

地理空间多智能体协同：架构、技术及应用

张继贤^{1,2*}, 顾海燕³, 沈豪杰¹, 刘飞⁴, 徐颖¹, 丁宜忠⁵

(1. 莫干山地信实验室, 浙江湖州 313200; 2. 国家基础地理信息中心, 北京 100830; 3. 中国测绘科学研究院, 北京 100830; 4. 北京建筑大学测绘与城市空间信息学院, 北京 102616; 5. 土豆数据科技集团有限公司, 北京 100193)

摘要: 地理空间多智能体协同是以地理空间大模型为核心, 通过多智能体相互协作、自组织、自学习、自适应, 持续优化迭代, 形成协同的智能新模式。本文在梳理地理空间多智能体协同发展现状的基础上, 分析了其内涵与特征, 提出了地理空间多智能体协同的体系架构及协同模式, 涵盖“物理感知-数据治理-智能引擎-多智能体-业务应用”五层框架以及水平协同、垂直协同、混合协同3种协同模式, 总结了多模态数据感知与表征、地理知识深度融合与理解、专业工具智能调用与质量控制、多智能体协同调度与自我优化等关键技术, 开展了灾害应急保障服务场景示范应用。本研究旨在为构建具备任务自规划、工具自调用、结果自评估与记忆自进化能力的智能系统奠定基础, 推动地理空间智能应用从静态分析向动态智能响应演进, 为自然资源监测、应急管理、智慧城市等提供新一代决策支持。

关键词: 地理空间智能; 多智能体协同; 地理空间大模型; 智能体; 大模型

中图分类号: P237 **文献标识码:** A

Geospatial Multi-Agent Collaboration: Architecture, Technologies, and Applications

Zhang Jixian^{1,2*}, Gu Haiyan³, Shen Haojie¹, Liu Fei⁴, Xu Ying¹, Ding Yizhong⁵

(1. Moganshan Geospatial Information Laboratory, Huzhou 313200, Zhejiang, China; 2. National Geomatics Center of China, Beijing 100830, China; 3. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China; 4. School of Geomatics and Urban Spatial Informatics, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China; 5. Tudou Data Technology Group Co., Ltd., Beijing 100193, China)

Abstract: Geospatial multi-agent collaboration is a new intelligent collaborative paradigm centered around geospatial large models, where multiple agents collaborate, self-organize, self-learn, and self-adapt through continuous optimization and iteration. Based on an analysis of the current development status of geospatial multi-agent collaboration, this study explores its essence and characteristics. It also presents a five-layer system architecture that comprises physical perception, data governance, intelligent engine, multi-agent, and business application layers, as well as three collaboration modes: horizontal, vertical, and hybrid collaboration. Moreover, the study summarizes key technologies such as multimodal data perception and representation, deep integration and understanding of geographical knowledge, intelligent utilization of specialized tools and quality control, as well as collaborative scheduling and self-optimization of multiple agents. Demonstration applications for disaster emergency support service scenarios are also carried out. This study aims to lay a foundation for constructing intelligent systems with capabilities such as task self-planning, tool self-invocation, result self-evaluation, and memory self-evolution. This will advance geospatial applications from static analysis to dynamic intelligent response,

收稿日期: 2026-04-22; 修回日期: 2026-06-24

通讯作者: *张继贤, 国家基础地理信息中心研究员, 研究方向为测绘遥感与地理空间智能; E-mail: zhangjx@casm.ac.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“面向2040的实景三维中国发展战略与推进路径研究”(L2424236)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

providing next-generation decision support for fields such as natural resource monitoring, emergency management, and smart cities.

Keywords: geospatial intelligence; multi-agent collaboration; geospatial large model; intelligent agent; large model

一、前言

智能体集感知、思考、行动、进化能力于一身，能够不断学习、持续优化，与环境高效互动，并为复杂任务提供强大智能支持^[1-2]。智能体从符号主义时代的规划执行者、机器学习时代的主动探索者、深度学习时代的超级决策者，发展到现在的群体协作者，其核心优势在于通过环境感知捕捉场景数据，借助大模型实现目标拆解与路径规划，调用专业工具完成具体操作，并通过反馈机制持续优化执行效果，形成闭环智能决策体系^[3-4]。目前，智能体形态多样，如软件程序、机器人或其他自动化设备，已经发展出单体智能、多智能体协同等多种应用形态，展现出广阔的应用前景与巨大潜力^[5-6]。多智能体协同指多个具备传感、计算、执行能力的智能体，通过网络通信与相互协作，自主学习、推理规划并选择策略，共同完成更为复杂和精细的任务^[7]。国际主流的多智能体协同框架已从“单智能体工具调用”迈向“多体协同自治”，如 AutoGen、Magentic-One、LangGraph、CrewAI、Swarm 等^[8-12]，在架构上愈发重视状态一致性、任务可追溯性与场景适配性，为复杂现实任务提供系统化智能解决方案。

地理空间智能回答“机器能否理解和分析空间问题”，地理空间智能体回答“机器能否自主地替人完成空间任务”，前者是后者的能力底座，后者是前者在智能体时代的工程化、自主化形态。近年来，地理空间智能正加速迈向以多智能体协同为核心的智能化新范式。国际科技企业与科研机构纷纷提出融合大模型、专业计算引擎与领域知识的多智能体框架，如 Earth AI、GeoLLM-Squad、Generative Agents、GeoChat、EarthLink、DA4DTE、ShapefileGPT、RescueADI 等^[13-21]，正从单点工具向“感知-推理-决策-执行”一体化演进，具有空间分析、时空推演、自主推理、决策生成等能力。地理空间智能体虽然在通用性、鲁棒性与算力依赖方面仍面临挑战，但已展现出强大的应用潜力与技术融合趋势。

为深入探讨地理空间多智能体协同，本文在分析地理空间多智能体协同发展现状的基础上，分析

其内涵与特征，设计总体框架与协同模式，研究关键技术及解决途径，并通过灾害应急保障服务开展场景示范应用，以期推动地理空间智能应用演进升级，为自然资源监测、应急管理、智慧城市等提供决策支持。

二、地理空间多智能体协同的体系架构及协同模式

（一）内涵与特征

地理空间多智能体协同是以地理空间大模型为核心，通过多智能体相互协同、自组织、自学习、自适应，持续优化迭代，形成协同的地理空间智能新模式^[22]。地理空间多智能体协同具有如下特征：① 多源协同感知，通过“空天地管网”技术手段的高效协作，充分感知其所处场景的物理特性和语义信息，从而作出更精准的决策。相较于单智能体，地理空间多智能体可以更为全面地感知信息，并借助多模态大模型能更好地理解所处环境及用户意图。② 交互式场景适应，可以根据需求变化快速调整自身行为，通过与用户主动交互来更加灵活地适应不同情况和任务^[23]，具有复杂环境中的知识迁移和泛化能力及针对应急任务的快速调整能力。③ 持续自主进化，通过智能体之间的持续交互，不断提升对复杂动态环境的应变能力与自治水平，通过持续知识更新影响决策行为，实现迭代反馈闭环。④ 分工协作与集体智能，通过引入多智能体分工协作机制，将复杂任务拆解为多个子任务，并分配给相应功能的智能体执行，并行处理与顺序执行相结合，显著提升任务效率。智能体之间借助通信机制进行信息交互、任务协调和知识共享，能够展现出远超前于单智能体的整体智能。

（二）总体框架

本研究提出的地理空间多智能体协同的总体架构为“物理感知-数据治理-智能引擎-多智能体-业务应用”五层技术架构（见图1），融合“空天地管网”多维感知、湖仓一体数据治理、地理空间大模型与多智能体协同决策，实现从全域动态感知到

智能闭环处置的全链条能力。通过任务分解、资源调度与知识反馈，驱动系统自主进化，支撑地理空间业务的自动化、智能化与可持续演进，形成“感知-认知-行动-进化”的新一代空间智能范式。

1. 物理感知层

物理感知层构建覆盖“空（低空无人机、飞艇、有人机）、天（卫星遥感）、地（物联网（IoT）传感器、摄像头）、管（政务审批与执法数据）、网（社交媒体、开放街道地图）”等众源信息五维一体的动态感知网络，作为系统全域认知的前端入口。该层通过多模态数据接入与标准化，结合时空特征提取、上下文增强及多源证据加权融合，输出结构化、可解释、带置信度的地理空间事件；同时，支持主动感知控制，可根据上层指令动态调度特定感知资源，形成“事件发布+任务响应”双通道协同机制，为上层提供高可信、全要素、全时序的感知输入。

2. 数据治理层

数据治理层支持地理空间湖仓一体存储、时空数据整合与治理、元数据与资源目录，实现数据的标准化、质量管控与按需调度。通过时空数据体系化治理，将分散、异构的原始数据转化为具备一致空间基准、统一语义表达和可计算特性的高质量数据集，为上层模型训练、推理分析与智能决策提供可靠的数据基础。

3. 智能引擎层

智能引擎层是系统的大脑和指挥控制中枢，负责将模糊、复杂的高层需求转化为具体、可执行的机器指令，依托地理空间大模型，解析高层意图与时空上下文，将感知事件分解为子任务，调用统一技能库，实现矢量与栅格数据处理、投影与坐标转化等，依托地理空间知识库，提供遥感影像特征、地理空间规律、地理知识图谱等信息，使分析结果



图1 地理空间多智能体协同总体框架

注：API表示应用程序编程接口；OSM表示开放街道地图。

更符合地理学逻辑。可为上层协同决策提供可调度、可组合、可进化的智能原子能力^[24]。

4. 多智能体协同层

多智能体协同层作为系统的核心决策枢纽，基于下层提供的智能原子能力，实现复杂任务的分解、调度与闭环执行。该层以任务智能体为协调者，在接收上层意图后，动态匹配技能库中的标准化流程，结合记忆库中的历史经验，以垂直、平行或混合协同机制，驱动数据接入与治理、场景建模、空间分析、模型推理、报告生成等业务智能体协同响应；任务全程携带空间约束，状态管理依托空间索引实现图斑级追踪，并通过应用服务层回流的效能评估持续优化技能库与记忆库，推动系统向可学习、可协同、可进化的生态演进。

5. 业务应用层

业务应用层是系统价值落地的最终出口，以“服务即能力”为核心理念，将底层智能转化为面向用户与业务场景的可操作服务。该层提供智能预警与事件推送、协同处置工作台、时空可视化与决策看板、开放API服务网关、第三方系统集成适配器、效能评估与知识沉淀等六大核心能力，所有功能均

以微服务形式部署，遵循用户中心、服务解耦、空间原生、可审计与弹性扩展原则^[25]；用户操作或外部调用被实时转化为对多智能体协同层的任务指令，由智能体集群调度执行，真正实现“智能体为引擎、应用为驾驶舱”的协同模式，完成从系统智能到业务效能的闭环转化。

（三）协同模式

协同模式决定了智能体之间的组织关系与信息流动方式，是影响系统整体效率、灵活性与可靠性的核心要素^[22-25]。根据场景业务逻辑，将地理空间多智能体协同模式分为水平协同、垂直协同与混合协同3种（见图2）。

1. 水平协同

地理空间场景复杂、需求变化多样，需融合多源数据，调用多个智能体处理分析相关信息。因此，围绕共享工作空间构建异步协同环境，通过标准化通信协议与共享消息池，各智能体发挥自身优势，进行多轮局部交互与协商；通过共享的全局目标分解与知识库实现数据共享和分析，在全局目标上达成一致。该模式是一种去中心化的协作模式，

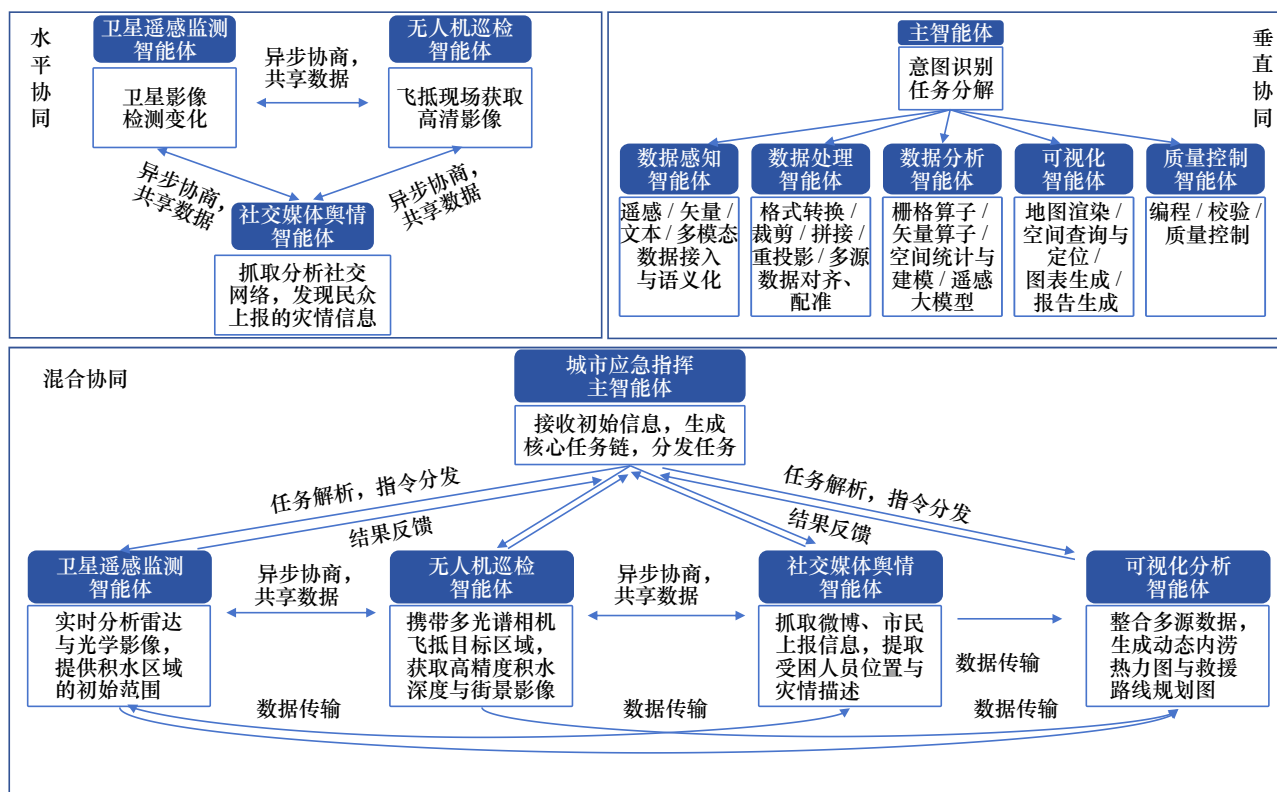


图2 地理空间多智能体协同模式示例

通过数据共享、统一协议、交互协商使系统具备高鲁棒性、动态扩展能力,并能从多维度视角解析复杂地理场景,涌现出全局最优解。

2. 垂直协同

垂直协同体现了层级化控制与集中式协调的组织原则,由主智能体和子智能体构成。其中,主智能体负责地理场景任务的全局解析、规划与指令分发;数据感知、处理、分析、可视化等子智能体构成执行层,严格按照指令完成子任务并反馈结果。这种“命令-执行-反馈”的闭环机制,确保了任务流程的强可控性与执行规范性,能有效规避决策冲突与资源竞争。垂直协同的核心优势在于对标准化、流程化任务的高效与可靠支撑,尤其适用于目标明确、环节清晰、对结果一致性要求严格的地理空间场景。

3. 混合协同

该模式运用核心流程垂直协同、动态环节水平协同的机制。在核心流程采用垂直协同模式执行任务,在子流程采用水平协同模式实现对等协商。其中,垂直协同确保任务推进的方向不偏离、资源不内耗、流程可追溯,为整个系统提供坚实的骨架;水平协同通过协商自主调整业务逻辑,得到更贴合实际的结论。该模式兼顾全局效率与局部弹性,能够在面对海量数据和复杂地理场景时,既能像生产线一样高效产出标准化成果,又能像专家团队一样灵活应对非结构化问题,是实现大规模、鲁棒性地理空间智能应用的理想方式。

三、地理空间多智能体协同关键技术

(一) 多模态数据感知与表征

地理空间多智能体协同的前提是所有智能体能在统一、可理解的数据基底上形成共识。然而,当前多源异构数据在接入、处理、融合与表征层面构成了系统性瓶颈:一是多源数据标准化接入与统一管理难题,异构数据协议与格式各异^[26],缺乏智能体可自主发现与调用的标准化抽象层;二是“空天地”多模态遥感数据基准的统一难题,难以快速生成时空基准一致、全域覆盖的高质量底图^[27-28];三是非遥感数据时空语义转化难题,政务、互联网等非结构化信息缺乏机器可读的时空标签与统一语义编码^[29-30];四是动态视频流实时融合难题,无人

机等视频流缺乏实时地理编码与跨视角协同分析能力^[30];五是多模态数据高维统一表征难题^[31],难以构建可支撑智能体深度推理的地理实体统一状态语言。

针对“空天地管网”多源异构数据在格式、基准、语义和时效上的不一致性^[31],本文提出多模态数据统一感知与表征技术框架(见图3),通过分层、分级、全流程技术优化,破解多源数据异构割裂、难以支撑多智能体协同推理的痛点。

1. 构建标准化数据接入与资产化管理体系

基于模型上下文协议(MCP)搭建分层适配抽象层,对遥感API、无人机视频流、IoT传感终端、政务业务接口等多类异构数据源进行统一协议适配、格式转码与权限封装,同步搭建含时空属性、精度指标、更新频次、智能体适配场景的全域数据资产目录与元数据库,支撑智能体基于语义规则完成数据自主检索、精准匹配与按需动态调用。

2. 搭建多模态遥感影像自动化联合处理流水线

适配光学、合成孔径雷达(SAR)、激光雷达(LiDAR)等遥感数据的成像特性,融合多维度特征匹配与迭代精配准算法^[32],结合众源控制点筛选去噪与光束法区域网平差方法统一时空基准,利用网格化自适应匀色与重叠区域融合策略,有效消除影像错位、色差与拼接缝隙,快速生成坐标统一、色彩均衡、无缝覆盖的“一张图”高精度底图。

3. 实现非结构化数据时空语义增强与统一编码

针对政务台账、执法记录、网络舆情等无规则文本数据,通过业务-地理字段规则映射、空间点位匹配等技术完成结构化与空间化转换,微调行业大语言模型(LLM)智能抽取地理实体、事件要素与关联关系,构建全域唯一的地理实体编码体系,实现非遥感数据与遥感数据的深度语义对齐^[33]。

4. 突破动态视频实时协同融合关键技术

针对无人机航拍、地面固定监控等动态视频流,实现实时地理编码与数字高程模型(DEM)地形、姿态双重微分纠正,解决画面抖动、视角偏移带来的空间畸变问题;结合跨视角目标检测与注意力特征融合模型,完成多设备视频数据的特征互补与协同分析,输出位置精准、时序连续、全域统一的地理态势^[33]。

5. 构建地理实体驱动的多模态高维表征体系

以地理实体为核心枢纽,聚合遥感视觉特征、

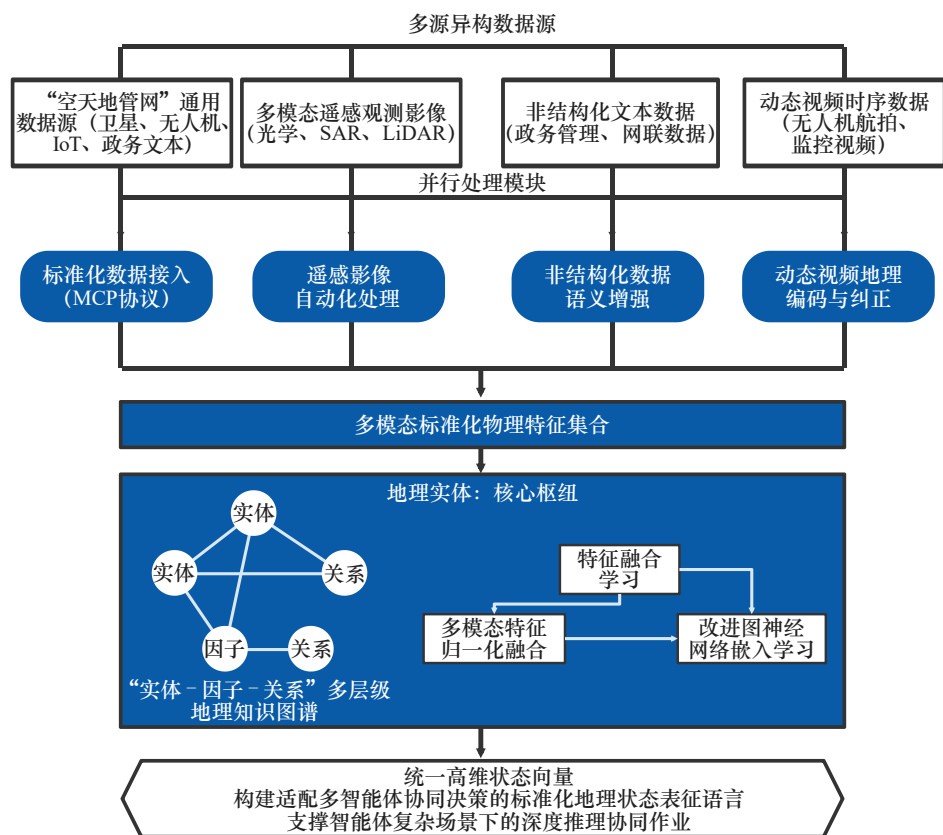


图3 多模态数据的感知与表征技术流程

物联时序特征、政务语义特征与空间关系特征，搭建“实体-因子-关系”多层级地理知识图谱；通过多模态特征归一化融合与图神经网络嵌入学习，生成可计算、可解释、可推理的统一高维状态向量，构建适配多智能体协同决策的标准化地理状态表征语言，支撑智能体复杂场景下的深度推理与协同作业。

（二）地理知识深度融合与理解

当前，LLM驱动的智能体普遍缺乏对地理空间领域知识的深层次理解^[34]，主要体现在3个方面。一是地理专业知识结构化表征与流程化注入。大量非结构化的行业规范、专家经验与历史案例难以转化为可计算、可执行的知识体系，且缺乏标准作业程序的刚性引导，导致协同决策缺乏精准可靠的地理依据。二是复杂时空拓扑关系的认知。现有模型缺乏对地理实体间时空关联与物理规律的内在理解^[35]，在推理中难以自动识别和修正违背地理常识的逻辑错误。三是地理知识的持续更新与经验复用。多智能体执行过程中产生的大量实战经验、业

务流程及决策规则缺乏有效沉淀与管理机制，难以转化为可复用的知识资产，导致知识体系无法持续更新，制约了复杂地理业务场景下智能体能力的长期积累与稳定提升^[36]。

为有效规避大模型幻觉引发的地理专业偏差、拓扑推理错误与决策不可解释等问题，针对性解决智能体地理知识表征不足、时空认知薄弱、知识无法迭代进化等核心缺陷，本文构建“知识存储-流程决策-知识更新”三层递进式地理认知增强机制（见图4），强化多智能体的地理专项认知与协同决策能力^[37]。

1. 知识存储层

采用“关系图谱+向量数据库+规则数据库”的复合知识架构，实现地理知识的结构化表达、语义检索与规则约束协同管理。针对地理知识空间关联复杂、专业规则隐含、非结构化资料难以直接计算等问题，依托地理知识图谱（如Neo4j或国产NebulaGraph）对地理实体、空间关系及业务关联进行结构化建模。在任务执行过程中，智能体根据用户任务自动生成图查询，检索相关地理实体及其

空间拓扑、上下游关联和业务依赖关系，并结合多层关系推理获取隐式知识，为任务规划与决策分析提供可计算的时空知识支撑，以弥补大模型原生时空认知能力不足等问题。采用向量数据库对专家经验、行业规范及历史案例进行语义向量化存储，结合检索增强生成（RAG）实现相似案例的精准召回，为复杂任务提供经验知识支撑。最后，依托 PostgreSQL/PostGIS 构建规则数据库，对行业规范、空间分析阈值及质量控制规则等确定性知识进行统一管理，提升分析过程的专业性、一致性与可解释性。上述 3 类知识协同工作，共同构建地理空间智能体的混合知识底座^[38]。

2. 流程决策层

引入面向地理场景的标准作业程序（SOP），实现地理知识驱动的流程约束与确定性编排。SOP 并非提示词的软性引导，而是采用声明式配置与确定性 workflow 引擎相结合的工程化方式进行固化。在 SOP 模板库构建过程中，由地理领域专家依据行业规范和典型业务流程，以自然语言描述标准作业流程及关键约束；LLM 在此基础上自动完成流程补全、节点规范化、参数抽象及配置生成，并转换为轻量级数据序列化格式，定义任务阶段、执行顺序、关键决策节点及质量控制规则，经人工审核后

注册为 SOP 模板。最终，结构化 SOP 配置由解析器转换为有向无环图（DAG），依托确定性 workflow 引擎严格控制各子任务的执行主体、时序依赖及空间约束（如必须完成影像配准后方可执行变化检测），将专业流程控制由 LLM 自主规划转变为基于 SOP 约束的确定性编排，从流程层面降低自由推理导致的专业误差。同时，通过状态检查点与任务快照机制支持长周期地理分析任务的断点续传与故障恢复，进一步提升复杂地理任务执行的稳定性与鲁棒性。

3. 知识更新层

通过构建地理知识持续更新机制，实现实战经验向领域知识的持续沉淀与演化。基于系统自动记录的多智能体执行过程中的任务轨迹、工具调用及执行结果，并结合任务质量评估和人工反馈，实现对验证成功的业务流程、领域知识及决策规则进行自动提取，经审核后分别更新至 SOP 模板库、知识图谱、向量数据库及规则数据库^[39]；对于执行失败或规则冲突案例，则归档至风险案例库，并形成相应约束规则，为后续任务提供风险预警与决策参考。同时，用户可上传最新行业标准、政策规范及典型案例等外部知识，对混合知识底座进行增量更新，实现地理知识的持续积累与演化，保障知识体

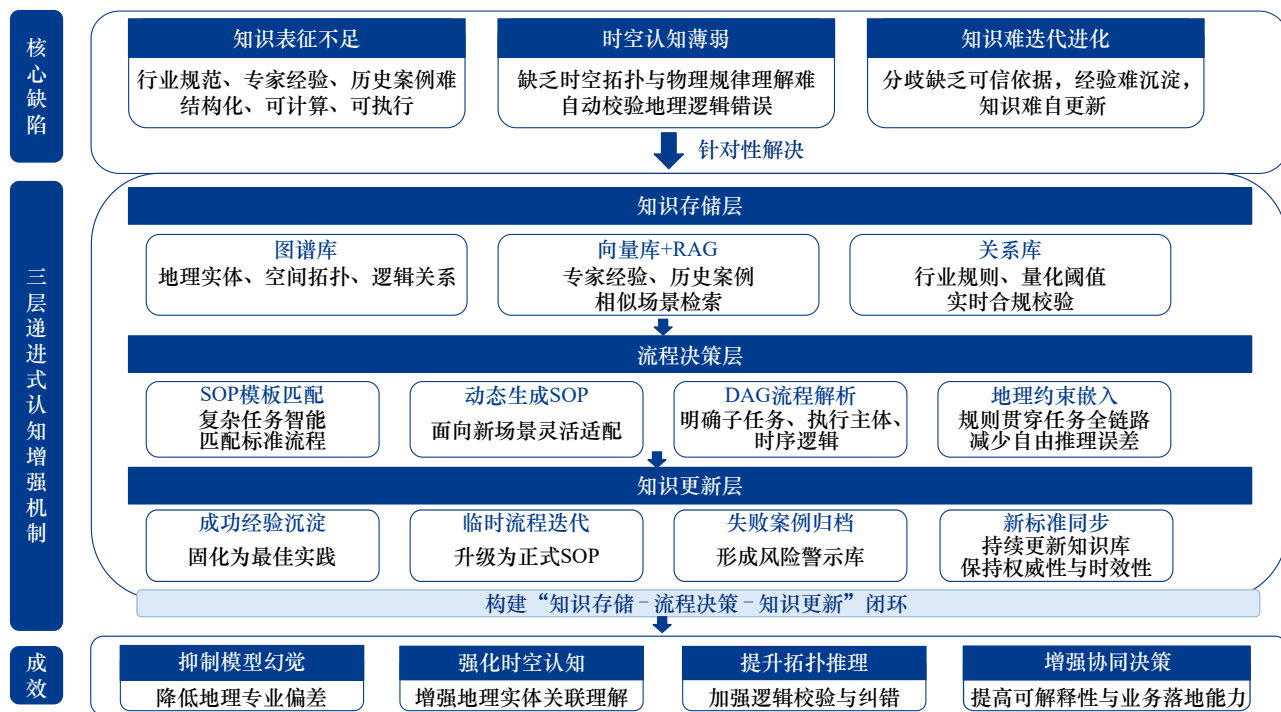


图4 地理知识深度融合与理解技术流程

系的时效性、准确性和场景适应能力。

（三）专业工具智能调用与质量控制

为克服多智能体协同决策与执行中的幻觉问题，需将专业地理信息工具深度融入智能体推理与执行过程。然而，该过程仍面临三大挑战。一是工具能力的标准化描述与智能匹配，现有地理信息系统（GIS）工具接口规范不统一、参数复杂，缺乏面向智能体的标准化能力描述^[40]，导致智能体无法自主认知与比较不同工具的能力边界，难以在任务规划中实现最优匹配。二是跨工具协同中的地理语义一致性保障。在地理空间任务处理链中，上游工具的输出（如矢量面、栅格瓦片、三维模型）需能被下游工具理解及匹配。若对同一地理实体的几何表达、属性结构及空间参考不一致，将导致信息在传递过程中易产生语义损耗与几何畸变，影响结果的真实性^[41]。三是复杂工具链执行过程的可靠保障。复杂地理分析通常涉及多智能体与多工具的串联协同^[42]，缺乏对工具执行状态、中间结果及异常情况的全过程监测与恢复机制，错误易在长链路执行过程中逐级累积，导致任务执行可靠性下降、问

题难以追溯，影响系统整体可信度。

为充分融合LLM的灵活推理能力与GIS工具确定性计算能力，针对工具智能匹配、跨工具数据一致性、复杂工具链可靠执行等关键问题，构建“工具服务-数据管控-执行保障”三层递进式专业工具智能执行与质量控制体系（见图5），实现专业工具的标准化接入、跨工具数据协同及全过程可靠执行，全面提升多智能体的精准性、稳定性与可信度。

1. 工具服务层

针对传统GIS工具接口异构、调用方式不一、难以被智能体自主理解等问题，对空间分析算子、地理计算模型^[42]、数据处理及可视化工具等进行统一服务化封装，屏蔽底层接口差异与复杂参数配置。依托MCP实现工具能力的标准化暴露，并结合工具注册机制完成工具注册、能力描述、资源管理及智能发现，形成工具画像，使智能体能够依据任务需求自动完成工具检索、能力匹配及参数调用，实现工具一次封装、多场景复用，提升专业工具的可调用性与智能调度能力。

2. 数据管控层

构建地理空间数据验证流水线，建立“声明级-

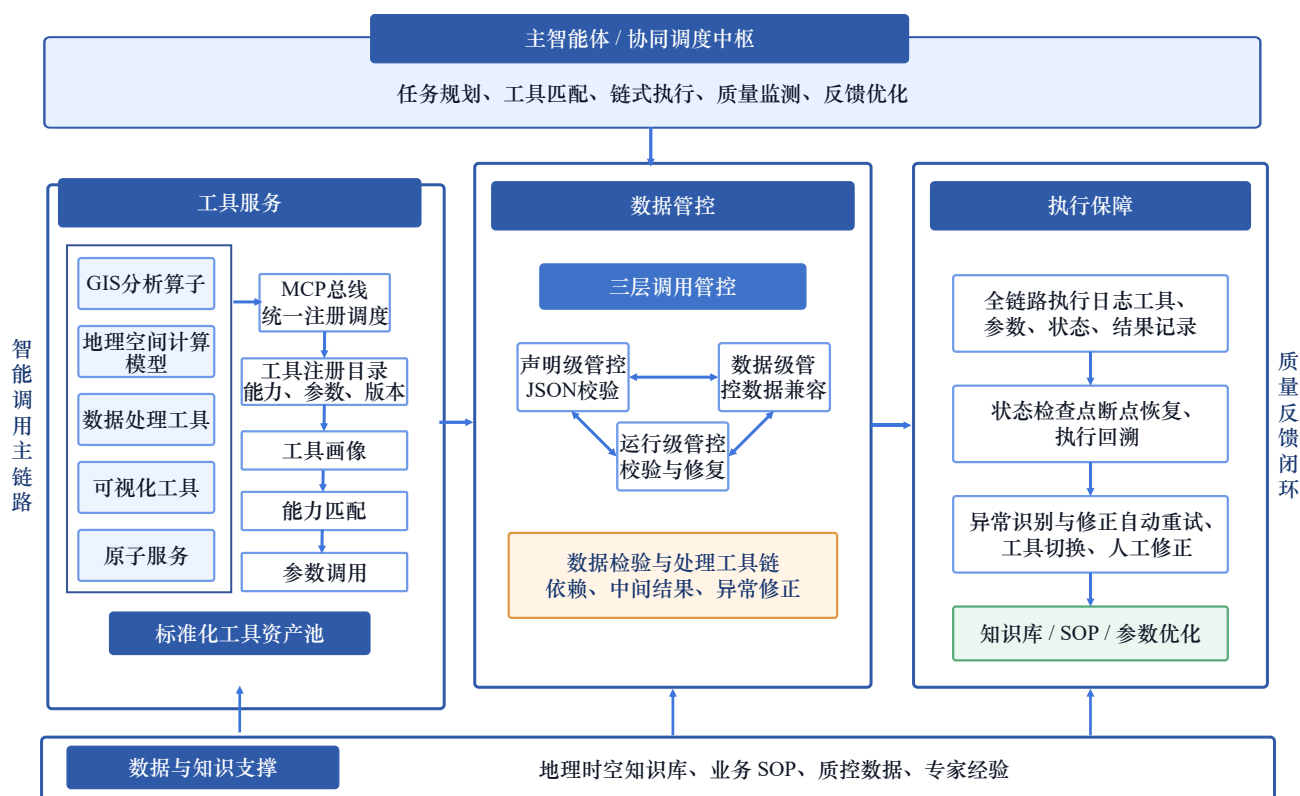


图5 专业工具智能调用与质量控制技术流程

数据级-运行级”三层一致性保障机制,确保跨工具协同过程中的数据语义一致与空间约束正确。声明级基于JSON模式对工具输入输出接口、数据类型及空间参考等进行标准化描述与一致性校验,保障工具能力规范化接入及上下游数据语义互通合规^[43];数据级依托地理空间数据抽象库(GDAL)/投影与坐标转换库(PROJ)完成不同工具间数据格式、坐标系统及空间参考的自动转换,实现跨工具数据兼容;运行级结合几何计算引擎,对拓扑关系、几何有效性及业务空间约束进行实时校验,并对异常几何、拓扑错误等问题进行自动修复或告警,避免链式处理过程中出现数据失真、几何畸变及空间约束冲突,确保跨工具协同的数据一致性与计算正确性。

3. 执行保障层

引入任务执行日志、状态检查点及容错恢复等执行治理技术,构建工具调用全过程治理机制。系统持续记录工具调用日志、输入输出参数、执行状态及中间结果,在关键节点建立状态检查点,实现复杂地理任务的断点恢复与执行回溯;针对工具调用失败、执行超时及结果异常等情况,结合自动重试、备用工具切换及人工介入等容错策略,保障复杂工具链的连续稳定运行。同时,将工具执行日志、异常案例及性能指标反馈至工具注册中心,持续优化工具能力描述、调用策略及参数配置,不断提升专业工具的可用性、调度效率与协同执行能力。

(四) 多智能体协同调度与自我优化

地理空间多智能体系统的整体效能不仅取决于专业任务执行的准确性,还取决于任务、智能体与算力资源能否在运行过程中实现高效协同。尤其在多个专业智能体共享中央处理器(CPU)、图形处理器(GPU)和内存资源的运行环境下,仍面临三个方面的挑战。一是多任务并发条件下的资源竞争与负载不均衡。大模型推理、遥感影像处理、空间分析及数据转换等任务具有不同的资源需求和执行时长,固定的执行顺序与并发配置容易引发任务积压、显存争用和资源闲置,影响整体执行效率。二是多智能体协同过程中的状态同步与成果共享^[44]。不同智能体需要持续获取任务进度、依赖状态及中间成果,若缺乏统一的协同状态管理与事件通知机制,容易出现重复查询、重复推理、成果重复传输

及协作等待等问题。三是动态运行环境下调度策略的适应能力不足。随着任务负载、资源占用和智能体运行状态不断变化,静态调度规则难以及时适配不同任务场景,且历史运行过程中形成的有效配置与协作经验难以被持续复用,制约了系统运行效率的长期提升。

面向应急响应、动态监测等复杂场景,针对资源竞争、协同状态不一致及调度策略适应能力不足等问题,本研究构建“资源调度优化-多智能体协同优化-环境自适应优化”三层递进式协同调度体系(见图6)。

1. 资源调度优化层

针对多智能体共享算力环境下任务积压、资源竞争及执行效率下降等问题,构建基于任务队列、优先级调度与资源准入控制的动态调度机制。系统读取SOP生成的待执行子任务,根据任务紧急程度,预计执行时长,CPU、GPU和内存需求建立任务优先级与资源画像,并结合智能体运行状态和实时资源余量判断任务执行条件^[45]。针对大模型推理、遥感影像处理等GPU密集型任务设置显存阈值与并发配额,针对数据查询、格式转换等CPU密集型任务,采用工作线程池进行并行处理;在运行过程中,根据任务等待时间、队列长度和资源占用率动态调整执行顺序与并发规模,提高单机环境下算力资源利用率和复杂任务执行效率。

2. 多智能体协同优化层

针对智能体间状态不同步、中间成果重复获取及协作等待等问题,构建基于共享上下文与事件驱动的协同机制。可采用远程字典服务(Redis)构建统一协同状态空间,以哈希(Hash)等结构集中维护子任务状态、智能体运行状态、任务依赖关系及中间成果索引,并通过Redis数据流建立事件总线,将任务完成、成果生成和资源释放等事件按需推送至相关智能体^[46];对于影像、矢量数据及三维模型等大型成果,仅在状态空间中登记存储地址、空间范围、坐标参考和版本等元数据,避免在智能体之间重复传输。在任务结束后,将关键协同状态及调度结果持久化至PostgreSQL,实现运行状态的快速共享与历史过程的结构化管理,减少智能体轮询等待、重复推理和重复数据加载。

3. 环境自适应优化层

针对任务负载波动、资源状态变化及智能体重

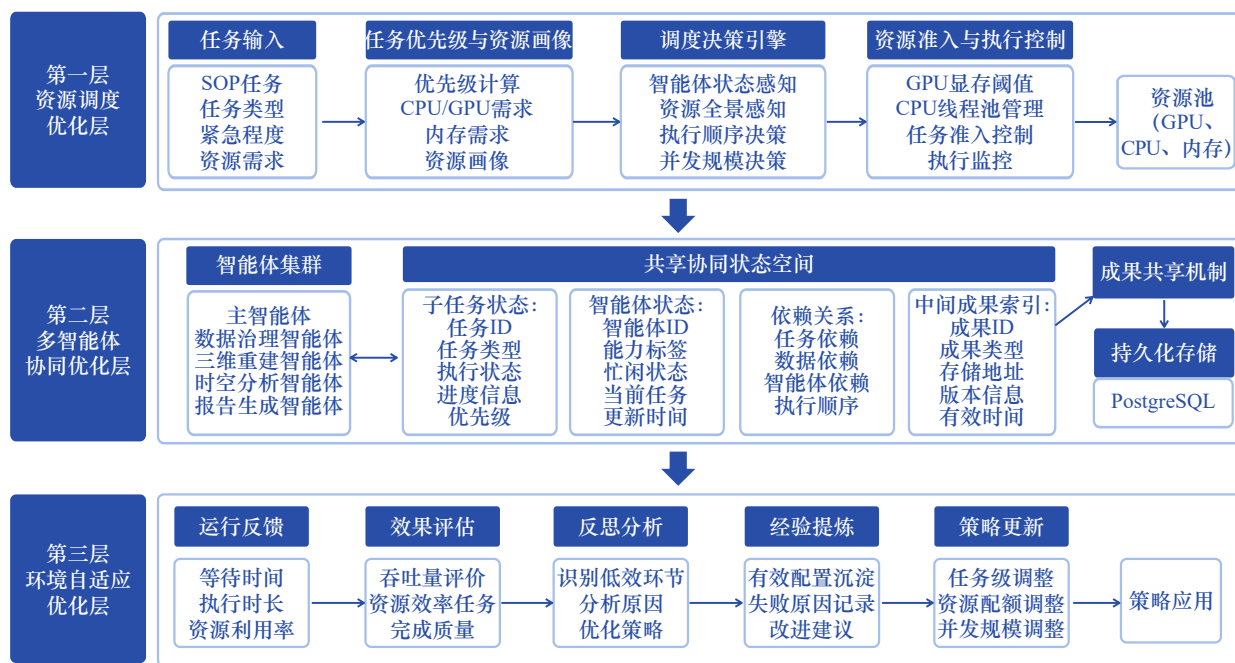


图6 地理空间多智能体协同与优化技术流程

复出现低效协作等问题，构建“运行反馈-效果评价-反思分析-经验提炼-策略更新”的闭环优化机制。系统持续采集任务等待时间、执行时长、资源利用率、智能体空闲率及协作开销等运行指标，通过反思机制识别优先级设置、并发配额和协作时序中的低效环节，并将有效配置、失败原因及改进建议沉淀为运行策略经验。在后续相似任务中，根据任务类型和资源状态检索相关经验，动态调整任务优先级、资源配额、并发规模及智能体协作节奏，实现运行调度策略的持续自我改进^[47]。

综上所述，本文围绕“感知-认知-执行-协同优化”全链条，构建支撑地理空间多智能体高效协同的技术体系。该体系以多源时空数据的动态感知与统一表征为基础，通过混合知识存储、SOP流程约束与知识持续更新强化地理认知和专业决策能力；通过GIS工具标准化服务、跨工具数据管控与全过程执行保障，提升专业任务执行的准确性、稳定性与可信度；通过运行时资源调度、共享上下文协同及运行策略自我改进，实现任务、智能体与算力资源的高效协同和持续优化。由此，系统性提升多智能体在复杂动态地理场景下的协同感知、专业推理、精准执行与自适应运行能力，为构建可落地、可演化、可信赖的地理空间智能系统提供技术路径。

四、地理空间多智能体协同服务灾害应急保障示范

针对塌方、洪涝等高动态、强时效突发性自然灾害，应急处置工作存在场景复杂、处置环节链条长、决策窗口期短等痛点。传统人工处置模式依赖技术人员操作专业软件，作业环节碎片化、人工干预占比高，难以高效兼顾多源数据感知归集、异构数据标准化治理、灾害场景三维快速重建、时空多维研判、应急报告智能编制等多元化复合型业务；而单一智能体模式又受自身技能边界与大模型上下文窗口限制，在高强度应急作业场景中，极易出现指令解析偏差、对话记忆混乱、上下文管控失衡、单项任务负载溢出等一系列问题，难以适配灾害黄金救援期内快速响应、精准研判、高效决策的核心需求^[47]。而地理空间多智能体协同模式通过角色拆分、任务解耦、动态调度的运行机制，弥补单智能体作业短板，在突发性灾害应急处置场景中具备较高的落地应用价值与技术优势。

（一）智能体设计

以某流域水库塌方灾害为场景，采用“主智能体统筹调度+专业化执行智能体分工作业”的垂直协同模式。基于不同业务环节的作业目标，为各类

型子智能体定制专属角色定位、精细化提示词库与专业化技能组件集，将应急场景下的用户意图识别、多源数据感知、异构数据治理、灾后实景三维建模、时空多维研判、应急研判报告编制等全链条业务环节进行深度解耦与动态重组。

在数据层面，以灾后无人机航拍影像为核心建模数据源，共计采集 500 余张 5 cm 影像，保障三维模型重建精度；同时引入灾害发生前的三维网格（Mesh）基准模型，用于实现灾前、灾后地形地貌的差分对比分析，量化塌方形变规模。在模型层面，全部智能体统一调用莫干·玄衍大模型，依托该模型强大的自然语言语义理解、多模态数据解析、三维模型生成能力，为任务拆解、数据治理、实景重建、灾情研判等全环节业务提供底层算法支撑。在技能组件层面，各智能体以 Python 开发框架、三维重建技术、GIS 空间分析技术、多线程调度算法为底层支撑，封装适配专属业务场景的模块化技能组件。各类智能体技能相互独立、互不干

涉，同时预留标准化通用接口。后续可根据洪涝、滑坡、泥石流、火灾等新增灾害场景的作业需求，直接迭代升级或新增技能模块，无需重构整体架构，显著提升体系的场景适配性与可拓展性。灾害应急保障服务系统的整体设计图如图 7 所示。各智能体的职责具体如下。

1. 主智能体

作为整个协同体系的中枢调度单元，核心负责接收应急人员的自然语言指令，完成用户意图解析、关键要素提取、复合型任务拆解；统筹管控全流程作业进度，动态下发任务至对应专业执行智能体，协调各智能体之间的资源调度与信息交互；校验所有子任务完成质量，汇总全链路核心作业成果，最终以通俗易懂的自然语言形式向应急人员反馈整体处置结果^[48]。

2. 数据治理智能体

承担全场景数据资产管理与数据接入工作，负责检索调取区域历史基准三维模型、实时摄像头视频

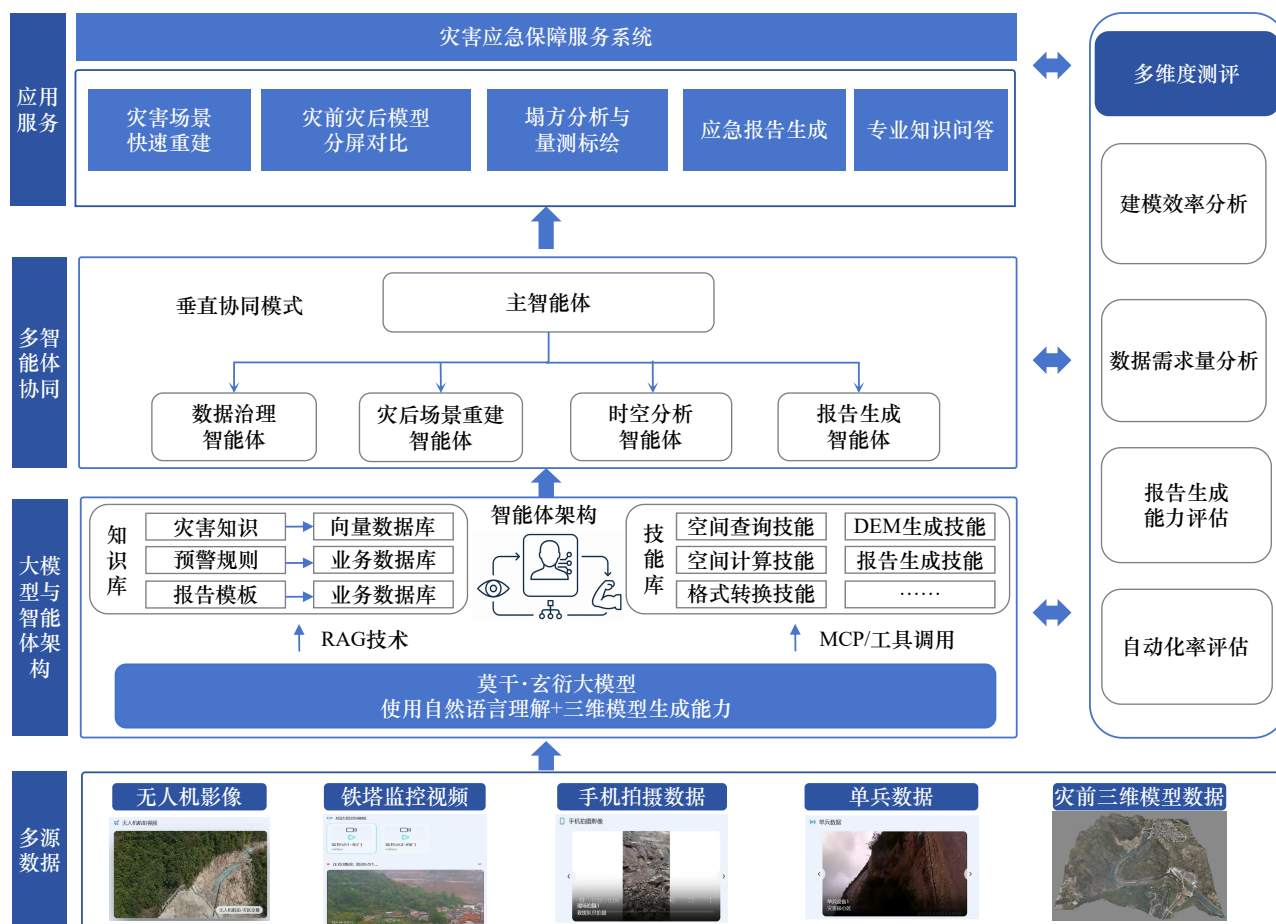


图 7 灾害应急保障服务系统

流、无人机影像、单兵设备数据等多源异构数据；完成数据清洗、格式适配等标准化治理工作；同时，承担成果归档、版本管理、历史案例库搭建职能，统一收纳历次应急作业生成的三维模型、研判数据、应急报告等成果，实现灾害数据全生命周期可追溯管理。

3. 灾后场景重建智能体

专项负责灾后实景三维模型构建，适配灾后复盘、应急研判两类业务，支持快速重建、精细化重建两种建模策略；基于航拍影像、监控视频等数据源，自动化完成点云生成、模型拟合、纹理映射等操作，并行输出多精度三维模型，并支持后续双时态模型分屏可视化比对。

4. 时空分析智能体

依托内置空间分析技能组件，基于灾前、灾后三维模型生成对应数字高程模型，自动完成塌方体量核算、受灾区域划定、地形形变分析、距离/面积量测等作业，为灾害定量分析提供依据^[49]。

5. 报告生成智能体

集成灾害研判标准化报告模板，自动归集灾害影像数据、三维建模成果、时空分析数据、灾害阈值指标等多维度业务数据；结合内置灾害分级预警规则，智能生成灾情概述、灾害等级判定、风险隐患分析、应急处置建议等文本内容，完成完整应急研判报告编制。

(二) 业务流程

选取某流域水库局部塌方区域作为测试场景，塌方灾害影响面积约 0.6 km²，区域内涵盖水库水域、山体边坡等多元地物类型，整体作业分为六大闭环阶段，业务流程具体如图 8 所示。

阶段 1：意图理解与数据准备

应急管理人员通过前端平台下达自然语言指令：“快速调取某流域水库塌方现场实时数据，帮我进行灾情紧急分析”。主智能体接收指令后，完成语义解析与要素拆解，精准提取任务核心关键信息（应急紧急度、作业地点、作业时间、数据需求、任务类型等），结合业务逻辑将复合型任务拆解为结构化、序列化子任务：① 加载目标区域灾前历史基准三维模型；② 采集调取现场实时监控视频流数据；③ 完成灾后场景实景三维重建；④ 开展塌方灾害等多维量化分析；⑤ 编制专项应急灾情研判报告。

任务拆解完成后，主智能体将任务①、任务②下发至数据治理智能体，该智能体并行启动双线程作业，一方面，在专属数据仓库中检索并调取目标区域已归档的灾前 Mesh 基准模型，支持 .glb、.ply 两类主流三维模型格式并完成前端加载；另一方面，对接现场监控摄像头，实时拉取、缓存视频流原始数据。待所有基础数据预处理完毕后，数据治理智



图 8 灾害应急保障业务流程图

能体将作业摘要成果回传至主智能体。主智能体汇总并校验基础数据,整合对应任务需求与数据源,调度灾后场景重建智能体开展实景建模作业。

阶段2:灾后三维模型快速生成

灾后场景重建智能体依托前置预处理数据源,结合应急处置不同阶段的作业需求,并行启动快速重建、精细化重建两类差异化重建作业,分别适配黄金救援期应急研判、后期灾害复盘三类业务场景。建模完成后同步生成灾前、灾后分屏可视化对比模型,直观呈现塌方区域地表形变特征。全部建模作业完成后,该智能体将多精度三维模型成果信息回传至主智能体。主智能体校验模型质量后,调度时空分析智能体开展灾情量化分析工作。

阶段3:塌方分析与量测标绘

时空分析智能体基于主智能体同步的双时态三维模型数据,调用内置DEM解算、空间差值分析、封闭区域体量测算、交互式标绘量测等专业技能组件,解算生成对应数字高程模型,通过差分比对量化塌方形变特征,输出塌方专题分析图表、交互式量测标绘数据等全套量化成果。在分析作业闭环后,所有研判数据统一回传至主智能体,经主智能体整合后,调度报告生成智能体编制应急研判报告。

阶段4:智能研判报告自动生成

报告生成智能体归集灾前影像数据、三维模型数据、DEM分析结果、塌方体量数据、人工标绘信息等全部作业成果,结合用户自定义的灾害分级预警阈值,在1 min内即可自动完成智能研判(如 $>200\text{ m}^3$ 预警, $>500\text{ m}^3$ 紧急,并引用具体位置)。报告可导出为PDF格式,并自动归档至数据治理智能体的历史模型库。

阶段5:成果校验与结论输出

在全部子任务闭环完成后,由主智能体对上述所有环节进行全方位校验与内容整合,最后以自然语言的方式回答用户的问题。

(三) 结果分析

为验证地理空间多智能体协同架构在突发灾害场景下的应用价值,从建模效率、数据消耗情况、智能化水平及鲁棒性维度,以 0.6 km^2 水库塌方实景作为实测案例,将该架构分别与固定工作流式应急业务模式、单智能体架构开展横向对比试验,系统

剖析各类作业模式的应急适配特性与综合应用优劣。

传统灾害应急作业模式主要依靠专业GIS建模软件与固定式应急业务系统协同作业,整体流程碎片化问题突出,跨环节协同联动能力较弱,三维建模整体周期冗长。针对本次水库塌方测试区域,精细化倾斜摄影建模工序繁琐、操作门槛较高,完整作业周期长达3~4 d。除此之外,面对灾情研判、应急报告编制等对动态适配、人机协同要求较高的业务场景,固定式应急业务系统仅能依据预设模板完成标准化输出,无法根据灾情变化动态调整作业策略与分析逻辑,难以适配复杂灾害场景下的快速响应需求。

相较于传统应急作业模式,地理空间多智能体协同架构具备动态策略调度、人机便捷协同、全链路自动化运行等显著优势。顶层主智能体可结合灾害应急等级与作业目标,自适应切换三维重建执行策略,分别适配灾后全域复盘、灾中快速研判两类核心应急作业场景。在效能层面,复盘模式依托500余组原始影像数据,可在10 h内完成全域场景精细化三维重建;应急研判模式结合影像智能抽稀算法或人工筛选上传模式,仅需50余张影像数据源,即可在10 min内完成轻量化快速建模。同时,该架构可贯通数据采集治理、三维实景重建、空间量化分析、应急报告生成、成果统一归档全业务链条,实现高自动化、智能化闭环作业。实测结果表明:相较于传统作业模式,地理空间多智能体协同架构的数据采集需求量降幅约为90%,建模响应时效由传统天级压缩至分钟级,全域复盘、快速研判两类场景的综合作业效率提升5倍以上。

从智能化水平与系统鲁棒性层面分析,地理空间多智能体协同架构依托层级化角色分工机制与模块化技能组件架构,相较于单智能体架构与传统固定工作流系统均具备明显差异化优势。在与单智能体架构对比方面,地理空间多智能体模式对全域上下文信息按作业角色进行解耦拆分,各子智能体仅独立维护自身业务域内的会话状态与工具调用记录,且主智能体仅接收各环节产出的轻量化指标摘要而非全量原始数据,从根本上规避了单智能体在长流程、多任务复杂应急场景中易出现的上下文窗口溢出、指令解析错误及工具调用失效等问题,有效提升复杂灾情下系统运行的稳定性与容错性。在与传统固定工作流式业务系统对比方面,多智能体

可通过优化提示词、扩充技能库两类轻量化更新方式，低成本、高效率适配动态演化的灾害场景与迭代更新的作业需求；而传统业务系统依托固化工作流驱动，若需适配全新作业规则与动态化应急需求，需由研发人员调整底层代码、完成程序调试与版本迭代，普遍存在适配成本高、更新周期长、场景泛化能力不足等缺陷。

综合上述，地理空间多智能体协同架构能够有效降低技术人员在数据治理、三维建模、报告编撰等重复性基础工作中的人力投入，缩短黄金救援窗口期的决策等待时长，同时可支撑后续应急功能的快速迭代拓展，为分钟级、高效灾害应急保障服务提供了新的工程落地方案。

五、结语

随着大模型与智能体的飞速发展，多智能体协同已成为人工智能领域兼具前沿学术价值与广泛工程潜力的重要方向^[50-53]，能够解决单体智能难以应对的复杂任务，正推动人工智能系统向更自主、更协同、更通用的方向演进，在地理信息领域展现出强大的应用潜力。地理空间多智能体协同不仅是多智能体研究在地理信息领域的重要深化，更是推动空间信息技术向智能感知与自主决策方向跃迁的关键路径。实现地理空间多智能体协同是一个系统工程，需深度融合遥感、IoT、人工智能和自动化技术，以更智能、更敏锐地感知地理空间，并作出更快速、更科学的决策。

面向未来，需深入研究地理空间多智能体的高效协同、多模态感知与融合^[54]、联合决策与规划、可解释理解与可信评估等理论方法。在工程落地角度，需构建低代码开发平台、标准化交互接口与弹性部署框架，以降低技术门槛，提升系统在真实场景中的适应性与扩展性。最终构建具备任务自规划、工具自调用、结果自评估与记忆自进化能力的智能系统，实现对地理环境及事件的持续感知、智能分析与自主决策，并通过“执行-反馈-学习”闭环，动态优化其策略与知识库，推动地理空间应用从静态分析向动态智能响应演进，为自然资源监测、应急管理、智慧城市等提供新一代决策支持。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: April 22, 2026; **Revised date:** June 24, 2026

Corresponding author: Zhang Jixian is a research fellow from National Geomatics Center of China. His major research field is surveying, remote sensing, and geospatial intelligence. E-mail: zhangjx@casm.ac.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the Practical, Three-Dimensional Development Strategy for China by 2040 and Its Implementation Path” (L2424236)

参考文献

- [1] 陈军, 艾廷华, 闫利, 等. 智能化测绘的混合计算范式与方法研究[J]. 测绘学报, 2024, 53(6): 985-998.
Chen J, Ai T H, Yan L, et al. Hybrid computational paradigm and methods for intelligentized surveying and mapping[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2024, 53(6): 985-998.
- [2] Derouiche H, Brahmi Z, Mazeni H. Agentic AI frameworks: Architectures, protocols, and design challenges[PP/OL]. arXiv (2025-08-13)[2026-01-28]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.10146>.
- [3] Xu W, Yu Z, Mu B, et al. RS-Agent: Automating remote sensing tasks through intelligent agent[J]. Science China Information Sciences, 2026, 69(8): 180302.
- [4] 李圆, 祝华夏, 付媛媛, 等. AI智能体驱动产业变革研究报告[R]. 北京: 中国软件行业协会信息主管(CIO)分会, 2025: 3.
Li Y, Zhu H X, Fu Y Y, et al. Research report on industrial transformation driven by AI intelligent agents[R]. Beijing: China Software Industry Association Information Chief (CIO) Branch, 2025: 3.
- [5] Abou Ali M, Domaika F, Charafeddine J. Agentic AI: A comprehensive survey of architectures, applications, and future directions[J]. Artificial Intelligence Review, 2025, 59(1): 11.
- [6] Bell A, Aides A, Helmy A, et al. Earth AI: Unlocking geospatial insights with foundation models and cross-modal reasoning[PP/OL]. V4. arXiv (2026-02-18)[2026-03-28]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.18318>.
- [7] Zhang X Q, Dong X F, Wang Y R, et al. A survey of multi-AI agent collaboration: Theories, technologies and applications[C]//The 2nd Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area International Conference on Digital Economy and Artificial Intelligence, 2025: 1875-1881.
- [8] Wang Y T, Pan Y H, Su Z, et al. Large model-based agents: State-of-the-art, cooperation paradigms, security and privacy, and future trends[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2026, 28: 1906-1949.
- [9] Talebirad Y, Nadiri A. Multi-agent collaboration: Harnessing the power of intelligent LLM agents[PP/OL]. arXiv (2023-06-05)[2026-01-28]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.03314>.
- [10] Wu Q Y, Bansal G, Zhang J Y, et al. AutoGen: Enabling next-gen LLM applications via multi-agent conversations[C]//The First Conference on Language Modeling (COLM), 2024: 1328.
- [11] Fournay A, Bansal G, Mozannar H, et al. Magentic-one: A generalist multi-agent system for solving complex tasks[PP/OL]. arXiv (2024-11-07)[2026-01-28]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.04468>.
- [12] Wang J L, Duan Z H. Agent AI with LangGraph: A modular framework for enhancing machine translation using large language

- models [PP/OL]. arXiv (2024-12-05)[2026-01-28]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.03801>.
- [13] Duan Z H, Wang J L. Exploration of LLM multi-agent application implementation based on LangGraph+CrewAI [PP/OL]. arXiv (2024-11-27)[2026-01-28]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.18241>.
- [14] Roumeliotis K I, Tselikas N D. ChatGPT and open-AI models: A preliminary review[J]. Future Internet, 2023, 15(6): 192.
- [15] Sun Z H, Sandoval L, Crystal-Ornelas R, et al. A review of earth artificial intelligence[J]. Computers & Geosciences, 2022, 159: 105034.
- [16] 江文源, 朱剑, 马骁驰, 等. 信创背景下中国 GIS 软件的发展研究与实践[J]. 科技与创新, 2025(23): 221-223.
Jiang W Y, Zhu J, Ma X C, et al. Research and practice on the development of GIS software in China under the background of Information Innovation[J]. Science and Technology & Innovation, 2025(23): 221-223.
- [17] Zhang J F, Hua X S, Huang J Q, et al. City brain: Practice of large-scale artificial intelligence in the real world[J]. IET Smart Cities, 2019, 1(1): 28-37.
- [18] Lee C, Paramanayakam V, Karatzas A, et al. Multi-agent geospatial copilots for remote sensing workflows[PP/OL]. arXiv (2025-01-27)[2026-01-28]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.16254>.
- [19] Park J S, O'Brien J, Cai C J, et al. Generative agents: Interactive simulacra of human behavior[C]//The 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 2023: 1-22.
- [20] Kuckreja K, Danish M S, Naseer M, et al. GeoChat: Grounded large vision-language model for remote sensing[C]//2024 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2024.
- [21] Guo Z J, Wang J, Ling F H, et al. A self-evolving AI agent system for climate science [PP/OL]. V3. arXiv (2025-11-03)[2026-01-28]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.17311>.
- [22] Tsokanaridou M, Hackstein J H, Hoxha G, et al. DA4DTE: An agentic system for enhancing the accessibility of digital twins of earth[C]//The Workshop on AI-driven Data Engineering and Reusability for Earth and Space Sciences (DARES'25) Co-located with the 28th European conference on artificial intelligence (ECAI 2025), 2025.
- [23] Lin Q M, Hu R, Li H X, et al. ShapefileGPT: A multi-agent large language model framework for automated shapefile processing[J]. International Journal of Digital Earth, 2025, 18(2): 2577884.
- [24] Liu Z R, Zhao D P, Yuan B, et al. RescueADI: Adaptive disaster interpretation in remote sensing images with autonomous agents [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2025, 63: 5611814.
- [25] Yang K, Yang D K, Zhang J Y, et al. Spatio-temporal domain awareness for multi-agent collaborative perception [C]//2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), 2023: 23326-23335.
- [26] Hong S R, Zhuge M C, Chen J, et al. MetaGPT: Meta programming for a multi-agent collaborative framework[C]//The Twelfth International Conference on Learning Representations (ICLR 2024), 2024: 23247-23275.
- [27] Wang L, Ma C, Feng X Y, et al. A survey on large language model based autonomous agents[J]. Frontiers of Computer Science, 2024, 18(6): 186345.
- [28] Amirkhani A, Barshooi A H. Consensus in multi-agent systems: A review[J]. Artificial Intelligence Review, 2022, 55(5): 3897-3935.
- [29] 董学辉, 李凡, 王帅, 等. 多源地理空间数据服务标准化融合技术[J]. 测绘与空间地理信息, 2025, 48(11): 125-127, 131.
Dong X H, Li F, Wang S, et al. Standardization fusion technology of multi-source geospatial data service[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2025, 48(11): 125-127, 131.
- [30] 陈军, 张珊珊, 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.
- [31] 张良培, 何江, 杨倩倩, 等. 数据驱动的多源遥感信息融合研究进展[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1317-1337.
Zhang L P, He J, Yang Q Q, et al. Data-driven multi-source remote sensing data fusion: Progress and challenges[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1317-1337.
- [32] Lei Z, Lei T L. Towards topological geospatial conflation: An optimized node-arc conflation model for road networks[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2024, 13(1): 15.
- [33] 于鲁平. 生态保护红线法律制度建设时空主要矛盾解析[J]. 政法论丛, 2019(6): 138-148.
Yu L P. Analysis on the main contradiction in the construction of the legal system of ecological protection red line[J]. Journal of Political Science and Law, 2019(6): 138-148.
- [34] 周新民, 胡宜桂, 刘文洁, 等. 基于多模态多层次数据融合方法的城市功能识别研究[J]. 计算机科学, 2021, 48(9): 50-58.
Zhou X M, Hu Y G, Liu W J, et al. Research on urban function recognition based on multi-modal and multi-level data fusion methods[J]. Computer Science, 2021, 48(9): 50-58.
- [35] 许斐. 基于 5G 网络的超高清动态视频实时编码与低延时传输技术研究[J]. 数字化传播, 2024(8): 75-77.
Xu F. Research on real-time encoding and low-latency transmission technology for ultra-high-definition dynamic video based on 5G networks[J]. Digital Communication, 2024(8): 75-77.
- [36] 万冉冉, 梁珍宝, 杨莹华. 国土空间多模态语义对齐: 时空权重与消解机制研究[J/OL]. 地理空间信息, 2025-12-16. <https://link.cnki.net/urlid/42.1692.P.20251215.1732.004>.
Wan R R, Liang Z B, Yang Y H. Multi-modal semantic alignment of national space: Research on spatial-temporal weight and resolution mechanism [J/OL]. China Industrial Economics, 2025-12-16. <https://link.cnki.net/urlid/42.1692.P.20251215.1732.004>.
- [37] 高超, 杨莹, 陈世超, 等. 多模态模型驱动的具身智能研究综述[J]. 智能感知工程, 2025, 2(2): 1-12.
Gao C, Yang Y, Chen S C, et al. Survey on multimodal model-driven embodied intelligence research[J]. Intelligent Perception Engineering, 2025, 2(2): 1-12.
- [38] Jin W Q, Du H Y, Tang S X, et al. A comprehensive survey on multi-agent cooperative decision-making: Scenarios, approaches, challenges and perspectives[PP/OL]. V2. arXiv (2025-03-17)[2026-01-28]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.13415>.

- [39] 熊骏, 张文博, 熊智, 等. 多智能体协同路径规划综述[J]. 系统仿真学报, 2025, 37(12): 3033-3049.
Xiong J, Zhang W B, Xiong Z, et al. Survey of cooperative multi-agent path finding[J]. Journal of System Simulation, 2025, 37(12): 3033-3049.
- [40] Dong Q, Wu Z Y, Lu J, et al. Existence and practice of gaming: Thoughts on the development of multi-agent system gaming[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2022, 23(7): 995-1001.
- [41] Rabinovich E, Ackerman S, Raz O, et al. Predicting question-answering performance of large language models through semantic consistency[C]//The Third Workshop on Natural Language Generation, Evaluation, and Metrics (GEM), 2023: 138-154.
- [42] 徐东伟, 杨涵凯, 顾同成, 等. 大语言模型驱动的匝道合并多智能体认知协同安全决策框架[J/OL]. 交通运输工程学报, 2025-12-12. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.113>.
Xu D W, Yang H K, Gu T C, et al. Large language model driven multi-agent cognitive collaborative security decision framework for ramp merge[J/OL]. China Industrial Economics, 2025-12-12. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.113>.
- [43] Xu Y C, Chen L L, Lu Z H, et al. An adaptive mechanism for dynamically collaborative computing power and task scheduling in edge environment[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(4): 3118-3129.
- [44] Guo Y K, Zhu J, Wu J L, et al. An automated construction method of 3D knowledge graph based on multi-agent systems in virtual geographic scene[J]. International Journal of Digital Earth, 2025, 18(1): 2449-185.
- [45] 李琳慧, 王宇, 刘越岩, 等. 特征相似度驱动的不动产多源异构数据快速融合模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(7): 1447-1454.
Li L H, Wang Y, Liu Y Y, et al. A fast fusion model for multi-source heterogeneous real estate data driven by feature similarity[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(7): 1447-1454.
- [46] 于瀚洋, 蓝朝桢, 王龙号, 等. 多模态遥感影像匹配的深度学习研究进展与趋势[J]. 地球信息科学学报, 2025, 27(8): 1896-1919.
Yu H Y, Lan C Z, Wang L H, et al. Research advances and development trends of deep learning methods for multimodal remote sensing image matching[J]. Journal of Geo-Information Science, 2025, 27(8): 1896-1919.
- [47] 向俞明, 白植达, 陈锦杨, 等. 众源数据辅助的高分辨率SAR影像控制点自动提取与校正方法研究[J]. 雷达学报(中英文), 2026, 15(2): 710-726.
Xiang Y M, Bai Z D, Chen J Y, et al. Research on automatic control point extraction and correction method for high-resolution synthetic aperture radar imagery assisted by multi-source data[J]. Journal of Radars, 2026, 15(2): 710-726.
- [48] Yaqoob A, Bi T, Muntean G M. A survey on adaptive 360° video streaming: Solutions, challenges and opportunities [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(4): 2801-2838.
- [49] 张继贤, 顾海燕, 杨懿, 等. 高分辨率遥感影像智能解译研究进展与趋势[J]. 遥感学报, 2021, 25(11): 2198-2210.
Zhang J X, Gu H Y, Yang Y, et al. Research progress and trend of high-resolution remote sensing imagery intelligent interpretation[J]. Journal of Remote Sensing, 2021, 25(11): 2198-2210.
- [50] 马丽莎, 刘殿锋, 刘耀林. 城市扩张与生态空间非线性动态耦合关系梯度分析模型[J]. 地球信息科学学报, 2023, 25(10): 1968-1985.
Ma L S, Liu D F, Liu Y L. Modelling gradient changes of non-linear dynamic coupling relationships between urban expansion and ecological land [J]. Journal of Geo-Information Science, 2023, 25(10): 1968-1985.
- [51] Attouche L, Baazizi M A, Colazzo D, et al. Validation of modern JSON schema: Formalization and complexity[J]. Proceedings of the ACM on Programming Languages, 2024, 8 (POPL): 1451-1481.
- [52] 刘海天, 郭焱, 石剑涛, 等. 分布式优化在电网中的应用分析及展望[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(22): 22-42.
Liu H T, Guo Y, Shi J T, et al. Application analysis and prospect of distributed optimization in interconnected power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(22): 22-42.
- [53] Pappula K K, Anasuri S, Rsum G P. Building observability into full-stack systems: Metrics that matter [J]. International Journal of Emerging Research in Engineering and Technology, 2021, 2: 48-58.
- [54] Chen Y, Ding Y M, Hu Z Z, et al. Geometrized task scheduling and adaptive resource allocation for large-scale edge computing in smart cities[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(10): 14398-14419.