引文格式:李德仁,秦昆,张过,等.社会遥感地理计算的研究进展与创新[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(1):1-21.DOI:10.13203/j.whugis20250371

Citation:LI Deren,QIN Kun,ZHANG Guo,et al.Development and Innovation of Geo-computation for Social Remote Sensing[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(1):1-21.DOI:10.13203/j.whugis20250371

社会遥感地理计算的研究进展与创新

李德仁[1,2] 秦 昆[1] 张 过[2] 李 熙[2] 王少华[3] 卢宾宾[1]
许 刚[4] 肖雄武[2] 关 晴[2] 张静怡[1] 章思源[4] 周 扬[1]

1 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079
2 武汉大学测绘遥感信息工程全国重点实验室,湖北 武汉,430079
3 中国科学院空天信息创新研究院遥感与数字地球全国重点实验室,北京,100094
4 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉,430079

摘 要:遥感已经从传统的对地观测发展到既对地观测,也对人、对社会进行观测。遥感地理信息科学与技术、计算理论与方法,与社会人文科学不断交叉融合,形成了一个新的交叉学科方向——社会遥感地理计算。首先提出了社会遥感地理计算的概念及研究框架,然后系统阐述了社会遥感地理计算的学科分支及研究进展(包括遥感经济学、遥感新闻学、遥感国际关系分析、遥感战场环境监测、遥感健康环境分析等),探索了社会遥感地理计算的研究方法(包括空中视角与空间思维、时空智能、社会感知与社会计算、地理计算与社会地理计算、空间数据挖掘与夜光遥感、时空大数据与人工智能、遥感大模型与知识图谱、地理空间优化,以及相关软件工具和平台等),最后对社会遥感地理计算的关键问题和未来发展方向进行了总结和展望。

关键词:社会遥感地理计算;遥感经济学;遥感新闻学;遥感战场环境监测;遥感大模型;空间数据挖掘;夜光遥感

中图分类号: P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-12-10

DOI:10.13203/j.whugis20250371 **文章编号**:1671-8860(2026)01-0001-21

Development and Innovation of Geo-computation for Social Remote Sensing

LI Deren[1,2] *QIN Kun*[1] *ZHANG Guo*[2] *LI Xi*[2] *WANG Shaohua*[3] *LU Binbin*[1] *XU Gang*[4]
XIAO Xiongwu[2] *GUAN Qing*[2] *ZHANG Jingyi*[1] *ZHANG Siyuan*[4] *ZHOU Yang*[1]

1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China
2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China
3 State Key Laboratory of Remote Sensing and Digital Earth, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China
4 School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Remote sensing has evolved from traditional Earth observation to observation of both the Earth and people (society). Remote sensing and geographic information science, computational science, and social sciences are increasingly intersecting and merging, forming an innovative interdisciplinary field: Geo-computing for social remote sensing. First, we propose the concept and research framework of geo-computation for social remote sensing, and systematically elucidate the disciplinary branches of geo-computation for social remote sensing and their research progress, including remote sensing economics, remote sensing journalism, remote sensing and international relations analysis, battlefield environment remote sensing monitoring, remote sensing and health environment analysis, and so on. Second, theories and methods of geo-computation for social remote sensing are explored, including aerial perspective and spatial thinking,

基金项目:国家自然科学基金(42171448,42571480);中央高校基本科研业务费专项资金(2042024kf0005)。

第一作者:李德仁,博士,教授,中国科学院院士,中国工程院院士,国际欧亚科学院院士,国际宇航科学院院士,主要从事地球空间信息科学的科研与教学工作,最近提出并推进时空智能学的科研和人才培养工作。drli@whu.edu.cn

通信作者:秦昆,博士,教授。qink@whu.edu.cn

spatiotemporal intelligence, social sensing and social computation, geo-computation and geo-computation for social sciences, spatial data mining and nighttime light remote sensing, spatiotemporal big data and artificial intelligence, remote sensing large models and knowledge graphs, geospatial optimization, as well as software tools and platforms. Finally, the key issues and future development directions of geo-computation for social remote sensing are summarized and prospected.

Key words: geo-computation for social remote sensing; remote sensing economics; remote sensing journalism; battlefield environment remote sensing monitoring; remote sensing large models; spatial data mining; nighttime light remote sensing

传统遥感是指在不直接接触的情况下,用遥感传感器(遥感相机)收集地球上目标物的电磁波,对目标物进行远距离感知的一门探测技术。传统遥感是对地物目标物理属性、几何特征的探测感知与分析[1-2]。传统的遥感技术为发生在地球表面上的自然物理现象提供了有力的技术支持,但是对社会发展提供的支持还较少。随着遥感技术、定位技术的发展,遥感已经从传统的对地观测发展到既对地观测,也对人、对社会进行观测[3]。遥感测绘学科也逐步从单学科走向了多学科交叉[4]。遥感源自摄影测量,是测绘学的组成部分,后来国际上称之为摄影测量与遥感。但是,遥感技术发展迅速,应用范围不断扩展,通过与相关学科交叉融合,逐步发展了资源遥感、环境遥感、气象遥感、海洋遥感、农业与林业遥感、城市遥感和测绘遥感等[4]。遥感学科建设和人才培养也同步快速发展,2002年遥感科学与技术本科专业在武汉大学首届招生,2022年教育部正式设立“遥感科学与技术”一级交叉学科门类[5],遥感学科呈现蓬勃发展的态势,中国遥感学科已经整体进入世界第一方阵。

社会科学是用科学的方法研究人类社会种种现象的各学科总体或其中的任一学科,如社会学研究人类社会,政治学研究政治、政策和有关的活动,经济学研究资源分配,新闻学研究新闻的传播及载体。社会科学的研究主要是采用问卷调查、社会实验等方法收集数据和资料,利用田野调查、个案访谈、参观考察等方法进行质性研究。这些传统方法存在数据收集慢、周期长、费用高等问题,迫切需要引入高新技术提升社会科学研究方法的效率和效果。从20世纪70年代开始,社会科学研究出现了空间转向,即将空间的社会本体论、空间概念等引入社会科学研究[6-7]。法国思想家福柯是哲学社会科学领域空间转向的先驱。福柯虽然没有建立起一般化的空间理论,但是他关于空间的思考影响和启迪了社会科学理论界,使“空间”开始成为哲学社会科学研究的重要议题[6-7]。社会科学研究的另一个转向是计算科学。2009年发表于*Science*的论文“Computational Social Science”[8]掀起了社会科学研究的计算化热潮。计算社会科学利用先进的计算技术、信息技术和智能技术等定量分析方法,研究复杂的人类行为及社会运行,既体现了日趋复杂的人类活动和网络社会所提出的迫切现实需求,也促进了计算机技术及多学科交叉所产生的新方法、新工具的快速发展[8]。

在此背景下,武汉大学于2018年1月8日联合芝加哥大学、密西根大学、哈佛大学等成立了社会地理计算联合研究中心,旨在建设有国际影响力的社会地理计算研究、咨询与服务机构。随后,武汉大学于2018年、2019年分别举行了两届社会地理计算研讨会。2023年,中国遥感应用协会正式成立社会遥感地理计算专业委员会,并于2024年5月17日—19日在武汉大学成功举行第三届社会遥感地理计算暨中国遥感应用协会社会遥感地理计算专业委员会学术年会,于2025年7月11日—13日在新疆大学成功举行第四届社会遥感地理计算暨中国遥感应用协会社会遥感地理计算专业委员会学术年会。这些学术研讨会吸引了全国数百名学者积极开展社会遥感地理计算的跨学科研究和创新探索。社会遥感地理计算的研究呈现蓬勃发展的态势,产生了一批相关的学术研究论文和一些相关的新理论、新方法、新工具。在分析社会遥感地理计算研究现状和发展趋势的基础上,本文对社会遥感地理计算的概念、研究框架、学科分支及进展、研究方法进行了探索,拟为推动社会遥感地理计算的未来发展奠定基础。

1 社会遥感地理计算的概念及研究框架

随着技术的发展,遥感已经从传统的对地观测发展到既对地观测,也对人、对社会进行观测。

如图 1 所示,传统遥感是对地观测,通过遥感传感器感知和探测地表地物的物理特性和几何特征。将遥感对地观测技术与定位设备、各种传感器相结合,可以有效地对人观测,特别是对人的群体活动特征进行感知和探测[3,9]。将遥感对地观测与对人、对社会观测相结合,从而研究地理学的核心问题——人地关系。通过研究人的活动(类别、强度、叠加)及其对环境的影响,从而对人地关系进行定性分析和定量研究。

社会遥感地理计算的概念框架如图 2 所示。社会遥感地理计算是在遥感地理信息科学与技术、计算理论与方法的支持下,从时空观、计算科学视角,研究和探讨社会人文科学的各种理论、方法和应用。空间综合人文学与社会科学侧重于“空间综合”[10],社会遥感地理计算侧重于“地理计算”。

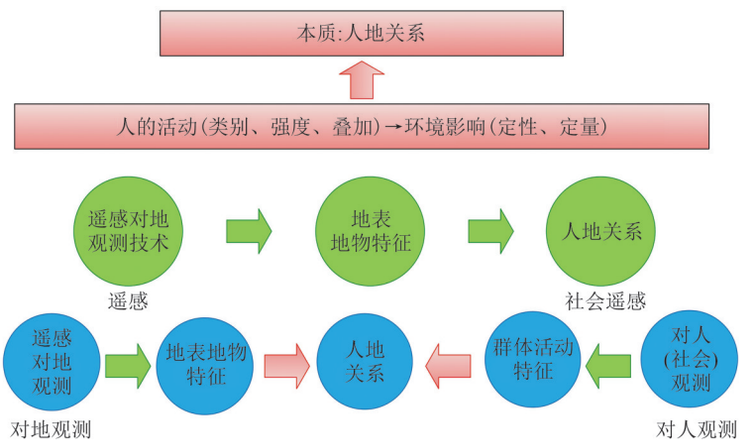


图 1　从对地观测到既对地观测也对人、对社会观测

Fig. 1　From Earth Observation to Observation of Both Earth and Human/Society

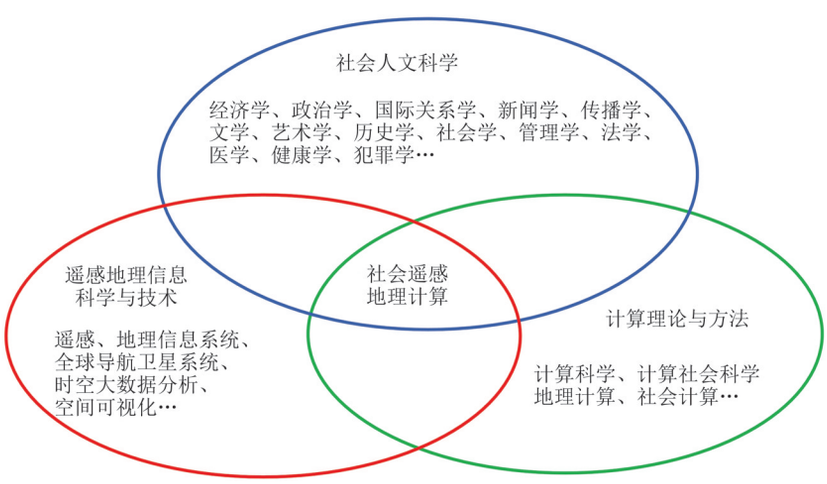


图 2　社会遥感地理计算的概念示意图

Fig. 2　Conceptual Diagram of Geo-computation for Social Remote Sensing

社会人文科学包括经济学、政治学、国际关系学、新闻学、传播学、文学、艺术学、历史学、社会学、管理学、法学、医学、健康学、犯罪学等。在社会人文科学中引入遥感地理信息科学与技术、计算理论与方法,利用遥感、地理信息系统、全球导航卫星系统,以及时空大数据分析技术、空间可视化技术等,为社会人文科学提供空间化、可视化的技术手段和方法。利用计算科学、计算社会科学、地理计算方法、社会计算方法等,为社会人文科学提供计算模型和定量分析手段。通过将遥感地理信息科学与技术、计算理论与方法,与社会人文科学交叉融合,产生了社会遥感地理计算的一系列分支和学科发展方向,如遥感经济学、遥感新闻学、遥感国际关系分析、遥感战场环境监测、遥感健康环境分析等。

2　社会遥感地理计算的学科分支及研究进展

社会遥感地理计算是遥感地理信息科学与技术、计算理论与方法与社会人文科学交叉融合产生的新理论、新方法,逐步衍生出一系列学科

分支。例如,与经济学交叉融合产生了遥感经济学,与新闻学交叉融合产生了遥感新闻学,与国际关系学交叉融合产生了遥感国际关系学等。同时,遥感在战场环境监测、健康环境监测等方面也发挥了重要的作用。

2.1 遥感经济学

遥感地理信息技术在经济学领域的应用不断拓展,逐步形成了遥感经济学。遥感经济学是遥感地理信息科学与经济学跨学科交叉融合产生的新的学科分支,是指将利用遥感技术获取的地球表面信息(如夜间照明、土地利用、植被指数等)作为经济活动的代理变量,结合计量经济学模型与空间数据分析方法,对社会经济现象进行多尺度的监测、评估和预测的交叉学科。

相较于传统的社会经济统计数据,遥感数据具有覆盖范围广、时空分辨率高、获取成本相对低且客观性强等优势,能够有效弥补传统经济统计方法的时效性滞后、统计口径不一致、空间细节缺失等方面的不足[11-12]。文献[13]的研究是该领域的奠基之作,它系统地验证了夜间灯光与国内生产总值(gross domestic product,GDP)之间的强相关性,指出国家层面的夜间灯光亮度与GDP增长高度相关。这一发现改进了经济增长的测度精度,探索了遥感数据在经济学研究中的重要作用,为理解区域经济活动提供了全新的客观视角。遥感经济学的分析基础在于挖掘不同遥感数据源背后所蕴含的经济语义。其中,夜间灯光数据是应用最为广泛的经济代理变量[13-16],能够捕捉城镇化水平、电力消耗及综合经济活动强度等[12]。此外,高分辨率光学影像在提取微观经济特征方面也具有独特优势,通过提取土地利用类型或土地覆盖类型[17]、建筑物规模[18-19]、屋顶类型[19]等物理特征,将其作为评估家庭资产财富和基础设施投资的微观指标。

遥感经济学基于多源遥感数据进行经济学问题分析,取得了一系列成果。例如,利用长时序植被指数估算农业产出[20],利用热红外波段监测工业设施的热异常与开工率[21],从而构建起“天-地”视角的经济感知网络。在宏观经济分析方面,利用遥感数据进行经济增长测度与区域差异分析[13];利用多源遥感数据深入分析区域发展的不均衡性及区域经济发展阶段的演变[21];结合日间光学影像与夜间灯光数据,利用深度学习模型精准识别贫困聚集区,在缺乏普查数据的非洲地区实现了对家庭消费和福利水平的低成本、高精度估计[22]。在城市微观经济分析方面,遥感技术为评估城市质量提供了新手段,包括监测城市扩张形态、评估商业街区的夜间经济活力等[23]。特别是在房地产市场研究中,通过对比夜间灯光强度与建筑物信息,计算城市住房空置率,为城市规划与资源配置提供预警[24]。遥感数据的高时效性使其成为评估突发冲突冲击经济后果的理想工具。例如,利用夜光数据量化地缘冲突对区域经济的破坏程度[25]。

随着数据维度的丰富与计算能力的提升,遥感经济分析的方法正从传统统计向地理人工智能(geographic artificial intelligence,GeoAI)的范式演进。面板数据回归[13]、地理加权回归(geographically weighted regression,GWR)[26]及多尺度GWR(multiscale GWR,MGWR)[27]等空间计量经济学方法,重点在于处理经济变量的空间溢出效应与非平稳性,揭示经济现象的空间异质性特征。然而,传统代理变量可解释性不强,因此部分研究开始尝试在光学信号、雷达散射机制与社会经济指标之间建立更加明确的过程关联模型,以提升指标反演的透明度[19,22]。深度学习技术的引入彻底改变了特征提取的方式。以卷积神经网络为代表的算法能够自动从高分影像中提取复杂的社会经济特征[28]。当前的前沿研究正致力于构建多源融合的分析框架,将遥感影像与社交媒体、手机信令、兴趣点(point of interest,POI)等跨模态的社会感知数据深度融合,从而实现从单一数据观测向综合社会计算的跨越。

遥感经济学的未来发展仍面临诸多挑战。作为经济活动的代理变量,遥感观测数据存在物理信号饱和及与经济价值非线性对应的固有偏差[29]。多源异构数据的融合尚缺乏统一的时空基准与语义映射标准,限制了多模态数据的深度挖掘。在自动化、智能化的经济分析快速发展的背景下,隐私泄露风险、数据伦理问题以及敏感经济设施暴露等带来的风险,需要学界在推动技术进步的同时加强治理。

2.2 遥感新闻学

遥感新闻是指在新闻生产过程中,以遥感技术采集到的对地观测数据为核心信息源和主要表现载体,通过图像、数据与可视化的综合运用来揭示新闻事实的一类新兴新闻形态,是在新闻传播学与遥感科学基础上形成的多学科交叉方向。遥感数据广泛嵌入新闻生产,正在重塑新闻实践与理论,呈现出由技术礼赞与可行性论证,

走向学科自觉与概念整合,再到叙事转向、生产流程研究,以及批判性反思并行的发展脉络。

早期新闻机构对遥感技术的利用较为零散,多依托军事、气象、环保等专业部门提供的云图、监测图进行偶发性引用。比如在20世纪下半叶,西方媒体偶尔引用侦察卫星影像曝光苏联军港等敏感设施,在切尔诺贝利核事故、“9·11”事件等重大事故中借助商业卫星照片进行独立核查[30]。这些应用大多是停留在个案层面的点状实践,卫星图像更多充当重大事件报道中的辅助画面或证据,还没有形成稳定的新闻类型。

随着中国进入高分专项时代,新华社等主流媒体开始真正把卫星遥感影像作为主体叙事资源,学界由此产生了更强的学科自觉。研究者通过对卫星新闻发展的梳理,总结出“尝试-探索-内涵深化”的实践路径[31]。从以《60万米高空看中国》[32]等卫星技术俯瞰视角为特色的新闻形式创新,逐步过渡到在生态环境、减灾防灾、区域发展等议题上常态化使用卫星遥感数据,最终形成了稳定的栏目和品牌[33]等系列产品,成为新闻制作的一般工具,并服务于更细化的新闻内容。以武汉大学和新华社合作提出的遥感新闻学[30]为标志,随后的一系列相关研究[34-35]开始尝试从学科层面搭建理论框架,将遥感影像获取、精处理、信息提取、叙事策略和可视化表达统摄在一个完整的研究对象之内,提出遥感新闻学这一更具专业指向性的概念,以区别于无人机等鸟瞰式新闻、其他传感器新闻和数据新闻形态。

在概念整合基础上,一部分研究视角逐渐转向针对遥感数据特点的叙事与组织生产。研究指出,卫星新闻以垂直俯瞰、高空“超视角”和“一镜到底”的空间游走,打破了传统新闻以时间线为主的线性叙事[34-35],将宏观场景、长期过程和结构性变迁转化为可视化的空间故事,推动新闻从事件报道走向场景报道[36]。另一部分研究视角则聚焦生产流程与组织模式。以新华社卫星新闻实验室为例,从选题策划、卫星调度与数据采购、图像处理与解译、编辑加工到多平台分发,梳理出新闻任务驱动的遥感链式服务模式,强调媒体机构、科研院所、商业遥感公司的协同,以及卫星新闻在富媒体矩阵中与数据新闻、地图新闻、互动H5(一种带超链接的推文)、长纪录片等形态之间的模块化组合关系[37-39]。

一些文献对遥感新闻做了系统实证化研究,并进行了批判性反思。例如,文献[40]运用新闻要素自动识别技术,对自20世纪80年代以来采用卫星遥感技术的326篇英文媒体报道进行了系统分析。研究发现,卫星遥感新闻一方面将新闻当事人从人物转向物体与空间场景,另一方面在议题上仍主要聚焦传统国际新闻关注的跨国冲突、人道危机与全球环境,说明遥感技术更多只是帮助媒体突破空间屏障的工具,而非改变其既有议题选择和价值取向。与此相呼应,从视觉文化与媒介批判角度出发的研究开始反思卫星新闻的景观化倾向及其潜在风险。相关学者指出,“鸟瞰式”“太空之眼”在强化宏大视野、国家叙事的同时,也可能造成“景观在场、真实缺场”,从而掩盖了微观个体的复杂性[41]。围绕俄乌冲突等案例的讨论表明:卫星图像作为一种权威、强势的证据形式,一方面有助于公开源情报核查与反虚假信息;另一方面若缺乏必要的方法说明与多源交叉验证,也可能被纳入舆论战和地缘政治的工具化使用之中[42]。

遥感新闻的研究已从早期以技术优势和应用前景为主的技术乐观主义论述,逐步演化为兼顾概念建构、叙事机制、生产机制、传播效果与规范反思的多维框架,并开始面对其在景观化、技术权力与舆论博弈方面的潜在问题。这一发展脉络既折射了遥感技术在新闻业中的深度嵌入,也表明未来相关研究需要从技术赋能走向规范约束,同时在着眼宏大空间叙事与具体人文关怀之间寻找新的平衡点。

2.3　遥感国际关系分析

遥感与政治及国际关系学的关联主要体现在地缘政治分析、国际关系时空大数据分析等方面。

地缘政治是国际关系的地理学,美国学者索尔·伯纳德·科恩聚焦地理环境与人文因素对国际关系和外交政策的影响分析,全面系统地阐述了地缘政治结构与理论、冷战及其后果等类型,并系统考察了北美洲、滨海欧洲及欧亚大陆等区域的战略特征[43]。地缘政治学是以全球战略的观点,分析地理现实与人类事务间的联系,探究其中地理要素的规律,为治国和战略制定服务的理论[44]。当前,全球地缘政治热点频发,从欧洲到中东再到亚太,地区局势错综复杂,全球地缘政治面临诸多不确定因素[45]。遥感具有全面宏观、高空间分辨率、高时间分辨率的优势,卫星观测、遥感数据采集和分析可以为地缘政治分析提供数据基础和技术支持。

2021年,国际期刊*Remote Sensing*组织了“Remote Sensing of Geopolitics(遥感地缘政治)”专辑。在该专辑中,文献[46]以缅甸为例,通过整合遥感影像、人群活动数据和政治经济数据等,对武装冲突和地缘政治在推动森林砍伐中的作用进行了探索研究。文献[47]利用多源遥感影像产品和武装冲突时空数据,对伊拉克库尔德斯坦地区战火、冲突和土地的地缘政治进行了分析。

进入21世纪以来,国际关系表现得更为复杂和多变,给世界的经济、安全、外交等带来了深刻的变化。国际关系研究具有复杂性、及时性、时空性等特点,迫切需要时空大数据分析技术为其提供新的思路和技术手段。文献[48]提出了一种基于复杂网络和时空大数据分析的国际关系研究方法,以全球事件、语言与语调数据库(global database of events, language, and tone, GDELT)的数据为基础,利用复杂网络方法构建国家交互网络,通过网络特征统计分析国家之间的交互关系,从而探测国家冲突事件交互网络的时空变化。文献[49]以中美贸易战为例,研究特殊事件中国际关系网络的时序演化模式,利用GDELT数据构建国际关系网络,用动态社区划分方法对其进行时序演化模式探测,并结合点分布模式、核密度分析、空间自相关等空间分析方法对国际关系进行空间特性分析。文献[50]基于新闻数据,对突发公共卫生事件下“全球-中国”国际关系进行分析和讨论,从时空可视化角度展示了国际关系的变化特征,并结合突发公共卫生事件期间的国际重要事件,分析了引起国际关系变化的原因。

2.4 遥感战场环境监测

遥感技术可以为战场环境监测提供有力的技术支撑。在战前筹备阶段,遥感技术提供了方便、快捷的军事侦察手段,通过遥感监测搜集和获取军事情报,为战略部署提供数据支持。在战争发生过程中,利用遥感技术提供数据保障,以及战时的快速支援。在战后阶段,利用遥感技术进行战场损失评估,为战后重建提供支撑。

与战争有关的城市破坏是一个重大的全球性问题,影响着国家安全、社会稳定、人民生存和经济发展[51]。基于卫星遥感的战场环境智能化动态监测的技术难点是如何实现对城市战争损毁的时序动态监测、多维度精准定量评估(包括解决大范围建筑物结构损毁等级的全自动确定问题)与趋势分析,进而完成从“遥感精准感知”到“社会地理计算和认知”的跨越。武汉大学李德仁、肖雄武研究团队利用珞珈三号01星、东方慧眼高分01星等,自主地对境外冲突区域的高分辨率卫星影像数据进行周期性获取,将人工智能与高分辨率遥感卫星数据相结合,实现了时序卫星遥感影像数据的智能化处理,提出了基于高精度时序变化检测的城市多类别地物战争损毁遥感动态监测方法,实现了巴勒斯坦-以色列冲突中加沙地带导弹弹坑(包含位置、大小、日期和数量)和损毁建筑(包含位置、建筑物类别、日期和损毁等级)的近实时检测,以及对不同省份、不同日期的不同类别地物(包含建筑、农田)的战争损毁定量评估,并对不同类别建筑物损毁等级进行自动评估[51]。该研究自动检测了3 747个导弹弹坑的位置、尺寸及日期,并精确量化了建筑损毁比例(截至2024年3月达58.4%),其中完全损毁占15.4%[51]。这些数据为国际组织评估人道危机提供了不可辩驳的实证。研究强调巴以冲突中的加沙地带迫切需要立即停火、释放人质,以防止更为严重的城市破坏和人员伤亡,并强烈呼吁国际社会对加沙地带开展人道主义援助和战后重建[51]。该研究通过科学数据剥离政治叙事,以技术公信力推动了国际干预从争议转向行动共识。

自2011年爆发的叙利亚内战给叙利亚国家和人民带来了巨大的灾难,平民伤亡惨重、大量基础设施被毁,国家陷入长期创伤。对叙利亚内战造成的人道灾难进行客观评估是国际社会高度关注的难题。武汉大学李熙和李德仁在*International Journal of Remote Sensing*期刊上以封面论文形式发表了题为“Can Night-Time Light Images Play a Role in Evaluating the Syrian Crisis?”的研究成果。该成果通过夜光遥感影像评估了叙利亚内战以来(2011-03—2014-02)人道主义危机的时空变化规律,获得了学术界的高度关注,也引起了联合国和多个国际组织的关注[25]。李熙团队在*Nature Food*期刊发表的一项研究成果显示,20多年间的战争给叙利亚带来了巨大的粮食危机[52]。但是,战争并非叙利亚耕地减少的首要因素。通常情况下,战争会导致抛荒。在叙利亚西北部城市阿勒颇、东南部代尔祖尔地区等战争胶着地区,确实显示出耕地减少、农作物减产,但在大马士革以及局势相对稳定的库尔德地区,许多原本种植果树的土地变成了农田,耕地面积出

现大幅增长[52]。

重大自然地质灾害和武装冲突往往对城市建筑造成严重破坏。北京师范大学张立强团队在*Nature Cities*上发文[53],用遥感图像监测城市损毁状况,借鉴自然语言处理的思路提出了一种时序知识引导的检测方案,大幅度提升了城市损毁识别的结果,分别用0.5 m和10 m分辨率的遥感图像检测了2011—2018年叙利亚内战期间6座城市的建筑损毁情况,用10 m分辨率的哨兵2号数据检测了2022—2023年乌克兰4座城市的建筑损毁情况[53]。

2.5　遥感健康环境分析

遥感技术通过跨尺度、连续化和多变量的观测能力,为理解环境变化与人类健康之间的系统性联系提供了关键的数据基础。人类健康本质上依赖于气候、生物多样性、水循环与土地系统等生命支持系统的稳定性。遥感通过获取地表温度、植被活力、土地利用变化等高时空分辨率信息,构建环境变化、生态系统响应与健康影响之间的因果链,为识别健康风险提供了稳定且可比较的证据支持[54]。

遥感作为环境暴露评估的重要数据源,在空气污染、城市热暴露、气候变化、水体污染以及绿地可达性等领域展现了关键作用。通过卫星反演气溶胶光学厚度并结合化学传输模型,可估算地表$PM_{2.5}$浓度的空间分布,为心血管及呼吸系统疾病负担的空间评估提供可靠基础[55]。热红外遥感产品能够刻画城市热岛效应的强度与范围,为分析高温暴露与热相关疾病的关联提供重要支撑[56]。遥感观测在刻画气候系统变化及其对人群暴露风险的影响方面具有重要作用,为气候驱动的健康风险评估奠定了基础[57]。同时,利用高分辨率遥感监测城市绿地覆盖、水体分布与水质变化,有助于评估绿地不足、水体污染或水环境退化等对人群健康的潜在影响[58-59]。

遥感技术对解析生态系统扰动与健康风险之间的因果机制发挥着桥梁作用。以亚马逊地区为例,基于陆地卫星的森林覆盖时序监测表明,森林砍伐与边缘化增加改变了局地微气候条件,进而提高了按蚊繁殖适宜性,并显著增加了疟疾的传播风险[60]。在高密度城市环境中,高分辨率遥感提取的居住绿地暴露与长期精神健康追踪数据结合显示,儿童时期暴露于更高水平绿地覆盖能够显著降低成年后的心理疾病发生风险[61]。遥感观测的气候变异指标与大量人口健康观测数据相结合,揭示了气候振荡对儿童营养状况的系统性影响[62]。长期气候遥感指标与宿主生态数据的整合表明:温度和降水等气候扰动能够驱动汉坦病毒暴发的年际波动,为基于气候预报的干预规划提供依据[63]。基于卫星追踪数据构建的迁徙网络模型进一步展示了遥感在理解禽流感等跨区域病原体传播中的应用价值[64]。这些研究通过整合环境变量、生态过程与健康数据,使生态系统扰动对人类健康的作用链条更加明确。

遥感技术通过提供空间化、时空连续的环境监测信息,增强了公共卫生系统应对环境风险的能力。例如,野火烟雾的火点监测与气溶胶浓度反演可用于量化烟雾暴露水平,进而评估其对呼吸系统疾病急诊和住院的健康负担[65]。洪涝发生后,利用合成孔径雷达和多光谱影像快速提取淹没范围,可用于识别水源性疾病爆发的高风险区域,为应急公共卫生干预提供空间依据[66]。基于地表温度产品与人口数据构建的热脆弱性图可用于支持城市在极端高温事件中的资源配置和风险管理[67]。这些研究说明,遥感技术强化了环境、生态与健康之间的联系,可以有效解释城市化背景下健康风险的空间分异,为理解城市环境与公共卫生之间的耦合机制提供关键证据[68]。

2.6　社会遥感地理计算的其他研究

遥感可以为社会人文科学研究提供丰富的数据,可以将遥感影像作为社会人文科学研究的底图,从而在遥感底图上展示各种社会人文要素,遥感与社会人文科学的跨学科交叉融合具有广泛的应用领域,除了前述5个分支方向以外,还有以下代表性研究和应用。

1)批判性遥感。批判性遥感应用遥感数据揭露不公平性事件[69]。文献[70]提出了一个利用批判性遥感技术进行环境正义斗争的框架,该框架包括4方面的内容:(1)理解遥感数据的技术特性及其在环境受损地区的作用;(2)列出了在争取环境正义的斗争中可以发挥作用的数据资源清单;(3)将环境冲突与可操作的遥感数据进行匹配,并探索如何将遥感数据用于加强环境正义的活动;(4)制定环境正义运动与遥感从业者联盟的指导方针[70]。文献[71]利用批判性遥感技术分析了塞扬皮纳尔国营农场在土耳其-叙利亚边境地区形成中的作用。

2)遥感在犯罪地理学中的应用。犯罪行为与周边环境密切相关。利用遥感技术和时空分

析方法,可以探测城市环境中引起犯罪的条件,从而为犯罪防控和警务决策提供技术基础。文献[72]构建了基于时空行为视角的犯罪地理创新研究框架,系统梳理了犯罪地理中时空行为的理论基础,评述了不同犯罪主体时空活动对犯罪空间格局影响的研究现状,讨论了与犯罪地理相关的时空行为研究前沿。文献[73]利用遥感技术评估了哥伦比亚麦德林市的犯罪和城市布局之间的关系,利用研究区的高分辨率遥感影像,并结合生活质量调查数据、凶杀案犯罪数据等进行分析。研究发现,高凶杀率区域的城市环境更加拥挤杂乱,小型建筑或住宅单元彼此紧挨,屋顶材料也各不相同。文献[74]分析了2003—2023年20年间英文文献中关于遥感数据在城市犯罪分析中的应用。研究表明,遥感数据具有高时空分辨率的特点,可以在不同程度上支持识别城市环境中的犯罪诱因,如街道、道路、地界、住房密度、植被特征和密度以及光照水平等。

3)遥感考古。遥感考古是遥感科学与考古学的学科交叉融合[75]。利用各种遥感技术,可以全面、立体、快速有效地探明地上和地下的古遗址信息。遥感技术在考古中发挥着非常重要的作用,取得了一系列重要成果[75]。例如,文献[76]开展了楚都遥感考古工作,利用卫星影像、航空像片和地形图,结合考古挖掘资料,通过实地考察绘制了纪南城的遗迹分布图。文献[77]将遥感考古学进一步发展为空间考古学,指出超越遥感的空间信息技术是空间考古的倚重技术。空间考古是遥感考古的进一步发展,空间考古学在推进遥感考古学发展的同时,也契合了当前考古学空间思维的发展趋势,并推动了遥感考古学研究的重大变革[78]。雷达遥感具有穿透性,在热带雨林或干沙场景古遗存探测中具有非凡潜力。雷达遥感在遗产地及赋存环境大范围、近实时、非侵入监测和评估中具有不可比拟的优势,已成为光学遥感考古的有益补充[79]。文献[80]利用深度学习和激光雷达遥感实现了楚纪南故城古城墙的精确识别。

4)遥感查违与遥感督察应用。违章建筑查处、违法违纪用地检测识别是城市管理部门、土地管理部门的重要职责,其实质属于社会治理问题。利用遥感技术的高时空分辨率特性可以实现对违章建筑、违法用地的“早发现、早制止、早查处”,从而为国家和社会的发展作出重要贡献。例如,自2008年北京奥运会成功申办以来,为充分发挥中国自主产权的遥感和地理信息系统技术在变化监测领域的应用优势,起到对北京奥运会的科技支撑作用,同时从实施新规划、解决交通拥堵、维护古城风貌等角度出发,利用国产的高分辨率遥感卫星数据结合地理信息系统和全球导航卫星系统在北京六环以内建立了北京市违章建筑卫星监控系统,实现了每个季度对违章建筑的监视和查处。该系统以中国国产卫星影像作为数据来源,极大地降低了数据成本和设计成本,给实际应用带来了巨大的经济效益[81]。文献[82]提出了一种基于卫星图像和深度学习的非法建筑监测方法,称为非法建筑监测网络,以提高对新建非法建筑的监测能力。土地例行督察是国家土地督察体制的重要探索,利用遥感技术进行大面积、大规模、实时、动态的土地利用状况监测已经成为可能。例如,国家自然资源督察成都局利用时序遥感影像有效地推进了土地例行督察工作[83]。耕地保护督察自2019年起每年在全国范围内部署开展。上海市测绘院将数字表面模型、高光谱遥感、无人机无人值守3项遥感技术应用于耕地保护督察,提高了疑似问题精准度,减少了外业工作量[84]。

5)遥感评估教育不公平性。衡量教育不平等的变化可以帮助教育工作者、教育从业人员和教育政策制定者进行决策和制定政策提供重要基础。文献[85]提出了一种结合人口分布、人类居住区和夜间灯光数据的方法,利用潜在增长模型评估和探索国家层面在多个时间段的发展和教育不平等。结果表明,人类发展水平较低的国家和地区往往面临更突出的教育不平等和城市人口分布失衡问题。人类发展指数可以用来解释教育不平等的线性增长率,但随着时间的推移,这种关联性会逐渐减弱。

3 社会遥感地理计算的研究方法

社会遥感地理计算作为一个新兴的学科交叉方向,经过系列研究,逐步发展了一套方法体系。

3.1 空中视角与空间思维

社会人文科学是社会科学与人文科学的统称,其研究对象涵盖人类精神文化现象及社会运行规律,包括哲学、经济学、法学、历史、文学、艺术等学科。人文科学侧重人类精神世界与微观文化现象,社会科学则聚焦宏观社会结构。社会人文科学的传统研究方法是问卷调查、社会实

验、个案访谈等,从人与人的关系、人与社会的关系的视角开展相关研究。

社会遥感地理计算则是从空中视角研究社会人文现象,将空间思维、空间概念引入社会人文的研究和分析中。例如,发表于 *The American Economic Review* 期刊的论文“Measuring Economic Growth from Out Space”提出,从外太空的视角,利用夜光遥感影像测度经济增长,提出了一种统计模型结合夜光遥感数据改善经济增长计算准确度的方法[13]。传统的新闻学是由记者到现场采访、拍照完成新闻稿,而遥感新闻学是利用遥感数据,从空中视角迅速获取新闻现场的影像,并配以相关解释,从而远程快速完成新闻稿[30]。卫星遥感技术为新闻业提供了一个俯瞰地球的视角[40]。将空间思维、空间概念引入社会人文科学是其空间转向研究的重要方向[10]。

3.2　无所不在的时空智能

世界是物质的,物质是运动的,时间和空间维度的特征共同揭示了运动的物质世界的本质[86]。随着人工智能技术和数据获取手段的迅猛发展,大规模时空数据的智能建模与解析已成为可能,这也推动了更深层次的技术突破与科学创新,新兴学科——时空智能学应运而生[86]。时空智能学利用通导遥智能传感器、云计算和人工智能方法对自然活动和人类活动进行感知、认知,是当代和未来的测绘遥感地理信息学,是人工智能的重要组成部分,又是服务科学的重要组成部分[86]。时空智能学是研究社会人文科学的重要理论和方法。例如,利用空天时空智能支撑应急响应,通过构建一个全时空覆盖、高效协同、实时响应的智能化时空服务网络,支持防灾减灾、环境监测、资源管理和国家安全等多元场景,依托时空大数据、云计算和智能终端实现全球无缝互联,为应急等部门提供快速、精准的时空信息服务[87]。

3.3　社会感知与社会计算

社会感知是一种新的理解社会经济环境的方法,是指基于感知设备获取地理空间大数据,挖掘人的时间空间行为模式,揭示其背后的社会经济特征的研究方法,并形成一条由人及地的研究路径[88-89]。随着传感器技术、定位技术和大数据技术的发展,人们可以直接感知社会经济特征和人的行为特征,可以称之为社会感知[88]。社会感知概念刻画了地理空间大数据基于大量人的行为时空模式获取环境特征的技术手段,有助于重新审视地理学研究中的一些基本问题,为地理学特别是人文地理学的研究提供了丰富的数据源和新的技术思路[89-90]。

社会感知可以作为传统遥感的有效补充,可以感知传统遥感技术无法感知的人的个体及群体行为。将社会感知与传统遥感融合,相互补充,可以实现地表地物、人和社会的全面感知,可以帮助人们更加深刻地理解人地关系。例如,从遥感影像中提取光谱特征、从推特数据中提取用户活动的时空特征和主题特征,基于随机森林法和深度神经网络法构建细粒度的城市土地利用分类模型。这种方法融合了遥感数据与社会感知数据,充分利用社会感知数据中隐含的用户活动时空模式和活动主题信息,提高了城市土地利用分类的精度[91]。将高分辨率遥感数据与社会感知数据融合,可以有效地实现街区冬季碳排放的空间化模拟和分析[92]。由于社会感知数据是由部分使用社交媒体等社会感知手段的用户提供的,其数据具有有偏性,在利用社会感知数据进行相关分析时,应注意其有偏性、代表性等问题[93-94]。

大数据时代的到来为研究人类社会动态和模拟社会问题带来了前所未有的机遇。计算机科学家、社会学家等各领域学者开始关注大数据给社会、经济、科学研究等方面带来的巨大价值[8,95]。社会计算是使用系统科学、人工智能、数据挖掘等科学计算理论作为研究方法,将社会科学理论与计算理论相结合,深入认识社会、改造社会,解决政治、经济、文化等领域复杂性社会问题的一种理论和方法论体系[95]。社会计算已经成为社会科学研究的一种新范式[95]。基于社会计算,智慧社会可充分利用开放流动的大数据资源,综合协调人、地、事、物和组织等各种要素,形成信息对称、权利对等、扁平化组织的社会结构,推动传统社会管理模式向分布式、集约化、信息化、智能化、全响应的创新社会管理模式转变[96]。社会计算驱动的社会科学研究方法包括基于大数据的探索性研究、基于大数据的验证性研究、大数据与结构化数据整合下的探索性或验证性研究、基于大型互联网实验的验证性研究、基于大数据(或结合结构化数据)先探索后验证的整合研究等[97]。

3.4　地理计算与社会地理计算

20 世纪 90 年代,地理计算作为以计算科学方法解决地理空间复杂问题的研究领域被提出,

通过引入机器学习、空间统计、优化算法和高性能计算等技术,实现对地理过程的模拟、预测与决策支持[98-99]。随着地理空间数据的极大丰富与计算能力的快速提升,地理计算已从早期的模型构建与理论方法探索逐步演化为系统性、跨学科的计算地理科学,其研究范式也由传统的“模型驱动”逐步向“数据驱动”与“模型-数据混合驱动”方向演进[100]。

在基础理论方面,面向传统统计的模型难以直接应用于地理学领域,地理计算则通过空间自相关[101]、地理加权回归分析[102]、空间多层模型[103]等技术,关注地理空间关系与过程的非平稳性、空间异质性和多尺度等复杂特征[104],为计量地理学发展以及地理空间分析与规律发现提供了新的有效途径。随着深度学习与人工智能技术的迅速发展,卷积神经网络、图神经网络、强化学习等技术在地表过程模拟与空间预测中发挥了重要作用,如气候模拟[105]、洪涝模拟[106]、城市演化[107]等,尤其得益于图形处理单元/张量处理单元、云计算等高性能计算技术的大规模应用,GeoAI为地理计算注入了新的活力[108]。在应用方面,地理计算已广泛渗透于生态环境管理、城市规划、自然灾害预警、公共卫生治理、交通优化等众多领域,如通过空间统计分析技术分析武汉市流出人口与突发公共卫生事件之间的关系[109]。

社会地理计算是近年来在地理信息科学、计算社会科学与城市研究等领域交叉融合下形成的新型研究方向,旨在利用大规模时空行为数据和计算模型刻画、理解和模拟社会过程的空间动态特征[3]。与传统的地理计算主要依赖统计汇总或小规模调查不同,社会地理计算以轨迹数据、社交媒体数据、移动信令数据、交通传感器数据以及夜光遥感影像等地理大数据为基础,更加侧重于对个体行为、群体互动、城市结构及其演化过程的精细化量化分析,如出行规律特征[110]、活动空间隔离[111]等。社会地理计算领域的研究更加趋于构建包括个体行为分析、交互网络分析和多尺度时空统计建模的多层次方法体系,如通过基于代理的模型模拟个体行为[112],以理解交通拥堵、城市扩张、社会分异等现象。此外,近年来基于循环神经网络、长短期记忆网络、Transformer、图神经网络等人工智能技术的时空预测模型也被广泛应用于人流预测[18]、城市活力估计[113]等社会空间过程建模任务。

总体而言,社会地理计算通过将计算社会科学、空间分析与地理大数据融合,推动了地理计算从“统计相关性”研究走向“空间行为机制”研究,为解释复杂社会空间过程和支持城市治理提供了新的知识框架和技术路径。

3.5 空间数据挖掘与夜光遥感

空间数据挖掘,简单地说,就是从空间数据库中提取隐含其中的、事先未知的、潜在有用的、最终可理解的空间或非空间的一般知识规则的过程[114-117]。具体而言,就是在空间数据库或空间数据仓库的基础上,综合利用确定集合理论、扩展集合理论、仿生学方法、可视化、决策树、云模型、数据场等理论和方法,以及相关的人工智能、机器学习、深度学习、专家系统、模式识别、网络等信息技术,从大量含有噪声、不确定性的空间数据中,分析提取人们可信的、新颖的、感兴趣的、隐藏的、事先未知的、潜在有用的和最终可理解的知识,从而揭示出蕴含在数据背后的客观世界的本质规律、内在联系和发展趋势,实现知识的自动获取,为技术决策与经营决策提供不同层次的知识依据[118-121]。

空间数据挖掘是社会遥感地理计算的重要理论和方法,其中最具代表性的就是夜光遥感数据挖掘[14]。相比于普通的遥感卫星影像,夜光遥感影像更多地反映人类活动,因此它在社会科学领域得到了广泛的应用。武汉大学李熙和李德仁通过夜光遥感数据挖掘评估了叙利亚内战以来(2011-03—2014-02)的人道主义危机的时空变化规律[25]。李熙团队利用夜光遥感数据和土地覆盖类别数据,分析了20多年间的战争给叙利亚带来的巨大粮食危机[52]。夜光遥感技术在人道主义灾难评估中发挥了重要的作用[122]。

夜光影像不仅可以反映夜间城镇灯光,还可以捕捉到夜间渔船、天然气燃烧、森林火灾的发光等,因此广泛地应用于社会经济参数估算、区域发展研究、重大事件评估、渔业监测等诸多研究领域,围绕夜光遥感数据进行空间数据挖掘的研究进入了快速发展阶段[14]。例如,基于1993—2012年长时间序列夜光遥感数据对共建“一带一路”国家的城市发展时空格局分析表明,“一带一路”合作伙伴各国城市夜间灯光增长最快的是进行经济改革的发展中国家和战后重建的国家,城市夜间灯光锐减主要发生在社会经济动荡地区[123]。随着夜光遥感的深入发展,夜光遥感由社会科学领域逐步渗透到了医学、生态等自然科学领域[14]。

3.6　时空大数据与人工智能

随着遥感、无人机、地面传感器、物联网与社会感知系统的广泛部署,地理空间数据呈现出典型的多源异构、高维复杂与动态时空特征。在此背景下,人工智能技术的快速发展正在深刻重塑地理计算的理论与方法体系,形成了以GeoAI为核心的新兴研究范式。与传统的地理信息科学相比,GeoAI更加强调人工智能与社会人文科学的深度融合,通过智能算法与社会空间分析的交互,为理解空间行为、社会动态与人地系统的复杂耦合提供了新的研究路径[124-126]。

GeoAI将遥感大数据、机器学习、深度学习与空间分析等相结合,为地理要素识别、变化检测及人类行为建模提供了智能化手段。在遥感影像解译领域,多模态深度学习方法通过融合不同来源与尺度的影像信息,显著提升了地表要素识别与变化检测的精度[127];在城市时空预测与社会感知分析方面,深度神经网络模型,包括循环神经网络、图神经网络以及结合视觉与空间特征的混合架构被广泛用于刻画人群流动、城市活力与社会空间关联特征等,进而揭示城市系统的动态机理[18]。

在社会遥感地理计算中,时空大数据与人工智能的结合显著扩展了应用领域。从城市功能区划与通勤模式分析[128]到灾害响应与应急管理[129],人工智能模型能实时处理海量社交媒体、移动信令与遥感数据,揭示城市活动模式与人地互动机制。例如,通过结合社交媒体与卫星影像,使用深度学习/机器视觉系统自动识别自然灾害(如洪水、火灾、滑坡等),对灾害发生与影响程度进行快速判断,为应急救援与公共卫生响应提供辅助支持[130]。文献[131]指出,尽管“遥感+社交媒体”数据融合在事件检测与响应中表现出高敏感度,但数据异质性、时空分辨率差异与语义鸿沟仍是瓶颈。GeoAI在社会遥感领域的关键挑战包括多源异构数据对齐、人工智能模型可解释性与不确定性评估、隐私保护与伦理规范等[132-133]。

3.7　遥感大模型与知识图谱

受自然语言处理领域基础模型成功经验的启发,遥感与地理信息科学领域出现了地理基础模型与遥感基础模型。这类基础模型基于大规模自监督或对比学习策略,从多源遥感影像与地理空间数据中自动学习通用特征表征,能够灵活迁移至地物识别、变化检测、场景理解与地理信息检索等多种下游任务[134]。文献[135]提出了地理基础模型(geo-foundation models,GeoFM)理论框架,强调在模型训练中引入地理空间先验知识,如空间邻近性、拓扑关系与尺度层次结构等,使模型不仅具备强大的表征学习能力,而且能更好地理解地理空间语义与人地系统的结构性特征。

知识图谱在社会遥感地理计算领域中的应用也日益广泛[136-138]。通过对地理实体、属性与关系的结构化表达,地理知识图谱(geographic knowledge graph,GeoKG)为多源地理数据(如遥感影像、社交媒体信息与传感器观测)提供了统一的语义支撑[139]。GeoKG的引入使得地理计算从数据驱动走向知识增强模式,为遥感与社会感知数据的语义融合、关系挖掘与可解释建模提供理论基础。文献[139]提出的GeoKG质量评估框架从结构完整性、语义一致性与推理能力等方面系统梳理了地理知识图谱构建与应用,为实现高质量地理知识组织与可信空间推理提供了支撑。文献[140]基于社交媒体构建暴雨-洪涝事件知识图谱,实现了灾害传播与公众感知的时空演化分析,为社会感知数据的结构化表达提供了范例。

在社会遥感地理计算中,大模型与知识图谱的融合正成为新趋势。文献[141]利用遥感知识图谱将灾害指标、受灾等级和响应规则显式化,通过大语言模型(large language model,LLM)实现了可解释的灾害早期预警。文献[142]提出将知识图谱嵌入LLM的检索增强生成流程,用以改善社会感知数据的时空一致性与语义可控性。文献[143]指出了GeoKG的构建与动态更新仍受制于异构数据融合与知识演化问题,将在GeoFM+GeoKG的协同机制、地理常识表达及知识注入方式上深入探索。基础模型提供了强大的特征学习与泛化能力,而知识图谱提供了规则、结构与可解释性,二者的融合正在成为社会遥感地理计算智能化的重要方向。

3.8　地理空间优化

随着城市感知技术的普及,大规模时空数据的获取推动了城市设施空间优化从静态模型向动态、数据驱动的决策模式转变。城市时空大数据(如移动信令、全球导航卫星系统轨迹、POI、社交媒体签到与公交刷卡记录等)能够细致刻画人口流动、服务需求与可达性动态[144-145],为设施布局提供重要支撑。基于时空大数据的优化方法

通常依托机器学习与深度学习模型挖掘人群行为模式与空间关系。例如,聚类与密度估计可识别需求热点,用于引导公共服务设施选址[146-147];图神经网络和时空回归模型被用于预测需求分布与服务可达性分析[148-149]。

深度强化学习(deep reinforcement learning,DRL)的发展,为城市公共设施选址问题提供了新的解决思路。文献[150]提出了统一的DRL框架SpoNet,用于求解P中位问题、P中心问题与最大覆盖问题等经典空间优化问题,实验结果表明SpoNet相比启发式方法更准确,并且比求解器具有显著的计算效率优势。文献[151]提出耦合改进图注意力网络与深度强化学习的公共服务设施智能化选址方法,在保持求解效率的同时提高了覆盖公平性。文献[152]提出了改进的多约束广告牌选址优化模型,构建了集成注意力机制的深度网络以求解该模型,并通过美国纽约市的真实交通流量数据进行实验,提升了广告设施选址的覆盖效率。文献[153]通过强化学习策略优化电动滑板车站点部署,提升了车辆利用率与服务可达性。文献[154]提出了一套集成犯罪时空预测、最小区域差异公平约束,以及深度强化学习求解策略的新型优化框架,构建了公平性约束的最大覆盖选址模型,实现了巡区布局从"只追求覆盖"向"效率+公平"的系统提升。文献[155]提出并验证了一种递归分层的零售设施选址框架,研究融合多源空间数据,将城市消费/人口的幂律特征转化为可操作的层级判定规则,嵌入改良后的最大覆盖模型中以递归布点,从高层级到低层级逐步剔除已覆盖区域。

LLM正逐渐成为社会地理计算中城市空间决策与设施选址的新型智能引擎。文献[156]提出了一种LLM驱动的选址推荐系统,该系统基于预训练语言模型的知识理解与推理能力,结合地理信息数据库与空间约束条件,将选址问题转化为语义-空间-决策一体化推理过程。文献[157]指出,随着地理大数据与GeoAI的兴起,地理空间优化研究正向多目标、多尺度与实时动态优化转型,呈现出学习驱动优化的趋势。该范式结合了机器学习与优化模型,如使用深度神经网络预测空间需求分布[158],再以元启发式算法或混合整数规划求解设施布局[159],实现了数据-预测-决策的闭环计算,体现了从社会感知到空间优化的预测-优化思路,为智能城市设施配置与公共资源调度提供了自适应、可解释的社会地理计算路径。

3.9 软件工具与平台

社会遥感地理计算领域的研究进展极大地得益于丰富的软件工具与平台,在遥感地理信息科学与社会人文科学深化融合的背景下,从早期的传统遥感与地理信息系统软件,到基于R、Python等语言构建的开源工具,再到公开的时空大数据与云计算平台,构成了完整的社会遥感地理分析基础设施。

在早期研究中,社会遥感地理计算研究以ERDAS、ENVI,以及ArcGIS、QGIS等传统的遥感和地理信息系统软件为主,提供了丰富且稳定的空间数据管理、可视化与空间统计分析等功能。但随着研究的不断深入,传统的遥感和地理信息系统软件的算法扩展性相对有限,对社会遥感地理计算复杂建模问题的支持不够灵活,且难以进行大规模数据处理,因此其在社会遥感地理计算中的作用逐渐从核心分析工具转为空间数据预处理与可视化基础设施。

随着开源科学计算的发展,以R与Python语言为代表的开源平台已成为社会遥感地理计算的重要技术支撑,如R语言中的spdep[160]、GWmodel[161]等函数包提供了全面的空间邻接分析、地理加权建模技术[162]等功能,为社会遥感地理计算分析的空间异质性建模提供了全面的技术方法体系;Python语言除囊括了丰富的空间统计分析工具包之外,还提供了强大的机器学习与深度学习框架,如PyTorch、TensorFlow等,为社会时空数据的预测、分类与聚类提供了强大的模型能力,使社会遥感地理计算能够自然地融入数据驱动和模型驱动的混合范式。

随着社会遥感地理计算研究面临不断增长的时空分辨率与数据体量,云端计算平台成为重要趋势,涌现了一系列的云计算工具平台。谷歌地球引擎通过整合海量遥感数据、社会经济指数数据与时空分析算子,使研究者能够在云端执行全球尺度的趋势分析、环境暴露计算及人口空间化等任务[163]。武汉大学发布了开放地球引擎,支持社会时空大数据的流式处理、可视化与智能分析,极大地降低了大规模数据处理的门槛,使社会遥感地理计算从单机分析向分布式计算转变,极大地提升了模型模拟与预测的空间覆盖范围与时效性[164]。

总体来看,社会遥感地理计算软件工具的发展呈现出多生态并存、跨平台融合与智能化增强的趋势。随着机器学习、知识图谱、地理大模型

等技术的快速发展,不同生态之间的接口与集成能力不断增强,社会遥感地理计算的研究模式正从工具驱动逐步迈向平台化、自动化与智能化,为城市治理、公共健康、社会公平等社会遥感地理计算的研究提供了强大的技术支撑。

4 结　语

遥感已经从传统的对地观测发展到既对地观测,也对人、对社会进行观测。社会人文科学研究出现了空间转向,并出现了计算化的研究热潮。遥感地理信息科学与技术、计算理论与方法,与社会人文科学的跨学科交叉融合逐步产生了社会遥感地理计算这一跨学科交叉融合的创新性研究方向。社会遥感地理计算已经衍生出一系列学科分支方向,包括遥感经济学、遥感新闻学、遥感与政治及国际关系学、遥感战场环境监测、遥感与健康分析,以及批判性遥感、遥感犯罪地理学、遥感考古、遥感查违与遥感督察、遥感评估教育不公平性等。社会遥感地理计算的研究方法包括空中视角与空间思维、时空智能学、社会感知与社会计算、地理计算与社会地理计算、时空大数据与人工智能、遥感大模型与知识图谱、地理空间优化等,并逐步开发了相关的软件平台和工具。

社会遥感地理计算是一个新的学科方向,还处于逐步探索阶段。未来的研究可以从以下几个方面开展:完善社会遥感地理计算的研究框架,探索大数据、大模型支持的社会遥感地理计算的理论、模型和方法,时空智能驱动的社会遥感地理计算方法,社会遥感地理计算的空间优化模型,研发社会遥感地理计算的在线分析和应用平台等,并逐步探索和发展社会遥感地理计算的各学科分支,包括遥感经济学、遥感新闻学、遥感国际关系学、遥感战场环境监测、遥感健康分析等。同时,需要开展相关的教学和培训,编写和出版相关教材和专著,为社会遥感地理计算的持续发展培养后备人才。

致谢:感谢中国遥感应用协会社会遥感地理计算专业委员会、中国地理学会空间综合人文社会科学工作委员会的各位委员,以及学术年会、相关专题论坛参会人员的交流和讨论。

参　考　文　献

[1] 李德仁. 摄影测量与遥感学的发展展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(12): 1211-1215.
LI Deren. Development Prospect of Photogrammetry and Remote Sensing[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(12): 1211-1215.

[2] 张兵, 柳钦火, 李晓明, 等. 遥感科学的内涵与基础性问题[J]. 遥感学报, 2025, 29(1): 1-48..
ZHANG Bing, LIU Qinhuo, LI Xiaoming, et al. The Core Concepts and Fundamental Issues of Remote Sensing Science[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2025, 29(1): 1-48.

[3] LI D R, GUO W, CHANG X M, et al. From Earth Observation to Human Observation: Geocomputation for Social Science[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(2): 233-250.

[4] 李德仁, 张华. 我国测绘遥感技术发展的回顾与展望[J]. 中国测绘, 2019(2): 24-27.
LI Deren, ZHANG Hua. Review and Prospect of the Development of Surveying and Mapping Remote Sensing Technology in China[J]. *China Surveying and Mapping*, 2019(2): 24-27.

[5] 吴立新, 龚健雅. 中国遥感学科的形成过程、现状与挑战[J]. 遥感学报, 2025, 29(6): 1314-1330.
WU Lixin, GONG Jianya. The Formation Process, Construction Status and Challenging Issues of Remote Sensing Discipline in China[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2025, 29(6): 1314-1330.

[6] FOUCAULT M, GORDON C. Questions on Geography[M]. New York: Routledge, 2016.

[7] 金新, 黄凤志. 国际关系理论研究的"空间转向"刍议[J]. 教学与研究, 2013(7): 92-99.
JIN Xin, HUANG Fengzhi. On the "Spatial Turn" of International Relation Theories[J]. *Teaching and Research*, 2013(7): 92-99.

[8] LAZER D, PENTLAND A, ADAMIC L, et al. Computational Social Science[J]. *Science*, 2009, 323(5915): 721-723.

[9] LI D R, ZHAO X, LI X. Remote Sensing of Human Beings: A Perspective from Nighttime Light[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2016, 19(1): 69-79.

[10] 秦昆, 林珲, 胡迪, 等. 空间综合人文学与社会科学研究综述[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(5): 912-928.
QIN Kun, LIN Hui, HU Di, et al. A Review of Spatially Integrated Humanities and Social Sciences[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(5): 912-928.

[11] MELLANDER C, LOBO J, STOLARICK K, et al. Night-Time Light Data: A Good Proxy Measure for Economic Activity?[J]. *PLoS One*, 2015, 10

(10): e0139779.

[12] ELVIDGE C D, BAUGH K E, KIHN E A, et al. Relation Between Satellite Observed Visible-Near Infrared Emissions, Population, Economic Activity and Electric Power Consumption[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(6): 1373-1379.

[13] HENDERSON J V, STOREYGARD A, WEIL D N. Measuring Economic Growth from Outer Space [J]. *The American Economic Review*, 2012, 102(2): 994-1028.

[14] 李德仁, 李熙. 论夜光遥感数据挖掘[J]. 测绘学报, 2015, 44(6): 591-601.
LI Deren, LI Xi. An Overview on Data Mining of Nighttime Light Remote Sensing[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(6): 591-601.

[15] HUANG Q X, YANG X, GAO B, et al. Application of DMSP/OLS Nighttime Light Images: A Meta-Analysis and a Systematic Literature Review[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(8): 6844-6866.

[16] DOLL C N H, MULLER J P, ELVIDGE C D. Night-Time Imagery as a Tool for Global Mapping of Socioeconomic Parameters and Greenhouse Gas Emissions[J]. *Ambio*, 2000, 29(3): 157-162.

[17] GEORGANOS S, GADIAGA A N, LINARD C, et al. Modelling the Wealth Index of Demographic and Health Surveys Within Cities Using Very High-Resolution Remotely Sensed Information[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(21): 2543.

[18] XU Y C, GAO S, HUANG Q Y, et al. Predicting Human Mobility Flows in Cities Using Deep Learning on Satellite Imagery[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 10372.

[19] ENGSTROM R, HERSH J, NEWHOUSE D. Poverty from Space: Using High Resolution Satellite Imagery for Estimating Economic Well-Being [J]. *The World Bank Economic Review*, 2022, 36(2): 382-412.

[20] BURKE M, LOBELL D B. Satellite-Based Assessment of Yield Variation and Its Determinants in Smallholder African Systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(9): 2189-2194.

[21] 刘志洋, 尹慧杰, 李明渊, 等. 利用多源遥感数据的中国三大经济带代表区域经济发展分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, DOI: 10.13203/j.whugis20240233.
LIU Zhiyang, YIN Huijie, LI Mingyuan, et al. Analysis of Economic Development in Representative Regions of China's Three Major Economic Belts Using Multi-source Remote Sensing Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, DOI: 10.13203/j.whugis20240233.

[22] JEAN N, BURKE M, XIE M, et al. Combining Satellite Imagery and Machine Learning to Predict Poverty[J]. *Science*, 2016, 353(6301): 790-794.

[23] SMALL C, POZZI F, ELVIDGE C D. Spatial Analysis of Global Urban Extent from DMSP-OLS Night Lights[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 96(3/4): 277-291.

[24] TAN Z R, WEI D L, YIN Z X. Housing Vacancy Rate in Major Cities in China: Perspectives from Nighttime Light Data[J]. *Complexity*, 2020, 2020(1): 5104578.

[25] LI X, LI D R. Can Night-Time Light Images Play a Role in Evaluating the Syrian Crisis?[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(18): 6648-6661.

[26] FOTHERINGHAM A S. Geographically Weighted Regression[M]. London, UK: SAGE Publications, 2009.

[27] FOTHERINGHAM A S, YANG W B, KANG W. Multiscale Geographically Weighted Regression (MGWR)[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2017, 107(6): 1247-1265.

[28] XIE M, JEAN N, BURKE M, et al. Transfer Learning from Deep Features for Remote Sensing and Poverty Mapping[C]//The 13th AAAI Conference on Artificial Intelligence, Bellevue, Washington, USA, 2015.

[29] SMALL C, ELVIDGE C D, BALK D, et al. Spatial Scaling of Stable Night Lights[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 269-280.

[30] 张过, 贺大为, 关晴, 等. 全媒体时代遥感新闻学[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(4): 469-478.
ZHANG Guo, HE Dawei, GUAN Qing, et al. Remote Sensing Journalism in the Omnimedia Era[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(4): 469-478.

[31] 吴鸿瑶. 新华社卫星新闻的内容创新研究[J]. 青年记者, 2022(4): 105-107.
WU Hongyao. Research on Content Innovation of Xinhua News Agency's Satellite News[J]. *Youth Journalist*, 2022(4): 105-107.

[32] 李梦婷. 卫星新闻新探索:基于新华社相关新闻报道的分析[J]. 传播创新研究, 2021(1): 110-124.
LI Mengting. New Explorations in Satellite News Reporting: An Analysis Based on Relevant News Reports from Xinhua News Agency [J]. *Communica-*

tion Innovation Research, 2021(1): 110-124.

[33] 李晓云, 郭建伟, 祁丽君. 论卫星数据在主题性新闻报道中的创新表达: 以卫星新闻产品《卫星知识局》为例[J]. 中国记者, 2021(9): 120-122.
LI Xiaoyun, GUO Jianwei, QI Lijun. On the Innovative Expression of Satellite Data in Thematic News Reports: Taking the Satellite News Product "Satellite Knowledge Bureau" as an Example[J]. *Chinese Journalist*, 2021(9): 120-122.

[34] 张莉. 卫星新闻: 概念辨析、叙事重构与时空感再造[J]. 中国记者, 2022(3): 96-101.
ZHANG Li. Satellite News: Concept Discrimination, Narrative Reconstruction and Sense of Time and Space Reconstruction[J]. *Chinese Journalist*, 2022(3): 96-101.

[35] 肖珺, 于林海, 张过, 等. 融合地理叙事: 探索卫星遥感新闻的传播创新[J]. 新闻与写作, 2023(1): 98-110.
XIAO Jun, YU Linhai, ZHANG Guo, et al. Integrating Geographic Narratives: Exploring Innovative Communication Strategies for Satellite Remote Sensing News[J]. *News and Writing*, 2023(1): 98-110.

[36] 秦红雨, 杨毅恒. "鸟瞰式"新闻的视觉生产与新闻形态再造[J]. 青年记者, 2023(5): 61-63.
QIN Hongyu, YANG Yiheng. Visual Production of "Bird's-Eye View" News and the Reconstruction of News Forms[J]. *Youth Journalist*, 2023(5): 61-63.

[37] 乔柯, 钟昊熹, 冯春, 等. 卫星新闻的融合传播意义及生产流程研究[J]. 对外传播, 2022(8): 67-71.
QIAO Ke, ZHONG Haoxi, FENG Chun, et al. Research on the Significance and Production Process of Integrated Communication of Satellite News[J]. *International Communications*, 2022(8): 67-71.

[38] 张梦玉, 王晓宁. 新华网"富媒体"新闻作品的空间叙事解读[J]. 青年记者, 2023(1): 66-68.
ZHANG Mengyu, WANG Xiaoning. A Spatial Narrative Interpretation of "Rich Media" News Works on Xinhua Net[J]. *Youth Journalist*, 2023(1): 66-68.

[39] 汪逸妹. 卫星新闻的内容生产策略与实践[J]. 青年记者, 2022(2): 70-72.
WANG Yimei. Content Production Strategies and Practices of Satellite News[J]. *Youth Journalist*, 2022(2): 70-72.

[40] 苏俊斌, 牛榕婷. 俯瞰地球的视角看什么: 卫星遥感新闻报道的要素分析[J]. 现代传播(中国传媒大学学报), 2024, 46(3): 130-138.
SU Junbin, NIU Rongting. What Can We See from a Bird's-Eye View of the Earth: An Analysis of the Elements of Satellite Remote Sensing News Reporting[J]. *Modern Communication* (*Journal of Communication University of China*), 2024, 46(3): 130-138.

[41] 杨毅恒. 新华社"卫星"新闻的视觉修辞研究[D]. 重庆: 西南大学, 2023.
YANG Yiheng. A Research on the Visual Rhetoric of "Satellite News" of Xinhua News Agen[D]. Chongqing: Southwest University, 2023.

[42] 程瑛, 山旭. 卫星调查在俄乌冲突报道及信息研判中的应用[J]. 中国记者, 2022(5): 126-128.
CHENG Ying, SHAN Xu. The Application of Satellite Imagery in Reporting and Information Analysis of the Russia-Ukraine Conflict[J]. *Chinese Journalist*, 2022(5): 126-128.

[43] COHEN S B. Geopolitics: The Geography of International Relations[M]. New York: Rowman & Littlefield, 2009.

[44] FLINT C. Introduction to Geopolitics[M]. New York: Routledge, 2021.

[45] 熊李力. 全球地缘政治现状剖析与趋势前瞻[J]. 人民论坛, 2025(3): 12-16.
XIONG Lili. Analysis of the Current Global Geopolitical Situation and Future Trends[J]. *People's Tribune*, 2025(3): 12-16.

[46] WOODS K M, WANG P S, SEXTON J O, et al. Integrating Pixels, People, and Political Economy to Understand the Role of Armed Conflict and Geopolitics in Driving Deforestation: The Case of Myanmar[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(22): 4589.

[47] EKLUND L, ABDI A M, SHAHPURWALA A, et al. On the Geopolitics of Fire, Conflict and Land in the Kurdistan Region of Iraq[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(8): 1575.

[48] 秦昆, 罗萍, 姚博睿. GDELT 数据网络化挖掘与国际关系分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(1): 14-24.
QIN Kun, LUO Ping, YAO Borui. Networked Mining of GDELT and International Relations Analysis[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(1): 14-24.

[49] 姚博睿, 秦昆, 罗萍, 等. 特殊事件中国际关系网络时序演化分析[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(4): 632-645.
YAO Borui, QIN Kun, LUO Ping, et al. Sequential Evolution Analysis of International Relations Network in Special Events[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2021, 23(4): 632-645.

[50] 薛浩男, 张雪英, 吴明光, 等. 基于新闻数据的突

发公共卫生事件下“全球-中国”国际关系变化分析方法[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(2): 351-363.
XUE Haonan, ZHANG Xueying, WU Mingguang, et al. The Analysis Method of Changes in “Global-China” International Relations During the Public Event Based on News Data[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2021, 23(2): 351-363.

[51] HOLAIL S, SALEH T, XIAO X W, et al. Time-Series Satellite Remote Sensing Reveals Gradually Increasing War Damage in the Gaza Strip[J]. *National Science Review*, 2024, 11(9): 304.

[52] LI X Y, LI X, FAN Z Y, et al. Civil War Hinders Crop Production and Threatens Food Security in Syria[J]. *Nature Food*, 2022, 3(1): 38-46.

[53] HOU Z Y, QU Y, ZHANG L Q, et al. War City Profiles Drawn from Satellite Images[J]. *Nature Cities*, 2024, 1(5): 359-369.

[54] GONG P, LI X C, WANG J, et al. Annual Maps of Global Artificial Impervious Area (GAIA) Between 1985 and 2018[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236: 111510.

[55] VAN DONKELAAR A, MARTIN R V, LI C, et al. Regional Estimates of Chemical Composition of Fine Particulate Matter Using a Combined Geoscience-Statistical Method with Information from Satellites, Models, and Monitors[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(5): 2595-2611.

[56] ZHAO L, LEE X H, SMITH R B, et al. Strong Contributions of Local Background Climate to Urban Heat Islands[J]. *Nature*, 2014, 511(7508): 216-219.

[57] YANG J, GONG P, FU R, et al. The Role of Satellite Remote Sensing in Climate Change Studies[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(10): 875-883.

[58] 吴蓉, 潘卓林, 刘晔, 等. 城市街景绿地对居民心理健康的影响: 以广州为例[J]. 地理研究, 2021, 40(8): 2272-2291.
WU Rong, PAN Zhuolin, LIU Ye, et al. The Effect of Streetscape Greenery on Residents' Mental Health: A Case Study of Guangzhou[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(8): 2272-2291.

[59] GASCON M, TRIGUERO-MAS M, MARTÍNEZ D, et al. Residential Green Spaces and Mortality: A Systematic Review[J]. *Environment International*, 2016, 86: 60-67.

[60] MACDONALD A J, MORDECAI E A. Amazon Deforestation Drives Malaria Transmission, and Malaria Burden Reduces Forest Clearing[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(44): 22212-22218.

[61] ENGEMANN K, PEDERSEN C B, ARGE L, et al. Residential Green Space in Childhood Is Associated with Lower Risk of Psychiatric Disorders from Adolescence into Adulthood[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(11): 5188-5193.

[62] ANTTILA-HUGHES J K, JINA A S, MCCORD G C. ENSO Impacts Child Undernutrition in the Global Tropics[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 5785.

[63] TIAN H Y, YU P B, CAZELLES B, et al. Interannual Cycles of Hantaan Virus Outbreaks at the Human-Animal Interface in Central China Are Controlled by Temperature and Rainfall[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(30): 8041-8046.

[64] TIAN H Y, ZHOU S, DONG L, et al. Avian Influenza H5N1 Viral and Bird Migration Networks in Asia[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(1): 172-177.

[65] WETTSTEIN Z S, HOSHIKO S, FAHIMI J, et al. Cardiovascular and Cerebrovascular Emergency Department Visits Associated with Wildfire Smoke Exposure in California in 2015[J]. *Journal of the American Heart Association*, 2018, 7(8): e007492.

[66] SHEN X Y, ANAGNOSTOU E N, ALLEN G H, et al. Near-Real-Time Non-Obstructed Flood Inundation Mapping Using Synthetic Aperture Radar[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221: 302-315.

[67] 田浩, 刘琳, 张正勇, 等. 2001—2020年中国地表温度时空分异及归因分析[J]. 地理学报, 2022, 77(7): 1713-1729.
TIAN Hao, LIU Lin, ZHANG Zhengyong, et al. Spatiotemporal Diversity and Attribution Analysis of Land Surface Temperature in China from 2001 to 2020[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(7): 1713-1729.

[68] GONG P, LIANG S, CARLTON E J, et al. Urbanisation and Health in China[J]. *The Lancet*, 2012, 379(9818): 843-852.

[69] BENNETT M M, CHEN J K, ALVAREZ LEÓN L F, et al. The Politics of Pixels: A Review and Agenda for Critical Remote Sensing[J]. *Progress in Human Geography*, 2022, 46(3): 729-752.

[70] SEGARRA J, GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ A, OSORNO-COVARRUBIAS J, et al. The Role of Critical Remote Sensing in Environmental Justice

Struggles[J]. *Progress in Environmental Geography*, 2024, 3(3): 185-211.

[71] MALONEY D V, MOODY A. Patterns of Strategic Land Use: A Critical Remote Sensing Analysis of the Role of the Ceyanpınar State Farm in the Making of the Turkish-Syrian Borderland[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2025, 115(8): 1763-1783.

[72] 柳林, 吴林琳, 宋广文, 等. 基于时空行为视角的犯罪地理创新研究框架[J]. 地理研究, 2022, 41(6): 1748-1764.
LIU Lin, WU Linlin, SONG Guangwen, et al. An Innovation Research Framework of Crime Geography Based on Spatio-Temporal Behavior Perspective[J]. *Geographical Research*, 2022, 41(6): 1748-1764.

[73] PATINO J E, DUQUE J C, PARDO-PASCUAL J E, et al. Using Remote Sensing to Assess the Relationship Between Crime and the Urban Layout[J]. *Applied Geography*, 2014, 55: 48-60.

[74] CECCATO V, IOANNIDIS I. Using Remote Sensing Data in Urban Crime Analysis: A Systematic Review of English-Language Literature from 2003 to 2023[J]. *International Criminal Justice Review*, 2025, 35(2): 102-122.

[75] 聂跃平, 杨林, 王长林. 遥感考古学: 一门极具发展潜力的新兴交叉学科[J]. 中国科学院院刊, 2005, 20(6): 459-465.
NIE Yueping, YANG Lin, WANG Changlin. Remote Sensing Archaeology: A New Discipline with Great Potential[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2005, 20(6): 459-465.

[76] 孙家抦. 楚都遥感考古[J]. 地图,2003(5): 16-19.
SUN Jiabing. Remote Sensing Archaeology of the Chu Capital[J]. *Map*, 2003(5): 16-19.

[77] 王心源, 郭华东. 空间考古学: 对象、性质、方法及任务[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(3): 360-367.
WANG Xinyuan, GUO Huadong. Space Archaeology: Disciplinary Attribute, Research Object, Method and Tasks[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30(3): 360-367.

[78] LUO L, WANG X Y, GUO H D. Transitioning from Remote Sensing Archaeology to Space Archaeology: Towards a Paradigm Shift[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2024, 308: 114200.

[79] CHEN F L, LASAPONARA R, MASINI N. An Overview of Satellite Synthetic Aperture Radar Remote Sensing in Archaeology: From Site Detection to Monitoring[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2017, 23: 5-11.

[80] WANG S L, HU Q W, WANG S H, et al. Archaeological Site Segmentation of Ancient City Walls Based on Deep Learning and LiDAR Remote Sensing[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2024, 66: 117-131.

[81] 李德仁, 王密, 胡芬. 利用我国高分辨率卫星影像监测北京市违章建筑[J]. 科学通报, 2009, 54(3): 305-311.
LI Deren, WANG Mi, HU Fen. Monitoring Illegal Constructions in Beijing Using High-Resolution Satellite Imagery[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(3): 305-311.

[82] DU H D, HUANG Z, ZHANG Y. An Optimized Edge-Focused Siamese Network for Monitoring New Illegal Buildings Using Satellite Images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 4703115.

[83] 陈志刚, 蔡辉. RS和GIS技术在土地例行督察实践中的应用研究[J]. 国土资源情报, 2009(11): 32-38.
CHEN Zhigang, CAI Hui. Application Research of RS and GIS Technologies in Routine Land Inspection Practice[J]. *Land and Resources Information*, 2009(11): 32-38.

[84] 童彤. 遥感技术在耕地保护督察中的应用初探[J]. 现代测绘, 2023, 46(3): 30-33.
TONG Tong. Application of Remote Sensing Technology in Supervision of Cultivated Land Protection[J]. *Modern Surveying and Mapping*, 2023, 46(3): 30-33.

[85] QI B X, WANG X T, SUTTON P, et al. Can Nighttime Satellite Imagery Inform Our Understanding of Education Inequality?[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 843.

[86] 李德仁, 王密, 肖晶, 等. 论无所不在的时空智能[J]. 遥感学报, 2025, 29(6): 1388-1398.
LI Deren, WANG Mi, XIAO Jing, et al. On Ubiquitous Spatio-Temporal Intelligence[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2025, 29(6): 1388-1398.

[87] 李德仁, 眭海刚, 张浩, 等. 时空智能助力应急监测的思考与探索[J]. 中国减灾, 2025(1): 16-17.
LI Deren, SUI Haigang, ZHANG Hao, et al. Thoughts and Explorations on the Application of Spatiotemporal Intelligence in Emergency Monitoring[J]. *Disaster Reduction in China*, 2025(1): 16-17.

[88] 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.

[89] 刘瑜. 地理大数据与社会感知[M]. 北京:科学出版社, 2023.
LIU Yu. Geographical Big Data and Social Sensing[M]. Beijing: Science Press, 2023.

[90] 刘瑜. 社会感知视角下的若干人文地理学基本问题再思考[J]. 地理学报, 2016, 71(4): 564-575.
LIU Yu. Revisiting Several Basic Geographical Concepts: A Social Sensing Perspective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(4): 564-575.

[91] 吴郁文, 林杰. 融合遥感与社会感知数据的城市土地利用分类方法[J]. 浙江大学学报(理学版), 2023, 50(1): 83-95.
WU Yuwen, LIN Jie. Integrating Remotely Sensed and Social Sensed Data for Urban Land Use Classification[J]. *Journal of Zhejiang University* (*Science Edition*), 2023, 50(1): 83-95.

[92] 刘代云, 李金祚, 蔡军, 等. 基于高分辨率遥感与社会感知数据的街区冬季碳排放空间化模拟与分析:以寒地滨海城市大连为例[J]. 西部人居环境学刊,2025,DOI:10.13791/j.cnki.hsfwest.20240205003.
LIU Daiyun, LI Jinzuo, CAI Jun, et al. Spatialized Simulation and Analysis of Winter Carbon Emissions in Blocks Based on Highresolution Remote Sensing Data and Social Perception Data: A Case Study of Cold Coastal City Dalian[J]. *Journal of Human Settlements in West China*, 2025, DOI: 10.13791/j.cnki.hsfwest.20240205003.

[93] MCKENZIE G, JANOWICZ K, KEßLER C. Uncovering Spatiotemporal Biases in Place-Based Social Sensing[J]. *AGILE: GIScience Series*, 2020, 1: 1-17.

[94] 何静. 社会感知中的偏见如何可能?[J]. 哲学分析, 2025, 16(2): 69-79.
HE Jing. How Is Bias in Social Perception Possible?[J]. *Philosophical Analysis*, 2025, 16(2): 69-79.

[95] 孟小峰, 李勇, 祝建华. 社会计算:大数据时代的机遇与挑战[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(12): 2483-2491.
MENG Xiaofeng, LI Yong, ZHU Jianhua. Social Computing in the Era of Big Data: Opportunities and Challenges[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2013, 50(12): 2483-2491.

[96] 王飞跃, 王晓, 袁勇, 等. 社会计算与计算社会:智慧社会的基础与必然[J]. 科学通报, 2015, 60(S1): 460-469.
WANG Feiyue, WANG Xiao, YUAN Yong, et al. Social Computing and Computational Societies: The Foundation and Consequence of Smart Societies[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(S1): 460-469.

[97] 周涛, 高馨, 罗家德. 社会计算驱动的社会科学研究方法[J]. 社会学研究, 2022, 37(5): 130-155.
ZHOU Tao, GAO Xin, LUO Jiade. Social Science Research Methods Driven by Social Computing[J]. *Sociological Studies*, 2022, 37(5): 130-155.

[98] BRUNSDON C, SINGLETON A. Geocomputation: A Practical Primer[M]. Los Angeles: Sage, 2015.

[99] OPENSHAW S, ABRAHART R J. GeoComputation[M]. New York: Taylor and Francis, 2000.

[100] DE SMITH M. Geospatial Analysis and Geocomputation: Concepts and Modeling Tools[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018.

[101] ANSELIN L. Local Indicators of Spatial Association: LISA[J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115.

[102] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM A S, CHARLTON M E. Geographically Weighted Regression: A Method for Exploring Spatial Nonstationarity[J]. *Geographical Analysis*, 1996, 28(4): 281-298.

[103] DUNCAN C, JONES K. Using Multilevel Models to Model Heterogeneity: Potential and Pitfalls[J]. *Geographical Analysis*, 2000, 32(4): 279-305.

[104] GOODCHILD M F, LI W W. Replication Across Space and Time Must Be Weak in the Social and Environmental Sciences[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(35): e2015759118.

[105] MENDLIK T, GOBIET A. Selecting Climate Simulations for Impact Studies Based on Multivariate Patterns of Climate Change[J]. *Climatic Change*, 2016, 135(3): 381-393.

[106] ZENG B W, HUANG G R, CHEN W J. Research Progress and Prospects of Urban Flooding Simulation: From Traditional Numerical Models to Deep Learning Approaches[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2025, 183: 106213.

[107] SHI Z M, FONSECA J A, SCHLUETER A. A Review of Simulation-Based Urban Form Generation and Optimization for Energy-Driven Urban Design[J]. *Building and Environment*, 2017, 121: 119-129.

[108] SONG Y Z, KALACSKA M, GAŠPAROVIĆ M, et al. Advances in Geocomputation and Geospatial Artificial Intelligence (GeoAI) for Mapping[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, 120: 103300.

[109] XU G, WANG W W, LU D D, et al. Geographically Varying Relationships Between Population

Flows from Wuhan and Public Cases in Chinese Cities[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2022, 25(2): 121-131.

[110]方志祥, 倪雅倩, 黄守倩. 融合Markov与多类机器学习模型的个体出行位置预测模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(6): 799-806.
FANG Zhixiang, NI Yaqian, HUANG Shouqian. A Multi-model Fusion Model of Individual Travel Location Prediction Using Markov and Machine Learning Methods[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(6): 799-806.

[111]CHRISTOPHER A J. Urban Segregation in Post-Apartheid South Africa[J]. *Urban Studies*, 2001, 38(3): 449-466.

[112]HUANG J Y, CUI Y K, ZHANG L L, et al. An Overview of Agent-Based Models for Transport Simulation and Analysis[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, 2022(1): 1252534.

[113]XIE X J, MAO W F, YANG Z L, et al. A Hybrid Spatial Learning Method Integrating Graph Neural Networks and Explainable AI to Understand Urban Vitality[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2025, 134: 106920.

[114]KOPERSKI K, ADHIKARY J, HAN J. Spatial Data Mining: Progress and Challenges Survey Paper[C]//ACM SIGMOD Workshop on Research Issues on Data Mining and Knowledge Discovery, Montreal, Canada, 1996.

[115]ESTER M, FROMMELT A, KRIEGEL H P, et al. Spatial Data Mining: Database Primitives, Algorithms and Efficient DBMS Support[J]. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2000, 4(2): 193-216.

[116]MILLER H J, HAN J. Geographic Data Mining and Knowledge Discovery[M]. New York: CRC Press, 2009

[117]王树良. 基于数据场与云模型的空间数据挖掘和知识发现[D]. 武汉: 武汉大学, 2002.
WANG Shuliang. Spatial Data Mining and Knowledge Discovery Based on Data Field and Cloud Models[D]. Wuhan: Wuhan University, 2002.

[118]李德仁, 王树良, 史文中, 等. 论空间数据挖掘和知识发现[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2001, 26(6): 491-499.
LI Deren, WANG Shuliang, SHI Wenzhong, et al. On Spatial Data Mining and Knowledge Discovery (SDMKD)[J]. *Editoral Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(6): 491-499.

[119]李德仁, 王树良, 李德毅, 等. 论空间数据挖掘和知识发现的理论与方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(3): 221-233.
LI Deren, WANG Shuliang, LI Deyi, et al. Theories and Technologies of Spatial Data Mining and Knowledge Discovery[J]. *Editoral Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(3): 221-233.

[120]李德仁, 王树良, 李德毅. 空间数据挖掘理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
LI Deren, WANG Shuliang, LI Deyi. Theory and Applications of Spatial Data Mining [M]. Beijing: Science Press, 2022.

[121]LI D R, WANG S L, LI D Y. Spatial Data Mining: Theory and Application [M]. Berlin, Germany: Springer, 2016.

[122]李德仁, 李熙. 夜光遥感技术在人道主义灾难评估中的应用[J]. 自然杂志, 2018, 40(3): 169-176.
LI Deren, LI Xi. Use of Night-Time Light Remote Sensing in Humanitarian Disaster Evaluation[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2018, 40(3): 169-176.

[123]李德仁, 余涵若, 李熙. 基于夜光遥感影像的"一带一路"沿线国家城市发展时空格局分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(6): 711-720.
LI Deren, YU Hanruo, LI Xi. The Spatial-Temporal Pattern Analysis of City Development in Countries Along the Belt and Road Initiative Based on Nighttime Light Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(6): 711-720.

[124]WANG S Q, HUANG X, LIU P Y, et al. Mapping the Landscape and Roadmap of Geospatial Artificial Intelligence (GeoAI) in Quantitative Human Geography: An Extensive Systematic Review[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024, 128: 103734.

[125]RUDEWICZ J. Theoretical Insights into Artificial Intelligence Applications in Human Geography and Spatial Management (GeoAI)[J]. *European Research Studies Journal*, 2024, XXVII(4): 973-984.

[126]GAO S. Cross-Disciplinary Opportunities for GeoAI and Human Geography[M]//GeoAI and Human Geography. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2025: 387-397.

[127]SAIDI S, IDBRAIM S, KARMOUDE Y, et al. Deep-Learning for Change Detection Using Multi-Modal Fusion of Remote Sensing Images: A Review[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(20): 3852.

[128]YANG X P, FANG Z X, YIN L, et al. Understanding the Spatial Structure of Urban Commuting Using Mobile Phone Location Data: A Case Study of Shenzhen, China[J]. *Sustainability*, 2018, 10

(5):1435.

[129]EROKHIN D, KOMENDANTOVA N. Social Media Data for Disaster Risk Management and Research [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2024, 114: 104980.

[130]AHUJA S, MICHAEL M, SELVAN M, et al. Natural Disaster Detection in Social Media and Satellite Imagery[J]. *ITM Web of Conferences*, 2022, 44: 03010.

[131]WIELAND M, SCHMIDT S, RESCH B, et al. Fusion of Geospatial Information from Remote Sensing and Social Media to Prioritise Rapid Response Actions in Case of Floods[J]. *Natural Hazards*, 2025, 121(7): 8061-8088.

[132]OLUOCH I, OLUOCH I. Crossing Boundaries: The Ethics of AI and Geographic Information Technologies[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2024, 13(3): 87.

[133]LI H, HUANG J W, KWAN M P. Challenges in Geoprivacy Protection: Methodological Issues, Cultural and Regulatory Contexts, and Public Attitudes [J]. *Transactions in GIS*, 2025, 29(4): e70075.

[134]XIAO A R, XUAN W H, WANG J J, et al. Foundation Models for Remote Sensing and Earth Observation: A Survey[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2025, 99: 2-29.

[135]JANOWICZ K, MAI G C, HUANG W M, et al. GeoFM: How will Geo-foundation Models Reshape Spatial Data Science and GeoAI?[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2025, 39(9): 1849-1865.

[136]齐如煜, 尹章才, 顾江岩, 等. 高精地图的知识图谱表达[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(4): 651-661.
QI Ruyü, YIN Zhangcai, GU Jiangyan, et al. Knowledge Graph Expression of High Definition Map[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(4): 651-661.

[137]李彦胜, 张永军. 耦合知识图谱和深度学习的新一代遥感影像解译范式[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(8): 1176-1190.
LI Yansheng, ZHANG Yongjun. A New Paradigm of Remote Sensing Image Interpretation by Coupling Knowledge Graph and Deep Learning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(8): 1176-1190.

[138]蒋秉川, 游雄, 李科, 等. 利用地理知识图谱的突发公共卫生事件态势交互式可视分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(6): 836-845.
JIANG Bingchuan, YOU Xiong, LI Ke, et al. Interactive Visual Analysis of Public Epidemic Situation Using Geographic Knowledge Graph[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(6): 836-845.

[139]WANG S, QIU P Y, ZHU Y Q, et al. Review, Framework, and Future Perspectives of Geographic Knowledge Graph (GeoKG) Quality Assessment [J]. *Geo-spatial Information Science*, 2025, 28(4): 1701-1721.

[140]LU H P, ZHANG S L, GAO Y, et al. Using Social Media Data to Construct and Analyze Knowledge Graph for "7·20" Henan Rainstorm Flood Event [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2025, 116: 105129.

[141]CHEN M Y, CAO X, CHEN M Y, et al. Construction of Remote Sensing Early Warning Knowledge Graph Based on Multi-source Disaster Data[J]. *Remote Sensing*, 2025, 17(21): 3594.

[142]LIANG J Y, HOU S Y, JIAO H Y, et al. GeoGraphRAG: A Graph-Based Retrieval-Augmented Generation Approach for Empowering Large Language Models in Automated Geospatial Modeling [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2025, 142: 104712.

[143]段雨希, 陈碧宇, 李岩, 等. 地理知识图谱推理研究进展与展望[J]. 地球信息科学学报, 2025, 27(1): 41-59.
DUAN Yuxi, CHEN Biyu, LI Yan, et al. Reasoning on Geographical Knowledge Graph: Advances and Perspectives[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2025, 27(1): 41-59.

[144]CAO K, LI W W, CHURCH R. Big Data, Spatial Optimization, and Planning[J]. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2020, 47(6): 941-947.

[145]YAO L H, GAO C, XU Y Q, et al. Prediction of Commercial Street Location Based on Point of Interest (POI) Big Data and Machine Learning[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2024, 13(10): 371.

[146]QIN K, ZHOU Q, WU T, et al. Hotspots Detection from Trajectory Data Based on Spatiotemporal Data Field Clustering[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, 42: 1319-1325.

[147]ZHANG W G, GU X, TANG L B, et al. Application of Machine Learning, Deep Learning and Optimization Algorithms in Geoengineering and Geoscience: Comprehensive Review and Future Challenge

[J]. *Gondwana Research*, 2022, 109: 1-17.

[148]HUANG F H, YI P Y, WANG J C, et al. A Dynamical Spatial-Temporal Graph Neural Network for Traffic Demand Prediction[J]. *Information Sciences*, 2022, 594: 286-304.

[149]LI J L, FAN L, WANG X R, et al. Product Demand Prediction with Spatial Graph Neural Networks [J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(16): 6989.

[150]LIANG H J, WANG S H, LI H L, et al. Sponet: Solve Spatial Optimization Problem Using Deep Reinforcement Learning for Urban Spatial Decision Analysis[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2024, 17(1): 2299211.

[151]王中, 曹凯. 耦合改进图注意力网络与深度强化学习的公共服务设施智能化选址方法[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26(11): 2452-2464.
WANG Zhong, CAO Kai. An Intelligent Site Selection Approach for Public Service Facilities Coupled with Improved Graph Attention Network and Deep Reinforcement Learning[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2024, 26(11): 2452-2464.

[152]ZHONG Y, WANG S H, LIANG H J, et al. ReCovNet: Reinforcement Learning with Covering Information for Solving Maximal Coverage Billboards Location Problem[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024, 128: 103710.

[153]YUE J W, LONG Y Q, WANG S H, et al. Optimization of Shared Electric Scooter Deployment Stations Based on Distance Tolerance[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2024, 13(5): 147.

[154]LIANG X J, ZHOU L, WANG S H, et al. Spatiotemporal Crime Prediction and Fairness-Constrained Spatial Optimization with Deep Reinforcement Learning for Patrol Region Design[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2025, 145: 104973.

[155]HUANG Z N, WANG S H, LIANG H J, et al. Recursive Hierarchical Facility Optimization for Enhancing Retail Equity: A Consumer-Centric Case in China's 4 State-Level New Districts[J]. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 2026, 89: 104642.

[156]高云帆, 郁董卿, 王思琪, 等. 大语言模型驱动的选址推荐系统[J]. 计算机研究与发展, 2024, 61(7): 1681-1696.
GAO Yunfan, YU Dongqing, WANG Siqi, et al. Large Language Model Powered Site Selection Recommender System[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2024, 61(7): 1681-1696.

[157]CAO K, ZHOU C H, CHURCH R, et al. Revisiting Spatial Optimization in the Era of Geospatial Big Data and GeoAI[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024, 129: 103832.

[158]RAHMAN M H, RIFAAT S M. Using Spatio-Temporal Deep Learning for Forecasting Demand and Supply-Demand Gap in Ride-Hailing System with Anonymised Spatial Adjacency Information [J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2021, 15(7): 941-957.

[159]JAHANGARD M, XIE Y, FENG Y J. Leveraging Machine Learning and Optimization Models for Enhanced Seaport Efficiency[J]. *Maritime Economics & Logistics*, 2025, 27(4): 710-751.

[160]BIVAND R. R Packages for Analyzing Spatial Data: A Comparative Case Study with Areal Data[J]. *Geographical Analysis*, 2022, 54(3): 488-518.

[161]GOLLINI I, LU B B, CHARLTON M, et al. GWmodel: An R Package for Exploring Spatial Heterogeneity Using Geographically Weighted Models [C]//The 22nd GISRUK Conference, Liverpool, UK, 2013.

[162]卢宾宾, 葛咏, 秦昆, 等. 地理加权建模理论与技术框架[J]. 遥感学报, 2025, 29(3): 596-609.
LU Binbin, GE Yong, QIN Kun, et al. Theoretical and Technical Frameworks for Geographically Weighed Models[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2025, 29(3): 596-609.

[163]HUBBARD A E, AHERN J, FLEISCHER N L, et al. To GEE or Not to GEE: Comparing Population Average and Mixed Models for Estimating the Associations Between Neighborhood Risk Factors and Health [J]. *Epidemiology*, 2010, 21(4): 467-474.

[164]YUE P, WANG K X, XU H W, et al. From Geospatial Data Cube to AI Cube: The Open Geospatial Engine (OGE) Approach[J]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2024(10): 441-446.