

## 模糊物元模型在区域水安全评价中的应用

李如忠

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009)

**摘要:** 基于水安全概念的模糊性和单项指标评价结果的不相容性, 在物元分析的基础上, 结合模糊集理论和欧氏贴近度概念, 建立了区域水安全评价的模糊物元模型, 并将该模型用于中国部分省级行政区域的水安全评价。依据待评样本与标准样本欧氏贴近度大小, 确定了各省区水安全形势从好到坏的排序依次为: 云南、广西、江苏、黑龙江、河南、陕西和山西。实例研究表明, 运用模糊物元模型评价区域水安全状况, 方法是可行的, 结论是可靠的。

**关键词:** 模糊物元模型; 区域水安全; 评价

**中图分类号:** X52

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2005)05-0221-03

## Fuzzy Matter-element Model and Its Application to Water Security Evaluation

LIRU-zhong

(School of Natural Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract** On the basis of matter-element analysis, a fuzzy matter-element model for evaluation of regional water security is established, combined with the fuzzy set theory and concept of Euclid approach degree. As a case, the model proposed above is used to assess some provincial water security in China. According to the Euclid approach degree of the evaluated samples to the standard fuzzy sample, the satisfying evaluation result is obtained. That is, the provinces in regarding to water security from good to poor in sequence are: Yunnan Province, Guangxi Zhuang Autonomy Region, Jiangsu Province, Heilongjiang Province, Henan Province, Shaanxi Province and Shanxi Province. Study result shows that the fuzzy matter-element method is practical for regional water security evaluation.

**Key words:** fuzzy matter-element model; regional water security; evaluation

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, 直接关系到国家的安全。对那些水资源紧张的国家或地区来说, 水资源已成为关系到生存和发展的战略问题, 同时也是影响国家安全和国际关系的一个重要方面<sup>[1]</sup>。2000 年 3 月在荷兰海牙召开的世界部长级会议和 2000 年 8 月在瑞典斯德哥尔摩召开的世界水讨论的主题都是“21 世纪水安全”问题。海牙会议上提出<sup>[2]</sup>: 为实现 21 世纪水安全, 我们面临着“满足基本需求; 保证食物供应; 保护生态系统; 共享水资源; 控制灾害等”一系列挑战。

作为一个发展中国家, 我国水资源安全问题也不容乐观。近年来, 随着人口的不断增加和工农业生产的迅速发展, 我国水资源供需矛盾日益尖锐, 而不断恶化的水质状况又进一步加剧了水资源危机<sup>[3]</sup>。目前, 国内学者已开始关注并着手研究这一课题<sup>[4~7]</sup>。但总的来说, 在水安全的范畴、水安全的度量、水安全的评价与水安全保障体系的建设等方面, 现有研究还远远不够, 还有许多问题值得进一步探讨<sup>[5]</sup>。区域水安全概念是一个模糊概念, 往往存在单个指标评价结果的不相容性问题。因此, 对于区域水安全的评价, 科学的处理方式应是从水安全概念的模糊性和评价结果的不相容性角度进行研究。本文在物元分析的基础上, 结合模糊集理论和欧氏

贴近度概念, 建立了区域水安全评价的模糊物元模型, 并用于我国部分省区水安全状况的比较, 取得了较好的效果, 为区域水安全问题研究提供了一种新方法。

### 1 区域水安全评价的模糊物元分析原理

#### 1.1 模糊物元的概念

给定事物的名称  $M$ , 它关于特征  $C$  有量值为  $v$ , 以有序三元组  $R = (M, C, v)$  作为描述事物的基本元, 称为物元。如果其中量值  $v$  具有模糊性, 则称物元  $R$  为模糊物元<sup>[8]</sup>, 记作

$$R = \begin{bmatrix} M \\ C \quad u(x) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $R$  —— 模糊物元;  $M$  —— 事物;  $C$  —— 事物  $M$  的特征;  $u(x)$  —— 与事物特征  $C$  相应的模糊量值, 也就是事物  $M$  对于其特征  $C$  相应量值  $x$  的隶属度。对于区域水安全评价问题来说, 这里的  $M$  就是待评价样本;  $C$  是评价指标;  $u(x)$  则是评价样本  $M$  对于评价指标  $C$  相应指标值  $x$  的隶属度。

#### 1.2 构造复合模糊物元

若待评样本  $M$  有  $n$  项评价指标  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , 与其相应的模糊量值分别为  $u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_n)$ , 则称  $R$  为  $n$  维模糊物元。若以  $R_{mn}$  表示  $m$  个评价样本  $n$  维复合模糊物元, 并以  $M_j$

收稿日期: 2004-10-14

基金项目: 合肥工业大学科学研究发展基金(030701F)资助项目

作者简介: 李如忠(1970-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水环境保护、水资源水环境系统不确定性问题研究等。

表示第  $j$  个评价样本,  $C_i$  表示第  $j$  个样本第  $i$  项评价指标, 相应的模糊量值为  $u(x_{ji})$  ( $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$ ), 则

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \dots & M_m \\ C_1 & u(x_{11}) & u(x_{21}) & \dots & u(x_{m1}) \\ C_2 & u(x_{12}) & u(x_{22}) & \dots & u(x_{m2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_n & u(x_{1n}) & u(x_{2n}) & \dots & u(x_{mn}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 1.3 计算从优隶属度

各单项评价指标相应的模糊量值, 从属于标准样本各对应评价指标相应的模糊量值隶属程度, 称之为从优隶属度。据此而建立的原则, 称为从优隶属原则。由于不同区域在自然、经济、社会和技术等方面存在着差异性, 使得某些指标属性值在不同样本之间可能存在较大变化, 而有些则相对变化较小。为了避免夸大变化范围小的指标在决策中的相对作用, 可采用下述优属度计算公式<sup>[9]</sup>

$$\text{越大越优型指标} \quad u(x_{ji}) = x_{ji} / \max x_{ji} \quad (3)$$

$$\text{越小越优型指标} \quad u(x_{ji}) = 1 - x_{ji} / \max x_{ji} \quad (4)$$

式中:  $x_{ji}$ ——第  $j$  个评价样本第  $i$  项评价指标对应的量值;  $\max x_{ji}$ ——各评价样本中每一项评价指标所有量值  $x_{ji}$  中的最大值。

### 1.4 建立标准模糊物元和差平方模糊物元<sup>[10]</sup>

由式(2)可以构造标准样本  $n$  维模糊物元  $R_{0n}$ , 其中各项由  $R_{mn}$  内各评价样本从优隶属度中的最大值或最小值加以确定, 则有

$$R_{0n} = \begin{bmatrix} M_0 \\ C_1 & u(x_{01}) \\ C_1 & u(x_{02}) \\ \vdots & \vdots \\ C_n & u(x_{0n}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

若以  $\Delta_{ji}$  ( $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ ) 表示标准模糊物元  $R_{0n}$  与复合模糊物元  $R_{mn}$  中对应各项差的平方, 则组成差平方复合模糊物元  $R_{\Delta}$ , 即

$$R_{\Delta} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \dots & M_m \\ C_1 & \Delta_{11} & \Delta_{21} & \dots & \Delta_{m1} \\ C_1 & \Delta_{21} & \Delta_{22} & \dots & \Delta_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_n & \Delta_{13} & \Delta_{23} & \dots & \Delta_{m3} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中,  $\Delta_{ji} = [u(x_{0i}) - u(x_{ji})]^2$ ,  $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ 。

### 1.5 确定评价指标权重

在区域水安全评价中, 指标权重的确定非常重要, 直接影响到评价的结果。目前, 确定权重的方法有很多, 大致可分为主观、客观和综合赋权等几类方法, 常用的有 AHP 法、Delphi 法、熵权法、主成分分析法等。假设  $w_i$  表示第  $i$  个评价指标权重, 则  $w_i$  满足

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1, w_i \geq 0 \quad (7)$$

### 1.6 水安全状况优劣排序

可用于两物元贴近度计算的公式有很多, 其中欧氏贴近度公式就是较为常用的一种。考虑到本文具有综合评价的意义, 因此采用  $M(\cdot, +)$  算法, 即先乘后加运算欧氏贴近度  $\rho_{Hj}$ , 则

$$\rho_{Hj} = 1 - \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i \Delta_{ji}} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

式中:  $\rho_{Hj}$ ——第  $j$  个评价样本与标准样本之间相互接近的

程度, 其值越大, 表示两者越接近; 反之, 则相差越大。然后, 以此构造欧氏贴近度复合模糊物元  $R_{\rho H}$ , 即

$$R_{\rho H} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \dots & M_m \\ \rho_{Hj} & \rho_{H1} & \rho_{H2} & \dots & \rho_{Hm} \end{bmatrix} \quad (9)$$

由于欧氏贴近度是表示各评价样本与标准样本(最优样本)之间的贴近程度, 根据贴近度值即可对评价样本水安全状况进行优劣排序。

## 2 应用实例——全国部分省级行政区的水安全评价

下面以全国部分地区水安全综合评价为例, 说明模糊物元模型在这一领域的应用。这里, 分别从东北地区、华北地区、华东地区、华中地区、华南地区、西南地区 and 西北地区中, 选择其代表性省份, 即黑龙江省、山西省、江苏省、河南省、广西区、云南省和陕西省作为研究对象, 对各省区的水安全状况进行评价。水安全评价指标体系及指标值, 见表 1 所列。

表 1 水安全评价指标体系及指标值<sup>[4]</sup>

评价指标	山西省	黑龙江	江苏省	河南省	广西区	云南省	陕西省
人均水资源量 $x_1/10^4 \text{ m}^3$	0.025	0.168	0.058	0.072	0.355	0.572	0.098
公顷均水资源量 $x_2/10^4 \text{ m}^3$	0.180	0.525	0.855	0.825	3.615	3.825	0.69
地表水利用程度 $x_3/\%$	43.089	36.359	134.752	18.407	17.619	5.565	13.157
地下水利用程度 $x_4/\%$	52.628	45.771	10.739	41.572	3.013	0.837	28.500
万元工业产值耗水量 $x_5/\text{m}^3$	54	271	81	66	192	114	71
农业用水综合定额 $x_6/\text{m}^3$	210	650	478	197	1176	593	303
人均用水量 $x_7/\text{m}^3$	170	800	600	220	650	340	220
单位面积 COD 排放量 $x_8/(\text{t} \cdot \text{km}^{-2})$	2.020	1.150	6.156	4.913	4.335	0.775	1.587
工业废水达标率 $x_9/\%$	79.280	90.440	95.890	91.520	74.000	79.120	80.880
Ⅳ级以上水质河段比例 $x_{10}/\%$	71.900	71.600	61.200	72.400	54.000	23.000	55.900
土壤侵蚀模数指数 $x_{11}$	0.615	0.138	0.094	0.149	0.264	0.242	1.000
荒漠化指数 $x_{12}$	0.165	0.000	0.000	0.005	0.000	0.009	0.185
森林覆盖率指数 $x_{13}$	0.154	0.701	0.074	0.202	0.497	0.482	0.474
洪水受灾面积率 $x_{14}/\%$	0.981	0.255	1.580	23.920	5.309	5.840	3.852
干旱受灾面积率 $x_{15}/\%$	50.560	28.795	37.537	29.592	22.687	3.208	32.098
区域工农业产值密度 $x_{16}$ $/(10^4 \text{ 元} \cdot \text{km}^{-2})$	105.134	71.505	805.433	304.838	85.342	51.474	80.578
单位面积蓄水总库容 $x_{17}$ $/(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	3.393	1.855	17.801	23.715	9.527	2.170	1.768
堤防保护耕地面积率 $x_{18}/\%$	8.698	22.313	94.518	49.060	5.332	5.705	5.914
人均粮食 $x_{19}/\text{kg}$	258.841	690.024	417.666	443.118	340.499	342.304	302.108
粮食单产 $x_{20}/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	2678	3242	5857	4542	4181	3463	2850
灌溉面积率 $x_{21}/\%$	23.512	15.373	65.703	52.346	27.658	18.921	20.531
氟病区人数比例 $x_{22}/\%$	6.759	7.452	4.947	10.345	0.254	0.038	8.613

### 2.1 区域水安全评价

根据模糊物元分析原理, 结合评价指标属性值(见表 1), 可以对全国上述地区的水安全形势作综合评价(限于篇幅, 具体计算过程从略)。评价步骤大致如下:

步骤 1: 构造复合物元。将表 1 中的各待评区域均视为物元的事物, 由这 7 个事物与其相应的 22 个评价指标及其属性值可以构造复合物元。

步骤 2: 确定从优隶属度。在步骤 1 所确定的复合物元中, 指标  $x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_{11}, x_{12}, x_{14}, x_{15}, x_{16}$  和  $x_{22}$  为越小越优型指标, 采用式(4)计算从优隶属度; 其它指标为越大越优型指标, 根据式(3)计算从优隶属度。由此, 可以构造复合模糊物元  $R_{7,22}$ 。

步骤 3: 计算标准模糊物元。标准模糊物元  $R_{0,22}$  是由步骤 2 所确定的复合模糊物元  $R_{7,22}$  内各评价样本从优隶属度

中的最大值或最小值加以确定的。这里, 选取最大值组成标准模糊物元, 则有  $u(x_{0i}) = 1$ 。

步骤 4: 确定差平方复合模糊物元。根据式(6)计算标准模糊物元  $R_{0.22}$  与复合模糊物元  $R_{7.22}$  中相应各项差的平方  $\Delta_{ji}$ , 再由计算所得的  $\Delta_{ji}$  组成差平方复合模糊物元  $R_{\Delta}$ , 即

$R_{\Delta} =$		山西省	黑龙江	江苏省	河南省	广西区	云南省	陕西省
	$x_1$	0 9145	0 4989	0 8075	0 7641	0 1439	0	0 6867
	$x_2$	0 9080	0 7443	0 6030	0 6651	0 0030	0	0 6717
	$x_3$	0 1023	0 0728	1	0 0187	0 0171	0 0017	0 0095
	$x_4$	1	0 7564	0 0417	0 06239	0 0033	0 0003	0 2932
	$x_5$	0 0397	1	0 0893	0 0593	0 5020	0 1770	0 0686
	$x_6$	0 0319	0 3055	0 1652	0 0281	1	0 2543	0 0664
	$x_7$	0 0452	1	0 5625	0 0756	0 6602	0 1806	0 1756
	$x_8$	0 1076	0 0349	1	0 6370	0 4959	0 0159	0 0665
	$x_9$	0 0300	0 0032	0	0 0021	0 0521	0 0306	0 0245
	$x_{10}$	0 0001	0 0001	0	0	0 0646	0 4655	0 0519
	$x_{11}$	0 3782	0 0190	0 0088	0 0222	0 0697	0 0586	1
	$x_{12}$	0 7955	0	0	0 0007	0	0 0024	1
	$x_{13}$	0 6089	0	0 8000	0 5067	0 0847	0 0976	0 1048
	$x_{14}$	0 0017	0 0001	0 0044	1	0 0492	0 0596	0 0259
	$x_{15}$	1	0 3243	0 5511	0 3426	0 2013	0 0040	0 4030
	$x_{16}$	0 0170	0 0079	1	0 1433	0 0112	0 0041	0 0010
	$x_{17}$	0 7343	0 8497	0 0622	0	0 3580	0 8254	0 8564
	$x_{18}$	0 8245	0 5835	0	0 2313	0 8904	0 8828	0 8787
	$x_{19}$	0 3905	0	0 1558	0 1280	0 2565	0 2534	0 3161
	$x_{20}$	0 2946	0 1994	0	0 0504	0 0819	0 1670	0 2636
	$x_{21}$	0 4123	0 5868	0	0 0413	0 3352	0 5069	0 4727
	$x_{22}$	0 4269	0 4188	0 2287	1	0 0006	0 0001	0 6932

步骤 5: 确定评价指标权重。为便于比较, 这里采用文献[4]的评价指标权重, 见表 2 所列。

表 2 评价指标权重											
指标	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$
权重	0 2059	0 2034	0 0193	0 0215	0 0231	0 0237	0 0286	0 0100	0 0002	0 0041	0 0037
指标	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$	$x_{16}$	$x_{17}$	$x_{18}$	$x_{19}$	$x_{20}$	$x_{21}$	$x_{22}$
权重	0 0083	0 0056	0 0266	0 0291	0 0214	0 0426	0 0535	0 0288	0 0202	0 0808	0 1396

步骤 6: 贴近度计算。由差平方复合模糊物元  $R$  和评价指标权重  $w$ , 根据式(8)可以得到评价样本与标准样本之间的贴近度  $\rho H_j$ , 见表 3 所列。

表 3 评价样本与标准样本之间的贴近度								
样本	山西省	黑龙江省	江苏省	河南省	广西区	云南省	陕西省	
$\rho H_j$	0 2082	0 2803	0 3502	0 2792	0 5558	0 6076	0 2593	

2 2 评价结果的分析

由表 3 可以看出, 在待评的 7 个样本中, 各地区水安全状况由优到劣的排序依次为: 云南省> 广西区> 江苏省> 黑龙江省> 河南省> 陕西省> 山西省。此外, 在表 3 中, 这些样本相对于标准样本的贴近度最大值仅为 0 607 6, 这表明上参考文献:

[1] 王小民 二十一世纪的水安全[J]. 社会科学, 2001, (2): 25- 29

[2] 方子云 水安全是 21 世纪现代水利的主要目标[J]. 人民长江, 2001, 32(5): 47- 48

[3] 姜文来 中国 21 世纪水资源安全对策研究[J]. 水科学进展, 2001, 12(1): 66- 71

[4] 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- 42

[5] 韩宇平, 阮本清 区域水安全评价指标体系初步研究[J]. 环境科学学报, 2003, 23(2): 267- 272

[6] 张家诚, 张沅 现代水荒初探[J]. 水科学进展, 1999, 10(1): 79- 83

[7] 程国栋 虚拟水——中国水资源安全战略的新思路[J]. 中国科学院院刊, 2003(4): 260- 264

[8] 肖芳淳 模糊物元分析及其应用研究[J]. 强度与环境, 1995, (2): 51- 59

[9] 熊德琪 环境系统模糊预测、评价、规划、决策理论模式与应用研究[D]. 大连: 大连理工大学土木系, 1994

[10] 李如忠, 钱家忠, 汪家权 模糊物元模型在区域水环境承载力评价中的应用[J]. 环境科学与技术, 2004, 24(5): 54- 56

述省份水安全状况都还是很理想的, 尤其是陕西省(0 259 3)和山西省(0 208 2)水安全状况更令人担忧。

文献[4]运用模糊优选模型法对上述省区水安全形势作了综合评价, 现将模糊物元模型与模糊优选模型所得结果进行比较, 见表 4。

从表 4 可以看出, 除山西省和陕西省外, 模糊物元模型与模糊优选模型所得各地区水安全状况排序结果是一致的。对照表 1 中山西和陕西两省各评价指标的属性值, 不难发现, 不仅陕西省有近一半评价指标优于山西省, 而且在权重较大的几个指标中, 大多数也都是陕西省优于山西省(尤其是人均水资源量  $x_1$  和公顷均水资源量  $x_2$ )。虽然在少数指标上山西省优于陕西省, 但两者间的差距并不十分显著。综合各评价指标的属性值和指标权重, 应当可以判定陕西省的水安全状况要稍好于山西省, 这与模糊物元模型评价结果是一致的。由此, 可以得出结论, 模糊物元模型评价结果是合理、可信的。

表 4 模糊物元模型与模糊优选模型评价结果比较				
省 份	模糊物元模型		模糊优选模型	
	贴近度	排序	优属度	排序
山西省	0 2082	7	0 0153	6
黑龙江	0 2803	4	0 0502	4
江苏省	0 3502	3	0 0886	3
河南省	0 2792	5	0 0393	5
广西区	0 5558	2	0 9034	2
云南省	0 6076	1	0 9056	1
陕西省	0 2593	6	0 0064	7

3 结 语

(1) 基于区域水安全概念的模糊性和单项指标评价结果的不相容性, 在物元分析的基础上, 结合模糊集理论和欧氏贴近度概念, 建立了区域水安全评价的模糊物元模型。根据该模型, 可以对各分区水安全状况进行优劣排序, 从而为区域水资源和社会经济协调发展提供决策依据。实例研究表明, 以模糊物元模型评价区域水安全状态, 理论上是可行的, 评价结论是可信的。

(2) 模糊物元模型物理概念清楚, 计算过程简单, 具有一定的推广和实用价值。该模型不仅可以用于区域水安全评价, 也可用于水资源(环境)承载力评价以及区域生态环境评价等多指标决策问题的研究。

(3) 本文根据模糊物元模型对各地区的水安全评价, 在很大程度上是对各地区在水安全方面的对比, 而非各地区的绝对值。所以, 有必要对某一地区的水安全评价模型作进一步深入地研究。