引文格式:朱庆,杨婷,丁雨淋,等.实体关联网络引导的三维地层建模方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(5):1025-1035.DOI:10.13203/j.whugis20240182

Citation:ZHU Qing,YANG Ting,DING Yulin,et al.Entity Association Network-Guided Method for Three-Dimensional Stratigraphic Modeling[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(5):1025-1035.DOI:10.13203/j.whugis20240182

实体关联网络引导的三维地层建模方法

朱 庆[1] 杨 婷[1] 丁雨淋[1] 吴浩宇[1] 王 强[2]

1 西南交通大学地球科学与工程学院,四川 成都,611752

2 兰州交通大学测绘与地理信息学院,甘肃 兰州,730070

摘 要:广域三维地层模型对铁路公路等重大基础设施勘察设计、地下空间资源开发、灾害风险评估等具有重要支撑作用。区域地质报告、地质图等广域范围地层数据存在地层信息描述粒度不一、缺乏地层邻接及空间分布关系的结构化描述、地层时间、空间及属性特征信息零散、缺少关联等问题。采用现有三维地层建模方法常运用的关系型实体组织模式组织广域范围地层数据会导致多维度关系和多元属性难以精准地表达,影响广域地层建模效率。为此,提出了实体关联网络引导的三维地层建模方法,首先构建地层实体异构图关联网络,利用ChatGPT从地质报告中抽取的地层特征信息及地质图内蕴的地层特征信息,实现地层实体的时间-空间-属性特征及多域特征共同约束下关联关系的集成表达;并基于地层实体异构图关联网络快速构建虚拟钻孔,引导区域三维地层建模。选择典型区域,整合数字高程模型、区域地质报告及地质图等数据的地层特征及关系信息,构建地层实体关联网络引导三维地层模型的生成,验证了研究方法的有效性。

关键词:三维地层模型;地层多域特征;异构图;关联网络;ChatGPT

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-01-20

DOI:10.13203/j.whugis20240182 **文章编号**:1671-8860(2026)05-1025-11

Entity Association Network-Guided Method for Three-Dimensional Stratigraphic Modeling

ZHU Qing[1] *YANG Ting*[1] *DING Yulin*[1] *WU Haoyu*[1] *WANG Qiang*[2]

1 Faculty of Geosciences and Engineering,Southwest Jiaotong University,Chengdu 611752,China

2 Faculty of Geomatics,Lanzhou Jiaotong University,Lanzhou 730070,China

Abstract: **Objectives**: Wide-area three-dimensional stratigraphic models play a crucial supporting role in the survey and design of major infrastructure projects such as railways and highways, the development of underground space resources, and disaster risk assessment. However, wide-area stratigraphic data, including regional geological reports and geological maps, are characterized by varying granularity of stratigraphic information, a lack of structured descriptions of stratigraphic adjacency and spatial distribution relationships, and scattered and poorly associated spatiotemporal and attribute characteristic information. The relational entity organization models commonly used in existing three-dimensional stratigraphic modeling methods struggle to accurately represent multi-dimensional relationships and multi-attribute characteristics, thereby limiting modeling efficiency. **Methods**: To address this issue, we propose a three-dimensional stratigraphic modeling method guided by an entity association network. First, a stratigraphic entity heterogeneous graph association network is constructed. Stratigraphic characteristic information extracted from geological reports, together with inherent stratigraphic information derived from geological maps using ChatGPT, is integrated to achieve a unified representation of association relationships under the joint constraints of spatio-

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB3904100)。

第一作者:朱庆,博士,教授,主要研究方向为数字摄影测量、多维动态GIS与虚拟地理环境。zhuqing@swjtu.edu.cn

通信作者:丁雨淋,博士,教授。dingyulin@swjtu.edu.cn

temporal, attribute, and multi-domain characteristics of stratigraphic entities. Based on the stratigraphic entity heterogeneous graph association network, virtual boreholes are rapidly constructed to guide regional three-dimensional stratigraphic modeling. **Results**: By selecting typical areas and integrating stratigraphic characteristics and relationship information from digital elevation model, regional geological reports, geological maps, and other data, the stratigraphic entity association network is constructed to guide the generation of a three-dimensional stratigraphic model. **Conclusions**: The effectiveness and applicability of the proposed method are validated through these case studies.

Key words: three-dimensional stratigraphic model; multi-domain features of strata; heterogeneous graph; association network; ChatGPT

地质空间信息本质具有三维性质[1],构建三维模型还原真实的地质环境能直观、完整、准确地反映复杂的地质构造和边界条件,提高地质资料的易理解性,不仅对铁路公路等重大基础设施勘察设计、地下空间资源开发、灾害风险评估等具有重要支撑作用[2],还可以促进地球科学的发展[3]。目前,三维地质建模方法主要以数据驱动为主[4],常用的方法包括基于钻孔数据的建模方法[5]、基于剖面的建模方法[6]、基于地球物理数据的建模方法[7]、基于平面地质图的建模方法[8]及多源数据融合的建模方法[9]等。以上方法主要针对小区域范围进行建模,建模数据、地质特征信息及实体关系清晰明确,通过关系型组织模式以表格形式对地质数据信息进行分类组织就能满足数据关联查询的需求。但是,在广域尺度下,地层数据多源异质且高度非结构化,地层特征信息分布零散,实体关系繁杂。关系型数据库需要预先定义好表的结构和字段,且表示多要素的关系时利用多表连接,处理复杂关系和异质数据时存在局限[10]。同构图的节点和边为单一类型,其结构仅表示基本的连接关系,缺乏对多样化实体及其复杂关系的表达能力[11]。因此通过关系型、同构图等空间实体组织模式难以有效处理这些复杂的语义关系和零散的特征信息,导致零散且多源异质的地层实体数据难以整合与关联,影响三维模型地层建模效率。

建立适应地层特点的知识表达模型,是实现地层知识组织与三维地层建模的关键基础[12]。知识图谱作为一种具有强信息整合和知识表达能力的技术,为地质数据的知识组织和关联提供了有效手段[13]。虽然其在多个领域取得了显著进展,但由于图结构固有的限制以及时空数据的复杂性,导致时间变化和事件序列难以有效表示,无法准确表达多尺度数据,以及处理多对多、多层次和嵌套关系[14],在处理时间和空间维度的建模以及实体间复杂关系的表达方面仍显示出了一定的局限性[15]。因此,在广域地层建模领域,借鉴知识图谱技术,设计基于异构图结构的地层时间-空间-属性特征及复杂关系的集成表达模型,构建地层多域特征关联网络,继而支撑广域范围内的三维地层建模,是一种可行的方案。

针对上述问题,本文首先通过分析地质报告、地质图等广域范围地层数据的特点,从地层实体的特征表达和关系表达出发,提出了地层实体关联网络表达模型;其次,借鉴知识图谱的构建方法,对文本及图件中的非结构化多域特征信息进行抽取,并采用异构图的方式建立地层实体关联网络,统一组织零散、庞杂且高度非结构化的地质数据信息,显式表达时间-空间-属性多域特征共同约束的地层实体关系;最后,基于实体关联网络快速构建全域虚拟钻孔,引导广域三维地层建模,提升了地质数据的利用能力。本文方法可以较好地解决使用关系型数据库表达广域地层实体及关系信息时,需要分别建立表格,容易产生大量数据冗余,以及在关系查找时需要执行繁琐的连接操作、查询效率低的问题,同时具有较高的深度关系检索能力,能够大大提高其实用价值。本文主要流程如图1所示。

1 地层实体异构图关联网络构建

基于地层信息描述的结构特点,解析并抽取与地层实体相关的时间、空间、属性等信息,将地质图作为重要的知识来源,以结构化、关联化的语义网络结构表示多源数据描述的地层实体多域特征及关联关系,继而在区域地层建模中发挥作用。本文面向时间、空间、属性特征,给出了地层多域特征关联网络构建流程与方法:(1)地层实体信息抽取。(2)基于异构图的地层实体信息表达。(3)地层多域特征关联网络构建。

1.1 地层实体异构图关联网络模型

顾及广域地层数据信息描述粒度不一、地层

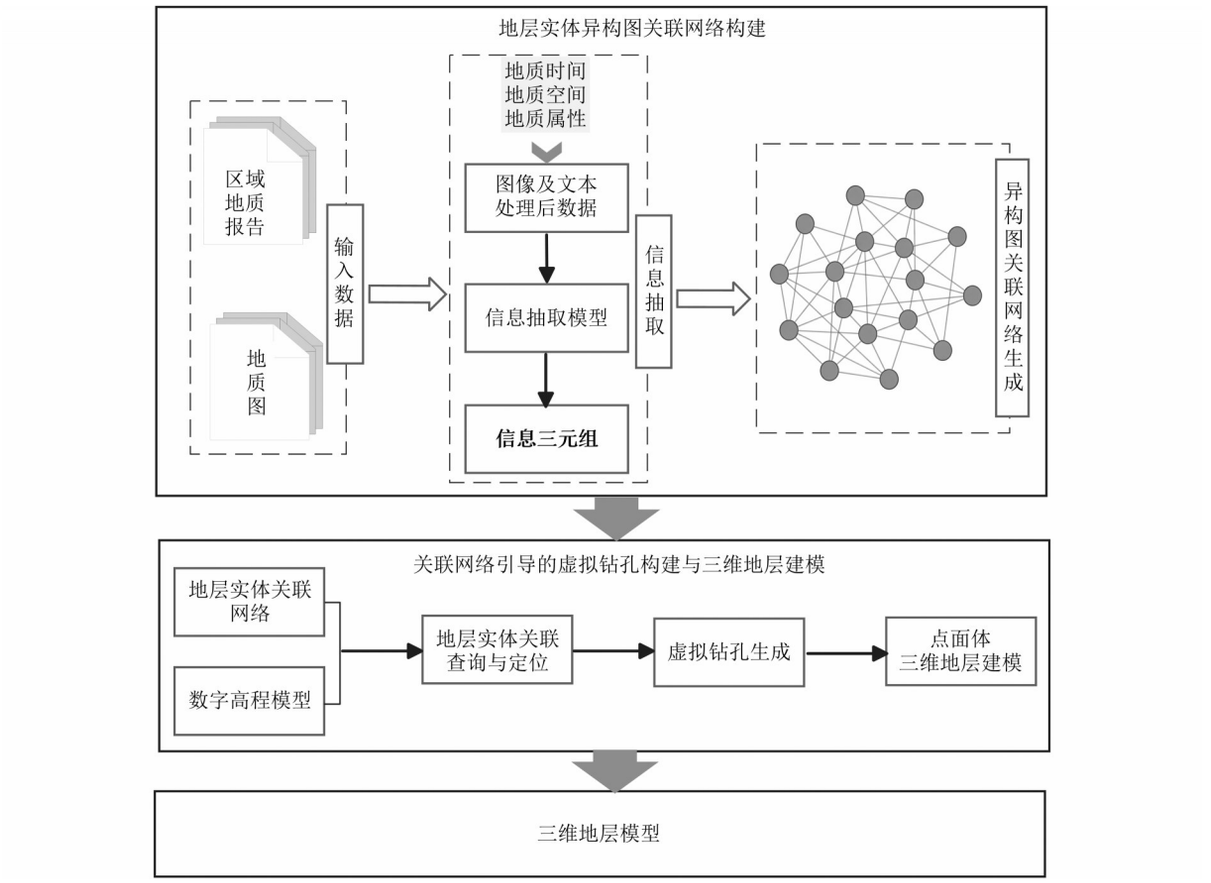


图 1　地层实体异构图关联网络构建与地层建模流程

Fig. 1　Construction of Stratum Entity Association Network and Stratigraphic Modeling Process

邻接及空间分布关系以非结构化描述为主、地层时间、空间、属性特征信息零散、缺少关联的问题及建模应用需要,本文提出地层实体异构图关联网络模型,对地层实体的多域特征和关系进行结构化描述。

1.1.1　地层实体时间-空间-属性特征

与通用领域数据不同,在地层数据中,地层实体具备更多的地质时间、空间、属性特征[16]。因此,顾及领域数据特点和应用需求,地层实体异构图关联网络模型面向区域地质报告、地质图及数字高程模型(digital elevation model,DEM)等数据,将地层实体的特征信息按照地质时间、地质空间和地质属性特征进行分类和组织,突出多域特征关联。

地质时间特征主要反映地质年代信息,表征地质体的形成顺序以及地质事件发生的相对年代或绝对年龄[17]。地质时间主要是依据地质年代表,最大一级(第一级)的地质年代单位是宙,第二级单位是代,第三级单位是纪,第四级单位是世[18]。以及对应于地质年代单位时期的地层划分单位为宇、界、系、统、阶,指相应的地质年代时间内所形成的地层。在文本地质资料中,时间信息的描述方式多样,根据上下文和段落内容的不同,可包括具体年代的描述、地质时期和地层时代的描述以及涉及地层层序关系的相对时间描述等。地质图中通常采用地层时代进行描述,按照较小尺度的地层单位群组来对时代特征、区域、岩性等因素进行划分,形成一个相对完整的地质时序框架,例如东大桥组、甲丕拉组等。

地质空间特征主要包括空间位置信息和空间关系信息[19],在地质文本资料中,地质实体的空间信息表达包含两种方式:(1)精确化表达。这种方式依赖于经纬度坐标提供具体位置的精确描述。(2)模糊性表达。这种方式基于地域名称或地址描述。虽然地质图是二维图件,但其通过巧妙的符号系统和地理坐标系统的综合应用,也能够表达具体的空间位置信息。通过文本地质资料中的地质空间信息将地质实体空间化,能够在地理空间上与地质图实现整合。

地质属性特征描述了地质实体在特定场景下的非空间信息[20]。在地质文本中,属性信息的类型多种多样,主要分为可度量属性和不可度量属性。可度量属性指存在数值关系且可通过数值进行度量的属性,例如地层的厚度。不可度量属性主要为描述性质的属性,难以用具体数值表示,例如岩石的颜色、纹理、构造要素的类型(断

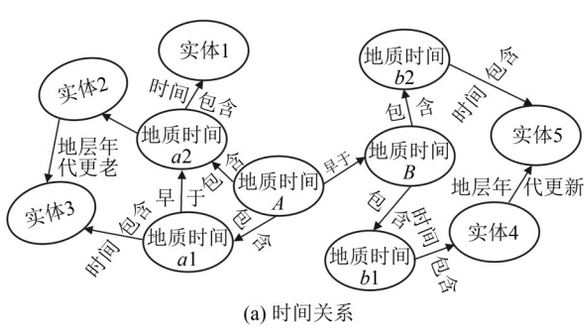
层、褶皱等)、地层的命名、岩性等。在地质图件中,属性信息通过符号的类型和颜色进行表达,通常为不可度量属性,如地质图上使用不同的颜色代表不同的岩石类型和地层单元、通过少量标注文字描述地层命名等。

1.1.2 地层实体的时间-空间-属性关系

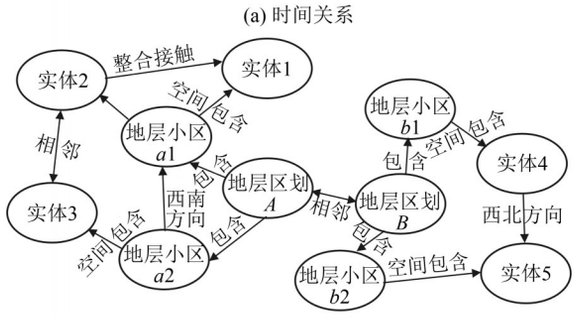
地层实体之间的时间关系反映了地球演化过程中不同地层的形成顺序和时代联系。通过在时间维度上对地层实体进行组织,可以分析不同地质年代下地层实体的各种特征,从而提高对关联信息的发现能力[21]。根据应用需要,本文主要考虑时间拓扑关系,它是不同地学现象之间相关性研究的基础[22],其中的相离关系(包括早于、晚于及在…之间)和包含关系在地层实体的时间关系中比较重要。时间关系模型G_T(图2(a))定义为:

$$G_T=(T, E, R_{TT}) \tag{1}$$

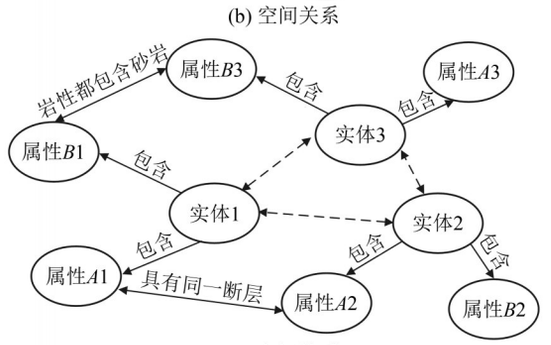
式中,T为地质时间集;E为地层实体集;R_{TT}为时间拓扑(temporal topology,TT)关系集。



(a) 时间关系



(b) 空间关系



(c) 空间关系

图2 地层实体的时间-空间-属性关系

Fig. 2 Temporal-Spatial-Attribute Relationships of Stratigraphic Entities

空间关系是地质实体之间由空间位置而产生的关系[23],包括拓扑关系、距离关系和方向关系[24]。其中拓扑关系和方向关系是地质空间域中关注的重点,拓扑关系描述地质要素之间的空间连接方式,主要涉及接触、相交、包含等关系。如地层间的整合接触、平行不整合接触、角度不整合接触等;一个地质要素穿过另一个地质要素形成相交关系,通常表示构造活动如断层。方向关系描述两个实体对象之间的空间顺序关系,旨在确定实体目标的方向信息[25]。空间拓扑关系和方向关系可直接基于地层实体进行表达,也可基于地层实体所属地层区划位置进行间接表达。空间关系模型G_S(图2(b))定义为:

$$G_S=(S, E, R_{ST}, R_{SD}) \tag{2}$$

式中,S为地层区划实体集;R_{ST}为空间拓扑(spatial topology,ST)关系;R_{SD}为空间方向(spatial direction,SD)关系。

属性关系指地层实体之间属性特征的关系。地层实体之间的属性关系涵盖岩性、地层厚度、构造特征等方面的相互联系。根据应用需要,特别关注地层实体属性关系中的定性关系,这种关系描述的是实体整体或各个属性项之间的相互关联,例如某个地层实体的岩性是否与另一个地层实体岩性存在相似,而不具体量化这些关系的强度或程度,记录关系类型即可。属性关系模型G_A(图2(c))定义为:

$$G_A=\left(E_i, E_j, R_A\right) \tag{3}$$

式中,E_i、E_j表示不同的地层实体;R_A为地层实体之间的定性属性集合。

1.1.3 基于异构图的地层实体关联网络模型

本文旨在表达地层实体的不同特征及关系,故采用异构图[26]的方式以实现更加丰富具体的表达。运用Neo4j图数据库进行地层实体关联网络模型的结构化表达,该数据库是一种高性能的NoSQL的图形数据库。相较于关系型数据库,Neo4j在查询速度上更快,且具有完善的图查询语言和优化的多跳查询性能[27]。本文针对3个特征域抽取得到的地层实体信息采用分层的节点结构进行组织和存储,以确保信息的有序管理和高效检索。具体包括以下关键层级:(1)地层实体作为整个关联网络结构的一级节点,是整个网络架构的基础,其下联接着多个二级节点;(2)二级节点包括地质时间、空间、属性特征,直接挂接在地层实体节点上,使得每个地层实体的核心特征被清晰地定义和组织;(3)各个具体的数据项如地质年代的具体数值、空间位置的坐标点或其

他相关地质属性,被定义为三级节点或更高层次的节点,进一步细化了地质数据的存储与表达。再分别构建地层实体的时间、空间与属性关联关系,关系节点挂载在相应的特征节点上面。地层实体关联网络模型的结构化表达如图 3 所示。

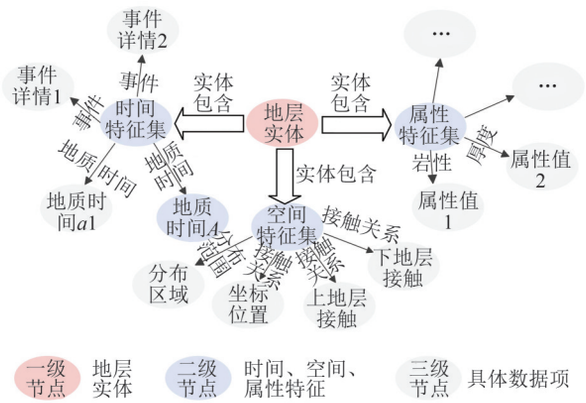


图 3　地层实体关联网络模型的结构化表达

Fig. 3　Structured Representation of the Stratigraphic Entity Association Network Model

1.2　区域地质报告及地质图数据的地层实体信息抽取

地层领域信息可分为文本信息和图像信息。由于地层领域信息缺乏公开标注的数据集,地层信息抽取仍然面临挑战[28]。ChatGPT 擅长理解和处理上下文信息[29],有利于解决地质报告中信息分散、上下文信息不连贯的问题[30]。因此本文通过设计有效的提示策略,将区域地质报告中的地层信息抽取转化为问答任务,通过 ChatGPT+Prompt 方法实现区域地质报告中地层实体的时间、空间和属性特征信息提取。地质图能够表达出露地层的空间位置信息、空间关系、地质年代及属性信息。鉴于从地质图中提取细致的语义概念的需求,根据其图例信息、坐标信息、属性表及目视解译结果,抽取地质图的属性信息,建立图像内部实体间的关系。区域地质报告及地质图信息抽取技术示意图如图 4 所示。

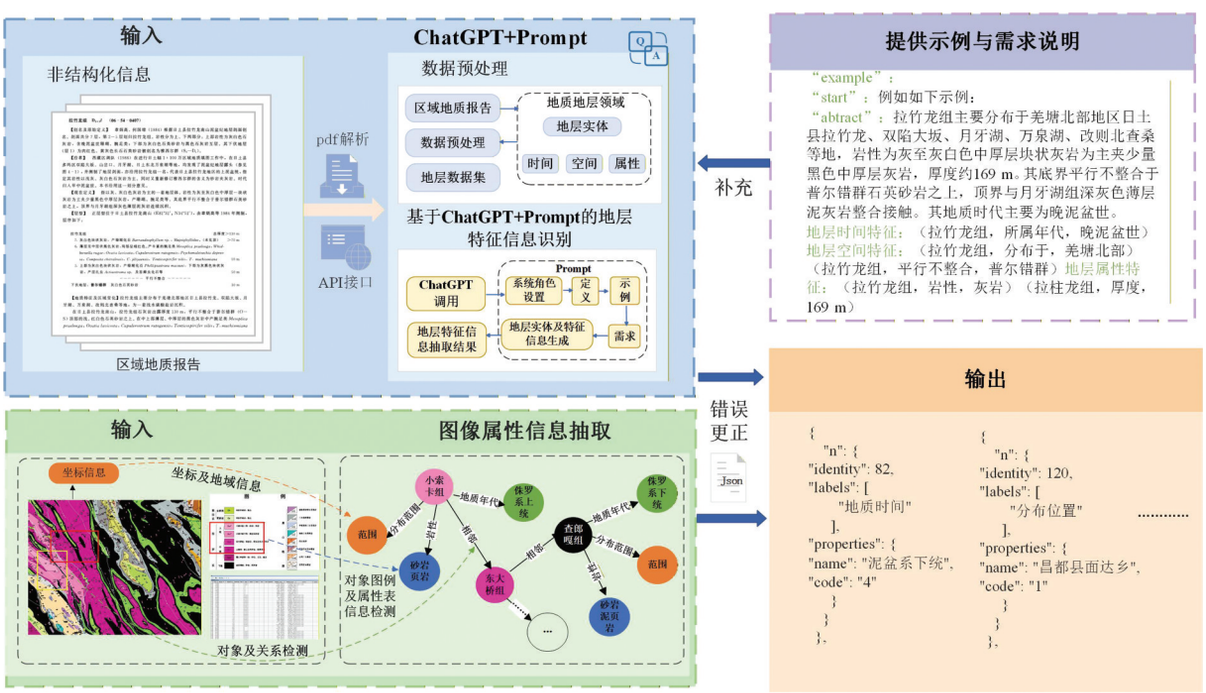


图 4　区域地质报告及地质图信息抽取

Fig. 4　Extraction of Information from Regional Geological Reports and Geological Maps

将区域地质报告作为输入数据,经过预处理后形成的地层数据集导入到 ChatGPT 中,调用 ChatGPT 的应用程序编程接口进行实验,默认参数为官方推荐值。本文采用单轮对话,构建符合地层实体及地层时间-空间-属性特征提取任务需求的 Prompt 进行抽取,流程可抽象为 Prompt=(定义,示例,需求)[31]。将地质图作为输入数据,顾及地理坐标系统,根据其属性表及解译结果抽取图像的属性信息,建立图像内部实体间的关系,相较于地质报告文本能够更加直观地描述出露地层的空间关系,对补充具体的出露地层对象的矢量表示、岩层属性及空间关系等方面都具有非常大的潜力。

1.3　地层多域特征关联网络生成

完成地质报告及地质图中地层实体的时间、空间和属性特征信息的抽取后,再构建地质时间、空间、属性特征的关联网络。在构建过程中,每个节点具有唯一的 ID 值,以避免节点冲突[32]。

1.3.1 时间特征关联构建

首先,定位每个地层实体的时间特征节点,并遍历这些实体的具体地质年代信息。随后,基于已有的时间数据和时间拓扑关系,建立各个地层实体时间特征节点之间的拓扑联系。时间特征关联构建可以有效地组织和理解地层数据中的时间维度,有助于分析地层实体之间的时间关系,从而支持更深入的地质研究。

1.3.2 空间特征关联构建

主要针对空间拓扑关系及方向关系进行构建。首先,引入地层实体所属的地层区划集,该集合内已定义空间拓扑关系。定位每个地层实体的空间特征节点,并遍历其地层区划、位置及接触信息,以建立空间位置节点及地层区划节点之间的拓扑关系,从而确保空间数据的准确关联和表示。随后,构建空间方向关系,定位各个地层实体的空间特征节点,并获取其方位信息。基于这些信息,建立地层实体之间的空间方位关系,这有助于更清晰地理解地层实体在空间上的相互定位和相互作用。

1.3.3 属性特征关联构建

根据属性特征关联构建后的意义和价值,明确要建立关联关系的属性,主要涉及地层的岩性、地质时代、构造特征等方面的相互联系。基于领域约束规则或知识判断关系是否存在来建立属性关联。如图5所示,本文将地层数据的多特征进行关联,从而生成地层多域特征关联网络。

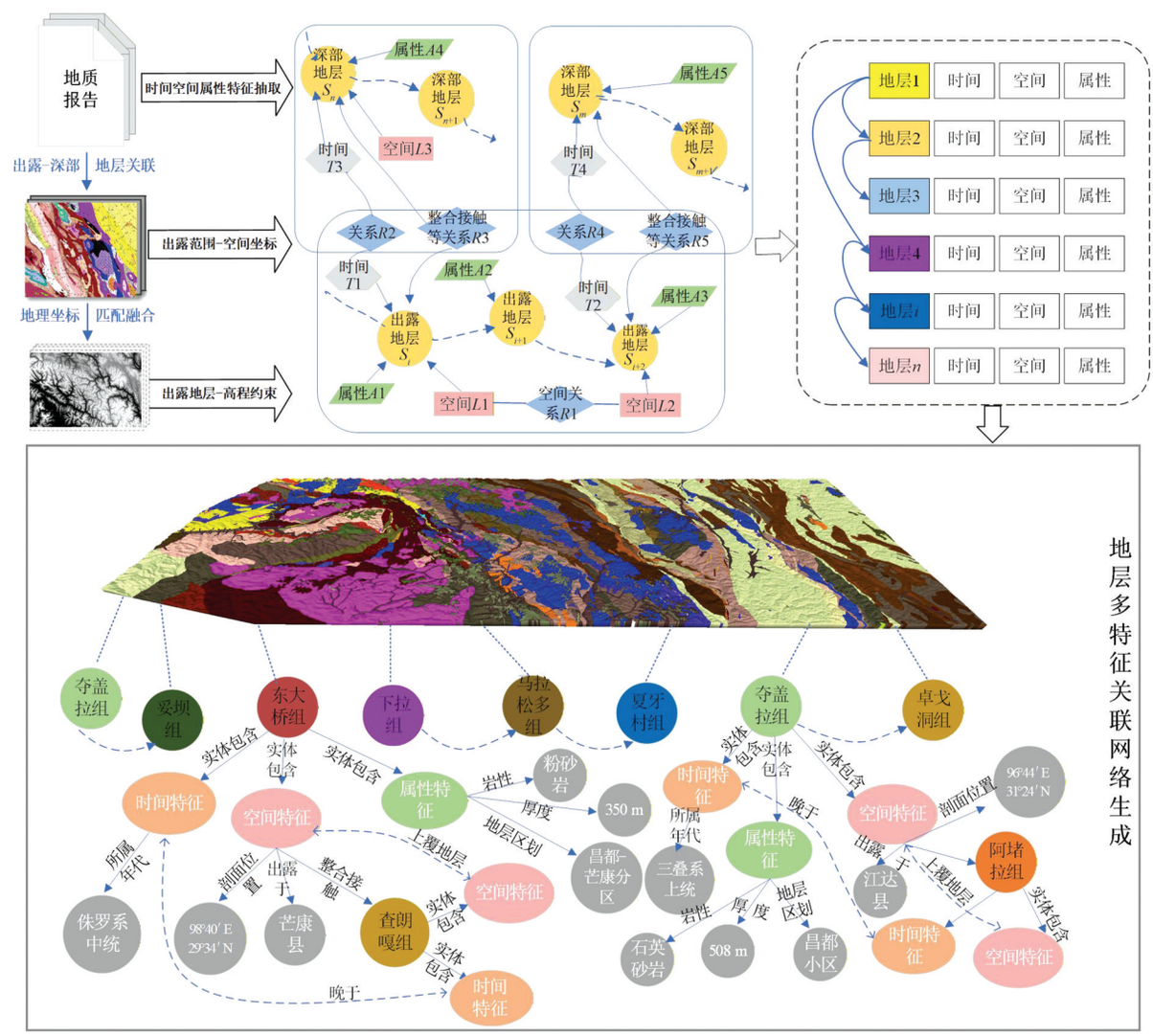


图5 地层实体多特征关联网络生成

Fig. 5 Generation of Multi-Feature Association Network for Stratigraphic Entities

本文的地层实体异构图关联网络提供了一种高度定制的方法来处理和表达广域地层数据。地层实体异构图关联网络能够实现区域地质报告、地质图及地形数据不同源的数据融合,将多源数据综合在一个统一的框架下,极大程度丰富了数据的维度和应用范围。在节点构建方面,本

文网络在地层实体节点上建立了时间、空间、属性特征3个主要节点。每个节点不仅承载着各自维度的特征信息,还挂接了这些特征维度间的关系。这种结构化的节点设计使得地层实体的每一面都能得到详细的表述和深入的分析,通过在时间维度上对地层实体进行组织,能够分析不同地质年代下地层实体的其他各种特征;通过在空间维度上对地层实体进行组织,可以实现空间位置和丰富语义信息的结合;通过在属性维度上对地层实体进行组织,能够分析某一属性相关联的地层实体在时间和空间维度上的异同。

此外,网络节点的内涵在这种关联网络中也得到了扩展。在传统的知识图谱中,一个地层实体可能只对应一个实体节点。而在地层实体异构图关联网络中,一个地层实体由多个节点组成,每个节点可能代表地层实体的某个特征集或实体属性值等,使其能更好地服务于地层领域的需求,增加了网络的灵活性和细致度,为实际应用提供了重要的支持和价值。

2　基于关联网络的虚拟钻孔构建与三维地层建模

2.1　虚拟钻孔构建与三维地层建模方法

在异构图关联网络引导下构建三维地层模型流程图如图6所示,主要包括3个核心步骤:(1)地层实体关联查询与定位。根据地质图上划定的建模范围内包含的出露地层实体,查询检索异构图关联网络,确定出露地层实体的深部地层实体及其层序、空间、属性关系。利用这些关系,可以精确定位各地层实体在三维空间中的关系,为后续的虚拟钻孔构建和建模提供基础。(2)虚拟钻孔构建。利用Python处理定位到的地层实体异构图关联网络中包含的地层实体的层序、空间关系、属性信息及DEM,快速构建虚拟钻孔以模拟地层的纵向分布。(3)经过对虚拟钻孔的生成,使得所有数据统一成钻孔,可相应地将问题简化为基于钻孔数据运用插值方法进行三维地层建模的构建[33]。采用一种“点面体”的建模方案,对全域钻孔进行钻孔地层面编号处理,以钻孔坐标点为离散点,再以建模区域边界及各个层面的控制点高程信息为约束,利用自然邻域法插值构建各个地层面的不规则三角网(triangulated irregular network,TIN)。将DEM-TIN作为顶面,最低点平面为底面,对各个地层面进行相交处理,然后将上下地层面缝合,构成三维地层模型。

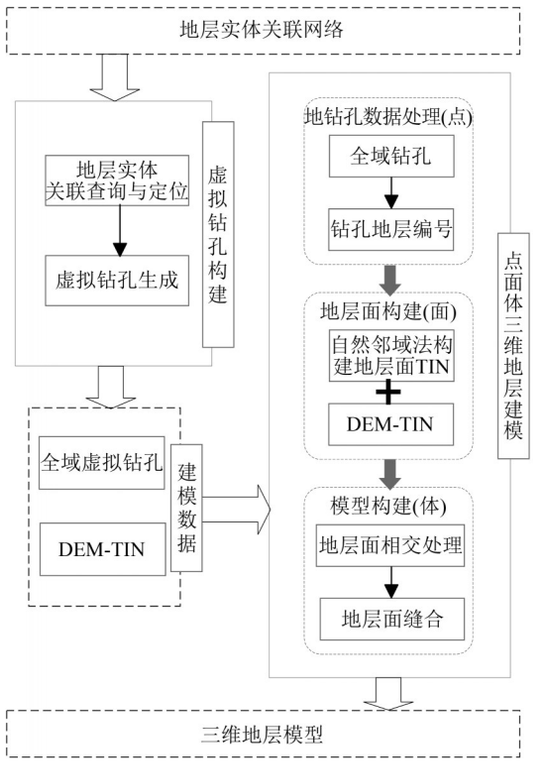


图6　虚拟钻孔构建与三维地层建模流程图

Fig. 6　Flowchart of Virtual Borehole Construction and 3D Formation Modeling

2.2　研究实例

选择中国西部高原地形复杂、环境艰险的地区作为研究区域,对本文方法的有效性与可靠性进行验证。整合DEM、区域地质报告及地质图等数据,构建区域地层实体异构图关联网络,实现地层实体的时间-空间-属性特征及多域特征共同约束下关联关系的集成表达,并基于地层实体异构图关联网络快速构建了该区域的虚拟钻孔,实现区域三维地层建模。如图7所示,本文构建了区域地层实体异构图关联网络,并在实体关联网络中对地质图中出露地层实体下拉组的空间特征节点进行查询,识别与地层实体下拉组通过有向关系连接的其他地层节点,可直观地展示出出露地层下拉组的深部地层层序与厚度属性信息。

利用Python强大的数据处理能力及Neo4j的高效图数据库特性,可以快速构建出建模范围内的虚拟钻孔,为三维地层建模提供数据支持。使用Python脚本建立与Neo4j的连接,通过针对性的Cypher查询,从异构图实体关联网络中提取地层实体的厚度、岩性等信息,这些信息是生成虚拟钻孔的基础,如图8所示。然后使用Python进行数据处理和分析,生成虚拟钻孔。本文利用虚拟钻孔对地质图进行离散化处理,既可以保证模型的精度,又能提高建模的效率。

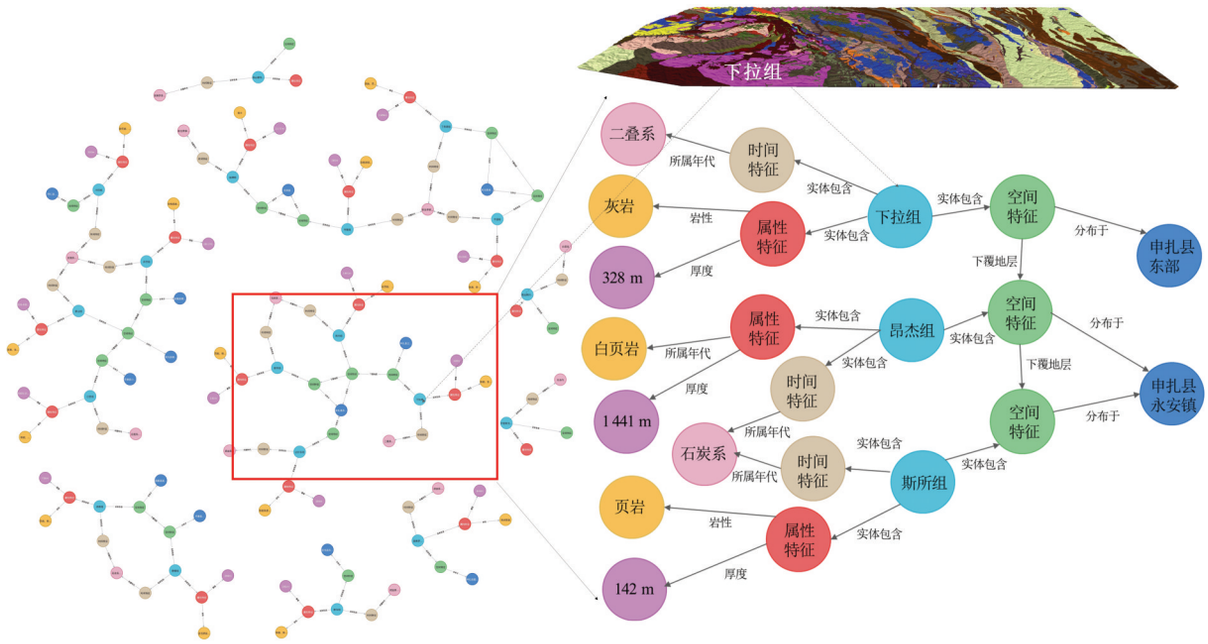


图7 地层实体关联查询与定位

Fig. 7 Associative Querying and Localization of Stratigraphic Entities

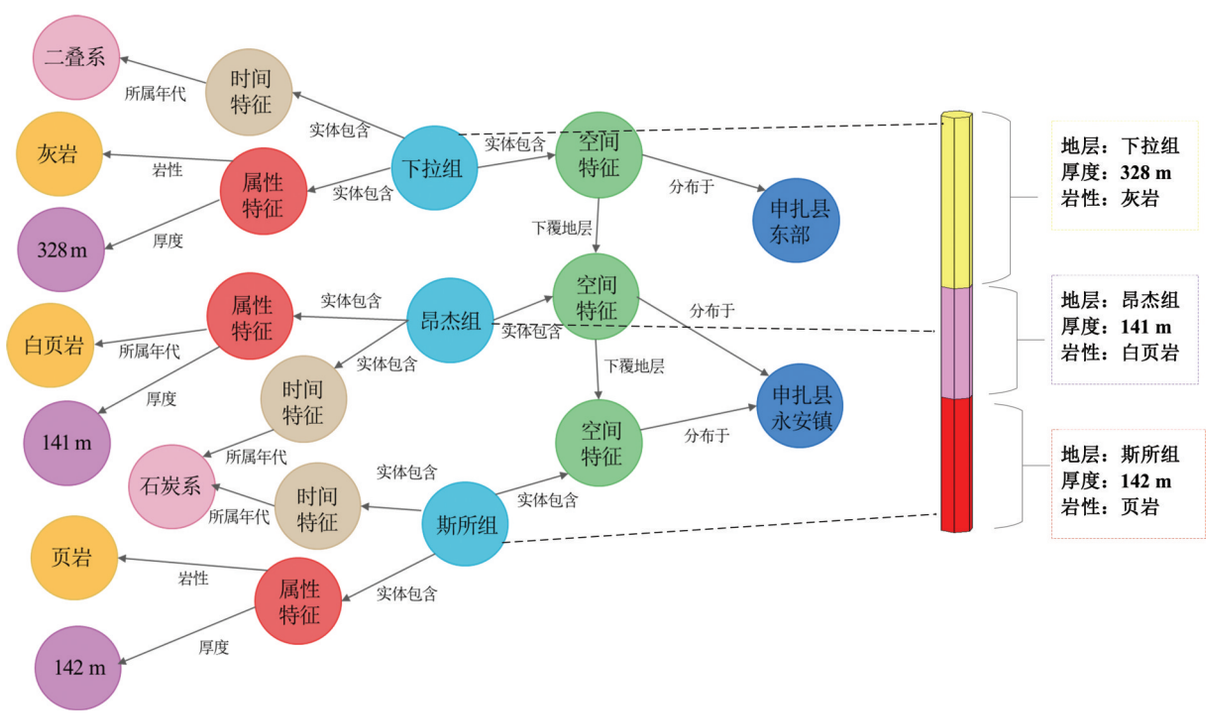


图8 虚拟钻孔生成

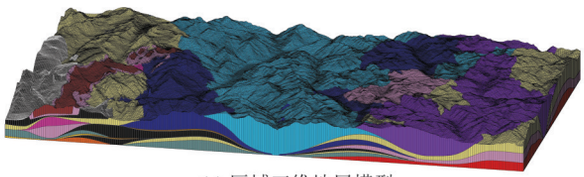
Fig. 8 Generation of Virtual Boreholes

经过对虚拟钻孔的生成，使得所有数据统一成钻孔，运用点面体的建模方案，对全域钻孔进行钻孔地层面编号处理。然后，以钻孔坐标点为离散点，以建模区域边界及各个层面的控制点高程信息为约束，利用自然邻域法插值构建各个地层面TIN。再将DEM-TIN作为顶面，最低点平面为底面，对各个地层面进行相交处理，将上下地层面缝合，构成三维地层体模型，最终构建的模型如图9所示。

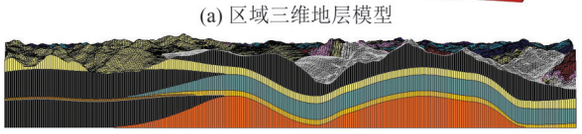
2.3 模型结果分析

将本文实体关联网络引导的三维地层建模方法过程与传统建模方法过程进行对比分析，结果见表1。

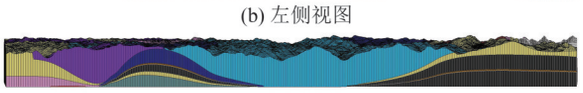
传统建模方法在建模流程中人力成本较高，本文建模方法能够显著减少人工操作的步骤和时间，降低了用户的建模成本。本文建模方法将地质图件及地质报告中蕴含的非结构化的专家经验知识及地质知识进行抽取并用于建模，



(a) 区域三维地层模型



(b) 左侧视图



(c) 后侧视图

图 9　三维地层模型

Fig. 9　3D Stratigraphic Model

能够有效解决原始勘探数据不完备条件下的区域地层建模。但由于地质资料的不确定性,并且通过算法插值构建的三维地质模型与实际情况本身存在一定的偏差,导致地质模型具有一定的不确定性。在没有原始勘探数据的情况下,将本文模型的结果与收集到的该区域地层简表进行对比验证,对比结果如表 2 所示。在位置 A 和 B,分别对本文模型结果的剖面地层层序及地层厚度与地层简表对应信息进行对比分析。本文模型生成的地层层序与地层简表的地层层序一致,且地层厚度也符合地层简表的厚度范围,表明在该区域通过本文模型构建的地层模型有一定的可靠性,能够在建模成本与精度上取得平衡。

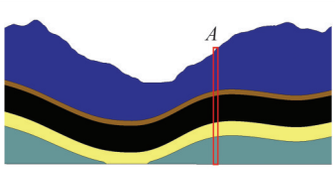
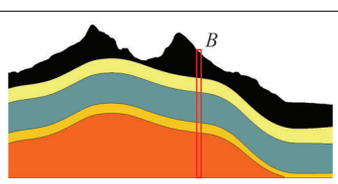
表 1　建模方法对比分析

Table 1　Comparison Analysis of Modeling Methods

建模方法	建模流程	运行时间	说明
传统建模方法	数据处理	若干	地质专家手动整理和提取特征信息
	查询	＞1 s	关系型数据库,多表连接查询复杂
	建模	＞30 min	解译成剖面,软件中手动建模,过程繁琐
本文建模方法	数据处理	若干	运用 ChatGPT 等自动抽取特征信息
	查询	＜1 s	图关联网络,针对性的 Cypher 语句查询
	建模	＜30 min	自动构建虚拟钻孔,建模步骤减少

表 2　地层简表与本文模型结果对比验证

Table 2　Comparison and Validation Between the Stratigraphic Summary Table and the Results of the Proposed Model

位置	模型剖面图	地层简表		本文模型	
		地层层序	厚度/m	地层层序	厚度/m
位置 A		昂杰组	≤1 441	昂杰组	1 083
		斯所组	≤142	斯所组	140
		汤莱组	≤736	汤莱组	731
		朋嘎组	≤398	朋嘎组	369
		查果罗玛组	—	查果罗玛组	—
位置 B		汤莱组	≤736	汤莱组	719
		朋嘎组	≤398	朋嘎组	391
		查果罗玛组	≤844	查果罗玛组	826
		郎马组	≤281	郎马组	277
		达尔东组	—	达尔东组	—

3　结　语

本文面向区域地质报告文本及地质图件数据,提出了基于异构图的地层实体关联网络,建立了地层特征及复杂关系的集成表达模型,利用 ChatGPT 抽取地质报告中的地层特征信息,并依据地质图属性表抽取图像属性信息,显式表达时间-空间-属性多域特征共同约束的地层实体关系,并将地层实体关联网络应用于实际广域范围三维地层模型构建,可以较好地解决使用关系型数据库在处理广域地层实体及其关系时,数据冗余大、多维度关系表达难、查询效率低的问题,且有较高的深度关系检索能力,能够提高整体的数据管理效率及实用价值。

参　考　文　献

[1] WU X C, LIU G, WENG Z P, et al. Constructing 3D Geological Models Based on Large-Scale Geological Maps[J]. *Open Geosciences*, 2021, 13(1): 851-866.

[2] LIU Y Y, ZHANG X W, GUO W, et al. Research Status of and Trends in 3D Geological Property Modeling Methods: A Review[J]. *Applied Sciences*,

2022, 12(11): 5648.

[3] PAN D D, XU Z H, LU X M, et al. 3D Scene and Geological Modeling Using Integrated Multi-source Spatial Data: Methodology, Challenges, and Suggestions[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 100: 103393.

[4] WELLMANN F, CAUMON G. 3D Structural Geological Models: Concepts, Methods, and Uncertainties[M]. Amsterdam: Elsevier, 2018.

[5] 李璐, 刘新根, 吴蔚博. 基于钻孔数据的三维地层建模关键技术[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 1056-1062.
LI Lu, LIU Xingen, WU Weibo. Key Technology of 3D Stratum Modelling Based on Borehole Data[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(3): 1056-1062.

[6] 王波, 雷传扬, 刘兆鑫, 等. 三维地质建模过程中综合地质剖面构建方法研究[J]. 沉积与特提斯地质, 2021, 41(1): 112-120.
WANG Bo, LEI Chuanyang, LIU Zhaoxin, et al. A Geological 3D Modeling Method of Comprehensive Geological Section for Chengdu[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2021, 41(1): 112-120.

[7] 王亚军, 张明江, 陈鲁. 物探数据在三维地质建模中的应用: 以新疆哈密盆地为例[J]. 西北地质, 2014, 47(3): 91-100.
WANG Yajun, ZHANG Mingjiang, CHEN Lu. The Application of Geophysical Data in 3D Geological Modeling: A Case Study of Hami Basin, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2014, 47(3): 91-100.

[8] 高士娟, 毛先成, 张宝一, 等. 基于平面地质图的地质体三维建模[J]. 地质找矿论丛, 2015, 30(4): 594-601.
GAO Shijuan, MAO Xiancheng, ZHANG Baoyi, et al. The Planar Geological Map-Based 3D Modeling of Geological Body[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2015, 30(4): 594-601.

[9] 刘鑫, 李季秀, 胡立堂. 基于多源数据融合的复杂地质矿区三维地质建模[J]. 工程勘察, 2021, 49(12): 35-39.
LIU Xin, LI Jixiu, HU Litang. 3D Geological Modeling of Complex Geological Mining Area Based on Multi-source Data Fusion[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2021, 49(12): 35-39.

[10] 朱庆, 王所智, 丁雨淋, 等. 铁路隧道钻爆法施工智能管理的安全质量进度知识图谱构建方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(8): 1155-1164.
ZHU Qing, WANG Suozhi, DING Yulin, et al. A Method of Safety-Quality-Schedule Knowledge Graph for Intelligent Management of Drilling and Blasting Construction of Railway Tunnels[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(8): 1155-1164.

[11] BING R, YUAN G, ZHU M, et al. Heterogeneous Graph Neural Networks Analysis: A Survey of Techniques, Evaluations and Applications[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2023, 56(8): 8003-8042.

[12] 张利国, 丁雨淋, 朱庆, 等. 铁路地理地质数据"本体域-变化域-状态域"三域关联的集成表达模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(6): 1018-1027.
ZHANG Liguo, DING Yulin, ZHU Qing, et al. A Holistic Multi-Domain Association Model for Railway Geographic and Geologic Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(6): 1018-1027.

[13] QIU Q J, WANG B, MA K, et al. A Practical Approach to Constructing a Geological Knowledge Graph: A Case Study of Mineral Exploration Data[J]. *Journal of Earth Science*, 2023, 34(5): 1374-1389.

[14] 方阳, 赵翔, 谭真, 等. 一种改进的基于翻译的知识图谱表示方法[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(1): 139-150.
FANG Yang, ZHAO Xiang, TAN Zhen, et al. A Revised Translation-Based Method for Knowledge Graph Representation[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2018, 55(1): 139-150.

[15] FILCHEV L, PASHOVA L, KOLEV V, et al. Challenges and Solutions for Utilizing Earth Observations in the "Big Data" Era[PP/OL]. ArXiv (2021-08-19)[2024-02-08]. https://arxiv.org/abs/2108.08886.

[16] 邱芹军, 王斌, 徐德馨, 等. 地质领域文本实体关系联合抽取方法[J]. 高校地质学报, 2023, 29(3): 419-428.
QIU Qinjun, WANG Bin, XU Dexin, et al. Research on the Joint Extraction Method of Entity Relations in Geological Domain[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2023, 29(3): 419-428.

[17] OGG J G, OGG G M, GRADSTEIN F M. A Concise Geologic Time Scale: 2016[M]. Amsterdam: Elsevier, 2016.

[18] 张雪英, 张春菊, 汪陈, 等. 面向中文文本的地质语义信息标注与语料库构建[J]. 高校地质学报, 2023, 29(3): 429-438.
ZHANG Xueying, ZHANG Chunju, WANG Chen, et al. Geological Semantic Information Labeling and Corpus Construction for Chinese Text[J]. *Geologi-*

cal Journal of China Universities, 2023, 29(3): 429-438.

[19] PAN D D, LI Y H, WANG X T, et al. Intelligent Image-Based Identification and 3-D Reconstruction of Rock Fractures: Implementation and Application[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, 145: 105582.

[20] TAN Y B, WANG H, CAI R F, et al. Spatial Proximity Relations-Driven Semantic Representation for Geospatial Entity Categories[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2025, 14(6): 233.

[21] 刘朋飞, 崔铁军. 地理数据关联研究进展[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2019, 39(3): 10-15.
LIU Pengfei, CUI Tiejun. Research Progress of Geographic Data Association[J]. *Journal of Tianjin Normal University* (*Natural Science Edition*), 2019, 39(3): 10-15.

[22] WANG C B, MA X G, CHEN J G. Ontology-Driven Data Integration and Visualization for Exploring Regional Geologic Time and Paleontological Information [J]. *Computers & Geosciences*, 2018, 115: 12-19.

[23] 陈晖萱, 郭旦怀, 葛世寅, 等. M2T 多源知识图谱融合的空间场景描述文本自动生成框架[J]. 地球信息科学学报, 2023, 25(6): 1176-1185.
CHEN Huixuan, GUO Danhuai, GE Shiyin, et al. Automatic Generation Framework of Spatial Scene Description Text Based on M2T Multi-source Knowledge Map Fusion[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2023, 25(6): 1176-1185.

[24] MIOLA M, CABIDDU D, PITTALUGA S, et al. A Computational Approach for 3D Modeling and Integration of Heterogeneous Geo-Data[J]. *Computers & Graphics*, 2022, 105: 105-118.

[25] 王大力, 童晓冲, 孟丽, 等. 文本中空间信息的结构化建模与语义定位[J]. 测绘学报, 2023, 52(8): 1398-1410.
WANG Dali, TONG Xiaochong, MENG Li, et al. Structured Modeling and Semantic Positioning of Spatial Information in Text[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(8): 1398-1410.

[26] WANG X, JI H Y, SHI C, et al. Heterogeneous Graph Attention Network [C]//The World Wide Web Conference, San Francisco, 2019.

[27] 卜令彬. 基于Neo4j图数据库的地理场景数据组织方法[D]. 南京: 南京师范大学, 2020.
BU Lingbin. A Data Organization Method for the Geograhic Scene Based in Neo4j Database[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2020.

[28] 储德平, 万波, 李红, 等. 基于ELMO-CNN-BiLSTM-CRF模型的地质实体识别[J]. 地球科学, 2021, 46(8): 3039-3048.
CHU Deping, WAN Bo, LI Hong, et al. Geological Entity Identification Based on ELMO-CNN-BiLSTM-CRF Model [J]. *Earth Science*, 2021, 46(8): 3039-3048.

[29] 车万翔, 窦志成, 冯岩松, 等. 大模型时代的自然语言处理: 挑战、机遇与发展[J]. 中国科学: 信息科学, 2023, 53(9): 1645-1687.
CHE Wanxiang, DOU Zhicheng, FENG Yansong, et al. Towards a Comprehensive Understanding of the Impact of Large Language Models on Natural Language Processing: Challenges, Opportunities and Future Directions[J]. *Scientia Sinica* (*Informationis*), 2023, 53(9): 1645-1687.

[30] MA Y, XIE Z, LI G, et al. Text Visualization for Geological Hazard Documents *via* Text Mining and Natural Language Processing[J]. *Earth Science Informatics*, 2022, 15(1): 439-454.

[31] 白如江, 陈启明, 张玉洁, 等. 基于ChatGPT+Prompt的专利技术功效实体自动生成研究[J]. 数据分析与知识发现, 2024, 8(4): 14-25.
BAI Rujiang, CHEN Qiming, ZHANG Yujie, et al. Generating Effectiveness Entities of Patent Technology Based on ChatGPT+Prompt [J]. *Data Analysis and Knowledge Discovery*, 2024, 8(4): 14-25.

[32] 许强, 崔圣华, 黄维, 等. 面向工程地质领域的滑坡知识图谱构建方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1601-1615.
XU Qiang, CUI Shenghua, HUANG Wei, et al. Study on the Construction Method of Landslide Knowledge Map for Engineering Geology Field[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1601-1615.

[33] 乔金海, 潘懋, 金毅, 等. 基于DEM三维地层建模及一体化显示[J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(2): 34-37.
QIAO Jinhai, PAN Mao, JIN Yi, et al. 3D Stratum Modeling and Integrated Display Based on DEM[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2011, 27(2): 34-37.