

水资源效益综合评价的可变模糊决策理论及应用

吕素冰*, 许士国, 陈守煜

(大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 水资源效益评价体系是一个综合经济效益、生态环境效益和社会效益,既有定量指标又有定性指标的多层次半结构性体系.为提高评价的可靠性,综合考虑了定性指标和定量指标对水资源经济效益、生态环境效益和社会效益的影响,并将两级可变模糊决策模型与可变模糊模式识别模型同时应用于半干旱地区灌区水资源综合效益评价研究中.结果表明,可变模糊模式识别模型优于两级模型,计算结果稳定,不仅能够进行不同方案优选,而且可以对各个方案进行优劣等级评价.

关键词: 水资源效益评价;可变模糊决策;定量和定性指标;可变模糊模式识别
中图分类号: TV212.4 **文献标志码:** A

0 引言

水资源是人类以及一切生物生存的先决条件,是促进社会发展进步和生态环境改善必不可少的重要物质.以发展经济目标为出发点的传统水资源利用使得水资源迅速接近承载力的上限.因此,研究水资源利用可持续程度,对水资源综合规划实施后进行宏观经济社会效益的评价,评价其与社会经济发展之间的协调程度具有重要意义.

水资源综合效益评价涉及经济、生态环境、社会、技术、资源等多个领域的相关指标,其中有些指标是定量的,如粮食产量和工业产值的增加,有些却是难以量化的定性指标,如水资源的综合利用提升当地人民的生活满意程度等.因此,水资源综合效益评价体系是一个多层次,既有定量指标又有定性指标的多目标半结构性评价体系.赵西宁等^[1]以黄土高原小流域为研究单元,以雨水为研究对象,用层次分析法原理构建了包含经济效益、生态效益和社会效益共32项指标的综合效益评价模型.赵洪杰和周维博等在文献[2]和[3]中分别针对黑河中游梨园灌区和干旱半干旱地域建立了包含经济效益、社会效益和生态效益的水资源综合效益评价体系,并利用层次分析法进行了

评价.这些已有的水资源综合效益评价研究存在以下两点不足:一是评价指标体系中多涉及定量指标的分析,对于一些生态环境和社会效益中难以量化的定性指标很少提及或只是简单的文字叙述而没有将其列入指标体系;二是目前的评价方法多用层次分析法,构建一个数学模型,将复杂的多目标评价模型按单一的评价模型求解.

针对以上问题,本文考虑定性指标对水资源效益评价的影响完善文献[3]的指标体系,应用陈守煜的可变模糊集理论^[4]中的可变模糊决策^[5],通过模型的指标权重、指标标准值等重要模型参数的变化以及对模型集的求解,提高优选决策的可信度和可靠性,并在实例计算中分别应用两级可变模糊决策模型与可变模糊模式识别模型^[6],提高评价结果的可靠性.

1 可变模糊决策模型

一定时空条件组合下的模糊概念(事物、现象)常具有相对性或动态可变性^[7].相应地,描述它们的隶属度、隶属函数也应是相对的、动态的.可变模糊集理论是在相对隶属度定义的基础上发展而来的,可变模糊集包括模糊优选模型、模糊模

式识别模型、模糊聚类循环迭代模型以及模糊决策、识别与聚类的统一模型等.

1.1 两级可变模糊决策模型^[7]

对于两级可变模糊决策,有

$$u_j = \frac{1}{1 + (d_{jg}/d_{jb})^\alpha} \tag{1}$$

式中: $d_{jg} = \left\{ \sum_{i=1}^m [\omega_i (1 - r_{ij})]^\rho \right\}^{1/\rho}$; $d_{jb} = \left[\sum_{i=1}^m (\omega_i r_{ij})^\rho \right]^{1/\rho}$. u_j 为决策集 ($j = 1, 2, \dots, n$; n 为决策数) 综合相对优属度; d_{jg} 为决策 j 对优的距离; d_{jb} 为决策 j 对劣的距离; ω_i 为指标 i ($i = 1, 2, \dots, m$) 的权重; r_{ij} 为样本 j 指标 i 特征值的相对隶属度 ($i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$); α 为优化准则, $\alpha = 1$ 为最小一乘方准则, $\alpha = 2$ 为最小二乘方准则; ρ 为距离, $\rho = 1$ 为海明距离, $\rho = 2$ 为欧氏距离.

通常情况下, α 和 ρ 可有以下 4 种搭配:

(1) $\alpha = 1, \rho = 1$

式(1)变为

$$u_j = \sum_{i=1}^m \omega_i r_{ij} \tag{2}$$

此时式(2)为模糊综合评判模型,是一个线性模型.

(2) $\alpha = 1, \rho = 2$

式(1)变为

$$u_j = \frac{d_{jb}}{d_{jb} + d_{jg}} \tag{3}$$

在 d_{jg} 和 d_{jb} 表达式中,取 $\rho = 2$,即取欧氏距离,此时式(3)为理想点模型.

(3) $\alpha = 2, \rho = 1$

式(1)变为

$$u_j = \frac{1}{1 + \left(\frac{1 - d_{jb}}{d_{jb}} \right)} = \frac{1}{1 + \left(1 - 1 / \sum_{i=1}^m \omega_i r_{ij} \right)^2} \tag{4}$$

此时式(4)为 Sigmoid 型即 S 型函数,可用以描述神经网络系统中神经元的非线性特性或激励函数.

(4) $\alpha = 2, \rho = 2$

式(1)变为

$$u_j = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{jg}}{d_{jb}} \right)^2} = \frac{1}{1 + \frac{\sum_{i=1}^m [\omega_i (1 - r_{ij})]^2}{\sum_{i=1}^m (\omega_i r_{ij})^2}} \tag{5}$$

此时式(5)为模糊优选模型.

1.2 可变模糊模式识别模型

两级可变模糊决策模型只涉及优、劣两个极端,通过后续的实例分析发现,此模型对评价结果较为粗劣,同一方案不同模型指标的相对优的隶属度之间差异较大;并且水资源利用是一个连续动态、逐步发展的过程,不仅要对其效益评价优劣,还需要对利用方案进行等级评价.因此,在分析两级可变模糊决策模型的基础上,进一步分析可变模糊模式识别模型^[6]:

$$u_{hj} = \begin{cases} 0; & h < a_j \text{ 或 } h > b_j \\ \frac{1}{\sum_{k=a_j}^{b_j} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m [\omega_{ij} (r_{ij} - s_{ih})]^\rho}{\sum_{i=1}^m [\omega_{ij} (r_{ij} - s_{ik})]^\rho} \right\}^{a/\rho}}; & a_j \leq h \leq b_j, d_{hj} \neq 0 \\ 1; & d_{hj} = 0 \end{cases} \tag{6}$$

式中: h 为级别; a_j 为决策 j 的级别下限值; b_j 为决策 j 的级别上限值; s_{ih} 为级别 h 指标 i 标准特征值的相对隶属度; d_{hj} 为决策 j 与级别 h 之间差异的广义权距离;其余符号同前. 同样有 4 种搭配.

(1) $\alpha = 1, \rho = 1$

有

$$d_{hj} = \sum_{i=1}^m [\omega_{ij} (r_{ij} - s_{ih})] \tag{7}$$

(2) $\alpha = 1, \rho = 2$

有

$$d_{hj} = \left\{ \sum_{i=1}^m [\omega_{ij} (r_{ij} - s_{ih})]^2 \right\}^{1/2} \tag{8}$$

(3) $\alpha = 2, \rho = 1$

有

$$d_{hj} = \left\{ \sum_{i=1}^m [\omega_{ij} (r_{ij} - s_{ih})] \right\}^2 \tag{9}$$

(4) $\alpha = 2, \rho = 2$

有

$$d_{hj} = \sum_{i=1}^m [\omega_{ij} (r_{ij} - s_{ih})]^2 \tag{10}$$

对于上述 4 种模型,定义

$$z_j = \sum_{h=a_j}^{b_j} (d_{hj})^{-1} \tag{11}$$

则有相对优属度 $u_{hj} = (d_{hj} \cdot z_j)^{-1}$.

2 应用研究

以半干旱地域灌区水资源综合效益评价为

例,应用式(1)、(6)中不同参数 α 、 p 的4种组合下的模型集分别进行分析计算,并比较两级可变模糊决策模型与可变模糊模式识别模型计算结果的异同.

2.1 指标体系

半干旱地区宝鸡峡灌区水资源十分短缺,水质污染严重,为保持灌区经济、社会和水土资源可持续发展,需要对灌区水资源利用综合效益进行评价^[3].研究区评价模型结构共3层,最高层为目标层,即综合效益;中间层为准则层,包括灌区经济效益、生态环境效益和社会效益;最低层为14个反映效益的具体指标.但该体系只考虑了经济、生态环境和社会效益中的定量指标,本文在此基础上,增加了3个定性指标,即生态环境效益中的气候湿润度(x_a)以及社会效益中的生活满意度(x_b)和社会文明程度(x_c).综上,建立了一个由14个定量指标和3个定性指标组成的多层次多指标半结构性水资源综合效益评价指标体系,具体如表1所示.

2.2 定性和定量指标的相对优属度矩阵

对于14个定量指标,只有 x_1 和 x_2 是越小越优,其余均为越大越优.越小越优指标利用 $r_{ij} =$

x_{imin}/x_{ij} 、越大越优指标利用 $r_{ij} = x_{ij}/x_{imax}$ 进行量纲一化计算.通过二元对比^[8]计算定性指标的优属度矩阵,然后将定量和定性指标综合,3种效益的指标相对优属度矩阵如下:

$$\mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} 0.722 & 1 & 0.849 \\ 0.902 & 0.867 & 1 \\ 0.833 & 0.933 & 1 \\ 0.892 & 0.954 & 1 \\ 0.970 & 0.979 & 1 \\ 0.815 & 0.961 & 1 \\ 0.549 & 0.769 & 1 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{R}_2 = \begin{pmatrix} 0.333 & 0.666 & 1 \\ 0.789 & 0.842 & 1 \\ 0.933 & 0.967 & 1 \\ 0.667 & 0.818 & 1 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{R}_3 = \begin{pmatrix} 0.794 & 0.938 & 1 \\ 0.252 & 0.363 & 1 \\ 0.303 & 0.520 & 1 \\ 0.198 & 0.365 & 1 \\ 0.538 & 0.667 & 1 \\ 0.600 & 0.739 & 1 \end{pmatrix}$$

表 1 灌区水资源综合效益评价体系系统分层与指标值

Tab.1 The comprehensive benefit evaluation system layer and indexes of water resources in irrigation area

准则层			指标层	特征目标值		
子系统序号	子系统	序号	指标	方案 1	方案 2	方案 3
1	经济效益	x_1	地表水资源开发程度/%	47.7	34.3	40.4
		x_2	地下水资源开发程度/%	68.5	71.3	81.8
		x_3	灌溉水利用系数	0.50	0.56	0.60
		x_4	渠系水利用系数	0.58	0.62	0.65
		x_5	耕地灌溉率/%	97.0	97.9	100
		x_6	单位灌溉水粮食产量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.67	1.97	2.05
		x_7	单位水量工业产值/($\text{元} \cdot \text{m}^{-3}$)	100	140	182
2	生态环境效益	x_8	污水处理率/%	20	40	60
		x_9	工业废水排放达标率/%	75	80	95
		x_{10}	盐碱地治理及除涝面积比率/%	84	87	90
		x_a	气候湿润度			
3	社会效益	x_{11}	人均粮食占有量/($\text{kg} \cdot \text{人}^{-1}$)	314.9	372.2	396.7
		x_{12}	人均 GDP/元	3 613	5 215	14 358
		x_{13}	居民年均收入/元	3 028	5 200	10 000
		x_{14}	农民年均收入/元	1 093	2 017	5 520
		x_b	生活满意度			
		x_c	社会文明程度			

2.3 定性和定量指标的权向量

根据二元对比法,确定各指标的权向量.应用文献[8]提出的确定指标权重重要性排序一致性定理,首先得到通过检验的指标重要性排序一致性标度矩阵,然后对指标做关于重要性程度的二元比较判断,并利用语气算子与相对隶属度之间的关系表^[8],得到评价指标的权向量.

子系统 1 指标对于重要性的相对隶属度向量 $w'_1 = (0.538 \ 0.538 \ 0.667 \ 0.667 \ 1.0 \ 1.0 \ 1.0)$, 归一化即得子系统 1 中 7 个指标的权向量

$w_1 = (0.100 \ 0.100 \ 0.124 \ 0.124 \ 0.184 \ 0.184 \ 0.184)$, 同理,子系统 2 中 4 个指标的权向量 $w_2 = (0.315 \ 0.285 \ 0.210 \ 0.190)$, 子系统 3 中 6 个指标的权向量 $w_3 = (0.207 \ 0.169 \ 0.187 \ 0.187 \ 0.138 \ 0.112)$, 3 个子系统的指标权向量 $w = (0.454 \ 0.302 \ 0.244)$.

2.4 两级可变模糊决策模型的结果

将数据代入模型(2)~(5),计算出两级可变模糊决策模型 4 个模型的相对优属度,如表 2 所示.

表 2 两级可变模糊决策模型方案相对优属度计算结果
Tab. 2 Relative optimal membership degrees of two-level variable fuzzy decision-making model schemes

方案	两级可变模糊决策模型计算结果				平均值
	$\alpha = 1, p = 1$	$\alpha = 1, p = 2$	$\alpha = 2, p = 1$	$\alpha = 2, p = 2$	
1	0.671	0.660	0.907	0.844	0.771
2	0.807	0.784	0.988	0.900	0.870
3	0.993	0.971	1.000	0.999	0.991

通过上表,根据方案相对隶属度最大或特征值最小原则,可以明显看出方案 3 优于方案 2,方案 2 优于方案 1.但是模型 $\alpha = 1, p = 1; \alpha = 1, p = 2$ 与模型 $\alpha = 2, p = 1; \alpha = 2, p = 2$ 之间,同方案相对优属度计算结果横向比较相差较大,结果的说说服力不够、可信度稍差.

2.5 可变模糊模式识别模型

为了更好地对方案进行评判,分析计算可变模糊模式识别模型,根据五级相对优属度标准值向量取值 $S = (1.0 \ 0.8 \ 0.6 \ 0.3 \ 0)$ 对应的优、良、中、可、劣对方案进行评判^[9]. 计算结果如表 3 所示.

表 3 可变模糊模式识别模型方案相对优属度计算结果
Tab. 3 Relative optimal membership degrees of variable fuzzy pattern recognition model schemes

方案	可变模糊模式识别模型计算结果				平均值
	$\alpha = 1, p = 1$	$\alpha = 1, p = 2$	$\alpha = 2, p = 1$	$\alpha = 2, p = 2$	
1	0.711	0.707	0.645	0.713	0.694
2	0.799	0.801	0.805	0.786	0.798
3	0.930	0.976	0.998	0.999	0.976

与两级可变模糊决策模型相比较,同方案相对优属度横向比较,变动幅度较小,结果较稳定.根据五级相对优属度标准值向量取值 $S = (1.0 \ 0.8 \ 0.6 \ 0.3 \ 0)$ 对应的优、良、中、可、劣,有方案 1 为中偏良,方案 2 为良,方案 3 为优,灌区规划年效益呈逐渐增长趋势.

3 结 论

本文应用可变模糊集理论中可变模糊决策理论,充分考虑定性指标的影响,完善了只含有定量指标的灌区水资源综合效益评价指标体系,构成能够考虑效益各个方面的多层次、多目标半结构综合评价指标体系,并应用两级可变模糊决策模

型进行计算,克服了以往分析评价的模型单一性;同时,分析计算了可变模糊模式识别模型,实例分析验证了模型的正确性,其计算结果比两级模型稳定、对方案的评价细化、可靠度更强.

参考文献：

[1] 赵西宁,冯浩,吴普特,等. 黄土高原小流域雨水资源化综合效益评价体系研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(3):354-360

[2] 赵洪杰,唐善德. 黑河中游灌区水资源综合效益评价体系研究[J]. 节水灌溉, 2006(6):58-62

[3] 周维博,李佩成. 干旱半干旱地域灌区水资源综合效益评价体系[J]. 自然资源学报, 2003, 18(3):288-293

[4] 陈守煜. 工程可变模糊集合理论与模型——模糊水文水资源学数学基础[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(2):308-312

(CHEN Shou-yu. Theory and model of engineering variable fuzzy set-Mathematical basis for fuzzy

hydrology and water resources [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2005, 45(2):308-312)

[5] 陈守煜,袁晶瑄,郭瑜. 可变模糊决策理论及其在水库防洪调度决策中应用[J]. 大连理工大学学报, 2008, 48(2):259-262

(CHEN Shou-yu, YUAN Jing-xuan, GUO Yu. Variable fuzzy decision-making theory and its application to decision-making supporting system for reservoir flood control operation [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2008, 48(2):259-262)

[6] 陈守煜. 可变模糊集合理论与可变模型集[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(18):146-153

[7] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2005

[8] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1998

[9] 陈守煜. 复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用[M]. 长春:吉林大学出版社, 2002

Variable fuzzy decision-making theory and its application to comprehensive benefits evaluation of water resources

LÜ Su-bing*, XU Shi-guo, CHEN Shou-yu

(School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The comprehensive benefit evaluation system of water resources is a multi-level and semi-structural system integrating economic, ecological environment and social benefits as well as including quantitative and qualitative indexes. To enhance the reliability, considering the influences of both quantitative and qualitative indexes on the integrated economic, eco-environmental and social benefits of water resources, two-level variable fuzzy decision-making model and variable fuzzy pattern recognition model are applied to the comprehensive benefits evaluation of water resources in a semi-arid irrigation areas. The results show that the variable fuzzy pattern recognition model is superior to two-level model, which makes the calculation results steadier. The variable fuzzy pattern recognition model can not only optimize the different schemes, but also evaluate the grade of each scheme.

Key words: benefits evaluation of water resources; variable fuzzy decision-making; quantitative and qualitative indexes; variable fuzzy pattern recognition