, 40(10): 1853-1866, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20250708005. (in Chinese)

低空经济视角下低空科技对低空产业发展的影响

王 勇[1*] 杨宇森[1] 曾继民[1] 何正龙[1,2] 岑宗羲[1,2]

1 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室 北京 100101
2 中国科学院大学 资源与环境学院 北京 100049

摘要 低空经济作为新质生产力的典型代表和战略性新兴产业，已成为推动我国经济高质量发展和实现科技自立自强的重要引擎。文章系统梳理低空经济发展历程，深入阐释低空科技内涵特征及其对产业发展的影响机制。研究发现，低空科技是制约低空经济发展的关键瓶颈，其通过“辐射效应”“牵引效应”和“网络效应”三重作用机制协同运作，推动低空产业系统性发展。然而，当前低空科技向产业转化仍面临技术成熟度低、市场需求碎片化、监管环境滞后和产业生态不完善等障碍。应立足全国统一大市场战略布局，统筹推进技术攻关、市场培育、制度创新和生态建设，加快形成低空科技创新与产业发展的良性循环，为建设现代化产业体系、服务国家重大战略目标提供有力支撑。

关键词 低空经济，低空科技，新质生产力，产业转化

DOI 10.3724/j.issn.1000-3045.20250708005
CSTR 32128.14.CASbulletin.20250708005

1 低空经济的“前世今生”

当前，全球正处于新一轮科技革命和产业变革的历史性交汇期[1]，新质生产力成为推动经济高质量发展的核心驱动力[2]。在这一重大时代背景下，低空经济作为新质生产力的典型代表①和引领中国经济转型的战略性新兴产业[3]，正承载着国家对于构建现代化产业体系、实现高水平科技自立自强的战略期待。

*通信作者

资助项目：国家重点研发计划（2022YFC3800700），中国科学院战略性先导科技专项（B类）（XDB0740200）
修改稿收到日期：2025年9月18日

① 工信部：四方面重点发力 加快打造低空经济增长新引擎. (2024-04-18)[2025-09-18]. http://www.scio.gov.cn/live/2024/33778/fbyd/202404/t20240428_845350.html.

低空经济概念的提出既顺应了我国低空飞行领域的长期实践经验，也洞察了未来科技创新产业的发展趋势，对于推动经济高质量可续发展具有重要意义。这一概念最早萌芽于2009年中国通用航空发展研究研讨会[4]，会议针对我国通用航空发展滞后问题，提出通过开发低空空域资源培育新兴经济形态的战略构想。然而早期的低空经济没有摆脱通用航空这一单一行业视角，关注点集中在航空器本身的技术性能和飞行作业能力上，这种传统思维模式忽略了低空空域作为稀缺资源的经济价值和产业辐射效应。

在随后的10余年间，随着低空空域资源管理改革的不断深化发展，航空实践和理论探索逐步突破传统行业视角，开始关注以通用航空为枢纽，整合航空运输、高端制造和现代服务集聚发展形成的复合型经济形态。2021年2月《国家综合立体交通网规划纲要》正式纳入低空经济这一概念，标志着该概念在政策层面得到确认，完成了从行业术语到经济形态的范式转换[5]。此后，在国家层面，低空经济的战略地位不断提升，相继出现在中央经济工作会议和政府工作报告中[6]。工业和信息化部、科学技术部、财政部、中国民航局等各部门相应出台了低空空域分类管理、低空基础设施建设、低空应用场景拓展等配套政策方针，驱动理论研究向产业融合、技术创新、制度创新等维度深化。2025年6月，十四届全国人大常委会第十六次会议审议的《中华人民共和国民用航空法》（修订草案）二次审议稿，专门增设“发展促进”一章，明确提出“国家采取措施优化低空空域资源配置，推动建设民用低空飞行相关服务监管平台，建立健全适应低空经济发展要求的适航审定、飞行管理等制度和标准，拓展应用服务领域，促进低空经济发展”。这一立法举措标志着低空经济开始被纳入国家法律保障体系②，迎来快速发展的黄金期。2024年，我国低空经济规模达6 702.5亿元，增速为32.5%。根据预计，未来我国低空经济将保持快速增长态势，2026年有望突破万亿规模[4]。

值得注意的是，这一发展路径与西方国家存在显著差异。美国航空航天局（NASA）和欧洲单一天空空中交通管理研究（SESAR）更多聚焦于城市空中交通（UAM）、先进空中交通（AAM）和无人机空域蓝图（U-Space）等低空空域管理方法的突破[7]，包括制定相关的数据和通信标准，应对碰撞或危害公共安全风险增加带来的挑战等[8]，其空域结构划分相对简单，监管框架较为成熟。相比之下，中国则更强调经济形态的系统构建，并以此为指导思想，灵活划分低空空域[9]，提高空域的运行和利用效率，并随着低空经济的加速推进，不断迭代与之相适应的低空监管体系。这种差异反映了不同国家对于低空资源开发利用的战略认知差异，也凸显了中国在该领域的理论创新和实践探索的独特优势，形成了具有中国特色的低空经济发展新范式。

当前学术界对低空经济内涵的讨论呈现多元化，不同学者分别从宏观层面[10]、经济学视角[11]、科技视角[12]、产业视角[3]等不同角度出发解构低空经济的内涵外延。尽管对低空经济的理解众说纷纭，但仍可以总结出其中的认知共识，即低空经济的核心是低空飞行活动，载体是低空飞行器，主要场所是低空空域。然而，在共识之外，不同视角的定义也存在明显分歧。宏观层面更注重政策导向和产业引导，强调战略性新兴产业的地位；经济学视角更关注商业价值和市场模式；科技视角则更偏向关键性的科学技术，注重概念的科学性和逻辑性；产业视角则更加凸显对上下游产业的辐射带动作用。

② 新华社. 十四届全国人大常委会第十六次会议举行 赵乐际主持. (2025-06-24)[2025-07-03]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202506/content_7029223.htm.

这种定义分歧并非缺陷，而是不同主体基于自身角色和利益诉求的合理表达。但过度的概念泛化可能导致政策制定和产业发展的偏差，因此，有必要在共识多元性的基础上，界定更加明确的内涵边界。基于对现有定义的分析，可以将低空经济定义为：以各类民用低空飞行器的制造及其在低空空域的飞行活动为牵引，辐射带动相关领域融合发展的综合性经济形态，其兼具有空间立体性、区域依赖性、数字生态性、产业融合性4个主要特征[13]。

进一步深入分析低空经济的内涵可以发现，其实质是对现有地面及其他经济作业形式的突破性补充或替代，主要在地面及其他经济形式无法涉及或无法提供同等生产效率的领域发挥作用；正是这一特点，决定了低空经济具有气象条件依赖性高、应用场景不确定性强、技术转化周期长等固有属性，使其目前面临的复杂性和系统性挑战远超一般新兴产业[14]。而在众多挑战中，低空科技作为低空飞行活动实现的技术前提和低空经济实施的基础支撑，在低空经济和低空产业发展中起到决定性作用；它不仅影响发展的速度，更决定着发展的质量和可持续性[15]。因此，有必要从低空科技的视角，系统阐释其内涵和特征。

2 低空科技的“庐山真面目”

2.1 低空科技的内涵

回溯低空科技的发展脉络，其技术雏形可追溯至18世纪末期的热气球技术，彼时的低空飞行主要依赖于基础的机械技术[16]。进入20世纪后，随着航空工业的兴起和电子技术的发展，低空科技开始向多学科交叉融合方向演进，特别是21世纪以来，伴随着信息技术革命的深入，低空科技迎来了前所未有的技术浪潮。据统计数据显示，我国低空经济相关发明专利申请公开量从2014年的852件激增至2023年的14 134件，特别是2021—2023年连续3年均保持在1万件以上的高位水平[17]，在无人机制造、电动垂直起降飞行器（eVTOL）技术研发等细分领域已经达到国际领先水平，充分反映了低空科技发展的强劲势头。

然而，当前人们对于“低空科技”内涵的界定存在一定局限，大多数研究将其等同于无人机技术或简单理解为传统通用航空技术在低空领域的延伸应用。实际上，低空科技本质上是一个技术融合的新范式，它既不是传统航空技术的简单降维，也不是新兴技术的机械叠加，而是在满足低空飞行活动所需的特定低空空域约束和高频次、多样化、智能化应用需求驱动下形成的技术体系重构。深入剖析现阶段低空科技的技术构成，可以将其归纳为主要由低空飞行器制造技术、无人机远程通信与控制技术、感知与导航定位技术、低空公共航路规划与空域精细管理技术、大数据、云计算与人工智能技术等五大核心技术构建的体系，每项技术都在低空科技体系中扮演着不可替代的角色（图1）。

低空飞行器制造技术作为整个体系的物理载体和基础平台，承担着将技术创新转化为实体产品的关键使命，正在经历从传统“制造”向智能“智造”的深刻变革。传统航空器设计遵循“安全第一、性能至上”的理念③，而低空飞行器设计则更强调“成本可控、场景适配”[18]。以eVTOL为代表的新型飞行器通过模块化组合实现多场景适应，体现了低空经济小批量、多品种、快响应的市场特性在技术层面的映射。

无人机远程通信与控制技术在低空科技体系中发挥着“神经网络”的关键作用，是连接地面操控系统与空中飞行器的重要纽带，承担着信息传输、指令下达、状态监控等核心功能，正从简单的遥控向复杂的

③ 工业和信息化部, 科学技术部, 财政部, 等. 通用航空装备创新应用实施方案(2024—2030年). (2024-03-27). https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2024/art_4ce8d09c15ee4fb1aefc3d5dfbbb6584.html.

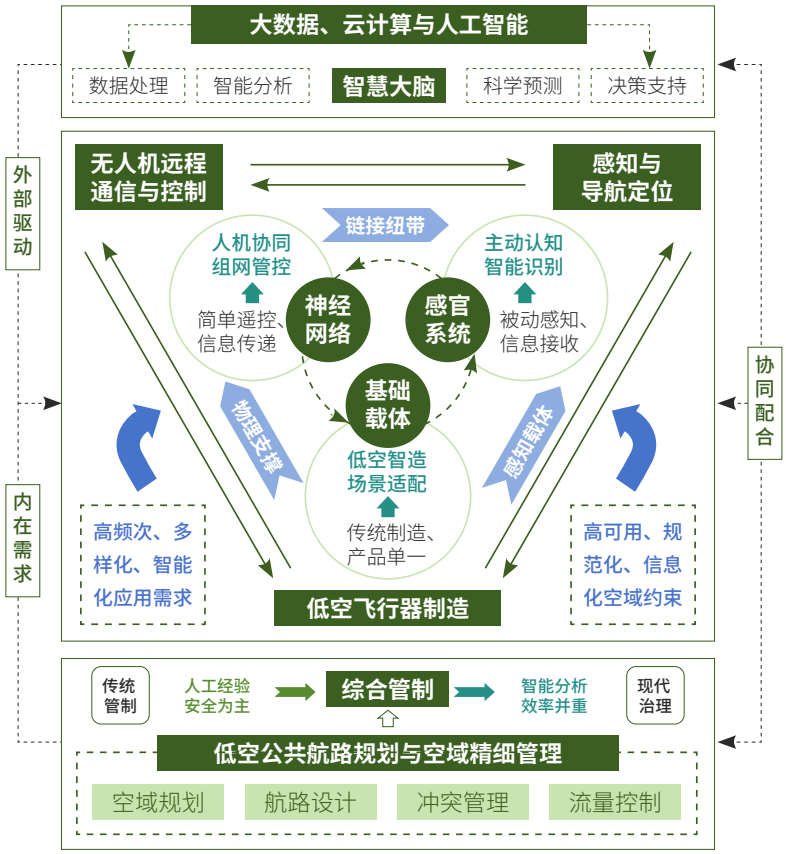


图 1　低空科技核心技术体系

Figure 1　Core technology system of low-altitude technology

智控升维，体现为从“人机主从”向“人机协同”、从“单机控制”向“组网管控”的双重转变[19]。

*感知与导航定位技术*在低空科技体系中承担着“感官系统”的重要职能，为低空飞行器提供精确的环境感知和位置信息，是实现自主飞行、避障导航、精准作业的技术基础，正在经历从“被动感知”到“主动认知”的质变，通过多传感器融合与人工智能算法的深度结合实现主动环境建模和智能态势理解，以应对低空空域环境相比高空更加复杂多变的特点[20]。

*低空公共航路规划与空域精细管理技术*在低空科技体系中发挥着“交通管制系统”的关键作用，承担着空域规划、航路设计、冲突管理、流量控制等重要功能，正在推动空域管理从传统的“管制”模式向现代的“治理”模式转型。体现为管理理念从“安全为主”向“安全与效率并重”的升级和技术手段从人工经验判别向数字化、智能化、自动化的转变，这种转型是低空经济高频次、小规模、多样化特征的内在要求[21]，我国正在推进的空域分类管理改革正是这种转型的制度化表达。

*大数据、云计算与人工智能技术*在低空科技体系中扮演着“智慧大脑”的核心角色，为整个系统提供数据处理、智能分析、决策支持等高级功能，是实现低空科技体系智能化升级的关键驱动力，正在实现从信息化到智能化的跃升。具体体现为从“数据驱动”向“智能决策”的演进，针对低空经济产生的多源异构、实时性强、信息密度高的数据，通过构建低空领域的“数字孪生+人工智能”技术体系实现数据的处理、预测和决策功能[22]。

这五大技术体系相互依存、协同配合，共同构成了低空科技的完整架构，形成了技术融合创新的有机整体，在推动低空经济发展中起到关键作用。

2.2 低空科技的典型特征

对低空科技技术构成和体系进行深入分析，可以发现低空科技具有4个典型特征：技术融合的“化学反应”、应用场景的“双向拉动”、系统复杂性的“涌现”和安全可靠性的“零容忍”。这些特征不仅体现了低空科技作为新兴技术体系的独特性，更揭示了其在推动低空经济发展中的内在机制和发展逻辑。

*技术融合的“化学反应”特征是低空科技最为突出的特征之一。*低空科技的融合性不是简单的技术叠加，而是类似“化学反应”的深度融合，这种融合产生了“1+1>2”的协同效应，催生了传统技术体系中不存在的新功能和新能力。例如，5G通信与人工智能

技术的融合不仅提升了通信质量，更实现了通信网与感知网的一体化，产生了新的技术范式[23]。这种化学反应特征要求重新审视技术创新的路径和方式，传统的技术创新往往沿着既定技术轨道渐进式发展，而低空科技的创新更多体现为跨领域技术的集成创新和跨越式创新，形成了技术突破的新模式。

*应用场景的“双向拉动”特征体现了低空科技发展的独特路径。*不同于传统的技术推动或需求拉动模式，低空科技更多表现为技术创新与应用场景相互促进、螺旋式发展的特征：一方面，具体应用场景的需求牵引着技术发展的方向和重点，形成了需求定义技术的创新模式；另一方面，技术的每一次突破又会催生出新的应用场景和商业模式，形成了“需求引领—技术创新—场景拓展—需求升级—技术再创新”的良性循环。这种特征的积极意义在于技术发展与市场需求的高度契合，确保了技术创新的实用性和商业价值，同时也通过技术突破不断拓展应用边界，创造新的市场空间。

*系统复杂性的“涌现”特征反映了低空科技作为复杂技术系统的本质属性。*低空科技系统的复杂性不仅体现在技术要素的多样性上，更体现在系统行为的“涌现”特征上，单个技术组件的简单组合可能产生意想不到的系统行为，这种非线性的复杂性是低空科技系统的内在特征。这种“涌现”特征要求人们采用整体性思维来理解和发展低空科技，不能简单地通过优化单个技术组件来提升系统性能，而需要从系统层面进行整体设计和优化，这对技术管理和系统工程能力提出了更高要求。

*安全可靠性的“零容忍”特征构成了低空科技发展的基本约束条件。*与其他新兴技术领域不同，低空科技对安全可靠性具有“零容忍”的严格要求，这种要求不仅来自技术本身的特点，更来自社会对于低空飞行安全的高度关注。安全性不是低空科技的附加要求，而是基础约束条件，任何低空科技创新都必须在确保安全的前提下进行[24]。这种“零容忍”特征对技术创新提出了更高要求，需要在创新与安全之间找到平衡点，如何在保证安全的前提下实现技术创新，如何通过技术创新提升安全水平，是低空科技发展的永恒主题。

2.3 低空科技的制约与突破

尽管低空科技具有上述典型特征和重要作用价值，但在现实发展过程中仍面临诸多制约因素。深入分析这些制约因素的本质特征和内在机制，对于制定有针对性的突破策略具有重要意义。当前低空科技发展主要面临4个方面的关键制约，这些制约相互交织、相互影响，构成了制约低空科技发展的综合性障碍。

*（1）“系统性”的技术瓶颈。*当前低空科技面临的瓶颈不是单一技术问题，而是系统性技术能力不足，这种系统性不足主要表现为3个层面：*① 关键核心技术的供给能力不足。*我国目前航空动力技术严重依赖进口，航空发动机进口依赖度达67.08%，在高端航空动力系统方面缺乏自主可控能力[25]。此外，核心零部件国产化率偏低，低空产品精密元器件等核心零部件国产化能力较弱[26]。*② 技术集成的协同能力不足。*低空科技作为多技术融合的复杂系统，集成了互联网、大数据、云计算、人工智能等信息化技术。而现阶段，我国在信息技术关键前沿领域存在突出的“缺芯少核”问题，制约了新技术在低空制造业领域的融合应用[27]。*③ 技术应用的转化能力不足。*传统的“卡脖子”分析往往聚焦于具体的技术产品或零部件，但低空科技的瓶颈更多体现在技术体系与应用场景融合的整体性和协调性上，即使突破了某些关键技术，如果缺乏对市场需求的深刻理解，导致技术创新与实际应用需求之间脱节，仍然难以获得持续的研发资金投入，无法形成整体优势。这种系统性特征要求必须从技术和市场的整体角度来理解和解决技术瓶颈问题。

*（2）技术创新与技术标准的匹配难题。*正如创新理论所揭示的，约束往往是创新的催化剂[28]。低空科

技正是在空域约束、成本约束、安全约束的多重压力下，实现了从“技术适应”到“技术创造”的跃迁。这与传统的“技术推动型”创新不同，低空科技的发展路径更多表现为应用场景需求先行，技术创新紧随其后。在这种需求牵引模式下，分散化的应用场景成为技术创新的主要驱动力，涵盖农林植保、物流配送、应急救援、低空文旅等多元化领域，每个领域的技术需求、安全要求、运营特点都具有显著差异。这就导致技术标准制定面临兼顾“统一标准与灵活创新”的内在矛盾。一方面，涉及飞行安全、空域管理等核心安全领域的技术标准具有基础性和原则性特征，需要优先建立统一规范或法规标准。例如，已出台的《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》《电动垂直起降航空器（eVTOL）起降场技术要求》[29]等，否则可能带来安全隐患，影响行业规范发展和公众信任建立。另一方面，由于各细分领域的技术路径和商业模式仍处于快速迭代期，过早的标准化可能形成“创新桎梏”，抑制技术多样性探索。因此，对于非安全核心领域，宜采取先达到规模门槛后标准化的策略，让市场充分验证技术可行性和商业可持续性后，再形成相应的行业标准。

（3）安全监管的“创新—安全”挑战。低空科技创新与安全监管之间存在天然的张力，过度强调安全可能转化为复杂冗长的审批流程，大幅提高了创新企业的准入门槛，或是要求技术开发投入更多成本满足安全要求，导致创新成本急剧上升，抑制技术创新；而过度追求创新又可能带来包括飞行安全、环境安全、隐私安全和数据安全等在内的复杂安全风险。如何在创新与安全之间找到动态平衡，是低空科技发展的核心挑战。这种平衡需要监管理念和监管方式的创新：传统的“严格管制”模式需要向“智能监管”模式转变，通过技术手段提升监管效率，通过制度创新为技术创新留出空间，在技术发展过程中不断调整和优化，确保低空飞行器的设计、运行和数据处理符合法规要求。

（4）产业化应用的“成本—性能”悖论。低空科技面临典型的“成本—性能”悖论：高性能技术往往意味着高成本，而低空经济的产业化应用又要求成本可控，这种悖论的根源在于技术成熟度与市场需求之间的不匹配。从发展规律看，任何新兴产业的成长都会经历技术探索、市场培育、规模化发展等阶段，当前低空经济正处于从技术探索向市场培育转换的关键节点，技术性能和经济效益有待提升，对地面或其他经济形式尚未形成明显优势，在一定程度上制约了低空经济在更大范围、更多场景的应用。而科技创新的突破程度将直接决定这一转换的成功与否，解决这一问题需要分阶段的技术发展策略：在技术发展初期，可以通过政府采购、示范应用等方式为高成本技术提供市场空间；在技术成熟期，通过规模化生产和技术优化实现成本下降；在技术普及期，通过标准化和规模化实现深度产业应用。

尽管低空科技发展面临上述多重制约，但这并不意味着低空科技价值的缺失，相反，正是这些制约的客观存在凸显了低空科技突破对于低空产业发展的关键意义。基于此，本文将进一步深入剖析低空科技对低空产业发展的多维影响机制，以求为制定针对性的产业政策和突破策略提供重要理论依据。

3 低空科技对低空产业发展的影响

低空科技之所以成为低空经济发展的关键瓶颈，根本原因在于其具有“基础性、先导性、全局性”的特征。“基础性”，是指低空科技构成了低空经济和低空产业发展的技术底座，无论是飞行器制造、运营服务还是基础设施建设，都必须依赖于坚实的技术基础。“先导性”体现在低空科技创新往往引领产业发展方向，技术突破决定着产业发展的可能性和产业竞争的“游戏规则”：在技术瓶颈存在的情况下，产业竞争主要体现为成本竞争和服务竞争，而在技术突破

之后，产业竞争将主要体现为技术竞争和生态竞争。“全局性”则表现为低空科技的影响不局限于低空产业发展的某个单一环节，而是能够通过“技术溢出效应”带动整个低空产业生态的跃升。这种业态的升级，将为低空产业在激烈的市场竞争中赢得主动权。深入剖析低空科技如何驱动低空产业发展，不仅有助于理解当前低空经济市场化的内在逻辑，更为突破产业发展瓶颈提供了理论支撑。

3.1 低空产业的产业结构与价值链条

低空产业是以低空空域为载体，以低空飞行活动为纽带，整合飞行器制造、运营服务、基础设施建设、监管保障等环节形成的综合性产业体系[30]。从产业属性看，低空产业呈现出3个突出特征：① 技术密集型，整个产业建立在低空科技的五大核心技术体系之上，技术创新是产业发展的第一驱动力；② 场景驱动性，产业发展高度依赖具体应用场景的拓展和深化，需求多样化将推动技术的差异化发展；③ 生态协同性，产业发展需要政府、企业、科研机构、用户等多元主体的深度协作，形成了复杂的利益共同体和价值链条。

基于对低空产业发展规律的深入分析，可以将其构成概括为上、中、下游的3层架构体系，每层都承担着特定的功能定位和价值创造使命。

（1）上游：低空飞行器研发与制造。作为整个产业链的源头，上游主要承担飞行器本体的设计、研发和制造功能，是技术创新最为活跃的环节。这一层级不仅包括传统通用航空器的制造，更重要的是新型低空飞行器如eVTOL、无人机等的研发制造。上游环节的技术水平直接决定了整个产业的基础能力和发展上限，其特点是技术壁垒高、研发投入大、创新周期长，但一旦实现突破，往往具有强烈的技术溢出效应[31]。

（2）中游：飞行器的组装、系统集成及售后服务。中游环节发挥着承上启下的关键作用，主要负责将上游的核心部件进行系统集成，形成完整的飞行器产品，同时提供维修保养、技术升级、培训服务等全生命周期服务。这一环节的特点是对系统工程能力要求高，需要具备强大的供应链整合能力和精细化的质量管控能力。中游环节的发展水平在很大程度上决定了低空产业的规模化程度和标准化水平。

（3）下游：行业应用与市场融合。下游是低空产业价值实现的最终环节，主要围绕具体应用场景提供专业化的低空运营服务飞行保障，包括巡检监测、应急救援、城市出行、物流配送、农业植保、文娱旅游等多个细分领域。下游环节直接面向最终用户，其发展状况直接反映了低空产业的市场接受度和商业化程度。这一环节的特点是应用场景多样化、商业模式创新活跃、对安全性和可靠性要求极高[32]。

3.2 低空科技对产业发展的多维影响机制

（1）技术突破的“辐射效应”。低空科技通过技术突破发挥着明显的“辐射效应”，一项核心技术的突破往往能够催生多个细分产业的发展。以感知与导航定位技术为例，其在低空领域的应用不仅提升了飞行器的自主飞行能力，更催生了精准农业、智能巡检、无人配送等一系列新兴业态。这种辐射效应的机制在于，低空科技的系统性特征使得单项技术突破能够通过技术融合产生协同效应，从而在多个应用领域同时释放价值[33]。更为重要的是，低空科技的“辐射效应”不仅体现在技术层面，更体现在商业模式和产业生态的重构上。技术突破为原本不可能或不经济的商业模式提供了实现基础，推动了“低空+”商业模式的大量涌现，形成了技术创新与商业模式创新的良性互动。

（2）应用需求的“牵引效应”。从应用需求看，低空科技受到强烈的“牵引效应”，具体应用场景的需求特点直接影响技术发展的方向和重点[34]。不同应用场景对飞行器性能、成本、安全性的要求存在显著差异，这种差异化需求推动了低空科技向着更加精细

化、专业化的方向发展。以城市空中出行与农业植保2个典型场景为例：前者对飞行器的舒适性、静音性、城市适应性要求较高，推动了eVTOL技术向着载人化、舒适化方向发展；后者对飞行器的载荷能力、作业精度、成本控制要求较高，推动了农用无人机向着大载荷、高精度、低成本方向发展。这种“牵引效应”确保了技术发展与市场需求的高度契合，使得低空科技始终向市场需求靠拢。

（3）生态协同的“网络效应”。低空科技对产业发展的影响还体现在生态协同的“网络效应”上，随着低空科技体系的不断完善，围绕低空产业形成了包括政府监管部门、上中下游企业、科研机构、金融机构、培训机构、用户群体在内的复杂网络生态。这种网络生态具有典型的“网络效应”特征，参与主体越多、协同程度越高，整个生态的价值就越大。网络效应的积极作用体现在：① 信息共享效率的提升，不同主体之间的信息流动加速了创新扩散；② 资源配置效率的优化，多元主体的参与实现了人才、资金、技术等要素的优化配置；③ 风险分担能力的增强，网络化的风险分担机制降低了单一主体的创新风险。

3.3 低空科技向产业转化的动态机制

低空科技创新与低空产业发展之间形成了正向反馈的双螺旋结构（图2）。这种结构的核心在于技术推动与需求拉动的双向互动：技术创新为产业发展提供新的可能性，产业应用为技术创新提供新的方向性；产业发展的规模效应反过来为技术创新提供资金支持和应用验证平台，技术创新的突破又为产业发展开辟新的增长空间。

这种双螺旋结构的动态特征表现为3个层面：① 在技术层面，表现为基础研究—技术开发—产品化—产业化的螺旋式推进；② 在市场层面，表现为小众市场—细分市场—大众市场—平台市场的螺旋式扩展；③ 在生态层面，表现为单点突破—局部协同—系统集成—生态优化的螺旋式演化。

在双螺旋结构的动态过程中，技术瓶颈与产能限制构成了影响转化效率的2个关键约束条件。技术瓶颈主要体现在关键核心技术的供给能力不足，导致产品成本高，制约了市场规模的扩大，进而影响了规模经济效应的发挥；产能限制主要体现在产业化能力和市场需求的不匹配，制约了技术价值的充分释放，这种相互作用使得低空科技向产业转化面临“技术—市场”双重困境④。

4 从低空科技到低空产业：需要跨越哪些障碍？

通过前文对低空科技向产业转化动态机制的分析，可以看出这一转化过程并非一蹴而就的线性过程，而是需要跨越一系列结构性障碍的复杂系统工程。深入剖析这些障碍的本质特征，对于制定针对性的突破策略、推动低空产业健康发展具有重要的理论和实践意义。

当前低空科技向低空产业转化面临的障碍不是孤立存在的，而是相互交织、相互影响，形成了制约产业发展的复合型约束体系。从障碍的属性维度看，主要表现为技术障碍、市场障碍、制度障碍和生态障碍4个层面，这些障碍的存在不仅影响转化的速度和效率，更决定着转化的质量和可持续性（图3）。

4.1 技术成熟度障碍：从实验室到产业化的“死亡谷”

低空科技向产业转化面临的首要障碍是技术成熟度与产业化要求之间的不匹配，这种落差构成了横亘

④ 城市和小城镇改革发展中心. 当前低空经济发展制约因素分析及对策研究. (2024-09-18)[2025-07-03]. https://www.ndrc.gov.cn/wsdwhfz/202409/t20240918_1393040.html.

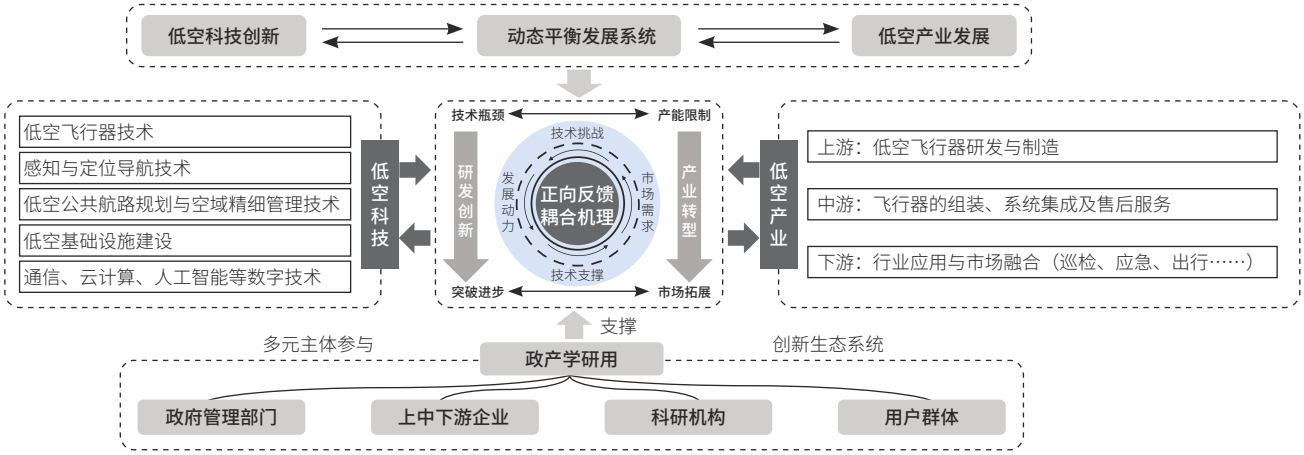


图2　低空科技向产业转化的动态机制

Figure 2　Dynamic mechanism of low-altitude technology's industrial transformation

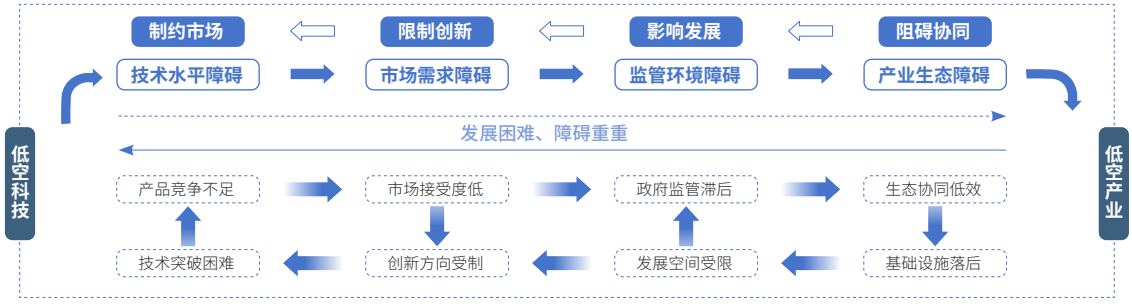


图3　低空科技向低空产业转化面临的障碍

Figure 3　Obstacles to transformation of low-altitude technology into low-altitude industry

在实验室成果与产业应用之间的“死亡谷”[35]。实验室阶段的技术突破往往侧重于功能验证和性能指标的实现，而产业化应用则对技术的稳定性、可靠性、成本控制、规模化生产等方面提出了更高要求。

以eVTOL技术为例，虽然在实验室和试验场景下已经实现了载人飞行的技术验证，但在产业化过程中仍面临电池能量密度不足、噪音控制困难、成本居高不下、用途相对单一等关键技术与应用瓶颈。这些瓶颈的存在使得eVTOL难以满足商业化运营的基本要求，导致技术价值无法有效转化为产业价值。

4.2 市场需求障碍：碎片化应用与规模化发展的矛盾

低空经济应用场景的多样性虽然为技术创新提供了丰富的需求来源，但也带来了市场高度碎片化的问题。不同应用场景对飞行器的技术要求、性能指标、成本控制等方面存在显著差异，导致难以形成统一的技术标准和产品规格，制约了规模效应的发挥[36]。

以无人机产业为例，农业植保、电力巡检、物流配送、航拍测绘等不同应用场景对无人机的载荷能力、飞行时间、控制精度、环境适应性等要求差异巨大，企业往往需要针对不同场景开发专用产品，难以实现规模化生产和成本优化。这种碎片化特征不仅增加了企业的研发和生产成本，也制约了产业链的标准化和专业化发展。

4.3 监管环境障碍：监管体系与配套政策滞后

现有的低空监管体系主要针对传统航空业设计，在面对低空经济这种新兴业态时往往显得适应性不

足。传统的“严格管制”监管模式虽然能够有效保障安全，但也可能过度抑制创新活力；而过度宽松的监管又可能带来安全风险[37]。

低空产业的发展需要在安全与创新之间找到动态平衡，这对监管理念、监管方式、监管技术都提出了新的要求。低空产业涉及民航、工信、交通、公安等多个部门，各部门之间的政策协调和统筹机制仍需完善。部门间职责界定不清、政策不衔接、标准不统一等问题增加了企业的合规成本和市场准入难度，制约着产业的健康发展。

4.4 产业生态障碍：支撑体系建设不完善

低空产业的发展需要完善的物理和数字基础设施支撑，包括低空通信网络、导航定位系统、气象监测网络、应急救援体系等。当前我国低空基础设施建设相对滞后，覆盖面不足、服务能力有限[38]，制约了低空产业的规模化发展。特别是在偏远地区和复杂环境下，基础设施的缺失更加突出，这不仅影响了低空飞行的安全性和可靠性，也限制了低空服务的覆盖范围和应用场景。

上述4个层面的障碍并非孤立存在，而是相互交织、相互影响的。技术障碍制约了产品的市场竞争力，市场障碍影响了技术创新的方向和动力，制度障碍限制了技术和市场的发展空间，生态障碍则制约了整个系统的协同效率。这种系统性特征决定了障碍的突破不能仅仅依靠单一维度的努力，而需要统筹考虑、系统设计、协同推进。

5 总结与展望

通过对低空科技的内涵特征及对低空产业发展的影响分析，可以看出低空科技已成为推动低空经济发展的核心驱动力和关键制约因素。低空科技以其技术融合的“化学反应”特征、应用场景的“双向拉动”特征、系统复杂性的“涌现”特征和安全可靠性的“零容忍”特征，构建了区别于传统航空技术的全新技术范式。这一技术范式不仅重新定义了低空飞行的技术边界，更为低空产业的跨越式发展提供了坚实的技术支撑。

从技术发展规律看，低空科技的五大核心技术体系正在经历从相对独立发展向深度融合演进的关键转型期。这种融合不是简单的技术叠加，而是催生了全新技术能力和应用模式的变革，其化学反应正在重塑整个低空产业的技术基础和竞争格局。从产业发展机制看，低空科技通过“辐射效应”“牵引效应”和“网络效应”三重作用机制协同运作，推动了低空产业从点状突破向系统性发展的跃迁，构成了低空科技向产业转化的内在动力系统。

然而，当前低空科技向产业转化仍面临技术成熟度低、市场需求碎片化、监管环境滞后和产业生态不完善等障碍，这些障碍相互交织、相互影响，形成了制约产业发展的复合约束。

展望未来，低空科技的发展将呈现出更加明显的融合化、智能化、生态化特征。通过与5G/6G通信、边缘计算、区块链、数字孪生、混合现实、元宇宙等前沿技术深度融合，催生更多创新应用和商业模式。现阶段深圳、合肥、苏州等地的先行试点，已为验证低空科技发展对产业规模扩大的实际影响提供了宝贵的实证样本。以深圳为例，依托大疆等行业龙头企业的技术优势，在无人机智能制造方面形成产业集群效应，其无人机产业产值已超过900亿元，占全球市场份额的70%以上[13]。

想要充分利用试点城市的先进经验，进一步下好全国一盘棋，全面推动低空经济高质量发展，需立足全国统一大市场统筹谋划。① 培育统一的市场主体，破除地方保护和市场分割，建立全国统一的低空经济市场准入标准和监管规则，推动要素资源在更大范围内优化配置。② 强化技术攻关，建立健全“政产学研用”深度融合的协同创新机制，集中力量攻克关键核心技术，打造具有国际竞争力的低空科技创新

高地。③ 完善政策法规，构建适应低空经济发展特点的法律法规体系，完善跨部门协调机制，形成政策合力。④ 强化生态建设，统筹推进基础设施、人才培养、标准体系等支撑要素建设，营造良好的产业发展生态环境，加快形成低空科技创新与产业发展的良性循环，使低空经济真正成为建设现代化产业体系、服务国家重大战略目标的关键力量，为实现中华民族伟大复兴提供强劲动力。

参考文献

1 Wang L, Luo G L, Sari A, et al. What nurtures fourth industrial revolution? An investigation of economic and social determinants of technological innovation in advanced economies. Technological Forecasting and Social Change, 2020, 161: 120305.

2 周文, 许凌云. 论新质生产力: 内涵特征与重要着力点. 改革, 2023, (10): 1-13.
Zhou W, Xu L Y. On new quality productivity: Connotative characteristics and important focus. Reform, 2023, (10): 1-13. (in Chinese)

3 Xu J H, Li X, Jiang C Y, et al. Research on UAV industry empowering the high-quality development of low altitude economy from the perspective of new quality productivity// Proceedings of 4th 2024 International Conference on Autonomous Unmanned Systems. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025: 12-21.

4 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. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版), 2025, 46(1): 118-131.
Ouyang R H. Boosting new quality productive forces with low-altitude economy: Mechanisms and paths. Journal of Xinjiang Normal University (Philosophy and Social Sciences), 2025, 46(1): 118-131. (in Chinese)

5 李学彦, 李鑫. 低空经济、新质生产力与现代化产业体系建设. 深圳大学学报(人文社会科学版), 2025, 42(3): 16-26.
Li X Y, Li X. Low-altitude economy, new quality productivity, and the construction of modern industrial system. Journal of Shenzhen University (Humanities & Social Sciences), 2025, 42(3): 16-26. (in Chinese)

6 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. 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. Economic Review Journal, 2024, (8): 53-62. (in Chinese)

7 Rohrmeier K, Wei W B, Ison D. Decoding the vertiport: Planning for urban air mobility. (2025-01-01). https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/08854122251314481.

8 Samir Labib N, Danoy G, Musial J, et al. Internet of unmanned aerial vehicles—A multilayer low-altitude airspace model for distributed UAV traffic management. Sensors, 2019, 19(21): 4779.

9 Pongsakornsathien N, Safwat N E, Xie Y B, et al. Advances in low-altitude airspace management for uncrewed aircraft and advanced air mobility. Progress in Aerospace Sciences, 2025, 154: 101085.

10 沈映春. 低空经济的内涵、特征和运行模式. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版), 2025, 46(1): 108-117.
Shen Y C. Low-altitude economy: Definition, characteristics and operation modes. Journal of Xinjiang Normal University (Philosophy and Social Sciences), 2025, 46(1): 108-117. (in Chinese)

11 覃睿, 李卫民, 靳军号, 等. 基于资源观的低空及低空经济. 中国民航大学学报, 2011, 29(4): 56-60.
Qin R, Li W M, Jin J H, et al. Low altitude economy based on resource-based view. Journal of Civil Aviation University of China, 2011, 29(4): 56-60. (in Chinese)

12 Huang C Q, Fang S F, Wu H, et al. Low-altitude intelligent transportation: System architecture, infrastructure, and key technologies. Journal of Industrial Information Integration, 2024, 42: 100694.

13 沈映春, 赵雨涵, 周昕怡. 低空经济现代化产业体系建设的逻辑框架与战略路径. 江苏社会科学, 2025, (2): 104-112.
Shen Y C, Zhao Y H, Zhou X Y. The logical framework and strategic pathways for constructing a modern industrial system for the low-altitude economy. Jiangsu Social Sciences, 2025, (2): 104-112. (in Chinese)

14 Sun X Q, Wang S, Zhang X J, et al. LAERACE: Taking the policy fast-track towards low-altitude economy. Journal of the Air Transport Research Society, 2025, 4: 100058.

15 兰旭东. 低空经济高质量发展的难点、焦点与对策. (2025-06-25). https://doi. org/10.14100/j. cnki. 65-1039/g4.20250624.001.
Lan X D. Difficulties, focal points, and countermeasures for the high-quality development of the low-altitude economy. (2025-06-25). https://doi. org/10.14100/j. cnki. 65-1039/g4.20250624.001. (in Chinese)

16 宋丹, 徐政. 低空经济赋能高质量发展的内在逻辑与实践路径. 湖南社会科学, 2024, (5): 65-75.
Song D, Xu Z. The inner logic and practical strategy of low altitude economy empowering high quality development. Social Sciences in Hunan, 2024, (5): 65-75. (in Chinese)

17 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, 38(9): 14-26.
Wang B Y. The technological and economic paradigm analysis and countermeasures for developing low altitude economy in China. China Business and Market, 2024, 38(9): 14-26. (in Chinese)

18 胡俊. 低空智联飞行器风险谱系解构与监管革新——基于“技术—规制”失衡的靶向纠偏. 江西社会科学, 2025, 45(5): 63-74.
Hu J. Deconstruction of the risk spectrum of low-altitude intelligent connected aircraft and regulatory innovation—Targeted correction based on “technology-regulation” imbalance. Jiangxi Social Sciences, 2025, 45(5): 63-74. (in Chinese)

19 Jiang Y H, Li X Y, Zhu G X, et al. Integrated sensing and communication for low altitude economy: Opportunities and challenges. (2025-04-07). https://ieeexplore. ieee. org/document/10955337.

20 Zhou W, Liu Z H, Tian Y, et al. Research on visual slam technology for UAV positioning and navigation// 2024 21st International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP). Chengdu: IEEE, 2024: 1-4.

21 廖小罕, 徐晨晨, 叶虎平. 低空经济发展与低空路网基础设施建设的效益和挑战. 中国科学院院刊, 2024, 39(11): 1966-1981.
Liao X H, Xu C C, Ye H P. Benefits and challenges of constructing low-altitude air route network infrastructure for developing low-altitude economy. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(11): 1966-1981. (in Chinese)

22 Soliman A, Al-Ali A, Mohamed A, et al. AI-based UAV navigation framework with digital twin technology for mobile target visitation. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 123: 106318.

23 Rahman M M, Manavalan M, Neogy T K. Artificial intelligence in 5G technology: Overview of system models. Asia Pacific Journal of Energy and Environment, 2021, 8(1): 7-16.

24 Huang X. The small-drone revolution is coming—Scientists need to ensure it will be safe. Nature, 2025, 637: 29-30.

25 张夏恒. 低空经济赋能新质生产力的逻辑、阻碍及建议. 当代经济管理, 2025, 47(1): 17-23.
Zhang X H. Logic, obstacles and suggestions of low altitude economy enabling new quality productive forces. Contemporary Economic Management, 2025, 47(1): 17-23. (in Chinese)

26 张其仔, 许明. 中国参与全球价值链与创新链、产业链的协同升级. 改革, 2020, (6): 58-70.
Zhang Q Z, Xu M. China’s participation in global value chain and synergistic upgrade of innovation chain and industry chain. Reform, 2020, (6): 58-70. (in Chinese)

27 Ge Z Q, Gao X, Deng X X, et al. Study on the constituent elements of domestic general chip industry technology alliance// 2018 15th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP). Chengdu: IEEE, 2019: 190-194.

28 Acar O A, Tarakci M, van Knippenberg D. Creativity and innovation under constraints: A cross-disciplinary integrative review. Journal of Management, 2019, 45(1): 96-121.

29 中国民用机场协会. T/CCAATB 0062—2024 电动垂直起降航空器(eVTOL)起降场技术要求. 北京: 中国民用机场协会, 2024.
China Civil Airports Association. T/CCAATB 0062—2024 Technical Requirements for Electric Vertical Take-off and Landing Aircraft (eVTOL) Landing Field. Beijing: CCAA,

2024. (in Chinese)

30 Li S. Analysis of the prospect of new energy and low-altitude economy industry combination under the background of low-carbon economy. Academic Journal of Business & Management, 2024, 6(8): 179-183.

31 Javaid M, Khan I H, Singh R P, et al. Exploring contributions of drones towards Industry 4.0. Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application, 2022, 49(3): 476-490.

32 樊邦奎, 李云, 张瑞雨. 浅析低空智联网与无人机产业应用. 地理科学进展, 2021, 40(9): 1441-1450.
Fan B K, Li Y, Zhang R Y. Initial analysis of low-altitude internet of intelligences (IOI) and the applications of unmanned aerial vehicle industry. Progress in Geography, 2021, 40(9): 1441-1450. (in Chinese)

33 Giones F, Brem A. From toys to tools: The co-evolution of technological and entrepreneurial developments in the drone industry. Business Horizons, 2017, 60(6): 875-884.

34 Kapoor D S, Singh K J, Bansal R, et al. Future commercial prospects of unmanned aerial vehicles (UAVs)// Third Congress on Intelligent Systems. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, 608: 79-89.

35 吴晓波, 邵贻玥, 林福鑫. 突破关键核心技术创新“死亡之谷”的路径机制. (2024-12-20). https://doi.org/10.16192/j.cnki.1003-2053.20241219.002.
Wu X B, Shao Y Y, Lin F X. The path mechanism for breaking through the “valley of death” of key core technology innovation. (2024-12-20). https://doi. org/10.16192/j.cnki.1003-2053.20241219.002. (in Chinese)

36 Wei J Y, Zhang X W, Tamamine T. Digital transformation in supply chains: Assessing the spillover effects on midstream firm innovation. Journal of Innovation & Knowledge, 2024, 9 (2): 100483.

37 Wang Y, Ran D X. China’s low-altitude economy needs to grow with more caution. Nature, 2025, 638: 891.

38 罗丹, 黄晓琴, 冷赞贤, 等. 数字孪生在交通基础设施智能建造中的应用与挑战. 交通运输工程学报, 2025, 25(3): 33-64.
Luo D, Huang X Q, Leng F X, et al. Applications and challenges of digital twin in intelligent construction of transportation infrastructure. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(3): 33-64. (in Chinese)

Impact of low-altitude technology on low-altitude industry development from perspective of low-altitude economy

WANG Yong[1*] YANG Yusen[1] ZENG Jimin[1] HE Zhenglong[1,2] CEN Zongxi[1,2]

（1 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System,
Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China）

Abstract Low-altitude economy, as a typical representative of new quality productive forces and a strategic emerging industry, has become an important engine for promoting high-quality economic development and achieving technological self-reliance and self-improvement in China. This study systematically reviews the development trajectory of low-altitude economy, deeply elucidates the connotations and characteristics of low-altitude technology and its impact mechanisms on low-altitude industrial development, providing theoretical support for constructing a modernized low-altitude economic system. It finds that the concept of low-altitude economy has undergone a paradigm shift from industry terminology to economic formation, gradually completing the institutionalization process from strategic planning to legal guarantee, forming a new paradigm of low-altitude economic development with Chinese characteristics. Low-altitude technology serves as the key bottleneck constraining low-altitude economic development. Its essence is a new system formed by the integration of five core technologies: low-altitude aircraft manufacturing, drone remote communication and control, environmental perception and navigation positioning, low-altitude air-route planning and airspace management, and big data, cloud computing, and artificial intelligence, which drives systematic development of low-altitude industries through three mechanisms. Nevertheless, the current transformation of low-altitude technology to industry still faces systematic obstacles including low technological maturity, fragmented market demand, lagging regulatory environment, and incomplete industrial ecosystem. Based on the strategic layout of a unified national market, efforts should be coordinated to advance technological research, market cultivation, institutional innovation, and ecosystem construction, accelerating the formation of a virtuous cycle between low-altitude technological innovation and industrial development, providing strong support for building a modernized industrial system and serving major national strategic objectives.

Keywords low-altitude economy, low-altitude technology, new quality productive forces, industrial transformation

王 勇 中国科学院地理科学与资源研究所副研究员。主要研究方向:低空地理学与人工智能、遥感与大数据挖掘。
E-mail: wangy@igsnrr.ac.cn

WANG Yong Associate Researcher of Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences (CAS). His research focuses on low-altitude geography and artificial intelligence, remote sensing and big data mining.
E-mail: wangy@igsnrr.ac.cn

■责任编辑：张帆

*Corresponding author