

考虑时间序列的动态大群体应急决策方法

徐选华[†], 刘尚龙

(中南大学 商学院, 长沙 410083)

摘要: 针对专家权重和属性权重未知、阶段权重未知且与时间序列有关的动态大群体应急决策问题, 提出一种考虑时间序列的动态大群体应急决策方法. 首先, 提出一个考虑区间直觉模糊数犹豫度的距离公式, 定义区间直觉模糊数贴适度, 综合考虑贴适度 and 相似度, 用模糊聚类法对大群体专家偏好信息进行聚类; 其次, 基于现有区间直觉模糊熵公式的不足, 提出一个新的区间直觉模糊熵公式, 基于此公式考虑专家之间知识水平的差异和各个阶段偏好信息不具遗传性等特点, 计算得出专家在不同属性下的权重和属性在各阶段下的权重; 再次, 考虑时间序列对各阶段权重的影响, 构建相对熵模型, 对阶段权重进行合理确定, 进而利用加权平均算子得到整个决策过程中各方案的综合决策偏好; 然后, 利用区间直觉模糊数的得分函数和精确函数对方案进行排序, 选出最优方案; 最后, 通过与以往文献的方法对比分析验证所提出方法的有效性和优越性.

关键词: 时间序列; 模糊熵; 动态决策; 大群体; 应急决策

中图分类号: C934 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0088

引用格式: 徐选华, 刘尚龙. 考虑时间序列的动态大群体应急决策方法[J]. 控制与决策, 2020, 35(11): 2609-2618.

Dynamic large group emergency decision-making method considering time series

XU Xuan-hua[†], LIU Shang-long

(School of Business, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: This paper proposes a dynamic large group emergency decision-making method considering time series, aiming at the time-series related problem with unknown expert weight, attribute weight and stage weight. Firstly, a distance formula considering the hesitation degree of interval intuitionistic fuzzy numbers is proposed, and the approximation degree of interval intuitionistic fuzzy numbers is defined. Comprehensively considering the approximation degree and similarity, the preference information of large groups of experts is clustered using the fuzzy clustering method. Then, aiming at the shortage of the existing interval intuitionistic fuzzy entropy formula, a new interval intuitionistic fuzzy entropy formula is proposed. Based on this formula, considering the difference of knowledge level among experts and the non-heritability of preference information in each stage, the weights of experts under different attributes and that of attributes under different stages are calculated. Considering the influence of time series on the weight of each stage, the relative entropy model is constructed to determine the stage weights reasonably, and then the weighted average operator is used to obtain the comprehensive group preference of each program in the whole decision process. And the comprehensive group preferences of each scheme in the whole decision-making process are obtained by using the weighted average operator. The scheme is ranked by using the score function and the exact function of the interval intuitionistic fuzzy set, and the optimal scheme is selected. Finally, the validity and superiority of the proposed method are verified by comparing it with the methods in previous literatures.

Keywords: time series; fuzzy entropy; dynamic decision-making; large group; emergency decision-making

0 引言

近几年,我国突发事件的发生呈明显上升趋势,由于突发事件具有快速扩散性、衍生性、传导变异性、高破坏性等特征,在进行应急决策时,需要多个部门共同参与才能保证决策的准确性,这使得参与决策

的专家规模很大,具有大群体决策的特点^[1]. 如今,越来越多的决策问题牵涉到众多领域,小群体决策方法已不适应社会发展中复杂决策问题的需要^[2-3]. 很多学者开始对大群体决策进行研究^[4-7]. 由于大群体决策的复杂性、不确定性以及决策成员自身背景、知

收稿日期: 2019-01-18; 修回日期: 2019-05-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71671189, 71971217); 国家自然科学基金重点项目(71790615, 91846301).

[†]通讯作者. E-mail: xuxh@csu.edu.cn.

识、经验、环境的差异性导致决策者在决策过程中难以在短时间压力下对决策方案作出准确判断,往往以模糊数的形式表达自己的偏好^[8-9].然而,一般的模糊数不能对一个特定决策问题的所有信息进行广泛描述^[10],为此 Atanassov^[11]提出了直觉模糊集的概念来解决该问题,同时,Atanassov^[12]考虑了隶属度和非隶属度信息之后对直觉模糊集进行扩展,提出了区间直觉模糊集.由于区间直觉模糊数不仅可以很好地表达决策者偏好信息的不确定性,而且还能提高解决实际决策问题的能力,更加符合实际决策情景,为此本文使用区间直觉模糊数表示专家的决策偏好信息.

近年来,区间直觉模糊数的多属性群决策问题获得了越来越多的关注.专家权重、属性权重、排序方法是解决群决策问题的3个关键问题.为了处理多属性群决策问题,相关学者从以下3个方面进行了研究:

1) 专家权重的确定.专家权重的确定是群决策过程中一个重要环节,直接影响到整体决策结果的准确性.目前,国内外学者提出了很多新的计算专家权重的方法,如基于扩展TOPSIS的方法^[13-14]、基于距离或相似度的优化方法^[15-16]、基于投影的方法^[17-18]、基于一致性的方法^[7]、基于聚类的方法^[19]等.

2) 属性权重的确定.陈晓红等^[20]提出了一个新的区间直觉模糊熵对属性权重进行确定.高明美等^[21]提出改进的区间直觉模糊熵计算属性的权重.当属性权重不完全时,徐选华等^[4]建立了模糊-冲突熵模型来对属性权重进行确定. Jin等^[22]以得分函数最大化为线性规划模型对属性权重进行确定. Wan等^[23]提出一种以非一致性最小化和一致性最大化为目标的线性规划模型对属性权重进行确定.

3) 排序方法.徐泽水^[24]定义了区间直觉模糊数的得分函数与精确函数对方案进行排序. Wan^[25]提出一种基于可能性均值和变异系数的决策方法. Chen^[26]提出基于区间直觉模糊数的QUALIFLEX排序方法,用于确定最优方案. Tan^[27]提出了一种基于Choquet积分的TOPSIS决策方法.

以上研究为区间直觉模糊数的多属性群决策提供了重要参考,但对区间直觉模糊环境下的群决策研究大多集中在专家权重和属性权重的确定、方案排序、集结算子优化等方面.研究问题较少涉及到突发事件,研究对象以较小规模决策者参与的一般决策问题为主,且多针对单阶段静态决策问题的研究,对于具有大群体特征的多阶段动态应急决策研究涉及较少,鲜有在属性权重未知情况下合理确定大群体专家权重的研究.徐选华等^[28-29]提出了一种属性

权重和阶段权重未知的多阶段应急决策方法,但所提出的区间直觉模糊数距离测度公式未考虑犹豫度对距离的影响,忽略了专家知识水平和经验对专家权重的影响,忽略了各阶段下偏好信息不具有遗传性的特点.此外,高明美等^[21]认为文献[28]所参考文献[30]中区间直觉模糊熵公式取最值的充要条件不符合实际情况,从而影响属性权重的确定和最终决策结果.对此高明美等^[21]提出了新的区间直觉模糊熵公式,并对区间直觉模糊熵的公理化定义进行整合,使其符合实际情况.然而,该区间直觉模糊熵公式存在无法对某些模糊数比较大小的情况.

鉴于此,本文针对专家权重未知、属性权重未知、阶段权重未知且专家偏好信息表示为区间直觉模糊数的动态大群体应急决策,提出一个考虑区间直觉模糊数犹豫度的距离公式和一个改进的区间直觉模糊熵公式,同时重视不同阶段信息的时间差异,提出一种考虑时间序列的动态大群体应急决策方法.针对文献[28]距离公式的不足,提出一个考虑区间直觉模糊数犹豫度的距离公式,由此定义了区间直觉模糊数的贴近度.文献[19]认为,对决策者进行相似度计算时,要同时考虑“位置”的相似性和“方向”的相似性,因此本文综合考虑决策者“位置”的贴近度和“方向”的相似度对决策者相似关系的影响,用模糊聚类法对各阶段的专家偏好进行聚类.提出一种改进的区间直觉模糊熵公式,考虑专家知识水平和经验的差异对专家权重的影响和各个阶段下偏好信息不具备遗传性等特点,对每个属性下的专家权重和每个阶段下的属性权重进行求解.此外,通过聚集中专家的一致性水平确定聚集权重,进而得到不同阶段下各个方案的大群体偏好.同时,重视不同阶段信息的时间差异,构建相对熵模型合理确定阶段权重.最后,利用加权平均算子得到整个决策过程中各个方案的综合决策偏好,计算各方案的得分函数和精确函数并对其进行排序,确定最佳方案.

1 区间直觉模糊集的基本知识

定义1^[12] 设 X 是一个非空有限集合,称 $A = \{\langle x, \tilde{\mu}_A(x), \tilde{\nu}_A(x) \rangle | x \in X\}$ 为区间直觉模糊集,其中 $\tilde{\mu}_A(x) = [\mu_A^-(x), \mu_A^+(x)] \subset [0, 1]$, $\tilde{\nu}_A(x) = [\nu_A^-(x), \nu_A^+(x)] \subset [0, 1]$,区间数 $\tilde{\mu}_A(x)$ 和 $\tilde{\nu}_A(x)$ 分别表示 X 中元素 x 对于区间直觉模糊集 A 的隶属度和非隶属度.令 $\tilde{\pi}_A(x) = 1 - \tilde{\mu}_A(x) - \tilde{\nu}_A(x)$, $\pi_A^-(x) = 1 - \mu_A^+(x) - \nu_A^+(x)$, $\pi_A^+(x) = 1 - \mu_A^-(x) - \nu_A^-(x)$,称 $\tilde{\pi}_A(x)$ 为 X 中元素 x 属于 A 的犹豫度.

区间直觉模糊集的一般表示形式为 $\tilde{\alpha} = (\tilde{\mu}_\alpha(x), \tilde{\nu}_\alpha(x))$,简要表示为 $\tilde{\alpha}_j = ([a_j^L, a_j^U], [b_j^L, b_j^U])$,其中 $j =$

1, 2, \dots, N.

定义 2^[24] 设 $\tilde{\alpha}_j = ([a_j^L, a_j^U], [b_j^L, b_j^U])$ ($j = 1, 2, \dots, N$) 为一组区间直觉模糊数, 则有

$$\begin{aligned} \text{IIFWA}_w(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N) &= \sum_{j=1}^N w_j \tilde{\alpha}_j = \\ & \left(\left[1 - \prod_{j=1}^N (1 - a_j^L)^{w_j}, 1 - \prod_{j=1}^N (1 - a_j^U)^{w_j} \right], \right. \\ & \left. \left[\prod_{j=1}^N (b_j^L)^{w_j}, \prod_{j=1}^N (b_j^U)^{w_j} \right] \right). \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $w = (w_1, w_2, \dots, w_N)^T$ 为 $\tilde{\alpha}_j$ ($j = 1, 2, \dots, N$) 的权重向量, $w_j \in [0, 1]$ 且 $\sum_{j=1}^N w_j = 1$. 称 IIFWA 为区间直觉模糊数的加权平均算子.

定义 3^[24] 设 $\tilde{\alpha}_1 = ([a_1^L, a_1^U], [b_1^L, b_1^U])$ 和 $\tilde{\alpha}_2 = ([a_2^L, a_2^U], [b_2^L, b_2^U])$ 为任意两个区间直觉模糊数, 记得分函数 $R(\tilde{\alpha}_1) = \frac{a_1^L - b_1^L + a_1^U - b_1^U}{2}$ 、精确函数 $L(\tilde{\alpha}_1) = \frac{a_1^L + b_1^L + a_1^U + b_1^U}{2}$, 有:

- 1) 若 $R(\tilde{\alpha}_1) < R(\tilde{\alpha}_2)$, 则 $\tilde{\alpha}_1 < \tilde{\alpha}_2$;
- 2) 若 $R(\tilde{\alpha}_1) = R(\tilde{\alpha}_2)$: ①若 $H(\tilde{\alpha}_1) = H(\tilde{\alpha}_2)$, 则 $\tilde{\alpha}_1 = \tilde{\alpha}_2$; ②若 $H(\tilde{\alpha}_1) < H(\tilde{\alpha}_2)$, 则 $\tilde{\alpha}_1 < \tilde{\alpha}_2$.

定义 4^[31] 设 $\tilde{\alpha}_1$ 和 $\tilde{\alpha}_2$ 为任意两个区间直觉模糊数, $\tilde{\alpha}_1$ 和 $\tilde{\alpha}_2$ 的犹豫度分别为 $[\pi_1^L, \pi_1^U]$ 和 $[\pi_2^L, \pi_2^U]$, 其相似度记为 $K_{\text{IIFW}}(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2)$, 则 $K_{\text{IIFW}}(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2)$ 满足如下 3 条性质:

- 1) $K_{\text{IIFW}}(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2) \in [0, 1]$;
- 2) $K_{\text{IIFW}}(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2) = 1$, 当且仅当 $\tilde{\alpha}_1 = \tilde{\alpha}_2$;
- 3) $K_{\text{IIFW}}(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2) = K_{\text{IIFW}}(\tilde{\alpha}_2, \tilde{\alpha}_1)$, 其中

$$\begin{aligned} K_{\text{IIFW}}(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2) &= \\ & (a_1^L a_2^L + a_1^U a_2^U + b_1^L b_2^L + b_1^U b_2^U + \pi_1^L \pi_2^L + \pi_1^U \pi_2^U) / \\ & \sqrt{(a_1^L)^2 + (a_1^U)^2 + (b_1^L)^2 + (b_1^U)^2 + (\pi_1^L)^2 + (\pi_1^U)^2} \times \\ & \sqrt{(a_2^L)^2 + (a_2^U)^2 + (b_2^L)^2 + (b_2^U)^2 + (\pi_2^L)^2 + (\pi_2^U)^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

定义 5 设 $\tilde{\alpha}_1$ 和 $\tilde{\alpha}_2$ 为任意两个区间直觉模糊数, $\tilde{\alpha}_1$ 和 $\tilde{\alpha}_2$ 的犹豫度分别为 $[\pi_1^L, \pi_1^U]$ 和 $[\pi_2^L, \pi_2^U]$, 则 $\tilde{\alpha}_1$ 与 $\tilde{\alpha}_2$ 之间的距离定义为

$$D(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2) = \frac{\sum_{x=a,b,\pi} D(x_1^L, x_1^U, x_2^L, x_2^U)}{2\sqrt{2}}. \quad (3)$$

其中

$$D(x_1^L, x_1^U, x_2^L, x_2^U) = \sqrt{(x_1^L - x_2^L)^2 + (x_1^U - x_2^U)^2}.$$

易知, $D(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2)$ 满足以下 3 条性质:

- 1) 有界性, $0 \leq D(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2) \leq 1$;
- 2) 自反性, $D(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2) = 0$, 当且仅当 $\tilde{\alpha}_1 = \tilde{\alpha}_2$;

3) 对称性, $D(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2) = D(\tilde{\alpha}_2, \tilde{\alpha}_1)$.

定义 6^[21] 对于一个实值函数 $E: \text{IVIFSs}(X) \rightarrow [0, 1]$, 如果满足以下约束条件, 则称实值函数 E 为区间直觉模糊熵:

- 1) $E(\tilde{\alpha}) = 0 \Leftrightarrow \tilde{\alpha}$ 为分明集;
- 2) $E(\tilde{\alpha}) = 1 \Leftrightarrow \tilde{\alpha} = ([0, 0], [0, 0])$;
- 3) $E(\tilde{\alpha}) = E(\tilde{\alpha}^C)$;

4) 对于任意两个区间直觉模糊集 $\tilde{\alpha}_1$ 和 $\tilde{\alpha}_2$, 当 $a_2^L \leq b_2^L$ 、 $a_2^U \leq b_2^U$ 时, 有 $\tilde{\alpha}_1 \subseteq \tilde{\alpha}_2$, 或当 $a_2^L \geq b_2^L$ 、 $a_2^U \geq b_2^U$ 时, 有 $\tilde{\alpha}_2 \subseteq \tilde{\alpha}_1$, 则 $E(\tilde{\alpha}_1) \leq E(\tilde{\alpha}_2)$.

2 方法原理

2.1 问题描述

应急决策群体 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_M\}$ 由 M ($M > 11$ ^[32]) 个专家组成, e_i ($i = 1, 2, \dots, M$) 表示第 i 个专家; 决策阶段集合 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_S\}$, t_s ($s = 1, 2, \dots, S$) 表示第 s 个决策阶段; 方案集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_P\}$, x_l ($l = 1, 2, \dots, P$) 表示第 l 个应急方案; 应急方案的属性集合 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_N\}$, f_j ($j = 1, 2, \dots, N$) 表示第 j 个属性; $w^s = (w_1^s, w_2^s, \dots, w_N^s)^T$ 表示第 s 个决策阶段下 N 个属性的权重, w_j^s 表示第 s 个阶段第 j 个属性的权重, 有 $0 \leq w_j^s \leq 1$ 且 $\sum_{j=1}^N w_j^s = 1$; $w^* = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_S^*)^T$ 表示决策阶段权重, 满足 $0 \leq w_s^* \leq 1$ 且 $\sum_{s=1}^S w_s^* = 1$; $A_{ij}^{s_i} = [\alpha_{ij}^{s_i}]_{P \times N}$ 表示专家 e_i 在第 s 个阶段给出的偏好矩阵, $\tilde{\alpha}_{ij}^{s_i}$ 表示专家 e_i 在第 s 个阶段给出的应急方案 x_l 在属性 f_j 下的偏好值, $\tilde{A}_i^{s_i} = (\tilde{\alpha}_{i1}^{s_i}, \tilde{\alpha}_{i2}^{s_i}, \dots, \tilde{\alpha}_{iN}^{s_i})$ 表示专家 e_i 在第 s 个阶段给出的应急方案 x_l 在 N 个属性下的偏好矢量.

2.2 基于综合相似度的模糊聚类法

2.2.1 综合相似度

定义 7 设 $\tilde{A}_1 = (\tilde{\alpha}_{11}, \tilde{\alpha}_{12}, \dots, \tilde{\alpha}_{1N})$ 和 $\tilde{A}_2 = (\tilde{\alpha}_{21}, \tilde{\alpha}_{22}, \dots, \tilde{\alpha}_{2N})$ 为两个区间直觉模糊矢量, \tilde{A}_1 与 \tilde{A}_2 之间的贴进度为

$$\rho(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (1 - D(\tilde{\alpha}_{1j}, \tilde{\alpha}_{2j})). \quad (4)$$

易证明 $\rho(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2)$ 满足有界性、自反性和对称性. 由于贴进度是基于欧氏距离来描述模糊数“位置”之间的贴进程度, 相似度是基于余弦夹角来描述模糊数“方向”之间的相似度, 两者从两个完全不同的方面对模糊数的关系进行刻画, 不具有相互替换性. 换句话说, 贴进度不一定与相似度成正比, 同样相似度也不一定与贴进度成正比. 例如: 设区间直觉模糊数

$$\tilde{\alpha}_1 = ([0.471, 0.482], [0.410, 0.422]),$$

$$\tilde{\alpha}_2 = ([0.488, 0.500], [0, 0.385]),$$

$$\tilde{\alpha}_3 = ([0.587, 0.601], [0, 0.252]),$$

可得 $\tilde{\alpha}_1$ 、 $\tilde{\alpha}_2$ 的贴近度和相似度分别为 $\rho(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2) = 0.71$, $K_{\text{IVIFW}}(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2) = 0.81$; $\tilde{\alpha}_1$ 、 $\tilde{\alpha}_3$ 的贴近度和相似度分别为 $\rho(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_3) = 0.68$, $K_{\text{IVIFW}}(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_3) = 0.83$. 易知, $\rho(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2) > \rho(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_3)$, 但 $K_{\text{IVIFW}}(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2) < K_{\text{IVIFW}}(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_3)$. 因此, 本文认为综合区间直觉模糊数的贴近度和相似度可以更准确地刻画模糊数之间的相似关系. 同样的, 由定义4可得 \tilde{A}_1 与 \tilde{A}_2 之间的相似度为

$$K_{\text{IVIFW}}(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N K_{\text{IVIFW}}(\tilde{\alpha}_{1j}, \tilde{\alpha}_{2j}). \quad (5)$$

易证明 $K_{\text{IVIFW}}(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2)$ 满足有界性、自反性和对称性. 不妨设综合相似度为 $\phi(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2)$, 有

$$\begin{aligned} \phi(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2) = \\ \sigma \rho(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2) + (1 - \sigma) K_{\text{IVIFW}}(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2). \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可知, 可以通过控制系数 σ 调节贴近度和相似度对综合相似度的影响. 当 $0 \leq \sigma \leq 0.5$ 时, 重视“方向”上的相似度对综合相似度的影响; 当 $0.5 \leq \sigma \leq 1$ 时, 重视“位置”上的贴近程度对综合相似度的影响. 在实际决策中, 对于不同的决策问题和数据类型, 可以给定不同的 σ 值, 但一般情况下取 $\sigma = 0.5$.

易证明 $\phi(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2)$ 满足有界性、自反性和对称性.

2.2.2 基于综合相似度的模糊聚类法

设在第 s 个决策阶段, M 个决策专家对 l 个应急方案在 N 个属性下形成的大群体偏好集合为 Ω_l^s . 采用基于综合相似度的闭包模糊聚类法^[33] 对大群体 Ω_l^s 中的偏好进行聚类, 设定阈值 γ_l^s ($0 \leq \gamma_l^s \leq 1$), 当 $\phi(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2) \geq \gamma_l^s$ 时, 可以将 \tilde{A}_1 、 \tilde{A}_2 归为一类, 以此来确定第 s 阶段方案 x_l 下的聚集. 由于选取不同的阈值 γ_l^s 会导致不同的聚类效果, 需对阈值 γ_l^s 进行科学的选取, 参考文献[28]选取群体偏好一致性指标为最大时的阈值 γ_l^s , 限于篇幅, 此处不再赘述.

聚类后, 大群体 Ω_l^s 中的专家偏好被划分成 K_l^s 个聚集, 第 k ($k = 1, 2, \dots, K_l^s$) 个聚集 C_l^{sk} 中专家个数为 n_l^{sk} , 则 $\sum_{k=1, k \in \Omega_l^s}^{K_l^s} n_l^{sk} = M$.

2.3 确定专家权重和属性权重

2.3.1 区间直觉模糊熵改进

高明美等^[21] 在与国内外众多学者提出的区间直觉模糊熵公式进行对比分析后, 为了更加符合实际情况, 提出了一个满足定义6的区间直觉模糊熵

计算公式. 设 $\tilde{A} = (\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2, \dots, \tilde{\alpha}_N)$ 为区间直觉模糊矢量, $\tilde{\alpha}_j = ([a_j^L, a_j^U], [b_j^L, b_j^U])$, 犹豫度 $[\pi_j^L, \pi_j^U] = [1 - a_j^U - b_j^U, 1 - a_j^L - b_j^L]$, $j = 1, 2, \dots, N$, 则 \tilde{A} 的模糊熵表示为

$$\begin{aligned} E_G(\tilde{A}) = \\ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{\{4 - [|a_j^L - b_j^L| + |a_j^U - b_j^U|]^2 + [\pi_j^L + \pi_j^U]^2\}}{8}. \end{aligned} \quad (7)$$

然而, 式(7)存在对某些模糊数无法比较大小的缺陷, 如: 设 $\tilde{\alpha}_1 = ([0.5, 0.5], [0.5, 0.5])$, $\tilde{\alpha}_2 = ([0.5, 0.5], [0.3, 0.3])$, 利用式(7)计算可得 $E_G(\tilde{\alpha}_1) = 0.5$, $E_G(\tilde{\alpha}_2) = 0.5$, 此时无法判断 $\tilde{\alpha}_1$ 和 $\tilde{\alpha}_2$ 熵的大小. 基于此, 本文通过考虑区间直觉模糊数的直觉性和模糊性, 提出一个新的且满足定义6的区间直觉模糊熵公式, 弥补式(7)在某些情况下无法比较熵大小的缺陷, 更加有效地描述了区间直觉模糊数的不确定程度和模糊程度.

设 $\tilde{A} = (\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2, \dots, \tilde{\alpha}_N)$ 为区间直觉模糊矢量, $\tilde{\alpha}_j = ([a_j^L, a_j^U], [b_j^L, b_j^U])$, 犹豫度 $[\pi_j^L, \pi_j^U] = [1 - a_j^U - b_j^U, 1 - a_j^L - b_j^L]$, $j = 1, 2, \dots, N$, 则 \tilde{A} 的模糊熵表示为

$$\begin{aligned} E_X(\tilde{A}) = \\ \frac{1}{P} \sum_{l=1}^P \sqrt{\frac{(f_{Alj}^s)^2 + (\pi_{lj}^{sL})^2 + (\pi_{lj}^{sU})^2}{3}}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $f_{Alj}^s = 1 - \frac{|a_{lj}^L - b_{lj}^L| + |a_{lj}^U - b_{lj}^U|}{2}$ 为区间直觉模糊数 $\tilde{\alpha}_j$ 在模糊矢量 \tilde{A} 中的模糊度. 式(8)综合考虑了区间直觉模糊数的模糊度和犹豫度. 对式(8)进行证明, 只需证明式(8)满足定义6中的4个条件即可, 限于篇幅, 证明过程略. 利用式(8)对 $\tilde{\alpha}_1$ 、 $\tilde{\alpha}_2$ 的熵计算可得 $E_x(\tilde{\alpha}_1) = 0.58$ 、 $E_x(\tilde{\alpha}_2) = 0.49$, 此时可以判断 $\tilde{\alpha}_1$ 和 $\tilde{\alpha}_2$ 熵的大小, 即 $E_x(\tilde{\alpha}_1) > E_x(\tilde{\alpha}_2)$. 由此可见, 式(8)可以解决某些特殊情况下式(7)无法判断熵大小的问题, 具有一定的优越性.

2.3.2 确定专家权重

现有专家权重的确定方法大多是在已知属性权重情况下进行的, 或是通过聚类方法确定的, 在属性权重未知并考虑专家知识水平和经验差异的情况下, 对不同属性下专家权重进行确定的研究较少. 因此, 本文通过考虑专家在不同属性下知识和经验水平的差异, 利用改进的区间直觉模糊熵确定专家权重. 由于区间直觉模糊熵是对专家所给偏好信息模糊程度的度量, 包含了专家所给偏好的犹豫程度和模糊程度, 专家在属性 f_j 下针对 x_l 方案的权重取决于专家

所给偏好信息的犹豫程度和模糊程度. 专家所给偏好的模糊熵越大, 犹豫程度和模糊程度越大, 知识水平和经验水平越低, 权重应越小. 本文通过计算聚集专家针对方案 x_l 在属性 f_j 下偏好信息的模糊熵大小对专家权重进行确定. 设大群体 Ω_l^s 中第 k ($k = 1, 2, \dots, K_l^s$) 个聚集 C_l^{sk} 中专家个数为 n_l^{sk} , 则聚集 C_l^{sk} 中专家 e_i 针对方案 x_l 在属性 f_j 下的权重为

$$\lambda_{ij}^{sk} = \frac{1 - E_X(\tilde{\alpha}_{lj}^{sk})}{n_l^{sk} - \sum_{i=1, i \in C_l^{sk}} E_X(\tilde{\alpha}_{lj}^{sk})}, \quad i \in C_l^{sk}. \quad (9)$$

在求得大群体 Ω_l^s 中各个聚集的专家权重后, 利用 IIFWA 算子将各个聚集的专家偏好信息进行集结, 则大群体 Ω_l^s 中第 k ($k = 1, 2, \dots, K_l^s$) 个聚集针对方案 x_l 在属性 f_j 下的偏好集结为

$$\begin{aligned} \tilde{y}_{lj}^{sk} = & \left(\left[1 - \prod_{i=1}^{n_l^{sk}} (1 - a_{ij}^{skL})^{\lambda_{ij}^{sk}}, 1 - \prod_{i=1}^{n_l^{sk}} (1 - a_{ij}^{skU})^{\lambda_{ij}^{sk}} \right], \right. \\ & \left. [(b_{ij}^{skL})^{\lambda_{ij}^{sk}}, (b_{ij}^{skU})^{\lambda_{ij}^{sk}}] \right). \end{aligned} \quad (10)$$

2.3.3 确定属性权重

设大群体 Ω_l^s 中共有 K_l^s 个聚集, 第 k ($k = 1, 2, \dots, K_l^s$) 个聚集 C_l^{sk} 中专家个数为 n_l^{sk} , 则聚集 C_l^{sk} 的偏好一致性指标定义为

$$\phi_l^{sk} = \frac{2}{n_l^{sk}(n_l^{sk} - 1)} \sum_{\substack{i_1, i_2=1, i_1 > i_2 \\ i_1, i_2 \in C_l^{sk}}} \phi(\tilde{A}_l^{si_1}, \tilde{A}_l^{si_2}). \quad (11)$$

ϕ_l^{sk} 越大, 聚集 C_l^{sk} 的偏好一致性水平越高, 聚集内部的冲突水平越低, 聚集的权重应越高. 因此, 可用聚集的偏好一致性水平对聚集权重进行确定, 聚集权重计算如下:

$$\lambda_l^{sk} = \frac{\phi_l^{sk}}{\sum_{k=1}^{K_l^s} \phi_l^{sk}}. \quad (12)$$

利用 IIFWA 算子对大群体 Ω_l^s 中各个聚集进行集结, 得到各个属性的大群体偏好为

$$\begin{aligned} \tilde{Y}_l^s = & \text{IIFWA}_w(\tilde{y}_{l1}^s, \tilde{y}_{l2}^s, \dots, \tilde{y}_{lN}^s) = \\ & \left(\sum_{k=1}^{K_l^s} \lambda_l^{sk} \cdot \tilde{y}_{l1}^{sk}, \sum_{k=1}^{K_l^s} \lambda_l^{sk} \cdot \tilde{y}_{l2}^{sk}, \dots, \sum_{k=1}^{K_l^s} \lambda_l^{sk} \cdot \tilde{y}_{lN}^{sk} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

在动态大群体应急决策中, 某阶段专家所给的偏好信息只与本阶段属性权重有关, 不可用于计算其他阶段的属性权重, 因此需要对每个阶段的属性权重进行求解才符合实际情况. 利用改进的区间直觉

模糊熵公式对第 s 阶段下的属性权重 $w^s = (w_1^s, w_2^s, \dots, w_N^s)^T$ 进行确定, 有

$$w_j^s = \frac{1 - E_X(\tilde{Y}_j^s)}{N - \sum_{j=1}^N E_X(\tilde{Y}_j^s)}. \quad (14)$$

其中

$$E_X(\tilde{Y}_j^s) = \frac{1}{P} \sum_{l=1}^P \sqrt{\frac{(f_{Alj}^s)^2 + (\pi_{lj}^{sL})^2 + (\pi_{lj}^{sU})^2}{3}},$$

$f_{Alj}^s = 1 - \frac{|a_{lj}^{sL} - b_{lj}^{sL}| + |a_{lj}^{sU} - b_{lj}^{sU}|}{2}$, π_{lj}^{sL} 、 π_{lj}^{sU} 分别表示第 s 个阶段方案 x_l 在属性 f_j 下偏好信息的模糊度、犹豫度下界、犹豫度上界.

2.4 确定阶段权重

与传统的单阶段静态应急决策相比, 多阶段动态应急决策需要考虑多个决策阶段的偏好信息, 由于每个决策阶段所处的时间节点不同, 导致各阶段专家所给偏好信息的重要程度存在差异. 郭亚军^[34]通过引入时间度和时间熵来解决动态评价中不同时段信息的重要性存在差异的问题, 建立了如下非线性规划模型:

$$\begin{aligned} \max I(\tilde{w}^*) = & - \sum_{s=1}^S \tilde{w}_s^* \cdot \ln \tilde{w}_s^*; \\ \text{s.t. } \eta = & \sum_{s=1}^S \frac{S-s}{S-1} \tilde{w}_s^*, \quad \sum_{s=1}^S \tilde{w}_s^* = 1, \quad \tilde{w}_s^* > 0. \end{aligned} \quad (15)$$

其中 η 为时间度. η 的大小体现了对不同时段信息的重视程度. 当 η 越接近于 0 时, 表明动态决策过程中越注重近期数据, 体现“厚今薄古”的思想, 主要用于已发生的动态决策问题中; 当 η 越接近于 1 时, 表明决策者越注重远期数据, 主要用于带有预测性的动态决策问题中. 特别地, 当 $\eta = 0$ 时, $\tilde{w}^* = (1, 0, \dots, 0)^T$; 当 $\eta = 1$ 时, $\tilde{w}^* = (0, 0, \dots, 1)^T$; 当 $\eta = 0.5$ 时, $\tilde{w}^* = (1/S, 1/S, \dots, 1/S)^T$. 时间度 η 的常用标度如表 1 所示.

表 1 时间度 (η) 的标度参考表

赋值 (η)	说明
0.1	极端重视近期数据
0.3	比较重视近期数据
0.5	同样重视各阶段数据
0.7	比较重视远期数据
0.9	非常重视远期数据
0.2, 0.4, 0.6, 0.8	对应以上相邻判断的中间情况

本文首次将时间度和时间熵运用到大群体动

态应急决策中,利用时间熵确定阶段权重,将通过式(15)得出的阶段权重称为时间权重.然而,无论时间度 η 怎样变化,时间权重均呈现一定的单调性,中期阶段的权重一直处于中间较低水平,近期阶段和远期阶段的权重随着时间的变化处于两端较高或较低水平.令 $S = 5$,求解非线性规划模型式(15),可得不同时间度 η 下,时间权重值的变化趋势如图1所示.图1中, $w_1 \sim w_5$ 分别表示1~5阶段的时间权重.

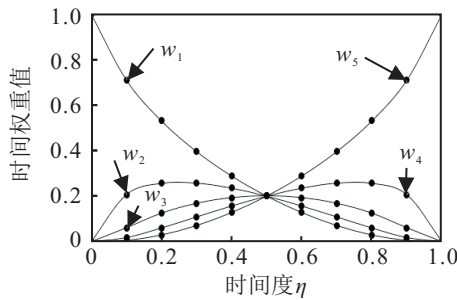


图1 不同时间度 η 下时间权重的变化趋势

由图1可见,时间权重由于过度注重近期数据和远期数据,导致中期阶段的权重处于较低水平,忽略了中期阶段权重的重要性.基于此,本文通过引入大群体偏好一致性指标来构建相对熵模型对时间权重进行修正,从而得到最优的阶段权重.

利用式(13)和(14)对各阶段大群体偏好进行集结,得到各阶段的方案大群体偏好矢量 $\tilde{V}^s = (\tilde{v}_1^s, \tilde{v}_2^s, \dots, \tilde{v}_P^s)$,其中 $\tilde{v}_l^s = \sum_{j=1}^N w_j^s \cdot \tilde{y}_{lj}^s$.那么第 s 阶段决策方案的大群体偏好矢量与其余各阶段决策方案大群体偏好矢量一致性水平为

$$\phi^s = \frac{1}{S-1} \sum_{r=1, r \neq s}^S (\sigma \rho(\tilde{V}^s, \tilde{V}^r) + (1-\sigma)K_{\text{IVIFW}}^s(\tilde{V}^s, \tilde{V}^r)). \quad (16)$$

根据各阶段决策方案大群体偏好矢量一致性水平对决策阶段进行赋权.一致性水平越高,表明该阶段的方案偏好与其他阶段的方案偏好冲突越小,应赋予更大的权重,计算公式如下:

$$\tilde{w}^* = \frac{\phi^s}{\sum_{s=1}^S \phi^s}. \quad (17)$$

由此得到基于一致性水平下各个阶段的权重 $\tilde{w}^* = (\tilde{w}_1^*, \tilde{w}_2^*, \dots, \tilde{w}_S^*)^T$.为了保证阶段权重的合理性,构建以下相对熵模型来确定阶段的最优权重:

$$\min H(w) = \sum_{s=1}^S w_s^* \cdot \ln(w_s^*/\tilde{w}_s^*) + \sum_{s=1}^S w_s^* \cdot \ln(w_s^*/\tilde{w}_s^*);$$

$$\text{s.t. } \sum_{s=1}^S w_s^* = 1, w_s^* > 0. \quad (18)$$

将式(15)~(18)所求的阶段权重与各个阶段方案的大群体偏好进行集结可得整个决策过程中方案的综合决策偏好矢量 $\tilde{V} = (\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \dots, \tilde{v}_P)$,其中 $\tilde{v}_l = \sum_{s=1}^S w_s^* \cdot \tilde{v}_l^s, 1 \leq l \leq P$.

2.5 方法步骤

基于上述分析,考虑时间序列的动态大群体应急决策方法步骤如下.

step 1: 根据应急决策问题,收集大群体决策专家的区间直觉模糊数偏好矩阵 $A_{ij}^{s_i} = [a_{ij}^{s_i}]_{P \times N}$.

step 2: 利用式(4)~(6)计算专家之间的综合相似度,采用基于综合相似度的闭包模糊聚类法对专家偏好进行聚类,得到各阶段不同方案下的聚集.

step 3: 利用式(8)和(9)对专家权重进行求解,然后利用式(10)对聚集中专家的偏好进行集结,得到各聚集的偏好,再利用式(11)和(12)对每个聚集的权重进行求解,最后利用式(13)对各个聚集进行集结,得到属性大群体偏好矢量 \tilde{Y}_l^s .

step 4: 由式(8)和(14)得到第 s 阶段的属性权重 $w^s = (w_1^s, w_2^s, \dots, w_N^s)^T$,利用IIFWA算子对 \tilde{Y}_l^s 进行集结,得到方案大群体偏好矢量 $\tilde{V}^s = (\tilde{v}_1^s, \tilde{v}_2^s, \dots, \tilde{v}_P^s)$.

step 5: 利用式(15)~(18)确定决策阶段的最优权重 $w^* = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_S^*)^T$,利用IIFWA算子对各阶段的方案大群体偏好 \tilde{V}^s 进行集结,得到整个决策过程方案的综合决策偏好矢量 $\tilde{V} = (\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \dots, \tilde{v}_P)$,最后利用定义3计算各方案的得分函数 $R(\tilde{v}_l)$ 和精确函数 $H(\tilde{v}_l)$ 对应急决策方案进行排序,选出最优方案.

3 方法原理

3.1 案例背景

我国西南某地公路沿线发生重大森林火灾,消防部门和交管部门等应急决策部门组织12位专家制定了3个应急方案:1)不封闭车道,采用人工扑灭,同时对周围的居民进行疏散撤离;2)完全封闭公路,采用大型机械进行灭火,不疏散沿线村落居民;3)封闭公路部分车道,采用小型机械进行灭火,疏散沿线村落居民.

在森林火灾应急决策中,风势、风向和降雨等环境因素会使火势产生阶段性变化,从而使得应急活动具有多阶段特点.通过对当前火情以及环境因素的分析,整个应急过程预测将持续3天,以天为单位对应急过程进行划分,各阶段的情景描述如下:

1) t_1 阶段. 天气: 晴, 东北风 4 ~ 5 级. 火情预测: 在阵风的影响下火势很大, 过火面积也在不断扩大, 并向公路护坡方向蔓延.

2) t_2 阶段. 天气: 晴, 西南风 2 ~ 3 级. 火情预测: 在西南风的影响下, 火势进一步加剧, 由于风向的变化, 火情开始远离护坡, 向村庄方向蔓延.

3) t_3 阶段. 天气: 中到大雨, 无风. 火情预测: 该阶段火势保持平稳, 由于在本地区将出现一次较强降水, 对整个火势的控制具有积极作用.

12 位应急决策专家通过对火灾现场进行分析, 结合自己经验判断对每个阶段下各个应急方案的应急处置能力进行评价分析. 主要从以下 3 个评价属性进行分析: f_1 (经济性)、 f_2 (时效性)、 f_3 (便捷性).

3.2 决策步骤

step 1: 根据该应急决策问题, 收集大群体决策专家给出的区间直觉模糊数偏好矩阵 $A_{ij}^{si} = [a_{ij}^{si}]_{3 \times 3}$, 为了表明本文方法的合理性, 使用文献 [28] 中的数据进行对比分析.

step 2: 利用式 (4) ~ (6) 计算专家之间的综合相似度, 采用基于综合相似度的闭包模糊聚类法对专家偏好进行聚类, 得到各阶段不同方案下的聚集, 如表 2 所示.

表 2 各阶段不同方案下的聚集情况

阶段	方案	聚集	专家
1	1	1	1, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12
		2	2, 3, 7, 8
	2	1	1, 2, 4, 5, 7, 8, 11, 12
		2	3, 9
		3	6, 10
	3	1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12
2		8, 9	
2	1	1	1, 9, 10, 11, 12
		2	2, 3, 6, 7, 8
		3	4, 5
	2	1	1, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 12
		2	2, 8
		3	5
3	1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11	
	2	7, 12	
3	1	1	1, 9
		2	2, 3, 4, 6, 7, 8, 11, 12
		3	5, 10
	2	1	1, 2, 3, 9, 10, 12
		2	4, 5, 6, 7, 8, 11
	3	1	1, 4, 7, 9, 12
2		2, 5, 6	
3		3, 8, 10, 11	

step 3: 由于专家在不同属性下的知识水平和经验不同, 在不同属性下的权重也应不同. 采用式 (8) 和

(9) 对专家权重进行求解, 得到各阶段各方案的聚集内专家在不同属性下的权重.

利用式 (10) 对聚集中专家的偏好进行集结, 得到各聚集的偏好, 再利用式 (11) 和 (12) 对每个聚集的权重进行求解, 最后利用式 (13) 对各个聚集进行集结, 得到属性大群体偏好矢量为

$$\begin{aligned} \tilde{Y}_1^1 &= (([0.804, 0.816], [0, 0.059]), ([0.469, 0.480], \\ &\quad [0.405, 0.416]), ([0.580, 0.594], [0, 0.236])), \\ \tilde{Y}_2^1 &= (([0.768, 0.781], [0, 0.076]), ([0.686, 0.700], \\ &\quad [0, 0.145]), ([0.710, 0.724], [0, 0.131])), \\ \tilde{Y}_3^1 &= (([0.440, 0.450], [0.432, 0.443]), ([0.391, 0.401], \\ &\quad [0.495, 0.505]), ([0.532, 0.543], [0.359, 0.370])), \\ \tilde{Y}_1^2 &= (([0.704, 0.717], [0, 0.143]), ([0.506, 0.519], \\ &\quad [0, 0.333]), ([0.411, 0.425], [0, 0.402])), \\ \tilde{Y}_2^2 &= (([0.566, 0.578], [0, 0.307]), ([0.304, 0.315], \\ &\quad [0.569, 0.580]), ([0.375, 0.386], [0.486, 0.498])), \\ \tilde{Y}_3^2 &= (([0.470, 0.482], [0.387, 0.400]), ([0.705, 0.716], \\ &\quad [0.178, 0.190]), ([0.595, 0.606], [0.288, 0.299])), \\ \tilde{Y}_1^3 &= (([0.492, 0.503], [0.382, 0.393]), ([0.430, 0.442], \\ &\quad [0, 0.417]), ([0.528, 0.540], [0.340, 0.352])), \\ \tilde{Y}_2^3 &= (([0.595, 0.607], [0.281, 0.294]), ([0.482, 0.493], \\ &\quad [0.398, 0.408]), ([0.652, 0.668], [0, 0.145])), \\ \tilde{Y}_3^3 &= (([0.533, 0.543], [0.359, 0.370]), ([0.408, 0.419], \\ &\quad [0.475, 0.485]), ([0.456, 0.467], [0.414, 0.426])). \end{aligned}$$

step 4: 由式 (8) 和 (14) 得到各个阶段的属性权重, 如表 3 所示. 利用 IIFWA 算子对各阶段不同方案下的属性大群体偏好矢量 \tilde{Y}_l^s 进行集结, 得到各阶段不同方案的大群体偏好, 如表 4 所示.

表 3 各个阶段的属性权重大小

阶段	属性权重		
	f_1	f_2	f_3
1	0.368	0.297	0.335
2	0.348	0.356	0.296
3	0.347	0.297	0.356

step 5: 采用式 (15) ~ (18) 确定决策阶段的最优权重 $w^* = (w_1^*, w_2^*, w_3^*)^T$, 然后利用 IIFWA 算子对各阶段的方案大群体偏好矢量 \tilde{V}^s 进行集结, 得到整个决策过程方案的综合决策偏好矢量 $\tilde{V} = (\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \tilde{v}_3)$, 最后利用定义 3 计算各方案的得分函数 $R(\tilde{v}_l)$ 和精确函数 $H(\tilde{v}_l)$ 对应急决策方案进行排序, 选出最优方案. 不同时间度 η 下最终的方案排序结果如表 5 所示.

表4 各阶段不同方案的群体偏好

阶段	方案	方案大群体偏好
1	1	[[0.660, 0.673], [0, 0.168]]
	2	[[0.726, 0.740], [0, 0.110]]
	3	[[0.459, 0.470], [0.423, 0.434]]
2	1	[[0.565, 0.578], [0, 0.262]]
	2	[[0.428, 0.440], [0, 0.444]]
	3	[[0.603, 0.614], [0.269, 0.282]]
3	1	[[0.488, 0.500], [0, 0.385]]
	2	[[0.587, 0.601], [0, 0.252]]
	3	[[0.471, 0.482], [0.410, 0.422]]

表5 不同时间度 η 下的方案排序结果及最优方案

η	阶段权重向量		方案排序	最优方案
	时间权重	最终最优权重		
0	(0, 0, 1)	(0, 0, 1)	$x_2 \succ x_1 \succ x_3$	x_2
0.1	(0.026, 0.147, 0.826)	(0.110, 0.261, 0.629)	$x_2 \succ x_1 \succ x_3$	x_2
0.2	(0.082, 0.236, 0.682)	(0.178, 0.301, 0.521)	$x_2 \succ x_1 \succ x_3$	x_2
0.3	(0.154, 0.292, 0.554)	(0.233, 0.320, 0.447)	$x_2 \succ x_1 \succ x_3$	x_2
0.4	(0.238, 0.323, 0.438)	(0.283, 0.328, 0.389)	$x_2 \succ x_1 \succ x_3$	x_2
0.5	(0.333, 0.333, 0.333)	(0.332, 0.331, 0.337)	$x_2 \succ x_1 \succ x_3$	x_2
0.6	(0.438, 0.323, 0.238)	(0.384, 0.329, 0.287)	$x_2 \succ x_1 \succ x_3$	x_2
0.7	(0.554, 0.292, 0.154)	(0.443, 0.320, 0.237)	$x_2 \succ x_1 \succ x_3$	x_2
0.8	(0.682, 0.236, 0.082)	(0.516, 0.303, 0.181)	$x_2 \succ x_1 \succ x_3$	x_2
0.9	(0.826, 0.147, 0.026)	(0.625, 0.263, 0.112)	$x_2 \succ x_1 \succ x_3$	x_2
1.0	(1, 0, 0)	(1, 0, 0)	$x_2 \succ x_1 \succ x_3$	x_2

由表5可知,方案 x_2 为最优方案,无论时间度取何值,方案的排序结果均为 $x_2 \succ x_1 \succ x_3$,其主要原因有以下几点:1)由一致性水平所得的阶段权重向量为 (0.331, 0.329, 0.340)^T,各阶段权重大小差异较小,不能改变时间权重变化的方向,只能延缓时间权重的变化趋势;2)方案 x_2 在阶段1和阶段3中都具有最大的得分函数值,因此在不能改变时间权重变化方向的情况下,方案 x_2 都为最优方案;3)方案数量的多少和阶段数量的多少也会对排序结果产生一定影响.但在一般的动态应急决策中,由于决策带有一定的预测性,决策者一般注重远期数据,时间度 η 应在 0.5 ~ 1 中取值.为了表明通过引入大群体偏好一致性指标来构建相对熵模型对时间权重进行修正的合理性,图2和图3分别给出了不同时间度 η 下时间权重和最优权重的趋势变化.

由图2可见,由于时间权重过度注重近期数据和远期数据,导致第2阶段的权重与第1阶段和第3阶段相差较大且一直处于较低水平.由图3可见,尽管修正后的最优权重随时间度 η 变化也未出现第2阶

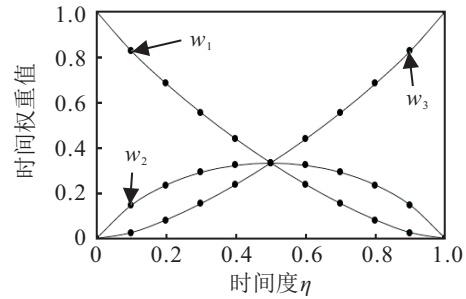


图2 不同时间度 η 下时间权重的变化趋势

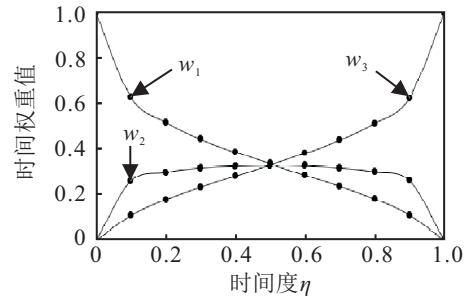


图3 不同时间度 η 下最优权重的变化趋势

段权重为最大的情况,其主要原因是由一致性水平求得各阶段权重大小差异较小,使得第2阶段的权重仍处于中间水平;但是,修正后的最优权重随时间度 η 的变化比较平缓,第2阶段的权重与第1阶段和第3阶段权重差距较修正前平缓,符合实际情况,因此修正后的最优权重能够减少决策失误的可能性.

3.3 方法比较与讨论

为了表明所提出方法的有效性和优越性,与文献[28]方法进行对比,所提出方法得出最优方案为 x_2 ,文献[28]方法得出最优方案为 x_1 .两种方法得出的最优方案有所不同,其主要原因有以下几点:

- 1) 文献[28]方法所用的距离测度公式未考虑犹豫度对距离的影响,从而导致聚类结果不同,影响最终排序结果;
- 2) 聚集偏好进行集结时未考虑专家知识水平和经验的差异性,对聚集权重进行确定时,未考虑聚集内部专家偏好之间的冲突和一致性水平;
- 3) 文献[28]方法所参考的区间直觉模糊熵存在不符合实际的情况,求解属性权重时认为各阶段偏好信息具有遗传性,即每个阶段的属性权重都相同,明显不符合实际情况;
- 4) 文献[28]方法未考虑时间序列对阶段权重的影响.以上4点是导致最终计算结果不一致的重要原因.

综上,对大群体专家偏好进行聚类时,要同时考虑专家之间的贴近度和相似度对聚类的影响.对专家偏好进行集结时要考虑专家知识水平和经验的差异性;对聚集权重进行确定时,要考虑聚集内部专家偏好之间的冲突和一致性水平;对属性权重进行确定时,由于各阶段偏好信息不具有遗传性的特点,需

要对每个阶段下的属性权重进行确定.此外,对动态大群体应急决策问题的阶段权重进行确定时,要考虑时间序列对决策过程的影响,并构建相对熵模型来合理确定阶段权重,降低决策失误的可能性,这也是本文提出该方法的主要原因.

4 结 论

本文针对专家权重和属性权重未知、阶段权重未知且与时间序列有关的动态大群体应急决策问题,提出了一种考虑时间序列的动态大群体应急决策方法,为模糊环境下的动态大群体应急决策问题提供了重要参考.一方面,提出了考虑犹豫度的区间直觉模糊数距离公式,定义了区间直觉模糊数的贴进度,并综合贴进度和相似度对大群体专家偏好信息进行聚类,降低了大群体专家偏好信息的分散程度,提高了应急决策的效率;另一方面,综合考虑区间直觉模糊数的模糊度和犹豫度,基于现有区间直觉模糊熵的不足,提出了新的区间直觉模糊熵计算公式,考虑专家知识水平差异和各阶段偏好信息不具遗传性等特点,对不同属性下的专家权重和不同阶段下的属性权重进行求解.最后,考虑时间序列对不同阶段专家偏好信息重要程度的影响,用时间度和时间熵对时间权重进行确定,同时引入大群体偏好一致性指标来构建相对熵模型对时间权重进行修正,获得最优阶段权重,提高了决策的准确性.然而,本文也存在一些不足,比如在整个动态应急决策过程中未考虑专家个人风险偏好对决策结果的影响,这也是未来进一步研究的方向.

参考文献(References)

- [1] 徐选华. 面向特大自然灾害复杂大群体应急决策模型及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1-3.
(Xu X H. Complex large group decision making models and its application oriented outside nature disasters[M]. Beijing: Science Press, 2012: 1-3.)
- [2] 徐选华, 陈晓红, 王红伟. 一种面向效用值偏好信息的大群体决策方法[J]. 控制与决策, 2009, 24(3): 440-445.
(Xu X H, Chen X H, Wang H W. A kind of large group decision-making method oriented utility valued preference information[J]. Control and Decision, 2009, 24(3): 440-445.)
- [3] 张晓, 樊治平. 基于前景随机占优的多属性多标度大群体决策方法[J]. 控制与决策, 2014, 29(8): 1429-1433.
(Zhang X, Fan Z P. Method for multi-attribute and multi-identifier large group decision making based on prospect stochastic[J]. Control and Decision, 2014, 29(8): 1429-1433.)
- [4] 徐选华, 孙寒寒. 基于模糊-冲突熵的风险性大群体应急决策方法[J]. 运筹与管理, 2018, 27(2): 1-10.
(Xu X H, Sun H H. Risky large group emergency decision-making method based on fuzzy-conflict entropy[J]. Operations Research and Management Science, 2018, 27(2): 1-10.)
- [5] Xu X H, Du Z J, Chen X H. Consensus model for multi-criteria large-group emergency decision making considering non-cooperative behaviors and minority opinions[J]. Decision Support Systems, 2015, 79(C): 150-160.
- [6] Xu X H, Zhong X Y, Chen X H. A dynamical consensus method based on exit-delegation mechanism for large group emergency decision making[J]. Knowledge-Based Systems, 2015, 86(C): 237-249.
- [7] 徐选华, 孙倩. 基于属性多粒度的双层权重大群体决策方法[J]. 控制与决策, 2016, 31(10): 1908-1914.
(Xu X H, Sun Q. Two-layer weight large group decision-making method based on multi-granularity attributes[J]. Control and Decision, 2016, 31(10): 1908-1914.)
- [8] Chai J, Liu J N K, Xu Z. A rule-based group decision model for warehouse evaluation under interval-valued Intuitionistic fuzzy environments[J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(6): 1959-1970.
- [9] 徐选华, 蔡晨光, 陈晓红. 基于区间模糊数的多阶段冲突型大群体应急决策方法[J]. 运筹与管理, 2015, 24(4): 9-15.
(Xu X H, Cai C G, Chen X H. A multi-stage conflict style large group decision-making emergency method based on interval fuzzy number[J]. Operations Research and Management Science, 2015, 24(4): 9-15.)
- [10] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Information & Control, 1965, 8(3): 338-353.
- [11] Atanassov K T. Intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20(1): 87-96.
- [12] Atanassov K T. Interval-valued intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1989, 31(3): 343-349.
- [13] Liu S, Chan F T S, Ran W. Decision making for the selection of cloud vendor: An improved approach under group decision-making with integrated weights and objective/subjective attributes[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 55: 37-47.
- [14] Yue Z, Jia Y. An application of soft computing technique in group decision making under interval-valued intuitionistic fuzzy environment[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(5): 2490-2503.
- [15] Mao J, Yao D, Wang C. Group decision making methods based on intuitionistic fuzzy soft matrices[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(9): 6425-6436.
- [16] Meng F, Zhang Q, Cheng H. Approaches to multiple-criteria group decision making based on interval-valued intuitionistic fuzzy Choquet integral with respect to the generalized λ -Shapley index[J]. Knowledge-Based Systems, 2013, 37: 237-249.

- [17] Ju Yanbing. A new method for multiple criteria group decision making with incomplete weight information under linguistic environment[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38(21/22): 5256-5268.
- [18] Yue Z. Approach to group decision making based on determining the weights of experts by using projection method[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2012, 36(7): 2900-2910.
- [19] 徐选华, 王兵, 周艳菊. 基于信任机制的不完全信息大群体决策方法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(4): 577-585. (Xu X H, Wang B, Zhou Y J. Method for large group decision making with incomplete decision preference information based on trust mechanism[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(4): 577-585.)
- [20] 陈晓红, 戴子敬, 刘翔. 基于熵和关联系数的区间直觉模糊决策方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(4): 791-795. (Chen X H, Dai Z J, Liu X. Approach to interval-valued intuitionistic fuzzy decision making based on entropy and correlation coefficient[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(4): 791-795.)
- [21] 高明美, 孙涛, 朱建军. 基于改进熵和新得分函数的区间直觉模糊多属性决策[J]. *控制与决策*, 2016, 31(10): 1757-1764. (Gao M M, Sun T, Zhu J J. Interval-valued intuitionistic fuzzy multiple attribute decision-making method based on revised fuzzy entropy and new scoring function[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(10): 1757-1764.)
- [22] Jin H P, Park I Y, Kwun Y C, et al. Extension of the TOPSIS method for decision making problems under inter-valued intuitionistic fuzzy environment[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, 35(5): 2544-2556.
- [23] Wan S P, Dong J Y. Interval-valued intuitionistic fuzzy mathematical programming method for hybrid multi-criteria group decision making with interval-valued intuitionistic fuzzy truth degrees[J]. *Information Fusion*, 2015, 26(C): 49-65.
- [24] 徐泽水. 区间直觉模糊信息的集成方法及其在决策中的应用[J]. *控制与决策*, 2007, 22(2): 215-219. (Xu Z S. Methods for aggregating interval-valued intuitionistic fuzzy information and their application to decision making[J]. *Control and Decision*, 2007, 22(2): 215-219.)
- [25] Wan S P. Multi-attribute decision making method based on possibility variance coefficient of triangular intuitionistic fuzzy numbers[J]. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2013, 21(2): 223-243.
- [26] Chen T Y. Interval-valued intuitionistic fuzzy QUALIFLEX method with a likelihood-based comparison approach for multiple criteria decision analysis[J]. *Information Sciences*, 2014, 261(10): 149-169.
- [27] Tan C. A multi-criteria interval-valued intuitionistic fuzzy group decision making with Choquet integral-based TOPSIS[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(4): 3023-3033.
- [28] 徐选华, 蔡晨光, 杜志娇, 等. 基于区间直觉模糊数的多属性多阶段冲突型大群体应急决策方法[J]. *运筹与管理*, 2016, 25(4): 12-22. (Xu X H, Cai C G, Du Z J, et al. A multi-attribute & multi-stage conflict style large group emergency decision-making method based on interval-valued intuitionistic fuzzy number[J]. *Operations Research and Management Science*, 2016, 25(4): 12-22.)
- [29] Cai C, Xu X H, Wang P, et al. A multi-stage conflict style large group emergency decision-making method[J]. *Soft Computing*, 2016, 21(7): 5765-5778.
- [30] Ye J. Multicriteria fuzzy decision-making method using entropy weights-based correlation coefficients of interval-valued intuitionistic fuzzy sets[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2010, 34(12): 3864-3870.
- [31] Dong G P, Kwun Y C, Jin H P, et al. Correlation coefficient of interval-valued intuitionistic fuzzy sets and its application to multiple attribute group decision making problems[J]. *Mathematical & Computer Modelling An International Journal*, 2009, 50(9): 1279-1293.
- [32] 宋光兴, 杨槐. 群决策中的决策行为分析[J]. *学术探索*, 2000(3): 48-49. (Song G X, Yang H. Analysis of decision behavior in group decision making[J]. *Academic Exploration*, 2000(3): 48-49.)
- [33] 贺仲雄. 模糊数学及其应用[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1983: 152-161. (He Z X. *Fuzzy mathematics and its applications*[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1983: 152-161.)
- [34] 郭亚军. 综合评价理论方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 138-143. (Guo Y J. *Comprehensive evaluation theory method and application*[M]. Beijing: Science Press, 2007: 138-143.)

作者简介

徐选华(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事决策理论与方法、信息系统与决策支持系统、应急管理决策、风险分析与管理等研究, E-mail: xuxh@csu.edu.cn;

刘尚龙(1995—), 男, 硕士生, 从事决策理论与方法、应急管理决策、风险分析与管理的研究, E-mail: sonlenliu@163.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)