

基于知识图谱的城市动态认知方法与微场景应用^{*}

Urban Dynamic Cognition Methods and Micro-Scenario Applications Based on Knowledge Graphs

闫凤英 卢鋆镁

YAN Fengying, LU Junmo

关键词 城市动态认知；人类活动；知识图谱；空间治理；高校校园

Keywords: urban dynamic cognition; human activity; knowledge graph; spatial governance; university campus

提 要 城市作为由物质空间与人类活动共同构成的复杂系统，其运行过程具有持续演化与反馈的动态特征。近年来，互联网与物联网的快速发展为刻画城市活动的实时过程提供了可能，但如何从碎片化感知中抽取可解释的知识结构，仍是实现城市动态认知的关键问题。因此，研究以知识图谱为载体，融合多源时空数据，构建“人—物—地—时—事—效”为核心语义结构的城市人类活动认知原理方法，实现城市空间与人类活动的多维网状认知与结构化表达。以高校校园为典型微场景，构建包含5.4万个实体节点与11.8万条关系边的知识图谱，开展关系提取与因果溯源分析。结果表明，该方法能够通过活动回溯与语义联通，有效支撑复杂空间中的活动归因与空间治理响应，具有良好的跨尺度可拓展性与可迁移性，为构建新技术时代的行为驱动的规划治理响应提供了可行路径与方法支撑。

Abstract: Cities, as complex systems composed of physical spaces and human activities, operate through continuously evolving, feedback-driven processes. With the rapid advancement of the Internet and the Internet of Things (IoT), real-time capture of urban activities has become increasingly feasible. However, transforming fragmented sensing data into interpretable knowledge structures remains a key challenge for achieving dynamic urban cognition. To address this issue, this study proposes a knowledge graph–driven framework that integrates multi-source spatiotemporal data and constructs a core semantic structure of "human—object—place—time—event—effect." This framework enables multidimensional, networked perception and structured representation of urban spaces and human activities. Using a university campus as a representative micro-scale scenario, a knowledge graph comprising 54,000 entity nodes and 118,000 relational edges was constructed to perform relation extraction and causal tracing analyses. The results demonstrate that the proposed approach effectively supports activity attribution and spatial governance in complex environments through activity backtracking and semantic linkage. It also exhibits strong scalability and transferability across spatial scales. This research provides a feasible methodological pathway for behavior-driven planning and governance in the era of intelligent urban technologies.

中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.16361/j.upf.202505008

文章编号 1000-3363(2025)05-0039-08

作者简介

闫凤英，天津大学建筑学院讲席教授、博士生导师，fengying@tju.edu.cn
卢鋆镁，天津大学建筑学院博士研究生

* 国家自然科学基金重点项目“数智融合的城市空间规划与治理协同控碳关键机理研究”（项目编号：52338002）；国家自然科学基金专项项目“基于多源数据驱动的城市人类活动碳排放与低碳规划决策支持研究”（项目编号：42341207）

城市是多要素耦合与多尺度演化的复杂系统，其运行并非静态结构的平衡结果，而是一种持续重构的动态过程。物质空间与人类活动之间的相互作用，使城市处于不断的再组织中^[1]，这种动态性不是城市化带来的副产物，而是城市自身的存在方式。正因如此，对城市的认知不应停留于结构性的空间形态，而应聚焦于捕捉并解析活动与环境交互正在发生的过程，以及背后隐含的机制与逻辑^[2-3]。

随着信息技术的发展，城市的动态性得以被前所未有地记录与量化。传感器网络、移动信令、社交媒体^[5]等多源时空大数据使人类活动的时空分布与演化特征被实时感知，推动城市研究从静态描述转向动态分析^[6]。然而，海量数据的积累并未自然转化为对城市运行的深层认知：现有研究仍以现象描述与统计归纳为主^[7]，缺乏将多维感知结果转化为可解释知识体系的机制。如何从数据的汇聚迈向认知的深化，成为当前城市科学面临的关键命题。

现有的感知技术与解析方法能够捕捉活动特征，但难以系统表达多主体、多要素之间的语义关系与因果链条。为解决这一问题，知识图谱（knowledge graph, KG）作为一种结构化语义表达与知识推理工具被引入城市研究领域。与依托静态信息的分析方法不同，知识图谱以“实体—关系—实体”三元组为基本单元，构建联结多维信息的动态语义网络，实现对城市活动过程的结构化表达^[8]。在城市功能认知、交通疏导、能耗管理等特定治理场景中，知识图谱在城市活动因果推理与逻辑表达方面的应用潜力得以验证。

基于此，本研究提出一种基于知识图谱的城市动态认知方法。该方法以“感知—理解—干预”的闭环结构贯通多源数据采集、语义建模与机制推理过程，通过构建“人—物—地—时—事—效”全要素的知识映射，实现从数据集成到机制认知的贯通。以典型校园空间为实验场景，验证模型在活动识别、结果溯源与动态干预等方面可行性与可拓展性。这一探索旨在为理解城市人类活动与物质空间环境的耦合机制提供新的认知框架，为行为驱动型城市治理提供方

法创新与理论支撑。

1 从空间感知到综合解析

1.1 城市认知理论演进

城市认知通常是指人类在与城市环境交互过程中对空间结构、功能关系及社会意义的表征与理解过程。它不仅关注“城市被如何感知”，更强调“城市如何被理解与解释”，是连接物质空间、行为机制与规划决策的重要中介。

城市认知研究的早期发展深受结构主义与空间形态学思想的影响，主要聚焦于城市物质形态的组织规律与视觉秩序。20世纪中叶，凯文·林奇以实证调研的方式提出城市意象的五要素理论（路径、边界、区块、节点与地标）^[9-10]，系统揭示了个体对城市空间的认知逻辑。这一理论奠定了城市认知的基础范式。简·雅各布斯^[11]则从社会互动视角强调街道生活的复杂性与多样性，扩展了对城市活动的关注范围。实证主义地理学则通过演绎与归纳推理强化了空间过程的量化刻画。这一阶段聚焦于城市可视性与秩序感，通过描述性方法揭示空间形态对个体感知的影响，奠定了规划学关注空间可识别性与场所价值的理论基础。

然而，对空间问题的过度简化导致研究一度忽视了城市中“人”的作用，引发了学界的反思浪潮^[12]。1960年代兴起的行为地理学强调个体与微观过程的重要性^[13-14]，为理解人类活动与地理环境在时空间上的复杂关系提供了新的视角。诺伯格-舒尔茨^[15]的与伊夫·图安^[16]从现象学与人本主义角度进一步深化了城市认知的思想内涵，强调感知经验、情感与意义在空间中的生成。托尔斯滕·哈格斯特兰的时间地理学通过“时间—空间路径”揭示了活动、约束与机会的动态关系^[17]，使城市认知的视角从静态空间感知拓展为对时空行为过程的系统理解。关于行为约束与决策机制的研究进一步表明，个体活动并非随机分布，而是在时间、资源与社会网络等多重制约下呈现出可分析的规律，推动城市认知从视觉表征走向过程分析，为理解空间配置与行为选择之间的因果链提供了新的理论支撑。

在此基础上，学界逐渐认识到，仅

从空间或行为的单一维度难以解释城市运行的复杂性。以社会空间理论与空间—行为交互理论为代表的新一轮理论整合，推动城市认知进入“物理空间—人类活动耦合”的研究阶段^[18]。进入信息化时代后，城市信息学的兴起，以及多源时空数据、人工智能与知识图谱等技术的引入，使城市认知从理论概念走向系统建模，城市不再仅是被感知和表征的对象，而成为可被实时理解、预测与干预的复杂系统^[19]。

总体来看，城市认知理论经历了从空间刻画到行为解析，再到数据驱动的系统认知的演化路径，不仅为技术方法的创新奠定了思想基础，也使“空间—活动互动”成为理解城市复杂运行机制的关键命题。

1.2 城市感知技术发展

在理论框架逐渐从空间—行为耦合转向系统认知之后，相关研究聚焦于以技术手段实现对城市运行机制的动态感知——通过多种技术手段获取城市中物质环境与人类活动的信息，并进行识别、收集和分类，为城市认知提供可计算的基础。城市感知技术的发展经历了从经验推演、人工调查到智能感知的演变，其核心在于感知对象从物质空间向人类活动的拓展，感知手段从单一数据源向多源融合，感知内容从静态刻画向动态时空过程的转型。

早期的城市感知以人工观测与经验调研为主，依托研究者的实地踏勘、问卷调查和统计数据获取城市空间特征，在数据完整性和覆盖范围方面存在局限。随着遥感影像与地理信息系统（GIS）的广泛应用，城市感知进入以“空间—图像—指标”为核心的数字化测绘阶段^[20]。此时的感知对象以地物、建筑、道路等物质空间要素为主，数据结构以栅格化或矢量化形式为主，实现了静态空间信息的精细化定量表达。

随着移动互联网与物联网技术的发展，空天地一体化的智慧基础设施逐渐完善，城市感知逐步迈入智能化与多源化阶段^[21]。以专业传感器采集的多时相、多光谱遥感影像、街景图像与环境监测数据为基础，结合以人为载体的社会感知（如手机信令、社交媒体、轨迹数据）和众包感知（如用户上传的照片、文本

和定位信息)，使得城市动态特征得以实时捕获，感知重心也由“物”延展至“人”^[22]。这一阶段的研究不仅关注城市空间的物理形态，更注重对个体与群体行为、出行模式、能耗变化等过程性信息的识别与分析^[23]。代表性的研究包括通过手机信令数据识别人群活动强度与功能区动态边界^[24-25]，利用社交媒体数据识别城市情绪与空间偏好^[26-27]，基于交通传感器与视频监控实现城市出行的实时感知^[28-29]。这种多源异构数据的融合使城市从“静态影像”转向“动态过程”的被观测对象，为城市运行的细粒度分析奠定了基础^[30]。

当前，城市感知正朝向综合化、智能化和认知化的方向持续深化。然而，仅依靠感知手段获取和整合数据，仍不足以揭示城市要素之间的内在逻辑关系。如何系统性解析空间结构与人类活动，为城市认知与决策提供支持，成为下一阶段研究的核心议题。

1.3 城市解析方法深化

城市解析是在感知的基础上，对物质空间与人类活动之间的交互关系进行识别、解释与预测的过程，旨在揭示城市运行的内在机制并为决策提供支持。城市解析方法经历了从空间统计到网络建模，再到语义推理的演化，其核心目标逐步由静态格局解析转向动态机制认知。

早期的城市解析主要依托空间统计和区域模型，揭示城市形态与功能配置的宏观规律。以时空分布分析为代表的方法揭示地理要素的空间自相关与演化特征^[31]；以传统统计模型（如重力模型、回归模型等）为代表的定量研究强调空间关系的统计相关性^[32-33]；以空间模型和网络分析为核心的研究，则通过空间句法、可达性分析等方法定量刻画空间结构的组织逻辑^[34-35]。随着人工智能的发展，机器学习与深度学习模型被引入城市研究，极大地提升了对复杂问题的分析能力^[36]。这一阶段的城市解析由结构描述向机制推理过渡，但仍以宏观尺度与聚合数据为主，难以捕捉城市这一复杂系统中多种要素的自组织特征和时空交互过程。

因此，复杂网络理论被引入这一领域，将城市抽象为由人、地、设施、事

件等组成的关系网络，通过分析网络的度分布、小世界性与聚类系数等指标为揭示城市运行的潜在规律提供了新的视角^[37]。在此基础上发展出的多层神经网络模型描述了国土、产业、人口与交通的跨层级联关系^[38]；多主体交互模型进一步将行为逻辑与决策机制引入分析框架，揭示人群行为与空间状态之间的动态响应。三者共同构建了城市复杂系统分析的基础，推动了城市解析由“并行感知”向“交互推理”转变，在理解空间—活动—效应耦合方面取得重要进展。

然而，这些模型在语义表达与逻辑推理方面仍存在不足，尤其是在面对多源异构数据时，难以实现跨领域信息的融合与因果机制的解释。知识图谱的引入为解决这一问题提供了突破口，它在继承网络结构分析优势的同时，强化了跨域数据整合与因果关系建模的能力。POI、社交媒体、视觉感知等数据驱动的城市功能认知已成为研究热点，基于多源数据的城市功能知识图谱被应用于支撑城市功能认知与时空演化分析^[39]；Chen 等^[40]将疫情期间的移动数据构建为动态图谱，用于辅助人流疏导与封控策略的实时调整；Zhu 等^[41]利用交通流量与天气数据图谱提升了短时交通预测的精度；Hu 等^[42]则融合知识图谱与图神经网络，对城市中心区人流与建筑能耗之间的因果关系进行建模，实现楼宇系统的智能调控。这些研究表明，知识图谱不仅可用于城市要素的语义整合，还能作为行为建模与治理推理的中介，将城市要素组织为可计算、可解释的知识体系。

基于这一背景，尝试以知识图谱为核心构建城市认知方法，通过结构化、语义化和动态化的分析框架，构建一种面向城市物质空间与人类活动的全过程交互的知识表达范式，探索贯通“感知—理解—响应”的动态认知体系，支撑多场景、多尺度的行为驱动型城市治理应用。

2 基于知识图谱的城市人类活动全景映射：逻辑与方法

为了感知和解析城市运行的复杂过程，本研究构建以城市物质空间与人类

活动多维信息为对象、以知识图谱为载体的城市动态认知体系，支持对“人—物—地—时—事—效”等要素的结构化表达与动态管理^[43]，可形式化定义为：

$$K_G = \{E, R, S, A\} \quad (1)$$

式中： K_G (knowledge graphs) 表示知识图谱；

E (entity) 表示实体，包含人类活动的具体事物和现象，是知识图谱中的节点；

R (relationship) 表示这些实体之间的关系，是知识图谱中的边；

S (set) = $\{(e_1, r, e_2) | r \in R, e_1, e_2 \in E\}$ ，表示由边将节点连接而成的实体—关系—实体三元组，构成知识图谱的基础语义单元；

A (attribution) 表示实体的属性，满足 $\forall e \in E$ ，其对应属性 $a_e \in A$ ，用于描述实体的身份、时间、空间与数值等特征信息。

2.1 从城市动态过程到知识图谱刻画的关键：实体定义与属性标注

构建城市人类活动的知识图谱，首要任务是识别和定义多维实体。城市中的人类活动涉及大量异构要素，可解析为人、物、地、时、事、效等一系列信息（图1）。这些语义实体共同构成了城市运行的基本信息节点，也是知识图谱建构的结构基础。其中：人或物是活动的主体，涵盖城市空间中执行活动的各类个体与载体；地点则指活动发生的空间场所，包括建筑、道路、广场等空间场所及其组合构成的片区与网络；时间用于刻画活动发生的时间背景，支撑对行为节奏与周期性规律的建模；事件则对应活动主体在特定时间、空间情境中所实施的具体操作，既涵盖静态资源使用（如电、水、气等能源的消耗），也包括动态行为过程（如通勤路径、空间流动、社交聚集）；效果用于反映城市人类活动在不同时间与空间中发生后所产生的影响，包括但不限于来自多元感知设备的建筑能耗、交通负载、空间强度等信息，是动态认知链条中面向治理干预的关键终点。

每类实体在图谱中均需具备完整的属性信息。属性类型不设固定维度，应依据实体本身在现实语境中的特征进行

灵活定义，通常包括身份标识（如ID、名称）、时空属性（如经纬度、时间戳）、行为属性（如角色、状态）、数值信息（如能耗、流量等）以及其他能够表征实体特征的信息，以实现对实体状态的多角度刻画。实体与其属性构成知识图谱的第一层结构维度是后续逻辑建构和因果表达的基础。

2.2 从城市多维要素到语义网络构建的核心：结构化处理与关系映射

在实体与属性定义的框架下，需将海量的人类活动感知数据转化为可统一操作的结构化信息。本研究借助深度学习方法，将视频图像、社交媒体文本、定位轨迹等多维信息进行处理。具体而言，视频图像可通过目标检测模型识别出人群与交通主体，社交媒体文本可借助语言模型提取行为事件、空间位置与时间标签，轨迹数据则结合时序建模方法识别路径模式与活动特征。所有数据在Python环境下进行格式转换与空间坐标解析，并统一存入Neo4j图数据库中，实现了从多源异构的原始数据到结构化语义单元的转换。

在结构化数据基础上，需进一步识别实体之间的语义关系，以构建具有逻辑表达能力的结构网络。城市系统中的语义关系包括但不限于空间邻接与归属、时间顺序与持续、行为执行、事件响应。这些关系反映了城市要素在语义层面上的真实互动，为建构“谁—在何地—因何—以何方式—产生何种结果”的逻辑链条提供了语义支撑。

基于此，构建耦合空间、时间与行为约束的规则体系，用以实现结构化数据间语义关系的半自动推理。其中：基础关系（如“发生于”“从属于”）通过在Python中利用pandas函数进行字段匹配而自动生成；空间关系依据经纬度，利用geopandas与shapely库计算空间距离，当距离小于设定阈值时，系统自动生成“位于”“相邻”“途径”等关系。时间关系（如“同步”“连续”）通过时间戳差值识别；行为关系（如“参与”“共现”）则根据主体标识与事件记录在时间窗内的重叠自动推导，逻辑由pandas时间序列函数实现。对于复杂语义关系（如“影响”“响应”“导致”等），则

结合专家知识设定逻辑规则，形成“人工标注+规则推理”的混合生成机制，以平衡语义准确性与计算可扩展性。

最终，结构化片段被映射为以“人—事—地—时—物—效”为核心的三元组，并以Neo4j等平台为载体嵌入知识图谱中，实现节点与关系的组织、查询与动态更新，从而为城市运行机制的认知与治理提供可操作的知识载体。见图2。

2.3 从数据集成到知识认知的桥梁：路径查询与推理分析

在完成知识图谱的构建后，本研究进一步引入了基于关系路径匹配与语义相似度计算的图谱推理分析方法，以实

现对多维语义网络从显性关系到潜在因果链条的知识认知。

关系路径匹配通过多跳关系路径推理，揭示潜在的行为链或空间依赖。例如，当“主体A—参与—事件B—发生在—建筑C”与“建筑C—邻近—建筑D”同时存在时，可通过路径推理识别出“主体A可能在建筑D附近活动”的隐含关系。这一方法依托Neo4j图数据库中利用Cypher查询语言的路径模式匹配功能，结合Python的NetworkX图分析库，实现多跳关系的自动检索与路径推断。

语义相似度计算则用于在多源实体中识别属性相似、功能接近或行为模式一致的对象。通过调用Python中的gensim与scikit-learn库对实体节点的属性信

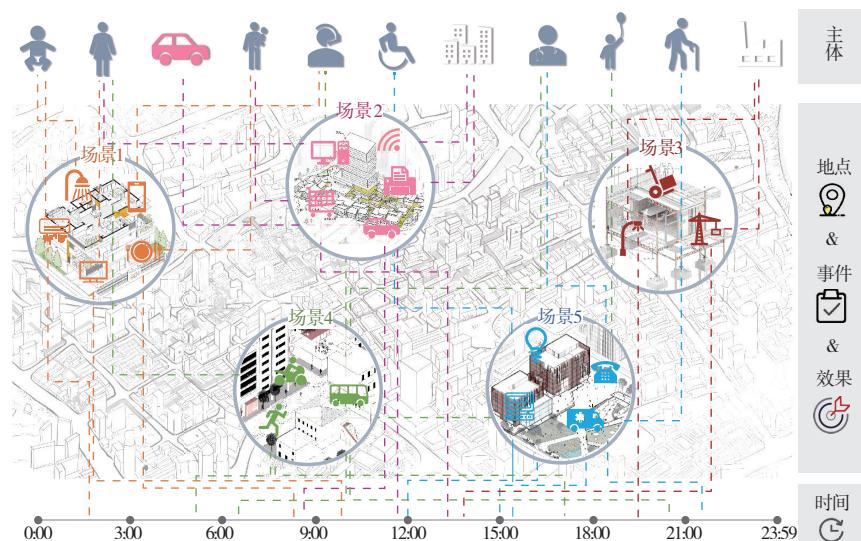


图1 城市活动知识图谱中的多维实体
Fig.1 Multidimensional entities in the urban activity KG



图2 基于知识图谱的城市物质空间—人类活动映射路径
Fig.2 Mapping pathway of urban physical space and human activities based on the KG

息作向量化处理，并结合 Neo4j 的节点相似度（node similarity）算法，对空间场与行为事件的语义相似度进行综合评估，从而揭示城市系统中的模式复现与功能耦合现象。

图谱推理体系在 Neo4j 图数据库环境中实现，数据预处理、路径检索与语义相似度计算等过程均在 Python 平台中完成，推理结果通过 Cypher 语句回写入 Neo4j 数据库，形成动态更新的知识网络。这一过程不仅实现了对城市物质空间与人类活动的全景表达，更有助于揭示行为链条、空间依赖及其因果机制。

3 基于知识图谱的城市微场景（高校校园）多维认知

3.1 研究对象与场景选择

为验证所提出方法的可行性和应用潜力，选取天津市郊区具备代表性和数据可获取性的高校 A 新校区作为微观试验平台。高校 A 新校区总面积超过 240 万 m²，建筑面积达 155 万 m²，空间布局采用学科带+功能带的规划模式，功能区边界清晰，活动类型丰富。同时，校区内部署完善的视频监控系统与智能计量设备，为构建知识图谱提供了数据支撑。

3.2 多源数据采集与结构化处理

结合实地调研与互联网大数据，获

取了该校园 2023—2024 年秋季学期（2023 年 9 月 1 日—2024 年 1 月 1 日）的活动信息，构建了涵盖建筑工程图纸、地理信息、社交媒体信息、交通监控和能耗计量文本的复合数据体系。数据主要来源于学校后勤管理部门提供的统计资料与公开网络平台的开源数据。由于手机信令数据受隐私保护与数据授权限制，获取难度较大，因此以机动车出行作为人的出行代理变量，用以刻画校园通勤行为。

在数据处理阶段，引入 YOLOv8 模型与 SDV（synthetic data vault）算法等智能方法，对多模态数据进行格式标准化、时间戳对齐与实体统一编码处理，整合成校园多维信息一张图（图 3），为知识图谱构建提供高质量、规范化的数据接口。

3.3 校园活动知识图谱的建模结果与特征

基于结构化处理后的数据，以 Neo4j 图数据库为载体构建校园活动知识图谱（图 4），共包含约 5.4 万个节点与 11.8 万条关系边，覆盖了校园内各类活动主体、行为事件、空间实体与能耗记录。图谱中，实体间的多层次关系及其与时间、空间、因果属性共同构成知识网络，能够通过语义查询与因果追溯，实现对异

常活动轨迹、高能耗场所、密集聚集事件等治理关键问题的快速响应分析。

4 知识图谱在城市认知中的应用与启示

4.1 校园场景中的治理应用

本研究提出的知识图谱驱动的城市动态认知方法，能够实现全域活动规律的结构化表达，并支持从任意节点出发的多维信息聚合与因果解析。其中，“效”维度用以表征人类活动在时间与空间上的结果性响应，是图谱认知的核心环节，也是城市治理的落脚点。因此，依托高校 A 校园活动知识图谱，选取 2023 年 12 月 18 日这一典型教学日的早高峰时段（7:30—8:30）作为观察窗口，随机抽取一辆入校机动车作为语义查询的起点，重点围绕其效果维度的属性特征与语义内涵开展探索，挖掘知识图谱在语义整合与因果逻辑识别中的应用潜力。

4.1.1 通勤路径识别：个体活动与空间轨迹

依托知识图谱的结构化组织与语义查询功能，系统以北门监控摄像头捕捉到的车辆津 H1Z* 为查询起点，识别其在 2023 年 12 月 18 日 8:17 进入校园后产生的出行活动节点 T041，并对这一通勤行为进行回溯 [图 5(a)]。图谱自动调用该通勤

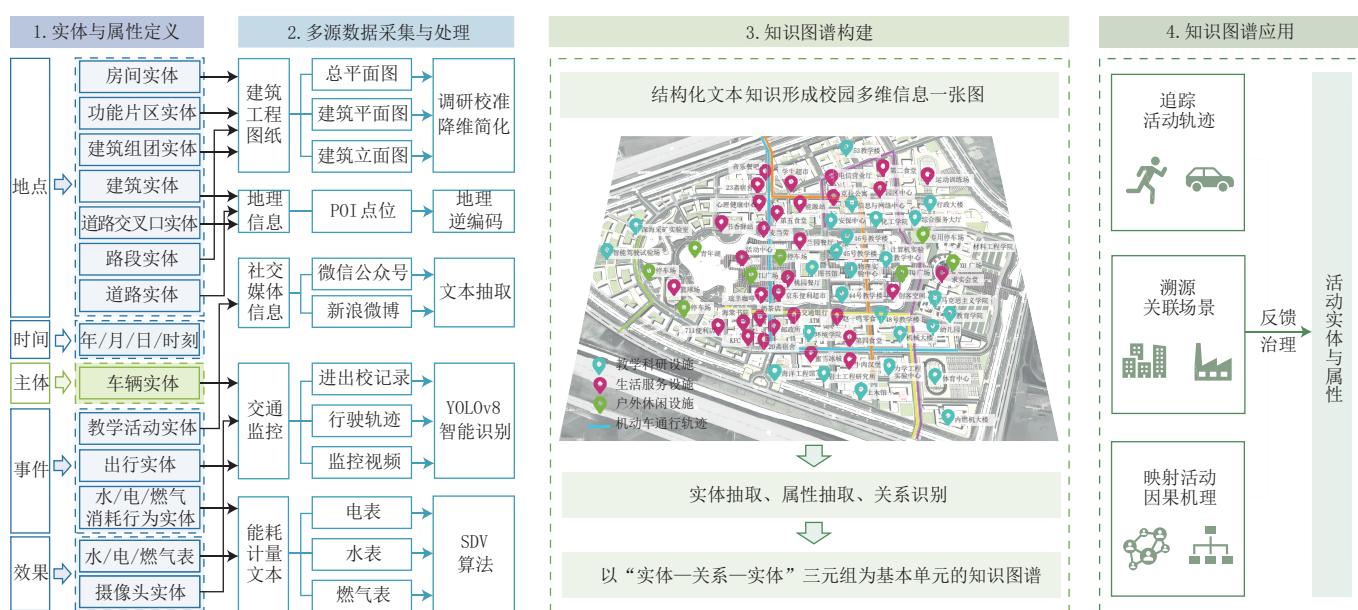


图 3 天津市高校 A 知识图谱构建技术路线

Fig.3 Technical roadmap for constructing KG of campus A, Tianjin

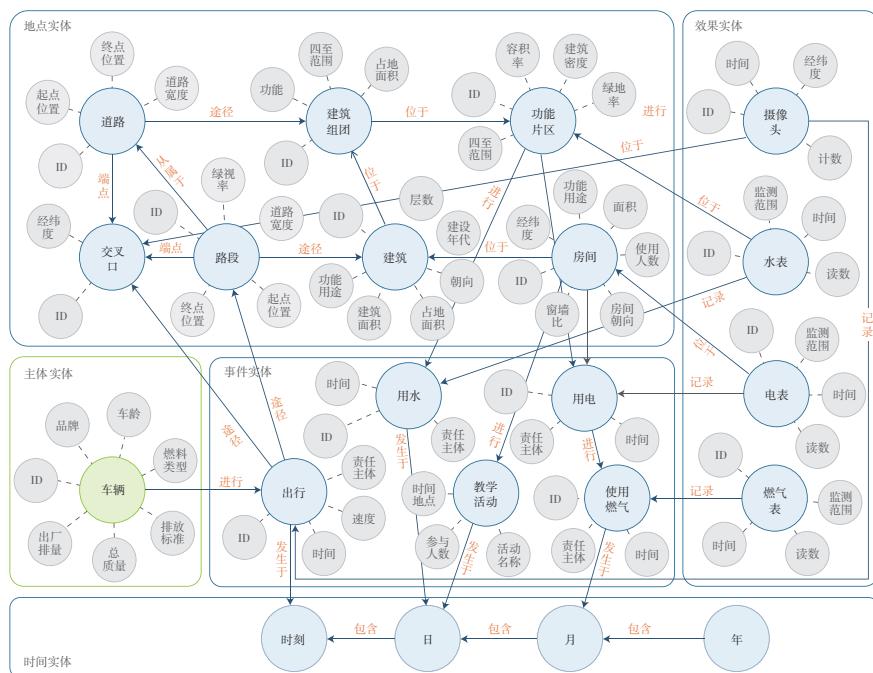


图4 天津市高校A活动知识图谱实体与属性定义

Fig.4 Entity and attribute definitions in the activity KG of campus A, Tianjin

事件的路径属性与相邻节点关系，完成机动车个体轨迹在校园空间网络中的语义重建。

路径追踪结果显示，该车辆从北门进入校园后，依次经过P01、P37、P56、P57、P58五个交叉口，最终停靠于55号教学楼附近，形成“XY北路—XY中路—MD北道”这一通勤路线。基于图谱中各个摄像头节点的车流量属性可知，该通勤路线是早高峰时段交通压力最为集中的主通道，其平均车流密度显著高于同期其他通行路径，承载了校园内大量跨区流动行为。

机动车轨迹的复原展示了知识图谱从个体节点出发构建完整行为链条的能力，为后续识别高频出行规律、挖掘空间使用逻辑提供了结构基础。

4.1.2 语义信息联动：空间要素网络与聚集特征

在识别出该通勤路径的基础上，系统进一步基于知识图谱的实体属性与语

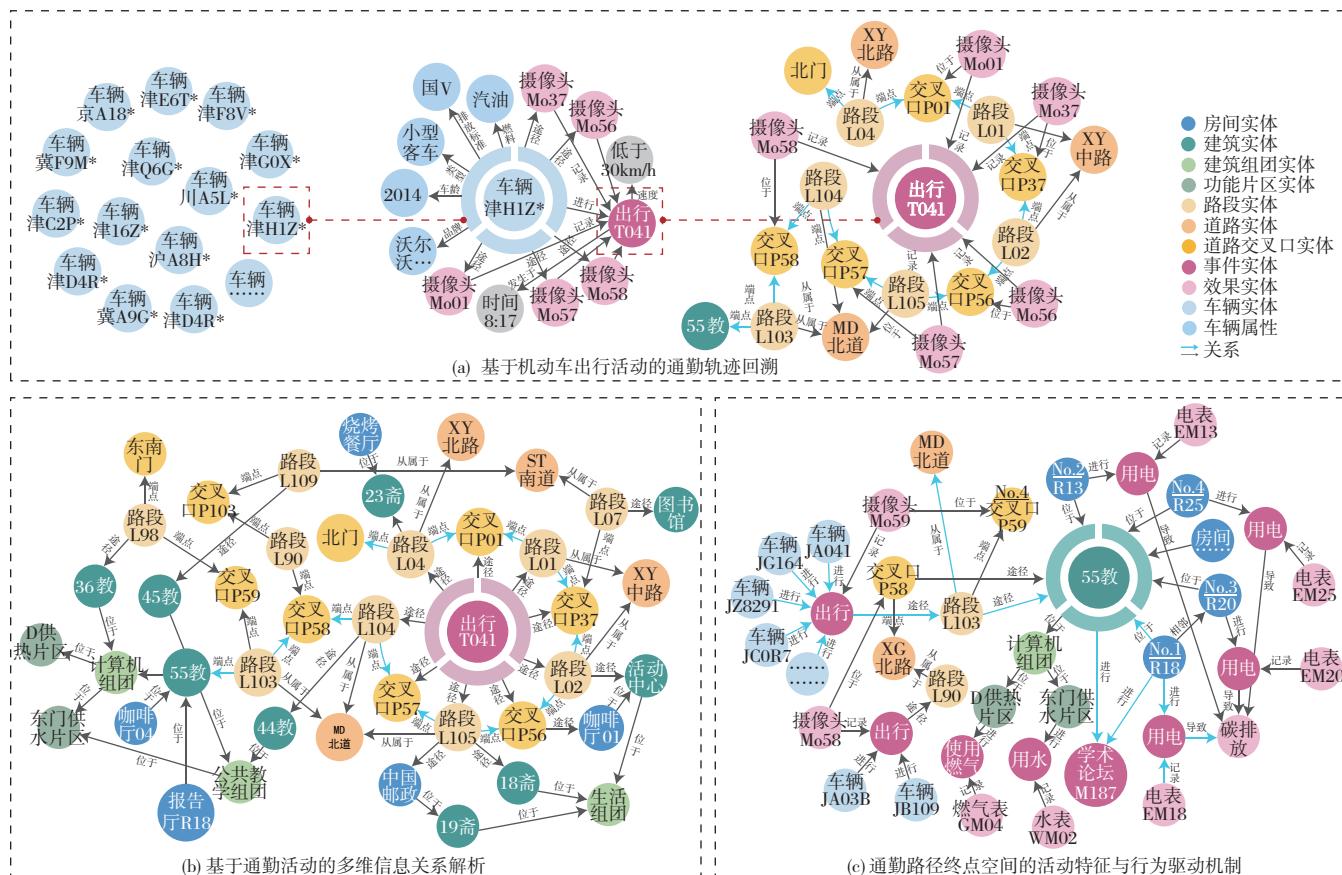


图5 知识图谱在校园场景中的治理应用

Fig.5 The application of KG in campus governance

资料来源：改编自高校A活动知识图谱

义关联机制，解析其所联通的多维空间结构与功能节点，揭示其背后的空间行为逻辑。

结果表明，通勤终点55号教学楼隶属于计算机学院组团，是全校师生数量多、教学与科研教学活动密集的单位之一，是高频通勤的典型目的地[图5(b)]。该通勤沿途经过多个学生宿舍、图书馆、活动中心、45号教学楼等重要的公共场所，串联起学生群体“居住—学习—交流”的日常行为链条。同时，这一路径还覆盖了生活组团中的超市、餐厅、邮政网点等服务设施节点。商业设施与教学设施的空间集聚效应叠加，显著提升了这一区域的人流吸附能力，进而形成了教学功能与生活服务共同牵引的空间—行为热点耦合关系。

空间信息的联动查询验证了知识图谱系统在以个体行为链为起点，自动关联至全域多维信息的能力，为理解校园内复杂空间结构与行为机制之间的互动关系提供了认知路径。

4.1.3 因果逻辑解析：事件驱动与能耗响应

基于前述通勤行为的终点位置，系统进一步调用知识图谱的语义关联模块，对55号教学楼相关的空间实体与活动内容进行深度查询与结构溯源。

首先，基于建筑节点属性的查询结果显示，55号教学楼所在的计算机教学组团隶属于D供热片区与东门供水片区，其用水与用能活动均被记录于片区量表中。该建筑内部包含174个房间，涵盖教室、实验室、会议室、报告厅、咖啡厅及洗手间等多种使用功能，其用电数据由各房间电表逐日采集，并实时记录于图谱的能耗节点属性中。进一步调取图谱中按日聚合的房间节点能耗属性发现，当日用电量排名前3%的29个房间中，有11个位于55号教学楼内部，占比高达37.9%。其中，R18报告厅的当日用电量高达87.3 kWh，折算碳排放69.4 kg，位列当日全校近万个房间之首，能源负荷显著高于校园内其他常规教学空间。

其次，系统调用知识图谱的语义溯源功能，联通55号教学楼的上层空间结构（教学组团、能源子区）、当日行为事件及周边交通节点等多维信息[图5(c)]。结果显示，12月18日当天，计算机学院

在该教学楼内承办了一场大型学术论坛，多个房间分别用于不同类型的研讨交流、成果展示及教学活动。其中，R18报告厅为论坛主会场，参会人数最多、活动持续时间最长，由此形成了当天最集中的能源使用需求。同时，L90与L103两条与55号教学楼相邻的主要通勤路段，在当日的交通强度曲线上与该建筑内多个房间的用电量变化呈现出高度一致的时序波动，揭示了以大型教学活动为驱动的“行为触发—空间聚集—能源消耗”典型机制，也反映了城市微尺度单元中多元要素交互作用的动态过程。

通过对图谱节点之间语义关联路径的追溯，系统有效整合了原本分散的多维信息，复原了校园活动背后的因果逻辑，为治理干预提供了结构性支撑。

4.2 多场景推广与方法论启示

基于校园场景的知识图谱实证研究，不仅验证了该方法在高密度空间中的信息整合与语义建模能力，也为理解更大尺度的城市行为过程提供了可推广的分析思路。通过对个体活动链条、空间使用频率及行为共现关系的识别，可揭示城市空间组织中普遍存在的行为逻辑与空间响应规律，为复杂城市问题的动态认知提供了微观参照。

作为贯通“识别—归因—模拟—反馈”全流程的核心载体，知识图谱的语义框架具有高度的可重构性，其中，实体与关系类型可根据应用场景灵活定义或增减，属性亦可实现动态更新，从而在不改变整体语义逻辑的前提下，适配多样化的数据源与认知需求。这一特征使本研究构建的认知模型能够在不同空间层级和主题领域中保持语义一致性与逻辑可解释性。由此，方法可进一步扩展至居住社区、工业园区、商业区等多类型城市空间乃至城市全域，并在能源管理、环境调控、遗产保护、城市更新等不同领域实现多维认知与响应建模。

从学科层面来看，知识图谱推动了城市规划研究从静态空间描述向动态认知分析的转变，构建了“信息—知识—认知”的逻辑链条，其意义不仅在于实现了城市多维要素的结构化整合与全景表达，更在于以可计算、可解释的方式揭示城市运行机制，为数字孪生城市建

设与智慧治理提供了新的实现路径，推动规划决策由经验导向向数据驱动、知识驱动转型，实现学科理论与治理实践的双向融合与创新。

5 结论与展望

本研究面向当前城市物质空间与人类活动耦合分析粒度不足、响应机制分离的问题，提出了一种基于知识图谱的城市动态认知方法。该方法以“人—物—地—时—事—效”的语义结构为核心，实现了从多源数据采集、行为建模到响应支撑的全流程闭环。

在高校校园的实证研究中，构建的人类活动知识图谱展现出良好的信息聚合与语义关联能力，有效支撑了从个体轨迹追踪、空间关系识别到因果机制解析的多维分析任务。研究验证了该方法在微尺度空间治理中的适用性与可扩展性，体现出知识图谱在增强动态认知方法的语义整合、结构表达与推理演绎等多方面的潜力。从城市规划治理视角出发，该方法为构建以“人—场景—行为”逻辑为核心的动态认知体系提供了技术路径，具备可推广的分析思路与可移植、可拓展的方法模型，能够嵌入中心区交通组织优化、工业园区环境监测调控、历史文化遗产保护更新等多类规划实践场景，助力实现从静态配置导向到动态行为驱动的治理范式转型。

未来，城市动态认知系统仍需在三个关键方向持续深化：一是推动输入端的数据接入自动化，提升对异构数据的实时处理能力；二是强化图谱中的信息挖掘深度，增强对复杂行为模式与语义关系的识别与建构能力；三是拓展图谱与决策端之间的耦合机制，提升策略反馈、场景模拟与跨部门协同的能力。上述路径将共同推动城市知识图谱从数据组织工具向城市治理平台的转化，为新型城市治理体系的构建提供支撑。

参考文献

- [1] BATTY M. The pulse of the city[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2010, 37(4): 575–577.
- [2] 杨俊宴, 张珣, 杨清心, 等. 溯源筑基: 城乡规划学的学科发展地貌图解析[J]. 城市规

- 划, 2025, 49(5): 4–16.
- [3] 王德, 胡杨. 城市时空行为规划: 概念、框架与展望[J]. 城市规划学刊, 2022(1): 44–50.
- [4] 邵云通, 吴晓.“等级—网络”双维度下长三角城市关联性的演变模式: 基于人口流动大数据的分析[J]. 城市规划学刊, 2023(6): 59–67.
- [5] 王伟强, 马晓娇. 基于多源数据的滨水公共空间活力评价研究: 以黄浦江滨水区为例[J]. 城市规划学刊, 2020(1): 48–56.
- [6] 吴志强, 何睿, 陈泽胤, 等. 智能场景: 全球246项案例的概念探讨与城市规划实践[J]. 城市规划学刊, 2024(5): 12–17.
- [7] 钮心毅, 林诗佳. 城市规划研究中的时空大数据: 技术演进、研究议题与前沿趋势[J]. 城市规划学刊, 2022(6): 50–57.
- [8] 赵珂, 段林伶, 李洁莲. 知识图谱技术支持: DIKW模型启示下智慧城市规划方式[J]. 国际城市规划, 2023, 38(1): 1–13.
- [9] 李杰文, 王红扬. 城市空间同质化问题的思辨与超越: 以上海武康路项目为例[J]. 城市规划, 2024, 48(1): 79–89.
- [10] 肖作鹏, 董子烨, 崔翀, 等. 面向时间的城市设计理论与实践探索[J]. 上海城市规划, 2024(2): 8–14.
- [11] JACOBS J. The death and life of great American cities[J]. New York Times Book Review, 2021, 12625.
- [12] JOHNSTON R J. Philosophy and human geography: an introduction contemporary approaches[M]. New York: Wiley, 1986.
- [13] 塔娜, 柴彦威. 行为地理学的学科定位与前沿方向[J]. 地理科学进展, 2022, 41(1): 1–15.
- [14] 张文佳, 鲁大铭. 行为地理学的方法论与微观人地关系研究范式[J]. 地理科学进展, 2022, 41(1): 27–39.
- [15] NORBERG-SCHULZ C. Genius loci: towards a phenomenology of architecture [M]. New York: Rizzoli, 1979.
- [16] TUAN Y F. Space and place: the perspective of experience[M]. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1977.
- [17] ELLEGÅRD K, SVEDIN U. Torsten Hägerstrand's time-geography as the cradle of the activity approach in transport geography[J]. Journal of Transport Geography, 2012, 23: 17–25.
- [18] 柴彦威, 谭一洛, 申悦, 等. 空间—行为互动理论构建的基本思路[J]. 地理研究, 2017, 36(10): 1959–1970.
- [19] 刘超, 吴志强. 城市信息学在规划科研实践与教育中的进展研究[J]. 国际城市规划, 2024, 39(1): 1–10.
- [20] 宁晓刚, 王浩, 张翰超, 等. 2000—2016年中国地级以上城市高精度城区边界遥感提取及时空扩展分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 1916–1926.
- [21] 龚健雅, 张翔, 向隆刚, 等. 智慧城市综合感知与智能决策的进展及应用[J]. 测绘学报, 2019, 48(12): 1482–1497.
- [22] 涂伟, 曹劲舟, 高琦丽, 等. 融合多源时空大数据感知城市动态[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(12): 1875–1883.
- [23] 韩胜发, 李继军, 崔蕴泽. 基于图像数据与时空数据的城市意向理论新发现: 局限、拓展与应用[J]. 城市规划学刊, 2024(增刊1): 127–133.
- [24] 田琳, 程遥, 钮心毅. 网络视角下的村镇空间组织: 基于杭州市临安区居民出行联系的分析[J]. 城市规划学刊, 2023(1): 104–110.
- [25] 肖宏伟, 赵民, 张捷, 等. 新时代“新城”的多尺度空间关联性分析及规划议题: 以北京、上海、广州为例[J]. 城市规划学刊, 2022 (6): 18–27.
- [26] 刘坚, 孟斌, 陈思宇, 等. 多源大数据下的北京市居民就餐活动与城市空间关系探究[J]. 人文地理, 2021, 36(2): 63–72.
- [27] 李哲睿, 甄峰, 黄刚, 等. 基于多源数据的城镇中心性测度及规划应用: 以常州为例[J]. 城市规划学刊, 2019(3): 111–118.
- [28] 孔宇, 甄峰, 张姗琪. 智能技术对城市居民活动影响的研究进展与展望[J]. 地理科学, 2022, 42(3): 413–425.
- [29] 李晓江, 吕晚禧, 邵玲, 等.“社区减碳”: 计量方法、排放特征及其实现路径[J]. 城市规划学刊, 2024(5): 40–46.
- [30] 陈军, 张姗琪, 张兵, 等. 时空信息赋能国土空间规划的发展方向[J]. 城市规划学刊, 2025(2): 20–27.
- [31] XU Y, CHEN D, ZHANG X, et al. Unravel the landscape and pulses of cycling activities from a dockless bike-sharing system [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2019, 75: 184–203.
- [32] LIN J J, YANG A T. Structural analysis of how urban form impacts travel demand: evidence from Taipei[J]. Urban Studies, 2009, 46(9): 1951–1967.
- [33] 陆希刚, 宋祖萱, 庞磊. 人口迁移空间互动的度量与诠释: 以“六普”“七普”省际迁移流为例[J]. 城市规划学刊, 2025(2): 35–42.
- [34] LONG Y H, JIANXIN Q, WU Y, et al. Analysis of urban park accessibility based on space syntax: take the urban area of Changsha city as an example[J]. Land, 2023, 12(5): 1061.
- [35] PAN Z G, LAN G W, FAN D L, et al. Analysis of accessibility of urban roads based on space syntax and distance measurement[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2020, 42(3/W10): 159–165.
- [36] 杨东峰, 王晓萌, 韩瑞娜. 建成环境对街道活力的非线性影响和交互效应: 以沈阳为例[J]. 城市规划学刊, 2023(5): 93–102.
- [37] 张济宁, 卓健, 翟端强, 等. 网络视角下职住空间关系的表象、逻辑、困境及应对研究[J]. 城市规划学刊, 2025(4): 112–121.
- [38] ZHANG D S, HE T, ZHANG F, et al. Urban-scale human mobility modeling with multi-source urban network data[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2018, 26(2): 671–684.
- [39] PANDEY S, PATEL A S. Urban scene representation and summarization using knowledge graph[J]. Expert Systems with Applications, 2025, 275: 126956.
- [40] CHEN T, ZHANG Y M, QIAN X W, et al. A knowledge graph-based method for epidemic contact tracing in public transportation[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 137: 103587.
- [41] ZHU J W, HAN X, DENG H H, et al. KST-GCN: a knowledge-driven spatial-temporal graph convolutional network for traffic forecasting[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(9): 15055–15065.
- [42] HU Y Q, CHENG X Y, WANG S H, et al. Time series forecasting for urban building energy consumption based on graph convolutional network[J]. Applied Energy, 2022, 307: 118231.
- [43] RODRIGUEZ H, CLIMENT S, VOSSEN P, et al. The top-down strategy for building EuroWordNet: vocabulary coverage, base concepts and top ontology[J]. Computers and the Humanities, 1998, 32 (2–3): 117–152.