文章编号: 1001-0920 (2016) 02-0225-08
DOI: 10.13195/j.kzyjc.2014.1915

面向具有多部门多指标特征的复杂大群体应急决策方法

徐选华, 蔡晨光, 王 佩, 周艳菊

(中南大学 商学院，长沙 410083)

摘 要: 针对具有多部门多指标特征的复杂大群体应急决策问题, 提出一种新的决策方法. 首先, 给出直觉模糊数相似度公式, 将其作为相聚度公式对专家偏好进行聚类; 然后, 以同一部门指标数据的方案区分度最大化为目标, 构建优化模型以确定部门指标权重; 接着, 基于部门信息区分度结合极大熵原理对部门权重进行求解, 进而对备选方案进行排序; 最后, 通过一个算例验证了所提出方法的可行性和有效性.

关键词: 应急决策；多部门多指标；复杂大群体

中图分类号: C934 **文献标志码:** A

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

XU Xuan-hua, *CAI Chen-guang*, *WANG Pei*, *ZHOU Yan-ju*

(School of Business，Central South University，Changsha 410083，China．Correpondent：CAI Chen-guang，E-mail: ccg169@126.com)

Abstract: In order to solve the large group emergency decision making problem with the characteristic of multi-department and multi-index, a new decision making method is proposed. Firstly, the similarity formula of intuitionistic fuzzy numbers is constructed, which is taken as the clustering formula for expert preference clustering operation. Then, aiming at maximization of the distinction degree over index data for each department, and index weights for each department are obtained. Based on the degree of differentiation over department information, combining with maximum entropy principle, department weights are calculated, and then all alternatives are ranked. Finally, an example is used to illustrate the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords: emergency decision making；multi-department and multi-index；complex large group

0 引 言

近年来, 我国重特大灾害突发事件呈明显上升态势. 根据民政部门统计, 2014 年重特大自然灾害共造成全国 24 353.7 万人次受灾, 直接经济损失 3 373.8 亿元. 重特大自然灾害具有复杂性、扩散性和高破坏性等特点, 如何根据突发事件的特征进行及时有效地决策, 是应急管理部门亟待解决的难题之一[1-2].

突发事件的影响范围很大, 决策活动大多需要集结多个部门共同完成, 这也使得应急决策通常具有多部门决策的特点[3-4]. 对于涉及多个部门的应急决策活动而言, 如何对应急指标和应急部门等要素进行有效赋权是应急决策活动的重要环节. 常见的赋权方法大体可分为 3 种: 主观赋权法、客观赋权法和组合赋权法. 主观赋权法的基本原理是通过决策者对评价对象给出相应的偏好意见, 再将偏好信息进行综合分析, 从而得到最终的权重结果[5]. 该方法操作简便且赋权结果能够很好地反应决策者意见, 已在应急决策中得到广泛应用. 例如: 在现实决策过程中, 各个部门的应急指标权重大多通过主观赋权法确定, 即各个部门组织相关人员给出本部门各个指标的重要程度, 然后对决策者意见进行集结, 进而确定各部门的指标权重[6-7]. 由于应急决策问题具有复杂性和不确定性, 决策专家很难在短时间内以精确值来表达自己的偏好, 通常以模糊数的形式表示[8-9], 无形之中增加了指标赋权的难度. 另外, 为了保证决策结果的有效性, 各部门参与决策的专家规模通常很大, 故该类型决策大多具有复杂大群体特征 (决策专家数量不少于 10 人[10]). 由于决策者间的知识背景、信息对称性等方面存在

收稿日期: 2014-12-16；**修回日期:** 2015-03-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71171202, 71171201).

作者简介: 徐选华 (1962–), 男, 教授, 博士生导师, 从事决策理论与方法、信息系统与决策支持系统等研究；蔡晨光 (1987–), 男, 博士生, 从事决策理论与方法、应急管理与决策的研究.

差异, 在高时间压力下很难形成统一的意见, 因此决策者之间会不可避免地产生冲突. 通常情况下, 参与决策的专家规模越大, 群体意见越分散, 冲突水平越高. 如何对决策者的偏好冲突进行处理, 尚有待进一步研究. 客观赋权法是指根据原始数据之间的关系通过一定的数学分析方法来确定权重, 常见的客观赋权法包括熵权法、标准离差法、CRITIC 法等[11], 对于应急决策而言, 在进行赋权操作时, 若没有完整的决策者意见作为赋权依据, 则可以采用客观赋权法来确定相关权重. 组合赋权法是指将两种或两种以上的赋权方式进行综合, 形成一种新的赋权方法[12], 在应急决策过程中, 可将面向不同目标的赋权方法进行组合, 从而提高赋权结果的合理性. 对于组合赋权法而言, 如何将多种赋权方式得到的权重结果进行有效整合, 是组合赋权操作中必须要考虑的关键问题之一.

基于上述分析, 本文针对部门权重完全未知, 部门决策者偏好表示为直觉模糊数的多部门多指标大群体应急决策问题, 提出一种新的决策方法. 首先, 给出一个考虑犹豫度水平直觉模糊数相似度公式, 将其作为相聚度公式对各部门的专家偏好信息进行聚类, 再以群体偏好一致性最大化为目标, 通过建模得到聚集权重, 进而得到各部门群体偏好信息; 然后, 根据各部门的群体偏好信息确定部门权重取值范围, 以同一部门指标数据的方案区分度最大化为目标建立优化模型, 对各部门的指标权重进行求解, 根据部门指标综合数据的方案区分度水平结合极大熵理论, 确定各个部门的权重; 最后, 利用余弦投影法对方案进行排序, 确定最优方案.

1 基于犹豫度的偏好相聚度模型构建

定义 1[13] 令 X 为一个集合, 定义

$$A=\{\langle x,\mu_A(x),\nu_A(x)\rangle|x\in X\} \tag{1}$$

为一个直觉模糊集 (IFS). 其中: $\mu_A(x)$ 为要素 x 的隶属度, $\nu_A(x)$ 为要素 x 的非隶属度. $\mu_A(x)$ 和 $\nu_A(x)$ 满足如下条件: 对于 $\forall x\in X$, 有 $\mu_A(x),\nu_A(x)\geqslant 0$ 且 $0\leqslant\mu_A(x)+\nu_A(x)\leqslant 1$. 另外, 对于 $\forall x\in X$, $\pi_A(x)=1-\mu_A(x)-\nu_A(x)$ 为要素 x 的犹豫度.

定义 2[14] 令 $a_j=\langle\mu_{a_j},\nu_{a_j}\rangle\,(j=1,2,\cdots,n)$ 为一个由 n 个直觉模糊数构成的数组, 若

$$\mathrm{IFWA}_w(a_1,a_2,\cdots,a_n)=\sum_{j=1}^n w_ja_j=$$

$$\Big(1-\prod_{j=1}^n(1-\mu_{a_j})^{w_j},\prod_{j=1}^n\mu_{a_j}^{w_j}\Big), \tag{2}$$

则称 IFWA_w 为直觉模糊加权平均算子 (IFWA). 其中: $w=(w_1,w_2,\cdots,w_n)^{\mathrm T}$ 为 $a_j=\langle\mu_{a_j},v_{a_j}\rangle\,(j=1,2,\cdots,n)$ 的权重矢量, $w_j\in[0,1]\,(j=1,2,\cdots,n)$, $\sum_{j=1}^n w_j=1$. 特别指出的是, 当 $w=\Big(\dfrac1n,\dfrac1n,\cdots,\dfrac1n\Big)^{\mathrm T}$ 时, IFWA 退化成直觉模糊平均算子 (IFA), 即

$$\mathrm{IFA}(a_1,a_2,\cdots,a_n)=\frac1n\sum_{j=1}^n a_j=$$

$$\Big(1-\prod_{j=1}^n(1-\mu_{a_j})^{\frac1n},\prod_{j=1}^n\mu_{a_j}^{\frac1n}\Big). \tag{3}$$

定义 3[15] 设 A_1 和 A_2 为两个由 n 个要素构成的直觉模糊数组, $X=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$, A_1 和 A_2 之间的相似度为

$$\vartheta(A_1,A_2)=1-\Big[\frac1n\sum_{j=1}^n|\varphi(a_{1j})-\varphi(a_{2j})|^\theta\Big]^{\frac1\theta}. \tag{4}$$

其中: $\varphi(a_j)=\dfrac{\mu_{a_j}+1-v_{a_j}}{2}$, $\theta\geqslant 1$ 且为整数.

定理 1 $\vartheta(A_1,A_2)$ 满足以下性质:

1) $0\leqslant\vartheta(A_1,A_2)\leqslant 1$;

2) $\vartheta(A_1,A_2)=\vartheta(A_2,A_1)$;

3) $\vartheta(A_1,A_2)=1$, if $A_1=A_2$.

易证性质 1) $\sim$ 性质 3) 成立.

由于式 (4) 未考虑直觉模糊数的犹豫度水平, 在进行相似度测度时可能会出现一些误差. 如: 设 A_1 和 A_2 为两个由 n 个要素构成的直觉模糊数组, $X=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$, A_1 和 A_2 中 n 个要素值均相等. 其中: $a_{1j}=\langle 0.2,0.4\rangle$, $a_{2j}=\langle 0.3,0.5\rangle$. 由式 (4) 可得

$$\varphi(a_{1j})=\frac{0.2+1-0.4}{2}=0.4,$$

$$\varphi(a_{2j})=\frac{0.3+1-0.5}{2}=0.4.$$

由此可得 $\vartheta(A_1,A_2)=0$, 这与实际情况显然不符.

在实际决策过程中, 专家对决策对象的评价值通常以直觉模糊数 $a=\langle\mu_a,v_a\rangle$ 的形式来表示, 其中隶属度 μ_a 和非隶属度 v_a 分别代表专家的满意度和非满意度. 直觉模糊数 a 的犹豫度为 $\pi_a=1-\mu_a-v_a$, 犹豫度越大, 说明专家对决策对象满意度和非满意度的变化范围越大. 设专家给出的评价值为 $\langle\mu_a,v_a\rangle$, 则专家满意度的取值范围为 $\mu_a\in[\mu_a,\mu_a+\pi_a]$, 专家非满意度的取值范围为 $v_a\in[v_a,v_a+\pi_a]$. 若将犹豫度引入到式 (4) 中, 隶属度和非隶属度则以区间数的形式来表示, 同时, $\varphi(a_j)$ 的值也表示为区间数, 根据 $\varphi(a_j)$ 数值的变化区间, 对式 (4) 进行改进, 可得以下定义.

定义 4 设 A_1 和 A_2 为两个由 n 个要素构成的直觉模糊数组, $X=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$, A_1 和 A_2 之间的相似度为

$$\rho(A_1,A_2)=$$

$$1-\Big[\frac1n\sum_{j=1}^n\frac{(|\delta(a_{1j})-\delta(a_{2j})|^\theta+|\phi(a_{1j})-\phi(a_{2j})|^\theta)}{2}\Big]^{\frac1\theta}. \tag{5}$$

其中: $\theta \geqslant 1$ 且为整数, 而

$$\delta(a_j) = \frac{\mu_{a_j}+1-v_{a_j}-\pi_{a_j}}{2} = \mu_{a_j},$$

$$\phi(a_j) = \frac{\mu_{a_j}+\pi_{a_j}+1-v_{a_j}}{2} = 1-v_{a_j}.$$

定理 2　$\rho(A_1, A_2)$ 满足以下性质:

1) $0 \leqslant \rho(A_1, A_2) \leqslant 1$;

2) $\rho(A_1, A_2) = \rho(A_2, A_1)$;

3) $\rho(A_1, A_2) = 1$, if $A_1 = A_2$.

易证性质 1) ～ 性质 3) 成立.

下面对式 (5) 的相似度测度有效性进行验证: $\delta(a_{1j}) = 0.2$, $\delta(a_{2j}) = 0.3$, 由此可得 $|\delta(a_{1j}) - \delta(a_{2j})| = 0.1$. 已知 $\phi(a_{1j}) = 0.6$, $\phi(a_{2j}) = 0.5$, 因此有 $|\phi(a_{1j}) - \phi(a_{2j})| = 0.1$, 进而可知 $\rho(A_1, A_2) \neq 0$. 因此可以得出以下结论: 同式 (4) 相比, 式 (5) 的相似度测度结果更符合实际.

2　方法原理

2.1　问题描述

设某应急决策问题的备选方案集合 $Z = \{z_1, z_2, \cdots, z_P\}$; 应急部门集合 $C = \{c_1, c_2, \cdots, c_Q\}$; 部门 q 的指标集合 $G_q = \{g_1^q, g_2^q, \cdots, g_{N_q}^q\}$, 各部门的指标数值为定量化数据, 以精确数或区间数形式表示. 对于备选方案 l, 部门 q 中指标 j 的数值为 a_{qj}^l, $q = 1, 2, \cdots, Q$, $l = 1, 2, \cdots, P$, $j = 1, 2, \cdots, N_q$. 对于备选方案 l, 部门 q 的指标数值形成一个矢量 $A_q^l = (a_{q1}^l, a_{q2}^l, \cdots, a_{qN_q}^l)$. 为了获得部门的指标权重, 各部门组织相关专家对该部门中各个指标的重要程度进行评价, 各位专家的评价值以直觉模糊数的形式给出, 指标重要程度与直觉模糊数之间的对应关系如表 1 所示.

表 1　指标重要程度与直觉模糊数之间的对应关系

重要程度	直觉模糊数	重要程度	直觉模糊数
极好/极高	$\langle 1, 0\rangle$	一般/中等	$\langle 0.5, 0.4\rangle$
特别好/特别高	$\langle 0.9, 0.1\rangle$	一般差/一般低	$\langle 0.4, 0.5\rangle$
很好/很高	$\langle 0.8, 0.1\rangle$	差/低	$\langle 0.25, 0.6\rangle$
好/高	$\langle 0.7, 0.2\rangle$	很差/很低	$\langle 0.1, 0.75\rangle$
一般好/一般高	$\langle 0.6, 0.3\rangle$	特别差/特别低	$\langle 0.1, 0.9\rangle$

设部门 q 中参与决策活动的专家集合 $E_q = \{e_1^q, e_2^q, \cdots, e_{M_q}^q\}$, 部门 q 中第 i 个决策专家针对该部门的指标 j 给出的评价值为 v_{ij}^q, $i = 1, 2, \cdots, M_q$. 部门 q 中第 i 个决策专家对该部门中所有指标给出的评价值形成偏好矢量为 $V_i^q = (v_{i1}^q, v_{i2}^q, \cdots, v_{iN_q}^q)$.

2.2　群体偏好集结

部门 q 中 M_q 个专家的偏好矢量 V_i^q 构成矢量群体 Ω_q, 以式 (5) 作为相聚度公式, 设定聚类阈值 λ_q 对 Ω_q 中的矢量聚类[16]. 通过聚类, 群体 Ω_q 中的专家偏好矢量形成若干个聚集. 设 Ω_q 中专家偏好信息形成的聚集个数为 $K_q (1 \leqslant K_q \leqslant M_q)$. 其中第 k ($k = 1, 2, \cdots, K_q$) 个聚集 C_q^k 中的专家数量为 n_k^q, $\sum\limits_{k=1, k\in\Omega_q}^{K_q} n_k^q = M_q$. 利用式 (3) 可得聚集 C_q^k 的偏好矢量为

$$G_k^q = (g_{k1}^q, g_{k2}^q, \cdots, g_{kN_q}^q) = \Big(\frac{1}{n_k^q}\sum_{i=1, i\in C_q^k}^{n_k^q} v_{i1}^q, \frac{1}{n_k^q}\sum_{i=1, i\in C_q^k}^{n_k^q} v_{i2}^q, \cdots, \frac{1}{n_k^q}\sum_{i=1, i\in C_q^k}^{n_k^q} v_{iN_q}^q\Big). \tag{6}$$

设群体 Ω_q 中所有聚集的权重信息为 $\omega_q = (\omega_1^q, \omega_2^q, \cdots, \omega_{K_q}^q)^{\mathrm{T}}$, 聚集 C_q^k 与其他聚集之间的偏好一致性为

$$\rho(\omega_k^q G_k^q, \omega_h^q G_h^q) = \sum_{h=1, h\neq k, h, k\in\Omega_q}^{K_q} \Big\{1- \frac{1}{N_q}\sum_{j=1, h, k\in\Omega_q}^{N_q} \Big[\frac{|\omega_k^q\delta(g_{kj}^q) - \omega_h^q\delta(g_{hj}^q)|^\theta}{2} + \frac{|\omega_k^q\phi(g_{kj}^q) - \omega_h^q\phi(g_{hj}^q)|^\theta}{2}\Big]^{\frac{1}{\theta}}\Big\}, \tag{7}$$

其中 $\theta \geqslant 1$ 且为整数.

以群体 Ω_q 中所有聚集的偏好一致性最大化为目标构建优化模型, 并对聚集权重进行求解, 即

$$\max F(\omega_k^q) = \frac{1}{K_q}\sum_{k=1, k\in\Omega_q}^{K_q} \rho(\omega_k^q G_k^q, \omega_h^q G_h^q); \tag{8}$$

$$\text{s.t.}\quad \sum_{k=1}^{K_q} \omega_k^q = 1,\ 0 < \omega_k^q < 1.$$

定理 3　模型 (8) 存在最优解.

证明　在 $0 < \omega_k^q < 1$ 的约束下, 存在 ω_k^q 值使得 $\sum\limits_{j=1}^{n} \omega_k^q = 1$ 成立, 故聚集权重的可行域为非空集. 另外, $f(\omega_k^q) \in [0, 1]$, 故 $f(\omega_k^q)$ 为有界连续函数, 聚集权重的约束条件为有界闭集, 因此模型 (8) 必定有最优解. □

利用模型 (8) 得到聚集权重 ω_k^q, 利用聚集权重 ω_k^q 对群体 Ω_q 中的聚集偏好进行集结, 得到群体 Ω_q 的偏好矢量为

$$G^q = (g_1^q, g_2^q, \cdots, g_{N_q}^q) = \Big(\sum_{k=1, k\in\Omega_q}^{K_q} \omega_k^q g_{k1}^q, \sum_{k=1, k\in\Omega_q}^{K_q} \omega_k^q g_{k2}^q, \cdots, \sum_{k=1, k\in\Omega_q}^{K_q} \omega_k^q g_{kN_q}^q\Big). \tag{9}$$

2.3　部门中各指标权重的确定

将区间数形式的矩阵 $A = [a_{ij}]_{m\times n}$ 利用比重变换法[17]规范成 $B = [b_{ij}]_{m\times n}$. 其中: $a_{ij} = [a_{ij}^L, a_{ij}^U]$, $b_{ij} = [b_{ij}^L, b_{ij}^U]$. 具体规范化的计算式如下: 当 a_{ij} 为效

益型指标时, 有

$$b_{ij}^L = \frac{a_{ij}^L}{\sum\limits_{i=1}^m a_{ij}^U},\ b_{ij}^U = \frac{a_{ij}^U}{\sum\limits_{i=1}^m a_{ij}^L}; \tag{10}$$

当 a_{ij} 为成本型指标时, 有

$$b_{ij}^L = \frac{1/a_{ij}^U}{\sum\limits_{i=1}^m 1/a_{ij}^L},\ b_{ij}^U = \frac{1/a_{ij}^L}{\sum\limits_{i=1}^m 1/a_{ij}^U}. \tag{11}$$

根据直觉模糊数与区间数的转化关系[18], 确定各部门指标权重的取值范围. 例如: 部门 q 中指标 j 的群体偏好值为 $g_j^q = \langle \mu_{g_j^q}, \gamma_{g_j^q} \rangle$, 先将其转化为区间数 $y_j^q = [y_j^{qL}, y_j^{qU}]$, 其中 $y_j^{qL} = \mu_{g_j^q}$, $y_j^{qU} = 1 - \gamma_{g_j^q} = \mu_{g_j^q} + \pi_{g_j^q}$; 再对 y_j^q 进行规范化处理, 得到部门 q 中指标 j 的权重取值范围, 即

$$w_j^q = [w_j^{qL}, w_j^{qU}] = \Big[\frac{y_j^{qL}}{\sum\limits_{j=1}^{N_q} y_j^{qU}}, \frac{y_j^{qU}}{\sum\limits_{j=1}^{N_q} y_j^{qL}}\Big]. \tag{12}$$

部门指标数据的表达形式主要分为精确数和区间数两种, 在进行决策前, 需要对各部门指标数据的表达方式进行统一化处理, 即: 将表示为精确数的指标数据改写成上限和下限相等的区间数形式. 为了消除量纲对决策的影响, 对区间数形式的指标数据进行规范化处理. 规范化后的指标数据矢量为 $\widetilde{A}_q^l = (\widetilde{a}_{q1}^l, \widetilde{a}_{q2}^l, \cdots, \widetilde{a}_{qN_q}^l)$. 其中: $\widetilde{a}_{qj}^l = [\widetilde{a}_{qj}^{lL}, \widetilde{a}_{qj}^{lU}]$, $0 \leqslant \widetilde{a}_{qj}^{lL} \leqslant \widetilde{a}_{qj}^{lU} \leqslant 1$.

设部门 q 中的指标权重为 $w_q = (w_1^q, w_2^q, \cdots, w_{N_q}^q)^{\mathrm{T}}$, 部门 q 中备选方案 l 与其他方案之间的指标数据区分度为

$$\theta_q^l(w_j^q) = \frac{1}{P-1} \sum_{f=1, f\neq l}^{P-1} D(\widetilde{A}_q^l, \widetilde{A}_q^f). \tag{13}$$

其中

$$D(\widetilde{A}_q^l, \widetilde{A}_q^f) = \sum_{j=1}^{N_q} w_j^q D(\widetilde{a}_{qj}^l, \widetilde{a}_{qj}^f),$$

$$D(\widetilde{a}_{qj}^l, \widetilde{a}_{qj}^f) = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\widetilde{a}_{qj}^{lL} - \widetilde{a}_{qj}^{fL})^2 + (\widetilde{a}_{qj}^{lU} - \widetilde{a}_{qj}^{fU})^2}.$$

根据文献 [19] 的"整体差异驱动"思想对各部门指标进行赋权. 该思想的赋权原理是从整体上尽可能地体现出各个方案之间的差异性, 使之尽可能地拉开档次, 以便进行排序. 因此, 以同一部门下所有方案的指标数据区分度最大化为目标建立优化模型, 并对部门指标权重进行求解, 即

$$\max Y(w_j^q) = \frac{1}{P} \sum_{l=1}^P \theta_q^l(w_j^q); \tag{14}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^{N_q} w_j^q = 1,\ w_j^{qL} < w_j^q < w_j^{qU}.$$

定理 4 模型 (14) 存在最优解.

证明过程同定理 3.

2.4 部门权重的确定

在应急管理过程中, 各个应急部门之间相互协作相互配合, 形成一个有机整体, 共同完成应急任务. 由于应急部门之间联系非常紧密, 决策者很难将各个应急部门分割开来对其个体的重要性进行评估. 在缺少决策者主观赋权意见的情况下, 可根据各部门的指标数据, 利用客观赋权法来对部门权重进行测算. 根据应急部门的特点, 将应急部门的赋权目标设置如下: 一是根据"整体差异驱动"思想, 使得不同方案的指标综合信息之间尽可能地拉开档次; 二是最大限度地减小部门权重之间的差异程度, 使赋权结果更符合实际情况. 另外, 在赋权过程中, 指标数据的模糊程度也是在赋权过程中必须考虑的重要因素. 基于上述赋权目标, 将多种客观赋权法进行组合, 提出一种部门权重组合赋权方法. 具体过程如下.

Step 1 基于指标数据的模糊度水平确定部门权重的取值区间.

设区间数 $a = [a^L, a^U]$ 中的数值均匀分布, 则 a 的中点为 $\overline{a} = (a^L + a^U)/2$, 区间数半径为 $r_a = (a^U - a^L)/2$. 其中: $\overline{a} \in [0, 1]$, $r_a \in [0, 0.5]$[20]. 利用区间数半径对指标数据的模糊度进行测度. 例如, 属性指标 $\widetilde{a}_{qj}^l$ 的模糊度为 $r_{qj}^l = (\widetilde{a}_{qj}^{lU} - \widetilde{a}_{qj}^{lL})/2$. 部门 q 中, 方案 l 的指标综合模糊度为

$$r_q^l = \sum_{j=1}^{N_q} w_j^q r_{qj}^l. \tag{15}$$

部门 q 中有 p 个方案, 故部门 q 中方案指标综合数据的模糊度变化区间为

$$r_q \in [r_q^L, r_q^U] = [\min_{l=1,2,\cdots,P} r_q^l, \max_{l=1,2,\cdots,P} r_q^l].$$

设部门权重为 $\eta = (\eta_1, \eta_2, \cdots, \eta_Q)^{\mathrm{T}}$, 由于部门指标综合数据的模糊度水平反映了各个部门的指标数据不确定程度, 根据各部门指标综合数据的模糊度水平, 结合区间数半径的基本性质确定部门的权重区间, 即

$$\eta_q \in [\eta_q^L, \eta_q^U] = \Big[\frac{0.5 - r_q^U}{\sum\limits_{q=1}^Q (0.5 - r_q^L)}, \frac{0.5 - r_q^L}{\sum\limits_{q=1}^Q (0.5 - r_q^U)}\Big]. \tag{16}$$

Step 2 以方案指标综合数据区分度最大化为目标确定部门权重.

设部门权重为 $\eta^1 = (\eta_1^1, \eta_2^1, \cdots, \eta_Q^1)^{\mathrm{T}}$, 方案 l 的部门指标综合数据与其他方案之间的区分度为

$$\delta^l(\eta_q^1) = \frac{1}{P-1} \sum_{f=1, f\neq l}^{P-1} \Big[\sum_{q=1}^Q \eta_q^1 D(\widetilde{A}_q^l, \widetilde{A}_q^f)\Big]. \tag{17}$$

基于“整体差异驱动”思想, 以所有方案的指标综合数据区分度最大为目标构建优化模型, 并对部门权重进行求解, 即

$$\max D(\eta_q^1)=\frac{1}{P}\sum_{l=1}^{P}\delta^l(\eta_q^1);\qquad(18)$$

$$\text{s.t.}\quad \sum_{q=1}^{Q}\eta_q^1=1,\ \eta_q^L<\eta_q^1<\eta_q^U.$$

定理 5　模型 (18) 存在最优解.

证明过程同定理 3.

Step 3　根据极大熵原理确定部门权重.

在应急管理过程中, 各个部门的应急决策信息对整个应急活动的实施效果都有重要的影响. 在部门权重未知的情况下, 若部门之间的权重水平相差过大, 则与实际情况不符, 决策结果的真实性也会受到影响. 因此, 在对部门进行赋权时, 必须考虑部门权重之间的差异化水平.

设部门权重为 $\eta^2=(\eta_1^2,\eta_2^2,\cdots,\eta_Q^2)^{\mathrm{T}}$, 基于极大熵原理对部门权重进行求解, 即

$$\max H(\eta_q^2)=-\sum_{q=1}^{Q}\eta_q^2\ln\eta_q^2;\qquad(19)$$

$$\text{s.t.}\quad \sum_{q=1}^{Q}\eta_q^2=1,\ \eta_q^L<\eta_q^2<\eta_q^U.$$

由极大熵原理可知, $H(\eta_q^2)$ 越大, 部门权重 η_q^2 之间的差异度越小.

定理 6　模型 (19) 存在最优解.

证明　构建 $H(\eta_q^2)$ 关于 η_q^2 的 Hesse 矩阵, 有

$$\nabla^2_{\eta_q^2}H(\eta_q^2)=-\mathrm{diag}[1,1,\cdots,1].$$

故 $\nabla^2_{\eta_q^2}H(\eta_q^2)$ 为负定矩阵, 在 $\eta_q^2\in[\eta_q^L,\eta_q^U]$ 的约束下, $\nabla^2_{\eta_q^2}H(\eta_q^2)$ 存在全局极大点和全局极值, 因此模型 (19) 存在唯一最优解. □

Step 4　权重协调系数的确定.

利用权重协调系数对 η_q^1 和 η_q^2 两种部门权重信息进行集结, 即

$$\eta_q^*=\alpha_1\eta_q^1+\alpha_2\eta_q^2.\qquad(20)$$

其中: η_q^* 为部门综合权重; η_q^1 为模型 (18) 得到的部门权重; η_q^2 为模型 (19) 得到的部门权重; α_1 和 α_2 为权重协调系数, $0<\alpha_1,\alpha_2<1,\alpha_1+\alpha_2=1$. 权重协调系数根据部门权重计算结果与权重取值区间中点的相似度进行设定. 部门权重与权重取值区间中点的相似度为

$$S(\eta^\kappa,\overline{\eta})=1-\max_{q=1,2,\cdots,Q}\left|\eta_q^\kappa-\overline{\eta}_q\right|.\qquad(21)$$

其中: $\kappa=1,2,\ \overline{\eta}_q=(\eta_q^L+\eta_q^U)/2$.

权重协调系数为

$$\alpha_\kappa=S(\eta^\kappa,\overline{\eta})\Big/\sum_{\kappa=1}^{2}S(\eta^\kappa,\overline{\eta}),\ \kappa=1,2.\qquad(22)$$

综上所述, 本文方法的具体步骤如下.

Step 1: 对各部门指标信息的表达方式进行统一化处理, 即将指标数据统一转化成区间数形式, 并对各部门的指标数据进行标准化处理.

Step 2: 各个部门专家以直觉模糊数的形式给出各个指标的评价值, 同一部门中所有专家给出的指标评价值形成专家偏好矢量 V_i^q.

Step 3: 以式 (5) 作为相聚度测度公式对各集合的专家偏好矢量进行聚类.

Step 4: 利用模型 (8) 确定各个集合的聚集权重, 得到各部门群体偏好 G_q.

Step 5: 利用式 (12) 得到部门 q 中指标 j 的权重取值范围 $[w_j^{qL},w_j^{qU}]$, 利用模型 (14) 确定各部门的指标权重 w_j^q.

Step 6: 利用式 (15) 和 (16) 确定部门权重的取值区间 $[\eta_q^L,\eta_q^U]$, 通过模型 (18) 和 (19) 得到两种不同类型的部门权重 η_q^1 和 η_q^2, 并利用式 (20) ~ (22) 确定最终的部门综合权重 η_q^*.

Step 7: 利用指标权重对方案的部门指标数据进行集结, 得到各个方案的部门指标综合数据

$$\widetilde{b}_q^l=[\widetilde{b}_q^{lL},\widetilde{b}_q^{lU}]=\Big[\sum_{j=1}^{N_q}w_j^q\widetilde{a}_{qj}^{lL},\sum_{j=1}^{N_q}w_j^q\widetilde{a}_{qj}^{lU}\Big].$$

对于方案 l, 所有部门的指标综合数据形成矢量 $\widetilde{B}_l=(\widetilde{b}_1^l,\widetilde{b}_2^l,\cdots,\widetilde{b}_Q^l)$. 备选方案 l 的余弦投影值

$$\Pr j_{\widetilde{B}}*\widetilde{B}_l=|\widetilde{B}_l|_\eta\frac{\displaystyle\sum_{q=1}^{Q}(\eta_q)^2(\widetilde{b}_q^{lL}\cdot\widetilde{b}_q^{L*}+\widetilde{b}_q^{lU}\cdot\widetilde{b}_q^{LU*})}{|\widetilde{B}_l|_\eta|\widetilde{B}^*|_\eta},\qquad(23)$$

根据各个方案的投影值对方案进行排序[21]. 其中

$$|\widetilde{B}_l|_\eta=\sqrt{\sum_{q=1}^{Q}(\eta_q|\widetilde{b}_q^l|)^2},$$

$$|\widetilde{B}^*|_\eta=\sqrt{\sum_{q=1}^{Q}(\eta_q|\widetilde{b}_q^*|)^2},$$

$$|\widetilde{b}_q^l|=\sqrt{(\widetilde{b}_q^{lL})^2+(\widetilde{b}_q^{lU})^2},$$

$$|\widetilde{b}_q^*|=\sqrt{(\widetilde{b}_q^{L*})^2+(\widetilde{b}_q^{U*})^2},$$

$$\widetilde{b}_q^{L*}=\max\{\widetilde{b}_q^{lL}\},\ \widetilde{b}_q^{U*}=\max\{\widetilde{b}_q^{lU}\}.$$

表 2 各部门指标原始数据

Z	c_1			c_2			c_3		
	g_1^1	g_2^1	g_3^1	g_1^2	g_2^2	g_3^2	g_1^3	g_2^3	g_3^3
z_1	3.81	[18, 30]	[12.74, 15.91]	1	3	[10.11, 12.24]	[0.68, 1.33]	85	83
z_2	4.76	[23, 31]	[11.25, 12.97]	2	2	[9.62, 10.19]	[0.74, 0.97]	91	91
z_3	6.87	[8, 15]	[14.54, 16.27]	2	2	[8.74, 10.64]	[0.54, 0.87]	78	85

表 3 标准化后各部门的指标数据

Z	c_1			c_2			c_3		
	g_1^1	g_2^1	g_3^1	g_1^2	g_2^2	g_3^2	g_1^3	g_2^3	g_3^3
z_1	[0.424 6, 0.424 6]	[0.148 8, 0.420 1]	[0.266 2, 0.389 7]	[0.500 0, 0.500 0]	[0.250 0, 0.250 0]	[0.257 5, 0.361 2]	[0.160 9, 0.501 5]	[0.334 6, 0.346 6]	[0.320 5, 0.320 5]
z_2	[0.339 9, 0.339 9]	[0.144 0, 0.328 7]	[0.326 5, 0.441 3]	[0.250 0, 0.250 0]	[0.375 0, 0.375 0]	[0.309 3, 0.379 6]	[0.220 6, 0.460 9]	[0.358 3, 0.358 3]	[0.351 4, 0.351 4]
z_3	[0.235 5, 0.235 5]	[0.297 6, 0.945 1]	[0.260 3, 0.341 5]	[0.250 0, 0.250 0]	[0.375 0, 0.375 0]	[0.296 2, 0.417 9]	[0.245 9, 0.631 6]	[0.307 1, 0.307 1]	[0.328 2, 0.328 2]

3 算例分析

某市高速公路沿线地区发生重大森林火灾, 消防部门 c_1、交管部门 c_2 和电信部门 c_3 三个部门联合参与救援活动. 通过对火情分析, 相关部门制定了 3 种备选方案进行应对, 分别为: z_1 为完全封闭公路, 引入大型消防机械进行灭火, 不疏散沿线村落居民; z_2 为封闭公路部分车道, 引入小型消防机械结合人工方式进行灭火, 疏散沿线村落居民; z_3 为封闭公路部分车道, 引入小型消防设备进行灭火, 疏散沿线村落村民. 消防部门的相关指标包括: 过火面积 (平方公里) g_1^1、复燃率 (%) g_2^1、灭火操作时长 (小时) g_3^1. 交管部门的相关指标包括: 封闭车道条数 (条) g_1^2、封闭出入口个数 (个) g_2^2、管制道路长度 (公里) g_3^2. 电信部门的相关指标包括: 应急通讯延时水平 (s) g_1^3、火场应急通讯网络覆盖率 (%) g_2^3、应急部门间信息共享水平 (定性指标) g_3^3. 每种备选方案的部门原始的指标数据如表 2 所示.

Step 1: 将指标原始数据表达方式统一成区间数的形式, 并根据指标类型 (效益型指标或成本型指标) 将区间数进行标准化处理. 其中 g_2^3、g_3^3 为效益型指标, 其他均为成本型指标. 标准化后的指标数据如表 3 所示.

Step 2: 为了获得合理的指标权重, 3 个部门各自选出 12 名专家组成部门应急专家群体, 利用直觉模糊数分别对相应部门的指标重要程度作出评价, 如表 4 所示.

Step 3: 将式 (5) 作为相聚度模型, 对群体 Ω_q 的专家偏好矢量进行聚类. 为了与式 (13) 和 (14) 在幂次上保持一致, 式 (5) 中的 $\theta = 2$, 群体 Ω_1、Ω_2 和 Ω_3 的聚类阈值分别设定为: $\lambda^1 = 0.85$, $\lambda^2 = 0.84$, $\lambda^3 = 0.85$, 聚类结果如表 5 所示.

表 4 各部门专家直觉模糊数形式的指标评价值

C	No.	g_1^1	g_2^1	g_3^1
c_1	V_1^1	$\langle 0.9, 0.1\rangle$	$\langle 0.7, 0.2\rangle$	$\langle 0.7, 0.2\rangle$
	V_2^1	$\langle 0.9, 0.1\rangle$	$\langle 0.7, 0.2\rangle$	$\langle 0.7, 0.2\rangle$
	V_3^1	$\langle 0.9, 0.1\rangle$	$\langle 0.7, 0.2\rangle$	$\langle 0.7, 0.2\rangle$
	V_4^1	$\langle 0.4, 0.5\rangle$	$\langle 0.1, 0.75\rangle$	$\langle 0.25, 0.6\rangle$
	V_5^1	$\langle 0.4, 0.5\rangle$	$\langle 0.1, 0.75\rangle$	$\langle 0.25, 0.6\rangle$
	V_6^1	$\langle 0.1, 0.9\rangle$	$\langle 0.25, 0.6\rangle$	$\langle 0.1, 0.75\rangle$
	V_7^1	$\langle 0.4, 0.5\rangle$	$\langle 0.4, 0.5\rangle$	$\langle 0.4, 0.5\rangle$
	V_8^1	$\langle 0.8, 0.1\rangle$	$\langle 0.6, 0.3\rangle$	$\langle 0.6, 0.3\rangle$
	V_9^1	$\langle 0.25, 0.6\rangle$	$\langle 0.25, 0.6\rangle$	$\langle 0.25, 0.6\rangle$
	V_{10}^1	$\langle 0.1, 0.9\rangle$	$\langle 0.1, 0.75\rangle$	$\langle 0.1, 0.75\rangle$
	V_{11}^1	$\langle 0.8, 0.1\rangle$	$\langle 0.6, 0.3\rangle$	$\langle 0.6, 0.3\rangle$
	V_{12}^1	$\langle 0.4, 0.5\rangle$	$\langle 0.1, 0.75\rangle$	$\langle 0.25, 0.6\rangle$
C	No.	g_1^2	g_2^2	g_3^2
c_2	V_1^2	$\langle 0.8, 0.1\rangle$	$\langle 0.8, 0.1\rangle$	$\langle 0.8, 0.1\rangle$
	V_2^2	$\langle 0.8, 0.1\rangle$	$\langle 0.8, 0.1\rangle$	$\langle 0.8, 0.1\rangle$
	V_3^2	$\langle 0.7, 0.2\rangle$	$\langle 0.6, 0.3\rangle$	$\langle 0.1, 0.75\rangle$
	V_4^2	$\langle 0.7, 0.2\rangle$	$\langle 0.6, 0.3\rangle$	$\langle 0.1, 0.75\rangle$
	V_5^2	$\langle 0.4, 0.5\rangle$	$\langle 0.25, 0.6\rangle$	$\langle 0.4, 0.5\rangle$
	V_6^2	$\langle 0.4, 0.5\rangle$	$\langle 0.25, 0.6\rangle$	$\langle 0.4, 0.5\rangle$
	V_7^2	$\langle 0.6, 0.3\rangle$	$\langle 0.6, 0.3\rangle$	$\langle 0.6, 0.3\rangle$
	V_8^2	$\langle 0.1, 0.9\rangle$	$\langle 0.6, 0.3\rangle$	$\langle 0.1, 0.9\rangle$
	V_9^2	$\langle 0.7, 0.2\rangle$	$\langle 0.25, 0.6\rangle$	$\langle 0.4, 0.5\rangle$
	V_{10}^2	$\langle 0.1, 0.9\rangle$	$\langle 0.6, 0.3\rangle$	$\langle 0.1, 0.9\rangle$
	V_{11}^2	$\langle 0.25, 0.6\rangle$	$\langle 0.4, 0.5\rangle$	$\langle 0.7, 0.2\rangle$
	V_{12}^2	$\langle 0.1, 0.9\rangle$	$\langle 0.6, 0.3\rangle$	$\langle 0.1, 0.9\rangle$
C	No.	g_1^3	g_2^3	g_3^3
c_3	V_1^3	$\langle 0.1, 0\rangle$	$\langle 0.4, 0.5\rangle$	$\langle 0.4, 0.5\rangle$
	V_2^3	$\langle 1, 0\rangle$	$\langle 0.4, 0.5\rangle$	$\langle 0.4, 0.5\rangle$
	V_3^3	$\langle 0.25, 0.6\rangle$	$\langle 0.6, 0.3\rangle$	$\langle 0.25, 0.6\rangle$
	V_4^3	$\langle 0.25, 0.6\rangle$	$\langle 0.25, 0.6\rangle$	$\langle 0.25, 0.6\rangle$
	V_5^3	$\langle 0.7, 0.2\rangle$	$\langle 0.25, 0.6\rangle$	$\langle 0.6, 0.3\rangle$
	V_6^3	$\langle 1, 0\rangle$	$\langle 0.7, 0.2\rangle$	$\langle 0.7, 0.2\rangle$
	V_7^3	$\langle 0.6, 0.3\rangle$	$\langle 0.6, 0.3\rangle$	$\langle 0.1, 0.75\rangle$
	V_8^3	$\langle 0.6, 0.3\rangle$	$\langle 0.6, 0.3\rangle$	$\langle 0.1, 0.75\rangle$
	V_9^3	$\langle 0.5, 0.4\rangle$	$\langle 0.4, 0.5\rangle$	$\langle 0.5, 0.4\rangle$
	V_{10}^3	$\langle 0.5, 0.4\rangle$	$\langle 0.4, 0.5\rangle$	$\langle 0.1, 0.75\rangle$
	V_{11}^3	$\langle 0.8, 0.1\rangle$	$\langle 0.8, 0.1\rangle$	$\langle 0.8, 0.1\rangle$
	V_{12}^3	$\langle 1, 0\rangle$	$\langle 0.1, 0.75\rangle$	$\langle 0.1, 0.75\rangle$

表 5 各部门专家直觉模糊数形式的指标评价值

集合	聚集	聚集中的专家偏好	聚集偏好
Ω_1	C_1^1	$V_1^1, V_2^1, V_3^1, V_8^1, V_{11}^1$	$\langle 0.8680, 0.1000\rangle\langle 0.6634, 0.2352\rangle\langle 0.6634, 0.2352\rangle$
	C_2^1	$V_4^1, V_5^1, V_7^1, V_9^1, V_{10}^1, V_{12}^1$	$\langle 0.3337, 0.5685\rangle\langle 0.1840, 0.6754\rangle\langle 0.2551, 0.6041\rangle$
	C_3^1	V_6^1	$\langle 0.1000, 0.9000\rangle\langle 0.2500, 0.6000\rangle\langle 0.1000, 0.7500\rangle$
Ω_2	C_1^2	V_1^2, V_2^2, V_7^2	$\langle 0.7480, 0.1442\rangle\langle 0.7480, 0.1442\rangle\langle 0.7480, 0.1442\rangle$
	C_2^2	V_3^2, V_4^2	$\langle 0.7000, 0.2000\rangle\langle 0.6000, 0.3000\rangle\langle 0.1000, 0.7500\rangle$
	C_3^2	$V_5^2, V_6^2, V_9^2, V_{11}^2$	$\langle 0.4665, 0.4162\rangle\langle 0.2907, 0.5733\rangle\langle 0.4955, 0.3976\rangle$
	C_4^2	$V_8^2, V_{10}^2, V_{12}^2$	$\langle 0.1000, 0.9000\rangle\langle 0.6000, 0.3000\rangle\langle 0.1000, 0.9000\rangle$
Ω_3	C_1^3	$V_1^3, V_2^3, V_3^3, V_4^3, V_5^3, V_7^3, V_8^3, V_9^3, V_{10}^3$	$\langle 1.0000, 0.0000\rangle\langle 0.4492, 0.4392\rangle\langle 0.3239, 0.5493\rangle$
	C_2^3	V_6^3, V_{11}^3	$\langle 1.0000, 0.0000\rangle\langle 0.7551, 0.1414\rangle\langle 0.7551, 0.1414\rangle$
	C_3^3	V_{12}^3	$\langle 1.0000, 0.0000\rangle\langle 0.1000, 0.7500\rangle\langle 0.1000, 0.7500\rangle$

Step 4: 利用式 (8) 对各个部门的聚集权重进行求解, 可得

$$\omega_1 = (0.15, 0.35, 0.50)^{\mathrm{T}},$$
$$\omega_2 = (0.17, 0.23, 0.27, 0.33)^{\mathrm{T}},$$
$$\omega_3 = (0.35, 0.26, 0.39)^{\mathrm{T}}.$$

利用聚集权重集结各个部门的聚集偏好, 得到部门群体偏好为

$$G_1 = (\langle 0.3926, 0.5512\rangle\langle 0.3150, 0.5434\rangle\langle 0.2738, 0.5843\rangle),$$
$$G_2 = (\langle 0.5111, 0.3788\rangle\langle 0.5684, 0.3155\rangle\langle 0.3800, 0.5071\rangle),$$
$$G_3 = (\langle 1.0000, 0.0000\rangle\langle 0.4597, 0.4030\rangle\langle 0.4195, 0.4358\rangle).$$

Step 5: 利用各个部门的指标群体偏好和式 (12) 确定各部门指标的取值范围为

$$w_1^1 \in [0.30, 0.46],\ w_2^1 \in [0.25, 0.47],$$
$$w_3^1 \in [0.21, 0.42],\ w_1^2 \in [0.28, 0.43],$$
$$w_2^2 \in [0.32, 0.47],\ w_3^2 \in [0.21, 0.34],$$
$$w_1^3 \in [0.46, 0.53],\ w_2^3 \in [0.21, 0.32],$$
$$w_3^3 \in [0.19, 0.30].$$

利用式 (14) 可得到各部门的指标权重为

$$w_1 = (0.32, 0.47, 0.21)^{\mathrm{T}},$$
$$w_2 = (0.43, 0.36, 0.21)^{\mathrm{T}},$$
$$w_3 = (0.53, 0.28, 0.19)^{\mathrm{T}}.$$

Step 6: 利用式 (16) 确定部门权重取值区间为

$$\eta_1 \in [0.25, 0.36],$$
$$\eta_2 \in [0.35, 0.40],$$
$$\eta_3 \in [0.29, 0.36].$$

由式 (18) 可得部门权重为

$$\eta^1 = (0.36, 0.35, 0.29)^{\mathrm{T}};$$

由式 (19) 可得部门权重为

$$\eta^2 = (0.32, 0.35, 0.33)^{\mathrm{T}}.$$

利用式 (20) ∼ (22) 可得到权重的协调系数. 其中: $\alpha_1 = 0.4931$, $\alpha_2 = 0.5069$. 进而可得到部门的综合权重

$$\eta^* = (0.34, 0.35, 0.31)^{\mathrm{T}}.$$

Step 7: 利用式 (23) 计算各个方案的投影值:

$$\mathrm{Pr}\, j_{\widetilde{B}} * \widetilde{B}_1 = 0.2866;$$
$$\mathrm{Pr}\, j_{\widetilde{B}} * \widetilde{B}_2 = 0.2487;$$
$$\mathrm{Pr}\, j_{\widetilde{B}} * \widetilde{B}_3 = 0.3209.$$

$\mathrm{Pr}\, j_{\widetilde{B}} * \widetilde{B}_3 > \mathrm{Pr}\, j_{\widetilde{B}} * \widetilde{B}_2 > \mathrm{Pr}\, j_{\widetilde{B}} * \widetilde{B}_1$, 由此可知 z_3 为最优方案, 即封闭公路部分车道, 引入小型设备结合人工方式进行灭火, 疏散沿线村落村民.

4 结 论

针对应急决策活动多指标多部门的特点, 本文提出了一种面向多部门多指标的复杂大群体应急决策方法, 给出了考虑犹豫度的直觉模糊数的相似度测度公式, 使相似度的测度效果更合理; 对专家偏好信息进行集结, 缩减了偏好信息的规模, 降低了决策难度; 以各个聚集中的偏好一致性最大化为目标构建优化模型对聚集权重进行求解, 降低了群体偏好冲突水平, 从而提高了群体偏好的一致性; 利用模糊聚类和聚集权重对离散的专家意见进行集结, 不需要专家之间针对意见分歧进行过多地讨论和协商, 使得群体意见可以在短时间内达成一致, 有效地缩短了反应时间; 在对应急指标和部门进行赋权的过程中, 基于“整体差异驱动”原理建模, 对指标权重和部门权重进行求解, 提高了方案间综合指标信息的区分度; 在对部门权重进行赋权时, 还考虑了区间数的模糊度和部门之间的权重差异化程度, 保障了部门赋权的合理性. 本文方

法未涉及复杂的智能算法, 且构建的所有优化模型均存在最优解, 因此整个过程可以利用MATLAB等软件进行运算, 从而达到降低决策难度、提高决策效率的目的. 今后可以从阶段赋权角度入手对该方法进行扩展, 并将其用于解决具有多阶段特征的大群体应急决策问题.

参考文献(References)

[1] Kou G, Wu W S. Multi-criteria decision analysis for emergency medical service assessment[J]. Annals of Operations Research, 2014, 223(1): 239-254.

[2] Cao J, Yang X G, Wang S Y. Key scientific problem in public emergency management[J]. Public Management, 2007, 4(2): 84-93.

[3] 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.)

[4] 左春荣, 田涛, 马英. 基于马尔科夫链的非常规突发事件应急决策模型[J]. 统计与决策, 2012, 19(4): 57-60.
(Zuo C R, Tian T, Ma Y. Unconventional emergency decision-making model based on Markov chain[J]. Statistics and Decision, 2012, 19(4): 57-60.)

[5] Toloie-Eshlaghy A, Homayonfar M, Aghaziarati M, et al. A subjective weighting method based on group decision making for ranking and measuring criteria values[J]. Australian J of Basic and Applied Sciences, 2011, 5(12): 2034-2040.

[6] 徐选华. 面向特大自然灾害复杂大群体决策模型及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 49-59.
(Xu X H. Complex large group decision making models and its application oriented outsize nature disasters[M]. Beijing: Science Press, 2012: 49-59.)

[7] Sene K. Flood warning, forecasting and emergency response[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2008: 23-45.

[8] Fu P P, Wu C, Tang J. Unconventional emergency management based on intelligent group decision-making methodology[J]. Advances in Information Sciences & Service Sciences, 2012, 4(7): 208-216.

[9] Wang F S, Wu L F, Rong Q B, et al. Decision-making model for ranking earthquake emergency events based on intuitionistic fuzzy sets[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 204(10): 2488-2493.

[10] 宋光兴, 杨槐. 群决策中的决策行为分析[J]. 学术探索, 2000, 57(3): 48-49.
(Song G X, Yang H. The decision-making behavior of group decision analysis[J]. Academic Exploration, 2000, 57(3): 48-49.)

[11] Shemshadia A, Shirazi H, Toreihia M, et al. A fuzzy VIKOR method for supplier selection based on entropy measure for objective weighting[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(10): 12160-12167.

[12] Ji B, Ye Y D, Xiao Y. A combination weighting algorithm using relative entropy for document clustering[J]. Int J of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2014, 28(3): 1453-1455.

[13] Atanassov K. Intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets System, 1986, 20(2): 87-96.

[14] Xu Z S. Intuitionistic fuzzy aggregation operators[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2007, 15(6): 1179-1187.

[15] Li D F, Chen C T. New similarity measures of intuitionistic fuzzy sets and application to pattern recognitions[J]. Pattern Recognition Letters, 2002, 23(1): 221-225.

[16] Xu Z S, Chen J, Wu J J. Clustering algorithm for intuitionistic fuzzy sets[J]. Information Science, 2008, 187(10): 3775-3790.

[17] Goh C H, Tung Y C, Cheng C H. A revised weighted sum decision model for robot selection[J]. Computers & Industrial Engineering, 1996, 30(2): 193-199.

[18] 夏勇其, 吴祈宗. 一种混合型多指标决策问题的TOPSIS方法[J]. 系统工程学报, 2004, 19(6): 630-634.
(Xia Y Q, Wu Q Z. A technique of order preference by similarity to ideal solution for hybrid multiple attribute decision making problems[J]. J of Systems Engineering, 2004, 19(6): 630-634.)

[19] 郭亚军. 一种新的动态综合评价方法[J]. 管理科学学报, 2002, 5(2): 49-54.
(Guo Y J. New theory and method of dynamic comprehensive evaluation [J]. J of Management Sciences in China, 2002, 5(2): 49-54.)

[20] Moore R E. Methods and applications of interval analysis[M]. London: Prentice-Hall Inc, 1979: 79-95.

[21] Xu Z S, Hu H. Projection models for intuitionistic fuzzy multiple attribute decision making[J]. Int J of Information Technology and Decision Making, 2010, 9(2): 267-289.

(责任编辑：滕 蓉)