

基于集对分析的自然灾害应急管理 能力评估方法研究

王松江, 盘大滨

(昆明理工大学 管理与经济学院, 云南 昆明 650504)

摘要:为了提高自然灾害应急管理能力评估的有效性,通过引入集对分析法,建立同异反五元联系数能力综合评估模型,将应急管理中确定与不确定的因素作为一个整体进行处理。在利用专家可信度考虑专家权重的基础上,通过不确定层次分析法确定各级评估指标权重区间,结合集对理论转化为精确权重,建立自然灾害应急管理能力评估模型;采用效应全偏系数分析各项能力的发展趋势,实现对能力评估的动静态结合。最后,以我国2个不同地区的城市为例对各城市的灾害应急管理能力进行评估,并与调研结果进行对比,结果表明,集对分析法应用于自然灾害应急管理能力和趋势分析是科学的、有效的,具有推广应用价值。

关键词:自然灾害;应急管理;集对分析;专家可信度;效应全偏系数;能力评估

中图分类号:C32; X43

文献标识码:A

Research on emergency management capability evaluation method of natural disasters based on set pair analysis

WANG Songjiang, PAN Dabin

(Faculty of Management and Economics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China)

Abstract: In order to improve the effectiveness of capability evaluation of natural disaster emergency management, the set pair analysis theory is introduced to establish a capability comprehensive evaluation model of identical, different and inverse five-element connection number, and the certain and uncertain factors in the emergency management are treated as a whole. On the basis of using expert credibility to consider expert weights, the uncertain AHP is introduced to determine the weight interval of all indicators and converted into precise weight by combining set pair theory, then the capability evaluation model of natural disaster emergency management is constructed. The effect full partial connection number is used to analyze the development trend of each capability and realize the dynamic and static combination of capability evaluation. Finally, two cities in different regions of China are taken as examples to evaluate the capability of disaster emergency management and compare with the survey results. The results prove that the application of set pair analysis theory in the capability evaluation and trend analysis of the natural disaster emergency management is scientific, effective, and has the value of popularization and application.

Key words: natural disaster; emergency management; set pair analysis; expert credibility; effect full partial connection number; capability evaluation

收稿日期:2022-10-27; 修回日期:2023-02-12

基金项目:国家社科基金应急管理体系建设研究专项项目(20VYJ028)

Supported by: National Social Science Foundation Emergency Management System Construction Research Project (20VYJ028)

作者简介:王松江(1960—),男,教授,主要从事项目管理研究。E-mail:richard777wang@163.com

通讯作者:盘大滨(1998—),男,硕士研究生,主要从事项目管理研究。E-mail:pdb2021@163.com

0 引言

我国是全球范围内自然灾害种类最多、受灾最为严重的国家之一^[1],2021年我国因各种自然灾害共造成1亿多人受灾,直接经济损失高达3340.2亿元^[2]。自然灾害的发生难以预测,其产生的威胁向政府的应急管理工作提出了更高的要求,虽然我国突发事件应急管理的形势稳中向好,但因起步较晚,自然灾害应急管理建设亟待加强。灾害应急管理评估是衡量城市灾害管理水平的重要手段^[3],深入研究自然灾害应急管理评价指标体系和评价模型的构建,科学准确地评价应急管理,找出城市在自然灾害处置工作的不足,对于提升应急管理、完善应急管理体系具有重要的理论和现实意义。

现阶段,国内外针对不同类型突发事件应急管理评估研究已日益成熟,ZHOU等^[4]采用多元线性回归法、支持向量机算法和神经网络对城市气象灾害应急响应能力进行评估。ZHANG等^[5]基于RS-IPA方法构建煤矿应急救援能力评价模型。OTAY等^[6]通过多准则决策分析法和区间直觉模糊集方法来评估灾害风险管理及应急响应能力。金小明等^[7]结合震害指数形式以及提出平均优劣度概念进行灾害性天气应急管理评价。郭燕等^[8]引入ISM模型和模糊评价法构建了地震应急管理评估模型。许硕等^[9]基于D数偏好关系改进层次分析法和逼近理想解排序法,提出一种突发事件应急管理评估方法。虽然上述方法能在应急管理评估研究中发挥一定作用,但鉴于应急管理评估对象和标准等具有较强的不确定性和模糊性^[10],无法有效预测和分析应急管理的发展趋势。

集对分析法(set pair analysis, SPA)由赵克勤^[11]提出,是研究确定性与不确定性的系统分析方法,其基本思路是从同异反三个角度全面分析问题,目前已广泛应用于隧道工程^[12]、矿业^[13]、水资源^[14]等领域的评价研究。自然灾害应急管理是一项复杂度高、综合性强的工作,涉及众多部门,各类因素互相影响,可以说应急管理评估是一个包含众多模糊性、不完全性和不确定性等元素的复杂系统,常规评价方法有着明显的局限性。因此,本文将集对理论与自然灾害应急管理评估相结合,通过不确定型层次分析法及集对分析中的三元联系数来确定评价指标权重,同时将基于不确定型判断矩阵总体相似性和局部差异性的专家可信度概念用以确定专家权重,从而构建同异反五元联系数的自然灾害应急管理综合评估模型,并采用多元效应偏联系数来定量分析应急能力的发展趋势,以期完成对自然灾害应急管理评估研究。

1 集对分析概述

1.1 联系度

集对是由2个具有一定联系的集合组成的基本单位,是把确定性与不确定性作为一个系统进行处理的研究方法;具体而言,即对构成集对的2个相关联的集合作同一性、差异性、对立性分析,然后建立同、异、反联系度。

集对分析中的联系度常用 μ 表示,通常可表示为:

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j \quad (1)$$

式中: N 为集对中的表征特性总数; S 为集对中2个集合的共同特性数; P 为集对中2个集合的相互对立特性数; F 为集对中2个集合既不共有也不对立的特性数; S/N 、 F/N 、 P/N 分别为所研究的2个集合在特定问题中的同一度、差异度、对立度; i 和 j 分别为差异度和对立度的系数,其中 $i \in [-1, 1]$,可视不同情况不确定

取值, $j \equiv -1$ 。若令 $a = \frac{S}{N}$, $b = \frac{F}{N}$, $c = \frac{P}{N}$,则式(1)可简写成:

$$\mu = a + bi + cj \quad (2)$$

式中, a , b , c 统称为联系度 μ 的联系分量,且 $a + b + c = 1$, $\forall a, b, c \in [0, 1]$ 。

根据问题的复杂性,可将式(2)进行拓展,得到多元联系数 μ :

$$\mu = a + b_1i_1 + b_2i_2 + \dots + b_ki_k + cj \quad (3)$$

式中, $a + b_1 + b_2 + \dots + b_k + c = 1$,而当 $k = 3$ 时,式(3)变为五元联系数:

$$\mu = a + b_1i_1 + b_2i_2 + b_3i_3 + cj \quad (4)$$

该式通常写作为： $a + bi + cj + dk + el$ ，其中 $\forall a, b, c, d, e \in [0, 1]$ ； $i \in [0, 1]$ ； j 为中性标记； $k \in [-1, 0]$ ； $l = -1$ ； a, b, c, d, e 具有“优序性”性质： $a > b > c > d > e$ ，且 $a + b + c + d + e = 1$ ，此层次特性可在自然灾害应急管理评估中将五元联系系数与能力评价分级相对应，如把 a, b, c, d, e 分别划为“优秀”、“良好”、“一般”、“较差”、“差”五大级别^[15]。

1.2 效应偏联系系数

偏联系系数是联系系数的一种伴随函数^[16]，主要用于反映联系系数之间的动态演化和同异反之间的转化规律，并可指出其同异反确定不确定联系状态的发展趋势^[17]。偏联系系数包括偏正联系系数、偏负联系系数和全偏联系系数，偏正联系系数主要表示联系系数的正向变化趋势：数值越大，事件往正向发展的趋势越显著；偏负联系系数主要表示联系系数的负向变化趋势：数值越小，事件往负向发展的趋势越显著；而全偏联系系数则等于同阶次的偏正与偏负联系系数的代数和，表示联系系数的双向变化趋势。

现有关于偏联系系数的研究^[14, 18]多数认为，多元联系系数在进行多阶求偏后方可消去差异度系数，以明晰评价对象的具体变化趋势。但此类计算方法缺乏合理性，实际上集对事件正因为不确定性系数的存在，才会隐含正负发展方向不确定的重要信息。基于此，金菊良等^[19]提出效应全偏联系系数的概念，考虑偏正与偏负联系系数中各差异度系数具有方向性、分别代表不同的效应，认为只需对联系系数求一次偏联系系数，再通过比例取值法确定各差异度系数的取值，进而得出反映全偏联系系数的效应全偏联系系数，即可求解多元联系系数的发展趋势。

1.2.1 三元效应全偏联系系数

设有三元联系系数 $\mu = a + bi + cj$ ，其效应偏正联系系数 $\partial^+ \mu$ 和偏负联系系数 $\partial^- \mu$ 可定义为：

$$\partial^+ \mu = \partial^+ a + i^+ \partial^+ b = \frac{a}{a+b} + i^+ \frac{b}{b+c} \tag{5}$$

式中： $\partial^+ a = \frac{a}{a+b}$ 为事物从处于差异性发展到同一性的比例；同理 $\partial^+ b = \frac{b}{b+c}$ 为事物从处于对立性发展到差异性的比例。 i^+ 一般按照比例取值法取值^[17]，取 $i^+ = \frac{\partial^+ a}{\partial^+ a + \partial^+ b}$ ， $i^+ \in [0, 1]$ ，表示偏正联系系数中 $\partial^+ b$ 转向 $\partial^+ a$ 的“正效应”作用系数，反映了事物正向发展趋势的强弱程度。

$$\partial^- \mu = i^- \partial^- b + j \partial^- c = i^- \frac{b}{a+b} + j \frac{c}{b+c} \tag{6}$$

式中， $\partial^- b = \frac{b}{a+b}$ 为事物从处于同一性发展到差异性的比例；同理， $\partial^- c = \frac{c}{b+c}$ 为事物从处于差异性发展到对立性的比例； $j = -1$ ，根据比例取值法，取 $i^- = -\frac{\partial^- c}{\partial^- b + \partial^- c}$ ， $i^- \in [-1, 0]$ ，表示偏负联系系数中 $\partial^- b$ 转向 $\partial^- c$ 的“负效应”作用系数，反映了事物负向发展趋势的强弱程度。

集对事件的发展趋势是在正向和负向趋势共同作用下的结果，则三元效应全偏联系系数的值 $\partial \mu$ 为偏正联系系数 $\partial^+ \mu$ 与偏负联系系数 $\partial^- \mu$ 之和，即：

$$\partial \mu = \partial^+ \mu + \partial^- \mu = \frac{a}{a+b} + i^+ \frac{b}{b+c} + \left(i^- \frac{b}{a+b} + j \frac{c}{b+c} \right) \tag{7}$$

1.2.2 五元效应全偏联系系数

对于五元联系系数 $\mu = a + bi + cj + dk + el$ ，其各阶偏联系系数见表 1。

表 1 各阶偏联系系数

Table 1 Partial connection number of each order

阶次	偏正联系系数	偏负联系系数
一阶	$\partial^+ \mu = \partial^+ a + i^+ \partial^+ b + j^+ \partial^+ c + k^+ \partial^+ d$ $\partial^+ a = \frac{a}{a+b}, \partial^+ b = \frac{b}{b+c}, \partial^+ c = \frac{c}{c+d}, \partial^+ d = \frac{d}{d+e}$	$\partial^- \mu = i^- \partial^- b + j^- \partial^- c + k^- \partial^- d + l \partial^- e$ $\partial^- b = \frac{b}{a+b}, \partial^- c = \frac{c}{b+c}, \partial^- d = \frac{d}{c+d}, \partial^- e = \frac{e}{d+e}$
二阶	$\partial^{2+} \mu = \partial^{2+} a + i^{2+} \partial^{2+} b + j^{2+} \partial^{2+} c$ $\partial^{2+} a = \frac{\partial^+ a}{\partial^+ a + \partial^+ b}, \partial^{2+} b = \frac{\partial^+ b}{\partial^+ b + \partial^+ c}, \partial^{2+} c = \frac{\partial^+ c}{\partial^+ c + \partial^+ d}$	$\partial^{2-} \mu = j^- \partial^{2-} c + k^- \partial^{2-} d + l \partial^{2-} e$ $\partial^{2-} c = \frac{\partial^- c}{\partial^- b + \partial^- c}, \partial^{2-} d = \frac{\partial^- d}{\partial^- c + \partial^- d}, \partial^{2-} e = \frac{\partial^- e}{\partial^- d + \partial^- e}$

续表

阶次	偏正联系数	偏负联系数
三阶	$\partial^{3+}\mu = \partial^{3+}a + i^+ \partial^{3+}b$ $\partial^{3+}a = \frac{\partial^{2+}a}{\partial^{2+}a + \partial^{2+}b}, \partial^{3+}b = \frac{\partial^{2+}b}{\partial^{2+}b + \partial^{2+}c}$	$\partial^{3-}\mu = k^- \partial^{3-}d + l \partial^{3-}e$ $\partial^{3-}d = \frac{\partial^{2-}d}{\partial^{2-}c + \partial^{2-}d}, \partial^{3-}e = \frac{\partial^{2-}e}{\partial^{2-}d + \partial^{2-}e}$
四阶	$\partial^{4+}\mu = \partial^{4+}a$ $\partial^{4+}a = \frac{\partial^{3+}a}{\partial^{3+}a + \partial^{3+}b}$	$\partial^{4-}\mu = l \partial^{4-}e$ $\partial^{4-}e = \frac{\partial^{3-}e}{\partial^{3-}d + \partial^{3-}e}$

各阶全偏联系数为: $\partial^i\mu = \partial^{i+}\mu + \partial^{i-}\mu, i=1,2,3,4$

五元效应偏系数由三元效应偏系数推广而来,在计算效应偏系数数值时,各差异度系数 i, j, k 的取值一般采取比例取值法^[20], 定义为: $i^+ = \frac{\partial^+a}{\partial^+a + \partial^+b}, j^+ = \frac{\partial^+a}{\partial^+a + \partial^+c}, k^+ = \frac{\partial^+a}{\partial^+a + \partial^+d}, i^+, j^+, k^+ \in [0, 1];$
 $i^- = -\frac{\partial^-e}{\partial^-b + \partial^-e}, j^- = -\frac{\partial^-e}{\partial^-c + \partial^-e}, k^- = -\frac{\partial^-e}{\partial^-d + \partial^-e}, i^-, j^-, k^- \in [-1, 0], l = -1。$

当效应全偏系数的计算结果 $\partial^i\mu > 0$ 时,表明事件发展趋势呈正向,有能力向好的趋势发展;当 $\partial^i\mu < 0$ 时,表明事件发展趋势呈负向,具有一定程度的恶化风险;当 $\partial^i\mu = 0$ 时,表明事件发展趋势不定,处于临界状态,可能往正向发展也可能往负向发展。

1.3 集对势

集对势是同一度与对立度的比值,反映了集对中 2 个集合在指定问题背景下的某种联系趋势,常用 $shi(\mu)$ 表示。根据五元联系数 $\mu = a + bi + cj + dk + el$ 中各系数大小关系,可将系统发展态势分为:“同势”: $shi(\mu) = \frac{a}{e} > 1$,表示该五元联系数所刻画的应急管理能力的呈正向提高态势;“均势”: $shi(\mu) = \frac{a}{e} = 1$,表示应急管理能力的呈中间过渡态势,与理想状态呈“势均力敌”状态;“反势”: $shi(\mu) = \frac{a}{e} < 1$,表示应急管理能力的呈负向提高态势^[21]。

2 基于集对分析的能力评估模型

2.1 构建评估指标体系

本文以应急管理 PPRR 模型^[22]为理论基础,深入分析我国突发事件应对法中“预防(prevention)、准备(preparation)、响应(response)、恢复(recovery)”的应急管理全过程理念以及自然灾害的主要机理性特点,秉承科学性、可行性和代表性等原则,以此构建评估指标体系。

为确保信息的真实性及指标选择的科学性,本文通过对我国近 20 a 的重大突发自然灾害事件进行深入分析,并结合京津冀、长三角、珠三角、四川省、云南省等典型地区的实地调研,对各地区不同层次的应急管理局(厅)、相关企事业单位工作人员等采用问卷调查方式确定影响因素。在问卷基础上,结合城市灾害应急管理能力的特点和文献^[23-25],共选取 18 个指标建立自然灾害应急管理评估指标体系,如表 2 所示。

表 2 自然灾害应急管理评估指标体系

Table 2 Capability evaluation indicators system of natural disaster emergency management

目标层	准则层	指标层
自然灾害应急管理	应急预防能力 u_1	监测预警设施 u_{11} 、社会参与程度 u_{12} 、灾害管理法律法规 u_{13} 、防灾工程 u_{14} 、应急队伍建设 u_{15}
	应急准备能力 u_2	危机信息处理与发布 u_{21} 、应急物资保障 u_{22} 、应急预案管理 u_{23} 、应急资源整合 u_{24}
	应急响应能力 u_3	救灾设备 u_{31} 、救灾专业技能 u_{32} 、医疗救助水平 u_{33} 、应急响应速度 u_{34} 、现场指挥协调能力 u_{35}
	应急恢复能力 u_4	政府救助机制 u_{41} 、灾害保险制度 u_{42} 、灾后恢复重建能力 u_{43} 、灾情评估及追责机制 u_{44}

2.2 能力评价等级划分

为满足应急管理评估研究的需要,在参考能力等级划分相关研究^[7-8,26]的基础上,结合团队的研究成果,将自然灾害应急管理能力的评估等级分为“优秀”、“良好”、“一般”、“较差”、“差”五级。由应急管理评估结果获得联系函数,为保证联系数值的可靠性,在最“保守”的情况下,根据均分原则^[27],取 $i, j, k = 0$ 。因归一化后联系数 μ 的取值范围为 $[-1, 1]$,根据均分原则,其所对应的应急管理评估等级见表 3。

表3 自然灾害应急管理评价等级标准

Table 3 Natural disaster emergency management capability evaluation level standards

能力等级	联系数 μ	应对措施
差	$[-1, -0.6)$	需引起高度重视,及时整改和完善
较差	$[-0.6, -0.2)$	需引起重视并采取有效的改进措施,同时加强检测
一般	$[-0.2, 0.2)$	需引起重视并开展定期检查
良好	$[0.2, 0.6)$	继续加强管理措施,提高能力水平
优秀	$[0.6, 1)$	保持稳定,适当提升

2.3 确定指标权重

2.3.1 权重区间的确定

考虑到自然灾害应急管理工作复杂,评价指标具有较强的不确定性和模糊性,专家难以对指标间的相对重要程度精准赋值,此时传统层次分析法不再适用,因此采用不确定型层次分析法^[28]对指标赋权能更好地反映专家对评估指标主观判断的不确定性,使评估结果更具参考价值。

假设某一准则层中有 n 个指标,各专家通过 1~9 比例标度法对任意 2 个指标之间的相对重要程度进行评价,评价结果用区间 $[a_{ij}^{(k)}, b_{ij}^{(k)}]$ 表示,式中 $i, j \in [1, n]; k \in [1, q]$ 为专家序号; $a_{ij}^{(k)}$ 和 $b_{ij}^{(k)}$ 分别为指标间相对重要性的下限和上限值,形成不确定区间数判断矩阵 A :

$$A^{(k)} = [a_{ij}^{(k)}, b_{ij}^{(k)}] = \begin{bmatrix} [1, 1] & [a_{12}^k, b_{12}^k] & [a_{13}^k, b_{13}^k] & \cdots & [a_{1n}^k, b_{1n}^k] \\ [\frac{1}{a_{12}^k}, \frac{1}{b_{12}^k}] & [1, 1] & [a_{23}^k, b_{23}^k] & \cdots & [a_{2n}^k, b_{2n}^k] \\ [\frac{1}{a_{13}^k}, \frac{1}{b_{13}^k}] & [\frac{1}{a_{23}^k}, \frac{1}{b_{23}^k}] & [1, 1] & \cdots & [a_{3n}^k, b_{3n}^k] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [\frac{1}{a_{1n}^k}, \frac{1}{b_{1n}^k}] & [\frac{1}{a_{2n}^k}, \frac{1}{b_{2n}^k}] & [\frac{1}{a_{3n}^k}, \frac{1}{b_{3n}^k}] & \cdots & [1, 1] \end{bmatrix} \quad (8)$$

记各专家权重为 $\alpha_k = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_q)$, 结合区间数及判断矩阵 A , 构建合并后满足互反性的不确定性区间判断矩阵 M , 并通过式(10)和式(11)对判断矩阵 $A^{(k)}$ 进行修正:

$$M = \sum_{k=1}^q \alpha_k \cdot A^{(k)} \quad (9)$$

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^q \alpha_k a_{ij}^{(k)} \quad (10)$$

$$b_{ij} = \sum_{k=1}^q \alpha_k b_{ij}^{(k)} \quad (11)$$

针对区间数判断矩阵 M , 计算得到一致性判断矩阵 S_{ij} 及其权重向量 $W_i = (w_1, w_2, \dots, w_n)$:

$$S_{ij} = (s_{ij})_{n \times n} = \left(\prod_{k=1}^n \frac{a_{ik} b_{ik}}{a_{jk} b_{jk}} \right)^{1/2n} \quad (12)$$

$$W_i = \frac{\left(\prod_{k=1}^n a_{ik} b_{ik} \right)^{1/2n}}{\sum_{j=1}^n \left(\prod_{k=1}^n a_{jk} b_{jk} \right)^{1/2n}} \quad (13)$$

因不确定区间数判断矩阵 M 和一致性判断矩阵 S_{ij} 之间存在一定误差, 故令 $\Delta_1 s_{ij} = s_{ij} - a_{ij}$, $\Delta_2 s_{ij} = b_{ij} - s_{ij}$, 可得:

$$\Delta_k W_j = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n s_{ij} \right)^{-4} \sum_{i=1}^n (\Delta_k s_{ij})^2} \quad k = 1, 2 \quad (14)$$

通过式(14)将误差传递后,得到修正后的权重区间 \tilde{W} :

$$\tilde{W} = ([w_1^-, w_1^+], [w_2^-, w_2^+], \dots, [w_n^-, w_n^+]) \tag{15}$$

式中: $w_i^- = w_i - \Delta_1 w_i, w_i^+ = w_i + \Delta_2 w_i, i \in [1, n]$ 。

2.3.2 专家权重计算

目前对专家权重的确定方法大多根据专家的工作经验和专业背景等来综合确定,是一种静态及主观的赋权,无法客观反映专家对决策问题的认知程度。而专家的动态赋权是将其与所做决策在群决策中的地位相联系,即专家权重应由其决策可信度来衡量^[29]。因此,本文将利用专家打分的可信度作为专家评估结果的实际权重。

专家可信度主要从决策的总体相似性和局部差异性计算得出^[30],以体现专家对评判因素的把握程度,提高评判的准确性。

1) 相似性计算

假定有 q 名专家参与决策,其给出的不确定区间数判断矩阵分别为 $A^{(k)} (k=1, 2, \dots, q)$ 。已知判断矩阵 $A = [a_{ij}^{(k)}, b_{ij}^{(k)}]_{n \times n}$, 则其导出向量为 $1 \times 2n^2$ 的行向量,表示为 $(a_{11}, \dots, a_{n1}, a_{12}, \dots, a_{n2}, a_{1n}, \dots, a_{nn}, b_{11}, \dots, b_{n1}, b_{12}, \dots, b_{n2}, b_{1n}, \dots, b_{nn})$ 。记 α 和 β 分别为 $A^{(l)}$ 和 $A^{(k)}$ 这 2 个决策矩阵的导出向量,2 个向量的相似性与其夹角 θ 的余弦值成反比,记 $\gamma_{lk} = \cos \theta, \alpha = (\alpha_i), \beta = (\beta_i)$, 则:

$$\gamma_{lk} = \cos \theta = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \alpha_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n \beta_i^2}} \tag{16}$$

显然有 $0 \leq \gamma_{lk} \leq 1$, 当且仅当 $\alpha_i = \beta_i$ 时, $\gamma_{lk} = 1$ 。 γ_{lk} 反映了 $A^{(l)}$ 和 $A^{(k)}$ 的相似程度,令 $\gamma_k = \sum_{l=1, l \neq k}^q \gamma_{lk}$, 则 γ_k 反映了 $A^{(k)}$ 与其他判断矩阵的相似程度之和。将 γ_k 作归一化处理,可得第 k 个专家的评判与其他专家评判的相似度 λ_k , 为:

$$\lambda_k = \frac{\gamma_k}{\sum_{k=1}^q \gamma_k} \tag{17}$$

2) 差异性计算

将 q 名专家给出的判断矩阵相应的 $1 \times 2n^2$ 导出向量转换为 $c_j = (c_1, c_2, c_3, \dots, c_{2n^2})$, 有:

$$\sigma_k = \sum_{j=1}^{2n^2} \left| c_j^{(k)} - \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q c_j^{(i)} \right| \quad k = 1, 2, \dots, q \tag{18}$$

式中: σ_k 为第 k 位专家的评判值和所有专家的评判值对应均值的差值总和。将 σ_k 作归一化处理,即得到第 k 位专家的评判与其他专家评判的差异度 δ_k , 即:

$$\delta_k = \frac{\sigma_k}{\sum_{k=1}^q \sigma_k} \quad k = 1, 2, \dots, q \tag{19}$$

3) 可信度计算

在得到相似性和差异性 2 个变量的计算结果后,即可得出专家可信度 r_k , 此时专家权重是一种动态赋权,随给出判断矩阵的不同而变化。其计算公式为:

$$r_k = \begin{cases} \lambda_k, & \sum_{i=1}^q \lambda_i \delta_i = 1 \\ \frac{\lambda_k (1 - \delta_k)}{1 - \sum_{i=1}^q \lambda_i \delta_i}, & \sum_{i=1}^q \lambda_i \delta_i \neq 1 \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, q \tag{20}$$

2.3.3 基于集对分析确定评估指标权重

因不确定型层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)得到的仅是各评估指标的权重区间值,未能得到准确值,故引入三元联系数从同、异、反 3 个方面综合确定指标准确权重值。因式(15)中 $\tilde{w}_i \subseteq [0, 1]$,可将区间分成 $[0, w_i^-]$ 、 $[w_i^-, w_i^+]$ 、 $[w_i^+, 1]$,把权重区间 \tilde{w}_i 和区间 $[0, 1]$ 建立集对,其三元联系数可表达为:

$$\mu_i = a_i + b_i i + c_i j \quad (21)$$

式中: $a_i = w_i^-$ 为确定能达到的程度; $b_i = w_i^+ - w_i^-$ 为不能确定达到的程度; $c_i = 1 - w_i^+$ 为确定不能达到的程度。

因此,可从确定性和不确定性 2 个角度来计算评估指标权重大小。记 p_i 和 q_i 分别为确定性区间的相对权重和不确定性区间的相对权重。具体表达式为:

$$p_i = \frac{1 + a_i - c_i}{\sum_{k=1}^n (1 + a_k - c_k)}, \quad q_i = \frac{1 - b_i}{\sum_{k=1}^n (1 - b_k)} \quad (22)$$

结合 p_i 和 q_i ,进而得到各评估指标的精确权重值 $w^* = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)$:

$$w_i^* = \frac{p_i q_i}{\sum_{k=1}^n p_k q_k} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (23)$$

2.4 应急管理评价模型构建

将自然灾害应急管理评价指标与相关标准对比,并与五元联系数的系数分量所对应,与评语集 $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ 相对应,分为“优秀”、“良好”、“一般”、“较差”、“差”五大评价等级。

由 q 名专家对各级指标按上述等级进行评价,结合公式 $R_{ij} = \frac{N_{ij}}{N}$ (N_{ij} 为将评价指标 i 归为等级 j 的专家人数, N 为专家总人数),得到能力评估矩阵 R ,再结合各评估指标的精确权重值 w^* 和五元联系数式,得到五元联系数同异反能力评估模型:

$$\begin{aligned} \mu^* &= w^* \cdot R \cdot E^T = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*) \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & u_{14} & u_{15} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & u_{24} & u_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & u_{n3} & u_{n4} & u_{n5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ i \\ j \\ k \\ l \end{bmatrix} \\ &= \sum_{r=1}^n w_r^* u_{r1} + \sum_{r=1}^n w_r^* u_{r2} i + \sum_{r=1}^n w_r^* u_{r3} j + \sum_{r=1}^n w_r^* u_{r4} k + \sum_{r=1}^n w_r^* u_{r5} l \end{aligned} \quad (24)$$

简记为:

$$\mu^* = a + bi + cj + dk + el \quad (25)$$

式中: μ^* 为综合联系数, $E = (1, i, j, k, l)$ 为能力评估系数矩阵;其中根据 SPA 理论可知: $a = \sum_{r=1}^n w_r^* u_{r1}$ 为同一性分量,为该指标属于优秀等级; $b = \sum_{r=1}^n w_r^* u_{r2}$ 为差异性偏同分量,表示该指标属于良好等级; $c = \sum_{r=1}^n w_r^* u_{r3}$ 为差异性居中分量,表示该指标属于一般等级; $d = \sum_{r=1}^n w_r^* u_{r4}$ 为差异性偏反分量,表示该指标属于较差等级; $e = \sum_{r=1}^n w_r^* u_{r5}$ 为对立性分量,表示该指标属于差等级。式中 a, e 为确定项, b, c, d 为不确定项。

3 实例分析

为验证自然灾害应急管理评价的科学性和合理性,本文分别选择分布于我国东部、西部 2 个地理位置差异显著并处于不同层面的城市作为研究对象,其中东、西部城市分别为广东省 S 市和四川省 W 县。S 市位于我国东部,行政级别属于副省级城市;W 县隶属于四川省阿坝藏族羌族自治州,行政级别为县级市。

通过前往两市当地的应急管理部门和机构实地调研,邀请两地应急管理领域的专家各 10 人就当地自然灾害应急管理建设情况,对 18 个能力评估指标进行能力等级评价。

3.1 计算评估指标权重

邀请军民融合、应急管理、卫生健康、疾病控制、高校各领域相关专家各 1 名,采用不确定性层次分析法和集对理论确定各级指标权重。以一级指标“应急预防能力”为例,说明具体计算过程。

3.1.1 构造区间数及判断矩阵

5 位专家根据 1~9 比例标度法,相互独立地对指标“应急预防能力 u_1 ”下的各二级指标“监测预警设施 u_{11} ”、“社会参与程度 u_{12} ”、“灾害管理法律法规 u_{13} ”、“防灾工程 u_{14} ”、“应急队伍建设 u_{15} ”之间的相互重要程度进行比较打分,得出的区间数与判断矩阵 $A^{(k)}$ ($k=1,2,3,4,5$) 如式(26a)~式(26e)所示:

$$A^{(1)} = \begin{bmatrix} [1,1] & [3,4] & [6,8] & [4,5] & [5,6] \\ [\frac{1}{4},\frac{1}{3}] & [1,1] & [5,6] & [4,5] & [3,5] \\ [\frac{1}{8},\frac{1}{6}] & [\frac{1}{6},\frac{1}{5}] & [1,1] & [\frac{1}{7},\frac{1}{6}] & [\frac{1}{7},\frac{1}{5}] \\ [\frac{1}{5},\frac{1}{4}] & [\frac{1}{5},\frac{1}{4}] & [6,7] & [1,1] & [\frac{1}{3},\frac{1}{2}] \\ [\frac{1}{6},\frac{1}{5}] & [\frac{1}{5},\frac{1}{3}] & [5,7] & [2,3] & [1,1] \end{bmatrix} \quad (26a)$$

$$A^{(2)} = \begin{bmatrix} [1,1] & [4,5] & [6,7] & [5,6] & [4,5] \\ [\frac{1}{5},\frac{1}{4}] & [1,1] & [6,7] & [3,5] & [5,6] \\ [\frac{1}{7},\frac{1}{6}] & [\frac{1}{7},\frac{1}{6}] & [1,1] & [\frac{1}{5},\frac{1}{4}] & [\frac{1}{6},\frac{1}{5}] \\ [\frac{1}{6},\frac{1}{5}] & [\frac{1}{5},\frac{1}{3}] & [4,5] & [1,1] & [3,4] \\ [\frac{1}{5},\frac{1}{4}] & [\frac{1}{6},\frac{1}{5}] & [5,6] & [\frac{1}{4},\frac{1}{3}] & [1,1] \end{bmatrix} \quad (26b)$$

$$A^{(3)} = \begin{bmatrix} [1,1] & [4,5] & [6,8] & [3,4] & [5,6] \\ [\frac{1}{5},\frac{1}{4}] & [1,1] & [5,6] & [3,4] & [2,3] \\ [\frac{1}{8},\frac{1}{6}] & [\frac{1}{6},\frac{1}{5}] & [1,1] & [\frac{1}{7},\frac{1}{6}] & [\frac{1}{8},\frac{1}{6}] \\ [\frac{1}{4},\frac{1}{3}] & [\frac{1}{4},\frac{1}{3}] & [6,7] & [1,1] & [\frac{1}{2},1] \\ [\frac{1}{6},\frac{1}{5}] & [\frac{1}{3},\frac{1}{2}] & [6,8] & [1,2] & [1,1] \end{bmatrix} \quad (26c)$$

$$A^{(4)} = \begin{bmatrix} [1,1] & [3,4] & [5,6] & [5,7] & [5,6] \\ [\frac{1}{4},\frac{1}{3}] & [1,1] & [7,9] & [2,3] & [3,5] \\ [\frac{1}{6},\frac{1}{5}] & [\frac{1}{9},\frac{1}{7}] & [1,1] & [\frac{1}{6},\frac{1}{5}] & [\frac{1}{7},\frac{1}{6}] \\ [\frac{1}{7},\frac{1}{5}] & [\frac{1}{3},\frac{1}{2}] & [5,6] & [1,1] & [\frac{1}{4},\frac{1}{3}] \\ [\frac{1}{6},\frac{1}{5}] & [\frac{1}{5},\frac{1}{3}] & [6,7] & [3,4] & [1,1] \end{bmatrix} \quad (26d)$$

$$A^{(5)} = \begin{bmatrix} [1,1] & [4,5] & [5,6] & [4,5] & [3,4] \\ [\frac{1}{5}, \frac{1}{4}] & [1,1] & [7,8] & [2,3] & [3,4] \\ [\frac{1}{6}, \frac{1}{5}] & [\frac{1}{8}, \frac{1}{7}] & [1,1] & [\frac{1}{7}, \frac{1}{5}] & [\frac{1}{7}, \frac{1}{6}] \\ [\frac{1}{5}, \frac{1}{4}] & [\frac{1}{3}, \frac{1}{2}] & [5,7] & [1,1] & [1,2] \\ [\frac{1}{4}, \frac{1}{3}] & [\frac{1}{4}, \frac{1}{3}] & [6,7] & [\frac{1}{2}, 1] & [1,1] \end{bmatrix} \quad (26e)$$

3.1.2 确定专家权重

考虑到各位专家的学术水平、经验程度等条件有所差别,在构建判断矩阵的基础上,依据不确定型判断矩阵相似性和差异性理论,为 5 位专家赋予相应权重。根据式(16)~式(20),可计算得出 5 位专家的相似度、差异度及可信度,如表 4 所示。

表 4 可信度计算

Table 4 Credibility calculation

指标	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
相似度	0.202	0.198	0.200	0.199	0.201
差异度	0.180	0.237	0.192	0.222	0.169
可信度	0.206	0.189	0.202	0.194	0.209

通过表 4 可看出 5 位专家评判结果的相似度和差异度均较为接近,结果可靠。因此,得到每位专家权重为:

$$\alpha_k = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5) = (0.206, 0.189, 0.202, 0.194, 0.209) \quad (27)$$

3.1.3 确定权重区间和一致性判断矩阵

在初始区间判断矩阵和专家权重的基础上,依据式(9)~式(11),进而计算得到不确定区间判断矩阵 M :

$$M = \begin{bmatrix} [1.000, 1.000] & [3.600, 4.600] & [5.597, 7.005] & [4.181, 5.375] & [4.393, 5.393] \\ [0.220, 0.283] & [1.000, 1.000] & [5.995, 7.189] & [2.803, 3.992] & [3.176, 4.576] \\ [0.145, 0.180] & [0.143, 0.171] & [1.000, 1.000] & [0.158, 0.196] & [0.144, 0.180] \\ [0.193, 0.248] & [0.264, 0.383] & [5.219, 6.428] & [1.000, 1.000] & [0.994, 1.544] \\ [0.190, 0.237] & [0.231, 0.342] & [5.605, 7.013] & [1.348, 2.070] & [1.000, 1.000] \end{bmatrix} \quad (28)$$

根据式(12)和式(13),计算得到一致性判断矩阵 S_{ij} 及其权重向量 W_i :

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} 1.000 & 1.949 & 15.244 & 4.115 & 3.932 \\ 0.513 & 1.000 & 7.821 & 2.111 & 2.017 \\ 0.066 & 0.128 & 1.000 & 0.270 & 0.258 \\ 0.243 & 0.474 & 3.705 & 1.000 & 0.956 \\ 0.254 & 0.496 & 3.877 & 1.046 & 1.000 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$W_i = (0.4817, 0.2471, 0.0316, 0.1171, 0.1225) \quad (30)$$

为检验不确定 AHP 法自然满足一致性要求的合理性,需对一致性判断矩阵 S_{ij} 作一致性检验。定义一致性指标为: $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$,其中 λ_{max} 为判断矩阵 S_{ij} 的最大特征值;定义一致性比率为: $CR = \frac{CI}{RI}$,其中 RI 为随机一致性指标,可根据矩阵阶数 n 来查表获得。在一般情况下,当一致性比率 $CR < 0.1$ 时,则认为判断矩阵符合一致性要求。

计算得到判断矩阵 S_{ij} 的最大特征值 $\lambda_{max} = 5.0015$, $CR = 0.00038 < 0.1$,认为该判断矩阵的一致性可以接受,专家打分结果的效度可靠。同理,其余指标层的判断矩阵均通过一致性检验。

通过式(14)~式(15)计算得到一级指标层“应急预防能力”中各评估指标的权重区间为:

$$\tilde{W}_1 = ([0.409, 0.541], [0.144, 0.409], [0.022, 0.041], [0.107, 0.151], [0.104, 0.168]) \quad (31)$$

将指标权重区间 \tilde{W}_1 与区间 $[0, 1]$ 构成集对,通过式(21)将权重区间分别转化为联系数:

$$\begin{aligned}
 \mu_1 &= 0.409 + 0.133i + 0.458j \\
 \mu_2 &= 0.144 + 0.265i + 0.591j \\
 \mu_3 &= 0.022 + 0.019i + 0.959j \\
 \mu_4 &= 0.107 + 0.045i + 0.848j \\
 \mu_5 &= 0.104 + 0.064i + 0.832j
 \end{aligned}
 \tag{32}$$

根据式(22),计算评价指标确定性和不确定性区间的权重值,并作归一化处理:

$$\begin{aligned}
 p_i &= [p_1, p_2, p_3, p_4, p_5] = [0.453, 0.264, 0.030, 0.123, 0.130] \\
 q_i &= [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5] = [0.194, 0.164, 0.219, 0.214, 0.209]
 \end{aligned}
 \tag{33}$$

按照式(23),得到“监测预警设施 u_{11} ”、“社会参与程度 u_{12} ”、“灾害管理法律法规 u_{13} ”、“防灾工程 u_{14} ”、“应急队伍建设 u_{15} ”的精确权重值 w_1^* :

$$w_1^* = [0.460, 0.227, 0.034, 0.137, 0.142] \tag{34}$$

同理,根据各专家对表 2 中其他指标的区间评价,设 w^* 、 w_2^* 、 w_3^* 、 w_4^* 分别为准则层指标、应急准备能力 u_2 、应急响应能力 u_3 、应急恢复能力 u_4 的指标权重,参照上述步骤计算得到一级指标与其他二级指标的权重值:

$$\begin{aligned}
 w^* &= [0.298, 0.528, 0.058, 0.116] \\
 w_2^* &= [0.545, 0.265, 0.063, 0.127] \\
 w_3^* &= [0.489, 0.229, 0.141, 0.049, 0.092] \\
 w_4^* &= [0.540, 0.171, 0.048, 0.241]
 \end{aligned}
 \tag{35}$$

各评估指标权重系数 w 的大小在一定程度上反映了其对应指标的重要性,如监测预警设施、救灾设备和政府救助机制等指标相对其他评估指标对自然灾害应急管理综合能力影响较大,有关部门在进行自然灾害应急管理工作中时应加强此类因素的建设力度。

3.2 构建评价模型

针对 W 县和 S 市两地自然灾害应急管理建设的实际情况,各邀请 10 位相关专家依据表 3 的能力评语集,对评估指标进行等级评判,得到能力评估矩阵 R ,并结合已求出的各评价指标权重,通过式(24)和式(25)求得五元联系数同异反能力评估模型,根据表 1 计算出各阶效应偏联系数(篇幅有限,仅列出四阶偏联系数),结果如表 5 和表 6 所示。

表 5 多元联系数及计算表(W 县)

Table 5 Multivariate connection number and calculation table(W County)

准则层	指标层	权重	现状五元联系数					μ	态势	四阶效应偏联系数			
			优秀	良好	一般	较差	差			偏正	偏负	全偏	趋势
应急预防能力 0.298	监测预警设施	0.460	0.20 + 0.20i + 0.30j + 0.20k + 0.10l					0.10	同势	0.56	0.55l	0.01	正向
	社会参与程度	0.227	0.00 + 0.10i + 0.10j + 0.50k + 0.30l					-0.30	反势	0.00	0.34l	-0.34	负向
	灾害管理法律法规	0.034	0.00 + 0.20i + 0.40j + 0.30k + 0.10l					-0.10	反势	0.00	0.50l	-0.50	负向
	防灾工程	0.137	0.50 + 0.20i + 0.20j + 0.10k + 0.00l					0.50	同势	0.53	0.00l	0.53	正向
	应急队伍建设	0.142	0.00 + 0.00i + 0.10j + 0.40k + 0.50l					-0.50	反势	0.00	0.32l	-0.32	负向
	合计	1.000	0.16 + 0.15i + 0.21j + 0.29k + 0.19l					-0.03	反势	0.33	0.40l	-0.07	负向
应急准备能力 0.528	危机信息处理与发布	0.545	0.10 + 0.10i + 0.20j + 0.30k + 0.30l					-0.20	反势	0.53	0.52l	0.01	正向
	应急物资保障	0.265	0.10 + 0.10i + 0.10j + 0.30k + 0.40l					-0.30	反势	0.40	0.43l	-0.03	负向
	应急预案管理	0.063	0.00 + 0.00i + 0.10j + 0.30k + 0.60l					-0.60	反势	0.00	0.34l	-0.34	负向
	应急资源整合	0.127	0.00 + 0.10i + 0.30j + 0.30k + 0.30l					-0.30	反势	0.00	0.54l	-0.54	负向
	合计	1.000	0.08 + 0.09i + 0.18j + 0.30k + 0.35l					-0.27	反势	0.39	0.47l	-0.08	负向
应急响应能力 0.058	救灾设备	0.489	0.10 + 0.40i + 0.20j + 0.20k + 0.10l					0.00	均势	0.33	0.37l	-0.04	负向
	救灾专业技能	0.229	0.20 + 0.60i + 0.10j + 0.10k + 0.00l					0.20	同势	0.29	0.00l	0.29	正向
	医疗救助水平	0.141	0.20 + 0.20i + 0.40j + 0.10k + 0.10l					0.10	同势	0.67	0.72l	-0.05	负向
	应急响应速度	0.049	0.40 + 0.40i + 0.10j + 0.10k + 0.00l					0.40	同势	0.37	0.00l	0.37	正向
	现场指挥协调能力	0.092	0.20 + 0.20i + 0.40j + 0.10k + 0.10l					0.10	同势	0.67	0.72l	-0.05	负向
	合计	1.000	0.16 + 0.40i + 0.22j + 0.15k + 0.07l					0.09	同势	0.40	0.35l	0.05	正向
应急恢复能力 0.116	政府救助机制	0.540	0.30 + 0.20i + 0.30j + 0.10k + 0.10l					0.20	同势	0.63	0.68l	-0.05	负向
	灾害保险制度	0.171	0.20 + 0.20i + 0.50j + 0.10k + 0.00l					0.20	同势	0.66	0.00l	0.66	正向
	灾后恢复重建能力	0.048	0.10 + 0.40i + 0.20j + 0.20k + 0.10l					0.00	均势	0.33	0.52l	-0.19	负向
	灾情评估及追责机制	0.241	0.20 + 0.20i + 0.40j + 0.10k + 0.10l					0.10	同势	0.67	0.29l	0.38	正向
	合计	1.000	0.25 + 0.21i + 0.35j + 0.11k + 0.08l					0.17	同势	0.63	0.46l	0.17	正向
	总合计	1.000	0.16 + 0.21i + 0.24j + 0.21k + 0.18l					-0.02	反势	0.44	0.42l	0.02	正向

表6 多元联系数及计算表(S市)

Table 6 Multivariate connection number and calculation table(S City)

准则层	指标层	权重	现状五元联系数					μ	态势	四阶效应偏联系数			
			优秀	良好	一般	较差	差			偏正	偏负	全偏	趋势
应急预防能力 0.298	监测预警设施	0.460	0.60 + 0.30i + 0.10j + 0.00k + 0.00l					0.60	同势	0.34	0.00l	0.34	正向
	社会参与程度	0.227	0.20 + 0.00i + 0.40j + 0.10k + 0.30l					-0.10	反势	1.00	0.85l	0.15	正向
	灾害管理法律法规	0.034	0.20 + 0.10i + 0.20j + 0.20k + 0.30l					-0.10	反势	0.60	0.59l	0.01	正向
	防灾工程	0.137	0.40 + 0.20i + 0.30j + 0.10k + 0.00l					0.40	同势	0.59	0.00l	0.59	正向
	应急队伍建设	0.142	0.40 + 0.30i + 0.20j + 0.00k + 0.10l					0.30	同势	0.67	1.00l	-0.33	负向
	合计	1.000	0.44 + 0.21i + 0.21j + 0.04k + 0.10l					0.34	同势	0.58	0.36l	0.22	正向
应急准备能力 0.528	危机信息处理与发布	0.545	0.60 + 0.10i + 0.20j + 0.10k + 0.00l					0.60	同势	0.60	0.00l	0.60	正向
	应急物资保障	0.265	0.40 + 0.30i + 0.10j + 0.10k + 0.10l					0.30	同势	0.43	0.40l	0.03	正向
	应急预案管理	0.063	0.40 + 0.30i + 0.20j + 0.10k + 0.00l					0.40	同势	0.48	0.00l	0.48	正向
	应急资源整合	0.127	0.50 + 0.10i + 0.30j + 0.10k + 0.00l					0.50	同势	0.67	0.00l	0.67	正向
	合计	1.000	0.52 + 0.16i + 0.19j + 0.10k + 0.03l					0.49	同势	0.56	0.11l	0.45	正向
应急响应能力 0.058	救灾设备	0.489	0.10 + 0.30i + 0.30j + 0.20k + 0.10l					0.00	均势	0.46	0.49l	-0.03	负向
	救灾专业技能	0.229	0.60 + 0.20i + 0.10j + 0.10k + 0.00l					0.60	同势	0.43	0.00l	0.43	正向
	医疗救助水平	0.141	0.50 + 0.10i + 0.10j + 0.20k + 0.10l					0.40	同势	0.44	0.46l	-0.02	负向
	应急响应速度	0.049	0.40 + 0.40i + 0.10j + 0.10k + 0.00l					0.40	同势	0.37	0.00l	0.37	正向
	现场指挥协调能力	0.092	0.40 + 0.10i + 0.30j + 0.20k + 0.00l					0.40	同势	0.62	0.00l	0.62	正向
	合计	1.000	0.31 + 0.24i + 0.22j + 0.17k + 0.06l					0.25	同势	0.46	0.30l	0.16	正向
应急恢复能力 0.116	政府救助机制	0.540	0.30 + 0.00i + 0.20j + 0.10k + 0.40l					-0.10	反势	1.00	0.79l	0.21	正向
	灾害保险制度	0.171	0.20 + 0.30i + 0.30j + 0.20k + 0.00l					0.20	同势	0.47	0.00l	0.47	正向
	灾后恢复重建能力	0.048	0.10 + 0.10i + 0.40j + 0.20k + 0.20l					-0.10	反势	0.72	0.75l	-0.03	负向
	灾情评估及追责机制	0.241	0.30 + 0.20i + 0.40j + 0.10k + 0.00l					0.30	同势	0.63	0.00l	0.63	正向
	合计	1.000	0.27 + 0.11i + 0.27j + 0.12k + 0.23l					0.04	同势	0.81	0.46l	0.35	正向
	总合计	1.000	0.39 + 0.18i + 0.22j + 0.11k + 0.10l					0.29	同势	0.61	0.31l	0.30	正向

3.3 结果分析

根据上述同异反评价模型的结果,并结合五元联系数发展态势排序表^[27],W县自然灾害应急管理综合能力联系函数值 μ 为-0.02,能力评估等级为“一般”,总体发展态势为反势173级,为强反势区,且四阶效应全偏联系数为0.02,表明该县的灾害应急管理能力仅有较弱的向优方向发展的趋势,能力降低风险较大;在18个能力评估指标中,处于同势的指标与反势的指标相当,也说明该县灾害应急管理能力处于一般水平。而S市自然灾害应急管理综合能力联系函数值为0.29,能力等级隶属于“良好”,总体发展态势为同势19级,为强同势区,且四阶效应全偏联系数为0.30,表明该市有能力继续向好的趋势发展;在18个能力评估指标中,处于同势的指标要远多于反势的指标,说明该市在自然灾害应急管理建设中取得不错成果。

在准则层指标中,W县除应急准备能力为“较差”水平外,其余3项能力均为“一般”水平,且应急预防能力和应急准备能力均处于强反势区,发展趋势均呈负向,能力下降风险较高,说明该县的应急管理存在重救援轻预防的现象,应提高预防准备阶段的重视程度,重点改进处于反势且权重较大的指标层因素,如“社会公众参与度”、“危机信息处理与发布”、“应急物资保障”等;S市的应急恢复能力隶属于“一般”,其余3项能力均为“良好”,虽然应急恢复能力的总体发展态势为同势21级,四阶效应全偏联系数为0.35,能力有较强的提高趋势,但仍需加强管理,重点关注处于反势的指标因素,总结经验教训,健全政府救助机制,积极开展恢复重建工作。

在指标层中,W县有7个指标处于“反势”,指标项均处于“较差”或“一般”水平,从未来发展趋势看,指标“危机信息处理与发布”的四阶效应偏联系数虽大于0但仅为0.01,水平提高趋势较弱,而其他6个指标的四阶效应偏联系数均小于0,呈负向走势,表明系统情况变差,恶化风险不断增高,应引起决策者的高度重视。S市有4个指标的发展态势为“反势”且均处于“一般”水平,其中指标“灾后恢复重建能力”呈现下降趋势,地方政府应提高灾后恢复工作重视程度,优先提升此类因素。

通过对比两地的自然灾害应急管理能力评估结果,可发现在灾害应急管理全过程中,S市除应急恢复能

力与W县处于相同水平外,其余各项能力均优于W县,与实际吻合,也证明了城市灾害应急能力与各地的行政级别、经济发展水平以及城市在防灾减灾方面的财政投入有着较强的正相关性,与学者王瑛等的研究结论基本一致^[31]。

4 结论

本文将集对分析法应用至自然灾害应急管理评估中,构建了多元联系数同异反评估模型,提出了集状态评价和趋势分析为一体的自然灾害应急管理综合评估方法。同时,结合不确定层次分析和集对分析确定指标权重、基于专家可信度确定专家权重,引入效应全偏联系数概念至应急能力发展趋势评估中,使评价结果更合理。通过选取2个不同层面的城市作为研究对象,结果表明,W县和S市的自然灾害应急管理分别为“一般”和“良好”水平,与实际情况基本一致,证明各地区应急管理能力和当地经济发展水平是密不可分的。W县的应急预防能力和应急准备能力均处于强反势区,能力下降风险大,应重视相应因素,通过不断完善法律法规,大力提高社会公众的参与度,加强应急队伍建设和应急物资保障等以提高应急管理综合能力;S市应大力提升应急恢复能力,健全善后恢复机制,积极开展恢复重建工作。研究结果表明了集对分析法的有效性和可行性,为自然灾害应急管理评估提供了新的研究思路。

参考文献:

- [1] 冯浩,张方,戴慎志.综合防灾规划灾害风险评估方法体系研究[J].现代城市研究,2017,32(8):93-98.
FENG Hao, ZHANG Fang, DAI Shenzi. The research on the method system of risk assessment in multi-hazard mitigation plan[J]. Modern Urban Research, 2017, 32(8): 93-98. (in Chinese)
- [2] 王彤.应急管理部发布2021年全国自然灾害基本情况[J].中国减灾,2022,(3):7.
WANG Tong. The Emergency Management Department released the basic information of national natural disasters in 2021 [J]. Disaster Reduction in China, 2022,(3): 7.(in Chinese)
- [3] 吴新燕,顾建华.国内外城市灾害应急能力评价的研究进展[J].自然灾害学报,2007,16(6):109-114.
WU Xinyan, GU Jianhua. Advance in research on urban emergency management capability assessment at home and abroad[J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(6): 109-114. (in Chinese)
- [4] ZHOU S Y, HUANG A C, WU J, et al. Establishment and assessment of urban meteorological disaster emergency response capability based on modeling methods [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022: 79.
- [5] ZHANG X S, LI S S, ZHANG X H. Evaluation of emergency rescue ability based on RS-IPA: Evidence from coal mining firms [J]. Natural Hazards, 2021, 106(3): 1915-1929.
- [6] OTAY İ, JALLER M. Multi-expert disaster risk management & response capabilities assessment using interval-valued intuitionistic fuzzy sets[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2019, 38(1): 835-852.
- [7] 金小明,王震,孙得璋,等.一种灾害性天气应急管理水平的评价方法——以杭州上城区为例[J].自然灾害学报,2018,27(1):106-112.
JIN Xiaoming, WANG Zhen, SUN Dezhang, et al. An evaluation method of emergency management capability of meteorological disaster: A case study of Shang-Cheng district of Hangzhou City[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(1): 106-112. (in Chinese)
- [8] 郭燕,郝蒙浩,赵秋红.基于ISM和FCE的地震应急管理评估[J].自然灾害学报,2016,25(5):133-141.
GUO Yan, XI Menghao, ZHAO QiuHong. Earthquake emergency management capacity evaluation based on ISM and FCE [J]. Journal of Natural Disasters, 2016,25(5):133-141.(in Chinese)
- [9] 许硕,唐作其,王鑫.基于D-AHP与TOPSIS的突发事件应急管理评估[J].计算机工程,2019,45(10):314-320.
XU Shuo, TANG Zuoqi, WANG Xin. Emergency management capability assessment based on D-AHP and TOPSIS[J]. Computer Engineering, 2019, 45(10): 314-320. (in Chinese)
- [10] 贺山峰,高秀华,杜丽萍,等.河南省城市灾害应急能力评价研究[J].资源开发与市场,2016,32(8):897-901.
HE Shanfeng, GAO Xiuhua, DU Liping, et al. Evaluation of urban disaster emergency capability in Henan Province[J]. Resource Development & Market, 2016, 32(8): 897-901. (in Chinese)
- [11] 赵克勤.集对分析及其初步应用[M].杭州:浙江科学技术出版社,2000.
ZHAO Keqin. Set pair analysis and its preliminary application[M]. Hangzhou: Zhejiang Science & Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [12] LYU H M, SHEN S L, ZHOU A N, et al. Assessment of safety status of shield tunnelling using operational parameters with enhanced SPA [J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2022: 123.
- [13] WANG Q L, ZHANG L B, HU J Q. An integrated method of human error likelihood assessment for shale-gas fracturing operations based on SPA and UAHP [J]. Process Safety and Environmental Protection,2019,123:105-115.
- [14] LYU H M, ZHENG Q, SHEN S L, et al. Method for a new risk assessment of urban water quality: IFN-SPA[J]. MethodsX, 2021, 8: 101237.

- [15] 张颖超,王璐,熊雄,等.基于SPA的福建省抗台风减灾能力评估[J].灾害学,2015,30(2):85-88.
ZHANG Yingchao, WANG Lu, XIONG Xiong, et al. Evaluation of typhoon disaster prevention and mitigation ability in Fujian Province based on set pair analysis[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(2): 85-88. (in Chinese)
- [16] 杨红梅,赵克勤.偏联系数的计算与应用研究[J].智能系统学报,2019,14(5):865-876.
YANG Hongmei, ZHAO Keqin. The calculation and application of partial connection numbers[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2019, 14(5): 865-876. (in Chinese)
- [17] 门宝辉,李晨,尹世洋.基于偏联系数的大兴区地下水水质时空动态演变趋势研究[J].水资源保护,2023,39(2):233-243.
MEN Baohui, LI Chen, YIN Shiyang. Analysis of spatio temporal dynamic evolution trend of groundwater quality in Daxing District based on partial connection number[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 233-243. (in Chinese)
- [18] 刘童,杨晓华,赵克勤,等.基于集对分析的水资源承载力动态评价——以四川省为例[J].人民长江,2019,50(9):94-100.
LIU Tong, YANG Xiaohua, ZHAO Keqin, et al. Dynamic evaluation of water resources carrying capacity based on set pair analysis: A case study of Sichuan Province[J]. Yangtze River, 2019, 50(9): 94-100. (in Chinese)
- [19] 金菊良,张浩宇,宁少尉,等.效应全偏联系数及其在区域水资源承载力评价中的应用[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2019,40(1):1-8.
JIN Juliang, ZHANG Haoyu, NING Shaowei, et al. Effect full partial connection number and its application in evaluation of regional water resources carrying capacity[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power, 2019, 40(1): 1-8. (in Chinese)
- [20] 金菊良,许继荣,陈梦璐,等.五元联系数的效应全偏联系及其在水问题趋势分析中的应用[J].灌溉排水学报,2021,40(9):93-101.
JIN Juliang, XU Jirong, CHEN Menglu, et al. The effect full partial connection of five element connection number and its application in trend analysis of water problems[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(9): 93-101. (in Chinese)
- [21] 杨亚锋,王红瑞,赵伟静,等.水资源承载力的集对势-偏联系数评价模型[J].工程科学与技术,2021,53(3):99-105.
YANG Yafeng, WANG Hongrui, ZHAO Weijing, et al. Evaluation model of water resources carrying capacity based on set pair potential and partial connection number[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(3): 99-105. (in Chinese)
- [22] MOHTADY A H, CHERYL D, JAMIE R, et al. Planning and assessment approaches towards disaster resilient hospitals: A systematic literature review [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021, 61: 102319.
- [23] 陈安,冯佳昊.2018年中国31个省市区应急表现能力评价[J].科技导报,2019,37(16):30-37.
CHEN An, FENG Jiahao. Assessment of 31 region's emergency performance capability in China in 2018 [J]. Science & Technology Review, 2019, 37(16): 30-37. (in Chinese)
- [24] 王会权,刘璐,谢东方.PPRR理论视角下自然灾害应急处置研究——以新乡市洪涝灾害处置为例[J].人民长江,2018,49(增刊2):27-31,34.
WANG Huiquan, LIU Lu, XIE Dongfang. Research on natural disaster emergency disposal from perspective of PPRR theory: Case of flood disaster disposal in Xinxiang City[J]. Yangtze River, 2018, 49(S2): 27-31, 34. (in Chinese)
- [25] 杨翼龄,张利华,黄宝荣,等.城市灾害应急能力自评价指标体系及其实证研究[J].城市发展研究,2010,17(11):118-124.
YANG Yiling, ZHANG Lihua, HUANG Baorong, et al. The analysis and practical application on self-assessment of disaster emergency capabilities of urban [J]. Urban Development Studies, 2010, 17(11): 118-124. (in Chinese)
- [26] 汪伟忠,卢明银,周波,等.基于集对分析的车间安全管理能力评价[J].安全与环境学报,2013,13(3):252-254.
WANG Weizhong, LU Mingyin, ZHOU Bo, et al. Assessment for the workshop safety management based on the set pair analysis[J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(3): 252-254. (in Chinese)
- [27] 王国平,杨洁,王洪光.五元联系数在地表水环境质量评价中的应用[J].安全与环境学报,2006,6(6):21-24.
WANG Guoping, YANG Jie, WANG Hongguang. Application of five-element connection number to the quality assessment of the surface water environment[J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(6): 21-24. (in Chinese)
- [28] 王家远,王宏涛.基于不确定AHP的建设项目风险模糊综合评判[J].深圳大学学报(理工版),2006,23(1):48-53.
WANG Jiayuan, WANG Hongtao. Fuzzy comprehensive evaluation for construction project risks based on uncertainty AHP[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2006, 23(1): 48-53. (in Chinese)
- [29] 潘仁飞,邹乐乐,侯运炳.基于专家可信度的不确定型AHP方法及其应用[J].系统工程,2008,26(10):101-106.
PAN Renfei, ZOU Lele, HOU Yunbing. The method of uncertain AHP based on expert credibility and its application [J]. Systems Engineering, 2008, 26(10): 101-106. (in Chinese)
- [30] 张晖,余蕊,张宁池,等.基于5G通信的智能配电网改造经济性综合评估方式[J].科学技术与工程,2021,21(25):10746-10754.
ZHANG Hui, SHE Rui, ZHANG Ningchi, et al. Comprehensive evaluation method of economics of smart distribution network reconstruction based on 5G communication [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(25): 10746-10754. (in Chinese)
- [31] 王瑛,赵谦,曹玮.气象灾害应急管理评价体系研究[J].安全与环境学报,2011,11(5):245-251.
WANG Ying, ZHAO Qian, CAO Wei. Study on evaluation system of meteorological disasters emergency management ability [J]. Journal of Safety and Environment, 2011, 11(5): 245-251. (in Chinese)