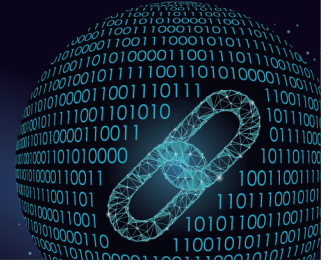




中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



应急环境下双重大规模行为主体知识融合方法及在方案排序中的应用

徐选华, 周鋈洁

引用本文:

徐选华,周洁. 应急环境下双重大规模行为主体知识融合方法及在方案排序中的应用[J]. *控制与决策*, 2024, 39(5): 1675–1686.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1012>

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>

基于云模型和多层权重求解的多粒度语言大群体决策方法

Multi-granularity linguistic large group decision-making based on cloud model and multi-layer weight determination

控制与决策. 2021, 36(9): 2257–2266 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0102>

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>

混合决策下考虑第三方偏好的远程医疗服务匹配方法

Matching method for telemedicine service considering third-party preferences in context of mixed decision-making

控制与决策. 2021, 36(11): 2803–2811 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0447>

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>

应急环境下双重大规模行为主体知识融合方法及 在方案排序中的应用

徐选华, 周鋈洁[†]

(中南大学 商学院, 长沙 410083)

摘要: 针对突发事件的复杂性、风险性、特殊性、行为主体知识结构的差异性以及有限性, 将大群体智慧引入应急决策中, 提出一种应用新的融合主体知识水平的方案选择方法. 首先, 在公众层面基于偏好序列向量和改进的知识测量公式确定公众的知识水平, 依据分歧矩阵和控制者进行公众聚类并对子群间的知识水平标准化, 形成基于公众行为知识水平的方案排名矩阵; 然后, 在专家层面基于多粒度二元语义和灰色关联模型确定专家的知识水平和属性权重, 通过聚合算子得到专家对方案的评估信息并形成专家对方案排名的支持矩阵; 接着, 引入参考公众共识阈值, 形成融合上述双重主体的共识矩阵, 并进行方案排序; 最后, 通过 Covid-19 案例和对比分析验证所提出方法的有效性和合理性.

关键词: 应急环境; 大规模行为主体; 双重主体; 知识水平; 共识达成

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1012

引用格式: 徐选华, 周鋈洁. 应急环境下双重大规模行为主体知识融合方法及在方案排序中的应用 [J]. 控制与决策, 2024, 39(5): 1675-1686.

Knowledge fusion method and application in alternative sorting of dual large-scale behavior agents under emergency environments

XU Xuan-hua, ZHOU Jun-jie[†]

(School of Business, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Due to the complexity, risk and specificity of emergencies and the difference and limited knowledge structure of agents, a new alternatives selection method using fusion agents' knowledge level is proposed by introducing large group wisdom into emergency decision-making (EDM). First, the public's knowledge level is determined by preference sequence vectors (PSV) and improved knowledge measurement formulas, and public are grouped by the divergence matrix and controller, and the knowledge level between subgroups is standardized to form a support matrix for the ranking of alternatives based on the public's knowledge level. Second, the experts' knowledge level and attributes are determined by the multi-granularity binary linguistic sets (MG-2LS) and the gray relational analysis (GRA) model. The experts' support matrix for the alternatives ranking is formed by combining the experts' evaluation information obtained by the aggregation operator. Then, the public consensus threshold is introduced to form the consensus matrix which integrates the above-mentioned two agents, and the ranking of schemes is realized. Finally, the validity and rationality of the proposed method are verified by the case of Covid-19 and comparative analysis.

Keywords: emergency environments; large-scale behavior agent; dual agent; knowledge measure; consensus reached

0 引言

突发事件具备随机性、迅速扩散性、传导变异性、风险破坏性特征, 不仅给国家带来严重的经济损失和社会失序, 且危及公众的生命安全、身体健康以及心理健康^[1-2]. 由于个体的有限理性、信息非完备和

突发事件的复杂性, 突发事件需要不同领域的专家提供应对方案并尽快做出抉择^[3]. 传统决策模式已不适用于解决当今庞大复杂的动态决策问题, 融入群体智慧的大群体决策成为决策科学领域新的研究视角. 为了利用群体智慧, 决策群体规模扩大的一致性

收稿日期: 2022-06-08; 录用日期: 2023-02-06.

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (72293574, 72091515); 国家自然科学基金项目 (71971217).

[†]通讯作者. E-mail: zjunj999@163.com.

决策已成为突发应急决策的重要研究方向之一,通常不少于20位专家团队视作大群体^[4-7]。同时,应急决策作为决策管理领域的关键问题之一^[5,8],往往对人民基本生活和社会稳定有重大影响。国家应急管理体系的完善呼吁多主体共建共治,社交平台的存在和大数据技术的发展也使得将公众诉求纳入决策过程的难度降低。公众不仅是突发事件的受害者,也是关注方案实施规模最大的利益相关者,理性认知是公众参与协同治理的基础^[9]。个体认知能力中的知识水平是一个模糊概念,通常与自身知识量和外界提供的信息量有关,隐藏于语言表达的模糊性和内容丰富度中。认知科学视角下的决策通常基于直觉模糊集中的隶属度关系,通过定义信息内容和清晰度进行知识度量^[10]。现有群决策中的知识测量大多基于证据推理、信息熵、知识图谱或个性化语义等方式^[7,11-12],知识结构和信息质量测量复杂,且大多难以获得个体层的知识水平。Hou等^[13]通过构建微分方程,揭露了个体的知识指标、无知指标以及不确定性间的关系。受此启发,针对实际情境中决策成员知识结构的差异性以及有限性问题,本文对公众数据依据信息结构和模糊性提出改进的知识测度公式以对个体认知特性量化评估,合理测度并比较个体间的智慧以及个体与群体间的智慧。

在传统应急决策中,往往由专家团队依据经验和偏好进行意见集结,并获得方案的排序向量和择优选取,其中可能会存在认知不足^[9]、从众决策^[14]、逆序抉择^[15]、偏好或信任值残缺^[16-17]、意见分歧与冲突^[5,18]等风险情境。为了降低单一角色的决策主观性以及信息缺乏下的决策风险性,基于分众视角的应急决策,即公众参与决策过程能够辅助专家了解更多的舆情生态并进行风险感知,有效降低决策风险和决策质量^[19-20]。现有的涉及公众-专家的大规模群体决策(LSGDM)的研究多是围绕以下4个方面:1)利用文本挖掘等技术获取社交平台中的公众内容数据,探究主题关注度^[21-22];利用文本挖掘和模糊关联规则获取公众在属性层上的意见,提取公众属性偏好^[22]。2)借助情感分析公众态度或识别风险偏好^[23-24],通过对社交媒体数据的公众数据情感分析来评估LSGDM的决策质量^[23]。3)区分决策成员角色或行为,并进行针对性管理^[2,4,25]。结合自信和置信水平判断成员是否接受调整,构建区分角色的两个意见动态模型并依据信任水平采取针对性管理措施^[26]。4)根据参与者的跟随行为,判断决策者的影响力。Liang等^[27]关注在层级社交网络中成员间的关系

和意见交换,结合贝叶斯决策理论和共识损失信息将参与者划分为有效、无效和犹豫跟随者,从而获取决策者的有效影响力。

尽管目前大群体应急决策的研究成果众多,但是仍然存在如下问题亟待解决:1)群体决策的确有助于群体智慧发挥效用,但是,社交平台上的羊群效应或会破坏群体智慧^[14,28]。目前涉及成员知识挖掘和质量测度的研究尚不充分,如何协调不同个体间的意见并引导成员理性行为决策,合理量化认知结构并衡量意见价值非常重要。2)突发事件发生后,应急部门的决策行动与网络公众的行为数据异步产生,双方的知识结构和所掌握的信息量、意见价值也存在差异。同时,基于社交平台的公众行为信息研究存在许多细节需要考虑,基于社交平台的多源大数据研究广度和公众-专家协同决策模式尚待拓宽。3)现有的方案排序方法多利用得分函数计算群体意见向量,缺乏对其余排序结果的质量评估和解释性说明。

针对上述问题,本文主要内容如下:1)借助社交平台获取积极的公众评估,拓宽决策成员规模和参考信息来源,对于把控应急事件的宏观发展方向、听取公民诉求以及舆论的正确引导具有重要意义。将个体认知能力测度引入决策过程,丰富和发展不确定信息环境下的大群体决策理论和方法。2)考虑到实际情境中决策成员知识结构的差异性和有限性,提出改进的知识测度来确定个体认知能力和信息可靠性,充分利用信息的内在特征和粒度选取的模糊倾向进行知识测度和后续的群体划分。3)考虑到决策要素和排序结果的多样性,提出一种基于群体支持度的意见集结和双重主体知识融合方法,适应于获取多样化排序结果下的群体支持度,直观地呈现方案排序和抉择过程,避免单一决策序列无法动态调整的缺陷,有助于探究认知特性下大群体应急决策管理的新范式,并为公众-专家协同下的群智决策提供新方法和思路,为现实防疫问题提供可行的方法借鉴和决策质量评估。

综上所述,本文针对单一决策角色认知受限的问题,提出一种应急环境下双重大规模行为主体知识融合方法,在大群体决策中依据语言模糊性并纳入分众视角具有重要的理论意义以及应用上的方法借鉴。同时,在决策过程中考虑个体认知和群体价值评估集结,引入公众群体评估的参考阈值,通过线性加权形成群体支持度下的方案排名矩阵,并进一步通过选择模型获取排序结果。最后,基于疫情防控的案例以及对比较验证所提出方法的可执行性和有效性。

1 方法基础

1.1 偏好序列向量

人类认知能力中,两两比较的事物间共存在以下3种关系:优势、无差异和弱势.通常以有向图或0-1矩阵描述实体间的优先关系^[29],本文采用PSV阐述序数排序^[30].

定义1^[30] 在有限集 $X = \{x_i | i = 1, 2, \dots, L\}$ 中,存在 $PSV = [PM_i]_{L \times 1}$,如下式所示:

$$PM_i = \{|G_i| + 1, |G_i| + 2, \dots, |G_i| + |H_i|\}. \quad (1)$$

其中: G 为 X 的优序集,记为 $G_i = \{x_k | x_k \succ x_i\}$; H 为 X 中各元素的无差异集,记为 $H_i = \{x_k | x_k \sim x_i\}$; $|H_i|$ 表示在 H 中的第 i 个元素所含个数; PM_i 为在 X 中 x_i 的可能排位.

引理1^[30] $[B_l]_{L \times 1}$ 为允许等价类,PSV 通过序数排序向量表示,其中 $R = \{1, 2, \dots, L\}$ 为排名集,PSV 满足以下性质:

- 1) $\forall l, B_l \subseteq R$ 必须满足 $B_l \neq \emptyset$ 且 $\bigcup_{l=1}^L B_l = R$;
- 2) $\forall l, k \in R$, 要么 $B_l = B_k$, 要么 $B_l \cap B_k = \emptyset$;
- 3) 若 $|B_l| > 1$, 则 B_l 内的元素 x_l 将会以连续位置的排名出现;
- 4) 元素 B_l 将会在 $[B_l]_{L \times 1}$ 中出现 $|B_l|$ 次.

1.2 知识水平

Hou 等^[13] 基于 Wierman^[31] 公式论证了所提出知识水平与知识粒度间存在线性关系,侧面反映了所提出知识水平度量的合理性.

定义2^[13] 假设 K, I, U 分别为个体的知识水平、无知程度和不确定性,在有限集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_L\}$ 中, Q 为 X 的分区集, $Q = \{Q_j | j = 1, 2, \dots, k, k \leq L\}$ 使得 q_j 为分块 Q_j 的基数,即 $q_j = |Q_j|$, 则有 $L = |X| = \sum_{j=1}^k |Q_j| = \sum_{j=1}^k q_j$. K, I, U 间的关系如下式所示:

$$K = \ln L - I = \ln L - \ln U = \ln L - \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \ln |x_i|. \quad (2)$$

若个体无法区分同质实体间的优劣程度,推断它们在一定程度上等价,则该个体达到最大无知程度,即 $U = L$ 或 $q_j = L$; 若个体表达出确切的优先序列,则该个体达到最大的知识水平 $K = \ln L$.

1.3 分歧矩阵和控制者

成对比较在决策过程中很重要,但是可能非常耗时,与应急决策所存在的时间压力相冲突^[32]. 本文采用 PSV 描述序数信息,部分主体间会存在序数共识^[30],具体定义如下.

定义3^[30] 假设 $[B_l^{(1)}]_{L \times 1}, [B_l^{(2)}]_{L \times 1}, \dots, [B_l^{(m)}]_{L \times 1}$ 为不同主体的 PSV. 当且仅当 $\forall l, \bigcap_{k=1}^m B_l^{(k)} \neq \emptyset$ 时,上述主体将存在共识. 部分群体共识表示为 $[B_l^{(c)}]_{L \times 1} = [\bigcap_{k=1}^m B_l^{(k)}]_{L \times 1}$. 对于 $\forall k, l, B_l^{(c)} \subseteq B_l^{(k)}$ 满足“群体智慧不弱于个体知识”,且若 $\forall l, B_l^{(i)} \subseteq B_l^{(k)}$, 则意味着主体 p_i 控制主体 p_k .

对于测量不同 PSV 中的分歧程度,现有测量主体间共识差值多基于距离测度,采用 Cook-Seiford 这种以序数的中位数排序的方式将会丢失一些隐藏信息,从而难以正确反映群体间的共识^[33]. Hou 等^[34] 引入了基于预度量的共识差指数,且其非传递性恰好满足主体间共识的非传递性特征,能够有效度量主体间排名偏好的分歧,并以经济学中最简单的茶与咖啡的偏好之争为例表明共识差的存在及其合理性.

定义4^[34] 假设 $B^1 = [B_i^1]_{L \times 1}, B^2 = [B_i^2]_{L \times 1}$ 为两位主体的 PSVs, 其中共识差 $\Delta(B^i, B^j)$ 如下式所示:

$$\Delta(B^1, B^2) = \sum_{i=1}^L \delta(B_i^1, B_i^2) = \sum_{i=1}^L \max\{0, (\min B_i^1 - \max B_i^2), (\min B_i^2 - \max B_i^1)\}. \quad (3)$$

所有主体间的分歧矩阵表示为 $DisPM = [\Delta(B^j, B^k)]_{M \times M}$, $DisPSV$ 是主对角线上元素为 0 (i.e. $j = k$) 的非负对称矩阵,故仅需计算 $k > j$ 的位置,共 $M \times (M - 1) / 2$ 次.

1.4 多粒度语言术语集

语言术语集在量化主体提供的模糊信息上实用性和可操作性强^[35-36]. 但是,群体对属性或方案的模糊评估多基于统一尺度,这可能违反现实,且难以精准量化主体的信息表达. 为了应对突发事件而聚集的决策群体拥有各自的知识背景和技能,主体对于同一事件在不同发展阶段的判断依据往往存在差异,故通过唯一的语言术语集来表示信息似乎并不充分. 为了保证实际语义质量,本文采用基于奇数粒度的平衡语言术语集. 同时,粒度转换函数能够在避免信息扭曲的前提下,实现高维和低维粒度的双向变化.

定义5^[37] 令 $S_{g+1} = \{s_0^{g+1}, s_1^{g+1}, \dots, s_g^{g+1}\}$ 是奇数粒度为 $(g + 1)$ 且为整数的对称分布式术语集, $\beta \in [0, g]$ 为聚合结果的数值. 二元组语言值 (s_α^{g+1}, θ) 通过 Δ 函数等价于 β , 如下式所示:

$$\Delta(\beta) = (s_\alpha^{g+1}, \theta), \begin{cases} s_\alpha^{g+1}, \alpha = \text{round}(\beta); \\ \theta = \beta - \alpha, \theta \in [-0.5, 0.5]. \end{cases} \quad (4)$$

其中: Δ 为一一对应的映射函数, $\Delta : [0, g] \rightarrow S \times [-0.5, 0.5]$; $\text{round}(\ast)$ 为回合算子. 存在 Δ 的逆运算函数 $\Delta^{-1} : S \times [-0.5, 0.5] \rightarrow [0, g]$, 如下式所示:

$$\Delta^{-1}(s_\alpha^{g+1}, \theta) = \alpha + \theta = \beta. \quad (5)$$

其中: α 为下标; θ 为邻近的语言术语 s_α 偏移量, 若 $\theta < 0$, 则向左位移, 若 $\theta > 0$, 则向右进行位移, 位移量为 θ .

定义 6^[36-37] 若存在 τ 和 $\hat{\tau}$ 两个不同的粒度值 (i.e. $\tau \neq \hat{\tau}$), 则多粒度间双向转换函数 (记作 GT) 如下式所示, 表示二元组语言值从粒度 $(\tau + 1)$ 向 $(\hat{\tau} + 1)$ 转换:

$$\begin{aligned} \text{GT}_{(\tau+1)(\hat{\tau}+1)}(s_\alpha^{\tau+1}, \theta^{\tau+1}) = \\ \Delta(\hat{\tau} \cdot \Delta^{-1}(s_\alpha^{\tau+1}, \theta^{\tau+1}) / \tau). \end{aligned} \quad (6)$$

引理 2^[37] 假设二元组语言值 (s_i^{g+1}, θ_i) 和 (s_j^{g+1}, θ_j) 来自同一粒度为 $(g + 1)$ 的 LTS, 则它们之间存在如下性质:

- 1) 数乘运算: $\lambda \otimes (s_i^{g+1}, \theta_i) = \Delta(\lambda \Delta^{-1}(s_i^{g+1}, \theta_i))$.
- 2) 距离运算为

$$\begin{aligned} d((s_i^{g+1}, \theta_i), (s_j^{g+1}, \theta_j)) = \\ |\Delta^{-1}(s_i^{g+1}, \theta_i) - \Delta^{-1}(s_j^{g+1}, \theta_j)|. \end{aligned}$$

- 3) 比较运算: 若 $i < j$, 则 $(s_i^{g+1}, \theta_i) < (s_j^{g+1}, \theta_j)$; 若 $i = j$ 且 $\theta_i < \theta_j$, 则 $(s_i^{g+1}, \theta_i) < (s_j^{g+1}, \theta_j)$; 若 $i = j$ 且 $\theta_i = \theta_j$, 则 $(s_i^{g+1}, \theta_i) = (s_j^{g+1}, \theta_j)$.

定义 7^[36-37] 假设存在二元语言集合 $T = \{(s_1, \theta_1), (s_2, \theta_2), \dots, (s_n, \theta_n)\}$ 以及与 (s_i, θ_i) 相关联的权重向量 $W = \{w_j | j = 1, 2, \dots, n\}$, 权重向量满足 $w_j \in [0, 1]$ 且 $\sum_{j=1}^n w_j = 1$, 则二元语义算术平均算子 (2L-AA) 和二元语义加权算子 (2L-WA) 如下式所示:

$$\begin{aligned} \Theta_{2L-AA}((s_1, \theta_1), (s_2, \theta_2), \dots, (s_n, \theta_n)) = \\ \Delta\left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta^{-1}(s_j, \theta_j)\right), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Theta_{2L-WA}((s_1, \theta_1), (s_2, \theta_2), \dots, (s_n, \theta_n)) = \\ \Delta\left(\sum_{j=1}^n w_j \Delta^{-1}(s_j, \theta_j)\right). \end{aligned} \quad (8)$$

1.5 灰色关联分析

灰色关联分析 (GRA) 是一种在较少样本和有限信息背景下衡量因素间关联程度的方法, 其模型是一种定性定量相结合的综合评价模型. 根据数据序列的几何形状, 利用 GRA 判断序列间的关联是否紧密^[38]. 基本思想是通过线性插值将离散的序列值转换为分段连续曲线, 由其几何特征构造^[36]. 曲线的几何相似度越接近, 相应比较序列间的 GRD 越大.

定义 8^[36,38] 假设 $t_i(\mu)$ 是用二元语言模型描述的, 则序列 T 的集合可称为二元语言信息序列 $T = \{t_i(\mu) | i = 1, 2, \dots, L\}$. 基于 GRA 和欧几里得距离, T_i 与 T_j 的相似度 S_{ij} 如下式所示:

$$S_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{\mu=1}^n \frac{A_{\min} + \xi A_{\max}}{|t_i(\mu) - t_j(\mu)| + \xi A_{\max}}. \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} |t_i(\mu) - t_j(\mu)| &= d((s_i^{g+1}, \theta_i), (s_j^{g+1}, \theta_j)), \\ A_{\min} &= \min_i \min_\mu |t_i(\mu) - t_j(\mu)|, \quad \xi \in (0, 1), \\ A_{\max} &= \max_i \max_\mu |t_i(\mu) - t_j(\mu)|, \end{aligned}$$

S_{ij} 满足 $S_{ij} \in (0, 1]$ 且 S_{ij} 与 $d((s_i^{g+1}, \theta_i), (s_j^{g+1}, \theta_j))$ 呈负相关关系.

2 方法原理

2.1 问题描述

设专家集合 $E = \{e_m | m = 1, 2, \dots, M\}$ 和公众集合 $P = \{p_q | q = 1, 2, \dots, K\}$ 对 L 个可行方案 $A = \{a_l | l = 1, 2, \dots, L\}$ 进行基于个体认知能力的评估, 专家评估用二元组语言值 (s_α^{g+1}, θ) 表示, 公众判断用 PSV 表示. 方案属性集合 $C = \{c_n | n = 1, 2, \dots, N\}$, 方案排名向量集合 $I = \{1, 2, \dots, L\}$, 其中 $1 < L, M, N < +\infty$ 且为正整数. 此外, 专家权重记为 $\omega = \{\omega_i | i = 1, 2, \dots, M\}$, 属性权重记为 $W = \{w_j | j = 1, 2, \dots, N\}$. 其中: $\sum_{i=1}^M \omega_i = 1, \sum_{j=1}^N w_j = 1$. 首先, 基于知识测度公式相对量化公众对决策问题的认知能力, 根据相对知识和表达分歧划分分子组, 并结合共识 PSV 形成方案排位矩阵 $\text{ARM}^{(P)} = [R_{ij}]_{L \times L}$. 其中: $j \in I, R_{ij}$ 为方案 a_i 排在第 j 位的公众共识水平. 然后, 考虑到决策问题的复杂性和专家表达的差异性, 采用不同尺度标准的多粒度语言术语表示专家意见, 形成原始知识矩阵 $\vec{O}_m = [\vec{o}_{nl}]_{N \times L}$, 专家在决策问题上的知识水平由其所选择的粒度来相对量化, 最终形成基于专家群体知识水平的方案排位矩阵 $\text{ARM}^{(E)}$. 最后, 引入基于群体智慧的公众评估参考阈值 δ , 通过加权得到最终的融合矩阵 $\text{ARM} = [\widehat{R}_{ij}]_{L \times L}$ 并确定方案排序.

2.2 方法框架

所提出方法流程如图 1 所示, 共分为 3 部分: 第 2.3 节和第 2.4 节分别形成公众和专家的基于知识水平的方案排名矩阵, 第 2.3 节和第 2.4 节独立且同时进行; 第 2.5 节基于以上结果, 得到融合双重行为主体知识水平的方案排序.

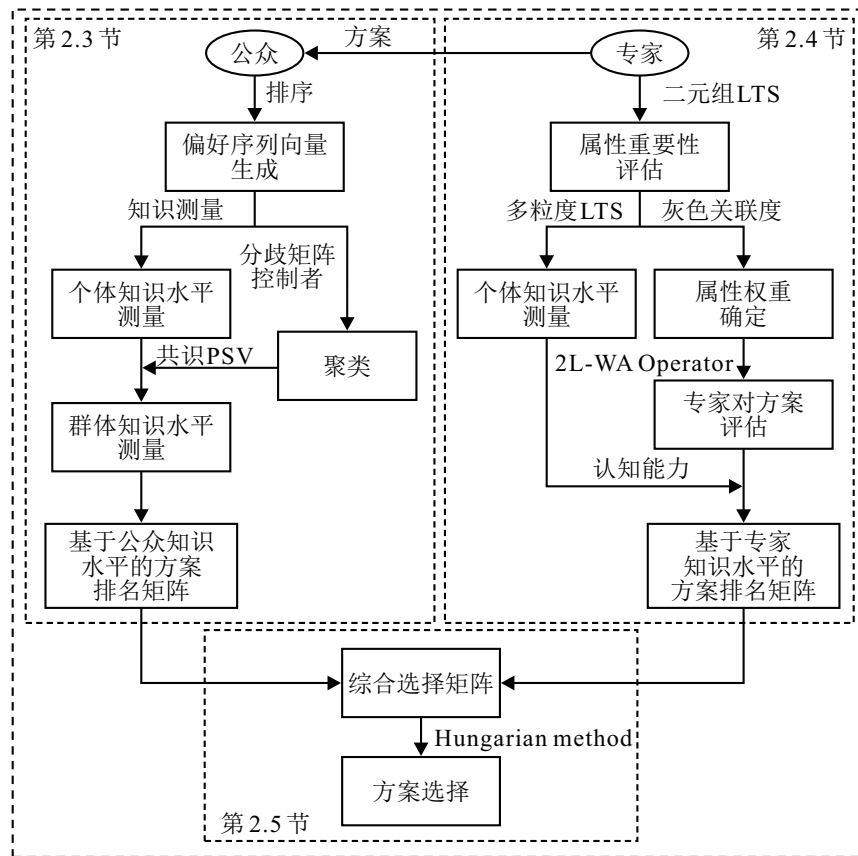


图1 基于双重行为主体知识水平的融合方法流程

2.3 基于公众知识水平的共识矩阵

通过收集公众意见获得个体对方案的全局排序, 基于PSV确定个体知识水平. 构建个体间的分歧矩阵, 然后基于控制者和知识水平对公众分组并标准化子组间的知识水平, 结合共识PSV形成基于公众知识水平的方案排名矩阵. 具体步骤如下.

step 1: 在专家提供多个备选方案后, 由来自不同领域、不同行业的 K 位公众提供对 L 个方案的直接排序信息, 允许并列排序的存在. 根据定义1, 形成公众的PSVs: $[B_i^{(1)}]_{L \times 1}, [B_i^{(2)}]_{L \times 1}, \dots, [B_i^{(K)}]_{L \times 1}$.

step 2: 计算各位公众的知识水平 $L_k^{p_a}$. 基于定义2, 引入区间 Q 改进Hou等^[13]提出的知识水平测量. 此外, 由于较少个体在突发事件中能够拥有绝对知识, 引入最大知识水平阈值 $\lambda (\lambda \leq 1)$, 使得个体的知识水平范围在 $[0, \lambda]$, 有

$$L_k = \begin{cases} \lambda, & L_k \geq \lambda; \\ \left(|Q_j| / \sum_{j=1}^k q_j^2 \right) \cdot K, & L_k < \lambda. \end{cases} \quad (10)$$

其中: L_k 与 Wierman^[31]所提出知识粒度测量KG也存在一定的关系, 如下式所示:

$$L_k = \left(|Q_j| / \sum_{j=1}^k q_j^2 \right) \cdot K =$$

$$\frac{k}{\sum_{j=1}^k q_j^2} \cdot \ln 2 \times \left(\log_2 L - \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \log_2 |X_i| \right) = \ln 2 \cdot \left(|Q_j| / \sum_{j=1}^k q_j^2 \right) \cdot KG. \quad (11)$$

step 3: 确定分组中的公众共识和知识水平. 首先, 结合定义3和定义4, 利用式(3)构建个体间的分歧矩阵 $\text{DisPM} = [\Delta(B^i, B^j)]_{K \times K}$, 同时, 利用step 1得到公众的PSVs确定控制者和成员共识PSV. 然后, 定位 $L_k = \lambda$ 的个体, 从所在行出发在DisPM矩阵中找到满足 $\Delta(B^i, B^j) = 0$ 的个体, 将其纳入同组, 若无, 则表示该个体独立表达没有支持度的观点, 自成一类. 接着, 不断根据step 2结果显示的个体知识水平的高低依次查找并分组, 使得同一子群中的任意成员间满足 $\Delta(B^i, B^j) = 0$. 最后, 得到数量为 n 的公众子组 $C_p = \{C^1, C^2, \dots, C^n\}$. 其中: $n \leq K, K = \sum_{i=1}^n |C^{(i)}|$. 聚类数量和子群内成员的数量取决于成员的评估量间的分歧, 无需预设数目.

step 4: 基于step 2获得的公众知识水平和step 3的聚类结果, 计算各子组内部的知识水平 $L^{(C^i)} = \sum_{q=1}^K L_q^{(C^i)}$, 并进行如下标准化处理:

$$L^{(C^i)} = \sum_{q=1}^K L_q^{(C^i)}. \quad (12)$$

step 5: 形成公众的基于群体知识水平的方案排名矩阵 $ARM^{(P)}$, 元素由子群共识PSV和子群知识水平确定. $ARM^{(P)} = [R_{ij}]_{L \times L}$. 其中: $j \in I, I = \{1, 2, \dots, L\}$; R_{ij} 为对方案 a_i 排在第 j 位无异议的公众共识水平, 即群体知识水平, 如下式所示:

$$R_{ij} = \sum_{i=1}^n \hat{L}_{ij}^{(C^i)}. \quad (13)$$

若 $R_{ij} = 0$, 则表明公众反对方案 a_i 排在第 j 位.

2.4 基于专家知识水平的共识矩阵

基于多粒度的二元组语言集获得专家对方案在属性上的原始评估, 利用转换函数获得标准化后的评估矩阵, 根据粒度值选取的模糊性确定专家的知识水平. 基于灰色关联模型确定属性权重, 通过聚合算子得到专家对方案的评估向量, 结合专家知识水平和评估值形成方案排名矩阵. 具体步骤如下.

step 1: 确定原始意见所采用的粒度语言术语集 $S = \{S^{(1)}, S^{(2)}, \dots, S^{(m)}\}$, 采用的粒度语言越高, 其意见表达的模糊性和不确定性程度越低, 该主体越可能提供更为精确的信息, 表明该主体对评估对象所掌握的知识越丰富. M 位专家提供基于二元组语言值 (i.e. $(s_{\alpha}^{\tau+1}, \theta^{\tau+1}), s_{\alpha}^{\tau+1} \in S$) 对 L 个方案下的 N 个属性的重要性评估, 形成专家原始知识矩阵 $\bar{O}_m = [\bar{o}_{nl}]_{N \times L}$, 其中矩阵元素 $\bar{o}_{nl} = (s_{\alpha}^{\tau+1}, \theta^{\tau+1})$.

step 2: 为了降低不同粒度的影响和便于后续比较, 根据定义5和定义6将step 1获得的专家知识矩阵统一向矩阵内存在的最高维粒度 $g + 1 = |\hat{S}^{g+1}| = |\max\{S\}|$ 转换. 由式(6)将专家的原始评估并统一标准化为 $\hat{O}_m = [o_{nl}]_{N \times L}$, 其中在 \hat{O}_m 中的每个元素满足 $o_{nl} = (s_{\alpha}^{g+1}, \theta^{g+1})$.

step 3: 确定参考标准. 选择每行属性表现最差的评估值作为参考标准, 对于每个属性, 计算评估方案 $T_c^m = \{t_{ci}(\mu) | i = 1, 2, \dots, L\}$ 和参考方案集 $\hat{T}_c^m = \{\min t_{ci}(\mu) | i = 1, 2, \dots, L\}$.

step 4: 确定专家 m 下的属性权重. 利用定义8和step 3得到相似度 $\psi_n^m = \mathfrak{R}_s(T_c^m, \hat{T}_c^m)$, 由于专家 m 的相似度 ψ_n^m 衡量在属性 n 下的总体与最差方案的接近程度, ψ_n^m 越大, 越偏离最优方案. 因此, 属性权重 w_n^m 与 ψ_n^m 呈负向关系, 有

$$w_n^m = (1 - \psi_n^m) / \sum_{n=1}^N (1 - \psi_n^m). \quad (14)$$

step 5: 获得专家评估集. e_m 对方案的总体评判能力由原始知识 \bar{O}_m 和属性权重 w_n^m 确定. 结合式(8)

和(14)得到 e_m 对方案的重要性评估集 EK_m , 即

$$EK_m = \Theta_{2L-WA}(\hat{O}_m) = [\oplus_{n=1}^N (o_{nl} \otimes w_n^m)]_{1 \times L}, \quad (15)$$

其中 EK_m 通过 $\oplus_{n=1}^N (o_{nl} \otimes w_n^m) = (o_{1l} \otimes w_1^m) \oplus (o_{2l} \otimes w_2^m) \oplus \dots \oplus (o_{nl} \otimes w_n^m)$ 计算. 然后用二元组语言值表示, 即有 $EK_m = [(s_{\alpha}^{g+1}, \theta^{g+1})]_{1 \times L}$.

step 6: 根据专家评估 \bar{o}_{nl} 确定知识水平粒度, 确定专家在方案属性上的知识水平 $L_k^{e_m}$ 并标准化, 有

$$\hat{L}^{(m)} = L_k^{(e_m)} / \sum_{m=1}^M L_k^{(e_m)}. \quad (16)$$

step 7: 形成专家的基于群体知识水平的方案排名矩阵 $ARM^{(E)}$, 元素值结合step 6的知识水平和专家的方案排序确定. $ARM^{(E)} = [\tilde{R}_{ij}]_{L \times L}$, \tilde{R}_{ij} 为对方案 a_i 排在第 j 位无异议的专家共识水平, 有

$$\tilde{R}_{ij} = \sum_{m=1}^M \hat{L}_{ij}^{(m)}. \quad (17)$$

2.5 基于双重主体知识水平的方案选择

大规模行为主体提供意见、偏好、序数排序等信息是为了充分考虑个体间的差异性表达, 得到基于群体智慧的方案最佳选择. 由第2.3节和第2.4节得到分别来自公众和专家的基于群体知识的方案排位矩阵 $ARM^{(P)}$ 和 $ARM^{(E)}$, 引入参考公众知识的方案排序共识阈值 δ , 通过加权计算得到融合双重主体知识水平的方案选择矩阵 $ARM = [\hat{R}_{ij}]_{L \times L}$, 有

$$\hat{R}_{ij} = \delta \cdot R_{ij} + (1 - \delta) \cdot \tilde{R}_{ij}. \quad (18)$$

其中: 矩阵中元素值 \hat{R}_{ij} 为群体对方案排位的共识水平, 元素值越大, 群体对 a_i 排在第 j 位的支持度越高. 找到各方案的最佳排位且达到整体的最大支持水平的问题借助匈牙利法的思想构建分配模型AM, 得到最终的方案排序. 模型如下式所示:

$$\begin{aligned} \max f &= \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L x_{ij} \hat{R}_{ij}. \\ \text{(AM) s.t.} & \begin{cases} \sum_{i=1}^L x_{ij} = 1, & \text{for all } j; \\ \sum_{j=1}^L x_{ij} = 1, & \text{for all } i; \\ x_{ij} = 0, 1, & \text{for all } i, j. \end{cases} \end{aligned}$$

3 案例分析

3.1 案例背景

2022年3月, 中国湖南省长沙市出现Covid-19次生疫情, 基于以往的疫情防控经验, 长沙市疾病预防控制中心迅速聚集来自不同领域的11位专家, 在时间压力内制定出 $A = \{a_i | i = 1, 2, 3, 4\}$ 方案集. 其中,

step 4: 结合 step 2 和 step 3 计算公众子组内部的知识水平,并根据式(12)标准化,如表3所示.与 step 2 获得的公众知识水平对比,由式(10)计算子组共识 PSV 的知识水平不低于组内个体的知识水平.

step 5: 形成 ARM^(P). 以 R₁₁ 为例,元素值表示对 a₁ 排在第 1 位无异议的公众基于群体知识水平上的共识,由式(13)计算元素值 R₁₁ = $\hat{L}^{(C3)} \approx 0.131$,如后文表 8 左侧所示.

3.2.2 形成基于专家知识水平的方案矩阵

由于多个方案的存在和专家间具有知识差异和理解差异,突发事件要求专家们统一意见,选择最有效的方案采纳实施.专家们经过讨论确定了方案的评估标准,组成属性集 C = {c_n|n = 1, 2, ..., 4}. 其中:c₁ 为舆论引导,c₂ 为物资保障,c₃ 为防控等级,c₄ 为安全程度.专家的评价信息是通过模拟真实场景随机生成的,其信息量不影响所提出方法的有效性.

step 1: 由于专家间存在知识和经验差异,引入 S = {S₃, S₅, S₇, S₉} 的多粒度 PLTs,专家根据知识水平和所掌握的信息选择合适粒度的二元组语言值表达对所有方案下不同属性的重要性评估,如表 4 所示.

表 4 专家提供的原始信息

	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄
e ₁	c ₁ (s ₁ ⁵ , -0.10)	(s ₃ ⁵ , 0.40)	(s ₁ ⁵ , 0.30)	(s ₃ ⁵ , -0.50)
	c ₂ (s ₂ ⁵ , 0.30)	(s ₃ ⁵ , -0.10)	(s ₀ ⁵ , 0.40)	(s ₂ ⁵ , 0.05)
	c ₃ (s ₂ ⁵ , 0.40)	(s ₄ ⁵ , -0.50)	(s ₃ ⁵ , -0.40)	(s ₁ ⁵ , -0.10)
	c ₄ (s ₂ ⁵ , -0.50)	(s ₄ ⁵ , -0.15)	(s ₁ ⁵ , 0.20)	(s ₁ ⁵ , 0.65)
⋮	⋮	⋮	⋮	
e ₁₁	c ₁ (s ₃ ⁷ , 0.19)	(s ₇ ⁷ , 0.38)	(s ₆ ⁷ , -0.06)	(s ₇ ⁷ , -0.02)
	c ₂ (s ₆ ⁷ , 0.35)	(s ₅ ⁷ , 0.41)	(s ₃ ⁷ , 0.06)	(s ₄ ⁷ , -0.01)
	c ₃ (s ₄ ⁷ , -0.42)	(s ₁ ⁷ , -0.41)	(s ₄ ⁷ , -0.50)	(s ₁ ⁷ , -0.45)
	c ₄ (s ₁ ⁷ , 0.20)	(s ₃ ⁷ , 0.25)	(s ₆ ⁷ , -0.40)	(s ₃ ⁷ , 0.21)

step 2: 利用式(4)标准化原始信息,如表 5 所示.

表 5 标准化专家的原始信息

	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄
e ₁	c ₁ (s ₂ ⁹ , -0.20)	(s ₇ ⁹ , -0.20)	(s ₃ ⁹ , -0.40)	(s ₅ ⁹ , 0)
	c ₂ (s ₅ ⁹ , -0.40)	(s ₆ ⁹ , -0.20)	(s ₁ ⁹ , -0.20)	(s ₄ ⁹ , 0.10)
	c ₃ (s ₅ ⁹ , -0.20)	(s ₇ ⁹ , 0)	(s ₅ ⁹ , 0.20)	(s ₂ ⁹ , -0.20)
	c ₄ (s ₃ ⁹ , 0)	(s ₈ ⁹ , -0.30)	(s ₂ ⁹ , 0.40)	(s ₃ ⁹ , 0.30)
⋮	⋮	⋮	⋮	
e ₁₁	c ₁ (s ₄ ⁹ , 0.25)	(s ₇ ⁹ , 0.17)	(s ₈ ⁹ , -0.08)	(s ₃ ⁹ , 0.44)
	c ₂ (s ₈ ⁹ , 0.47)	(s ₇ ⁹ , 0.22)	(s ₄ ⁹ , 0.08)	(s ₅ ⁹ , 0.33)
	c ₃ (s ₇ ⁹ , 0.44)	(s ₁ ⁹ , -0.22)	(s ₅ ⁹ , -0.34)	(s ₁ ⁹ , -0.27)
	c ₄ (s ₂ ⁹ , -0.40)	(s ₄ ⁹ , 0.34)	(s ₇ ⁹ , 0.47)	(s ₄ ⁹ , 0.28)

step 3: 确定参考标准. $\hat{T}_c^m = \{\min t_{ci}(\mu)|i = 1,$

$2, \dots, L\}$ 为参考,以 e₁ 的 c₁ 为例, $\hat{T}_1^1 = \{(s_2^9, -0.2)\}$, $T_1^1 = \{(s_2^9, -0.2), (s_7^9, -0.2), (s_3^9, -0.4), (s_5^9, 0)\}$. 由式(9),得到

$$S_{11} = \frac{1}{4} \sum_{\mu=1}^4 \frac{\Lambda_{\min} + \xi \Lambda_{\max}}{|T_1^l(\mu) - \hat{T}_1^1| + \xi \Lambda_{\max}} \approx 0.71.$$

其中: $\xi = 0.8, |T_1^l(1) - \hat{T}_1^1| = 0, |T_1^l(2) - \hat{T}_1^1| = 5, |T_1^l(3) - \hat{T}_1^1| = 0.8, |T_1^l(4) - \hat{T}_1^1| = 3.2$,因此, $\Lambda_{\min} = 0, \Lambda_{\max} = 5$.

step 4: 确定各专家上的属性权重. 以 e₁ 为例,由 step 3,得到 S₁₂ ≈ 0.63, S₁₃ ≈ 0.64, S₁₄ ≈ 0.79,则 $\psi^1 = \{\psi_n^1|n = 1, 2, \dots, 4\} = \{0.71, 0.63, 0.64, 0.79\}$,由式(14),得到 $w_1^1 = (1 - \psi_1^1) / \sum_{n=1}^4 (1 - \psi_n^1) \approx 0.236, w_2^1 \approx 0.303, w_3^1 \approx 0.288, w_4^1 \approx 0.173$,如表 6 所示.

表 6 通过 GRD 模型获得各专家预期的属性权重

W	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄
e ₁	0.236	0.303	0.288	0.173
e ₂	0.260	0.243	0.223	0.274
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
e ₁₁	0.260	0.268	0.205	0.267

step 5: 获得方案评估值. 结合表 5 和表 6,由式(15),有 $EK_1 = \Theta_{2L-WA}(\hat{O}_1) = [\oplus_{n=1}^N (o_{nl} \otimes w_n^1)]_{1 \times L} = [(s_4^9, -0.28), (s_7^9, -0.29), (s_3^9, -0.23), (s_4^9, -0.49)]$,如表 7 和图 2 所示.

表 7 各专家对方案的认知评估

	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄
e ₁	(s ₄ ⁹ , -0.28)	(s ₇ ⁹ , -0.29)	(s ₃ ⁹ , -0.23)	(s ₄ ⁹ , -0.49)
e ₂	(s ₅ ⁹ , 0.49)	(s ₃ ⁹ , -0.17)	(s ₃ ⁹ , 0.41)	(s ₆ ⁹ , -0.11)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
e ₁₁	(s ₅ ⁹ , 0.33)	(s ₅ ⁹ , 0.12)	(s ₆ ⁹ , 0.10)	(s ₄ ⁹ , -0.39)

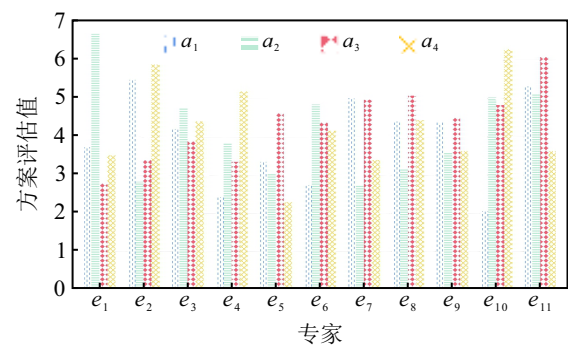


图 2 专家的方案评估

step 6: 确定专家的知识水平. 专家采用的多粒度 PLTs,有 S = {S₃, S₅, S₇, S₉},假定各粒度下的知识水平是 L_k^S = {0.2, 0.4, 0.6, 0.8} 的等差序列. 以 e₁ 为

例,结合表4可知, $L_k^1 = 0.4$,由式(16)标准化, $\hat{L}^{(1)} = L_k^1 / \sum_{m=1}^9 L_k^m \approx 0.077$. 同理,得到 $\hat{L}^{(m)} = \{0.077, 0.154, 0.077, 0.115, 0.038, 0.077, 0.154, 0.115, 0.038, 0.038, 0.115\}$.

step 7: 形成 $ARM^{(E)}$. 以 \tilde{R}_{12} 为例,即对 a_1 排在第2位无异议的专家群体共识,结合表7和step 6,由式(17),得到 $\tilde{R}_{12} = \hat{L}^{(1)} + \hat{L}^{(2)} + \hat{L}^{(5)} + \hat{L}^{(9)} + \hat{L}^{(11)} \approx 0.423$,如表8右侧所示.

表8 基于主体知识的方案可能排位矩阵

$ARM^{(P)}$	1	2	3	4	$ARM^{(E)}$	1	2	3	4
a_1	0.131	0.405	0.131	0.464	a_1	0.154	0.423	0.192	0.308
a_2	0.000	0.131	0.869	0.131	a_2	0.231	0.154	0.154	0.462
a_3	0.869	0.131	0.000	0.000	a_3	0.308	0.231	0.308	0.154
a_4	0.000	0.333	0.262	0.667	a_4	0.308	0.192	0.346	0.154

3.2.3 基于双重行为主体的方案选择

引入参考公众共识阈值 δ ,为不失一般性,本文假定 $\delta = 0.5$. 结合表8,由式(18)得到融合双重行为主体共识度的 ARM ,如表9所示.

表9 双重行为主体的共识矩阵

ARM	1	2	3	4
a_1	0.15	0.43	0.16	0.36
a_2	0.12	0.15	0.51	0.30
a_3	0.59	0.18	0.15	0.08
a_4	0.15	0.24	0.31	0.44

利用第3.2.2节提出的方案选择模型 AM 确定最佳排序,得到 $a_3 \succ a_1 \succ a_2 \succ a_4$, a_3 为最佳方案. 结合表8左侧矩阵,可以发现:实施 a_3 既能达到一定的安全防控要求,也能得到公众较大的支持度,而防控过于严格的 a_4 易引起公众的抵制和抱怨情绪.

4 敏感性和对比分析

现有的 $LSGDM$ 中,研究侧重有以下3方面: 1) 属性权重已知的前提下确定专家权重; 2) 专家权重已知的前提下确定属性权重; 3) 属性和专家权重均未知情况下确定权重. 关于第3方面且在双重主体的知识融合视角的方法研究成果较少,本节通过对内部其他角度的验证,表明所提出方法的合理性. 此外,通过与现有研究进行比较来验证其科学性和有效性.

4.1 敏感性分析

对公众共识阈值 δ 进行敏感性分析,以研究 δ 对群体知识生成以及方案排名的影响. 由表10可见, δ 取值对方案排名结果存在影响. 但是,无论 δ 如何变化,最佳方案和次优方案的选择均为 a_3 和 a_1 . 这是由于公众和专家对于 a_3 和 a_1 的排位是无异议的,阈值的取值只影响到了最劣方案的认定.

的取值只影响到了最劣方案的认定.

表10 不同取值的 δ 下的方案排序结果

δ	ranking of alternatives
$\delta = 0$	$a_3 \succ a_1 \succ a_4 \succ a_2$
$\delta \in (0, 0.2981)$	$a_3 \succ a_1 \succ a_4 \succ a_2$
$\delta = 0.3$	$a_3 \succ a_1 \succ a_2 \succ a_4$
$\delta \in (0.3, 1)$	$a_3 \succ a_1 \succ a_2 \succ a_4$
$\delta = 1$	$a_3 \succ a_1 \succ a_2 \succ a_4$

4.2 公众层面的比较

在 $LSGDM$ 中,最终目的即对所有备选方案进行评估并选择最有效且主体支持度最高的方案进行实施. Hou等^[34]利用 PSV 和分歧矩阵确定最终方案排序为 $A_1 > A_2 > A_3 > A_5 \sim A_4$,采用所提出方法得到排序结果为 $A_1 > A_2 > A_3 > A_5 > A_4$,结果基本一致. Hou等^[34]基于最小化方案间的分歧值确定结果,而没有考虑到主体的知识水平测度上. 所提出方法是基于最大化群体的知识水平衡量方案实施的有效性和支持度. 此外,下面从本文其他角度考虑所提出方法的有效性. 方法0为本文公众层面所提出方法,各比较方法与方法0的差异描述如下.

方法1: 确定个体知识水平采用

$$L'_k = \begin{cases} \lambda, & L'_k \geq \lambda; \\ K / \max = (1/2) \times KG, & L'_k < \lambda. \end{cases}$$

其余同第2.3节.

方法2: 不进行公众的聚类,同等重视每位公众的排序意见表达,其余同本文. 为了观察以上方法在公众层面的群体共识方案选择,用模型 AM 计算结果,直观展示公众的方案选择,如表11所示.

表11 公众层面各方法的比较

方法	$ARM^{(P)}$				方案排序
0	如表8左侧所示				$a_3 > a_1 > a_2 > a_4$
1	0.136	0.446	0.136	0.418	$a_3 > a_1 > a_2 > a_4$
	0.000	0.136	0.864	0.136	
	0.864	0.136	0.000	0.000	
	0.000	0.282	0.272	0.718	
2	0.334	0.405	0.159	0.464	$a_3 > a_1 > a_2 > a_4$
	0.028	0.291	0.869	0.175	
	0.869	0.334	0.028	0	
	0	0.333	0.437	0.667	
3	0.141	0.359	0.141	0.500	$a_3 > a_1 > a_2 > a_4$
	0.000	0.141	0.859	0.141	
	0.859	0.141	0.000	0.000	
	0.000	0.359	0.283	0.641	

方法3: 低知识水平 ($L'_k < 0.5$) 的公众退出决策, 如 p_6, p_8, p_9 的退出, 其余同本文.

在表 11 中, 各方法的排序结果完全一致. 因此, 所提出公众层面基于知识水平的排名方法具有一定的合理性和有效性. 此外, 进行子群划分的优势在于决策信息的降维, 在不影响最终目的下缩减获得群体共识的方案排序所需时间. 所提出方法考虑到了公众的进入和退出情形, 从而达到动态变更方案排名的目的. 但是, 由方法 0 可知, 被控制者乃至低知识水平主体的退出不会改变分组结果和集体知识水平下的方案排序, 如方法 3 所示.

4.3 专家层面的比较

在专家知识确定上, 所提出方法 0 根据专家偏好信息的粒度选择, 结合专家对方案的二元评估值, 得到专家最终的方案排序为 $a_3 > a_1 > a_4 > a_2$. 若是在得到专家对方案的评估值后 (如图 2 所示), 则根据分值区间确定专家对方案的序数排位, 再根据 PSV 和式 (10) 测量专家知识水平并逐步形成, 无论是划分专家子组 (方法 1), 综合考量所有专家意见 (方法 2), 还是低知识水平的专家退出决策 (方法 3), 如 e_3, e_6, e_9 , 得到的最终方案排序仍然为 $a_3 > a_1 > a_4 > a_2$, 如表 12 所示. 在采用不同的知识水平测量上, 方案排序与最佳方案完全一致, 验证了所提出方法根据粒度确定专家知识水平的合理性.

表 12 专家层面各方法的比较

方法	ARM ^(E)				方案排序
0	如表 8 右侧所示				$a_3 > a_1 > a_4 > a_2$
1	0.251	0.704	0.453	0.296	$a_3 > a_1 > a_4 > a_2$
	0.131	0.511	0.215	0.358	
	0.466	0.143	0.404	0.131	
	0.404	0.346	0.381	0.215	
2	0.274	0.704	0.453	0.296	$a_3 > a_1 > a_4 > a_2$
	0.154	0.534	0.405	0.358	
	0.489	0.274	0.404	0.131	
	0.427	0.369	0.405	0.251	
3	0.234	0.703	0.468	0.297	$a_3 > a_1 > a_4 > a_2$
	0.117	0.532	0.234	0.351	
	0.468	0.117	0.414	0.117	
	0.414	0.351	0.351	0.234	

与 Zhang 等^[36] 的方法相比, 利用专家权重和专家对方案的评估值, 最终排序为 $a_1 > a_5 > a_3 > a_2 > a_4$. 此外, 不考虑专家权重的一致, 参考 PSV 汇总专家对方案的评估值, 最终排序为 $a_1 > a_5 > a_3 > a_2 > a_4$. 采用所提出方法计算, 得到的排序结果为 $a_1 > a_5 >$

$a_3 > a_2 > a_4$, 在最优和次优方案上是一致的, 且节省计算 PSV 聚合过程的时间. Zhang 等^[36] 基于意见相似度和不同粒度确定专家权重, 不能获得存在专家采用同一粒度表达下的结果, 而所提出方法也允许部分专家采用相同的粒度水平, 在适用性方面有较好的优势.

5 结论

对于突发公共安全事件, 由于其复杂性、不确定性和演变难预测性等特点, 需要多位专家建立评估体系并进行方案评估. 此外, 将公众意见作为辅助专家决策和方案选择的参考是合理的, 不仅拓宽了信息获取渠道, 还将公众诉求纳入决策抉择. 本文创造性地将公众的群体智慧及其质量测度纳入决策过程, 提出了一种新的在应急环境下基于双重大规模行为主体知识水平的融合方法, 有助于探究认知特性下大群体协同应急决策管理的新范式. 首先, 分别从公众和专家层面提出了知识水平测度方法、聚类依据以及群体共识集结过程; 然后, 融合双重行为主体的共识进行方案排序, 提高决策结果可靠性并减少实施方案的公众阻力, 为公众-专家协同下的群智决策提供新方法和思路, 同时, 为现实防疫问题提供了可行的方法借鉴和决策质量评估方法; 最后, 通过应用 Covid-19 案例模拟表明知识水平融合和方案选择过程, 并通过敏感性和对比分析表明所提出方法的合理性和有效性. 然而, 所提出方法不足之处在于: 仅根据粒度选取衡量专家的知识水平, 知识测度方法存在不足, 未来将采用更完善的方法体系进行深入研究, 丰富个体认知能力的测度方法; 同时, 个体的认知能力是随决策时间和信息量而动态变化的, 且专家在属性上的异质信息表达或许并非采用统一标准, 未来应加以考虑在决策要素动态或异质环境下的大群体应急决策问题. 如何进一步优化方法并将其应用于实际社会生产、工程建设问题, 还需要进一步研究.

参考文献 (References)

[1] 李永海, 樊治平, 袁媛. 考虑应急方案实施效果的突发事件应急方案生成方法[J]. 控制与决策, 2014, 29(2): 275-280.
(Li Y H, Fan Z P, Yuan Y. Method for generating emergency alternative with considering implementation effects of emergency alternatives[J]. Control and Decision, 2014, 29(2): 275-280.)

[2] 徐选华, 杜志娇, 陈晓红, 等. 保护少数意见的冲突型大群体应急决策方法[J]. 管理科学学报, 2017, 20(11): 10-23.
(Xu X H, Du Z J, Chen X H, et al. Conflict large-group

- emergency decision-making method while protecting minority opinions[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2017, 20(11): 10-23.)
- [3] Cosgrave J. Decision making in emergencies[J]. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 1996, 5(4): 28-35.
- [4] Li X F, Liao H C. A group decision making method to manage internal and external experts with an application to anti-lung cancer drug selection[J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 183: 115379.
- [5] Liu Z M, Wang W X, Liu P D. Dynamic consensus of large group emergency decision-making under dual-trust relationship-based social network[J]. *Information Sciences*, 2022, 615: 58-89.
- [6] 王伟明, 徐海燕, 朱建军. 复杂网络视角下的大规模群体 DEMATEL 决策方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(1): 200-212.
(Wang W M, Xu H Y, Zhu J J. Large-scale group DEMATEL decision making method from the perspective of complex network[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2021, 41(1): 200-212.)
- [7] Liu Z M, Bi Y W, Liu P D. An evidence theory-based large group FMEA framework incorporating bounded confidence and its application in supercritical water gasification system[J]. *Applied Soft Computing*, 2022, 129: 109580.
- [8] 陈雪龙, 张钟, 李悦. 临机决策视角下的非常规突发事件应急处置方案生成[J]. *中国管理科学*, DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.1982.
(Chen X L, Zhang Z, Li Y. Generation of emergency response plan for unconventional emergencies from the perspective of improvisational decision-making[J]. *Chinese Journal of Management Science*, DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.1982.)
- [9] 张涛. 突发公共卫生事件中的风险沟通与专家困境[J]. *自然辩证法研究*, 2022, 38(5): 123-128.
(Zhang T. Risk communication and expert dilemma in public health emergency[J]. *Studies in Dialectics of Nature*, 2022, 38(5): 123-128.)
- [10] Guo K H, Xu H. Preference and attitude in parameterized knowledge measure for decision making under uncertainty[J]. *Applied Intelligence*, 2021, 51(10): 7484-7493.
- [11] Yang Z J, Ye J B, Wang L L, et al. Inferring substitutable and complementary products with knowledge-aware path reasoning based on dynamic policy network[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2022, 235: 107579.
- [12] Li C C, Dong Y C, Liang H M, et al. Data-driven method to learning personalized individual semantics to support linguistic multi-attribute decision making[J]. *Omega*, 2022, 111: 102642.
- [13] Hou F J, Triantaphyllou E, Yanase J. Knowledge, ignorance, and uncertainty: An investigation from the perspective of some differential equations[J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 191: 116325.
- [14] Frey V, van de Rijt A. Social influence undermines the wisdom of the crowd in sequential decision making[J]. *Management Science*, 2021, 67(7): 4273-4286.
- [15] Tsetsos K, Usher M, Chater N. Preference reversal in multiattribute choice[J]. *Psychological Review*, 2010, 117(4): 1275-1293.
- [16] Torres-Manzanera E, Díaz S, Chiclana F, et al. Transitive full covers of incomplete preference relations[J]. *Information Fusion*, 2022, 80: 44-55.
- [17] 金飞飞, 刘金培, 陈华友, 等. 基于信任关系和信息测度的概率语义社会网络群决策模型[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(10): 178-190.
(Jin F F, Liu J P, Chen H Y, et al. Social network group decision-making model based on trust relationship and information measures with probabilistic linguistic information[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29(10): 178-190.)
- [18] Chao X R, Kou G, Peng Y, et al. An efficient consensus reaching framework for large-scale social network group decision making and its application in urban resettlement[J]. *Information Sciences*, 2021, 575: 499-527.
- [19] 徐选华, 孙寒寒, 陈晓红. 基于分众模式的多部门大群体应急决策方法[J]. *控制与决策*, 2019, 34(4): 871-879.
(Xu X H, Sun H H, Chen X H. Multi-department large group emergency decision making method based on crowd sourcing[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(4): 871-879.)
- [20] 孙德超, 胡灿美. 重大突发事件应对中不确定信息的功能建构、生发传播与协同善治[J]. *福建论坛: 人文社会科学版*, 2022(7): 183-190.
(Sun D C, Hu C M. The functional constructs, generative propagation and collaborative good governance of uncertain information in response to critical emergencies[J]. *Fujian Forum: Humanities and Social Sciences*, 2022(7): 183-190.)
- [21] 徐选华, 余紫昕. 社会网络环境下基于公众行为大数据属性挖掘的大群体应急决策方法及应用[J]. *控制与决策*, 2022, 37(1): 175-184.
(Xu X H, Yu Z X. A large group emergency decision making method and application based on attribute mining of public behaviour big data in social network environment[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(1):

- 175-184.)
- [22] Xu X H, Yin X P, Chen X H. A large-group emergency risk decision method based on data mining of public attribute preferences[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2019, 163: 495-509.
- [23] Wan Q F, Xu X H, Zhuang J, et al. A sentiment analysis-based expert weight determination method for large-scale group decision-making driven by social media data[J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 185: 115629.
- [24] Cao J, Xu X H, Dai F, et al. An evolution model of risk preference influenced by extremists in large group emergency consensus process[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2020, 39(5): 7733-7746.
- [25] Chen X H, Zhang W W, Xu X H, et al. A public and large-scale expert information fusion method and its application: Mining public opinion via sentiment analysis and measuring public dynamic reliability[J]. *Information Fusion*, 2022, 78: 71-85.
- [26] Yang G R, Wang X Q, Ding R X, et al. Managing public opinion in consensus-reaching processes for large-scale group decision-making problems[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2022, 73(11): 2480-2499.
- [27] Liang D C, Fu Y Y, Xu Z S. Three-way group consensus decision based on hierarchical social network consisting of decision makers and participants[J]. *Information Sciences*, 2022, 585: 289-312.
- [28] 裴凤, 何雨薇, 闫安, 等. 一种考虑群体智慧的直觉模糊群决策方法[J]. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2022, 45(10): 1407-1412.
(Pei F, He Y W, Yan A, et al. An intuitionistic fuzzy group decision-making method considering collective intelligence[J]. *Journal of Hefei University of Technology: Natural Science*, 2022, 45(10): 1407-1412.)
- [29] Gou X J, Xu Z S, Liao H C. Alternative queuing method for multiple criteria decision making with hybrid fuzzy and ranking information[J]. *Information Sciences*, 2016, 357: 144-160.
- [30] Hou F J. The prametric-based GDM selection procedure under linguistic assessments[C]. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Istanbul, 2015: 1-8.
- [31] Wierman M J. Measuring uncertainty in rough set theory[J]. *International Journal of General Systems*, 1999, 28(4/5): 283-297.
- [32] Srinivasan V, Shocker A D. Linear programming techniques for multidimensional analysis of preferences[J]. *Psychometrika*, 1973, 38(3): 337-369.
- [33] Cook W D, Seiford L M. Priority ranking and consensus formation[J]. *Management Science*, 1978, 24(16): 1721-1732.
- [34] Hou F J, Triantaphyllou E. An iterative approach for achieving consensus when ranking a finite set of alternatives by a group of experts[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 275(2): 570-579.
- [35] 汤国林, 杨文栋, 刘培德. 基于区间二型模糊决策粗糙集的三支决策方法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(5): 1347-1356.
(Tang G L, Yang W D, Liu P D. Three-way decisions based on decision-theoretic rough sets with interval type-2 fuzzy information[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(5): 1347-1356.)
- [36] Zhang L, Wang Y Z, Zhao X Y. A new emergency decision support methodology based on multi-source knowledge in 2-tuple linguistic model[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2018, 144: 77-87.
- [37] Herrera F, Martinez L. A model based on linguistic 2-tuples for dealing with multigranular hierarchical linguistic contexts in multi-expert decision-making[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics*, 2001, 31(2): 227-234.
- [38] Deng J L. Control problems of grey systems[J]. *Systems & Control Letters*, 1982, 1(5): 288-294.

作者简介

徐选华(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事大数据智能决策理论与方法、信息系统与决策支持系统等研究, E-mail: xuxh@csu.edu.cn;

周鋈洁(1999—), 女, 硕士生, 从事大数据决策理论与方法、应急管理决策等研究, E-mail: zjunj999@163.com.