DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2025. 02. 013

基于复杂网络的洪涝灾害链风险评估

高玉琴,徐 诺,汪 键,王丽君,刘 彤

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:为研究洪涝灾害演化过程对流域居民生活和社会经济的影响,从灾害链和复杂网络视角对洪涝灾害链演化风险开展评估。通过收集洪涝灾害典型案例,结合事件树分析法,搭建了洪涝灾害链演化网络。基于贝叶斯网络和网络传播模型,构建了洪涝灾害链风险评估模型,并应用于秦淮河流域。结果表明:洪涝灾害链综合风险由节点风险累积或叠加构成;秦淮河流域"2016·7"洪涝灾害链综合风险水平在洪涝灾害发生后约 103 h 达极大值,约 173 h 达第二峰值,综合风险水平约为原生洪涝风险的 7 倍;公路事故、供排水事故、生态环境破坏事故、水污染事故为关键节点,洪涝灾害→水土流失灾害→水污染事故→生态环境破坏事故为关键传播边,通过对关键节点加强监测应对,对关键链条进行阻截断链,可有效减灾降损。

关键词:洪涝灾害;灾害链;复杂网络;事件树分析法;贝叶斯网络;秦淮河流域

中图分类号:TV213. 4 **文献标志码**:A **文章编号**:1004 - 6933(2025)02 - 0115 - 08

Risk assessment of flood disaster chain based on complex network//GAO Yuqin, XU Nuo, WANG Jian, WANG Lijun, LIU Tong(*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: To study the impact of the evolution process of flood disaster on the resident lives and socio-economic development in the watershed, the evolution risk of flood disaster chain was evaluated from the perspective of disaster chain and complex network. By collecting typical cases of flood disaster and combining event tree analysis, the evolution network of flood disaster chain was constructed. Based on the Bayesian network and network propagation model, a flood disaster chain risk assessment model was built, and a case study was conducted in the Qinhuai River Basin. The results show that the comprehensive risk of flood disaster chain is composed of the accumulation or superposition of node risks. The comprehensive risk level of the "2016·7" flood disaster chain in the Qinhuai River Basin reaches the maximum value about 103 h after the occurrence of the flood disaster and the second peak value about 173 h, which is about 7 times the risk of primary flood disaster. Road accident, water supply and drainage accident, ecological environment damage accident, and water pollution accident are key nodes. Flood disaster→soil erosion disaster→water pollution accident→ecological environment destruction is the key transmission edge. By strengthening monitoring and response to key nodes and intercepting critical chains, effective disaster reduction and damage reduction can be achieved.

Key words: flood disaster; disaster chain; complex network; event tree analysis; Bayesian network; the Qinhuai River Basin

全球气候变暖背景下,极端天气导致的洪涝灾害显著增加,且随着城市化进程不断深入,洪涝灾害复杂的形成机理常导致多灾并发[1]、次生灾害频发,进而形成链式效应[2]。例如,2021 年河南省发生严重洪涝并引发大量次生灾害,造成重大人员伤亡和财产损失[3]。单一灾害的爆发为其他次生灾害创造发生条件,是一种灾害传播和放大的现象,被称为灾害链[4]。结合对灾害链理论的认识和洪涝灾害演变规律的深入了解,针对洪涝灾害演变中的关键环节采取预防措施对于提高灾害预警能力、减少灾害损失有重要意义。

国内外众多学者已从灾害链视角分析洪涝灾害并探讨减灾策略,例如:Metin 等[5]构建了区域气象、降雨径流、区域洪水、损失估算等一系列模型来系统描述洪涝灾害链的过程;王婷等[6]构建了台风-洪涝-地质灾害链减灾能力评估指标体系,应用多级模糊综合评估模型定量评价了该灾害链的减灾能力。随着复杂网络理论的发展,有学者将复杂网络

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3000104);国家自然科学基金项目(52079039);江苏省水利科技项目(2023009)

作者简介:高玉琴(1978—)女,教授,博士,主要从事水资源规划与洪灾风险控制研究。E-mail:yqgao@ hhu. edu. cn

引入到洪涝灾害链演化过程研究和风险评估中，揭示洪涝灾害等复杂系统的内在特性[7]。例如：李磊等[8]在复杂网络视角下建立了雨洪灾害链风险评估模型，基于节点重要度和边脆弱度对灾害链风险进行评估；刘颖颖等[9]分析了郑州“7·20”特大洪涝灾害链，结合复杂网络理论量化了灾害链脆弱性并确定了关键节点路径。当前，多数灾害链风险评估研究从复杂网络角度分析灾害链演化的拓扑结构，对风险的评估主要通过网络进行分析推理[8-9]。也有学者通过构建基于网络的风险动态演化模型[10]、引入动力学变量[11]、知识图谱灾害链推演[12]等方式探索灾害链演化过程中风险的时变特征，其中部分研究结合了数学模型[13]量化灾害链风险水平。目前，洪涝灾害链的研究成果主要集中于理论分析和定性描述层面，尚未形成系统的研究框架，在如何利用数学和物理建模深入分析洪涝灾害链的形成机制以及如何量化评估洪涝灾害链的风险方面仍缺乏有效的研究方法。因此，本文基于复杂网络理论搭建洪涝灾害链演化网络，结合贝叶斯网络和网络传播模型，构建洪涝灾害链风险评估模型，分析风险评估结果，提取洪涝灾害链关键节点和关键传播边，以期为区域防灾减灾提供参考。

1 洪涝灾害风险传递关系分析

通过网络大数据和事件树分析法，对国内外洪涝灾害案例进行归纳梳理，提取洪涝灾害链的节点单元，确定洪涝发生后可能的灾害事件并分析事件间相互作用与演化关系，基于复杂网络搭建洪涝灾害链演化网络，用于后续风险评估。

1.1 洪涝灾害链节点提取

洪涝灾害链是由致灾因子、孕灾环境以及承灾体三要素[14]构成的复杂系统。其中，致灾因子为引发或加剧灾害并造成损失的因素，包括极端气候变化、人类活动等，具有不可预测性和突发性；孕灾环境为地区可能孕育灾害的所有环境条件的总和；承灾体为直接遭受严重损失的个体，包括居民、基础设施等，是致灾因子的作用对象[15-16]。洪涝灾害链系统的表达式为

$$D = \{E, H, S, R\} \tag{1}$$

式中：D 为洪涝灾害链系统；E 为致灾因子；H 为孕灾环境；S 为承灾体；R 为三者复杂耦合作用所形成的灾情反馈。

案例检索是理解灾害事件的关键手段，可为分析洪涝灾害链提供基础。本文利用网络大数据技术，通过网络、报纸、自媒体等多种信息传播渠道，设置“洪涝灾害”“洪水”“流域洪涝”“历史超大洪水”等主题关键词，获取具有广泛影响的特定洪涝灾害案例。经过数据采集、重复数据删除、噪音数据删除及案例核验，最终收集到 2 438 条数据用于后续分析。例如，2020 年长江流域特大洪水，梅雨期持续强降雨，鄱阳湖水位突破历史极值，圩堤出现决口，导致周边多个城市内涝，交通动脉中断，影响了抗洪物资的运输；2021 年河南省发生洪涝灾害，引发河流泛滥和山体滑坡，生态景区不同程度受损，城市内涝积水导致超 50% 的小区地下空间和重要公共设施被淹，多区域出现断电、断水、断网，高速封路，高铁和航班停运。经分析，洪涝灾害防御的对象主要包括基础设施、公共安全、生态环境和社会经济 4 个方面；洪涝灾害链的节点事件存在相继出现或同时出现的现象，各节点单元存在关联；随着洪涝灾害的发生，孕灾环境变化，致灾因子增强，基础设施失效致使承灾体进一步暴露，进而导致次生灾害以及各因素跨系统的耦合灾害，加剧了洪涝灾害所带来的影响。在收集全国范围内历史洪涝灾害案例数据基础上，运用事件树分析法研究洪涝灾害引发的次生灾害[17]，得到涵盖自然灾害、事故灾难、公共卫生和社会安全等 4 个方面突发事件的洪涝灾害链节点单元，如表 1 所示。

表 1 洪涝灾害链节点单元

Table 1 Node unite of flood disaster chain

节点编号	节点名称	节点编号	节点名称
V_1	洪涝灾害	V_{15}	矿山事故
V_2	公路事故	V_{16}	地铁事故
V_3	地面塌陷灾害	V_{17}	通信事故
V_4	铁路事故	V_{18}	生态环境破坏事故
V_5	泥石流灾害	V_{19}	水污染事故
V_6	电力事故	V_{20}	植物病虫害
V_7	滑坡灾害	V_{21}	生活必需品市场混乱
V_8	供气事故	V_{22}	爆炸/火灾
V_9	崩塌灾害	V_{23}	传染病疫情
V_{10}	水土流失灾害	V_{24}	动物疫情
V_{11}	供排水事故	V_{25}	土壤污染
V_{12}	建筑安全事故	V_{26}	饮用水安全事件
V_{13}	盐渍化灾害	V_{27}	食物中毒
V_{14}	航运事故	V_{28}	社会治安事件

1.2 洪涝灾害链演化网络搭建

复杂网络是一种由多节点和多条边组成的网络拓扑结构，将真实系统高度抽象化得到具有复杂结构特性的网络，为预防灾害进一步演化提供基础[18]。通过洪涝灾害案例分析，在外界刺激与新危险因素相互作用下，风险事件的链式效应不断被触发，灾害释放的物质、能量和信息以灾变形式传播和演变，形成连续的破坏性事件，如图 1 所示。根据洪涝灾害案例数据分析，选用 Jaccard 指数法量化各节点单元共现频率，节点间共现频率越大，其相互关

联性越密切,计算公式为

$$\alpha_{j\to i}=\frac{C_{ij}}{C_i+C_j-C_{ij}} \tag{2}$$

式中:$\alpha_{j\to i}$ 为节点 i、j 之间的共现频率,当 $\alpha_{j\to i}\geqslant 0.5$ 时,认为两节点间存在邻接关系;C_{ij} 为洪涝灾害案例中节点 i、j 同时发生灾害的频次;C_i 为节点 i 发生灾害的总频次;C_j 为节点 j 发生灾害的总频次。

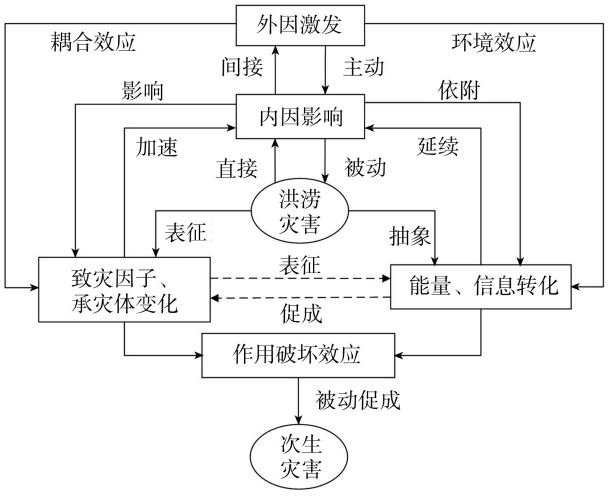


图 1　洪涝灾害链形成机理

Fig. 1　Formation mechanism of flood disaster chain

Cytoscape 软件是一款开源的复杂网络分析工具,可提供网络显示、布局、查询等方面的功能。本文借助 Cytoscape 软件,以洪涝灾害为输入变量、灾害后续时间为输出变量,结合节点有序传递关系,构建洪涝灾害链演化网络拓扑图,如图 2 所示,该图将洪涝灾害链中各节点单元之间的关系用拓扑图谱结构的方式展现,可更直观地了解各节点间的诱发关系。

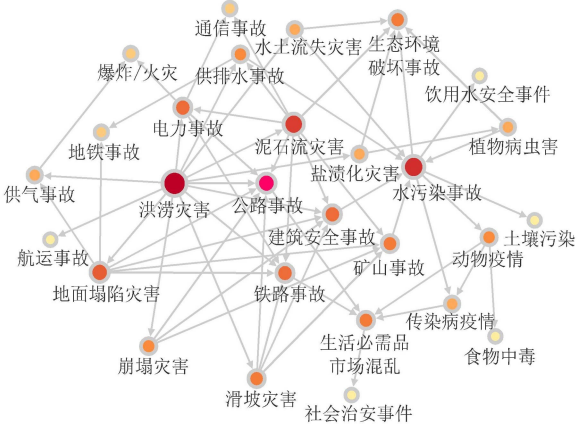


图 2　洪涝灾害链演化网络拓扑图

Fig. 2　Topology diagram of flood disaster chain evolution network

2　洪涝灾害链风险评估模型构建

洪涝灾害风险通常包括致灾因子和孕灾环境的危险性、承灾体的暴露性和脆弱性以及防灾减灾能力[19],其损失是多种因素相互作用的结果[20]。而灾害链视角下各节点单元的发生具有不确定性,加剧了洪涝灾害风险的复杂性,放大了洪涝灾害所造成的社会和经济影响[21]。因此,基于链式风险的概念,将洪涝灾害链风险定义为:在洪涝灾害发生后,灾害链事件在一定概率条件下造成灾害损失并诱发相关连锁反应所导致的系统链式风险。参考 Zhu 等[10]研究中的灾害演化风险组成框架,将灾害链中每个关键节点视作特定灾害事件的风险。节点风险由节点所代表事件的发生可能性与事件造成的后果严重性共同组成,各节点风险以叠加或累积的方式构成整个洪涝灾害链的综合风险。不同流域在不同年份的洪涝特征可能存在差异,因此利用灾害链中的"发生可能性"这一因素对不同区域洪涝特征进行区分,利用"后果严重性"这一因素对不同年份洪涝特征进行区分,确保模型能够对于不同情境进行合理的解释。

2.1　基于贝叶斯网络的节点发生可能性模型

贝叶斯网络常被用于模仿人类在推断因果关系时处理不确定性的方式[22]。贝叶斯网络模型数学表达的核心公式见式(3)。贝叶斯网络中每个节点象征具体的风险事件,所有可以引出指向其他节点的风险节点称为父节点,被引出指向的节点则对应为其子节点;有向边则揭示事件间的相互作用,作用关系通过父节点到子节点的方向性表示,通过条件概率量化变量之间的依存关系,需确定每个父节点与其所有子节点之间可能组合的状态概率值。

$$P(A\mid B)=\frac{P(AB)}{P(B)}=\frac{P(B\mid A)P(A)}{P(B)} \tag{3}$$

式中:$P(A\mid B)$ 为后验概率,即 B 事件发生时 A 事件发生的概率;$P(AB)$ 为 A、B 两个事件共同发生的概率,也称为联合概率;$P(A)$、$P(B)$ 为 A、B 两个事件发生的先验概率;$P(B\mid A)$ 为条件概率,即 A 事件发生时 B 事件发生的概率。

节点先验概率计算基于网络大数据获取历史灾害案例统计资料进行,计算公式见式(4)。根据各节点先验概率,对由单一父节点事件引发单一子节点事件的发生可能性进行计算,计算公式见式(5)。对所有节点发生可能性进行汇总,逐步计算该灾害链中各父节点引发各子节点的概率,以此完成该灾害链发生可能性的计算,计算公式见式(6)。

$$P(x_i\mid x_{pi})=N_i/N_{pi}\quad(i=1,2,\cdots,n) \tag{4}$$

$$P(x_i)=P(x_{pi})P(x_i\mid x_{pi}) \tag{5}$$

$$P(x_1,x_2,\cdots,x_n)=\prod_{i=1}^{n}P(x_i\mid x_{pi}) \tag{6}$$

式中:x_{pi} 为节点 x_i 的父节点;N_{pi} 为父节点事件发

生数量；N_i 为由其父节点导致的节点 x_i 的事件发生数量；n 为洪涝灾害链节点数。

2.2 节点后果严重性网络传播模型

参考邵月洋等[23-24]的研究，将后果严重性定义为：洪涝灾害链网络演化进程中，每单位时间事件所造成的生命财产和经济活动的期望损失值。因此，基于空间信息格网计算洪涝灾害损失，并对其在时间上求导，获得每个计算步长下的后果严重性量化值，计算公式为

$$W_t = \mathrm{d}Q_t/\mathrm{d}t \tag{7}$$

式中：W_t 为节点事件 t 时刻的后果严重性；Q_t 为 t 时刻洪涝灾害经济损失。

灾害链节点事件的后果严重性会随着灾害演化的推进而变化，因此对其进行量化时，父节点与子节点事件间的相互作用关系不可忽略。此外，演化过程中各节点的后果严重性会因链式效应在时间上呈放大效应，其影响和危害逐步被扩大[11]。基于此，借鉴 Chen 等[25]提出的灾害演化系统动力学模型，构建洪涝灾害链节点后果严重性网络传播模型，表达式为

$$W_{tj} = \alpha_{i\to j}\left(\left(\frac{1}{r_{i\to j}} - 1\right)\varepsilon_{i\to j} + 1\right)P_j\beta_{i\to j}W_{ti}(t - t^*_{i\to j}) \tag{8}$$

其中

$$\beta_{i\to j} = \begin{cases} 0 & t - t^*_{i\to j} < 0 \\ 1 & t - t^*_{i\to j} \geqslant 0 \end{cases}$$

$$\varepsilon_{i\to j} = \begin{cases} 0 & \text{无干预力量} \\ 1 & \text{存在干预力量} \end{cases}$$

式中：W_{tj} 为 t 时刻子节点 x_j 的后果严重性；W_{ti} 为 t 时刻父节点 x_i 的后果严重性；$r_{i\to j}$ 为灾害干预能力；$\varepsilon_{i\to j}$ 为判别系数；P_j 为子节点 x_j 处于发生状态的后验概率；$\beta_{i\to j}$ 为时序系数，是一种判断函数，避免当 $t-t^*_{i\to j}<0$ 时洪涝灾害链节点后果严重性无输出结果的情况出现；$t^*_{i\to j}$ 为延时时间，是由父节点 x_i 导致子节点 x_j 演化行为的延时时间。$\alpha_{i\to j}$ 反映了父节点 x_i 对子节点 x_j 的影响度。$r_{i\to j}$ 用于判别父节点 x_i 与子节点 x_j 之间是否存在干预力量，参照赵冬月等[26]的研究，对灾害干预等级进行划分，结果如表 2 所示。为进一步评估洪涝灾害链风险，对后果严重性的计算结果进行标准化处理，将数值标准化至 0~10，计算公式为

$$W^* = \frac{W - W_{\min}}{W_{\max} - W_{\min}} \times 10 \tag{9}$$

式中：W 为洪涝灾害链后果严重性量化值；W^* 为后果严重性标准化值；$W_{\min}$、$W_{\max}$ 分别为后果严重性量化的最小值和最大值。

表 2 干预等级划分结果

Table 2 Result of intervention level classification

干预等级	干预形式	干预能力
无干预	责任部门未做出应对措施，各部门间无协同工作	1.0
弱干预	节点事件即将发生或已经发生，责任部门做出应对措施，但各部门间沟通协作差，管理混乱，未形成有效的救援力量	1.5
强干预	节点事件即将发生，责任部门及时做出应对，各部门间沟通协作良好，可以迅速定位、进行干预并形成有效的救援力量	3.0

2.3 洪涝灾害链风险评估模型

将发生可能性和后果严重性划分为 5 个等级，如表 3 所示。图 3 为洪涝灾害风险矩阵，基于其进行洪涝灾害链节点风险和综合风险的评估。

表 3 发生可能性和后果严重性等级划分

Table 3 Classification of probability and severity of consequences

等级	发生可能性		后果严重性	
	取值范围/%	含义	取值范围	含义
极高	80~00	极有可能发生	8~<10	破坏性大，会造成重大损失，短时间不可控
较高	60~<80	较大可能发生	6~<8	破坏力较大，会造成较大损失且可控性低
中等	30~<60	可能发生	4~<6	破坏性中等，可控性中等，会造成损失
较低	10~<30	较小可能发生	2~<4	破坏性较小，可控性较高，损失较小
极低	0~<10	不太可能发生	0~<2	破坏性极小，完全可控，几乎不造成损失

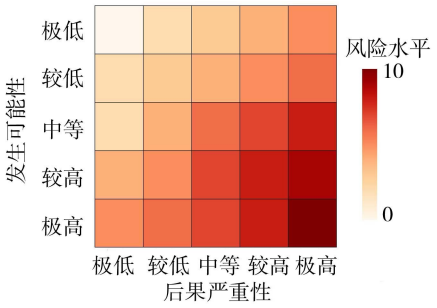


图 3 洪涝灾害链风险矩阵

Fig. 3 Risk matrix of flood disaster chain

根据节点事件某时刻对应发生可能性和后果严重性的等级确定节点风险水平，进而计算各节点风险水平量化值，计算公式为

$$R = R_{\min} + \frac{(W' - W'_{\min})(P - P_{\min})}{(W'_{\max} - W'_{\min})(P_{\max} - P_{\min})}(R_{\max} - R_{\min}) \tag{10}$$

式中：R 为节点风险水平量化值；$R_{\min}$、$R_{\max}$ 分别为某一风险等级区间的最小值和最大值；W'为节点后果

严重性量化值；W'_{min}、W'_{max} 分别为某一后果严重程度等级区间的最小值和最大值；P 为节点发生可能性量化值；P_{min}、P_{max} 分别为某一发生可能性等级区间的最小值和最大值。

洪涝灾害链综合风险是指由洪涝灾害作为原生灾害引发灾害链演化网络的系统综合风险，由多个子风险累积构成。基于计算所得每个步长下的节点风险水平，计算洪涝灾害链综合风险，计算公式为

$$R_t^* = \sum_{i=1}^{n} R_{ti} \tag{11}$$

式中：R_t^* 为 t 时刻洪涝灾害链综合风险水平；R_{ti} 为 t 时刻 x_i 节点的风险水平。

3 实例应用

3.1 研究区概况

秦淮河流域属长江干流水系，位于江苏省西南部，流经镇江市、句容市和南京市的大部分地区。秦淮河流域四季分明，温和湿润，属亚热带季风气候区，地貌以丘陵、岗地为主，中间地势低平，呈蒲扇形，流域性洪涝时常发生。根据水文年鉴资料，秦淮河流域 2016 年发生的洪水是由持续强降雨与长江潮水位共同作用下产生，年降水量较多年平均降水量偏多 75%，秦淮河水倒灌，流域内涝严重，导致流域内发生道路积水封闭、水污染、居民区断电，流域内省道发生泥石流等一系列次生灾害，全流域受灾情况严重。因此选取秦淮河流域 2016 年洪水作为洪涝灾害链风险评估实例。

3.2 洪涝灾害链节点发生可能性评估

根据构建的基于贝叶斯网络的节点发生可能性模型，以洪涝灾害链演化子网络为例，说明贝叶斯网络节点条件概率的计算过程。图 4 为洪涝灾害链演化子网络条件概率分布示意图，其中节点 A、B、C、D、E 分别代表洪涝灾害、公路事故、建筑安全事故、生活必需品市场混乱以及水污染事故。对贝叶斯网络中的节点取值变量进行离散化处理，其中节点被建模为二元变量，即处于节点发生状态（是）或未发生状态（否），贝叶斯网络中各个节点与其父节点间的依赖关系，反映各节点在其父节点不同状态时对应的条件概率分布情况。由图 4 可见，节点 A、B 无父节点，发生概率不依赖于其他节点的状态，而节点 C、D、E 的概率则取决于其他节点。节点 C 的父节点为节点 A、B，当 A、B 分别处于不同状态时，节点 C 处于发生状态的概率可分为 4 种情形 C1、C2、C3、C4，节点 D、E 的概率情况同理可得。

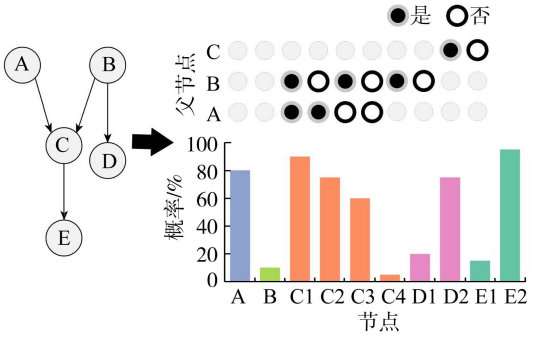


图 4 洪涝灾害链演化子网络条件概率分布示意图

Fig. 4 Schematic diagram of conditional probability distribution of sub network of flood disaster chain evolution

基于网络大数据获取秦淮河流域历史灾害案例统计资料，并结合《中国气象灾害大典》（江苏卷）中暴雨洪涝部分内容，统计历年强降雨作用下各类典型次生灾害事件的发生次数，计算“洪涝灾害”节点 V_1 完全处于发生状态（是）时，每个节点在贝叶斯网络中的发生可能性，结果如图 5 所示，图中数字代表各灾害事件发生状态为是或否的概率。

3.3 洪涝灾害链节点后果严重性评估

基于 Gao 等[27]的研究，收集秦淮河流域农业产值、固定资产等社会经济数据，建立洪涝灾害损失评估模型，基于空间信息格网计算洪涝灾害动态损失，结果如图 6 所示。根据计算得到的秦淮河流域洪涝灾害总损失在每个时间步长下的变化值，求得每个时刻的后果严重性值并开展分析。图 7 为秦淮河流域洪涝灾害后果严重性变化过程，可见在洪涝淹没模拟过程中，洪涝灾害后果严重性呈先升高后降低，再升高再降低的趋势。通过后果严重性网络传播模型，求得各节点后果严重性量化值。将灾情设定为发现并确认洪涝灾害已发生情况下，即父灾害节点对子灾害节点之间不存在干预力量，灾害干预能力 r 的判别系数为 0。

3.4 洪涝灾害链风险评估

根据节点发生可能性和后果严重性的等级划分，通过风险矩阵找到节点风险对应的数值区间，量化风险水平，进而求得实例洪涝灾害链综合风险水平，结果如图 8 所示。由图 8 可见，实例洪涝模拟开始后综合风险水平不断增大，直到 103 h 左右达到综合风险的极大值，之后呈下降趋势，约 173 h 达第二峰值，随后下降速率显著变缓。对比洪涝原生灾害风险随时间的变化情况，考虑洪涝灾害链的系统综合风险峰值约为原生洪涝灾害的 7 倍，达到峰值的时刻有所滞后，而高风险时段的持续时间更长，这是由于灾害链系统风险由多个节点风险累积叠加构成，且节点间存在风险传递关系。同时，多数节点的风险水平在洪涝灾害的演化过程中呈现先升高后降低的趋势，部分节点甚至出现多个风险峰值。例如：

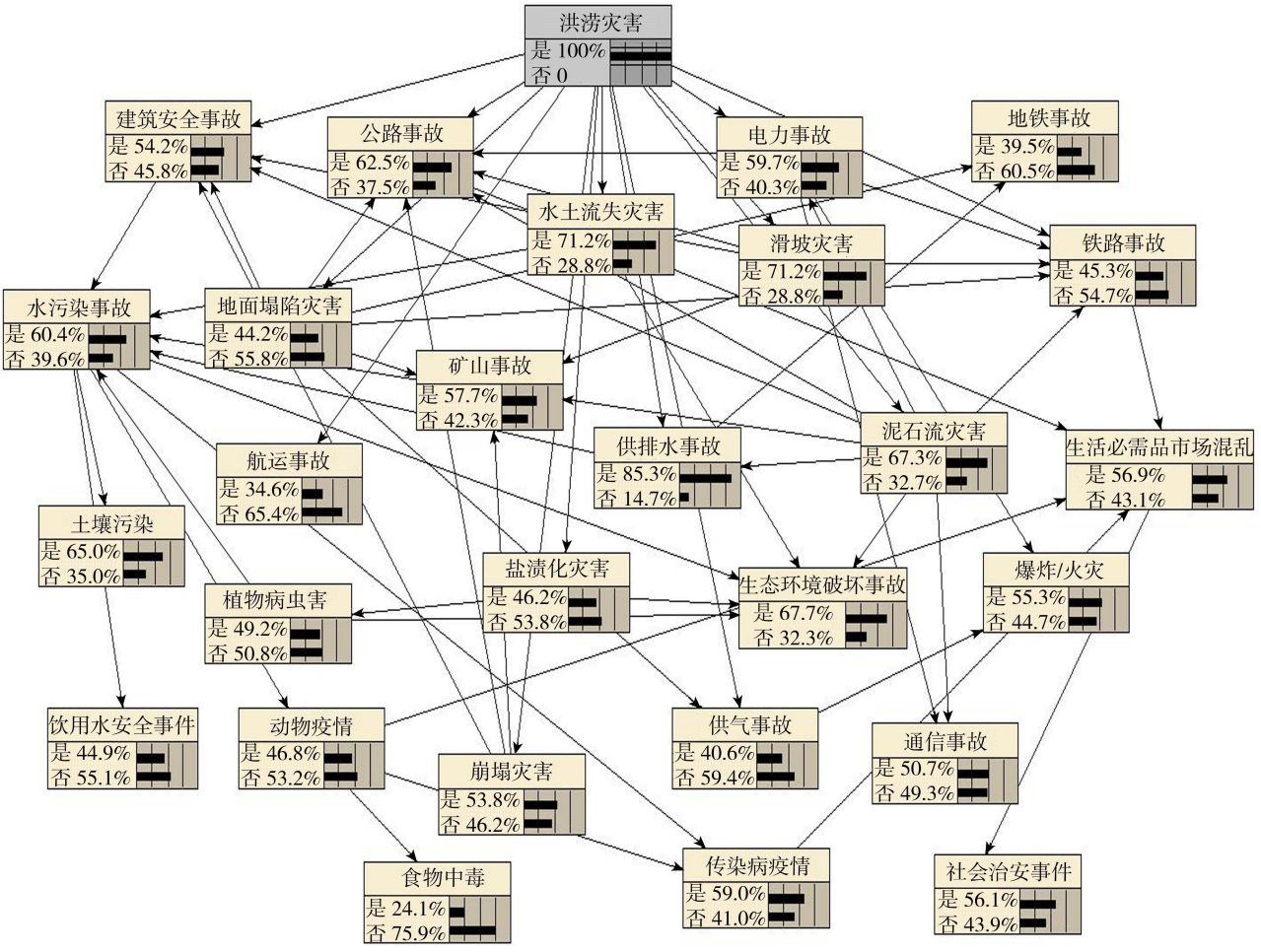


图 5　秦淮河流域洪涝灾害链贝叶斯网络图

Fig. 5　Bayesian network diagram of example flood disaster chain in the Qinhuai River Basin

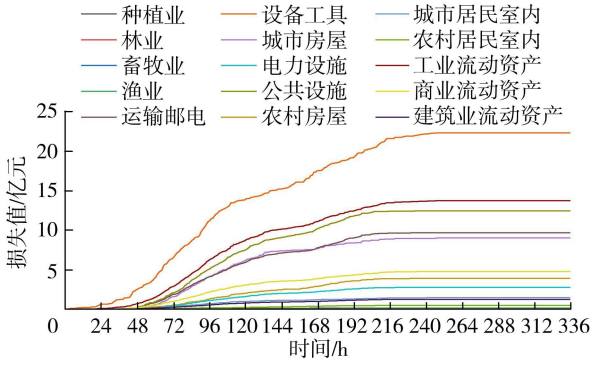


图 6　秦淮河流域洪涝损失动态变化曲线

Fig. 6　Dynamic change curves of example flood loss in the Qinhuai River Basin

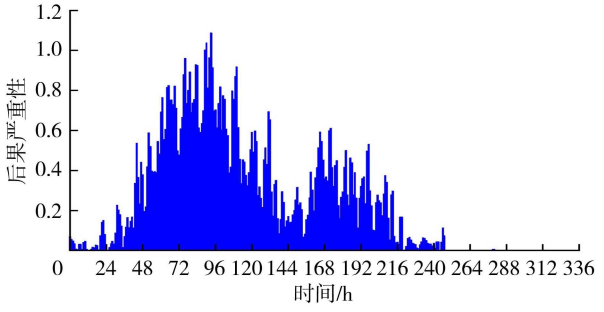


图 7　秦淮河流域洪涝灾害后果严重性变化过程

Fig. 7　Change process of consequence severity of example flood disaster in the Qinhuai River Basin

节点 V_2 在洪涝模拟开始后风险水平呈上升趋势，约 99 h 达第一峰值 8.125，随即风险水平呈下降趋势，约 149 h 再次出现上升，约 178 h 达第二峰值 4.087。除节点 V_2 外，V_{11}、V_{18}、V_{19} 等节点风险水平也出现反复升降的情况，一方面由于这些节点受到多个父节点的影响，另一方面则由于不同父节点对子节点造成的影响存在延迟效应。

根据洪涝灾害节点风险量化值对洪涝灾害链节点风险水平进行等级划分，包括极低（<2）、较低（2~<4）、中等（4~<6）、较高（6~<8）、极高（8~10）5 个等级。统计各节点风险处于中、高风险等级的时长分布情况，即节点风险 $R_i \geqslant 4$ 的持续时间。洪涝灾害链节点 V_2、V_5、V_7、V_{10}、V_{11}、V_{12}、V_{18}、V_{19} 都存在处于中等及以上风险等级的时段，说明这些节点在洪涝灾害链演化网络中起到了相对重要的作用，其中节点 V_2、V_{11}、V_{18}、V_{19} 部分时段处于较高、极高风险状态，说明这些节点单元在洪涝灾害链演化网

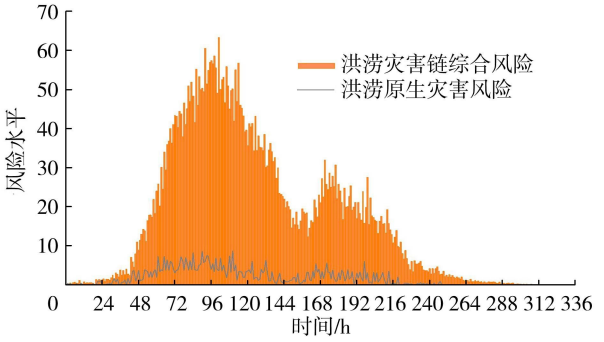


图 8　秦淮河流域洪涝灾害链综合风险

Fig. 8　Comprehensive risk of example flood disaster chain in the Qinhuai River Basin

络中风险表现较明显,在洪涝灾害中应作为重点防治节点。将存在较高、极高风险状态的节点单元作为关键节点,寻找与其关的连接边,进行洪涝灾害链演化网络的关键传播边提取,结果如表 4 所示,相关政府部门应重点关注,加强其灾害干预能力,通过降低或阻断链式效应减灾降损。

表 4　关键灾害传播链条

Table 4　Key chains of disaster transmission

灾害链条	中等、较高及极高风险状态总时长/h
洪涝灾害→水土流失灾害→水污染事故→生态环境破坏事故	183
洪涝灾害→泥石流灾害→供排水事故→水污染事故→土壤污染	139
洪涝灾害→电力事故→公路事故→生活必需品市场混乱	127
洪涝灾害→滑坡灾害→建筑安全事故→水污染事故→土壤污染	109

4　结　论

a. 基于灾害风险和链式风险的视角,将洪涝灾害链风险定义为:在洪涝灾害发生后,灾害链事件在一定概率条件下造成灾害损失并诱发相关连锁反应所导致的系统综合风险。将灾害链中的每个关键节点视作特定灾害事件的风险,节点风险由所代表事件的发生可能性与该事件后果严重性组成,洪涝灾害链综合风险由节点风险累积或叠加构成。

b. 秦淮河流域“2016・7”洪涝灾害链的综合风险水平在模拟开始后不断增大,约 103 h 达到峰值,之后风险呈下降趋势,约 173 h 达第二峰值;洪涝灾害链综合风险峰值约为原生洪涝风险峰值的 7 倍,达峰时刻略有滞后,高风险时段持续时间更长。多数节点的风险水平在洪涝灾害的演化过程中呈现先升高后降低的趋势;部分节点出现多个风险峰值,与父节点数量和延时效应有关。

c. 根据各节点风险处于中、高等级风险状态的时长分布情况,提取出秦淮河流域“2016・7”洪涝灾害链 4 条关键传播边:①洪涝灾害→水土流失灾害→水污染事故→生态环境破坏事故;②洪涝灾害→泥石流灾害→供排水事故→水污染事故→土壤污染;③洪涝灾害→电力事故→公路事故→生活必需品市场混乱;④洪涝灾害→滑坡灾害→建筑安全事故→水污染事故→土壤污染。通过对关键节点加强监测应对,对关键链条进行阻截断链,可有效减灾降损。

参考文献:

[1] 张金良,罗秋实,王冰洁,等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J]. 水资源保护,2024,40(1):6-15. (ZHANG Jinliang,LUO Qiushi,WANG Bingjie,et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (1): 6-15. (in Chinese))

[2] 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))

[3] 张楚汉,王光谦,李铁键. 变化环境下城市暴雨致灾防御对策与建议[J]. 中国科学院院刊,2022,37(8):1126-1131. (ZHANG Chuhan, WANG Guangqian, LI Tiejian. Prevention countermeasures and suggestions for urban rainstorm disasters under changing environment [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37 (8):1126-1131. (in Chinese))

[4] WANG Qiyuan, HOU Jundong. Hazard assessment of rainstorm-geohazard disaster chain based on multiple scenarios[J]. Natural Hazards,2023,118(1):589-610.

[5] METIN A D, DUNG N V, SCHRÖTER K, et al. How do changes along the risk chain affect flood risk? [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2018, 18 (11):3089-3108.

[6] 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))

[7] 周建林,樊瑛,狄增如. 复杂网络进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2023,59(5):691-704. (ZHOU Jianlin, FAN Ying, DI Zengru. Progress in complex networks [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science),2023,59(5):691-704. (in Chinese))

[8] 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))
[9] 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))
[10] ZHU Guangyu, SUN Ranran, FAN Jiaxin, et al. Coupling effect and chain evolution of urban rail transit emergencies [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(1):1044-1053.
[11] 赵冬月,陈长坤,易亮. 灾害演化网络时序性风险评估模型[J]. 中国安全科学学报,2021,31(3):171-177. (ZHAO Dongyue, CHEN Changkun, YI Liang. Time-series risk assessment model for disaster evolution network[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(3):171-177. (in Chinese))
[12] 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))
[13] 陈长坤,谢明峰,赵冬月. 基于风险矩阵的灾害演化网络定量分析方法[J]. 灾害学,2022,37(1):13-17. (CHEN Changkun, XIE Mingfeng, ZHAO Dongyue. Research on quantitative analysis method of disaster evolution network based on risk matrix[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(1):13-17. (in Chinese))
[14] 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))
[15] 姚蕊,杨群涛,张书亮. 城市暴雨内涝灾害脆弱性研究综述[J]. 水资源保护,2023,39(1):93-100. (YAO Rui, YANG Quntao, ZHANG Shuliang. Review on vulnerability of urban rainstorm waterlogging disaster[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1):93-100. (in Chinese))
[16] 季孔阳,李学明,高见,等. 城市暴雨洪涝灾害脆弱性评价[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):13-20. (JI Kongyang, LI Xueming, GAO Jian, et al. Assessment of urban vulnerability to heavy rain and flood disasters[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(3):13-20. (in Chinese))
[17] 吴双阳. 基于复杂网络的暴雨灾害链时序性风险评估研究[D]. 北京:北方工业大学,2022.
[18] 汪小帆,李翔,陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
[19] 郑德凤,高敏,李钰,等. 基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):1-8. (ZHENG Defeng, GAO Min, LI Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3):1-8. (in Chinese))
[20] 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))
[21] 刘高峰,王慧敏,黄晶,等. 洪涝灾害诱发的城市系统性风险管理[J]. 复杂科学管理,2023(1):65-74. (LIU Gaofeng, WANG Huimin, HUANG Jing, et al. Systemic risk management of urban areas induced by flood disasters [J]. Complex Scientific Management, 2023(1):65-74. (in Chinese))
[22] 张超,翁文国,陈勇,等. 基于贝叶斯网络的地铁暴雨内涝风险预警模型及协同响应机制研究[J]. 中国安全生产科学技术,2023,19(12):179-186. (ZHANG Chao, WENG Wenguo, CHEN Yong, et al. Research on risk warning model and collaborative response mechanism of subway rainstorm waterlogging based on Bayesian network [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(12):179-186. (in Chinese))
[23] 邵月洋. 天津生态城城市生产安全风险评估及动态管控研究[D]. 天津:天津大学,2019.
[24] 马聪. 基于变形的高土石坝地震易损性分析及抗震安全风险评估研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2023.
[25] CHEN Changkun, LI Zhi, SUN Yunfeng. A new model for describing evolution and control of disaster system including instantaneous and continuous actions [J]. International Journal of Modern Physics C, 2010, 21(3):307-332.
[26] 赵冬月,施波,陈以琴,等. 协同管理对城市韧性增强机制的影响[J]. 管理评论,2016,28(8):207-214. (ZHAO Dongyue, SHI Bo, CHEN Yiqin, et al. Effect of collaborative management on enhancement mechanism of urban resilience[J]. Management Review, 2016, 28(8):207-214. (in Chinese))
[27] GAO Yuqin, LIU Yunping, GAO Li, et al. Change of stream network connectivity under polder-type flood control measure [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2023, 59(4):701-725.

(收稿日期:2024-07-10 编辑:王芳)