

基于累积前景理论的大群体风险型动态应急决策方法

徐选华[†], 杨玉珊

(中南大学 商学院, 长沙 410083)

摘 要: 针对复杂环境下决策者对于应急事件作出的决策往往会面对偏好转移的问题, 提出一种新的大群体风险型动态应急决策方法. 首先利用偏好判断矩阵对全体决策者偏好进行聚类分析和偏好集结; 其次, 利用累积前景理论计算决策大群体的总体前景值; 再次, 考虑未来状态转移链, 经过多轮调整得出决策者偏好转移矩阵, 结合偏好转移矩阵和大群体总体前景值可得到当前突发事件状态下的最优方案; 最后, 通过案例分析与对比表明所提出方法的有效性和可行性.

关键词: 大群体; 决策者偏好转移; 风险; 应急决策

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Method of dynamic emergency decision for risk type of large group based on cumulative prospect theory

XU Xuan-hua[†], YANG Yu-shan

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

Abstract: Due to decision makers usually face the problem of preference transfer when they make decisions for emergency events in the complex environment, a new method of dynamic emergency decision for the risk type of a large group is proposed. At first, the preference judgment matrix is used to aggregate and cluster the decision makers' preference. Then, the cumulative prospect theory can be used to calculate the overall outlook value of the large group of decision making. Moreover, according to the future state transition chain, the transition matrix of the decision maker's preference is obtained through multi-stage adjustment. Associating preference transfer matrix with the overall outlook value of a large group, the optimal scheme on the current state is given. Finally, the case analysis and comparison verify the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords: large group; decision makers' preference transfer; risk; emergency decision

0 引 言

近年来,特大突发事件的发生频率越来越高,鉴于突发事件的随机性、快速扩散性、动态性等特征,突发事件一旦发生,便会对社会稳定带来十分消极的影响. 风险具有极高的随机不确定性和动态演变性,这与突发事件的特征极其符合,因此突发事件应急决策实际上就是高风险决策. 由于应急决策问题对于时间有着较高的要求,即需要在较短的时间内有效解决相应的问题,具有时间短、决策快等特征. 目前,在应急管理应用上比较新颖的是使用“分众(crowd sourcing)”方式^[1-2],它主要是指由决策者通过网络平台(包括移动互联网)分散完成工作任务,并通过整合后在网上提供服务的一种方式. 在这个过程中,相

关决策信息可以通过网络迅速传递到指挥部门,因此可以满足应急决策的时间性要求. 在该方式中,应急决策往往会涉及众多不同层次的组织、专家和社会公众,因此构成了复杂的决策大群体^[3].

风险型应急决策是一种非预期性决策,其决策结果很难预料且风险极大^[4],并且随着事件危机情况实时演变. 因此,针对突发事件的决策结果往往只能由决策者凭借自己的主观判断和预测给出,这就导致决策结果容易受决策者的心理行为影响. 在当前针对风险型(应急)决策,许多学者已经进行了相应的方法研究. Fan 等^[5]将案例推理法(CBR)引入到应急方案制定活动中,然后结合现场实际情况对历史案例进行修正,生成相应的应急方案; Gao 等^[6]用绝对风险厌

收稿日期: 2016-09-24; 修回日期: 2017-01-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71671189, 71171202, 71431006); 中南大学创新驱动计划项目(2015CX010).

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; 杨玉珊(1994—), 女, 硕士生, 从事应急管理与决策、风险分析与管理的研究.

[†]通讯作者. E-mail: xuxh@csu.edu.cn

恶系数表达决策者的风险厌恶程度,提出了考虑决策者风险态度的GOWUA-HARA算子;Chen等^[7]对水库实时防洪调度问题进行风险分析,构建了水库洪水调度函数,并以该函数为基础提出了一种有效的风险评价方法.而自从Kahneman等^[8]提出了前景理论以来,一些考虑决策者心理行为的决策理论得到了迅速发展,例如失望与后悔理论^[9-12]、前景理论^[13]以及累积前景理论^[14].与传统的期望效用值理论相比,相关文献已经表明累积前景理论更加适用于需要考虑决策者心理影响因素的决策环境^[15-17].针对应急决策,Liu等^[18]将累积前景理论运用到应急响应决策过程中,表明在进行应急响应时必须考虑决策专家的风险偏好;Wang等^[19]在采用前景理论进行应急决策时,提出了一种新的动态参考点方法,以此满足应急决策过程中的动态性要求;而Jou等^[20]、Bocquého等^[21]以及Shi等^[22]的工作也表明,累积前景理论可运用于行为预测方法中.

尽管上述方法丰富了累积前景理论在应急决策和决策者行为领域的运用,但却忽视了应急决策中大群体决策是一个动态过程^[23-24],事件状态的演变转移往往会导致在整个决策过程中的决策者心理偏好也会随之动态变化.考虑到应急决策的时间紧迫性,如果这种偏好转移不能被提前测得,则最终所产生的决策结果就可能失去准确性.因此,针对风险型应急决策进行研究,必须要考虑到决策专家心理偏好的转移对其决策结果的影响,而采用累积前景理论计算的决策者前景值比采用传统效用值计算会更符合风险型应急决策环境.此外,由于决策群体的复杂性和应急事件的信息不完全性,必须考虑到决策专家偏好不确定性和异质性.偏好判断矩阵可以很好地满足决策专家表达自己对于决策方案的不确定性,同时马尔科夫决策技术也已经日益运用于应急决策领域,利用偏好判断矩阵和马尔科夫决策技术^[25],可以将决策专家的前景值与应急决策复杂动态过程整合在一起,使得应急决策的不确定性、动态性和决策群体的动态性都可得到满足.因此,本文基于累积前景理论,采用偏好判断矩阵和马尔科夫决策技术,提出一种新的风险型动态应急决策方法.

1 问题描述与方法基础

1.1 问题描述

设应急决策问题存在 N 个准则、 S 个状态和 P 个决策方案.对于第 l 个决策方案,群体成员 $\Omega = e_1, e_2, \dots, e_M$ 中的第 i 个成员针对状态 s 下的准则 j 给出满足一致性要求的互补判断矩阵 A_{i,l_j} 或互反判断

矩阵 B_{i,l_j} ($i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N; l = 1, 2, \dots, P; s = 1, 2, \dots, S$).状态发生的概率为 p_{s_i} ,准则权重为 $W = (w_1, w_2, \dots, w_N)$,且 $\sum_{s_i=1}^S p_{s_i} = 1$,

$$\sum_{i=1}^N w_i = 1.$$

针对应急事件的风险性和动态性,决策者偏好判断矩阵也需进行相应调整,给定总共调整次数为 t , p_{st} 为在第 t 轮调整时,状态 s 发生的概率,即在未来不同阶段 $T_i = 1, 2, \dots, t$ 下,决策者面对事件状态发生的概率也会有所改变.最后,得到决策者在不同状态下的判断矩阵,利用累计前景理论和马尔科夫技术对判断矩阵进行计算,得出偏好转移矩阵,在降低方案决策风险基础上,得出当前突发事件状态下的最优方案.

1.2 互补判断矩阵和互反判断矩阵

互补判断矩阵和互反判断矩阵与传统的效用值形式相比,更加适用于信息不完全情况,因为在这种情况下,决策者很难就具体的方案给出效用值.对于多属性决策问题,全体决策者分别独立地对所有决策方案进行两两比较,可得:

1) 专家按互反型标度给出互反判断矩阵 $B = (b_{i,l_j})_{P \times P}$, b_{i,l_j} 表示方案 l_i 相对于 l_j 的偏好值, $b_{i,l_j} > 1$ 表示方案 l_i 严格优于方案 l_j ,且 $b_{i,l_j} > 0, b_{j,l_i} = 1/b_{i,l_j}, b_{i,l_i} = 1$,其中 $i, j = 1, 2, \dots, P$.若 $b_{i,l_j} = b_{i,l_k} b_{k,l_j}$,则称该互反判断矩阵满足完全一致性.

2) 专家按互补型标度给出互补判断矩阵 $A = (a_{i,l_j})_{P \times P}$, a_{i,l_j} 表示方案 l_i 相对于 l_j 的偏好值, $a_{i,l_j} > 0.5$ 表示方案 l_i 严格优于方案 l_j ,且 $a_{i,l_j} > 0, a_{j,l_i} = 1 - a_{i,l_j}, a_{i,l_i} = 0.5$,其中 $i, j = 1, 2, \dots, P$.若 $a_{i,l_j} = a_{i,l_k} + a_{k,l_j} - 0.5$,则称该互补判断矩阵满足加型一致性;若 $a_{i,l_j} = a_{i,l_k} a_{k,l_j} / (a_{i,l_k} a_{k,l_j} + (1 - a_{i,l_k})(1 - a_{k,l_j}))$,则称该互补矩阵满足乘型一致性.

1.3 累积前景理论

累积前景理论是由Tversky等^[14]在改进前景理论的基础上提出的一种考虑决策者风险偏好的决策方法.关于决策者前景值的计算过程主要包括两个部分:价值函数 $v(\Delta x_i)$ 和决策权重函数 Π_i ,具体公式如下:

1) 价值函数

$$v(\Delta x_i) = \begin{cases} (\Delta x)^\alpha, & \Delta x \geq 0; \\ -\lambda(-\Delta x)^\beta, & \Delta x < 0. \end{cases} \quad (1)$$

其中: Δx 表示决策者相对于参考点所获得的收益或损失值; $0 < \alpha, \beta < 1$ 分别为风险厌恶和风险偏好系

数,当 $\alpha \neq \beta$ 时,表明个体决策者对于损失和收益的偏好效用值不一致; λ 为损失规避系数,一般而言, $\lambda > 1$ 表示相比于收益,决策者对于损失感受到的效用值更大,表明一般的决策者往往是风险规避者。

2) 决策权重函数

累积前景理论区别于前景理论的关键是累积前景理论所采用的权重函数不再是线性函数,而是一条反S型曲线,表明个体决策者往往都会高估小概率事件发生的可能性,而低估中、高概率事件发生的可能性,故收益和损失的概率权重公式分别为

$$\omega^+(p_i) = \frac{p_i^\chi}{[p_i^\chi + (1 - p_i)^\chi]^{1/\chi}}, \quad (2)$$

$$\omega^-(p_i) = \frac{p_i^\delta}{[p_i^\delta + (1 - p_i)^\delta]^{1/\delta}}, \quad (3)$$

其中 $0 < \chi, \delta < 1$ 分别表示个体决策者对于收益和损失的态度.一般情况下,往往有 $\chi < \delta$,表示决策者经常高估小概率事件而低估大概率事件。

根据式(1),将计算结果按从小到大排序,则下标集合为 $1, 2, \dots, n$,可得收益和损失的决策权重为

$$\Pi_i = \begin{cases} \omega^+\left(\sum_{j=i}^n p_j\right) - \omega^+\left(\sum_{j=i+1}^n p_j\right), & \Delta x_i \geq 0; \\ \omega^-\left(\sum_{j=1}^i p_j\right) - \omega^-\left(\sum_{j=1}^{i-1} p_j\right), & \Delta x_i < 0. \end{cases} \quad (4)$$

根据文献[14],给定累积前景理论公式中的各个参数值 $\alpha = \beta = 0.88, \lambda = 2.25, \chi = 0.61, \delta = 0.69$,则最终总体前景值计算公式为

$$O_i = \sum_{i=1}^n v(\Delta x_i) \Pi_i. \quad (5)$$

1.4 离散时间马尔科夫模型

马尔科夫模型是由俄国数学家Markov于1906年提出的适用于动态性决策领域的模型,其中一个随机变量序列如果它具有如下属性:

$$\begin{aligned} T\{E_{n+1} = j | E_n = i, E_{n-1} = i_{n-1}, \dots, E_0 = i_0\} &= \\ T\{E_{n+1} = j | E_n = i\}, & \\ T_{ij} = T\{E_{n+1} = j | E_n = i\}, & \end{aligned}$$

则可称为马尔科夫链.它表示未来发生事件的概率独立于过去状态,只与当前其所处的状态有关.其中: E_i 表示一个事件; $\sum_{j=0}^{\infty} T_{ij} = 1, T_{ij} > 0$ 表示事件*i*转移到事件*j*的概率, T 为转移概率矩阵。

离散时间马尔科夫链具有如下性质:若在 t_n 时刻的系统状态分布为 $\pi^{(n)}$,则在 t_{n+1} 时刻的系统状态分布为 $\pi^{(n+1)} = \pi^{(n)} \times T$ 。

2 方法原理

2.1 偏好判断矩阵按准则集结

在多准则决策中,要实现判断矩阵的一致性是很困难的,这可能需要多次对决策者给出的判断矩阵进行调整.但是,应急决策对于时间有着紧迫性要求,若按照传统方法固定决策者的偏好判断矩阵类型,则会导致对该类判断矩阵不够了解的决策者无法迅速调整自己的判断矩阵.因此,考虑到不同决策者偏好表达形式往往不一致,在减少决策者自身偏好不确定性的基础上还需满足决策者偏好的异质性结构,本文允许决策者根据自身情况选择3种偏好判断矩阵,即互反判断矩阵、加型一致性互补判断矩阵和乘型一致性互补判断矩阵,但要求一个决策者只能使用一种判断矩阵形式.这样,决策者给出的判断矩阵可以建立在其对该类型的偏好判断矩阵的熟悉上,可以尽量花费较少时间满足该矩阵对应的一致性要求。

当事件状态发生概率处于 $T_i = t$ 时,获得决策者给出的一致性互补矩阵 $A_{ij}^s = (a_{i,l_j})_{P \times P}$ 或互反矩阵 $B_{ij}^s = (b_{i,l_j})_{P \times P}$ 后,为了测得该决策者对于全体方案的偏好效用值,首先必须要在某一状态*s*下,将个体决策者对全部准则所作出的判断矩阵进行集结,集结公式如下:

1) 若 A_{ij}^s 是满足加型一致性的互补判断矩阵,则^[26]

$$a_{i,l_j} = \sum_{j=1}^N w_j a_{i,l_j}^j, \quad l_i, l_j = 1, 2, \dots, P; \quad (6)$$

2) 若 A_{ij}^s 是满足乘型一致性的互补判断矩阵,则^[27]

$$a_{i,l_j} = \frac{\prod_{j=1}^N (a_{i,l_j}^j)^{w_j}}{\left(\prod_{j=1}^N (a_{i,l_j}^j)^{w_j} + \prod_{j=1}^N (1 - a_{i,l_j}^j)^{w_j} \right)}; \quad (7)$$

3) 若 B_{ij}^s 是满足一致性的互反判断矩阵,则^[28]

$$b_{i,l_j} = \prod_{j=1}^N (b_{i,l_j}^j)^{w_j}, \quad l_i, l_j = 1, 2, \dots, P. \quad (8)$$

在式(6)~(8)中, a_{i,l_j}^j 表示在状态*s*下,根据准则*j*得到的互补判断矩阵中方案*l_i*对方案*l_j*的偏好值; w_j 为准则*j*的权重.运用集结公式可得状态*s*下的互补判断矩阵 $A_i^s = (a_{i,l_j})_{P \times P}$,集结后的矩阵同样满足其对应的一致性要求.类似地, b_{i,l_j}^j 表示在状态*s*下,根据准则*j*得到的互反判断矩阵中方案*l_i*对方案*l_j*的偏好值,其集结后的互反判断矩阵 $B_i^s = (b_{i,l_j})_{P \times P}$ 同样满足一致性。

2.2 大群体偏好聚类分析

通过上述3种集结公式的转换,即可得到决策者对于全体方案在事件不同状态下的偏好判断矩阵. 本文研究的决策群体为大群体,为探索决策风险,需要对大群体偏好进行聚类分析,得出不同的聚集以及其相应的聚集权重. 除此之外,还可以根据聚集内决策成员对聚集的不同贡献生成聚集内的决策者权重. 但是,由于上述所给出的偏好判断矩阵具有异质性结构,还需要统一形式后才可对全体成员给出的决策信息进行后续研究. 本文主要采用转换公式将互补判断矩阵转换为互反判断矩阵,再根据所得偏好矩阵进行聚类分析,具体步骤如下.

1) 若 A_i^s 是满足加型一致性的互补判断矩阵,则通过转换公式

$$b_{li l_j} = 9^{(2a_{li l_j} - 1)}, \quad l_i, l_j = 1, 2, \dots, P \quad (9)$$

可得到满足一致性的互反判断矩阵 B_i^s (互反矩阵采用9标度).

2) 若 A_i^s 是满足乘型一致性的互补判断矩阵,则通过转换公式

$$b_{li l_j} = a_{li l_j} / a_{l_j l_i}, \quad l_i, l_j = 1, 2, \dots, P \quad (10)$$

可得到满足一致性的互反判断矩阵 B_i^s .

3) 计算转换后的决策者 e_i 与决策者 e_j 在同一个状态 s_i 下的所有互反判断矩阵之间的冲突程度,冲突程度测度公式为

$$\rho_{e_i e_j}^{s_i}(B_{e_i}^{s_i}, B_{e_j}^{s_i}) = \frac{1}{P(P-1)} \sum_{l_i=1}^P \sum_{l_j=1}^P |b_{l_i l_j}^{e_i} - b_{l_i l_j}^{e_j}| \quad (11)$$

根据不同的状态概率 p , 利用加权公式计算得到最终冲突程度为

$$\rho_{e_i e_j} = \frac{f}{f^2 - 1} \sum_{s_i=1}^S p_{s_i} \rho_{e_i e_j}^{s_i}(B_{e_i}^{s_i}, B_{e_j}^{s_i}) \quad (12)$$

其中: $0 \leq \rho_{e_i e_j} \leq 1, e_i, e_j = 1, 2, \dots, M; f$ 为互反矩阵所采用的标度,通常取9标度.

4) 对大群体偏好进行聚类分析. 采用文献[29]中的聚类方法,得到聚集数 K 和群体成员聚类结构,计算当 $T_i = t$ 时,聚集 C_t^k 的权重 $u_{tk} = n_{tk} / M$, 其中 n_{tk} 为聚集 C_t^k 中的成员数.

5) 对于聚集内部的决策者,其权重不应看成相等值,而应根据其对聚集 C_t^k 的贡献进行划分,具体计算公式^[30]如下:

$$\theta_{ti} = \frac{\sum_{j=1}^{n_k} (1 - \rho_{e_i e_j})}{\sum_{l=1}^{n_k} \sum_{j=1}^{n_k} (1 - \rho_{e_l e_j})},$$

$$i = 1, 2, \dots, n_k, \quad (13)$$

其中 t 代表当前所处状态 $T_i = t$. 通过大群体聚类算法,最终可得聚集权重 u_{tk} 和聚集内决策者权重 θ_{ti} . 统一全体决策者的偏好判断矩阵后,为了便于利用累积前景理论,还需将个体决策者的互反判断矩阵转换为决策者处于不同状态下的方案排序结果. 即采用和法计算可得决策者对于各方案的偏好值为 $v_i^s = (v_{l_1}^s, \dots, v_{l_p}^s)$, 它代表第 i 个决策者在状态 s 下对于不同方案的效用值. 和法计算公式如下:

$$v_i^s = \frac{1}{P} \sum_{l_j=1}^P \frac{b_{li l_j}}{\sum_{l_k=1}^P b_{l_k l_j}}, \quad l_i = 1, 2, \dots, P. \quad (14)$$

2.3 个体决策者的方案总体前景值

由于应急决策往往具有相当大的不确定性,专家在面对应急决策问题时往往会以自身经验为基础进行判断,且表现为有限理性,即对于单个决策者而言,其自身心理状态往往会影响到他的决策结果. 在集结大群体决策者偏好时,基于决策者的认知不确定性,本文认为采用模糊理想点法来计算决策者的意愿水平才更符合决策者的模糊心理状态^[31]. 该方法是以正、负理想点方案作为决策参考点,令 R_{is} 表示决策者 e_i 处于状态 s 下的心理参考点,则正、负理想参考点分别为 $R_{is}^+ = \max_{1 \leq l_i \leq P} (v_{l_i}^s)$ 、 $R_{is}^- = \min_{1 \leq l_i \leq P} (v_{l_i}^s)$. 具体的求解前景值的过程如下.

首先,根据正、负理想点的定义求得决策者的心理参考点,即将式(14)中计算得到的效用值 $v_{l_i}^s$ 先与正理想点进行比较,得到决策者的损失矩阵 $LM_i = (x_{l_i s_j}^-)_{P \times S}$. 其中

$$x_{l_i s_j}^- = v_{l_i}^{s_j} - R_{is}^+, \quad l_i = 1, 2, \dots, P, \quad s_j = 1, 2, \dots, S. \quad (15)$$

然后,将效用值 $v_{l_i}^s$ 与负理想参考点进行比较,可得收益矩阵 $GM_i = (x_{l_i s_j}^+)_{P \times S}$. 其中

$$x_{l_i s_j}^+ = v_{l_i}^{s_j} - R_{is}^-, \quad l_i = 1, 2, \dots, P, \quad s_j = 1, 2, \dots, S. \quad (16)$$

通过上述计算,获得决策者在不同状态下的收益和损失矩阵,进而对决策者的累积前景值进行计算.

1) 利用式(1),可将决策者的收益矩阵和损失矩阵各自转换为相应的价值矩阵 $V_i^+ = v(GM_i)$ 和 $V_i^- = v(LM_i)$.

2) 根据给定的状态发生概率 p , 利用式(2)~(4), 可计算求得其对应的决策权重 Π_i^+ 或 Π_i^- .

3) 利用式(5)计算每个决策者对于全体方案的总

体前景值,即

$$\Pi_{s_j}^+ = \omega^+ \left(\sum_{i=j}^S p_{s_i} \right) - \omega^+ \left(\sum_{i=j+1}^S p_{s_i} \right), x_{l_i s_j} \geq 0; \quad (17)$$

$$\Pi_{s_j}^- = \omega^- \left(\sum_{i=1}^j p_{s_i} \right) - \omega^- \left(\sum_{i=1}^{j-1} p_{s_i} \right), x_{l_i s_j} < 0; \quad (18)$$

$$O_{il_i} = \sum_{j=1}^S \Pi_{s_j}^+ V(x_{l_i s_j}^+) + \sum_{j=1}^S \Pi_{s_j}^- V(x_{l_i s_j}^-). \quad (19)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, M$; $l_i = 1, 2, \dots, P$. 至此,在当前突发事件状态下,决策者对全体方案给出的决策信息已考虑了其风险偏好的影响. 下面还需考虑未来事件发展状态的改变情况,继续求得在动态环境下因受心理偏好转移的影响,决策者给出的方案前景值.

2.4 基于累积前景值的马尔科夫模型

应急决策过程是一个动态演化的复杂过程,在演化过程中,受偏好转移的影响,决策者往往会更改其决策结果,而传统的应急决策方法往往忽略了动态环境下决策者偏好转移对决策结果的影响^[18]. 本文将累计前景值代入动态应急决策环境中,采用累积前景值计算决策者偏好转移矩阵,以消除决策者偏好转移和风险偏好对其决策结果的影响.

考虑在风险动态演化的情况下,决策者偏好会发生转移,基于应急决策的时间紧迫性,由应急指挥中心根据当前情况预测出一条未来状态概率变化链(变化次数为 t),即

$$\begin{bmatrix} p_{11} & p_{21} & \cdots & p_{s1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{1t} & p_{2t} & \cdots & p_{st} \end{bmatrix}.$$

其中: p_{st} 为 $T_i = t$ 时,状态 s 的发生概率,规定 $T_i = 1$ 为当前突发事件初始状态. 当事件状态概率发生改变时 ($T_i = 2, 3, \dots, t$), 在应急决策平台上的决策者根据新的状态概率需给出新的判断矩阵(满足一致性要求), 根据式(1)~(10)和(15)~(19)重新计算得出在该状态概率下的总体前景值, 根据式(11)~(13)对大群体成员偏好进行重新聚类. 假设某突发事件状态发生改变的次数为 t , 则可得 t 轮偏好判断矩阵, 经上述步骤计算得到个体决策者对于各方案的 t 轮总体前景值

$$O_i = \begin{bmatrix} o_{i1}^1 & o_{i1}^2 & \cdots & o_{i1}^P \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ o_{it}^1 & o_{it}^2 & \cdots & o_{it}^P \end{bmatrix},$$

其中每一行表示为不同阶段状态下的个体决策者总

体前景值. 例如 o_{it}^P 表示第 i 个决策者在第 t 轮状态概率下对于第 P 个方案的前景值, 由马尔科夫链的属性可知, 第 t 轮所得的前景值只受第 $t - 1$ 轮的前景值的影响, 与其他轮次无关.

现根据得到的矩阵 O_i , 将第 $e + 1$ 行与第 e 行进行对比, 若发现在第 $e + 1$ 行中, 决策者对于方案 l_i 的前景值 $o_{i(e+1)}^{l_i}$ 下降而对方案 l_j 的前景值 $o_{i(e+1)}^{l_j}$ 上升, 则认为在第 $e + 1$ 行状态时, 决策者已经改变了他对方案 l_i 和方案 l_j 的偏好. 令状态变量 $E_{l_i l_j} = E_{l_i l_j} + 1$, 它表示决策者对方案 l_i 的偏好转移到方案 l_j 的偏好次数, 由于一共进行了 $t - 1$ 轮偏好调整, 令 $E_r = t - 1$, 可得如下决策者的偏好状态转移矩阵:

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 - \sum_{l_j \neq 1} \frac{E_{1l_j}}{E_r} & \cdots & \frac{E_{1P}}{E_r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{E_{P1}}{E_r} & \cdots & 1 - \sum_{l_j \neq 1} \frac{E_{Pl_j}}{E_r} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

易知, $T_i = T_{l_i l_j} (l_i, l_j = 1, 2, \dots, P)$ 为概率矩阵, 其中, 若 $T_{l_i l_i} = 1$, 则表明决策者经过 t 轮调整后对方案 l_i 的偏好没有发生转移. 假定当前突发事件处于初始状态 $T_i = 1$, 则考虑聚集 C_1^k 内决策者受其未来偏好转移影响而产生的决策结果为

$$T_1 = \sum_{i=1}^{n_k} \theta_{1i} T_i, \quad k = 1, 2, \dots, K; \quad (21)$$

$$A_{1k} = (\theta_{11}, \theta_{12}, \dots, \theta_{1n_k}) \begin{bmatrix} o_1^1 & o_1^2 & \cdots & o_1^P \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ o_{n_k}^1 & o_{n_k}^2 & \cdots & o_{n_k}^P \end{bmatrix} T_1. \quad (22)$$

其中: $\begin{bmatrix} o_1^1 & o_1^2 & \cdots & o_1^P \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ o_{n_k}^1 & o_{n_k}^2 & \cdots & o_{n_k}^P \end{bmatrix}$ 代表当 $T_i = 1$ 时, 聚集 C_1^k 内全体决策者的方案前景值, $(\theta_{11}, \theta_{12}, \dots, \theta_{1n_k})$ 代表聚集 C_1^k 内决策者权重, A_{1k} 为 $T_i = 1$ 时聚集 C_1^k 给出的决策结果. 基于当前状态链, 当 $T_i = 1$ 时大群体决策结果为

$$A_1 = \sum_{k=1}^K u_{1k} A_{1k}, \quad (23)$$

从而可得 $A_1 = (A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1P})$. 根据预测给出的状态变化次数 t , 利用式(21)~(23)还需重复计算 t 次, 得到 $T_i = 1, 2, \dots, t$ 时的方案决策结果 A_t . 最后利用下式:

$$A = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t A_i, \quad (24)$$

可得最终结果为 $\Lambda = (A_1, A_2, \dots, A_P)$. 选择其中最大值所对应的方案作为最优备选方案, 可知该方案为综合考虑了决策者偏好转移和风险偏好下的最优方案. 与传统的决策方法相比, 该方法更适用于风险型决策领域.

2.5 方法步骤

综上所述, 本文所提出的基于累积前景理论的大群体风险型动态应急决策方法步骤如下.

Step 1: 首先由应急决策指挥中心召集大群体决策者进行应急决策, 考虑动态应急决策情况下偏好转移情况, 对事件可能出现的状态进行预测, 给出未来突发事件不同阶段的状态发生概率(状态链). 当 $T_i = 1$ 时, 每个决策者基于当前事件发生的不同状态, 根据不同的准则进行方案之间两两比较, 得出相应的互补判断矩阵或互反判断矩阵.

Step 2: 将每个决策者给出的偏好判断矩阵, 依照事件发生的不同状态, 利用矩阵集结公式(6)~(8)对判断矩阵进行集结, 得到各决策者在不同状态下对全部方案的判断矩阵.

Step 3: 利用式(9)和(10), 将上述得到的互补或互反判断矩阵进行形式统一, 得到全体决策者的互反判断矩阵并进行聚类, 得到若干个不同的聚集 C_1^k , 由此计算得出聚集权重 n_{1k} 和聚集内决策者权重 θ_{1n_k} .

Step 4: 利用式(14)将全体决策者的判断矩阵转换为不同状态下的对各方案的效用值.

Step 5: 计算正负理想参考点, 并将其与决策者的效用值进行比较, 得出决策者的收益和损失矩阵.

Step 6: 利用累积前景理论中的效用函数将收益和损失矩阵分别转换为价值矩阵, 最终利用式(2)~(5)和(17)~(19)得到每个决策者对于不同方案的最终总体前景值.

Step 7: 重复 Step 1~Step 6 进行 $(t - 1)$ 轮动态调整, 得到个体决策者的动态前景值矩阵, 然后采用马尔科夫法计算得到个体决策者的偏好状态转移矩阵.

Step 8: 将偏好状态转移矩阵与各轮 $(T_i = 1, 2, \dots, t)$ 中的前景值和聚集权重进行结合, 利用式(21)~(24)计算得到大群体决策者对各方案的前景值结果, 选择其中具有最大前景值的方案作为最优方案.

3 案例分析

3.1 案例背景

利用天津港特大爆炸火灾事件中的背景资料, 采用本文所提出的方法对火灾事件中的各个方案进行评选. 在这次特大爆炸火灾事件中, 由于起火地点位于危险品仓库, 且先后发生多次爆炸, 这给救援灭火

工作带来了巨大的困难, 已有许多消防官兵在这次救援行动过程中丧失生命, 但若任由大火继续燃烧爆炸, 则有可能导致危险品持续泄漏, 从而污染整个天津市环境并给周围居民带来严重伤害. 根据对燃烧情况的分析, 给出了如下4种可能发展状态:

A_1 : 险情在12小时内得到完全控制; A_2 : 险情在24小时内得到完全控制; A_3 : 险情在48小时内得到完全控制; A_4 : 险情在48小时后依旧无法被完全控制.

基于该事件的紧迫性和复杂性, 天津市应急决策指挥中心在网络上紧急召集20位各领域的专家, 成立了专项应急决策小组, 并给出了如下3个方案:

S_1 : 紧急疏散事故周边3个小区居民, 并加大从周边地区调遣消防人员进入火灾现场外围区域进行灭火工作;

S_2 : 紧急疏散事故周边3个小区居民, 不再增派消防人员, 但是派出专业防化救援人员进入火灾现场核心区域进行人员搜救工作;

S_3 : 紧急疏散事故周边3个小区居民, 加大从周边地区调遣消防人员进入火灾现场外围区域进行灭火工作, 并派出专业防化救援人员进入火灾现场核心区域进行人员搜救工作.

各专家在进行决策时, 需要考虑如下4点准则:

C_1 : 财产损失数; C_2 : 人员伤亡数; C_3 : 环境污染情况; C_4 : 救援行动成本. 经过专家讨论得出各准则的权重为 $W = (0.2, 0.5, 0.2, 0.1)$. 应急指挥中心根据突发事件实际情况对其未来发展状态进行预测, 给出整个事件状态可能发生变化的次数 $t = 5$, 并预测某一条状态转移链中各状态发生概率改变情况如表1所示, 其中 $T_i = 1$ 为突发事件的初始状态.

表1 状态概率转移链

T_i	A_1	A_2	A_3	A_4
1	0.4	0.3	0.2	0.1
2	0.3	0.3	0.3	0.1
3	0.2	0.3	0.4	0.1
4	0.1	0.2	0.6	0.1
5	0.1	0.1	0.7	0.1

从表1可以看出, 该条状态链预测未来 A_3 状态发生的概率会不断增大, 而应急指挥中心将组织决策者进行5轮重复决策, 要求每一轮中的决策者均需根据给定的事件状态概率重新给出判断矩阵.

3.2 决策过程

下面根据本文方法进行决策. 当 $T_i = 1$ 时, 应急指挥中心预测各状态发生的概率为 $p = (0.4, 0.3, 0.2, 0.1)$, 首先要求每个决策者对方案进行两两比较并给出偏好判断矩阵, 决策者1的互反判断矩阵如下表2所示(其他决策者此处省略).

表2 决策者1在不同准则下的互反判断矩阵

	C_1			C_2			C_3			C_4		
A_1	1	2	8	1	3	9	1	1	8	1	1	3
	0.5	1	4	0.333	1	3	1	1	8	1	1	3
	0.125	0.25	1	0.111	0.333	1	0.125	0.125	1	0.333	0.333	1
A_2	1	3	6	1	1	2	1	3	3	1	1	4
	0.333	1	2	1	1	2	0.333	1	1	1	1	4
	0.167	0.5	1	0.5	0.5	1	0.333	1	1	0.25	0.25	1
A_3	1	0.167	0.167	1	0.25	0.25	1	0.111	0.111	1	2	2
	6	1	1	4	1	1	9	1	1	0.5	1	1
	6	1	1	4	1	1	9	1	1	0.5	1	1
A_4	1	0.5	0.167	1	0.333	0.167	1	0.167	0.5	1	0.25	0.5
	2	1	0.333	3	1	0.5	6	1	3	4	1	2
	6	3	1	6	2	1	2	0.333	1	2	0.5	1

由表2易知,决策者1的判断矩阵为满足一致性的互反判断矩阵. 现利用式(8)将决策者1在不同准则下的互反判断矩阵进行集结,得到不同状态下的决策者1的互反判断矩阵. 重复上述步骤,并运用式(9)和(10),将互补判断矩阵转换为互反判断矩阵,最终可得全体决策者的互反判断矩阵. 由于本案例采用的互反判断矩阵的标度为9标度,注意到所有决策者转换后的判断值均在区间[0,9]内,若出现大于该区间的互反判断矩阵,则需通过下式进行转换:

$$b_{ij} = (1 + \log^{a_{ij}})/2, \quad i = 1, 2, \dots, 9, \quad j = 1, 2, \dots, 9. \quad (25)$$

根据文献[29]对上述互反判断矩阵进行聚类可得结果如表3所示.

表3 聚类结果($\gamma = 0.15$)

C_1	C_2	C_3	C_4
1, 2, 3, 5, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20	4, 6, 10	7, 8, 9	11, 16

当阈值 $\gamma = 0.15$ 时,不存在单独决策者成一聚集,故该阈值情况下的聚集较佳. 从而可得各聚集小组权重为 $u = (0.6, 0.15, 0.15, 0.1)$;聚集内决策者权重

$$\begin{aligned} \theta_{11} &= (0.0167, 0.0790, 0.0513, 0.1580, \\ &\quad 0.0852, 0.1799, 0.0359, 0.0521, \\ &\quad 0.0287, 0.0269, 0.1717, 0.1145), \\ \theta_{12} &= (0.1279, 0.6266, 0.2455), \\ \theta_{13} &= (0.3499, 0.2281, 0.4220), \\ \theta_{14} &= (0.4848, 0.5152); \end{aligned}$$

聚集数 $k = 4$. 然后,利用式(14)对互反判断矩阵进行排序,将判断矩阵转换为效用值形式,并对每个决策者计算其正、负理想参考点,可得其收益以及损失矩阵,再根据累积前景理论公式(1)~(5)和(17)~(19),可得各个决策者在当前状态概率下($T_i = 1$)的最终前景值如表4所示.

表4 大群体决策者的总体前景值

	DM1	DM2	DM3	DM4	DM5	DM6	DM7	DM8	DM9	DM10
S_1	-0.1069	0.587	0.5414	0.5111	0.5245	0.2402	0.5152	0.5389	0.2111	-0.3277
S_2	-0.1701	-0.5748	-0.6722	-0.8918	-0.4149	-0.1183	-0.3357	-1.0041	-0.0289	0.2948
S_3	-0.5408	-0.967	-1.2303	-1.3883	-1.2618	-1.0834	-1.2422	-1.2274	-0.9612	-0.6432
	DM11	DM12	DM13	DM14	DM15	DM16	DM17	DM18	DM19	DM20
S_1	0.5009	-0.3531	-0.3435	-0.2441	-0.1246	-0.2024	-0.1688	-0.5515	0.5889	-0.5527
S_2	-0.8778	-0.2004	-0.4964	-0.9326	0.1009	-0.0355	-0.2856	0.2201	-0.7592	-0.1438
S_3	-1.1585	-0.4019	-0.4873	-0.4197	-1.1441	-0.6876	-1.0537	-0.3233	-1.3424	0.0884

至此,第1轮决策结束.经过5轮重复决策后,可得决策者1的偏好状态转移矩阵

$$T_r = \begin{bmatrix} 0.75 & 0 & 0.25 \\ 0.25 & 0.5 & 0.25 \\ 0 & 0.25 & 0.75 \end{bmatrix}.$$

根据式(21)~(23)可得该条状态链下大群体决策结果如表5所示.

表5 状态链下大群体决策结果

T_i	S_1	S_2	S_3
1	-0.2135	-0.4733	-0.4493
2	-0.2341	-0.4957	-0.4087
3	-0.2452	-0.5421	-0.3907
4	-0.2698	-0.5672	-0.3794
5	-0.2958	-0.5724	-0.3628

最后,根据式(24)可得大群体最终方案排序结果为 $A = (-0.2517, -0.5301, -0.3083)$. 可见各方案的最终总体前景值均为负值,这表明应急事件会给决策者带来的负面影响,即决策者对方案的前景值均为损失值,且若未来状态 A_3 的出现概率逐渐增大,则受决策者偏好转移影响下的当前突发状态下的最优方案为 S_1 . 以此类推,可以计算其他状态链下(如状态 A_2 的概率逐渐增大)的最优方案,可将这些方案作为预案,再根据实际情况进行选择,从而加快应急响应速度并减少决策风险.

3.3 方法比较与讨论

为了验证本文方法的有效性,将本文方法与文献[18]进行对比.文献[18]针对突发事件进行应急决策只考虑了传统的累积前景理论方法,并没有考虑动态环境下决策者偏好转移情况,因此,利用文献[18]的方法得到方案的最终结果为(0.1328, -0.3748, -0.8940),最优方案为 S_1 . 通过比较可以发现这两种方法虽然都确定 S_1 为最优方案,但是对于 S_2 和 S_3 却具有相反的排序,造成这样结果的主要原因是在未来发展阶段,决策者对 S_2 和 S_3 的偏好会发生较大变动,表明 S_2 和 S_3 方案容易受事件状态变化的影响. 本文认为不考虑决策者偏好转移的影响而只针对当前事件状态作出决策结果是不准确的,因为这种决策结果较为脆弱,极易受到未来决策者偏好变化的影响,这也是本文提出在应急决策中要考虑决策者偏好转移的主要原因.

4 结论

通过上述案例分析可以发现,在应急决策过程中,决策者群体的偏好并不是保持不变,而是随着事

件发生状态的改变,大部分决策者的偏好均会发生明显转移,这充分反映了大群体决策过程是一个动态演化的过程,在对应急方案进行决策时,必须要考虑到动态的应急事件对决策群体心理偏好的影响. 此外,绝大部分决策者的前景值均为负值也表明了应急事件给决策者带来的一般都是损失效用,应急决策具有极大的风险性. 基于应急决策的突发性和时间紧迫性,若在应急决策过程中,根据信息的不断完善再去进行大群体决策,可能会导致决策缓慢,从而错失最佳反应时间. 因此,针对风险型应急响应,采用本文的方法可以提前预测在不同状态链下决策群体的偏好状态转移趋势,从而提前得出在各不同发展状态下的最佳方案. 与传统的决策方法相比,利用此方法得到的最优方案综合了决策者心理因素和偏好转移对其决策的影响,因此该方法更加适应于风险型动态应急决策领域. 此外,应急指挥中心可以将这些不同最优方案作为应急预案,再根据实时情况进行选择,从而大幅度减少应急响应事件的反应时间,最大限度降低应急事件给社会造成的损失.

参考文献(References)

- [1] Zook M, Graham M, Shelton T, et al. Volunteered geographic information and crowdsourcing disaster relief: A case study of the haitian earthquake[J]. World Medical Health Policy, 2010, 2(2): 7-33.
- [2] Gao H, Barbier G, Goolsby R, et al. Harnessing the crowdsourcing power of social media for disaster relief[J]. IEEE Intelligent Systems, 2011, 26(3): 10-14.
- [3] 宋光兴, 杨槐. 群决策中的决策行为分析[J]. 学术探索, 2000, 13(3): 48-49.
(Song G X, Yang H. Decision behavior analysis in group decision making[J]. Academic Exploration, 2000, 13(3): 48-49.)
- [4] 姜平. 突发事件应急管理[M]. 北京: 国家行政学院出版社, 2011: 10-16.
(Jiang P. Emergency management[M]. Beijing: National School of Administration Press, 2011: 10-16.)
- [5] Fan Z P, Li Y H, Zhang Y. Generating project risk response strategies based on CBR: A case study[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(6): 2870-2883.
- [6] Gao J, Li M, Liu H. Generalized ordered weighted utility averaging-hyperbolic absolute risk aversion operators and their applications to group decision making[J]. European J of Operational Research, 2015, 243(1): 258-270.
- [7] Chen J, Zhong P A, Xu B, et al. Risk analysis for real-time flood control operation of a reservoir[J]. J of Water Resources Planning and Management, 2015, 141(8): 1-10.
- [8] Kahneman D, Tversky A N. Prospect theory: An analysis of decision under risk[J]. Econometrica, 1979, 47(2):

- 263-291.
- [9] Bell D E. Regret in decision making under uncertainty[J]. *Operations Research*, 1982, 30(5): 961-981.
- [10] Bell D E. Disappointment in decision making under uncertainty[J]. *Operations Research*, 1985, 33(1): 1-27.
- [11] Loomes G, Sugden R. Regret theory: An alternative theory of rational choice under uncertainty[J]. *The Economic J*, 1982, 92(368): 805-824.
- [12] Loomes T, Sugden R. Disappointment and dynamic consistency in choice under uncertainty[J]. *The Review of Economic Studies*, 1986, 53(2): 271-282.
- [13] 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 dominance[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(8): 1429-1433.)
- [14] Tversky A, Kahneman D. Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty[J]. *J of Risk and Uncertainty*, 1992, 5(4): 297-323.
- [15] Han B, Zank H. Additive utility in prospect theory[J]. *Management Science*, 2009, 55(5): 863-873.
- [16] Hu J, Yang L. Dynamic stochastic multi-criteria decision making method based on cumulative prospect theory and set pair analysis[J]. *Systems Engineering Procedia*, 2011, 1(1): 432-439.
- [17] Schmidt U, Zank H. Risk aversion in cumulative prospect theory[J]. *General Information*, 2002, 54(1): 208-216.
- [18] Liu Y, Fan Z P, Zhang Y. Risk decision analysis in emergency response: A method based on cumulative prospect theory[J]. *Computers & Operations Research*, 2014, 42(2): 75-82.
- [19] Wang L, Zhang Z X, Wang Y M. A prospect theory-based interval dynamic reference point method for emergency decision making[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(23): 9379-9388.
- [20] Jou R C, Chen K H. An application of cumulative prospect theory to freeway drivers route choice behaviours[J]. *Transportation Research Part A Policy & Practice*, 2013, 49(3): 123-131.
- [21] Bocquého G, Jacquet F, Reynaud A. Expected utility or prospect theory maximisers Assessing farmers' risk behaviour from field-experiment data[J]. *European Review of Agricultural Economics*, 2014, 41(1): 135-172.
- [22] Shi Y, Cui X, Li D. Discrete-time behavioral portfolio selection under cumulative prospect theory[J]. *J of Economic Dynamics & Control*, 2015, 61(12): 283-302.
- [23] 王亮, 王应明, 胡勃兴. 基于前景理论的应急方案动态调整方法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(1): 99-104.
(Wang L, Wang Y M, Hu B X. Dynamic adjusting method of emergency alternatives based on prospect theory[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(1): 99-104.)
- [24] 张炳江. 基于方案修订的群决策一致性形成的研究[J]. *控制与决策*, 2014, 29(10): 1914-1920.
(Zhang B J. Research on consistency formation of group decision making based on alternative adjustment[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(10): 1914-1920.)
- [25] Shen H, Zhao J, Huang W W. Mission-critical group decision-making: Solving the problem of decision preference change in group decision-making using Markov chain model[J]. *J of Global Information Management*, 2008, 16(2): 35-57.
- [26] Harsanyi J C. Cardinal welfare, individualistic ethics, and interpersonal comparisons of utility[J]. *J of Political Economy*, 1955, 63(4): 309-321.
- [27] Yager R, Rybalov A. Uninorm aggregation operators[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1996, 80(1): 111-120.
- [28] Aczel J, Saaty T L. Procedures for synthesizing ratio judgements[J]. *J of Mathematical Psychology*, 1983, 27(1): 93-102.
- [29] 徐选华, 范永峰. 改进的蚁群聚类算法及在多属性大群体决策中的应用[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(2): 346-349.
(Xu X H, Fan Y F. Improved ants-clustering algorithm and its application in multi-attribute large group decision making[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(2): 346-349.)
- [30] 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 multigranularity attributes[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(10): 1908-1914.)
- [31] Krohling R A, Souza T T M. Two examples of application of TOPSIS to decision making problems[J]. *Salesian J on Information Systems*, 2011(8): 31-35.

(责任编辑: 李君玲)