控制与决策
Control and Decision

基于前景理论的多阶段多情景多部门应急决策的矩阵方法

王彪, 薛源, 陈萍萍, 郭影

引用本文:
王彪, 薛源, 陈萍萍, 等. 基于前景理论的多阶段多情景多部门应急决策的矩阵方法[J]. 控制与决策, 2025, 40(2): 655-654.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1707

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

概率区间值直觉犹豫模糊Maclaurin对称平均算子及决策方法

Probabilistic interval-valued intuitionistic hesitant fuzzy Maclaurin symmetric mean operators and decision method

控制与决策. 2021, 36(5): 1249-1258 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1370

考虑社会网络邻接关系的群体判断矩阵决策方法

Group preference relations decision making approach based on social network adjacency relations

控制与决策. 2021, 36(4): 983-992 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0817

考虑社会网络邻接关系的群体判断矩阵决策方法

Group preference relations decision making approach based on social network adjacency relations

控制与决策. 2021, 36(4): 983-992 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0817

大群体应急决策中考虑属性关联的偏好信息融合方法

Preference information fusion method of large groups emergency decision-making based on attributes association

控制与决策. 2021, 36(10): 2537-2546 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0117

考虑时间序列的动态大群体应急决策方法

Dynamic large group emergency decision-making method considering time series

控制与决策. 2020, 35(11): 2609-2618 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0088

基于前景理论的多阶段多情景多部门应急决策的矩阵方法

王 彪[1,2]，薛 源[1,2]，陈萍萍[1,2]，郭 影[3†]

(1. 山东大学 管理学院，济南 250100；2. 山东省高等学校数智管理与决策模拟实验室，济南 250100；
3. 山东师范大学 商学院，济南 250358)

摘 要: 针对一类多阶段多情景多部门应急决策过程, 考虑心理偏好及多部门协同, 基于前景理论构建指标情景值矩阵和综合情景值矩阵等新矩阵, 提出恒定区间下的应急决策矩阵方法, 对事态发展进行全方面评估, 以实现科学高效决策. 给出前景值计算的矩阵形式, 使其可程序化, 能够有效应对突发事件多阶段的动态性 (部门变动和方案变动), 提升决策效率. 恒定区间的引入描述了决策者的心理承受能力, 并进一步讨论恒定区间正负变化的影响以优化应急决策流程. 例如, 当承受能力增加时, 虽不改变各方案情景值的大小关系, 但可能影响最优方案的选择, 而某些情形下却不影响. 最后,针对某化工厂实例进行分析, 验证了该矩阵方法的有效性, 对处理这类应急决策具有较好的应用价值.

关键词: 应急决策；前景理论；矩阵理论；动态决策；优化；心理偏好

中图分类号: C934 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1707

引用格式: 王彪, 薛源, 陈萍萍, 等. 基于前景理论的多阶段多情景多部门应急决策的矩阵方法 [J]. 控制与决策, 2025, 40(2): 655-664.

Matrix approach for multi-stage, multi-scenario, and multi-department emergency decision-making based on prospect theory

WANG Biao[1,2]，*XUE Yuan*[1,2]，*CHEN Ping-ping*[1,2]，*GUO Ying*[3†]

(1. School of Management， Shandong University， Jinan 250100， China； 2. The Digitalized & Intelligent Management and Decision Simulation Laboratory of Colleges and Universities in Shandong Province，Jinan 250100，China；3. Business School，Shandong Normal University，Jinan 250358，China)

Abstract: This article addresses a class of multi-stage, multi-scenario, multi-department emergency decision-making processes, considering psychological preferences and interdepartmental collaboration. Based on prospect theory, some new matrices such as indicator scenario value matrices and comprehensive scenario value matrices are constructed. Under the framework of constant interval, an emergency decision-making matrix method is proposed to evaluate developments in a comprehensive manner, thereby achieving scientific and efficient decision-making. The article presents the matrix form of prospect value calculation, making it programmable to effectively cope with the dynamics of multi-stage emergencies(departmental and scenario changes), thus enhancing decision-making efficiency. The constant interval is introduced to describe the psychological tolerance of decision-makers, and the influence of positive and negative changes in the constant interval is further discussed to optimize the emergency decision-making process. For example, when the tolerance increases, although it does not change the relationship between the magnitude values of each scenario, it may affect the choice of the optimal solution, while in certain situations, it does not have an effect. Finally, an analysis of a chemical plant case study confirms the effectiveness of this matrix method and demonstrates its valuable application in handling such emergency decision-making situations.

Keywords: emergency decision-making；prospect theory；matrix theory；dynamic decision-making；optimization；psychological preferences

0 引 言

近年来, 随着经济社会的发展, 人口、资产密度迅速提高, 人为灾害、自然灾害以及复合型灾害的发生频率、影响范围与危害程度也均在增长. 各种突发

收稿日期: 2023-12-09；**录用日期:** 2024-05-09.
基金项目: 国家自然科学基金项目 (12101366, 72134004, 72104131, 72201156).
责任编委: 刘士新.
†通讯作者. E-mail: guo1006ying@126.com.
本文附带电子附录文件,可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

事件例如地震、火灾、流行性病毒等造成了人员伤亡、经济损失、生态环境破坏以及不可预估的社会危害[1-3]. 因此, 如何迅速合理地开展应急决策是一个具有实际意义的重要课题[4]. 应急决策是指系统面临危机时, 根据动态的危机信息, 为避免或减少损失而做出的快速决策[5].

化工事故危害性极大, 针对其进行的决策具有一定的代表性, 是应急决策问题的重中之重[6]. 化工事故发生的比例也远远高于其他种类生产事故, 根据国家相关部门调查统计, 2013 ～ 2020 年间一共发生了 1 268 起化工生产事故, 1 708 人在事故中死亡, 多人致伤致残及数人失踪[7]. 2022 年国务院公布《“十四五”国家应急体系规划》, 文中指出推进化工园区示范创建, 建设化工园区风险评估与分级管控平台是重要举措. 因此提出一种高效的应对化工事故的应急决策方法是十分必要的.

借助前景理论提出的决策方法是解决突发事件的一种有效手段. 1979 年, Kahneman 等[8] 提出前景理论用以风险决策, 它在考虑决策者心理偏好的同时, 结合实际数据实现决策. 随后适用于不确定性和任意数量结果风险前景的累积前景理论被提出[9]. 标准化的决策方法在权衡损失和收益的同时, 能有效缩短响应时间, 提高决策效率. Liu 等[10] 将累积前景理论运用到应急响应问题中, 比较潜在价值选出最优方案. Fennema 等[11] 探讨了前景理论与累积前景理论之间的差异, 对其风险规避的灵敏性进行了重新验证. 结合前景理论与模糊理论, 多准则决策和综合决策框架也相应被提出[12-13]. 以上研究丰实了前景理论, 但关于多阶段多情景动态心理参考点决策的研究仍是少数. 心理参考点是决策者的经验、偏好、价值观等因素, 是决策时所依据的基准[14].

矩阵方法广泛应用于各领域, 在管理学中常用于数据记录、事件关联、资源分配和绩效评估等[15]. 矩阵可以恰当地表示多主体间的约束关系, 与应急决策中的多部门形成良好呼应. 在 Simon 的研究中, 组织内部各部门之间存在着复杂的关系, 而不同组织之间的约束关系正是组织复杂性的重要来源[16]. 陈兴等[17] 借助矩阵方法定义了关联矩阵来表示部门间的协同关系, 并以此提出了多阶段多目标多部门的应急决策模型. Xue 等[18] 通过部门子方案、综合方案的向量化, 将该模型彻底矩阵化, 然而其问题设置没有考虑突发事件中存在的不确定性, 忽略了对决策者心理承受能力的考量; 文献 [19] 提出了一种基于前景理论的决策分析方法, 其中人员伤亡、财产损失以及情景概率等都是矩阵呈现, 但未考虑随事态演进带来的决策者心理行为特征变化; 文献 [20] 利用方案有效性研究了应急方案的生成问题, 但因缺乏历史案例参考, 该方法不适用于新兴突发事件. 基于上述研究, 搭建一种完全基于矩阵的运算方式使其可程序化是必需的. 此外, 前景理论侧重于描述人们对风险和收益的主观态度, 而矩阵方法则更注重客观的量化分析. 将两者结合可以充分发挥各自的优势, 既考虑了主观因素, 又具备客观的数据支撑, 使决策更加科学全面. 同时, 矩阵方法能够提供定量的风险评估和决策支持, 通过数学模型分析不同决策的效果, 有助于纠正决策中的偏差, 提高决策的准确性和可靠性.

受以上启发, 本文以前景理论为基础, 针对一类多阶段、多情景、多部门应急决策过程, 构建其可程序化的矩阵方法. 本文主要工作如下:

1) 通过定义指标上下限矩阵、指标情景值矩阵、情景权重矩阵等一系列矩阵, 给出了计算全方案前景值的矩阵方法.

2) 利用恒定区间解释了决策者的心理承受能力波动对指标情景值、综合情景值及前景值的可能影响. 无论心理承受能力的增加或减小均不会影响各指标情景值的大小关系, 但指标权重会改变综合情景值的大小关系, 从而影响前景值. 由此,决策者可根据实际承受能力的变化, 参照本文的结论调整恒定区间, 以提升决策效率.

3) 矩阵方法易于计算编程, 可有效应对数据更新, 方案和情景的增减只需调整矩阵的行列, 避免大幅度变动即可实现动态决策, 优化应急决策的动态响应能力, 有利于决策共享平台的搭建.

1 问题描述

1.1 问题及解决思路

突发事件的处理过程如图 1 所示, 当某个突发事件发生时, 应急部门作为决策指挥中心会第一时

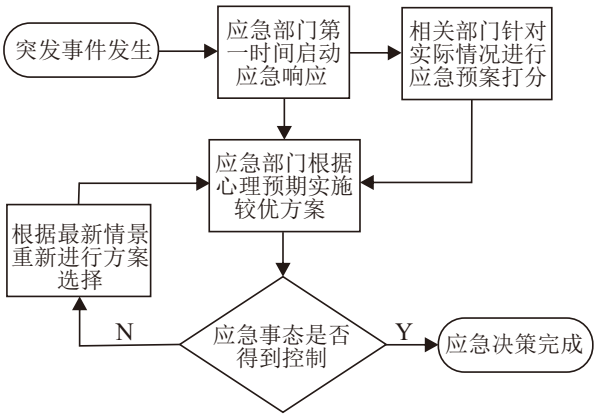

图1 应急决策过程

间介入统筹. 应急部门通过各部门的反馈, 结合以往经验对事故的可能发展进行重要性推断, 并对可能造成的损失进行评价, 形成针对性的心理预期值, 从而进一步制定综合的决策方案. 这是一个多部门协同的动态应对过程, 需要根据实时数据和事态演变等相关信息不断调整和优化应对策略, 以便最大限度地降低损失和影响.

1.2 相关符号

一般地, $M=[m_{ij}]_{p\times q}$表示$p\times q$阶的矩阵, 其中m_{ij}表示矩阵中第i行第j列的元素.

$A=\{A_1,A_2,\dots,A_m\}$表示当突发事件发生后, 应急部门对可能引起的情景进行预测得到的集合, 其中A_i表示可能的第i种情景. n为受应急事故影响需要提出紧急预案的部门数量, 应急部门根据反馈制定综合方案集合$C=\{C_1,C_2,\dots,C_n\}$, 其中每一个综合方案C_j是由各部门的子方案组成.

突发事件发生后, 能否最大程度地挽救生命及财产安全是评价综合方案的两个重要指标, 人员伤亡和财产损失是事故导致的直接后果. 人员伤亡下限矩阵 (上限矩阵) 由 $G^l=[g^l_{ji}]_{n\times m}$ (和 $G^h=[g^h_{ji}]_{n\times m}$) 表示. 矩阵中元素$g^l_{ji}$ (g^h_{ji}) 表示应急部门对采取综合方案C_j在情景A_i下的最少 (最多) 人员伤亡数量估值. 同理, 财产损失下限矩阵 (上限矩阵) 由 $F^l=[f^l_{ji}]_{n\times m}$ (和$F^h=[f^h_{ji}]_{n\times m}$) 表示. 矩阵中元素 f^l_{ji} (f^h_{ji}) 表示应急部门对采取综合方案C_j在情景A_i下的最少 (最多) 财产损失数量估值. 本文分别用G、F表示人员伤亡矩阵($G^l\leqslant G\leqslant G^h$)和财产损失矩阵($F^l\leqslant F\leqslant F^h$).

本文设置$G^h-G^l=a\mathbf{1}_n\times\mathbf{1}_m^{\mathrm{T}}$为某个常数$a$构成的常阵, 称$a$为恒定区间, 对财产损失上下限矩阵也做类似处理. 恒定区间是对各个指标上下限矩阵的一种限制, 不同指标具备不同的恒定区间设置, 体现当下决策者心理承受能力以及对综合方案处理效果的预期, 恒定区间一般是由应急部门根据经验联合专家建议给出的.

H^G、H^F分别表示应急部门对事故造成的人员伤亡和财产损失的心理预期值. $H^G=[h^G_1,h^G_2,\dots,h^G_m]$, $H^F=[h^F_1,h^F_2,\dots,h^F_m]$, 其中$h^G_i$和$h^F_i$分别表示情景$A_i$下的人员伤亡和财产损失心理预期值. 心理预期值不能为负, 因为无论哪种情景发生, 都是应急事故的后续演进, 损失一定存在, 本文不考虑因应急事故产生而获益的情况. 如果某情景下综合方案的心理预期值高于 (低于) 此时的上限 (下限) 损失, 则认为该综合方案能够 (不能) 满足要求; 若此时心理预期值处于上下限损失之间, 则认为该综合方案满足要求但不一定是最优的, 仍需进一步评价.

$P=[p_{ji}]_{n\times m}$为综合方案能够控制住应急事故的概率矩阵, 其中$p_{ji}\in[0,1]$表示在应急部门的主观评价下, 综合方案C_j妥善解决情景A_i的概率. 概率矩阵的制定可灵活运用贝叶斯估计、事件树分析等方法[20] 并结合专家建议给出估值, 具体采用的方法要根据实际情况进行择断.

W^G、W^F表示人员伤亡和财产损失重要性程度$W^G=\mathrm{diag}\{w^G_1,\dots,w^G_m\}$和$W^F=\mathrm{diag}\{w^F_1,\dots,w^F_m\}$是对角矩阵, 其中$w^G_i$和$w^F_i$表示情景$A_i$下人员伤亡和财产损失评价指标的重要程度, 满足$w^G_i+w^F_i=1$. 本文只考虑上述两个评价指标, 二者的重要程度随着情景和阶段的变化而变化.

2 原理与方法

本文运用矩阵方法处理决策过程中的原始数据, 给出前景值计算的矩阵形式, 使其可程序化以实现借助计算机语言提高应急响应效率.

2.1 情景综合价值计算

对一个综合方案进行评价, 不仅是损失越小越好, 更要根据事故的实际情况, 借助应急部门给出的心理参考点来对不同综合方案的价值进行衡量. 定义人员伤亡预期差值上限矩阵和下限矩阵分别为$G^l_I=G^l-\mathbf{1}_mH^G$, $G^h_I=G^h-\mathbf{1}_mH^G$, 其中$\mathbf{1}_m$是由1构成的$m$维列向量. 伤亡预期差值矩阵描述了综合方案实施效果预期与心理参考点预期的差值. 类似地定义财产损失预期差值上下限矩阵分别为 $F^l_I=F^l-\mathbf{1}_mH^F$, $F^h_I=F^h-\mathbf{1}_mH^F$. 注意到, 预期差值上下限矩阵构成了一个取值范围. 在闭区间$[G^l_I,G^h_I]$中某个矩阵的第j行第i列元素g^I_{ji}表示综合方案C_j应对情景A_i时, 实施效果预期与心理参考点预期的差值, 满足不等式 $g^l_{Iji}\leqslant g^I_{ji}\leqslant g^h_{Ijj}$.

价值函数描述了决策者对不同选项的偏好程度, 是定义在预期差值上的函数[9]

$$\begin{cases}v(x)=(-x)^{\alpha}, & x\leqslant 0;\\ v(x)=-\lambda x^{\beta}, & x>0.\end{cases}$$

其中: 自变量$x\in\{g^I_{ji},f^I_{ji}\}$为预期差值; α和β分别表示决策者规避风险的态度以及价值函数的锐度程度, $0\leqslant\alpha,\beta\leqslant 1$;$\lambda$表示损失规避系数, λ越大决策者对损失越敏感. 本文取定$\alpha=0.89$、$\beta=0.92$、$\lambda=2.25$[9].

根据预期差值矩阵$\{G^l_I,G^h_I\}$和$\{F^l_I,F^h_I\}$, 结合价值函数, 定义指标情景值矩阵$G_S=[g^S_{ji}]_{n\times m}$和$F_S=[f^S_{ji}]_{n\times m}$, 其中元素$g^S_{ji}$和$f^S_{ji}$分别表示综合方案

C_j在情景A_i下的人员伤亡和财产损失情景值,有

$$g_{ji}^S=\int_{g_{ji}^l}^{g_{ji}^h}v(x)\mu(x)\mathrm{d}x,$$

$$f_{ji}^S=\int_{f_{ji}^l}^{f_{ji}^h}v(x)\mu(x)\mathrm{d}x,$$

其中$\mu(x)$为概率密度函数, 表示实际损失差值在预期差值上下限中的分布. 迫于$\mu(x)$的复杂性, 指标情景值的积分往往难以计算, 故下面给出其近似计算方法. 首先根据人员伤亡预期差值的上下限矩阵G_I^h和G_I^l, 将各元素区间z等分得到分界矩阵$\{G_I^0, G_I^1, \ldots, G_I^z\}$, 其中$G_I^b=[g_{Iji}^b]_{n\times m}$. 为了提高决策效率以及处理密度函数可能导致无法积分的情形, 应急部门根据实际需求制定z值, 求出积分值$(z=+\infty)$的近似. 根据积分定义, 指标情景值可近似计算如下:

$$g_{ji}^S\approx\sum_{b=0}^{z-1}v(g_{I_{ji}}^b)\mu(g_{I_{ji}}^b)\frac{g_{ji}^h-g_{ji}^l}{z}=$$

$$\frac{g_{ji}^h-g_{ji}^l}{z}[v(g_{I_{ji}}^0)\ v(g_{I_{ji}}^1)\ \ldots\ v(g_{I_{ji}}^{z-1})]\times$$

$$[\mu(g_{I_{ji}}^0)\ \mu(g_{I_{ji}}^1)\ \ldots\ \mu(g_{I_{ji}}^{z-1})]^{\mathrm{T}}.$$

因此, 得到指标情景值计算的矩阵形式如下:

$$G_S\approx d_g[g_{ji}^S]_{n\times m}=d_g\sum_{b=0}^{z-1}v(G_I^b)\circ\mu(G_I^b).$$

其中: $d_g=\dfrac{g_{ji}^h-g_{ji}^l}{z}$表示分割宽度, $i\in[1,m]$, $j\in[1,n]$; $v(G_I^b)=[v(g_{Iji}^b)]_{n\times m}$, $v(F_I^b)=[v(f_{Iji}^b)]_{n\times m}$; $\circ$为矩阵的哈达玛积. 同理令$d_f=\dfrac{f_{ji}^h-f_{ji}^l}{z}$, 财产损失情景值矩阵$F_S$的矩阵计算形式如下:

$$F_S\approx\ d_f[f_{ji}^S]_{n\times m}=\ d_f\sum_{b=0}^{z-1}v(F_I^b)\circ\mu(F_I^b).$$

应急部门根据突发情况制定统一的方案预期差值的上下限区间, 受影响部门会判断出最符合实际情况的损失区间. 此外, 不同评价指标的量纲不同, 故对指标情景值矩阵G_S和F_S进行如下标准化:

$$\bar{G}=\frac{G_S}{\max\limits_{i\in[1,m],j\in[1,n]}\left[g_{ji}^S\right]},$$

$$\bar{F}=\frac{F_S}{\max\limits_{i\in[1,m],j\in[1,n]}\left[f_{ji}^S\right]}.$$

结合评价指标人员伤亡和财产损失的重要性程度, 可获得全方案的综合情景值矩阵如下:

$$\Phi=[\varphi_{ji}]_{n\times m}=\bar{G}W^G+\bar{F}W^F. \tag{1}$$

Φ记录了所有综合方案在相应情景下的综合情景值, 其中φ_{ji}为综合方案C_j在情景A_i下的综合情景值.

2.2 情景权重

综合方案的情景权重既取决于解决事态的概率, 也包括其控制多个情景的期望, 得失权重函数为

$$\omega^+(p)=\frac{p^\gamma}{(p^\gamma+(1-p)^\gamma)^{1/\gamma}}, \tag{2}$$

$$\omega^-(p)=\frac{p^\delta}{(p^\delta+(1-p)^\delta)^{1/\delta}}. \tag{3}$$

其中: p为某综合方案能控制住某情景的概率, $\gamma=0.61$、$\delta=0.69$[9].

计算情景权重前需要确定各方案能够解决的情景数量及类别, 综合情景值的正负意味着综合方案的收益或损失, 故对综合情景值进行排序以得到方案的适用情况. 下面介绍换位算法. 某方案C_j在解决情景A_i为收益时, 其在处理其他情景A_{i+1}时也存在收益可能, 所以情景权重不仅包含综合方案解决情景的概率, 还要考虑所有收益情形的概率. 首先对矩阵Φ的每一行分别进行由小到大的排序, 查找某综合方案是否能够解决多个情景的情况, 再依据概率矩阵计算情景权重. 对矩阵Φ的第j行采用如下算法进行排序, 该算法执行过程简述如下.

step 1: 取$i=1$, $k=1$, 比较φ_{j1}和φ_{jk}的大小, 若$\varphi_{j1}\leqslant\varphi_{jk}$, 则取$i=i+1$, 重复上述过程; 若$\varphi_{j1}>\varphi_{jk}$, 则生成换位记录矩阵$V_k^j$, V_k^j是由m阶单位矩阵互换第i行和第$i+1$行构成的初等矩阵, 然后取$i=1$, $k=k+1$, 重复上述过程.

step 2: 按照指标$i=1,2,\ldots,m$, 假设共生成o个换位记录矩阵, 计算$V^j=\prod\limits_{k=1}^{o}V_k^j$.

由该算法所构造的矩阵V^j可通过ΦV^j将综合情景值矩阵Φ的第j行元素按照升序排列. 当获得所有行对应的换位矩阵$V^1,V^2,\ldots,V^n$后, 便可得到换位之后的综合情景值矩阵$\bar{\Phi}=[\bar{\varphi}_{ji}]_{n\times m}$和概率矩阵$\bar{P}=[\bar{p}_{ji}]_{n\times m}$, 计算方式如下:

$$\bar{\Phi}=\sum_{j=1}^{n}(e_j^n)^{\mathrm{T}}e_j^n\Phi V^j,$$

$$\bar{P}=\sum_{j=1}^{n}(e_j^n)^{\mathrm{T}}e_j^nPV^j,$$

其中e_i^j为第i位是1其余位置是0的j维单位向量.

下面介绍情景权重矩阵$\Pi=[\pi_{ji}]_{n\times m}$的计算方法, 情景权重矩阵描述了综合方案在不同情景下的情景权重, 其中π_{ji}表示综合方案C_j在情景A_i下的情景权重. 根据矩阵$\bar{\Phi}$中元素的正负进行如下计算:

step 1: 若$\bar{\varphi}_{ji}<0, i=1$,则

$$\bar{\pi}_{ji}=\omega^{-}\Big(e_j^n\bar{P}\Big(\sum_{k=i}^{i}e_k^m\Big)^{\mathrm{T}}\Big).$$

step 2: 若$\bar{\varphi}_{ji}<0, i>1$,则

$$\bar{\pi}_{ji}=\omega^{-}\Big(e_j^n\bar{P}\Big(\sum_{k=1}^{i}e_k^m\Big)^{\mathrm{T}}\Big)-\omega^{-}\Big(e_j^n\bar{P}\Big(\sum_{k=1}^{i-1}e_k^m\Big)^{\mathrm{T}}\Big).$$

step 3: 若$\bar{\varphi}_{ji}>0$, $\bar{\varphi}_{ji-1}<0$,则

$$\bar{\pi}_{ji}=\omega^{+}\Big(e_j^n\bar{P}\Big(\sum_{k=i}^{i}e_k^m\Big)^{\mathrm{T}}\Big).$$

step 4: 若$\bar{\varphi}_{ji-1}>0$, 找出t, 使$\bar{\varphi}_{jt}>0$, $\bar{\varphi}_{jt-1}<0, t\in[1,i-1]$,则

$$\bar{\pi}_{ji}=\omega^{+}\Big(e_j^n\bar{P}\Big(\sum_{k=t}^{i}e_k^m\Big)^{\mathrm{T}}\Big)-\omega^{+}\Big(e_j^n\bar{P}\Big(\sum_{k=t}^{i-1}e_k^m\Big)^{\mathrm{T}}\Big).$$

step 5: 计算情景权重矩阵

$$\mathit{\Pi}=\sum_{j=1}ne_j^n\bar{\mathit{\Pi}}(V^j)^{-1}. \tag{4}$$

其中: 矩阵$\bar{\mathit{\Pi}}=[\bar{\pi}_{ji}]_{n\times m}$, $(V^j)^{-1}$表示矩阵V^j的逆.

2.3 前 景 值

前景值记录了人们对未来可能获得的利益或损失所做的主观估价. 本文模型中共有n个综合方案, 故构成一个n维行向量$S=[s_1,s_2,\ldots,s_n]$, 其中s_j表示第j个综合方案的前景值. 根据上述所构造的一系列矩阵, 给出如下结论.

定理 1　由综合情景值矩阵$\mathit{\Phi}$和情景权重矩阵$\mathit{\Pi}$, 可计算包含全部综合方案的前景值为

$$S=\mathbf{1}_n[I_n\circ(\mathit{\Phi}\mathit{\Pi}^{\mathrm{T}})]. \tag{5}$$

突发事件一定会造成损失, 所以前景值为负. 前景值为正表示因实施某综合方案获益, 而本文不考虑因突发事件而获益的情况, 因此在$s_j<0$的基础上, s_j越大综合方案C_j越优.

3 动态化决策

为应对突发事件中多阶段的情景变化和应急需求, 应急部门需不断收集、更新、分析和评估事件演进的相关信息, 协同公安、医疗、交通等多部门以应对不断变化的情况, 实时更新决策方案, 将现场的控制情况调整到最佳状态, 以保障事故得到更加妥善的处理. 本章将着重探讨单阶段的方法如何通过更新来适应多阶段决策, 从而帮助企业提升应急管理能力, 以应对应急情况的多变性.

3.1 部门变动

多部门增减这种临时调整一般发生在: 新的应急需求、新的风险因素、新的任务目标等情况出现. 在应急过程中, 部门交替变动, 而指挥部门不会因子方案的变动急剧更改综合方案. 此处考虑在综合方案数量不变时, 部门增减对矩阵方法的影响. 新部门加入或现有部门退出后, 应急部门需重新评估现有的综合方案, 以确保各部门之间的协同性.

对于本文提出的矩阵方法, 上述讨论所涉及的综合方案以及情景数量均未发生变化. 例如, 部门发生变动后, 人员伤亡下限矩阵从$G^l=[g_{ji}^l]_{n\times m}$变化为$G^{l\prime}=[g_{ji}^{l\prime}]_{n\times m}$, 其矩阵维数保持不变, 仅需对矩阵中元素进行数据更新, 即对新的综合方案进行评分以及对新综合方案控制情景的概率进行重新评估.

3.2 现有综合方案变动

随着决策的多阶段进行, 应急部门需及时与各部门协商, 重新评估和部署以确保综合方案的实施.

1) 现有综合方案减少,一般发生在阶段变动时, 该方案的目的已经完成, 其在应急决策中的职责已经实现, 或者由于事态恶化, 导致综合方案不再适用. 对应于本文提出的矩阵方法, 综合方案删减仅需对人员伤亡矩阵G、财产损失矩阵F和概率矩阵P进行更新即可完成综合方案的动态调整, 即删去矩阵中淘汰方案所对应的行. 若删除综合方案C_j, 则人员伤亡预期差值下限矩阵G_I^l变为$G_I^{l\prime}=[(e_1^n)^{\mathrm{T}},(e_2^n)^{\mathrm{T}},\ldots,(e_{j-1}^n)^{\mathrm{T}},(e_{j+1}^n)^{\mathrm{T}},\ldots,(e_n^n)^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}G_I^l$, 其余矩阵变化同理.

2) 现有综合方案增加,一般发生在应急事故仍未可控之时, 应急部门在原有方案上进行动态调整, 制定出更加符合情况的方案来提高各部门对应急事故的响应力度. 令行向量$G_m^l=[g_{m1}^l,g_{m2}^l,\ldots,g_{mm}^l]$和$G_m^h=[g_{m1}^h,g_{m2}^h,\ldots,g_{mm}^h]$分别表示新增方案在所有情景下的人员伤亡下限和上限, 其中元素g_{mi}^l和g_{mi}^h表示新增综合方案C_{n+1}在情景A_i下人员伤亡的下限和上限. 由此,当综合方案增加时, 人员伤亡上下限矩阵$(G^{l\prime},G^{h\prime})$计算方法如下:

$$G^{l\prime}=[I_n\ 0]^{\mathrm{T}}G^l+(e_{n+1}^{n+1})^{\mathrm{T}}G_m^l, \tag{6}$$

$$G^{h\prime}=[I_n\ 0]^{\mathrm{T}}G^h+(e_{n+1}^{n+1})^{\mathrm{T}}G_m^h. \tag{7}$$

同时, 综合方案增加需更新财产损失上下限矩阵和控制概率矩阵. 更新后的财产损失上下限矩阵$F^{l\prime}$, $F^{h\prime}$和控制概率矩阵P'仅需将式 (6) 和 (7) 中的G_m^l替换为F_m^l, F_m^h, P_m即可, 其中$P_m=[p_{m1},\ldots,p_{mm}]$为新增方案对所有情景的控制概率.

3.3 情景变动

随着综合方案的实施, 事故现场逐渐得到控制, 某些情景会被排除, 同时某些隐患被逐一发现, 应急

人员会继续对这些问题进行处理.

1) 情景减少,一般发生在事故逐渐可控之后, 可预见的情景数量下降, 此时任务转换以控制修复为主. 本模型仅需更新人员伤亡矩阵, 财产损失矩阵和概率矩阵即可完成情景的动态调整, 即删去不再考虑的情景所对应的列. 若排除情景A_i, 则人员伤亡预期差值下限矩阵G_I^l变为$G_I^{l\prime}$, 且$G_I^{l\prime}=G_I^l[(e_1^m)^{\mathrm{T}},\dots,(e_{i-1}^m)^{\mathrm{T}},(e_{i+1}^m)^{\mathrm{T}},\dots,(e_m^m)^{\mathrm{T}}]$, 其余矩阵同理.

2) 情景增加,一般发生在新的安全隐患出现时, 应急部门需考虑新增情景, 重新评估所有现有方案, 更新最优方案. 令列向量$G_n^l=[g_{n1}^l,g_{n2}^l,\dots,g_{nn}^l]^{\mathrm{T}}$和$G_n^h=[g_{n1}^h,g_{n2}^h,\dots,g_{nn}^h]^{\mathrm{T}}$分别表示各方案在新情景$A_{m+1}$下的人员伤亡下限和上限, g_n^l和g_n^h分别表示在新情景A_{m+1}下, 对实施综合方案C_j产生人员伤亡的下限和上限. 由此当情景增加, 人员伤亡上下限矩阵$(G^{l\prime},G^{h\prime})$计算方法如下:

$$G^{l\prime}=G^l[I_m\ 0]+G_n^l e_{m+1}^{m+1},\tag{8}$$

$$G^{h\prime}=G^h[I_m\ 0]+G_n^h e_{m+1}^{m+1}.\tag{9}$$

同时, 情景增加需更新财产损失上下限矩阵和控制概率矩阵. 更新后的财产损失上下限矩阵$F^{l\prime}$, $F^{h\prime}$和控制概率矩阵P'仅需将式 (8) 和 (9) 中的G_n^l替换为F_n^l, F_n^h, P_n即可, 其中$P_n=[p_{n1},\dots,p_{nn}]^{\mathrm{T}}$为所有方案对新增情景的控制概率.

相关矩阵完成动态更新后, 前景值计算如第 2.3 节所示. 在面对复杂多变的突发事件时, 本文提出的方法可通过仅改变较少的原始矩阵以及更新相关的评分数据即可实现多阶段决策. 通过及时收集现场数据, 多阶段动态调整, 从而将复杂的应急决策分解成多个阶段组成的决策问题, 这样实现的多阶段多情景多部门协同的动态决策过程是符合实际需求的.

4 针对恒定区间进行的优化

本文提出恒定区间的目的是为了限制预期损失的范围, 给出损失上下波动的统一标尺, 以实现尽可能的准确. 恒定区间是由应急部门根据经验联合专家建议给出的, 通常符合突发事件的实际需求. 然而恒定区间的设置难免出现偏差, 例如区间过大、区间过小、区间偏移等, 这种变化是否对最优决策产生影响是一个很有意思的问题.

恒定区间的设置与决策者的主观心理有关: 1) 恒定区间设置过大 (过小) 说明决策者过于保守 (激进); 2) 恒定区间设置较大 (较小) 说明决策者较为稳健 (冒险); 3) 恒定区间设置偏左 (偏右) 说明决策者比较乐观 (悲观). 此外, 若区间设置中出现了负值, 仅用来表示相对于损失而言的收益程度. 当决策者承受能力增加时, 恒定区间膨胀, 其变动体现在人员伤亡预期差值闭区间$[G_I^l,G_I^h]$和财产损失预期差值闭区间$[F_I^l,F_I^h]$的扩大, 而且各评价指标的变化趋势往往是一致的, 若容许某综合方案在各情景下伤亡上限加 1, 则其他综合方案对应的伤亡上限也同样加 1. 令膨胀后的区间为$[G_T^l,G_T^h]$和$[F_T^l,F_T^h]$, 其可能产生如下 5 种变动: (i) 恒定区间上下限仍为正; (ii) 恒定区间上下限仍为负; (iii) 恒定区间下限仍为负, 恒定区间上限仍为正; (iv) 恒定区间下限由正变负; (v) 恒定区间上限由负变正. 由于损失上下限均为估计值, 故合理假设为整数. 损失分布函数有多种情形, 下面取均匀分布进行讨论.

4.1 恒定区间上下限仍为正或负

恒定区间上下限仍为正: $0\leqslant G_T^l\leqslant G_I^l\leqslant G_I^h\leqslant G_T^h$. 因$[F_T^l,F_T^h]$与$[G_T^l,G_T^h]$变化规律相同, 故仅分析人员伤亡预期差值矩阵即可. 此时可得如下结论:

(c1) 任意综合方案C_j在情景A_i下的指标情景值g_{ji}^S变小.

(c2) 人员伤亡指标情景值矩阵G_S和财产损失指标情景值矩阵F_S变小.

(c3) 任意两个综合方案C_{j_1}和C_{j_2}在同一情景A_i下的指标情景值, 膨胀后的大小关系保持一致.

(c4) 恒定区间膨胀后, 任意综合方案C_j在所有情景$A_1,A_2,\dots,A_m$下情景值大小关系保持不变.

(c5) 恒定区间膨胀后, 综合情景值矩阵$\varPhi$变小, 即$\varPhi\geqslant\varPhi'$, 其中$\varPhi'$表示恒定区间膨胀后的综合情景值矩阵.

考虑如下元素: $\varphi_{ji},\varphi_{ji+1},\varphi'_{ji},\varphi'_{ji+1}$, 假设

$$\varphi_{ji}=w_i g_{Iji}^S+(1-w_i)f_{Iji}^S<$$
$$\varphi_{ji+1}=w_{i+1}g_{Iji+1}^S+(1-w_{i+1})f_{Iji+1}^S,$$

此时, 取$w_i=0.1$, $w_{i+1}=0.8$, g_{Iji}^S所处区间为 [5, 8], g_{Iji+1}^S所处区间为 [15, 18], 且在该人员伤亡预期差值矩阵中, 最大元素 $g_{Ij'i'}^S$ 处于区间 [50, 53], 在财产损失预期差值矩阵中, f_{Iji}^S处于区间 [12, 25], f_{Iji+1}^S处于区间 [6, 19], 最大元素 $f_{Ij'i'}^S$ 处于区间 [45, 58]. 计算得$\varphi_{ji}=-0.381<\varphi_{ji+1}=-0.350$, 符合假设. 恒定区间膨胀后, $[G_I^l,G_I^h]$膨胀为$[G_I^l-1,G_I^h]$, $[F_I^l,F_I^h]$膨胀为$[F_I^l,F_I^h+5]$, 此时计算得$\varphi'_{ji}=-0.391>\varphi'_{ji+1}=-0.428$, 所以并不能推出

$$\varphi'_{ji}=w_i g_{Tji}^S+(1-w_i)f_{Tji}^S<$$
$$\varphi'_{ji+1}=w_{i+1}g_{Tji+1}^S+(1-w_{i+1})f_{Tji+1}^S.$$

恒定区间膨胀后虽然使综合情景值矩阵变小,

但是不同位置元素减小的程度不同, 而且权重不同, 这将导致不同情景下的综合情景值大小关系发生变化, 进而影响情景权重矩阵的计算, 因此,最优综合方案在恒定区间膨胀后可能发生变化. 这说明了一个实际现象, 决策者心理承受能力的增加或缩小将改变决策的选择.

当恒定区间上下限仍为负时: $G_T^l \leqslant G_I^l \leqslant G_I^h \leqslant G_T^h \leqslant 0$. 此时与情形 (i) 结论类似, 结论 (c1), (c2), (c5) "变小" 更换为 "变大", 结论 (c3), (c4) 保持一致. 情形 (i) 与情形 (ii) 中价值函数$v(x)$单调性一致, 仅存在符号正负差异, 故此部分证明省略.

4.2　恒定区间上限仍为正, 下限仍为负

此时有 $G_T^l < G_I^l < 0 < G_I^h < G_T^h$, 以及 $F_T^l < F_I^l < 0 < F_I^h < F_T^h$, 二者变化规律相同, 现仅以人员伤亡预期差值矩阵为例进行分析. 考虑综合方案C_j在情景A_i下的指标情景值

$$g_{Iji}^S = \frac{1}{g_{Iji}^h - g_{Iji}^l}\int_{g_{Iji}^l}^{0}(-x)^{\alpha}\mathrm{d}x + \frac{1}{g_{Iji}^h - g_{Iji}^l}\int_{0}^{g_{Iji}^h}(-\lambda)x^{\beta}\mathrm{d}x.$$

此时与第 4.1 节中结论 (c3), (c4), (c5) 是类似的. 另外两种情形 (iv) 和 (v) 也同理满足上述 3 条结论. 综上对 5 种情形的讨论, 可得到恒定区间膨胀对指标情景值和前景值的影响.

定理 2　两个综合方案C_j与C_j'在情景A_i下的指标情景值随着恒定区间膨胀而逼近, 即

$$|g_{Tji}^S - g_{Tj'i}^S| < |g_{Iji}^S - g_{Ij'i}^S|.$$

进一步, 任意两综合方案C_j与C_j'在情景A_i下的前景值也逐渐逼近.

本节仅讨论了区间扩大的情形, 对于缩小、偏移等其他情形可类似分析. 从实际意义上讲, 区间的变动反映了决策者主观意愿的调整, 从数学意义上讲, 区间变动最初反映在$[G_I^l, G_I^h]$以及$[F_I^l, F_I^h]$两个闭区间的膨胀, 而综合情景值矩阵Φ、情景权重矩阵Π等一系列矩阵都受其影响. 因此,恒定区间的膨胀需要具体情况具体分析, 并不能从简单的符号中获得相对有效的信息. 决策者可根据本文结论, 在符合讨论的情形出现时优化决策过程, 减少制定恒定区间的时间成本, 缩短应急响应的周期.

5　实例验证

本研究选择某化工厂作为案例研究对象, 针对其发生的一次生产事故进行模拟验证. 该化工厂是一家规模较大的气雾剂企业, 主要生产气雾漆、气雾胶等化工产品. 由于设备老化等原因导致气雾漆装罐流程发生了爆炸事故.

5.1　情景模拟

应急部门分析出以下 4 种可能情景, a : 爆炸仅发生在事故工位, 没有产生泄露等环境问题; b : 爆炸引起了该车间的连锁反应, 导致气雾漆原料的泄露; c :爆炸导致该工位产生火灾, 仅导致化工毒气产生; d : 爆炸引起火灾后持续影响, 威胁全产业园的安全. 应急部门根据厂内的生产部门, 社会上的消防部门及环保部门制定出 3 个综合方案: A 为生产部门仅暂停该工位生产, 消防部门仅派遣小队查看情况, 环保部门进行外围环境监控; B 为生产部门暂停该车间生产, 消防部门派遣消防队到场, 环保部门进行外围的清理; C 为生产部门进行全厂停工检查, 消防部门派遣消防车队到场, 环保部门对现场疏散清洁. 同时, 应急部门选择人员伤亡和财产损失这两个最相关的评价标准, 来对不同的综合方案进行专家打分.

应急部门联合专家讨论综合方案, 将人员伤亡 (D_1) 和财产损失 (D_2) 的评估、心理参考点 (E_1)、重要度 (E_2) 及方案的解决情景概率 (E_3) 整理为表 1.

表1　原始数据表

		a	b	c	d
D_1	A	[2, 4]	[7, 9]	[17, 19]	[40, 42]
	B	[1, 3]	[6, 8]	[14, 16]	[34, 36]
	C	[0, 2]	[4, 6]	[9, 11]	[31, 33]
D_2	A	[3, 6]	[15, 18]	[22, 25]	[46, 49]
	B	[6, 9]	[8, 11]	[16, 19]	[33, 36]
	C	[16, 19]	[17, 20]	[18, 21]	[26, 29]
E_1	D_1 (人)	1	6	15	30
	D_2 (万元)	3	14	22	34
E_2	D_1	0.2	0.5	0.6	0.7
	D_2	0.8	0.5	0.4	0.3
E_3	A	0.34	0.31	0.21	0.12
	B	0.38	0.32	0.23	0.20
	C	0.40	0.34	0.26	0.21

5.2　计算评价

1) 价值函数. 根据表 1 分别构建人员伤亡矩阵G和财产损失矩阵F, 再计算人员伤亡和财产损失预期差值矩阵. 由于假定真实损失均匀分布在预期的损失区间内, 概率密度函数$\mu(x)$取均匀分布, 取定$z = 2$, 可得人员伤亡指标情景值矩阵如下:

$$G_S=\begin{bmatrix}-3.255 & -3.255 & -5.220 & -19.570\\ -1.125 & -1.125 & 0.500 & -8.975\\ 0.500 & 1.425 & 4.560 & -3.255\end{bmatrix}.$$

类似地, 取定$z=3$, 可计算财产损失指标情景值矩阵F_S. 同理, 利用区间右端点可求得另一组情景值矩阵. 通过对比可知, 区间分割越细越接近实际积分值, 区间分割的数量z由决策者根据具体情况具体设置.

标准化后, 根据式 (1) 计算综合情景值矩阵

$$\varPhi=\begin{bmatrix}-0.098 & -0.165 & -0.194 & -0.979\\ -0.268 & 0.060 & 0.090 & -0.328\\ -0.794 & -0.125 & 0.182 & -0.047\end{bmatrix}.$$

2) 计算情景权重. 利用换位算法可得换位之后的综合情景值矩阵$\bar{\varPhi}$和概率矩阵$\bar{P}$如下:

$$\bar{\varPhi}=\begin{bmatrix}-0.979 & -0.194 & -0.165 & -0.098\\ -0.328 & -0.268 & 0.060 & 0.090\\ -0.794 & -0.125 & -0.047 & 0.182\end{bmatrix},$$

$$\bar{P}=\begin{bmatrix}0.12 & 0.21 & 0.31 & 0.34\\ 0.20 & 0.38 & 0.32 & 0.23\\ 0.40 & 0.34 & 0.21 & 0.26\end{bmatrix}.$$

利用情景权重算法, 根据式 (4) 可得各综合方案的情景权重矩阵:

$$\varPi=\begin{bmatrix}0.369 & 0.199 & 0.157 & 0.190\\ 0.248 & 0.329 & 0.118 & 0.257\\ 0.392 & 0.226 & 0.296 & 0.232\end{bmatrix}.$$

根据式 (5), 可得前景值

$$S=\mathbf{1}_n[I_n\circ(\varPhi\varPi^{\mathrm{T}})]=$$
$$[-0.285\,465,\ -0.120\,400,\ -0.296\,530].$$

3 个方案的前景值均为负, 这说明应急部门认为所有综合方案的投入成本及其造成的损失劣于心理期望. 综上分析, 以前景值最大为原则, 最佳选择为综合方案B.

3) 动态调整**.** 在应急决策的第一阶段, 综合方案B的实施取得一定的成效. 随后, 经过现场分析发现事态不会恶化到情景d, 故删除情景d. 由于不确定是否会发现其他隐患, 应急部门不会轻易变动综合方案. 应急部门排除情景d, 取$i=4$, 对相应矩阵更新, 可得前景值

$$S=[-0.181\,548,\ -0.154\,450,-0.301\,524].$$

由此可知, 在排除了情景d并且对其他信息不确定时, 维持B方案是有利的.

下面结合该例讨论恒定区间膨胀对前景值的影响. 考虑恒定区间从中心膨胀, 将人员伤亡闭区间$[G_I^l,G_I^h]$膨胀到$[G_I^l-1,G_I^h+1]$, 财产损失闭区间$[F_I^l,F_I^h]$膨胀到$[F_I^l-3,F_I^h+3]$, 保持分割宽度不变, 取$d_g=d_f=1$, 计算可得前景值

$$S=[-0.295\,467,\ -0.154\,451,\ -0.296\,528].$$

可见不同方案之间的前景值差值缩小, 随着恒定区间的膨胀, 对不同综合方案的心理考量逐渐趋近.

考虑恒定区间向左侧膨胀, 将$[G_I^l,G_I^h]$和$[F_I^l,F_I^h]$膨胀到$[G_I^l-2,G_I^h]$和$[F_I^l-6,F_I^h]$, 保持分割宽度不变. 计算可得前景值

$$S=[-0.208\,362,\ -0.012\,047,\ -0.251\,377].$$

可见最优综合方案仍然是方案B, 乐观的恒定区间设置使得每个方案的前景值都有所上升. 通过对比可知, 越是符合最优情况的指标情景值上升越多, 而对于本就不优越的综合方案, 前景值变化不大. 这表明了应急部门即使在乐观情景下, 也没有忽视对风险的考量.

考虑恒定区间向右侧膨胀, 将$[G_I^l,G_I^h]$和$[F_I^l,F_I^h]$膨胀到$[G_I^l,G_I^h+2]$和$[F_I^l,F_I^h+6]$, 保持分割宽度不变. 计算得前景值

$$S=[-0.384\,748,\ -0.219\,005,-0.370\,286].$$

此时, 最优综合方案仍是方案B. 悲观的恒定区间使得每个综合方案的前景值都有所下降. 通过对比可知, 越是不符合最优情况的指标情景值下降越多. 而对优越的综合方案来说, 前景值变化不大. 这表明了应急部门在悲观情景下, 对风险的重视程度加大.

5.3 方法对比

将本文的矩阵方法与下述文献进行对比分析:

与文献 [17-18] 对比: 本文提出的矩阵方法不仅可应对方案或部门的动态变化过程, 也可分析决策者心理承受能力变化带来的影响. 考虑到救援过程中的不确定性, 针对人员伤亡以及财产损失两个指标, 分别建立相应的上下限矩阵, 以体现决策者心理承受能力和对综合方案处理效果的预期.

与文献 [19] 对比: 本文引入恒定区间量化描述决策者的心理特征, 在整个应急过程中, 恒定区间的变动反映了决策者主观意愿的调整. 不同指标具备不同的恒定区间设置, 这是应急部门对整体情形的判断, 既减少了信息的不确定性, 也降低了计算过程的不对称性, 以实现更高效、更精准的动态决策.

与文献 [20] 对比: 文献 [20] 主要依据历史案例数据, 可有效应对常见的突发事件. 但随社会科技的迅猛发展, 许多新兴极端突发事件出现, 罕有的参考依据使得距离熵–相似度方法不再适用. 特别的, 突发事件发生后, 又一偶然事件突发, 此时出现新旧部门和方案的变动, 这种具备参考价值的历史案例较少. 本文的方法适用性更为宽泛, 不受历史数据的限

制, 即使面对经验匮乏的突发事件仍可发挥作用.

6 结 论

本文能为应急部门或企业带来如下的管理启示:

1) 综合考虑多方面因素, 在应急决策过程中, 需考虑多阶段、多情景以及多部门的因素, 因此需要企业综合评估各种情况下的决策效果. 决策者应该重视全面、综合的信息, 以科学高效地做出决策.

2) 心理偏好反应了决策者对事态发展的主观预期, 会影响对不同应急方案的评估和选择. 在实例验证部分 (第 5 节), 情景d的排除致使预期差值上下限矩阵发生改变, 进而影响 3 个方案的前景值变化. 决策者应当培养相对理性的心理偏好, 以提高决策的准确性和可行性.

3) 突发事件下, 资源从短缺到充盈, 实现其有效调配时刻影响决策者的可承受能力, 这种变化会影响最优方案的选择. 可承受能力上升时, 决策者偏向于冒险策略, 而当可承受能力下降时, 决策者偏向于保守策略.

4) 由实例验证可知, 人员伤亡和财产损失闭区间会受实际情形变化发生偏移, 无论是中心膨胀、左侧膨胀或右侧膨胀, 前景值S的变化一致. 方案得分的变化并不一定会影响最优方案的选择. 这也说明在应急决策中, 心理期望的变化不会直接影响最优方案的选择, 仍需实际情形计算分析.

本文针对多阶段多情景多部门协同决策过程, 提出了恒定区间下的应急决策矩阵方法. 该方法能够综合考虑决策者的心理偏好, 对事态发展的多阶段多情景进行全方面评估, 为后续的应急决策程序化设计提供了可能, 从而实现科学高效决策. 在文中实例验证中发现, 方案B经过多阶段决策后 (包括方案增加、方案删除、恒定区间膨胀等) 仍然为最优方案, 这是一个很有趣的现象, 也是未来研究的课题, 即最优方案的鲁棒性.

参考文献 (References)

[1] 中华人民共和国国务院法制办. 中华人民共和国突发事件应对法[M]. 中国: 中国法制出版社, 2007.
(The People's Republic of China State Council Legislative Affairs Office. People's republic of China (PRC) emergency response law[M]. Beijing: China Legal Publishing House, 2007.)

[2] 刘亚杰, 雷洪涛, 郭波. 地震灾害救援动员中的选址分配模型与算法[J]. 控制与决策, 2013, 28(1): 78-83.
(Liu Y J, Lei H T, Guo B. Facility location-allocation model and algorithm for mobilization of earthquake disaster relief[J]. Control and Decision, 2013, 28(1): 78-83.)

[3] 于振华, 黄山阁, 卢思, 等. 新冠肺炎传播动力学建模及预测[J]. 控制与决策, 2023, 38(3): 699-705.
(Yu Z H, Huang S G, Lu S, et al. Nonlinear dynamics modeling and epidemic forecast of COVID-19[J]. Control and Decision, 2023, 38(3): 699-705.)

[4] 王长峰, 庄文英. 基于动态微分博弈理论的工程应急决策研究[J]. 中国管理科学, 2017, 25(10): 179-186.
(Wang C F, Zhuang W Y. Study on emergency decision making of major projects based on the dynamic differential game theory[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(10): 179-186.)

[5] 汪季玉, 王金桃. 基于案例推理的应急决策支持系统研究[J]. 管理科学, 2003, 16(6): 46-51.
(Wang J Y, Wang J T. A study of emergency decision support system based on case-based reasoning[J]. Journal of Management Science, 2003, 16(6): 46-51.)

[6] Qi K X, Chai H, Duan Q L, et al. A collaborative emergency decision making approach based on BWM and TODIM under interval 2-tuple linguistic environment[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2022, 13(2): 383-405.

[7] 刘光富. 化工安全事故应急决策模型分析[J]. 化工管理, 2023, 657(6): 105-108.
(Liu G F. Analysis of emergency decision model for chemical safety accidents[J]. Chemical Engineering Management, 2023, 657(6): 105-108.)

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

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

[10] 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: 75-82.

[11] Fennema H, Wakker P. Original and cumulative prospect theory: A discussion of empirical differences[J]. Journal of Behavioral Decision Making, 1997, 10(1): 53-64.

[12] Krohling R A, de Souza T T M. Combining prospect theory and fuzzy numbers to multi-criteria decision making[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(13): 11487-1493.

[13] Krishankumar R, Nimmagadda S S, Rani P, et al. Solving renewable energy source selection problems using a q-rung orthopair fuzzy-based integrated decision-making approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 123329.

[14] Loewenstein G F, Weber E U, Hsee C K, et al. Risk as feelings[J]. Psychological Bulletin, 2001, 127(2): 267-

286.

[15] Kiousis S, Mitra S, Wu S. Competition among the big three: Analyzing interactivity on three online news sites through a journalistic metapragmatic approach[J]. Journal of Public Relations Research, 2010, 22(3): 265-284.

[16] Simon H A. The architecture of complexity[J]. Proceedings of the American Philosophical Society, 1962, 106(6): 467-482.

[17] 陈兴, 王勇, 吴凌云, 等. 多阶段多目标多部门应急决策模型[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(11): 1977-1985.
(Chen X, Wang Y, Wu L Y, et al. Emergency decision model with multiple stages, multiple objectives, and multidivisional cooperation[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2010, 30(11): 1977-1985.)

[18] Xue Y, Wang B. Matrix approach to multi-department, multi-stage, multi-objective emergency decision-making[C]. The 35th Chinese Control and Decision Conference. Yichang, 2023: 5001-5006.

[19] 樊治平, 刘洋, 沈荣鉴. 基于前景理论的突发事件应急响应的风险决策方法[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.)

[20] 郑晶, 王应明, 陈圣群. 考虑方案有效性的应急案例决策方法[J]. 控制与决策, 2016, 31(10): 1824-1830.
(Zheng J, Wang Y M, Chen S Q. Decision method for emergency case with considering effectiveness of alternative[J]. Control and Decision, 2016, 31(10): 1824-1830.)

作者简介

王彪 (1986−), 男, 助理教授, 博士, 主要研究方向为博弈理论与应急管理, E-mail: wangbiao@sdu.edu.cn;

薛源 (1999−), 男, 硕士生, 主要研究方向为应急管理与供应链管理, E-mail: gruey@mail.sdu.edu.cn;

陈萍萍 (1994−), 女, 助理教授, 博士, 主要研究方向为供应链管理, E-mail: ppchen@sdu.edu.cn;

郭影 (1990−), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为应急管理与供应链管理, E-mail: guo1006ying@126.com.