

面向智能治理的时空信息数智化关键技术研究

张新长^{1,2}, 邬伦³, 朱庆⁴, 刘瑜³, 曹凯滨⁵, 孙颖⁶, 罗明⁶,
阮永俭², 林锦耀², 刘锋⁵

1. 新疆大学 地理与遥感科学学院, 乌鲁木齐 830017;
2. 广州大学 地理科学与遥感学院, 广州 510006;
3. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871;
4. 西南交通大学 地球科学与工程学院, 成都 611756;
5. 城乡院(广州)有限公司, 广州 511300;
6. 中山大学 地理科学与规划学院, 广州 510006

摘要: 时空信息数智化平台是智慧城市建设与运行不可或缺的基础性支撑。涉及城市各个要素, 如何让机器打破多元信息壁垒, 理解城市时空演变过程、挖掘其背后隐含的本质, 在人工智能与地理信息科学领域均属于前沿难题。本文以时空信息智能感知—智能融合—智能认知—智能决策—智能服务的全生命周期流转处理方向为关键技术突破节点, 阐述时空信息数智化平台, 以期新型智慧城市建设提供有力支撑; 重点介绍在城市人地关联时空信息智能泛在感知、混合时空索引的大场景多模态时空数据高效组织管理和自适应可视化技术方法、城市安全的超前预警和精准研判模型, 以及时空信息数智化平台集成等方面的特点。研究成果已推广并广泛应用于城市基础测绘、规划建设、公共安全、民生服务等多个行业领域, 为国土空间规划、社会精细化治理等领域提供了科学的决策依据与技术支持。

关键词: 时空信息; 数智化平台; 智慧城市; 人工智能; 自然资源管理

引用格式: 张新长, 邬伦, 朱庆, 刘瑜, 曹凯滨, 孙颖, 罗明, 阮永俭, 林锦耀, 刘锋. 2025. 面向智能治理的时空信息数智化关键技术研究. 时空信息学报, 32(5): 481-490

Zhang X C, Wu L, Zhu Q, Liu Y, Cao K B, Sun Y, Luo M, Ruan Y J, Lin J Y, Liu F. 2025. Key technologies of spatiotemporal information digital intelligence towards smart governance. Journal of Spatio-temporal Information, 32(5): 481-490, doi: 10.20117/j.jsti.202505010

1 引言

党的十九大报告中提出, 推动互联网、大数据、人工智能和实体经济深度融合, 建设数字中国、智慧社会。城市是社会最活跃的地区, 智慧城市建设是智慧社会的重要组成部分, 时空信息数智化平台是智慧城市建设与运行的基础(李德仁, 2021; 陈军等, 2024; 王瑜婷, 2024; 徐红, 2024; 张新长等, 2024)。它既是履行自然资源管理

职责的技术支撑, 又是为城市管理提供一张底板、一个平台、一套数据的重要基础。时空信息能直观展现城市空间布局, 并能细致刻画一定时间内的城市演变过程, 全面发挥时空信息数智化平台的基础性作用, 是促进城市高质量发展的关键(张新长等, 2021, 2023; 阮永俭等, 2023; 李成仁和冒静娴, 2025)。

数智化作为数字化转型的高级形态, 是通过深度融合大数据、人工智能、物联网等技术, 实现数

收稿日期: 2024-10-27; 修订日期: 2025-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(42571533, 42371406, 42401518); 教育部人文社科青年基金项目(23YJC630145); 广东省自然科学基金面上项目(2025A1515011066)

作者简介: 张新长, 研究方向为空间数据整合及自适应更新技术方法、数字城市(智慧城市)理论与方法、深度学习与自然资源要素分类和提取。E-mail: zhangxc@gzhu.edu.cn

通信作者: 阮永俭, 研究方向为生态遥感、冰冻圈遥感、深度学习与自然资源要素分类和提取。E-mail: ruanyj@gzhu.edu.cn

据要素的智能化处理与知识化应用。核心在于构建数据—信息—知识—服务的转化链条,通过机器学习、知识图谱等技术,将海量城市感知数据转化为可解释、可推理、可决策的智能服务。在智慧城市中,数智化不仅强调现实空间中的数字化映射,更注重通过人工智能实现复杂城市系统的自我感知、自我学习与自适应决策,为城市治理提供全要素、全周期、全场景的智能支撑(吴杭彬等, 2024)。

近年来,随着大数据、云计算、物联网及人工智能等技术的飞速发展,城市时空信息平台的建设与应用取得了显著进展。如以 SuperMap 等为代表的 GIS 平台不断融合大数据、人工智能技术,提升了对海量空间数据的存储、处理和分析能力。部分研究提出了宏观的平台框架,如王家耀等(2021)针对黄河流域生态保护与高质量发展需求,构建了包含感知系统、存储管理系统和操作系统的“智能大脑”概念框架。在城市感知与数据获取方面,利用遥感影像、移动设备轨迹数据、社交媒体数据、传感器网络等多源数据,进行城市状态监测、人居环境感知(Zhang 等, 2018; 张朝阳等, 2024)、交通流分析(吴华意等, 2019; 杜俊健等, 2024)、城市规划(Xu 等, 2021; Chen 等, 2022)等研究已广泛开展。另有,部分研究也为复杂的城市系统模拟提供了支撑,如赵鹏军等(2025)基于 CitySPS 平台,构建了融合土地利用、人口、住房和交通的一体化模拟技术框架。这体现了时空信息平台在支撑复杂决策方面的潜力。

然而,作为地理信息科学领域的研究热点,城市时空信息的智能治理仍面临诸多挑战。具体表现为:①城市感知数据具有多源异构、跨尺度、多模态等特性,而已有城市时空信息平台通常是各自独立处理来自天—空—地、零散、异构、点(单体)与面(区域)脱节的多源数据,难以“看全”城市时空演变过程。如何设计高效的混合时空索引机制,实现多模态数据的高效组织与全局感知,是提升平台性能的核心挑战。②由于跨模态数据融合壁垒,时空数据信息密度低、关联性差,由海量数据向有用信息的智能化转变效率不高,难以“看清”城市脉动的本质。如何通过深度学习、知识图谱等人工智能技术,实现多模态数据的语义对齐与智能化融合,是需要解决的难题。③感知数据与机理模型之间割裂,缺乏专业知识、物理模型和跨域信息的融合分析,无法诠释时空过程的外在表征与内在物理

学机理之间的关系,城市复杂系统的分析需融合物理机理模型与数据驱动模型。然而,上述研究多采用单一建模范式,难以“看懂”各种诊断与处方的结果,严重制约了复杂城市环境整体认知能力。④城市各要素日益高度关联,对城市多源多模态时空数据、物理与智能模型、专业知识等进行统一高效调度,成为城市智能决策和服务的迫切需求。

因此,本文深度融合前沿理论与产业应用需求,构建一套以时空信息数据的智能感知—智能融合—智能认知—智能决策—智能服务全生命周期流转处理的关键技术体系。重点解决多源异构数据整合、跨模态语义对齐、机理与数据模型融合等前沿难题,提出基于门控深度残差优化的动态感知方法、全局—局部混合时空索引机制及自适应可视化技术,构建城市人—地关系时序分析模型与潜在危害预测模型,实现城市安全超前预警、土地资源高效配置及精细化治理。

2 时空信息数智化平台的总体设计

运用大数据、人工智能、移动通信、云计算、物联网等新技术,从智能感知—智能融合—智能认知—智能决策—智能服务五个方面开展一系列的时空信息智能化处理的关键技术探索,同时构建一体化时空信息数智化平台。平台总体框架如图1所示。智能感知,构建人—地一体综合感知框架,实现人与地理环境的大范围时空信息的全面动态感知;智能融合,实现多模态时空数据的自适应组织、轻量化访问、精确融合与多层次可视化;智能认知,构建基于大数据融合挖掘分析模型,对城市内人与地理环境进行长期监测、定期评估,实现城市安全运行态势的全息刻画;智能决策,将时空信息数智化成果应用于城市规划、生态环境治理、经济运行、公共安全等领域,提高决策的针对性和有效性;智能服务,面向人民生命健康,为居民休闲出行提供便利,提高居民的生活质量和健康水平。

研发时空信息数智化平台,以扁平化多功能子平台模式提供时空信息智能决策与服务系列模式。提出城市时空信息数据全域融合、时空多维呈现、要素自动配置、知识辅助决策的智能城市治理新范式。时空信息数智化平台具体包括土地储备业务管理系统、供后用地监测系统、地下管线管理信息系统、三维地下管线系统、国土空间管理信息平台、

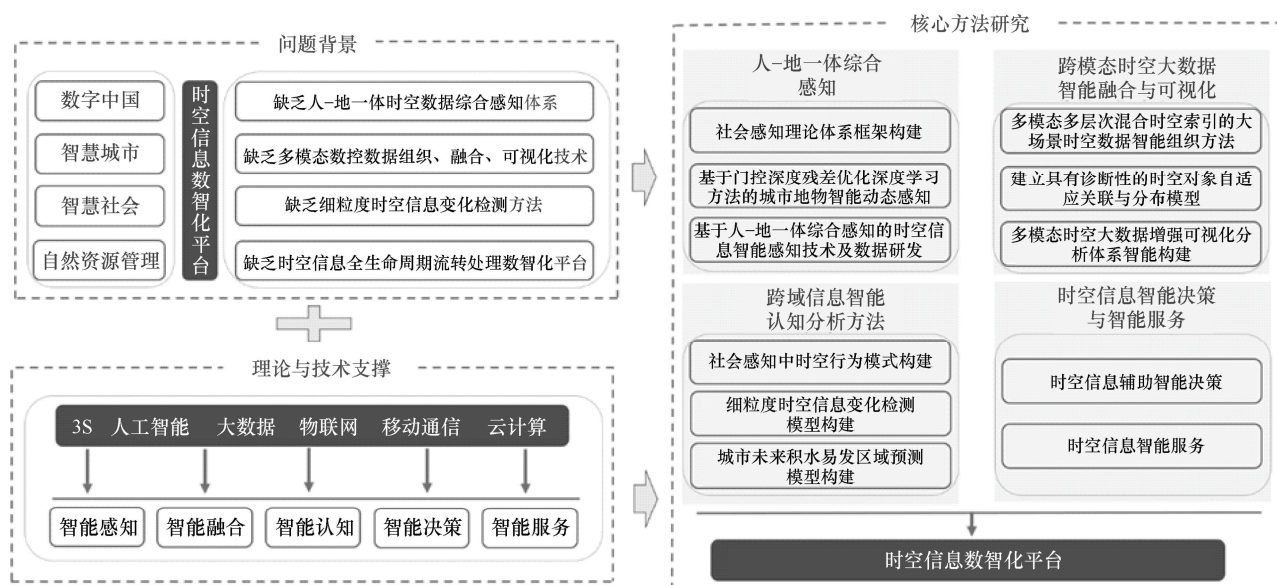


图 1 平台总体框架

3S 为全球定位系统 (global positioning system, GPS)、遥感 (remote sensing, RS) 和地理信息系统 (geographic information system, GIS) 的合称

Fig.1 Overall architecture of the platform

政务空间管理信息平台、移动众采平台、移动国规平台、林业局口袋公园 (增城公园) 等子平台系统。主要从数据层、算法层、应用层三方面实施。

1) 多模态时空数据的全域融合与高效组织

在数据层, 针对多源异构时空数据的碎片化与跨模态融合壁垒, 提出全局-局部混合时空索引机制, 设计多模态层次化数据组织模型。通过构建全域时空数据仓库, 实现跨部门、跨层级、跨业务的数据高效整合与轻量化访问。同时, 研发自适应时空数据可视化引擎, 支持任务驱动的动态数据调度与多尺度渲染, 为大场景三维城市实时交互可视化提供技术保障。

2) 机理与数据双驱动的智能分析模型

在算法层, 提出门控深度残差优化网络 (gated deep residual optimization network, GD-ResNet), 解决遥感影像中地物局部特征与全局结构信息协同提取的难题。构建人-地关系时序分析模型, 融合知识图谱与时空行为挖掘算法, 实现城市体征 (如人口流动、热环境演变) 的细粒度实时监测。此外, 还开发多任务权值共享变化检测模型, 结合土地覆盖与物理机理约束, 为超前预警提供算法支撑。

3) 全场景智能服务与协同治理范式

在应用层, 基于数据与算法的协同优化, 构建集中统一共享、分层分级管理的智能决策范式。基

于时空信息数智化平台, 立足社会大众, 实现交通、休闲场所等多业务时空信息的智能服务, 服务城市居民休闲出行。

3 时空信息数智化平台的关键技术

3.1 城市人地关联时空信息智能泛在感知方法体系构建

城市研究中对人的活动感知与对地理环境感知通常相互独立, 为解决数据来源与分析方法差异所导致的感知割裂问题, 构建社会感知、地物感知与人-地一体综合感知的技术体系, 如图 2 所示。通过拓展社会感知理论体系, 提出基于 GD-ResNet 的城市目标动态感知与获取方法, 构建人-地一体综合感知热环境数据集, 解决人地关联时空信息智能感知和识别问题, 为定量揭示人与地理环境之间的耦合关系奠定了重要的理论基础。

(1) 社会感知理论体系框架构建。现有社会感知研究多聚焦于单一数据源分析, 缺乏系统性理论框架。移动定位数据时空粒度过粗, 难以支撑精细尺度的人-地交互研究; 传统 GIS 空间模型在动态群体行为建模方面存在理论缺失。以人作为最小粒度感知单元, 构建包含感知传输、数据管理、行为模式、空间特征和专题应用的社会感知理论体系框架 (Wang 等, 2019; Zhang 等, 2019; Jiang 等,

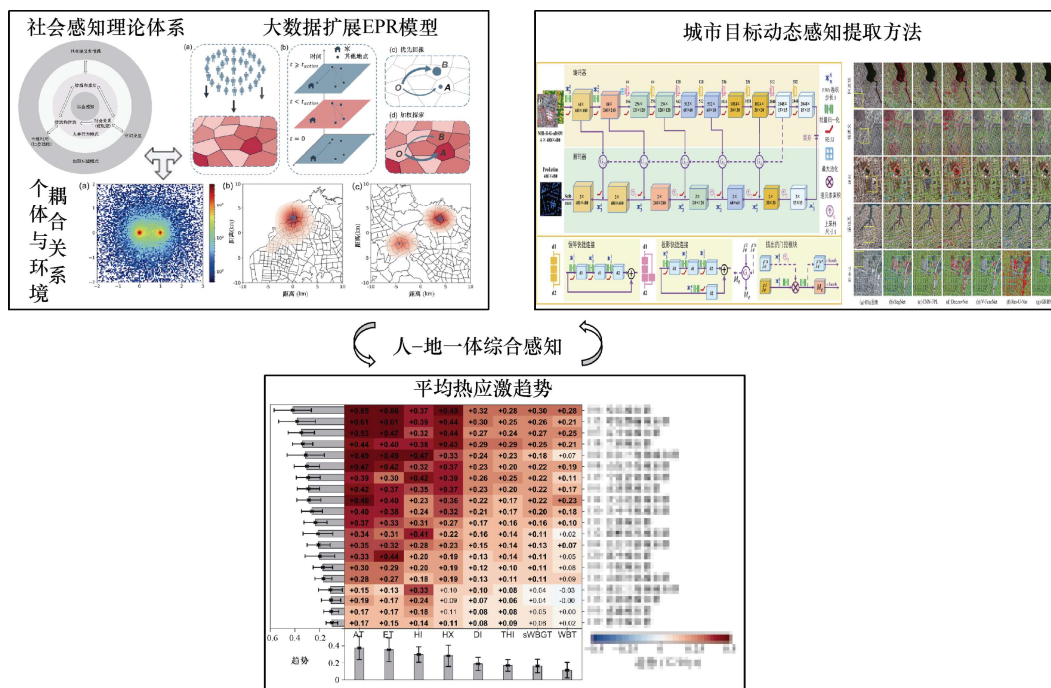


图 2 人-地一体综合感知技术体系

探索与优先返回 (exploration and priority return, EPR)

Fig.2 Integrated human-land sensing technology system

2022a, b)。利用大数据扩展 GIS 空间模型与分析方法、机器学习等方法, 智能挖掘人的时空行为模式, 阐明人-地综合感知的城市热环境演变规律, 定量揭示人与地理环境之间的耦合关系。

(2) 基于 GD-ResNet 的城市地物智能动态感知。传统卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN) 模型存在深层网络梯度消失、高低层级特征交互受限等问题 (LeCun 等, 1998)。ResNet 虽通过跳跃连接缓解梯度问题, 但固定连接方式难以适应复杂地物特征; 另外注意力机制虽能增强重要特征, 也会使计算复杂度呈平方增长 (He 等, 2016)。门控机制在自然语言了自适应特征调控优势, 因此提出一种基于 GD-ResNet 的深度学习方方法 (Huang 等, 2019), 实现遥感影像在 CNN 中高、低层级特征之间的多方向信息传递和增强, 获得更完整的地物局部视觉特征和全局空间结构信息, 以提升城市地物的智能动态感知能力。

(3) 基于人-地一体综合感知的时空信息智能感知技术及数据研发 (Luo 和 Lau, 2021)。开展时空信息数智化关键技术的人-地一体综合感知数据的生产、分析挖掘研究, 系统研究人-地一体综合感知的时空信息智能感知技术, 核心在于融合

人-地系统的多源信息, 以量化城市化对人体热应力的影响。具体而言, 整合长时间序列的气象站点观测数据与多期遥感土地利用/覆盖数据。首先, 通过分析每个气象站点周边缓冲区内的土地利用与土地覆盖 (land use and land cover, LULC) 动态变化, 将站点动态分类为城市站点或乡村站点; 其次, 基于各站点的气象数据计算多种人体热应力指标; 最后, 通过对比城市站点与乡村站点热应力指标的变化趋势差异, 构建能够揭示城市化效应的热应力数据集。

3.2 大场景多模态时空数据高效组织管理和自适应可视化技术

面对城市运行与发展过程中产生的地理空间数据、移动对象轨迹、视频监控、社交媒体文本/图像等 PB 级多模态数据的管理挑战, 传统数据库和 GIS 在处理如此海量、异构, 且具有复杂时空关联的数据时, 常面临查询效率低下、数据模型不兼容、可视化表达困难等瓶颈。因此, 系统研究大场景、多模态复杂时空数据的高性能组织管理和自适应可视化技术方法体系。提出“数据驱动+模型驱动+交互驱动”的多模态时空大数据增强可视化分析体系架构, 发展大场景时空数据高效组织管理的

多模态多层次混合时空索引方法，建立具有诊断性的时空对象自适应关联与分布模型。这突破了任务、数据、计算、绘制并行复杂交织导致的高性能

自适应可视化难题，为精确融合、描述、展示和分析时空信息提供强有力的技术支撑。大场景时空数据组织、关联、可视化方法如图3所示。

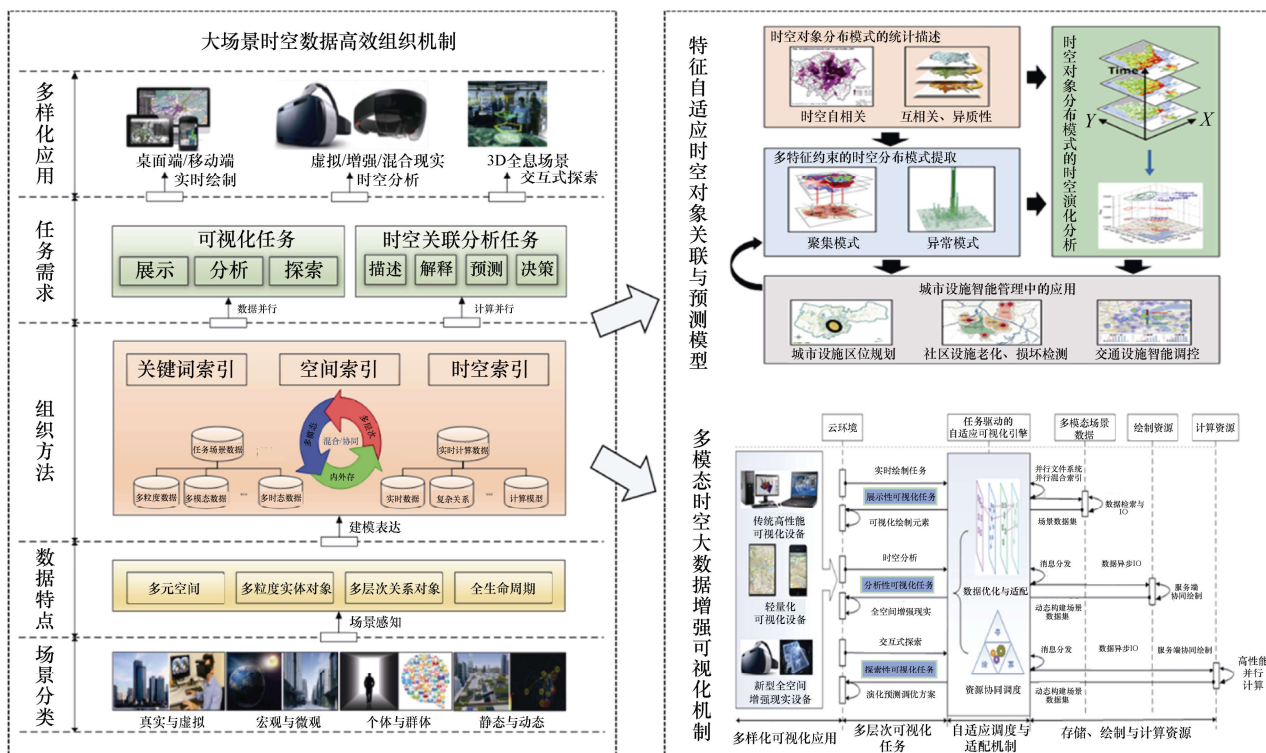


图3 大场景时空数据组织、关联、可视化方法

Fig.3 Methods for the organization, association, and visualization of spatiotemporal data in large-scale scenes

(1) 基于多模态多层次混合时空索引的大场景时空数据智能组织。现有时空索引多针对单一数据类型设计，如STR树处理移动对象、GeoHash处理点数据，缺乏跨模态的统一索引框架。地理视频数据具有时空连续性和语义关联性，传统视频关键帧提取方法易丢失地理空间信息。因此，定义一种多模态时空场景数据；并结合不同索引策略的优势，如使用全局索引维护宏观关系、局部索引处理精细时空对象，设计一种全局-局部混合时空索引体系结构；提出基于全局图的索引算法和集成的STR图索引框架(Feng等, 2018)。此外，针对具有丰富时空语义的地理视频数据，顾及其中空间位置、对象行为与场景变化，提出以位置变化为中心的语义时空索引方法(Wu等, 2018)，将语义信息与时空维度结合，提升内容检索效率。

(2) 具有诊断性的时空对象自适应关联与分布模型建立。理解城市系统中各要素之间的复杂相互作用，如人口流动、土地利用、交通状况，不是通过简单的统计描述，而是要建立能揭示内在关联和

演化机制的模型。时空数据的高维性、非线性及多模态特征间的潜在协同关系，致使建模极具挑战。考虑到低秩假设有助于从高维数据中提取本质结构与去除噪声，并发现潜在的群体模式，因此提出基于低秩表征的多尺度时空对象聚类方法(Yin等, 2017)；为能够自适应地融合不同模态的信息，并评估其对特定现象的贡献度，如交通拥堵、人群聚集，建立诊断性和预测性的多模态特征自适应协同的时空对象关联、分布和预测分析模型(Hu等, 2018)；以分析时空对象分布模式的时空演化规律从理论上解决如何有效融合多源信息并深入理解时空数据的关联融合问题。

(3) “数据驱动+模型驱动+交互驱动”的多模态时空大数据增强可视化分析体系智能构建。面对海量的复杂时空数据，传统静态地图或图表的可视化方式信息承载量有限，难以支持深入的探索性分析和复杂模式发现。用户需要更智能、更具交互性的可视化工具。从展示、分析和探索三个层次构建面向多模态时空数据自适应可视化的多层次可视

化任务模型（朱庆等，2017；刘铭崑等，2018；Wu等，2018；Li等，2020），以剖析不同任务的时空信息需求及其可视化表达驱动力。设计任务感知的多模态时空数据增强可视化引擎，整合数据驱动（自动从数据中发现显著模式并可视化）、模型驱动（将分析模型、模拟结果可视化）和交互驱动（允许用户通过交互操作动态探索数据、调整视图、验证假设）三种范式，实现原型系统，从而给用户提供更灵活、更高效、更智能的可视化分析体验。

3.3 城市安全的超前预警和精准研判模型

在城市复杂系统预警中，传统基于阈值的简单报警系统或依赖滞后统计数据的分析方法，难以应对现代城市运行的复杂性和突发事件的快速演变，迫切需要能融合多源信息、具备预测能力的智能模型。为提升城市安全态势感知与预警能力，构建基于大数据融合挖掘的时间序列行为分析、城市体征

分析等方法模型体系。提出时空行为分布与演化模式，通过时空大数据挖掘获得城市中人与自然环境的相关时空指标及规律，建立精确实时的人地关系模型；发展融合土地覆盖与变化检测的多任务变化探测模型，利用权值共享突破细粒度变化检测；研发城市内涝未来潜在危害分布图，为城市决策者的精准研判提供时空信息支持。时空信息智能认知方法如图4所示。

（1）社会感知中时空行为模式构建，包括时空行为的分布、交互和演化模式。通过对大规模、高时空分辨率的人类活动数据进行时空数据地理分析，应用聚类、关联规则挖掘、序列模式分析等技术，获得城市人群行为特征、人口流动态势、城市结构变异等以往难以精确量化的时空指标与规律，建立精确实时的人地关系模型（Zhang等，2019；Huang等，2021；Zhu等，2021；张新2022）。这有助于解决地理空间分异格局、结构与作用的反

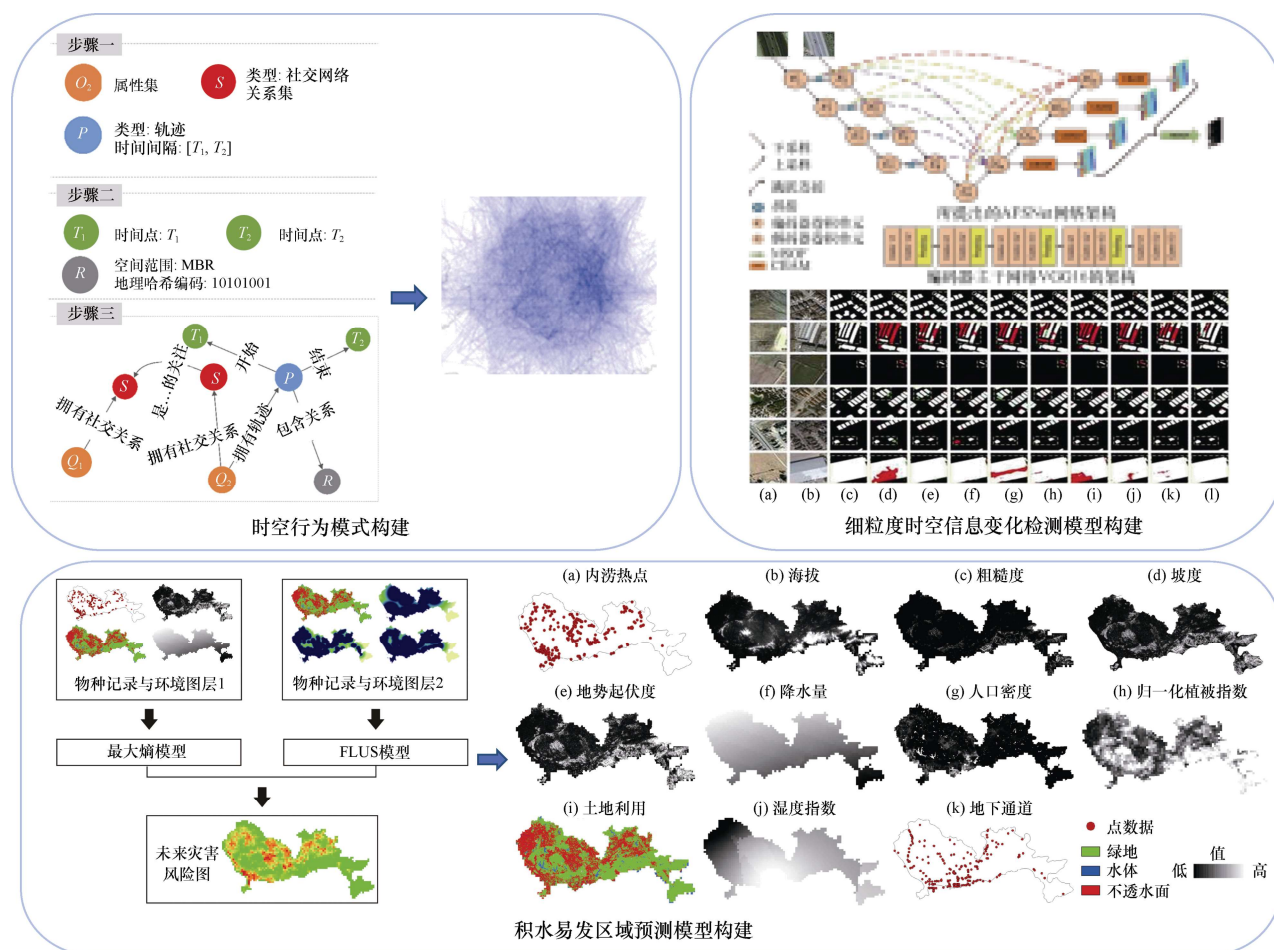


图4 时空信息智能认知方法

Fig.4 Intelligent cognitive methods for spatiotemporal information

演问题，为理解城市运行机制、识别异常活动提供基础。

(2) 细粒度时空信息变化检测模型构建 (Sun 等, 2018, 2022; Jiang 等, 2022a)。传统遥感变化检测方法通常仅输出变化或未变化的二元结果，或仅关注单一土地覆盖类型的变化，难以满足城市精细化管理对“什么地物变成了什么地物”这一细粒度变化信息的需求。通过将土地覆盖分类与变化检测这两个密切相关的任务整合进一个多任务学习框架中，进行网络权值共享，使模型能够同时学习地物识别特征和变化特征，相互促进，实现地物类别感知的细粒度变化检测。亦即，依托人工智能模型，利用遥感、大数据，实现城市运行的定期评估与长期监测。

(3) 城市未来积水易发区域预测模型构建。城市内涝是多种因素复杂作用的结果，如降水、地形、下垫面、管网等，且未来土地利用变化会显著影响区域的易涝性，这使得预测极具挑战。结合最大熵模型及未来土地利用模拟模型等，构建用于预测未来积水易发区域的稳健方法 (Liu 等, 2017; Lin 等, 2022)。在揭示不透水表面的比例、人口密度和地比例是城市内涝关键空间驱动因素的基础上，预测动态土地利用变化情景下潜在积水易发区域时空分布格局。

3.4 技术协同与对数智化平台的系统性支撑

上文所述通过逻辑递进与功能互补，构建了时空信息数智化平台的核心技术链条。协同作用体现为三个方面。

(1) 感知层驱动数据输入。基于 GD-ResNet 的动态感知方法，实现人-地-环境多源异构数据的高精度捕获与语义对齐，为平台提供实时、全域的时空信息输入，以解决传统感知碎片化、单模态的局限。

(2) 数据层赋能高效处理。通过全局-局部混合时空索引与自适应可视化引擎，实现 PB 级多模态数据的轻量化组织与任务驱动调度，支撑大场景数据的秒级检索与高帧率交互展示，为智能认知与决策提供结构化数据基础。

(3) 应用层实现价值闭环。安全预警模型融合机理分析与数据挖掘，将感知与处理后的数据转化为超前预警信号与精准治理策略，通过智能服务模块反馈至城市管理末端，形成感知-融合-认知-

决策-服务的全流程闭环。

上述三者以数据流为纽带，逐层递进，共同解决了数据壁垒、分析低效、决策滞后的瓶颈问题，支撑平台在智能感知、动态分析、实时响应等维度的综合性能提升，为智慧城市的精细化治理与可持续发展提供技术保障。

3.5 典型应用案例

聚焦于时空信息数智化全流程的关键技术研发和应用推广，相关成果已广泛应用于国土空间规划、城市治理、民生服务等多个行业领域，并取得了良好的社会效益，为推动区域社会经济发展做出积极贡献。时空信息数智化平台应用案例如图 5 所示。城乡院（广州）有限公司在不增加增城区开发区用地规模的情况下，融合规划建设用地与高分航空影像、高压电网、绿地、道路、环保、文物等异构空间信息，进行了局部区域内部规划建设用地与道路、绿地、管线、现状自然资源用地调整，置换出了可利用的连片建设用地 2000 余亩（1 亩 $\approx$ 666.67 m²）。这充分展现了时空信息数智化技术在城市管理的强大支撑与辅助作用，有效提升了国土空间资源的利用效率和价值。

4 结 语

时空信息数智化平台是智慧城市建设与运行不可或缺的基础性支撑。时空信息数智化平台的建立将涉及城市各个要素，如何让机器打破多元信息壁垒，理解城市时空演变过程、挖掘其背后隐含的本质，在人工智能与地理信息科学领域均属于前沿难题。针对上述挑战，并响应数字中国与智慧社会建设的战略需求，本文以时空信息智能感知-智能融合-智能认知-智能决策-智能服务的全生命周期流转处理方向为关键技术突破节点，阐述了时空信息数智化平台，为新型智慧城市建设提供了有力支撑。主要包括：①提出了基于社会感知的人群行为模式提取和基于 GD-ResNet 的城市目标动态感知方法，实现了城市人地关联时空信息智能泛在感知；②研发了基于全局-局部混合时空索引的大场景多模态时空数据高效组织管理和自适应可视化技术方法，突破了多任务并行交织下的高性能自适应可视化难题，奠定了城市时空大数据的精准融合与动态分析的基础；③建立了时空行为模式分

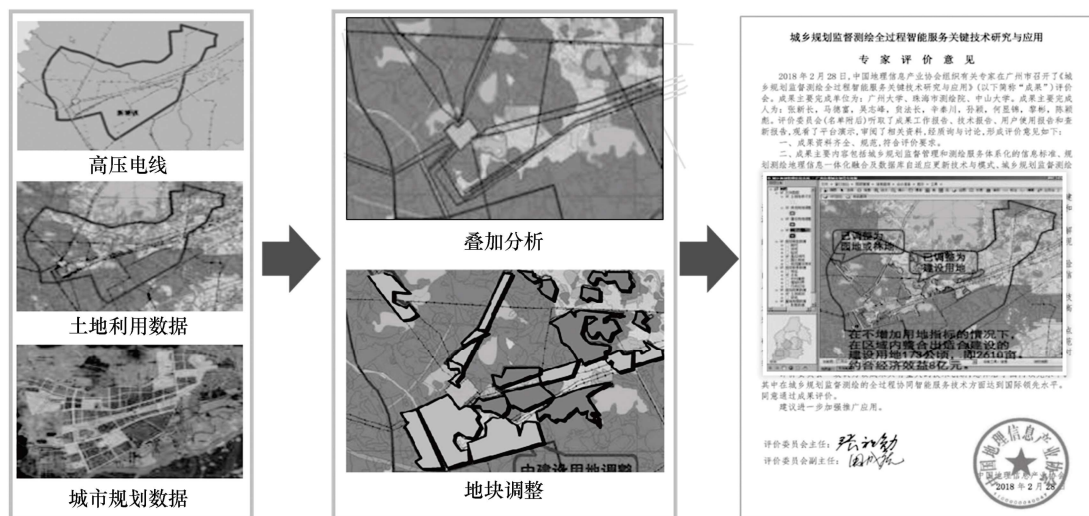


图5 时空信息数智化平台应用案例

Fig.5 Application case studies of spatiotemporal information digital intelligence platform

析、城市体征细粒度监测、潜在危害预测等模型，实现了对城市安全的超前预警和精准研判；④研发了时空信息数智化平台，协同政府部门、人民群众等多方主体，在国土空间规划、社会精细化治理等领域支撑了政府的科学决策。

尽管在时空信息数智化技术方面取得了一定进展，但仍存在一些不足。一是，面对智慧城市建设中不断涌现的异构化、碎片化新形态数据，平台在形成统一、动态适应的标准方面尚有欠缺。未来方向将聚焦于自适应数据治理框架，以实现从数据层面的被动融合向知识层面的主动互操作跨越。二是，平台虽已具备强大的分析能力、初步智能决策功能，且能实现对城市复杂系统动态变化的部分前瞻性预判，但尚未形成 预判与主动干预的深度联动。下一步工作将致力于将平台功能从智能监测提升至智慧干预，能够真正实现对城市复杂系统的动态模拟与优化。

参考文献 (References)

- 陈军, 翟曦, 王艳慧, 阮于洲, 刘万增, 李晓波, 吴洪涛, 曹春华, 王东华, 赵鹏军, 王光辉, 王立刚. 2024. 智慧国土的基本内涵与发展方向. 时空信息学报, 31(2): 157-167[Chen J, Zhai X, Wang Y H, Ruan Y Z, Liu W Z, Li X B, Wu H T, Cao C H, Wang D H, Zhao P J, Wang J H, Wang L G. 2024. The basic connotation and development directions of smart territory. Journal of Spatio-temporal Information, 31(2): 157-167 (in Chinese)]
- 杜俊健, 杨俊涛, 康志忠, 王旭哲, 彭城. 2024. 一种联合时空信息与社交互动特征的行人轨迹预测方法. 时空信息学报, 31(3): 337-347[Du J J, Yang J T, Kang Z Z, Wang X Z, Peng C. 2024. A pedestrian trajectory prediction method integrating spatiotemporal

- information and social interaction features. Journal of Spatio-temporal Information, 31(3): 337-347 (in Chinese)]
- 李成仁, 冒静娴. 2025. 面向城市治理的实景三维平台建设关键技术. 时空信息学报, 32(2): 203-213[Li C R, Mao J X. 2025. Key technologies for the construction of a 3D realistic geospatial landscape model platform for urban governance. Journal of Spatio-temporal Information, 32(2): 203-213 (in Chinese)]
- 李德仁. 2021. 基于数字孪生的智慧城市. 互联网天地, (7): 12[Li D R. 2021. Smart city based on digital twin. China Internet, (7): 12 (in Chinese)]
- 刘铭威, 朱庆, 朱军, 冯斌, 李赟, 张骏骁, 付萧, 张鹏程, 杨卫军, 宁新稳, 徐婉妍. 2018. 多模态时空数据多层次可视化任务模型. 测绘学报, 47(8): 1098-1104[Liu M W, Zhu Q, Zhu J, Feng B, Li Y, Zhang J X, Fu X, Zhang P C, Yang W J, Ning X W, Xu W Y. 2018. The multi-level visualization task model for multi-modal spatio-temporal data. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 47(8): 1098-1104 (in Chinese)]
- 阮永俭, 张新长, 居圣哲, 廖曦, 阮宝珍, 刘江, 敬峰瑞. 2023. 智慧城市快速建设背景下的老旧社区智慧化改造探讨. 测绘通报, (1): 14-19[Ruan Y J, Zhang X C, Ju S Z, Liao X, Ruan B Z, Liu J, Jing F R. 2023. The wisdom renovation of old communities in the context of rapid construction of smart city. Bulletin of Surveying and Mapping, (1): 14-19 (in Chinese)]
- 王家耀, 秦奋, 郭建忠. 2021. 建设黄河“智能大脑”服务流域生态保护和高质量发展. 测绘通报, (10): 1-8[Wang J Y, Qin F, Guo J Z. 2021. Building the “intelligent brain” of the Yellow River to serve the ecological protection and high-quality development of the river basin. Bulletin of Surveying and Mapping, (10): 1-8 (in Chinese)]
- 王瑜婷. 2024. 周成虎院士: 智慧城市让人、自然与社会更加和谐. 中国测绘, (8): 31-33[Wang Y T. 2024. Academician Zhou Chenghu: Smart cities make people, nature and society more harmonious. China Surveying and Mapping, (8): 31-33 (in Chinese)]
- 吴杭彬, 韦朝旭, 陈茜茜, 胡辰雨, 周少军, 赵峰, 刘一宁, 黄炜, 刘春. 2024. 基于本体和知识图谱的城市空间数字底座架构及应用. 时空信息学报, 31(2): 292-301[Wu H B, Wei C X, Chen Q Q, Hu C Y, Zhou S J, Zhao F, Liu Y N, Huang W, Liu C. 2024. Architecture and application of urban spatial digital base based on ontology and knowledge graph. Journal of Spatio-temporal Information, 31(2): 292-301 (in Chinese)]
- 吴华意, 黄蕊, 游兰, 向隆刚. 2019. 出租车轨迹数据挖掘进展. 测绘学报, 48(11): 1341-1356[Wu H Y, Huang R, You L, Xiang L G.

2019. Recent progress in taxi trajectory data mining. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 48(11): 1341-1356 (in Chinese)]
- 徐红. 2024. 李德仁院士：智慧城市建设进入发展新高度. *中国测绘*, (8): 24-26[Xu H. 2024. Academician Li Deren: Smart city construction has entered a new height of development. *China Surveying and Mapping*, (8): 24-26 (in Chinese)]
- 张朝阳, 李翔宇, 翁阳, 黄竞雄, 党安荣. 2024. 基于多源时空数据的北京大型公园绿色绅士化现象研究. *时空信息学报*, 31(6): 773-784[Zhang C Y, Li X Y, Weng Y, Huang J X, Dang A R. 2024. Green gentrification in Beijing's large urban parks: A multi-source spatiotemporal data analysis. *Journal of Spatio-temporal Information*, 31(6): 773-784 (in Chinese)]
- 张新长, 何显锦, 孙颖, 黄健锋, 张志强. 2022. 多尺度空间数据联动更新技术研究现状及展望. *测绘学报*, 51(7): 1520-1535 [Zhang X C, He X J, Sun Y, Huang J F, Zhang Z Q. 2022. Advance and future development of the multi-scale spatial data linkage updating. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 51(7): 1520-1535 (in Chinese)]
- 张新长, 廖曦, 阮永俭. 2023. 智慧城市建设中的数字孪生与元宇宙探讨. *测绘通报*, (1): 1-7, 13[Zhang X C, Liao X, Ruan Y J. 2023. Discussion on digital twin and metaverse in smart city construction. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (1): 1-7, 13 (in Chinese)]
- 张新长, 华淑贞, 齐霁, 阮永俭. 2024. 新型智慧城市建设与展望：基于 AI 的大数据、大模型与大算力. *地球信息科学学报*, 26(4): 779-789[Zhang X C, Hua S Z, Qi J, Ruan Y J. 2024. Progress and prospects of new smart city construction: AI-based big data, big models and big computing power. *Journal of Geo-Information Science*, 26(4): 779-789 (in Chinese)]
- 张新长, 李少英, 周启鸣, 孙颖. 2021. 建设数字孪生城市的逻辑与创新思考. *测绘科学*, 46(3): 147-152, 168[Zhang X C, Li S Y, Zhou Q M, Sun Y. 2021. The rationale and innovative thinking of building Digital Twin City. *Science of Surveying and Mapping*, 46(3): 147-152, 168 (in Chinese)]
- 赵鹏军, 陈霄依, 王祎勃, 侯勇企, 郑昱. 2025. 城市系统交通需求模拟预测技术框架构建及应用. *地球信息科学学报*, 27(3): 539-552[Zhao P J, Chen X Y, Wang Y Q, Hou Y Q, Zheng Y. 2025. Construction and application of an urban system-based travel demand forecasting technology framework. *Journal of Geo-Information Science*, 27(3): 539-552 (in Chinese)]
- 朱庆, 陈兴旺, 丁雨淋, 刘铭崑, 何华贵, 杨卫军, 陈利燕, 曹振宇. 2017. 视觉感知驱动的三维城市场景数据组织与调度方法. *西南交通大学学报*, 52(5): 869-876[Zhu Q, Chen X W, Ding Y L, Liu M W, He H G, Yang W J, Chen L Y, Cao Z Y. 2017. Organization and scheduling method of 3D urban scene data driven by visual perception. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 52(5): 869-876 (in Chinese)]
- Chen L, Xu F L, Han Z Y, Tang K, Hui P, Evans J, Li Y. 2022. Strategic COVID-19 vaccine distribution can simultaneously elevate social utility and equity. *Nature Human Behaviour*, 6(11): 1503-1514
- Feng B, Zhu Q, Liu M W, Li Y, Zhang J X, Fu X, Zhou Y, Li M S, He H G, Yang W J. 2018. An efficient graph-based spatio-temporal indexing method for task-oriented multi-modal scene data organization. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(9): 371
- He K M, Zhang X Y, Ren S Q, Sun J. 2016. Deep residual learning for image recognition//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 770-778
- Hu Y, Zhu J, Li W L, Zhang Y H, Zhu Q, Qi H, Zhang H X, Cao Z Y, Yang W J, Zhang P C. 2018. Construction and optimization of three-dimensional disaster scenes within mobile virtual reality. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(6): 215
- Huang J F, Zhang X C, Sun Y, Xin Q C. 2021. Attention-guided label refinement network for semantic segmentation of very high resolution aerial orthoimages. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 4490-4503
- Huang J F, Zhang X C, Xin Q C, Sun Y, Zhang P C. 2019. Automatic building extraction from high-resolution aerial images and LiDAR data using gated residual refinement network. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 151: 91-105
- Jiang M, Zhang X C, Sun Y, Feng W M, Gan Q, Ruan Y J. 2022a. AFSNet: Attention-guided full-scale feature aggregation network for high-resolution remote sensing image change detection. *GIScience & Remote Sensing*, 59(1): 1882-1900
- Jiang Z J, Dong L, Wu L, Liu Y. 2022b. Quantifying navigation complexity in transportation networks. *PNAS Nexus*, 1(3): 126
- LeCun Y, Bottou L, Bengio Y, Haffner P. 1998. Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11): 2278-2324
- Li Y, Zhu Q, Fu X, Feng B, Liu M W, Zhang J X, Zhu J, He H G, Yang W J. 2020. Semantic visual variables for augmented geovisualization. *The Cartographic Journal*, 57(1): 43-56
- Lin J Y, He P T, Yang L, He X Y, Lu S Y, Liu D Y. 2022. Predicting future urban waterlogging-prone areas by coupling the maximum entropy and FLUS model. *Sustainable Cities and Society*, 80: 103812
- Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. 2017. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 168: 94-116
- Luo M, Lau N C. 2021. Increasing human-perceived heat stress risks exacerbated by urbanization in China: A comparative study based on multiple metrics. *Earth's Future*, 9(7): e2020EF001848
- Sun Y, Li Z M, He H G, Guo L, Zhang X C, Xin Q C. 2022. Counting trees in a subtropical mega city using the instance segmentation method. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 106: 102662
- Sun Y, Zhang X C, Xin Q C, Huang J F. 2018. Developing a multi-filter convolutional neural network for semantic segmentation using high-resolution aerial imagery and LiDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 143: 3-14
- Wang J Y, Dong L, Cheng X M, Yang W J, Liu Y. 2019. An extended exploration and preferential return model for human mobility simulation at individual and collective levels. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 534: 121921
- Wu C, Zhu Q, Zhang Y T, Xie X, Qin H, Zhou Y, Zhang P C, Yang W J. 2018. Movement-oriented objectified organization and retrieval approach for heterogeneous GeoVideo data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(7): 255
- Xu F L, Li Y, Jin D P, Lu J H, Song C M. 2021. Emergence of urban growth patterns from human mobility behavior. *Nature Computational Science*, 1(12): 791-800
- Yin L Z, Zhu J, Li Y, Zeng C, Zhu Q, Qi H, Liu M W, Li W L, Cao Z Y, Yang W J, Zhang P C. 2017. A virtual geographic environment for debris flow risk analysis in residential areas. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(11): 377
- Zhang F, Wu L, Zhu D, Liu Y. 2019. Social sensing from street-level imagery: A case study in learning spatio-temporal urban mobility patterns. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 153: 48-58
- Zhang F, Zhou B L, Liu L, Liu Y, Fung H H, Lin H, Ratti C. 2018. Measuring human perceptions of a large-scale urban region using machine learning. *Landscape and Urban Planning*, 180: 148-160
- Zhu Q, Liao C, Hu H, Mei X M, Li H F. 2021. MAP-Net: Multiple attending path neural network for building footprint extraction from remote sensed imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(7): 6169-6181

Key technologies of spatiotemporal information digital intelligence towards smart governance

ZHANG Xinchang^{1,2}, WU Lun³, ZHU Qing⁴, LIU Yu³, CAO Kaibin⁵, SUN Ying⁶, LUO Ming⁶,
RUAN Yongjian², LIN Jinyao², LIU Feng⁵

1. College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;

2. School of Geography and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

3. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

4. Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

5. Urban and Rural Institute (Guangzhou) Co., Ltd., Guangzhou 511300, China;

6. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China

Abstract: Spatiotemporal information digital intelligence platforms constitute an indispensable foundational infrastructure for constructing and operating smart cities, representing the technological linchpin for realizing a truly intelligent urban twin. However, enabling machines to break down information silos, comprehend urban spatiotemporal evolution, and uncover latent patterns presents a frontier challenge at the intersection of artificial intelligence (AI) and geographic information science (GIS). Traditional systems, engineered for structured data, struggle with the velocity and heterogeneity of contemporary urban data streams. This gives rise to three critical challenges: fragmented processing of multi-modal data obstructs a holistic view of the “urban pulse”; a persistent semantic gap impedes the transformation of vast data volumes into actionable knowledge; and a disconnection between perceptual, data-driven approaches and established mechanistic models constrains our ability to understand causal relationships, consigning urban management to a reactive posture rather than a proactive one. This study confronts these challenges by proposing and developing a comprehensive spatiotemporal information digital intelligence platform. Its architecture is meticulously designed around the full lifecycle of spatiotemporal information, encompassing five key stages: intelligent perception, intelligent fusion, intelligent cognition, intelligent decision-making, and intelligent services. This framework methodically guides the transformation along a “data-information-knowledge-service” value chain: raw multi-source data are acquired through perception; they are organized into structured information via fusion; patterns and insights are extracted as actionable knowledge during cognition; and this knowledge ultimately drives intelligent decision-making and targeted service delivery. This architecture fundamentally shifts the paradigm of urban governance from fragmented reaction to integrated, predictive foresight. The research introduces significant innovations across several domains. First, in intelligent perception, we established a ubiquitous sensing framework for monitoring urban human-land interactions, integrating both physical and social sensing modalities. This was accomplished by developing a novel gated deep residual optimization network (GD-ResNet), which adaptively enhances information flow between feature layers to capture both fine-grained local textures and overarching global spatial structures from remote sensing imagery. Second, to surmount data management bottlenecks, we devised a high-performance organization and adaptive visualization system. A core innovation is a global-local hybrid spatiotemporal indexing mechanism that creates a unified framework for efficiently querying petabyte (PB)-scale heterogeneous data. This is augmented by an adaptive visualization engine that supports collaborative, hypothesis-driven exploration for decision-makers. Third, in intelligent cognition, the research developed advanced models offering both diagnostic and prognostic capabilities. By bridging the gap between empirical observation and physical reality, models for phenomena such as urban waterlogging not only identify current risks but also predict future vulnerabilities under various development scenarios, enabling decision-makers to understand the causes of events and simulate potential outcomes of interventions. These technological advancements were systematically integrated into the unified digital intelligence platform. The platform has been successfully deployed and widely applied across numerous sectors, including urban master planning and land management, economic operations, public safety, and ecological conservation. By providing a scientific basis for fine-grained urban governance and evidence-based decision-making, as demonstrated by practical applications in enhancing land-use efficiency and optimizing resource allocation.

Key words: spatiotemporal information; digital and intelligent platform; smart city; artificial intelligence; natural resource management

Supported by National Natural Science Foundation of China (42571533, 42371406, 42401518); Humanities and Social Sciences Youth Foundation of Ministry of Education of China (23YJC630145); Natural Science Foundation of Guangdong Province (2025A1515011066)