

基于隧道淹没事件的城市洪涝灾害链风险演化及响应解析

王 佳^{1,2}, 刘家宏^{1,2}, 梅 超^{1,2}, 王 浩¹, 杜 伟³, 杨子昕⁴

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环与水安全全国重点实验室; 2. 水利部数字孪生流域重点实验室;
3. 北京工业大学建设与城市规划学院; 4. 吉林大学新能源与环境学院)

摘要: 针对城市洪涝灾害链传递机制及阻断措施研究不足的问题, 通过系统识别城市洪涝灾害的致灾因子、孕灾环境、承灾体、响应措施等要素, 探究了洪涝灾害链构成关键要素及其相互作用关系, 解析了灾害链发生发展过程, 构建了灾害链关键要素贝叶斯网络模型, 并结合郑州“7·20”暴雨中京广快速路北隧道被淹事件进行了案例研究。边际概率分析结果表明, 郑州“7·20”暴雨下京广快速路北隧道严重积水概率为 0.482, 导致严重人员伤亡和车辆损失的概率分别为 0.434 和 0.558。响应措施联合概率分析结果表明, 若应急预案、交通调度及专业救援均未及时实施, 出现严重损失的概率最高, 为 0.494; 及时采取响应措施可显著降低严重损失发生概率, 其中预案实施程度、救援效率和交通调度快慢的综合减灾能力依次递减; 及时实施 3 种救灾措施使最严重的人员伤亡和车辆损失概率降至 0.152。

关键词: 城市洪涝; 灾害链; 贝叶斯网络; 应急响应; 郑州“7·20”暴雨

Risk evolution and response analysis of urban flood disaster chains based on tunnel inundation event// Wang Jia^{1,2}, Liu Jiahong^{1,2}, Mei Chao^{1,2}, Wang Hao¹, Du Wei³, Yang Zixin⁴ (1. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research; 2. Key Laboratory of River Basin Digital Twinning, Ministry of Water Resources; 3. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology; 4. College of New Energy and Environment, Jilin University)

Abstract: Aiming at the problem of insufficient research on the transmission mechanism and blocking measures of urban flood disaster chain, this paper systematically identifies the disaster causing factors, disaster pregnant environment, disaster bearing body, response measures and other elements of urban flood disaster, explores the key elements of the flood disaster chain and their interactions, analyzes the occurrence and development process of the disaster chain, constructs a Bayesian network model of the key elements of the disaster chain, and conducts a case study in combination with the inundation event of the Beijing Guangzhou Expressway North Tunnel in the “7·20” rainstorm in Zhengzhou. The marginal probability analysis results show that the probability of serious ponding in the north tunnel of Beijing Guangzhou Expressway under the “7·20” rainstorm in Zhengzhou is 0.482, and the probability of causing serious casualties and vehicle losses is 0.434 and 0.558 respectively. The joint probability analysis of response measures shows that if the emergency plan, traffic dispatch, and professional rescue are not implemented in a timely manner, the probability of serious losses is the highest, which is 0.494. Timely response measures can significantly reduce the probability of serious losses, among which the comprehensive disaster reduction capabilities of the implementation level of contingency plans, rescue efficiency, and traffic dispatch speed decrease in sequence. Timely implementation of three disaster relief measures reduces the probability of the most serious casualties and vehicle losses to 0.152.

Key words: urban flood; disaster chain; Bayesian network; emergency response; “7·20” rainstorm in Zhengzhou

洪涝灾害是损失最严重的灾害种类之一^[1]。近年来, 全球范围内由极端天气引发的洪涝灾害频

率和强度呈现增强趋势^[2-3]。城市洪涝具有时空变异性特征^[4], 宏观尺度上城市洪涝风险的时空变异

基金项目: 国家自然科学基金项目(52409048); 国家重点研发计划项目(2022YFC3090600); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项资金项目(WR110145B0042025)

作者简介: 王佳(1986—), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事城市水文学研究。E-mail: wangjia@iwhr.com

通信作者: 刘家宏(1977—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事工程水文学研究。E-mail: liujh@iwhr.com

性主要体现在其发生频率、强度、影响范围和影响程度上的变化,这种变化与气候变化带来的极端天气、城市化进程中的土地利用的变化、洪涝风险防治措施的实施等多种因素密切相关^[5]。从洪涝事件尺度上来说,城市洪涝风险具有链式传播特性,原生灾害的发生可能引起一系列次生灾害甚至衍生灾害的发生,使灾害在主要节点中逐级传导和放大^[6],被称为城市洪涝灾害链。

近年来,城市洪涝灾害链受到学术界广泛关注,相关研究集中在传递机制、时空演变特性、风险与损失评估、应急决策支持等方面^[7]。在灾害链的传递机制解析方面,Wang等^[8]考虑暴雨强度、环境因素以及次生地质灾害的形成因素定量分析了洪水灾害链的风险传递机制和损失放大效应;王婷等^[9]从灾害三要素致灾因子、孕灾环境、承灾体角度出发,分析了台风-洪涝-地质灾害链形成机制;卢兴超等^[10]将城市洪涝灾害链划分为串发式、并发式和复合式3种类型,提出了灾害链传递过程的同源性、共发性、累积性与放大性、多变性与复杂性特征。在灾害链的时空演变特征方面,王浩等^[11]采用知识图谱分析方法,以郑州“7·20”暴雨洪涝事件为案例,解析了城市洪涝灾害链传递的时空特性;刘颖颖等^[12]采用危险与可操作性分析法,对城市洪涝灾害的节点和传播路径进行建模,并结合复杂网络理论分析了城市洪涝灾害链的脆弱性、关键节点和关键传播路径。在灾害链的风险与损失评估方面,高玉琴等^[13]结合事件树分析法,搭建了洪涝灾害链演化网络,基于贝叶斯网络模型评估了秦淮河流域洪涝灾害→水土流失灾害→水污染事故→生态环境破坏事故灾害链风险;何玥双等^[14]基于复杂网络理论台风灾害链时序性风险评估模型,综合分析了灾害发生概率、复杂网络脆弱性和预估灾害损失。在灾害链的应急决策支持方面,李磊等^[15]对节点的重要程度和边的风险度进行分级,识别出高风险链条单元作为断链减灾措施考虑的关键;王治莹等^[16]考虑洪水灾害链的特点和节点间的因果及耦合关系,结合决策者不同的情绪状态,提出基于贝叶斯网络模型的洪水灾害链多阶段决策方法。现有研究表明,洪涝灾害链相关研究虽已取得一定成果,但在灾害链动态演化过程的内在机理、响应措施的阻断效能等方面仍缺乏系统性探索。

鉴于此,本文从洪涝事件尺度出发,系统识别城市洪涝灾害链的致灾因子、孕灾环境、承灾体及响应措施等关键要素,分析其因果与传递关系,构建响应措施有效性推演方法,并利用郑州“7·20”暴雨京广快速路北隧道灾害链案例进行应用,以期在城市

洪涝灾害链的预防与阻断提供科学依据。

1 案例研究对象与研究方法

1.1 案例研究对象

2021年7月17—23日,河南省遭遇历史罕见特大暴雨,发生严重洪涝灾害。《河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告》显示,7月20日郑州最大日降水量达624.1mm,16—17时极端小时雨强达201.9mm。本次降雨远超郑州市内涝防治标准,主城区超过50%的小区地下空间和重要公共设施受淹。淹水发生多个灾害链连锁反应,多个区域断电断水断网,道路交通断行,最终造成重大人员伤亡和财产损失。此次事件中,郑州京广快速路北隧道发生淹水倒灌事件,人员伤亡及车辆财产损失严重。此隧道全长1835m,其中暗埋段长1360m、高6m,敞开段长475m,隧道共设4个平行式进出口匝道,隧道内的排水系统由洞口阻水反坡、车道右侧排水沟和2座地下附建式排水泵站组成,进入隧道内的雨水径流通过水泵提升后,排入地面雨水管网^[17]。因难以获取事件发生当日的人口和车辆等通行过程详细数据,本文灾害时间线、雨情特征、人员伤亡与车辆损失数据来源于《河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告》及网络爬虫获取互联网数据;人口数据来源于2025年同期交通畅通、交通拥堵条件下的人口热力图;交通通行数据基于行车速度随积水深度的变化关系以及车辆密度与行车速度的关系估算;概率评估基础数据结合专家打分与层次分析法获得。

1.2 研究方法

1.2.1 城市洪涝灾害链关键要素识别

城市洪涝灾害链构成的关键要素主要包括致灾因子、孕灾环境、承灾体及响应措施。采用有向无环图建立灾害链构成关键要素的因果关系网络,将致灾因子、孕灾环境、承灾体与响应措施之间的相互作用和传导路径进行结构化表达。在致灾因子方面,极端降雨作为主要触发因子,与流域洪水(如河道顶托、漫堤、溃堤)以及山洪等共同构成多灾种遭遇威胁,这些因子的时空叠加将产生外洪内涝叠加放大效应。在孕灾环境方面,城市及流域的地形地貌特征、水系分布格局和土地利用变化等共同形成灾害的孕育条件,其中地形低洼区(如城市低洼片区、下凹式立交桥、地下空间)和高强度开发区敏感性更强。承灾体不仅包括人口、车辆和建筑等传统要素,更涵盖交通、电力、通信等城市生命线工程,这些要素在空间上的高度集聚使得灾害链式反应风险显著增加。响应措施是指通过调控城市降雨径流过程、干预洪涝灾害链关键环节来降低洪涝风险的措

施,分为工程性措施(防洪、排涝设施等)和非工程性措施(预警预报、应急救援等),其有效性取决于对灾害链关键环节的干预能力。

1.2.2 城市洪涝灾害链风险演化过程解析

城市洪涝灾害链风险在时间上可以划分为潜藏阶段、起始阶段、发展阶段、衰减阶段4个阶段。本文通过量化各阶段积水深度及对应的承灾体风险损失来解析灾害链风险的时空演化过程。潜藏阶段为极端天气事件的发生阶段,这一阶段雨水径流通过防洪排涝措施消纳和排除,对承灾体造成实质性影响的洪涝风险尚未显现,但是造成洪涝损失的可能性存在于各种征兆之中,如持续的暴雨、人、车、物等暴露在潜在风险区等,这一阶段的洪涝风险管理重在监测和预报。起始阶段随着降水量增加积水开始产生,导致小部分承灾体受淹,洪涝风险出现,此时在承灾体自身阻抗力作用下,风险进程较为缓慢,这一阶段的洪涝风险管理重在结合监测、预报信息做好洪涝风险的预警和预案。发展阶段随着暴雨持续加强逐渐开始,积水量增多且范围逐渐扩大,随着灾害链的扩散,承灾体范围逐渐扩大,洪涝风险程度超过承灾体自身阻抗力和响应措施抵抗能力,洪涝风险迅速上升,风险最大值出现在这个阶段,这一阶段的洪涝风险管理重在突发事件进行及时的应急响应。衰减阶段随着致灾因子减弱逐渐开始,积水持续下降或承灾体的安全转移及避险安置,灾害链传递驱动力逐渐减小,洪涝风险程度逐渐降低直至消除,这一阶段的洪涝风险管理重在灾后恢复、重建以及城市抵御洪涝风险综合能力的提升。

在城市洪涝事件中,交通系统通常是受影响最严重的承灾体之一,本文拟通过构建函数关系量化交通系统城市洪涝灾害链风险。行车速度随积水深度衰减的函数^[18]表达式见式(1);行车速度与车辆密度之间的关系采用线性函数、指数函数、对数函数进行拟合,车流密度很大时一般采用对数函数拟合^[19],表达式见式(2)。

$$v = \frac{v_0}{2} \tanh\left(\frac{-x+a}{b}\right) + \frac{v_0}{2} \quad (1)$$

$$v = v_m \ln(K_j/K) \quad (2)$$

其中

$$v_m = \frac{1}{2}v_t$$

式中: v 为车辆速度; v_0 为行驶位置的设计车速; x 为积水深度; a 为造成车辆停滞的临界积水深度,本文取15cm; b 为衰减弹性系数,一般为3~5, b 值越小速度衰减得越快,本文取3; v_m 为行驶位置最大交通量时的速度; K_j 为阻塞密度,即当车流密集到所有车辆无法移动时的密度; K 为车辆密度; v_t 为行驶位

置道路畅行时的速度,本文取 $v_t=v_0$ 。

1.2.3 城市洪涝灾害链响应措施有效性分析

灾害链演化过程的核心在于关键要素间的因果关系。贝叶斯网络模型通过量化事件发生的可能性,可有效捕捉风险因素间的潜在关联,并推演灾害链事件的发生概率,从而实现对风险不确定性的系统评估^[20-22]。设 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 为一组变量,则贝叶斯网络的联合概率分布可表示:

$$P(X) = P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i/P_a(X_i)) \quad (3)$$

式中: X_i 为第*i*个贝叶斯网络节点; n 为贝叶斯网络节点数; $P_a(X_i)$ 为 X_i 父节点的概率。

基于贝叶斯网络模型的灾害链演化过程可表述为:

$$B = (X, C) \quad (4)$$

式中: B 为灾害链演化情景; X 为灾害链关键节点; C 为演化情景中各事件的有向关系。

由于历史灾情数据通常是灾害最终状态的统计数据,灾害发生发展过程的统计数据相对缺乏,本文结合专家打分和层次分析法确定灾害链关键节点的条件概率,将方案层的重要性概化为节点事件发生的可能性。相较于直接通过专家打分法确定条件概率的方式,通过层次分析法的定权评分可以减少主观评定误差^[23-24]。通过专家打分方式对父节点组成的各种状态进行重要性排序,结合(0,1,2)标度法来计算条件概率。其中,专家开展重要性排序主要依靠判断造成当前节点状态最可能的假设情景。假设父节点与子节点均存在*M*种状态,其中父节点数量为*L*,则父节点与子节点之间的有向关系转化为指标层(父节点状态的组合数量为 M^L)与目标层(子节点状态数量为*M*),父节点的状态组合引发子节点的可能性即层次分析法中的权重。

2 案例结果与分析

2.1 案例关键要素及因果关系

图1为郑州京广快速路北隧道淹没事件因果关系。本次事件的致灾因子主要为极端降雨及其引发的隧道积水,孕灾环境主要为地势低洼、北低南高的地下交通隧道,公共交通中通行人员和车辆作为承灾体在孕灾环境中与致灾因子相遇,但防汛应急预案、交通调度、积水排除等均未得到及时有效地实施,导致灾害链不断放大,最终造成严重的人员伤亡和车辆财产损失。

2.2 案例灾害链风险演化过程

基于《河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报

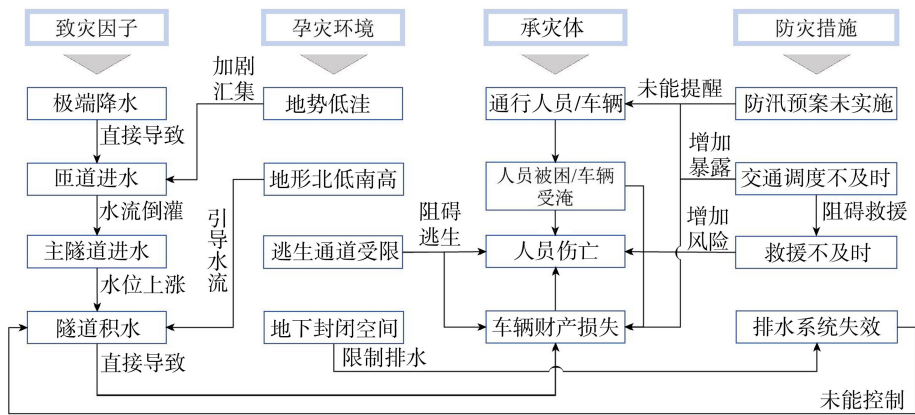


图1 郑州京广快速路北隧道洪涝事件因果关系

Fig. 1 Causal relationship of Zhengzhou Jingguang Expressway North Tunnel flooding incident

告》和相关新闻报道,结合积水深度、行车速度、车辆密度之间的关系,推演本次城市洪涝灾害链发展过程,如图2所示。7月20日15:00,隧道匝道出口路面积水已超过40cm;15:14,隧道匝道入口开始形成明显径流;15:38车辆受隧道内积水影响开始拥堵;16:00—17:00,1h降水量达201.9mm,16:00隧道持续进水,17:00隧道大面积积水,隧道内水位上涨到汽车尾盘;16:16,隧道在强制封闭,但此时大量车辆已经被困,仍有车辆从隧道内开出,大部分车内人员陆续弃车逃生;17:30,隧道完全淹没。据相关

报道,隧道内布置的地下式排水泵站由于故障在本次事件中未能启动,本次事件最终造成6人死亡,247辆汽车被淹。

由图2可见,隧道淹没事件洪涝灾害链中人口和车辆风险及损失随时间的变化曲线呈现典型的单峰钟形分布特征,较为清晰地反映了洪涝灾害链从潜藏、起始、发展到衰减的完整演化过程。基于高斯分布函数的拟合结果显示,人口和车辆风险的拟合优度分别为0.983和0.757。需要指出的是,由于城市洪涝灾害链的复杂性,实际风险曲线也可能表

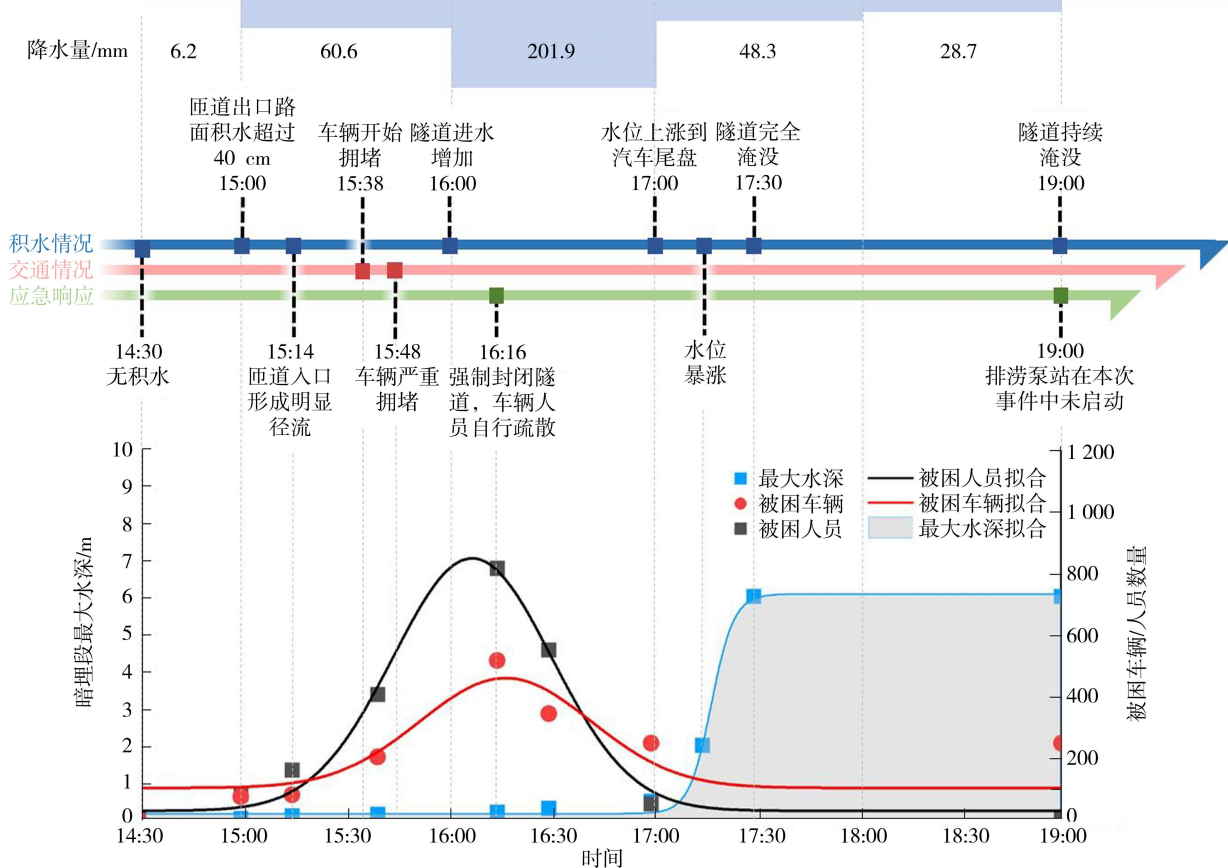


图2 洪涝灾害链发展过程

Fig. 2 Development process of flood disaster chain

现出左偏、右偏或多峰等非对称分布特征。

2.3 响应措施有效性

为分析响应措施的有效性,将影响洪涝灾害链发展过程的关键要素节点划分为3类:致灾因子节点为降雨强度 I ;洪涝演化节点包括主隧道进水程度 E_1 、匝道进水程度 E_2 、隧道积水程度 E_3 ;响应措施节点包括预案实施程度 P 、排水状况 D 、交通调度效率 R_1 和救援效率 R_2 ;灾害损失节点包括人员伤亡程度 L_1 、车辆损失状况 L_2 。在本案例中,考虑到此次单一隧道洪涝灾害链的孕灾环境相对稳定且具有确定性特征,因此未将其纳入贝叶斯网络的关键节点体系。本次案例隧道洪涝灾害链的有向无环图如图3所示。

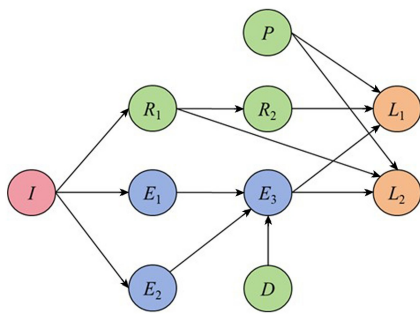


图3 隧道洪涝灾害链的有向无环图

Fig. 3 Directed acyclic graph of tunnel flood disaster chain

设极端降雨状态先验概率为1,所有节点都设定两种状态(状态1、状态2),表1为除隧道积水程度、人员伤亡程度、车辆损失状况外,其他节点的状态描述及先验概率。隧道积水程度的状态1、2分别为轻微积水、积水严重;人员伤亡程度的状态1、2分别为无人员伤亡、有人员伤亡;车辆损失状况的状态1、2分别为车辆损失较轻、车辆损失严重。采用层次分析法计算隧道积水程度、人员伤亡程度、车辆损失状况的条件概率,结果如表2~4所示,表中变量的下标1、2分别表示状态1和状态2。本次隧道被淹事件实际发生的情况为预案实施不及时、隧道积水严重、排水能力差、交通调度慢、救援不及时,由表3和表4计算结果可知,此种情况下发生人员伤亡和严重车辆损失的概率均为0.900,表明条件概率计算结果基本合理。

图4为贝叶斯网络边际概率推理结果。由图4可见,当极端降雨事件确定发生时(即极端降雨发生概率为1.000),主隧道和匝道的进水概率显著增大。在此情境下,隧道发生严重积水的概率为0.482,进而导致人员严重伤亡和车辆严重损失的概率分别为0.434和0.558。尽管及时采取预案启动、排水作业、交通调度及应急救援等响应措施的概率均不低于0.600,但在极端强降雨条件下,其风险

表1 部分节点的状态描述及先验概率

Table 1 State descriptions and prior probabilities for part of nodes

节点	状态1描述	状态2描述	状态1先验概率	状态2先验概率
I	无降雨	极端降雨	0.000	1.000
E_1	主隧道进水程度低	主隧道大面积进水	0.200	0.800
E_2	匝道进水程度低	匝道大面积进水	0.325	0.675
D	排水能力差	排水能力良好	0.233	0.767
P	预案实施不及时	预案及时实施	0.333	0.667
R_1	交通调度不及时	交通调度及时	0.400	0.600
R_2	救援不及时	及时救援	0.200	0.800

表2 隧道积水程度条件概率

Table 2 Conditional probability of tunnel water accumulation severity

状态	$E_{11}E_{21}D_1$	$E_{11}E_{21}D_2$	$E_{11}E_{22}D_1$	$E_{11}E_{22}D_2$	$E_{12}E_{21}D_1$	$E_{12}E_{21}D_2$	$E_{12}E_{22}D_1$	$E_{12}E_{22}D_2$
1	0.475	0.900	0.317	0.767	0.261	0.655	0.100	0.525
2	0.525	0.100	0.683	0.233	0.739	0.345	0.900	0.475

表3 人员伤亡程度条件概率

Table 3 Conditional probability of casualty severity

状态	$P_1R_{21}E_{31}$	$P_1R_{21}E_{32}$	$P_1R_{22}E_{31}$	$P_1R_{22}E_{32}$	$P_2R_{21}E_{31}$	$P_2R_{21}E_{32}$	$P_2R_{22}E_{31}$	$P_2R_{22}E_{32}$
1	0.551	0.100	0.767	0.345	0.655	0.233	0.900	0.449
2	0.449	0.900	0.233	0.655	0.345	0.767	0.100	0.551

表4 车辆损失状况条件概率

Table 4 Conditional probability of vehicle damage status

状态	$P_1R_{11}E_{31}$	$P_1R_{11}E_{32}$	$P_1R_{12}E_{31}$	$P_1R_{12}E_{32}$	$P_2R_{11}E_{31}$	$P_2R_{11}E_{32}$	$P_2R_{12}E_{31}$	$P_2R_{12}E_{32}$
1	0.551	0.100	0.767	0.345	0.655	0.233	0.900	0.449
2	0.449	0.900	0.233	0.655	0.345	0.767	0.100	0.551

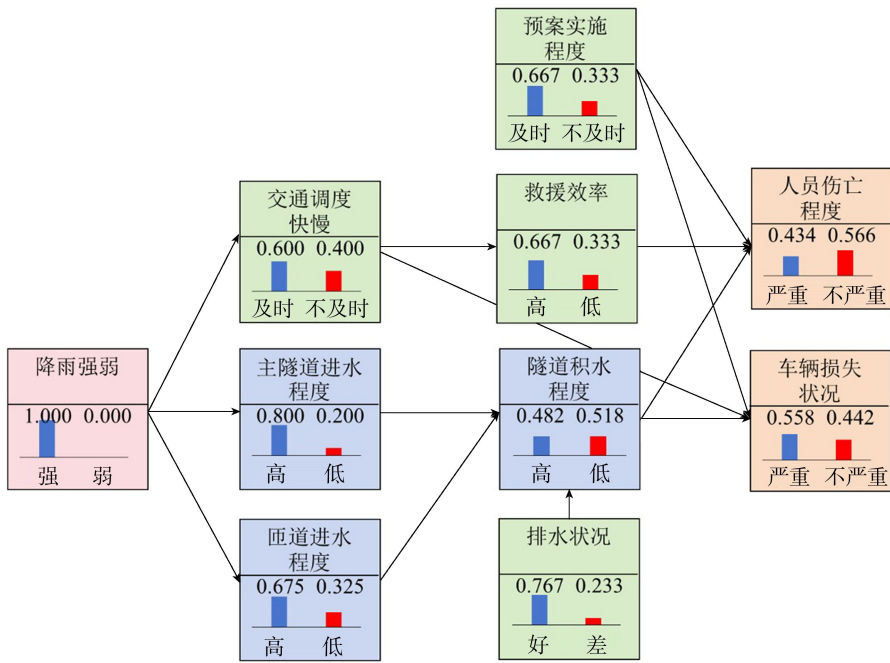


图 4 贝叶斯网络边际概率推理结果

Fig. 4 Bayesian network marginal probability inference results

控制效能仍显不足。这一结果显示了城市基础设施在极端天气中的脆弱性,同时现有灾害应急响应体系在应对极端天气时仍存在优化空间。

为了进一步分析应急响应措施的有效性,应用贝叶斯网络模型计算应急预案、交通调度及专业救援 3 类措施组合影响下的联合概率,结果如图 5 所示(图中 L_{11} 表示状态 1 下的人员伤亡程度,以此类推)。当 3 种救灾措施均未及时实施时,产生严重人员伤亡和车辆财产损失的可能性最大,联合概率为 0.494。仅采取 1 种救灾措施时,产生严重人员伤亡和车辆财产损失的可能性降低,3 种措施的综合减灾能力由强到弱为:应急预案、专业救援、交通调度。当使用 2 种有效的救灾措施时,其综合减灾能力相比于仅采取 1 种有效措施的情况有了显著提升。当同时有效地实行 3 种救灾措施后,最严重的人口和车辆损失情景发生概率降低到 0.152。

3 结论

a. 基于有向无环图解析了城市洪涝风险的链式传播特性,识别了城市洪涝灾害链的致灾因子、孕灾环境、承灾体、响应措施等构成关键要素,解析了城市洪涝灾害链风险的发展过程,包括潜藏、起始、发展、衰减 4 个阶段。

b. 以郑州“7·20”暴雨京广快速路北隧道被淹事件为案例进行分析,发现人口和车辆风险损失随时间的变化呈现典型的单峰钟形分布特征,完整呈现了风险潜藏、起始、发展和衰减的全过程。基于高

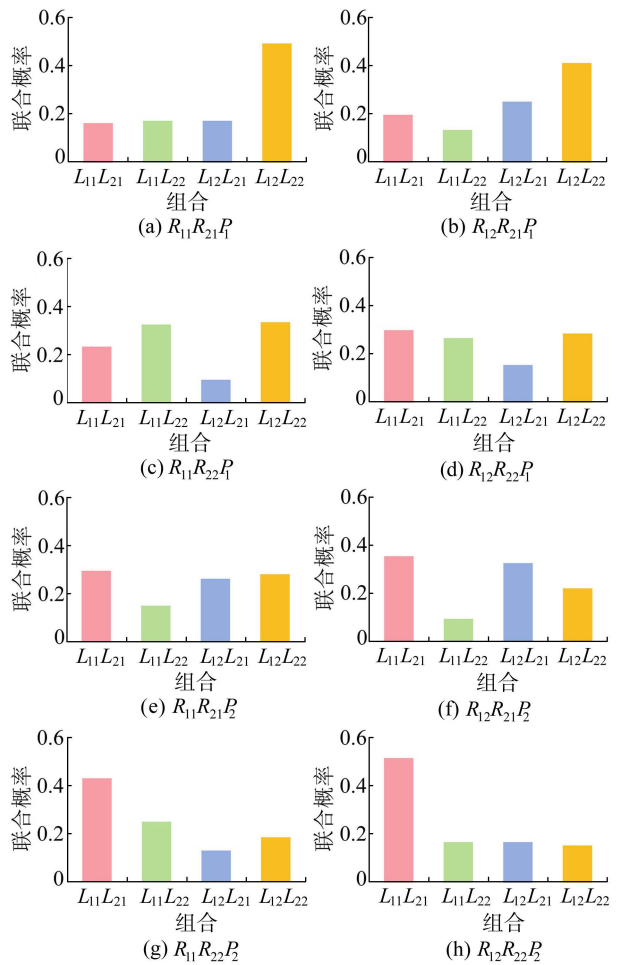


图 5 响应措施组合的联合概率

Fig. 5 Joint probability of response measures combination
斯分布函数的拟合结果显示,人口和车辆风险的拟合优度分别达到 0.983 和 0.757,具有较高的可靠性。

c. 贝叶斯网络边际概率结果显示,在极端暴雨情景下,案例隧道发生严重积水的概率达0.482,引发严重人员伤亡和车辆损失的概率分别为0.434和0.558,表明现有城市基础设施及应急响应措施在应对极端气候事件中仍存在优化空间。

d. 响应措施联合概率结果显示,当应急预案、交通调度及专业救援3项关键措施均未及时实施时,系统产生严重损失的概率最高,为0.494;及时采取综合响应措施可使损失概率降低,其中综合减灾能力由强到弱依次为预案实施程度、救援效率和交通调度快慢。及时实施3种救灾措施使最严重的人员伤亡和车辆损失概率降至0.152。

参考文献:

- [1] 褚明华,杜晓鹤,何秉顺.我国水旱灾害防御应对[J].水利发展研究,2024,24(8):1-8. (Chu Minghua, Du Xiaohu, He Bingshun. China's prevention and response to flood and drought disasters [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(8): 1-8. (in Chinese))
- [2] 徐宗学,卢兴超,施奇妙.城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J].水利水电科技进展,2025,45(1):1-9. (Xu Zongxue, Lu Xingchao, Shi Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 1-9. (in Chinese))
- [3] 刘丁蓉,杨凯,孙仕.珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J].水利经济,2024,42(4):23-29. (Liu Dingrong, Yang Kai, Sun Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging disaster resilience in Pearl River Delta urban agglomeration [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(4): 23-29. (in Chinese))
- [4] 王浩,赵铜铁钢,田雨,等.考虑时间变化的洪涝灾害损失评估[J].水利学报,2024,55(2):127-136. (Wang Hao, Zhao Tongtiegang, Tian Yu, et al. Incorporating temporal changes into flood loss assessments [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(2): 127-136. (in Chinese))
- [5] 蒋卫威,鱼京善,赤穗良辅,等.变化环境与人类活动对城市水文与水动力过程影响研究进展[J].北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(2):160-168. (Jiang Weiwei, Yu Jingshan, Akoh R, et al. Impact of changing environment and human activities on urban hydrological and hydrodynamics process: a review [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2020, 56(2): 160-168. (in Chinese))
- [6] 刘家宏,梅超,刘宏伟,等.特大城市外洪内涝灾害链联防联控关键科学技术问题[J].水科学进展,2023,34(2):172-181. (Liu Jiahong, Mei Chao, Liu Hongwei, et al. Key scientific and technological issues of joint prevention and control of river flood and urban waterlogging disaster chain in megacities [J]. Advances in Water Science, 2023, 34(2): 172-181. (in Chinese))
- [7] 刘永志,唐雯雯,张文婷,等.基于灾害链的洪涝灾害风险分析综述[J].水资源保护,2021,37(1):20-27. (Liu Yongzhi, Tang Wenwen, Zhang Wenting, et al. Review of flood disaster risk analysis based on disaster chain [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 20-27. (in Chinese))
- [8] Wang Qiyuan, Hou Jundong. Hazard assessment of rainstorm-geohazard disaster chain based on multiple scenarios [J]. Natural Hazards, 2023, 118(1): 589-610.
- [9] 王婷,吴绍洪,高江波,等.区域台风-洪涝-地质灾害链减灾能力评估[J].灾害学,2022,37(4):193-200. (Wang Ting, Wu Shaohong, Gao Jiangbo, et al. Coping capacity assessment of regional typhoon-flood-geological disaster chain [J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(4): 193-200. (in Chinese))
- [10] 卢兴超,徐宗学,施奇妙,等.城市暴雨洪涝灾害链演变特征及减灾途径[J].水科学进展,2025,36(1):97-108. (Lu Xingchao, Xu Zongxue, Shi Qimiao, et al. Evolution characteristics of urban flood disasters chain and approaches for disaster mitigation [J]. Advances in Water Science, 2025, 36(1): 97-108. (in Chinese))
- [11] 王浩,杜伟,刘家宏,等.基于知识图谱的城市洪涝灾害链推演及时空特性解析[J].水科学进展,2024,35(2):185-196. (Wang Hao, Du Wei, Liu Jiahong, et al. Derivation and transmission analysis of urban flood disaster chain based on knowledge graph [J]. Advances in Water Science, 2024, 35(2): 185-196. (in Chinese))
- [12] 刘颖颖,李经纬,陈睿山,等.基于复杂网络的郑州市特大暴雨洪涝灾害链研究[J].灾害学,2024,39(2):227-234. (Liu Yingying, Li Jingwei, Chen Ruishan, et al. Analyzing the flood disaster chain in Zhengzhou city based on complex network [J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(2): 227-234. (in Chinese))
- [13] 高玉琴,徐诺,汪键,等.基于复杂网络的洪涝灾害链风险评估[J].水资源保护,2025,41(2):115-122. (Gao Yuqin, Xu Nuo, Wang Jian, et al. Risk assessment of flood disaster chain based on complex network [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2): 115-122. (in Chinese))
- [14] 何玥双,江辉仙.台风灾害链时序性风险评估研究[J].灾害学,2024,39(4):213-218. (He Yuehuang, Jiang Huixian. Study on the temporal risk assessment of typhoon disaster chain [J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(4): 213-218. (in Chinese))

128. (Huang Yan. Practice and reflections on joint operation scheme of water projects of Changjiang River Basin; flood control and water projects operation in 2020 flood[J]. Yangtze River, 2020, 51(12): 116-128. (in Chinese))
- [28] 王小杰, 夏军强, 李启杰, 等. 长江中下游各省市洪涝灾情时空变化及影响因素[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 78-86. (Wang Xiaojie, Xia Junqiang, Li Qijie, et al. Spatiotemporal variation of flood distribution and influencing factors in provinces in middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 78-86. (in Chinese))
- [29] 王小杰, 夏军强, 李启杰, 等. 长江中下游地区洪灾损失率函数构建及洪涝灾害损失评估[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 88-98. (Wang Xiaojie, Xia Junqiang, Li Qijie, et al. Construction of flood loss rate function and flood loss assessment in middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 88-98. (in Chinese))
- [30] 白淑英, 张正, 顾海敏, 等. 长江流域汛期候尺度降水量时空集中特征和洪涝关系[J]. 气象科学, 2024, 44(5): 825-832. (Bai Shuying, Zhang Zheng, Gu Haimin, et al. Spatial and temporal concentration characteristics of pentad-precipitation and its relationship to flood-producing into the Yangtze River Basin [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2024, 44(5): 825-832. (in Chinese))
- [31] 张涛, 胡挺, 胡琼方, 等. 长江流域历史典型洪水研究[J]. 人民长江, 2023, 54(9): 17-23. (Zhang Tao, Hu Ting, Hu Qiongfang, et al. Research on historical typical floods in Changjiang River Basin [J]. Yangtze River, 2023, 54(9): 17-23. (in Chinese))
- [32] 水利部长江水利委员会. 长江流域综合规划(2012—2030年)[R]. 武汉: 水利部长江水利委员会, 2012.
- [33] 中华人民共和国水利部. 2024年长江流域水工程联合调度运用计划获水利部批复[R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2024.
- [34] 郭生练, 王俊, 谢雨祚, 等. 面向新时期新需求的三峡水库运行方案研究[J]. 水利学报, 2024, 55(4): 379-388. (Guo Shenglian, Wang Jun, Xie Yuzuo, et al. Three gorges reservoir operation scheme facing the new era and new demands [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(4): 379-388. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-09-09 编辑: 王芳)

(上接第 71 页)

- [15] 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. (in Chinese))
- [16] 王治莹, 马若涵, 刘翰界. 考虑决策者不同情绪状态的洪水灾害链多阶段应急决策方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, 21(5): 209-217. (Wang Zhiying, Ma Ruohan, Liu Hanjie. Multi-stage emergency decision-making method for flood disaster chain considering different emotional states of decision-makers [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2025, 21(5): 209-217. (in Chinese))
- [17] 李选栋, 申国朝. 郑州市京广北路隧道设计综述[J]. 城市道桥与防洪, 2013(7): 344-347. (Li Xuandong, Shen Guochao. Summarization on design of Jingguang road (N) tunnel in Zhengzhou City [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2013(7): 344-347. (in Chinese))
- [18] 杜磊, 杨晓宽. 不同道路积水情况对交通影响及造成损失的研究[C]//科技创新 绿色交通: 第十一次全国城市道路交通学术会议论文集. 大连: 中国土木工程学会市政工程分会城市道路与交通学术委员会, 2011: 389-393.
- [19] Pudjaprasetya S R, Noor M M. An analysis of a three-phase versus a four-phase traffic lights regulation for a four-leg intersection [J]. Journal of the Indonesian Mathematical Society, 2020, 26(2): 192-201.
- [20] Hasman A. Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference [M]. Burlington: Morgan Kaufmann Publishers, 1991: 221-225.
- [21] Hosseini F S, Choubin B, Mosavi A, et al. Flash-flood hazard assessment using ensembles and Bayesian-based machine learning models: application of the simulated annealing feature selection method [J]. Science of the Total Environment, 2020, 711: 135161.
- [22] Huang Shanqing, Wang Huimin, Xu Yejun, et al. Key disaster-causing factors chains on urban flood risk based on Bayesian network [J]. Land, 2021, 10(2): 210.
- [23] 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. (in Chinese))
- [24] 朱茵, 孟志勇, 阚叔愚. 用层次分析法计算权重[J]. 北方交通大学学报, 1999, 23(5): 119-122. (Zhu Yin, Meng Zhiyong, Kan Shuyu. Determination of weight value by AHP [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 1999, 23(5): 119-122. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-06-13 编辑: 王芳)