

模糊物元模型在区域水安全评价中的应用

黄 乾^{1,2} 彭世彰¹ 田守岗² 李玉国² 徐俊增¹

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 江苏 南京 210098; 2. 山东省水利科学研究院 山东 济南 250013)

摘要 结合熵值理论与模糊物元理论,建立了基于熵权的水安全模糊物元模型.根据水安全评价的特点和评价区域的实际情况,构建了区域水安全的评价指标体系,并利用水安全模糊物元模型对水安全体系中生命安全、经济安全、生态环境安全、社会安全和管理安全的 23 个指标进行了评价.引用信息熵所反映的数据本身的效用值来计算指标的权重系数,有效地避免了指标权重分配困难的问题.对山东省 2005 年的水安全状况进行了评价,并与基于 AHP 的模糊综合评价结果进行了比较分析.结果表明,模糊物元模型能计算各评价样本与评价标准之间的远近程度关系,并且可以同时评价多个样本,引进熵权后减少了评价的主观性,评价结果客观合理,具有较好的实用性.

关键词 熵权 模糊物元 水安全 评价

中图分类号 X824

文献标识码 A

文章编号 1000-198X(2007)04-0379-05

对水资源紧张的国家和地区来说,水安全已经成为其生存和发展的战略问题.1972 年联合国第 1 次环境与发展大会就预言,石油危机后的下一个危机便是水危机.2000 年的世界水论坛及部长级会议指出,水资源不仅是一个生态环境问题,也是一个经济问题、社会问题和政治问题,它直接关系到国家的安全和稳定.由于我国人均水资源占有量匮乏、水体污染严重、饮用水质不达标、用水浪费现象严重,我国的区域水安全问题变得非常严峻.因此,对区域水安全进行客观评价具有重要意义.通过水安全评价模型,可以定量分析区域水安全面临的危险程度,预测未来水安全的变化趋势,进而建立区域水安全的预警系统,进行水安全调控.

目前,国内外已提出了一些水安全评价方法,如不确定性方法、系统动力学方法、风险分析方法、层次分析法和优化方法等.在我国,韩宇平等^[1]建立了多目标模糊优选模型并用该模型对我国部分省级行政区的水安全状况进行了评价.樊彦芳等^[2]利用层次分析法进行了水环境安全综合评价.陈绍金^[3]利用距离指数-层次分析综合法对湘江流域的水安全状况进行了评价.邱德华^[4]建立了区域水安全战略的系统动力学模型和区域水安全的等级评价模型. GPPGE, 卢敏等^[5]利用集对分析(SPA)模型对小城镇的水安全进行了评价.

由于利用模糊物元分析方法^[6]处理模糊不相容信息效果较好,本文构建了水安全模糊物元模型,并利用该模型对山东省 2005 年的水安全状况进行了评价.

1 模糊物元模型

1.1 模糊物元概念

物元分析中所描述的事物 M 及其特征 C 和量值 x 组成物元 $R=(M, C, x)$ 或 $R=(M, C, C(M))$, 事物的名称、特征和量值称为物元三要素.如果物元模型中的量值 x 具有模糊性,则称 R 为模糊物元^[7].事物 M 有 m 个特征 $C_1, \dots, C_m$ 及相应的量值 $x_1, \dots, x_m$, 则称 R 为 m 维模糊物元. n 个事物的 m 维物元组合在一起便构成 n 个事物的 m 维复合模糊物元 R_{mn} , 即

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} M_1 & \dots & M_n \\ C_1 & x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_m & x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: R_{mn} —— n 个事物的 m 个模糊特征的复合物元; M_j ——第 j 个事物($j = 1, 2, \dots, n$); C_i ——第 i 个特征($i = 1, 2, \dots, m$); x_{ij} ——第 j 个事物第 i 个特征对应的模糊量值。

1.2 从优隶属度

各单项指标相应的模糊值从属于标准方案各对应评价指标相应的模糊量值隶属程度,称为从优隶属度。各评价指标特征值对于方案评价来说,有的是越大越优,有的是越小越优,因此,对不同的从优隶属度分别采用不同的计算公式。本文采用式(2)(3)^[8]计算从优隶属度:

越大越优型
$$\mu_{ij} = x_{ij} / \max x_i \tag{2}$$

越小越优型
$$\mu_{ij} = \min x_i / x_{ij} \tag{3}$$

式中: μ_{ij} ——从优隶属度; $\max x_i, \min x_i$ ——第 i ($i = 1, \dots, m$) 个评价指标中的最大值和最小值。由此可以构建从优隶属度矩阵 $\tilde{R}_{mn}$:

$$\tilde{R}_{mn} = (\mu_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \cdots & \mu_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ \mu_{m1} & \cdots & \mu_{mn} \end{bmatrix} \tag{4}$$

1.3 标准模糊物元与差平方矩阵

标准模糊物元 R_{0n} 是指从优隶属度模糊物元 $\tilde{R}_{mn}$ 中各评价指标的从优隶属度的最大值或最小值。本文以最大值表示最优,即各指标从优隶属度均为 1。若以 Δ_{ij} ($i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$) 表示标准模糊物元 R_{0n} 与从优隶属度矩阵 $\tilde{R}_{mn}$ 中元素差的平方,则组成差平方矩阵 R_Δ :

$$\Delta_{ij} = (\mu_{0j} - \mu_{ij})^2 \tag{5}$$

$$R_\Delta = \begin{bmatrix} \Delta_{11} & \cdots & \Delta_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ \Delta_{m1} & \cdots & \Delta_{mn} \end{bmatrix} \tag{6}$$

1.4 熵权的确定

信息系统中的信息熵是信息无序度的度量,熵值越小,系统无序程度越小,故可用信息熵评价所获系统信息的有序度及其效用。由评价指标值构成的判断矩阵来确定指标权重,可尽量消除各指标权重计算的人为干扰,使评价结果更符合实际。熵权的计算步骤如下^[9-10]:

a. 构建 n 个事物 m 个评价指标的判断矩阵 R :

$$R = (x_{ij})_{mn} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$$

b. 将判断矩阵进行归一化处理,利用下式得到归一化判断矩阵 B :

$$b_{ij} = (x_{ij} - \min x_i) / (\max x_i - \min x_i) \tag{7}$$

c. 根据熵的定义, n 个评价事物 m 个评价指标,评价指标的熵为

$$H_i = - \frac{1}{\ln n} \left[\sum_{j=1}^n (f_{ij} \ln f_{ij}) \right] \tag{8}$$

$$f_{ij} = b_{ij} / \sum_{j=1}^n b_{ij} \tag{9}$$

d. 计算评价指标熵权 $W = (w_i)_{1 \times m}$,其中

$$w_i = (1 - H_i) / \left(m - \sum_{i=1}^m H_i \right) \tag{10}$$

可见,利用熵值法计算各指标的权重,其本质是利用各指标所含信息有序度的差异性。指标内样本值的差异性越大,指标权重就越大。

1.5 贴近度的计算

贴近度是指被评价样本与标准样本两者之间互相接近的程度,贴近度越大,表示两者越接近,反之则相离越远。因此,可以根据贴近度的大小对各方案进行优劣排序,也可以根据标准值的贴近度进行类别划分。可以用模糊算子来计算和构建贴近度模糊物元矩阵 $R_{\rho H}$:

$$R_{\rho H} = \begin{bmatrix} M_1 & \cdots & M_n \\ \rho H_j & \rho H_1 & \cdots & \rho H_n \end{bmatrix} \tag{11}$$

式中 ρ_{H_j} 为贴近度模糊物元矩阵 $R_{\rho H}$ 中的第 j 个贴近度：

$$\rho_{H_j} = 1 - \sqrt{\sum_{i=1}^m w_i \Delta_{ij}} \quad (j = 1 \dots n)$$

(12)

得到贴近度模糊物元矩阵 $R_{\rho H}$ 后,评价样本属于哪个评价标准,可以用 ρ_{H_j} 之间的欧氏距离来判断.

2 应用实例

山东省地处黄河下游,面积约 15.67 万 km²,占全国总面积的 1.6%,总体经济实力和社会发展水平居全国前列.该省人口众多,水资源总量缺乏且时空分布不均,年际变化剧烈,水质恶化严重,水安全状况不容乐观.本文选取 2005 年作为山东省水安全现状评价年.

2.1 评价指标体系的构建

水安全评价指标体系的建立是区域水安全评价的前提和基础.只有建立科学的评价指标体系,才能对水安全状况做出客观正确的评价.为此,本文根据山东省水安全的实际情况并依据以下几个原则,选取水安全体系中生命安全、经济安全、生态环境安全、社会安全、管理安全 5 个系统层的 23 个指标作为综合评价指标.(a)全面性与代表性相结合(b)定性分析与定量分析相结合,定量为主,定性指标尽转化为定量指标(c)科学性与可操作性相结合(d)动态性与静态性相结合^[11].

指标选取后,首先初步海选出 57 个基本指标,在此基础上利用主观预判、理论分析和频度统计方法进行筛选,删除那些对评价指标序位不敏感或不产生影响的指标,然后进行指标的相关性分析,删除具有明显相关性的次要指标,即根据多年实际数据计算指标的相关系数,确定每个相关系数的临界值,删除相关系数较大的 2 个指标中的 1 个,如果相关系数小于临界值,则 2 个指标全部保留.通过“海选”→“筛选”→“相关分析”几个步骤,尽可能地避免了评价指标的重复和遗漏.需要说明的是,不同评价者对水安全的理解是不一样的,其指标体系的选择也存在较大差异.本文在保证评价指标体系科学性的基础上更注重其完备性,即将系统分为 3 个层次,区域的总体水安全为第 1 层次,系统层为第 2 层次,指标层为第 3 层次,并以“非常安全”、“安全”、“基本安全”、“不安全”、“极不安全”作为体系的评价标准,标准阈值的确定参考了国内外不同类型地区水安全、水资源可持续发展等相应指标标准以及山东省各规划年的水资源发展利用规划等.具体构建的水安全评价指标体系结构、评判对象、评判标准及现状年指标值如表 1 所示.

表 1 山东省水安全评价体系

Table 1 Water security evaluation system for Shandong Province														
评价指标体系	生命安全			经济安全				生态环境安全						
	人均水资源量/ ($\text{m}^3\cdot\text{人}^{-1}$)	饮用水水质/%	人均生活用水量/ ($\text{L}\cdot\text{人}^{-1}$)	人均 GDP/ ($\text{元}\cdot\text{人}^{-1}$)	工业用水重复利用率/%	人均粮食/ ($\text{kg}\cdot\text{人}^{-1}$)	人均有效灌溉面积/ ($\text{hm}\cdot\text{人}^{-1}$)	工业万元产值取水量/ ($\text{m}^3\cdot\text{万元}^{-1}$)	污径比/%	地表水水质/%	地下水水质/%	客水水质/%	土壤盐渍化率/%	
评价标准 阈值	2005 年指标值	344	90.0	71	11 618	65	377.0	0.05	16.0	0.44	70.0	100.0	95.0	1.0
	非常安全	1 100	99.5	220	15 000	90	530.0	0.07	5.0	1.00	98.0	98.0	95.0	0.5
	安全	875	97.5	180	13 458	80	471.5	0.06	16.5	4.35	82.5	92.5	82.5	2.5
	基本安全	625	94.5	140	10 670	70	399.5	0.05	30.0	6.60	67.5	87.5	67.5	5.5
	不安全	375	91.5	100	7 882	60	360.0	0.04	43.5	8.85	52.5	82.5	52.5	8.5
	极不安全	225	88.5	60	5 000	50	333.0	0.03	63.5	12.25	38.0	75.0	30.0	13.0
评价指标体系	社会安全					管理安全								
	水灾害损失占 GDP 的比例/%	干旱受灾面积率/%	洪涝受灾面积率/%	水利投资占 GDP 的比例/%	城市防洪标准/%	河道防洪标准/%	灌溉水利用系数	城市管网供水利用率/%	管理人员学历结构系数	水利现代化投资比例/%				
评价标准 阈值	2005 年指标值	2.48	49.00	5.300	0.220	50	20	0.55	80.00	0.60	1.00			
	非常安全	0.50	3.00	1.000	1.500	97	97	0.80	97.00	0.95	6.00			
	安全	1.60	9.15	3.335	0.870	91	91	0.70	93.35	0.85	4.75			
	基本安全	2.80	17.45	5.505	0.605	83	83	0.65	90.05	0.75	3.25			
	不安全	4.30	25.80	8.170	0.335	75	75	0.60	86.70	0.65	1.75			
	极不安全	5.50	34.00	13.000	0.150	65	65	0.50	81.00	0.55	0.50			

注(a)饮用水水质表示饮用水中能达到国家制定的饮用水卫生标准的百分比(b)地表水水质表示地表水中Ⅳ类水及优于Ⅳ类水水量占地表水总量的百分比(c)地下水水质表示地下水中Ⅲ类水及优于Ⅲ类水水量所占地下水总量的百分比(d)客水水质表示客水中Ⅲ类水及优于Ⅲ类水水量所占客水的百分比.

2.2 评价

按照表 1 中评价年和评价标准提供的数据,利用 Matlab6.0 编程进行计算和评价.由式(4)可以构造出从优隶属度矩阵 $\tilde{R}_{mn}$,由式(5)可以构造出差平方矩阵 R_{Δ} ,由式(7)~(10)可以获得水安全评价的熵权 W :

$$W = \begin{bmatrix} 0.0490 & 0.0480 & 0.0500 & 0.0382 & 0.0387 & 0.0466 & 0.0367 & 0.0434 \\ 0.0483 & 0.0377 & 0.0406 & 0.0417 & 0.0515 & 0.0398 & 0.0428 & 0.0383 \\ 0.0495 & 0.0383 & 0.0340 & 0.0407 & 0.0490 & 0.0469 & 0.0502 & \end{bmatrix}^T$$

利用式(12)可以求出贴适度矩阵 $R_{\rho H}$.评价结果为

$$R_{\rho H} = \begin{bmatrix} 2005\text{年} & \text{非常安全} & \text{安全} & \text{基本安全} & \text{不安全} & \text{极不安全} \\ 0.5333 & 0.2957 & 0.3877 & 0.4942 & 0.6350 & 0.8496 \end{bmatrix}$$

2.3 结果分析

由贴适度从小到大的排序结果可知,山东省 2005 年水安全状况处于“基本安全”和“不安全”之间,而从欧氏距离来看,山东省 2005 年水安全状况应属于“基本安全”.AHP 模糊综合评价法校验结果表明:山东省 2005 年水安全状况,属于“非常安全”的可能性为 7.4%,属于“安全”的可能性为 7.0%,属于“基本安全”的可能性为 33.0%,属于“不安全”的可能性为 22.7%,属于“极不安全”的可能性为 29.9%,水安全状况属于“基本安全”的可能性最大.2 种模型的评价结果(表 2)一致,说明采用基于熵权的水安全模糊物元模型来评价水安全状况是可行的.AHP 模糊综合评价模型有 2 个不足之处:(a)只能说明该评价年水安全状况最接近“基本安全”评价标准,而对该评价年水安全状况离“安全”或“不安全”这 2 个标准有多远无法估算;(b)现状年的水安全状况属于“极不安全”的可能性(29.9%)比属于“不安全”的可能性(22.7%)大,这不太合理(原因在于权重确定的半主观性,部分指标值位于“极不安全”标准附近使结果积累放大).采用基于熵权的模糊物元模型,2005 年水安全状况与“基本安全”之间的欧氏距离为 0.0391,与“不安全”之间的欧氏距离为 0.1017,说明评价年水安全状况非常接近“基本安全”评价标准但还有一点距离,还需采取一定的措施来改善该区域的水安全状况,以使该区域的水安全状况进入到“安全”和“基本安全”评价标准的范围内.

表 2 评价结果的比较
Table 2 Comparison of evaluated results

方 法	2005 年 水安全评价	评价等级				
		非常安全	安全	基本安全	不安全	极不安全
熵权模糊物元模型	0.5333	0.2957	0.3877	0.4942	0.6350	0.8496
AHP 模糊综合评价模型		0.0740	0.0700	0.3300	0.2270	0.2990

3 结 论

- a. 水安全评价需要综合考虑不确定性和确定性多指标的属性,在评价方法的研究上应注重实效性和理论性.
- b. 利用模糊物元模型不仅可以得出各评价样本与评价标准之间客观的远近程度关系,还可以同时评价多个样本(例如多个规划年)并比较样本间的差异.利用熵值理论计算熵权,可以从数据本身所反映的信息无序化效用值得到权重系数,从而可有效地减小评价的主观性,使评价结果更加客观,而且易实现计算机编程,提高通用性.

参考文献:

[1] 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.
[2] 樊彦芳,刘凌,陈星.层次分析法在水环境安全综合评价中的应用[J].河海大学学报:自然科学版,2004,32(5):512-514.
[3] 陈绍金.水安全系统评价、预警与调控研究[D].南京:河海大学,2005.
[4] 邱德华.区域水安全战略的仿真评价研究[D].南京:河海大学,2006.

[5] 卢敏,张展羽,石月珍.集对分析法在水安全评价中的应用研究[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(5):505-509.
[6] 张斌,雍歧东,肖芳淳.模糊物元分析[M].北京:石油工业出版社,1997:7-8.
[7] 蔡文.物元模型及应用[M].北京:科学技术文献出版社,1994:10-11.
[8] 张先起,梁川.基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用[J].水利学报,2005,36(9):1057-1061.
[9] 邱菀华.管理决策与应用熵学[M].北京:机械工业出版社,2001:32-33.
[10] 闫文周,顾连胜.熵权决策法在工程评价中的应用[J].西安建筑科技大学学报,2004,36(1):98-100.
[11] 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,2006:153-154.

Application of fuzzy matter-element method to regional water security evaluation

HUANG Qian^{1, 2}, PENG Shi-zhang¹, TIAN Shou-gang², LI Yu-guo², XU Jun-zeng¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydropower Engineering ,
Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
2. Shandong Water Conservancy Research Institute , Jinan 250013 , China)

Abstract :A fuzzy matter-element model for water security was established based on the entropy value theory and fuzzy matter-element theory , and an evaluation index system for regional water security was built in the light of the characteristics of water security and the reality of evaluated regions . Then , 23 indexes related to life security , economy security , ecology and environment security , society security , and management security in water security system were evaluated by use of the fuzzy matter-element model . The application of avail value of data reflected by information entropy to calculation of the weight coefficients of indexes effectively overcame the difficulty in weight distribution . With the fuzzy matter-element model , the water security of Shandong Province in 2005 was evaluated , and the result was compared with that of fuzzy comprehensive evaluation based on AHP . The result shows that the fuzzy matter-element model realizes multi-sample evaluation simultaneously , and the differences between samples and the evaluation criteria could be calculated . The introduction of entropy weight makes the evaluated result more objective and the matter-element model more applicable .

Key words :entropy weight ; fuzzy matter-element ; water security ; evaluation