DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.02.009

基于模糊优选理论的水资源效益评价体系

冯 峰[1,2],许士国[1]

(1.大连理工大学土木水利学院,辽宁 大连 116024;2.黄河水利职业技术学院水利系,河南 开封 475004)

摘要:以模糊优选理论与模型为基础,同时考虑定量和定性指标的影响,构建了灌区水资源利用综合效益的多目标多层次半结构性评价体系。介绍该模型的计算步骤,应用该模型对陕西省某灌区的水资源效益进行综合评价,并与其他方法的评价结果进行比较。结果表明:该评价体系克服了以往评价以经济效益为主、忽视生态环境效益和社会效益的缺点;不仅能够用于不同方案的优选,而且还能给予每个方案优劣评价;评价体系更加合理,可靠性、实用性强,还可对指标进行扩展或变化,适用于多种综合评价问题。

关键词:水资源效益;定性指标;半结构性评价体系;模糊优选

中图分类号:TV21 **文献标识码**:A **文章编号**:1006-7647(2008)02-0035-04

Benefit evaluation system of water resources based on fuzzy optimization theory//FENG Feng[1,2],XU Shi-guo[1](1. *College of Civil and Water Conservancy Engineering*, *Dalian University of Science and Technology*, *Dalian* 116024, *China*;2. *Department of Water Resource*, *Yellow River Conservancy Technical Institute*, *Kaifeng* 475004, *China*)

Abstract: Based on the fuzzy optimization theory and model, a multi-objective, multi-level and semi-structural evaluation system of water resources utilization in irrigation areas was developed, with consideration of the effects of both quantitative and qualitative indexes. The calculation steps were presented and the model was applied to the comprehensive evaluation of water resources benefit in an irrigation area of Shanxi Province. Comparison of results demonstrates that this evaluation system, which pays more attention to eco-environmental and social benefits, is better than other methods. Moreover, it can not only be used for optimization of different schemes but also for evaluation of each scheme. This evaluation system, with its function of extension and transformation of assessment indices, is highly rational, reliable and practical and is suitable for comprehensive evaluation of various problems.

Key words: water resources benefit; qualitative index; semi-structural evaluation system; fuzzy optimization

水是构成生态环境的基本要素,也是人类生存与发展不可替代的重要资源。水资源的合理开发利用是人类、社会、经济可持续发展的基础条件[1]。从我国社会经济发展的速度和趋势来看,水资源已迅速接近承载力的上限,水资源短缺问题将越来越成为我国农业和社会经济发展的制约因素[2]。实现水资源的可持续利用,发挥其经济、社会、生态效益是当前和今后长期的重要任务。而开展水资源效益评价,既是水资源可持续利用与管理的依据,也是与水资源有关的工程合理规划和正常运行的前提。

水资源效益评价是一种复杂的多目标多层次的评价过程,影响因素较多,且各因素之间关系错综复杂,在不同地区、气候、工程和环境背景下综合效益相差很大。周维博等[3]构建了干旱半干旱地域灌区水资源综合效益评价体系,并利用层次分析法(AHP)对灌区进行了评价;杨晴等[4]构建了灌区水资源开发利用特性评价模型,从灌区水资源特点、水量供需和水环境 3 个方面建立了 5 个指标,依据国际评价量值进行了指标定值分析。目前大多数的水资源效益评价都是只计算定量指标,对于一些难以量化的指标比如生态环境效益、社会效益等则不考虑或只部分考虑,采用的评价方法单一,导致评价结果不是十分科学合理。针对以上问题,笔者运用陈守煜提出的多层次多目标模糊优选理论与模型[5],重新构建了半结构性水资源综合效益评价指标体系,并应用该模型对陕西省某灌区的水资源效益进行了综合评价。

1 评价指标体系构建

1.1 多层次半结构性评价指标体系的构建

从水资源与经济、环境、社会相互作用的角度出发,水资源效益可分为经济效益、生态环境效益和社

基金项目:国家自然科学基金(50679012);"十一五"国家科技支撑计划重点项目(2006BAB14B06)

作者简介:冯峰(1978—),女,河南驻马店人,讲师,博士研究生,从事水文学与水资源研究。E-mail:fengfeng_624@163.com

会效益三大部分，每部分用若干个指标来衡量和评估。评价指标体系以水资源综合效益为目标层，经济效益、生态环境效益、社会效益为准则层，第 3 层为指标层。

1.2 评价指标的选取

评价指标的选择既要有代表性，又要便于获取数据，既相互联系又不重复干扰。不同的地区、气候、工程和环境背景下，选择的指标会有一定的变化。构建的含有 14 项定量指标、5 项定性指标的灌区水资源利用综合效益评价指标体系如图 1 所示。

2 多层次半结构性模糊优选理论

把多层次系统分解为 H 层，最高层为 H，若最低层即第 1 层输入层有 M 个目标相对优属度输入到有若干个并列的单元系统（第 2 层），该层每个单元系统均有多个目标相对优属度输入，每个目标有不同的权重，对每个单元系统计算输出，即方案相对优属度向量

$$\boldsymbol{u}_i' = (u_{i1}'\ u_{i2}'\ \cdots\ u_{in}')$$

组成第 3 层中某个单元系统的 i 个输入如图 2 所示。令

$$\boldsymbol{u}_{ij}' = \boldsymbol{r}_{ij}$$

如此从第 1 层向第 H 层进行计算，直到最高层，由于最高层只有 1 个单元系统，可得最高层单元系统的输出，即方案相对优属度向量

$$\boldsymbol{u} = (u_1\ u_2 \cdots\ u_n)$$

据此可对各个方案进行优选和综合评价[5]。

3 水资源综合效益评价计算过程

a. 确定定量指标的相对优属度矩阵，根据指标的类型，越大越优型指标用式（1）计算，越小越优型指标用式（2）计算。

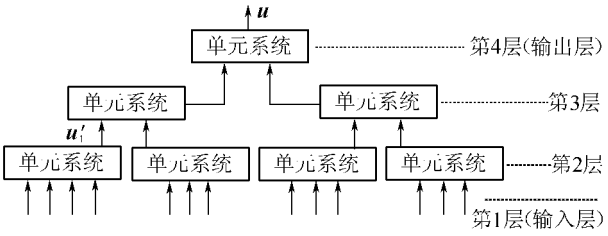

图 2 4 层模糊优选系统

$$\boldsymbol{r}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max\limits_j x_{ij}} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{r}_{ij} = \frac{\min\limits_j x_{ij}}{x_{ij}} \tag{2}$$

b. 确定定性指标的相对优属度矩阵，按二元比较互补性决策思维理论[6]和方法确定。

c. 确定指标、子系统权向量，利用排序一致性标度矩阵对指标进行重要性排序，利用模糊语气算子与相对隶属度的关系表确定每个子系统下的指标相对隶属度，归一化处理后得到指标权向量。也由此方法确定子系统权向量。

d. 计算第 1 层各子系统相对优属度向量，利用多级模糊优选理论公式（3）计算。

$$u_{hj} = \begin{cases} 0 & h < a_j \text{ 或 } h > b_j \\ (d_{hj}^2 z_j)^{-1} & a_j \leqslant h \leqslant b_j, d_{hj} \neq 0 \\ 1 & d_{hj} = 0 \end{cases} \tag{3}$$

$$h = a_j, a_{j+1}, \cdots, b_j$$

$$j = 1, 2, \cdots, n$$

其中

$$d_{hj}^2 = \sum_{i=1}^{m} [w_i(r_{ij} - s_h)]^2$$

$$z_j = \sum_{h=a_j}^{b_j} (d_{hj}^2)^{-1} = \sum_{h=a_j}^{b_j} (d_{hj}^2)^{-1}$$

e. 计算第 2 层亚系统相对优属度向量，把各子系统的输出作为输入，计算原理同第 d 步。

f. 得出最高层输出相对优属度向量，用式（4）

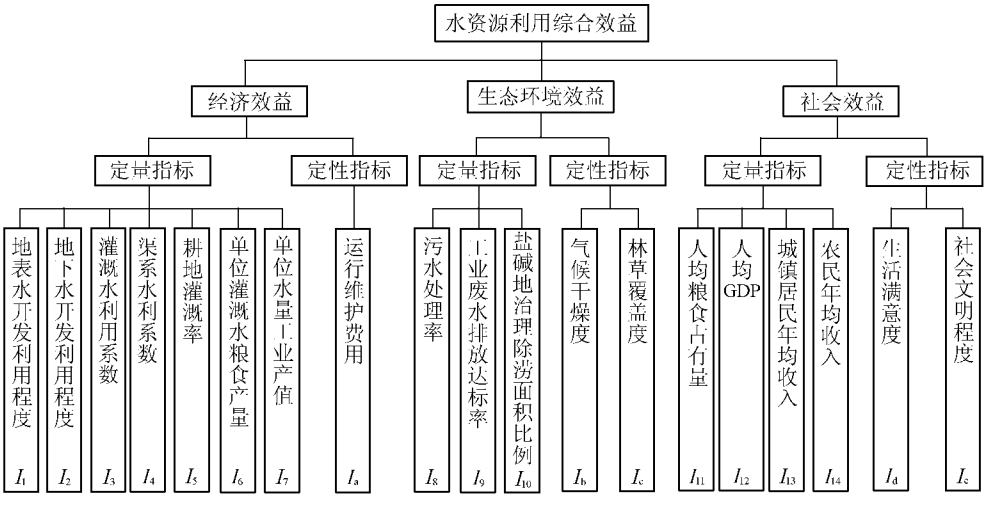

图 1 灌区水资源利用综合效益评价指标体系

计算各方案的级别特征值[7]。

$$H_j = (1\ 2 \cdots c)(u_{1j}\quad u_{2j}\quad \cdots\quad u_{cj})^{\mathrm{T}} \qquad (4)$$

4 某灌区水资源综合效益评价实例

评价数据来源于文献[3],如表 1 所示。

4.1 确定相对优属度矩阵

4.1.1 定量指标的相对优属度矩阵

根据表 1,I_1和 I_2 为越小越优型指标,其余为越大越优型指标,利用式(1)、式(2)计算 3 个子系统的定量指标相对优属度矩阵:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.722 & 1 & 0.849 \\ 0.902 & 0.867 & 1 \\ 0.833 & 0.933 & 1 \\ 0.892 & 0.954 & 1 \\ 0.970 & 0.979 & 1 \\ 0.815 & 0.961 & 1 \\ 0.549 & 0.769 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.333 & 0.666 & 1 \\ 0.789 & 0.842 & 1 \\ 0.933 & 0.967 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.794 & 0.938 & 1 \\ 0.252 & 0.363 & 1 \\ 0.303 & 0.520 & 1 \\ 0.198 & 0.365 & 1 \end{bmatrix}$$

4.1.2 定性指标的相对优属度矩阵

先确定子系统 1 定性指标运行维护费用 I_a 关于 3 个方案的目标相对优属度。显然,投入运行的时间越短,运行费用就越少,其优的排序依次为方案 1,2,3。方案 1 比方案 2 略为优秀,方案 1 比方案 3 明显优秀。同理确定 I_b 和 I_c。当地居民收入增加后,会更加安居乐业,社会文明程度也会提高,所以设置 2 个定性指标:生活满意度指标 I_d 和社会文明程度指标 I_e。生活满意度指标 I_d 的优排序为方案 3,2,1,即方案 3 比方案 2 略为优秀、比方案 1 较为优秀;社会文明程度指标 I_e 的优排序方案 3,2,1,即方案 3 比方案 2 略为优秀、比方案 1 较为优秀。根据语气算子和相对隶属度的关系表[6],可查出每个定性指标的相对优属度矩阵:

$$R_1' = [1\quad 0.667\quad 0.429]$$

$$R_2' = \begin{bmatrix} 0.818 & 0.905 & 1 \\ 0.667 & 0.818 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_3' = \begin{bmatrix} 0.538 & 0.667 & 1 \\ 0.600 & 0.739 & 1 \end{bmatrix}$$

4.2 确定指标权向量

4.2.1 确定各子系统下的指标权向量

先确定子系统 1 下的各指标权向量。给出子系统 1 的 8 个指标二元比较重要性的定性排序标度矩阵:

$$E = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \\ 1 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

根据行标度总和从大到小排序,指标的重要性排序依次为 5,6,7,3,4,1,2,8。应用语气算子和隶属度的关系表,5,6,7 同样重要,比 3 和 4 略为重要,比 1,2 和 8 较为重要。得出子系统 1 对于重要性的相对隶属度向量:

$$w_1' = (0.538\ 0.538\ 0.667\ 0.677\ 1\ 1\ 1\ 0.538)$$

归一化后得到子系统 1 的指标权向量:

$$w_1 = (0.090\ 0.090\ 0.113\ 0.113\ 0.168\ 0.168\ 0.168, 0.090)$$

同理,得到子系统 2、子系统 3 的指标权向量:

$$w_2 = (0.267\ 0.217\ 0.196\ 0.143\ 0.177)$$

$$w_3 = (0.207\ 0.169\ 0.187\ 0.187\ 0.138\ 0.112)$$

4.2.2 确定子系统之间的权向量

根据经济效益、生态环境效益和社会效益 3 个子系统在水资源评价中的作用,按照语气算子与相对隶属度的关系得子系统对于重要性的相对隶属度向量 w',归一化后得子系统权向量 w:

$$w' = (1\quad 0.667\quad 0.538)$$

$$w = (0.454\quad 0.302\quad 0.244)$$

4.3 确定第1层子系统的相对优属度向量

4.3.1 经济效益子系统的相对优属度向量

a. 方案 1,2,3 对各级相对优属度的计算。确

表 1 陕西省某灌区水资源综合效益评价指标数据

不同水平年方案	经济效益指标							生态环境效益指标			社会效益指标			
	I_1/%	I_2/%	I_3	I_4	I_5/%	I_6/(kg·m^{-3})	I_7/(元·m^{-3})	I_8/%	I_9/%	I_{10}/%	I_{11}/(kg·人$^{-1}$)	I_{12}/元	I_{13}/元	I_{14}/元
1997 年方案 1	47.5	68.5	0.50	0.58	97.0	1.67	100	20	75	84	314.9	3613	3028	1093
2005 年方案 2	34.3	71.3	0.56	0.62	97.9	1.97	140	40	80	87	372.2	5215	5200	2017
2015 年方案 3	40.4	61.8	0.60	0.65	100.0	2.05	182	60	95	90	396.7	14358	10000	5520

定方案 1 的 a_1 和 b_1。将方案 1 的 8 个指标相对优属度(0.722 0.902 0.833 0.892 0.970 0.815 0.549 1)逐一地与 $S=(1\ 0.8\ 0.6\ 0.3\ 0)$ 相比较,得 $a_{11}=2$, $b_{11}=3$;$a_{21}=1$, $b_{21}=2$;$a_{31}=1$, $b_{31}=2$;$a_{41}=1$, $b_{41}=2$;$a_{51}=1$, $b_{51}=2$;$a_{61}=1$, $b_{61}=2$;$a_{71}=2$, $b_{71}=3$;$a_{81}=1$, $b_{81}=1$;$a_1=\min_i a_{i1}=1$, $b_1=\max_i b_{i1}=3$, $i=1,2,\cdots,8$。

同理可确定方案2和方案3的各级相对优属度。

b. 利用式(3)计算经济效益子系统方案 1 对 5 个级别的相对优属度向量,见表 2。

表 2 经济效益子系统各方案对 5 个级别的相对优属度向量

方案	u_{11}	u_{21}	u_{31}	u_{41}	u_{51}
1	0.231	0.570	0.198	0	0
2	0.455	0.455	0.091	0	0
3	0.601	0.285	0.085	0.028	0

c. 经济效益子系统的方案级别特征值计算。利用式(4)计算出经济效益子系统 3 个方案的级别特征值 $H=(1.965\ 1.638\ 1.538)$,由于 H 为 1 级和 2 级时所对应的相对优属度标准值分别为 1 和 0.8,按线性内插得到经济效益子系统的方案相对优属度向量:

$$u_1=(0.807\quad 0.872\quad 0.892)$$

4.3.2 生态环境子系统的相对优属度向量

同经济效益子系统的计算过程,得生态环境效益子系统的方案相对优属度向量:

$$u_2=(0.686\quad 0.804\quad 1)$$

4.3.3 社会效益子系统的相对优属度向量

同经济效益子系统的计算过程,得到社会效益子系统的方案相对优属度向量:

$$u_3=(0.510\quad 0.662\quad 1)$$

4.4 确定第2层亚系统的相对优属度向量

根据多层多目标多级模糊优选原理[5],第 1 层子系统的输出就是第 2 层亚系统的输入。则第 2 层的输入各子系统的方案相对优属度矩阵和各子系统权向量为

$$R=\begin{bmatrix}0.807 & 0.872 & 0.892\\ 0.686 & 0.804 & 1\\ 0.510 & 0.662 & 1\end{bmatrix}$$

$$w=(0.454\quad 0.302\quad 0.244)$$

计算方案 1,2 和 3 对 5 个级别的相对优属度向量,结果见表 3。

4.5 计算输出层相对优属度向量

应用级别特征值向量式(式(4))计算得 $H=(2.316\ 1.963\ 1.235)$,由于 H 为 1 级、2 级、3 级时所对应的相对优属度标准值分别为 1,0.8,0.6,按线性内插得到各方案输出层的相对优属度向量:

$$u=(0.737\quad 0.807\quad 0.953)$$

表 3 第 2 层亚系统各方案对 5 个级别的相对优属度向量

方案	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5
1	0.105	0.524	0.325	0.047	0
2	0.126	0.785	0.089	0	0
3	0.765	0.235	0	0	0

根据方案相对优属度最大或级别特征值最小的优选原则,陕西省某灌区的水资源综合效益方案 3 为满意或最优方案,即 2015 年水资源综合效益最优。与文献[3]层次分析法(AHP)计算的综合效益评价值向量 $R=(0.778\quad 0.833\quad 0.95)$ 相比较,评价结果不完全一致,但更为合理。根据 5 级相对优属度标准值向量取值 $S=(1\quad 0.8\quad 0.6\quad 0.3\quad 0)$ 对应的优、良、中、可、劣,可判断方案 1 为良略偏中,方案 2 为良,方案 3 为优。

5 结 语

由多层次半结构性模糊优选原理与模型构建的灌区水资源综合效益评价体系能够全面考量效益的各个方面,评价结果更加科学合理。应用该体系对陕西省某灌区进行了效益综合评价,根据结果可知 2015 年即方案 3 为最优方案,分别比 2005 年和 1997 年提高综合效益 9.5% 和 29.3%。

基于模糊优选理论与模型构建的水资源效益评价体系与层次分析法(AHP)评价比较,不仅能够用于不同方案的优选,而且还能够对每个方案给予优劣评价,同时考虑了定量和定性指标对评价结果的影响,权重确定符合中国人的思维习惯,更显示出综合评价的合理性,其结果更加可靠,且计算过程简便。

参考文献:

[1] 陈家琦,王浩,杨小柳.水资源学[M].北京:科学出版社,2002:26-27.

[2] 黄修桥,高峰,王宪杰.节水灌溉与 21 世纪水资源的持续利用[J].灌溉排水,2001(3):1-5.

[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研究[J].自然资源学报,2003(5):288-293.

[4] 杨晴,曾肇京,雷声隆.灌区水资源利用特性评价模型研究[J].水力发电,2002(5):11-16.

[5] 陈守煜.复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用[M].吉林:吉林大学出版社,2002:50-55.

[6] 陈守煜.水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M].辽宁:大连理工大学出版社,2005:53-57;65-77.

[7] 陈守煜.工程模糊集理论与应用[M].北京:国防工业出版社,1998:99-100.

(收稿日期:2007-04-29 编辑:高建群)