

引用格式: 饶文利, 罗年学. 台风风暴潮情景构建与时空推演[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(2): 187-197. [ Rao W L, Luo N X. Scenarios construction and spatial-temporal deduction of typhoon storm surge[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(2): 187-197. ] DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.190604

# 台风风暴潮情景构建与时空推演

饶文利<sup>1</sup>, 罗年学<sup>2\*</sup>

1. 北京辰安科技股份有限公司, 武汉 430000; 2. 武汉大学测绘学院, 武汉 430079

## Scenarios Construction and Spatial-temporal Deduction of Typhoon Storm Surge

RAO Wenli<sup>1</sup>, LUO Nianxue<sup>2\*</sup>

1. Beijing Global Safety Technology Company Limited, Wuhan 430000, China;  
2. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** Due to abruptness of typhoon storm surge, continuity of the evolution time and uncertainty of the path, it is hard for emergency decision-makers to make correct decisions in emergency rescue. To solve this problem, this article applies "scenario-response" to the typhoon storm surge. Firstly, based on the analysis of the typhoon storm surge scenarios and the conceptual model of the scenario elements, we extract the key scenario elements by means of data collection and attribute recognition. Then, we construct the dynamic scenario network of the typhoon storm surge by the method of frame representation. Secondly, we analysis the evolution and path of typhoon storm surge. Thirdly, we construct dynamic scenario network of typhoon storm surge with the dynamic Bayesian network method. Finally, we calculate the state probability of scenarios with the prior state probability and conditional probability and realize the key scenario deduction of the typhoon storm surge. In the end of the essay, we simulated an experiment for the influence of typhoon on the coastal cities of Guangdong Province from 11 to 17 on September 16 in 2018. The experiment results show that the probability of dykes, seawater inversion, floods and landslides respectively are 85%, 81%, 74%, 54%. The conclusion is drawn as follows: (1) The structure and content of each scenario element in the scenario construction process are different and interactional. Frame representation can reasonably characterize complex heterogeneous scenario elements data. (2) The evolution path of the situation is determined by many factors such as the situation itself, the disaster-bearing body, and emergency management. Decision makers need to comprehensively consider the emergency team and the rational use of resources when making decisions. (3) From the construction of the storm surge scenario to the deduction, the whole process has clear ideas and intuitive results, which is conducive to the promotion and application in marine disasters. The tentative application of "scenario-response" in storm surge events provides new emergency ideas and solutions for storm surge control.

**Key words:** typhoon storm surge; scenario elements; frame representation; scenario evolution; evolution path; dynamic Bayesian network; scenario deduction; emergency decision

\*Corresponding author: LUO Nianxue, E-mail: nxluo@sgg.whu.edu.cn

收稿日期: 2019-10-15; 修回日期: 2019-11-20.

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC1405300)。 [ **Foundation item:** National Key Research and Development Project of China, No.2017YFC1405300. ]

作者简介: 饶文利(1990—), 女, 湖北武汉人, 硕士, 主要从事GIS产品研发。E-mail: 1194721378@qq.com

\*通讯作者: 罗年学(1966—), 男, 河南光山人, 博士, 教授, 主要从事地理信息系统工程、灾害监测及应急管理、测量数据处理软件设计。E-mail: nxluo@sgg.whu.edu.cn

**摘要:**因台风风暴潮的突发性、情景演变时间的连续性和路径的不确定性,导致应急决策者在应急救援中难以做出正确决策,针对这一现状,将“情景一应对”应用在台风风暴潮应急决策中。本文在分析台风风暴潮情景、情景要素的概念模型基础上,首先通过资料搜集、属性识别等方法提取关键情景要素,采用框架表示法构建情景;然后分析台风风暴潮情景演变规律及演变路径;其次通过动态贝叶斯网络法构建台风风暴潮动态情景网络;最后利用先验概率与条件概率计算情景状态概率,实现了台风风暴潮的关键情景推演。本文以2018年9月16日11时至17时山竹台风对广东省沿海城市影响为例,演示了台风风暴潮的情景推演流程及关键技术。实证分析结果表明,溃堤、海水倒灌、洪水、滑坡发生的概率分别为85%、81%、74%、54%,验证了情景推演在风暴潮中应用的合理性。

**关键词:**台风风暴潮;情景要素;框架表示法;情景演变;演变路径;动态贝叶斯网络;情景推演;应急决策

## 1 引言

台风风暴潮(简称风暴潮)是一种由于大气的剧烈扰动,导致海水异常升降,使受其影响的海区潮位大大超过平常潮位的灾害性自然现象<sup>[1]</sup>,是我国的主要海洋灾害之一,属于突发事件中的一种,具有成灾频率高、来势猛、速度快、破坏力强和潜在次生衍生危害等特征。同时,风暴潮事件还具有很强的“情景依赖”,传统的“预测—应对”模式已难以应对处置。而“情景一应对”是将已存在的信息、知识应用在当前情景中,认知当前情景随着时间变化时可能出现的情景及造成危害的程度,进而生成应对方案的新型决策方法,在非常规突发事件应急中发挥了重要作用<sup>[2]</sup>。

近年来,“情景一应对”在突发事件中取得了较多研究进展。研究人员分别将其应用在洪水<sup>[3]</sup>、环境<sup>[4]</sup>、民航突发事件<sup>[5]</sup>、暴雨内涝<sup>[6]</sup>、危险化学品泄漏<sup>[7]</sup>、建筑火灾<sup>[8]</sup>等灾种上,取得了较好的效果,很大程度地控制了灾情并降低了灾害损失。如吴倩等<sup>[5]</sup>针对航空运输重大突发事件运用动态贝叶斯网络模型,构建了基于时间节点的情景演化模型;孙超等<sup>[6]</sup>集内涝水淹模型、城市路况模型、多维度情景推演于一体,针对不同应急救援目标实施了不同应急救援方案的预评估;张恭孝等<sup>[7]</sup>在危化品泄漏事件中成功应用“情景一应对”模式,针对事件构建情景库并验证了情景库反演溯源的效果。

“情景一应对”在突发事件中成功应用的同时,相继也提出了系统动力学<sup>[9]</sup>、演化博弈理论<sup>[10]</sup>、贝叶斯网络推理<sup>[11]</sup>、案例推理<sup>[12]</sup>等方法,为情景推演方法多样化提供了基础。如王循庆等<sup>[10]</sup>基于演化博弈理论构建了危化品安全监管演化博弈模型,并进行了情景推演模拟仿真;王宁等<sup>[12]</sup>以共性知识元模型为基础,基于案例匹配进行了突发事件情景推演。

上述研究均应用在其它非常规灾害事件中,探讨了情景演化过程的不确定性问题,为风暴潮情景

推演提供了重要指导和参考;但不同灾种的情景内部各情景要素作用机理差别大,风暴潮与其他灾种较明显的区别是空间移动性<sup>[18]</sup>。目前风暴潮灾害的研究主要集中在影响因素分析<sup>[13]</sup>、危险性评估<sup>[14]</sup>、数值模拟<sup>[15]</sup>与淹没情景模拟<sup>[16]</sup>等方面,虽对风暴潮发生与作用机理进行了研究,但普遍缺乏对整个灾情态势发展与控制的研究。Zhu等<sup>[17]</sup>尝试以台风为例验证了基于动态贝叶斯方法情景推演的可行性,但并未对风暴潮的特性及情景构建、情景演化深入研究,并且没有考虑台风在空间上的演变。而突发事件的发展过程,实际上是其影响在时间和空间蔓延的过程,且风暴潮灾害损失与时空分布有一定关系<sup>[18]</sup>。

本研究将“情景一应对”思想引入到风暴潮模拟中,结合情景演化的时间特性与空间特性,拟构建实时更新多源异构信息下的风暴潮情景构建与时空推演方法。首先介绍风暴潮情景结构与知识表示,包含情景结构知识单元与框架表示;然后介绍风暴潮情景时空推演方法,包含情景演化规律、情景状态概率计算、情景链构建;最后以山竹为例进行实例分析。

## 2 研究方法

本文首先基于框架表示法研究了风暴潮情景构建,然后根据情景演化规律构建了情景链,并采用动态贝叶斯方法计算了情景链中的各情景发生概率,完成了风暴潮情景推演方法的研究。

### 2.1 风暴潮情景结构与知识表示

#### 2.1.1 情景结构知识单元

事件是由不同时刻下的情景序列构成的情景链,概念表示模型定义为:

$$S = (S_{t_1}, S_{t_2}, \dots, S_{t_n}) \quad (1)$$

式中:  $S$  表示由多个情景组成的事件;  $S_{t_n}$  表示在  $t_n$

时刻下的情景。

纵观风暴潮从发生、发展到造成灾害作用直至我们采取应急措施的全过程,可以发现事件中的情景存在3个主体<sup>[19]</sup>:①灾害事故本身,包含了导致灾害发生的因素,灾害发生时的外部环境;②突发事件作用的对象;③采取的应急管理,包含人员、物资、行动等。概念表示模型定义为:

$$S_i = (S, A, D) \quad (2)$$

式中:  $S_i$  表示某时刻下的情景;  $S$  表示情景本身;  $A$  表示情景作用对象,即承灾体;  $D$  表示应急管理。

每类情景要素都是对代表事物类别、数量、质量、价值、时间、空间分布信息的描述,用于表达当前情景的真实状态<sup>[20]</sup>,概念表示模型定义为如下形式:

$$K = (N, C, G_i) \quad (3)$$

式中:  $K$  表示情景要素向量;  $N$  表示情景要素名称;  $C$  表示情景要素的特征集;  $G_i$  表示情景要素的属性状态集。

根据式(2)、(3),风暴潮情景包含情景本身、承灾体、应急管理3类情景要素,每类情景要素均由名称、特征集、属性状态集构成,如图1所示。

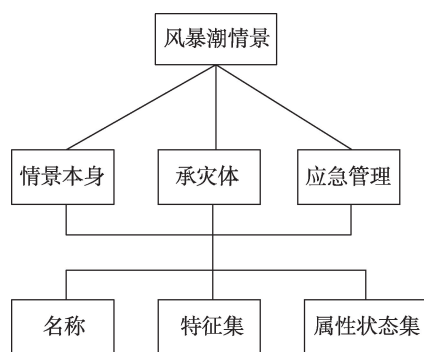


图1 风暴潮情景结构

Fig. 1 Structure of scenario in storm surge

### 2.1.2 情景知识框架表示

风暴潮所形成的灾害具有4个特点:①共生性,风暴潮的产生与台风的移动、中心气压、风圈半径等密切相关,具有季节性与区域性;②依赖性,风暴潮的发生、发展依赖台风变化,由于台风时空变化速度快<sup>[21]</sup>,造成受扰地区、时间及程度上的复杂变化;③复杂性,风暴潮不仅反映了气象的扰动,还反映了近岸地形的变化,同时风暴潮与天文潮水位的非线性耦合,造成多种风暴潮增水形式;④综合性,风暴潮自身灾害激烈化与扩大化,会造成多种次生衍生灾害的发生,防灾研究是将自然科学与社

会科学相结合的综合性问题。因此,多种影响因子的结合,构成了风暴潮情景的复杂性。

将复杂情景有层次有逻辑地表达出来,需借助一定数据结构或方法。而框架表示法是一种描述所论对象属性的层次性数据结构,由一些能嵌套或继承的框架组成,能很好地将情景的内部结构及情景要素间的关系描述出来。框架的顶层固定,表示概念、对象或事件,其下层由一些在实际情况中能被一定类型的实例或数据填充的槽组成,每个槽又可以根据对象具体情况分割成多个“侧面”。框架表示法可以基本表示为:(<框架名>(<槽>(<侧面>(<值>)))。基于情景知识结构的分析<sup>[22]</sup>,结合风暴潮自身特点与框架表示法原理,风暴潮情景知识表示结构如图2所示。

根据风暴潮知识表示结构可知,风暴潮情景按照情景结构知识元分为情景本身、承灾体、应急管理。情景本身包含风暴潮情景的基本信息,如名称、位置、发生时间;情景发生的外部环境,如天气、温度、影响台风的风场及流场等;作用在承灾体上的灾害因子。其中外部环境与灾害因子互相作用,造成了情景的复杂性。每个灾害因子均包含了灾害基础信息、影响灾害发生变化的关键驱动要素、辅助信息。因灾害因子具有时空性,故基础信息中包含了时间、位置信息。承灾体是灾害、外部环境、应急管理的共同作用对象,除包含基本属性外,还包含空间分布信息、抗灾承受能力等。应急管理是应急决策者对救灾队伍、物资合理分配与利用的过程,实施在承灾体上,发挥防灾减灾作用。

确定了风暴潮情景结构后,需进一步确定各情景要素取值范围。由于风暴潮情景要素包含的信息来源广、种类杂<sup>[23]</sup>,既包含语义信息,也包含精确值、范围值信息,如何从复杂信息中确定情景要素值是情景构建中的难点。本研究通过对风暴潮历史案例的梳理,将情景要素划分3个类别:可精确度量的数值型属性、不可度量的区间型属性、语言型属性。其中,数值型属性是指为精确数值的数据,需统一规范数值表示方式,如数据精度、单位、连接符等;区间型属性是指具有无法精确的存在上下界限值的属性,需对所有区间型属性规范统一区间表示方式,如区间步长等;语言型属性是通过语义词来评价状态等级,需进行数值转换成统一规范化的数值或区间表示方式,如台风级别为热带低压,则区间数值对应最大风速为10.8~17.1 m/s。

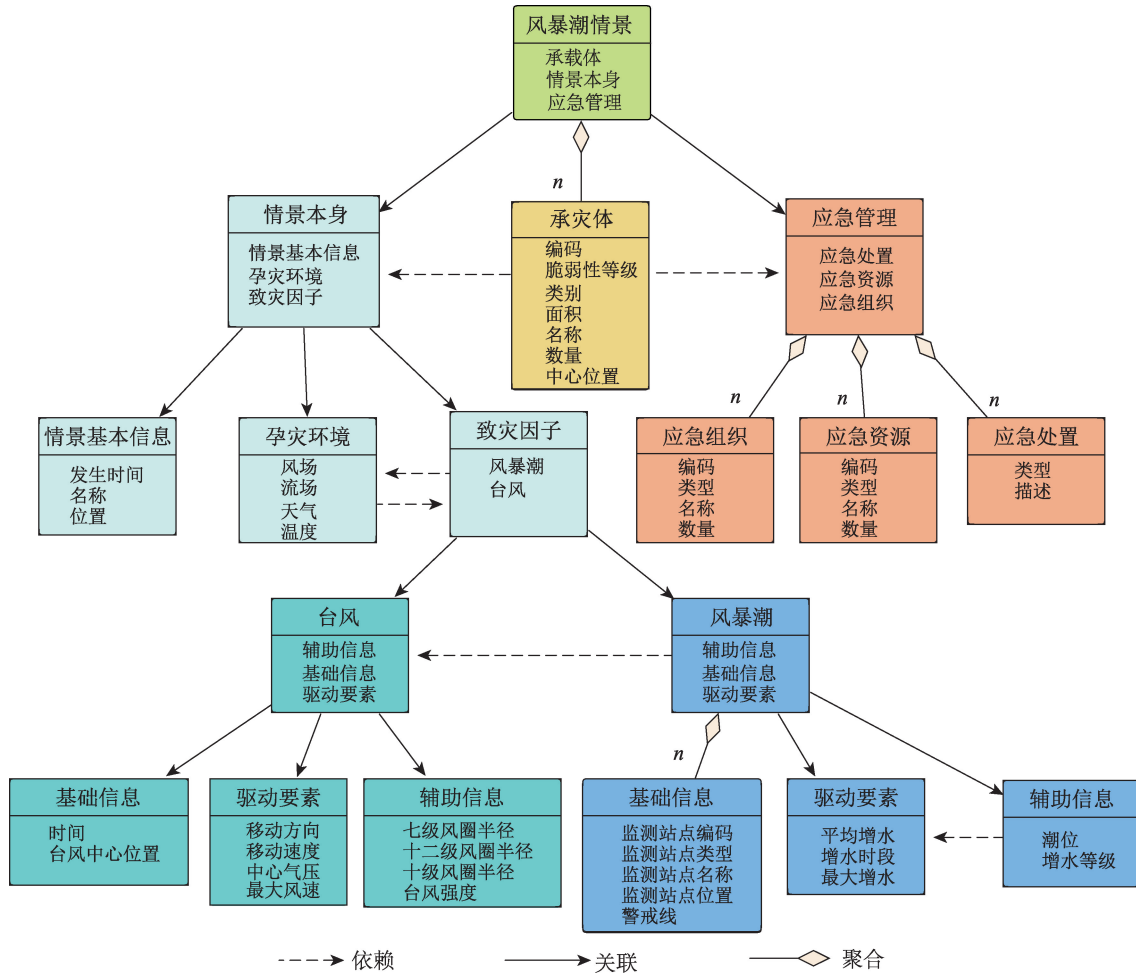


图2 风暴潮情景统一建模语言图

Fig. 2 UML(Unified Modeling Language) diagram of storm surge

### 2.2 风暴潮情景时空推演方法

#### 2.2.1 情景演化规律

假设风暴潮从事件开始到消亡共经历  $n$  次情景转换, 情景序列分别记为  $S_1, S_2, \dots, S_{n-1}, S_n$ 。每个情景状态所对应的时间节点分为  $t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, t_n$ ,  $A_i, D_i$  分别为  $t_i$  时刻的承灾体、应急管理,  $i \in (1, 2, \dots, n)$ 。则风暴潮事件从情景发生到情景结束的演化规律<sup>[24]</sup>如图3所示。

图3中,  $S_0$  为风暴潮  $t_0$  时刻作用在承灾体  $A_0$  上的初始情景状态, 在应急管理  $D_0$  干预下, 情景状态发生变化转换为下一情景状态。由于不同应急物资数量、应急处置, 对情景状态的作用力度也不一样, 故下一情景会出现多种可能性。假设风暴潮在向  $t_1$  时刻演变的过程中, 情景状态为  $S_1$ , 此时的承灾体为  $A_1$ , 在应急管理  $D_1$  干预下, 情景又发生变化, 出现新的情景, 以此类推, 直至  $t_n$  时刻事件结束, 情景演化终止。

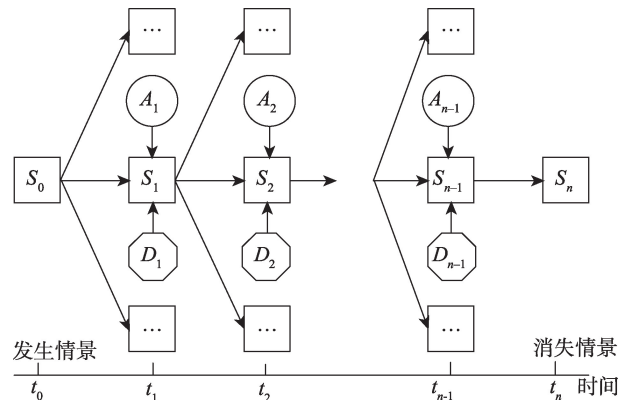


图3 风暴潮情景演化规律

Fig. 3 Evolution of storm surge scenario

#### 2.2.2 情景状态概率计算

风暴潮的演化是一个不确定性问题, 既包含一些确定信息, 如时间、气象、海况等, 也存在一些未知信息。而贝叶斯网络可以在不完整或不确定信息下利用随机变量间的关系, 更新节点概率保障推

断结果的可靠性。在贝叶斯网络上加一个时间要素,构成了随时间而改变的系统模型,即动态贝叶斯网络<sup>[25]</sup>。计算公式为:

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_i P\left(X_i | P\left(\prod_{j \neq i} X_j\right)\right) \quad (4)$$

式中:  $X$  表示某时刻下的情景;  $P(X_1, \dots, X_n)$  表示  $n$  个情景作用下的情景状态值;  $P\left(\prod_{j \neq i} X_j\right)$  表示网络节点变量的先验概率;  $P\left(X_i | P\left(\prod_{j \neq i} X_j\right)\right)$  表示网络节点变量的条件概率。

在构建风暴潮情景及演化情景链的基础上,提取不同时刻下情景的关键情景要素作为动态贝叶斯网络的节点变量;将随时间变化且具有因果关系的节点变量的先验概率与条件概率作为式(4)的输入,计算情景状态的概率值,实现风暴潮的情景推演。

### 2.2.3 情景链构建

风暴潮情景根据情景演化规律,随着时间推移不断演化成一条条情景链,基于多条情景链可构建动态贝叶斯网络。风暴潮情景的动态贝叶斯网络构建大体可分如下3步:

(1)确定网络节点变量。通过专家经验打分或层次分析法计算风暴潮情景中属性权重值来确定关键属性,关键属性值即为节点变量。具体可分步完成:①根据风暴潮情景要素的分类,通过知识框架表示法结构化采集情景要素;②风暴潮研究领域专家根据经验以打分形式评价情景要素从而得到关键要素;③根据关键要素知识框架表示,确定关键要素的类型、取值范围。

(2)确定网络节点变量之间的关系。根据第一步的结果得到网络节点变量,接着分析确定网络节点变量之间的关系,用有向边连接一个节点到另一个节点以表示节点变量之间的因果关系,从而形成

完整的情景动态贝叶斯网络。

(3)确定网络节点变量的概率。需先确定没有父节点的网络节点变量的先验概率,即  $P\left(\prod X_i\right)$ ;然后采用专家打分方式,组织风暴潮领域专家对有父节点的网络节点变量分配概率,对同一节点变量的不同专家给出的条件概率计算算术平均值后,确定节点变量的条件概率,即  $P\left(X_i | P\left(\prod_{j \neq i} X_j\right)\right)$ ;最后通过已确定的节点变量概率计算情景状态概率<sup>[26]</sup>,从而得出下一时刻情景的状态概率,实现风暴潮的情景推演,为合理应急决策提供科学依据。

## 3 实证分析

### 3.1 实例情景及数据来源

2018年第22号台风“山竹”(简称山竹)9月15日19时其中心位于广东江门台山市东偏南方向690 km的南海东北部海面上,16日下午移动到广东珠海到湛江一带沿海登陆。据广东省民政厅报告,16日11—16时,强降雨主要分布在江门、东莞、深圳、中山、惠州等地,时段雨量大于100 mm的站有101个,16时沿海出现最高319 cm的风暴增水。17时山竹登陆,风力14级,中心最低气压955 hPa。主要灾情统计显示,大鹏和盐田发生海水倒灌事件,10宗水库溢洪,地质灾害1起,次生灾害13起等。

以2018年9月16日11—17时山竹(从114.7°E, 21.0°N移动到112.5°E, 21.9°N)对广东沿海城市影响为例,针对主要灾情信息提取关键情景要素,分析情景演变路径,通过动态贝叶斯网络法实现情景推演,验证本研究提出的风暴潮情景推演方法的有效性。数据来源见表1。

表1 实例分析使用的数据与来源

Tab. 1 Datas and sources using in instance analysis

数据	数据来源	描述
承灾体	课题组制定	Shapefile格式;包含沿海城市的堤防工程、重点保护目标、生态敏感目标、沿岸社区人口与房屋、沿岸内陆区域、电力设施、地质灾害高发区等多种类型承灾体的名称、类别、编码、位置、脆弱性等级等
台风数据	气象局	GeoJSON、CSV格式;包含时间、位置、台风等级、台风强度、风速、中心气压、风圈半径等
台风预测数据	中国、中国香港、中国台湾、美国、韩国、日本6个台风预测机构提供	GeoJSON格式
底图	<a href="http://www.tianditu.gov.cn/">http://www.tianditu.gov.cn/</a>	天地图
应急管理数据	课题组制定	Excel格式;包含名称、类别、编码、数量等
增减水数据	课题组模拟设计	Tiff格式;中国、中国香港、日本3个机构预测的山竹16日17时增减水模拟数据

### 3.2 山竹情景与情景链构建

确定山竹在该时段内的关键情景(溃堤、海水倒灌、洪水、滑坡)及其情景要素信息。根据风暴潮情景UML图,山竹 $S_0$ 情景详细信息如图4所示。

依此类推构建其他关键情景,由关键情景构成的山竹事件情景链见表2所示。

根据表2中关键情景的因果关系,结合自主研发的风暴潮情景推演系统功能,以地图可视化形式展示山竹时空演化过程,见图5—图7(底图为天地图)。包含山竹在11时的预测路径,以及风圈影响范围内承灾体分布,通过不同机构预测山竹2018年9月16日17时增减水情况,模拟海水倒灌与洪水情景。

将关键情景作为情景动态网中的节点变量,根据网络节点的现实意义,确定网络节点变量的类型与取值集合,如表3所示。

### 3.3 山竹情景概率计算

对没有父节点的节点确定先验概率,对有父节

点的网络节点变量进行专家打分确定其条件概率。在 $D_1 = T, A_1 = P, S_0 = T$ 情况下,对领域内三位专家分别给出的溃堤发生的概率0.91、0.88、0.90计算平均值,  $P(S_1 = T | D_1 = T, A_1 = P, S_0 = T) = (0.91 + 0.88 + 0.90) / 3 = 0.90$ ,依此类推确定其他条件概率。部分结果见表4。

根据山竹台风情景演化、节点网络关系及节点的先验概率、条件概率等数据,利用式(4)计算 $S_0$ 的状态概率为0.89,以此类推计算其他情景的状态概率,具体如图8所示。

### 3.4 结果分析

在2018年9月16日11—17时时间片段内,山竹台风(从114.7°E, 21.0°N移动到112.5°E, 21.9°N)临近广东,广东沿海一带发布红色预警,通过风暴潮在不同时间片段中关键情景的状态概率可知:溃堤、海水倒灌、洪水、滑坡发生的概率分别为85%、81%、74%、54%,对比山竹灾害统计情况,情景推演

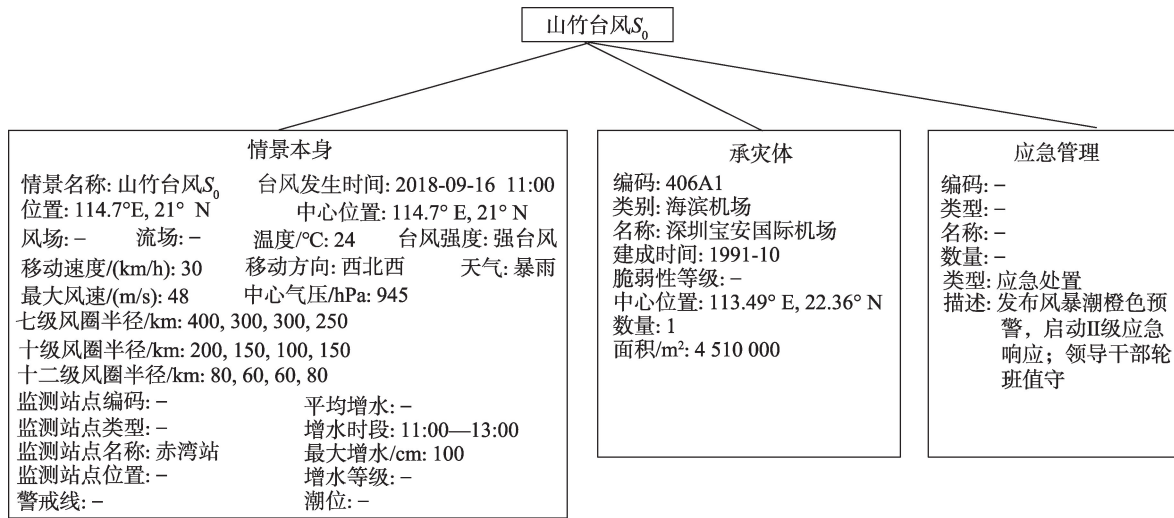


图4 山竹情景要素信息

Fig. 4 Scenario elements of Mangkhut

表2 山竹事件情景链(部分推演)

Tab. 2 Scenario chain of Mangkhut (partial deduction)

情景名称	承灾体	应急管理
山竹台风 ( $S_0$ )	广东沿海城市 ( $A_0$ )	建立应急指挥救援小组, 启动预案 ( $D_0$ )
溃堤 ( $S_1$ )	广东沿海城市 ( $A_1$ )	加紧抢修溃堤口, 加固堤坝 ( $D_1$ )
事件消失 ( $S_2$ )	广东沿海城市	
海水倒灌 ( $S_3$ )	广东沿海城市 ( $A_3$ )	紧急疏散、转移可能倒灌区域人员 ( $D_3$ )
洪水 ( $S_4$ )	广东沿海城市 ( $A_4$ )	蓄洪滞洪分洪, 人员转移安置 ( $D_4$ )
事件消失 ( $S_5$ )	广东沿海城市	
滑坡 ( $S_6$ )	广东沿海城市 ( $A_6$ )	撤离危险区人员, 疏通排水渠道, 引导泥石流顺畅流动 ( $D_6$ )
事件消失 ( $S_7$ )	广东沿海城市	



图5 山竹2018年9月16日11时预测路径  
Fig. 5 Forecast path of at 11 o'clock of Mangkhut on September 16, 2018



图6 山竹2018年9月16日11时风圈影响范围内受损承灾体  
Fig. 6 Damaged body within the influence range of Mangkhut at 11 o'clock on on September 16, 2018

计算结果基本符合山竹台风现场实际情况,验证了在风暴潮中应用情景推演的合理性。为保证情景推演应用的时效性,课题组规划开发风暴潮情景推演系统,实时接入来自第三方系统的台风数据,系统根据当前台风数据一键构建情景,通过改变情景要素信息,推演台风可能演化路径与发生概率,使决策者快速了解灾情态势发展。

从山竹情景要素信息可知,情景要素数据既有台风中心气压等确定型数值,又有增水时段等区间型数据,台风强度等语义型数据;在情景时空推演过程中,既有承灾体统计等常规属性数据,又涉及承灾体分布等空间数据;同时,空间数据根据数据种类的不同有 Shapefile、CSV 等格式的矢量数据, PNG、TIFF 等格式的栅格数据。针对上述不同结构数据,通过框架表示法能层次化梳理复杂异构的情景要素<sup>[27]</sup>,并用计算机技术简化、处理数据,合理刻画情景,为情景推演顺利进行提供了基础保障。

从山竹2018年9月16日11时风圈影响范围可知,台风风圈半径越大,受影响的承灾体越多。而承灾体地理空间分布及脆弱性,决定了承灾体受损情况,也直接影响应急决策者实施的应急处置。台风、受损承灾体、应急决策三者共同影响,又改变了情景的演化。为使灾情朝期望方向演变,应急决策者需综合考虑灾情及应急队伍、资源的合理利用。

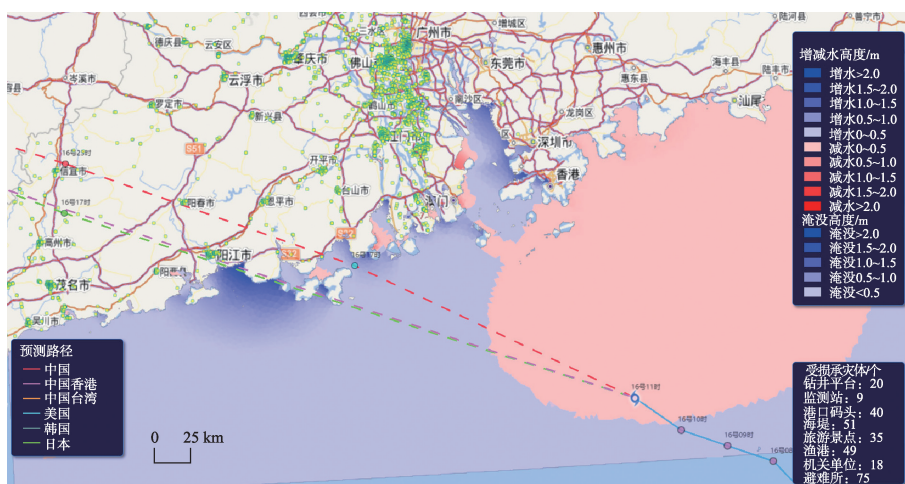
从情景推演结果中可看出,情景具有不确定性<sup>[28]</sup>,溃堤、海水倒灌发生的概率非常大,分别为85%、81%,有可能只发生一种,或二者同时发生。应急决策者可根据下一时间片段不同灾害情景可能发生的概率,进行有选择的响应,实现科学、合理的应急决策。对海水倒灌实施应急决策后,灾情朝恶化情景(洪水)发生的概率(74%)依然很大,但并不意味着应急响应失效。它降低了灾害可能造成的损失,在一定程度上控制了灾情的快速发展,为下一步应急处置争取了宝贵时间。

## 4 结论与讨论

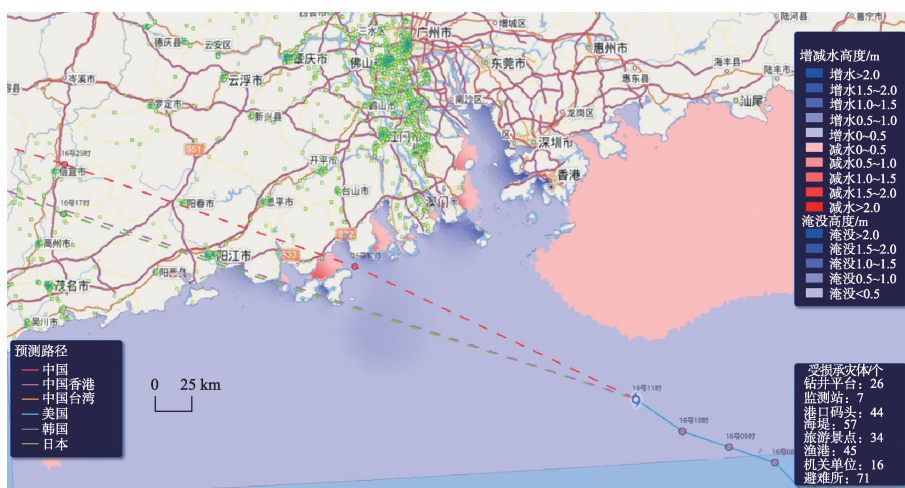
近年来“情景一应对”在突发事件中应用较多,但在风暴潮灾害中的研究有所欠缺。本文将“情景一应对”应用在风暴潮事件中,采用框架表示法构建了风暴潮情景,根据情景演化规律与路径构建了动态情景网络,通过动态贝叶斯网络公式计算得到情景状态概率,实现了风暴潮的情景推演,并以山竹台风某时段内影响广东省沿海城市为例,对研究方法过程进行了有效验证。研究结论如下:

(1)“情景一应对”能辅助应急决策。风暴潮灾害来势猛、速度快、破坏力强,具有潜在次生衍生危害和很强的“情景依赖”,传统的“预测-应对”模式已难以应对处置。同时,目前风暴潮研究主要集中在影响因素分析,危险性评估、数值模拟等方面,普遍缺乏对整个灾情态势发展与控制的研究。“情景一应对”是新型决策方法,通过情景推演,能认知当前情景随着时间变化时可能出现的情景及造成危害的程度,进而生成应对方案辅助应急决策<sup>[2]</sup>。

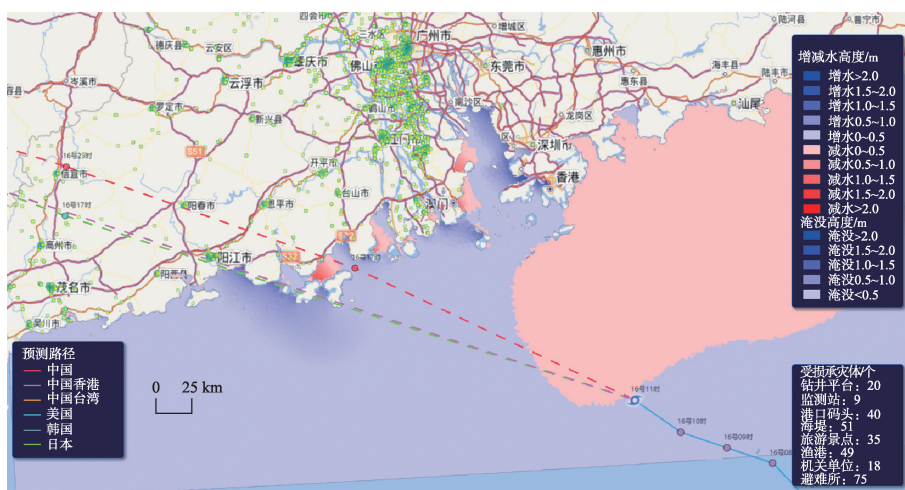
(2)框架表示法能合理刻画情景结构与情景间关系。风暴潮形成的灾害具有共生性、依赖性、复杂性及综合性,多种影响因子的相互作用,导致风暴潮情景的复杂性。情景数据来源不一、结构多样,而情景是整个风暴潮事件中的关键元素。框架



(a) 中国



(b) 中国香港



(c) 日本

图7 不同机构预测山竹2018年9月16日17时增减水情况

Fig. 7 Results of predicting the increase and decrease of water of Mangkhut by different agencies at 17 o'clock on September 16, 2018



表3 网络节点变量类型与取值集合

Tab. 3 Variable type and value set of network node

节点名称	类型	取值集合
情景状态 ( $S$ )	布尔变量	{真 ( $T$ ), 假 ( $F$ )}
承灾体 ( $A$ )	二值顺序变量	{积极 ( $P$ ), 消极 ( $N$ )}
应对措施 ( $D$ )	布尔变量	{真 ( $T$ ), 假 ( $F$ )}

表示法能层次化梳理多源异构数据,合理、正确地从大量灾情信息中提取出情景数据,分类、组织并刻画成情景。

(3)合理的应急决策可以使风暴潮情景朝期望方向演化。情景链的关键情景及下一情景演化方向由情景本身、承灾体自身特点、应急管理共同

表4 网络节点的先验概率与条件概率(部分数据)

Tab. 4 Prior probability and conditional probability of network nodes (partial data)

情景	节点变量	先验概率		条件概率	
山竹台风	$S_0$	$P(D_0 = T)$	0.95	$P(S_0 = T D_0 = T, A_0 = P)$	0.95
		$P(D_0 = F)$	0.05	$P(S_0 = T D_0 = T, A_0 = N)$	0.80
		$P(A_0 = P)$	0.70	$P(S_0 = T D_0 = F, A_0 = P)$	0.70
		$P(A_0 = N)$	0.30	$P(S_0 = T D_0 = F, A_0 = N)$	0.40
溃堤	$S_1$	$P(D_1 = T)$	0.96	$P(S_1 = T D_1 = T, A_1 = P, S_0 = T)$	0.90
		$P(D_1 = F)$	0.04	$P(S_1 = T D_1 = T, A_1 = P, S_0 = F)$	0.70
		$P(A_1 = P)$	0.75	$P(S_1 = T D_1 = T, A_1 = N, S_0 = T)$	0.85
		$P(A_1 = N)$	0.25	$P(S_1 = T D_1 = T, A_1 = N, S_0 = F)$	0.60
		—	—	$P(S_1 = T D_1 = F, A_1 = P, S_0 = T)$	0.55
		—	—	$P(S_1 = T D_1 = F, A_1 = P, S_0 = F)$	0.40
		—	—	$P(S_1 = T D_1 = F, A_1 = N, S_0 = T)$	0.30
		—	—	$P(S_1 = T D_1 = F, A_1 = N, S_0 = F)$	0.25

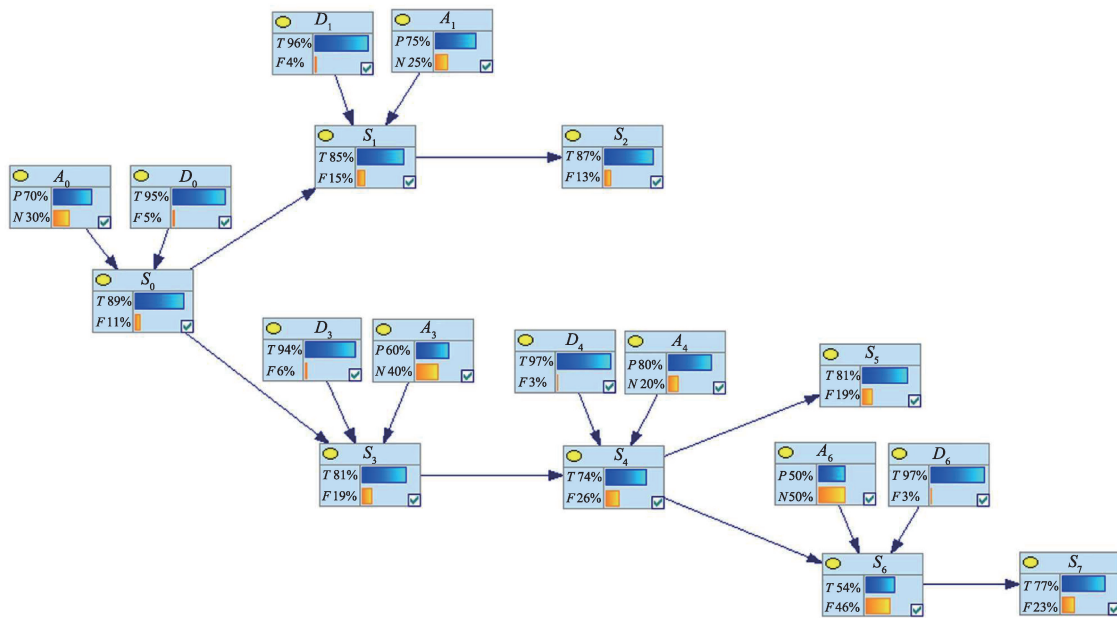


图8 基于动态贝叶斯网络的山竹情景推演

Fig. 8 Scenario deduction of Mangkhut based on dynamic Bayesian network

决定,具有不确定性。动态贝叶斯网络方法能保障不确定性情景演化的可靠性。由于不同应急管理会使情景朝不同方向发展,应急决策者需综合考虑情景现状、应急队伍与资源能力而做出合理决策。

本文将“情景一应对”尝试性应用在风暴潮事件中,在前人对台风情景推演研究基础上,填补了风暴潮情景构建的空白,增加了情景构建与情景演化过程的研究,实例分析更具体化,推动了情景推演的进一步落实,丰富了风暴潮灾情应急研究,为风暴潮灾情控制提供了新的应急思路与解决方法。本研究推演了情景的演化及发生概率,但未能给出下一情景发生的时间范围。故下一研究重点是通过模型计算演化情景的发生时间,使情景推演发挥更大作用。同时,将案例推理引入风暴潮情景推演中,构建风暴潮历史案例库与情景规则库,结合知识匹配与深度学习来降低情景推演中的主观因素,提高推演结果精确度。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 孙湘平.中国近海区域海洋[M].北京:海洋出版社,2006. [ Sun X P. Offshore seas of China[M]. Beijing: Ocean Press, 2006. ]
- [ 2 ] 舒其林.非常规突发事件的情景演变及“情景-应对”决策方案生成[J].中国科学技术大学学报,2012,42(11):936-941. [ Shu Q L. Study on scenario evolution and alternative generation of "scenario-response" decision-making in unconventional emergencies[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2012,42(11):936-941. ]
- [ 3 ] Chang M S, Tseng Y L, Chen J W. A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2007,43(6):737-754.
- [ 4 ] Mahmoud M, Liu Y Q, Hartmann H. A formal framework for scenario development in support of environmental decision-making[J]. Environmental Modelling & Software, 2009,24(7):798-808.
- [ 5 ] 吴倩,谈伟,盖文妹.基于动态贝叶斯网络的民航突发事件情景分析研究[J].中国安全生产科学技术,2016,12(3):169-174. [ Wu Q, Tan W, Gai W M. Study on scenario analysis of civil aviation emergency based on dynamic Bayesian network[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016,12(3):169-174. ]
- [ 6 ] 孙超,钟少波,邓羽.基于暴雨内涝灾害情景推演的北京市应急救援方案评估与决策优化[J].地理学报,2017,72(5):804-816. [ Sun C, Zhong S B, Deng Y. Scenario deduction based emergency rescue plan assessment and decision optimization of urban rainstorm water-logging: A case study of Beijing[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(5):804-816. ]
- [ 7 ] 张恭孝,杨荣华,崔萌,等.基于“情景-应对”模式的危险化学品泄漏应急决策系统的构建[J].化工环保,2018,38(5):609-614. [ Zhang G X, Yang R H, Cui M, et al. Construction of the emergency decision system for hazardous chemicals leakage based on "scenario-response" model [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2018, 38(5):609-614. ]
- [ 8 ] 徐元元.基于动态贝叶斯网络的高层建筑火灾应急决策研究[D].郑州:郑州大学,2019. [ Xu Y Y. Study on the decision making of high-rise buildings fire emergency based on for on dynamic Bayesian network[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019. ]
- [ 9 ] 仲秋雁,路光,王宁.基于知识元模型和系统动力学模型的突发事件仿真方法[J].情报科学,2014,32(10):15-19. [ Zhong Q Y, Lu G, Wang N. Simulation method research on emergencies based on system dynamics model and knowledge element model[J]. Information Science, 2014,32(10):15-19. ]
- [ 10 ] 王循庆,李勇建,孙晓羽.基于演化博弈的危化品安全监管情景推演研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(1):115-121. [ Wang X Q, Li Y J, Sun X Y. Study on scenario inference of hazardous chemicals safety supervision based on evolutionary game[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017,13(1):115-121. ]
- [ 11 ] 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 Y H, Liu H X, Jiang X Y, 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. ]
- [ 12 ] 王宁,谢晓珊,刘海园.基于案例的突发事件推演规则验证方法[J].系统工程学报,2019,34(2):145-157,237. [ Wang N, Xie X S, Liu H Y. Validation method of emergency deduction rules based on cases[J]. Journal of Systems Engineering, 2019,34(2):145-157,237. ]
- [ 13 ] 曾银东.福建宁德海洋工程风暴潮灾害风险特征参数分析[J].应用海洋学学报,2017,36(4):500-511. [ Zeng Y D. Risk characteristics of storm surge hazards on marine project in Ningde[J]. Journal of Applied Oceanography, 2017,36(4):500-511. ]
- [ 14 ] 张敏,罗军,胡金磊,等.雷州市沿海风暴潮淹没危险性评估[J].热带海洋学报,2019,38(2):1-12. [ Zhang M, Luo J, Hu J L, et al. Inundation risk assessment of storm surge along Lei Zhou coastal areas[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2019,38(2):1-12. ]

- [15] 原楠,陈新平,陈学恩,等.罗源湾海域台风风暴潮数值模拟研究[J].海洋通报,2019,38(1):20-30. [ Yuan N, Chen X P, Chen X E, et al. Numerical simulation of typhoon storm surge at the Luoyuan Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2019,38(1):20-30. ]
- [16] 汤富平,郭见兵,余华芬,等.基于GIS的台风风暴潮淹没情景模拟方法与平台开发[J].地理与地理信息科学,2019,35(1):6-11,2,19. [ Tang F P, Guo J B, Yu H F, et al. Scenario simulation method and platform of typhoon storm surge inundation based on geographic information system[J]. Geography and Geo- information Science, 2019,35(1):6-11,2,19. ]
- [17] Zhu X H, Li X Y, Wang S Y, et al. Scenarios conversion deduction method of natural disaster based on dynamic Bayesian networks[C]. Proceedings of 2017 2<sup>nd</sup> International Conference on Computational Modeling: Simulation and Applied Mathematics, 2017:267-271. ]
- [18] 孙佳,左军成,黄琳,等.东海沿岸台风及风暴潮灾害特征及成因[J].河海大学学报(自然科学版),2013,41(5):461-465. [ Sun J, Zuo C J, Huang L, et al. Characteristics and causes of typhoon and storm surge along coast of East China Sea[J]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences), 2013,41(5):461-465. ]
- [19] 范维澄,闪淳昌.公共安全与应急管理[M].北京:科学出版社,2018. [ Fan W C, Shan C C. Public safety and emergency management[M]. Beijing: Science Press, 2018. ]
- [20] 李春娟.突发事件应急管理知识系统演化研究[D].秦皇岛:燕山大学,2015. [ Li C J. Research on the evolution of emergency management knowledge system[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015. ]
- [21] 冯文娟,杜云艳,苏奋振.台风时空过程的网络动态分析技术与示例[J].地球信息科学学报,2007,9(5):57-63. [ Feng W J, Du Y Y, Su F Z. Dynamic network analyzing technology of typhoon spatio- temporal process and illustration researching[J]. Journal of Geo- information Science, 2007,9(5):57-63. ]
- [22] 陈泽强,陈能成,杜文英,等.一种洪涝灾害时间信息建模方法[J].地球信息科学学报,2015,17(6):644-652. [ Chen Z Q, Chen N C, Du W Y, et al. A method of modelling flood event[J]. Journal of Geo-information Science, 2015, 17(6):644-652. ]
- [23] 朱晓寒,李向阳,王诗莹.自然灾害链情景态势组合推演方法[J].管理评论,2016,28(8):143-151. [ Zhu X H, Li X Y, Wang S Y. Scenarios combination deduction method of natural disaster[J]. Management Review, 2016,28(8): 143-151. ]
- [24] 张明红.基于案例的非常规突发事件情景推理方法研究[D].武汉:华中科技大学,2012. [ Zhang M H. Study on unconventional emergency scenario reasoning method the cases-based[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. ]
- [25] 徐磊.基于贝叶斯网络的突发事件应急决策信息分析方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013. [ Xu L. Research on emergency events decision making information analysis method based on Bayesian network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. ]
- [26] 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. [ Gong Q S. Research on scenario deduction model of emergency based on dynamic Bayesian network [J]. Journal of Xi'an Shiyou University( Natural Science Edition), 2018,33(2):119-126. ]
- [27] 张凯华.化工园区火灾事故情景推演及应急知识匹配研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2017. [ Zhang G H. Research on scenario deduction and emergency knowledge matching of fire accident in chemical industry zone[D]. Qingdao: School of Economics and Management China University of Petroleum ( East China), 2017. ]
- [28] 杨伟,李彤.非常规灾害事件情景演化的概率性生长模式——基于台风莫拉克的探索性案例研究[J].电子科技大学学报(社科版),2013,15(5):14-19. [ Yang W, Li T. Probabilistic growing mode of scenario evolution in unconventional disaster: Exploratory case study of typhoon Morakot[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China ( Social Sciences Edition), 2013,15 (5):14-19. ]