

集对分析法在水安全评价中的应用研究

卢 敏^{1,2}, 张展羽¹, 石月珍¹

(1. 河海大学现代农业工程系, 江苏 南京 210098; 2. 云南农业大学水电与建筑学院, 云南 昆明 650201)

摘要 利用集对分析理论(SPA)描述水安全系统中存在的不确定性问题,提出了基于集对分析的水安全评价法.该方法用联系度去描述有关不确定性问题,充分利用研究问题中所包含的信息,不仅能反映评价区域的水安全趋势,还避免了以往评价需要计算权重的问题.应用结果表明,该分析方法简单实用,可用于区域水安全的分析评价.

关键词 集对分析 水安全 联系度

中图分类号 X924.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2006)05-0505-04

随着经济的发展和城镇化进程的加快,水安全问题已被公认是疾病蔓延、食物短缺、用水纷争、畜牧业和农业停滞的主要原因.但国内外对水安全的研究才刚刚起步,定性研究居多,在系统性和量化方面显得不足^[1],因此需要尽快从水安全评价、水安全度量和水安全保障体系等方面入手,建立一套完整的水安全理论体系.要研究水安全首先必须对水安全进行评价.由于水资源和水环境系统存在大量的不确定因素,以往相关的评价研究常采用模糊理论来处理这类不确定性问题.如韩宇平等^[2]建立了一个区域的多层次水安全评价指标体系,采用模糊评价方法评价水安全问题.但模糊理论中隶属度的确定常常带有主观随意性,因此往往丢弃了模糊不确定性在一定范围不确定的信息^[3].20 世纪 80 年代末,赵克勤提出了一种新的不确定性理论——集对理论(Set Pair Analysis, SPA),其核心思想是将被研究客观事物的确定性与不确定性视作一个确定不确定系统,认为确定性与不确定性在其中互相转化、影响和制约,并用联系度 μ 来统一描述各种不确定性,从而把对不确定性的辩证认识转换成具体的数学工具.

目前集对分析法在管理决策、地下水水质评价、湖泊富营养化、水资源开发利用评价等方面都有初步的应用^[4-8],但主要还是集中在水环境质量评价方面.本文将集对分析法应用于区域水安全的综合评价,以进一步证实该方法在水安全评价中的科学性和适用性.

1 集对分析方法^[3]

1.1 基本原理

首先对某个研究的问题构建集对,在研究问题的背景下,对集对中两集合的特性进行同一(同)、差异(异)、对立(反)的系统分析,然后用联系度 μ 表达式定量刻画,再推广到由 $m > 2$ 个集合组成的系统,进行系统相关问题的分析研究^[5].这里集对是指具有一定联系的 2 个集合组成的对子.

1.2 联系度

1.2.1 概念

对于给定的 2 个集合组成的集对 $H=(A, B)$,在某个具体问题背景(设为 W)下,对集对 H 的特性展开分析,共得到 N 个特性,其中有 S 个为集对 H 中 2 个集合 A 和 B 共同具有,集合 A 和 B 中有 P 个特性相对立,其余的 $F=N-S-P$ 个特性既不相互对立,又不为这 2 个集合共同具有,则有

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j \quad (1)$$

式中 $\frac{S}{N}, \frac{F}{N}, \frac{P}{N}$ ——同一度、差异度和对立度,反映了这 2 个集合同、异及反的测度; μ ——联系度,用于刻画某一数字时称为联系数.令 $a = \frac{S}{N}, b = \frac{F}{N}, c = \frac{P}{N}$,则式(1)可简写为

$$\mu = a + bi + cj \quad (a + b + c = 1) \quad (2)$$

式中: i ——差异度系数, $i \in [-1, 1]$, 且取值不确定; j ——对立度系数, $j = -1$. 由式(1)(2)可知, 联系度表达式同时体现出同、异、反三者的联系、影响与转化. 当 i 为 1 时, 不确定度转化为同一度; i 为 -1 时, 则不确定度转化成对立度; 当 i 在 $(-1, 1)$ 区间取值时, 则反映了确定性与不确定性分别所占的比例. 联系度 μ 与差异度系数 i 组成了集对理论的核心, 包含了随机、模糊、灰色等常见的不确定性.

1.2.2 联系度的功能性

a. 联系度具有层次性. 集对的核心之一——差异度系数 i 是在 μ 中的 a, b, c 确立之后才确定的, 目的在于使 bi 项能同时体现不确定性联系可以在一定条件下确定这一面和在一条件下不能确定这一面. 其数学表达为

$$\mu = \frac{S}{N} + \left(\frac{S_1}{F} + \frac{F_1 i}{F} + \frac{P_1 j}{F} \right) i + \frac{P}{N}$$

$$\mu = \frac{S}{N} + \left(\frac{S_1}{F} + \dots + \left(\frac{S_n}{F_{n-1}} + \frac{F_n i}{F_{n-1}} + \frac{P_n j}{F_{n-1}} \right) i + \dots + \frac{P_n j}{F_{n-1}} \right) i + \frac{P}{N}$$

b. 联系度具有可展性, 其一般形式为

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F_1 i_1}{N} + \frac{F_2 i_2}{N} + \dots + \frac{F_m i_m}{N} + \frac{P_1 j_1}{N} + \frac{P_2 j_2}{N} + \dots + \frac{P_n j_n}{N}$$

简写为

$$\mu = a + b_1 i_1 + b_2 i_2 + \dots + b_m i_m + c_1 j_1 + c_2 j_2 + \dots + c_n j_n$$

将联系度这 2 个功能联合应用, 以进一步分析和研究问题.

2 水安全评价的集对分析方法

社会经济、水资源和水环境复合系统的安全是水安全评价的核心, 该系统存在大量的确定性和不确定性因素. 水安全评价实质上是将确定性的评价指标和评价标准与不确定性的评价因子及其变化相结合进行分析的过程, 其应用的核心是确定差异度系数和联系度^[6].

将集对分析方法用于水安全评价, 就是将建立的水安全评价指标和既定的水安全评价标准一起构成一个集对. 若某评价指标处于同一评价级别中, 则认为是同一; 若处于相隔的评价级别中, 则认为是对立; 若在相邻的评价级别中, 则认为是差异. 取差异度系数 i 在 $[-1, 1]$ 之间变化. 越接近要评价的级别, i 越接近 1; 越接近相隔的评价级别, i 越接近 -1. 对于一定区域的水安全评价体系, 设有 N 个评价指标, 根据标准, 其中有 S 个指标属于某一级别, P 个指标完全属于相邻级别, 另有 $N - P - S$ 个指标处于前两者所属的级别之间或缺乏比较, 则可根据此建立该评价问题的联系度表达式(1)或(2). 分析 a, b, c 三者之间的定量关系, 就可以判断评价区域的水安全状况. 显然, a 值越大, b 和 c 值越小, 水安全状况就越好. 此外, 还可以依据 a, b, c 的具体数值, 即以评价指标相对于水安全评价标准的大小及其所占比例, 确定水安全等级. 由于水安全评价指标数值的差异, 即使处于同一级别, 区域水安全程度也会有所不同, 可以根据需要对分级标准继续进行同一、差异、对立的集对分析.

水安全评价体系中各项评价指标因为单位不一致, 数值量级差异较大. 为了消除各个评价指标由于量纲和单位不同造成的影响, 需要根据评价指标的特征分别采用式(3)(4)进行联系度计算.

a. 成本型评价指标:

$$\mu = \begin{cases} 1 + 0i + 0j & x \in (-\infty, x_1) \\ \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} i + 0j & x \in [x_1, x_2] \\ 0 + 0i + j & x \in (x_2, +\infty) \end{cases} \quad (3)$$

b. 效益型评价指标:

$$\mu = \begin{cases} 0 + 0i + j & x \in (-\infty, x_1) \\ \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} + \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} i + 0j & x \in [x_1, x_2] \\ 1 + 0i + 0j & x \in (x_2, +\infty) \end{cases} \quad (4)$$

式中: x_1, x_2 ——水安全评价标准的最差、及格或最优的门限值; x ——各个待评价区域水安全评价指标值. 由

式(2)计算结果,根据同一度、差异不确定度和对立度的大小,对各个待评价区域(地区、城市)的水安全程度进行评价排序.分别取式(3)(4)计算结果的平均值,得到各个评价区域的平均联系度 $\bar{\mu}$,由 $\bar{\mu}$ 中同一度、差异不确定度和对立度的大小确定待评价区域水安全程度所属的等级^[6].

3 实例应用

根据文献[1]中给出的北京、天津、上海及全国的水安全评价指标值和特征值来探讨集对分析法在水安全评价中的应用.为了验证集对分析法的可行性和评价结果的合理性,将本文的评价结果与文献[1]中的函数曲线评价模型结果进行对照.

表 1 北京、天津、上海及全国的水安全评价指标值和评价特征值

Table 1 Water safety evaluation indices and characteristic values for Beijing , Tianjin , Shanghai , and the whole of China										
指 标		水资源		生态环境			社会经济			
		人均水资源 量/m ³	水资源利用 率/%	防洪 标准/a	城市人均绿地 面积/m ²	污径 比/%	污水处理 率/%	人均 GDP/元	城市化 水平/%	平均受教育 年限/a
指标 特征值	最差值	10		1	0.01	1	20.0	800	1	0
	及格值	1 700	40		9	0.04		24 000		
	最优值		10	1 000			100		100	16
实际 指标值	北京	272.8	168.5	50	14.91	0.6	42	17 336	77.54	10.3
	全国	2 171.0	19.9		6.8	0.02	36.4	6 840	36.2	7.8
	天津	138.9	121.4	50	7.542	2.09	61.2	15 824	71.99	9.2
	上海	183.63	10.85	500	6.503	0.645 1	62	17 328	88.31	9.5

首先根据式(2)计算得到 4 个城市水安全程度的联系度值(表 2),然后根据表 1 中水资源、生态环境、社会经济的不同指标由式(3)(4)计算不同评价区域水安全评价指标的联系度和联系度均值(表 3、表 4).

4 评价结果分析及对照

从表 2 的联系度值可以看出,全国的水安全状况要优于 3 个直辖市.与全国的水安全状况相比,北京要优于上海和天津,而北京、天津的水资源利用量已达极限,上海的水资源拥有量明显优于天津和北京.

表 3 区域各项水安全指标的联系度值

Table 3 Connection degree of water safety indices for each region												
区域指标	北京			天津			上海			全国		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
水资源	0.160	0.840	0.000	0.080	0.920	0.000	0.100	0.900	0.000	1.000	0.000	0.000
	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	1.000	0.970	0.030	0.000	0.670	0.330	0.000
	0.050	0.950	0.000	0.050	0.950	0.000	0.500	0.500	0.000			
生态环境	1.000	0.000	0.000	0.840	0.160	0.000	0.720	0.280	0.000	0.760	0.240	0.000
	0.420	0.580	0.000	0.000	0.000	1.000	0.370	0.630	0.000	1.000	0.000	0.000
	0.275	0.725	0.000	0.520	0.480	0.000	0.000	0.220	0.000	0.210	0.790	0.000
社会经济	0.710	0.290	0.000	0.650	0.350	0.000	0.000	0.290	0.000	0.260	0.740	0.000
	0.770	0.230	0.000	0.720	0.280	0.000	0.880	0.120	0.000	0.360	0.640	0.000
	0.000	0.640	0.360	0.000	0.580	0.420	0.000	0.590	0.410	0.000	0.490	0.510

表 4 区域各项水安全指标的联系度平均值

Table 4 Average Connection degree of water safety indices for each region												
联系度平均值	北京			天津			上海			全国		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
水资源 $\bar{\mu}_1$	0.070	0.600	0.330	0.040	0.620	0.330	0.520	0.480	0.000			
生态环境 $\bar{\mu}_2$	0.570	0.440	0.000	0.450	0.210	0.330	0.360	0.380	0.000	0.660	0.340	0.000
社会经济 $\bar{\mu}_3$	0.710	0.290	0.000	0.650	0.350	0.000	0.490	0.270	0.000	0.370	0.630	0.000
综合联系度 $\bar{\mu}$	0.447	0.442	0.111	0.382	0.396	0.222	0.624	0.376	0.000	0.594	0.406	0.000

表 2 各区域联系度值

Table 2 Connection degree of each region			
区域	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
北京	0.111	0.667	0.222
天津	0	0.778	0.222
上海	0	1	0
全国	0.25	0.75	0

由表3联系度 a, b 值的比较可知,上海水资源安全程度最高,但人均水资源拥有量低于北京,最少的是天津;在生态环境方面,水安全程度从高到低的排列顺序为全国、北京、天津、上海;在社会经济方面,从优到劣的排列顺序为北京、上海、天津、全国。从综合联系度值 $\bar{\mu}$ 来比较:上海水资源较为丰富,但生态环境建设方面不如北京和天津,如不注重生态保护,上海将面临水质型缺水的威胁;北京由于水资源量少,所以投入了足够的资金加大生态环境保护,而天津虽然也极为注重生态环境保护,但因为本身水资源缺乏加上污染严重,所以水安全程度最差。这些均与文献[1]中采用函数曲线评价模型得到的结果一致。由表2~4结果可知,上海的水安全状况不如北京,表明尽管天然水资源量是水安全程度的决定因素,但从长远来看,只有注重生态环境的保护,才能保证水资源的安全和可持续利用。这也从另一个侧面说明生态环境保护是水安全评价中极为重要的因素。

5 结 语

集对分析法以联系度为核心,是一种新的不同于传统概率论和模糊集的不确定性理论。与模糊评判法相比,该方法采用联系度去描述有关不确定性问题,充分利用研究问题中所包含的信息,将对研究问题的辩证认识与系统性定量描述有机结合起来,便于进一步分析。

参考文献:

- [1] 阮本清,魏传江.首都圈水资源安全保障体系建设[M].北京:科学出版社,2004:50-52.
- [2] 韩宇平,阮本清,解建仓.多层次多目标模糊优选模型在水安全评价中的应用[J].资源科学,2003,25(4):37-43.
- [3] 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,2000:1-2.
- [4] 赵克勤,宣爱理.集对论——一种新的不确定性理论方法与应用[J].系统工程,1996,14(1):18-25.
- [5] 赵克勤.集对分析对不确定性的描述和处理[J].信息与控制,1995,24(3):162-167.
- [6] 刘慧,龚士良.集对分析及在地下水环境质量评价中的应用[J].工程勘察,2000(5):16-18.
- [7] 门宝辉,梁川.评价区域水资源开发利用程度的集对分析法[J].南水北调与水利科技,2003,1(6):30-33.
- [8] 王栋,朱元生,赵克勤.基于集对分析和模糊集合论的水体营养化评价模型的应用研究[J].水文,2004,24(3):9-11.

Application of set pair analysis to evaluation of water safety

LU Min^{1,2}, ZHANG Zhan-yu¹, SHI Yue-zhen¹

(1. Department of Modern Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. School of Water Resources, Hydraulics, and Architecture, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: The set pair analysis is used to solve the uncertainty problem in water safety system, and a water safety evaluation method is proposed. The method can not only reflect the trend of regional water safety, but also avoid calculating the weights. The application of the method to practical cases and the comparison of the calculated results with those obtained from the function curve evaluation model show that the set pair analysis is simple and applicable, and can be used for evaluation of regional water safety.

Key words: set pair analysis; water safety; connection degree