引文格式：王琳,王光耀,张唯. 超大城市低空可利用空间构建方法研究[J]. 地理空间信息, 2026, 24(6):46-49. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.06.008

超大城市低空可利用空间构建方法研究

王　琳[1,2]，王光耀[1,2*]，张　唯[1,2]
（1. 上海市测绘院，上海 200063；2. 自然资源部超大城市自然资源时空大数据分析应用重点实验室，上海 200063）

摘　要：低空空间是低空经济活动的核心载体，科学构建可利用低空空间资源是推动低空经济高质量发展的关键任务。从测绘的角度出发，立足低空空间的自然资源特性，依托实体化、立体化、真实化的实景三维上海建设成果，对低空支撑要素和低空影响要素进行分类和组织、建模和可视化，提出了可变尺度的低空空间基底理念，形成了超大城市可利用低空空间构建和动态更新方法，在此基础上阐述了低空空间的四维分割利用规则。研究可为低空空间资源的安全高效利用提供支撑。

关键词：低空经济；低空空间；资源开发利用；实景三维
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）06-0046-04

Research on the Construction Methods for Usable Low-altitude Space in Megacities

WANG Lin[1,2], WANG Guangyao[1,2], ZHANG Wei[1,2]
(1. Shanghai Surveying and Mapping Institute, Shanghai 200063, China;
2. Key Laboratory of Spatial-temporal Big Data Analysis and Application of Natural Resources in Megacities, Shanghai 200063, China)

Abstract: Low-altitude space is the core carrier of low-altitude economic activities, and scientific construction of usable low-altitude space resources is a key task to promote the high-quality development of low-altitude economy. Based on the natural resource attributes of low-altitude space and relying on the construction achievements of 3D real scene Shanghai, we classified, organized, modeled, and visualized low-altitude supporting elements and low-altitude influence elements. Then, we proposed the concept of low-altitude space base with variable scale, and formed a method for constructing and dynamically updating usable low-altitude space in megacities. Finally, we expounded the four-dimensional division and utilization rules of low-altitude space. The research in this paper can provide support for the safe and efficient utilization of low-altitude space resources.

Key words: low-altitude economy, low-altitude space, resource development and utilization, 3D real scene

2021 年国家层面首次提出“发展低空经济”，2024 年写入政府工作报告并纳入新质生产力范畴，各地纷纷出台配套政策，2024 年被称为“低空经济元年”。

低空空间是低空经济活动的核心载体。目前国外将城市空域划分为完全混合、分层、分区和管道 4 种模式[1-2]，国内进一步细分为五类[3]，但传统管理模式存在粒度较粗、利用率不足等局限，难以支撑高密度低空飞行。

本文基于实景三维上海数据，融合各类空域结构优势，探索建立“分层-廊道-航线”的低空空间建模方法，为低空空间高效管理利用提供借鉴。

1　低空的自然资源特性

1.1　低空空间的属性

低空空间和地下空间同属城市自然资源。2011 年，覃睿[4]提出低空空域是国家重要自然资源；2021 年，廖小罕等[5]指出其具有自然资源通用属性；2022 年，林荇辰[6]提出天空资源是优质绿色再生资源；2023 年，覃睿[7]将低空空域概括为低空经济的关键资源。综上，开发利用低空空间资源，对推动低空经济高质量发展具有重要现实价值与深远影响[8]。

低空空间作为自然资源，具有空地对应性、可开发利用性、空间可分割性。

1）空地对应性：低空空间是地表垂直向上的自然延伸，和地表具有紧密相连的对应关系，是“地下-地表-地上”立体自然空间的组成部分。

2）可开发利用性：低空空间蕴含巨大的经济价值，存在可开发“空间体量”上限，可动态形成已开发的体量和未来可以开发的体量，存在“空间体量”的集约利用命题。

项目来源：长三角自然科学基金资助项目（2024CSJZN01304）。
第一作者简介：王琳（1989—），博士，高级工程师，从事地理信息数据建设及应用工作，E-mail：wanglin_whu@126.com。
通信作者：王光耀（1965—），本科，正高级工程师，从事工程测量和城市地理信息生产和应用等工作，E-mail：wgyst@sohu.com。

3）空间可分割性：低空空间具有可分割性，可根据不同应用场景和管理需要，运用测绘地理信息技术构建空间三维模型，并基于时空维度进行四维划分与动态更新，将虚的空间以一定实的形式可视化表达。

1.2　低空可利用空间

科学规划可用低空空间资源是推动低空经济高质量发展的关键任务，通过精准测算最大可用空间体量，并实施精细化分割管理，可以实现资源利用效率最大化。在通用航空领域有空域容量的概念，指特定空域在安全条件下的最大航空器流量。相关研究主要基于交通冲突模型、时空资源分割和动态调配算法进行容量评估[9]，旨在平衡运行效率与安全需求。空域容量与空域管理分类息息相关。地理围栏是通过地理坐标或电子边界（如GNSS坐标、RFID）划定的虚拟空域范围，限制航空器进入敏感或受限区域，从而实现安全飞行的目标。

当前国家空域通过政策法规划定禁飞区、限飞区、适飞区，在此基础上借助地理围栏等技术手段执行禁飞区、限飞区的电子化管控。一方面，空域容量和地理围栏均是从无人机运行视角出发，高度依赖传感器、GPS、实时计算来确保飞行安全，在贴近地面建筑或遇到极端天气等情形下，可能存在因GPS信号失联或者传感器故障等导致的飞行问题。另一方面，“容量+分区+围栏”的模式对于空间的开发利用存在精细度偏低、利用不充分的情况。需要借助测绘地理信息技术，将低空可利用空间通过数字化手段进行界定，进一步支撑低空飞行的安全性和效率。同时，实景三维中国的建设也可以为低空经济的发展提供全方位的支撑[10-15]。

2　可利用低空空间构建

2.1　总体思路

本文基于实景三维统一时空基底，耦合低空飞行支撑要素和低空飞行影响要素，研究形成可利用低空空间构建方法，总体思路如图1所示。

2.2　低空要素组织

目前上海市域范围内，利用W类空域（0～120 m）、G类空域（120～00 m）和部分E类空域（300～1 000 m）开展低空飞行活动。上海作为特大城市和国际枢纽，基于管理需求在基础空域架构上实施分级管控，形成禁飞区、限飞区、适飞区的差异化管理制度。在此基础上，可以区分低空支撑要素和低空影响要素进行低空要素组织，作为低空可利用空间的构建因素。



图1　可利用低空空间构建示意图

2.2.1　低空支撑要素

低空支撑要素是指保障低空飞行器（如无人机、eVTOL、轻型通用航空器）起飞、巡航到降落等过程中安全、有序、高效运行的相关要素。低空支撑要素包括：①交通配套设施（机库、起降场、维修站、联络通道等）；②空域感知设施（无线电站、雷达站等）；③通信网络设施（通信基站、导航基站等）；④能源基础设施（充换电站、加油站）等。

2.2.2　低空影响要素

低空影响要素是指在低空飞行活动过程中（从起飞、巡航到降落），可能对飞行安全、效率、合规性及周边环境产生直接或间接干扰、制约的各类内外部因素。低空影响要素包括：

1）地形地貌地表起伏变化，河流和湖泊水体以及森林、草地植被等自然要素。

2）建构筑物及其附属设施、各类空中管线实体（高压电线、电缆等）、交通设施（铁路、道路、桥梁、隧道）等人工要素。

3）环境要素（风向、风速、湿度、气压、降雨等环境要素）。

4）安全保密要素（重点单位、重要革命纪念地、重要不可移动文物、人口密集区等）。

2.3　低空要素建模和可视化

2.3.1　实景三维建模

在国家战略和自然资源部统一部署下，上海积极推进实景三维上海建设工作，持续构建具有上海特色的高精度数据资源体系；创新适应超大城市的测绘与管理模式；打造多级多场景的服务支撑能力；推进实景三维在重大战略与民生领域的应用[16-18]。

2.3.2　专题要素建模

在低空飞行场景中，气象条件、高压铁塔电磁环境、通信基站服务覆盖等专题要素是决定飞行安全与效率的核心要素。通过科学建模，可量化分析各要素对低空飞行器（如无人机、轻型通用航空器）的影响。

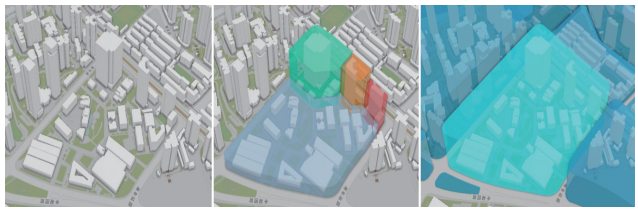
气象要素建模的核心是构建时空动态的低空气象场模型，预测不同区域、时段的气象风险等级，包括小尺度下的“微气象”建模。高压铁塔电磁建模的核心是量化铁塔周边电磁场分布，划定“安全干扰阈值区”。基站服务范围建模的核心是精准预测基站的覆盖边界、信号强度及通信质量，确保飞行全程“无通信盲区”。

2.4 可变尺度的低空空间基底

实景三维上海在国家要求基础上拓展了多维度地理实体，包括市、区、街镇、街道、街坊、院落、建筑、建筑部件等地理实体。在此基础上，根据不同应用需求，选择各类城市要素、地理实体数据进行组装，实现意向框架级、实景仿真级、动态拟真级三级城市实景模型建设。其中意向框架级侧重三维区域布局和空间形态表达，实景仿真级着重建筑主体结构和真实纹理表达，动态拟真级实现场景细节结构和材质纹理表达。

在国家和上海空域管理基础上，依托实景三维上海建设成果构建可变尺度的低空空间基底。利用实景三维建筑模型可构建全景基底，利用实景三维院落实体可构建中观基底，利用实景三维街坊实体可构建概略基底。

通过构建可变尺度的低空空间基底，可实现对不同应用场景需求的适配，既能为宏观航线规划提供大范围、小尺度的整体空间概览，也能为精细化作业（如无人机巡检、应急救援）提供小范围、大尺度的细节空间呈现，如图2所示。



a全景基底(实景三维建筑模型)　b中观基底(实景三维建筑+院落盒子)　c概略基底(实景三维建筑+街坊盒子)

图2　可变尺度的低空空间基底示意图

在可利用低空空间构建的过程中，也可以基于空间尺度和地物类型，实现可变尺度的低空下垫面界定。基于空间尺度的划分是指根据低空下垫面的空间范围和应用需求，确定不同级别的尺度。宏观应用可以采用较大的尺度，微观应用采用较小的尺度。基于地物类型的划分是指根据下垫面的地物类型和特征，进行尺度的差异化划分。

2.5 可利用低空空间动态更新

可利用低空空间不是一成不变的，如城市新建高楼、临时施工围挡、塔吊等新增障碍物等情形下，原有的可利用低空空间会发生变化。要确保整个低空空间数字化成果的时效性，需要建立低空自然资源动态调查监测机制。

从技术支撑维度，构建以无人机、多类型传感器、AI算法、实景三维建模等为代表的技术体系，实现低空要素“动态感知–智能分析–精准反馈”的技术闭环。

从监测机制维度，采用“定期+动态”相结合的模式，相关自然要素按照年度或季度“定期更新”、人工要素和管理要素结合项目审批、竣工验收等管理工作“动态更新”。

通过调查监测技术与机制的协同发力，实现对低空支撑要素和低空影响要素相关新增、变更等信息的实时感知，动态调整低空空间模型与相关信息，最终实现可利用低空空间的动态更新。

2.6 可利用低空空间应用

2.6.1 低空起降场选址优化

对于低空起降场选址，传统模式是基于CAD平台完成起降场二维选址方案设计，依据进近面角度阈值等关键约束参数，构建起降场及进近面三维实体模型。将三维模型嵌入城市实景三维场景中进行可视化分析与目视判读，若识别出模型与实景环境存在空间碰撞、穿透等情形，则反馈给设计人员进行方案调整和迭代优化。

基于构建的可利用低空空间，在将起降场与进近面由二维平面信息转化为三维坐标集的基础上，通过三维坐标点与低空空间体的空间关系运算（点在体内），可高效、直观地研判选址方案的空间可行性。一方面，可实现空间碰撞程度的定量化表达；另一方面，通过数值计算替代目视判读，能够有效提升分析结果的精度与客观性。

2.6.2 低空无人机路径规划

低空无人机路径规划的核心目标是在复杂低空环境约束下，规划出一条满足安全性、高效性、可行性及任务需求的最优飞行路径，目前该领域已发展出多种经典的路径规划算法，如RRT算法、A*算法等。其核心难点在于低空环境的复杂性与不确定性，规划过程需综合考量多类约束条件，特别是空间约束。

基于构建的可利用低空空间，可为路径规划算法提供精准、高效的空间约束基础。一方面可以将相关算法的路径搜索范围严格限定于可利用空间内部，规避算法对不可利用区域的无效搜索，显著提升路径规划的运算效率，降低算法时间复杂度；另一方面，当低空环境发生动态变化（如临时空域管制、新增障碍物等）时，可通过更新低空可利用空间的边界与参

数，快速调整相应算法的空间约束条件，实现路径规划的动态响应。

3　低空空间的四维分割利用

低空空间的利用是四维的（X、Y、Z、T），三维空间（X、Y、Z）为低空活动提供了“在哪里飞、飞多高”的静态框架，时间维度则赋予这一框架“什么时候能飞、什么时候调整”的动态弹性，可以通过构建“空间三维+时间维度”的四维利用体系，支撑低空空间资源的全维度开发。

3.1　空间分割

本文按照“垂直分层区分功能、水平划分管理单元、同一层内分廊道使用、廊道内多个航线布设”对低空空间进行分割利用提高低空资源使用效率。

3.1.1　垂直层面

垂直物理分割：按照一定的垂直间距，将空间分为不同的层。这一垂直间距的设定并非固定统一，而是结合低空经济的不同应用场景、飞行器性能差异及空域安全要求综合确定，兼顾安全性与资源利用率。针对非均质地表的近地低空空间，可采用基于城市三维形态的弹性分层模式，以减小建筑高度差异悬殊所导致的高楼周边空域资源浪费与空间利用冲突。

垂直逻辑分割：在垂直物理分割的基础上，按照低空应用进行功能层划分，如低层高用于社会经济活动、中层高用于政务执法、高层高用于公共服务等。

3.1.2　水平层面

水平物理分割：按照比例尺地形图、北斗格网等物理格网进行分割。根据低空经济不同应用场景的精度需求，选择合适比例尺（如大比例尺用于城市低空精细化管理、中小比例尺用于区域低空宏观规划）构建格网体系，通过将低空空间与地形图上的坐标格网精准关联，实现对低空空间的规则化划分。

水平逻辑分割：按照行政区划、网格化管理单元等进行分割，支撑低空应急救援等活动，例如当发生低空飞行碰撞等应急事件时，基于行政区划分割可快速锁定事发区域所属的管理主体，启动属地应急响应机制，更高效地开展应急救援。

3.2　时间分割

一方面，针对不同时段的低空活动需求差异，动态调整空间利用规则；另一方面，低空飞行器还要考虑其周围环境随时间的变化，根据变化动态调整对应区域的低空飞行限制。

4　结　语

低空经济需将低空空间转化为可量化、可管理、可利用的经济资源。本文基于上海实景三维建设，探索可利用低空空间的构建方法。实景三维是反映人类活动空间的新型基础设施，通过构建可变尺度低空基底，耦合支撑与影响要素，经分类组织、建模和可视化界定可利用低空空间，并建立动态监测机制实现更新。在此基础上，通过时空四维分割实现低空空间最大化开发与高效利用。该方法可提升精细化管理水平，为低空物流、应急救援、城市治理等低空经济活动提供安全保障。

参考文献

[1] Elsayed M, Mohamed M. Robust Digital-twin Airspace Discretization and Trajectory Optimization for Autonomous Unmanned Aerial Vehicles[J]. Scientific Reports, 2024,7:12506

[2] Sunil E, Ellerbroek J, Hoekstra J. Metropolisurban Airspace Design[R]. Delft: Technical University of Delft National,2014

[3] 王俊潼,包丹文,周佳怡,等. 低空空域规划研究现状与展望[J]. 航空学报,2025,46(11):82-107

[4] 覃睿,李卫民,靳军号,等. 基于资源观的低空及低空经济[J].中国民航大学学报,2011,29(4):56-60

[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] 林苻辰. 智慧空中城市建设,先行者赢[J]. 产城,2022,9(8):60-61

[7] 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

[8] 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

[9] 张洪海,夷珈,李姗,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

[10] 陈军,刘建军,田海波. 实景三维中国建设的基本定位与技术路径[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(10):1568-1575

[11] 陈军,高鉴,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

[12] 陈军,田海波,高鉴,等. 实景三维中国的总体架构与主体技术[J]. 测绘学报,2025,54(4):636-649

[13] 燕琴,翟亮,刘坡. 实景三维中国建设关键技术研究综述[J]. 测绘科学,2023,48(7):1-9

（下转第72页）