

控制与决策

Control and Decision



考虑决策者情绪更新机制的多阶段应急决策方法

王治莹, 聂慧芳, 赵宏丽

引用本文:

王治莹, 聂慧芳, 赵宏丽. 考虑决策者情绪更新机制的多阶段应急决策方法[J]. 控制与决策, 2020, 35(2): 436–444.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0493>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于双层专家权重确定的风险型大群体决策

Risky large group decision-making based on two-lawyer expert weight determination

控制与决策. 2017, 32(5): 885–891 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0516>

基于前景理论的区间直觉模糊双向投影决策方法

Bidirectional projection method with interval-valued intuitionistic fuzzy information based on prospect theory

控制与决策. 2016, 31(6): 1143–1147 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0590>

面向具有多部门多指标特征的复杂大群体应急决策方法

Complex large group emergency decision making method oriented characteristic of multi-department and multi-index

控制与决策. 2016(2): 225–232 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1915>

考虑偏好冲突的多类评价信息群体决策方法

Multi-attribute group decision making method for preference conflicting with different kinds of information

控制与决策. 2016, 31(11): 2013–2018 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0948>

基于证据推理和第3代前景理论的不确定性多属性决策方法

Method for uncertain multi-attribute decision making based on evidential reasoning and third-generation prospect theory

控制与决策. 2016, 31(1): 105–113 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1472>

基于后悔理论的多目标灰靶决策方法

Multi-objective grey target decision model based on regret theory

控制与决策. 2015(9): 1635–1640 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1038>

考虑应急方案总体优势度的决策方法

Decision method for emergency alternative with considering total superiority degree

控制与决策. 2015(7): 1239–1244 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.0661>

一种基于前景理论的三参数区间灰数型群体灰靶决策方法

A group grey target decision making method with three parameter interval grey number based on prospect theory

控制与决策. 2015(1): 105–109 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2013.1641>

考虑决策者情绪更新机制的多阶段应急决策方法

王治莹^{1,2†}, 聂慧芳¹, 赵宏丽¹

(1. 安徽工业大学 管理科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243032;

2. 安徽工业大学 公司治理与运营研究中心, 安徽 马鞍山 243032)

摘要: 针对决策者情绪影响下参照点的动态调整可能导致不同决策结果的情形, 提出一种考虑决策者情绪更新机制的多阶段应急决策方法. 首先, 描述突发事件下的多阶段应急决策问题, 并以直觉模糊数的形式刻画相关决策信息; 其次, 给出决策者情绪影响下动态参照点的设置方法, 并运用累积前景理论计算突发事件各个演化阶段的情景价值, 据此建立决策者的情绪更新机制; 然后, 计算各个演化阶段的情景权重, 并结合备选方案的期望价值、投入成本及启动时间价值, 计算方案在各个演化阶段的前景价值; 进一步, 通过给出各个演化阶段权重的计算方法, 计算备选方案的综合前景价值, 并据此给出备选方案的优劣次序; 最后, 通过算例分析及与其他方法的对比验证所提出方法的有效性.

关键词: 情绪更新机制; 多阶段应急决策; 累积前景理论; 直觉模糊数; 动态参照点; 突发事件

中图分类号: C934

文献标志码: A

Multi-stage emergency decision-making method with emotion updating mechanism of decision-makers

WANG Zhi-ying^{1,2†}, NIE Hui-fang¹, ZHAO Hong-li¹

(1. School of Management Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China;

2. Center for Corporate Governance and Operation, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China)

Abstract: Aiming at the situation that the dynamic adjustment of reference points under the impact of decision makers' emotions may lead to different decision-making results, a multi-stage emergency decision-making method with emotion updating mechanism of decision-makers is proposed. Firstly, the multi-stage emergency decision-making problem under emergencies is described, and the relevant decision-making information is described in the form of intuitionistic fuzzy numbers. And a setting method of dynamic reference points under the impact of decision makers' emotions is given, and the cumulative prospect theory is used to calculate the scenario value of each evolutionary stage of emergencies, thereby an emotion updating mechanism is developed. Then, the scenario weights of each stage are calculated, and the prospect values of alternatives at each stage are calculated according to the expected values, input costs and start-up time values of the alternatives. Furthermore, by giving a calculation method of the weight of each stage, the overall values of the alternatives are calculated and the ranking of the alternatives is given. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by a numerical example and comparison with other methods.

Keywords: emotion updating mechanism; multi-stage emergency decision-making; cumulative prospect theory; intuitionistic fuzzy number; dynamic reference points; emergencies

0 引言

近年来, 频繁爆发的突发事件往往会造成巨大的人员伤亡和经济损失, 如 2008 年我国 5·12 汶川地震, 造成 69 227 人死亡和 8 452.15 亿元经济损失. 在此背景下, 相关应急决策问题(如车辆调度、物资分配和人员疏散)日益受到各国政府和学者们的关注. 然而, 突

发事件态势的演变性往往导致应急决策问题具有多阶段性、动态性和不确定性, 这使得最优方案的选择通常需要考虑较多因素, 如决策者的风险态度变化^[1]和多阶段中决策信息的集成^[2]. 因此, 如何设计一种多阶段应急决策方法, 以快速准确地集结多阶段的决策信息, 并及时确定最优方案, 对于降低突发事件的

收稿日期: 2019-04-19; 修回日期: 2019-07-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71704001); 安徽省自然科学基金项目(1808085QG224); 安徽省高校人文社科研究重点项目(SK2019A0075); 安徽省哲学社会科学规划项目(AHSKY2018D13).

责任编委: 王光臣.

[†]通讯作者. E-mail: zywang87@163.com.

危害具有重要意义。

目前,多阶段应急决策问题研究集中在两个方面:一是多阶段群体偏好信息集结优化下的方案选择,如文献[3]和文献[4]刻画了不同阶段群体偏好水平,并以群体偏好一致性最小化为目标实现方案排序,但未能考虑各阶段决策情景的演变及其对方案排序的影响;二是不同情景下的方案调整,如姜艳萍等^[5]和王亮等^[6]基于情景态势变化实现了不同阶段方案的动态调整,但未能考虑不同情景下决策者的行为变化对决策过程的影响。值得一提的是,随着前景理论^[7-8]的提出,一些考虑决策者行为的应急决策方法迅速涌现。Wang等^[9]提出了基于前景理论的群应急决策方法;Zhang等^[10]基于前景理论提出了不同应急情形下的决策方法;Wang等^[11]提出了带有区间动态参照点的应急决策方法;Cheng等^[12]以正负理想点为参照点,基于前景理论建立了不完全信息下的应急决策模型。可见,前景理论在应急决策方法研究中的应用大多集中在单阶段而较少考虑到多阶段问题,而决策者的行为因素往往会随着突发事件的演化而变化,进而影响决策行为。此外,参照点设置是前景理论应用研究中不可缺少的环节,可直接影响决策结果^[13]。目前,参照点的动态性研究大多考虑的是时间等外部影响因素,很少关注到决策者自身行为因素的影响。如Pei等^[13]通过设置与时间有关的参照点,提出了基于两参照点的动态混合多属性群决策方法;Li等^[14]从竞争力、决策者期望及时间3个维度考虑参照点的设置,并结合累积前景理论给出了应急方案的排序方法;张晓等^[15]分析了个人参照点对群体参照点的影响,运用前景理论提出了方案的群体前景价值计算方法。随着研究深入,学者们开始考虑到决策者的情绪对决策过程的影响。如Bechara等^[16]提出的躯体标记假说(somatic marker hypothesis)表明,不同情绪状态会改变决策者神经系统的激活程度,进而导致不同决策结果;Blanchette等^[17]指出,情绪对决策中模糊信息的解释、概率和后果的判断都能产生重要影响;Loewenstein等^[18]建立的情绪模型表明,决策过程能同时受到预期情绪和即时情绪的影响。然而,该方面研究大多局限于定性分析层面,较少从更为深入的定量建模层面提出决策者情绪及其更新影响下的应急决策方法。

综上所述,决策者情绪及其更新影响下的动态参照点的设置问题及带有动态参照点的前景理论在多阶段应急决策方法中的应用问题亟待进一步解决。事实上,决策者的情绪变化与其认知相互作用,共

同支配着决策行为^[19]。与一般情境下的决策相比,一方面突发事件情境下的应急方案绩效通常根据人员伤亡、财产损失、时间和成本等标准综合评定,决策过程难免不会受到决策者感知差异所带来的情绪波动的影响^[20];另一方面,突发事件的演变性和不确定性更易激发决策者情绪的变化,如决策者在突发事件向有利态势演化时往往比向更为复杂态势演化时的乐观情绪更为强烈。此外,决策过程中参照点的形成实际上是决策者对外界环境的反馈^[20],而情绪变化往往会改变参照点,从而传统的静态参照点设置方法(如均值法、正负理想点法)往往难以体现多阶段应急决策的动态特征。鉴于此,本文提出一种考虑决策者情绪更新机制的多阶段应急决策方法。首先,给出决策者情绪影响下的动态参照点设置方法,建立情绪更新机制;然后,运用累积前景理论计算应急方案在突发事件各个演化阶段的前景价值;最后,通过给出阶段权重的计算方法,得到方案的综合前景价值和优劣次序。本文的创新之处在于:1)基于突发事件演化态势的不确定性,考虑了决策者情绪影响下参照点的动态变化;2)基于突发事件演化的多阶段性和动态性,建立了决策者的情绪更新机制,并提出了多阶段应急决策方法;3)计算方案在突发事件各个演化阶段的前景价值时,综合考虑了方案的期望价值、投入成本和启动时间价值。

1 理论基础

1.1 累积前景理论

定义1^[21] 不确定前景 f 是状态集 S 到结果集 X 的函数,即 $f: S \rightarrow X$,对于任意状态 $s_i \in S$,都存在 $f(s_i) = x_i, x_i \in X$ 。

风险决策具有编辑和估值两个阶段。在编辑阶段,决策者将决策结果之于参照点的相对值作为收益或损失^[12];在估值阶段,决策者依据价值函数和权重函数^[7-8]得到决策结果的综合价值。函数如下:

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

其中: $v(\Delta x_i)$ 为价值函数; Δx_i 为决策结果相对于参照点的损益, $\Delta x_i \geq 0$ 表示收益, $\Delta x_i < 0$ 表示损失; α 和 β 分别为风险厌恶和风险偏好系数; λ 为损失规避系数, $\lambda > 1$ 为决策者对损失比对收益更为敏感;通常 $\alpha = 0.89, \beta = 0.92, \lambda = 2.25$ ^[22]。有

$$\pi_i^+ = W^+ \left(\sum_{j=i}^n p_j \right) - W^+ \left(\sum_{j=i+1}^n p_j \right),$$

$$\Delta x_i \geq 0;$$

$$\pi_i^- = W^- \left(\sum_{j=1}^i p_j \right) - W^- \left(\sum_{j=1}^{i-1} p_j \right), \Delta x_i < 0. \quad (2)$$

其中: π_i^+ 和 π_i^- 分别为决策者对收益和损失的决策权重函数; $W^+(\cdot)$ 和 $W^-(\cdot)$ 均为非线性函数, 有

$$\begin{cases} W^+(p_i) = \frac{p_i^\chi}{[p_i^\chi + (1-p_i)^\chi]^{\frac{1}{\chi}}}, \\ W^-(p_i) = \frac{p_i^\delta}{[p_i^\delta + (1-p_i)^\delta]^{\frac{1}{\delta}}}. \end{cases} \quad (3)$$

χ 和 δ 分别为决策者对收益和损失的态度, 通常 $\chi = 0.61, \delta = 0.69^{[8]}$. 基于式(1)~(3), 可得如下用于判定最优决策结果的综合前景价值 $V^{[23]}$:

$$V = \sum_{i=1}^t \pi_i^+ v(\Delta x_i) + \sum_{i=t+1}^n \pi_i^- v(\Delta x_i). \quad (4)$$

1.2 直觉模糊数

由于突发事件应急决策问题具有不确定性, 决策者难以在短时间内获取精确的决策信息, 通常用模糊数对其进行表示^[24]. 自 Atanassov^[25] 提出直觉模糊集后, 学者们发现其能够同时考虑到犹豫度、隶属度和非隶属度, 在刻画不确定性问题上比一般的模糊集更具有优势, 从而得到了更为广泛的应用^[26]. 在多阶段应急决策问题中, 由于突发事件演化的多阶段性和不确定性, 决策者在短时间内也难以获取多个演化阶段中人员伤亡和财产损失等决策信息的精确值, 不妨考虑用直觉模糊数对这些决策信息的不确定性取值进行刻画.

定义2^[27] 设 X 是一个非空集合, 直觉模糊集 $A = \{ \langle x, \mu_A(x), \nu_A(x) | x \in X \rangle \}$ 为 X 上的子集. 其中: $\mu_A(x)$ 和 $\nu_A(x)$ 分别为 x 属于 A 的隶属度和非隶属度, $\mu_A(x) : X \rightarrow [0, 1], \nu_A(x) : X \rightarrow [0, 1]$, 且满足 $0 \leq \mu_A(x) + \nu_A(x) \leq 1, \forall x \in X, \pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - \nu_A(x)$ 为 x 属于 A 的犹豫度.

若直觉模糊数 $a_1 = (\mu_1, \nu_1), a_2 = (\mu_2, \nu_2)$, $\gamma > 0$ 为任意实数, 则有如下运算法则:

- 1) $\bar{a}_1 = (\nu_1, \mu_1)$;
- 2) $\gamma a_1 = (1 - (1 - \mu_1)^\gamma, \nu_1^\gamma)$;
- 3) $a_1^\gamma = (\mu_1^\gamma, 1 - (1 - \nu_1)^\gamma)$;
- 4) $a_1 - a_2 = (\mu_1 \nu_2, \nu_1 + \mu_2 - \nu_1 \mu_2)$;
- 5) $a_1 + a_2 = (\mu_1 + \mu_2 - \mu_1 \mu_2, \nu_1 \nu_2)$;
- 6) $a_1 \times a_2 = (\mu_1 \mu_2, \nu_1 + \nu_2 - \nu_1 \nu_2)$;
- 7) $a_1 \div a_2 = (\mu_1 + \nu_2 - \mu_1 \nu_2, \nu_1 \mu_2)$.

定义3^[28] 设 $a = \langle \mu_A(x), \nu_A(x) \rangle$, 称 $S(a) = \mu_A(x) - \nu_A(x)$ 和 $H(a) = \mu_A(x) + \nu_A(x)$ 分别为 a 的记分函数和精确函数, 且 $S(a) \in [-1, 1]$. 设 $a_1 = (\mu_1, \nu_1)$ 和 $a_2 = (\mu_2, \nu_2)$: 1) 若 $S(a_1) > S(a_2)$, 则 $a_1 > a_2$; 2) 若 $S(a_1) = S(a_2)$, 则当 $H(a_1) = H(a_2)$ 时有

$a_1 = a_2$, 当 $H(a_1) > H(a_2)$ 时有 $a_1 > a_2$.

定义4^[29] 若直觉模糊数 $a_1 = (\mu_1, \nu_1), a_2 = (\mu_2, \nu_2)$, 则 a_1 与 a_2 的距离 $D(a_1, a_2)$ 为

$$D(a_1, a_2) = (1 - \max(L, H), \min(L, H)). \quad (5)$$

其中: $L = \min(\mu_1, \mu_2) / \max(\mu_1, \mu_2), H = \min(1 - \nu_1, 1 - \nu_2) / \max(1 - \nu_1, 1 - \nu_2)$. 故 $D(a_1, a_2)$ 也为直觉模糊数.

定义5^[27] 若直觉模糊数 $a_1 = (\mu_1, \nu_1), a_2 = (\mu_2, \nu_2)$, 则 $a_1 \geq a_2$ 的可能度 $p(a_1 \geq a_2)$ 为

$$p(a_1 \geq a_2) = \min \left\{ \max \left\{ \frac{1 - \nu_1 - \mu_2}{\pi_1 + \pi_2}, 0 \right\}, 1 \right\}. \quad (6)$$

其中: 若 $p(a_1 \geq a_2) \geq 0.5$, 则 $a_1 \geq a_2$; 若 $p(a_1 \geq a_2) < 0.5$, 则 $a_1 < a_2$.

2 问题描述

突发事件的演化往往会经历多个阶段(如根据核泄漏事故中烟云扩散的特点, 可分为“到来前”、“经过时”及“经过后”3个阶段^[5]), 假设阶段数为 n 且阶段的集合为 $T = (T_1, T_2, \dots, T_n)$. 相应地, 假设阶段权重集合为 $w = (w^1, w^2, \dots, w^n)$, 满足 $\sum_{i=1}^n w^i = 1$. 其他参数和变量说明如下:

$S^i = (s_1^i, s_2^i, \dots, s_k^i)$, 表示突发事件演化至 T_i 阶段时可能出现的 k 个情景, s_j^i 表示突发事件演化至 T_i 阶段可能出现的第 j 个情景;

$L_1^i = (l_{11}^i, l_{12}^i, \dots, l_{1k}^i)$, 表示情景所导致的人员伤亡向量, l_{1j}^i 表示 T_i 阶段的情景 s_j^i 所导致的人员伤亡数, 以直觉模糊数的形式进行表示, 即 $l_{1j}^i = [u_{1j}^i, w_{1j}^i], 0 \leq u_{1j}^i + w_{1j}^i \leq 1$;

$L_2^i = (l_{21}^i, l_{22}^i, \dots, l_{2k}^i)$, 表示情景所导致的财产损失向量, l_{2j}^i 表示 T_i 阶段的情景 s_j^i 所导致的财产损失量, 同样以直觉模糊数的形式进行表示, 即 $l_{2j}^i = [u_{2j}^i, w_{2j}^i], 0 \leq u_{2j}^i + w_{2j}^i \leq 1$;

$A = (A_1, A_2, \dots, A_m)$, 表示 m 个备选应急方案的集合, A_h 为第 h 个备选应急方案;

$C_1 = (c_{11}, c_{12}, \dots, c_{1m})$, 表示方案的投入成本向量, c_{1h} 为方案 A_h 的投入成本, 包括人力、物力和财力等, 以直觉模糊数的形式进行表示, 即 $c_{1h} = [u_{1h}^c, w_{1h}^c], 0 \leq u_{1h}^c + w_{1h}^c \leq 1$;

$C_2 = (c_{21}, c_{22}, \dots, c_{2m})$, 表示方案的启动时间向量, c_{2h} 为方案 A_h 的启动时间, 采用直觉模糊数表示为 $c_{2h} = [u_{2h}^c, w_{2h}^c], 0 \leq u_{2h}^c + w_{2h}^c \leq 1$;

$P^i = [P_{hj}^i]_{n \times m \times k}$, 表示情景概率矩阵, P_{hj}^i 表示采用方案 A_h 能够导致 T_i 阶段中的情景 s_j^i 发生的概率, 以直觉模糊数的形式进行表示, 即 $P_{hj}^i = [u_{hj}^{pi}, w_{hj}^{pi}], 0 \leq u_{hj}^{pi} + w_{hj}^{pi} \leq 1$;

$\eta = (\eta_1, \eta_2)$, 表示人员伤亡和财产损失的权重向量, 满足 $0 \leq \eta_1, \eta_2 \leq 1$ 且 $\eta_1 + \eta_2 = 1$;

$i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, k, h = 1, 2, \dots, m$.

基于此, 本文要解决的多阶段应急决策问题可以描述为: 基于突发事件的多阶段性、动态性和不确定性演化过程, 如何设计一种科学的决策方法, 通过集结突发事件各个演化阶段的决策信息 (如人员伤亡和财产损失), 融入决策者的情绪及其更新对决策参照点的影响, 并在综合考虑备选应急方案的期望价值、投入成本和启动时间的基础上, 得到备选应急方案的优劣次序。

3 多阶段应急决策方法

方法思路为: 首先, 以决策者情绪变化为突破点, 提出决策者情绪影响下的动态参照点设置方法; 然后, 运用累积前景理论计算突发事件各演化阶段的情景价值, 据此建立决策者的情绪更新机制; 接着, 在此基础上计算各演化阶段的情景权重及方案在各演化阶段的前景价值; 最后, 计算各演化阶段的权重和方案的综合前景价值, 实现备选应急方案的排序。

3.1 决策者情绪影响下的动态参照点

决策者对决策信息的处理往往受到其情绪的影响, 如具有积极情绪时易做出乐观判断, 而具有消极情绪时易做出悲观判断^[19]。在本文研究情境中, 若考虑决策者在突发事件下一演化阶段的情绪主要受到当前演化阶段中突发事件演化态势的影响, 即设 $em^i (em^i \in [0, 1])$ 表示在 T_i 阶段中决策者的情绪值, 则当 T_i 阶段中突发事件向有利态势演化时, 决策者将在 T_{i+1} 阶段中更为乐观, 从而其情绪值增大, 有 $em^{i+1} > em^i$; 反之, 决策者将在 T_{i+1} 阶段中更为悲观, 从而其情绪值减小, 则有 $em^{i+1} < em^i$ 。因此, 决策者在相邻阶段间的情绪值满足一定的转换关系 (即情绪更新机制)。

根据前景理论, 决策者通过参照点衡量决策结果的收益或损失, 而参照点实际上是决策者对突发事件所造成的各种损失的心理预算^[28]。文献 [20] 在研究出行者路径选择问题时提出了出行者具有 ϕ 个出行时间预算等级, 本文予以借鉴, 假设决策者对某一具体的突发事件所造成的损失具有 ϕ 个预算等级 (budget level, BL), 且 $\phi \in [1, 2, \dots, z], z > 1$, 其中 z 表示决策者对各种类型的突发事件造成的损失所具有的预算等级总数, 也即可能的最大预算等级, 其值可由《中华人民共和国突发事件应对法》所划分的一般、较大、重大和特别重大4级或在此基础上的进一步细化而得到。基于此, 可得决策者情绪影响下的动

态参照点的设置方法为

$$\bar{L}_q^i = \begin{cases} \min_j l_{qj}^i + \frac{2\phi-1}{2\phi} (\max_j l_{qj}^i - \min_j l_{qj}^i), \\ \quad em^i < \frac{1}{\phi}, BL : \phi; \\ \min_j l_{qj}^i + \frac{2\phi-3}{2\phi} (\max_j l_{qj}^i - \min_j l_{qj}^i), \\ \quad \frac{1}{\phi} \leq em^i < \frac{2}{\phi}, BL : \phi-1; \\ \vdots \\ \min_j l_{qj}^i + \frac{3}{2\phi} (\max_j l_{qj}^i - \min_j l_{qj}^i), \\ \quad \frac{\phi-2}{\phi} \leq em^i < \frac{\phi-1}{\phi}, BL : 2; \\ \min_j l_{qj}^i + \frac{1}{2\phi} (\max_j l_{qj}^i - \min_j l_{qj}^i), \\ \quad \frac{\phi-1}{\phi} \leq em^i, BL : 1. \end{cases} \quad (7)$$

$$\bar{C}_t^i = \begin{cases} \min_h c_{th} + \frac{2\phi-1}{2\phi} (\max_h c_{th} - \min_h c_{th}), \\ \quad em^i < \frac{1}{\phi}, BL : \phi; \\ \min_h c_{th} + \frac{2\phi-3}{2\phi} (\max_h c_{th} - \min_h c_{th}), \\ \quad \frac{1}{\phi} \leq em^i < \frac{2}{\phi}, BL : \phi-1; \\ \vdots \\ \min_h c_{th} + \frac{3}{2\phi} (\max_h c_{th} - \min_h c_{th}), \\ \quad \frac{\phi-2}{\phi} \leq em^i < \frac{\phi-1}{\phi}, BL : 2; \\ \min_h c_{th} + \frac{1}{2\phi} (\max_h c_{th} - \min_h c_{th}), \\ \quad \frac{\phi-1}{\phi} \leq em^i, BL : 1. \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\bar{L}_q^i (q = 1, 2)$ 表示 T_i 阶段中人员伤亡和财产损失的动态参照点; $\bar{C}_t^i (t = 1, 2)$ 表示 T_i 阶段中方案投入成本和启动时间的动态参照点。可见, 决策者情绪与参照点的关系为: 当决策者的情绪值 em^i 增大即其更乐观时, 其对损失的判断也更乐观, 即预算等级减小, 从而参照点 $\bar{L}_q^i$ 和 $\bar{C}_t^i$ 均降低; 反之, 当决策者的情绪值 em^i 减小即其更悲观时, 其对损失的判断也更悲观, 即预算等级增大, 从而参照点 $\bar{L}_q^i$ 和 $\bar{C}_t^i$ 均提高。

3.2 各阶段的情景价值与情绪更新机制

1) T_i 阶段的情景价值计算。

首先由直觉模糊数间的距离计算式 (5), 可得 T_i 阶段情景 s_j^i 所导致的人员伤亡数 l_{1j}^i 和财产损失量 l_{2j}^i 相对于其动态参照点 $\bar{L}_1^i$ 和 $\bar{L}_2^i$ 的损益值分别为

$$t_{1j}^i = D(\bar{L}_1^i, l_{1j}^i), \quad t_{2j}^i = D(\bar{L}_2^i, l_{2j}^i). \quad (9)$$

然后计算 T_i 阶段情景 s_j^i 所导致的人员伤亡数 l_{1j}^i 和财产损失量 l_{2j}^i 的前景值,分别为

$$v_{1j}^i = \begin{cases} (t_{1j}^i)^\alpha, & \bar{L}_1^i > l_{1j}^i; \\ -\lambda(t_{1j}^i)^\beta, & \bar{L}_1^i \leq l_{1j}^i. \end{cases}$$

$$v_{2j}^i = \begin{cases} (t_{2j}^i)^\alpha, & \bar{L}_2^i > l_{2j}^i; \\ -\lambda(t_{2j}^i)^\beta, & \bar{L}_2^i \leq l_{2j}^i. \end{cases} \quad (10)$$

当 $\bar{L}_1^i > l_{1j}^i$ 和 $\bar{L}_2^i > l_{2j}^i$ 时,表示决策者对 T_i 阶段的情景 s_j^i 所造成的人员伤亡数 l_{1j}^i 和财产损失量 l_{2j}^i 的心理感知是收益,反之为损失.

最后计算 T_i 阶段情景 s_j^i 的综合价值 v_j^i ,有

$$v_j^i = \sum_{q=1}^2 \eta_q v_{qj}^i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, k. \quad (11)$$

2) 情绪更新机制.

由第3.1节的分析可知,突发事件下一演化阶段中的决策者情绪值取决于当前演化阶段中的决策者情绪值和突发事件演化态势,当前演化阶段中的突发事件演化态势,可通过对比当前阶段的情景价值评价与给定的标准评价价值间大小而得到. T_i 阶段的情景价值评价 $\bar{\text{eva}}^i$ 为

$$\bar{\text{eva}}^i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \text{eva}_j^i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (12)$$

其中 $\text{eva}_j^i = (v_j^i - \min_j v_j^i) / (\max_j v_j^i - \min_j v_j^i)$, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, k$.

设 T_i 阶段的情景标准评价价值为直觉模糊数 $\text{ewa}^i = (u^{\text{ewa}^i}, w^{\text{ewa}^i})$,其中 $0 \leq u^{\text{ewa}^i} + w^{\text{ewa}^i} \leq 1$.根据定义5,若 $p(\bar{\text{eva}}^i > \text{ewa}^i) \geq 0.5$,则 $\bar{\text{eva}}^i > \text{ewa}^i$,表明 T_i 阶段中突发事件向有利态势演化,因此决策者将在 T_{i+1} 阶段中更为乐观,从而 $\text{em}^{i+1} > \text{em}^i$;反之,若 $p(\bar{\text{eva}}^i > \text{ewa}^i) < 0.5$,则 $\bar{\text{eva}}^i < \text{ewa}^i$,表明 T_i 阶段中突发事件向不利态势演化,因此决策者将在 T_{i+1} 阶段中更为悲观,从而 $\text{em}^{i+1} < \text{em}^i$.特殊情况下,若 $p(\bar{\text{eva}}^i = \text{ewa}^i) \geq 0.5$,则 $\bar{\text{eva}}^i = \text{ewa}^i$,从而 $\text{em}^{i+1} = \text{em}^i$.此外,在实际决策过程中,决策者情绪不仅会受突发事件演化态势影响,还会受突发事件下的其他复杂因素(如时间压力^[30])的影响.因此可得

$$\text{em}^{i+1} = \begin{cases} F(\text{em}^i) + \theta |S(\bar{\text{eva}}^i)|, & p(\bar{\text{eva}}^i > \text{ewa}^i) \geq 0.5; \\ F(\text{em}^i), & p(\bar{\text{eva}}^i = \text{ewa}^i) \geq 0.5; \\ F(\text{em}^i) - \theta |S(\bar{\text{eva}}^i)|, & p(\bar{\text{eva}}^i > \text{ewa}^i) < 0.5. \end{cases} \quad (13)$$

其中: $\theta \in [0, 1]$ 为决策者的情绪反馈强度^[17], $S(\cdot)$ 为定义3中的记分函数; $\theta |S(\bar{\text{eva}}^i)|$ 为突发事件演化

态势对决策者情绪的影响.此外,由于当前关于情绪对应决策行为影响的研究甚少,且多数学者均是从定性角度分析其影响机理^[30],借鉴文献[31],定义 $F(\text{em}^i)$ 为情绪值 em^i 的情绪函数,且 $F(\text{em}^i) \in [0, 1]$,用于刻画突发事件下的时间压力等因素对决策者情绪的影响.

在此基础上,考虑到本文的研究重点在于分析突发事件不同演化态势下决策者的情绪更新,且现有研究缺乏对情绪函数 $F(\text{em}^i)$ 更为具体地描述,因此不妨借鉴与本文研究较为相关的文献[20],将情绪函数 $F(\text{em}^i)$ 考虑为以线性函数为例,即 $F(\text{em}^i) = \text{em}^i$,则式(13)转化为

$$\text{em}^{i+1} = \begin{cases} \text{em}^i + \theta |S(\bar{\text{eva}}^i)|, & p(\bar{\text{eva}}^i > \text{ewa}^i) \geq 0.5; \\ \text{em}^i, & p(\bar{\text{eva}}^i = \text{ewa}^i) \geq 0.5; \\ \text{em}^i - \theta |S(\bar{\text{eva}}^i)|, & p(\bar{\text{eva}}^i > \text{ewa}^i) < 0.5. \end{cases} \quad (14)$$

若 $\text{em}^{i+1} > 1$,则令 $\text{em}^{i+1} = 1$;若 $\text{em}^{i+1} < 0$,则令 $\text{em}^{i+1} = 0$.

3.3 各阶段的情景权重

由定义3中的记分函数 $S(\cdot)$ 和精确函数 $H(\cdot)$,将各演化阶段情景价值的得分进行排序,可得

$$S(v_{(1)}^i) \geq S(v_{(2)}^i) \geq \dots \geq S(v_{(f)}^i) \geq 0 \geq S(v_{(f+1)}^i) \geq \dots \geq S(v_{(k)}^i),$$

其中 $v_{(g)}^i$ 表示 T_i 阶段中排在第 g 位的情景价值,若 $g \leq f$,则 $S(v_{(g)}^i) \geq 0$,若 $g \geq f+1$,则 $S(v_{(g)}^i) \leq 0$.相应地,记 $v_{(g)}^i$ 所对应的突发事件情景为 $s_{(g)}^i$, $s_{(g)}^i \in S^i$.令 $P_{h(g)}^i$ 表示采用方案 A_h 能够导致 T_i 阶段中的情景 $s_{(g)}^i$ 发生的概率,若 $s_{(g)}^i = s_j^i$,则 $P_{h(g)}^i = P_{hj}^i$.基于此,由式(2)可得 T_i 阶段情景 $s_{(g)}^i$ 的权重 $\pi_{h(g)}^i$ 为

$$\pi_{h(g)}^i = \begin{cases} W^+ \left(\sum_{j=1}^g P_{h(j)}^i \right) - W^+ \left(\sum_{j=1}^{g-1} P_{h(j)}^i \right), & g = 1, 2, \dots, f; \\ W^- \left(\sum_{j=g}^k P_{h(j)}^i \right) - W^- \left(\sum_{j=g+1}^k P_{h(j)}^i \right), & g = f+1, f+2, \dots, k. \end{cases} \quad (15)$$

其中: $W^+(\cdot)$ 和 $W^-(\cdot)$ 均为非线性函数,可由式(3)确定其大小; $h = 1, 2, \dots, m$, $i = 1, 2, \dots, n$.

3.4 方案在各阶段的前景价值

基于上述各阶段的情景价值和情景权重,结合方案的投入成本和启动时间价值,计算方案在各阶段的前景价值.

首先由式(11)和(15), 计算方案 A_h 在 T_i 阶段的期望情景价值 EV_h^i , 有

$$EV_h^i = \sum_{g=1}^k v_{h(g)}^i \pi_{h(g)}^i. \quad (16)$$

依据直觉模糊数间的距离式(5), 计算方案 A_h 的投入成本 c_{1h} 和启动时间 c_{2h} 相对于 T_i 阶段其动态参照点 $\bar{C}_1^i$ 和 $\bar{C}_2^i$ 的损益值, 有

$$\begin{cases} d_{1h}^i = D(c_{1h}, \bar{C}_1^i), \\ d_{2h}^i = D(c_{2h}, \bar{C}_2^i). \end{cases} \quad (17)$$

然后计算 A_h 的 c_{1h} 和 c_{2h} 在 T_i 阶段的前景值, 有

$$\begin{aligned} v_{1h}^{ci} &= \begin{cases} (d_{1h}^i)^\alpha, & c_{1h} < \bar{C}_1^i; \\ -\lambda(d_{1h}^i)^\beta, & c_{1h} \geq \bar{C}_1^i. \end{cases} \\ v_{2h}^{ci} &= \begin{cases} (d_{2h}^i)^\alpha, & c_{2h} < \bar{C}_2^i; \\ -\lambda(d_{2h}^i)^\beta, & c_{2h} \geq \bar{C}_2^i. \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

当 $c_{1h} \geq \bar{C}_1^i$ 和 $c_{2h} \geq \bar{C}_2^i$ 时, 表示决策者对方案 A_h 的投入成本 c_{1h} 和启动时间 c_{2h} 在 T_i 阶段的心理感知是损失, 反之为收益.

最后可得方案 A_h 在 T_i 阶段的前景价值 OV_h^i 为

$$OV_h^i = \varphi_1 EV_h^i + \varphi_2 v_{1h}^{ci} + \varphi_3 v_{2h}^{ci}. \quad (19)$$

其中: φ_1 、 φ_2 和 φ_3 分别为方案 A_h 在 T_i 阶段的期望情景价值、投入成本价值和启动时间价值的决策权重, 满足 $0 \leq \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 \leq 1, \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 1; h = 1, 2, \dots, m, i = 1, 2, \dots, n$.

3.5 各阶段权重和方案综合前景价值

随着时间推移, 突发事件的应急决策信息会不断更新和清晰化. 因此, T_{i+1} 阶段的权重大于 T_i 阶段的权重. 基于此, 首先提出时间权重比的概念, 即

$$\xi = \frac{w^{i+1}}{w^i}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (20)$$

其中: w^i 为 T_i 阶段权重; $\xi > 1$ 为后一阶段比前一阶段更为重要的决策特征. 可见, 各阶段权重符合公比大于1的等比数列, 由等比数列求和公式可得

$$\sum_{i=1}^n w^i = \frac{w^1(1 - \xi^n)}{1 - \xi}. \quad (21)$$

然后由于各阶段权重满足 $\sum_{i=1}^n w^i = 1$, 结合式(21)可得 $w^1 = (1 - \xi)/(1 - \xi^n)$. 在此基础上, 结合式(20)可得到 $w^i (i = 2, 3, \dots, n)$ 的取值.

最后计算方案 A_h 的综合前景价值 $\bar{V}_h$, 即

$$\bar{V}_h = \sum_{i=1}^n OV_h^i w^i, \quad h = 1, 2, \dots, m. \quad (22)$$

由式(22)可得备选应急方案 $A_h (h = 1, 2, \dots,$

$m)$ 的优劣次序, 即 $\bar{V}_h$ 越大, 方案 A_h 越优. 值得一提的是, 式(22)中 $\bar{V}_h$ 为直觉模糊数, 可采用以下两种方式排序方案, 即对于任意的 $\bar{V}_{h_1}$ 和 $\bar{V}_{h_2}$, 有:

1) 依据定义5中的可能度, 若 $p(\bar{V}_{h_1} > \bar{V}_{h_2}) \geq 0.5$, 则 $\bar{V}_{h_1} > \bar{V}_{h_2}$, A_{h_1} 优于 A_{h_2} ; 若 $p(\bar{V}_{h_1} > \bar{V}_{h_2}) < 0.5$, 则 $\bar{V}_{h_1} < \bar{V}_{h_2}$, A_{h_1} 劣于 A_{h_2} ; 若 $p(\bar{V}_{h_1} = \bar{V}_{h_2}) \geq 0.5$, 则 $\bar{V}_{h_1} = \bar{V}_{h_2}$, A_{h_1} 与 A_{h_2} 等价.

2) 依据更为简便的定义3中的记分函数 $S(\cdot)$ 和精确函数 $H(\cdot)$, 若 $S(\bar{V}_{h_1}) > S(\bar{V}_{h_2})$, 则 $\bar{V}_{h_1} > \bar{V}_{h_2}$, A_{h_1} 优于 A_{h_2} ; 若 $S(\bar{V}_{h_1}) < S(\bar{V}_{h_2})$, 则 $\bar{V}_{h_1} < \bar{V}_{h_2}$, A_{h_1} 劣于 A_{h_2} ; 若 $S(\bar{V}_{h_1}) = S(\bar{V}_{h_2})$, 则当 $H(\bar{V}_{h_1}) = H(\bar{V}_{h_2})$ 时有 $\bar{V}_{h_1} = \bar{V}_{h_2}$ (A_{h_1} 与 A_{h_2} 等价), 当 $H(\bar{V}_{h_1}) > H(\bar{V}_{h_2})$ 时有 $\bar{V}_{h_1} > \bar{V}_{h_2}$ (A_{h_1} 优于 A_{h_2}), 当 $H(\bar{V}_{h_1}) < H(\bar{V}_{h_2})$ 时有 $\bar{V}_{h_1} < \bar{V}_{h_2}$ (A_{h_1} 劣于 A_{h_2}). 若 A_{h_1} 与 A_{h_2} 等价, 则可结合实施难度确定优劣次序.

4 算例分析

采用文献[23]的案例和数据介绍本文方法的应用, 并通过方法对比验证本文方法的有效性. 为满足计算需要作如下处理: 1) 将暴雨导致山体崩塌的过程划分为 T_1 (暴雨引发洪水) 和 T_2 (洪水引发山体崩塌) 两个阶段, T_1 阶段的情景包括 s_1^1 (小洪水)、 s_2^1 (中等洪水)、 s_3^1 (大洪水) 和 s_4^1 (特大洪水), T_2 阶段的情景包括 s_1^2 (少量山体崩塌)、 s_2^2 (1/3 山体崩塌)、 s_3^2 (1/2 山体崩塌) 和 s_4^2 (整座山体崩塌); 2) 将原案例中人员伤亡数、财产损失数和方案投入成本的区间数转化为直觉模糊数, 并将其作为 T_1 阶段的决策信息; 3) 补充方案启动时间及 T_2 阶段的人员伤亡数和财产损失数信息. 具体如表1和表2所示.

表1 案例决策信息

阶段情景	人员伤亡数		财产损失		
	区间数	对应的直觉模糊数	区间数	对应的直觉模糊数	
T_1	s_1^1	[3, 5]	[0.946, 0.000]	[10, 15]	[0.950, 0.000]
	s_2^1	[6, 10]	[0.811, 0.081]	[20, 30]	[0.800, 0.100]
	s_3^1	[11, 20]	[0.541, 0.216]	[40, 60]	[0.500, 0.300]
	s_4^1	[21, 40]	[0.000, 0.486]	[80, 110]	[0.000, 0.700]
T_2	s_1^2	[13, 15]	[0.946, 0.000]	[20, 25]	[0.950, 0.000]
	s_2^2	[16, 20]	[0.811, 0.081]	[30, 40]	[0.800, 0.100]
	s_3^2	[21, 30]	[0.541, 0.216]	[50, 70]	[0.500, 0.300]
	s_4^2	[31, 50]	[0.000, 0.486]	[90, 120]	[0.000, 0.700]

此外, 根据参数含义将计算过程中涉及的参数设置为: $\phi = 5, em^1 = 0.5, ewa^1 = ewa^2 = (0.5, 0.5), (\eta_1, \eta_2) = (0.8, 0.2), (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) = (0.7, 0.2, 0.1), \theta = 0.5, \xi = 2$, 情景概率矩阵如表3所示.

表 2 备选应急方案

方案	含义	投入成本	启动时间
A_1	告知潜在危险区域中 人员准备疏散,并启用 10 个应急灯、2 台推土机 和 2 辆救护车	[0.900, 0.100]	[0.800, 0.200]
A_2	在方案 A_1 的基础上, 增加 10 个应急灯、 2 台推土机、2 台挖掘 机和 1 辆救护车	[0.750, 0.250]	[0.692, 0.286]
A_3	以方案 A_2 为基础, 调动大型装备, 加快人员撤离	[0.250, 0.750]	[0.285, 0.704]
A_4	以方案 A_3 为基础, 增加直升机 和医务人员	[0.100, 0.900]	[0.200, 0.800]

下面运用本文方法给出备选方案的排序步骤:

- 1) 将 $em^1 = 0.5$ 代入式 (7) 和 (8), 可得 T_1 阶段人员伤亡、财产损失、方案投入成本和启动时间的参照点分别为 $\bar{L}_1^1 = [0.265, 0.000]$, $\bar{L}_2^1 = [0.421, 0.000]$, $\bar{C}_1^1 = [0.608, 0.392]$, $\bar{C}_2^1 = [0.520, 0.480]$.
- 2) 由式 (9)~(11) 可得 T_1 阶段的情景价值如表 4 所示,在此基础上,根据情绪更新机制 (式 (12)~(14)) 得到 T_2 阶段的情绪值 $em^2 = 0.635$.
- 3) 将上述情绪值 em^2 代入式 (7) 和 (8), 可得 T_2 阶段的参照点为 $\bar{L}_1^2 = [0.169, 0.000]$, $\bar{L}_2^2 = [0.280, 0.000]$, $\bar{C}_1^2 = [0.453, 0.547]$, $\bar{C}_2^2 = [0.411, 0.589]$.
- 4) 同步骤 2), 可得 T_2 阶段情景价值如表 5 所示.
- 5) 由 v_j^1 和 v_j^2 的得分排序可得 $S(v_4^1) > S(v_1^1) > 0 > S(v_3^1) > S(v_2^1)$, $S(v_4^2) > S(v_1^2) > 0 > S(v_2^2) > S(v_3^2)$. 由式 (15) 可得各阶段的情景权重如表 6 所示.

表 3 各阶段的情景概率矩阵

P^1				P^2			
[0.200, 0.700]	[0.170, 0.750]	[0.150, 0.770]	[0.120, 0.780]	[0.155, 0.745]	[0.175, 0.745]	[0.200, 0.720]	[0.150, 0.750]
[0.220, 0.690]	[0.180, 0.750]	[0.170, 0.760]	[0.140, 0.770]	[0.250, 0.720]	[0.150, 0.780]	[0.175, 0.755]	[0.100, 0.870]
[0.250, 0.680]	[0.200, 0.720]	[0.190, 0.750]	[0.150, 0.760]	[0.200, 0.720]	[0.150, 0.750]	[0.200, 0.760]	[0.185, 0.795]
[0.260, 0.650]	[0.230, 0.700]	[0.210, 0.740]	[0.170, 0.750]	[0.250, 0.645]	[0.245, 0.715]	[0.200, 0.760]	[0.150, 0.730]

6) 由式 (16)~(19), 可得方案在 T_1 和 T_2 阶段的前景价值如表 7 和表 8 所示.

7) 由式 (20) 和 (21) 可得 T_1 与 T_2 阶段的权重分别为 $w^1 = 1/3$, $w^2 = 2/3$. 进而由式 (22) 可得备选方案 A_h 的综合前景价值 $\bar{V}_h$ ($h = 1, 2, 3, 4$), $\bar{V}_1 = [0.254, 0.245]$, $\bar{V}_2 = [0.328, 0.224]$, $\bar{V}_3 = [0.360, 0.225]$, $\bar{V}_4 = [0.495, 0.156]$. 在此基础上, 采用排序方式 2) 得到各方案的优劣次序为 $A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$, 其中“ $\succ$ ”表示“优于”.

实际上, 根据表 7 中 OV_h^1 和表 8 中 OV_h^2 , 也可以得到各备选方案分别在 T_1 和 T_2 阶段中的排序, 即在

表 4 v_{1j}^1 、 v_{2j}^1 和 v_j^1 的计算结果

T_1 阶段的情景	v_{1j}^1	v_{2j}^1	v_j^1
s_1^1	[0.049, 0.000]	[0.139, 0.000]	[0.067, 0.000]
s_2^1	[0.069, 0.209]	[0.207, 0.250]	[0.098, 0.827]
s_3^1	[0.176, 0.467]	[0.194, 0.658]	[0.179, 0.500]
s_4^1	[0.526, 0.000]	[0.728, 0.000]	[0.576, 0.000]

表 5 v_{1j}^2 、 v_{2j}^2 和 v_j^2 的计算结果

T_1 阶段的情景	v_{1j}^2	v_{2j}^2	v_j^2
s_1^2	[0.028, 0.000]	[0.046, 0.000]	[0.031, 0.000]
s_2^2	[0.025, 0.209]	[0.081, 0.250]	[0.037, 0.217]
s_3^2	[0.062, 0.467]	[0.342, 0.518]	[0.126, 0.477]
s_4^2	[0.526, 0.000]	[0.728, 0.000]	[0.526, 0.000]

表 6 各阶段的情景权重

π_{hj}^1				π_{hj}^2			
[0.327, 0.505]	[0.272, 0.519]	[0.257, 0.582]	[0.370, 0.506]	[0.374, 0.472]	[0.239, 0.559]	[0.322, 0.534]	[0.329, 0.585]
[0.360, 0.496]	[0.283, 0.539]	[0.147, 0.725]	[0.587, 0.275]	[0.299, 0.642]	[0.372, 0.553]	[0.265, 0.594]	[0.377, 0.514]
[0.375, 0.483]	[0.291, 0.546]	[0.267, 0.594]	[0.409, 0.473]	[0.432, 0.537]	[0.320, 0.612]	[0.280, 0.610]	[0.415, 0.523]
[0.404, 0.475]	[0.295, 0.555]	[0.273, 0.613]	[0.447, 0.454]	[0.372, 0.446]	[0.266, 0.521]	[0.319, 0.604]	[0.415, 0.523]

表 7 EV_h^1 、 v_{1h}^1 、 v_{2h}^1 和 OV_h^1 的计算结果

方案	EV_h^1	v_{1h}^1	v_{2h}^1	OV_h^1
A_1	[0.285, 0.185]	[0.373, 0.627]	[0.340, 0.660]	[0.309, 0.268]
A_2	[0.388, 0.108]	[0.578, 0.422]	[0.445, 0.519]	[0.437, 0.166]
A_3	[0.312, 0.168]	[0.624, 0.376]	[0.473, 0.507]	[0.406, 0.220]
A_4	[0.332, 0.160]	[0.853, 0.147]	[0.649, 0.351]	[0.537, 0.170]

表 8 EV_h^2 、 v_{1h}^2 、 v_{2h}^2 和 OV_h^2 的计算结果

方案	EV_h^2	v_{1h}^2	v_{2h}^2	OV_h^2
A_1	[0.239, 0.137]	[0.186, 0.814]	[0.196, 0.804]	[0.224, 0.234]
A_2	[0.260, 0.169]	[0.287, 0.713]	[0.256, 0.724]	[0.265, 0.261]
A_3	[0.284, 0.156]	[0.489, 0.511]	[0.322, 0.650]	[0.335, 0.228]
A_4	[0.285, 0.116]	[0.801, 0.199]	[0.552, 0.448]	[0.472, 0.148]

T_1 阶段中 $A_4 \succ A_2 \succ A_3 \succ A_1$, 在 T_2 阶段中 $A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$. 可见, 两阶段间的方案排序结果存在差异, 可进一步由情景概率矩阵的灵敏度分析得以验证 (如表 9 所示, 其中 $(P^{1(\tau)}, P^{2(\tau)})$, $\tau = 1, 2, \dots, 6$, 是在表 3 所示的 (P^1, P^2) 基础上分别增加步长 0.004、0.008 和 0.012 及减少步长 0.004、0.008 和 0.012 所得), 原因是 T_1 阶段中突发事件的演化态势影响 T_2 阶段中决策者的情绪值, 并改变了 T_2 阶段中决策信息的参照点. 因此, 在应急决策方法研究中, 考虑突发事件演化的多阶段性、动态性和不确定性, 并融入决策者情绪及其更新影响下决策信息参照点的动态调整具

有一定的必要性.

为了与其他方法进行对比, 基于以上基础决策信息, 运用文献 [23] 的单阶段应急决策方法可得排序结果为 $A_4 \succ A_2 \succ A_3 \succ A_1$. 可见这不同于本文方法的两阶段综合排序结果 $A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$. 此外由表 9 可知, 在多组情景概率矩阵下, 本文方法的两阶段综合排序结果与文献 [23] 中方法的排序结果也不完全相同. 原因是文献 [23] 方法未考虑到突发事件的多阶段特征, 也未考虑到突发事件演化态势所导致的决策者情绪更新对决策信息参照点的影响, 这进一步验证了本文方法的有效性.

表 9 情景概率矩阵的灵敏度分析

情景概率矩阵	T_1 阶段的排序结果	T_2 阶段的排序结果	两阶段的综合排序结果	文献 [23] 中方法的排序结果
$(P^{1(1)}, P^{2(1)})$	$A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$	$A_4 \succ A_3 \succ A_1 \succ A_2$	$A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$	$A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$
$(P^{1(2)}, P^{2(2)})$	$A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$	$A_4 \succ A_3 \succ A_1 \succ A_2$	$A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$	$A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$
$(P^{1(3)}, P^{2(3)})$	$A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$	$A_4 \succ A_1 \succ A_3 \succ A_2$	$A_4 \succ A_3 \succ A_1 \succ A_2$	$A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$
$(P^{1(4)}, P^{2(4)})$	$A_4 \succ A_2 \succ A_3 \succ A_1$	$A_4 \succ A_3 \succ A_1 \succ A_2$	$A_4 \succ A_3 \succ A_1 \succ A_2$	$A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$
$(P^{1(5)}, P^{2(5)})$	$A_4 \succ A_2 \succ A_3 \succ A_1$	$A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$	$A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$	$A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$
$(P^{1(6)}, P^{2(6)})$	$A_4 \succ A_2 \succ A_3 \succ A_1$	$A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$	$A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$	$A_4 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_1$

5 结 论

本文提出了一种考虑决策者情绪更新机制的多阶段应急决策方法. 该方法通过考虑突发事件演化的多阶段性、动态性和不确定性, 融入了决策者情绪及其更新影响下决策参照点的动态调整, 并用直觉模糊数刻画了各阶段中决策信息的模糊性. 主要工作在于: 1) 提出了决策者情绪影响下动态决策参照点的设置方法; 2) 根据突发事件演化态势的变化, 建立了决策者的情绪更新机制; 3) 运用累积前景理论, 在综合考虑备选应急方案的期望价值、投入成本和启动时间价值基础上, 得到了方案在各阶段的前景价值, 进而通过给出阶段权重的计算方法, 最终得到方案的综合前景价值和优劣次序.

未来的研究可进一步与多阶段群决策问题进行结合, 考虑决策者情绪及其更新机制受突发事件演化和决策者间的情绪互动的综合影响, 研究带有情绪更新机制的多阶段应急群决策方法.

参考文献 (References)

[1] 郝晶晶, 朱建军, 刘思峰. 基于前景理论的多阶段随机多准则决策方法[J]. 中国管理科学, 2015, 23(1): 73-81.
(Hao J J, Zhu J J, Liu S F. A method for multi-stage stochastic multi-criteria decision making concerning prospect theory[J]. Chinese Journal of Management Science, 2015, 23(1): 73-81.)

[2] 徐选华, 杨玉珊. 基于累积前景理论的大群体风险型动态应急决策方法[J]. 控制与决策, 2017, 32(11):

1957-1965.
(Xu X H, Yang Y S. Method of dynamic emergency decision for risk type of large group based on cumulative prospect theory[J]. Control and Decision, 2017, 32(11): 1957-1965.)

[3] Xu Y J, Wen X W, Zhang W C. A two-stage consensus method for large-scale multi-attribute group decision making with an application to earthquake shelter selection[J]. Computers and Industrial Engineering, 2018, 116: 113-129.

[4] Xu X H, Cai C G, Du Z J, et al. A multi-attribute and 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.

[5] 姜艳萍, 樊治平, 苏明明. 多阶段应急决策的方案链选择方法[J]. 运筹与管理, 2014, 23(3): 97-101.
(Jiang Y P, Fan Z P, Su M M. Method for selecting the alternative chain in multi-stage emergency decision[J]. Operations Research and Management Science, 2014, 23(3): 97-101.)

[6] 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.)

[7] Kahneman D, Tversky A. Prospect theory: An analysis of decision under risk[J]. Econometrica, 1979, 47(2): 263-291.

[8] Tversky A, Kahneman D. Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty[J]. Journal of Risk and Uncertainty, 1992, 5(4): 297-323.

- [9] Wang L, Wang Y M, Martínez L. A group decision method based on prospect theory for emergency situations[J]. *Information Sciences*, 2017(418/419): 119-135.
- [10] Zhang Z X, Wang L, Wang Y M. An emergency decision making method based on prospect theory for different emergency situations[J]. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2018, 9(3): 407-420.
- [11] 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.
- [12] Cheng T J, Wu F P, Li J B. Risk decision model for emergency response based on cumulative prospect theory with incomplete information[J]. *Systems Engineering*, 2014, 32(4): 70-75.
- [13] Pei F, Zhang L L, Yan A. Algorithm of dynamic hybrid multi-attribute group decision-making based on two reference points[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(3): 571-576.
- [14] Li H, Zhu J J, Zhang S T, et al. Dynamic risk decision-making method considering three reference point in cumulative prospect theory[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2014, 22(S1): 42-50.
- [15] 张晓, 樊治平. 考虑群体参照点的多属性决策方法[J]. *运筹与管理*, 2015, 24(3): 106-111.
(Zhang X, Fan Z P. Method for multiple attribute decision making with group reference points[J]. *Operations Research and Management Science*, 2015, 24(3): 106-111.)
- [16] Bechara A, Damasio H, Tranel D, et al. Deciding advantageously before knowing the advantageous strategy[J]. *Science*, 1997, 275(5304): 1293-1295.
- [17] Blanchette I, Richards A. The influence of affect on higher level cognition: A review of research on interpretation, judgement, decision making and reasoning[J]. *Cognition and Emotion*, 2010, 24(4): 561-595.
- [18] Loewenstein G F, Weber E U, Hsee C K, et al. Risk as feelings[J]. *Psychological Bulletin*, 2001, 127(2): 267-286.
- [19] 庄锦英. 情绪与决策的关系[J]. *心理科学进展*, 2003, 11(4): 423-431.
(Zhuang J Y. Relationship of emotion and decision making[J]. *Advances in Psychological Science*, 2003, 11(4): 423-431.)
- [20] Li X Y, Li X M, Li X W, et al. Sentiment reference points based self-organized multi-agent model of route choice[J]. *Journal of Systems & Management*, 2017, 26(2): 259-267.
- [21] Hu J H, Chen X H, Liu Y M. Multi-criteria decision making method based on linguistic evaluation and prospect theory[J]. *Control and Decision*, 2009, 24(10): 1477-1482.
- [22] 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.)
- [23] Liu W J, Li L. Emergency decision-making combining cumulative prospect theory and group decision-making[J]. *Granular Computing*, 2019, 4(1): 39-52.
- [24] 徐选华, 蔡晨光, 王佩, 等. 面向具有多部门多指标特征的复杂大群体应急决策方法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(2): 225-232.
(Xu X H, Cai C G, Wang P, et al. Complex large group emergency decision making method oriented characteristic of multi-department and multi-index[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(2): 225-232.)
- [25] Atanassov K T. Intuitionistic fuzzy sets[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1986, 20(1): 87-96.
- [26] Joshi D, Kumar S. Interval-valued intuitionistic hesitant fuzzy Choquet integral based TOPSIS method for multi-criteria group decision making[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 248(1): 183-191.
- [27] Xu Z S, Cai X Q. Recent advances in intuitionistic fuzzy information aggregation[J]. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 2010, 9(4): 359-381.
- [28] Hong D H, Choi C H. Multicriteria fuzzy decision-making problems based on vague set theory[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000, 114(1): 103-113.
- [29] 李鹏, 吴君民, 朱建军. 基于新直觉模糊距离的随机决策方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(6): 1517-1524.
(Li P, Wu J M, Zhu J J. Stochastic multi-criteria decision-making methods based on new intuitionistic fuzzy distance[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2014, 34(6): 1517-1524.)
- [30] 吴静杰, 杨乃定, 封超, 等. 突发事件下情绪对决策者风险偏好和框架效应的影响[J]. *管理学报*, 2016, 13(6): 906-912.
(Wu J J, Yang N D, Feng C, et al. The effects of risk preference and framing effect under emergency[J]. *Chinese Journal of Management*, 2016, 13(6): 906-912.)
- [31] 谢军, 杨春鹏. 投资者情绪影响下资本资产定价的区制性[J]. *系统工程*, 2015, 33(1): 24-30.
(Xie J, Yang C P. The regime switching of capital asset price based on the investor sentiment[J]. *Systems Engineering*, 2015, 33(1): 24-30.)

作者简介

王治莹(1987—), 男, 副教授, 博士, 从事突发事件应急管理和舆情危机管理等研究, E-mail: zywang87@163.com;
聂慧芳(1993—), 女, 硕士生, 从事突发事件应急管理的研究, E-mail: nhf9698@163.com;
赵宏丽(1995—), 女, 硕士生, 从事突发事件应急管理的研究, E-mail: zhaohli0105@163.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)