

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

任永存^①, 张韧^{①*}, 张永生^②, 孙涵^②, 李明^①, 刘泉宏^①, 许婧^①

① 国防科技大学 气象海洋学院, 湖南 长沙 410000;

② 航天新气象数字减灾研究院, 北京 100000

* 联系人, E-mail: haitian_style@163.com

2022-10-13 收稿, 2023-01-10 接受

国家自然科学基金资助项目(41976188); 湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ40669)

摘要 2021 年 7 月 20 日河南郑州特大暴雨造成的地铁突发灾害是近年来为数不多的城市重大人员伤亡事件。该事件产生既有暴雨强烈、事故突发等客观原因, 也包含风险意识淡薄、应急机制不健全等主观因素。本文首先遴选“郑州暴雨地铁灾害事件”演化的主要情景要素, 采用情景分析法构建了该事件情景演化流程。在此基础上, 基于贝叶斯网络构建了“郑州暴雨地铁灾害事件”情景推演模型。采用专家打分法计算网络节点的条件概率, 利用 Netica 软件推算出灾害情景节点状态概率。最后, 通过调试特定节点先验概率, 开展不同暴雨灾害等级、应急响应行动、周围环境状态情况下人员死亡和地铁受损害的概率评估与情景推演, 旨在总结经验、查找漏洞, 为应对和防范“郑州暴雨地铁灾害”类似事件提供风险防范和响应对策参考。

关键词

郑州暴雨地铁
灾害事件;
情景分析;
贝叶斯网络;
灾害概率评估

近年来, 受全球气候变暖的影响, 暴雨洪涝灾害和强对流天气发生频率明显增高。在这样的背景下, 随着城市化进程的加速, 城市自然水文条件发生了明显的改变, 城市区域下垫面不透水比例增加, 在城市排水设施不畅的情况下, 遭遇短时强降水影响, 更易引起城市内涝, 甚至人员伤亡(张炜等, 2012)。特别是 21 世纪以来, 许多大城市的观测站均出现了突破历史极值的暴雨事件(严昇, 2015), 出现在大城市的致洪暴雨造成的灾害往往更严重。2012 年 7 月 21 日, 北京及其周边地区遭遇 1949 年以来最强降雨过程, 局部降雨量接近 500 年一遇, 导致严重城市洪涝灾害, 造成大量房屋倒塌、人员伤亡(湛芸等, 2012)。2016 年 7 月, 我国南方大部地区遭遇特大暴雨洪涝事件, 武汉遭受损失最为严重(张正涛等, 2020)。2016 年, 南京市内发生多次持续时间长的强降雨, 主要河湖水位均超历史纪录, 对流域居民生命财产等造成巨大的损失(吴玉明和杨红卫, 2016)。2021 年 7 月 17 日至 23 日, 河南省遭遇了历史罕见的特大暴雨, 发生

了严重洪涝灾害, 造成了重大人员伤亡和财产损失。围绕此次河南“7.20”暴雨灾害, 相继开展了区域模式预报(史文茹等, 2021)、多模式预报性能评估(栗晗等, 2022)和降水微物理特征分析(郭换换和王坤, 2023)等诸多研究。由此可见, 暴雨洪涝灾害已经成为一个非常突出的社会问题, 必须重视起来。

近年来, 城市洪涝与防灾减灾日益受到国内外广泛关注 and 高度重视, 针对暴雨引起的城市洪涝灾害的风险评估和应急响应等也成为亟待开展研究的重要问题。现有大多数研究主要集中在基于历史灾情数理统计(缪启龙等, 2012)、RS(遥感技术)和 ArcGIS 技术(殷杰等, 2009)、情景模拟方法(López-Valencia, 2019)、指标体系评估方法(叶瑞峰等, 2022)等方法进行暴雨内涝灾害风险评价, 进而开展暴雨洪涝灾害应急预案生成(丁继勇等, 2015)以及应急处置决策(侯雷, 2015)。然而, 针对暴雨洪涝灾害评估研究还不够全面, 现有研究并未细致全面剖析暴雨洪涝灾害事件的演化发展过程, 没有将应急响应行动统一到暴雨洪

引用格式: 任永存, 张韧, 张永生, 等, 2023. 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, 46(6): 904-916.

Ren Y C, Zhang R, Zhang Y S, et al., 2023. Scenario analysis and simulation deduction of the “Zhengzhou Rainstorm Subway Disaster Event” based on Bayesian network[J]. Trans Atmos Sci, 46(6): 904-916. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20221013001. (in Chinese).

涝灾害演化发展过程中去,没有明确得出应急响应行动在暴雨洪涝灾害发展过程中所起的作用,只是定性地给出应急响应行动的重要性,因而不能更好地指导政府部门开展应急响应行动。

针对暴雨洪涝灾害的高度不确定性和信息不完备性,传统的“准备—响应”灾害响应策略并不是成功预测和应对暴雨洪涝灾害的良好选择,亟需开展新的建模方法研究。本文以“郑州暴雨地铁灾害事件”为研究对象,进行“郑州暴雨地铁灾害事件”情景分析与仿真推演建模,在事件情景演化路径分析的基础上,利用贝叶斯网络构建“郑州暴雨地铁灾害事件”情景演化贝叶斯网络,通过网络结构构建、网络节点变量概率分配、网络概率推理,开展“郑州暴雨地铁灾害事件”情景回溯、态势推演,旨在为应对和处置类似突发事件提供风险防范和对策参考。

1 资料与方法

1.1 资料来源

本文关于此次灾害事件的信息来源于 2022 年 1 月国务院灾害调查组公布的《河南郑州“7.20”特大暴雨灾害调查报告》(简称为《调查报告》)。《调查报告》由国务院牵头组织调查编写,详细描述了河南郑州“7.20”特大暴雨灾害经过以及各方的应对措施,权威性、可信度都非常高,是研究河南郑州“7.20”特大暴雨灾害极为重要的资料。本文研究对象是“郑州暴雨地铁灾害事件”,参考资料包含报告中描述这次暴雨灾害严重程度的文字和数据资料以及原报告中“郑州地铁 5 号线亡人事件”调查内容(包括文字和数据资料)。

1.2 研究方法

1.2.1 情景分析

情景(Scenario)一词最早出现于 1967 年,情景分析是对未来情景的描述,是事件从原始状态向未来转变的趋势(Ritchie-Calder, 1968)。基于“情景”的“情景分析法”(Scenario Analysis)是在对经济、产业或技术的重大演变提出各种关键假设的基础上,通过对未来进行详细的、严密的推理和描述来构想未来各种可能的方案。根据情景的概念,情景分析被认为是创造一系列可能的未来“故事”的研究过程。情景分析方法最初是作为一种定性方法来运用的,目前已有多种定量方法与情景分析相结合。情景分析的主要操作步骤(Punjabi, 2015)如下:1)识别系统的驱动力。情景分析的第一步是识别系统的驱动力,驱动力是实现对系统全面理解的主要因素。2)将驱动力分为两类,

即可能趋势和不确定性。驱动力的分类也基于专家判断,系统的不确定性在后续情景推断中起着重要的作用。3)根据不确定的结果拟订设想。情景分析最后一步是建立情景贝叶斯网络,并根据专家访谈收集的信息对其进行改进。此方法首先应用于军事战略规划,现已成功应用于许多领域,如环境(Tourki et al., 2013)和经济学(Ehlen and Vargas, 2013)。近年来,情景分析的思想也被应用于应急策略和灾害风险的评估(Lü et al., 2013)。

1.2.2 贝叶斯网络

贝叶斯网络是由 Pearl 在 1988 年提出的一种基于网络结构的有向无环图描述,是基于概率分析和图论的推理模型(Hasman, 1991)。从概念上讲,贝叶斯网络由拓扑结构和概率分布两部分构成。

在结构方面,贝叶斯网络包含父节点、子节点两种节点。如图 1 所示,A 为 B、C 的父节点(B、C 为 A 的子节点),B、C 为 D 的父节点(D 为 B、C 的子节点)。父节点、子节点加上连接两者之间的有向边构成贝叶斯网络的基本结构,有向边表示要素之间的因果关系。

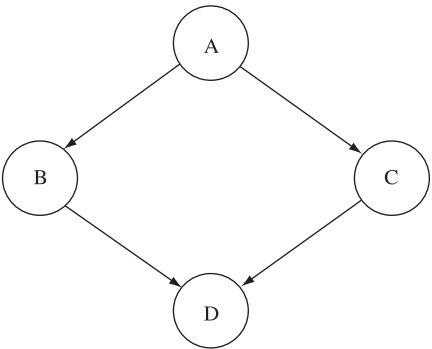


图 1 贝叶斯网络示意图
Fig.1 Bayesian network diagram

在概率方面,分为先验概率和条件概率。先验概率计算基于先前资料和专家意见等。条件概率是集合多种统计方法得出的,如 D-S 证据理论(Gong and Wang, 2014)和 Delphi 法(任春华和孙林夫, 2019)。条件独立假设和马尔科夫性质可以极大简化联合概率的计算,贝叶斯网络的联合概率分布可表示为边缘概率和条件概率的乘积,即:

$$P(S_1, S_2, \dots, S_n) = \prod_{i=1}^n P(S_i / Pa(S_i)) \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$
(1)

其中: $\{S = S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 表示一组变量,由贝叶斯网络的节点 S_i 组成; $Pa(S_i)$ 为节点 S_i 的父节点,条件独立性关系使得联合概率的表达更简洁。

贝叶斯网络的建模方法大致可分为专家建模、数据学习建模、专家知识与样本数据结合建模。

贝叶斯网络是预测推理的有效技术途径。用贝叶斯网络进行预测推理的计算过程依赖于条件概率表,该表通常从统计数据中获得或通过专家意见收集。以 D 为例,假设图 1 中每个节点有两种状态,则 D 的条件概率表如表 1 所示。

表 1 图 1 中 D 的条件概率表示例

Table 1 Example of conditional probability table for D in Fig.1

B	状态 1		状态 2	
	状态 1	状态 2	状态 1	状态 2
C	状态 1	0.7	0.8	0.75
	状态 2	0.3	0.2	0.25
D	状态 1	0.7	0.8	0.75
	状态 2	0.3	0.2	0.25

在此情况下,B 和 C 的概率可通过条件概率表计算。通过设置 A 的状态,D 的概率为:

$$P(D|A) = P(D|C, B) P(C|A) P(B|A)$$

式中: $P(B|A)$ 和 $P(C|A)$ 在其条件概率表中给出。各情景状态概率借助计算软件 Netica 计算出。Netica 是基于决策理论的、图形化的建模开发工具,能够方便地进行贝叶斯网络拓扑建模,并能够进行先验概率的初始赋值以及后验状态概率的计算,进而根据贝叶斯网络的有向无环拓扑结构的特点,进行知识传递与积累,具有适用性强、可视化操作的特点(刘春生等,2017)。

1.2.3 D-S 证据理论

Dempster-Shafer 证据方法定义了一个辨别框架 θ 和质量函数。质量函数需要满足以下条件:

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0; \\ \sum_{A \subseteq \theta} m(A) = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Dempster-Shafer 证据的综合规则如下式所示:

$$m(A) = \begin{cases} \frac{1}{1-K} \sum_{A_1 \cap A_2 \cdots \cap A_N = A} m_1(A_1) m_2(A_2) \cdots m_N(A_N), & A \neq \emptyset; \\ 0, & A = \emptyset. \end{cases} \quad (3)$$

在这里, $m_1, m_2, \dots, m_N$ 是基于从同一识别框架 θ 中的一组信息源中获得的信息形成的质量函数,A 是事件的状态,K 表示 $m_1, m_2, \dots, m_N$ 之间的冲突程度,K 的计算如下:

$$K = \sum_{A_1 \cap A_2 \cdots \cap A_N = \emptyset} m_1(A_1) m_2(A_2) \cdots m_N(A_N) = 1 - \sum_{A_1 \cap A_2 \cdots \cap A_N \neq \emptyset} m_1(A_1) m_2(A_2) \cdots m_N(A_N). \quad (4)$$

2 “郑州暴雨地铁灾害事件”情景分析与建模

“郑州暴雨地铁灾害事件”情景贝叶斯网络构建分为 3 个步骤,描述如下:

1)明确贝叶斯网络节点:根据案例研究和专家判断,确定贝叶斯网络节点变量及其状态分类。借鉴情景分析思想,确定了 13 个关键情景要素(贝叶斯网络变量):“暴雨”“城市内涝”“洪水灌入地铁隧道”“人员被困”“城市道路基础设施”“周围环境”“加强检查巡视,隐患排查”“排水”“发布预警,引导人员”“疏散救援”“修复地铁”“人员死亡”“地铁受损害”。

2)明确贝叶斯网络节点之间的关系:结合先前过程已经得到的具体节点变量,进一步对各个节点变量之间的关联性进行确定,利用专家打分法结合 D-S 证据理论确定具有因果关系的情景要素对,完成贝叶斯网络结构的确定。

3)确定所有节点的条件概率:在这一步,利用专家打分法确定叶斯网络节点的条件概率。

完成以上步骤后,就可以使用贝叶斯网络进行预测推理分析了。“郑州暴雨地铁灾害事件”情景贝叶斯网络构建及过程推理分析步骤如图 2 所示。

2.1 情景分析

通过对我国典型暴雨灾害事件的案例研究和综合分析,以及参考《调查报告》,从中提取了 13 个情景要素作为“郑州暴雨地铁灾害事件”情景贝叶斯网络的节点变量。并将这 13 个情景要素分为 4 类,即“突发事件”“危险因素”“应急响应行为”“造成后果”(范维澄等,2009)。各情景要素的分类如表 2 所示。

全部 13 个情景要素状态分类具体介绍如下。

2.1.1 突发事件

“突发事件”要素描述最初的暴雨灾害事件发展到该时刻对物或人造成的影响。

1)暴雨:暴雨节点设置暴雨、大暴雨、特大暴雨 3 级状态。按中国气象局颁布的降水强度等级划分标准,按照满足 24 h 累计降雨量条件确定,3 级状态的阈值范围分别为 $[50.0, 100.0)$ mm、 $[100.0, 250.0)$ mm、 $[250.0, \infty)$ mm。

2)城市内涝:“城市内涝”设置低风险、中风险、高风险 3 个等级状态。参照宗旻(2020),按最大积水深度,3 级状态的阈值范围分别为 $[15.0, 27.0)$ cm、 $[27.0, 50.0)$ cm、 $[50.0, \infty)$ cm。

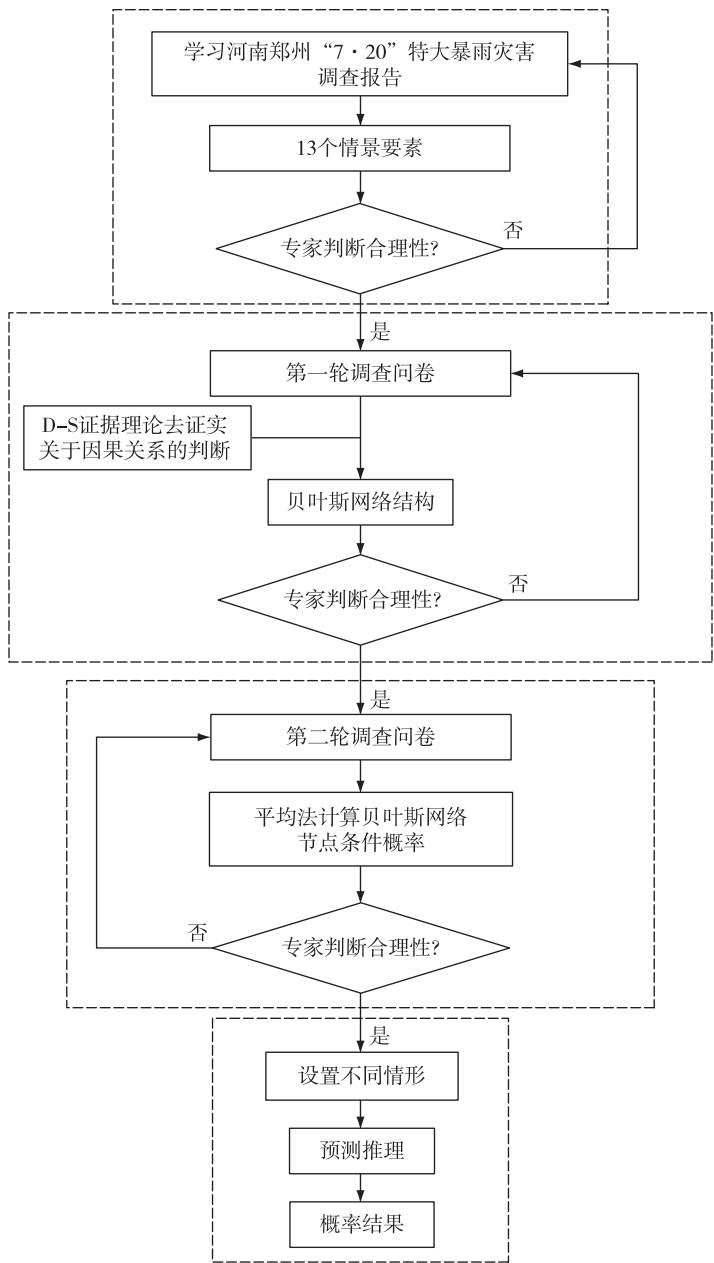


图2 概率评估与推演步骤
Fig.2 Probability assessment and deduction steps

3)洪水灌入地铁隧道:按洪水涌入量以及涌入流速设置2个等级状态:低风险;高风险。

4)人员被困:中国地铁一趟列车平均上座量约为900人,本文据此设置为3个状态:少,[1,450)人;中,[450,900)人;多,[900,∞)人。

2.1.2 危险因素

“危险因素”包括承载体和孕灾环境两部分,承载体本身存在风险性,孕灾环境本身会让事件更加恶化。

1)城市道路基础设施:郑州市内涝防治标准

是50年一遇,对应的降雨量折算到最大一小时为83.0mm,百年一遇一小时降雨量为92.0mm(王家卓,2021)。《郑州市加强防洪防涝系统规划编制工作实施方案》提到,郑州市5年一遇防洪标准为小时降雨量50.3mm。以上述3个数据为临界点,设置3个状态:风险,[50.3,83.0)mm/h;大风风险,[83.0,92.0)mm/h;特大风险,[92.0,∞)mm/h。

2)周围环境:“周围环境”分为两个状态:低风险;高风险。

表 2 情景要素集的状态
Table 2 Status of the scenario element set

要素类型	要素(贝叶斯网络节点变量)	要素状态
突发事件	暴雨	①暴雨:[50.0,100.0) mm/(24 h) ②大暴雨:[100.0,250.0) mm/(24 h) ③特大暴雨:[250.0,∞) mm/(24 h)
	城市内涝	①低风险:27.0 cm>h≥15.0 cm ②中风险:50.0 cm>h≥27.0 cm ③高风险:h≥50.0 cm
	洪水灌入地铁隧道	①低风险 ②高风险
	人员被困	①少:[1,450) 人 ②中:[450,900) 人 ③多:[900,∞) 人
危险因素	城市道路基础设施	①风险:[50.3,83.0) mm/h ②大风险:[83.0,92.0) mm/h ③特大风险:[92.0,∞) mm/h
	周围环境	①低风险 ②高风险
	加强检查巡视,隐患排查	①开展 ②未开展
应急响应活动	排水	①开展 ②未开展
	发布预警,引导人员	①开展 ②未开展
	疏散救援	①开展 ②未开展
	修复地铁	①开展 ②未开展
	人员死亡	①一般:[1,3) 人 ②较大:[3,10) 人 ③重大:[10,30) 人 ④特别重大:[30,∞) 人
造成后果	地铁受损害	①一般 ②严重

2. 1. 3 应急响应行动

“应急响应行动”分为预防性措施和处置性措施,有效的应急响应行动能让事件朝好的方向发展。

1)加强检查巡视,隐患排查:状态分为开展、未开展两类。

2)排水:状态分为开展、未开展两类。

3)发布预警,引导人员:状态分为开展、未开展两类。

4)疏散救援:状态分为开展、未开展两类。

5)修复地铁:状态分为开展、未开展两类。

2. 1. 4 造成后果

1)人员死亡:《生产安全事故报告和调查处理

条例》第三条规定,造成 30 人以上死亡界定为特别重大事故,造成 10 人以上 30 人以下死亡界定为重大事故,造成 3 人以上 10 人以下死亡界定为较大事故,造成 3 人以下死亡界定为一般事故。“人员死亡”要素也据此分为 4 个状态:一般,[1,3)人;较大,[3,10)人;重大,[10,30)人;特别重大,[30,∞)人。

2)地铁受损害:“地铁受损害”分为两个状态:一般;严重。

2.2 贝叶斯网络结构构建

为建立合理的贝叶斯网络,通过问卷调查收集了专家的专业判断和意见。在 Delphi 的类似专家评估方法中,如果有 10 到 20 个情景元素,建议寻求 3 到 5 位专家的建议或判断 (Bañuls et al., 2013)。本文进行了两轮问卷调查,每轮收集来自 5 位专家的专业判断。第一轮是判断 4 类 13 个情景元素之间的关联性,要求 5 位专家给出概率评估发放问卷中 4 类 13 个要素中每两个情景要素(共 78 对情景要素)之间的因果关系。为降低专家意见的主观性,采用 Dempster-Shafer 证据理论对收集到的数据进行分析。如果因果关系值大于阈值(通常定义为 0.85),则确认这两个要素之间存在因果关系。表 3 给出了判断“暴雨”节点和“城市内涝”节点以及“洪水灌入地铁隧道”节点和“人员被困”节点因果关系

表 3 表征情景元素因果关系的专家判断数据及其最终加权结果

Table 3 Multi-expert judgment data and final weighted results representing causal relationships between scenario elements

因果关系要素		专家判断					计算结果
		$m_1(1,2)$	$m_2(1,2)$	$m_3(1,2)$	$m_4(1,2)$	$m_5(1,2)$	$m(T)$
暴雨	城市内涝	(0.7,0.3)	(0.8,0.2)	(0.8,0.2)	(0.6,0.4)	(0.9,0.1)	0.998
洪水灌入 地铁隧道	人员被困	(0.6,0.4)	(0.6,0.4)	(0.8,0.2)	(0.6,0.4)	(0.8,0.2)	0.982

在对专家的所有判断数据收集并进行计算后,确定 13 个情景要素每两个情景要素之间的因果关系值,取因果关系值大于阈值(0.85)的情节要素对,构建因果关系网络,即“郑州暴雨地铁灾害事件”情景贝叶斯网络,如图 3 所示,其中,圆形代表“突发事件”要素,矩形代表“危险因素”要素,六边形代表“应急响应行动”要素,菱形代表“造成后果”要素。

2.3 贝叶斯网络节点条件概率的确定

为了进行情景推演,需要进行第二轮问卷调

过程中专家的打分数据及其最终加权结果。

以运用 Dempster-Shafer 法分析“暴雨”节点与“城市内涝”节点的因果关系以及“洪水灌入地铁隧道”与“人员被困”节点的因果关系为例。5 位专家分别给出了判断概率数据,如表 3 所示。 $m_1(1,2),\dots,m_5(1,2)$ 分别代表 5 位专家给出的概率分布。 $m_1(1,2)$ 的值为 (0.7,0.3),表示第一个专家认为“暴雨”节点对“城市内涝”节点有很大影响,因此他给出“暴雨”节点与“城市内涝”节点之间的因果关系概率为 0.7,不存在因果关系的概率为 0.3。基于式(3)和式(4),表征“暴雨”节点与“城市内涝”节点因果关系的多专家判断数据加权结果计算如下:

$$K=m_1(A_1) m_2(A_1) m_3(A_1) m_4(A_1) m_5(A_1) + m_1(A_2) m_2(A_2) m_3(A_2) m_4(A_2) m_5(A_2) = 0.024, \\ m(A_1) = \frac{1}{K} m_1(A_1) m_2(A_1) m_3(A_1) m_4(A_1) m_5(A_1) = 0.998.$$

表 3 中,由于“暴雨”节点与“城市内涝”节点的因果关系值计算结果为 0.998,大于阈值(0.85),因此“暴雨”节点与“城市内涝”节点之间存在因果关系。同理,“洪水灌入地铁隧道”节点与“人员被困”节点之间因果关系值计算结果为 0.982,大于阈值(0.85),因此,“洪水灌入地铁隧道”节点与“人员被困”节点之间也存在因果关系。

查以确定贝叶斯网络节点的条件概率。图 3 中有 3 种类型的节点。第一类是如“暴雨”和“排水”节点,没有父节点,需要专家根据专业经验给出先验概率。第二类节点是如“人员死亡”节点,没有子节点。第三类是如“城市内涝”节点既有父节点又有子节点。在第二轮问卷中,收集专家对贝叶斯网络各节点的条件概率的判断,然后采用平均法对结果进行处理,表 4 显示了“地铁受损害”节点概率问卷结果和最终条件概率计算结果。

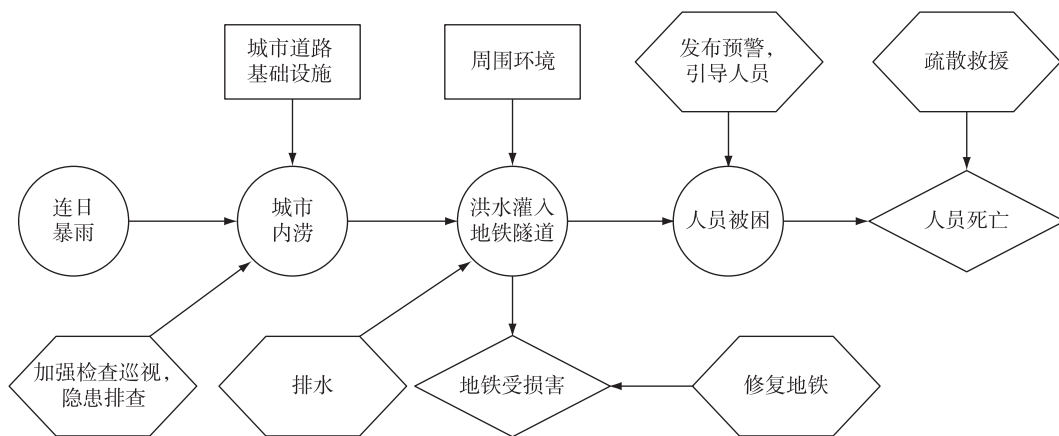


图3 “郑州暴雨地铁灾害事件”的贝叶斯网络结构

Fig.3 Bayesian network of the “Zhengzhou Rainstorm Subway Disaster Event”

表4 “地铁受损害”节点概率问卷结果和最终条件概率计算结果

Table 4 Results of the probability questionnaire and final conditional probability calculation for “Subway damage” nodes

节点		专家意见					计算结果
洪水灌入 地铁隧道	修复地铁	$m_1(1,2)$	$m_2(1,2)$	$m_3(1,2)$	$m_4(1,2)$	$m_5(1,2)$	$m(T)$
低风险	开展	0.7,0.3	0.8,0.2	0.75,0.25	0.7,0.3	0.8,0.2	0.75,0.25
低风险	未开展	0.55,0.45	0.6,0.4	0.6,0.4	0.55,0.45	0.6,0.4	0.58,0.42
高风险	开展	0.4,0.6	0.4,0.6	0.45,0.55	0.4,0.6	0.4,0.6	0.41,0.59
高风险	未开展	0.3,0.7	0.2,0.8	0.25,0.75	0.3,0.7	0.2,0.8	0.25,0.75

表4中, $m_1(1,2), \dots, m_5(1,2)$ 分别代表从5位专家那里收集到的概率。 $m(T)$ 表示使用平均法对从5位专家那里收集到的判断概率的再处理结果。例如,在“洪水灌入地铁隧道”节点状态为低风险且“修复地铁”节点状态为开展的情况下,5位专家给出了“地铁受损害”节点两种状态(一般;严重)的概率分布如表4第一行所示。 $m_1(1,2)$ 给定值(0.7, 0.3)表示在“洪水灌入地铁隧道”节点状态为低风险且“修复地铁”节点状态为开展的情况下,“地铁受损害”节点的第一状态(一般)的概率要大得多;因此给第一个状态的概率为0.7,给第二个状态的概率为0.3。用平均法对5位专家的判断进行处理后,最终得到第一状态“一般”出现的概率为0.75,第二状态“严重”出现的概率为0.25。

3 “郑州暴雨地铁灾害事件”情景推演与实验仿真

3.1 复盘推演

在构建了“郑州暴雨地铁灾害事件”贝叶斯网络结构和确定了节点的条件概率后,基于本文对贝

叶斯网络的描述,则贝叶斯网络的两个组成部分就都确定了,下面要构建完整的“郑州暴雨地铁灾害事件”情景贝叶斯网络。前述在介绍贝叶斯网络时提到,可用Netica软件来进行贝叶斯网络的推理运算,即Netica软件不仅可以体现贝叶斯网络结构,也可以体现概率的推理计算过程,非常适用于本文研究内容。如图4所示,这是Netica软件界面截图,是将图3的网络结构和节点条件概率结合起来的产物,数字代表节点状态概率;图中共有13个情景要素,即13个节点,每个节点为一个小方块,方块之间用带箭头的直线连接,代表了节点之间的因果关系,这样,贝叶斯网络结构就构建起来了,然后将节点条件概率输入到小方块中,完整的贝叶斯网络就得到了构建。

“郑州暴雨地铁灾害事件”贝叶斯网络节点先验概率由专家根据事件本身情况直接给定,具体解释如表5所示。将确定的上述节点先验概率输入到对应小方块中,借助Netica软件自动推理计算得出“郑州暴雨地铁灾害事件”贝叶斯网络各节点变量的状态概率。

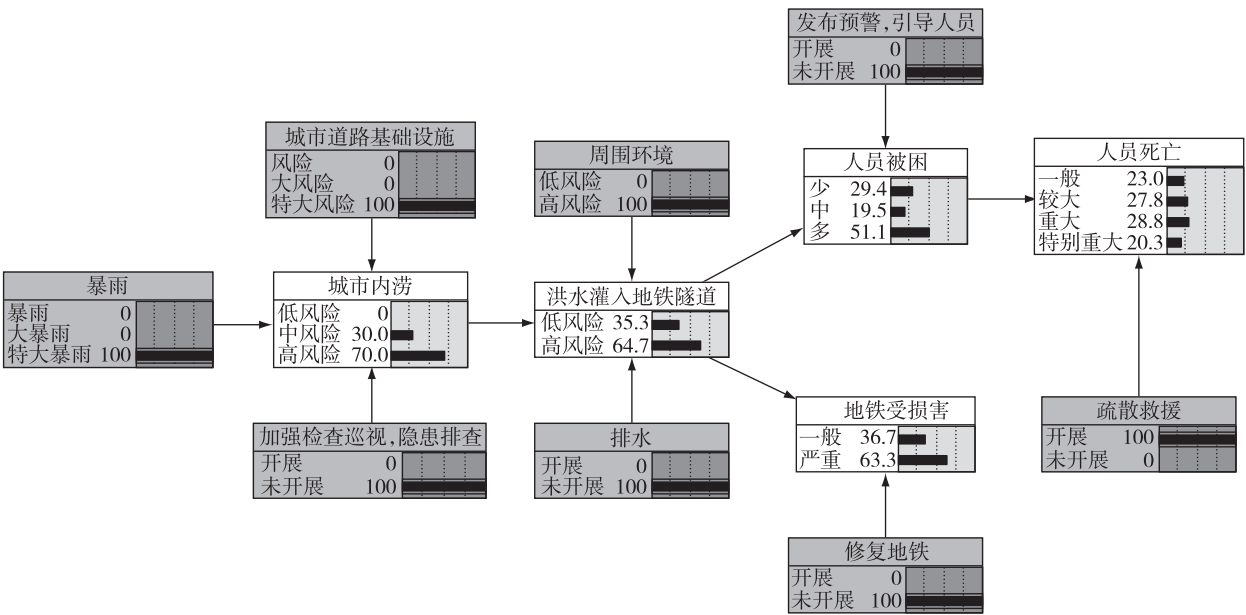


图 4 “郑州暴雨地铁灾害事件”状态概率结果图

Fig.4 Schematic diagram of state probability calculation for the “Zhengzhou Rainstorm Subway Disaster Event”

表 5 “郑州暴雨地铁灾害事件”贝叶斯网络节点先验概率表

Table 5 Prior probability table of Bayesian network nodes in the “Zhengzhou Rainstorm Subway Disaster Event”

要素(贝叶斯网络节点变量)	要素状态	先验概率/%	解释
暴雨	①暴雨:[50.0,100.0) mm/(24 h)	(0,0,100)	20日郑州国家气象站出现最大日降雨量624.1 mm,状态评估为特大暴雨。
	②大暴雨:[100.0,250.0) mm/(24 h)		
	③特大暴雨:[250.0,∞) mm/(24 h)		
城市道路基础设施	①风险:[50.3,83.0) mm/h	(0,0,100)	郑州“7·20”特大暴雨灾害 16 时至 17 时出现 201.9 mm 的极端小时雨强,因此状态评估为特大风险。
	②大风险:[83.0,92.0) mm/h		
	③特大风险:[92.0,∞) mm/h		
周围环境	①低风险	(0,100)	在此次事件中,“停车场处于较深的低洼地带”“停车场挡水围墙质量不合格”“五龙口停车场附近明沟排涝功能严重受损”,因此状态评估为高风险。
	②高风险		
加强检查巡视,隐患排查	①开展	(0,100)	“郑州地铁集团有限公司未按有关预案要求加强检查巡视,对运营线路淹水倒灌隐患排查不到位”,因此,状态评估为未开展。
	②未开展		
排水	①开展	(0,100)	“五龙口停车场附近明沟排涝功能严重受损”,因此,状态评估为未开展。
	②未开展		
发布预警,引导人员	①开展	(0,100)	“应对处置不力,未及时采取预警响应行动”,状态评估为未开展。
	②未开展		
疏散救援	①开展	(100,0)	“经疏散救援”,状态评估为开展。
	②未开展		
修复地铁	①开展	(0,100)	“行车指挥调度失误”,状态评估为未开展。
	②未开展		

图 4 展示了“郑州暴雨地铁灾害事件”情景演化情况:在“暴雨”等级为“特大暴雨”、“城市道路基础设施”为“特大风险”、“加强检查巡视,隐患排查”

状态为“未开展”时,“城市内涝”的“低风险”概率为 0、“中风险”概率为“30%”、“高风险”概率为 70%;在“城市内涝”的“低风险”概率为 0、“中风险”

险”概率为“30%”、“高风险”概率为 70%，“排水”状态为“未开展”，“周围环境”状态为“高风险”时，“洪水涌入地铁隧道”的“低风险”概率为 35.3%、“高风险”概率为“64.7%”；在“洪水涌入地铁隧道”的“低风险”概率为 35.3%、“高风险”概率为 64.7%，“修复地铁”状态为“未开展”时，“地铁受损害”的“一般”概率为 36.7%、“严重”概率为 63.3%；在“洪水涌入地铁隧道”的“低风险”概率为 35.3%、“高风险”概率为 64.7%，“发布预警，引导人员”状态为“未开展”时，“人员被困”的“少”概率为 29.4%、“中”概率为 19.5%、“多”概率为 51.1%；在“人员被困”的“少”概率为 29.4%、“中”概率为 19.5%、“多”概率为 51.1%，“疏散救援”状态为“开展”时，“人员死亡”的“一般”概率为 23%、“较大”概率为 27.8%、“重大”概率为 28.8%、“特别重大”概率为 20.3%。

由上述计算结果可知：应用此模型推理得出的“城市内涝”节点状态为“高风险”的概率为 70%，《调查报告》提到，此次事件中郑州主城区 20 日午后普遍严重积水，路面最大水深近 2.6 m，查阅表 2 知其状态隶属于“高风险”，推算结果与真实结果大体一致；“洪水灌入地铁隧道”节点状态为“高风险”的概率为 64.7%，《调查报告》提到，此次事件中洪水急速涌入地铁隧道，查阅表 2 知其状态隶属于“高风险”，推算结果与真实结果大体一致；“地铁受损害”节点状态为“严重”的概率为 63.3%，《调查报告》提到，此次事件中地铁失电迫停，查阅表 2 知其状态隶属于“严重”，推算结果与真实结果大体一致；“人员被困”节点状态为“多”的概率为 51.1%，《调查报告》提到，此次事件中 953 人安全撤出，由此推断出被困人员至少有 953 人，查阅表 2 知其状态隶属于“多”，推算结果与真实结果大体一致；“人员死亡”节点状态为“重大”的概率为 28.8%，此次事件中死亡 14 人，状态隶属于“重大”，推算结果与真

实结果大体一致。综上所述，推理结果与真实情况大体一致，验证了该模型的可靠性和可行性。

3.2 典型情景推演

为了详细分析暴雨等级、应急响应行动、周围环境、城市道路基础设施对“郑州暴雨地铁灾害事件”演化发展的影响，本文设定了几种典型情景，推理比较最终人员死亡、地铁受损害的概率差异，开展“郑州暴雨地铁灾害事件”情景想定推演（计算过程仍借助 Netica 软件）。

1) 暴雨级别的影响。表 5 中，只改变“暴雨”节点先验概率，其他节点先验概率保持不变，进行情景推演，分别得出暴雨等级为“暴雨”“大暴雨”“特大暴雨”时“地铁受损害”节点和“人员死亡”节点的状态概率结果，并做分析。

由图 5 可知，“郑州暴雨地铁灾害事件”暴雨量级由“暴雨”到“大暴雨”再到“特大暴雨”情景下，最终“地铁受损害”节点状态为“一般”的概率越来越低，而“严重”的概率则越来越高；“人员死亡”节点状态为“一般”的概率越来越低，而“重大”和“特别重大”的概率则越来越高。

2) 及时的应急响应行动的重要性。为了进行对比分析，在保持表 5 中其他节点状态不变的情况下，设置两个状态，比较分析不同状态下造成“人员死亡”和“地铁受损害”后果的概率差异。第一状态为“加强检查巡视，隐患排查”“排水”“发布预警，引导人员”“修复地铁”4 个应急响应行动节点的“未开展”状态（表 5），即“郑州暴雨地铁灾害事件”原始状态，对比状态是相应 4 个节点状态的反状态，即开展“加强检查巡视，隐患排查”“排水”“发布预警，引导人员”“修复地铁”。

如图 6 所示，4 个应急响应行动从全开展到全不开展，相应地，最终造成后果“地铁受损害”节点状态为“一般”的概率降低，而“严重”的概率则升高；“人员死亡”节点状态为“一般”的概率降低，而

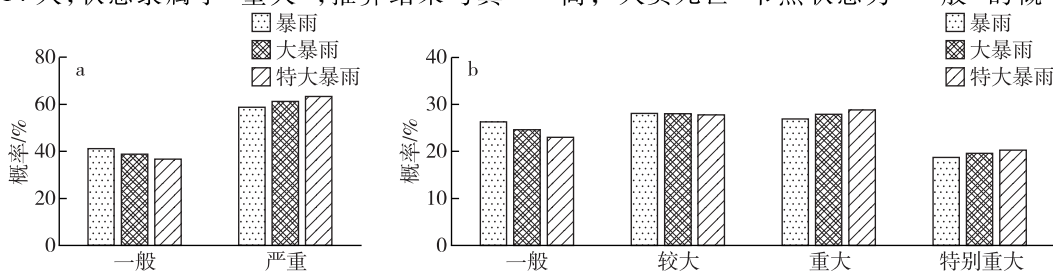


图 5 “暴雨”“大暴雨”“特大暴雨”状态下“地铁受损害”(a)和“人员死亡”(b)状态概率

Fig.5 State probability of (a) “Subway damage” and (b) “Death of personnel” under “Rainstorm”, “Large storm” and “Extreme rainstorm”

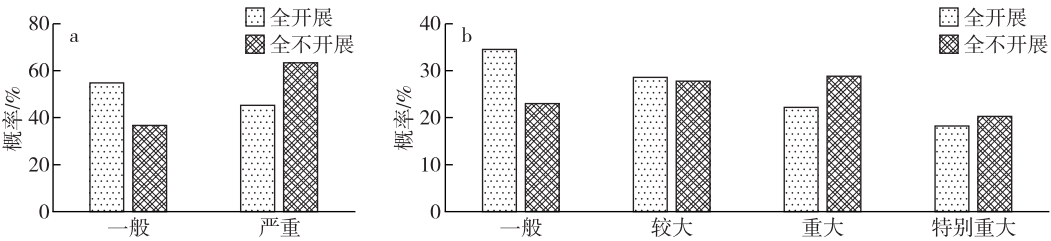


图6 4个应急响应活动全开展、全不开展状态下“地铁受损害”(a)和“人员死亡”(b)状态概率

Fig.6 State probability of (a) “Subway damage” and (b) “Death of personnel” under whether all four emergency response activities were carried out or not

“重大”和“特别重大”的概率则升高;即便开展应急响应行动,造成“地铁受损害”的“严重”的概率,“人员死亡”的“重大”和“特别重大”的概率仍然较高,这是因为此次事件暴雨等级为“特别重大”。

通过调节网络中针对突发事件应急响应行动的量值,可以计算应急响应行动对灾害后果的影响。针对城市内涝,加强检查巡视,隐患排查;针对洪水灌入地铁隧道,及时排水;针对地铁受损害,及时修复地铁;针对人员被困,及时发布预警,引导人员;针对人员伤亡,及时疏散救援。由此采取的应急响应措施,可以有效降低灾害后果的发生概率。

3) 周围环境风险性对灾害事件后果的影响。表5中,只改变“周围环境”节点先验概率,其他节点先验概率保持不变,进行情景推演,分别得出“周围环境”节点状态为“一般”和“严重”时“地铁受损害”和“人员死亡”节点的状态概率结果,并做分析。

由图7可知,“周围环境”由“低风险”到“高风险”,相应地,最终造成后果“地铁受损害”节点状态为“一般”的概率降低,而“严重”的概率则升高;“人员死亡”节点状态为“一般”的概率降低,而“重大”和“特别重大”的概率则升高;即便降低周围环境风险性,造成“地铁受损害”的“严重”的概率和“人员死亡”的“重大”和“特别重大”的概率仍然较高,这是因为此次事件暴雨等级为“特别重大”。

通过调节网络中针对突发事件周围环境风险性

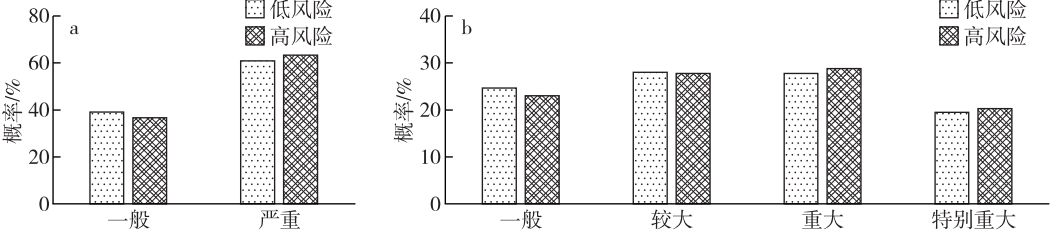


图7 “周围环境”的“低风险”“高风险”状态下“地铁受损害”(a)和“人员死亡”(b)状态概率

Fig.7 State probability of (a) “Subway damage” and (b) “Death of personnel” under “Low risk” and “High risk” of the “Surrounding environment”

的量值,可以计算周围环境风险性对灾害后果的影响。结果表明,若早先就能降低周围环境的风险性,则可有效降低灾害后果的发生概率。

4) 城市道路基础设施的影响。表5中,只改变“城市道路基础设施”节点先验概率,其他节点先验概率保持不变,进行情景推演,分别得出“城市道路基础设施”节点状态为“风险”“大风险”和“特大风险”时“地铁受损害”和“人员死亡”节点的状态概率结果,并做分析。

由图8可知,“郑州暴雨地铁灾害事件”城市道路基础设施风险性由“风险”到“大风险”再到“特大风险”,最终造成“地铁受损害”节点状态为“一般”的概率越来越低,而“严重”的概率则越来越高;“人员死亡”节点状态为“一般”的概率越来越低,而“重大”和“特别重大”的概率则越来越高;即便开展行动,降低城市道路基础设施风险性,造成“地铁受损害”的“严重”的概率,“人员死亡”的“重大”和“特别重大”的概率仍然较高,这是因为此次事件暴雨等级为“特别重大”。

由此可知,对城市道路基础设施进行隐患排查,完善基础设施的抗灾设防标准,对预防暴雨洪涝灾害以及减轻暴雨洪涝灾害造成后果具有重要意义。

4 结论与展望

本文结合情景分析方法和贝叶斯网络建立了

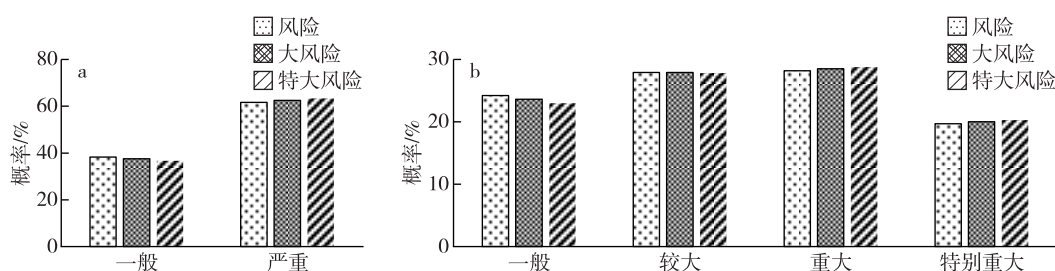


图 8 “城市道路基础设施”在“风险”“大风险”和“特大风险”状态下的“地铁受损害”(a)和“人员死亡”(b)状态概率

Fig.8 State probability of (a) “Subway damage” and (b) “Death of personnel” under “Risk”, “Large risk” and “Extreme risk” of “Urban road infrastructure”

“郑州暴雨地铁灾害事件”情景推演模型,对“郑州暴雨地铁灾害事件”进行了复盘分析,并在不同暴雨等级、应急响应行动开展情况、周围环境风险性、城市道路基础设施风险性状态下对“地铁受损害”和“人员死亡”概率进行了评估与推演,得到以下主要结论:

1)归纳提炼出了代表“郑州暴雨地铁灾害事件”演化的 13 个情景要素,并按不同状态进行划分,分别对应“突发事件”“危险因素”“应急响应行动”和“造成后果”4 种类型。利用专家打分和 D-S 证据理论,判断出 12 对具有因果关系的情景要素对,并用有向边进行连接,构建了“郑州暴雨地铁灾害事件”情景贝叶斯网络结构;利用专家打分和平均法,确定了“郑州暴雨地铁灾害事件”情景贝叶斯网络节点条件概率,结合“郑州暴雨地铁灾害事件”情景贝叶斯网络结构,最终构建了完整的“郑州暴雨地铁灾害事件”情景贝叶斯网络。

2)根据“郑州暴雨地铁灾害事件”实际情况,结合专家意见,确定贝叶斯网络节点先验概率,利用 Netica 软件进行情景推演,最终得到推演结果,与“郑州暴雨地铁灾害事件”实际结果对比可知两者大体一致,验证了模型的可靠性和可行性。

3)分析了暴雨等级、应急响应行动、周围环境、城

市道路基础设施对“郑州暴雨地铁灾害事件”演化发展的影响,结果表明,暴雨级别或灾害强度、周围环境与城市道路基础设施、应急响应机制与防范对策等 3 个因素对灾害损失和人员伤亡的影响同样重要;暴雨强度和周围环境属天气与城市的自然属性,属“天灾”,而城市道路基础设施、应急机制与防范对策则属人为主观范畴,若应急不力或处置不当,则属“人祸”。因此,在“天灾”难以避免的情景下,通过改进优化城市道路基础设施和加强暴雨灾害风险防范及应急机制建设,同样可以达到避免或减轻灾害损失和人员伤亡的目的。

4)暴雨强度对此次极端降水灾害损失和人员伤亡的状态概率影响显著,这是因为造成此次事件的初始致灾因素——暴雨等级为“特大暴雨”,表明极端暴雨初始致灾因素对于防灾减灾结果具有很大的影响和制约,因此加强极端降水天气的监测和预报预警是减轻和防范灾害的重要手段和途径。

本文针对“郑州暴雨地铁灾害事件”的情景表达模型尚属小范围有限要素,训练和仿真都基于相同的样本,未来研究应考虑融合整个暴雨灾害事件及其诸多影响因素并关注模型的泛化能力,只有这样才能避免因局部因素不足而导致全局性、真实性降低的问题。

参考文献 (References)

- Bañuls V A, Turoff M, Hiltz S R, 2013. Collaborative scenario modeling in emergency management through cross-impact [J]. Technol Forecast Soc Change, 80(9): 1756-1774. doi: 10. 1016/j. techfore. 2012. 11. 007.
- 谌芸, 孙军, 徐璐, 等, 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考 (一) 观测分析及思考 [J]. 气象, 38(10): 1255-1266. Chen Y, Sun J, Xu J, et al., 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part I: observation and thinking [J]. Meteor Mon, 38(10): 1255-1266. (in Chinese).
- 丁继勇, 王卓甫, 郭光祥, 2012. 基于贝叶斯和动态博弈分析的城市暴雨内涝应急决策 [J]. 统计与决策 (23): 26-29. Ding J Y, Wang Z F, Guo G X, 2012. Emergency decision-making of urban rainstorm waterlogging based on Bayesian and dynamic game analysis [J]. Stat Decis (23): 26-29. doi: 10. 13546/j. cnki. tjyjc. 2012. 23. 002. (in Chinese).
- Ehlen M A, Vargas V N, 2013. Multi-hazard, multi-infrastructure, economic scenario analysis [J]. Environ Syst Decis, 33(1): 60-75. doi: 10. 1007/s10669-013-9432-y.

- 范维澄,刘奕,翁文国,2009.公共安全科技的“三角形”框架与“4+1”方法学[J].科技导报,27(6):3. Fan W C,Liu Y,Weng W G,2009.Triangular framework and “4+1” methodology for public security science and technology[J].Sci Technol Rev,27(6):3.doi:10.3321/j.issn:1000-7857.2009.06.001.(in Chinese).
- Gong Y S,Wang Y Z,2014.Application research on Bayesian network and D-S evidence theory in motor fault diagnosis[C]//2013 6th International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS).November 1-3,2013,Shenyang,China.IEEE:240-243.doi:10.1109/ICINIS.2013.68.
- 郭换换,王坤,2023.基于双偏振雷达和降水现象仪的郑州“7.20”极端强降水微物理特征分析[J].大气科学学报,46(5):713-724. Guo H H,Wang K,2023.Analysis of the microphysical characteristics of the “7.20” extremely heavy rainfall in Zhengzhou based on dual-polarization radar and precipitation phenomenon instrument data[J].Trans Atmos Sci,46(5):713-724.doi:10.13878/j.cnki.dqkxb.20220715001.(in Chinese).
- Hasman A,1991.Probabilistic reasoning in intelligent systems; networks of plausible inference[J].Int J Bio-Med Comput,28(3):221-225.doi:10.1016/0020-7101(91)90056-k.
- 侯雷,2015.对城市内涝灾害应急管理的反思及建议[J].行政与法(1):5-9. Hou L,2015.Reflections on city waterlogging disaster emergency management and its countermeasures[J].Public Adm Law(1):5-9.doi:10.3969/j.issn.1007-8207.2015.01.002.(in Chinese).
- 栗哈,王新敏,朱枫,2022.“21.7”河南极端暴雨多模式预报性能综合评估[J].大气科学学报,45(4):573-590. Li H,Wang X M,Zhu F,2022.Comprehensive evaluations of multi-model forecast performance for “21.7” Henan extreme rainstorm[J].Trans Atmos Sci,45(4):573-590.doi:10.13878/j.cnki.dqkxb.20211019002.(in Chinese).
- 刘春生,王斌,卢义成,2017.基于 Netica 的机载雷达侦察效能评估[J].现代雷达,39(3):8-12,16. Liu C S,Wang B,Lu Y C,2017.Effectiveness evaluation of airborne radar’s reconnaissance based on Netica[J].Mod Radar,39(3):8-12,16.doi:10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.03.002.(in Chinese).
- López-Valencia A P,2019.Vulnerability assessment in urban areas exposed to flood risk:methodology to explore green infrastructure benefits in a simulation scenario involving the Cañavalejo River in Cali,Colombia[J].Nat Hazards,99(1):217-245.doi:10.1007/s11069-019-03736-8.
- Lü Y,Huang G H,Guo L,et al.,2013.A scenario-based modeling approach for emergency evacuation management and risk analysis under multiple uncertainties[J].J Hazard Mater,246/247:234-244.doi:10.1016/j.jhazmat.2012.11.009.
- 缪启龙,陈鑫,俞布,等,2012.杭州市暴雨洪涝灾害风险区划[J].长江流域资源与环境,21(S2):163-168. Miao Q L,Chen X,Yu B,et al.,2012.Risk division of rainstorm flooding disasters in Hangzhou city[J].Resour Environ Yangtze Basin,21(S2):163-168.(in Chinese).
- Punjabi M,2005.Integrating econometric analysis with scenario analysis for forecasting in a rapidly changing environment;case study of the United States dry bean industry[D].East Lansing,MI:Michigan State University.
- 任春华,孙林夫,2019.面向协作企业群的三阶段主客观公平权重动态评价[J].计算机集成制造系统,25(11):2874-2891. Ren C H,Sun L F,2019.Dynamic evaluation of three-stage subjective and objective fair weights for collaborative enterprise groups[J].Comput Integr Manuf Syst,25(11):2874-2891.doi:10.13196/j.cims.2019.11.017.(in Chinese).
- Ritchie-Calder L,1968.The year 2000: a framework for speculation on the next thirty-three years [J].Polit Sci Q,83(4):663-665.doi:10.2307/2146851.
- 史文茹,李昕,曾明剑,等,2021.“7.20”郑州特大暴雨的多模式对比及高分辨率区域模式预报分析[J].大气科学学报,44(5):688-702. Shi W R,Li X,Zeng M J, et al.,2021.Multi-model comparison and high-resolution regional model forecast analysis for the “7.20” Zhengzhou severe heavy rain[J].Trans Atmos Sci,44(5):688-702.doi:10.13878/j.cnki.dqkxb.20210823001.(in Chinese).
- Tourki Y,Keisler J,Linkov I,2013.Scenario analysis;a review of methods and applications for engineering and environmental systems[J].Environ Syst Decis,33(1):3-20.doi:10.1007/s10669-013-9437-6.
- 王家卓,2021.三大疑问解析郑州暴雨,八大警示加码城市安全[EB/OL].中国建设新闻网.(2021-08-25)[2022-10-13]. Wang J Z,2021.Three questions analysis of Zhengzhou rainstorm,eight warnings increased the safety of the city[EB/OL].China Construction News Network.(2021-08-25)[2022-10-13].http://www.chinajsb.cn/html/202108/25/22631.html.(in Chinese).
- 吴玉明,杨红卫,2016.南京市 2016 年暴雨洪水分析与思考[J].江苏水利(12):69-72. Wu Y M,Yang H W,2016.Analysis and thoughts of storm and flood in 2016 in Nanjing[J].Jiangsu Water Resour(12):69-72.doi:10.16310/j.cnki.jssl.2016.12.016.(in Chinese).
- 严昇,2015.我国大城市暴雨特性及雨岛效应演变规律[D].上海:东华大学. Yan S,2015.The rainstorm characteristics and rain island effect evolvement rule in Chinese large cities[D].Shanghai:Donghua University.(in Chinese).
- 叶瑞峰,潘耀忠,唐钰嫣,等,2022.基于主成分分析的城市内涝灾害风险评估:以杭州市临安区为例[J].杭州师范大学学报(自然科学版),21(3):320-326. Ye R F,Pan Y Z,Tang Y Y,et al.,2022.Risk assessment of urban waterlogging disaster based on principal component analysis: an example of Lin’an District of Hangzhou[J].J Hangzhou Norm Univ(Nat Sci Ed),21(3):320-326.doi:10.19926/j.cnki.issn.1674-232X.2022.03.013.(in Chinese).
- 殷杰,尹占娥,王军,等,2009.基于 GIS 的城市社区暴雨内涝灾害风险评估[J].地理与地理信息科学,25(6):92-95. Yin J,Yin Z E,Wang J,et al.,2009.GIS-based disaster risk assessment of the urban community rainstorm waterlogging[J].Geogr Geo-Inf Sci,25(6):92-95.(in Chinese).
- 张炜,李思敏,时真男,2012.我国城市暴雨内涝的成因及其应对策略[J].自然灾害学报,21(5):180-184. Zhang W,Li S M,Shi Z N,2012.Formation causes and coping strategies of urban rainstorm waterlogging in China[J].J Nat Disasters,21(5):180-184.doi:10.13577/j.jnd.

2012. 0525. (in Chinese).

张正涛, 崔鹏, 李宁, 等, 2020. 武汉市“2016. 07. 06”暴雨洪涝灾害跨区域经济波及效应评估研究[J]. 气候变化研究进展, 16(4): 433-441.

Zhang Z T, Cui P, Li N, et al., 2020. Research on the assessment of the multi-regional economic ripple effect caused by disasters: a case study of a flood disaster in Wuhan city on July 6, 2016[J]. Clim Change Res, 16(4): 433-441. doi:10. 12006/j. issn. 1673-1719. 2019. 259. (in Chinese).

宗旻, 2020. 基于 PRS 与 SWMM 模型的城市内涝问题研究[D]. 抚州: 东华理工大学. Zong M, 2020. Study on urban waterlogging based on PRS and SWMM Model[D]. Fuzhou: East China Institute of Technology. doi:10. 27145/d.cnki. ghddc. 2020. 000116. (in Chinese).

· ARTICLE ·

Scenario analysis and simulation deduction of the “Zhengzhou Rainstorm Subway Disaster Event” based on Bayesian network

REN Yongcun¹, ZHANG Ren¹, ZHANG Yongsheng², SUN Han², LI Ming¹, LIU Quanhong¹, XU Jing¹

¹ College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410000, China;

² Institute of Space New Meteorological Digital Disaster Reduction, Beijing 100000, China

Abstract The sudden subway disaster resulting from exceptionally heavy rainfall in Zhengzhou, Henan Province, on July 20, 2021, marked one of the most significant casualties the city had experienced in recent years. This incident arose from a combination of objective factors, such as intense rainstorms and unexpected accidents, and subjective factors, including a lack of risk awareness and inadequate emergency response mechanisms. This paper begins by identifying key scenario elements within the evolution of the “Zhengzhou Rainstorm Subway Disaster Event” and constructing the scenario evolution process of the event through scenario analysis. Building upon this foundation, we create a scenario deduction model for the “Zhengzhou Rainstorm Subway Disaster Event” using Bayesian network. Expert scoring methods are employed to calculate the conditional probabilities of network nodes, and Netica software is used to compute the state probabilities of disaster scenarios nodes. Finally, we assess and deduce the probabilities of personnel fatalities and subway damage under varying levels of rainstorm disasters, different emergency response activities, and distinct surrounding environmental conditions. The objective is to extract insights, pinpoint vulnerabilities, and provide valuable references for risk prevention and response measures in anticipation of and protection against events similar to the “Zhengzhou Rainstorm Subway Disaster”.

Keywords Zhengzhou Rainstorm Subway Disaster Event; scenario analysis; Bayesian network; risk assessment

doi:10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20221013001

(责任编辑:倪东鸿)