

城市低空规划：地空协同的要素、实现路径和规划响应*

Urban Low-Altitude Planning: Elements, Implementation Pathways, and Planning Strategies for Ground-Air Coordination

黄建中 何嘉雯 张伟聪 肖作鹏 吴志强

HUANG Jianzhong, HE Jiawen, ZHANG Weicong, XIAO Zuopeng, WU Zhiqiang

关键词 低空经济；无人机配送；地空协同；新型基础设施；新质生产力

Keywords: low-altitude economy; drone delivery; ground-air collaboration; new infrastructure; new quality productive forces

提 要 低空经济的发展驱动城市规划深入思考地面与低空的关系及利用方式，地空协同已成为建构低空服务网络、开展城市低空规划的关键命题。然而，现有研究多在技术层面进行讨论，没有从空间组织的视角分析地空协同的要素与实现路径。基于文献综述与案例调研的方法，以无人机配送为例，分析地空协同的要素、特征及实现路径，阐述实践挑战并提出相关规划响应。研究发现：地空协同具有多主体场景协同、多目标网络协同、多尺度节点协同等特征；具体实现路径包括区分需求差异建构服务场景谱系、锚定地面要素组织航线网络、嵌入建成环境建设节点设施等。为此，提出城市规划应评估真实需求、推进分级布局，完善空域管制、统筹推进航线开发，创新管控政策、促进设施落地成网，为开展城市低空规划促进地空协同提供方法与政策建议。

Abstract: The development of the low-altitude economy has given rise to new demands for the integrated utilization of ground and airspace. In urban low-altitude planning, ground-air coordination has become essential for building effective low-altitude service networks. However, existing research has focused primarily on technical issues and lacks analysis of the elements and implementation pathways from a spatial-organization perspective. Taking drone delivery logistics as an example, this paper, employing a literature review and case study approach, analyzes the elements, characteristics, and implementation pathways of ground-air collaboration, elaborates on the practical challenges, and proposes corresponding planning strategies. The study finds that ground-air coordination is characterized by multi-agent scenario collaboration, multi-target network collaboration, and multi-scale node collaboration. In terms of implementation, it follows a pathway that ranks demand to construct a spectrum of service scenarios, anchors ground-based elements to organize route networks, and integrates node facilities into the built environment. To this end, the study suggests that urban low-altitude planning should identify real needs, promote hierarchical planning, improve airspace control, coordinate route development, innovate management mechanisms, and integrate facilities into a network. These measures can provide the spatial safeguards to advance the coordinated development of ground and air operations.

中图分类号 TU984 文献标志码 A
DOI 10.16361/j.upf.202505002
文章编号 1000-3363(2025)05-0014-09

作者简介

黄建中，同济大学建筑与城市规划学院教授、博士生导师，huang03213@tongji.edu.cn

何嘉雯，同济大学建筑与城市规划学院博士研究生

张伟聪，澳门城市大学城市与可持续发展研究院博士研究生

肖作鹏，哈尔滨工业大学（深圳）建筑学院副教授、博士生导师，通信作者，tacxzp@foxmail.com

吴志强，中国工程院院士，同济大学建筑与城市规划学院教授、博士生导师

* 国家自然科学基金项目“基于空间活动的大都市区多层网络结构的识别、评价与优化方法研究”（项目编号：52178049）；国家自然科学基金项目“即时配送动态网络内部活动边界的识别、成因及在服务分区中应用”（项目编号：42571286）；广东省普通高校青年创新人才类项目项目“数字化转型下的居民日常消费生活圈重构：平台作用与空间应对”（项目编号：2023WQNCX140）

自低空经济在2021年首次被写入《国家综合立体交通网规划纲要》^[1]后,低空飞行带动飞行器制造等快速发展^[2],在物流配送、巡检治理、应急救援、农业植保、消费文旅等多个场景中率先取得突破。特别是,在中国邮政、京东、美团、顺丰等企业的引领实践下,利用无人机在高密度城市商圈、偏远农村、景区园区、离岛海岛、灾区消防等场景中进行餐饮外卖、生鲜食品、医疗及应急物资等高频、短时、快速响应的配送模式快速发展。与传统物流运输相比,无人机配送不依赖地面道路等运输,能够突破地理空间障碍、大幅提升运输效率,具有广泛的应用需求,成为低空经济塑造新质生产力^[2]、融入城市生产生活的范例,也成为城市开展低空规划需要高度重视的现象。

无人机配送的快速发展,充分体现了利用低空这一自然资源能有效实现地面资源的供需连接^[3-5]。这些实践也表明,虽然无人机及其低空飞行是实现低空货物运输的主要载体及其形式,但其取货、送货、能源补给等均高度依赖地面基础设施、操作人员及信息系统的支撑,飞行路径、起降场站设计等也受到地面要素约束。因此,无人机配送不只是低空飞行的连接与跨越,更是地面资源的低空延伸与扩展,也是低空资源的向地整合与空间嵌入。换言之,低空经济无法脱离地面研究空中交通,尤其需要注重对地面与空中系统的协同研究。

国内外研究目前关于低空经济的地空协同的研究概括起来有以下三个方面。其一,研究探索地面资源与管理对空域容量^[6]、风险评估^[7]、航线规划^[8-9]与运营^[10-11]等影响。其二,关注无人机与地面交通的协同^[12],包括无人机与货车^[13]、电动车^[14-15]、无人车^[16]、机器人^[17]等。其三,研究从地空协同的视角分析了节点布局^[18-19]、路由设计与任务分配的策略优化^[20-21]。但是,现有研究多集中在航空及交通领域,侧重算法与技术设计。此外,现有研究也较少结合真实案例,从空间组织的视角深入挖掘“地”与“空”的要素构成及协同要求,没有充分探究地空协同的路径,进而结合土地利用、空间开发及设施配置等提出空间规划的响应策略。

为此,基于现有研究,本研究解析低空飞行地空协同的结构要素与技术要求,提出无人机配送地空协同的特征与内在要求。基于多家企业的案例研究,探究无人机配送实现地空协同的路径,阐述其中挑战及促进策略,以期低空规划实现地空协同提供政策建议。

1 地空协同的要素与要求

1.1 低空飞行地空协同的要素及技术要求

地空协同,在概念上可追溯到广义的“空天地一体化网络”(Space-Air-Ground Integrated Network, SAGIN)^[13,17,22](图1)。也即,依托太空(space)提供的通信等技术系统及地面(ground)的基础设施系统,结合统一的数据标准实现信息实时共享,为飞行任务协同分配时间与空间,保障通用飞机、无人机、飞艇等空中(air)运输需求,促使各系统资源充分整合与利用,形成高效、稳定的协同运行机制^[24]。

空中系统,主要包括服务航空器垂直起降及执行运输任务的无障碍空间(Obstacle Free Volume, OFV)、连接各起降场航线以及为保障起降及航线安全的空域分区。无障碍空间是指垂直起降场上空为执行垂直程序的航空器减少外部环境、噪声和障碍物干扰而划定的漏斗形状的空间^[25]。空域分区,则根据可

开展飞行活动的许可不同,具体划分为适飞区、管控区、禁飞区等。其中:航线一般位于适飞区,也即无须取得特殊通用航空飞行任务批准文件即可进行无人机飞行活动;管控区是需要许可才可以飞行的区域;禁飞区则是禁止一切无人机飞行活动的区域。

地面系统,主要是指起降设施,承担了无人机因装卸货或上下客而需要完成的起降活动。其具体形式则包括枢纽起降场、具有卸货和下客功能的空投柜或索降点,以及为应对无人机飞行过程中天气条件变化、电磁干扰等突发情况而预留安全降落位置的备降点等。从空间要素上看,起降点包括接地区和离地区(Touchdown and Liftoff Area, TLOF)、进近区和起飞区(Final Approach and Takeoff Area, FATO)、安全区(safety area, SA),以及各类配套设施^[22]。其中:接地区和离地区是指供电动垂直起降器接地或离地的承载区^[26];进近区和起飞区是指用于电动垂直起降航空器悬停或着陆,以及开始起飞动作的特定区域;安全区,也即保护区(protection area)^[25],是为了降低航空器偏离FATO或停机位而划定的限定区域。各类配套设施,包括停机位等基础设施,通信、导航、监测、气象等辅助设施,指挥室、数据中心等控制中心,机库、堆货区等存储设施,充放电、照明、消防、安全等保障设施。上述框架从纵向维度阐述了低空

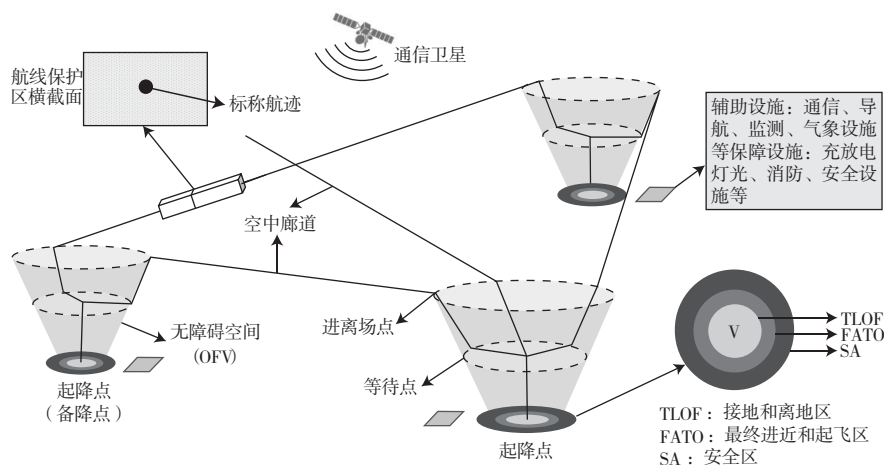


图1 低空飞行地空协同系统及其要素

Fig.1 Ground-air coordination system and its elements for low-altitude flying

资料来源:改绘自参考文献[23]

飞行地空协同系统的关键要素,明确了要素间实现协同、保障低空飞行的技术要求,构成了地空协同系统基本模式(图2)。但是,从无人机配送的实际运作来看,其地空协同则有更多维度的特征及内在要求。

1.2 无人机配送地空协同的特征与内在要求

1.2.1 多主体场景协同

无人机配送本质上是连接货物供给方与需求方的第三方物流服务(图3)。因此,其地空协同首先指向的是货品、供需主体在无人机配送场景中的协同。例如,餐食饮料从商圈店铺运送到客户构成了无人机即时配送,医疗样本从乡镇采样点通过无人机运送到城市中心监测站构成低空医疗配送,生活物资从近岸基地运送到海岛居民区构成低空跨海运输,应急物资从储运站投放到受灾区域构成低空应急配送,施工器材从服务站运输到施工点构成低空工程物流,农产品从农田运输到收储站构成低空农业运输。货品、供需主体及空间场域共同界定了无人机配送的需求频次、起讫点分布、航距、时效及“干—支—末”组织运行模式(图4)。这些要素构成了航线网络设计以及地空协同体系建立的基础。

1.2.2 多目标网络协同

现有以航空技术为主体的地空协同侧重的是在空中交通层面保障航线及飞行器的安全。相较于一般航空运输,无人机配送的飞行高度更低,其飞行安全等需要更多考虑地形地貌、土地利用、建成环境、地表活动、人口分布等(图4)。除安全性外,这些因素也涉及其他目标。例如,根据地面活动确定航线的经济性,结合城市供需空间分布的异质性,提升高需求、低覆盖区的无人机配送服务的可获得性,联动卡车、公交、轨道交通等发挥其规模优势、提高无人机配送的效率与可支付性,增强无人机配送服务的网络韧性。这些目标深刻地影响了无人机配送航线与地面社会经济与空间等的网络协同。

1.2.3 多尺度节点协同

无人机配送结合地面空间场景组织网络,形成多种节点。这种节点既包括宏观上无人机配送服务模式的落点布局,

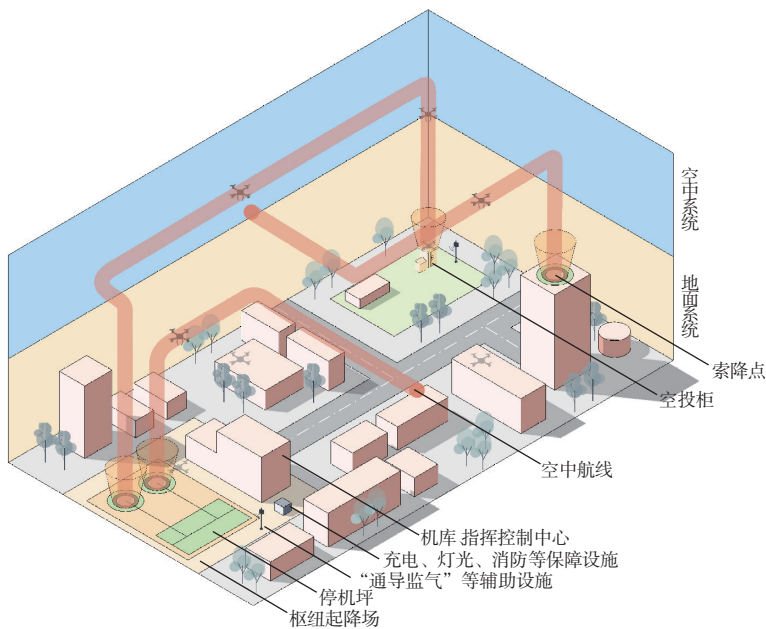


图2 低空飞行地空协同系统模式图

Fig.2 Diagram of ground-air coordinated low-altitude flight systems

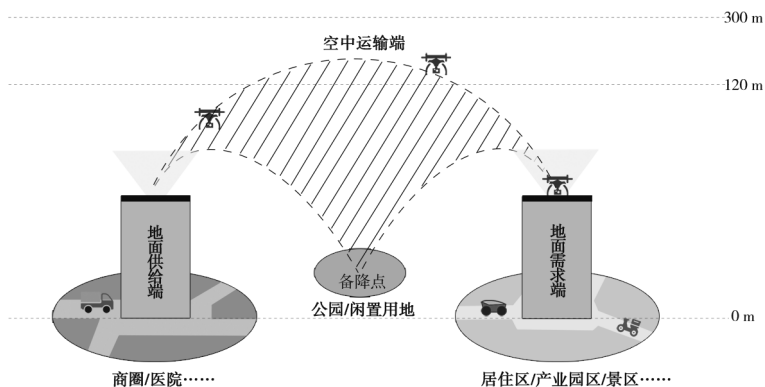


图3 无人机配送地空协同示意图

Fig.3 Ground-air coordination of drone delivery

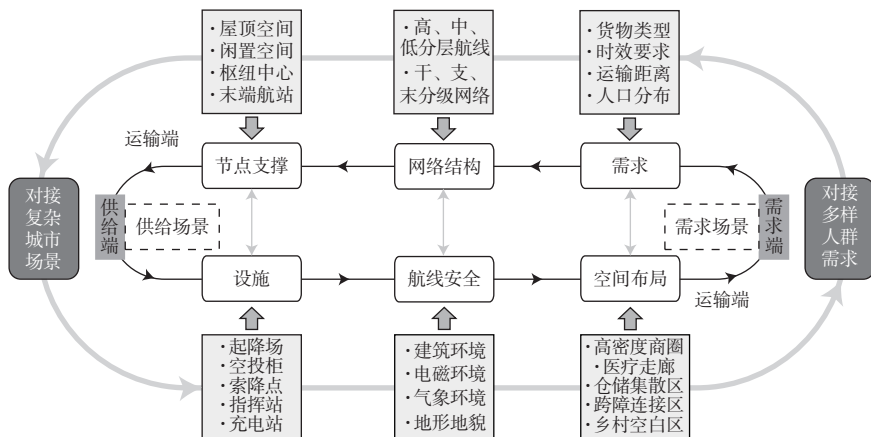


图4 无人机配送地空协同实现路径的逻辑

Fig.4 The logic of ground-air coordination pathway for drone delivery

也包括以嵌入建筑物或地面建立的起降场为代表的各类微观节点（图4）。这些嵌入式的节点是无人机配送在场景上锚定的各类基础设施，是支撑无人机配送活动组织的物理载体，也是无人机配送地空协同网络连接多种运输模式转换的枢纽，直接影响了无人机配送的作业流程与响应效率。

2 研究案例与方法

2.1 研究案例

本研究以案例研究为主。根据目前我国无人机配送的发展现状，聚焦即时配送、物流快递及医疗转运等场景，选择在上述场景中具有代表性的M、S及Y企业等作为案例（表1）。

作为我国规模最大的即时零售平台之一，M公司自2017年就开始探索轻量级、短距离（小于3 km）的无人机即时配送业务。2021年初，该企业成功完成首个面向真实用户的订单配送任务。2023年2月底，获得《特定类无人机试运行批准函》和《通用航空企业经营许可证》，并在深圳开始试行无人机配送。截至2024年年底，已在中国境内开通53条无人机配送航线。其中，大部分航线集中在深圳，其余分布在北京、上海、广州等地，服务覆盖办公、社区、景区、市政公园、校园、图书馆等场景。

作为国内规模最大的综合物流服务提供商，S公司提供包括快递、快运、冷链、医疗及同城急送等服务。S公司在2015年开展载货物流无人机的研发，2017年成为首家由中国民用航空局批准的运营试点企业，并于2018年3月获民航局颁发的全国首张《无人机航空运营（试点）许可证》。2025年8月，S公司正

式获得民航局颁发的全国首个城市全域无人机配送牌照。截至2024年底，S公司无人机已在全国开通549条航线，累计飞行110多万架次，运输货物620余万件，飞行总里程超过570万km。

Y公司成立于2015年，2019年10月获得由民航局颁发的全球首张《特定类无人机试运行批准函》和《无人机物流配送经营许可》，目前，主要在医疗急救、同城即配、生鲜电商、邮政快递、园区配送等领域提供了无人机配送解决方案。截至2025年8月14日，其累计飞行超过31万架次，飞行总时长近5.9万h，飞行总里程超过200万km。其中，城市医疗占无人机配送市场应用的85%，已覆盖50余个城市，服务医共体及市级以上医院超过百家。

2.2 研究方法

针对上述3家企业及相关企业，本研究于2024年3月—2025年6月进行了持续的跟踪研究。①通过公司网站、新闻中心、年报财报等，收集企业发展、现有规模及布局、运营成本等相关资料。②对这些企业进行了实地走访，与企业相关负责人等开展了深入的座谈交流，详细了解企业的发展历程、主导业务、运营设备、飞行航线、运营模式、经营情况、安全要求等信息，获取了航线、操作手册及发展蓝图等，实地踏勘了起降场的用地规模、建筑面积等空间需求。③利用这些企业的网站、可视化平台以及客户端，采用测试研究等方法，进一步获取了案例企业的航线、起降场站、商家等信息，并结合ArcGIS等软件进行三维可视化仿真模拟。

3 无人机配送地空协同的实现路径

3.1 区分需求差异，建构地空协同场景谱系

无人机配送地空协同首要任务是锚定特定区域主体需求，建立对应的服务模式。从案例企业来看，其地空协同服务模式主要是面向企业业务，着力用无人机配送提升服务模式（表2）。譬如，M公司主要开展餐饮外卖业务，因此其地空协同主要是锚定商圈，在具有大流量门店的购物中心设置起降场，在起降场0.5—2 km范围内居民区、办公区、景区等高需求区域设置空投柜，建立轴辐式的服务网络，使用无人机完成从购物中心到需求点空投柜的单向投递。居民可依据实际需求选择是否采用这一模式，也可以进一步选择到空投柜自取或安排快递员接力配送。与之相反，S公司主要开展的是高价值包裹与急件投递业务，因此其地空协同模式主要依托现有网点建立起降场，构建网点互通网络，同时将这种网点间（7 km内）快速的低空运输作为一种服务产品提供给消费按需选择。目前，主要的服务对象包括黄金、珠宝等高价值物品及海鲜、水果等高时效性的同城紧急配送。Y公司则锚定医疗机构，特别是医疗共同体内部的生物样本、疫苗物资、医疗物资等转运需要，因此选择在医疗场所等建立起降场，形成了多层双向互动地空协同服务网络。

深入分析上述3家企业建构无人机配送服务的场景，其核心在于使用无人机进行地空协同能够替代传统的地面人工配送。这一替代主要是产品及服务需求驱动。产品驱动，主要是指货品具有较强的时效性或高价值。服务需求，主要是指代地面交通或其他交通方式不能满足需求，因此要引入无人机配送服务。具体包括城市复杂高密度路网导致地面交通效率不高，传统地面配送存在穿山越海、跨江过湖等现象导致时效不高等，高层建筑区域（包括高层办公楼及住宅楼）存在“等电梯”等垂直交通效率低的问题，特定区域如旅游度假区、文化体育区等本地需求供给不足，景区、大学校园、公园等区域也存在“门难找、进门难”等空间渗透性不足的问题而需

表1 案例企业基本情况

Tab.1 Basic information on company cases

案例企业	主导业务	起降点/个	航线数量/条	平均航线距离/km	飞行高度/m
M	商圈的即时配送	61	49	2.0	120
S	网点间快递物流	222	549	6.3	120—300
Y	医院间物资转运	100	2550	7.2	120

注：M数据截至2025年8月，起降点包括起降场和空投柜；S数据截至2025年5月底；Y数据截至2025年4月，起降点包括起降场和索降点。

表2 无人机配送需求谱系及其地空协同模式

Tab.2 Low-altitude logistics demand profile and ground-air coordination model

场景需求	地空协同模式	示意图
商圈即时配送	商圈无人机配送+末端空投柜 骑手接驳配送/用户自取	
商圈集合配送	商圈骑手配送+枢纽站间无人机 运输+末端骑手配送	
景区即时配送	商场无人机配送+景区索降点/ 自动枢纽站用户自取	
快递物流配送	枢纽站间无人机转运/配送+末端 航站骑手接驳配送/用户自取	
医疗物资转运	区域中心血站无人机配送+ 各级医疗机构专员自取	
海洋海岛运输	枢纽站无人机运输+末端航站 骑手配送/用户自取	

要二次配送，特殊天气或者灾害场景导致地面配送中断等。面向这些场景，不同的企业根据其业务特点、资源优势等，选择完全重建或者合作建设无人机配送服务系统。

3.2 锚定地面要素，组织地空协同航线网络

航线网络是地空协同的关键要点。从S、M、Y等企业来看，其航线规划，包括飞行器起飞、降落、巡航、悬停等在不同状态下的飞行航线，需要考虑多层地面因素，具体包括自然地貌、土地利用、建成环境及人类活动因素（表3）。这些因素可以从正面或负面影响航线的安全性、可靠性及公众接受度。其中：安全性主要是考虑航空器对地面的安全，

包括对地面人员、设施的伤害，引发二次灾害的概率以及搜寻无人机及货物的难度；可靠性是指在气象、电磁与障碍物环境下保证航线的持续稳健运行；公众接受度则是评估航线带来的噪声及隐私给公众带来的影响。

（1）自然地貌方面，航线投影下方存在山地/绿地及水体，可以降低航空器失事后给地面人员带来的伤害，成为航线划设的正向驱动要素；但是，丘陵地区也常出现不稳定气象，影响航线运行可靠性。山地、绿地及水体等影响了飞行器的搜寻难度，也需要审慎评估其带来次生灾害的可能性。

（2）土地利用方面，航线下方的道路可以提供更多开阔空间，提升航线的安全性、可靠性和公共接受度。因此，

M、S、Y公司航线多沿着主要交通干道推进（图5）。但是，无人机起降带来的视觉干扰是影响交通安全和公众接受度的重要因素。民用及军用机场、核电站、油库、高速铁路等具有战略价值和安全防护性，成为无人机配送航线的禁飞区（图6）。政府单位、高端别墅住区等因隐私关系及其公众接受度，成为航线划设的负向因素。幼儿园、学校、疗养院、居住社区等由于对噪声敏感，也成为航线划设的负向因素。相反，工业园、物流仓储区等噪声背景较高，空地荒地可作为备降点，都成为航线划设的正面因素。

（3）建成环境方面，高层建筑及建筑遮挡物等形成的障碍物会影响飞行安全，建筑物布局引致的风切变区域会影响局地气象环境，铁塔、通信基站、高压线路及电力线路构成障碍物的同时也改变局地电磁环境进而影响航线安全性。

（4）地面活动方面，鸟类、风筝及热气球放飞、高层塔吊施工等都构成动态障碍物，作为负向约束因素，影响低空飞行安全性。

3.3 嵌入建成环境，扩展地空协同节点设施

相较于航线多利用低空这一公共资源，起降场（点）等所占有的空间类型则是有更强的多样性（表4）。从类型上看，目前无人机配送存在起降场、空投柜、索降点等形式，不同类型设施的功能及配套设施也不尽相同。起降场提供了无人机起降、存储、控制、装卸货等多种功能，因此通常配置了通信设施、导航设施、监测设施、气象设施、充电设施、消防设施、指挥控制台、堆货区与多个起降位等，其占地面积在300 m²以上。空投柜则只是货品收发及取用的智能设施，占地面积在10 m²左右，配备电源和管理装置，兼具中转接驳与用户自提功能。索降点则更为简单，多在地面或者建筑平面上划定特定视觉定位标识，无人机利用地理坐标定位及超视距图像感知识别具体位置，通过悬索将腹仓货物放置落下，而无需其他辅助设施，适合大规模铺设以提高覆盖范围。

建设方式上，主要是由无人机企业利用建筑楼顶、院落空间、街道空间、

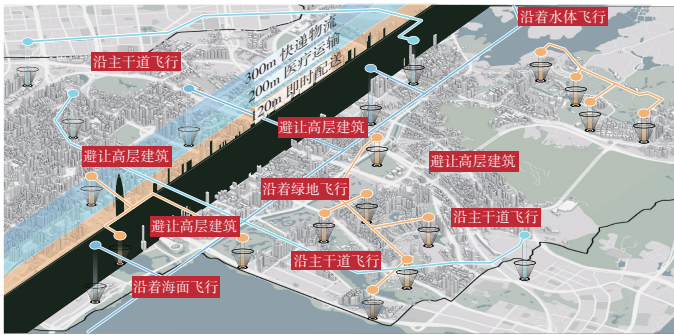


图5 三维环境下深圳市南山区无人机配送航线示意图

Fig.5 Diagram of low-altitude drone delivery routes in 3D environments in Nanshan District, Shenzhen

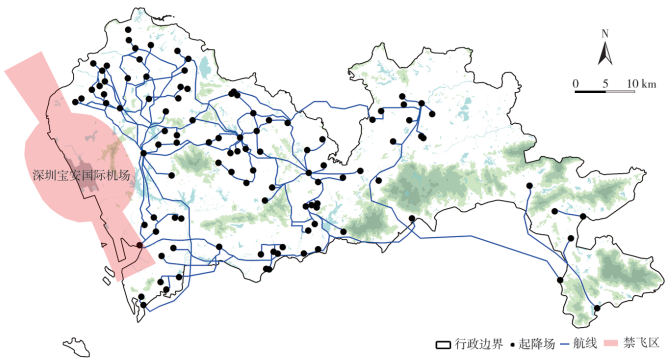


图6 深圳市S公司无人机配送航线网络现状图

Fig.6 Current status of S company's drone delivery network in Shenzhen

表3 地空协同视角下无人机配送航线划设的影响因素及正负效应

Tab.3 Influencing factors and positive-negative impacts on the establishment of low-altitude logistics routes from ground-air coordination perspective

	要素	安全性	可靠性	公共接受度
自然地貌	山体/绿地	★★★★	☆☆☆	★★★★★
	水体	★★★★	★★★★	★★★★★
土地利用	道路	★★★★	★★★	★★★★
	铁路、高速铁路	☆☆☆☆	☆☆	
	机场	☆☆☆☆	☆☆☆	
	核电站、油库	☆☆☆☆	☆☆☆☆	
	高等级居住区	☆☆☆☆	★★★	☆☆☆☆
	学校、政府机关	☆☆☆☆		☆☆☆☆
	工业、物流仓储区	★★★	☆☆☆	★★★★★
	空地荒地、未利用地	★★★	★★★★★	★★★★★
建成环境	高层建筑	☆☆		☆☆☆☆
	建筑物风口	☆☆☆	☆☆☆	
	铁塔、高压线、电力线	☆☆☆	☆☆☆	
	通信基站	☆☆☆	☆☆☆☆	
地面活动	建筑工地(塔吊)	☆	☆☆☆	
	市民活动(风筝、人群活动)	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆

注：★为正向效应，☆为负向效应

公园空间等设置起降场(点)(图7)。例如，M公司主要有两种方式。①租赁商圈购物中心上空无遮挡的裙房、办公楼顶层建立起降场或索降场；②经过管理部门批准后利用街道及公园空间建设空投柜或索降场。S公司因为有广泛分布的自有物业或租赁空间建设的网点设施，因此多在其网点顶层或院落空间自建起降场。Y公司则在上述三种方式外，还存在另外一种方式，也即无人机配送需求方(如医院、血站)利用自有物业空

间自主投资、Y公司代建起降场(点)。上述布局策略体现了无人机配送企业在行业扩张初期阶段，聚焦起降场(点)网络扩张与成本控制等，根据空间资源获取的差别，自主探索多样化的差异路径。

4 挑战与规划响应

4.1 评估真实需求，分级谋划地空协同

无人机配送本质上是载货飞行，通

过载货飞行完成物的位移。这种位移需求的产生需要对比其他运输方式研究无人机的适配场景。这一适配场景包含运输品类、运输需求所指向的时间、空间等维度。所谓适配，除了技术上的安全性外，另一重要维度就是经济性，也即使用无人机配送低空物流相比其他方式具有更好的经济性。只有具有经济性，这种需求才具有可持续性。在货品维度，目前M、S、Y企业在商业价值上有可持续性的主要是具有“急、难、险、贵”等特征的货物，具体包括同城急送、地面运输难以送达的货物、需要额外时效保证的险件以及高价值的贵重物品。基于这些产品，在上文阐述的时间与空间场域下，形成了无人机配送与地面配送的时空价值差，使无人机配送需求成为真实需求。因此，城市低空规划需要评估、思考相关空间推动地空协同的“技术—经济”逻辑，避免“盲目乐观、普遍配套”。具体来说，应对需求场景等建立评价指标，确定评估方法与技术框架，根据场景需求程度的差异性，确定开展无人机配送不同优先级，开展短期、中期、长期等全生命周期规划，优先为医疗应急、高端冷链等无人机配送提供空间配套与基础设施支撑。在规划实施层面，研判真实需求场景指导城市更新中的空间预留，为无人机配送场景从单一试点逐级走向规模化提供前瞻性的制度支持。

除此之外，也有企业认为应该从更宏观、长远的角度考虑无人机配送与其他运输方式的时空价值差。例如：未来老龄化及少子化、社会保障规范化后人

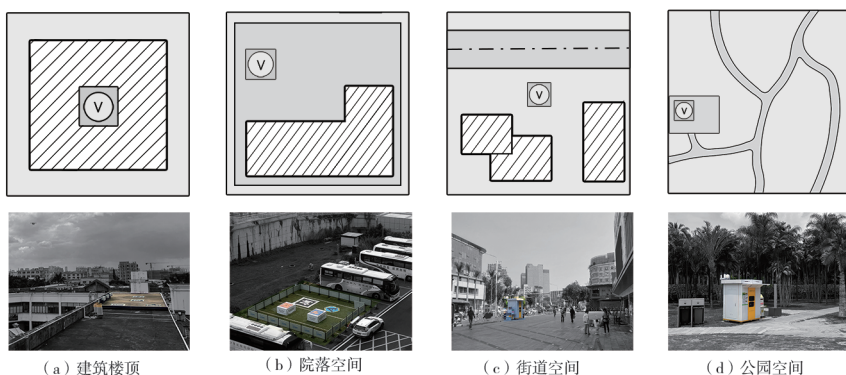


图7 无人机配送地空协同节点所在的建成环境类型

Fig.7 Types of built environments hosting nodes for ground-air coordinated drone delivery

表4 起降场的类型及空间分布

Tab.4 Types and spatial distribution of landing fields

空间类型	M		S	Y
	起降场 / 个	空投柜 / 个	起降场 / 个	起降场 / 个
建筑楼顶	10	0	91	0
院落空间	0	4	2	16
街道空间	0	21	0	2
公园空间	0	20	0	6
总计	10	45	93	24

注：报告的数据是M公司、S公司在深圳，Y公司在合肥的统计数据

工配送综合成本会持续上升，无人机制造成本会持续下降，腹仓规模提升、集合配送等规模化应用也会降低单次配送的边际成本；衔接卡车、轨道等交通方式，无人机配送通过多式联运可以更好发挥优势；未来低空客运（electric Vertical Take-off and Landing, eVTOL）规模化应用后，可能出现低空客运与货运一体化（co-modality）^[28]。因此，城市低空规划需要对未来无人机配送的可能性保持审慎乐观、适度开放态度，思考大规模应用后会带来新的组织模式，超前锚定相关场景进行场地及航线布局，或者预留接入条件。在传导落实层面，将低空应用场景需求的分级评估结果纳入国土空间总体规划及综合交通体系规划中，统筹利用地面与低空空域资源，分级审批、分类划设低空空域与航线，构建与地面交通高效衔接的地空协同机制。

4.2 完善空域管制，统筹推进航线开发

在低空经济发展初期，航线普遍由企业自主测绘、划设、申建和运营。这在无人机配送领域尤为明显。例如，本研究中的案例企业都斥巨资开展相关工作，并将之视为企业核心资产之一。从更大的范畴来看，各省、市低空服务系统平台也都是服务本区域企业，互不联通，难以实现跨企业、跨区域“一网统飞”。这一现象将随着低空经济的发展而产生航线竞争问题，影响了低空资源使用效率。为此，目前学术与行业研究都提出了优化空域分区、划设公共航线、推动空域共享、推动空域资源动态释放等思路。例如，有研究认为需要基于不同的业务需求划分空域使用高度。例如，消费级无人机120 m以下，即时配送120—200 m、物流转运200—300 m等。根据前面基于企业航线划分的分析，本研究认为，无论是空域分区还是航线划定，都不是单纯空中交通的问题，其对地面的关系也不是“自上而下”空中交通的投影，而是需要“自下而上”从地面延伸到低空领域。

完成这种延伸需要在理论和技术上做好规划应对。在技术上，随着无人机配送率先推动城市中各要素的流动形式由二维升至三维。这需要在三维环境中分析障碍物及其动态变化^[28-30]，研判地面各要素在三维环境中考虑安全与经济后的可达性及路由。同时，应以河道、水体为代表的低影响、高安全的下垫面上空划设低空飞行廊道，结合土地资源利用现状划分不同等级的噪声敏感区及

隐私敏感区，制定航线退线等方法控制航线上飞行器飞行带来的噪声及隐私暴露等对地面的影响。地方层面可结合城市立体空间环境与土地利用现状，编制《低空空域分类与航线管理专项规划》，明确低空空域划设方式、航线布局及安全缓冲区的空间范围，为后续地面基础设施建设与向上级部门进行航线申报提供依据。

更长远的是，需要在理论层面研究低空这一空间的开发权及空间管制问题。从所有权的角度来说，低空资源与空域一样属于国家全民所有。从使用层面，目前是政府代表全民行使开发权^[31]。但是，这一“公权”也在实践中碰到阻力。最为直接的就是有关的“上空权”（Air Rights）的讨论^[32]。在美国，低至500英尺（150 m）以下的上空权属于地产拥有者，以上区域属于通航区域（Navigable Airspace），土地拥有者对其土地上空权的“直接范围”拥有所有权，拥有“至少与其可以占用或使用的地面空间一样多的空间”^[33]。在我国，相关规定还比较模糊。2007年的《中华人民共和国物权法》在用益物权中对建设用地等提出了“地役权”的概念，2021年的《中华人民共和国民法典》第三百四十五条则进一步说明，“建设用地使用权可以在土地的地表、地上或者地下分别设立”；同时，在相邻关系中，进一步明确了采光、通行等“役权”实践^[32, 34]。因此，可以认为建筑物上空及其周边区域属于“役权”范围，尽管现有法规尚未明确指出其权利形式及归属。因此，未来包括低空无人机配送规划在内的城市低空规划，都需要面向低空这一空间资源明确公权与私权的关系，建立三维地籍及三维城市空间数字底座，为划定公共航线、低空资源用途管制、有偿使用机制等建立律法基础。

4.3 创新管控政策，促进设施落地成网

作为地空协同的连接点，起降设施是无人机配送的关键基础设施。目前的起降设施多依托楼顶和公共空间。从产权的角度来说，公共建筑有明确业主，居民楼宇的楼顶则属于共有财产，街道的公共空间则属于国家所有^[35]。但是，总体来说，这些地面公共空间与屋顶空

间普遍存在产权模糊等问题,导致功能转化困难,成为率先发展无人机配送的关键瓶颈。因此,空间规划不仅要在技术上率先规划好航线和起降场,也需要在制度上支持并引导起降场的落地。特别是,应该参考目前的社区嵌入式服务设施,需要与原产权归属者、市政部门协商权力、责任、收益的分配。对于新建项目或者改造项目,可以将其纳入容积率奖励范围之内^[36]。根据4.1部分的需求分析,在高需求区域中预留无人机配送专用场地,将起降平台纳入项目的控制性详细规划管理之中。在规划编制上,可以将起降平台及其用地纳入用地用海分类、建筑兼容管理等方面,推动新型基础设施建设并成网。

除了空间嵌入外,还需要为这些起降点设施与其他交通方式或功能空间预留智能化与自动化条件。起降场不仅联系了空间与地面,也连接初始商家与消费者,构成了运作流程的最先100—300 m和最末100—300 m。目前,最初端和最末端的物流运输仍然广泛依赖外卖员投递及消费者自取等人工运输[图8(a)]。即便这两端运输距离只有100—300 m,其时效比无人机飞行段的时间都要长,其成本甚至比飞行段都要大,成为制约无人机配送时效与成本的关键堵点。因此,面向未来低空无人机配送的规模化应用,城市建筑的更新与管理需充分适配其特点,通过安装货梯[图8(b)]、物流机器人[图8(c)]甚至是挂窗式接收系统[图8(d)]等智能化系统,提升无人机配送前端发货及末端收货环节的效率。

5 结论与展望

以无人机配送为代表的低空经济正

以超预期的速度发展,驱动低空飞行在多样化的复杂地理环境中建立了地空协同系统,在不同场景下联系了供给与需求,实现了地空协同的规模化复制和扩张。这些低空服务改变了城市生产生活的面貌,也为城市空间规划带来了挑战。传统规划通常以二维平面视角对地面资源进行优化配置,无法应对无人机配送等带来的空间与时间配置需求。因此,需要将低空纳入空间规划的范畴,研究低空的建构方法、使用规则和规划思路,探索地面与低空的协同联动,研究适配低空经济发展的新型空间模式,丰富城市低空规划的概念内涵与技术方法体系,满足低空经济快速发展阶段的新型基础设施与空间需求^[37-39]。有鉴于此,本研究通过文献综述、实地调研与仿真模拟的方法,总结了无人机配送地空协同的要素与特征,对无人机配送头部三家企业进行了深度案例分析,提炼了无人机配送地空协同的实现路径及挑战,提出相关响应建议,得到了以下结论:

(1) 地空协同需要在技术上实现多种空中与地面要素的数据及运作协同,也需要空间组织上实现场景协同、网络系统和节点协同。地空协同不只是技术目标,而是考虑经济与技术等多种目标的新基建的布局原型。

(2) 地空协同在实际中呈现了“面向服务需求建构场景谱系、锚定地面特点组织航线网络、嵌入建成环境扩展节点设施”等实现路径,深刻地反映了低空经济“顶天立地”的基本过程,是城市低空规划需要高度关注、服务并及时响应的地方。

(3) 面向无人机配送的需求挖掘、航线开发、起降场所建设等问题,城市

规划需要创新空间制度设计以及更新空间技术手段,推进低空资源管制,推动低空航线与地面协同联动,分级分类做好空间基础设施布局,并做好相关存量空间的智能化改造,提升低空服务场景落地的广度、深度及速度。

低空飞行地空协同是以空间为基础的多维联动协同,是以地面为基础的多层次空间协同。因此,城市规划在这一以无人机配送为触媒的空间重组过程中能够发挥建构空间操作系统的关键作用,综合运用“分级超前做好空间管控、组织协同配置空间资源、深层做好空间资源保障”的学科知识与治理工具,建立城市低空规划的专业领域,切实为低空经济的空间实现及演进提供技术支撑。未来的研究也可以就这些目标进行更多案例支撑分析、技术工具开发及治理效能模拟。

注释

- ① 无人机运行带来的生命与财产安全风险、携带的摄像头造成的隐私担忧也是影响公众接受度的关键因素。在国外实践中,为了应对公众隐私担忧与激增的申诉量,部分企业采用将无人机拍摄画面进行灰度处理的方式降低隐私干扰。
- ② 噪声问题是影响公众接受度的首要影响因素。特别是无人机起降时产生的噪声对养老院、学校、居住区、政府等噪声敏感区域影响尤为显著。从数据上看,低空无人机飞行产生的噪声约60—85 dB(A),高于中华人民共和国环境保护部^[40]《声环境质量标准》中对康复疗养区等0类声环境功能区规定的昼间50 dB(A)、夜间40 dB(A)及居住、文教、机关等1类声环境功能区昼间55 dB(A)、夜间45 dB(A)的噪声限值。

参考文献

- [1] 中共中央 国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》[EB/OL]. (2021-02-24) [2025-07-05]. https://www.gov.cn/zhengce/202203/content_3635479.htm.
- [2] 吴志强,严娟,徐浩文,等.城乡规划学科发展年度十大关键议题(2024—2025)[J].城市规划学刊,2024(6):8-11.
- [3] 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):1-29.

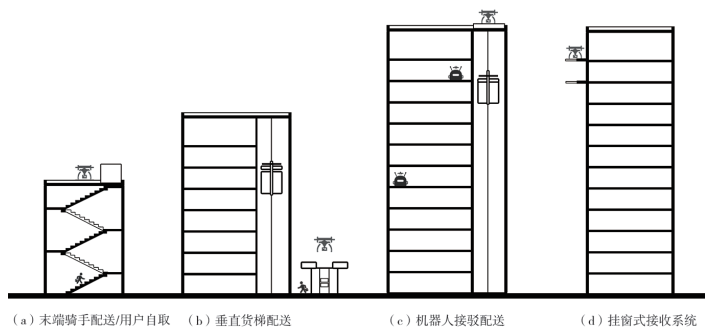


图8 无人机配送地空协同节点的垂直布局

Fig.8 Vertical layout of nodes for ground-air coordinated drone delivery

- [4] 廖小罕, 张捷, 黄耀欢. 浅析低空地理学的特征及其对地理学的拓展[J]. 地理学报, 2024, 79(3): 551-564.
- [5] 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.
- [6] 张洪海, 夷珈, 李娜, 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.
- [7] LI A, HANSEN M, ZOU B. Traffic management and resource allocation for UAV-based parcel delivery in low-altitude urban space[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 143: 103808.
- [8] 张启瑞, 魏瑞轩, 何仁珂, 等. 城市密集不规则障碍空间无人机航路规划[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(10): 133-139.
- [9] 刘泉, 陈瑶瑶, 洪晓菁, 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(5): 64-70.
- [10] SAFADI Y, GEROLIMINIS N, HADDAD J. Integrated departure and boundary control for low-altitude air city transport systems[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2024, 189: 103020.
- [11] 陈丹, 汤程, 谢宇, 等. 面向城市低空物流配送的无人机实时航迹双层规划[J/OL]. 航空学报, 2025: 1-20[2025-07-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20250417.1126.002.html>.
- [12] DING Y, XIN B, CHEN J. A review of recent advances in coordination between unmanned aerial and ground vehicles[J]. Unmanned Systems, 2021, 9(2): 97-117.
- [13] HUANG S H, HUANG Y H, BLAZQUEZ C A, et al. Solving the vehicle routing problem with drone for delivery services using an ant colony optimization algorithm[J]. Advanced Engineering Informatics, 2022, 51: 101536.
- [14] DUKKANCI O, CAMPBELL J F, KARA B Y. Facility location decisions for drone delivery with riding: a literature review[J]. Computers & Operations Research, 2024, 167: 106672.
- [15] LI Y, LIU M, HU H, et al. A cost analysis of the collaborative delivery mode of drones and riders in food delivery scenarios[J]. International Journal of Logistics Research and Applications, 2025, 28(2): 1-30.
- [16] 王修业, 汪会明, 孙芹芹. 无人机-无人车空地无人集群系统多任务协同控制[J]. 无人系统技术, 2023, 6(6): 70-79.
- [17] LIU C, ZHAO J, SUN N. A review of collaborative air-ground robots research[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2022, 106(3): 60.
- [18] 覃睿, 杨智博. 城区物流无人机起降场选址问题研究[J]. 科学技术创新, 2024(15): 50-54.
- [19] 肖作鹏, 张伟聪, 李玮杨, 等. 低空无人机配送的空地协同组织特征及挑战: 以深圳市为例[J]. 资源科学, 2025, 47(8): 1663-1674.
- [20] SHAVERANI S M, GOLABI M, IZBI-RAK G. A capacitated biobjective location problem with uniformly distributed demands in the DAV-supported delivery operation[J]. International Transactions in Operational Research, 2019, 26(4): 1-24.
- [21] CHANG Y S, LEE H J. Optimal delivery routing with wider drone-delivery areas along a shorter truck-route[J]. Expert Systems with Applications, 2018, 104: 307-317.
- [22] FAA. Engineering Brief No. 105A, Vertiport design, supplemental guidance to advisory circular 150/5390-2D, heliport design[R/OL]. (2024-12-27) [2025-07-07]. https://www.faa.gov/airports/engineering/engineering_briefs/eb_105a_ver-tiports#:~:text=This%20Engineering%20Brief%20%28EB%29%20provides%20standards%20and%20guidance,meet%20the%20reference%20aircraft%20criteria%20in%20Table%201-1.
- [23] 中国民用航空局. 城市市场景小型无人驾驶航空器物流航线划设规范[S]. 北京: 中国民用航空局, 2022.
- [24] SHENG J, CAI X, LI Q, et al. Space-air-ground integrated network development and applications in high-speed railways: a survey[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 23(8): 10066-10085.
- [25] CASA. Guide to vertiport design [R/OL]. (2024-05-29) [2025-07-10]. <https://www.casa.gov.au/sites/default/files/2024-05/guide-to-vertiport-design.pdf>.
- [26] 中国民用机场协会. 电动垂直起降航空器(eVTOL)起降场技术要求[S]. 北京: 中国民用机场协会, 2024.
- [27] 中国移动, 迅蚁. 未来城市的物流毛细血管: 5G机器人运力网络白皮书[R/OL]. (2019-1) [2025-6-25]. <https://xyi-web.oss-cn-hangzhou.aliyuncs.com/files/5G%E6%9C%BA%E5%99%A8%E4%BA%BA%E8%BF%90%E5%8A%9B%E7%BD%91%E7%BB%9C%E7%99%BD%E7%9A%AE%E4%B9%A620210901.pdf>.
- [28] 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, 2024, 39(3): 1-16.
- [29] 陈军, 高崧, 郭辰阳, 等. 实景三维赋能低空经济的基本思路与重点任务[J]. 时空信息学报, 2025, 32(1): 1-10.
- [30] 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.
- [31] 陈本寒, 谢媛. 论物权法上空间权的类型与立法模式[J]. 财经法学, 2018(3): 15-30.
- [32] 陈学军. 低空开放背景下的低空使用权[J]. 北京航空航天大学学报社会科学版, 2016, 29(1): 47-57.
- [33] United States Congress. The Air Commerce Act of 1926[S]. (1926-05-20) [2025-07-15]. https://archive.org/download/UnitedStatesAirCommerceAct1926/United%20States%20Air%20Commerce%20Act%20-%201926_text.pdf.
- [34] 赵秀梅. 土地空间权利利用的形态及其分析[J]. 政法论坛, 2011, 29(2): 90-99.
- [35] 张菁, 赵振乐, 王颖楠, 等. 城市更新视角下社区嵌入式服务设施建设难点与运营机制[J]. 城市规划学刊, 2025(1): 71-77.
- [36] 周广坤, 卓健. 城市更新背景下开发权转移与奖励的理论逻辑解析和制度性建构[J]. 城市规划学刊, 2023(3): 66-74.
- [37] 刘婷婷, 戴慎志, 宋海瑜. 智慧社会基础设施新类型拓展与数据基础设施规划编制探索[J]. 城市规划学刊, 2019(4): 95-101.
- [38] 王凯, 赵燕菁, 张京祥, 等. “新质生产力与城乡规划”学术笔谈[J]. 城市规划学刊, 2024(4): 1-10.
- [39] 汪光焘, 刘翔, 李芬, 等. 关于新时代城市学的思考: 兼论城市问题—城市科学—城市学[J]. 城市规划学刊, 2025(3): 9-15.
- [40] 中华人民共和国环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 声环境质量标准[S]. (2008-08-19) [2025-07-15]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/wlhj/shjzlbz/200809/W02011121351590491445.pdf>.

修回: 2025-11