

中文引用格式:李莎莎,崔铁军,张晶. 多灾害耦合下灾害演化过程智能推演[J]. 中国安全科学学报,2026,36(1):227-233.

英文引用格式:LI Shasha, CUI Tiejun, ZHANG Jing. Intelligent deductive for disaster evolution process under multi-disasters coupling [J]. China Safety Science Journal,2026,36(1):227-233.

多灾害耦合下灾害演化过程智能推演^{*}

李莎莎^{1,2} 副教授, 崔铁军^{**1} 教授, 张晶^{2,3}

(1 沈阳理工大学 环境与化学工程学院, 辽宁 沈阳 110159; 2 清华大学 安全科学学院, 北京 100084; 3 应急管理部 灾害事故调查评估应急管理部重点实验室, 北京 100084)

中图分类号:X913

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.01.0370

资助项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3016800);辽宁省属本科高校基本科研业务费专项资金资助(LJ212410144051, LJ212410144032)。

【摘要】 为有效预测灾害及评估干预措施效果,提出多灾害耦合演化智能推演方法,论述灾害过程与多灾害耦合、演化智能推演的优点和困难,描述灾害演化过程,提出智能推演方法,并以露天矿采掘过程为例,应用所提方法进行分析,验证其有效性。结果表明:多灾害耦合过程复杂多变,具有不确定、网络结构效应和时空分布差异等特征;系统故障演化理论能从概念描述、拓扑结构和数学分析角度为多灾害耦合演化智能推演提供支持;建立演化智能推演方法,给出步骤和数学模型,其能定性定量地推演多灾害耦合演化过程,发现隐藏灾害过程并涌现知识。

【关键词】 多灾害耦合; 演化过程; 网络结构; 智能推演; 系统故障演化理论

Intelligent deductive for disaster evolution process under multi-disasters coupling

LI Shasha^{1,2}, CUI Tiejun¹, ZHANG Jing^{2,3}

(1 School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning 110159, China; 2 School of Safety Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3 Key Laboratory of Investigation on Disaster and Accident, Ministry of Emergency Management, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to effectively predict disasters and evaluate the effectiveness of intervention measures, a multi-disaster coupling evolution intelligent deduction method was proposed. The disaster process, multi-disaster coupling, as well as the advantages and difficulties of evolutionary intelligent deduction, were discussed. The disaster evolution process was described, and an intelligent deduction method was established. Taking the mining process of an open-pit mine as an example, the proposed method was applied for analysis, and its effectiveness was verified. The results show that the multi-disaster coupling process is complex and changeable, with characteristics such as uncertainty, network structure effect and spatio-temporal distribution difference. The system fault evolution theory can provide support for the multi-disaster coupling evolution intelligent deduction from the perspectives of conceptual description,

* 文章编号:1003-3033(2026)01-0227-07; 收稿日期:2025-08-11; 修稿日期:2025-11-09

** 通信作者:崔铁军(1983—),男,辽宁沈阳人,博士,教授,主要从事系统可靠性及系统故障演化理论方面的研究。E-mail:ctj.159@163.com。

topological structure and mathematical analysis. The evolutionary intelligent deduction method is established, and its steps and mathematical model are provided. This method can qualitatively and quantitatively deduce the multi-disaster coupling evolution process, discover hidden disaster processes and generate emergent knowledge.

Keywords: multi-disaster coupling; evolution process; network structure; intelligent inference; system fault evolution theory

0 引言

多灾害耦合现象是普遍存在的,不同地区和时间段内,自然灾害与人为灾害常相互交织、相互影响,形成复杂多变的灾害过程。因此,研究多灾害耦合的重要性不容忽视。同时,多灾害耦合研究也面临诸多挑战。包括灾害间复杂多变的相互作用机制难以捕捉,数据收集与整合难度大,跨学科合作困难,以及缺乏适合的评估标准和模型等,都限制了多灾害耦合现象的理解与预测。利用灾害演化智能推演多灾害耦合具有可行性。

目前,对灾害耦合过程、预测推演及防治干预的研究较多,包括灾害耦合机制与风险分析^[1-3]、灾害系统与城市灾害^[4-5]、特殊领域灾害研究^[6]等。这些成果充分分析了不同领域的不同灾害、事故等,为后继研究提供了支持,但仍有较大发展空间。目前面临的主要问题在于多灾害演化的描述,缺少概念、结构和数学模型,难以澄清它们的相互作用机制。这是实现多灾害耦合演化推理的理论基础,但仍缺乏理论支持及通用方法技术。

鉴于此,笔者拟利用系统故障演化理论^[7],对多灾害耦合演化过程进行概念描述、拓扑结构抽象和数学分析。提出多灾害耦合演化智能推演方法,给出步骤和数学模型,定性定量地推演多灾害演化过程,发现隐藏灾害路径,以期能够预测灾害及评估干预措施效果。

1 灾害过程与多灾害耦合

生产生活中的灾害主要由自然灾害和人为灾害及其之间的相互作用产生。典型自然灾害主要包括地震、洪水、台风等;典型人为灾害包括矿山开采灾害、化工爆炸、建筑坍塌等。其发生发展及相互作用存在时空上的多灾害耦合现象,且耦合中多是相互促进少有抑制作用。地震由地球内部岩体应力释放引发,涉及应力积累、岩石破裂与能量释放;人为矿山开采、隧道掘进等也会导致岩石破裂和能量释放,造成近地表振动并破坏建筑物。洪水源于强降雨、

冰雪融化、水库溃坝等,经历降雨、土壤饱和、洪水等形成阶段,且人为堵塞河道、水库溃坝会加剧其威力。台风作为热带强烈气旋,伴随强风、暴雨和风暴潮,形成过程包括热带扰动至台风形成及降水,是城市内涝的直接诱因。矿山开采事故因地质条件、技术、管理等问题引发,地质复杂、技术不当、管理不善会触发巷道坍塌、透水、瓦斯爆炸等事故。化工储罐爆炸多由设备故障、操作失误等导致,地震、洪水、飓风、雷电等自然灾害会通过损坏结构、撞击、引发火灾等方式促使其发生,泄漏物质还能形成易燃易爆环境。

显然,多灾害耦合演化过程是复杂的,是2种或多种自然/人为灾害在相同时空内相互影响、相互作用,导致灾害结果加强或产生次生灾害的过程。在多灾害耦合过程中,一种灾害可能触发或加剧另一种灾害,形成灾害链,并在相同时空内叠加;各灾害之间存在复杂作用机制易引发次生灾害;具有复杂演化特征,不同时间、地点和强度导致灾害的时空分布特征变化。因此,其特点包括复杂性、不确定性、灾害网络效应和时空分布差异性。郭付三等^[8]给出了露天矿采掘引起地质环境灾害的过程,涉及多种灾害的相互作用。

类似的,崔铁军等^[9]给出了某露天矿边坡灾害演化过程。因此,自然和人为灾害是生产生活中普遍存在且必须面对的问题。涉及时空范围内所有灾害形式及导致这些灾害的生产活动。这些灾害及其演化过程各具特点且相互作用,使灾害耦合演化过程具有随机性和多样性,给研究、预防和治理带来困难。研究多灾害耦合演化智能推演方法是解决这些的重要途径之一。

2 多灾害耦合演化智能推演的优点和困难

多灾害耦合演化智能推演是利用人工智能技术,对多种灾害的演化过程进行模拟、预测和推演的一种方法,可提高灾害演化的准确性和时效性。主要优点包括推演准确性、时效性,以及优化资源配置

和个性化方式等。智能推演能整合分析不同领域和渠道的多模态数据,包括音频、视频及异构数据蕴含的气象、地质、水文等信息,实现多灾害实时监测和预警;通过深度学习等算法从大量数据中提取灾害前兆,提高推演准确性。实时多模态数据流分析技术能迅速分析灾害现场情况,在灾害发生前发出预警并提供及时避险指导。智能推演则实现了对多种灾害的预警和监测;不仅提高了针对性和实用性,还增强了时空覆盖面。其能迅速分析受灾区域需求,优化资源配置和调度;将预警信息实时推送并采取相应避险措施。

智能推演亦面临诸多挑战:①数据层面,需要准确全面的数据支撑,但灾害数据常存在缺失、不准问题,且监测系统的破坏会影响数据的完整性与时效性导致推演失败。②模型方面,灾害推演需要结果及依据与过程,即可解释性;但当前相关模型可解释性较差,难以呈现形成过程,影响推演结果可信度。③技术适应性与鲁棒性上,不同地区灾害特征各异,推演需具备应对复杂不确定情况的能力;同时网络延迟、设备故障等问题也会影响其实时性与鲁棒性。

可见:多灾害耦合演化智能推演在提高推演准确性、时效性、扩大推演范围等方面具有显著优点;但也面临着数据质量和数量问题、结果可解释性和可信度、技术适应性和鲁棒性等方面的挑战。

3 多灾害耦合演化过程的描述

系统故障演化理论^[7]可从概念描述、拓扑结构抽象和数学分析角度描述多灾害耦合演化过程;建立概念模型、网络拓扑结构模型和数学分析模型,从而实现多灾害耦合演化智能推演的目标。

系统故障演化过程是描述在多因素影响下系统实现预定功能能力变化的过程;而在该过程中某时刻的实现预定功能的状态称为系统功能状态^[10]。前者是在连续时间内描述演化的总体变化特征;后者是描述某一时刻演化的具体情况。多灾害耦合演化过程可使用系统故障演化理论进行研究。

系统故障演化的概念模型包括经历事件、影响因素、逻辑关系和演化条件4要素。经历事件是灾害过程存在的标志,将灾害演化过程分段,确定代表各阶段的特征、行为和状态作为事件,如露天采掘过程,事件分为基本原因事件是演化过程的开始(露天采掘),最终结果事件是演化过程的结束事件(地面沉降),过程事件在上述两者之间(塌陷与地裂缝)。影响因素是影响事件状态变化的因素,进而

影响整个演化过程。逻辑关系是多个原因事件导致结果事件时,原因事件之间的作用叠加形式,可使用一般的布尔逻辑和柔性逻辑表示^[11]。布尔逻辑提供确定性框架,而柔性逻辑通过模糊化和叠加逻辑关系增强对复杂系统的适应性,描述过程确定性与不确定性逻辑关系。演化条件是原因事件导致结果事件发生所需条件的出现情况。

拓扑结构模型是描述灾害演化过程中4要素关系的网络拓扑结构。对应4要素,因素为圆形符号,事件为矩形符号,逻辑关系用结果事件矩形符号下角标表示,演化条件是事件的间有向线段。其数学模型能实现定性定量分析。设因素集合为 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_I\}$, $f_i \in F$, $i = 1, 2, \dots, I$, I 为因素数量。事件集合为 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_N\}$, $e_n \in E$, $n = 1, 2, \dots, N$, N 为事件数量;其中,原因事件集合为 E_Y , 原因事件 $e_y \in E_Y$; 结果事件集合为 E_J , 结果事件 $e_j \in E_J$ 。设传递概率集合为 $T_p = \{t_{p,1}, t_{p,2}, \dots, t_{p,K}\}$, $k = 1, 2, \dots, K$, $t_{p,k} \in T_p$, K 为传递概率数量。因素 f_i 对事件 e_n 的影响使用特征函数 $q_{n,i}$ 表示,所有因素 $f_1, f_2, \dots, f_I$ 对事件 e_n 的影响使用事件发生概率分布表示, $q_n = 1 - \prod_{i=1}^I (1 - q_{n,i})$ 。对于逻辑关系,可使用布尔逻辑和柔性逻辑表示。崔铁军等^[11]给出2事件发生的柔性逻辑表示;同时,演化过程中各类逻辑关系都可表示为与、或逻辑。当拓扑分解空间故障网络时,可得到以与或逻辑表示的演化过程。与逻辑连接的事件构成了灾害发生模式;或逻辑表示了所有模式之间的关系。演化条件在数值上用传递概率 $t_{p,k}$ 表示,则数学表达式为 $q_j = t_{p,y \rightarrow j} q_y$ 。可见:上述的概念描述、拓扑结构抽象和数学分析可实现多灾害耦合演化智能推演。

4 多灾害耦合演化智能推演

4.1 灾害事件因果关系库建立

关系库用于形成多灾害耦合演化过程;建立事件之间的因果对应关系,以及原因事件、演化条件和结果事件的简单三元组,并以这些三元组为基础,建立多灾害耦合演化网络结构。

由前述研究可知:无论是布尔逻辑或柔性逻辑都可最终简化为与或逻辑^[11]。其中,或逻辑关系可转化为单一原因事件导致单一结果事件的作用传递过程,如图1a所示,这就退化为演化条件的传递逻辑,如露天采掘→塌陷与地裂缝;而与逻辑关系则可表示为多原因事件与演化条件共同导致的结果事

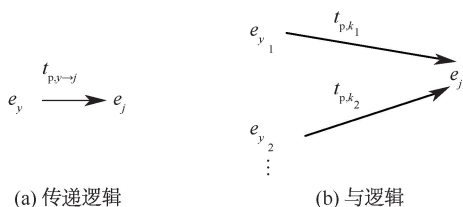


图1 逻辑关系

Fig.1 Logical relation

件,如图1b所示,即暴雨与洪水且碎屑流滑坡→泥石流。那么事件因果关系库可从定性和定量2方面构建,定性定量如下式:

$$R_r = \left\{ \begin{array}{l} \{r_\theta\} \mid r_\theta = \begin{cases} e_y \rightarrow e_j \text{ 传递逻辑} \\ \oplus_x e_{y_x} \cdots \rightarrow e_j \text{ 与逻辑} \end{cases} \\ e_y, e_{y_x} \in E_Y, e_j \in E_J, E_Y, E_J \subset E, \theta = 1, 2, \dots, \vartheta \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$R_q = \left\{ \begin{array}{l} \{q_\theta\} \mid q_\theta = \begin{cases} q_y t_{p,k} \text{ 传递逻辑} \\ \prod_x q_{y_x} t_{p,k_x} \text{ 与逻辑} \end{cases} \\ e_y, e_{y_x} \in E_Y, e_j \in E_J, E_Y, E_J \subset E, \theta = 1, 2, \dots, \vartheta \end{array} \right\} \quad (2)$$

式中: $\oplus$ 为原因事件 e_{y_x} 的链接符号,实际中可省略; X 为 e_{y_x} 的数量; R_r 为灾害事件因果关系库的定性表示,其中,定性关系为 r_θ , $\theta = 1, 2, \dots, \vartheta$; R_q 为灾害事件因果关系库的定量表示,其中,定量关系为 q_θ , $\theta = 1, 2, \dots, \vartheta$ 。在不引起歧义且配合演化网络图能确定传递概率时,在“ $\rightarrow$ ”上不标注传递概率编号。

灾害演化过程作为整体分析是困难的,因此,采用的方法是确定事件之间的因果关系,如传递逻辑和与逻辑。确定原因事件、条件和结果事件的三元组,这是相对简单且直接的;再根据 R_r 中所有关系 r_θ 的原因事件和结果事件是否相同构建事件间的网络拓扑结构。

4.2 多灾害耦合演化网络结构建立

根据 R_r 中某关系 r_θ 的原因事件 e_y 和结果事件 e_j ,遍历 R_r 中其余所有关系 r_θ 的原因事件 $e_{y'}$ 是否与 e_y 相同,或结果事件 $e_{j'}$ 是否与 e_j 相同。如果相同则链接2个关系构建网络,如下式:

$$\begin{cases} e_{y'} \rightarrow e_{j'} = e_y \rightarrow e_j \Rightarrow e_{y'} \rightarrow e_{j'} (e_y) \rightarrow e_j \\ e_y \rightarrow e_j = e_{y'} \rightarrow e_{j'} \Rightarrow e_y \rightarrow e_j (e_{y'}) \rightarrow e_{j'} \end{cases} \quad (3)$$

如露天采掘→塌陷与地裂缝=塌陷与地裂缝→地面沉降,链接为露天采掘→塌陷与地裂缝→地面

沉降。将所有关系进行链接就形成了多灾害耦合演化的网络拓扑结构。

4.3 网络结构路径分解

路径分解是网络拓扑形成路径的关键,也是实现演化推演的关键。演化路径是演化过程网络拓扑结构中,由基本原因事件到达最终结果事件的一条通路。网络中存在多条路径,每条路径都有一定概率导致最终结果事件发生。也可理解为各路径对应一种故障模式。由于因素直接作用于事件,逻辑关系已被分解,因此,路径中只包含事件和演化条件。当基本原因事件出现且所有演化条件出现时最终结果事件可能发生。定量方面,某一路径的连通概率是基本原因事件发生概率分布与所有演化条件传递概率的乘积。同时,分解路径有利于发现隐藏的灾害演化路径,可实现知识涌现的目标。这也是智能推演的重要表现,涌现过程如图2所示。

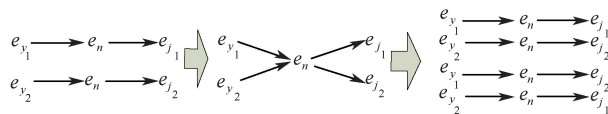


图2 灾害演化路径的涌现

Fig.2 Emergence of disaster evolution paths

由图2可知:原有的2个已知演化路径具有相同的过程事件。那么以该过程事件为节点,可形成4条演化路径。涌现的2条路径就是发现的隐藏灾害演化过程。路径表达式集合为 L ,路径表达式为 l_b , B 为路径数量, $\otimes$ 代表路径的链接符号,实际中可省略。路径连通计算式集合为 Q^L ,路径连通计算式为 q_b^L ,如下式:

$$L = \left\{ \begin{array}{l} \{l_b\} \mid l_b = \otimes (e'_{y'} \rightarrow) (e'_{y'} \oplus_x e_{y_x} \rightarrow), \\ e'_{y'}, e_{y_x} \in l_b, b = 1, 2, \dots, B \end{array} \right\} \quad (4)$$

$$Q^L = \left\{ \begin{array}{l} \{q_b^L\} \mid q_b^L = \prod_{x=1}^X q_{y_x} \prod_{k=1}^K t_{p,k} \mid q_{y_x}, t_{p,k} \in l_b \end{array} \right\} \quad (5)$$

4.4 灾害推演条件设定

利用式(4)对所有路径进行定性连通性分析,利用式(5)计算所有路径连通概率。由式(4)可知:其与事件和演化条件相关;而式(5)和事件发生概率分布以及演化条件的传递概率相关。由于基本原因事件 $q_y = q_y(F) = q_y(f_1, f_2, \dots, f_l) = 1 - \prod_{i=1}^l (1 - q_{y,i})$,因此,路径连通计算结果与所有因素的变化相关。

实现多灾害耦合演化智能推演就必须设定包括

事件、演化条件、各因素变化及传递概率等定性定量条件。设条件中因素集合为 $F' = \{f_1', f_2', \dots, f_l'\}$, 传递概率集合为 $T_p' = \{t_{p,1}', t_{p,2}', \dots, t_{p,K}'\}$, 可用于定量分析。进一步通过 $q_y(F')$ 判断事件的存在性, 通过 $T_p' = \{t_{p,1}', t_{p,2}', \dots, t_{p,K}'\}$ 判断演化条件的存在性, 实现定性分析。

4.5 路径连通可能性确定

根据式(4), 参考 $F' = \{f_1', f_2', \dots, f_l'\}$ 和 $T_p' = \{t_{p,1}', t_{p,2}', \dots, t_{p,K}'\}$ 可在定性上判断路径 l_b 是否具有发生的可能性。同时, 根据式(5), 将 $F' = \{f_1', f_2', \dots, f_l'\}$ 和 $T_p' = \{t_{p,1}', t_{p,2}', \dots, t_{p,K}'\}$ 代入, 可得路径连通计算式, 计算结果为路径连通概率。

$$q_b^L(F', T_p') = \prod_{x=1}^X \left(1 - \prod_{i=1}^{l'} (1 - q_{y_x, i})\right) \prod_{k=1}^{K'} t_{p, k}' \quad (6)$$

综上, 得到多灾害耦合演化智能推演的定性和定量表达式。总体思路是确定多灾害耦合演化过程中的4要素, 构建拓扑结构, 形成所有可能演化过程和结果的模板; 再通过设定灾害推演条件来确定所有路径连通的可能性和具体连通概率。

5 多灾害耦合演化实例分析

利用露天矿采掘过程中的多灾害作用关系(图3)分析实例。

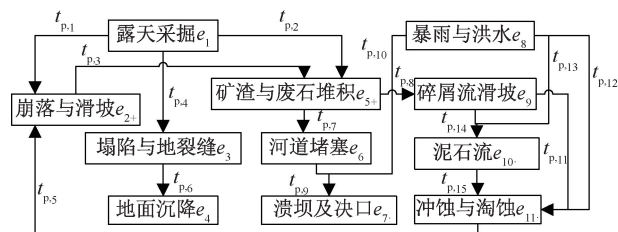


图3 露天矿采掘中多灾害的相互作用

Fig. 3 Interaction of multi-disasters in open pit mining

设事件集合为 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_{11}\}$, 事件数量 $N=11$; 其中, 原因事件集合为 $E_Y = \{e_1, e_8\}$, 结果事件集合为 $E_J = \{e_4, e_7\}$ 。设传递概率集合为 $T_p = \{t_{p,1}, t_{p,2}, \dots, t_{p,15}\}$, 传递概率数量 $K=15$ 。对于露天矿采掘活动, 是人工作业、地质环境和降水等事件的共同作用。语义中或表示逻辑或, 图中用结果事件下角标的“+”表示; 且表示逻辑与, 用“·”表示。如下进行多灾害耦合作用下的灾害演化过程智能推演。

步骤1: 建立灾害事件因果关系库。根据式(1)得到事件因果关系库的定性描述, 如下式:

$$R_i =$$

$$\left\{ \begin{aligned} &e_1 \rightarrow e_3, e_3 \rightarrow e_4, e_1 \rightarrow e_5, e_5 \rightarrow e_9, e_9 \oplus e_8 \rightarrow e_{11}, \\ &e_9 \oplus e_8 \rightarrow e_{10}, e_{11} \rightarrow e_2, e_2 \rightarrow e_5, e_{10} \rightarrow e_{11}, e_5 \rightarrow e_6, \\ &e_6 \oplus e_8 \rightarrow e_7, e_1 \rightarrow e_2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中, “→”上未标注传递概率编号, 可结合图3确定。

步骤2: 建立多灾害耦合演化网络结构, 如图3所示。

步骤3: 进行网络结构路径分解。分解得到的路径表达式集合为 $L = \{l_1, l_2, \dots, l_{11}\}$ 。具体为 $l_1 = e_1 \xrightarrow{t_{p,4}} e_3 \xrightarrow{t_{p,6}} e_4$, $l_2 = e_1 \xrightarrow{t_{p,2}} e_5 \xrightarrow{t_{p,8}} e_9$, $l_3 = e_1 \xrightarrow{t_{p,2}} e_5 \xrightarrow{t_{p,8}} e_9 \oplus e_8$, $l_{p,11} \oplus l_{p,12} \xrightarrow{t_{p,5}} e_{11} \xrightarrow{t_{p,3}} e_2 \xrightarrow{t_{p,7}} e_5, \dots$ $l_6 = e_1 \xrightarrow{t_{p,2}} e_5 \xrightarrow{t_{p,7}} e_6$ 。由图3可知:

$l_7, \dots, l_{11}$ 与 $l_2, \dots, l_6$ 相关, 可表示为 $l_7, \dots, l_{11} = e_1 \xrightarrow{t_{p,1}} e_2 \xrightarrow{t_{p,3}} e_5 \otimes l_2, \dots, l_6$ 。分解网络结构形成路径的网络拓扑结构如图4所示。

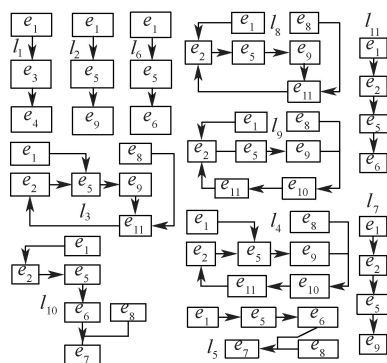


图4 分解结构形成的路径网络拓扑结构

Fig. 4 Path network topology formed by decomposition structure

步骤4: 灾害推演条件设定与路径连通可能性确定。设灾害推演条件为事件 e_1 和 e_8 同时出现, 且 $t_{p,2}, t_{p,8}, t_{p,11}, t_{p,12}, t_{p,5}, t_{p,3}$ 条件存在, 这时路径 l_3 存在; $\{e_1, e_8, t_{p,2}, t_{p,8}, t_{p,11}, t_{p,12}, t_{p,5}, t_{p,3}\}$ 构成了该条件下的一种灾害发生模式, 其发生过程为 l_3 。设灾害推演条件为事件 e_1 出现且 $t_{p,4}, t_{p,6}$ 条件存在, 这时路径 l_1 存在; $\{e_1, t_{p,4}, t_{p,6}\}$ 构成了该情况下的一种灾害发生模式。同理, 如果设 e_8 不出现, 则可能出现的路径为 $l_1, l_2, l_6, l_7, l_{11}$ 。上述过程进行了简单的多灾害耦合演化智能推演, 实现了研究目标。

6 讨论

由于影响因素和演化条件可能随着时间的变化

而变化,这时因素值和传递概率是时间的函数,则有

$q_y = 1 - \prod_{i=1}^I (1 - q_{y,i}(f_i(t)))$ 和 $t_{p,k} = t_{p,k}(t)$ 。根据式(6)和因素及演化条件的变化趋势,可得到未来某时刻所有路径的连通概率 $q_k^t(F(t), T_p(t))$ 。这就实现了智能推演之上的智能预测,以及灾害演化过程的动态描述。另外,对于灾害演化过程的干预和预防,可通过抑制 4 要素在拓扑结构中的出现实现。如抑制某事件,确定包含该事件的路径,这些路径是必然没有连通性的。同理,可判断所有因素和演化条件对干预演化进程的作用。可见:方法不但能智能推演多灾害耦合演化过程,也能实现基于趋势的预测;并为演化干预措施及效果评估提供方法。

演化的时空异质性问题可借助空间故障网络数学模型说明。核心是事件发生概率与因素值变化的特征函数,叠加同一事件的所有特征函数,形成因素空间中的事件发生概率分布曲面,而演化过程是更复杂的因素空间曲面。方法可表达任意条件下的灾害发生情况,能获得广泛的演化性质,因此,具备动态性和时空异质性表示能力。

研究不足在于概念模型 4 要素确定的具体方法及定量分析中特征函数、传递概率数值确定较复杂,但这不在文中研究范围内。因具体对象、关系和数

值需通过试验与计算确定,且各领域方法不同,应依具体问题而定。最优确定顺序为关系函数、逻辑推理、实例调查和专家经验。随着理论方法发展,多灾害耦合演化智能推演框架可加入新方法实现替换优化,完成持续迭代以提升效能。

7 结 论

1) 灾害过程涉及自然与人为灾害,它们在时空上相互作用、耦合,相互促进而非抑制。多灾害耦合过程复杂多变,具有不确定性、演化网络效应性和时空分布差异性。因此,智能推演是研究多灾害耦合演化过程的重要途径。

2) 多灾害耦合演化智能推演面临着数据质量和数量不足、模型可解释性和可信度低、技术适应性和鲁棒性差等挑战。系统故障演化理论能为多灾害耦合演化智能推演提供支持。

3) 多灾害耦合演化智能推演方法基于灾害演化的概念描述、拓扑结构抽象和数学分析模型。通过构建灾害事件因果关系库、多灾害演化网络结构、网络结构路径分解、设定灾害推演条件、确定路径连通可能性的过程实现智能推演。该方法能定性定量地推演多灾害耦合演化过程,发现隐藏灾害路径,实现知识涌现。

参 考 文 献

[1] 吴森,齐得旭,李虎,等. 基于灾害动态演化过程的管道滑坡灾害多因素耦合预警模型[J]. 水文地质工程地质, 2024,51(6): 182-189.
WU Sen, QI Dexu, LI Hu, et al. A multifactor coupled rarely-warning model for pipeline landslide hazards based on the dynamic evolutionary process of disaster[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024,51(6):182-189.

[2] WU Xia, DU Mingxia, LIU Hanqing, et al. Coupled assessment and risk reconfiguration of debris hazards in natural gas pipeline incidents via multi-scale stochastic modeling[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025,200:DOI: 10.1016/J.PSEP.2025.107344.

[3] 张好,敬小非,毛菁鑫,等. 暴雨山洪与山坪塘漫坝多灾害耦合风险分析 [J]. 重庆科技学院学报:自然科学版, 2024,26(2): 100-107.
ZHANG Hao, JING Xiaofei, MAO Jingxin, et al. Analysis of multi hazard coupling risk caused by mountain flood and dam over flow in shanping pond[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology:Natural Science Edition, 2024, 26(2):100-107.

[4] YIN Hao, XIAN Yong, FAN Qian, et al. Disaster resilience assessment and key drivers of resilience evolution in mountainous cities facing geo-disasters: a case study of disaster-prone counties in western Sichuan[J]. Sustainability, 2025,17(8):DOI: 10.3390/SU17083291.

[5] WANG Xu, HU Saitao,ZHANG Shengzhu, et al. Study on the spatial and temporal evolution of hydrogen-blended natural

gas leakage and flare-up in the typical semi-open space[J]. Fire, 2025, 8(4):DOI: 10.3390/FIRE8040146.

[6] ZHANG Ruoyi, ZHOU Jiawen, SUN Fei, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of urban resilience against disasters: a dual perspective of urban systems and resilience capacities [J]. Land, 2025, 14(4): DOI: 10.3390/LAND14040741.

[7] 崔铁军,李莎莎. 系统故障演化过程最终事件状态及发生概率研究 [J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(8): 1-7. CUI Tiejun, LI Shasha. Study on target event state and occurrence probability of system fault evolution process [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31 (8): 1-7.

[8] 郭付三,袁巧红,殷坤龙,等. 矿山小流域地质环境灾害链及系统治理技术研究:以豫西小秦岭地区金矿开采为例[J]. 金属矿山, 2010(4): 146-152. GUO Fusan, YUAN Qiaohong, YIN Kunlong, et al. Research on geological environment disaster chain and systemic treatment technology of mine gully area: a case study of exploitation of Xiaoqinling gold mine at Western Henan[J]. Metal Mine, 2010(4): 146-152.

[9] CUI Tiejun, LI Shasha. Research on disaster evolution process in open-pit mining area based on space fault network[J]. Neural Computing and Applications, 2020, 32(21): 16 737-16 754.

[10] 崔铁军,李莎莎. 系统多功能状态表达式构建及其置信度研究[J]. 智能系统学报, 2023, 18 (1): 124-130. CUI Tiejun, LI Shasha. Construction of a system multi-function state expression and its confidence [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2023, 18 (1): 124-130.

[11] 崔铁军,李莎莎. 量子态叠加的事件发生柔性逻辑统一表达式研究 [J]. 西北工业大学学报, 2024, 42 (4): 774-782. CUI Tiejun, LI Shasha. Study on unified expression of event occurrence flexible logic based on superposition quantum states [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42 (4): 774-782.

作者简介： 李莎莎 （1988—）,女,辽宁盘锦人,博士,副教授,主要从事系统安全与安全管理等方面的研究。E-mail:lsslntu@163.com。