

数字孪生技术背景下城市人口底数的精准映射：创新技术框架与规划运用展望*

伍江 张逸平 袁也 汤舸 段睿妍 徐诗滢 孔翎

提 要 数字孪生是实现国土空间智能规划的基础。与传统的工程技术孪生不同，城市数字孪生因其对象中存在动态复杂的人口社会因素，一直以来在人口底数方面缺乏足够的映射精度。这使得目前的数字孪生技术较难提供精准的人口信息以支持城市规划决策。梳理城市数字孪生发展概况及其技术难点，总结当前主流的人口映射方法及其问题，围绕“真实空间、真实人口、真实需求”的逻辑，提出精准映射城市人口底数的创新技术框架。该框架融合以各类政务数据为主的大量数据源，构建面向政务服务需求的人口底数数字化平台。该项技术有助于实现高颗粒度的城市人口分析、精细化的社区公共品供给以及高质量的国土空间规划。

关键词 城市数字孪生；人口底数；精准映射；创新技术框架；规划运用展望

中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.16361/j.upf.202403005

文章编号 1000-3363(2024)03-0028-10

作者简介

伍江，同济大学建筑与城市规划学院教授，上海市城市更新及其空间优化技术重点实验室主任，同济大学超大城市精细化治理（国际）研究院院长，wujiang@tongji.edu.cn

张逸平，同济大学建筑与城市规划学院博士研究生

袁也，西南交通大学建筑学院讲师，上海市城市更新及其空间优化技术重点实验室客座研究员，通信作者，yuanye26@qq.com

汤舸，上海脉策数据科技有限公司创始人&CEO

段睿妍，上海脉策数据科技有限公司咨询师

徐诗滢，西南交通大学建筑学院本科生

孔翎，西南交通大学建筑学院本科生

Precise Mapping of Urban Population Base under the Influence of Digital Twin Technology: Innovative Technological Framework and Prospects for Planning Application

WU Jiang, ZHANG Yiping, YUAN Ye, TANG Ge, DUAN Ruiyan, XU Shiyun, KONG Ling

Abstract: Digital twin is one of the fundamental technologies for achieving intelligent spatial planning. Unlike traditional engineering twin technologies, urban digital twins have not achieved sufficient mapping accuracy over a long period of time due to complex population dynamics and social changes, especially fluctuations in population statistics. This limitation has made it difficult for existing digital twin technologies to provide precise population databases necessary for effective planning decision-making. This paper reviews the technical challenges of urban digital twins and examines current mainstream population data mapping methods and their shortcomings. It proposes an innovative technological framework for accurately mapping urban populations based on the principles of "real space, real population, and real demand". This framework integrates extensive data from various government sources to establish a comprehensive digital population base through data engineering. The framework enables fine-grained multidimensional analysis of urban population, accurate provision of community facilities, and improved quality of territorial spatial planning.

Keywords: urban digital twin; population base; precise mapping; innovative technological framework; application in planning practice

我国城镇化进入以提升质量为主的新发展阶段，城市发展方式与治理模式面临新的机遇和挑战。其中，如何通过数字化新时空生态建立可感知、能学习、善治理、自适应的智慧规划是今后的重要战略方向^[1-2]。数字孪生作为将真实世界映射到虚拟世界中的技术，是实现智慧规划的基础手段。与此同时，党的二十大报告进一步凸显了“人民城市”理念，提出“人民城市人民建，人民城市为人民”。在数字孪生的技术赋能下，一方面，通过建立多样化的城市数字治理平台，广泛吸纳居民对城市发展更新的有益思考，真正实现“人民城市人民建”；另一方面，以数字映射精准刻画不同居民群体的公共事务需求，为空间公共品供给提供客观依据，真正实现“人民城市为人民”。然而，受传统工程技术孪生的影响，当前城市的数字孪生存在“重物轻人”的问题，集中体现在对人口信息映射不足，抑或集中映射某一类特定形态的“人口”，造成了城市数字孪

* 上海市城市更新及其空间优化技术重点实验室资助项目：基于精细化人口底数的基础教育设施配置研究（项目编号：20230202）

生体中所映射出的“人口底数图层”与真实情况存在较大差异。如果城市的数字孪生无法准确映射出相对真实的城市人口信息，那么在城市规划、建设、治理过程中便无法精准识别、评估相关的公共事务问题，抑或造成对公共事务问题的误判，进而导致决策失误或失效，最终影响社会公平和居民幸福感。因此，在城市数字孪生中，如何精准映射“人口底数图层”极具关键性。基于上述认识，本文首先概述数字孪生城市的国内外发展现状，总结当前代表性人口底数的映射方法及问题，而后基于实践经验的总结凝练，提出一个映射城市人口真实信息的创新技术框架，以实现城市人口底数的精细化，最后对该项技术如何运用于规划实践进行讨论。

1 数字孪生城市的发展概述与难点

1.1 数字孪生与数字孪生城市

数字孪生(digital twin)是以数字化方式建立针对某物理实体的多维度、多时空、多尺度、多变量的动态虚拟模型，用以刻画、仿真孪生对象在真实环境中的属性、行为和规则等^[3]。数字孪生的概念最早由Michael Grieves教授在2003年密歇根大学的产品生命周期管理课程上提出，将其定义为物理工件或过程的数字镜像^[4]。2012年，美国国家宇航局(NASA)在发布的《未来美国航天与空军用机的数字孪生范式》报告^[5]中，提出了有关数字孪生的最具里程碑意义的定义之一^①。经过十余年全球学者的共同探索，催生了数字孪生相关理论的百花齐放^[6]。随着近年来我国大力推动数字化转型，各个学科、领域均开展了大量探讨，提出了数字孪生在卫星/空间通信网络、船舶全生命周期、车辆抗毁伤、电厂智能管控、数字孪生城市等场景下的应用框架^[3]。

数字孪生理念在2010年代后期进入城市领域^[7]，是以城市运行为对象的虚实交互技术，其目的是实现规划、建设、治理全生命周期信息的时空共享、辅助精细化治理决策和数字资源的资产化增值^[8]。近些年发达国家在城市数字孪生方面已有较多探索^[9]，如新加坡较早提出的

“智慧新加坡计划”(2015)、欧盟提出的“目标地球”(DestinE)计划(2021)、美国新墨西哥州开发的数字孪生城市平台SmartWorldPro(2019)、日本国土交通省牵头发起的PLATEAU项目(2021)、法国政府主导开发的用于城市建设与施工管理的Unity平台(2021)等。这些新兴数字孪生项目均建立在明确的公共问题导向之上，如：“目标地球”(DestinE)致力于监控、预测人类活动与自然环境之间的互动作用，为应对重大自然灾害提供决策支持；SmartWorldPro瞄准城市能源利用的模拟优化，以促进低碳清洁能源的普及；PLATEAU整合了建筑、交通、地理、经济、医疗、防灾等数据，用以监测城市活动、应对灾害事件、模拟规划实施等。

国内有关数字孪生城市的探索并不比西方晚，如：吴志强^[10]院士早在上海世博会筹划期间就开展了相关的理论思考与实践探索；而2017年开始的雄安新区建设首次将数字孪生城市理念运用于城市规划实践，完成了包括“纵向全流程迭代”和“横向多类型统筹”的雄安新区规划建设管理平台^[11-12]；而后，住建部又将北京副中心，广州、南京、厦门等城市列入数字孪生试点城市，并开展了相应评估^[13]。近年来，学界又从多个角度丰富了城市数字孪生的探索，如：杨俊宴^[14]实践了数字化的城市设计管控方法；杨保军等^[15]提出了以数字规划平台服务城市规划实践的新模式；郑德高等^[16]建立了以可持续发展为基准的城市空间数字画像指标框架；杨滔等^[17]将数字孪生技术运用于苏州古城的保护与活化；吴志强等^[18]则从城市生命体的演化视角提出了“跨代孪生”的新见解。

1.2 数字孪生城市的难点：城市复杂性及其人口底数的精准映射

城市的复杂性特征是数字孪生运用于城市领域的最大挑战。数字孪生最早起源于航空、航天制造领域，其经典应用如基于传感器和计算机仿真对飞机的运行状态进行实时监控^[19]。然而，正如Peter Hall所言，航天计划有明确的目标指向，类似固定打靶，可以预测其运动轨迹^[8]；而城市规划面临的是社会要素的动态不确定性，更像打移动靶，实施起

来比航天计划更难。Batty等^[4]也认为，数字孪生的主流概念是对某种物理系统的抽象，是“硬”的，如果让它去“映射”以人类行为为主的“软”系统，将会困难得多。因此，数字孪生技术在城市规划领域的应用与其在工程领域有着本质区别，主要体现在城市数字孪生除了映射物理空间外，还需要全面关注物理空间变迁背后的决策参与者和受影响者，以及批判性地响应城市的制度性要素^[7]，而这一过程本身就充满了动态复杂性。

人口的多主体、多目标、多行为、多组织特征带来了城市的复杂性，也是影响城市发展决策、行为互动影响和制度性建构的“底层逻辑”。虽然有学者将城市数字孪生比喻为复杂的堆栈模型(stack model)，即通过垂直的多类型、多尺度、多属性、多模块的可操作层所组建的，以内部接口和协议对这些可操作层进行专制整合、持续迭代的平台^[20]，但这并不意味着数字孪生城市的数据就应该越多越好，而是应从实际需求出发，映射“需要的全量”^[8]。在众多城市数据中，城市人口底数在识别公共问题、研判供需关系、评价城市公平性等工作中有关键作用，是最需要映射“全量”的底层数据。因此，城市数字孪生首先应该解决人口底数映射的真实性和精确性，为推动高效、有为的城市公共治理创造前提条件。当前，在数据科学、地理科学、计算机视觉以及相关交叉领域的探索中，出现了多种映射城市人口信息的方法，为探索城市人口底数的构建路径提供了一定的基础。

2 现有人口底数的映射途径及其问题

2.1 人口数据栅格化

将人口数据映射为栅格单元是较为常见的方法，能以均质单元呈现人口分布特征。现有研究主要采用两种栅格化途径：一是细分映射，以地理空间信息、社会经济统计数据等辅助信息将人口普查数据细分映射至栅格^[21-22]，其方法包括面插值法、统计回归、机器学习、集成堆叠等。该方法的运用相对成熟，国内外机构已开发了多款相关数据产品，

实现了对人口普查数据的高分辨率栅格转化^[23] (表1)。二是统计汇总,随着手机等移动设备的大规模普及,随之产生的移动信令数据也被广泛用于人口布局研究^[24]。该方法基于移动通信设备留下的带有时间、位置信息的数据,按规律性行为汇总每个栅格中的个体数量,以反映就业、居住、游憩等不同活动特征的人口栅格分布^[25-26]。

2.2 基于特定图斑单元的人口数据空间化

特定图斑单元的原理、方法与人口数据栅格化类似,但通常是将人口数据映射到行政单元(如社区)、交通区、医疗服务区、学区、居住小区等“图斑”上。该方法有助于探索人口分布、公共服务绩效等问题。如:城市人口时空分布研究通常以行政区划作为映射的图斑^[27-28];交通服务研究以城市主干道划分的交通区为图斑,映射人口数据后可进一步探讨职住通勤^[29]或公交服务的相关问题^[30];医疗设施布局研究以医院的服务缓冲区为图斑,评估不同地区人口就医的可达性差异^[31-32];教育设施研究则以学区作为人口的映射图斑,以评估各学区内的人口结构、入园入学诉求等是否与教育设施容量匹配^[33]。

除了上述较大的空间单元外,一些研究将人口数据细化到了建筑图斑尺度。如:有学者^[34]以住宅图斑面积、图斑内建筑面积比重、图斑内建筑物层数、公摊率等特征描述居住空间,建立常住人口数量与居住空间属性的关系模型,由此便可依据住宅图斑特征来推算居住人口数量;另有研究建立了建筑物体积与静态人口分布的关系模型^[35],在此基础上结合多种空间地理数据,通过功能分析和空置率识别,推算出相应的人口数据^[36-40]。上述研究将图斑尺度细化到了住宅楼栋,并以楼栋图斑的相关指标作为估算人口的模型变量,但其结论属于“模型中的人口”,并非真实身份的人口。

2.3 基于城市传感设备的人口数据映射

随着物联网技术的发展,城市传感器的基础设施建设不断完善,人口信息映射有了新的数据来源。物联网架构分为感知层、互联网层及应用层,位于感

知层的传感器主要负责识别物体并获取各类实时数据,在人口数据采集中发挥了重要作用(表2)。这类数据可分为两类:一是摄像监控设备采集的图像、视频类数据,这类数据可借助计算机视觉分析实现对人群数量的估算(表3)。在城市规划、公共服务等领域中,研究者们进一步根据图像数据的地理信息进行空间映射,储存为GIS数据,在定义的空间单位进行聚合估算^[41]。二是非视觉传感设施采集到的Wi-Fi信号、射频信号、环境信息等数据,类型丰富且精度较高,也可用于映射人口数据。如:Wi-Fi探针通过采集Wi-Fi信号记录移动终端的访问量,从而估算人口数量;出入口射频装置通过统计射频信号中断次

数来估算人流量;环境交互装置通过获取人群与建成环境的多种交互数据来估计人流量^[42]。

2.4 现有问题总结:人口底数映射的精准度、真实度、覆盖度不足

上述三种人口数据的映射方法在研究和实践中已有较多运用。然而,从建立城市运维管理所需的“人口底数”的角度来看,当前方法在精准度、真实度和覆盖度等方面存在不足。一是,栅格化方法将人口数据抽象为栅格单元,在宏观尺度上有其运用价值,但在中微观尺度上则存在失真,因为该方法忽略了复杂建成环境对人口分布变化产生的具体影响。二是,基于特定图斑单元的方

表1 代表性人口数据栅格化产品

Tab.1 Products of population data rasterization

代表性数据产品	分辨率 / m	辅助数据
GPWv4(2018)	900	水域、行政区划
LandScan Global(2000)	1000	土地覆盖、行政区划、DEM、DMSP/OLS夜间灯光、交通路网
LandScan USA(2007)	90	土地覆盖、交通路网、配套设施、行政区划
CnPop(2002)	100	土地覆盖、行政区划
GRUMP(2005)	1000	行政区划、定居点、DMSP/OLS夜间灯光
WorldPop(2015)	100	土地覆盖、行政区划、DEM、NPP-VIIRS可见光+红外光、配套设施

表2 常见的人口数据传感器和应用场景

Tab.2 Common sensors and their application scenarios

传感器设备	数据类型	人口数据的映射模式	适用场景
Wi-Fi探针 ^[43]	Wi-Fi信号	探针设备记录附近移动终端的MAC地址,获得一定时段区域内的到访人数、人流量以及行为轨迹	交通节点或开放公共场所
摄像头等图像采集器	图像、视频	监控设备持续拍摄,从而获取即时的人口数量。人脸识别摄像头还可以监测人物性别、情绪等属性	交通节点或公共空间
出入口射频装置 ^[44]	射频信号	人群经过会阻挡射频信号的接收,统计信号中断的次数转化为区域内的人流量	人流较小的户内空间
声、光、热等环境交互装置 ^[45]	环境变化数据	通过获取人群与城市空间交互时产生的环境因素变化,如声音、热量、压力等,实现对人流量的估计	户内空间

表3 常见的计算机视觉处理方法

Tab.3 Common computer vision processing methods

方法类别	处理模式	适用场景
基于检测	识别行人整体特征或检测特定部位(头、肩)	人群分布松散且无严重遮挡
基于回归	分割图像前景区域并提取前景特征(周长、面积、边缘、纹理、角点等),最终基于特征回归计数	人群分布密集或背景复杂
基于密度映射	提取像素点特征,训练回归模型,以此将像素点特征映射到对应的人群密度分布图	人群分布密集或业务需要反映人群的空间分布信息
基于深度学习 ^[46]	CNN(Convolution Neural Network)及其延伸模型通过训练样本数据集,学习图像中的人群分布规律,从而预测人群密度	人群分布不均或视角变化较大

法虽然考虑了建成环境的复杂性及其形态特征，目前的运算精度也越来越高，但该方法多以建立统计模型来估算人口数量，忽略了人口的本地身份，导致其无法精准判定居民的公共服务需求。三是，采用传感设备识别人流的方法多用于城市重点地段，在城市设计管理、公共安全监测等方面有其优势，但因其识别范围集中在局部区域，难以满足城市规划、建设、治理的“全量”底数要求。因此，迫切需要一种兼顾精准、真实、全量的人口底数映射方法，以满足数字孪生时代城市全生命周期运维管理的需要。

3 精准映射城市人口底数的创新技术框架

随着近年来城市政府的数字化转型，政府各个部门的政务数字平台上留存了大量的市民办事信息，出现了“政务数据”这一类新兴数据源。该类数据为实现真实、精细、全量的人口映射提供了基础。近年来，笔者团队先后在浦东^[47]、黄浦、静安各区多个街镇开展了城市数字孪生的相关实践，经过不断地验证、调整和优化，针对城市人口底数的构建问题，总结凝练出了一套具有可操作性的创新技术框架。在该框架的创建过程中，确立了以“真实”为基准的原则，通过“空间—人口—需求”的逻辑，进一步延伸出了“映射真实空间”“刻画真实人口”“响应真实需求”等三个部分。见图1。

(1) 映射真实空间：构建映射城市物理环境的“精细化”空间底图，主要包括两部分：一是不同层级行政边界的地理数据，以及街区、地块、建筑等建成环境要素；二是以建筑楼栋“户室”为基础的分户地址数据，这部分通过多个渠道的政务数据获得。将行政边界数据、建成环境数据和分户地址数据聚合，便可构建出“精准到户”的精细化空间底图。这种方式不但避免了栅格化数据的失真问题，也提升了数据的颗粒度和真实性。

(2) 刻画真实人口：通过多业务条线的政务数据，获取实际人口信息，与空间底图进行挂接，实现人口数据“精

准到户”。而后，融入多源人口大数据，由此在政务人口底数基础上叠加、补充人口信息，再通过构建人口全生命周期画像图谱对人口进行精准画像描绘，在尊重合法隐私的前提下适度刻画人口的真实身份信息。

(3) 响应真实需求：以图数据库^②作为上述“空间—人口”底数的工程化方案，形成数据平台产品，并配套数据维护、监测和更新的技术与机制。在此基础上，根据政务工作中民生、教育、医疗、社区管理等不同类型的服务场景与数据需求，从图数据库中调取特定的数据集，以支撑面向各类政务公共服务的场景应用。

3.1 映射真实空间：构建“精准到户”的空间底图

3.1.1 构建基于建成环境和行政边界的空间底图

城市人口从事任何非户外活动，都要依托居住、办公、商业等具体功能的建成环境作为载体。同时，从政务治理的角度，也有一套由行政管理边界体系所构成的“城市”。这套体系是不同层级政府机构处理辖区内公共事务的权限边界。因此，在空间底图的构建中，同时将上述两套体系进行映射：一方面，对于建成环境而言，包括独栋建筑物、地块、街区、功能区、城市片区乃至整个城市的空间模型；另一方面，对于行政边界而言，则包括楼栋底面、社区管理“微网格”^③、社区、街镇、区界、市界、

省界等不同层次的边界，既与行政治理单元相对应，也会跟随行政范围变化而动态调整。

这部分映射空间底图的技术路径如下：①搜集和整理各类地图资源中的相关数据。行政管理边界数据主要来自政府官方公示信息；物理环境数据则来自测绘单位地理数据、政府工作中的线下台账记录^④、互联网地图等。②对上述不同格式的数据资源进行标准化加工，统一数据格式。若行政管理边界数据有缺失，则可通过人工绘制、修正的方式处理；对于格式多样的非政府互联网数据，可运用人工智能、图像识别、信息提取等计算机技术进行智能化处理。同时，结合测绘单位的常规数据更新工作、政务工作者线下工作校验等机制对空间底图内容持续更新，确保空间底图的准确性。③依据实际情况，对标准化的地理数据进行空间关联，使其层级关系准确：一方面每个行政管理层级能无缝覆盖下级所有单元；另一方面建筑模型底面能覆盖所有楼栋、户室信息。见图2。

3.1.2 细化空间底图中的“户室”信息

真实准确的空间底图必须依靠真实的地址信息来支撑，这类信息通常以建筑楼栋的“户室”为基本单位。虽然“户室”是居住人口的空间载体，但这类数据一般不会出现于测绘数据、地图数据中，只能通过其他渠道获得。从当前的实践经验来看，获取空间底图中的“户室”数据通常分为两种情况：第一种情况是某些大城市政务系统中已经建立

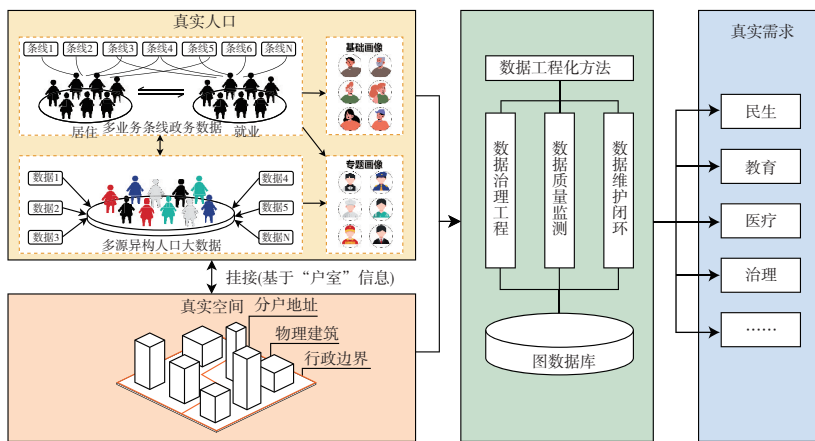


图1 精准映射城市人口底数的创新技术框架逻辑
Fig.1 The logic of the technological framework of urban population precise mapping

了专门的建筑房屋基础数据，包括房产局留存的建筑房屋专题库数据^⑤、街道或居委会自建的房屋基础库（以数据库形式或以纸质房态图留存）、市区层面牵头建设的“社区云”（上海）或“基层治理四平台”（杭州）等系统中的房屋地址库。这些数据都包含了“精确到户”的地名、地址信息，并会通过基层走访进行实时更新。对于这种情况，可直接获取数据融入空间底图。第二种情况是一些地方并未完善建筑房屋基础数据库，因此需要运用“人口分户地址技术”来获取户室数据，其原理是通过获取政务人口中的居民地址信息来反向构建“精确到户”的户室信息。具体操作上，先获取居民地址信息，再采用计算机自然语言处理中的词典分词法^⑥对地址数据按照“省—市—区—路—弄—号—室”的结构进行识别，然后提取出准确的“户室”数据，最后再与建筑分户模型挂接，融入空间底图。

3.2 刻画真实人口：人口挂接空间，建立画像体系

准确的人口信息是分析公共服务问题的基础，主要包含两方面：其一是人口的“在地”信息，依靠与空间底图的挂接来实现。其二是人口特征的刻画，涉及如何对其进行画像。提出“全生命周期人口画像图谱”的思路，并通过融入多源非政务数据，进一步补充“专题画像”。上述步骤共同构成了精细化人口底数的映射框架。见图3。

3.2.1 人口数据挂接空间底图

人口数据主要来自政府多业务条线的政务数据，如公安部门存有户籍办理数据、卫健委存有生育和健康档案数据，民政局存有婚姻和养老数据、人社局存有工作和社保缴纳数据等。同时，企业作为社会主体在办理公司注册、专利申请、投资融资等活动过程中也留下了相应的法人库数据。此外，各地数据部门或城市管理部门还自建了各类数字化应用场景，积累了如工单热线、事务咨询等特定的人口活动数据。精细化人口底数的构建需要对上述多类政务部门的人口数据进行融合。在融合过程中，通过对不同数据源设置不同的采信优先级，以避免相同数据的重复采集。政务数据

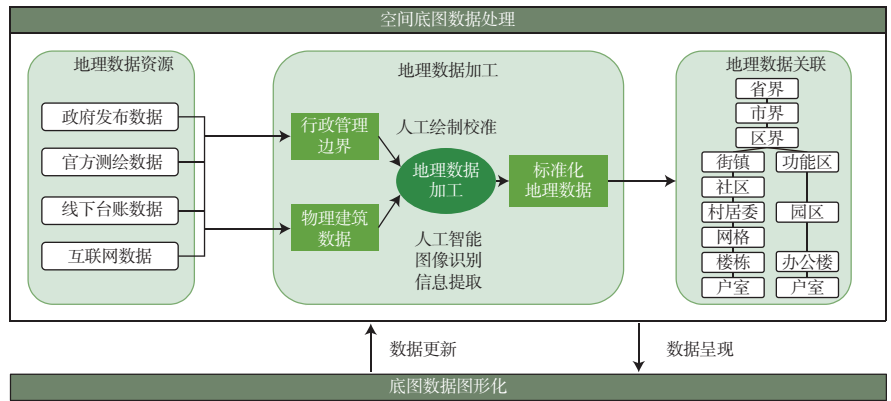


图2 “精确到户”的空间底图映射技术示意图

Fig.2 Technological framework of basemap for household-level precision mapping

融合完成后，将人口数据通过其地址信息字段与空间底图进行挂接，如：人口居住地址中的户室信息与对应的居住楼宇空间数据挂接；而人口社保数据中的企业信用代码与对应的办公楼宇空间数据挂接。

3.2.2 全生命周期人口画像

身份信息是体现人口数据“真实性”的关键，同时，必要的身份信息也能满足高效政务管理和精准公共服务的需要。本文基于“全生命周期管理”理念，建立了全方位的“人口画像图谱”框架，主要参考以下三方面的内容：一是有关人口全生命周期、家庭全生命周期、人口画像等议题的相关学术研究^[48]；二是现行人口代码及分类的规范标准，包括国家标准、行业标准及各省市的地方标准等；三是行政部门的数据分类现状，以及基于各部门业务需求的数据应用场景，主要参考了团队在上海、北京、杭州等城市进行的人口数据库建设相关工作的调研成果。基于以上研究，提出“1+9+X”的人口画像图谱体系：①“1”是指人口的基础属性，包括性别、年龄段、民族、人户在地等信息，其中，“人户在地”是指通过居委台账判断某居民是否“居住在地”，通过公安户籍判断其是否“户籍在地”。②“9”是指在“全生命周期管理”视角下与治理场景密切相关的多重人口信息维度，包括教育、就业、婚育、养老、社会活动和社会身份等。③“X”是指特定或特殊条件下的人口属性，可以是具有时间突发性的公共事件，如突发公共卫生事件中某人的“检测阳/阴性”属性，也可以是地域

特殊性密切相关的传统习俗，如民族地区中某人具有“某氏族重要长者”的属性。人口画像图谱体系中“X”具有开放性，可根据实际情况灵活调整。

3.2.3 多源数据融合

政务数据基本能完成对城市常住人口、工作人口等信息的刻画，但对在城市中从事其他多元活动的人口，如休闲、旅游、消费等活动人群缺少描述。对这部分人口的刻画，则需要补充其他非政务平台的商用大数据。如，通过模型算法分析手机信令数据可以描绘城市中休闲人口的分布情况，表达常驻短驻、流动方向等人口活动信息。再比如，结合互联网平台消费、点评、社交媒体图文、视频发布等数据，可以描绘城市消费人口的活跃度和时空分布特征。通过将非政务端的多源大数据和政务人口底数进行比对、融合，可实现对人口数据维度的补充完善，同时也能对人群进行“专题化”的刻画。

3.3 响应真实需求：以数据工程化方法实现多场景政务服务

城市政府的不同部门、公共机构因受限于特定的服务场景，对人口底数有着不同需求。为满足不同部门“多用户、多场景、高变化”的需求，研究团队建立了一套工程化方法将人口底数加工为能满足不同用户日常使用，且能实现数据“汇入—治理—维护—更新”全链路自动化闭环的数字平台产品。该套工程化方法包括“数据库架构体系”和“数据运维体系”（图4）。前者用来支撑人口底数中的数据关联网络和映射过程，以

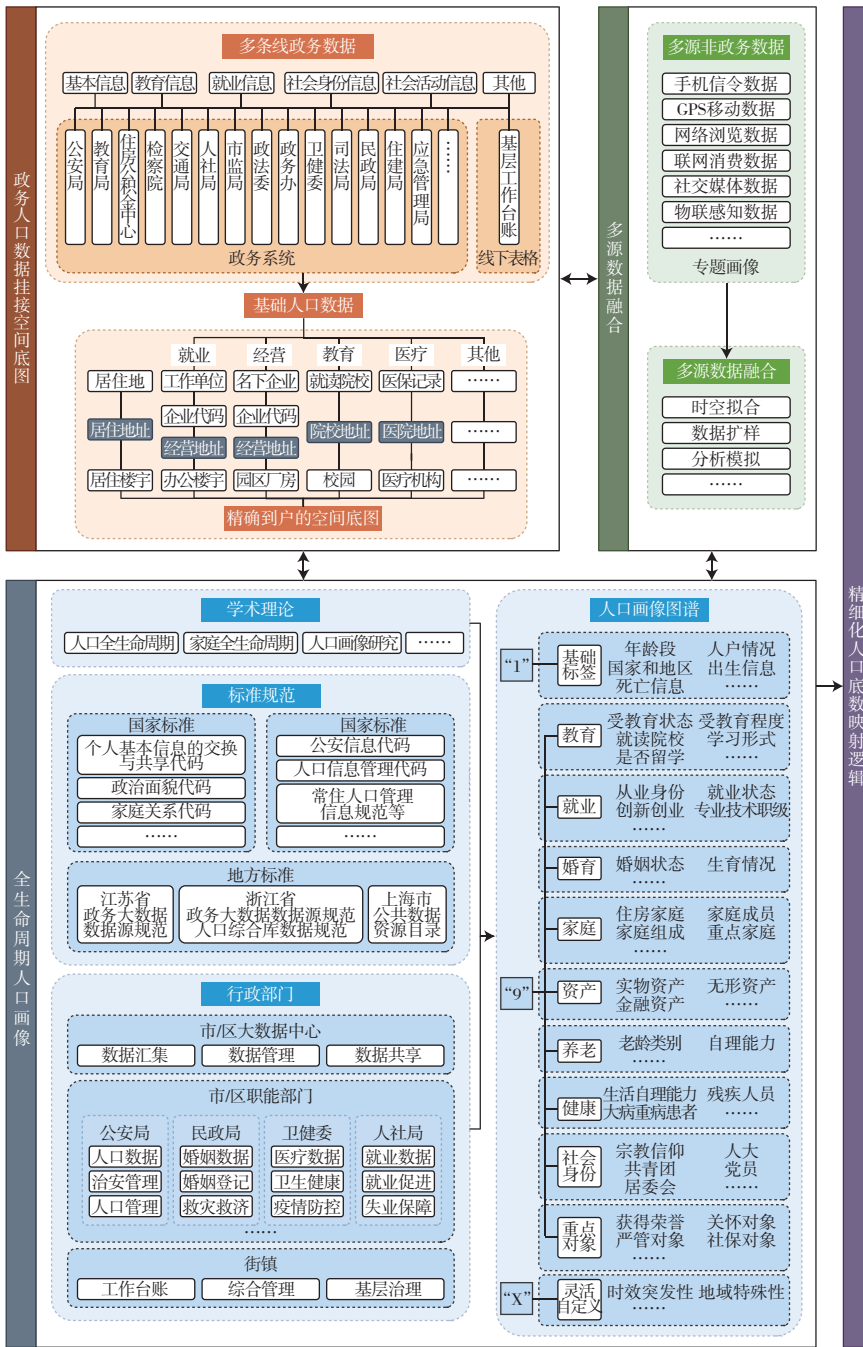


图3 精细化人口底数的映射框架

Fig.3 An integral engineering framework for precise mapping of urban population base

及不同用户端发出的数据应用需求；后者通过一套技术机制来保障人口底数的准确性、真实性和及时性。

“数据库架构体系”是人口底数数据与复杂城市客体同步更新、柔性扩展的工程化方法。因此，该数据库架构需要具备通用性强、约束性小、集成效率高等特点。由于城市人口底数中包含了“空间—人口—需求”之间的复杂关联与

动态变化，若选用传统的关系型数据库^⑦，容易引发数据调用速度慢、产品运行性能低、修改过程中用户无法使用等问题。因此，选择以“实体—关联”为基本结构的图数据库作为产品的底层架构。在精细化人口底数数据中，建筑、人口、企业等物理空间和社会主体被视为“实体”，而实体之间的相互关系则被视作“关联”，如某市民“居住在”某建

筑、“工作在”某企业、“注册于”某组织，形成了实体间的关联，而当某项数据发生变更时，只需要改变“关联”的属性即可。图数据库这种简洁的“实体—关联”数据结构，可以支撑精细化人口底数平台产品面向各类使用端的扩展运用和灵活调用。

“数据运维体系”包括数据治理工程、数据质量监测以及数据维护闭环等三部分。数据治理工程是数据底图的工程化“生产流”，之后数据进入图数据库，通过初始源数据入库、数据清洗修正、聚合统计计算、人口画像打标、面向应用的数据拆分等步骤，实现人口底数在末端出库时可以直接运用于政务使用端的各类场景。数据质量监测是数据的“监测流”，通过自动化、人工手段以及业务应用情况来监测数据的一致性、准确性、时效性等，以保证出库的数据质量。数据维护闭环是数据的“更新流”。数据维护闭环分为向上和向下两个方向。向上闭环是数据与上级数据源（即数据中心、业务部门）之间的定期更新和问题反馈；向下闭环则是用户在一线使用过程中进行的更新、校验和修正。

4 精细化人口底数的运用展望讨论

4.1 运用必要性与数据安全保障

精细化人口底数的映射过程涉及大量的人口隐私信息，如年龄、身份、住址、健康、行踪等，而根据《民法典》规定，自然人的姓名、出生、身份证、生物识别、住址、电话、电邮、健康信息、行踪信息等均受法律保护。因此，这里存在两个问题：①该技术涉及海量隐私数据，其运用是否必要？②如果需要，应如何保障其数据安全？对于第一个问题，笔者发现，我国法律鼓励将个人数据运用于公共服务和公共事务，如：《民法典》规定，以维护公共利益和自然人合法权益的隐私数据采集，行事人不用承担民事责任^[49]；《数据安全法》则更进一步明确，“国家支持开发利用数据资源提升公共服务智能化水平，且应当充分考虑老年人、残疾人的需求”^[50]。因此，站在当前优化城市公共服务质量、

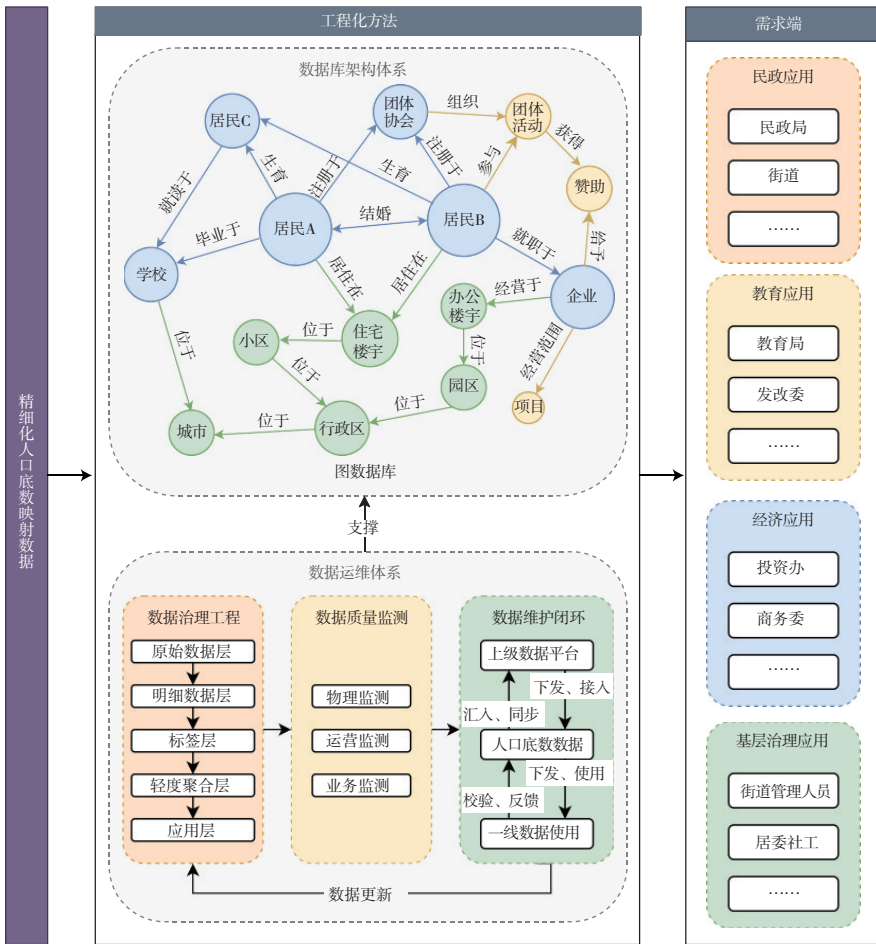


图4 面向多场景政务需求的精细化人口底数工程产品框架示意图

Fig.4 A precise population base product framework for diverse government service scenarios

时空变化特征：①基于政务数据，可进一步分析居民落户的时空特征、子女入园入学的空间流向、就业失业居民的时空分异、居民使用医疗设施的时空频谱等，为城市制定相应的公共政策提供依据。②基于基层工作台账，则可对社区个体的居住在地、户籍在地信息进行精确统计，甄别出“人在户在”“人在户不在”“人不在户在”等属性。“人在户在”属于常住人口的一部分，在城市实有人口^[51]中属于静止人口；“人在户不在”可根据居住时长是否满足6个月而区分出其中的常住人口和流动人口；“人不在户在”属于外出人口。由此，可为城市常住人口判定、实有人口分析等工作提供细颗粒度数据。③非政务数据在当前已有较多成熟运用，如城市的密度分析、活力评估、结构识别等^[52]。本文将非政务数据作为补充数据融入精细化人口底数框架，拓展了城市人口底数映射的信息维度。

4.3 精细化人口底数运用于社区治理规划

社区是空间治理的基本单元，而精准的公共服务供给是社区治理的主要任务之一。在城市“空间—人口”复杂多变的背景下，社区公共品的精准供给是提升居民生活品质的关键因素，也是有限公共资源和公共财力高效使用的必由之路。精细化人口底数可为公共品的精准供给提供科学依据。决策者可根据不同类型的服务对象精确评估其公共服务需求，并制定相应的公共品供给规划，包括以下方面：

(1) 设施与空间类公共品的供给。精细化人口底数结合城市路网、公共设施POI等数据，引入数据算法和模型，可支持各类设施与空间类公共品供给的场景。比如，15 min社区服务生活圈设施规划与实施监测，可通过空间算法计算实际步行路径可达范围，结合精细化人口底数数据，精确计算设施服务覆盖的细分人群规模，按细分人群需求确定设施配置规模。比如，教育资源规划中，结合人口底数和教育数据，围绕入园入学场景构建数据分析模型，预测学龄人口、学校招生数量、测算教育资源匹配等，并以小程序等形式对市民共享数据

提升城市治理水平的角度看，映射人口的“全量”底数有其必要性。对于第二个问题，可从相关实践经验中得到解答：精细化人口底数包括“研制”和“应用”两个阶段。“研制”是将多源人口信息映射为数据底座，其运行基于政务网环境，不涉及任何“用户”，因此可以通过隔离网络环境来保障数据安全。“应用”阶段因为有大量终端“用户”介入，运行环境相对开放，所以可通过引入严格的权限系统、管理规范、问责制度等来保障数据安全。

4.2 精细化人口底数运用于城市人口分析

精细化人口底数来自大量的政务数据源和非政务数据源，而这些不同数据的更新频率也存在不同特点：①政务数据的更新频率具有“不确定性”，如居民落户、子女入学、申领失业金、门诊治

疗、社保使用等都会在相应的政务系统中更新数据，其更新频率与事件发生直接相关，如落户、入学等通常属于低频，而申领失业金、医疗社保数据则相对高频。②基层工作台账的频率取决于基层工作者的走访频率，且对不同人群的信息更新频率也有所不同，如重点关注人群被走访的频次更高，其数据更新也更频繁。③非政务数据包括手机信令、GPS移动、社交媒体等，通常在移动终端使用期间就会有数据记录。平台提供数据时，会按需将其聚合为小时、日度、周度、月度等不同频度的数据。因此，不同类型的数据源，其更新频率会因事、因人、因需而存在差异。

将上述“多源异频”的人口数据融入精细化底数平台，一方面可聚合为不同尺度的空间单元以判断不同空间单元中特定人口数据的频数差异，另一方面则可基于不同视角解析城市人口的多维

信息，为市民置业及子女入学决策提供支撑。

(2) 针对特定人群的软服务供给。精细化人口底数的画像图谱标签，可以辅助精准定位特定服务对象群体，实现定制化服务供给。如：对各类弱势群体关怀政策，需要社区工作人员找到最符合救助条件的困难居民；通过人口画像标签的交叉叠加，可以找到老人、残疾人、失业人员以及多重困难的市民，并与社会管理与服务资源进行条件匹配，实现救助服务的精准送达。再如，如果要提升社区医院的家庭医生服务触达比例，可通过画像标签筛选出孕产妇、重病患者等重点人群，与社区医院签约数据比对，找到未签约的人群鼓励签约，以及为有需要的人群提供长效的医疗咨询服务和定向的健康事项提醒。

(3) 公众参与及其他服务型公共品供给。精细化人口底数和线上多元交互形式结合的新兴民主参与模式可以提升市民公共事务的参与度。传统的线下民主参与沟通渠道，合作机制陈旧，限制了公众参与的积极性。精细化人口底数结合虚拟现实、数字人、实时渲染等元宇宙集成技术，可以实现特定人群通过身份验证后线上参与居民议事会、业主大会等会议。该项服务能打破传统线下参会的时空限制，降低居民议事的门槛，提升市民民主参与率，进一步拓展市民参与的广度和深度。

4.4 精细化人口底数运用于国土空间规划

随着国土空间规划体系的进一步完善，对城市数字孪生工作也提出了更高要求。总体而言，本文提出的精细化人口底数实现方法，由于映射出了真实的“空间—人口”系统，且能基于“精确到户”的细颗粒度数据向上聚合为不同层次的空间治理单元，因此可为不同尺度、不同类型的规划工作提供精确的基础底数。

(1) 总体规划方面。面向国土空间全域、全要素的管控需求，精细化人口底数可提供基于“全量人口”的数据底座及画像图谱，为国土空间的结构关系识别、功能布局优化、规划动态调适等工作提供精确、及时的人口布局、变化

与流向信息，进一步提升国土空间规划的决策效力和实施精度。

(2) 详细规划方面，针对国土空间详细规划“单元规划+实施方案”的总体趋势^[53]，精细化人口底数提供的高精度“空间—人口”基座，一方面可为详细规划单元的划定标准、范围选择、范围调适等工作提供基础信息，另一方面还可为详细规划单元中的问题辨析、短板识别、实施方案等工作提供“人本视角”的数据支持，进一步推动详细规划单元的精细化管理和数字化治理转型。

(3) 体检评估方面。当前工作中，人口信息与建成环境、运行系统、活动系统等存在串联不足的问题^[54]。精细化人口底数可基于“户室”数据，向上聚合为网格、街区、片区、城区等多种尺度的空间单元，精准映射特定范围内的多维人口信息。在此基础上，可进一步揭示特定范围内的“空间—人口”适配度问题，并为生态环境、住房保障、公共服务、交通市政等支撑系统的改进优化提供依据，实现支撑系统与人口活动的精准匹配，避免因人口底数精度不足、覆盖度不够而导致的失配与错配问题。

(4) 实施监测方面。随着国土空间规划实施监测网络(CSPON)建设方案的出台，以数字化途径建立国家、省、市、县等层级的“一张图”基础信息平台成为重要工作。该平台协同多个部门并横向互联多种类型的业务系统，构建共建、共治、共享的开放治理新生态^[55]。精细化人口底数可作为该网络横向互联的业务系统之一，嵌套于CSPON平台之中。它不但能够为CSPON平台提供精准的人口底数信息，还能与平台中的其他数据进行交叠、融合，使得实施监测工作能够精准跟踪“空间—人口”的互动关系，提升实施监测的效用。

5 结语

城市的数字孪生并非要孪生现实城市中的所有元素。正如Batty等^[4]指出，仅仅构建一个与真实事物完全相同的孪生体没有意义，否则孪生体本身就将成为真实系统。孪生的理念应当是孪生体以某种方式与真实系统融合，但不会成为真实系统本身。从这个意义上讲，

城市的“数字孪生体”应当作为城市规划、建设、治理中的“基础数据映射集成”，是决策者分析公共问题、制定改良政策的科学依据，而在众多可以孪生的对象中，精准的城市人口底数信息最为关键、难度最大的部分。本文在梳理现有人口底数映射方法及其问题的基础上，结合实践探索，基于“真实空间—真实人口—真实需求”的原则，建构了融合地图数据、政务数据、画像标签、商用大数据等于一体的精细化人口底数映射路径，并探讨了该项技术如何赋能今后的城市规划相关实践。这项技术框架是基于当前城市规划、建设、治理数字化转型的迫切需求而提出的，不但体现了城乡规划“以人为本”的初心使命，也有助于贯彻实现“人民城市”这一新发展理念。

感谢上海脉策数据科技有限公司技术团队的支持，以及浦东、静安、黄浦等数字城市实践中相关领导给予的帮助；感谢审稿专家提出的中肯意见和宝贵建议。

注释

- ① NASA的定义：数字孪生(digital twin)是借助现有的最佳物理模型、新型传感器、历史数据等，对竣工车辆或系统(as-built vehicle or system)进行多物理场、多尺度、概率性的集成模拟，以反映孪生对象的全生命周期使用状况。在这一里程碑意义的定义提出后，有关数字孪生的定义开始出现在不同领域的讨论中。
- ② 图数据库(GDB)是计算机科学中的一个概念。它是指一个使用“图结构”进行语义查询的数据库，使用节点、边和属性来表示和存储数据。该系统的关键概念是图，它直接将存储中的数据项与数据节点、节点间表示关系的边的集合相关联。这些关系允许直接将存储区中的数据链接在一起，并且在许多情况下可以通过一个操作进行检索。图数据库将数据之间的关系作为优先级。
- ③ “微网实格”，即保持现有网格工作层级不变，进一步划小治理范围，着眼楼栋、单元形成社区总网格、片区一般网格、楼栋微网格“三级划分”和专属网格“自主划分”，以此实现基层治理全覆盖、精细化。具体信息见《中青在线》：<http://m.cyol>。

com/gb/articles/2023-07/04/content_OV
LbXOTWyE.html

- ④ 线下台账即非联网的政务工作台账。工作台账在政务工作中通常用于记录各种工作任务、项目进度、会议纪要、决策执行、工作总结等信息。它可以是传统的纸质形式，也可以是电子表格文档，目前主要以离线版本的Excel表格为主。
- ⑤ 从当前的经验来看，房产局的建筑房屋专题数据库很难获得，实践中较少用到。
- ⑥ 词典分词法是计算机自然语言处理(NLP)中的一种常见分词算法。其原理是，依据已有词典的语料库，让计算机识别待处理文本中符合词典词条的内容，并进行逐一标注。这种识别文本的方法就叫词典分词法。运用这种方法可以快速对一段文字进行分词，但也会受限于词典语料库的范围。
- ⑦ 关系型数据库(RDB)是一种在表、行和列中构建信息结构的方法。RDB可以通过联接表在信息之间建立关联或关系，从而使用户可以理解和分析各种数据点之间的关系。关系型数据库的弊端在于面向高并发读写、字段不固定、大量数据写入等情况时性能较差。

参考文献

[1] 庄少勤,赵星烁,李晨源.国土空间规划的维度和温度[J].城市规划,2020,44(1):9-13.

[2] 党安荣,田颖,李娟,等.中国智慧国土空间规划管理发展进程与展望[J].科技导报,2022,40(13):75-85.

[3] 陶飞,刘蔚然,张萌,等.数字孪生五维模型及十大领域应用[J].计算机集成制造系统,2019,25(1):1-18.

[4] 迈克尔·巴蒂,林旭辉.数字孪生、图灵测试和城市模型[J].上海城市规划,2023(5):1-3.

[5] FULLER A, FAN Z, DAY C, et al. Digital twin: enabling technologies, challenges and open research[J]. IEEE Access, 2020, 8: 108952-108971.

[6] SEMERARO C, LEZOCHE M, PANNETTO H, et al. Digital twin paradigm: a systematic literature review[J]. Computers in Industry, 2021, 130: 103469.

[7] 万励,尹芊懿,汤俊卿,等.数字孪生在城市规划实践应用中的批判性思考[J].上海城市规划,2023(5):18-23.

[8] 杨滔,田颖,徐艳杰.数字孪生赋能下的互动生成式规划与治理[J].上海城市规划,

2023(5):4-10.

[9] 易雪琴.国内外数字孪生城市建设的经验及启示[J].信息通信技术与政策,2023,49(8):25-30.

[10] 吴志强,甘惟,臧伟,等.城市智能模型(CIM)的概念及发展[J].城市规划,2021,45(4):106-113.

[11] 杨滔,杨保军,鲍巧玲,等.数字孪生城市与城市信息模型(CIM)思辨:以雄安新区规划建设BIM管理平台项目为例[J].城乡建设,2021(2):34-37.

[12] 周瑜,刘春成.雄安新区建设数字孪生城市的逻辑与创新[J].城市发展研究,2018,25(10):60-67.

[13] 党安荣,王飞飞,曲薇,等.城市信息模型(CIM)赋能新型智慧城市发展综述[J].中国名城,2022,36(1):40-45.

[14] 杨俊安.从数字设计到数字管控:第四代城市设计范型的威海探索[J].城市规划学刊,2020(2):109-118.

[15] 杨保军,杨滔,冯振华,等.数字规划平台:服务未来城市规划设计的新模式[J].城市规划,2022,46(9):7-12.

[16] 郑德高,林辰辉,吴浩,等.面向城市可持续发展的空间化研究和数字画像技术框架[J].城市规划学刊,2023(6):32-39.

[17] 杨滔,李晶,李梦焱,等.苏州古城历史文化遗产保护与活化的数字孪生方法[J].城市规划学刊,2024(1):82-90.

[18] 吴志强,周咪咪,刘琦,等.“跨代孪生”:映射城市生命特征[J].城市规划学刊,2024(1):9-17.

[19] 田颖,杨滔,党安荣.基于场景迭代的数字孪生城市构建逻辑[J].上海城市规划,2023(5):24-30.

[20] 韩涛,郭曦.从文化孪生到技术孪生再到数字孪生:基于大历史观的数字孪生城市逻辑考察[J].上海城市规划,2023(5):31-35.

[21] 王雪梅,李新,马明国.基于遥感和GIS的人口数据空间化研究进展及案例分析[J].遥感技术与应用,2004(5):320-327.

[22] CHENG L, WANG L, FENG R, et al. Remote sensing and social sensing data fusion for fine-resolution population mapping with a multimodel neural network[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 5973-5987.

[23] BHADURI B, BRIGHT E, COLEMAN P, et al. LandScan USA: a high-resolution geospatial and temporal modeling approach for population distribution and dy-

namics[J]. GeoJournal, 2007, 69: 103-117.

[24] 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.

[25] 丁亮,钮心毅,宋小冬.基于移动定位大数据的城市空间研究进展[J].国际城市规划,2015,30(4):53-58.

[26] 李星月,陈福临.基于手机信令数据的中小城市区域联系及人口研究[J].城市交通,2020,18(4):47-54.

[27] 李峰清,赵民,吴梦笛,等.论大城市“多中心”空间结构的“空间绩效”机理:基于厦门LBS画像数据和常规普查数据的研究[J].城市规划学刊,2017(5):21-32.

[28] 王德,刘振宇,俞晓天,等.城市人口规模的战略视角分析:以武汉人口规模专题编制为例[J].城市规划学刊,2017(5):58-65.

[29] 龙瀛,张宇,崔承印.利用公交刷卡数据分析北京居住关系和通勤出行[J].地理学报,2012,67(10):1339-1352.

[30] TEH B T, SHINOZAKI M, CHAU L W, et al. Using building floor space for station area population and employment estimation[J]. Urban Science, 2019, 3(1): 12.

[31] 冯明翔,方志祥,路雄博,等.交通分析区尺度上的COVID-19时空扩散推估方法:以武汉市为例[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(5):651-657.

[32] 刘晓慧,刘永伟,蔡菲,等.面向时空可达性的城市应急医疗机构推荐方法[J].地球信息科学学报,2019,21(9):1411-1419.

[33] WESOLOWSKI A, O'MEARA W P, TATEM A J, et al. Quantifying the impact of accessibility on preventive healthcare in sub-Saharan Africa using mobile phone data[J]. Epidemiology (Cambridge, Mass.), 2015, 26(2): 223.

[34] 徐涛,刘颖莹,卢桂伊,等.面向人口空间分异的市教育设施配置方法:以武汉市硚口区初中为例[J].现代城市研究,2022,7(37):93-99.

[35] 董南,杨小唤,蔡红艳.基于居住空间属性的人口数据空间化方法研究[J].地理科学进展,2016,35(11):1317-1328.

[36] QIU F, SRIDHARAN H, CHUN Y. Spatial autoregressive model for population estimation at the census block level using LIDAR-derived building volume information[J]. Cartography and Geographic Information Science, 2010, 37(3): 239-257.

[37] URAL S, HUSSAIN E, SHAN J. Building population mapping with aerial imagery

- and GIS data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, 13(6): 841-852.
- [38] BAKILLAH M, LIANG S, MOBASHERI A, et al. Fine-resolution population mapping using OpenStreetMap points-of-interest[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2014, 28(9): 1940-1963.
- [39] 连婷. 基于随机森林和夜间灯光数据的建筑物尺度人口估算[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- [40] SHANG S, DU S, DU S, et al. Estimating building-scale population using multi-source spatial data[J]. *Cities*, 2021, 111: 103002.
- [41] GARRIDO-VALENZUELA F, CATS O, VAN CRANENBURGH S. Where are the people? counting people in millions of street-level images to explore associations between people's urban density and urban characteristics[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2023, 102: 101971.
- [42] 龙瀛, 曹哲静. 基于传感设备和在线平台的自反馈式城市设计方法及其实践[J]. *国际城市规划*, 2018, 33(1): 34-42.
- [43] 李力, 张婧, 方立新. 低精度Wi-Fi探针数据采集分析方法研究: 以街区尺度环境行为研究为例[C]// 智筑未来: 2021年全国建筑院系建筑数字技术教学与研究学术研讨会论文集, 2021.
- [44] 李茹平, 合子琦, 张林燕, 等. 基于微信小程序云开发的人流量监测系统[J]. *电子技术与软件工程*, 2021(8): 68-70.
- [45] KANNAN P G, VENKATAGIRI S P, CHAN M C, et al. Low cost crowd counting using audio tones[C]// *Proceedings of the 10th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems*. 2012: 155-168.
- [46] 张君军, 石志广, 李吉成. 人数统计与人群密度估计技术研究现状与趋势[J]. *计算机工程与科学*, 2018, 40(2): 282-291.
- [47] 李嘉宁, 张逸平, 汤舸, 等. 面向基层治理的数字孪生城市工作体系初构: 以花木数字孪生城市为例[J]. *上海城市规划*, 2023(6): 91-97.
- [48] 陈思. 基于人口生命周期的空间比对分析模型研究[J]. *地理空间信息*, 2020, 18(12): 24-26.
- [49] 中华人民共和国全国人民代表大会. 中华人民共和国民法典[S]. 2020-05-28.
- [50] 中华人民共和国全国人民代表大会. 中华人民共和国数据安全法[S]. 2021-06-10.
- [51] 王德, 任熙元. 日常流动视角下的上海市实有人口分布与流动性构成[J]. *城市规划学刊*, 2019(2): 36-43.
- [52] 张尚武, 晏龙旭, 王德, 等. 上海大都市地区空间结构优化的政策路径探析: 基于人口分布情景的分析方法[J]. *城市规划学刊*, 2015(6): 12-19.
- [53] 张尚武, 刘振宇, 张皓. 国土空间规划体系下的详细规划及其运行模式探讨[J]. *城市规划学刊*, 2023(4): 12-17.
- [54] 伍江, 王信, 陈焯, 等. 超大城市城市体检的挑战与上海实践[J]. *城市规划学刊*, 2022(4): 28-34.
- [55] 王伟, 柳泽, 林俞先, 等. 从国土空间规划“一张图”到CSPON“一张网”学术笔谈[J/OL]. *北京规划建设*, [2024-01-17]: 1-39. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2882.tu.20240110.1523.002.html>.

修回: 2024-04