**引文格式**:乐鹏,王凯旋.国际地理信息服务体系设计与标准化进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(8):1685-1699.DOI:10.13203/j.whugis20260172

**Citation**: YUE Peng, WANG Kaixuan. Progress in the Design and Standardization of International Geographic Information Services [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(8):1685-1699. DOI:10.13203/j.whugis20260172

# 国际地理信息服务体系设计与标准化进展

乐 鹏[1,2] 王凯旋[1,3,4,5]

1 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学·咸宁低空经济创新研究院,湖北 咸宁,437300

3 湖北珞珈实验室,湖北 武汉,430079

4 地球空间信息技术协同创新中心,湖北 武汉,430079

5 湖北省空间信息智能处理工程技术研究中心,湖北 武汉,430079

**摘 要**:中国将时空信息列为重要的新型基础设施,如何有效提供地理信息服务,是发挥全球时空信息基础设施效能的关键。传统空间数据基础设施(spatial data infrastructure, SDI)正面临着服务内容与服务技术的变革。结合地理信息两大标准化组织国际标准化组织(international organization for standardization,ISO)/TC211和国际开放地理信息协会的地理信息服务实践,提出新一代国际地理信息服务体系总体框架,涵盖服务分类、服务接口、服务架构、服务元数据、服务实施5大核心内容,通过技术解耦与依赖分层,增强体系的可扩展性与可持续演进能力。在此基础上,总结当代地理信息服务系列技术标准,提出服务标准制定实施指南,为全球ISO 19119地理信息服务体系标准修订提供理论方法支撑。

**关键词**:地理信息服务;空间数据基础设施;地理信息标准;地理信息服务分类;国际标准化组织;开放地球引擎

**中图分类号**:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-05-25

**DOI**:10.13203/j.whugis20260172 **文章编号**:1671-8860(2026)08-1685-15

# Progress in the Design and Standardization of International Geographic Information Services

*YUE Peng*[1,2] *WANG Kaixuan*[1,3,4,5]

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

2 Wuhan University-Xianning Institute for Advanced Air Mobility (Low-Altitude Economy), Xianning 437300, China

3 Hubei Luojia Laboratory, Wuhan 430079, China

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

5 Hubei Province Engineering Center for Intelligent Geoprocessing, Wuhan 430079, China

**Abstract**: **Objectives**: Geographic information services (GIServices) are a key enabler for realizing the full potential of global geospatial data and information infrastructures. There are significant efforts on the development of spatial data infrastructures (SDIs) to deliver efficient GIServices, which in turn have led to the evolution of an international service infrastructure that guides the development and standardization of geospatial services across countries. Traditional geospatial services in SDIs are enriched with more content and advanced technologies. There is a need to propose a new-generation framework for geospatial services. **Methods**: Building upon the geospatial service design defined in international organization for standardization (ISO) 19119:2016, and incorporating the latest advancements in service technologies, we extend an overarching framework for an international geospatial service infrastructure characterized by technological decoupling and layered dependencies. This framework encompasses five key components: service taxonomy, service interfaces, service architecture, service metadata, and service implementation. Based on these

**基金项目**:国家杰出青年科学基金(42425108);教育部基础学科和交叉学科突破计划(JYB2025XDXM111);湖北省自然科学基金创新群体(2025AFA035)。

**第一作者**:乐鹏,博士,教授,主要研究方向为地理信息系统。pyue@whu.edu.cn

**通信作者**:王凯旋,博士生。wangkaixuan@whu.edu.cn

core components, the connotation of geospatial services and their standard design are systematically elaborated. **Results:** A resource-based geospatial service taxonomy is introduced, comprising geographic sensing services, geographic discovery services, geographic data services, geographic processing services, geographic visualization services, and geographic knowledge services. This service taxonomy is compatible with geospatial artificial intelligence (GeoAI) technologies, thereby enabling the provision of GeoAI services. The abstract interface model of GIServices is presented, encompassing components including interfaces, operations, parameters, and operation chains. Methods for achieving syntactic and semantic interoperability among interfaces are also elaborated. An abstract interface can be mapped to different service architectural styles. Such mappings need to take into account the representation of service interfaces, payloads and protocols, as well as message exchange patterns. The mapping approaches for the two mainstream architectural styles of GIServices, service-oriented architecture and resource-oriented architecture, are presented. The GIServices metadata model defined in ISO 19119/19115-1 is refined by decoupling it from the abstract interface model, enriching it with service descriptions and fundamental attributes, and incorporating quality of service. A service development procedure is proposed, which maps from technology-neutral unified modeling language to specific data encodings, communication protocol bindings, and particular development languages and frameworks. Additionally, intelligent GIServices implementation based on agents for service chaining is also introduced. Based on the key content mentioned above, a multi-tiered geospatial information service standards framework has been suggested, encompassing fundamental service standards, platform-neutral standards, platform-specific standards and service metadata standards. A practical guideline for developing service standards is proposed. **Conclusions:** The five components of the service framework are fundamental for developing an infrastructure of geospatial services. It also provides the guideline on setting up new geospatial service standards. The design rationale depending on the technical decoupling and multi-layer dependencies ensures scalability for future technologies. The work provides the methodological foundation for the new version of ISO 19119 series standards.

**Key words**: geographic information services (GIServices); spatial data infrastructure (SDI); geospatial information standards; geospatial service taxonomy; international organization for standardization (ISO); open geospatial engine (OGE)

在时空信息成为新型基础设施的背景下,当代地理信息系统(geographic information system,GIS)正走向地理信息服务。全球空间数据基础设施(spatial data infrastructure,SDI)汇集了海量多源的地理空间信息数据,催生出地理信息服务的巨大需求。地理信息服务从服务科学的理念出发,通过数据、算法、算力的耦合,实现地理空间数据、计算、模型、知识等共享,使分布式资源整合为相互协作、可扩展的网络化服务系统,推动传统SDI朝着时空计算基础设施与时空人工智能(artificial intelligence,AI)基础设施发展[1]。

世界各地通过SDI的建设推动了地理信息服务的发展。传统SDI在国际和国家层面形成了不同的指导框架或服务平台,例如国际对地观测组织的全球综合对地观测系统[2]、联合国综合地理信息框架[3]、美国联邦地理数据委员会提供的GeoPlatform.gov[4]、欧盟推动的欧洲空间信息基础设施建设(infrastructure for spatial information in Europe,INSPIRE)[5]、中国的天地图[6]等。随着大数据、云计算与人工智能等新兴技术的赋能,国际上涌现出谷歌地球引擎[7]以及开放地球引擎(open geospatial engine,OGE)[8]为代表的“存-算-推”一体的就绪型SDI。服务架构模式逐渐从以服务为中心架构(service-oriented architecture,SOA)向更轻量的以资源为中心架构(resource-oriented architecture,ROA)过渡。以ChatGPT和DeepSeek为代表的大语言模型(large language model,LLM)以及以谷歌AlphaEarth[9]为代表的地理空间基础模型,正在驱动地理信息服务范式从传统的数据和计算服务,走向自动化的智能推理服务。基于SOA架构的传统地理信息服务以数据发布、检索和交换为主,缺乏轻量级服务协议,对分析计算与机器自主服务支撑不足,难以满足当前智能地理信息服务开发需求。

国际地理信息服务体系是指支撑分布式地理信息资源与功能在全球范围内实现共享、协同

和互操作的综合框架,比较代表性是国际标准化组织(international organization for standardization,ISO)19119服务基础规范。在地理信息领域,以国际标准化组织地理信息技术委员会(ISO/TC 211)和国际开放地理信息协会(open geospatial consortium,OGC)为主导,奠定了当代SDI的服务体系。在分工上,ISO和OGC共同制定基础规范,为地理信息服务提供统一的顶层框架;在此基础上OGC制定服务实施规范,如OGC Web服务(OGC Web services,OWS)和OGC应用程序编程接口(application programming interfaces,APIs),以支持SDI环境下地图、矢量要素、栅格覆盖、实时观测和地理处理等资源与能力的共享。同时,其他国际标准化组织也从不同技术视角开展了相关工作,并与ISO/OGC标准体系形成补充。例如国际电信联盟电信标准化部门主要面向通信网络,下设物联网与智慧城市研究组,关注智慧城市物联网背景下的地理信息定位、数据采集与传输服务等,以及在智慧城市场景如灾害等领域的应用;万维网联盟则立足Web环境,推进服务协议与描述的标准化。

目前,ISO和OGC正共同驱动地理信息服务体系的修订,以期形成国际地理信息服务新的标准化指导。本文针对地理信息服务体系建设与标准化面临的挑战,从以下3个方面开展研究:(1)以ISO传统地理信息服务基础规范为基础,结合服务技术演进趋势,构建新一代地理信息服务体系总体框架;(2)围绕服务分类、服务接口、服务架构、服务元数据与服务实施5个核心要素,系统阐释地理信息服务体系的内涵;(3)构建多层次、可持续的地理信息服务标准体系,介绍当前基础服务标准化进展与现有挑战,并为服务标准制定提供指导方法。研究将为国际地理信息服务体系基础标准修订提供理论方法支撑,并为后续系列服务标准提供实施指南。

## 1　相关工作

### 1.1　国际地理信息服务体系

国际上,不同组织从多元视角提出了一系列国际地理信息服务体系框架,用于指导时空信息基础设施建设与发展。联合国全球地理空间信息管理专家委员会提出的综合地理信息框架(integrated geospatial information framework,IGIF),旨在促进各国地理信息资源的高效利用。IGIF面向国家层面,提供地理信息管理与服务体系建设的综合性指导,涵盖治理与制度、政策与法律、财政支持、数据、创新、标准、合作、能力建设与教育以及沟通与参与等九大战略路径[3]。IGIF侧重宏观层面的行动指南,对具体技术实现的约束较弱。欧盟INSPIRE从技术实施角度构建了地理信息服务体系,提供元数据、服务接口和数据3个方面的技术指南,定义了发现服务、下载服务和可视服务三类核心服务技术要求,支持地名地址、土地利用、能源、气象等多源地理信息数据的共享[10]。OGC发布的OGC Reference Model作为其标准基线,与ISO 19119规范协同,开展地理信息服务体系建设[11]。ISO 19119基于通用计算机领域下描述开放分布式处理系统的ISO开放分布式处理参考模型(reference model of open distributed processing,RM-ODP)规范,从企业、信息、计算、工程与技术5个视角对地理信息服务进行建模[12]。新型时空信息基础设施的建设为地理信息服务体系注入了新的技术内涵。例如,空间数字孪生在传统SDI的基础上,进一步强化了时空环境的实时数据交换能力,以及面向动态过程的模拟与分析能力[13];数据空间侧重于时空数据资产的可信流通与共享机制,强调数据主权与安全保障[14];地理宇宙则突出地理空间AI(geospatial AI,GeoAI)的服务能力,通过协同全球分布的SDI、各类信息系统及感知设备,构建以机器为中心的虚实融合的全球互联地理信息生态体系,从而提供自动化的智能服务[15]。

### 1.2　国际地理信息服务标准化建设

当前,国际地理信息服务标准体系已形成由ISO/TC 211主导的基础规范与由OGC主导的实施规范相互协同的格局。基础规范ISO 19119:2016在概念和模型层面对地理信息服务进行统一抽象,提出了基于架构参考模型和基于SDI生命周期的服务分类体系。在此基础上,OGC面向特定平台与架构风格开展服务标准规范制定。早期OGC标准基于SOA架构形成OWS系列服务,包括网络地图服务(Web map service,WMS)、网络目录服务(catalogue services for the Web,CSW)、网络要素服务(Web feature service,WFS)、网络覆盖服务(Web coverage service,WCS)和网络处理服务(Web processing service,WPS)等典型服务规范。随着信息技术的发展,服务架构由SOA向ROA转型,叠加GeoAI与地理空间智能体的兴起,推动OGC标准体系

持续演进。近年来,OGC陆续发布一系列基于ROA的用于交换地理信息资源的API规范体系,包括OGC API-Maps、Records、Features、Coverages和Processes,用于地理信息资源的交换与访问。面向GeoAI的数据与模型标准化工作同时推进,进一步促进GeoAI服务的发展。例如,发布OGC TrainingDML-AI支持样本数据的互操作,以及成立OGC Deep Learning Model标准工作组推动GeoAI模型描述的标准化。现行的ISO 19119:2016在服务体系设计上已滞后于OGC实施规范的发展。一方面,其高度耦合ISO RM-ODP的设计弱化了对地理信息领域自身特定的关注;另一方面,服务抽象模型和服务分类体系仍存在与特定技术(如SOA)的依赖,难以适应新兴技术的发展需求。基于此,本文以ISO 19119的修订为切入点,提出一种与ISO RM-ODP解耦的地理信息服务体系设计,以指导国际地理信息服务标准化。

## 2 国际地理信息服务体系框架

本文在ISO 19119:2016的基础上,将地理信息服务体系与ISO RM-ODP的5个视角解耦,并适应最新技术发展,提出了如图1所示的国际地理信息服务体系总体框架。该框架涵盖了5个核心内容:服务分类、服务接口、服务架构、服务元数据和服务实施。

1)服务分类:依据特定原则将功能相似的服务进行聚类,形成服务分类体系,用于服务的组织、标识与发现。服务分类可以从多视角开展,如传统基于架构参考模型的分类和新的以地理信息资源为中心的分类等。同一个服务实例可归属于不同分类体系。

2)服务接口:特定类型服务通过接口向服务消费者提供功能。一个接口由一个或多个操作构成,每个操作对应于地理信息资源的具体行为,例如空间查询和空间模拟等。多个操作经过有序的编排组合形成服务链,在通过语法校验后支持复杂地理分析任务的执行。

3)服务架构:描述支撑服务运行的信息技术组件及其组织结构。特定的架构风格为地理信息服务接口的实现提供了一系列约束,涉及服务面向的对象、接口表达方式、参与方间的信息交换模式以及服务发现模式等。

4)服务元数据:用于描述服务的关键属性,支持服务理解、发现与重用。主要包括服务描述、范畴、类别、版本、依赖架构及关联的地理信息资源等;服务元数据有助于提升服务的可发现性。

5)服务实施:描述抽象服务接口到特定计算平台上的技术映射,包括地理空间数据和元数据的编码、通信协议绑定以及特定开发语言与开发框架等;由多个服务实例编排形成服务链以及自动化服务组合的智能服务也是服务实施的重要内容。

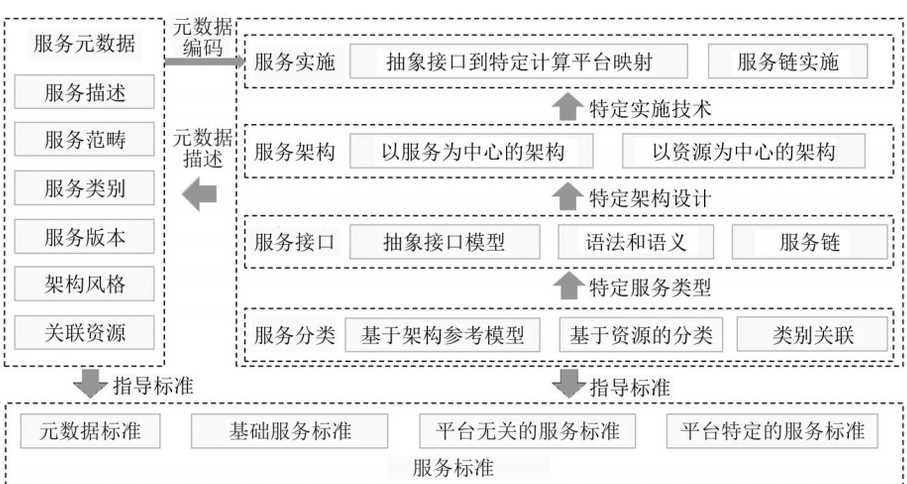



图1 国际地理信息服务体系总体框架

Fig. 1 Overall Framework of the International Geographic Information Services

该体系立足当前国际地理信息服务的最佳实践与发展趋势,可为未来一段时期内相关系列标准的制定与完善提供指导。一方面,该体系框架避免了直接采用原有规范中通用计算机领域ISO RM-ODP的5个视角,转而以地理信息服务实践中符合领域认知的5项核心内容进行规范,从服务分类、接口、架构、元数据、实施出发,涵盖了ISO/OGC地理信息服务已发布和当前正在开

展工作的标准关注内容。其考虑了新一代SDI对服务分类与发现的最佳实践,探讨了与ISO 19115正在开展的元数据标准修订工作的协同,既涵盖了当前及未来一段时间内以资源为中心的地理信息服务标准化工作,同时也考虑未来GeoAI服务可能的扩展,并为新服务标准的制定提供了参考框架。

同时,该体系框架尽量兼容原有规范ISO RM-ODP中5个视角内容,例如企业视角描述服务在业务逻辑中的角色、应用范畴和作用,现体现为服务元数据中的相关属性。计算视角关注通过服务接口模型来定义和描述服务功能以及服务之间的交互,信息视角强调服务接口在语法和语义上的互操作,二者共同构成服务接口的主要内容。此外,信息视角下基于功能语义划分得到的服务分类,作为SDI实践大家关注的内容独立出来进行规范。工程视角关注服务分布式运行所需的基础设施和架构设计,对应于服务架构。技术视角描述服务系统实现所需的软硬件技术,对应于服务实施。通过上述映射,该框架在保持与ISO RM-ODP兼容的同时,增强了其在地理信息领域下的可理解性和实践指导价值。

## 3　国际地理信息服务体系内容

本节着重介绍服务体系框架中服务分类、服务接口、服务架构、服务元数据和服务实施5个核心部分的基本内涵,包括基于地理信息资源的分类体系、抽象服务接口建模方法、特定服务架构下接口的表达、基于ISO 19115-1扩展的服务元数据模型以及抽象接口和服务链在特定计算平台下的实施方法等。

### 3.1　服务分类

地理信息服务可依据不同视角构建多种分类体系。ISO 19119:2016中提出了两种典型分类法:基于架构参考模型的服务分类与基于SDI服务生命周期的服务分类。前者基于通用架构参考模型识别出地理信息服务所使用的通用接口类型,包括人机交互服务、信息管理服务、工作流管理服务、处理服务、通信服务以及安全管理服务,但其源自通用信息领域,对地理信息本身的关注相对不足;后者从传统SDI下数据和服务的生命周期出发,将地理信息服务划分为注册服务、发现服务、可视服务、下载服务和转换服务,但其局限在数据服务,在技术适应性与现实支撑能力方面已逐渐滞后于当前实践。

当前SDI的服务能力已由传统数据服务拓展至信息与知识层面的增值服务,覆盖从数据采集、处理到知识挖掘的全链路。随着AI相关技术、标准和政策与SDI的深入结合,衍生出AI就绪SDI,以提供数据驱动的分析和推理能力[16]。本文从SDI最新实践出发,在ISO 19119:2016基于SDI服务生命周期的服务分类基础上,扩展出图2所示的基于地理信息资源的服务分类模型。该模型从SDI中地理空间数据的价值链出发,按照资源在获取、描述、交换、计算、图示与知识服务过程中的功能定位,分为观测资源、元数据资源、数据资源、处理资源、可视化资源和知识资源,分别提供实时传感观测数据、元数据描述、可交换的存档数据、处理算法或推理模型、可视化地图/瓦片/三维数据,以及时空本体和智能体等。

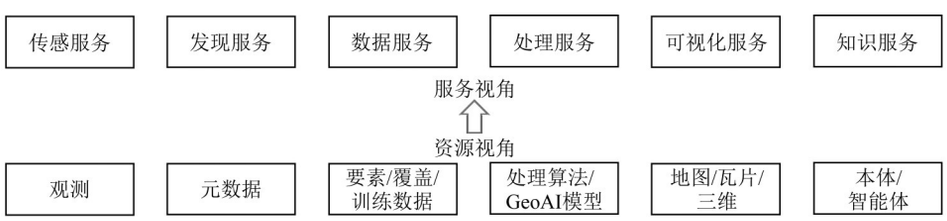



图2　SDI下基于地理信息资源的服务分类模型

Fig. 2　Service Classification Model Based on Geospatial Resources in SDI

从服务视角出发,各类资源分别对应以该资源为主要操作对象的服务,由此形成以下6类服务:

1)地理空间传感服务:用于访问、查询和管理传感设备及其观测数据,涵盖传感网、物联网及天基/空基对地观测等场景。该类服务既支持对已有观测数据流的过滤与订阅,也支持通过任务规划实现按需采集;观测数据可通过拉取或推送模式提供给服务消费者。在AI SDI中,GeoAI赋能的传感服务可表现为:(1)部署在传感设备的GeoAI模型可视为虚拟传感器,以提供增值的观测信息;(2)通过大模型与机器设备结合的具身智能,推动传感服务从基于人工的传感采集向自动化的感知-推理-行动的智能传感服务转变。

2)地理空间发现服务:结合元数据等,实现地理空间资源与服务的检索与发现。ISO 19115和都柏林元数据等规范为地理信息资源提供了通用的元数据字段。地理人工智能样本标记语言OGC TrainingDML-AI[17-18]和地理深度学习模型描述语言[19],为GeoAI系统中存档的地理空间训练数据集和训练模型提供了时空任务、时空范围、波谱范围和时空泛化性等元数据属性。其他类型的GeoAI资源如工具、智能体Skill等,都可以被该类服务发现。

3)地理空间数据服务:用于存档地理空间数据的交换与访问,支持数据发现、获取/下载、访问控制以及事务操作(如创建、更新和删除)。在大数据背景下,通过标准化或定制的服务接口对数据子集的按需检索,以降低传输开销。数据服务根据所提供的数据类型可进行二级分类,例如SDI中的要素数据服务和覆盖数据服务,以及AI就绪SDI下的训练样本数据服务、AI嵌入数据服务等。

4)地理空间处理服务:提供在远程环境中执行地理空间计算与转换的能力,对输入数据进行处理并返回结果。地理空间处理既可基于物理模型(如环境模拟),亦可基于GeoAI模型(如深度学习模型),并可通过二者的融合实现机理驱动与数据驱动相结合的处理服务。处理服务还可按照不同视角进行二级分类,例如按处理对象的数据类型划分(覆盖数据和要素数据)或按处理语义类型划分(如空间、专题、时间和元数据)。

5)地理空间可视服务:以直观方式呈现地理空间信息,是实现人机交互的入口之一。在二维场景中,符号化后的地理空间数据以地图形式表达,符号化规则定义为样式。地图通常以图像格式(如PNG、JPEG)提供,并通过切片与瓦片金字塔支持客户端的按需加载。在三维场景中,带有地理空间坐标的三维模型构成主要的可视化资源。GeoAI的集成进一步提升了可视服务的能力,通过语义提取和动态内容构建,使可视化结果从静态要素(如点线面)的表达演进为对空间认知结果的展示;同时支持基于自然语言与AI智能体的交互方式,形成人机协同的认知可视服务。

6)地理空间知识服务:地理空间知识是地理空间数据价值的最高形态,通过知识服务为目标需求提供知识内容和解决方案。知识是一种基于推理的认知形式,通常源自经验、规则、模型或对历史数据的归纳。以本体为代表的显式知识使用逻辑断言和形式化模型来明确描述地理实体及其关系;以基础大模型为代表的数据驱动模型,通过大数据训练形成用于知识响应的近似函数,可被视为隐式知识,并成为知识服务的重要实现形式。基于LLM实现的智能体系统能够理解地理信息上下文,并按需自动调用组合各类原子服务完成复杂任务,能够为用户提供直接的决策知识。

从整体视角看,地理信息服务分类体系并非是严格的层级结构,而是由多类类别相互关联、支持动态扩展的复杂网络结构。同一地理信息服务实例在不同的分类体系下的类别所属不同,而不同分类体系下的类别之间可能存在语义关联。已有研究利用形式概念分析法及概念格构建,对不同类别进行概念表达和关联映射,从而实现多分类体系的融合[20-21]。此外,结合知识图谱与链接数据等技术,可为服务分类体系、服务类别及服务实例构建形式化本体,以支持类别管理与语义匹配查询[22]。通过维护统一的类型资源注册和链接平台,有助于提升服务类别的机器可读性与语义一致性。例如OGC所开发的链接数据注册库OGC Rainbow为各类OGC标准化资源提供唯一的标识符,并基于知识图谱实现资源之间的交叉联系[23]。

### 3.2 地理信息服务接口

服务接口由一组用于表征服务功能的操作构成,是对外提供地理信息能力的统一访问入口。针对特定服务类型定义的抽象地理信息服务接口,可以在不同技术平台上派生出多种实现,从而实现接口定义与特定技术的解耦。具备互操作性的接口为服务重用与服务链组合提供统一的语法与语义基础,是实现服务重用以及自动化组合调用的重要前提。

图3所示为地理信息服务接口的信息模型。特定服务类别的抽象服务规范(SV_AbstractServiceSpecification)定义一组接口(SV_Interface),每个接口聚合若干操作(SV_Operation)。接口具有可重用性,其定义能够被多个服务规范共享,且可在不同语义场景下复用统一语法结构。操作作为接口对外暴露的功能单元,可被调用以执行特定动作,例如时空查询、空间分析和空间转换。每个操作都应具有明确的名称及输入/输出参数(SV_Parameter)。规范化的参数定义应包含参数名称、数据类型、参数方向、可选性、重

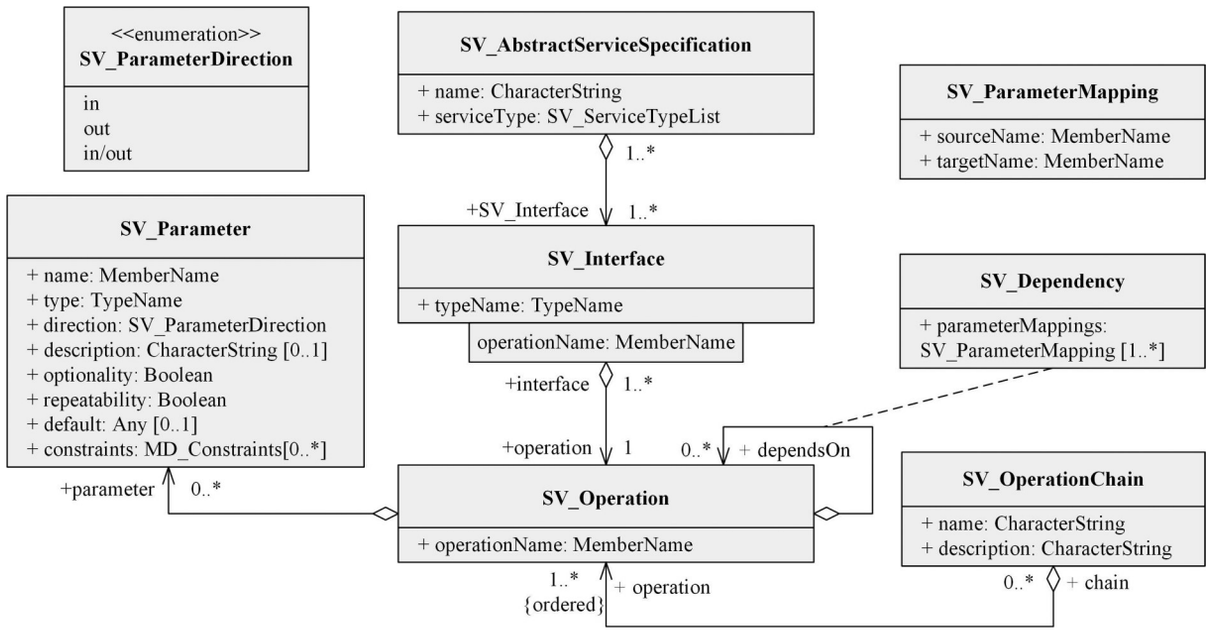



图 3　服务接口信息模型(修改自 ISO 19119:2016)

Fig. 3　Information Model of Service Interface(Revised from ISO 19119:2016)

复性,以及必要的描述、默认值与约束条件。操作链(SV_OperationChain)由多个操作按执行顺序组合而成,操作之间通过参数传递形成依赖关系;相邻操作间的参数映射及依赖语义由关联类 SV_Dependency 显式描述。操作链是服务链在接口层面的表达,经语法校验后,可借助工作流执行引擎完成复杂的地理空间任务。

服务间语法与语义的互操作性是分布式系统之间协同工作的基础,也是地理信息数据在服务链中正确传递与处理的前提。语法互操作性确保两个服务系统在信息交换时采用一致的数据结构;语义互操作性确保服务系统间对于接口的能力、输入/输出参数以及可能的异常等内容具有一致的理解。各服务系统的抽象接口建模应遵循现行的 ISO 和 OGC 标准套件开发信息模型和语义模型,以确保互操作。值得注意的是,具备通用隐式知识的 LLM 在非结构化服务描述文本的语义理解方面表现出显著能力,能够支持任务意图识别及数据与服务的自动匹配,为实现语义理解提供了具有前景的技术路径。

### 3.3　地理信息服务架构风格

服务架构是以服务为核心的信息技术组件的设计与组织模式,提供了一组面向服务单元的设计原则和约束,呈现出特定的服务表示形式、交互模式和发现方法。不同架构所呈现的典型特征称为架构风格。早期 SOA 多基于远程过程调用(remote procedure call,RPC)这类以过程为中心的分布式实现方式;近年来,以表述性状态传递(representational state transfer,REST)为代表的资源导向思想为服务实现提供新的范式。OGC 针对 SOA 和 ROA 等多种架构风格展开过广泛讨论,形成的共识是不同服务架构之间并非相互替代,而是在实践中相互补充并推动演进。当前地理信息服务虽呈现向 ROA 转型的趋势,但多种架构风格仍长期并行并在实际系统中混合应用。在地理信息服务规范层面,基于同一个架构无关的抽象服务规范可以扩展出多个不同架构风格的服务规范。尽管 SOA 与 ROA 在关注对象及实现机制上存在差异,其接口映射仍存在一些共性的考虑:

1)服务接口表示:明确抽象接口在特定架构下的结构化表达,包括服务端点、操作入口以及参数、响应与异常的表示方式等。

2)负载与协议:负载是指经过编码后的请求参数和响应内容,通过特定的通信协议进行传输;映射应指出所支持的负载编码形式和通信协议,在服务参与方之间达成共识。

3)信息交换模式:描述了服务参与者之间的信息流,请求/响应和发布/订阅是两种基本的信息交换模式。

在 SOA 中,服务以可复用功能单元的形式组织,每个操作对应一个可调用方法,强调对功能与调用接口的抽象而无需关注内部实现。其接口通常通过形式化模型或服务描述语言定义,如基于统一建模语言(unified modeling language,UML)的面向服务体系架构建模语言(service

oriented architecture modeling language, SoaML)或Web服务描述语言(Web service description language, WSDL)文档,并对操作的输入输出参数进行结构化描述(图4(a))。负载方面,SOA支持多种编码(如可扩展标记语言(extensible markup language, XML)、关键字-值对(keyword-value pair, KVP))及通信协议(如超文本传输协议(hypertext transfer protocol, HTTP)、简单对象访问协议(simple object access protocol, SOAP)、gRPC、消息队列遥测传输协议(message queuing telemetry transport, MQTT)),需注意特定编码与特定协议之间的绑定关系及可能的约束,例如符合SOAP规范的XML编码消息必须包含强制性的Envelope和Body元素。在信息交换模式上,SOA传统上以同步的请求/响应模式为主,对应典型的远程过程调用;同时也支持基于消息的异步通信与发布/订阅模式,通常依赖消息中间件或事件总线实现(如基于MQTT或消息队列的主题订阅),并衍生出事件驱动的服务架构。SOA基于"发布-发现-绑定"的服务模式实现服务参与者之间的交互,服务提供者向注册中心发布服务元数据和服务描述,服务消费者通过元数据匹配在注册中心发现服务,之后绑定特定数据执行服务;各类OWS服务遵循该服务模式进行交互。

在基于REST的ROA中,服务以资源为核心,通过统一资源标识符(uniform resource identifier, URI)对地理信息资源进行统一标识,并利用HTTP方法(如GET、POST等)对资源状态进行操作。其接口由资源标识、操作方法及请求与响应的结构化表示共同定义,通常采用OpenAPI或RAML等API定义语言进行描述(图4(b))。资源表示支持多种编码格式(如GeoJSON、GML或GeoTIFF),并通过HTTP媒体类型及内容协商机制进行选择。在信息交换模式上,ROA以无状态的请求/响应交互为基础,强调每次请求均包含完成操作所需的全部信息;同时,通过事件化扩展也可支持发布/订阅模式,例如借助Webhooks、Server-Sent Events或WebSocket实现资源状态变化的推送与订阅,从而在保持REST约束的同时支持一定程度的异步与流式交互。此外,ROA提供了超媒体应用状态引擎机制,通过在响应中嵌入相关资源链接(如基于RFC 8288的Web Linking),实现客户端对其他可用资源及操作的动态发现。

**SOA下服务接口的表示示例**

**(1) 服务端点**

http://example.org/coverage_service

**(2) 基于WSDL 2.0的操作参数定义**

```
<xsd:schema targetNamespace="http://example.com/coverage_service">
    <xsd:element name="GetCoverageRequest">
     <xsd:complexType>
      <xsd:sequence>
          <xsd:element name="coverageId" type="xsd:string"/>
      </xsd:sequence>
     </xsd:complexType>
    </xsd:element>
    <xsd:element name="GetCoverageResponse">
     <xsd:complexType>
      <xsd:sequence>
          <xsd:element ref="gml:AbstractCoverage"/>
      </xsd:sequence>
     </xsd:complexType>
    </xsd:element>
</xsd:schema>
```

(a) SOA下服务接口表示示例

**ROA下服务接口的表示示例**

**(1) HTTP方法和Coverage资源URI**

GET
http://example.org/coverage_api/collections/{coverageId}/coverage

**(2) 基于OpenAPI 3.0的操作参数定义**

1. Parameter:

```
name: coverageId
in: path
required: true
schema:
  type: string
description: Identifier of
the coverage collection
```

2. Response: Coverage

```
oneOf:
    - type: string
      description: Coverage encoded as GeoTIFF
      format: binary
    - type: object
      description: Coverage encoded in CoverageJSON
      schema:
          $ref: "https://covjson.org/schema/dev/
coveragejson.json"
```

(b) ROA下服务接口表示示例

图4 SOA和ROA下的服务接口表示示例

Fig. 4 Example Representations of Service Interfaces Under SOA and ROA

### 3.4 地理信息服务元数据

地理信息服务元数据是实现服务发现的关键支撑。早期ISO 19119定义了服务的元数据模型,后将其移至ISO 19115-1元数据标准中统一维护。现行ISO 19119/19115-1[24]服务元数据模型包含3个核心类:服务基础属性(SV_ServiceIdentification)、操作元数据(SV_OperationMetadata)以及服务关联数据的元数据(MD_DataIdentification)。本文在原有ISO 19119/19115-1服务元数据模型的基础上,从接口解耦、语义增强、服务描述和服务质量4个方面进行扩展(图5)。

1)与抽象接口模型解耦

原SV_OperationMetadata聚合了参数信息模型(SV_Parameter),而参数本质上属于抽象接口的组成部分,不纳入元数据的范畴。本文将SV_Parameter移动至抽象服务接口模型中(图3),并扩展关键属性,包括数据类型(type)、默认值(default)和约束(constraints)等以完善参数定义,

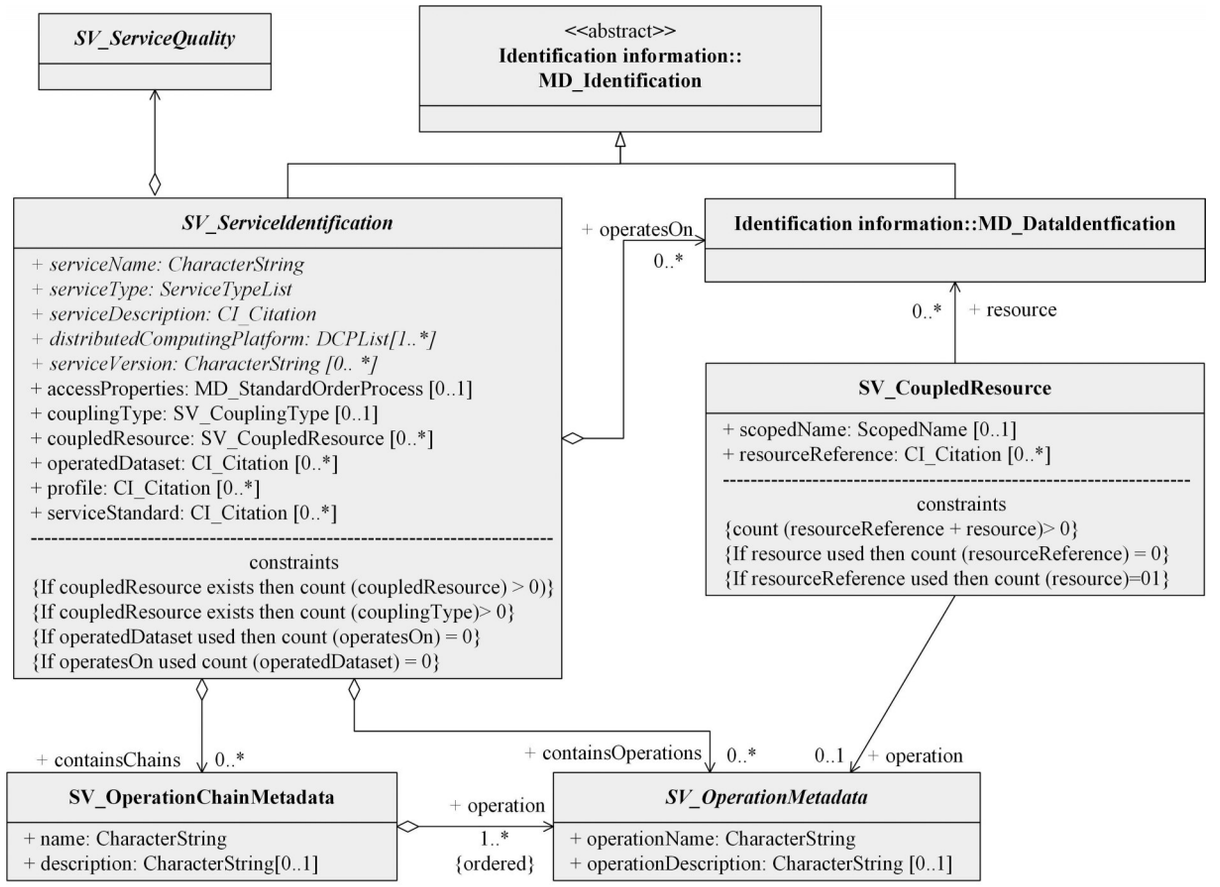



图 5　基于 ISO 19119/19115-1 修改的地理信息服务元数据模型(改动部分以斜体标示)

Fig. 5　A Refined Geographic Information Services Metadata Model Based on ISO 19119/19115-1 (Modifications Are Shown in Italics)

保证接口的可调用性。

2)语义增强

服务基础元数据进一步完善,包括新增服务名称(serviceName);采用 CodeList 结构(ServiceTypeList)统一管理服务类型(serviceType),以兼容多种分类体系;将 serviceTypeVersion 重命名为 serviceVersion,以明确其服务版本的语义。

3)服务描述

服务描述以机器可读的文档形式提供完备的服务重用的描述,是特定服务实例在具体技术环境下对接口模型与元数据模型的综合映射。服务描述文档使人或机器在不依赖额外背景知识的情况下,能够理解如何使用服务。不同架构风格和计算平台下有不同的服务描述实现,例如 SOA 下的 WSDL 和 ROA 下的 OpenAPI 文档。现行服务元数据模型中 SV_OperationMetadata 类虽包含了接口调用相关属性,例如调用名称(invocationName)和调用端点(connectPoint),但其无法涵盖所有架构下的技术实现,在技术实践中并不常用。本文移除了上述属性,并在 SV_ServiceIdentification 类新增服务描述文档的引用(serviceDescription)和其依赖的计算平台(distributedComputingPlatform),以促进服务重用。

4)服务质量

服务质量是分布式环境中服务选择的重要依据,尤其在大数据背景下,服务的可靠性、延迟与吞吐量等指标具有关键意义。目前 ISO 与 OGC 尚未针对地理信息服务质量形成专门标准。ISO 19119:2016 推荐采用通用信息领域中的服务质量与容错建模规范 QFTP(UML profile for modeling quality of service and fault tolerance characteristics and mechanisms),其定义了一组服务质量指标,包括性能、可靠性、安全性、完整性、一致性、吞吐量、延迟、效率、需求、可靠性和可用性等[25];欧盟 INSPIRE 技术指南则重点关注地理空间数据获取的 3 个服务质量度量:可用性、性能和容量[10]。构建统一的地理信息服务质量指标与评价体系,是实现跨场景服务智能选择的基础,也是服务元数据体系的重要组成部分。

### 3.5　地理信息服务实施

地理信息服务实施旨在解决如何利用多种

技术手段,将抽象的服务模型转化为可运行的服务实例。其核心在于明确目标分布式计算平台下的实现细节,包括地理信息模型的编码、通信协议绑定以及服务开发所依赖的编程语言与框架等。在地理信息标准框架下,数据与服务通常采用UML及其领域扩展进行技术中立的概念建模;服务实施则是将技术中立的UML映射到特定技术细节的过程。

1)特定编码:以UML表达的地理信息数据模型和元数据模型通过"模型-模式-编码"的逐级映射实现数据编码实施。首先由UML模型映射为形式化的模式描述(Schema),如XML Schema或JSON Schema,再由Schema约束具体的数据实例编码(如XML或JSON文档);该路径可遵循通用的UML到模式的转换规范,例如ISO 19118(编码框架)和OGC关于从UML到JSON编码规则的最佳实践等。此外,也可由既定模式规范直接约束数据编码的实现方式,例如CoverageJSON编码规范、OGC TrainingDML-AI-2&3 JSON编码和XML编码规范以及OpenAPI Schema等,其通过直接提供模式定义指导数据编码。

2)通讯协议绑定:UML中定义的抽象服务接口与具体通信协议绑定需要考虑交互端点,请求/响应的构造以及协议语义。首先将操作转换为目标协议下的交互端点,如ROA架构下的HTTP方法和资源URI;其次输入参数需映射到具体请求结构中,例如路径参数、查询参数或消息体,返回数据类型以协议约束下的编码格式作为响应;最后接口语义映射到协议语义,例如成功的响应映射到HTTP的200状态码。

3)特定编程语言与框架:在服务开发实现层面,将接口与数据模型映射为具体编程语言中的类与方法,并支持基于框架(如Spring Boot、FastAPI)实现服务发布与运行。例如,在Java技术体系中,该映射通常体现为:UML包映射为Java模块或包结构,UML接口映射为Java接口,UML操作映射为Java方法,UML属性映射为成员变量,而UML中的数据类型(如CharacterString)则映射为Java内建类型(如String)。

此外,服务链的实施是服务实施的重要内容。根据用户参与程度,服务链可划分为透明服务链、半透明服务链以及不透明服务链。透明服务链完全由用户定义并控制各个服务的执行顺序,所有服务的细节对用户是可见的;半透明服务链由工作流服务进行管理并执行,用户可感知到每个服务的执行状态,可通过地理信息工作流建模工具如ArcGIS ModelBuilder[26],GeoJModelBuilder[27]和OGE模型组合器[8]等编排和执行半透明服务链;透明服务链是将服务链发布成单个服务向用户呈现,而用户不关心各服务的执行细节。

当前,实现半透明与透明服务链的自动编排与执行,推动以机器为中心的智能地理信息服务实施,正逐渐成为实践与研究的重点方向。智能服务被认为具备用户意图理解与地理信息上下文感知能力,能够自主组合与调用各类原子服务,并通过持续更新运行上下文动态调整服务链方案,从而自动完成复杂任务。从本质上看,智能服务的实施是一个服务链动态生成、绑定、执行与优化调整的过程。早期利用本体和语义网构建为地理空间资源赋予语义描述,通过基于规则的语义匹配和推理自动构建服务链[28-30]。但这类实施方法依赖专家知识构建本体,泛化性较弱,仍属于半自动化的方法。最近基于LLM的AI智能体方法已成为智能服务实施的最具前景的实施路径。该方法依托LLM的强大的自然语言理解,能够根据目标任务和可用服务的元数据生成服务链,借助LLM的工具调用能力执行服务,并保存服务状态到上下文记忆中,通过上下文的更新与共享动态迭代服务链直至任务完成[31-33]。在智能体系统中,单个服务可被封装为智能体可调用的工具;同时,单个智能体系统亦可作为透明服务与其他智能体进行交互,从而形成多智能体服务体系。智能体与服务之间以及智能体之间的互操作通过模型上下文协议(model context protocol,MCP)[34]和A2A(Agent2Agent)[35]等事实标准实现。地理信息服务可通过机器可读的服务描述文档,如OpenAPI文档,自动转换为互操作的MCP工具[36]。此外,通过检索增强补充机器可读的服务标准和持久化的领域知识,将显著降低LLM可能出现的"幻觉"和地理信息领域知识理解不足等问题,以增强智能服务的可信性和可解释性[37-38]。

## 4 国际地理信息服务体系标准化

本节从新体系框架的视角,介绍各类服务标准的工作进展,分析GeoAI背景下服务标准面临的挑战,并为服务标准的制定提供方法指导。

### 4.1 国际地理信息服务标准化挑战

参照§3服务体系,可从4个层面来介绍现有国

际地理信息服务标准进展:首先是以ISO 19119为主的基础服务标准,在顶层定义地理信息服务体系内容、服务基本概念、分类体系与抽象接口模型,为后续各类服务标准与服务实例的设计提供统一基础;其次是平台中立的服务标准,为特定服务类型的服务接口定义技术无关的语法与语义要求;再次是平台特定的服务标准,规范了抽象服务接口在特定服务架构与技术平台下的设计与实现,如OWS与OGC APIs;最后是以ISO 19115-1为主的服务元数据标准,用于对服务实例进行规范化描述,以支持服务的发现与复用。

在基础服务标准ISO 19119和元数据标准ISO 19115-1的指导下,ISO/OGC已开发出一系列平台中立/特定的服务标准。本文采用基于资源的服务分类体系对这些服务标准进行归类,并梳理了各类服务标准的发展历程,如图6所示。在标准化实践中,部分服务标准同时包含平台中立要素(如基于UML的抽象服务接口)以及平台特定要素(如特定通信协议的绑定与编码),因此图6未对二者进行严格区分。从整体来看,服务标准化的发展历程呈现出以下特征:(1)新的信息模型挑战:一方面服务内容不局限于传统的影像和矢量等信息资源,例如三维模型数据等;另一方面,新的时空大数据关联信息模型在继续发展,例如面向分析就绪的时空数据立方体服务OGC API-GeoDataCube;(2)新的服务架构挑战:从传统基于SOA架构的服务标准系列(W*S系列),到以资源为中心的服务标准系列(OGC APIs系列);(3)新的服务对象挑战:原有的服务缺乏对最新技术趋势的反映,忽略了机器智能体。GeoAI服务内容与接口的标准化正在成为近期发展的重点。

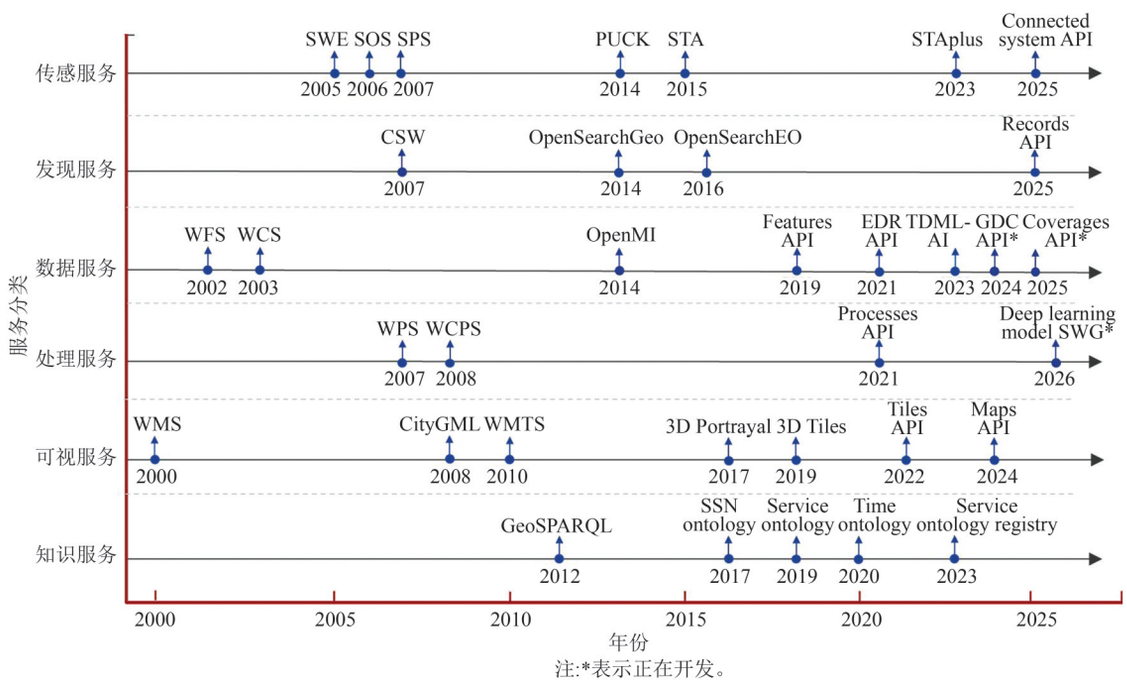



图6　国际地理信息服务标准化进展

Fig. 6　Progress in the International Standardization of Geographic Information Services

目前,传统地理信息服务技术标准已较为成熟,而面向AI的服务标准尚有待进一步发展。(1)在服务类别方面,GeoAI扩展了传统地理信息服务的功能内涵,并已在数据共享和处理服务上扩展出了训练样本共享和模型描述标准化工作。然而,更深入细化的分类尚需考虑模型训练与推理、可信溯源、服务接口、算力消耗和隐私伦理等内容。通用AI标准化领域已形成一系列基础规范,如ISO/IEC JTC 1/SC 42制定的ISO/IEC 42001 AI管理系统、ISO/IEC 5338 AI系统生命周期和ISO/IEC TS 25058深度学习模型质量评估等。未来GeoAI服务标准需要考虑与通用AI标准充分协调,并重点关注地理信息专有需求,如地理样本的空间异质性和模型的时空泛化性等。(2)在服务接口和服务元数据方面,传统服务标准可进一步扩展,以适应地理空间智能体对服务自动发现、语义理解和自主调用的需求。通用智能体领域已形成MCP和Skill等事实性技术规范,以增强外部服务与智能体之间的互操作,但如何统一表示非文本的地理空间数据和具有时

空约束的服务尚未达成共识。目前看来,服务接口与元数据的结构化描述,有助于清晰描述服务用途和使用方法,降低AI产生参数幻觉的风险。(3)在服务架构与实施方面,REST可以进一步支持智能体服务。例如A2A协议可以理解为基于REST作为底层传输载体,在REST基础上叠加智能体服务定义,包括智能体描述、技能集合、上下文和外部知识等。正如SOA架构下可以有KVP-RPC(例如WMS)和SOAP-RPC(例如SOAP Web Service),REST也可以不局限于OGC APIs(例如Maps API),进而走向时空智能体服务,通过A2A等协议为智能体发现和任务协作提供基础支持,其中与地理信息语义及空间任务约束的协调仍有待进一步研究。

2024年,GeoAI领域首个国际标准OGC TrainingDML-AI规范了GeoAI训练样本的信息表达与编码,并随后转化为ISO 19178系列标准;2026年OGC成立Deep Learning Model标准工作组,旨在规范GeoAI模型描述和GeoAI处理服务能力;ISO/TC 211亦启动ISO/TR 19182,探索如何在各类服务标准中融入GeoAI方法,并为GeoAI服务的标准化提供指导;当前ISO围绕本体已发布若干标准,而随着基于LLM和智能体的知识服务技术逐渐成熟,如何从这些技术中标准化地理信息的部分正在成为焦点。

### 4.2 国际地理信息服务标准制定

国际地理信息服务标准的制定以基础服务标准作为基线。现行基础标准ISO 19119:2016覆盖了从技术中立到技术依赖的地理信息服务规范体系核心内容,在长期的服务标准化中发挥了重要的指导作用。然而,该标准体量较大,涵盖了技术中立和技术相关的内容(如SOA和SoaML等),导致使用者难以高效提取关键内容,同时也增加了标准维护与技术演进协同更新的复杂性。因此,有必要对其进行结构性重构,将相对稳定的抽象服务模型与持续演进的架构映射及实施技术解耦,从而构建多层次、可持续演进的基础服务标准体系。最近ISO/TC 211决定将ISO 19119划分为多部分标准,分离出稳定的技术无关的内容作为ISO 19119-1基础与架构单独维护。该标准面向顶层设计,定义国际地理信息服务体系,规范服务相关基本概念、抽象信息模型及服务分类体系,提供地理信息服务标准制定的统一指导方法。该部分保持技术中立,具有较高稳定性,并作为其他平台中立和平台特定的服务规范提供基础。未来可进一步扩展技术相关的部分标准,如ISO 19119-2 Web服务指导基于SOA的地理信息服务开发、ISO 19119-3以资源为中心的API指导基于ROA的API开发。

标准开发者可遵循ISO 19119-1基线,从服务分类、服务接口、服务架构、服务实施和服务元数据5个模块出发,按需制定机器可读的平台中立标准规范和平台特定标准规范。本文结合覆盖数据服务作为示例介绍服务标准化的主要流程(图7)如下:

1)服务分类确定:确定目标服务所属的分类体系与类别,明确其功能范畴及所提供的地理信息资源或能力。以覆盖数据服务为例,其归属于以资源为中心的分类体系下的数据服务,主要提供覆盖数据的发现与访问功能。

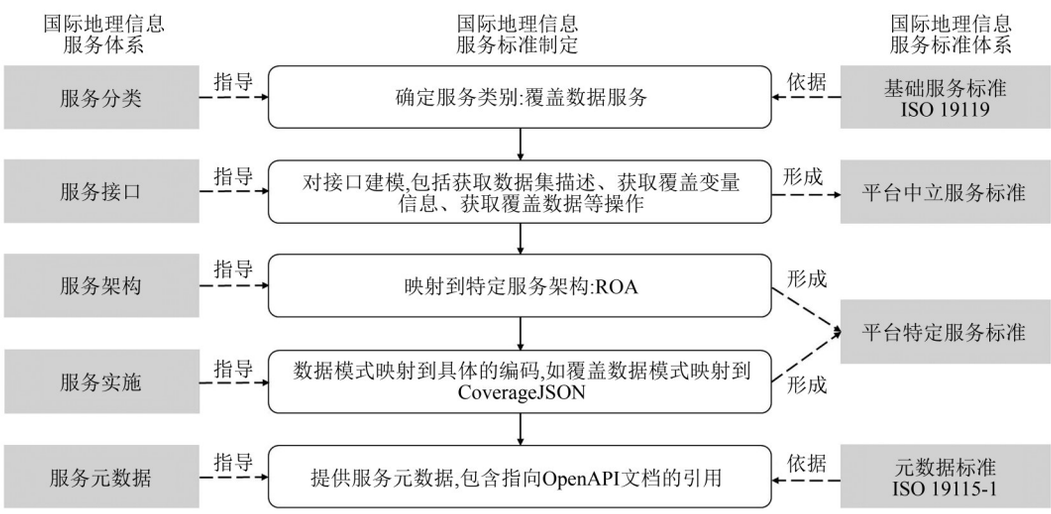



图7 国际地理信息服务标准制定流程示意——以覆盖数据服务为例(流程内容为部分示例)

Fig. 7 Schematic of the Standards Development Process for Geographic Information Services—Taking Coverage Data Services as an Example (the Process Shown is a Partial Illustration)

2)抽象服务接口定义:遵循既有 ISO/OGC 标准套件,为服务功能定义语法与语义互操作的抽象接口,明确操作集合及其行为约束。对每个操作定义前置条件、后置条件、输入/输出参数及异常语义,可通过有向无环图对服务链进行建模并验证参数依赖关系的一致性。以覆盖数据服务为例,其操作集合包括获取覆盖数据集描述、变量信息及覆盖数据本身等,并基于 UML 进行建模,同时复用 ISO 19123-1:2023 等既有标准,形成平台中立的覆盖数据服务标准。

3)特定架构映射:明确所采用的架构风格,以及抽象接口在该架构下的接口表示方式、消息交换模式、通信协议、负载格式及服务发现机制。以覆盖数据服务为例,将抽象接口映射至 ROA 架构,采用基于 HTTP 协议的请求/响应信息交换模式,以 URI 标识地理空间资源,请求与响应通过 OpenAPI Schema 描述,并结合 OpenAPI 文档与 Web Linking 机制实现服务发现。

4)服务实施技术映射:定义抽象接口模型或架构特定模型向具体技术实现的映射方法,包括接口、操作、参数、行为约束、服务链及服务描述等要素向具体编码格式与技术实现的转换规则,从而指导服务实例的生成。以覆盖数据服务为例,在实施层将覆盖数据模型映射为 CoverageJSON 编码,将请求与响应数据模式映射为相应的数据结构。特定架构和服务实施技术的映射将指导形成平台特定的覆盖数据服务标准(如 OGC API-Coverages)。

5)服务元数据与描述:服务实例应基于统一的元数据标准进行完整描述,明确元数据的表达形式与获取方式,并与服务发现机制协同设计,以促进服务元数据及接口描述的获取。以覆盖数据服务为例,依据 ISO 19115-1 提供服务元数据信息,其中包含对 OpenAPI 服务描述的引用。

所制定的服务标准规范应施加机器可读性约束,以提升服务与数据的机器可解释性,进而降低 AI 系统的幻觉风险。依据 OGC 提供的机器可读标准发布指南[39],标准中的各类定义应采用机器可读的模式语言(如 UML、JSON Schema 和 XML Schema)以及规则语言(如 SHACL 和 Schematron)进行表达,并配套提供自动化验证工具与测试样例。标准及其标准化单元(即构建块)应由统一的注册体系进行管理,维护其元数据、依赖关系声明与溯源信息,并为其分配可解析的 URI,以指向相应的机器可读内容或人类可读文档。

## 5　结　语

针对全球地理信息服务向轻量化、智能化和技术多样化发展的趋势,本文对适应于时空信息基础设施的国际地理信息服务体系设计与标准化展开研究。首先提出了地理信息服务体系的总体框架,梳理了包括服务分类、服务接口、服务架构、服务实施和服务元数据五大核心内容。然后在此基础上进一步阐释国际地理信息服务体系的内涵,包括:兼容 GeoAI 的资源导向的服务分类方法,语法与语义互操作的抽象地理信息服务接口建模,抽象接口模型在特定服务架构中的表达机制,支撑智能服务发现的服务元数据模型更新,以及基于 UML 映射的服务实施方法与服务链和智能服务实施。最后,介绍多层次的国际地理信息标准体系和标准化现状与挑战,提供机器可读服务标准的创建指南,促进标准体系的可持续演进。

目前 ISO/TC 211 正在开展 ISO 19119-1: Fundamentals and Architectures 的制定,以规范地理信息服务的基础概念、分类体系和服务标准体系的顶层设计。本文的研究为构建可持续的国际地理信息服务体系与标准化提供了基础,为 ISO 19119-1 修订提供主要思路,并为其他部分标准及服务实例的创建提供方法论指导。

## 参　考　文　献

[1] 乐鹏, 王凯旋, 吴浩儒, 等. 地理信息服务研究进展与技术实践[J]. 科学通报, 2025, 70(30): 5163-5179.
YUE Peng, WANG Kaixuan, WU Haoru, et al. Recent Progress and Technical Practices of GIServices[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2025, 70(30): 5163-5179.

[2] GEO. GEO Strategic Plan 2016—2025: Implementing GEOSS[R/OL]. 2015-11-12. https://old.earthobservations.org/documents/GEO_Strategic_Plan_2016_2025_Implementing_GEOSS_Reference_Document.pdf.

[3] UN-GGIM. United Nations Integrated Geospatial Information Framework (UN-IGIF): A Strategic Guide to Develop and Strengthen National Geospatial Information Management–Part 1: Overarching Strategy (2nd ed.)[R/OL]. 2023-02-07. https://ggim.un.org/UN-IGIF/part1.cshtml.

[4] FGDC. GeoPlatform.gov[EB/OL]. [2026-05-23].

https://www.geoplatform.gov/.

[5] VILLA M, DI MATTEO G, LUCCHI R, et al. INSPIRE Network Services Soap Framework[R/OL]. 2008-12-17. https://docslib.org/doc/7143056/inspire-network-services-soap-framework-clarifying-standard-versions-and-supplying-specific-references-for-all-the-necessary-specifications.

[6] 李志刚, 蒋捷, 翟永, 等. 面向分布式服务聚合的"天地图"总体技术架构[J]. 测绘地理信息, 2012, 37(5): 13-15.
LI Zhigang, JIANG Jie, ZHAI Yong, et al. "TIANDITU" Technical Architecture for Supporting Distributed Service Aggregation[J]. *Journal of Geomatics*, 2012, 37(5): 13-15.

[7] GORELICK N, HANCHER M, DIXON M, et al. Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 18-27.

[8] 龚健雅, 乐鹏, 向隆刚, 等. 开放地球引擎OGE设计与研制[J]. 测绘学报, 2025, 54(4): 587-602.
GONG Jianya, YUE Peng, XIANG Longgang, et al. The Design and Implementation of the Open Geospatial Engine (OGE)[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2025, 54(4): 587-602.

[9] BROWN C F, KAZMIERSKI M R, PASQUARELLA V J, et al. AlphaEarth Foundations: An Embedding Field Model for Accurate and Efficient Global Mapping from Sparse Label Data[PP/OL]. V2. arXiv (2025-09-08)[2026-04-17]. https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.22291.

[10] INSPIRE. INSPIRE Technical Guidance Documents[EB/OL]. (2025-01-31)[2026-04-16]. https://github.com/INSPIRE-MIF/technical-guidelines.

[11] OGC. OGC Reference Model[R/OL]. 2011-12-19. https://docs.ogc.org/orm/03-040/03-040.pdf.

[12] ISO 19119:2016 Geographic Information—Services[S/OL]. https://www.iso.org/standard/59221.html.

[13] ALI M E, CHEEMA M A, HASHEM T, et al. Enabling Spatial Digital Twins: Technologies, Challenges, and Future Research Directions[J]. *PFG—Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 2024, 92(6): 761-778.

[14] KOTSEV A, MINGHINI M, TOMAS R, et al. From Spatial Data Infrastructures to Data Spaces—A Technological Perspective on the Evolution of European SDIs[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(3): 176.

[15] UN-GGIM. Future Geospatial Information Ecosystem: From SDI to SoS and on to the Geoverse[R/OL]. 2022-07-06. https://ggim.un.org/meetings/GGIM-committee/12th-Session/side_events/Future%20Geospatial%20Information%20Ecosystem.pdf.

[16] 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[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1616-1631.
YUE Peng, LIU Ruixiang, SHANGGUAN Boyi, et al. GeoAI Training Data: Model, Quality, and Services[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1616-1631.

[17] Open Geospatial Consortium. OGC Training Data Markup Language for Artificial Intelligence (Training-DML-AI) Part 1: Conceptual Model Standard[S/OL]. http://www.opengis.net/doc/is/trainingdml-ai-1/1.0,2023.

[18] YUE P, SHANGGUAN B Y, HU L, et al. Towards a Training Data Model for Artificial Intelligence in Earth Observation[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2022, 36(11): 2113-2137.

[19] YUE P, TENG B X, WU H R, et al. Towards a Representation Framework for EODeep Learning Models inSDI[J]. *Transactions in GIS*, 2026, 30: e70216.

[20] 王艳东, 何奕霖, 杨建思, 等. 利用形式概念分析的空间信息服务分类体系融合方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(1): 100-105.
WANG Yandong, HE Yilin, YANG Jiansi, et al. Integration Method of Geospatial Services Taxonomies Based on Formal Concept Analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(1): 100-105.

[21] LI H, WANG Y D, BIAN L, et al. Identifying Geospatial Services Across Heterogeneous Taxonomies[J]. *Geocarto International*, 2016, 31(10): 1058-1077.

[22] 詹勤, 李德仁, 眭海刚, 等. 一种遥感信息服务分类本体构建方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(3): 343-346.
ZHAN Qin, LI Deren, SUI Haigang, et al. A Method for Building Remote Sensing Information Services Classification Ontology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(3): 343-346.

[23] OGC. OGC RAINBOW: About the OGC Definitions Service[EB/OL]. (2026-02-26)[2026-04-16]. https://ogcincubator.github.io/rainbow-docs/about.html.

[24] ISO 19115-1:2014 Geographic Information—Metadata—Part 1: Fundamentals[S/OL]. https://webstore.

ansi.org/preview-pages/INCITS/preview_INCITS+ISO+19115-1+2014+(R2019).pdf.

[25] Object Management Group. UML™ Profile for Modeling Quality of Service and Fault Tolerance Characteristics and Mechanisms Specification[EB/OL]. (2008-04-05)[2026-05-10]. https://www.omg.org/spec/QFTP/1.1/PDF.

[26] ALLEN D W. Getting to Know ArcGIS ModelBuilder[M]. Redlands: Esri Press, 2011.

[27] ZHANG M D, BU X Q, YUE P. GeoJModelBuilder: An Open Source Geoprocessing Workflow Tool[J]. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 2017, 2(1): 8.

[28] 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[J]. *GeoInformatica*, 2011, 15(2): 273-303.

[29] MÜLLER M. Hierarchical Profiling of Geoprocessing Services[J]. *Computers & Geosciences*, 2015, 82: 68-77.

[30] YUE P, GUO X, ZHANG M D, et al. Linked Data and SDI: The Case on Web Geoprocessing Workflows[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 114: 245-257.

[31] LI Z L, NING H. Autonomous GIS: The Next-Generation AI-Powered GIS[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2023, 16(2): 4668-4686.

[32] LEE C, PARAMANAYAKAM V, KARATZAS A, et al. Multi-agent Geospatial Copilots for Remote Sensing Workflows[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Brisbane, Australia, 2025.

[33] LUO Q Q, LIN Q M, XU L C, et al. GeoJSON Agents: A Multi-agent LLM Architecture for Geospatial Analysis—Function Calling vs. Code Generation[J]. *Big Earth Data*, 2026. https://doi.org/10.1080/20964471.2026.2615511.

[34] Model Context Protocol. Model Context Protocol Specification[EB/OL]. (2025-11-25)[2026-04-19]. https://modelcontextprotocol.io/specification/2025-11-25.

[35] A2A Protocol. Agent2Agent (A2A) Protocol Specification[EB/OL]. (2026-03-12)[2026-04-19]. https://a2a-protocol.org/latest/specification.

[36] MASTOURI M, KSONTINI E, BARRAK A, et al. From REST to MCP: An Empirical Study of API Wrapping and Automated Server Generation for LLM Agents[PP/OL]. V4. arXiv (2026-04-06)[2026-04-19]. https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.16044.

[37] SANTHANAVANICH T, COORS V. OGC-AI: A Retrieval-Augmented Large Language Model Interface for Open Geospatial Consortium Web Services[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2025, XLVIII-4/W16-2025: 157-163.

[38] LI H, YUE P, WU H R, et al. A Question-Answering Framework for Geospatial Data Retrieval Enhanced by a Knowledge Graph and Large Language Models[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2025, 18(1): 2510566.

[39] SIMONIS I, ATKINSON R, VILLAR A, et al. The Machine-Interpretable Standards Ecosystem: Standards, Profiles, Building Blocks, and Registers: An Architectural Framework for a Composable, Discoverable, and AI-Ready Standards Infrastructure (OGC Document: 26-021)[R/OL]. 2026-04-16. https://doi.org/10.62973/26-021.