

廖开怀, 邹燕, 刘佳豪, 等. 基于空间异质性视角的城乡低空规划述评与要点探析[J]. 广东工业大学学报. doi: 10.12052/gdutxb.260056.
Liao Kaihuai, Zou Yan, Liu Jiahao, et al. A review of low-altitude planning from the perspective of spatial heterogeneity and the key points of planning[J]. Journal of Guangdong University of Technology. doi: 10.12052/gdutxb.260056.

基于空间异质性视角的城乡低空规划 述评与要点探析

廖开怀¹, 邹燕^{1,2}, 刘佳豪¹, 符天蓝¹

(1. 广东工业大学 建筑与城市规划学院, 广东 广州 510006; 2. 宁都县教育体育局, 江西 宁都 342800)

摘要: 针对低空经济空间规划中空域管控标准同质化、低空用地布局混乱、老城区设施适配差、乡村低空资源闲置等问题, 本文从空间异质性视角构建差异化的城乡低空规划响应框架。基于CiteSpace文献计量分析和文献综述法, 梳理研究演进脉络, 提出“特征研判—空间布局—实施管理—技术赋能”四维分析框架。国内研究形成以技术应用为主线、聚焦空域适配与多规融合的研究格局, 但存在重技术轻空间、忽视地域差异的不足。规划响应上, 区域宜搭建跨区域协同管理机制, 构建跨域低空走廊与“干线+配送”网络, 发展长距离高价值物流与城际低空通勤; 老城区宜结合城市更新嵌入点状起降设施, 强化限禁飞、噪音和隐私管控, 优先保障应急救援、医疗配送等公共服务场景; 新城区可预留专项空间, 宜构建分层网格, 重点发展低空通勤、物流配送与产业集聚示范区; 乡村宜构建“县—镇—村”三级服务网, 拓展植保、物流、文旅和应急服务。城乡低空规划应因地制宜、分类施策, 配套分场景管理机制与技术支持, 形成从理论到落地的全链条方案。未来需深化空域统筹、政策协同、基础设施更新、以及安全隐私与社会接受度等问题研究。

关键词: 低空经济; 城乡规划; 空间异质性; 发展路径; 研究述评

中图分类号: F562

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2026)00-0001-15

A Review of Low-altitude Planning from the Perspective of Spatial Heterogeneity and the Key points of Planning

Liao Kaihuai¹, Zou Yan^{1,2}, Liu Jiahao¹, Fu Tianlan¹

(1. School of Architecture and Urban Planning, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China;

2. Ningdu Education and Sports Bureau, Ningdu 342800, Jiangxi, China)

Abstract: To address the problems in spatial planning for the low-altitude economy, such as homogenized airspace control standards, disordered low-altitude land-use layout, poor facility adaptability in old urban districts, and idle rural low-altitude resources, this paper constructs a differentiated urban-rural low-altitude planning response framework from the perspective of spatial heterogeneity. Based on CiteSpace bibliometric analysis and a literature review, this paper sorts out the evolution of related research and proposes a four-dimensional analytical framework of “characteristic assessment-spatial layout-implementation management-technology empowerment.” Domestic research has formed a research landscape centered on technological application and focused on airspace adaptation and multi-planning integration, but it still has shortcomings such as emphasizing technology over space and neglecting regional differences. In terms of planning responses, at the regional level, it is advisable to establish cross-regional collaborative management mechanisms, build cross-regional low-altitude corridors and a “trunk+distribution” network, and develop long-distance high-value logistics and intercity low-altitude commuting. In old urban districts, point-type takeoff and landing facilities should be embedded in urban renewal. Restrictions and prohibitions on flight, noise and privacy controls should be strengthened, and public service scenarios such as

收稿日期: 2026-04-30 录用日期: 2026-08-03 网络首发日期: 2026-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42571266); 广东省自然科学基金资助面上项目(2024A1515011309); 广东省本科高校教学质量与教学改革工程建设项目(粤教高函(2024)30号)

作者简介: 廖开怀(1984-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为国土空间规划与城市更新、粤港融合研究, E-mail: kaihuai121@126.com

通信作者: 符天蓝(1988-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为国土空间规划、区域发展、产业升级, E-mail: tianlanfu@126.com

emergency rescue and medical delivery should be prioritized. In new urban districts, dedicated space can be reserved, hierarchical grids should be built, and emphasis should be placed on low-altitude commuting, logistics distribution, and industrial agglomeration demonstration zones. In rural areas, a county-town-village three-tier service network should be built to expand plant protection, logistics, cultural tourism, and emergency services. Urban-rural low-altitude planning should be tailored to local conditions and differentiated by category, supported by scenario-specific management mechanisms and technical support, so as to form a full-chain solution from theory to implementation. Future research should further deepen airspace coordination, policy synergy, infrastructure renewal, and issues such as safety, privacy, and social acceptance.

Key words: low-altitude economy; urban and rural planning; spatial heterogeneity; development path; literature review

自2021年《国家综合立体交通网规划纲要》首次将低空经济纳入国家规划以来,低空经济引发了社会各界的广泛关注。2024年全国两会上,低空经济首次被写入政府工作报告,定位为“新增长引擎”。2026年“十五五”规划纲要明确提出“加快新能源、新材料、航空航天、低空经济等战略性新兴产业集群发展”,标志着低空经济将成为新兴支柱产业。

低空资源作为国家空间资源的关键组成部分,深刻影响着区域经济发展与居民生活方式,是推进空间治理现代化不可或缺的一环。随着信息技术、航空航天技术的持续发展,无人机逐步从军事领域拓展到民用与商用领域。欧盟制定了U-Space(无人机空域)系统,把民用和军用无人机集成到现有的环境和空域类别中,确保无人机在低空空域环境下的安全和可控运行,通过空域分层管理与服务化推动了城乡空间结构的再组织^[1]。覃睿等^[2]指出低空经济是指以航空载运与作业装备技术为主要工具,以低空空域为主要活动场域,以低空飞行活动为最终产出形式的系列经济活动构成的经济领域。也有学者将低空经济定义为以真高1 000 m以下空域为载体,涵盖无人机物流、城市空中交通(Urban Air Mobility, UAM)、低空旅游、应急救援等多场景的经济活动体系^[3-5]。低空空间被赋予了运输、物流、监测等多功能属性,从城乡规划视角来看,低空经济意味着低空交通的常态化,进而带来人流与物流组织方式以及城市基础设施和功能布局的革命性变化^[6-7]。在城市中心,低空航线与垂直起降点形成新的空中街区,削减了地面交通压力^[8]。在乡村地区,低空物流与巡检服务突破传统道路瓶颈,提升了居民获取商品和公共服务的时效性^[9]。而这种变革直接关联城市居民的多样化活动需求,也与城市地面建成环境紧密耦合,对空间规划和协同治理提出了更高的要求。

当前低空空域和航迹规划尚处于初步发展阶段,关于低空经济的研究也较多基于技术工程、法规制度等视角,低空经济空间规划虽然提出了“人—地—空”一体化的视角,但是规划体系的构建仍缺乏对地域差异的充分考量。现有城乡低空经济空间规划与管理存在空域管控标准同质化、城乡低空用地布局混乱、老城区设施适配性差以及乡村低空资源闲置等问题。上述痛点表明,亟需从空间异质性出发,构建差异化的低空空间规划响应框架。本文聚焦于城乡规划视角下的低空经济空间规划研究,基于CiteSpace梳理国内城乡规划与低空经济相关研究进展,从空间异质性视角提出“特征研判—空间布局—实施管理—技术赋能”为一体的四维规划分析框架,总结研究内容与方法,拟为构建适应性的低空规划体系提供理论参考与政策启示。

1 CiteSpace分析

1.1 数据来源

本文使用CiteSpace软件6.4.R2版本,对低空经济与城乡规划领域相关的中文文献绘制知识图谱,主要包括关键词突现、合作网络、聚类分析和时间线图谱等,并对研究阶段及主题进行分析。文献数据来源于中国知网(CNKI, www.cnki.net),文献来源类别限定为北大核心、CSSCI和CSCD。检索日期为2026年3月18日,文献时间跨度为2011年1月至2026年2月。分别以“低空”与“规划”、“无人机”与“规划”为主题词组合,采用“并含”(AND)逻辑进行检索。根据与城乡规划学科研究的相关性,剔除含“算法”、“任务规划”等关键词的文献,经人工筛查与去重,最终获得中文文献207篇。按年统计结果如图1所示。整体而言,该领域研究文献在2025年呈现快速增长,这与国内低空经济产业政策密集出台、规划实践加速落地

的进程相呼应,反映出该议题已迅速成为国内城乡规划及相关学科重点关注的领域。



图1 低空经济与规划中文献分析
Fig.1 Literature analysis of low-altitude economy and planning in China

1.2 研究热点分析

1.2.1 关键词共现

基于图2,研究发现低空经济领域的知识结构呈现出既相互关联又各有侧重的网络特征。研究网络展现了无人机技术应用与空间治理、制度体系的深度融合。一方面,“无人机”的度数中心性(Degree=58)与中介中心性(Centrality=0.81)表明了其作为技术基础的地位;同时,“测绘与遥感技术”(Degree=26)、“实景三维”(Degree=12)等技术性节点与其同属一个聚类,共同构成了空间信息采集与工程应用的技术板块。另一方面,新兴节点“低空经济”(Degree=31、Centrality=0.59)和“城乡规划”已显现出宏观政策与规划研究的核心地位。值得关注的是,“无人机”“测绘与遥感技术”等技术节点与“城乡规划”“智慧城市”“乡村规划”等空间载体关键词形成了稳定链接,表明技术应用已深度嵌入空间治理语境。

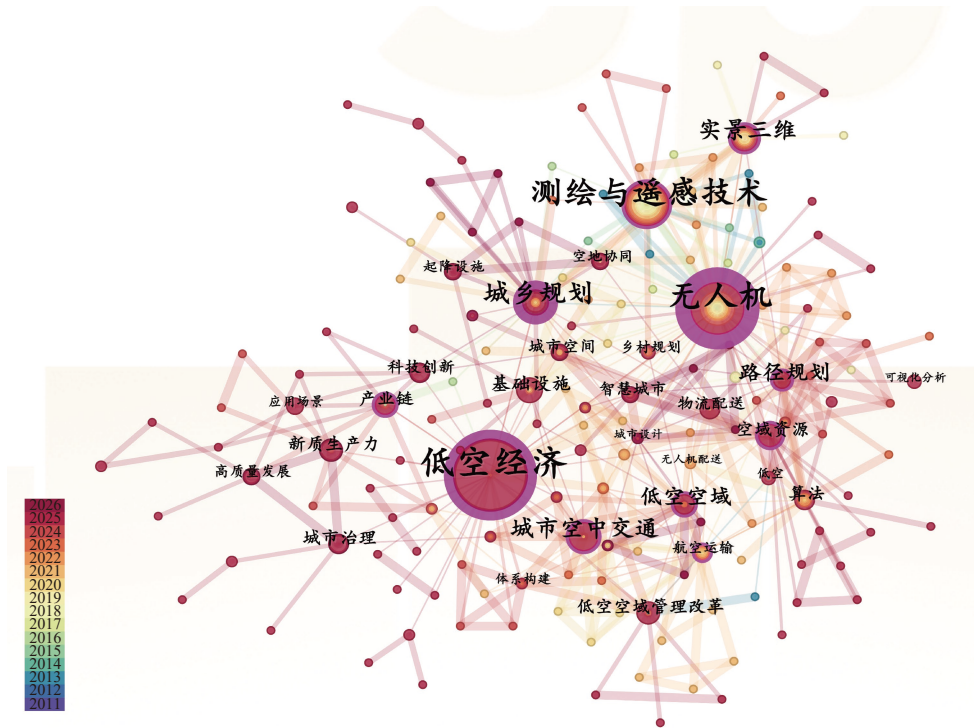


图2 关键词共现图谱
Fig.2 Co-occurrence map of keywords

1.2.2 关键词聚类分析

通过对文献的关键词进行聚类分析,可以揭示低空经济研究的热点主题。网络模块度Q分数为0.602 4,加权平均轮廓分数为0.888 7,表明聚类结构可信^[10](见图3)。国内研究呈现出以技术和应用为基础,以管控为核心,以空间为场域的清晰结构:一是,

运行管控与空域支撑板块,包含#1空域管理、#2空间规划和#5路径规划。空域管理涉及空域资源的划分、管理与协同,空间和路径规划确保无人机在应对复杂建成环境中的布局布点、作业轨迹优化与任务实施等问题时,与空域管理共同构成低空安全高效运行的技术与制度基础;二是,#6空域资源、#0低空经

济和#4新质生产力板块则具体探索低空资源的合理利用和可持续发展。

总体上,低空经济呈现出以技术运行与应用为链条的研究格局,其结构紧密围绕城乡规划落地需

求展开,聚焦空域资源适配、多规融合、应用场景嵌入等本土化治理议题,体现了从技术集成到空间赋能、从资源管控到制度创新的研究特征。

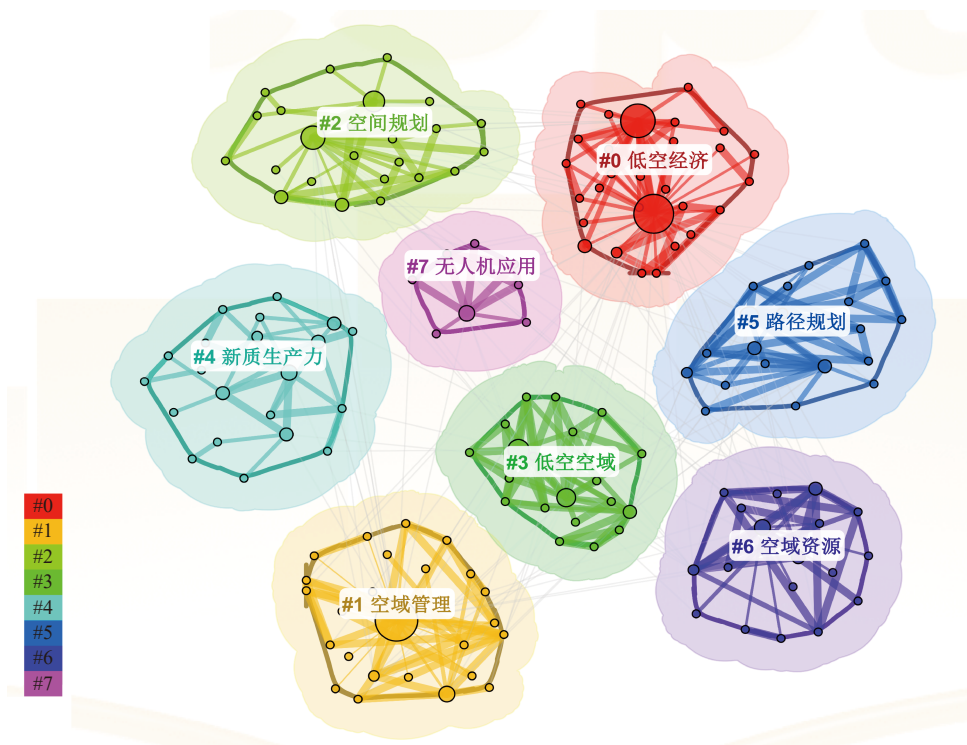


图3 关键词聚类图谱

Fig.3 Keyword clustering map

1.3 科研合作分析

作者合作网络图谱(见图4)显示该研究领域的作者群体呈现较为明显的集聚特征。其中廖小罕、叶虎平、徐晨晨、张洪海、刘焱和王姣娥等作者构成了网络中的主要节点,其节点规模反映出他们在该领域具有较高的发文量或影响力。从连边结构来看,研究力量主要集中在以廖小罕、王姣娥、张洪海、刘焱和谭刚毅等作者为核心的研究团队,其中王姣娥及其合作者连接了多位国际学者,体现了较明显的国际合作特征。整体上,研究网络呈现出“局部紧密、全局松散”的特征,各学术团队内部合作频繁,但跨团队之间的直接合作联系相对有限,一定程度上说明跨群体之间的深度合作有待进一步拓展。

1.4 演进阶段分析

结合时间线分析(见图5)和关键词突现分析(见图6),国内低空经济与城乡规划研究主要围绕低空管控(对应#1空域管理、#5路径规划)、低空产业(对应#0低空经济、#4新质生产力)以及空间协同规划(对应

#2空间规划、#3无人机、#6空域资源)三大方向展开,分别回应了空域安全运行、产业链落地实施,以及与国土空间规划体系融合的核心议题。文献的发展路径与国内宏观政策、产业发展及工程建设节奏高度同频,呈现出从专业技术工具,到规模化工程应用,转向制度化治理与空间融合的鲜明转型特征。

低空管控探索期(2010~2016年):聚焦空域分类管控与测绘应用。该阶段政策开启低空空域改革,后期随着民用无人机兴起,研究关键词逐步聚焦于“无人机”“测绘遥感技术”等相关方向,核心聚焦将无人机平台作为城乡建设领域新型空间数据采集载体,致力于服务测绘^[11]、资源调查、土地管理与整治^[12]等城乡规划与建设领域的基础业务,同时探讨无人机空域分区管理的基本规则。研究共识在于无人机技术显著提升了空间信息获取效率,但争议集中于无人机管理的盲区,“黑飞”引发的隐私、安全和不受控制的监控等问题^[13]。

产业落地拓展期(2017~2023年):聚焦低空经济产业链与基础设施工程。伴随《关于促进通用航空

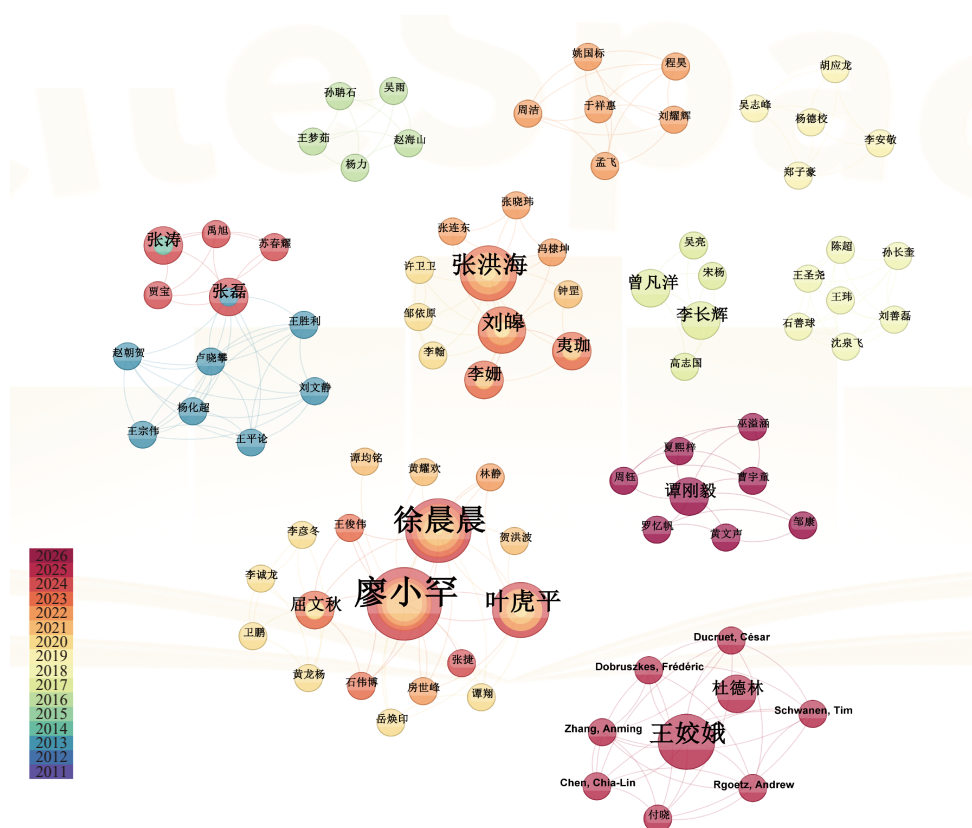


图4 作者合作网络图谱

Fig.4 Author collaboration network map

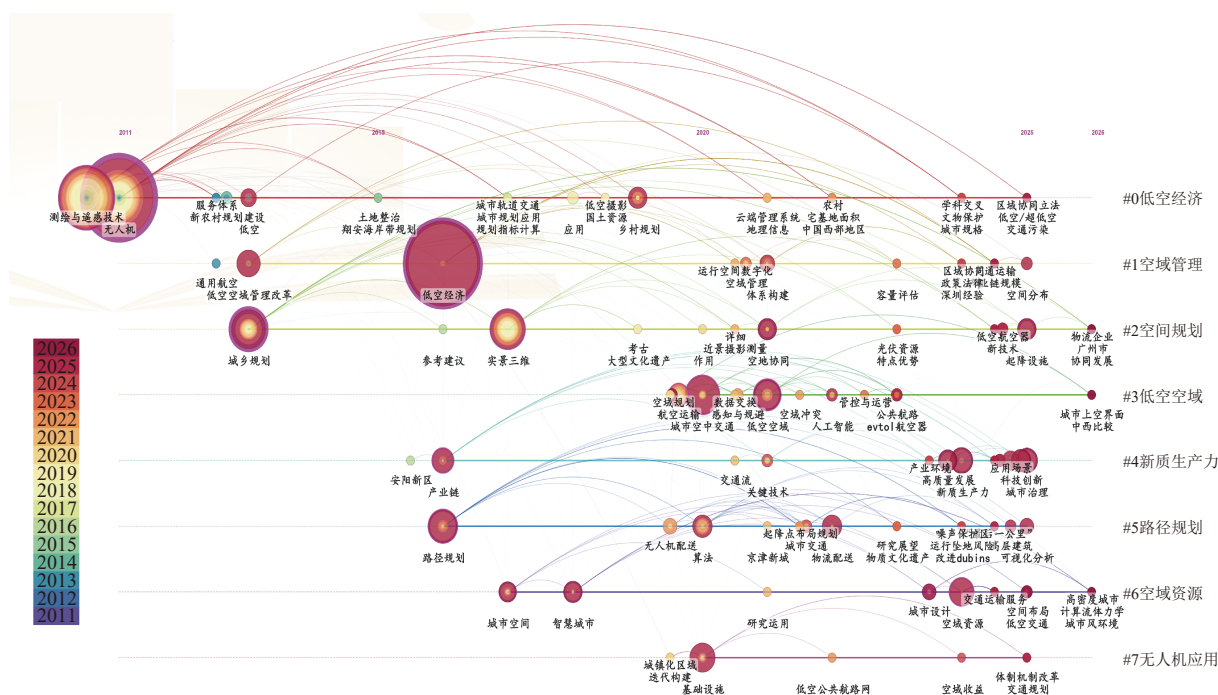


图5 关键词时间线图谱

Fig.5 Keyword timeline map

业发展的若干意见》等产业政策的推动,以及无人机物流、航拍等商业场景的快速落地,研究重心转向

产业应用与工程实践。关键词以“实景三维”和“无人
机配送”的突现和持续深化研究为关键节点。研究

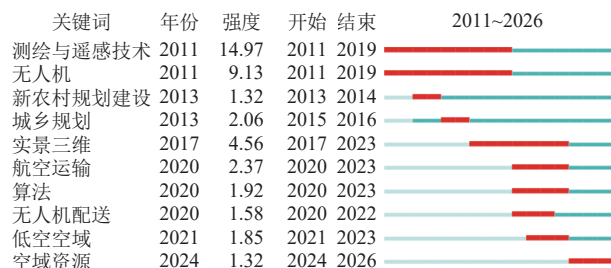


图6 关键词突现图谱

Fig.6 Keyword emergence map

重心从单一数据获取转向低空系统运行和应用拓展,并与“低空航路规划”^[14]、“物流配送规划”^[15]、“低空基础设施规划”^[16]等工程领域关键词紧密关联。这一阶段的研究逐步形成低空航路与起降设施需与地面交通、物流网络协同布局的共识。然而,争议集中于产业布局分散、产业落地“重建设、轻协同”、空域划设各自为政、低空基础设施标准不一,缺乏跨行政区域的统筹协调机制,也尚未触及不同城市空间(如老城与新城)的差异化适配问题。

空间协同规划深化期(2024年至今):聚焦低空与国土空间规划融合。该阶段低空经济已形成一个完整的概念,治理融合与空间制度化成为新趋势。空域管控与治理^[17-18]、体制机制改革^[19-20]、规划体系构建^[21-22]等研究活跃度显著提升。表明国内研究前沿正从技术工程层面,加速迈向与国土空间规划体系、产业政策及公共安全治理深度结合的宏观制度构建与实施机制设计阶段,致力于构建技术应用、产业发展与空间管制、公共安全相协调的治理框架^[19,22]。由此可见,国内低空相关研究的核心关注点,已转向低空经济新业态的空间统筹管控与制度体系建构,整体形成由技术工具应用、工程实践落地向全域空间治理跨越的转型特征。但存在低空基础设施建设滞后、空域资源的产权属性与使用权分配尚未厘清、各地协同管理机制不健全、精细化空域管控标准尚未建立等问题。

1.5 文献述评与研究不足

学界对低空经济展开了系列研究和综述,如廖望等^[23]从地理学角度审视低空空域资源和梳理了低空经济研究的脉络,党安荣等^[24]对低空基础设施规划研究进行了综述。现有低空经济研究主要采用以下视角展开:一是从技术工程视角,关注无人机、e-VTOL(electric Vertical Take-off and Landing)等飞行器产品性能、动力系统、自主导航等,致力于探讨更加稳定、高效的技术支撑^[25];二是从政策法规视角,探讨空域协同治理^[26]、安全监管等方面的法律法规

和技术标准^[19,27];三是从产业高质量发展视角,认为低空经济作为绿色、智能的新质生产力,应当培育“低空经济+”多元化应用场景,加速相关产业链延伸^[28]和智慧城市智慧建设^[29];四是从空域容量角度,从多个方面探索低空空域容量评估方法,以及低空空域资源量测度指标体系的构建^[30]。

空间异质性作为地理学与城乡规划学的核心概念,强调不同地域在自然条件、建成环境、社会经济等方面的差异性与空间分异规律。在低空经济研究领域,部分学者已开始关注空间差异对低空运行的影响。例如,张洪海等^[31]从空域容量评估角度指出,不同城市的地理环境、产业需求各不相同,需要开展因地制宜的低空空域建设;李玲玲等^[32]以北京市为例,识别出城市主城区低空空域的可用空间主要沿交通干线呈圈层式分布,指出空域具有连续性表征,但需要借助地理要素的非均衡性来充分反映;王纪武等^[33]探讨了低空空域利用的规划应对策略,指出低空空域资源并非均质分布,其受到经济社会与城市发展的需求影响与约束,呈现出显著的时空分异特征。

然而,现有研究多以技术性评估为主,对“空间异质性—低空规划”的理论构建不足,较少深入剖析高密度城区、开阔新城、乡村地域等异质性建成环境对低空运行的约束和不同人群需求的影响,具体表现为4方面的问题:(1)空域管控标准同质化:城市群与一般地市的空域分区(如航路密度和间隔标准等)、基站布设标准等趋同,未充分反映本地空域容量、障碍物密度、地形地貌及产业需求的差异;(2)城乡低空用地布局混乱:城市内部物流起降点、城市空中交通(UAM)枢纽与乡村服务网点之间缺乏系统性的地空协同布局指引,导致设施重复建设或覆盖盲区并存;(3)老城区低空设施适配性差:在建筑密集、历史保护、人口老龄化的复杂环境下,起降场选址困难、噪音与隐私冲突突出,缺乏与城市更新相结合的规划衔接;(4)乡村低空资源闲置:通信网络盲区、运维能力不足、应用场景单一,使得空域资源利用率低下。上述痛点的存在,反映出立体城乡规划视角的缺失将导致难以深入分析低空经济与空间互动的关系、差异化发展策略及低空经济的实施路径。这些不足凸显了从空间异质性出发,进行跨学科整合与规划理论方法创新的迫切性与必要性。

2 低空规划与路径

结合相关文献的梳理,基于空间异质性的考量,以空间特征研判为基础,落实空间规划布局,配套实

施管理机制,依托技术方法赋能,构建四维低空规划分析理论框架(见图7),探讨低空经济的规划路径。从空域尺度上看,城乡空域可划分为区域、城市、乡村三个板块。从时间尺度上看,低空规划的全周期流程,包括空域特征、价值评估、规划目标与模式、重点设计、实施管理等内容^[34]。从规划工具来看,包括了相关的技术方法和标准规范等内容。

首先,特征分析是基础层,旨在识别区域、城市(新/老城区)、乡村等不同空间的空域条件和容量、建成环境与人群需求差异,为后续规划提供认知前提。

其次,空间规划是核心层,基于特征诊断制定差异化的规划目标、布局模式与节点设计方案,将异质性约束转化为空间响应策略。再次,实施管理是保障层,针对各空间类型在跨域协调、隐私安全、基础设施适配、运营可持续性等方面的挑战,设计配套管理机制。最后,依托技术方法赋能低空规划,贯穿前述三个维度,提供从需求预测、数字建模到智能路径优化等关键技术支撑。四个维度通过“特征—规划—管理”的实践反馈与技术迭代形成动态闭环,确保低空规划做到因地制宜、持续优化。

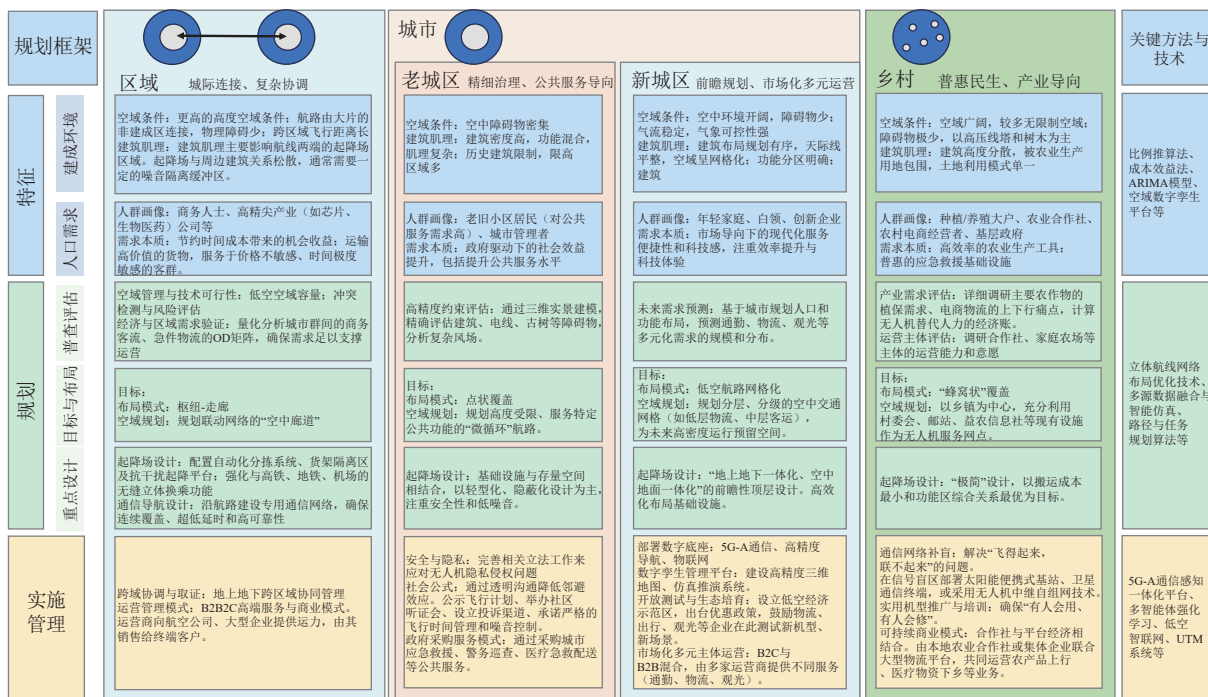


图7 “特征研判—空间布局—实施管理—技术赋能”的四级分析框架

Fig.7 Four-level analysis framework of "characteristic analysis - spatial planning - implementation management - technology empowerment"

2.1 空域特征研判

低空经济是一种高度依赖空间资源和场景的新型经济形态^[35]。低空经济的发展对城乡规划提出了新的要求,扩展了城乡三维立体规划的范围,要求地下、地面和空域统筹考虑。城乡建成环境的差异影响低空航线和站点等基础设施的规划^[33,36]。结合区域、城市和乡村差异的不同,其应用场景和需求也存在显著的差异。建成环境的密度、高度和布局形态决定了无人机飞行的效率和安全性,衍生了大量的复杂建成环境下无人机路径规划与优化研究^[37]。因此,低空规划前期需要综合分析建成环境的要素特征、运行基础、空域条件和场景需求等内容。

低空路网规划必须统筹空中与地面交通基础设

施的衔接,将低空航路与现有的高速公路、输电走廊、河流、铁路等线性设施相结合,实现空地协同的进出航路设计与运行调度^[38]。从空间交通来看,董雅晴等^[39]将空中廊道归纳为一种新型空域资源配置系统,也称为高容量管道、流动走廊、天空高速公路等。这种空中廊道适用于跨区域长航线的空域规划。这一类区域范围物理障碍少,跨区域飞行距离长,空中飞行需要应对更复杂的“区域小气候”和“中尺度天气系统”。文献^[40]指出在跨区域长航程中,中尺度天气系统是导致风场剧烈变化的主要因素,因此空中廊道规划必须在航路设计阶段进行风险评估。

城市环境对低空空域的利用规模和方式具有显著影响。具体从不同城乡空间来看,在老城区,空中

障碍物密集,存在电线、广告牌、阳台、屋顶设备、古树等非建筑障碍物密布的情况;建筑群相对密集,层高较低,风场复杂,对飞行器稳定性构成挑战。城市高密度建筑群引发的“城市峡谷”微气候效应,会显著破坏低空飞行环境,产生如气流紊乱、飞行轨迹偏移以及控制需求增加等风险^[41]。建筑间距缩小也会导致气流加速与湍流增强,进而显著增加四旋翼无人机对抗横风的能耗^[42]。Zhang等^[43]通过现场测量发现,在保持一定容积率的前提下,适度降低建筑密度或采用统一层高布局,可提升块体内部的风速均匀性,使风速保持在舒适且稳定的1.3~5 m/s范围内,从而减弱因密集建筑导致的风速突变和切变。在乡村空域广阔的区域,建筑高度分散,土地利用模式单一,除了高压线塔和树木以外,障碍物极少,无限制空域较多。

从应用场景与群体需求差异来看,低空经济的发展面向多元应用场景和差异化的群体与区域需求^[44]。区域层面的主要服务对象为高度时间敏感型群体,其选择低空交通的核心动机在于节约时间成本所衍生的机会收益。因此兼具长航时、大载荷、低能耗、低成本等重要特征与价值属性的新能源飞行器,更符合当前高价值物流运输的场景应用需求^[45]。在不同空间区域,群体需求具有差异性。例如,在老城区和老旧小区,居民以及城市治理主体等核心用户对提升型公共服务存在显著需求。其中,老旧小区居民关注低空技术对生活便利性与应急服务能力的改善;城市治理主体关注低空手段在安防巡查、应急响应等城市精细化管理中的应用。整体上,老城区的低空经济需求本质是在政府驱动下的社会效益提升,特别是提升公共服务水平。

在新城区,主要的需求群体为年轻家庭、白领群体及创新型企业。这类群体的需求在于运用低空交通实现便捷通勤、快速的商品配送、科技体验及创新示范等。其需求本质是市场导向下的现代化服务便捷性和科技感,注重效率提升与科技体验。在乡村地区,核心用户包括规模种植的养殖户、农业合作社、农村电商经营者及基层政府。其需求本质是将低空技术视为高效的现代化农业生产工具,弥补传统基础设施短板,以及实现普惠性应急救援与公共服务覆盖的重要路径。这类群体对低空产品的需求主要是高效率的农业生产工具以及普惠的应急救援基础设施。因此,规划前期分析需要开展基于需求差异的应用场景模拟,构建不同的场景,进而根据不同场景的飞行器类型(如无人机、eVTOL)、起降频次、航线密

度等,量化起降场、通信导航监视(Communications Navigation and Surveillance, CNS)、气象、能源补给等基础设施的需求,为规划空域分层与航线网络服务^[46]。

结合每一类空间分类和地域差异特征,可匹配专属的特征分析指标、规划策略、管理制度和技术手段,从而为精细化的低空经济空间规划提供参考(见表1)。

2.2 空间规划模式

2.2.1 规划评估

低空经济评估框架涵盖多层级视角,主要包括空域容量、空域管理与技术可行性、基础设施支撑、经济与区域需求、环境影响和风险等评估。在现有研究中,学者对低空经济评估进行了较多讨论。杜德林等^[47]认为受数据可获取性的限制,目前中国缺少对不同地区和场景的低空经济发展态势的定量化评估与研究。彭榆善等^[48]从安全性、效率性、有序性、资源承载性与环境适应性五个维度出发,构建了层次化的低空空域容量评价指标体系。

在区域层面,应从空域管理与技术可行性方面评估低空空域容量。在现有研究中,学者分别从概率阈值、空间结构、控制变量三个维度探索低空容量评估方法^[31]。空中廊道规划需要进行冲突检测与风险评估,量化和管理空中交通的碰撞风险。Yan等^[49]利用冲突区域碰撞建模理论,考察了物流无人机在特定空域飞行可能存在的安全风险隐患。在经济与区域需求方面,有必要构建高精度的数字孪生空域,规划者可通过复现不同的空域规划方案和运行场景,量化评估城市群间的商务客流、急件物流的OD矩阵,确保需求足以支撑运营。如ElSayed和Mohamed^[50]提出了一种新颖的自主先进空中机动物流系统,通过动态数字孪生模型识别可行空域,系统使空域容量提升了10%,生成的轨迹节能50%。

在城市的不同地域,低空经济评估的方式与内容应更具差异性。其中,老城区因其建筑密集、结构复杂、人口密集且通常包含历史文化保护区等,对低空飞行活动的约束条件极为苛刻。高精度约束评估亟需通过三维实景建模,精确评估建筑、电线、古树等障碍物,以及分析复杂的风场和无人机噪音影响等。在现有研究中,李玲玲等^[32]综合使用地理围栏技术和冲突检测与解决模型,对北京市主城区低空空域可用空间和空域容量分别进行了识别和评估。该研究指出,新城区未来需求预测应当基于城市规划人口和功能布局,预测通勤、物流、观光等多元化需求的规模和分布,以及识别规划中的绿地、交通枢

表 1 城乡低空经济差异化的规划响应
Table 1 Differentiated planning response framework for urban and rural low-altitude spaces

地域	特征分析指标	规划策略	管理制度	技术方法
区域	城际可达性	构建跨区域低空交通走廊	建立跨行政区空域协同管理机制	基于GIS的动态空域评估与分区平台
	产业集聚度	布局低空产业集聚区与综合服务枢纽	建立差异化空域分类管理制度	低空航路优化系统
	物流需求指数	推动机场、高铁站、物流园等节点协同联动	探索区域协同运营模式	北斗导航网络
	空域连通度	形成“干线运输+区域配送”网络体系	建立低空基础设施共建共享机制	CNS通信导航监视一体化系统
	空域容量指数	构建分级分类的低空分区管理体系	空域资源动态监测与评估机制	空域数字孪生平台
老城区	建筑密度	划定低空精细管控分区	建立分级飞行管控制度	三维实景建模
	建筑高度	依托医院、消防站等公共设施布局公共服务起降点	重点区域限飞禁飞制度	数字空域地图
	人口密度	结合城市更新改造存量建筑屋顶平台	公共服务优先保障机制	UTM低空交通管理平台
	公共服务需求指数	建设应急救援与医疗配送网络	建立公众参与与安全风险评估机制(噪声、安全)	建筑屋顶起降场智能监测与运行管理系统
	历史文化资源密度	构建历史街区低空敏感区管控体系	历史街区低空活动备案制度	智慧低空安防管理平台
新城区	开发强度	预留低空基础设施专项空间	建立低空基础设施规划管控要求	5G-A通信网络、智慧起降场
	道路密度	构建低空功能单元与航路网络协同布局体系	实施空地协同规划制度、低空设施专项规划审查制度	数字孪生城市与低空交通仿真系统
	产业园区规模、创新企业密度	建设低空经济产业示范园区	市场化运营机制	物联网感知系统、数字化管理与服务平台
	空间预留度	推进空地一体化交通系统建设	低空空域预留与动态调整制度(控规调整)	GIS低空适宜性评价与选址决策平台
	村庄集聚度	构建“县—镇—村”三级低空服务体系	县域低空服务站运营管理体系	卫星通信系统
乡村	耕地比例	推广农业植保与巡检服务	农业无人机服务体系	农业遥感监测与无人机协同作业平台
	物流需求指数	建设乡村无人机物流配送网络	政企合作运营模式	低成本自动起降平台
	文旅资源密度	培育物流、农业、文旅复合应用场景,打造乡村低空观光旅游线路	农村低空运营扶持与绩效考核机制	智能航迹规划系统
	通信覆盖水平	编制农村通信基础设施布局专项规划	推动资源集约化,共享通信杆路、管道等设施	无人机蜂窝网络

纽、商业中心等空间资源,评估其作为起降节点的潜力与容量。在深圳等城市试点示范区中,如丰翼宝安低空智慧物流运营中心,相关系统已初步实现了对城市空域的高精度三维建模,并融合实时飞行数据、城市地形、建筑结构、气象变化等因素,构建出动态演化的虚拟空域场景,从而为飞行调度、冲突预警、空域规划等提供科学依据。

在乡村地区,低空交通需求存在点多面广的问题,低空经济评估则应侧重低空产业需求评估^[9],详细调研主要农作物的植保需求、电商物流的上下行痛点,计算无人机替代人力的经济效益等^[51]。此外,需要评估调研合作社、家庭农场等主体的运营能力和需求意愿。

2.2.2 规划目标与布局模式

低空规划目标的制定需要结合当地的经济水平、地域安全和产业需求等进行综合的考虑,设置阶段性的发展目标。低空规划的布局模式需以空域容量评估为基础,深度融合城乡建成环境差异,实现地空设施协同与需求驱动的分级网络化布局。刘川等^[52]提出了低空规划的模式与总体思路。其中,城市空中交通(Urban Air Mobility, UAM)规划主要包括低空空域划定、公共航路和起降场布局,以及通信、导航、监视、气象和航空情报等配套基础设施规划。

从区域层面来看,城市群的资源和枢纽共享需求高,规划模式以构建枢纽走廊为主。董雅晴等^[53]提出划分空中廊道来动态配置空域资源。Li等^[54]以深圳—珠海跨城eVTOL航线为典型案例,揭示了跨行政区域飞行路径需要联合空管和海事部门共同管理的协同路径。金利霞等^[55]从“空间—制度—产业”系统整合视角,探索低空交通引导区域一体化与城市空间重塑的开发模式。例如,川渝签署跨省低空飞行协同管理工作机制,发布了北线、中线、南线三条低空通道计划,川渝两地在低空经济领域的跨省域协作已从概念探索走向机制化建设。在成渝地区双城经济圈,以低空经济走廊为代表的跨行政区“地空一体”规划,系统整合了空中与地面交通资源,构建起多层次的立体交通网络^[56]。

在城市内部,由于人口密集,运输需求旺盛,在控制性详细规划中应明确其基础设施的点位、规模和配套要求。其中,老城区由于建筑密集,高度受限,应侧重于精细治理与公共服务导向。例如杭州市上城区结合社区党群服务中心场地,建设了首个枢纽型无人机公共垂直起降场,占地约1 000 m²,设有5个标准起降单元与1个应急降落点,主要服务于“低空+医疗场景”,可实现医院间血包、器官等紧急医疗物资的高效配送。

在新城区,由于建筑布局规整,适宜建立空域分层、分级的空中交通网络,可以为未来高密度运行预留空间^[21]。例如,深圳市宝安区通过部署5G-A通感一体基站和设施网、空联网、航路网和服务网“四张网”架构,构建了智能融合低空系统(Smart Integrated Lower Airspace System, SILAS),实现对低空物流、通勤及观光等多场景的并行监控。此外,城市内需要严格划定适飞区、禁飞区、限飞区和噪音敏感区,保障居民的安全及隐私^[57]。

在乡村地区,由于地域辽阔,村落分散,低空空域规划应以产业为主导,强化农村低空无人机植保作业建设,健全乡村低空治理机制^[58]。

2.2.3 重点节点设计

基于宏观的空域规划,需进一步细化微观的节点设计,引导起降场前瞻布局,从而指导低空场景有序拓展^[52]。低空飞行起降场址应考虑具体的业务需求、设计机型性能及使用的限制条件,宜在交通接驳便利,接近主要服务对象的地方设置,确保设施的安全性、便利性和实用性^[59]。但是不同层面的起降场设计存在不同的侧重内容,在具体选址及设计时,需要根据具体情况对区域、城市及乡村的起降场设计进行分级规划。

在区域层面,作为连接两个城市层面的空中交通,区域的主要服务对象为高度时间敏感型群体,其选择低空交通的核心动机在于节约时间成本所衍生的机会收益。因此区域层面的起降场设计应满足物流和通勤需求。在物流方面强调高效流转能力,需配置自动化分拣系统、货架隔离区及抗干扰起降平台;针对通勤需求,应当按照大型枢纽标准,强化与高铁、地铁、机场的无缝立体换乘功能。此外,由于区域之间多为田地、林地等大片非建成区,需要沿航路建设专用通信网络,确保网络的连续覆盖、低时延和高稳定性。

在城市层面,老城区与新城区的设计具有差异性。在老城区,一方面,推动城市更新与低空经济发展的紧密结合。由于老城区较难拥有单独的空间进行起降场设计,应该将起降场等基础设施与存量空间更新相结合,充分利用现有空地、屋顶、立交桥等闲置空间^[24]。活化闲置资源、降低建设成本,同时降低飞行器对地面的干扰以及起降能源消耗。另一方面,老城区人口老龄化程度高,起降场等基础设施也应该要注重安全性和低噪音,从而降低低空设施对居住人群生活的影响。戚玉亮^[60]提出了隔震支座等方案解决现有屋顶垂直起降场建设存在的噪声与振

动问题。在新城区,土地空间更为充裕、规划弹性大,可以更为高效化布局基础设施,实现规划衔接,避免反复开挖和资源浪费。低空基础设施层可以与地面交通、智慧城市平台同步布局,形成分布式、模块化的空中网络,提升整体运输效率。

在乡村层面,低空设计以区域间的无人机物流运输和乡村内部的农业航空作业为主,起降场侧重极简设计,以搬运成本最小和功能区综合关系最优为目标,进行科学布局,提升货物收发效率和航空作用效率^[61]。结合乡村特点,起降场设计可兼顾平时物流配送与急时应急救援、战时应战等多重用途,增强乡村社区的应急保障和抗灾韧性^[62]。

2.3 实施管理

低空经济的健康可持续发展,依赖构建高效、安全且可持续的运营管理体系。在实施管理阶段,不同区域面临的核心任务与挑战存在显著差异,需要因地制宜地采取策略。首先,区域层面的跨域协调是目前较为突出的难点问题,低空航线的运行往往涉及多个行政区域,空域与地面的管理机制又彼此独立,需建立统一的空域数据交换平台和协同管理机制,解决空域分割、标准不一的问题。陈志杰等^[63]基于数字化低空空域系统,提出设计面向空域管理的全球尺度网格空域模型,建立空中交通和战场空域的时空大数据库,为低空空域区域协同管理提供了理论支撑。

在电动垂直起降飞行器(eVTOL)场景应用实践中,居民消费群体更关注其安全稳定性、消费经济性和技术成熟性三方面因素^[45]。在老城区,一方面,由于老龄人对无人驾驶航空器接受度较低,因而需通过公众沟通、噪音管理、安全宣传等方式减少社区居民对低空飞行活动的疑虑。另一方面,无人机隐私安全问题也亟需重视。黄煦淇等^[64]讨论了民用无人机存在的隐私侵权问题及其造成的数据安全问题 and “黑飞”问题。应完善相关立法工作来应对无人机隐私侵权问题,降低无人机等低空飞行项目推进的社会阻力。与老城区不同,新城区的优势在于规划前瞻性,具有空间预留充足和基础设施可嵌入性强等优势。实施层面应以未来6G网络为技术底座,构建空地海一体化网络与万物智连体系,协同部署高精度导航、智能感知和物联网等数字基础设施,为低空产业的系统化智慧建设提供技术支撑。此外,应结合本地产业特色培育创新生态,设立低空经济示范区,出台具体的优惠政策,鼓励物流、出行、观光等企业在此集聚。如深圳、上海先后成立低空经济产业综合示

范区,持续推进低空智能融合基础设施及通信、导航等设施体系的建设。

在乡村地区,低空项目实施应注重通信网络补盲和本地化运营能力建设。偏远地区通信覆盖不足是低空运行的主要瓶颈,需结合卫星通信、移动基站等手段消除网络盲区。本地化运营需培养基层技术力量,确保“有人会用、有人会修”。通过采购性价比高的农业无人机和中小型物流无人机,开展面向本地农民的“飞手”培训和技能认证。开发适合乡村的应用场景,如农产品运输、农业遥感等,确保低空经济项目的可持续性。

2.4 关键方法与技术

低空经济的空域规划与实施离不开技术支撑。从需求预测、规划设计到实施运营,学者们相继提出了创新的方法与技术。在需求层面,孙国辉等^[65]利用比例推算法和成本效益法,以行业权威统计(无人机在册数量、单机成本等)计算低空经济在制造、基础设施、应用三类产业的市场空间占比。

在规划设计层面,董绍轩提出了基于数字孪生的低空运行服务与监管平台设计方案,该平台具备融合空间数据底座、多源数据感知、全过程服务与管控、智能仿真等能力,为低空经济的安全、高效发展提供了可落地的技术方案^[66]。贾永楠^[67]结合中国低空空域管理的实际需求,提出了一种“分层、分类、分域、网格化”的无人机交通管理(Unmanned-aircraft-system Traffic Management, UTM)架构,并创新性地设计了以“八卦图”为核心的立体航线网络,以优化空域资源配置,提高无人机群的运行效率。

在实施管理阶段,低空经济的空域规划核心在于构建高效的空域交通网络与系统。陈林等总结了当前路径规划算法的研究进展,并将其归纳为基于逻辑的算法、基于搜索的算法、基于优化的算法以及基于学习的方法四类。刘冉^[68]将通感一体技术在低空经济中的作用总结为信息传输、定位导航和环境监测三个方面,不仅实时、高效传输低空飞行器信息和提供精准的定位和导航服务,还可以通过实时监测低空环境中的气象条件、空气质量等关键指标,为低空经济活动提供及时的环境信息。为应对多机巢无人机配送中的复杂约束,周星宇等^[69]提出了一种基于多智能体系统与图神经网络的混合优化算法(MAS-GNN),该算法以路径最短、能耗最低及避障安全为综合优化目标,在城市复杂场景中展现出高效的全局寻优能力,为低空物流调度提供了可靠的智能支持。

3 结论与展望

3.1 主要研究结论

低空空域作为城市重要的空间资源,现有的相关研究主要将低空经济视为国家经济高质量发展的新业态,更多地从技术、制度等层面致力于推动其可持续性发展。但研究尚未深入剖析高密度城区、开闢新城、乡村地域等异质性建成环境和不同人群需求对低空运行的差异化约束与塑造作用。“人—地—空”的立体规划视角的缺失导致对低空经济与空间互动关系、差异化发展策略及实施路径的研究不足。本研究基于空间异质性的视角,从区域、城市(新老城区)、乡村三个地域层面,构建“特征研判—空间布局—实施管理—技术赋能”四级地空一体的低空规划框架,梳理了低空规划在区域、新老城区和乡村的规划重点与内容。主要结论如下:

城乡规划对于低空经济的响应是一个差异化、精准化的过程。在区域层面,应聚焦于城际协同与复杂空域协调,构建枢纽走廊式的空中廊道,重点服务于跨城通勤与高价值物流。老城区侧重低空管控与改造更新,在建筑密集、存量空间有限的约束下,以点状覆盖的微循环航路为主,结合城市更新嵌入起降设施,强化安全管控、噪音治理与隐私保护,优先满足应急服务、老旧小区配送等公共需求。新区侧重低空产业集聚规划,依托规整的路网与预留空间,构建网格化分层空中交通网络,同步部署通信导航监视等数字基础设施,引导低空制造、运营服务等产业链环节向示范区集聚,形成“地空一体”的产业生态。乡村侧重低空文旅与物流普惠发展,依托乡镇中心构建蜂窝状服务网络,拓展农产品出村、快递进村、应急救援及无人机农事作业等场景,弥补传统基础设施短板,实现低空资源的普惠化利用。

在此基础上,规划还应同步配套分场景的实施管理策略与关键技术支撑体系。区域层面强调跨域运营模式创新,老城侧重安全隐私保障与公共服务采购,新城推进数字底座与低空产业市场化运营,乡村则重点完善通信补盲与可持续商业模式。同时,从普查评估到重点设计,再到空域数字孪生、立体航线优化等关键方法技术,形成从理论到落地的全链条支撑体系,为不同空间尺度下的低空经济规划提供系统性的操作指引与差异化解决方案。

3.2 研究展望

未来关于低空规划研究可以从以下几个方向展开:

第一,低空空域资源的统筹配置与精细化空间管控。作为国土空间的重要组成部分,低空空域在功能分区、分层使用规则及动态管控方法等方面亟需系统性研究。如何建立以多源遥感+GIS技术耦合的城乡低空空域适宜性评价体系,如何建立国土空间规划体系下的低空空域分级管控机制衔接国土空间总体规划,以及如何构建政府、企业、居民多元协同的城乡低空治理模式,完善老旧城区低空安全管控规范等,是未来研究的关键方向。

第二,低空政策体系与管理机制的协同构建与创新。研究应致力于探索跨区域航空网络的协同机制,推动空域结构、飞行标准与监管流程在区域层面的整合。需统筹规划区域间低空航路网络,实现航线衔接、信息互通与调度协同,构建“区域一盘棋”的空域资源管理框架。未来应建立健全跨部门、跨层级的低空治理协同平台,为低空经济高质量发展提供制度支撑。

第三,低空基础设施与城市更新的深度融合与规划设计。城市基础设施普遍无法应对大量的城市低空飞行。低空基础设施在存量空间中如何布局、设计、嵌入,是老城区发展低空经济最迫切的实践问题。亟需把低空经济发展的需求纳入到城市更新体系中。建立不同城市区域(如高密度建成区、生态敏感区、交通枢纽周边)差异化的低空基础设施更新技术标准与规划指引,推动形成立体交通网络。

第四,数字化与智能化技术在低空管理中的系统集成与应用。随着未来6G网络、人工智能、数字化等技术的快速发展,未来可重点探索如何依托6G网络空地海一体化通信能力与万物智连体系,协同高精度定位、智能空管系统等关键技术支持低空交通的高效、安全运行。同时,进一步研究如何构建UTM等低空运行服务与监管平台,实现对空域资源的动态调度与优化,以及人工智能在飞行冲突预测与解脱中的应用。

第五,重视低空活动引发的安全、隐私与社会接受度问题。研究需综合评估低空飞行对城市公共安全、个人隐私及声环境等方面的影响,探索从空间引导、技术保障和社区参与等多维度提升公众认知与接受度的路径,为低空经济的可持续发展营造良好社会环境。

参考文献:

- [1] BARRADO C, BOYERO M, BRUCCULERI L, *et al.* U-space concept of operations: a key enabler for opening airspace to emerging low-altitude operations[J]. *Aerospace*, 2020, 7(3): 24.
- [2] 覃睿. 再论低空经济: 概念定义与构成解析[J]. *中国民航大学学报*, 2023, 41(6): 59-64.
QIN R. Further discussion on low altitude economy: concept definition and composition analysis[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2023, 41(6): 59-64.
- [3] HUANG C Q, FANG S F, WU H, *et al.* Low-altitude intelligent transportation: system architecture, infrastructure, and key technologies[J]. *Journal of Industrial Information Integration*, 2024, 42: 100694.
- [4] 王姣娥, 杜德林. 低空经济的地理学释义与低空人地系统理论解析[J]. *资源科学*, 2025, 47(8): 1628-1639.
WANG J E, DU D L. Geographical interpretation of low-altitude economy and theoretical analysis of low-altitude human-environment system[J]. *Resources Science*, 2025, 47(8): 1628-1639.
- [5] 刘泉, 陈瑶瑶, 洪晓苇, 等. 面向无人机的城市低空空域规划的国际经验[J]. *城市规划学刊*, 2024, 285(5): 64-70.
LIU Q, CHEN Y Y, HONG X W, *et al.* International experience of urban low altitude airspace planning for drones[J]. *Urban Planning Forum*, 2024, 285(5): 64-70.
- [6] 李翔, 甘惟, 申程, 等. 低空经济视阈下城市空中交通的影响评估与设施更新[J]. *规划师*, 2025, 41(3): 33-41.
LI X, GAN W, SHEN C, *et al.* Impact assessment and infrastructural renewal of urban air mobility from the perspective of low-altitude economy[J]. *Planners*, 2025, 41(3): 33-41.
- [7] 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, 295(15): 38-44.
ZHUANG Z. AI empowers low-altitude economy: application scenarios and future directions[J]. *Frontiers*, 2024, 295(15): 38-44.
- [8] RATH S, CHOW J Y J. Air taxi skyport location problem with single-allocation choice-constrained elastic demand for airport access[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2022, 105: 102294.
- [9] 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.
- [10] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace知识图谱的方法论功能[J]. *科学学研究*, 2015, 33(2): 242-253.
CHEN Y, CHEN C M, LIU Z Y, *et al.* The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. *Studies in Science of Science*, 2015, 33(2): 242-253.
- [11] 李志学, 颜紫科, 张曦. 无人机测绘数据处理关键技术及应用探究[J]. *测绘通报*, 2017, (S1): 36-40.
LI Z X, YAN Z K, ZHANG X. Discussion on key technology and application of UAV surveying data processings[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017, (S1): 36-40.
- [12] 廖玉佳, 胡勇, 叶涛. 低空无人机倾斜摄影在国土管理中的应用[J]. *测绘与空间地理信息*, 2019, 42(2): 97-100.

- LIAO Y J, HU Y, YE T. Application of UAV oblique photogrammetry in land resources management[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2019, 42(2): 97-100.
- [13] 冯登超, 袁晓辉. 低空安全走廊及应急管理可视化研究进展[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(4): 493-505.
- FENG D C, YUAN X H. Advancement of safety corridor and emergency management visualization in low altitude airspace[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(4): 493-505.
- [14] 廖小罕, 徐晨晨, 叶虎平, 等. 无人机应用发展关键基础设施与低空公共航路网规划[J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(7): 977-988.
- LIAO X H, XU C C, YE H P, *et al.* Critical infrastructures for developing UAVs' applications and low-altitude public air-route network planning[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(7): 977-988.
- [15] 张洪海, 冯棣坤, 张晓玮, 等. 城市物流无人机起降点布局规划研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2022, 22(3): 207-214.
- ZHANG H H, FENG D K, ZHANG X W, *et al.* Urban logistics unmanned aerial vehicle vertiports layout planning[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2022, 22(3): 207-214.
- [16] 廖小罕, 屈文秋, 徐晨晨, 等. 城市空中交通及其新型基础设施低空公共航路研究综述[J]. *航空学报*, 2023, 44(24): 6-34.
- LIAO X H, QU W Q, XU C C, *et al.* A review of urban air mobility and its new infrastructure low-altitude public routes[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(24): 6-34.
- [17] 刘洁敏, 苏雪娇, 沈振江. 无人机交通治理导向的城市低空空域与地上地下空间协同开发模式探析[J]. *国际城市规划*, 2026, 41(2): 120-128.
- LIU J M, SU X J, SHEN Z J. Exploring the collaborative development model of urban low-altitude airspace and surface-subsurface spaces oriented by UAV-based traffic governance[J]. *Urban Planning International*, 2026, 41(2): 120-128.
- [18] 王姣娥. 低空资源与低空经济——地理学视角下的新质生产力与空间治理新命题[J]. *资源科学*, 2025, 47(8): 1625-1627.
- WANG J E. Low-altitude resources and low-altitude economy: a new proposition of new quality productive forces and spatial governance from a geographical perspective[J]. *Resources Science*, 2025, 47(8): 1625-1627.
- [19] 贾圣真, 姚怡行. 面向未来的城市空中交通法律规制框架[J]. *北京航空航天大学学报(社会科学版)*, 2025, 38(1): 63-70.
- JIA S Z, YAO Y X. Future-oriented legal regulatory framework for urban air mobility[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics(Social Sciences Edition)*, 2025, 38(1): 63-70.
- [20] 孔得建, 袁泽. 低空经济政策法律体系的现状、经验与展望[J]. *北京航空航天大学学报(社会科学版)*, 2024, 37(5): 85-95.
- KONG D J, YUAN Z. Current situation, experience and prospect of the policies and legal system of low-altitude economy[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics(Social Sciences Edition)*, 2024, 37(5): 85-95.
- [21] 吴沈松, 郑皓, 陆建城, 等. 低空经济空间体系构建及规划衔接——以苏州市为例[J]. *规划师*, 2025, 41(4): 82-91.
- WU S S, ZHENG H, LU J C, *et al.* Low-altitude economic spatial system construction and planning connection: taking Suzhou city as an example[J]. *Planners*, 2025, 41(4): 82-91.
- [22] 黄启翔, 王东. 低空经济规划编制特点与技术框架体系[J]. *城市交通*, 2025, 23(2): 29-38.
- HUANG Q X, WANG D. Characteristics and technical framework system of low-altitude economic planning[J]. *Urban Transport of China*, 2025, 23(2): 29-38.
- [23] 张洪海, 夷珈, 李珊, 等. 低空空域容量评估研究综述[J]. *交通运输工程学报*, 2023, 23(6): 78-93.
- ZHANG H H, YI J, LI S, *et al.* Review on research of low-altitude airspace capacity evaluation[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, 23(6): 78-93.
- [24] 李玲玲, 韩瑞玲, 张晓燕. 城市低空空域可用空间识别与容量评估——以北京市为例[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(19): 8253-8261.
- LI L L, HAN R L, ZHANG X Y, *et al.* Identification and capacity evaluation of available space in urban low-altitude airspace: a case study of Beijing[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(19): 8253-8261.
- [25] 王纪武, 王奕宁, 章俊岫. 低空经济下低空空域利用的规划应对策略[J]. *规划师*, 2025, 41(4): 31-38.
- WANG J W, WANG Y N, ZHANG J C. Planning response strategies for the utilization of low-altitude airspace in the context of low-altitude economy[J]. *Planners*, 2025, 41(4): 31-38.
- [26] 谢华, 苏方正, 尹嘉男, 等. 复杂低空无人机飞行冲突网络建模与精细管理[J]. *航空学报*, 2023, 44(18): 221-241.
- XIE H, SU F Z, YIN J N, *et al.* Network modeling and refined management of UAV flight conflicts in complex low altitude airspace[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(18): 221-241.
- [27] 夏海山. 低空经济与智慧交通[J]. *西部人居环境学刊*, 2025, 40(3): 4.
- [28] 贾圣真. 低空经济法律制度的体系建构[J]. *当代法学*, 2025, 39(6): 76-86.
- JIA S Z. The systematic construction of low-altitude economy legal system[J]. *Contemporary Law Review*, 2025, 39(6): 76-86.
- [29] 张青兰, 蒋永强. “产业—技术”协同式发展: 低空经济高质量发展的新质生产力逻辑及其路径[J]. *当代经济研究*, 2025, 357(5): 47-55.
- ZHANG Q L, JIANG Y Q. “Industry-technology” synergistic development: the logic and path of new quality productive forces for high-quality growth in low-altitude economy[J]. *Contemporary Economic Research*, 2025, 357(5): 47-55.

- [30] 刘文静, 陈跃峰, 林伟. 低空经济助力智慧城市建设更新发展的对策建议[J]. *西部人居环境学刊*, 2025, 40(3): 34-40.
- LIU W J, CHEN Y F, LIN W. Countermeasures and suggestions for low-altitude economy to help smart city construction, renewal and development[J]. *Journal of Human Settlements in West China*, 2025, 40(3): 34-40.
- [31] 廖小罕, 黄耀欢, 徐晨晨. 面向无人机应用的低空空域资源研究探讨[J]. *地理学报*, 2021, 76(11): 2607-2620.
- LIAO X H, HUANG Y H, XU C C. Views on the study of low-altitude airspace resources for UAV applications[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11): 2607-2620.
- [32] 廖望, 曹小曙, 袁立洋, 等. 国内外低空经济研究脉络与进展评述——基于CiteSpace的可视化分析[J]. *热带地理*, 2025, 45(6): 1-17.
- LIAO W, CAO X S, YUAN L Y, *et al.* Context and progress of domestic and international low-altitude economic research based on the CiteSpace software[J]. *Tropical Geography*, 2025, 45(6): 1-17.
- [33] 党安荣, 张朝阳, 王飞飞, 等. 低空基础设施规划研究进展与展望[J]. *西部人居环境学刊*, 2025, 40(3): 25-33.
- DANG A R, ZHANG C Y, WANG F F, *et al.* Progress and prospect of low-altitude infrastructure planning research[J]. *Journal of Human Settlements in West China*, 2025, 40(3): 25-33.
- [34] 刘露, 许旺土. 国土空间规划中低空交通空间要素专项规划体系研究[J]. *城市规划*, 2026, 50(2): 76-87.
- LIU L, XU W T. A study on the sectoral planning system for low-altitude transportation spatial elements in territorial planning[J]. *City Planning Review*, 2026, 50(2): 76-87.
- [35] 刘强强. 低空经济驱动的城市空间生产: 内在逻辑、安全风险和治理路向[J]. *湖北社会科学*, 2025, 467(11): 83-92.
- LIU Q Q. Urban space production driven by low-altitude economy: internal logic, security risks and governance directions[J]. *Hubei Social Sciences*, 2025, 467(11): 83-92.
- [36] CHENG Z K, YANG J Y, SUN J F, *et al.* Trajectory planning of unmanned aerial vehicles in complex environments based on intelligent algorithm[J]. *Drones*, 2025, 9: 468.
- [37] 张恩齐, 刘翼, 蔡忻怡, 等. 高密度障碍环境无人机安全路径规划方法[J]. *航天控制*, 2025, 43(4): 78-85.
- ZHANG E Q, LIU Y, CAI X Y, *et al.* Safe path planning methods for UAVs in high-density obstacle environments[J]. *AerospaceControl*, 2025, 43(4): 78-85.
- [38] 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[J]. *中国科学院院刊*, 2024, 39(11): 1966-1981.
- LIAO X H, XU C C, YE H P, *et al.* Benefits and challenges of constructing low-altitude air route network infrastructure for developing low-altitude economy[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2024, 39(11): 1966-1981.
- [39] 董雅晴, 路紫, 张一诺, 等. 航空流网络解构与空域资源动态配置研究——以京-成空中廊道为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2022, 38(1): 116-123.
- DONG Y Q, LU Z, ZHANG Y N, *et al.* Deconstruction of air traffic flow network and dynamic allocation of airspace resources: a case study of Beijing-Chengdu Corridor-in-the-sky[J]. *Geography and Geo-information Science*, 2022, 38(1): 116-123.
- [40] VERFAILLIE M, CHO E, DWYRE L, *et al.* UAS remote sensing applications to abrupt cold region hazards[J]. *Frontiers in Remote Sensing*, 2023, 4: 1095275.
- [41] GENG X T, GOU Z H. Urban morphology and wind effects on uav flight risks: a CFD-based risk mapping framework[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2026, 144: 107396.
- [42] WANG J H, HE X Y, JIANG S, *et al.* Evaluation of urban wind effects on flight path planning of delivery drones using computational fluid dynamics simulations[J]. *Physics of Fluids*, 2025, 37: 087124.
- [43] ZHANG Q, ZHOU D, XU D, *et al.* Association between wind environment and spatial characteristics of high-rise residential buildings in cold regions through field measurements in Xi'an[J]. *Buildings*, 2023, 13: 2007.
- [44] 黄建中, 何嘉雯, 张伟聪, 等. 城市低空规划: 地空协同的要素、实现路径和规划响应[J]. *城市规划学刊*, 2025, (5): 14-22.
- HUANG J Z, HE J W, ZHANG W C, *et al.* Urban low-altitude planning: elements, implementation pathways, and planning strategies for ground-air coordination[J]. *Urban Planning Forum*, 2025, (5): 14-22.
- [45] 胡科翔, 张鸿飞, 谭志雄. eVTOL典型场景应用的研究进展和演变态势——基于Meta分析与LDA主题建模的双重验证[J]. *资源科学*, 2025, 47(8): 1702-1717.
- HU K X, ZHANG H F, TAN Z X, *et al.* Research progress and evolutionary trends of typical eVTOL scenario applications: dual verification based on meta-analysis and LDA topic modeling[J]. *Resources Science*, 2025, 47(8): 1702-1717.
- [46] 江捷, 袁子茹, 吕一彤, 等. 场景驱动的低空起降设施布局规划技术体系研究[J]. *城市交通*, 2025, 23(6): 80-87.
- JIANG J, YUAN Z R, LYU Y T, *et al.* Technology system for scenario-driven layout planning of low-altitude takeoff and landing facilities[J]. *Urban Transport of China*, 2025, 23(6): 80-87.
- [47] 杜德林, 谭文蔚, 王姣娥, 等. 中国低空经济政策演进及区域差异[J]. *资源科学*, 2025, 47(8): 1651-1662.
- DU D L, TAN W W, WANG J E, *et al.* Evolution and regional differences of low-altitude economy policies in China[J]. *Resources Science*, 2025, 47(8): 1651-1662.
- [48] 彭榆善, 夏征宇, 肖文裕, 等. 基于熵权-CRITIC-TOPSIS模型的低空空域容量综合评价方法[J]. *交通运输研究*, 2025, 11(6): 121-139.
- PENG Y S, XIA Z Y, XIAO W Y, *et al.* A comprehensive evaluation method for low-altitude airspace capacity based on Entropy-CRITIC-TOPSIS model[J]. *Transport Research*, 2025, 11(6): 121-139.
- [49] YAN Y G, LI X F, SHEN Z Y, *et al.* A high-precision risk analysis model of logistics UAV network with multiple constraining factors[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2024, 41(2): 218-232.

- [50] ELSAYED M, MOHAMED M. Robust digital-twin airspace discretization and trajectory optimization for autonomous unmanned aerial vehicles[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 12506.
- [51] QIN W C, CHEN P Y, WANG B K. Productivity model and experiment of field crop spraying by plant protection unmanned aircraft[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1168228.
- [52] 刘川, 顾侃, 程国宏, 等. 城市空中交通规划方法研究及杭州市探索实践[J]. *城市交通*, 2025, 23(2): 47-56.
- LIU C, GU K, CHENG G H, *et al.* Urban air mobility planning methods and practice in Hangzhou[J]. *Urban Transport of China*, 2025, 23(2): 47-56.
- [53] 董雅晴, 路紫, 刘媛, 等. 中国空中廊道划设与时空拥堵识别及其航线流量影响[J]. *地理学报*, 2018, 73(10): 2001-2013.
- DONG Y Q, LU Z, LIU Y, *et al.* The design of China's corridors-in-the-sky and the influence of air routes traffic on the identification of space-time congestion[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(10): 2001-2013.
- [54] LI C P, ZHAO Z G, CHEN Y B, *et al.* Modeling the urban low-altitude traffic space based on the land administration domain model—case studies in shenzhen, China[J]. *Land*, 2024, 13: 2062.
- [55] 金利霞, 李珊, 曾嘉荣, 等. 低空交通导向开发(VOD): 国际比较与中国路径[J]. *城市规划学刊*, 2026, 296(1): 73-80.
- JIN L X, LI S, ZENG J R, *et al.* VOD(low-altitude traffic-led development): international comparisons and the chinese approach[J]. *Urban Planning Forum*, 2026, 296(1): 73-80.
- [56] 赵光辉. 中国低空——交通经济发展的协同治理研究[J]. *改革与战略*, 2025, 41(4): 70-79.
- ZHAO G H. China's low-altitude: research on collaborative governance of traffic economic development[J]. *Reformation & Strategy*, 2025, 41(4): 70-79.
- [57] 郭文彤, 李翔宇, 金温妍, 等. 中国主要城市低空适飞空域分析[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2025, 23(3): 60-73.
- GUO W T, LI X Y, JIN W Y, *et al.* Analysis of low altitude flyable airspace in major cities in China[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2025, 23(3): 60-73.
- [58] 万红, 朱颖. 嵌入到融入: 低空经济赋能乡村治理的现实梗阻与法治因应[J]. *西北农林科技大学学报(社会科学版)*, 2026, 26(3): 1-11.
- WAN H, ZHU Y. From embedding to integration: realistic obstacles and rule of law responses of low-altitude economy empowering rural governance[J]. *Journal of Northwest A&F University (Social Science Edition)*, 2026, 26(3): 1-11.
- [59] 中国民用航空局. 民用垂直起降场地技术要求(征求意见稿)[R]. 北京: 中国民航出版社, 2024.
- [60] 戚玉亮, 黄柯柯, 梁秋河. 面向低空交通的新基建发展机遇分析[J]. *建筑科技*, 2024, 8(11): 32-35.
- QI Y L, HUANG K K, LIANG Q H. Analysis of development opportunities for new infrastructure oriented towards low-altitude traffic[J]. *Building Technology*, 2024, 8(11): 32-35.
- [61] 覃睿, 赖雨馨. 基于SLP的物流无人机垂直起降场功能区布局研究[J]. *科学技术创新*, 2024, (13): 225-228.
- QIN R, LAI Y X. Research on functional area layout of logistics UAV VTOL field based on SLP[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2024, (13): 225-228.
- [62] 陈刚, 付江月. 军民融合背景下无人机配送中心选址问题研究[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(8): 226-231.
- CHEN G, FU J Y. Drone distribution center location problem under military-civilian integration strategy[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(8): 226-231.
- [63] 陈志杰, 朱永文, 刘杨. 基于数字化空域系统的城市无人机管理对策研究[J]. *中国民航大学学报*, 2023, 41(3): 8-12.
- CHEN Z J, ZHU Y W, LIU Y, *et al.* Management strategy of the urban UAV based on digital airspace system[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2023, 41(3): 8-12.
- [64] 黄煦淇, 洪晟. 民用无人机领域数据与飞行安全法律规制研究[J]. *信息技术与网络安全*, 2022, 41(6): 31-35.
- HUANG X Q, HONG S. Research on legal regulation of data and flight safety in civil UAV field[J]. *Information Technology and Network Security*, 2022, 41(6): 31-35.
- [65] 孙国辉, 聂鹏, 赵丽彤. 低空经济市场空间预测研究[J]. *信息通信技术与政策*, 2024, 50(11): 33-40.
- SUN G H, NIE P, ZHAO L T. Research on market space forecast of low-altitude economy[J]. *Information and Communications Technology and Policy*, 2024, 50(11): 33-40.
- [66] 董绍轩. 基于数字孪生的低空运行服务与监管平台设计[J]. *数字技术与应用*, 2025, 43(6): 173-175.
- DONG S X. Design of low-altitude operation service and supervision platform based on digital twin[J]. *Digital Technology and Application*, 2025, 43(6): 173-175.
- [67] 贾永楠. 低空空域无人系统交通管理方案初探[J]. *航空学报*, 2025, 46(11): 121-147.
- JIA Y N. A scheme for unmanned aerial system traffic management in low-altitude airspace[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, 46(11): 121-147.
- [68] 刘冉. 对低空经济背景下5G-A通感一体基础设施规划的思考[J]. *智能建筑与智慧城市*, 2024, (S1): 4-6.
- LIU R. Thoughts on the planning of 5G-A integrated sensing infrastructure under the background of low altitude economy[J]. *Intelligent Building & Smart City*, 2024, (S1): 4-6.
- [69] 周星宇, 李姝涵, 薛锋. 基于多智能体图神经网络的城市无人机配送路径优化[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2025, 23(4): 50-61.
- ZHOU X Y, LI S H, XUE F. Urban UAV delivery routing optimization using multi-agent graph neural networks[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2025, 23(4): 50-61.

(责任编辑: 张玮欣)