

高山, 王晗奕. 基于动态贝叶斯网络的突发公共卫生事件情景推演[J]. 灾害学, 2021, 36(3): 28–34. [GAO Shan and WANG Hanyi. Deductive Scenario of Public Health Emergencies Based on Dynamic Bayesian Network[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(3): 28–34. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.03.006.]

基于动态贝叶斯网络的突发公共卫生事件情景推演^{*}

高山, 王晗奕

(中南大学 商学院, 湖南 长沙 430074)

摘要: 情景是突发公共卫生事件应急决策的基础和依据, 通过对突发公共卫生事件进行情景推演, 能够为决策者进行应急决策提供科学有效的辅助支持。在分析突发公共卫生事件情景演变规律的基础上, 提取了情景状态(S)、应急目标(T)和应急措施(M)三个要素, 构建了基于知识元的情景表示模型, 对突发公共卫生事件的情景进行了刻画; 在此基础上, 针对突发公共卫生事件的不确定性特点, 运用动态贝叶斯网络扩展知识元模型的不确定性表示和推理, 构建了动态贝叶斯网络的情景推演模型, 实现了对突发公共卫生事件的情景推演和演变路径分析; 最后, 以新冠肺炎疫情为例, 阐述了新冠肺炎疫情情景推演流程及关键技术, 并对情景推演的结果进行了分析。推演结果与实际疫情发展情景及发展状态基本一致, 验证了情景推演方法的合理性和可行性。

关键词: 突发公共卫生事件; 情景推演; 知识元模型; 动态贝叶斯网络

中图分类号: X4; X915.5; R211 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2021)03-0028-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.03.006

突发公共卫生事件, 是指突然发生、造成或者可能造成社会公众健康严重损害的重大传染病疫情、群体性不明原因疾病、重大食物和职业中毒以及其他严重影响公众健康的事件^[1]。近年来, 在全球范围内发生了很多重大突发公共卫生事件。如2003年, 我国爆发SARS疫情; 2007年, 全球范围内爆发甲型H1N1流感; 2010年以来, 非洲爆发埃博拉病毒; 2018年8月, 非洲猪瘟在我国各地爆发; 2020年, 全球范围内爆发新型冠状病毒肺炎。突发公共卫生事件具有突发性、复杂性、紧迫性、持续性和破坏性等特征^[2], 其发生给人类的生命财产和社会发展带来了巨大的损失和影响, 严重阻碍了人类社会的发展步伐。因此, 在复杂环境下, 突发公共卫生事件的应急管理极为重要, 如果应急决策出现偏差, 可能会造成更大的损失, 导致更为严重的社会影响。情景是决策者对突发公共卫生事件应急决策的基础和依据, 因此, 研究突发公共卫生事件情景表示与演化规律, 对于决策者做出应急决策、进行应急管理具有重要的理论和现实意义。

传统“预测——应对”决策模式难以应对复杂多变的突发公共卫生事件, 学术界开始向“情景——应对”决策模式进行转化。COSGRAVE J^[3]

认为: “情景——应对”就是对发生过的事件进行分析、推演、归纳, 总结出其演化规律, 并形成应急管理预案。KATHLEE等^[4]立足于“情景——应对”型应急决策模型, 对非常规突发事件演化机理进行了阐述。COHN R等^[5]阐述了非常规突发事件情景表现通常采用的方法, 构建了各个阶段处置过程中, 情景表现的选择、应用的方法与步骤。

情景表示是情景推演的前提和基础, 一些学者对应急决策中情景表示进行了探讨。陈雪龙等^[6]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。张磊等^[7]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, 并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。张志霞等^[8]运用知识元表示法描述突发事件的情景状态、应急活动、孕灾环境和承灾体四种要素, 构建了基于动态贝叶斯网络的情景推演模型。

情景表示和情景推演是一个有机整体, 情景的知识表示是情景模型和推理演化的前提和基础。本文首先构建了基于知识元的情景表示模型, 对突发公共卫生事件的情景进行刻画; 在此基础上,

^{*} 收稿日期: 2021-01-20 修回日期: 2021-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目“社会化媒体下重大决策社会稳定风险传导路径与防控机制研究”(71573280); 2020年度湖南省创新型省份建设专项项目(2020sk3010)

第一作者简介: 高山(1969-), 男, 汉族, 湖南长沙人, 博士, 教授, 主要从事风险管理、应急管理研究. E-mail: gs@csu.edu.cn

通讯作者: 王晗奕(1988-), 女, 汉族, 湖南株洲人, 博士, 主要从事应急决策研究. E-mail: 171601028@csu.edu.cn

运用动态贝叶斯网络扩展知识元模型的不确定性表示和推理, 提出了基于动态贝叶斯网络的情景推演模型与方法, 实现对突发公共卫生事件的情景推演和演变路径分析, 能够为决策者进行应急决策提供科学有效的辅助支持。

1 突发公共卫生事件情景表示

1.1 知识元模型

知识元是对若干抽象事物的表示, 是事件各个要素不可再分的最小实体单元。知识元模型具有通用性, 能全面表达非常规突发公共卫生事件发展的各个过程, 使情景表示具体且结构化。利用共性知识元表示公共卫生突发事件, 有助于深刻地认识突发公共卫生事件的演化过程以及各个要素之间的相互联系^[9-10]。如一个具体的公共卫生事件由很多个实体单元组成, 包含多个的知识对象 M , 其共性知识可以表示为一个三元组:

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

式中: N_m 表示事物的名称和概念, A_m 表示事物的定量或定性属性, R_m 表示事物内部属性间的相互关系。而

$$A_m = A_m^I \cup A_m^S \cup A_m^O. \quad (2)$$

式中: A_m^I 为输入属性, A_m^S 为状态属性, A_m^O 为输出属性。

若某一属性 $\alpha \in A$, 则 α 可以用属性知识元模型规范表示为:

$$K_\alpha = (p_\alpha, d_\alpha, f_\alpha). \quad (3)$$

式中: p_α 为对象属性的可测或可描述特性; d_α 为属性的可测度量纲, 如取值单位等; f_α 表示属性状态的时变函数, 仅当属性可测且随时间变化时, 不为空。

若某一事物内部属性间约束关系 $r \in R$, 则 r 用关系知识元模型表示为:

$$K_r = (p_r, A_r^I, A_r^O, f_r). \quad (4)$$

式中: p_r 表示映射关系属性, 如线性、非线性、逻辑、结构、随机、函数等; A_r^I 表示关系输入属性状态集, A_r^O 表示关系输出属性状态集, f_r 表示关系 r 的具体映射函数, 通常以函数、结构关系或规则等形式存在。

1.2 情景知识表示模型

情景表示模型是指通过符号化、网络化的方式表达出情景要素、情景要素之间关系以及情景当前的状态、情景的演变过程以及情景的可能演变结果。通过情景演变路径分析, 使应急决策主体能够对突发公共卫生事件当前的状态以及未来可能的发展趋势、影响事态发展的因素、驱动这些因素发挥力量的力量等有直观、概括的了解, 使应急决策主体能够在紧迫的时间约束下, 尽可能地做出满意的、科学的决策。

探求突发公共卫生事件的情景演变规律是情

景演变路径分析的基础。非常规突发公共卫生事件具有历史罕见性、时效紧迫性和极端不确定性等特征^[11]。此类事件的情景演变过程及规律具有复杂性, 事件情景从发生后的初始状态、灾害事故发展、演变的规律以及人为干预和外界环境的影响等, 会伴随一系列的动态演变。

突发公共卫生事件的知识表示模型如图 1 所示, S 表示突发公共卫生事件当前的情景状态, M 表示针对此情景状态要采取的应急处理方法, T 表示应急目标。处理目标的完成情况受情景状态和处理方法影响, 根据处理目标的完成与否, 跳转到 $S1$ 和 $S2$ 两个不同的情景状态, 在不同的情景状态中又有对应的不同应急处理方法和应急目标^[12]。以此类推, 直到跳转到突发公共卫生事件结束的情景状态。

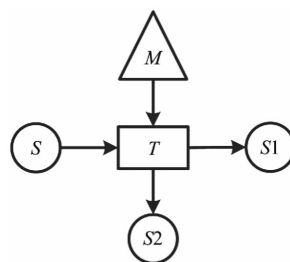


图1 知识元要素模型

在知识元要素模型中, 情景状态 S 表示突发公共卫生事件的初始状态。在该状态的前提下, 分析相关的因素关联性, 判断其后续的发展态势。依据判断的结果, 采用对应的处理措施, 对事件的发展进行干预, 使其向应急目标 T 进行演化, 从而形成后续的可能状态 $S1$ 或者 $S2$ 。这样的处理规律, 与动态贝叶斯网络的概率演化模型及其相似, 即后续状态依据前序状态的条件, 以及影响其过程的因素来共同决定。因而, 可以根据事件演化过程的状态概率关系, 构造相对应的贝叶斯网络, 完成定量的分析和推演。

对于公共卫生事件而言, 需要对涉及事件其中的因素进行知识元提取, 已有文献研究主要是从情景状态、应急活动、孕灾环境和承灾体四个角度进行知识元认知。例如情景状态可以包括当前涉及人群范围、设备需求、医疗条件等; 应急活动可以包括隔离、调配物质、筹集药物用品等; 孕灾环境可以包括接触途径、人群交流范围、个人卫生状态等; 承灾体可以包括日常用品、参与人、医护器械等。根据这几个方面的知识要素, 本文从中提取出影响公共卫生事件应急决策的信息, 形成对应的状态构成、应急目标和应急措施等信息表。公共卫生事件状态图对应的转换信息如表 1 所示。

表1 要素信息表

情景状态(S)	应急目标(T)	应急措施(M)
$S1$ 公共卫生状态 1	$T1$ 应急目标 1	$M1$ 措施方案 1
$S2$ 公共卫生状态 2	$T2$ 应急目标 2	$M2$ 措施方案 2

2 突发公共卫生事件动态贝叶斯网络模型

基于知识元的突发公共卫生事件情景表示模型可以反映出情景要素构成及要素之间的联系机制,便于从突发公共卫生事件的形成机制和机理上对所需要采取的措施进行决策和推断。但由于突发公共卫生事件发展的不确定性、复杂性和随机性,给情景推演带来了大量的不确定性。因此,可以采用概率认知的方式,以以往的数据积累为基础,构建突发公共卫生事件动态贝叶斯网络模型,以扩展知识元模型的不确定性表示和推理,实现对突发公共卫生事件的情景推演和演变路径分析。

2.1 动态贝叶斯网络

贝叶斯网络也称为信度网络、因果网络或概率图模型,由代表变量节点以及连接点的有向边构成的一个无环图,是目前不确定知识表达和推理领域最有效的模型之一^[13-14]。假设 x 为贝叶斯网络中因果关系的原因集合或父节点集, y 为贝叶斯网络中因果关系的结果或称子节点,则有 $x \rightarrow y$, 其中集合 x 包含 n 个元素,每个元素记为 x_i , 则有 $x_i \in x (i=1, 2, \dots, n)$ 。全概率公式为:

$$p(y) = p(yx) = p(yx_1 + yx_2 + \dots + yx_n) \\ = p(yx_1) + p(yx_2) + \dots + p(yx_n) \quad (5)$$

从式(5)可以看出,全概率公式本质上是根据原因推结果。只要给出父节点的先验概率以及父节点到子节点的条件概率,就可以计算出子节点的后验概率。而贝叶斯公式与全概率公式正好相反,是在结果已经发生的情况下,推理某一原因的发生概率,表示式为:

$$p(x_i|y) = \frac{p(x_iy)}{p(y)} = \frac{p(x_i)p(y|x_i)}{\sum_{j=1}^n p(x_j)p(y|x_j)} \quad (6)$$

由于贝叶斯网络推理均隐含了一个条件独立性的前提假设,即对于一个给定节点的父节点集,该节点独立于它的所有非后代节点。因此,贝叶斯网络表示的所有节点的联合概率就可以表示为各节点条件概率的乘积,即:

$$p(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n p(x_i|x_1, x_2, \dots, x_{i-1}) \\ = \prod_{i=1}^n p(x_i|pa(x_i)) \quad (7)$$

式中: $pa(x_i)$ 为 x_i 的父节点集。

所谓动态贝叶斯网络,其实就是在静态贝叶斯网络的基础上增加了时间因素,使得时间推理与事件发展的时间上保持一致性与连续性,从而更符合客观现实。本质上动态贝叶斯网络可以看成是静态贝叶斯网络在时间轴上的展开式^[15]。假设现有 T 个时间片段,有 n 个隐藏节点和 m 个观测节点, x_{ij} 表示第 j 个时间片段的第 i 个隐藏节点的状态,则有:

$$p(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{T1}, x_{Tn} | y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1m}, \dots, y_{T1}, y_{T2}, \dots, y_{Tm}) \\ = \frac{\prod_{i,j} p(y_{ij} | pa(y_{ij})) \prod_{i,k} p(y_{ik} | pa(y_{ik}))}{x_{11}, x_{12}, \dots, x_{T1}, x_{T2}, \dots, x_{Tm} \prod_{i,j} p(y_{ij} | pa(y_{ij}, j)) \prod_{i,k} p(y_{ik} | pa(y_{ik}))}, \\ i \in [1, T], j \in [1, m], k \in [1, n] \quad (8)$$

式中: x_{ij} 为一个取值状态,每个变量的第一个下标 i 表示时间片段,第二个下标表示该时间片段内的第 j 个隐藏节点; y_{ij} 为观测值, $pa(y_{ij})$ 为 y_{ij} 的父节点集合。

构建动态贝叶斯网络可分为以下三步,这三步可按顺序进行,也可相互交叉,通过反复调整最终确定整个动态贝叶斯网络。

(1)确定网络节点变量。动态贝叶斯网络由各节点组成。选取关键要素形成节点变量,网络节点变量确定后根据实际情况,确定各节点变量的类型和取值。

(2)确定节点变量之间的相互关系。节点变量确定之后,根据突发公共卫生事件情景演变进程和规律,确定节点变量之间的因果关系。然后用有向线段连接表示,从而形成有向无环网络结构图。

(3)概率分配。贝叶斯网络结构确定后,要对网络结构中的各个节点赋予其条件概率,以描述节点与其父节点之间的关联程度。然而动态贝叶斯网络结构中有些变量有父节点有些变量无父节点,对没有父节点的变量要给定其先验概率,有父节点的变量通过专家经验等手段确定其条件概率。

2.2 基于动态贝叶斯网络的情景推演

由于突发公共卫生事件涉及元件多、演变复杂、难以建立案例库和可供借鉴的历史经验数据较少,因此多以专家评估打分方法为主。为了避免专家个人的主观局限性,采用多名专家评估结果的平均值作为最终结果^[16]。根据事故在不同阶段的发展和演变情况,基于历史数据经验及专家知识确定每个节点变量的条件概率,各节点的先验概率和条件概率如表2所示。

表2 概率信息表

项目	True	False
S1	$p1$	$p2$
M1	$p3$	$p4$
T1	$S1 = T, M1 = T$	$S1 = T, M1 = F$
True	$p5$	$p6$
False	$p7$	$p8$
T1	$S1 = F, M1 = T$	$S1 = F, M1 = F$
True	$p9$	$p10$
False	$p11$	$p12$
S2	$T1 = T$	$T1 = F$
True	$p13$	$p14$
False	$p15$	$p16$

根据突发公共卫生事件的情景发展趋势, 以及各个元素之间的关系, 可以画出如图 2 所示的状态演化图。

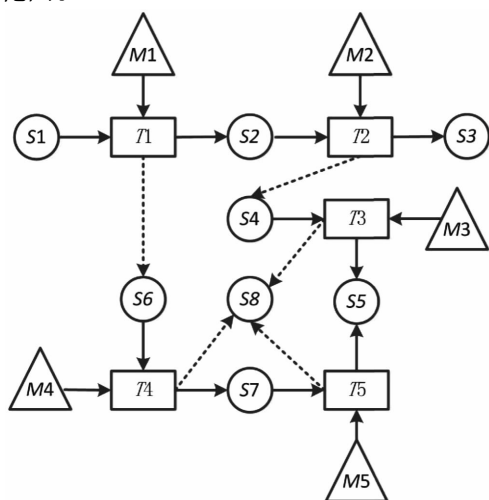


图2 状态演化图

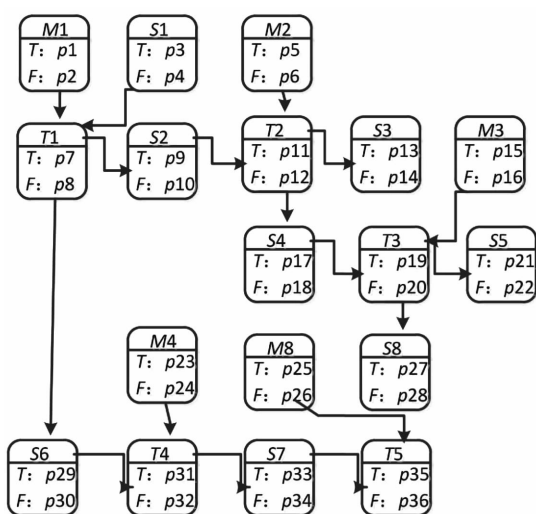


图3 状态概率图

根据图 2 所示, 创建突发公共卫生事件情景推演图 3 所示, 根据条件概率表为每个节点变量输入参数。根据条件概率公式, $M1$ 与 $S1$ 按事件真实情况设定先验概率, 计算 $T1$ 顺利完成的概率如下所示:

$$P(T1 = T) = P(S1 = T) \times P(M1 = T) \times P(T1 = T | S1 = T, M1 = T) + P(S1 = T) \times P(M1 = F) \times P(T1 = T | S1 = T, M1 = F) + P(S1 = F) \times P(M1 = T) \times P(T1 = T | S1 = F, M1 = T) + P(S1 = F) \times P(M1 = F) \times P(T1 = T | S1 = F, M1 = F) = p5 \times p1 \times p3 + p6 \times p1 \times p4 + p9 \times p2 \times p3 + p10 \times p5 \times p2. \quad (9)$$

3 实例分析

3.1 新冠肺炎疫情描述

据我国卫生健康委员会公布的数据显示, 截至 2020 年 8 月 28 日 24 时, 现有确诊新冠肺炎病例 262 例, 累计治愈出院病例 80 126 例, 累计死

亡病例 4 634 例, 全国累计报告确诊病例 85 022 例^[17]。据世界卫生组织发布的数据显示, 截至欧洲中部时间 2020 年 8 月 28 日 16:33 (北京时间 2020 年 8 月 28 日 22:33), 全球新冠确诊病例达到 24 299 923 例, 死亡病例达到 827 730 例^[18]。

从公开的数据特征来看, 新冠肺炎疫情具有高发性、持续性和高感染性, 如能够通过已有数据分析其中情景要素构成以及要素之间的联系机制, 构建情景表示模型, 并在此基础上构建相应的动态贝叶斯网络情景推演模型, 呈现出疫情感染和防控之间的关系, 便可有效地推演出疫情发展的趋势和方向。

3.2 情景知识元构建

根据新冠肺炎的发展特点, 为了便于推演其发展趋势, 并为采取相关的处理方法提供判断依据, 可以对疫情进行场景的划分, 从中提取出影响疫情发展过程的关键要素, 更利于分析判断要素间的相关性和关联程度^[19]。具体情景描述如下。

情景一: 某市民身体状况良好, 可正常和家人生活居住, 进出小区不受限制, 自由出入公共场所, 根据出行需求自行选择交通工具, 不需要任何其他的医疗服务和生活照顾。

情景二: 某市民被检测出体温超过限定温度, 例如可以设定为 37°C , 被就地带到隔离区, 其他家庭成员即时被要求居家隔离; 该市民在隔离屋中单独隔离, 并开始接受医疗仪器的感染检测, 包括温度、血液、粘膜等。

情景三: 某市民经过血液检查后, 结果呈现阳性感染指示; 防疫部门开始追踪该市民在一定时间内曾经去过的公共场所, 锁定所乘坐交通工具的时间段; 针对该市民身体状况, 开始调配相应的应急医疗设备及医护人员; 开始对其家人进行感染检测, 并记录身体健康状态的变化情况。

情景四: 调集大量防疫防护设备及医护人员, 对受感染市民曾经到过的公共场所进行人员筛查及环境消毒; 追踪受感染市民所乘坐公共交通的运行轨迹及同乘的其他乘客, 并进行感染检测和筛查, 对交通工具及其所经全线进行消毒, 对密切接触者采取隔离措施, 并筹调相关应急物资和保障人员; 政府、医疗、社会相关部门根据相应的应急预案进行工作。

情景五: 社会各界相关人士和部门, 根据统一应急部署要求, 完成分区域隔离检测筛查, 切断传染源与传播途径, 医疗物资和生活物资统一调配, 确保受隔离人群的正常生活保障和生命健康安全; 并做好后期规划及准备措施。

根据以上的情景分析, 提取出相对应的疫情情景要素表, 总结相关的处理方法集和处理目标集(表 3)。

为了便于清晰完整说明本文的研究思路, 列举出 8 个典型情景、5 种处理方法和 5 个对应的处理目标。根据情景要素的关系, 构造出情景知识元的结构为:

表 3 要素信息表

情景状态 S	应急措施 M	应急目标 T
S1 某市民身体状况良好	M1 出行和生活无限制	T1 确保正常生活秩序
S2 某市民体温表现异常	M2 进行个人隔离观察	T2 切断个人与社会的传染途径, 确保人身健康状态受控
S3 某市民血液检测呈现阳性感染	M3 对相关家人进行对应检查, 排查受感染人群	T3 确定与其密切接触者的健康状况, 防止传染源二次扩散
S4 某市民及其家人被隔离观察	M4 调集相关生活保障物资及应急医疗力量	T4 确保受隔离人群的正常生活保障, 并密切观察身体健康状况
S5 某市民相关联的市场出现感染者	M5 面向全社会, 启动相应应急预案及联动机制, 确保感染进一步扩散	T5 全面切断社会中的感染传播路径, 将受感染源隔离治疗, 直至消除
S6 某市民相关联的公共交通线路乘客出现感染者		
S7 公共场所进行封闭; 公共交通路线停运		
S8 全社会进入隔离状态, 启动应急相应预案		
$S_n \cdots \cdots$	$M_n \cdots \cdots$	$T_n \cdots \cdots$

$K = \{S, M, T\}$, 其中在知识元结构描述中, 情景状态可以分为 n 个, 每个之间的情景为递进发展的关系, 根据疫情发展的轻重情况进行等级描述, 可以表述为:

$$S = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, \cdots, S_n\}. \quad (10)$$

针对划分的各个情景发展阶段, 采用相适应的处理方法。处理方法根据不同情景的处理需求, 涉及到的社会资源范围也不同, 所参与的全社会力量要求程度也不同, 可以表述为:

$$M = \{M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, \cdots, M_n\}. \quad (11)$$

针对 S 中的各种疫情情景描述和 M 中采用的相应应急措施, 就要制定出相应的应急目标, 并根据目标的达成情况, 调节或者优化应急措施, 使得在整个疫情期间, 充分发挥出社会各界的积极参与程度, 促进情景向好的趋势发展。处理目标表述如下:

$$T = \{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, \cdots, T_n\}. \quad (12)$$

3.3 情景贝叶斯网络构建

根据上述的情景 - 处理 - 目标知识元结构, 分析疫情情景发展的相关性, 对所有场景之间的

关系划分为可达或不可达状态^[20-21]。针对可达状态, 确定其过程所采取的处理方式, 明确处理环节的实施途径, 并与达到状态的目标相对比, 形成新的起始状态, 即情景演化的初态情景。由此不断循环分析, 确定出情景演化过程的可达路径及其条件, 明确达到状态与目标状态的偏离程度, 从而引入贝叶斯概率进行有效反馈和引导演变, 获得更加优化的疫情推演结果。

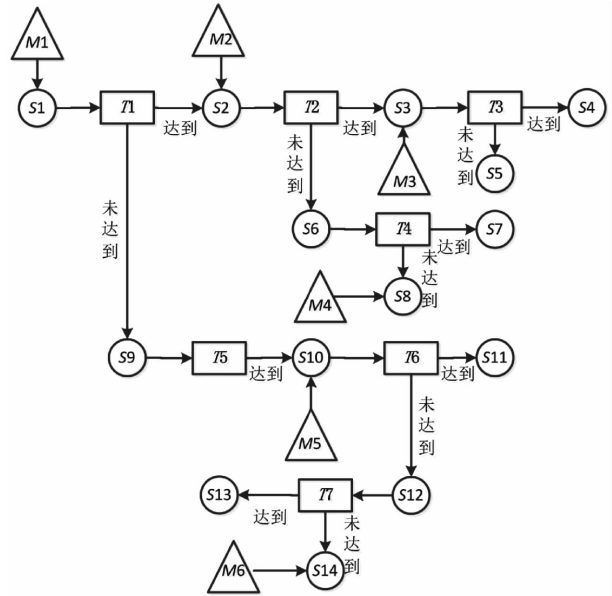


图 4 推演状态图

为了构造更加完善的疫情推演趋势(图4), 引入了14个可达状态, 并在6个相关处理方法的引导下, 确定连续7个目标形成的贝叶斯网络图, 如图所示。可以用知识元结构与贝叶斯网络构图描述方式进行表述:

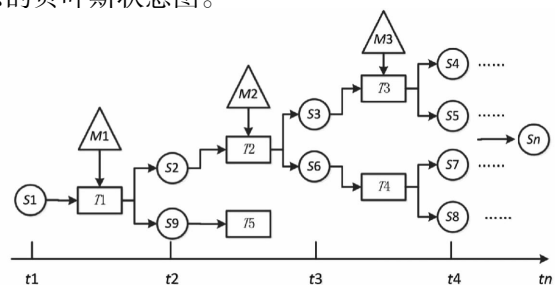
$$T_1: (S_1)(M_1) - > (S_2). \quad (13)$$

表示情景 S_1 , 通过 M_1 方式进行处理, 达到 T_1 要求的目标, 演化到了情景 S_2 。依次可得其他的情景推演表述:

$$T_2: (S_2)(M_2) - > (S_3). \quad (14)$$

$$T_3: (S_3)(M_3) - > (S_4). \quad (15)$$

另外注意到, 例如对于情景 S_2 而言, 在采用了 M_2 的处理方式以后, 针对目标 T_2 的要求, 可以推演得到 S_3 和 S_6 两个可达状态, 其最终可达概率由具体的概率计算量化确定, 并构造出如图5所示的贝叶斯状态图。



3.4 概率计算

计算各个节点的概率值,及各种情景相关的先验及后验概率。动态贝叶斯网络结构确定后,要对网络结构中的各个节点赋予其条件概率,以描述节点与其父节点之间的关联程度^[22]。然而动态贝叶斯网络结构中有些变量有父节点有些变量无父节点,对没有父节点的变量要给定其先验概率,有父节点的变量通过专家经验等手段确定其条件概率。

由于疫情具有连续发病并持续扩散的自然特点,因此完成历史数据的获取并不难,只需要根据病发前几天的数据统计分析,结合其他相关历史数据的经验判断,由相关专家对数据的发展趋势进行打分和预测,便能够得到相对应的先验概率。基于此条件,通过动态贝叶斯网络扩散特点,进一步获得对应的后验概率。两者数据相结合,得到各个情景下的状态数据表(表4)。

表4 贝叶斯概率信息表

项目	True	False	项目	True	False
M1	0.96	0.04	True	0.8	0.3
S1	M1 = True	M1 = False	False	0.2	0.7
True	0.9	0.95	...		
False	0.1	0.05	M6	0.88	0.12
T1	S1 = True	S1 = False	S9	T4 = True	T4 = False
True	0.9	0.85	True	M6 = True	M6 = False
False	0.1	0.15	False	0.05	0.9
M2	0.95	0.05	T4 = True	T4 = False	
S2	T1 = True	T1 = False	M6 = False	M6 = True	
True	M2 = True	M2 = False	True	0.45	0.45
True	0.7	0.3	False	0.55	0.55
False	0.3	0.7	T6	S9 = True	S9 = False
T1 = True	T1 = False	True	0.9	0.1	
M2 = False	M2 = True	False	0.3	0.7	
True	0.6	0.6	S10	T6 = True	T6 = False
False	0.4	0.4	True	0.95	0.05
T2	S2 = True	S2 = False	False	0.15	0.85

利用贝叶斯概率计算公式,对照表4中各节点变量的状态概率,计算S1中True的状态概率为:

$$P(S1) = P(S1/M1 = \text{True}) \times P(M1 = \text{True}) + P(S1/M1 = \text{False}) \times P(M1 = \text{False}) = 0.902. \quad (16)$$

S1中False的状态概率为:

$$P(S1/M1 = \text{True}) \times P(M1 = \text{True}) + P(S1/M1 = \text{False}) \times P(M1 = \text{False}) = 0.098. \quad (17)$$

依次类推,可计算其他节点变量的状态概率,并构造出如图6所示的情景推演概率图。

根据概率图所表示的状态推演概率分布,很容易对情景的演变趋势进行把握,并通过处理方式的及时调整和优化,使得情景向着更好的处理目标演化,及时阻断疫情的发展和扩散。概率计

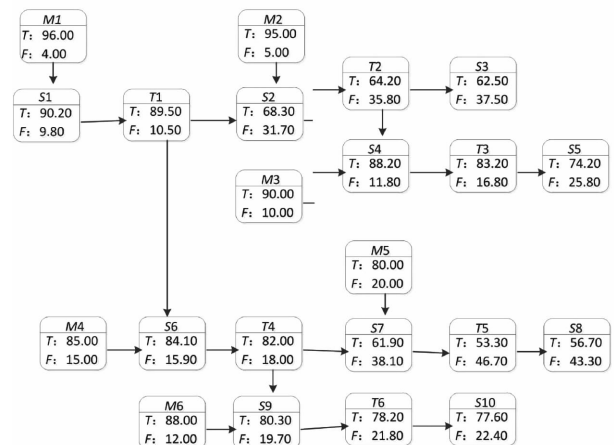


图6 贝叶斯状态概率分布图

算让疫情推演过程得到了具体的量化,更具有说服力和可操作性,也是情景推演的目的和意义所在。

3.5 结果分析

通过概率图的推演计算,此次疫情发展概率最大的几个情景和实际的疫情情景最大类似,并随着时间的推移出现,证明了动态贝叶斯网络构建及计算方法的可行性。同时,针对每一个疫情的关键情景,都会有不同的应急措施和应急目标,这些具有针对性的应急措施是应急指挥决策主体为减少疫情造成重大人员伤亡和财产损失的必然行为;采取不同的应急措施,还将影响疫情的发展及演变的路径。

无论应急措施和应急目标是否合理,疫情本身自然会朝恶化方向演变的概率依然很大;但并不意味着应急措施和应急目标不影响事故的演变方向,适宜的应急措施和应急目标不仅可以延缓疫情朝恶化方向演变,为应急响应争取时间,还在一定程度上减少疫情造成的人员和经济损失。

以上对新冠疫情发展的情景推演进行了简化,真实的突发疫情灾害事件影响灾变因素繁多。在实际应用中可提取关键因素,以减少专家打分的主观壁垒,提高情景推演的精度。

4 结束语

情景是突发公共卫生事件应急决策的基础和依据,通过对突发公共卫生事件进行情景推演,能够为决策者进行应急决策提供科学有效的辅助支持。本文在分析突发公共卫生事件情景演变规律的基础上,首先构建了基于知识元的突发公共卫生事件情景表示模型,从情景状态(S)、应急目标(T)和应急措施(M)三个要素对突发公共卫生事件的情景进行了刻画,并通过要素之间的关联阐述了情景演化的过程;在此基础上,运用动态贝叶斯网络扩展知识元模型的不确定性表示和推理,构建了动态贝叶斯网络的情景推演模型,实现了

对突发公共卫生事件的情景推演和演变路径分析;最后,以新冠肺炎疫情为例,利用动态贝叶斯网络对疫情演化路径进行分析和情景概率计算,并对情景推演的结果进行了分析,推演结果与实际疫情发展情景及发展状态基本一致,验证了本文情景推演方法的合理性和可行性。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院. 突发公共卫生事件应急条例[M]. 北京: 法律出版社, 2003.
- [2] SANTOS Joost R, MA Larissa, HAIMAR Amine El. Risk - based input - output analysis of influenza epidemic consequences on interdependent workforce sectors[J]. Risk Analysis, 2013, 33(9): 1620 - 1635
- [3] COSGRAVE J. Decision making in emergencies[J]. Disaster Prevention and Management, 1996, 5(4): 28 - 35.
- [4] KATHLEEN M Kowalski—Trakofler, CHARLES V, TED S. Judgment and decision making under stress: an overview for emergency managers[J]. International Journal of Emergency Management, 2003, 1(3): 278 - 289.
- [5] COHN R A, LESSARD D R. The effect of inflation on stock prices international evidence[J]. Journal of Finance, 1998, 36(2): 277 - 289.
- [6] 陈雪龙, 董恩超, 王延章. 非常规突发事件应急管理知识元模型[J]. 情报杂志, 2011, 30(12): 22 - 26.
- [7] 张磊, 王延章, 陈雪龙. 基于知识元的非常规突发事件情景模糊推演方法[J]. 系统工程学报, 2016, 31(6): 729 - 738.
- [8] 张志霞, 郝纹慧, 张二双. 网络舆情驱动下突发事件情景推演研究[J]. 情报科学, 2020, 38(5): 141 - 147.
- [9] ROSANNE Janssen, PIETER Spronck, ARNOUD Arntz. Case - based reasoning for predicting the success of therapy[J]. Expert Systems, 2015, 2(32): 165 - 177.
- [10] 李健行, 夏登友, 武旭鹏. 基于贝叶斯网络的高层建筑火灾后果预测模型[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(12): 54 - 59.
- [11] 国家突发公共事件总体应急预案[EB/OL]. (2005 - 08 - 07) [2020 - 08 - 28]. http://www.gov.cn/yjgl/2005 - 08/07/content_21048.htm.
- [12] 关惠兴, 刘茂, 赵庆香. 基于多专家决策方法的氨气泄漏应急决策[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2007, 40(6): 28 - 33.
- [13] 徐志新, 奚树人, 曲静原. 核事故应急决策的多属性效用分析方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(3): 445 - 448.
- [14] DAUD M Ahmed, DAVID Sundaram, SELWYN Piramuthu. Knowledge - based scenario management - Process and support [J]. Decision Support Systems, 2010, 49(4): 507 - 520.
- [15] 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[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(5): 963 - 970.
- [16] 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[J]. 系统工程学报, 2012, 27(6): 739 - 750.
- [17] 国家卫生健康委员会. 截至 8 月 28 日 24 时新型冠状病毒肺炎疫情最新情况[EB/OL]. [2020 - 08 - 29]. <http://www.nhc.gov.cn/xcs/yqfkdt/202008/ac1c7ff6089147549c87ba9497caa2dd.shtml>.
- [18] World Health Organization. Weekly Operational Update on COVID - 19 28 August 2020[EB/OL]. [2020 - 08 - 28]. https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/wou-28-august-approved.pdf?sfvrsn=d9e49c20_2.
- [19] 傅小华, 季建华, 何冰. 基于情景分析的电力突发事件应急管理研究[J]. 工业工程与管理, 2013, 18(5): 118 - 123.
- [20] 韦理云. 基于情景构建的电力系统应急管理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [21] 巩前胜. 基于动态贝叶斯网络的突发事件情景推演模型研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2018, 33(2): 119 - 126.
- [22] 张振海. 铁路突发事件应急情景构建与动态推演技术研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.

Deductive Scenario of Public Health Emergencies Based on Dynamic Bayesian Network

GAO Shan and WANG Hanyi

(Business School, Central South University, Changsha 430074, China)

Abstract: Scenarios are the basis of decisions to public health emergencies, and via deduction of scenarios of these emergencies, it provides decision makers with efficient and scientific supports. This thesis analyses the basis of public health emergency patterns, extracting scenario situations, target solutions, and measures, in order to construct knowledge-unit model which illustrates the public health outbreaks. On top of that, regarding the features of uncertainties of public health events, this thesis extends the uncertainty representation and uncertainty inference of knowledge-unit model by using dynamic Bayesian network, then construct dynamic Bayesian network scenario model, completing the analysis stemming from public health emergency scenario and deductive pathways. Finally, by taking Covid-19 pandemic for demonstration, this thesis depicts the scenario deductive pathways and key techniques of Covid-19, and by further analyzing the results of deductive scenario, it is believed that deductive results, and actual pandemic development situations as well as its status bear great resemblance, thus proving the feasibility and reasonability of deductive scenario.

Key words: public health emergencies; deductive scenario; knowledge-unit model; dynamic Bayesian network