

中文引用格式:刘冬华,张睿阳,郭梨. 基于改进 DS 理论-FBN 的城市内涝灾害应急能力评估[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(5): 255-262.

英文引用格式:LIU Donghua, ZHANG Ruiyang, GUO Li. Emergency response capacity assessment for urban flooding disasters based on improved DS theory and FBN[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(5): 255-262.

基于改进 DS 理论-FBN 的城市内涝 灾害应急能力评估*

刘冬华讲师, 张睿阳, 郭梨 讲师

(西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055)

中图分类号:X915.5

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.1448

【摘要】 为提升城市内涝灾害应急能力,提出一种基于改进 DS 理论和模糊贝叶斯网络(FBN)结合的应急能力评估模型。首先,从灾害应急管理的全过程出发,建立城市内涝灾害应急能力评估指标体系,并映射为贝叶斯网络(BN);然后,针对评估过程中的信息不确定性以及主观性较强等问题,引入改进 DS 理论确定指标权重,利用专家知识结合模糊集量化根节点的先验概率,采用事故树分析关键指标并利用排序质心法对基本事件概率赋值,通过 FBN 模型计算内涝灾害风险概率,在此基础上进行应急能力评估和推理分析;最后,以郑州市主城区为例,利用 GeNIe4.0 软件生成内涝灾害应急能力评估 BN 模型,并得到该市的内涝灾害应急能力等级和敏感指标。研究结果表明:该市主城区内涝灾害应急能力为良,影响应急能力的敏感指标为应急响应及时性、预警信息发布规范性、应急处置专业性和内涝信息反馈准确性。

【关键词】 模糊贝叶斯网络(FBN); DS 理论; 城市内涝灾害; 应急能力评估; 城市雨水系统

Emergency response capacity assessment for urban flooding disasters based on improved DS theory and FBN

LIU Donghua, ZHANG Ruiyang, GUO Li

(School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology,
Xi'an Shaanxi 710055, China)

Abstract: In order to improve the emergency response capacity of urban flooding disasters, an emergency response capacity assessment model based on the combination of improved DS evidence theory and FBN was proposed. Firstly, from the whole process of disaster emergency management, the urban flood disaster emergency response capacity assessment index system was established and mapped into a Bayesian network (BN) model. Then, to address the problems of information uncertainty and strong subjectivity in the assessment process, the improved DS theory was introduced to determine the index weights. The expert knowledge combined with the fuzzy set was used to quantify the prior probability of the root node. The accident tree was applied to analyze the key indexes, and the Sorting center of mass method was used to assign basic event probabilities. The probability of flooding disaster risk was calculated through

the BN model. Emergency response capacity assessment and reasoning analysis were carried out on the basis of the above results. Finally, take the main urban area of Zhengzhou city as an example, GeNIe4.0 software was used to generate the BN model of emergency response capacity assessment of flooding disaster, and the emergency response capacity level and sensitive indexes of flooding disaster in the city were obtained. The results show that the emergency response capacity of the main urban area of the city is good. The sensitive indicators affecting the emergency response capacity are timeliness of the emergency response, normality of the warning information release, professionalism of the emergency response and accuracy of flooding information feedback.

Keywords: fuzzy Bayesian networks (FBN); DS theory; urban flooding disaster; emergency capacity assessment; urban stormwater systems

0 引言

随着全球气候变化加剧与城市化进程加快,极端降雨频率与强度显著增加,城市内涝成为威胁居民生活和经济发展的主要灾害之一^[1-2]。据统计,2023年我国的洪涝灾害共造成5 278.9万人次受灾,直接经济损失高达2 445.7亿元^[3]。因此,科学系统地评估城市内涝灾害的应急能力,对提升城市内涝防治水平、保障城市安全具有重要意义。

针对城市应急能力评估,国内外学者开展了相关研究。在城市应急能力评估指标方面,LI Xianghai等^[4]基于灾害寿命周期理论从灾前预防能力、灾中处置能力和灾后恢复能力3方面,建立郑州市洪涝灾害应急能力评估指标体系;LIU Delin等^[5]利用应急知识、技能、意识及物资4个指标构建了城市居民洪涝灾害应急准备能力指数;刘云熹等^[6]基于《中华人民共和国突发事件应对法》和相关文献研究,构建了基于应急管理全过程的城市灾害事故应急能力评估指标体系。在评估方法方面,MILI等^[7]采用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 计算响应能力指数 (Response Capacity Index, Rc) 的指标权重;齐春泽等^[8]将云模型引入到城市灾害应急能力评估中;彭恒明等^[9]基于 Z-numbers 评估了重庆、武汉等城市内涝灾害应急能力;胡孙琪等^[10]将 AHP 与模糊综合评估法相结合,定量、定性分析多方案决策,评估城市应急管理能力。综上,AHP 法简单且适应性广泛,但未综合考虑城市内涝灾害应急能力的模糊性和不确定性。此外,现有评估方法在确定指标权重时较为主观,且未综合考虑城市内涝灾害应急能力的复杂性。

贝叶斯网络 (Bayesian Network, BN)^[11]在复杂系统建模与表达不确定性方面有优势,通过引入模糊理论,建立模糊 BN (Fuzzy BN, FBN)^[12],解决了

BN 在确定先验概率时的局限性。同时,改进 DS 理论^[13]通过融合专家评估信息,进一步降低了指标权重确定时的主观性。鉴于此,笔者拟综合考虑城市内涝灾害应急能力的复杂性与不确定性,提出一种基于改进 DS 理论和 FBN 结合的城市内涝灾害应急能力评估方法,以评估城市内涝灾害应急能力并确定内涝灾害应急能力敏感因子,以期相关部门应急管理提供决策依据,提升城市内涝灾害应急能力。

1 城市内涝灾害应急能力评估

1.1 应急能力评估指标体系

1) 指标体系构建。从应急管理的全过程出发,选取城市内涝灾害应急能力评估的4个一级指标。参考相关文献及标准规范结合专家意见,确定9个二级指标及23个三级指标^[6,9,14-15],如图1所示。

2) 事故树建模。有效的城市雨水系统能够迅速排除积水,降低内涝风险,保障城市正常运行。因此,以雨水系统排水能力 A_{24} 指标为例,进行事故树分析。

将城市雨水系统划分为小排水系统和大排水系统^[16-17]。小排水系统包括源头控制系统和雨水管渠系统,前者通过减少径流量减轻排水压力,后者负责处理超出源头控制的径流。大排水系统由调蓄设施和地表径流通道组成,用于应对超出小排水系统排水能力的降雨。

将雨水系统排水能力不足作为事故树顶事件,导致失效的直接原因包括运维管理和调度措施不当,以及小排水系统和大排水系统的排水能力不足。小排水系统排水能力不足与设计标准低、管网建设不完善及设施组件老化有关;大排水系统排水能力不足与调蓄设施和地表径流通道缺乏有关。雨水系统排水能力不足的事故树如图2所示,符号意义见表1。

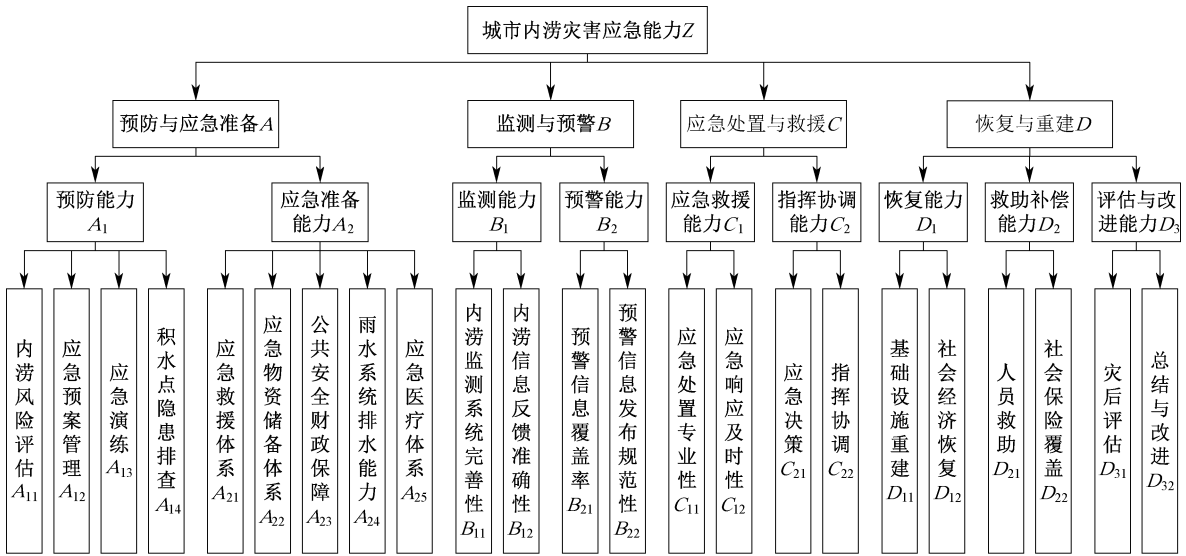


图 1 城市内涝灾害应急能力评估指标体系

Fig. 1 Evaluation index system of urban flooding disaster emergency response capacity

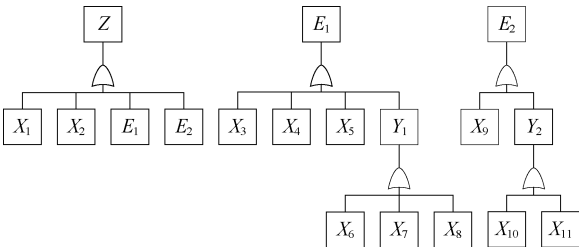


图 2 城市雨水系统排水能力不足事故树模型

Fig. 2 Fault tree model for inadequate drainage capacity of urban stormwater system

表 1 城市雨水系统事故树各符号含义

Table 1 Significance of each symbol in urban stormwater system fault tree

符号	故障	符号	故障
Z	雨水系统排水能力不足	X ₄	管网建设不完善
E ₁	小排水系统排水能力不足	X ₅	雨水设施组件老化
E ₂	蓄排设施失效	X ₆	雨污分流不彻底
Y ₁	雨水排水设施压力增大	X ₇	源头减排设施欠缺
Y ₂	蓄排设施欠缺	X ₈	不透水面增加
X ₁	运维管理不当	X ₉	河道运力不足
X ₂	调度措施不当	X ₁₀	调蓄设施欠缺
X ₃	雨水设施规划设计标准低	X ₁₁	排放通道缺乏

1.2 改进 DS 证据理论

DS 理论,也称为 Dempster-Shafer 证据理论,广泛应用于处理多源不确定信息。然而,在处理高冲突证据时,直接使用 DS 理论的合成规则可能会产生反直觉的结论。因此,结合加权平均法^[18]改进该合成规则。

首先,设有 n 个证据函数为 $m_1, m_2, \dots, m_n$,对每

个证据函数给定 1 个权重因子 $w_t, t = 1, 2, \dots, n$,满足 $\sum_{t=1}^n w_t = 1$ 。则平均证据函数为:

$$\bar{m}(A) = \sum_{i=1}^n w_i m_i(A), \forall A \subseteq \Omega \quad (1)$$

式中: $m_i(A)$ 为 a 的第 t 个证据函数; Ω 为识别框架。

由 $m_1, m_2, \dots, m_n$ 合成的证据函数为:

$$M = [\bar{m}_1 \oplus \bar{m}_2 \oplus \dots \oplus \bar{m}_n] \quad (2)$$

通过每个证据的证据函数确定权重因子。假设存在证据函数 $m_t (t = 1, 2, \dots, n)$,各平均证据函数为:

$$\bar{m} = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{n} \quad (3)$$

其次,计算 m_t 与 $\bar{m}$ 的欧氏距离。

$$d_t = \|m_t - \bar{m}\| = \sqrt{(m_t(A) - \bar{m}(A))^2 + \dots} \quad (4)$$

证据 m_t 的似真度表示为 $S_t = 1 - d_t, t = 1, 2, \dots, n$ 。

最后,计算各证据的可信度,即权重:

$$c_t = \frac{s_t}{\sum_{i=1}^n s_i}, t = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中: c_t 为第 t 个证据的可信度; s_t 为第 t 个证据的似真度。

1.3 构建应急能力评估模型

1) 建立 BN 拓扑结构。在城市内涝灾害应急能力评估指标体系中,各指标间相互独立,根据逻辑

关系,将该指标体系转化为 BN,如图 3 所示。利用可视化软件 GeNIe 建立城市内涝灾害应急能力评估 BN 模型。

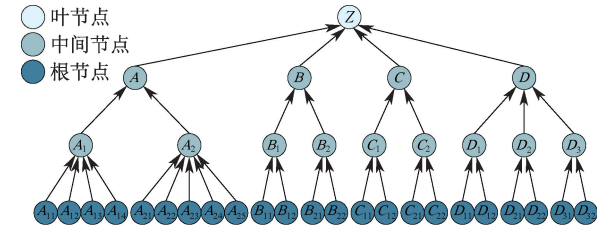


图 3 城市内涝灾害应急能力评估 BN

Fig. 3 BN for emergency response capacity assessment of urban flooding disasters

2) 定义节点状态。应用内涝灾害风险概率评估城市内涝灾害应急能力,每个节点均有存在风险(是)和不存在风险(否)2种状态,二者值域均为[0,1]。结合相关评估及专家意见,将城市内涝灾害应急能力分为5级,见表2。

表 2 城市内涝灾害应急能力评估等级

Table 2 Evaluation level of emergency response capacity for urban flooding disaster

内涝灾害风险概率/%	评估等级	评估级别
[0,20)	1	应急能力优
[20,40)	2	应急能力良
[40,60)	3	应急能力一般
[60,80)	4	应急能力较差
[80,100)	5	应急能力差

3) FBN 节点参数确定。①根节点先验概率确定。雨水系统排水能力 A_{24} 指标的先验概率,由事故树顶上事件的概率输入,事故树基本事件概率赋值采用排序质心法(Rank-Order Centroid method, ROC)^[19]。为确定其余节点先验概率,引入模糊理论与 BN 结合,建立 FBN;FBN 通过专家知识获取先验概率,鉴于专家更倾向于语言变量来评估事件发生概率,因此,引入七级语言变量供专家打分^[20]。

②子节点条件概率表确定。由于缺少大量样本数据进行参数学习,因此,根据研究对象的实际情况,采用指标权重计算得到子节点条件概率表,具体计算过程参照文献[21]。

4) FBN 推理分析。①正向推理分析。假设节点 A_i 存在父节点 $U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{il}$,则 A_i 存在风险的概率 $P(A_i)$ 为:

$$P(A_i) = \sum_{j=1}^l (P(A_i | U_{ij})P(U_{ij})) \quad (6)$$

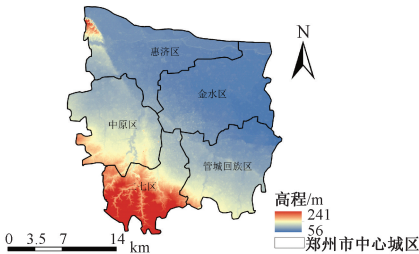
式中: $P(A_i | U_{ij})$ 为在事件 U_{ij} 发生的情况下 A_i 发生的概率; $P(U_{ij})$ 为事件 U_{ij} 发生的概率。

②逆向推理分析。假设子节点 A_i 已经发生变化,识别引起 A_i 发生变化的可能原因,具体由 U_{ij} 引起 A_i 发生变化的概率称为后验概率,计算如下:

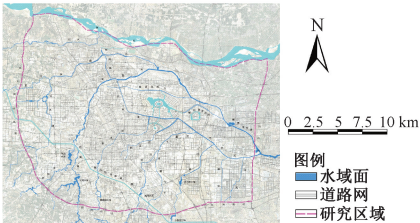
$$P(U_{ij} | A_i) = \frac{P(A_i | U_{ij})P(U_{ij})}{P(A_i)} = \frac{P(A_i, U_{ij})}{P(A_i)} \quad (7)$$

2 应急能力评估案例分析

郑州市地处河南省中北部,地形趋势为西南高东北低,属温带大陆性季风气候。以郑州市主城区为研究对象,如图 4a 所示。该区域人口密集,水系众多,是内涝防控的重点区域,如图 4b 所示。



(a) 研究区域范围



(b) 郑州市主城区水系现状

图 4 研究区域及郑州市主城区水系现状

Fig. 4 Current status of water system in study area and main urban area of Zhengzhou city

根据所构建的城市内涝灾害应急能力评估指标体系,邀请4名从事城市内涝应急管理专家结合评价集及模糊评价值(表3)评价指标。每个评价指标由1个信任结构表示,评价结果以 $A_{11} \sim A_{14}$ 指标为例,见表4。

表 3 评价集及模糊评价值

Table 3 Evaluation sets and fuzzy evaluation values

评价集	符号	模糊评价值
高	V_1	0.9
较高	V_2	0.7
中	V_3	0.5
较低	V_4	0.3
低	V_5	0.1

根据式(3)一式(5),计算每个信任结构的权重因子,结果见表5。

表 4 4 位专家对三级指标的评估结果

Table 4 Evaluation results of tertiary indicators by 4 experts

指标	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4
A_{11}	$(\{V_1\}, 0.8; \{V_2\}, 0.2)$	$(\{V_1\}, 1)$	$(\{V_1\}, 0.9; \{V_2\}, 0.1)$	$(\{V_1\}, 0.5; \{V_2\}, 0.5)$
A_{12}	$(\{V_1\}, 0.2; \{V_2\}, 0.8)$	$(\{V_2\}, 1)$	$(\{V_1\}, 0.3; \{V_2\}, 0.7)$	$(\{V_1\}, 0.1; \{V_2\}, 0.9)$
A_{13}	$(\{V_2\}, 0.8; \{V_3\}, 0.2)$	$(\{V_2\}, 0.3; \{V_3\}, 0.7)$	$(\{V_2\}, 0.6; \{V_3\}, 0.4)$	$(\{V_2\}, 0.5; \{V_3\}, 0.5)$
A_{14}	$(\{V_1\}, 0.6; \{V_2\}, 0.4)$	$(\{V_1\}, 0.3; \{V_2\}, 0.7)$	$(\{V_1\}, 0.7; \{V_2\}, 0.3)$	$(\{V_1\}, 0.2; \{V_2\}, 0.8)$

表 5 三级指标信任结构的权重因子

Table 5 Weighting factors for trust structure of tertiary indicators

指标	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4
A_{11}	0.317 3	0.227 6	0.272 4	0.182 7
A_{12}	0.270 6	0.229 4	0.229 4	0.270 6
A_{13}	0.205 1	0.205 1	0.294 9	0.294 9
A_{14}	0.274 7	0.274 7	0.225 3	0.225 3

1) 指标权重。根据式(1)和式(2)合成加权平均后的证据函数,得到三级指标的融合结果,并根据模糊评价量化专家评价语言,最终得到三级指标的评价结果及权重,同理获得 $A_1 \sim A_2$ 指标和一级指标融合结果及其权重,见表 6。

2) FBN 子节点条件概率确定。根据 1.3 节中由指标权重获取条件概率的算法,以及表 7 计算得

表 6 指标评估融合结果及其权重

Table 6 Fusion results of index evaluation and their weights

指标	融合评估	最终评估结果	权重
A_{11}	$m(\{V_1\}) = 0.997\ 6; m(\{V_2\}) = 0.002\ 4$	0.899 5	0.299 9
A_{12}	$m(\{V_1\}) = 0.001\ 0; m(\{V_2\}) = 0.999\ 0$	0.700 2	0.233 4
A_{13}	$m(\{V_2\}) = 0.690\ 5; m(\{V_3\}) = 0.309\ 5$	0.638 1	0.212 7
A_{14}	$m(\{V_1\}) = 0.309\ 5; m(\{V_2\}) = 0.690\ 5$	0.761 9	0.254 0
A_1	$m(\{V_1\}) = 0.998\ 3; m(\{V_2\}) = 0.001\ 7$	0.899 7	0.515 0
A_2	$m(\{V_1\}) = 0.736\ 5; m(\{V_2\}) = 0.263\ 5$	0.847 3	0.485 0
A	$m(\{V_1\}) = 0.999; m(\{V_2\}) = 0.001$	0.899 7	0.321 2
B	$m(\{V_2\}) = 0.996\ 4; m(\{V_3\}) = 0.003\ 6$	0.699 3	0.249 6
C	$m(\{V_1\}) = 0.012\ 2; m(\{V_2\}) = 0.987\ 8$	0.702 4	0.250 3
D	$m(\{V_3\}) = 0.998\ 8; m(\{V_4\}) = 0.001\ 2$	0.499 8	0.178 7

到的节点权重,计算子节点的条件概率,并将结果输入到 GeNIe4.0 软件中更新 FBN。

3) FBN 根节点先验概率确定。 A_{24} 节点采用 ROC 法赋值事故树各基本事件发生概率,各基本事件的概率见表 7,其中, φ_i 为基本事件分配似然度, P_i 为第 i 个事件发生的概率。同时根据事故树相关公式计算,得到事故树顶上事件的概率为 0.51,将其作为 A_{24} 节点的先验概率输入。

其余节点根据三角模糊数的算法^[22],获取根节点的先验概率,以 $A_{11} \sim A_{14}$ 节点为例,见表 8。

4) FBN 推理分析。将根节点的先验概率输入 GeNIe4.0 软件中并更新网络,实现正向推理,图 5 为各节点风险概率分布。由图 5 可知:内涝灾害风险概率为 25%。对比表 2 中应急能力评估等级划分结果可知,郑州市主城区城市内涝灾害应急能力评估等级为 2 级,即内涝灾害应急能力为良。

逆向推理是指由结果推断出原因的过程。通过

表 7 事故树基本事件概率

Table 7 Fault tree basic event probabilities

编号	事件	排序	φ_i	P_i
X_1	运维管理不当	4	0.727	0.083
X_2	调度措施不当	5	0.636	0.073
X_3	雨水设施规划设计标准低	3	0.818	0.093
X_4	管网建设不完善	1	1	0.114
X_5	雨水设施组件老化	8	0.364	0.041
X_6	雨污分流不彻底	2	0.909	0.104
X_7	源头减排设施欠缺	6	0.545	0.062
X_8	不透水面增加	7	0.455	0.052
X_9	河道运力不足	10	0.182	0.021
X_{10}	调蓄设施欠缺	9	0.273	0.031
X_{11}	排放通道缺乏	11	0.091	0.010

改变关键节点的风险概率,确定导致城市内涝灾害发生的最可能的风险因素组合。假设城市内涝灾害风险发生概率为 1,通过 FBN 逆向推理可知:若城市内涝灾害必然发生,则应急响应及时性导致风险发

表 8 贝叶斯根节点先验概率

Table 8 Bayesian root node prior probabilities

编号	状态	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	均值	解模糊	归一化
A_{11}	是	(0,0,0.1)	(0,0,0.1)	(0,0,0.1)	(0,0,0.1)	(0,0,0.1)	0.0250	0.0250
	否	(0.9,1,1)	(0.9,1,1)	(0.9,1,1)	(0.9,1,1)	(0.9,1,1)	0.9750	0.9750
A_{12}	是	(0,0,0.1)	(0,0,0.1,0.3)	(0,0,0.1,0.3)	(0,0,0.1)	(0,0.05,0.2)	0.0750	0.0750
	否	(0.9,1,1)	(0.7,0.9,1)	(0.7,0.9,1)	(0.9,1,1)	(0.8,0.95,1.0)	0.9250	0.9250
A_{13}	是	(0.0,0.1,0.3)	(0.1,0.3,0.5)	(0.0,0.1,0.3)	(0.0,0.1,0.3)	(0.025,0.15,0.35)	0.1687	0.1687
	否	(0.7,0.9,1)	(0.5,0.7,0.9)	(0.7,0.9,1)	(0.7,0.9,1)	(0.65,0.85,0.975)	0.8313	0.8313
A_{14}	是	(0,0.1,0.3)	(0,0.1,0.3)	(0,0,0.1)	(0.1,0.3,0.5)	(0.025,0.125,0.3)	0.1437	0.1437
	否	(0.7,0.9,1)	(0.7,0.9,1)	(0.9,1,1)	(0.5,0.7,0.9)	(0.7,0.875,0.975)	0.8563	0.8563

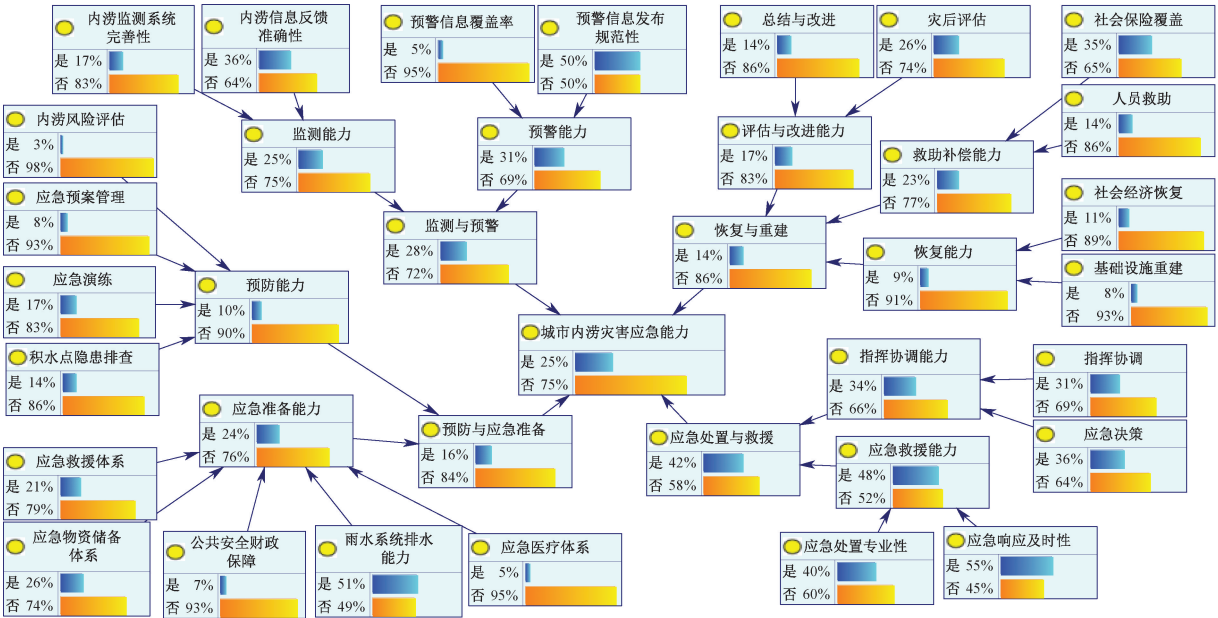


图 5 城市内涝灾害应急能力评估 BN 模型

Fig. 5 BN model for evaluating emergency response capacity of urban flooding disasters

生概率最高,为 62%,其次为预警信息发布规范性、雨水系统排水能力,风险概率均大于 50%。为降低城市内涝灾害风险并提升应急能力,应采取以下整改措施:提高应急响应及时性,加强预警信息发布规范性,以及增强雨水系统排水能力。

5) 敏感性分析。敏感性分析通过评估输入变量的变化,确定哪些变量对模型的输出结果最为关键。在城市内涝灾害应急能力的评估中,敏感性分析能够帮助确定哪些因素对应急能力的影响最大,从而为优化应急管理策略提供科学依据。利用 GeNIe4.0 软件所建立的 FBN 进行敏感性分析,结果如图 6 所示。

由图 6 可知:应急响应及时性、预警信息发布规范性、应急处置专业性和内涝信息反馈准确性 4 个节点对于目标节点(城市内涝灾害应急能力)的敏感度较高,故其对应的 4 个指标应当作为内涝应急

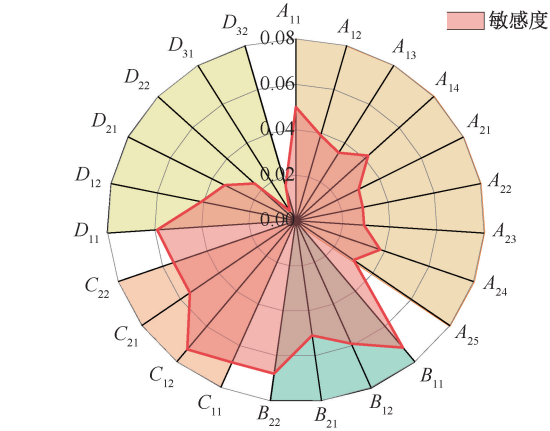


图 6 敏感性分析

Fig. 6 Sensitivity analysis

管理关注的重点,并采取针对性措施,从而提高城市内涝灾害应急能力。

3 结 论

1) 从灾害应急管理全过程出发,构建了包括预防与应急准备、监测与预警、应急处置与救援、恢复与重建4个一级指标、9个二级指标、23个三级指标的城市内涝灾害应急能力评估指标体系。基于该指标体系构建 BN 拓扑结构,通过改进 DS 理论,融合专家对指标的主观评价结果,确定指标权重以更新节点条件概率表。

2) 基于 ROC 法计算导致雨水系统排水能力失效的基本事件发生概率,并计算顶上事件概率,基于

三角模糊数计算其余指标风险概率,以更新根节点的先验概率。通过 FBN 正向推理,得出郑州市主城区内涝灾害应急能力为良(2级);通过逆向推理,得出应急响应及时性、预警信息发布规范性、雨水系统排水能力为内涝灾害发生的主要因素。

3) 在构建 FBN 网络基础上进行敏感性分析得出城市内涝灾害应急能力的关键敏感节点为:应急响应及时性、预警信息发布规范性、应急处置专业性和内涝信息反馈准确性,为制定应急能力提升策略提供了科学依据。

参 考 文 献

- [1] 赵超辉,王金红,张云霞,等. 城市内涝特征、成因及应对研究综述[J]. 灾害学, 2023, 38(1): 220-228.
ZHAO Chaohui, WAN Jinhong, ZHANG Yunxia, et al. Review of the characteristics, causes and governance of urban flood in China[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(1): 220-228.
- [2] 汪军能,秦年秀,姜彤,等. IPCC AR6 报告解读:气候变化对城市、住宅和关键基础设施的影响与适应[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(4): 433-441.
WANG Junneng, QIN Nianxiu, JIANG Tong, et al. Interpretation of IPCC AR6: impacts and adaptations of climate change on cities, settlements and key infrastructure[J]. Climate Change Research, 2022, 18(4): 433-441.
- [3] 中华人民共和国应急管理部. 国家防灾减灾救灾委员会办公室应急管理部发布 2023 年全国自然灾害基本情况[EB/OL]. (2024-01-20). https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202401/t20240120_475697.shtml.
- [4] LI Xianghai, LI Mengjie, CUI Kaikai, et al. Evaluation of comprehensive emergency capacity to urban flood disaster: an example from Zhengzhou city in Henan province, China[J]. Sustainability, 2022, 14(21): DOI: 10.3390/SU142113710.
- [5] LIU Delin, YANG Zhuowei, XU Xiangyang, et al. Assessment and influencing factors of urban residents' flood emergency preparedness capacity: an example from Jiaozuo city, China[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024, 102: DOI: 10.1016/j.ijdr.2024.104294.
- [6] 刘云熹,时德轶,张鹏,等. 城市灾害事故应急能力评估指标体系构建研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(1): 179-186.
LIU Yunxi, SHI Deyi, ZHANG Peng, et al. Research on construction of index system for emergency capability assessment of urban disasters and accidents[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(1): 179-186.
- [7] MILI R R, HOSSEINI A K, IZADKHAHI O Y. Developing a holistic model for earthquake risk assessment and disaster management interventions in urban fabrics[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018, 27: 355-365.
- [8] 齐春泽,代文锋. 基于云模型的城市灾害应急能力评价[J]. 统计与决策, 2019, 35(4): 41-45.
QI Chunze, DAI Wenfeng. Evaluation on capability of urban emergency response to disaster based on cloud model[J]. Statistics & Decision, 2019, 35(4): 41-45.
- [9] 彭恒明,王铁骊. 基于 Z-numbers 的城市内涝灾害应急能力评价研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(5): 115-121.
PENG Hengming, WANG Tieli. Study on evaluation of emergency capacity for urban waterlogging disaster based on Z-numbers[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(5): 115-121.
- [10] 胡孙琪,徐晓玲,胡煜文,等. 基于 AHP-模糊综合法的城市应急管理能力评价研究[J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版, 2022, 44(2): 188-194.
HU Sunqi, XU Xiaoling, HU Yuwen, et al. Evaluation of city emergency management capability based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering,

2022, 44(2): 188–194.

[11] KONG Dewei, LIN Zelong, LI Wei, et al. Development of an improved Bayesian network method for maritime accident safety assessment based on multiscale scenario analysis theory[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2024, 251: DOI: 10.1016/j.ress.2024.110344.

[12] WANG Shuang, WANG Jiashi, WANG Xinjian. Risk analysis of human evacuation aboard passenger ships based on fuzzy DEMATEL-ISM-BN[J]. Ocean Engineering, 2024, 313(3): DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.119520.

[13] 李金蓉, 杨玉中. DS 理论-贝叶斯网络下的煤矿通风系统风险评估 [J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(8): 146–153.

LI Jinrong, YANG Yuzhong. Risk assessment of ventilation system in coal mines based on DS theory and Bayesian network[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(8): 146–153.

[14] 蒋俊, 陈妍, 贺钢锋, 等. 城市应急准备能力评估体系构建及应用[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(6): 190–197.

JIANG Jun, CHEN Yan, HE Gangfeng, et al. Construction and application of urban emergency preparedness capability assessment index system[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(6): 190–197.

[15] 徐瑞华, 张攀科, 罗帆, 等. 河南省社区居民洪涝灾害应急能力评价研究[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(3): 23–31.

XU Ruihua, ZHANG Panke, LUO Fan, et al. Evaluation of flood disaster emergency response capacity of community residents in Henan Province[J]. Safety and Environmental Engineering, 2024, 31(3): 23–31.

[16] GB 50318—2017, 城市排水工程规划规范[S].

GB 50318—2017, Code for urban wastewater and stormwater engineering planning[S].

[17] GB 51222—2017, 城镇内涝防治技术规范[S].

GB 51222—2017, Technical specification for urban flood control[S].

[18] DENG Xinyang, ZHENG Xi, SU Xiaoyan. An evidential game theory framework in multi-criteria decision[T]. Applied Mathematics and Computation, 2014, 244: 783–793.

[19] 杨震, 刘哲明, 郭梨. 金属矿深井充填管道系统失效风险可视化分析方法[J]. 金属矿山, 2022 (4): 173–179.

YANG Zhen, LIU Zheming, GUO Li. Visual analysis method of failure risk of deep filling pipeline system in metal mine[J]. Metal Mine, 2022(4): 173–179.

[20] GUAN Xinjian, YU Fengjiao, XU Hongshi, et al. Flood risk assessment of urban metro system using random forest algorithm and triangular fuzzy number based analytical hierarchy process approach[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 109: DOI: 10.1016/j.scs.2024.105546.

[21] 赵振武, 贾朋霖. 融合改进 D-S 理论与贝叶斯网络的机场旅客风险研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(12): 4 425–4 434.

ZHAO Zhenwu, JIA Penglin. Research on airport passenger risk by fusing improved D-S theory and Bayesian network[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(12): 4 425–4 434.

[22] 田晓敏, 李晓冬. 基于故障树-模糊贝叶斯网络的装配式建筑施工质量风险分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(30): 13 119–13 126.

TIAN Xiaomin, LI Xiaodong. Quality risk analysis of prefabricated building construction based on fault tree analysis-fuzzy Bayesian network[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(30): 13 119–13 126.

作者简介： 刘冬华 （1982—）,女,河南商丘人,博士,讲师,主要从事安全人机工程和安全管理等方面的研究。E-mail:donghualiu@xauat.edu.cn。

