

深圳高层建筑低空化改造潜力的空间分异与类型识别

彭泓博

北京建筑大学城市经济与管理学院, 中国·北京 100044

摘要: 低空经济由概念示范进入设施落地阶段, 深圳高层建筑存量为低空起降设施的“建筑融合”提供了重要载体, 但不同建筑的改造潜力差异明显。本文构建“物理—技术层、规划—网络层、社会—制度层”三层八维 18 项指标体系, 整合高德地图 API、OSM 建筑足迹、WorldPop 人口栅格、建筑数据库和 GIS 空间计算数据, 采用层级熵权法与 TOPSIS 评价深圳市 9 个行政区 325 栋 150 m 及以上高层建筑的低空化改造潜力, 并运用 Moran's I、LISA、Getis-Ord G_i^* 和 Jenks 自然断点法识别空间格局与建筑类型。结果显示: 深圳高层建筑低空改造潜力呈显著正空间自相关 (Moran's $I=0.522$, $p=0.001$), 热点高度集中于福田—南山走廊; 325 栋建筑可分为设施升级型、全场景枢纽型和末端嵌入型三类; 建筑功能类型与空间区位共同塑造潜力差异, 其中综合体和办公建筑显著优于住宅。研究为低空起降设施选址、存量建筑更新和分区分类改造提供了可复现的量化框架。

关键词: 低空经济; 高层建筑改造; 空间分异; 熵权-TOPSIS; 深圳

Spatial Differences and Type Identification of Low-Altitude Renovation Potential for High-Rise Buildings in Shenzhen

Peng Hongbo

School of Urban Economics and Management, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, China Beijing 100044

Abstract: The low-altitude economy has moved from conceptual demonstrations to the stage of facility implementation. The existing stock of high-rise buildings in Shenzhen provides an important carrier for the "building integration" of low-altitude takeoff and landing facilities, but the remodeling potential varies significantly across different buildings. This paper constructs an 18-indicator system across three layers and eight dimensions: the "physical-technical layer," the "planning-network layer," and the "social-institutional layer." It integrates Gaode Map API, OSM building footprints, WorldPop population grids, building databases, and GIS spatial calculation data, using the hierarchical entropy weight method and TOPSIS to evaluate the low-altitude transformation potential of 325 high-rise buildings (150 m and above) across Shenzhen's 9 districts. Moran's I, LISA, Getis-Ord G_i^* , and Jenks natural breaks method are used to identify spatial patterns and building types. The results show that the low-altitude transformation potential of Shenzhen's high-rises has significant positive spatial autocorrelation (Moran's $I=0.522$, $p=0.001$), with hotspots highly concentrated along the Futian-Nanshan corridor. The 325 buildings can be divided into three types: facility upgrade type, full-scenario hub type, and terminal embedded type. The differences in potential are shaped by both building function and spatial location, with complexes and office buildings performing significantly better than residential ones. This study provides a reproducible quantitative framework for site selection of low-altitude takeoff and landing facilities, updating existing buildings, and zoned classification transformations.

Keywords: Low-altitude economy; High-rise building transformation; Spatial differentiation; Entropy-TOPSIS; Shenzhen

0 引言

低空经济正在成为城市交通、物流和公共服务体系的新增长点。深圳作为低空经济先行城市, 已形成无人机研发制造、适航认证、城市空中交通运营等较完整产业链, 并提出加快建设低空起降点。与此同时, 深圳中心城区开发强度高, 新增大规模地面起降设施面临土地稀缺、成本高和邻避冲突等约束。相比之下, 既有高层建筑屋顶和附属空间具有嵌入低空功能的潜力, 是低空基础设施从集中

式新建转向存量空间复合利用的重要方向。

问题在于, 高层建筑并非同质载体。办公、综合体和住宅在屋顶面积、产权结构、消防条件、周边敏感设施和交通网络中的位置上存在显著差异; 同一城市内, 福田、南山等核心区与光明、宝安外围区也呈现不同的建成环境和政策覆盖条件。现有低空起降设施研究多重视空域、需求和宏观选址, 对单栋建筑级别的改造潜力识别不足; 城市更新研究虽常用熵权-TOPSIS 等综合评价方法, 却较

少把低空功能植入纳入评价对象。基于此，本文回答三个问题：如何构建可复现的建筑级低空改造潜力指标体系？深圳高层建筑潜力在空间上呈现何种分异？不同建筑应采取怎样的差异化改造路径？

1 文献综述与指标体系

低空基础设施规划研究已形成以 vertiport 设计规范、空域可达性、需求预测和多目标选址为核心的技术路线。FAA、EASA 等机构发布了垂直起降设施设计要求，相关研究也开始利用 BWM、GIS 空间分析和优化模型进行选址。然而，这些研究往往把建筑看作普通点位，较少纳入建筑功能、产权结构和既有设施条件。城市更新研究强调存量建筑再利用，EWM-TOPSIS 已广泛用于老旧片区更新优先级评价，但“低空功能植入”尚未成为常规维度。建筑安全研究则提示，eVTOL 或无人机起降涉及屋顶承载、消防、锂电池火灾和噪声外部性，需要把工程安全与社区接受度同时纳入评价。

本文据此建立三层八维 18 项指标体系（见表 1）。物理—技术层包括空间承载力和空域可达性，反映建筑高度、屋顶面积、既有航空设施、管制空域距离及周边建筑密度。规划—网络层包括节点网络价值和用地规划兼容性，反映低空航路、人口密度、轨道交通、用地类型和城市更新单元。社会—制度层包括安全韧性、绿色低碳适配、社区接受度和实施可行性，反映消防可达性、建筑年龄、噪声敏感设施、住宅用地比例、产权复杂度、社区组织密度、低空基础设施邻近度和建筑功能适配度。与原有单指标社区接受度或二值政策变量相比，本文增加 X15b 社区组织密度和 X16 低空基础设施邻近度，尝试提高社会治理和实施条件的可测性。

2 数据与方法

研究对象为深圳市 325 栋 150 m 及以上高层建筑，覆盖南山 82 栋、福田 63 栋、罗湖 41 栋、光明 38 栋、宝安 38 栋、龙华 27 栋、龙岗 24 栋、坪山 8 栋和盐田 4 栋。建筑功能包括住宅 195 栋、办公 91 栋、综合体 38 栋和酒店 1 栋，建筑高度范围为 150–599 m，均值约 201 m。

数据来源包括五类。第一，高德地图 API 用于获取地铁站距离、消防站距离、学校和医疗设施数量、社区组织数量以及通用航空或无人机相关 POI。第二，OSM 建筑足迹用于估算屋顶面积、周边 500 m 建筑密度和住宅用地比例。第三，WorldPop 2024 年 100 m 人口栅格用于提取人口密度。第四，建筑数据库和公开资料提供高度、竣工年份、既有航空设施、产权复杂度和功能适配度。第五，GIS 空间计算用于获得管制空域距离、低空航路距离、用地兼容度和城市更新单元覆盖情况。

方法上，本文先对正向和负向指标进行 Min–Max 标准化，再采用层级熵权法赋权：八个维度各占 12.5%，维度内部由信息熵决定指标权重。随后运用 TOPSIS 计算每栋建筑到正、负理想解的相对接近度，得到综合潜力分值。空间分析采用 k 近邻权重矩阵，全局 Moran's I 检验整体空间自相关，LISA 识别高一高、低—低及异常集聚，Getis–Ord Gi* 识别冷热点，Jenks 自然断点法将建筑划分为三类潜力模式。

3 结果

3.1 指标权重与综合得分

层级熵权结果显示，排名前五的全球权重为管制空域距离 X4（12.33%）、建筑功能得分 X17（12.01%）、产权复杂度 X15a（11.18%）、建筑年龄 X12（10.95%）和人口密度 X7（10.32%）。这说明深圳高层建筑低空改造潜力主要受空域准入、建筑功能、产权制度、设施年龄和需求密度共同驱动。X5 建筑密度、X8 地铁站距离和 X16 低空基础设施邻近度权重较低，反映这些指标在样本内区分度有限，尤其是低空专用设施 POI 仍较稀疏。

325 栋建筑 TOPSIS 得分介于 0.254–0.642 之间，均值 0.412，中位数 0.386，标准差 0.090，呈轻微右偏。行政区层面，福田均值最高（0.492），南山（0.431）和罗湖（0.419）次之，盐田最低（0.288），形成核心区高、外围区低的梯度。功能类型层面，综合体均值 0.545、办公 0.495，显著高于住宅 0.347，说明建筑类型本身对改造潜力具有强解释力。关键统计结果汇总见表 2。

表1 高层建筑低空改造潜力指标体系

层级	维度	主要指标	数据来源
物理—技术层	D1 空间承载力	高度、屋顶面积、既有航空设施	建筑数据库、OSM、公开资料
物理—技术层	D2 空域可达性	管制空域距离、周边建筑密度	GIS空间计算、OSM
规划—网络层	D3 节点网络价值	低空航路距离、人口密度、地铁站距离	GIS、WorldPop、高德API
规划—网络层	D4 用地规划兼容性	用地兼容度、城市更新单元	规划数据、GIS叠加
社会—制度层	D5–D8 实施条件	消防、建筑年龄、噪声敏感设施、产权、社区组织、低空设施邻近度、功能适配度	高德API、建筑数据库、GIS

3.2 空间分异格局

全局 Moran's I 为 0.522 ($p=0.001$, 999 次置换), 表明深圳高层建筑低空改造潜力并非随机分布, 而是存在显著正空间自相关。LISA 结果显示, 高一高集聚区 56 栋, 占 17.2%, 主要位于福田 CBD、车公庙、南山后海和科技园一带; 低一低集聚区 50 栋, 占 15.4%, 主要位于光明高层住宅群和宝安外围。高一低异常区 15 栋, 包括宝安沙井的万丰海岸城、龙岗坂田的星河双子塔等外围高潜力建筑; 低一高异常区 6 栋, 零散分布于核心区边缘。Getis-Ord G_i^* 进一步识别出 70 栋 95% 置信热点, 其中福田 34 栋、南山 31 栋, 两区合计占 92.9%; 冷点 48 栋, 主要在光明和宝安外围。空间分布与 LISA 集聚分别见图 1 和图 2。

3.3 类型识别

Jenks 自然断点法将建筑划分为三类(见表 3)。第一

类为设施升级型, 共 119 栋, 占 36.6%, 以办公和综合体为主体, 集中于福田、南山和罗湖。这类建筑通常已有较好的屋顶平台、航空设施或商务出行需求, 适合优先开展消防升级、eVTOL 适配和枢纽级起降设施改造。第二类为全场景枢纽型, 共 88 栋, 占 27.1%, 由部分住宅和办公建筑构成, 分布较广, 适合根据具体条件在商务出行、应急救援、低空物流之间进行弹性配置。第三类为末端嵌入型, 共 118 栋, 占 36.3%, 全部为住宅, 主要位于宝安、光明和南山外围, 受屋顶面积、产权分散和噪声敏感设施约束, 更适合轻量化、低扰动的社区末端配送或应急节点。由于 Jenks GVF 仅 0.115, 三类边界应理解为连续谱上的规划分段, 而非截然分离的统计群组。

4 讨论

深圳高层建筑低空改造潜力的空间格局由三类因素叠加形成。首先, 土地利用与建成环境分层明显。福田、南

表2 低空改造潜力评价关键统计结果

项目	结果
样本规模	325栋150 m及以上高层建筑
TOPSIS得分	0.254–0.642, 均值0.412, 中位数0.386
行政区差异	福田0.492最高, 盐田0.288最低
功能类型差异	综合体0.545, 办公0.495, 住宅0.347
空间自相关	Moran's I=0.522, $p=0.001$
LISA集聚	HH 56栋, LL 50栋, HL 15栋, LH 6栋
冷热点	热点70栋, 冷点48栋

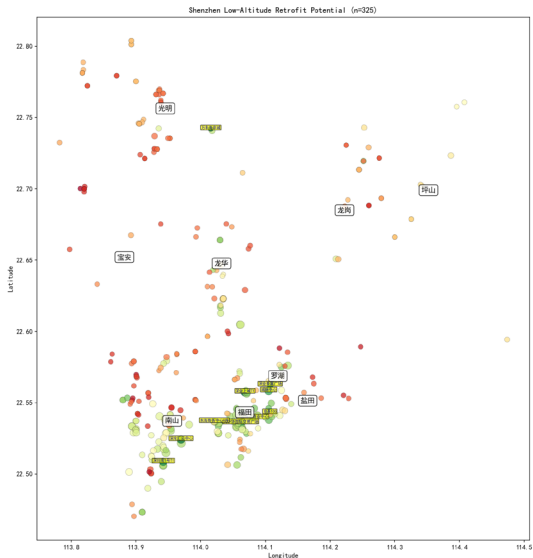


图1 深圳高层建筑低空改造潜力空间分布

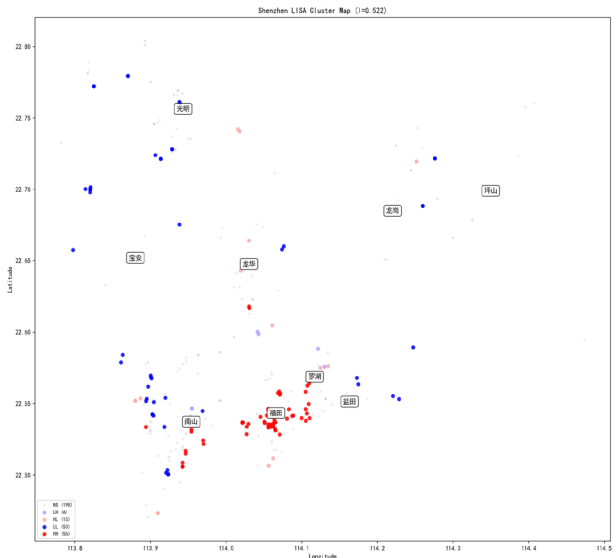


图2 深圳高层建筑低空改造潜力LISA集聚图

表3 三种低空改造潜力类型比较

类型	数量及占比	建筑主体	主要分布	改造方向
设施升级型	119栋, 36.6%	办公、综合体	福田、南山、罗湖	消防升级、eVTOL适配、枢纽级起降设施
全场景枢纽型	88栋, 27.1%	住宅、办公	南山、福田、龙华等	商务出行、应急救援、低空物流弹性配置
末端嵌入型	118栋, 36.3%	住宅	宝安、光明、南山外围	轻量化社区配送、应急节点

山核心区集中了更多办公和综合体建筑, 轨道交通、消防网络、城市更新单元和低空航路也更密集, 多指标共同抬升潜力得分。其次, 建筑类型效应并不完全服从行政区划。即使位于外围区, 具备大体量、复合功能和较好设施条件的建筑仍可能形成高一低异常点; 相反, 核心区住宅若产权复杂、噪声敏感、屋顶条件不足, 潜力也会下降。因此, 低空设施选址不宜只按行政区分配指标, 而应把建筑功能和工程条件作为前置筛查标准。第三, 新增社会治理指标具有方法意义, 但现阶段解释力有限。社区组织密度能够补充产权复杂度无法反映的治理通道, 低空基础设施邻近度则受当前 POI 稀疏影响较大, 未来随起降点建设推进需要重新采集和校准。

本文也存在局限。其一, 研究为横截面评价, 尚未反映低空政策、建筑更新和设施建设的动态变化。其二, 住宅样本占 60%, 且 150–200 m 办公建筑可能因公开数据库覆盖不足而被低估。其三, 屋顶可用面积主要由建筑足迹估算, 未完全纳入设备层、避障空间和结构承载条件。其四, Jenks 分类分离度有限, 规划应用中应优先采用排序和分层筛查, 而不是机械套用类别标签。

5 结论与建议

本文基于多源实测数据构建了深圳高层建筑低空化改造潜力评价框架, 并对 325 栋 150m 及以上建筑进行实证分析。研究得到四点结论: 第一, 深圳高层建筑低空改造潜力存在显著空间集聚, 福田—南山走廊是最主要热点区域。第二, 建筑可划分为设施升级型、全场景枢纽型和末端嵌入型三类, 但三类之间是连续过渡关系。第三, 建筑功能类型与空间区位共同决定潜力, 综合体和办公建筑整体优于住宅。第四, 高德地图 API、OSM、WorldPop 和 GIS 计算能够形成可复现的建筑级评价流程, 为同类城市提供方法参考。

政策上, 建议建立“建筑类型前置筛查 + 分区分级推进”的低空设施选址机制。福田、南山和前海等核心走廊可优先选择 10–15 栋设施升级型建筑开展工程试点, 重点评估消防、电池安全、屋顶承载和运营组织成本; 罗湖、龙华、龙岗等中间区可选取全场景枢纽型建筑开展多功能复合节点试验; 光明、宝安等外围住宅集中区应以轻量化末端物流和应急配送为主, 并把社区协商、噪声控制和利

益共享机制置于工程改造之前。后续研究应引入三维 GIS 或 CityGML 模型细化屋顶净空约束, 持续跟踪深圳起降点建设数据, 并使用 CRITIC、VIKOR 等方法开展稳健性检验。

参考文献:

- [1] Federal Aviation Administration. (2024). Engineering Brief No. 105A: Vertiport Design. Washington, DC: U.S. DOT.
- [2] EASA. (2022). Prototype Technical Design Specifications for Vertiports. Cologne: EASA.
- [3] Mercan, E., Akyurt, I., & Karakaya, G. (2025). Vertiport location selection criteria for urban air mobility. *Journal of Air Transport Management*, 124, 100225.
- [4] Lu, W., Zeng, X., Wei, Y., et al. (2025). Vertiport location selection and optimization for UAM in complex urban scenes. *Aerospace*, 12(8), 709.
- [5] Tang, Y., Yue, H., Ma, J., et al. (2025). City Fly: Modeling demand and vertiport location jointly. *Multimodal Transportation*, 4(2), 100160.
- [6] Gonzales, J., Krebs, A., & Naru, R. (2025). Fire risk assessment techniques for eVTOL operations at heliports. *Proceedings of the 81st VFS Forum*.
- [7] Qiao, S., Zhang, L., & Wang, M. (2024). Comprehensive evaluation of urban renewal based on entropy and TOPSIS. *Journal of Contemporary Urban Affairs*, 9(1), 112–128.
- [8] Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93–115.
- [9] Getis, A., & Ord, J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 24(3), 189–206.
- [10] 深圳市发展和改革委员会. (2025). 深圳市低空基础设施高质量建设方案 (2024–2026 年). 深圳.
- [11] 深圳市人民代表大会常务委员会. (2024). 深圳经济特区低空经济产业促进条例.
- [12] CTBUH. (2024). CTBUH Year in Review: Tall Trends of 2024. Chicago: CTBUH.