

面向土石坝历史病险特征的知识图谱构建与应用

李陈瑶^{1,2}, 王芳^{1,2}, 周宁^{1,2}, 李宏恩^{1,2*}

(1. 水利部 交通运输部 国家能源局南京水利科学研究院, 210029, 南京;

2. 水利部东北寒区长距离有压供水工程野外科学观测研究站, 210029, 南京)

摘要:土石坝是我国分布最广、数量最多的坝型,其安全运行直接关系流域防洪与供水保障。海河流域土石坝工程密集、坝龄普遍偏大,病险隐患类型复杂,加之近年极端天气事件频发,工程安全面临严峻挑战。该流域长期积累了大量工程病险处置记录、安全评价报告、运行日志等非结构化或半结构化文本资料,涵盖了丰富的工程实践知识与处置经验,但受限于分散存储、语义异构、关联隐蔽等特点,传统人工查阅方式难以实现经验知识的有效复用。为此,本文引入知识图谱技术,以海河流域某大型土石坝为依托,基于多年病险处置资料,构建以“工程结构-病险表征-处置措施”为框架的土石坝病险知识图谱。区别于现有知识图谱研究多采用静态本体描述,本研究提出融合“时间-空间-状态”多维属性的动态本体模型,实现病险从发现、发展到处置全过程的语义建模;在知识抽取环节,融合大语言模型与领域规则约束方法,兼顾文本理解能力与领域术语的规范化表达,提升抽取的准确性与一致性,最后利用 Neo4j 图数据库实现知识存储与检索。应用结果表明,该图谱能够实现土石坝病险的快速定位,并通过病险类型分布、处置响应时间与实际成效等要素的关联检索,显著提升知识复用效率,从而为水库大坝除险加固智能决策提供技术支撑。

关键词:土石坝;知识图谱;本体建模;知识抽取;病险工程;大坝安全

Construction and application of a knowledge graph for historical defect and risk characteristics of earth-rock dams

LI Chenyao^{1,2}, WANG Fang^{1,2}, ZHOU Ning^{1,2}, LI Hong'en^{1,2*}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Ministry of Water Resources, Ministry of Transport, National Energy Administration, Nanjing 210029, China; 2. Northeastern Cold Region Long-Distance Water-Supply Project Observation and Research Station, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: Earth-rock dams are the most widely distributed and numerous dam type in China, and their safe operation is directly related to basin-level flood control and water supply security. The Haihe River basin is characterized by a high density of earth-rock dam projects, generally aging dam structures, complex types of defects and risks, and increasingly frequent extreme weather events, all of which pose severe challenges to engineering safety. A large volume of unstructured or semi-structured textual materials has been accumulated in this basin, including defect and risk treatment records, safety evaluation reports, and operation logs, which encompass extensive engineering practice knowledge and treatment experience. However, due to the limitations

收稿日期:2026-02-15 修回日期:2026-05-22

作者简介:李陈瑶,硕士研究生,主要从事水库大坝安全评估与病险诊断方面研究。

通信作者:李宏恩,正高级工程师,主要从事大坝安全评估与病险诊断方面研究。E-mail: heli@nhri.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3210604);国家自然科学基金项目(U2443231);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y724008、Y725006、Y725008、Y725009);引绰济辽工程科研项目(YC-KYXM-11-2024);南京水利科学研究院研究生学位论文基金(Yy725012)。

of decentralized storage, semantic heterogeneity, and implicit associations, traditional manual review methods have difficulty in achieving effective reuse of this empirical knowledge. To address this issue, this paper introduced knowledge graph technology and, based on a large earth-rock dam in the Haihe River basin, and constructed a defect-and-risk knowledge graph for earth-rock dams using multi-year treatment records, organized around the framework of “engineering component, defect and risk characterization, and treatment measure”. Unlike existing knowledge graph studies that primarily rely on static ontology descriptions, this paper proposed a dynamic ontology model incorporating multi-dimensional attributes of “time, space, and state”, enabling semantic modeling of the entire process from defect and risk discovery and development to treatment. In the knowledge extraction phase, the approach integrated a large language model with domain rule constraints, balancing text comprehension capability with standardized domain terminology expression to improve extraction accuracy and consistency. Finally, the Neo4j graph database was employed for knowledge storage and retrieval. The application results demonstrate that the constructed knowledge graph enables rapid positioning of earth-rock dam defects and risks and significantly improves knowledge reuse efficiency through associated retrieval of defect and risk type distribution, treatment response time, and actual effectiveness, thereby providing technical support for intelligent decision-making in the reinforcement of reservoir dams.

Keywords: earth-rock dam; knowledge graph; ontology modeling; knowledge extraction; defect and risk engineering; dam safety

中图分类号: TV641+TP18 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2026)11-0045-12

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2026.11.006

一、研究背景

土石坝是我国分布最广、数量最多的坝型,其安全运行直接关系防洪安全、供水安全与流域生态安全。水利工程安全评价领域长期积累了大量检测记录、除险加固方案、运行日志、专家会商纪要等非结构化或半结构化文本资料,不仅记录了工程病险的具体表征,更承载了数十年工程的实践处置经验,对提升土石坝安全评价与处置的精准性、预见性具有不可替代的价值。然而,受制于文本资料分散存储、语义异构、关联关系隐蔽等特点,传统人工查阅与经验比对方式难以实现大规模、深层次的信息提取与知识复用,导致大量有价值内容仍搁置在档案系统中,挖掘程度和利用效率严重不足。如何系统整合多源异构信息、构建可计算推理的病险知识体系,已成为推动土石坝安全管理从经验驱动向数据驱动转型的关键科学问题。

知识图谱作为一种语义化知识组织技术,能够对分散、异构的信息进行实体对齐、关系抽取与逻辑关联,进而形成支持推理与决策的结构化语义网络。近年来,该技术已在应急决策、险情处置、调度运行等场景中初步展现出强大的信息组织与管理能力,例如龚士林等将知识图谱应用于大坝安全监控预警,通过构

建大坝监测知识图谱实现多测点监控信息的关联分析与智能预警,但其研究侧重于监测数据驱动的预警模型,未涉及病险处置经验知识的结构化组织与复用。在本体建模层面,段浩等构建了水利综合知识图谱,侧重于水利领域通用概念体系的组织,但未针对土石坝病险处置过程进行专门建模;张继勋等面向土石坝险情构建了基于本体的知识图谱,但其本体模型以静态结构描述为主,缺乏对病险的时间演化、空间分布与状态变迁等多维属性的系统刻画。在知识抽取层面,张栋梁等采用基于规则与模板的方法从防汛抢险文本中抽取知识,对格式化文本应用效果较好,但对表述灵活的安全评价报告泛化能力有限;冯仲恺等引入大语言模型构建水库调度知识图谱,验证了大语言模型在水利文本知识抽取中的可行性,但未充分考虑领域术语归一化与同义消歧等问题。因此,现有研究在动态本体建模与领域适配的知识抽取两方面尚有提升空间。针对土石坝病险知识来源多、关联弱、更新慢的现实问题,构建以“工程结构-病险表征-处置措施”为框架的土石坝病险知识图谱,可实现病险智能识别、性态诊断及应急决策的全链条场景应用。

海河流域是京津冀协同发展战略的核心支撑区,防洪安全保障需求高。海河流域也是我国土石坝工程

密集、坝龄老化的典型区域,根据周宁等的研究,在极端气候年份,该流域发生的溃坝事件占全国同期溃坝事件总数的38.9%,其中土石坝占比超过九成,这与区域坝型结构老化、病险积累以及应对超标准洪水韧性不足关联密切。近年来极端天气事件多发,对防洪工程体系带来挑战,因此亟须引入智能化手段提升安全评价与除险加固的精准度与时效性。

基于上述背景,本文以海河流域某大型土石坝为研究对象,基于历史病险诊断与处置资料,构建以“工程结构-病险表征-处置措施”为框架的土石坝病险知识图谱。区别于现有研究,本文的主要改进在于:①提出融合时间、空间、状态多维属性的动态本体模型,系统刻画病险从发现、定位、处置到复查的全过程演变特征;②采用大语言模型与领域规则约束融合的知识抽取方法,通过结构化提示语模板引导大语言模型完成实体识别与关系抽取,同时利用领域专业词典进行实体归一化与语义消歧,实现通用语言理解能力与领域知识规范化的有机统一。针对除险加固过程中文本资料利用不充分、挖掘不深入的问题,采用知识图谱为水库大坝提供标准化的工程知识与经验管理模板,进一步建立病险智能评价诊断模型,为水库大坝除险加固智能决策提供参考依据。

二、土石坝典型病险知识图谱核心要素

1. 研究对象与数据基础

本研究选取位于海河流域漳河干流中游的某大型水库为研究对象,该水库坝龄长,病险类型多样、投入运行后经历多次除险加固,积累了大量病险数据资料,

包括安全评价报告、除险加固设计资料等,其核心安全问题在于局部坝顶结构缺陷导致的防洪能力不足,对下游区域的防洪安全构成潜在威胁。该工程在海河流域土石坝群中具有典型代表性,以其为对象构建的病险知识图谱框架与方法具备向同类工程推广的潜力。本文选取该水库2022—2025年病险隐患排查及整改报告进行文本信息挖掘,构建土石坝病险知识图谱。对上述文本资料进行梳理,提取出病险处置记录636条,涵盖该水库在不同运行时期病险情况的发现及处置记录,涉及防洪安全、渗流安全、结构安全(主要指土建结构及坝体稳定安全)、金属结构安全(主要指金属构件及启闭设备运行安全)及运行管理安全等五大类病险类型,具有较好的时间跨度覆盖性与病险类型完整性,能够为知识图谱构建提供具有代表性的数据基础。

2. 土石坝病险知识核心实体分类

知识图谱构建的首要任务是系统界定其核心实体类型。本文基于行业规范与安全评价报告等文本数据,将知识体系划分为“工程结构-病险表征-处置措施”3个层次(见图1)。核心实体具体包括:存在病险的工程结构实体,依据《水库大坝安全评价导则》(SL 258—2017)编制框架划分的病险类型实体(包括防洪安全、渗流安全、结构安全、金属结构安全及运行管理安全),以及涵盖工程与非工程手段的处置措施实体。实体构成知识图谱的节点,其附带的时空与状态等多维属性,为深度关联与动态分析提供了手段。

3. 土石坝病险知识时空状态属性界定

工程病险的属性特征可从时间、空间与状态3个维

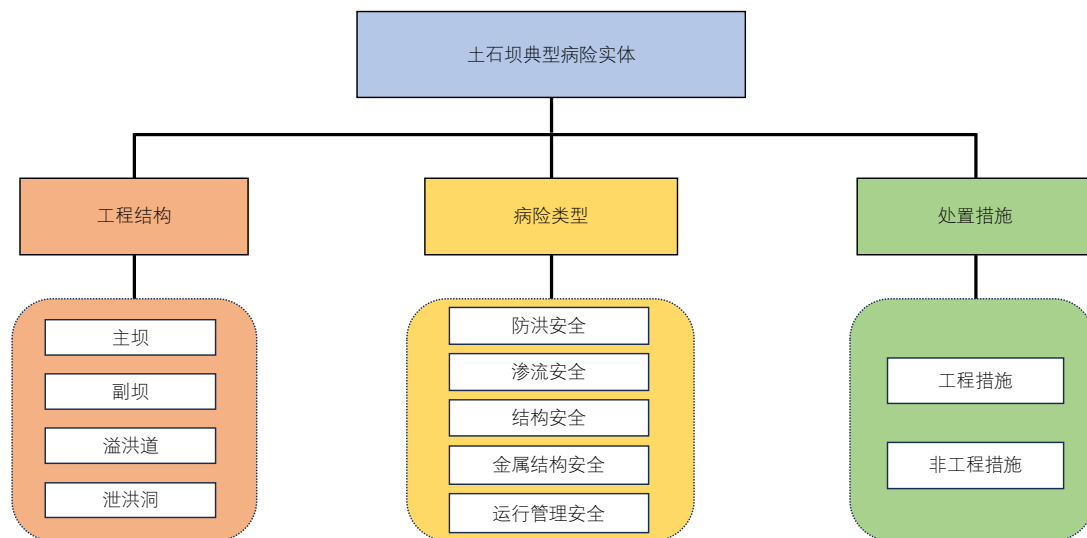


图1 土石坝病险实体划分示意

度进行划分。时间维度贯穿病险发生、发展与处置全过程,涵盖发现、处置、复查等关键时间节点;空间维度通过部位坐标、影响范围等属性,确立病险的方位与拓扑关系;状态维度则在特定时空点上表征病险的物理指标与风险等级(见图2)。3个维度相互关联、动态交织,共同描述了病险从发现识别到处置完成的全过程信息,从而为基于知识图谱的历史追溯、趋势推演与决策支持奠定逻辑基础。

4. 土石坝病险知识语义关系定义

本文所构建的本体模型以“工程结构-病险表征-处置措施”作为核心实体框架,通过特征属性与语义关系刻画实体间动态关联(见图3)。特征属性包含描述实体自身特征的数据及作为限制条件的信息,语义关系则用于连接不同实体以保障逻辑自洽性,二者协同作用,共同构成支撑动态分析与智能推理的知识基础。为系统描述工程病险处置过程中的实体关联,本文将本体关系划分为4类:空间关系、时间关系、从属关系和处置关系,以此支撑病险溯源、影响分析以及措施推荐等实际应用。

三、土石坝病险知识图谱模式层构建

1. 土石坝病险本体模型与三元组表达

土石坝工程典型病险知识图谱的构建涉及模式层与数据层两个关键部分。其中,模式层作为语义框架,用于界定该领域内的工程实体、属性及语义关系;数据层则是基于这一框架所形成的具体案例集合,能够实现对工程结构、病险特征以及处置措施的结构化映射。

模式层的设计与实现依靠本体模型来完成。本体模型从概念层面提供了对土石坝工程典型病险知识的形式化与规范化定义,是保障知识在逻辑上具有一致性的语义基础,本质上构成了该知识图谱的概念体系。在知识表示方法上,本文采用主体、谓语、客体三元组结构作为基本单元,以此描述工程中涉及的相关概念与具体实例。

其中,主体与客体通常代表某个工程结构或相应的属性值,谓语则用来描述它们之间的语义关系。

基于上述本体模型框架,可将复杂的病险处理过程,拆解成一系列既相互独立、又具备规范形式且能够建立逻辑关联的陈述(见表1和表2)。

2. 土石坝病险本体模型可视化

为直观呈现土石坝典型病险本体模型的内在结构

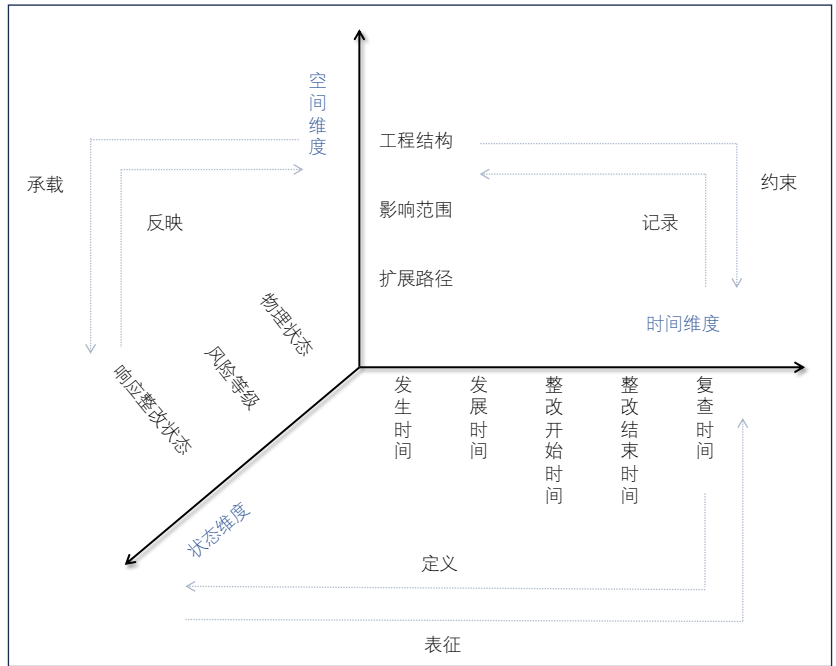


图2 病险知识时间、空间、状态属性

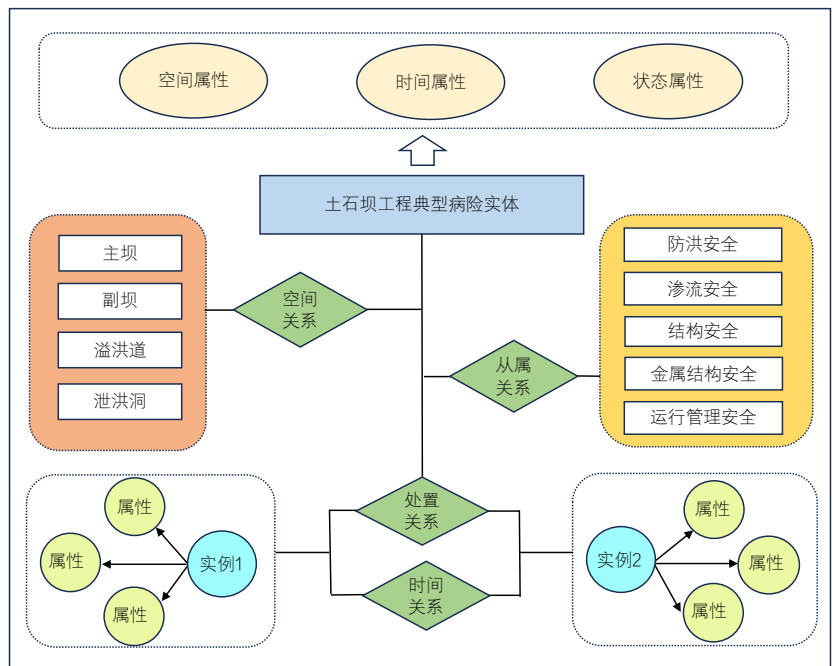


图3 土石坝病险知识框架

表1 土石坝工程典型病险知识图谱实体设计

实体识别范围	实体名称	概念	示例
工程对象	工程结构	水库枢纽的具体组成部分	主坝、副坝、溢洪道、泄洪洞、防浪墙、减压井
病险信息	病险类型	依据规范划分的病险分类	防洪安全、渗流安全、结构安全、金属结构安全、运行管理安全
	病险表征	发现的特定风险隐患个体	主坝背水坡0+600处凹坑、溢洪道堰面剥蚀漏筋、泄洪洞检修闸门锈蚀
时间信息	发现时间	某一特定病险问题被正式识别和记录的初始时间点	2021年10月水利部督查组提出主坝下游坝坡荆棘杂草问题
	处置开始时间	已识别病险问题治理措施的具体启动时间点	大坝坝顶防浪墙基础破损,于2022年10月8日开始修复抹面处理
	处置结束时间	针对特定病险问题的治理项目完成时间点	应急预案内容不全,已于2022年10月31日前完成修订
	复查时间	病险问题处置完成后,为验证治理效果而主动进行再次检查的特定时间点	下游坝坡杂草问题,在2022年9月督查时被再次发现,作为复查问题
工程措施	工程措施	为消除病险采取的物理工程手段	修复抹面、回填夯实、设置量水堰、更换钢丝绳、混凝土修补
非工程措施	非工程措施	为防控风险采取的管理与技术手段	修订应急预案、开展专题培训、建立处置台账、严禁扩大鱼塘规模
责任主体	责任主体	负责问题处置或日常管理的组织或岗位	某局党委、工管科、水政科、养护公司、防汛办公室
法规标准	法规标准	问题判定与采取措施所依据的规范性文件	《水库大坝安全管理应急预案编制导则》《土石坝安全监测技术规范》

表2 土石坝工程典型病险知识图谱关系类型设计

序号	关系类型	关系名称	三元组示例
1	空间关系	位于	凹坑,位于,主坝背水坡0+600
2		相邻	排水沟,相邻,下游坝脚
3	时间关系	发现于	主坝下游坝坡杂草问题,发现于,2021年10月
4		处置开始于	防浪墙基础修复,处置开始于,2022年10月8日
5		处置完成于	应急预案修订,处置完成于,2022年10月31日
6		复查于	下游坝坡杂草问题,复查于,2022年9月
7	从属关系	属于	泄洪洞检修闸门锈蚀,属于,金属结构安全
8		隶属于	养护公司,隶属于,某管理局
9	处置关系	实施	破损观测墩,实施,混凝土清除与修补
10		设置	主坝左坝段减压井,设置,小型量水堰
11		依据	预案修订,依据,《水库大坝安全管理应急预案编制导则》

及其语义关联,本文借助知识建模工具Protégé实现模型的形式化表达,并在此基础上通过专家评审与实例验证对模型进行逐级优化,确保最终生成以“工程结构-病险表征-处置措施”为框架的语义网络兼具规范性与适用性(见图4)。

四、土石坝病险知识图谱数据层构建

1. 基于大语言模型的病险知识抽取与融合处理

近年来,大语言模型与知识图谱的协同应用已成为知识工程领域的重要研究方向。本文通过融合大语言模型与领域规则约束,从非结构化文本资料中抽取符合本体模型定义的三元组,以支持知识图谱数据层的构建。本研究采用通义千问大语言模型(Qwen-Plus),通过平台API接口进行调用,设置温度参数为

0.1以控制输出的稳定性与可复现性。

土石坝除险加固相关文本资料通常具有规范化的结构,其中病险表征与处置措施内容相对独立,可按单元切分以适应模型输入限制。针对病险文本的特点,本文设计了结构化提示语模板来引导模型完成实体识别与关系抽取任务。提示语采用“系统角色设定+任务指令+输出格式约束”的三层结构:首先通过系统提示语将模型角色设定为水利工程领域专家,其次在任务指令中明确限定7类实体识别范围和11类语义关系,最后要求模型以“主体-关系-客体”的JSON结构化格式输出抽取结果,典型提示语设计示例见表3。

基于上述提示语模板,对636条病险记录逐条进行三元组抽取,初步生成三元组5225条。针对抽取结果中存在的表述不一致问题,进一步对三元组进行实体

模型为依托,各类实体映射为节点,语义关系映射为边,并通过节点与边的双向连接实现知识的层级化表达。通过其内置的Cypher查询语言可进行有向或无向检索,其中有向检索能够查找与某一节点相关的所有节点,无向检索可沿关系方向进行链式推导,获取下属层级的详细信息,并结合工程实践场景开展多维信息检索与分析。

五、土石坝病险知识图谱应用验证

传统的土石坝病险处置决策多依赖于经验驱动,且相关信息常分散存储于不同结构的数据中,存在知识碎片化、跨源信息关联薄弱等局限,影响了工程病险诊断与处置措施决策的效率。知识图谱本身具备的结构化语义网络特点,能够实现对多源异构文本数据的系统化组织与管理,从而基于历史数据形成可参考复用的经验知识。本文基于研究对象土石坝2022—2025年的实际病险处置资料,遵循本体构建、知识抽取与融合、知识存储等步骤,构建了土石坝典型病险知识图谱(见图5),共形成656个实体与2544条关系,并以此为基础开展应用验证。

1. 知识图谱多维度关联查询

基于所构建的知识图谱,本文开展了多维度关联检索与分析。首先以工程结构为起点进行全局检索,在掌握整体分布后,聚焦工程结构展开下属层级查询。例如,针对溢洪道节点所关联的病险问题,按“发现年份”属性进行分组统计,可清晰呈现该结构隐患在时间上的分布特征;进一步沿关系路径追溯某一具体病险问题,即可完整复现从问题发现、定位到措施落实的全过程,实现对病险事件处置过程的追溯。

2. 应用验证

(1) 某水库主要工程结构

图6为某水库主要工程结构知识图谱,以“工程结

构”为中心节点,系统组织了主坝、4座副坝及泄水建筑物等关键建筑物的拓扑关系与异构数据。该图谱定义实体间“包含”“属于”等语义关系,直观展示了水库工程结构的层次化架构,例如以节点表征工程实体“主坝”及其“55.5 m最大坝高”等属性参数。

(2) 某水库病险类型及具体表征

以查询“病险类型”为例,用5个节点代表防洪安全、渗流安全、结构安全、金属结构安全与运行管理安全5类病险类型,对“结构安全”节点进一步展开,对其下级具体病险如“堰面剥蚀露筋”“上游翼墙结构裂缝”等更为具体的损伤形态进行表征。节点间通过“包含”“属于”等有向边连接,清晰反映了从病险类型到具体病险表征的层级从属关系(见图7)。

(3) 某水库病险诊断时间

以查询“病险诊断年份”为例,以不同颜色区分节点类型,其中年份节点通过“发生在”有向边关联至具体的病险表征节点。以“2024年”节点为例,可清晰展示该年度对应的病险表征信息。点击任一病险表征节点,可进一步查看其详细属性,如点击“进水塔闸门检查记录内容填写不规范”节点即可展示严重程度、发现时间、整改状态等具体数据。节点间的有向边直观呈现了从年份到对应病险表征的动态关联关系,为追溯不同时期病险问题的演变与处置情况提供了可视化支撑(见图8)。

(4) 某水库病险诊断及处置

以查询“处置措施”为例,处置措施分为工程措施与非工程措施2类,可分别查询其下属的具体处置方法。处置方法节点(如“重新铺设电缆”“编制了水库污染源清单”等)通过“实施”有向边关联至对应的病险表征节点,并进一步延伸至具体病险类型节点。以“未建立水库污染源清单”节点为例,可进一步展开其属性信息,包

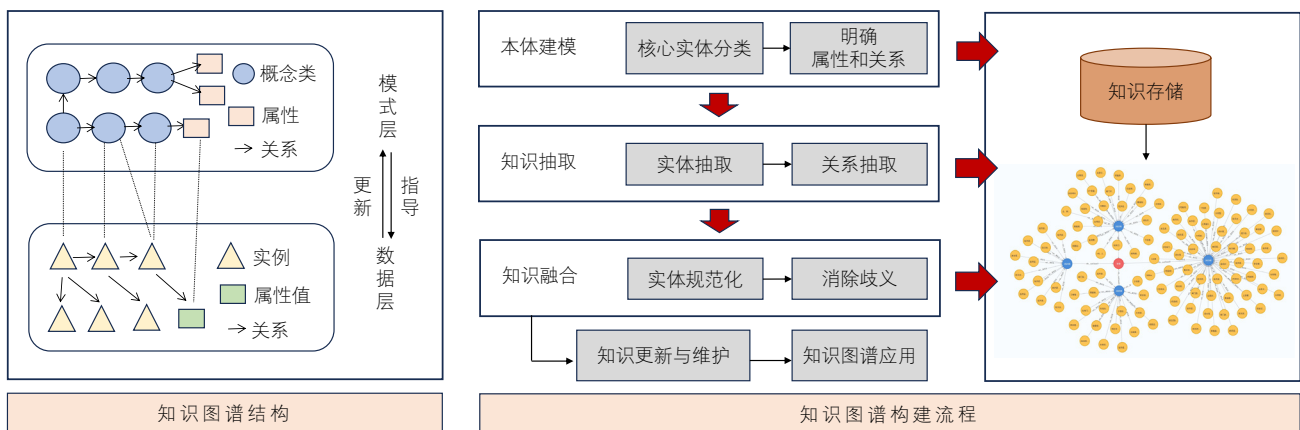


图5 土石坝工程典型病险知识图谱构建示意

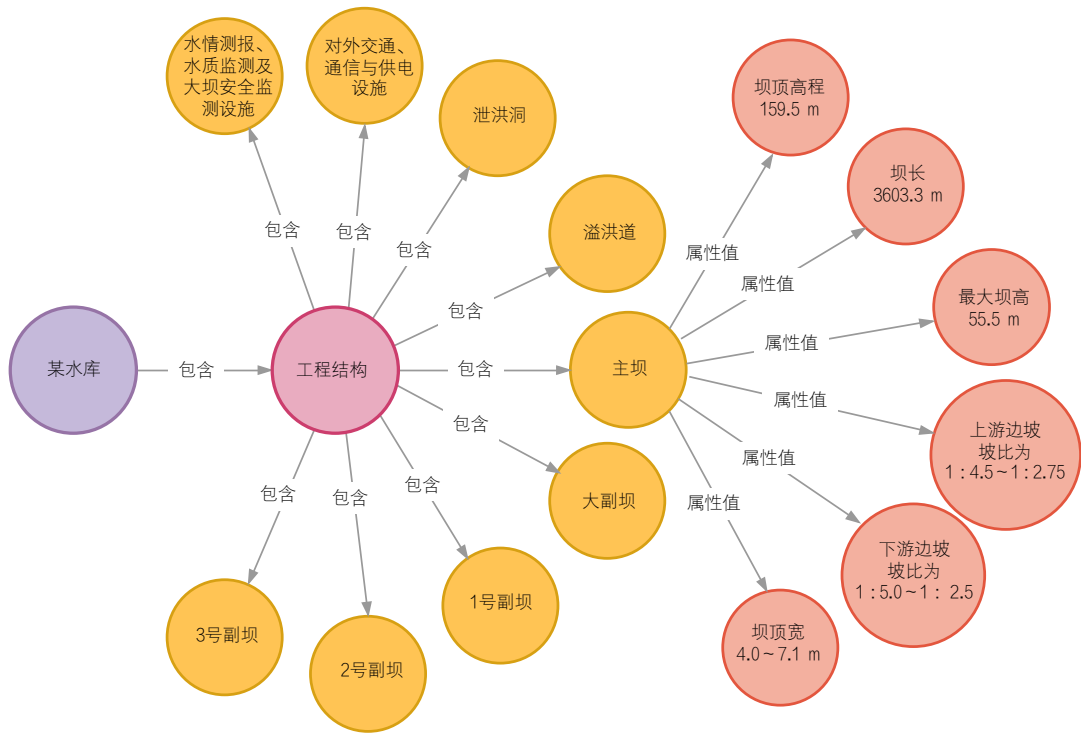


图6 某水库工程结构知识图谱可视化示例

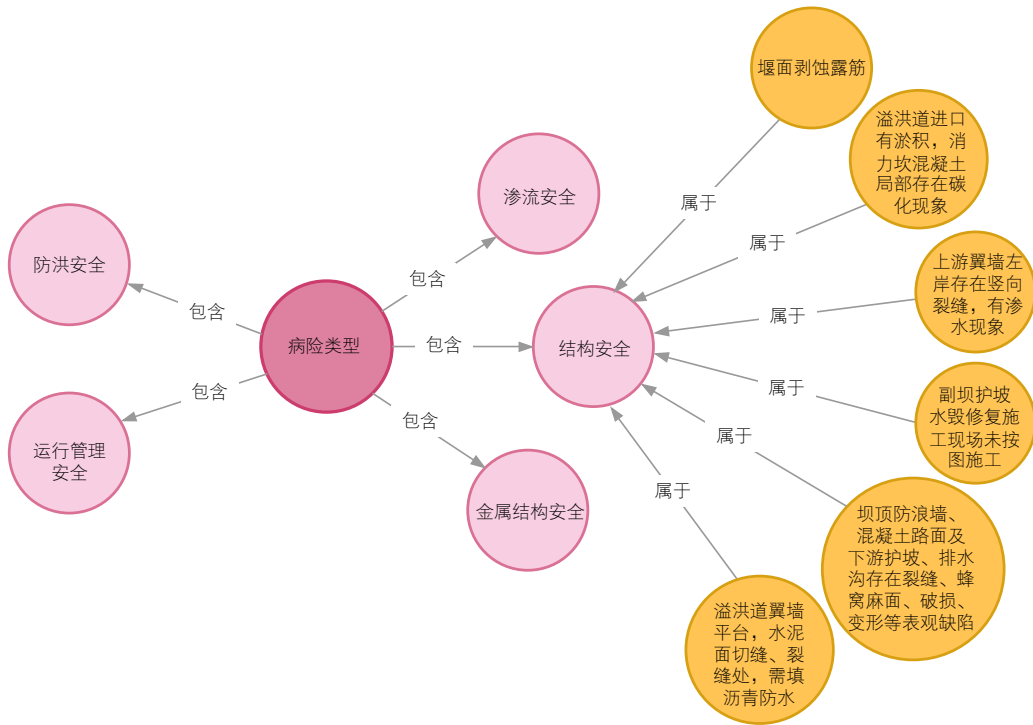


图7 某水库病险类型知识图谱可视化示例

括整改开始时间、整改结束时间等具体数据。节点间的有向边直观呈现了从处置措施到病险类型再到具体病险表征的层级对应关系,为理解病险与针对性处置措施的

关联逻辑提供了宏观层面的可视化支撑(见图9)。

在此基础上,进一步以某一具体病险表征的完整处置信息为例进行深入查询,所得结果如图10所示。

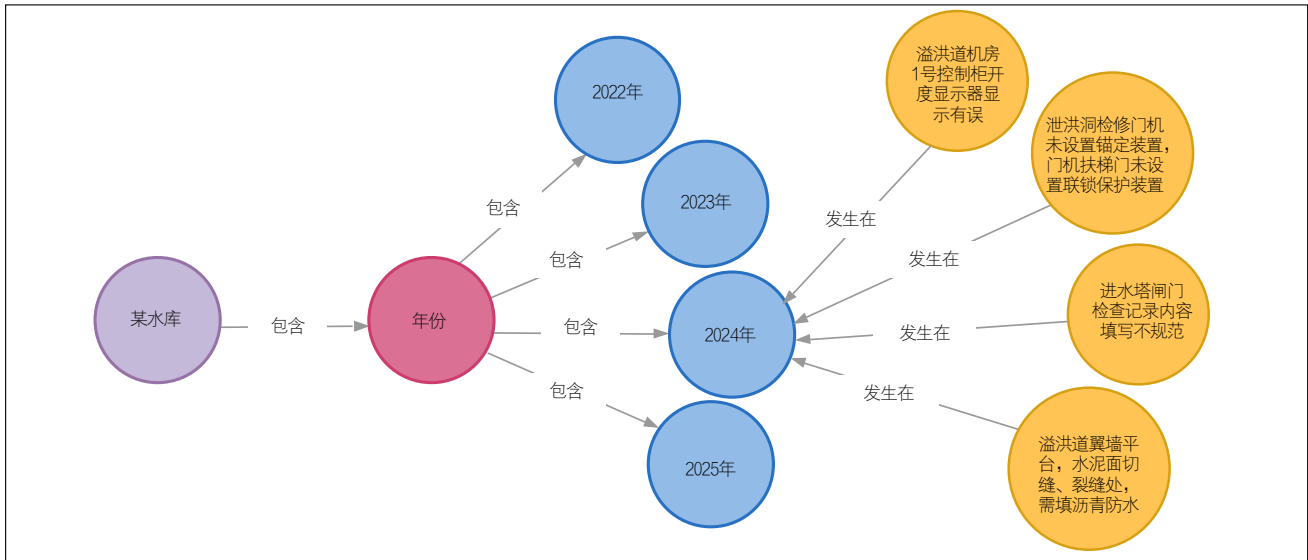
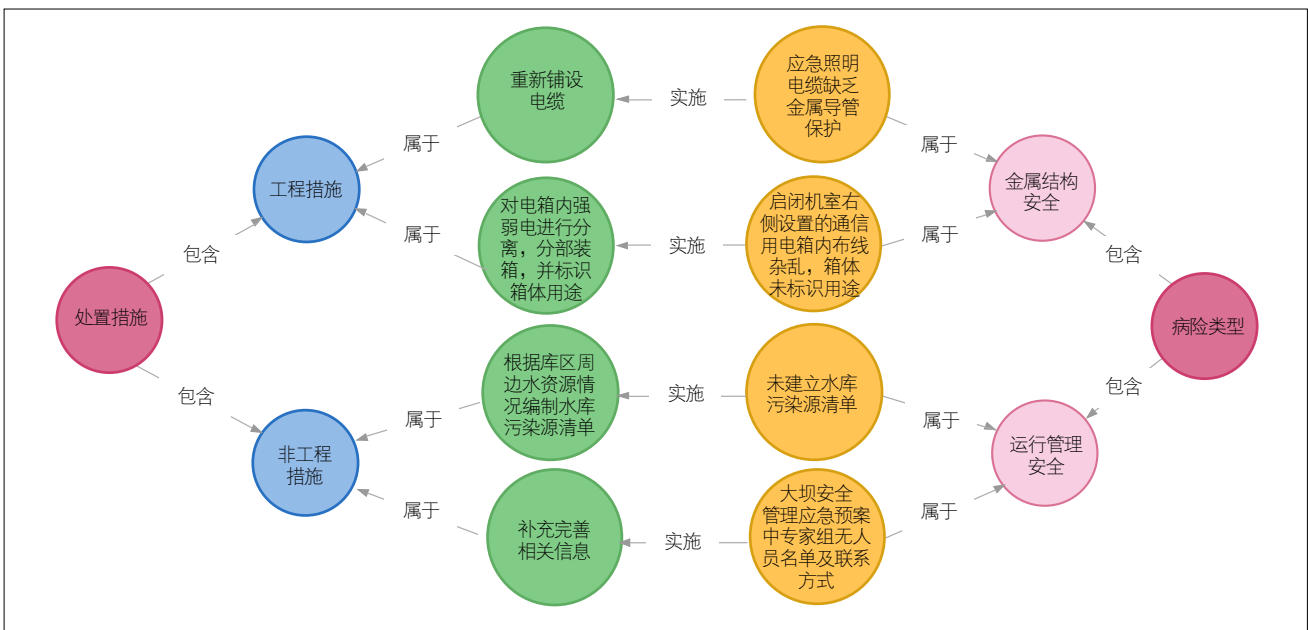


图8 某水库诊断年份知识图谱可视化示例



节点属性	
处置措施	
<id>	126
整改开始时间	2024/7/18
整改结束时间	2024/8/4
uri	根据库区周边水资源情况编制水库污染源清单

图9 某水库处置措施知识图谱可视化示例

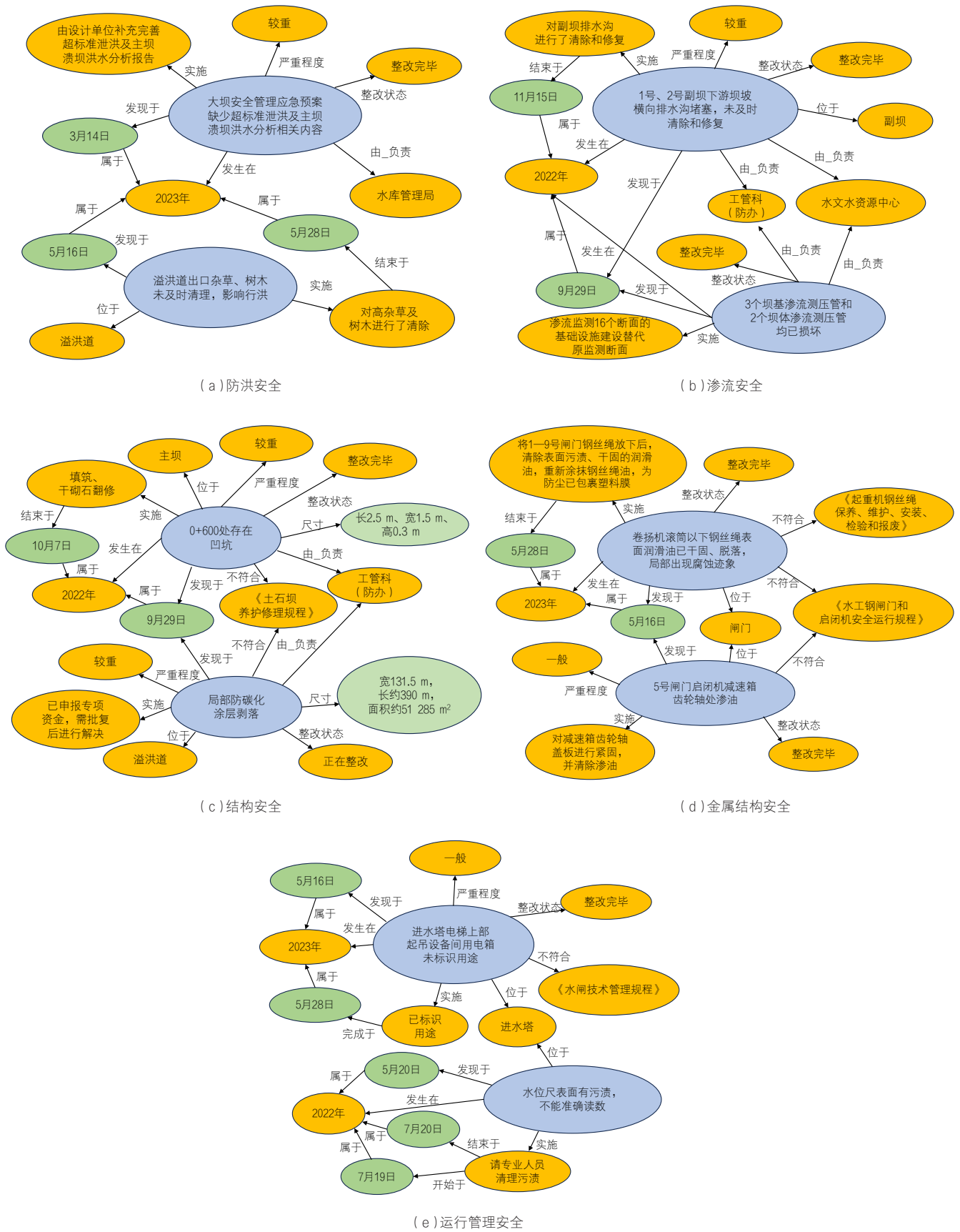


图 10 按病险类型分类的典型病险查询

以图10(a)为例,图中以“大坝安全管理应急预案缺少超标泄洪及主坝溃坝洪水分析相关内容”这一病险节点为核心展开,节点间的有向边与属性信息的叠加,直观揭示了从病险表征到针对性处置措施、从发现时间到整改完成的完整问题解决路径,为深入理解病险问题的成因、处置逻辑及闭环管理过程提供了可追溯的案例支撑。

综上所述,知识图谱可对土石坝病险知识进行系统化管理:一方面,能够对各类病险表征及其对应的处置措施进行高效索引,实现病险知识的快速定位;另一方面,支持从多个维度展开关联检索,通过病险类型分布、处置响应时间与实际成效等要素,有效对接具体工程实践场景,为辅助土石坝除险加固决策提供可落地的技术支撑。

六、结论与展望

本研究基于水库大坝工程建设运行过程中积累的大量文本资料,构建了面向土石坝除险加固的病险知识图谱,通过构建涵盖工程结构、病险表征、处置措施等核心要素的图谱框架,对文本资料进行结构化组织与管理,构建了包含656个实体与2544条关系的语义网络,可实现土石坝历史病险信息的数字化管理与关联检索,进一步为土石坝病险处置的智能决策提供技术支撑。

同时,当前研究仍存在一定局限性:数据源以静态历史文本为主,尚不具备实时更新能力;知识抽取仍依赖大语言模型与人工审核相结合的半自动方式,大规模应用时的效率与一致性还有提升空间。后续研究可重点围绕以下两个方向展开:一是多源异构数据融合,逐步将大坝安全监测时序数据及遥感影像解译成果接入现有知识图谱,实现静态经验知识与动态监测信息的融合;二是智能决策与预警应用,结合图神经网络等深度学习方法,探索病险发展趋势预测和除险加固方案自动推荐。

参考文献:

[1] 李国英.推动水利高质量发展 保障我国水安全 为确保基本实现社会主义现代化取得决定性进展作出水利贡献[J].中国水利,2026(1):1-9.

[2] TIAN D, LI M C, SHI J, et al. On-site text classification and knowledge mining for large-scale projects construction by integrated intelligent approach[J].Advanced Engineering Informatics, 2021,

49:101355.

- [3] ZHANG D, LI M, TIAN D, et al. Intelligent text recognition based on multi-feature channels network for construction quality control[J].Advanced Engineering Informatics, 2022, 53:101669.
- [4] 刘婷,张社荣,王超,等.水利施工事故文本智能分析的BERT-BiLSTM混合模型[J].水力发电学报,2022,41(7):1-12.
- [5] 李明超,田丹,沈扬,等.融入Attention机制改进Word2vec技术的水利水电工程专业词智能提取与分析方法[J].水利学报,2020,51(7):816-826.
- [6] PENG C Y, XIA F, NASERIPARSA M, et al. Knowledge Graphs: Opportunities and Challenges[J].Artificial Intelligence Review, 2023, 56(11):31-32.
- [7] LIN J, ZHAO Y, HUANG W, et al. Domain knowledge graph-based research progress of knowledge representation[J].Neural Computing and Applications, 2020, 33(2):1-10.
- [8] 段浩,韩昆,赵红莉,等.水利综合知识图谱构建研究[J].水利学报,2021,52(8):948-958.
- [9] 刘雪梅,卢汉康,李海瑞,等.知识驱动的水利工程应急方案智能生成方法——以南水北调中线工程为例[J].水利学报,2023,54(6):666-676.
- [10] 张军琿,黄希扬,桂明宇,等.面向数字孪生工程的水利知识图谱构建及应用[J].人民黄河,2024,46(4):121-124+130.
- [11] 冯仲恺,林腾,牛文静,等.基于大语言模型的水库调度知识图谱智能构建[J].水利学报,2025,56(12):1556-1569.
- [12] 张栋梁,周伟,马刚,等.面向水利防汛抢险的知识图谱构建与应用[J].水利学报,2025,56(3):341-353.
- [13] 毕吴瑕,翁白莎,王旭,等.基于知识图谱的早涝急转研究进展[J].水资源保护,2021,37(6):40-48+120.
- [14] 周逸凡,段浩,赵红莉,等.水文模型知识图谱构建与应用[J].水利学报,2024,55(1):80-91.
- [15] 龚士林,孙辅庭,黄维,等.基于知识图谱的大坝安全智能监控预警方法[J].工程科学与技术,2024,56(3):32-40.
- [16] 杨明鑫,翟家齐,王梅,等.1956—2022年海河流域极端降水时空变化特征[J].人民黄河,2026,48(1):

- 26-32.
- [17] 张志彤.海河“23·7”流域性特大洪水防御启示与对策——以永定河为例[J].中国水利,2024(3):4-7.
- [18] 乔建华.深入贯彻习近平总书记治水重要论述精神奋力推进新阶段海河流域水利高质量发展[J].中国水利,2023(24):48-49.
- [19] 周宁,王芳,李铮,等.1957—2017年中国不同流域土石坝溃坝事件时空演化规律[J].水科学进展,2024,35(5):689-699.
- [20] 张继勋,王虞清,焦修明,等.基于本体和自然语言处理的土石坝险情知识图谱构建方法研究[J].水利学报,2024,55(9):1071-1083+1097.
- [21] 水利部.水库大坝安全评价导则:SL 258—2017[S].北京:中国水利水电出版社,2017.
- [22] 王春玲,诸云强,王曙,等.考虑时空特征及演化关系的行政区划知识图谱构建[J].地球信息科学学报,2026,28(1):89-104.
- [23] 陈兰兰,卢书航,彭雪飞,等.基于知识图谱的洪水调度研究及展望[J].黑龙江水利科技,2024,52(11):16-20.
- [24] 易小薇.基于知识图谱的国内智慧水利领域研究进展[J].河南水利与南水北调,2024,53(8):105-107.
- [25] 徐增林,盛泳潘,贺丽荣,等.知识图谱技术综述[J].电子科技大学学报,2016,45(4):589-606.
- [26] 诸云强,孙凯,王曙,等.顾及复杂时空特征及关系的地球科学知识图谱自适应表达模型[J].中国科学:地球科学,2023,53(11):2609-2622.
- [27] LI X W, YANG D J, YUAN J F, et al.BIM-enabled semantic web for automated safety checks in subway construction[J].Automation in Construction, 2022, 141:104454.
- [28] 吴文隆,尹海莲,王宁,等.大语言模型和知识图谱协同的跨域异质数据查询框架[J].计算机研究与发展,2025,62(3):605-619.
- [29] 马冰琦,周盈海,王梓宇,等.一种基于大语言模型的威胁情报信息抽取方法[J].网络空间安全科学学报,2024,2(2):36-46.
- [30] SUMMER G, KELDER T, ONO K, et al.cyNeo4j: connecting Neo4j and Cytoscape[J].Bioinformatics (Oxford, England), 2015, 31(23):3868-3869.
- [31] 史政一,吕君可,黄弘.基于Neo4j的城市地下管道信息知识图谱构建研究[J].中国安全生产科学技术,2024,20(6):5-10.

责任编辑 刘磊宁