

金子鑫,王琰,窦小楠,等. 自然资源时空数据管理技术研究进展[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(2): 224-240. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.017

JIN Zixin, WANG Yan, DOU Xiaonan, et al. Research progress on spatiotemporal data management technologies for natural resources [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(2): 224-240. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.017

自然资源时空数据管理技术研究进展

金子鑫¹, 王琰^{2,3}, 窦小楠¹, 孟洁¹, 岳建伟^{2,3}, 雷添杰⁴

(1. 河南省地理信息院, 河南 郑州 450003; 2. 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875;
3. 遥感与数字地球全国重点实验室, 北京 100875; 4. 中国农业科学院农业环境与
可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要: 【目的】自然资源时空数据管理技术一直是自然资源领域的研究热点。为了理清自然资源时空数据管理技术的研究现状和发展趋势, 【方法】使用结构关系法, 围绕自然资源数据库构建分析框架, 以各分体结构技术为切入点, 包括自然资源数据建模方法、时空索引技术和数据更新方法, 详细梳理了自然资源时空数据管理关键技术与方法的内容与关系, 根据其整体与局部的关联, 对自然资源时空数据管理技术在数据应用、数据建模、数据检索和数据更新等未来发展趋势进行了分析。【结果】目前的自然资源时空数据管理技术在静态的实体表达、结构化的时空索引、同类型的数据更新和二维数据的存储共享的研究已较为成熟, 能够满足单一领域或某一模式下的数据数字化管理, 但在多源数据融合、多模态模型建模和数据动态索引更新仍存在技术瓶颈, 【结论】面向自动化、智能化的管理目标构建多模态、动态、精细化的数据管理技术将是下一阶段的研究重点。

关键词: 自然资源; 自然资源实体; 时空数据; 数据管理; 数据库; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.017

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TP11

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)02-0224-17



Research progress on spatiotemporal data management technologies for natural resources

JIN Zixin¹, WANG Yan^{2,3}, DOU Xiaonan¹, MENG Jie¹, YUE Jianwei^{2,3}, LEI Tianjie⁴

(1. Henan Institute of Geographic Information, Zhengzhou 450003, Henan, China; 2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. State Key Laboratory of Remote Sensing and Digital Earth, Beijing 100875, China; 4. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract [Objective] Spatiotemporal data management technologies for natural resources have long been a research focus in the field of natural resources. The aim is to clarify the current research status and identify future development trends in this area. [Methods] A structural relational approach is employed to construct an analytical framework centered on natural resource

收稿日期: 2025-06-15; 修回日期: 2025-11-17; 录用日期: 2025-11-18; 网络出版日期: 2025-11-24

基金项目: 河南省自然资源厅 2023 年度河南省自然资源科研项目(2023-382-7); 国家重点研发计划项目(2022YFF1303405)

作者简介: 金子鑫(1982—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事地理信息系统及时空数据库的研究与应用研究。E-mail: 59646501@qq.com

通信作者: 岳建伟(1975—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事空间信息技术应用研究。E-mail: yuejianwei@bnu.edu.cn

窦小楠(1982—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事测绘地理信息及遥感技术的应用研究。E-mail: 24938672@qq.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

databases. Taking various component technologies as entry points—including natural resource data modeling method, spatiotemporal indexing techniques, and data update method—the content and relationships of key technologies and method for spatiotemporal data management of natural resources are systematically reviewed. Based on the connections between the whole and its parts, future development trends of spatiotemporal data management technologies for natural resources in data application, data modeling, data retrieval, and data updating are analyzed. [Results] At present, technologies for spatiotemporal data management in natural resources are relatively mature in areas such as static entity representation, structured spatiotemporal indexing, homogeneous data updating, and 2 D data storage and sharing. These technologies can effectively support digital data management within a single domain or under a specific modality. However, there are still technical bottlenecks in multi-source data fusion, multimodal model construction, and dynamic data indexing and updating. [Conclusion] To achieve the goals of automated and intelligent data management, future research should focus on the development of multimodal, dynamic, and refined data management technologies.

Keywords: natural resources; natural resource entities; spatiotemporal data; data management; database; influencing factors

0 引言

随着自然资源管理对精细化、动态化和智能化要求的不断提升,自然资源时空数据正发挥着越来越重要的作用。自然资源时空数据包含空间、时间、关联及演化规律等多维度信息,具有鲜明的空间性、关联性和时序性特征,不仅能够精准、动态地反映自然资源对象的实时状态,还能够揭示自然资源要素之间的相互关系和变化趋势^[1]。然而,由于自然资源业务管理范围广、业务种类多、数据来源广泛、数据时效性强等特点,仍然存在自然资源数据应用范围较窄、数据模型不完整、数据检索效果不佳和数据更新缓慢等不利于自然信息化发展等问题^[2-3]。具体来说,一是自然资源管理业务涉及国土空间、矿产、水资源、森林、湿地等多个领域,业务种类繁多、系统架构复杂,导致数据类型多样,集成难度高;二是由于历史原因,不同部门独立建设信息系统,造成大量数据重复、缺乏共享机制;三是当前自然资源数据模型大多仍停留在二维或静态层面,缺乏对数据时序演变和语义信息的有效刻画,限制了时空智能分析的深度与广度;四是数据检索方式落后,多依赖人工分类与关键词匹配,难以满足复杂业务场景下的快速查询与精确定位需求。由于从某种程度上来说,数据的存储管理形式决定了数据的利用方式和利用效率,因此,如何对自然资源数据进行有效的融合和管理一直是自然资源信息化建设过程中的重要研究内容。

时空数据库技术通过整合多源异构的自然资源时空数据,建立覆盖空间分布、时间演变和语义关联的多维数据模型,不仅能够实现资源状态的动态感知和精准表达,更能为资源规划、生态评估和灾害预警等关键业务提供智能化决策支持。近年来,随着遥感监

测、物联网、大数据和人工智能等技术的迅猛发展,时空数据库在数据获取、存储计算、分析挖掘等方面取得了显著进展。一方面,遥感与传感器技术的发展大大提高了数据获取的空间精度与时间频率,实现了从静态记录向动态监测的跃升;另一方面,云计算与分布式存储架构的应用,使得超大规模时空数据的高效存储与调度成为可能;此外,机器学习与深度学习算法的引入,使得海量自然资源数据的挖掘分析能力大幅提升,推动了自然资源管理从静态描述向动态表达、从单一专题向综合分析的转变^[4]。在此过程中,实体表达建模、时空演变建模、空间网格编码和语义关联网络等关键建模方法不断丰富,为复杂自然资源实体的精准表达与全生命周期管理奠定了基础。同时,面向大规模、高频次的数据访问需求,时空索引结构也经历了从树结构向图结构的演进,逐步引入学习型索引等新兴技术,以提升查询效率与扩展性。在数据更新方面,从以往低频、人工为主的全量更新模式,向融合遥感变化检测、智能识别与级联同步的高效更新机制转变,极大地增强了数据的现势性与响应性。

本文围绕自然资源时空数据的管理技术,梳理了自然资源时空数据库在不同发展阶段的技术演进路径,分析了传统数据库、时空数据库到三维立体数据库的发展特点;总结了自然资源时空数据管理中的关键技术方法,包括数据建模、时空索引、数据更新与数据库管理等核心环节;并结合当前人工智能、大数据与分布式计算等新兴技术,探讨了未来自然资源时空数据管理在数据应用、数据建模、数据检索、数据更新等方面关键技术挑战与发展趋势。

1 自然资源时空数据库的发展

自然资源时空数据库的发展经历了从传统数据库

表1 各阶段自然资源时空数据库对比

Table 1 Comparison of spatiotemporal databases for natural resources at different stages

发展阶段	技术架构	数据组织方式	应用能力
传统数据库	以关系型数据库为核心, 存储静态信息	以专题要素为单位, 单一表格化存储	支持基本的数据存储和检索查询, 缺乏跨部门整合能力
时空数据库	关系型、面向对象、对象-关系型数据库, 引入时空建模	通过时空数据模型组织空间、属性、时间和语义关系	支持时序分析、预测分析、时空叠加等动态推理, 扩展性增强
三维立体时空数据库	关系型、非关系型、文件型数据库, 分级、分片存储	多态组织方式, 支持二维、三维及多库关联, 形成一体化体系	实现时间、空间、语义、管理、服务等多维一体化应用, 支持跨层级协同与共享

到时空数据库, 再到三维立体时空数据库的逐步演进过程。这一发展反映了自然资源管理由静态存储到动态监测、再到多维一体化表达的转变。不同阶段的数据库在技术架构、数据组织方式和应用能力等方面各具特点, 如表1所列。

1.1 传统数据库

在传统数据库阶段, 自然资源的数据库管理旨在从纸质化、分散化向数字化过渡。随着数据库和GIS技术的广泛应用与普及, 基于数据库架构的自然资源管理系统逐渐成为实现自然资源数字化治理的关键技术手段。我国自20世纪70年代中后期开始系统推进资源数据库的研发建设, 早期的自然资源数据库以关系型数据库为基础, 主要存储地名、高程、地貌、河流、道路、土地利用等自然资源要素的特性及其分布信息^[5]。这一时期的自然资源数据库旨在完成自然资源数据的存储和信息的检索查询^[6]。但受限于数据库技术和部门规划, 该阶段的自然资源数据库建设存在显著技术瓶颈: 从数据库结构上, 关系型数据库对于具有多维属性的空间数据表达能力上有所欠缺, 没有综合的数据库管理系统, 需要针对具体应用进行具体设计; 从业务管理上, 各类自然资源的管理分属不同部门, 各专题数据库仅服务于部门专属业务需求, 在数据编码体系、空间参考基准、元数据标准等缺乏统一的数据库架构设计规范, 严重制约了自然资源数据的整合分析与综合管理。

1.2 时空数据库

自然资源时空数据库不仅能反映自然资源实体的存在状态, 而且可以表达其发展变化的过程和趋势, 从动态范围全面管理自然资源信息^[7]。时空数据库主要分为关系型数据库、面向对象数据库和对象-关系数据库, 其都具备空间分布表达、属性更新变化和动态时空变化的时空建模功能, 区别在于数据的组织模式不同^[8]。构建时空数据库的关键是时空数据模型的建立, 即如何通过模型结构有效组织自然资源数据的空间、属性、语义关系和时间关系^[9]。与传统数据库相比, 时空数据库的最大进步在于增强了时空

分析与推理能力, 包括时空数据的分类管理、变化的统计分析、时间量测、时空叠加、时序分析、预测分析等^[10]。自然资源时空数据库在结构上打破了传统数据库的范式, 不仅引入了时间序列的概念, 增加了数据库的时空分析能力, 还借助多种时空数据模型, 实现了更强的扩展性, 支持用户依据具体业务需求灵活定制数据库结构与功能^[11]。但由于各模型对实体的抽象或对关系的组织形式不同, 造成数据管理上的不一致, 因而在数据检索、数据更新上面临困境, 自然资源的二三维一体化和时空一体化管理仍难以实现。

1.3 三维立体时空数据库

自然资源部成立以后, 《自然资源三维立体时空数据库建设总体方案》(下称“《总体方案》”)中提出了自然资源三维立体时空数据库的概念。基于山水林田湖草是一个生命共同体的概念, 自然资源三维立体时空数据库通过统筹整合数据库内容, 面向自然资源各类调查监测数据立体化统一管理, 构建融合多源异构数据的自然资源三维时空数据模型, 推动土地、森林、湿地、水体等自然资源在时间、空间、语义、管理及服务等方面的协同表达与综合应用, 其基本架构如图1所示。基于《总体方案》的设计规划, 赵秋菊^[12]采用“数据与应用分离”的原则, 按照数据上下游关系, 建设包括汇集库、资源库、服务库在内的一体化三大逻辑数据库, 三者协同有机构成了自然资源数据的应用、沉淀、更新的自我循环体系。刘晶东等^[13]通过空间数据叠加分割及属性数据多库挂接形成一对多的数据组织形式, 将基础地理信息数据及自然资源专题数据整合为多态自然资源数据库。未来将逐步实现纵向贯通, 在主库与地方数据库间建立服务调用机制, 支持多级数据协同应用。

2 自然资源时空数据管理关键技术

自然资源时空数据涉及多要素、多属性和多关系, 存在表达复杂性高、业务逻辑关联不足和跨部门应用受限等问题。为解决这一挑战, 需要统一数据

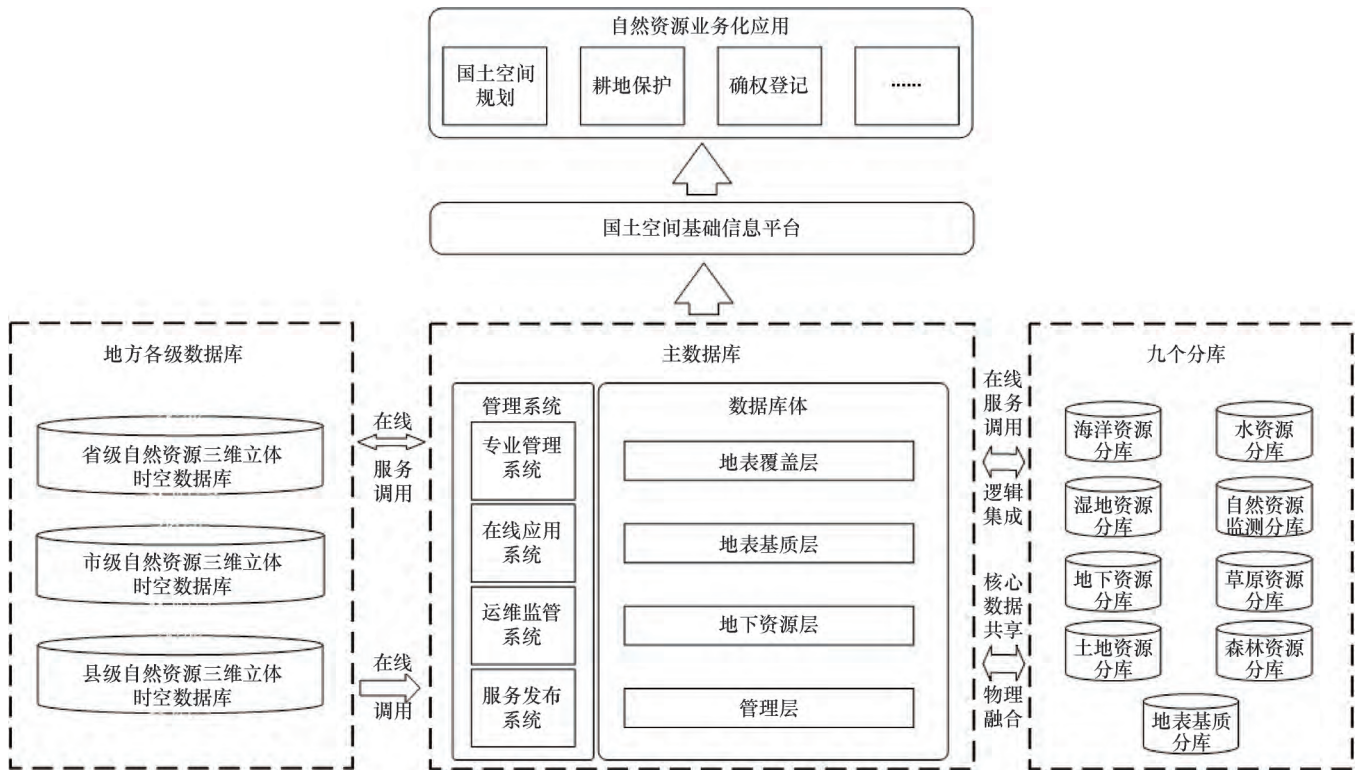


图1 自然资源三维立体时空数据库架构

Fig.1 Architecture of 3D spatiotemporal database for natural resources

内容与模型设计, 开发实体多维属性表达与语义关联建模技术, 实现数据实体间的空间关联; 同时, 需要基于实体语义规则构建业务逻辑关系网络, 解决跨部门数据共享与业务协同难题。在此背景下, 数据库的模型建立、索引方式和更新机制是实现自然资源数据全要素统一管理的关键。

2.1 自然资源数据建模技术

自然资源时空数据模型以自然资源实体为对象, 通过实体表达模型、时空演变模型、地球空间网格模型以及业务关系模型, 精准呈现自然资源实体在时序、空间、数量、质量等方面的多维关系, 综合表达自然资源的要素特征。

2.1.1 实体表达模型

自然资源实体在真实世界中具有完整的特征结构, 其实体表达模型基于三维重建等建模方法对实体对象的空间特性进行计算机数字化抽象表达, 其基本框架如图2所示。从实体表达的演变角度, 自然资源实体表达模型经历了从自然语言描述, 到地图表达, 再到实体全局精细化表达的变化^[14]。

自然语言表达通过多角度、全方位的定性描述来构建自然资源对象或现象^[15], 虽然能够在一定程度上表达自然资源实体的属性特征, 但缺乏形式化建模

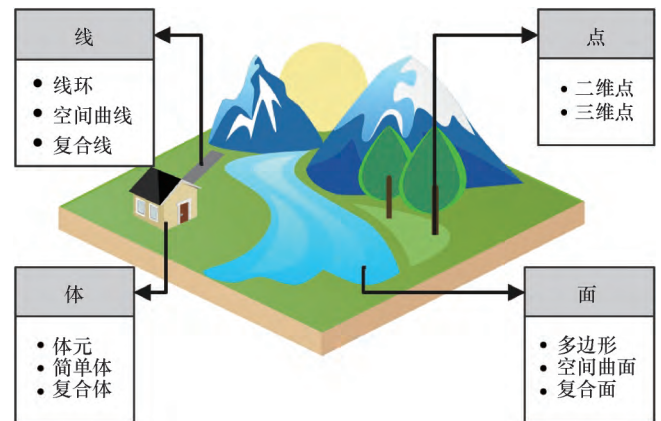


图2 实体表达模型基本框架

Fig.2 Basic framework of entity expression model

框架, 导致模型构建呈现任意独立结构; 缺失空间信息的可视化表达, 难以支撑复杂自然资源多尺度特征的具象化, 仅适合作为关系表述的补充。

为了弥补自然资源实体的数字可视化表达, 基于矢量数据的地图表达以点、线、面等要素实现实体的图层化表达^[16]。大量学者通过探讨地图符号的特征开展实体空间信息的可视化表达^[17], 还有学者从面向对象^[18]、分层约束^[19]、分析与制图一体化^[20]等角度开展研究。这些方法在客观上反映了自然资源实体

的部分特征信息,但其面向地图而非客观实体及其关系的局限性,限制了其在实体语义、属性深度上的表达,且其基于简单的几何对象对实体的表达,难以支撑复杂自然对象、连续自然对象与自然演变过程的表达^[21]。

在数字孪生城市、实景三维等概念的提出后,自然资源实体的实体表达模型逐渐向三维、整体、精细化方向发展^[22]。从模型构建上,现有研究在空间组织与几何多态特征上实现了多源数据融合与多形态表达^[23],在三维可视化方面,借助虚拟现实建模语言和 Lidar 点云等技术,实体重建能力得到大幅提升^[24]。同时,二三维一体化技术的探索拓展了自然资源实体在几何、属性与语义层面的综合表达^[25]。然而,总体来看,该阶段研究更多集中于几何层面的实体构建,如何进一步增强语义表达能力、实现动态演变建模与多尺度统一,仍是未来发展的关键突破方向。

虽然实体表达模型面向自然资源实体对象进行构建,但是建模的单元体缺少实体之间的关联关系和时间动态变化信息,难以覆盖自然资源实体的全生命周期,不便于实体的管理。由于实体对象的差异性和复杂性,实体细粒化的表达也面临巨大的挑战。

2.1.2 时空演变模型

时空演变模型通过扩展实体的时空属性,建立几何形态、空间拓扑与属性特征的时间演变机制,支持多态时变建模,实现对自然资源产生、演化与消亡的全周期动态管理,并为状态变化与事件分析提供基础。在时空演变模型中,实体的时间状态和空间状态被统一表达,基于实体的唯一标识编码,对自然实体的时间空间动态演变进行建模。时空演变模型的基本公式表达为

$$M = UID(A), \vec{R}_t(A), \vec{R}_s(A), T(t_1, t_2), P \dots \quad (1)$$

式中,UID 为自然资源实体的标识编码; \vec{R}_t 和 \vec{R}_s 分别为实体间的时间关系和空间关系; $T(t_1, t_2)$ 为

模型作用的时间域; P 为实体的其他属性集合。

目前主要的时空演变模型设计方法有以下 3 种:一是面向数据管理的时空演变模型;二是面向过程演化的时空演变模型;三是面向对象的时空演变模型^[1]。面向数据管理的时空演变模型结构简单、容易实现,侧重描述对象的时间状态和空间状态的变化,但它们本质上是“状态记录型”而非“过程表达型”,无法显式地捕获和定义“变化”事件本身及其驱动机制。例如,模型记录了某块林地在水点 t_1 和 t_2 的覆盖范围,但无法直接回答“为何变化”以及“如何变化”。为了克服上述局限,面向过程演化的时空演变模型通过建模对象变化的事件与过程,描述对象在特定时域内的动态演化特征,突出新旧状态之间的变化特点。但当面对大规模、并发发生的演变事件时,事件间的关联与推理会导致计算量急剧增加,对模型的性能和可扩展性构成严峻考验。因此,它更适用于特定、已定义清晰的领域过程研究。目前,面向对象构造的时空数据模型最为常用。这类模型通过对空间域的自然划分构建时空对象,支持实体和存储记录的动态更新,其核心优势在于其强大的语义表达能力和良好的可扩展性,非常适合于构建包含多种异质实体及复杂交互的综合系统。然而,其过程表达的直观性较弱的缺点同样明显,如表 2 所列。

目前的研究主要集中在模型对数据的时空分析,但自然资源实体的动态变化往往是非线性和多尺度的,这要求时空动态模型能够捕捉和表达这些复杂过程;模型的实时性和预测能力需要时空演变模型的数据存储结构和更新模式进行进一步优化。未来的研究重点是如何将面向过程的模型与面向对象的模型进行深度融合,即在对象模型中内嵌更强大的过程表达机制,以实现复杂地理系统“实体-关系-过程”的一体化精准刻画。

2.1.3 地球空间网格模型

地球空间网格模型基于全球多级网格划分体系,将自然资源实体的三维空间分布范围,按尺度层级规则细分为多分辨率网格单元,建立实体与网格单元的

表 2 各类型时空演变模型对比

Table 2 Comparison of different types of spatiotemporal evolution models

模型类型	代表方法	优点	缺点
面向数据管理的时空演变模型	序列快照模型 ^[26] 、离散格网单元列表模型 ^[27] 、时空立方体模型 ^[28] 、基态修正模型 ^[29]	结构简单、容易实现	数据冗余度高
面向过程演化的时空演变模型	基于事件的时空数据模型 ^[30] 、基于图论的时空数据模型 ^[31] 、面向过程时空数据模型 ^[32]	能实现特定时域下的动态表达	大规模变化数据计算复杂度较高
面向对象的时空演变模型	NINF 时空数据模型 ^[33] 、时空三域模型 ^[34] 、基于本体时空数据模型 ^[35]	适合复杂系统中多实体交互的建模	过程表达较为复杂

归属映射关系, 并赋予自然资源实体基于网格的全球唯一空间身份标识编码, 可快速实现实体空间定位、地上地表地下三维空间关联分析。

地球空间网格按剖分方式分为全球离散格网和经纬度格网^[36]。

全球离散网格体系包括正多面体全球格网体系与自适应全球格网体系^[37-38], DUTTON^[39]对三角形分割的全球网格模型(QTM)中的格网几何模型的选择、分割方法、分级坐标系及数据编码等内容开展了研究; GOODCHILD等^[40-41]研究了基于三角形、菱形或多边形分割的全球网格划分方式。其核心优势在于格网单元的几何形态和面积相对均匀, 避免了经纬度格网在高纬度地区的严重形变, 但在空中、水下、地下等区域的空间要素位置和分布描述存在表达缺陷, 且三角格网或多边形格网的设计难以符合地球椭球体的要求, 实用性较差^[42]。

经纬度格网通过设定固定尺寸的经纬度面片作为参考网格单元, 实现对地球表面位置的划分与空间定位^[43], 其最显著的优点是现有地理空间数据体系的匹配, 能够高效地集成和处理海量的现有地理数据。然而, 如何在高纬度地区有效保持精度和分析的准确性, 以及如何更好地适应复杂地形表面的三维表达是该格网面临的重大问题。为解决三维表达与极区格网变异性问题, 球体经纬度格网采用经纬高递归划分以保持一致性与正交性^[44]。球体退化八叉树格网^[45]和Yin-Yang格网^[46]针对两极地区格网收缩的问题提出了近似格网方案。程承旗团队^[43]提出的GeoSOT地球剖分模型已成为目前研究应用的基础模型。

尽管地球空间网格模型在自然资源实体表达和分析中发挥着重要作用, 但模型在三维空间和复杂地形的适用性仍有待提高, 未来应聚焦于如何结合不同格网的优势, 根据数据密度或应用需求进行动态调整格网状态, 以适应复杂自然资源的管理需求。同时, 还需要进一步研究如何将网格编码深度融入分布式计算、空间大数据分析和人工智能算法中, 使其从单纯的数据组织工具, 升级为高性能空间计算的底层算子。

2.1.4 业务关系模型

业务关系模型基于自然资源实体间的业务语义与逻辑关联, 采用知识图谱建模方法构建关联网络, 并通过语义规则生成动态逻辑链路, 以支持场景化计算与分析, 实现场景化计算与分析。

业务关系模型以空间、时间、属性等语义关系为

核心, 并在特定应用场景中扩展至因果、认知和过程关系, 通过将自然资源实体及其语义关系存储在一个结构化图谱中, 如图3所示, 模型能够实现复杂的推理与查询。图谱的构建严重依赖领域知识和约束条件。高嘉良等^[47]提出类型约束的语义相似性度量方法以提升知识图谱关系表达的准确性; 凌朝阳等^[48]构建语义驱动的多维实体表达框架, 涵盖概念、空间、属性与时间; 叶帅等^[49]基于知识图谱与本体建模, 为自然资源实体关系构建提供新思路。这些研究提升了关系表达精度和智能化分析能力, 但构建成本高、语义歧义处理复杂、动态更新与跨域融合能力有限。

语义关联知识图谱的构建技术体系已形成以语义网技术、图数据库技术及自然语言处理技术为核心的主流范式。自然语言处理技术结合图神经网络实现了自然资源文本中实体关系的深度建模与细粒度隐含关系挖掘。谢腾等^[50]结合BERT与实体关键词、实体对信息和实体类型特征等提升关系抽取中的语义建模能力; 陈晓玲等^[51]提出的模型无需借助领域知识或人工特征, 能够直接从园林文本中识别并抽取实体对关系; 苗琳等^[52]基于图神经网络的联合实体关系抽取模型提升了实体和关系的交互能力。这些方法在精度、自动化和复杂关系建模方面均取得进展, 但仍未完全摆脱“数据驱动”的局限性。大语言模型在自然资源这类垂直领域存在“专业知识幻觉”和“术语理解偏差”的风险, 需要更精确的领域微调才能可靠应用。且处理自然资源中涉及长时间序列、大空间范围的复杂关系链时, 模型容易忽略长程关联。

当前, 模型构建已初步实现自动化, 但在知识的深度、精度与动态性方面仍面临严峻挑战。未来, 发展融合领域知识的自然资源专用大模型, 识别关系背后的驱动机制, 是提升自然资源管理、监测等领域的智能化决策的关键。同时, 如何处理不规则自然资源语义文本数据以及跨领域知识的迁移学习, 构建更加立体的业务关系网络将是未来研究的重要方向。

2.2 自然资源数据时空索引技术

时空索引技术作为自然资源时空数据管理的核心研究方向, 主要通过构建多维时空编码机制, 实现异构数据的高效组织与检索。现有方法以树形结构为主, 包括四叉树、R树及其变体, 通过空间分割与时间分层完成实体快速定位。近年来, 图结构索引逐渐受到关注, 依托图邻接关系与路径优化实现复杂时空关系的建模与查询。时空索引的核心问题在于时间与空间维度的协同组织, 以满足检索效率与应用需求的

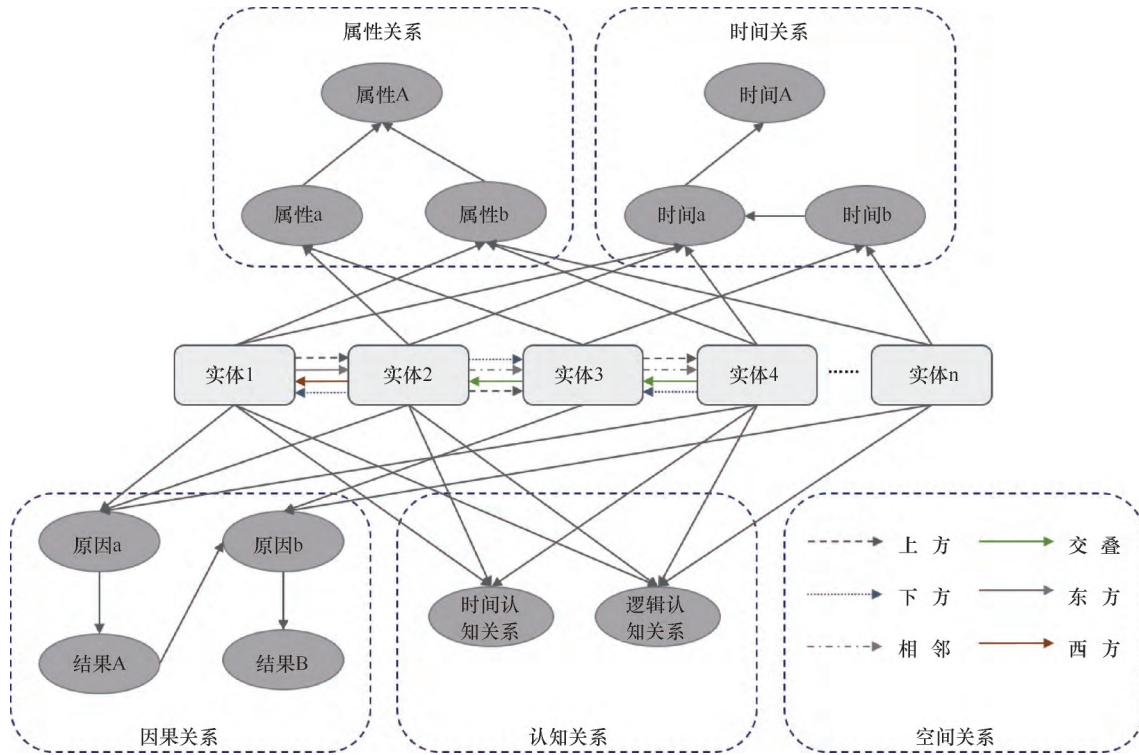


图3 实体语义关联结构

Fig. 3 Entity semantic association structure

双重优化。

2.2.1 基于树结构的时空索引技术

树结构最初用于空间索引，为了扩展应用到时空数据，需要在空间索引的基础上考虑时间因子形成时空索引。基于这种思路，树结构的时空索引方法可分为三类：时间优先的时空索引方法、空间优先的时空索引方法和时空同步的时空索引方法。

时间优先的时空索引方法以时间维度为主构建索引，再组织空间节点，其中最有代表性的是 HR 树和 MR 树，二者采用 R 树结构保存不同时刻对象的空间分布，并通过节点共享支持连续时间查询^[53]。在此基础上，延伸出的方法有 HR⁺ 树、MV3R 树等^[54-55]。这类方法对时间点查询十分有效，但索引数据占据的空间太大，任何微小的空间变化都可能触发整个空间索引的调整，而且难以支持对时间片段条件的查询^[56]。因此，时间优先索引实质上牺牲了存储和更新效率来优化特定类型的查询，它仅适用于数据变化不频繁且查询模式以时间点为主的历史档案库场景，难以应对高频更新的动态环境。

空间优先的时空索引方法先按空间分区再建立时间索引，典型代表为 RT 树^[53]，延伸的还有 MTSB 树、SETI 树、HBSTR 树等^[57-61]。此类方法空间区域划分固定，索引构建和查询效率高，有利于提高数据

并发访问效率，缺点是空间数据分布不均，容易导致数据访问倾斜，如果变化对象的数量很大许多索引项被创建 RT 树会迅速膨胀^[57]。因此，该方法适用于空间分布相对稳定、对象运动性弱的场景，如对静态地物的变更管理。

时空同步的时空索引方法把时间看作单独的 1 维，在原有空间索引结构中添加时间维度，最有代表性的方法是 3D R 树，常见的还有 STR 树、TB 树、3D⁺ 树等^[53-63]。这类方法在表示位置和范围均不随时间发生变化或变化较小的时空对象时十分直观，但对于那些长期保持静止或位置变化大的对象，会形成许多长条的立方体，使得索引性能大大下降^[61]。尽管后续的 TB 树等尝试通过区分静态和动态对象来优化，但未能从根本上解决高维数据固有的检索效率问题。这表明，简单地将时间作为普通维度处理，无法有效应对时空数据的独特特性。

无论哪种树结构都因其底层结构的静态和刚性，难以自适应数据分布，在面对海量、高动态、多粒度的现代自然资源时空数据时，其性能瓶颈日益凸显。

2.2.2 基于图结构的时空索引技术

在时空索引研究中，图结构展现出区别于传统树结构的独特优势。相较于受限于父子节点层次化约束的树状索引，图结构通过引入多类型顶点与边的泛化

拓扑关系, 构建出具有强表达能力的网络架构, 能够有效编码多维时空对象间的非层次化关联特征。

为了最小化搜索空间的大小, 这类方法通常利用任意类型图的子结构, 如路径、树或一般子图, 来构建图索引。现有的图索引方法, 如基于路径枚举的 GraphGrep^[64] 和考虑语义关系的本体索引^[65], 其本质都是在表达能力和查询效率之间寻找平衡点。通过预先计算并存储某些子结构来加速查询, 是一种以空间换时间的策略。图结构的高度非结构化使其可表达性成为优势, 如朱庆等^[57] 提出的时空关系稀疏图索引方法, 将多模态场景数据抽象为图的节点和边, 支持时间、空间以及关联关系的高效组织。图索引的高度非结构化导致其存在固有的缺陷, 频繁的数据更新可能引起图拓扑结构的剧烈变化, 使其在动态环境下的可扩展性较差, 且在索引过程中产生的图数据量较大, 影响索引速度^[66]。

图结构时空索引代表了一种从“空间优先”到“关系优先”的转变。未来的索引结构将不局限于单种形态架构, 采用“树-图”混合或与机器学习技术的深度结合发展成为学习型索引, 将会实现更好的性能与计算资源的平衡。

2.3 自然资源数据更新技术

自然资源数据的时效性与准确性对国土规划、环境监测及资源管理具有至关重要的作用。传统的基础测绘数据更新方法存在周期长、更新效率低等不足, 而近年来, 多源数据融合、遥感影像比对以及大数据挖掘等新技术的出现, 为自然资源数据的快速更新提供了全新的思路和技术手段。

自然资源数据的更新主要有 3 种模式: 全量更新、增量更新和级联更新, 具体如表 3 所列。

表 3 各类型数据更新模式对比

Table 3 Comparison of different types of data update modes

更新模式	优点	缺点
全量更新	更新全面, 能完整记录数据变化	工作量大, 更新成本高
增量更新	能实现高时效性的数据动态更新	局部更新, 整体变化趋势反映不全面
级联更新	支持多尺度联动更新	更新过程较为复杂, 尺度匹配精度波动大

2.3.1 全量更新模式

早期数据库更新主要依赖人工测量, 采用定期全量更新模式, 对于大区域的数据获取需要投入大量的人力物力。早期芬兰国家测绘局和荷兰地形署均需数百人、多台工作站, 更新周期达 4~10 a^[67]; 我国第

一次全国土地调查历时 12a, 主要采用人工测绘、手工记录的方式, 并且多以纸质文档进行数据存储。这种以被动式定期更新为主、任务式增量更新为辅的模式, 周期长、耗时长, 且需要大量的人力物力投入, 难以匹配自然资源的实际变化速度。同时, 更新后在数据库中形成的新版数据, 与旧版数据间缺少关联性, 难以直观体现单个对象的产生、变化和消亡, 多版数据中未发生变化的数据重复存储, 也造成数据库存储冗余。

2.3.2 增量更新模式

增量更新模式是针对全量更新模式效率低下问题的重要革新。随着自然资源调查、监测技术手段的不断进步, 多源遥感影像与矢量地图可通过图像配准、几何纠正、特征匹配及深度学习变化检测, 实现区域变化信息的高效自动提取^[4]。其核心思想是仅探测和更新发生变化的地理要素或区域, 而非替换整个数据集, 实现对变化地理要素的“及时发现、及时测定、及时更新、及时发布”。这一模式将避免定期更新周期偏长的问题, 从而有效提高地理空间数据的现势性。基于这一特性, 陈军等^[68] 在多源遥感影像与矢量化地图自动配准、典型地理要素变化提取、用户数据库更新等方面开展了深入的研究。在二调时期, 土地变更调查机制引入增量更新, 仅对变化图斑进行更新, 以增量代替全部重测, 大大提高了效率。由于变化检测技术在复杂场景和微小变化识别方面仍存在不足, 其结果可靠性难以保障, 从而成为增量更新精准应用的首要制约因素。与全量更新一样, 在同一时期通常都只能更新一个尺度的基础地理空间数据, 难以实现对多个尺度的基础地理空间数据进行同步更新, 存在着同一地理要素多尺度数据间无法保持一致性的问题^[69]。

2.3.3 级联更新模式

为实现多个比例尺和多类型数据之间的联动更新, 级联更新模式被提出^[70]。级联更新模式基于多尺度数据联动, 通过要素映射规则和自动综合技术实现跨比例尺更新, 其基本过程如图 4 所示。在多尺度空间数据库管理中, 基于实体关联的协同更新机制实现跨比例尺数据动态同步, 确保信息一致性^[70]; 在时空数据库组织架构层面, 多级协同增量更新通过系统节点增量触发机制实现跨库联动^[71]; 在多尺度地图数据库更新层面, 地图缩编更新在维护数据的尺度一致性方面发挥了重要的作用^[72]。级联更新有效提升了数据变更响应速度和多级数据库协调性, 提高了更新效率与准确性。然而, 在数据复杂性增加或实时

更新需求较高的情况下, 跨库触发机制和同步策略仍存在性能瓶颈, 尤其在大规模异构数据整合方面尚需优化。实现级联更新的关键是建立同名地理要素的关联机制, 目前的研究提出了规则匹配^[73]、松弛标记匹配^[74]、多阶段匹配^[75]等算法, 虽然这些算法在一定程度上提高了匹配精度, 但临近尺度实体间的对应关系仍难以准确匹配。随着深度学习的发展, 还有学者利用人工神经网络对居民地匹配进行了准确量化^[76]。目前各类智能化算法仍只能应用在联动更新的某一阶段, 实现完全自动化的联动更新仍有一定的发展空间。

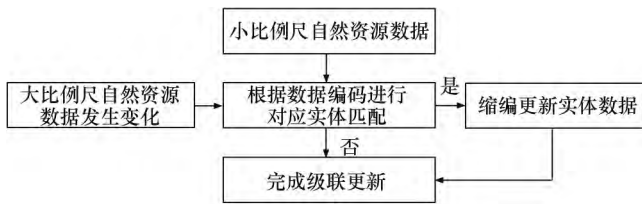


图 4 级联更新过程
Fig. 4 Cascade update process

2.4 自然资源时空数据库管理技术

自然资源时空数据库管理技术是实现自然资源数据高效整合、动态更新与智能应用的关键支撑。随着三维 GIS、云计算和大数据发展, 管理模式正由二维向三维立体时空数据库转变, 重点聚焦于数据存储管理与共享机制。

2.4.1 数据存储管理

为应对当前海量自然源数据的存储管理, 自然资源时空数据的存储模式从集中式发展到分布式存储, 数据存储形式从文件型、关系型数据库发展到非关系数据库, 数据存储相关技术也不断获得创新。以 PostgreSQL 为代表的关系型数据库, 其核心优势在于

强大的 SQL 查询能力, 特别适合对数据一致性要求极高的核心矢量数据管理。然而, 其面临扩展性困难和面对海量非结构化数据时的性能瓶颈。文档型、列式等 NoSQL 数据库, 通过牺牲部分复杂查询能力和严格的事务一致性, 换来了较强的水平扩展能力, 非常适合存储和管理海量的传感器时序数据、遥感影像元数据等半结构化或非结构化数据。但其模型结构和专用查询接口, 也增加了应用开发的复杂性, 如表 4 所列。

面对海量时空数据的存储与计算挑战, 时空数据库管理采用统一混合存储框架, 集成分布式文件系统、对象存储和时空数据库, 以适配不同类型数据的高效管理^[77]。吴益玲等^[78]基于 MongoDB 构建原型数据与表现数据分离的三层统一存储体系; 薛白茹等^[79]通过压缩算法与智能分区显著降低海量空间数据存储开销; 蒋凤钗^[80]基于改进 Spark 的 SVM 方法提升了自然资源数据分类管理效率。这些技术在提升存储性能、数据管理效率和分类处理能力方面具有明显优势, 但在跨平台兼容性、动态更新响应及复杂数据关联处理方面仍存在优化空间。

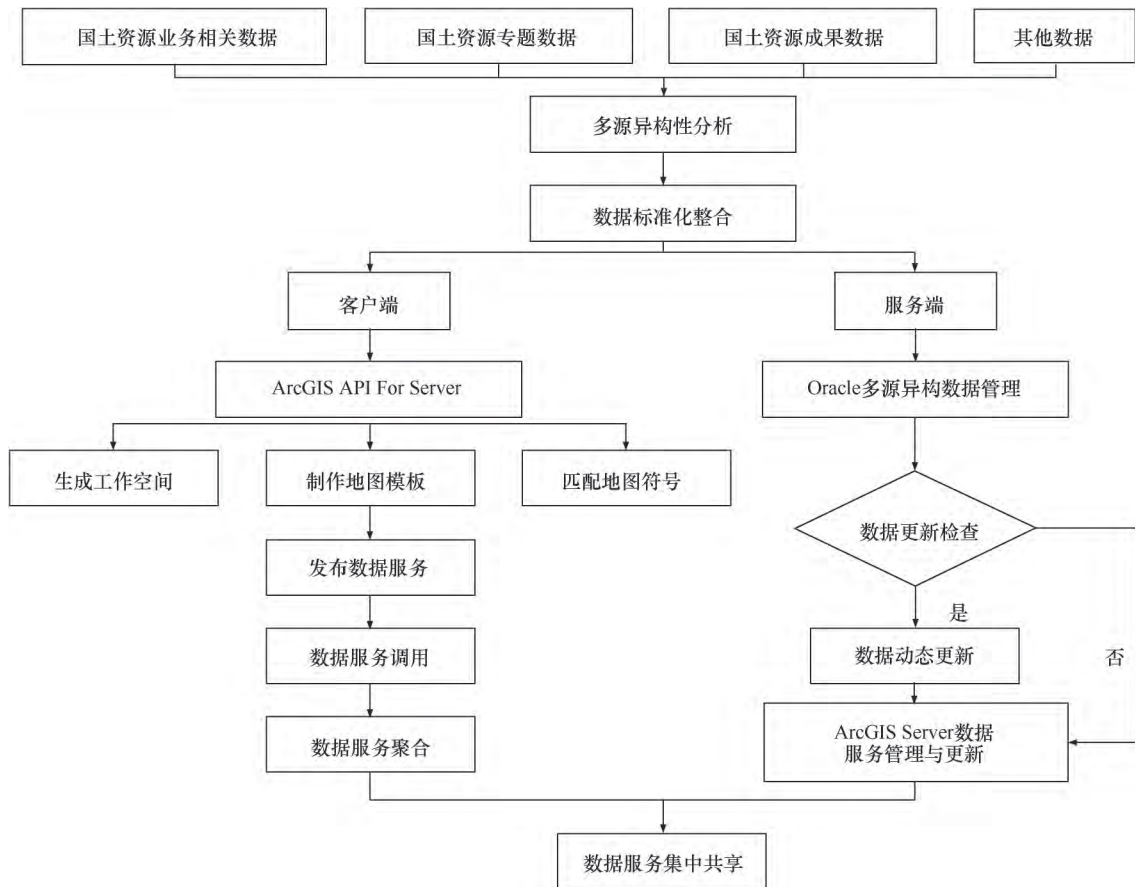
2.4.2 数据共享模式

数据共享是自然资源时空数据库管理的重要环节, 涉及跨部门、跨层级的数据整合与协同应用。当前, 数据共享模式正从传统的单向分发向云原生、智能化的协同共享转变, 以解决数据孤岛、标准不一、安全管控等难题^[81]。通过研究测绘地理信息共享与服务, 刘亚楠^[82]构建了一套完整的自然资源时空信息智能技术服务解决方案(见图 5); 周显芳^[83]提出融合云计算与服务聚合的新型地理空间信息共享模式; 在大文件共享场景下, 分片存储、断点续传、多线程传输、数据加密和纠错机制等技术的结合, 能够

表 4 常见数据存储结构优缺点对比

Table 4 Comparison of advantages and disadvantages of common data storage structures

存储结构名称	类型	优点	缺点
MySQL	关系型数据库	(1) 读取性能稳定性好 (2) 可扩展性强	(1) 高并发写入性能弱 (2) 难以适应复杂查询
PostgreSQL	关系型数据库	(1) 支持多种扩展 (2) 可定制性强	(1) 扩容成本较高 (2) 资源占用高
MongoDB	文档型数据库	(1) 支持复杂查询 (2) 支持分片, 水平扩展性好	(1) 存在数据不一致问题 (2) 系统内存占用大
CouchDB	文档型数据库	(1) 支持数据同步更新 (2) 支持自动分布式复制	(1) 读取性能较弱 (2) 集成兼容度低
Redis	键值数据库	(1) 数据读取效率高 (2) 支持数据持久化存储	(1) 受系统内存限制 (2) 缺乏复杂查询支持
HBase	列式数据库	(1) 支持海量存储 (2) 可大规模并行处理	(1) 不支持条件查询 (2) 不支持复杂聚合运算

图5 自然资源多源异构数据服务共享流程^[82]Fig. 5 Multi-source heterogeneous data service sharing process of natural resources^[82]

显著增强传输的安全性、效率及稳定性^[84]。

这些技术创新不仅解决了海量时空数据管理的核心难题,更为构建高效、智能的自然资源时空数据库提供了关键技术支撑,将有效推动自然资源管理向数字化、智能化方向转型升级。

3 自然资源时空数据管理技术发展趋势展望

虽然自然资源时空数据管理技术已经获得长足发展,但随着人工智能、知识图谱等新技术的快速发展和深入应用,自然资源时空数据管理技术也必然需要不断更新迭代。一方面,精细化管理、动态化监测与智能化决策的需求不断增强,推动时空数据管理必须实现从数据存储向知识获取与智能服务的转变;另一方面,人工智能、大数据、知识图谱等新兴技术的快速发展为时空数据的高效组织、深度挖掘和语义关联提供了新的方法与工具,显著促进了时空数据管理的自动化、智能化。因此,本文将从数据应用、模型构建、数据更新等方面探讨自然资源时空数据管理研究所面临的技术挑战和发展趋势。

3.1 专题知识图谱的构建提升自然资源时空数据的精准应用

自然资源时空数据种类多、非结构化特征强,在集成分析与智能应用中面临语义关系模糊、应用粒度粗糙等挑战,传统图层叠加或表格查询方法难以满足多维特征深度挖掘与推理的需求。

知识图谱技术通过构建面向实体的语义网络结构,将多源异构数据进行统一建模与语义融合,能够实现实体多维特征的结构化表达,并增强语义关联和知识推理。但目前知识图谱在统一本体构建规则、语义泛化能力、动态关系表达上仍面临不足。未来面向自然资源实体的专题知识图谱将会根据自然资源时空数据结构特征、实体关系构建更精细化的深层网络(见图6),向优化检索、知识问答、支持决策等方面提供更精准的应用^[85]。不少研究者从专题知识图谱的知识融合、知识推理等方面开展了更精细的研究^[86]。具体来说,在知识融合阶段,专题知识图谱将加强跨模态数据的融合,可基于 SeqGPT^[87]等大语言模型增强非结构化数据的知识抽取能力,实现结构

化与非结构化数据的统一表达; 在知识融合基础上, 利用时空嵌入与深度学习等方法, 结合自然资源实体动态感知数据, 提升专题知识图谱对实体间关系的动态推理能力, 拓展模型的业务应用场景。

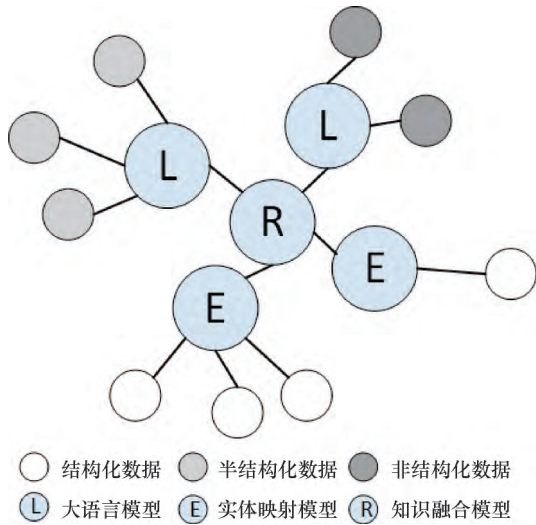


图 6 专题知识图谱示意

Fig. 6 Schematic diagram of thematic knowledge graph

3.2 自然资源时空数据模型向多模态综合化方向发展

自然资源空间的时空表达和演化是在复杂地表环

境下发生的, 现有的模型多基于单一对象或要素进行建模, 难以全面综合地构建地理时空过程的耦合演化、因果分析^[88]。虽然目前对具体的各类型模型都开展了大量研究, 但这些模型都是基于各自的数据格式和应用需求设计的, 如何使这些模型集成统一表达仍需要进一步研究。

未来自然资源时空数据模型将由单模态向多模态综合化发展, 整合实体表达、时空演变、地球空间网格及业务关系模型, 以更全面反映自然资源实体的复杂性与多样性, 其应用框架如图 7 所示。深度学习、大模型与知识图谱技术的引入, 使数据库不仅可进行异构数据建模和关联分析, 还可支持智能分析与动态预测。在未来的应用场景中, 文本数据利用 BERT、GPT 等自然语言处理模型进行实体识别、文本分类和语义关联挖掘; 遥感影像等空间数据集成 Vision Transformer 或卷积神经网络进行地物分类、变化检测等任务; 异构数据通过构建如 CLIP、ALIGN 等多模态大模型, 实现多源数据的统一建模与分析提升对自然资源实体对象的全方位感知与表达能力。但在实际应用中, 大模型存在计算量和内存开销较大问题, 如何高效部署大模型同样值得关注。目前不少学者已经从模型压缩、轻量化结构设计、分布式部署等方式开

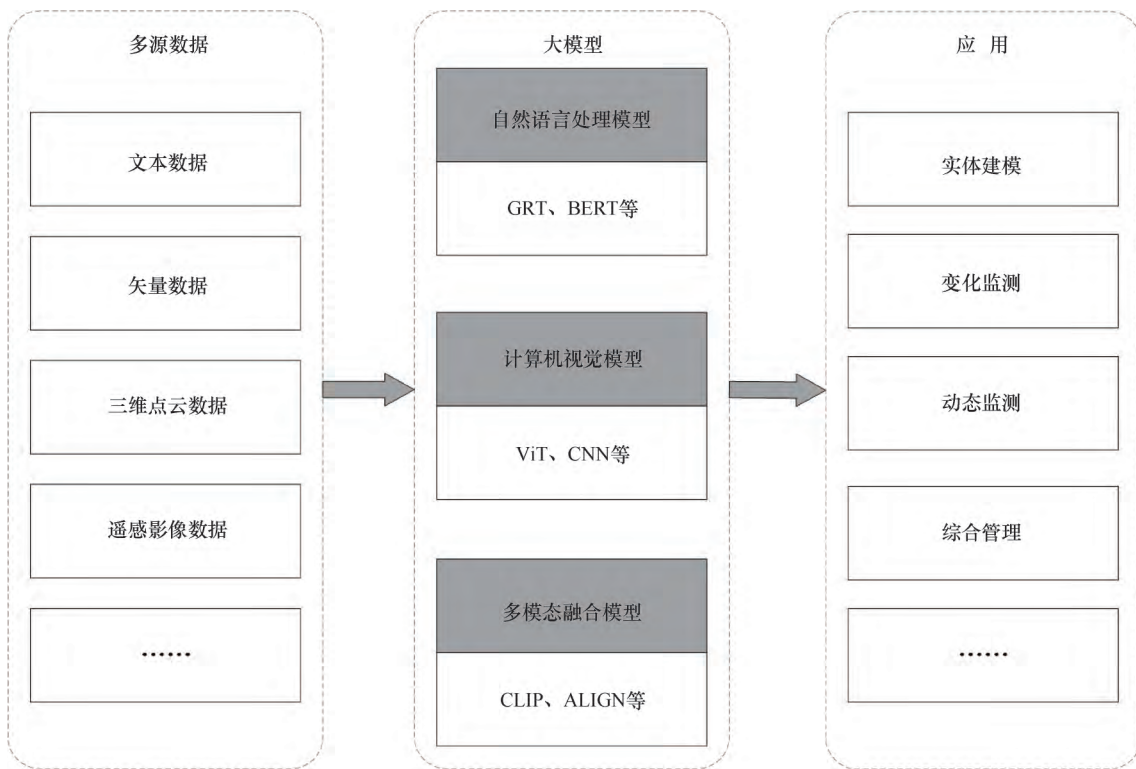


图 7 多模态综合应用

Fig. 7 Multimodal integrated application

展大模型的高效应用研究, 最大化地发挥大模型在数据管理、综合分析和动态预测上的优势。

3.3 自然资源时空数据索引向自主学习型转变

传统的树结构或图结构索引在处理大规模、动态变化的数据时, 容易出现查询瓶颈和存储冗余。此外, 自然资源的复杂关系推理需要融合更多自然资源语义关联数据, 而现有的研究多忽略这一点, 少量的顾及语义关系的时空索引方法也是针对特定节点设计特定的存储结构, 当数据面临大量更新时便会暴露出扩展性差的问题。

时空索引效率和索引结构的可扩展性将是下一阶段研究的重点内容。随着人工智能和机器学习技术的发展, 学习型索引技术的概念被引入。学习型索引将新的可学习模型替换传统的索引结构(见图8), 通过学习数据间的底层逻辑关系, 利用数学运算代替树结构的遍历, 能够有效地减少存储开销, 提升索引效率^[89]。针对动态时空查询, WU 等^[90]提出的 NEIST 学习型索引结构通过结合 RNN 神经网络, 基于动态对象间的运动模式提高了索引的效率和准确性, 可适用于更多的应用场景, 展现出学习型索引的良好扩展性。对于时空数据具有动态变化的特性, 未来研究可进一步探索如何构建更具适应性自我优化能力的学习型索引模型, 以更有效地应对复杂时空数据的多维检索需求。从数据处理的角度, 时空数据降维也是提升索引性能一种有效方式。空间填充曲线通过在映射过程中保持时空数据的局部邻接性, 有效提升了数据在存储结构中的聚集度, 从而降低了内存开销并简化了索引维护流程, 尤其适用于面向高频更新与高并发查询的时空数据管理场景。未来可以通过使用 Hilbert 曲线、Z 曲线等空间填充曲线, 优化对应的检索算法, 以提升对于时空大数据的应用。

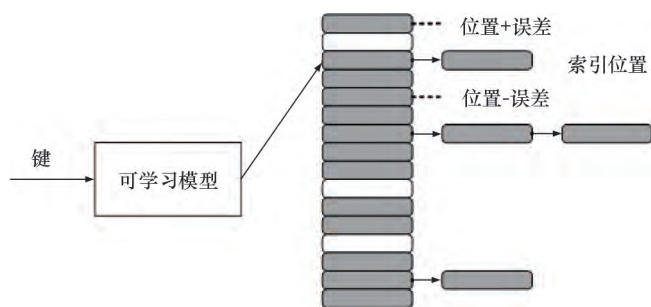


图8 学习型索引示意

Fig. 8 Schematic diagram of learned index

3.4 自然资源时空数据更新将更加智能化

随着人工智能和大数据技术的发展, 自然资源时

空数据库的更新模式正朝着智能化、自动化方向发展。然而, 由于自然资源数据类型多样、来源广泛, 且部分数据采集周期长、更新频率低, 如何在保证数据准确性和时效性的前提下, 实现多源、多尺度数据的高效同步与一致性更新, 仍需要深入研究。

对于数据更新的实时性, 深度学习技术正成为目前的研究热点。通过对神经网络进行训练学习, 模型能够学习到遥感影像、自然资源语义文本等丰富的实体特征, 基于变化检测结构, 模型能快速识别并提取出变化内容, 在实际应用中能提高变化更新的准确性和更新效率。且诸如 ChangeCLIP^[91]、FD-MCD^[92]等的多模态变化检测大模型能够适应多源数据输入, 从而在数据更新的自动化和可扩展性上建立了更大的优势。数据更新的一致性的核心在于同名实体关联。深度学习、强化学习、知识图谱技术为同名关联提供了一种新的解决思路。基于深度学习和知识图谱的智能匹配技术, 通过考虑几何、拓扑相似性, 融入语义、功能等多维信息, 以更准确地建立跨尺度、跨来源的同名实体关联, 为级联更新提供更可靠的基础。同时, 强化学习等方法能够优化更新策略, 根据数据重要性、变化频率和用户需求动态调整更新模式(如增量、级联或混合更新)和更新路径, 实现效率与一致性的平衡。

4 结论

本文从数据库发展历程、关键技术与方法、未来发展趋势等方面对自然资源时空数据管理技术的研究进展进行了总结。我国自然资源时空数据库的建设经历了传统数据库、时空数据库和三维立体时空数据库阶段, 在这一演变过程, 管理方式从静态存储、单一结构向动态监测、多维一体化表达。在具体组成技术上, 实体表达、时空演变、地球空间网格及业务关系模型共同构成了从几何、时空到语义的多维表达体系, 树结构与图结构索引为海量异构时空数据的高效组织与检索提供了核心支撑, 全量、增量与级联更新模式的组合提升了数据的现势性与一致性。

本文认为, 当前技术在静态实体表达、结构化时空索引及同构数据更新等方面已趋于成熟, 能够有效支撑单一领域或特定模态下的数字化管理需求。然而, 面对自然资源管理日益增长的精细化、智能化要求, 现有技术在多源数据融合、多模态模型统一表达、动态索引优化以及跨尺度实时协同更新等方面仍面临严峻挑战和发展机遇:

(1) 未来的自然资源时空数据库将突破单一对象

或单一模态的局限, 向多模态综合化发展。实体表达模型、时空演变模型、地球空间网格模型与业务关系模型将被有机融合, 形成统一表达框架。深度学习、大模型与知识图谱将被引入, 实现从几何—语义—时间—业务逻辑的全方位表达, 从而支撑自然资源对象的综合感知与动态预测。

(2) 针对自然资源时空数据的非结构化特征和语义模糊性, 专题知识图谱将成为提升数据精准应用的重要突破口。通过预训练语言模型与图神经网络, 结合时空嵌入方法, 可实现实体多维关系的深度建模与动态推理。

(3) 数据更新将由半自动化的更新模式, 向基于深度学习与多模态变化检测的大规模自动化更新演进。未来的更新机制将结合知识图谱与强化学习, 实现跨尺度、跨来源的同名实体智能匹配与动态优化更新策略。

只有在解决数据集成、时空一致性及更新实时性等核心挑战的基础上, 才能为国土空间规划、生态保护及资源管理提供更为坚实和高效的技术支撑, 从而推动自然资源管理水平的提升, 并支持我国智慧城市和数字孪生建设向更深层次迈进。

参考文献(References):

- [1] 姬龙涛, 李亚汝, 张军海, 等. 面向对象时空数据模型研究概述[J]. 时空信息学报, 2024, 31(6): 732-744.
JI L T, LI Y R, ZHANG J H, et al. An overview of research on object-oriented spatiotemporal data models [J]. Journal of Spatio-Temporal Information, 2024, 31(6): 732-744.
- [2] 韩红太, 焦利伟, 马林娜, 等. 自然资源管理辅助决策服务平台设计与实现[J]. 测绘科学, 2019, 44(6): 337-340.
HAN H T, JIAO L W, MA L N, et al. Design and implementation of the auxiliary decision-making service platform for the management of natural resources [J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(6): 337-340.
- [3] 张朝忙, 王霄雷, 应荷香, 等. 面向自然资源业务管理的全要素编码探讨[J/OL]. 自然资源信息化, 2025: 1-7. [2025-09-18]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GTZX20250417001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
ZHANG C M, WANG X L, YING H X, et al. Discussion on comprehensive element coding for natural resource business management [J/OL]. Natural Resources Informatization, 2025: 1-7. [2025-09-18]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GTZX20250417001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [4] 郭艳, 黎慧斌. 基于大数据技术的自然资源数据快速更新体系研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(8): 135-137.
GUO Y, LI H B. Research on the rapid update system of natural resource data based on big data technology [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2020, 43(8): 135-137.

- [5] 李泽辉. 自然资源数据库[J]. 自然资源, 1989, 11(3): 56-66.
LI Z H. Natural resources database [J]. Resources Science, 1989, 11(3): 56-66.
- [6] 孙九林, 李泽辉. 中国自然资源数据库[J]. 现代图书情报技术, 1997(4): 9-14.
SUN J L, LI Z H. Database of natural resources of China (DNRC) [J]. New Technology of Library and Information Service, 1997(4): 9-14.
- [7] 王家耀, 魏海平, 成毅, 等. 时空GIS的研究与进展[J]. 海洋测绘, 2004, 24(5): 1-4.
WANG J Y, WEI H P, CHENG Y, et al. The research and development of spatio-temporal GIS [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2004, 24(5): 1-4.
- [8] 魏海平. 时空GIS建模研究与实践[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2007.
WEI H P. Research and Application of Spatio-Temporal GIS Modeling [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2007.
- [9] 姜晓轶, 周云轩. 从空间到时间: 时空数据模型研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(3): 480-485.
JIANG X Y, ZHOU Y X. From space to time: A research on spatio-temporal data model [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(3): 480-485.
- [10] 唐新明, 吴岚. 时空数据库模型和时间地理信息系统框架[J]. 遥感信息, 1999, 14(1): 4-8.
TANG X M, WU L. Spatiotemporal database models and temporal GIS frameworks [J]. Remote Sensing Information, 1999, 14(1): 4-8.
- [11] 王华敏, 陈继祥, 于雷易. 基于基态修正模型的地籍时空数据库设计与实现[J]. 测绘信息与工程, 2003, 28(3): 9-11.
WANG H M, CHEN J X, YU L Y. Design and implementation of cadastral spatio-temporal database based on data models of base state with amendments [J]. Wtsum Bulletin of Science and Technology, 2003, 28(3): 9-11.
- [12] 赵秋菊. 新疆自然资源一体化数据库构建及应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(9): 151-154.
ZHAO Q J. Construction and application of natural resources integrated database in Xinjiang [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2021, 44(9): 151-154.
- [13] 刘晶东, 赵栋梁, 刘达. 基于多态的自然资源数据库研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(S1): 68-69.
LIU J D, ZHAO D L, LIU D. Research on natural resources database based on polymorphism [J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2020, 43(S1): 68-69.
- [14] 韩志刚, 孔云峰, 秦耀辰. 地理表达研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 30(2): 141-148.
HAN Z G, KONG Y F, QIN Y C. Research on geographic representation: A review [J]. Progress in Geography, 2011, 30(2): 141-148.
- [15] WAWRZYNIAK L, NIKITENKO D, MATSAKIS P. Speaking with spatial relations [J]. International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications, 2006, 1(3/4): 280.
- [16] 郭利川, 郭建星, 代晓波. 浅谈地理信息系统中的空间数据模型[J]. 地理空间信息, 2005, 3(1): 37-39.

- GUO L C , GUO J X , DAI X B. Study on GIS spatial data models [J]. *Geospatial Information* , 2005 , 3(1) : 37-39.
- [17] 薄伟伟. 基于 ArcMap 的地图符号设计与研究 [J]. *地理空间信息* , 2006 , 4(2) : 70-72.
BO W W. Map symbol design in GIS based on ArcMap [J]. *Geospatial Information* , 2006 , 4(2) : 70-72.
- [18] 谈晓军, 边馥苓, 何忠焕. 地图符号可视化系统的面向对象设计与实现 [J]. *测绘通报* , 2003(1) : 11-13.
TAN X J , BIAN F L , HE Z H. Object-oriented design and implementation of map symbol visualization system [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping* , 2003(1) : 11-13.
- [19] 尹章才, 李霖, 龙毅, 等. 基于分层的面积状地图符号设计 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)* , 2004 , 29(12) : 1111-1114.
YIN Z C , LI L , LONG Y , et al. Design of area map symbols in layers [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* , 2004 , 29(12) : 1111-1114.
- [20] 龙毅, 沈婕, 周卫. GIS 空间数据的分析与制图一体化策略 [J]. *测绘科学技术学报* , 2006 , 23(4) : 299-303.
LONG Y , SHEN J , ZHOU W. Integrative methods for analysis and mapping of spatial data of GIS [J]. *Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping* , 2006 , 23(4) : 299-303.
- [21] 闫国年, 袁林旺, 俞肇元. GIS 技术发展与社会化的困境与挑战 [J]. *地球信息科学学报* , 2013 , 15(4) : 483-490.
LYU G N , YUAN L W , YU Z Y. Challenges to development and socialization of GIS technology [J]. *Journal of Geo-Information Science* , 2013 , 15(4) : 483-490.
- [22] 徐肇文. 自然资源要素数据模型知识集成表达及应用 [D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
XU Z W. Integrated Data-Model-Knowledge Representation and Application for Natural Resource Entities [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University , 2022.
- [23] 张翼然, 贾光军, 陶迎春, 等. 地理实体的空间组织与多态特征及其应用 [J]. *测绘通报* , 2020(8) : 135-138.
ZHANG Y R , JIA G J , TAO Y C , et al. Geographic entity spatial organization , variety characters and its application [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping* , 2020(8) : 135-138.
- [24] REDDY M , LECLERC Y , IVERSON L , et al. TerraVision II: Visualizing massive terrain databases in VRML [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications* , 1999 , 19(2) : 30-38.
- [25] 冯冲, 韩健, 温旭昶. 二三维一体化新型基础测绘实施探索 [J]. *城市勘测* , 2022(4) : 127-131.
FENG C , HAN J , WEN X C. Research and implementation on new fundamental surveying and mapping of 2D and 3D integration [J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying* , 2022(4) : 127-131.
- [26] ARMSTRONG M P. Temporality in spatial databases [J]. *GIS/LIS 88 Proceedings: Accessing the world* , 1988: 880-889.
- [27] KUCERA G. Time in Geographic Information Systems [M]. London: CRC Press , 2020.
- [28] HÄGERSTRAND T. What about people in regional science? [J]. *Papers in Regional Science* , 1986 , 24(1) : 143-158.
- [29] LANGRAN G , CHRISMAN N R. A framework for temporal geographic information [J]. *Cartographica* , 1988 , 25(3) : 1-14.
- [30] PEUQUET D J , DUAN N. An event-based spatiotemporal data model (ESTDM) for temporal analysis of geographical data [J]. *International Journal of Geographical Information Systems* , 1995 , 9(1) : 7-24.
- [31] 尹章才, 李霖, 艾自兴. 基于图论的时空数据模型研究 [J]. *测绘学报* , 2003 , 32(2) : 168-172.
YIN Z C , LI L , AI Z X. A study of spatio-temporal data model based on graph theory [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* , 2003 , 32(2) : 168-172.
- [32] 薛存金, 周成虎, 苏奋振, 等. 面向过程的时空数据模型研究 [J]. *测绘学报* , 2010 , 39(1) : 95-101.
XUE C J , ZHOU C H , SU F Z , et al. Research on process-oriented spatio-temporal data model [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* , 2010 , 39(1) : 95-101.
- [33] 黄明智, 张祖勋. 时空数据模型的 N1NF 关系基础 [J]. *测绘学报* , 1997 , 26(1) : 1-6.
HUANG M Z , ZHANG Z X. n1nf relational basis of spatiotemporal data model [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* , 1997 , 26(1) : 1-6.
- [34] 李红晔. 基于特征的时空三域数据模型及其在环境变迁中的应用 [D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 1999.
LI H G. Feature-based Spatio-temporal Three-domain Data Model and Its Application in Environmental Change [D]. Beijing: Aerospace Information Research Institute Chinese Academy of Sciences , 1999.
- [35] 陈新保, Songnian Li, 李黎, 等. 基于对象-事件-过程的时空数据模型及其应用 [J]. *地理与地理信息科学* , 2013 , 29(3) : 10-16.
CHEN X B , SONGNIAN L , LI L , et al. Object-event-process-based spatiotemporal data model and its application into sea-ice dynamics [J]. *Geography and Geo-Information Science* , 2013 , 29(3) : 10-16.
- [36] 程承旗, 付晨. 地球空间参考网格及应用前景 [J]. *地理信息世界* , 2014 , 21(3) : 1-8.
CHENG C Q , FU C. Earth space reference grid and its application prospect [J]. *Geomatics World* , 2014 , 21(3) : 1-8.
- [37] DUTTON G H. A Hierarchical Coordinate System for Geoprocessing and Cartography [M]. Heidelberg: Springer-Verlag , 1999.
- [38] 赵学胜, 王磊, 王洪彬, 等. 全球离散网格的建模方法及基本问题 [J]. *地理与地理信息科学* , 2012 , 28(1) : 29-34.
ZHAO X S , WANG L , WANG H B , et al. Modeling methods and fundamental issues of the global discrete grid [J]. *Geography and Geo-Information Science* , 2012 , 28(01) : 29-34.
- [39] DUTTON G. Improving locational specificity of map data: A multi-resolution , metadata-driven approach and notation [J]. *International Journal of Geographical Information Systems* , 1996 , 10(3) : 253-268.
- [40] GOODCHILD M F , YUAN M , COVA T J. Towards a general theory of geographic representation in GIS [J]. *International journal of geographical information science* , 2007 , 21(3) : 239-260.
- [41] FEKETE G , TREINISH L A. Sphere quadtrees: A new data structure to support the visualization of spherically distributed data [J]. *Extracting Meaning from Complex Data: Processing , Display , Interaction* , 1990 , 1259: 242-253.
- [42] 周成虎, 欧阳, 马廷. 地理网格模型研究进展 [J]. *地理科学进展* , 2009 , 28(5) : 657-662.

- ZHOU C H, OU Y, MA T. Progresses of geographical grid systems researches [J]. *Progress in Geography*, 2009, 28(5): 657-662.
- [43] 曾艳艳, 张奎, 周燕迪, 等. 基于地球剖分网格的面状地理实体时空标识编码方法[J]. *测绘科学*, 2024, 49(10): 166-174.
- ZENG Y Y, ZHANG K, ZHOU Y D, et al. A spatiotemporal identifier coding method of polygon geo-entity based on global subdivision grid [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2024, 49(10): 166-174.
- [44] 白建军, 孙文彬. 球面格网系统特征分析及比较 [J]. *地理与地理信息科学*, 2011, 27(2): 1-5.
- BAI J J, SUN W B. Character analysis and comparison of global grid systems [J]. *Geography and Geo-information Science*, 2011, 27(2): 1-5.
- [45] 吴立新, 余接情. 基于球体退化八叉树的全球三维网格与变形特征 [J]. *地理与地理信息科学*, 2009, 25(1): 1-4.
- WU L X, YU J Q. Global 3D-grid based on sphere degenerated octree and its distortion features [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2009, 25(1): 1-4.
- [46] 李德仁, 朱欣焰, 龚健雅. 从数字地图到空间信息网: 空间信息多级网格理论思考 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2003, 28(6): 642-650.
- LI D R, ZHU X Y, GONG J Y. From digital map to spatial information multi-grid: A thought of spatial information multi-grid theory [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(6): 642-650.
- [47] 高嘉良, 余丽, 仇培元, 等. 基于通用知识库的地理实体开放关系过滤方法 [J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(9): 1392-1401.
- GAO J L, YU L, QIU P Y, et al. A knowledge-based method for filtering geo-entity relations [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(9): 1392-1401.
- [48] 凌朝阳, 李锐, 吴华意, 等. 语义驱动的地理实体关联网络构建与知识服务 [J]. *测绘学报*, 2023, 52(3): 478-489.
- LING Z Y, LI R, WU H Y, et al. Semantic-driven construction of geographic entity association network and knowledge service [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(3): 478-489.
- [49] 叶帅, 王乃生, 游浩妍, 等. 一种知识图谱驱动的新型基础地理实体生产方法 [J]. *测绘地理信息*, 2024, 49(6): 82-87.
- YE S, WANG N S, YOU H Y, et al. A novel knowledge graph-driven method for producing new fundamental geo-entity [J]. *Journal of Geomatics*, 2024, 49(6): 82-87.
- [50] 谢腾, 杨俊安, 刘辉. 融合多特征 BERT 模型的中文实体关系抽取 [J]. *计算机系统应用*, 2021, 30(5): 253-261.
- XIE T, YANG J A, LIU H. Chinese entity relation extraction based on multi-feature bert model [J]. *Computer Systems and Applications*, 2021, 30(5): 253-261.
- [51] 陈晓玲, 唐丽玉, 胡颖, 等. 基于 ALBERT 模型的园林植物知识实体与关系抽取方法 [J]. *地球信息科学学报*, 2021, 23(7): 1208-1220.
- CHEN X L, TANG L Y, HU Y, et al. Extracting entity and relation of landscape plant's knowledge based on ALBERT model [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2021, 23(7): 1208-1220.
- [52] 苗琳, 张英俊, 谢斌红, 等. 基于图神经网络的联合实体关系抽取 [J]. *计算机应用研究*, 2022, 39(2): 424-43.
- MIAO L, ZHANG Y J, XIE B H, et al. Joint entity relation extraction based on graph neural network [J]. *Application Research of Computers*, 2022, 39(2): 424-43.
- [53] 柳建平, 杨晓宇, 岳丽华, 等. 一种基于 R^* -tree 的时空索引 [J]. *计算机工程*, 2003, 29(14): 60-62.
- LIU J P, YANG X Y, YUE L H, et al. A spacialtemporal index based on R^* -tree [J]. *Computer Engineering*, 2003, 29(14): 60-62.
- [54] MONDAL A, KAKKAR A, PADHARIYA N, et al. Efficient indexing of top-k entities in systems of engagement with extensions for geo-tagged entities [J]. *Data Science and Engineering*, 2021, 6(4): 411-433.
- [55] WANG Y, LI K Y, LI G L, et al. Road-aware indexing for trajectory range queries [J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2023, 35(8): 8476-8489.
- [56] 林星, 高勇, 张毅, 等. 对象关系数据库中的时空索引机制研究 [J]. *地理与地理信息科学*, 2006, 22(3): 31-34.
- LIN X, GAO Y, ZHANG Y, et al. On spatio-temporal data access methods in ORDBMS [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2006, 22(3): 31-34.
- [57] 朱庆, 冯斌, 李茂粟, 等. 面向动态关联数据的高效稀疏图索引方法 [J]. *测绘学报*, 2020, 49(6): 681-691.
- ZHU Q, FENG B, LI M S, et al. An efficient sparse graph index method for dynamic and associated data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(6): 681-691.
- [58] BRISABOA N R, GAGIE T, GÓMEZ-BRANDÓN A, et al. An index for moving objects with constant-time access to their compressed trajectories [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2021, 35(7): 1392-1424.
- [59] YUAN H T, LI G L. A survey of traffic prediction: From spatio-temporal data to intelligent transportation [J]. *Data Science and Engineering*, 2021, 6(1): 63-85.
- [60] 曹布阳, 冯华森, 梁峻浩, 等. 利用 Hilbert 曲线与 Cassandra 技术实现时空大数据存储与索引 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(5): 620-629.
- CAO B Y, FENG H S, LIANG J H, et al. Hilbert curve and Cassandra based indexing and storing approach for large-scale spatiotemporal data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(5): 620-629.
- [61] 黄曙荣, 彭静玉. 离散时空索引研究 [J]. *苏州大学学报(工科版)*, 2002, 22(5): 7-12.
- HUANG S R, PENG J Y. Research of index mechanisms in discrete spatio-temporal environment [J]. *Journal of Suzhou Institute of Silk Textile Technology*, 2002, 22(5): 7-12.
- [62] 秦伟, 张修远, 白璐斌, 等. 空间聚类模式发现研究进展: 概念、方法及应用 [J]. *地球信息科学学报*, 2025, 27(1): 116-130.
- QIN W, ZHANG X Y, BAI L B, et al. Research progress on spatial clustering pattern discovery: Concepts, methods and applications [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2025, 27(1): 116-130.
- [63] LIU H, YAN J N, WANG J L, et al. HGST: A Hilbert-GeoSOT

- spatio-temporal meshing and coding method for efficient spatio-temporal range query on massive trajectory data [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2023, 12(3): 113.
- [64] FERRO A, GIUGNO R, MONGIOVÌ M, et al. GraphFind: enhancing graph searching by low support data mining techniques [J]. BMC bioinformatics, 2008, 9(Suppl 4): S10.
- [65] 侯双双. 基于本体的语义索引技术研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
HOU S S. Research on Ontology-Based Semantic Indexing Technology [D]. Shanghai: East China Normal University, 2015.
- [66] 刘雅辉, 刘春阳, 张铁赢, 等. 图索引技术研究综述 [J]. 山东大学学报(理学版), 2013, 48(11): 44-52.
LIU Y H, LIU C Y, ZHANG T Y, et al. An overview of graph indexing technology [J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2013, 48(11): 44-52.
- [67] VAN A P. Digital updates at the Dutch Topographic Service [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996, 31: 891-900.
- [68] 陈军, 刘万增, 张剑清, 等. GIS 数据库更新模型与方法研究进展 [J]. 地理信息世界, 2008, 15(3): 12-16.
CHEN J, LIU W Z, ZHANG J Q, et al. Research progress of the model and method for GIS database updating [J]. Geomatics World, 2008, 15(3): 12-16.
- [69] 周焰, 肖强, 赵国成, 等. 基础地理空间数据持续更新模式分析 [J]. 测绘工程, 2014, 23(1): 12-16.
ZHOU Z, XIAO Q, ZHAO G C, et al. Research on fundamental geo-spatial data continuous updating model [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2014, 23(1): 12-16.
- [70] 傅仲良, 吴建华. 多比例尺空间数据库更新技术研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(12): 1115-1118.
FU Z L, WU J H. Update technologies for multi-scale spatial database [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(12): 1115-1118.
- [71] 魏雪梅. 多级时空数据库联动增量更新方法 [J]. 测绘通报, 2019(5): 134-138.
WEI X M. Linkage incremental update method of multilevel spatiotemporal database [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(5): 134-138.
- [72] 李香莉, 李恒利, 蔡冬梅. 土地利用现状图中数据缩编的质量控制分析 [J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(4): 175-177.
LI X L, LI H L, CAI D M. The quality control analysis of land use actualities map data generalization [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2012, 35(4): 175-177.
- [73] 赵栋梁, 刘达, 王永澍, 等. 国、省基础时空信息数据库联动更新方法研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(S1): 84-87.
ZHAO D L, LIU D, WANG Y S, et al. Research on the linkage updating method of national and provincial basic spatiotemporal information database [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2023, 46(S1): 84-87.
- [74] KARSZNIA I, PRZYCHODZE Ń M, SIELICKA K. Methodology of the automatic generalization of buildings, road networks, forests and surface waters: A case study based on the Topographic Objects Database in Poland [J]. Geocarto International, 2020, 35(7): 735-758.
- [75] HACAR M, GÖKGÖZ T. A new, score-based multi-stage matching approach for road network conflation in different road patterns [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019, 8(2): 81.
- [76] 许俊奎, 武芳, 魏慧峰. 神经网络在居民地面状匹配中的应用 [J]. 测绘科学技术学报, 2013, 30(3): 293-298.
XU J K, WU F, WEI H F. Areal settlements matching algorithm based on artificial neural network technique [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2013, 30(3): 293-298.
- [77] 赵沛, 曹郡, 贾瑞龙. 基于 hadoop 技术的医疗云数据安全管理系统设计与应用 [J]. 生命科学仪器, 2020, 18(3): 77-82.
ZHAO P, CAO J, JIA R L. Design and application of medical cloud data security management system based on hadoop technology [J]. Life Science Instruments, 2020, 18(3): 77-82.
- [78] 吴益玲, 周敏, 叶遥. 自然资源三维立体时空数据库管理系统设计与实现 [J]. 现代测绘, 2024, 47(6): 61-64.
WU Y L, ZHOU M, YE Y. Design and implementation of natural resources 3D spatio-temporal database management system [J]. Modern Surveying and Mapping, 2024, 47(6): 61-64.
- [79] 薛白茹, 徐婷. 测绘实景三维数据库管理系统的建设分析 [J]. 中国金属通报, 2024(5): 104-106.
XUE B R, XU T. Construction Analysis of a Surveying and Mapping Real 3D Database Management System [J]. China Metal Bulletin, 2024(5): 104-106.
- [80] 蒋凤钗. Spark 技术在自然资源数据管理中的应用研究 [J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(6): 41-45.
JIANG F C. Application of spark technology in natural resource data management [J]. Techniques of Automation and Applications, 2022, 41(6): 41-45.
- [81] 王秀慧. 省级自然资源和空间地理数据共享平台构建研究 [J]. 河北省科学院学报, 2023, 40(2): 39-45.
WANG X H. Research on the construction of provincial natural resources and spatial geographic data sharing platform [J]. Journal of the Hebei Academy of Sciences, 2023, 40(2): 39-45.
- [82] 刘亚楠. 自然资源测绘地理信息共享与服务的研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(5): 57-59.
LIU Y N. Research on the sharing and service of surveying and mapping geographic information of natural resources [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2022, 45(5): 57-59.
- [83] 周显芳. 省级空间地理信息资源共享平台设计 [J]. 大数据时代, 2018(5): 8-10.
ZHOU X F. Design of the provincial spatial geography information sharing platform [J]. Big Data Time, 2018(5): 8-10.
- [84] 周煜莹, 崔岩松, 王丹志, 等. 基于自适应分片的大文件快速上传 [J]. 计算机系统应用, 2022, 31(7): 143-148.
ZHOU Y Y, CUI Y S, WANG D Z, et al. Fast upload of large files based on adaptive slicing [J]. Computer Systems and Applications, 2022, 31(7): 143-148.
- [85] 黄诗颖, 黄涛. 自然资源领域知识图谱构建与应用研究 [J]. 自然资源信息化, 2023(4): 53-59.
HUANG S Y, HUANG T. Research on knowledge graph construction

- and application in natural resources field [J]. *Natural Resources Informatization*, 2023(4): 53-59.
- [86] 李彦胜, 钟振宇, 孟庆祥, 等. 遥感时空知识图谱驱动的自然资源要素变化图斑智能净化[J]. *地球信息科学学报*, 2025, 27(2): 350-366.
- LI Y S, ZHONG Z Y, MENG Q X, et al. Intelligent purification of natural resource element change polygons driven by remote sensing spatiotemporal knowledge graphs [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2025, 27(2): 350-366.
- [87] YU T Y, JIANG C Y, LOU C, et al. SeqGPT: An out-of-the-box large language model for open domain sequence understanding [J]. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2024, 38(17): 19458-19467.
- [88] 刘凤, 钟志农, 贾庆仁, 等. 面向富语义复杂事件的时空数据建模[J]. *地理学报*, 2024, 79(7): 1700-1717.
- LIU F, ZHONG Z N, JIA Q R, et al. Spatio-temporal data modeling of rich semantic for composite events [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(7): 1700-1717.
- [89] TIAN Y, YAN T, ZHAO X, et al. A learned index for exact similarity search in metric spaces [J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2022, 35(8): 7624-7638.
- [90] WU S, PANG Z F, CHEN G, et al. NEIST: A neural-enhanced index for spatio-temporal queries [J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2021, 33(4): 1659-1673.
- [91] DONG S J, WANG L B, DU B, et al. ChangeCLIP: Remote sensing change detection with multimodal vision-language representation learning [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2024, 208: 53-69.
- [92] CHEN H, YOKOYA N, CHINI M. Fourier domain structural relationship analysis for unsupervised multimodal change detection [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, 198: 99-114.

(责任编辑 王海锋)