

# 区间信息类型下的突发事件动态预警方法

张自欣<sup>1,2</sup>, 王 亮<sup>1,2</sup>, 王应明<sup>1†</sup>

(1. 福州大学 决策科学研究所, 福州 350116; 2. 哈恩大学 计算机科学系, 哈恩 23071)

**摘 要:** 针对已有突发事件预警研究的不足及预警信息的动态性等特征, 提出区间信息类型下的突发事件动态预警方法. 首先, 建立区间形式评价等级标准, 并在此基础上利用  $t_i \sim t_{i+1}$  时刻间的动态区间预警信息, 计算各指标的基本置信度; 然后, 利用证据推理方法对基本置信度进行转化, 并从最末级指标开始依次逆向逐级融合, 最终得到可判断预警对象安全状态的置信度, 以达到预警目的. 最后, 通过分析数据实例验证所提方法的可行性和有效性.

**关键词:** 动态预警; 区间信息; 证据推理; 突发事件

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

## Dynamic early-warning method of emergency event with interval information

ZHANG Zi-xin<sup>1,2</sup>, WANG Liang<sup>1,2</sup>, WANG Ying-ming<sup>1†</sup>

(1. Institute of Decision Science, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 2. Department of Computer Sciences, University of Jaén, Jaén 23071, Spain)

**Abstract:** Considering the limitation of the existing studies and the features of uncertainty and dynamics of emergency event early-warning information, a dynamic early-warning method for emergency event is proposed. Interval evaluation grade standard is firstly described. Based on this standard and the dynamic early-warning interval information between time points  $t_i - t_{i+1}$ , the basic belief degrees on different assessment grades with regards to each criterion are calculated. Then, the basic belief degrees are transformed and integrated by evidential reasoning from the subcriterion step by step until the final belief degrees are calculated, which can reflect the safety state of the emergency warning objects. Finally, a numerical example is provided to illustrate the feasibility and validity of the proposed method.

**Keywords:** dynamic early-warning; interval information; evidential reasoning; emergency event

## 0 引 言

近年来,随着经济的快速发展,人类社会所面对的各种自然灾害、事故灾难等突发事件不断增多. 例如,2016年日本九州熊本发生了7.3级地震,日本九州经济调查协会称该地震将导致九州地区年经济产值减少24到34亿美元<sup>[1]</sup>;2016年,我国新疆的“4.3”天利煤矿重大顶板事故,造成10人死亡<sup>[2]</sup>;2015年,河南平顶山的“5.25”老年公寓发生重大火灾,伤亡45人,经济损失两千多万元<sup>[3]</sup>. 频频发生的突发事件给人们的生活带来了巨大的损失,并严重影响了社会的稳定发展. 因此,如何在突发事件发生之前进行及时、有效的预警,以避免突发事件的发生或在其发生时造成最

小的损失和影响,已成为政府和学术界所关注的重点之一.

在已有的突发事件预警研究中,部分学者致力于预警系统的开发及完善,Peng等<sup>[4]</sup>为了降低地震的破坏性并减少生命财产的损失,开发出了地震早期预警系统;Grasso等<sup>[5]</sup>为了减少地震预警系统发出错误警报信息带来的影响,提出了一种科学的决策方法来提高和改进原有预警系统的不足,从而增加预测的可靠性. 而有些学者致力于预警数据的监测,Burchard-Levine等<sup>[6]</sup>为了实现对饮用水水源污染的监测,将遗传算法和人工神经网络相结合,提出了混合演变的数据驱动模型;Huang等<sup>[7]</sup>针对我国西部山区泥石流预

收稿日期: 2016-06-08; 修回日期: 2016-09-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71371053); 福建省社科基金青年博士论文项目(FJ2016C202); 浙江省自然科学基金项目(LY15G030021); 教育部人文社会科学研究青年项目(14YJC630056).

作者简介: 张自欣(1988—),女,博士生,从事决策理论与方法的研究;王应明(1964—),男,教授,博士生导师,从事决策理论与方法等研究.

†通讯作者. E-mail: msymwang@hotmail.com

警问题进行研究,提出了基于3D WebGIS平台与无线传感器相结合的方法来进行泥石流监测,分析潜在泥石流雨量阈值,并在此基础上自动连续监测,从而达到泥石流预警的目的.更多的学者则致力于预警方法模型的研究,刘樑等<sup>[8]</sup>运用定性定量的综合预警模型来解决突发事件发展中演化路径的无规律性、非线性以及指标难以量化等问题;钟铭<sup>[9]</sup>在对瓦斯参量多传感器数据监测的基础上,提出了基于模糊数据融合的煤矿瓦斯预警模型;陈淑娟<sup>[10]</sup>对传感器采集到的信息运用证据推理方法进行融合,并将该方法引入到火灾探测危险预警系统中,通过融合一氧化碳、二氧化碳浓度的变化率及温度等数据参数,可以准确地掌握一氧化碳的浓度变化是一氧化碳泄漏还是火灾产生所导致的;张自欣等<sup>[11]</sup>针对突发事件的预警,结合证据推理方法的优点,构建了突发事件的预警模型,该模型是在获得某一时刻精确预警信息的基础上对突发事件进行预警.

突发事件预警问题通常会用到大量的预警信息,预警信息的可获得性会直接影响到预警结果的可参考性.而实际应用中,预警信息却存在不充分、不确定及动态性等特征.因此,突发事件预警方法应该考虑现实生活中预警信息的这些特征.然而,在已有的突发事件预警方法模型研究中<sup>[6-9]</sup>,却没有将预警信息的不确定性和预警信息的动态性等特征考虑在内.证据推理方法中的信度函数能很好地描述证据中的未知成分,对不确定性问题的描述更加接近人的思维惯性,而证据合成规则能够较好地处理多个不确定信息的合成问题<sup>[12]</sup>.基于证据推理的优点,针对以上不足,同时考虑突发事件发生前预警信息的不确定性和动态性等特征,本文提出区间信息类型下的突发事件动态预警方法.

### 1 证据推理

证据推理方法的一个最显著的特征是能够用分布模型结构处理精确数据和未知数据,用证据合成规则来集结完全信息或不完全信息.本小节将简单介绍证据推理的相关内容.

#### 1.1 证据推理简介

Dempster<sup>[13]</sup>首次提出证据理论,并由Shafer<sup>[14]</sup>对其进行了扩充和完善,证据推理由此产生,因此又称为D-S理论或简称为DST.到目前为止,证据推理已经广泛应用于多属性决策分析、人工智能、数据库与知识挖掘、信息融合、审计风险评价等<sup>[15-24]</sup>各个领域.

**定义1** 设  $H = \{H_1, H_2, \dots, H_N\}$  为识别框架,

若集函数  $m : 2^H \rightarrow [0, 1]$ , 满足

$$m(\Phi) = 0, \tag{1}$$

$$\sum_{A \subseteq H} m(A) = 1, \tag{2}$$

则称  $m$  为  $H$  上的基本可信度分配(BPA),简称mass函数.其中: $\Phi$ 为空集, $A$ 为 $H$ 中的任意子集, $2^H$ 为 $H$ 的幂集,包含了 $H$ 的所有子集,即

$$2^H = \{\Phi, \{H_1\}, \dots, \{H_N\}, \dots, \{H_1, H_2\}, \dots, \{H_1, H_N\}, \dots, H\}. \tag{3}$$

$m(A)$ 所分配的概率称为 $A$ 的基本概率分配,代表了证据对 $A$ 为真的支持程度.所有子集的分配概率之和为1,空集不分配概率.分配给 $H$ 的概率 $m(H)$ 称为全局未知程度.对于 $\forall A \subseteq H$ ,若 $m(A) > 0$ ,则称 $A$ 为 $m$ 的焦元,所有相关焦元的集合称为证据体系.

**定义2** 设 $H$ 为识别框架, $m : 2^H \rightarrow [0, 1]$ 为框架 $H$ 上的基本可信度分配函数,则

$$\text{Bel}(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B). \tag{4}$$

其中: $\text{Bel}(A)$ 为信度函数, $A, B$ 分别为 $H$ 的子集.

设 $m_1, m_2, \dots, m_n$ 为识别框架 $H$ 上的 $n$ 个基本可信度分配函数,其正交和表示为 $m = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n$ ,其中 $m_1$ 和 $m_2$ 为任意两个基本可信度分配函数.Dempster组合规则<sup>[16]</sup>是证据推理方法中最重要的部分,其证据融合的方法如下:

$$[m_1 \oplus m_2](C) = \begin{cases} 0, & C = \Phi; \\ \frac{\sum_{A \cap B = C} m_1(A)m_2(B)}{1 - \sum_{A \cap B = \Phi} m_1(A)m_2(B)}, & C \neq \Phi. \end{cases} \tag{5}$$

其中: $A$ 和 $B$ 都是焦元, $[m_1 \oplus m_2](C)$ 是合成后的基本概率分配(BPA).通常情况下,用 $k$ 代表分母 $1 - \sum_{A \cap B = \Phi} m_1(A)m_2(B)$ ,称为规范化因子,

$\sum_{A \cap B = \Phi} m_1(A)m_2(B)$ 表示证据之间的冲突程度.

Dempster组合规则满足以下特征<sup>[17]</sup>:

交换性: $m_1 \oplus m_2 = m_2 \oplus m_1$ ;

结合性: $(m_1 \oplus m_2) \oplus m_3 = m_1 \oplus (m_2 \oplus m_3)$ .

交换性和结合性的存在可以使多个证据以任何顺序进行成对融合.

#### 1.2 置信度构建

在现有的研究中,证据推理方法中置信度的获得通常有两种方式,一种是由专家直接给出,一种是由计算获得.

1)由专家直接给出.例如Yang等<sup>[18]</sup>在用证据推理解决不确定性多属性决策问题时,所用的一个

例子. 一个专家在判断某一机器的性能时, 认为该机器的性能有70%可以被评“好”, 30%可以被评“非常好”, 其中70%和30%就是由专家直接给出的置信度. 又如Lee等<sup>[25]</sup>在介绍区间证据集结方法的文章中所用的肺炎诊断的例子. 肺炎通常由3种原因 {Pneumococcus, Legionella, Klebsiella} 引起, 为了便于记忆, 作者将识别框架定义为  $H = \{P, L, K\}$ . 以下是两个医生对一肺炎病例起因的判断:

$$\begin{aligned} m_1(\{P\}) &= [0.5, 0.8], \\ m_1(\{L, K\}) &= [0.3, 0.4], \\ m_1(H) &= [0.2, 0.5]; \\ m_2(\{P, L\}) &= [0.4, 0.6], \\ m_2(\{L, K\}) &= [0.3, 0.5], \\ m_2(H) &= [0.3, 0.4]. \end{aligned}$$

类似 [0.5, 0.8] 的区间数据就是由专家直接给出的区间置信度.

2) 由计算获得. Wang等<sup>[26]</sup>给出的置信度和区间置信度的计算方法如下:

识别框架为  $H = \{H_1, H_2, \dots, H_N\}$ , 第  $i$  个指标在每个评价等级上的标准为

$$Y_{n,i} = \{Y_{1,i}, Y_{2,i}, \dots, Y_{N,i}\},$$

第  $i$  个指标在每个评价等级上的置信度为

$$\beta_{n,i} = \{\beta_{1,i}, \beta_{2,i}, \dots, \beta_{N,i}\},$$

第  $i$  个指标在每个评价等级上的区间置信度为

$$\begin{aligned} [\beta_{n,i}^-, \beta_{n,i}^+] &= \\ & \{[\beta_{1,i}^-, \beta_{1,i}^+], [\beta_{2,i}^-, \beta_{2,i}^+], \dots, [\beta_{N,i}^-, \beta_{N,i}^+]\}. \end{aligned}$$

如果第  $i$  个指标的监测值为精确值  $y_i$ , 且  $Y_{n,i} \leq y_i \leq Y_{n+1,i}$ , 则置信度为

$$\begin{aligned} \beta_{n,i} &= \frac{Y_{n+1,i} - y_i}{Y_{n+1,i} - Y_{n,i}}, \\ \beta_{n+1,i} &= \frac{y_i - Y_{n,i}}{Y_{n+1,i} - Y_{n,i}}. \end{aligned}$$

如果第  $i$  个指标的监测值为区间值  $[y_i^-, y_i^+]$ , 且  $Y_{n,i} \leq y_i^- \leq y_i^+ \leq Y_{n+1,i}$ , 则区间置信度为

$$\begin{aligned} \beta_{n,i}^- &= \frac{Y_{n+1,i} - y_i^+}{Y_{n+1,i} - Y_{n,i}}, \\ \beta_{n,i}^+ &= \frac{Y_{n+1,i} - y_i^-}{Y_{n+1,i} - Y_{n,i}}, \\ \beta_{n+1,i}^- &= \frac{y_i^- - Y_{n,i}}{Y_{n+1,i} - Y_{n,i}}, \\ \beta_{n+1,i}^+ &= \frac{y_i^+ - Y_{n,i}}{Y_{n+1,i} - Y_{n,i}}. \end{aligned}$$

置信度的第1种获取方式往往在指标或属性监测值难以获取时由专家直接给出. 这种方式得到的置信度往往具有较大的主观性, 且会受到专家专业知识的限制. 置信度的第2种获取方式比较客观, 但会受到指标或属性监测值的可获得性的限制. 另外, 在第2种情况下, 评价等级标准  $Y_{n,i}$  是精确数, 但精确数在现实中具有一定的局限性, 不能准确、全面地定义识别框架, 因此本文中的评价等级标准将采用区间形式, 本文将在接下来的第二部分进行详细介绍.

## 2 基于证据推理的突发事件预警方法

基于证据推理的突发事件预警主要包括以下3个部分, 分别是: 突发事件预警问题描述、模型的信度构建及证据融合.

### 2.1 突发事件预警问题描述

在本文中用  $O$  表示突发事件预警对象, 假设  $O$  有  $m$  个预警指标, 用  $C_i$  表示,  $C_i = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ . 在运用证据推理对预警对象  $O$  进行预警时, 需要针对所有预警指标建立统一全面的识别框架. 识别框架为  $H$ , 记为  $H = \{H_1, H_2, \dots, H_N\}$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ , 其中  $H_1, H_2, \dots, H_N$  是相互独立的.

为了更贴合实际, 本文将采取区间形式的评价等级标准, 因为  $H_1, H_2, \dots, H_N$  是相互独立的, 所以采用半闭半开区间来表示评价等级标准. 突发事件预警对象  $O$  的第  $i$  个指标在每个评价等级上的评价等级标准记为

$$\begin{aligned} [Y_{n,i}^-, Y_{n,i}^+] &= \\ & \{[Y_{1,i}^-, Y_{1,i}^+], [Y_{2,i}^-, Y_{2,i}^+], \dots, [Y_{N,i}^-, Y_{N,i}^+]\}, \\ & i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned}$$

设预警对象  $O$  的第  $i$  个预警指标在某一时刻的监测值为  $y_i$ , 但某一时刻的监测值具有一定的局限性, 不能很好地反应预警对象  $O$  所处的安全状态. 因此, 本文采用第  $i$  个预警指标在  $t_i \sim t_{i+1}$  时间段内的实时监测数据变化范围  $[y_i^-, y_i^+]$  来对预警对象  $O$  在该时段的安全状态进行预警, 其中  $0 \leq y_i^- \leq y_i^+, i = 1, 2, \dots, m$ .

### 2.2 突发事件预警模型的信度构建

1)  $[y_i^-, y_i^+]$  与  $[Y_{n,i}^-, Y_{n,i}^+]$  的位置关系.

$t_i \sim t_{i+1}$  时间段内的实时监测数据变化范围  $[y_i^-, y_i^+]$  与评价等级标准  $[Y_{n,i}^-, Y_{n,i}^+]$  的关系有3种类型, 如表1所示.

表1  $[y_i^-, y_i^+]$  与  $[Y_{n,i}^-, Y_{n,i}^+]$  的不同类型关系

类型	位置关系
类型1	$Y_{n,i}^- \leq y_i^- \leq y_i^+ < Y_{n,i}^+$
类型2	$Y_{(n-1),i}^- \leq y_i^- < Y_{(n-1),i}^+, Y_{n,i}^- \leq y_i^+ < Y_{n,i}^+$
类型3	$Y_{(n-1),i}^- \leq y_i^- < Y_{(n-1),i}^+, Y_{(n+1),i}^- \leq y_i^+ < Y_{(n+1),i}^+$

2) 基本置信度分配,

设  $\beta_{n,i}$  为基本置信度, 表示预警对象  $O$  的第  $i$  个预警指标分配到第  $n$  个评价等级上的置信度. 在求解基本置信度  $\beta_{n,i}$  的过程中, 针对  $[y_i^-, y_i^+]$  与  $[Y_{n,i}^-, Y_{n,i}^+]$  之间的3种关系类型, 其求解过程分别如下:

i) 当  $[y_i^-, y_i^+] \subseteq [Y_{n,i}^-, Y_{n,i}^+]$ , 即  $Y_{n,i}^- \leq y_i^- \leq y_i^+ < Y_{n,i}^+$  时, 有

$$\beta_{n,i} = 1, \tag{6}$$

也就是说, 第  $i$  个预警指标分配到第  $n$  个评价等级上的基本置信度为1.

ii) 当  $y_i^- \in [Y_{(n-1),i}^-, Y_{(n-1),i}^+], y_i^+ \in [Y_{n,i}^-, Y_{n,i}^+]$ , 即  $Y_{(n-1),i}^- \leq y_i^- < Y_{(n-1),i}^+, Y_{n,i}^- \leq y_i^+ < Y_{n,i}^+$  时, 有

$$\begin{aligned} \beta_{(n-1)i} &= \frac{Y_{(n-1),i}^+ - y_i^-}{y_i^+ - y_i^-}, \\ \beta_{n,i} &= \frac{y_i^+ - Y_{n,i}^-}{y_i^+ - y_i^-}, \end{aligned} \tag{7}$$

其中  $\beta_{(n-1)i} + \beta_{n,i} = 1$ . 也就是说, 第  $i$  个预警指标的基本置信度分配到了第  $n-1$  个和第  $n$  个评价等级上.

iii) 当  $y_i^- \in [Y_{(n-1),i}^-, Y_{(n-1),i}^+], y_i^+ \in [Y_{(n+1),i}^-, Y_{(n+1),i}^+]$ , 即  $Y_{(n-1),i}^- \leq y_i^- < Y_{(n-1),i}^+, Y_{(n+1),i}^- \leq y_i^+ < Y_{(n+1),i}^+$  时, 有

$$\begin{cases} \beta_{(n-1)i} = \frac{Y_{(n-1),i}^+ - y_i^-}{y_i^+ - y_i^-}, \\ \beta_{(n)i} = \frac{Y_{n,i}^+ - Y_{n,i}^-}{y_i^+ - y_i^-}, \\ \beta_{(n+1)i} = \frac{y_i^+ - Y_{(n+1),i}^-}{y_i^+ - y_i^-}, \end{cases} \tag{8}$$

其中  $\beta_{(n-1),i} + \beta_{n,i} + \beta_{(n+1),i} = 1$ . 也就是说, 第  $i$  个预警指标的基本置信度分配到了第  $n-1$  个、第  $n$  个和第  $n+1$  个评价等级上.

2.3 突发事件预警模型的证据融合

设  $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}$  为预警对象  $O$  的预警指标的相对权重, 其中  $\omega_i$  为第  $i$  个预警指标的权重,  $0 \leq \omega_i \leq 1, \sum_{i=1}^m \omega_i = 1, i = 1, 2, \dots, m$ .

突发事件预警模型的证据融合步骤如下.

Step 1: 根据突发事件预警对象的各预警指标  $C_i$  在  $t_i \sim t_{i+1}$  时刻时间段内的监测数据  $[y_i^-, y_i^+]$ , 运用式(6)~(8)计算各预警指标在不同评价等级上的基本置信度  $\beta_{n,i}$ .

Step 2: 用下面公式将各预警指标  $C_i$  的基本置信度转化为对应的基本mass函数:

$$\begin{aligned} m(H_n|C_i) &= w_i \beta_{n,i}, \\ i &= 1, 2, \dots, m, n = 1, 2, \dots, N; \end{aligned} \tag{9}$$

$$m(H|C_i) = 1 - \sum_{n=1}^N m(H_n|C_i) = 1 - w_i \sum_{n=1}^N \beta_{n,i}; \tag{10}$$

$$\bar{m}(H|C_i) = 1 - w_i; \tag{11}$$

$$\tilde{m}(H|C_i) = w_i \left( 1 - \sum_{n=1}^N \beta_{n,i} \right); \tag{12}$$

$$m(H|C_i) = \bar{m}(H|C_i) + \tilde{m}(H|C_i). \tag{13}$$

其中  $m(H|C_i)$  为各预警指标的全局基本概率, 是由判断未知  $\tilde{m}(H|C_i)$  和权重未知  $\bar{m}(H|C_i)$  所构成.

Step 3: 利用证据推理的组合规则, 用下面公式对各预警指标  $C_i$  的基本mass函数进行合成, 得到合成后的置信度  $\beta_n$ :

$$\begin{aligned} \{H_n\} : m(H_n|C_i) &= \\ k \left[ \prod_{i=1}^m (m(H_n|C_i) + \bar{m}(H|C_i) + \right. \\ \left. \tilde{m}(H|C_i)) - \prod_{i=1}^m (\bar{m}(H|C_i) + \tilde{m}(H|C_i)) \right], \end{aligned} \tag{14}$$

$$\{H\} : \tilde{m}(H|C_i) = \tag{15}$$

$$k \left[ \prod_{i=1}^m (\bar{m}(H|C_i) + \tilde{m}(H|C_i)) - \prod_{i=1}^m \bar{m}(H|C_i) \right], \tag{16}$$

$$\{H\} : \bar{m}(H|C_i) = k \left[ \prod_{i=1}^m \bar{m}(H|C_i) \right], \tag{17}$$

$$k = \left[ \sum_{n=1}^N \prod_{i=1}^m (m(H_n|C_i) + \bar{m}(H|C_i) + \tilde{m}(H|C_i)) - (N-1) \prod_{i=1}^m (\bar{m}(H|C_i) + \tilde{m}(H|C_i)) \right]^{-1}, \quad (18)$$

$$\{H_n\} : \beta_n = \frac{m(H_n|C_i)}{1 - \bar{m}(H|C_i)}, \quad (19)$$

$$\{H\} : \beta_H = \frac{\tilde{m}(H|C_i)}{1 - \bar{m}(H|C_i)}. \quad (20)$$

Step 4: 根据最终监测数据  $[y_i^-, y_i^+]$  在各个评价等级  $H_n$  上的置信度  $\beta_n$  的大小来判断突发事件预警对象  $O$  所处的安全状态, 以达到预警目的.

如果突发事件预警对象  $O$  含有多级预警指标, 则需要先按照 Step 1 ~ Step 3 对最末级指标进行合成, 然后按照 Step 2 和 Step 3 依次逆向逐级合成各级指标, 直至得到最终的置信度  $\beta_n$ .

为达到连续动态预警的目标, 可在获得  $t_{i+1} \sim t_{i+2}$  时间段内区间预警信息的基础上, 按照上述步骤, 获得预警对象在  $t_{i+1} \sim t_{i+2}$  时间段内的安全状态. 同理可实现后续时间段内的预警.

### 3 数据实例

以某国有煤矿企业  $t_i \sim t_{i+1}$  时间段内安全生产状态的数据来验证所提预警方法的合理性和有效性.

#### 3.1 煤矿事故预警识别框架

运用证据推理对煤矿事故进行预警, 需要针对所有预警指标建立统一的识别框架. 参考《国家煤矿安全质量标准化标准》, 本文将矿井安全生产风险分为5个评价等级, 识别框架为  $H$ , 记为  $H = \{H_1, H_2, H_3, H_4, H_5\}$ , 见表2.

表2 煤矿事故预警模型的评价等级

评价等级	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$
评价等级描述	安全	轻度危险	中度危险	重度危险	高度危险

#### 3.2 煤矿事故预警指标体系

本文所采用的指标是参考《煤矿地质勘探规范》、《国家煤矿安全质量标准化标准》及《煤矿安全规程》等规章制度及已有研究<sup>[27-28]</sup>而构建的, 具体如下:

用  $C_i$  表示一级预警指标, 记为  $C_i = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}, i = 1, 2, \dots, m$ ;

用  $\omega_i$  表示各一级预警指标的权重, 记为  $\omega_i = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}, i = 1, 2, \dots, m$ ;

用  $C_{ix}$  表示二级预警指标, 记为  $C_{ix} = \{C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{ix}\}, i = 1, 2, \dots, m, x = 1, 2, \dots, X$ ;

用  $\omega_{ix}$  表示各二级预警指标权重, 记为  $\omega_{ix} = \{\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{ix}\}, i = 1, 2, \dots, m, x = 1, 2, \dots, X$ ;

表3 煤矿事故预警指标

一级预警指标	二级预警指标
煤矿固有风险 ( $C_1$ )	平均瓦斯涌出量 ( $C_{11}$ )
	矿井正常涌出量 ( $C_{12}$ )
	单位面积断层条数 ( $C_{13}$ )
	矿井平均断层落差 ( $C_{14}$ )
人力资源 ( $C_2$ )	大专及以上学历所占比例 ( $C_{21}$ )
	技术人才比重 ( $C_{22}$ )
	人力资源利用效率 ( $C_{23}$ )
	人力资源投入 ( $C_{24}$ )
安全投入与效率 ( $C_3$ )	采煤机械化程度 ( $C_{31}$ )
	研发投入与营业收入 ( $C_{32}$ )
	吨煤安全投入 ( $C_{33}$ )
安全规章制度与执行 ( $C_4$ )	安全管理制度完善程度 ( $C_{41}$ )
	安全违规比重 ( $C_{42}$ )

本文根据现有研究<sup>[27-28]</sup>和相关煤矿制度, 将该煤矿事故预警中各二级预警指标的不同评价等级标准  $[Y_{n,i}^-, Y_{n,i}^+]$  均取全国平均水平, 见表4, “-”代表此评价等级无对应取值.

表4 各预警指标的不同等价等级标准

	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$	
$C_1$	$C_{11}$	[0,4.0]	[4.0,8.0]	[8.0,10]	[10,40]	[40,60]
	$C_{12}$	[0,20]	[20,180]	[180,600]	[600,1200]	[1200,2000]
	$C_{13}$	[0,0.5]	[0.5,1.0]	[1.0,1.5]	[1.5,2.0]	[2.0,3.0]
	$C_{14}$	[0,0.8]	[0.8,1.0]	[1.0,1.3]	[1.3,1.5]	[1.5,3.0]
$C_2$	$C_{21}$	[0.16,1.0]	[0.1,0.16]	[0.05,0.1]	[0,0.05]	-
	$C_{22}$	[0.3,1.0]	[0.16,0.3]	[0.09,0.16]	[0,0.09]	-
	$C_{23}$	[0.25,0.5]	[0.14,0.25]	[0.1,0.14]	[0,0.1]	-
	$C_{24}$	[1.15,2.0]	[0.45,1.15]	[0.13,0.45]	[0,0.13]	-
$C_3$	$C_{31}$	[0.95,1.0]	[0.84,0.95]	[0.70,0.84]	[0,0.70]	-
	$C_{32}$	[0.03,0.05]	[0.025,0.03]	[0.009,0.025]	[0,0.09]	-
	$C_{33}$	[29,35]	[16,29]	[5,16]	[0,5]	-
$C_4$	$C_{41}$	[0.82,1.0]	[0.49,0.82]	[0.16,0.49]	[0,0.16]	-
	$C_{42}$	[0,0.17]	[0.17,0.52]	[0.52,0.84]	[0.84,1.0]	-

针对不同指标, 在  $t_1 \sim t_2$  时间段内的监测值区间  $[y_i^-, y_i^+]$ , 如表5所示.

表5 各预警指标在  $t_1 \sim t_2$  时间段内的监测值区间

	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{21}$
$[y_i^-, y_i^+]$	[7,11]	[100,170]	[0.7,1.1]	[0.8,1.1]	[0.15,0.17]
	$C_{22}$	$C_{23}$	$C_{24}$	$C_{31}$	$C_{32}$
$[y_i^-, y_i^+]$	0.32	[0.18,0.3]	[0.11,0.98]	[0.75,0.89]	[0.02,0.028]
	$C_{33}$	$C_{41}$	$C_{42}$		
$[y_i^-, y_i^+]$	[4,13]	[0.6,0.75]	[0.48,0.6]		

由式(6)~(8)及表4和表5中的数据, 各二级预警指标在不同评价等级上的基本置信度如表6所示. 其中, 括号内所示的是各指标的相对权重, 是在借鉴文献<sup>[27-28]</sup>的基础上进行相应调整而得到的.

通过Step 2求得各二级预警指标的mass函数, 再在此基础上根据Step 3对各二级预警指标的mass函数进行合成, 各一级预警指标在不同评价等级上的置信度如表7所示.

表6  $t_1 \sim t_2$ 时刻不同指标的基本置信度

$C_i(\omega_i)$	$C_{ix}(\omega_{ix})$	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$
$C_1(0.0300)$	$C_{11}(0.3685)$	0	0.25	0.5	0.25	0
	$C_{12}(0.3211)$	0	1	0	0	0
	$C_{13}(0.1263)$	0	0.75	0.25	0	0
	$C_{14}(0.1840)$	0	0.67	0.33	0	0
$C_2(0.3365)$	$C_{21}(0.1578)$	0.5	0.5	0	0	0
	$C_{22}(0.3242)$	1	0	0	0	0
	$C_{23}(0.3365)$	0.42	0.58	0	0	0
	$C_{24}(0.3511)$	0	0.61	0.37	0.02	0
$C_3(0.1321)$	$C_{31}(0.3500)$	0	0.36	0.64	0	0
	$C_{32}(0.3500)$	0	0.96	0.04	0	0
	$C_{33}(0.3000)$	0	0	0.89	0.11	0
$C_4(0.5013)$	$C_{41}(0.5000)$	0	1	0	0	0
	$C_{42}(0.5000)$	0	0	0.33	0.67	0

表7  $t_1 \sim t_2$ 时刻各一级预警指标的置信度

$C_i(\omega_i)$	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$
$C_1(0.0300)$	0	0.6639	0.2521	0.084	0
$C_2(0.3365)$	0.4683	0.4291	0.0973	0.0053	0
$C_3(0.1321)$	0.315	0.1338	0.5225	0.0287	0
$C_4(0.5013)$	0	0.5	0.165	0.335	0

在表7的基础上,按照Step 2得到各一级预警指标的mass函数,再在此基础上按照Step 3对各一级预警指标的mass函数进行合成,最终得到能够反应该煤矿安全状态的置信度,见表8.

表8  $t_1 \sim t_2$ 时刻煤矿安全状态的置信度

	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$
$\beta_n$	0.1577	0.4808	0.1758	0.1857	0

由表8的数据可知,在由 $t_1 \sim t_2$ 时刻的区间信息分析得到的能够最终反应该煤矿安全状态的置信度中,最大为0.4808,说明在 $t_1 \sim t_2$ 时刻下该煤矿的安全状态处于 $H_2$ 评价等级,也就是说该煤矿处于轻度危险状态.

为实现连续、动态的预警,根据 $t_2 \sim t_3$ 时刻的监测数据对煤矿安全状态再次进行预警. $t_2 \sim t_3$ 时刻的监测数据如表9所示.

表9 各预警指标在 $t_2 \sim t_3$ 时段内的监测数据

	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{21}$
$[y_i^-, y_i^+]$	[9,19]	[100,300]	[0.9,1.6]	[0.8,1.1]	0.15
	$C_{22}$	$C_{23}$	$C_{24}$	$C_{31}$	$C_{32}$
$[y_i^-, y_i^+]$	0.32	[0.18,0.3]	[0.11,0.98]	[0.75,0.89]	[0.02,0.028]
	$C_{33}$	$C_{41}$	$C_{42}$		
$[y_i^-, y_i^+]$	[10,17]	[0.3,0.56]	[0.48,0.6]		

同理,按照Step 1计算 $t_2 \sim t_3$ 时刻各二级预警指标所对应的基本置信度,然后根据Step 2将各二级预警指标的基本置信度转化为mass函数,按照Step 3对所得的mass函数进行合成得到各一级预警指标的置信度,然后跳至Step 2、Step 3对一级预警指标的置信度进行转化并进行融合,直至得到最终能够反应该煤

矿安全状态的置信度,见表10.

表10  $t_2 \sim t_3$ 时刻煤矿安全状态的置信度

	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$
$\beta_n$	0.0606	0.2656	0.4065	0.176	0

由表10的数据可知,在由 $t_2 \sim t_3$ 时刻的区间信息分析得到的能够最终反映该煤矿安全状态的置信度中,最大为0.4065,这说明在 $t_2 \sim t_3$ 时刻该煤矿的安全状态处于 $H_3$ 评价等级,也就是说该煤矿处于中度危险状态.

根据两个连续时刻 $t_1 \sim t_2$ 、 $t_2 \sim t_3$ 时刻的预警结果,可以看出该煤矿的安全状态在不断恶化,决策者需要采取相应的措施来检查并消除煤矿生产中所存在的安全隐患,确保煤矿的生产安全,进而实现煤矿安全预警的目标.为节约篇幅,本文只考虑了两个连续的时段,类似的可以实现 $t_i \sim t_{i+1}$ 时刻的预警, $i = 3, 4, \dots, n$ ,以实现连续动态的预警,达到更加稳定、连续、可靠的预警效果(注:本文暂不考虑如何消除安全隐患等后续工作).

### 4 结 论

本文针对已有突发事件预警研究的不足及预警信息的不确定和动态性等特征,提出了区间信息类型下的动态突发事件预警方法.该方法建立了区间形式评价等级标准,并确立了基本置信度在区间评价等级标准下的计算方式.同时考虑了不同时间段内的区间信息,运用证据推理方法来判断预警对象在某一时间段内的安全状态,从而达到预警目标.最后,通过分析煤矿安全生产实例来验证所提方法的可行性、合理性和有效性.本文为突发事件预警工作的后续研究奠定了一定的基础,网络大数据环境下的突发事件预警将是后续研究的重点和方向.

### 参考文献(References)

- [1] 中国经济网.日熊本地震冲击九州地区经济-多行业受影响[EB/OL]. (2016-05-20)[2016-06-22]. [http://intl.ce.cn/sjjj/qy/201605/20/t20160520\\_11800130.shtml](http://intl.ce.cn/sjjj/qy/201605/20/t20160520_11800130.shtml). (China Economic Net. Kyushu economic impact of the Kumamoto Earthquake: Many industries affected[EB/OL]. (2016-05-20)[2016-06-22]. [http://intl.ce.cn/sjjj/qy/201605/20/t20160520\\_11800130.shtml](http://intl.ce.cn/sjjj/qy/201605/20/t20160520_11800130.shtml).)
- [2] 中国煤矿安全生产网. 安监总局通报新疆天利煤矿"4·3"重大顶板事故[EB/OL]. (2016-04-13)[2016-06-22]. <http://www.mkaq.org/html/2016/04/10/358647.shtml>. (China Coal Mine Production Safety Net. SAWS informed an "4·3" major roof accident in Tianli Coal mine in Xinjiang[EB/OL]. (2016-04-13)[2016-06-22]. <http://www.mkaq.org/html/2016/04/10/358647.shtml>.)
- [3] 中国煤矿安全生产网. 河南平顶山5.25特别重大火灾事故调查报告[EB/OL]. (2015-10-17)[2016-06-22]. <http://www.mkaq.org/html/2015/10/17/331578.shtml>.

- (China Coal Mine Production Safety Net. Pingdingshan 5.25 particularly serious fire accident investigation report[EB/OL]. (2015-10-17)[2016-06-22]. <http://www.mkaq.org/html/2015/10/17/331578.shtml>.)
- [4] Peng C, Yang J, Xue B, et al. Exploring the feasibility of earthquake early warning using records of the 2008 Wenchuan earthquake and its aftershocks[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, 57(7): 86-93.
- [5] Grasso V F, Beck J L, Manfredi G. Automated decision procedure for earthquake early warning[J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(12): 3455-3463.
- [6] Burchard-Levine A, Liu S, Vince F, et al. A hybrid evolutionary data driven model for river water quality early warning[J]. *J of Environmental Management*, 2014, 143(3): 8-16.
- [7] Huang J, Huang R, Ju N, et al. 3D WebGIS-based platform for debris flow early warning: A case study[J]. *Engineering Geology*, 2015, 197(7): 57-66.
- [8] 刘樑, 沈焱, 曹学艳, 等. 基于关键信息的非常规突发事件预警模型研究[J]. *管理评论*, 2012, 24(2): 166-176.  
(Liu L, Shen Y, Cao X Y, et al. Research on early-warning model of unconventional emergencies based on key information[J]. *Management Review*, 2012, 24(2): 166-176.)
- [9] 钟铭. 基于模糊数据融合的煤矿瓦斯预警研究[D]. 西安: 西安科技大学安全科学与工程学院, 2009: 6-7.  
(Zhong M. Research on early-warning of gas in coal mine based on fuzzy Ddta fusion[D]. Xi'an: College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, 2009: 6-7.)
- [10] 陈淑娟. 基于D-S证据理论的多传感器数据融合危险预警系统[D]. 北京: 北京化工大学信息科学与技术学院, 2010: 2-5.  
(Chen S J. The realization of fire early alarm system using multi-sensor data fusion technology based on D-S evidence theory[D]. Beijing: College of Information Science & Technology, Beijing University of Chemical Technology, 2010: 2-5.)
- [11] 张自欣, 王亮, 王应明, 等. 基于证据推理的突发事件预警方法研究[J]. *中国管理科学*, 2015, S1(1): 291-296.  
(Zhang Z X, Wang L, Wang Y M. et al. Study on the early-warning method of emergency event based on evidential reasoning[J]. *Chinese J of Management Science*, 2015, S1(1): 291-296.)
- [12] 张洪涛. 两维语义证据推理方法及其在科学基金评估中的应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学管理学院, 2013: 9-12.  
(Zhang H T. Research on two dimentional linguistic information based on evidential reasoning and it's application in scientific foundation project selection[D]. Hefei: School of Management Hefei University of Technology, Hefei University of Technology, 2013: 9-12.)
- [13] Dempster A P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping[J]. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1967, 38(2): 325-339.
- [14] Shafer G. A mathematical theory of evidence[M]. Princeton: Princeton University Press, 1976: 28-33.
- [15] Walley P. Measures of uncertainty in expert systems[J]. *Artificial Intelligence*, 1996, 83(1): 1-58.
- [16] Wang Y M, Yang J B, Xu D L. A preference aggregation method through the estimation of utility intervals[J]. *Computers & Operations Research*, 2005, 32(8): 2027-2049.
- [17] Yager R R. On the valuation of alternatives for decision-making under uncertainty[J]. *Int J of Intelligent Systems*, 2002, 17(7): 687-707.
- [18] Wang Y M, Yang J B, Xu D L. Environmental impact assessment using the evidential reasoning approach[J]. *European J of Operational Research*, 2006, 174(3): 1885-1913.
- [19] Wang Y M, Elhag T M S. Evidential reasoning approach for bridge condition assessment[J]. *Expert Systems with Applications*, 2008, 34(1): 689-699.
- [20] Yager R R. Decision making under dempster-shafer uncertainties[J]. *Int J of General System*, 1992, 20(3): 233-245.
- [21] Yang J B, Wang Y M, Xu D L, et al. The evidential reasoning approach for MADA under both probabilistic and fuzzy uncertainties[J]. *European J of Operational Research*, 2006, 171(1): 309-343.
- [22] Yager R R. Decision making using minimization of regret[J]. *Int J of Approximate Reasoning*, 2004, 36(2): 109-128.
- [23] Xu D L, Yang J B. Intelligent decision system for self-assessment[J]. *J of Multi-Criteria Decision Analysis*, 2003, 12(1): 43-60.
- [24] Xu D L, Yang J B, Wang Y M. The evidential reasoning approach for multi-attribute decision analysis under interval uncertainty[J]. *European J of Operational Research*, 2006, 174(3): 1914-1943.
- [25] Lee E S, Zhu Q. An interval dempster-shafer approach[J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 1992, 24(7): 89-95.
- [26] Wang Y M, Yang J B, Xu D L, et al. The evidential reasoning approach for multipule attribute decision analysis using interval belief degrees[J]. *European J of Operational Research* 2006, 175(1): 35-66.
- [27] 杨军. 煤矿安全风险评价与预警研究[D]. 徐州: 中国矿业大学安全工程学院, 2013.  
(Yang J. Study on appraisal and early-warning of safety risk of coal mines[D]. Xuzhou: School of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, 2013.)
- [28] 乔国厚. 煤矿安全风险综合评价与预警管理模式研究[D]. 武汉: 中国地质大学工程学院, 2013: 14-43.  
(Qiao G H. A study on the coal mine safety comprehensive evaluation and risk warning management mode[D]. Wuhan: Faculty of Engineering, China University of Geosciences, 2013: 14-43.)