



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目： 城市三维空间形态演进特征与驱动因素分析--以武汉市主城区为例
作者： 李博闻，彭明军，谭仁春
DOI： 10.13203/j.whugis20220800
收稿日期： 2023-06-04
网络首发日期： 2023-07-10
引用格式： 李博闻，彭明军，谭仁春. 城市三维空间形态演进特征与驱动因素分析--以武汉市主城区为例[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20220800>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20220800

引用格式:

李博闻, 彭明军, 谭仁春. 城市三维空间形态演进特征与驱动因素分析--以武汉市主城区为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220800 (Li Bowen, Peng Mingjun, Tan Renchun. Analysis of the evolution characteristics and driving factors of the three-dimensional morphology of the city space: A case study of Wuhan Main Urban Area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220800)

城市三维空间形态演进特征与驱动因素分析--以武汉市主城区为例

李博闻^{1,2} 彭明军^{1,2} 谭仁春^{1,2}

1. 武汉市测绘研究院, 湖北 武汉, 430010

2. 自然资源部实景三维建设与城市精细化治理工程技术创新中心, 湖北 武汉, 430010

摘要: 分析城市三维空间扩张演进特征, 掌握其背后驱动影响因素, 有助于从根源上解决大型城市高速扩张带来的城市问题。现有三维空间下的城市扩张类研究, 存在没有将水平与垂直尺度扩张特征剥离的问题。为弥补此不足, 本研究将在使用传统指标, 解构武汉市主城区三维空间形态演进特征的基础上, 改进 VHG 指数, 判定分析城市扩张主导类型与幅度, 并根据相应结果, 使用随机森林模型, 分析识别三维空间扩张主要驱动因素。所得结论包括: 2000 年至 2018 年间, (1) 城市三维空间扩张特征明显, 大量居住类型建筑的兴建是该现状的直接诱因; (2) 改进后的 VHG 指数显示, 城市垂直尺度扩张幅度远大于水平尺度扩张幅度; (3) 地铁站与火车站作为城市内与城市对外交通枢纽, 对城市垂直尺度扩张有较强的驱动作用。

关键字: 城市三维空间 形态演进特征 驱动影响因素分析 VHG 指数 随机森林模型

Analysis of the evolution characteristics and driving factors of the three-dimensional morphology of the city space: A case study of Wuhan Main Urban Area

Li Bowen^{1,2}, Peng Mingjun^{1,2}, Tan Renchun^{1,2}

1. Wuhan Geomatics Institute, Wuhan 430010, China

2. Technology Innovation Center for Real Scene 3D Construction and Refined Urban Governance of Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Wuhan 430010, China

Abstract: Objectives: To analyze the evolution of Wuhan's three-dimensional urban space and identify its driving factors to help solve urban problems caused by rapid expansion. **Methods:** The traditional architectural landscape indicators were used to analyze the general three-dimensional space structure of Wuhan from 2000 to 2018. An improved VHG ratio was then introduced to more accurately detect whether horizontal or vertical scale expansion occurred during the corresponding year interval. Finally, we employed a random forest model to construct a nonlinear model to identify the driving factors that have led to the current status of the city's three-dimensional space. **Results:** From 2000 to 2018, traditional architecture landscape indicators show that the city of Wuhan underwent an expansion in the three-dimensional city space features, and the construction of a large number of residential buildings is the direct cause of this situation. The improved VHG ratio indicates that the main urban area of Wuhan underwent significant vertical space expansion. In addition, our study reveals that subway and railway stations have played a significant role in driving the vertical scale expansion of the city's three-dimensional space. **Conclusions:** Our research

项目资助: 广东省科技创新战略专项资金(粤港澳联合实验室)项目 项目号: 2020B1212030009.

第一作者: 李博闻, 博士, 工程师, 在站博士后, 从事城市计算与城市空间分析研究。libowenhome@sina.com

通讯作者: 彭明军, 博士, 教授, 主要研究方向为智慧城市和遥感应用。pmj@zrzygh.wuhan.gov.cn

successfully identified the evolution characteristics of the three-dimensional morphology of urban space in Wuhan and the driving factors behind it. The methods we used in this study, including traditional architectural landscape indicators, improved VHG ratio, and random forest model, can be applied to other cities to provide insights into their three-dimensional urban space evolution.

Key words: Three-dimensional morphology of the city space, Morphological evolution characteristics, Driving factor analysis, VHG ratio, Random forest model

1. 引言

伴随着城市化进程的快速推进,截至2020年底,我国城区常住人口超过1000万的超大城市已达到7个^[1]。城市规模的高速扩张在保证经济社会快速发展的同时,也造成了一系列亟待解决的城市问题,例如:交通拥堵,环境污染等^[2,3]。掌握城市高速扩张过程中的状态信息,分析背后的扩张驱动影响因素,进而形成对未来趋势的预判,是解决相关城市问题的重要手段。

围绕建筑物高度数据提取、扩张驱动影响因素分析、未来扩张状态预测三个方向,现有三维尺度下的城市扩张类研究主要分为三大类:(1)建筑物信息提取研究为三维尺度下城市扩张研究的基础,此类研究多基于提取信息,分析研究区域扩张状态,高分辨率光学遥感影像^[4-6]、激光雷达(Light Detection and Ranging, LIDAR)^[7]、合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)^[8]、夜光遥感影像^[9]为常用数据源,近年来在影像数据分类方法不断优化的背景下^[10],同类研究^[2,11]逐渐开始基于中分辨率遥感影像,进行长时序性下城市三维空间变迁分析;(2)驱动影响因素识别研究中,多将可以反映三维空间变迁程度的指标量(例如,高度^[12]、容积率^[13]指标)作为因变量,并在一定时间间隔下分析社会经济驱动因子^[14,15]、自然要素驱动因子^[16]等要素与因变量之间的相互关系;(3)三维尺度下的城市扩张预测研究,主要依赖于对元胞自动机(Cellular Automaton, CA)算法进行改进^[17,18]展开,例如,相关研究将随机森林算法^[19]、神经网络算法^[20]、“IF-THEN”判定规则^[21]与CA算法进行融合,实现从城市水平尺度扩张结果的预测,延展至对城市三维空间扩张结果的预测。

总体来看,三维空间下的城市扩张类研究,来源于水平尺度下的同类研究,在沿用

水平尺度相关研究方法时,多数研究存在没有将水平与垂直维度扩张特征剥离的问题。而城市的水平或垂直尺度扩张结果,实际是不同类型城市开发方式的直观表征,其背后驱动因素存在一定差别。在不区分扩张类型的基础上,直接将随着年份推移一定存在小幅上升的指标量(例如,建筑物平均高度等^[22,23]),视作城市垂直维度出现扩张的相关指标量,并进行驱动因素分析^[11],存在一定缺陷。首先界定主导扩张类型、进而选择适合的候选驱动影响因素、最后分析识别主要驱动影响因子,明显更为合理。

为改进以上不足,建立相应研究范式,实现对大型城市三维空间扩张趋势、原因的更好解构,本研究将在使用传统建筑景观与空间形态指标,解析武汉市主城区三维空间结构、形态演进特征后,完成对垂直水平增长比指数(Vertical-to-Horizontal Growth ratio, VHG)的改进,定义水平与垂直尺度扩张边界值,判定分析城市扩张主导类型与幅度,并以此为基础,利用随机森林模型,对武汉市主城区三维空间扩张的驱动影响要素进行识别分析。

后文的实证研究部分,将围绕形态演进特征解译与驱动要素分析,渐进式的解决三个研究问题:即在选定时间范围内,(1)城市三维空间形态如何演进,(2)水平与垂直尺度扩张趋势怎样变化,(3)三维空间扩张的主要驱动要素是什么?

2. 研究区域与数据数

2.1 研究区域

案例研究城市武汉为我国中部地区的中心城市,是全国重要的工业基地、科教基地和综合交通枢纽。全国第七次人口普查显示,武汉市常住人口数量超过1000万。本文选定包括:江岸、江汉、硚口、汉阳、武

昌、青山、洪山区在内的七个行政区组成的主城区为研究区域(如图 1 所示)。其中, 由于建筑物普查数据收集范围限制, 洪山区除去了隶属于东湖新技术开发区实际管辖的相应区域。

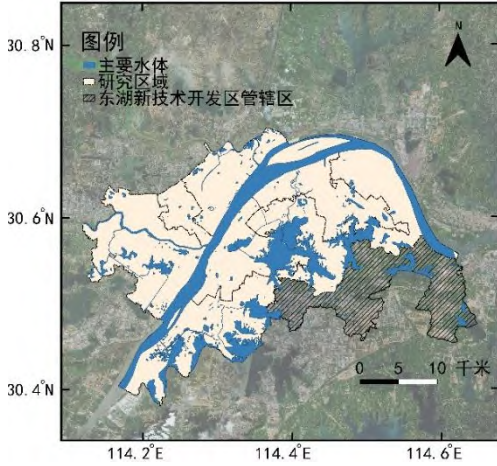


图 1 研究区域(地图底图数据来自于天地图开放地图服务, 武汉市测绘研究院提供矢量要素数据)
Fig. 1 Research area (The base map data is from the open map service of Tianditu, while the vector feature data is provided by the Wuhan Geomatics Institute)

2.2 数据

本文的研究数据主要分为两大类：(1) 建筑物普查数据；(2) 驱动影响因素分析数据。其中：

(1) 建筑物普查数据

该数据来源于 2019 年底完成的武汉市房屋建筑物普查调查工程, 数据成果以矢量格式进行存储, 其统计了研究区域内建筑物分布、建筑物层数等信息。本次建筑物普查将武汉市内建筑物总体分为八类, 包括: 居

住类、工业类、公共服务类等(详见表 1)。基于建筑物普查数据成果, 本文将按照建筑物一层 3m 推演建筑物高度^[16], 同时, 基于相关文献经验^[22], 也将使用建筑物普查数据中的建筑年代信息, 对主城区内建筑物变迁趋势、状态进行分析。

(2) 扩张驱动影响因素分析数据

本研究按照社会经济、自然条件、邻域状态三大类驱动影响因素, 对潜在城市扩张驱动数据进行了收集:

1) 社会经济驱动影响因素: 考量到与城市中心、对内对外交通枢纽、水系等要素的距离, 对城市扩张的制约作用^[24,25], 以及“学区”问题对城市垂直尺度扩张的潜在影响, 本研究自互联网开放 API 收集了 5 种相关 POI 数据与 1 种矢量线状地物数据(详见表 1), 其中, 主要商业中心 POI 位置的确定依照了已有文献成果^[26], 而考虑到地铁站点存在规划建设周期长、所形成的时空影响广的特点, 地铁站点选取为截至 2022 年 7 月 30 已建成通车的所有站点, 重点中小学分布数据主要基于互联网数据并进行人工筛选获得。

2) 自然条件驱动影响因素: 基于数据的可获取性, 最终选定高程、坡度以及与主要水系距离三类自然条件驱动影响因素, 分析其对城市三维空间扩张的驱动、制约影响。高程与坡度数据均通过 80m 分辨率 DEM 数据计算、转换而得, DEM 原始数据收集自中科院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>)。

表 1 研究数据
Tab.1 Research data

数据类型	数据来源	数据详情
建筑物普查数据	武汉市房屋建筑物普查调查工程	数据包含内容: 建筑物分布、建筑物层数、基底面积、类型(包含: 公共服务类、商业服务类、工业类、居住类、城市交通类、公用设施类、物流仓储类与其他类型)、建筑年代。
	高德地图开放 API	该类数据包含 5 类 POI 数据: 1.主要商业中心分布、2.行政中心(省市区政府所在地)分布、3.火车站分布、4.地铁站分布、5.重点中小学分布。
扩张驱动影响因素分析数据	OSM 开放 API	该类数据包含 1 类矢量线状数据: 城市道路分布(包含: 城市快速路、主干路、次干路、支路分布)。
	中科院资源环境科学与数据中心	原始数据为: 80m 分辨率 DEM 标准产品。
	第三次全国国土调查	该类数据包含 1 类矢量面状数据: 研究区域内主要水系分布。
邻域状态驱动影响因素数据	第三次全国国土调查	原始数据为三调标准矢量数据产品, 用于计算城市建成区的用地字段包括: 科教文卫用地, 公用设施用地, 商业服务业设施用地, 城镇住宅用地, 工业用地, 机关团体新闻出版用地, 公园与绿地。

3) 邻域状态驱动影响因素: 某一区域周边已完成城市化区域发展状态、面积, 对于该区域是否发生城市扩张有较大影响^[27,28]。本研究中将通过量化抽样区域内城市建成区面积占比^[29,30], 对邻域要素进行量化。须注意的是, 传统建成区定义中, 包含一些难以对城市三维空间扩张形成影响的用地类型, 例如管道运输用地类型等。因此本研究将在对用地字段进行筛选后(结果详见表1), 基于第三次全国国土调查成果(后文简称三调数据), 推算获得城市建成区占比。

2.3 方法

2.3.1 形态演进特征分析

形态演进特征分析旨在通过使用常用建筑景观指标、空间形态指标, 掌握研究区域三维空间的基本变化特征。在定量计算形态演进特征前, 将首先使用 Cesium.js 函数库, 渲染展示武汉市三维空间整体变化情况。为使结果更为直观, 同时减少细碎显示特征, 将按照 100m 网格内建筑物平均高度, 对 2000 年至 2018 年间, 三维空间时变趋势进行浏览器前端渲染。

形态演进特征分析将通过使用: 平均高度 H_{AH} , 平均体积 V_{AV} , 容积率 F_{FAR} 、建筑物平整度指数 (Building Evenness Index, BEI) R_{BEI} 与建筑物拥挤度指数 (Spatial Congestion Degree, SCD) R_{SCD} , 定量计算并展示武汉市主城区自 2000 年至 2018 年间的三维空间变化特征。其中, 前三种指数常用于描述建筑物基础形态, BEI 指数用于描述研

究区域建筑物平整程度, 该值越大, 研究区域内建筑物愈发参差不齐, SCD 指数用于描述研究区域内建筑物拥挤程度, 该值越大, 研究区域内建筑物越拥挤, 五类指数计算式如式(1)至式(5)所示。同时为推断形态演进特征背后的直接诱因, 也将使用五类指标计算不同类型建筑物的变化特征。

式(1)至式(5)中, A 、 n 、 H_i 、 V_i 分别表示目标区域总面积、建筑物总数量, 以及建筑物 i 的高度与体积, 式(3)中 BA_i 与 F_i 分别表示建筑物 i 的基底面积与建筑物层数, 式(4)中 AV 表示建筑物的平均体积。

2.3.2 水平垂直尺度扩张趋势分析

使用以上建筑景观指标, 可对研究区域内三维空间时变特征进行基础性解译。而对于大型城市而言, 其水平与垂直尺度扩张直观表征上存在区别, 2 种扩张模式背后蕴含的驱动因素也有一定差异。因此, 直接将传统指数(例如, 高度、体积、容积率)出现变化视为垂直尺度产生变化, 并根据计算结果进行驱动因素分析存在局限性。在判断城市扩张主导类型后, 进而进行驱动因素分析明显更为合理。

因此, 本研究将修改并使用 VHG 指数^[14], 即修改 VHG 指数垂直水平扩张比率的计算方式, 从而更为清晰地界定城市区域发生何种类型扩张(水平尺度扩张或垂直尺度扩张), 以达到更好捕捉相应扩张类型背后主要驱动影响因素的研究目标。VHG 指数 R_{VHG} 的计算方式如式(6)所示。

$$H_{AH} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n} \quad (1)$$

$$V_{AV} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad (2)$$

$$F_{FAR} = \frac{\sum_{i=1}^n (BA_i * F_i)}{A} \quad (3)$$

$$R_{BEI} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - AV)^2}{A}} \quad (4)$$

$$R_{SCD} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{\max\{H_i\} * A} \quad (5)$$

$$R_{VHG} = \frac{V_{sum_{t+1}}^{H \geq bm}}{V_{sum_{t+1}}^{H < bm}} - \frac{V_{sum_t}^{H \geq bm}}{V_{sum_t}^{H < bm}} \quad (6)$$

式(6)中, $V_{sum_{t+1}}^{H \geq bm}$ 代表 $t+1$ 时间节点(计算终止时间节点)下, 选定区域内高于高度基准 bm 的建筑物的总体积值。该式其他组成部分含义可依此类推。本研究中, 取高度基准为 27 米, 该值根据相应国标^[31]中中层建筑上限标准 9 层换算而得。即若新增 27 米及以下建筑, 代表该建筑所处地块, 城市向水平尺度扩张, 新增 27 米以上建筑, 代表对应地块向垂直尺度扩张。

由 VHG 指数的构造形式可得, 该指数实际由 $t+1$ 时间节点下, 某一区域内垂直与水平尺度扩张比率, 与 t 时间节点下, 该区域内垂直与水平尺度扩张比率相减而得。 R_{VHG} 指数值为正代表: $t+1$ 至 t 时间范围内, 城市向垂直尺度扩张趋势更为明显, 且值越大, 扩张幅度越大, 垂直尺度扩张的主导地位越强。该指数为负代表: 城市向水平尺度扩张趋势更为明显, 且值越小, 扩张幅度越大, 水平尺度扩张的主导地位越强。该值为 0, 则水平与垂直尺度扩张幅度相同。

VHG 指数原定义中, 垂直水平扩张比率主要通过高于与低于一定高度基准的建筑物总数量计算获得。该计算方式存在一些缺陷, 例如, 其忽视了新建超高层建筑所形成的明显的高度城市化特征。这类建筑物虽然数量较少, 但高度、体量远超其他类型建筑, 仅通过数量信息“量化”这部分建筑, 并汇入式(6)计算垂直水平扩张比率, 存在低估城市垂直尺度扩张特征的风险。通过建筑物总体积量化建筑物, 并分别计算式(6)中 $t+1$ 与 t 时间节点下垂直水平扩张比率, 可以更好地捕捉城市三维空间维度扩张特征。

2.3.3 三维空间扩张驱动影响因素分析

由于 VHG 指数可对城市发生垂直或水平尺度扩张, 以及扩张幅度进行清晰判定, 因此将使用随机森林算法, 通过非线性建模, 对形成现状 VHG 指数背后的驱动影响过程进行非线性拟合。

驱动影响因素分析中, 将首先基于 QGIS 空间分析工具, 在研究区域内选取随机抽样点。经过多次实验运算, 在综合硬件性能、输出结果有效性与同类文献^[24]已有经验后, 最终确定研究区域内随机抽样点个数

为 1500 个。考虑到 VHG 指数需基于一定区域内所有建筑物进行计算, 因此将根据随机抽样点, 在研究区域内构建泰森多边形抽样区域, 并依据这一结果, 计算相应 VHG 指数值展开驱动影响因素分析。使用泰森多边形建立抽样区域的主要原因为: 基于泰森多边形的性质, 某一多边形城市区域内点位, 与对应抽样点间距离总是小于其他任意抽样点距离, 因此认为这些区域在地理上存在更强的同质性, 其域内各类地理因素对 VHG 指数的影响更大。

常用城市扩张驱动影响因素主要分为四大类^[32]: (1)邻域驱动影响因素、(2)政策驱动影响因素、(3)社会经济驱动影响因素、(4)自然条件驱动影响因素。

其中邻域驱动影响因素反映了城市发展的空间相关性, 即若某一待发展地区周边存在更多建成区, 则该区域有更大的可能发生城市扩张^[32,33]。考虑到数据的可获取性, 以及相关法律法规(例如,《中华人民共和国土地管理法》第 44 条中相关规定)中变更用地性质所设定的严格条件, 认为在研究时间范围内(2000 年至 2018 年间), 城市用地性质不会发生大量改变, 因此将基于三调数据进行邻域驱动影响因素分析。即将计算抽样点所属泰森多边形内建成区占比, 并将结果作为邻域驱动影响因子展开相关分析。

对于有长时序特征的城市扩张驱动力分析而言, 政策驱动影响因素存在难以量化的问题^[29]。在一定数据支持下, 现有研究多仅采用计算一定区域内规划建设区或生态功能区比重的方法展开分析^[30]。由于在构建邻域驱动影响因素时, 所使用的区域内建成区比重因子源于三调数据, 该结果具有国土空间管制效力, 因此政策驱动影响因素将不再单独建模。

所选取的社会经济驱动影响因素包括: 与商业中心、行政中心、三大火车站、地铁站、主要道路、重点中小学的距离。扩张驱动分析中, 将具体计算抽样点与各类型矢量数据最短欧式距离, 并将结果作为驱动影响因素。考虑到行政单元尺度统计调查数据(例如, 人口、GDP 等), 存在空间分辨率较低的问题^[32], 故本研究并未使用此类数据。

高程、坡度、地质、地貌、气候等自然条件因素^[34]对城市扩张也存在较大影响,而由于地质、地貌条件等因素不易获取,本文选定统计单元内平均高程、坡度以及与主要水系距离因素,分析自然条件因素对三维空间扩张状态的驱动影响程度。

考虑到所进行的随机抽样,会导致驱动影响因素间存在无法避免的空间相关性,这也导致常用线性回归模型并不适用。随机森林模型作为 1 种非线性模型,其存在与神经网络模型相似的特性,即不用在清晰分析变量间相互关系前提下,基于大量训练数据便可得出较稳定结果,并同步解析变量重要程度^[16,35]。因此,本研究将使用随机森林模型,在拟合形成现状城市扩张特征的基础上,分析各因子在驱动城市三维空间扩张过程中的重要程度。须注意的是,随机森林模型的因子重要性分析,主要通过集成学习过程中使用基尼指数,判断各因子对学习结果贡献度获得,其并未判断相关因子为正向驱动或负向影响,因此将同时使用斯皮尔曼等级相关系数,对驱动影响因素分析结果进行佐证。

3. 结果

3.1 形态演进特征分析结果

附图 A 展示了武汉市主城区三维空间的变迁情况,目视解译可得,自 2000 年起至 2018 年时间间隔下,主城区存在较清晰的整体发展脉络,即城市三维空间生长始于江北的江岸、江汉与硚口三区,以及汉阳局地(例如,王家墩商业区),而伴随着时间推移,武昌、洪山与青山区三维空间生长存在明显的面广、高速特征。

图 2 展示了各建筑景观指标与空间形态指标的变化趋势。由平均高度、平均体积、容积率 3 种常用建筑景观指标可得:(1) 总体来看,武汉市主城区建筑平均高度呈现出快速攀升的趋势,高度由 2000 年的 7.3 米跃升至 2018 年的 9.5 米,增长了约 30%,但自 2016 年起,平均高度的增长趋势出现明显放缓,从各区的角度分析,江汉区与江岸区的平均高度始终保持为最高,而青山与洪山区的平均高度始终位于低位,图 2(A)同

样表明,汉阳区建筑平均高度具有明显的快速拉升趋势;(2) 平均体积指标的变化趋势与平均高度指标趋同,其中,直观可得江汉区建筑物单体体量远超其他行政区;(3) 针对容积率指标,较明显特征包括两点,即武昌区容积率在目标时间范围内取得急速攀升,从 2000 年的 0.056 增长为 2018 年 1.517,同时,江汉区容积率变化趋势,继续对该区拥有最为明显三维空间扩张特征这一结论进行了佐证。

BEI 与 SCD 指数可对目标区域三维空间形态进行深入刻画。由图 2(D,E)中 BEI 与 SCD 指数变化趋势可推得的,随着时间推移,研究区域内三维空间在愈发高低错落的同时也逐渐更加拥挤,这与对附 A 可视化结果的直观认知基本相符。

图 2(F-J)展示了 8 种不同类型建筑物的 5 类指数计算结果:其中平均高度的变化表明,仅居住类、商业服务类建筑与总体平均高度的变化趋同;而建筑物平均体积变化表明,商业服务类建筑始终拥有最大的单体体量,这与居民直观感觉相符,而诸如交通设施、工业设施类建筑平均体量均出现下降,推测主要由于小体量类型建筑物数量增加导致;同时,图 2(H)中的结果更为清晰地表明,主城区内建筑物容积率变化主要受居住类建筑物影响;BEI 与 SCD 指数对于不同类型建筑物空间形态的定量刻画均也显示,主城区内建筑物的整体空间形态受居住类建筑影响较大。

因此,基于以上五类指数计算结果可推得,主城区内三维空间的存在明显扩张特征,且居住类建筑的大量兴建、生长与城市三维空间的扩张直接相关。

3.2 水平垂直尺度扩张趋势分析结果

联合使用五类指数,可以对研究区域内城市三维空间结构、形态变化特征,进行较全面的分析评价。但仅依靠分析以上类型指数变化,仍难以对三维空间扩张背后的深层次原因进行详细解构。而由于 VHG 指数可以对城市扩张主导类型、扩张幅度进行清晰判定分析,其更适用于分析形成三维空间扩张现状背后的深层次机理。

为更清晰展示武汉市各年份间隔下,城

市三维空间变迁情况，表 2 详细罗列了自 2000 年起，1 年份时间间隔下 VHG 指数计算结果(即 R_{VHG} 值)。同时，为更直观表现城市三维空间整体扩张趋势，图 3(A)与(B)中

分别选择 2 年时间间隔与 5 年时间间隔，基于各区 VHG 指数计算结果，绘制了雷达分析图。

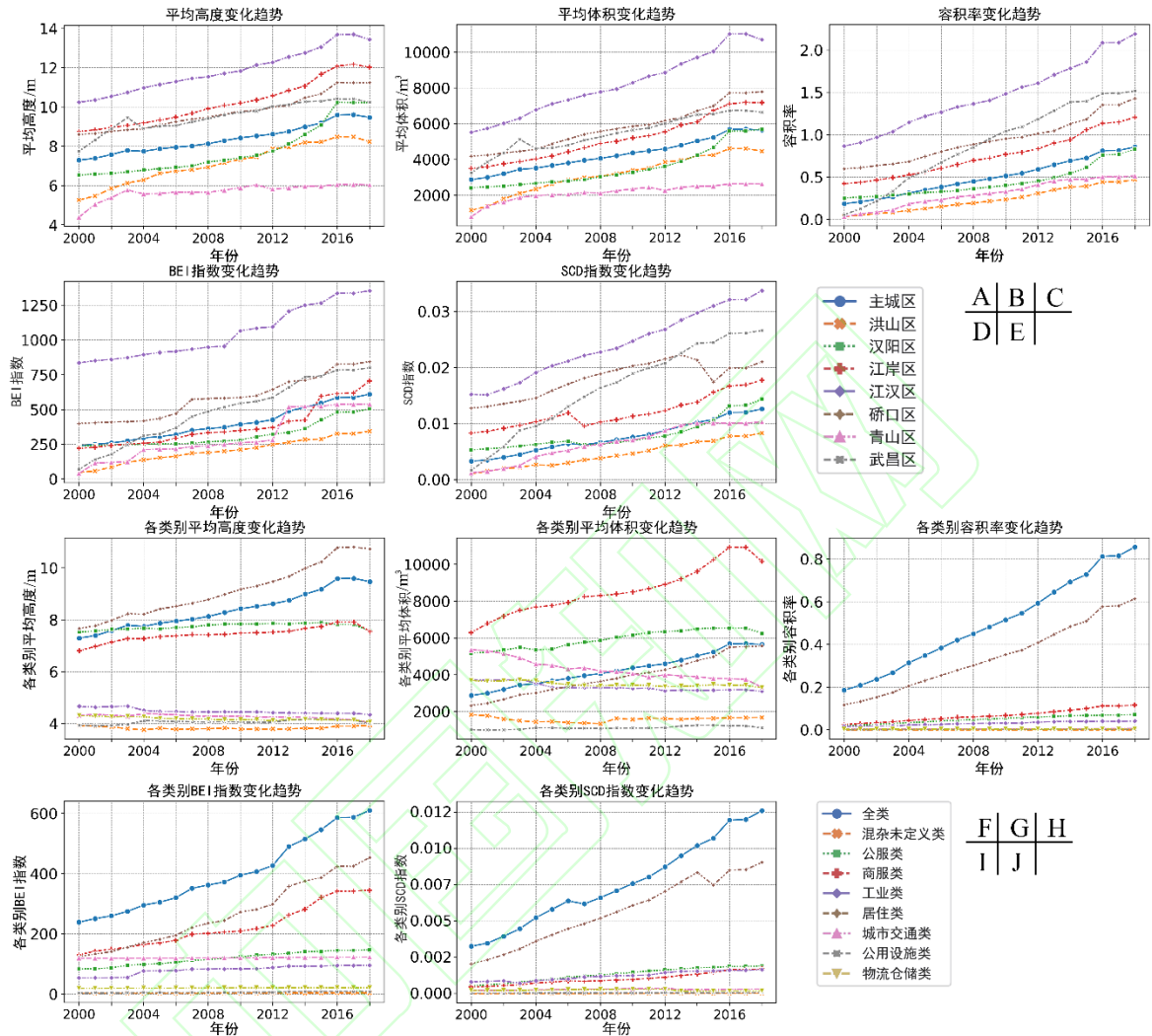


图 2 建筑景观指标与空间形态指标变化趋势

Fig. 2 Change trend of architectural landscape indices and spatial morphology indices

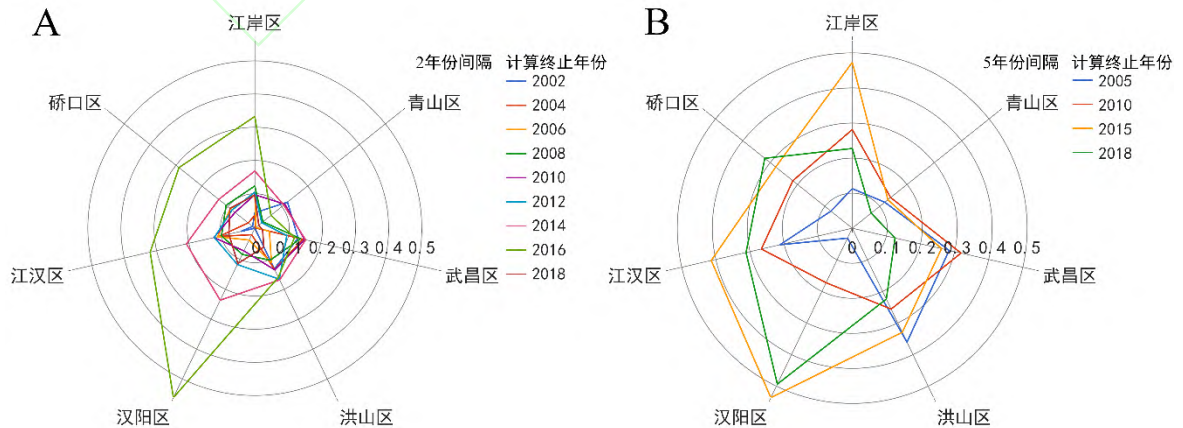


图 3 VHG 指数变化趋势

Fig. 3 Change trend of the VHG ratio

表 2 区域 VHG 指数计算结果
Tab. 2 The VHG outcomes of each districts

计算终止年份	主城区	江岸区	江汉区	硚口区	汉阳区	武昌区	青山区	洪山区
2001	0.011	0.018	0.024	0.003	0.002	0.101	0.134	-0.002
2002	0.021	0.024	0.015	0.001	-0.007	0.029	-0.012	0.134
2003	0.035	0.023	0.037	0.009	0.014	0.101	-0.015	0.093
2004	0.025	0.012	0.069	0.012	0.003	0.044	0.013	0.041
2005	0.039	0.036	0.066	0.052	0.018	0.010	-0.001	0.094
2006	0.034	0.061	0.045	0.038	0.018	0.031	0.001	0.018
2007	0.055	0.058	0.063	0.074	0.023	0.074	0.002	0.081
2008	0.046	0.065	0.036	0.033	0.061	0.064	0.025	0.022
2009	0.055	0.046	0.042	0.033	0.035	0.093	0.047	0.067
2010	0.058	0.051	0.080	0.039	0.036	0.057	0.065	0.069
2011	0.038	0.039	0.077	0.029	0.052	0.022	0.040	0.024
2012	0.065	0.065	0.045	0.055	0.066	0.073	-0.017	0.143
2013	0.089	0.118	0.119	0.052	0.107	0.076	0.074	0.075
2014	0.080	0.050	0.089	0.083	0.129	0.077	0.033	0.093
2015	0.070	0.200	0.085	0.061	0.183	0.014	0.000	-0.006
2016	0.179	0.132	0.235	0.228	0.380	0.105	0.058	0.166
2017	0.006	0.027	0.002	0.000	0.007	0.003	0.000	0.000
2018	0.059	0.068	0.074	0.092	0.107	0.017	0.011	0.059

由 VHG 指数构造方式可得, 对 1 年时间间隔下结果进行累加, 可得对应区域内任意时间间隔下 VHG 指数计算结果。因此, 由表 2 可得: 从主城区整体来看, 其在 2000 年至 2018 年任意时间间隔下, 垂直尺度扩张始终占据主导地位, 且由值为 0.965 的 2000—2018 年间 R_{VHG} 值可知, 主城区内三维空间垂直尺度扩张幅度远大于水平尺度扩张幅度; 而对于各主要行政区而言, 除部分行政区在少数特定年份下 R_{VHG} 值为负值以外, 其他计算结果也均为正值, 其代表各区内, 垂直尺度扩张也始终为城市扩张的主要表现形式。

图 3 中的雷达分析图更为直观地展示了以下 3 种趋势: (1) 总体来看, 长江以南三个主要行政区内城市垂直尺度扩张幅度, 弱于长江以北的四个主要行政区。(2) 在 2010 年至 2018 年时间范围内, 汉阳、江岸区展示了非常强的城市空间垂直尺度扩张趋势, 例如, 汉阳区在时间范围 2010—2015 年与 2014—2016 年下, R_{VHG} 值分别为 0.536 与 0.562, 远远高于位于江南的其他主要行政区。(3) 伴随着时间逐渐推移至 2018 年, 各主要行政区的垂直尺度扩张幅度出现一定收窄。例如, 2 年时间间隔下, 在时间范围 2016 年至 2018 年间, 各行政区 R_{VHG} 值均出现下降, 其中武昌区的 R_{VHG} 值缩减至 0.019, 该结果

为 2 年时间间隔尺度下的最低值。同样的, 汉阳区的 R_{VHG} 值在 2014 年至 2016 年间为 0.562, 而在 2016 年至 2018 年间迅速缩减至 0.113。推测形成此类结果的主要原因为: 由 3.1 节分析可得, 城市三维空间的形态变迁主要由居住类建筑导致, 而在 2016 年至 2018 年间, 商品房房地产市场开始出现降温, 最终形成城市垂直尺度扩张幅度快速收缩的结果。

3.3 三维空间扩张驱动影响因素分析结果

图 4 展示了全市以及各区尺度下, 基于 2000—2018 年间 VHG 指数计算结果的随机森林模型因子重要性分析结果。其中, 为方便展示, 图 4(B 至 D)中各行政区分析结果共用相同纵坐标。同时, 为更好地对各驱动影响因子的正负向驱动效应进行佐证分析, 表 3 展示了在显著性指标为 0.05 时, 2000—2010 年、2010—2018 年以及 2000—2018 年间, 全市尺度 VHG 指数数值与各候选因子之间的斯皮尔曼等级相关系数分析结果。其中, 主城区内所进行的随机森林模型对应决定系数 R^2 为 0.860, 各行政区内所进行的同类分析中, 除江汉区模型 R^2 为 0.780 以外, 其他均位于 0.8 以上。即整体来看, 随机森林模型对 VHG 指数与各驱动因子所进行的拟合, 取得了较可靠结果。

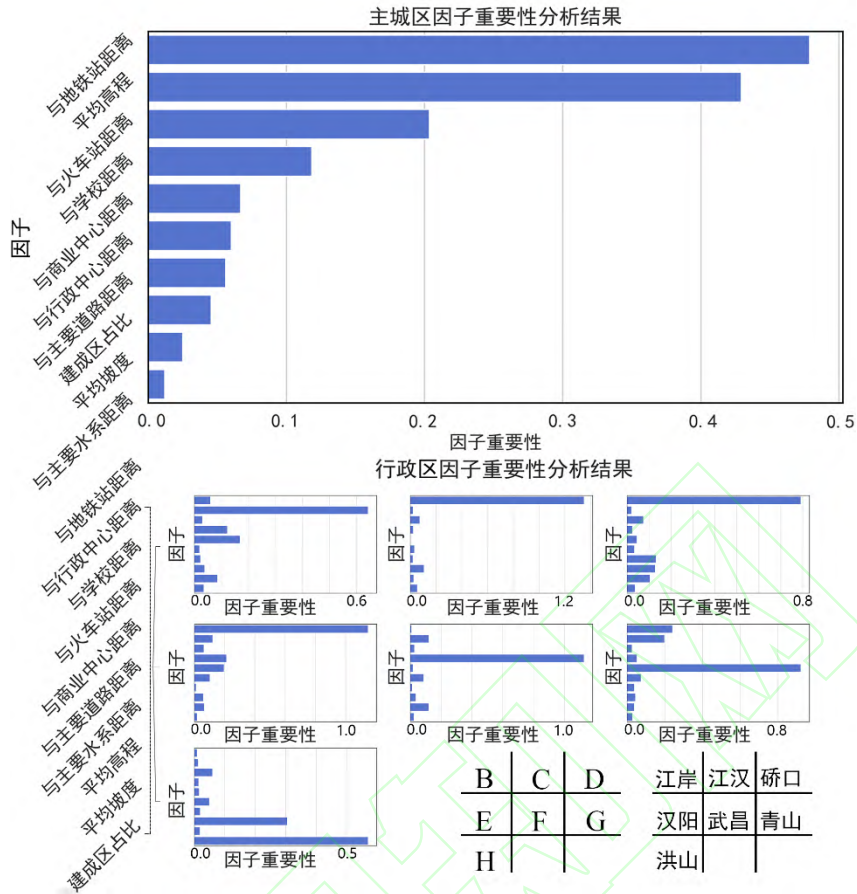


图 4 驱动因子重要性分析结果
Fig. 4 The importance analysis results of the driving factors

由图 4 可知，就主城区整体而言，对三维空间垂直尺度扩张状态影响最大的驱动因子为：与地铁站点距离、平均高程以及与主要火车站的距离。其中，高程对于城市发展的制约作用不言而喻，同时，结合表 3 中相应分析结果可得，地铁站点对于垂直尺度扩张存在明显正向驱动效应，其与武汉市近年来强调的公共交通导向发展(Transit Oriented Development, TOD)方针相契合，这既体现了规划导向与实际城市发展之间的呼应关系，同时也从侧面印证了驱动影响因素分析结果的可信度。而针对高铁站点，同类研究也已验证其对城市扩张、发展有明显驱动作用^[36]，本研究的分析结果进一步验证了结论：作为九省通衢的武汉市，其对外交通枢纽对城市垂直尺度也有明显的驱动作用。

图 4 中的分析结果也表明：虽然武汉市高层建筑存在一定“围湖沿江”趋势，但从全市尺度来看，临近景观水系对城市垂直尺度

扩张影响有限。

图 4 中，各区的驱动影响因素分析与各区的实际发展状态、规划定位存在较好的对应关系。例如，由驱动因素分析结果可知，对江岸区垂直尺度扩张有较大影响的因素为：与行政中心的距离。这与江岸区为武汉市传统行政中心的定位相符。而对于位于长江以南的洪山区而言，由 3.1 节的分析结论可得，该区在进入二十一世纪后才取得了快速的城市发展，同时，由于该区中并不具备驱动城市快速生长的对外交通枢纽，且在 2017 年地铁 8 号线开通前，该区始终处于缺乏地铁布局的状态，因此邻接城市空间带来的驱动效力，具有比交通因素更大的驱动影响。此外，由图 4 可得，该区内平均高程对垂直尺度扩张也具有较强影响，这与区内实际情况相符：该区内分布了较多的侵蚀剥蚀高丘陵、剥蚀堆积低丘陵区域(例如，东湖磨山等)，而这些区域没有发生明显的垂直尺度扩张。

表 3 VHG 指数与各驱动因子相关性分析结果
Tab. 3 The outcomes of the correlation analyses between the VHG ratio and each driving factors

计算起止 年份 [t,t+1]	与行政 中心距 离	与商业 中心 距离	与地铁 站距离	与火车 站距离	与中小学 学校距离	与主干 道距离	与主 要水 系距 离	平均 坡度	平均 高程	建成区 占比
[2000,2010]	-0.457	-0.444	-0.445	-0.238	-0.408	-0.332		-0.107		0.281
[2010,2018]	-0.281	-0.238	-0.255	-0.072	-0.252	-0.207		-0.185	-0.121	0.214
[2000,2018]	-0.397	-0.429	-0.365	-0.311	-0.372	-0.239		0.069	0.139	0.220

4. 讨论

综合同类研究现状,本研究主要创新可总结为以下两点:

(1) 已有城市扩张驱动影响因素分析,主要基于水平尺度城市空间(二维空间)展开,即仅分析城市水平尺度的扩张现状、影响。本文提出了较完整的城市三维尺度扩张问题研究范式:即在使用基础建筑景观指标获取城市三维空间形态演进特征基础上,界定城市扩张主导类型,进而推断相应扩张类型背后的驱动影响因素。基于该研究范式展开分析、得出结果,可帮助规划师,更为全面地掌握城市空间的扩张现状、背后深层机理,并进行更有针对性的规划调整。

(2) 现有针对城市三维空间扩张问题的研究,存在套用二维空间相关研究方法的问题。高度、容积率等传统指标的变化,仍被视为垂直尺度扩张的直接表现。本文对VHG指数进行了改进,更为清晰地界定了水平与垂直扩张的状态边界,并基于指数计算结果,量化分析城市三维空间扩张的驱动影响因素,该方法明显更为合理。

基于本文的研究成果可对于武汉市后期规划给出以下实际建议:

(1) 在3.1节与3.2节中,基于建筑景观指标、空间形态指标、VHG指数的计算分析表明:居住类建筑极大的影响了城市三维空间整体形态,为控制城市向垂直空间过度增长,建议在江汉区(垂直空间生长现状特征最显著)、汉阳区(垂直空间生长趋势较强)新建居住用地的规划条件中,严控容积率、建筑密度等指标,以此保证城市空间的健康生长。

(2) 3.3节的分析指出,武汉市主城区范围下,城市内与城市对外交通枢纽对城市垂直尺度扩张存在较大影响,这是交通规划与

城市自然生长结果间存在相辅相成关系的具体表征,因此,建议在未来新区规划建设中,在延续地铁站点TOD发展的同时,加强高铁站点TOD导向规划,凭借此举快速推动新区城市发展。

基于本文所使用数据、方法的特点,需要进一步解释的内容包括:

(1) 使用建筑物普查数据进行城市三维形态变化分析,存在忽视城市更新过程中,拆除行为对城市形态产生影响的问题,但考量到武汉市高度城市化起步于20世纪末^[37],因此,研究时间范围内(2000年至2018年间)的拆除行为主要围绕城中村、低矮老旧住宅展开,这类高度、体量有限的建筑物,对三维空间形态变迁问题的影响也较有限。因此,结合建筑物普查数据空间精度较高、属性信息较全的特点,本研究最终选择使用相应矢量格式成果数据进行分析研究。

(2) 此外,将对驱动影响分析章节内容进行相关解释,此章节中,驱动力影响分析结论,是在较长时间间隔下,基于非线性建模得出的一个综合结果。该部分分析论述侧重于验证所提出方法的可行性,时间粒度较粗糙。后续同类型实证研究可结合先验发展经验,细化具体发展时间间隔,进行驱动力影响分析,得出更具说服力的结果。

5. 结论

本研究通过使用传统建筑景观指标与城市空间形态指标,实现了对2000年起至2018年间,武汉市主城区三维空间结构、形态演进特征的解构,同时为克服依赖传统指标进行三维空间扩张驱动力分析存在的缺陷,对VHG指数进行了改进,并基于该指数计算结果,在判定城市存在明显垂直尺度扩张趋势的前提下,利用随机森林模型中的

因子重要性分析,实现对主城区三维空间扩张驱动影响要素的详细解译。

基于所建立的研究范式,所得主要结论包括:

(1) 总体来看,进入 21 世纪以来的 18 年间,城市三维空间的平均高度、体积、容积率都经历了快速增长,同时三维空间扩张的主要形态变化包括:整体空间更为集约的同时,各类建筑愈发高低错落。以上现象的直接诱因为区域内新建了大量高层、超高层居住类型建筑;

(2) 改进后的 VHG 指数计算结果显示:武汉市主城区内,垂直尺度扩张为城市三维空间扩张的主要表现形式,且对于区级行政单元而言,江岸、江汉、汉阳等区拥有较强的垂直尺度城市空间扩张趋势;

(3) 基于集成学习的因子重要性分析表明:武汉市主城区内,地铁站与火车站作为城市内与城市对外交通枢纽,对城市垂直尺度扩张有较强驱动影响,本研究认为这是规划导向与城市发展自然趋势间相辅相成所形成的结果,而诸如水系、坡度一类自然条件因素,对武汉市垂直尺度扩张的影响非常有限。

结合本文所使用数据、方法的局限性,同类研究可从以下三个方面展开后续分析:

(1) 本文中,驱动影响因素分析主要根据基于抽样点建立的泰森多边形展开,为使分析结果更具实际指导价值,后续研究可结合实际经验,基于考量社会经济发展同质性的划分方式(例如,社区或交通小区等),划分分析单元,计算对应 VHG 指数,并根据这种更具实际意义的指数计算结果,展开驱动力分析,寻找驱动、影响不同城市区域扩张的关键因素。

(2) 此外,由于数据获取受限等原因,本文在对具体驱动因子挑选上也存在一定局限性,后续研究可在驱动影响因素建模过程中,补充添加更为全面的候选驱动力因素(例如,地质空间状态信息,经过量化后的规划审批数据等),构建更加完善的驱动力分析模型。

(3) 同样的,相关研究也可处理使用多时相遥感数据,结合建筑物普查矢量数据,

建构研究框架,更好地量化、衡量、分析城市更新行为对城市形态变迁产生的影响。

参考文献

- [1] National Bureau of Statistics. Statistical Chart of Economic and Social Development: Basic Population Statistics of Megacities in The Seventh National Population Census[J], QiuShi, 2018(18) (国家统计局. 经济社会发展统计图表: 第七次全国人口普查超大、特大城市人口基本情况[J]. 求是, 2018(18)).
- [2] Zhang, W, Li, W, Zhang, C, et al. Analyzing Horizontal and Vertical Urban Expansions in Three East Asian Megacities with the ss-comcrf Model[J]. Landscape and Urban Planning, 2018, 177: 114-127..
- [3] Lee D, Choe H. Estimating the Impacts of Urban Expansion on Landscape Ecology: Forestland Perspective in the Greater Seoul Metropolitan Area[J]. Journal of Urban Planning & Development, 2011, 137(4): 425-437.
- [4] Zhang P. Spatiotemporal Features of the Three-dimensional Architectural Landscape in Qingdao, China[J]. Plos One, 2015, 10(9).
- [5] Qiao W, Liu Y, Wang Y, et al. Analysis on the Characteristics of Three-Dimensional Urban Space Expansion in Nanjing Since 2000.Geographical Research, 2015(4):666-676 (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(4): 666-676).
- [6] Li X, Bai X, Li Z, et al. High-Resolution Image Building Extraction Based on Multi-level Feature Fusion Network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(8): 1236-1244 (李星华, 白学辰, 李正军, 等. 面向高分影像建筑物提取的多层次特征融合网络[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(8): 1236-1244).
- [7] Wurm M, Taubenbock H, Esch T, et al. The Changing Face of Urban Growth: An Analysis Using Earth Observation Data[C] Joint Urban Remote Sensing Event., Sao Paulo, Brasilien, 2013.
- [8] Liao H, Wen Z. Extracting Urban Water Bodies from High-resolution Radar Images: Measuring the Urban Surface Morphology to Control for Radar's Double-bounce Effect[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2020, 85.
- [9] Froking S, Milliman T, Seto K, et al. A Global Fingerprint of Macro-scale Changes in Urban Structure from 1999 to 2009[J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(2).
- [10] Li W, Zhang C, Willig M, et al. Bayesian Markov Chain Random Field Cosimulation for Improving Land Cover Classification Accuracy[J]. Mathematical Geosciences, 2015, 47(2): 123-148.
- [11] Zhang W, Li W, Zhang C, et al. Detecting Horizontal and Vertical Urban Growth from Medium Resolution Imagery and Its Relationships with Major Socioeconomic Factors[J].

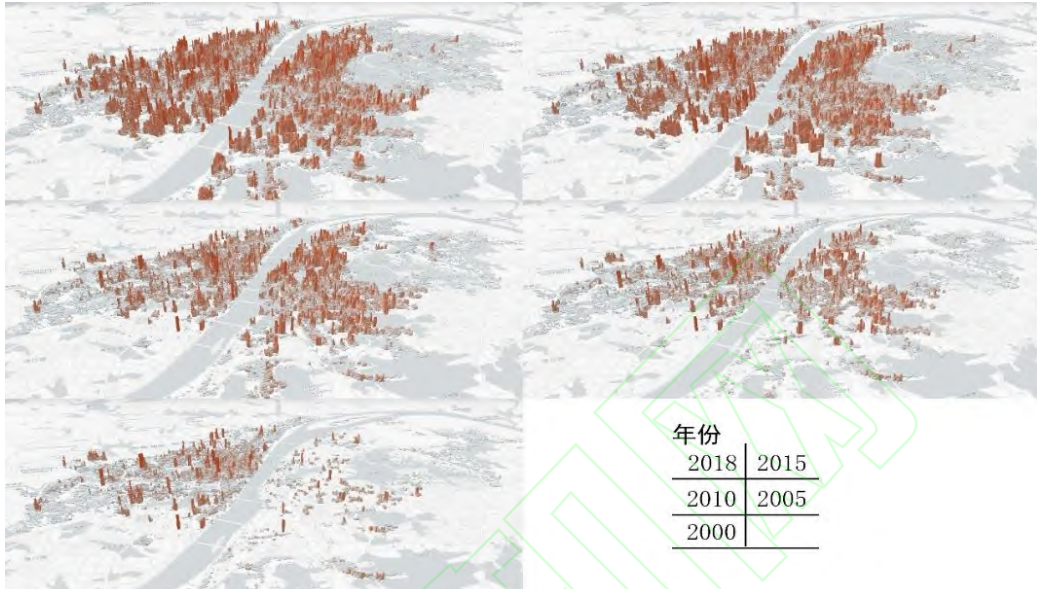
- International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(12): 3704-3734.
- [12] Shi L, Shao G, Cui S, et al. Urban Three-dimensional Expansion and Its Driving Forces -a Case Study of Shanghai, China[J]. Chinese Geographical Science, 2009, 19(4): 291-298.
- [13] Wang N, Chen Z, Li T, et al. Spatiotemporal Pattern Evolution and Influence Mechanism of Urban Vertical Expansion: A Case Study of Jiangsu Province, China[J]. Land, 2022, 11(3).
- [14] Zamboni I, Colantoni A, Salvati L. Horizontal vs Vertical Growth: Understanding Latent Patterns of Urban Expansion in Large Metropolitan Regions[J]. Science of the Total Environment, 2019, 654: 778-785.
- [15] Lu S. Characteristics and Driving Mechanism of Urban Space Expansion in Urumqi[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(7): 1025-1034 (卢世俊. 乌鲁木齐城市空间扩展特征及驱动机制[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(7): 1025-1034).
- [16] Li L, Liu X, Ou J, et al. Spatial-temporal Changes and Mechanism Analysis of Urban 3D Expansion Based on Random Forest Model[J]. Geography and Geo-information Science, 2019(2): 53-64 (李柳华, 刘小平, 欧金沛, 等. 基于随机森林模型的城市扩张三维特征时空变化及机制分析[J]. 地理与地理信息科学, 2019(2): 53-64).
- [17] Qin J, Fang C, Wang Y. The Three-dimensional Urban Growth Simulating Based on Cellular Automata[J]. Journal of Geo-information Science, 2013, 15(5): 662-671 (秦静, 方创琳, 王洋. 基于元胞自动机的城市三维空间增长仿真模拟[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(5): 662-671).
- [18] Benguigui L, Czamanski D, Roth R. Modeling Cities in 3D: A Cellular Automaton Approach[J]. Environment and Planning. B, Planning and Design, 2008, 35: 413-430.
- [19] Chen Y. An Extended Patch-based Cellular Automaton to Simulate Horizontal and Vertical Urban Growth Under the Shared Socioeconomic Pathways[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2022, 91: 1-12.
- [20] He Q, Liu Y, Zeng C, et al. Simultaneously Simulate Vertical and Horizontal Expansions of a Future Urban Landscape: A Case Study in Wuhan, Central China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2017, 31(10): 1-22.
- [21] Lin J, Huang B, Chen M, et al. Modeling Urban Vertical Growth Using Cellular Automata—Guangzhou as a Case Study[J]. Applied Geography, 2014, 53: 172-186.
- [22] Salvati L, Zitti M, Sateriano A. Changes in City Vertical Profile as an Indicator of Sprawl: Evidence from a Mediterranean Urban Region[J]. Habitat International, 2013, 38: 116-125.
- [23] Qin J, Fang C, Wang Y, et al. Evaluation of Three-dimensional Urban Expansion: A Case Study of Yangzhou City, Jiangsu Province, China[J]. Chinese Geographical Science, 2015, 25(2): 224-236.
- [24] Wang C, Dou W, Cheng Y, et al. Spatial Expansion and Driving Force in Jinan City in the Stage of Rapid Urbanization[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(9): 1513-1521 (王成新, 窦旺胜, 程钰, 等. 快速城市化阶段济南城市空间扩展及驱动力研究[J]. 地理科学, 2020, 40(9): 1513-1521).
- [25] Sun M, He H, Zhou B, et al. Imperviousness Change Analysis Tool (I-CAT) for Simulating Pixel-level Urban Growth[J]. Landscape & Urban Planning, 2014, 124: 104-108.
- [26] Sun B, Zhao L. Study on the Spatial Characteristics of Urban Commercial Center: A Case study of Wuhan[C]// Proceedings of 2019 China Annual Conference on Urban Planning, 2019: 391-401 (孙冰洁, 赵丽元. 城市商业中心空间特征研究——以武汉主城区为例[C]//2019中国城市规划年会论文集, 2019: 391-401).
- [27] Shi Y, Sun X, Zhu X, et al. Characterizing Growth Types and Analyzing Growth Density Distribution in Response to Urban Growth Patterns in Peri-urban Areas of Lianyungang City[J]. Landscape & Urban Planning, 2010, 98(4): 425-433.
- [28] Banzhaf H S, Lavery N. Can the Land Tax Help Curb Urban Sprawl? Evidence from Growth Patterns in Pennsylvania[J]. Journal of Urban Economics, 2010, 67(2): 169-179.
- [29] Li G, Sun S, Fang C. The Varying Driving Forces of Urban Expansion in China: Insights From a Spatial-temporal Analysis[J]. Landscape and Urban Planning, 2018, 174: 63-77.
- [30] Chen J, Gao J, Wei Y, et al. Spatial Determinants of Urban Land Expansion in Large Chinese Cities: A Case Study of Nanjing City[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(6): 676-684 (陈江龙, 高金龙, 魏也华, 等. 大都市区建设用地空间扩展机理研究——以南京市区为例[J]. 地理科学, 2013, 33(6): 676-684).
- [31] Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Code for Design of Civil Buildings [M]. Beijing: China building industry press, 2005 (住房和城乡建设部. 民用建筑设计通则[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005).
- [32] Li X, Zhou W, Ouyang Z. Forty Years of Urban Expansion in Beijing: What Is the Relative Importance of Physical, Socioeconomic, and Neighborhood Factors? [J]. Applied Geography, 2013, 38(1): 1-10
- [33] Müller K, Steinmeier C, Küchler M. Urban Growth along Motorways in Switzerland[J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 98(1): 3-12.
- [34] Lin T, Li X, Zhang G, et al. Dynamic Analysis of Island Urban Spatial Expansion and Its Determinants: A Case Study of Xiamen Island. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(6): 715-726. (吝涛, 李新虎, 张国钦, 等. 厦门岛城市空间扩张特征及其影响因素分析[J]. 地理学报, 2010, 65(6): 715-726).
- [35] Auret L, Aldrich C. Interpretation of Nonlinear Relationships Between Process Variables by Use of Random Forests[J]. Minerals Engineering, 2012, 35: 27-42.
- [36] Zhang M, Sun Y, Din R, et al. Integration of Land Use and Public Transportation: International Cases and Chinese Practices[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2015. (张明, 孙一民, 丁日成, 等. 土地使用与公交整合的城市发展

模式--国际案例和中国实践[M]. 北京：中国建筑工业出版社, 2015).

[37] Feng Y. Research on Urban Land Development and the Disciplines of Urban Spatial Expansion in Wuhan since 1990s[D]. Wuhan: The Dissertation for Master Degree of Huazhong University of

Science and Technology, 2007. (冯艳. 1990年代以来武汉城市土地开发及空间发展规律研究[D]. 武汉：华中科技大学, 2007).

附图



附图 A 城市三维空间变化概览(武汉市测绘研究院提供地图底图数据及相应矢量要素数据)
Appendix A. An overview of the change of the city three-dimensional space structure (The Wuhan Geomatics Institute provides the base map data and the corresponding vector data)

网络首发:

标题: 城市三维空间形态演进特征与驱动因素分析--以武汉市主城区为例

作者: 李博闻, 彭明军, 谭仁春.

DOI: 10.13203/j.whugis20220800

收稿日期: 2023-06-04

引用格式:

李博闻, 彭明军, 谭仁春. 城市三维空间形态演进特征与驱动因素分析--以武汉市主城区为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220800 (Li Bowen, Peng Mingjun, Tan Renchun. Analysis of the evolution characteristics and driving factors of the three-dimensional morphology of the city space: A case study of Wuhan Main Urban Area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j. whugis20220800)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

城市扩张程度的影响因素分析——以武汉市为例

宋艳华, 焦利民, 刘稼丰, 许刚

武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(3): 417-426

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190106>