

文章编号:0559-9350(2010)06-0711-09

基于三角模糊数截集的联系数模型在城市 涝灾影响等级评价中的应用

吴开亚¹, 金菊良², 潘争伟³

(1. 复旦大学 公共管理与公共政策创新基地, 上海 200433;

2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009;

3. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:在一般系统等级评价中通常把评价样本值与标准等级之间的关系作为实数之间数值接近性进行评价,这易产生系统偏差。为克服这一不足,本文将三角模糊数与集对分析方法相耦合,建立了基于三角模糊数截集的联系数评价模型,并应用于湖南省29个城市的涝灾影响等级评价中。结果表明:除少数城市外,大部分城市的涝灾影响等级总体上较高。本文模型不仅给出了评价指标的具体等级,所得的评价等级为一置信区间,评价结果更符合实际情况,而且还可以根据区间数的期望-方差排序法对评价结果进行综合排序,确定评价结果的优劣次序。该模型在自然灾害综合评价中具有推广应用价值。

关键词:城市涝灾;影响等级评价;集对分析;三角模糊数;模糊数截集;区间数排序

中图分类号:P333.2

文献标识码:A

1 研究背景

城市涝灾影响等级评价,是对城市可能受涝灾影响的各种因素进行综合分析、诊断和评估^[1-3],可为城市洪涝灾害风险管理提供科学的决策依据,对于减轻城市洪涝灾害的损失、促进城市社会经济可持续发展具有重要意义^[3-5]。受自然和社会众多因子的综合作用,城市涝灾影响等级评价系统是一个典型的复杂系统,其主要特点是孕灾环境、致灾因子、承灾体属性和社会承灾能力等因子众多、关联复杂,随机性、模糊性、未确知性等不确定性显著^[3-7],已提出的模糊综合评价方法^[3]、投影寻踪方法^[8]等方法是基于点值之间数值接近性的一种运算,这与一般以区间形式表示涝灾影响等级标准的要求存在明显差异,易得到与实际情况存在明显系统偏差的评价结果^[9]。可见这些评价方法在处理不确定性问题方面都有其局限性。集对分析(Set Pair Analysis)是赵克勤先生于1989年提出的利用联系度处理不确定性问题的一种新颖系统分析理论^[10],目前已广泛应用于众多领域^[11-13]。其联系度的表达式 $\mu = a + bi + cj$ 中, a 、 c 是确定项,不确定项 bi 的不确定性是指差异度系数 i 的取值在 $[-1, 1]$ 上变化是不确定的,具有明显的模糊性特征。用模糊集表示差异度系数 i ,能有效刻画差异度系数 i 取值变化的不确定性。集对分析中同、异、反关系的变化是一个连续过程,相应地,引起这种变化的联系数分量系数的变化也可以看作是一个连续变化过程。即由“同”、“异”变化到“反”,联系分量系数则由1、0变化到-1。对“异”联系分量系数而言,则存在最可能值0、最小值-1和最大值1,可以构造三角模糊数 $\tilde{A} = (-1, 0, 1)$ 。

收稿日期:2008-11-04

基金项目:国家自然科学基金项目(70771035);中国气象局成都高原气象开放实验室基金课题(LPM2008018);“十一五”国家科技支撑计划重点项目(2006BAB14B02)

作者简介:吴开亚(1968-),男,安徽利辛人,博士,副教授,主要从事环境系统分析研究。E-mail: wuky2000@vip.sina.com

通讯作者:金菊良(1966-),男,江苏吴江人,博士,教授,主要从事水资源系统工程研究。E-mail: JINJL66@126.com

本文据此思路,利用三角模糊数 \tilde{A} 的 α -截集表示差异度系数,建立基于三角模糊数 α -截集的联系系数评价模型,并应用于湖南省 29 个城市的涝灾影响等级评价问题中,得到更符合实际情况的“区间数”评价结果。

2 基本理论

2.1 集对分析理论 集对分析理论的基础是集对,所谓集对是指具有一定联系的两个集合所组成的一个对子。设集合 A, B 组成一个集对 H ,记作: $H = (A, B)$ 。集对分析的基本思路^[11]是:在具体的问题背景下,通过分析集对 H 的同一性、差异性和对立性,建立集对 H 在所论问题背景下的联系度表达式,从而刻画事物之间的确定性与不确定性。联系度的基本表达式为:

$$\mu = a + bi + cj \quad (1)$$

式中: a, b 和 c 分别为同一度、差异度和对立度, $a, b, c \in [0, 1]$, 且 $a + b + c = 1$; i 为差异度系数,取值区间为 $[-1, 1]$,有时仅起差异标记作用; j 为对立度系数,取值规定为 -1 ,有时仅起对立标记作用。

式(1)所示的联系度表达式 $\mu = a + bi + cj$ 称为同异反联系度或三元联系系数^[11]。在一些实际问题中,仅对研究对象所处的状态空间作“一分为三”的划分显得过于粗糙^[12-13],不能明确地描述问题。为此,需要对联系度的基本表达式作不同层次的扩展,在同一层次上展开形成一种多元联系系数,其表达式为^[11-15]:

$$\mu = a + b_1 i_1 + b_2 i_2 + \dots + b_{n_1} i_{n_1} + c_1 j_1 + c_2 j_2 + \dots + c_{n_2} j_{n_2} \quad (2)$$

目前被广泛采用的有五元联系系数^[16]。但在以点值为分级标准的五级评价中,存在超 V 级的情况。考虑这种情况,给出包含超 V 级标准的五元联系系数表达式:

$$\mu = a + b_1 i_1 + b_2 i_2 + b_3 i_3 + c_1 j_1 + c_2 j_2 \quad (3)$$

式中: $a, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2 \in [0, 1]$, 且 $a + b_1 + b_2 + b_3 + c_1 + c_2 = 1$; a 为集对的同一度; b_1, b_2, b_3 为集对的差异度; c_1, c_2 为集对的对立度; i_1, i_2, i_3 为差异度系数,取值区间为 $[-1, 1]$,有时仅起差异标记作用; j_1, j_2 表示对立度系数,取值规定为 -1 ,有时仅起对立标记作用。

2.2 模糊集理论 定义 1^[17-18]: 设在实数域 R 上的一个模糊数 \tilde{A} , 定义一个隶属函数 $\mu_{\tilde{A}}(x): R \rightarrow [0, 1]$, $x \in R$, 若特征函数(隶属函数) $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 表示为:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x < l_1 \\ \frac{x - l_1}{l_2 - l_1} & l_1 \leq x \leq l_2 \\ \frac{l_3 - x}{l_3 - l_2} & l_2 \leq x \leq l_3 \\ 0 & x > l_3 \end{cases} \quad (4)$$

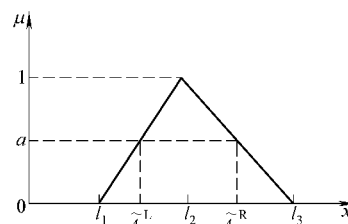


图 1 三角模糊数的 α -截集

式中: $l_1 \leq l_2 \leq l_3$; 当 $l_1 = l_2 = l_3$ 时, \tilde{A} 为一个精确数,三角模糊数的分布如图 1 所示。

定义 2^[19]: 设 \tilde{A} 是论域 U 上的模糊集,对 $\alpha \in [0, 1]$ 称普通集合 $\tilde{A}_\alpha = \{x | \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\}$ 为模糊集 \tilde{A} 的 α 水平截集,简称 α -截集(图 1); 当 $\tilde{A}_\alpha = \{x | \mu_{\tilde{A}}(x) > \alpha\}$ 时,称为 \tilde{A} 的 α 强截集, α 为截集水平。

设三角模糊数 $\tilde{A} = (l_1, l_2, l_3)$, 取截集水平 $\alpha \in [0, 1]$, 可得置信水平区间^[20]:

$$\tilde{A}_\alpha = [\tilde{A}_\alpha^L, \tilde{A}_\alpha^R] = [(l_2 - l_1)\alpha + l_1, -(l_3 - l_2)\alpha + l_3] \quad (5)$$

对于实数域 R 上的模糊数 \tilde{A} , α -截集 \tilde{A}_α 即为实数区间数 $[\tilde{A}_\alpha^L, \tilde{A}_\alpha^R]$, 且满足如下四则运算法则^[21]:

$$[a \ b] + [c \ d] = [a + c \ b + d], [a \ b] - [c \ d] = [a - d \ b - c] \quad k \cdot [c \ d] = [k \cdot c \ k \cdot d] \quad (k > 0),$$

$$[a \ b] \cdot [c \ d] = [\min\{ac \ ad \ bc \ bd\}, \max\{ac \ ad \ bc \ bd\}],$$

$$[a \ b] \div [c \ d] = [a \ b] \cdot \left[\frac{1}{d}, \frac{1}{c}\right] = \left[\min\left\{\frac{a}{d}, \frac{a}{c}, \frac{b}{d}, \frac{b}{c}\right\}, \max\left\{\frac{a}{d}, \frac{a}{c}, \frac{b}{d}, \frac{b}{c}\right\}\right] \quad ([c \ d] \neq 0).$$

2.3 期望 - 方差排序法 设两个区间数 $a = [a^-, a^+]$ 和 $b = [b^-, b^+]$, 区间 $[a^-, a^+]$ 上变量服从均匀分布, 则区间数 $a = [a^-, a^+]$ 的数学期望 $E = \frac{(a^- + a^+)}{2}$, 方差 $D = \frac{(a^+ - a^-)^2}{12}$. 定义一种区间数的优先序方法为^[22]: (1) a 优于 b 指以下两种情况: ① $E_a > E_b$; ② $E_a = E_b$ 且 $D_a < D_b$, 记作: $a > b$. (2) a 等价于 b 指下列情况: $E_a = E_b$ 且 $D_a = D_b$, 记作: $a \sim b$. (3) a 劣于 b 指以下两种情况: ① $E_a < E_b$; ② $E_a = E_b$ 且 $D_a > D_b$, 记作: $a < b$.

3 基于三角模糊数 α -截集的联系度评价模型

按照集对分析系统分析的基本步骤^[13], 建立基于三角模糊数 α -截集的联系度评价模型的基本步骤为: 构建研究对象集对, 分析集对的同异反关系结构; 确定基于三角模糊数 α -截集的联系度表达式; 选取截集水平 α 构建联系度矩阵 R ; 确定评价指标权重集 W ; 建立联系度数学模型, 进行综合评价分析。

3.1 构建研究对象集对, 分析集对的同异反关系结构 系统分析评价中, 通常建立评价指标集 A 与评价标准集 B 的集对 $H = (A, B)$ 。分析集对 H 所包含的特征, 建立研究对象的同异反关系结构。考虑以点值为分级标准的五级评价的情况, 根据集对分析理论的层次理论^[13], 建立同异反关系结构(图2)。

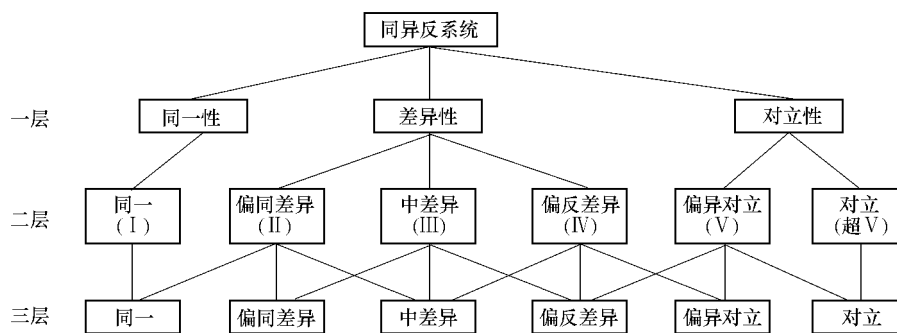


图2 同异反关系的层次结构

图2表明:(1) 第一层关系即为传统的“同异反”关系。第二层关系将“差异”和“对立”关系细化, 如将“差异”关系划分为“偏同差异”、“中差异”和“偏反差异”^[13], 而“对立”关系划分为“偏异对立”和“对立”, 从而与 I—V、超V级评价标准对应; 相应地 i_1, i_2, i_3, j_1, j_2 分别为偏同差异度系数、中差异度系数、偏反差异度系数、偏异对立度系数和对立度系数。第三层关系将第二层的“偏同差异”、“中差异”、“偏反差异”和“偏异对立”关系进一步细化, 如将“偏同差异”按一定比例分配给“同一”、“偏同差异”和“中差异”, 使集对 H 的同异反关系进一步细化, 以解决度量规则粒度过大^[23]这一关键问题;(2) 符合 I 级标准为同一度; 符合 II 级标准按一定比例划分为同一度、偏同差异度、中差异度; 符合 III 级标准按一定比例划分为偏同差异度、中差异度、偏反差异度; 符合 IV 级标准按一定比例划分为中差异度、偏反差异度、偏异对立度; 符合 V 级标准按一定比例划分为偏反差异度、偏异对立度、对立度; 符合超 V 级标准为对立度。

3.2 确定基于三角模糊数 α -截集的联系度表达式

(1) 分级联系度表达式。集对分析的关键是确定联系度的表达式, 目前有穷举法、逐步分析法、直接比较观察法和层次分析法等方法^[11]。而在系统分析评价中采用的方法有: ①按联系度定义, 由概率统计法^[24]计算联系分量, 确定联系度表达式; ②由三角隶属函数法^[25]计算联系分量, 确定联系度表达式。三角隶属函数法计算隶属程度的实质是“二分法”, 与集对分析“一分为三”的思想并不完全吻合。为此, 本文提出按一定比例分配联系分量, 如将“偏同差异”按一定比例分配给“同一”、“偏同差异”和“中差异”, 充分体现了集对分析“一分为三”的思想。根据上述分析, 给出分级联系度表达式如下:

$$\mu_{mk} = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j_1 + 0j_2 & c_{mk} \in \text{I 级} \\ \frac{1}{2} \frac{c_{mk} - s_{m2}}{s_{m1} - s_{m2}} + \frac{1}{2} i_1 + \frac{1}{2} \frac{s_1 - c_{mk}}{s_{m1} - s_{m2}} i_2 + 0i_3 + 0j_1 + 0j_2 & c_{mk} \in \text{II 级} \\ 0 + \frac{1}{2} \frac{c_{mk} - s_{m3}}{s_{m2} - s_{m3}} i_1 + \frac{1}{2} i_2 + \frac{1}{2} \frac{s_{m2} - c_{mk}}{s_{m2} - s_{m3}} i_3 + 0j_1 + 0j_2 & c_{mk} \in \text{III 级} \\ 0 + 0i_1 + \frac{1}{2} \frac{c_{mk} - s_{m4}}{s_{m3} - s_{m4}} i_2 + \frac{1}{2} i_3 + \frac{1}{2} \frac{s_{m3} - c_{mk}}{s_{m3} - s_{m4}} j_1 + 0j_2 & c_{mk} \in \text{IV 级} \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \frac{1}{2} \frac{c_{mk} - s_{m5}}{s_{m4} - s_{m5}} i_3 + \frac{1}{2} j_1 + \frac{1}{2} \frac{s_{m4} - c_{mk}}{s_{m4} - s_{m5}} j_2 & c_{mk} \in \text{V 级} \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j_1 + 1j_2 & c_{mk} \in \text{超 V 级} \end{cases} \quad (6)$$

式中： m 表示第 m 个评价指标， $m = 1, 2, \dots, M$ ； k 表示第 k 个评价样本， $k = 1, 2, \dots, K$ ； c_{mk} 表示评价指标的样本值； s_{mx} 表示第 m 个指标的第 x 级评价标准的限值。

(2) 基于三角模糊数 α -截集的联系分量系数。依照上述所建立的同异反关系层次结构，符合 I 级标准为同一度 α ，可以将同一度 α 的系数看作为 1；符合 V 级、超 V 级标准分别为偏异对立度 c_1 、对立度 c_2 ，偏异对立度系数 j_1 和对立度系数 j_2 常取 -1；符合 II、III、IV 标准分别为偏同差异度 b_1 、中差异度 b_2 、偏反差异度 b_3 。

若采用分析取值法的特殊值法^[11]确定符合 II、III、IV 级标准的差异度系数： $i_1 = 0.5$ ， $i_2 = 0$ ， $i_3 = -0.5$ ，使得符合 I—V 级、超 V 级标准的联系分量系数生成一组序列：1、0.5、0、-0.5、-1、-1，且在 $[-1, 1]$ 上是连续的。则符合 II、III、IV 级标准的联系分量系数存在最小值 i_{\min} 、最可能值 i_{opt} 、最大值 i_{\max} ，据此可以构造三角模糊数 $\tilde{A}(i) = (i_{\min}, i_{\text{opt}}, i_{\max})$ 。例如，符合 II 级标准为偏同差异度，则偏同差异度 i_1 的最小值为 0，最可能值为 0.5，最大值为 1，据此可以构造偏同差异度系数的三角模糊数 $\tilde{A}(i_1) = (0, 0.5, 1)$ 。同理，构造中差异度系数的三角模糊数 $\tilde{A}(i_2) = (-0.5, 0, 0.5)$ ，偏反差异度系数的三角模糊数 $\tilde{A}(i_3) = (-1, -0.5, 0)$ 。

若给定截集水平 α ，由式(5)计算可得截集水平 α 下的置信区间：

$$\tilde{A}_\alpha(i_1) = [0.5\alpha, -0.5\alpha + 1] \quad (7)$$

$$\tilde{A}_\alpha(i_2) = [0.5\alpha - 0.5, -(0.5\alpha - 0.5)] \quad (8)$$

$$\tilde{A}_\alpha(i_3) = [0.5\alpha - 1, -0.5\alpha] \quad (9)$$

当取 $\alpha = 1$ 时， $\tilde{A}_\alpha(i_1) = 0.5$ ， $\tilde{A}_\alpha(i_2) = 0$ ， $\tilde{A}_\alpha(i_3) = -0.5$ ，与分析取值法所得结果一致。

3.3 选取截集水平 α 构建联系度矩阵 R 设评价指标样本值为 c_{mk} ，由联系度表达式(6)计算得评价样本值 c_{mk} 的联系度计算表达式。选取适当截集水平 α ，由式(7)–(9)得截集水平 α 下的偏同差异度系数置信区间 $\tilde{A}_\alpha(i_1)$ 、中差异度系数置信区间 $\tilde{A}_\alpha(i_2)$ 和偏反差异度系数置信区间 $\tilde{A}_\alpha(i_3)$ 。根据实数区间的运算法则，计算得评价指标样本值 c_{mk} 的联系度值 μ_{mk} 。联系度值 μ_{mk} 为置信区间数，且 $\mu_{mk} \subset [-1, 1]$ ，它们组成联系度矩阵 $R = (r_{ij})_{M \times K}$ ：

$$R = \begin{bmatrix} [\mu_{11}^L, \mu_{11}^R] & [\mu_{12}^L, \mu_{12}^R] & \cdots & [\mu_{1K}^L, \mu_{1K}^R] \\ [\mu_{21}^L, \mu_{21}^R] & [\mu_{22}^L, \mu_{22}^R] & \cdots & [\mu_{2K}^L, \mu_{2K}^R] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [\mu_{M1}^L, \mu_{M1}^R] & [\mu_{M2}^L, \mu_{M2}^R] & \cdots & [\mu_{MK}^L, \mu_{MK}^R] \end{bmatrix}$$

3.4 确定评价指标权重集 W 可采用环境质量评价中广泛应用的污染贡献率法，由指标样本值 c_{mk} 和评价标准 s_{mx} 确定指标权重集 W ^[3]：

$$w'_{mk} = c_{mk} / \left(\sum_{m=1}^5 s_{mx} / 5 \right) \quad (10)$$

通常需要对权重进行归一化：

$$w_{mk} = w'_{mk} / \left(\sum_{m=1}^M w_{mk} / M \right) \quad (11)$$

经归一化得第 k 个评价样本的指标权重集 $W = [w_{1k}, w_{2k}, \dots, w_{mk}]$ 。

3.5 建立联系数学模型,进行综合评价分析

(1) 综合评价结果。采用加法加权综合方法^[26]进行系统综合评价:

$$G = W \cdot R = [g_1, g_2, \dots, g_k] \quad (12)$$

式中: $g_k = [g_k^L, g_k^R] = \sum_{m=1}^M w_m \cdot [\mu_{mk}^L, \mu_{mk}^R]$ 。

由式(12)可得截集水平为 α 的综合评价结果。与联系度 μ_{mk} 值类似,综合评价结果 g_k 也为置信区间数,且 $g_k \subset [-1, 1]$ 。

(2) 进行综合排序。由综合评价结果 $g_k = [g_k^L, g_k^R]$,可以按照期望-方差排序法进行综合排序。

(3) 确定综合评价等级。依据评价指标模拟值,由式(6)可得联系度值 μ_{mk} 与评价等级 y_k 的散点图(图3),由此建立综合评价等级 y_k 与综合评价结果 g_k 的投影函数:

$$y_k = f(g_k) = -2g_k + 3 \quad (g_k \subset [-1, 1]) \quad (13)$$

由投影函数式(13)可以确定综合评价等级,综合评价等级 $y_k = [y_k^L, y_k^R]$ 为截集水平为 α 的置信区间数,且 $y_k \subset [1, 5]$ 。

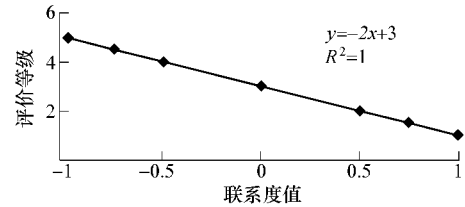


图3

4 实例分析

现应用上述基于三角模糊数 α -截集的联系度评价模型对湖南省 29 个城市的涝灾影响等级进行实例分析。选取城市涝灾影响等级的主要影响指标作为评价指标,包括人口密度、工业产值密度、道路网密度、排水管道密度和建成区绿地率(表1)^[3]。为消除不同量纲对评价结果的影响,首先需对评价指标的原始值进行标准化处理。对城市涝灾影响等级起正向作用的指标,如人口密度、工业产值密度和道路网密度,其处理方法为 $c'_{mk} = c_{mk}/c_{mmax}$;对城市涝灾影响等级起负向作用的指标,如排水管道密度和建成区绿地率,处理方法为 $c'_{mk} = 1 - c_{mk}/c_{mmax}$ 。湖南省 29 个城市的涝灾影响等级评价指标的原始值和经标准化处理后的数据见表1。

根据标准化处理后的数据将城市涝灾影响程度划分为 I—V 级,即高度影响、较高度影响、中度影响、较低度影响、低度影响,而超过 V 级称为微度影响。各指标的评价标准见表2^[3]。

按照基于三角模糊数 α -截集的联系度评价模型的基本步骤分析如下。

(1) 构建研究对象集对。第 m 个评价指标的样本值组成评价指标集 $A_m = [c_{m1}, c_{m2}, \dots, c_{m29}]$,第 m 个评价指标的评价标准集 $B_m = [s_{m1}, s_{m2}, s_{m3}, s_{m4}, s_{m5}]$,则集合 A_m, B_m 构成研究集对 $H = (A_m, B_m)$ 。

(2) 确定基于三角模糊数 α -截集的联系度计算式。以长沙市为例,根据评价标准所属等级,采用式(6)相应的计算分式,计算得各评价指标样本值的分级联系度计算式(表3)。

(3) 选取截集水平 α ,构建联系度矩阵 R 。本文取截集水平 $\alpha = 0.75$,由式(7)~(9)计算截集水平 $\alpha = 0.75$ 下的偏同差异度系数置信区间 $\bar{A}_\alpha(i_1) = [0.375, 0.625]$ 、中差异度系数置信区间 $\bar{A}_\alpha(i_2) = [-0.125, 0.125]$ 和偏反差异度系数置信区间 $\bar{A}_\alpha(i_3) = [-0.625, -0.375]$ 。进一步计算评价指标样本值的联系度值 μ_{mk} (表4),由评价指标样本值的联系度值 μ_{mk} 构建联系度矩阵 R 。

(4) 确定评价指标权重集 W 。根据指标样本值 c_{mk} 和评价标准 s_{mx} ,由式(10)得指标样本权重集 W ,由式(11)进行归一化处理得权重集 $W = [w_{1k}, w_{2k}, w_{3k}, w_{4k}, w_{5k}]$,各指标权重见表4。

(5) 综合评价分析。

① 综合评价结果。根据指标权重向量 W 和联系度矩阵 R ,由式(12)得截集水平 $\alpha = 0.75$ 的综合评价结果(见表4)。

表 1 湖南省城市涝灾影响等级评价指标值

评价单元	人口密度		工业产值密度		道路网密度		排水管道密度		建成区绿地率	
	原始值 /(人/km ²)	标准化	原始值 /(万元/ 年·km ²)	标准化	原始值 /(km/km ²)	标准化	原始值 /(km/km ²)	标准化	原始值 /%	标准化
长沙市	11 749	0.784 1	16 243	0.607 9	8.47	0.747 6	5.45	0.451 2	25.80	0.360 1
株洲市	8 801	0.587 3	25 772	0.964 6	6.83	0.602 8	5.88	0.407 9	32.04	0.205 4
湘潭市	11 783	0.786 3	17 028	0.637 3	5.34	0.471 3	7.36	0.258 8	33.39	0.171 9
衡阳市	10 028	0.669 2	9 355	0.350 1	6.14	0.541 9	4.70	0.526 7	26.91	0.332 6
邵阳市	9 301	0.620 7	5 090	0.190 5	4.16	0.367 2	3.05	0.692 8	17.43	0.567 7
岳阳市	7 282	0.486 0	26 718	1.000 0	6.45	0.569 3	4.73	0.523 7	29.80	0.260 9
常德市	11 905	0.794 5	16 333	0.611 3	5.69	0.502 2	5.79	0.416 9	28.20	0.300 6
张家界	13 014	0.868 5	2 161	0.080 9	11.33	1.000 0	3.61	0.636 5	7.37	0.817 2
益阳市	9 697	0.647 1	6 126	0.229 3	6.67	0.588 7	4.68	0.528 7	26.97	0.331 1
郴州市	10 423	0.695 6	13 968	0.522 8	3.83	0.338 0	3.81	0.616 3	26.90	0.332 8
永州市	7 412	0.494 6	8 399	0.314 4	6.05	0.534 0	4.10	0.587 1	23.37	0.420 4
怀化市	10 214	0.681 6	4 084	0.152 9	5.23	0.461 6	2.59	0.739 2	32.20	0.201 4
浏阳市	6 045	0.403 4	11 384	0.426 1	4.43	0.391 0	2.26	0.772 4	5.52	0.863 1
醴陵市	8 766	0.585 0	14 360	0.537 5	4.73	0.417 5	3.78	0.619 3	30.02	0.255 5
湘乡市	7 235	0.482 8	20 463	0.765 9	5.62	0.496 0	5.57	0.439 1	9.50	0.764 4
韶山市	3 629	0.242 2	5 090	0.190 5	9.68	0.854 4	9.60	0.033 2	40.32	0.000 0
耒阳市	5 446	0.363 4	6 098	0.228 2	5.33	0.470 4	9.93	0.000 0	21.36	0.470 2
常宁市	6 445	0.430 1	15 917	0.595 7	5.46	0.481 9	9.21	0.072 5	11.45	0.716 0
武冈市	6 543	0.436 6	2 070	0.077 5	4.44	0.391 9	4.54	0.542 8	10.94	0.728 7
汨罗市	5 986	0.399 5	25 429	0.951 8	5.28	0.466 0	5.99	0.396 8	17.25	0.572 2
临湘市	10 490	0.700 0	12 816	0.479 7	8.01	0.707 0	4.25	0.572 0	7.03	0.825 6
津市市	10 476	0.699 1	10 421	0.390 0	8.25	0.728 2	5.82	0.413 9	22.75	0.435 8
沅江市	14 985	1.000 0	11 972	0.448 1	5.59	0.493 4	1.84	0.814 7	8.09	0.799 4
资兴市	5 011	0.334 4	7 344	0.274 9	4.01	0.353 9	1.87	0.811 7	15.51	0.615 3
洪江市	10 714	0.715 0	12 481	0.467 1	9.82	0.866 7	3.86	0.611 3	34.04	0.155 8
娄底市	8 031	0.535 9	15 087	0.564 7	7.63	0.673 4	5.73	0.423 0	27.20	0.325 4
冷水江	6 228	0.415 6	12 740	0.476 8	4.76	0.420 1	2.23	0.775 4	11.10	0.724 7
涟源市	6 180	0.412 4	11 047	0.413 5	7.98	0.704 3	3.44	0.653 6	25.73	0.361 9
吉首市	10 459	0.698 0	13 171	0.493 0	7.22	0.637 2	3.90	0.607 3	22.02	0.453 9

表 2 城市涝灾影响等级指标评价标准

评价指标	评价标准				
	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
B_1 : 人口密度	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40
B_2 : 工业产值密度	0.75	0.60	0.50	0.40	0.30
B_3 : 道路网密度	0.75	0.65	0.55	0.45	0.40
B_4 : 排水管道密度	0.75	0.65	0.55	0.45	0.30
B_5 : 建成区绿地率	0.80	0.70	0.55	0.40	0.25

表 3 长沙市各评价样本指标值的联系度计算式

指标	联系度计算式	评价标准等级
B_1	$\mu_{11} = 0.4205 + 0.5000i_1 + 0.0795i_2 + 0i_3 + 0j_1 + 0j_2$	II
B_2	$\mu_{21} = 0.0263 + 0.5000i_1 + 0.4737i_2 + 0i_3 + 0j_1 + 0j_2$	II
B_3	$\mu_{31} = 0.4880 + 0.5000i_1 + 0.0120i_2 + 0i_3 + 0j_1 + 0j_2$	II
B_4	$\mu_{41} = 0 + 0i_1 + 0.0060i_2 + 0.5000i_3 + 0.4940j_1 + 0j_2$	IV
B_5	$\mu_{51} = 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0.3670i_3 + 0.5000j_1 + 0.1330j_2$	V

②综合排序。由综合评价结果置信区间数 $g_k = [g_k^L, g_k^R]$,计算其期望、方差(表 4)。根据区间数的期望 - 方差排序法得湖南省 29 个城市涝灾影响等级由强到弱的排序(表 4)。

表 4 评价样本指标权重、评价结果及排序

评价单元	权重					评价结果	期望 E	方差 D	排序
	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5				
长沙市	0.244 9	0.223 3	0.250 2	0.156 6	0.125 0	[0.411 2 ρ .115 4]	0.263 3	0.007 3	5
株洲市	0.192 6	0.372 2	0.211 8	0.148 6	0.074 8	[0.248 6 ρ .062 4]	0.155 5	0.002 9	6
湘潭市	0.312 1	0.297 6	0.200 4	0.114 1	0.075 8	[0.151 0 , -0.065 0]	0.043 1	0.003 9	9
衡阳市	0.255 8	0.157 4	0.221 9	0.223 7	0.141 2	[-0.125 0 , -0.474 0]	-0.299 9	0.010 1	26
邵阳市	0.235 2	0.084 9	0.149 1	0.291 7	0.239 1	[0.046 3 , -0.267 0]	-0.110 2	0.008 2	20
岳阳市	0.154 6	0.374 1	0.194 0	0.185 1	0.092 2	[0.224 0 ρ .008 7]	0.116 3	0.003 9	7
常德市	0.278 9	0.252 4	0.188 9	0.162 6	0.117 2	[0.138 2 , -0.150 0]	-0.006 1	0.006 9	17
张家界	0.237 9	0.026 1	0.293 5	0.193 8	0.248 7	[0.316 2 ρ .765 1]	0.540 7	0.016 8	1
益阳市	0.258 5	0.107 8	0.252 0	0.234 7	0.147 0	[-0.072 0 , -0.432 0]	-0.251 8	0.010 8	24
郴州市	0.255 0	0.225 5	0.132 8	0.251 1	0.135 6	[0.050 7 , -0.298 0]	-0.123 6	0.010 1	21
永州市	0.193 5	0.144 7	0.223 9	0.255 2	0.182 7	[-0.226 0 , -0.586 0]	-0.405 6	0.010 8	28
怀化市	0.283 9	0.074 9	0.206 0	0.342 0	0.093 2	[0.139 0 , -0.101 0]	0.018 8	0.004 8	14
浏阳市	0.128 5	0.159 6	0.133 4	0.273 2	0.305 3	[-0.379 0 ρ .206 0]	-0.086 5	0.028 5	18
醴陵市	0.221 9	0.239 8	0.169 6	0.261 0	0.107 7	[-0.104 0 , -0.416 0]	-0.259 6	0.008 1	25
湘乡市	0.148 5	0.277 0	0.163 4	0.150 0	0.261 1	[0.011 1 ρ .055 0]	0.033 0	0.000 2	12
韶山市	0.170 7	0.158 0	0.645 3	0.026 0	0.000 0	[0.290 6 , 0.290 6]	0.290 6	0.000 0	3
耒阳市	0.219 1	0.161 9	0.303 9	0.000 0	0.315 1	[-0.408 0 , -0.792 0]	-0.600 2	0.012 3	29
常宁市	0.170 5	0.277 7	0.204 6	0.031 9	0.315 3	[-0.053 0 , -0.234 0]	-0.143 3	0.002 7	22
武冈市	0.185 0	0.038 6	0.177 9	0.255 5	0.343 0	[-0.303 0 , -0.394 0]	-0.349 0	0.000 7	27
汨罗市	0.129 1	0.361 8	0.161 3	0.142 4	0.205 4	[0.127 3 , -0.074 0]	0.026 6	0.003 4	13
临湘市	0.195 8	0.157 9	0.211 9	0.177 8	0.256 6	[-0.091 0 ρ .255 1]	0.081 9	0.010 0	8
津市市	0.242 5	0.159 2	0.270 7	0.159 6	0.168 0	[0.123 8 , -0.206 0]	-0.041 1	0.009 1	16
沅江市	0.259 8	0.137	0.137 3	0.235 2	0.230 7	[0.334 8 ρ .484 9]	0.409 8	0.001 9	2
资兴市	0.127 5	0.123 3	0.144 6	0.343 9	0.260 7	[0.085 9 , -0.093 0]	-0.003 3	0.002 7	15
洪江市	0.234 8	0.180 5	0.304 9	0.223 0	0.056 8	[0.392 9 ρ .188 3]	0.290 6	0.003 5	4
娄底市	0.194 6	0.241 3	0.262 1	0.170 7	0.131 3	[-0.007 0 , -0.336 0]	-0.171 7	0.009 0	23
冷水江	0.134 4	0.181 3	0.145 5	0.278 5	0.260 3	[0.075 3 , -0.004 0]	0.035 6	0.000 5	10
涟源市	0.148 2	0.174 9	0.271 3	0.261 1	0.144 5	[0.072 8 , -0.246 0]	-0.086 6	0.008 5	19
吉首市	0.222 3	0.184 7	0.217 5	0.214 9	0.160 6	[0.227 0 , -0.160 0]	0.033 3	0.012 5	11

③确定综合评价等级。根据综合评价结果 $g_k = [g_k^L, g_k^R]$,由投影函数式(13)计算得截集水平 $\alpha = 0.75$ 的湖南省 29 个城市涝灾影响等级综合评价结果(表 5) ,表中同时给出模糊综合法和投影寻踪法的评价结果。

表 5 用不同方法评价湖南省城市涝灾影响等级的结果

评价单元	本文评价结果	模糊	投影	评价单元	本文评价结果	模糊	投影
		综合法 ^[3]	寻踪法 ^[8]			综合法 ^[3]	寻踪法 ^[8]
长沙市	[2.178 , 2.769]	1	2	韶山市	[2.419 , 2.419]	1	5
株洲市	[2.503 , 2.875]	1	3	耒阳市	[3.816 , 4.585]	4	5
湘潭市	[2.698 , 3.129]	1	4	常宁市	[3.105 , 3.468]	2	4
衡阳市	[3.251 , 3.949]	3	3	武冈市	[3.607 , 3.789]	2	3
邵阳市	[2.907 , 3.533]	3	2	汨罗市	[2.745 , 3.148]	1	3
岳阳市	[2.552 , 2.983]	1	3	临湘市	[2.490 , 3.183]	2	1
常德市	[2.724 , 3.301]	1	3	津市市	[2.752 , 3.412]	1	2
张家界	[1.470 , 2.368]	1	1	沅江市	[2.030 , 2.330]	1	1
益阳市	[3.144 , 3.863]	3	3	资兴市	[2.828 , 3.185]	1	2
郴州市	[2.899 , 3.596]	2	3	洪江市	[2.214 , 2.623]	1	2
永州市	[3.451 , 4.171]	3	3	娄底市	[3.015 , 3.672]	2	3
怀化市	[2.722 , 3.203]	1	3	冷水江	[2.849 , 3.008]	1	2
浏阳市	[2.588 , 3.758]	1	2	涟源市	[2.854 , 3.492]	2	2
醴陵市	[3.207 , 3.831]	3	3	吉首市	[2.546 , 3.321]	2	2
湘乡市	[2.890 , 2.978]	1	2				

④结果比较分析。从表 5 评价结果可以看出 ,除永州、益阳等城市外 ,湖南省 29 个城市的涝灾影响等级总体上较高 ,从单指标所属等级分析也可以看出综合评价结果是准确可信的。例如 ,衡阳市的 5 项

评价指标中,1项Ⅲ级、2项Ⅳ级、2项Ⅴ级,评价结果置信区间为[3.251,3.949];而模糊综合法和投影寻踪法评价结果为Ⅲ级,与实际指标所属等级差别较大。再如,韶山市的5项评价指标中,1项Ⅰ级,所占权重为0.6453,4项为超Ⅴ级,所占权重较小,故评价结果置信区间为[2.419,2.419];而模糊综合法和投影寻踪法评价结果分别为Ⅰ和Ⅴ级,没有充分考虑实际情况。可见,基于三角模糊数 α -截集的联系系数评价模型能得出评价等级为区间数的更为精确和可信的结果。

5 结论

通过对湖南省29个城市涝灾影响等级的实例分析评价可以看出:(1)传统评价方法只能得到粗略的评价所属等级,不能进一步细致区分优劣;如长沙市、株洲市均可归属于中度影响,但株洲市比长沙市的影响更弱;(2)基于三角模糊数 α -截集的联系系数评价模型不仅可以给出评价结果的具体等级,并且得到的评价等级为一置信区间,随着截集水平 α 在[0,1]上取值不同,评价等级的置信区间也不同。当取 $\alpha=1$ 时,评价结果不再是置信区间,而是确定的数值;(3)基于三角模糊数 α -截集的联系系数评价模型不仅可以给出评价等级的置信区间,还可以根据区间数的期望-方差排序法对综合评价结果进行优劣排序,在自然灾害系统等级评价中具较广泛的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] Blaikie P, Cannon T, Wisner B. At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters [M]. London: Routledge, 1994:13-21.
- [2] 卢少为,朱勇辉,魏国远,等. 我国近期涝灾研究综述[J]. 中国农村水利水电, 2009,(7):61-64.
- [3] 毛德华,王立辉. 湖南城市洪涝易损性诊断与评估[J]. 长江流域资源与环境, 2002,11(1):89-93.
- [4] Smith K. Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster (3th Edition) [M]. London: Routledge, 2001.
- [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] 高吉喜,中村武洋,潘英姿,等. 洪水易损性评价—洞庭湖地区案例研究[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2004.
- [7] Hansson K, Danielson M, Ekenberg L. A framework for evaluation of flood management strategies[J]. Journal of Environmental Management, 2008(86):465-480.
- [8] 朱聪,秦蓓蕾,王文圣,等. 城市洪涝易损性分类与诊断研究[J]. 云南地理环境研究, 2005,17(2):15-18.
- [9] 汪新凡. 基于属性数学和联系数学的煤灰结渣特性综合评判模型及应用[J]. 锅炉技术, 2006,37(6):47-50.
- [10] 赵克勤. 集对与集对分析——一种新的概念和一种新的系统分析方法[C]//全国系统理论与区域规划研讨会论文集. 1989.
- [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.
- [12] 蒋云良,徐从富. 集对分析理论及其应用研究进展[J]. 计算机科学, 2006,33(1):205-209.
- [13] 赵克勤. SPA的同异反系统理论在人工智能研究中的应用[J]. 智能系统学报, 2007,2(5):20-35.
- [14] 余国祥. 综合评价的多元联系系数模型及应用[J]. 绍兴文理学院学报, 2004,24(9):99-102.
- [15] 覃杰,赵克勤. 多元联系系数在医院医疗质量综合评价排序中的应用[J]. 中国医院统计, 2004,11(2):195-198.
- [16] 金菊良,吴开亚,魏一鸣. 基于联系系数的流域水安全评价模型[J]. 水利学报, 2008,39(4):401-409.
- [17] 陈水利,李敬功,王向公. 模糊集理论及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [18] Promentilla M A B, Furuichi T, Ishii K, et al. A fuzzy analytic network process for multi-criteria evaluation of contaminated site remedial countermeasures[J]. Journal of Environmental Management, 2008,88(3):479-495.
- [19] Nangfei Pan. Fuzzy AHP approach for selecting the suitable bridge construction method [J]. Automation in Construction, 2008,17(8):958-965.

- [20] Ronald E G , Robert E Y. Analysis of the error in the standard approximation used for multiplication of triangular and trapezoidal fuzzy numbers and the development of a new approximation [J]. *Fuzzy Sets and Systems* , 1997 , 91 (1) :1 - 13.
- [21] 曾文艺 ,罗承忠 ,肉孜阿吉. 区间数的综合决策模型[J]. *系统工程理论与实践* ,1997 ,17(11) :48 - 50.
- [22] 吴超 ,胡昆. 区间数多属性决策中权重灵敏度分析[J]. *系统工程与电子技术* ,2004 ,26(9) :1217 - 1218 , 1242.
- [23] 刘颖 ,于冬梅 ,程显毅. 联系数学中的几个问题[J]. *数学的实践与认识* ,2004 ,34(10) :77 - 82.
- [24] 王红芳 ,王文圣 ,丁晶 ,等. 联系数在水资源可再生能力评价中的应用[J]. *水利与建筑工程学报* ,2008 ,6(1) :9 - 11 ,44.
- [25] 邓红霞 ,李存军 ,朱兵 ,等. 基于集对分析法的生态承载能力综合评价方法[J]. *长江科学院院报* ,2006 ,23(6) :35 - 38.
- [26] 金菊良 ,魏一鸣. 复杂系统广义智能评价方法与应用[M]. 北京 :科学出版社 ,2008 :26 - 29.

Set pair analysis model based on triangle fuzzy intervals and its application to impact rating evaluation of urban flood

WU Kai-ya¹ , JIN Ju-liang² , PAN Zheng-wei²

(1. *Fudan University , Shanghai 200433 , China*; 2. *Hefei University of Technology , Hefei 230009 , China*)

Abstract: A set pair analysis model based on the cut set number of triangular fuzzy intervals was developed as a new approach to evaluate the impact ratings of urban flood. A pilot study of 29 cities in Hunan province of China was taken as an example. The result shows that the method not only can present the ranking of evaluating indicators , but also demonstrate the evaluating rank as a confidence interval. Besides , according to the expectation and square difference method for priorities of interval numbers , the evaluated results can be sorted comprehensively and its sequence between good and bad level can be determined. So the set pair analysis model can be widely applied to comprehensive ranking evaluation of different natural disasters.

Key words: urban flood; impact rating evaluation; set pair analysis; triangle fuzzy number; cut set of fuzzy number; priority - ranking of interval numbers

(责任编辑:韩 昆)