“跨代孪生”：映射城市的生命特征

吴志强　周咪咪　刘　琦　甘　惟　徐浩文　黑静好

The "Cross-Generational Twin City": Mapping the Life Characteristics of the City

WU Zhiqiang, ZHOU Mimi, LIU Qi, GAN Wei, XU Haowen, HEI Jinghao

提　要　围绕“跨代孪生”为何与如何映射城市生命特征展开，回顾“跨代孪生”提出的根本原因，总结“跨代孪生”的发育进程，提炼“跨代孪生”要素分类体系及其关系矩阵，指出“跨代孪生”未来攻关方向及可能的贡献。遵循城市生命具有三重形式：物质生命、社会生命和数字生命。城市物质生命和社会生命是不断迭代演进的，因此城市数字生命也必须映射城市物质生命和社会生命进行迭代演进。“孪生”从工业生产过程引入城市规划建设管理，应针对城市迭代演进的特征，与城市规划建设管理中核心关切的“时间”结合在一起。“跨代孪生”的关键在于看到城市的未来，以未来引导现在的决策；“跨代孪生”的优势在于看见城市的历史，为当前和未来的发展作出科学依据；“跨代孪生”的科学意义在于以此发现城市发展规律。“跨代孪生”帮助城市学科理解历史、现在和未来之间的相互关系，以及城市生命构成过程中内在多要素之间的关联，为城市发展赋予动力。

关键词　跨代孪生；数字孪生；城市发展规律；城市推演；要素体系

中图分类号　TU984　文献标志码　A
DOI　10.16361/j.upf.202401002
文章编号　1000-3363(2024)01-0009-09

Abstract: This paper explores why and how the concept of "cross-generational twin city" embodies the life characteristics of the city. It provides an overview of the contextual origins of the term, traces its developmental trajectory, establishes a classification system and a relationship matrix of the elements within a "cross-generational twin city", and prospects for future research directions and potential contributions of the concept. The paper argues that urban life has three forms: material, social, and digital. The city's digital life, reflecting its material and social aspects, dynamically represents the ongoing transformations in the material and the social worlds. The concept of "digital twin", emerging from the industrial production process, is applied to urban planning and construction management. The “digital twin” must reflect characteristics of urban iterative evolution and emphasizes the crucial factor of "time" in urban planning and construction management. The crux of "cross-generational twin city" lies in its ability to project future urban development and serve as a guide for future-oriented decision-making at the present. The concept deepens our understanding of historical development and provides a foundation for current and future development. Its scientific significance lies in its role in unveiling the laws of urban development. It helps shed light on the interconnections among the past, present, and future, and reveals the interplay of various factors that shape urban processes. The concept facilitates a more comprehensive understanding of cities and empowers urban development.

Keywords: Cross-Generational Twin City; digital twin; urban development laws; urban evolution, element system

作者简介

吴志强，中国工程院院士，同济大学建筑与城市规划学院教授，wus@tongji.edu.cn

周咪咪，同济大学建筑与城市规划学院博士研究生

刘　琦，同济大学规划设计研究院主创规划师

甘　惟，同济大学建筑与城市规划学院助理教授

徐浩文，同济大学建筑与城市规划学院博士研究生

黑静好，同济大学设计创意学院硕士研究生

1　“跨代孪生”：城市孪生为什么要跨代？

1.1　城市生命视角下的数字孪生城市的反思

Digital twins（数字孪生）起源于美国，从工业端渗透到孪生城市，虽然存在诸多争议，但无可否认，孪生城市的概念已经受到公众的广泛知晓和传播，类似的情况比如来

* “十四五”国家重点研发计划课题“多维信息融合的立体网络空间智慧运维平台及应用示范”（项目编号：2023YFC3807505）；上海市2022年度“科技创新行动计划”科技支撑碳达峰碳中和专项项目“双碳背景下超大城市环境动态规划设计研究及示范”（项目编号：22dz1207800）；土木、水利与建筑领域前瞻性储备性战略研究项目课题“城市规划与设计”（项目编号：2023-JB-04）；“十四五”国家重点研发计划课题“城市可持续规划建设多模态情景智能仿真信息平台研究”（项目编号：2022YFC3800205）；国家自然科学基金合（协）作项目“新一代人工智能与智能社会领域工程科技未来20年发展战略研究”（项目编号：L212400016）

自美国的“绿色城市”（green city）的本质是“可持续城市”（sustainable city），而“智慧城市”（smart city）的实质是“智能城市”（intelligent city），通俗的术语如“绿色城市”（green city）和“智慧城市”（smart city）更加便于传播。数字孪生技术的起源最早可以追溯到1960年代，美国宇航局使用基本的孪生想法进行当时的太空规划，通过在地面创建物理复制系统来匹配太空中的系统。“数字孪生”一词于1998年首次被提及，指的是演员艾伦·阿尔达声音的数字副本①。之后2002年，美国密歇根大学的迈克尔·格里夫斯教授针对设备全生命周期管理，提出了物理实体的虚拟数字表达和三维模型，虽然当时并没有用数字孪生这个术语，但是明确了数字孪生的内涵。直到2012年，NASA在其发布的技术路线图的“simulation-based systems engineering”部分中，首次将“数字孪生”（digital twins）的概念与内涵进行了统一。2015年，西门子等公司将数字孪生应用到工业界，开发了工业系统的数字孪生。2017—2019年，Gartner连续三年将数字孪生列入十大战略性技术。数字孪生引起广泛关注和高度重视，开始在各行各业获得应用。

数字孪生的概念在城市领域有多种理解，例如“数字孪生城市”的概念2017年首次在雄安新区规划中提出，旨在通过数字化映射物理世界，全面覆盖城市数据，形成可视、可控、可管的数字孪生城市[1]。同年，佐治亚理工学院提出了“智慧城市数字双胞胎（smart city digital twins）”的概念，将数字孪生视为一个智能、支持物联网（IoT）的、数据丰富的城市虚拟平台，用于复制和模拟真实城市中发生的变化，以提高城市的弹性、可持续性和宜居性[2]。2018年，中国信通科技（CAICT）提出，数字孪生城市是基于数字识别、自动感知、网络化连接、包容性计算、智能控制和平台服务等信息技术体系，在数字空间中再现与实体城市相匹配的数字城市，对实体城市实体在真实环境中的状态进行全息模拟、动态监控、实时诊断和准确预测②。

然而，尽管数字孪生颇受关注，部分数字企业以此扩大销售平台，学者们则通过此概念增加发表文章数量，表达对城市可视、可控、可管的梦想，但在城市管理实践中，基本上是“都在打雷，未曾下雨”，其核心问题是数字孪生仍无法满足城市规划、建设和管理的实际需求，这是因为城市具有：

（1）生长随机律：城市的运行和建设不像工业生产那样具有明确的工艺、流程和产品，而是由各个随机构成的系统构成的整体；

（2）边界模糊律：城市的内外体系并不像企业那样可以清晰地分割，城市与周边的物流、交通、信息交流、经济合作、社会血缘以及自然生态共享，无法划分独立明确的边界；

（3）未来导向律：城市规划建设是未来导向的，关注明天，不仅是现在，因此，对未来的全面刻画比对现状的简单映射更为重要；

（4）历史因果律：为了理解城市未来的发展，必须基于城市过去的发展内在因果关系，而不是仅仅复制和模仿一个现实系统。

基于以上城市的四大规律，城市复杂系统的刻画，难以通过仅仅复制和模仿一个现实系统完成，而是需要对其长期发展过程的内在动力和机制进行精准的模拟演绎，这正是当前的城市数字孪生的致命短板。

1.2 城市智能模型的发展为城市生命特征的映射提供了新可能

在城市领域，智能模型技术已经有近20年的发展历程。2004年，上海世博会上首次提出了campus intelligent model（CIM）的概念，后来扩展为city intelligent model，简称“CIM”[3]。CIM以“城市生命体”（city being）为理论基础，强调数字城市应像真实城市一样具有生长演变的过程，并通过在数字化城市平台中引入智能模型来实现。在经历四次迭代和大量实践后，城市智能模型现在已具备模拟城市复杂要素、对城市关键问题进行预判的能力。自2014年以来，引入人工智能（AI）技术进一步强化了城市智能模型的推演和预测能力。例如，利用AI算法预测城市人口规模、土地增长、交通流量等已成为城市研究领域的成熟技术。在2016年，笔者提出并研制了“人工智能的城市规划”理论与技术，形成了城市人工智能诊断与推演技术体系。

AI技术的引入将城市智能模型CIM推向新阶段，即CIMAI（CIM+AI）。基于城市人工智能诊断与推演技术体系，这一阶段有助于城市智能系统回溯城市历史并推演城市未来，为科学地洞察城市未来发展提供了新的可能性[4-5]。

1.3 “跨代孪生” 映射城市的生命特征

在城市治理中，地方政府和职能部门是城市智能系统的管理和运营方。这些决策者已不仅仅关注当下问题的发现和理解，而是更注重对城市未来发展的合理预判，以制定更科学、精准的政策。这种精细治理需求将引导城市的智能系统朝着能够预测、推演城市未来方向的方向发展。

基于多年在城市智能化领域的实践和对城市政府及职能部门需求的思考，结合学界和业界关于城市智能模型和数字孪生的共同探索，笔者于2022年提出了“跨代孪生”的概念（图1）。这一概念在数字孪生基础上引入人工智能等技术，实现了以下三个方面的目标：①城市的数字生命迭代，即数字生命不断映射物质生命和社会生命，实现持续向前的迭代；②实现对城市未来的预测，基于城市历史和今天的发展规律，推演并洞察城市的未来；③解析城市生命构成过程，深入理解城市的历史、现在和未来之间的关系，以及内在多要素之间的生命构成过程，为更好地理解城市、赋能城市发展提供支持。

2 “跨代孪生”的发育过程

伴随技术的不断突破和在城市规划领域中的应用，“跨代孪生”不断发育，逐步集成GIS、大数据分析、城市环境模拟、虚拟现实、机器学习、代理人模型和图像生成等关键技术，最终实现看见城市的未来。见图2、表1。

2.1 C1“看见现在”：城市物质要素的映射

数字孪生技术首先在工业领域发展，

其主旨是为物理系统构建精确的虚拟模型，实现仿真、监测和优化[6]，GIS、三维仿真建模技术的应用推动数字孪生突破工业界限，进入城市管理和规划领域，孪生技术具备多领域应用潜力。TC 1.0的本质是对城市物质空间的映射，在物理城市和数字城市之间建立实时连接和动态反馈，通过对动态数据的跟踪识别来反映城市的真实信息，但仅是物质空间的映射不足以发挥信息化、智能化对城市发展的强大赋能[3]。

“看见现在”这一发育阶段初次展拓了数字孪生技术在城市领域的应用，提供了对城市物质空间的初步认识，但在理解城市生命内部运作和辅助决策等应用方面具有较大的局限性。

2.2　C2“看见形流”：城市非物质要素的映射及其与物质要素的互动

基于城市大数据底板的拓展和大数据分析技术，“看见形流”实现了城市流动要素，包括自然流、人流、信息流和能量流等的映射，这种映射能力揭示了城市物质空间内部的流动规律，Kitchin强调了大数据在实现智能城市规划中的关键作用，特别是在监测和理解城市内部流动的复杂性方面。在成功获取建筑信息模型和城市三维地理信息的基础上，利用物联网技术把相关流动要素数字化和可视化，智能感知和监测城市中物质、非物质的流动情况[8-9]。

2008年，都江堰灾后重建规划中，笔者及工作小组依托城市环境模拟技术，对都江堰自然流进行模拟，基于对气流和水流在昼夜运行规律的发掘，发现了城市活动与自然流动之间的相互作用关系[10]，重塑城市与山、水、堰相融格局（图3）。2016年，北京城市副中心防洪防涝安全规划中，笔者及工作小组借鉴“堰”的分水理念，构建“通州堰”系列分洪体系，基于副中心区域水循环模拟与调控的多方案比较，确定区域分洪方式和每个枢纽及蓄滞洪区的分流和调蓄方式[11]。

“看见形流”这一发育阶段解释了城市非物质要素的流动规律及其与物质要素的互动关系，但仍局限于对今天的城市生命的映射，无法揭示城市发展过程的动态变化和驱动因素，无法全面而深刻地理解城市发展脉络。

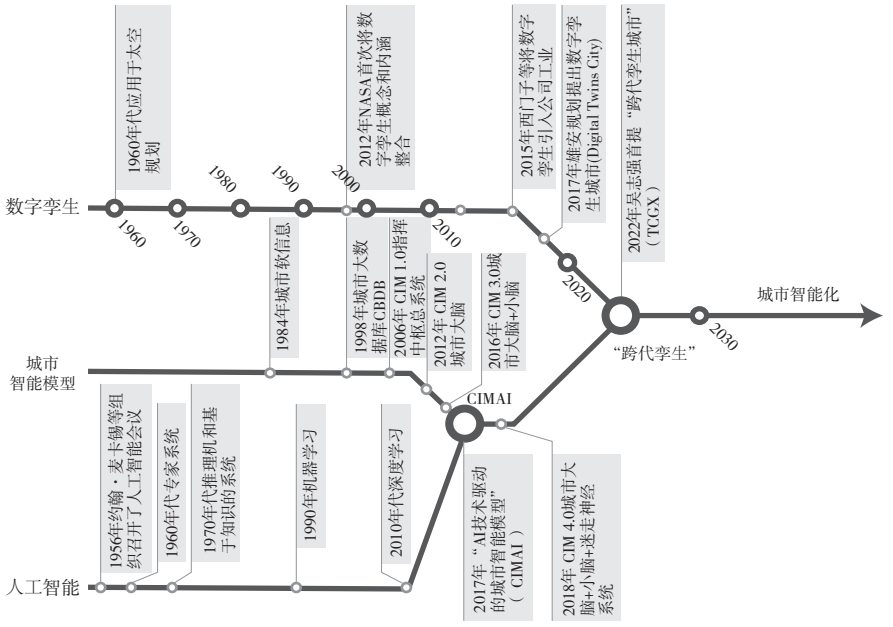

图1　数字孪生、城市智能模型以及人工智能技术在城市规划领域的迭代、相互影响和融合示意

Fig.1　Conceptual illustration of the development, mutual influence, and integration of digital twins, city intelligent model, and artificial intelligence in the field of urban planning

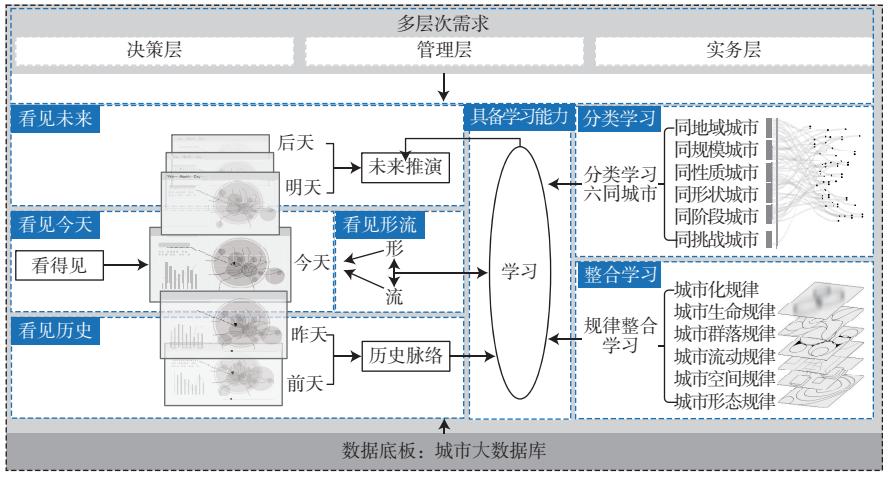

图2　“跨代孪生”发育过程示意

Fig.2　Conceptual illustration of the development process of the "Cross-Generational Twin City"

2.3　C3“看见历史”：城市生命历史脉络的映射

基于大量历史资料，以测量影像、虚拟现实和数据反演等技术为支撑，“跨代孪生”跨出了代际，对城市历史演变到今天的发展轨迹的映射。例如，分析城市建设用地数据的扩张时序有利于监测城市发展的动态变化进程，有助于深入理解城市发展的驱动因素[12-13]。

2011年，在青岛啤酒厂规划设计中，笔者及工作小组基于现存历史建筑和周边环境的历史基因梳理，依托虚拟现实和数据反演技术再现了1903年啤酒厂的历史场景（图4）。2015年，在“城市树”研究项目中，通过30 m×30 m精度网格，在40年时间跨度内对全世界所有城市的卫片进行智能动态识别，建构了“城市树”（图5），直观观察城市增长的过程，辨识其增长点[5]。

“看见历史”这一阶段拓展了城市生命的时间向量，基于城市历史到现在的发展规律的挖掘，对城市生命本质的探

表1 “跨代孪生”的发育过程中关键突破、代表性技术、基础设施、信息数据、运营安全、场景服务和笔者基于“跨代孪生”的大地实践

Tab.1 key breakthroughs, representative technologies, infrastructure, information data, operational security, scenario services, and the authors´ geospatial practice related to "Cross-Generational Twin City"

发育阶段	C1看见现在	C2看见形流	C3看见历史	C4具备学习能力	C5分类学习	C6整合学习	C7看见未来
关键突破	城市物质要素的映射	城市非物质要素的映射及其与物质要素的互动(主要强调的是城市流,包括自然流、人流、信息流、能量流)	城市历史脉络的映射	城市发展规律的发掘,从简单信息映射到知识提取	城市发展规律发掘的系统化提升,基于多样本分类规律的精准挖掘	基于规律发掘的城市生命诊断和优化	城市生命的迭代,基于规律的城市发展趋势推演
代表性技术	GIS; 三维仿真建模	大数据分析; 城市环境模拟	测量影像; 虚拟现实; 数据反演	机器学习; 应用人工智能、机器学习等先进技术	机器学习	机器学习	代理人模型; 元胞自动机; 机器学习预测; 参数化生成; 图像生成
基础设施	引入数字技术;实现城市基本设施的数字监测和数据收集	扩大感知终端部署规模;通过数据分析技术,优化基础设施	应用智能监测系统,能够实时收集、分析和响应数据	具备大型数据库并实现云服务	设施之间实现数据共享和协同工作	具备超大型数据中心; 充足云计算资源	应用智能网联技术,实现设施之间的智能协同
信息数据	具备经济人口地理信息等基础库; 初步建立数据管理制度	具备城市各类数据基础库; 建立较完善的数据管理制度	具备连续的年代跨度数据; 初步实现数据资源和应用场景的结合; 建立完善数据管理制度	城市多源高频、高精数据采集; 初步建立孪生城市数据标准体系	多源数据分类管理; 孪生城市数据标准体系完善	多源数据整合; 具备完善的数据安全管理能力	数据样本量充足,按需调用
运营安全	保障在基本的安全措施上使用数字技术	将数据分析技术应用于城市安全措施	实现各类安全系统的整合,形成综合安全网络	利用人工智能和机器学习技术进行智能化安全分析和预测	严格实施安全标准和协议; 建立定期安全评估机制	持续优化运维流程; 提升安全响应效率和速度	形成高度数字化、智能化的可持续发展的商业模式
场景服务	二维地图呈现; 三维建模加载静态数据	城市流动要素呈现与分析; 满足数据查询、业务管理、统计分析等需求	针对不同主体需求,单系统孪生城市应用拓展; 城市发展脉络的挖掘	跨行业孪生城市应用初步打通	跨行业孪生城市应用整合	跨行业孪生城市应用提升与迭代	各主体预判及互相预判,博弈推演,城市资源平衡配置
笔者基于“跨代孪生”的大地实践		2008都江堰都江堰灾后重建规划自然流模拟; 2016北京城市副中心通州堰雨洪模拟	2011青岛啤酒厂1903年历史环境再现; 2015宁波“城市树”1975—2015历史样本	2016北京城市副中心功能布局模式学习	2016七种类型CityGO学习	2022厦门城市TOD区域功能规律发掘	2006世博会人流模拟

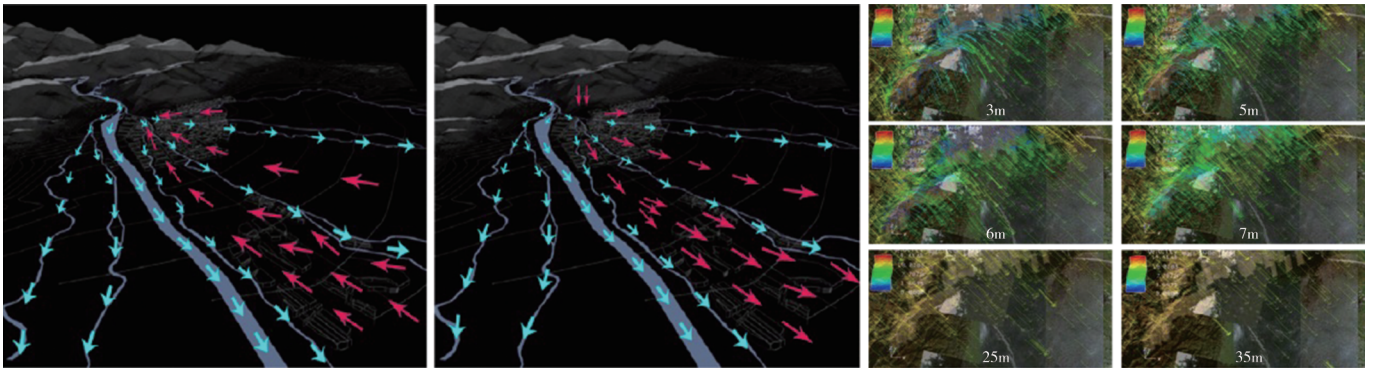

图3 都江堰灾后重建规划自然流模拟示意

Fig.3 Conceptual illustration of natural flow simulation for the post-disaster reconstruction and planning of Dujiangyan

资料来源：都江堰项目组绘制

图4　青岛啤酒厂1903年历史环境再现示意
Fig.4　Conceptual illustration of the historical environment reconstruction at Qingdao Brewery
资料来源：青岛啤酒厂项目组绘制

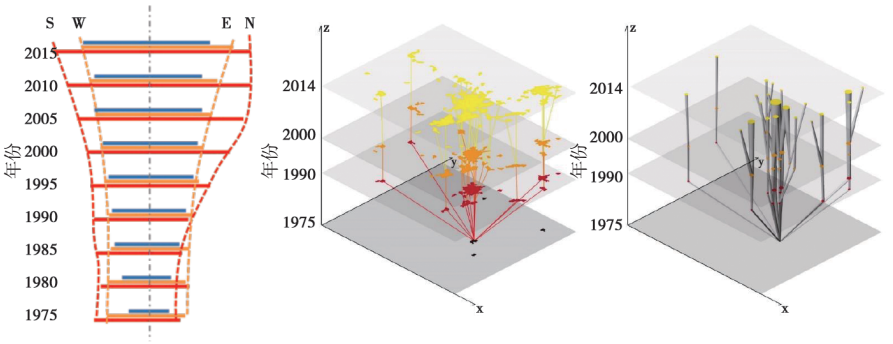

图5　宁波“城市树”研究示意
Fig.5　Conceptual illustration of the "urban tree" research in Ningbo
资料来源：“城市树”研究课题组绘制

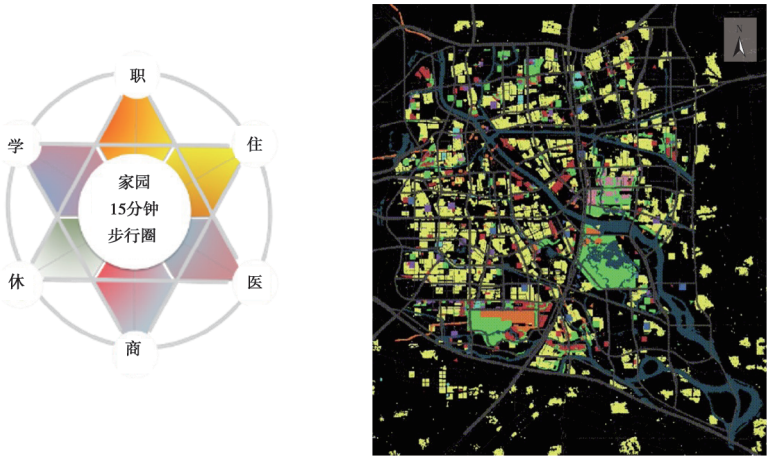

图6　北京城市副中心功能布局模式学习示意
Fig.6　Conceptual illustration of functional layout patterns in Beijing Municipal Administrative Center
资料来源：北京城市副中心项目组绘制

究有了质的突破，但这个阶段仍局限于简单的映射，无法通过数据和算法整合应用于为解决城市问题和决策支持，无法应对城市系统的非线性、复杂性和不确定性。

2.4　C4“具备学习能力”：城市生命发展规律的发掘

大数据时代的到来使城市研究及城市规划受到前所未有的影响和冲击，“大智移云”的技术巨大推动了人工智能辅助城市规划方法技术的发展和进步[14-15]。伴随人工智能技术的导入，城市具备了学习能力，这标志着数据分析与解读的一个新纪元[16-17]。突破简单的数据分析与解读，AI技术辅助城市信息整合与知识形成[18]。人工智能能够通过大量数据集的训练识别出城市发展中的固有模式、周期性变化以及可能的异常情况，从而具备学习能力，学习并整合后的知识可以被应用于对城市发展趋势的预测中，从而实现对城市规划与决策的科学辅助[19]。

2016年，在北京城市副中心规划设计中，笔者及工作小组将城市利益相关体分为政府、规划师、投资商和市民等四方，基于深度学习技术，提取四方需求和决策特点。针对四方目标，对副中心155 km^2的职业、居住、医疗、教育、休闲、商业等六元功能布局模式进行各自决策，由此构建四方六元的决策职能配置模型[4]。见图6。

“具备学习能力”这一发育阶段基于人工智能技术的导入使城市具有学习能力，但由于城市自身规律的挖掘和分类仍未形成系统，对学习的对象也缺少精准分类和对位。

2.5　C5“分类学习”：城市生命发展规律发掘的系统化

“分类学习”进一步聚焦关键样本的学习，人工智能技术导入不再是简单的学习和模仿，而是形成分类学习和规律发掘的能力，精准选择学习的对象，从复杂的场景中提取人类难以发现的客观规律[14]。笔者和工作小组针对目标城市的地理位置、规模、性质、形态、发展阶段和所面临的挑战，提出“6同城市”的分类学习对象。同地域城市具备地理上的邻近性，在人流、物流、信息流等方面存在紧密联系；同规模城市具备人口总量或经济总量或建成区面积的相似性，在资源配置、公共服务提供等方面存在相通性；同性质城市具备相似的城市主要职能，通过对标可以帮助揭示城市如何充分发挥其独特角色，并与其他城市建立有益的合作关系；同形态城市具备相似形状的建成区轮廓和与自然格局，在城市空间发展方面存在相通性；同阶段城市处于相同的城市生命阶段，学习揭示城市在其生命周期的某一特定阶段所面临的机遇和问题；同挑战城市面临相似的发展瓶颈和未来挑战，经验学习可以帮助城市更快速地识别和实施有效的解决策略。

运用人工智能的类型学技术，在前文提及的“城市树”基础上，笔者及团队构建了七种类型的CityGO学习，通过对已绘制的“城市树”曲线边缘进行统计和学习，归纳出萌芽型、佝偻型、成长型、膨胀型、成熟型、区域型和衰落型等七大类城市发展类型（图7），分析各类型城市的发展脉络、增长或衰减趋势及其对应的空间模式，以支撑目标城市的科学决策。

在“分类学习”这一发育阶段，人工智能技术在城市规划中实现了更为精准的学习和规律发掘，也为从更精细、

特定的城市分类学习过渡到对城市发展规律的全面整合奠定了基础。

2.6 C6“整合学习”：基于规律发掘的城市生命诊断和优化

基于分类学习的多样本规律挖掘，“整合学习”系统建立了城市发展规律谱系，对多维度规律进行整合学习，映射出更加全局性、系统性和科学性的城市发展模型[20]。Batty的多代理人模型对GIS科学进展的论述为我们的整合学习提供了强有力的理论支持，这些理论支持城市空间规律的深入理解和模型的构建。整合学习的目的在于将复杂系统中不同维度的规律在一个模型中进行集成，从而得到更加具有全局性、系统性和科学性的学习结果[5]。

2016年，笔者和工作小组在北京城市副中心规划中，基于对副中心自身发展脉络和需求的挖掘，以及全球大都会副中心发展的案例对标，通过规律整合学习对副中心城市人口、城市密度、城市产业空间、城市资源、城市交通、空间形象、城镇群落、建设时序等进行全局和系统的决策（图8）。2022年，在厦门TOD研究项目中，通过对全球120个轨交站点及其周边的功能要素及其空间关系的整合学习，发掘站点及周边商业、产业、居住、创新和交通等功能占比和空间上亲疏关系，进而为厦门TOD站点设计提供参考和支撑。

“整合学习”这一发育阶段不再仅仅局限于对各维度城市发展规律的学习，而是迈向了更高层次的全局性、系统性和科学性的发展模型。整合学习后的城市发展规律系列为“跨代孪生”提供了坚实的基础。

2.7 C7“看见未来”：城市生命的迭代

基于城市发展规律系列对其各项要素的演变进行推演，进而能够反映未曾发生的状况或是潜在的问题，即看见城市的明天，以帮助决策者进行提前判断、决策、部署。Mohammadi等[21]和Batty[22]提出用CA模型分析城市系统的复杂性，通过CA模型模拟城市动态，并进一步提出了多代理人模型（Agent-Based Model），每个“代理”代表一个参与者以及他们如何与“环境”或整个系统交互，通过空间动力模拟，研究现实情境下的城市土地利用、交通政策模拟等。大数据和深度学习的应用可以用来推测一些短期的趋势，未来需要更好地以人工智能和自动化执行为基础，改进因果推断和推理时，显著提高态势感知能力，不仅能够更好地预测短期变化，而且能够更好地理解地球系统在环境条件和人类压力方面正在经历的渐进变化[23]。

决策者对城市未来发展的判断直接决定了其决策精准性，因此，借助人工智能手段预测城市发展趋势对城市规划、建设、管理尤为重要。“看见未来”引入城市智能推演模型有效地实现了这一目标，完成向“跨代孪生”的本质跨越。城市智能推演是采用计算机建模方法，基于特定的模型规则和约束条件，对城市不同要素的未来发展变化过程进行推理和演绎进而反映其时空演化关系的技术。早在2006年世博园区智能模型中，笔者及团队将园区划分为20 m×20 m的空间单元进行人流的空间和时段模拟，推演园区运行过程中可能发生的紧急事件并做好预案（图9）。目前，笔者和工作小组已经研制完成12项智能推演技术，采用机器学习模型和计算机博弈算法，对城市的人口、用地、环境、产业创新等多维信息进行智能推演和动态优化。

3 “跨代孪生”的要素体系

3.1 “跨代孪生”的要素类型

“跨代孪生”涉及各个方面的要素，这些要素在不同空间、不同时段和不同功能中扮演了不同的角色。大量实践告诉我们，“跨代孪生”无法在城市中成功运营并发挥作用，往往是某几个要素在某些阶段被忽视造成的。这些关键要素及其发挥作用的过程阶段的梳理，是过去十多年实践工作的经验总结，可能也是本文中最具创新意义的部分，即首次将所有系统进行全方位、全过程、全要素的梳理和总结。我们至此发育成为3

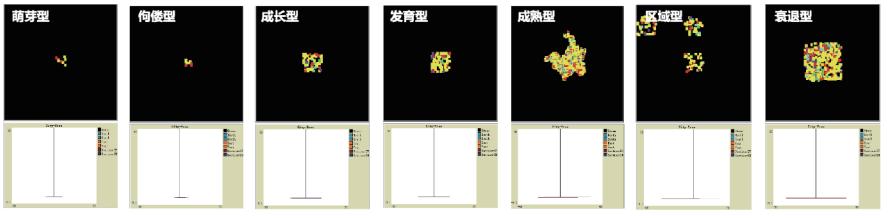

图7 城市七种类型CityGO学习示意

Fig.7 Conceptual illustration of seven CityGO´s urban types

资料来源：北京城市副中心项目组绘制

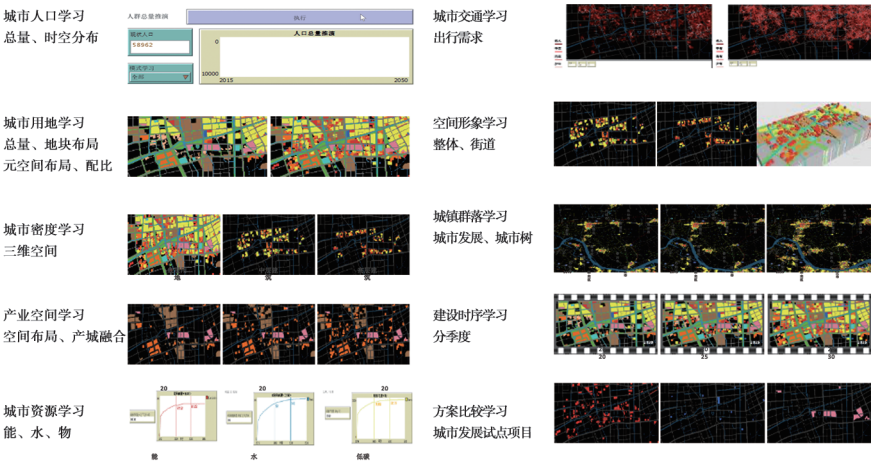

图8 北京城市副中心城市人口、用地等整合学习示意

Fig.8 Conceptual illustration of population, land use, and other aspects of Beijing Municipal Administrative Center

资料来源：北京城市副中心项目组绘制

种不同的分类系统，分别是：

（1）物质类型分类法，包括以下四类要素：

1.载体要素；

2. 数字要素；

3. 社会要素；

4. 时间迭代要素。

每一类要素包含各个子要素。

（2）社会属性分类法，包括以下四类要素：

1. 使用方要素；

2. 建构方要素；

3. 运营方要素；

4. 投资方要素。

每一类要素包含各个子要素。

（3）技术流程分类法，包括以下三类要素：

1. 初始端要素；

2. 过程端要素；

3. 终端要素。

每一类要素包含各个子要素。

3.2　“跨代孪生”要素间联系类型

以上的“跨代孪生”的三大类要素分类可以相互交接成两个矩阵关系，分别从社会属性和技术前后使用端来观察“跨代孪生”的设计、建设、运营全过程的成败原因。按照这两个视角构成了2个表，分别成为“跨代孪生”物质属性分类和社会属性分类矩阵表和物质属性分类和技术流程分类矩阵表。见表2、表3。

“跨代孪生”物质属性分类和社会属性分类矩阵表中，三星矩阵格是在某些社会角色中对某些物质要素需要特别关心的，例如：使用方对社会要素的关注；建构方对载体要素的建设方案的关注；运营方对数字要素的采集、处理和使用的关注；投资方则让技术专家打开了投资与产出的视野，也许孪生城市至今大量投入，没有办法真的进入城市规划设计建设运营治理的效率和效益，正是缺少了这些投资方专家的视野，而他们对于技术的判断也让规划专家重新审视并真正进入“跨代孪生”的使用价值。

“跨代孪生”物质属性分类和技术流程分类矩阵表：初始端中，关注“跨代孪生”的载体要素，尤其是数据采集设备的布局和质量，往往直接影响了整个系统的迭代更新，初始端的数据导入和感知技术，直接影响了“数字孪生”有无能力进行自我迭代；过程端中，我们发现数字如何采集、处理和入库都变成重要的，在数字孪生大家都关心的最后呈现时，往往对于数据过程的处理得不到应有的投入，包括技术投入、资金投入和设备投入；在终端要素上，往往关心不同使用者的使用情况，比如手机端移动使用或是电脑端使用，但内部的决策使用和外部的展示混为一谈，气派的城市数字孪生展厅往往是愚蠢的，而朴素的、实用的却是战略决策真正使用的。

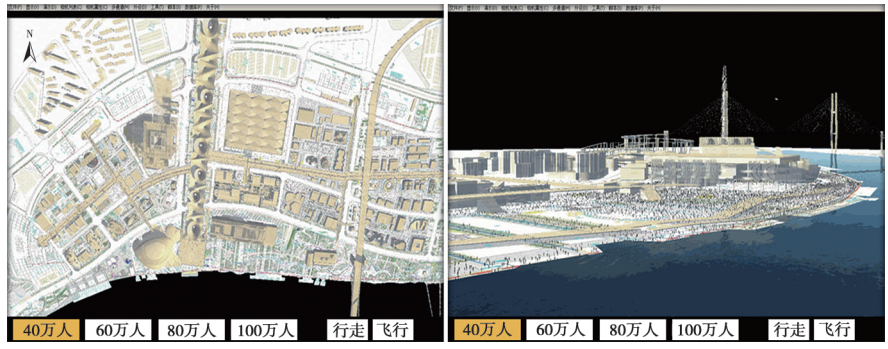

图9　上海世博园区人流模拟示意

Fig.9　Conceptual illustration of pedestrian traffic flow simulation in Shanghai World Expo Park

资料来源：上海世博会项目组绘制

表2　“跨代孪生”物质属性分类和社会属性分类矩阵表

Tab.2　Matrix table of "Cross-Generational Twin City": classifications of material and social attributes

		社会属性分类			
		使用方要素	建构方要素	运营方要素	投资方要素
物质属性分类	载体要素	★	★★★	★	★★★
	数字要素	★★		★★★	★★
	社会要素	★★★		★	★
	时间迭代要素	★	★	★	★★★

表3　“跨代孪生”物质属性分类和技术流程分类矩阵表

Tab.3　Matrix table of "Cross-Generational Twin City": classifications of material attributes and technological processes

		技术流程分类		
		初始端要素	过程端要素	终端要素
物质属性分类	载体要素	★★★	★	
	数字要素		★★★	
	社会要素		★★	★★★
	时间迭代要素	★	★	★

3.3　“跨代孪生”要素体系总架构

在实际应用中，为了符合各个城市经济社会发展的智能化需求，更加符合各城市市委市政府的决策、各业务主管部门的管理需求，以及各单位、各机构和各园区与社区的日常运营操作要求，根据可提供的技术、装备和机器能力，笔者在城市“跨代孪生”要素总体架构考量了四个方面：

（1）系统性。“跨代孪生”要素体系的建立使“跨代孪生”城市能够被系统地构建和应用。确保技术的实际应用具有系统性和协同性，以更好地服务于城市的可持续发展。

（2）适应性。“跨代孪生”要素体系的选择针对不同城市的现实需求。不同城市具有各自独特的经济、社会和文化特征，“跨代孪生”要素体系形成较为灵

活的框架，以确保跨代孪生技术能够有效地适应不同城市的智能化需求。

（3）决策支持。“跨代孪生”要素体系为城市决策者提供了一个清晰的框架，在制定战略和进行规划时提供了更明智的决策支持。

（4）迭代发展。“跨代孪生”要素体系通过要素维度和孪生阶段横纵定位，有助于推动孪生技术和理念的不断迭代，更好地适应不断变化的城市大环境和技术趋势。

基于以上四个方面的考量，笔者在架构“跨代孪生”要素总体系时包含以下6个维度：

D1 基础设施。基础设施维度涉及“跨代孪生”网络基础设施、物联网基础设施和算力基础设施。网络基础设施包括互联网、移动网络和5G网络的关键性能和覆盖；物联网基础设施包括物联网设备、传感器网络和数据采集的全面性和精度；算力基础设施包括数据中心、云计算资源和处理能力。

D2 信息数据。信息数据维度涉及“跨代孪生”数据采集、存储和管理、互操作和整合以及分析和利用。数据采集包括数据多样性、频率和质量；存储和管理包括数据可扩展性和安全性；互操作和整合包括数据协同性和一致性；数据分析和利用包括数据的深度挖掘和应用。

D3 技术平台。技术平台维度涉及“跨代孪生”整体架构和功能。具体包括技术整体架构、可视化呈现、空间分析计算、模拟仿真推演、虚实融合互动、自学习自优化和众创扩展应用，以支持多层次和多角度需求。

D4 场景设计。场景服务维度涉及“跨代孪生”实际应用效果、服务协同和用户体验。应用效果包括数字应用对物理实体和空间的影响效果；服务协同包括数字化业务流程和协同效率；客户体验包括用户满意度和互动体验。

D5 建设建构。建设建构维度涉及“跨代孪生”设备、基建和安全防护等，既保障了基础设施、信息数据、技术平台和场景设计维度的使用顺畅和便捷，更重要的是，将传统的电信、电力、建筑、装修、室内设计、材料等系统结合完整整体。

D6 安全运营。运营安全维度涉及“跨代孪生”的运营模式、效益评估、项目管理和安全保障。运营模式包括数字孪生项目的系统运维、设备运营、平台运营、算法运营和数字资产运营；效益评估包括项目的质量验收、经济社会效益、生态效益和多维评估迭代优化；包括项目管理关注全过程管理方式的运用和项目的进度、质量、成本的优化改进；安全保障涉及规划、建设、运营、维护和使用等各环节。

4 “跨代孪生”未来攻关方向及可能贡献

4.1 “个性化定制”：满足不同城市的个性需求

“跨代孪生”通过深度了解城市决策、管理和实务的不同层级需求，致力于提供城市更个性化、更精准化需求的支撑。在决策层面，“跨代孪生”通过强大的智能服务，为城市政府提供关键的宏观策略和规划决策支持[24-25]。对于管理层，“跨代孪生”提供实时调度和全生命周期管理的智能服务，以满足地区级、园区级和企业级管理人员对经济活动和资源管理的需求。在实务层，”跨代孪生”专注于基层服务和运作，为实际操作人员提供即时的、跨业务协同操作的智能服务，从而实现全方位的支持[26]。

4.2 “新技术渗透”：逐步持续提升城市响应的智能迭代

“跨代孪生”未来将深度融合边缘计算、物联网和5G通信技术，将前沿技术与城市管理深度结合[27-28]。这种深度融合不仅提升了城市管理的实时数据处理和反馈能力，而且更助力构建具有更高智能度和敏捷性的城市响应机制。这样的技术整合将使城市规划和决策更加精确和及时，将有力地推动城市更有效地应对动态变化，为未来城市的可持续发展奠定坚实基础[16, 29]。

4.3 “自适应学习”：推动以AI引领的城市数智化发展

城市规划未来将依托新一代AI技术发展，发育出对城市感知、城市认识、城市分析、城市模拟和城市决策全新的基础可能[30-31]。未来城市规划将倚赖新一代AI技术的发展。“跨代孪生”将在这一背景下成为一个具有出色自我学习和自适应能力的城市智能系统。这不仅使其能够更好地看见城市的未来，引领城市今天和明天的建设管理，同时也使其能够对城市进行少代价且高效的干预[32]。“跨代孪生”还将实时模拟干预效果，为城乡规划提供一个持续、自适应和前瞻的研究框架。这一全面升级将大大增强“跨代孪生”在实践中的应用价值和影响力，为未来城市规划注入更多创新动力[33-34]。

4.4 “虚实相生”：创造城市生生不息的新生命

“跨代孪生”的发展将引导城市形态向虚实融合发展[35]。实体城市与虚拟城市之间将建立起相互合作的关系，实体城市为虚拟城市提供真实服务的能力，而虚拟城市则为实体城市带来新颖的创新可能[36]。这种虚实城市的相互促进将形成螺旋式上升的发展模式，实现城市生命形态的创新发展。

4.5 “众脑结构”：构建城市群落智能化的新时代

“跨代孪生”将统筹城市各方决策参与者中城市决策者、商业领袖和企业领导、专业学者、街道委员会和居委会、城乡人民和媒体等需求，构建立体式、多层次的多大脑群落智慧架构，走向城市群落智能化。

5 结语

城市孪生必须演进为“跨代孪生”。在城市环境中，工业界的孪生尤其需要具备跨代特性，否则将无法充分发挥城市数智化的本质作用，看见城市的未来和看见城市的历史，对城市问题的解决也将无法产生更为根本的效果和贡献。自2004年始，笔者在城市智能化领域的多年实践中不断积累、突破和创新，涉及数据挖掘、规律发现、未来推演以及动力机制剖析等方面。笔者期待并邀请有更多的学者参与“跨代孪生”命题的研究，共同推动理论、技术模式和应用场景的拓展和探索。

注释

① https://www.zhihu.com/pin/1617555633972162560。

② China Academy of Information and Communication Research (2018), Digital Twin City Research Report, Beijing: http://www. caict. ac. cn/kxyj/qwfb/bps/201812/t20181218_190859.htm。

参考文献

[1] 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.

[2] MOHAMMADI N, TAYLOR J E. Urban energy flux: spatiotemporal fluctuations of building energy consumption and human mobility−driven prediction[J]. Applied Energy, 2017, 195: 810−818.

[3] 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.

[4] 吴志强. 人工智能辅助城市规划[J]. 时代建筑, 2018(1): 6−11.

[5] 吴志强, 甘惟. 转型时期的城市智能规划技术实践[J]. 城市建筑, 2018(3): 26−29.

[6] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1−18.

[7] KITCHIN R. Big data, new epistemologies and paradigm shifts[J]. Big Data & Society, 2014, 1(1): 2053951714528481.

[8] SINGH D , JARA G T A. A survey of internet−of−things: future vision, architecture, challenges and services[M]. Internet of Things. IEEE, 2014.

[9] 李德仁. 数字孪生城市智慧城市建设的新高度[J]. 中国勘察设计, 2020(10): 13−14.

[10] 吴志强, 王德, 干靓, 等. 2010 年上海世博会园区规划建设三维仿真可视化控制管理系统[M]. 上海: 同济大学, 2008.

[11] HERZOG O, 潘海啸, 邓智团, 等. 新一代人工智能赋能城市规划: 机遇与挑战[J]. 城市规划学刊, 2023(4): 1−11.

[12] XIE Y, WENG Q. Spatiotemporally enhancing time−series DMSP/OLS nighttime light imagery for assessing large−scale urban dynamics[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 128: 1−15.

[13] BERILA A, ISUFI F. Two decades (2000−2020) measuring urban sprawl using GIS, RS and landscape metrics: a case study of municipality of Prishtina (Kosovo)[J]. Journal of Ecological Engineering, 2021, 22(6): 114 – 125.

[14] 吴志强, 王坚, 李德仁, 等. 智慧城市热潮下的“冷”思考学术笔谈[J]. 城市规划学刊, 2022(2): 1−11.

[15] 甘惟, 吴志强, 王元楷, 等. AIGC辅助城市设计的理论模型建构[J]. 城市规划学刊, 2023(2): 12−18.

[16] 吴志强, 甘惟, 刘朝晖, 等. AI城市: 理论与模型架构[J]. 城市规划学刊, 2022(5): 17−23.

[17] 甄峰, 孔宇. “人—技术—空间”一体的智慧城市规划框架[J]. 城市规划学刊, 2021(6): 45−52.

[18] GROSHEV M, GUIMARAES C, MARTIN−PEREZ J, et al. Toward intelligent cyber−physical systems: digital twin meets artificial intelligence[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(8): 14 – 20.

[19] ALEXOPOULOS K, NIKOLAKIS N, CHRYSSOLOURIS G. Digital twin−driven supervised machine learning for the development of artificial intelligence applications in manufacturing[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2020, 33(5): 429 – 439.

[20] BATTY M, MARSHALL S. The origins of complexity theory in cities and planning [J]. Complexity Theories of Cities Have Come of Age: An Overview With Implications to Urban Planning and Design, 2012: 21−45.

[21] MOHAMMADI N, TAYLOR J E. Smart city digital twins[C]//2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, 2017.

[22] BATTY, M. Digital twins[M]. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 2018.

[23] SUN A Y, SCANLON B R. How can big data and machine learning benefit environment and water management: a survey of methods, applications, and future directions [J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(7): 073001.

[24] 吴志强. 人工智能推演未来城市规划[J]. 经济导刊, 2020(1): 58−62.

[25] RUOHOMÄKI T, AIRAKSINEN E, HUUSKA P, et al. Smart city platform enabling digital twin[C]//2018 International Conference on Intelligent Systems (IS), 2018.

[26] SMITH J, JOHNSON A, THOMPSON B. The role of CIM in modern urban planning[J]. Urban Planning Journal, 2018, 45 (2): 120−135.

[27] WANG T, ZHAO M, ZHANG L. Digital twin cities: a new approach for sustainable urban planning[J]. Urban Studies Journal, 2019, 56(8): 1598−1615.

[28] LEE H, PARK J. Exploring the relationship between CIM and BIM: a new perspective[J]. Construction and Building Research, 2020, 58(3): 230−245.

[29] LIU H, WANG F, ZHOU K. Integrating AI with city modeling: towards smarter cities[J]. AI & Urban Planning, 2020, 12(1): 25−42.

[30] XUE F, LU W, CHEN Z, et al. From LiDAR point cloud towards digital twin city: clustering city objects based on gestalt principles[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 167: 418−431.

[31] CHEN L, ZHANG X, LIU Y. CIMAI: the future of urban planning[J]. City Development Review, 2021, 67(4): 410−427.

[32] FAN C, ZHANG C, YAHJA A, et al. Disaster city digital twin: a vision for integrating artificial and human intelligence for disaster management[J]. Int. J. Inf. Manag, 2021, 56: 102049.

[33] WHITE G, ZINK A, CODECÁ L, et al. A digital twin smart city for citizen feedback[J]. Cities, 2021, 110: 103064.

[34] SHAHAT E, HYUN C T, YEOM C. City digital twin potentials: a review and research agenda[J]. Sustainability, 2021, 13 (6): 3386.

[35] DENG T, ZHANG K, SHEN Z J. A systematic review of a digital twin city: a new pattern of urban governance toward smart cities[J]. Journal of Management Science and Engineering, 2021, 6(2): 125−134.

[36] ALLAM Z, DHUNNY Z A. On big data, artificial intelligence and smart cities[J]. Cities, 2019, 89: 80−91.

修回：2024-01