

人工智能时代城市地理学发展的变革与挑战

杨永春^{1,2}, 菅煜婷¹

(1. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000; 2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 人工智能(AI)引发的新一轮技术革命已成为全球各国抢抓的竞争优势,同时也会引发城市地理学的革新。本文回溯了人工智能发展历程,提出了面向人工智能的城市人地系统概念模型,从数据表达、场景应用、空间变革、城市发展等4个方面梳理与总结了人工智能介入的城市地理研究,并提出了学科智能化转型面临的困境、情境、探索路径与未来展望。研究发现:①面向人工智能的城市人地系统要素交互更加复杂。②人工智能成为城市地理研究主要手段的趋势逐渐明显,具有高效率、低成本、学习能力强的数据处理优势,对空间感知与智慧决策也具有重要意义;人工智能引发了空间变革,不仅打造了复杂的虚拟空间,同时重构了社会空间;人工智能助力建设智慧城市并打造城市前沿应用平台。③智能化转型下的城市地理研究面临数据与技术困境以及全球与地方变革、科技伦理与人文价值发展等情境,未来可在突破技术壁垒、关注城市空间建设与治理、注重多元智能转向效应研究等3方面探索发展路径,学科亟待全面转型升级。

关键词: 人工智能;第四次工业革命;城市地理学;学科变革;城市人地系统;虚拟空间;智慧城市

DOI: 10.11821/dlxb202410002

1 引言

纵观人类发展史,大致经历了3次历史性的伟大变革^[1],且都为人类社会的生产生活、社会关系带来巨变,最终进入到当今的“人类世”^[2]。当下以互联网产业化和工业智能化为标志^[3],以技术融合为主要特征的人工智能(Artificial Intelligence, AI),作为抢占社会经济发展制高点的第4次变革^[4-5],不仅正对全球格局和人类社会产生极其深刻的影响,同时也以一系列颠覆性技术改变着城乡面貌,重塑人与自然的关系^[6]。城市作为时代的中心,自然受到了人工智能最快、最直接、最彻底的影响。自1956年人工智能的概念正式诞生以来^[7],其作为一种新视角、新工具 and 可能形成的新研究范式,以远超人类本身的深度学习、图像识别、信息获取、数据处理等能力,驱动新一轮科技革命和产业变革。ChatGPT的出现更是一夜之间把人工智能推向风口浪尖,标志着人工智能时代的正式到来^[8]。

在全球层面,超级大国高度关注这一领域的霸权竞争并将人工智能纳入到国家战略中,抢抓人工智能的顶层设计和统筹规划,竞相研发和应用人工智能技术,以谋求经济、军事等领域的竞争优势^[4],如美国出台了《国家人工智能战略发展计划》、英国发布了《国家人工智能战略》等。世界经济论坛(World Economic Forum, WEF)认为中国和印度等新兴经济体受到的影响相较于发达国家可能更大。2018年习近平总书记指出信息革

收稿日期: 2023-11-29; 修订日期: 2024-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(42371198, 41971198); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK1005)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.42371198, No.41971198; The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program, No.2019QZKK1005]

作者简介: 杨永春(1969-), 男, 陕西白水人, 教授, 博士生导师, 研究方向为城市与区域发展、转型与规划。

E-mail: yangych@lzu.edu.cn

命对中华民族是千载难逢的历史机遇,加快发展新一代人工智能是事关中国能否抓住新一轮变革机遇的战略问题^[9]。中国共产党的“二十大”报告、“十四五”规划也均强调了发展人工智能的重要意义。

在学术研究层面,随着智能化、数字化的跨越式发展,人工智能正在深刻影响并扩展科学发现的边界,日趋成为各个学科关注的热点问题^[10],呈现出学科多元性、综合性和交叉性。当然人工智能研究目前还处于探索与起步阶段,已有的研究主要集中在人工智能的起源与发展、方法技术、驱动因素^[11]、各领域与场景的应用^[12-14]、战略性的智库支撑^[15-16]、效应与影响^[17-20]等方面。目前地理学、城乡规划学、经济学等学科至少在地理研究应用与地理空间变革^[12, 21-26]、智慧城市建设^[27-28]与智慧规划管理^[29-30]、区域社会经济发展^[18-19, 31-33]等3方面取得进展。城市地理学作为人文地理学的重要分支,人工智能已对其研究内容、研究方法和研究趋势等产生重要影响^[34]。已有研究表明,人工智能通过多元要素配置来提高企业生产与创新效率^[35],促进产业结构升级、城市绿色发展与低碳转型^[32],但是影响前提和机制尚未完全明晰。

伴随着大数据积累、理论算法革新与计算能力提高,人工智能已在研究与应用方面进入到一个崭新的阶段。从学科发展历史看,人类每一次技术革命都将带来学科发展的巨大变革,并将孕育新的学科范式产生^[36]。地理学作为国家先导性、基础性、全局性的战略支撑和战略手段^[37],正在世界百年未有之大变局中面临新的价值转型、目标优化和方式变革,而其经久不衰、蓬勃发展的根源正是在于不断吸收先进技术的同时进行自我革命^[38],可能的“人工智能研究范式”可为地理学提供更为综合、多元、理性的研究视角、方法和平台。就城市地理学而言,其作为应对全球变化、可持续发展和人地关系和谐的重要战略性工具,人工智能可为促进其学科体系现代化提供全新的技术和思路。因此,城市地理学须把握人工智能机遇,以高度的历史责任,重新审视学科的未来发展。事实上,城市地理学结合人工智能的科学范式已进入到新纪元。然而,目前仍然存在以下科学问题有待解答:① 人工智能介入地理学研究的路径是什么?即人工智能转向下地理学研究的时间演化路径与可能存在的空间作用路径分别是什么?② 面向人工智能的城市地理学研究发生了哪些层面的变革?③ 智能化转型下的城市地理研究面临哪些关键问题?可能的探索路径又是什么?

基于此,本文首先回溯了人工智能发展历程,并对人工智能介入的地理研究进行了计量统计分析,提出了面向人工智能的城市人地系统概念模型;其次,从数据表达、场景应用、空间变革、城市发展等4个方面梳理了人工智能介入的城市地理学研究;最后,提出了智能化转型下城市地理研究面临的困境、情境、探索路径与学科展望,以期为城市地理学发展提供参考。

2 地理学研究中的“智能革命”

2.1 人工智能转向下的地理学研究

人工智能最早可追溯到20世纪40年代,神经元数学模型的提出为人工智能学科奠定基石。1950年艾伦·图灵提出“图灵测试”^[39],让机器产生智能的想法首次出现。1956年约翰·麦卡锡在达特茅斯会议上首次提出了“人工智能”的概念,标志着人工智能学科正式诞生。此后,人工智能经历了曲折起伏的发展历程。目前随着大数据、云计算、互联网、物联网等信息技术的发展,人工智能迎来爆发式增长的蓬勃期。人工智能的定义因技术与迭代、应用场景繁多而产生了不同的界定与演变,但每个定义都包含了“非人类智能”的关键概念^[4]。Russell等认为人工智能是指模仿与人类属性(如学习、语言和

解决问题）相关的认知功能的系统^[40]；Kaplan等认为人工智能具有独立解释和学习外部数据的能力，能够通过灵活适应来实现特定结果^[41]。另外，人工智能还有狭义的弱人工智能（依据计算机编程执行自动化操作的机器人）与广义的强人工智能（执行人类所有认知功能的技术）之分。此外，所谓超级人工智能，即机器的表现和思维超越了人类。

在地理学研究中，一方面，人工智能技术为解决地理学的科学难题提供了新方法和新思路；另一方面，不断产生的时空数据也支持了人工智能的模型训练和算法研发^[12]。本文基于CiteSpace工具和中国知网（CNKI）数据库，以“人工智能”“地理”进行“篇关摘”检索，共计获得1992—2023年已收录的核心及以上级别的文献292篇（图1）。地理学的人工智能研究起步较早，但前期受到的关注较少，以2015年为分水岭，发文量快速上升，表明人工智能逐步成为研究热点。同时，基于CNKI和“Web of Science”（WOS）两个平台展现相关成果突现词与突现时间（表1）。国外研究中，“artificial neural network（人工神经网络）”突现度最高，“genetic algorithm（遗传算法）”突现时间最长；国内研究中，“专家系统”“突现度最高，“决策支持系统”突现时间最长，这体现了学科间的融合与交叉。此外，值得关注的是随着信息通信与智能技术的发展，AI+城市科学新兴交叉研究领域逐渐发展，城市地理相关领域研究面临智能化与融合创新的新机遇与新挑战。

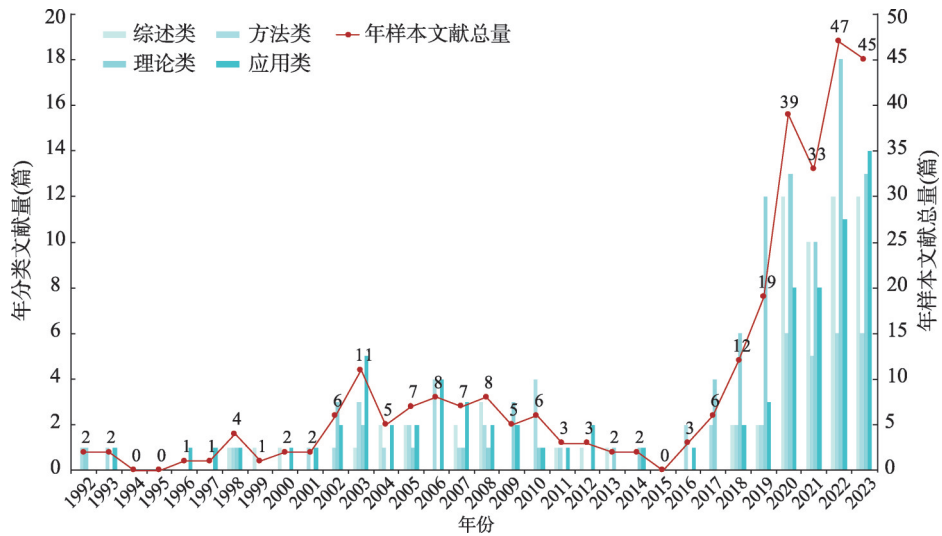


图1 1992—2023年人工智能介入地理研究的文献量统计

Fig. 1 Quantitative statistics in geographic research with artificial intelligence intervention, 1992-2023

2.2 面向人工智能的城市人地系统概念模型

在过去100多年中人地系统研究一直是中国人文地理学的重要组成部分^[42]。地理学的人工智能变革不应仅停留在方法或技术的“表象”上，其本质更应是影响深远的思想和系统模拟、预测等的革命及应用，即地理学应融合人工智能时代所建立的科学范式，至少应促进人地关系地域系统研究的认识革命。

人工智能介入城市发展的本质在于通过计算机系统模拟、延伸和扩展人类智能，形成具有自组织、可学习、可迭代特征的高度智能化的城市形态^[27]，最终构成有机协调的面向人工智能的城市人地系统。当下人工智能的迅猛发展打破了城市的时空限制，改变了各类实体、虚拟要素及其流动的方向、范式与耦合关系，重塑了城市空间的形式、功能以及人类与环境之间的调控、反馈和交互机制^[43]，进而促进了基于智能技术与复杂适

表 1 人工智能介入地理研究前 15 位突现词及其突现度与突现时间

Tab. 1 The top 15 emerging terms in domestic and international research, along with their prominence and the time of their emergence

关键词	突现度	起始年份	结束年份	关键词	突现度	起始年份	结束年份
genetic algorithm	5.15	2008	2019	决策支持系统	3.75	1997	2012
geographic information retrieval	2.41	2008	2014	专家系统	6.77	1998	2012
cellular automata	3.08	2009	2014	地理信息系统	6.26	2003	2006
AI	1.96	2009	2012	应用	3.11	2014	2017
artificial neural network	5.27	2013	2019	大数据	6.63	2017	2023
area	2.16	2014	2019	测绘地理	3.24	2017	2023
data mining	3.17	2016	2020	云计算	4.00	2018	2023
big data	2.40	2018	2020	地理信息产业	5.94	2019	2020
air pollution	2.33	2018	2020	智慧城市	5.05	2019	2023
support vector machine	1.98	2018	2019	时空大数据	4.51	2019	2021
spatial prediction	2.84	2019	2020	物联网	5.62	2020	2023
frequency ratio	2.35	2019	2020	人工智能	5.09	2020	2021
landslide susceptibility	2.05	2019	2020	数字孪生	3.41	2020	2023
impact	3.01	2020	2023	地理信息科学	3.29	2020	2023
China	2.35	2020	2021	深度学习	5.48	2021	2023

注：以中国知网(CNKI)和“Web of Science”(WOS)为检索平台,检索截止日期为 2023 年 11 月 20 日。

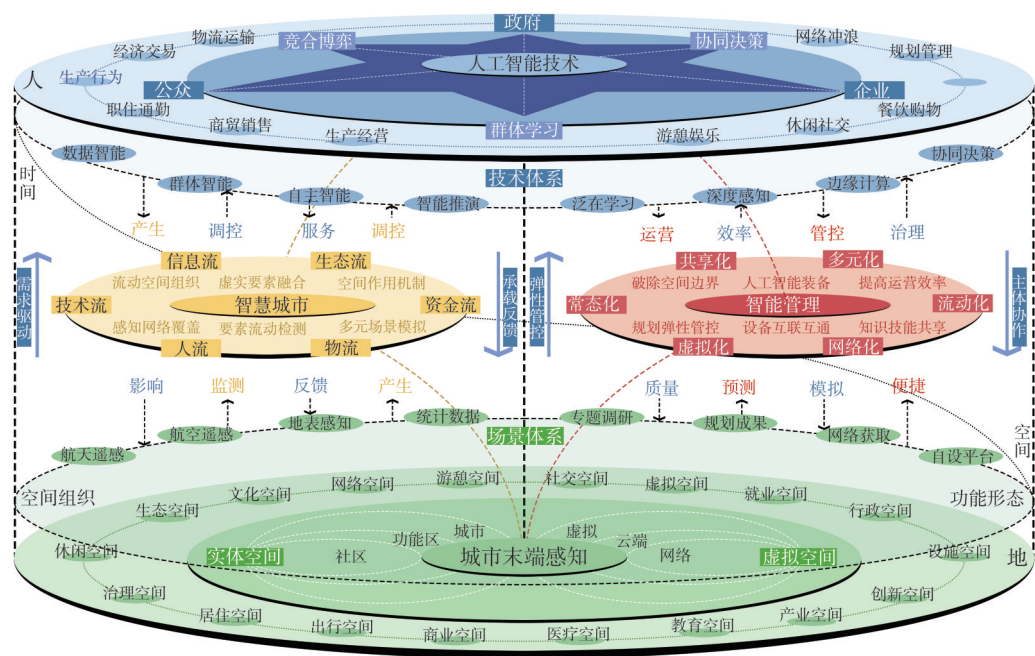
应系统的城市人地系统的形成。本文基于人—地核心体系、技术体系、场景体系等维度，构建了面向人工智能的城市人地系统概念模型（图2），展示了人工智能介入的结构与范式及其对城市人地系统综合、复杂的影响。智能技术为城市人地系统的监测与调控提供了新兴技术手段的同时，还深刻影响了要素交互、联系尺度、耦合关系、动态演进、互动反馈模式。因此，面向人工智能的城市人地系统表现为要素更多元、交互更复杂、联系更紧密、尺度更多维、技术更智能多样、人类主观能动性和调控干预能力更强的特点。

3 人工智能介入的城市地理研究

城市地理学主要研究不同地理环境下城市形成、发展、组合分布和空间结构变化规律^[44]。人工智能技术以多维、多元的渠道介入城市地理学的研究对象、研究手段，进而拓展与丰富其研究内容与范畴、迭代更新其研究方法与范式，从而对学科发展产生广泛而深刻的影响。这是新、旧现象、方法、视角相互碰撞、融合并孕育新观点、结论与理论，同时引发学科创新与进步的过程，它们具有同源异流、交互影响、相互促进的逻辑关系。

3.1 数据表达：从人工解译到智慧驱动

计量革命后，地理学研究从以调查、描述为基本途径与表达方式的经验主义，逐渐转向以寻求定量方法重建研究内容和理论主体的实证主义^[36]。随着时空大数据的爆发式增长，整合分析、有效转化和表达海量数据进而挖掘自然和社会新规律就变得尤为重要^[45]。人工智能作为通用基础性技术，在数据挖掘与处理表达、模型构建与空间分析等方面不断发展，成为城市地理主要研究手段的趋势愈发明显（表2），并逐渐对空间交互、地理复杂性甚至研究范式产生影响^[46-47]。目前呈现的优势有：① 高效率。人工智能算法、模型、算力的高速发展提升了空间数据获取、分析与处理能力。② 低成本。高效集成的人工智能大幅降低了人力、物力资本与时间成本的投入。③ 学习能力强。巨量的数据训练驱使人工智能模型快速迭代，有效优化各类资源的使用，提升信息处理的精准度。人工智



注：主要在参考文献[27, 43]的基础上整理和改绘。

图2 面向人工智能的城市人地系统概念模型

Fig. 2 Urban human-environmental systems for artificial intelligence: A conceptual model

表2 地理大数据分类及应用

Tab. 2 Classification and applications of geographic big data

大数据来源	大数据类型	人工智能算法	应用
科学机器装置	中国天眼FAST传感器、卫星等	人工神经网络、决策树、聚类分析、深度卷积神经网络、云计算等	描述地理空间现象，挖掘内在规律和机理，预测趋势及优化决策算等
传感网络	街景数据、物联网传感数据		
城市移动设备	车载GPS导航数据、手机基站位置数据、手机或车辆移动的时空标记数据		
社交媒体和网络	微博、Twitter、小红书等数据		

注：根据北京大学刘瑜教授讲座《地理大数据分析及应用》及其他公开资料整理。

能巨量、实时、智能、集成的优势突破了传统城市研究范式中路径不清、样本容量有限的缺陷，一定程度上克服了尺度效应的不利影响，为有效采集、处理、分析及预测各类研究数据提供了便利。然而，人工智能的发展对数据有极高的依赖性，数据越多越智能，这导致泛人工智能的数据采集与应用在一定程度上增大了城市研究需承担的法律风险。

3.2 场景应用：从智能感知到智慧决策

在社会经济与生态环境变化相互交织、快速发展的时代，城市人居环境建设的评估、检测及分析变得前所未有的紧迫。新一代通信智能技术的日益深入，为人类智能感知和智慧决策提供了更有效、便捷与准确的依据，丰富了人本主义的城市治理与规划。

在空间感知方面，基于人工智能的GIS街景识别和分析已从2维、2.5维、3维表达扩展到高维表达^[48]。基于海量标准地图，借助语义分割模型和全卷积神经网络等人工智能技术，构建多要素的识别分类器，从而能够对城市各要素进行大规模的高精度识别。例如在局部尺度，通过识别植被信息构建包含色彩信息的植被数据库，为城市绿色空间建设和宜居环境打造提供建议^[49]；在广域尺度，用于还原全线视觉景观的城乡交通廊道感知分析。

在智慧决策方面,人工智能技术如群体智能算法、机器学习、深度学习等已介入(城市)地理学研究^[50],为人类科学决策提供依据。

群体智能算法的概念最早由Beni等提出,指模拟群体间的信息交流与协作,利用共识主动性实现优化,目前已存在数十种群体智能算法。在地理研究中,粒子群算法被用于土地利用、城市扩张模拟^[50]与形态演化等;蚁群优化算法被用于空间数据聚类、边界划定与区位优化^[51]等;布谷鸟搜索和萤火虫算法被用于遥感和土地覆被制图中的图像分割等;遗传算法和象群算法被用于城市土地利用和分类管理等。总之,群体智能算法适用于城市地理研究中目标优化的情景,但也存在易偏离最优解的缺陷。

机器学习是指计算机模仿人类的学习行为,在海量数据中学习规律和模式,获取新的知识或经验,并重新组织已有的知识结构来提高自身的智能性。机器学习一般包括监督学习、无监督学习、半监督学习和强化学习4类,亦可分为多种学派与算法(表3)^[52-53],已广泛用于解决分类、回归、聚类等地理研究中。例如,基于机器学习算法提出移动向心性,用以描述城市功能结构动态演变,解决了普查数据无法及时跟踪城市结构变化的难题^[54];借助随机森林、支持向量机、逻辑回归等算法探究乡村旅游竞争力^[55]、贫困地区识别^[56]等;借助XGBoost和SHAP进行区域犯罪预测^[57];借助人工神经网络和贝叶斯网络模拟、识别城市用地扩张、环境演变以及生态脆弱性等^[58]。目前以机器学习为代表的大数据分析方法虽然进行得如火如荼,但仅适用于弱人工智能范畴,而对于以人地关系为核心的地理问题,则面临复杂挑战。

深度学习是指由多个处理层组成的计算模型,它通过模拟人脑构建深层神经网络自动学习和提取数据的内在特征,从而增强预测,解决复杂问题。与传统机器学习相比,深度学习的核心区别在于无需人工参与设计提取各隐层特征,而是通过神经网络自主学习,可用于分类、分割和目标提取等任务,在城市地理研究方面具有巨大潜力,已被用于处理和分析大量的地理空间数据^[59],如运用深度卷积神经网络测度跨时空的地理可复制性^[60],识别城市更新^[61]以及街景图像分析^[48]等。

深度学习是指由多个处理层组成的计算模型,它通过模拟人脑构建深层神经网络自动学习和提取数据的内在特征,从而增强预测,解决复杂问题。与传统机器学习相比,深度学习的核心区别在于无需人工参与设计提取各隐层特征,而是通过神经网络自主学习,可用于分类、分割和目标提取等任务,在城市地理研究方面具有巨大潜力,已被用于处理和分析大量的地理空间数据^[59],如运用深度卷积神经网络测度跨时空的地理可复制性^[60],识别城市更新^[61]以及街景图像分析^[48]等。

3.3 空间变革:从人地协同到虚拟交互

技术对城市空间的塑造和影响一直是城市地理学者们关注的话题。国内外关于信息通信技术(ICT)对城市空间的影响已有一定探讨^[62-63],而对智能技术引发的空间变革研究还处于起步阶段。一方面,智能技术作为驱动力直接影响城市空间形态、结构和功能,如智能技术不仅会促使城市空间结构网络化、扁平化,形成整体分散、局部集中的多节点、模块化结构,也会促使城市空间功能复合化、碎片化。另一方面,智能技术也可通过影响人类社会的生产生活方式改变城市(实体)空间。例如,通过改变就业结构、活动区位的选择标准、活动模式与路线从而间接地、多元化地改变城市用地形态、用地结构和交通组织等^[26];通过改变产业空间格局、降低城市间要素流动成本而强化区域间分工协作,进而形成以城市群为基本形态的多中心网络型城镇体系,并以集聚大量创新要素的城市群作为整体参与全球竞争^[24]。当然虚拟空间与实体空间的交织也会改变城市空间模式。此外,人工智能技术也会介入城市形态研究,如基于规则推演、参数化等人工智能算法实现城市空间形态生成技术,大力推进了城市的智能化设计。

表3 机器学习各学派分支及其主要算法

Tab. 3 Machine learning paradigms, branches, and their principal algorithms

学派	主要算法
联结学派	人工神经网络、深度学习
类推学派	K-均值聚类、K最邻近算法、支持向量机、支持向量回归
贝叶斯学派	隐马尔可夫模型、朴素贝叶斯分类器、贝叶斯网络
进化学派	强化学习、遗传算法
符号学派	基于规则推理和案例推理的专家系统、决策树
其他	语音识别、自然语言处理、机器人

3.3.1 人工智能与社会空间重构 人工智能驱动的社会空间重构主要包括对产业空间、居住空间、活动空间、文化空间的重构。

在产业空间重构方面,“机器人”和智能制造(Intelligent Manufacturing)通过多元路径推动产业空间演变。在微观层面,由于优化了生产流程、降低了用工规模、提升了技术融合程度,使得工业建筑与工业园区紧凑化发展;在中观层面,通过改善生产效益提升企业竞租水平,通过重塑产业生态网络改变工业发展的要素需求,从而引发工业区位转移和布局重塑,表现为轻工业的服务导向型布局、重工业的交通导向型布局、创意工业的科技导向型布局;在宏观层面,受人工智能引发的区域新集聚力量的影响,产业空间结构会加速网络化,呈现“小节点一大网络”的新集聚模式^[64],同时推动智能空间载体的出现^[25]。

在居住空间重构方面,人工智能会通过作用于结构性和附着性空间要素而对居住空间产生直接影响^[25]。例如:①居住智能化建造,包括立面造型、部品配置、内部布局等。②居住办公复合型智慧社区成为新趋势。图像、自然语音智能识别以及VR虚拟现实等人工智能技术促进居住与工作、休闲、教育等功能的进一步融合,公—住复合户型、第三空间将迎来新机遇。③适老化宜居住区逐渐兴起,智慧养老技术和居家养老形态的结合成为新趋势。随着集成化智能照护系统、家居系统、安防系统、治愈性景观设计等的发展,人工智能将不断促进智慧养老,推进打造适老化社区。

在活动空间重构方面,研究表明,手机屏幕使用时间可能已超过了睡眠时间,人类活动空间已进入到虚实融合的线上线下阶段,两种渠道一元共生、融合协作^[65]。目前在AI、5G、物联网、AR、VR等新技术引领下,城市活动开始向大规模线下化、线上化趋缓转变。即线上事物与线上空间智慧程度虽然仍在衍生与提升,但纯线上的创新相对减少,进入瓶颈期。相反,越来越多的实体空间被线上赋能而转变为线下新空间,例如,线上资源赋能的VR博物馆,物联网应用赋能的智能家居空间,AR/AI技术赋能的AR/AI公园以及社区团购、无人驾驶汽车等。由于线下化的物化功能实现了实体资源和服务的跨区域投放,这会导致城市区位扁平化、去中心化,地理中心性在一定程度上开始让位于物流中心性。未来线上线下将呈泛在化、智慧化和融合化走向。此外,智能技术使居民活动在出行决策、活动形式、新时空利用等方面产生影响^[66]。

在文化空间方面,人工智能在丰富人类想象力的同时,赋能文化空间数字化和智慧化,并通过改变人类生活习惯和交往范式进而产生新的文化。一方面,虚拟文化空间蓬勃发展,不断拓展时空边界,如虚拟博物馆、元宇宙+文化空间等新兴事物应运而生。另一方面,文化空间的智慧管理迈上新台阶。例如,通过大数据分析、图像识别、语音合成、自然语言处理等技术,实现对文化遗产的智能化识别、分类、修复、解读、展示等,从而提高文化遗产的保护效率和利用水平。此外,基于人工智能技术的智慧旅游也有了一定探索^[30]。

3.3.2 人工智能与虚拟空间建构 随着技术演进,“距离已死”“地理消亡”的时空压缩已成为事实,地理实体空间对人类活动的限制、约束作用减弱,公众的时空灵活性与流动性在不断增强。人工智能在创造了更加丰富的虚拟空间的同时,也改变了人类的空间行为、生活方式以及社会生产空间结构^[67]。依托人工智能、数字孪生等新兴技术,虚拟空间在有效延拓实体空间边界并加快空间活动的同时,使更多的生产生活、研发与管理活动在虚拟空间中发生,颠覆了传统空间活动的主体关系与资源配置的逻辑^[68]。此外,基于XR技术的虚实空间(具有三维空间感、可用几何图式表示、可与实体环境实时交互)更进一步促进了城市空间的虚实融合、交互与协同^[69]。目前学界对于虚拟空间与实体空

间的关系、关联结构^[70]、时空行为^[71]、虚实交互的社区生活圈^[72]均有一定的探讨，但虚拟空间对实体空间的影响方向、虚拟空间中政治、经济的系统性治理等有待进一步探讨。

3.4 城市发展:从机器城市到智慧城市

人工智能技术的不断创新与升级，持续推动智慧城市研究与实践向更高层次发展。由此，人类社会将从机器城市时代、数字城市时代转向智慧城市时代。智慧城市被称为新型城镇化的标准，是实现创新驱动、产业升级以及缓解人类生存压力的有效途径^[67]。智慧城市建设主要包含“自上而下”和“自下而上”两种模式，政府、企业、高校和市民都承担着关键角色。在理论层面，研究主要集中在智慧城市内涵、发展阶段、支撑要素、评价体系、逻辑框架以及发展战略与对策等方面^[73]。在实践层面，一方面，智慧城市建设逐渐从技术驱动向人本主义导向转变，主要包括与智慧城市运行系统相关的各子领域和子系统的升级改造，如智慧经济、智慧交通、智慧医疗、智慧社区等。另一方面，搭载人工智能快车的规划和智慧城市建设平台也有了巨大进展（表4）。系列成果与应用平台在促进城乡规划、城市治理、国土空间管理的智能化转型以及推进智慧城市建设等方面均具有重要意义。

表4 人工智能城市前沿应用平台(部分)
Tab. 4 Cutting-edge applications platform for artificial intelligence in cities (partial)

应用领域	应用平台代表	应用平台功能
城市规划	北京大学行为与空间智能实验室 PlanGPT	文本分析、语言生成、自动排版等
	中国城市规划设计研究院 CoPlanner	国土空间规划、智慧城市、交通出行等
交通物流	美国国家人工智能中心 TILOS、AI4OPT	城市供应链、能源系统优化、可持续生态系统
	深圳市位和 GeoAI 云平台	疫情辐射追踪、社区精准画像、防疫资源均衡
	上海 ATOM AI 平台	数据物联、智慧交管、轨道预测、扬尘治理
管理决策	同济大学 CityEye	城市 CIM 大数据应用、智慧感知与智能决策
数据挖掘	上海臻图数字孪生三维可视化平台	城市模型搭建、三维可视化平台、人机交互
搜索引擎	美国 ChatGPT	数据集成和挖掘分析、优化决策、定制开发
应急安防	美国帕兰提尔公司大模型 AIP	自动预警、环境感知、过程监测等智能辅助
公共安全	英国人工智能安全研究所	舆情跟踪、面部识别、情报分析、自动报警
遗产保护	Google TensorFlow 敦煌计划	图像识别、三维建模、数字化重建

4 智能化转型下城市地理研究的困境、情境与探索路径

4.1 内生困境与外生情境

4.1.1 数据与技术发展困境 地理数据的处理经历了数字信号时代的统计模型、定量遥感时代的物理模型以及当下地理大数据时代的数据模型，人工智能引发了地理研究的第四范式革新^[47]，数据需求量愈发大，成本愈发高，应用场景也愈发复杂。目前存在以下局限亟需关注和解决。

（1）数据不确定性大，训练样本成本高。城市研究中的数据主要包括表征地表要素分布及变化的遥感数据，表征公众个体日常生活模式的通勤和社交数据，表征区域空间各维要素流动的统计数据。各类型数据属性差异大、采集渠道少、样本总量小、处理过程粗糙，需要认真筛选和有效融合才能保证提取数据的可用性。同时，人工智能训练模型的泛化能力需要巨量、多样、均衡的高质量训练样本，然而人工解译与数据标注效率低下且成本高昂，这导致目前的相关研究实际上缺乏或无法精准定位高质量的数据训练

样本。因此提高数据采集、筛选及处理的准确度,研发在小样本情况下获得稳健的模型值得进一步探索。

(2) 缺乏专用模型和算法,技术共享壁垒高。目前较为成熟的算法模型大多来自通用图像处理和计算机视觉领域,通过改造的通用模型参数繁杂、缺乏解释、泛化性能不易度量,难以融合多源异构的地理信息数据。同时,受制于数据获取、属性标注、模型训练的高昂成本,多源城市研究数据难以融合配准,人工智能应用的学科壁垒仍然较高。这些因素致使当前数据、算法和模型的共享处于较低水平,发展路径暂不清晰。

(3) 技术难以转化和应用,设备性能要求高。目前因现实城市环境的复杂性和高质量数据的不确定性,城市研究领域较为先进的算法与模型距落地生产应用仍有一定差距,提取的数据之间缺乏拓扑、属性等关键信息。同时,由于人工智能应用场景的需求增多、数据量的指数增长、算法模型的日趋复杂与精细,数据采集、存储与处理等均对高性能、高算力的计算设备提出一定要求。全国范围内的超级计算机应用与普及范围小,广大研究团队使用的计算设备性能有限甚至不足以支撑科学研究。

综上,由于数据、技术、设备等的制约,当前城市地理研究需要关注下列两个问题:

① 多尺度的城市数据暂未得到有效利用。通过不同采集方式获取的不同属性格式与时空分辨率的多元数据应用场景显著增加,但因强烈的时空异质性、噪声、缺失等因素普遍存在质量差、不确定性高等问题,横纵向均无可比性。② 实际应用所需的有效数据信息匮乏,关键数据对研究体系的影响占比过大。因人工智能算法、模型的设计水平与数据样本训练水平参差不齐,以及多尺度要素的多变量存在非平稳变化、稀疏观测或无法直接观测等情况,致使传统人工智能技术在信息提取的过程中存在一定局限。此外,研究人员对地学规律的认知仍需提升,如需注重研究的跨尺度及其效应的分析,由单一尺度静态化“表征—过程—机制”分析向多尺度动态化的复杂交互综合研究转变。

4.1.2 全球与地方发展情境 未来人工智能的快速发展和广泛应用将对全球与地方发展造成难以估量的深度影响,这为城市地理学变革提供了新兴外生情境。

(1) 全球层面,人工智能竞争与博弈可能重塑大国权力结构,引发新型地缘政治关系和国家安全问题。技术变革往往通过改变经济、军事等打破既有国际平衡进而引发权力流动。人工智能作为兼具国家战略性和市场通用性的复合型新兴技术,更是会多元、多维地介入国家与国家之间、国家与非国家行为体(如跨国公司)之间等多重复杂关系。基于Susan Strange的结构性能理论^[74],从以下4方面探讨人工智能如何重塑全球关系。① 当代国际竞争是知识与信息的竞争。人工智能通过改变知识处理、理解、存储、传播方式等实现对现有知识结构的重塑,进一步增强先发国的知识垄断权力(如率先搭建人工智能相关制度框架并进一步控制知识技术的传播)。② 人工智能通过创造新产品、改变生产和运输方式等颠覆各行各业,重构全球价值链与生产链。一方面,人工智能对劳动成本的压缩使发达国家深化制造业“去空心化”;另一方面,发达国家出于知识保护目的引导高端制造业回流本土,如美国政府大力引导芯片生产本土化。这意味着先发国在完善本国生产链、提升生产结构韧性的同时,后发国通过劳动优势参与国际劳动分工、升级本国产业结构的道路变得愈发曲折,对技术引进的依赖进一步加剧,更易被锁定在低技术产品供应位置。此外,跨国公司通过整合发展“AI+业务”,将被人工智能赋予更多的支配权和更高地位。③ 人工智能冲击现有国际安全结构的稳定性,加剧弱国安全问题。一方面,人工智能算法技术和智能武器已在现代战争中发挥作用,如在新一轮巴以冲突中,以色列军方通过驱动人工智能技术占尽上风,传统军事手段和战术在科技面前呈“以卵击石”之状,这无疑使技术弱国面临更严峻的风险。另一方面,人工智能技术的军

民两用性使相关研发企业,尤其是跨国公司拥有更大的支配权和干预能力。④随着全球金融体系的数字化和智能化,国际金融体系持续扩张与开放,一方面,“多米诺骨牌效应”风险和监管难题加剧;另一方面,先发国及资本优势体收割财富的效率进一步提升,而后发国对金融体系和头等货币的依赖性加深,资源和财富的流向不对等加剧,国家间差距以乘数效应累积。因此,在人工智能冲击下的国际政治变革中,发达国家相较于发展中国家,发展机遇更大,承受风险更小。

(2) 地方层面,人工智能可能引发系列社会影响。①“机器代人”通过提升产业自动化和智能化水平改变就业格局和劳动力市场。一方面,会引发一些传统岗位的消失和新就业机会的产生,这可能对社会公平、社会结构甚至社会价值观产生消极影响;另一方面,也会促使劳动力向第三产业转移^[75],促进产业结构升级和劳动生产率的提高,缓解老龄化带来的消极影响,推进高质量发展。②非均衡效应与“索洛悖论”等问题。创新产业和技术会受区域自身条件差异影响而对不同区域具有倾向异质性,这就导致先进区域有潜力通过智能化升级强化“头部效应”,而落后地区可能因“数字鸿沟”的扩大走向衰落,即人工智能技术可能会强化城市与区域发展及其结构体系的“马太效应”。同时,虽然“机器代人”会促进经济增长这一观点得到了学术界的普遍认可,但从长远看,有研究认为“机器代人”在未来会降低工资、减少投资从而抑制繁荣,以及人工智能技术在宏观层面可能对中国经济呈现出新“索洛悖论”特征^[76]。

综上,人工智能介入下可能导致“全球—地方”关系巨变,城市地理学应密切关注前沿话题,以地理学视角为全人类提供更科学、更具深度的现象认知与机理解析,为国家提供更有效的治理或政策方案。

4.1.3 科技伦理与人文价值发展情境 历次科技革命都会带来新的伦理问题与挑战,例如,蒸汽革命、电气革命、信息革命先后引发了关于劳工生存条件与环境污染、资本集中与贫富差距、数字隐私与信息平等问题。如今的人工智能更是一场席卷全球的社会伦理实验,深化了比以往更复杂、影响更深远的伦理问题。科技伦理问题的哲学根源在于人类在科技文明中的自由度^[77],人与技术的自由关系是否会导致新的人地关系产生?因此,这不仅是技术伦理学探寻的终极目标,也应是城市地理学关注的话题,同时也涉及到城市地理学研究的负责任与可持续应用。基于此,本文从以下3个方面阐述人工智能面临的科技伦理与人文价值发展情境。

(1) 算法与数据伦理问题。计算时代经历了巨型计算、个人计算、网络计算和普适计算阶段,与之相伴的数据收集则经历了数据库阶段、网络阶段、大数据阶段。数据与算法相辅相成,数据是来源于离散个体的原材料,算法则是由单一性机构控制的加工厂^[77]。用户作为数据的来源是被动的、透明化和去隐私化的,数据与算法都是隐藏的;掌握算法的机构则具有巨大的数据权力,数据与算法都是透明的。如此,用户与机构巨大的不对等地位,使数据权利与数据权力严重失衡,引发数据滥用、数据隐私泄露、算法黑箱以及资本介入下的信息资源垄断甚至是对关键话语权的掌控等一系列问题。此外,人类正在将诸多事情的决定权转移给具备高度智能的算法,最终可能导致尖锐的社会矛盾、完全机械化的世界观、人的齐一性和个体自由的彻底丧失。

(2) 智能机器的伦理问题。随着智能机器人逐步渗透到医疗、教育、交通等各个领域,法律与道德的双重伦理问题已逐渐显露。一方面,人类对服务型机器人的情感依赖引发系列伦理问题,如能否和机器人结婚;另一方面,人工智能技术的自动决策使责任归属变为难题,当系统做出错误决策而造成不良后果时,究竟由哪一方(如研发者、制造商、使用者甚至是机器本体)承担后果?这些难题的核心在于要判别人工智能是否属

于真正意义上的人格实体或具有道德主体地位?目前学术界普遍支持现阶段人工智能缺失自我感知,依然处于机械与工具范畴,不过仍然存在削弱人类主体地位的风险。

(3) 法律与治理盲区问题。传统的责任承担制无法真正妥善解决人工智能实践的负向结果,伦理责任机制化作为主要强调事前责任的预警或可起主导性作用。目前,国外学者对人工智能的伦理指南、可信任性等方面进行了更为全面的理论分析^[78-79];中国已关注到人工智能法治缺失会对社会传统治理程序造成冲击,甚至引发社会不安定,但此方面研究相对欠缺,未来需要政府、学术界、企业和社会公众共同努力,确保人工智能技术的发展符合社会利益和人类价值观。

当前,联合国2030年可持续发展进程过半,世界局势风云变幻,动荡不安。人类面临着前所未有的复杂问题和多难抉择,以人工智能为代表的强大科技变革力量及其对社会发展的推动作用愈发凸显。在这一背景下,要发挥引领和杠杆作用,就必须以人为本、以人文价值为参照,着眼于真正为人类增进福祉,从而推动社会可持续发展,破解“斯芬克斯之谜”。

4.2 探索路径

4.2.1 关注数据收集与技术问题,破除相关壁垒或困境

(1) 提高关键数据获取和应用能力。一方面,建立数据影响评估体系,即评估关键数据对研究成果的影响力程度,并开发相应的修正和优化方法,减少对单一数据的过度依赖。另一方面,建立重点数据的监测系统,确保数据及时、准确地获取。如通过移动设备、传感器网络等方式进行不涉及个人隐私的公众数据收集,提高数据覆盖范围和精度。同时,加强开放共享的数据平台的建设。政府、科研机构、企业应加强合作,建立统一的数据标准和协议,创建和推广城市地理数据的开放平台,使数据获取更加便捷和低成本。

(2) 注重跨学科研究,开发专用模型与算法。一方面要促进地理学、计算机科学、数学等多学科的深度融合,开发适用于城市地理研究的专用模型和算法,如先进的数据清洗和融合技术。另一方面鼓励研究人员和机构进行算法与模型的开源,降低技术共享壁垒,促进技术传播和应用。同时,创建标准化的测试集和评估标准,便于比较和改进不同算法的性能。

(3) 注重多尺度数据整合,加强技术转化与应用能力。注重微观个体数据与宏观城市数据、传统数据与时空大数据的有机结合与综合分析,为城市发展变化提供更为精确的研究结论,从而形成可推广、可实践的典型案例、方法和技术方案。同时,加强高校、研究机构与企业的合作,加快科研成果的转化,推动技术在实际中的应用。例如,高效、低成本的硬件设备的研发与推广,以及相关技术的培训和教育等。

4.2.2 关注城市空间建设与治理问题,提升城市智能转向正效应 人工智能为人地系统耦合的理解、模拟、优化等提供了有效的方法。未来城市空间建设与治理的路径将主要聚焦于以下3个方面:① 空间布局与优化。人工智能颠覆了传统城市空间结构的布局规律,这既为城市空间演化带来挑战,也为全面认知人地系统、科学归纳与预测城市空间发展规律和趋势等提供技术支持。通过城市管理、社会生产和个人生活的万物互联,可探索城市发展过程中多主体参与的人工智能动态应用。② 智能感知与自主学习。目前人工智能的具体实践仍处在模型自主学习和环境智能感知的初级阶段,尚缺少在真实世界中的大规模应用。未来需通过优化模型,将实体世界的多元要素在全要素感知的基础上进行数字化,以便实时监测、动态模拟、分析优化城市空间的可持续发展。③ 智慧决策与协同治理。通过人工智能技术对城市的发展质量、预期风险等城市问题的持续追踪、精准评估、动态诊断和预测,最终实现对城市的智慧治理、智慧规划。

4.2.3 关注多元智能转向效应研究,强化未雨绸缪能力 随着人工智能的跨越式发展,国际政治、经济、科技形势风起云涌、变幻莫测。城市地理学有责任紧跟时事,不断丰富研究视角与内容,为人类社会关注的严峻问题提供本领域见解。

(1) 人工智能介入下的地缘政治与国家安全问题。① 分析人工智能时代关键城市在国家与国际地缘政治格局中的战略地位以及人工智能技术如何提升城市战略价值,改变城市间的互动与合作关系。② 考察人工智能在国家安全、城市防御与应急系统中的应用,包括智能动态监测与分析、智能预警应急系统、灾害预测与模拟等。

(2) 人工智能介入下的社会公平与区域竞争。① 评估人工智能对不同区域、行业、人群的就业影响以及对于不同群体在资源分配、公共服务、技术运用等方面的差距,考察数字鸿沟对社会公平的影响,尤其是如何保障弱势群体的利益。② 研究人工智能如何促进区域经济增长与创新,推动区域产业结构升级,以及如何制定促进区域协调发展的策略,避免区域间发展失衡。

(3) 人工智能介入下的技术扩散与全球治理。① 分析城市间技术传播路径与模式,探讨跨国公司在技术扩散中的角色,以及技术扩散对经济、社会、环境的影响。② 探讨国际规则与治理标准,如国际合作机制的建设,以及如何在全球治理框架中体现公平与包容,确保技术扩散带来的利益能够惠及所有国家和社会群体。

(4) 人工智能介入下的人文价值与可持续发展。关注数据隐私、算法公正性、人机关系、文化遗产与保护等问题以及资源开发利用、生态环境保护、智慧城市建设、政策支持与激励机制等议题。

5 结论与展望

众所周知,历次技术革命都会引发人类思想认知、生产生活、学科研究范式的重大变革。人工智能已快速介入城市地理学并导致其发生了“智能化转型”。① 人工智能历经80多年的曲折发展历程,在20世纪90年代就为中国地理学所关注,具有较强的学科综合性与交叉性。面向人工智能的城市人地系统概念模型的提出体现了多元要素的复杂交互。② 人工智能通过分别介入城市地理学的研究对象、研究手段进而对其研究内容与方法范式产生广泛而深刻的影响。一是人工智能成为城市地理研究主要手段的趋势与倾向逐渐明显,具有高效率、低成本、学习能力强的数据处理优势;二是基于人工智能的GIS街景图像识别技术已为空间智能感知做出重要贡献,群体智能算法、机器学习、深度学习等算法深刻影响了地理智慧决策。三是人工智能引发了空间变革,不仅打造了复杂的虚拟空间,同时也重构了社会空间,包括产业空间、居住空间、活动空间和文化空间;四是人工智能助力建设智慧城市和打造城市前沿应用平台。③ 智能化转型下的城市地理研究面临数据与技术发展困境以及全球与地方变革、科技伦理与人文价值发展等情境;未来有望从突破数据与技术壁垒、关注城市空间建设与治理、注重多元智能转向效应研究等3个方面找到自身发展路径。

在人工智能时代,城市地理学亟待全面转型,积极融入新技术、新方法和新思维,在智慧与实践中得到真正的飞跃。城市地理学应从以下3个方面谋求转型与突破:① 从传统分析到智能化研究的转型。一方面,城市地理学需要充分利用大数据和人工智能技术,如通过数据挖掘、机器学习等方法进行城市问题的智能化分析和预测,提高城市管理的反应速度和决策精度;另一方面,也需要空间智能与决策支持系统的建立,如运用智能GIS平台实现多源数据的集成融合与空间分析,助力城市规划和管理。② 从单一学

科到多学科融合的转型。这既需要数学、计算机科学、统计学等学科提供方法与技术支持,也需要环境科学、社会学、人类学等提供理论与思维扩展。③从静态的单要素单尺度分析到动态的多要素多尺度综合分析的转型。现实世界是具有高度复杂性和动态性的系统,借助先进的人工智能仿真手段,实现对现实世界的动态监控与模拟,结合宏观、微观尺度进行综合性研究,取得理论与实践应用的重大突破。同时,区域规划与城市治理更加灵活,从传统静态模式转为动态管理方法,从单一角色治理转为公众参与式治理,有利于增强城市韧性,提高决策过程的透明度和公众信任度。总之,城市地理学将在人工智能的驱动下,在推动智慧城市建设、提升城市治理水平和实现可持续发展方面发挥更重要的作用。

参考文献(References)

- [1] Yuval N H. Sapiens: A Brief History of Humankind. Lin Junhong, trans. Beijing: CITIC Press Corporation, 2017. [尤瓦尔·赫拉利. 人类简史. 林俊宏, 译. 北京: 中信出版社, 2017.]
- [2] Waters C N, Turner S D. Defining the onset of the Anthropocene. *Science*, 2022, 378(6621): 706-708.
- [3] Li Xin, Yuan Linwang, Pei Tao, et al. Disciplinary structure and development strategy of information geography in China. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(9): 2094-2103. [李新, 袁林旺, 裴韬, 等. 信息地理学学科体系与发展战略要点. *地理学报*, 2021, 76(9): 2094-2103.]
- [4] Dwivedi Y K, Hughes L, Ismagilova E, et al. Artificial Intelligence (AI): Multidisciplinary perspectives on emerging challenges, opportunities, and agenda for research, practice and policy. *International Journal of Information Management*, 2021, 57: 101994. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2019.08.002.
- [5] Liao Y X, Deschamps F, Loures E F R, et al. Past, present and future of Industry 4.0: A systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, 2017, 55(12): 3609-3629.
- [6] Xu Peng, Xu Xiangyi. Change logic and analysis framework of enterprise management in the era of artificial intelligence. *Management World*, 2020, 36(1): 122-129, 238. [徐鹏, 徐向艺. 人工智能时代企业管理变革的逻辑与分析框架. *管理世界*, 2020, 36(1): 122-129, 238.]
- [7] Zhang C M, Lu Y. Study on artificial intelligence: The state of the art and future prospects. *Journal of Industrial Information Integration*, 2021, 23: 100224. DOI: 10.1016/j.jii.2021.100224.
- [8] Kocoń J, Cichecki I, Kaszyca O, et al. ChatGPT: Jack of all trades, master of none. *Information Fusion*, 2023, 99: 101861. DOI: 10.1016/j.inffus.2023.101861.
- [9] Xi Jinping. Letter of congratulation from president xi Jinping to the opening of the 2018 world artificial intelligence conference. *Gazette of the State Council of the People's Republic of China*, 2018(30): 5. [习近平. 习近平致信祝贺2018世界人工智能大会开幕. *中华人民共和国国务院公报*, 2018(30): 5.]
- [10] Wang H C, Fu T F, Du Y Q, et al. Scientific discovery in the age of artificial intelligence. *Nature*, 2023, 620(7972): 47-60.
- [11] Duan Y Q, Edwards J S, Dwivedi Y K. Artificial intelligence for decision making in the era of big data: Evolution, challenges and research agenda. *International Journal of Information Management*, 2019, 48: 63-71.
- [12] Liu P Y, Biljecki F. A review of spatially-explicit GeoAI applications in urban geography. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 112: 102936. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102936.
- [13] Zhen Feng, Kong Yu. An integrated "human-technology-space" framework of smart city planning. *Urban Planning Forum*, 2021(6): 45-52. [甄峰, 孔宇. “人—技术—空间”一体的智慧城市规划框架. *城市规划学刊*, 2021(6): 45-52.]
- [14] Wang J, Biljecki F. Unsupervised machine learning in urban studies: A systematic review of applications. *Cities*, 2022, 129: 103925. DOI: 10.1016/j.cities.2022.103925.
- [15] Borges A F S, Laurindo F J B, Spínola M M, et al. The strategic use of artificial intelligence in the digital era: Systematic literature review and future research directions. *International Journal of Information Management*, 2021, 57: 102225. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2020.102225.
- [16] Mikalef P, Lemmer K, Schaefer C, et al. Enabling AI capabilities in government agencies: A study of determinants for European municipalities. *Government Information Quarterly*, 2022, 39(4): 101596. DOI: 10.1016/j.giq.2021.101596.
- [17] Cicerone G, Faggian A, Montresor S, et al. Regional artificial intelligence and the geography of environmental technologies: Does local AI knowledge help regional green-tech specialization? *Regional Studies*, 2023, 57(2): 330-343.

- [18] Yang C H. How artificial intelligence technology affects productivity and employment: Firm-level evidence from Taiwan. *Research Policy*, 2022, 51(6): 104536. DOI: 10.1080/00343404.2022.2092610.
- [19] Liu J, Chang H H, Forrest J Y L, et al. Influence of artificial intelligence on technological innovation: Evidence from the panel data of China's manufacturing sectors. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, 158: 120142. DOI: 10.1016/j.techfore.2020.120142.
- [20] Allam Z, Jones D S. Future (post-COVID) digital, smart and sustainable cities in the wake of 6G: Digital twins, immersive realities and new urban economies. *Land Use Policy*, 2021, 101: 105201. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.105201.
- [21] Zou Weiyong, Xiong Yunjun. Spatio-temporal evolution characteristics of AI development in Chinese cities and its influencing factors. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(7): 1207-1217. [邹伟勇, 熊云军. 中国城市人工智能发展的时空演化特征及其影响因素. *地理科学*, 2022, 42(7): 1207-1217.]
- [22] Janowicz K, Sieber R, Crampton J. GeoAI, counter-AI, and human geography: A conversation. *Dialogues in Human Geography*, 2022, 12(3): 446-458.
- [23] Wang Linhui, Jiang Hao, Dong Zhiqing. Will industrial intelligence reshape the geography of companies. *China Industrial Economics*, 2022(2): 137-155. [王林辉, 姜昊, 董直庆. 工业智能化会重塑企业地理格局吗. *中国工业经济*, 2022(2): 137-155.]
- [24] Huang Jingnan, Ma Can, Zhou Jun. The trend and countermeasures of urban space change under the impact of new technological revolution led by artificial intelligence and its enlightenment to China. *Urban Development Studies*, 2023, 30(6): 16-23, 80. [黄经南, 马灿, 周俊. 人工智能引领的新一轮技术革命冲击下城市空间变革趋势、对策及对我国的启示. *城市发展研究*, 2023, 30(6): 16-23, 80.]
- [25] Wei Cheng, Chen Sainan, Shen Jing. Urban spatial evolution trend and planning response driven by artificial intelligence. *Urban Development Studies*, 2022, 29(7): 47-54. [魏成, 陈赛男, 沈静. 人工智能驱动下的城市空间演变趋势与规划响应. *城市发展研究*, 2022, 29(7): 47-54.]
- [26] 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. [孔宇, 甄峰, 张姗姗. 智能技术影响下的城市空间研究进展与思考. *地理科学进展*, 2022, 41(6): 1068-1081.]
- [27] Wu Zhiqiang, Gan Wei, Liu Zhaohui, et al. The AI city: Theory and structural model. *Urban Planning Forum*, 2022(5): 17-23. [吴志强, 甘惟, 刘朝晖, 等. AI城市: 理论与模型架构. *城市规划学刊*, 2022(5): 17-23.]
- [28] Allam Z, Dhunny Z A. On big data, artificial intelligence and smart cities. *Cities*, 2019, 89: 80-91.
- [29] Wu Zhiqiang, Zhang Xiuning, Lu Feidong, et al. Emerging technology and planning: A new paradigm guided by data informed laws. *Planners*, 2021, 37(19): 5-10. [吴志强, 张修宁, 鲁斐栋, 等. 技术赋能空间规划: 走向规律导向的范式. *规划师*, 2021, 37(19): 5-10.]
- [30] Tussyadiah I. A review of research into automation in tourism: Launching the annals of tourism research curated collection on artificial intelligence and robotics in tourism. *Annals of Tourism Research*, 2020, 81: 102883. DOI: 10.1016/j.annals.2020.102883.
- [31] Guo Kaiming, Wang Yubing. Direction of artificial intelligence progress, transformation of time allocation and the prospect of human labor evolution. *China Industrial Economics*, 2022(12): 33-51. [郭凯明, 王钰冰. 人工智能技术方向、时间配置结构转型与人类劳动变革远景. *中国工业经济*, 2022(12): 33-51.]
- [32] Luo Liangwen, Zhang Zhengqiu, Zhou Qian. Industrial intelligence and urban low-carbon economic transformation. *Business and Management Journal*, 2023, 45(5): 43-60. [罗良文, 张郑秋, 周倩. 产业智能化与城市低碳经济转型. *经济管理*, 2023, 45(5): 43-60.]
- [33] Zhao P Y, Gao Y, Sun X. How does artificial intelligence affect green economic growth? Evidence from China. *Science of the Total Environment*, 2022, 834: 155306. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155306.
- [34] Zhen Feng, Xu Jingtian, Xi Guangliang. Domestic and international urban geography researches in recent 10 years: Progress and perspectives. *Economic Geography*, 2021, 41(10): 87-96. [甄峰, 徐京天, 席广亮. 近十年来国内外城市地理研究进展与展望. *经济地理*, 2021, 41(10): 87-96.]
- [35] Li C M, Xu Y, Zheng H, et al. Artificial intelligence, resource reallocation, and corporate innovation efficiency: Evidence from China's listed companies. *Resources Policy*, 2023, 81: 103324. DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.103324.
- [36] Song Changqing. On paradigms of geographical research. *Progress in Geography*, 2016, 35(1): 1-3. [宋长青. 地理学研究范式的思考. *地理科学进展*, 2016, 35(1): 1-3.]
- [37] Fu Bojie. Geography: From knowledge, science to decision making support. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11): 1923-1932. [傅伯杰. 地理学: 从知识、科学到决策. *地理学报*, 2017, 72(11): 1923-1932.]

- [38] Song Changqing, Cheng Changxiu, Shi Peijun. Geography complexity: New connotations of geography in the new era. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1204-1213. [宋长青, 程昌秀, 史培军. 新时代地理复杂性的内涵. 地理学报, 2018, 73(7): 1204-1213.]
- [39] Turing A M, Haugeland J. *Computing Machinery and Intelligence*. Cambridge: MIT Press, 1950.
- [40] Russell S J, Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Malaysia: Pearson Education Limited, 2016.
- [41] Kaplan A, Haenlein M. Siri, Siri, in my hand: Who's the fairest in the land? On the interpretations, illustrations, and implications of artificial intelligence. *Business Horizons*, 2019, 62(1): 15-25.
- [42] Fan J. A century of integrated research on the human-environment system in Chinese human geography. *Progress in Human Geography*, 2022, 46(4): 988-1008.
- [43] Zhen Feng, Xi Guangliang, Zhang Shanqi, et al. Theoretical framework and scientific problems of smart city man-land system. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(9): 2187-2200. [甄峰, 席广亮, 张姗姗, 等. 智慧城市人地系统理论框架与科学问题. 自然资源学报, 2023, 38(9): 2187-2200.]
- [44] Xu Xueqiang, Zhou Yixing, Ning Yuemin. *Urban Geography*. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2009. [许学强, 周一星, 宁越敏. 城市地理学. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2009.]
- [45] Li Deren. The intelligent processing and service of spatiotemporal big data. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(12): 1825-1831. [李德仁. 论时空大数据的智能处理与服务. 地球信息科学学报, 2019, 21(12): 1825-1831.]
- [46] 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. [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. 地理学报, 2020, 75(7): 1523-1538.]
- [47] Cheng Changxiu, Shi Peijun, Song Changqing, et al. Geographic big-data: A new opportunity for geography complexity study. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(8): 1397-1406. [程昌秀, 史培军, 宋长青, 等. 地理大数据为地理复杂性研究提供新机遇. 地理学报, 2018, 73(8): 1397-1406.]
- [48] Sun M R, Zhang F, Duarte F, et al. Understanding architecture age and style through deep learning. *Cities*, 2022, 128: 103787. DOI: 10.1016/j.cities.2022.103787.
- [49] Wu Jiayu, Wang Shiyi, Li Hong, et al. The correlation between plant color perception and anxiety based on artificial intelligence technology. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(4): 1044-1056. [吴佳雨, 王诗奕, 李红, 等. 基于人工智能技术的植被色彩感知与焦虑关联分析. 地理学报, 2023, 78(4): 1044-1056.]
- [50] Liao J F, Tang L N, Shao G F, et al. A neighbor decay cellular automata approach for simulating urban expansion based on particle swarm intelligence. *International Journal of Geographical Information Science*, 2014, 28(4): 720-738.
- [51] Zhao Yuan, Zhang Xinchang, Kang Tingjun. An ant colony algorithm based on multi-way tree for optimal site location. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(2): 279-286. [赵元, 张新长, 康停军. 多叉树蚁群算法及在区位选址中的应用研究. 地理学报, 2011, 66(2): 279-286.]
- [52] Domingos P. *The Master Algorithm: How the Quest for the Ultimate Learning Machine Will Remake Our World*. New York: Basic Books, 2015.
- [53] Murphy K P. *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*. Cambridge: MIT Press, 2012.
- [54] Xu Y Y, Olmos L E, Mateo D, et al. Urban dynamics through the lens of human mobility. *Nature Computational Science*, 2023, 3(7): 611-620.
- [55] Zhao Qiuhaio, Jin Pingbin, Wang Bingbing, et al. Evaluation of rural tourism competitiveness based on multi-source data and machine learning: A case study of Lin'an District in Hangzhou, China. *Progress in Geography*, 2023, 42(8): 1541-1555. [赵秋皓, 金平斌, 王冰冰, 等. 基于多源数据与机器学习的乡村旅游竞争力评价研究: 以杭州市临安区为例. 地理科学进展, 2023, 42(8): 1541-1555.]
- [56] Zhao Yu, Bai Yu, Yuan Xuefeng. Comparison of machine learning algorithms for identifying poverty-stricken regions: A case of Shaanxi. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(8): 1421-1432. [赵雨, 白宇, 员学锋. 基于机器学习的贫困地区识别算法对比: 以陕西省为例. 地理科学, 2022, 42(8): 1421-1432.]
- [57] Zhang X, Liu L, Lan M X, et al. Interpretable machine learning models for crime prediction. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2022, 94: 101789. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2022.101789.
- [58] Cui Xuegang, Fang Chuanglin, Li Jun, et al. Progress in dynamic simulation modeling of urbanization and ecological environment coupling. *Progress in Geography*, 2019, 38(1): 111-125. [崔学刚, 方创琳, 李君, 等. 城镇化与生态环境耦合动态模拟模型研究进展. 地理科学进展, 2019, 38(1): 111-125.]
- [59] Grekousis G. Artificial neural networks and deep learning in urban geography: A systematic review and meta-analysis. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2019, 74: 244-256.
- [60] Goodchild M F, Li W W. Replication across space and time must be weak in the social and environmental sciences.

- Proceedings of the National Academy of Sciences, 2021, 118(35): e2015759118. DOI: 10.1073/pnas.2015759118.
- [61] Bai Ting, Deng Shiquan, Xiong Hua, et al. Research and application of urban renewal unit recognition method based on AI and remote sensing. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(6): 1517-1531. [白婷, 邓实权, 熊花, 等. 基于人工智能和遥感技术的城市更新单元识别方法研究及应用. *自然资源学报*, 2023, 38(6): 1517-1531.]
- [62] Dadashpoor H, Yousefi Z. Centralization or decentralization? A review on the effects of information and communication technology on urban spatial structure. *Cities*, 2018, 78: 194-205.
- [63] Luo Zhendong, Mao Ming, Zhang Ji, et al. Takeaway factory: Formation mechanism of new urban spaces in the mobile Internet era. *Urban Planning Forum*, 2022(4): 64-70. [罗震东, 毛茗, 张佶, 等. 移动互联网时代城市新空间形成机制: 以“外卖工厂”为例. *城市规划学刊*, 2022(4): 64-70.]
- [64] Su Xijian, Hu Anjun. Artificial intelligence's penetration of industries and regions: States, dynamics, models and challenges. *Economist*, 2023(2): 79-89. [苏玺鉴, 胡安俊. 人工智能的产业与区域渗透: 态势、动力、模式与挑战. *经济学家*, 2023(2): 79-89.]
- [65] Niu Qiang, Wu Wanxian, Wu Lei. Review and prospect of the evolution of urban activities and space in the information age. *Urban Development Studies*, 2022, 29(10): 96-106. [牛强, 吴宛娴, 伍磊. 信息时代城市活动与空间的演变与展望: 基于线上线下的视角. *城市发展研究*, 2022, 29(10): 96-106.]
- [66] 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. [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. *地理科学*, 2022, 42(3): 413-425.]
- [67] Feng Jian, Shen Xin. A review of researches on urban geography under the background of information and communication technology. *Human Geography*, 2021, 36(5): 34-43, 91. [冯健, 沈昕. 信息通信技术(ICT)与城市地理研究综述. *人文地理*, 2021, 36(5): 34-43, 91.]
- [68] Guo Rongyu, Chen Jin, Li Zhendong. Virtual space-based innovation: Space evolvement, theoretical framework and research prospects. *Studies in Science of Science*, 2024, 42(2): 383-394. [国容毓, 陈劲, 李振东. 基于虚拟空间的创新: 空间演进、理论框架与展望. *科学学研究*, 2024, 42(2): 383-394.]
- [69] Dai Zhimei, Hua Chen, Tong Lei, et al. Virtual-physical relationship of future urban space: Based on the evolution of technology. *City Planning Review*, 2023, 47(2): 20-27. [戴智妹, 华晨, 童磊, 等. 未来城市空间的虚实关系: 基于技术的演进. *城市规划*, 2023, 47(2): 20-27.]
- [70] Castells M. *The Information Age: Economy, Society and Culture* (3 volumes). Oxford: Blackwell, 1996, 1997, 1998.
- [71] Shaw S L, Yu H B. A GIS-based time-geographic approach of studying individual activities and interactions in a hybrid physical-virtual space. *Journal of Transport Geography*, 2009, 17(2): 141-149.
- [72] Zhang Shanqi, Zhen Feng, Kong Yu, et al. The evaluation and spatial optimization of community life circle service amenities from a perspective of virtual-physical space interaction: Research progress and agenda. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(10): 2435-2446. [张姗姗, 甄峰, 孔宇, 等. 基于虚实空间交互的社区生活圈服务设施评估与优化配置: 研究进展与展望. *自然资源学报*, 2023, 38(10): 2435-2446.]
- [73] Yao Chong, Zhen Feng, Xi Guangliang. Research progress and prospect of smart city in China. *Human Geography*, 2021, 36(5): 15-23. [姚冲, 甄峰, 席广亮. 中国智慧城市研究的进展与展望. *人文地理*, 2021, 36(5): 15-23.]
- [74] Bu Yanjun, Xu Kaiyi. Remodeling and intervention: An exploration of the role of artificial intelligence technology on international power structures. *Forum of World Economics & Politics*, 2023(1): 86-111. [部彦君, 许开轶. 重塑与介入: 人工智能技术对国际权力结构的影响作用探析. *世界经济与政治论坛*, 2023(1): 86-111.]
- [75] Yang Weiguo, Qiu Zitong, Wu Qingjun. A Literature Review on the Impact of Artificial Intelligence on Employment. *Chinese Journal of Population Science*, 2018(5): 109-119, 128. [杨伟国, 邱子童, 吴清军. 人工智能应用的就业效应研究综述. *中国人口科学*, 2018(5): 109-119, 128.]
- [76] Chen Nan, Cai Yuezhou. AI, accommodating capacity and economic growth in China: The new "solow paradox" and an empirical analysis using the AI patent data. *Economic Perspectives*, 2022(11): 39-57. [陈楠, 蔡跃洲. 人工智能、承接能力与中国经济增长: 新“索洛悖论”和基于AI专利的实证分析. *经济学动态*, 2022(11): 39-57.]
- [77] Li Lun. "The Truman effect": The "ideology" of the data megamachine: Dataism and rights-based data ethics. *Exploration and Free Views*, 2018(5): 29-31. [李伦.“楚门效应”: 数据巨机器的“意识形态”: 数据主义与基于权利的数据伦理. *探索与争鸣*, 2018(5): 29-31.]
- [78] Kaur D, Uslu S, Rittichier K J, et al. Trustworthy artificial intelligence: A review. *ACM Computing Surveys*, 2022, 55(2): 1-38. DOI: 10.1145/3491209.
- [79] Jobin A, Ienca M, Vayena E. The global landscape of AI ethics guidelines. *Nature Machine Intelligence*, 2019, 1(9): 389-399.

The transformation and challenges of urban geography development in the era of artificial intelligence

YANG Yongchun^{1,2}, JIAN Yuting¹

(1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education of the People's Republic of China, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The new wave of technological revolution driven by artificial intelligence (AI) has become a competitive advantage pursued by countries worldwide, and it is also expected to bring about significant innovations in urban geography. This paper reviews the development trajectory of AI and proposes a conceptual model of the urban human-environment system oriented towards AI. It systematically outlines and summarizes the involvement of AI in urban geography research from four perspectives: data representation, scenario applications, spatial transformations, and urban development. Additionally, it identifies the challenges, contexts, exploration paths, and future prospects faced in the intelligent transformation of academic disciplines. The study finds that: (1) The interactions between elements within the urban human-environment system oriented towards AI are becoming increasingly complex. (2) The trend of AI becoming a primary tool in urban geography research is increasingly evident, offering high efficiency, low cost, and strong learning capabilities in data processing. This has significant implications for spatial perception and intelligent decision-making. AI has sparked spatial transformations, not only creating complex virtual spaces but also reconstructing social spaces. Additionally, AI supports the development of smart cities and the establishment of cutting-edge urban application platforms. (3) Urban geography research in the context of intelligent transformation faces challenges related to data and technology, as well as the broader contexts of global and local changes, technological ethics, and the development of humanistic values. Future development paths could explore overcoming technical barriers, focusing on urban spatial construction and governance, and emphasizing the research on the effects of multiple intelligence shifts. The discipline urgently needs comprehensive transformation and upgrading.

Keywords: artificial Intelligence; fourth industrial revolution; urban geography; disciplinary transformation; urban human-earth system; virtual space; smart cities