

基于梯形模糊数联系系数的评价方法及其应用

潘争伟^{1,2}, 金菊良^{3,4}, 周戎星¹

(1. 安徽新华学院土木与环境工程学院, 安徽 合肥 230088; 2. 安徽新华学院安全与环境评价研究所, 安徽 合肥 230088; 3. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 4. 合肥工业大学水资源与环境系统工程研究所, 安徽 合肥 230009)

摘要: 针对当联系分量系数取值具有峰值较宽的分布特征时, 利用三角模糊数表示差异度系数可能存在误差较大的问题, 通过分析差异度系数取值与等级标准阈值的对应关系, 确定了差异度系数的最优取值区间, 构造了以梯形模糊数表示的差异度系数, 提出了基于梯形模糊数联系系数的评价方法。将该评价方法应用于巢湖流域水资源系统脆弱性评价, 结果表明: 置信水平 75% 条件下巢湖流域水资源系统脆弱性等级置信区间为 [2.89, 3.44]; 所提出的方法不仅能得出评价等级的置信区间, 有效避免差异度系数峰值较宽时产生的误差, 还可以采用“期望-方差排序法”对不同子区域的脆弱性等级进行优劣排序。

关键词: 联系系数; 梯形模糊数; 水资源系统; 脆弱性评价; 巢湖流域

中图分类号: TV213.4; P964 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2016)05-0069-06

Assessment method using connection number based on trapezoidal fuzzy numbers and its application//PAN Zhengwei^{1,2}, JIN Juliang^{3,4}, ZHOU Rongxing¹ (1. School of Civil Engineering and Environmental Engineering, Anhui Xinhua University, Hefei 230088, China; 2. Institute of Safety and Environmental Assessment, Anhui Xinhua University, Hefei 230088, China; 3. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 4. Institute of Water Resources and Environmental Systems Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Using a triangular fuzzy number to express the difference degree coefficient might lead to a large error when the connection components show a broad peak distribution characteristic. The optimal interval of the difference degree coefficient was determined, the difference degree coefficient was formulated with the trapezoidal fuzzy numbers, and an assessment method using the connection number based on trapezoidal fuzzy numbers was developed through analysis of the relationship between the difference degree coefficient and grade standard threshold. The method was applied to vulnerability assessment of the water resources system in the Chaohu Basin. The results show that the confidence interval of the vulnerability grade in the water resources system in the Chaohu Basin is [2.89, 3.44] with a 75% confidence level. This method can not only obtain the confidence interval of the evaluation grade and effectively avoid the error induced by the broad peak of the difference degree coefficient, but also determine the priorities of vulnerability grades in different sub-regions using the expectation-variance method

Key words: connection number; trapezoidal fuzzy number; water resources system; vulnerability assessment; Chaohu Basin

集对分析方法利用联系数刻画研究问题, 联系数的差异度系数在区间 $[-1, 1]$ 连续取值过程中具有明显的模糊性特征, 与正态分布近似的三角模糊数能有效处理这种模糊性信息^[1-2]。根据差异度系数取值的连续性, 笔者曾构造了差异度系数的三角模糊数 \bar{A} , 建立了基于三角模糊数的联系系数评价模型^[3-4]。在水资源与水环境、水利工程等应用方面, 汪哲荪等^[2]建立了三角模糊数随机模拟的防洪工程联系系数风险评价模型, 并将其应用于防洪工程系统风险评价; 潘争伟等^[4]建立了基于三角模糊联系

数的系统综合决策模型, 并将其应用于安徽省水环境系统脆弱性评价; 杨淇翔等^[5]针对受多种不确定性因素影响的地下水环境质量评价问题, 建立了集对分析与三角模糊数耦合的地下水环境质量评价模型; 彭涛等^[6]采用基于集对分析与三角模糊数耦合的方法对滨海湿地生态系统健康进行了评价。然而, 进一步对联系分量系数取值与等级标准阈值对应关系的分析表明, 等级标准 g 的联系分量系数存在最优取值区间, 而当联系分量系数取值具有峰值较宽的分布特征时, 可能导致基于三角模糊数的联

系数存在较大误差^[1,7],为此,本文构造梯形模糊数表示差异度系数,提出了基于梯形模糊数联系系数的评价方法。

1 基于梯形模糊数联系系数的评价方法

1.1 方法基础

1.1.1 联系系数

集对分析方法的基础是确定联系系数,联系系数的基本表达式^[8]为

$$u = a + bI + cJ \quad (1)$$

式中: a, b, c 分别为集对的一度、差异度和对立度,取值区间为 $[0, 1]$,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)建立在对描述对象作“同、异、反”划分的基础上,称为同异反联系系数或三元联系系数^[8]。实际应用中,仅对描述对象所处的状态空间做一次“同、异、反”的划分尚不够细化,往往需要对联系系数基本表达式作更深层次的扩展^[9-10],形成一种多元联系系数:

$$u = (a_1 + a_2 + \dots + a_m) + (b_1I_1 + b_2I_2 + \dots + b_nI_n) + (c_1J_1 + c_2J_2 + \dots + c_tJ_t) \quad (2)$$

式中: $a_x(x=1, 2, \dots, m)$ 、 $b_y(y=1, 2, \dots, n)$ 、 $c_z(z=1, 2, \dots, t)$ 为联系分量,取值区间为 $[0, 1]$,且 $\sum_{x=1}^m a_x +$

$\sum_{y=1}^n b_y + \sum_{z=1}^t c_z = 1$; I_1, I_2, \dots, I_n 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, \dots, J_t 为对立度系数,取值规定为 -1 ,有时仅起对立标记作用。

1.1.2 梯形模糊数

如图1所示,实数域 \mathbf{R} 上的梯形模糊数^[11] $\tilde{A} = (a, b, c, d)$,当 $a < b = c < d$ 时, \tilde{A} 为三角模糊数,当 $a = b = c = d$ 时, \tilde{A} 为一实数。

1.1.3 置信水平区间

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^[11];当 $\tilde{A}_\alpha = \{x | \mu_{\tilde{A}}(x) > \alpha\}$ 时,称为 \tilde{A} 的 α 强截集, α 称为置信水平。

设梯形模糊数 $\tilde{A} = (a, b, c, d)$,取置信水平 $\alpha \in [0, 1]$,可得置信水平区间^[11](图1):

$$\tilde{A}_\alpha = [\tilde{A}_\alpha^L, \tilde{A}_\alpha^R] = [(b-a)\alpha + a, d - (d-c)\alpha] \quad (3)$$

对于实数域 \mathbf{R} 上的模糊数 \tilde{A} , α 截集 \tilde{A}_α 即为实数区间数 $[\tilde{A}_\alpha^L, \tilde{A}_\alpha^R]$,满足实数区间数四则运算法则^[12]。

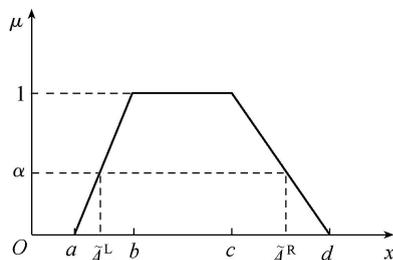


图1 梯形模糊数及其 α 截集

1.2 方法的分析步骤

根据同异反分析的基本步骤^[10]和系统评价方法分析的一般步骤^[13],基于梯形模糊数联系系数的评价方法的分析步骤如下:

步骤1:分析所论评价问题,结合实际确定评价对象的指标体系。评价对象的样本 i 子系统 j 指标 k 的样本数据为 $x_{ijk}(i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, N_j)$,等级评价标准为 $s_{gjk}(g=1, 2, \dots, G; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, N_j)$;各指标的样本值 x_{ijk} 组成集合 A_k ,该指标等级 g 的标准阈值 s_{gjk} 组成集合 B_k ,则由集合 A_k 与 B_k 构造一个集对 $H(A_k, B_k)$ 。其中 n, m, N_j 和 G 分别为评价样本数目、子系统数目、子系统 j 的评价指标数目和评价等级标准的等级数目。

步骤2:采用集对分析的“同、异、反”思想构造评价对象的样本 i 子系统 j 指标 k 的单指标联系系数 u_{ijk} 。在具体计算单指标联系系数 u_{ijk} 时,可采用“同异反层次法”联系系数表达式计算^[14-15],取 $G=5$,单指标联系系数 u_{ijk} 的表达式为

$$u_{ijk} = \begin{cases} \frac{x_{ijk} - s_{1jk}}{2(s_{0jk} - s_{1jk})} + 0.5 + \frac{s_{0jk} - x_{ijk}}{2(s_{0jk} - s_{1jk})}I_1 + 0I_2 + 0I_3 + 0J_1 + 0J_2 & x_{ijk} \in [s_{0jk}, s_{1jk}] \\ 0 + \frac{x_{ijk} - s_{2jk}}{2(s_{1jk} - s_{2jk})} + 0.5I_1 + \frac{s_{1jk} - x_{ijk}}{2(s_{1jk} - s_{2jk})}I_2 + 0I_3 + 0J_1 + 0J_2 & x_{ijk} \in (s_{1jk}, s_{2jk}] \\ 0 + 0 + \frac{x_{ijk} - s_{3jk}}{2(s_{2jk} - s_{3jk})}I_1 + 0.5I_2 + \frac{s_{2jk} - x_{ijk}}{2(s_{2jk} - s_{3jk})}I_3 + 0J_1 + 0J_2 & x_{ijk} \in (s_{2jk}, s_{3jk}] \\ 0 + 0 + 0I_1 + \frac{x_{ijk} - s_{4jk}}{2(s_{3jk} - s_{4jk})}I_2 + 0.5I_3 + \frac{s_{3jk} - x_{ijk}}{2(s_{3jk} - s_{4jk})}J_1 + 0J_2 & x_{ijk} \in (s_{3jk}, s_{4jk}] \\ 0 + 0 + 0I_1 + 0I_2 + \frac{x_{ijk} - s_{5jk}}{2(s_{4jk} - s_{5jk})}I_3 + 0.5J_1 + \frac{s_{4jk} - x_{ijk}}{2(s_{4jk} - s_{5jk})}J_2 & x_{ijk} \in (s_{4jk}, s_{5jk}] \end{cases} \quad (4)$$

式中 s_{0jk}, s_{5jk} 分别为子系统 j 指标 k 的标准值的左极值和右极值。

步骤3:构造差异度系数的梯形模糊数。当差异度系数取值具有峰值较宽的分布特征时,可能导致基于三角模糊数的联系系数存在较大误差^[1,7]。陈南祥等^[16]在三角模糊数的基础上,约定了相对最可能值区间 $[a_2, a_3]$,其长度 $\delta = a_3 - a_2 = 0.1$,构造梯形模糊数 $\tilde{A}_l = (I_{\min}, I_{\text{opt}1}, I_{\text{opt}2}, I_{\max})$ 表示差异度系数。这种主观约定尚缺乏依据,为此,对差异度系数取值与等级标准阈值的对应关系作进一步分析。

取 $G=5$,评价对象的子系统 j 指标 k 的等级标准阈值为—组序列数: $s_{0jk}, s_{1jk}, s_{2jk}, s_{3jk}, s_{4jk}, s_{5jk}$,采用分析取值法的特殊值法^[8]确定联系分量系数取值,并建立与等级标准阈值的对应关系,如图2所示。

评价等级	1		2		3		4		5	
等级标准阈值	s_{0jk}	s_{1jk}	s_{2jk}	s_{3jk}	s_{4jk}	s_{5jk}				
联系分量系数取值	1	0.7	0.2	-0.2	-0.7	-1				

图2 联系分量系数取值与等级标准阈值的对应关系

由图2可见,与等级标准阈值 $s_{0jk}, s_{1jk}, s_{2jk}, s_{3jk}, s_{4jk}, s_{5jk}$ 对应的联系分量系数为—组序列数:1、0.7、0.2、-0.2、-0.7、-1,且在 $[-1, 1]$ 上是连续的。此种情况下,符合2、3、4级标准的联系分量系数取值为宽值域,即存在最优取值区间 $[I_{\text{opt}1}, I_{\text{opt}2}]$,以相邻等级标准阈值对应的联系分量系数作为该等级标准联系分量系数最小值 I_{\min} 和最大值 I_{\max} ,由此,可构成梯形模糊数 $\tilde{A}_l = (I_{\min}, I_{\text{opt}1}, I_{\text{opt}2}, I_{\max})$ 。如:符合2级标准的联系分量系数存在最小值 $I_{\min} = -0.2$,最优值区间 $[I_{\text{opt}1}, I_{\text{opt}2}] = [0.2, 0.7]$,最大值 $I_{\max} = 1$,构造偏同差异度系数的梯形模糊数 $\tilde{A}_{l_1} = (-0.2, 0.2, 0.7, 1)$;同理可构造中差异度系数的梯形模糊数 $\tilde{A}_{l_2} = (-0.7, -0.2, 0.2, 0.7)$,偏反差异度系数的梯形模糊数 $\tilde{A}_{l_3} = (-1, -0.7, -0.2, 0.2)$ 。

步骤4:确定评价指标权重,采用综合评价指标函数方法^[13]计算子系统联系系数 u_{ij} 和样本联系系数 u_i 。目前,加法加权综合方法是应用比较广泛的系统评价方法,可采用下式计算子系统联系系数 u_{ij} 和样本联系系数 u_i :

$$u_{ij} = \sum_{k=1}^{N_j} w_{jk} u_{ijk} \quad u_i = \sum_{j=1}^m w_j u_{ij} \quad (5)$$

式中: w_{jk} 为子系统 j 指标 k 的指标权重; w_j 为子系统 j 的权重。

步骤5:确定置信水平 α ,计算联系系数置信区间。根据步骤3所构造的差异度系数的梯形模糊数,由式(3)可得置信水平 α 下的差异度系数置信区间:

$$\begin{cases} \tilde{A}_{\alpha, l_1} = [0.4\alpha - 0.2, 1 - 0.3\alpha] \\ \tilde{A}_{\alpha, l_2} = [0.5\alpha - 0.7, 0.7 - 0.5\alpha] \\ \tilde{A}_{\alpha, l_3} = [0.3\alpha - 1, 0.2 - 0.4\alpha] \end{cases} \quad (6)$$

当取 $\alpha=1$ 时, $\tilde{A}_{\alpha, l_1} = [0.2, 0.7]$, $\tilde{A}_{\alpha, l_2} = [-0.2, 0.2]$, $\tilde{A}_{\alpha, l_3} = [-0.7, -0.2]$,即为2、3、4级标准的联系分量系数的最优取值区间。

若给定置信水平 α ,由式(6)得差异度系数置信区间值,对立度系数取值规定为-1,由联系系数表达式(式(4))计算联系系数置信区间。

步骤6:根据联系系数和评价等级映射关系,建立评价等级与联系系数的函数计算式^[14],计算样本 i 子系统 j 指标 k 的单指标评价等级 h_{ijk} 、子系统评价等级 h_{ij} 和样本评价等级 h_i :

$$\begin{cases} h_{ijk} = f(u_{ijk}) = -2u_{ijk} + 3 & (u_{ijk} \in [-1, 1]) \\ h_{ij} = f(u_{ij}) = -2u_{ij} + 3 & (u_{ij} \in [-1, 1]) \\ h_i = f(u_i) = -2u_i + 3 & (u_i \in [-1, 1]) \end{cases} \quad (7)$$

步骤7:综合分析。式(7)计算结果为评价等级置信区间,可采用“期望-方差排序法”^[4,17]对不同子区域评价等级进行优劣排序。

2 巢湖流域水资源系统脆弱性评价

巢湖流域位于安徽省中部,介于长江与淮河之间,流域总面积1.35万 km^2 。近年来随着流域人口增长和社会经济发展,对水资源的开发利用不断增大,污染物排放随意性较大,导致水环境污染严重,环境承载力脆弱等问题凸显。以下采用前述基于梯形模糊数联系系数的评价方法对巢湖流域水资源系统脆弱性进行评价分析。

2.1 巢湖流域水资源系统脆弱性评价指标体系

水资源系统脆弱性是水资源系统状态受到系统压力引起的敏感性和系统状态对系统压力的适应性的函数^[4]。水资源“系统压力”往往由水资源短缺、水资源开发利用等产生,“系统状态”通常指生态环境所处的状况,而“适应性响应”可理解为系统状态在系统压力下表现出的承载能力,包括社会、经济和环境承载能力。由此,根据科学性、代表性、可操作性和动态性原则,从水资源脆弱性、生态环境脆弱性和承载能力脆弱性等三方面选择评价指标,建立巢湖流域水资源系统脆弱性评价指标体系^[15]如表1所示。

2.2 巢湖流域水资源系统脆弱性评价分析

根据流域水资源系统脆弱性评价指标体系,收集巢湖流域9个县市及流域指标数据,应用基于梯形模糊数联系系数的评价方法对巢湖流域水资源系统脆弱性进行评价分析。

步骤1:借鉴现有水资源系统脆弱性研究成果,结合研究区域实际情况,确定巢湖流域水资源系统脆弱性评价标准,见表2。

表1 巢湖流域水资源系统脆弱性评价指标体系

流域水资源系统脆弱性	水资源脆弱性 B_1	年降水量 C_{11}
		水资源模数 C_{12}
		水资源利用率 C_{13}
人均水资源量 C_{14}		
人均日生活用水量 C_{15}		
万元工业产值耗水量 C_{16}		
工业用水重复利用率 C_{17}		
灌溉水综合利用系数 C_{18}		
生态环境脆弱性 B_2		植被覆盖率 C_{21}
		水域面积比 C_{22}
		城市生活污水处理率 C_{23}
		工业废水处理率 C_{24}
		饮用水卫生达标人口率 C_{25}
		地表水环境质量 C_{26}
		水土流失面积比 C_{27}
承载能力脆弱性 B_3		人口密度 C_{31}
		区域开发程度 C_{32}
		人均GDP C_{33}
	工业废水排放强度 C_{34}	
	干旱受灾率 C_{35}	
	洪水受灾率 C_{36}	
	水利工程投资占GDP比例 C_{37}	
	公众节水意识和节水器具的普及程度 C_{38}	

步骤2:采用“同异反层次法”联系数计算公式(式(4))计算巢湖流域水资源系统脆弱性评价样本 i 子系统 j 指标 k 的单指标联系数 u_{ijk} 。

步骤3:采用模糊层次分析法确定巢湖流域水资源系统脆弱性评价子系统指标权重^[15](表3),由

式(5)计算得子系统联系数 u_{ij} 。同时分析确定3个子系统的权重为0.4、0.3和0.3,由式(5)计算得样本联系数 u_i ,结果见表4。

步骤4:取置信水平 $\alpha = 75%$,由式(6)可得置信水平75%条件下的差异度系数置信区间为

$$\tilde{A}_{\alpha, I_1} = [0.1, 0.775]$$

$$\tilde{A}_{\alpha, I_2} = [-0.325, 0.325]$$

$$\tilde{A}_{\alpha, I_3} = [-0.775, -0.1]$$

步骤5:由式(7)计算得巢湖流域水资源系统脆弱性等级置信区间如表4所示,表4同时给出了模糊集对分析评价方法^[15]和模糊综合评价方法^[18]的计算结果。

2.3 结果分析

由表4可知,置信水平75%条件下巢湖流域水资源系统脆弱性等级区间为[2.89, 3.44],与模糊集对分析评价方法和模糊综合评价方法结果基本一致。流域不同区域的脆弱性等级优劣排序依次为肥东、和县、庐江、居巢、无为、含山、合肥、肥西和舒城。

为进一步分析巢湖流域水资源系统脆弱性的主要影响因素,表5给出了合肥、舒城和全流域的各子系统脆弱性评价结果。表5结果表明:①从子系统分析,巢湖流域水资源系统脆弱性的主要影响因素为承载能力脆弱性。随着流域人口不断增加、城镇化加快,以及水资源开发利用率的增大,造成流域范

表2 巢湖流域水资源系统脆弱性评价标准

标准等级	C_{11}/mm	$C_{12}/(\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	$C_{13}/\%$	C_{14}/m^3	C_{15}/L	C_{16}/t	$C_{17}/\%$	C_{18}
微脆弱	[1 100, 1 600]	[300, 500]	[0, 10]	[3 000, 8 000]	[0, 120]	[0, 150]	[90, 100]	[0.50, 1.00]
轻脆弱	[800, 1100]	[150, 300]	(10, 25]	[2 300, 3 000]	(120, 150]	(150, 250]	[80, 90)	[0.40, 0.50]
中度脆弱	[400, 800)	[75, 150)	(25, 40]	[1 700, 2 300)	(150, 180]	(250, 350]	[70, 80)	[0.25, 0.40]
强脆弱	[200, 400)	[30, 75)	(40, 60]	[1 000, 1 700)	(180, 220]	(350, 450]	[50, 70)	[0.15, 0.25]
极脆弱	[0, 200)	[5, 30)	(60, 100]	[100, 1 000)	(220, 350]	(450, 600]	[25, 50)	[0.05, 0.15]
标准等级	$C_{21}/\%$	$C_{22}/\%$	$C_{23}/\%$	$C_{24}/\%$	$C_{25}/\%$	$C_{26}/\%$	$C_{27}/\%$	
微脆弱	[30, 50]	[30, 55]	[80, 100]	[97.5, 100]	[95, 100]	[90, 100]	[0, 2]	
轻脆弱	[20, 30)	[23, 30)	[60, 80)	[92.5, 97.5)	[85, 95)	[80, 90)	(2, 5]	
中度脆弱	[15, 20)	[18, 23)	[40, 60)	[85, 92.5)	[75, 85)	[70, 80)	(5, 10]	
强脆弱	[10, 15)	[10, 18)	[20, 40)	[80, 85)	[70, 75)	[50, 70)	(10, 20]	
极脆弱	[5, 10)	[1, 10)	[0, 20)	[15, 80)	[60, 70)	[0, 50)	(20, 50]	
标准等级	$C_{31}/(\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	$C_{32}/\%$	$C_{33}/\text{万元}$	$C_{34}/(\text{t} \cdot \text{万元}^{-1})$	$C_{35}/\%$	$C_{36}/\%$	$C_{37}/\%$	C_{38}
微脆弱	[50, 100]	[5, 30]	[1.2, 5.0]	[0.5, 10]	[0, 5]	[0, 7]	[1.0, 1.5]	高
轻脆弱	(100, 200]	(30, 45]	[0.8, 1.2)	(10, 25]	(5, 10]	(7, 15]	[0.8, 1.0)	较高
中度脆弱	(200, 350]	(45, 60]	[0.5, 0.8)	(25, 40]	(10, 20]	(15, 26]	[0.5, 0.8)	中等
强脆弱	(350, 500]	(60, 85]	[0.2, 0.5)	(40, 55]	(20, 30]	(26, 35]	[0.2, 0.5)	较低
极脆弱	(500, 3 000]	(85, 100]	[0.05, 0.2)	(55, 100]	(30, 50]	(35, 55]	[0, 0.2)	低

表3 巢湖流域水资源系统脆弱性评价指标权重

指标	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}
权重	0.193	0.165	0.090	0.144	0.099	0.081	0.105	0.123	0.153	0.090	0.105	0.132
指标	C_{25}	C_{26}	C_{27}	C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{34}	C_{35}	C_{36}	C_{37}	C_{38}	
权重	0.186	0.223	0.111	0.129	0.081	0.105	0.096	0.179	0.179	0.144	0.087	

表4 综合评价结果

子区域/流域	联系数	脆弱性等级置信区间	排序	模糊集对分析评价 ^[15]	模糊综合评价
合肥	$u_1 = 0.0798 + 0.1628I_1 + 0.1629I_2 + 0.1404I_3 + 0.1699I_4 + 0.1968I_5 + 0.0875I_6$	[3.05, 3.50]	7	3.12	3.0
肥东	$u_2 = 0.1448 + 0.2431I_1 + 0.1133I_2 + 0.0403I_3 + 0.1851I_4 + 0.2166I_5 + 0.0568I_6$	[2.80, 3.12]	1	2.86	3.0
肥西	$u_3 = 0.0739 + 0.1576I_1 + 0.1702I_2 + 0.1435I_3 + 0.1938I_4 + 0.1990I_5 + 0.0620I_6$	[3.04, 3.52]	8	3.10	3.0
居巢	$u_4 = 0.1033 + 0.1526I_1 + 0.1438I_2 + 0.2077I_3 + 0.2201I_4 + 0.1397I_5 + 0.0328I_6$	[2.87, 3.39]	4	2.92	3.0
庐江	$u_5 = 0.1043 + 0.2170I_1 + 0.1516I_2 + 0.0758I_3 + 0.1749I_4 + 0.2073I_5 + 0.0693I_6$	[2.89, 3.28]	3	2.95	3.0
含山	$u_6 = 0.0774 + 0.1944I_1 + 0.1634I_2 + 0.0984I_3 + 0.1822I_4 + 0.2072I_5 + 0.0770I_6$	[3.00, 3.42]	6	3.06	3.0
无为	$u_7 = 0.1258 + 0.1825I_1 + 0.1383I_2 + 0.1136I_3 + 0.1240I_4 + 0.2039I_5 + 0.1119I_6$	[2.97, 3.33]	5	3.02	3.0
和县	$u_8 = 0.0885 + 0.1811I_1 + 0.1779I_2 + 0.1754I_3 + 0.1916I_4 + 0.1435I_5 + 0.0420I_6$	[2.81, 3.32]	2	2.85	3.0
舒城	$u_9 = 0.0765 + 0.1653I_1 + 0.1495I_2 + 0.1239I_3 + 0.2095I_4 + 0.2109I_5 + 0.0645I_6$	[3.08, 3.53]	9	3.15	4.0
全流域	$u_{10} = 0.0479 + 0.1756I_1 + 0.2169I_2 + 0.1491I_3 + 0.2186I_4 + 0.1753I_5 + 0.0167I_6$	[2.89, 3.44]		2.96	3.0

表5 子系统脆弱性评价结果

子区域/流域	联系数	脆弱性等级置信区间	模糊综合评价
合肥	$u_{11} = 0.0554 + 0.1739I_1 + 0.2670I_2 + 0.1596I_3 + 0.0955I_4 + 0.1665I_5 + 0.0822I_6$	[2.84, 3.34]	3.0
	$u_{12} = 0.0930 + 0.1087I_1 + 0.0525I_2 + 0.1877I_3 + 0.2858I_4 + 0.2036I_5 + 0.0687I_6$	[3.33, 3.80]	4.0
	$u_{13} = 0.0990 + 0.2020I_1 + 0.1345I_2 + 0.0674I_3 + 0.1532I_4 + 0.2305I_5 + 0.1133I_6$	[3.07, 3.41]	3.0
舒城	$u_{91} = 0.0884 + 0.2403I_1 + 0.1596I_2 + 0.0273I_3 + 0.2174I_4 + 0.2323I_5 + 0.0346I_6$	[2.88, 3.27]	4.0
	$u_{92} = 0.0212 + 0.0930I_1 + 0.2029I_2 + 0.1832I_3 + 0.1070I_4 + 0.2239I_5 + 0.1689I_6$	[3.44, 3.90]	4.0
	$u_{93} = 0.1159 + 0.1375I_1 + 0.0826I_2 + 0.1933I_3 + 0.3015I_4 + 0.1692I_5 + 0.0000I_6$	[3.00, 3.52]	3.0
全流域	$u_{101} = 0.0529 + 0.2389I_1 + 0.2476I_2 + 0.0717I_3 + 0.1679I_4 + 0.1894I_5 + 0.0316I_6$	[2.73, 3.21]	3.0
	$u_{102} = 0.0000 + 0.1564I_1 + 0.2909I_2 + 0.2615I_3 + 0.2074I_4 + 0.0820I_5 + 0.0017I_6$	[2.73, 3.44]	3.0
	$u_{103} = 0.0890 + 0.1104I_1 + 0.1018I_2 + 0.1399I_3 + 0.2974I_4 + 0.2497I_5 + 0.0119I_6$	[3.26, 3.76]	4.0

围内人口密度、区域开发程度、工业废水排放强度等指标的脆弱性状况变差,承载能力脆弱性对水资源系统脆弱性的影响逐渐增大。②合肥、舒城的生态环境脆弱性也较差,反映了随着社会经济的发展、城镇化的加快,生态环境压力逐渐加大,应加强生态环境综合治理,改善生态环境质量,降低生态环境脆弱程度。

3 结语

根据差异度系数峰值取值的特征,通过分析联系分量系数取值与等级标准阈值的对应关系,确定等级标准 g 的联系分量系数的最优取值区间 $[I_{opt1}, I_{opt2}]$,以相邻等级标准阈值对应的联系分量系数作为该等级标准联系分量系数最小值 I_{min} 和最大值 I_{max} ,构造了以梯形模糊数表示的差异度系数,提出了基于梯形模糊数联系数的评价方法。实例应用结果表明:基于梯形模糊数联系数的评价方法所得评价结果为置信区间,避免了当差异度系数取值峰值较宽时可能产生的误差;其中置信水平 α 取值采用了主观取值,如何确定置信水平的取值尚需进一步研究;对脆弱性评价等级置信区间还可采用“期望-方差排序法”对不同子区域的综合评价等级进行优劣排序,能有针对性地对脆弱性排序靠后的子区域进行综合治理,改善流域的水资源系统脆弱性状况。

参考文献:

[1] 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.

[2] 汪哲荪,金菊良,魏一鸣,等.三角模糊数随机模拟的防洪工程联系数风险评价模型[J]. 水利学报, 2010, 41(10): 1173-1178. (WANG Zhesun, JIN Juliang, WEI Yiming, et al. Connection number based risk evaluation method for watershed flood control engineering system using stochastic simulation and triangular fuzzy numbers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(10): 1173-1178. (in Chinese))

[3] 潘争伟,吴开亚,金菊良,等.三角模糊数的联系数在环境质量评价中的应用[J]. 安阳工学院学报, 2009(2): 39-43. (PAN Zhengwei, WU Kaiya, JIN Juliang, et al. The connection number based on the triangular fuzzy number and its application to urban evaluation of environmental quality [J]. Journal of Anyang Institute of Technology, 2009(2): 39-43. (in Chinese))

[4] 潘争伟,金菊良,吴开亚,等.区域水环境系统脆弱性指标体系及综合决策模型研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(4): 518-525. (PAN Zhengwei, JIN Juliang, WU Kaiya, et al. Research on the indexes and decision method of regional water environmental system vulnerability [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(4): 518-525. (in Chinese))

[5] 洪祺翔,陈南祥.基于集对分析与三角模糊数耦合的地下水环境质量评价[J]. 中国农村水利水电, 2012(8):

- 38-42. (YANG Qixiang, CHEN Nanxiang. A coupling model of set pair analysis and triangular fuzzy numbers for evaluation of groundwater environmental quality[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012 (8): 38-42. (in Chinese))
- [6] 彭涛,陈晓宏,王高旭,等. 基于集对分析与三角模糊数的滨海湿地生态系统健康评价[J]. 生态环境学报, 2014, 23 (6): 917-922. (PENG Tao, CHEN Xiaohong, WANG Gaoxu, et al. Assessment of coastal wetland ecosystem health based on set pair analysis and triangular fuzzy numbers[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(6):917-922. (in Chinese))
- [7] 李如忠,童芳,周爱佳,等. 基于梯形模糊数的地表灰尘重金属污染健康风险评价模型[J]. 环境科学学报, 2011, 31 (8): 1790-1798. (LI Ruzhong, TONG Fang, ZHOU Aijia, et al. Fuzzy assessment model for the health risk of heavy metals in urban dusts based on trapezoidal fuzzy numbers[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(8):1790-1798. (in Chinese))
- [8] 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,2000:9-43.
- [9] 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. (LIU Ying, YU Dongmei, CHENG Xianyi. Several questions in connection mathematics [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2004, 34(10):77-82. (in Chinese))
- [10] 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. (ZHAO Keqin. The application of SPA-based identical-discrepancy-contrary system theory in artificial intelligence research[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2007, 2(5):20-35. (in Chinese))
- [11] 杨纶标,高英仪,凌卫新. 模糊数学原理及应用[M]. 广州:华南理工大学出版社,2011:1-30.
- [12] 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 (11): 48-50. (ZENG Wenyi, LUO Chengzhong, ROZI Haji. Comprehensive decision model of interval number [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 1997 (11): 48-50. (in Chinese))
- [13] 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.
- [14] 吴开亚,金菊良,潘争伟. 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[J]. 水利学报, 2010, 41 (6): 711-719. (WU Kaiya, JIN Juliang, PAN Zhengwei. Set pair analysis model based on triangle fuzzy intervals and its application to impact rating evaluation of urban flood[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(6):711-719. (in Chinese))
- [15] 胡蓓琳,潘争伟,金菊良,等. 基于集对分析模型的巢湖流域水资源系统脆弱性评价[J]. 水电能源科学, 2013, 31 (10): 21-24. (HU Beilin, PAN Zhengwei, JIN Juliang, et al. Vulnerability evaluation of Chaohu Basin water resources system based on set pair analysis method[J]. Water Resources and Power, 2013, 31 (10): 21-24. (in Chinese))
- [16] 陈南祥,杨淇翔. 基于博弈论组合赋权的流域水资源承载力集对分析[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32 (2): 81-85. (CHEN Nanxiang, YANG Qixiang. Set pair analysis of watershed water resources carrying capacity based on game theory combination weighting[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(2):81-85. (in Chinese))
- [17] 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. (WU Chao, HU Kun. Sensitivity analysis to weight of priorities in multiple attribute decision making with intervals [J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(9):1217-1218. (in Chinese))
- [18] 王文圣,张翔,金菊良,等. 水文学不确定性分析方法[M]. 北京:科学出版社,2011:188-202.

(收稿日期:2015-08-11 编辑:熊水斌)

· 简讯 ·

中国大坝工程学会 2016 学术年会暨国际水库大坝学术研讨会将于 10 月举办

由中国大坝工程学会主办的中国大坝工程学会 2016 学术年会拟于 2016 年 10 月下旬在陕西省西安市举办,会议期间将同时举办由中国工程院主办的国际水库大坝学术研讨会,就大坝风险管理、考虑气候变化条件下的水库大坝安全、水库大坝建设新技术、新材料和新工艺等方面展开讨论。会议议题主要包括:①高坝建设关键技术;②水库大坝与水电站的运行管理;③水利水电工程的新技术、新产品和新工艺;④跨流域引调水关键技术;⑤水下检测及修补加固技术等。

中国大坝工程学会自 2011 年成立以来,已举办 5 届学术年会。年会的召开为会员单位搭建了良好的交流平台,对促进水库大坝及相关领域的交流与合作发挥了重要的作用。

(本刊编辑部供稿)