

# Study on Risk Zoning of Mountain Flood Disaster Based on Trapezoidal Fuzzy Number and Grey Clustering

Qiong Li<sup>1,2</sup>, Jiaming Cai<sup>2</sup>, Jianzhong Zhou<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hubei Polytechnic University, Huangshi Hubei

<sup>2</sup>School of Hydropower & Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Email: liqiong070108@163.com

Received: Apr. 28<sup>th</sup>, 2018; accepted: May 15<sup>th</sup>, 2018; published: May 22<sup>nd</sup>, 2018

---

## Abstract

In view of the existing risk assessment system of flood disasters in multiplicity, complexity, nonlinearity and uncertainty, this paper puts forward a comprehensive evaluation model based on trapezoidal fuzzy number and analytic hierarchy process (TFN-AHP), and combined with the grey clustering method, the comprehensive evaluation of the mountain flood disaster area is carried out. In this method, the traditional analytic hierarchy process (AHP) is improved, and the reliability of the evaluation results is improved by accurately quantifying the scale of traditional analytic hierarchy process (AHP). Then, TFN-AHP is applied to the regional risk analysis of mountain torrents disaster. The results show that the method is more objective and more practical than the single analytic hierarchy process. Thus, the results of mountain flood risk zoning obtained by this method have high application value in Hubei province.

## Keywords

Risk Analysis, Trapezoidal Fuzzy Number, Analytic Hierarchy Process, Trapezoid Whitening Weight Function, Grey Evaluation

---

# 基于梯形模糊数 - 灰色聚类的山洪灾害风险区划研究

李琼<sup>1,2</sup>, 蔡佳明<sup>2</sup>, 周建中<sup>2</sup>

<sup>1</sup>湖北理工学院, 湖北 黄石

<sup>2</sup>华中科技大学水电与数字化工程学院, 湖北 武汉

Email: liqiong070108@163.com

## 摘要

本文针对山洪灾害风险评价系统中存在的多重性、复杂性、非线性和不确定性，提出基于梯形模糊数和层次分析法的综合评价模型——梯形模糊层次分析法(TFN-AHP)，并与灰色聚类方法相结合对山洪灾害区域进行灰色综合评价，得到各区域的风险区划等级。本方法对传统层次分析法进行了改进，通过精确量化传统层次分析法(AHP)的等级标度，提高了评估结果的可信度。将此方法应用到山洪灾害区域风险分析中，结果表明：该方法较单一的层次分析法更加客观、结果更符合实际，应用此方法得到的湖北省山洪灾害风险区划结果具有较高应用价值。

## 关键词

风险分析，梯形模糊数，层次分析，梯形白化权函数，灰色评价

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

山洪灾害因其突发性强、破坏性大、发生频率高等特点，已成为我国危害较严重的自然灾害之一，尤其是长江中上游流域已经成为山洪灾害频发区域，严重威胁人民群众的生命财产安全，阻碍了经济的可持续发展[1] [2]。

山洪灾害风险分析是建立在对洪水灾害系统中致灾因子危险性分析和承灾体易损性分析基础上的[3]。目前山洪灾害风险分析的研究方法较多，如突变理论、神经网络和 GIS 技术等，更多的依赖于成熟的基础理论，各有其优点与不足[4]。灰色聚类考虑了模糊不确定性，利用最大隶属度原理，概念清晰、简单易行，能精确求出评价值并进行排序，已成功应用于防洪调度决策等领域。而对于模型中各风险指标权重的确定，常用方法有层次分析法[5]、遗传投影寻踪法[6]、变异系数法[7]和熵权法[8] [9]等。为了克服传统 AHP 方法过于主观和片面的局限性，使评价结果能更好的反映实际情况，本文利用梯形模糊数对 AHP 做出改进，并与灰色聚类分析相结合对山洪灾害风险进行综合评价，以为山洪灾害管理及防治决策提供理论依据。

## 2. 梯形模糊层次分析法(TFN-AHP)

在决策分析中，使用判断矩阵确定指标权重的方法具有十分广泛的应用，可根据矩阵中的元素构成方式将其分为 AHP (互反判断矩阵)和模糊判断矩阵两类。本文针对评价对象的不确定性，引入梯形模糊层次分析法，通过构造正互反梯形模糊判断矩阵  $R$  ( $R$  中的元素  $r_{ij}$  可表示为  $(a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})$ ) 来确定指标权重。在传统比较判断矩阵中，各元素值一般采用“1~9”比较标度法，然而“1~9”标度法存在一些缺陷，譬如不能比较“精确地”反映实际思维等[10]。为此，按标度给出的相对重要性大小应与定性分析结果基本相符的原则，本文采用改进后的标度等级，即利用表 1 所列的梯形模糊数隶属度函数计算与之对应的梯形模糊数，计算后得到的标度等级赋值如表 2 所示[11]。

**Table 1.** Trapezoid fuzzy numbers and corresponding membership functions  
**表 1.** 梯形模糊数及相应的隶属度函数

梯形模糊数	隶属度函数
$\tilde{1}$	$\left(1, 1, \frac{3}{2}, 2\right)$
$\tilde{x}$	$\left(x-1, x-\frac{1}{2}, x+\frac{1}{2}, x+1\right)$ for $x=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$
$\tilde{9}$	$\left(8, \frac{17}{2}, 9, 9\right)$

**Table 2.** Importance rank and assignment of elements in comparison with each other

**表 2.** 元素两两对比时的重要性等级及赋值

元素重要性比较	传统赋值	改进赋值	赋值
相等	1	5/5	$\tilde{5}/\tilde{5}=(1,1,1,1)$
稍微重要	3	6/4	$\tilde{6}/\tilde{4}=\left(1, \frac{11}{9}, \frac{13}{7}, \frac{7}{3}\right)$
明显重要	5	7/3	$\tilde{7}/\tilde{3}=\left(\frac{3}{2}, \frac{13}{7}, 3, 4\right)$
强烈重要	7	8/2	$\tilde{8}/\tilde{2}=\left(\frac{7}{3}, 3, \frac{17}{3}, 9\right)$
极端重要	9	9/1	$\tilde{9}/\tilde{1}=\left(4, \frac{17}{3}, 9, 9\right)$

上述两相邻判断中值 2、4、6、8 改进后分别取 5.5/4.5、6.5/3.5、7.5/2.5、8.5/1.5。

假设同时聘请  $L$  ( $L \geq 1$ ) 位专家(设各专家处于平等地位), 分别对同一指标集  $X$  中的  $n$  个指标进行两两比较判断, 并分别给出梯形模糊数互补判断矩阵, 则记第  $k$  位专家给出的判断矩阵为  $R^{(k)} = (r_{ij}^{(k)})_{n \times n}$ , 其中  $r_{ij}^{(k)} = (a_{ij}^{(k)}, b_{ij}^{(k)}, c_{ij}^{(k)}, d_{ij}^{(k)})$  ( $k=1, 2, \dots, L; i, j \in N$ )。下面给出关于梯形模糊数互补判断矩阵的权重确定方法及计算步骤[12]:

① 综合各专家的偏好信息, 其计算公式为:

$$r_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}) = \frac{1}{L} \otimes (r_{ij}^1 \oplus r_{ij}^2 \oplus \dots \oplus r_{ij}^L) = \left( \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L a_{ij}^{(k)}, \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L b_{ij}^{(k)}, \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L c_{ij}^{(k)}, \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L d_{ij}^{(k)} \right) \quad (i, j \in N) \quad (1)$$

计算各指标  $X_i$  得到模糊评价值, 其计算公式如下:

$$\tilde{v}_i = (a_i, d_i^{-1}, b_i, c_i^{-1}, c_i, b_i^{-1}, d_i, a_i^{-1}) \quad (2)$$

$$\text{其中: } a_i = \left[ \prod_{j=1}^n a_{ij} \right]^{1/n}, a = \sum_{i=1}^n a_i; \quad b_i = \left[ \prod_{j=1}^n b_{ij} \right]^{1/n}, b = \sum_{i=1}^n b_i; \quad c_i = \left[ \prod_{j=1}^n c_{ij} \right]^{1/n}, c = \sum_{i=1}^n c_i; \quad d_i = \left[ \prod_{j=1}^n d_{ij} \right]^{1/n}, d = \sum_{i=1}^n d_i$$

为减小个别专家的极端意见对权重结果的影响, 此处采用几何平均数代替算术平均数求解  $\tilde{v}_i$  ( $i \in N$ )。

② 计算指标  $X_i$  的模糊评价值的期望。由于  $\tilde{v}_i$  ( $i \in N$ ) 为梯形模糊数, 先计算出  $v_i$  的期望值, 即可确定各指标的权重:

$$I(\tilde{v}_i) = \alpha I^L(\tilde{v}_i) + (1-\alpha) I^R(\tilde{v}_i) \quad (3)$$

其中  $0 \leq \alpha \leq 1$ ,  $i \in N$  通常可取  $\alpha = 0.5$ , 则式(3)可变形为

$$I(\tilde{v}_i) = \frac{a_i + b_i + c_i + d_i}{4} \quad (i \in N) \quad (4)$$

特别的, 当  $b_i = c_i$  时,  $r_{ij}$  为三角模糊数, 则

$$I(\tilde{v}_i) = \frac{a_i + 2b_i + d_i}{4} \quad (i \in N) \quad (5)$$

③ 计算指标值的权重。对  $I(\tilde{v}_i)$  进行归一化即得各指标相对上一层权重为:

$$\omega_i = \frac{I(\tilde{v}_i)}{\sum_{i=1}^n I(\tilde{v}_i)}, \quad i \in N \quad (6)$$

### 3. 山洪灾害风险评价方法

在上文提出的梯形模糊综合权重法基础上, 本文确定的山洪灾害风险评价方法步骤为, 首先, 建立一个合理的评价指标体系; 其次, 利用本文提出的基于层次分析和梯形模糊(TFN-AHP)的组合方法求得各指标的综合权重; 最后, 采用灰色聚类分析法, 根据求得的权重系数, 确定每个对象归属的灰类, 从而得到山洪灾害风险区域的合理风险等级评价结果。

#### 3.1. 山洪灾害风险区划评价指标体系

山洪灾害风险区划是指根据研究区山洪危险性特征, 并参考区域承灾能力及社会经济状况, 把山洪灾害划分为不同风险等级的区域。要研究山洪灾害风险区划, 需要首先确定影响山洪灾害风险区划的主要因素。由于山洪灾害的形成和发展受约于多种自然与社会经济因素, 具有自然和社会双重属性, 因此可以根据成灾形成条件, 将影响洪灾风险区划的因子归结为自然因素和社会经济要素, 并结合已有实际资料, 建立山洪灾害风险分析指标体系(图 1)。

#### 3.2. 计算综合权重

下面通过聘请 4 位专家填写梯形互补判断矩阵对山洪灾害风险评价危险性和易损性指标的重要程度进行比较[13], 利用 MATLAB 软件编写相应程序, 根据式(1)得到如下各决策者的偏重信息。

$$r_{ij} = \begin{bmatrix} [1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00] & [1.00 & 1.17 & 1.64 & 2.00] & [0.57 & 0.65 & 0.86 & 1.00] \\ [0.57 & 0.65 & 0.86 & 1.00] & [1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00] & [0.29 & 0.38 & 0.61 & 0.75] \\ [1.00 & 1.17 & 1.64 & 2.00] & [1.38 & 1.70 & 2.71 & 3.58] & [1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00] \\ [0.30 & 0.40 & 0.63 & 0.77] & [0.38 & 0.49 & 0.75 & 0.92] & [0.15 & 0.22 & 0.38 & 0.49] \\ [1.38 & 1.70 & 2.71 & 3.58] & [1.46 & 1.83 & 3.10 & 4.42] & [1.25 & 1.54 & 2.43 & 3.17] \\ [0.57 & 0.65 & 0.86 & 1.00] & [1.13 & 1.38 & 2.14 & 2.75] & [0.38 & 0.49 & 0.75 & 0.92] \\ [0.15 & 0.22 & 0.38 & 0.49] & [0.18 & 0.25 & 0.44 & 0.55] & [0.11 & 0.13 & 0.22 & 0.29] \\ [0.29 & 0.38 & 0.61 & 0.75] & [1.00 & 1.11 & 1.43 & 1.67] & [2.13 & 2.71 & 5.00 & 7.75] \\ [0.30 & 0.40 & 0.63 & 0.77] & [0.38 & 0.49 & 0.75 & 0.92] & [1.92 & 2.43 & 4.33 & 6.50] \\ [0.34 & 0.44 & 0.68 & 0.83] & [1.13 & 1.38 & 2.14 & 2.75] & [4.00 & 5.67 & 9.00 & 9.00] \\ [0.15 & 0.18 & 0.31 & 0.40] & [0.22 & 0.29 & 0.49 & 0.61] & [1.13 & 1.38 & 2.14 & 2.75] \\ [1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00] & [1.58 & 1.98 & 3.38 & 4.83] & [4.00 & 5.67 & 9.00 & 9.00] \\ [0.26 & 0.35 & 0.56 & 0.69] & [1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00] & [2.13 & 2.71 & 5.00 & 7.75] \\ [0.11 & 0.13 & 0.22 & 0.29] & [0.15 & 0.22 & 0.38 & 0.49] & [1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00] \end{bmatrix}$$

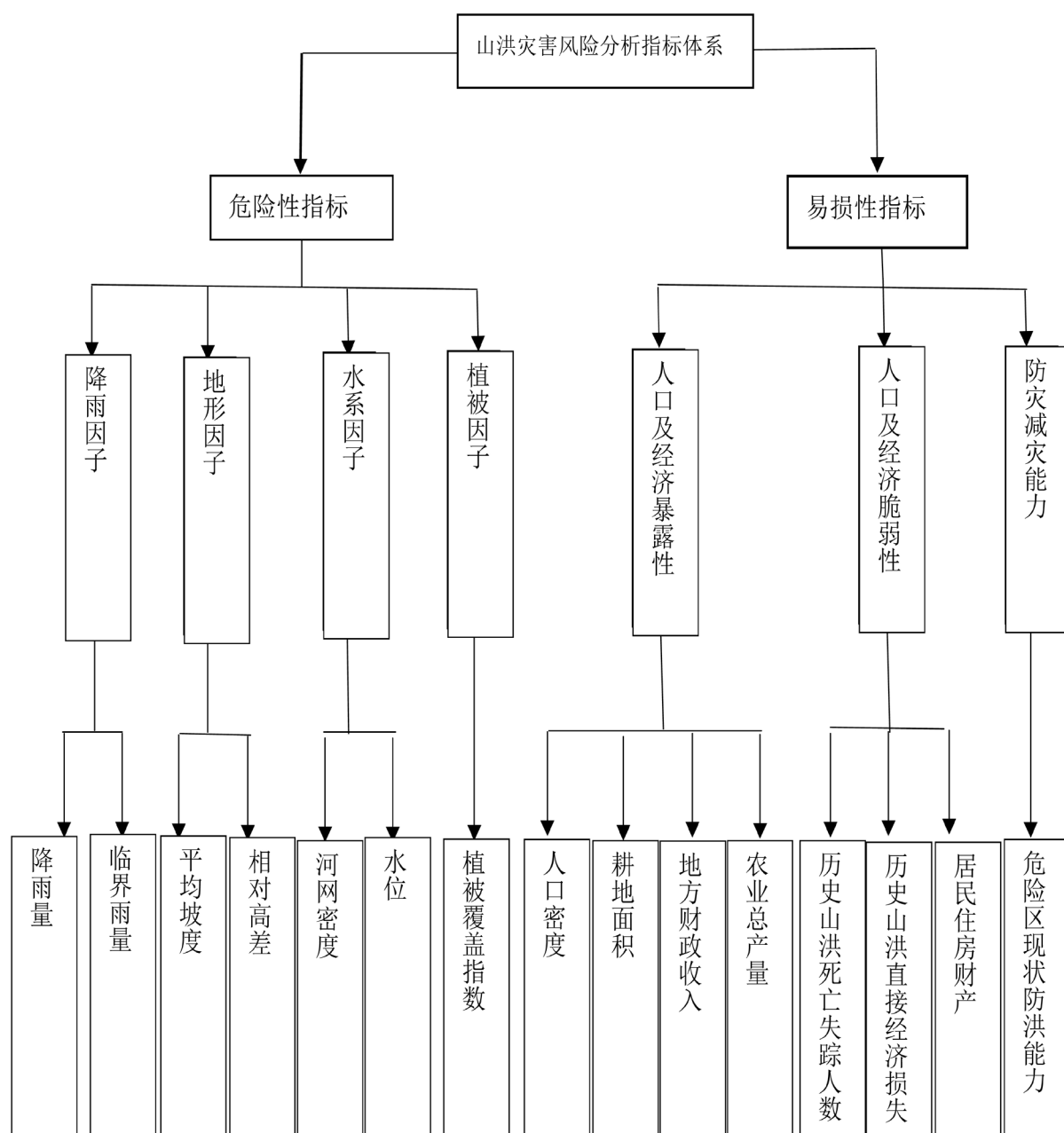


Figure 1. Risk assessment index system for mountain torrents  
图 1. 山洪灾害风险评价指标体系图

由上述式(2)计算得危险性各指标模糊评价值为:  $\tilde{V}_1 = (0.069, 0.100, 0.212, 0.321)$ ,  
 $\tilde{V}_2 = (0.048, 0.072, 0.157, 0.235)$ ,  $\tilde{V}_3 = (0.094, 0.141, 0.313, 0.465)$ ,  $\tilde{V}_4 = (0.026, 0.041, 0.093, 0.138)$ ,  
 $\tilde{V}_5 = (0.132, 0.201, 0.457, 0.683)$ ,  $\tilde{V}_6 = (0.061, 0.091, 0.201, 0.309)$ ,  $\tilde{V}_7 = (0.016, 0.025, 0.058, 0.089)$ ; 可得  
 $I(\tilde{V}_1) = 0.176$ ,  $I(\tilde{V}_2) = 0.128$ ,  $I(\tilde{V}_3) = 0.253$ ,  $I(\tilde{V}_4) = 0.074$ ,  $I(\tilde{V}_5) = 0.368$ ,  $I(\tilde{V}_6) = 0.165$ ,  $I(\tilde{V}_7) = 0.047$ ;  
 再根据式(4)可得各指标权重为:  $\omega_1 = 0.145$ ,  $\omega_2 = 0.106$ ,  $\omega_3 = 0.209$ ,  $\omega_4 = 0.061$ ,  $\omega_5 = 0.304$ ,  $\omega_6 = 0.136$ ,  
 $\omega_7 = 0.039$ 。

易损性:

$$r_{ij} = \begin{bmatrix} [1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00] & [2.75 & 3.67 & 6.50 & 9.00] & [0.26 & 0.35 & 0.56 & 0.69] & [0.71 & 0.82 & 1.12 & 1.33] \\ [0.11 & 0.16 & 0.29 & 0.38] & [1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00] & [0.11 & 0.13 & 0.22 & 0.29] & [0.11 & 0.16 & 0.29 & 0.38] \\ [1.58 & 1.98 & 3.38 & 4.83] & [3.58 & 5.00 & 8.17 & 9.00] & [1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00] & [1.92 & 2.43 & 4.33 & 6.50] \\ [0.86 & 1.00 & 1.38 & 1.67] & [2.75 & 3.67 & 6.50 & 9.00] & [0.18 & 0.25 & 0.44 & 0.55] & [1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00] \\ [1.00 & 1.11 & 1.43 & 1.67] & [2.96 & 4.05 & 6.67 & 7.75] & [0.29 & 0.38 & 0.61 & 0.75] & [1.38 & 1.70 & 2.71 & 3.58] \\ [0.38 & 0.49 & 0.75 & 0.92] & [1.71 & 2.14 & 3.67 & 5.25] & [0.11 & 0.16 & 0.29 & 0.38] & [0.34 & 0.44 & 0.68 & 0.83] \\ [0.18 & 0.25 & 0.44 & 0.55] & [1.00 & 1.22 & 1.86 & 2.33] & [0.15 & 0.18 & 0.31 & 0.40] & [0.26 & 0.35 & 0.56 & 0.69] \\ [0.26 & 0.35 & 0.56 & 0.69] & [1.58 & 1.98 & 3.38 & 4.83] & [0.11 & 0.11 & 0.18 & 0.25] & [0.22 & 0.29 & 0.49 & 0.61] \\ \\ [0.71 & 0.77 & 0.91 & 1.00] & [1.00 & 1.22 & 1.86 & 2.33] & [1.71 & 2.14 & 3.67 & 5.25] & [1.58 & 1.98 & 3.38 & 4.83] \\ [0.15 & 0.18 & 0.31 & 0.40] & [0.25 & 0.33 & 0.54 & 0.67] & [0.43 & 0.54 & 0.82 & 1.00] & [0.26 & 0.35 & 0.56 & 0.69] \\ [1.38 & 1.70 & 2.71 & 3.58] & [2.75 & 3.67 & 6.50 & 9.00] & [3.58 & 5.00 & 8.17 & 9.00] & [4.00 & 5.67 & 9.00 & 9.00] \\ [0.29 & 0.38 & 0.61 & 1.75] & [1.13 & 1.38 & 2.14 & 2.75] & [1.71 & 2.14 & 3.67 & 5.25] & [1.71 & 2.14 & 3.67 & 5.25] \\ [1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00] & [1.50 & 1.86 & 3.00 & 4.00] & [2.33 & 3.00 & 5.67 & 9.00] & [2.54 & 3.38 & 5.83 & 7.75] \\ [0.29 & 0.38 & 0.61 & 1.75] & [1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00] & [1.13 & 1.38 & 2.14 & 2.75] & [1.13 & 1.38 & 2.14 & 2.75] \\ [0.15 & 0.22 & 0.38 & 0.49] & [0.38 & 0.49 & 0.75 & 0.92] & [1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00] & [0.86 & 1.00 & 1.38 & 1.67] \\ [0.15 & 0.20 & 0.35 & 0.44] & [0.38 & 0.49 & 0.75 & 0.92] & [0.86 & 0.94 & 1.17 & 1.33] & [1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00] \end{bmatrix}$$

同理可知易损性各指标模糊评价值为： $\tilde{V}_1=(0.061,0.090,0.201,0.311)$ ， $\tilde{V}_2=(0.013,0.021,0.051,0.078)$ ， $\tilde{V}_3=(0.135,0.214,0.513,0.775)$ ， $\tilde{V}_4=(0.054,0.083,0.195,0.309)$ ， $\tilde{V}_5=(0.082,0.124,0.288,0.451)$ ， $\tilde{V}_6=(0.034,0.052,0.121,0.188)$ ， $\tilde{V}_7=(0.022,0.035,0.080,0.121)$ ， $\tilde{V}_8=(0.023,0.035,0.079,0.122)$ ；求得期望值分别为 $I(\tilde{V}_1)=0.165$ ， $I(\tilde{V}_2)=0.041$ ， $I(\tilde{V}_3)=0.409$ ， $I(\tilde{V}_4)=0.160$ ， $I(\tilde{V}_5)=0.236$ ， $I(\tilde{V}_6)=0.099$ ， $I(\tilde{V}_7)=0.065$ ， $I(\tilde{V}_8)=0.065$ ；由此计算得到易损性指标权重为： $\omega_1=0.133$ ， $\omega_2=0.033$ ， $\omega_3=0.330$ ， $\omega_4=0.129$ ， $\omega_5=0.191$ ， $\omega_6=0.080$ ， $\omega_7=0.052$ ， $\omega_8=0.052$ 。

### 3.3. 基于灰色聚类的风险评价

灰色聚类分析法是以灰色系统的关联分析法确定的关联系数为基础进行聚类的方法，目前比较广泛的应用于水质分析、大气污染等评价，尤其在地质灾害评价领域得到广泛应用。灰色白化权函数聚类主要用于检查观测对象是否属于事先设定的不同类别，以区别对待。基于梯形白化权函数的灰色评估，其核心方法是先按照评估要求所需，将各个指标的取值范围划分为多个灰类，然后通过梯形白化权函数计算每个指标值对于每个灰类的隶属度，再利用隶属度值计算每个对象对于灰类的综合聚类系数，最后根据综合聚类系数，确定每个对象归属的灰类，以达到聚类的目的。分类方法和步骤如下[14][15]：

① 计算灰色评价权矩阵。对评价指标  $x_i (i=1,2,3,\dots,15)$ ，第  $s$  个数据属于第  $e$  个评价灰类的灰色评价系数记为： $x_{ie}^{(s)} (e=1,2,3,4,5)$ ，则  $x_i^{(s)} = f_{ie}(x_i)$ ， $x_i$  表示第  $i$  个指标值。对评价指标  $x_i (i=1,2,3,\dots,15)$ ，第  $s$  个数据属于各个评价灰类的总灰色评价系数记为  $x_i^{(s)}$ ，则有：

$$x_i^{(s)} = \sum_{e=1}^{15} x_{ie}^{(s)} \tag{7}$$

对所有指标值就评价指标  $x_i (i=1,2,3,\dots,15)$ ，第  $s$  个数据属于第  $e$  个灰类的灰色评价权记为  $r_{ie}^{(s)}$ ，则有：

$$r_{ie}^{(s)} = \frac{x_{ie}^{(s)}}{x_i^{(s)}} \tag{8}$$

则第  $s$  个数据就评价指标  $x_i (i=1,2,3,\dots,15)$  对于各灰类的灰色评价权向量:  $r_i^{(s)} = (r_{i1}^{(s)}, r_{i2}^{(s)}, \dots, r_{i5}^{(s)})$ ; 将第  $s$  个数据的全部指标对于各评价灰类的灰色评价权向量综合后, 得到第  $s$  个数据对于各评价灰类的评价权矩阵:

$$R^{(s)} = \begin{pmatrix} r_{1,1}^{(s)} & r_{1,2}^{(s)} & \cdots & r_{1,5}^{(s)} \\ r_{2,1}^{(s)} & r_{2,2}^{(s)} & \cdots & r_{2,5}^{(s)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{15,1}^{(s)} & r_{15,2}^{(s)} & \cdots & r_{15,5}^{(s)} \end{pmatrix} \quad (9)$$

② 灰色聚类综合评价。对第  $s$  个数据作综合评价模型为:  $B^{(s)} = U_R \cdot R^{(s)} = (b_1^{(s)}, b_2^{(s)}, \dots, b_5^{(s)})$ 。若  $b_k = \max \{b_1^{(s)}, b_2^{(s)}, \dots, b_5^{(s)}\}$ , 则确定第  $s$  个数据属于第  $k$  类, 进而得到所有数据分类的结果。

#### 4. 实例分析

本文以湖北省 10 个乡镇作为山洪灾区的研究对象, 以研究提出的 TFN-AHP 方法得到风险评价指标的权重系数, 采用灰色聚类分析法对湖北省进行山洪灾害危险、易损和风险评价。

根据湖北省 2013~2015 年度调查评价数据和湖北省 74 个县(市、区)的小流域设计暴雨分析计算、计算单元的设计暴雨洪水、现状防洪能力, 综合考虑水文气象、地形地貌和社会经济特征以及历史山洪灾害情况等, 结合湖北省植被覆盖指数和小流域空间信息数据, 运用地理信息系统软件(ArcGIS)的空间数据提取、空间数据采样插值及空间数据分析计算等功能, 为风险分析提供数据支撑, 整理得到 10 个乡镇的山洪灾害危险性、易损性评价数据, 如表 3、表 4 所示。

根据指标调查数据的实际情况和特点, 并参考已有的分级标准, 确定危险性指标和社会易损性指标评价灰类为 I 类、II 类、III 类、IV 类和 V 类 5 个等级(如表 5), 对应高风险、较高风险、中等风险、较低风险、低风险 5 个风险等级。确定灰类的灰数、以及灰数的梯形白化权函数(如表 5)。

在上述工作基础上, 建立的梯形白化权函数, 并以降雨量为例:

**Table 3.** Hazard assessment data for mountain torrents

**表 3.** 山洪灾害危险性评价数据

乡镇名称	降雨量(mm)	临界雨量(mm)	水位(m)	平均坡度(°)	相对高差(m)	河网密度(km/km <sup>2</sup> )	植被覆盖指数(%)
龙港镇	84.66	126.90	1.84	18.18	431	0.88	80.41
香口乡	61.01	72.90	0.88	28.56	610	0.86	95.28
丰溪镇	122.44	75.94	0.41	39.22	1619	0.62	93.31
螺祖镇	204.39	193.60	1.36	32.43	679	0.54	95.22
湾潭镇	105.63	178.10	34.19	20.80	1312	0.58	98.43
车埠镇	105.88	217.25	-0.29	3.32	33.00	0.51	76.97
三里乡	84.33	125.75	1.29	19.17	719.00	0.54	95.25
清太平镇	98.46	124.08	-3.57	23.23	982.00	0.49	95.89
沙道沟镇	115.84	132.21	-0.05	32.23	1193.00	0.59	94.84
容美镇	136.18	150.00	1.64	30.33	1205.00	0.58	97.39



**Table 4.** Vulnerability assessment data for mountain torrents  
**表 4.** 山洪灾害易损性评价数据

乡镇名称	现状防洪能力(年)	耕地面积占比(%)	人口密度(人/km <sup>2</sup> )	历史山洪直接经济损失(万元)	历史山洪死亡失踪人口(人)	防治区居民住房财产(万元)	农业总产量(吨)	地方财政收入(万元)
龙港镇	1.02	0.18	301.61	120,000	7	12.59	31,069.86	4890.50
香口乡	2.89	0.02	53.28	39,966	11	21.78	14,990.80	1374.00
丰溪镇	2.91	0.04	29.48	2000	16	11.24	18,062.50	2375.00
螺祖镇	7.15	0.07	70.81	3100	5	28.56	17,153.29	16,714.29
湾潭镇	3.99	0.09	53.82	2497	45	180.63	17,441.71	4157.14
车埠镇	3.14	0.24	299.34	4950.00	0	11.79	27,450.33	17,193.50
三里乡	5.80	0.26	254.61	159.00	2	43.21	38,012.70	15,926.00
清太平镇	31.99	0.14	144.64	8000.00	8	62.42	26,683.83	4519.92
沙道沟镇	3.04	0.07	101.33	303.00	0	25.89	24,048.00	3232.00
容美镇	16.32	0.08	133.95	112.00	0	40.36	19,733.57	30,286.29

**Table 5.** Risk assessment grading standard  
**表 5.** 风险性评价分级标准

评价指标	I类	II类	III类	IV类	V类
降雨量(mm)	<10	10~70	70~00	100~150	>150
临界雨量(mm)	>171.2	149.8~171.2	128.5~149.8	107.1~128.5	<107.1
水位(m)	<-1.4	-1.4~-0.5	-0.5~-0.1	0.1~1.4	>1.4
危险性 平均坡度(°)	<5	5~10	10~30	30~50	>50
相对高差(m)	<100	100~200	200~500	500~1000	>2000
河网密度(km/km <sup>2</sup> )	<0.5	0.5~0.7	0.7~0.9	0.9~2	>2
植被覆盖指数(%)	>95	80~95	60~80	40~60	<40
危险区现状防洪能力(年)	>100	10~100	5~10	2~5	<2
耕地面积占比	<0.2	0.2~0.3	0.3~0.5	0.5~0.8	>0.8
人口密度(人/km <sup>2</sup> )	0~150	150~300	300~420	420~500	>500
易损性 历史山洪直接经济损失(万元)	<100	100~200	200~300	300~1000	>1000
历史山洪死亡失踪人口(人)	<2	2~5	5~10	10~30	>30
防治区居民住房财产(万元)	<10.2	10.2~16.1	16.1~51.2	51.2~80.46	>80.46
农业总产量(吨)	<10,000	10,000~20,000	20,000~30,000	30,000~50,000	>50,000
地方财政收入(万元)	<3000	3000~5000	5000~10,000	10,000~20,000	>20,000

$$f_1 = \begin{cases} 1 & x \in [0, 10] \\ \frac{x-40}{-30} & x \in [10, 40] \end{cases}, f_2 = \begin{cases} \frac{x-6}{4} & x \in [6, 10] \\ 1 & x \in [10, 70] \\ \frac{x-85}{-15} & x \in [70, 85] \end{cases}, f_3 = \begin{cases} \frac{x-40}{30} & x \in [40, 70] \\ 1 & x \in [70, 100] \\ \frac{x-125}{-25} & x \in [100, 125] \end{cases},$$

$$f_4 = \begin{cases} \frac{x-85}{15} & x \in [85, 100] \\ 1 & x \in [100, 150] \\ \frac{x-175}{-25} & x \in [150, 175] \end{cases}, f_5 = \begin{cases} 1 & x \in [150, \infty] \\ \frac{x-150}{25} & x \in [125, 150] \end{cases}$$



本文在风险评估方法中,将危险性与易损性按照 4:1 的比例进行叠加,其中危险性是灾害的自然属性,易损性则是灾害的社会属性[16]。将 TFN-AHP 计算得到的综合评价指标的权重系数结果与常规层次分析法和改进熵权法所得结果作比较,结果如表 6 所示。

从表 6 分析上述三种方法的权重结果:① 危险性指标中,除水位和相对高差两个主占比元素外,梯形模糊的权重系数均略高于 AHP 和改进熵权这两类方法;② 易损性指标中,由于只按风险性的 20%计算,故三类方法的比例数值大小相差不大。③ 总体上改进熵权与梯形模糊的结果更为接近,且 AHP、改进熵权法各自与梯形模糊平均差距为 0.018、0.016,最大差异度为 0.095;改进熵权法将层次分析法的主观权重系数与基于熵值法计算的客观权重系数进行有机结合,故两者相较于传统 AHP 可信度更高(如图 2)。

Table 6. Weight coefficient of the evaluation indexes

表 6. 评价指标权重系数结果

评价指标	AHP	改进熵权[17]	TFN-AHP
降雨量	0.093	0.096	0.116
临界雨量	0.047	0.056	0.084
水位	0.189	0.178	0.167
平均坡度	0.025	0.038	0.049
相对高差	0.338	0.307	0.243
河网密度	0.093	0.096	0.109
植被覆盖指数	0.016	0.030	0.031
危险区现状防洪能力	0.023	0.024	0.027
耕地面积占比	0.004	0.007	0.007
人口密度	0.079	0.072	0.066
历史山洪直接经济损失	0.023	0.024	0.026
历史山洪死亡失踪人口	0.046	0.043	0.038
防治区居民住房财产	0.012	0.014	0.016
农业总产量	0.006	0.009	0.010
地方财政收入	0.006	0.009	0.010

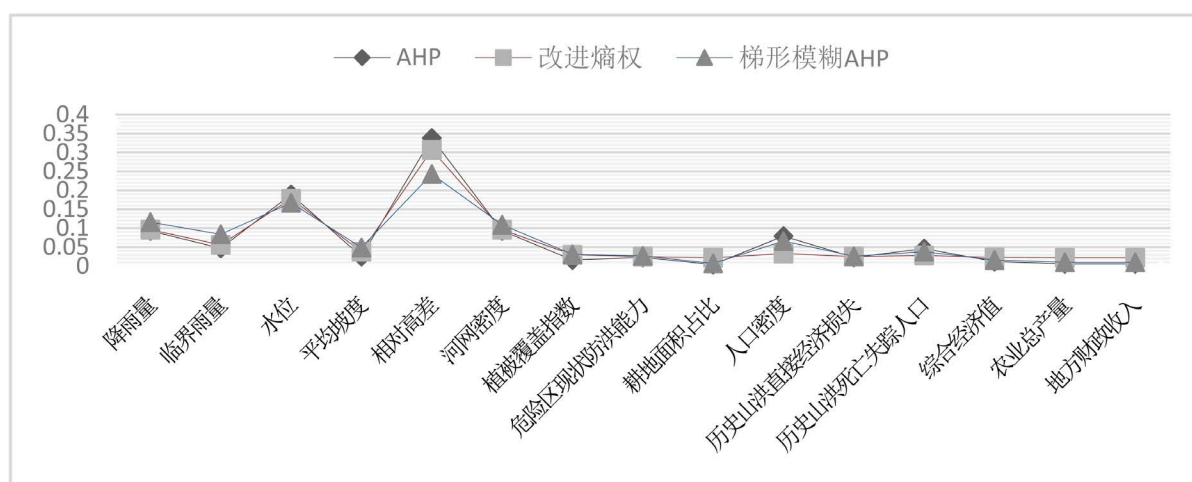


Figure 2. Probability distribution of each index

图 2. 各指标概率分布图

**Table 7.** Results of risk assessment grade  
**表 7.** 风险评价等级成果表

乡镇名称	梯形模糊综合评价					AHP	改进熵权	梯形模糊 AHP
	低风险(I)	较低风险(II)	中等风险(III)	较高风险(IV)	高风险(V)			
龙港镇	0.064	0.039	0.468	0.220	0.210	III	III	III
香口乡	0.112	0.075	0.261	0.419	0.133	IV	IV	IV
丰溪镇	0.120	0.062	0.136	0.239	0.443	V	V	V
螺祖镇	0.155	0.106	0.144	0.363	0.232	IV	IV	IV
湾潭镇	0.159	0.069	0.124	0.059	0.589	V	V	V
车埠镇	0.309	0.283	0.259	0.099	0.050	I	I	I
三里乡	0.093	0.110	0.279	0.396	0.122	IV	IV	IV
清太平镇	0.259	0.133	0.156	0.240	0.211	I	I	I
沙道沟镇	0.146	0.096	0.219	0.225	0.313	V	V	V
容美镇	0.147	0.122	0.060	0.222	0.449	V	V	V

通过三种方法获得的权重系数分析,可以看出结果主要分布在相对高差、水位和降雨量,且三者比重相差较大在相对高差、人口密度和临界雨量三个指标,与梯形模糊 AHP 相差度最大是相对高差;而三类方法的分布标准差分别为 0.087、0.077、0.065,由此可见,梯形模糊 AHP 的波动性最小,传统 AHP 的波动性最大,改进熵权法居于两者之间。

从表 7 看出,三种分类方法对山洪灾害区域的 10 个乡镇的分类结果是相同的,表明在权重系数相差不大的情况下,灰色聚类的评价结果不会发生改变;而且每个乡镇的风险等级高低与各自历史山洪灾害死亡失踪人口、直接经济损失实际情况基本吻合,沙道沟镇和容美镇虽然死亡失踪人口为 0,但降雨量、临界雨量和现状防洪能力等影响山洪发生的重要自然因素相对其他乡镇较为薄弱,严重影响了沙道沟镇、容美镇的风险等级。由此可见,上述结果在风险区划中合理、可信。

## 5. 结语

本文对已有的基于层次分析法的风险区划等级分类方法的不足进行了分析,提出了一种梯形模糊 AHP (TFN-AHP)与灰色聚类相结合的风险等级确定方法,运用该方法进行实例分析,研究结果表明:① 评价过程在模糊的环境下更客观精确的反映了所研究的问题,提高了风险等级评价的精度;② 灰色聚类分析法更好的运用了研究数据本身的特征信息,更准确、细致的计算各评价单元的风险等级,克服了风险分析等级分类中的不确定性和不可靠性;③ 结果很好的与历史山洪灾害损失程度相吻合,提高了风险分析结果的可信度与稳定性;④ 权重系数较与单一的层次分析法更加客观、更加符合实际,得到的区划结果具有较高应用价值,具有一定可行性。

## 基金项目

国家自然科学基金重大研究计划重点项目(91547208); 2017 年度湖北省教育厅科学研究计划资助项目(B2017255), 中国博士后科学基金第 61 批面上资助(2017M612460)。

## 参考文献

- [1] 仇蕾, 王慧敏, 马树建. 极端洪水灾害损失评估方法及应用[J]. 水科学进展, 2009, 20(6): 869-875.

- [2] 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: 11-18.
- [3] Zou, Q., Zhou, J.Z., Zhou, C., *et al.* (2013) Comprehensive Flood Risk Assessment Based on Set Pair Analysis-Variable Fuzzy Sets Model and Fuzzy AHP. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **27**, 525-546. <https://doi.org/10.1007/s00477-012-0598-5>
- [4] Li, Q., Zhou, J.Z., Liu, D.H., *et al.* (2012) Disaster Risk Assessment Based on Variable Fuzzy Sets and Improved Information Diffusion Method. *Human and Ecological Risk Assessment*, **19**, 857-872. <https://doi.org/10.1080/10807039.2012.713824>
- [5] 赵昱, 刘行, 徐佳欣, 等. 基于层次分析法——灰色聚类的 PFI 模式下公租房建设的风险评价方法[J]. 工程管理学报, 2013, 27(1): 69-72.
- [6] 汪志红, 王斌会. 投影寻踪技术在突发事件风险分类评级中的应用——以广东省雷电灾害风险评价为例[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 78-82.
- [7] 徐建新, 闫旂君. 基于变异系数法的灰色关联决策模型在城市供水方案优选中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(4): 9-11.
- [8] 欧阳森, 石怡理. 改进熵权法及其在电能质量评估中的应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 156-159.
- [9] 李英海, 周建中. 基于改进熵权和 Vague 集的多目标防洪调度决策方法[J]. 水电能源学, 2010, 28(6): 32-35.
- [10] 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.
- [11] 刘雨华. 江苏省沿江开发综合评价研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2006: 21-25.
- [12] 刘雨华. 基于梯形模糊数的指标权重确定方法的应用研究[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2009, 1(4): 369-372.
- [13] 牟琼, 杨春德. 一种基于梯形模糊数互补判断矩阵确定权重的方法[J]. 重庆邮电学院学报: 自然科学版, 2006, 18(6): 809-812.
- [14] 王正新, 党耀国, 裴玲玲. 基于相对隶属度的灰色聚类评估方法[J]. 统计与决策, 2012(3): 100-102.
- [15] 杨秀文, 付诗禄, 顾又川, 等. 两类白化权函数的比较[J]. 后勤工程学院学报, 2010, 26(1): 88-91.
- [16] 丁文峰, 杜俊, 陈小平, 等. 四川省山洪灾害风险评估与区划[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(12): 41-45.
- [17] 邹强, 周建中, 杨小玲, 等. 属性区间识别模型在溃坝后果综合评价中的应用[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, 43(2): 45-50.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5485, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [aep@hanspub.org](mailto:aep@hanspub.org)