

中文引用格式:方丹辉,曾倪萍,王佩佩. 考虑应急主体心理的山区突发暴雨灾害情景推演[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(12): 221–229.

英文引用格式:FANG Danhui, ZENG Niping, WANG Peipei. Scenario deduction of sudden mountain rainstorm disaster considering psychological factors of emergency subjects[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(12): 221–229.

考虑应急主体心理的山区突发暴雨灾害情景推演*

方丹辉¹副教授, 曾倪萍¹, 王佩佩^{**2}讲师

(1 武汉理工大学 安全科学与应急管理学院, 湖北 武汉 430070;

2 武汉理工大学 数学与统计学院, 湖北 武汉 430070)

中图分类号:X915.5

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.12.1739

基金项目:国家社会科学基金一般项目资助(23BGL280);湖北省交通运输厅 2024 年交通运输科技项目(2024-81-2-1);中央高校基本科研业务费专项资金资助(WUT:104972024JYS0031)。

【摘要】 为有效应对山区突发暴雨灾害,探究应急主体心理对灾害演化的影响,利用博弈论和贝叶斯网络(BN)相结合的方法,推演山区突发暴雨灾害演化路径。首先,分析历史灾害数据,并咨询相关专家,确定应急情景、孕灾环境、应急措施和人的心理这4类情景要素;然后,使用 Jaccard 指数确定情景间的关系,运用博弈论方法优化由案例分析统计法和三角模糊数法确定的 BN 节点概率,构建一个考虑应急主体心理的山区突发暴雨灾害 BN 情景推演模型;最后,将其应用于四川金阳“8·21”山洪泥石流灾害开展对比试验。结果表明:该模型具有可行性和优越性,且忽略心理因素会导致灾害风险被低估。因此,应急管理部门在制定应急策略时,应重视人的心理对预警、疏散和资源分配的影响,以增强措施的有效性和适应性。

【关键词】 应急主体心理; 山区突发暴雨灾害; 情景推演; 贝叶斯网络(BN); 博弈论; 案例分析统计法; 三角模糊数法

Scenario deduction of sudden mountain rainstorm disaster considering psychological factors of emergency subjects

FANG Danhui¹, ZENG Niping¹, WANG Peipei²

(1 School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology,

Wuhan Hubei 430070, China; 2 School of Mathematics and Statistics, Wuhan

University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China)

Abstract: In order to effectively respond to sudden mountain rainstorm disaster and explore the impact of emergency subjects' psychology on disaster evolution, a method combining game theory and BN was used to simulate the disaster's progression. First, historical disaster cases were analyzed, and consultations with relevant experts were conducted to identify four key scenario elements: emergency scenarios, disaster-forming environment, emergency measures, and human psychology. The Jaccard index was then employed to determine the relationships between these scenarios, while game theory methods were applied to optimize

* 文章编号:1003-3033(2025)12-0221-09; 收稿日期:2025-06-14; 修稿日期:2025-09-08

** 通信作者:王佩佩(1985—),男,安徽蚌埠人,硕士,讲师,主要从事高等教育管理、高等教育质量与评价方面的研究。E-mail:1969248419@qq.com。

the BN node probabilities, which were initially estimated through case analysis statistics and triangular fuzzy number methods. This led to the construction of a BN-based disaster simulation model that incorporated the psychological factors of emergency subjects in the context of sudden mountain rainstorm disaster. Finally, the model was applied to analyze the "8 · 21" mountain flood and debris flow disaster in Jinyang, Sichuan, and comparative experiments were carried out. The results demonstrate that the disaster reasoning model is feasible and superior, and the neglect of psychological factors leads to an underestimation of disaster risks. Therefore, emergency management agencies should consider the influence of human psychology on early warnings, evacuation, and resource allocation when designing emergency strategies, in order to improve the effectiveness and adaptability of their measures.

Keywords: emergency subjects' psychology; sudden mountain rainstorm disaster; scenario deduction; Bayesian network (BN); game theory; case-analytical statistical method; triangular fuzzy number method

0 引言

全球气候变暖背景下,极端天气气候事件频发,由突发暴雨引发的地质水文灾害风险显著上升^[1]。相较于平原地区,山区复杂的地形地质条件使得暴雨灾害的表现形式更为多样,破坏能力更强,往往造成重大人员伤亡和财产损失^[2]。以现实为例,2024年6月,广东平远县遭遇特大暴雨,引发山体滑坡、洪涝及泥石流,导致38人死亡、2人失踪^[3];2024年7月,陕西柞水县突发暴雨山洪,丹宁高速水阳段山阳方向严坪村二号桥垮塌,造成25辆车辆坠河,62人死亡失踪^[4];2025年5月,贵州大方出现突破历史极值的强降雨,果瓦乡庆阳村发生山体滑坡,致使8户19人被困^[5]。这些事件的发生不仅凸显了暴雨对山区居民生命财产安全的严重威胁,更暴露了当前应急管理体系的不足。因此,深入研究山区突发暴雨灾害的演化过程及应急主体心理对灾害的影响,对于优化应急管理策略、提升区域防灾减灾韧性和保障公共安全具有重要的现实意义。

近年来,情景分析法被逐渐用于灾害的演化研究,而贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)是常用的情景推演方法。BN以数学概率推理为基础,对不确定系统进行推理和建模,具有丰富的概率表达能力、不确定性问题的处理能力以及多源信息的融合能力,在灾害发生概率推理计算方面具有显著优势。当前,基于BN的灾害情景推演研究主要集中在沿海地区的台风灾害^[6-7]、山区的地质灾害^[8-9]以及平原地区的暴雨洪涝灾害^[10-11],而对于山区暴雨灾害的研究并不多见。在利用BN进行暴雨情景推演研究时,有2个关键步骤:①确定具有因果关系的节点变量集合及其网络拓扑结构;②确定节点概率

值^[11]。现有研究显示,学者们在遴选暴雨灾害的节点变量时,大多只考虑与灾害演化和应对相关的客观因素,如气象因素、应急情景、应急行动、应急目标等^[10,12],而忽略公众、企业、应急救援单位等应急主体心理这一主观因素。然而,相关研究表明:情绪、风险感知、环境熟悉度等难以直接观测的心理因素都对应急响应过程和结果具有显著影响。王治莹等^[13]指出,情绪变化会改变应急决策过程中参照点的形成,进而影响决策结果;TANG Lan等^[14]发现风险感知对居民疏散意愿具有正向影响,且接受过风险教育和培训的公众有更高的风险意识。晋泽倩^[15]、霍非舟^[16]、YE Ran^[17]等研究表明:考虑心理因素的模型对人员疏散的预测和分析更为准确。然而,现阶段对于如何量化处理暴雨灾害演化过程中不可避免的主观因素,以及评估其对灾害演化的影响,还缺乏系统和深入的研究。目前,常用来确定BN节点先验概率和条件概率表(Conditional Probability Table, CPT)的方法有2大类:①案例分析统计方法,通过分析历史灾害数据确定概率;②基于专家经验的方法,结合证据理论或模糊理论,运用层次分析法、三角模糊数法等设定概率分布。在以往的研究中,学者们大多采用单一赋权法^[11,18]计算概率,但这2大类方法均存在一定的局限性,前者得到的概率值容易融入过多的专家主观意愿,所得评估结果难以让人信服;而后者又需要进行大量的案例分析,对案例数量和文本处理能力要求高。因此,单一赋权法并不能得到令人满意的BN节点概率。

鉴于此,笔者拟基于BN和博弈论,构建考虑公众、企业、应急救援单位等应急主体心理的山区突发暴雨灾害BN情景演绎模型,并利用该模型对山区

暴雨灾害开展因果推理研究和对比试验,探究应急主体心理这一主观因素对灾害演化的影响,以期为应急管理部门暴雨灾害风险应对提出一些有建设性的意见。

1 相关理论与方法

1.1 BN 理论

BN 是 PEARL^[19]提出的一种定性与定量相结合的推理模型,是由节点变量及连接节点的有向边构成的有向无环图。其中,节点代表随机变量,有向边和 CPT 表明节点之间的相互关系和关联强度。一般地,对于一个包括 n 个节点的 BN,假设网络中的变量为 $X_1, X_2, \dots, X_n$,其联合概率 P 可以表示为:

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i \mid \pi(X_i)) \quad (1)$$

式中 $\pi(X_i)$ 为 X_i 的父节点集。

1.2 模糊理论和三角模糊数法

模糊理论是指用到模糊集合的基本概念或连续隶属度函数的理论;其基本精神是接受模糊性现象存在的事实,以处理概念模糊不确定事物为研究目标^[20]。三角模糊数是模糊数的一种常见形式,它能够有效把定性指标定量化,解决评价指标无法准确度的问题,方法简单,易于计算^[21]。

1.3 博弈论

博弈论的基本思想是在博弈参与者之间寻找到一个冲突与妥协的均衡点,使各方的收益最大化^[21]。对由案例分析统计法和三角模糊数法得到的BN节点在某一状态下的概率向量 $\mathbf{P}_1$ 和 $\mathbf{P}_2$,引入线性组合系数 α ,得到计算综合概率的线性组合为:

$$\mathbf{P} = \alpha_1 \mathbf{P}_1^T + \alpha_2 \mathbf{P}_2^T \quad (2)$$

为在可能的向量集中寻找最优概率向量 $\mathbf{P}^*$, 需对各权重向量作离差极小化处理, 即:

$$\min ||\mathbf{P} - \mathbf{P}_i||_2 \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

根据矩阵的微分性质,得到式(3)最优化一阶导数条件的线性方程组,具体表达形式为:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{P}_1 \mathbf{P}_1^T & \mathbf{P}_1 \mathbf{P}_2^T \\ \mathbf{P}_2 \mathbf{P}_1^T & \mathbf{P}_2 \mathbf{P}_2^T \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 \mathbf{P}_1^T \\ \mathbf{P}_2 \mathbf{P}_2^T \end{bmatrix} \quad (4)$$

将线性组合系数作归一化处理,得到 P^* :

$$\mathbf{P} * = \alpha_1 \mathbf{P}_1^T + \alpha_2 \mathbf{P}_2^T \quad (5)$$

式中 α_i^* 为 α_1 、 α_2 归一化后的组合系数。

2 基于 BN 的山区突发暴雨灾害情景构建

2.1 情景要素确定

情景是由多个要素组成的复杂系统,各要素内部及彼此间存在相互作用,确定情景要素是情景构建和推演的前提^[22]。不同领域的学者对突发事件情景要素的划分方法不同^[10,18]。在山区突发暴雨灾害情景中,公众、企业、应急救援单位等应急主体不同的应急处置措施、孕灾环境的特点、事件自身的发展演变特征以及他们的心理状态都会影响灾害的发展演化方向。因此,提取出4类要素作为山区突发暴雨灾害情景的构成单元,如图1所示。

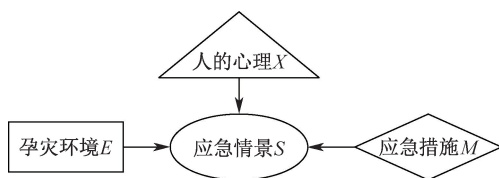


图 1 山区突发暴雨灾害情景单元结构

Fig. 1 Scenario unit structure of sudden rainstorm disaster in mountainous areas

为进一步深化对山区突发暴雨灾害的认识,通过检索国家减灾网、地方政府网站和新华网等权威网站信息,并利用中国知网查询关键词为降雨、滑坡、泥石流和山洪的相关文献资料,系统地收集2010—2024年我国山区因降雨引发的85个灾害事件案例。在此基础上,运用微词云分析软件分析案例,提取我国山区突发暴雨灾害发生和处置过程中出现的关键词,绘制词云图,如图2所示。词云字体大小表征词出现的频次。



图2 山区突发暴雨灾害词云图

Fig. 2 Word cloud map of sudden mountain rainstorm disaster

接着,将提取出的关键词按情景构成单元合并

分类,并通过咨询专家和参考已有的研究成果,确定由 12 个应急情景、6 种孕灾环境、8 项处置措施和 8 个心理状态变量组成的山区突发暴雨灾害情景要素集合,即 BN 节点变量集合,见表 1。

其中, S_4 、 S_6 、 S_{10} 和 S_{12} 为山区突发暴雨灾害的结束情景,因此,这几个节点处并没有设置其他变量。另外,将应急主体的心理状态简化为积极状态和消极状态 2 种基本类型。积极状态指能够推动暴雨情景朝着人们期望的方向发展的心理状态,如风

险感知强、情绪乐观、环境熟悉度高等。相反,消极状态指那些可能导致暴雨情景朝着人们不期望的方向发展的心理状态,如风险感知低、情绪悲观、环境熟悉度低等。虽然人的心理状态复杂多样,但文中选择不设置中间状态,原因为:①通过分析我国山区暴雨灾害事件,发现在暴雨灾害过程中,人们往往表现出明显的心理趋向,中间状态较为少见。②为简化分析模型,这种简化能够更清晰地探讨积极与消极心理状态在暴雨情境下的不同作用。

表 1 山区突发暴雨灾害情境要素组成

Table 1 Components of sudden mountain rainstorm disaster situations

<i>S</i>	<i>E</i>	<i>M</i>	<i>X</i>
降雨开始 S_1	极端天气、大气环流、台风来袭等 E_1	发布气象预警,启动预案 M_1	积极状态、消极状态 X_1
强降雨持续,达到暴雨级别,做好灾害发生时的准备 S_2	充足的水汽、强烈的气流上升运动和大气层结构的不稳定等 E_2	提高应急响应水平,配备应急物资和设备,加固老旧房屋,清理出水口 M_2	积极状态、消极状态 X_2
地表积水,河道河水上涨,水库水位上涨 S_3	—	大力疏通泄洪通道和排水系统,加强对山洪地质灾害易发点监测预警 M_3	积极状态、消极状态 X_3
积水及时排出,水位下降,洪水发生概率降低 S_4	—	—	—
天气继续恶化,暴雨持续,人们进入备战状态 S_5	大气环流稳定、地形降水效应仍显著、对流“列车效应”持续等 E_3	强制可能受灾的单位停工停产,转移安置处于危险区的群众 M_4	积极状态、消极状态 X_4
人员及时避险,0 伤亡 S_6	—	—	—
河堤决口、溃坝、山洪/洪涝 S_7	坡度陡峭、汇水地貌 E_4	开挖泄流槽降低水位、加固河道堤防和水库坝体、24 h 连续监测河流上游和水库的水位情况,根据监测信息及时排险 M_5	积极状态、消极状态 X_5
崩塌、滑坡、泥石流 S_8	坡度陡峭、岩石风化、丰富的松散固体物源补给 E_5	全面排查地质隐患、24 h 连续监测山体位移变形情况,采取工程治理措施 M_6	积极状态、消极状态 X_6
人员伤亡严重、房屋倒塌、道路桥梁塌方、农业受损、断水断电断气事故 S_9	—	启动应急响应,对危险区实行全面管制,疏通车辆,清理道路,搜救人员,危险区人员转移避险,抢修生命线系统,调拨救灾物资,疫情防控 M_7	积极状态、消极状态 X_7
人员全部撤离,无次生灾害发生,伤亡不再增加、危险被完全控制 S_{10}	—	—	—
堰塞湖 S_{11}	存在原有水系 E_6	清理堆积物、爆破泄洪或开挖引流槽、泄流渠,水泵抽水 M_8	积极状态、消极状态 X_8
不发生溃决、暴雨消失 S_{12}	—	—	—

2.2 情景要素的关系确定

灾害发生后,应急主体会采取措施以控制灾害继续恶化,然而,由于灾害发展速度快、破坏性强以及应急资源可能不足,在实际演化过程中,应急处置活动不一定能控制住事态的发展。这导致灾害发展演化出现 2 种不同的路径,一种是向期望方向发展,灾害迅速得到控制,达到损失最小;另一种是灾害不

断恶化,造成重大人员伤亡和财产损失^[22-23]。因此,根据山区突发暴雨灾害情景要素的确定过程及灾害的演化特征,构建出山区突发暴雨灾害 BN 情景推演路径,如图 3 所示。

在利用该推演路径开展研究前,需量化应急情景集中每 2 个情景之间的关联程度,以验证路径的合理性。由于确定的山区突发暴雨灾害情景的构成

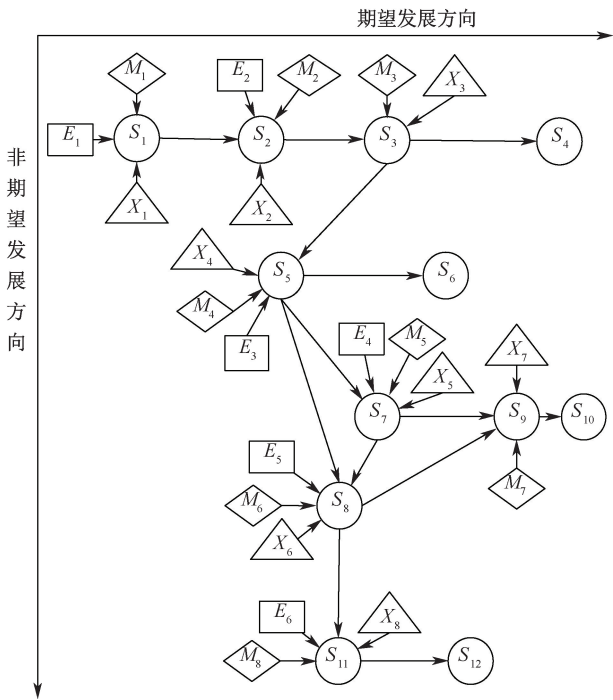


图 3 山区突发暴雨灾害 BN 情景推演路径
Fig. 3 Scenario deduction path of BN for sudden mountain rainstorm disaster

单元中应急情景、孕灾环境、应急措施及人的心理 4 类要素都是布尔变量,只有 0 和 1 这 2 种取值。因此,分析收集到的 85 个案例,将各变量的状态用 0 和 1 表示出。在此基础上,采用 Jaccard 指数计算 2 个情景间的关联程度。Jaccard 指数是一种用于比较样本集相似性与多样性的统计量,它通过度量 2 个集合交集的大小与并集的大小之间的比例来定义,值越接近 1 表示 2 个集合越相似,值越接近 0 表示 2 个集合越不相似^[24],计算公式如下:

$$J_{AB} = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} = \frac{n_{AB}}{n_A + n_B - n_{AB}} \quad (6)$$

式中: J_{AB} 为情景 A 与 B 间的关联程度, $0 \leq J_{AB} \leq 1$; n_A 、 n_B 为情景 A、B 出现的频次; n_{AB} 为情景 A 和 B 共同出现的频次。

表 2 BN 节点变量的先验概率和 CPT (节选)

Table 2 Prior probability and CPT of node variables (partial)						
节点变量	状态	案例分析统计法	三角模糊数法	α_1	$\alpha_2 = 1 - \alpha_1$	综合概率
X_1	1	0.624	0.886	0.326	0.674	0.800
X_2	1	0.565	0.812	0.222	0.778	0.757
X_3	1	0.529	0.721	0.135	0.865	0.695
E	孕灾环境是灾害发生的必要条件,因此,只考虑 E 存在的情况, $P(S \mid E=0)=0$, $P(E=1)=1$					
M	若采取应急措施,则 $P(M=1)=1$; 若没有,则 $P(M=0)=1$					
$S_1 = 1$ ($E_1 = 1$)	$M_1 = 1, X_1 = 1$	1.000	0.892	0.507	0.493	0.947
	$M_1 = 1, X_1 = 0$	0.875	0.899	0.496	0.504	0.887
	$M_1 = 0, X_1 = 1$	1.000	0.396	0.715	0.285	0.828
	$M_1 = 0, X_1 = 0$	0.792	0.397	0.688	0.312	0.669

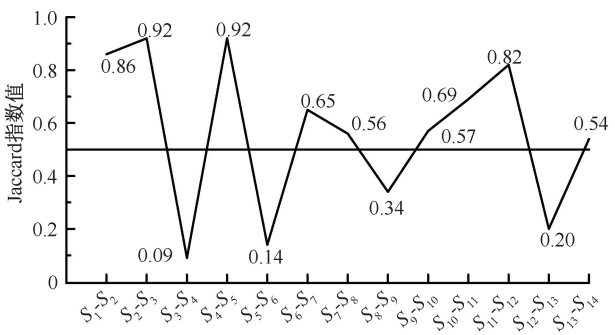


图 4 情景间的关联程度
Fig. 4 Degree of association between scenarios

最终的计算结果如图 4 所示。
由图 4 可知:大部分情景间的关联程度大于 0.5,关联性较强。 S_3-S_4 、 S_5-S_6 处关联程度低,可能是因为以 S_4 和 S_6 为结束情景,并不是山区突发暴雨灾害的主要演化方向;而 S_7-S_8 、 S_8-S_{11} 处低表示洪水引发地质灾害,滑坡泥石流引发堰塞湖的概率不高,与现实情况并不相违背。因此,山区突发暴雨灾害 BN 情景推演路径具有合理性。

3 基于博弈论的模糊概率评估

3.1 基于案例分析统计法的客观概率计算

通过计算各事件在案例中出现的频率,估计节点的先验概率和条件概率,从而获取变量的客观概率。具体来说,节点的先验概率是通过统计该节点取值为 1 的案例数占总案例数的比例来估计的,而条件概率的计算方式如下式。最终确定的节点先验概率和 CPT 见表 2。

$$P(A = a \mid B = b) = \frac{n(A = a, B = b)}{n(B = b)} \quad (7)$$

式中: $P(A=a \mid B=b)$ 为在事件 $B=b$ 发生条件下,事件 $A=a$ 发生的概率; $n(B=b)$ 为所有满足 $B=b$ 的样本数量; $n(A=a, B=b)$ 为同时满足 $A=a, B=b$ 的样本数量。

续表 2

节点变量	状态	案例分析统计法	三角模糊数法	α_1	$\alpha_2 = 1 - \alpha_1$	综合概率
$S_2 = 1$ ($E_2 = 1$)	$S_1 = 1, M_2 = 1, X_2 = 1$	1.000	0.771	0.544	0.456	0.896
	$S_1 = 1, M_2 = 1, X_2 = 0$	1.000	0.770	0.545	0.455	0.895
	$S_1 = 1, M_2 = 0, X_2 = 0$	0.667	0.618	0.573	0.427	0.646
	$S_1 = 1, M_2 = 0, X_2 = 1$	0.929	0.700	0.589	0.411	0.835
	$S_1 = 0, M_2 = 0, X_2 = 0$	0.000	0.120	0.509	0.491	0.059
	$S_1 = 0, M_2 = 0, X_2 = 1$	0.000	0.228	0.544	0.456	0.104
	$S_1 = 0, M_2 = 1, X_2 = 1$	0.000	0.261	0.562	0.438	0.114
	$S_1 = 0, M_2 = 1, X_2 = 0$	0.000	0.093	0.505	0.495	0.046

3.2 基于三角模糊数法的主观概率计算

三角模糊数法确定 BN 节点概率的步骤^[21]为：
1) 确定评价矢量和专家权重。用 7 种等级作为专家对节点发生概率的语言描述,对应的三角模糊数见表 3。

表 3 语言概率描述形式

Table 3 Language probability description form		
等级	语言描述	三角模糊数
1	非常高	(0.85,0.925,1)
2	高	(0.75,0.8,0.85)
3	略高	(0.55,0.65,0.75)
4	中等	(0.45,0.5,0.55)
5	略低	(0.25,0.35,0.45)
6	低	(0.05,0.15,0.25)
7	非常低	(0,0.025,0.05)

在获取节点发生的概率时,邀请 4 位本领域内的专家给出每个节点不同状态下发生概率的语言描述,再将其转化为三角模糊数。矢量公式为：

$$\begin{cases} U_j = \sum_{i=1}^4 \omega_i u_j = (U_j^l, U_j^m, U_j^n) \\ u_j = (u_j^l, u_j^m, u_j^n) \end{cases} \quad (8)$$

式中： U_j 为综合四位专家意见后的三角模糊数； ω_i 为第 i 个专家的权重； u_j 为专家对节点在状态 j 下的三角模糊评价价值； U_j^l 、 U_j^m 和 U_j^n 分别为评价矢量的最小可能的值、最可能的值和最大可能值。

由于专家的学历、工作年限以及职位不同,专家在整体决策中的影响力不同。邀请 4 位专家在决策中重要性的取值为 (0.315,0.211,0.211,0.263)。

2) 三角模糊数去模糊值。三角模糊数不利于 BN 的推理计算,故将其去模糊化,公式如下：

$$P_i = \frac{(n_i - l_i) + (m_i - l_i)}{3} + l_i \quad (9)$$

式中 P_i 为三角形的中心,是由模糊隶属度函数变换后的去模糊值。在去模糊化处理,若同一节点各状态下概率和不为 1,则进行归一化处理。

3.3 基于博弈论的综合概率计算

由案例分析统计方法和三角模糊数法计算得到的 BN 节点概率均存在局限,前者受限于样本量,而后者受限于专家个体的认知偏差和经验的主观性。因此,采用博弈论方法优化由这 2 种方法确定的主客观 BN 节点概率,得到与主客观概率的偏差最小化的综合概率,从而提高概率估计的准确性。

利用式 (2) 一式 (5) 计算各节点在各个状态下的组合系数和综合概率,最终计算结果见表 2。

4 基于 BN 的山区暴雨灾害情景推演分析

选取 2023 年四川金阳“8·21”山洪泥石流灾害进行模型验证。

4.1 事件描述

2023 年 8 月 21 日凌晨,凉山州金阳县芦稿林河流域受上游集中强降雨影响暴发山洪泥石流灾害,位于芦稿林河下游的蜀道集团沿江高速金宁一(JN1)标段项目部钢筋加工场施工人员驻地被冲毁,造成 6 人死亡、46 人失联、21 人受伤^[25]。

灾害发生前,钢筋加工场汛期违规住人。根据暴雨预警,防汛应急部门对 JN1 标段项目进行多次预警和调度。然而,由于 JN1 项目部安全负责人和值班人员存在严重侥幸心理,他们虽均确认反馈,但其实并未按照要求组织人员避险转移。灾害发生后,随着搜救核实工作的推进,调查人员发现该公司存在谎报瞒报失联人数行为,且凉山州、金阳县部分干部也存在默许纵容谎报瞒报行为^[25]。

4.2 事件推理

基于考虑应急主体心理构建山区突发暴雨灾害 BN 推理模型(图 5),利用 GeNIe 软件对灾害开展因果推理。

由图 5 可知:当四川金阳芦稿林河流域暴雨过

程风险存在时,若应急相关部门仅在降雨开始时发布气象预警及启动预案 M_1 ,在天气恶化时转移人员 M_4 ,而不采取其他应急措施以及及时关注应急主体的心理状态,那么此地发生山洪 S_7 的概率是 71%;发生滑坡、泥石流 S_8 的概率是 76%;最终出现人员伤亡严重、房屋倒塌、道路桥梁塌方等 S_9 的概率是 80%。推理结果与实际情况相符,这说明山区突发暴雨灾害 BN 模型能够有效地分析和预测山区暴雨灾害的风险,帮助应急管理人员掌握暴雨事件的全局态势,研判灾害的关键节点,从而提高应急响应措施的及时性和针对性。

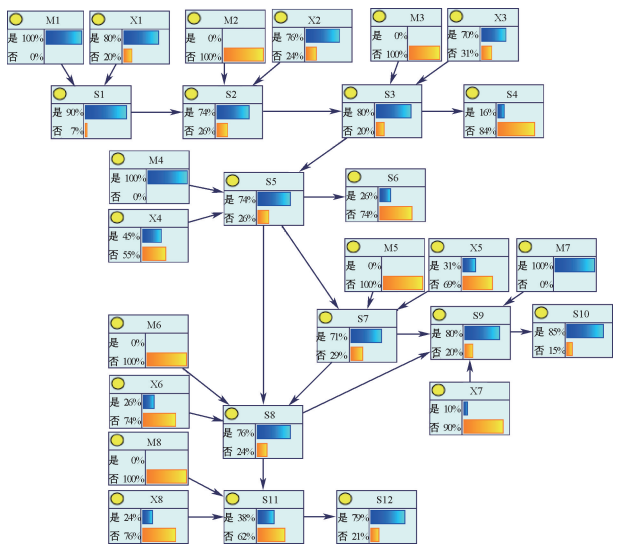


图 5 金阳“8·21”山洪泥石流灾害 BN 情景推演

Fig. 5 Scenario deduction of BN for “8·21” landslide and debris flow disaster in Jinyang, Sichuan

4.3 对比试验

首先,为验证基于博弈论的山区突发暴雨灾害 BN 情景推演模型是否具有优越性,分别将由案例分析统计法和三角模糊数法确定的 BN 节点先验概率和 CPT 更新至模型中,得到 2 个新的推演模型;接着使用它们模拟四川金阳“8·21”山洪泥石流灾害的演变过程,并对比所得结果与原始模型的结果,如图 6 所示。

由图 6 可知:基于案例分析统计法的推演模型在推演时倾向于高估灾害的发生概率;而基于三角模糊数法的推演模型则倾向于将结果集中在概率中值 50%附近,其中, S_9 的发生概率仅为 46%,推演结果与实际情况不相符。相比之下,基于博弈论的模型则展现出更好的平衡性和准确性,更真实地反映灾害事件的概率分布,具有优越性。

其次,为探究应急主体心理对突发暴雨灾害演

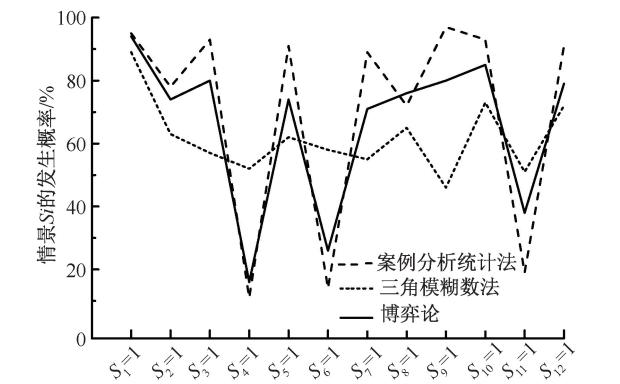


图 6 3 个模型的对比结果

Fig. 6 Comparison results of three models

化的影响,笔者从山区突发暴雨灾害 BN 推演路径中去除与心理相关的 8 个变量 ($X_1, X_2, \dots, X_n$),并采用相同的方法重新计算 BN 节点的先验概率和 CPT。随后,进行对比试验,对比结果如图 7 所示。

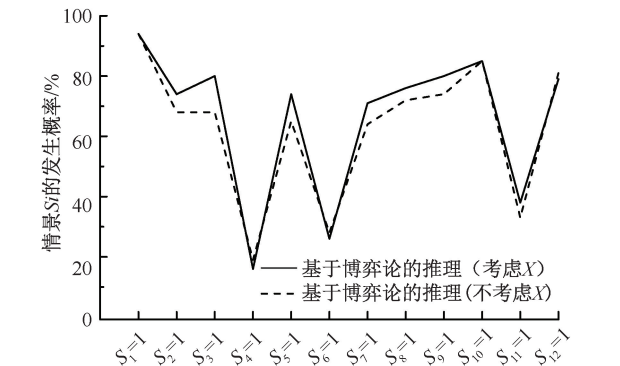


图 7 “心理因素”变量加入前后的对比结果

Fig. 7 Comparison of results before and after incorporating "psychological factors" variable

由图 7 可知:在不考虑应急主体心理时,计算出的灾害情景概率更低。其中,山洪 S_7 发生概率降低 7%;滑坡泥石流 S_8 发生概率降低 4%;出现人员伤亡、房屋倒塌、道路桥梁塌方 S_9 的概率降低 6%。这一结果表明:若忽视人在面对灾害时的心理反应,应急部门对灾害演化的预测会更为乐观。然而,这种乐观的预测会导致低估灾害的严重性和复杂性。因此,应急部门在制定应对策略时,必须考虑到人的心理对灾害响应的影响。即在灾害预警、人员疏散和资源分配等环节中,更加关注人的心理状态和行为反应,以确保措施的有效性和适应性。

5 结 论

1) 利用博弈论方法优化由案例分析统计法和三角模糊数法确定的 BN 节点概率,不仅整合了历

史灾害数据,还融入了专家的主观经验,有助于提高 BN 推理的准确性。因而,基于博弈论的山区突发暴雨灾害 BN 情景推演模型具有可行性和优越性。

2) 在山区突发暴雨灾害情景推演过程中,忽略心理因素会导致灾害风险的严重性和复杂性被低估。因此,应急管理部门在制定暴雨灾害应急策略

时应重视心理状态对预警、疏散和资源分配的影响,以增强措施的有效性和适应性。

3) 案例分析统计法依赖于历史数据的可用性和质量。如果数据不足或不准确,可能导致概率估计的偏差。在未来的研究中,应继续收集和分析历史灾害数据,改进数据处理方法,以进一步提高基于案例的概率估计的准确性。

参 考 文 献

- [1] 钟气. 建立气候风险早期预警系统, 科学应对极端天气气候事件[J]. 生命与灾害, 2024 (7): 14-17.
- [2] 李哲, 夏中原, 兰光宇, 等. 汨水河洪涝风险模拟及灾害防控评价[J]. 自然灾害学报, 2024, 33 (3): 56-66.
LI Zhe, XIA Zhongyuan, LAN Guangyu, et al. Flood risk simulation and disaster prevention and control evaluation of Sishui river[J]. Journal of Natural Disasters, 2024, 33(3): 56-66.
- [3] 聚焦防汛抗旱|强降雨导致广东省平远县 38 人死亡 2 人失联[EB/OL]. (2024-06-21). <http://www.news.cn/local/20240621/322d5dc4c7a94edeb41c75ed6af4d50f/c.html>.
- [4] 中央广电总台央视新闻. 丹宁高速水阳段桥梁垮塌灾害调查评估报告公布 43 名公职人员被问责[EB/OL]. (2025-03-27). <https://news.cri.cn/20250327/a1a2611e-6525-aa01-4922-f21c2c7fba20.html>.
- [5] 多方力量紧急驰援 贵州大方果瓦乡山体滑坡救援持续进行[EB/OL]. (2025-05-23). https://gz.cnr.cn/jiaodiantu/20250523/t20250523_527183121.shtml.
- [6] BAI Chengzu, ZHANG Ren, ZHANG Jianqi, et al. Risk assessment of typhoon storm surge disasters in Guangdong province based on the improved fuzzy Bayesian network[C]. Proceedings of the 7th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention, 2016: 217-223.
- [7] 张润川, 林广发, 周星辰, 等. 基于动态贝叶斯网络的福建省台风暴雨灾害链预测推理[J]. 亚热带资源与环境学报, 2023, 18 (1): 17-25.
ZHANG Runchuan, LIN Guangfa, ZHOU Xingchen, et al. Prediction and inference of typhoon rainstorm disaster chains in Fujian province based on dynamic Bayesian network[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2023, 18(1): 17-25.
- [8] 李浩, 李惠. 基于模糊多态贝叶斯网络的山岭隧道塌方风险预测[J]. 项目管理技术, 2023, 21 (10): 54-60.
LI Hao, LI Hui. Risk prediction of mountain tunnel collapse based on fuzzy polymorphic Bayesian network[J]. Project Management Technology, 2023, 21 (10): 54-60.
- [9] 朱庆, 郑威鹏, 吴浩宇, 等. 基于模糊贝叶斯网络的隧道围岩富水破碎风险三维分析方法[J]. 西南交通大学学报, 2025, 60(5): 1 071-1 079.
ZHU Qing, ZHENG Weipeng, WU Haoyu, et al. Three-dimensional analysis method for water-rich and broken risk in tunnel surrounding rock using fuzzy Bayesian network[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2025, 60(5): 1 071-1 079.
- [10] XIE Xiaoliang, HUANG Linglu, MARSON S M, et al. Emergency response process for sudden rainstorm and flooding: scenario deduction and Bayesian network analysis using evidence theory and knowledge meta-theory[J]. Natural Hazards, 2023, 117 (3): 3 307-3 329.
- [11] 王喆, 孔维磊, 方丹辉, 等. 基于贝叶斯网络的城镇洪涝应急情景推演研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(6): 182-188.
WANG Zhe, KONG Weilei, FANG Danhui, et al. Research on urban flood and waterlog emergency scenario deduction based on Bayesian network[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(6): 182-188.
- [12] 任永存, 张韧, 张永生, 等. 基于贝叶斯网络的“郑州暴雨地铁灾害事件”情景分析与仿真推演[J]. 大气科学学报, 2023, 46 (6): 904-916.
REN Yongcun, ZHANG Ren, ZHANG Yongsheng, et al. Scenario analysis and simulation deduction of the "Zhengzhou

rainstorm subway disaster event" based on Bayesian network[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023, 46(6): 904-916.

[13] 王治莹, 聂慧芳, 赵宏丽. 考虑决策者情绪更新机制的多阶段应急决策方法[J]. 控制与决策, 2020, 35 (2): 436-444.

WANG Zhiying, NIE Huifang, ZHAO Hongli. Multi-stage emergency decision-making method with emotion updating mechanism of decision-makers[J]. Control and Decision, 2020, 35 (2): 436-444.

[14] TANG Lan, ZHOU Jiawen, ZHOU Langyu, et al. Exploring the effects of perception factors on evacuation intentions of residents [J]. Journal of Mountain Science, 2025, 22 (2): 1-19.

[15] 晋泽倩, 俞诚成. 混合效用和后悔规则下的洪涝交通疏散决策行为研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2025, 25(2): 16-25.

JIN Zeqian, YU Chengcheng. Flood evacuation decision-making behavior under hybrid utility and regret rules [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2025, 25(2): 16-25.

[16] 霍非舟, 范丹丹, 刘昶, 等. 考虑结伴行为与情绪感染的人员疏散模型[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33 (11): 126-132.

HUO Feizhou, FAN Dandan, LIU Chang, et al. Study on evacuation model considering companion behavior and emotion contagion[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(11): 126-132.

[17] YE Ran, XU Shuangyan, LIU Juan, et al. Investigation and simulation of non-adaptive psychology of crowd evacuation under toxic gas leakage accident in chemical park[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2023, 85: DOI:10.1016/j.jlp.2023.105160.

[18] 耿增显, 陈俊宇. 基于模糊贝叶斯网络的低空无人机运行风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34 (8): 53-60.

GENG Zengxian, CHEN Junyu. Risk assessment of low-altitude unmanned aerial vehicle operation based on fuzzy Bayesian network[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(8): 53-60.

[19] RADERMACHER J F. Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference (judea pearl) [J]. SIAM Review, 2006,32 (4): 704-707.

[20] 李郎达. 模糊理论在信息检索上的应用[J]. 情报科学, 2004, 22(3): 343-345.

LI Langda. Application of fuzzy theory in information retrieval[J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2004, 22(3): 343-345.

[21] 林志军, 李敏, 贺珊, 等. 基于博弈论-贝叶斯网络的煤矿瓦斯爆炸风险评估[J]. 煤炭学报, 2024, 49 (8): 3 484-3 497.

LIN Zhiyun, LI Min, HE Shan, et al. Risk assessment of gas explosion in coal mines based on game theory and Bayesian network[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(8): 3 484-3 497.

[22] 张江石, 冯娜娜. 基于动态贝叶斯网络情景推演的危化品事故应急处置研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20 (4): 1 420-1 426.

ZHANG Jiangshi, FENG Na'na. On the emergency disposal of the hazardous chemical accidents based on the dynamic Bayesian network scenario deduction[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(4): 1 420-1 426.

[23] 宋英华, 刘子奇, 刘丹, 等. 基于模糊贝叶斯网络的化工园区火灾爆炸事故情景推演[J]. 安全与环境工程, 2022, 29 (3): 86-93.

SONG Yinghua, LIU Ziqi, LIU Dan, et al. Scenario deduction of fire and explosion accidents in chemical industry parks based on fuzzy Bayesian network[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29 (3): 86-93.

[24] 李博文, 张印, 杨芳, 等. 基于复杂网络模型的广州市增城区洪涝灾害风险评估[J]. 人民珠江, 2023, 44 (10): 47-53.

LI Bowen, ZHANG Yin, YANG Fang, et al. Flood risk assessment for Zengcheng district of Guangzhou city based on complex network models[J]. Pearl River, 2023, 44 (10): 47-53.

[25] 凉山州金阳县“8·21”山洪灾害调查评估报告公布[N]. 四川日报, 2024-02-06(001).

作者简介： 方丹辉 （1976—）,女,湖北荆门人,博士,副教授,主要从事应急管理、情景推演、公共安全等方面的研究。E-mail:2871926@qq.com。