

杨开先, 甄峰. 地理学视角下城市空间智能化研究进展与思考 [J]. 地理科学, 2024, 44(7): 1166-1177. [Yang Kaixian, Zhen Feng. Progress and thinking on urban spatial intelligence from the perspective of Geography. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(7): 1166-1177.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.20230386

地理学视角下城市空间智能化研究进展与思考

杨开先^{1,2}, 甄峰^{1,2}

(1. 南京大学建筑与城市规划学院, 江苏 南京 210093; 2. 江苏省智慧城市规划与
数字治理工程研究中心, 江苏 南京 210093)

摘要: 智能化是对城市未来发展方向的一种描述, 城市研究需要地理学从空间角度对城市智能化发展进行把控, 从而为解决城市问题提供更加有效的应对措施。本文从研究历程、内容和方法 3 个方面梳理了城市空间智能化研究进展。针对当前研究的不足, 基于地理学视角对城市空间智能化研究进行思考。首先, 本文探讨了城市空间智能化的地理内涵, 即城市中的要素利用智能技术对城市中的客观事物和状态进行学习、分析、判断, 并采取有目的性的行为从而有效地适应环境的过程。其次, 本文提出了由人、机器和空间要素构成的城市空间智能化系统模型, 对“人-机-空间”作用机制进行了解读, 总结出自发交互、自主调节和双向选择 3 种机制, 可对城市空间的形态、功能、结构等研究有所帮助。最后, 构建了城市空间智能化研究框架, 以城市空间智能化特征、功能结构、人与空间互动关系以及空间智能化模拟预测为重点内容, 对城市空间智能化全过程进行剖析, 以期在城市智能化发展提供科学、精准的空间资源配置方案, 丰富智能时代城市空间的研究。

关键词: 空间智能化; 城市空间; 地理学视角; 智能技术

中图分类号: K928.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2024)07-1166-12

当前, 以信息技术、人工智能为代表的新兴科技快速发展, 拓展了时间、空间和人们认知的范围, 人类正在进入一个“人-机-物”三元融合的万物智能互联时代^[1]。世界范围内, 很多国家推出了新的城市信息通信技术基础设施建设、技术研发以及产业发展规划作为未来发展的战略, “智能化”成为世界主要发达国家对城市未来发展的集体判断^[2]。近年来, 随着新基建和数字化转型上升为国家战略, 中国也迎来了城市空间智能化发展的新时代^[3]。

随着 5G、物联网、人工智能等技术的成熟, 国家出台政策鼓励智能技术在各类空间中的应用, 空间智能化已经进入了真正可以实现的阶段^[4]。从学术研究角度看, 不同学科领域针对空间智能化已经开展了研究。计算机学科关注通过改善计算方法、布设先进信息设备等方式以支持人们方便地获得计算机系统服务的空间^[5]; 信息与通信工程学科关注空间的位置感知和室内定位的智能化^[6]; 机械工程

学科关注建模仿真与独立模态空间控制; 测绘学科关注如何构建智能空间决策支持系统^[7]; 建筑学科关注建筑物实现自动化、智能化的运行和管理^[8]。上述学科领域主要强调从技术辅助的角度来实现智能化, 城市研究更需要地理学从空间角度对城市智能化发展进行研究, 增强对学术研究方向和政府政策制定的话语权^[9]。

地理学视角涵盖形态、要素、关系等多重维度, 具有综合性、交叉性、复杂性和动态性, 可对空间属性进行准确定义和描述, 不仅可以解释已发生的现象, 更重要的是服务现在、预测未来^[10]。因此, 本文基于地理学视角, 融合多学科知识, 在梳理城市空间智能化研究进展的基础上, 尝试构建城市空间智能化的系统模型与研究框架, 为城市智能化发展提供科学、精准的空间资源配置方案, 从而应对智能时代新技术驱动的生活方式与空间利用模式的变革对城市空间结构与功能组织带来的挑战^[11]。

收稿日期: 2023-06-11; 修订日期: 2023-10-22

基金项目: 国家自然科学基金 (42330510) 资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (42330510).]

作者简介: 杨开先 (1994—), 女, 吉林长春人, 博士研究生, 研究方向为智慧城市、城市空间智能化。E-mail: dg1936014@smail.nju.edu.cn

通信作者: 甄峰。E-mail: zhenfeng@nju.edu.cn

1 城市空间智能化研究进展

城市是最好的空间形态, 在研究中多被抽象概念化为空间关系以及空间中的行为和过程^[12]。地理学研究强调空间功能和运行的智能化^[13], 本文从研究历程、研究尺度和研究方法 3 个方面对城市空间智能化的研究进展进行总结。

1.1 研究历程

随着人类发展和技术的进步, 人类社会进入地理空间、社会空间和信息空间的三元世界, 城市空间研究范式出现了以下 3 个方面的转变^[14]: 一是从自然空间向社会空间的转变。20 世纪后期, 人文社会科学界出现“空间转向”, 研究开始强调空间过程的成因和后果, 研究对象转向人类空间行为的决策及认知过程, 众多学者提出从人地关系视角来研究空间^[15]。二是从现实空间向信息空间的转变。受信息网络技术的影响, 空间研究开始探究虚实空间的关系, 出现了流空间^[16]、地理网络空间^[17]、复合式空间^[18]、灰空间^[19]等新的空间概念。三是从信息空间向智能空间的转变。智慧地球、智慧社会等概念促进了学者对于空间智能化的思考, 开始从空间的视角去认识智慧城市、智慧园区、智慧社区等智能化空间。

1.2 研究内容

地理学所具备的时空尺度引发了学者从不同尺度进行城市空间智能化研究, 呈现出从城市尺度向宏观区域尺度和微观空间和场景拓展的趋势^[20]。① 宏观尺度上, 以共享和协调为特征的区域智能化建设将促进更大范围的协同, 出现了智慧区域、智慧城市群、智慧都市圈等空间智能化研究实践^[21-22]。学者们认为可以以城市群、都市圈等新一轮区域一体化发展空间为媒介, 形成互联互通的智慧城市群空间智能化研究体系, 通过构建智能化公共服务与基础设施体系提升其辐射带动作用, 从根本上解决城市效率低下的问题^[23]。② 中观尺度上, 学者们聚焦城市空间发展, 提出虚拟城市空间^[24]、城市智慧空间^[25]等概念。智能技术为城市研究提供了多维度、深层次的数据与方法支撑, 对城市发展的评估、模拟、预测能力大大增强^[26], 涌现了大量关于城市功能智能配置^[27]、城市形态智能设计^[28]等方面的研究。与此同时, 技术驱动的智慧城市需要将研究视角从具有行政边界的城市扩展到具有丰富内涵的智能化空间。学者们结合人地关系协调和城市问题解决的

需求, 开始从智慧城市规划与建设的角度思考城市空间智能化发展方向^[29], 并通过积极推动智慧要素融入不同尺度的城市空间实践, 促使形成“家庭-小区-社区-组团-城市”多维空间的智慧城市布局^[30]。③ 微观尺度上, 空间智能化研究主要集中在城市内部小尺度空间的规划与场景设计。学者们通过场景设计把技术更好地融入民众日常生活, 实现空间服务和资源转化, 为用户带来沉浸式体验以便于被用户更好地理解 and 接受^[31]。

1.3 研究方法

随着数字中国和智慧社会等国家战略的实施, 城市空间智能化的研究方法也在逐渐演进。① 技术方法方面, 空间智能化强调用技术改善空间基础设施等设备以消灭空间距离, 3S 技术的发展是空间技术智能化的突破口^[32]。遥感测绘技术以实现从信息化到智能化的转型为目的, 增强处理遥感数据的效率和精度^[33]; 地理信息系统搭建地理空间通往信息空间的桥梁, 从单独对空间数据进行管理转向对整个空间的集成化管理, 建筑信息模型(BIM)、城市信息模型(CIM)等利用地理信息系统增强空间意识^[34-35]; 定位服务已融入日常生活, 未来三维空间定位技术成为智能时代发展新趋势。同时, 人工智能领域技术通过对多源异构数据进行时空化治理和融合, 代替或协助人类进行可视化、聚类 and 运算等^[36], 出现了地理空间人工智能(Geospatial Artificial Intelligence, GeoAI)^[37]和时空人工智能(Spatio-Temporal AI)^[38]等地理空间科学与人工智能结合的前沿概念, 助力空间智能化方法研究。② 空间分析方法方面, 随着时空大数据的爆发式增长, 空间技术不断集成融合, 智能化空间分析方法开始广泛应用于空间规划中, 出现了包括决策树、专家系统、元胞自动机和多智能体系统等计算分析方法帮助探究事物的空间分布规律及空间关系^[39]。与此同时, 复杂城市系统面临的新问题也对传统的城市规划方法提出挑战, 要求空间能对人的时空行为模式以及人、地、场景间的关系有更深刻的理解, 出现了城市空间智能计算平台^[40]、城市计算^[41]等方法应用于城市空间复杂性研究^[42]。也有学者从算法创新的角度对智能化空间分析方法进行补充, 提出如卷积神经网络、图卷积神经网络和生成对抗网络等面向城市空间分析与建模的计算神经网络框架^[43-44]。

1.4 研究述评

从研究历程上看, 随着技术进步, 城市空间研

究经历了信息化、数字化阶段,正在向智能化阶段迈进,地理学关于新的人地关系系统和时空协调研究为其提供了理论与方法支撑^[45]。从研究内容上看,宏观尺度的研究更重视大尺度时空技术的应用对空间的影响,通过研究区域内不同城市间的要素联系,明确城市的等级及节点作用,从而实现更大范围空间的智能化发展协同;中观尺度的空间智能化普遍落在城市研究中,学者们提出多种空间设计构想,通过促进人、技术与空间的协同发展,解决城市智能化过程中可能面临的问题;微观尺度以智能空间和场景营造为研究对象,通过技术赋能场景空间,呈现可感知、可操作的智能化空间。从研究方法上看,空间设施和技术的发展催生了大量新的数据和研究手段,推动了智能化空间分析方法融入到传统的空间研究体系之中,为定量理解城市空间动态提供了新途径。这可以帮助人类得以更加全面和准确地了解空间信息、分析空间规律,对空间领域的生产及宏观规划进行辅助决策,以满足更加广泛的社会应用^[46]。

然而,上述研究在以下几个方面还存在提升空间:研究内容上,当前研究更关注各种相对成熟的技术在城市中的应用,是对已发生现象的总结,停留在对概念和特征的描述阶段,缺乏对空间智能化理论、方法及作用机制的探索,需要更多面向未来发展的理论和实践创新。研究视角上,城市空间智能化的宗旨是以人为本,当前研究更关注虚拟空间的设计,与实体空间营造存在一定程度的脱节,欠缺对城市层面的居民日常活动空间的分析。研究方法上,需要融入地理学研究方法,构建应对人地关系日益复杂化的地理学研究方法体系,对空间关系、网络结构等进行探究。

2 基于地理学视角的城市空间智能化研究思考

2.1 城市空间智能化的地理内涵

城市空间智能化是对城市发展方向的一种描述,更多强调的是城市空间自发智能化的潜力。城市空间智能化的意义是通过取代低效率的人为操作,合理地规划和利用资源,让为人群服务的空间更高效地运作,降低空间管理和运营成本^[47]。地理学以人地关系系统协调和解决城市问题作为核心研究内容,强调空间的构成要素、尺度、主体、类型和结构等^[48]。因而,从地理学视角出发,城市空间智能化是

服务于城市空间营造的系统化空间模式,可以理解为城市中的要素利用智能技术对城市中的客观事物和状态进行学习、分析、判断,并采取有目的性的行为从而有效地适应环境的过程。基于地理学视角的城市空间智能化研究需要学者和规划师们以解决城市问题为导向,关注空间智能化过程中对城市的影响,根据空间的不同性质提供定制化的服务和实现方案^[49]。

城市空间智能化研究需要将对“空间”的研究引向对“空间系统”的研究,从系统角度理解并建模城市空间复杂结构和多元功能,注重人、机器、空间等要素协同发展,实现城市系统的有机联系,包括城市内部不同要素之间的联系,以及与过去、未来的联系,并对这一复杂系统进行有效的控制管理,使之具备为城市发展服务的功能^[50-51]。

2.2 城市空间智能化系统模型

本文基于地理学视角,集成多学科理论方法,从“人-机-空间”交互关系切入,提出城市空间智能化系统模型(图1)。该模型旨在理解城市空间的变化特征以及人、机器、空间等要素之间的交互关系与作用路径,为城市空间智能化研究框架的确立提供基础。

2.2.1 要素构成

城市聚合了多种生产生活要素,是连接个体、群体和社会的空间综合体。智能技术的快速发展有效融合了城市中人、机器、空间等要素,要素间的互动关系成为研究的新趋势。作为城市的创造者和使用者,人是城市空间演化的主要动力,也是解决城市空间发展问题的关键,更是城市空间智能化的核心要素。机器在城市中指具备感知能力或产生数据能力的设施或设备,包括新型基础设施、便携式智能设备等,是城市空间中节点交互的基础,通过中介作用为人和空间的交互提供渠道及驱动力。机器的智能化有助于提高城市内部生产力和居民流动性,是城市空间智能化的重要硬件支撑。城市空间包括自然资源承载空间、建成环境场所空间、主体行为活动空间、资源要素流动空间等^[52]。在空间智能化的研究视角下,城市空间是一个超越场所限制的可持续发展的智能空间,由物理空间、社会空间、信息空间融合而成,能够全方位整合各空间的数据资源,实现空间联动,是城市空间智能化业务和互动的载体。物理空间是城市空间的外在表现形式,即建成环境,人通过触摸等行为与其进行交互,还可以借

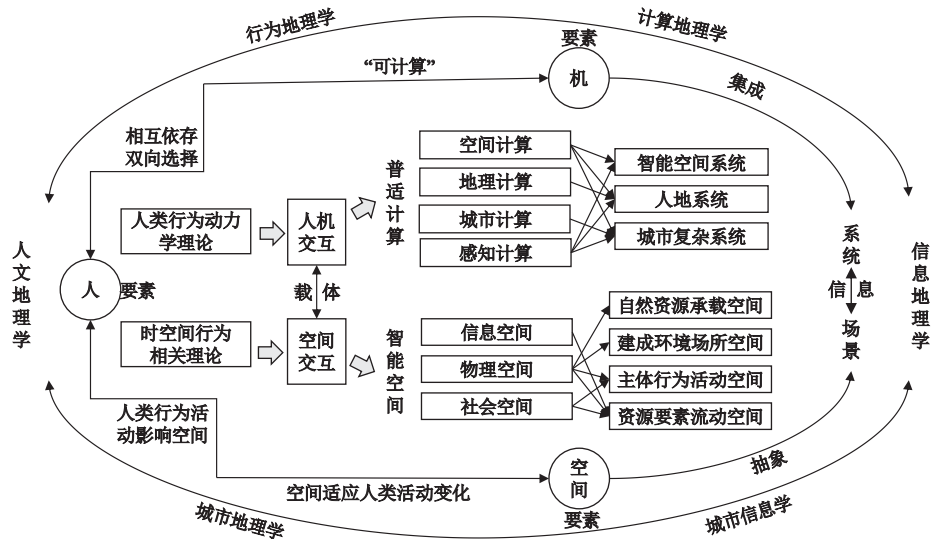


图1 城市空间智能化系统模型

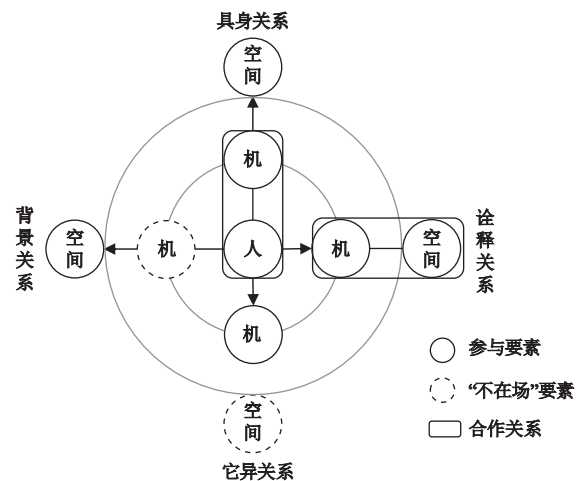
Fig.1 Urban spatial intelligent system model

助设备感知来控制空间中的实体。社会空间指城市中各种互动交流的环境,是社会群体感知和利用的空间。信息空间以物理空间为基础,借由信息流实现空间信息互联互通,为物理空间和社会空间提供服务。智能空间通过技术将物理空间中的信息映射到信息空间,利用信息空间的分析结果指导物理空间决策,推动要素的有机连接与协作,为城市智能化的发展奠定良好的空间背景基础^[53]。

2.2.2 作用机制

作用机制的分析有助于理解空间要素的运行方式和组织逻辑。随着科技的发展,机器为人与空间的互动提供了新的路径和改造空间的可能。根据 Ihde 提出的技术现象学思想^[54],人通过机器来感知空间,通过对机器在人与空间中的不同位置分析,可归纳出 4 类“人-机-空间”关系(图 2)。

具身关系中,机器与人融为一体来帮助人类感知空间;诠释关系中,机器与空间是一个整体,人们认知通过机器展现出的空间;它异关系中,机器与人具有同等地位;背景关系中,机器在与人的关系中逐渐隐退,成为空间中不可或缺的一部分。具身关系和诠释关系在城市空间中比较常见,人通过佩戴感知设备或通过空间中具有感知功能的设施,在日常活动中与空间建立良好的互动关系。随着技术的成熟,部分机器具有极高的自主性,迫近它异关系,引发了“机器代人”的伦理思考^[55]。背景关系是具身关系的理想状态,也是城市空间智能化所追求



根据文献 [54] 整理

图2 “人-机-空间”关系

Fig.2 “Human-machine-space” relationships

的“人-机-空间”关系。具体来说,城市空间中的人将相对公平地获得智能化服务的机会,且在为人提供易得易用、自然交互的智能服务的同时,人自身并不确切知道或察觉这些技术和机器的存在,于无形中让人体验智能。

城市空间智能化发展是在保障内部秩序正常运行的基础上,通过外部联系进行调节,实现各要素之间的内外联通。本文通过深入辨析人、机器、空间等要素相互作用模式,提出“人-机-空间”作用机制(图 3),可对城市空间的形态、功能、结构等研究有所帮助。

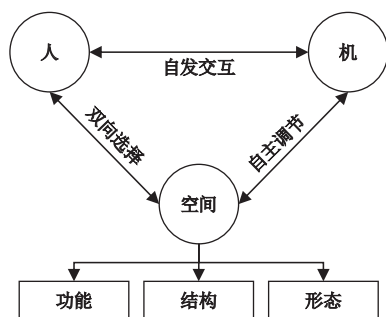


图3 “人-机-空间”作用机制

Fig.3 Action mechanism of “human-machine-space”

1)内部秩序主要通过机器(城市基础设施)和空间的自主调节机制维持。自组织的城市更具生命力,设施和空间的自主调节是空间智能化的精髓,人为干预仅起到辅助作用^[56]。设施应在减少人为干预的情况下,根据预设策略在空间中形成自主调节机制,灵活利用空间,为人提供高效服务。城市空间能够感知外界信息刺激,在与其他主体进行相互作用的过程中,通过“自学习”和“自适应”改变自身结构和行为方式,进而主导系统进化演变^[57]。

2)外部联系依托人在日常行为过程中与机器(城市基础设施)自发进行的交互行为。设施作为空间中的一种交互媒介,不仅可以满足人的功能需求,还可以完善城市功能,旨在通过合理的设施配置使得居民通过更少的出行来获得完整服务。城市空间中设施和人的关系是动态变化的,空间依托设施和设备产生的数据为用户提供丰富的信息展示和知识获取能力,并对发生在空间中的事情根据设定进行记录反馈,最终实现智能化服务。

3)内外联通需要人和空间进行双向选择。城市空间是社会发展的产物,实现以人为本的城市空间智能化,需要探究人与空间的交互关系及演化规律^[58]。人在空间自由移动的过程中,通过机器(携带的移动设备)借由网络服务与各种信息源进行交互协作以获得增强的服务。交互过程中产生的大量可以反映人的行为规律和特征的数据可以将个人节点的贡献放大,削弱机器的中介作用。在一定程度上,可以认为人的行为活动反映了人与空间的双向选择,即用户根据需求主动进入空间,空间通过分析用户的行为活动引导空间的营造。

2.3 城市空间智能化研究框架

基于上述对城市空间智能化的概念、构成要素及作用机制的解读,城市空间智能化研究应重视多

学科融合,通过引入新的分析手段高效利用城市数据,分析城市空间特征,把握城市发展规律,从而优化空间管理、解决城市问题。本文基于地理学视角构建集理论支撑体系、数据支撑与研究方法于一体的城市空间智能化研究框架,以城市空间智能化特征、功能结构、人与空间互动关系以及空间智能化模拟预测为重点研究内容,对城市空间智能化全过程进行剖析,并探讨规划实践中的应用(图4)。

2.3.1 理论支撑

地理学视角下的城市空间智能化研究应以地理学相关理论为宗旨,以城市地理学为理论根基,以行为地理学和计算地理学为方法论支撑,以信息地理学为空间交互研究的突破口。从以上理论中汲取、传承重要理论观点与研究成果,并借助人机交互和空间交互等来自不同学科理论的研究基础和范式,从“人-机-空间”的互动关系来理解城市空间智能化。通过新的研究推动上述理论基础实现理论价值的构建与创新,最终形成城市空间智能化研究的理论支撑体系。

1)城市空间相关理论。城市地理学研究城市现象的类型和过程,通过描述性、解释性和评价性为城市空间智能化研究提供理论支撑^[59]。行为地理学强调个体和群体在空间中的认知及行为决策,是解读城市空间与要素相互作用关系的重要方法^[60]。计算地理学可利用计算技术对地理事物建模,通过分析地理信息来模拟地理过程。城市信息学关注动态的空间交互,包括社会空间中的社会关系、信息空间中的行为、物理空间与社交空间之间的相互作用机理等方面,为城市分析提供新的视角^[61]。

2)人机交互相关理论。人机交互理念下的城市空间设计具有包容性和动态性,避免了因主观定性决策可能导致的空间问题^[62]。传统意义上的人机关系是一种单向关系,主体(人类)通过中介(机器)认识客体(空间)。普适计算大幅提升机器的感知和应变能力,机器从被动应答者向主动服务者转变,重新定义人与机器相互作用的方式。人类行为动力学结合行为动力学与复杂网络理论,对人类行为事件的特征进行定量统计并解析其背后的统计性规律及动力学机制,对发掘城市问题的根源具有借鉴意义^[63]。

3)空间交互相关理论。空间交互是空间中不同位置的事物以物质、能量、信息等形式进行移动和交换的过程,表现在人与空间的关系上^[64]。空间交互开启了人和物在附近空间融合存在的体验,好的

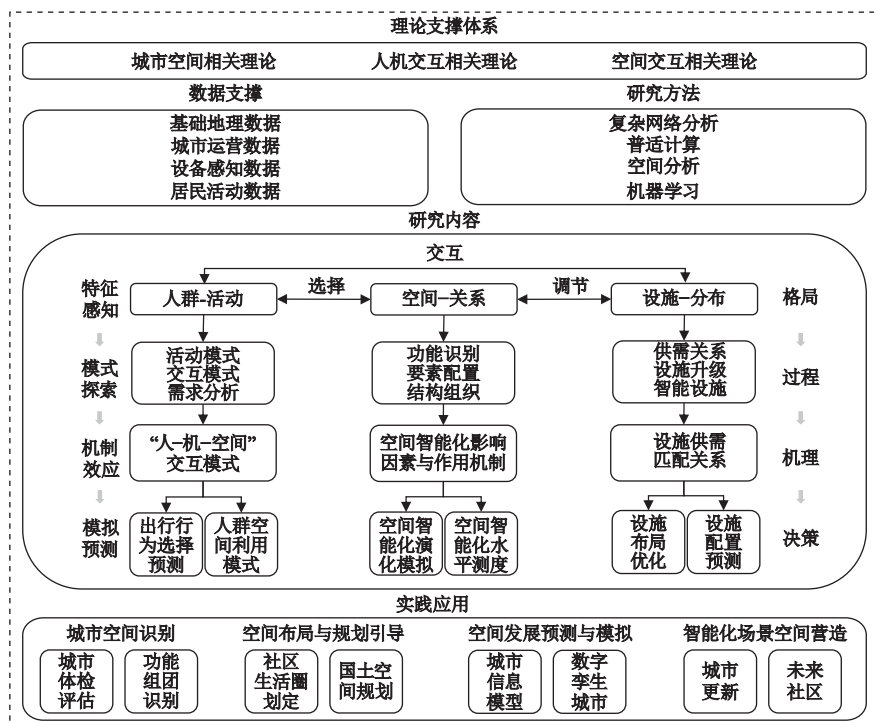


图4 城市空间智能化研究框架

Fig.4 Research framework of urban spatial intelligence

空间交互建立在良好的人机交互机制上, 让人觉得自然并符合直觉。城市人地关系是人类活动与地理环境在特定城市地域中相互联系与作用而形成的一种动态结构系统, 具有层次性、自组织性、整体性等特点。空间-行为互动理论强调空间与行为的双向作用, 研究不同空间尺度的空间-行为互动模式, 是人与空间结合的研究范式, 丰富了城市空间智能化的研究方法^[65]。

2.3.2 数据支撑与研究方法

数据是城市空间智能化研究的基础, 通过对各类数据进行分类组织与有效管理, 为城市问题分析、城市发展模拟与要素空间布局等功能提供支撑。城市空间智能化研究中涉及的数据可归为以下几类: ① 基础地理数据, 指来自测绘遥感及地面传感网的反映地球表层及环境特征的时空数据, 包括遥感测绘数据、道路网络数据、土地利用数据和地理普查数据等; ② 城市运营数据, 指城市在运营过程中产生的数据, 包括政府公开数据、规划成果数据、统计年鉴数据、社会调查数据、业务数据和网络舆情数据等; ③ 设备感知数据, 指具有感知能力的设施和设备产生的数据, 包括智能基础设施、导航设备、可穿戴设备、视频监控设备、传感器等产生的数据; ④ 居

民活动数据, 指居民在日常行为活动过程中产生的行为交互数据, 包括通勤数据、社交网络数据等。

大数据的广泛应用使得空间中的交互关系得以量化, 出现了复杂网络、普适计算等方法为城市空间智能化过程中“空间交互”和“人机交互”的研究提供方法支撑^[66]。复杂网络方法通过对城市计算、模拟与分析, 将城市空间层次化、网络化, 可用于分析城市中复杂要素及其相互作用关系等研究, 如空间要素的分布特征检测、功能空间划分等, 为城市空间智能化研究提供了分析手段^[67]。普适计算是物理空间与信息空间的融合, 人可以通过随时随地获得的计算能力和系统资源而享受智能服务。学者们从地理学研究的开放性和复杂性出发, 提出“普适地理计算”, 通过便携式移动设备和遍在的传感器网络实现“可计算”的人地关系^[68]。随着智能基础设施和感知设备的丰富, 城市空间与人的动态感知促进了普适计算在城市研究中的应用, 出现了群智感知计算^[69]和社会感知计算^[70]等方法支撑城市空间智能化过程中跨空间交互研究。

2.3.3 研究内容

城市空间具备多尺度性、多层级性与动态性^[71]。实现城市空间智能化的综合性、系统性与集成性研

究,需要遵循地理学“格局-过程-机理-决策”的科学逻辑,以“特征感知-模式探索-机制效应-模拟预测”为逻辑线索,对其结构、功能、过程、机理与效应等方面进行研究。

① 特征感知方面,感知城市空间智能化的关键要素,识别人群活动特征、探究多尺度城市空间关系与结构特征以及设施分布的格局。② 模式探索方面,一是关注城市智能化发展可能对人群活动产生的影响,对人群活动的模式、出行需求以及人机交互模式进行探讨;二是探究设施如何应对城市智能化的发展,包括基础设施的升级以及智能化设施的引入对设施供需关系及布局的影响;三是依托对空间特征的识别,充分运用智能技术和大数据,分析城市空间智能化组织模式和要素配置,明晰要素组成结构与功能关联性,从而定量揭示城市空间智能化过程的机理与效应,深刻阐述塑造城市空间格局的地理空间过程^[72-73]。③ 机制效应方面,智能化发展对城市空间的影响因素与作用机制的探索是空间研究的重点。通过分析不同尺度“人-机-空间”的交互模式,设施供需匹配关系等对城市空间智能化影响因素、机制及效应进行挖掘,解释城市空间智能化的内在影响过程及其对场所空间转型的作用,分析智能化过程中城市空间结构和组织的形态变化,实现从地理过程刻画向地理机理阐释的转变,为后续的预测模拟提供支持^[74]。④ 模拟预测方面,结合城市空间发展政策,从城市空间智能化演化模拟、空间设施布局优化和人群出行行为选择等角度开展不同场景模拟预测及结果评估,提出城市空间智能化发展策略和方向,为城市空间的功能组织、资源配置和结构优化提供支撑^[75]。

2.3.4 实践应用

基于上述理论、数据方法与研究内容,城市空间智能化研究可以从学科理论、方法论等角度回答其所蕴含的关键科学问题,使得城市研究不再仅关注技术和功能的智能化,而是聚焦于空间的智能化。在实践应用中,需要结合政策和场景需求,通过城市空间识别、城市空间布局与规划引导、城市空间发展预测模拟、智能化场景空间构建等环节,为城市的发展定位、空间布局、政策评估等提供辅助决策。① 在城市空间识别方面,可以通过构建评价指标体系对城市空间智能化水平进行有效评估,分级分类有效推进城市空间智能化建设,以此作为城市体检评估中重要的考量指标和功能组团识别标准。

② 在城市空间布局与规划引导方面,在国土空间规划的大背景下,基于“人-机-空间”机制探索城市资源的组织和配置,提升空间使用的集约效率,可应用于社区生活圈划定等。③ 在城市空间发展预测模拟方面,引入先进的模型方法对城市数据挖掘分析,对城市系统的空间演变和功能运行机制规律进行模拟,为解决城市发展问题提供可行的工作路径^[76]。④ 在智能化场景空间营造方面,一方面结合城市更新在既有空间中进行智能化功能的更替和内涵注入,如在老城空间更新改造过程中,积极探索智慧化更新的新路径^[77];另一方面响应新基建和数字化转型号召,在新空间中产生新的智能形式与设计范式,打造智慧社区、智慧园区、智慧商圈等智能化空间,为城市新功能和新业态提供空间载体。

3 总结与讨论

城市空间智能化是对城市发展方向的一种描述,是技术渗透到城市生活各个方面的具体体现,可为解决城市问题提供更加有效的应对措施。城市空间研究应依托技术发展机遇,以提升空间智能化为目标导向,深化对城市空间的理解。从具体问题出发,基于地理学的视角综合分析城市发展,以及预测空间智能化发展过程中可能对城市空间造成的影响是城市空间智能化研究关注的重点。

首先,本文对城市空间智能化的研究历程、内容和方法进行总结,针对当前研究在城市空间智能化理论、作用机制等方面探索的不足,基于地理学视角对城市空间智能化研究进行思考。本文认为地理学视角下的城市空间智能化是城市中的要素利用智能技术对城市中的客观事物和状态进行学习、分析、判断,并采取有目的性的行为从而有效地适应环境的过程。其次,本文提出由人、机器和空间要素构成的城市空间智能化系统模型。城市空间智能化是在保障内部秩序正常运行的基础上,通过外部联系进行调节,实现各要素之间的内外联通。通过对空间智能化过程中所涉及的人、机器和空间等要素的关系及内在机理进行分析,总结了自发交互、自主调节和双向选择3种机制,可对城市空间的形态、功能、结构等研究有所帮助,提升了地理学视角下对城市空间智能化的认知。最后,在城市空间智能化系统模型的基础上,基于理论融合、数据支撑与研究方法的整合,构建城市空间智能化研究框架,以城市空间智能化特征、功能结构、人与空间互动

关系以及空间智能化模拟预测为重点研究内容,对城市空间智能化全过程进行剖析,并探讨了规划实践中的应用,以期在城市智能化发展提供科学、精准的空间资源配置方案,丰富智能时代城市空间的研究。

然而,在城市空间智能化建设过程中又充满着矛盾性。城市空间智能化的发展初衷是靠空间自身的学习、调节和组织等能力实现空间智能化运转,而城市作为有机体和复杂巨系统,不可能“自动地”步入良性运转轨道。因此,未来城市空间智能化的发展需要理论和实践的创新探索来干预城市空间朝向健康和良性的方向发展,还需要在以下几个方面进行突破以实现城市空间发展的可预测和可控制:① 探索城市空间要素的内在协同规律和交互机制;② 构建城市空间智能计算与服务系统;③ 加强城市空间自适应系统顶层设计;④ 突破数据分析关键技术。城市空间智能化的实现需要通过空间智能化功能的实施来逐步构建起新的常态化生活场景,重新构建人与人、人与空间之间的互动关系。未来城市的基础设施以及人们生活方式的智能化还需要学者更深入地参与到对技术本身的研究与思考之中,将技术和方法在城市空间实践中去组合和研发,更深刻地理解城市结构和功能的组织逻辑。

参考文献(References):

- [1] 习近平. 在中国科学院第二十次院士大会、中国工程院第十五次院士大会、中国科协第十次全国代表大会上的讲话 [N]. 人民日报, 2021-05-29(2). [Xi Jinping. Speech at the 20th Academician Conference of the Chinese Academy of Sciences, the 15th Academician Conference of the Chinese Academy of Engineering, and the 10th National Congress of the Chinese Association for Science and Technology. The People's Daily, 2021-05-29(2).]
- [2] 中国智能城市建设与推进战略研究项目组. 中国智能城市建设与推进战略研究 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2015. [China Smart City Construction and Promotion Strategy Research Project Group. Research on the construction and promotion strategy of smart city in China. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2015.]
- [3] 吴健生, 何东冉, 李贵才. 基于 ICT 视阈的智慧空间营造 [J]. 规划师, 2015, 31(12): 83-88. [Wu Jiansheng, He Dongran, Li Guicai. ICT visual threshold based smart space creation. *Planners*, 2015, 31(12): 83-88.]
- [4] 周成虎. 未来地理空间的智能时代 [N]. 光明日报, 2019-09-26(16). [Zhou Chenghu. Future geospatial intelligent era. *Guangming Daily*, 2019-09-26(16).]
- [5] 明亮, 赵刚, 谢桂海, 等. 面向智能空间的位置感知方法研究 [J]. 软件学报, 2009, 20(3): 671-681. [Ming Liang, Zhao Gang, Xie Guihai et al. Research on smart space oriented location awareness method. *Journal of Software*, 2009, 20(3): 671-681.]
- [6] 孙佩刚, 赵海, 罗玎玎, 等. 智能空间中 RSSI 定位问题研究 [J]. 电子学报, 2007(7): 1240-1245. [Sun Peigang, Zhao Hai, Luo Dingding et al. Research on RSSI-based location in smart space. *Acta Electronica Sinica*, 2007(7): 1240-1245.]
- [7] 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. [Gong Jianya, Zhang Xiang, Xiang Longgang et al. Progress and applications for integrated sensing and intelligent decision in smart city. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(12): 1482-1497.]
- [8] 陈光. 元宇宙与建筑空间智能化发展 [J]. 中外建筑, 2023(9): 19-23. [Chen Guang. Metaverse and intelligent development of building space. *Chinese & Overseas Architecture*, 2023(9): 19-23.]
- [9] 王波, 卢佩莹, 甄峰. 智慧社会下的城市地理学研究——基于居民活动的视角 [J]. 地理研究, 2018, 37(10): 2075-2086. [Wang Bo, Becky P Y Loo, Zhen Feng. Urban geography research in the e-society: A perspective from human activity. *Geographical Research*, 2018, 37(10): 2075-2086.]
- [10] 宋长青, 程昌秀, 史培军. 新时代地理复杂性的内涵 [J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1204-1213. [Song Changqing, Cheng Changxiu, Shi Peijun. Geography complexity: New connotations of geography in the new era. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1204-1213.]
- [11] 俞肇元, 袁林旺, 吴明光, 等. 地理学视角下地理信息的分类与描述 [J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(1): 17-24. [Yu Zhaoyuan, Yuan Linwang, Wu Mingguang et al. Classification and description of geographic information from the perspective of Geography. *Journal of Geo-Information Science*, 2022, 24(1): 17-24.]
- [12] 艾少伟, 苗长虹. 从“地方空间”“流动空间”到“行动者网络空间”: ANT 视角 [J]. 人文地理, 2010, 25(2): 43-49. [Ai Shaowei, Miao Changhong. “Space of places”, “space of flows” and “space of actor-networks”: From the perspective of ANT. *Human Geography*, 2010, 25(2): 43-49.]
- [13] 孙中伟, 王杨, 田建文. 地理学空间研究的转向: 从自然到社会, 现实到虚拟 [J]. 地理与地理信息科学, 2014, 30(6): 112-116. [Sun Zhongwei, Wang Yang, Tian Jianwen. Turns of Geography space research: From natural space to social space and realistic space to virtual space. *Geography and Geo-Information Science*, 2014, 30(6): 112-116.]
- [14] 郭仁忠, 陈业滨, 应申, 等. 三元空间下的泛地图可视化维度 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2018, 43(11): 1603-1610. [Guo Renzhong, Chen Yebin, Ying Shen et al. Geographic visualization of pan-map with the context of ternary spaces. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(11): 1603-1610.]

- [15] 柴彦威. 空间行为与行为空间 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2014. [Chai Yanwei. Spatial behaviour and behavioral space. Nanjing: Southeast University Press, 2014.]
- [16] Castells M. The informational city: Information technology, economic restructuring, and the urban-regional process[M]. Oxford: Blackwell, 1989.
- [17] H·巴凯斯, 路紫. 从地理空间到地理网络空间的变化趋势——兼论西方学者关于电信对地区影响的研究 [J]. 地理学报, 2000,55(1): 104-111. [Bakis Henry, Lu Zi. The change from the geographical space to geocyberspace—Review on the western scholars on regional effects by telecommunication. *Acta Geographica Sinica*, 2000,55(1): 104-111.]
- [18] 张楠楠, 顾朝林. 从地理空间到复合式空间——信息网络影响下的城市空间 [J]. 人文地理, 2002, 17(4): 20-24. [Zhang Nan-nan, Gu Chaolin. From geographical space to composite space: The urban space under the influence of information networks. *Human Geography*, 2002, 17(4): 20-24.]
- [19] 甄峰. 信息时代新空间形态研究 [J]. 地理科学进展, 2004, 23(3): 16-26. [Zhen Feng. Researches on new spatial forms in information era. *Progress in Geography*, 2004, 23(3): 16-26.]
- [20] 庄少勤. 新时代的空间规划逻辑 [J]. 中国土地, 2019(1): 4-8. [Zhuang Shaoqin. Spatial planning logic in the new era. *China Land*, 2019(1): 4-8.]
- [21] 甄峰, 王波. 建设长三角智慧区域的初步思考 [J]. 上海城市规划, 2012(5): 74-77. [Zhen Feng, Wang Bo. The preliminary study on the construction of the Yangtze River Delta smarter region. *Shanghai Urban Planning Review*, 2012(5): 74-77]
- [22] 杜振华, 郭怀英. 以智慧区域建设促进京津冀协同发展 [J]. 宏观经济管理, 2015(9): 57-60. [Du Zhenhua, Guo Huaiying. Promote the coordinated development of Beijing, Tianjin and Hebei with smart regional construction. *Macroeconomic Management*, 2015(9): 57-60.]
- [23] 杨尧, 赵耀龙, 王彬. “一联三生”体系下粤港澳大湾区智慧城市群的构建 [J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(6): 1073-1086. [Yang Yao, Zhao Yaolong, Wang Bin. Construction of smart urban agglomeration in Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area under the system of “one connection and ecological-living-production space system”. *Journal of Geo-Information Science*, 2022, 24(6): 1073-1086.]
- [24] 牛强, 卢相一, 魏伟. 虚拟智慧城市初论——基于虚拟城市空间的智慧城市建设方式探索 [J]. 城市建筑, 2018(15): 26-30. [Niu Qiang, Lu Xiangyi, Wei Wei. Virtual smart city: Exploration of smart city construction modebased on virtualcity space. *Urban-ism and Architecture*, 2018(15): 26-30.]
- [25] 杨滔, 秦凌, 黄奇晴, 等. 城市智慧空间的设计与建构 [J]. 未来城市设计与运营, 2022(1): 17-22. [Yang Tao, Qin Ling, Huang Qiqing et al. Design and construction of urban smart spaces. *Future City Studies*, 2022(1): 17-22.]
- [26] 孔宇, 甄峰, 张珊珊. 智能技术影响下的城市空间研究进展与思考 [J]. 地理科学进展, 2022, 41(6): 1068-1081. [Kong Yu, Zhen Feng, Zhang Shanqi. Research progress and prospect of urban space under the influence of smart technology. *Progress in Geography*, 2022, 41(6): 1068-1081.]
- [27] 吴志强. 人工智能辅助城市规划 [J]. 时代建筑, 2018(1): 6-11. [Wu Zhiqiang. Artificial intelligence assisted urban planning. *Time Architecture*, 2018(1): 6-11.]
- [28] 张恩嘉, 龙瀛. 空间干预、场所营造与数字创新: 颠覆性技术作用下的设计转变 [J]. 规划师, 2020, 36(21): 5-13. [Zhang Enjia, Long Ying. Spatial intervention, place making and digital innovation: Design transformation driven by disruptive technologies. *Planners*, 2020, 36(21): 5-13.]
- [29] 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. [Zhen Feng, Kong Yu. An integrated “human-technology-space” framework of smart city planning. *Urban Planning Forum*, 2021(6): 45-52.]
- [30] 席广亮. 城市流动性与智慧城市空间组织 [M]. 北京: 商务印书馆, 2021. [Xi Guangliang. Urban mobility and smart city spatial organization. Beijing: The Commercial Press, 2021.]
- [31] 王飞飞, 刘艳梅, 张刘引. 智慧城市空间理论与规划实践 [J]. 工程建设与设计, 2021(2): 9-11. [Wang Feifei, Liu Yanmei, Zhang Liuyin. Space theory and planning practice of smart city. *Construction & Design for Project*, 2021(2): 9-11.]
- [32] 宋关福, 卢浩, 王晨亮, 等. 人工智能 GIS 软件技术体系初探 [J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(1): 76-87. [Song Guanfu, Lu Hao, Wang Chenliang et al. A tentative study on system of software technology for artificial intelligence GIS. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(1): 76-87.]
- [33] 刘经南, 高柯夫. 智能时代测绘与位置服务领域的挑战与机遇 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2017, 42(11): 1506-1517. [Liu Jingnan, Gao Kefu. Challenges and opportunities for mapping and surveying and location based service in the age of intelligence. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(11): 1506-1517.]
- [34] 郭仁忠, 林浩嘉, 贺彪, 等. 面向智慧城市的 GIS 框架 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2020, 45(12): 1829-1835. [Guo Renzhong, Lin Haojia, He Biao et al. GIS framework for smart cities. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(12): 1829-1835.]
- [35] 苏奋振, 吴文周, 张宇, 等. 从地理信息系统到智能地理系统 [J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(1): 2-10. [Su Fenzhen, Wu Wenzhou, Zhang Yuet al. From geographic information system to intelligent geographic system. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(1): 2-10.]
- [36] Openshaw S, Openshaw C. Artificial intelligence in Geography [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [37] 高松. 地理空间人工智能的近期研究总结与思考 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2020, 45(12): 1865-1874. [Gao Song. A review of recent researches and reflections on geospatial artificial intelligence. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(12): 1865-1874.]
- [38] 时空人工智能赋能数字孪生城市白皮书编委会. 时空人工智能赋能数字孪生城市白皮书 [R/OL]. 2021.[2024-03-05] <https://>

- www.wayz.ai/aiexplore. [Editorial Board of Spatial-temporal Artificial Intelligence Powering the Digital Twin City White Paper. Spatial-temporal artificial intelligence powering the digital twin city white paper. 2021. [2024-03-05].<https://www.wayz.ai/aiexplore>.]
- [39] 鲁学军, 秦承志, 张洪岩, 等. 空间认知模式及其应用 [J]. *遥感学报*, 2005, 9(3): 277-285. [Lu Xuejun, Qin Chengzhi, Zhang Hongyan et al. Spatial cognitive mode and its application. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(3): 277-285.]
- [40] 朱钥, 李琦. 城市空间智能计算平台研究 [J]. *地理与地理信息科学*, 2011, 47(1): 11-15. [Zhu Yue, Li Qi. Research of urban spatial intelligence computation platform. *Geography and Geo-Information Science*, 2011, 47(1): 11-15.]
- [41] Zheng Y, Capra L, Wolfson O et al. Urban computing: Concepts, methodologies, and applications[J]. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)*, 2014, 5(3): 1-55.
- [42] 乐阳, 刘瑜, 陈云松, 等. 空间和地理计算与计算社会学的融合路径 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2022, 47(1): 1-18. [Yue Yang, Liu Yu, Chen Yunsong et al. Integration path of spatial and geo-computing and computational social science. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(1): 1-18.]
- [43] Wan L, Zhang H, Lin G et al. A small-patched convolutional neural network for mangrove mapping at species level using high-resolution remote-sensing image[J]. *Annals of GIS*, 2019, 25(1): 45-55.
- [44] Zhu D, Cheng X, Zhang F et al. Spatial interpolation using conditional generative adversarial neural networks[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2020, 34(4): 735-758.
- [45] 甄峰, 席广亮, 秦箫. 基于地理视角的智慧城市规划与建设的理论思考 [J]. *地理科学进展*, 2015, 34(4): 402-409. [Zhen Feng, Xi Guangliang, Qin Xiao. Smart city planning and construction based on geographic perspectives: Some theoretical thinking. *Progress in Geography*, 2015, 34(4): 402-409.]
- [46] 芮小平, 于雪涛. 地学空间信息建模与可视化 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016. [Rui Xiaoping, Yu Xuetao. Modeling and visualization of geospatial information. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.]
- [47] Komninos N. Intelligent cities: Variable geometries of spatial intelligence[J]. *Intelligent Buildings International*, 2011, 3(3): 172-188.
- [48] 吴传钧. 论地理学的研究核心——人地关系地域系统 [J]. *经济地理*, 1991, 11(3): 1-6. [Wu Chuanjun. On the research core of Geography—The regional system of man earth relationship. *Economic Geography*, 1991, 11(3): 1-6.]
- [49] 傅伯杰. 地理学: 从知识、科学到决策 [J]. *地理学报*, 2017, 72(11): 1923-1932. [Fu Bojie. Geography: From knowledge, science to decision making support. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11): 1923-1932.]
- [50] 曹小曙. 基于人地耦合系统的国土空间重塑 [J]. *自然资源学报*, 2019, 34(10): 2051-2059. [Cao Xiaoshu. Geogovernance of national land use based on coupled human and natural systems. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(10): 2051-2059.]
- [51] 武廷海, 宫鹏, 李嫣. 未来城市体系: 概念、机理与创造 [J]. *科学通报*, 2022, 67(1): 18-26. [Wu Tinghai, Gong Peng, Li Yan. Future cities as a system of systems: Its concept, mechanism and creation. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(1): 18-26.]
- [52] 曹阳, 甄峰. 智慧城市仿真模型组织架构 [J]. *科技导报*, 2018, 36(18): 47-54. [Cao Yang, Zhen Feng. The organization of smart city simulation model. *Science & Technology Review*, 2018, 36(18): 47-54.]
- [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] Ihde D. Technology and the lifeworld: From garden to earth[M]. Bloomington: Indiana University Press, 1990.
- [55] 黄经南, 杨石琳. 机器人驱动下城市空间演变及规划对策——一些初步的设想 [J]. *城市发展研究*, 2021, 28(3): 58-64, 69. [Huang Jingnan, Yang Shilin. Urban spatial evolution and planning strategy driven by “machines replacing people”: Some preliminary ideas. *Urban Development Studies*, 2021, 28(3): 58-64, 69.]
- [56] 刘春成. 城市隐秩序: 复杂适应系统理论的城市应用 [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2017. [Liu Chuncheng. The hidden order of city: Complex adaptive system theory in urban studies. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2017.]
- [57] 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. [Zhou Yu, Liu Chuncheng. The logic and innovation of building digital twin city in Xiong'an new area. *Urban Development Studies*, 2018, 25(10): 60-67.]
- [58] 刘瑜, 詹朝晖, 朱递, 等. 集成多源地理大数据感知城市空间分异格局 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2018, 43(3): 327-335. [Liu Yu, Zhan Zhaohui, Zhu Di et al. Incorporating multi-source big geo-data to sense spatial heterogeneity patterns in an urban space. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(3): 327-335.]
- [59] 许学强, 周一星, 宁越敏. 城市地理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009. [Xu xueqiang, Zhou Yixing, Ning Yuemin. Urban Geography. Beijing: Higher Education Press, 2009.]
- [60] 申悦, 塔娜, 柴彦威. 基于生活空间与活动空间视角的郊区空间研究框架 [J]. *人文地理*, 2017, 32(4): 1-6. [Shen Yue, Ta Na, Chai Yanwei. Research framework of suburban space based on perspective of living space and activity space. *Human Geography*, 2017, 32(4): 1-6.]
- [61] Kontokosta C E. Urban informatics in the science and practice of planning[J]. *Journal of Planning Education and Research*, 2021, 41(4): 382-395.
- [62] 王建国. 基于人机互动的数字化城市设计——城市设计第四代范型刍议 [J]. *国际城市规划*, 2018, 33(1): 1-6. [Wang Jianguo.

- Digital urban design based on human-computer interaction: Discussion on the fourth generation of urban design. *Urban Planning International*, 2018, 33(1): 1-6.]
- [63] 闫小勇. 空间交互网络研究进展 [J]. 科技导报, 2017, 35(14): 15-22. [Yan Xiaoyong. Advances in modeling spatial interaction network. *Science & Technology Review*, 2017, 35(14): 15-22.]
- [64] 王丹, 林姚宇, 金美含, 等. 空间交互理论与城市规划应用研究进展 [J]. *现代城市研究*, 2020(9): 47-54. [Wang Dan, Lin Yaoyu, Jin Meihan et al. Advances in spatial interaction theory and its applications in urban planning. *Modern Urban Research*, 2020(9): 47-54.]
- [65] 柴彦威, 谭一泓, 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. [Chai Yanwei, Tan Yiming, Shen Yue et al. Space-behavior interaction theory: Basic thinking of general construction. *Geographical Research*, 2017, 36(10): 1959-1970.]
- [66] 刘瑜, 姚欣, 龚咏喜, 等. 大数据时代的空间交互分析方法和应用再论 [J]. *地理学报*, 2020, 75(7): 1523-1538. [Liu Yu, Yao Xin, Gong Yongxi et al. Analytical methods and applications of spatial interactions in the era of big data. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(7): 1523-1538.]
- [67] 罗桑扎西, 甄峰, 张姗姗. 复杂网络视角下的城市人流空间概念模型与研究框架 [J]. *地理研究*, 2021, 40(4): 1195-1208. [Luo Sangzhaxi, Zhen Feng, Zhang Shanqi. A conceptual model and methodological framework for examining urban people flow space based on complex network perspective. *Geographical Research*, 2021, 40(4): 1195-1208.]
- [68] 边馥苓, 石旭. 普适计算与普适 GIS [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2006, 31(8): 709-712. [Bian Fuling, Shi Xu. Pervasive computing and pervasive GIS. *Geomatics And Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(8): 709-712.]
- [69] Yi F, Yu Z, Chen H et al. Cyber-physical-social collaborative sensing: From single space to cross-space [J]. *Frontiers of Computer Science*, 2018, 12(4): 609-622.
- [70] 於志文, 於志勇, 周兴社. 社会感知计算: 概念、问题及其研究进展 [J]. *计算机学报*, 2012, 35(1): 16-26. [Yu Zhiwen, Yu Zhiyong, Zhou Xingshe. Socially aware computing. *Chinese Journal of Computers*, 2012, 35(1): 16-26.]
- [71] 邓伟, 张少尧, 张昊, 等. 人文自然耦合视角下过渡性地理空间概念、内涵与属性和研究框架 [J]. *地理研究*, 2020, 39(4): 761-771. [Deng Wei, Zhang Shaoyao, Zhang Hao et al. Transitional geospace from the perspective of human-nature coupling: Concept, connotations, attributes, and the research framework. *Geographical Research*, 2020, 39(4): 761-771.]
- [72] 席广亮, 甄峰. 基于可持续发展目标的智慧城市空间组织和规划思考 [J]. *城市发展研究*, 2014, 21(5): 102-109. [Xi Guangliang, Zhen Feng. The spatial organization and planning of smart cities based on the sustainable development goals. *Urban Development Studies*, 2014, 21(5): 102-109.]
- [73] 郑佳琪, 董会和, 高心雨. 基于“互联网+流通”的长春市商业空间演化研究 [J]. *贵州师范大学学报 (自然科学版)*, 2022, 40(5): 55-63. [Zheng Jiaqi, Dong Huihe, Gao Xinyu. Research on the evolution of Changchun's commercial space based on "Internet + Circulation". *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2022, 40(5): 55-63.]
- [74] 孔宇, 甄峰, 张姗姗. 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. [Kong Yu, Zhen Feng, Zhang Shanqi. Progress and prospects of the impact of smart technology on urban residents' activities. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(3): 413-425.]
- [75] 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, 118. [Wu Zhiqiang, Gan Wei, Zang Wei et al. Concept and development of the city intelligent model (CIM). *City Planning Review*, 2021, 45(4): 106-113, 118.]
- [76] 杨天人, 金鹰, 方舟. 多源数据背景下的城市规划与设计决策——城市系统模型与人工智能技术应用 [J]. *国际城市规划*, 2021, 36(2): 1-6. [Yang Tianren, Jin Ying, Fang Zhou. Decision-making for urban planning and design with multi-source data: Applications with urban systems models and artificial intelligence. *Urban Planning International*, 2021, 36(2): 1-6.]
- [77] 北京城市实验室和腾讯研究院. WeSpace2.0·未来城市空间 2.0[R/OL]. 2022. [2024-03-05]. <https://www.beijingscitylab.com/projects-1/48-wespace-future-city-space/>. [Beijing City Lab and Tencent Research Institute. WeSpace2.0: Future urban space 2022[2024-03-05][<https://www.beijingscitylab.com/projects-1/48-wespace-future-city-space/>].]

Progress and thinking on urban spatial intelligence from the perspective of Geography

Yang Kaixian^{1,2}, Zhen Feng^{1,2}

(1. School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 2. Jiangsu Provincial Engineering Research Center of Smart City Planning and Digital Governance, Nanjing 210093, Jiangsu, China)

Abstract: Intelligence is a concrete manifestation of the penetration of technology into various aspects of urban life, and also a description of the future development direction of cities. Urban research needs geography to control the development of urban intelligence from a spatial perspective, so as to provide more effective measures to solve urban problems. This article reviews the progress of urban spatial intelligence research from 3 aspects: research process, research content, and research methods. In response to the shortcomings of current research, this article considers urban spatial intelligence research from a geographical perspective. Firstly, this article explains the geographical connotation of urban spatial intelligence, which refers to the process in which elements in urban space use smart technology to learn, analyze, and judge objective things and states in the city, and to take purposeful actions to effectively adapt to the environment. Secondly, this article proposes an urban spatial intelligent system model composed of human, machine and space. On the basis of ensuring the normal operation of the internal order, urban spatial intelligence is adjusted through external connections to realize the internal and external connections between various elements. Through the interpretation of the mechanism of “human-machine-space”, this article summarizes 3 mechanisms: spontaneous interaction, self-regulation and two-way selection, which can be helpful to the study of the form, function and structure of urban space. Finally, based on the urban spatial intelligent system model, this article constructs a research framework for urban spatial intelligence. The framework focuses on the characteristics of urban spatial intelligence, and the whole process of urban spatial intelligence is analyzed with the characteristics of urban spatial intelligence, functional structure, human-space interaction relationship, and spatial intelligence simulation and prediction as the key research content. This article aims to provide scientific and accurate spatial resource allocation plans for the development of urban intelligence, enrich the research on urban space in the intelligent era, and better respond to the challenges that the transformation of lifestyle and spatial utilization models driven by new technologies in the intelligent era may bring to urban spatial structure and functional organization.

Key words: spatial intelligence; urban space; perspective of Geography; smart technology