

城市科学视角下的时空智能与新时期城市精细化治理:理论、方法与应用途径*

Spatiotemporal Intelligence and Refined Urban Governance in the New Era: Theories, Methods, and Application Approaches from an Urban Science Perspective

许立言 XU Liyan

摘 要 城市的精细化治理是国家治理体系与治理能力现代化的重要维度,时空智能在该事业中扮演重要角色。从城市科学的角度,结合新时期的目标与任务,试论述以时空智能支持城市精细化治理的理论基础、方法框架和应用途径。首先扼要梳理时空智能研究的谱系,并指出既有城市科学研究分别从地理模式、机制和调控的角度出发,不仅为城市精细化治理建立了充分的可行性基础,而且设定了理论上所能达到的目标;大量方法研究亦为城市空间格局分析、交互和时间动态规律挖掘、问题归因和趋势预测,以及运筹优化提供了丰富的工具库。进一步地,通过具体案例展示上述时空智能工具在从城市态势感知、空间管理、响应处置、预判预警到体制机制建设的城市精细化治理完整闭环中的应用途径。

Abstract Refined urban governance is an important dimension of the modernization of the national governance system and governance capacity, and spatiotemporal intelligence plays a significant role in this endeavor. This paper, from the perspective of urban science and considering the objectives and tasks of the New Era, attempts to discuss the theoretical basis, methodological framework, and application pathways for spatiotemporal intelligence to support urban governance. This paper first briefly reviews the research spectrum of spatiotemporal intelligence and points out that existing urban science research has established a solid foundation for urban governance from the perspectives of geographical patterns, mechanisms, and regulation, while also setting theoretical goals that can be achieved. Many methodological studies have also provided a rich toolkit for urban spatial pattern analysis, interaction and temporal dynamic pattern mining, problem attribution and trend prediction, as well as operational optimization. This paper further demonstrates, through specific cases, the application pathways of the aforementioned spatiotemporal intelligence tools in the complete closed-loop of urban governance, from urban situation awareness, spatial management, response and disposal, prediction and warning, to institutional building.

关 键 词 时空智能;城市科学;城市治理;精细化治理;社会感知

Key words spatiotemporal intelligence; urban science; urban governance; refined governance; social sensing

文章编号 1673-8985 (2025) 02-0007-08 中图分类号 TU981 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. sup. 20250202

作者简介

许立言

北京大学建筑与景观设计学院

研究员,博士生导师,xuliyan@pku.edu.cn

0 引言

城市治理是国家治理体系和能力现代化的重要组成部分。随着我国城市发展进入从规模扩张转向质量提升的新阶段,城市工作的重心正从“设计—建设”的增量阶段转向“监测—优化”的存量阶段。因此,建立全周期、闭环式的精细化治理体系以契合新时期我国城市高质量发展的目标,是推进国家治理体系和

能力现代化的重要维度^[1]。然而,现代城市的复杂巨系统特征^{[2]21-28}对传统治理工具构成了根本性挑战。如何精准认知多元城市主体的行为特征,精细分析其相互作用,并精巧调控其行为,从而促进城市运行更加高效、有序,实现城市善治,成为当前城市精细化治理所面临的重要理论与实践问题。

在此背景下,时空智能——即关于时空

*基金项目:国家社会科学基金项目“基于行为科学理论和数据驱动方法的精细化治理研究”(编号22BGL279)资助。

信息的智能体系,对城市精细化治理的意义是明显的。从基础设施到人群活动,城市治理对象的时空属性及复杂关联无疑是普遍的^[3],时空(或在一定语境下简化为“空间”)治理也因此成为城市治理的主要面向之一,要求相应智能化工具的介入^[4]。以“智慧城市”为名的各类时空智能应用近年来蓬勃发展^[5-6],凸显了其普遍的技术价值。

本文希望强调的是,时空智能不仅是一种技术工具。作为从人地关系角度理解和干预城市复杂动态的一种途径,时空智能作为交叉学科的城市科学建立了基本框架。其整合了地理科学、信息科学、复杂系统理论等学科的视角、方法和知识,并植根于地理学“时空模式识别—机制解析—调控优化”的基本范式。近年来,时空智能研究不仅发现了大量关于城市时空对象的实证规律^[7],还揭示了城市中人类活动与物质环境相互作用形成的时空耦合系统的演化模式、因果作用机制和干预渠道^[8]。这些理论突破和实证发现使得城市治理开始从经验直觉转向规律驱动:基于时空模式规律的问题诊断、依托因果推理的策略优化、遵循理论极限的效能评估,正在重塑治理实践的科学基础,并为破解传统城市治理中重静态规划、轻动态调节的困境提供了新的可能。本文的内容框架如图1所示。

1 作为基础科学的时空智能:理论与方法

时空智能的本质是以地理学的研究范式观照作为研究对象的都市,以期揭示城市复杂系统的运行规律,进而指导城市治理实践。地理学的基本研究范式可概括为“模式(格局—过程)—机制—调控”这一三元组^[9]。在城市治理的语境下,模式分析重点强调对特定研究对象自身地理性质的认识,其中格局分析关注空间要素的分布特征与结构模式,建立城市系统的静态认知基础;过程分析揭示时空要素的动态演变轨迹与交互规律,刻画系统的时变行为特征。机制分析则着眼于解析多种地理对象在地理格局形成与过程演化中的因果关联,从而构

建系统运行的理论解释框架。以上构成了地理学研究范式中的实证部分。最后,调控分析构成了地理学研究范式中的规范部分,即面向治理需求,将对地理格局、过程和机制的科学认知转化为可操作的时空干预策略^[10](见图2)。

1.1 时空智能的理论基础:物理定律、机制动力学与调控边界

在地理学范式下,时空智能的理论基础具有丰富的内涵。不妨遵循前述叙事逻辑,将其分为3个层面。首先,在地理模式层面,所谓理论指的是关于城市治理对象(城市中人类、建成环境和其他对象)分布或行为的实证规律,特别是(统计)物理学意义上的规律;其次,在地理机制层面,理论的意涵在于各类城市对象彼此关联的因果性法则和动力学模型;最后,在地理调控层面,理论则更多地体现为调控过程中的涌现性,尤其是城市系统调优限度的理论极值等知识。

城市时空系统的“物理”性规律是时空智能理论的第一层内涵。这些规律通常以统计物理风格“定律”的形式给出,构成了城市科学的实证基础。值得强调的是,虽然城市系统的人类和物质组分看似随机性和差异性很强,但作为一个整体的城市在统计意义上有其稳定的规律,这是城市作为复杂系统之涌现性的体现,也是城市作为一门“科学”研究对象的本体论和认识论基础。学者早已揭示了一些经典的定律,如关于城市规模分布的齐普夫定律(Zipf's Law)^[11]等。这些认识早已成为全体城市研究和实践工作者的共同知识基础。然而,近年来时空观测技术和分析方法的长足进步推动了活跃的基础研究工作,大量关于城市系统的新的重要定律被揭示出来,其进步节奏远远超出了教科书更新的速度,因此值得在此择要略作介绍。

在城市系统的时空格局方面,研究发现城市形态呈现显著的分形特征,相当普遍的分形维度(D≈1.7—1.9)刻画了城市用地形态的自相似特性^[12]^[15];对城市规模演化的认识则经历了从齐普夫定律到更为复杂的无稳态非

幂律分布^[12]^[400]的升级。作为时空过程的典型代表,人类移动(Human Mobility, HM)研究揭示,个体时空行为在多种重要测度上遵循普适的统计分布特征,如移动距离与回转半径的(截断)幂律分布 $P(r) \sim r^{-\beta}$ ^[13]、出行频次的距离频率平方反比律等^[14]^[524]。与此同时,人类移动在群体层面形成多种结构,如层级结构——人类活动存在于一组尺度嵌套的时空容器中,这一发现解释了无标度的幂律分布与主观的特征尺度感受之间的矛盾^[15];向量场结



图1 城市精细化治理的时空智能体系
Fig.1 Spatiotemporal intelligence framework for refined urban governance

资料来源:笔者自绘。



图2 时空智能理论和方法体系
Fig.2 Theoretical and methodological framework of spatiotemporal intelligence

资料来源:笔者自绘。

构——群体移动向量服从高斯定律且具有无旋性,因而可以定义势能场^{[16]4}等。在分布和结构之外,尚有守恒量研究:人类移动在任一时刻最常访问地点数量在25左右,这一发现解决了人类移动高度重复可预测但又缓慢演化这两个发现之间的矛盾^[17]。前述城市形态特征和规模特征在一定程度上被人类移动解释^{[14]525, [18]},这些关联的构建就涉及时空智能理论的第二个层面,即解释和预测。

时空因果机制的解析是时空智能理论的第二层内涵。这里的“机制”至少可以有两种理解,对应两条十分不同的研究进路。一方面,“机制”可以理解为因果推断范式下的因果性关联,对此,扩展的Pearl因果框架^[19]为城市研究提供了可靠的分析工具。通过引入时空反事实推理,可以识别事件传导的因果链,例如商业区犯罪率上升可能源于相邻区域警力重新部署的溢出效应。近10余年来,此类研究随着社会科学领域“可信性革命”^[20]的浪潮如雨后春笋般涌现出来。另一方面,除因果推断范式外,利用最少假设模型解释人类移动和城市的基本物理量的规律的由来以及物理量之间的联系,是又一重要范式,不妨称为动力学范式。例如,探索与偏好返回个体移动模型解释了步长、驻留时长、扩散速度、返回频次等物理量的标度律和相互关联^[21],对该模型的调整进一步将探索者和返回者的二分^[22],以及频次规律^{[14]524}纳入了解释框架。有了这些理论,原则上人们甚至可以解析某些重要的城市状态及其动态,这种能力就将我们带到了时空智能理论的第三个层面,即干预和调节。

城市治理语境下的时空调控反映了治理者的主观能动性,对此,时空智能理论的第三层内涵体现为以阈值、限界等形式给出的能动性的限度。例如,人类移动可预测性上限定理($S_{\max} \approx 93\%$)表明人类移动的模式高度可预测^[23],这使高精度治理的存在成为可能,同时也指出了其效用边界;城市规模的随机方程理论指出了城市规模分布的非稳态,以及受冲击性人口流动影响产生的难预测性^{[12]399, [24]}。又如,在稍具体的问题上,面向基础设施规划,

一定结构的基础设施网络存在系统性的脆弱性,在环境扰动不大于阈值时能够维持稳态,但超过阈值将造成不可逆的崩溃,因而呈现非线性特征^[25];面向电、水、车流管理,地理网络存在系统性韧性^[26],同时也存在级联崩溃的可能^[27];面向传染病传播规律研究,其背后的隐藏几何结构不可忽略^[28]等。此类涌现现象是规划治理自身作为大量要素在多尺度发生非线性相互作用的结果。充分认识并尊重此类规律,对于在城市治理实践中合理设定目标和路径、避免盲目追求不切实际的目标,具有重要的价值。

1.2 时空智能的方法体系:从“原子化”算法到共性能力

时空智能的方法体系同样可遵从前述地理学研究范式,分为格局、过程、机制和调控分析方法4大类,每类包括多种可实现特定分析目的的“原子”化方法。进而为更好地与城市治理语境衔接,这些原子化方法可进一步组合为服务于治理实践的若干共性时空分析能力。

时空格局分析旨在识别城市系统的空间分布特征与结构规律,为治理决策提供基础空间认知。常见的格局分析包括:空间模式识别,如通过人类移动势能场发掘城市圈层结构和多中心结构^{[16]7, [29]};异常状态检测,例如基于复杂网络的双曲理论模型^[30]探测异常空间交互;空间结构分析,例如基于复杂网络的低维几何理论^[31],建立城市各局部之间空间关联的流形,为空间分布的变量的关联、推断提供参考^[32]等。

时空过程分析侧重于解析城市动态系统的交互模式和演化规律。前述模式识别、异常探测、结构分析等方法往往也均有针对动态、交互或“流”^[33]的版本,如流模式提取——使用网络重整化,提取关键流及其层级结构^[34]等。值得一提的是,大量城市“流”形成复杂网络,针对城市网络的分析方法是时空过程分析中的一大重要类型,例如网络结构分析——通过计算节点介数中心性与社区模块度,揭示交通出行网络的空间组织特征^[35];通过人类移动规律,对出行OD等空间网络进行合成和预

测^{[14]526, [36]};动态建模,例如应用时空超图理论,为地铁出行等多途经点行为建模^[37]等。

时空机制分析致力于揭示城市现象的因果关联与驱动规律,或利用已知因果关联和驱动规律推导未知因素。该方法可应用的方向包括:因果推断,如运用时空加权回归(GTWR)模型与贝叶斯网络,量化政策干预的时空异质性效应^[38];人地关联挖掘,例如通过张量分解发现城市功能分区与活动人群的对应关系^[39],以及城市功能结构对人口波动及其时空标度律的影响^[40];基于行为表现模式的影响因素反演,即借助人类移动规律和物理量,发掘不同群体或处于不同场地时的行为参数差异^{[41]655},以揭示群体画像^[42]、土地利用^[43]、公平性^{[41]657}等。

时空调控分析则面向城市治理策略的生成与优化,其方法大抵属于运筹学范畴,只是强调运筹对象的时空属性乃至动态性。其主要应用方向包括:资源配置的时空优化,例如面向人类移动场景下动态需求的覆盖选址问题^[44],以及拼车等场景的动态匹配问题^[45];治理分区划分,例如立足于城市科学中的连续性、中心性和路网优化理论,通过空间交互划分应急管理单元^{[46]1316},以及立足于网络固有社团结构存在性理论,融合空间交互、地理邻近、人口和电信流量使用的电信治理分区^{[47]2165};过程干预设计与评估,如借助网络传播模型和人类移动数据,评估传染病干预措施的效用^[48],以及优化干预方案^[49];路径规划,如基于网络双曲几何,论证可导航性以及快速实现最短路径提取^[50]等。

以上时空分析方法梳理的线索是学理逻辑。若从城市治理实践的角度,则不难发现学理和实践话语体系有时并不相容。例如,假设治理实践要求识别某类城市事件的时空“规律”,此要求可能指的是其时空格局或过程的“模式”;又如,假设治理实践要求对某种城市对象进行“预测”,则该任务既可能通过模式外推,又可能通过机制推断乃至动力学计算实现。为弥合两种话语体系之间的张力,本文认为在城市治理的时空能力建设实践中,在系统架构上为算法层(通常属于中台)设计双层

结构是必要的,其中下层包括上述4大类基础时空分析的“原子”化方法;上层则可根据城市治理实践的切实需求,将这些方法重新组合为若干种面向实操的共性能力,如指标计算、空间区划、区位分析、评估评价、归因诊断、模拟仿真、预测预警、运筹优化等。当然,如何实现这种组合,即甄别实践需求的方法本质、进而选择合适的“原子”化算法并完成分析,十分考验系统设计者的能力。这反过来进一步强调了从业人员掌握时空智能基础理论并熟悉其方法体系的重要意义。

2 时空智能的城市治理应用

时空智能技术工具体系的建设归根结底应服务于城市治理的切实需求。如前所述,在我国城镇化阶段转型、治理能力建设目标及精细化要求的大背景下,时空智能支持新时期城市高质量发展的重点在于构建“可感知、可计算、可优化”的治理闭环系统^[51-52]。为此,本文提出一种时空智能支持城市精细化治理的应用框架,其强调相关技术方法在城市治理5个主要环节——态势感知、空间管理、处置响应、预判预警、体制机制建设中的应用途径(见图3)。这5个环节构成了完整的治理技术闭环,其逻辑为:态势感知通过多源数据采集

集和融合治理建立城市运行的准确、细粒度、高动态数字基底;空间管理作为基础操作层,通过网格分区等手段为各种治理目标划定合理的空间管理和操作单元;处置响应针对具体问题精准、敏捷干预;预判预警则基于深入时空机制的揭示而“治未病”;最后,体制机制建设为技术应用提供制度保障。

2.1 态势感知

可靠的态势数据输入是任何智慧城市系统的运行基础。由于城市治理中大量数据本质上属于社会感知数据^[53]^[513],城市治理中态势感知的主要挑战源于此类数据中常见的3类质量问题,即观测有偏性、时空稀疏性和语义单薄性^[54]^[41]。三者的危害是递进式的:若数据存在系统性偏差(偏),即便通过技术手段扩展时空覆盖(稀)或丰富语义信息(薄),其结果仍可能偏离真实的城市运行状态。为此,需要综合运用合理的时空智能方法进行数据治理,从而实现数据质量提升,为城市治理建立可靠的态势基础。

观测有偏性是数据治理的首要问题,其由来在于社会感知数据生成过程中人类认知、行为的多种扭曲效应。例如,考虑对某种城市事件的观测,视频监控设备的部署策略可能导

致空间选择偏误;市民投诉数据则因居民举报意愿差异,实际上仅反映了特定人群而非市民整体的偏好。这些偏误使得数据不能客观反映城市问题的全貌,甚至可能放大认知偏差。为解决这一问题,可利用“多渠道部分重复观测”机遇构造时空因果推断模型,在此基础上应用贝叶斯信念网络或其他时空统计推断方法分解,并最终校正各类偏误效应^[54]^[46]。

确保数据可靠性是解决时空稀疏性问题的前提。受成本与物理限制,对地理对象的观测往往存在时空盲区,导致任何数据在特定时空尺度上都是稀疏的。对此,可联合应用时空智能和其他方法提出一个“生成—增强”协同框架:一方面,基于空间统计学模型(如地理加权回归)进行数据补样^[55],或采用生成对抗网络(GAN)或扩散模型^[56]等方法模拟未观测区域的潜在事件分布^[57];另一方面,通过强化学习优化移动感知设备的动态部署,实现关键区域的主动补强。在城市治理语境下,这也是将数据稀疏性处理转化为治理资源配置问题的一个途径。

一旦无偏且稠密的数据基准得以建立,语义单薄性问题就不难解决了。稠密且无偏的数据容易进行多尺度时空对齐,从而允许多源融合技术充分发挥效能。数据融合加厚可以通过直接时空对齐实现^[2]^[351],也可以通过结合时空知识图谱挖掘“事件—环境—行为”的关联规则而实现^[58]。例如,整合市民投诉与街景影像数据时,精确的时空坐标使建筑立面特征、商业设施密度等语义信息能够准确关联,进而识别噪声投诉中的餐饮聚集区影响机制。在城市治理语境下,这种融合不仅扩展了数据维度,其构建的时空和语义关联本身也有助于揭示治理对象的深层作用逻辑。

2.2 空间管理

城市治理的日常任务之一是其决策落实到具体的空间单元上,例如社区、街区或其他功能分区。对这些空间单元的识别、划定和动态调整,即为城市治理中空间管理环节的任务。这一环节既要满足行政区划、自然条件约



图3 时空智能支持城市精细化治理的应用框架

Fig.3 Application framework of spatiotemporal intelligence for supporting refined urban governance

资料来源:笔者自绘。

束等刚性要求,又要反映城市形态、结构和功能的内在逻辑,并不是一项简单的任务,其复杂性体现在数据基础与划分方法两个层面。

高质量的城市空间单元数据是科学治理的前提,但这一前提并不容易满足。具体来说,我国城市治理中的基本空间单元可视为各级“片区”“街区”或“网格”(强调相当细的空间划分颗粒度)等,但在全球范围内,此类数据普遍存在缺失与标准割裂问题。虽然部分发达国家已建立成熟的街区划分体系(如美国的普查区census tracts/blocks),但发展中国家往往缺乏系统化的空间单元数据;即使存在这种数据,不同国家采用的分级逻辑也差异显著,导致国际比较基准无法建立。针对这一问题,可通过融合开放街道地图(OpenStreetMap)数据与多尺度空间分析方法,构建覆盖全球主要城市(985个)的分级街区/片区单元划分数据集(MSDCW)。该研究集中使用了各类时空智能方法,包括采用约束Delaunay三角剖分技术识别街区邻接关系,结合道路缓冲分析与形态规则化算法,生成标准化空间单元,以及构造形态一致性和可比性指标用以验证结果等(见图4)^[59]。

同时,城市治理空间单元的划分往往涉及多重目标,而它们之间常有冲突。例如,分区边界需要保持稳定以方便管理,但也有随人口

流动与经济活动进行动态调整的需求;区域内部要求属性同质化,而跨区域交互需要最小化阻隔。这里描述的正是前文所述的时空智能基础理论中空间形态与空间交互的张力问题。因此,该问题是本质性而非技术性的,不可能从根本上“解决”。在实践中,可根据特定的治理目标和城市实际条件施加适当的约束,并通过空间运筹的方式求得一定条件下的相对最优。例如,一种融合了地理网络社区探测和扩张修型的地理区划方法框架,其将空间属性(如用地功能、人口密度)编码为多层网络中的节点,将交互数据(如通勤流、信息流)建模为网络连接,进而通过社区检测识别潜在功能簇,最后经核扩展算法生成连续的空间治理单元,在实证中显示了有效性^{[47]2168-2174}。

2.3 响应处置

城市时空态势的精准感知和空间管理单元的科学划分是城市精细化治理中基础性、前提性的任务。在更加具体、落地的管理实践环节,如何高效处置海量的城市日常问题,是治理效能提升的主要挑战。当前,在通常以任务工单为载体的城市问题“上报—分拨—处置”链条中的每个环节都存在多种困难。如任务分拨环节中,因空间定位模糊、责任主体交叉而导致的响应延迟;处置调度环节中,受限于一

线人力物力资源的高度复杂性而难以实现动态资源的优化配置等。不难看出,这些问题都存在明显的时空维度。因此,通过引入时空数据增强、空间语义解析和时空运筹等技术,时空智能方法体系可为破解上述难题提供有力的支持(见图5)。

在任务分拨环节,传统上城市问题处置的主要痛点包括工单重复、分类混乱、任务分派“踢皮球”等问题。通过地理编码技术,工单中的非结构化地址信息可被转化为精确的地理坐标,并关联市政网格边界与历史工单热力图,形成空间上下文映射,由此不仅解决了“问题发生在何处”这个基本问题,还有助于进一步通过“空间—语义”双重校验(地理编码确保事件定位的空间准确性,语义解析则通过上下文理解消解职责边界模糊的问题)明确后续的任务分拨责任主体。当然,这里的语义解析是通过大语言模型等自然语言处理技术实现的。时空智能与大语言模型等新兴技术的融合,为城市问题工单的智能化精准分拨带来了巨大的创新可能性。

在问题处置环节,实践中的主要挑战在于如何实现日常和各种应急响应情形下各类治理资源的准确指挥调度和高效利用。当前,我国城市已普遍实现管理网格的基本覆盖,人员、设备、资产等各类资源也通常相对均质化且刚性地与管理网格绑定,但均质化的网格体系难免忽视城市空间的可达性差异与城市事件分布的动态特征。这是一个典型的时空运筹问题,可引入基于交互网络的空间优化方法来解决^{[46]1316}。首先,可对一线巡逻人员历史轨迹所形成的空间网络进行社区检测,将城市划分为内部通行成本最小化的管理单元,同时约束各分区工作负荷的均衡阈值。接下来,在台风、公共卫生突发事件等应急响应场景下,通过动态调整事件密度权重,实时重组分区边界与资源配置优先级。例如,在暴雨引发的内涝事件中,系统可自动识别积水高发区域,将其周边3—5个常规管理单元合并为临时应急分区,集中调度抽水设备与巡查人员,同时通过相邻分区的弹性扩缩维持基础服务覆盖。在这个例

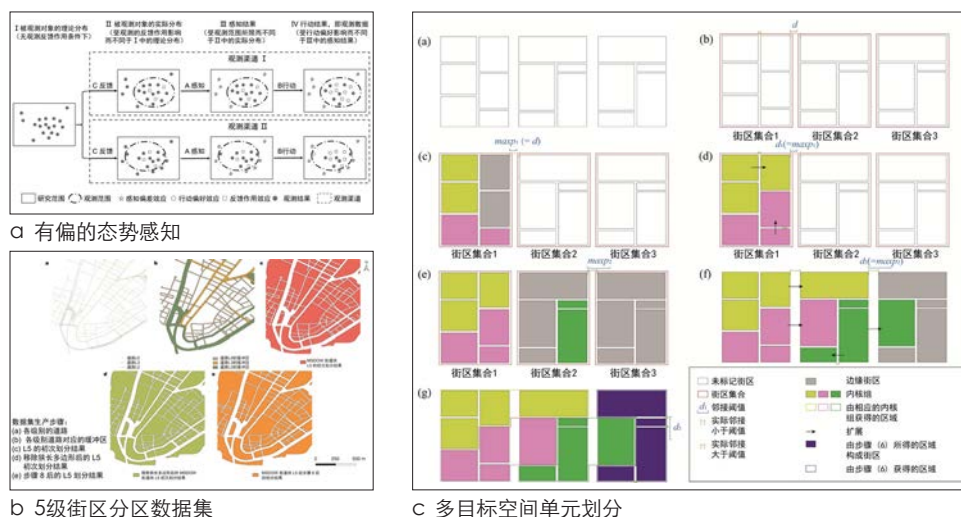


图4 态势感知和空间管理实例

Fig.4 Examples of situation awareness and spatial management

资料来源:笔者根据[47]2168, [54]44, [59]4自绘。

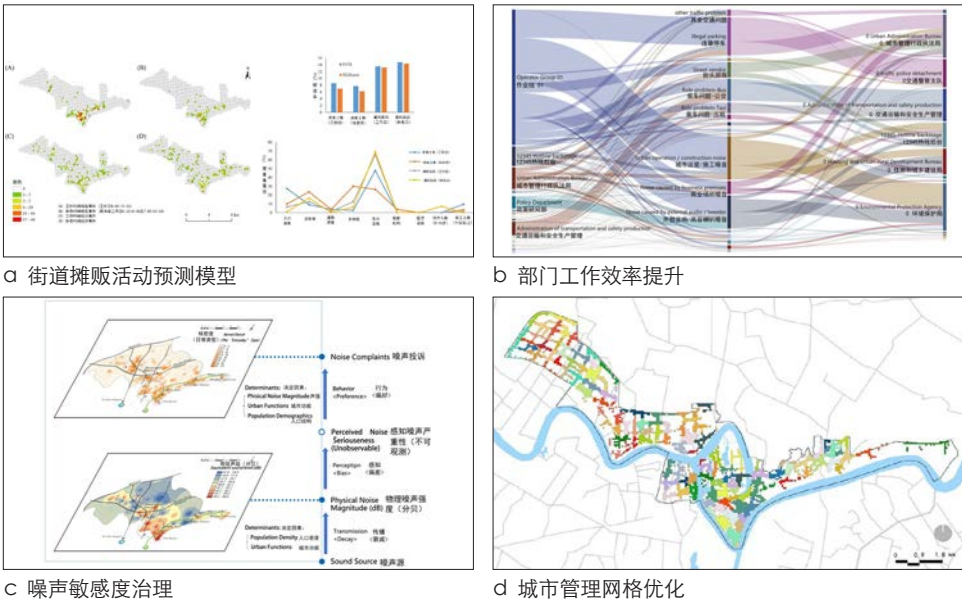


图5 响应处置、预判预警和机制建设实例
Fig.5 Examples of response handling, risk prediction, and mechanism construction

资料来源：笔者根据[46]1323, [61]1, [62]6, [63]10自绘。

子中,城市形态的某种普遍规律在理论上支持了上述优化操作的可行性,而时空运筹技术具体地实现了该优化操作,从而提升了城市管理在问题响应处置环节的效率和韧性。

2.4 预判预警

更进一步地,相比问题发生后的高效处置,更高水平的城市治理则聚焦于风险的前瞻预判与系统性防控。这一目标驱动着治理范式从末端治理向源头管控、从被动响应向主动预判——或一言以蔽之,从治标向治本转型。对此,无论是基于模式识别、因果推断还是动力学计算,时空智能方法体系提供了丰富的工具库,可借以实现城市问题的预测、预判和预警。

在理论层面,城市问题的可预测性与其内在规律密切相关。部分问题如交通拥堵、季节性环境变化等具有显著时空规律性,可通过历史模式识别与周期分析实现预测;而突发事件、极端天气等随机性事件虽不可完全预知,但通过异常检测与风险概率建模仍可划定潜在影响范围。对于这种预测,重要的是合理设定其准确性、前瞻性等目标。对此,时空智能的理论研究有助于通过揭示城市动态的复杂性边界而设定上述目标。例如,多尺度时空分

析^[60]表明,异常事件的表达特征受观测尺度影响,精细尺度能捕捉局部扰动,宏观尺度则反映系统性偏移。这种尺度敏感性为构建分层预警体系提供了理论依据——通过多尺度特征匹配,既能识别微观异常征兆,又能评估其对宏观系统的潜在传导效应,从而界定可预测性的限度。

在方法实践层面,可通过多种时空智能技术路径支持城市问题的预判预警。例如,基于时空模式分析,可通过分解时间序列、提取残差特征,识别偏离常态的潜在风险。如上述多尺度异常检测方法可有效分解城市动态中的周期、趋势和随机组分,并量化残差异常,由此既能发现节假日出行模式的全局偏移,也能定位局部区域因大型活动引发的瞬时聚集,为交通管控与安全预警提供前瞻线索。又如,基于统计推断或其他推断方法(如机器学习),可通过构建概率模型量化风险阈值、归因致灾要素。例如在城市噪声污染治理中^{[61]11},可通过时空克里金插值与Tobit模型预测城市不同功能区的噪声超标概率及其规划根源,以辅助城市规划及管理部门提前优化设施布局、部署执法力量。再如,在街道摊贩治理中^{[62]8},可通过特征工程实现模式泛化,并进而通过

XGBoost等简单机器学习算法识别摊贩聚集地的城市环境和功能特征,并结合时间序列预测其出现概率,从而支撑城管资源的精准预调度。未来,随着实时感知与边缘计算等支持性技术的发展,城市治理中的预判预警甚至可能从事后复盘逐步走向实时演算,使城市治理真正步入“治未病”的新境界。

2.5 体制机制建设

城市治理的现代化转型不仅依赖技术方法层面的创新,更需要与时俱进的体制机制改革作为制度保障。虽然这项工作的核心是规则与流程的重构,但时空智能理论与方法仍能够为制度建设提供科学依据与实践工具。社会感知理论^{[53]521-524}为此提供了一条可行的进路:通过对市民活动数据中隐含的治理需求的时空智能挖掘,可将碎片化的民间反馈转变为系统化的制度优化依据,从而推动治理规则从经验预设向数据校准演进。下文将从法律法规和标准规范体系两方面分别说明。

城市治理法律法规的完善得益于社会感知对现实矛盾的精准映射。以城市噪声管理为例,当前的管理措施大体采用了基于噪声物理响度即分贝限值的分区管理策略。然而,社会感知角度的研究表明,噪声的客观水平与市民对噪声扰民程度的感知往往不一致,后者与城市功能有关,如居住区22:00后的“噪声敏感度”是商业区的3倍^{[61]16}。该发现由此可作为结合主客观噪声状态的管理法规完善的依据。类似逻辑亦可推广至其他新兴领域,使技术应用与法律法规框架协同进化。

城市治理标准规范的更新同样可依托社会感知对治理盲区的系统性发现。以城市问题分类标准为例,传统分类标准易陷入管理者视角的局限,例如将“占道经营”笼统归为市容问题,却忽视其民生服务属性。相反,从社会感知视角出发分析12345热线文本的时空关联特征,可发现市民诉求中存在约40%未被定义的问题类型,继而通过时空和语义聚类,构建起128类精细化问题标签体系^{[63]13-16}。这种方法相比传统“自上而下”的城市问题分类体

系具有机动灵活的优势。例如,它能够识别出“广场舞扰民”与“夜间施工噪声”的处置策略差异(前者需社区协商,后者需执法介入,时空发生和处置的机制均明显不同);亦可在适当形势下将“共享单车淤积”从“市容杂乱”中解构为独立类别(新兴问题的体量增大到一定程度时即具有了独立性),从而明确处置责任主体。由此可见,这种“自下而上”标准生成机制与传统“自上而下”的体系形成了很好的互补,有助于显著提升城市治理的灵活性和响应性。

3 结语

时空智能的发展为城市治理现代化提供了新的理论工具与实践路径。通过解析城市复杂系统的时空规律,构建覆盖理论探索、技术方法与制度创新的治理框架,这一领域正推动城市治理从经验驱动向数据驱动转型。作为新型城镇化战略的重要支撑,时空智能有效支撑智慧、韧性、宜居城市的政策目标:多源数据融合与动态建模技术整合城市运行信息,形成可计算的决策支持系统^{[2]14-16};多尺度风险识别与系统仿真技术建立全周期风险防控体系^[64];社会感知技术捕捉市民行为特征与诉求差异,推动公共服务精准化^{[53]525-526}。这些实践表明,时空智能能够为城市高质量发展提供科学支撑。

当然,作为实证科学知识体系,时空智能本身是价值中立的,其应用需避免若干潜在陷阱。数据伦理要求建立数据采集与使用的伦理边界,防止个人隐私泄露与权利让渡^[65];算法公平性需警惕弱势群体数据缺失导致的决策偏差,例如医疗资源分配中的区域覆盖不足^[66];技术人文性需协调效率目标与在地价值,如通过公共参与机制平衡数字化改造与传统空间保护^[67]。这些问题的本质是工具理性与价值理性之间的张力,对它们的深入探讨超出了本文的范围。作为展望,本文希望将时空智能置于人本导向的城市治理框架中,使其在提升治理效能的同时,始终服务于人的城市权利与空间正义^[68],从而使时空智

能真正成为新时期高质量城市发展的赋能者而非支配者。

(感谢北京大学建筑与景观设计学院硕士研究生牛源、北京大学前沿交叉学科研究院区域与国别研究院博士研究生姜河之是对本文成文的帮助。)

参考文献 References

- [1] 陆军. 城市精细化管理指数的构建与应用——以北京市为例[J]. 城市管理与科技, 2021, 22(2): 10-13.
LU Jun. Construction and application of urban refined management index[J]. Urban Management and Science & Technology, 2021, 22(2): 10-13.
- [2] BATTY M. The new science of cities[M]. Cambridge: MIT Press, 2013.
- [3] GOODCHILD M F. Reimagining the history of GIS[J]. Annals of GIS, 2018, 24(1): 1-8.
- [4] CLAUDEL C, MATTHEW R. The city of tomorrow: sensors, networks, hackers, and the future of urban life[M]. New Haven: Yale University Press, 2016.
- [5] BATTY M, AXHAUSEN K W, GIANNOTTI F, et al. Smart cities of the future[J]. The European Physical Journal Special Topics, 2012, 214(1): 481-518.
- [6] ZHANG H, GONG Z, THILL J C. A review on urban modelling for future smart cities[C]//MENG X, ZHANG X, GUO D, et al. Spatial data and intelligence. Singapore: Springer, 2024: 346-355.
- [7] BARTHELEMY M. The structure and dynamics of cities[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.
- [8] BETTENCOURT L M A. The origins of scaling in cities[J]. Science, 2013, 340(6139): 1438-1441.
- [9] LEGENDRE P, FORTIN M J. Spatial pattern and ecological analysis[J]. Vegetatio, 1989, 80(2): 107-138.
- [10] GOODCHILD M F. Twenty years of progress: GIScience in 2010[J]. Journal of Spatial Information Science, 2010(1): 3-20.
- [11] ZIPF G K. Human behavior and the principle of least effort: an introduction to human ecology[M]. Cambridge: Addison-Wesley, 1949.
- [12] VERBAVATZ V, BARTHELEMY M. The growth equation of cities[J]. Nature, 2020, 587(7834): 397-401.
- [13] GONZÁLEZ M C, HIDALGO C A, BARABÁSI A L. Understanding individual human mobility patterns[J]. Nature, 2008, 453(7196): 779-782.
- [14] SCHLÄPFER M, DONG L, O'KEEFE K, et al. The universal visitation law of human mobility[J]. Nature, 2021, 593(7860): 522-527.
- [15] ALESSANDRETTI L, ASLAK U, LEHMANN S. The scales of human mobility[J]. Nature, 2020, 587(7834): 402-407.

- [16] MAZZOLI M, MOLAS A, BASSOLAS A, et al. Field theory for recurrent mobility[J]. Nature Communications, 2019, 10: 1-11.
- [17] ALESSANDRETTI L, SAPIEZYNSKI P, SEKARA V, et al. Evidence for a conserved quantity in human mobility[J]. Nature Human Behaviour, 2018, 2(7): 485-491.
- [18] XU F, LI Y, JIN D, et al. Emergence of urban growth patterns from human mobility behavior[J]. Nature Computational Science, 2021, 1(12): 791-800.
- [19] PEARL J. Causal inference in statistics: an overview[J]. Statistics Surveys, 2009, 3: 96-146.
- [20] ANGRIST J D, PISCHKE J S. The credibility revolution in empirical economics: how better research design is taking the con out of econometrics[J]. Journal of Economic Perspectives, 2010, 24(2): 3-30.
- [21] SONG C, KOREN T, WANG P, et al. Modelling the scaling properties of human mobility[J]. Nature Physics, 2010, 6(10): 818-823.
- [22] PAPPALARDO L, SIMINI F, RINZIVILLO S, et al. Returners and explorers dichotomy in human mobility[J]. Nature Communications, 2015, 6: 1-8.
- [23] SONG C, QU Z, BLUMM N, et al. Limits of predictability in human mobility[J]. Science, 2010, 327(5968): 1018-1021.
- [24] BARTHELEMY M. Stochastic equations and cities[J]. Reports on Progress in Physics, 2023, 86(8): 084001.
- [25] PENNY D, ZACHRESON C, FLETCHER R, et al. The demise of Angkor: systemic vulnerability of urban infrastructure to climatic variations[J]. Science Advances, 2018, 4(10): eaau4029.
- [26] GAO J, BARZEL B, BARABÁSI A-L. Universal resilience patterns in complex networks[J]. Nature, 2016, 530: 307-312.
- [27] ZHAO J, LI D, SANHEDRAI H, et al. Spatio-temporal propagation of cascading overload failures in spatially embedded networks[J]. Nature Communications, 2016, 7: 3-8.
- [28] BROCKMANN D, HELBING D. The hidden geometry of complex, network-driven contagion phenomena[J]. Science, 2013, 342(6164): 1337-1342.
- [29] JI J, WANG J, JIANG Z, et al. STDEN: towards physics-guided neural networks for traffic flow prediction[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2022, 36(4): 4048-4056.
- [30] PAPADOPOULOS F, KITSACK M, SERRANO M Á, et al. Popularity versus similarity in growing networks[J]. Nature, 2012, 489(7417): 537-540.
- [31] SERRANO M Á, KRIOUKOV D, BOGUÑÁ M. Self-similarity of complex networks and hidden metric spaces[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(7): 078701.

- [32] CROSBY H, DAMOULAS T, JARVIS S A. Embedding road networks and travel time into distance metrics for urban modelling[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2019, 33(3): 512-536.
- [33] 裴韬, 舒华, 郭思慧, 等. 地理流的空间模式: 概念与分类[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22 (1): 30-40.
- PEI Tao, SHU Hua, GUO Sihui, et al. The concept and classification of spatial patterns of geographical flow[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2020, 22(1): 30-40.
- [34] ZHENG M, GARCÍA-PÉREZ G, BOGUÑA M, et al. Geometric renormalization of weighted networks[J]. *Communications Physics*, 2024, 7(1): 97.
- [35] LIU X, GONG L, GONG Y, et al. Revealing travel patterns and city structure with taxi trip data[J]. *Journal of Transport Geography*, 2015, 43: 78-90.
- [36] ZHU D, HUANG Z, SHI L, et al. Inferring spatial interaction patterns from sequential snapshots of spatial distributions[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2018, 32(4): 783-805.
- [37] CHAMI I, YING R, RÉ C, et al. Hyperbolic graph convolutional neural networks[J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2019, 32(1): 1-20.
- [38] FOTHERINGHAM A S, CRESPO R, YAO J. Geographical and temporal weighted regression (GTWR)[J]. *Geographical Analysis*, 2015, 47(4): 431-452.
- [39] KANG C, QIN K. Understanding operation behaviors of taxicabs in cities by matrix factorization[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2016, 60: 79-88.
- [40] TAN X, HUANG B, BATTY M, et al. The spatiotemporal scaling laws of urban population dynamics[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 2881.
- [41] XU F, WANG Q, MORO E, et al. Using human mobility data to quantify experienced urban inequalities[J/OL]. *Nature Human Behaviour*, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41562-024-02079-0>.
- [42] JIANG S, FERREIRA J, GONZALEZ M C. Activity-based human mobility patterns inferred from mobile phone data: a case study of Singapore[J]. *IEEE Transactions on Big Data*, 2016, 3(2): 208-219.
- [43] LIU X, KANG C, GONG L, et al. Incorporating spatial interaction patterns in classifying and understanding urban land use[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2016, 30(2): 334-350.
- [44] VAZIFEH M M, ZHANG H, SANTI P, et al. Optimizing the deployment of electric vehicle charging stations using pervasive mobility data[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2019, 121: 75-91.
- [45] SANTI P, RESTA G, SZELL M, et al. Quantifying the benefits of vehicle pooling with shareability networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(37): 13290-13294.
- [46] JIANG H, XU L, LI J, et al. Enhancing urban resilience through spatial interaction-based city management zoning[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2024, 114(6): 1310-1329.
- [47] XU L, TANG J, JIANG H, et al. MNCD-KE: a novel framework for simultaneous attribute- and interaction-based geographical regionalization[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2024, 38(10): 2148-2182.
- [48] ALETA A, MARTÍN-CORRAL D, BAKKER M A, et al. Quantifying the importance and location of SARS-CoV-2 transmission events in large metropolitan areas[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, 119(26): 1-8.
- [49] HOSSEINI E, GHAFOR K Z, SADIQ A S, et al. COVID-19 optimizer algorithm, modeling and controlling of coronavirus distribution process[J]. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2020, 24(10): 2765-2775.
- [50] BOGUÑA M, KRIOUKOV D, CLAFFY K C. Navigability of complex networks[J]. *Nature Physics*, 2009, 5(1): 74-80.
- [51] PEREIRA G V, PARYCEK P, FALCO E, et al. Smart governance in the context of smart cities: a literature review[J]. *Information Polity*, 2018, 23(2): 143-162.
- [52] SILVA B N, KHAN M, HAN K. Towards sustainable smart cities: a review of trends, architectures, components, and open challenges in smart cities[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 38: 697-713.
- [53] LIU Y, LIU X, GAO S, et al. Social sensing: a new approach to understanding our socioeconomic environments[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2015, 105(3): 512-530.
- [54] 许立言. 数据偏误、行为选择与政策助推——行为科学视角下城市信息治理的陷阱和机遇[J]. *国际城市规划*, 2024, 39 (1) : 41-50.
- XU Liyan. Data bias, behavioral choices, and policy nudge: pitfalls and opportunities in urban information governance from a behavioral science perspective[J]. *Urban Planning International*, 2024, 39(1): 41-50.
- [55] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM A S, CHARLTON M E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity[J]. *Geographical Analysis*, 1996, 28(4): 281-298.
- [56] ZHU Y, YE Y, ZHANG S, et al. DiffTraj: generating GPS trajectory with diffusion probabilistic model[C]//*Advances in Neural Information Processing Systems*. 2023: 36.
- [57] GOODCHILD M F. Citizens as sensors: the world of volunteered geography[J]. *GeoJournal*, 2007, 69(4): 211-221.
- [58] ZHU D, ZHANG F, WANG S, et al. Understanding place characteristics in geographic contexts through graph convolutional neural networks[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2020, 110(2): 408-420.
- [59] TANG J, XU L, YU H, et al. A dataset of multi-level street-block divisions of 985 cities world-wide[J]. *Scientific Data*, 2025, 12(1): 456.
- [60] CHENG X, WANG Z, YANG X, et al. Multi-scale detection and interpretation of spatio-temporal anomalies of human activities represented by time-series[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 88: 101627.
- [61] SI Y, XU L, PENG X, et al. Comparative diagnosis of the urban noise problem from infrastructural and social sensing approaches: a case study in Ningbo, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(5): 2809.
- [62] LI C, HUANG Y, SHEN Y, et al. Spatiotemporal patterns and mechanisms of street vending from the social sensing perspective: a comparison between law-enforcement reported and residents complain events[J]. *Cities*, 2022, 124: 103597.
- [63] PENG X, LI Y, SI Y, et al. A social sensing approach for everyday urban problem-handling with the 12345-complaint hotline data[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2022, 94: 101790.
- [64] KITCHIN R. The real-time city? Big data and smart urbanism[J]. *GeoJournal*, 2014, 79(1): 1-14.
- [65] 彭兰. 假象、算法囚徒与权利让渡: 数据与算法时代的新风险[J]. *西北师大学报(社会科学版)*, 2018, 55 (5) : 20-29.
- PENG Lan. Illusion, prisoner of algorithm, and transfer of rights: the new risks in the age of data and algorithm[J]. *Journal of Northwest Normal University (Social Sciences)*, 2018, 55(5): 20-29.
- [66] 邓凯, 吴灏文. 数字化助推: 一种智慧城市的公共政策视角[J]. *决策探索*, 2020 (8) : 11-15.
- DENG Kai, WU Haowen. Digital nudging: a public policy perspective on smart cities[J]. *Policy Research & Exploration*, 2020(8): 11-15.
- [67] 姜晓萍, 吴宝家. 警惕伪创新: 基层治理能力现代化进程中的偏差行为研究[J]. *中国行政管理*, 2021 (10) : 41-48.
- JIANG Xiaoping, WU Baojia. Warning against pseudo-innovation: study on deviant behavior in the process of modernization of local governance capacity[J]. *Chinese Public Administration*, 2021(10): 41-48.
- [68] LEFEBVRE H. The production of space[M]. Paris: Éditions Anthropos, 1974.