

引用格式:张新长,齐霁,陈一平,等.面向城乡融合的智能规划关键技术与应用[J].地球信息科学学报,2026,28(1):15-27. [Zhang X C, Qi J, Chen Y P, et al. Key Technologies and applications of intelligent planning for urban-rural integration development[J]. Journal of Geo-information Science, 2026,28(1):15-27.] DOI:10.12082/dqxxkx.2026.250444; CSTR:32074.14.dqxxkx.2026.250444

面向城乡融合的智能规划关键技术与应用

张新长^{1,2,3}, 齐 霁^{2,3}, 陈一平⁴, 刘 锋^{5*}, 易雅琴⁶, 张元梅¹, 阮永俭^{2,3}, 袁源琳⁷, 赵 元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. 广州大学黄埔研究院, 广州 510000; 4. 中山大学遥感科学与技术学院, 珠海 519082; 5. 城乡院(广州)有限公司, 广州 511300; 6. 广东省国土资源测绘院, 广州 510500; 7. 广东省城乡规划设计研究院科技集团股份有限公司, 广州 510290

Key Technologies and Applications of Intelligent Planning for Urban-Rural Integration Development

ZHANG Xinchang^{1,2,3}, QI Ji^{2,3}, CHEN Yiping⁴, LIU Feng^{5*}, YI Yaqin⁶, ZHANG Yuanmei¹, RUAN Yongjian^{2,3}, YUAN Yuanlin⁷, ZHAO Yuan⁵

1. The 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. Huangpu Research School of Guangzhou University, Guangzhou 510000, China; 4. School of Geospatial Engineering and Science, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 5. Urban and Rural Institute (Guangzhou) Co., Ltd., Guangzhou 511300, China; 6. Guangdong Institute of Land Resources Surveying and Mapping, Guangzhou 510500, China; 7. Guangdong Urban-rural Planning and Design Research Institute Technology Group Co., Ltd., Guangzhou 510290, China

Abstract: [Objectives] To systematically investigate the key pathways and application models for leveraging intelligent technologies in urban-rural integrated planning. It seeks to explore potential responses to the complex challenges arising from China's strategic developmental shift towards the renewal and quality enhancement of its existing urban and rural stock. In this new era, traditional planning methodologies, which often rely on static data and experience-driven decision-making, face significant limitations in addressing the intricate stakeholder relationships, intertwined land uses, and dynamic nature of established built environments. This review, therefore, explores how a more intelligent, data-informed approach could better support contemporary planning objectives. **[Discussion]** Addressing challenges such as the precise identification of multi-source features, the issue of persistent data silos, and the need for in-depth cognition of complex human-environment relationships, this paper reviews and proposes a closed-loop "Perception-Fusion-Cognition-Planning" conceptual framework. This framework is intended to guide the application of intelligent digitalization across the planning lifecycle. It begins with Intelligent Perception, which suggests integrating multi-modal data from sources like high-altitude cameras and

收稿日期:2025-09-20;修回日期:2025-10-19.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42371406,42571533)。 [**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.42371406, No.42571533.]

作者简介:张新长(1957—),男,新疆乌鲁木齐人,博士,国际欧亚科学院院士,俄罗斯工程院外籍院士,主要从事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等方面的教学与研究。E-mail: zhangxc@gzhu.edu.cn

*通讯作者:刘 锋(1983—),男,广东龙川人,硕士,高级工程师,主要从事空间数据整合、地理空间分析等方面研究。E-mail: zulf@163.com

drones with AI-driven algorithms for the automated semantic analysis and dynamic monitoring of urban-rural elements. This is followed by Spatio-temporal Data Fusion, which focuses on standardizing and integrating these heterogeneous data streams onto a unified baseline, creating a consistent and reliable digital foundation for analysis. The third stage, Cognition, employs knowledge graph technology to transform the integrated data into deep, systemic insights by explicitly modeling the implicit relationships between spatial entities, socio-economic factors, and regulatory policies. Finally, the Planning and Governance stage describes how an integrated enabling platform can translate these insights into actionable decision support, facilitating scenario analysis and collaborative workflows. A case study focused on farmland protection in Zengcheng District, Guangzhou, is presented to illustrate the potential and feasibility of this integrated technological pathway. The case demonstrates how the framework can be applied to achieve end-to-end governance, from automated change detection to policy-based reasoning and targeted enforcement. **[Prospect]** This systematic framework offers a potential conceptual approach for addressing the multifaceted challenges inherent in the intelligent planning for urban-rural integration. It is hoped that this work can help facilitate a paradigm shift in planning from traditional, experience-driven methods toward modern, data-informed "platform-based governance," characterized by more dynamic, evidence-based, and collaborative processes. By providing both theoretical references and practical guidance, this review aims to contribute to the ongoing efforts to modernize spatial governance capabilities, thereby supporting the overarching goals of sustainable and high-quality integrated development in China.

Key words: urban development; urban-rural integration; territorial spatial planning; spatial governance; intelligent planning; Artificial Intelligence

***Corresponding author:** LIU Feng, E-mail: zsul@163.com

摘要:【目的】系统探讨智能技术赋能城乡规划的关键路径与应用模式,以应对我国城乡发展进入存量提质增效阶段后面临的复杂挑战。【探讨】针对多源要素精准识别、数据孤岛消解、复杂人地关系认知等难题,本文系统梳理并提出了一个“感知-融合-认知-规划”四位一体的智能技术框架。该框架旨在通过集成多模态智能感知技术以实现城乡要素的动态监测,运用时空数据融合技术以构建统一数字底座,采用知识图谱技术以深化对空间与人文要素关联的理解,并最终依托一体化赋能平台以支撑智能设计与协同决策。以广州增城区耕地保护为例的案例分析,初步验证了该智能化技术路径在城乡生态空间闭环治理中的应用潜力与可行性。【展望】这一系统性的技术框架为破解城乡融合智能规划难题提供了一种可能的解决思路,有望促进规划范式从传统经验驱动向现代化的“平台治理”转型,为新时期提升我国城乡空间治理能力提供理论参考与实践指引。

关键词:城市发展;城乡融合;国土空间规划;空间治理;智能规划;人工智能

1 引言

当前,我国城乡发展正步入深刻转型期。2025年8月,《中共中央、国务院关于推动城市高质量发展的意见》中明确指出,“我国城镇化正从快速增长期转向稳定发展期,城市发展正从大规模增量扩张阶段转向存量提质增效为主的阶段^[1]。”这一“两个转向”的重大论断标志着我国城市工作的重心已发生历史性迁移。新的时代目标是建设“创新、宜居、美丽、韧性、文明、智慧”的现代化人民城市,其核心路径在于大力推动“城市结构优化、动能转换、品质提升、绿色转型、文脉赓续、治理增效”。在此宏观背景下,城乡关系及其空间治理模式的重塑成为实现中国式现代化的关键议题。

城乡融合作为协调区域空间重构、引导要素高效配置、促进城乡共同繁荣的关键,其核心任务已从传统的新增建设用地扩张,深刻转变为对城乡存量空间的系统性优化与一体化治理^[2]。党的二十大报告与党的二十届三中全会精神均强调,要全面提高城乡规划、建设、治理的融合水平,促进城乡要素双向流动与共同繁荣。这要求规划不再是分割城乡、各自为战的蓝图绘制,而是必须深入存量肌理,通过功能置换、空间织补、设施联动与生态共保等手段,实现城乡空间的有机更新与价值再生。因此,如何精准响应这一转型需求,成为新时期国土空间规划体系面临的重大挑战。

然而,存量背景下的城乡融合面临着前所未有的复杂性。与增量规划相对清晰的“白地”不同,存

量空间呈现出权利关系复杂、利益主体多元、系统耦合性强、历史文脉与现实需求交织等特征。传统的规划方法,往往依赖于静态的断面数据、有限的样本调研和经验驱动的方案比选,在应对城乡复杂系统的动态演化、多源异构要素的内在关联以及多重目标间的权衡博弈时,其在数据获取的全面性与时效性、空间认知的广度与深度、决策推演的精准性和预见性等方面的局限性日益凸显,难以满足上述“两个转向”的时代需求。

为应对上述挑战,引入前沿智能技术以构建贯穿城乡融合全过程的支撑体系,已成为提升规划科学性、决策精准性的关键突破口。其核心在于通过集成遥感、地理信息系统(Geographic Information System, GIS)、人工智能与大数据分析等技术,形成覆盖“感知-融合-认知-规划”全链条的智能能力,进而为深刻洞悉城乡复杂系统、精准推演发展情景、优化配置空间资源提供强大的技术引擎^[3-5]。本研究旨在系统梳理并构建面向存量更新的城乡融合智能规划技术框架,并探讨其应用路径,以期为我国城乡空间治理能力的现代化转型提供理论参考与实践支撑。

2 面向城乡融合的智能规划理论框架

城乡规划的智能化转型需要理论框架提供有效指引。为此,本文提出如图1所示的整体框架,以“感知-融合-认知-规划”为核心脉络,依次贯穿智能感知、智能融合、智能认知与智能规划四大环节,共同驱动规划范式的系统性变革。其内在逻辑在于:通过智能感知对城乡时空要素进行精准捕获;继而运用智能融合对多源异构数据实现无缝集成;



图1 面向城乡融合的智能规划框架

Fig. 1 A Intelligent planning framework for urban-rural integration

在此基础上,经由智能认知深度挖掘数据背后潜藏的模式与关联;最终,将洞察赋能于智能规划,形成科学决策与高效治理。这一环环相扣的递进式架构,旨在为应对存量更新背景下的城乡规划挑战提供系统性的理论指引。

2.1 智能感知:城乡地理要素的精准语义化

智能感知作为智能规划框架中的首要环节,其重点在于对城乡各类地理要素进行全面、精确且实时的获取与识别。这一阶段的根本目标是实现“感知准”,即确保所获取数据的准确性、完整性与时效性,为后续的分析、认知与规划奠定坚实的基础。城乡地理环境复杂,表现为自然地貌与人造景观混存,空间尺度差异显著,从宏观的区域地貌特征到微观的建筑结构细节,均需被有效感知并精确捕捉。

智能感知的核心在于突破传统单一数据源的感知局限,通过整合多模态空间数据,形成互补协同的观测能力。这包括但不限于:卫星遥感数据能够提供广域覆盖和周期性更新的宏观视角,航空摄影数据能够捕捉中高分辨率的区域细节和纹理信息,激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)数据,则以其高精度三维点云的特性,精确刻画地物的高度、形态和结构,地理信息系统数据作为承载和管理各类空间信息的框架^[6]。这些不同来源、不同特性的数据并非孤立存在,而是通过智能感知机制被有机地汇聚起来,形成一个多维度、多尺度的城乡空间信息集合,旨在克服单一数据源在空间分辨率、信息维度或覆盖范围上的局限性,从而实现对城乡景观中建筑、道路、植被、水体等多样化、异构性要素的智能化识别与动态监测^[7-9]。这种智能化识别能够自动、准确地辨识出城乡区域内各种自然和人造地物,并对其空间分布、形态特征以及功能属性进行精确描述。同时,通过持续性的数据采集和分析,智能感知还能够实现对城乡要素的动态监测,及时捕捉其随时间发生的变化,例如城市扩张、乡村聚落变迁、基础设施更新或生态环境演变等,为城乡规划的动态调整和精细化管理提供实时、可靠的数据支撑。

2.2 智能融合:多源数据的协同集成

智能融合是智能规划框架中的关键枢纽环节,其核心功能在于将智能感知阶段所获取的多元、异

构数据进行系统性的整合与协调。城乡区域的数据来源广泛且多样,涉及不同平台的数据格式、不同的空间基准、不一致的空间覆盖度以及密度差异极大的各类信息。因此,智能融合阶段的根本目标是实现“融合全”,即构建一个统一、全面且无缝的数据基础,以消除数据壁垒,确保所有相关信息能够被综合利用,从而形成对城乡系统更为完整和深入的理解。

智能融合在处理多时序地表关键要素时,需要一个能够有效整合海量、多源、异构数据的统一框架提供一个统一的、动态的时空数据管理与集成环境,它能够应对来自卫星遥感、航空摄影、激光雷达、地理信息系统等不同类型、不同时相的数据,并为其建立统一的空间基准和时间模型。这种融合不仅仅是数据的简单叠加,更是通过空间配准、数据清洗、语义匹配等概念性操作,实现不同数据源之间的逻辑关联和协同增效^[10-12]。特别是在多时序地表关键要素的融合与更新中,智能融合致力于构建统一的时空参考系,以确保不同时间点、不同来源的数据在空间和时间维度上的一致性与兼容性。通过整合多时序数据,该阶段旨在捕捉地表关键要素的动态变化,维持时间连续性,从而构建一个全面、一致且持续更新的动态空间数据库,有效解决了城乡规划中长期存在的“数据孤岛”问题,促进了不同来源和时间点数据的协同利用,从而提升了数据的整体价值和城乡系统动态演变的全面理解。

2.3 智能认知:基于知识图谱的城乡空间深度理解

智能认知是智能规划框架中承上启下的核心环节,其目的在于将经过智能融合处理的多元数据转化为有意义的知识和深层洞察。城乡系统不仅包含物质空间要素,更蕴含着复杂的社会、经济、生态功能及其相互关系,这些关系往往是非线性且动态变化的。因此,智能认知阶段的根本目标是实现“认知清”,即清晰地理解城乡要素的空间结构、功能关系以及演变规律,从而为科学决策提供依据。这一过程超越了单纯的数据展示,旨在揭示数据背后隐藏的模式、趋势和潜在问题,将数据转化为可理解、可应用的规划知识。

知识图谱的构建是实现智能认知的关键步骤,知识图谱作为一种结构化的知识表示方法,能够将城乡空间中离散的实体(如建筑、道路、绿地、人口、产业等)及其复杂的相互关系以图的形式组织起来。它通过构建实体、属性和关系的三元组,将异

构数据转化为统一的知识体系,从而弥合了城乡空间结构与功能关系之间的割裂^[13-15]。这种知识驱动的框架,能够从海量数据中提取深层语义信息,实现对城乡复杂相互依赖关系的整体理解,将碎片化信息转化为结构化知识库,以支持高级分析、预测和决策。更重要的是,知识图谱能够进一步揭示这些实体之间的复杂关系,例如“建筑物位于某地块”“道路连接某区域”“产业集聚于某功能区”,以及“人口分布与公共服务设施的关联”等。这种对空间与人文要素关联关系的建模,突破了传统数据分析中空间与人文信息割裂的局限性,使得规划者能够从更宏观、更全面的视角理解城乡系统的运行机制,从而提升空间与人文要素分析的准确性与全面性,推动城乡规划向知识驱动模式转型。这种能力使得智能认知超越了简单的统计分析,能够揭示城乡要素之间更深层次的因果关系和相互作用机制,为规划者提供更为直观、可靠的决策支持,从而推动城乡融合在理论与实践层面的双重跃升。

2.4 智能规划:规划平台构建与决策赋能

智能规划是城乡融合智能规划框架的最终环节,也是前3个阶段(智能感知、智能融合、智能认知)成果的最终应用体现。目标在于将经过深度认知的城乡系统知识转化为具体的、可操作的规划方案与决策支持。城乡融合不仅要解决当前问题,更要面向未来发展,实现资源优化配置、空间结构合理化以及社会经济与生态环境的协调发展。因此,智能规划阶段的根本目标是实现“规划好”,即制定出更高效、更具适应性和可持续性的规划方案。

智能规划的核心在于城乡融合智能化平台系统的构建。这一平台作为整体框架的集成载体,旨在提供一个涵盖数据管理、智能分析、决策支持等流程的综合环境。它通过汇聚智能感知所获取的精准数据、智能融合所形成的全面数据库以及智能认知所提炼的深层知识,实现从数据输入到规划产出的无缝衔接。该平台致力于打破传统规划模式的局限,推动规划决策从经验驱动向数据驱动和智能辅助的范式转变,从而有效提升规划的科学性、预见性和实施效率。通过该智能化平台,规划者能够基于实时、全面的城乡信息进行多情景优化分析。这使得在规划过程中可以充分考虑多种要素的相互作用、多重目标的协同达成以及复杂情景下的应对策略,从而对不同规划方案的潜在影响进行综合评估。平台通过提供直观的可视化界面和强

大的分析工具,支持规划方案的快速生成、迭代优化和效果验证,显著提升了规划编制的效率与质量。这种系统化的平台构建,不仅为城乡融合提供了强大的技术支撑,更促进了规划管理、决策与实施各环节的协同联动,确保规划成果能够更好地响应城乡发展的实际需求,并推动城乡空间治理体系的现代化。

综上所述,城乡融合智能规划框架体现了从数据获取到知识生成再到决策应用的完整闭环。通过这种结构化的智能化路径,城乡融合得以在数据驱动、智能辅助的背景下,实现更为精准、科学的决策,从而有力推动城乡区域的协调发展与共同繁荣。

3 面向城乡融合智能规划的关键技术

在明确了智能规划总体框架基础上,接下来的关键在于解构并阐明实现该框架的技术路径。本章将聚焦于此,针对智能感知、智能融合、智能认知和智能规划四大环节,系统性地探讨其核心技术方案(图2),旨在回应城乡地理要素的精准感知、多源异构数据的协同集成、复杂空间关系的深度认知以及一体化平台的构建等关键挑战。该技术体系环环相扣、互为支撑,共同构成了一个从数据获取、信息提炼、知识发现到智能决策的全链条解决方案,以推动城乡融合从理论框架走向实践应用。

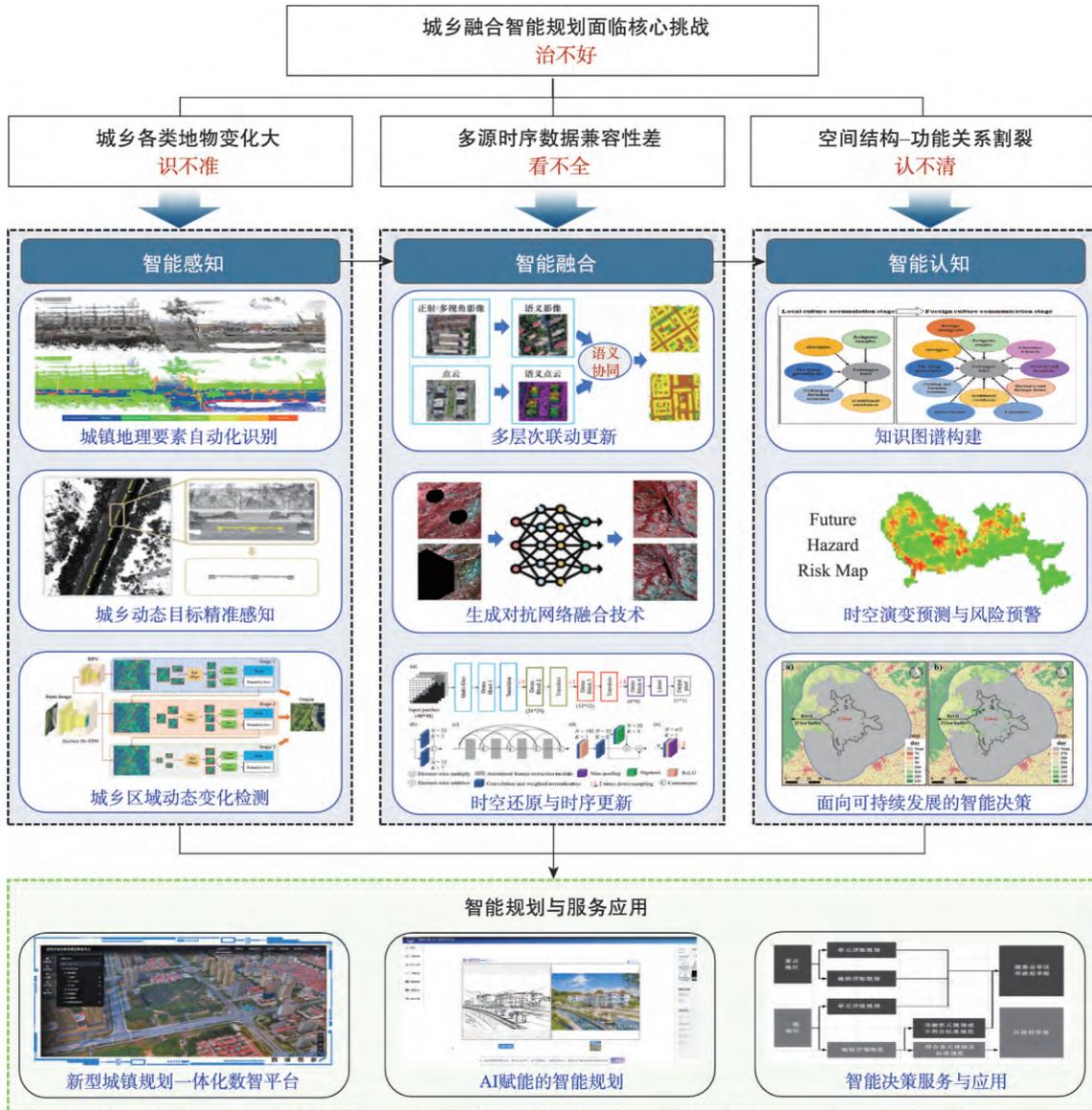


图2 面向城乡融合的“感知-融合-认知-规划”智能技术体系

Fig. 2 The "Perception-Fusion-Cognition-Planning" intelligent technology system for urban-rural integration

3.1 智能感知:多模态城乡地理要素自动语义感知技术体系

在城乡融合智能化规划背景下,智能感知的核心目标是实现对复杂城乡空间要素精准、高效的自动化语义解析。这主要涉及地理要素的自动化、高精度识别,城乡动态目标的精准感知,以及城乡区域的动态变化检测等任务(图3)。

针对地理要素的自动化、高精度识别任务,当前的主流范式是基于深度学习的语义分割技术^[16-17]。为应对城乡地物形态、尺度与纹理的高度异质性,该技术路径的核心在于构建多尺度特征融合架构^[18-19]。这类架构通过端到端的神经网络,能够同时捕获全局上下文信息与局部细节特征,确保在复杂场景下对不同尺度地物(如大片林地与精细道路)语义识别的准确性与完整性^[20]。通过引入空间结构自适应变换等机制,模型还能更精准地建模地理要素间的空间关系^[21-22],从而有效提升分割边界的精度,最终生成高精度的建筑、道路、水体、植被等静态语义图层。

城镇动态目标的精准感知则聚焦于特定地物的更新与变化。这在建筑物改造、设施更新等场景中至关重要,通常要求融合时序遥感影像与三维点云等多源异构数据。为应对此挑战,技术前沿在于发展能够自适应进行特征加权的知识引导或多门控深度网络^[23]。这类模型能够根据不同数据源的特征贡献度动态调整权重,并结合空间上下文信息进行联合判别^[24-25],从而在城乡交错带等复杂背景下,实现对单个或小范围变化目标的稳定、精准地识别。

与具体目标感知不同,城乡区域的动态变化检测致力于宏观格局的演变监测。该任务主要面向城镇扩张、土地利用变更等大范围变化场景,其技术难点在于抑制伪变化并精准勾勒变化边界。当前,全尺度特征与块-像素协同判别的双分支检测

框架是应对该难题的有效途径^[26-27]。该框架通过对不同时相遥感影像进行深度特征级的比较分析,并结合像素级的精细判别与邻域块级的上下文约束,能够高效、准确地捕捉城乡动态景观的演化过程,为规划的动态评估与调整提供宏观依据。

综上所述,地理要素的高精度静态识别、特定动态目标的精准感知以及区域宏观格局的动态变化检测,共同构成了智能感知的3大技术支柱。它们分别从静态、微观动态和宏观动态3个维度,为智能规划提供了全面、多维、时效的数据来源与感知能力。

3.2 智能融合:多时序地表关键要素融合与更新

智能融合的核心任务,是构建一个能够动态整合并实时更新城乡空间要素的、时空一致的高质量数据库。这一目标的实现,要求相应技术体系至少包含2个方面关键内容:①建立多源数据的统一时空基准与共享服务平台(图4);②运用先进算法实现跨模态数据的高质量时空还原与时序更新。

构建统一时空基准是实现有效融合的根本前提。面对来源、格式、精度各异的多源异构数据(如遥感影像、地形图、测绘成果等),首要任务是在国家统一地理坐标系(如CGCS2000)下进行严格的空配准与标准化处理。在此基础上,通过构建面向服务的共享平台与分层数据架构,实现对各类数据的“异构集成”与“共享集成”。这不仅克服了因数据壁垒导致的信息不一致问题,也为上层分析提供了稳定、可靠、无缝衔接的数据底座。

在统一的基准之上,技术体系的核心挑战在于保证融合数据的质量与时效性。对此,可针对具体问题选择合适的深度学习方法加以解决:

(1)针对时序数据不完整问题,需采用时间序列重建技术。由于云雾遮挡、传感器故障等因素,

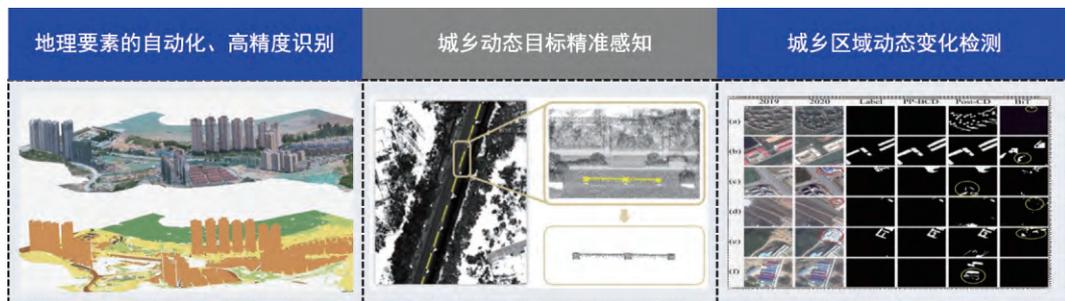


图3 城乡地理要素自动语义感知任务

Fig. 3 Tasks for automatic semantic perception of urban-rural geographical elements



图4 多源数据的统一时空基准与共享服务平台
 Fig. 4 A unified spatio-temporal framework and shared service platform for multi-source data

遥感观测序列常存在数据空缺,破坏了时间连续性。对此,时间注意力机制与多尺度生成对抗网络(Generative Adversarial Nets, GAN)的结合提供了一种有效的解决方案^[28-29]。时间注意力模块能够捕捉地表要素随时间变化的内在规律与长期依赖性^[30],而GAN则能生成符合时空演变逻辑的、高度逼真的数据来填补缺失部分,从而实现对遥感影像时间序列的有效重建,确保数据的时序完整性。

(2)为解决融合过程中的空间细节损失问题,需引入邻域上下文特征建模。不同传感器的数据

在分辨率和纹理表达上存在差异,简单融合易导致空间纹理模糊、地物边界响应不佳。技术前沿在于构建能够整合邻域上下文与提取精细纹理的深度学习模型。这类模型通常以局部图像块(Patch)为处理单元,通过对邻域空间信息的深度建模,在像素级别上对地物纹理和结构进行细致恢复。这确保了融合后的数据在保持时间一致性的同时^[31],也能高度还原地表要素的空间细节,实现真正高质量的时空数据还原。

多时序地表关键要素的融合与更新技术,是一个从“标准化平台构建”到“智能化质量提升”的系统工程。它通过统一的时空基准解决了数据的“入口”问题,再借助时间序列重建和空间纹理恢复两大核心算法,确保了数据库的动态性、完整性与保真度,从而为城乡规划提供可靠的时空数据支撑。

3.3 智能认知:知识图谱驱动的城乡融合认知方法

智能认知旨在将海量、异构的数据转化为对城乡复杂系统的深层理解与洞察,是推动规划模式从经验驱动走向知识驱动的关键环节。实现这一目标的核心技术路径,在于构建并应用城乡融合知识图谱,从而将离散的多源数据转化为结构化的、可推理的知识网络,为规划决策提供深层洞察(图5)。

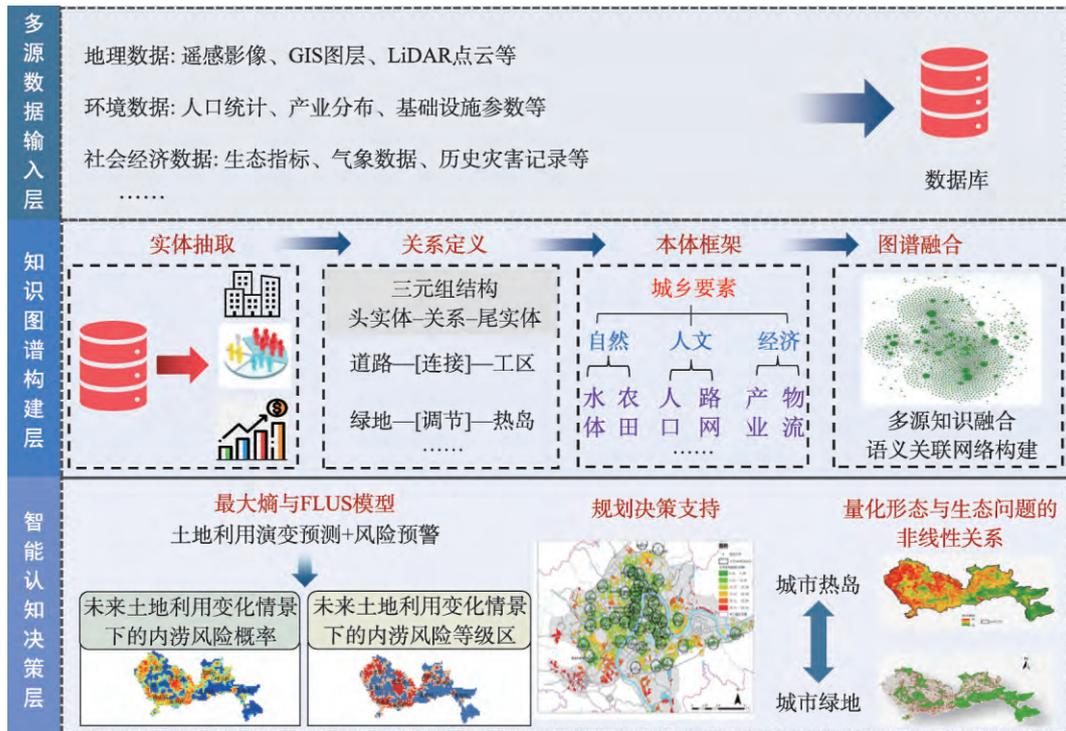


图5 面向城乡融合认知的知识图谱构建

Fig. 5 The framework for constructing a knowledge graph for urban-rural integration cognition

认知智能的基础,在于城乡知识图谱的构建。该过程始于对多源异构数据的系统性输入,涵盖了地理数据(如遥感影像、GIS图层)、环境数据(如人口统计、产业分布)及社会经济数据(如生态指标、气候记录)等。图谱构建的核心流程包括:首先,从数据库中进行实体抽取,识别出建筑、道路、人口、产业等关键城乡要素;其次,通过“头实体-关系-尾实体”的三元组结构进行关系定义(如“道路-[连接]-工业区”,“绿地-[调节]-热岛”);再次,将这些实体与关系置于一个统一的本体框架下,按自然、人文、经济等维度进行归类;最终,通过图谱融合技术,将所有信息编织成一个多源知识关联网络。这一流程将碎片化的信息孤岛连接起来,形成了对城乡系统的整体性、结构化认知。

基于构建的知识图谱,可支撑多路径的智能认知与决策应用:

(1)时空演变预测与风险预警。通过将知识图谱与专业的仿真预测模型(如最大熵与FLUS模型)深度耦合^[32-33],可实现对未来发展情景的精准推演。知识图谱为模型提供了关于土地利用现状及其背后复杂驱动因素的丰富先验知识,显著提升了模型预测的准确性。这使得对未来土地利用变化,以及由此引发的内涝等潜在风险进行动态、精细化的预警成为可能。

(2)量化分析复杂的非线性关系。城乡系统充满了复杂的相互作用,如城市形态与生态环境问题之间的关联。知识图谱的语义关联网络,为深度挖掘这些关系提供了强大工具^[34-35]。例如,通过在图谱上进行关联查询与分析,可以量化城市绿地布局、建筑密度等形态指标与城市热岛效应之间的非线性关系^[36],从而为生态可持续性规划提供科学依据。

(3)为规划决策提供综合性支持。知识图谱赋予了规划系统强大的跨域推理能力。规划者可以执行复杂的语义查询,将宏观政策目标(如生态保护红线)与微观地块特征进行关联分析,评估不同规划方案的潜在影响,或挖掘成功规划案例背后的隐含规律。这种知识驱动的模式,显著提升了规划决策的科学性与可解释性。

基于知识图谱的认知方法构建了一个从“数据-信息-知识-决策”的完整闭环。它不仅实现了空间实体与社会经济要素的深度融合,更通过模拟

预测、关联挖掘与智能推理,为城乡融合提供了全局性、前瞻性的认知能力与决策支持。

3.4 智能规划:城乡规划新范式

智能规划环节是整个技术体系的最终落脚点与价值体现,其实现有赖于一个一体化的智能规划平台。该平台作为前述技术的集成载体与应用中枢,旨在将感知、融合、认知的技术成果,系统性地转化为具体的规划方案与高效的决策支持,最终推动规划作业模式从传统的“蓝图绘制”向现代化的“平台治理”转型。

一个设计完善的赋能平台,其架构通常包含3个核心层面:

(1)统一的数据基座与服务层。这是平台的基础。它负责汇聚并管理由智能感知和智能融合技术所提供的多源时空数据(如遥感影像、三维模型、GIS数据、知识图谱等),构建形成标准化的统一数据库,并通过开放接口对外提供数据服务与分析能力。

(2)智能分析与生成引擎层。这是平台的大脑。该层面内置了多种算法工具与知识库,能够调用知识图谱进行要素的自动关联与语义分析。更进一步,它还集成了由语义结构和位置信息驱动的生成式模型,能够辅助规划师进行方案的智能设计。例如,在建筑风貌设计中,模型可根据规划规范、地理环境等多模态输入,自动生成符合约束条件的多种设计草图,极大地提升了规划设计的效率与创新性^[37]。

(3)协同决策与流程管理层。这是平台的工作台。该层面为规划者提供了人机协同的交互式环境,支持对不同规划方案进行多情景比选、实时评估和冲突检查。同时,系统通过支持多用户协作、权限分级、版本管理与操作追溯等功能,确保了规划过程的透明性、规范性与可追溯性,将复杂的规划任务转化为结构化的、可管理的协同工作流程。

一体化智能规划平台不仅是一个技术工具的集合,更是一个系统性的工作环境与决策中枢。它通过构建“数据-分析-决策”的闭环,打通了从数据获取到方案实施的全流程,在提升规划效率与协同水平的同时,也根本性地增强了城乡规划的科学与前瞻性。其开放性的架构设计,也为未来集成更多先进算法与服务提供了持续扩展的可能。

4 智能技术赋能城乡融合的实践案例

保障区域生态与粮食安全是城乡融合发展的基石,而处于城乡过渡地带的耕地保护则是其核心挑战。在广州市增城区这一兼具高密度建成区与广阔乡村腹地的典型区域,该挑战尤为突出。当地率先推行的“田长制”,要求对违法占用耕地的行为进行动态监测与高效处置,这使得传统巡查模式的局限性日益凸显。为此,一项旨在破解上述困境的智能化探索在增城展开,其核心在于将前文所述的“感知-融合-认知-规划”闭环框架落地,以期提升“发现-判定-处置”全流程的效率与精准性,最终实现耕地保护由被动响应向前瞻管理的根本性转变。

这一探索始于“感知”环节——构建一个立体化的智能感知网络以破解“发现难”的问题。通过整合42个铁塔高空监测摄像头与3个无人机智能机库,形成了时空互补的协同监测体系(图6)。其中,固定摄像头作为“背景”感知层,其全天候视频流由自动变化检测算法进行实时比对,以精准识别地表覆盖发生变化的“异常图斑”。这些由算法自动锁定的“疑似问题”区域,随即触发无人机进行高机动性、高分辨率的“特写”式精细核查。并且,无人机智能机场的引入(图7),通过远程操控平台实现了无人值守、自主起降与全天候作业,将数据采集周期提升至每日一次,完成了从静态“快照”到动

态“流数据”的范式转变。

感知网络捕捉到的影像与位置信息,唯有置于统一的时空框架下与地政、规划数据进行关联,才能转化为具备管理属性的信息。在增城的实践中,这一关键的“融合”环节依托于覆盖全域的二三维一体化平台(图8)得以实现。该平台首先对多源数据进行严格的时空配准,将无人机获取的高精度正射影像、三维模型等动态感知数据,与地籍图、规划红线、地形图等多源异构数据进行融合。针对多源、多分辨率数据融合中常见的空间细节损失问题,系统引入了基于邻域上下文特征的智能融合算法。确保高分辨率监测影像在与底图叠加时,田块边界与纹理细节的高度保真。这一经过精准配准与质量增强的数字底座,为后续判定变化图斑是否触碰红线、涉及何种权属提供了无可争议的空间依据,有效解决了因数据来源、标准不一导致的“认定难”问题。

为从融合数据中提炼出可用于决策的知识,“认知”环节进一步引入了知识图谱技术。该技术通过对融合数据库、政策文件库、权属登记库等多源信息进行实体抽取,识别出“耕地地块”“田长”“保护条例”等核心实体。继而,通过关系定义将这些实体以“头实体-关系-尾实体”的三元组结构进行链接(例如,“地块A-[属于]-农户B”“地块A-[监管]-田长C”),最终形成了一个深度结构化的

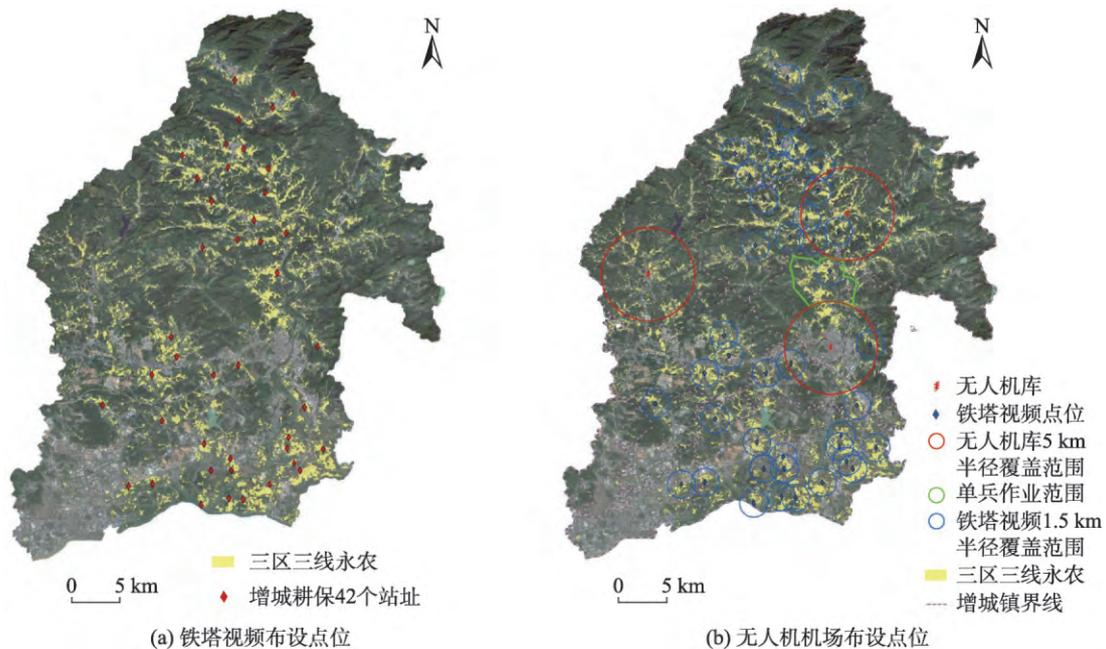


图6 面向耕地保护的立体化智能感知网络

Fig. 6 A Multi-layered intelligent perception network for farmland protection

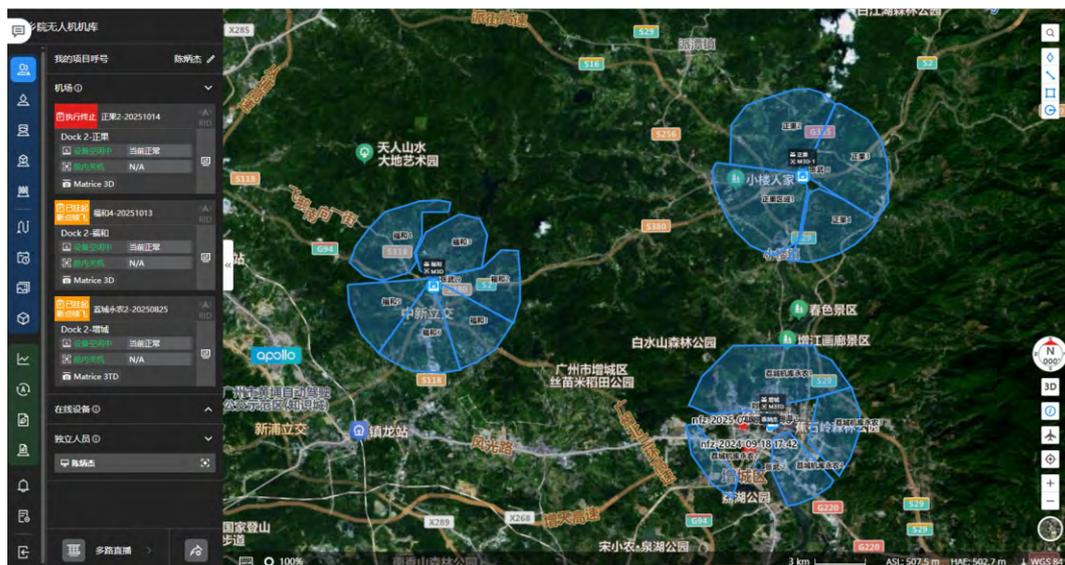


图7 无人机机场操控平台

Fig. 7 Drone airport control platform



图8 增城区二三维一体化平台

Fig. 8 Integrated 2D-3D platform for Zengcheng district

“地块-指标-权责-规则”语义关联网。这一知识图谱为耕地保护提供了2个层面的决策支持。在核心的执法监管层面,当感知系统发现地表变化后,系统能够基于图谱进行自动推理:它将变化图斑与关联的保护规则进行语义比对,判定其“非农化”属性,并沿关系网络锁定责任田长、匹配执法依据,从而形成“违规地块-行为性质-责任主体-法律条款”的完整证据链,将人工的经验判断升级为机器的智能推理。在更具前瞻性的规划决策层面,该图谱同样提供了综合性支持。通过执行复杂的语义查询,

系统能够智能识别那些具有复垦潜力的零散、低效建设用地,为“占补平衡”提供科学选址依据;或通过耦合生态模型,对存在土壤退化、环境污染风险的耕地区域进行前瞻性预警。这一由数据驱动、知识赋能的认知模式,最终将传统的被动响应升级为覆盖“监测-规划-预警-评估”全链条的系统性智能治理。

最终,“感知-融合-认知”的完整信息链在“规划与治理”环节实现了闭环。前一环节中由知识图谱驱动形成的“违规地块-行为性质-责任主体-

法律条款”完整证据链,在大语言模型辅助下被进一步结构化,为包含处置建议的诊断报告,并推送给相应的“田长”,为其提供了清晰、可靠的执法依据,极大地缩短了耕地保护处置的响应周期。更重要的是,沉淀下来的结构化数据也为更高层次的国土空间规划提供了决策支持,例如通过分析违规行为的时空分布规律以优化巡查重点,或通过评估不同区域的耕地质量与生态价值以指导“占补平衡”指标的精准落地。这一系列功能的实现,展示了智能规划技术如何将理论框架转化为系统性的治理能力,最终推动耕地保护范式从传统的被动响应,向主动、高效、精准的“平台治理”模式转型。

5 结语

在我国城乡发展步入存量提质增效的深刻转型期,以智能规划技术赋能城乡融合已成为提升空间治理能力现代化的必然选择。本文系统地阐述了这一转型过程中的理论框架、关键技术与实践路径,即以“感知-融合-认知-规划”为核心的闭环理论框架,并梳理了支撑该框架的智能感知、智能融合、知识图谱、一体化平台等全链条关键技术,从而构成一条从数据获取与融合、深度知识发现与认知、到科学决策支持的路径。而广州增城的案例分析则进一步彰显了该整合式技术体系在应对“耕地保护”与“风貌更新”等真实、复杂的城乡规划挑战时,所能发挥的系统性实践效能。这套理论与技术路径的整合,共同为推动传统规划范式向现代化的“平台治理”转型提供了理论参考与实践支撑。

尽管智能规划技术展现出巨大潜力,但其在城乡融合中的深度应用仍处于探索阶段,面临若干局限与挑战,值得未来持续关注。首先,数据与模型的领域深度有待加强。当前的感知模型在处理复杂的城乡混合地物时仍有精度瓶颈,知识图谱的构建也高度依赖人工定义,缺乏对规划领域深层因果关系的自适应学习能力。未来研究需着力于研发融合地理空间先验知识的深度学习模型,并探索规划知识的自动化抽取与推理技术。其次,技术应用的社会经济耦合分析尚显不足。智能规划不仅是技术问题,更涉及多元利益主体的博弈与社会经济效益的权衡。当前的技术体系

在模拟、评估规划方案的社会经济影响方面能力有限。未来应加强多智能体模型、社会感知计算等方法与规划模型的集成,以更全面地支撑综合决策。最后,人机协同的规划范式仍需理论与实践的共同探索。以智能设计平台为代表的新工具,正在重塑规划师的角色与工作流程。如何界定人与机器在规划过程中的职责边界,并构建更高效、更具创造性的人机协同决策机制,这些问题不仅关乎技术,更触及规划伦理与制度创新,是未来亟待深入探讨的重要议题。

AI使用说明: 本文使用AI技术对文章进行了润色。

利益冲突: Conflicts of Interest

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflicts of interest.

作者贡献: Author Contributions

本研究由张新长构思;刘锋、易雅琴、袁源琳、赵元参与实验设计和操作;张新长、齐霁、陈一平、张元梅、阮永俭参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

The study was designed by ZHANG Xinchang. The experimental operation was completed by LIU Feng, YI Yaqin, YUAN Yuanlin and ZHAO Yuan. The manuscript was drafted and revised by ZHANG Xinchang, QI Ji, CHEN Yiping, ZHANG Yuanmei and RUAN Yongjian. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献(References):

- [1] 中共中央,国务院.关于推动城市高质量发展的意见[J].中华人民共和国国务院公报,2025(25):7-11. [Central Committee of the Communist Party of China, State Council of the People's Republic of China. Opinions on promoting high-quality urban development[J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2025(25): 7-11.] DOI:CNKI:SUN:GWYB.0.2025-25-004
- [2] 莫正玺,叶强,赵垚.我国存量建设空间利用的政策、理论与实践演进脉络[J].经济地理,2022,42(6):156-167. [Mo Z X, Ye Q, Zhao Y. The evolutionary context of policies, theories and practices for the utilization of stock construction space in China[J]. Economic Geography, 2022,42(6): 156-167.] DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2022.06.016
- [3] Salem M, Ravetz J, Sareen S, et al. Managing the urban-rural transition: A review of approaches and policies for peri-urban land use[J]. Journal of Urban Management,

- 2025 DOI:10.1016/j.jum.2025.04.006
- [4] 陈军,张姗姗,张兵,等.时空信息赋能国土空间规划的发展方向[J].城市规 划学刊,2025(2):20-27. [Chen J, Zhang S Q, Zhang B, et al. Development pathways of spatiotemporal information-empowered territorial spatial planning[J]. Urban Planning Forum, 2025(2): 20-27.] DOI:10.16361/j.upf.202502003
- [5] 罗珂,郭雨露,何可,等.城乡高质量融合发展阶段都市农业的模式研究——基于广州的实践[J].热带地理,2023,43(7):1302-1314. [Luo K, Guo Y L, He K, et al. Urban agriculture pattern in high-quality urban-rural integration stage: A case study of Guangzhou[J]. Tropical Geography, 2023,43(7):1302-1314.] DOI:10.13284/j.cnki.rddl.003709
- [6] Peng R S, Bian C J, Chen S, et al. Link-state-aware proactive data delivery in integrated satellite - terrestrial networks for multi-modal remote sensing[J]. Remote Sensing, 2025,17(11):1905. DOI:10.3390/rs17111905
- [7] Sun Y, Zhang X C, Xin Q C, et al. Developing a multi-filter convolutional neural network for semantic segmentation using high-resolution aerial imagery and LiDAR data [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018,143:3-14. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2018.06.005
- [8] Zhang Z Q, Zhang X C, Jiang X, et al. Automated surface water extraction combining sentinel-2 imagery and OpenStreetMap using presence and background learning (PBL) algorithm[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019,12(10):3784-3798. DOI:10.1109/JSTARS.2019.2936406
- [9] Sun Y, Zhang X C, Huang J F, et al. Fine-grained building change detection from very high-spatial-resolution remote sensing images based on deep multitask learning[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022,19:8000605. DOI:10.1109/LGRS.2020.3018858
- [10] Peng Y D, Li W S, Luo X B, et al. Integrated fusion framework based on semicoupled sparse tensor factorization for spatio-temporal - spectral fusion of remote sensing images[J]. Information Fusion, 2021,65:21-36. DOI:10.1016/j.inffus.2020.08.013
- [11] Wang W Q, Mu K P, Liu H. A multihierarchy flow field prediction network for multimodal remote sensing image registration[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2025,18:5232-5243. DOI:10.1109/JSTARS.2025.3532939
- [12] 赵军,余成华,卢永华,等.面向数字孪生城市的三维数字底座多源数据融合[J].测绘地理信息,2025,50(5):117-122. [Zhao J, Yu C H, Lu Y H, et al. Multi-source data fusion for the three-dimensional digital foundation of digital twin cities[J]. Journal of Geomatics, 2025,50(5):117-122.] DOI:10.14188/j.2095-6045.20240775
- [13] Ning Y S, Liu H, Wang H, et al. UUKG: Unified urban knowledge graph dataset for urban spatiotemporal prediction[EB/OL]. 2023: arXiv: 2306.11443. <https://arxiv.org/abs/2306.11443>
- [14] Liu Z H, Pang Y B, Sekimoto Y. A preliminary study on dynamic urban knowledge graph construction using heterogeneous spatio-temporal data[C]//2024 IEEE International Conference on Big Data (BigData). IEEE, 2025: 6834-6841. DOI:10.1109/BigData62323.2024.10825457
- [15] Liu Y, Ding J T, Fu Y J, et al. UrbanKG: An urban knowledge graph system[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2023,14(4):1-25. DOI:10.1145/3588577
- [16] 葛钦兵,矫桂娥.注意力引导的高维多尺度遥感图像语义分割网络[J].测绘科学,2025,50(5):49-60. [Ge Q B, Jiao G E. Attention-guided semantic segmentation network for multi-scale high-dimensional multi-scale remote sensing images[J]. Science of Surveying and Mapping, 2025,50(5): 49-60.] DOI:10.16251/j.cnki.1009-2307.2025.05.005
- [17] Xin J, Zhang X C, Zhang Z Q, et al. Road extraction of high-resolution remote sensing images derived from DenseUNet[J]. Remote Sensing, 2019,11(21):2499. DOI:10.3390/rs11212499
- [18] Han T, Chen Y P, Ma J, et al. Point cloud semantic segmentation with adaptive spatial structure graph transformer[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2024,133:104105. DOI:10.1016/j.jag.2024.104105
- [19] Bi Y X, Liu P, Zhang T Y, et al. Multi-scale sparse convolution and point convolution adaptive fusion point cloud semantic segmentation method[J]. Scientific Reports, 2025,15:4372. DOI:10.1038/s41598-025-88905-5
- [20] Zhang S, Wang B, Chen Y P, et al. Point and voxel cross perception with lightweight cosformer for large-scale point cloud semantic segmentation[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2024,131:103951. DOI:10.1016/j.jag.2024.103951
- [21] Huang S T, Huang H Y. AMFFNet: Adaptive multi-scale feature fusion network for urban image semantic segmentation[J]. Electronics, 2025,14(12):2344. DOI:10.3390/el14122344
- [22] Han Z J, Li X, Wang X T, et al. Building segmentation in

- urban and rural areas with MFA-net: A multidimensional feature adjustment approach[J]. *Sensors*, 2025,25(8):2589. DOI:10.3390/s25082589
- [23] Huang J F, Zhang X C, Xin Q C, et al. Automatic building extraction from high-resolution aerial images and LiDAR data using gated residual refinement network[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 151:91-105. DOI:10.1016/j.isprs.2019.02.019
- [24] Li Z M, Yan C X, Sun Y, et al. A densely attentive refinement network for change detection based on very-high-resolution bitemporal remote sensing images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60:4409818. DOI:10.1109/TGRS.2022.3159544
- [25] Yang J, Zhang X C, Huang Y. Graph attention feature fusion network for ALS point cloud classification[J]. *Sensors*, 2021,21(18):6193. DOI:10.3390/s21186193
- [26] Hafner S, Fang H, Azizpour H, et al. Continuous urban change detection from satellite image time series with temporal feature refinement and multitask integration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2025,63:5627118. DOI:10.1109/TGRS.2025.3578866
- [27] Cheng G L, Huang Y M, Li X T, et al. Change detection methods for remote sensing in the last decade: A comprehensive review[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(13): 2355. DOI:10.3390/rs16132355
- [28] Qin X W, Shi H Y, Dong X G, et al. Improved generative adversarial imputation networks for missing data[J]. *Applied Intelligence*, 2024,54(21): 11068-11082. DOI: 10.1007/s10489-024-05814-2
- [29] Peng K, Li S K, Hui F, et al. A novel GAN-based point cloud completion network for 3D object enhancement[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2025,32:2499-2503. DOI: 10.1109/LSP.2025.3577120
- [30] Liu S J, Chen H, Tang K, et al. Innovative SAR-optical data fusion for reflectance time series reconstruction in vegetation-covered regions[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2025, 140:104567. DOI:10.1016/j.jag.2025.104567
- [31] Ao Z R, Sun Y, Pan X Y, et al. Deep learning-based spatio-temporal data fusion using a patch-to-pixel mapping strategy and model comparisons[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022,60:5407718. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3154406
- [32] Lin J Y, He P T, Yang L, et al. Predicting future urban waterlogging-prone areas by coupling the maximum entropy and FLUS model[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 80:103812. DOI:10.1016/j.scs.2022.103812
- [33] Zhang J C, Li L, Li Q S, et al. Multiscenario land use change simulation and its impact on ecosystem service function in Henan Province based on FLUS-InVEST model[J]. *Ecology and Evolution*, 2025, 15(3): e71111. DOI:10.1002/ece3.71111
- [34] 刘宇,李勇. 面向城市可持续发展的城市商圈/街区知识图谱构建方法与应用展望[J]. *地球信息科学学报*,2023, 25(12): 2374-2386. [Liu Y, Li Y. Methodology for constructing urban business area/region knowledge graph and the applications in urban sustainable development[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2023, 25(12): 2374-2386.] DOI:10.12082/dqxxkx.2023.230262
- [35] 唐曾杨,艾廷华,徐海江. 地理知识图谱下的建筑群空间分布模式推理[J]. *地球信息科学学报*,2023,25(6): 1202-1214. [Tang Z Y, Ai T H, Xu H J. Reasoning of spatial distribution pattern of building cluster based on geographic knowledge graph[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2023, 25(6):1202-1214.] DOI:10.12082/dqxxkx.2023.220761
- [36] 郑晓云,董仁才,练岸鑫,等. 基于多模态生态治理数据构建生态管理知识图谱技术[J]. *生态学报*,2024,44(9): 3924-3933. [Zheng X Y, Dong R C, Lian A X, et al. Preliminary study on the construction of ecological management knowledge graph technology based on the data of multi-modal ecological governance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(9):3924-3933.] DOI:10.20103/j.stxb.202307091480
- [37] 张新长,赵元,齐霁,等. 基于AI大模型的文生图技术研究及应用[J]. *地球信息科学学报*, 2025,27(1): 10-26. [Zhang X C, Zhao Y, Qi J, et al. Research and application of text-to-image technology based on AI foundation models [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2025, 27(1): 10-26.] DOI:10.12082/dqxxkx.2025.240657

■ 本文图文责任编辑: 黄光玉 蒋树芳