

信息不完全下极端气象灾害态势感知建模优化

杨继君¹, 曾子轩^{2,3}

(1. 广东财经大学, 广东 广州 510320;

2. 上海交通大学, 上海 200030;

3. 广西财经学院跨境电商智能信息处理重点实验室, 广西 南宁 530003)

摘要:极端气象灾害事件态势演化问题是应急决策者关心的首要问题, 因为它是制定应急处置与救援措施的前提和依据。鉴于整个极端气象灾害的态势演化过程类似于一个隐马尔可夫状态转移过程, 为此首先设计了极端气象灾害事件态势演化框架模型, 在此基础上构建基于隐马尔可夫状态转移的极端气象灾害态势感知模型及其求解算法, 实现对极端气象灾害的态势进行实时精准感知, 以便为应急决策者提供决策支持。鉴于极端气象灾害相关信息的不完全性, 致使极端气象灾害态势感知模型中部分参数的初始值选择存在不足, 为此引入贝叶斯方法对其进行修正, 很好地克服了上述问题。最后通过实例分析说明该方法的应用过程和实际意义。此外, 该方法也为极端气象灾害态势演化规律的探索提供了新的思路和途径。

关键词:信息不完全; 隐马尔可夫链; 极端气象灾害; 态势感知; 建模优化

中图分类号: X915.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2021)02-0169-06

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2021.02.031

Situation Awareness Modeling and Optimization of Extreme Meteorological Disasters Based on Incomplete Information

YANG Ji-jun¹, ZENG Zi-xuan^{2,3}

(1. Guangdong University of Finance & Economics, Guangzhou 510320, China;

2. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

3. Guangxi Key Laboratory Cultivation Base of Cross-border E-commerce Intelligent Information Processing, Guangxi University of Finance & Economics, Nanning 530003, China)

Abstract: Situation evolution of extreme meteorological disasters is the primary problem that the emergency decision makers care about, because it's the premise and basis for emergency response and rescue measures. In view of the fact that the evolution process of extreme meteorological disasters is similar to a hidden Markov state transition process, a framework model for the evolution of extreme meteorological disasters is constructed. Then situation awareness model and its solution algorithm of extreme meteorological disasters based on hidden Markov chain are designed to accurately perceive the situation of extreme meteorological disasters and provide decision support for emergency decision-makers. Due to incomplete information of extreme meteorological disasters, the Bayesian method is applied to modify the initial values in this model, which overcomes above problems effectively. Finally, the application process and practical significance of this method are illustrated by an example. In addition, this method also provides a new idea and way to explore the evolution law of extreme meteorological disaster.

Key words: incomplete information; hidden Markov chain; extreme meteorological disasters; situation awareness; modeling and optimizing

0 引言

极端气象灾害事件属于一类特殊的非常规突发事件, 从概率的角度来讲, 属于小概率事件, 但造成的破

坏和损失往往相当严重, 比如 2019 年 7 月 23 日贵州水城因暴雨引发山体滑坡并造成重大人员伤亡和财产损失(贵州水城“7·23”特大山体滑坡灾害), 其中 42

收稿日期: 2020-03-03

修回日期: 2020-07-06

基金项目: 国家社会科学基金重点资助项目(16AGL017); 广西社科基金重点项目(15AGL003); 广西重点研发计划(2018AB67003); 南宁市科技创新项目(20183101)

作者简介: 杨继君(1972-), 男(土家族), 博士(后), 研究员(教授级), 英国纽卡斯尔大学访问学者, 从事大数据与应急决策研究; 通讯作者: 曾子轩(1991-), 女, 博士研究生, 讲师, 从事供应链风险建模与仿真优化研究。

人死亡,9人失踪^[1]。极端气象灾害来临时,由于信息的高度缺失、时滞和失真,通常会造成应急决策者高度的紧张和压力,而时间的紧迫性又要求应急决策者必须在极短的时间内做出重大决策。因此,对应急决策来说,此时最关心的事情是极端灾害目前处于什么状态,下一步将如何发展。只有大致弄清楚这些情况后,才能制定具有针对性的应急措施,实施高效处置与救援,故设计具有实时感知极端气象灾害状态的方法就有重要的理论和现实意义。

态势感知(situational awareness, SA)^[2-3]是在一定的时空条件下,对环境因素的获取、理解以及对未来状态的预测。它首先源于航天飞行的人的因素的研究,此后在网络安全、军事战场等领域^[4-10]得到较为充分的研究和应用。目前,国内外学者围绕态势感知对突发事件的应急管理展开了探索性研究。比如, Turoff 等^[11]首次提出把信息的态势感知引入到突发事件应急管理中。Feng 等^[12]构建了由共享的态势感知和独立行为主体构成的决策支持系统模型。Hannes 等^[13]对应急处置与救援行动中态势感知共享的影响因素进行了研究。Luukkala^[14]开发了时间约束条件下危机态势感知的信息系统。曾大军等^[15]提出了一整套应用大数据实现突发事件态势感知与决策支持的理论解决方案。陈凌等^[16]通过对态势感知的发展及其应用的分析,揭示了信息态势感知在政府危机中的作用。朱娜娜等^[17]构建了基于社会传感器的网络安全态势感知及应急管理模型,通过网民行为、情感、态度等数据感知网络社会与现实社会的安全态势,并结合计算机仿真系统,以实时数据分析为导向,用以解决具体突发事件。黄伟等^[18]对基于态势感知技术的电网台风预

警防御框架进行了研究,以期对近年来频发的台风灾害应对提供帮助。

上述针对突发事件态势感知的研究缺少具有可操作性的研究成果,并且对极端气象灾害态势感知方法的研究尚未检索到。因此,该文在设计极端气象灾害事件态势演化框架的基础上,尝试构建面向信息不完全的极端气象灾害态势感知方法,以便对极端气象灾害态势进行精准感知,从而为应急决策者提供决策支持。

1 问题描述与模型构建

1.1 极端气象灾害态势演化的马尔可夫链描述

极端气象灾害事件的演化过程可类似于一个隐马尔可夫状态转移过程即隐马尔可夫链过程(如图1所示,图1为4阶段状态转移模型),在不同的阶段有其子事件(状态)与之对应。因此假定,在极端气象灾害演化过程中后一阶段子事件的发展仅取决于当前阶段子事件的状态,而与过去的子事件没有关系,即可以认为事件过去所有的信息都包含在当前子事件(状态)之中。比如超强台风往往伴随大风和暴雨,而暴雨可能引发洪水,进而引发泥石流等一系列灾害。根据上述假设,第三阶段的泥石流灾害仅与第二阶段的洪水有关,而与第一阶段的暴雨没有直接关系。这样,整个极端气象灾害事件的态势演化过程就满足隐马尔可夫链模型的基本前提假设,此时极端气象灾害事件当前状态分布可表示为:

$$P(s_t = s_j | s_{t-1}, \dots, s_1) = P(s_t = s_j | s_{t-1}) \quad (1)$$

据上分析可知,利用隐马尔可夫状态转移模型设计极端气象灾害事件态势感知方法成为可能。

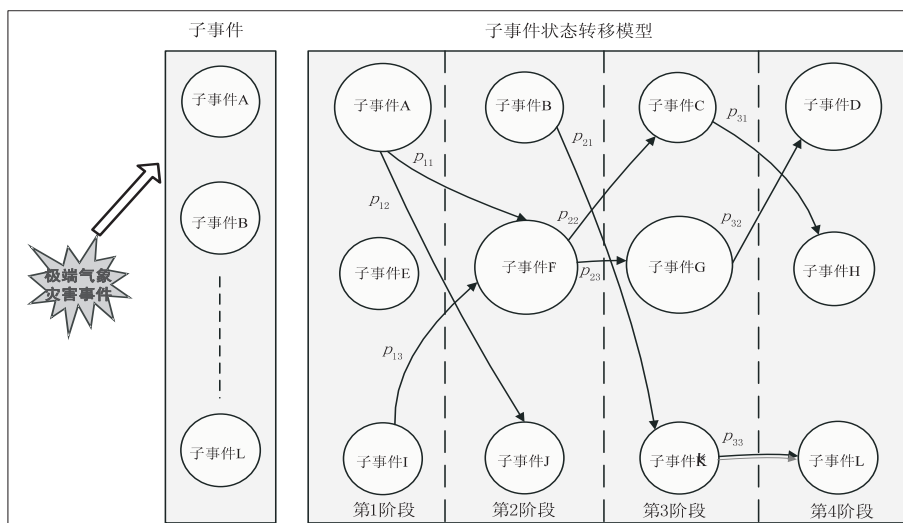


图1 极端气象灾害事件态势演化框架模型

1.2 面向极端气象灾害态势感知的隐马尔可夫状态转移模型

如前所述,由于信息的不完全性,极端气象灾害事

件的真实状态很难在短时间内被应急决策者所掌握,应急决策者只能从观察到的现象(被称为观测值)中推测其真实状态(被称为隐含状态),例如暴雨是否引

发市内洪涝灾害、水库溃坝还是山体滑坡。应急决策者通过暴雨导致的一些现象(比如观察到暴雨持续时间与积水情况)去推测可能造成灾害事件的真正状态即从观测值来估计隐含状态。

极端气象灾害事件的状态是由其内在属性决定的,而属性是对灾害事件某一方面性质的描述,比如灾害事件的类型属性、级别属性、空间属性、时间属性等等。灾害事件的属性要素提取是一个组合优化问题,复杂程度高,需要专门的搜索算法来解决^[19]。为了简化问题分析,在极端气象灾害事件诸多属性中选取事件的类型和等级这两个主要属性来描述其状态即极端气象灾害事件的状态空间 S 包含灾害类型 L 和灾害等级 D (记为 $S=L \times D$, $s_r=(l_i, d_j)$, $l_i \in L, d_j \in D$)。若极端气象灾害事件有 k 种类型 ($k=|L|$) 和 m 个等级 ($m=|D|$), 则极端气象灾害事件共有 $|S|=km$ 个状态。比如某次超强台风,可能造成城市内涝和泥石流 2 种灾害即 $n=2$; 依据自然灾害等级分级^[20]: I 级(特别重大)、II 级(重大)、III(较大)和 IV(一般)即 $m=4$, 则此次超强台风灾害共有 $|S|=2 \times 4=8$ 个状态,依次表示如下:

$s_1=(城市内涝, I)$; $s_2=(城市内涝, II)$; $s_3=(城市内涝, III)$; $s_4=(城市内涝, IV)$;

$s_5=(泥石流, I)$; $s_6=(泥石流, II)$; $s_7=(泥石流, III)$; $s_8=(泥石流, IV)$

标准的 5 元组隐马尔可夫链模型如式(2)所示^[21]:

$$HMM=(\mu, O, S, A, B) \quad (2)$$

其中, μ 为初始状态概率分布; $S=\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 为极端气象灾害事件的状态集合(隐变量); $O=\{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ 为极端气象灾害事件的观测序列; $A=(a_{ij})$ 为极端气象灾害事件的状态转移矩阵; $B=(b'_i(o_t))$ 为输出概率矩阵。

1.3 模型参数设定

利用隐马尔可夫模型对极端气象灾害进行态势感知时,各个参数含义如下:

(1) μ 为极端气象灾害初始状态概率分布;

(2) $S=\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 为极端气象灾害事件的状态集合(隐变量);

(3) $O=\{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ 为极端气象灾害事件的观测序列;

(4) $A=(a_{ij})$ 为极端气象灾害事件的状态转移矩阵, $a_{ij}=P(s_{t+1}=s_j | s_t=s_i)$ 表示极端气象灾害事件 t 阶段状态 s_i 向 $t+1$ 阶段状态 s_j 转化的概率。

极端气象灾害事件虽然在当时由于灾害信息的不完全而导致决策者无法判断其真实状态,但是在事后

或者稍后的决策中,由于灾害信息的逐渐完善,灾害事件的状态是可以确定的即灾害的事后状态是可以观察的。另外,对于相似的灾害事件,其演化基本上遵循相同的规律即通过统计与当前灾害事件相似的历史事件的演化过程,就可以作为当前灾害事件的发展规律。因此,可以直接从以往发生的极端气象灾害事件的历史数据中挖掘当前极端气象灾害状态转移概率。

根据假设条件:极端气象灾害态势演化满足马尔可夫链假设,只要通过统计与分析极端气象灾害事件的历史资料,就可以确定各子事件之间的状态转移概率。比如超强台风往往会有暴雨,随后可能造成城市内涝、山体滑坡、泥石流、水库溃坝等一系列灾害子事件。通过统计国内某一城市近 40 年来的超强台风灾害,假定一共有 $N_{暴雨}$ 次从暴雨出发的状态转移,其中转化成城市内涝灾害的次数为 $N_{暴雨,内涝}$, 则状态转移概率可确定如下:

$$P(s_{t+1}=内涝 | s_t=暴雨) = \frac{N_{暴雨,内涝}}{N_{暴雨}} \quad (3)$$

当然,其他灾害事件之间的状态转移概率求法类似式(3)。特别规定:有些子事件之间存在确定的单向转化关系,此时记 $P_{ij}=1$, 而有些子事件之间不会发生转移,则记 $P_{ij}=0$ 。

(5) $B=(b'_i(o_t))$ 为输出概率矩阵。 $b'_i(o_t)$ 表示极端气象灾害在 t 阶段给定 s_j 状态下观测值 $o_t(t=1, 2, \dots, N)$ 出现的概率。输出概率矩阵 $B=(b'_i(o_t))$ 属于主观概率矩阵,是应急决策者在 t 阶段给定灾害状态 s_j 下观察到灾害现象(信息) o_t 的条件概率分布,具体按如下公式确定:

$$b'_i(o_t) = P(o_t | s_j), t=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

1.4 基于马尔可夫链改进的极端气象灾害态势感知方法及其步骤

对于应急决策者来说,只有在了解极端气象灾害事件的真正状态之后,才能采取有针对性的应急措施。但是在灾害事件的发展过程中由于信息的高度缺失,所观察到的往往是灾害事件的表象,应急决策者需要通过灾害事件的表象估计其真实状态即应急决策者根据现有的观测值(信息),结合自己的主观判断估计其隐状态序列,这一过程被称为灾害态势感知。

在极端气象灾害初始阶段即 $t=1$ 阶段,由于灾害信息缺乏,其初始状态概率分布(μ)分如下两种情况确定:

(1) 灾害信息完全缺失即应急决策者对极端气象灾害事件无任何先验知识(对灾害信息一无所知),则初始状态概率分布 μ 取等值即 $\mu_i = \frac{1}{|S|}$ ($|S|$ 为状态总数)。

(2) 灾害信息部分缺失即应急决策者获得极端气象灾害的部分信息,但不完全,此时应急决策者可以借鉴专家知识并结合自己的判断确定初始状态概率分布 μ 的大小。

因第一种情况在现实中基本不存在,故不赘述;而第二种情况则比较常见,此时极端气象灾害的初始状态概率分布按照贝叶斯公式进行修正:

$$\mu_i(s_i | X_i) = \frac{\mu(X_i | s_i)\mu(s_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(X_i | s_i)\mu(s_i)} \quad (5)$$

其中, $\mu(s_i)$ 表示极端气象灾害处于初始状态 s_i 的先验概率; $\mu_i(s_i | X_i)$ 表示极端气象灾害信息 X_i 获得时,在条件概率 $\mu(X_i | s_i)$ 已知的情况下应急决策者对灾害初始状态判断的后验概率。

在观测到当前灾害事件的现象 (o_1) 后,应急决策者估计不同状态下观测到 o_1 的概率即确定输出矩阵 B_1 ,则灾害事件处于 s_i 的似然值按如下公式确定:

$$P(s_i | o_1) \propto L(s_i | o_1) = P(o_1 | s_i)P(s_i) = b_1^i(o_1)\mu_i \quad (6)$$

此时,应急决策者判定当前灾害事件最有可能的状态为:

$$s_1^* = \arg \max_{0 \leq s_i \leq |S|} L(s_i | o_1) \quad (7)$$

那么在初始阶段 ($t = 1$) 最佳隐变量序列确定为: $\{s_1^*\}$ 。另外,根据极端气象灾害事件的历史统计资料确定状态转移矩阵 $A = (a_{ij})$,随后应急决策者预测第 2 阶段 ($t = 2$) 极端气象灾害最有可能的状态如下:

$$s_2^* = \arg \max_{0 \leq s_i \leq |S|} P(s_i | s_1^*) \quad (8)$$

则此时的最优隐状态序列为: $\{s_1^*, s_2^*\}$,应急决策者根据确定的最优状态序列制定相应的极端气象灾害应急方案并加以实施。

当灾害事件进入第 2 阶段后,随着灾害信息的不断完善,应急决策者对灾害事件状态演化序列 $\{s_1^*, s_2^*\}$ 进行修正并采取应对措施,然后对灾害事件第 3 阶段 ($t = 3$) 的可能状态进行预测并采取措施。重复上述决策过程,直到灾害事件得到有效控制和消除为止。

2 实例分析

以超强台风“威马逊”造成海口市城市洪涝灾害为例说明该方法的具体应用过程。超强台风“威马逊”于 2014 年 7 月 18 日下午 3 时从文昌市登陆,横扫整个海南省。依据相关气象资料显示,海口市从 2014 年 7 月 17 日早上开始普降暴雨,晚上为大暴雨;7 月 18 日超强台风登陆时为特大暴雨。为了简要说明问题,将这段时间内因超强台风带来的强降雨过程分为

三个阶段即暴雨阶段 (o_1)、大暴雨阶段 (o_2) 和特大暴雨阶段 (o_3);城市洪涝灾害的状态分为不严重 (s_1) 和严重 (s_2) 两种 (s_1 状态对应的处置措施为 δ_1 , s_2 状态对应的处置措施为 δ_2)。现假定洪涝灾害态势演化过程满足隐马尔可夫链模型基本前提假设,其状态转移概率依据海南近 40 年来的台风灾害资料统计所得^[22-25],初始状态分布的先验概率根据决策者在最初阶段获得的部分台风信息并结合个人经验做出判断(此处假定 $\mu(s_1) = 0.6$, $\mu(s_2) = 0.4$);因灾害信息的缺失性与滞后性,应急决策者需要在 2 位应急专家的支持下决策,假定他们对决策方案的制定影响程度相同 (ω) 即 $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$;另外,收集到灾害状态 s_i ($i = 1, 2$) 的征兆信息为 X_i 。所有相关数据如图 2 所示。现在应急决策者依据三个阶段观察到的降雨情况该如何制定应对方案?

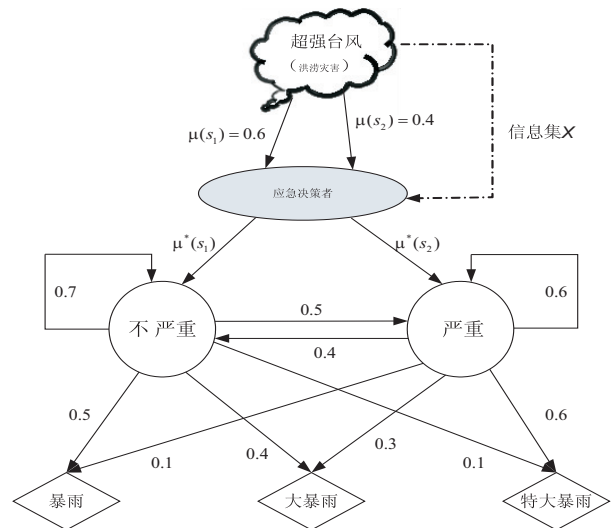


图 2 洪涝灾害态势感知

问题分析:

(1) 确定模型参数

① 灾害初始状态概率分布。

依据图 2 可知如下情况:洪涝灾害隐含状态分为不严重和严重,记为 $S = \{s_1, s_2\}$;应急决策者观察到的下雨状况为:暴雨、大暴雨和特大暴雨,记为 $O = \{o_1, o_2, o_3\}$ 。

灾害初始状态分布的先验概率为: $\mu(s_1) = 0.6$, $\mu(s_2) = 0.4$;收集到灾害状态 s_i 的征兆信息为 X_i ,假定专家此时给定的条件概率为:

专家 1:

$$\begin{cases} \mu_1(X_1 | s_1) = 0.9, \mu_1(X_2 | s_1) = 0.1 \\ \mu_1(X_1 | s_2) = 0.3, \mu_1(X_2 | s_2) = 0.8 \end{cases}$$

专家 2:

$$\begin{cases} \mu_2(X_1 | s_1) = 0.8, \mu_2(X_2 | s_1) = 0.2 \\ \mu_2(X_1 | s_2) = 0.1, \mu_2(X_2 | s_2) = 0.7 \end{cases}$$

依据专家 1 给定的条件概率计算其后验概率如下:

$$\mu_1(s_1 | X_1) = \frac{\mu_1(X_1 | s_1)\mu(s_1)}{\mu_1(X_1 | s_1)\mu(s_1) + \mu_1(X_1 | s_2)\mu(s_2)} \approx 0.82$$

$$\mu_1(s_2 | X_1) = 0.18$$

$$\mu_1(s_1 | X_2) = \frac{\mu_1(X_2 | s_1)\mu(s_1)}{\mu_1(X_2 | s_1)\mu(s_1) + \mu_1(X_2 | s_2)\mu(s_2)} \approx 0.16$$

$$\mu_1(s_2 | X_2) = 0.84$$

同理计算专家 2 判断的后验概率为:

$$\mu_2(s_1 | X_1) = 0.92$$

$$\mu_2(s_2 | X_1) = 0.08$$

$$\mu_2(s_1 | X_2) = 0.3$$

$$\mu_2(s_2 | X_2) = 0.7$$

依据海口市 7 月 17 日白天普降暴雨、晚上降大暴雨,7 月 18 日降特大暴雨等信息(征兆信息为 X_2),此时应急决策者借助 2 位专家的支持对灾害初始状态的判断修正如下:

$$\mu^*(s_1) = \omega_1\mu_1(s_1 | X_2) + \omega_2\mu_2(s_1 | X_2) = 0.24$$

$$\mu^*(s_2) = 0.76$$

②状态转移矩阵为:

$$A = \begin{pmatrix} 0.7 & 0.5 \\ 0.4 & 0.6 \end{pmatrix}$$

③输出概率矩阵为:

$$B = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.1 \\ 0.1 & 0.3 & 0.6 \end{pmatrix}$$

(2)在第一阶段观察到暴雨时,洪涝灾害最可能的状态确定如下:

$$P_1^1 = P(\text{第一阶段 } s_1) = P(s_1^1) =$$

$$P(o_1 | s_1^1) \times \mu^*(s_1) = 0.5 \times 0.24 = 0.12$$

$$P_2^1 = P(\text{第一阶段 } s_2) = P(s_2^1) =$$

$$P(o_1 | s_2^1) \times \mu^*(s_2) = 0.1 \times 0.76 = 0.076$$

因有 $P_1^1 > P_2^1$,故第一阶段洪涝灾害最可能的状态是不严重(s_1),应急决策者可以采用 δ_1 进行应对。

(3)在第二阶段观察到大暴雨时,洪涝灾害最可能的状态确定如下:

由第一阶段的状态不严重或者严重转到第二阶段的不严重或严重,有 4 种情况即:

$$P_1^2 = P(\text{第一阶段 } s_1, \text{第二阶段 } s_1) = P(s_1^1) \times P(s_1^1 \rightarrow s_1^2) \times b(o_2 | s_1^2) = 0.12 \times 0.7 \times 0.4 = 0.0336$$

$$P_2^2 = P(\text{第一阶段 } s_1, \text{第二阶段 } s_2) =$$

$$P(s_1^1) \times P(s_1^1 \rightarrow s_2^2) \times b(o_2 | s_2^2) = 0.12 \times 0.5 \times 0.3 = 0.018$$

$$P_3^2 = P(\text{第一阶段 } s_2, \text{第二阶段 } s_1) =$$

$$P(s_2^1) \times P(s_2^1 \rightarrow s_1^2) \times b(o_2 | s_1^2) = 0.076 \times 0.4 \times 0.4 = 0.01216$$

$$P_4^2 = P(\text{第一阶段 } s_2, \text{第二阶段 } s_2) =$$

$$P(s_2^1) \times P(s_2^1 \rightarrow s_2^2) \times b(o_2 | s_2^2) = 0.076 \times 0.6 \times 0.3 = 0.01368$$

因有 $P_1^2 > P_2^2 > P_4^2 > P_3^2$,故第二阶段洪涝灾害最可能的状态仍是不严重(s_1),应急决策者可以继续采用 δ_1 进行应对。

(4)在第三阶段观察到特大暴雨时,洪涝灾害最可能的状态确定如下:

$$P_1^3 = P(\text{第二阶段 } s_1, \text{第三阶段 } s_1) =$$

$$P(s_1^2) \times P(s_1^2 \rightarrow s_1^3) \times b(o_3 | s_1^3) = 0.0336 \times 0.7 \times 0.1 = 0.002352$$

$$P_2^3 = P(\text{第二阶段 } s_1, \text{第三阶段 } s_2) =$$

$$P(s_1^2) \times P(s_1^2 \rightarrow s_2^3) \times b(o_3 | s_2^3) = 0.0336 \times 0.5 \times 0.6 = 0.01008$$

$$P_3^3 = P(\text{第二阶段 } s_2, \text{第三阶段 } s_2) =$$

$$P(s_2^2) \times P(s_2^2 \rightarrow s_2^3) \times b(o_3 | s_2^3) = 0.01368 \times 0.6 \times 0.6 = 0.0049248$$

$$P_4^3 = P(\text{第二阶段 } s_2, \text{第三阶段 } s_1) =$$

$$P(s_2^2) \times P(s_2^2 \rightarrow s_1^3) \times b(o_3 | s_1^3) = 0.01368 \times 0.4 \times 0.1 = 0.0005472$$

因有 $P_2^3 > P_3^3 > P_1^3 > P_4^3$,故第三阶段洪涝灾害最可能的状态是严重(s_2),应急决策者需要采用 δ_2 进行应对。

综上所述,应急决策者感知洪涝灾害在三个阶段的最佳状态序列为:不严重、不严重和严重,即 $\{s_1^{1*}, s_1^{2*}, s_2^{3*}\}$;而海口市的实际情况是:7 月 17 日白天和晚上,海口市城市内涝都不严重,但从 7 月 18 日下午 3 时至下午 6 时左右,海口城市内涝已经相当严重,整个城市的交通处于瘫痪状态,致使海口市全面开启了“看海模式”,这说明模型感知结果与事实相符。

3 结束语

极端气象灾害的演化态势是应急决策者制定应急救援与处置方案的依据和前提。该文对极端气象灾害态势感知问题进行了研究。鉴于整个极端气象灾害的态势演化过程类似于一个隐马尔可夫状态转移过程,在对隐马尔可夫模型进行改进的基础上设计了面向信息不完全的极端气象灾害态势感知方法。通过实例分析介绍了该方法的应用过程和实际意义;同时该方法也为探索极端气象灾害态势演化规律提供了新的思路

和途径。

参考文献:

- [1] 新华社. 贵州水城“7·23”特大山体滑坡灾害搜救工作结束[EB/OL]. [2019-07-30]. http://www.gov.cn/xinwen/2019-07/30/content_5416541.htm.
- [2] ENDSLEY M R. Design and evaluation for situation awareness enhancement[C]//32th annual meeting on human factors & ergonomics society. Santa Monica, CA: [s. n.], 1988: 97-101.
- [3] ENDSLEY M R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems[J]. *Human Factors*, 1995, 37(1): 32-64.
- [4] BASS T. Intrusion detection system and multisensory data fusion; creating cyberspace situational awareness[J]. *Communications of the ACM*, 2000, 43(4): 99-105.
- [5] 梁颖, 王慧强, 赖积保. 一种基于粗糙集理论的网络安全态势感知方法[J]. *计算机科学*, 2007, 34(8): 95-97.
- [6] FRANKE U, BRYNIELSSON J. Cyber situational awareness—a systematic review of the literature[J]. *Computers & Security*, 2014, 46: 18-31.
- [7] 赵宗贵, 李君灵, 王珂. 战场态势估计概念、结构与效能[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2010, 5(3): 226-230.
- [8] KIM Y J, HOFFMANN C M. Enhanced battlefield visualization for situation awareness[J]. *Computers & Graphics*, 2003, 27(6): 873-885.
- [9] 曹裕华, 江敬灼. 基于态势评估的实体决策行为模拟[J]. *计算机仿真*, 2004, 21(12): 48-50.
- [10] 孔亦思, 胡晓峰, 朱丰, 等. 战场态势感知中的注意力机制探析[J]. *系统仿真学报*, 2017, 29(10): 2233-2240.
- [11] TUROFF M, CHUMER M, WALLE B V. The design of a dynamic emergency response management information system[J]. *Journal of Information Technology Theory and Application*, 2004(5): 1-35.
- [12] FENG Y H, TENG T H, TAN A H. Modelling situation awareness for context-aware decision support[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(1): 455-463.
- [13] SEPPÄNEN H, MÄKEL J, LUOKKALA P, et al. Developing shared situational awareness for emergency management[J]. *Safety Science*, 2013, 55(6): 1-9.
- [14] LUOKKALA P. Developing information systems to support situational awareness and interaction in time—pressuring crisis situations[J]. *Safety Science*, 2014, 63(4): 191-203.
- [15] 曾大军, 曹志冬. 突发事件态势感知与决策支持的大数据解决方案[J]. *中国应急管理*, 2013(11): 15-23.
- [16] 陈凌, 孙晓宇. 政府危机决策的态势感知研究初探[J]. *图书馆学研究*, 2015(14): 94-97.
- [17] 朱娜娜, 张伟男, 韩双梅, 等. 基于社会传感器的网络安全态势感知与应急管理模型研究[J]. *智能计算机与应用*, 2017, 7(6): 135-138.
- [18] 黄伟, 黄廷城, 王立勇, 等. 基于态势感知的电网台风预警防御框架研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(11): 162-169.
- [19] 盛勇, 孙庆云, 王永明. 突发事件情景演化及关键要素提取方法[J]. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(1): 17-21.
- [20] 中国政府网. 中华人民共和国突发事件应对法[EB/OL]. 2018. http://www.chinasafety.gov.cn/fw/fgzc/201803/t20180327_200691.shtml
- [21] CHING W K, HUANG X M, MICHAEL K N, et al. 马尔可夫链: 模型、算法与应用[M]. 陈曦, 译. 北京: 清华大学出版社, 2015: 21-23.
- [22] 中国天气台风网. 2008-2017 台风专题数据库[EB/OL]. 2018. <http://typhoon.weather.com.cn/hist/2018.shtml>.
- [23] 中国气象数据网. 中国暴雨洪涝灾害数据集/中国热带气旋灾害数据集[EB/OL]. [2001-02-01]. <http://data.cma.cn/data/cdcindex/cid/dcaa6510b4d6441b.html>.
- [24] 中国气象局. 台风年鉴(1978-1988)/热带气旋年鉴(1989-2017)[M]. 北京: 气象出版社, 2019.
- [25] 海口气象局信息网. 气象灾害数据库[EB/OL]. [2017-09-18]. <http://www.hkqx.net/Disasters>.