

国土空间视角下“空—地”协同低空空域划设技术及用途管理框架探讨*

Framework for Air–Ground Integrated Low–Altitude Airspace Zoning and Usage Management: A Territorial Spatial Perspective

安诣彬 徐小黎 党安荣 孙久虎 李翔宇 荣月静

AN Yibin, XU Xiaoli, DANG Anrong, SUN Jiuhu, LI Xiangyu, RONG Yuejing

关键词 低空空域；划设技术；用途管理；空—地协同；低空资源利用

Keywords: low-altitude airspace; delineation technology; usage management; air–ground coordination; low-altitude resource utilization

提 要 在低空经济快速发展与国土空间全域全要素治理背景下，低空空域作为新型立体国土空间资源日益受到关注，而传统低空空域划设“重空中、轻地面”的模式，难以适应物流配送、应急救援、载人飞行等多元化低空活动需求。从“空—地”系统耦合视角，推动低空空域划设由“航路管制”向“立体空间治理”转型，明确其立体国土资源属性，揭示空中通行与地面利用的耦合关系，构建空中与地面边界协同的划设技术体系与“用途分区+用途分类”管理框架，并以济南市实证验证其科学性与可操作性，为低空资源高效配置与低空经济高质量发展提供方法支撑与决策参考。

Abstract: Against the backdrop of the rapid development of the low-altitude economy and the shift toward whole-territory, full-element governance of territorial space, low-altitude airspace is drawing increasing attention as a new type of three-dimensional territorial spatial resource. However, the traditional approach to low-altitude airspace delineation, which prioritizes airspace over ground space, is inadequate to meet the demands of diverse low-altitude activities such as logistics delivery, emergency rescue, and passenger flights. From the perspective of integrated air–ground systems, this paper proposes a shift in low-altitude airspace delineation from "route control" toward "three-dimensional spatial governance." It clarifies the system's attribute as a three-dimensional territorial resource, reveals the coupled relationship between aerial corridors and ground land use, and develops a technical method for delineating coordinated air-ground boundaries within a management framework that encompasses use classification and zoning. Using Jinan City as a case study, the study empirically verifies the scientific validity and operability of the proposed approach, offering methodological support and decision-making references for the efficient allocation of low-altitude resources and the high-quality development of the low-altitude economy.

中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.16361/j.upf.202602009

文章编号 1000-3363(2026)02-0065-09

作者简介

安诣彬，自然资源部国土空间规划研究中心正高级工程师，注册城乡规划师，183811227@qq.com

徐小黎，自然资源部国土空间规划研究中心副主任，研究员

党安荣，清华大学建筑学院教授

孙久虎，山东省国土测绘院正高级工程师

李翔宇，天津大学建筑学院副教授

荣月静，中国科学院生态环境研究中心助理研究员，通信作者，yjrong@rcees.ac.cn

* 自然资源部2024年部省合作项目“国土空间低空空域规划编制关键方法研究”（项目编号：2024ZRBSHZ075）；国家自然科学基金项目“低空基础设施的空地协同规划机理与模型研究”（项目编号：52508067）

随着我国经济转型升级进入关键阶段，低空经济作为新兴产业形态，正在成为新的增长动能^[1-2]。无人机物流配送、城市空中交通（UAM）、低空文旅观光等应用场景快速涌现，使低空飞行活动呈现出高频化、多样化与精细化特征^[3-8]。与此同时，低空交通导向开发（vertical-oriented development, VOD）等理念开始受到关注，强调低空交通网络、垂直起降设施与城市功能空间之间的协同组织，对低空空域资源的供给能力、组织方式与管理精度提出了前所未有的要求^[9]。作为低空经济运行的核心空间载体，低空空域的规划布局、划设技术与用途管理水平，直接关系到飞行活动的安全性与运行效率，并进一步影响产业规模化发展的质量与上限^[10]。

传统低空空域划设源于航空管理逻辑，侧重空中交通流组织，忽视了对地面国土功能、环境承载力及风险暴露的考量。这种“重空中、轻地面”的路径导致空一地要素错配，引发飞行活动与城市环境冲突、局部供给不足与闲置并存等问题^[9]。与我国快速发展的低空经济需求相比，我国低空空域管理体系在技术与治理模式层面存在明显滞后，制约因素集中体现在空域划设方法与用途管理机制尚难以适应新业态运行需求^[11-12]。

更新低空空域用途管理思维、强化空一地协调是突破上述困境的关键，该需求既符合我国国土空间全域全要素管控的改革导向^[13-14]，又契合国际低空管理的发展趋势^[15-16]。空地协同本质上是打破低空空域划设与地面空间治理、空中运行与地面监管服务之间的管理壁垒。以自然资源管理和国土空间规划“一张图”为底座，从地空协同视角识别低空活动、地面设施、城市功能、安全风险

与治理规则等关键要素^[17-18]。针对上述问题，本研究在梳理现有文献局限的基础上，构建空一地协同的划设技术与用途管理框架。这不仅丰富了国土空间三维治理理论，更为低空空域精细化治理提供了可操作的方法论支撑。

1 低空空域划设技术与用途管理研究进展

1.1 低空空域概念及属性

低空空域是受地表环境和人类活动深刻影响的立体国土空间资源，具有非结构化、高异质性和强地表耦合性^[19-21]，其稀缺性、容量约束及风险外部性，决定了开发利用必须在国土空间视角下统筹安全、效率与治理需求^[22-25]。因此，低空空域管理应突破“空中—地面”割裂，将用途管制延伸至立体空间，通过分区划设、规则约束和协同治理，实现与国土空间功能格局的精准衔接^[26-29]。随着低空物流、城市空中交通等业态发展，低空空域作为新型生产要素的经济属性日益凸显，其管理框架需在守住安全底线的基础上促进资源高效配置与低空经济有序发展^[30-36]。

1.2 低空空域划设技术研究进展与演化脉络

低空空域划分技术的早期思路主要源自传统航空空域规划与运行安全研究，划分依据多聚焦于飞行可行性与避障约束，例如以航路/走廊组织、障碍物净空、起降点连通性与隔离间隔等要素进行空间切分与边界确定^[15,19]。这类“空中运行主导”的方法在保障飞行安全与基本秩序方面具有较强的工程可操作性，但在城市密集建成区与多类型地表空间

并置的低空环境中，容易面临地面风险暴露差异大、空间约束高度异质性强以及跨区域一致性不足等问题，划分结果也往往表现为走廊式、碎片化，且难以精细刻画垂向差异。

随着 2010 年代中后期 UTM/U-space 等体系推动无人机规模化运行的需求上升，国外逐渐形成更强调“以国土空间特征为前置条件”的划分范式。面向无人机的城市低空空域规划国际经验表明，美国、欧盟国家、日本等普遍将风险分级、地理围栏、运行场景、航路组织和数字化监管作为低空空域规划的重要内容^[37]。在这一转向下，低空空域划分不再仅以飞行可行性、避障条件和航路连通性为依据，而是进一步将人口暴露、地表功能与敏感目标、建筑形态与高度、关键基础设施廊道、生态敏感区等纳入划分的基础约束，并通过“垂向分层—走廊/节点组织—地理分区（geozone）”等要素组合实现三维划设表达。其中，地理分区成为承载规则数字化发布、检索与更新的关键载体^[38-39]，使划分从单纯的避障与连通性优化，转向对“空间风险—地表特征—运行需求”耦合关系的综合刻画。在此框架下，不同地区形成差异化路径^[15,30,40-44]：美国更偏向广域尺度下的类别化组织与动态管理思路，欧盟国家围绕高密度复杂环境逐步建立 U-space 地理分区与规则体系，日本则在城市低空应用与场景导向的制度与技术推进中强调与城市空间条件的匹配。总体而言，低空空域划分技术呈现出由“空中运行（航路/避障）”转向“国土空间特征（地理分区/三维综合约束）”的趋势，为后续精细化三维连续划分与跨区域一致性表达奠定了基础（表 1）。

表 1 不同国家低空空域划设原则与分类模式对比

Tab.1 Comparison of low-altitude airspace designation principles and classification systems across different countries

| 国家或地区 | 划设基本原则 | 空域分类逻辑 | 划设要素 | 技术/规则依据 |
|-------|--------------|----------------------------------|------------------------|---|
| 美国 | 安全优先、开放高效 | 遵循 ICAO/FAA A-G 类，低空以 Class G 为主 | 既有类别与机场管制为骨架，动态划设 | FAA 分类体系、UTM 数字化授权 ^[15] |
| 欧盟 | 风险导向、空一地协同 | 以 U-space 地理区为核心，按风险叠加加入 | 地理区分级管理，叠加航线走廊 | U-space ConOps 与法规，服务分级 ^[41] |
| 日本 | 城市安全优先、空一地一体 | 遵循 ICAO，聚焦 AAM 专用场景 | 航线走廊—起降场—运行区一体化 | AAM 路线图，耦合城市规划 ^[40] |
| 加拿大 | 规则清晰、责任导向 | 采用 ICAO A-G 类体系 | 空域类别为底，按风险设禁限区 | TC 无人机法规、地理限制机制 ^[42] |
| 澳大利亚 | 风险分级、规则简化 | 遵循 ICAO 分类体系 | 基于地理限制与运行条件，规避复杂重构 | CASA 规则体系、线上合规工具 ^[43] |
| 英国 | 安全创新并重、渐进式划设 | 以管制/非管制为基础，衔接 U-space | Class G 为核心，推进走廊/节点工程化 | CAA 政策、U-space 试点框架 ^[30,44] |

在此基础上，近年来我国立足本土低空空间用途管制经验，以国土空间与低空空域协同管理为核心，尝试将国土空间管制经验拓展至低空领域，初步形成了中央统筹制度框架、地方细化实施规则的治理机制，以兼顾制度统一性与地方适应性。逐步强调城市低空规划中的地空要素识别、运行场景适配、设施网络布局和规划响应机制^[18]，并借助低空空域资源承载力评估^[25]，限制性区域识别、多源数据融合计算等方法^[45]，低空空域管理的科学性有所增强，无人机航路规划系统、感知与通信一体化（ISAC）联合资源管理等技术进展，也为低空航路组织、空域资源配置与空地协同管控提供了支撑^[46]。但从总体来看，当前低空空域划设与用途管理仍存在明显不足。在管理实施层面，空中管理与地面管控之间的权责边界尚未完全厘清。根据《国务院办公厅关于促进通用航空业发展的指导意见》（国办发〔2016〕38号），低空空域治理涉及军民航、地方政府及相关部门的协同推进，但部分地区尚未建立完善的跨部门衔接机制，致使空域管理、基础设施布局和项目实施之间存在脱节。在制度衔接层面，低空空域管理尚未充分融入地面特殊功能区的避让要求和典型障碍物约束的地面低空管控体系。综合来看，现有低空空域划设方法尚未充分将地面空间边界纳入空域划设过程，难以支撑跨区域、跨业态场景下低空资源的精细化配置与高效利

用。

1.3 低空空域用途管理与规划衔接路径

国土空间全域全要素治理背景下，低空空域用途管理与国土空间规划的科学衔接是改善低空资源利用与安全保障矛盾的重点。目前国外低空空域用途管理与规划衔接主要有市场引导、技术赋能、行政规制三类模式，以法律、产业、技术方式适配低空空域的监管。美欧等以市场引导模式为主，适配产业发展需求^[30]；日本多以飞行器技术迭代为先，法规及市场监管相对滞后^[40]；加拿大、澳大利亚、英国等国行政规制模式以国土安全为主，但易抑制新业态活力^[42-43]；见表2。尽管低空空域的用途管理途径已覆盖多国，但总体上仍存在模式普适性弱、多元目标平衡机制缺失等局限缺少空中与地面的协同衔接和综合管理。

为加强低空空域监管，2010年《关于深化我国低空空域管理改革的意见》发布标志着国内低空改革正式启动，此后创新性引入管制、监视、报告“三类空域”体系^[20]，推动空域管理从纸面静态管理向数字化转型；2020年以来，伴随“低空经济”上升为国家战略^[1]，实景三维、数字孪生等技术支撑空域划设从划区向划网升级^[27]，UTM/UOM系统探索动态管理模式，但始终存在试点标准不一、数据孤岛、动态管理规则与协同机制滞后等问题^[11, 28]。而静态二元分区模式导致的空域利用率低、审批烦琐等问题

也长期制约产业发展，这些关键矛盾尚未得到根本解决。在此基础上，目前深圳、浙江、山东、广西等地已逐步开展低空空域规划与用途管理相结合的实践探索，其中，深圳已实现无人机物流的普及化，浙江等地也凭借扎实的数字化基础与低空产业积淀，初步建立时空立体数据体系，为低空空域划设提供了数据支撑。从体量来看，仅2023年浙江全省低空产业规模已达450亿元，而当前各地相关实践多仍处于试点与框架搭建阶段，规划表达体系、用途分类口径及跨部门协同机制尚未完全统一^[22, 44]，迫切需要推动规范有效的低空空域划设与用途管理。

2 空—地系统耦合的低空空域划设理论基础

随着低空经济由试点探索阶段逐步迈向规模化应用阶段，低空空域治理问题已不再局限于航空运行安全范畴，而日益演化为城市空间结构重组与多维资源再配置的重要议题。在高密度城镇化背景下，低空空域与地面空间在功能组织、风险外溢与治理主体等方面高度耦合，传统以航空运行效率或航线安全为核心的空域划设理论，难以回应城市复杂空间系统中多目标协同的现实需求。基于此，有必要在国土空间治理语境下，系统重构低空空域划设的理论基础，形成能够支撑空—地协同治理的低空空域划设理论体系。

2.1 属性界定：国土空间视角下低空空域的资源化认知

在国土空间治理体系中，空间被视为承载多重用途、受多重约束的稀缺资源，其特征在于可分区、可管理、可调配。将低空空域纳入这一体系，首先需在理论层面对其空间属性进行重新界定。从空间形态上看，低空空域并非抽象的高度范围，而是由地表起伏、建筑形态与人工设施共同塑造的三维立体空间，其可利用性随高度、位置与周边环境显著变化。从功能属性上看，低空空域同时承载交通、公共服务、产业运行与安全防护等多重功能，具有典型的复合用途特征。从治理属性上看，低空空域既

表2 不同国家低空空域用途管理对比

Tab.2 Comparison of low-altitude airspace designation and usage control systems across different countries

| 国家或地区 | 核心法律/政策(及其颁布/生效时间) | 监管机构 | 用途管理导向 |
|-------|---|----------------------------------|----------------|
| 美国 | 《联邦航空法》(1958) 《小型无人机规则 Part 107》(2016) 《先进空中交通协调及领导力法案》(2022) | 联邦航空管理局(FAA) | 市场引导 |
| 欧盟 | 《欧盟无人机条例》(2019) 《U-space法规框架》(2023) | 欧洲航空安全局(EASA) 及各成员国国家航空局(NAA) | 市场引导 |
| 日本 | 《航空法》(2022) 《先进空中交通(AAM)发展路线图》(2018) | 国土交通省航空局(JCAB) | 技术赋能 |
| 加拿大 | 《航空法》(1985) 《加拿大航空条例 Part IX (无人机)》(2019) | 加拿大运输部(Transport Canada) | 行政规制 (国土安全) |
| 澳大利亚 | 《民航安全法规 Part 101 (无人机)》(2002) 《空域法》(2007) | 民航安全局(CASA) | 行政规制 (国土安全) |
| 英国 | 《空中航行令》(2016) | 民航局(CAA) | 行政规制 (国土安全) |

不同于完全市场化配置的土地资源，又有别于完全行政管制的禁飞空间，而是一种需要在公共利益与运行效率之间动态平衡的准公共空间资源。因而，低空空域划设的理论前提应由传统的“空域分类”转向“空间资源化表达”，即通过明确空间边界、权属属性、开发权配置、用途准入、收益分配与公共安全约束等内容，使低空空域成为能够被识别、被计量、被配置，并纳入规划管理体系的三维空间资源^[36]。这一从“飞行空间”到“空间资源”的转译过程构成了空地协同划设理论的基础逻辑。

2.2 耦合机理：国土空间与低空资源的交互关联

从空间系统整体性视角出发，国土空间与低空资源构成垂直嵌套、双向约束的空间耦合系统，其交互作用集中体现为空间本底约束、功能适配协同与风险传导联动的多重机制。政治军事敏感区域、地表地形地貌与建筑高度轮廓等国土空间核心要素，直接划定了低空空域的可用范围与运行阈值，构成低空资源开发的刚性约束条件；而低空巡检、空中物流、城市空中交通等多元活动的空间集聚，又反向引导地面起降节点、保障设施与服务网络布局，推动国土空间利用向三维立体拓展。二者在功能与风险上的深度耦合，决定了低空空域划设必须与国土空间用途管制相衔接：地面功能分区决定低空使用强度与管控等级，人口密集区、生态敏感区等空间单元对应差异化的低空准入规则与安全阈值；同时，低空飞行的安全风险、环境外部性直接作用于地表公共利益，使得空地系统耦合不仅是物理空间的嵌套，更是规划逻辑、管控规则与治理权责的制度性耦合，成为重构低空空域划设理论的内在依据。

国土空间规划“全域覆盖、全要素管控”的特征，为低空资源治理提供了核心底座支撑，这是国土空间视角下低空资源治理理论建构的关键。现行低空飞行作业控制平台（UOM）虽已具备立体治理雏形，但仍需以国土空间规划为引领，实现空地管控的深度协同与规则衔接。国土空间视角下低空资源治理的理论建构，核心是依托国土空间规划

的全域管控框架，衔接现行低空管理体系，厘清“地对空”约束与“空对地”反馈的双向作用机制，实现低空资源与国土空间的协同配置、有序利用，为低空空域划设提供系统性的理论支撑。

3 国土空间视角下空地协同划设技术与用途管理框架

3.1 框架构建：从要素叠加到系统耦合的空地协同划设

“空地协同”超越了传统地面障碍物限制飞行的单向约束，强调双向的动态耦合：一方面，地面的用地性质、人口密度与建筑形态决定了上方空域的风险等级与准入条件；另一方面，低空航路与作业区的划设也对地面的建筑限高、噪声敏感点布局及配套设施用地提出了反向要求。

从空间机理看，低空空域的可利用性不仅取决于空中运行条件，更受地面空间结构深刻塑造。人口分布、建筑形态、基础设施廊道及生态与安全敏感区共同界定了低空空域的边界与风险背景，并通过空地要素的动态反馈关系，影响低空空间的可达性、连续性与运行安全。因此，空地协同划设强调在统一的三维空间框架下刻画空地要素的相互作用，而非将地面要素作为事后叠加的限制条件。在功能层面，低空运行活动主要服务于地面城市系统，其运行功能与地面功能分区之间存在内在匹配关系。若划设脱离地面功能组织，易引发空间冲突与风险外溢。空地协同划设通过协调低空空间的开放强度与运行类型，实现低空用途与地面用途的空间协同。在治理层面，低空空域涉及多部门共同管理，空地协同划设通过提供统一的空间单元与规则载体，使安全约束、运行管理与用途管理在同一空间框架下展开，降低制度摩擦并提升治理效率。综上，空地协同下的低空空域划设是一项融合空间科学、风险治理与制度设计的综合性理论命题。本文将界定为：在城市三维空间框架下，将低空空域作为与地面空间结构、功能分区和治理规则相互耦合的空间资源，以风险分级和底线约束为基础，通过静态分区与动态调控相结合，形成可执行、可更新的低

空空域边界与准入规则体系。

3.2 空地协同划设技术与用途管理框架

本研究构建的国土空间视角下低空空域划设技术与用途管控综合体系，以全域治理空地协同为核心逻辑，形成了涵盖约束识别、技术支撑与用途管理的完整分析框架。框架以安全、环境、社会等三类低空空域限制因素为逻辑起点，通过危险避让、污染控制、社会敏感度识别等技术手段，明确空域开发的刚性约束边界。在此基础上，依托基于飞行类别、层级、网格、网络的多元划设技术，锚定底线约束、适配协同、高效公平等三大基本原则，系统开展低空空域空中边界与地面边界的双层划设。在低空空域生成与细化环节，通过空域结构设计、航路网络规划、三维建模与仿真，完成空域从宏观框架到微观运行的全流程技术落地。最终以低空空域用途分类分级管控为落脚点，通过公用商业私人类用途管控、行政市场技术类多元手段，结合空地一体化综合监测、效能与风险评估以及动态更新纠偏机制，实现低空空域资源的全生命周期精细化治理，为低空经济高质量发展提供可落地、可协同、可迭代的技术支撑与制度保障（图1）。

3.3 空地协同划设技术体系

空地协同的低空空域划设技术是国土空间全域全要素治理理念在低空领域的重要落地载体，重点在于通过技术路径破解传统划设中空域与地面数据割裂、技术适配性不足等问题，实现低空资源配置与地面功能布局、安全管理需求的精准耦合。鉴于当前我国低空空域划设技术仍存在空地边界界定精准度不足、技术融合深度不够、动态适配能力薄弱等短板，难以充分适配城乡低空业态多元化发展需求，推动低空空域空地协同划设具有重要现实需求。

3.3.1 低空空域空中边界划设

空中边界划设是低空空域管理的基础前提，需兼顾刚性标准与动态适配，涵盖垂向高度与水平范围两大要素。在垂向维度，参考相关标准，将低空划分为微型无人机适飞区（如120 m以下）、

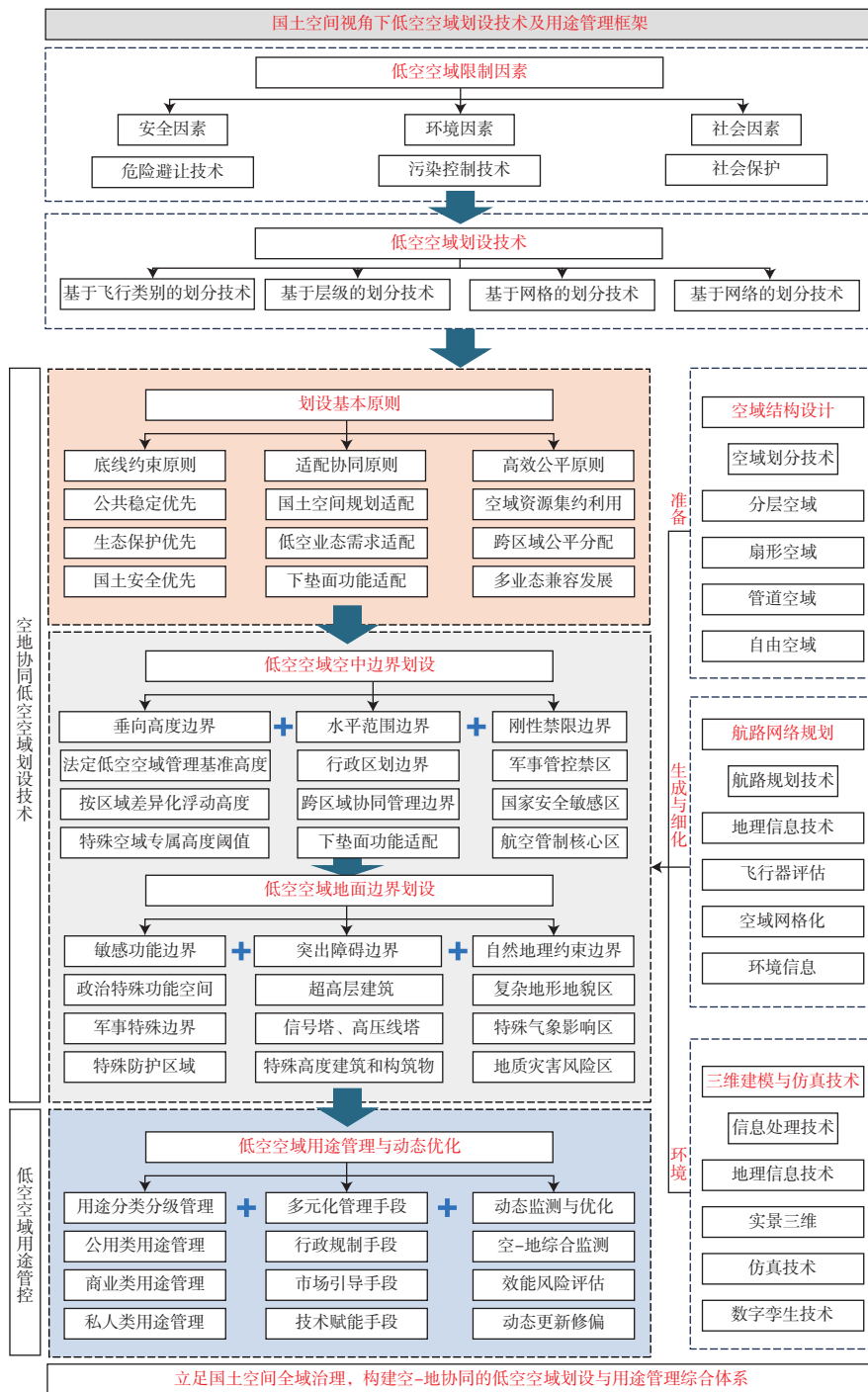


图1 空—地协同的低空空域划设与用途管理体系

Fig.1 A low-altitude airspace delineation and usage management system based on air-ground coordination

轻小型无人机管理区及通用航空融合区。在水平维度，依托高精度地理信息数据和实景三维中国数据底座，摒弃传统的“点对点”航路模式，采用三维网格技术对空域进行体素化切分，精确计算建筑物净空包络与安全隔离带，生成数字化

电子围栏，实现空中边界的精准落图。同时结合飞行场景需求与安全约束，采用固定空域与临时空域相结合的模式，其中临时空域划设时限宜控制在12个月内，适配低空旅游、应急救援等动态需求。通过融合实景三维、网格剖分及高

精度地形数据构建低空数字孪生底座，依托集成空间叠加分析、边界矢量化解译功能的全空间智能GIS平台，实现空中边界的可视化界定与实时动态调整，改善传统划设精度不足的限制。

3.3.2 低空空域地面边界划设

地面边界划设是地面要素对空域的映射/投影，将地面的刚性管理要素（政治、军事、特殊防护区域等）、风险敏感要素（学校、危化品库、核电站等）及高层建筑障碍物，通过垂直投影或缓冲扩展的方式，映射为低空空域的“限制体”或“禁飞体”。利用GIS空间叠加分析技术，建立地面用地功能与上方空域属性的拓扑关联。地面边界划设关键在于锚定低空飞行的地面约束条件，实现与国土空间规划的深度衔接。空间上，针对地面管控刚性管理、风险敏感以及地质灾害风险区等要素，实行地面边界对低空空域的分区分用途约束；针对过境运输、勘测航摄、监测作业等划定不同的准入标准，同时严格避让机场净空保护区、输电线路、高铁枢纽等重大基础设施以及人口密集建成区等安全敏感区域。数据支撑上，应系统普查地面地形地貌、建筑物分布、电磁环境等基础信息，结合地理信息技术与三维网格剖分的划设技术，梳理固定或临时地面障碍物的空间坐标与高度参数，将其转化为空中边界划设的分级、分区、量化的约束指标，确保低空飞行与地面空间利用的安全兼容。此外，地面边界划设需将降场布局、低空基础设施配套需求相衔接，强化地面支撑设施与空中航路网络的空间匹配，为低空空域安全提供保障。

3.3.3 低空空域空—地协同划设技术

空—地边界协同的关键在于构建技术融合与制度联动双重保障机制。技术上，应充分依托地理信息平台整合空地多源数据，建立空中界限、地面约束的双向反馈模型，实现空中划设方案与地面边界条件的实时校核与动态优化。同时，引入分阶段、复合型划设策略，针对城镇、乡村、生态区等不同区域优化空—地边界适配模式，提升协同精准度。通过推动空—地协同的低空空域划设，实现低空资源配置与地面功能布局、安全管理需求的深度耦合，为低空经济

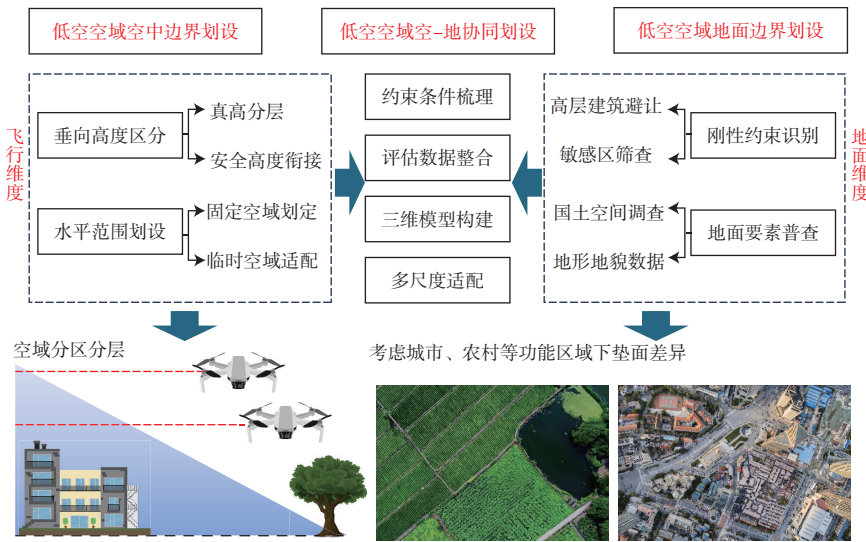


图2 国土空间视角下低空空域划设技术体系

Fig.2 Technical framework for low-altitude airspace delineation from the perspective of territorial spatial planning

高质量发展提供空间保障(图2)。

3.4 空一地协同用途管理制度设计

3.4.1 空一地协同条件下低空用途管理的制度逻辑

空一地协同的低空空域用途管理是低空资源高效利用与国土空间安全保障的重要抓手,以制度规范与监管闭环为支撑,实现与现有国土空间规划体系的深度衔接与实操落地,改善当前我国低空空域用途管理仍存在制度体系与规划体系衔接不畅、管理要求难以嵌入规划实施流程等短板,保障低空空域管理适配《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》中通用航空与低空经济融合发展的需求。

通过构建空一地协同的用途管理框架,优化传统空域与地面空间管理割裂的格局,将低空用途管理贯穿低空空域规划编制、实施、评估全流程,形成与现有规划制度互补衔接的管理思路。在管理分类上,基于应急类、商业类、公共服务类、产业运行类等用途属性,细化差异化管理标准,建立国土空间用地类型、低空活动类型与管理强度等级的多维对应关系。在实施路径上,强化规划衔接、技术赋能与跨部门联动的有机结合,稳固安全底线,保障低空资源高效利用,实现低空用途管理与低空空域

规划的深度融合、高效落地。

3.4.2 面向国土空间治理的低空用途分区制度

在规划优化层面,也需针对现有规划中低空管理内容缺失、衔接机制不完善等问题,优化规划编制,将低空用途管理内容明确纳入国土空间总体规划、详细规划及综合交通、生态保护等专项规划。总体规划层面落实全域低空管理分区,详细规划层面细化地市级管理要求,专项规划层面衔接降场等基础设施布局。实施层面,将低空飞行许可与规划许可联动,建立跨部门联合管理机制,构建低空管理、基础设施、产业布局的多规融合体系,确保管理要求嵌入规划审批、监管全流程。在低空空域监管与动态更新上,依据《全国国土空间规划纲要(2021—2035年)》动态调整要求,结合低空业态发展与管理实施评估结果,定期优化管理规则与规划布局,强化管理效果对规划修编的反馈作用,形成“编制—实施—评估—优化”的闭环衔接机制,确保低空空域用途管理与国土空间规划体系协同高效、动态适配。

3.4.3 面向国土空间治理的低空用途分类制度

空一地协同用途管理框架的落实,需推动与现有规划体系的精准衔接及优化完善,确保落地见效。在衔接逻辑上,

以《全国国土空间规划纲要(2021—2035年)》“统筹陆海空全域空间利用”要求为引领,将低空空域管理分类、强度标准嵌入现有规划体系。分类进行差异化管理,适配执法、商业、应急、科研监测等低空空域用途类型,衔接城市综合交通规划与基础设施专项规划。同时,将低空空域边界、用途管理措施等成果嵌入国土空间规划信息平台,依托地理信息技术建立对应关系模型,实现规划布局与管理要求同步校核。在此基础上,研究结合国土空间用地类型、典型低空活动类型、管理强度的多维对应规则,通过用地类型锚定空间约束的基底属性,并结合活动类型匹配低空业态的需求属性,以管控强度进行分级,实现精细化的差异化管理。构建过程中,基于全域国土空间用地类型不同空间的法定约束与敏感程度,对区域低空活动按公共属性、风险特征等分类,进而通过格网化风险评估,匹配不同用地的承载能力与不同活动的风险外溢特征,形成分区分类的低空空域多维规制。结果上,管控强度与国土空间敏感程度正相关,生态保护、城镇核心类敏感用地的管控强度显著高于其他区域。从安全角度上,管控强度与活动风险等级正相关,商业载人、物流运营类高风险活动的管控强度显著高于公共作业类,而公共属性活动可突破空间的常规强度约束,在合规条件下最大限度地释放通行效率(表3)。

3.5 案例剖析:空一地协同的低空空域划设与用途管理

以山东省济南市中心城区部分适飞空域作为示范区,将低空空域规划纳入国土空间规划体系,结合规划实证,论述低空空域规划与管理的实操性,为城市低空空域规划提供参考。

3.5.1 空一地协同低空空域划设

空一地协同的低空空域划设以实现空中范围与地面约束的精准匹配为目标,划设过程分为数据整合、综合评价与划设实施三阶段。案例区以实景三维为基础,在低空数据整合阶段,通过市域格网地形、建筑物白模及低空飞行障碍物等数据,形成涵盖地形、地物、空域、社会经济及物联感知的低空资源数据库,

为划设提供数据基础。在综合评价阶段，从容量、风险、需求等3个准则层构建指标体系，进行容量评估、风险评估、需求评估。在划设实施阶段，案例区采用空中分层与地面分区相结合的方式，空中按真高划分为0—300 m、300—600 m、600—1000 m等3个层次，分别对应

低速飞行、中速飞行及长距离飞行等不同需求。地面以政治军事敏感区、特殊高层建筑与地质灾害区等为约束条件，避让公共基础设施、涉密单位、危化品区域等管制空域，结合低空空域资源适用性评价结果，划定禁用区、限用区与适用区，实现空中划设与地面空间功能

的协同适配(图3)。

3.5.2 低空空域用途分层—分区管理的实践路径

结合国土空间功能与低空业态需求，案例区在空域划设的基础上构建了分层、分区、分时相结合的三维时空管理与布局方式，各管理维度结合实际飞行需求与客观条件划定依据，实施差异化管理要求(图4)。分层方面，依据飞行高度需求、障碍物分布及不同高度的空气动力学特性，低空空域底层主要用于公共服务、无人机物流配送等低速低高度飞行活动，需严格控制飞行速度和航线；中层适用于短途载人飞行、空中观光等活动，飞行空间相对开阔；高层主要用于长距离飞行、应急救援等活动，需考虑与高空航空器的协调。分区方面，结合国土空间规划地面功能分区与低空飞行活动类型，划定核心商业、居民生活、产业物流、交通枢纽、生态保护、农业生产等低空功能区域，各区域按对应可用性等级管理，如核心商业低空区以Ⅰ级可用性为主允许高密度飞行，居民生活低空区以Ⅱ级可用性为主限制夜间飞行、控制噪声，生态保护低空区以Ⅲ级可用性为主仅允许经审批的必要飞行活动，交通枢纽低空区则围绕机场、车站差异化设置禁飞环与专用走廊。分时方面，依据飞行流量变化、地面活动强度及气象条件的时段变化，划分为高峰、平峰、低峰等三个管理时段：高峰时段严格控制飞行航线和密度，优先保障公共交通

表3 国土空间用地类型、低空活动类型与管理强度等级多维对应关系示例

Tab.3 An example of multi-dimensional correspondence relationship among land-use types, low-altitude activity types, and control intensity

| 国土空间类型 | 用地类型 | 典型活动类型 | 强度分级 | 管理机制 |
|---------------------------------|-------------------|-----------------|------------------|------------------------|
| 城镇空间 | 城镇建设用地 | 城市空中交通(UAM)载人运输 | 高强度 | 审批、备案运营资质,严格限定范围,常态化监管 |
| | | 无人机物流 | 高强度 | |
| | | 城市巡检与应急救援 | 低强度 | 事后报备,不受常规空域约束,优先应急通行效率 |
| | 乡村建设用地 | 低空文旅与商业航拍 | 中强度 | 备案运营资质,审批相关空域,重点时段监管 |
| | | 农村物流 | 中强度 | 备案运营资质,限定范围,常态化监管 |
| 农业空间 | 耕地 | 农业巡检 | 低强度 | 无需审批,备案作业、巡查范围 |
| | | 农田植保 | 低强度 | |
| | | 作物动态监测 | 低强度 | |
| | 园地、林地、草地等其他农业生产用地 | 林业资源巡检 | 高强度 | 相关部门审批,限定飞行范围 |
| | | 防火巡航 | 中强度 | 无需审批,备案巡查范围 |
| | | 生态保护巡查 | 中强度 | |
| 生态空间 (含湿地、自然保护区、未利用地等生态功能用地) | 植被常态化监测 | 中强度 | 相关部门审批,限定监测范围与高度 | |
| | 生物多样性保护巡查 | 中强度 | 专项审批,限定区域、时段、高度 | |
| | 地质灾害水环境动态监测 | 中强度 | 专项审批,限定区域 | |

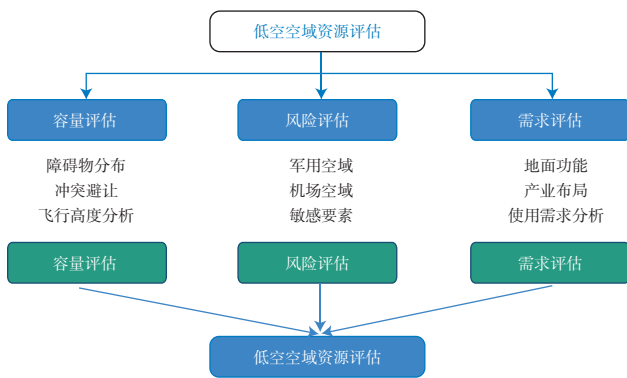
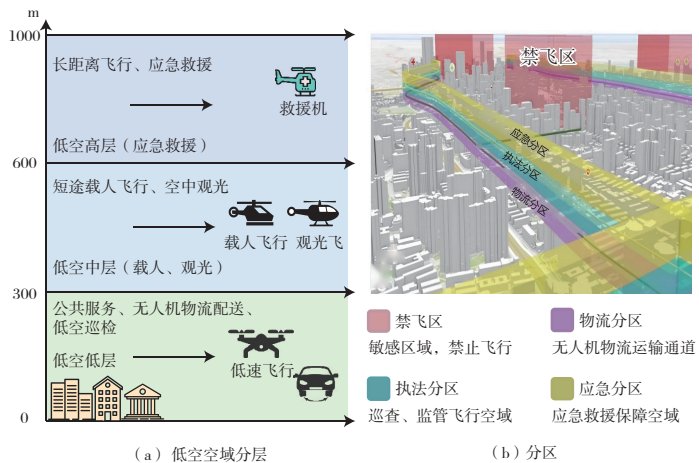


图3 低空空域资源评估框架实例

Fig.3 An illustrative framework for low-altitude airspace assessment



(a) 低空空域分层

(b) 分区

图4 用途管理示意

Fig.4 Schematic illustration of usage management

和应急飞行；平峰时段适当放宽飞行限制，优先保证货运与公共服务走廊畅通；低峰时段仅允许夜间物流配送、安全巡查等特殊飞行活动，同时严控噪声和灯光污染。

3.5.3 空一地协同框架的实践适配性与经验启示

案例区的核心经验在于初步落地了本研究提出的低空空域空一地协同框架划设流程与分区分类管理体系，一定程度上改善了部分传统低空空域治理的局限。研究案例区中，将数据整合、综合评价、划设实施三个环节形成了完整的技术传导链，以国土空间规划“一张图”为统一基底，整合多源空一地数据解决了异构数据脱节的问题，基于用地—活动匹配的量化评价模型完成全域空域适用性分级，将评价结果转化为空域划设的多约束，实现从数据到落地规则的完整传导。同时，试点落地的分层—分区—分时三维管理，也从管理端突破了传统单一维度管制的局限。相对于仅侧重实现高度分层或区域禁限的单一规则，难以适配复杂的低空活动需求，案例区通过将三类规则联动形成管理矩阵，实现了对低空活动的精细化适配。但从全域全要素的角度，目前这套体系仍存在跨域规则协同以及乡村、自然保护区等非城市区域支撑不足的短板，未来需进一步完善跨区域规则对接，构建动态渐进式的规划调整机制，支撑更大范围的低空资源统筹。

4 讨论与结论

4.1 研究结论

本研究聚焦国土空间全域全要素治理视角，围绕低空空域划设与用途管理问题展开系统研究，构建了空一地协同划设技术与用途管理系统性框架。本研究证实，低空空域已从单纯的“飞行介质”演变为需进行三维确权与精细化配置的“立体国土资源”，而空一地协同的本质是地面开发权益与空中通行权益的双向博弈与动态平衡。此外，研究提出的“基于地面风险映射的划设技术”与“分区—分类—分级用途管理体系”，突破了传统空域管理“重天轻地”的局限，为将低空空域纳入国土空间规划“一张

图”提供了可操作的技术接口。

4.2 政策建议

低空空域划设与用途管理需紧扣国土空间规划体系，强化与现有规划的深度衔接及落地实施。研究提议加快制定城市低空、空地一体基础设施专项规划标准，明确低空分区、设施布局等关键指标，将其全面纳入国土空间详细规划单元，落地到具体规划管理单元，赋予法定实施依据。管理联动上，建立自然资源、民航等多部门协同机制，搭建统一的低空资源数据共享平台，整合多源数据，打通跨部门数据与审批链路。在城市核心区域，结合低空业态迭代特征引入弹性留白机制，依托公共服务廊道、交通枢纽等，统筹预留垂直起降公共服务廊道，明确空域管理与地面建设约束，避免空域资源永久性灭失。同时，依托数字孪生、全空间智能GIS技术，构建“规划—监测—评估—预警”动态反馈闭环，实时监测规划实施与飞行动态，定期开展成效评估，联动国土空间规划动态调整机制，推动低空治理从“静态蓝图”向“动态治理”转变。

4.3 局限与展望

本研究围绕低空空域划设与用途管理及规划衔接问题开展初步探索，提出了空一地一体的综合性管理框架，为低空领域规划与管理提供思路，但受研究条件限制，仍存在两方面局限。数据上，受精细化城市三维模型（LOD3级以上）获取难度的约束，本研究提出的划设技术在复杂建成环境下的微观验证尚显不足。技术上，研究构建的框架以静态物理空间形态为基础，尚未充分考虑风场、电磁环境等动态气象/物理场对空域划设的实时影响，存在空一地空间动态耦合分析的缺失。未来研究将重点聚焦基于实时感知的动态空域网格划分，以及低空空域容纳量的量化评估模型，以期为低空经济的高效运行提供更精准的科学依据。

参考文献

[1] 李晓华. 政府引导、产业生态构建与低空经济发展[J]. 改革, 2025(2): 21-35.
[2] 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: 25-33.

[3] 张洪海, 李姝, 夷珈, 等. 城市低空航路规划研究综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(6): 827-838.
[4] 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: 2607-2620.
[5] 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: 31-38.
[6] 费毓晗, 张洪海, 张连东, 等. 城市物流无人机运输路径规划[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2023, 47: 79-84.
[7] UBER. Fast-forwarding to a future of on-demand urban air transportation[R/OL]. (2016-10-27) [2026-05-29]. https://evtol.news/_media/UE_WhitePaper_2016.pdf.
[8] 刘佳雯, 王缪莹, 沈通, 等. 国内外低空经济发展及其在铁路领域的应用场景研究[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47: 30-43.
[9] 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(1): 73-80.
[10] 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: 82-107.
[11] 高志宏. 低空经济空域管理法治建设[J]. 中国法律评论, 2025, 184-195.
[12] 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: 85-95.
[13] 中共中央, 国务院. 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[Z/OL]. (2019-05-23) [2026-05-29]. http://www.gov.cn/zhengce/2019-05/23/content_5394187.htm.
[14] 于海涛, 林坚, 彭震伟, 等. “健全国土空间用途管制制度”学术笔谈[J]. 城市规划学刊, 2023(5): 1-11.
[15] Federal Aviation Administration. Small unmanned aircraft systems (UAS) Regulations (part 107) [R/OL]. (2020-10-06) [2026-05-29]. <https://www.faa.gov/newsroom/small-unmanned-aircraft-systems-uas-regulations-part-107>.
[16] European Commission. Commission implementing regulation (EU) 2021/664 of 22 April 2021 on a regulatory framework for the U-space (text with EEA relevance) [R/OL]. (2021-04-23) [2026-05-29]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/>

- EN/TXT/? uri=CELEX% 3A32021R0664.
- [17] FINN R L, WRIGHT D. Unmanned aircraft systems: surveillance, ethics and privacy in civil applications[J]. *Computer Law & Security Review*, 2012, 28(2): 184-194.
- [18] 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.
- [19] International Civil Aviation Organization. Procedures for air navigation services - air traffic management (PANS-ATM, Doc 4444)[R]. 16th ed. Montréal: ICAO, 2016.
- [20] 全权, 李刚, 柏艺琴, 等. 低空无人机交通管理概览与建议[J]. *航空学报*, 2020, 41(1): 6-34.
- [21] 陈志杰. 未来空中交通管制系统发展面临的技术挑战[J]. *指挥信息系统与技术*, 2016, 7(6): 1-5.
- [22] 毕云龙, 谭丽萍, 涂梦昭, 等. 国土空间用途管制的历史演进、地方实践与体系构建[J]. *规划师*, 2025, 41: 78-85.
- [23] 王洲林, 陈蔚镇. 国土空间规划治理机制与模式探析: 基于“控制权”理论的视角[J]. *城市发展研究*, 2021, 28(6): 50-57.
- [24] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于促进通用航空业发展的指导意见[Z/OL]. (2016-05-13) [2026-05-29]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/17/content_5074120.htm.
- [25] 林坚, 吴宇翔, 吴佳雨, 等. 论空间规划体系的构建: 兼析空间规划、国土空间用途管制与自然资源监管的关系[J]. *城市规划*, 2018, 42(5): 9-17.
- [26] 汤新民, 顾俊伟, 刘冰, 等. 低空监视技术及其发展趋势综述[J]. *南京航空航天大学学报*, 2024, 56: 973-993.
- [27] 樊哲, 于丰源, 赵剑波. 低空飞行器导航系统测试技术发展现状与趋势[J]. *计测技术*, 2025, 45: 100-110.
- [28] 权在昕, 武丁杰, 高嘉静, 等. 城市低空中交通及无人机路径规划研究综述[J]. *航空计算技术*, 2024, 54(4): 121-126.
- [29] KOPARDEKAR P, RIOS J, PREVOT T, et al. Unmanned aircraft system traffic management (UTM) concept of operations [R/OL]. (2016-06-13) [2026-05-29]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20160003003>.
- [30] Sesar Joint Undertaking. U-space concept of operations (CONOPS)[R/OL]. (2019-09-30)[2026-05-29]. <https://www.sesar-ju.eu/sites/default/files/documents/u-space/CORUS%20ConOps%20vo12.pdf>.
- [31] 朱永文, 陈志杰, 蒲钊, 等. 空中交通智能化管理的科学与技术问题研究[J]. *中国工程科学*, 2023, 25: 174-184.
- [32] 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: 121-147.
- [33] DORLING K, HEINRICHS J, MESSIER G G, et al. Vehicle routing problems for drone delivery[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, 47(1): 70-85.
- [34] 陈晓, 毛焯焯. ADS-B技术在低空空域安全中应用的现状与展望[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(20): 61-67.
- [35] 蔡铭, 马川洪, 朱华斌, 等. 低空运行安全保障技术研究综述[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2025, 23: 1-26.
- [36] 石春晖, 柳泽, 尤潇, 等. 基于低空开发权的低空空域用途管制: 现状、学理与制度体系[J]. *城市规划学刊*, 2026(1): 65-72.
- [37] 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(5): 64-70.
- [38] 倪红福, 王晓星. 低空空域管理的经济学逻辑分析[J]. *东南学术*, 2025(4): 175-187.
- [39] 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: 1628-1639.
- [40] Public-Private Committee for Advanced Air Mobility. Concept of operations for advanced air mobility[R/OL]. (2023-12-06)[2026-05-29]. <https://www.aero.jaxa.jp/eng/research/star/concerto/>.
- [41] European Union Aviation Safety Agency. Study on the societal acceptance of urban air mobility in Europe[R/OL]. (2021-05-19) [2026-05-29]. <https://trid.trb.org/View/1869021>.
- [42] Transport Canada. Aeronautical information manual (TC AIM) [R/OL]. (2025-10-02) [2026-05-29]. <https://tc.canada.ca/en/aviation/publications/aeronautical-information-manual-aim>.
- [43] Civil Aviation Safety Authority. Civil aviation safety regulations 1998[S/OL]. (2024-11-29)[2026-05-29]. <https://www.legislation.gov.au/F2024L01553/asmade/2024-11-29>.
- [44] United Kingdom Civil Aviation Authority. The air navigation order 2016[S/OL]. (2016-07-13) [2026-05-29]. <https://www.legislation.gov.uk/uksi/2016/765/contents>.
- [45] 冯明翔, 李海军, 严飞, 等. 融合多源数据的城市低空飞行限制性区域识别和计算方法[J]. *城市规划学刊*, 2025(增刊2): 146-153.
- [46] 夏昊, 林粤伟, 颜军, 等. 通信感知一体化低空无人机关键技术研究综述[J]. *电讯技术*, 2025, 65(6): 838-847.

修回: 2026-05