



地理信息服务研究进展与技术实践

乐鹏¹, 王凯旋^{1,2,3,4*}, 吴浩儒¹, 刘瑞祥¹

1. 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079

2. 湖北珞珈实验室, 武汉 430079

3. 地球空间信息技术协同创新中心, 武汉 430079

4. 湖北省空间信息智能处理工程技术研究中心, 武汉 430079

* 联系人, E-mail: wangkaixuan@whu.edu.cn

2025-01-26 收稿, 2025-04-15 修回, 2025-06-03 接受, 2025-06-17 网络版发表

国家杰出青年科学基金(42425108)资助

摘要 人类活动、智慧城市管理等均与时空密切相关, 我国已将时空信息列为重要的新型基础设施。地理信息服务是发挥时空信息基础设施效能的关键, 也是地理信息系统(GIS)发展的重要趋势。如何有效提供地理信息服务, 驱动对地观测数据-信息-知识的转化, 促进全球地理信息互联与标准制定, 是地理信息研究的重要内容。本文回顾了地理信息服务的研究历程, 将其梳理为“互操作GIS-网络服务(web service)-基础设施GIS-GeoAI服务”四个阶段。在此基础上, 围绕其中涌现出来的九个研究议题介绍研究进展, 包括基础设施、观测服务、数据服务、模型与处理服务、可视服务、知识服务、质量溯源、服务协同、智能服务等。并结合国际标准化组织ISO和OGC的技术标准实践, 介绍了地理信息服务技术标准化现状。最后结合时空信息基础设施软件——开放地球引擎OGE的服务实践, 介绍基于先进技术和标准的算力-数据-算法深度耦合与开放共享的新型时空信息基础设施服务模式, 并结合应用指出未来地理信息服务将加速向“人-机-物”一体化、开放协作的时空智能基础设施服务迈进。

关键词 地理信息服务, 地理信息系统, 时空数据基础设施, 时空智能基础设施, 开放地球引擎

当前, 以全球定位导航和高分辨率对地观测系统为代表的对地观测技术发展迅速, 对地观测研究从上游设备制造和数据采集向下游应用服务显著后移, 催生全社会对于地理空间信息的巨大需求。一方面传统地理信息经历了模拟技术、数字技术与信息服务技术的发展, 在地理信息系统(geographic information system, GIS)基础上, 通过与网络技术的融合, 走向地理信息服务的技术方法体系。另一方面, GIS与大数据和人工智能(artificial intelligence, AI)融合, 如何提供智能化的地理信息服务, 充分发挥日益增长的对地观测系统和数据的效能, 是对地观测领域的重要科学与技术问题。

中国已经将时空信息列为重要的新型基础设施。

从导航定位、时空数据、时空计算、再到时空AI基础设施, 全球时空信息基础设施正从数据服务走向智能计算服务(图1)。地理信息服务是发挥时空信息基础设施效能的关键, 也是地理信息学的重要发展方向。如何有效提供地理信息服务, 驱动对地观测数据-信息-知识的转化, 促进全球地理信息互联与标准制定, 是地理信息研究的重要内容, 是落实国家“互联网+”和大数据战略的工作重点, 也是参与和主导全球地理信息知识创新的必由之路。

已有地理信息研究赋予了GIS三个角色: 系统(GI-System)、科学(GIScience)与服务(GIService)^[1,2]。从传统注重空间数据管理到强调时空分析, 有了GIS系统与科学之分; 从集中式系统到分布式网络, 有了GIS服务。

引用格式: 乐鹏, 王凯旋, 吴浩儒, 等. 地理信息服务研究进展与技术实践. 科学通报, 2025, 70: 5163–5179

Yue P, Wang K, Wu H, et al. Recent progress and technical practices of GIServices (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 5163–5179, doi: 10.1360/TB-2025-0107

从服务科学理念出发, 传感器、观测数据、分析处理算法和时空过程模型等资源可看成是一系列地理信息服务(图2), 遵循互操作服务规范, 可以自动搜索和链接地理空间数据与服务, 构建满足不同应用需求的地理信息服务网络环境^[3,4]. 地理信息服务可以理解为将具有感知、计算和分析能力的观测互联网、计算互联网、模型互联网与万维网有机结合, 使分布式资源整合为相互协作的、可扩展的、动态适应并可重新配置的网络化灵性服务系统, 建立传感器实时观测直接支持决策的聚焦服务, 是GIS在互联网、传感网、物联网时代的高级形态, 体现了对地观测领域的发展远景. 其通过一系列标准接口来提供地理数据、计算、模型、知识等服务, 建立了沟通“异构传感器系统”“模型与仿

真”和“决策支持系统”之间的桥梁, 有助于在统一框架下解决重大地球事件监测过程中观测来源单一、现势性差、处理能力不足等问题, 将大幅提高对地观测的能力和服务水平. 其所具有的共享性、互操作性、动态实时性、可扩展性、灵活性和智能性等优势使之成为国际对地观测领域的科学前沿.

为进一步推动地理信息服务的发展, 本文通过回顾其发展历史, 总结关键技术 with 标准化现状, 并展望未来演进方向, 以期提供科学的理论和实践指导. 文章结构安排如下: 首先分四个阶段回顾地理信息服务的研究历程; 归纳九大核心议题并介绍相关研究进展; 梳理国际开放地理信息协会OGC和国际标准化组织ISO现有标准体系与最新动态; 通过基于开放地球引擎OGE



图 1 (网络版彩色) 新型时空信息基础设施

Figure 1 (Color online) New spatiotemporal information infrastructures

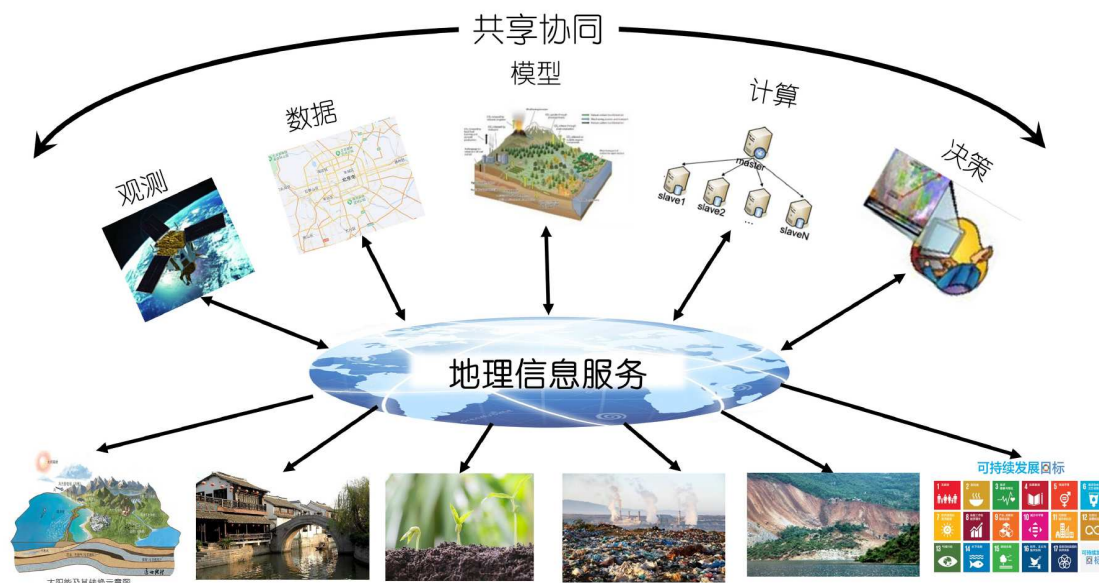


图 2 (网络版彩色) 地理信息服务

Figure 2 (Color online) Geographic information services

的服务实践,展示新型基础设施服务模式;最后总结并展望AI赋能的服务发展新趋势。

1 地理信息服务研究历程

作为服务科学与地理信息的跨学科交叉,地理信息服务已经有了丰富的研究成果和应用实践,网络地图服务、地理信息公共服务、数字地球等相关方法不断涌现。世界第一个网络地图诞生于1993年,第一个网络地图服务WMS标准由OGC发布于1999年。我国也已形成以“天地图”为代表的地理信息公共服务平台体系。目前全球已有近5万个WMS服务实例提供各类丰富的在线专题地图服务。*Science*曾专栏介绍了信息基础设施的发展,指出未来的科学研究将是“基于服务的科学(service-oriented science)”^[5]。图3列举了国际上地理信息服务研究的若干个代表性案例,体现了不同历史阶段的特点。

(1) 20世纪90年代,美国国家地理信息与分析中心(National Center for Geographic Information & Analysis, NCGIA)率先资助“互操作GIS”(interoperating GIS)的研究,通过遵循统一的数据格式和公共接口规范,实现不同GIS功能组件之间的数据交换和互操作^[6]。

(2) 21世纪初,随着Web GIS的发展,基于“网络服务(web service)”的面向服务架构(service-oriented architecture, SOA)开始被GIS采用,可支持远程数据访问、在线分析和知识发现。例如美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)资助的GeoBrain项目^[7]和欧洲委员会(European Commission, EC)推动的INSPIRE计划^[8]。近年来面向资源的架构广泛应用,OGC服务规范从SOA架构向面向资源的架构(resource-oriented architecture, ROA)转变,走向新一代OGC API,例如从传统WMS走向OGC API-Maps规范。

(3) 随着网络信息基础设施(cyberinfrastructure)、

e-Science、云计算等信息基础设施的兴起,地理信息服务的重点从数据访问和互操作扩展到更高效利用底层基础设施(如存储和计算资源),以提供大规模时空数据管理和高性能计算支持,从传统孤立的GIS软件走向类似北斗服务的“基础设施GIS”服务。例如美国国家科学基金会(National Science Foundation, NSF)资助的CyberGIS^[9]和EarthCube^[10]。其中EarthCube从2012~2022年连续资助10年,旨在建立支持地球系统科学数据、信息、知识集成共享服务的基础设施。云计算的普及进一步催生了数据、算法和算力深度耦合的数字地球云平台,如谷歌(Google)开发的谷歌地球引擎(google earth engine, GEE)^[11]、国际卫星对地观测委员会(Committee on Earth Observation Satellites, CEOS)推动的开源数据立方体(open data cube, ODC)^[12]和武汉大学研制的开放地球引擎(open geospatial engine, OGE) (<https://openge.org.cn/>)。

(4) 近年来,地理空间人工智能(geospatial artificial intelligence, GeoAI)的发展为地理信息服务注入了新的内涵,推动地理信息从服务内容和服务方法上适应“GeoAI服务”需求。例如围绕GeoAI数据服务需求,ISO和OGC推出首个地理人工智能样本数据标准^[13],并继续推进GeoAI模型标准;在智能服务方法上,GeoAI为实现服务协同与自主智能提供了新的途径。美国基金委发起“人工智能与地球科学合作(Collaborations in Artificial Intelligence and Geosciences, CAIG)”项目通过探索GeoAI模型服务增进对地球系统的科学理解。联合国全球地理信息管理委员会(UN-GGIM)提出了“地理宇宙(Geoverse)”愿景,通过语义网与AI智能体等机器辅助技术,实现全球空间数据基础设施、传感器网络 and 应用程序之间的智能交互和资源的动态整合,以支持即时决策^[14]。GeoAI服务将从传统数学物理方程驱动的时空过程模型服务提升为数据驱动的AI模型服务,

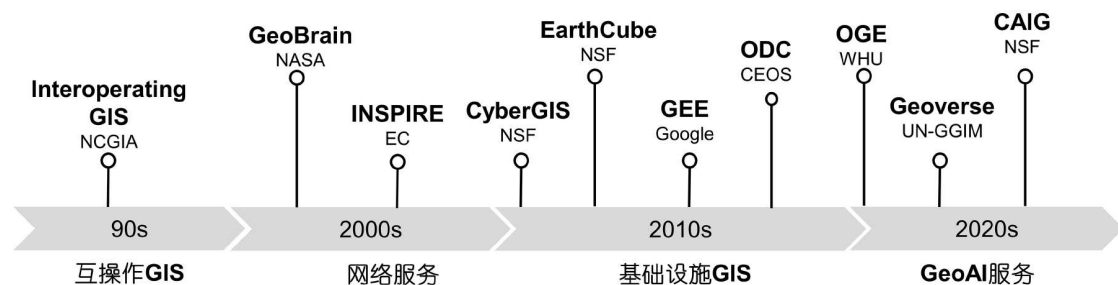


图3 (网络版彩色)地理信息服务研究发展历史

Figure 3 (Color online) History of geographic information services research

构建融合人工智能ML/DL(机器学习/深度学习)相关政策、技术、数据和模型的时空AI基础设施^[13], 提供数据驱动的分析, 提升机器智能体的服务化能力。

2 地理信息服务研究议题

从地理信息服务的研究历程来看, 其研究议题可归纳为: 基础设施、观测服务、数据服务、模型与处理服务、可视服务、知识服务、质量溯源、服务协同和智能服务(图4), 涵盖了地理空间数据“数据-模型-知识-决策”的完整价值链。其中, 基础设施为地理信息服务提供了必要的集成运行环境; 观测服务通过传感设备采集数据, 由数据服务实现数据共享; 模型与处理服务执行数据分析并通过可视服务展示结果; 知识服务支持知识发现与获取, 质量溯源保障数据和知识的可信性; 服务协同促进各服务的集成与协作, 智能服务进一步实现自主感知、分析和决策。

2.1 基础设施

21世纪以来, cyberinfrastructure的建设为科学研究提供了一个信息化的科研环境^[15], 地理信息研究开始进入一个网络时代。其通过先进的计算、信息和通信技术, 将人、科学仪器与装置、计算工具和信息联结在一起, 提供了协同工作的环境, 并整合了海量数据管理、高性能计算、高端可视化的能力, 为GIS解决复杂科学应用问题提供了可能^[16,17]。时空信息基础设施是在cyberinfrastructure的基础上, 通过添加新的中间件以集成和管理海量的地理信息数据和计算资源, 并提供一系列地理信息服务, 从而构成了其它服务议题的集成环境和运行载体。

传统时空信息基础设施以空间数据基础设施(spatial data infrastructure, SDI)为代表, 是一个涉及政策、制度、技术、标准、数据和人员的框架, 使不同组织和个人之间能够发现、访问和共享空间数据^[18]。地理信息服务基础设施在SDI的框架下, 以开放分布式处理参考模型(reference model for open distributed processing, RM-ODP)作为基础服务模型, 确保在分布式环境中实现高效的资源管理和功能交付^[19]。服务的实现架构主要包括面向服务的SOA架构和面向资源的ROA架构两种主流模式。代表性基础设施如欧盟发起的INSPIRE, 其通过OGC开放标准服务, 支持超过15万个空间数据集的检索和获取^[20]。

时空信息基础设施根据技术需求不断演进其表现形式。以GEE为代表的空间计算基础设施, 通过耦合数据和算力提供高效的在线处理服务, 从单机计算走向云端高效协作; 空间数字孪生(spatial digital twin, SDT)则弥补了传统SDI在实时动态模拟和分析能力上的不足, 借助传感网和物联网、流计算、仿真模拟及三维可视化等技术, 实现对物理世界的实时监测、动态模拟和及时决策^[21,22]。数据空间(data space)旨在促进私有时空数据资产的流通、交易和共享, 基于去中心化架构, 通过智能合约、隐私计算等技术保障数据主权, 被认为是灵活、可扩展的新一代SDI^[23]。因此, 时空信息基础设施是支撑各类地理信息服务研究的基础。

2.2 观测服务

观测服务通过标准化网络接口查询和访问观测数据, 这些数据通常来自传感器、物联网、原位观测、

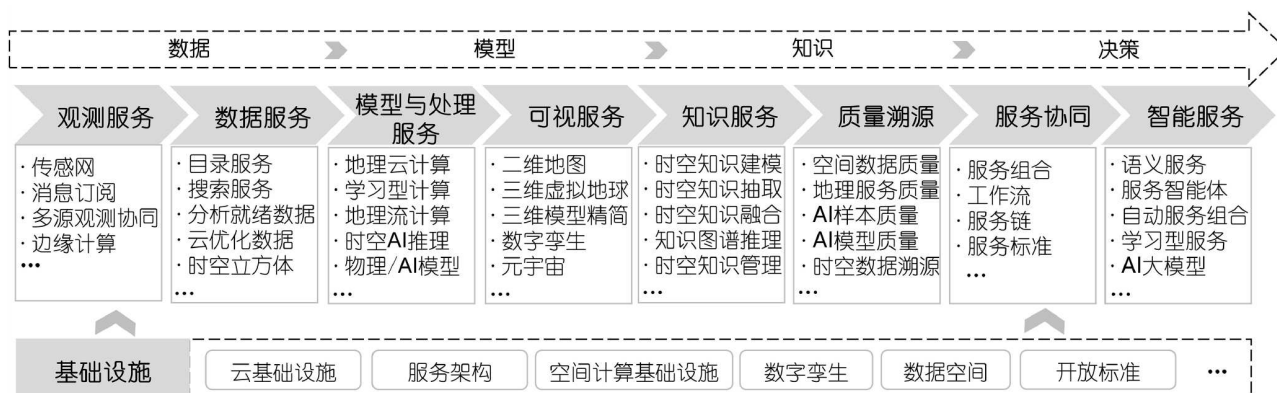


图4 (网络版彩色)地理信息服务研究议题

Figure 4 (Color online) Research topics on geographic information services

卫星或其他观测设备。传感网(sensor web)是一个复杂的自适应系统,组织为互联网上开放的传感器资源网络^[24]。为实现传感网,OGC发起了传感网赋能(sensor web enablement, SWE)倡议,通过标准接口来发现、访问和控制传感器并获取观测数据。SWE包含一系列技术标准,包括信息模型标准,例如观测和测量(observations and measurements, O&M)和传感器模型语言(sensor model language, SensorML),以及网络服务标准,例如传感器观测服务(sensor observation service, SOS)、传感器规划服务(sensor planning service, SPS)和传感器事件服务(sensor event service, SES)。基于传感网的观测服务采用事件驱动架构(event driven architecture, EDA),能够感实时事件,并做出反应^[25]。区别于SOA的请求/响应的信息交换模式,EDA采用发布/订阅(Pub/Sub)的范式主动推送数据流到订阅用户^[26]。

地理信息观测服务正向多源观测的协同优化发展,旨在结合特定任务和时空约束,收集多平台数据进行协同分析,以应对全球气候变化或自然资源变化等科学问题^[27,28]。实现观测协同的关键技术包括多传感器协调机制、优化观测模型、集成多源传感器系统(天、空、陆、海系统)、异构传感器数据同化和边缘计算。Li等人^[29]提出了“对地观测脑”的智能观测服务架构,旨在实现“何时、何地、何物发生何事”的精准观测,并在正确的时间、地点将正确的信息推送给正确的人(4R服务),从而助力实时决策。因此,智能化观测协同服务是未来的重要方向之一。

2.3 数据服务

海量地理空间数据基于文件系统或数据库进行组织和管理,并通过标准化的接口提供目录服务和下载服务^[30]。目录服务通过元数据匹配发现数据条目,网络目录服务(catalogue service for the web, CSW)是广泛使用的开放接口标准。基于开放搜索标准OpenSearch的扩展,如OpenSearchGeo和OpenSearchEO,进一步提升了搜索引擎的时空数据检索能力。下载服务通过实现开放标准,如网络要素服务(web feature service, WFS)和网络覆盖服务(web coverage service, WCS),实现矢量和栅格数据的获取和互操作。一些云优化的文件格式,如云优化的GeoTIFF(COG),允许通过网络按需获取数据,被称为“数据即服务”^[31]。随着人工智能技术的发展,数据服务的内容扩展到了地理人工智能样本,如样本目录服务和样本数据服务^[32]。

传统的数据服务内容通常需要经过繁琐的预处理才能适用于后续的分析应用,分析就绪型数据服务由此被提出,以降低数据使用门槛。分析就绪型数据被定义为按照最低要求预处理并组织为可立即用于分析的数据^[33],有效降低了用户的数据处理成本。时空数据立方体是组织管理海量分析就绪数据的新一代数据基础设施,它被定义为基于时间序列的多维时空数据产品集,涵盖时间、空间、产品、波段及其他主题维度,支持多维检索^[34]。基于立方体的数据服务以每个数据单元为基本粒度,而非传统的景文件,从而有利于分布式检索和在线联机分析。国际上陆续开展了多种时空数据立方体基础设施的建设,例如ODC^[12]、ESDC^[35]、GeoCube^[36]等,并逐步将其作为提供数据服务的主流方案。

2.4 模型与处理服务

地理信息处理服务提供了数据处理、分析和推理方法的接口,地理分析模型是处理服务提供的主要内容。地理分析模型通过地理建模与模拟系统构建和运行,可用于对现实地理世界的反演、模拟、仿真和分析^[37,38]。由于地理系统的高度复杂性,单个模型难以全面刻画其物理机制,需要集成多源模型以增强对地理过程的模拟能力。已有研究基于网络处理服务(web processing service, WPS)和开放建模接口(open modeling interface, OpenMI)等规范,将模型作为服务进行注册和发布,实现模型共享、复用和集成,以解决的复杂地理建模问题^[39,40]。然而以时空过程为研究对象的模型,其状态随时间不断演变,模型间存在动态交互和时空尺度不一致等问题。传统的WPS服务限制了用户对模型内部运行的了解和控制,需加以扩展以支持时空过程模型细粒度功能之间的交互^[41]。为了进一步推动地理模型的开放共享,近年来不同学者对开放式的模型服务方法进行了探索,成立了具有影响力的合作社区,如CSDMS^[42]、HydroShare^[43]和OpenGMS^[44],以进一步强化协作式地理求解能力。

地理分析模型可划分为物理模型和AI模型两类,前者基于理论驱动范式,通常具有较强的可解释性;后者基于数据驱动范式,在处理数据时更具灵活性,能够识别潜在的模式^[45]。两类模型之间的相互作用关系通常表现在以下方面:(1)将AI模型替代物理模型进行建模和仿真,经过训练的AI模型能够在更短的时间内提供高精度的结果,可用于如气候建模^[46]和植被动态模

型^[47]; (2) 使用AI模型嵌入到物理模型中来改进相关参数, 例如基于ML/DL方法预测地理计算强度和负载均衡, 提高分布式计算资源利用率^[48,49]; (3) 物理模型和AI模型混合建模, 具有串联和并联两种基本模式, 例如在时空数据立方体中协调物理模型和GeoAI模型创建混合分析 workflow, 以促进新见解的发现^[50]. 有研究提出了AI模型集成到地理建模中的迭代理论框架, 为地球系统模拟定制建模流程提供了科学指导^[51].

在技术实现上, 提供高效的处理服务需要应对海量时空数据带来的数据密集型挑战, 而分布式并行计算是一种行之有效的解决方案^[52]. 适用于云的分布式计算范式, 如OpenMP、MPI、Apache Hadoop和Apache Spark等, 已与地理信息处理结合催生出了SpatialHadoop^[53]、SparkGIS^[54]和Geotrellis(<https://geotrellis.io/>)等时空大数据云计算框架. 流式计算框架如Apache Storm、Apache Spark Streaming和Apache Flink, 因其低延迟、高吞吐量和易扩展性, 已广泛应用于时空流数据的高效处理^[55]. 此外, 分布式推理框架如TensorflowOnSpark和Ray被用于加速大规模时空数据的AI推理, 通过实施CPU/GPU的混合并行调度策略, 进一步提升推理任务的处理效率和资源利用率^[50,56].

2.5 可视服务

传统的二维地图可视化服务已被广泛用于地理信息的展示与分析, 但其局限于平面表达, 难以全面反映地球表面的三维特征. 随后三维虚拟地球的出现(如Google Earth、Microsoft Virtual Earth、World Wind和GeoGlobe)提供了全球视角的三维空间可视化与交互功能. 为促进三维数据的互操作, ISO和OGC发布了多种数据规范包括KML、glTF、3D Tiles、I3S、CityGML和CDB等. 目前, 三维可视化已经成为SDT发展的重要组成部分, 是反映物理世界最直观的手段. SDT广泛采用基于HTML5和WebGL等网络技术开发三维可视化引擎, 如CesiumJS和ArcGIS Scene Viewer等, 以在浏览器端构建三维场景. 实时展示SDT汇集的海量高精度三维模型对渲染性能、传输带宽和存储容量提出了巨大挑战^[57]. 一些研究通过去除冗余几何来精简模型, 在尽可能保持几何与纹理细节的同时减少数据存储和传输需求^[58,59]. 此外, 流式可视化技术将大范围三维模型碎片化并建立树状空间索引结构, 根据空间尺度实时加载局部外观, 提升渲染效率. 3D Tiles和I3S是支持流式可视化的代表性数据格式. 元宇宙(Me-

taverse)则通过虚拟现实、增强现实和混合现实等沉浸式技术实现物理和虚拟空间的融合. 与反映真实世界的SDT不同, 元宇宙允许用户进入虚拟空间获得沉浸式的交互体验^[60], 已在室内导航^[61]和紧急疏散模拟^[62]等领域中得到应用.

2.6 知识服务

知识服务是一种面向知识内容和解决方案的服务, 通过知识建模、表达和推理, 实现知识按需交付和智能分析^[63]. 2001年, Berners-Lee提出了语义网的概念, 通过标准化的描述语言(如RDF、OWL等)表示数据和知识, 使得机器能够正确理解和处理^[64]. 在地理信息领域, 通过开发地理空间本体对数据和服务进行语义描述, 支持地理数据和知识的按需交付. 例如, 网络目录服务CSW可通过语义网技术扩展, 以实现地理空间数据和服务的动态发现和选择^[65]. 目前面向各类地理空间资源的本体被提出, 包括传感器数据、栅格数据、工作流、网络服务和溯源信息^[66~70]. 然而自动化实现领域本体的构建和跨领域本体间对齐仍具有挑战^[71].

知识图谱是语义网的进一步发展, 其被定义为一个结构化的语义知识库, 支持多源语义和知识的集中表达、存储以及大规模查询和推理^[72]. 知识图谱技术被广泛作为一种地学知识表达的基本模式, 衍生出不同语境下的相关术语, 包括地理知识图谱、地学知识图谱和时空知识图谱. 地理知识图谱强调地理要素的关联表示; 地学知识图谱侧重于地学领域知识; 时空知识图谱则强调时空分布或位置要素之间的语义关联^[73]. 本文语境下以时空知识图谱统称.

时空知识图谱通过手动或自动化的方法, 从网络资源(如开放街道地图OSM、维基百科和期刊文献)中抽取知识. 构建标注语料库^[74~76]有助于训练自然语言处理模型以帮助完成地理实体识别^[77]、语义消歧^[78]和空间关系抽取^[79]的自动化. 时空知识推理是获取深层次知识的关键步骤. 传统基于规则和本体的推理方法虽具高准确性, 但依赖专家知识且泛化能力有限^[80]. 最近的研究引入了知识图嵌入技术, 将表征空间关系的符号化表示转移到向量空间中, 通过距离模型、语义匹配或ML/DL方法实现链接预测和问答等任务^[81~83]. 由于目前的图数据索引结构和基于图数据库的经典算法未考虑知识图谱数据的时空特性, 导致时空知识图谱在进行路径检索、知识推理等数据查询与链接分析时, 需要额外计算复杂的时空约束条件, 从而使得查询

和分析效率下降,大规模时空知识图谱的索引管理与服务软件尚未成型。

相较于时空知识图谱以结构化三元组显式表达知识,大语言模型(large language model, LLM)作为一种隐性知识服务,具备更广泛的知识覆盖和更强的语言理解能力,能够基于生成式范式提供知识回答。然而,LLM 在时空领域的知识较匮乏,易产生幻觉,更新成本高,且缺乏可解释性。已有研究探索将 LLM 与时空知识图谱互补结合,通过检索增强的方法优化时空知识回答^[84]。

2.7 质量溯源

通过服务共享的地理空间数据并非完全符合预期,正确识别数据质量有助于避免错误的分析结果。检查地理空间数据质量是一个复杂的过程,需要考虑多种指标。地理空间数据质量标准ISO 19157定义了6个维度:完整性、逻辑一致性、主题精度、位置精度、时间质量和元质量(Metaquality)。ISO 19157已被用于点云数据^[85]、众包矢量数据^[86]、元数据产品^[87]以及人工智能样本^[13]的质量评价。在服务系统中,服务质量(quality of service, QoS)也会影响最终数据的交付,涉及服务的性能、成本、可靠性、可用性、安全性等。地理信息领域扩展出特定的质量概念模型^[88]和评估工具及方法^[89],被应用到服务选择和地理工作流的动态组合中^[90]。以GeoAI模型为主体的智能服务的质量评价方法还有待探索,人工智能通用领域的相关标准如ISO/IEC JTC 1/SC 42所制定的涉及模型分类性能、鲁棒性和偏差的系列规范可提供借鉴思路。

在开放的地理信息服务环境中,空间数据以不可测的方式传播和处理,时空数据溯源通过记录数据产品的衍生过程,捕捉其时空来源,有助于评估产品的质量。其主要研究议题包括可互操作的时空数据溯源模型、溯源信息的自动捕获以及溯源数据的管理和共享^[91]。已有的代表性研究包括:基于ISO 19115 Lineage Model和W3C PROV Data Model的空间数据溯源表达^[92,93]、对空间数据^[94]和时间步长模型^[95]的多粒度溯源信息分层记录以及基于WPS的服务工作流^[96]的溯源信息自动捕获。

2.8 服务协同

服务协同旨在根据任务需求组合分布式服务形成服务链,以解决涉及异构数据、多计算步骤及不同服

务提供者的复杂地理空间任务。一个可执行的服务链可被表示为有向无环图,其中节点表示服务,相邻节点之间通过数据流连接,前一节点的输出作为后一节点执行的必要条件。服务协同通过定义统一的接口和数据格式,确保服务节点之间的正确连接,促进异构地理资源和处理模型的集成运行。根据用户参与程度,服务链分为三类:透明服务链(用户完全自定义)、半透明服务链(工作流服务代理)和不透明服务链(用户不可见原子服务)。半透明服务链基于工作流技术将服务组合划分为抽象工作流建模、工作流实例化和工作流执行三步^[97],允许用户自主编排服务链。已有工具如GeoJModelBuilder^[98]通过链接地理处理算法、模型和数据等服务,支持环境监控和集成建模。在SDT操作环境下,服务协同对象从传统静态GIS数据转变为动态实时观测数据。通过扩展标准服务接口,支持传感观测数据服务和复杂的环境模型服务之间的耦合,实现实时分析以辅助决策^[99]。通过服务标准克服工作流中的服务异构性,是实现服务协同的基础。

2.9 智能服务

智能服务通过理解用户意图和感知服务环境,通过智能推理自动生成服务组合方案,并动态调整服务链的执行,以满足复杂地理空间任务的需求,具有语义意识、自主推理和自适应等特征。尽管传统的服务协同基于语法互操作能够确保服务之间的正确连接和数据传输,但由于缺乏对服务、数据和传感器等网络资源的理解能力,难以实现服务链的自动组合与动态调整^[100,101]。为此,一些研究通过为网络资源添加基于本体的语义描述,根据用户任务进行语义匹配,生成抽象服务模板并绑定适配资源^[67,102,103]。然而上述方法在本体的构建上仍然依赖于专家知识,难以适应泛化场景。

当前以GPT-4和DeepSeek为代表的LLM展现出卓越的自然语言理解和知识问答能力,开始成为各类智能体系统的决策核心^[104]。服务智能体通过与服务环境(如硬件资源、服务状态和服务质量等)的感知交互,能够按需调配资源,实现服务优化和智能组合。传统驱动服务智能体的方法包括基于规则^[105]、语义^[106]、启发式算法^[107]和强化学习^[108]等。最新研究尝试利用LLM构建智能体驱动服务组合,利用提示工程引导LLM生成思维链,动态规划服务调用方案,通过反馈机制引导自我修正^[109]。此外,可针对不同任务创建专用智能体,通过多智能体协作,进一步提高服务组合的准确率^[110]。

为解决LLM可能引发的“幻觉”和“捏造”问题,一些研究尝试整合持久化的领域知识,如领域本体和知识库,以扩展知识边界来提升模型的可靠性^[84,111,112]。目前,基于LLM实现服务智能还处于起步阶段,需重点关注推理能力增强、领域知识集成、动态知识更新、推理的可追溯性与可解释性、多智能体协作以及自主学习等关键问题,以推动自治且可信的服务智能的实现。

3 地理信息服务技术标准

地理信息服务的理论方法在九个研究议题上取得了一定进展,但其跨领域协作应用仍面临挑战,需要建立统一的技术标准体系来标准化数据交换和服务接口。目前,ISO/TC211和OGC是地理信息领域的两大标准化组织。ISO/TC211注重顶层基础规范,OGC则侧重实施规范。目前地理信息标准体系已较为完善,可分为6个模块(图5):基础规范、数据模型与编码、服务与API、数据发现、数据存储和传感采集。

3.1 基础规范

基础规范提供了通用的框架或模板来描述核心概念、模型和架构,独立于具体技术实现或平台。ISO/

TC211早期标准被定位为基础规范,被OGC采纳作为实施规范的基础。例如,ISO 19101定义了地理信息标准化的总体框架和基本原则;ISO 19103规定了基于统一建模语言(unified modeling language, UML)的地理信息模型定义和表示方法,支撑信息模型设计与互操作;ISO 19115 是地理信息元数据模式的标准规范,可为服务元数据的制定提供指导;ISO 19119规范了地理信息服务规范的创建以及服务的描述和分类方法,支持服务的互操作;ISO 19157定义了数据质量的描述、评估和报告方法。上述规范构成了地理信息标准化的基础框架,以确保后续标准开发的一致性和互操作性。

3.2 数据模型与编码

数据模型和编码为各类地理信息数据定义了统一的概念模型和编码模式,以促进数据交换。OGC首个标准Simple Features定义了几何对象模型和操作规范,为统一GIS软件接口奠定了基础,并衍生出如GeoJSON等矢量要素的编码规范。地理标记语言GML是基于XML的地理信息数据存储编码规范,为多类型空间数据供标准化的交换格式。GML扩展形成了多个领域标准,例如表示城市三维语义的CityGML、表示室内空间信

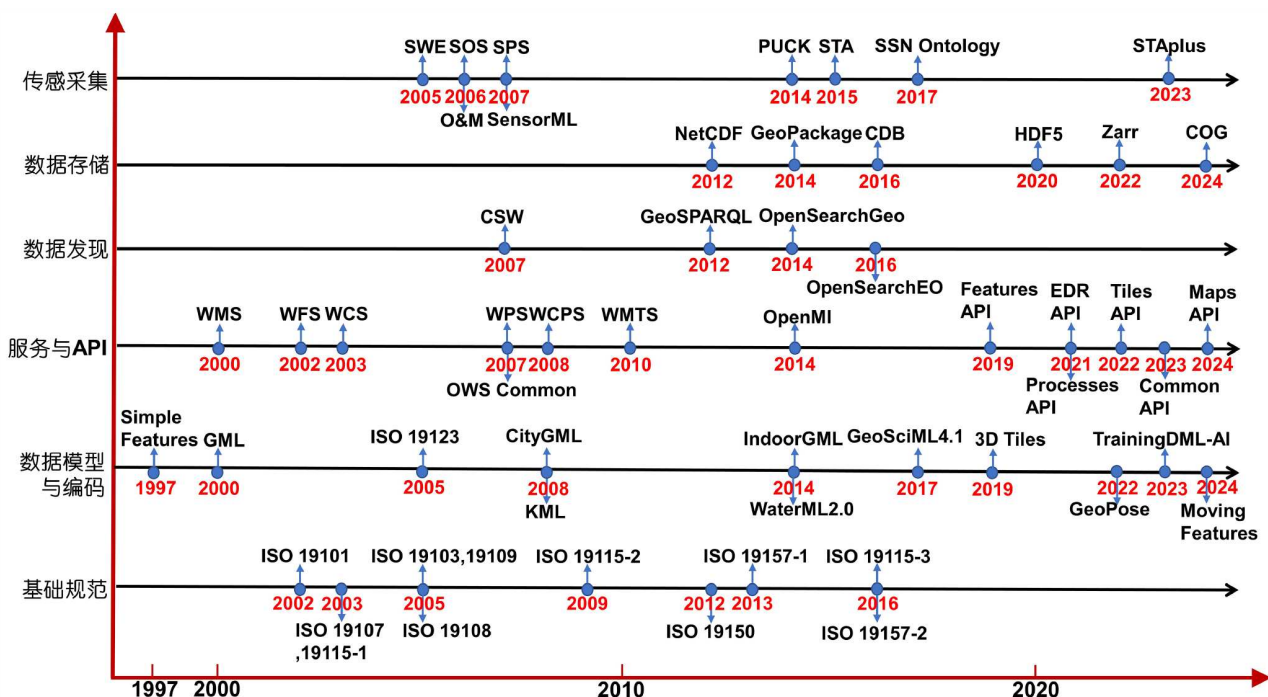


图 5 (网络版彩色) 地理信息服务标准发展时间线。以代表性标准为例, 时间为首次发布时间

Figure 5 (Color online) Development timeline of geographic information service standards. Representative standards are listed, with dates indicating their initial release

息的IndoorGML等。KML是一种面向地理可视化的数据格式, 3D Tiles则侧重于大规模三维数据的高效传输和可视化。分析就绪数据规范正在ISO和OGC积极推进。GeoAI领域首个国际标准TrainingDML-AI规范了GeoAI样本的信息模型与编码^[13,32], 现正扩展至GeoAI模型描述语言标准(https://github.com/opengeospatial/TrainingDML-AI_SWG/tree/main/model-extension)以促进模型的共享与重用。智能交通领域的ISO 20524 GDF系列标准被引入并修订以兼容OGC标准基线, 旨在推动交通空间要素和道路地图数据的标准化。

3.3 服务与API

服务与API通过接口标准化实现地理信息服务的跨系统互操作和无缝集成。自2000年以来, OGC发布了一系列基于SOA架构的OGC Web Services(OWS)标准, 包括WMS、WFS、WCS、WPS以及WMTS等。然而, OWS的RPC-over-HTTP通信机制与XML编码导致开发复杂、成本较高。为此, OGC逐步由OWS转向轻量的OGC API系列标准。OGC API基于ROA架构, 采用轻量的JSON作为消息体, 支持HTTP状态码和OpenAPI元数据规范, 提供与OWS等效的标准(如OGC AP-Maps、Features、Coverages、Processes、Tiles)。OGC API标准由一系列构建块组成, 用户可按需组装实现构建块所对应的功能, 有利于降低开发成本。OGC API亦拓展至新型数据类型, 如OGC API-GeoDataCube用于互操作访问时空数据立方体^[113]。基于OGC API-Features开发的STAC API集成数据发现与访问功能, 支持灵活的数据目录和扩展机制, 已成为OGC社区标准。

3.4 数据发现

数据发现是通过查询元数据在网络中寻找和访问地理信息资源的过程。ISO 19115定义了数据和服务的元数据模型, 可支持发现和获取。标准化的查询接口进一步提升了数据发现的互操作性。CSW定义了用于发布和访问地理空间数据、服务及相关资源的元数据目录的接口和框架, 服务内容可兼容ISO 19115和都柏林等元数据规范所定义的核心元素。OGC API-Record是CSW对应的REST风格下的目录服务标准。在搜索引擎检索方面, OpenSearchGeo和OpenSearchEO规范分别增强了时空检索和对地观测数据的属性查询。在语义方面, GeoSPARQL扩展了SPARQL的空间查询能力, 支持基于语义网的地理数据发现。

3.5 数据存储

数据存储模块涵盖了数据库和文件存储格式规范。OGC提出了GeoPackage和CDB(common database)两种数据库标准。GeoPackage基于SQLite, 支持多种地理信息数据, 具备空间索引和SQL查询能力, 常用于离线和移动应用。CDB采用Tiles-Layers-LoDs架构统一管理多源数据(如矢量、栅格、点云、三维模型), 适用于数字地球和仿真应用。NetCDF和HDF5以多维数组形式存储数据, 其中HDF5通过分层结构和压缩技术优化了并行IO性能。Zarr和COG属于云优化文件格式, 适配云环境部署, 支持按需加载降低网络开销。

3.6 传感采集

OGC SWE系列规范基于SOA架构, 标准化了传感网的数据编码和访问接口。在物理设备层面, PUCK协议支持传感设备元数据(如SensorML文档)的自动检索和网络接入。在语义层面, SSN Ontology(semantic sensor network ontology)定义了传感器、观测、测量、传感数据和相关过程的本体, 增强了语义互操作。SensorThings API(STA)是SWE对应的REST风格版本, 支持HTTP和MQTT协议。STAplus是STA的扩展, 增加了对多方合作、观测关联、数据分组和使用控制的支持, 适用于复杂物联网场景。

4 地理信息服务技术实践

地理信息服务需要有标准, 标准推广需要技术认可。针对新型时空信息基础设施建设, 开展地理信息服务技术实践, 打造地理信息服务平台, 形成地理信息服务理论研究与技术实践的出口。本文结合实例, 瞄准“数字中国”国家战略需求, 提出以全球动态时空信息的就绪型数字孪生地球云服务为目标, 介绍数据-算法-算力深度耦合与开放共享的数字孪生地球平台—开放地球引擎OGE。平台动态汇聚了覆盖全球多源、异构、海量的时空数据产品和开放多源的算子模型, 实现了一体化的全球时空数据管理、高性能计算推理、可扩展的时空算子体系, 通过弹性伸缩的应用赋能, 形成数据与算法云端协同的新型时空信息基础设施。

OGE平台具有三大中心, 包括资源中心、开发中心和应用中心, 其中资源中心可进一步划分为数据中心和模型中心, 每个模块的设计遵循了开放标准和先进的服务技术, 如图6所示。

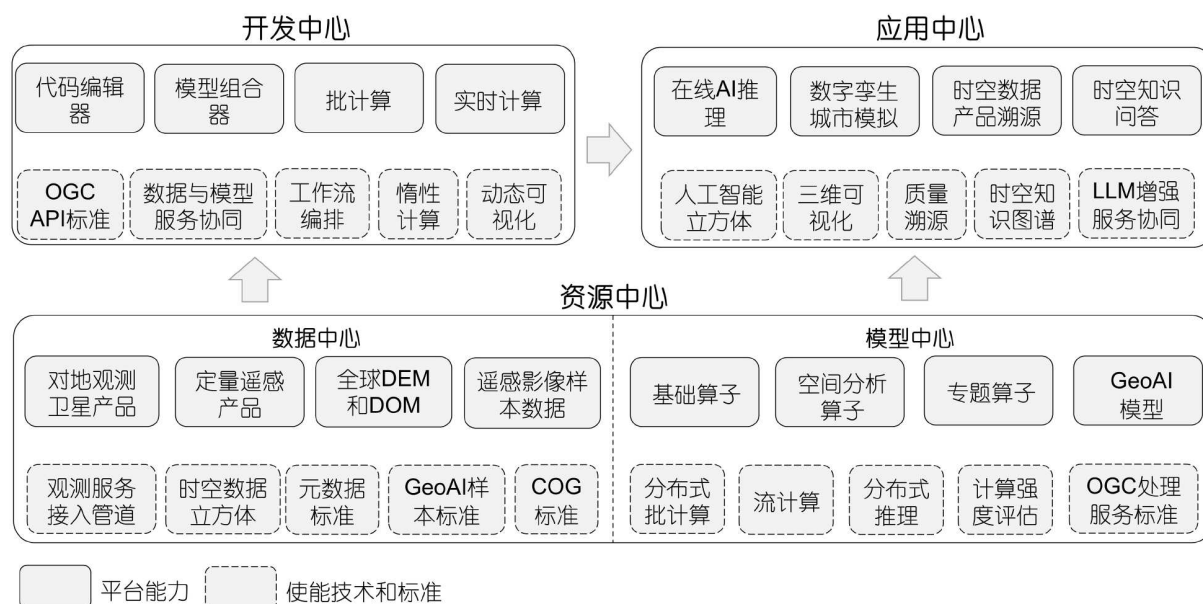


图 6 (网络版彩色)OGE中心能力建设

Figure 6 (Color online) Capacity building of the OGE centers

(1) 数据中心. OGE数据中心是数据服务的具体实践, 通过接入观测服务汇集时空数据, 经过一致性的预处理流程组织成分析就绪数据, 提供数据检索和下载服务. 数据中心底层基于自研时空立方体模型Geo-Cube管理全球范围内的对地观测数据、定量遥感产品、数字高程模型(digital elevation model, DEM)、数字正射影像图(digital orthophoto map, DOM)和对地观测样本产品等共16个系列264种空间数据产品, 共计约170TB数据. 通过Pub/Sub消息订阅协议接入观测服务标准接口包括OGC SensorThings API, 实时获取全球虚拟星座卫星和地面传感网采集的数据, 并集成到数据立方体中. 元数据库遵循ISO 19115标准规范, 支持通过目录服务检索查询目标数据. 立方体物理存储遵循COG存储文件规范, 提供云优化的数据服务. 数据中心集成了大型遥感样本库Luojiaset^[114], 遵循OGC TrainingDML-AI样本标准对其组织管理, 提供样本就绪服务.

(2) 模型中心. OGE模型中心是模型与处理服务的具体实践, 其基于开放标准和分布式计算框架, 提供近300个物理/AI模型服务, 包括栅格和矢量的基础算子、空间分析算子、专题算子和GeoAI模型. 模型来源包括原生开发的算子, 开源工具(如QGIS和GRASS)以及第三方标准处理服务, 共同构成开放的时空算子体系. 底层计算采用流批推一体化的立方体计算模型, 基于分

布式计算框架Apache Spark针对立方体数据设计了弹性分布式数据集对象以支持高效的批计算和流计算; 耦合分布式推理框架Ray支持高效的分布式推理; 结合学习型AI的计算强度评估方法, 实现多计算节点的负载均衡和动态调度. 基于上述计算理论方法, OGE已实现将TB级数据的处理时间缩减到1 h左右, 并支持全球范围数据的高效计算. 模型中心遵循服务接口规范包括OGC API-Processes和WPS对外提供处理服务.

(3) 开发中心. OGE开发中心是服务协同和可视服务的具体实践. 开发中心提供了代码编程和模型组合两种模式, 组合数据服务和模型处理服务来构建地理分析 workflows. 编程模式提供了OGEScript脚本编程语言, 其语法设计遵循OGC API标准范式, 且允许第三方开放服务集成^[115], 图7展示了使用OGEScript在线计算长沙市植被净初级生产力. 模型组合基于“拖拉拽”的低代码范式编排 workflows, 降低用户学习门槛. 代码脚本或模型组合生成一个规范的有向无环图, 通过标准化的参数控制和处理服务嵌套, 实现数据和模型的协同. 开发中心支持实时计算和批计算两种模式, 前者快速返回当前视口范围下的计算结果, 通过惰性执行、结果缓存以及动态可视化技术提供结果的实时可视化服务; 后者则适用于大规模数据的批量处理, 返回精确结果. 开发中心的定制的服务链可通过标准处理服务与第三方应用进行集成.

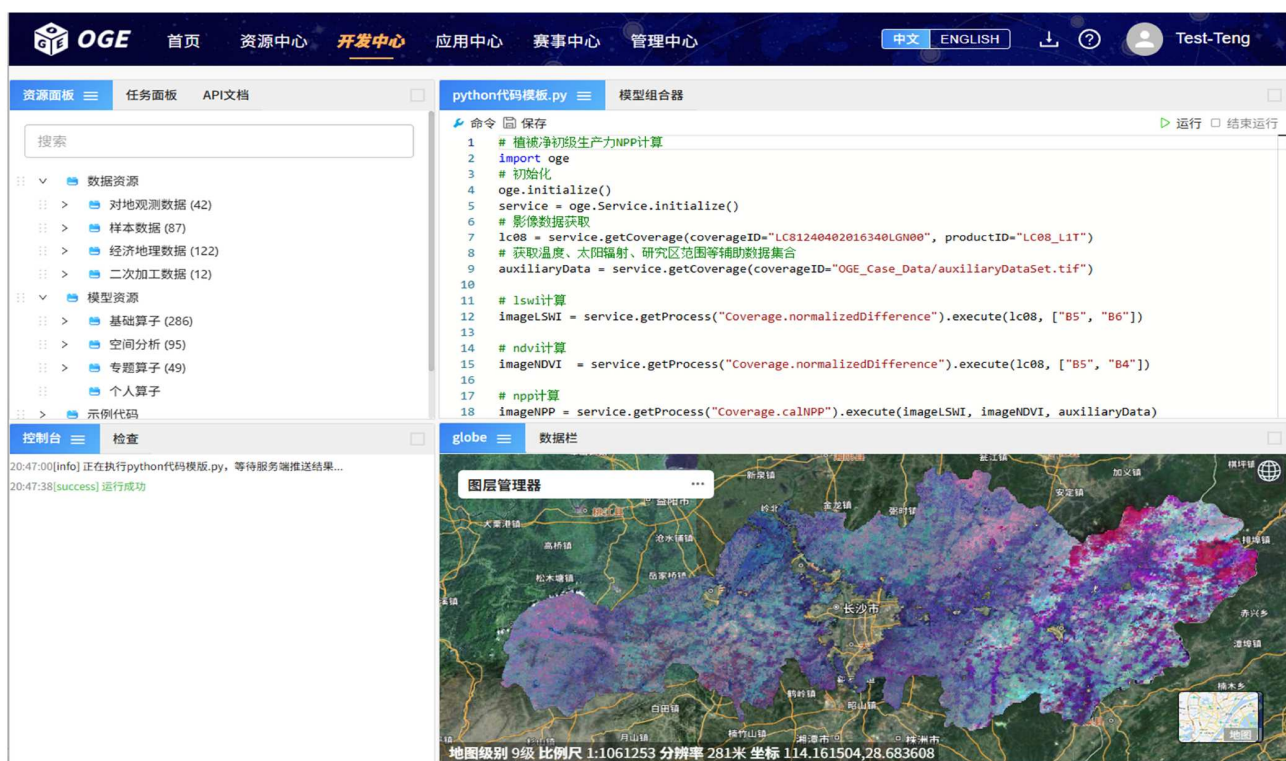


图7 (网络版彩色)OGE在线分析——以长沙市植被净初级生产力计算为例

Figure 7 (Color online) Online analysis of OGE—an example of Vegetation Net Primary Production (NPP) in Changsha City

(4) 应用中心. 应用中心是基于上述中心所提供的各类服务, 包括数据服务、处理服务、可视服务和协同工作流等, 所实现的高层次应用, 并进一步探索质量溯源、知识服务和智能服务的应用模式. 典型的应用案例包括在线AI推理、数字孪生城市模拟、时空数据产品溯源和时空知识问答等. 在线AI推理基于人工智能立方体技术, 通过耦合GeoAI模型服务和数据立方体支持大范围场景下的模型智能选择和高性能推理, 提供AI推理服务. 数字孪生城市模拟借助三维可视服务和流计算处理服务, 基于3D Tiles和OGC SensorThings API等标准规范, 帮助构建数字孪生城市, 用于灾害应急等多个应用场景. 时空质量溯源遵循ISO 19115溯源模型和ISO 19157数据质量规范, 帮助追溯由服务协同工作流输出的数据产品的各个生产环节、中间结果和质量指标. 时空知识问答是知识服务和智能服务的探索和实践. 该问答系统构建了时空知识图谱, 涵盖了通用的时空知识以及OGE平台服务知识, 通过图检索和时空推理提供知识服务; 并与LLM集成支持通过自然语言交互式地探索时空知识图谱, 根据用户意图

自动组合OGE服务提供精准的知识回答.

OGE平台在多个领域展现了其新型时空信息基础设施服务能力. 在地球科学领域成功应用于全球尺度的气象分析任务, 例如表观温度和干旱指数的计算^[116], 实现了大范围植被指数提取、城市区域识别以及长时序水体变化分析等遥感应用^[117]. 在自然资源监管领域, 依托平台的在线AI推理能力, 实现省级尺度高分辨率土地利用分类图的快速生成, 显著提升资源管理的精度和效率^[50]. 在自动驾驶领域, OGE平台可作为第三方监管平台, 提供车端数据的监管与合规控制, 并通过智能网联汽车众源制图技术, 推动构建面向机器的新型公共地图基础设施, 从而降低智能网联汽车基础地图的成本^[118].

5 总结与展望

国内外在网络地理信息共享与服务的理论与方法研究上取得了一系列进展, 地理信息公共服务、数字地球等相关方法不断涌现. 本文总结了地理信息服务研究的九大研究议题和六大模块的技术标准体系, 覆

盖了服务基础设施到空间数据完整价值链的服务专题、服务技术、标准支撑,回顾了已有的成果并指出未来的发展动态.通过OGE的技术实践,展示了新型时空基础设施在促进地理信息服务的发展和行业应用中的潜力.

地理信息服务模式经历了“互操作GIS-网络服务(web service)-基础设施GIS-GeoAI服务”的转变.随着AI技术的发展与GeoAI服务的深化,时空大模型与智能体等将极大提升地理信息的自动化服务能力,包括支持机器能够自主发现和组合分散的地理信息服务,自主获取知识并反馈给人或其他机器,形成自主互联的服务网络系统,具备自感知、自发现、自组织、自验证和自执行等特性.目前传统地理信息服务技术标准相对成熟,而基于AI的服务方法与标准体系仍需进一步深化,实现端到端的空间智能与机器服务仍面临诸多挑战.地理信息标准化也将从新技术、新场景、新用户出发,拓展 GeoAI 服务,从二维走向三维场景,从人到机器,涵盖样本、模型、质量、接口、系统、伦理与隐私等多个方面.新型地理信息服务的特征从以“人”为中心转变为“机器”并重,服务能力从以“物理模型”转向“AI模型”并重,从数据提供转向智能计算服务.未来,地理信息服务逐渐走向开放共享的“人-机-物”一体化的时空智能基础设施服务.

(1) 从数据到智能计算: 地理信息服务正在从单纯的数据服务向计算驱动的高效处理服务演进.通过深化数据-算力-算法深度耦合的新型时空数据基础设施,支持从海量空间数据中快速提取价值信息,满足全球尺度的高效地理分析需求,进而构建“存-算-推”一体、模拟预测、智能交互的数字孪生地球,以应对气候变化、环境监测、城市规划和灾害应急等全球性挑战.

(2) 从物理模型到AI模型: 数据驱动的AI方法在地球系统的预测、建模和复杂性理解中表现出卓越性能. GeoAI服务的进一步发展不仅能够实现全球尺度的高效智能推理应用,还能通过结合物理模型与AI模型,提供兼具可解释性和数据自适应性的解决方案.这种协同方法有助于从大规模地球数据中挖掘潜在模式和关系,为复杂问题提供创新的解决思路.

(3) 从以人为中心到以机器为中心: 随着自动驾驶、无人机集群和智能终端等无人系统的快速发展,地理信息服务的主体逐步从人类转向机器智能体.通过知识图谱、大语言模型等技术驱动的机器辅助手段,无人系统之间能够实现高效的服务协同,以支持自动决策.同时,基于开源协作和众包机制,构建面向机器的新型地图基础设施,以解决智能网联时空数据系统的孤立性和服务滞后问题,为无人系统提供更高效的支持.

参考文献

- 1 Yue P, Baumann P, Bugbee K, et al. Towards intelligent GIServices. *Earth Sci Inform*, 2015, 8: 463–481
- 2 Wang J Y. Thoughts on the future development of geographic information system (in Chinese). *Geomat Inf Sci Wuhan Univ*, 2022, 47: 1535–1545 [王家耀. 关于地理信息系统未来发展的思考. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022, 47: 1535–1545]
- 3 Yue P, Gong J Y, Di L P, et al. GeoPW: laying blocks for the geospatial processing web. *Trans GIS*, 2010, 14: 755–772
- 4 Zhang M D, Bu X Q, Yue P. GeoJModelBuilder: an open source geoprocessing workflow tool. *Open Geospat Data Softw Stand*, 2017, 2: 8
- 5 Foster I. Service-oriented science. *Science*, 2005, 308: 814–817
- 6 Goodchild M F, Egenhofer M J, Fegeas R. Interoperating GISs. In: Report of a Specialist Meeting Held under the Auspices of the Varenus Project. Santa Barbara: NCGIA, 1997. 63
- 7 Di L P. GeoBrain—a web services based geospatial knowledge building system. In: Proceedings of NASA Earth Science Technology Conference. Citeseer, 2004. 22–24
- 8 Bartha G, Kocsis S. Standardization of geographic data: the European inspire directive. *Eur J Geogr*, 2011, 2: 79–89
- 9 Wang S W, Anselin L, Bhaduri B, et al. CyberGIS software: a synthetic review and integration roadmap. *Int J Geograph Inf Sci*, 2013, 27: 2122–2145
- 10 Rubin K, Ramamurthy M. Update on the EarthCube initiative. In: Proceedings of the EGU General Assembly 2019, Geophysical Research Abstracts. European Geosciences Union, 2019. 21
- 11 Gorelick N, Hancher M, Dixon M, et al. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens Environ*, 2017, 202: 18–27
- 12 Killough B. Overview of the open data cube initiative. In: IGARSS 2018–2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2018. 8629–8632

- 13 Yue P, Shangguan B Y, Hu L, et al. Towards a training data model for artificial intelligence in earth observation. *Int J Geograph Inf Sci*, 2022, 36: 2113–2137
- 14 UN-GGIM. Future Geospatial Information Ecosystem: from SDI to SoS and on to the Geoverse. Technical Report, United Nations, 2022
- 15 Hey T, Trefethen A E. Cyberinfrastructure for e-Science. *Science*, 2005, 308: 817–821
- 16 Yue P. Web Geographic Information Systems and Services (in Chinese). Wuhan: Wuhan University Press, 2011 [乐鹏. 网络地理信息系统和服务. 武汉: 武汉大学出版社, 2011]
- 17 Yue P. High-performance Geospatial Computation (in Chinese). Beijing: Science Press, 2021 [乐鹏. 高性能地理计算. 北京: 科学出版社, 2021]
- 18 Shahi K. Volunteered geographic information (VGI) in spatial data infrastructure (SDI) continuum. *EAI Endorsed Trans IoT*, 2023, 9: e3
- 19 Brodeur J. Geosemantic Interoperability and the Geospatial Semantic Web. In: Springer Handbook of Geographic Information. Heidelberg: Springer, 2022. 531–550
- 20 Sjoukema J W, Samia J, Bregt A K, et al. The governance of INSPIRE: evaluating and exploring governance scenarios for the European spatial data infrastructure. *Int J Geo-Inf*, 2022, 11: 141
- 21 Santhanavanich T, Padsala R, Würstle P, et al. The spatial data infrastructure of an urban digital twin in the building energy domain using OGC standards. *ISPRS Ann Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci*, 2022, X-4/W2-2022: 249–256
- 22 Jeddoub I, Nys G A, Hajji R, et al. Digital Twins for cities: analyzing the gap between concepts and current implementations with a specific focus on data integration. *Int J Appl Earth Observation GeoInf*, 2023, 122: 103440
- 23 Kotsev A, Minghini M, Tomas R, et al. From spatial data infrastructures to data spaces—a technological perspective on the evolution of European SDIs. *Int J Geo-Inf*, 2020, 9: 176
- 24 Zyl T L, Simonis I, McFerren G. The sensor web: systems of sensor systems. *Int J Dig Earth*, 2009, 2: 16–30
- 25 Bukhsh Z A, van Sinderen M, Singh P M. SOA and EDA: a comparative study: similarities, differences and conceptual guidelines on their usage. In: 2015 12th International Joint Conference on E-Business and Telecommunications (ICETE): vol. 2. IEEE, 2015. 213–220
- 26 Rieke M, Bigagli L, Herle S, et al. Geospatial IoT—the need for event-driven architectures in contemporary spatial data infrastructures. *Int J Geo-Inf*, 2018, 7: 385
- 27 Zhang X, Chen N C, Chen Z Q, et al. Geospatial sensor web: a cyber-physical infrastructure for geoscience research and application. *Earth-Sci Rev*, 2018, 185: 684–703
- 28 Zhang Y B, Li J, Duan M, et al. Multi-sensor integration management in the earth observation sensor web: state-of-the-art and research challenges. *Int J Appl Earth Observ GeoInf*, 2023, 125: 103601
- 29 Li D R, Wang M, Guo H N, et al. On China's earth observation system: mission, vision and application. *GEO-Spatial Inf Sci*, 2024, doi: 10.1080/10095020.2024.2328100
- 30 Deng H P, Yue P, Yu D Y, et al. A geospatial data and model hub for online geospatial analysis. In: 2023 11th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics). Wuhan, China: IEEE, 2023. 1–6
- 31 Leith A, Adams C, Borges D, et al. Cloud native geospatial: realizing the digital earth vision. In: IGARSS 2024-2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2024. 6886–6889
- 32 Yue P, Liu R X, Shangguan B Y, et al. GeoAI training data: model, quality, and services (in Chinese). *Geomat Inf Sci Wuhan Univ*, 2023, 48: 1616–1631 [乐鹏, 刘瑞祥, 上官博屹, 等. 地理人工智能样本: 模型, 质量与服务. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48: 1616–1631]
- 33 Lewis A, Lacey J, Mecklenburg S, et al. CEOS analysis ready data for Land (CARD4L) overview. In: IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2018. 7407–7410
- 34 Gao F, Yue P, Jiang L C, et al. GeoCube: a multi-source EO cube towards large-scale analysis (in Chinese). *J Remote Sens*, 2022, 26: 1051–1066 [高凡, 乐鹏, 姜良存, 等. Geocube: 面向大规模分析的多源对地观测时空立方体. 遥感学报, 2022, 26: 1051–1066]
- 35 Mahecha M D, Gans F, Brandt G, et al. Earth system data cubes unravel global multivariate dynamics. *Earth Syst Dynam*, 2020, 11: 201–234
- 36 Gao F, Yue P, Cao Z P, et al. A multi-source spatio-temporal data cube for large-scale geospatial analysis. *Int J Geograph Inf Sci*, 2022, 36: 1853–1884
- 37 Chen M, Lv G N, Zhou C H, et al. Geographic modeling and simulation systems for geographic research in the new era: some thoughts on their development and construction. *Sci China Earth Sci*, 2021, 64: 1207–1223 [陈旻, 闫国年, 周成虎, 等. 面向新时代地理学特征研究的地理建模与模拟系统发展及构建思考. 中国科学: 地球科学, 2021, 51: 1664–1680]
- 38 Chen M, Yang C, Hou T, et al. Developing a data model for understanding geographical analysis models with consideration of their evolution and application processes. *Trans GIS*, 2018, 22: 1498–1521
- 39 Castronova A M, Goodall J L, Elag M M. Models as web services using the Open Geospatial Consortium (OGC) Web Processing Service (WPS) standard. *Environ Model Software*, 2013, 41: 72–83
- 40 Gao F, Yue P, Zhang C X, et al. Coupling components and services for integrated environmental modelling. *Environ Model Software*, 2019, 118: 14–22

- 41 Zhang M D, Jiang L C, Yue P, et al. Interoperable web sharing of environmental models using OGC web processing service and Open Modeling Interface (OpenMI). *Environ Model Software*, 2020, 133: 104838
- 42 Tucker G E, Hutton E W H, Piper M D, et al. CSDMS: a community platform for numerical modeling of Earth surface processes. *Geosci Model Dev*, 2022, 15: 1413–1439
- 43 Bandaragoda C, Castronova A, Istanbuluoglu E, et al. Enabling collaborative numerical modeling in earth sciences using knowledge infrastructure. *Environ Model Software*, 2019, 120: 104424
- 44 Xu K, Chen M, Yue S S, et al. The portal of OpenGMS: bridging the contributors and users of geographic simulation resources. *Environ Model Software*, 2024, 180: 106142
- 45 Reichstein M, Camps-Valls G, Stevens B, et al. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. *Nature*, 2019, 566: 195–204
- 46 Castruccio S, McInerney D J, Stein M L, et al. Statistical emulation of climate model projections based on precomputed GCM runs. *J Clim*, 2014, 27: 1829–1844
- 47 Fer I, Kelly R, Moorcroft P R, et al. Linking big models to big data: efficient ecosystem model calibration through Bayesian model emulation. *Biogeosciences*, 2018, 15: 5801–5830
- 48 Yue P, Gao F, Shanguan B Y, et al. A machine learning approach for predicting computational intensity and domain decomposition in parallel geoprocessing. *Int J Geographical Inf Sci*, 2020, 34: 2243–2274
- 49 Gao F, Lu W, Gan L L. A ConvNets-based method for computational intensity prediction and spatial domain decomposition (in Chinese). *Geomat Inf Sci Wuhan Univ*, 2024, doi: 10.13203/j.whugis20240119 [高凡, 路威, 甘麟露. 基于卷积神经网络的地理空间域计算强度预测与分解方法. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, doi: 10.13203/j.whugis20240119]
- 50 Yue P, Wang K X, Xu H W, et al. From geospatial data cube to AI cube: the open geospatial engine (OGE) approach. *ISPRS Ann Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci*, 2024, X-4-2024: 441–446
- 51 Chen M, Qian Z, Boers N, et al. Iterative integration of deep learning in hybrid Earth surface system modelling. *Nat Rev Earth Environ*, 2023, 4: 568–581
- 52 Schadt E E, Linderman M D, Sorenson J, et al. Computational solutions to large-scale data management and analysis. *Nat Rev Genet*, 2010, 11: 647–657
- 53 Eldawy A, Mokbel M F. Spatialhadoop: a mapreduce framework for spatial data. In: 2015 IEEE 31st International Conference on Data Engineering. IEEE, 2015. 1352–1363
- 54 Yue P, Wu Z Z, Shanguan B Y. Design and implementation of a distributed geospatial data storage structure based on Spark (in Chinese). *Geomat Inf Sci Wuhan Univ*, 2018, 43: 8 [乐鹏, 吴昭炎, 上官博屹. 基于Spark的分布式空间数据存储结构设计及实现. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2018, 43: 8]
- 55 Shanguan B Y, Yue P, Yan Z H, et al. A stream computing approach for live environmental models using a spatial data infrastructure with a waterlogging model case study. *Environ Model Software*, 2019, 119: 182–196
- 56 Lunga D, Gerrand J, Yang L, et al. Apache spark accelerated deep learning inference for large scale satellite image analytics. *IEEE J Sel Top Appl Earth Observations Remote Sens*, 2020, 13: 271–283
- 57 Yu D Y, Yue P, Wu B W, et al. Towards an integrated approach for managing and streaming 3D spatial data at the component level in spatial data infrastructures. *Int J Geographical Inf Sci*, 2024, 39: 847–871
- 58 Yu D Y, Yue P, Ye F, et al. Bidirectionally greedy framework for unsupervised 3D building extraction from airborne-based 3D meshes. *Automation Construction*, 2023, 152: 104917
- 59 Li M L, Nan L L. Feature-preserving 3D mesh simplification for urban buildings. *ISPRS J Photogrammetry Remote Sens*, 2021, 173: 135–150
- 60 Lv Z H, Shang W L, Guizani M. Impact of digital twins and metaverse on cities: history, current situation, and application perspectives. *Appl Sci*, 2022, 12: 12820
- 61 Liu B, Ding L F, Meng L Q. Spatial knowledge acquisition with virtual semantic landmarks in mixed reality-based indoor navigation. *Cartography Geographic Inf Sci*, 2021, 48: 305–319
- 62 Lochhead I, Hedley N. Mixed reality emergency management: bringing virtual evacuation simulations into real-world built environments. *Int J Digital Earth*, 2019, 12: 190–208
- 63 Gong J Y, Geng J, Wu H Y. Geospatial knowledge service: a review (in Chinese). *Geomat Inf Sci Wuhan Univ*, 2014, 39: 883–890 [龚健雅, 耿晶, 吴华意. 地理空间知识服务概论. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2014, 39: 883–890]
- 64 Lassila O, Hendler J, Berners-Lee T. The semantic web. *Sci Am*, 2001, 284: 34–43
- 65 Yue P, Gong J Y, Di L P, et al. Integrating semantic web technologies and geospatial catalog services for geospatial information discovery and processing in cyberinfrastructure. *GeoInformatica*, 2011, 15: 273–303
- 66 Compton M. What now and where next for the W3C semantic sensor networks incubator group sensor ontology. In: SSN. Citeseer, 2011. 1–8

- 67 Yue P, Guo X, Zhang M D, et al. Linked Data and SDI: the case on web geoprocessing workflows. *ISPRS J Photogrammetry Remote Sens*, 2016, 114: 245–257
- 68 Garijo D, Gil Y. A new approach for publishing workflows: abstractions, standards, and linked data. In: *Proceedings of the 6th Workshop on Workflows in Support of Large-Scale Science*. ACM, 2011. 47–56
- 69 Yuan J, Yue P, Gong J Y, et al. A linked data approach for geospatial data provenance. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2013, 51: 5105–5112
- 70 Paik I, Chen W, Kumara B T, et al. Linked data-based service publication for service clustering. In: *Advances in Computer Science and Its Applications: CSA 2013*. Springer, 2014. 1429–1435
- 71 Qiu Q J, Zheng S Y, Li J L, et al. A deep learning architecture for aligning cross-domain geographic knowledge graph. *Int J Geograph Inf Sci*, 2025, doi: [10.1080/13658816.2025.2477615](https://doi.org/10.1080/13658816.2025.2477615)
- 72 Jang B C, Wan G, Xu J, et al. Geographic knowledge graph building extracted from multi-sourced heterogeneous data (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2018, 47: 1051–1061 [蒋秉川, 万刚, 许剑, 等. 多源异构数据的大规模地理知识图谱构建. *测绘学报*, 2018, 47: 1051–1061]
- 73 Lu F, Zhu Y Q, Zhang X Y. Spatio-temporal knowledge graph: advances and perspectives (in Chinese). *J Geo-Inf Sci*, 2023, 25: 1091–1105 [陆锋, 诸云强, 张雪英. 时空知识图谱研究进展与展望. *地球信息科学学报*, 2023, 25: 1091–1105]
- 74 Li H, Yue P, Tapete D, et al. ESDC: an open Earth science data corpus to support geoscientific literature information extraction. *Sci China Earth Sci*, 2024, 67: 3840–3854 [李皓, 乐鹏, Tapete D, 等. ESDC:一种用于支持地学文献信息抽取的开放地球科学数据语料库. *中国科学: 地球科学*, 2024, 54: 3888–3902]
- 75 Zhang X, Zhu S N, Zhang C J. Annotation of geographical named entities in Chinese text (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2012, 41: 115–120 [张雪英, 朱少楠, 张春菊. 中文文本的地理命名实体标注. *测绘学报*, 2012, 41: 115–120]
- 76 Chu D P, Wan B, Li H, et al. A machine learning approach to extracting spatial information from geological texts in Chinese. *Int J Geographical Inf Sci*, 2022, 36: 2169–2193
- 77 Zhang X Y, Lü G N, Du M, et al. Acquisition and application on geographical names information based on large data driving (in Chinese). *Mod Surv Mapp*, 2017, 40: 1–5 [张雪英, 闫国年, 杜咪, 等. 大数据驱动的地名信息获取与应用. *现代测绘*, 2017, 40: 1–5]
- 78 Santos R, Murrieta-Flores P, Calado P, et al. Toponym matching through deep neural networks. *Int J Geographical Inf Sci*, 2018, 32: 324–348
- 79 Ramrakhiyani N, Palshikar G, Varma V. A simple neural approach to spatial role labelling. In: *Advances in Information Retrieval: 41st European Conference on IR Research, ECIR 2019, Cologne, Germany, April 14–18, 2019, Proceedings, Part II* 41. Switzerland: Springer, 2019. 102–108
- 80 Chen X J, Jia S B, Xiang Y. A review: knowledge reasoning over knowledge graph. *Expert Syst Appl*, 2020, 141: 112948
- 81 Mai G C, Yan B, Janowicz K, et al. Relaxing unanswerable geographic questions using a spatially explicit knowledge graph embedding model. In: *Geospatial Technologies for Local and Regional Development: proceedings of the 22nd AGILE Conference on Geographic Information Science* 22. Switzerland: Springer, 2020. 21–39
- 82 Hu L, Li W W, Zhu Y Q. Geometric feature enhanced knowledge graph embedding and spatial reasoning. In: *Proceedings of the 7th ACM SIGSPATIAL International Workshop on AI for Geographic Knowledge Discovery*. Atlanta GA USA: aCM, 2024. 50–53
- 83 Hu L, Li W W, Xu J, et al. GeoEntity-type constrained knowledge graph embedding for predicting natural-language spatial relations. *Int J Geograph Inf Sci*, 2025, 39: 376–399
- 84 Feng Y, Ding L F, Xiao G H. Geoqamap-geographic question answering with maps leveraging LLM and open knowledge base (short paper). In: *12th International Conference on Geographic Information Science (GIScience 2023)*. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum für Informatik, 2023, 28: 1–28
- 85 Ariza-López F J, Reinoso-Gordo J F, García-Balboa J L, et al. Quality specification and control of a point cloud from a TLS survey using ISO 19157 standard. *Automation Construction*, 2022, 140: 104353
- 86 Sierra Requena R, Martínez-Llario J C, Lorenzo-Sáez E, et al. Development of an algorithm to evaluate the quality of geolocated addresses in urban areas. *Int J Geo-Inf*, 2023, 12: 407
- 87 Ureña-Cámara M A, Nogueras-Iso J, Lacasta J, et al. A method for checking the quality of geographic metadata based on ISO 19157. *Int J Geographical Inf Sci*, 2019, 33: 1–27
- 88 Wu H Y, Zhang H W. QoGIS: concept and research framework (in Chinese). *Geomat Inf Sci Wuhan Univ*, 2007, 32: 385–388 [吴华意, 章汉武. 地理信息服务质量(QoGIS): 概念和研究框架. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2007, 32: 385–388]
- 89 Yue P, Tan Z Y, Zhang M D. GeoQoS: delivering quality of services on the Geoprocessing Web. In: *Proceedings of OSGeo's European Conference on Free and Open Source Software for Geospatial (FOSS4G-Europe 2014): vol. 2014*. OSGeo, 2014. 11
- 90 Jin F Y, Li R, Liang J Y, et al. An augmented geospatial service web based on QoS constraints and geospatial service semantic relationships. *Int J Geo-Inf*, 2022, 11: 357
- 91 Di L P, Yue P, Ramapriyan H K, et al. Geoscience data provenance: an overview. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2013, 51: 5065–5072
- 92 Jiang L C, Yue P, Kuhn W, et al. Advancing interoperability of geospatial data provenance on the web: gap analysis and strategies. *Comput Geosci*, 2018, 117: 21–31

- 93 He L L, Yue P, Di L P, et al. Adding geospatial data provenance into SDI—a service-oriented approach. *IEEE J Sel Top Appl Earth Observ Remote Sens*, 2015, 8: 926–936
- 94 Yue P, Zhang M D, Guo X, et al. Granularity of geospatial data provenance. In: 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Quebec City, QC: IEEE, 2014. 4492–4495
- 95 Zhang M D, Yue P, Wu Z Y, et al. Model provenance tracking and inference for integrated environmental modelling. *Environ Model Software*, 2017, 96: 95–105
- 96 Zhang M D, Jiang L C, Zhao J, et al. Coupling OGC WPS and W3C PROV for provenance-aware geoprocessing workflows. *Comput Geosci*, 2020, 138: 104419
- 97 Yue P, Di L P, Yang W, et al. Semantic Web Services-based process planning for earth science applications. *Int J Geograph Inf Sci*, 2009, 23: 1139–1163
- 98 Yue P, Zhang M D, Tan Z Y. A geoprocessing workflow system for environmental monitoring and integrated modelling. *Environ Model Software*, 2015, 69: 128–140
- 99 Zhang M D, Yue P, Hu L, et al. An interoperable and service-oriented approach for real-time environmental simulation by coupling OGC WPS and SensorThings API. *Environ Model Software*, 2023, 165: 105722
- 100 Cömert Ç, Ulutaş D, Akıncı H, et al. Semantic web services for implementing national spatial data infrastructures. *Sci Res Essays*, 2010, 5: 685–692
- 101 Brogi A, Corfini S, Montes J F A, et al. A prototype for discovering compositions of semantic web services. In: Proceedings of the SWAP, 2006, 201: 1–8
- 102 Ulutaş Karakol D, Cömert Ç. Architecture for semantic web service composition in spatial data infrastructures. *Survey Rev*, 2022, 54: 1–16
- 103 Müller M. Hierarchical profiling of geoprocessing services. *Comput Geosci*, 2015, 82: 68–77
- 104 Ray P P. ChatGPT: a comprehensive review on background, applications, key challenges, bias, ethics, limitations and future scope. *Internet Things Cyber-Phys Syst*, 2023, 3: 121–154
- 105 He L L, Yang J G, Deng C, et al. Multi-agent framework for service-oriented geospatial computing. In: 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, vol. 1. IEEE, 2005. 143–148
- 106 Jing D S, Bi S W, Wu F. Geospatial information services on the basis of agent and OWL-S. In: Proceedings, 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS'05, vol. 2. IEEE, 2005. 4
- 107 Farnaghi M, Mansourian A. Multi-agent planning for automatic geospatial web service composition in geoportals. *Int J Geo-Inf*, 2018, 7: 404
- 108 Gao W B, Wang R, Wang T F, et al. QoS-aware service composition based on deep reinforcement learning (in Chinese). *Comput Technol Dev*, 2022, 32: 92–98 [高文斌, 王睿, 王田丰, 等. 基于深度强化学习的QoS感知Web服务组合. 计算机技术与发展, 2022, 32: 92–98]
- 109 Zhang Y F, Wei C, He Z T, et al. GeoGPT: an assistant for understanding and processing geospatial tasks. *Int J Appl Earth Observ GeoInf*, 2024, 131: 103976
- 110 Wu Q Y, Bansal G, Zhang J Y, et al. Autogen: enabling next-gen LLM applications via multi-agent conversation framework, 2023, arXiv: 2308.08155
- 111 Hwang Y S, Um J S, Pradhan B, et al. How does ChatGPT evaluate the value of spatial information in the 4th industrial revolution? *Spat Inf Res*, 2024, 32: 187–194
- 112 Zhu J, Dang P, Cao Y G, et al. A flood knowledge-constrained large language model interactable with GIS: enhancing public risk perception of floods. *Int J Geograph Inf Sci*, 2024, 38: 603–625
- 113 Jacob A, Stoicescu M, Ahola R, et al. Introduction to the OGC geodatacube standard working group. In: iGARSS 2023-2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2023. 2489–2492
- 114 Cao Z P, Jiang L C, Yue P, et al. A large scale training sample database system for intelligent interpretation of remote sensing imagery. *GEO-Spatial Inf Sci*, 2024, 27: 1489–1508
- 115 Wang K X, Yue P, Yu D Y, et al. OGEScript: an OGC-oriented interoperable script API for online geospatial analysis. In: 2023 11th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics). Wuhan: IEEE, 2023. 1–5
- 116 Liu R X, Yue P, Shangguan B Y, et al. RTGDC: a real-time ingestion and processing approach in geospatial data cube for digital twin of earth. *Int J Digital Earth*, 2024, 17: 2365386
- 117 Liu R X, Yue P, Yu D Y, et al. A cube-enabled cloud geoprocessing engine for big earth data. In: 2023 11th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics). Wuhan: IEEE, 2023. 1–6
- 118 Yue P, Liu X X, Liu R X, et al. Modelling and development approaches for spatial-temporal data governance in intelligent connected vehicles (in Chinese). *Geomat Inf Sci Wuhan Univ*, 2024, doi: 10.13203/J.whugis20240353 [乐鹏, 刘晓雪, 刘瑞祥, 等. 智能网联汽车时空数据监管建模与实施方法研究. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, doi: 10.13203/J.whugis20240353]

Summary for “地理信息服务研究进展与技术实践”

Recent progress and technical practices of GIServices

Peng Yue¹, Kaixuan Wang^{1,2,3,4*}, Haoru Wu¹ & Ruixiang Liu¹

¹ School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Hubei LuoJia Laboratory, Wuhan 430079, China

³ Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

⁴ Hubei Province Engineering Center for Intelligent Geoprocessing (HPECIG), Wuhan 430079, China

* Corresponding author, E-mail: wangkaixuan@whu.edu.cn

Geographic information systems (GIS) are moving from systems to geographic information services (GIServices). By leveraging GIS and distributed infrastructures, distributed geospatial resources including sensors, geospatial data, geoprocessing algorithms and models can be accessed as services on the Web, and coordinated together by workflows to transform data into information and knowledge. Recent progress of GIServices can be summarized as the following four stages, Interoperating GIS-Web services-Infrastructure GIS-Geospatial Artificial Intelligence (GeoAI) services. The earlier focus in GIService is interoperability in that it enables the services to be plugged in and play through standard-compliant interfaces. The Web technologies enable GIServices to be accessible and chainable in a distributed environment, while infrastructures like Cyberinfrastructure and cloud computing allow services to manage big geospatial data and support high-performance geocomputation. Recent advancement in GeoAI significantly improves the automation of services in fulfilling the demands of end users, thus enabling intelligent GIServices. The paper identifies nine fundamental research topics: infrastructure, observation services, data services, model and processing services, visualization services, knowledge services, quality and provenance, service coordination, and intelligent services. The topics have been investigated intensively in the past decade in GIServices. The paper summarizes the advancements and enabling technologies of each topic and also highlights future directions. Some latest work is highlighted: the development of new infrastructures such as Spatial Digital Twin and Data Spaces, the development of geospatial data cubes for analysis ready data, the accommodation of GeoAI models in geoprocessing services, the leverage of metaverse in visualization services, the management of large-scale geographic knowledge graphs, the quality assessment of GeoAI systems, and intelligent geospatial service leveraging large language models (LLM) and AI agents. Recent work on the standardization of geospatial technologies is also highlighted, using the work from two major international standardization organizations as an illustration, i.e. the International Organization for Standardization Technical Committee on Geographic Information/Geomatics (ISO/TC211) and Open Geospatial Consortium (OGC). The standards ensure the interoperability and coordination of GIServices. The paper summarizes the progress of standards into six categories: fundamental specifications, data models and encodings, services and APIs, data discovery, data storage, and sensing. It can be observed that GIServices are moving from Service-oriented Architecture (SOA) to Resource-oriented Architecture (ROA). The significant proof is that the OGC API (Application Programming Interface) series of standards is being proposed as the next-generation standard family for GIServices due to their simplicity and lightweight usage. There is another emerging track is on GeoAI services. Recently OGC published its first GeoAI-related standard on training data sharing, i.e., the Training Data Markup Language for Artificial Intelligence (TrainingDML-AI). The work on GeoAI model descriptions is moving forward. Finally, by leveraging related methods, technologies, and standards together, the paper presents the practices of GIServices using the Open Geospatial Engine (OGE) as an example. OGE is an open service platform building on Cyberinfrastructure. It couples computing power, data, and algorithms together to support various geospatial services including data acquisition, processing, analysis, and visualization. It integrates global multi-source geospatial data by following a GeoCube model and provides large-scale online geospatial analysis in a cloud-native environment. Based on the comprehensive review and latest technical practices, it can be observed that the emphasis of GIServices will move from data to computing, physical models to GeoAI models, and humans to machines. This also necessitates the standardization of GIServices will shift from human-centric to machine-oriented interactions, and focus more on GeoAI, 3D and physical/virtual interactions. The future GIS is involved from desktop-based siloed GIS applications into an intelligent spatiotemporal infrastructure that relies heavily on GIServices to support the integration and collaboration of connected humans, machines, and things.

geographic information service (GIService), geographic information system (GIS), spatial data infrastructure (SDI), spatiotemporal intelligence infrastructure, open geospatial engine (OGE)

doi: [10.1360/TB-2025-0107](https://doi.org/10.1360/TB-2025-0107)