

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2012.03.002

巢湖流域水安全评价的集对分析模型

潘争伟¹, 金菊良², 吴开亚³, 徐雅琦¹

(1. 安徽新华学院土木与环境工程学院, 安徽 合肥 230088 ;

2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009 3. 复旦大学公共管理与公共政策创新基地, 上海 200433)

摘要 集对分析方法从同、异、反 3 方面综合描述事物之间的联系, 能有效地描述水安全系统的确定不确定关系。利用联系数描述水安全系统的确定不确定关系时, 差异度系数 i 在 $[-1, 1]$ 之间取值是不确定的, 为刻画差异度系数取值的不确定性, 提出利用三角模糊数表示差异度系数 i , 建立流域水安全评价的集对分析模型, 并应用于巢湖流域水安全综合评价。结果表明: 巢湖流域 9 区(县)及全流域的水安全状况从高到低依次为: 合肥、居巢、含山、全流域、和县、庐江、无为、肥西、舒城和肥东。流域水安全评价的集对分析模型能有效利用三角模糊数联系数确定水安全等级, 为流域水安全问题研究提供了一种新的方法, 具有一定的推广应用价值。

关键词 水安全系统评价模型; 三角模糊数; 联系数; 巢湖流域

中图分类号: TV213; X143 文献标识码: A 文章编号: 1004-6933(2012)03-0009-07

Set pair analysis model for water safety evaluation of Chaohu Watershed

PAN Zheng-wei¹, JIN Ju-liang², WU Kai-ya³, XU Ya-qi¹

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Anhui Xinhua University, Hefei 230088, China ;

2. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China ;

3. National Innovative Institute for Public Management and Public Policy, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract : The set pair analysis method comprehensively describes the relationship between things from an identical-discrepancy-contrary perspective, and can effectively describe the certainty and uncertainty of a water safety system. When using the connection number to describe the certainty and uncertainty of the water safety system, the discrepancy coefficient i in the range of $[-1, 1]$ is uncertain. In order to demonstrate this uncertainty, the triangular fuzzy number was used to define the discrepancy coefficient i . The set pair analysis model for the evaluation of the watershed water safety was established and applied to the comprehensive evaluation of water safety in the Chaohu Watershed. The results show that the ranking of the water safety status in nine districts and counties of the Chaohu Watershed and in the whole watershed is in the following descending order: Hefei, Juchao, Hanshan, the whole watershed, Hexian, Lujiang, Wuwei, Feixi, Shucheng, and Feidong. This set pair analysis model can effectively identify water safety grades by using the connection number of the triangle fuzzy number, thus providing a new approach for water safety evaluation, and it has a certain applicable value.

Key words : evaluation model for water safety system; triangle fuzzy number; connection number; Chaohu Watershed

水资源不仅是基础性的自然资源, 而且是战略性的经济资源, 随着水资源短缺、人为水环境污染、

旱涝灾害以及水生态环境问题的日益加剧, 水安全问题已经成为全球关注和研究的焦点问题。目前常

基金项目 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07106-001) ; 国家自然科学基金(51079037) ; 安徽高等学校省级自然科学基金项目(KJ2011Z158, KJ2012B072)

作者简介 潘争伟(1980—)男, 讲师, 主要研究方向为水环境系统分析。E-mail: pzhwei1023@163.com

通讯作者 吴开亚, 副教授。E-mail: wuky2000@vip.sina.com

用的系统分析评价方法,如模糊综合评价法^[1]、层次分析法^[2]、属性识别法^[3]、物元评判法^[4]等的广泛应用,使水安全评价的研究不断深入。但上述方法本质上是从同一性单方面来描述事物之间的联系,比较而言,集对分析方法是从事物的同一性、差异性和对立性三方面综合描述事物之间的联系,能有效地描述水安全系统的确定不确定关系^[5]。利用联系数描述水安全系统的确定不确定关系时,差异度系数*i*的取值在[-1,1]之间的变化是不确定的。傅国耀^[6]将Zadeh模糊集的隶属函数的值域从[0,1]拓展为[-1,1],使得模糊集的隶属函数与差异度系数在值域上建立了一致性,利用三角模糊集表示差异度系数*i*是可行的^[7]。在上述理论上,利用三角模糊数表示差异度系数*i*,并给出基于三角模糊数的四元联系数表达式,建立流域水安全评价的集对分析模型。

1 理论基础

1.1 集对分析思想

集对分析(set pair analysis)是中国学者赵克勤^[5]于1989年提出的一种新的系统分析方法,该方法利用联系数刻画事物之间的确定性与不确定性。联系数表达式为

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

式(1)所示的联系数表达式是建立在对描述对象作“同、异、反”划分基础上的,所以又称为同异联系数或三元联系数。通常情况下,仅对描述对象所处的状态空间作“一分为三”的划分是不够细化的^[5,7-8]。为此,需要对联系数表达式 $\mu = a + bi + cj$ 作不同层次的扩展,对*bi*项进行扩展后形成一种多元联系数,表达式为

$$\mu = a + b_1i_1 + b_2i_2 + \dots + b_{n-2}i_{n-2} + cj \quad (2)$$

当*n*=4时,得四元联系数表达式:

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

式中:*a*、*b*₁、*b*₂、*c*∈[0,1],且*a*+*b*₁+*b*₂+*c*=1;*a*为集对的同一度;*b*₁、*b*₂为集对的差异度;*c*为集对的对立度;*i*₁、*i*₂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。

1.2 三角模糊数(triangle fuzzy number)

定义^[9]设在实数域R上的一个模糊数*A*,定义一个隶属函数: $\mu_A(x):R \rightarrow [0,1]$,*x*∈R,若特征函数(隶属函数) $\mu_A(x)$ 表示为

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases}$$

则称*A*为三角模糊数,记作*A*=(*a*,*b*,*c*),其中,*a*≤*b*≤*c*;当*a*=*b*=*c*时,*A*为一个精确数。三角模糊数的分布如图1所示。

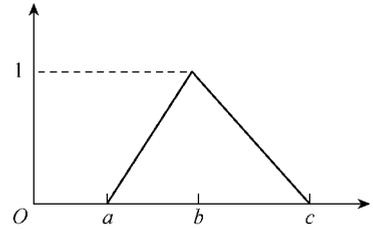


图1 三角模糊数

傅国耀^[6]将模糊集的隶属函数的值域由[0,1]拓展为[-1,1],同样三角模糊数的隶属函数的值域也可以拓展为[-1,1],与差异度系数*i*在取值上建立了一致性,为应用三角模糊数表示差异度系数*i*提供了理论基础。

2 流域水安全评价的集对分析模型

流域水安全评价的集对分析模型的基本步骤包括:构建流域水安全评价指标体系和评价标准,确定基于三角模糊数的联系数,建立联系数与评价等级的投影函数,确定评价指标权重向量,流域水安全综合评价分析。

2.1 构建流域水安全评价指标体系和评价标准

流域水安全是涉及自然、社会、经济和环境等多方面相互联系又彼此制约的复杂系统。各种因素对流域水安全的影响程度差别很大,因此,科学、合理地选择评价指标及确定评价标准是评价优劣的关键。依照科学性、系统性、可比性及可操作性等原则,将流域水安全评价系统分为水资源安全、水环境安全、水灾害防治安全和社会经济安全4个子系统,初步选取各子系统指标。邀请专家对初选指标进行两两指标间的重要性比较,根据专家意见采用AGA-FAHP计算确定流域水安全评价指标体系^[10](见图2和表1)。

根据评价指标体系的物理含义及其对流域经济、社会、资源与环境可持续性等方面的作用,参照国际水安全指标标准等级和水资源系统评价等级,建立流域水安全5级评价标准^[10-11]。V级分别为“很安全、较安全、临界安全、较不安全、很不安全”。

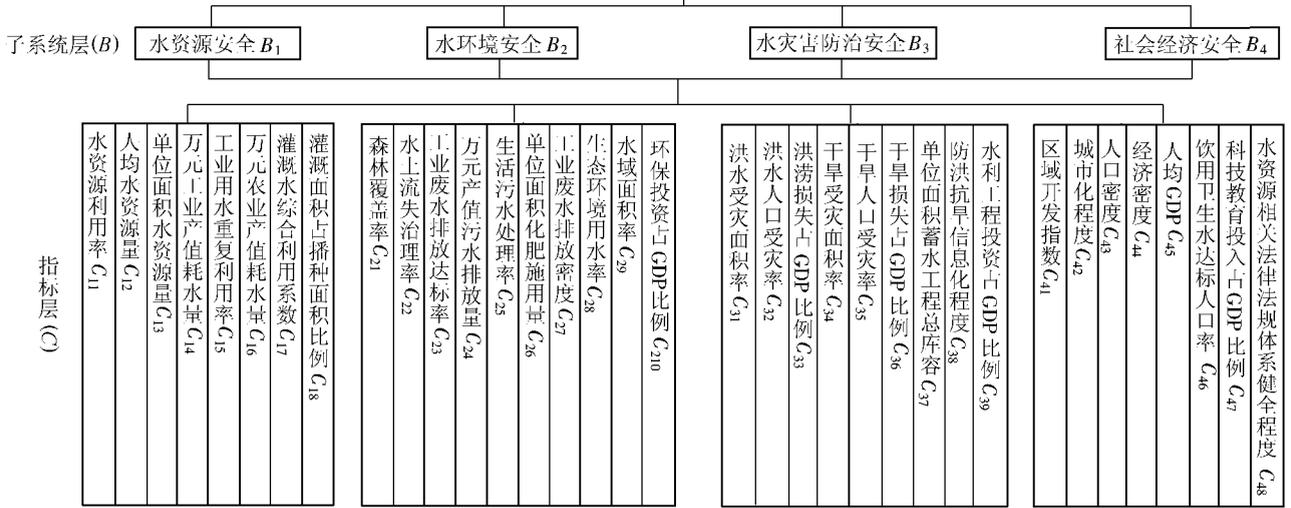


图2 巢湖流域水安全评价指标体系

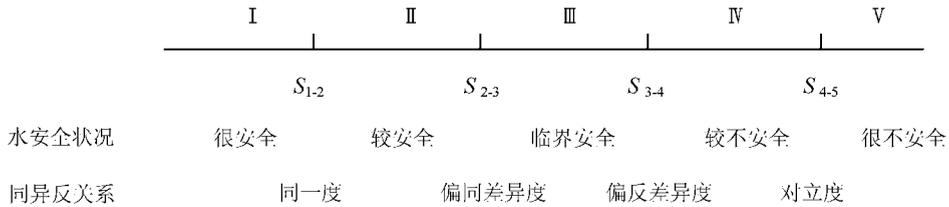


图3 水安全状况与同异反关系对照

2.2 确定基于三角模糊数的联系系数

2.2.1 等级标准联系系数表达式

依据集对分析同异反思想,采用四元联系系数描述流域水安全状况,水安全状况与同异反关系对照如图3所示。

由图3可见,可将水安全等级“很安全”定义为“同一度”;“很不安全”可定义为“对立度”,水安全状况由“很安全”变化为“很不安全”,则同异反关系由

“同一度”逐渐变化为“对立度”。

对评价指标的质量水平进行量化时,往往变化趋势不完全相同,评价指标的安全水平随评价标准值的增大而增大,称为正向指标,如:人均水资源量、工业用水重复率等;反之,称为反向指标,如:水资源利用率、万元工业产值耗水量等。

根据上述分析,给出等级标准联系系数的具体表达式为^[12]

$$\mu_{mk} = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0j & \text{正向指标: } c \geq s_{1-2} & \text{反向指标: } c \leq s_{1-2} \\ \frac{c - s_{2-3}}{s_{1-2} - s_{2-3}} + \frac{s_{1-2} - c}{s_{1-2} - s_{2-3}} i_1 + 0i_2 + 0j & \text{正向指标: } s_{2-3} \leq c < s_{1-2} & \text{反向指标: } s_{1-2} < c \leq s_{2-3} \\ 0 + \frac{c - s_{3-4}}{s_{2-3} - s_{3-4}} i_1 + \frac{s_{2-3} - c}{s_{2-3} - s_{3-4}} i_2 + 0j & \text{正向指标: } s_{3-4} \leq c < s_{2-3} & \text{反向指标: } s_{2-3} < c \leq s_{3-4} \\ 0 + 0i_1 + \frac{c - s_{4-5}}{s_{3-4} - s_{4-5}} i_2 + \frac{s_{3-4} - c}{s_{3-4} - s_{4-5}} j & \text{正向指标: } s_{4-5} \leq c < s_{3-4} & \text{反向指标: } s_{3-4} < c \leq s_{4-5} \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 1j & \text{正向指标: } c < s_{4-5} & \text{反向指标: } c > s_{4-5} \end{cases} \quad (4)$$

式中: m 表示第 m 个评价指标; k 表示第 k 个评价样本; c 表示评价指标的样本值; s_{x-y} 表示评价标准中第 x 、 y 级的等级标准分隔点。

2.2.2 基于三角模糊数的差异度系数

差异度系数的确定包括多种方法^[5,13]:分析取值法、计算取值法、顺势取值法、逆势取值法、随机取值法、概率取值法、函数模拟法等。上述方法并没有充分考虑差异度系数的不确定性,笔者引入模糊数

学知识,尝试利用三角模糊数表示差异度系数取值的不确定性。

根据水安全5级评价标准,符合I级标准为同一度 a ,可以将同一度 a 的系数看作为1,符合V级标准为对立度 c ,对立度系数 j 常取-1,而符合II、III、IV级标准定义为差异度。评价标准中等级分隔点的差异度系数采用分析取值法确定,分别取 s_{2-3} 对应的差异度系数 $i_1 = 1/3$, s_{3-4} 对应的差异度系数

$i_2 = -1/3$ 。相邻标准等级之间的差异度系数利用

三角模糊数(图4)表示,基于三角模糊数的差异度系数的表达式为

$$i_1 = \begin{cases} 0 & \text{正向指标: } c \geq s_{1-2} & \text{反向指标: } c \leq s_{1-2} \\ \frac{s_{1-2} - c}{\mathfrak{X}(s_{1-2} - s_{2-3})} & \text{正向指标: } s_{2-3} \leq c < s_{1-2} & \text{反向指标: } s_{1-2} < c \leq s_{2-3} \\ \frac{c - s_{3-4}}{\mathfrak{X}(s_{2-3} - s_{3-4})} & \text{正向指标: } s_{3-4} \leq c < s_{2-3} & \text{反向指标: } s_{2-3} < c \leq s_{3-4} \\ 0 & \text{正向指标: } c > s_{3-4} & \text{反向指标: } c > s_{3-4} \end{cases} \quad (5)$$

$$i_2 = \begin{cases} 0 & \text{正向指标: } c \geq s_{2-3} & \text{反向指标: } c \leq s_{2-3} \\ -\frac{s_{2-3} - c}{\mathfrak{X}(s_{2-3} - s_{3-4})} & \text{正向指标: } s_{3-4} \leq c < s_{2-3} & \text{反向指标: } s_{2-3} < c \leq s_{3-4} \\ -\frac{c - s_{4-5}}{\mathfrak{X}(s_{3-4} - s_{4-5})} & \text{正向指标: } s_{4-5} \leq c < s_{3-4} & \text{反向指标: } s_{3-4} < c \leq s_{4-5} \\ 0 & \text{正向指标: } c < s_{4-5} & \text{反向指标: } c < s_{4-5} \end{cases} \quad (6)$$

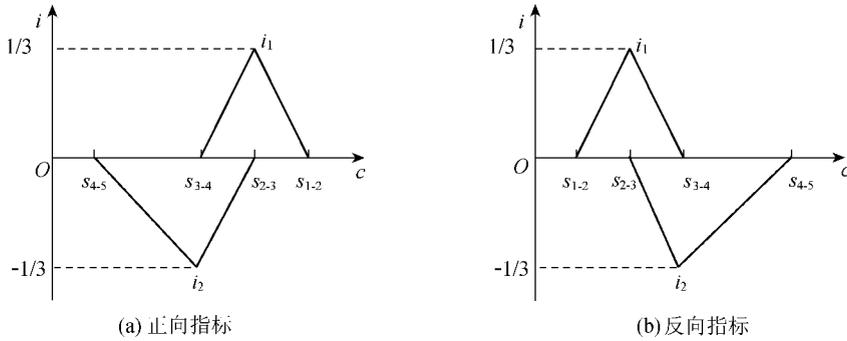


图4 基于三角模糊数的差异度系数

2.2.3 基于三角模糊数的联系数

j 代入等级标准联系数表达式(4),则可得基于三角

将基于三角模糊数差异度系数 i 和对立度系数

模糊数的联系数表达式为

$$\mu_{mk} = \begin{cases} 1 & \text{正向指标: } c \geq s_{1-2} & \text{反向指标: } c \leq s_{1-2} \\ \frac{c - s_{2-3}}{s_{1-2} - s_{2-3}} + \frac{(s_{1-2} - c)^2}{\mathfrak{X}(s_{1-2} - s_{2-3})^2} & \text{正向指标: } s_{2-3} \leq c < s_{1-2} & \text{反向指标: } s_{1-2} < c \leq s_{2-3} \\ \frac{(c - s_{3-4})^2 - (s_{2-3} - c)^2}{\mathfrak{X}(s_{2-3} - s_{3-4})^2} & \text{正向指标: } s_{3-4} \leq c < s_{2-3} & \text{反向指标: } s_{2-3} < c \leq s_{3-4} \\ -\frac{(c - s_{4-5})^2}{\mathfrak{X}(s_{3-4} - s_{4-5})^2} - \frac{s_{3-4} - c}{s_{3-4} - s_{4-5}} & \text{正向指标: } s_{4-5} \leq c < s_{3-4} & \text{反向指标: } s_{3-4} < c \leq s_{4-5} \\ -1 & \text{正向指标: } c < s_{4-5} & \text{反向指标: } c > s_{4-5} \end{cases} \quad (7)$$

2.3 建立联系数与评价等级的投影函数

2.4 确定评价指标权重向量 W

通过数学模型分析得联系数 μ_{mk} 与评价等级

评价指标权重向量 $W = [w_1, w_2, \dots, w_M]$ 的确定方法有多种^[14-15] 笔者采用基于加速遗传算法的模糊层次分析法(AGA-FAHP)计算指标权重。其中, M 表示评价指标数目。

$y(x)$ 的散点图如图5所示。

由图5得联系数与评价等级的投影函数:

2.5 流域水安全综合评价结果

$$y(x) = \begin{cases} 3e^{-1.47x} & x \geq 0 \\ 6 - 3e^{1.47x} & x < 0 \end{cases} \quad (8)$$

由评价指标样本值的联系数 μ_{mk} 可以构造联系数矩阵 R 根据评价指标权重向量 W 和联系数矩阵 R , 选择适当的矩阵合成算子 将 W 与 R 合成得到 B ,

式中: x 表示联系数。

则水安全评价等级可以由式(8)计算确定。

$$B = W \cdot R = [b_1, b_2, \dots, b_K] \quad (9)$$

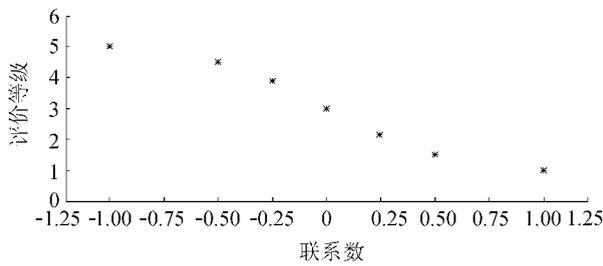


图5 联系系数 μ_{mk} 与评价等级 $y(x)$ 的散点图

这里,选择模糊乘算子,即: $b_k = \sum_{m=1}^M w_m \mu_{mk}$ 。

由评价等级与联系系数的投影函数即可确定流域水安全综合评价结果。

3 实例分析

巢湖位于安徽省中部,是我国5大淡水湖泊之一,流域总面积1.67万 km^2 , 占全省面积的9.66%, 涵盖合肥市、肥东、肥西、巢湖市居巢区、含山、和县、庐江、无为和舒城等市县区。由于流域发展水平不均衡,各地区水资源利用程度差异很大,巢湖流域作为重要的粮食基地,农业用水量较大,流域内人口

稠密,工矿企业集中,人均水资源量和单位面积水资源量均较小。近年来,随着社会经济的的发展和人口的增长,水资源供需日益紧张、水污染加剧、水环境不断恶化,水安全受到了严重威胁,水安全已成为制约流域社会、经济、自然协调发展的重要因素。科学评价流域的水安全状况,不仅可以分析确定流域水安全的主要影响因素,为改善流域水安全状况提供依据,也为流域社会经济可持续发展提供强有力的保障。

3.1 确定巢湖流域水安全评价等级标准

参照国际水安全指标临界值和其他流域水安全指标评价标准^[16],安徽省水功能区划标准,以及评价区的水安全指标样本值等,确立巢湖流域水安全评价等级标准^[10-11](表1)。

3.2 基于三角模糊数的联系系数

根据巢湖流域水安全评价指标样本值,由式(7)计算可得指标样本值的联系系数 μ_{mk} (表2)。

3.3 评价指标权重向量

根据巢湖流域社会经济和水环境现状,4个子系统采用等权重处理,即权重均为0.25;各子系统评价指标权重采用AGA-FAHP确定,计算得巢湖流域水安

表1 巢湖流域水安全评价等级标准

水安全评价等级	水资源安全(B_1)									
	$C_{11}/\%$	$C_{12}/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$)	$C_{13}/$ ($\text{万 m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$)	$C_{14}/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	$C_{15}/\%$	$C_{16}/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	C_{17}	$C_{18}/\%$		
I 很安全	≤ 10	≥ 3000	≥ 300	≤ 200	≥ 90	≤ 500	≥ 0.50	≥ 60		
II 较安全	10 ~ 25	2300 ~ 3000	150 ~ 300	200 ~ 400	80 ~ 90	500 ~ 1000	0.40 ~ 0.50	50 ~ 60		
III 临界安全	25 ~ 40	1700 ~ 2300	75 ~ 150	400 ~ 600	70 ~ 80	1000 ~ 1500	0.25 ~ 0.40	40 ~ 50		
IV 较不安全	40 ~ 60	1000 ~ 1700	30 ~ 75	600 ~ 1000	50 ~ 70	1500 ~ 2000	0.15 ~ 0.25	30 ~ 40		
V 很不安全	≥ 60	≤ 1000	≤ 30	≥ 1000	≤ 50	≥ 2000	≤ 0.15	≤ 30		
水安全评价等级	水环境安全(B_2)									
	$C_{21}/\%$	$C_{22}/\%$	$C_{23}/\%$	$C_{24}/$ ($\text{t} \cdot \text{万元}^{-1}$)	$C_{25}/\%$	$C_{26}/$ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$C_{27}/$ ($\text{万 t} \cdot \text{km}^{-2}$)	$C_{28}/\%$	$C_{29}/\%$	$C_{210}/\%$
I 很安全	≥ 30	≥ 80	≥ 97.5	≤ 10	≥ 80	≤ 0.1	≤ 1	≥ 5.5	≥ 20	≥ 1.5
II 较安全	20 ~ 30	70 ~ 80	92.5 ~ 97.5	10 ~ 25	60 ~ 80	0.1 ~ 0.25	1 ~ 2	4 ~ 5.5	15 ~ 20	1.0 ~ 1.5
III 临界安全	15 ~ 20	60 ~ 70	85 ~ 92.5	25 ~ 40	40 ~ 60	0.25 ~ 0.4	2 ~ 3	2.5 ~ 4	10 ~ 15	0.6 ~ 1.0
IV 较不安全	10 ~ 15	50 ~ 60	80 ~ 85	40 ~ 55	20 ~ 40	0.4 ~ 0.5	3 ~ 4	1 ~ 2.5	5 ~ 10	0.3 ~ 0.6
V 很不安全	≤ 10	≤ 50	≤ 80	≥ 55	≤ 20	≥ 0.5	≥ 4	≤ 1	≤ 5	≤ 0.3
水安全评价等级	水灾害防治安全(B_3)									
	$C_{31}/\%$	$C_{32}/\%$	$C_{33}/\%$	$C_{34}/\%$	$C_{35}/\%$	$C_{36}/\%$	$C_{37}/$ ($\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	C_{38}	$C_{39}/\%$	
I 很安全	≤ 2	≤ 2	≤ 1	≤ 5	≤ 2	≤ 1	≥ 40	高	≥ 1.0	
II 较安全	2 ~ 4	2 ~ 5	1 ~ 2.5	5 ~ 10	2 ~ 5	1 ~ 2.5	30 ~ 40	较高	0.8 ~ 1.0	
III 临界安全	4 ~ 6	5 ~ 10	2.5 ~ 4	10 ~ 20	5 ~ 10	2.5 ~ 4	20 ~ 30	中等	0.5 ~ 0.8	
IV 较不安全	6 ~ 8	10 ~ 20	4 ~ 5.5	20 ~ 30	10 ~ 20	4 ~ 5.5	10 ~ 20	较低	0.2 ~ 0.5	
V 很不安全	≥ 8	≥ 20	≥ 5.5	≥ 30	≥ 20	≥ 5.5	≤ 10	低	≤ 0.2	
水安全评价等级	社会经济安全(B_4)									
	$C_{41}/\%$	$C_{42}/\%$	$C_{43}/$ ($\text{人} \cdot \text{km}^{-2}$)	$C_{44}/$ ($\text{万元} \cdot \text{km}^{-2}$)	$C_{45}/10^3$ 元	$C_{46}/\%$	$C_{47}/\%$	C_{48}		
I 很安全	≤ 30	≥ 50	≤ 100	≥ 600	≥ 12	≥ 95	≥ 6	高		
II 较安全	30 ~ 45	30 ~ 50	100 ~ 200	400 ~ 600	8 ~ 12	85 ~ 95	4 ~ 6	较高		
III 临界安全	45 ~ 60	20 ~ 30	200 ~ 350	300 ~ 400	5 ~ 8	70 ~ 85	3 ~ 4	中等		
IV 较不安全	60 ~ 85	10 ~ 20	350 ~ 500	100 ~ 300	2 ~ 5	60 ~ 70	1 ~ 3	较低		
V 很不安全	≥ 85	≤ 10	≥ 500	≤ 100	≤ 2	≤ 60	≤ 1	低		

表 2 巢湖流域水安全评价指标样本值的联系数及各评价指标权重

指标	联系数										权重
	合肥	肥东	肥西	居巢	庐江	含山	无为	和县	舒城	全流域	
C_{11}	-1	-1	-1	0.3721	0.0431	0.2973	0.0942	1	-0.3433	-0.3684	0.1671
C_{12}	-1	-1	-1	-0.4765	-1	-0.0078	-1	-0.8422	-0.7096	-0.3406	0.1470
C_{13}	0.0978	-1	-0.9605	-0.5294	-0.6533	-0.2613	-0.5819	-0.3570	-0.3913	-0.5687	0.1055
C_{14}	1	1	0.3456	1	-0.0867	0.6666	0.0747	1	1	0.9930	0.1269
C_{15}	0.4741	0.2993	0.6175	-0.7348	-0.1920	-1	-1	-1	-1	0.0927	0.1055
C_{16}	-1	-1	-1	0.3256	-0.1383	-1	-0.3421	0.7977	-1	-1	0.1181
C_{17}	0.7300	0.7300	0.7300	0.5833	0.7300	0.5833	0.5833	0.5833	1	0.6533	0.1219
C_{18}	0.1047	1	0.0653	0.3501	-0.3120	0.3921	-0.0313	0.3377	-0.3777	0.1600	0.1080
C_{21}	-0.6832	-0.4325	-0.7625	-0.3401	0.3660	0.7300	0.0800	0.4476	1	0.0627	0.0889
C_{22}	1	0.5995	0.5833	1	1	1	0.4271	1	-1	0.2600	0.1139
C_{23}	-1	-1	-1	0.1653	-1	-1	-1	-1	-1	-0.6161	0.1042
C_{24}	0.0551	-1	0.4439	0.2787	1	1	1	1	1	0.3711	0.0792
C_{25}	0.1540	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-0.4631	0.0889
C_{26}	-1	-0.9316	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.0917
C_{27}	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.0819
C_{28}	-0.8726	-0.7570	-0.9348	-0.7037	-0.4459	-0.2444	-0.5615	-0.3837	0.4459	-0.5615	0.0986
C_{29}	1	1	1	1	0.4612	0.1787	0.2827	-0.0600	-0.5212	0.6388	0.1292
C_{210}	-0.7570	-1	-1	-0.6533	-1	-1	-0.8426	-1	-1	-1	0.1236
C_{31}	1	0.0667	0.1100	-0.5800	-0.8441	0.5604	-1	-0.5934	-1	-0.8756	0.0965
C_{32}	1	-0.5023	-0.4306	-0.9742	-0.7978	-0.1440	-1	-0.9586	-1	-0.7413	0.1330
C_{33}	1	-1	-1	0.7792	0.3244	1	-0.3596	0.2133	-1	0.3727	0.0834
C_{34}	1	0.9221	1	1	1	1	1	1	1	1	0.1330
C_{35}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.0821
C_{36}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.1199
C_{37}	-0.5389	-0.5389	-0.5389	-1	-1	-1	-1	-1	1	0.0160	0.1291
C_{38}	0.3333	0	0	0.3333	0	0	0	0	0	0	0.0860
C_{39}	-1	-1	-0.3111	-1	-1	-0.8726	-1	-0.1111	-0.7848	-1	0.1369
C_{41}	-0.6285	-0.6248	-0.5381	-0.2462	-0.7543	-0.9980	-0.8123	-0.5200	-0.9601	-0.6400	0.1109
C_{42}	1	-0.7141	-0.8512	0.4293	-0.8922	-0.4903	-1	-0.6659	-0.5414	-0.0347	0.1307
C_{43}	1	-0.9337	-0.6321	-0.5293	1	-0.5481	1	-0.5517	-0.7880	1	0.1261
C_{44}	1	-0.8575	-1	-0.3700	-0.6908	-0.5508	-0.5833	-0.8133	-0.9033	-0.3508	0.1413
C_{45}	1	-0.7800	-0.9818	0.0931	-0.6177	-0.2980	-0.5833	-0.6147	-0.8382	-0.2367	0.1535
C_{46}	1	0.2729	1	1	1	1	1	0.7040	0.8903	1	0.1246
C_{47}	-1	-0.4400	-0.3974	-1	-0.7340	-1	-0.7750	-0.8177	-0.4451	-0.8711	0.1049
C_{48}	0.3333	0	0	0.3333	0	0	0	0	0	0	0.1079

全各子系统评价指标权重向量 W^{1-11} (表 2)。

3.4 综合评价分析

表 2 指标样本值的联系数 μ_{mk} 构成联系数矩阵 R , 由式 (9) 得巢湖流域水安全各子系统综合评价联系数, 再由投影函数式 (8) 得巢湖流域水安全各子系统评价等级。各子系统综合评价联系数构成子系统联系数矩阵 R , 同样方法得巢湖流域水安全综合评价联系数和评价等级 (表 3)。

表 3 同时给出文献 [10] 巢湖流域水安全综合评价结果。由表 3 分析得出: ①巢湖流域水安全状况不容乐观。从分区(县)看, 各区(县)及全流域的水安全状况从高到低依次为: 合肥(较安全), 居巢、含山、全流域、和县、庐江(临界安全), 无为、肥西、舒城和肥东(较不安全); 从行政分区上看, 仅合肥水安全

属于较安全, 是因为合肥社会经济发展水平较高, 注重水资源的开发与利用保护, 水安全状况较好; 其他区县水安全状况不容忽视; 从各子系统看, 水资源和水环境的安全状况较差, 表现为流域水资源短缺和水环境污染严重, 应采取相应措施改善流域水安全状况, 为流域社会经济可持续发展提供强有力的保障。②巢湖流域水安全评价的集对分析模型评价结果与文献 [10] 评价结果基本一致。该模型在宏观层面上, 利用同异反思想描述水安全标准等级的安全状况, 同时, 在微观层面上, 考虑了差异度系数取值的不确定性, 利用三角模糊数构造差异度系数 i , 描述水安全等级之间变化的不确定性; 所得评价结果为精确值, 较粗略等级更加准确合理, 符合巢湖流域水安全实际状况。

表 3 综合评价结果及对比分析

水安全子系统	合肥		肥东		肥西		居巢		庐江	
	μ_{mk}	等级								
水资源安全	-0.1447	3.575	-0.1822	3.705	-0.3285	4.149	0.1620	2.364	-0.2010	3.767
水环境安全	-0.2570	3.944	-0.3150	4.112	-0.2557	3.940	0.0033	2.985	-0.0852	3.353
水灾害防治安全	0.4701	1.503	-0.0256	3.111	0.0928	2.617	-0.0229	3.099	-0.0915	3.378
社会经济安全	0.5376	1.361	-0.5334	4.630	-0.4597	4.474	-0.0203	3.088	-0.2190	3.826
综合评价	0.1515	2.278	-0.2641	4.143	-0.2378	4.052	0.0305	2.838	-0.1492	3.712
文献 [10] 综合评价等级	II		IV		IV		III		IV	

水安全子系统	含山		无为		和县		舒城		全流域	
	μ_{mk}	等级								
水资源安全	-0.0046	3.020	-0.2613	3.957	0.2941	1.947	-0.1844	3.712	-0.1508	3.596
水环境安全	-0.0695	3.291	-0.1909	3.734	-0.1392	3.555	-0.2957	4.058	-0.1470	3.583
水灾害防治安全	0.2048	2.220	-0.1905	3.733	0.0237	2.897	0.0438	2.813	0.0482	2.795
社会经济安全	-0.3477	4.201	-0.2233	3.839	-0.4216	4.386	-0.4687	4.494	-0.0021	3.009
综合评价	-0.0543	3.282	-0.2165	3.975	-0.0608	3.314	-0.2263	4.011	-0.0629	3.324
文献 [10] 综合评价等级	III		IV		III		IV		III	

4 结论

流域水安全评价的集对分析模型利用三角模糊数构造差异度系数 i , 能有效描述差异度系数的不确定性。实例分析结果表明: 流域水安全评价的集对分析模型思路清晰、运算简便、评价结果准确, 该模型将模糊数学知识和集对分析方法有机结合, 为集对分析方法描述不确定性提供了一种更为有效的手段, 也为流域水资源系统分析提供了一种可行的方法。

参考文献:

[1] 王远坤, 夏自强, 曹升乐. 水安全综合评价方法研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(6): 619-621.

[2] 王彦威, 邓海利, 王永成. 层次分析法在水安全评价中的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2007, 35(3): 117-119.

[3] 张龙云, 曹升乐, 杨尚阳. 属性识别理论在水安全评价中的应用研究[J]. 山东大学学报: 工学版, 2006, 36(5): 70-72.

[4] 黄乾, 彭世彰, 田守岗, 等. 模糊物元模型在区域水安全评价中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 36(5): 379-383.

[5] 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.

[6] 傅国耀. [-1, 1]上的模糊集及其在集对分析中的应用[J]. 科技通报, 1999, 15(2): 91-93.

[7] 吴开亚, 金菊良, 潘争伟. 基于三角模糊数截集的城市洪涝易损性联系数评价模型[J]. 水利学报, 2010, 41(6): 711-719.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 金菊良, 吴开亚, 魏一鸣. 基于联系数的流域水安全评价模型[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 401-409.

[11] 吴开亚, 金菊良, 周玉良, 等. 流域水资源安全评价的集对分析: 可变模糊集耦合模型[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(3): 6-12.

[12] 陈丽燕, 付强, 魏丽丽. 五元联系数在湖泊水质综合评价中的应用[J]. 环境科学研究, 2008, 21(3): 82-86.

[13] 余国祥. 对联系数中的不确定数 i 的研究[J]. 辽宁师范大学学报: 自然科学版, 2002, 25(4): 349-352.

[14] 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.

[15] 程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1225-1228.

[16] 陈绍金. 水安全系统评价、预警与调控研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.

(收稿日期: 2011-05-30 编辑: 徐娟)

