doi:10.11988/ckyyb.20181271 2020,37(3):37-44

基于柔性耦合权重的四川省洪灾评估标准计算

廖 力[1],周雪芹[2],邹 强[3],高 峰[2],纪 锋[1]
(1.湖北工业大学 电气与电子工程学院,武汉 430068;2.湖北工业大学 工程技术学院,武汉 430068;
3.长江勘测规划设计研究院,武汉 430010)

摘 要:洪灾损失具有随机性、模糊性和不确定性,其评估标准难以确定。采用加权模糊核聚类(WFKCA)方法对四川省历史洪灾样本集进行模糊聚类迭代运算,提取其中的内在分布特性,从而计算出洪灾损失各类别间的边界值,作为洪灾损失评估的参考标准。为了使评估工作具有一定普适性,针对性地选取了评估指标体系,并且对绝对值及相对值2种标准进行了探讨。考虑到指标权重对评估工作的关键性,利用模糊层次分析法计算出的主观综合判断矩阵推导出各指标权重的专家组指导性范围,并用来约束WFKCA对客观权重的搜索范围,得到在满足专家组主观决策偏好的前提下尽可能对代表客观性的聚类效果进行优化的主、客观性间柔性耦合的权重。实例分析证明本文提出的方法计算出的洪灾评估标准较为可靠,具有一定的参考价值。

关键词:洪灾评估标准;加权模糊核聚类;模糊聚类迭代运算;模糊层次分析法;柔性耦合权重
中图分类号:P333.2 **文献标志码**:A
文章编号:1001-5485(2020)03-0037-08

Calculation of Flood Disaster Assessment Standard for Sichuan Province Based on Flexible Coupling Weighting Method

LIAO Li[1], ZHOU Xue-qin[2], ZOU Qiang[3], GAO Feng[2], JI Feng[1]
(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;
2. Engineering and Technology College, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;
3. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: The evaluation standard of flood disaster loss is difficult to determine due to its randomness, fuzziness and uncertainty. In this paper the internal distribution characteristics of historic flood sample set in Sichuan Province as a case study were extracted through fuzzy clustering iteration calculation using the weighted fuzzy kernel clustering algorithm (WFKCA). The boundary values between different flood loss levels were calculated as the reference standard in flood loss assessment. The evaluation indexes were selected specifically to make the assessment universal, and two kinds of standards (absolute value and relative value) of data set were discussed, respectively. In view that index weights are crucial to the assessment, a flexible coupling weighting method (FCWM) is proposed. Firstly, the fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) algorithm was adopted to calculate the subjective judgment matrix for deducing the expert guidance range of each index weight; then the guidance range was applied to constrain the objective weight search range of WFKCA. The FCWM could get the optimized cluster effect as much as possible on the premise of meeting the subjective decision-making preferences. Experimental simulations show that the assessment standard calculated by FCWM is relatively reliable and valuable for the decision-making reference.

Key words: flood disaster assessment standard; weighted fuzzy kernel clustering algorithm (WFKCA); fuzzy clustering iterative calculation; fuzzy analytic hierarchy process (FAHP); flexible coupling weighting method (FCWM)

收稿日期:2018-11-30;**修回日期**:2019-03-11
基金项目:湖北省教育厅科学研究项目(B2017456);湖北省教育厅人文社会科学研究项目(16Q096)
作者简介:廖 力(1979-),男,湖北武汉人,副教授,博士,主要从事模糊综合评价、洪灾风险分析等研究。E-mail: amazon2008@163.com
通信作者:周雪芹(1984-),女,湖北武汉人,副教授,硕士,主要从事风险分析与管理研究。E-mail:conmie2008@163.com

1 研究背景

近十年来，极端气候情况频繁出现，而经常伴随其出现的洪水灾害会对人类社会造成极大危害[1-2]。洪灾损失评估工作能提供直观精确的因洪水灾害而造成的破坏程度等级，客观、有效地反映区域洪灾风险程度，为决策者进行发展规划提供相关支撑，同时为制定相关防控策略提供科学依据，是洪水灾害风险调控系统的重要组成部分。然而，洪灾评估工作中存在的随机性、模糊性以及时空差异性问题导致相关评估标准不易确定。对洪灾等级评估标准的制定方法的探讨一直在进行[3-5]，但均在处理时空分布导致的指标值差异、反映洪水灾害损失随等级非线性增长规律等方面不同程度存在一些不足。

洪灾导致的受损情况与洪水规模、突发程度、区域环境、承灾体集中度、防灾减灾措施等因素有关。如果历史灾情样本集真实可靠，受损情况必然是以上因素的外在反映，从而会遵循一定的非线性分布规律。为此，本文尝试利用模糊聚类方法[6]的智能聚集特性来发掘这一分布规律，找出不同等级洪灾样本间的边界值，将其作为洪水灾情等级评估的参考标准。为达到这一目的，灾情样本集必须在各等级上均有完备的分布并且规模足以达到提取其中的分布规律；而分析可知，四川省 1976—2006 年洪水灾情样本集完全符合以上要求[7]。为了使工作不失一般性，对评估指标体系的普适性及标准的形式进行了一些探讨。另外，对于较为关键的指标权重选取问题，本文试图突破以往单一主观权重或客观权重或分别求出两者后折衷的框架限制，建立了一种在权重制定过程中以满足决策者主观偏好为前提、同时兼顾聚类效果优化的方法。

根据以上思想，本文探讨了洪水灾情指标体系的选取及评估标准的表示形式对评估工作的影响，然后利用具有良好聚类效果的加权模糊核聚类[8]（Weighted Fuzzy Kernal Clustering Algorithm，WFKCA）方法来对四川省 1976—2006 年洪水灾情样本集进行聚类迭代运算，利用隶属度矩阵和聚类中心矩阵来找出不同类别洪水间的边界样本，以此作为灾情评估的参考样本。在聚类过程中，首先用模糊层次分析法[9-10]（Fuzzy Analytic Hierarchy Process，FAHP）计算出指标权重的主观性专家组指导性范围，并用来限定 WFKCA 对客观权重的搜索范围，从而在满足主观决策意义的前提下能够达到尽可能好的聚类有效性，使得在权重制定过程中能实现主、客观性间的柔性耦合。

2 WFKCA 评估方法介绍

WFKCA 模型通过核映射[11-12]将样本空间映射至高维特征空间，并在高维特征空间推求线性回归方程，使处理后的样本更适合于聚类运算，能有效提高聚类效果，改善对于样本间特征差异的依赖，且其计算复杂度不会随着特征空间维数的增加而有明显变化。

WFKCA 的目标函数为

$$J_{\mathrm{WFKCA}} = 2\sum_{i=1}^{C}\sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{L} {u_{ij}}^{m}{\omega_{ik}}^{\beta}[1 - K(x_{jk},v_{ik})]\ 。 \tag{1}$$

式中：C 为聚类类别数；N 为样本数量；L 为指标维数；u_{ij} 为 x_j 对于类别 i 的隶属度；ω_{ik} 为第 i 类第 k 维属性的权重；x_{jk} 为样本 j 第 k 维的特征值；v_{ik} 为第 i 类第 k 维的聚类中心值；m 和 β 为模糊性系数，且 $m>1$，$\beta>1$；$K(x,y)=\exp(-\|x-y\|^2/\sigma^2)$，为高斯核函数，其中 σ 是标准方差。

通过对目标函数最小值求解，可以得到隶属度矩阵 $\boldsymbol{U}$、聚类中心矩阵 $\boldsymbol{V}$ 和权重矩阵 $\boldsymbol{\omega}$：

$$\begin{cases} u_{ij} = \left\{ \sum_{r=1}^{C} \dfrac{\sum_{k=1}^{L}\omega_{ik}^{\beta}[1 - K(x_{jk},v_{ik})]}{\sum_{k=1}^{L}\omega_{ik}^{\beta}[1 - K(x_{jk},v_{rk})]} \right\}^{-\frac{1}{m-1}}, \\ v_{ik} = \dfrac{\sum_{j=1}^{N} u_{ij}^{m}K(x_{jk},v_{ik})\ x_{jk}}{\sum_{j=1}^{N} u_{ij}^{m}K(x_{jk},v_{ik})}, \\ \omega_{ik} = \left\{ \sum_{t=1}^{L} \dfrac{\sum_{j=1}^{N} u_{ij}^{m}[1 - K(x_{jk},v_{ik})]}{\sum_{j=1}^{N} u_{ij}^{m}[1 - K(x_{jk},v_{it})]} \right\}^{-\frac{1}{\beta-1}}。 \end{cases} \tag{2}$$

令每一指标在不同类别的权重相等，则 ω_{ik}^{t} 变为 ω_{k}^{t}，权重矩阵简化为一个权重向量。在 WFKCA 的求解过程中，若以权重向量 $\boldsymbol{\omega}$ 为优化对象，用混沌文化差分进化算法（Chaotic Cultural Differential Evolution，CCDE）[8]优化算法寻优，则能得到最优客观权重 $\boldsymbol{\omega}_0$。

3 FAHP 主观权重法介绍

为准确反映专家在决策过程中思维上的模糊性

和不确定性,可以采用如图 1 所示的梯形模糊数来改进 AHP 标度等级[9],构造 FAHP 方法,用相应的梯形模糊数“1′~9′”来替代传统 AHP 中的“1~9”标度等级,并计算多位专家意见统一后的模糊综合判断矩阵,再推求出主观权重。

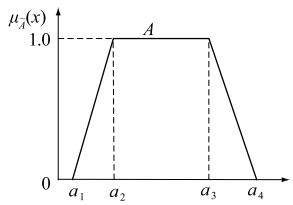


图 1　梯形模糊数 $\tilde{A}=(a_1,a_2,a_3,a_4)$ 的隶属函数

Fig. 1　Trapezoidal membership function of fuzzy number $\tilde{A}=(a_1,a_2,a_3,a_4)$

显然,当 $a_1=a_2=a_3=a_4$ 时,$\tilde{A}$ 退化为一个实数值;当 $a_1=a_2$ 且 $a_3=a_4$ 时,$\tilde{A}$ 退化为一个区间;当 $a_1<a_2=a_3<a_4$ 时,$\tilde{A}$ 转化为三角模糊数。

表征有 D 位成员的专家组的统一意见的模糊综合判断矩阵可按式(5)求解,即

$$\boldsymbol{C}=[\tilde{A}_{ij}]_{m\times m}=\frac{1}{D}(C^1+C^2+\cdots+C^D)=\left[\frac{1}{D}(\tilde{A}^1_{ij}+\tilde{A}^2{}_{ij}+\cdots+\tilde{A}^D{}_{ij})\right]_{m\times m}。\tag{5}$$

式中 $\tilde{A}_{ij}=(a_{ij},b_{ij},c_{ij},d_{ij})$,为属性 i 和 j 的综合相对重要性程度比较。

得到矩阵 $\boldsymbol{C}$ 后,用几何平均法求模糊评价期望,经归一化处理即可得主观权重向量 $\boldsymbol{\omega}_S$[10]。

4　基于柔性耦合权重的评估标准计算

指标权重系数作为描述各指标项在评价中的贡献程度的重要参量,在综合评价工作中十分关键,其合理性直接关系到评价结果的准确与否,更是决策者偏好的直观体现。目前指标权重确定方法主要有主观权重法[13-14]、客观权重法[15-16]以及组合权重法[17]3 类。但是,主观权重法根据专家偏好所确定的权重具有主观性、模糊性及不确定性,一般只能定性给出指导性范围,难以定量确定指标权重;而客观权重法聚焦于根据样本集内在分布规律使得聚类效果最优的目标,忽略了指标权重本身在综合评价中的“决策意义”[18];现有组合权重法多为分别计算主、客观权重后再将二者“折衷”来得到最终结果,往往既偏离了决策偏好,又使聚类效果远低于客观权重法。本文采用 FAHP 得到多位专家统一意见后的模糊综合判断矩阵,并由此推算出符合专家偏好的各指标权重的指导性选取范围,以此作为 WFKCA 对客观权重进行搜索的约束条件,使得最终结果在符合决策偏好的前提下能达到尽可能好的聚类效果,帮助决策者更好地进行相关决策工作。由此给出“柔性耦合权重”的含义:根据主观权重法的思想得出一个代表主观偏好的模糊性搜索范围,再利用客观权重法在此范围内进行搜索,从而使得最后得到的权重在满足主观性决策偏好的同时,尽可能使代表其客观性的聚类有效性最大化。

评估标准是洪灾等级评估工作中的重要组成部分,是对评估对象进行等级划分的依据,对相关防灾减灾政策的决策有着重大影响。评估标准一般以每一指标在每一类别中的上下限值来表示,实际上也是两相邻类别间的边界值。WFKCA 可以通过聚类迭代运算来发掘样本集内在分布特性,将相同类别样本紧密聚集在一起,而使不同类别间距离尽可能地稀疏。由隶属度的特性可知,相邻类别之间的边界点到两类别聚类中心的欧氏距离必然相等,可以据此计算出各类别间的边界值,并作为洪灾等级评估的参考标准。

基于柔性耦合权重的评估标准计算流程如图 2 所示,其具体步骤如下:

(1)用 FAHP 求解专家组模糊综合判断矩阵。邀请若干位专家对评价指标进行评分,按照各人对各指标两两之间的相对重要程度的主观判断构造模

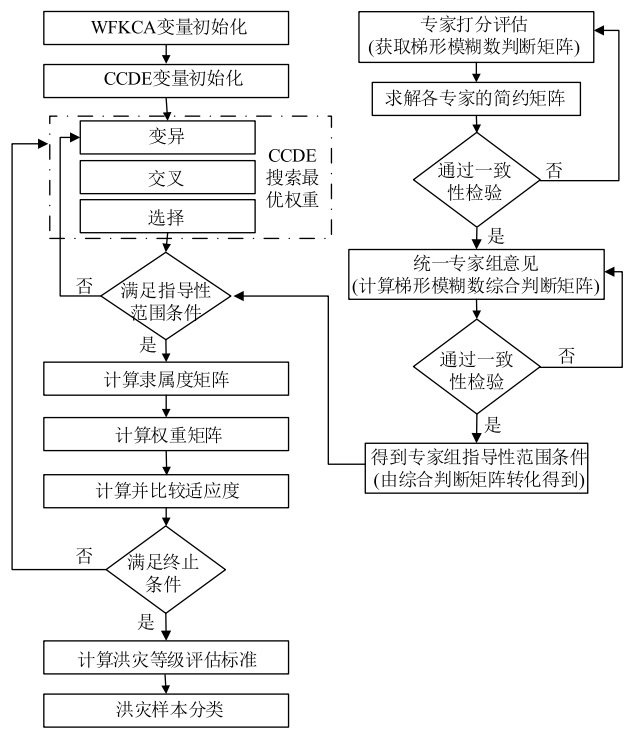


图 2　基于柔性耦合权重的评估标准计算流程

Fig. 2　Process of calculating evaluation standard based on flexible coupling weights

糊判断矩阵,通过一致性检验后再代入式(5)中求出模糊综合判断矩阵 $\boldsymbol{C}$。

(2)求解指标权重的专家组主观性指导范围。按以下定理一对模糊综合判断矩阵 $\boldsymbol{C}$ 求解在 WFKCA 中最优客观权重的搜索范围。

定理一:假设客观权重向量为 $\boldsymbol{\omega}_0$,则将 $\boldsymbol{\omega}_0$ 看成另一位"客观专家"的评分,同样用梯形模糊数形式来进行描述。由于客观权重为确定实数值,即图 1 中 $a_1=a_2=a_3=a_4$ 的情况,构建客观权重判断矩阵 $\boldsymbol{B}=[\tilde{B}_{ij}]_{m\times m}$,$\tilde{B}_{ij}=(B_{ij},B_{ij},B_{ij},B_{ij})$,则该矩阵应该符合专家组统一意见所限定的分布特性,即对于专家组综合判断矩阵 $\boldsymbol{C}=[\tilde{A}_{ij}]_{m\times m}$,$\tilde{A}_{ij}=(a_{ij},b_{ij},c_{ij},d_{ij})$,应有 $b_{ij}<B_{ij}<c_{ij}$。这里 $\tilde{A}_{ij}$ 表示专家组所做出的第 i 个指标相对于第 j 个指标的重要程度的主观性判断,数值形式上即为梯形模糊数所表示的 FAHP 标度等级。

(3)柔性耦合权重计算。初始化 WFKCA 参数及聚类中心矩阵,将上一步中求出的专家组指导范围作为 WFKCA 对最优客观权重进行搜索的约束条件,进行聚类迭代运算,得到在指导范围内使式(1)目标函数值最优的权重向量,即为满足条件的主、客观性柔性耦合的权重向量。这里的终止条件指达到指定的适应度精度或者达到 CCDE 最大进化代数。

(4)评估标准计算及评估结果输出。求解柔性耦合权重过程中,可得最优隶属度矩阵 $\boldsymbol{U}$ 及最优聚类中心矩阵 $\boldsymbol{V}$,可在矩阵 $\boldsymbol{V}$ 中 2 个相邻聚类中心向量 $\boldsymbol{v}_i$ 与 $\boldsymbol{v}_{i+1}$ 间找到与两点欧式权距离相等的点作为类别分界点,如式(6)所示。

$$s_{ik}=\frac{v_{i,k}+v_{i+1,k}}{2}\quad 。\tag{6}$$

式中 s_{ik} 为第 k 项指标 i 类与 i+1 类之间的分界点。得到的全部分界点矩阵 $\boldsymbol{S}=[s_{in}]_{C\times L}$ 即为分级标准。

同时,将最优隶属度矩阵 $\boldsymbol{U}$ 代入式(7)可得到第 j 个样本的等级特征值,即

$$L(j)=\sum_{i=1}^{C}u_{ij}\cdot i\quad 。\tag{7}$$

5 实例仿真及验证

5.1 指标体系及标准表示形式探讨

基于前文中对于用来计算标准的洪灾样本集所需达到的条件的分析,选取四川省 1976—2006 年共 31 a 的洪灾损失数据集作为研究对象,原数据集中有"受灾农田面积""受灾人口""倒房""损粮""死亡人口""直接经济损失"6 项指标。考虑到基础数据中并未找到房屋总数且房屋间差异性也较大,而损粮实际与受灾农田面积基本成比例性关系,因此最终选取"受灾农田面积""受灾人口""死亡人口""直接经济损失"4 项与国计民生最为相关的指标作为评估依据,与文献[7]一致。

另外在标准表示形式方面,在学习和分析了文献[19]中的相关规定后,也分为绝对值和相对值 2 套标准来分别计算,并根据《国家突发公共事件总体应急预案》的规定,参考文献[19]中内容将洪涝灾害分为一般洪涝灾害、较大洪涝灾害、重大洪涝灾害和特别重大洪涝灾害 4 个级别,分别以 1 级、2 级、3 级、4 级来对应表示。但出于以下考虑,本文在部分方面采用了与文献[19]中不同的做法:

(1)本文考虑从区域样本自身分布特性出发,尝试利用聚类方法来计算最佳边界值,为相关工作提供参考,因此其权重应在首要考虑主观决策偏好的前提下,次要顾及样本集内在分布特性的影响。

(2)发生灾害时出现死亡人口概率随着人口基数同步上升,因此对这一项分别设置了绝对值和相对值标准。

(3)直接经济损失一项,文献[19]考虑洪灾损失对当年区域 GDP 的影响,用前一年区域 GDP 来作为基准求取相对值,但四川省洪灾样本集中,考虑 1998 年特大洪水前后 5 a 的区域 GDP 总量[20](见表 1 所示)增长速度并未受到明显影响,并且考虑 2001 年后区域 GDP 年增长均超过 10%以上,2006 年相对 2005 年甚至达到将近 17%,若以上一年数据为基准,则对于反映损失数据的实际价值来说会存在一定误差,因此仍然以当年区域 GDP 来作为基准求取相对值。

采用最大最小法来消除单位量纲,如式(8)。

$$r_{ij}=\frac{x_{ij}-x_{i\min}}{x_{i\max}-x_{i\min}}\quad 。\tag{8}$$

相对值数据取为 $\frac{\text{受灾农田面积}}{\text{耕地总面积}}$、$\frac{\text{死亡人口}}{\text{总人口}}$、$\frac{\text{受灾人口}}{\text{总人口}}$、$\frac{\text{直接经济损失}}{\text{当年区域 GDP}}$。

表 1 1996—2006 年四川省 GDP

Table 1 Total GDP of Sichuan Province from 1996 to 2006

年份	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
GDP/(亿元)	2 871.65	3 241.47	3 474.09	3 649.12	3 928.2	4 293.5	4 725.01	5 333.09	6 379.63	7 385.11	8 637.81

为验证本文方法,收集了四川省 1976—2006 年间的洪灾损失数据[21-22]以及相应基础性数据[20],并分别对绝对值数据以及按照本节中方法所得的相对值数据进行了标准化计算及等级评估工作,并在可靠性及有效性方面进行了分析。采用式(8)进行标准化处理来消除量纲后的数据如表 2 所示。

5.2　指标权重的专家组指导性范围确定

借鉴文献[19]中对指标权重的设定,“死亡人口”与“直接经济损失”均为 0.3,而“受灾农田面积”和“受灾人口”均为 0.1,则前 2 项相对于后 2 项的重要性应该在梯形模糊数标度等级“5′”(明显重要)与“7′”(强烈重要)之间。邀请多位专家对指标相对重要性进行了评估[23],并按照式(5)计算得到如式(9)所示的专家组模糊综合判断矩阵。

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix} 1' & 6' & 6' & 1' \\ (6')^{-1} & 1' & 1' & (6')^{-1} \\ (6')^{-1} & (1')^{-1} & 1' & (6')^{-1} \\ (1')^{-1} & 6' & 6' & 1' \end{bmatrix}。\quad (9)$$

根据定理一,由综合判断矩阵得到各指标权重向量指导性范围,如表 3 所示。

表 3　各指标权重指导性范围

Table 3　Guiding range of each index weight

类别	受灾农田面积	死亡人口	受灾人口	直接经济损失
权重指导性下限	0.093 75	0.354 17	0.093 75	0.354 17
权重指导性上限	0.145 83	0.406 25	0.145 83	0.406 25

可知,专家偏好排序为“死亡人口”≈“直接经济损失”>“受灾人口”≈“受灾农田面积”。

5.3　柔性耦合权重方法有效性验证

为验证柔性耦合权重计算方法的有效性,对不同权重方法的评价结果聚类有效性进行比较。CCDE 算法初始化参量设置如下:种群规模为 50,最大进化代数为 500,交叉因子初值为 0.9,变异因子初值为 0.4,分段线性混沌映射参数 $r=0.8$,适应度精度终止条件为达到 10^{-4} 以下。以相对值数据为例,WFKCA 所得客观权重为 $\boldsymbol{\omega}_O$ = (0.014 2, 0.050 3, 0.016 5, 0.919 0),FAHP 计算所得到的主观权重为 $\boldsymbol{\omega}_S$ = (0.099 6, 0.400 4, 0.099 6, 0.400 4),按文献[24]中相关方法得到的组合权重为 $\boldsymbol{\omega}_C$ = (0.056 9, 0.225 35, 0.058 05, 0.659 7),本文提出的柔性耦合权重计算方法所得出的权重为

表 2　经过标准化处理后的四川省 1976—2006 年 4 类洪灾指标绝对值数据及相对值数据

Table 2　Four kinds of normalized absolute and relative values of flood indexes of Sichuan Province from 1976 to 2006

年份	受灾农田面积	受灾农田面积 / 耕地总面积	死亡人口	死亡人口 / 总人口	受灾人口	受灾人口 / 总人口	直接经济损失	直接经济损失 / 当年区域 GDP
1976	0.000 0	0.000 0	0.019 1	0.020 4	0.000 0	0.000 0	0.000 7	0.016 0
1977	0.020 5	0.018 8	0.000 0	0.000 0	0.015 1	0.017 8	0.000 0	0.006 1
1978	0.206 4	0.188 7	0.088 8	0.090 0	0.167 9	0.197 9	0.007 0	0.047 3
1979	0.085 7	0.078 9	0.456 4	0.468 2	0.069 8	0.081 3	0.012 2	0.064 4
1980	0.075 8	0.070 2	0.183 8	0.184 3	0.093 7	0.108 5	0.014 9	0.068 5
1981	0.363 4	0.337 3	1.000 0	1.000 0	0.324 0	0.374 2	0.208 3	1.000 0
1982	0.296 0	0.272 7	0.598 8	0.592 3	0.245 3	0.280 3	0.058 3	0.238 2
1983	0.265 5	0.248 0	0.266 5	0.259 5	0.255 1	0.288 8	0.047 0	0.168 3
1984	0.307 6	0.291 0	0.297 9	0.289 1	0.277 6	0.313 2	0.044 0	0.238 2
1985	0.196 6	0.189 2	0.134 0	0.126 9	0.174 4	0.194 5	0.036 1	0.079 3
1986	0.200 4	0.193 7	0.240 4	0.226 8	0.183 0	0.201 1	0.058 6	0.126 7
1987	0.425 4	0.410 2	0.330 8	0.308 7	0.430 2	0.469 3	0.059 7	0.109 8
1988	0.220 7	0.214 2	0.221 3	0.201 5	0.237 1	0.253 8	0.054 4	0.074 3
1989	0.550 8	0.532 2	0.595 7	0.546 1	0.663 3	0.707 9	0.217 2	0.329 7
1990	0.299 2	0.290 4	0.212 9	0.188 4	0.309 0	0.324 2	0.115 7	0.134 5
1991	0.185 7	0.181 7	0.145 7	0.125 2	0.400 5	0.417 2	0.154 7	0.153 0
1992	0.148 4	0.146 4	0.199 6	0.172 9	0.375 8	0.388 9	0.152 3	0.125 4
1993	0.477 5	0.468 1	0.195 8	0.168 2	0.528 1	0.544 9	0.203 4	0.133 3
1994	0.148 9	0.148 1	0.051 4	0.037 6	0.148 2	0.148 5	0.053 3	0.003 0
1995	0.395 3	0.391 0	0.274 3	0.234 2	0.403 4	0.408 5	0.464 6	0.194 4
1996	0.335 6	0.333 7	0.114 5	0.091 7	0.300 3	0.300 7	0.165 9	0.038 7
1997	0.286 4	0.286 8	0.238 1	0.198 9	0.286 9	0.285 1	0.211 6	0.047 3
1998	1.000 0	1.000 0	0.453 0	0.384 1	1.000 0	1.000 0	0.945 4	0.290 0
1999	0.267 4	0.272 3	0.098 8	0.075 5	0.291 8	0.286 5	0.200 5	0.035 0
2000	0.325 3	0.339 5	0.171 3	0.137 0	0.431 1	0.423 1	0.308 2	0.062 5
2001	0.395 9	0.418 7	0.131 4	0.102 1	0.440 7	0.431 1	0.508 9	0.109 4
2002	0.443 5	0.496 0	0.048 3	0.030 5	0.417 3	0.405 9	0.320 5	0.049 8
2003	0.510 2	0.593 6	0.166 0	0.129 7	0.574 8	0.557 4	0.427 3	0.064 1
2004	0.376 1	0.439 6	0.173 4	0.134 4	0.498 9	0.479 1	0.906 7	0.136 7
2005	0.458 1	0.533 4	0.092 5	0.065 7	0.668 0	0.639 9	1.000 0	0.128 7
2006	0.149 0	0.178 2	0.019 9	0.004 4	0.198 2	0.183 5	0.223 2	0.000 0

$\boldsymbol{\omega}_F$=(0.103 77,0.385 54,0.104 74,0.405 95)。不同权重情况下在 WFKCA 中对四川省洪灾样本集进行评估的聚类有效性指标[8]比较见表 4。

表 4 不同权重下四川省洪灾相对值评价的有效性比较

Table 4 Comparison of validity of relative values of flood evaluation of Sichuan Province with different weights

方法	欧氏距离平方和	XB	PC	PE
客观权重法	$8.880\ 3\times10^{-3}$	0.013 0	0.820 0	0.515 9
组合权重法	$1.387\ 4\times10^{-2}$	0.019 5	0.664 3	0.925 5
主观权重法	$2.179\ 2\times10^{-2}$	0.019 5	0.602 6	1.081 1
柔性耦合权重法	$2.084\ 3\times10^{-2}$	0.018 1	0.602 9	1.079 9

注:XB、PC、PE 均为针对聚类评价有效性的评价指标参数[8];欧式距离平方和越小越优,XB、PE 越小越优,PC 越大越优。

由表 4 可知,聚类有效性方面客观权重法最优,组合权重法次之,但两者均与专家组偏好判断相差较大,失去了最重要的“决策意义”。而主观权重法和柔性耦合权重均完全符合专家组确定的指导性范围,但柔性耦合权重聚类有效性要优于主观权重法,达到了在满足决策者主观偏好前提下尽可能提高聚类有效性的目的,使不同类别间差异最大化,可为洪灾损失评估提供更有力的决策支持。

5.4 标准计算及评估结果输出

将相对值数据下的柔性耦合权重 $\boldsymbol{\omega}_F$ 代入 WFKCA,求得隶属度矩阵 $\boldsymbol{U}$ 及聚类中心矩阵 $\boldsymbol{V}$。因篇幅所限,仅列出聚类中心矩阵 $\boldsymbol{V}$,即

$$\boldsymbol{V}=\begin{bmatrix}0.171\ 4 & 0.286\ 4 & 0.337\ 6 & 0.367\ 5\\ 0.046\ 2 & 0.138\ 2 & 0.257\ 5 & 0.539\ 6\\ 0.170\ 5 & 0.320\ 5 & 0.374\ 5 & 0.429\ 5\\ 0.023\ 4 & 0.105\ 7 & 0.132\ 6 & 0.279\ 4\end{bmatrix}。\quad(9)$$

用式(6)对聚类中心矩阵处理,并根据式(8)的逆向式反归一化后可得到四川省洪灾评估的相对值标准,如表 5 所示;将隶属度矩阵代入式(7)得到样本评估结果,如表 6 所示。同理,计算出的绝对值标准如表 7 所示,相应的评估结果一并放入表 6 中,其柱状图见图 3 所示。

表 5 反归一化后的相对值标准

Table 5 Relative value standard after reverse normalization

等级	受灾农田面积/耕地总面积	死亡人口/总人口	受灾人口/总人口	直接经济损失/当年区域 GDP
1	[0, 0.110 5)	[0, 2.78×10^{-6})	[0, 0.118 9)	[0, 3.85×10^{-3})
2	[0.110 5, 0.141 2)	[2.78×10^{-6}, 4.69×10^{-6})	[0.118 9, 0.162 7)	[3.85×10^{-3}, 1.01×10^{-2})
3	[0.141 2, 0.205 4)	[4.69×10^{-6}, 8.31×10^{-6})	[0.162 7, 0.236 5)	[1.01×10^{-2}, 2.01×10^{-2})
4	[0.205 4, ∞)	[8.31×10^{-6}, ∞)	[0.236 5, ∞)	[2.01×10^{-2}, ∞)

表 6 四川省洪灾评估结果

Table 6 Evaluation results of flood disaster in Sichuan Province

年份	洪水灾情等级评估结果				文献[7]等级
	绝对值样本		相对值样本		
	特征值	等级	特征值	等级	
1976	1.284 9	1	1.209 0	1	1
1977	1.298 4	1	1.228 9	1	1
1978	1.109 0	1	1.309 5	1	2
1979	2.178 9	2	2.876 5	3	2
1980	1.337 3	1	2.174 4	2	2
1981	3.873 4	4	4.499 9	4	4
1982	2.827 6	3	3.767 0	4	3
1983	1.915 9	2	2.908 7	3	3
1984	1.945 2	2	2.946 5	3	3
1985	1.140 1	1	1.864 2	2	2
1986	1.829 6	2	2.790 9	3	2
1987	2.039 7	2	2.817 0	3	3
1988	1.834 1	2	2.372 6	3	2
1989	3.677 1	4	3.906 0	4	4
1990	1.985 2	2	2.420 4	2	2
1991	1.900 5	2	2.097 0	2	2
1992	1.948 5	2	2.260 9	2	2
1993	2.265 1	2	2.159 3	2	3
1994	1.075 4	1	1.042 6	1	1
1995	2.949 6	3	2.713 5	3	3
1996	1.897 1	2	1.526 7	2	2
1997	2.108 6	2	2.246 3	2	2
1998	4.458 7	4	3.165 0	4	4
1999	1.983 5	2	1.276 3	1	2
2000	2.753 0	3	1.989 9	2	2
2001	2.977 7	3	1.994 7	2	3
2002	2.715 9	3	1.598 4	2	2
2003	2.971 0	3	2.034 1	2	3
2004	4.230 4	4	2.049 8	2	3
2005	4.258 0	4	2.009 8	2	3
2006	1.470 3	1	1.131 0	1	1

表 7 反归一化后的绝对值标准

Table 7 Absolute value standard after reverse normalization

灾损等级	受灾农田面积/(万亩)	死亡人口/人	受灾人口/(万人)	直接经济损失/(亿元)
1	[0, 686.74)	[0, 251)	[0, 872.96)	[0, 10.48)
2	[686.74, 1 043.39)	[251, 320)	[872.96, 1 111.89)	[10.48, 20.55)
3	[1 043.39, 1 487.81)	[320, 625)	[1 111.89, 1 574.15)	[20.55, 40.32)
4	[1 487.81, ∞)	[625, ∞)	[1 574.15, ∞)	[40.32, ∞)

注:1 亩约为 666.67 m^2

对表 5、表 6、表 7 中计算结果及图 3 分析可知,本文相对值数据评估结果与文献[7]相近,对所存在差异的分析如下:文献[7]中投影方向向量 $\boldsymbol{a}$=(0.484 6,0.547 9,0.292 7,0.615 9)可通过归一化方法转化为客观权重向量 $\boldsymbol{\omega}_0$=(0.249 6,0.282 2,0.150 8,0.317 3),可以看出文献[7]中认为受灾农田面积与死亡人口重要性相近,与本文柔性耦合权

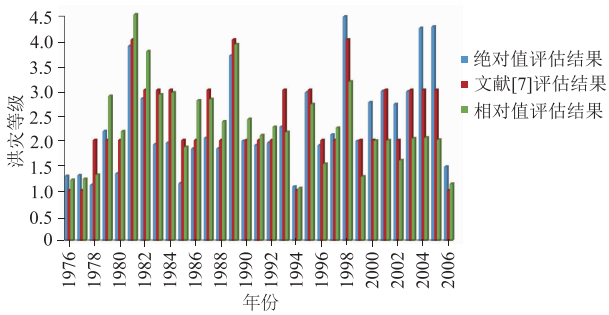


图 3　四川省 1976—2006 年洪灾等级评估结果

Fig. 3　Evaluation results of flood level in Sichuan Province from 1976 to 2006

重 $\boldsymbol{\omega}_F$ 有所不同,因各指标对评估结果贡献程度的认识有所不同而导致评估结果存在差异。

而对于绝对值数据的评价结果,分析可知本文绝对值评估标准及评估结果也是合理有效的。首先以众所周知的 1998 年特大洪水为参考,其 4 项指标受灾农田面积、死亡人口、受灾人口、直接经济损失的绝对值分别为 3 012.6 万亩、670 人、3 681.4 万人和 127.9 亿元,均超过表 7 中 4 级灾标准,并且“受灾农田面积”和“受灾人口”2 项均为历年最高,“直接经济损失”一项为历年来第二高,远超 4 级灾下限,故等级特征值 4.458 7 为所有样本中最高;又如 1981 年样本,其 4 项指标受灾农田面积、死亡人口、受灾人口、直接经济损失的绝对值分别为 1 154.9 万亩、1 384 人、1 256.5 万人、28.7 亿元,有 3 项在表 7 中属于 3 级,但死亡人口远超 4 级灾下限,且贡献程度较高,因此等级特征值为 3.8734,被评为 4 级属于合理范围。限于篇幅这里不再对其他样本一一分析。

另外,从图 3 可以看出,绝对值数据的评估结果与相对值数据的评估结果有很大不同,典型的有 2004 年、2005 年绝对值情况下评为 4 级,而相对值情况下评为 2 级,这是由于随着人口、经济等基数的高速增长,这两年损失绝对值较大而相对值却较小所造成的。这一点从表 2 可以很清晰地看出,这两年的直接经济损失绝对值标准化后为 0.906 7 和 1.0,分别为历史第 3 和第 1,但相对值经过标准化后却分别只有 0.136 7 和 0.128 7,而直接经济损失在本文柔性耦合权重中贡献程度达到 0.4 以上,是最重要的决策指标,故评价结果会有较大不同。

这是 2 种不同决策思路的体现,两者各有其意义所在:绝对值标准更加直观地反映损失情况,但是当时空分布变化时,基础数据差异巨大,导致评估结果普适性不高,比较适于某一固定区域较短年限内不同场次洪灾损失的直观评估;相对值标准能够一定程度上抑制时空分布不均以及通货膨胀、人口增长等因素的影响,普适性相对较高,但是不够直观,相关决策时也要结合基础数据来判定,如援灾减灾投入也应按照地区基础数据相对值来考虑。对于本文中四川省这一特定区域研究对象,笔者认为,2 种标准都有其存在意义,决策者可以根据 2 种评估结果来综合考虑相关政策的制定。当然,若待评估对象时空特性差异较大,如不同省市在不同年份的洪灾损失样本集,则普适性更高的相对值标准更为合适。

最后,按照文献[19]中相关规定,计算各指标平均值 $\bar{X}$ 后以 $\{(0,0.5\bar{X})$、$[0.5\bar{X},\bar{X})$、$[\bar{X},1.5\bar{X})$、$[1.5\bar{X},\infty)\}$ 来确定洪水灾害等级标准中 4 个灾害损失级别的边界阈值,见表 8。

表 8　按文献[19]规定所得绝对值标准

Table 8　Absolute value standard in accordance with the provisions of literature [19]

灾损等级	受灾农田面积/(万亩)	死亡人口/人	受灾人口/(万人)	直接经济损失/(亿元)
1	[0,490.47)	[0,191)	[0,649.33)	[0,15.9)
2	[490.47,980.94)	[191,382)	[649.33,1 298.65)	[15.9,31.8)
3	[980.94,1 471.41)	[382,573)	[1 298.65,1 947.98)	[31.8,47.7)
4	[1 471.41,∞)	[573,∞)	[1 947.98,∞)	[47.7,∞)

将表 8 与表 7 相比较,可以看出两者较为相近。考虑到本文根据目标区域洪灾损失样本集内在分布规律进行聚类划分,并寻找各级别间边界值作为类别划分依据,且相关等级评估结果可靠、有效,因此计算所得评估标准的客观性和针对性较强,反映了洪灾损失随级别上升而非线性增长特性,对于相关决策工作具有可操作的参考价值。

6　结　语

洪水灾害等级评估标准对于防洪减灾相关决策工作非常重要,但由于洪水灾害的非线性特性而难以计算。本文尝试利用聚类方法对历史洪水灾害样本集的内在分布规律进行提取,通过计算各聚类类别间的边界值来获得分类标准。实例计算中,本文首先在考虑有效性和普适性的前提下讨论了四川省洪灾评估标准的指标体系及标准表示形式;然后从决策者重要程度偏好以及综合评估的角度出发,采用了以满足主观偏好为主、兼顾聚类有效性的提高的柔性耦合权重计算方法;最后分别给出了计算所得绝对值和相对值 2 种指标体系下的评估标准。实例计算与结果分析表明,对于同一区域内不同年份洪灾的损失评估工作来说,本文提出的方法计算所

得的评估标准具有客观性、针对性和普适性,可作为相关标准制定工作的参考依据。

参考文献:

[1] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报,2013,44(7):779-790.

[2] PALL P, AINA T, STONE D A, *et al*. Anthropogenic Greenhouse Gas Contribution to Flood Risk in England and Wales in Autumn 2000 [J]. Nature, 2011, 470(7334): 382-385.

[3] 蒋金才,季新菊,刘 良,等. 河南省 1950—1990 年水旱灾害分析[J]. 灾害学,1996,11(4): 69-73.

[4] LI Qiong, ZHOU Jian-zhong, LIU Dong-han, *et al*. Research on Flood Risk Analysis and Evaluation Method Based on Variable Fuzzy Sets and Information Diffusion [J]. Safety Science, 2012, 50(5): 1275-1283.

[5] 魏一鸣,金菊良,杨存建,等. 洪水灾害风险管理理论[M]. 北京:科学出版社,2002.

[6] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京:国防工业出版社,1998.

[7] 陈 曜,丁 晶,赵永红. 基于投影寻踪原理的四川省洪灾评估[J]. 水利学报,2010,41(2):220-225.

[8] LIAO Li, ZHOU Jian-zhong, ZOU Qiang. Weighted Fuzzy Kernel-clustering Algorithm with Adaptive Differential Evolution and Its Application on Flood Classification[J]. Natural Hazards, 2013, 69(1): 279-293.

[9] 罗志猛,周建中,杨俊杰,等. 基于模糊 AHP 的虚拟研究中心合作伙伴选择[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2008,36(12):100-103.

[10] 邹 强,周建中,周 超,等. 基于最大熵原理和属性区间识别理论的洪水灾害风险分析[J]. 水科学进展,2012, 23(3):323-333.

[11] 张 莉,周伟达,焦李成. 核聚类算法[J]. 计算机学报, 2002,25(6): 587-590.

[12] 吴小燕,陈松灿. 联机核模糊 C 均值聚类方法[J]. 系统工程与电子技术,2012,34(12):2599-2606.

[13] 金菊良,魏一鸣,丁 晶. 基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J]. 水利学报,2004(3): 65-70.

[14] 田 军,张朋柱,王刊良,等. 基于德尔菲法的专家意见集成模型研究[J]. 系统工程理论与实践,2004,26(1):57-62,69.

[15] HE Yao-yao,ZHOU Jian-zhong,KOU Pan-gao,*et al*. A Fuzzy Clustering Iterative Model Using Chaotic Differential Evolution Algorithm for Evaluating Flood Disaster[J]. Expert Systems with Applications,2011,38(8):10060-10065.

[16] 廖 力,周雪芹,邹 强,等. 基于模糊聚类迭代模型的洪灾评估标准计算方法[J]. 长江科学院院报,2015,32(2): 34-38.

[17] 袁永博,窦玉丹,刘 妍,等. 基于组合权重模糊可变模型的旱涝灾害评价[J]. 系统工程理论与实践,2013, 33(10):2583-2589.

[18] 何耀耀,宋晓晨,廖 力. 基于决策者偏好 DE 算法的模糊聚类迭代洪灾评估方法[J]. 长江科学院院报,2016, 33(4):33-38.

[19] SL 579—2012,洪涝灾情评估标准[S]. 北京:中国水利水电出版社,2012.

[20] 四川省统计局,国家统计局四川调查总队. 四川统计年鉴 2007[M]. 北京:中国统计出版社,2008.

[21] 四川省水利电力厅. 四川水旱灾害[M]. 北京:科学出版社, 1996:31-82.

[22] 四川省人民政府防汛抗旱指挥部办公室. 四川省 1996—2006 年洪涝灾害损失统计表[R]. 成都:四川省人民政府防汛抗旱指挥部办公室,2007.

[23] ZOU Qiang, ZHOU Jian-zhong, ZHOU Chao, *et al*. Comprehensive Flood Risk Assessment Based on Set Pair Analysis-variable Fuzzy Sets Model and Fuzzy AHP[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013, 27(2): 525-546.

[24] 金菊良,吴永林,汪明武. 城市防洪标准方案优选的组合权重方法[J]. 四川大学学报(工程科学版),2004,36(4): 1-5.

(编辑:罗 娟)

本刊电子信箱:cjkb@163.net