

中文引用格式:朱莉,杨耀星. 面向灾害风险研判的应急事理图谱构建及应用[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(11):220-227.

英文引用格式:ZHU Li, YANG Yaoxing. Construction and application of emergency event evolutionary graph for disaster risk assessment [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(11):220-227.

面向灾害风险研判的应急事理图谱构建及应用^{*}

朱莉^{1,2}教授, 杨耀星^{1,2}

(1 南京信息工程大学 管理工程学院, 江苏 南京 210044;

2 南京信息工程大学 风险治理与应急决策研究院, 江苏 南京 210044)

中图分类号:X915.5

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.11.1632

基金项目:国家社会科学基金资助(22BGL242); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX25_1547)。

【摘要】 为精准捕捉灾害风险的动态演化特性与模式特征,实现科学高效的灾害风险研判,创新融合灾害的自然与社会双重属性考量,依托事件抽取、关系识别及事件泛化成果,提出一种基于因果关联强度的事理模式抽象方法,构建出面向链式灾害风险研判的应急事理图谱;结合覆盖灾害事件多维属性的相似度匹配策略,选择以地震灾害为例进行实证分析。研究表明:所提出的基于事理图谱的灾害风险研判框架,不仅能为目标案例泸定地震快速匹配高相似度的历史事件,还可依据图谱揭示的风险间内在复杂关联与演化路径,进一步预测堰塞湖等次生灾害风险以及谣言传播等衍生社会风险。

【关键词】 灾害风险研判; 应急事理图谱; 风险演化; 因果关联; 次生灾害

Construction and application of emergency event evolutionary graph for disaster risk assessment

ZHU Li^{1,2}, YANG Yaoxing^{1,2}

(1 School of Management Science and Engineering, Nanjing University of Information Science &

Technology, Nanjing Jiangsu 210044, China; 2 Research Institute for Risk Governance and

Emergency Decision-Making, Nanjing University of Information Science & Technology,

Nanjing Jiangsu 210044, China)

Abstract: In order to more accurately capture the evolutionary patterns of disaster risks and facilitate scientific risk assessment, this study innovatively integrated the dual natural and social attributes of disasters. By leveraging the outcomes from event extraction, event relationship identification, and event generalization, a method based on causal association strength was developed to mine event logic. Subsequently, an emergency event evolutionary graph was constructed for assessing chain-reaction disaster risks. Combined with a similarity matching method that incorporates the multi-dimensional attributes of disaster events, an empirical study was conducted using earthquake disasters as a case study. The results demonstrate that the proposed disaster risk assessment framework based on the event evolutionary graph can rapidly identify historical earthquake events with high similarity to the Luding earthquake case. Furthermore, by leveraging the intrinsic interconnections and evolutionary paths among risks revealed by

the graph, the framework can predict secondary disasters (e.g., landslide-dammed lakes) and derivative social risks (e.g., rumor propagation).

Keywords: disaster risk assessment; emergency event evolutionary graph; risk evolution; causal association; secondary disaster

0 引言

近年来,各类灾害的频发性与异常性日益凸显,且随着信息技术迅猛发展,社会风险演化速度明显加快,尤其在自然灾害发生后,次生灾害风险与社会风险易交织叠加,给高效应对灾害风险带来严峻挑战。在此背景下,依托趋势性信息动态剖析灾害风险演化机制,实现灾害风险快速、精准研判,成为减轻灾害影响、保障生命安全的关键。

在灾害风险研判领域,传统研究多采用概率分析^[1-2]、灾害情景构建^[3-4]以及复杂网络理论^[5-6]等方法识别与预测灾害风险。这些研究为灾害防控提供了重要指导,但难以避免对专家经验的依赖,导致灾情信息处理在客观性、时效性与全面性方面存在局限。知识图谱作为一种能高效整合海量非结构化数据的前沿方法,在应急资源调度优化^[7]、灾情感知与响应^[8-9]等应急管理领域也有一些应用,其优势在于可实现跨领域知识的可解释性关联与高效检索,不过在复杂动态事件的逻辑关系推理及预测方面仍存在不足。近年来,以事件为核心的事理图谱因能准确刻画事件间逻辑关系与推演态势,逐渐应用于金融^[10]、灾害应急管理^[11-14]等领域,尤其在灾害链扩散机制分析、次生事件预测等方面优势明显。如 MAO Qianren 等^[13]探究了基于演化事件本体知识的事理图谱,旨在系统性分析并预测地质灾害等突发事件的复杂演化模式。刘高峰等^[14]构建了暴雨洪涝灾害链的事理知识图谱,辨识了灾害事件演化的关键路径。这类相关研究在灾害链演化路径的探索与预测方面取得较大进展,不过其多聚焦于灾害自身风险的动态演化过程,对灾后可能引发的复杂社会风险的考量及其系统性评估方面稍显不足。此外,现有研究在运用事理图谱推理风险演化路径时,大多采用共现分析手段来描绘事件间的关联性^[11,14],在深入挖掘事件间深层次因果机制及其动态交互过程方面尚有一定局限。

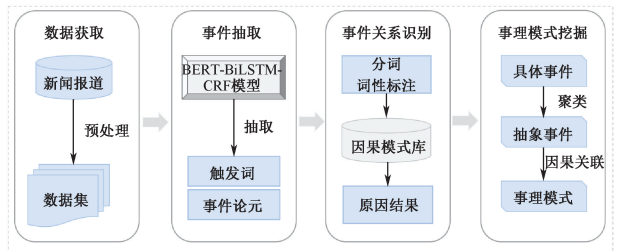
鉴于此,笔者拟从灾害的自然属性和社会属性双重维度出发,构建一套面向灾害风险研判的事理图谱,通过提出一种基于因果关联强度的事理模式挖掘策略,采用基于历史数据相似度评估机制的灾

害风险预测方法,深入探究次生灾害风险与衍生社会风险之间交织并发的复杂演化特性及发展逻辑,以期从海量事件信息中细致准确地提炼出灾害事件内在发展趋势及动态演变轨迹,减轻灾害链式反应带来的负面影响。

1 基于事理图谱的灾害风险研判框架

1.1 应急事理图谱构建流程

应急事理图谱的构建包括数据获取、事件抽取、事件关系识别和事理模式挖掘 4 个步骤(图 1)。



注:BERT(Bidirectional Encoder Representations from Transformers)为双向编码器表征法;BiLSTM(Bidirectional Long Short-Term Memory)为双向长短期记忆网络;CRF(Conditional Random Field)为条件随机场。

图 1 事理图谱构建流程

Fig. 1 Construction process of event evolutionary graph

1.1.1 事件抽取

事件抽取聚焦于从海量数据中精准提取出事件触发词及其相关论元。为捕捉事件的关键信息,先利用 Brat 等软件标注部分训练语料(图 2)。接着,采用 BERT-BiLSTM-CRF 模型,自动识别并分类灾害事件触发词及其论元。首先,利用 BERT 预训练模型获取深层次的上下文语义表征;然后,引入 BiLSTM 模型有效捕捉句子中的长距离依赖关系;最后,引入 CRF 层优化整个序列的标注结果。

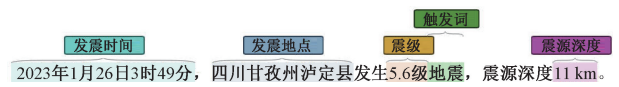


图 2 文本标注示例

Fig. 2 Example of text annotation

1.1.2 事件关系识别

事件抽取任务完成后,运用模式匹配策略抽取事件关系。鉴于次(衍)生灾害的频发态势及其内

在级联效应,在此特别聚焦于灾害应急领域复杂因果关系的精确抽取。通过定义包含从果溯因以及由因到果2类逻辑在内的多元化因果关系表达规则集,形成因果模式库。先是作标注每个句子词性等预处理,而后依托已构建的因果模式库,精准识别与抽取事件因果关系。事件及事件关系识别的具体实例如图3所示。

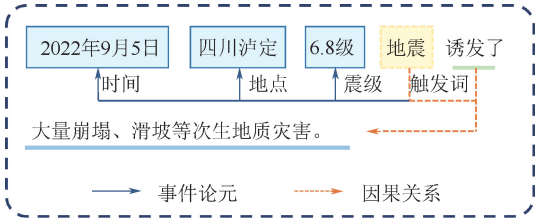


图3 事件及事件关系识别示例

Fig. 3 Example of event and event relationship recognition

1.1.3 事理模式挖掘

事理模式,作为事件演化的一种内在逻辑或模式,是剖析事件发展态势的重要基础。为深入探究不同事件间内在特征,采用事理模式挖掘策略,通过相似事件聚合以及因果关联强度分析,挖掘事件间潜在的深层次发展逻辑。

1) 具体事件抽象。为提炼事件间的本质性逻辑关联,对同类具体事件进行抽象化表达。首先,利用 Word2Vec 模型将事件转换为向量表示,并采用 K-means 等方法自动识别与聚合相似事件,聚类后同一簇事件语义相似度高,可将其抽象化为一类事件。为进一步提升抽象效果,需细致筛选与优化聚类结果。最终,依托规则匹配与统计分析手段,从各类簇中提取具有代表性的抽象事件名称。例如:道路受损和电力设施损毁等具体事件可被统一归纳为抽象事件“基础设施受损”,以精炼表征复杂事件系统。

2) 事理模式抽象。在完成具体事件抽象化基础上,为进一步探究抽象化事件之间的演化模式,通过统计具体事件间的演化频率,估计抽象事件之间可能的演化路径与相应概率,进而将这些信息凝练为抽象事件之间的演化模式。例如:通过统计分析发现,善款发霉事件多次伴随公众信任度下降事件的出现,则可归纳总结出抽象事件“慈善丑闻”与“信任危机”之间存在一种具有显著概率的事件演化模式。

故基于关联分析方法^[15],将事理模式形式化地定义为三元组 (e_1, e_2, p) ,其中 e_1 和 e_2 是通过泛化

得到的抽象事件;概率 p 为2抽象事件之间的因果关系强度的量化指标,表示当抽象事件 e_1 和 e_2 共现时(如在同一篇报道中出现),2抽象事件间有概率 p 存在因果关联。 p 的计算公式如下:

$$p = \frac{M_r(e_1, e_2)}{M(e_1, e_2)} \quad (1)$$

式中: $M_r(e_1, e_2)$ 为抽象事件 e_1 和 e_2 之间存在因果关系的实例数量; $M(e_1, e_2)$ 为抽象事件 e_1 和 e_2 共现的实例数量。

1.2 基于应急事理图谱的灾害风险研判

遵循1.1节的流程,经由灾害事件关系抽取等步骤,构建出涵盖历史风险传导路径的具体事件事理图谱;进一步挖掘事理模式,提炼基于因果关联的抽象事理图谱,二者共同构成灾害风险研判的基础。图4为基于应急事理图谱的灾害风险研判整体框架。在实际应用中,面对新发灾害事件,需先捕获并分析其关键属性,随后利用相似度匹配技术在具体事理图谱中定位并提取相关历史事件路径,辨识潜在次生灾害风险。同时,依托抽象事理图谱所呈现的次生灾害与社会风险间的交织关系,基于已研判的次生灾害风险,进一步预测衍生社会风险,为灾害风险管理策略的制定提供支持。

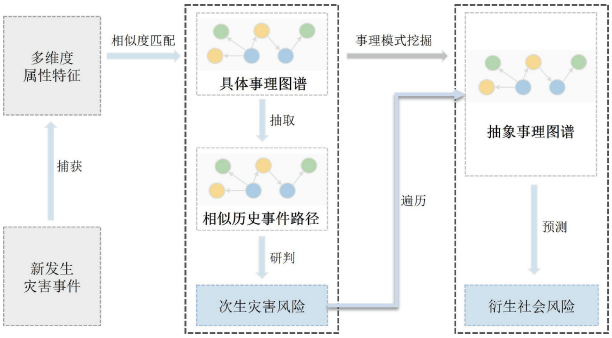


图4 灾害风险研判框架

Fig. 4 Framework for disaster risk assessment

2 面向灾害风险研判的应急事理图谱应用

为验证所构基于应急事理图谱的灾害风险研判框架的有效性和实用性,选择地震灾害作为典型案例开展实证分析。

2.1 地震灾害事理图谱的构建

依据1.1节应急事理图谱构建流程,以地震灾害为例,使用地震、地震影响等关键词,从人民网等权威媒体及澎湃新闻、新浪新闻等主流平台,爬取

2008 年以来 20 余起 6 级以上地震事件(如 2010 年玉树地震、2022 年芦山地震)的新闻报道。经去重、剔除无关信息等数据清洗后,构建出含 508 个实体节点、452 对因果关系的地震灾害事理图谱,并使用

Neo4j 图数据库可视化呈现(图 5)。该图谱清晰呈现地震影响的自然与社会双重属性:一是其对自然环境等造成的直接破坏与连锁反应;二是在社会层面引发的心理冲击、信任缺失等影响。

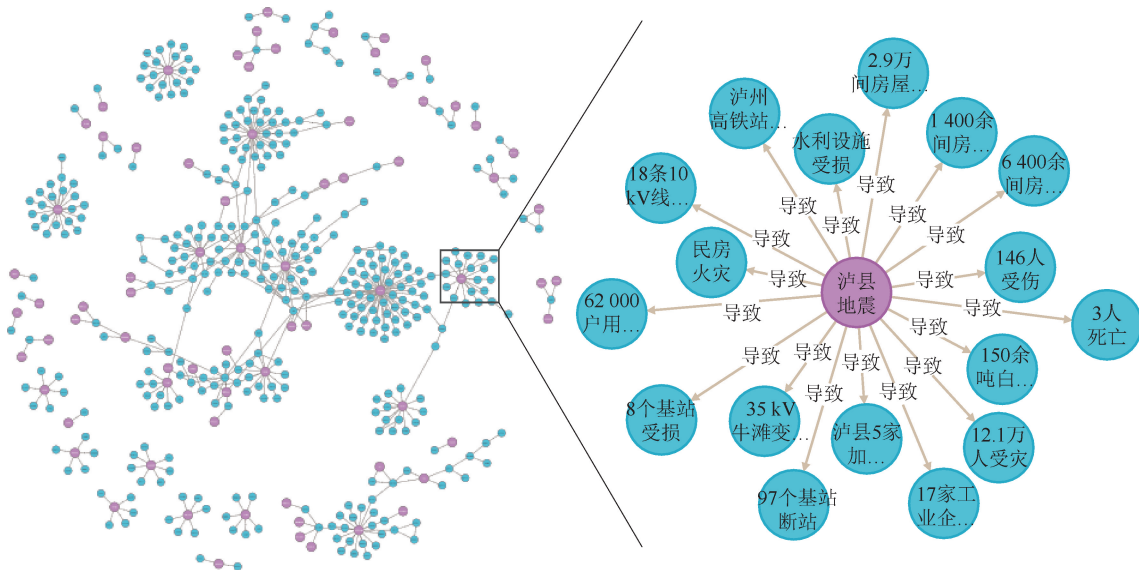


图 5 地震灾害事理图谱示例

Fig. 5 Example of event evolutionary graph of earthquake disasters

2.2 基于相似事件匹配的次生灾害风险识别

面对构建的地震灾害事理图谱,设计一种基于相似历史事件的风险识别框架,以高效精准识别新发地震事件次生灾害风险。

2.2.1 相似事件匹配

以 2022 年泸定地震为目标案例,该地震是我国近期发生的具有典型性的地震事件,其灾情演化过程充分体现了自然-社会双重风险耦合特征。结合灾后应急响应的实际需求,从灾后初期数据的可迅速获得性以及全面性 2 个关键原则出发,系统考量地震本体特征(发震日期、震级、震源深度、震中经度/纬度)、救援环境条件(最低/最高气温、平均海拔)、社会脆弱性(人口密度、人均国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)) 3 个维度^[16-17],选出 10 项在灾害应急响应初期即可快速获取的关键事件属性(表 1),用于比对目标案例与多个历史地震事件,部分案例关键属性对比如图 6 所示。

通过比对关键属性,可从历史地震数据库中迅速而准确地筛选出与目标案例泸定地震在特征上高度吻合的历史事件集合。记历史事件数 $M=\{1,2,\cdots,m\}$,设历史事件集为 $P=\{P_i \mid i \in M\}$,其中, P_i 表示第 i 个历史事件;记属性数 $N=\{1,2,\cdots,n\}$,关键属性集 $C=\{C_j \mid j \in N\}$,其中, C_j 表示第 j 个属

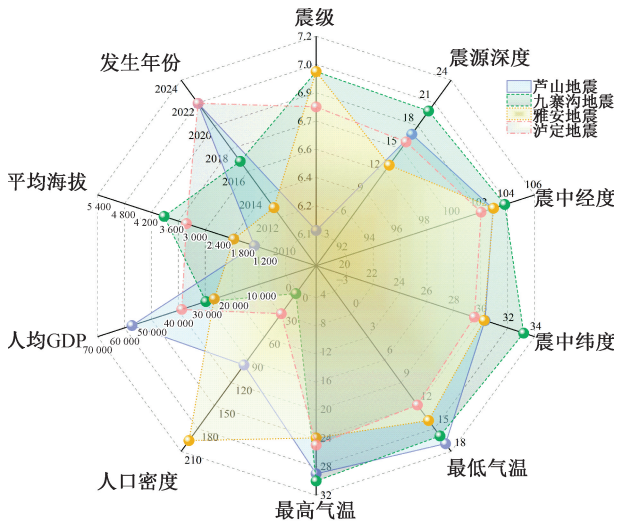


图 6 部分案例关键属性对比

Fig. 6 Comparison of key attributes among some cases

性;设 T^* 表示目标案例。具体地,先归一化处理地震事件的各关键属性,以确保各属性在相似度评估中具有可比性;然后运用设计的相似度算法,逐一衡量目标案例泸定地震与历史事件中各属性特征的相似程度,此过程可定量表达为:

$$\text{Sim}_j(T^*, P_i) = \exp \left[\frac{-|T_j^* - P_{ij}|}{d_j^{\max} - d_j^{\min}} \right] \quad (2)$$

其中:

$$d_j^{\max} = \max\{T_j^*, \max\{P_{ij} \mid i \in M, j \in N\}\} \quad (3)$$

$$d_j^{\min} = \min\{T_j^*, \min\{P_{ij} \mid i \in M, j \in N\}\} \quad (4)$$

式中： T_j^* 为目标案例中属性 C_j 的属性值； P_{ij} 为历史事件 P_i 中属性 C_j 的属性值； $d_j^{\max}$ 和 $d_j^{\min}$ 分别为历史事件及目标案例中属性 C_j 的最大值和最小值。

进一步计算这 10 个关键属性特征相似程度的平均值,得出一个综合指标,用以量化评估目标案例

与任一历史事件之间的整体相似性,表达如下:

$$\text{Sim}(T^*, P_i) = \frac{1}{n} \sum_{j \in N} \text{Sim}_j(T^*, P_i) \quad (5)$$

依据式(2)一式(4)计算出历史地震事件与目标案例泸定地震不同维度属性的相似度,利用式(5)得出的综合相似度,具体结果见表 2。综合相似度数值越大,表明 2 个地震事件在多个关键属性上的契合度越高。

表 1 目标案例与部分历史事件的关键属性

Table 1 Key attributes of target case and some historical events

地震事件	发震日期	震级	震源深度/km	震中经度/(°)	震中纬度/(°)	最低气温/℃	最高气温/℃	平均海拔/m	人口密度/(人·km ⁻²)	人均GDP/元
芦山地震	2022-06-01T17:00	6.1	17	102.94	30.37	17	29	1554	98	57 424
玉树地震	2010-04-14T7:49	7.1	14	96.60	33.10	-3	18	4809	87	8 531
九寨沟地震	2017-08-08T21:19	7.0	20	103.82	33.20	16	30	3827	6	30 351
雅安地震	2013-04-20T8:02	7.0	13	103.00	30.30	14	24	2073	196	27 317
康定地震	2014-11-22T16:55	6.3	18	101.70	30.20	-0.2	8.6	4200	9	37 678
泸县地震	2021-09-16T4:33	6.0	10	105.34	29.20	19	26	310	499	51 218
泸定地震	2022-09-05T12:52	6.8	16	102.08	29.59	12	25	3266	32	39 195

表 2 目标案例与部分历史事件各属性的相似度

Table 2 Similarity between target case and some historical events across different attributes

地震事件	发震日期	震级	震源深度/km	震中经度/(°)	震中纬度/(°)	最低气温/℃	最高气温/℃	平均海拔/m	人口密度/(人·km ⁻²)	人均GDP/元	综合相似度
芦山地震	0.983	0.678	0.905	0.906	0.913	0.863	0.852	0.683	0.874	0.689	0.835
玉树地震	0.452	0.846	0.819	0.534	0.665	0.643	0.756	0.710	0.895	0.534	0.685
九寨沟地震	0.722	0.895	0.670	0.819	0.657	0.889	0.819	0.883	0.949	0.835	0.814
雅安地震	0.548	0.895	0.741	0.900	0.921	0.943	0.961	0.767	0.717	0.784	0.818
康定地震	0.607	0.722	0.800	0.957	0.932	0.698	0.519	0.714	0.954	0.969	0.793
泸县地震	0.940	0.641	0.549	0.689	0.956	0.814	0.961	0.518	0.388	0.782	0.724

2.2.2 次生灾害风险识别

基于表 2 所示的相似度评估结果,选择 0.8 作为案例相似度阈值,筛选出与目标案例泸定地震高度相似的 3 个匹配案例:2013 年雅安地震、2017 年

九寨沟地震以及 2022 年芦山地震。利用 Cypher 查询语言的 Match 子句抽取出来与之相似历史案例的事理图谱子图,如图 7 所示。通过剖析这些匹配案例的风险演化路径并结合目标案例泸定地震实际情

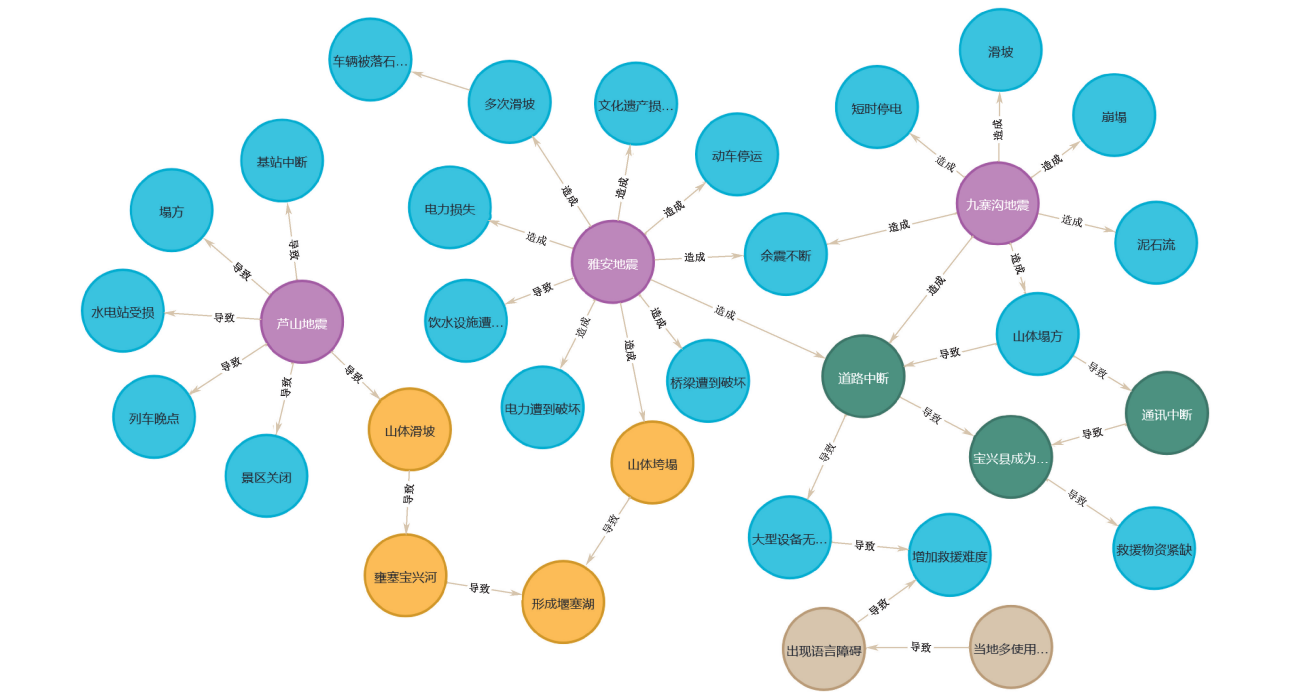


图 7 匹配案例事理图谱(部分)

Fig. 7 Event evolutionary graph for matching cases (partial)

况,能够有效识别出震后次生灾害风险及伴随的救援风险。

观察图 7,有几点启示:① 首要发现的是相似历史案例中不仅芦山地震存在“地震→山体滑坡→壅塞河道(壅塞宝兴河)→形成堰塞湖”这一风险演化路径,且雅安地震也有地震→山体垮塌→形成堰塞湖这一风险传导链,预示着泸定地震区域也有较大风险形成堰塞湖。由此,建议应急相关部门立即启动全面地质灾害隐患排查,并开展水文应急监测,确保对可能形成堰塞湖区域的水文气象状况的动态掌握。② 在相似历史案例中,道路中断等事件呈现高入度特性,表明地震次生灾害中交通等基础设施损毁高发,这易使灾区成为信息孤岛,阻碍高效救援。由此,建议相关应急部门应预先制定并严格执行应急通信保障预案,以保障灾区在紧急事态下通信畅通。③ 结合表 2 和图 7 可知:目标案例泸定地震与历史案例雅安地震在地理位置上较为相近,故二者在受灾人群特征上可能存在相似性,即灾区存在不少使用少数民族语言的受灾者。语言障碍可能会削弱受灾者对救援团队的信任感,进而对救援效果产生不利影响。故在震后应急响应机制设计中,需将语言沟通问题置于高度优先地位,应迅速部署策略以组建针对少数民族语言及地方方言的专业应急救援翻译小组,提升救援信息传递准确性。

2.3 基于因果关联强度的衍生社会风险预测

围绕 2.2 节研判出的泸定地震次生灾害风险关键节点,聚焦其可能引发的连锁社会风险反应,通过统计不同风险对共现及存在因果关系的频次,计算概率 p ,进一步构建基于因果关联强度的抽象事理图谱(图 8)。

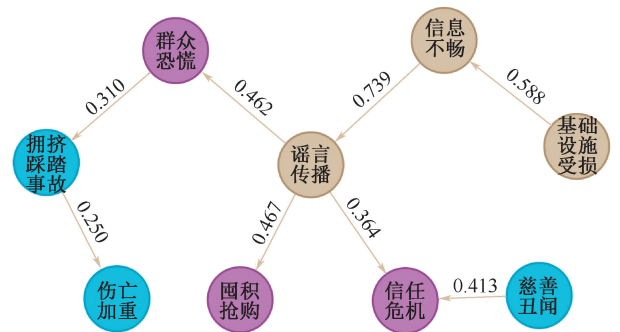


图 8 社会风险抽象事理图谱(部分)

Fig. 8 Abstract event evolutionary graph for social risks (partial)

实际上,地震及其所诱发的次生灾害(如形成堰塞湖等)可能会对电力供应系统、道路交通网络等基础设施造成较大损害,导致信息流通受阻,此障碍随后又可能触发一系列错综复杂的社会连锁反应。图 8 中节点表示泸定地震后由若干次生灾害风险可能引致的部分社会风险实例,图中各有向箭头所标示的数值则量化的是所连接 2 类抽象风险事件

间的因果关联概率。

由图 8 可知:信息不畅以较大概率触发谣言传播,而谣言的迅速扩散存在较高概率煽动公众恐慌情绪。这一系列具备连锁反应特征的社会风险可能侵蚀社会民众的信任基础、导致信任危机的产生,甚至对社会稳定构成一定威胁。由此,在应对地震及其次生灾害时,建议相关应急部门应秉持全面而系统的风险防控理念,既要强化对自然灾害本身及其次生灾害的研判与防范,也需通过强化网络舆情监测与管理等手段,有效降低社会风险的发生概率与扩散范围,确保社会体系在面对突发灾害时能够维持稳定并具良好韧性。

3 结 论

1) 应急事理图谱揭示了灾害演化过程中自然

与社会风险的高度耦合特性,以泸定地震为目标案例,通过多维属性特征的相似度匹配策略,识别出堰塞湖、道路中断等高发次生灾害风险。

2) 通过事理图谱进一步解析出次生灾害事件可能触发的社会风险传导机制,如在泸定地震灾害情境下可能存在信息不畅→谣言扩散→群众恐慌等风险演化路径。这一发现可为应急决策提供关键风险环节的早期预警。

3) 在未来研究中,可进一步探究新一代人工智能技术的融合路径,尤其可聚焦如何有效利用大语言模型的上下文感知、语义理解以及知识生成等方面的强大能力,来优化事件及事件关系的抽取效果,以增强在处理复杂、模糊以及多源灾情信息时的预测精准度与研判效率。

参 考 文 献

[1] MEN Jinkun, CHEN Guohua, YANG Yunfeng, et al. An event-driven probabilistic methodology for modeling the spatial-temporal evolution of natural hazard-induced domino chain in chemical industrial parks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 226: DOI:10.1016/j.res.2022.108723.

[2] LU Ying, LIU Jie, YU Wenhui. Social risk analysis for mega construction projects based on structural equation model and Bayesian network: a risk evolution perspective[J]. Engineering, Construction and Architectural Management, 2024, 31(7): 2 604-2 629.

[3] 张磊, 王延章, 陈雪龙, 等. 面向突发事件应急决策的情景建模方法[J]. 系统工程学报, 2018, 33(1):1-12. ZHANG Lei, WANG Yanzhang, CHEN Xuelong, et al. Scenario modeling method for unconventional emergency decision-making [J]. Journal of Systems Engineering, 2018, 33(1):1-12.

[4] 郝子君, 荣莉莉. 面向灾害情景推演的区域模型构建方法研究[J]. 管理评论, 2020, 32(10):276-292. QIE Zijun, RONG Lili. A construction method of hazard-affected region for disaster scenario evolution[J]. Management Review, 2020, 32(10):276-292.

[5] 李磊, 马梦格, 折亚亚, 等. 复杂网络下雨洪灾害链风险分析及断链减灾研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(12):192-197. LI Lei, MA Mengge, SHE Yaya, et al. Risk analysis of rainstorm flood disaster chain and research on disaster mitigation of broken chain under complex network[J]. China Safety Science Journal, 2023,33(12):192-197.

[6] GUO Haixiang, HE Xinyu, LYU Xinbiao, et al. Risk analysis of rainstorm-urban lifeline system disaster chain based on the PageRank-risk matrix and complex network[J]. Natural Hazards, 2024, 120(12): 10 583-10 606.

[7] MU Heng, WU Peng, SU Wenyi. Construction of knowledge graph for emergency resources[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2024, 2024: DOI: 10.1155/2024/6668559.

[8] 邵舒羽, 张扬, 刘艳. 基于 KGCN 的地质地震灾害事件演化结果预测[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(2): 212-219. SHAO Shuyu, ZHANG Yang, LIU Yan. Prediction of geological earthquake disaster event evolution results based on KGCN[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(2):212-219.

[9] FAN Chao, ZHANG Cheng, YAHJA A, et al. Disaster city digital twin: a vision for integrating artificial and human intelligence for disaster management[J]. International journal of Information Management, 2021, 56: DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2019.102049.

[10] LIU Zhenghao, ZHANG Zhijian, ZENG Xi. Risk identification and management through knowledge association: a

financial event evolution knowledge graph approach[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 252: DOI: 10.1016/j.eswa.2024.123999.

[11] 单晓红, 庞世红, 刘晓燕, 等. 基于事理图谱的网络舆情演化路径分析:以医疗舆情为例[J]. 情报理论与实践, 2019, 42(9): 99-103, 85.

SHAN Xiaohong, PANG Shihong, LIU Xiaoyan, et al. Analysis on the evolution path of internet public opinions based on the event evolution graph: taking medical public opinions as an example[J]. Information Studies: Theory & Application, 2019, 42(9): 99-103, 85.

[12] YAN Zhen, ZHOU Xiao, ZHANG Qiuyun, et al. Predicting multi-subsequent events and actors in public health emergencies: an event-based knowledge graph approach[J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 187: DOI: 10.1016/j.cie.2023.109852.

[13] MAO Qianren, LI Xi, PENG Hao, et al. Event prediction based on evolutionary event ontology knowledge[J]. Future Generation Computer Systems, 2021, 115: 76-89.

[14] 刘高峰, 李佳静, 王慧敏, 等. 城市暴雨洪涝灾害链辨识及系统性风险评估[J]. 中国管理科学, 2025, 33(7): 222-231.

LIU Gaofeng, LI Jiajing, WANG Huimin, et al. Identification of urban rainstorm flood disaster chain and assessment of systematic risk[J]. Chinese Journal of Management Science, 2025, 33(7):222-231.

[15] CHEN Leida, SAKAGUCHI T, FROLICK M N. Data mining methods, applications, and tools[J]. Information systems management, 2000, 17(1): 65-70.

[16] 张佰尚, 李向阳, 李相华. 信息不完备条件下地震应急案例结构化方法研究[J]. 运筹与管理, 2015, 24(2): 78-86.

ZHANG Baishang, LI Xiangyang, LI Xianghua. Research on structuralization method for earthquake emergency cases under the condition of incompleteness information[J]. Operations Research and Management Science, 2015, 24(2): 78-86.

[17] GAO Zemin, DING Mingtao, HUANG Tao, et al. Geohazard vulnerability assessment in Qiaojia seismic zones, SW China[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021, 52: DOI: 10.1016/j.ijdrr.2020.101928.



作者简介：朱莉（1983—），女，江西上饶人，博士，教授，主要从事应急管理方面的研究。E-mail: lzhu@nuist.edu.cn。