

中文引用格式:孙慧芳,陈杨,毛文鑫. 基于改进灰色群决策的城市洪涝灾害应急管理效能评价[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(9): 220–227.

英文引用格式:SUN Huifang, CHEN Yang, MAO Wenxin. Evaluation of emergency management efficiency for urban flood disaster based on improved grey group decision making [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(9): 220–227.

基于改进灰色群决策的城市洪涝灾害 应急管理效能评价^{*}

孙慧芳¹讲师, 陈杨², 毛文鑫^{**3}副教授

(1 河南大学 建筑工程学院, 河南 开封 475004; 2 中国中元国际工程有限公司, 北京 100089; 3 河南大学 商学院, 河南 开封 475004)

中图分类号:X915. 5

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.09.1608

基金项目:国家自然科学基金资助(72304087); 国家社会科学基金资助(25CJY009); 教育部人文社科青年项目(24YJC630184); 河南省哲学社会科学规划项目(2023CSH028)。

【摘要】 为解决城市洪涝灾害应急管理效能评价中决策者在风险条件下的偏好依赖与损失规避问题, 构建融合决策者风险偏好的改进灰色群决策模型, 首先, 提出一种基于群体意见一致性和差异性的决策者权重确定方法, 弥补传统方法在集成个体信息时忽略决策者专业背景、经验和个人偏好的差异问题; 然后, 提出改进的交互式多准则决策(TODIM)方法, 降低在计算优势度时决策者面对风险的损失夸大问题; 最后, 将模型应用于城市洪涝灾害应急管理方案效能评价, 验证所提方法的有效性。结果表明: 在综合考虑应急救援效率、防灾减灾效果、资源利用效率和应急管理成本的情况下, 应急响应和救援体系完善方案优于早期预警与监测系统建设方案和信息化技术支持方案, 且这一最优应急方案在81.82%的情景中维持稳健。

【关键词】 城市洪涝灾害; 应急管理效能; 灰色群决策; 风险偏好; 交互式多准则决策(TODIM)

Evaluation of emergency management efficiency for urban flood disaster based on improved grey group decision making

SUN Huifang¹, CHEN Yang², MAO Wenxin³

(1 School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng Henan 475004, China;

2 China IPPR International Engineering CO., Ltd., Beijing 100089, China;

3 Business School, Henan University, Kaifeng Henan 475004, China)

Abstract: To address the issues of preference dependence and loss aversion of decision makers under risk conditions in the evaluation of urban flood disaster emergency management efficiency, an improved grey group decision-making model integrating the risk preference of decision-makers was constructed. Firstly, a decision-maker weight determination method based on group consensus and difference was proposed, which overcame the limitation of traditional method that ignored differences of decision-maker's

^{*} 文章编号:1003-3033(2025)09-0220-08; 收稿日期:2025-03-19; 修稿日期:2025-06-11

^{**} 通信作者:毛文鑫(1991—),男,河南许昌人,博士,副教授,主要从事城市韧性方面的研究。E-mail: maowenxin@henu.edu.cn。

professional background, experience and personal preference when integrating individual information. Then, the TODIM method was proposed to reduce the problem of loss overestimation faced by decision makers under risk when calculating dominance. Finally, the model was applied to the efficiency evaluation of urban flood disaster emergency management schemes, which verified its effectiveness. The results show that the scheme of improving the emergency response and rescue system is superior to both the early warning and monitoring system construction scheme and information technology support scheme, when comprehensively considering emergency rescue efficiency, disaster prevention and mitigation effect, resource utilization efficiency and emergency management cost. Moreover, this optimal emergency scheme remains robust in 81.82% of the scenarios.

Keywords: urban flood disaster; emergency management efficiency; grey group decision-making; risk preference; improved interactive multi-criteria decision-making (TODIM)

0 引言

随着城市化进程中建设用地的高强度、高密度开发,城市热岛和雨岛效应叠加,令短时强降雨概率增加,显著提升城市洪涝灾害风险^[1]。2021年,郑州“7·20”特大暴雨导致的洪涝灾害,是新中国成立以来最严重的城市洪涝灾害,河南省共计398人因灾遇难,直接经济损失高达1200.6亿元^[2]。面对突发性洪涝灾害,及时有效的应急管理和应急响应可以减少人员伤亡和财产损失。在此背景下,城市在面临突发性洪涝灾害冲击时所具备的应急管理效能(即应急管理绩效与功能的复合),能够有效减缓洪涝灾害造成的损失^[2]。因此,科学合理的评价城市洪涝灾害应急管理效能,有助于控制灾害后果和维护社会秩序稳定。

当前研究主要从城市洪涝灾害应急管理效能评价的应用场景和理论方法2方面展开。在应用场景方面,研究重点聚焦在应急响应能力评价、缓解措施评价、应急物资调配效能评价等^[3]。例如:美国联邦应急事务管理局和联邦应急事务委员会联合开发了一套应急管理准备能力评价体系,构建了涵盖政府、企业、社区、家庭协同响应的灾害应急能力系统^[4]。OZGUVEN等^[5]以超级风暴桑迪为研究案例,集成射频识别技术,提出基于综合反馈机制的灾害应急管理框架,评价应急救援期间应急物资需求的动态变化,为重要物资供应提供安全保障。CHEN Peng等^[6]基于战争博弈原理和灾害管理理论,建立暴雨规则动态模型及可视化动态模型模拟城市内涝灾害的救援过程,用以评价城市在灾害中的物资配置和人员分配的最优数量。

在理论方法层面,一方面,洪涝灾害的发生和演变过程受城市建设布局、气候变化等众多因素影响,

表现出高度的不确定性和复杂性,要求应急管理过程中能够处理不完备和不确定的信息,以应对洪涝灾害的不确定性挑战。传统的多准则决策方法,如层次分析法^[7]、模糊综合评价^[1]和云模型^[8]等,能够有效地量化分析不同准则。另一方面,洪涝灾害应急管理涉及政府、居民等多方利益相关者,不同利益相关者存在不同的观点、偏好,进而使应急管理效能评价面临群体决策的需求^[9]。例如:LI Guangxu等^[10]指出参与者规模和异质性信息对群体共识的达成过程有重要影响,使用模糊聚类分析对大规模群决策问题的异构信息进行集成,从而支持在紧急情况下选择最佳救援方案。YIN Xuanpeng等^[11]开发群体偏好集结技术,提出大群体应急方案的风险量化方法,基于不同群体的信息覆盖范围及环境约束下的决策风险差异,对应急策略进行综合评判。

然而,受限于不同利益相关者认知差异和应急管理决策的复杂环境,决策者给出的群体效果评价价值通常是灰数,即仅能确定范围而无法获得精确数值^[12]。灰数信息下的灰色群决策模型在处理决策信息不确定性和信息缺失方面具有显著优势^[13],尤其适用于城市洪涝灾害应急管理决策所面临的信息不完全且决策者意见不一致的情境。但是,现有灰色群决策模型在城市洪涝灾害应急管理效能评价的应用中仍存在以下2个方面的局限性:一方面,现有模型多基于加权集结原理或群体意见一致性、满意度和共识度等指标构建信息融合机制,但忽略了应急管理效能评价过程中不同决策者在知识结构、经验水平及主观倾向上的差别对信息集结的影响;另一方面,现有的灰色群决策方法多建立在期望效用理论基础上,默认决策者具有完全理性的行为特征。而应急管理效能评价的复杂性使得决策者难以完全理性地参与决策,从而导致实际决策结果偏离理性

模型的预期。现有研究忽略了决策者非理性行为(如参照依赖和损失规避)对决策结果的影响。

鉴于此,文中拟针对决策信息存在三参数区间灰数的城市洪涝灾害应急管理效能评价问题,构建考虑决策者风险偏好的改进灰色群决策模型,从群体意见一致性和差异性2个视角出发,综合计算决策者权重,并针对决策者面临益损时的风险偏好依赖和损失规避等非理性行为,提出改进的交互式多准则决策(Improved Interactive Multi-criteria Decision-Making, TODIM)方法,用于对所有城市洪涝灾害应急管理方案的效能进行排序和择优,以期为城市洪涝灾害应急管理决策提供理论和实践支持。

1 城市洪涝灾害应急管理效能评价模型

1.1 应急管理效能评价问题描述

设在某城市洪涝灾害应急管理效能评价问题中,应急管理效能评价方案集包括 m 个方案,记为 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, 指标集包括 n 个指标,记为 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, 令 w_j 为指标 C_j ($j = 1, 2, \dots, n$) 的权重,满足 $\sum_{j=1}^n w_j = 1$, 且 $0 \leq w_j \leq 1$; 决策者集为 $e = \{e_1, e_2, \dots, e_l\}$, 令 λ_s 为决策者 e_s 的权重,满足 $\sum_{s=1}^l \lambda_s = 1$, 且 $0 \leq \lambda_s \leq 1$ 。在决策者 e_s 下,应急管理方案 A_i 关于应急管理效能评价指标 C_j 的效果评价值为三参数区间灰数 $a_{ij}^s(\otimes)$, 记为 $a_{ij}^s(\otimes) \in [\underline{a}_{ij}^s, \tilde{a}_{ij}^s, \bar{a}_{ij}^s]$, 构成决策者 e_s 下的效果样本矩阵 $D^s = (a_{ij}^s(\otimes))_{m \times n}$ 。在考虑决策者参照依赖和损失规避等有限理性心理行为的基础上,评价各城市洪涝灾害应急管理方案的效能。综上,完整的评价模型流程框架如图1所示。

为消除洪涝灾害应急管理效能评价指标在量纲上的差别以提升区分度,引入极差变换把评价值 $a_{ij}^s(\otimes) \in [\underline{a}_{ij}^s, \tilde{a}_{ij}^s, \bar{a}_{ij}^s]$ 标准化为 $x_{ij}^s(\otimes) \in [\underline{x}_{ij}^s, \tilde{x}_{ij}^s, \bar{x}_{ij}^s]$, 构成标准化效果样本矩阵 $X^s = (x_{ij}^s(\otimes))_{m \times n}$ 。

设 $\bar{a}_j^{*(s)} = \max_{1 \leq i \leq m} \bar{a}_{ij}^s, \underline{a}_j^{\nabla(s)} = \min_{1 \leq i \leq m} \underline{a}_{ij}^s$ ($j = 1, 2, \dots, n$), 若 C_j 为效益型洪涝灾害应急管理效能评价指标,则:

$$\underline{x}_{ij}^s = \frac{\underline{a}_{ij}^s - \underline{a}_j^{\nabla(s)}}{\bar{a}_j^{*(s)} - \underline{a}_j^{\nabla(s)}}, \tilde{x}_{ij}^s = \frac{\tilde{a}_{ij}^s - \underline{a}_j^{\nabla(s)}}{\bar{a}_j^{*(s)} - \underline{a}_j^{\nabla(s)}},$$

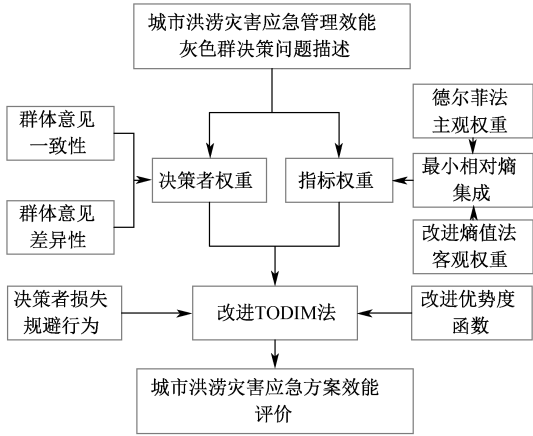


图1 模型流程框架

Fig. 1 Framework of the model process

$$\bar{x}_{ij}^s = \frac{\bar{a}_{ij}^s - \underline{a}_j^{\nabla(s)}}{\bar{a}_j^{*(s)} - \underline{a}_j^{\nabla(s)}} \quad (1)$$

若 C_j 为成本型洪涝灾害应急管理效能评价指标,则:

$$\underline{x}_{ij}^s = \frac{\bar{a}_j^{*(s)} - \bar{a}_{ij}^s}{\bar{a}_j^{*(s)} - \underline{a}_j^{\nabla(s)}}, \tilde{x}_{ij}^s = \frac{\bar{a}_j^{*(s)} - \tilde{a}_{ij}^s}{\bar{a}_j^{*(s)} - \underline{a}_j^{\nabla(s)}}, \quad (2)$$
$$\bar{x}_{ij}^s = \frac{\bar{a}_j^{*(s)} - \underline{a}_{ij}^s}{\bar{a}_j^{*(s)} - \underline{a}_j^{\nabla(s)}}$$

1.2 基于群体一致性和差异性的决策者权重

基于群体意见一致性和差异性思想确定决策者权重,其中,一致性旨在降低权重分配的不确定性,也即集结群体信息后的决策矩阵与初始个体决策矩阵的相似度较大,以确保最少的信息损失;差异性用于识别潜在的冲突或分歧,规定当某一个体决策与群体决策的偏离度越大,其对应权重越小。

首先,计算基于群体意见一致性视角下的决策者权重。当某决策者 e_s ($s = 1, 2, \dots, l$) 的标准化效果矩阵 $X^s = (x_{ij}^s(\otimes))_{m \times n}$ 与其余决策者对应矩阵的相似度较高时,说明决策者 e_s 的矩阵 X^s 可靠性更强,因此,群体决策中应赋予更大的权重。决策者 e_s, e_q 的标准化效果样本矩阵 $X^s = (x_{ij}^s(\otimes))_{m \times n}, X^q = (x_{ij}^q(\otimes))_{m \times n}$ 的第 i 行相似度为:

$$G(\sigma_i^{(s,q)}) = \sum_{j=1}^n B(x_{ij}^s(\otimes), x_{ij}^q(\otimes)) \quad (3)$$

其中

$$B(x_{ij}^s(\otimes), x_{ij}^q(\otimes)) = \frac{(\underline{x}_{ij}^s \underline{x}_{ij}^q + \tilde{x}_{ij}^s \tilde{x}_{ij}^q + \bar{x}_{ij}^s \bar{x}_{ij}^q)}{\sqrt{(\underline{x}_{ij}^s \underline{x}_{ij}^s + \tilde{x}_{ij}^s \tilde{x}_{ij}^s + \bar{x}_{ij}^s \bar{x}_{ij}^s) \times (\underline{x}_{ij}^q \underline{x}_{ij}^q + \tilde{x}_{ij}^q \tilde{x}_{ij}^q + \bar{x}_{ij}^q \bar{x}_{ij}^q)}} \quad (4)$$

式中: $B(x_{ij}^s(\otimes), x_{ij}^q(\otimes))$ 为决策者 e_s, e_q 的标准化效果样本矩阵 $\mathbf{X}^s, \mathbf{X}^q$ 中对对应位置三参数区间灰数型元素 $x_{ij}^s(\otimes) \in [\underline{x}_{ij}^s, \tilde{x}_{ij}^s, \bar{x}_{ij}^s]$ 和 $x_{ij}^q(\otimes) \in [\underline{x}_{ij}^q, \tilde{x}_{ij}^q, \bar{x}_{ij}^q]$ 的相似度, 也即矩阵内元素在数值上的一致程度。当 $x_{ij}^s(\otimes)$ 和 $x_{ij}^q(\otimes)$ 完全相同时, 有 $B(x_{ij}^s(\otimes), x_{ij}^q(\otimes)) = 1$ 。显然随着 $G(\sigma_i^{(s,q)})$ 取值增大, 矩阵 $\mathbf{X}^s$ 和 $\mathbf{X}^q$ 的相似度相应提升, 由此可定义决策者 e_s 的标准化效果样本矩阵 $\mathbf{X}^s = (x_{ij}^s(\otimes))_{m \times n}$ 与其他决策者矩阵之间的相似度:

$$G(\mathbf{X}^s) = \frac{\sum_{q=1, q \neq s}^l \sum_{i=1}^m (x_{ij}^s x_{ij}^q + \tilde{x}_{ij}^s \tilde{x}_{ij}^q + \bar{x}_{ij}^s \bar{x}_{ij}^q)}{\sqrt{(\underline{x}_{ij}^s \underline{x}_{ij}^s + \tilde{x}_{ij}^s \tilde{x}_{ij}^s + \bar{x}_{ij}^s \bar{x}_{ij}^s) \times (\underline{x}_{ij}^q \underline{x}_{ij}^q + \tilde{x}_{ij}^q \tilde{x}_{ij}^q + \bar{x}_{ij}^q \bar{x}_{ij}^q)}} \quad (5)$$

从而可得基于群体意见一致性视角下的决策者 e_s 的权重 $\lambda_s^{(1)}$ 为:

$$\lambda_s^{(1)} = G(\mathbf{X}^s) / \sum_{s=1}^l G(\mathbf{X}^s) \quad (6)$$

随后, 通过计算个体决策者 e_s 与群体间的偏离程度, 确定基于群体意见差异性的决策者权重 $\lambda_s^{(2)}$ 。该偏离程度定义为:

$$y_s = \sum_{q=1, q \neq s}^l \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d(x_{ij}^s(\otimes), x_{ij}^q(\otimes)) \quad (7)$$

式中 $d(x_{ij}^s(\otimes), x_{ij}^q(\otimes))$ 为三参数区间灰数 $x_{ij}^s(\otimes)$ 和 $x_{ij}^q(\otimes)$ 二者间的距离, 采用文献[14]中距离公式计算灰数间的距离。

当个体决策与群体决策的偏离程度增大时, 其对应的权重值应当减小。由此, 决策者 e_s 在群体意见差异性视角下的权重 $\lambda_s^{(2)}$ 可表示为:

$$\lambda_s^{(2)} = \frac{1}{y_s} / \sum_{s=1}^l \frac{1}{y_s} \quad (8)$$

最终, 融合群体意见一致性和差异性特征, 确定决策者 e_s 的综合权重 λ_s 为:

$$\lambda_s = u \lambda_s^{(1)} + (1 - u) \lambda_s^{(2)} \quad (9)$$

式中 u 为决策者意见的偏好系数^[15], $0 \leq u \leq 1$ 。 u 值增大时, 群体意见一致性更受重视; u 值减小时, 个体决策信息量获得更高关注。为了减少参数 u 取值的主观性带来的影响, 通常会结合专家咨询法设定合理的取值, 并通过敏感性分析探寻获得稳定决策结果的参数 u 的取值区间。

运用各决策者 e_s 的综合权重 λ_s 集结群体决策

信息, 生成综合决策矩阵:

$$\mathbf{X} = (x_{ij}(\otimes))_{m \times n} = \sum_{s=1}^l \lambda_s \mathbf{X}^s \quad (10)$$

其中, $x_{ij}(\otimes) \in [\underline{x}_{ij}, \tilde{x}_{ij}, \bar{x}_{ij}] = \sum_{s=1}^l \lambda_s x_{ij}^s(\otimes)$ 。

1.3 评价指标权重的确定

融合德尔菲法和改进的熵值法, 并基于最小相对熵准则构建综合集成赋权法^[16], 计算城市洪涝灾害应急管理效能评价指标的权重。

首先, 采用德尔菲法获取统一的关于各应急管理效能评价指标的专家主观权重, 并把各评价指标的主观权重向量记作 $\mathbf{W}_b = (w_{b1}, w_{b2}, \dots, w_{bn})$ 。随后, 采用改进的熵值法计算客观权重。以灰色系统理论中灰数 $\otimes$ 的核 $\hat{\otimes}$ 作为灰数 $\otimes$ 的代表, 构造城市洪涝灾害应急管理方案的三参数区间灰数的核矩阵。据此计算应急管理效能评价指标的熵值, 进而得到各应急管理效能评价指标的客观权重。参照区间灰数核的定义^[17], 同时结合三参数区间灰数下界、重心点和上界的联动性, 三参数区间灰数型评价核 $x_{ij}(\otimes) \in [\underline{x}_{ij}, \tilde{x}_{ij}, \bar{x}_{ij}]$ 的核为:

$$\hat{x}_{ij}(\otimes) = \frac{3}{5} \tilde{x}_{ij} + \frac{1}{5} (\underline{x}_{ij} + \bar{x}_{ij}) \quad (11)$$

根据上述某一应急管理效能评价指标 C_j 下各城市洪涝灾害应急管理方案 A_i 评价值的核 $\hat{x}_{ij}(\otimes)$, 可得各应急管理效能评价指标 C_j 的熵。

$$K_j = - \sum_{i=1}^m \varepsilon_{ij} \ln \varepsilon_{ij} / \ln m \quad (12)$$

式中 ε_{ij} 为核的归一化值, $\varepsilon_{ij} = \hat{x}_{ij}(\otimes) / \sum_{i=1}^m \hat{x}_{ij}(\otimes)$ 。特别地, 若 $\varepsilon_{ij} = 0$, 则定义 $\lim_{\varepsilon_{ij} \rightarrow 0} \varepsilon_{ij} \ln \varepsilon_{ij} = 0$ 。若各城市洪涝灾害应急管理方案 A_i 在应急管理效能评价指标 C_j 上的取值相等时, 则 $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{m}$, 此时 K_j 取极大

值, 即 $K_j = K_{\max} = - \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m \frac{1}{m} \ln \frac{1}{m} = 1$ 。

熵值 K_j 越大, 应急管理效能评价指标 C_j 对各应急管理方案排序的影响程度越小, 则赋予应急管理效能评价指标 C_j 的权重应越小; 反之亦然。基于此, 可得应急管理效能评价指标 C_j 的客观权重为:

$$w_{gj} = (1 - K_j) / \sum_{j=1}^n (1 - K_j) \quad (13)$$

式中 $1 - K_j$ 为应急管理效能评价指标 C_j 对于不同应

急管理方案排序的重要影响程度。

最后,根据最小相对熵原理集结主、客观权重 w_{bj} 与 w_{gj} ,建立如下优化模型求解应急管理效能评价指标的权重 w_j 。

$$\begin{aligned} \min F &= \sum_{j=1}^n w_j \left(\ln \frac{w_j}{w_{bj}} \right) + \sum_{j=1}^n w_j \left(\ln \frac{w_j}{w_{gj}} \right) \\ \text{s. t. } &\sum_{j=1}^n w_j = 1, w_j > 0 \end{aligned} \quad (14)$$

利用拉格朗日乘子法求解模型,得到应急管理效能评价指标的权重,即:

$$w_j = \sqrt{w_{bj} w_{gj}} / \sum_{j=1}^n \sqrt{w_{bj} w_{gj}} \quad (15)$$

1.4 基于改进 TODIM 方法的效能评价模型

为避免在经典 TODIM 方法中存在的夸大风险,基于前景理论,决策者在决策时对损失的敏感度通常高于对等量收益的敏感度^[18],文中提出改进 TODIM 方法。具体地,对应应急管理效能评价指标 C_j 下应急管理方案 A_i 相较于方案 A_k 的优势度函数实施优化,构建了在应急管理效能评价指标 C_j 下应急管理方案 A_i 与方案 A_k 相比较时分别应对收益与损失这 2 种情形下的优势度函数:

$$\begin{aligned} \varphi_j(A_i, A_k) &= \\ &\begin{cases} d(x_{ij}(\otimes), x_{kj}(\otimes))^\alpha, p(x_{ij}(\otimes) \geq x_{kj}(\otimes)) \geq 0.5 \\ -\eta d(x_{ij}(\otimes), x_{kj}(\otimes))^\beta, p(x_{ij}(\otimes) \geq x_{kj}(\otimes)) < 0.5 \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

式中: α 和 β 为在收益与损失范围下优势度函数的凹凸度; η 为损失规避参数。根据 Kahneman 和 Tversky 试验结果,当参数 $\alpha = \beta = 0.88, \eta = 2.25$ 时能够较好反映决策者面对风险时的真实心理行为。 $d(x_{ij}(\otimes), x_{kj}(\otimes))$ 为 2 个三参数区间灰数的距离, $p(x_{ij}(\otimes) \geq x_{kj}(\otimes))$ 为灰数 $x_{ij}(\otimes)$ 优于 $x_{kj}(\otimes)$ 的可能度, $p(x_{ij}(\otimes) \geq x_{kj}(\otimes))$ 的具体计算公式如下:

$$\begin{aligned} p(x_{ij}(\otimes) \geq x_{kj}(\otimes)) &= \\ \min \left(1, \max \left(\frac{\tilde{x}_{ij} - \tilde{x}_{kj} + \kappa(x_{ij}(\otimes)) - \kappa(x_{kj}(\otimes))}{\tilde{x}_{ij} - \underline{x}_{ij} + \tilde{x}_{kj} - \underline{x}_{kj}} + \frac{1}{2}, 0 \right) \right) \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $\kappa(x_{ij}(\otimes)) = (\tilde{x}_{ij} + \underline{x}_{ij})/2, \kappa(x_{kj}(\otimes)) = (\tilde{x}_{kj} + \underline{x}_{kj})/2$ 。

针对可能度 $p(x_{ij}(\otimes) \geq x_{kj}(\otimes))$,有以下 3 种决策规则^[19]。①当 $p(x_{ij}(\otimes) \geq x_{kj}(\otimes)) > 0.5$ 时,

$x_{ij}(\otimes)$ 优于 $x_{kj}(\otimes)$;②当 $p(x_{ij}(\otimes) \geq x_{kj}(\otimes)) < 0.5$ 时, $x_{kj}(\otimes)$ 优于 $x_{ij}(\otimes)$;③当 $p(x_{ij}(\otimes) \geq x_{kj}(\otimes)) = 0.5$ 时,

若 $\frac{\tilde{x}_{ij}}{\tilde{x}_{ij} - \underline{x}_{ij}} > (< \text{ or } =) \frac{\tilde{x}_{kj}}{\tilde{x}_{kj} - \underline{x}_{kj}}$, 则 $x_{ij}(\otimes) > (< \text{ or } =) x_{kj}(\otimes)$ 。

利用各应急管理效能评价指标 $C_j(j = 1, 2, \dots, n)$ 的权重 w_j ,对各指标下 2 个应急管理方案在效能评价指标 C_j 下相对比时收益与损失的优势度进行融合,计算方案 A_i 相较于方案 A_k 的总体优势度:

$$\vartheta(A_i, A_k) = \sum_{j=1}^n \varphi_j(A_i, A_k) w_j, (i, k = 1, 2, \dots, m) \quad (18)$$

最终,对优势度矩阵进行标准化处理,从而获取各应急管理方案 $A_i(i = 1, 2, \dots, m)$ 的全局价值:

$$\begin{aligned} \Phi(A_i) &= \frac{\sum_{k=1}^m \vartheta(A_i, A_k) - \min_i \left\{ \sum_{k=1}^m \vartheta(A_i, A_k) \right\}}{\max_i \left\{ \sum_{k=1}^m \vartheta(A_i, A_k) \right\} - \min_i \left\{ \sum_{k=1}^m \vartheta(A_i, A_k) \right\}} \end{aligned} \quad (19)$$

其中, $0 \leq \Phi(A_i) \leq 1$ 。根据 $\Phi(A_i)$ 值的大小,可确定各城市洪涝灾害应急管理方案 $A_i(i = 1, 2, \dots, m)$ 的效能优先序。 $\Phi(A_i)$ 值越大,对应方案 A_i 的洪涝灾害应急管理效能综合水平越高。

1.5 应急管理效能评价模型步骤

基于改进灰色群决策的城市洪涝灾害应急管理效能评价模型总体步骤如下:

步骤 1:通过式(1)和式(2),对效果样本矩阵实施标准化处理。

步骤 2:运用式(3)一式(10),依次确定基于群体意见一致性和差异性视角下的决策者权重,并集成为综合权重;通过式(10)生成综合决策矩阵。

步骤 3:依据式(11)一式(15),确定各洪涝灾害应急管理效能评价指标的权重。

步骤 4:采用式(16)和式(17),得到在各洪涝灾害应急管理效能评价指标下,两两应急管理方案相比较时收益和损失的优势度。

步骤 5:依据式(18),计算各应急管理方案相较于其余应急管理方案的总体优势度。

步骤 6:采用式(19),计算各应急管理方案的全局价值,据此评价备选应急管理方案的应急管理效能综合水平。

2 城市洪涝灾害应急管理效能评价

2.1 研究案例与效能评价结果

城市 F 易受暴雨引发的洪涝灾害影响,需要制定有效的应急管理方案,以提高其应对突发性洪涝灾害的处置能力。利用文中构建模型评价城市 F 的洪涝灾害应急管理方案的效能,通过以下步骤确定应急管理方案集:①收集各种针对城市洪涝灾害的应急管理方案,包括学术研究成果、政府文件、实际案例等。②根据研究目的,制定备选应急管理方案的筛选标准,考虑方案的操作性、资源投入与效益比、预期改善效果等方面。③根据筛选标准,对各备选方案进行权衡和对比分析。④根据评价结果和研究需求,最终选定了 3 个备选的应急管理方案 A_1 、 A_2 、 A_3 ,见表 1。

表 1 城市洪涝灾害应急管理方案集

Table 1 Set of emergency management schemes for urban flood disaster	
备选方案	方案描述
A_1 : 早期预警和监测系统建设方案	侧重于建设城市 F 洪涝灾害早期预警和监测系统,提高对洪涝灾害的感知和应对能力,包括洪水监测设备、气象预警系统、水位水质监测设施等
A_2 : 应急响应和救援体系完善方案	着重于加强城市 F 应急响应和救援体系的建设,包括完善灾害应急预案、提升救援队伍能力、强化应急物资储备等
A_3 : 信息化技术支持方案	采用信息技术支持城市 F 洪涝灾害的应急管理,包括建设应急管理信息系统、利用大数据和人工智能技术进行灾害预测和应急指挥,提升灾害应对智能化水平

城市洪涝灾害应急管理效能评价指标集的确定步骤:①收集相关文献、政府报告、实际案例和专家意见,了解已有应急管理效能评价的指标体系。②基于研究目的和文献资料,初步制定能够全面反映应急管理方案在减灾成效方面的指标筛选标准,确保指标具备客观性、可操作性和代表性等。③根据筛选标准,对比分析收集到的各种评价指标,选择能够最大程度覆盖应急管理核心内容的关键性指标。④根据评价结果和研究目标,最终确定了包含 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 共 4 个指标的应急管理效能评价指标(C_1 、 C_2 、 C_3 为效益型指标, C_4 为成本型指标),具体见表 2。

应急决策具有动态性和实时更新的特性,单纯

表 2 城市洪涝灾害应急管理效能评价指标
Table 2 Evaluation index of emergency management efficiency of urban flood disaster

评价指标	对应指标的含义解释
C_1 : 应急救援效率	指救援行动的速度、有效性和覆盖范围,反映救援队伍和物资的调动和应用效果。主要包括救援队伍到达灾区的时间、救援执行效果、救援物资供应的及时性等
C_2 : 防灾减灾效果	指应急管理措施对灾害发生和发展的抑制和减轻程度。主要包括防洪设施的稳定性和效果、排水系统的通畅性、应急预案的实施效果等
C_3 : 资源利用效率	指应急管理中各类资源(人力、物资、设备等)的调配和利用效果,以及衡量资源调配的合理性和利用效果,包括物资储备和调配的时效性、人力资源的优化配置等
C_4 : 应急管理成本	指实施应急管理方案所需的经济投入和资源消耗。主要包括方案的实施成本、维护成本以及灾后恢复和修复的经济投入等

依赖历史数据进行评价受到挑战,且部分指标难以通过纯数据分析实现完全量化,在此引入专家知识和经验判断是确保决策实时性和补充数据不足的重要手段,以实现更全面的应急管理评价。基于此,邀请气象学家 e_1 、应急管理专家 e_2 、信息技术专家 e_3 ,根据其专业知识和实践经验,分别给出备选应急管理方案(A_1 、 A_2 、 A_3)在评价指标(C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4)上的三参数区间灰数型效果样本值,见表 3。根据表 2 评价指标的含义,在应急救援效率(C_1)和资源利用效率(C_3)指标下的样本值,%;在防灾减灾效果(C_2)指标下的样本值以百分制表示,分;在应急管理成本(C_4)指标下的样本值,万元。

表 3 不同专家的效果样本值

Table 3 Sample values from different experts					
专家		C_1	C_2	C_3	C_4
e_1	A_1	[82, 85, 88]	[84, 86, 90]	[87, 89, 94]	[390, 420, 460]
	A_2	[86, 89, 94]	[81, 85, 89]	[88, 90, 93]	[320, 360, 410]
	A_3	[84, 87, 91]	[85, 88, 92]	[82, 85, 89]	[370, 410, 470]
e_2	A_1	[85, 88, 90]	[81, 85, 89]	[84, 87, 90]	[350, 370, 420]
	A_2	[84, 86, 91]	[83, 89, 94]	[86, 91, 95]	[280, 330, 380]
	A_3	[86, 89, 93]	[80, 82, 86]	[83, 87, 91]	[260, 300, 350]
e_3	A_1	[80, 83, 87]	[82, 87, 93]	[79, 84, 87]	[360, 400, 470]
	A_2	[87, 90, 94]	[81, 85, 88]	[82, 86, 89]	[300, 340, 370]
	A_3	[82, 86, 89]	[78, 83, 86]	[85, 88, 93]	[330, 380, 440]

根据文中所构建的模型,评价上述备选应急管理方案的效能,具体评价过程如下:

步骤 1:依据式(1)和式(2),分别构建由上述 3 位专家(e_1, e_2, e_3)提供的标准化效果样本矩阵 $X=(x_{ij}^s(\otimes)_{3\times 4})(s=1,2,3)$ 。

步骤 2:依据式(3)一式(5),从群体意见一致性视角,获取各专家 $e_s(s=1,2,3)$ 的权重 $\lambda_s^{(1)}$ 为:

$$\lambda_1^{(1)}=0.333\ 4,\lambda_2^{(1)}=0.333\ 0,\lambda_3^{(1)}=0.333\ 6$$

取 $\theta=\xi=0.5$,即不考虑各专家的效果样本值的风险偏好,根据式(7)和式(8),从群体意见差异性视角计算各专家 $e_s(s=1,2,3)$ 的权重 $\lambda_s^{(2)}$ 为:

$$\lambda_1^{(2)}=0.342\ 7,\lambda_2^{(2)}=0.311\ 0,\lambda_3^{(2)}=0.346\ 3$$

鉴于一致性视角与差异性视角均未预设专家群体意见的偏好方向,故设定 $u=0.5$;结合各专家的群体意见一致性权重 $\lambda_s^{(1)}$ 和差异性权重 $\lambda_s^{(2)}$,获得综合权重为 $\lambda_1=0.338\ 0,\lambda_2=0.322\ 0,\lambda_3=0.340\ 0$ 。

根据各专家 $e_s(s=1,2,3)$ 的综合权重集成群体标准化效果样本矩阵,得到综合决策矩阵。

步骤 3:根据德尔菲法所得专家主观评价权重结果为 $(0.20, 0.40, 0.20, 0.20)$,结合式(11)一式(15),得到各指标 $C_j(j=1,2,3,4)$ 的综合权重 w_j 分别为: $w_1=0.283\ 6,w_2=0.181\ 2,w_3=0.193\ 7,w_4=0.341\ 5$ 。

步骤 4:依据式(16)和式(17),分别计算成对应急管理方案在各效能评价指标 $C_j(j=1,2,3,4)$ 下相对比时收益与损失的优势度值。

步骤 5:依据式(18),计算应急管理方案 A_i 相较于应急管理方案 A_k 的总体优势度。

步骤 6:依据式(19),计算各应急管理方案 $A_i(i=1,2,3)$ 的全局价值,即 $\Phi(A_1)=0.000\ 0,\Phi(A_2)=1.000\ 0,\Phi(A_3)=0.459\ 6$ 。 $\Phi(A_i)$ 的值越大,所对应洪涝灾害应急管理方案 A_i 的应急管理效能越高。因此,可得到各应急管理方案 $A_i(i=1,2,3)$ 应急管理效能的优先序为: $A_2 > A_3 > A_1$ 。

2.2 稳健性分析与对比分析

首先,为验证结果稳健性,调整式(9)中决策者意见偏好系数 u ,分析决策结果对群体意见一致性和个体决策意见信息量的敏感性,减少参数 u 取值主观性对结果的影响。以 0.1 为步长进行取值, u 从 0 变化到 1 的稳健性分析结果如图 2 所示。

由图 2 可知:仅当 $u=0.9$ 和 1.0 时,决策结果从 $A_2>A_3>A_1$ 变化为 $A_2>A_1>A_3$,其余情况均与原始结果保持一致,最优方案的一致率高达 81.82%,表明文中模型具备较好的稳健性。

其次,将所构建的决策模型分别与经典 TODIM

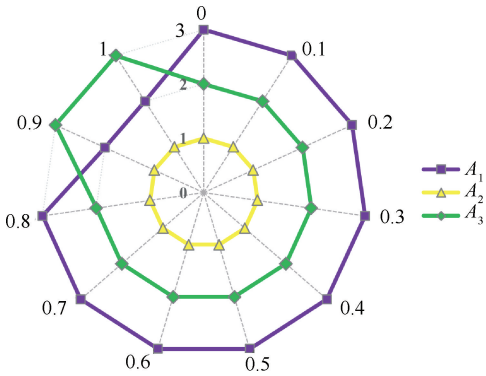


图 2 稳健性分析结果

Fig. 2 Robustness analysis results

方法、文献[17]的灰色关联决策方法、以及文献[12]中群体信息集结方法和文中改进 TODIM 模型所构成的结合方法进行比较,对比结果见表 4。

表 4 对比分析结果

Table 4 Comparative analysis results

决策方法	决策结果
文中所提方法	$A_2 > A_3 > A_1$
经典 TODIM	$A_2 > A_1 > A_3$
文献[17]灰关联决策方法	$A_2 > A_3 > A_1$
文献[12]群体信息集结方法	$A_2 > A_1 > A_3$

由表 4 可知:①经典 TODIM 法得出的应急方案优先排序为: $A_2 > A_1 > A_3$ 。与文中结果的差异源自文中模型融合了前景理论,在计算方案间各指标比较的优势度时考虑了决策者的损失规避心理,从而克服了传统方法可能高估风险损失的问题。②采用文献[17]灰关联决策得到应急方案的优先序为: $A_2 > A_3 > A_1$,与文中结果一致,佐证了文中所提方法的有效性和可靠性。但文中模型将决策者在收益与损失情境下的风险偏好差异纳入群体决策过程,全面考量了行为特征和心理因素对评价结果的作用,更好地反映了实际决策中存在的有限理性与环境不确定性。③采用文献[12]中群体信息集结方法和文中模型所构成的结合方法所得结果为: $A_2 > A_1 > A_3$,结果差异原因在于文中群体信息集结方法考虑了决策者群体信息的一致性和差异性,而文献[12]仅考虑了一致性,相对而言文中群决策信息集结过程与实际情况更为相符。

3 结 论

1) 基于群体意见一致性和差异性的决策者权重确定方法,充分考虑了决策者在洪涝灾害应急管理背景、经验及个体偏好上的差异性,使得群体信息的集结更具科学性和全面性。

2) 改进的 TODIM 方法将决策者的风险偏好纳入决策分析框架,重点考虑决策者参照依赖与损失规避等心理特征,使决策结果能更贴近应急管理方案效能评价的实际场景。

3) 通过 F 市突发性洪涝灾害应急管理方案效能评价的实例分析,验证了模型的有效性。未

来研究将考虑基于大群体决策的数据驱动方法,动态优化模型参数(如决策者偏好系数 u),进一步确保专家权重的合理性。同时,结合传感器网络和物联网数据,构建实时动态决策支持系统,降低专家打分依赖,提升应急管理的时效性与精准度。

参考文献

- [1] 李海辰,冯文文,张少恺,等. 城市洪涝灾害防御中的前沿信息技术应用[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(9): 137-143.
LI Haichen, FENG Wenwen, ZHANG Shaokai, et al. Review on application of cutting-edge information technology in urban flood prevention system[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(9): 137-143.
- [2] 王永明,郑姗姗. 地方政府应急管理效能提升的多重困境与优化路径:基于“河南郑州‘7·20’特大暴雨灾害”的案例分析[J]. 管理世界, 2023, 39(3): 83-96.
WANG Yongming, ZHENG Shanshan. Multiple dilemmas and optimization path for improving the efficiency of local government emergency management: case analysis based on henan zhengzhou torrential rain-caused disaster on July 20[J]. Management World, 2023, 39(3): 83-96.
- [3] CHEN Ning, LIU Wenjing, BAI Ruizhen, et al. Application of computational intelligence technologies in emergency management: a literature review[J]. Artificial Intelligence Review, 2019, 52: 2 131-2 168.
- [4] EMERGENCY R. Federal emergency management agency[J]. Federal Register, 1996, 61(90): 20 944-20 970.
- [5] OZGUVEN E E, OZBAY K. An RFID-based inventory management framework for emergency relief operations[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 57: 166-187.
- [6] CHEN Peng, ZHANG Jiquan, SUN Yingyue. Research on emergency rescue of urban flood disaster based on wargame simulation[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2018, 46(10): 1 677-1 687.
- [7] 宋英华,韩保帅,郭晨. 考虑洪涝灾害风险的县域应急避难场所选址模型[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(4): 191-198.
SONG Yinghua, HAN Baoshuai, GUO Chen. Location selection model of emergency shelter considering risk of flood disaster in county[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4): 191-198.
- [8] ZHANG Yang, SHANG Kejian. Cloud model assessment of urban flood resilience based on PSR model and game theory[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2023, 97: DOI: 10.1016/j.ijdr.2023.104050.
- [9] MEHRVAR S, SURMINSKI S. Investigating flood resilience perceptions and supporting collective decision-making through fuzzy cognitive mapping[J]. Science of the Total Environment, 2022, 837: DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155854.
- [10] LI Guangxu, KOU Gang, PENG Yi. Heterogeneous large-scale group decision making using fuzzy cluster analysis and its application to emergency response plan selection[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 52(6): 3 391-3 403.
- [11] YIN Xuanpeng, XU Xuanhua, PAN Bin. Selection of strategy for large group emergency decision-making based on risk measurement[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 208: DOI: 10.1016/j.res.2020.107325.
- [12] SUN Huifang, MAO Wenxin, DANG Yaoguo, et al. Optimum path for overcoming barriers of green construction supply chain management: a grey possibility DEMATEL-NK approach[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 164: DOI: 10.1016/j.cie.2021.107833.
- [13] XIE Xudong, HU Mingli, YANG Yingjie, et al. Grey target group decision model based on expected intervals of experts[J]. The Journal of Grey System, 2020, 32(4): 77-89.
- [14] 孙慧芳,党耀国,毛文鑫. 基于前景理论的风险型多阶段灰靶决策方法[J]. 统计与决策, 2020, 36(7): 183-188.
SUN Huifang, DANG Yaoguo, MAO Wenxin. Risk based multistage grey target decision making method based on prospect theory[J]. Statistics and Decision Making, 2020, 36(7): 183-188.
- [15] 姜雨茹,刘焱,叶国菊. 基于专家动态赋权的离散模糊语言群决策方法[J]. 西华大学学报:自然科学版, 2024, 43(5): 124-130.
JIANG Yuru, LIU Yan, YE Guojie. Discrete fuzzy language group decision making method based on expert dynamic weighting[J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition, 2024, 43(5): 124-130.
- [16] SUN Huifang, DANG Yaoguo, MAO Wenxin. Identifying key factors of regional agricultural drought vulnerability using a panel data grey combined method[J]. Natural Hazards, 2019, 98(2): 621-642.
- [17] LIU Sifeng, YANG Yingjie, FORREST J. Grey data analysis[M]. Singapore: Springer Singapore, 2017: 234-239.
- [18] KAHNEMAN D, TVERSKY A. Prospect theory: an analysis of decision under risk[M]. Singapore: Handbook of the Fundamentals of Financial Decision Making: Part I. 2013: 99-127.
- [19] 闫书丽. 灰靶决策方法及应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
YAN Shuli. Grey target decision method and its application[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.

作者简介: 孙慧芳 (1990—),女,河南叶县人,博士,讲师,主要从事城市韧性、灾害应急管理方面的研究。E-mail: sunhuifang@henu.edu.cn。

