

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

Exploring the Collaborative Development Model of Urban Low-altitude Airspace and Surface-Subsurface Spaces Oriented by UAV-based Traffic Governance

刘洁敏 苏雪娇 沈振江
LIU Jiemin, SU Xuejiao, SHEN Zhenjiang

摘要：本文探讨了中国城市空间规划从二维走向三维的发展趋势特征、新的交通方式对城市变革的触发效应和信息科技的支持作用，提出了一种低空空域与城市地上地下空间协同开发的新的城市发展路径。笔者对国内外城市低空空域管制的发展历程开展了历史考察和文献综述，并对相关法规政策进行梳理，进而提出城市三维空间整体开发设计构想。首先，以“机场—卫星城—中心城区”为功能组团，构建“低高空—低中空—低低空”三个空域划设层级；其次，在中心城区，依托三个空域划设层级构建三级管道空域飞行交通系统，分别利用城市的生态绿廊、城市封闭型道路与轨道交通以及高层建筑集中建成区，为载人飞行器、大型和小型货运无人机设置特定飞行廊道以提供安全的运行环境；最后，依托城市民航机场、城市立体交通系统和中央商务综合体组团，综合利用高层建筑、停车楼、轻轨和地铁站点等地上地下空间开展协同布局，构建“低空空域—地上地下”三维一体的新型城市综合交通运输系统，拓展“TOD+ 无人机”模式，提升城市整体的运行效率。笔者期望抓住城市交通变革的新契机，推动城市组团间和邻近城市间的互动与协作，为城市经济注入新的活力。

Abstract: This paper explores the evolution of Chinese urban spatial planning from 2D to 3D, the transformative impact of new transportation modes on urban development, and the supportive role of information technology. It proposes a novel approach to urban development that integrates low-altitude airspace and above-ground space. The author conducts a historical investigation and literature review of the development process of domestic and foreign urban low-altitude airspace control, and sorts out relevant regulations and policies, and then puts forward the concept of overall development and design of urban three-dimensional space. Firstly, by establishing a functional group consisting of "airports-satellite city-central city", three levels of airspace (low altitude-low medium altitude-low high altitude) are constructed. Secondly, within the central urban area, a three-tiered pipeline airspace flight traffic system is developed based on these levels of airspace; specific flight corridors are designated for manned aircraft as well as large and small cargo UAVs using ecological green corridors, closed roads within cities, rail transit systems, and areas with concentrated high-rise buildings, respectively, to ensure a safe operating environment. Lastly, by leveraging urban civil aviation airports, three-dimensional transportation systems, and central business complexes, a collaborative layout can be achieved through the comprehensive use of high-rise buildings, parking structures, light rail and subway stations to create a "low-altitude airspace-above-ground underground" integrated urban transportation system, expand the "TOD+ UAV" model and enhance overall city operation efficiency. Seizing the new opportunity of urban air traffic reform will promote interaction and cooperation between urban groups and neighboring cities while injecting new vitality into the urban economy.

关键词：无人机；交通治理；低空空域；三维空间；国土空间规划

Keywords: UAV; traffic management; low-altitude airspace development; three-dimensional space; spatial planning

国家自然科学基金青年项目“城市制造业与服务行业协同演化的整体与个体效应关联性研究”(42201178)

作者：刘洁敏，博士，福州大学建筑与城乡规划学院，副教授。LiujieminFuzhouUni@163.com
苏雪娇，福州大学建筑与城乡规划学院，硕士研究生。SUxuejiao_official@163.com
沈振江（通信作者），博士，福州大学建筑与城乡规划学院，教授。fzukupslab@fzu.edu.cn

当今中国站在“两个一百年”的历史交汇点，国土空间规划迎来新一轮发展契机。以生态文明体制改革为背景，中央政府制定并开展“三区三线”划定和自然资源资产产权制度改革等新的空间治理政策，城市国土空间由“增量开发”向“增量与存量开发并举”的发展方式转变^[1]，空间的外延式水平拓展受到严格限制，进而通过向地上地下和向海拓展等多条路径，满足空间增长需求^[2]。中国城市低空空域开发起步较晚。2019年，《中共中央 国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》发布^[3]，提到构建国土空间规划的“空天地海一体化”监测系统，健全“地上地下、陆海相连”的自然资源“一张图”大数据系统^[4]。2023年，《自然资源部关于加快测绘地理信息事业转型升级更好支撑高质量发展的意见》发布，强调“拓展测绘地理信息赋能应用……建设以实景三维中国为时空基底的自然资源三维立体‘一张图’和国土空间基础信息平台”^[5]；同年，《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》发布，提出“规范化空域和飞行活动管理，进一步划设无人机适飞空域”^[6]。

在这样的时代背景与政策引领下，如何通过城市低空空域与地上地下空间的联合开发，进一步立体纵深

开发城市国土空间，或将成为推动城市高质量发展、促发城市经济活力的又一个重要议题^[7]。

1 空间治理政策演进、交通方式变革和科技创新引领下的城市国土空间多维拓展趋势特征

1.1 中国空间规划的历史沿革与发展趋势特征：从点轴布局走向三维协同发展

空间规划作为经济社会发展的空间映射，受到区域政策变化的深刻影响^[8]。中华人民共和国成立初期，以国民经济和社会发展规划为指导，以重工业振兴为抓手，在国家层面开展社会生产力布局，工业用地布局规划呈现点轴布局的一维开拓特征。改革开放初期，国土规划和城市总体规划在协调政府与市场资源配置关系中发挥重要作用^[9]，空间规划相应呈现水平外延式拓展与近程协同的发展模式。为缓解城市边界无序蔓延，协调发展与保护的关系^[10]，在确立法定规划体系的基础上，《全国主体功能区规划》于2010年发布，从顶层设计层面界定不同区域的开发强度与管制边界，该时期空间规划呈现面、点分散布局的二维开拓与近远程协同特征。为应对陆域资源趋紧和地缘政治引发的用海需求增长等现实问题^[11]，我国于2011年修订《城市地下空间开发利用管理规定》，为地上一地下垂直空间开发提供了管理依据；2012年，“陆海统筹”理念被纳入《全国海洋功能区划》^[4,12]，推动空间规划向三维开拓，形成国土横向近远程协同和纵向近程协同的开发格局。2019年《中共中央 国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》发布，构建“地上地下、陆海相连”的统一的自然资源“一张图”大数据体系^[13]，空间规划向着三维拓展、近远程协同规划的方向持续迈进（图1）。

1.2 “空中交通时代”的到来引发城市发展变革的新机遇

城市发展变革通常由一种新的交通方式的普及引发：

“第一次浪潮”由港口海洋运输引发；“第二次浪潮”由内河运输引发；“第三次浪潮”由铁路运输引发；“第四次浪潮”由高速公路运输引发^[14-16]；北卡罗来纳州立大学卡萨达（Kasarda）教授提出，航空运输正在推动城市发展变革的“第五次浪潮”^[17]。近年来，随着低空空域管理改革的深化和低空空域飞行需求的释放，低空经济有望成为城市新的经济增长引擎^[18]。小型载人飞行器和无人机作为空中交通时代的重要载体和低空经济的推手，一旦进入普及阶段，或将催生新一轮的城市发展变革^[19]（图2）。

1.3 以信息科技为基础的现代化城市治理新要求：推动信息化城市向智慧化城市转型

受信息科技驱动，当代城市规划与空间治理的演进可归纳为三个典型阶段^[20-21]：信息化城市阶段，基于地理信息技术开展国土资源信息化工作，并构建城市信息通信网络^[22-23]；数字化城市阶段，通过集成智能技术、大数据应用和物联网等新技术，为智慧城市时空信息云平台的搭建奠定基础^[24]；智慧化城市阶段，基于成熟的通信网络技术、天地一体化网络构架和无人机等技术^[25-26]，初步建成以自然资源“一张图”为基础的自然资源立体时空模型^[27]，该模型生成的时空数据不仅能为城市空间治理提供动态化、精细化的决策支持，也可为小型飞行器提供城市空中交通网络信息服务平台。展望未来，依托网络飞行调度、航迹规划和紧急管理等大数据算法，小型飞行器有望作为移动终端，融入城市“时空大数据模型”，实现调度指令的实时接收与飞行任务的自主执行^[28-29]。

1.4 小结

中国空间规划伴随着时代发展的脉搏，从二维走向三维，并有望在先进交通工具和信息科技驱动下，进一步向立体纵深拓展，开创革命性的新型城市空间形态。通过梳理城市低

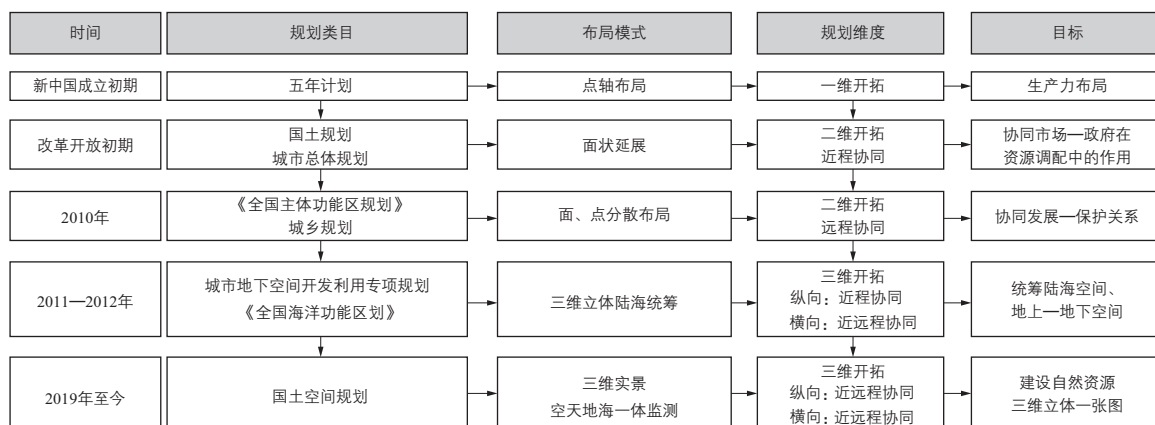


图1 中国空间规划的历史沿革与发展趋势示意图

年代	运输方式变革	典型案例所在城市或地区	城市发展特征
1630—1690	第一次浪潮： 航海运输	国外：美国波士顿、纽约、费城、查尔斯顿 国内：上海	海港城市率先进入城市化初期，崛起成为门户城市
1690—1830	第二次浪潮： 河道运输	国外：美国匹兹堡、辛辛那提、圣路易斯、新奥尔良 国内：苏州、扬州	内陆河港口城市进入区域城市化发展历程，成为国内经济中心
1830—1920	第三次浪潮： 铁路运输	国外：美国芝加哥、亚特兰大 国内：株洲、石家庄、郑州	铁路枢纽城市率先进入城市化鼎盛时期，成为区域的经济中心
1920—1990	第四次浪潮： 公路运输	国外：美国华盛顿都市区 国内：东北地区、环渤海地区西南片区和东南沿海地区	步入城市化、郊区化阶段
1990至今	第五次浪潮： 航空运输	国外：美国孟菲斯、荷兰阿姆斯特丹、法国巴黎 国内：北京	推动城市网络化发展，枢纽机场城市成为网络的关键和节点
	第五次浪潮的延伸： 无人机运输	国外：美国得克萨斯州、英国考文垂、日本千叶县 国内：粤港澳大湾区	促进城市“空地一体化”开发，开启城市空中交通新时代

图2 城市交通方式变革浪潮和典型案例一览表

空空域管制发展的历史脉络、文献、法规政策和实践，本文尝试提出一种以无人机和小型载人飞行器为主要载体、以城市低空空域与地上地下空间协同开发为基础的城市空间发展模式，以期为国土空间总体规划远景战略布局下的空间范式构建提供理论指引，为新一轮城市发展变革抢占先机。

2 低空无人机交通概述

低空无人机交通通常指在真高1 000 m以下（可根据实际需要扩展至3 000 m）的空域内，由无人驾驶空中飞行器提供的各类服务活动。依据其应用场景的不同，可划分为四种类型：一是物流无人机，用于货物、快递和医疗用品等物资的快速配送；二是无人驾驶载人航空器，如飞行汽车、空中出租车，分别实现了陆空两用的个性化出行方式和城市间与市内的便捷短途交通服务；三是公共服务型无人机，用于警用侦察、应急救援和环境监测等领域；四是农工业应用无人机，用于农田管理、管道维护和建筑监测等场景。随着技术迭代与市场成熟，无人机交通正逐步由概念走向现实，为提升城市交通整体运输效率开辟新径。不过，技术瓶颈、空中管制和公众认可度的提高仍是其发展道路上亟待解决的关键挑战。

3 国内外城市低空空域管制的发展历程

3.1 低空空域管制与开发的国际探索

3.1.1 欧美地区城市低空空域管制的制度建设

美国国家航空航天局（NASA: National Aeronautics and Space Administration）认为城市低空空域开发将走向成熟运营阶段^[30]。为应对高速、高密度、大规模的未来城市空中交通（UAM: Urban Air Mobility），NASA于2014年提出无人机交通管理（Unmanned Traffic Management）概念，并于2017年全力推进城市空中交通项目，引领了全球对城市低空空域开发的研究热潮^[30]。美国科技公司优步（Uber）于2016年

发布白皮书，描绘“按需城市航空运输”的商业运营愿景，致力于为居民提供更高效率的交通选择^[31]。欧盟于2017年制定“欧洲单一天空空管研究计划”（Single European Sky ATM Research）^[32]，旨在提高空中交通的效率、安全性和可持续性。美国联邦航空管理局（FAA: Federal Aviation Administration）于2020年提出城市空中交通运营概念，并在2023年进一步完善^[33]，致力于为全行业提供一个共同的空中交通管理行动框架。领先企业和相关部门的愿景和政策的发布与制定，为城市低空空域的逐级放开提供了良好的制度背景。

3.1.2 国外城市低空空域规划的理论研究进展

智慧城市相关理论与技术推动了低空空域规划理论的发展，主要体现在空域结构划设、航线网络设计和地面基础设施布局三个维度（图3）。

（1）空域结构划设。空域结构为不同类型、层次和容量的飞行器和航线提供相应的空间载体，是空中交通管制（Air Traffic Control）的基础，也是实施低空空域开发的核心。目前，对于城市低空的空域结构还没有统一、明晰的定义^[34]。根据飞行范围，可将空域结构分为机场空域和航路空域。机场空域特指环绕垂直起降机场运作区域的三维空间，涵盖诸如漏斗型和双螺旋电梯型等多种空域结构。航路空域作为连接不同机场或机场与特定航路点之间的空中走廊，旨在保障空中交通的高效流转。根据风险分级，航路空域可划分为适飞区、限飞区和禁飞区^[35]，也被称为低风险区、中风险区和高风险区^[36]。根据空域容量，可划分为自由空域、扇形空域、分层空域和管道空域四种空域类型（图4）。分层空域结构通过精细的水平分割，不仅显著提升了空域使用的安全性，还兼顾了高效性和灵活性；管道空域结构则以其明确的边界和预定义的无人机飞行路径，确保了空中交通的有序性和可预测性^[37-38]。两者均被视为未来高密度、高流量城市空中交通系统的理想选择。

（2）航线网络设计。城市低空空域的航线网络设计面临多方面制约，包括低空环境、空域结构和地面基础设施的布局以及飞行器的性能等因素^[30,39]。目前，城市低空空域的航线网络设计研究尚处初级阶段^[34]。根据交通管制的不同，可分为基本飞行、自由航线、管道航线和固定航线^[29]；根据节点位置的不同，可分为空中矩阵节点型航线网络、建筑节点型航线网络、道路沿线型航线网络三种类型^[40-41]。其中，固定航线主要用于执行综合性强、远距离的任务，如城市间的运输；道路沿线型航线适合城市内部的长距离运输；管道航线适用于“点对点”式的市中心高层建筑之间的短程运输^[42]。

（3）地面基础设施布局。地面基础设施承载起飞、降落、

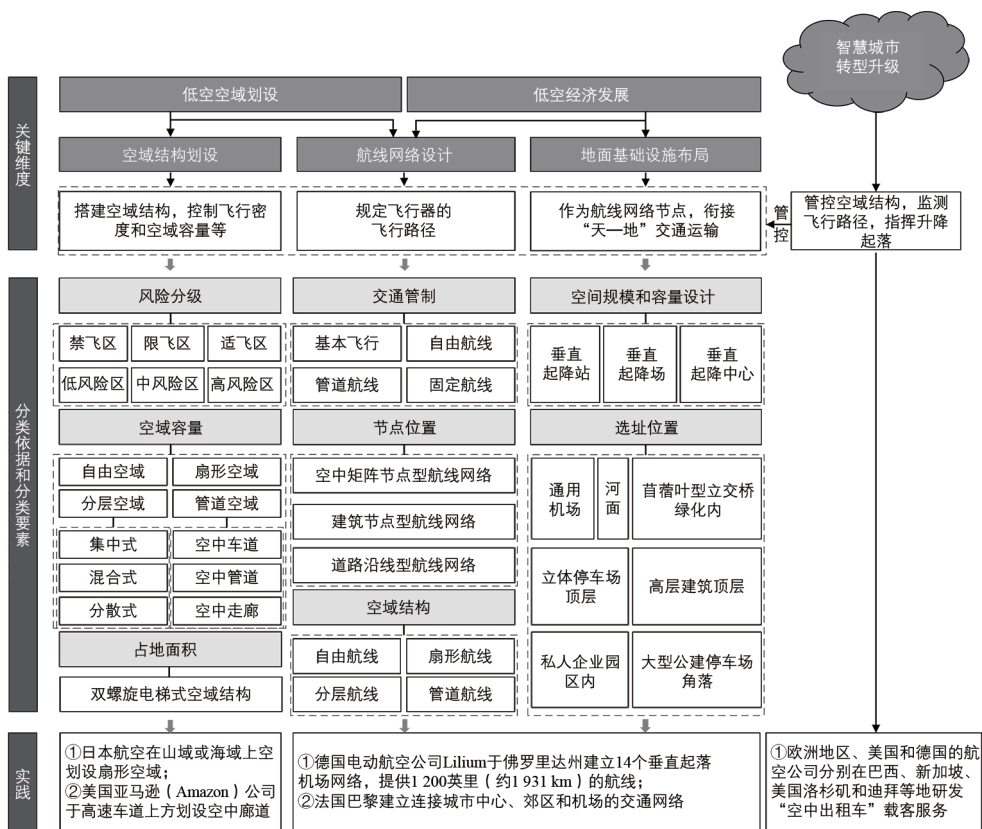
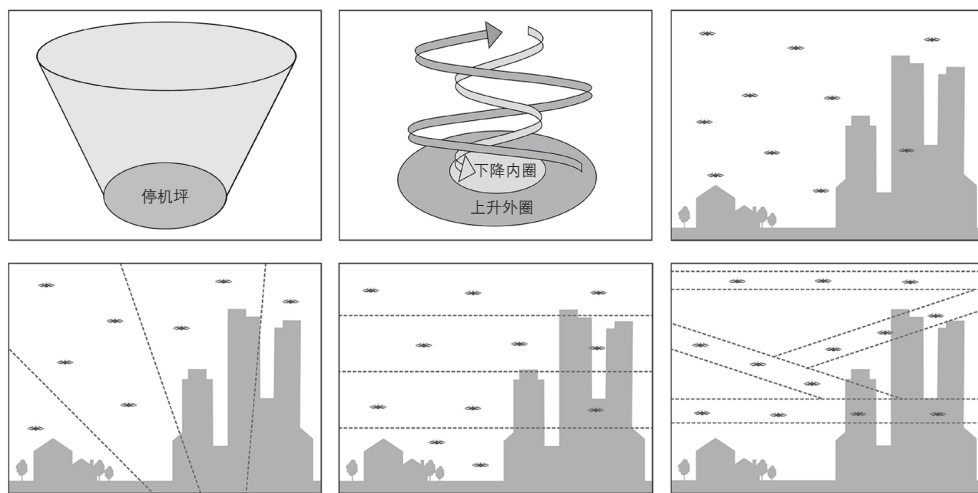


图3 空域结构划设、航线网络设计和地面基础设施布局的分类与实践一览图



注：从左向右、从上向下依次为漏斗型空域、双螺旋电梯型空域、自由空域、扇形空域、分层空域和管道空域。

图4 城市低空空域分区示意图

资料来源：作者译自参考文献[37]

停放和维护等功能，是衔接空中交通与地上地下空间综合开发的关键节点。当前，相关研究集中于垂直起降停机坪的规划^[43]。从选址位置的角度来看，垂直起降停机坪可设置于通用机场、河面、苜蓿叶型立交桥绿化内、立体停车场顶层、高层建筑顶层、私人企业园区内和大型公共建筑

停车场角落^[31,44]。

3.1.3 发达经济体城市低空空域开发的实践探索

发达经济体在城市低空空域开发领域开展了一系列创新性的实践探索工作，主要体现在三个方面。在空域结构

划设方面,日本航空(JAL: Japan Airlines Corporation)在山域或海域上空为偏远地区开展无人机运输服务,运送灾后救济物资、生活必需品和医疗物资等^[45];美国亚马逊公司拟在高速公路上方200~400英尺(约61~122 m)的空中廊道开展无人机货运服务^[46]。在航线网络设计和地面基础设施布局方面,德国电动航空公司Lilium计划于佛罗里达州建立14个垂直起落机场网络,提供大约1200英里(约1931 km)的航线^[47];法国巴黎于2024年建立连接城市中心、郊区和机场的空中交通网络,成为首个在奥运会和残奥会期间提供电动垂直起降机器人(eVTOL: Electric Vertical Take-off and Landing)服务的城市^[48]。在城市低空载人航空运输方面,欧洲地区航空公司Airbus、美国航空公司Terrafugia、Wisk和德国航空公司Volocopter分别在巴西圣保罗、新加坡、洛杉矶和迪拜等地研发并试运营空中出租车载客服务^[49]。这些前沿实践探索为城市低空空域开发的廊道划设、地面基础设施建设和低空载人航空运输提供了丰富且具有可参考性的实践经验。

3.2 低空空域开发的中国探索

3.2.1 中国城市低空空域管理体制改革路径

中国低空空域的开发截至目前经历了三个阶段。在探索阶段,2010年发布的《国务院中央军委关于深化我国低空空域管理改革的意见》开放1000 m以下的低空空域,开启了我国低空空域发展的新篇章。在深化阶段,2016年印发的《国务院办公厅关于促进通用航空业发展的指导意见》,将低空空域范围扩大至3000 m并简化相关审批手续^[50]。在精细化发展阶段,2021年中共中央、国务院印发的《国家综合立体交通网规划纲要》提出:“发展城市直升机运输服务,构建城市群内部快速空中交通网络”^[51];2023年国务院、中央军委公布的《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》提出,差异化管理无人机、划设无人机适飞空域和优化监管服务^[6]。至此,我国以3000 m、1000 m和500 m为低空空域划设的基本层级,以直升机和小型载人飞行器作为低空客运运输工具,以不同等级规模无人机作为低空货物运输工具的城市低空空域开发格局初步形成。

3.2.2 中国城市低空经济发展趋势特征

中国以无人机客货运输为代表的低空经济已初步呈现蓬勃发展的态势。国家统计局数据显示,2025年规模以上智能无人飞行器制造行业增加值增长57%,正在重塑物流

模式^①。例如:京东着力打造以“智慧物流中心—通航—无人机”为基础的“起点—干支线—末端”三级智慧物流体系,在西安市郊区设置无人机配送站,为城郊居民提供配送服务^②;顺丰构建“前端投送无人机+大型有人运输机+大型支线无人机+末端投送无人机”的四段式航空运输网络,在粤港澳大湾区等地开展偏远地区无人机配送的常规化运营服务。此外,载人飞行器同样蕴藏着巨大的市场潜力,空中巴士等运营项目在多个城市已进入试点研发阶段^[52-53]。就已有探索性实验发展趋势,目前中国低空经济相关业务主要服务于少数农村、城郊、偏远地区和特殊场景,在城市中心区域内开展常态化应用仍面临着空中管制、环境干扰、安全和成本等方面的多重挑战。

3.2.3 中国城市低空空域发展规划的前期探索

中国城市低空空域规划领域已产生精细化配置空域空间资源的需求^[54],部分省市纷纷推出试点方案。在空域结构划设方面,江西省、安徽省、海南省和湖南省分别获批设置7个、22个、23个和171个低空空域。在航空网络设计方面,湖南省规划了97条低空目视航线^[55],覆盖全省飞行需求;海南省规划了3条低空目视航线,连接通用机场、临时起降点和主要景区^[56]。在地面基础设施布局方面,海南省在高层建筑楼顶、重要办公场所和重点医院等区域建设起降点^[56],并在《海南省国土空间规划(2020—2035)》中提出预留区域空中基础设施廊道空间需求;广东省深圳市已基本形成覆盖全市的起降点设施网络^[57],并于2024年1月3日公布的《深圳经济特区低空经济产业促进条例》中提出“市交通运输部门会同市规划和自然资源部门编制本市低空飞行基础设施建设规划”^[58]。可以预见,城市低空空域的逐级释放将触发城市空间规划的新一轮变革^[59]。

3.3 小结

经过对国内外低空空域规划的理论成果和实践经验总结,获得启发如下。首先,城市低空空域开发是先进国家与地区进行整体功能提升的重要举措,发达地区已在广泛开展规划布局;其次,对于空域结构划设,分层空域和管道空域是主流的开发类型,飞行器起降场地是重要城市基础设施,需要提前做好规划预留;第三,空域航线的选择多依托道路沿线和高层建筑节点之间的“点对点”管道,起降场地建设多与城市公共交通基础设施结合设置,故空域航线规划与城市综合交通运输系统应开展一体化布局。

① 转引自参考文献[52]。

② 引自腾讯新闻纪录片《看得见的未来(第一季)》。

4 以无人机交通治理为导向的城市低空空域与地上地下空间协同开发策略研究

4.1 以“机场—城市远郊区—中心城区”为功能组团，布局市域低空分层空域规划

依据《国务院办公厅关于促进通用航空业发展的指导意见》和《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》的相关规定，3 000 m 以下为通用航空小型载客飞机适飞区域，500 m 以下为无人驾驶小型飞行器适飞区域。然而，目前国家出台的低空空域规划相关政策尚未与市级国土空间规划进行有效的功能衔接。笔者主张以分层空域划设为基本格局，在各层级空域设计与该空域级别飞行器相匹配的管道空域划设区间。分层空域管理技术相对成熟，具有高度适应性和可扩展性，能够灵活应对多样飞行器的飞行需求，通过分层设计不同等级飞行器的飞行高度，可保障市域内不同重量和速度等级的飞行器安全运行。具体规划如下：在距离地面 3 000~1 000 m 高度段，设计为飞行汽车的飞行区间，主要开展城市组团间和临近城市之间的低空客运工作；在 1 000~500 m 高度段，设计为重型货运无人机的飞行区间，主要开展机场、城郊卫星城（包括选定的中心镇、中心村等居住组团）与中心城区之间的货物运输工作；在 500 m 以下高度段，主要开展中心城区和城郊卫星城内部的小型无人运输机的运输工作。据此，构建出“低高空—低中空—低低空”的城市低空空域分层运输体系，奠定低空交通运输的基本结构（图 5）。

4.2 在分层空域规划基础上，以“客运、重型货运和轻型货运飞行器管道空域”为基础，构建三级低空飞行廊道

自改革开放以来，中国在 40 余年的快速城镇化进程中涌现了多个超大和特大城市。这些城市的规划建设多以生态绿廊和网络状交通基础设施为基本骨架，以高层建筑的集中建设区为城市核心功能区，体现了鲜明的时代发展特征。这样的城市结构对于城市低空空域的联合开发具备现实优势。在市域低空分层空域规划的基础上，可分别依托城市生态廊道、城市快速路与轨道交通沿线以及中心城区高层集中区，逐层构建客运、重型货运和轻型货运飞行器的管道空域飞行系统。首先，特大城市往往以山体、水体和集中连片绿地为基础构建城市的生态绿廊，如成都“公园城市”结构等。这些生态绿廊可以作为 3 000~1 000 m 第一层级分层空域的飞行廊道，供载人飞行器从郊区进入中心城区。这样的廊道宽阔且方便设置为封闭人流通行的区域，可最大限度保障载人飞行器深入城市内部特定低空空域的飞行安全。

其次，特大城市往往由环形结合放射形道路构成基本的城市路网骨架，同时建设了纵横交错的地铁和轻轨线路，这

些路段多为封闭通行以保障安全。因此，这类路段上方可以设置为 1 000~500 m 第二层级分层空域的管道飞行区域，供重型货运无人机飞行。这类飞行廊道的安全性在于，即便无人机在运行过程中不慎跌落并摔到下方的道路路面或客车、地铁的车顶，一般也不会造成严重的人员伤亡事故。

第三，特大城市中心城区多建设以密集高层建筑为基本风貌特征的中心商务区，在高层建筑下方，以裙楼、中心广场和绿地为主要用地特征。这类地区可以作为 500 m 以下的第三层级低空空域的飞行管道，用于小微型无人机的飞行。在建筑楼顶或公园绿地等地设置垂直起降机场空域划设区，建立垂直起降场、垂直起降站、垂直起降点三级协同运输系统^[46]（图 6）。小型无人机可在高层之间沿着特定的飞行管道进行固定线路飞行；借助绿地、裙楼等公共空间，沿上方飞行管道投影区域设置封闭行人通行区域，保障飞行安全。这类“低低空”飞行管道的设置主要用于高层办公楼、高层商业区和高层住宅楼之间轻型文件、办公材料、轻型与贵重商品等物品的即时传递，以加快中心商务区的协作办公流程，协助居家办公等新型生产模式的广泛开展，以及开创市区范围内网络购物的便捷到货体验，进一步激发城市经济活力。

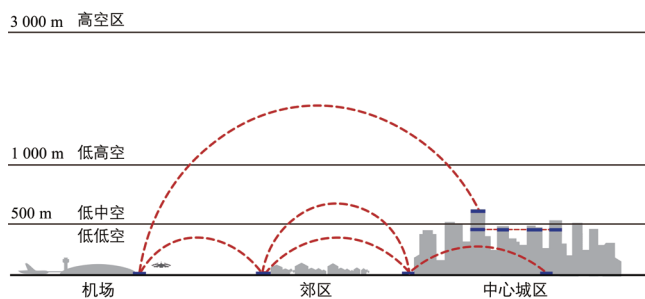


图 5 市域范围内分层空域示意图

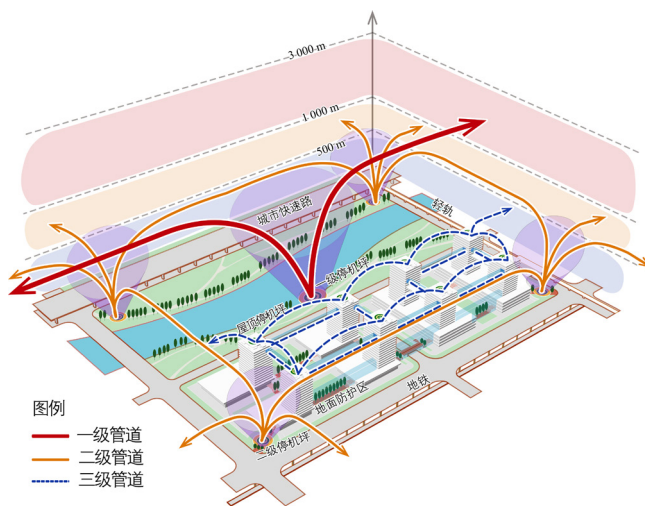


图 6 中心城区低空空域三级管道空域飞行交通系统示意图

4.3 融合城市低空空域飞行廊道和轨道交通基础设施，构建“空—地”协同 TOD 综合交通运输系统

在规划中心城区分层空域并在各层级空域设置特定类型飞行器管道空域的基础上，分别针对货运飞行器和客运飞行器的飞行管道，与城市地上地下交通设施进行协同布局，构建城市低空空域—地上地下空间协同开发的、新型 TOD 综合交通运输系统。首先，结合设置在“低中空”的第二层级管道空域和设置在“低低空”的第三层级管道空域，创造出一种协同城市“低空空域—地上空间—地下空间”的城市货运交通运输系统。在主城区的商务中心，设置地上地下一体化综合运输枢纽；在高层建筑顶部规划垂直起降站场空域，在停机坪下设置专用货运电梯直通地下各层；高层建筑下的裙楼与地上机场专用高架轻轨、地面城市道路和地下轨道交通互通互联。空运货物自机场卸货后，可沿着机场轻轨专线上方管道空域直飞到市中心高层顶部无人机停机坪，再经无人驾驶货运小车从专用货梯直达楼内收货地址；如地址在高层周边小区，可由无人驾驶货运小车自动接驳后经货梯运送到地面城市道路，再送入收货小区指定接驳点。通过这样的方式，城市与城市之间快递业务可实现 3 小时送达，最大程度发挥城市空运业务的即时优势（图 7）。

其次，针对设置在“低高空”的第一层级管道空域，即供载人飞行器飞行的城市生态廊道，在飞行器起降区域，

通过与城市主干道路连接，并在城市内部各商务中心的停车楼设置专用停机位，将载人飞行器的飞行廊道与城市综合交通系统进行有效协同。中国在 2010 年发布的《国务院办公厅关于促进通用航空业发展的指导意见》提出，要成为未来世界第二大通用航空运输强国。四川省已经率先制定《低空协同管理空域建设方案》，将孤立空域以低空通道联通为通航飞行网络。如果四川的方案逐步拓展到更多的城市和地区，中国将有机会建立起 3 000 m 以下的通航网络。目前中国的通用航空飞行环境正在走向成熟：中国民航总局已规划建设 500 个通用航空机场，并在全国各地区规划建设了 2 000 个飞行营地。可以预计，未来几乎每个县都会有飞行营地。在这样的发展趋势下，可依托前期预设的载人飞行器飞行廊道，开展邻近城市间飞行汽车的载人航天低空飞行业务。飞行汽车在国内已面世，其两翼折叠后与普通汽车等宽，可在道路上与汽车同步运营。飞行汽车从停车楼的专用停机位开出后，经城市道路开到特定起降点，展开双翼沿着封闭生态廊道飞行到目标邻近城市并降落到特定起降点，再收起双翼经城市道路开行到特定目的地。未来城市郊区自驾游如能通过这种更加便捷的方式展开，则会最大限度缩减出行时间，提升出行体验。这种新的出行方式或将催生近邻城市和城市组团间新型合作运营模式（图 8，表 1）。

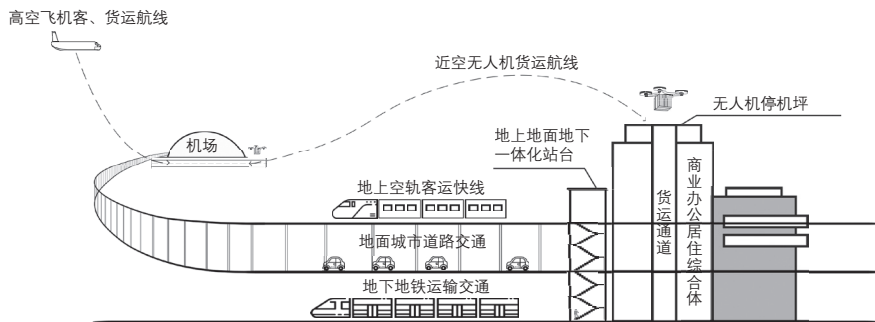


图 7 新型 TOD 综合交通运输系统示意图

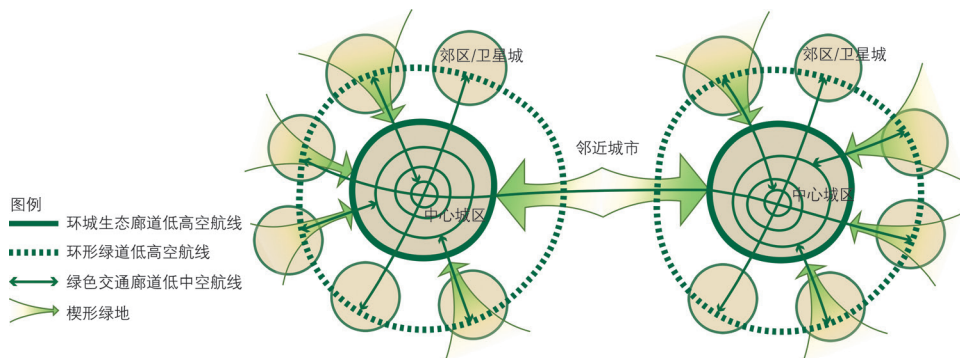


图 8 飞行汽车沿城市生态廊道飞行示意图

表 1 城市低空空域与地上地下空间协同开发模式分类总结

空域层级高度区间	城市飞行区间	飞行廊道	飞行工具	规划期
3 000~1 000 m	邻近城市间；城市组团间	沿城市大型绿廊，如大型生态绿地、城市绿楔、城市水体	飞行汽车；载人无人驾驶飞行器	远景规划
1 000~500 m	中心城区内部	沿封闭交通廊道，如轻轨、地铁、快速路上方	大型货运无人机	远期规划
500 m 以下	中心城区内部；卫星城内部	沿中心商务区高层之间的特定飞行管道	小型货运无人机；微型民用无人机	中期规划；近期规划

5 结论与展望

本文探讨了中国城市空间规划从二维走向三维的历史沿革以及新的交通工具和信息科技革命的支持作用，提出了城市低空空域与地上地下空间协同开发的新型空间发展模式。通过对国内外低空空域管制发展历程的梳理和总结，提出一种以无人机和载人飞行器为载体，以分层空域和管道空域为基本划设办法，综合利用城市生态绿廊、城市封闭交通廊道、城市高层组团间的封闭廊道，并经高层商务综合体、停车楼、轻轨和地铁站点等地上地下空间协同布局的发展策略。届时，城乡空间拓展有望不拘于陆海空间的限制，迈向天、地、海一体化多维拓展阶段。在国土空间规划“自然资源三维立体一张图”的绘制过程中，有必要在有条件的城市群、大都市区和重点城市，将城市低空空域规划叠加至“一张蓝图”，形成陆地、海洋和低空空域三维一体化的国土空间规划设计构想。区域内空中航线、轨道交通线路、高速公路和天地配套基础设施的联合开发与统筹运营应成为规划的重点之一。

为实现这样的宏伟目标，需要在近期国土空间规划进程中，准确把握地上无人机基础设施建设先机，为各层级空中交通运输廊道的地面协同布局预留战略白地，为未来分阶段系统开展多层次领空规划打好基础。正如美国未来学家阿尔文·托夫勒提出的著名的“迅者生存”理念：在后疫情时代全球经济复苏与深度调整期，如能做好“城市低空空域—地上地下空间”协同规划布局，有计划、按步骤建设配套设施，或可抢占城市低空经济发育触发城市新一轮发展变革的市场先机。UPI

注：文中未注明资料来源的图表均为作者绘制。

参考文献

- 杨保军, 陈鹏, 董珂, 等. 生态文明背景下的国土空间规划体系构建[J]. 城市规划学刊, 2019(4): 16-23.
- 吴克捷, 赵怡婷, 石晓冬. 国土空间规划体系下地下空间规划编制研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(12): 1683-1690.
- 中共中央 国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见[EB/OL]. (2019-05-23)[2024-07-23]. http://www.gov.cn/zhengce/2019-05/23/content_5394187.htm.
- 李满春, 陈振杰, 周琛, 等. 面向“一张图”的国土空间规划数据库研究[J]. 中国土地科学, 2020, 34(5): 69-75.
- 中华人民共和国中央人民政府. 自然资源部关于加快测绘地理信息事业转型升级更好支撑高质量发展的意见[EB/OL]. (2023-08-22)[2024-07-23]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202308/content_6899855.htm.
- 中华人民共和国中央人民政府. 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例[EB/OL]. (2023-06-28)[2024-07-23]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202306/content_6888799.htm.
- 张雄化. 低空经济兴起及高质量发展的理论与实践: 深圳的视角[J]. 特区经济, 2023(8): 15-19.
- 杨开忠. 新中国 70 年城市规划理论与方法演进[J]. 管理世界, 2019, 35(12): 17-27.
- 孙施文. 解析中国城市规划: 规划范式与中国城市规划发展[J]. 国际城市规划, 2019(4): 1-7.
- 耿慧志. 城乡规划管理与法规[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- 姜忆湄, 李加林, 马仁锋, 等. 基于“多规合一”的海岸带综合管控研究[J]. 中国土地科学, 2018, 32(2): 34-39.
- 朱宇, 李加林, 汪海峰, 等. 海岸带综合管理和陆海统筹的概念内涵研究进展[J]. 海洋开发与管理, 2020, 37(9): 13-21.
- 刘洁敏, 蔡高明. 前沿经济地理学理论与方法对我国空间规划体系重构的技术支撑作用探析[J]. 城市发展研究, 2020, 27(1): 26-43.
- 杨会军. 美国交通经济史[M]. 中国社会科学出版社, 2013.
- 李娟, 王有为, 黎明, 等. 规范空间秩序: 国土空间规划中交通的价值思考[J]. 城市交通, 2021, 19(1): 19-28.
- 王旭. 空港都市区: 美国城市化的新模式[J]. 浙江学刊, 2005(5): 12-17.
- KASRDA J D. Logistics and the rise of aerotropolis[J]. Real estate issues, 2000, 25(4): 43-48.
- 郭辰阳, 敖万忠, 吕宜宏. 充分把握发展机遇, 加快推进低空经济高质量发展[J]. 财经界, 2022(25): 36-38.
- 樊邦奎, 李云, 张瑞雨. 浅析低空互联网与无人机产业应用[J]. 地理科学进展, 2021, 40(9): 1441-1450.
- 张陶新, 杨英, 喻理. 智慧城市的理论与实践研究[J]. 湖南工业大学学报(社会科学版), 2012, 17(1): 1-7.
- 韦颜秋, 李瑛. 新型智慧城市建设的逻辑与重构[J]. 城市发展研究, 2019, 26(6): 108-113.
- 王成亮, 张定强, 倪宇智, 等. 基于“一张图”的金土工程建设模式探讨[J]. 地理信息世界, 2013, 20(2): 89-93.
- 唐任伍, 赵国钦. 公共服务跨界合作: 碎片化服务的整合[J]. 中国行政管理, 2012(8): 17-21.
- 乔思伟, 徐瑶. 库热西: 加强顶层设计创新建设 推动智慧城市科学发展[N]. 中国国土资源报, 2014.
- 陈楠梓. 新基建为“路空一体”添翼[J]. 交通建设与管理, 2020(3): 68-73.
- 赵亚军, 郝光辉, 徐汉青. 6G 移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(8): 963-987.
- 中华人民共和国中央政府. 自然资源部关于印发《自然资源调查监测体系构建总体方案》的通知[EB/OL]. (2020-01-17)[2024-07-23]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-01/18/content_5470398.htm.
- Ippolito C A. Dynamic ground risk mitigation for autonomous small UAS in urban environments[C] // Proceedings of the AIAA Scitech Forum. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019: 1-6.
- MUELLER E R, KOCHENDERFER M. Simulation comparison of collision avoidance algorithms for small multi-rotor aircraft[C] // AIAA Modeling

- and Simulation Technologies Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016: 3674.
- [30] THIPPHAVONG D P, APAZA R, BARMORE B, et al. Urban air mobility airspace integration concepts and considerations[C] // 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2018: 3676.
- [31] Uber Elevate. Fast-forwarding to a future of on-demand Urban Air Transportation[EB/OL]. (2016-10-27)[2024-07-23]. https://evtol.news/___media/PDFs/UberElevateWhitePaperOct2016.pdf.
- [32] 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.
- [33] LIEB J, VOLKERT A. Unmanned aircraft systems traffic management: a comparison on the FAA UTM and the European CORUS ConOps based on U-space[C] // 2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference. IEEE, 2020: 1-6.
- [34] 张洪海, 邹依原, 张启钱, 等. 未来城市空中交通管理研究综述[J]. *航空学报*, 2021, 42(7): 024638.
- [35] SUNIL E, ELLERBROEK J, HOEKSTRA J, et al. Analysis of airspace structure and capacity for decentralized separation using fast-time simulations[J]. *Journal of guidance, control, and dynamics*, 2017, 40(1): 38-51.
- [36] AGENCY E, UNDERTAKING S. U-space: blueprint[EB/OL]. (2023-12-02)[2024-07-23]. <https://policycommons.net/artifacts/265019/u-space/1058459/>.
- [37] SUNIL E, ELLERBROEK J, HOEKSTRA J M, et al. Three-dimensional conflict count models for unstructured and layered airspace designs[J]. *Transportation research part c: emerging technologies*, 2018, 95: 295-319.
- [38] HOEKSTRA J M, MAAS J, TRA M, et al. How do layered airspace design parameters affect airspace capacity and safety?[C] // Proceedings of the 7th international conference on research in air transportation. ICRAT Philadelphia, USA, 2016: 1-8.
- [39] BAURANOV A, RAKAS J. Designing airspace for urban air mobility: a review of concepts and approaches[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2021, 125(1): 100726.
- [40] SALLEH M F B M, TAN D Y, KOH C H, et al. Preliminary concept of adaptive urban airspace management for unmanned aircraft operations[C] // 2018 AIAA Information Systems-AIAA Infotech@ Aerospace, 2018: 2260.
- [41] SUNIL E, HOEKSTRA J, ELLERBROEK J, et al. Metropolis: relating airspace structure and capacity for extreme traffic densities[C]. ATM seminar 2015, 11th USA/EUROPE Air Traffic Management R&D Seminar, 2015.
- [42] RUIZ S, SOLER M. Conflict pattern analysis under the consideration of optimal trajectories in the European ATM[C]. FAA/Eurcontrol ATM Seminar, 2015.
- [43] DASKILEWICZ M J, GERMAN B J, WARREN M M, et al. Progress in vertiport placement and estimating aircraft range requirements for eVTOL daily commuting[C] // 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2018: 2884.
- [44] ROBINSON J N, SOKOLLEK M D R, JUSTIN C Y, et al. Development of a methodology for parametric analysis of STOL airpark geo-density[C] // 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2018: 3054.
- [45] Japan Airline. JAL conducts demonstration of drone implementation model to support island life[EB/OL]. (2022-12-28)[2024-07-23]. <https://press.jal.co.jp/en/release/202211/007077.html>.
- [46] SINGIREDDY S R R, DAIM T U. Technology roadmap: drone delivery-amazon prime air[J]. *Infrastructure and technology management: contributions from the energy, healthcare and transportation sectors*, 2018: 387-412.
- [47] KELSEY R. Air taxi companies ramp up infrastructure plans as aircraft certification looms[EB/OL]. (2021-08-25)[2024-07-23]. <https://www.aviationtoday.com/2021/08/25/air-taxi-companies-ramp-up-infrastructure-plans-as-aircraft-certification-looms-near/>.
- [48] Volocopter. Groupe ADP & Volocopter at forefront of electric urban air mobility: a world first in summer 2024[EB/OL]. (2023-06-20)[2024-07-23]. <https://www.volocopter.com/en/newsroom/volocopter-paris-routes>.
- [49] PONS-PRATS J, ŽIVOJINOVIĆ T, KULJANIN J. On the understanding of the current status of urban air mobility development and its future prospects: commuting in a flying vehicle as a new paradigm[J]. *Transportation research part e: logistics and transportation review*, 2022, 166: 102868.
- [50] 中国民用航空局. 国务院办公厅关于促进通用航空业发展的指导意见[EB/OL]. (2016-05-18)[2024-07-23]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/ZFGW/201605/t20160518_37445.html.
- [51] 新华网. 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)[2024-07-23]. http://www.xinhuanet.com/politics/zyw/2021-02/24/c_1127135212.htm.
- [52] 李诚龙, 屈文秋, 李彦冬, 等. 面向 eVTOL 航空器的城市空中运输交通管理综述[J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20(4): 35-54.
- [53] 张扬军, 钱煜平, 诸葛伟林, 等. 飞行汽车的研究发展与关键技术[J]. *汽车安全与节能学报*, 2020, 11(1): 1-16.
- [54] 高志宏. 我国低空空域管理体制改革的变迁与未来取向[J]. *海南大学学报(人文社会科学版)*, 2019, 37(1): 40-47.
- [55] 湖南省人民政府. 全域低空空域管理改革试点 湖南取得突破性进展[EB/OL]. (2022-05-08)[2024-07-23]. https://www.hunan.gov.cn/hnszf/hnyw/sy/hnyw1/202205/t20220508_24466890.html.
- [56] 海南省交通运输厅. 海南省通用航空产业发展“十四五”规划[EB/OL]. (2021-12-20)[2024-07-23]. http://jt.hainan.gov.cn/xxgk/0200/0202/202112/t20211220_3115923.html.
- [57] 南方网. 深圳已建成超 70 个直升机起降点 助力大湾区形成 15 分钟经济生活圈[EB/OL]. (2022-02-28)[2024-07-23]. https://www.southcn.com/node_20d09eff75/1d565af896.shtml.
- [58] 深圳市人大常委会. 深圳经济特区低空经济产业促进条例[EB/OL]. (2024-01-03)[2024-07-23]. http://www.szrd.gov.cn/v2/zx/szfg/content/post_1123253.html.
- [59] 陆晓华, 郑林, 张奇. 高密度城市低空空间综合利用的思考[C] // 交通治理与空间重塑——2020 年中国城市交通规划年会论文集. 中国城市规划设计研究院城市交通专业研究院, 2020: 279-285.

(本文编辑: 王枫)