

文章编号: 1001-0920(2013)12-1859-05

突发事件下选择应急方案的风险决策方法

李仕峰, 杨乃定, 张云翌

(西北工业大学 管理学院, 西安 710129)

摘要: 针对突发事件应急方案选择问题, 提出一种考虑决策者行为因素的混合多属性风险决策方法. 首先, 分析归纳突发事件应急方案选择问题决策信息结构的基本特征; 然后, 引入前景理论中的价值函数, 通过将备选方案两两比较和基元情景交叉判断的方式计算方案各属性的前景价值, 并运用二元语义模型计算各方案的综合价值, 据此确定方案排序; 最后, 通过算例研究表明了所提出方法的有效性和可行性.

关键词: 应急方案选择; 风险决策; 行为因素; 两两比较; 交叉判断

中图分类号: C934

文献标志码: A

Risk decision analysis method for emergency plan selection

LI Shi-feng, YANG Nai-ding, ZHANG Yun-yi

(School of Management, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China. Correspondent: LI Shi-feng, E-mail: sfengli@yeah.net)

Abstract: A hybrid multi-attribute risk decision analysis method considering decision maker's behavioral factors is proposed to solve the emergency plan selection problem. Firstly, basic paradigms of decision information structures of the problem are induced. Then, the value function of prospect theory is applied to calculate the prospect value of each alternative property under the thought of pair-wise comparison of choice schemes and cross judgment of basic situations. Furthermore, the overall value of each plan is calculated to determine a ranking of alternatives based on the two-tuple model. Finally, examples are given to demonstrate the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words: emergency plan selection; risk decision-making; behavioral factor; pairwise comparison; cross judgment

0 引言

突发事件是指在一定区域内发生、规模较大且对社会产生广泛负面影响、对生命和财产构成严重威胁的事件或者灾难^[1]. 近年来, 国内外突发事件的频繁发生(如美国的“911”事件, 印度洋海啸, 日本福岛核危机, 我国的非典疫情, 汶川大地震和南方冰灾等)引起了社会各界的广泛关注. 在应对处理突发事件过程中, “情景-预案”范式是最基本, 也是最常用的方法, 如何在突发事件爆发之初从多个备选方案中选择最优方案对突发事件进行响应是该方法的关键环节之一. 因此, 关于突发事件应急方案选择方法的研究具有十分重要的理论意义和实际应用价值.

正如应急管理专家 Tufekci 和 Wallace 所言, 应急管理本质上是一个复杂的多目标优化问题^[2]. 多目标决策理论已广泛应用于突发事件的应急决策, 例如 Hmäläinen 等^[3]和徐志新等^[4]针对核事故应急方案选

择问题, 分别提出了一种基于多属性效用理论的决策方法; Jens Körte^[5]针对应急环境高度不确定性的特征, 提出了一种包括定义、建模、分析及标准化定义等9个步骤的偶然性风险决策分析方法; 杨文国等^[6]对于考虑信息缺失的两阶段应急处置问题, 提出了应急方案效度的概念, 构造了考虑资源约束条件下的应急方案选择模型; Fu^[7]针对防洪调度应急方案选择问题, 提出了基于 F-TOPSIS 的决策方法; 张云龙等^[8]针对应急决策中许多信息难以定量描述的问题, 运用模糊集合理论, 建立了在事故灾难复杂环境下对应急决策进行动态调整的模糊群体决策方法; 邬文帅等^[9]针对应急环境下的信息具有不确定性和模糊性的特征, 集成模糊理论、灰色系统理论和多目标决策理论, 提出了一种改进的模糊多目标应急决策方法. 这些方法均遵循传统的完全理性决策范式, 缺乏对决策者行为因素的考虑, 很有可能会产生不合理的决策

收稿日期: 2012-09-03; 修回日期: 2012-11-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71171162).

作者简介: 李仕峰(1987—), 男, 博士生, 从事决策理论与方法、应急管理的研究; 杨乃定(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事管理系统工程、应急管理、项目管理等研究.

结果. 目前, 关于考虑决策者行为因素的应急决策方法的研究尚处于起步阶段, 樊治平等^[10]针对应急方案对突发事件发展演变存在干预并可能导致不同的人员伤亡和财产损失的情形, 提出了一种基于前景理论的应急预案风险决策方法. 该方法能够较好地反映决策者心理行为特征, 但它依赖于决策者主观设定的参照点, 换言之, 决策者设定的参照点不同, 所得到的决策结果就很可能不同, 这无疑大大影响了方法的稳定性. 此外, 不难发现已有的关于突发事件应急方案选择问题的研究, 大多是属性值为单一数据类型的决策分析方法.

综上所述, 本文针对突发事件应急方案选择问题, 分析归纳了其决策信息结构的基本特征, 提出了一种考虑决策者行为因素的混合多属性风险决策方法. 所提出方法的基本思路为: 引入前景理论中的价值函数, 通过将备选方案两两比较、基元情景交叉判断的方式计算出方案各属性的前景价值; 然后, 基于二元语义模型统一化处理不同数值形式的属性前景价值, 计算出各方案的综合价值, 据此确定方案排序.

1 问题与方法

1.1 问题描述

突发事件的应急环境比较复杂, 其演变过程具有较强的不确定性, 因此突发事件应急方案的选择问题常常是风险决策问题. 为了方便研究, 规定一些基本符号如下:

$S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 表示突发事件可能出现的 n 个基元情景的集合;

$A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ 表示突发事件下 m 个备选应急方案的集合;

$C = \{C_1, C_2, \dots, C_l\}$ 表示应急方案的属性集合;

$w = (w_1, w_2, \dots, w_l)$ 表示属性权重向量, 通常情况下 w 由决策者直接给出, 且满足 $\sum_{k=1}^l w_k = 1$;

$P = [P(S_j|A_i)]_{m \times n} = [p_{ij}]_{m \times n}$ 表示情景概率矩阵, $P(S_j|A_i)$ 表示执行方案 A_i 时情景 S_j 发生的可能性, 且 p_{ij} 满足 $p_{ij} \in [0, 1]$, $\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1$;

$Q_{C_k} = [Q_{C_k}(S_j|A_i)]_{m \times n} = [q_{ij}^k]_{m \times n}$ 表示情景结果矩阵, q_{ij}^k 表示执行方案 A_i 并出现情景 S_j 时方案属性 C_k 的结果值 (可以是精确数、区间数、三角模糊数或语言模糊数中的某一类).

本文要解决的问题是, 根据情景概率矩阵 P 、情景结果矩阵 Q_{C_k} 和属性权重向量 w , 如何通过科学有效的决策分析方法对应急方案进行排序或择优.

下面综合已有的研究成果, 依据方案执行与情景

发生 (概率和结果两个维度) 的不同关系, 进一步分析归纳突发事件应急方案选择问题决策信息结构的基本特征.

模式 1 (概率相同, 结果不同) 应急方案的执行不影响情景的概率分布, 但关系到情景结果. 比如, 在核事故应急中, 气象条件往往会影响应急方案的执行效果. 显然, 未来的天气状况具有不确定性, 且一般不会受到方案执行的影响. 对于此类突发事件应急方案的选择, 其决策信息结构模式可以抽象为

$$\begin{cases} P(S_j|A_{i_1}) = P(S_j|A_{i_2}), i_1 \neq i_2; \\ P[(S_j|A_{i_1})|(S_j|A_{i_2})] = 1, i_1 \neq i_2; \\ P[(S_{j_1}|A_{i_1})|(S_{j_2}|A_{i_2})] = 0, i_1 \neq i_2, j_1 \neq j_2; \\ \exists C_k \Rightarrow Q_{C_k}(S_j|A_{i_1}) \neq Q_{C_k}(S_j|A_{i_2}), i_1 \neq i_2. \end{cases} \quad (1a)$$

模式 2 (结果相同, 概率不同) 应急方案的执行决定情景的概率分布, 但无关情景结果. 比如, 在流行病防控应急中, 习惯将未来疫情分为几种基本状态, 然后结合方案执行后各种疫情状态出现的可能性来描述方案前景, 通常基本的疫情状态具有稳定的标志性结果. 对于此类突发事件应急方案的选择, 其决策信息结构模式可以抽象为

$$\begin{cases} \exists S_j \Rightarrow P(S_j|A_{i_1}) \neq P(S_j|A_{i_2}), i_1 \neq i_2; \\ P[(S_{j_1}|A_{i_1}), (S_{j_2}|A_{i_2})] = \\ P(S_{j_1}|A_{i_1}) \cdot P(S_{j_2}|A_{i_2}), i_1 \neq i_2; \\ Q_{C_k}(S_j|A_{i_1}) = Q_{C_k}(S_j|A_{i_2}), i_1 \neq i_2. \end{cases} \quad (1b)$$

1.2 决策方法

为了解决上文描述的突发事件应急方案选择问题, 下给给出一种考虑决策者行为因素的混合多属性风险决策方法.

Step 1 属性前景价值的计算.

引入累积前景理论中的价值函数^[11], 同时受层次分析法^[12]、三代前景理论^[13]和后悔理论^[14]思想的启发, 通过将备选方案两两比较、基元情景交叉判断的方式计算方案各属性的前景价值, 公式为

$$V(C_k|A_{i_1}) = \frac{1}{m-1} \sum_{i_2=1, i_2 \neq i_1}^m \sum_{j_1=1}^n \sum_{j_2=1}^n \{u(q_{i_1 j_1}^k), q_{i_2 j_2}^k) \cdot P[(S_{j_1}|A_{i_1}), (S_{j_2}|A_{i_2})]\}. \quad (2)$$

其中: $V(C_k|A_{i_1})$ 表示执行方案 A_{i_1} 时属性 C_k 的前景价值; $u(*)$ 为累积前景理论中的价值函数. 当 C_k 为效益型属性时, 有

$$u(q_{i_1 j_1}^k, q_{i_2 j_2}^k) = \begin{cases} (q_{i_1 j_1}^k - q_{i_2 j_2}^k)^\alpha, q_{i_1 j_1}^k \geq q_{i_2 j_2}^k; \\ -\lambda(q_{i_2 j_2}^k - q_{i_1 j_1}^k)^\beta, q_{i_1 j_1}^k < q_{i_2 j_2}^k. \end{cases} \quad (3a)$$

当 C_k 为成本型属性时, 有

$$u(q_{i_1 j_1}^k, q_{i_2 j_2}^k) = \begin{cases} -\lambda(q_{i_1 j_1}^k - q_{i_2 j_2}^k)^\beta, & q_{i_1 j_1}^k \geq q_{i_2 j_2}^k; \\ (q_{i_2 j_2}^k - q_{i_1 j_1}^k)^\alpha, & q_{i_1 j_1}^k < q_{i_2 j_2}^k. \end{cases} \quad (3b)$$

其中: α 和 β 分别表示“收益”和“损失”时价值函数的凸凹程度, λ 表示决策者对“损失”的厌恶程度.

需进一步说明的是, 当突发事件应急方案的决策信息结构符合模式 1 时, 由式 (1a) 和 (2) 可知

$$V(C_k|A_{i_1}) = \frac{\sum_{i_2=1, i_2 \neq i_1}^m \sum_{j=1}^n p_{i_1 j} \cdot u(q_{i_1 j}^k, q_{i_2 j}^k)}{m-1}; \quad (4a)$$

当突发事件应急方案的决策信息结构符合模式 2 时, 由式 (1b) 和 (2) 可知

$$V(C_k|A_{i_1}) = \frac{1}{m-1} \sum_{i_2=1, i_2 \neq i_1}^m \sum_{j_1=1}^n \sum_{j_2=1}^n \{p_{i_1 j_1} \cdot p_{i_2 j_2} \cdot u(q_{i_1 j_1}^k, q_{i_2 j_2}^k)\}. \quad (4b)$$

为方便计算, 当属性值为语言模糊数时, 不妨令 $q_{i_j}^k \in s$, 其中 $s = \{s_0, s_1, \dots, s_g\}$ 为语意变量集, 且 $s_0 < s_1 < \dots < s_g$; 若 $q_{i_j}^k = s_t$, 则不妨记 $q_{i_j}^k = t, t = 0, 1, \dots, g$.

此外, 规定三角模糊数和区间数运算法则为: 设 k 为实数, 若 $a = [a^L, a^U]$ 和 $b = [b^L, b^U]$ 为区间数, 则

$$\begin{aligned} a + b &= [a^L + b^L, a^U + b^U], \\ a - b &= [a^L - b^U, a^U - b^L], \\ ka &= [ka^L, ka^U]; \end{aligned} \quad (5a)$$

若 $a = [a^L, a^M, a^U]$ 和 $b = [b^L, b^M, b^U]$ 为三角模糊数, 则

$$\begin{aligned} a + b &= [a^L + b^L, a^M + b^M, a^U + b^U], \\ a - b &= [a^L - b^U, a^M - b^M, a^U - b^L], \\ ka &= [ka^L, ka^M, ka^U]. \end{aligned} \quad (5b)$$

至此, 综合式 (3a)~(5b) 即可计算出相应情况下的属性前景价值 $V(C_k|A_i)$, 以下记为 $V_{ki}, i=1, 2, \dots, m, k=1, 2, \dots, l$.

Step 2 属性前景价值的规范化.

为了消除不同量纲对计算结果的影响, 将 V_{ki} 规范化为 $|V_{ki}|$, 方法如下:

当 V_{ki} 为精确数时, 有

$$|V_{ki}| = (V_{ki} - \min_j V_{kj}) / (\max_j V_{kj} - \min_j V_{kj}); \quad (6a)$$

当 V_{ki} 为区间数时, 不妨记 $V_{ki} = [V_{ki}^L, V_{ki}^U]$, 则

$$\begin{cases} |V_{ki}^L| = \frac{V_{ki}^L - \min_j V_{kj}^L}{\max_j V_{kj}^U - \min_j V_{kj}^L}, \\ |V_{ki}^U| = \frac{V_{ki}^U - \min_j V_{kj}^L}{\max_j V_{kj}^U - \min_j V_{kj}^L}; \end{cases} \quad (6b)$$

当 V_{ki} 为三角模糊数时, 不妨记 $V_{ki} = [V_{ki}^L, V_{ki}^M,$

$V_{ki}^U]$, 则

$$\begin{cases} |V_{ki}^L| = \frac{V_{ki}^L - \min_j V_{kj}^L}{\max_j V_{kj}^U - \min_j V_{kj}^L}, \\ |V_{ki}^M| = \frac{V_{ki}^M - \min_j V_{kj}^L}{\max_j V_{kj}^U - \min_j V_{kj}^L}, \\ |V_{ki}^U| = \frac{V_{ki}^U - \min_j V_{kj}^L}{\max_j V_{kj}^U - \min_j V_{kj}^L}. \end{cases} \quad (6c)$$

Step 3 属性前景价值的统一化.

为了集结不同数值形式的 $|V_{ki}|$, 运用二元语义模型^[15-16] 将 $|V_{ki}|$ 统一化为二元语言形式的 \bar{V}_{ki} , 方法如下:

令 $s = \{s_0, s_1, \dots, s_g\}$ 为语意变量集, 且 $s_0 < s_1 < \dots < s_g$. 若 $|V_{ki}|$ 为精确数, 则有

$$\begin{aligned} \bar{V}_{ki} &= \Delta(|V_{ki}|) = (s_t, \alpha_t); \\ \Delta: \begin{cases} t = \text{round}(|V_{ki}| \cdot g), & t \in \{0, 1, \dots, g\}; \\ \alpha_t = |V_{ki}| \cdot g - t, & \alpha_t \in [-0.5, 0.5]. \end{cases} \end{aligned} \quad (7a)$$

其中 round 为四舍五入取整算子. 此外

$$\Delta^{-1}(\bar{V}_{ki}) = \Delta^{-1}(s_t, \alpha_t) = \frac{t + \alpha_t}{g}. \quad (7b)$$

若 $|V_{ki}|$ 为区间数或三角模糊数, 则首先计算 $|V_{ki}|$ 与 s 中每个语意变量的交集度, 即

$$\tau_r = \max_x \min\{\eta_{|V_{ki}|}(x), \eta_{s_r}(x)\}, \quad r = 0, 1, \dots, g, \quad (8a)$$

其中 $\eta_X(x) (x \in X)$ 表示 X 的隶属度函数; 然后依据式 (7a) 计算 $\Delta(\delta)$ 即可将区间数或三角模糊数形式的 $|V_{ki}|$ 转化为 \bar{V}_{ki} , $\Delta(\delta)$ 中 δ 为

$$\delta = \sum_{r=0}^g (r \cdot \tau_r) / \left(g \cdot \sum_{r=0}^g \tau_r \right). \quad (8b)$$

Step 4 方案综合价值的计算.

运用二元语义加权平均算子计算方案综合价值

$$\begin{aligned} \bar{V}(A_i) &= w \cdot \bar{V}_{ki} = \Delta \left[\sum_{k=1}^l w_k \cdot \Delta^{-1}(\bar{V}_{ki}) \right], \\ i &= 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (9)$$

根据 $\bar{V}(A_i)$ 的大小即可对应急方案进行排序和择优.

2 算例应用

例 1 核电事故应急方案选择.

以核电事故应急方案选择问题为背景, 说明模式 1 下方法的潜在应用. 基于文献 [4] 编制算例如下.

某核电站发生 PWR5 事故放射性物质释放事件, 预计未来风场状况可能为 S_1, S_2 或 S_3 , 专家通过统计计算, 同时结合相关经验制定 5 项备选方案 (具体内容见文献 [4]), 并分别确定 3 种风场状况下各方案的属性值 (见表 1). 其中方案属性集 $C = \{\text{可避免最大}$

个人剂量 (C_1), 可避免集体剂量 (C_2), 代价费用 (C_3), 社会心理影响 (C_4), 政治影响 (C_5), C_4 和 C_5 在语义变量集 $s = \{s_0, s_1, \dots, s_8\}$ 中取值, 且 $s_0 < s_1 < \dots < s_8$. 此外, 已知 3 种风场发生的先验概率分别为 0.3, 0.5 和 0.2, 方案属性权重向量为 $w = (0.15, 0.2, 0.05, 0.25, 0.35)$.

表 1 不同风场状况下各方案的属性值

S_1	$C_1/(mSv)$	$C_2/(10^4 mSv)$	$C_3/(10^6 \text{元})$	C_4	C_5
A_1	0	0	[0, 0.5]	s_3	s_6
A_2	1 000	[75, 80, 85]	[1, 2]	s_8	s_8
A_3	1 000	[115, 120, 125]	[20, 25]	s_1	s_8
A_4	1 000	[145, 150, 155]	[2, 3]	s_1	s_6
A_5	1 200	[125, 130, 135]	[155, 165]	s_2	s_2

S_2	$C_1/(mSv)$	$C_2/(10^4 mSv)$	$C_3/(10^6 \text{元})$	C_4	C_5
A_1	0	0	[1.5, 3]	s_1	s_3
A_2	900	[55, 60, 65]	[3, 4]	s_5	s_5
A_3	900	[95, 100, 105]	[35, 40]	s_4	s_5
A_4	900	[115, 120, 125]	[3.5, 4.5]	s_4	s_6
A_5	1 100	[105, 110, 115]	[165, 175]	s_4	s_4

S_3	$C_1/(mSv)$	$C_2/(10^4 mSv)$	$C_3/(10^6 \text{元})$	C_4	C_5
A_1	0	0	[25, 30]	s_0	s_0
A_2	800	[35, 40, 45]	[20, 25]	s_2	s_2
A_3	800	[75, 80, 85]	[47, 52]	s_6	s_2
A_4	800	[95, 100, 105]	[20, 25]	s_7	s_2
A_5	1 000	[95, 100, 105]	[180, 200]	s_6	s_6

显然, 此问题的决策信息结构符合“概率相同, 结果不同”的模式. 鉴于此, 运用所提出的方法解决该问题, 具体过程如下:

首先, 综合式 (3a)、(3b)、(4a)、(5a) 和 (5b) 计算出方案各属性的前景价值 (取式 (3a) 和 (3b) 中 $\alpha = 0.89$, $\beta = 0.92$, $\lambda = 2.25^{[11]}$), 结果见表 2; 然后, 运用式 (6a) ~ (6c) 规范化属性前景价值, 结果见表 3; 进一步, 运用式 (7a) ~ (8b) 统一化属性前景价值, 结果见表 4; 最后, 在表 4 所示结果的基础上, 依据式 (9) 计算出各方案综合价值分别为 $\overline{V}(A_1) = (s_0, 0.4659)$, $\overline{V}(A_2) = (s_7, 0.0912)$, $\overline{V}(A_3) = (s_7, -0.1524)$, $\overline{V}(A_4) = (s_7, 0.0099)$, $\overline{V}(A_5) = (s_5, -0.409)$. 据此确定方案排序为 $A_1 < A_5 < A_3 < A_4 < A_2$.

表 2 不同方案各属性的前景价值

V_{ik}	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
A_1	-1 246.4	[-163.4, -156.3, -149.1]	[25.3, 30.7]	-5.77	-3.72
A_2	33.9	[-65.7, -53.7, -41.5]	[25.4, 30.6]	1.12	0.41
A_3	33.9	[-3.9, 6.4, 17.2]	[-22.1, -11.8]	-1.14	0.41
A_4	33.9	[28.3, 34.5, 39.7]	[24.4, 29.9]	-0.86	0.12
A_5	212	[14.4, 22.6, 30.3]	[-245.7, -225.5]	-0.54	-3.17

表 3 方案属性前景价值的规范化结果

$ V_{ik} $	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
A_1	0	[0, 0.035, 0.071]	[0.980, 1]	0	0
A_2	0.878	[0.481, 0.540, 0.600]	[0.981, 0.9995]	1	1
A_3	0.878	[0.785, 0.836, 0.889]	[0.809, 0.846]	0.671	1
A_4	0.878	[0.944, 0.974, 1]	[0.977, 0.997]	0.712	0.93
A_5	1	[0.875, 0.916, 0.954]	[0, 0.073]	0.758	0.133

表 4 方案属性前景价值的统一化结果

\overline{V}_{ik}	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
A_1	$(s_0, 0)$	$(s_0, 0.364)$	$(s_8, -0.138)$	$(s_0, 0)$	$(s_0, 0)$
A_2	$(s_7, 0.024)$	$(s_4, 0.221)$	$(s_8, -0.132)$	$(s_8, 0)$	$(s_8, 0)$
A_3	$(s_7, 0.024)$	$(s_7, -0.387)$	$(s_7, -0.407)$	$(s_5, 0.367)$	$(s_8, 0)$
A_4	$(s_7, 0.024)$	$(s_8, -0.322)$	$(s_8, -0.159)$	$(s_6, -0.30)$	$(s_7, 0.439)$
A_5	$(s_8, 0)$	$(s_7, 0.413)$	$(s_0, 0.369)$	$(s_6, 0.066)$	$(s_1, 0.067)$

例 2 校园疫情应急方案选择.

以文献 [10] 中阐述的校园 H1N1 疫情应急方案选择问题为例说明模式 2 下方法的潜在应用. 问题基本信息如下: 某校园出现 H1N1 疫情, 校方准备从应急方案 A_1 , A_2 和 A_3 (成本分别为 20 万、40 万和 80 万, 具体内容见文献 [10]) 中选择一个进行应急响应. 通过咨询相关专家, 确定学校将会出现的 3 个可能的基本疫情情景为 S_1 , S_2 和 S_3 . 各情景结果以及执行不同方案时各情景发生的概率分别见表 5 和表 6, 已知方案成本、感染人数和经济损失的权重向量为 $w = (0.1, 0.75, 0.15)$.

表 5 基本疫情情景结果

	感染人数/人	经济损失/万元
S_1	[5, 10]	[5, 10]
S_2	[11, 20]	[20, 30]
S_3	[21, 40]	[40, 60]

表 6 不同方案下各情景发生的概率

p_{ij}	S_1	S_2	S_3
A_1	0.5	0.3	0.2
A_2	0.6	0.25	0.15
A_3	0.7	0.2	0.1

显然, 此问题的决策信息结构符合“结果相同, 概率不同”的模式. 限于篇幅, 该问题的计算过程不再赘述, 最终确定方案排序为 $A_1 < A_2 < A_3$.

3 结 论

本文分析归纳了突发事件应急方案选择问题决策信息结构的基本特征, 提出了一种考虑决策者行为因素的混合多属性风险决策方法. 相比于已有的研究结果, 所提出的方法不仅考虑了决策者的行为因素, 更为重要的是, 方法中“备选方案两两比较、基元情景交叉判断”的做法更贴近于人类的直觉思维模式, 并且可以有效地避免决策结果对决策者主观参照点的依赖, 从而促进决策方法的稳定性. 然而, 突发事件应急决策问题十分复杂, 决策信息往往并不都是完备的, 对此仍需进一步深入研究.

参考文献(References)

[1] 计雷, 池宏, 陈安, 等. 突发事件应急管理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 9-10.
(Ji L, Chi H, Chen A, et al. Emergency management[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 9-10.)

- [2] Tufekci S, Wallace W A. The emerging area of emergency management and engineering[J]. *IEEE Trans on Engineering Management*, 1998, 45(2): 103-105.
- [3] Hmäläinen R P, Lindstedt M R K, Sinkko K. Multiattribute risk analysis in nuclear emergency management[J]. *Risk Analysis*, 2000, 20(4): 455-467.
- [4] 徐志新, 奚树人, 曲静原. 核事故应急决策的多属性效用分析方法[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2008, 48(3): 445-448.
(Xu Z X, Xi S R, Qu J Y. Multi-attribute analysis of nuclear reactor accident emergency decision making[J]. *J of Tsinghua University: Science and Technology*, 2008, 48(3): 445-448.)
- [5] Jens Körte. Risk-based emergency decision support[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2003, 82(3): 235-246.
- [6] 杨文国, 黄钧, 池宏, 等. 信息缺失下的应急方案选择模型及算法研究[J]. *中国管理科学*, 2007, 15(专辑): 729-732.
(Yang W G, Huang J, Chi H, et al. The study on the choosing emergency plan problem with incomplete information[J]. *Chinese J of Management Science*, 2007, 15(S): 729-732.)
- [7] Fu G T. A fuzzy optimization method for multicriteria decision making: An application to reservoir flood control operation[J]. *Expert Systems with Applications*, 2008, 34(1): 145-149.
- [8] 张云龙, 刘茂, 李剑峰. 模糊群体决策方法在应急决策中的应用[J]. *中国安全科学学报*, 2009, 12(2): 33-37.
(Zhang Y L, Liu M, Li J F. The application of fuzzy group decision method to the decision-making of emergency[J]. *China Safety Science J*, 2009, 12(2): 33-37.)
- [9] 郭文帅, 寇纲, 彭怡, 等. 面向突发事件的模糊多目标应急决策方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(6): 1298-1304.
(Wu W S, Kou G, Peng Y, et al. A fuzzy multi-criteria emergency decision-making method[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2012, 32(6): 1298-1304.)
- [10] 樊治平, 刘洋, 沈荣鉴. 基于前景理论的突发事件应急响应风险决策方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(5): 977-984.
(Fan Z P, Liu Y, Shen R J. Risk decision analysis method for emergency response based on prospect theory[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2012, 32(5): 977-984.)
- [11] Tversky A, Kahneman D. Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty[J]. *J of Risk and Uncertainty*, 1992, 5(4): 297-323.
- [12] Saaty T L. A scaling method for priorities in a hierarchical structure[J]. *J of Mathematical Psychology*, 1977, 15(3): 234-281.
- [13] Schmidt U, Starmer C, Sugden R. Third-generation prospect theory[J]. *Risk Uncertainty*, 2008, 36(3): 203-223.
- [14] Loomes G, Sugden R. Regret theory: An alternative theory of rational choice under uncertainty[J]. *The Economic J*, 1982, 92(368): 805-824.
- [15] Herrera F, Martinez L. A 2-tuple fuzzy linguistic represent model for computing with words[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2000, 8(6): 746-752.
- [16] Herrera F, Martinez L. Managing non-homogeneous information in group decision making[J]. *European J of Operational Research*, 2005, 166(11): 115-132.