

基于知识图谱的航道疏浚工程施工风险分析方法

武鹏¹, 袁金贝¹, 李如鑫², 张文佳², 王春梅^{3*}

(1. 长江南京航道工程局, 江苏 南京 211800; 2. 天津市交通运输综合行政执法总队, 天津 300304; 3. 天津城建大学, 天津 300384)

摘要: 针对航道疏浚工程施工风险分析存在碎片化认知和关联关系挖掘不全面的问题, 提出了一种基于知识图谱的风险分析方法。首先, 自顶而下设计航道疏浚工程领域本体模式层, 定义施工风险概念及关联关系; 然后, 自底向上通过规则匹配和因果关系识别方法抽取实体与关系, 并采用相似度计算实现知识融合, 构建结构化的施工风险知识图谱。在此基础上, 引入复杂网络分析方法, 将知识图谱转化为风险传播网络, 通过网络密度和卡茨中心性等指标, 从整体结构和关键节点2个层面对施工风险进行定量评估。以天津港大港港区10万吨级航道提升工程为案例, 实证结果表明该风险知识图谱网络整体呈现分散化特征, “违规操作”“安全装置失效”“设备有缺陷”等节点具有较高的结构影响力, 人为因素与设备状态是施工风险防控的核心。研究验证了基于知识图谱的复杂网络分析方法在海事工程安全管理中的可行性, 为智慧疏浚与平安工地建设提供了新思路。

关键词: 港口航道; 疏浚施工; 安全风险; 知识图谱

中图分类号: U6; U615 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2026)04-0045-06

doi:10.7640/zggwjs202604008

Knowledge graph-based method for risk analysis in channel dredging construction

WU Peng¹, YUAN Jin-bei¹, LI Ru-xin², ZHANG Wen-jia², WANG Chun-mei^{3*}

(1. Changjiang Nanjing Waterway Engineering Bureau, Nanjing, Jiangsu 211800, China; 2. Tianjin Transportation Comprehensive Administrative Law Enforcement Crops, Tianjin 300304, China; 3. Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: To address the fragmented understanding and incomplete extraction of interrelations in risk analysis of channel dredging construction, a knowledge graph-based risk analysis method is proposed. Firstly, a top-down approach is employed to design an ontological schema layer specific to the domain of channel dredging, defining key construction risk concepts and their interrelationships. Then, a bottom-up process is employed to extract entities and relationships through rule matching and causal relation identification, while similarity-based alignment is used for knowledge fusion, thereby constructing a structured risk knowledge graph. On this basis, a complex network analysis method is introduced to transform the knowledge graph into a risk propagation network. By applying metrics such as network density and Katz centrality, the construction risks are quantitatively assessed from both global structural and key-node perspectives. A case study on the 100 000-ton channel capacity enhancement project at Dagang Port of Tianjin demonstrates that the constructed knowledge graph exhibits a dispersed structure, with nodes such as "rule violation", "safety device failure", and "equipment defect" showing high structural influence. These findings indicate that human factors and equipment conditions are the core concerns for risk prevention and control. The study verifies the feasibility of applying knowledge graph-based complex network analysis to maritime engineering safety management and provides new insights for smart dredging and safe construction.

Key words: port channels; dredging construction; safety risk; knowledge graph

收稿日期: 2025-08-27 修回日期: 2025-09-20

作者简介: 武鹏 (1990—), 男, 安徽宿州人, 工程师, 从事航道工程管理工作。

*通讯作者: 王春梅, E-mail: wchunmeiwindbell@163.com

0 引言

航道疏浚工程是通过挖掘、运输及处置泥沙以治理和维护航道，保障其水深与宽度满足通航需求的关键水运工程，对航运安全与效率具有重要意义。航道疏浚工程施工面临复杂风险，如高密度的通航环境、航道底质空间变异、动态水文气象等。这些因素耦合作用形成了多维风险特征，直接影响施工安全^[1]。因此，研究航道疏浚工程施工风险评价对避免安全事故发生和提高作业水平有重要意义。

国内学者对航道疏浚工程施工风险方面进行了相关研究，朱元章等^[2]采用案例分析法聚焦长江航道整治工程施工安全管理，总结出“人-物”双控管理体系，实证表明该体系能有效预防等级事故；王珍等^[3]以大型深水航道疏浚工程为对象，通过通航风险系统分析构建了涵盖工程项目、船舶、船员、交通组织的多维监管模式，提出分时错峰、船舶编队、VTS 协管等创新方法，协同管控施工与通航矛盾。然而，传统的风险评估方法普遍依赖离散的事故统计与经验判断，难以全面覆盖多维度因素，且未能有效构建完整的因果链条，导致风险事件之间的关联关系被截断。

知识图谱(Knowledge Graph)以结构化的形式描述客观世界中实体及其之间的关系，目前在金融^[4]以及医疗卫生^[5]等多个领域展开了应用研究。相较于传统的关系型数据库，知识图谱的优势在于能够整合非结构化异构数据，并通过图计算处理深层次关联关系，从而能够挖掘到更多隐藏知识。近年来，知识图谱在工程建设风险和安全管理领域的应用也逐渐受到关注，Peng 等^[6]利用知

识图谱技术开发了一套地下公用隧道运维故障管理系统，用于辅助故障溯源分析及维护措施的决策。周义棋等^[7]以电网应急预案为对象，融合规则与深度学习技术抽取实体关系，构建可视化知识图谱，通过实际案例验证其在缩短应急决策时间、提升事故处置效率方面的有效性。

综上所述，目前相关研究多集中于陆地施工和安全管理领域，少有涉及航道疏浚工程领域的研究。因此，本文提出一种针对航道疏浚施工风险的知识图谱构建方法，进一步基于知识图谱构建风险复杂网络模型。通过卡茨中心性与网络密度等分析指标，量化风险整体结构特征和各风险节点影响力，为航道工程施工风险防控措施的制定和应用提供依据。

1 航道疏浚施工风险知识图谱构建

1.1 知识图谱构建流程

知识图谱作为一种结构化语义网络，其核心是由“实体-关系-实体”三元组构成的有向图知识库。在本研究中，节点代表航道疏浚施工过程中的各类风险要素，有向边代表风险事件间的关联关系。本文通过自顶向下和自底向上的方式建立航道疏浚施工风险知识图谱，如图 1 所示。首先基于领域本体进行模式层设计，定义风险概念的层次结构与语义关联。随后从相关资料中，运用自然语言处理技术识别嵌套实体，结合因果关系识别抽取实体关系，并通过实体对齐和关系整合实现知识融合。最后，进行知识图谱存储与更新，将抽取的知识关联到模式层中，完成模式层到数据层的映射，从而构建了航道疏浚施工风险知识图谱。

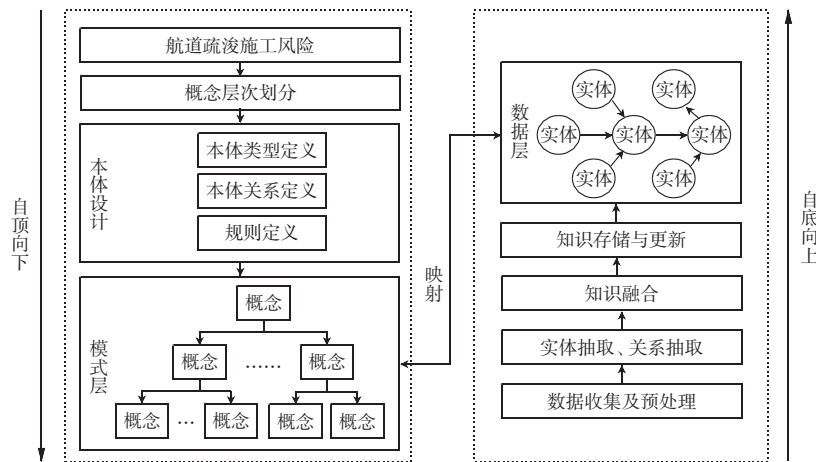


图 1 知识图谱构建流程

Fig. 1 Knowledge graph construction process

1.2 模式层构建

航道疏浚施工风险知识图谱的模式层由概念集合和关系边集合构成。其中,概念集合指各类风险要素,关系边指风险要素间的关联关系。模式层作为知识图谱的概念模型与逻辑基础,通常以本体的形式表达。在本体设计中,“类”代表实体概念抽象,明确了后续数据采集对象并构建了知识图谱的雏形。本研究融合航道疏浚施工领域的专业知识与现场经验,采用自上而下的本体设计方法,完成疏浚施工风险知识图谱模式层的构建。在航道疏浚工程领域中,可将施工风险类型划分为“机械伤害”“物体打击”“船舶问题”等。基于这些风险类型,从概念层梳理风险对应的对象,以“船舶问题”为例说明风险对象的层次划分逻辑。“船舶问题”包括“船舶倾覆”“船舶碰撞”等,这些对象通过“包含”关系与“船舶问题”相关联。同时,“船舶问题”通过“后果”关系与“风险后果”相关联,“风险后果”包括“人员伤亡”“经济损失”,以及通过“原因”关系与“致险因素”相关联,“致险因素”包含“人员因素”“物的因素”“管理因素”“环境因素”。模式层结构如图2所示。

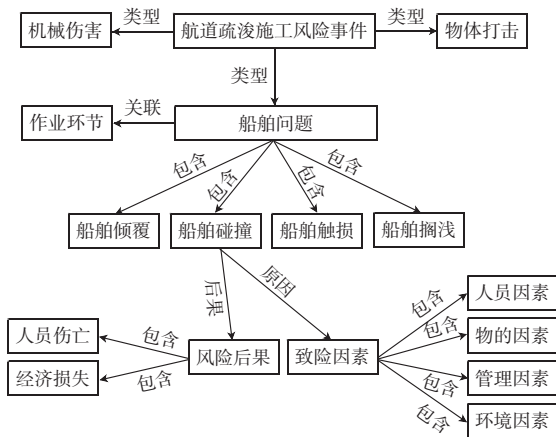


图2 航道疏浚施工风险知识图谱模式层结构(部分)

Fig.2 Partial structure of the schema layer in the risk knowledge graph for channel dredging construction

1.3 数据层构建

数据层构建即在模式层组织框架指导下,从资料文本中提取所需实体及关系。数据层构建的关键步骤包括数据收集与预处理、实体抽取、关系抽取、知识融合和知识更新。

1.3.1 数据收集与预处理

本文依托天津港大港港区10万吨级航道提升

工程项目进行数据收集。该工程位于天津市滨海新区独流减河入海口,是天津市近年来规模最大的航道疏浚工程,因此具有较强的代表性与典型性。收集的数据集由3类文件组成:1)项目规范标准与制度文件;2)项目技术文件(专项风险评估报告、专项应急预案、现场处置方案);3)事故案例与通报。完成数据收集工作后,将收集资料采用OCR与版式解析提取纯文本内容,然后进行符号与标点规范处理,清除异常字符;最后结合航道工程施工领域词典进行同义映射,完成数据预处理。

1.3.2 实体抽取

航道疏浚施工风险知识图谱中,每个实体Entity对应1个节点Node,节点具有标签和属性,如式(1)所示:

$$Entity = Node:Name\{Property_1, Property_2, \dots\} \quad (1)$$

式中:Name为该实体名称;Property₁, Property₂为该实体的不同属性。

采用基于规则与关键词匹配的方法识别风险相关实体。流程如下:利用正则表达式对预处理后的文本进行分词和模式匹配,识别出候选风险实体,例如“设备失效”“船舶碰撞”等;其次,对候选结果进行归类和筛选,包括风险事件(如“船舶碰撞”)、人员因素(如“违规操作”)、环境因素(如“恶劣气象”)、风险后果(如“人员伤亡”“经济损失”)等。最后,人工对模糊表达进行校验与修正。节点属性方面,从实体所在语句中抽取与数量、状态、条件相关的描述,如实体“违规操作”的属性包括岗位、操作类型等。

1.3.3 关系抽取

航道疏浚施工风险知识图谱中的关系Relationship如式(2)所示:

$$Relationship = \{node_{start} - [rel:Property_3] \rightarrow node_{end}\} \quad (2)$$

式中:node_{start}为头实体;node_{end}为尾实体;rel为关系名称;Property₃为关系属性。

在关系抽取环节,本文采用因果关系识别算法,从包含因果触发词(如“导致”“引发”“造成”“由于”)的语句中提取风险实体之间的直接关系。具体做法为先定位触发词,再划分其左右论元,并与已识别的风险实体对齐,若无法匹配则舍弃;对于否定句或条件假设句则不纳入。最终形成“实体—导致—实体”的因果边,如“设备有缺陷导致

“安全装置失效”抽取为“设备有缺陷—导致—安全装置失效”，“由于能见度下降，发生航行偏差”抽取为“能见度下降—导致—航行偏差”。该方法仅保留文本中直接、确定的因果关系，保证结果的可解释性和严谨性。

1.3.4 知识融合

采用基于相似度计算的实体对齐和关系整合方法进行知识融合。实体融合阶段，通过计算实体名称的语义相似度，识别表述不同但语义相同的实体对。对于识别出的相似实体对，采用保留信息量最大的实体作为代表实体，并将其他实体的所有关系转移到代表实体上。关系融合则通过关系类型标准化和关系强度聚合实现，将语义相近的关系类型进行合并，并根据关系出现频次计算关系强度。

1.3.5 知识更新

目前，航道疏浚工程相关规范、技术文件及案例不断增加，因此施工风险知识图谱需要持续更新以保证知识的有效性，确保其能够在风险事件发生时为施工风险防控与应急处置提供参考。风险知识的主要内容和模式层相对稳定，因此在新增或修订规范文件、专项评估报告或事故案例时，可在原有模式层的基础上对数据层进行更新。新增的风险知识通过知识融合的方式补充到原有知识图谱中，同时对新增实体或关系进行比对，判断是否已存在相同或相似的内容，若存在则去重或替换；对已废止或失效的知识节点与关系则予以剔除。

2 基于知识图谱的风险分析方法

在完成知识图谱构建后，需要进一步将图谱转化为可用于风险识别与评价的分析工具。本文引入复杂网络分析思想，将航道疏浚施工风险知识图谱视为一个由节点和有向边组成的复杂网络。在该网络中，节点代表施工风险要素，边代表要素之间的因果或关联关系。其中风险节点集合 $R = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ ， n 为图谱节点数，风险节点之间有向边的集合 $E = \{L_{m_1 m_2}, L_{m_1 m_3}, \dots, L_{m_i m_j}\}$ ， $L_{m_i m_j}$ 为由风险节点 m_i 指向风险节点 m_j 的有向边，因此使用邻接矩阵表示风险事件之间的因果关系网络。通过网络指标的计算，可以从宏观和微观 2 个层面对施工风险进行系统性分析。

2.1 宏观分析

宏观层面上，复杂网络的网络密度指标能够

反映风险体系的整体结构特征，揭示风险要素之间的耦合程度和风险传播的潜在复杂性。网络密度反映网络中实际连边数与最大可能连边数的比值^[8]，其值从 0—1 表示网络中节点间的关系从稀疏趋向密集。密集的网络说明事件之间关系紧密，整体风险要素间的耦合程度较高。该指标有助于刻画风险网络的全局特征，为施工管理提供整体性认识。网络密度的计算公式如式(3)所示。

$$\rho = \frac{e}{n(n-1)} \tag{3}$$

式中： ρ 为有向图密度； e 为边数。

2.2 微观分析

微观层面上，卡茨中心性用于衡量复杂网络中某个节点在网络中的相对影响力，与传统度中心性相比，卡茨中心性不仅考虑直接相邻关系，还通过衰减系数引入间接影响路径，能够更全面地反映节点在风险传导中的作用力。通过统计相邻节点和网络中通过这些相邻节点连接到考虑中节点的所有其他节点的数量，来计算网络中节点的相对影响^[9]。卡茨中心性高的航道疏浚施工风险事件灾变趋势多元化，其风险后果引发灾害类型多样、防范困难^[10]。卡茨中心性的计算公式如式(4)所示。

$$C_{m_i} = \alpha \sum_{j=1; j \neq i}^n A_{ij} C_{m_j} + \beta \tag{4}$$

式中： C_{m_i} 和 C_{m_j} 分别为节点 m_i 和 m_j 的卡茨中心性； A_{ij} 为图的邻接矩阵； α 为衰减系数，取值范围为 A_{ij} 的最大特征值； β 为初始影响常数，通常设为 1。

通过求解线性方程组可得式(5)：

$$C = (I - \alpha A_{ij})^{-1} \beta \tag{5}$$

式中： C 为卡茨中心性； I 为单位矩阵。

3 应用及效果

3.1 知识图谱可视化

在完成模式层与数据层的构建后，需进一步将航道疏浚施工风险知识以图形化方式呈现，以便直观揭示风险要素及其关联关系。流程为：1) 将抽取的风险实体和因果关系按模式层架构进行映射和整合，形成结构化的风险网络；2) 对节点和边赋予信息，以区别不同风险要素在图谱中作用；3) 利用 Python 工具对知识图谱进行布局优化和可视化渲染，生成拓扑结构图，如图 3 所示，其中 Z 为直接经济损失金额，万元。

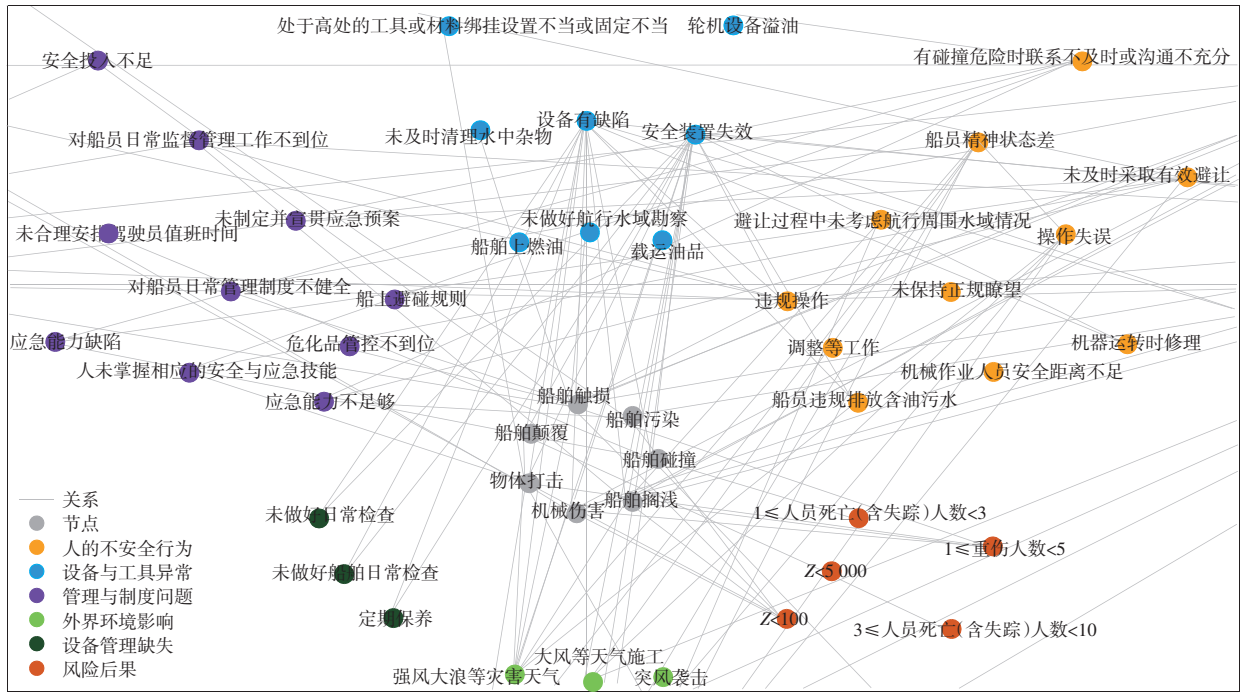


图3 天津港大港港区10万吨级航道提升工程施工风险知识图谱(部分)

Fig. 3 Partial risk knowledge graph for the 100 000-ton channel capacity enhancement project at Dagang port area of Tianjin Port

3.2 结果分析

3.2.1 网络密度

根据图3天津港大港港区10万吨级航道提升工程施工风险知识图谱,风险事件节点与因果关系边的数据统计以及网络密度计算结果如表1所示。分析可知,该知识图谱网络密度值为0.0229,表明图谱中各节点之间连接相对稀疏^[1]。该数值反映了整体风险要素间的关联程度较低,说明在航道疏浚施工过程中,虽然存在多类风险因素,但多数因素彼此之间并不直接关联。这种低密度结构有助于识别关键节点和核心风险链条,也提示在实际风险管理中需关注潜在的风险隐性联系。

表1 知识图谱网络数据

Table 1 Network data of the knowledge graph

知识图谱类别	节点数量/个	边数量/个	网络密度
航道疏浚施工	75	127	0.0229

3.2.2 卡茨中心性

以卡茨中心性为评价指标,分别对各类风险节点进行结构重要性的定量评估,分析影响航道疏浚工程施工的关键因素。不同类型的节点卡茨中心性排序如图4所示,在“人的不安全行为”类

别中,“违规操作”节点的卡茨中心性值最高,接近0.20,这表明人为因素仍是当前施工风险管理的核心问题,特别是在复杂、动态、恶劣环境中作业时,作业人员的不安全行为极易引发多类事故,需通过严格培训与制度规范进行干预。“设备与工具异常”类别节点中,“安全装置失效”“设备有缺陷”也表现出较高的卡茨中心性值,说明设备状态是影响风险传导的重要物理载体,应强化设备维护与安全冗余设计。“外界环境影响”类别如季节性大风、复杂气象条件等因素虽然卡茨中心性值偏低,但其普遍处于均衡水平,说明其在局部区域风险传导中仍具一定基础作用。“设备管理损失”类别节点中,如未做好船舶日常检查、定期保养等因素卡茨中心性值比较均衡,说明各设备管理缺失因素在风险网络中影响力相近,对设备故障及后续风险传导中的作用程度较为一致,不存在某一因素占据绝对主导地位的情况。“管理与制度问题”类节点,其卡茨中心性值整体处于中等水平(0.09~0.12),其中“船舶操纵知识培训不到位”影响较为显著。这类节点常作为风险链条的中间环节,隐性影响力较强,可能在多路径中发挥放大或弱化作用。

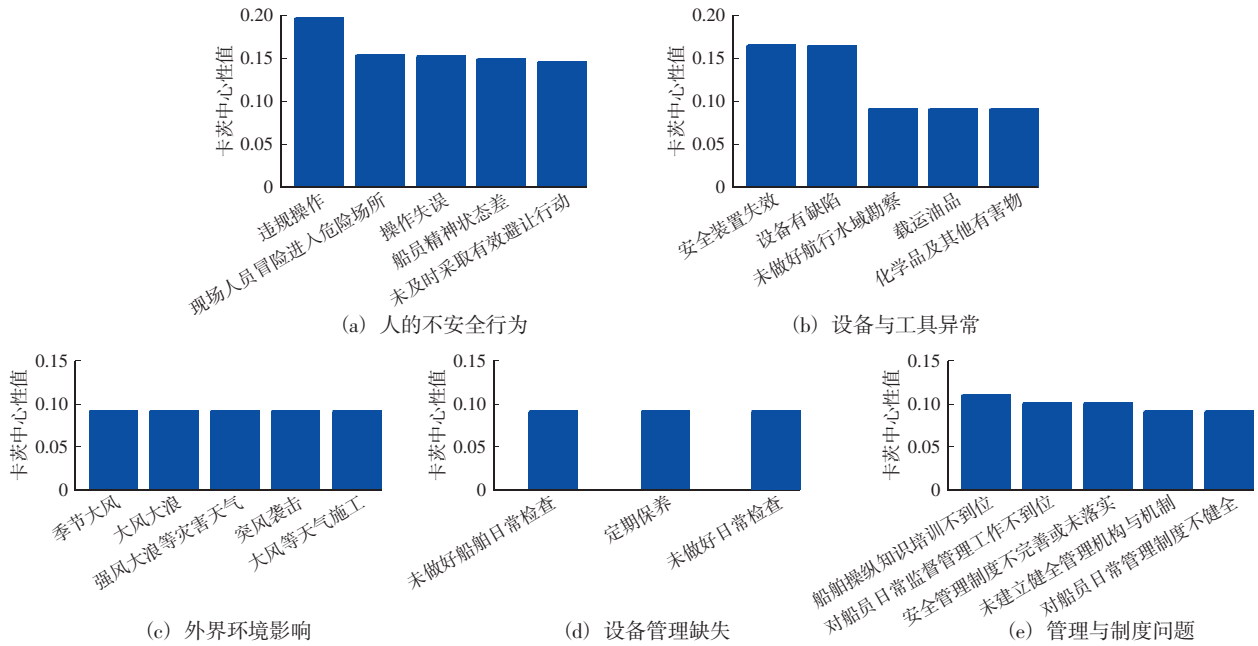


图 4 卡茨中心性排序
Fig. 4 Katz centrality ranking

4 结语

1) 通过自顶向下设计模式层、自底向上抽取实体与关系，构建了航道疏浚施工风险知识图谱，实现了对风险要素及其因果关系的系统化表达。图谱能够直观揭示风险传播路径，并为后续的风险分析奠定了数据与结构基础。

2) 复杂网络分析结果表明，构建的风险知识图谱整体网络密度较低(0.022 9)，呈分散化特征。此特征有助于识别关键风险链条，并提示在实际施工风险管理中需关注风险中潜在的隐性联系。

3) 卡茨中心性分析揭示“违规操作”“安全装置失效”“设备有缺陷”等节点具有较高的结构影响力，说明人为因素和设备状态是施工风险传导的核心。而管理因素更多作为风险链条的中间环节，对整体风险传播具有隐性放大或弱化作用。

参考文献:

[1] 孟萍萍. 长江下游航道维护性疏浚施工安全风险[D]. 南京:东南大学,2021.
MENG Ping-ping. Safety risk assessment of maintenance dredging construction in the lower reaches of the Yangtze River[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.

[2] 朱元章,田栋,冷乐飞. 长江航道整治工程安全管理综述[J]. 水运工程,2014(11):120-122.
ZHU Yuan-zhang, TIAN Dong, LENG Le-fei. Review of waterway regulation engineering of the Yangtze River safety management[J]. Port & Waterway Engineering, 2014(11): 120-122.

[3] 王珍,周伟,刘铁华. 大型深水航道疏浚施工期通航安全监管模式的构建[J]. 水运管理,2015,37(9):24-27.

WANG Zhen, ZHOU Wei, LIU Yi-hua. Construction of navigation safety supervision mode for large deep-water channel dredging during construction period[J]. Shipping Management, 2015, 37(9): 24-27.

[4] 祝由,贾冉,王纲金,等. 供应链金融风险评估研究综述-基于知识图谱技术[J]. 系统工程理论与实践,2023,43(3):795-812.
ZHU You, JIA Ran, WANG Gang-jin, et al. A review of supply chain finance risk assessment research: Based on knowledge graph technology[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2023, 43(3): 795-812.

[5] CHANDAK P, HUANG K, ZITNIK M. Building a knowledge graph to enable precision medicine[J]. Scientific Data, 2023, 10(1): 67.

[6] PENG F L, QIAO Y K, YANG C. Building a knowledge graph for operational hazard management of utility tunnels[J]. Expert Systems with Applications, 2023: 119901.

[7] 周义棋,刘畅,龙增,等. 电网应急预案知识图谱构建方法与应用[J]. 中国安全生产科学技术,2023,19(1):5-13.
ZHOU Yi-qi, LIU Chang, LONG Zeng, et al. Construction method and application of knowledge graph in emergency plans for power grid[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(1): 5-13.

[8] NEWMAN M. Networks[M]. Oxford: Oxford university press, 2018.

[9] ARRIGO F, HIGHAM D J, NOFERINI V, et al. Dynamic Katz and related network measures[J]. Linear Algebra and its Applications, 2022, 655: 159-185.

[10] 李晓健,陈雍君,邱实,等. 复杂地区铁路工程建设风险知识图谱的建立与分析方法[J]. 铁道学报,2025,47(5):187-196.
LI Xiao-jian, CHEN Yong-jun, QIU Shi, et al. Establishment and analysis method of risk knowledge graph of railway engineering construction in complex areas[J]. Journal of the China Railway Society, 2025, 47(5): 187-196.

[11] GOPSILL J, GIUNTA L, GOUDSWAARD M, et al. Data mining prototyping knowledge graphs for design process insights[J]. Journal of Engineering Design, 2024, 36(7-9): 1222-1248.