

低空经济与供应链变革

理论基础、应用模式与未来展望

王金月 高丁莉
成都师范学院

摘要 低空经济特别是在物流领域的应用，正呈现出爆发式增长，其市场规模预计在未来十年实现数十倍扩张。“最后一公里”配送、医疗物资运输、仓储管理和工业巡检成为核心应用场景。本文在交易成本经济学、复杂网络理论和创新扩散理论的框架下，系统分析低空物流的组织模式与扩散机制，提出四类典型应用路径：城市即时物流、偏远地区可及性物流、工业闭环物流与空地协同混合物流。文章进一步指出，低空经济的发展不仅依赖技术突破，还取决于数字基础设施、空域法规和成本效益等生态要素。结论强调，低空物流是未来城市空中交通（UAM）的基础，其战略意义在于推动供应链向效率、韧性与可持续性并重的方向演进。

关键词 低空经济；无人机物流；供应链优化；城市空中交通

DOI <https://doi.org/10.6914/tpss.070414> **文章编号** 2664-1127.2025.0704.129-133

低空经济，特别是其在物流领域的应用，正展现出爆发式的增长潜力。全球无人机物流与运输市场的规模预计将从2023年的9亿美元增长至2030年的161亿美元，年均复合增长率高达50.1%。其他市场分析报告也给出了类似的乐观预测，普遍预计市场规模将在未来十年内增长数十倍，年均复合增长率在30%至50%之间。这一增长由多个细分市场共同驱动，其中“最后一公里”配送、仓储库存管理、医疗物资运输和工业巡检是当前的核心应用领域。从地理分布来看，北美凭借其成熟的电子商务市场和领先的技术投入，目前占据最大的市场份额。然而，亚太地区，尤其是在中国等国家积极的政策推动和广泛的应用场景探索下，预计将成为全球增长最快的市场。更重要的是，当前的无人机货物运输仅仅是低空经济发展的序幕。其长远发展轨迹正清晰地指向一个更为宏大的愿景——城市空中交通（Urban Air Mobility, UAM）。UAM生态系统将不仅包括货物运输，还将涵盖载人飞行器，最终形成一个与地面交通并行的、立体化的城市交通网络。因此，理解并优化当前的无人机物流供应链，不仅是解决当下的效率问题，更是为未来十年乃至更长远的城市空中交通时代奠定技术、法规和运营基础。

一、理论基础

为了深刻理解低空经济对供应链的系统性影响，单一的技术或运营视角是不足的。本部分将引入三个互补的理论透镜——交易成本经济学、复杂网络理论和创新扩散理论——构建一个整合的分析框架，旨在从经济组织、网络结构和技术采纳三个层面，揭示这场变革的底层逻辑。

首先，交易成本经济学（Transaction Cost Economics, TCE）为分析低空物流领域正在出现的关键治理决策——自建无人机运力与外购无人机服务——提供了强有力的分析工具。该理论的核心思想在于，企业组织形式的选择旨在最小化交易过程中的各类成本。在低空物流领域，企业面临的核心抉择是投入巨资建立并运营一支私有的无人机队，还是利用第三方提供的“无人机即服务”（Drone-as-a-Service, DaaS）平台。TCE理论揭示了影响这一决策的三个关键变量：资产专用性、不确定性和交易频率。资产专用性越高，企业越倾向于通过内部化来保护投资。在技术和法规高度不确定性的环境下，选择灵活的DaaS模式可以有效规避沉没成本。对于高频次业务，自建机队具备规模经济效应，而对于低频次需求，购买DaaS服务则更具成本效益。DaaS商业模式的兴起，是市场为应对建立无人机物流能力所伴随的极高交易成本而自发形成的有效治理结构，它极大地降低了市场采纳新技术的门槛。

其次，复杂网络理论（Complex Network Theory）提供了一个更精确的视角，将供应链理解为一个由众多相互连接的节点构成的复杂自适应系统。高效的空中物流网络将演化成为一种具备特定拓扑结构的“无标度网络”（Scale-Free Network）。其特征包括少数高度连接的“枢纽”节点、高集群系数和短路径长度，这些特征使得信息和货物能在网络中快速流动，提升了系统效率。然而，这种网络结构在赋予供应链高效率的同时，也带来了一种“韧性悖论”。它对随机性故障表现出极强的韧性，但对针对核心枢纽的攻击却异常脆弱，可能引发“级联失效”，导致整个网络瘫痪。因此，供应链战略的重心必须从单纯追求效率最优化，转向构建一个兼具效率与韧性的网络结构。

最后，埃弗雷特·罗杰斯的创新扩散理论（Diffusion of Innovations Theory）为分析低空物流的采纳路径提供了经典框架。该理论认为，一项创新的采纳速率主要受五个感知属性的影响：相对优势、兼容性、复杂性、可试用性和可观察性。“监管沙盒”等政策工具通过提供受控的试用环境，降低了初期探索的风险，加速了学习曲线。在用户层面，技术接受模型（Technology Acceptance Model, TAM）进一步揭示了影响个体采纳意愿的心理因素，即感知有用性和感知易用性。此外，感知风险和社会影响等外部变量也对用户的采纳决策起着至关重要的调节作用。因此，成功的低空物流运营商不仅需要是技术专家，更需要成为有效的社会沟通者，通过透明的运营和积极的社区互动来建立公众信任。

二、低空经济在供应链中的应用模式与路径

低空经济对供应链的优化并非单一路径，而是根据不同的应用场景、价值主张和网络环境，演化出多种独特的运作模型。这些模型可归纳为四种典型路径：城市即时物流、偏远地区可及性物流、工业闭环物流以及空地协同混合物流。

第一种是城市即时物流模型，专注于人口稠密的城市环境，其核心价值主张是极致的速度，旨在满足消费者对即时性的需求。其典型特征是航程短、载荷轻、运营频次极高，主要应用于餐饮外卖、零售闪送等领域。网络结构上通常呈现为“点对多点”或动态的“网状”结构。以美团为例，截至2024年底，其无人机已在中国多个核心城市开通了53条商业化航线，累计完成订单超过45万单。美团致力于打造“城市15分钟生活圈”，通过将平均配送时间压缩至12到20分钟，有效解决了地面交通拥堵的效率瓶颈。其采用的“人机协同”模式，由地面配送员完成首末两端的取派任务，无人机负责执行空中干线运输，充分发挥了人与机器的各自优势。

第二种是偏远地区可及性物流模型，旨在解决地面基础设施薄弱地区的物流难题，其核心价值主张在于“可及性”。其特征是航程较长，载荷通常为高价值或高时效性物品，运营频次相对较低但单次任务价值极高。网络结构上是经典的“轴辐式”网络。全球医疗无人机物流的标杆企业 Zipline 是该模型的典范，已在全球完成了超过 100 万次商业配送，服务网络覆盖卢旺达、加纳等国的数千家医疗机构。Zipline 能够在几十分钟内将血液、疫苗等关键医疗物资精准投递到偏远诊所，据称在卢旺达将血液制品浪费率降低了 67%，并将产后出血导致的孕产妇死亡率降低了 51%。其采用与各国卫生部门深度合作的 B2G 模式，提供端到端的垂直整合解决方案。同样，京东物流在中国农村地区探索了“两段式”配送模式，无人机负责从县级配送中心到村级合作站点的“空中中继”运输，再由乡村推广员完成最终到户的派送，有效解决了“最后一公里”的配送痛点。

第三种是工业闭环物流模型，专注于在特定、封闭或受控的环境内执行高价值、高时效性或高风险的物流任务，如大型工业园区、医疗园区、港口等。其核心价值主张是极致的可靠性、安全性与精准性。网络结构通常为固定的、点对点的“空中走廊”或闭环网络。例如，顺丰丰翼在中国医院院区之间进行血液样本、病理切片等医疗物资的快速转运，能将原本需要 45 至 60 分钟的地面车程缩短至 6 至 19 分钟，为临床诊断赢得了宝贵时间。在工业与能源领域，无人机用于运输精密零部件或为海上钻井平台递送紧急备件，能够显著减少生产线停工时间，降低安全风险。

第四种是空地协同混合物流模型，这是集成度最高、最具前瞻性的一种模式，它将无人机与传统地面运输工具整合成一个协同作业的有机系统。在此模型中，货车扮演着“移动母舰”的角色，作为无人机的移动起降平台和调度中心。货车在主干道上进行长距离运输，同时根据实时订单需求，释放多架无人机执行末端配送任务。这种空地协同模式旨在实现全局最优，精准地克服了单一运输方式的固有缺陷：货车解决了无人机续航里程短、载荷有限的问题，而无人机则解决了货车在末端配送环节效率低下的问题。理论模型研究表明，该系统的整体效率提升与无人机和货车之间的速度比呈正相关，显示出巨大的优化潜力。

三、低空经济供应链的生态系统架构与挑战

低空经济的规模化发展，并非仅仅取决于无人机本身的性能，而是依赖于一个由技术、法规和经济逻辑共同构成的复杂生态系统的支撑。这个生态系统主要由三大支柱构成：作为“神经系统”的数字基础设施，作为“交通规则”的空域管理与法规框架，以及作为“商业引擎”的成本效益核算。

数字基础设施是安全、高效低空物流网络的基石，主要由三个相互关联的技术层构成。首先是 5G/5G-A 通信网络，它以其超低时延、高带宽和网络切片能力，为大规模、自动化的无人机运营提供了通信基础，是实现安全超视距飞行（BVLOS）和复杂空域中防撞避障的先决条件。其次是无人机交通管理（UTM）系统与数字孪生技术。UTM 是一个专门为低空无人机设计的“空中交管”生态系统，通过分布式服务提供商网络，提供身份识别、飞行计划审批、冲突告警等关键服务。数字孪生技术通过构建与物理世界实时同步的城市三维虚拟模型，对无人机交通进行高精度仿真，允许管理者在投入实际运营前就识别并解决潜在问题，极大地降低了试错成本和安全风险。最后，人工智能（AI）与自主技术作为整个系统的“大脑”，被深度嵌入到飞行控制、调度算法和后端运营的每一个环节，实现了从单机智能到群体智能的跃升。

尽管技术日新月异，但法规的滞后和空域管理的复杂性是当前制约低空经济规模化发展的最大瓶颈。实现商业上的可行性，无人机物流必须突破视距内（VLOS）运营的限制，进行超视距飞行（BVLOS），但这需要开发出能够可靠替代人眼“看见并规避”功能的“探测与规避”（DAA）系统。全球主要航空管理机构正在探索不同的路径来规范 BVLOS 运营。美国联邦航空管理局（FAA）长期依赖于繁琐的逐案豁免审批流程，延缓了大规模商业部署的步伐，目前正向一个更加标准化的认证框架过渡。欧洲航空安全局（EASA）则采取了更具前瞻性的顶层设计方法，推出了“U-space”框架，为行业发展提供了相对清晰的

路线图。以英国民航局（CAA）为代表的一些监管机构，采用了“监管沙盒”这种敏捷治理模式，允许企业在受控环境中测试创新技术，实现了规则与创新的协同进化，被认为是破解当前监管困境的有效途径之一。

低空物流的商业可行性最终取决于其经济账本。综合多项研究和行业报告，可以构建一个全面的成本-效益分析模型。分析显示，尽管无人机物流的初始资本支出和基础设施投入巨大，但其在运营成本（特别是人工和能源）方面具有压倒性优势，部分研究显示其运营成本可比传统货车低60%至90%。其核心经济价值在于通过大幅提升配送效率和拓展服务边界，创造了传统物流无法实现的增量价值。然而，其经济性高度依赖于运营密度和场景。在高密度、高频次的城市环境中，巨大的订单量可以摊薄高昂的固定成本；而在高价值的医疗或工业场景中，单次配送所避免的巨大损失或创造的生命价值，使得其成本效益尤为突出。

四、战略要务与未来展望

综合前述分析，为身处这场变革浪潮中的关键参与者——企业、政策制定者与技术供应商——提供一套清晰、可执行的战略路线图至关重要。其核心目标是超越眼前的技术挑战，构建一个兼具效率、韧性与可持续性的三维供应链未来。

对于希望利用低空物流的企业而言，需要制定一套系统性的整合与发展战略。企业应首先基于前述的四种运作模型，对其自身的供应链特征和战略目标进行精准匹配。同时，基于交易成本经济学的分析，企业必须审慎评估是投资自建无人机队还是利用DaaS平台。对于核心业务高度依赖即时配送的大型平台企业，自建模式可能是长期最优解；而对于大多数中小企业或处于市场探索阶段的企业，利用DaaS服务则能以最低的风险和成本快速验证商业模式。此外，鉴于高效的无标度网络所固有的“脆弱性”，企业必须将韧性作为与效率同等重要的战略目标，具体策略包括避免单一平台锁定、构建冗余节点以及强化网络安全。

政府和监管机构在低空经济的发展中扮演着“生态培育者”的关键角色。其政策目标不应是直接干预市场，而是创造一个公平、安全、可预期的创新环境。应在全球范围内大力推广“监管沙盒”模式，允许创新项目在受控条件下进行真实世界的运营测试，使监管机构能够与行业同步学习，基于实证数据制定出科学、务实的BVLOS和UTM法规。政策的着力点应从补贴单个企业转向投资于构成低空经济基础的“数字公共品”，如加速5G/5G-A网络覆盖、主导制定统一的UTM数据交换标准、支持构建城市数字孪生基础模型等。同时，政府应牵头开展公众教育活动，建立透明的飞行数据披露机制和社区沟通渠道，主动回应公众在安全、噪音、隐私等方面的关切，以建立社会信任。

低空经济的终极图景，是实现从货物运输到载人交通的无缝演进，最终构建一个立体化的、智能的、可持续的城市交通体系。大规模、高可靠性的无人货物运输网络的成功运营，是未来城市空中交通（UAM）得以实现的技术、法规和社会基础。在物流应用中积累的海量飞行数据、成熟的UTM管理经验、经过验证的DAA技术以及逐步建立的公众信任，都将直接服务于未来“空中出租车”的商业化。因此，今天对低空物流的每一份投入，都是在为明天的城市空中交通铺路。最终的愿景，是一个深度融合、三维立体的全自主供应链。在这个系统中，AI作为总指挥，无缝调度着在空中飞行的无人机群、在公路上行驶的无人驾驶卡车、以及在仓库内工作的自动化机器人。货物从生产线下线到送达消费者手中，整个过程实现了端到端的自动化和智能化。这不仅是物流效率的巅峰，更是对整个社会资源配置方式的一次革命。低空经济，正是开启这场革命的钥匙。

- [1] 王成城, 尹艳. 基于 PMC 指数模型的低空经济政策分析 [J/OL]. 重庆三峡学院学报, 1-15 [2025-04-20]. <https://doi.org/10.13743/j.cnki.issn.1009-8135.20250418.001>.
 - [2] 高信波. 低空经济产业政策分析、挑战与对策建议 [J]. 数字化转型, 2025, 2(04): 14-22.
 - [3] 李德明. 新发展理念下低空经济驱动新质生产力发展的内在逻辑机制与路径选择 [J/OL]. 企业科技与发展, 1-8 [2025-04-20]. <https://doi.org/10.20137/j.cnki.45-1359/t.20250417.001>.
 - [4] [卢书锋, 孙晓俊. 物流行业的供应链管理优化策略研究 [J]. 物流科技, 2025, 48(04): 123-126. DOI: 10.13714/j.cnki.1002-3100.2025.04.031.
 - [5] 徐岩. 基于供应链管理的港口物流运营模式及经济效益分析 [J]. 中国物流与采购, 2025, (06): 120-121. DOI: 10.16079/j.cnki.11-3663.2025.06.048.
 - [6] 马达. 大数据分析在供应链管理中的优化策略与实践研究 [N]. 北京科技报, 2025-03-24(007).
 - [7] 袁邢君. 电子商务环境下企业物流与供应链管理创新 [J]. 中国航务周刊, 2025, (14): 53-55.
 - [8] 刘俊. 电子商务环境下企业物流与供应链管理创新研究 [J]. 中国管理信息化, 2025, 28(06): 113-115.
 - [9] 孙济南, 管宇宁. 基于物流供应链提高应急物流体系保障能力 [J]. 供应链管理, 2025, 6(04): 40-47. DOI: 10.19868/j.cnki.1002-3100.2025.07.031.
 - [10] 包锋. 基于区块链的供应链信息共享机制研究 [J]. 物流科技, 2025, 48(07): 135-137. DOI: 10.13714/j.cnki.1002-3100.2025.07.031.
- 引用本文 王金月, 高丁莉, . 低空经济与供应链变革：理论基础、应用模式与未来展望 [J]. 社会科学理论与实践, 2025, 7(4): 129-133. <https://doi.org/10.6914/tpss.070414>.

Cite This Article Jinyue WANG, Dingli GAO, . (2025). Low-Altitude Economy and Supply Chain Transformation: Theoretical Foundations, Application Models, and Future Prospects. *Theory and Practice of Social Science*, 7(4): 129-133. <https://doi.org/10.6914/tpss.070414>

Low-Altitude Economy and Supply Chain Transformation: Theoretical Foundations, Application Models, and Future Prospects

Jinyue WANG, Dingli GAO, ,

Qilu Institute of Technology

Abstract While local government debt has played a positive role in promoting economic development and improving people's livelihoods, its rapid expansion has also generated significant risks. In recent years, the debt scale has continued to rise, reaching RMB 40.74 trillion by the end of 2023, with pronounced regional disparities. Within the debt structure, special-purpose bonds account for over 60 percent, implicit debt problems remain prominent, and maturities exhibit irrational patterns. Some regions face heavy debt-servicing pressure, the stability of repayment sources is weakening, and the efficiency of fund utilization needs to be improved. The risks of local government debt in China are manifested in debt repayment, fiscal sustainability, financial contagion, and systemic vulnerabilities. The underlying causes include mismatches between fiscal revenues and expenditure responsibilities, performance evaluation pressures and inter-local competition, reliance on land finance and hidden borrowing, institutional deficiencies in debt management, and macroeconomic shocks. Accordingly, this paper proposes countermeasures such as short-term debt swaps and restructuring, medium-term regulation of borrowing mechanisms, and long-term promotion of economic transformation.

Keywords Public Infrastructure; Urban Economy; Suzhou; Singapore; Pearson Analysis

(责任编辑: 黄欣 Email: wtocom@gmail.com)