引文格式:庞小平,胡昕衍,叶帅,等.面向北极航道夏季适航性评估的知识图谱构建方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(6):1253-1262.DOI:10.13203/j.whugis20250122

Citation:PANG Xiaoping,HU Xinkan,YE Shuai,et al.Construction Method of Knowledge Graph for Summer Navigability Assessment of Arctic Passage[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(6):1253-1262.DOI:10.13203/j.whugis20250122

面向北极航道夏季适航性评估的知识图谱构建方法

庞小平[1,3] 胡昕衍[1,3] 叶 帅[2] 孟小亮[1,2] 王月云[1,3]

1 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

2 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

3 极地环境监测与公共治理教育部重点实验室(武汉大学),湖北 武汉,430079

摘 要:随着全球气候的剧烈变化,北极航道实现全面通航的可能性逐渐增大,然而,目前北极航道适航性评估研究面临通航评估碎片化、多源异构数据难以整合以及复杂影响因素缺乏系统指标体系的挑战。因此,探索了一种面向夏季适航性决策的知识图谱链规则和推理模式,提出了知识图谱构建方法,从而为通航评估提供可靠有效的决策支持。首先,基于北极航道知识图谱相关本体模型对多模态多源数据进行预处理,运用检索增强生成技术,结合大语言模型进行本体引导下的数据清洗与验证,接着进行实体和关系的抽取,获取具有高置信度的三元组;然后,构建符合决策需求的图谱链规则和推理模式,并利用Neo4j图数据库存储和管理图谱链体系;最后,结合极地领域专家提供的相关规则知识检索图谱库,实现北极航道夏季适航性的计算与推理。通过2017—2021年东北航道和2021年国际船舶轨迹数据进行实验验证,结果表明,该方法能够实现从多源多模态数据到面向决策的夏季适航性知识的可靠转化。

关键词:知识图谱;北极航道;图谱链;推理规则;夏季适航性评估

中图分类号:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-09-18

DOI:10.13203/j.whugis20250122 **文章编号**:1671-8860(2026)06-1253-10

Construction Method of Knowledge Graph for Summer Navigability Assessment of Arctic Passage

PANG Xiaoping[1,3] *HU Xinkan*[1,3] *YE Shuai*[2] *MENG Xiaoliang*[1,2] *WANG Yueyun*[1,3]

1 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

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

3 Key Laboratory of Polar Environment Monitoring and Public Governance of Ministry of Education (Wuhan University), Wuhan 430079, China

Abstract: **Objectives**: With the drastic changes in the global climate, it is increasingly likely that the Arctic Passage will become fully navigable. However, current research on the navigability assessment of Arctic Passage faces the following challenges: Fragmented navigability assessment, difficulties in integrating multi-source heterogeneous data, as well as the lack of a systematic indicator system for complex influencing factors. Therefore, a knowledge graph chain rule and reasoning model for summer navigability decision-making is explored, and a knowledge graph construction method is proposed, thereby providing reliable and effective decision support for navigability assessment. **Methods**: First, multimodal and multi-source data are preprocessed based on the relevant ontology model of Arctic Passage knowledge graph. Retrieval augmented generation technology combined with a large language model is used for ontology-guided data cleaning and verification. Entities and relationships are subsequently extracted to obtain high-confidence triples. Then, knowledge

基金项目:武汉市自然科学基金(2024040701010030);中央高校基本科研业务费专项资金(2042025kf0082)。

第一作者:庞小平,博士,教授,研究方向为极地测绘遥感与地理信息可视化等。pxp@whu.edu.cn

通信作者:孟小亮,博士,教授。xmeng@whu.edu.cn

graph chain rules and reasoning models that meet decision-making needs are constructed, and the graph chain system is stored and managed using the Neo4j graph database. Finally, by incorporating the relevant rules and knowledge provided by experts in the polar field to query the knowledge graph library, the calculation and reasoning of the summer navigability of Arctic Passage are achieved. **Results:** The experimental verification is carried out on the example of the Northeast Passage from 2017 to 2021 and the international ship trajectory data in 2021. **Conclusions:** The results show that the proposed method can achieve reliable transformation from multi-source and multimodal data to decision-oriented summer navigability assessment knowledge.

Key words: knowledge graph; Arctic Passage; graph chain; inference rule; summer navigability assessment

北极航道是指穿越北冰洋、连接大西洋与太平洋的海上通道，主要包括东北航道、西北航道和中央航道3条主要航段[1-2]，示意图如图1所示。由于全球气候的剧烈变化，北冰洋海冰覆盖面积不断减少，夏季尤为显著，这为北极航道的夏季通航增加了可能性[3-5]。相比于经过苏伊士运河或巴拿马运河的传统航道，北极航道在航行距离和经济成本方面展现出明显优势。此外，北极地区资源丰富，其航道的通航将重塑全球经济贸易、能源与政治格局，因而成为全球关注的焦点[6-7]。

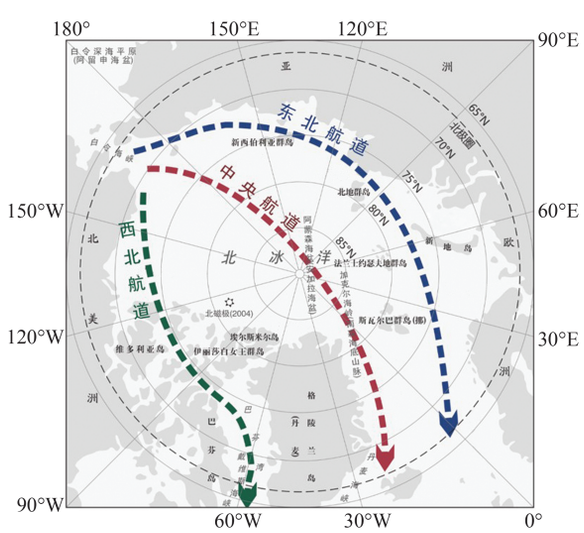


图1 北极航道示意图

Fig. 1 Diagram of Arctic Passage

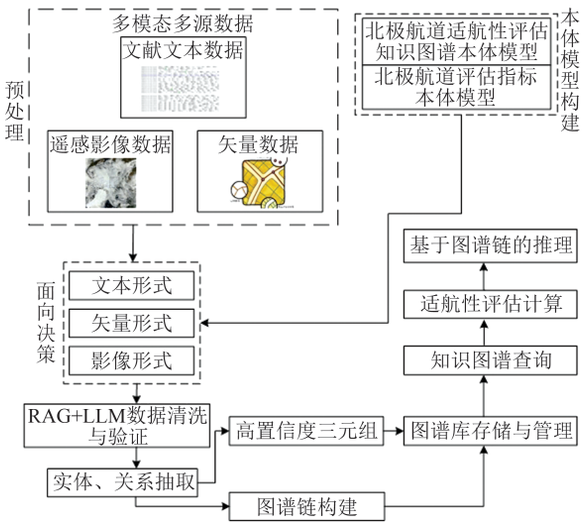
由于北极航道地理位置特殊，沿岸冰情环境多变，气象与水文条件具有高度不确定性，为保障航行安全和环境的可持续发展，对北极航道适航性进行准确评估十分重要。文献[8-9]提出了基于动态贝叶斯网络的北极东北航道关键海区通航可行性评估与预测技术，证明预测结果在短期内的准确性较高。文献[10]提取并分析了1968—2020年北极西北航道多年冰的状况，结果表明，尽管全球变暖导致多年冰的每年生成速率持续降低，但是多年冰的生成仍然会对未来航行造成巨大威胁。文献[11]利用基于遥感的日尺度海冰密集度数据集，探讨了西北航道可通航年份和时间的规律性问题。文献[12]提出了一种实现北极航行所需的地缘政治环境因素的空间可视化与时空变化分析方法。然而，目前对北极航道适航性评估的研究仍面临显著挑战[13-15]：(1)用于北极航道通航评估的数据呈现碎片化的特征，尤其是复杂多变的地形、海冰、气象及水文等环境信息难以整合，未能充分挖掘和分析极地领域所蕴藏的大体量、多来源、异构数据，未能将其转化为有用信息与领域知识。(2)现有研究多聚焦于航道上海冰密集度变化、航道通航的经济性、解读相关地缘政治政策等单一维度，缺乏系统性评估标准和定量研究。

知识图谱技术为改善以上问题提供了契机，作为一种描述物理世界中实体概念及其相互关系的结构化语义网络技术，主要以“实体-关系-实体”或“实体-属性-属性值”为基础单元三元组构建形成图数据库[16]。知识图谱可分为通用领域知识图谱和垂直领域知识图谱，通用领域知识图谱是指面向所有领域的大规模知识图谱，而垂直领域知识图谱仅针对特定领域，强调知识的质量和可解释性。在目前地学领域由弱人工智能向强人工智能迈进的趋势下，一些学者已开始关注垂直领域知识图谱并开展相关研究。例如，在灾害管理领域，文献[17]和文献[18]分别提出了自然灾害应急和面向一体化综合减灾的知识图谱构建方法；在工程地质领域，文献[19]研究了面向工程地质领域的滑坡知识图谱构建方法；在海洋工程领域，文献[20]利用知识图谱技术构建了海洋工程智能搜索系统；在土地资源领域，文献[21]研究了基于知识图谱的土地资源数据管理与检索。然而，现有研究主要集中在针对不同地学领域的知识图谱构建方法研究与技术应用上，面向极地领域尤其是北极航道适航性

相关的知识图谱研究相对稀缺。部分研究虽在海洋环境、气候数据整合等方面应用了知识图谱技术,如文献[22]构建了气候知识图谱来整合多源气象数据,文献[23]提出了环境交互知识图谱以用于极端天气事件分析,但均未针对极地航道通航评估构建专门的语义与推理框架。因此,本文针对北极航道夏季适航性评估场景,提出了一种垂直领域知识图谱构建方法,旨在填补该领域内多源异构数据语义整合与智能决策推理的研究空白,并探索面向适航性决策的图谱链规则与推理模式,为北极航道通航评估提供可靠有效的决策支持。

1　知识图谱构建方法

针对目前北极航道适航性评估中面临的数据碎片化、评估维度单一、多源异构数据利用率低等问题,本文提出面向北极航道夏季适航性的知识图谱构建方法。其核心目标为:(1)整合多源异构数据。建立结构化语义网络,解决海冰、气象、水文等环境数据碎片化的问题。(2)多维指标协同分析。通过本体建模与图谱链规则设计,实现多维评估指标的系统性协同分析。(3)智能化决策支持。结合面向决策的图谱链规则和推理模式,提升动态环境下的风险评估能力。其关键技术包括:(1)多模态数据融合。面向决策地对文本、矢量、遥感影像形式的多模态数据进行处理,提取实体与关系的语义映射。(2)垂直领域本体建模。结合层次分析法与粗糙集理论,构建北极航道夏季适航性知识图谱本体与北极航道评估指标本体模型。(3)知识推理优化。基于图谱链规则实现局部与全局推理协同,降低计算复杂度。知识图谱构建与推理评估的具体流程如图2所示。



注:RAG(retrieval augmented generation)为检索增强技术;LLM(large language model)为大语言模型。

图2　知识图谱构建与推理评估流程

Fig. 2　Process of Knowledge Graph Construction and Reasoning Evaluation

北极航道夏季适航性评估知识图谱的构建涉及到多模态多源数据,包括文献文本、遥感影像、矢量数据等类型。针对不同来源的地形、海冰、气象及水文等环境信息数据,本文首先进行了预处理,具体的处理方式见表1;然后,从决策的角度出发,基于北极航道评估指标本体与北极航道夏季适航性知识图谱本体模型,同时运用RAG技术结合LLM,进行本体引导下的数据清洗与验证,接着进行实体和关系的抽取,获取高置信度的三元组,并构建符合决策需求的图谱链规则;最后,将抽取到的三元组及填充完成的图谱链数据通过Neo4j图数据库进行存储与管理。为实现夏季适航性评估,可以运用Cypher语言完成知识图谱库的检索、计算与知识推理。

表1　多模态数据的处理方法

Table 1　Processing Method of Multimodal Data

数据形式	处理方法	最终数据示例		
		头实体	尾实体	关系
文本形式	利用领域本体构建、实体分类消歧等方法进行数据抽取	适航性	海冰	影响因子
		气象	气温	重要参数
		北极航道	亚洲	连接
矢量形式	依据点状、线状、面状数据的时间、空间、属性进行信息提取	点编号	俄罗斯	所属国家
		线编号	专属经济	法律地位
		面编号	1 573 km^2	海域大小
遥感影像形式	基于遥感影像的元数据、属性、基本单元进行实体、关系抽取	像元编号	气温	参数类型
		气温	风速	加权相加
		像元编号	0.87	适宜性值

1.1 北极航道评估指标本体构建

北极航道的适航性受多种复杂因素的共同影响[24-26],包括:(1)海冰因素。海冰是北极航道通航的主要障碍,海冰密集度是衡量海冰条件的核心参数,其变化很大程度上决定了航道的可通航程度,通常情况下,高海冰密集度区域的航行风险较高,而低海冰密集度区域相对安全。(2)气象与水文环境因素。气象因素包括气温和风速,水文环境因素主要包括海流流速,这些因素不仅直接影响船舶航行,还通过改变海冰的形成间接影响通航能力。(3)地理环境因素。航道宽度、航道深度、地形复杂度等地理条件对船舶通航能力亦存在显著影响。(4)政治因素。北极地区是多个国家和国际组织的利益交汇点,地缘政治竞争激烈,沿岸国家的政治态度、法律法规及海洋权益划分等,都对航道的适航性产生重要影响。本文结合极地领域专家知识和相关文献对影响因素进行筛选,采用适用于垂直领域的自顶向下方式,围绕实际决策需求构建北极航道夏季适航性知识图谱本体模型,部分本体模型示意图如图3所示。

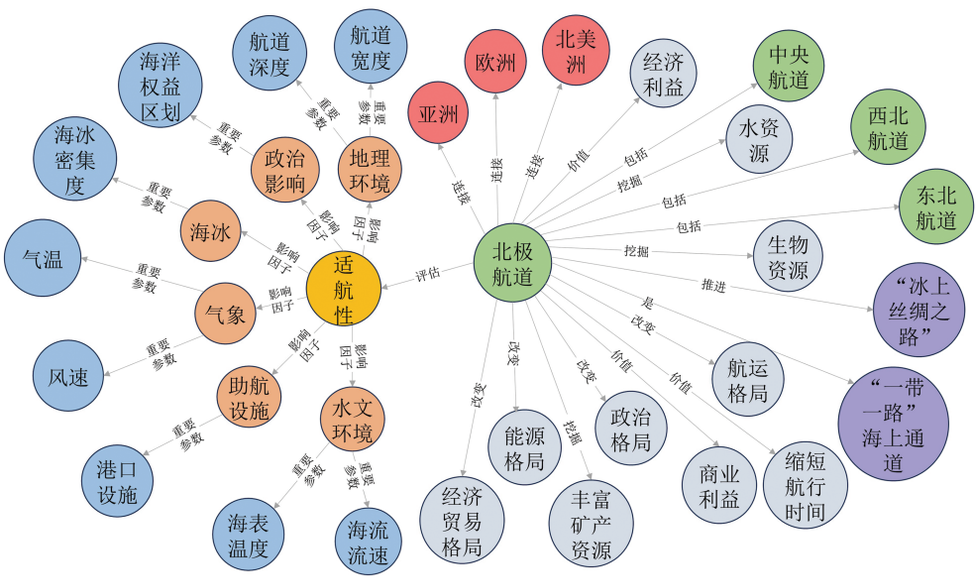


图3 北极航道夏季适航性部分知识图谱本体模型

Fig. 3 Partial Ontology Model of Knowledge Graph for Summer Navigability of Arctic Passage

本文构建如图4所示的北极航道评估指标本体模型,为知识图谱库的数据填充提供模板与支撑。该本体模型的一级指标涵盖了对适航性影响最显著的6大类核心要素,分别是水文、地理、海冰、气象、政治因素及助航设施,而二级指标则对一级指标进行了精细化分解,具体涉及海冰密集度、气温、风速、海流流速、海表温度、航道深度、航道宽度、港口设施、海洋权益区划等要素。这些指标的设定考虑了多维决策要素,旨在全面评估北极航道夏季适航性。针对上述一级指标与二级指标,本文运用层次分析法与粗糙集思想进行处理,获取到如表2所示的北极航道适航性评估指标权重表。该权重表包括处理和计算后获得的一级权重、二级权重以及每项评估因子的最终权重,为后续的推理与计算提供基础。

1.2 面向决策的图谱链规则建立

在北极航道夏季适航性评估中,针对决策需求构建面向决策的图谱链规则是一项关键工作。与通用领域常见的网状结构知识图谱不同,本文的图谱链采用线状结构,将同一地理像元处的多源指标按决策逻辑顺序串联,形成具有清晰因果路径和可解释性的链式模型,具体如图5所示。这种结构不仅方便存储与检索,而且在推理和决策支持中能够直观反映不同指标间的关联关系。

图谱链的基本单元是节点和边,节点代表某一位置上的特定指标信息,例如海冰密集度、航道宽度、风速等,每个节点均附带归一化值、原始测量值、数据来源、时间标签等属性,以便后续分析与追溯。边表示节点之间的关联关系,按决策逻辑顺序连接节点。规则构建过程主要包括以下几个步骤:(1)利用Python开源库(如地理空间数据抽象库、Pandas数据分析库等)完成对海冰密集度、航道宽度、海流流速等北极航道评估指标的遥感图像进行分辨率重采样、时间对齐等必要预处理步骤。(2)将处理后的各类指标归一化到[0,1]区间,并在每个像元位置生成对应的多指标节点。(3)采用层次分析法计算初始权重,并

结合历史评估结果与领域专家意见进行修正与归一化,将权重信息存储于节点中,根据决策逻辑顺序建立节点间的边。(4)通过Py2neo接口将生成的节点及其关系存储于Neo4j图数据库,建立空间位置、指标类型与时间等多重索引,以支持条件检索与时空推理相同像元位置的像素值。

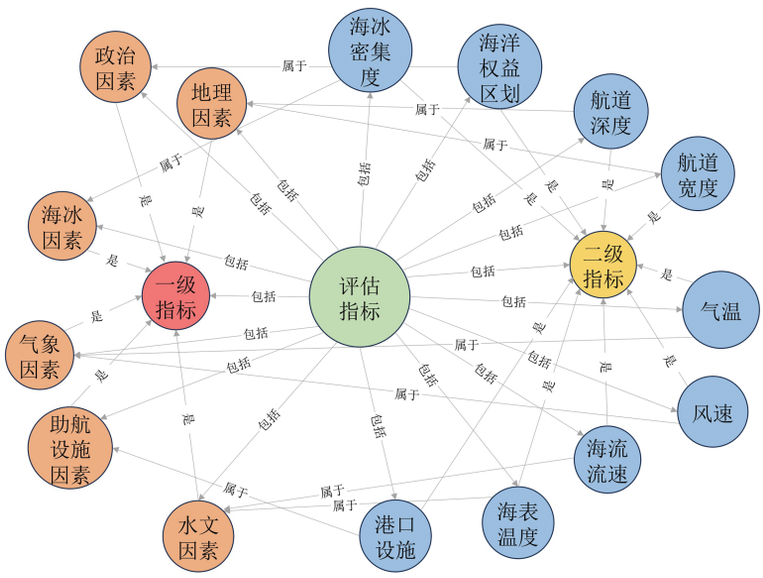


图 4　北极航道评估指标本体模型

Fig. 4　Ontology Model of Evaluation Indicators for Arctic Passage

表 2　北极航道适航性评估指标权重表

Table 2　Weights of Navigability Evaluation Indicators for Arctic Passage

一级指标	一级权重	二级指标	二级权重	最终权重
海冰因素	0.350	海冰密集度	1.000	0.350
气象因素	0.230	气温	0.324	0.075
		风速	0.676	0.155
水文因素	0.140	海流流速	0.532	0.074
		海表温度	0.468	0.066
地理因素	0.100	航道深度	0.560	0.056
		航道宽度	0.440	0.044
助航设施因素	0.090	港口设施	1.000	0.090
政治因素	0.090	海洋权益区划	1.000	0.090

2　基于图谱链的推理

基于图谱链的推理流程可分为3大模块,如图6所示,具体包括:(1)总图谱链库,包含所有北极航道适航性评估指标的图谱链。(2)基于规则n的推理,依照定义的推理规则要素与设定的阈值进行推理。(3)适航性分析图生成,通过连接Neo4j图数据库执行推理规则,返回适宜性计算结果,并生成适宜性栅格图像。

基于图谱链的推理规则采用规范化的知识表示方法,包括规则语义定义与描述逻辑两部分。首先,在规则语义定义阶段,如表3所示,将基于图谱链的推理规则中的各类要素(节点、边、权重、阈值等)按照本体模型进行格式化表示,确保其概念、属性及关系的统一性与可扩展性;其次,在描述逻辑阶段,采用“条件-动作”形式对推理过程进行建模:每条推理规则均由前提条件与执行操作两部分构成,其中前提条件对应预设的适航性阈值范围T_n,执行操作对应推理计算与结果输出。当某条图谱链的加权叠加值满足阈值T_n所定义的条件时,即触发相应的推理动作,则将其归入对应的图谱链簇。

通过以上步骤,可以对图谱链库中m条图谱链的每一条图谱链进行加权计算,得到对应的适航性评估数值,并判断适航性评估数值是否落在相关适航性评估规则对应的适航性评估数值范围T_n内。若落在相关适航性评估规则的范围内,则输出对应的图谱链,将该图谱链加入相关适航性评估规则的图谱链簇中。

本文基于推理出的图谱链簇,采用适宜性评价算法,生成了适宜性栅格图像。主要包括以下几个步骤:(1)建立与Neo4j图数据库的连接,初始化图谱链簇数据的列表。(2)遍历时间序列数据,逐年度构建并执行基于图谱链推理规则的Cypher查询语句,提取符合阈值条件的图谱链簇数据,并存入数据列表。(3)依据图谱链与北极航道区域像元位置的一一对应关系,将各年度图谱

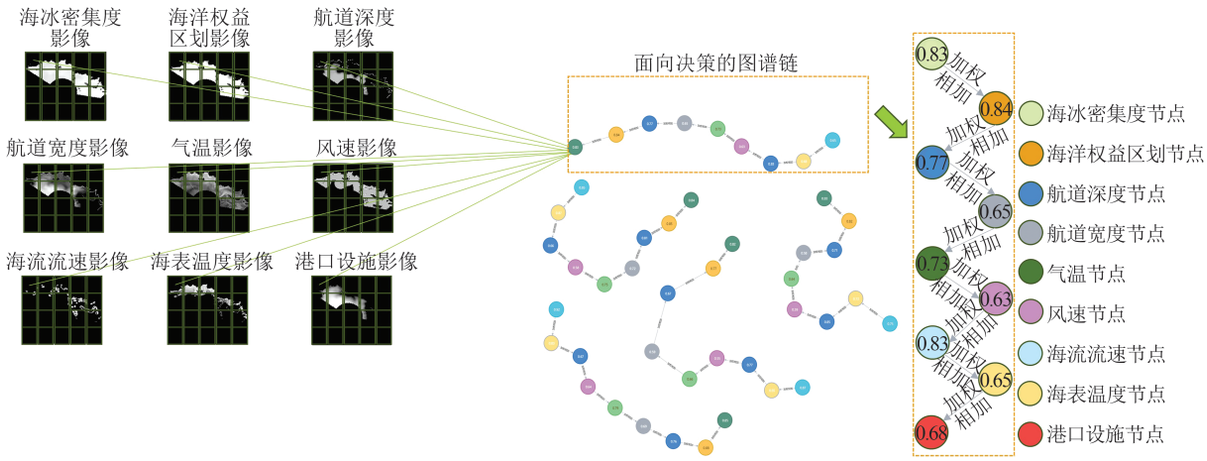


图5 面向决策的图谱链规则示例

Fig. 5 Examples of Decision-Oriented Graph Chain Rule

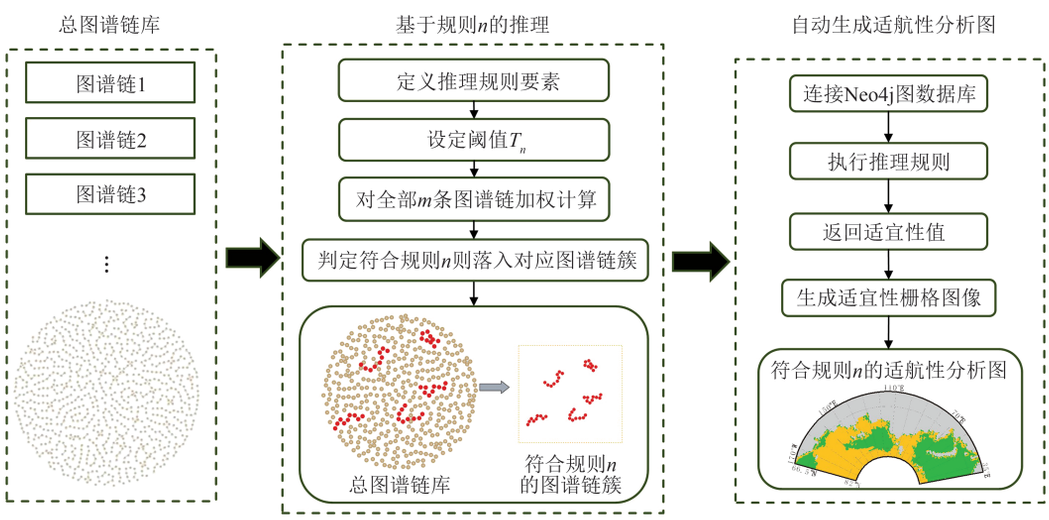


图6 基于图谱链的推理流程

Fig. 6 Inference Process Based on Graph Chain

表3 基于图谱链的推理规则要素

Table 3 Elements of Inference Rules Based on Graph Chain

基于图谱链的推理规则要素	定义
GraphChainLibrary	图谱链库
GraphChain	图谱链
GraphChainCluster	图谱链簇
$\text{node}_n(a,b,c,d,e,f,g,h,i)$	第n条图谱链包含的节点,$a,b,c,\cdots,i$代表北极航道9项评估指标要素
$\text{edge}_n(ab,bc,cd,de,ef,fg,gh,hi)$	第n条图谱链包含的边,$ab,cd,\cdots,hi$代表9项评估指标要素节点之间的关系
W_k	第n条图谱链中第k个节点的权重
T_n	推理规则的阈值判定范围

链簇的适航性评估计算结果填充至对应的栅格单元,得到适航性评估结果分布图。

3 东北航道适航性实验分析

北极东北航道是指起始于东北亚,向西经北冰洋南部的楚科奇海、东西伯利亚海、拉普捷夫海、喀拉海、巴伦支海,直至北欧的海运通道。东北航道主要经过的海区及海峡如图7所示。由于该航道每年海冰变化幅度较大,相比于中央航道与西北航道,东北航道具有更高的通航可能性,已成为研究热点区域[27]。因此,本文选取东北航道航段作为实验验证区域。实验验证步骤与分析如下:

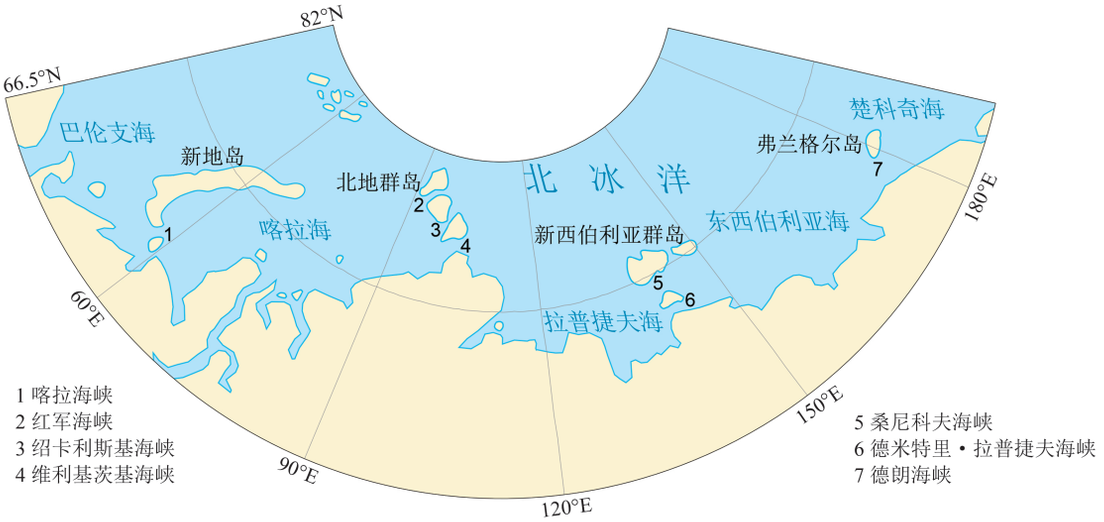


图 7　北极东北航道示意图

Fig. 7　Schematic Diagram of the Arctic Northeast Passage

1)对多模态多源数据进行预处理。数据来源包括 2017—2021 年间的欧洲中期天气预报中心的全球大气再分析资料、美国国家雪冰数据中心的海冰密集度产品、美国国家环境预测中心气候预测系统再分析资料、美国国家海洋和大气管理局的北冰洋国际等深线图、文献[28]提供的北冰洋划界信息数据、美国环境系统研究所发布的世界港口指数及北半球基础地理底图数据。利用 ENVI IDL、ArcGIS 等专业软件,并依照表 1 的处理方法对以上数据进行预处理。

2)对本体引导下的 RAG+LLM 数据进行清洗与验证。为了解决多源异构数据中存在的缺失、冲突及语义不一致问题,本文在数据清洗与验证阶段引入了 RAG 技术与 LLM ChatGPT,并以领域本体作为语义控制核心,构建了“检索-生成-验证”3 阶段处理框架。(1)检索:基于构建的北极航道领域本体模型,利用 RAG 技术从多源数据仓库及外部知识库中检索与目标实体、属性、关系相关的高置信度参考信息。(2)生成:调用 LLM 对原始数据进行语义解析、冗余消解与缺失信息补全,生成结构化的候选知识三元组。(3)验证:利用本体的层级约束与关系约束,对候选三元组进行一致性验证与冲突消解,确保所有知识单元在概念、属性类型、值域及关系方向上均符合领域语义规范。为评估方法效能,本文在包含 500 条专家标注样本的北极航道多源异构数据集上进行测试,数据集涵盖航行报告、港口文档、气象记录及航运新闻。选取基于规则的方法作为基线进行对比,实验采用数据一致性错误率与信息缺失补全率作为核心评估指标,并进行显著性检验。结果表明,相较于传统的基线方法,本文所提的本体引导 RAG+LLM 框架将数据一致性错误率显著降低了 28%(显著性概率小于 0.01),信息缺失补全率提升了 17%(显著性概率小于 0.05),有效提升了多源数据的完整性与一致性。

3)实体与关系的抽取以及图数据库的构建。将清洗后的结构化数据进行实体和关系的抽取,获取高置信度的三元组。同时,依照所提出的图谱链范式,构建北极航道评估指标遥感影像图谱链体系,并将其存储于 Neo4j 图数据库中,共生成 1 496 880 个节点、166 320 条图谱链。

4)基于知识图谱进行推理与计算。利用图检索技术结合极地领域专家制定的指标权重标准,通过适宜性评价算法实现 2017—2021 年东北航道的夏季适航性评估计算。本文依据极地领域专家经验设置阈值 T_n(n=1,2,3,4,5,对应 5 项规则),5 个阈值分别为 0.258、0.335、0.416、0.515、0.716,进行基于图谱链的推理计算,结果如图 8 所示。可以发现,北极航道夏季适航性整体呈现改善趋势,风险大且不可通航的海域面积逐年减少,但在 2021 年有所回升。其中,风险较大需视情况通航与风险大不可通航的区域集中分布在东西伯利亚海与拉普捷夫海的高纬度海域,最安全与较安全的可通航区域集中分布在巴伦支海与喀拉海。值得注意的是,2021 年北极航道的适航风险指标出现了阶段性回升,这一现象可能与当年极端气候事件和航运活动增加密切相关。一方面,虽然 2021 年夏季北极多年冰面积降至历史新低,但部分航段的冰情复杂度却出现

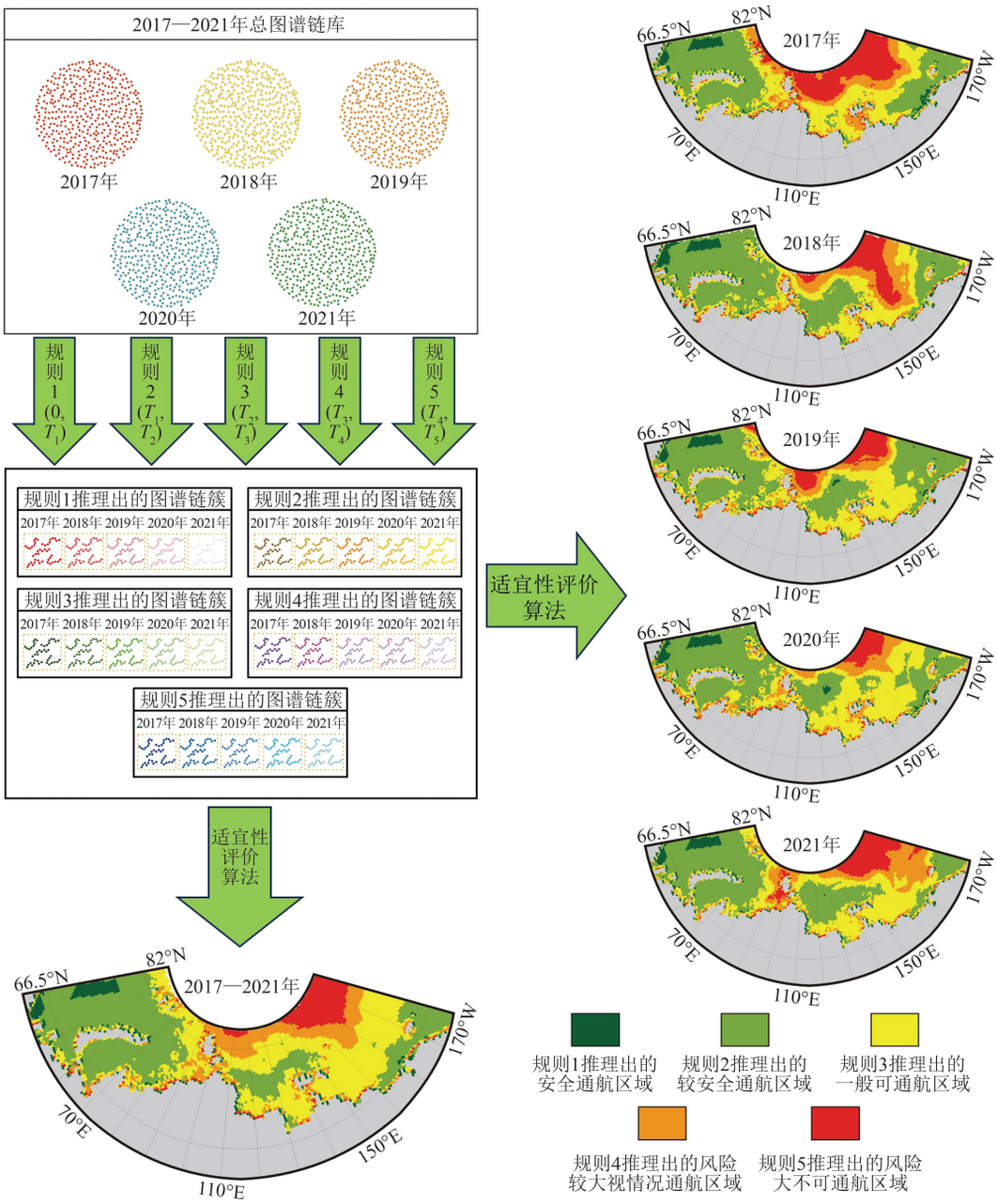


图8 东北航道适航性的计算结果

Fig. 8 Calculation Results of Navigability of Northeast Passage

反弹,增加了通航的不确定性;另一方面,北极地区的航运活动量持续增长,进一步提升了潜在的航行风险[29]。本文构建的知识图谱能够整合气象、海冰、航迹等多源异构数据,后续研究中可考虑并通过图谱链规则将专家经验(如"冰情-通航风险"关系规则)引入推理过程,进一步验证并分析可能的原因。

5)船舶轨迹验证。本文利用从挪威的北方海路信息局获取的2021年国际船舶过境航行数据,来验证上述推理结果的可靠性。选取来自中国的大德(Da De)与天佑(Tian You)货船、荷兰的Americaborg货船、葡萄牙的UHL Falcon货船以及俄罗斯的Sparta 3货船,将这些货船的航行轨迹经纬度数据与本文的计算推理结果进行轨迹校验,验证结果如图9所示。由图9可知,所有船舶的航行轨迹与本文基于知识图谱推理计算的结果呈现高度一致性,大部分轨迹路线分布于规则1与规则2推理出的安全与较安全通航区域,少量经过规则3推理出的一般可通航区域,极少涉及规则4推理出的风险较大视情况通航区域,完全避开了规则5推理生成的风险大不可通航区域。

4 结 语

本文提出了一种面向北极航道夏季适航性

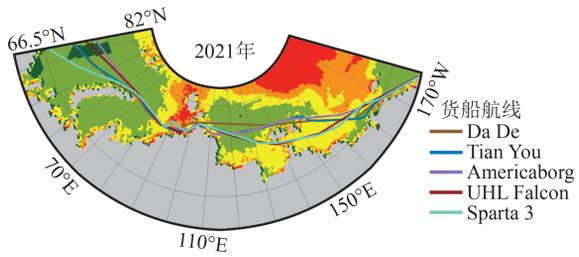


图 9　2021 年东北航道船舶轨迹验证结果

Fig. 9　Verification Results of Ship Trajectories on Northeast Passage in 2021

评估的知识图谱构建方法,通过北极航道夏季适航性知识图谱本体模型与北极航道评估指标本体模型,对多源异构数据进行预处理;面向决策需求,运用RAG技术结合LLM进行本体引导下的数据清洗与验证,针对性抽取领域知识实体与关系,并建立图谱链范式;通过结合图检索技术,实现北极航道夏季适航性的智能化评估。为验证所提方法的可靠性,本文使用2017—2021年多模态多源的东北航道风险评估相关数据构建知识图谱,并进行夏季适航性评估推理计算,利用2021年的国际船舶航行轨迹数据对评估结果进行了对比。实验结果表明,所提方法能够有效整合气象、海冰、航迹等多源多模态数据,评估结果与实际船舶航行轨迹高度一致,验证了所提方法的可靠性。

尽管该方法在多源异构数据整合与推理方面取得了较好的效果,但在复杂气候背景下的长期预测、动态风险感知以及与实时航行数据的融合等方面仍有进一步的提升空间。未来研究可考虑将气候模式预测数据、实时船舶自动识别系统数据与历史多模态数据进行融合,利用图谱链规则在短期、中期及长期尺度上开展适航性情景预测,并引入不确定性量化方法来提升评估的稳健性。在现有框架中进一步完善知识动态更新机制,以快速识别异常冰情、极端气象和突发航行状况,并提升推理能力。同时,可以尝试构建可视化与交互式航道适航性分析平台,实现适航性分布、风险等级变化及多方案对比的实时展示,推动本文方法在极地航运管理中的落地应用。

参考文献

[1] STEPHENSON S R, SMITH L C. Impacts of Projected Sea Ice Changes on Trans: Arctic Navigation [C]//AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 2012.

[2] ØSTRENG W, EGER K M, FLØISTAD B, et al. Shipping in Arctic Waters: A Comparison of the Northeast, Northwest and Trans Polar Passages [M]. Berlin: Springer, 2013.

[3] STROEVE J C, SERREZE M C, HOLLAND M M, et al. The Arctic's Rapidly Shrinking Sea Ice Cover: A Research Synthesis[J]. *Climatic Change*, 2012, 110(3): 1005-1027.

[4] COMISO J C. Large Decadal Decline of the Arctic Multiyear Ice Cover[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(4): 1176-1193.

[5] KHON V C, MOKHOV I I, LATIF M, et al. Perspectives of Northern Sea Route and Northwest Passage in the Twenty-First Century [J]. *Climatic Change*, 2010, 100(3): 757-768.

[6] 彭振武, 王云闯. 北极航道通航的重要意义及对我国的影响[J]. 水运工程, 2014(7): 86-89.
PENG Zhenwu, WANG Yunchuang. Significance and Domestic Impact of Navigable Arctic Channel [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2014(7): 86-89.

[7] 李春花, 李明, 赵杰臣, 等. 近年北极东北和西北航道开通状况分析[J]. 海洋学报(中文版), 2014, 36(10): 33-47.
LI Chunhua, LI Ming, ZHAO Jiechen, et al. Navigable Status Analysis of Arctic Northeast and Northwest Passage in Recent Years[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(10): 33-47.

[8] 单雨龙, 张韧, 李明. 基于动态贝叶斯网络的北极东北航道关键海区通航可行性研究[J]. 极地研究, 2019, 31(1): 94-102.
SHAN Yulong, ZHANG Ren, LI Ming. A Feasibility Study on Navigation in a Key Sea Area of the Northeast Passage of the Arctic Based on the Dynamic Bayesian Network[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2019, 31(1): 94-102.

[9] 王宜涵. 基于动态贝叶斯网络的北极东北航道航行安全评估[D]. 大连: 大连海事大学, 2023.
WANG Yihan. Navigation Safety Assessment of the Arctic Northeast Passage Based on Dynamic Bayesian Network [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2023.

[10] HOWELL S E L, BABB D G, LANDY J C, et al. Multi-year Sea Ice Conditions in the Northwest Passage: 1968—2020[J]. *Atmosphere-Ocean*, 2023, 61(4): 202-216.

[11] 汪楚涯, 杨元德, 张建, 等. 基于遥感数据的北极西北航道海冰变化以及通航情况研究[J]. 极地研究, 2020, 32(2): 236-249.
WANG Chuya, YANG Yuande, ZHANG Jian, et al. Research on Sea Ice Variability and Navigation of the Arctic Northwest Passage from Remote Sensing Data[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2020, 32(2): 236-249.

[12] WANG C J, LIU D H, WANG J P, et al. Spatial Match Analysis of Multiple Factors in the Geopolitical Environment of the Arctic Passage[J]. *PLoS One*, 2022, 17(7): e0270262.

[13] 蔡梅江, 曹伟, 胡冰. 北极东北航道经济性及未来发展趋势分析[J]. 交通信息与安全, 2020, 38(3): 105-111.
CAI Meijiang, CAO Wei, HU Bing. An Analysis of Economic and Future Development of Arctic Northeast Passage[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2020, 38(3): 105-111.

[14] LIU C Y, FAN H M, DANG X J, et al. The Arctic Policy and Port Development Along the Northern Sea Route: Evidence from Russia's Arctic Strategy[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2021, 201: 105422.

[15] PAVLOVA O, PAVLOV V, GERLAND S. The Impact of Winds and Sea Surface Temperatures on the Barents Sea Ice Extent, a Statistical Approach[J]. *Journal of Marine Systems*, 2014, 130: 248-255.

[16] 刘峤, 李杨, 段宏, 等. 知识图谱构建技术综述[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(3): 582-600.
LIU Qiao, LI Yang, DUAN Hong, et al. Knowledge Graph Construction Techniques[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2016, 53(3): 582-600.

[17] 杜志强, 李钰, 张叶廷, 等. 自然灾害应急知识图谱构建方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(9): 1344-1355.
DU Zhiqiang, LI Yu, ZHANG Yeting, et al. Knowledge Graph Construction Method on Natural Disaster Emergency[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(9): 1344-1355.

[18] 陶坤旺, 赵阳阳, 朱鹏, 等. 面向一体化综合减灾的知识图谱构建方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(8): 1296-1302.
TAO Kunwang, ZHAO Yangyang, ZHU Peng, et al. Knowledge Graph Construction for Integrated Disaster Reduction[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(8): 1296-1302.

[19] 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. Construction of a Landslide Knowledge Graph in the Field of Engineering Geology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1601-1615.

[20] ZHU R, WU X Q, HU Y N, et al. OEIS: Knowledge Graph Based Intelligent Search System in Ocean Engineering[C]//The 10th International Conference on Advanced Cloud and Big Data, Guilin, China, 2022.

[21] 张永军, 程鑫, 李彦胜, 等. 利用知识图谱的国土资源数据管理与检索研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(8): 1165-1175.
ZHANG Yongjun, CHENG Xin, LI Yansheng, et al. Research on Land and Resources Management and Retrieval Using Knowledge Graph[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(8): 1165-1175.

[22] WU J T, ORLANDI F, O'SULLIVAN D, et al. LinkClimate: An Interoperable Knowledge Graph Platform for Climate Data[J]. *Computers & Geosciences*, 2022, 169: 105215.

[23] MUNASINGHE T, CORNELL K A, WEI J C, et al. A Knowledge Graph Framework for Organizing Heterogeneous Datasets for Utilization in Classical and Quantum Computing: Current Challenges and Future Directions[C]//IEEE International Conference on Big Data, Washington, USA, 2024.

[24] 王月云. 北极航道夏季通航环境与适航性分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
WANG Yueyun. Analysis of Navigation Environment and Navigability for Ship of the Arctic Passage in Summer[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.

[25] AN L, MA L, WANG H, et al. Research on Navigation Risk of the Arctic Northeast Passage Based on POLARIS[J]. *Journal of Navigation*, 2022, 75(2): 455-475.

[26] 黄季夏, 张天媛, 曹云锋, 等. 北极海冰消融情景下东北航道通航性能演变分析[J]. 地理学报, 2021, 76(5): 1051-1064.
HUANG Jixia, ZHANG Tianyuan, CAO Yunfeng, et al. The Evolution of Navigation Performance of Northeast Passage Under the Scenario of Arctic Sea Ice Melting[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(5): 1051-1064.

[27] SMITH L C, STEPHENSON S R. New Trans-Arctic Shipping Routes Navigable by Midcentury[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(13): 4871-4875.

[28] 成昆凤. 北冰洋划界信息系统的研究与应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
CHENG Kunfeng. Development and Application of the Delimitation Information System for the Arctic Ocean[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.

[29] MEIER W N, PETTY A, HENDRICKS S, et al. Sea Ice[EB/OL]. [2023-10-12]. https://doi.org/10.25923/xyp2-vz45.