

基于知识元的非常规突发事件情景模糊推演方法

张磊, 王延章, 陈雪龙

(大连理工大学管理科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对非常规突发事件的情景表示中跨领域、跨学科知识支持和微观分析的不足, 基于情景要素及其相互作用关系的相对微观分析, 给出了一种以知识元模型为基础的情景表示模型; 针对非常规突发事件情景推演中信息不确定性问题, 提出了一种模糊推演方法, 应用知识元间相互作用关系构建模糊规则, 将不确定的情景信息与模糊规则进行匹配, 判断情景推演的结果及其可能性, 进而为决策者进行决策提供依据. 最后, 以舟曲泥石流事件为例, 验证了文中方法的科学性和实用性.

关键词: 知识元; 非常规突发事件; 情景; 模糊推演

中图分类号: C934; N949

文献标识码: A

文章编号: 1000-5781(2016)06-0729-10

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2016.06.002

Fuzzy inference method for unconventional events scenarios based on knowledge unit

Zhang Lei, Wang Yanzhang, Chen Xuelong

(School of Management Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In view of the lack of interdisciplinary knowledge support and microscopic analysis in scene expression of unconventional emergencies, this paper proposes a scenario representation model based on the knowledge unit model and the micro-analysis of scenarios factors and their interactions. In view of the uncertainty of information in scenarios inference, a fuzzy inference method is introduced. This method constructs the fuzzy rules on the basis of the interaction between knowledge units, matches the uncertainty information with the fuzzy rules, and then estimates the results and probability of scenarios inference which can provide the basis for decision making. Finally, the Zhouqu debris flow event is given as an example to testify the feasibility and practicability of the proposed method.

Key words: knowledge element; unconventional emergencies; scenario; fuzzy inference

1 引言

近年来非常规突发事件频发, 对国家和人民造成了巨大损失. 由于缺乏对非常规突发事件演化规律的认识, 导致出现什么样的事件状态、出现这些状态的可能性以及造成的危害都很难预测, 于是人们开始从传统“预测-应对”决策模式向“情景-应对”决策模式进行转化^[1]. 情景是决策者对非常规突发事件应急决策的基础和依据, 因此, 情景的描述与动态推演分析是非常规突发事件应急管理研究体系的重要组成部分.

收稿日期: 2014-03-25; 修订日期: 2014-08-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71203019; 71533001); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(201100411-20028); 教育部人文社科基金青年资助项目(11YJC630023); 辽宁社科规划基金资助项目(L13DGL061); 中央高校基本科研业务费资助项目(DUT14RW108).

目前很多文献从不同角度对非常规突发事件的演化进行了研究. CBR 是一种较新的情景推演方法, 汪季玉等^[2]从危机信息处理的角度, 提出了 CBR 的应急决策支持系统. 裘江南等^[3,4]针对突发事件具有不确定性特点, 以贝叶斯网络为建模工具, 构建了用于对突发事件进行预测的贝叶斯网络模型; 杨保华等^[5]提出了非常规突发事件情景推演的 GERT 网络中灾害衍生耦合问题的解决方法, 为非常规突发事件情景推演提供了有效的数学工具; 陈长坤等^[6]基于复杂网络的相关理论对冰雪灾害事件演化机理进行了分析; 刘铁民^[7]提出用系统动力学(SD)理论方法研究重大事故的演化过程; 韩传峰等^[8]通过构建 SD 模型揭示了应急决策系统内在反馈机制和动态作用机理; Zheng 等^[9]利用元胞自动机(CA)模拟了在出口选择和受社会力影响的突发状况下人员疏散的过程; 余雷等^[10]通过建立 CA 模型的方法模拟疾病传播过程; 杨青等^[11]运用 CA 模型分析突发传染病传播的内在原因, 在此基础上提出了应对突发传染病的对策建议. 非常规突发事件的情景推演需多学科多领域的理论、方法、技术、知识和模型的支持, 上述理论方法对非常规突发事件情景推演的研究提供了很好的思路 and 基础. 在上述方法中, 基于网络的方法具有较好的通用性, 但对节点设计、数据确定、节点间关系结构以及演化机理等问题要求较高, 而 SD 和 CA 方法侧重于从宏观角度对事件发生发展过程的特征和规律进行描述与总结, 且对已知事件的经验性知识具有较高依赖性. 综上所述, 目前的方法均没有从相对微观视角审视非常规突发事件的情景结构和推演问题; 同时, 现有的模型方法针对信息不确定和知识不完备的非常规突发事件, 往往不能给予很好地解决.

情景的描述是情景推演研究的基础, 而情景表示需要综合多学科多领域的知识予以支撑. 一些学者针对非常规突发事件应急管理中的知识管理问题进行了探讨. Raman^[12]使用 Wiki 技术设计了一个基于 Web 的知识管理系统; 王庆全等^[13]基于范畴论与定型范畴论提出一种辅助应急决策知识供给的概念建模方法(CCM); 温立^[14]提出了基于本体的应急决策知识模型. 这些表示方法为应急管理中的知识管理提供了很好的研究思路和方法, 但仍难以实现非常规突发事件应急管理跨领域跨学科知识的综合诠释; 其中, 基于本体或范畴论的方法虽在一定程度上可以解决跨领域、跨学科的知识融合问题, 但巨大的概念间关系描述会造成推理的不完备问题. 王延章^[15]面向多领域, 建立了概念、属性与关系三元组形式的共性知识元模型, 实现了对知识、信息与模型等在人类认知六层次上的管理; 陈雪龙等^[16]在其基础上, 构建了知识元模型, 解决了应急管理多领域、多学科知识融合与知识推理的问题. 知识元模型以其本原性、细粒度性对应急管理中事件及推演规则进行管理, 可以有效解决情景推演中信息不确定和知识不完备问题. 基于以上分析, 本文利用知识元模型, 从人类认知角度对客观事物进行建模, 为情景构建与推演提供综合知识支持.

2 基于知识元的情景结构模型

2.1 知识元模型

知识元是知识管理的基础. 作为知识结构的最小组成单元, 知识元有助于从更加微观的角度认知非常规突发事件及其演化规律. 本文中的知识元是文献[15]提出的一种知识表示方法. 如一个具体事物对象 m 的共性知识可以表示为一个三元组

$$K_m = (N_m, A_m, R_m), \quad m \in M, \quad (1)$$

其中 M 为事物对象集合, N_m 为对应事物的概念及属性名称, $A_m = A_m^I \cup A_m^O \cup A_m^S$ 为定性或定量描述的属性集, A_m^I 为输入属性, A_m^O 为输出属性, A_m^S 为状态属性, $R_m \subseteq A_m \times A_m$ 表示属性状态变化关系集.

设属性 $a \in A_m$ 可以用属性知识元表示为

$$K_a = (p_a, d_a, f_a), \quad (2)$$

其中 p_a 为可测特征描述(如可测量、可描述), d_a 表示当属性状态可测度时的测度量纲(如取值类型, 取值区间和取值单位等), f_a 为属性时变规律的函数, 仅当属性可测且具有时间变化可辨时不为空, 则存在关系 $a_t = f_a(a_{t-1}, t)$.

设关系 $r \in R_m$ 用关系知识元表示为

$$K_r = (p_r, A_r^I, A_r^O, f_r), \quad (3)$$

其中 p_r 描述映射 r 所具有属性(结构, 线性, 非线性和函数映射等), A_r^I 为关系 r 的输入属性集, A_r^O 为关系 r 的输出属性集, f_r 为具体的关系映射函数, $f_r(A_r^I) \rightarrow A_r^O$, $A_r^I \subseteq A_m^I \cup A_m^S$, $A_r^O \subseteq A_m^O \cup A_m^S$. 一般而言, f_r 是以数理逻辑关系, 函数, 启发式规则, 结构关系, 规则或知识描述的属性状态变化关系等形式存在的.

2.2 基于知识元的情景结构模型

目前, 在应急管理领域, 许多学者对非常规突发事件的情景进行了广泛深入的研究, 主要集中在情景的要素分析和描述上^[1,17-19], 而关于非常规突发事件的情景定义还没有达成共识. 因此, 在对情景形式化描述之前, 首先需明确非常规突发事件情景的含义.

突发事件所处的时间、空间环境称为事件所处的时空场景. 情景中的灾变触发必须满足时空约束, 如 A 地区的堰塞湖不会影响到 B 地区的生命财产安全, 这是决策者在实际中所关心的. 因此, 本文认为非常规突发事件的情景既包含某个时间点上要素的状态集合, 也包含时空约束下要素自身与要素之间关系及其变化趋势的描述.

1) 情景要素描述

情景的主要目的是辅助决策, 情景的要素不仅仅包括客观存在的事物, 也包含一些具有主观性的活动(如应急活动). 因此, 本文认为情景的要素主要包括致灾因子(DF)、承灾体(SF)、孕灾环境(EF)以及应急活动(AF)四部分, 如图 1 所示.

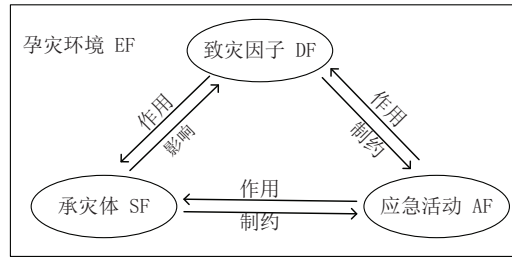


图 1 非常规突发事件情景要素及其间关系

Fig. 1 The scenario factors of unconventional emergencies and the relationship among them.

若 S 表示情景, 则情景表示为

$$S = \{DF, SF, EF, AF\}. \quad (4)$$

致灾因子(DF)表示对事件发生和发展起推动作用的致灾因素的集合, 如泥石流、台风等自然致灾因子以及火灾、安全生产事故等人为(环境)致灾因子; 孕灾环境(EF)是指灾害发生发展时所处的外部环境因素的集合, 包含系统所处自然环境和社会因素; 承灾体(SF)是各种致灾因子作用对象的集合; 应急活动(AF)是指针对事件本身, 人类所采取一系列活动内容. 根据第 2.1 节, 情景中的要素表示为

$$k_m = \{ai_1, ai_2, \dots, ai_l, as_1, as_2, \dots, as_p, ao_1, ao_2, \dots, ao_q\}, \quad l, p, q \in \mathbf{N}^*, \quad (5)$$

其中 k_m 表示情景的要素知识元, ai_l, as_p, ao_q 分别表示要素的输入属性、状态属性和输出属性, 用式(2)的属性质知识元描述. 以泥石流知识元为例, $k_{\text{泥石流}} = \{\text{位置, 时间, 重度, 流速, 冲击力} \dots\}$, 其中流速可用属性知识元描述为 $k_{\text{流速}} = (\text{可测量, m/s, 数值确定型})$.

2) 要素间关系描述

情景演化过程可以抽象为情景要素间的相互作用关系, 主要体现为属性间因果关系. 一般地, 这种因果关系通过两种方式构建: 1)要素知识元间的直接输入输出关系, 即知识元 k_m 的输出属性为知识元 k_n 的输入属性; 2)要素知识元间通过关系知识元构建, 即知识元 k_m 的输出属性和知识元 k_n 的输入属性分别为对

应关系 f_r 的输入属性与输出属性.

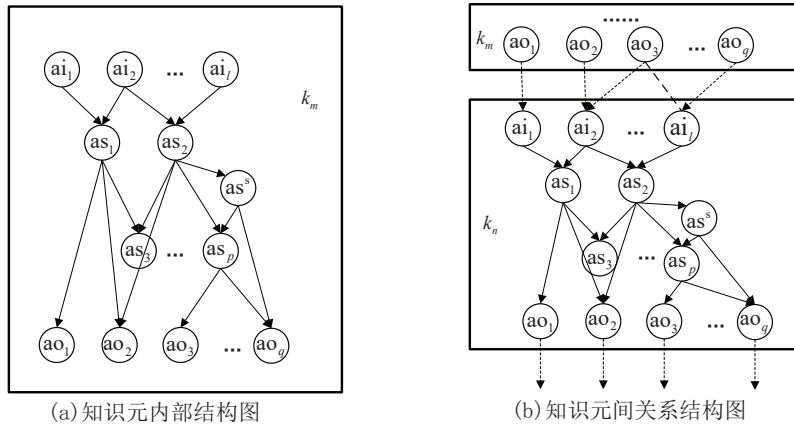


图 2 知识元内部与知识元间关系结构图

Fig. 2 The structure diagram of knowledge units and the relationship among knowledge units

图 2 中 $ai_i \in A^I$ 表示输入属性, $ao_q \in A^O$ 表示输出属性, $as_p \in A^S$ 表示状态属性. 状态属性的变化依赖于输入属性的值, 状态属性的变化又能够产生一定的输出, 影响其他属性. $as^s \in A^S$ 是标记事件是否发生的特殊状态变量, 取值为 1 或 0, 即事件发生或不发生.

设情景中的要素知识元 k_m, k_n 之间的作用关系通过知识元属性间关系建立, 如图 2(b)所示. 而这些关系可用式(3)关系知识元描述. 那么, 要素知识元间关系用数学模型可描述为

$$\begin{cases} \Phi_1(A_m^O, A_n^I, F') = 0 \\ \Phi_2(A_n^I, A_n^S, F'') = 0 \\ \Phi_3(A_n^S, A_n^O, F''') = 0, \end{cases} \quad (6)$$

其中 F' 表示 k_m 的输出属性与 k_n 输入属性间作用关系集, F'' 表示 k_n 输入属性与状态属性间作用关系集, F''' 表示 k_n 的状态属性与输出属性间作用关系集.

令 $R_{mn} = \{F', F'', F'''\}$ 表示 k_m 与 k_n 的因果关系集合, 即

$$k_n = R_{mn}(k_m). \quad (7)$$

特别地, 若 $m = n$ 时, 表示知识元自身内部结构作用关系, 即图 2(a)所示.

3) 情景的结构模型

时空属性是知识元本质属性, 对于情景推演及其应急决策只有构建具有时空约束的情景才有现实意义.

定义 1^[20] 令二元组 $(TS, \leq)$ 是一个时间域, 其中 $TS = \{t \in T | t \geq 0\}$ 是时间集, $\leq$ 表示 TS 上的全序.

定义 2^[20] 令二元组 $(SS, \leq)$ 是一个空间域, 其中 $SS = \{s \in Z | s \geq 0\}$ 是空间集, $\leq$ 表示 SS 上的全序.

定义 3 令二元组 (t_i, sr_j) 是一个时空区间, 表示在时刻 t_i 的空间区域 sr_j , 即具有时空属性的区域, 其中 $sr_j = s_k - s_l, s_k \in SS, s_l \in SS, k \geq l$.

因此, 本文将情景描述为

$$S = (t, sr, K, R), \quad (8)$$

其中 S 表示情景, t 是情景所处的时刻, sr 是情景演化的空间区域, 即突发事件所影响区域范围, 本文限定 sr 是最大影响范围, 为所有要素影响区域的并, $K = \{k_i\}, i \in \mathbf{N}^*$, 是区域 sr 内情景的要素集合, $R = \{R_{mn}\} \subseteq K \times K, m, n \in \mathbf{N}^*$, 表示 t 时刻情景要素间的作用影响关系集合.

3 非常规突发事件情景模糊推演方法

非常规突发事件情景演化过程是情景中要素属性状态不断变化的过程. 在信息知识确定情况下, 按式(7)的关系分析情景中各个要素间关系, 进而对情景进行推演分析. 决策者根据获取的数据、知识构建当前情景, 从微观层面分析情景中要素间关系(如图3). 通过情景推演得到的一系列情景可以较完整地体现了事件的演化过程. 然而, 人们在认识事件的过程中, 由于事物本身表露不完全和人们自身条件限制(时间、心理压力等)等原因造成人们对该事件发生的条件和发展认识不清, 难以把握. 广义的讲, 几乎所有的非常规突发事件的情景推演都是在知识不完备或信息不确定条件下进行的, 这就使得像数学、物理那样严格的逻辑推理方法难以实现, 即使忽略次要因素能够进行推理, 也与实际情况相差甚远. 因此, 针对非常规突发事件的不确定性的特点, 本节以知识元为基础, 采用模糊推理方法, 解决情景推演中信息不确定情况下无法推演分析的问题.

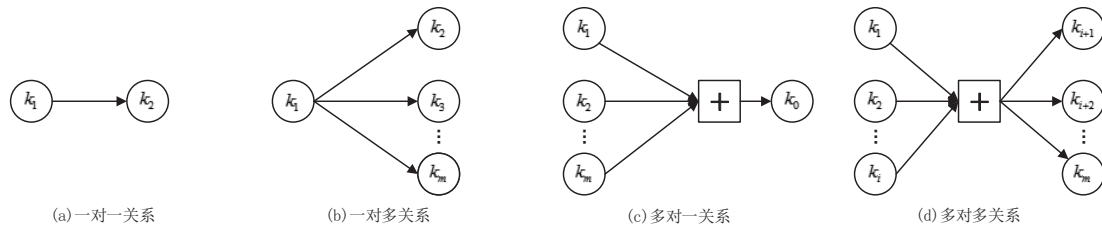


图3 情景要素知识元间关系基本结构图

Fig. 3 The basic structure diagram of scenario factors

图3中“+”号表示耦合关系, 图中的四种基本关系结构可抽象为如图3(a)的一对一关系简单情况, 因此, 本文只着重研究图3(a)形式的关系. 情景演化的本质是在孕灾环境和应急活动影响下致灾因子和承灾体间关系的变化. 为了方便推理分析, 本文将情景中致灾因子和承灾体间关系用矩阵 M 描述. 设情景 S 共有 n 个要素知识元 $k_1, k_2, \dots, k_n$, 那么

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \dots & m_{nn} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中 m_{ij} 取值 0 或 1, 当知识元间 k_i, k_j 存在并促发如式(7)的作用关系, 那么 $m_{ij} = 1$, 否则为 0. 但是在情景不确定情况下, 难以通过精确的定量分析来确定要素间的作用关系是否促发. 因此, 本文用模糊关系来描述情景要素间的不确定关系. 模糊关系是普通关系的拓广, 用来描述事物间关联的程度.

设情景 S 中 n 个要素知识元 $k_1, k_2, \dots, k_n$ 组成论域 $U = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$, 那么, 论域 U 上的模糊关系

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} \tilde{r}_{11} & \tilde{r}_{12} & \dots & \tilde{r}_{1n} \\ \tilde{r}_{21} & \tilde{r}_{22} & \dots & \tilde{r}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{r}_{n1} & \tilde{r}_{n2} & \dots & \tilde{r}_{nn} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中 $\tilde{r}_{ij}$ 表示要素知识元 k_i 对 k_j 作用关系的影响程度, $0 \leq \tilde{r}_{ij} \leq 1, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n$. 在模糊关系中, 要素知识元间的作用关系存在着一个介于 0 与 1 之间的隶属度, 表示情景中要素间作用关系的影响程度. 特别地, 要素间确定存在作用关系, 相当于元组的隶属度为 1, 否则为 0.

正是对所有要素知识元间的作用关系赋予一个隶属度, 使得情景中要素知识元间的关系模糊化, 将这样

的模糊关系称为情景推演的效用矩阵. 矩阵中的每个元素代表了情景演化的一条模糊规则, 将这些规则表示为模糊产生式规则形式

$$\text{Rule}[N]: \text{if } L\{P_1(w_1, F_1), P_2(w_2, F_2), \dots, P_n(w_n, F_n)\}, \text{then } Q(\theta, \tau), \quad (11)$$

其中 $N = 1, 2, \dots, m$ 表示模糊规则的数目; L 表示各个子前提间的逻辑组合关系(合取); P_i 表示规则中第 i 个前提; $w_i \in (0, 1]$ 表示子前提 P_i 的权重, 即前提 P_i 的重要程度, $\sum_{i=1}^n w_i = 1$; n 为前提条件的个数; Q 表示规则结论; $F_i \in (0, 1]$ 表示前提的模糊隶属度; $\theta \in (0, 1]$ 表示该规则产生的结论的置信度; $\tau \in (0, 1]$ 为该规则的“可应用阈值”, 表示规则是否被采纳的判断标识, θ 和 τ 根据专家和经验数据法给出.

模糊规则可以将应急领域的不确定的知识和信息加以表示. 不确定的情景信息与模糊规则的前提进行匹配, 分析情景推演的结果及其可能性, 进而辅助决策者进行决策. 令 $M^N(E, P) (0 \leq M^N(E, P) \leq 1)$ 表示情景不确定信息集 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 与第 N 条规则前提集 $P^N = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 的匹配程度, 即

$$M^N(E, P) = \sum_{i=1}^n w_i m(e_i, p_i), \quad (12)$$

其中 $m(e_i, p_i)$ 表示子前提的匹配度, 具体匹配度算法根据实际应用特点定义.

实际中, 存在着这样一种情况, 在前提集中存在特别重要的前提, 而其他次要子前提对结论的推理不会产生较大的影响, 本文将这样的匹配称为特殊匹配. 那么需首先满足条件

$$m(e_i, p_i) \geq \lambda_i, \quad (13)$$

其中 λ_i 表示特殊匹配的匹配阈值, 即在存在特殊前提的匹配中, 只有特殊匹配满足阈值 λ_i 的前提下, 再进行规则的匹配计算.

在模糊匹配中, 对于第 N 条规则, 当 $M^N(E, P) \geq \tau$ 时, 模糊规则被激活, 且推出结论 Q 的可能性为

$$\mu = M^N(E, P) \wedge \theta. \quad (14)$$

在信息和知识不确定情况下, 利用要素知识元间的关系构建如式(11)所示的模糊规则, 形成情景推演模糊规则库. 决策者进行情景推演时, 首先分析确定情景中所包含的要素知识元; 接着根据当前的信息或数据将要素知识元实例化^[18]为相应的要素对象(如建筑物知识元实例化为学校、医院等), 情景的不确定性通过知识元模型蕴含到要素对象的属性描述中; 然后与模糊规则进行匹配, 计算要素对象间发生影响作用关系的可能性, 进而得到情景推演的效用矩阵; 最后通过当前情景和效用矩阵推演分析的情景发展态势.

4 案例分析

2010年8月, 甘肃省甘南藏族自治州舟曲县城突发大规模泥石流灾害, 给舟曲县城造成了毁灭性灾难, 伤亡人数之多, 财产损失之大, 成为我国历史上有记录以来的泥石流灾害之最. 本节以舟曲泥石流灾害为例, 验证前文给出方法的科学性和实用性.

舟曲县地处西秦岭地质构造带南部陇南山地, 主城区位于三眼峪等泥石流沟堆积扇上. 2010-08-07在三眼峪等泥石流形成区的降雨量达 77.3 mm/h , 暴雨形成强大洪水依次冲毁两条沟内的天然堆石坝和人工拦挡坝, 形成规模巨大的高容重黏性泥石流, 泥石流携带具有强大冲击力的巨石冲毁房屋 5 500 余间, 造成 1 744 人死亡和失踪. 其中, 三眼峪沟流域面积为 25.75 km^2 , 流域相对高差 2 488 m, 主沟长 9.7 km, 主沟平均比降为 24.1%, 沟口扇形地东西长约 2 050 m, 平均比降为 11%, 供给泥石流的固体物质约 $200 \times 10^4 \text{ m}^3$, 流量高达约 $1 800 \text{ m}^3/\text{s}$, 一次最大固体物质冲出量为 $110 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[21].

本节将知识元模型用于泥石流灾害的情景表示与推演分析中, 首先分析确定情景中的要素知识元及其相互作用关系; 接着根据情景的信息实例化情景要素知识元, 构建初始情景; 最后, 针对事件中信息不确定的问题, 通过模糊推理方法进行情景推演分析. 为简化论述, 本例中泥石流灾害仅给出一条泥石流沟和两处

建筑物. 如图4所示, 在事件影响区域 sr 内有一条泥石流沟, 泥石流沟的下游有2处建筑物. 根据事件的描述, 可以抽取情景中的要素知识元: 泥石流、泥石流沟以及建筑物共3个, 用式(5)描述各要素知识元见表1, 要素知识元属性描述见表2 (以泥石流知识元为例).

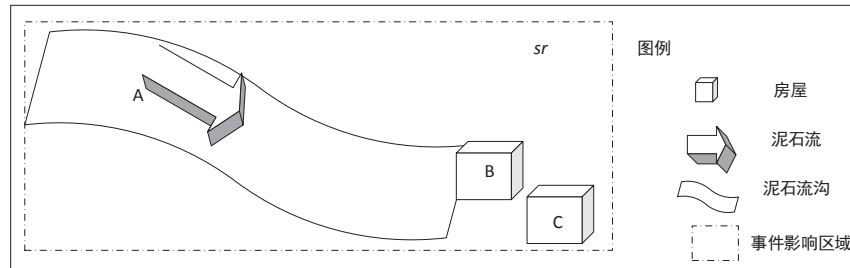


图4 情景结构示意图

Fig. 4 The structure diagram of scenario

表1 要素知识元表

Table 1 Elements of knowledge unit table

知识元	知识元名称	知识元属性
k_1	泥石流	位置、时间、重度、最大流速、流量、冲击力...
k_2	泥石流沟	位置、主沟长度、沟床比降、流域面积、形状...
k_3	建筑物	位置、形状、建筑材料、状态(是否倒塌)、最大抗冲击力...

表2 泥石流属性知识元表

Table 2 The attribute knowledge element table of debris

属性名称	取值类型	取值区间	取值单位	是否有时变性	时变函数
位置	空间型	—	空间	否	无
时间	时间点	—	—	否	无
重度	数值型	—	t/m^3	否	无
最大流速	数值型	—	m/s	否	无
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

要素对象间相互作用关系的促发是推动情景演化的重要参数. 本例中要素对象间相互作用关系主要包含泥石流与建筑物间作用关系和泥石流沟与泥石流间作用关系, 为说明问题, 本文以式(15)的泥石流与建筑间的作用关系为例, 其他相关关系因篇幅所限, 在此不再赘述. 根据第2.3节要素对象间的关系描述, 将泥石流与建筑物间的作用关系 R_{13} 描述为

$$\begin{cases} \Phi_1(\{\gamma_c, V_c\}, \{F\}, f_1) = 0 \\ \Phi_2(\{F, F_{\max}\}, \{sd\}, f_2) = 0, \end{cases} \quad (15)$$

其中 F 表示泥石流冲击力, g 为重力加速度, α 为房屋受力面与泥石流冲击力方向夹角, σ 为建筑物形状系数, γ_c 为泥石流重度, V_c 为泥石流流速, $F_{\max}$ 表示拦挡坝最大抗冲击力, sd 表示建筑物状态, 即是否倒塌.

结合当前情景信息将要素知识元实例化为要素对象, 构建初始情景 S_0 , 记为

$$S_0 = (t_0, sr, \hat{K}, \hat{R}), \quad (16)$$

其中 $\hat{K} = \{\hat{k}_1, \hat{k}_2, \hat{k}_3^1, \hat{k}_3^2\}$ 表示 t_0 时刻, 区域 sr 内, 要素知识元实例化后的要素对象集, $\hat{k}_1, \hat{k}_2$ 分别为泥石流、泥石流沟知识元的实例化对象, $\hat{k}_3^1, \hat{k}_3^2$ 分别表示建筑物知识元实例化的要素对象房屋1与房屋2. 以泥石流沟为例, 将其实例化后为 $\hat{k}_2 = \{\text{主沟长度}(9.7 \text{ km}), \text{流域面积}(35.75 \text{ km}^2), \text{沟床比降}(24.1\%), \dots\}$; $\hat{R}$ 表示对象间的关系集. 但由于事件发生时泥石流的部分属性难以确定(如重度 γ_c)导致无法按照关系 R_{13} 进行推演分析. 根据第3节分析, 将 R_{13} 按式(11)形式写成式(17), 其中子前提的权重利用文献[22]中的灰色关联

度分析法确定, 隶属度利用文献[23]中的模糊概率综合评价方法确定.

Rule[1]: if 泥石流速度快 (0.397, 0.72) and 泥石流重大 (0.426, 0.67) and 泥石流与建筑物接触面积大 (0.177, 0.8) then $sd = 1(0.75, 0.70)$. (17)

假设初始时刻 t_0 泥石流位于 A 点, 根据式(9)可知初始情景 S_0 的关联矩阵

$$M_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

当 t_1 时刻, 泥石流到达 B 点位置, 利用模糊概率综合评价方法将情景信息处理后为 $E = \{e_1, e_2, e_3\}$, 其中 $e_1 = (\text{泥石流速度快}, 0.69)$, $e_2 = (\text{泥石流重大}, 0.54)$, $e_3 = (\text{泥石流与建筑物接触面积大}, 0.8)$.

用式(19)计算匹配度 $m(e_i, p_i)$ [24]

$$m(e_i, p_i) = \frac{e_i^T p_i}{(p_i^T p_i) \vee (e_i^T p_i)}, \quad (19)$$

其中 $\vee$ 为取大, 则

$$m(e_1, p_1) = \frac{0.69 \times 0.72}{(0.72 \times 0.72) \vee (0.69 \times 0.72)} = 0.958. \quad (20)$$

同理, $m(e_2, p_2) = 0.806$, $m(e_3, p_3) = 1$, 根据式(12)可得

$$M^N(E, P) = \sum_{i=1}^n w_i m(e_i, p_i) = 0.90. \quad (21)$$

显然, $M^N(E, P) > \tau$, 模糊规则被激活, 按式(14)可知房屋倒塌的可能性为 $\tilde{r} = M^N(E, P) \wedge \theta = 0.75$. 采用相同方法可得情景推演的效用矩阵 $\tilde{R}$. 然后, 通过如下的模糊推理算式得到下一个情景 S_1 的关系矩阵

$$M_1 = M_0 \vee \tilde{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \vee \begin{bmatrix} 0 & 0.75 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.75 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

以此类推得到情景的关系矩阵不再变动, 即情景演化结束. 由推演结果可知, 在 t_0 时刻, 泥石流移动到 A 点, 与住房不满足空间约束, 所以关系矩阵 M_0 的元素都是 0, 即泥石流未能冲毁建筑物; 在 t_1 时刻, 泥石流到达 B 点, 与房屋 1 满足时空约束并激活相应的模糊规则 R_{13} , 经计算可知, 泥石流冲毁住房 1 的可能性是 0.75; 而泥石流与房屋 2 不满足时空约束, 故泥石流冲毁住房 2 的可能性依然是 0. 可见本方法推演结果是符合实际的, 因此, 通过本方法既可以辅助决策者在情景信息难以确定的情况下把握事件发展趋势, 同时也可以从微观层面对情景结构和演化机理进行分析, 做出及时科学的应对措施.

5 结束语

非常规突发事件的情景表示与推演分析是非常突发事件应对的基础. 情景的表示与推演一方面需要多领域、多学科知识的综合支持, 另一方面, 非常规突发事件的性质决定了其情景构建与推演分析所依据的信息通常具有不确定性. 此外, 若能从相对微观视角刻画非常规突发事件的情景构成及演化机理, 将更有助于非常规突发事件的决策应对. 而已有相关研究在上述几方面仍有待进一步提升.

本文以知识元模型为基础, 从相对微观的视角描述了情景构成要素及其间相互作用规律, 给出了一种适用于演化分析的情景表示模型, 解决了非常规突发事件情景构建中的多学科、多领域知识支持问题, 并实现了对情景构成要素相对微观的刻画; 基于该情景表示模型, 提出了一种基于知识的情景模糊推演方法. 通过

知识元属性间关系的不确定性推理得出情景推演的结果及其可能性, 解决了非常规突发事件情景演化分析中的信息不确定性问题, 并实现了对情景演化机理相对微观的刻画, 有助于决策者对事件演化过程的深刻认知与把握, 进而做出科学高效的应对决策. 最后, 通过算例分析证明了该方法的科学性与实用性.

本文提出的方法是对非常突发事件情景构建与推演研究的一次有益尝试, 其推演结论与知识元体系的完备程度以及模糊规则的作用阈值具有相关性. 因此, 知识元体系完备程度的刻画、模糊规则合理作用阈值的选取以及推演结论的置信度分析还需进一步深入研究, 这将在后续研究工作中给出.

参考文献:

- [1] 李仕明, 刘娟娟, 王博, 等. 基于情景的非常规突发事件应急管理研究: “2009 突发事件应急管理论坛”综述. 电子科技大学学报(社科版), 2010, 12(1): 1–3.
Li S M, Liu J J, Wang B, et al. Unconventional incident management research based on scenarios: “The First International Forum on Incident Management”(IFIM09) overview. Journal of University of Electronic Science and Technology of China(Social Sciences Edition), 2010, 12(1): 1–3. (in Chinese)
- [2] 汪季玉, 王金桃. 基于案例推理的应急决策支持系统研究. 管理科学, 2003, 16(6): 46–51.
Wang J Y, Wang J T. A study of emergency decision support system based on case-based reasoning. Management Sciences in China, 2003, 16(6): 46–51. (in Chinese)
- [3] 裘江南, 王延章, 董磊磊, 等. 基于贝叶斯网络的突发事件预测模型. 系统管理学报, 2011, 20(1): 98–103.
Qiu J N, Wang Y Z, Dong L L, et al. A model for predicting emergency event based on bayesian networks. Journal of Systems & Management, 2011, 20(1): 98–103. (in Chinese)
- [4] 裘江南, 刘丽丽, 董磊磊. 基于贝叶斯网络的突发事件链建模方法与应用. 系统工程学报, 2012, 27(6): 739–750.
Qiu J J, Liu L L, Dong L L. Modeling method and application of emergent event chain based on bayesian networks. Journal of Systems Engineering, 2012, 27(6): 739–750. (in Chinese)
- [5] 杨保华, 方志耕, 刘思峰, 等. 基于 GERTS 网络的非常规突发事件情景推演共力耦合模型. 系统工程理论与实践, 2012, 32(5): 963–970.
Yang B H, Fang Z G, Liu S F, et al. Model of co-coupling in unconventional incidents based on GERTS network. Systems Engineering: Theory & Practice, 2012, 32(5): 963–970. (in Chinese)
- [6] 陈长坤, 孙云凤, 李智. 冰雪灾害危机事件演化及衍生链特征分析. 灾害学, 2009, 24(1): 18–21.
Chen C K, Sun Y F, Li Z. Characteristic analysis of evolution and derivation chain of risk event caused by snow and ice disasters. Journal of Catastrophology, 2009, 24(1): 18–21. (in Chinese)
- [7] 刘铁民. 重大事故动力学演化. 中国安全生产科学技术, 2007, 2(6): 3–6.
Liu T M. Dynamic evolution of major accidents-concepts and rudiments. Journal of Safety Science and Technology, 2007, 2(6): 3–6. (in Chinese)
- [8] 韩传峰, 王兴广, 孔静静. 非常规突发事件应急决策系统动态作用机理. 软科学, 2009, 23(8): 50–53.
Han C F, Wang X G, Kong J J. Dynamci mechanism of unconventional emergency decision-making system. Soft Science, 2009, 23(8): 50–53. (in Chinese)
- [9] Zheng X, Li W, Guan C. Simulation of evacuation processes in a square with a partition wall using a cellular automaton model for pedestrian dynamics. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2010, 389(11): 2177–2188.
- [10] 余雷, 薛惠锋, 高晓燕, 等. 基于元胞自动机的传染病传播模型研究. 计算机工程与应用, 2007, 43(2): 196–198.
Yu L, Xue H F, Gao X Y, et al. Epidemic spread model based on cellular automaton. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(2): 196–198. (in Chinese)
- [11] 杨青, 杨帆. 基于元胞自动机的突发传染病事件演化模型. 系统工程学报, 2012, 27(6): 727–738.
Yang Q, Yang F. Emergency epidemics spread model using cellular automata. Journal of Systems Engineering, 2012, 27(6): 727–738. (in Chinese)
- [12] Raman M. Claremont colleges emergency preparedness: An action research initiative. Systemic Practice and Action Research, 2006, 19(3): 253–271.
- [13] 王庆全, 荣莉莉, 于凯. 应急决策知识发现的推理方法研究. 运筹与管理, 2010, 19(1): 21–29.
Wang Q Q, Rong L L, Yu K. A knowledge reasoning method for emergency decision-making knowledge discovery. Operations Research and Management Science, 2010, 19(1): 21–29. (in Chinese)

- [14] 温立. 基于本体的应急决策知识模型研究. 大连: 大连理工大学, 2008.
Wen L. The Study of Ontology for Knowledge Model based on Emergency Decision-making. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [15] 王延章. 模型管理的知识及其表示方法. 系统工程学报, 2011, 26(5): 291–297.
Wang Y Z. Knowledge and representation of model management. Journal of Systems Engineering, 2011, 26(5): 291–297. (in Chinese)
- [16] 陈雪龙, 董恩超, 王延章, 等. 非常规突发事件应急管理知识元模型. 情报杂志, 2011, 30(12): 22–26.
Chen X L, Dong E C, Wang Y Z, et al. Knowledge unit model for emergency management of unconventional incident. Journal of Intelligence, 2011, 30(12): 22–26. (in Chinese)
- [17] 姜卉, 黄钧. 罕见重大突发事件应急实时决策中的情景演变. 华中科技大学学报(社会科学版), 2009, 23(1): 104–108.
Jiang H, Huang J. The study on the issues of scenario evolvement in real time decision making of infrequent fatal emergencies. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Social Sciences Edition), 2009, 23(1): 104–108. (in Chinese)
- [18] 仲秋雁, 郭艳敏, 王宁, 等. 基于知识元的非常规突发事件情景模型研究. 情报科学, 2012, 30(1): 115–120.
Zhong Q Y, Guo Y M, Wang N, et al. Research on unconventional emergency scenario model based on knowledge element. Information Science, 2012, 30(1): 115–120. (in Chinese)
- [19] 王颜新, 李向阳, 徐磊. 突发事件情境重构中的模糊规则推理方法. 系统工程理论与实践, 2012, 32(5): 954–962.
Wang Y X, Li X Y, Xu L. Fuzzy rules reasoning method in emergency context reconstruction. Systems Engineering: Theory & Practice, 2012, 32(5): 954–962. (in Chinese)
- [20] 徐洪学, 郭秀英, 刘永贤. 基于RBAC的具有时空约束的工作流授权模型. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(2): 217–220.
Xu H X, Guo X Y, Liu Y X. Temporarily-Spatially constrained workflow authorization model based on RBAC. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2006, 27(2): 217–220. (in Chinese)
- [21] 胡向德, 王根龙, 赵成, 等. 舟曲“8.8”三眼峪特大泥石流特征值分析. 西北地质, 2011, 44(3): 44–52.
Hu X D, Wang G L, Zhao C, et al. Analyses of characteristic values for Sanyanyu debris flow in Zhouqu county on August 8, 2010. Northwestern Geology, 2011, 44(3): 44–52. (in Chinese)
- [22] 郭万铭, 焦金鱼. 基于模糊综合评判法分析的岷县洮河流域单沟泥石流危险性评价. 地质灾害与环境保护, 2010, 21(2): 15–18.
Guo W M, Jiao J Y. Hazard assessment of single gully debris flows in the Taohe river valley of Min County based on fuzzy comprehensive evaluation method. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2010, 21(2): 15–18. (in Chinese)
- [23] 刘章军. 基于模糊概率方法的泥石流危险性评价. 三峡大学学报(自然科学版), 2007, 29(4): 295–298.
Liu Z J. Debris flow danger evaluation based on fuzzy probability method. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences Edition), 2007, 29(4): 295–298. (in Chinese)
- [24] Yeung D S, Tsang E C C. Improved fuzzy knowledge representation and rule evaluation using fuzzy petri nets and degree of subsethood. International Journal of Intelligent Systems, 1994, 9(12): 1083–1100.

作者简介:

张磊 (1989—), 男, 山西高平人, 博士生, 研究方向: 应急管理, Email: zhang2007dlut@mail.dlut.edu.cn;

王延章 (1952—), 男, 辽宁开原人, 博士, 教授, 研究方向: 应急管理, 系统工程, Email: yzwang@dlut.edu.cn;

陈雪龙 (1978—), 男, 吉林白山人, 博士, 副教授, 研究方向: 应急管理, 决策支持系统, Email: chenxl.dg@dlut.edu.cn.