引文格式：赵涛涛,王志莉,沈长江,等. 襄阳市中心城区三维空间格局分异特征研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(12):37-40. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.12.008

襄阳市中心城区三维空间格局分异特征研究

赵涛涛[1]，王志莉[1]，沈长江[1]，李清娟[1]
（1. 襄阳市测绘研究院，湖北 襄阳 441003）

摘　要：城市空间扩展受多重因素驱动，传统二维研究难以反映高层建筑塑造的三维格局，故利用建筑体量表征三维空间成为研究热点。以襄阳市中心城区三维建筑数据为基础，选取三维景观指标，运用空间统计（Getis-Ord Gi*、Moran’s I）和结构方程模型（SEM），从多个角度来研究城市三维空间格局时空分异特征。研究表明：①三维空间具有显著的政策导向性分异特征，呈东北—西南轴向扩展；②老城区受保护政策限制呈现“低矮高密”特征，新城区则表现为“高疏”形态；③基于SEM的驱动机制分析表明政策、经济与自然因子对襄阳市三维空间格局的形成具有差异化的驱动效应。研究发现，政策导向、市场力量与自然因素对城市三维空间塑造存在交互增强作用。为此，亟需构建“政策刚性约束-市场弹性响应-自然本底调节”三元驱动模型，为国土空间立体开发提供决策支持。

关键词：三维空间格局；空间异质性；城市天际线；襄阳市中心城区
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）12-0037-04

Research on the Differentiation Characteristics of 3D Spatial Pattern in Xiangyang Central Urban Area

ZHAO Taotao[1], WANG Zhili[1], SHEN Changjiang[1], LI Qingjuan[1]
(1. Xiangyang Surveying and Mapping Research Institute, Xiangyang 441003, China)

Abstract: While urban spatial expansion is driven by multiple factors, traditional two-dimensional methodologies are insufficient to represent the complex 3D patterns resulting from high-rise building proliferation. Therefore, characterizing 3D space through building volumes has gained prominence as a research focus. Based on 3D building data from the central urban area of Xiangyang City, we employed 3D landscape metrics, spatial statistics (Getis-Ord Gi*, Moran’s I), and structural equation model (SEM) to investigate the spatio-temporal differentiation characteristics of urban 3D spatial patterns from multiple perspectives. The findings reveal that ①the 3D spatial structure exhibits significant policy-oriented differentiation, extending predominantly along a northeast-southwest axis. ②Protected by restrictive policies, the old urban core manifests a “low-rise but high-density” morphology, while newly developed areas demonstrate “high-rise and sparse” forms. ③SEM-based driving mechanism analysis indicates that policy, economic, and natural factors exert differentiated driving effects on the formation of Xiangyang’s 3D spatial pattern. The study further reveals interactive enhancement effects among policy guidance, market forces, and natural factors in shaping the urban 3D space. Therefore, there is an urgent need to construct a ternary driving model of “rigid policy constraints-flexible market responses-natural baseline mediation”, which can provide quantitative decision-making support for 3D development of territorial space.

Key words: 3D spatial pattern, spatial heterogeneity, urban skyline, Xiangyang central urban area

城市三维空间作为人地关系在垂直维度的物质载体，其形态特征直接影响城市微气候（通风效率、热岛效应）、空间绩效（土地集约度）和视觉景观品质[1]。根据联合国人居署《世界城市报告2022》，全球中等城市的三维扩张速率已达年均3.2%，但相关理论研究严重滞后于实践需求。在此背景下，城市天际线作为城市三维空间在视觉层面的总体轮廓表达，可实现对城市三维空间进行直观反映与有效表征[2-3]，其形态特征与形成机制成为城市地理学与城市规划领域的研究热点[4-15]。

本文以襄阳市中心城区为研究区域，以城市国土空间监测数据、三维建筑模型数据、新型基础测绘数据、卫星影像等为数据基础，基于空间分析和结构方程模型（SEM）方法来探讨襄阳市中心城区城市建筑空间格局的时空分异特征，以期为未来城市空间发展提供一定参考。

1　研究方法

1.1　三维异质性量化

三维重心以城市三维实体为研究对象，将城市建成区划分成合适尺寸的规则格网，用格网对城市三维模型进行分割，求每个格网的建筑总面积，进而计

第一作者简介：赵涛涛（1989—），硕士研究生，工程师，主要从事遥感影像与地理信息系统相关工作，E-mail：2643720213@qq.com。

算各格网的平均建筑高度；其次利用等值线追踪法生成建筑高度等值线；最后将建筑高度等值线立体化，将各等值线之间的部分看成是组成三维城市的层层“薄板”，利用组合体的重心求解原理求解三维城市的重心，并可进一步计算出转移方向和转移距离。

利用Getis-Ord Gi*分析建筑加权平均高度的空间异质性分布，公式如下：

$$G_i^* = \frac{\sum_j w_{ij}x_j - \bar{X}\sum_j w_{ij}}{S\sqrt{\frac{n\sum_j w_{ij}^2 - (\sum_j w_{ij})^2}{n-1}}} \tag{1}$$

式中，i 为某个空间单元 i；w_{ij} 为权重矩阵，表示 i 和 j 是否为邻居；x_j 为单元 j 的观测值；$\sum_j w_{ij}x_j$ 为其值和领域单元值的总和；$\bar{X}$ 为全局均值；S 为全局标准差；n 为总单元数；$G_i^* > 0$，热点（高值聚集）值越大，显著性越强；$G_i^* < 0$，冷点（低值聚集）值越小，显著性越强。

空间自相关（Moran’s I）用于量化2个不同变量间的空间依赖关系。利用Moran’s I分析建筑加权平均高度与土地出让地价的关系，揭示建筑高度（垂直开发强度）与地价（经济驱动力）的空间联动效应，公式如下：

$$I = \frac{N}{\sum_{ij} w_{ij}} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij}(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \tag{2}$$

式中，i，j 为多边形编号；w_{ij} 为 i，j 之间的空间连接矩阵；$\bar{X}$ 为研究区域内的属性均值。如果 $I>0$，则说明空间正相关；若 $I<0$，说明空间负相关；若 $I=0$，说明空间中不相关。

1.2 城市天际线评价

选取轮廓节奏、景观层次、建筑起伏度和建筑首位度等4个指标对天际线进行定量评价。

1.2.1 轮廓节奏度

轮廓节奏度是描述整体轮廓节奏感的重要特征，指数越大表示轮廓起伏变化较大，富有韵律。相邻建筑物高度的轮廓或建筑物和山体的高度不超过20 m称为平缓轮廓，而超过20 m的轮廓称为波动轮廓，轮廓节奏的强度可用轮廓波段与整个天际线轮廓的比例衡量，公式如下：

$$S = \frac{L_{波动}}{L_{总}} \times 100\% \tag{3}$$

式中，S 为轮廓节奏感；$L_{波动}$ 为轮廓波动段的总长度；$L_{总}$ 为整体天际线轮廓段的总长度。

1.2.2 景观层次度

景观层次度丰富的城市天际线既有高低错落的建筑群轮廓，还有各层次建筑组合之间的错动关系。不同距离之间的错动和叠加会增加景观视觉的丰富度和观赏性。景观层次度可用前景建筑立面面积与整个大立面面积的比例衡量，公式如下：

$$L = 1 - \frac{A_{前景}}{A_{总}} \times 100\% \tag{4}$$

式中，L 为景观层次度；$A_{前景}$ 为前景建筑立面面积；$A_{总}$ 为整个大立面的建筑面积。

1.2.3 建筑起伏度

建筑起伏指建筑群体的高低变化对人们视觉感受，不同大小和风格的建筑群将对天际线产生不同的影响。按角度60°为一个单元，计算所有的单元内最高建筑和最矮建筑差值的平均值，公式如下：

$$R = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6}(H_i - h_i) \tag{5}$$

式中，R 为建筑起伏度；H_i 为第 i 个单元内的最高建筑高度；h_i 为第 i 个单元内的最低建筑高度。

1.2.4 首位度

首位度反映的是城市中的最高建筑在视觉范围中所占的凸显程度。一般情况下，首位度越高，则标志性建筑在视觉中的显著度就越高，景观的显著性就越大。首位度用最高建筑高度与其余平均建筑高度的高差值占最高建筑高度的比重来决定的，该值越大，说明最高建筑相对于区域内其他建筑的平均高度越突出、越具有首位优势。公式如下：

$$P = \frac{H_{max} - H_{avg}}{H_{max}} \times 100\% \tag{6}$$

式中，P 为首位度；H_{max} 为该视点视线范围内的最高建筑高度；H_{avg} 为该视点视线范围内的平均建筑高度。

1.3 结构方程模型（SEM）

结构方程模型（SEM）是一种多变量统计分析技术，用于分析变量之间的复杂关系，可分析单项指标对总体的作用和单项指标间的相互关系，同时能够解释模型中变量尽可能多的变异。本研究建立包含3个外生潜变量（政策、经济、自然）和3个内生潜变量（高度、密度、形态）的SEM模型来分析城市三维空间分异形成机制，政策通过规划强度、土地政策、容积率及限高直接塑造高度与密度，并通过城市设计导则间接影响形态；经济通过GDP增速、地租梯度、资本集聚优先作用于高度，随后传导至密度与形态；自然（地形起伏、水系、生态敏感区）首先约束形态，再间接对高度和密度产生限制。同时，3个内生变量

之间存在“高度→密度→形态”的层级链式效应，以及“形态→高度”的反向反馈，以体现三维空间的自组织特征。在 Amos 24.0 中绘制包含 3 个外生潜变量（ξ_1 政策、ξ_2 经济、ξ_3 自然）和3个内生潜变量（η_1 高度、η_2 密度、η_3 形态）的完整路径图（图1）。

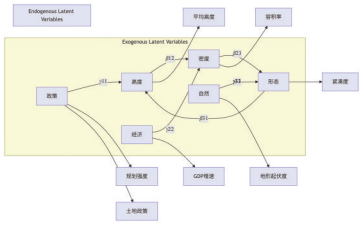


图1　SEM模型图示

2　结果与分析

2.1　城市三维空间格局统计分析

将襄阳市中心城区划分为250 m×250 m的网格，通过叠加中心城区建筑物数据，计算每个网格内建筑物的体积，进而求得建筑加权平均高度，如图4所示。襄阳市中心城区三维重心位于汉江与小清河交汇处，距离樊城区、襄州、鱼梁洲3个行政区界线交点48 m，方位在交点的东南约40°，襄阳市中心城区的三维重心高度为7.74 m。从垂直梯度来看，樊城区最高建筑（238 m）与襄城区古城限高区（24 m）形成7.9倍落差。从平面扩展来看，近3 a东北向扩展速率达56 m.a^{-1}。

通过 Getis-Ord Gi* 热点分析，识别出高层建筑集聚的显著热点区（p <0.01）主要分布在樊城区长虹路商圈（Gi* =3.82）与高新区邓城大道沿线（Gi* =2.97），而襄城古城墙周边形成冷点区（Gi* =−4.15）。襄阳市中心城区建筑物高度较高区域呈东北—西南方向分布，东西轴向扩展强度为南北向的2.6倍，与襄阳市“西进东拓”，大力发展东津新区和樊西新区有关。

Moran’s I指数显示建筑高度存在显著空间自相关（I =0.417，Z =8.26），表明三维空间分异具有明显的政策导向性：历史保护区（襄城区）容积率与高度呈负相关（r =−0.63），符合《襄阳历史文化名城保护规划》关于建筑限高的规定；商务核心区（樊城区）建筑体积与地价呈现对数关系（R^2 =0.81），反映了市场驱动机制对建筑物体量的影响；产业拓展区（东津新区）工业用地平均高度仅14.3 m，但近3 a空间扩展强度指数达1.87 km·a^{-1}，体现产城融合特征。

2.2　城市天际线分析

根据襄阳市城建实际情况，从视点布局的科学性、合理性、实际性出发，选择了具有代表性的购物广场、交通路口、区位地标性建筑的7个视点。利用ArcScene对城市建筑物高度进行拉伸，从视点观察建筑高度轮廓得到城市天际线，生成天际线图（见图2）。通过计算观察点到天际线每个折点的距离，将ArcGIS软件生成的天际线做拉直处理（见图3）。

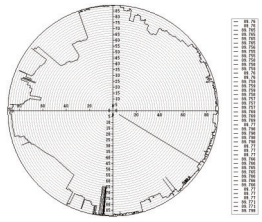


图2　城市天际线图

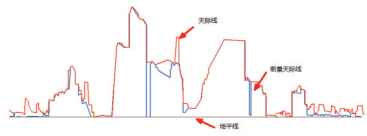


图3　城市天际线拉直后效果图

统计各视点城市天际线各项指标，见表1。从轮廓节奏感来看，各视点轮廓节奏感差异不大，但沃尔玛商圈因建筑高度变化明显而富有韵律感，商业区通常通过市场化开发实现建筑多样性，而其他区域可能受功能分区限制，导致节奏感趋同。从景观层次度来看，汉江五桥附近前后建筑高度差异较大，形成了丰富的景观层次；北街商圈附近受建筑限高影响，景观层次度较低，保护与发展的政策目标差异直接影响了建筑层次感。从建筑起伏度来看，沃尔玛商圈每60°的视线范围内高低变化差异较大，整体来看建筑起伏明显，与地块开发时整体协调设计有关；汉江五桥每60°的视线范围内高低变化较小，建筑高度一致性较好。从首位度来看，汉江五桥首位度最高，为90.26%，与东津新区超高层建筑集中布局以塑造城市形象有关；北街商圈首位度最低，与建筑限高有一定关系。

表1　城市天际线各项指标统计表

区域	轮廓节奏感/%	景观层次度/%	建筑起伏度/m	首位度/%
卧龙大道与邓城大道交叉口	46.15	13.12	62.06	71.62
沃尔玛商圈	47.83	8.29	91.80	59.09
浩然广场	44.44	17.04	22.88	71.01
悦活荟商圈	45.45	7.40	42.76	73.38
汉江五桥	42.86	38.15	21.03	90.26
鱼梁洲快乐水岸	45.45	34.57	44.83	83.73
北街商圈	44.44	1.71	76.76	42.25

2.3　城市三维空间演变的驱动因素分析

基于6个视点的天际线指标，构建结构方程模型（SEM）揭示驱动因素。政策因子通过限高规定抑制首位度（北街商圈首位度仅为42.25%）。经济因子对建筑起伏度影响最大，商圈周边高度差普遍超过80 m（樊城区沃尔玛商圈代表了襄阳市经济活力最活跃区域，建筑起伏度为91.8%）。自然因子在汉江沿岸体现为天际线与水系的协同度（汉江五桥、鱼梁洲景观层次度高达38.15%、34.57%）。

通过SEM模型解析襄阳市三维空间分异的形成机

制（表2），模型构建过程严格遵循理论驱动与数据验证相结合的研究路径。首先将理论维度操作化为可量化指标，其中“政策刚性约束”体现为历史保护区建筑限高（β=0.67，p<0.001）与容积率管制等制度性变量的直接效应，解释了高度变异47.3%的方差（R^2=0.473）。“市场弹性响应”通过地价—开发强度弹性系数（β=0.58，p=0.003）表征经济要素对建筑密度的主导性影响。而“自然本底调节”则表现为汉江两岸通过地形适应度与视觉廊道约束产生的间接形态调控作用（β=0.33，p=0.021）。经验证“政策刚性约束—市场弹性响应—自然本底调节”三元驱动要素通过非线性交互产生协同效应：政策变量对市场行为存在显著调节作用（交叉效应β=0.29），自然条件则通过生态阈值对开发强度形成刚性约束（γ=−0.41）。这一量化分析验证了三元驱动模型的理论假设。

表2 基于SEM模型的三维空间形成机制分析结果

路径关系	系数	p值	效应分解
政策→高度	0.67	<0.001	直接效应
经济→密度	0.58	0.003	直接效应
自然→形态	0.33	0.021	间接效应

3 结 语

本研究揭示了襄阳市中心城区三维空间格局的时空分异特征：建筑高度异质性显著，历史区与商务区极差达7.9倍，整体呈东北–西南轴向扩展。老城区受保护政策约束呈“低矮高密”格局，新城区则表现为“高疏”形态。研究构建了“政策刚性约束—市场弹性响应—自然本质调节”三元驱动模型，系统阐述了政策、经济与自然因子对空间形态的差异化影响机制，为城市三维空间的精细化治理与可持续发展提供了系统化的方案与实践范式。

参考文献

[1] 乔伟峰,刘彦随,王亚华,等. 2000年以来南京城市三维空间扩展特征[J]. 地理研究,2015,34(4):666-676

[2] 史宜,曹俊,朱骁. 基于评价模型的城市天际线景观美学解析[J]. 现代城市研究,2018,32(10):67-74

[3] 徐苇葭,曾坚. 城市天际线定量评价方法探究:以天津海河沿岸天际线为例[J]. 南方建筑,2018,37(6):110-116

[4] 王越,何伟,李华,等. 融合空-地LiDAR和倾斜摄影的高层建筑物三维建模[J]. 地理空间信息,2023,21(6):49-52

[5] 张亚红. 倾斜影像和机载LiDAR融合的城市三维建模技术[J]. 地理空间信息,2023,21(2):89-92

[6] 潘中华,金晶,陈胜林,等. 基于机载LiDAR点云数据的建筑物自动提取[J]. 地理空间信息,2022,20(5):57-59

[7] 江宇,韦兴荣,王国飞,等. 机载和车载LiDAR融合构建高精三维城市模型研究[J]. 地理空间信息,2021,19(12):81-83

[8] 李有鹏,刘国栋. 基于街景和POI数据的街道空间品质评价[J]. 地理空间信息,2024,22(2):64-67

[9] 郜鲁豪,徐旌,郑琳,等. GIS在城市天际线及建筑高度控制中的应用研究[J]. 云南地理环境研究,2024,36(5):8-15

[10] 金勇,李凡,刘义鹏. 城市主干道天际线设计与管控方法探究:以合肥高新区为例[J]. 建筑与文化,2025,21(5):67-68

[11] 王杨玥. 基于分形理论的上海黄浦江两岸城市天际线分析[D]. 长沙:中南林业科技大学,2023

[12] 关瑞敏. 郑州市三维景观空间格局变化及其碳效应[D]. 开封:河南大学,2023

[13] 张长城. 济南城市三维景观格局时空分异特征研究[D]. 济南:山东师范大学,2019

[14] 王翠平,王豪伟,郑渊茂. 城市建筑群三维空间布局评价与优化:以厦门岛滨海地带为例[J]. 生态学报,2020,40(22):8 119-8 129

[15] 杨俊,国安东,席建超,等. 城市三维景观格局时空分异特征研究:以大连市中山区为例[J]. 地理学报,2017,72(4):646-656

（上接第16页）

[10] Eismann T M, Hardie C R. Application of the Stochastic Mixing Model to Hyperspectral Resolution Enhancement[J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 2004,42(9):1 924-1 933

[11] Qi W, Nicolas D, Jean-yves T. Fast Fusion of Multi-band Images Based on Solving a Sylvester Equation[J]. IEEE Transactions on Image Processing:A Publication of the IEEE Signal Processing Society,2015,24(11):4 109-4 121

[12] Rz W, Pgjc E M S. Unmixing-based Landsat TM and Meris Fr Data Fusion[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing letters,2008,5(3):453-457

[13] Ren K, Sun W, Meng X, et al.Fusing China GF-5 Hyperspectral Data with GF-1, GF-2 and Sentinel-2A Multispectral Data:Which Methods Should Be Used?[J]. Remote Sensing,2020,12(5):882-886

[14] 张立福,彭明媛,孙雪剑,等. 遥感数据融合研究进展与文献定量分析(1992—2018)[J]. 遥感学报, 2019, 23(4):603-619

[15] 徐聪,于丽君,柳泽,等. 基于特色村镇的多源影像最优融合分类方法探讨[J]. 地理空间信息,2024,22(3):66-71

[16] Puhong D, Jibao L, Pedram G, et al.Component Decomposition-based Hyperspectral Resolution Enhancement for Mineral Mapping[J]. Remote Sensing , 2020 , 12(18):2 903-2 913