



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



基于三元群智信息量子态证据体融合的突发事件风险危重度研判

汤辰悦, 朱建军, 刘微俏

引用本文:

汤辰悦, 朱建军, 刘微俏. 基于三元群智信息量子态证据体融合的突发事件风险危重度研判[J]. *控制与决策*, 2024, 39(11): 3829–3838.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1358>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

基于语言共识模型的电子商务信用风险评价方法

An approach to E-commerce credit risk assessment based on linguistic consensus model

控制与决策. 2021, 36(6): 1465–1471 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1398>

基于群决策考虑属性效用一致性的DEA他评交叉效率公共权重排序法

A common-weight ranking method for DEA peer-efficiency based on group decision-making and considering the consistency of attribute utility

控制与决策. 2021, 36(9): 2279–2289 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1719>

考虑个体累积共识贡献的犹豫模糊语言自适应共识模型

Adaptive consensus model with hesitant fuzzy linguistic information considering individual cumulative consensus contribution

控制与决策. 2021, 36(1): 187–195 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0556>

基于参数自适应蚁群算法的高速列车行车调度优化

Optimization of high-speed train operation scheduling based on parameter adaptive improved ant colony algorithm

控制与决策. 2021, 36(7): 1581–1591 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0992>

基于三元群智信息量子态证据体融合的 突发事件风险危重度研判

汤辰悦¹, 朱建军^{1†}, 刘微俏^{1,2}

(1. 南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106; 2. 山东财经大学 工商管理学院, 济南 250000)

摘要: 针对突发事件复杂、多源信息难以有效融合的问题, 研究面向三元群智信息证据融合的风险危重度研判方法. 构建由硬件感知、媒介感知和群体感知组成的三元群智信息风险危重度研判体系, 设计三元群智信息的二维表征方式; 为测度三元群智信息间的内联关系, 建立考虑向量投影和距离范数的群智信息相似度测度模型; 为减弱三元群智信息证据间的冲突特性, 建立考虑量子加权平均算子的风险危重度测算方法. 最后通过算例验证方法的有效性.

关键词: 突发事件应急决策; 三元群智信息; 证据理论; 量子态证据融合

中图分类号: C934

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1358

引用格式: 汤辰悦, 朱建军, 刘微俏. 基于三元群智信息量子态证据体融合的突发事件风险危重度研判[J]. 控制与决策, 2024, 39(11): 3829-3838.

Emergency risk severity judgment based on fusion of quantum state evidence bodies of ternary crowd intelligence information

TANG Chen-yue¹, ZHU Jian-jun^{1†}, LIU Wei-qiao^{1,2}

(1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. School of Business Administration, Shandong University of Finance and Economics, Jinan 250000, China)

Abstract: In view of the difficulty of processing complex heterogeneous multivariate information of emergencies, this paper studies the risk criticality judgment method for ternary crowd intelligence information evidence fusion. The ternary crowd intelligence information evaluation index system composed of hardware perception information, media perception information and group perception information is constructed, and the two-dimensional representation of ternary crowd intelligence information is designed. To represent the connection and conflict between information, a ternary crowd intelligence information similarity measurement model considering vector projection and distance norm is established. To weaken the conflict between evidences, a risk criticality measurement method considering quantum weighted average optimization operator is established. Finally, an example is given to illustrate the effectiveness of the proposed proposed method.

Keywords: emergency decision-making; ternary crowd intelligence information; evidence theory; quantum state evidence fusion

0 引言

当今社会, 突发事件的发生频率和影响范围日益扩大, 其对社会稳定和公共安全构成了严峻挑战. 因此, 对突发事件风险危重度进行准确研判, 不仅是科学决策的需要, 也是保障公众安全的关键一环. 突发事件风险危重度研判是对造成或者可能造成严重社

会危害, 需要采取应急处置予以应对的自然灾害、事故灾难、公共卫生事件和社会安全事件进行风险危重度的等级甄别^[1-3]. 针对突发事件造成的广泛影响, 许伟等^[4]基于数据挖掘研究了跨媒体分析的事件检测与趋势研判模型. 突发事件致使信息多渠道传播, 李芋均等^[5]利用互联网技术获取多源灾情信息加以

收稿日期: 2023-09-23; 录用日期: 2024-01-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目(72071106).

责任编辑: 李登峰.

[†]通讯作者. E-mail: Zhujianjun@nuaa.edu.cn.

*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.

融合进而判断灾情烈度. 在危重度研判过程中, 专家的主观经验直接影响事件等级划分, 叶鑫等^[6]提出一种考虑群体信度的等级研判方法; 余高峰等^[7]构造了考虑多情形指标特征值级别隶属函数和混合型变权的安全态势评级模型, 解决了指标间信息非补偿性和评级方法稳定性问题. 杜元伟等^[8]针对决策主体庞杂性和业务关系交叉性, 构建了“由上至下”的双层分布式融合决策方法, 但不足在于缺乏对于决策主体间交互作用的研究. 刘培德等^[9]提出了广义 Shapley 值体现专家间的交互作用, 构建了基于证据理论的概率语言环境下的多属性群决策方法; 狄鹏等^[10]进一步考虑到专家不同知识体系和逻辑习惯差异, 提出基于云决策矩阵和三元冲突系数来解决模糊性问题. 在多元模糊信息的基础上, 张磊等^[11]建立了考虑专家影响力和评价一致性研判决策模型. 为了提高处理信息模糊性的精度, Wang 等^[12]提出了分布式参考点证据推理的分析模型. 在信息融合过程中常常遇到冲突和不一致的问题, 学者们也提出了较为丰富的解决方案, Xiao^[13]为解决高冲突证据信息出现反直觉结果的问题, 设计了一种新的信任熵并由此修正证据之间的冲突程度. 为降低信息丢失与信息冗余的概率, 赵静等^[14]定义了新的信息源区间距离度量方法, 解决受环境、设备局限及人为干预影响而导致的高冲突信息融合问题; 徐祖润等^[15]采用改变证据源的组合规则衡量证据间的贴近度. 研究表明, 多元信息的获取和有效处理对突发事件风险危重度的研判至关重要, 但多样的信息渠道和多元的结构类型加大了分析难度, 如何提取重要的信息并进行有效融合是突发事件风险危重度分析亟需解决的关键问题.

伴随着互联网、物联网和大数据等技术的快速发展, 突发事件中海量信息感知单元的实时感知、移动互联并智能协作, 形成了具有分布式特征的群智信息^[16], 近年来得到了学术界的广泛重视与应用, 聚焦于群智信息的协同交互机制、用户情感分析、群智计算理论模型等方面^[17-20]. 实际上, 群智信息的来源、类别和特征都具有显著差异, 本文将群智信息分为智能终端等获得的硬件感知信息、由各类网络媒介等获得的媒介感知信息、由决策者专家等获得的群体感知信息等3种类型(称为“三元群智信息”), 由于三元群智信息的复杂性和异质性, 研判过程中常常受到三元群智信息融合冲突的挑战, 现有文献较少考虑多类型群智信息内在的联动特征, 缺乏对三元群智信息的网络情绪、不完全事实、主观能动等风险特征的表

征研究^[21]. 对此, 本文提出一种面向三元群智信息证据融合的突发事件风险危重度研判方法, 建立硬件感知信息、媒介感知信息、群体感知信息的二维表征方法, 结合云模型研究了三元群智信息的可靠性、情感性和客观性的风险感知特征, 填补了现有研究中多类型群智信息联动特征的研究不足; 借鉴向量投影思想与距离范数刻画了三元群智信息之间的冲突关系; 定义了三元群智信息的量子加权平均算子, 提出了考虑三元群智信息冲突证据融合的危重度研判方法, 为突发事件应急决策的科学性和合理性做出了创新性探索, 有望在实际应用中提供一定的参考价值, 为社会的安全和稳定做出积极贡献.

1 基本概念与问题描述

云模型作为一种将概率论与传统模糊数学理论相结合的数学模型, 能够将定量评价向定性评语集模糊转化, 采用期望值 Ex 、熵 En 和超熵 3 个数字特征体现定性概念的不确定性、模糊性和随机性, Ex 反映了云的重心位置, 表示相应模糊信息转化为量化评估的中心值; En 反映了云滴的散布程度和波动区间, 是对 Ex 不确定性的估计; He 体现了云滴的稳定程度, 是熵值的熵, 表示了熵的不确定性. 云滴数量越多, 越能反映定性概念的随机性与模糊性^[22], 该定性概念的整体特征体现的更加明显, 云模型及运算规则见文献^[23].

证据理论是一种具有处理不确定信息能力的推理方法, 其样本空间称为辨识框架, 用 Ω 表示, 是由一系列互不相容的对象组成的有限集合, 包含当前需要识别的全部对象. 对于任意的 $v \subseteq \Omega$, 若有 $m(v) > 0$, 则称 v 为焦点. $Z(\Omega)$ 为 Ω 的所有子集构成的集合, $Z(\Omega)$ 为 Ω 的幂集, \emptyset 为空集, 称 $m: Z(\Omega) \rightarrow [0, 1]$ 为基本概率分配函数 (BPA, 称之为 Mass 函数), 可反映相关证据对焦点的支持程度 (隶属度), 满足 $\sum_{v \in Z(\Omega)} m(v) = 1, m(\emptyset) = 0$. 证据理论方法及融合规则可参见文献^[24-25].

设突发事件风险危重度的研判指标 $i \in I = \{1, 2, \dots, m\}$, 风险危重度等级 $j \in J = \{1, 2, \dots, n\}$, 三元群智信息类别集合 T , 第 t 类群智信息 $t \in T = \{A, B, P\}$, 其中硬件感知信息集合 $A = \{A_h | h = 1, 2, \dots, H\}$, 媒介感知信息集合 $B = \{B_k | k = 1, 2, \dots, K\}$, 群体感知信息集合 $P = \{P_g | g = 1, 2, \dots, G\}$. 本文拟解决的面向三元群智信息融合的突发事件风险危重度研判问题, 难点在于两个方面: 一是突发事件发生后获得的三元群智信息来源多样且形式各异, 加

大了群智信息内在关联分析难度;二是如何考虑三元群智信息的关联性和冲突性,依托数据驱动的思维促使风险危重度评价更加科学合理.

2 三元群智信息融合的突发事件风险危重度研判方法

在突发事件风险危重度研判过程中,如何刻画和表征三元群智信息并测度其内在关联与冲突性是关键所在.

2.1 基于“云模型-风险性”的三元群智信息风险二维表征

考虑到硬件感知信息具有数据粒度上不完全一致特征、媒介感知信息承载了网络复杂情绪传播特征、群体感知信息体现了决策者主观能动性和主体利益倾向性特征,为有效融合多元不确定模糊信息并量化其内在关联关系,本文采用“云模型-风险性” $D_{tij} = [c_{tij}, s_{ti}] = [C_{tij}(\text{Ex}_{tij}, \text{En}_{tij}, \text{He}_{tij}), S_{ti}(R_{ti}, F_{ti}, O_{ti})]$ 来表征三元群智信息,通过专家打分的形式以群智信息风险感知偏度系数 S_{ti} 刻画三元群智信息风险指标的可靠性 R_{ti} 、情感性 F_{ti} 、客观性 O_{ti} .其中:可靠性是指三元群智信息完整和准确的程度,情感性是指三元群智信息内含情感倾向性的程度,客观性是指三元群智信息基于事实、不受主观意识影响的程度.

硬件感知是通过感应探测技术、智能终端等传递的信息,其云模型为

$$C_{A_h ij}(\text{Ex}_{A_h ij}, \text{En}_{A_h ij}, \text{He}_{A_h ij}) = c_{A_h ij},$$

风险感知偏度系数为

$$S_{A_h i}(R_{A_h i}, F_{A_h i}, O_{A_h i}) = s_{A_h i},$$

则

$$D_{A_h ij} = [c_{A_h ij}, s_{A_h i}] = [C_{A_h ij}(\text{Ex}_{A_h ij}, \text{En}_{A_h ij}, \text{He}_{A_h ij}), S_{A_h i}(R_{A_h i}, F_{A_h i}, O_{A_h i})],$$

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

媒介信息主要来源于报纸、网页、视听设备等媒介载体,设其形式为连续数字和语言描述,连续数字型媒介感知信息云模型表示为

$$C_{B_{\text{NUK}} ij}(\text{Ex}_{B_{\text{NUK}} ij}, \text{En}_{B_{\text{NUK}} ij}, \text{He}_{B_{\text{NUK}} ij}) = c_{B_{\text{NUK}} ij},$$

风险感知偏度系数为

$$S_{B_{\text{NUK}} i}(R_{B_{\text{NUK}} i}, F_{B_{\text{NUK}} i}, O_{B_{\text{NUK}} i}) = s_{B_{\text{NUK}} i}.$$

令

$$D_{B_{\text{NUK}} ij} = [c_{B_{\text{NUK}} ij}, s_{B_{\text{NUK}} i}] =$$

$$[C_{B_{\text{NUK}} ij}(\text{Ex}_{B_{\text{NUK}} ij}, \text{En}_{B_{\text{NUK}} ij}, \text{He}_{B_{\text{NUK}} ij}), S_{B_{\text{NUK}} i}(R_{B_{\text{NUK}} i}, F_{B_{\text{NUK}} i}, O_{B_{\text{NUK}} i})],$$

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

语言描述型媒介感知信息云模型为

$$C_{B_{\text{DEK}} ij}(\text{Ex}_{B_{\text{DEK}} ij}, \text{En}_{B_{\text{DEK}} ij}, \text{He}_{B_{\text{DEK}} ij}) = c_{B_{\text{DEK}} ij},$$

风险感知偏度系数为

$$S_{B_{\text{DEK}} i}(R_{B_{\text{DEK}} i}, F_{B_{\text{DEK}} i}, O_{B_{\text{DEK}} i}) = s_{B_{\text{DEK}} i}.$$

令

$$D_{B_{\text{DEK}} ij} = [c_{B_{\text{DEK}} ij}, s_{B_{\text{DEK}} i}] = [C_{B_{\text{DEK}} ij}(\text{Ex}_{B_{\text{DEK}} ij}, \text{En}_{B_{\text{DEK}} ij}, \text{He}_{B_{\text{DEK}} ij}), S_{B_{\text{DEK}} i}(R_{B_{\text{DEK}} i}, F_{B_{\text{DEK}} i}, O_{B_{\text{DEK}} i})],$$

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

设群体感知信息的形式为决策矩阵, $P_0 =$

$$\begin{bmatrix} p_{11} & p_{21} & \dots & p_{f1} \\ p_{12} & p_{22} & \dots & p_{f2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{1m_p} & p_{2m_p} & \dots & p_{fm_p} \end{bmatrix}, m_p = 1, 2, \dots, M_P, f = 1, 2, \dots, F, M_P$$

为群体感知信息指标数, F 为专家数,群体感知信息云模型表示为

$$C_{P_g ij}(\text{Ex}_{P_g ij}, \text{En}_{P_g ij}, \text{He}_{P_g ij}) = c_{P_g ij},$$

风险感知偏度系数为

$$S_{P_g i}(R_{P_g i}, F_{P_g i}, O_{P_g i}) = s_{P_g i}.$$

令

$$D_{P_g ij} = [c_{P_g ij}, s_{P_g i}] = [C_{P_g ij}(\text{Ex}_{P_g ij}, \text{En}_{P_g ij}, \text{He}_{P_g ij}), S_{P_g i}(R_{P_g i}, F_{P_g i}, O_{P_g i})],$$

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

本文设三元群智信息风险危重度等级划分标准由区间型数据和模糊型数据构成.针对区间型属性群智信息数据云模型隶属度测算,设 x_{ij}^t 为第 t 类群智信息评价指标 i 对应风险等级 j 的指标值,其评价区间为 $[x_{ij}^{t \min}, x_{ij}^{t \max}]$,每个等级区间的中间值最能代表该等级的整体定性概念^[26],故期望值 Ex_{tij} 取等级区间的中值,即

$$\text{Ex}_{tij} = \frac{x_{ij}^{t \min} + x_{ij}^{t \max}}{2}. \tag{1}$$

由于 $x_{ij}^{t \min}$ 同时是相邻风险危重度等级的约束边界值, $x_{ij}^{t \max}$ 对于这两个风险危重度等级具有相同的隶属度0.5,即

$$\exp\left(-\frac{(x_{ij}^{t \min} - \text{Ex}_{tij})^2}{2(\text{En}_{tij})^2}\right) =$$

$$\exp\left(-\frac{(x_{ij}^{t_{\min}} - x_{ij}^{t_{\max}})^2}{8(\text{En}_{tij})^2}\right) = 0.5,$$

故化简得熵值如下:

$$\text{En}_{tij} = \frac{x_{ij}^{t_{\max}} - x_{ij}^{t_{\min}}}{2.355}. \quad (2)$$

超熵 He_{tij} 反应了熵的离散程度,可根据具体指标的模糊性与随机性由经验值获得,本文取 $\text{En}_{tij}/10$.

结合上述基准云模型数字特征,根据正向云发生器算法计算出区间型属性群智信息数据云模型风险危重度等级隶属度如下:

$$\mu_{ij}^t = \exp\left(\frac{-(x_i^t - \text{Ex}_{tij})^2}{2(\text{En}'_{tij})^2}\right), \quad (3)$$

其中 En'_{tij} 为以 En_{tij} 为期望、 He_{tij} 为标准差的正态随机数.

对于模糊型群智信息突发事件风险等级评价,使用等级模糊评价值^[22]. 根据正向云发生器算法计算出第 t 类群智信息各指标 i 在每个风险等级 j 下的隶属度,构成隶属度矩阵 $U^t = (u_{ij}^t)_{m \times n}$, 其中 m 为指标数, n 为等级数,隶属度 μ_{ij}^t 计算如下:

$$\mu_{ij}^t = \exp\left(\frac{-(x_i^t - \text{Ex}_{tij})^2}{2(\text{En}'_{tij})^2}\right), \quad (4)$$

其中 En'_{tij} 为以 En_{tij} 为期望、 He_{tij} 为标准差的正态随机数.

2.2 基于证据理论的三元群智信息证据体相似度测算

通过三元群智信息评价指标 Mass 函数云值相似度和风险相似度,描述三元群智信息证据体的关联与冲突程度. 对于三元群智信息云值相似度的测算,借鉴向量投影思想^[27],引入 L_2 距离范数测量“信息空间”中群智信息集之间的直线距离,即刻画全局视角下三元群智信息证据体向量组之间的冲突关系.

由于各评价指标分级区间云模型特征值计算第 t 类群智信息第 j 个风险等级下第 i 个指标的隶属度和不为 1,即不完全满足 D-S 证据中基本概率分配函数的定义,引入第 t 类群智信息第 i 个指标等级分配不确定概率 $m_{i\theta}^t$,将云模型得到的隶属度转化成符合证据理论定义的基本概率分配,即

$$m_{ij'}^t = \frac{(1 - \theta_i^t)\mu_{ij}^t}{\sum_{j=1}^n \mu_{ij}^t}; \quad (5)$$

$$\theta_i^t = 1 - \max(\mu_{i1}^t, \mu_{i2}^t, \dots, \mu_{in}^t), \quad t = 1, 2, 3; \quad (6)$$

$$m_{i\theta}^t = \theta_i^t. \quad (7)$$

设任意两向量 $m_\tau, m_\sigma \in m_{ij}^t$, 令 $\text{Sim}_1(m_\tau, m_\sigma) = S_{1\tau\sigma}$ 为 Mass 函数 m_τ 与 m_σ 的云值相似性测度,有

$$S_{1\tau\sigma} = \alpha(m_\tau, m_\sigma)\beta(m_\tau, m_\sigma), \quad \tau, \sigma = 1, 2, \dots, m. \quad (8)$$

其中: $\alpha(m_\tau, m_\sigma)$ 为云值方向相似度, $\langle m_\tau, m_\sigma \rangle$ 表示向量 m_τ 与 m_σ 的夹角,有

$$\alpha(m_\tau, m_\sigma) = 1 - \frac{\langle m_\tau, m_\sigma \rangle}{90^\circ}. \quad (9)$$

$\beta(m_\tau, m_\sigma)$ 为云值范数相似度,有

$$\beta(m_\tau, m_\sigma) = \begin{cases} 1 - \frac{\|m_\sigma^+\|_2 - \|m_\tau\|_2}{\|m_\tau\|_2}, & \|m_\sigma^+\|_2 \leq 2\|m_\tau\|_2; \\ 0, & \|m_\sigma^+\|_2 > 2\|m_\tau\|_2. \end{cases} \quad (10)$$

其中: m_σ^+ 为 m_σ 在 m_τ 上的投影向量,有

$$\|m_\sigma^+\|_2 = \|m_\sigma\|_2 |\cos\langle m_\tau, m_\sigma \rangle|, \quad (11)$$

$$\cos\langle m_\tau, m_\sigma \rangle = \frac{\|m_\tau\|_2^2 + \|m_\sigma\|_2^2 - \|m_\tau m_\sigma\|_2^2}{2\|m_\tau\|_2 \|m_\sigma\|_2}. \quad (12)$$

令 $\text{Sim}_2(s_{t\varepsilon}, s_{t\delta}) = S_{2\varepsilon\delta}$ 为 Mass 函数 m_τ 与 m_σ 的风险相似度,表示三元群智信息风险感知下的可靠性、情感性、客观性程度相似性测度,有

$$S_{2\varepsilon\delta} = [S_2(R_{t\varepsilon}, F_{t\varepsilon}, O_{t\varepsilon}), S_2(R_{t\delta}, F_{t\delta}, O_{t\delta})] = \left(\frac{1}{1 + |R_{t\varepsilon} - R_{t\delta}|}\right) \cdot \left(\frac{1}{1 + |F_{t\varepsilon} - F_{t\delta}|}\right) \cdot \left(\frac{1}{1 + |O_{t\varepsilon} - O_{t\delta}|}\right). \quad (13)$$

令 $\text{Sim}_3(m_\tau, m_\sigma) = \text{Sim}_1 \times \text{Sim}_2 = S_{3\tau\sigma}$ 为 Mass 函数 m_τ 与 m_σ 的三元群智信息“云模型-风险性”相似性测度矩阵,则

$$\text{Sim}_3(m_\tau, m_\sigma) = \text{Sim}_1 \times \text{Sim}_2 = \begin{bmatrix} 1 \times 1 & S_{112} \times S_{212} \\ S_{121} \times S_{221} & 1 \times 1 \\ \vdots & \vdots \\ S_{1m1} \times S_{2m1} & S_{1m2} \times S_{2m2} \\ S_{113} \times S_{213} & \dots & S_{11m} \times S_{21m} \\ S_{123} \times S_{223} & \dots & S_{12m} \times S_{22m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{1m3} \times S_{2m3} & \dots & 1 \times 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

2.3 三元群智信息量子态证据体的感知融合方法

干涉效应在量子力学中发挥了重要作用,学者尝试从量子力学的角度理解人类决策的复杂过程^[28],借助量子态叠加将决策变量与量子态中的基态映射,实现决策过程的量子化.为解决三元群智信息证据体高冲突性的问题,依托 2.2 节得到的三元群智信息

相似性值,运用量子加权平均算子减弱证据间的冲突,依据 D-S 规则融合减弱冲突后的证据体研判突发事件风险危重度等级.

文献 [29] 表明与其他平均算子相比,平均运算是克服证据体质量函数之间高冲突问题的有效方法.由于量子干涉的影响,量子平均算子对质量函数权重变化具有更好的灵敏度.对此,本文通过计算三元群智信息的相似度,获得各评价指标 Mass 函数的可信度 (15)~(17),并作为量子加权算子的权重.

由于证据体 Mass 函数支持度反映的是该证据体被其他证据体所支持的程度,将支持度归一后得到可信度.相似度越高,证据体间相互支持的程度越高,该证据体越可信,设

$$\text{Sup}(m_\tau) = \sum_{\sigma=1, \sigma \neq \tau}^m \text{Sim}_3(m_\tau, m_\sigma) = \sum_{\sigma=1, \sigma \neq \tau}^m S_{3\tau\sigma} \quad (15)$$

$$|\eta(m)\rangle_q = \omega_f(m_{1j}^1)|\eta(m_{1j}^1)\rangle + {}_q\omega_f(m_{2j}^1)|\eta(m_{2j}^1)\rangle + {}_q\omega_f(m_{ij}^t)|\eta(m_{ij}^t)\rangle = \frac{1}{S} \sum_{j=1}^n \rho_j e^{a\gamma_{ij}^t} |\Omega_j\rangle; \quad (18)$$

$$\left\{ \begin{aligned} &|\eta(m_{ij}^t)\rangle = \sum_{j=1}^n \rho_{ij}^t e^{a\gamma_{ij}^t} |\Omega_j\rangle = \sum_{j=1}^n \sqrt{m_{ij}^t} e^{a\gamma_{ij}^t} |\Omega_j\rangle, \quad i = 1, 2, \dots, m, t = 1, 2, 3, \gamma_{ij}^t \in [-\pi, \pi]; \\ &\rho_j^2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m (\omega_f(m_{ij}^t))^2 \sqrt{m_{ij}^t}^2 + 2 \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{i'=i+1}^m (\omega_f(m_{ij}^t) \omega_f(m_{i'j}^t)) \sqrt{m_{ij}^t} \sqrt{m_{i'j}^t} \cos(\gamma_{ij}^t - \gamma_{i'j}^t), \\ &\quad \forall j = 1, 2, \dots, n; \\ &S^2 = \sum_{j=1}^n \rho_j^2; \\ &\gamma_{ij}^t = \arctan \frac{\omega_f(m_{1j}^1) \rho_{1j}^1 \sin \gamma_{1j}^1 + \omega_f(m_{2j}^1) \rho_{2j}^1 \sin \gamma_{2j}^1 + \dots + \omega_f(m_{ij}^t) \rho_{ij}^t \sin \gamma_{ij}^t}{\omega_f(m_{1j}^1) \rho_{1j}^1 \cos \gamma_{1j}^1 + \omega_f(m_{2j}^1) \rho_{2j}^1 \cos \gamma_{2j}^1 + \dots + \omega_f(m_{ij}^t) \rho_{ij}^t \cos \gamma_{ij}^t}. \end{aligned} \right. \quad (19)$$

其中:在 $|\eta(m_{ij}^t)\rangle = \sum_{j=1}^n \rho_{ij}^t e^{a\gamma_{ij}^t} |\Omega_j\rangle$ 中, $\rho_{ij}^t e^{a\gamma_{ij}^t}$ 表示与基本状态 Ω 相关联的概率振幅, ρ_{ij}^t 和 γ_{ij}^t 分别为该概率振幅的模和相位角, $a = \sqrt{-1}$, e 表示欧拉常数,刻画了质量函数量子平均算子,如式 (18). 在式 (19) 中,三元群智信息的 Mass 函数为贝叶斯质量函数,其概率振幅模是固定的,可表示为 $\rho_{ij}^t = \sqrt{m_{ij}^t}$,由此质量函数和量子模型之间建立了联系,在 $(\gamma_{1j}^1 - \gamma_{2j}^1) = (\gamma_{2j}^1 - \gamma_{3j}^1) = \dots = (\gamma_{i-1j}^{t-1} - \gamma_{ij}^t) = 0$ 时证据体量子态间的干扰项相互支持作用达到最大,即从证据融合角度来说,最大限度地增强了自三元群智信息之间的相互支持程度.

定义 2 设 $m_{q\text{-avg}}(\Omega_j)$ 为突发事件风险危重度等级 Ω_j 的量子加权平均概率值,有

为 Mass 函数 m_τ 的支持度,令

$$\text{Bel}(m_\tau) = \frac{\sup(m_\tau)}{\sum_{\sigma=1}^m \sup(m_\sigma)}, \quad \tau, \sigma = 1, 2, \dots, m \quad (16)$$

为 Mass 函数 m_τ 的可信度,满足

$$\sum_{\tau=1}^m \text{Bel}(m_\tau) = 1. \quad (17)$$

定义 1 设 $M = \{m_{ij}^t | i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n, t = 1, 2, 3\}$ 为突发事件危重度等级辨识框架 $\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n\}$ 上第 t 类群智信息、第 i 个评级指标对应评价等级 j 的概率分配函数集合,令 $\text{Bel}(m_{ij}^t) = \omega_f(m_{ij}^t), i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n, t = 1, 2, \dots, T$ 为 Mass 函数 m_{ij}^t 的权重,称 $|\eta(m_{ij}^t)\rangle$ 为 Mass 函数 m_{ij}^t 的量子态表示, ${}_q$ 为量子平均算子, $|\eta(m)\rangle_q$ 为 Mass 函数集合 $M = \{m_{ij}^t | i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n, t = 1, 2, 3\}$ 的突发事件风险感知量子加权平均,有

$$m_{q\text{-avg}}(\Omega_j) = \frac{\rho_j^2}{S^2} = \frac{\rho_j^2}{\sum_{j=1}^n \rho_j^2}, \quad \forall j = 1, 2, \dots, n. \quad (20)$$

进一步地,根据 D-S 合成规则融合后的 t 类群智信息评价指标在第 j 个风险等级下的概率分配函数为

$$m_{j,t}^{\text{AP}} = \underbrace{m_{q\text{-avg}}(\Omega_1) \oplus \dots \oplus m_{q\text{-avg}}(\Omega_j)}_{i-1 \text{ 次}}, \quad t = 1, 2, 3. \quad (21)$$

综上,突发事件风险危重度研判模型主要流程如图 1 所示,具体步骤如下.

step 1: 构建三元群智信息指标体系.基于云模型和风险感知偏度系数对三元群智信息进行“云模型-风险性”二维表征,并对风险危重度等级区间进行处理.

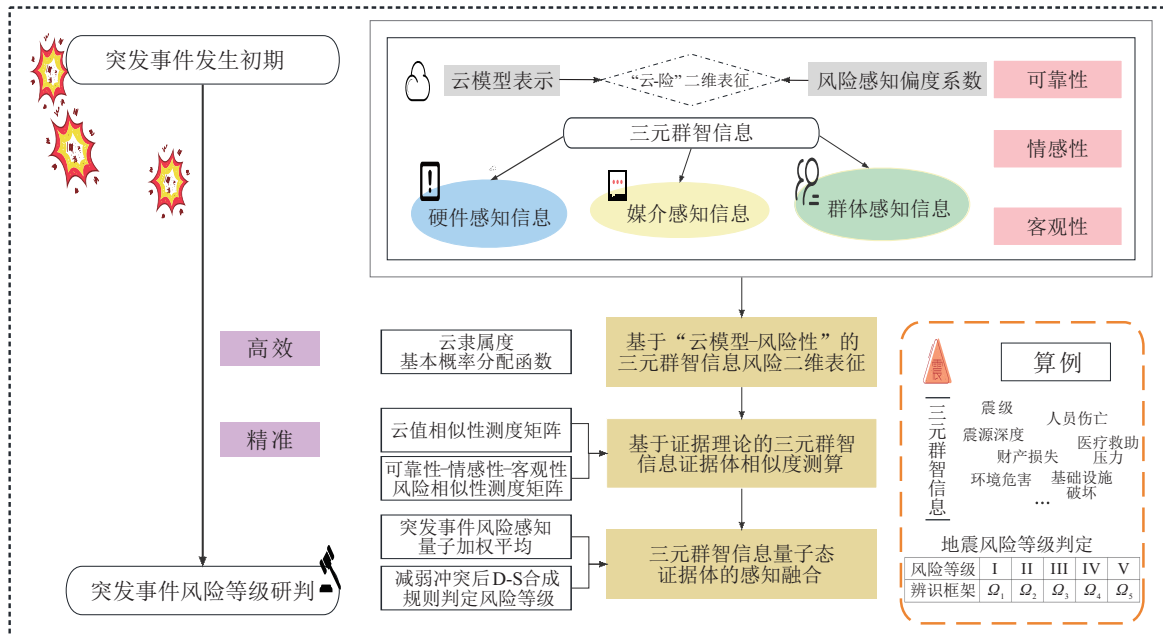


图1 三元群智信息突发事件风险危重度感知模型

step 2: 考虑三元群智信息评价指标证据体的冲突性与复杂性, 借鉴 L_2 范数和投影向量的思想获得突发事件风险危重度等级评价指标证据体“云模型-风险性”相似性测度矩阵。

step 3: 为减弱三元群智信息证据间的冲突, 建立量子加权平均算子对参与融合的证据基本概率分配函数进行集结, 得到减弱冲突影响的新证据。

step 4: D-S 证据合成规则融合三元群智信息的新证据, 进而对突发事件危重度等级进行研判。

3 算例分析

3.1 背景和基础数据

某县发生 6.8 级地震, 造成重大人员伤亡以及住房、交通、通信等基础设施严重破坏。为了判断该次地震危重度, 构建三元群智信息危重度辨识框架(表 1)、三元群智信息危重度感知评价指标(表 2)。根据近年来地震事件统计数据制定三元群智信息突发事件危重度感知评价等级划分标准, 本次地震事件三元群智信息初步处理后定量(性)指标数据如表 3 所示, 其中

硬件感知信息数据来源于地震评估官方报告, 媒介感知信息与群体感知信息数据来源于媒体报道、已有文献及专家打分等渠道(具体过程略)。

表 1 三元群智信息交互下危重度辨识框架

危重等级	I	II	III	IV	V
辨识框架	Ω_1	Ω_2	Ω_3	Ω_4	Ω_5

表 2 三元群智信息突发事件风险等级感知评价指标

一级指标	二级指标
硬件感知信息 A	震级 A1 (级) 震源深度 A2 (公里) 最高烈度 A3 (度)
媒介感知信息 B	人员遇难 B1 (人) 人员受灾 B2 (万人) 环境危害 B3 经济损失 B4 (亿元) 次生灾害 B5
群体感知信息 P	居民生活影响 P1 医疗救援难度 P2 基础设施破坏 P3 地震原生现象灾害严重性 P4 地震次生现象灾害严重性 P5

表 3 某县 6.8 级地震事件初步处理后定量(性)指标数据

A			B					P				
A1	A2	A3	B1	B2	B3	B4	B5	P1	P2	P3	P4	P5
6.8	16	9	93	11	较大(87)	232.05 ^[30]	较大(86)	大(98)	较大(83)	大(94)	大(93)	大(98)

3.2 三元群智信息“云模型-风险性”测度与地震危重度量子态证据体感知融合

根据表 1~表 3 和 2.1 节方法构建三元群智信息各等级的“云模型-风险性”二维表征。根据式(3)

~(7) 计算三元群智信息危重度评价指标在各危重度等级下的云模型隶属度并将其转化成符合证据理论定义的基本概率分配, 如表 4 所示。基于 2.2 节方法计算得到三元群智信息各评价指标“云模型-风险性”

相似度(表 5)。根据式(15)~(17), 计算三元群智信息各评价指标支持度、可信度, 基于 2.3 节方法采用量子态表征三元群智信息下评价指标 Mass 函数, 以可信度为权重, 运用 Python 3.10 计算三元群智信息各评价指标在各评价等级的量子加权平均, 可得

$$m_{q-avg}(\Omega_1) = m_{q-avg}(I) = 0.016\ 88,$$

$$m_{q-avg}(\Omega_2) = m_{q-avg}(II) = 0.000\ 39,$$

$$m_{q-avg}(\Omega_3) = m_{q-avg}(III) = 0.010\ 65,$$

$$m_{q-avg}(\Omega_4) = m_{q-avg}(IV) = 0.176\ 01,$$

$$m_{q-avg}(\Omega_5) = m_{q-avg}(V) = 0.432\ 31,$$

$$m_{q-avg}(\Omega_6) = m_{q-avg}(\theta) = 0.363\ 76.$$

表 4 三元群智信息各评价指标在各评价等级的基本概率分配

	A			B					P				
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B4	B5	P1	P2	P3	P4	P5
I	0	0.026	0.008	0	0.499	0	0	0	0	0	0	0	0
II	0	0	0	0	0.201	0	0.156	0	0	0	0	0	0
III	0.011	0.092	0.031	0.934	0.182	0	0.467	0	0	0.004	0	0	0
IV	0.911	0.052	0.392	0.061	0.032	0.505	0	0.555	0	0.606	0	0	0
V	0.078	0.784	0.321	0.005	0	0.008	0	0.005	0.573	0	0.771	0.760	0.573
θ	0	0.046	0.248	0	0.086	0.487	0.377	0.440	0.427	0.390	0.229	0.240	0.427

表 5 三元群智信息各评价指标“云模型-风险性”相似度

	A			B					P				
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B4	B5	P1	P2	P3	P4	P5
A1	1.000 000	0.009 509	0.167 011	0.001 152	0.000 830	0.080 351	0.000 010	0.095 905	0.000 559	0.220 539	0.000 959	0.001 655	0.000 945
A2	0.009 509	1.000 000	0.128 026	0.003 748	0.001 539	0.001 702	0.002 078	0.001 454	0.116 290	0.001 823	0.228 704	0.403 517	0.206 530
A3	0.167 011	0.128 026	1.000 000	0.001 513	0.009 088	0.149 775	0.019 331	0.146 718	0.089 650	0.202 286	0.075 447	0.142 084	0.156 895
B1	0.001 152	0.003 748	0.001 513	1.000 000	0.017 615	0.001 120	0.203 621	0.000 855	0.000 016	0.001 222	0.000 021	0.000 008	0.000 005
B2	0.000 830	0.001 539	0.009 088	0.017 615	1.000 000	0.004 566	0.041 836	0.004 182	0.001 431	0.005 073	0.000 304	0.000 777	0.002 600
B3	0.080 351	0.001 702	0.149 775	0.001 120	0.004 566	1.000 000	0.077 934	0.650 632	0.089 571	0.598 503	0.024 385	0.019 378	0.064 105
B4	0.000 010	0.002 078	0.019 331	0.203 674	0.041 836	0.077 955	1.000 000	0.074 566	0.050 889	0.039 014	0.014 520	0.008 087	0.043 072
B5	0.095 905	0.001 454	0.146 718	0.000 855	0.004 182	0.650 632	0.074 566	1.000 000	0.059 929	0.650 191	0.016 938	0.014 159	0.059 929
P1	0.000 559	0.116 290	0.089 650	0.000 016	0.001 431	0.089 571	0.050 868	0.059 929	1.000 000	0.036 105	0.446 146	0.324 256	0.509 796
P2	0.220 539	0.001 823	0.202 286	0.001 222	0.005 073	0.598 503	0.038 988	0.650 191	0.036 105	1.000 000	0.008 407	0.011 632	0.041 963
P3	0.000 959	0.228 338	0.075 447	0.000 021	0.000 304	0.024 385	0.014 520	0.016 938	0.446 146	0.008 407	1.000 000	0.482 337	0.376 629
P4	0.001 655	0.403 517	0.142 084	0.000 008	0.000 777	0.019 378	0.008 087	0.014 159	0.324 256	0.011 632	0.482 337	1.000 000	0.548 153
P5	0.000 945	0.206 530	0.156 895	0.000 005	0.002 600	0.064 105	0.043 072	0.059 929	0.509 796	0.041 963	0.376 629	0.548 153	1.000 000

根据式(21), 使用 D-S 证据理论合成这些加权平均后的新证据, 最终得到概率分配函数 BPA, 从而判断该事件的危重度等级。可得 $m(V) = 0.938\ 7$, 即该突发事件风险危重度判断为等级 V。

3.3 对比分析

为了使分析结果具有可比性, 验证本文方法的优越性和合理性, 根据本文所构建的三元群智信息风险危重度评价指标体系, 分别采用文献[15, 24, 31-32]的方法对本算例三元群智信息的关联与冲突性进行分析计算, 所得对比结果如表 6 所示。

由表 6 可以看出: 由于 D-S 融合规则自身的缺陷, 不适合对冲突证据进行融合, 纵向来看融合过程中等级 IV 和等级 V 的基本概率分配值非常接近, 分辨性低, 易出现融合结果错误的情况。Yager 规则虽然在 D-S 规则的基础上进行了修正, 但其本身忽略了冲突信息的可用性, 将发生冲突的那部分概率全部赋给未知命题, 导致了错误的突发事件风险危重度判断

结果。方法 3 运用 Murphy 算术平均法通过将所有证据取算术平均值代替全部原始证据来减弱证据冲突性, 该法赋予证据相同的权重进行计算, 而实际上证据间的重要性存在一定的差异, 通过迭代融合可知等级 IV 的基本概率分配值从 0.245 2、0.227 9 降低为 0.169 8, 等级 V 的基本概率分配值从 0.378 1、0.434 6 提高为 0.712 6, 虽然可以判断出危重度结果为等级 V, 但需在收集到较多证据时才能比较清晰地识别出该事件的危重度。方法 4 通过灰色关联思想及修正方法改变证据源, 取得了比经典方法满意的效果, 等级 V 的基本概率分配值从 0.458 1、0.513 5 逐步提升为 0.911 3, 但缺乏对于不同类型三元群智信息特征的处理。

本文方法充分考虑到证据之间的关联度与冲突性, 可从纵向来看(即风险危重度等级概率), 风险等级 I 至 θ 的基本概率分配从第 1 次融合时的 0.000 8, 0.000 0, 0.000 3, 0.088 4, 0.533 1, 0.377 4 到最

表6 突发事件风险危重度判定方法证据融合结果对比

	迭代1次	迭代2次	...	迭代11次	迭代12次	决策结果
D-S ^[24]	$m(III) = 0.0009$ $m(IV) = 0.4325$ $m(V) = 0.5666$	$m(III) = 0.0008$ $m(IV) = 0.4857$ $m(V) = 0.5135$	迭代第5次 $m(IV) = 1.0000$			IV
Yager ^[31]	$m(III) = 0.0010$ $m(IV) = 0.0474$ $m(V) = 0.0612$ $m(\Omega) = 0.8904$	$m(IV) = 0.0185$ $m(V) = 0.0196$ $m(\theta) = 0.2217$ $m(\Omega) = 0.7402$	迭代6次 $m(\Omega) = 1.0000$			Ω
方法3 ^[32]	$m(I) = 0.0072$ $m(II) = 0.0031$ $m(III) = 0.0742$ $m(IV) = 0.2452$ $m(V) = 0.3781$ $m(\theta) = 0.2922$	$m(I) = 0.0011$ $m(II) = 0.0003$ $m(III) = 0.0397$ $m(IV) = 0.2279$ $m(V) = 0.4346$ $m(\theta) = 0.2964$	...	$m(IV) = 0.1994$ $m(V) = 0.6741$ $m(\theta) = 0.1265$	$m(IV) = 0.1698$ $m(V) = 0.7126$ $m(\theta) = 0.1176$	V
方法4 ^[15]	$m(I) = 0.0001$ $m(II) = 0.0001$ $m(III) = 0.0051$ $m(IV) = 0.1956$ $m(V) = 0.4581$ $m(\theta) = 0.3410$	$m(IV) = 0.1433$ $m(V) = 0.5135$ $m(\theta) = 0.3432$	...	$m(V) = 0.9034$ $m(\theta) = 0.0966$	$m(V) = 0.9113$ $m(\theta) = 0.0887$	V
本文方法	$m(I) = 0.0008$ $m(III) = 0.0003$ $m(IV) = 0.0884$ $m(V) = 0.5331$ $m(\theta) = 0.3774$	$m(I) = 0.0001$ $m(IV) = 0.0406$ $m(V) = 0.6012$ $m(\theta) = 0.3581$	...	$m(V) = 0.9097$ $m(\theta) = 0.0903$	$m(V) = 0.9387$ $m(\theta) = 0.0613$	V

后一次融合结果的0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.9387, 0.0613, 剔除概率为0.0000的风险危重度等级数据, 融合结果极差从0.4447扩大至0.8774, 且等级V的基本概率分配值最终为0.9387 > 0.5000, 即算例突发事件风险危重度等级为V, 体现了本文方法的强分辨效果; 从横向来看(即各风险危重度等级迭代概率), 等级V的基本概率分配值最终为0.9387, 其第11次和第12次迭代过程收敛速率为3.2%, 对比其他方法计算效果, 可见本文方法研判结果准确且快速收敛, 验证了本文方法研判突发事件风险危重度等级的准确性和高效性。

此外, 分别计算考虑硬件感知信息、媒介感知信息以及群体感知信息的单元评价价值融合, 与本文综合考虑三元群智信息融合结果进行比较, 结果如图2所示。可以看出, 忽略多维信息间的联系与冲突, 一方面可能会导致研判结果出现弱分辨的现象, 如只考虑硬件感知信息时, 等级IV和等级V的分配概率分别为0.4587和0.5135, 研判结果模棱两可, 其可靠性较低; 另一方面可能会导致证据的基本概率分配不合理, 从而获得错误的研判结果。如只考虑媒介感知信息时, 由于缺少多维信息的综合评估, 而媒介感知信息证据具有情感性较强、客观性较弱的特点, 此时等级IV的基本概率分配值达到了0.8928, 最终得到了隶属于等级IV的研判结果。对比考虑三元群智信息融合下风

险危重度等级V基本概率分配结果为0.9387, 可知考虑单维群智信息影响下的融合结果是不准确或分辨性较弱的。因此, 本文提出的融合三元群智信息交互作用的突发事件风险危重度研判方法处理信息更加准确、明晰。

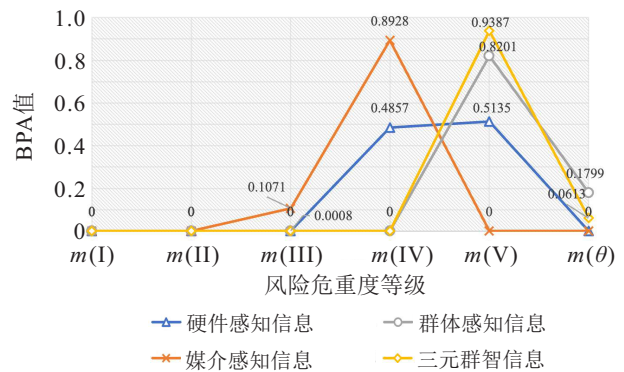


图2 单元信息与三元群智信息风险危重度计算结果对比

4 结论

鉴于三元群智信息的感知结构差异和感知内容差异, 本文提出了一种面向三元群智信息量子态证据融合的突发事件风险危重度研判方法, 科学有效处理三元群智信息的风险特征与冲突性, 该方法计算收敛速度较快, 研判结果分辨性较强。一方面, 将三元群智信息纳入突发事件危重度研判具有重要的现实意义和理论价值, 本文通过构建硬件感知信息、媒介感知

信息、群体感知信息“云模型-风险性”二维表征方式,既能充分反映应急决策过程中三元群智信息的内在含义,又能避免忽略其不确定性、非完全可靠性以及情感性的风险特性。另一方面,本文引入三元群智信息数据向量投影相似度与考虑信息可靠性、情感性、客观性的风险相似度相结合度量证据间的冲突程度,并设计突发事件三元群智信息风险感知量子加权平均算子以减弱证据信息间的高冲突现象,提高研判结果完备性与可靠性,填补了现有研究中对多类型群智信息联动特征的研究不足。算例仿真实验结果表明了该方法能够较好地处理三元群智信息风险特性与冲突问题,提高证据组合的合理性,为多元信息时代突发事件风险危重度研判问题提供了参考与借鉴。下一步研究处理高冲突证据融合时,将基于博弈论思想形成更为合理的三元群智信息评价指标、静态组合权重计算框架,尽可能地保留非冲突信息,进一步修正冲突证据,提高研判结果的科学性。

参考文献(References)

- [1] 张辉,刘远立,陈春花,等.全球性公共卫生危机治理:趋势与重点[J].管理科学学报,2021,24(8):133-146.
(Zhang H, Liu Y L, Chen C H, et al. Global public health crisis governance: Trend and emphasis[J]. Journal of Management Sciences in China, 2021, 24(8): 133-146.)
- [2] 全国人大常委会办公厅.中华人民共和国突发事件应对法[M].北京:人民出版社,2008.
- [3] 胡琦浠,孙英英.中国突发公共卫生事件应急响应研究综述——基于CNKI文献可视化分析[J].统计与管理,2021,36(11):42-47.
(Hu Q X, Sun Y Y. Summary of research on emergency response to public health emergencies in china—Based on the visualization analysis of CNKI literature[J]. Statistics and Management, 2021, 36(11): 42-47.)
- [4] 许伟,刘令宇,王明明.基于跨媒体分析的突发事件检测及趋势研判研究[J].系统工程理论与实践,2015,35(10):2550-2556.
(Xu W, Liu L Y, Wang M M. Emergency event detection and analysis for emergence management based on cross-media analytics[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2015, 35(10): 2550-2556.)
- [5] 李芋均,郭红梅,黄丁发,等.基于区间证据理论的多源灾情信息融合及烈度判定研究[J].计算机应用研究,2020,37(S2):92-94.
(Li Y J, Guo H M, Huang D F, et al. Research on multi-source disaster information fusion and intensity judgment based on interval evidence theory[J]. Application Research of Computers, 2020, 37(S2): 92-94.)
- [6] 叶鑫,白羽轩,张磊.双信度下考虑专家风险态度的突发事件等级确定方法[J].系统管理学报,2022,31(2):396-405.
(Ye X, Bai Y X, Zhang L. A method for determination of emergency levels considering the risk attitude of experts in double reliability[J]. Journal of Systems & Management, 2022, 31(2): 396-405.)
- [7] 余高锋,李登峰.新零售生态网络安全态势评级混合型变权方法及稳定性研究[J].中国管理科学,DOI:10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.2002.
(Yu G F, Li D F. The stability and variable weight decision method for rating new retail ecology network security situation[J]. Chinese Journal of Management Science, DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.2002.)
- [8] 杜元伟,杨娜.大数据环境下双层分布式融合决策方法[J].中国管理科学,2016,24(5):127-138.
(Du Y W, Yang N. Double-layer distributed fusion decision method in big data environment[J]. Chinese Journal of Management Science, 2016, 24(5): 127-138.)
- [9] 刘培德,滕飞.基于证据推理和广义Shapley值的扩展概率语言多属性群决策方法[J].中国管理科学,2020,28(11):206-218.
(Liu P D, Teng F. Multiple attribute group decision-making method based on evidential reasoning and generalized shapley for extended probabilistic linguistic term set[J]. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(11): 206-218.)
- [10] 狄鹏,倪子纯,尹东亮.基于云模型和证据理论的多属性决策优化算法[J].系统工程理论与实践,2021,41(4):1061-1070.
(Di P, Ni Z C, Yin D L. A multi-attribute decision making optimization algorithm based on cloud model and evidence theory[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2021, 41(4): 1061-1070.)
- [11] 张磊,韩可可,叶鑫.广义Z-numbers证据下考虑专家影响力和评价价值一致性的应急决策方法[J].中国管理科学,https://kns.cnki.net/kcms/detail//11.2835.g3.20230202.2233.003.html.
(Zhang L, Han K K, Ye X. Emergency decision-making method considering the influence of expert and the consistency of valuation from the perspective of generalized Z-numbers evidence[J]. Chinese Journal of Management Science, https://kns.cnki.net/kcms/detail//11.2835.g3.20230202.2233.003.html.)
- [12] Wang J, Zhou Z J, Hu C H, et al. Performance evaluation of aerospace relay based on evidential reasoning rule with distributed referential points[J]. Measurement, 2021, 182: 109667.
- [13] Xiao F Y. Multi-sensor data fusion based on the belief divergence measure of evidences and the belief entropy[J]. Information Fusion, 2019, 46: 23-32.
- [14] 赵静,关欣,衣晓,等.一种新的解决冲突问题的不确定性度量方法[J].控制与决策,2020,35(6):1307-1315.
(Zhao J, Guan X, Yi X, et al. A new uncertainty measurement method for conflict problem[J]. Control and Decision, 2020, 35(6): 1307-1315.)
- [15] 徐祖润,刘思峰,方志耕,等.基于信息融合的罪案关联证据推理模型[J].控制与决策,2020,35(1):

- 228-234.
(Xu Z R, Liu S F, Fang Z G, et al. Crime-related evidence reasoning model based on information fusion[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(1): 228-234.)
- [16] 蒲志强, 易建强, 刘振, 等. 知识和数据协同驱动的群体智能决策方法研究综述[J]. *自动化学报*, 2022, 48(3): 627-643.
(Pu Z Q, Yi J Q, Liu Z, et al. Knowledge-based and data-driven integrating methodologies for collective intelligence decision making: A survey[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(3): 627-643.)
- [17] Johnson M, Albizri A, Harfouche A, et al. Integrating human knowledge into artificial intelligence for complex and ill-structured problems: Informed artificial intelligence[J]. *International Journal of Information Management*, 2022, 64: 102479.
- [18] Ding R X, Palomares I, Wang X Q, et al. Large-scale decision-making: Characterization, taxonomy, challenges and future directions from an Artificial Intelligence and applications perspective[J]. *Information Fusion*, 2020, 59: 84-102.
- [19] Afflerbach P, van Dun C, Gimpel H, et al. A simulation-based approach to understanding the wisdom of crowds phenomenon in aggregating expert judgment[J]. *Business & Information Systems Engineering*, 2021, 63(4): 329-348.
- [20] 徐选华, 黄丽, 陈晓红. 基于共词网络的群智知识挖掘方法——在应急决策中应用[J]. *管理科学学报*, 2023, 26(5): 121-137.
(Xu X H, Huang L, Chen X H. Collective intelligence knowledge mining method based on co-word network: Application in emergency decision-making[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2023, 26(5): 121-137.)
- [21] 肖婷. 社会网络环境下基于群智知识融合的大群体应急决策研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
(Xiao T. Research on large group emergency decision-making based on group intelligence knowledge fusion under social network environment[D]. Changsha: Central South University, 2022.)
- [22] 李晓英, 王兆勇. 基于云模型与改进证据理论的设计方案评价与优选[J]. *机械设计*, 2023, 40(5): 136-142.
(Li X Y, Wang Z Y. Evaluation and optimization of design schemes based on cloud model and improved evidence theory[J]. *Journal of Machine Design*, 2023, 40(5): 136-142.)
- [23] 叶琼, 李绍稳, 张友华, 等. 云模型及应用综述[J]. *计算机工程与设计*, 2011, 32(12): 4198-4201.
(Ye Q, Li S W, Zhang Y H, et al. Cloud model and application overview[J]. *Computer Engineering and Design*, 2011, 32(12): 4198-4201.)
- [24] Dempster A P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping[J]. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1967, 38(2): 325-339.
- [25] Shafer G. A mathematical theory of evidence[M]. Princeton: Princeton University Press, 1976.
- [26] 王国胤, 李德毅, 姚一豫, 等. 云模型与粒计算[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
(Wang G Y, Li D Y, Yao Y Y, et al. Cloud model and granular computing[M]. Beijing: Science Press, 2012.)
- [27] 钱吴永, 董扬兵. 基于改进向量相似度的区间数动态多指标决策模型及应用[J]. *控制与决策*, 2019, 34(1): 25-30.
(Qian W Y, Dong Y B. Dynamic multi-attribute decision-making model and application with interval number based on improved vector similarity[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(1): 25-30.)
- [28] Agrawal P M, Sharda R. OR forum—Quantum mechanics and human decision making[J]. *Operations Research*, 2013, 61(1): 1-16.
- [29] Deng X Y, Xue S Y, Jiang W. A novel quantum model of mass function for uncertain information fusion[J]. *Information Fusion*, 2023, 89(C): 619-631.
- [30] 王文强, 李懿龙, 张振国, 等. 2022年9月5日泸定M6.8级地震灾害损失快速评估[J]. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(6): 1342-1352.
(Wang W Q, Li Y L, Zhang Z G, et al. Rapid estimation of disaster losses for the M6.8 Luding earthquake on September 5, 2022[J]. *Scientia Sinica: Terrae*, 2023, 53(6): 1342-1352.)
- [31] Yager R R. On the Dempster-Shafer framework and new combination rules[J]. *Information Sciences: An International Journal*, 1987, 41(2): 93-137.
- [32] Murphy C K. Combining belief functions when evidence conflicts[J]. *Decision Support Systems*, 2000, 29(1): 1-9.

作者简介

汤辰悦(2000—), 女, 博士生, 从事应急决策、信息融合等研究, E-mail: nuuaa-tcy0011@nuuaa.edu.cn;

朱建军(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能决策、供应链管理等研究, E-mail: Zhujianjun@nuuaa.edu.cn;

刘微俏(1992—), 女, 讲师, 博士, 从事云模型、共识决策等研究, E-mail: liuweiqiao@sdufe.edu.cn.