



引用格式:朱兴林,温喜梅.基于前景理论与理想解法的应急预案评估模型[J].科学技术与工程,2020,20(29):12125-12130

Zhu Xinglin, Wen Ximei. Emergency plan evaluation model based on prospect theory and TOPSIS method[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(29): 12125-12130

基于前景理论与理想解法的应急预案评估模型

朱兴林,温喜梅

(新疆农业大学交通与物流工程学院,乌鲁木齐 830052)

摘要 为对突发事件救援确定最优应急预案、提高救援效率,通过选取全面性、时效性、经济性、可操作性4个指标,基于前景理论以及理想解法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)对应急预案优劣排序。首先,专家根据打分标准给出各指标下预案的属性值,并利用Shapley值集结指标;其次,利用直觉模糊熵计算各专家权重值,确定最优方案。以选择最优的应急预案为例,结果表明方法的可行性与实用性。

关键词 应急预案;前景理论;直觉梯形模糊数;Shapley值;理想解法(TOPSIS)

中图分类号 U298.6; **文献标志码** A

Emergency Plan Evaluation Model Based on Prospect Theory and TOPSIS Method

ZHU Xing-lin, WEN Xi-mei

(School of Transportation and Logistics Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumuqi 830052, China)

[Abstract] To determine the optimal emergency plan for emergency rescue and improve rescue efficiency, four indicators of comprehensiveness, timeliness, economy, and operability were selected, and the pros and cons of the emergency plan were ranked based on the prospect theory and the technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) method. At beginning, the attribute values of the plans were given by experts under each indicator according to the scoring scheme, and the Shapley value was used to aggregate the indicators. Secondly, the intuitionistic fuzzy entropy was used to calculate the weight values of each expert to determine the optimal solution. The test of the optimal emergency plan shows good feasibility and practicability of the method.

[Key words] emergency plan; prospect theory; intuitionistic trapezoidal fuzzy number; Shapley value; technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS)

目前,交通建设快速发展,但事故发生率以及造成的损失相对来说较高,存在严重的安全问题,主要原因在于规划以及救援方面不足,救援方案是否合适直接影响着救援效果^[1]。应急预案主要是路面交通事故以及对公共事件地震等救援处理并且为提高救援效率、减少伤亡率的一项行动指南。通过对应急预案的评估,可以从中发现预案存在的问题,同时也可以对应急预案提出建议,对应急预案进一步优化,从而也提高了预案的科学性,在实际工作救援中更加具有操作性、针对性。

应急预案的评估方法多为层次分析法、层次分析法的改进序关系分析法(G1)^[2]、多属性决策方法^[3]等。常建鹏等^[4]针对指标之间具有一定的联系性、信息的模糊性,以提高列车脱轨事件救援的应急能力为例,提出以直觉梯形模糊数为基础的前

景理论决策模型,在候选的几个方案中确定最优方案;王顺豪^[5]以对高速线路方案的优选为例,提出了基于前景理论和改进理想解法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)灰色关联综合法建立模型,计算结果更加可靠;程铁军等^[6]针对不完全信息突发事件的决策问题,充分考虑决策者有限理性、敏感性等容易受影响的相关因素,利用累计前景理论,构建决策模型并求解;陕振沛等^[7]提到所编制的应急预案与实际存在一定差距,主要利用了TOPSIS法对应急预案评估根据评估结果对预案提出修改意见,考虑到信息的模糊性,把三角形直觉模糊数和TOPSIS方法相结合建立决策模型,以对森林大火扑救为例确定最优应急预案。

针对以上研究的不足与补充,考虑到信息模糊

收稿日期:2019-10-24; 修订日期:2020-03-06

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金(2018D01A21)

第一作者:朱兴林(1971—),女,汉族,乌鲁木齐人,博士,副教授。研究方向:交通运输环境与安全。E-mail: zx13740965@163.com。

性、不确定性特点,现以直觉梯形模糊数为基础,通过前景理论决策模型确定前景值以及利用直觉模糊熵计算专家权重,通过集结专家权重,确定出各应急预案的评估值,最后利用 TOPSIS 法对应急预案评估,确定出符合评估指标的最优预案。

1 评估指标选取

指标的重要性在所有评价活动过程中具有直观的科学性、准确性显示,它不单单影响到整个指标体系所体现的完善程度,而且还直接关系到评价结果是否具有客观性与准确性。孙剑萍等^[8]为了获得更加科学、合理评价救援的效果,同时考虑铁路的不同速度以及现场的调研,构建完整性、可操作性、有效性、针对性、及时性 5 个指标对高铁应急预案进行决策评价。张素丽等^[9]以浙江省突发事件为例,通过因子分析法在选取的 66 种指标中归纳了 4 个具有代表性的因素影响,分别为应急准备、应急救援组织机构、应急响应程序、预案管理,通过对各指标的研究分析发现问题、采取措施。张海龙等^[10]通过建立时间、人员损失、经济损失、社会影响、资源消耗、运输保障及方案的动态调整作为评价对象,一级模型与二级模型相结合共同处理对 5 个应急预案评估,确定应急预案的优劣。

在编制以及对应急预案评估时,应满足其要求内容。应急预案是整个管理工作的具体反映,内容应包括应急救援的整个过程^[11],不仅仅是事故发生过程中的应急救援,还应包括事故发生前的监测、准备过程以及对事故救援后的后续恢复工作等。

应急预案是一项连续的救援工作,从监测准备工作到应急响应救援再到恢复工作等,因此最重要的一项评估标准就是全面性;其次,救援刻不容缓,当救援有效而且时间够快时,进一步保障了人身安全,因此需保证时效性;最后,在救援时要保证救援可以有效展开、有序进行,同时在救援时要避免物资人力的浪费,要确保应急预案的可操作性和经济性。因此,全面性、时效性、可操作性和经济性 4 个方面作为应急预案评估的一套综合指标体系,这 4 个评估指标作为一级指标又可细分为以下几个方面标准,作为二级指标^[12],如表 1 所示。

在全面性指标中,“事故发生前的监测”是指要实事求是监测交通情况,避免在事故发生时没有人发现,不能及时救援。“事故发生前假设的合理性”是指在制定预案时,所考虑的问题以及后面的假设要结合以往情况符合实际。“确定突发事件的类型”是指每一级突发事件对物资都有明确规定。“救援响应中各机构任务分配的合理性”与“后期交通

表 1 预案评估指标
Table 1 Plan evaluation indicators

一级指标	二级指标
全面性	事故发生前的监测;事故发生前假设的合理性;确定突发事件的类型;救援响应中各机构任务分配的合理性;后期交通恢复处理
时效性	救援人员、物资的快速到位;传递与处理信息的快速;及时发布相关信息;后期交通恢复处理
可操作性	确定指挥体系,提高救援能力;预防与响应之间有序衔接、不紊乱;各环节灵活操作、可随机应变;后期交通恢复处理
经济性	建立的应急点应简单,不易过度奢华;资源配置适量;各阶段所需的资源与费用有节制,不浪费

恢复处理”是指在对各部门救援以及后续恢复中任务分配合理,相互配合恢复交通。

在时效性指标中,“救援人员、物资的快速到位”是指要快速救援,人员、物资快速到位进一步保证了生命安全。“传递与处理信息的快速”是指发生事故以及救援的情况要及时传送与处理信息,不耽误救援。“及时发布相关信息”是指避免交通堵塞等问题,及时绕行等。“后期交通恢复处理”是指要有效率处理交通事故、恢复交通,避免二次事故等。

在可操作性指标中,“确定指挥体系,提高救援能力”是指在救援前要加强应急救援训练,提高救援能力。“预防与响应之间有序衔接、不紊乱”与“各环节灵活操作、可随机应变”是指在救援时,灵活有序操作。“后期交通恢复处理”是指处理交通事故、恢复交通,避免二次事故等工作有序进行。

在经济性指标中,“建立的应急点应简单,不易过度奢华”是指建立应急点不应铺张浪费。“资源配置适量”是指对于应急救援,资源不宜过少,但是有些物资不易存放,过多也会浪费,因此资源适量。“各阶段所需的资源与费用有节制,不浪费”在救援过程中应分配合理,所用的资源不能浪费。

在对应急预案评估打分时,不仅仅考虑一级指标,还需确定各指标所对应的详细指标,因此在综合考虑各二级指标要求的基础上,确定在一级评估标准下的评估值。

2 应急预案评估的理论基础及模型构建

一个合适的预案对应急救援有着及其重要的影响,极大提高了救援效率。假设有 m 个备选应急预案,依据各项指标原则, l 位专家对备选的应急预案进行评估,选出最优方案。 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k, \dots, t_l\}$, t_k 表示第 k 个专家, $k = 1, 2, \dots, l$; $R = \{r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_m\}$, r_i 表示第 i 个应急预案, $i = 1,$

$2, \dots, m; Z = \{z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_n\}$, z_j 表示第 j 个指标, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

2.1 直觉梯形模糊数

直觉梯形模糊数可以表述不确定信息的特点, 设 $\tilde{a} = \{([a, b, c, d]; \mu_{\tilde{a}}, [a_1, b, c, d_1]; v_{\tilde{a}})\}$ 为直觉梯形模糊数。当 $a = a_1, d = d_1$ 时, $\tilde{a} = \{([a, b, c, d]; \mu_{\tilde{a}}, v_{\tilde{a}})\}$, $\mu_{\tilde{a}}$ 为隶属度函数, $v_{\tilde{a}}$ 为非隶属度函数, $\pi_{\tilde{a}}(x) = 1 - \mu_{\tilde{a}}(x) - v_{\tilde{a}}(x)$ 表示 \tilde{a} 的犹豫度函数, 值越小, 表示模糊数越确定^[8]。其中, $\mu_{\tilde{a}}$ 和 $v_{\tilde{a}}$ 的计算公式为

$$\mu_{\tilde{a}}(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-d}\mu_{\tilde{a}}, & a \leq x < b \\ \mu_{\tilde{a}}, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}\mu_{\tilde{a}}, & c < x \leq d \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$v_{\tilde{a}}(x) = \begin{cases} \frac{b-x+v_{\tilde{a}}(x-a_1)}{b-a_1}, & a_1 \leq x < b \\ v_{\tilde{a}}, & b \leq x \leq c \\ \frac{x-c+v_{\tilde{a}}(d_1-x)}{d_1-c}, & c < x \leq d_1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$T_a = [a, b, c, d]$ 为 \tilde{a} 的传统梯形模糊数, 且 $\|T_a\| = (|a| + |b| + |c| + |d|)/4$ 。组织评估专家采用直觉梯形模糊数对各项要求及指标打分, 打分标准以及关于直觉梯形模糊数的运算法则参考文献[4]。

2.2 基于前景理论对各预案的评估值

前景理论即风险决策理论, 属于描述型的决策模型, 主要描述了人们在面临决策时如何选择。人们在面对积极的选择时, 往往为风险规避; 面对消极选择时, 往往为风险偏好, 人们会选择冒险一试, 主要应用于营销、投资以及方案的评估等。在做选择时决策者很大程度上更在意收益或损失, 统称为损益, 而不是结果本身, 因此取决于参考点或者期望值的设置。根据事件发生的概率不同, 决策者所赋予的权重也会不同, 因此根据损益值的价值函数以及决策权重可计算出前景价值函数。

若已知专家对应急预案的评估数据为 \tilde{a}_{ij}^k 和专家对各方面的期望值 \tilde{b}_j^k , 相减确定损益 \tilde{e}_{ij}^k ^[13] 为

$$\tilde{e}_{ij}^k = \begin{cases} \tilde{a}_{ij}^k - \tilde{b}_j^k, & \tilde{a}_{ij}^k \geq \tilde{b}_j^k \\ \tilde{b}_j^k - \tilde{a}_{ij}^k, & \tilde{a}_{ij}^k < \tilde{b}_j^k \end{cases} \quad (3)$$

根据损益 \tilde{e}_{ij}^k , 求得相应的价值函数 $\tilde{v}_{ij}^{k(+)}$ 、 $\tilde{v}_{ij}^{k(-)}$ 为

$$\begin{cases} \tilde{v}_{ij}^{k(+)} = (\tilde{e}_{ij}^k)^{\alpha} = \{[(d_{ij}^k - d_j^k)^{\alpha}, (b_{ij}^k - c_j^k)^{\alpha}, (c_{ij}^k - b_j^k)^{\alpha}, (d_{ij}^k - a_j^k)^{\alpha}], \\ \mu_{a_{ij}^k}^{\sim k} - b_j^k, v_{a_{ij}^k}^{\sim k} - b_j^k\}, \\ \tilde{a}_{ij}^k \geq \tilde{b}_j^k \\ \tilde{v}_{ij}^{k(-)} = -\theta(\tilde{e}_{ij}^k)^{\beta} = \{-\theta(d_j^k - a_{ij}^k)^{\beta}, -\theta(c_j^k - b_{ij}^k)^{\beta}, \\ -\theta(b_j^k - c_{ij}^k)^{\beta}, -\theta(a_j^k - d_{ij}^k)^{\beta}\}, \\ \mu_{b_j^k}^{\sim k} - \tilde{a}_{ij}^k, v_{b_j^k}^{\sim k} - \tilde{a}_{ij}^k\}, \\ \tilde{a}_{ij}^k \leq \tilde{b}_j^k \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \mu_{a_{ij}^k}^{\sim k} - b_j^k = \mu_{b_j^k}^{\sim k} - \tilde{a}_{ij}^k = \frac{T_{a_{ij}^k}^{\sim k} \mu_{a_{ij}^k}^{\sim k} + T_{b_j^k}^{\sim k} \mu_{b_j^k}^{\sim k}}{T_{a_{ij}^k}^{\sim k} + T_{b_j^k}^{\sim k}} \\ v_{a_{ij}^k}^{\sim k} - b_j^k = v_{b_j^k}^{\sim k} - \tilde{a}_{ij}^k = \frac{T_{a_{ij}^k}^{\sim k} v_{a_{ij}^k}^{\sim k} + T_{b_j^k}^{\sim k} v_{b_j^k}^{\sim k}}{T_{a_{ij}^k}^{\sim k} + T_{b_j^k}^{\sim k}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: α, β 表示各指标的收益和损失区域价值幂函数的凹凸程度, 通常 $\alpha = \beta = 0.88$; 参数 θ 表征专家对指标的损失与收益的敏感度, θ 越大, 专家对损失的敏感性越强, 通常取 $\theta = 2.25$ ^[4]。

决策者对于权重的判断依据事件发生的概率 p 的大小。对于出现的收益事件, 给出的决策权重为 $\omega^+(p)$; 对于出现的损失事件, 判断的决策权重 $\omega^-(p)$, 即

$$\begin{cases} \omega^+(p) = \frac{p^{\tau}}{[p^{\tau} + (1-p)^{\tau}]^{\frac{1}{\tau}}} \\ \omega^-(p) = \frac{p^{\delta}}{[p^{\delta} + (1-p)^{\delta}]^{\frac{1}{\delta}}} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: τ 和 δ 分别表示收益和损失的估计系数, 分别取值为 0.61 和 0.71^[4]。根据以上计算可确定基于前景理论为基础的前景价值函数 \tilde{v}_{ij}^k , 可确定关于专家 t_k 的综合前景矩阵 V^k 为

$$V^k = [\tilde{v}_{ij}^k]_{m \times n} = \begin{bmatrix} \tilde{v}_{11}^k & \tilde{v}_{12}^k & \dots & \tilde{v}_{1n}^k \\ \tilde{v}_{21}^k & \tilde{v}_{22}^k & \dots & \tilde{v}_{2n}^k \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \tilde{v}_{m1}^k & \tilde{v}_{m2}^k & \dots & \tilde{v}_{mn}^k \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)中: $\tilde{v}_{ij}^k = \tilde{v}_{ij}^{k(+)} \omega^+(p) + \tilde{v}_{ij}^{k(-)} \omega^-(p)$, $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。

2.3 基于 Shapley 值各专家对各预案的评估值

Shapley 值最早由罗伊德·夏普利 (Lloyd Shapley) 在 1953 年提出, 主要考虑了参加者所获得的利益与做出的贡献相对应, 服从公平分配原则, 普遍应用于合理分配等问题。记 $I = \{1, 2, \dots, n\}$,

代表 n 个参与者合作的集合,合理分配确定参与者获得的利益 $X_i(\mu)$,即

$$X_i(\mu) = \sum_{A \in A_i} w(A) [\mu(A) - \mu(A \setminus i)] \quad (8)$$

式(8)中: $w(A) = \frac{(|A| - 1)!(n - |A|)!}{n!}$, $w(A)$ 表示概率,总和等于 1; $|A|$ 表示集合 A 的势; $A \setminus i$ 表示参加者 i 对不同的子集 A 的边际效益及贡献。

由于各指标之间并非简单的独立关系,利用扩展 Shapley 值对指标集结。针对专家 t_k , 指标集合的所有子集的集合为 $P(Z^k)$, 并令 P 上的集函数为 $\mu^{[14]}$, 若 μ 满足以下条件:① $\mu(\emptyset) = 0, \mu(Z^k) = 1$; ②若 $A, B \in P(Z^k), A \subseteq B$, 则 $\mu(A) \leq \mu(B)$, 则称 μ 为模糊测度。同时, μ 还可以称为 λ 模糊测度, $\lambda \in (-1, \infty)$ 。当 $\lambda > 0$ 时, $\mu(A \cup B) > \mu(A) + \mu(B)$, 则表示指标集 A 与 B 间存在互补关联关系; $\lambda < 0$ 时, $\mu(A \cup B) < \mu(A) + \mu(B)$, 则表示指标集 A 与 B 间存在冗余关联关系; $\lambda = 0$ 时, 说明指标集之间没有关系,但由于各指标间有一定的相互关系,因此 $\lambda = 0$ 这种情况不存在。

对于各指标集 $A \subseteq Z, \lambda$ 模糊测度 $\mu(A)$ 可通过式(9)求得。

$$\mu(A) = \begin{cases} \frac{1}{\lambda} \left\{ \prod_{j \in A} [1 + \lambda \mu(z_j^k)] - 1 \right\}, & \lambda \neq 0 \\ \sum_{j \in A} \mu(z_j), & \lambda = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$\mu(A_j) - \mu(A_{j+1})$ 表示指标 z_j 的权重 w_j ; $\mu(Z) = 1$, 参数 λ 可由式(10)确定:

$$\lambda + 1 = \prod_{j=1}^n [1 + \lambda \mu(z_j^k)] \quad (10)$$

利用 Shapley 值分配指标权重^[15], 对前景价值矩阵 $V^k = [\tilde{v}_{ij}^k]_{m \times n}$ 指标集结, 得到各专家对各预案的综合前景矩阵 $V = [\tilde{v}_i^k]_{m \times l}$ 为

$$V = [\tilde{v}_i^k]_{m \times l} = \begin{bmatrix} v_1^1 & v_1^2 & \cdots & v_1^l \\ v_2^1 & v_2^2 & \cdots & v_2^l \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_m^1 & v_m^2 & \cdots & v_m^l \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(11)中: $\tilde{v}_i^k = \sum_{j=1}^n \tilde{v}_{i(j)}^k X_j(\mu)$ 表示专家 t_k 对应急预案 r_i 的综合前景评估值, (j) 表示对向量 $\{\tilde{v}_{i1}^k, \tilde{v}_{i2}^k, \dots, \tilde{v}_{in}^k\}$ 的转置。

2.4 基于直觉模糊熵确定专家权重

专家对决策对象的了解程度相对较少,则专家权重值较小;反之,赋予的专权重较大。专家判断信息的模糊性和不确定性可用模糊熵来衡量,专家

权重计算公式为

$$\gamma_k = \frac{1 - H_k}{K - \sum_{k=1}^K H_k} \quad (12)$$

式(12)中: $H_k = \sum_{j=1}^g w_j E(A_j^k)$ ($0 \leq H_k \leq 1$) 为加权直觉模糊熵,表示专家 t_k 给出信息的模糊程度, g 为属性个数, w_j 为属性权重。设 $A = \{[x, \mu_A(x), v_A(x)], x \in X\}$ 为直觉模糊集, X 表示一个非空集合, A_j^k 表示专家 t_k 在第 j 个属性下给出的 m 个评价对象判断信息构成的直觉模糊集, $E(A_j^k)$ 为 A_j^k 的直觉模糊熵。

若在第 1 个属性下, 第 1 个专家给出直觉模糊熵 $E(A_1^1)$ 计算为^[16]

$$E(A_1^1) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \{1 - [\mu_A(x_i) + v_A(x_i)]\} \times \sin \frac{\pi}{2} [\mu_A(x_i) + v_A(x_i)] \quad (13)$$

式(13)中: m 为共有的评价对象个数; $\mu_A(x_i)$ 为 x_i 的隶属度函数; $v_A(x_i)$ 为 x_i 的非隶属度函数。

已知专家权重为 $\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_l\}$ 以及专家对各应急预案的综合前景矩阵为 V , 集各专家权重, 得出各预案的综合前景值 $v_i = \sum_{k=1}^l \gamma_k \tilde{v}_i^k$ ($i = 1, 2, \dots, m$)。

2.5 TOPSIS 法评估

TOPSIS 是 Hwang 和 Yoon 于 1981 年首次提出, TOPSIS 法是对备选的几个对象与理想化目标相比较, 计算各个对象与理想化的接近程度, 根据值的大小对备选对象优劣排序。

利用 TOPSIS 对 m 个应急预案评估时, 首先确定规范化决策矩阵的正理想解 A^+ 和负理想解 A^- , 计算公式为

$$A_j^+ = \left[\begin{matrix} \max_{1 \leq i \leq m} (a_i), & \max_{1 \leq i \leq m} (b_i), & \max_{1 \leq i \leq m} (c_i), \\ \max_{1 \leq i \leq m} (d_i), & \max_{1 \leq i \leq m} (\mu_i), & \max_{1 \leq i \leq m} (v_i) \end{matrix} \right] \quad (14)$$

$$A_j^- = \left[\begin{matrix} \min_{1 \leq i \leq m} (a_i), & \min_{1 \leq i \leq m} (b_i), & \min_{1 \leq i \leq m} (c_i), \\ \min_{1 \leq i \leq m} (d_i), & \min_{1 \leq i \leq m} (\mu_i), & \min_{1 \leq i \leq m} (v_i) \end{matrix} \right] \quad (15)$$

式(14)和式(15)表示对各预案的综合评估值 $\tilde{a} = ([a, b, c, d]; \mu_a, v_a)$ 进行比较, 依次从中选择出最大值 \max 与最小值 \min , 作为正理想解 A^+ 和负理想解 A^- 。其中: μ_a, v_a 分别为隶属度函数与非隶属度函数, 计算可见式(1)、式(2)。

计算 m 个各应急预案的属性值到正理想解 A^+ 与负理想解 A^- 的距离 d_i^+, d_i^- , 计算公式为^[7]

$$d_i^+ = \frac{1}{4} [|a_{i-1 \leq i \leq m}^{\max}(a_i)| + |b_{i-1 \leq i \leq m}^{\max}(b_i)| + |c_{i-1 \leq i \leq m}^{\max}(c_i)| + |d_{i-1 \leq i \leq m}^{\max}(d_i)|] + \max [|\mu_{i-1 \leq i \leq m}^{\max}(\mu_i)|, |v_{i-1 \leq i \leq m}^{\min}(v_i)|] \quad (16)$$

$$d_i^- = \frac{1}{4} [|a_{i-1 \leq i \leq m}^{\min}(a_i)| + |b_{i-1 \leq i \leq m}^{\min}(b_i)| + |c_{i-1 \leq i \leq m}^{\min}(c_i)| + |d_{i-1 \leq i \leq m}^{\min}(d_i)|] + \max [|\mu_{i-1 \leq i \leq m}^{\min}(\mu_i)|, |v_{i-1 \leq i \leq m}^{\max}(v_i)|] \quad (17)$$

当一项应急预案的评估值越接近正理想解、远离负理想解时,说明这项应急预案在这几个应急预案中最优、更适合,符合评估指标要求。最后计算各应急预案与正理想解的相对贴适度 D_i 的大小,见式(18),由大到小按顺序排列确定各方案优劣。

$$D_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (18)$$

3 实例分析

随着全球气候的变化,天气越来越恶劣,对交通安全产生严重的影响,尤其某些地区具有特殊的地形和气候特征,更需要及时的救援。现有4个针对突发事件救援的应急预案,邀请3位专家对这4个对于突发事件的应急预案评估,进而选择出最优的一个预案作为事故救援的行动指南。根据专家打分标准^[4],评估专家对应急预案给出数值评估,由于3位专家给出数据较多,只列出部分数据,如表2所示,同时给出各评估指标的期望值,如表3所示。

表2 专家 t_1 对各应急预案的数值评估
Table 2 Expert t_1 numerical evaluation of each emergency plan

指标	状态	概率	r_1	r_2	r_3	r_4
z_1	好	0.5	([5,6,8,8]; ([6,7,8,9]; ([6,6,7,8]; ([6,7,8,9]; 0.7,0.2) 0.9,0.1) 0.8,0.1) 0.9,0.1)			
	一般	0.3	([3,4,5,5]; ([3,5,6,7]; ([4,5,5,7]; ([4,4,6,7]; 0.3,0.4) 0.4,0.4) 0.5,0.3) 0.5,0.4)			
	差	0.2	([1,1,2,3]; ([1,2,3,4]; ([2,2,3,4]; ([2,3,4,5]; 0.1,0.2) 0.3,0.4) 0.5,0.2) 0.5,0.3)			
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
z_4	好	0.5	([7,7,8,8]; ([7,7,8,9]; ([7,7,8,9]; ([6,7,8,9]; 0.6,0.3) 0.8,0.1) 0.8,0.1) 0.7,0.2)			
	一般	0.3	([2,4,5,5]; ([3,4,5,6]; ([4,5,6,7]; ([2,3,4,5]; 0.4,0.1) 0.5,0.3) 0.6,0.2) 0.4,0.3)			
	差	0.2	([1,2,3,3]; ([1,2,3,4]; ([2,2,3,3]; ([2,2,3,3]; 0.3,0.2) 0.4,0.2) 0.5,0.2) 0.4,0.1)			

表3 各指标期望值

Table 3 Expected values of each indicator

专家	指标			
	z_1	z_2	z_3	z_4
t_1	([6,7,8,9]; 0.9,0.1)	([7,8,8,9]; 0.9,0.1)	([7,8,9,9]; 1,0)	([7,7,8,9]; 0.9,0.1)
t_2	([7,8,9,9]; 1,0)	([6,8,9,9]; 0.9,0)	([8,8,9,9]; 0.8,0.2)	([8,8,9,9]; 0.8,0.2)
t_3	([8,8,9,9]; 0.9,0)	([8,8,9,9]; 1,0)	([6,7,8,9]; 0.8,0.1)	([6,7,8,9]; 0.8,0.1)

根据以上评估值以及期望值,可确定各专家基于前景理论在各指标下各应急预案前景值。3位专家分别给出各个指标的模糊测度,例如专家 t_1 给出各指标模糊测度, $\mu(z_1^1) = 0.2$ 、 $\mu(z_2^1) = 0.2$ 、 $\mu(z_3^1) = 0.18$ 、 $\mu(z_4^1) = 0.15$,依据式(10)可计算出 $\lambda = 1.18$ 。同理,可依次计算出各值以及各指标集的模糊测度,通过各指标集结,可得出各专家对各预案的评估值。

根据2.4节利用直觉模糊熵确定专家权重: $\gamma_1 = 0.31$, $\gamma_2 = 0.35$, $\gamma_3 = 0.34$,集结专家权重确定各应急预案综合评估值,如表4所示。

计算各应急预案相对贴适度,根据值的大小确定最优方案,如表5所示。根据式(14)、式(15),可确定正理想解 A^+ 、负理想解 A^- :

$$\begin{cases} A^+ = ([-9.39, -7.78, -4.85, -2.05]; 0.784, 0.105) \\ A^- = ([-10.17, -8.55, -5.2, -2.31]; 0.776, 0.121) \end{cases} \quad (19)$$

根据表4可确定应急预案 $r_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 的排序为 $r_3 > r_2 > r_1 > r_4$, 其中,最理想方案为 r_3 , 其次为 r_2 。

表4 各应急预案综合评估值

Table 4 Comprehensive evaluation values of each emergency plan

应急预案	评估值
r_1	([-9.9, -8.19, -4.85, -2.27]; 0.776, 0.119)
r_2	([-9.49, -7.85, -5.22, -2.31]; 0.786, 0.12)
r_3	([-9.39, -7.78, -4.95, -2.05]; 0.78, 0.109)
r_4	([-10.17, -8.55, -4.98, 2.17]; 0.79, 0.105)

表5 各应急预案相对贴适度及排序

Table 5 Relative affiliation and ranking of each emergency plan

应急预案	d_i^+	d_i^-	D_i	排序
r_1	0.349	0.26	0.43	3
r_2	-0.184	0.355	0.66	2
r_3	0.004	0.523	0.99	1
r_4	0.4325	0.113	0.35	4

4 结论

以救援应急预案选择为例,在备选的方案中确定最优,根据打分标准专家给出各情况下的评估结果,经过一系列步骤计算得出各应急预案的综合评估值,以及各应急预案的相对贴近度。

(1)通过与正理想解 A^+ 、负理想解 A^- 的比较,可以看出预案3与正理想解 A^+ 较为接近同时与负理想解 A^- 相差较远,可初步确定 r_3 为最优预案。

(2)对各应急预案 D_i 排序: $0.99 > 0.66 > 0.43 > -0.35$,即可确定应急预案的优劣排序: $r_3 > r_2 > r_1 > r_4$ 。所以, r_3 为最优应急预案。

(3)基于前景理论以及TOPSIS法对应急预案进行全面深入的评估,为对事故救援应急预案评估中引入定量评价做了一个有益尝试。分析结果表明该方法能够较好地评估应急预案的完整性和有效性,对于应急预案的编制和改进具有一定的指导意义,结果表明了方法的可行性,对事故的救援具有积极的影响,提高了救援的有效性,进一步保证了人身安全。

参 考 文 献

- 1 向红艳,邵毅明,王亮亮. 高速公路应急救助的资源规划选址模型[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(10): 2655-2658.
Xiang Hongyan, Shao Yiming, Wang Liangliang. Resource distribution model for expressway emergency rescue[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(10): 2655-2658.
- 2 罗文婷,王艳辉,贾利民,等. 改进层次分析法在铁路应急预案评价中的应用研究[J]. 铁道学报, 2008, 30(6): 24-28.
Luo Wenting, Wang Yanhui, Jia Limin, et al. Application of improved AHP in evaluation of railway emergency plans[J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(6): 24-28.
- 3 李梅. 基于决策者偏好视角的直觉模糊多属性决策方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Li Mei. Research on intuitionistic fuzzy multi-attribute decision making based on decision makers' preference perspective[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- 4 常建鹏,陈振颂,周国华,等. 基于前景理论的铁路应急预案多指标风险评估研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(2): 7-18.
Chang Jianpeng, Chen Zhensong, Zhou Guohua, et al. Study on multi-index risk assessment of railway emergency plan based on prospect theory[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(2): 7-18.
- 5 王顺豪. 基于前景理论的高速铁路线路方案优选研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
Wang Shunhao. Research on the optimization of high-speed railway line scheme based on prospect theory[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- 6 程铁军,吴凤平,李锦波. 基于累计前景理论的不完全信息下应急风险决策模型[J]. 系统工程, 2014(4): 70-75.
Cheng Tiejun, Wu Fengping, Li Jinbo. Emergency risk decision model with incomplete information based on cumulative prospect theory[J]. Systems Engineering, 2014(4): 70-75.
- 7 陕振沛,宁宝权,张慧愿,等. 基于三角形直觉模糊数TOPSIS

群决策方法在应急预案有效性评估中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2019, 49(11): 245-253.

Shan Zhenpei, Ning Baoquan, Zhang Huiyuan, et al. Application of TOPSIS group decision making method based on triangle intuitionistic fuzzy number in effectiveness evaluation of emergency plan [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2019, 49(11): 245-253.

- 8 孙剑萍,胡文燕,汤兆平. 基于指标字典序偏好的高铁应急预案群决策评价[J]. 中国科技论文, 2018, 13(19): 2214-2218.
Sun Jianping, Hu Wenyan, Tang Zhaoping. Group decision evaluation of high-speed rail emergency plan based on index preference in dictionary order [J]. China Science and Technology Paper, 2018, 13(19): 2214-2218.
- 9 张素丽,王睿,李振明. 浙江省突发事件应急预案管理现状调查研究[J]. 工业安全与环保, 2013, 39(12): 76-80.
Zhang Suli, Wang Rui, Li Zhenming. Investigation and research on the status quo of emergency response plan management in Zhejiang Province [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2013, 39(12): 76-80.
- 10 张海龙,李雄飞,董立岩. 应急预案评估方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(7): 142-148, 179.
Zhang Hailong, Li Xiongfei, Dong Liyan. Fuzzy evaluation methods of emergency plans [J]. China Safety Science Journal, 2009, 19(7): 142-148, 179.
- 11 夏保成,牛帅印,张永领,等. 我国专项应急预案完备性评估指标与方法探讨[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2012, 31(1): 19-24.
Xia Baocheng, Niu Shuaiyin, Zhang Yongling, et al. Study on completeness evaluation index and method of China special emergency plan [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 31(1): 19-24.
- 12 韩二东,徐国东. 基于直觉模糊交叉熵及灰色关联的混合评价信息供应商选择决策[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(7): 1-9.
Han Erdong, Xu Guodong. Supplier selection decision making method based on intuitionistic fuzzy cross entropy and grey relational [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(7): 1-9.
- 13 常建鹏,周国华,陈振颂,等. 考虑专家行为偏好与指标关联的铁路应急预案评估[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(5): 1371-1385.
Chang Jianpeng, Zhou Guohua, Chen Zhensong, et al. Evaluation of railway emergency plan considering the relationship between expert behavior preference and index [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(5): 1371-1385.
- 14 许华,王明刚. 基于组合权重灰色关联分析的城市循环经济发展评价[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(10): 2499-2504.
Xu Hua, Wang Minggang. Evaluation based on combination weight and grey relational analysis [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(10): 2499-2504.
- 15 刘佩,高更君. 基于绿色供应链利益分配的P-DEA与Shapley值模型[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(9): 2448-2454.
Liu Pei, Gao Gengjun. P-DEA and Shapley value model based on benefit distribution of green supply chain [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(9): 2448-2454.
- 16 赵萌,任嵘嵘,邱莞华. 基于直觉模糊熵的专家权重确定方法及其验证[J]. 控制与决策, 2015, 30(7): 1233-1238.
Zhao Meng, Ren Rongrong, Qiu Wanhua. Experts weights method and computational experiment analysis based on intuitionistic fuzzy entropy measures [J]. Control and Decision, 2015, 30(7): 1233-1238.