

中文引用格式:宋英华,徐弘倩,桑小艳. 突发事件连锁演化单一情景构建与分析[J]. 中国安全科学学报,2026,36(4):184-193.

英文引用格式:Song Yinghua, Xu Hongqian, Sang Xiaoyan. Construction and analysis of a unitary scenario for cascading evolution of emergencies[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(4): 184-193.

突发事件连锁演化单一情景构建与分析^{*}

宋英华^{1,2}教授,徐弘倩^{**1,2},桑小艳^{1,2}

(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 中国应急管理研究中心,湖北 武汉 430070)

中图分类号:X913.4

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.04.0033

基金项目:国家社科基金重大项目资助(21&ZD127);中央高校基本科研业务费专项资金(104972024KFYZXK0042)。

【摘要】 针对突发事件情景建模粒度固定、多情景属性和结构描述不清晰等问题,从微观情景视角出发,基于底线思维提出一种自顶向下的单一情景构建方法。通过状态要素和驱动要素2类知识元建立演化关系,结合分层Petri网(PN)逐层求精,系统刻画突发事件连锁演化情景,模拟情景演化态势;以暴雨影响下的生命线灾害级联事件为例,构建分层情景模型,刻画级联失效、共因失效和升级失效特征并分析其演化态势,识别出城市生命线失效与应急响应间的互锁困境。结果表明:该方法可通过分层情景结构满足不同层次决策需求,通过同构马尔可夫链识别影响情景态势发展的关键要素。

【关键词】 突发事件; 单一情景; Petri网(PN); 连锁演化; 马尔可夫链

Construction and analysis of a unitary scenario for cascading evolution of emergencies

Song Yinghua^{1,2}, Xu Hongqian^{1,2}, Sang Xiaoyan^{1,2}

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

Wuhan Hubei 430070, China; 2 China Research Center for Emergency Management,

Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China)

Abstract: To address problems such as fixed granularity in emergency scenario modelling and unclear descriptions of multi-scenario attributes and structures, a top-down unitary-scenario construction method was proposed from a microscopic perspective based on baseline thinking. Evolution relationships were established based on two types of knowledge elements, namely state elements and trigger elements. Combined with a hierarchical PN and refined layer by layer, the cascading evolution scenarios of emergencies were systematically characterized, and the evolution dynamics of scenarios were simulated. Taking cascading lifeline disaster events under heavy rainfall as an example, a hierarchical scenario model was constructed. The characteristics of cascading failure, common cause failure and escalation failure features were characterized, and the evolution trends were analyzed. The interlocking dilemma between urban lifeline failure and emergency response was identified. The results indicate that the proposed

* 文章编号:1003-3033(2026)04-0184-10; 收稿日期:2025-11-21; 修稿日期:2026-02-28

** 通信作者:徐弘倩(1994—),女,山东烟台人,博士研究生,主要研究方向为公共安全和应急管理、突发事件情景分析和灾害风险管理。

E-mail:xhq511512@163.com。

scenario construction method can meet different levels of decision-making needs through a hierarchical scenario structure. The isomorphic Markov chain can identify the critical elements affecting the scenario evolution.

Keywords: emergency; unitary scenario; Petri net(PN); cascading evolution; Markov chain

0 引言

错综复杂的突发事件给经济发展和社会稳定带来极大挑战,把握突发事件演化规律与发展机制,通过构建情景描述可能未来,是突发事件应对与决策的关键路径^[1]。在宏观上,情景分析在战略层面不断拓展,由中长期规划引领应急能力建设,描绘未来愿景;而在中观层面上,以情景构建为载体结合地理信息、知识情报、安全工程以及管理学等学科方法形成了大量研究成果,在应急准备、应急决策、风险识别和脆弱性评估等领域开展应用,形成各类突发事件情景清单^[2]。

钱静等^[3]提出“要素-对象-结果”框架模型,结构化地描述了突发事件演变过程中的一系列情景;姜卉等^[1]以情景的空间特征为依据构建情景树模型,丰富了复杂灾害多情景理论模型。近年来,情景技术在各类突发事件领域得到广泛应用,Xie Xiaoliang 等^[4]结合知识元模型构建了暴雨洪涝领域情景概念模型;Ricci 等^[5]基于贝叶斯网络构建了用于自然灾害所引发的级联事件情景的应急响应评估框架并采用蒙特卡罗方法模拟分析。Pang Lei 等^[6]构建了一般粉尘爆炸事故的一般情景演化路径,利用模糊数学理论和动态贝叶斯联合概率模型求解情景状态概率。

情景演化作为动态视角下的情景方法,强调应急决策主体随时间推移所面临的新的情景态势,是对风险系统而生动的展示^[1]。在时空层面,以生命周期理论为核心,依据时间节点或事件发生、发展、演变及终结阶段而凝练情景演化特征^[7];或以空间分解为依据进一步讨论子情景演化关系^[3]。在因果层面,通过前因情景寻找后序情景的动态变化描述灾害链特征,按照突发事件间的连锁反应和扩散模式分别讨论各类情景机制,较为深入地探讨了情景演化中的耦合行为和扩散特征^[8]。基于以上特点,情景推演形成了以贝叶斯网络^[5]和马尔可夫过程^[9]为代表的概率推理方法。上述研究从不同角度互相补充,站在较为宏观的角度考虑了某一领域事件情景间的共性特征。然而在构建情景时,事件过程总是被切分为多个情景片段,片段内假设固定

的情景要素及关联形式,随演化过程将其串联进而呈现同粒度下的多情景模型。这可能存在以下局限:①事件演化的整体性被分割,忽略了不同情景间属性的级联与耦合特征;②不同层次决策者所面对的情景粒度的差异被忽视,从而导致情景结构表达的不完整或冗余。

因此,笔者拟基于应急管理流程视角和底线思维,聚焦突发事件演化过程中的级联与耦合特征,提出突发事件连锁演化的单一情景模型。运用分层 Petri 网(Petri Net,PN)自上而下刻画突发事件连锁演化模式,构建级联事件分层情景,同构马尔可夫链分析情景态势,以期为情景探索与应急决策提供理论基础和参考依据。

1 单一情景理论模型

1.1 单一情景概念界定

研究认为,突发事件“情景”是应急决策者所面对的突发事件发生和发展的“态势”,常被视为灾害要素在某一时刻的状态集合^[1,10-11]。在此基础上定义突发事件单一情景,即基于底线思维,对突发事件发生发展的整个生命周期内,事件演化特征及发展态势的系统刻画。故单一情景模型框架应当能够抽象描述事件发展的最坏可能,阐明突发事件所涉及的情景要素、要素关系及随演化而改变的情景结构,并用于敏感性分析以考察要素的不确定性,帮助把握突发事件应对主动权。单一情景与多情景模型差异对比见表 1。

表 1 多情景与单一情景模型对比

Table 1 Comparison of multi-scenario and unitary scenario models

模型方法	多情景模型	单一情景模型
连锁特征	级联	级联和耦合
刻画粒度	固定粒度	自上而下多粒度
时间特征	基于时刻	基于时间
反馈回路	无	有
情景结构	固定	可变
事件数量	单一事件	多事件耦合

将突发事件演化情景表示为 $S = (T,U,R)$,情景的基本特征为 T ,包括事件时间、地点及名称等;

情景要素知识元 U 是构成情景的基本单元^[4],以对象、属性、关系三元组的方式表达突发事件单一情景的共性知识,是微观尺度上情景无限可分的基础; R 为情景结构,表示情景知识元间的关联方式及功能。

1.2 突发事件演化情景知识元

情景分析通过剖析系统中的驱动力及互相联系以探究未来的可能性。为合理构建单一情景演化模型框架,梳理和总结了目前较为主流的情景要素知识元^[1,5,12]。关键情景要素知识元由决定事件状态变迁的驱动要素和表达事件态势的状态要素构成, $U = \{U^D, U^O\} = \{U_E^D, U_M^D, U_H^O, U_C^O, U_B^O\}$; 其中, U^D 、 U^O 分别表示关键驱动要素集合和状态要素集合;驱动要素是指从事件发生、发展到消亡的主导情景发展的自然和人为动作, U_E^D 、 U_M^D 分别表示包括突发事件和应急管理知识元集合;状态要素由表达事件本质特征的对象载体构成, U_H^O 、 U_C^O 、 U_B^O 分别表示致灾因子、孕灾环境和承灾体知识元集合。要素间的互相作用是事件向前演化的根本原因,2 类要素通过互相作用引发情景态势转换如图 1 所示。

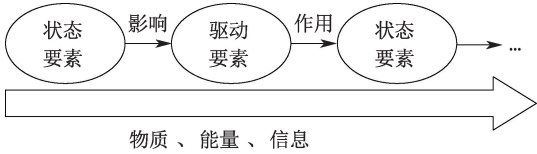


图 1 情景演化知识元关系

Fig.1 Knowledge element relations of scenario evolution

2 基于 PN 的单一情景模型构建

2.1 突发事件演化单一情景模型

PN 作为复杂系统建模与分析的图形化仿真工具,在描述并发和异步关系上具有优势,其描述系统状态转变的模型特征可用于突发事件演化的复杂过程分析^[12]。

基于知识元属性关系形成有向网络,突发事件演化的单一情景模型表示为:

$$R = (V, G, F) \tag{1}$$

式中: V 为演化情景模型节点变量的集合, $V = \bigcup_{i=1}^{|U_E^D|+|U_M^D|+|U_H^O|+|U_C^O|+|U_B^O|} A_i, A_i$ 为各知识元属性集合; G 为连接节点有向边的集合,情景要素间通过属性的映射关系以及信息加工与传递,形成因果或时序的关联即为属性对 $\langle a_i, a_j \rangle, G = \{ \langle a_i, a_j \rangle |$

$a_i, a_j \in V\}$; F 为情景模型的功能函数,根据建模方法而有所不同,以 PN 方法为例, $V = (T, P), G = (P \times T) \cup (T \times P), F_i(x) = P\{x_i \leq x\}, x_i$ 为服从指数分布的随机变量并与 T 的触发相关联:

$$F_i = 1 - \exp(-\lambda_i x) \tag{2}$$

式中: λ_i 为平均演化速度, $\lambda_i > 0; \lambda_i = \frac{1}{\tau_i}, \tau_i$ 为演化时间。

在突发事件演化过程的 PN 模型中,通过库所中的标记黑点即托肯 (token) 在模型中的流动模拟系统演化的动态行为。因此,用库所和变迁分别表示状态要素属性和驱动要素属性,用托肯的转移表示情景状态。根据突发事件演化的链式特点^[9],实现 4 种演化模式的形式化表达,进而刻画连锁演化过程。

1) 转化。状态要素 u_i^o 的属性变化引发事件 $u_{e_1}^d$,状态要素属性 u_j^o 发生态势改变,进一步转化为事件 $u_{e_2}^d$,如图 2a 所示。

2) 蔓延。状态要素 u_i^o 的属性变化引发事件 $u_{e_1}^d$,事件 $u_{e_1}^d$ 蔓延影响到状态要素 u_j^o 并引发新事件 $u_{e_2}^d$,且对状态要素 u_i^o 的影响并不会消失,如图 2b 所示。

3) 衍生。状态要素 u_i^o 在采取措施 u_m^d 时,改变了状态要素 u_j^o 从而引发次生事件 u_e^d ,如图 2c 所示。

4) 耦合。2 个或 2 个以上状态要素属性共同作用导致事件 $u_{e_3}^d$ 发生或加重,如图 2 d 所示。

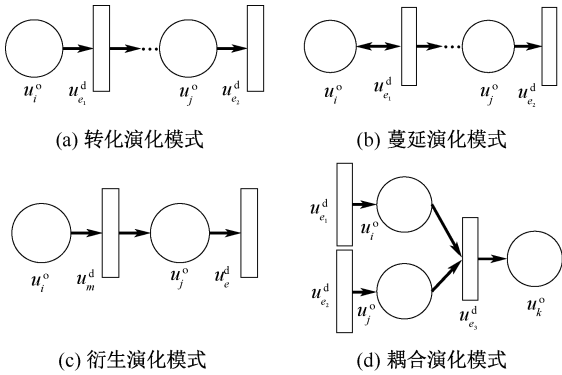


图 2 突发事件演化模式

Fig.2 Evolutionary pattern of emergent events

2.2 级联事件分层情景结构

对于复杂情景系统,不同演化阶段决策者的职责及所掌握的信息不同,对情景的任务需求也有所差别。常见的扁平模型要么难以充分描述演化过

程,要么情景空间过于庞大,不利于情景的微观表达与深层刻画。而层次模型是处理系统复杂性的一种通用方法,用于解决情景细化不足问题。使用模块化表示将复杂的单一情景模型结构分层,一组子网组成一个完整情景模型,具体为:

$$H = \{H_1, H_2, \dots, H_m\} \tag{3}$$

式中: H_i 表示第 i 层子模型, $i \in [1, m]$; m 为情景模型层数。所形成的具有层结构的演化情景,表达情景要素中可能存在的上下位关系。

在复杂的层次化情景系统中,替换知识元是子网的特征。每个子网都被认为是一个独立的、完整的 PN,但它的输入和输出与其他子网相关,分层情景结构框架如图 3 所示。分层情景模型采用自上而下逐步的方式构建层次化的网络模型,隐藏子网内部结构和详细描述,图 3 中,In 表示子网入口,Out 表示子网出口。例如:将 T_3 排涝应急处置作为替代变迁细化情景粒度,以 P_3 地表径流增多、 P_4 排水设施瘫痪作为子网入口, P_{13} 排水系统待改造为子网出口对情景进一步求精。层次化的情景建模可以在逻辑上简化网络结构,使应急决策者关注相应抽象层次设计。

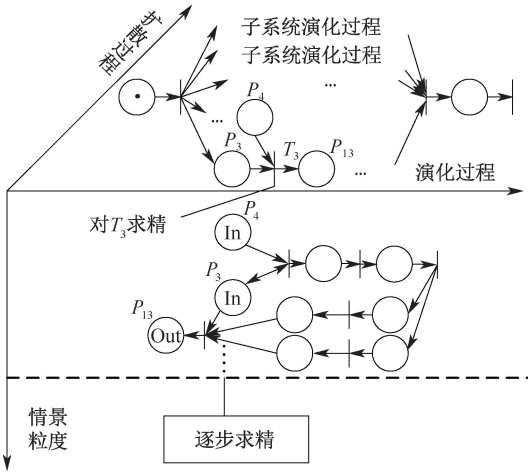


图 3 分层情景结构框架

Fig. 3 Hierarchical scenario structure framework

2.3 情景态势分析

突发事件演化时情景状态存在一定的递进演化关系进而形成情景态势。基于 PN 的相关定义^[13],情景态势分析包括以下步骤:

- 1) 构造可达树,同构马尔可夫链,获得情景演化状态标识集 M 。
- 2) 根据 Chapman-Kolmogorov 方程及马尔可夫平稳分布定理求解稳态概率:

$$\begin{cases} \Pi Q = 0 \\ \sum_{i=1}^n \pi_i = 1 \end{cases} \tag{4}$$

式中: $\Pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$ 为稳态概率分布; $Q = [q_{i,j}]$ 为状态转移矩阵, $i \geq 1, j \leq n$ 。

3) 分析演化系统,识别关键情景状态及情景要素。 $\forall p_k \in P, \bar{u}_k$ 表示在稳定状态下,库所 p_k 在任一可达标识状态中平均所含有的标记数;根据标记分布计算状态要素的繁忙概率 $\bar{u}$:

$$\bar{u}_k = \sum_j j \times \Pi[M(p_k) = j] \tag{5}$$

式中: M 为可达状态集; $\Pi[M(p_k) = j]$ 表示库所 p_k 中包含 j 个标记的概率。

类似的,求解驱动要素的利用率 U :

$$U(t_k) = \sum_{M \in E} \Pi[M] \tag{6}$$

式中 E 为使 t_k 可触发的所有可达状态标识集。

分析驱动要素变化对系统的整体影响,若 $\lambda_k \in [a, b]$,则稳态概率累计变化值为:

$$\Delta_k = \sum_{i=1}^n (\max_{\lambda_k} \pi_i - \min_{\lambda_k} \pi_i) \tag{7}$$

4) 识别潜在管理挑战,提出基于“情景-应对”的突发事件应急管理建议。

3 算例分析

联合国政府间气候变化专门委员会发布报告显示,全球变暖仍在不断加剧,极端强降水事件也在趋多趋强^[14],由此带来的城市 Natech 事件成为不可忽视的重要问题。

3.1 连锁演化情景模型构建

分析收集到的 59 例暴雨影响城市生命线事件,提取影响频次较高的关键情景知识元。考虑受暴雨灾害影响的城市生命线种类较多,选择排水系统、道路交通系统以及供电系统为关键承灾体,构建连锁演化情景分层情景模型,如图 4 所示(图中符号含义见下)。

模型由 14 个库所和 13 个变迁组成,符号含义如下:

- 1) 状态要素。 P_1 表示暴雨物理条件; P_2 表示排水能力不足; P_3 表示地表径流增多; P_4 表示排水设施瘫痪; P_5 表示城市供电中断; P_6 表示电力设施受损; P_7 表示供电系统; P_8 表示道路中断; P_9 表示车辆、行人被困; P_{10} 表示道路交通系统; P_{11} 表示建筑浸水; P_{12} 表示影响民生; P_{13} 表示排水系统待改

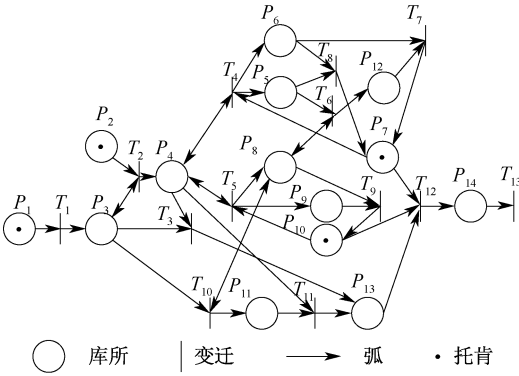


图4 暴雨影响下的城市生命线系统演化情景 PN 模型

Fig. 4 PN model of urban lifeline system evolution under the impact of heavy rainfall

造; P_{14} 表示生命线隐患信息。

2) 驱动要素。 T_1 表示暴雨; T_2 表示排水系统失效; T_3 表示排涝应急处置; T_4 表示供电系统失效; T_5 表示交通系统失效; T_6 表示电力系统抢修受阻; T_7 表示协同应急供电; T_8 表示抢修复电; T_9 表示道路抢通救援; T_{10} 表示排水系统抢修受阻; T_{11} 表示多部门协同应急救援; T_{12} 表示事件信息汇总; T_{13} 表示灾后评估与恢复重建。

3.2 情景结构特征分析

证明构建方法有效性的任务之一是要在模型中呈现情景知识元之间的反馈回路和复杂结构特征。以城市暴雨影响下的生命线失效演化情景为例,基于所提出的情景基础控制流和演化结构实现 3 种连锁失效模式^[15]的情景刻画与表达:

1) 级联失效。级联失效是指失效的某些组件引发其他组件失效的现象。在暴雨影响下,排水系统失效引发电力系统或道路交通系统的功能失效即为级联失效。以 P_4 排水系统对 P_7 电力系统的级联影响为例,在城市排水设施瘫痪时,会导致 T_4 被触发,供电系统失效,此时托肯转移到 P_5 和 P_6 ,产生供电中断和电力设施损坏等影响。

2) 共因失效。共同原因导致多个系统组件失效即为共因失效。例如:当 P_4 出现托肯即排水系统瘫痪时,影响 P_7 电力系统和 P_{10} 道路交通系统,既会触发 T_4 在 P_5 和 P_6 形成新托肯,也可能触发 T_5 在 P_8 和 P_9 形成新托肯。造成供电系统或道路交通系统失效,在供电系统造成供电中断和电力设施损坏,在道路交通系统造成道路中断和车辆行人被困等。

3) 升级失效。一种系统组件的失效由于另一种组件失效而加剧其严重性即为升级失效。随着 T_5 道路交通系统失效触发 P_8 道路中断,交通不畅会

延迟维修人员或备用设备的到达,导致电力系统和排水系统恢复时间增加,造成升级失效。以 P_6 电力设施受损为例,若道路交通系统未发生失效,触发 T_8 开展积极及时的电力抢修即可将托肯转移到 P_7 ,供电系统被恢复;而当托肯在 P_8 即道路中断时,触发 T_6 抢修受阻并导致托肯转移到 P_{12} 造成社会影响的进一步扩大,需要触发 T_7 电力系统和道路交通系统的协同应急响应才能使之恢复正常。

3.3 分层情景构建

1) 应急响应子系统层次模型。3.2 节阐述了暴雨作用下的城市生命线受损事件开始到结束的全过程,而不同的演化阶段情景任务不同,各级决策者所掌握的情景粒度信息亦有所差别。因此,以排水系统的应急响应为求精对象,将 T_3 作为替代变迁构建第 2 层模型并丰富情景细节,排水子系统响应情景 PN 模型如图 5 所示。

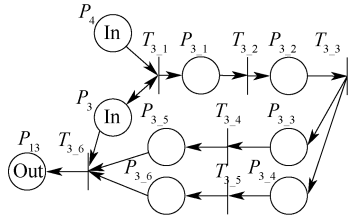


图5 排水子系统响应情景 PN 模型

Fig. 5 PN model of drainage subsystem response scenario

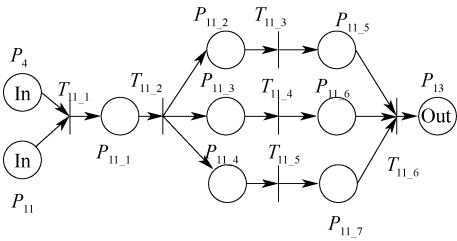


图6 多部门协同应急处置 PN 模型

Fig. 6 PN model for multi-department coordinated emergency response

该系统以 P_3 暴雨径流增多的致灾因子属性和 P_4 排水设施瘫痪的承灾体状态为输入接口,以恢复阶段的 P_{13} 排水系统待改造为目标输出接口,任务情景演化过程主要属性及符号含义:应急指挥部报告为 $T_{3.1}$;警情判断为 $T_{3.2}$;启动应急预案为 $T_{3.3}$;工程应急抢修为 $T_{3.4}$;运营管理调整为 $T_{3.5}$;善后处置为 $T_{3.6}$ 。排水管及泵站信息为 $P_{3.1}$;预警信息为 $P_{3.2}$;工程受损状态为 $P_{3.3}$;运营管理不良状况为 $P_{3.4}$;受损工程已修复为 $P_{3.5}$;运营管理功能恢复为 $P_{3.6}$ 。

2) 多主体协同应急响应过程模型。以排水系统在道路交通系统失效时导致的升级失效为例,将多部门协同应急救援 T_{11} 作为替代变迁进行层次模型细化,如图 6 所示。该过程以排水设施瘫痪 P_4 和建筑浸水 P_{11} 的承灾体状态为输入接口,以救援结束后的排水系统待改造 P_{13} 为目标输出接口,协同过程的主要属性及符号含义:应急指挥部发布指令为 T_{11-1} ;应急资源准备为 T_{11-2} ;排涝应急处置为 T_{11-3} ;道路中断抢通为 T_{11-4} ;灾民营救为 T_{11-5} ;协同情况报告为 T_{11-6} ;保障部门就位为 P_{11-1} ;市政部门就位为 P_{11-2} ;交通运输部门就位为 P_{11-3} ;公安消防就位为 P_{11-4} ;内涝点处置完毕为 P_{11-5} ;道路交通功能恢复为 P_{11-6} ;受灾群众转移为 P_{11-7} 。

分析上述 2 种应急响应模式的马尔可夫链,排水系统应急响应模型状态空间具有 8 个节点和 9 条状态转移弧,而多部门协同应急处置过程模型的状态空间有 11 个节点和 16 条状态转移弧,意味着协同应急响应过程效率将影响事件演化的复杂性,应当做好协同应急演练,提升不同生命线责任主体间

的联动效率。

3.4 情景态势分析与讨论

模型的初始标识为: $M_1 = (1,1,0,0,0,1,0,0,1,0,0,0,0)$,即 P_1, P_2, P_7 和 P_{10} 中分别含有一个托肯,为便于记录,用状态要素编号来表达情景状态属性集,记为 $M_1 = (1,2,7,10)$ 。此时符合强降水的物理条件,排水系统、电力系统和道路交通系统作为风险承灾体。当 T_1 激活,暴雨成为城市洪涝灾害的致灾因子, P_1 的托肯移动到 P_3 ,其他库所的托肯不变,此时城市地表径流增多,状态记为 $M_2 = (2,3,7,10)$,以此类推,共得到 21 个情景状态。

同构马尔可夫链,根据式(4)求解稳态概率。选取 2021 年郑州“7·20”特大暴雨案例作为仿真模拟对象,通过查阅案例资料,假设驱动要素的演化速度: $\lambda_1 = 2, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = 1/7, \lambda_4 = 1/2, \lambda_5 = 1/2, \lambda_6 = 1/3, \lambda_7 = 1/3, \lambda_8 = 1/5, \lambda_9 = 1/3, \lambda_{10} = 1/5, \lambda_{11} = 1/5, \lambda_{12} = 1/7, \lambda_{13} = 1/15$ 。经 Matlab 求解,得到各状态的稳态概率见表 2。

表 2 演化情景各稳态概率

Table 2 Steady-state probabilities of the evolutionary scenario

π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6	π_7	π_8	π_9	π_{10}	π_{11}
0.015 1	0.030 1	0.039 9	0.211 0	0.023 6	0.032 9	0.011 8	0.013 5	0.031 1	0.023 4	0.044 6
π_{12}	π_{13}	π_{14}	π_{15}	π_{16}	π_{17}	π_{18}	π_{19}	π_{20}	π_{21}	—
0.006 1	0.014 9	0.009 3	0.007 3	0.008 9	0.009 7	0.008 5	0.003 2	0.003 1	0.452 1	—

1) 状态要素繁忙概率及驱动要素利用率。根据式(5)和式(6),求解库所的繁忙概率和变迁的利用率,见表 3 和表 4。可以看出,状态要素 P_{14} 的繁忙概率和驱动要素 T_{13} 的利用率最大。说明在事件演化过程中,隐患信息是减灾的重要依据,而事件后期的恢复重建将持续较长时间。因此,应关注对各生命线隐患的提前排查,防患于未然;还应有效评估基础设施受损情况,及时有效开展灾后恢复重建,从根本上提高城市基础设施的系统韧性。

P_7, P_{10}, P_{13} 的繁忙概率相对较高,反映了供电系统、道路交通系统和排水系统作为事件承灾体将会有较长时间处于风险中。 T_{12}, T_3, T_8 和 T_9 的变迁利用率也相对较高,这意味着事件信息的汇总和各子系统的应急响应相对耗时,是影响事件发展的关键驱动环节。由于强降水事件造成的城市生命线受损情况复杂,对信息的反复确认和统计会较为困难。因此,应提高信息反馈能力,加强灾情统计报送工作,以便出台具体的针对性措施,尽快恢复城市正常运转。各子系统应急处置涉及多个主体共同协作,

处置难度较大。也应提高应急响应活动的及时性,有效减轻灾害的不良后果,控制事态的级联发展。

表 3 状态库所繁忙概率

Table 3 Busy probability of the state places

$\bar{u}_1$	$\bar{u}_2$	$\bar{u}_3$	$\bar{u}_4$	$\bar{u}_5$	$\bar{u}_6$	$\bar{u}_7$
0.015	0.045	0.162	0.189	0.132	0.178	0.370
$\bar{u}_8$	$\bar{u}_9$	$\bar{u}_{10}$	$\bar{u}_{11}$	$\bar{u}_{12}$	$\bar{u}_{13}$	$\bar{u}_{14}$
0.141	0.141	0.407	0.056	0.046	0.314	0.452

表 4 驱动变迁利用率

Table 4 Utilization rate of the trigger transitions

$U(t_1)$	$U(t_2)$	$U(t_3)$	$U(t_4)$	$U(t_5)$	$U(t_6)$	$U(t_7)$
0.015	0.030	0.132	0.083	0.094	0.046	0.046
$U(t_8)$	$U(t_9)$	$U(t_{10})$	$U(t_{11})$	$U(t_{12})$	$U(t_{13})$	—
0.132	0.141	0.056	0.056	0.211	0.452	—

2) 关键驱动要素识别与仿真。每个驱动要素对演化过程的影响程度不同,假设各驱动要素演化速度在 0~1 之间变化,根据式(7),计算状态标识的稳态概率累计变化值,见表 5。 Δ_k 值越大,则改进该环节的效果越明显。将稳态概率累计变化值较大的

驱动要素作为关键驱动要素,仿真级联及耦合过程。以变化范围最大的 T_9 为例,进一步观察其对演化态势的影响。

表 5 λ 变化下稳态概率累计变化量

Table 5 Cumulative changes in steady-state probability when λ varies							
λ_i	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
Δ_k	1.94	1.94	0.70	0.45	0.45	0.21	2.04
λ_i	λ_8	λ_9	λ_{10}	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	—
Δ_k	2.05	2.07	0.26	1.98	1.93	1.90	—

假设其他参数不变,道路抢通救援 λ_9 变动,各状态的稳态概率、状态要素繁忙概率及驱动要素利用率的变化趋势分别如图 7—图 9 所示。

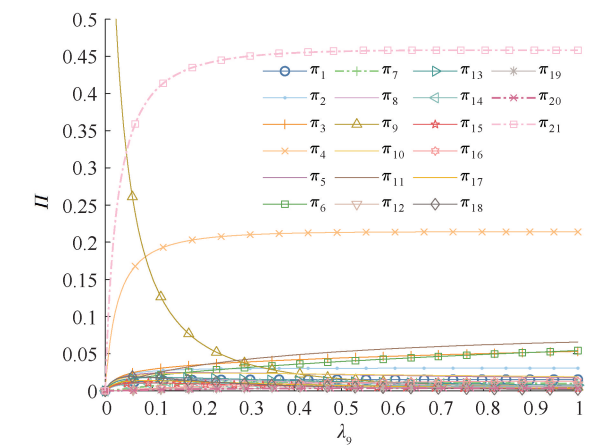


图 7 λ_9 变化下情景演化系统的稳态概率
Fig. 7 Steady-state probability when λ_9 varies

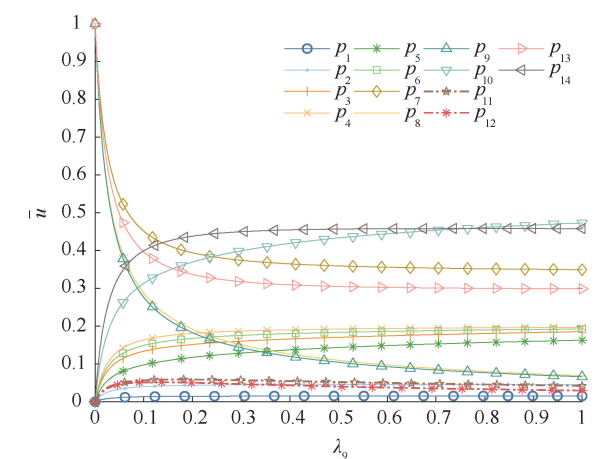


图 8 λ_9 变化下状态要素的繁忙率
Fig. 8 Busy probability of state elements when λ_9 varies

此时, π_9 快速下降, π_{21} 和 π_4 快速增长,说明事件演化重点将由蔓延期转入恢复期。在该稳态下,交通系统失效 $\bar{u}(p_8)$ 和行人车辆被困 $\bar{u}(p_9)$ 的繁忙

概率迅速降低,生命线受损信息汇总 $U(t_{12})$ 以及灾后评估与恢复重建 $U(t_{13})$ 的利用率快速提高。在生命线系统的级联影响方面,道路系统的应急响应加快也加速了其他生命线系统的演化进程,水毁设施待修缮 $\bar{u}(p_{13})$ 概率和供电系统 $\bar{u}(p_7)$ 风险降低。因此,应当做好交通疏散与道路救援预案,提高应急响应速度。

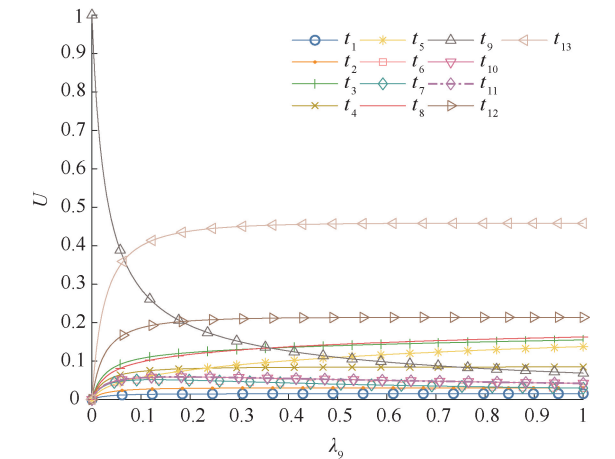


图 9 λ_9 变化下驱动要素的利用率
Fig. 9 Utilization rate of trigger elements when λ_9 varies

3) 情景结构特征仿真。首先对演化中的级联影响仿真,分别对关键驱动要素和状态要素敏感性分析。以排水系统失效 λ_2 变动为例,说明驱动事件变化对各状态要素的影响。

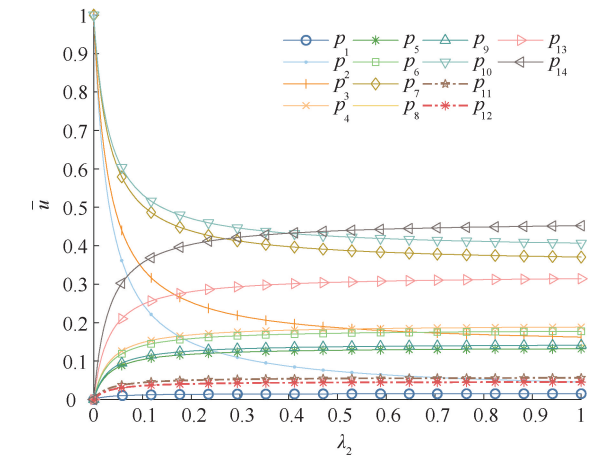


图 10 λ_2 变化下状态要素的繁忙率
Fig. 10 Busy probability of state elements when λ_2 varies

变化下状态要素的繁忙率如图 10 所示,当排水设施失效过程加快,生命线隐患信息 $\bar{u}(p_4)$ 繁忙率上升,造成供电设施受损 $\bar{u}(p_6)$ 以及交通道路中

断 $\bar{u}(p_8)$ 的级联影响,各系统失效所造成的不良后果($\bar{u}(p_5)$ 、 $\bar{u}(p_9)$ 、 $\bar{u}(p_{11})$ 、 $\bar{u}(p_{12})$ 、 $\bar{u}(p_{13})$) 都有上升趋势。说明排水系统作为承灾体,在致灾因子暴雨的影响下成为新的致灾因子,导致其他生命线级联失效、影响不断扩散。排水系统失效作为级联演化中心,是城市暴雨事件防控的关键,应当将排水系统的监控与改造作为管理重点,预防维护等技术性措施和排水设施隐患清理等非技术性措施相结合,增加排水系统失效延迟,降低级联影响。

以供电系统失效 $\bar{u}(p_6)$ 为例,说明各驱动事件变化对生命线的级联影响。

不同驱动事件对供电系统失效的影响作用变化如图 11 所示。从级联视角观察,除提高抢修复电效率 λ_8 和加快交通和电力部门的协同应急响应 λ_7 外,加快交通排水多部门协同应急救援 λ_{11} 速度,增强排涝应急处置能力 λ_3 也可以通过减轻系统的级联失效影响进而降低电力设施失效的繁忙率。这其中,随着 λ_3 速度的加快,级联影响下的子系统失效的繁忙概率 $\bar{u}(p_6)$ 可以降到最低,说明提升排涝应急处置 T_3 效率可以有效降低电力系统受损风险。此外,随着 λ_{11} 的增加系统将最先进入稳态,建议应提前组织协调多部门应急联动,提升协同应急救援 T_{11} 效率以控制事件连锁演化。

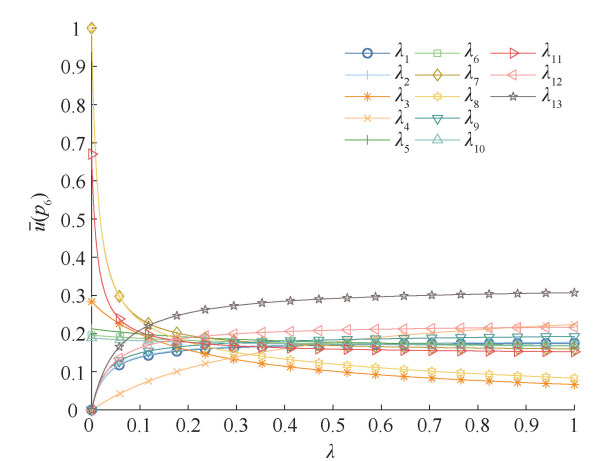


图 11 不同驱动要素变化对 p_6 繁忙率的影响

Fig. 11 Busy probability of p_6 changes when different trigger elements varies

上述 2 个不同视角的仿真结果共同说明所提模型方法可用于支持突发事件演化过程的级联影响建模。排水系统是暴雨影响下城市基础设施事件演化系统的核心,是级联演化应对的关键环节。应对级联失效,除提前做好各生命线的应急部署,还应做好关联子系统响应过程的紧密协作。建议针对

级联失效的特定组合,如排水—道路交通和排水—电力失效事件演化过程,重点监控,完善协同联动应急预案,建立应急响应联动系统,提高应对效率。

其次对演化中的共因影响仿真,改变关键共因事件的驱动要素演化速度,观察前因驱动事件对各子系统的影响,以暴雨事件 λ_1 为例说明。

假设其他参数不变,超过城市防护标准的降雨速度 λ_1 变动,各状态要素繁忙率变化如图 12 所示。在致灾因子暴雨的作用下,导致排水系统 $\bar{u}(p_4)$ 、供电系统 $\bar{u}(p_7)$ 和道路交通系统 $\bar{u}(p_{10})$ 均受影响,并进一步引发情景中各承灾体要素($\bar{u}(p_5)$ 、 $\bar{u}(p_6)$ 、 $\bar{u}(p_8)$ 、 $\bar{u}(p_9)$ 、 $\bar{u}(p_{11})$ 、 $\bar{u}(p_{12})$) 的繁忙率升高。仿真结果符合事件演化的共因失效特征。应急管理过程虽无法决定致灾因子属性,即降雨过程无法改变,但应对共因失效可以通过合理的防灾减灾规划,提高生命线设施恢复力,减轻承灾体脆弱性以降低灾害损失。因此,建议设计道路交通系统、电力系统及排水系统的暴雨分级失效规范,提高防灾设计标准,提高承灾体韧性;建立气象、交通、水务、电力等多部门跨系统协同预警机制,提前部署资源,通过实时共享和协同响应平台共同应对暴雨共因风险。

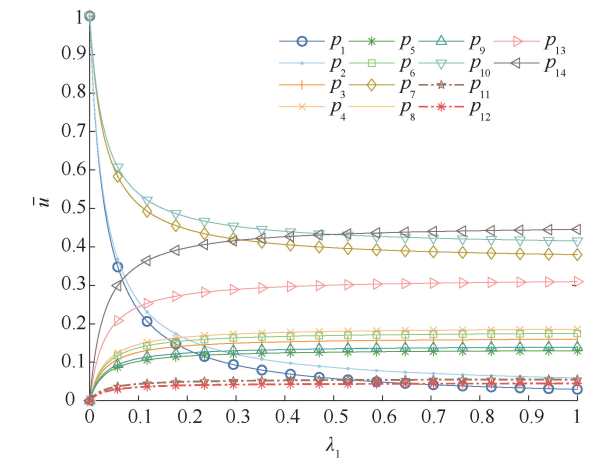


图 12 λ_1 变化下状态要素的繁忙率

Fig. 12 Busy probability of state elements when λ_1 varies

最后对演化中的升级影响仿真,分析前因升级事件对各系统的影响,以道路交通系统失效 λ_5 的升级影响为例说明。

各状态要素繁忙率变化如图 13 所示。当道路交通系统失效的速度加快,除了造成道路中断 $\bar{u}(p_8)$ 、车辆行人被困 $\bar{u}(p_9)$ 的繁忙率升高,也提高了排水系统和供电系统的升级影响繁忙率:排水不畅后果由地表径流增多进一步发展到建筑、人员浸

水 $\bar{u}(p_{11})$;电力系统影响由供电中断发展为影响民生 $\bar{u}(p_{12})$ 。升级失效中,应对具有演化关联的生命线系统实施联合监控,及时发现和控制前因升级事件,通过快速有效的道路清理和交通疏散等断链减灾措施阻止事态在排水系统和通电系统的进一步扩大。此外,改进各生命线子系统的应急响应效率对控制事件演化态势影响较为明显(T_7 、 T_8 、 T_9 、 T_{11}),见表 5。因此,控制升级失效,建议针对区域特点分布式布局应急资源,冗余道路交通系统和电力救援响应系统等关键节点配置,解耦演化中的需求关联,

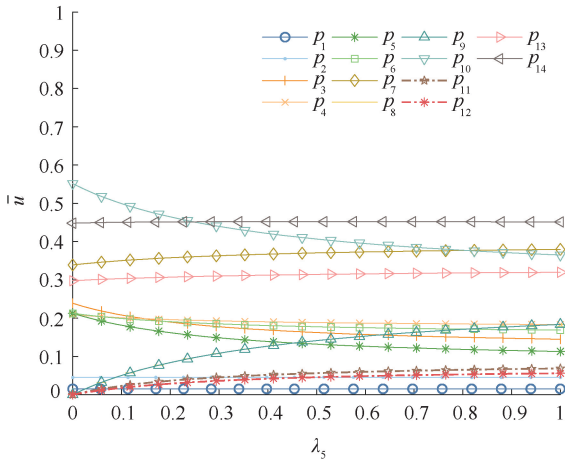


图 13 λ_s 变化下状态要素的繁忙率

Fig. 13 Busy probability of state elements when λ_s varies

以减少对道路交通和排水等子系统的功能依赖,优化前因事件应急响应速度。

通过态势仿真分析发现,城市生命线失效与应急响应之间呈现互锁困境。生命线功能与应急响应间互为前提而又相互制约的演化态势。在案例情景的演化仿真中,电力系统和排水系统与道路交通系统的应急响应之间互为前提。针对关键互锁组合,应当提前做好协同应急联动准备,通过应急预案部署消除合作边界、减轻互锁依赖。

4 结 论

- 1) 从微观视角解析并构建的突发事件演化单一情景模型,即分层建模逐步求精,可增强突发事件连锁演化特征的表达能力,有助于系统解决情景分析中的连锁特征缺失与粒度固化问题。
- 2) 案例验证结果表明:影响事件发展的核心环节和最具改进效率的关键驱动要素为道路抢通救援和抢修复电;刻画了该类事件连锁演化过程形成的 3 种连锁演化模式,演化态势的动态变化趋势可作为建议参考,为不同环节的决策者提供科学依据。
- 3) 基于所提出的情景框架,未来可在情景知识元提取方面与深度学习及人工智能技术相结合,提高情景构建与态势分析效率。

参 考 文 献

[1] 姜卉. 应急实时决策中的情景表达及情景间关系研究[J]. 电子科技大学学报:社科版, 2012, 14(1): 48-52.
Jiang Hui. Expression of scenarios and the relationship among scenarios in emergency real-time decision-making[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China: Social Sciences Edition, 2012, 14(1): 48-52.

[2] 宋英华, 刘含笑, 蒋新宇, 等. 基于知识元与贝叶斯网络的食物安全事故情景推演研究[J]. 情报学报, 2018, 37(7): 712-720.
Song Yinghua, Liu Hanxiao, Jiang Xinyu, et al. Research on scenario evolution of food safety incidents based on knowledge element and bayesian network[J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2018, 37(7): 712-720.

[3] 钱静, 刘奕. 突发事件分析的 EOC 概念模型[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2022, 62(2): 259-265.
Qian Jing, Liu Yi. EOC model: a conceptual model to analyze emergencies[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2022, 62(2): 259-265.

[4] 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: 3 307-3 329.

[5] Ricci F, Yang Ming, Reniers G, et al. Emergency response in cascading scenarios triggered by natural events[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 243: DOI: 10.1016/j.ress.2023.109820.

[6] Pang Lei, Zhang Mengxi, Yang Kai, et al. Scenario derivation and consequence evaluation of dust explosion accident based on dynamic bayesian network[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2023, 83: DOI:10.1016/

- j. jlp. 2023. 105055.
- [7] Shi Lingyuan, Yang Xin, Li Jue, et al. Scenario construction and deduction for railway emergency response decision-making based on network models[J]. Information Sciences, 2022, 588: 331–349.
- [8] 陈雪龙, 姜坤. 基于贝叶斯网络的并发型突发事件链建模方法[J]. 中国管理科学, 2021, 29(10): 165–177.
Chen Xuelong, Jiang Kun. Modeling method of concurrent emergency chain based on bayesian network[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(10): 165–177.
- [9] 刘艺, 李茂源, 王欣芝, 等. 大型活动踩踏事故“态-势”情景构建与组合推演方法[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(9): 183–190.
Liu Yi, Li Maoyuan, Wang Xinzh, et al. Research on ‘status and trends’ scenario construction and combination deduction method of stampede accident in large-scale activities[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(9): 183–190.
- [10] Mietzner D, Reger G. Advantages and disadvantages of scenario approaches for strategic foresight[J]. International Journal of Technology Intelligence and Planning, 2005, 1(2): DOI:10.1504/IJTIP.2005.006516.
- [11] 李仕明, 张志英, 刘樑, 等. 非常规突发事件情景概念研究[J]. 电子科技大学学报:社科版, 2014, 16(1): 1–5.
Li Shiming, Zhang Zhiying, Liu Liang, et al. Research on scenario concepts of unconventional emergencies[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China: Social Sciences Edition, 2014, 16(1): 1–5.
- [12] Chen Chen, Yang Yabin, Wang Mengtong, et al. Characterization and evolution of emergency scenarios using hybrid petri net[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 114: 133–142.
- [13] Liu Qiong, Guo Kai, Wu Xianguo, et al. Simulation-based rescue plan modeling and performance assessment towards resilient metro systems under emergency[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024: DOI: 10.1016/j.ress.2023.109642.
- [14] Lee H, Romero J. Synthesis report: climate change 2023[R]. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.
- [15] Rinaldi S A, Peerenboom J P, Kelly T K. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(6): 11–25.

作者简介: 宋英华 (1962—),男,湖北武汉人,博士,教授,主要从事公共安全与应急管理、公共管理、协同决策等方面的研究。E-mail:song6688c@163.com。