

高分辨率遥感影像中城市扩张监测与建模分析

姚宇哲

安徽省基础测绘信息中心 安徽 合肥 230001

摘要：高分辨率遥感影像凭借其高精度、高时效性优势，成为城市扩张研究的关键数据源。通过建筑形态演变、交通网络扩展等多维度监测指标，可精准刻画城市空间变化特征。元胞自动机、机器学习等多种建模方法的应用，实现了对城市扩张趋势的科学预测与动态模拟。这些研究为城市规划与资源合理配置提供了数据支撑与技术保障，有助于深入理解城市发展规律，提升城市可持续发展能力。

关键词：高分辨率；遥感影像；城市扩张监测；建模

引言

在城镇化快速推进的背景下，城市空间形态与功能结构不断演变，亟需科学手段对城市扩张进行动态监测与预测。高分辨率遥感影像以其丰富的空间信息和强大的空间分辨率，为城市扩张研究开辟了新路径。本文基于高分辨率遥感影像，构建多维度城市扩张监测指标体系，探讨元胞自动机、机器学习等多种建模方法，旨在揭示城市扩张规律，为城市规划与管理提供理论依据与技术支持。

1 高分辨率遥感影像概述

高分辨率遥感影像指空间分辨率优于5米的遥感影像，能够以厘米至米级精度捕捉地球表面地物细节。凭借航空航天平台搭载的光学、雷达等传感器，高分辨率遥感影像获取技术突破传统观测局限，可从多角度、多波段采集目标信息，实现对地物几何形态、光谱特征的精准刻画。光学遥感影像通过捕捉地物反射的太阳辐射，在可见光与近红外波段形成高清晰度地物纹理，而合成孔径雷达（SAR）影像则利用微波穿透云层、植被的特性，提供全天候、全天时的观测能力。高分辨率遥感影像数据包含丰富的空间语义信息，其高空间分辨率使得建筑物轮廓、道路走向、植被分布等细节清晰可辨，结合多光谱与高光谱数据，还能进一步解析地物的物质成分与理化属性。在数据处理层面，基于深度学习的影像解译技术充分挖掘高分辨率影像的潜在价值，通过构建卷积神经网络模型，可实现地物目标的智能检测与分类。利用多源数据融合方法，将高分辨率影像与激光雷达点云、地理信息系统（GIS）数据相结合，能够生成高精度三维地理场景，提升空间信息的表达与分析能力。随着卫星星座组网与无人机集群作业模式的发展，高分辨率遥感影像的获取效率与覆盖范围显著提升。在城市规划领域，此类影像为建筑布局优化、土地利用监

测提供精确底图；在生态环境研究中，可用于植被健康评估、水体污染监测；在灾害应急响应时，能快速识别受灾区域，辅助救援决策。其应用价值正不断向更多行业渗透，推动地理空间信息从宏观认知向微观精准分析转变，成为支撑数字孪生、智慧城市等前沿领域发展的重要数据基础。

2 高分辨率遥感影像中城市扩张监测指标

2.1 建筑形态演变指标

在高分辨率遥感影像的助力下，对建筑形态演变指标的监测能够精准洞察城市扩张过程中的建筑发展态势。通过影像解译与分析技术，可获取建筑的高度、密度以及布局等关键信息。就建筑高度而言，不同时期影像对比能直观展现出城市中高层建筑的增长趋势，如一些新兴城区原本以低矮建筑为主，随着时间推移，高分辨率影像清晰呈现出高层写字楼、公寓等建筑的拔地而起，这反映出城市空间在垂直方向上的拓展。建筑密度的变化同样显著，在城市扩张初期，建筑分布相对稀疏，随着发展，遥感影像显示建筑密度逐渐增大，尤其在城市中心区域以及新开发的热点区域，建筑紧密排列，反映出土地利用效率的提升以及城市空间的紧凑化发展。建筑布局从早期的相对分散、规律性不强，逐渐向集中式、组团式或者沿交通干线分布转变，这在遥感影像中表现为清晰的建筑聚集区域以及沿道路延伸的建筑带，这一转变与城市功能分区的细化以及交通引导的发展模式息息相关，高分辨率遥感影像为这种复杂的建筑形态演变监测提供了高精度的数据支持，使得对城市扩张在建筑层面的理解更加深入和全面^[1]。

2.2 交通网络扩展指标

交通网络是城市扩张的重要骨架与引导因素，高分辨率遥感影像为监测其扩展提供了宏观且细致的视角。道路作为交通网络的基础组成，影像能够清晰分辨出不

同等级道路的新建、拓宽与延伸情况。从城市主干道来看,在影像上可以直观看到其向城市外围的延伸,连接起新的开发区、卫星城镇等,如一些城市为了缓解交通压力并带动周边区域发展,在原有主干道基础上进行拓宽,同时新修向外辐射的干道,在遥感影像中呈现出明显的线条加粗与向外伸展的变化。对于次干道和支路,高分辨率影像能够捕捉到其在城市内部加密的过程,尤其是在城市更新区域或者新兴居住区,新的次干道和支路不断涌现,以满足日益增长的交通需求,优化区域交通微循环。交通枢纽在城市扩张中的作用举足轻重,通过遥感影像可监测到机场、车站等枢纽的扩建,以及其配套交通设施的完善,如机场周边道路网络的加密、火车站站前广场及周边交通设施的新建与改造,这些变化都反映出城市交通网络随着城市扩张不断优化与拓展,以适应城市规模扩大带来的人流、物流运输需求。

2.3 基础设施覆盖指标

基础设施的覆盖情况是衡量城市扩张质量与范围的重要标志,高分辨率遥感影像为精准监测其变化提供了有力手段。在能源供应设施方面,电力变电站、风力发电场、太阳能电站等在影像中具有独特的纹理与形状特征,通过多时相影像对比,能够清晰看到电力变电站的增建以及风力、太阳能发电设施向城市周边区域的扩展,反映出城市能源供应范围的扩大以及对清洁能源利用的重视与发展。供水与排水设施同样在遥感影像中有迹可循,供水管网虽然铺设于地下,但通过其相关附属设施以及对周边环境的影响,可在影像中推断其扩展方向与范围;排水管网中的污水处理厂、排水泵站等设施则清晰可见,监测其规模的扩大与新设施的建设,能够了解城市在应对扩张过程中污水收集与处理能力的提升。通信基站作为现代城市不可或缺的基础设施,在高分辨率影像中呈现为点状分布,随着城市扩张,基站数量不断增加且分布范围更广,以保障城市通信信号的全覆盖与高质量,这些基础设施的变化共同勾勒出城市在扩张过程中不断完善自身功能、提升承载能力的发展轨迹^[2]。

2.4 人口密度空间化指标

将人口密度进行空间化监测,高分辨率遥感影像结合其他多源数据发挥了重要作用。利用遥感影像提取的土地利用类型,如居住用地、商业用地、工业用地等,结合社会经济统计数据中的人口数量、就业岗位分布等信息,通过空间分析模型可实现人口密度的空间化模拟。在城市中心的商业区,高分辨率影像显示建筑密度大且多为商业写字楼等,结合商业活动带来的大量就业人口以及相关的人流量统计数据,能够推断出该区域在

工作日的高人口密度情况;在城市的居住区,根据住宅建筑的类型、数量以及居住环境特征,结合居民人口统计信息,可精确估算不同居住区的人口密度。随着城市扩张,新的居住区在城市边缘或卫星城镇出现,遥感影像捕捉到这些区域的建设过程,同时结合人口迁移数据等,能够动态监测到人口密度在空间上的变化,即从城市核心区向周边新兴区域的扩散,以及不同区域人口密度随着时间的增减情况,为城市规划者合理布局公共服务设施、交通设施等提供关键的人口分布信息依据,以适应城市扩张过程中的人口动态变化需求。

3 高分辨率遥感影像中城市扩张建模方法

3.1 元胞自动机(CA)模型

(1)元胞自动机(CA)模型以空间离散化的元胞网格为基础,将城市空间分割为具有同质性的元胞单元,每个元胞依据局部邻居元胞的状态及预设转换规则,在时间维度上动态演化。在高分辨率遥感影像支撑下,该模型可精准捕捉城市土地利用变化细节,利用影像提供的地物光谱、纹理等特征,为元胞状态的定义与转换规则的制定提供丰富数据依据,使城市扩张模拟更贴近现实。(2)CA模型在城市扩张建模中的优势显著,其强大的空间显式表达能力,能够直观呈现城市扩张的空间形态演变过程,从零散的城市斑块增长到连片区域的形成,通过可视化方式清晰展现。该模型可有效模拟城市扩张的非线性、自组织特性,充分考虑交通路网、地形地貌等空间因素对城市扩张的影响,实现对城市空间增长模式的多情景模拟。(3)CA模型在实际应用中也面临挑战。转换规则的设定依赖经验知识与数据挖掘,其准确性直接影响模拟结果的可靠性,且难以全面考虑复杂的社会经济因素对城市扩张的潜在影响。随着城市系统复杂性增加,高分辨率遥感影像带来的海量数据对模型计算效率提出更高要求,如何优化算法以实现高效模拟是亟待解决的问题。

3.2 机器学习预测模型

(1)机器学习预测模型凭借强大的数据驱动能力,在高分辨率遥感影像城市扩张建模中崭露头角。该模型通过挖掘遥感影像中的光谱信息、空间特征以及历史城市用地数据,构建复杂的非线性映射关系,实现对城市扩张趋势的精准预测。例如,利用卷积神经网络(CNN)自动提取影像中的建筑物、道路等目标特征,结合随机森林、支持向量机等算法进行分类与预测,有效提升建模精度。(2)机器学习方法能够处理高维、异构数据,不仅可以融合多源遥感影像数据,还可结合地理信息数据、人口分布数据等,全面分析影响城市扩

张的驱动因素。其自适应学习能力使其能从大量数据中自动发现潜在规律,无需预先设定复杂的数学模型,对复杂城市系统的动态变化具有更强的适应性和灵活性。

(3) 机器学习预测模型也存在局限性。模型的性能高度依赖数据质量与数量,高分辨率遥感影像数据的预处理、特征提取等过程繁琐且对专业技术要求高,数据中的噪声和误差会影响模型准确性。多数机器学习模型的预测结果可解释性较差,难以清晰阐述城市扩张背后的驱动机制,限制了其在城市规划决策中的深度应用^[3]。

3.3 系统动力学模型

(1) 系统动力学模型基于系统科学理论,将城市视为一个包含人口、经济、环境等多个子系统相互作用的复杂动态系统。在高分辨率遥感影像辅助下,该模型能快速且精准地获取城市土地利用现状、生态环境状况等关键数据。借助这些数据,可对各子系统间的物质流、能量流和信息流进行量化分析,构建反映城市扩张内在机制的因果关系网络。(2) 通过建立包含状态变量、速率变量和辅助变量的流图模型,系统动力学模型能够模拟城市扩张过程中各要素的动态反馈机制。例如,分析人口增长与城市建设用地需求之间的正向反馈,以及生态环境约束对城市扩张的负向反馈,预测不同发展策略下城市扩张的长期趋势,为城市可持续发展提供决策依据。(3) 系统动力学模型在建模过程中,对各子系统间关系的简化可能导致部分重要信息丢失,模型结构的构建需要深入理解城市系统运行规律,且参数校准过程复杂,需结合大量实际数据进行反复调整。该模型侧重于宏观层面的系统分析,在整体架构与趋势把握上表现突出,但微观模拟能力薄弱,难以准确刻画城市扩张的空间形态演变细节。

3.4 时空数据分析模型

(1) 时空数据分析模型以时间和空间维度为核心,聚焦高分辨率遥感影像所蕴含的时空信息,通过时空统计、时空插值等方法,揭示城市扩张在时间序列上的演变规律和空间分布特征。该模型利用遥感影像的多时相

数据,构建城市土地利用变化的时空数据集,分析城市扩张的速度、方向和强度等动态指标。(2) 时空数据分析模型能够有效捕捉城市扩张过程中的时空异质性,结合空间自相关分析、时空聚类分析等方法,识别城市扩张的热点区域和冷点区域,以及不同区域扩张模式的时空差异。通过构建时空预测模型,如时空回归模型、时空马尔可夫链模型等,可对未来城市扩张的时空格局进行预测,为城市空间规划和资源合理配置提供科学指导。(3) 时空数据分析模型面临数据量庞大、计算复杂度高的问题,高分辨率遥感影像的高时空分辨率特性导致数据存储和处理难度增加。模型在处理时空数据的动态性和不确定性方面仍存在挑战,如何有效融合多源时空数据、提高模型对复杂时空过程的模拟精度,是进一步提升该模型在城市扩张建模中应用价值的关键^[4]。

结语

综上所述,高分辨率遥感影像在城市扩张监测与建模分析中展现出显著优势。通过多维度监测指标与多样化建模方法的有机结合,有效实现了对城市扩张的精准刻画与科学预测。然而,城市系统的复杂性对研究提出更高要求。未来研究可进一步融合多源数据,优化模型算法,提升对城市动态演变过程的理解与预测能力,更好地服务于城市可持续发展战略。

参考文献

- [1] 李雪涛,王盼成,曾永年.基于高分辨率遥感影像深度特征的城市非渗透表面集成学习提取[J].测绘学报,2024,53(4):700-711.
- [2] 王婷婷,程熙,李斌,等.基于高分辨率遥感影像的城市水体语义分割和制图[J].物探化探计算技术,2025,47(3):466-474.
- [3] 张廷玉,汤燕,傅田甜,等.基于GIS的城市扩张监测与驱动力分析[J].北京测绘,2024,38(5):727-733.
- [4] 张亚男,张承明,李芳.基于多源遥感数据的城市扩张监测与分析[J].山东国土资源,2020,36(5):55-62.