

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.153>



面向公共安全的台风—崩塌灾害链风险评估模型 构建方法

刘洪光¹, 杨强根^{2*}, 施霞珍³, 陈小红⁴, 周永贵⁴, 施昌辉⁵

1. 航天宏图信息技术股份有限公司武汉分公司, 湖北武汉 430073
2. 中国地质大学(武汉)信息化工作办公室, 湖北武汉 430074
3. 武汉蓝天绿野咨询设计有限公司, 湖北武汉 430024
4. 航天宏图信息技术股份有限公司, 北京 100195
5. 湖北溪岸节能环保科技有限公司, 湖北武汉 430056

摘要: 公共安全是人类社会发展的基础, 通过提升公共安全对灾害链的应对能力, 来保障社会经济和人员财产的安全。当前, 多变的气候特征导致台风—崩塌灾害链对承灾体的安全产生严重威胁。利用知识图谱技术、人工智能技术, 融合专家打分法, 分析、研究台风—崩塌灾害链中人员、建筑物、交通、财产等承灾体间的关联关系和体系结构, 创新性地构建台风—崩塌灾害链风险评估模型。该模型成果, 结合台风“杜苏芮”和云梦山公路边崩塌, 进行了验证分析。研究表明: 该模型能够为台风—崩塌灾害链风险评估提供有效的支持, 提高了灾害链风险评估的准确性和可靠性, 为公共安全领域的灾害风险管理提供了新的方法和思路。

关键词: 公共安全; 台风; 崩塌; 灾害链; 知识图谱; 人工智能; 风险评估; 工程地质学。

中图分类号: P642

文章编号: 1000—2383(2025)10—4059—12

收稿日期: 2025-05-23

Construction Methodology of Modeling Risk Assessment for Typhoon-Collapse Disaster Chain for Public Safety

Liu Hongguang¹, Yang Qianggen^{2*}, Shi Xiaozhen³, Chen Xiaohong⁴, Zhou Yonggui⁴, Shi Changhui⁵

1. Wuhan Branch of Piesat Information Technology Co., Ltd., Wuhan 430073, China
2. Network and Information Center, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. Wuhan Lantian Lvye Consulting and Design Co., Ltd., Wuhan 430024, China
4. Piesat Information Technology Co., Ltd., Beijing 100195, China
5. Hubei Xi'an Energy Saving and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Wuhan 430056, China

Abstract: Public safety serves as the foundation for human social development. Enhancing the capability to respond to disaster chains safeguards socio-economic activities and protects lives and property. Currently, variable climate patterns pose severe threats

作者简介: 刘洪光(1985—), 男, 中级工程师, 硕士, 从事 GIS、自然灾害监测预警风险评估以及信息技术应用研究。ORCID: 0009-0004-8127-9054. E-mail: 308287460@qq.com

*** 通讯作者:** 杨强根(1973—), 男, 高级工程师, 博士, 从事 GIS 以及网络信息技术应用研究。ORCID: 0000-0001-9215-8128. E-mail: yangqg@cug.edu.cn

引用格式: 刘洪光, 杨强根, 施霞珍, 陈小红, 周永贵, 施昌辉, 2025. 面向公共安全的台风—崩塌灾害链风险评估模型构建方法. 地球科学, 50(10): 4059—4070.

Citation: Liu Hongguang, Yang Qianggen, Shi Xiaozhen, Chen Xiaohong, Zhou Yonggui, Shi Changhui, 2025. Construction Methodology of Modeling Risk Assessment for Typhoon-Collapse Disaster Chain for Public Safety. *Earth Science*, 50(10): 4059—4070.

to exposed elements via typhoon-collapse disaster chains. This research employs knowledge graph technology, artificial intelligence techniques, and integrates the expert scoring method to analyze, and investigate the correlations and structural systems between exposed elements—such as personnel, buildings, transportation, and property—within typhoon-collapse disaster chains. It innovatively constructs a risk assessment model for these disaster chains. The model's outcomes were validated through case studies of Typhoon Doksuri and a highway slope collapse at Yunmeng Mountain. Findings demonstrate that the model effectively supports risk assessment for typhoon-collapse disaster chains, improving assessment accuracy and reliability. This provides novel methodologies and insights for disaster risk management in the field of public safety.

Key words: public safety; typhoon; collapse; disaster chain; knowledge graph; artificial intelligence; risk assessment; engineering geology.

0 引言

近年来,复杂的气候变化导致自然灾害及次生灾害频发,形成连续性强、危害大的灾害链。其中,台风及其引发的次生灾害,对人员生命、建筑安全、交通安全、财产安全等造成了严重威胁。2023年第5号超强台风“杜苏芮”和2024年第3号超强台风“格美”,在引发强降雨天气灾害的同时,在湖北、河南、北京、山东、湖南等多地引发山体滑坡、崩塌、泥石流等次生地质灾害,造成了严重的人员伤亡、交通中断、建筑损毁和经济损失。

为保障人员、建筑、交通、财产等公共要素的安全,积极应对台风—崩塌灾害链带来的影响,一方面,现阶段主要采用较为成熟的方法思路,开展灾害风险评估工作。该方法思路主要针对崩塌,通过光学卫星、雷达卫星、无人机、激光雷达、监测传感器等多类型的设施设备,汇聚多源、海量、异构的卫星遥感数据、实景三维数据、实时监测数据、影响因素数据、承灾体数据等多种数据,研究地质灾害隐患的发生机制、发展趋势、影响范围,开展风险评估工作。另一方面,专家、学者积极拓展新视角、新技术、新方法,研究其在灾害风险评估中的适用性。比如:拓展研究角度,研究不同空间尺度下,不同灾害风险评估方法的异同及其适用性(Philip *et al.*, 2020);参考灾害链思路,研究台风—崩塌灾害链内容,构建台风—崩塌灾害链相关的系统和模型(叶金玉, 2015;王然等, 2016;刘俊杰, 2021;何玥双和江辉仙, 2024);引入知识图谱技术,或者了解该技术在地质灾害业务中的贡献度(郭飞等, 2024),或者对现实世界中的灾害风险评估数据赋以明确概念,厘清灾害风险评估数据之间的关联关系,构建台风及次生灾害的灾害链知识图谱,开展灾害预测、评估(王萍, 2020;邱芹军等, 2023;黄晶等, 2024;王浩等, 2024;朱海铭等, 2024);采用人工智

能技术,设计、实现灾损评估模型、灾害预警模型和灾害业务系统,为灾损评估、灾后预警、发现隐藏的灾害隐患等工作提供支持(陈伟, 2022;蔡文博等, 2023;董力豪, 2023;王帅, 2023;吴博, 2024)。

以上方法思路和研究内容都取得了较为良好的效果,同时也留下了进一步补充完善的空间。现有常用的方法和思路中,重点关注的是台风引发的崩塌,忽略研究关注台风、崩塌之间的内在关联性、时空关联性、链式效应,难以准确捕捉台风—崩塌灾害链的复杂机理,难于满足台风—崩塌灾害链风险评估要求。研究采用的角度、技术和方法,受限于其所处的历史时期和匹配环境,使得难以充分融合技术能力,未能综合发挥技术优势。

针对以上问题,并且为服务于公共安全的工作业务需求,本文创新性地融合灾害链、知识图谱、人工智能技术、专家打分等技术和方法,研究台风—崩塌灾害链,构建台风—崩塌灾害链知识图谱,梳理、分析灾害链中诱发因子、致灾因子、承灾体的内在关联性、时空关联性、链式效应等关联关系;基于以上关联关系,进而构建台风—崩塌灾害链风险评估体系和模型;借助于该模型和多源、海量的灾害风险评估业务数据,实现台风—崩塌灾害链科学、合理的风险评估,为今后灾害链的风险评估工作提供模型参考、技术参考和理论参考。

1 台风—崩塌灾害链知识图谱构建

自然因素之间息息相关,灾害之间同样存在着一定的关联性。基于灾害链思路,通过链式思维,构建台风—崩塌灾害链,分析台风—崩塌灾害链的发生原因,还原台风—崩塌灾害链的发生过程。台风—崩塌灾害链如图1所示。

研究、分析台风—崩塌的灾害链式关系,其中涉及台风数据、崩塌数据、人员数据、建筑物数据、交通数据和财产数据等多类型的业务数据。以上业

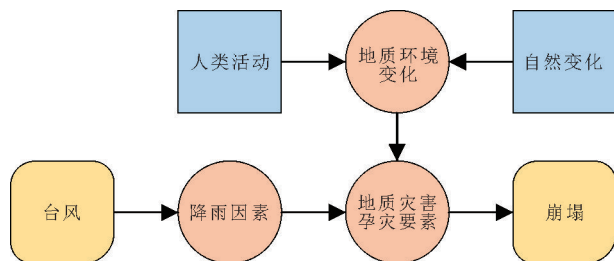


图1 台风—崩塌的链式关系

Fig. 1 Typhoon-collapse disaster chain coupling mechanism

务数据呈现多源、异构、海量的特点,直接或间接地对灾害风险评估工作产生不同程度的影响.本研究充分融合知识图谱、人工智能等技术思路,发挥其技术优势,分析、研究台风数据、崩塌数据、人员数据、建筑物数据、交通数据和财产数据的归属类型,进而划分成诱发因子、致灾因子、承灾体等数据类型;厘清以上业务数据的内在关联性、时空关联性、链式效应等关联关系,进而构建台风—崩塌灾害链知识图谱.基于台风—崩塌灾害链知识图谱中诱发因子、致灾因子、承灾体的数据实体内容、数据关联关系,从而为构建台风—崩塌灾害链风险评估模型提供数据基础、内在关联和业务逻辑.

1.1 台风—崩塌灾害链知识图谱构建方法

知识图谱技术是用来解决现实世界中复杂繁冗的实体对象及其关联关系的技术.张吉祥等(2022)明确了知识图谱技术的发展和本质:知识图谱概念由 Google 于 2012 年提出,用于完善搜索引擎,是一种典型的多边关系图,由节点(实体)和边(实体之间的关系)组成.知识图谱本质上是一种语义网络,用于揭示万物之间的关系.其旨在从多种类型的复杂数据中抽取概念、实体和关系,是事物关系的可计算模型.黄恒琪等(2019)分析说明了知识图谱由数据层和模式层构成.

本研究获取多来源、充足的台风数据、崩塌数据和承灾体数据,通过对以上数据进行处理,实现数据的标准化和规范化.利用知识图谱技术,分析、明确数据的规则、约束、节点和节点关系,形成台风—崩塌灾害链知识图谱的模式层和数据层.知识图谱的构建方法包括自底向上、自顶向下和二者混合 3 种方法.基于数据层和模式层,面向灾害风险评估需求,针对性地选择自底向上的方法完成台风—崩塌灾害链知识图谱的构建.台风—崩塌灾害链知识图谱的构建方法如图 2 所示.

1.2 台风—崩塌灾害链知识图谱构建流程

台风—崩塌灾害链知识图谱构建流程主要包

括数据来源与规范处理、知识抽取与知识融合、知识图谱构建与可视 3 个步骤.

1.2.1 数据来源与规范处理 本研究的数据主要为崩塌隐患数据、承灾体数据、台风数据、台风引发的降雨数据.研究数据主要为研究区域内年度性的数据.其中,崩塌隐患数据、承灾体数据为研究区域内自然资源部门机构、应急管理部门机构提供的数据;台风数据、台风引发的降雨数据为台风及其残余环流影响区域的中央气象台、省级气象局、市级气象局发布、总结的台风数据及其引发的降雨数据.

本研究的数据主要包括结构化数据和非结构化数据.针对数据特点,参照标准规范和灾害风险评估业务工作要求,对研究数据进行标准化、规范化处理.结构化数据的处理,主要包括数据转换、数据清洗、数据抽取、数据关系重建等操作;非结构化数据的处理,主要包括拓扑关系修正、数据拼接、数据裁切、数据镶嵌、空间参考转换、格式转换、与结构数据关联等操作.数据处理的工具主要包括 ETL 工具、ArcGIS 等基础性的大数据处理软件和地理信息软件.通过数据处理,为台风—崩塌灾害链风险评估提供可靠、科学、有效、合理的数据支持.

1.2.2 知识抽取与知识融合 台风—崩塌灾害链知识图谱包括数据层和模式层.其中,数据层则是模式层的具体体现,模式层则是台风—崩塌灾害链涉及的概念基础和逻辑关系.

将规范处理的台风数据、台风引发的降雨数据、崩塌隐患数据、承灾体数据等台风—崩塌灾害链数据作为实体,分析台风—崩塌灾害链数据之间的时空拓扑关系和逻辑关系.通过 Neo4j,以“实体—关系—实体”的三元组形式进行知识融合和数据存储,构建台风—崩塌灾害链的图状知识库.不仅对台风—崩塌灾害链实例数据进行实体抽取、关系抽取和属性抽取,而且对台风—崩塌灾害链实例数据进行知识融合,一方面保证数据实体在现实世界的指向正确,另一方面保证数据实体的属性可靠、有效.通过以上工作,构建完成台风—崩塌灾害链知识图谱的数据层.

基于构建完成的数据层,抽象其中的概念和逻辑,形成台风—崩塌灾害链知识图谱的模式层,进而对数据层进行相应的约束和指导.台风—崩塌灾害链知识图谱模式层的概念包括诱发因子、致灾因子、承灾体,逻辑包括引发、诱发、威胁.

1.2.3 知识图谱构建与可视 台风—崩塌灾害链

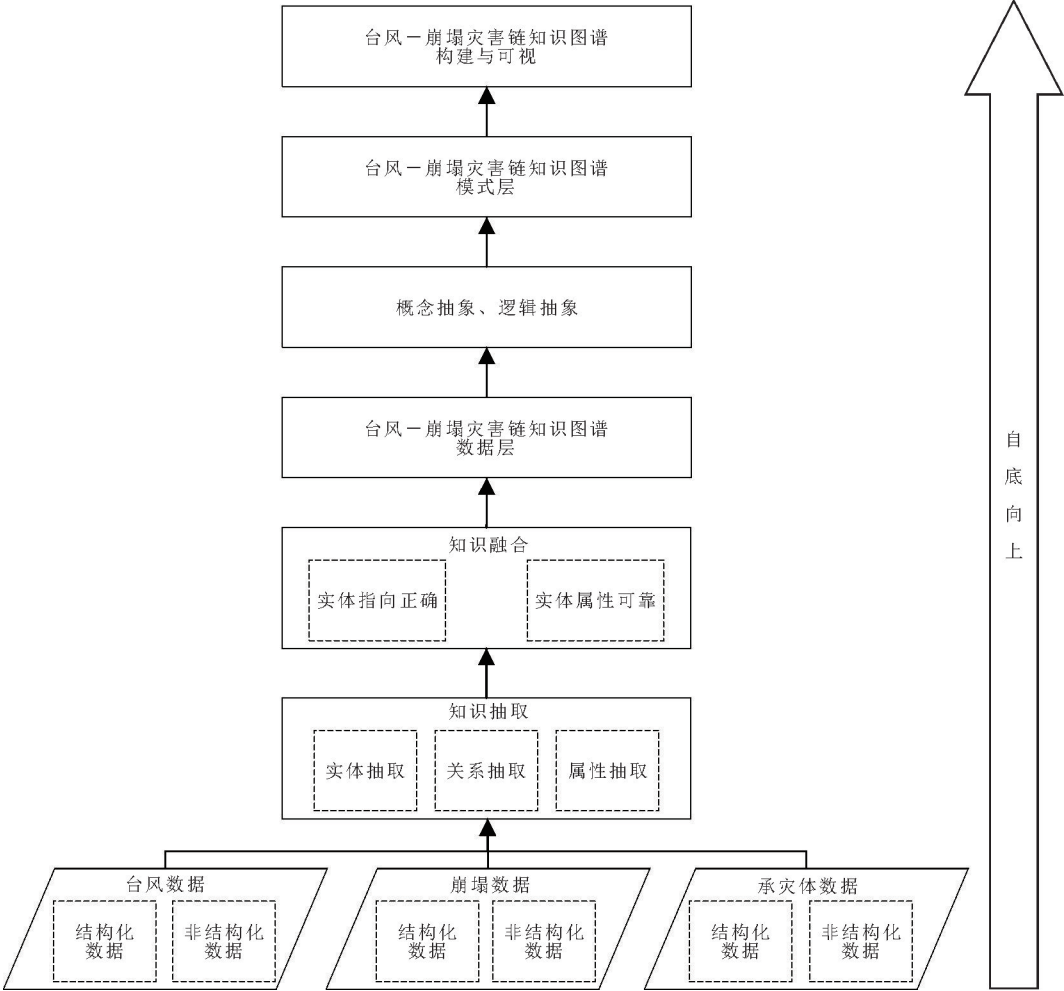


图 2 台风—崩塌灾害链知识图谱构建方法

Fig. 2 Construction methodology of knowledge graph for typhoon-collapse disaster chain

图状知识库结合 Neo4j,通过实体联结和显示台风—崩塌灾害链的三元组,构建台风—崩塌灾害链的知识图谱.知识图谱的可视如图 3 所示.

2 台风—崩塌灾害链风险评估模型构建

通过数据来源与规范处理、知识抽取与知识融合、知识图谱构建与可视 3 个步骤构建的台风—崩塌灾害链知识图谱,可以明确台风数据、崩塌数据、人员数据、建筑物数据、交通数据和财产数据的归属类型和数据的内在关联性、时空关联性、链式效应等关联关系.台风—崩塌灾害链知识图谱包含的诱发因子、致灾因子、承灾体的数据实体内容、数据关联关系是构建并实现台风—崩塌灾害链风险评估模型的基础.

基于构建完成的台风—崩塌灾害链知识图谱

中的数据基础、内在关联和业务逻辑,分析、研究台风—崩塌灾害链风险评估体系,完成台风—崩塌灾害链风险评估模型的构建工作和实现工作,为公共安全业务工作提供系统、科学的逻辑支持、体系支持和模型支持.

2.1 台风—崩塌灾害链风险评估体系构建

联合国提出:风险是在给定地区和一定时间段内,特定的自然灾害对人们的生命、财产和经济活动造成的预期损失价值.该定义普遍为学者所接受,数值计算方式为:风险性(Risk)=危险性(Hazard)×易损性(Vulnerability)(张超彪,2022).台风—崩塌灾害链中的风险主要由崩塌引发,综合考虑台风—崩塌灾害链中诱发因子、致灾因子、承灾体的关联关系,采用《GB/T 40112-2021 地质灾害危险性评估规范》《DZ/T 0438-2023 地质灾害风险调查评价规范(1:50 000)》及以往的研究成果,融合台风—崩塌灾害链的诱发因素(降雨),针对性地研

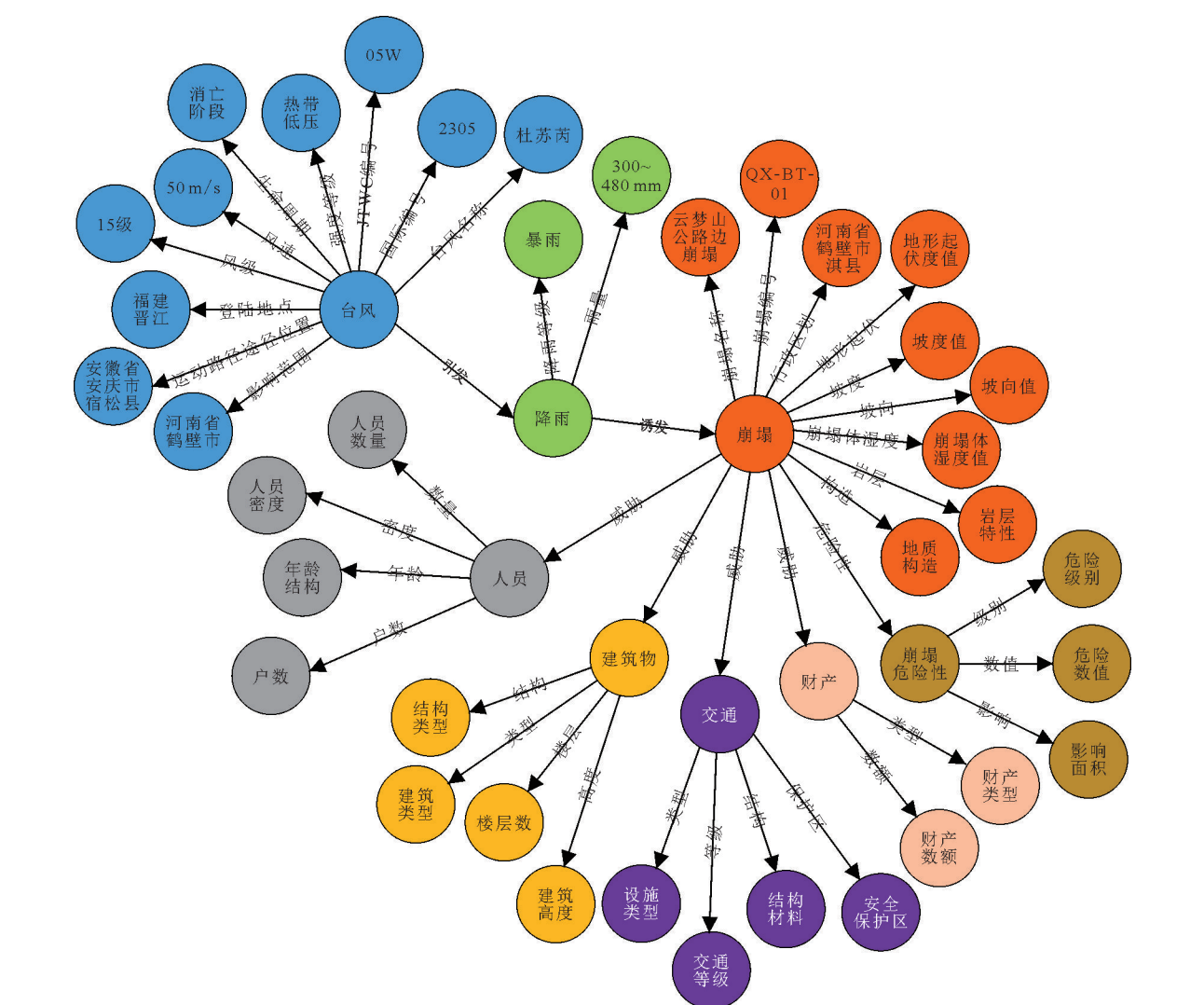


图 3 台风—崩塌灾害链知识图谱
Fig. 3 Typhoon-collapse disaster chain knowledge graph

表 1 降雨量等级分级
Table 1 Classification of rainfall intensity levels

评估内容	台风引发的降雨						
降雨量等级分级	特大暴雨	大暴雨	暴雨	大雨	中雨	小雨	微量降雨(零星小雨)

究降雨量等级评估体系、崩塌危险性评估指标体系、承灾体易损性评估指标体系,进而构建系统、科学的台风—崩塌灾害链风险评估指标体系.指标体系的赋值介于0~1.

2.1.1 降雨量等级评估体系 台风—崩塌灾害链中,崩塌诱发因素主要为台风引发的降雨,降雨量主要包括预报降雨量、累计降雨量.参考《GB/T 28592-2012降水量等级》中的降雨量等级划分,降雨量等级分级详见表1.

2.1.2 崩塌危险性评估体系 崩塌危险性主要根

据发育程度、危害程度两个指标确定(表2).

2.1.3 承灾体易损性评估体系 台风—崩塌灾害链中承灾体主要为人员、建筑物、交通和财产,其易损性评估等级详见表3.

2.1.4 台风—崩塌灾害链风险评估体系 台风—崩塌灾害链风险评估体系在降雨量等级评估、崩塌危险性评估、承灾体易损性评估基础上构建(表4).

2.2 台风—崩塌灾害链风险评估模型构建与实现

2.2.1 台风—崩塌灾害链风险评估模型构建流程 灾害风险性评价是对灾害危险性和承灾体易损性

表 2 崩塌危险性评估指标

Table 2 Indicators of collapse hazard assessment levels

发育程度分级	危害程度分级	危险性等级
极其强烈	危害极大	极高
强烈	危害大	高
中等	危害中等	中
弱	危害小	低

表 3 承灾体易损性评估等级

Table 3 Classification of exposed elements vulnerability assessment levels

承灾体	易损性评估等级分级
人员	极高
	高
	中
	低
建筑物	极高
	高
	中
	低
交通	极高
	高
	中
	低
财产	极高
	高
	中
	低

表 4 台风—崩塌灾害链风险评估等级

Table 4 Classification of typhoon-collapse disaster chain risk assessment levels

评估内容	风险评估等级分级
台风—崩塌灾害链风险评估	极高
	高
	中
	低

的综合分析,其体现了灾害的自然属性和社会属性。参考已有灾害风险评价研究成果,分析台风—崩塌的灾害链特点,融合知识图谱技术、人工智能技术,基于降雨量等级评估体系、崩塌危险性评估体系、承灾体易损性评估体系、台风—崩塌灾害链风险评估体系等风险评估体系内容,采用模型因子权重计算算法,构建台风—崩塌灾害链风险评估模型。台风—灾害链风险评估模型构建流程如图 4 所示。

模型构建过程中,利用人工智能技术及其产品

(如 ChatGPT、DeepSeek 等),分析、研究台风—崩塌灾害链图状知识库中的数据实体和数据关系,分析、完善台风—崩塌灾害链风险评估相关的危险性评估体系、易损性评估体系等,训练台风—灾害链风险评估模型。

2.2.2 台风—崩塌灾害链风险评估模型构建方法
经过多年的业务知识积累和工作经验积累,专家对灾害链的风险评估有着充分的客观认识和主观理解。相较于其他一些方法,专家打分法能合理地综合兼顾客观数据和人为认知。台风—崩塌灾害链风险评估模型构建采用专家打分法。首先,基于专家知识和经验,对各个评估因子赋予权重;然后,利用等级评分加权处理;最后,进行灾害链风险评估。

选取诱发因子、致灾因子、承灾体因子及其权重系数,在各个等级区间对各个因子进行加权叠加,得到目标评估系数 E :

$$E = \sum_{i=1}^n x_i \omega_i,$$

(1)

式中: x_i 为不同等级、各个因子的量化评分; ω_i 为各个因子的权重系数。

2.2.3 台风—崩塌灾害链风险评估模型研究构建
综合台风—崩塌灾害链图状知识库中的数据实体、数据关系,采用专家打分法,辅以人工智能技术,进行降雨量等级评估、崩塌危险性评估、承灾体易损性评估和台风—崩塌灾害链风险评估。降雨量等级评估为台风影响研究区域时引发的降雨量等级评估划分。崩塌危险性评估为受台风影响的研究区域中崩塌的危险性等级评估划分。承灾体易损性评估,主要体现在人员易损性、建筑物易损性、交通易损性、财产易损性 4 个方面。台风—崩塌灾害链风险评估为台风引发的降雨诱发崩塌,崩塌对特定区域不同范围的风险等级评估划分。

基于台风—崩塌灾害链中的降雨量等级评估结果、崩塌危险性评估结果、承灾体易损性评估结果,融合专家打分法,应用人工智能技术,对风险评估体系中的结果分别赋以不同的权重,构建台风—崩塌灾害链风险评估模型。

台风—崩塌灾害链风险评估模型,主要由崩塌危险性评估结果、承灾体易损性评估结果相乘得出。台风—崩塌灾害链风险评估模型如下式所示:

$$H_{\text{危险}} = H_{\text{崩塌}} \times \omega_{\text{崩塌}} + H_{\text{雨量}} \times \omega_{\text{雨量}},$$

(2)

$$V_{\text{易损}} = x_i^{\text{人员}} \times \omega_{\text{人员}} + x_i^{\text{建筑物}} \times \omega_{\text{建筑物}} + x_i^{\text{交通}} \times \omega_{\text{交通}} + x_i^{\text{财产}} \times \omega_{\text{财产}},$$

(3)

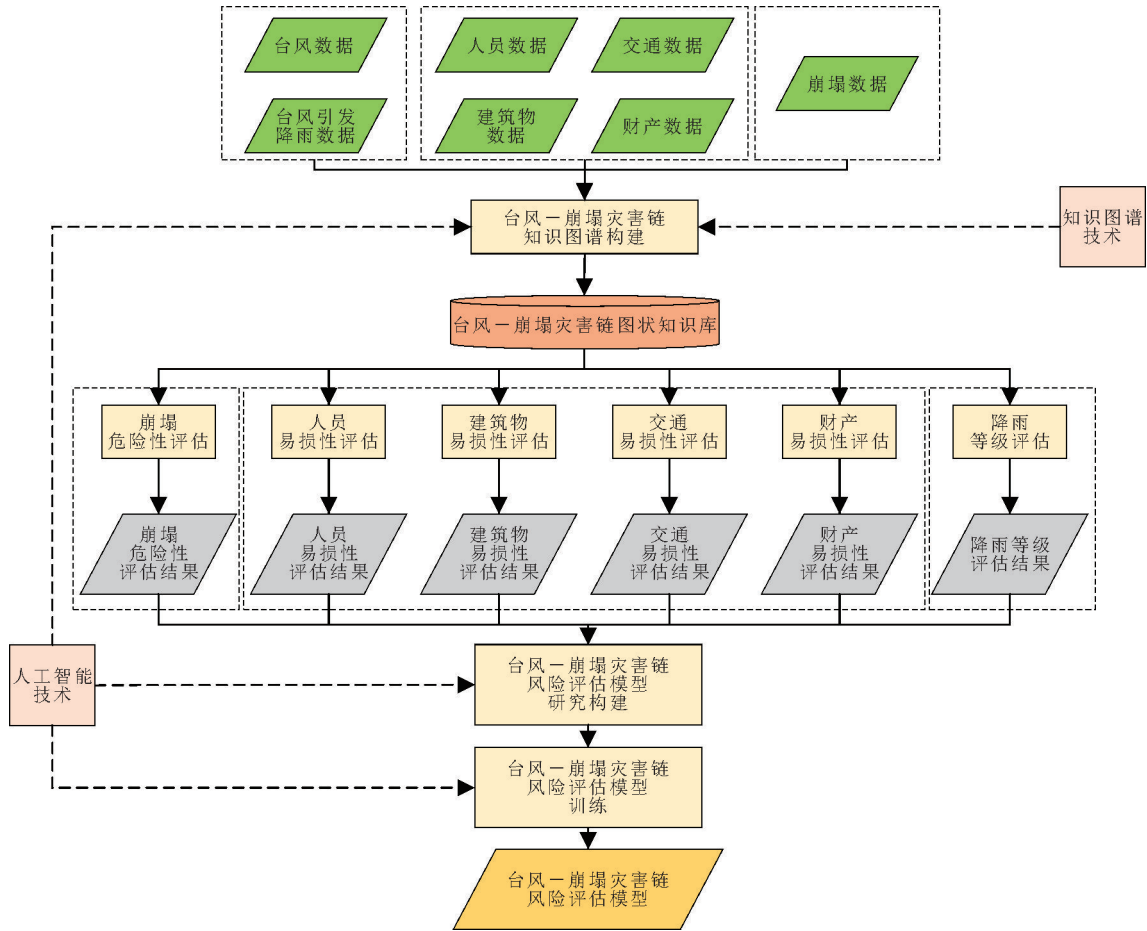


图4 模型构建流程

Fig. 4 Model construction workflow

$$R_{\text{台风—崩塌灾害链}} = H_{\text{危险}} \times V_{\text{易损}} = (H_{\text{崩塌}} \times \omega_{\text{崩塌}} + H_{\text{雨量}} \times \omega_{\text{雨量}}) \times (x_i^{\text{人员}} \times \omega_{\text{人员}} + x_i^{\text{建筑物}} \times \omega_{\text{建筑物}} + x_i^{\text{交通}} \times \omega_{\text{交通}} + x_i^{\text{财产}} \times \omega_{\text{财产}}), \quad (4)$$

式中: $i=1, \dots, n$; $R_{\text{台风—崩塌灾害链}}$ 为台风—崩塌灾害链风险评估结果; $H_{\text{危险}}$ 为台风—崩塌灾害链危险性评估结果; $V_{\text{易损}}$ 为台风—崩塌灾害链承灾体易损性评估结果; $H_{\text{崩塌}}$ 为崩塌危险性评估结果; $\omega_{\text{崩塌}}$ 为崩塌危险性评估权重系数; $H_{\text{降雨}}$ 为根据台风—崩塌灾害链的特点, 台风引发的降雨等级数据; $\omega_{\text{降雨}}$ 为根据台风—崩塌灾害链的特点, 台风引发的降雨等级数据的权重系数; $x_i^{\text{人员}}$ 为人员易损性评估结果数据; $\omega_{\text{人员}}$ 为人员易损性评估结果数据的权重系数; $x_i^{\text{建筑物}}$ 为建筑物易损性评估结果数据; $\omega_{\text{建筑物}}$ 为建筑物易损性评估结果数据的权重系数; $x_i^{\text{交通}}$ 为交通易损性评估结果数据; $\omega_{\text{交通}}$ 为交通易损性评估结果数据的权重系数; $x_i^{\text{财产}}$ 为财产易损性评估结果数据; $\omega_{\text{财产}}$ 为财产易损性评估结果数据的权重系数。

2.2.4 台风—崩塌灾害链风险评估模型训练

从台风—崩塌灾害链图状知识库中抽取训练区域的崩塌隐患数据、承灾体数据(包括: 人员数据、建筑物数据、交通数据、财产数据)、台风数据、台风引发的降雨数据, 同时对数据进行清洗, 去除噪声数据和无效样本数据, 获得训练区域规范、统一的风险评估业务数据。将获得的规范、统一的风险评估业务数据输入到台风—崩塌灾害链风险评估模型中, 将训练区域划分成不同风险等级的区域, 生成台风—崩塌灾害链风险评估结果。

按照分位数分级法, 划分台风—崩塌灾害链风险评估指标, 指标值由高到低排序, 前 20% 为极高, 20%~40% 为高, 40%~80% 为中, 80%~100% 为低。台风—崩塌灾害链风险评估指标详见表 5。

3 案例分析

2023 年第 5 号超强台风“杜苏芮”自 2023 年 7 月 28 日以强台风级登陆福建省晋江市沿海以后, 该台风及其残余环流对我国大部分地区产生了巨大的

表 5 台风—崩塌灾害链风险评估指标

Table 5 Typhoon-collapse disaster chain risk assessment indicators

风险等级	风险评估指标值($R_{\text{台风-崩塌灾害链}}$) (排序范围)
极高	(0, 20%]
高	(20%, 40%]
中	(40%, 80%]
低	(80%, 100%]
备注	$R_{\text{台风-崩塌灾害链}}$ 值系根据公式(4)计算得出

影响,引发了包括山体滑坡、崩塌、泥石流等多种自然灾害.其中,2023年7月29日,河南省鹤壁市云梦山公路沿线部分路段就发生了崩塌,在阻断该地区交通运输的同时,对该地区的公共安全产生了巨大的威胁.

本研究以河南省鹤壁市为研究区域,以台风“杜苏芮”和河南省鹤壁市的云梦山公路边崩塌为研究对象,进行面向公共安全的台风—崩塌灾害链风险评估研究分析.

3.1 案例区域说明

鹤壁市地处河南省北部,属于太行山东麓向华北平原过渡地带.全市地势西高东低.西部太行山脉的断续隆起形成石灰岩侵蚀剥蚀低山区,中部华北平原的相对沉降形成砂页岩泥岩剥蚀堆积丘陵岗区,东部为华北平原.鹤壁市地质灾害类型主要为地面塌陷、滑坡和崩塌.2023年,鹤壁市自然资源和规划局通过对全市所有县区地质灾害防治隐患的全面排查,确定42处地质灾害隐患点.其中,崩塌23处,主要分布于浚县石灰岩矿区、淇滨区及淇县西部山区.崩塌包括土质崩塌和岩质崩塌两类.

作为本次研究对象的云梦山公路边崩塌是云梦山景区道路修建时,开挖的路基边坡形成的.该边坡较陡,一般为80°左右的陡坎.边坡上游危岩体较多,岩性为灰岩,由于地质构造节理较为发育,岩石破碎为约0.5 m³的岩块,受风化降雨等影响,路基边坡形成的大量破碎危岩体经常剥落,直接威胁过往游人的生命安全及通行车辆的财产安全.

3.2 案例数据来源

本研究案例数据主要为鹤壁市云梦山公路边崩塌数据、承灾体数据、台风数据及其引发的降雨数据.鹤壁市云梦山公路边崩塌数据、承灾体数据来源于鹤壁市2023年度地质灾害隐患点明细,承灾

体数据主要包括受崩塌威胁的人员数据、交通数据、财产数据等公共安全数据.

台风数据及其引发的降雨数据为台风“杜苏芮”及其残余环流北上影响期间,中央气象台、河南省气象局、鹤壁市气象局发布、总结的台风数据及其引发预报降雨数据、累计降雨数据.2023年7月29日~7月30日,鹤壁市气象局的气象预报为:鹤壁市阴有大到暴雨、局部大暴雨.2023年7月30日,中央气象台发布的2023年7月26日08时~7月30日17时的累计降水量实况为:河北保定、石家庄、邢台、邯郸,山西阳泉、晋中、晋城,河南鹤壁、新乡等地的累计降雨量为300~480 mm,同时以累计降水量实况图专题图的形式进行公布(据中央气象台《台风“杜苏芮”为1949年以来登陆福建第二强台风风雨影响大》, <https://mp.weixin.qq.com/s/k6HQRvWQA9SgDFb3z8aTTw>).

3.3 案例效果展示

基于鹤壁市云梦山公路边崩塌数据、人员数据、交通数据、财产数据等承灾体数据、台风“杜苏芮”数据及其引发的预报降雨数据、累计降雨数据,融合本研究的台风—崩塌灾害链风险评估模型,获取面向公共安全的台风—崩塌灾害链风险评估结果数据:云梦山公路边崩塌所在区域的风险等级为中,崩塌地质灾害发生可能性较大.风险评估结果如图5所示.

3.4 结果对比分析

受2023年第5号台风“杜苏芮”残余环流的强烈影响,河南省自然资源厅和河南省气象局,在2023年7月28日联合发布的2023-07-28 20:00~2023-07-29 20:00时段的《河南省汛期地质灾害气象风险预警》明确:鹤壁鹤山区、山城区、淇滨区、淇县为河南省县(市)级地质灾害气象风险预警的黄色预警区域,即为鹤壁市的西部地区、北部地区地质灾害发生的可能性较大;同时以河南省汛期地质灾害气象风险预警专题图的形式进行公布(据河南省自然资源厅《2023-07-28河南省汛期地质灾害气象风险预警》, <https://dnr.henan.gov.cn/2023/07-28/2787228.html>).

《鹤壁市2023年度地质灾害隐患点明细表》明确了鹤壁市42处地质灾害隐患的名称、类型、空间地理位置以及受威胁的人员数据、交通数据、财产数据等公共安全数据.台风“杜苏芮”及其残余环流北上影响期间,中央气象台、河南省气象局、鹤壁市

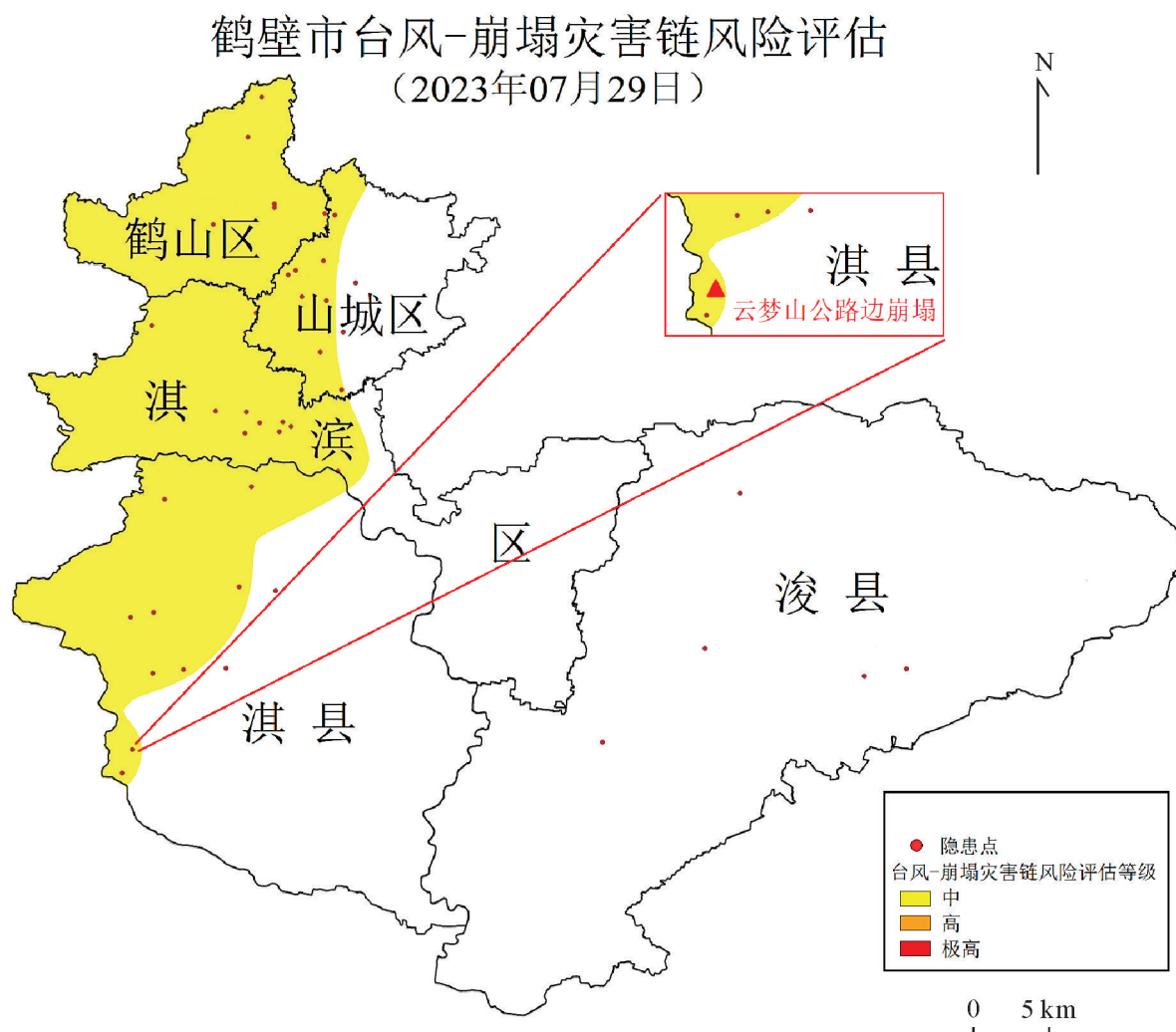


Fig.5 Risk assessment results of typhoon-collapse disaster chain(Hebi City)

气象局发布、总结了该时段的台风数据及其引发的预报降雨数据、累计降雨数据。以上数据中鹤壁市的崩塌数据、承灾体数据、台风数据及其引发的降雨数据,结合本研究中的台风—崩塌灾害链风险评估模型开展台风—崩塌灾害链风险评估。评估结果表明:鹤壁市云梦山公路边崩塌所在区域的风险评估等级为中,崩塌地质灾害发生可能性较大,如图5所示。

上述的《河南省汛期地质灾害气象风险预警》信息和台风—崩塌灾害链风险评估结果相吻合,均表明:在2023-07-28 20:00~2023-07-29 20:00时段内,鹤壁市云梦山公路边崩塌地质灾害发生的可能性较大。以上信息通过鹤壁市云梦山公路边崩塌的实时、持续的监测数据(特别是视频监控数据)予以证实。该地质灾害隐患点已经安装布设的视频监测设备等多种普适型监测设备监测到:2023-07-29

16:05,鹤壁市云梦山公路边崩塌发生崩塌灾害,随即阻碍道路的交通通行情况,如图6所示。

由此可以看出,本研究构建的台风—崩塌灾害链风险评估模型,结合相应的崩塌数据、承灾体数据、台风数据及其引发的降雨数据,能够针对性地生成科学、有效的灾害链风险评估数据,完全满足公共安全业务的灾害链风险评估工作要求。

4 结论与展望

4.1 研究结论

台风是国家科委、国家计委、国家经贸委、自然灾害综合研究组划分的自然灾害中气象灾害的一种。台风及其引发的崩塌,均对公共安全有着严重影响,而且为链式影响。面向当前公共安全业务灾害风险评估的工作需求,本研究分析、研究崩塌隐

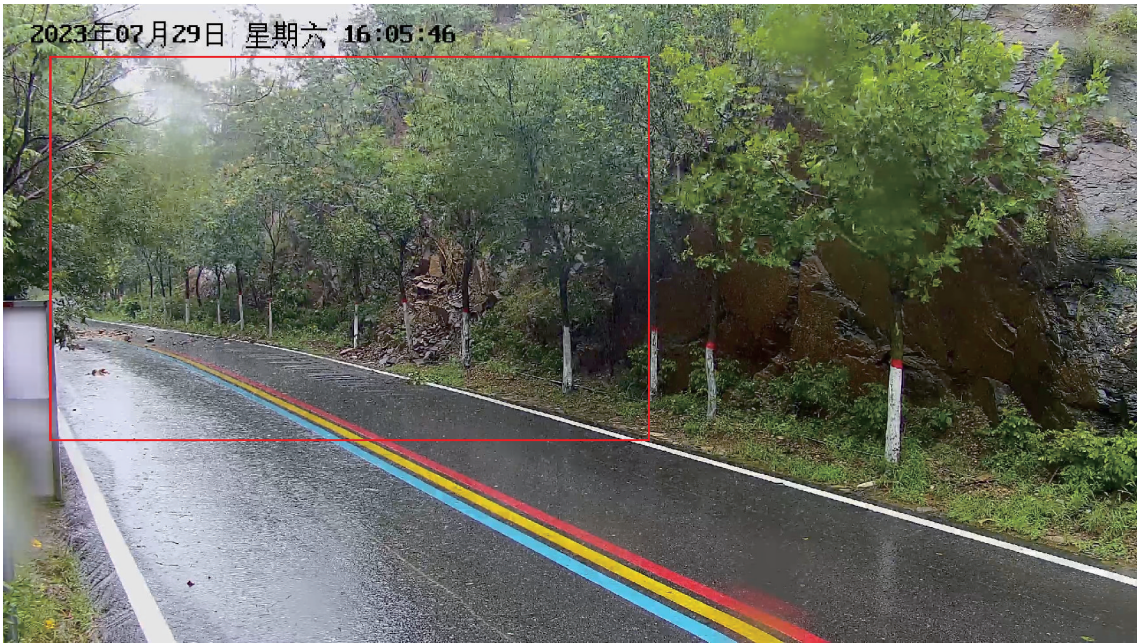


图 6 2023 年 7 月 29 日云梦山公路边崩塌视频监控

Fig.6 Video monitoring of the roadside landslide at Yunmeng Mountain on July 29, 2023

患数据、人员数据、建筑物数据、交通数据、财产数据、台风数据以及台风引发的降雨数据,融合知识图谱技术、人工智能技术、专家打分法,构建台风一崩塌灾害链知识图谱和台风一崩塌灾害链风险评估模型,同步开展相应的研究和论证.本研究取得的研究成果如下:

(1)台风一崩塌灾害链知识图谱.利用规范、统一的崩塌隐患数据、人员数据、建筑物数据、交通数据、财产数据、台风数据、台风引发的降雨数据,将数据归类为诱发因子、致灾因子、承灾体,分析台风一崩塌灾害链中的实体内容,对实体进行知识抽取与知识融合,构建台风一崩塌灾害链图状知识库,最终以可视化的形式展示台风一崩塌灾害链中实体之间的内在关联性、时空关联性、链式效应等关联关系,为台风一崩塌灾害链风险评估模型构建方法研究提供基础支持.

(2)台风一崩塌灾害链风险评估模型.基于台风一崩塌灾害链图状知识库,研究、分析台风一崩塌灾害链中的诱发因子、致灾因子和承灾体.参考相应的标准规范,结合本研究的内容,形成由降雨量等级评估体系、崩塌危险性评估体系、承灾体易损性评估体系和台风一崩塌灾害链风险评估体系组成的风险评估体系.综合台风一崩塌灾害链中数据实体及其关系、风险评估体系内容,采用人工智能技术,构建、训练台风一崩塌灾害链风险评估模

型,其准确率达到90%以上.

(3)鹤壁市的台风一崩塌灾害链风险评估.选取鹤壁市为评估验证区域,本研究开展了台风一崩塌灾害链风险评估.评估结果揭示了鹤壁市范围内台风一崩塌灾害链风险的空间分布规律和特征,为鹤壁市今后的地质灾害防治、风险管理、公共安全业务协调等提供了科学依据.本研究的评估结果与实际灾害情况的对比,验证了台风一崩塌灾害链风险评估模型的有效性和可靠性.

4.2 研究展望

台风一崩塌灾害链是一个体系化、复杂化的系统结构,台风和崩塌之间存在的内在关联性、时空关联性、链式效应一直是灾害风险评估研究的重点和难点.针对以上情况,本研究综合公共安全灾害风险评估工作要求、已有的相关研究成果、知识图谱技术、人工智能技术、专家打分法、鹤壁市崩塌隐患数据、承灾体数据、台风数据和台风引发的降雨数据,研究、构建了面向公共安全的台风一崩塌灾害链风险评估模型,对台风一崩塌灾害链的风险评估做了初步分析和探讨.但是受限于多种条件,本次研究内容存在以下情况,需要在今后的研究中做进一步的完善.

(1)灾害类型待扩展.综合考虑自然灾害发生的时机和地域,本次研究选取了2023年第5号超强台风“杜苏芮”和鹤壁市崩塌地质灾害隐患作为研

究对象.台风和崩塌是全部自然灾害的组成部分之一,台风—崩塌灾害链难以全面表现其他类型自然灾害之间存在的关联性和相关性.今后的研究中,可进一步扩充地震、洪水、滑坡、泥石流等其他类型的自然灾害,进而构建层次丰富、内容充分、结构复杂的自然灾害链条.

(2)业务数据待补充.本研究所用的风险评估业务数据主要来源于自然资源部门、应急管理部门和气象部门.业务数据的真实性在得到保障的同时,其在数据数量、时效、空间范围等方面存在一定的局限性,在一定程度上影响了本研究结果的准确性.今后的研究中,扩展业务数据的来源部门机构,扩大业务数据的覆盖范围,增加业务数据的数据数量,为风险评估模型的优化、完善提供更加丰富的数据量和模型参数,以提升风险评估模型的精度.

(3)评估模型待完善.本研究提出的台风—崩塌灾害链风险评估模型构建方法,将知识图谱技术、人工智能技术、台风—崩塌灾害链中多类型的数据因素进行了融合,构建的台风—崩塌灾害链风险评估模型基本达到预期研究目标.为构建更为完善的评估模型,今后的研究需进一步深入知识图谱技术和人工智能技术,设计模型训练的学习架构和训练方法,结合训练数据,逐步优化台风—崩塌灾害链风险评估模型.

(4)应用范围待扩大.本研究提出的台风—崩塌灾害链风险评估模型在鹤壁市的应用取得了良好的效果,但是由于不同地区的地质条件、气候特征和社会经济状况存在差异,在其他地区的适用性还需要做进一步的验证.

References

Cai, W. B., Zhang, J., Tian, J., et al., 2023. Big Data and Artificial Intelligence Technology Help Rapid Assessment of Typhoon Disaster Losses. *Disaster Reduction in China*, (17): 24—26(in Chinese).

Chen, W., 2022. Research and Platform Development of Typical Landslide Disaster Early Warning in the Three Gorges Reservoir Area Based on Deep Learning (Dissertation). China Three Gorges University, Yichang(in Chinese with English abstract).

Dong, L. H., 2023. Research on Regional Landslide Warning Model in Fujian Province Based on Artificial Intelligence Algorithms(Dissertation). North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou(in Chinese with English abstract).

Guo, F., Lai, P., Huang, F. M., et al., 2024. Literature Review and Research Progress of Landslide Susceptibility Mapping Based on Knowledge Graph. *Earth Science*, 49(5): 1584—1606(in Chinese with English abstract).

He, Y. S., Jiang, H. X., 2024. Study on the Temporal Risk Assessment of Typhoon Disaster Chain. *Journal of Catastrophology*, 39(4): 213—218. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-811X.2024.04.031>

Huang, H. Q., Yu, J., Liao, X., et al., 2019. Review on Knowledge Graphs. *Computer Systems & Applications*, 28(6): 1—12(in Chinese with English abstract).

Huang, J., Wu, X. Y., Wang, H. M., et al., 2024. Mining and Forecasting of Rainstorm Disaster Chain Based on Knowledge Graph. *Frontiers of Science and Technology of Engineering Management*, 43(4): 46—53(in Chinese with English abstract).

Liu, J. J., 2021. Risk Analysis and Assessment of Urban Public Safety Event Chain Based on Complex Network (Dissertation). Hunan University of Science and Technology, Xiangtan(in Chinese with English abstract).

Philip, J. W., Veit, B., Nadia, B., et al., 2020. Natural Hazard Risk Assessments at the Global Scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(4):1082—1088. doi:10.5194/nhess-20-1069-2020

Qiu, Q. J., Wu, L., Ma, K., et al., 2023. A Knowledge Graph Construction Method for Geohazard Chain for Disaster Emergency Response. *Earth Science*, 48(5): 1875—1891(in Chinese with English abstract).

Wang, H., Du, W., Liu, J. H., et al., 2024. Derivation and Transmission Analysis of Urban Flood Disaster Chain Based on Knowledge Graph. *Advances in Water Science*, 35(2): 185—196(in Chinese with English abstract).

Wang, P., 2020. Disaster Chain Mining and Visualization Analysis Based on Knowledge Graph: A Case Study of Geological Disasters (Dissertation). Lanzhou Jiatong University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).

Wang, R., Lian, F., Yu, H., et al., 2016. Classification and Regional Features Analysis of Global Typhoon Disaster Chains Based on Hazard-Formative Environment. *Geographical Research*, 35(5): 836—850(in Chinese with English abstract).

Wang, S., 2023. Design and Implementation of Regional Disaster Safety Early Warning System Based on GIS Technology (Dissertation). Wuhan Institute of Technology, Wuhan (in Chinese with English abstract).

Ward, P. J., Blauhut, V., Bloemendaal, N., et al., 2020. Review Article: Natural Hazard Risk Assessments at the Global Scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*

- es, 20(4): 1069—1096. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1069-2020>
- Wu, B., 2024. Study on Monitoring and Early Warning Methods of Geological Disasters in Shenzhen (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Ye, J. Y., 2015. Typhoon Disaster Chains Integrated Risk Assessment Model and Information Tupu Based on Multi-Dimensional Matrix (Dissertation). Fujian Normal University, Fuzhou (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C. B., 2022. Risk Assessment of Geological Disasters in Fushun West Open-Pit Mine (Dissertation). Liaoning Technical University, Fuxin (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. X., Zhang, X. S., Wu, C. X., et al., 2022. Survey of Knowledge Graph Construction Techniques. *Computer Engineering*, 48(3): 23—37(in Chinese with English abstract).
- Zhu, H. M., Lin, G. F., Zhang, M. F., et al., 2024. Construction of Typhoon Disaster Chain Knowledge Graph Based on Disaster Risk Survey Knowledge. *Journal of Catastrophology*, 39(1): 209—215(in Chinese with English abstract).
- 中文参考文献**
- 蔡文博, 张洁, 田杰, 等, 2023. 大数据、人工智能技术助力台风灾害损失快速评估. *中国减灾* (17): 24—26.
- 陈伟, 2022. 基于深度学习的三峡库区典型滑坡灾害预警研究及平台开发(硕士学位论文). 宜昌: 三峡大学.
- 董力豪, 2023. 基于人工智能算法的福建省区域滑坡预警模型的研究(硕士学位论文). 郑州: 华北水利水电大学.
- 郭飞, 赖鹏, 黄发明, 等, 2024. 基于知识图谱的滑坡易发性评价文献综述及研究进展. *地球科学*, 49(5): 1584—1606.
- 何玥双, 江辉仙, 2024. 台风灾害链时序性风险评估研究. *灾害学*, 39(4): 213—218.
- 黄恒琪, 于娟, 廖晓, 等, 2019. 知识图谱研究综述. *计算机系统应用*, 28(6): 1—12.
- 黄晶, 吴星妍, 王慧敏, 等, 2024. 基于知识图谱的暴雨灾害链挖掘与预测研究. *工程管理科技前沿*, 43(4): 46—53.
- 刘俊杰, 2021. 基于复杂网络与多维矩阵理论的台风事件链风险分析与评估(硕士学位论文). 湘潭: 湖南科技大学.
- 邱芹军, 吴亮, 马凯, 等, 2023. 面向灾害应急响应的地质灾害链知识图谱构建方法. *地球科学*, 48(5): 1875—1891.
- 王浩, 杜伟, 刘家宏, 等, 2024. 基于知识图谱的城市洪涝灾害链推演及时空特性解析. *水科学进展*, 35(2): 185—196.
- 王萍, 2020. 知识图谱支持下的灾害链挖掘与可视化分析: 以地质灾害为例(硕士学位论文). 兰州: 兰州交通大学.
- 王然, 连芳, 余瀚, 等, 2016. 基于孕灾环境的全球台风灾害链分类与区域特征分析. *地理研究*, 35(5): 836—850.
- 王帅, 2023. 基于GIS技术的区域性地灾安全预警系统设计与实现(硕士学位论文). 武汉: 武汉工程大学.
- 吴博, 2024. 深圳市地质灾害监测预警方法研究(硕士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 叶金玉, 2015. 基于多维矩阵的台风灾害链综合风险评估模型及其信息图谱表达(硕士学位论文). 福州: 福建师范大学.
- 张超彪, 2022. 抚顺西露天矿区地质灾害风险评价(硕士学位论文). 阜新: 辽宁工程技术大学.
- 张吉祥, 张祥森, 武长旭, 等, 2022. 知识图谱构建技术综述. *计算机工程*, 48(3): 23—37.
- 朱海铭, 林广发, 张明锋, 等, 2024. 基于灾害风险普查知识库的台风灾害链知识图谱构建. *灾害学*, 39(1): 209—215.