

# 基于集对分析法的大型灌区运行状况评价研究

游 黎<sup>1</sup>, 费良军<sup>1</sup>, 武锦华<sup>1,2</sup>

(1. 西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 山西省水利厅, 山西 太原 030002)

**摘 要:** 运用集对分析法建立综合评估模型在确定指标权重时, 先将粗糙集理论中的属性重要度的确定方法和专家评分法相结合, 再运用博弈论方法对确定的权重进行集化和融合, 得到灌区评价指标的综合权重。本研究应用集对分析法对山西汾河灌区 2004 年度运行状况进行了较准确地综合评价, 等级为良; 评估结果表明, 集对分析方法具有较高的分辨率和较大的实用性, 具有不遗失数据中间信息、评价结果与实际情况更为相符的优点, 为灌区运行状况综合评价提供了一种简单而适用的评价方法。

**关键词:** 大型灌区; 集对分析; 粗糙集理论; 综合权重; 综合评价

**中图分类号:** S274.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)02-0132-04

大型灌区在我国粮食安全, 水资源配置与生态环境建设中具有十分重要的作用。我国大型灌区多建于 20 世纪 50~70 年代, 目前普遍存在引水量不足、工程年久失修、工程建设标准低、配套程度差、老化损坏严重、用水效率低、工程管理基础设施差等问题。近几年, 国家投资实施了一系列以节水为中心的大型灌区续建配套与节水改造项目<sup>[1]</sup>, 为了使灌区可持续发展, 并发挥项目的最大效益, 有必要对灌区运行状况进行综合评估。目前, 国内外在灌区综合评估方面开展了一些研究工作<sup>[2]</sup>, 如 2002 年, 中英墨灌区综合评价体系应用研究在湖北省漳河灌区启动<sup>[2,3]</sup>, 2008 年 Komaragiri Srinivasa Raju. A. Vasani 用多指标效用理论对灌溉系统进行了评估。H. Okada 等用层次分析法对灌区工程改造进行了分析研究。西安理工大学费良军、刘从柱等人对陕西省关中九大灌区进行了综合评价<sup>[4]</sup>。以上大多是针对灌区节水改造项目进行的后评估或完工评估, 对于灌区运行状况评价方面研究较少。灌区运行状况评估既不是对灌区进行评优也不是评差活动, 而是对灌区的性能进行比较分析<sup>[5]</sup>, 对灌区存在的问题提出一些有效的改进措施, 同时进行动态的跟踪观测和分析, 使灌区的性能逐步得到提高, 是一个动态的过程。因此, 对灌区运行状况评估十分必要。目前, 集对分析法在地下水水质评价、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, 本文探讨用集对分析方法对灌区运行状况进行综合评价, 以进一步证实该方法在灌区运行状况评价中的可行性和科学性。

## 1 集对分析方法

### 1.1 基本原理

集对分析 (Set Pair Analysis, SPA) 是赵克勤在 1989 年提出的一种新的系统分析方法<sup>[6,7]</sup>。它从同、异、反 3 个方面研究 2 个事物的不确定性, 全面刻画了 2 个不同事物的联系。集对分析的实质是一种新的不确定性理论。一般定义:  $S/N$  为集合  $A$  与集合  $B$  的同度, 简记为  $a$ ;  $F/N$  为集合  $A$  与集合  $B$  的差异度, 简记为  $b$ ;  $P/N$  为集合  $A$  与集合  $B$  的对立度, 简记为  $c$ 。为全面刻画 2 个集合  $A$ 、 $B$  总的联系状况, 用联系度表示为

$$u = (A, B) = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j = a + bi + cj \quad (1)$$

式中:  $a, b, c$  满足归一化, 即  $a + b + c = 1$ ; 联系度在一般情况下表示为等式右边的式子; 在特殊情况下才是一个数值, 称为联系数;  $i$  为差异不确定度的系数, 取值  $[-1, 1]$ ;  $j$  为对立度系数, 规定其取恒值为  $-1$ 。这种刻划是对确定性与不确定性的定量描述, 其中  $a, c$  是相对确定的, 而  $b$  是相对不确定的。这样表示  $b, c$  过粗, 本研究引入了优异、劣异、优反和劣反, 若指标值处于等级的相邻级别中, 且在评价级别优越一边则认为是优异, 其值简记  $b^+$ ; 若在评价级别劣差一边则认为是劣异, 其值简记  $b^-$ 。若指标值处于等级的相隔级别中, 且在评价级别优越一边, 则认为是优反, 其值简记  $c^+$ ; 若在评价级别劣差一边, 则认为是劣反。这样细化了同异反态势取值, 并且这样处理符合原创联系度可展性。式(1)可以

收稿日期: 2009-07-27

基金项目: 陕西省重点实验室重点科研计划项目(08JZ51)

作者简介: 游 黎(1983—), 男, 江西九江人, 硕士研究生, 主要从事灌区综合评价研究。E-mail: jayr2006@163.com。

通讯作者: 费良军(1963—), 男, 陕西蓝田人, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术, 农业水资源与水环境研究。E-mail: feiliangjun@sohu.com。

写成式(2):

$$\begin{aligned} u &= (A, B) = a + bi + cj \\ &= a + (b^+ + b^-)i + (c^+ + c^-)j \quad (2) \\ i &\in [-1, 1] \quad j = -1 \end{aligned}$$

1.2 同异反态势排序

根据联系数表达式(1)中  $a, b, c$  的大小关系而进行的一种系统状态排序称为同异反态势排序, 如果对每一个排序用  $[0.1 \ 1]$  之间的相应实数表示, 则每一个数值可以称为态势度。基于联系数的同异反态势排序的态势度, 描述被研究对象在系统中所处的态势, 并反映系统各种态势之间的强弱程度。

2 评价指标综合权重的确定

权重是指指标本身属性的客观反映, 其大小反映了综合评判中各参评因素的相对重要程度, 其取值是否合理得当将直接影响到评价结果的好坏。因此, 如何求得权重并使得权重大小偏差达到最小等问题就成为研究和关注的目标, 基于粗糙集确定客观权重, 并运用博弈论<sup>[8]</sup>融合主客观权重就是其中较为有效的一种方法。

2.1 利用粗糙集重要性确定权重

粗糙集<sup>[9,10]</sup>(Rough Set Theory)是波兰·华沙理工大学教授 Z·Pawlak 等人于 1982 年提出的一种处理不精确、不一致和不完整等各种不完备信息的方法。最大的特点是:不需要提供求解问题时所需处理的数据集合之外的任何先验知识, 仅对实测数据本身进行分类处理即可发掘隐含知识, 揭示潜在的数据内部律。

确定权重的具体方法和操作步骤:

① 收集大量历史评价样本构成灌区数据信息系统。② 依据相应公式, 计算数据信息系统的条件属性  $C = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  中  $x_i$  的重要  $Sigx_i(x_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )。③ 将步骤 ② 中的属性重要度  $Sigx_i(x_i)$  进行归一化处理, 可求得每个属性  $x_i$  的客观权重, 记为  $u_1$ 。④ 根据专家经验知识给出的条件属性集中每个属性的主观权重记为  $u_2$ 。

2.2 综合权重的确定

两种方法得到的权重有一定差异, 因而有必要将两者进行融合。利用博弈论法将粗糙集重要度确定的权重  $u_1$  和专家评分法确定的权重  $u_2$  相结合, 即可得到指标的综合权重, 对于基本权重集  $\{u_1, u_2\}$ , 权向量的集化模型具体写为

$$\begin{bmatrix} u_1 u_1^T & u_1 u_2^T \\ u_2 u_1^T & u_2 u_2^T \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 u_1^T \\ u_2 u_2^T \end{pmatrix} \quad (3)$$

计算求得  $(\alpha_1, \alpha_2)$ , 然后再对其归一化处理。即

$$\alpha_k^* = \alpha_k / \sum_{k=1}^2 \alpha_k \quad (k = 1, 2) \quad (4)$$

$$\text{综合权重为: } u = \sum_{k=1}^2 \alpha_k^* \cdot u_k^T \quad (5)$$

3 集对分析综合评估模型

灌区节水改造综合评估的指标中主要包括效益型指标和成本型指标。结合相关研究将灌区节水改造项目评估标准分为“优、良、中、差”四个等级, 分别进行综合评估。

效益型指标相对于一级的联系度计算式为:

$$\begin{aligned} u_1(v_1, x_k) &= a + b_1 i^+ + c_1 j^+ + b_2 i^- + c_2 j^- \\ &= \begin{cases} 1 & x_k \in [v_3, v_4) \\ \frac{x_k - v_2}{v_3 - v_2} + \frac{v_3 - x_k}{v_3 - v_2} i^- & x_k \in [v_2, v_3) \\ \frac{x_k - v_1}{v_2 - v_1} i^- + \frac{v_2 - x_k}{v_2 - v_1} j^- & x_k \in [v_1, v_2) \\ j^- & x_k \in (0, v_1) \end{cases} \quad (6) \end{aligned}$$

成本型指标相对于一级的联系度计算式为:

$$\begin{aligned} u_1(v_1, x_k) &= a + b_1 i^+ + c_1 j^+ + b_2 i^- + c_2 j^- \\ &= \begin{cases} 1 & x_k \in (0, v_1) \\ \frac{v_2 - x_k}{v_2 - v_1} + \frac{x_k - v_1}{v_2 - v_1} i^- & x_k \in [v_1, v_2) \\ \frac{v_2 - x_k}{v_2 - v_3} i^- + \frac{x_k - v_3}{v_2 - v_3} j^- & x_k \in [v_2, v_3) \\ j^- & x_k \in [v_3, +\infty) \end{cases} \quad (7) \end{aligned}$$

式中:  $v_1, v_2, v_3, v_4$  分别为评价指标的门限值, 将作为集对分析联系度表达式中的同一度、差异度、对立度的取值依据;  $x_k$  为各个评估指标的实际值; 由计算结果, 根据同一度、差异不确定性和对立度的大小可以对各个待评价指标的好坏进行评价和归类, 根据计算结果, 分别取其平均值, 其具体的计算公式如下:

$$\bar{u}_1 = \sum_{i=1}^N a_i \omega_i + \sum_{i=1}^N b_i^+ \omega_i i^+ + \sum_{i=1}^N b_i^- \omega_i i^- + \sum_{i=1}^N c_i^+ \omega_i j^+ + \sum_{i=1}^N c_i^- \omega_i j^- \quad (8)$$

同理, 可以得到相对于二级、三级和四级的加权平均联系度公式和参数。并且可以根据联系系数的大小对确定评估等级。

4 实例研究

以山西汾河灌区运行状况评估为例, 运用改进

集对分析法对该灌区运行状况进行综合评价。根据灌区运行状况评价指标体系的设计原则,结合该灌区自身特点,从供水执行情况、财务状况、生产效率、管理水平、生态环境等方面,选取以下 9 个评价指标进行分析:单位控制面积产值  $A_1$ (元/hm<sup>2</sup>);灌溉水利用系数  $A_2$ (%);单位灌溉用水量产值  $A_3$ (元/m<sup>3</sup>);(WUA)单位员工管理灌溉面积  $A_4$ ;生态用水量  $A_5$

(m<sup>3</sup>);地下水环境改善度  $A_6$ (%);灌区收入与支出比  $A_7$ (%);水费收缴到位程度  $A_8$ (%);单位控制面积供水量  $A_9$ (m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)。

根据对汾河灌区的收集的基本资料,结合汾河灌区的实际,划分评价标准。设定优、良、中、差四个等级为评定等级。对 2004 年灌区运行状况进行综合评价,等级划分标准和特征指标值如表 1 所示。

表 1 灌区评价等级划分标准及汾河灌区评价指标值

Table 1 Indexes for defining different condition of irrigation district and evaluation indexes' values of Fenhe irrigation district

指标 Indicator	优 Excellent	良 Good	中 Fair	差 Poor	2004 评价指标值 2004 Evaluation indicators' value
$A_1$	3000 ~ 4000	2000 ~ 3000	1000 ~ 2000	0 ~ 1000	2103
$A_2$	0.8 ~ 1	0.5 ~ 0.8	0.4 ~ 0.5	0 ~ 0.3	0.43
$A_3$	4 ~ 5	3 ~ 4	2 ~ 3	0 ~ 2	3.83
$A_4$	400 ~ 500	300 ~ 400	200 ~ 300	0 ~ 200	395
$A_5$	700 ~ 800	550 ~ 700	400 ~ 550	0 ~ 400	485
$A_6$	80 ~ 100	70 ~ 80	50 ~ 70	0 ~ 50	75.6
$A_7$	120 ~ 150	90 ~ 120	60 ~ 90	0 ~ 60	83.4
$A_8$	100 ~ 120	80 ~ 100	60 ~ 80	0 ~ 60	78.2
$A_9$	≥ 3000	2000 ~ 3000	1500 ~ 2000	≤ 1500	1987

(1) 确定指标综合权重。应用博弈论方法来确定综合权重,采用 1998 ~ 2005 年样本资料,用粗糙

集属性重要度确定的权重  $u_1$  和专家评分法确定的权重  $u_2$  分别列于表 2。博弈论确定的综合权重为  $u$ 。

表 2 用粗糙集权重法和专家评分法确定的各指标的权重

Table 2 Indexes weight identified by conjunctive method of rough set theory and the expert various targets weight

权重 Weight	单位控制面积产值 (元/hm <sup>2</sup> ) The unit controls the area output value	灌溉水利用系数 (%) Irrigation water utilization factor	单位灌溉用水量产值 (元/m <sup>3</sup> ) The unit irrigates the water consumption output value	WUA 管理灌溉面积 (hm <sup>2</sup> ) WUA management irrigated area	生态用水量 (m <sup>3</sup> ) Ecology water consumption	地下水环境改善度 (%) Groundwater environment improvement	灌区收入与支出比 (%) Irrigation area income and disbursement ratio	水费收缴到位程度 (%) The water fee captures the arriving degree	单位控制面积供水量 (m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> ) The unit controls the area volume of diversion
$u_1$	0.1035	0.1136	0.1219	0.0935	0.0941	0.0904	0.1164	0.1212	0.1285
$u_2$	0.0903	0.1021	0.1317	0.1024	0.1091	0.0925	0.1264	0.1106	0.0985
$u$	0.0947	0.1125	0.1227	0.0982	0.0950	0.0921	0.1179	0.1202	0.1025

(2) 运用集对分析法对灌区运行状况进行综合评价。首先对所选取评估指标值进行归一化处理,然后结合步骤(1)计算出指标的权重,运用集对分析法建立评估模型,并计算出评价结果,见表 3。

量措施、减员增效促进程度等方面有待于提高。

表 3 评价结果

Table 3 Evaluation results

加权联系度 Weighted connection degree	$a$	$b^+$	$b^-$	$c^+$	$c^-$
$u_{\text{优}}$ Excellent	0.5061	0.0000	0.2617	0.0000	0.2118
$u_{\text{良}}$ Good	0.6088	0.2011	0.2038	0.0000	0.0000
$u_{\text{中}}$ Fair	0.3926	0.3087	0.0000	0.2402	0.0000
$u_{\text{差}}$ Poor	0.2056	0.1763	0.0000	0.5525	0.0000

由运用改进集对分析评价方法所得评价结果可知,级别变量特征值均一致靠近等级良,说明汾河灌区在 2004 年度的运行状况是良好的。汾河灌区优、良、中、差四级评价加权平均联系度中良级联系度为 0.6088,最大,因此,2004 年灌区的运行状况评估结果为良。同时,可以看出在有些方面还有待改善,如灌区现代化管理水平、地下水的合理开采、水费的计

## 5 结论与讨论

选取合适的评价方法对灌区运行状况评价至关重要,本文运用改进集对分析评价法对山西汾河灌区运行状况进行了评价,根据其评价结果,可以得到以下结论:

1) 由于权重的确定对灌区综合评价的结果有显著影响,本文运用博弈论方法将主观权重和客观权重融合,使求得的综合权重与各单一权重向量的偏差最小,克服了单纯依赖专家意见或样本数据来确定指标权重的不足。

2) 灌区综合评价是一个多目标、多属性的评价过程。构建综合评价模型需综合考虑灌区评价多属性、多因素、多目标的特点,解决了单个评价指标无法全面反映灌区综合水平的问题。应用集对分析法,可以使等级划分更细密,采用方法——合成联系度时,在一定程度上可以消除因各评价指标的相关性对评价结果的影响。并且,更好地诊断出了灌区存在不足之处。本文运用集对分析法对汾河灌区2004年运行状况进行了综合评价,并得出评价等级结果为良,其结果与灌区的实际情况相符合。此方法计算过程简单易懂,评价结果直观明了。因此该方法可以为灌区运行状况的改进提供科学依据。

3) 目前尚未形成一套权威的,标准的适用于所

有类型的灌区运行状况综合评价标准,该研究拟定的某个评价标准难免会存在不适用于其它类型灌区问题,因此,如何确立一套权威的灌区运行状况综合评价标准有待于进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 韩振中,闫冠宇,刘云波,等.大型灌区续建配套与节水改造评价指标体系的研究[J].中国农村水利水电,2002,(7):17—21.
- [2] Malano H, Burton M. Guidelines for Benchmarking Performance in The Irrigation and Drainage Sector[R]. Rome, 2001:102—123.
- [3] Charles M Burt, Robert E Walker, Stuart W styles. Irrigation System Evaluation Manual[R]. California Dept of Water Resource and Dept of Agriculture, 1999:201—213.
- [4] 雷雁斌,齐青青,费良军.大型灌区节水改造项目评价方法研究[J].沈阳农业大学学报(自然科学版),2008,39(2):23—28.
- [5] 朱秀珍,李远华,崔远来,等.运用灰色关联法进行灌区运行状况综合评价[J].灌溉排水学报,2004,23(6):44—49.
- [6] 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,2000:3—90.
- [7] 贺瑞敏,张建云,王国庆.基于集对分析的广义水环境承载力评价[J].水科学进展,2007,18(5):730—735.
- [8] 陈家良.基于博弈论的组合赋权评价方法研究[J].福建电脑,2003,(3):15—16.
- [9] 张文修,吴伟志.粗糙集理论与方法[M].北京:科学出版社,2001:1—20.
- [10] 张文修,吴伟志.粗糙集理论介绍和研究综述[J].模糊系统与数学,2000,14(4):1—12.

## Study on evaluation of current condition of large-scale irrigation areas based on the set pair analysis

YOU Li<sup>1</sup>, FEI Liang-jun<sup>1</sup>, WU Jin-hua<sup>1,2</sup>

(1. Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE at XAUT, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. Shanxi Provincial Department of Water Conservancy, Taiyuan, Shanxi 030002, China)

**Abstract:** The use of set pair analysis in determining the establishment of an integrated assessment model index weight, at first, the rough set theory in the attribute importance to determine methods and expert ratings of the Combination, and then use game theory methods to determine the right set of weights and integration, to be Irrigation comprehensive evaluation index weights. In this study, set to the analysis of the Fenhe River in Shanxi Province Irrigation District in 2004 to run a more accurate status of a comprehensive evaluation rating of good; evaluation results show that the set pair analysis method has a higher resolution and greater practicality, with a do not lose the data center information, evaluation results with the actual situation is even more consistent with the advantages of a comprehensive evaluation of operational status for the Irrigation District provides a simple and appropriate evaluation methods.

**Keywords:** large-scale irrigation district; set pair analysis; rough set theory; comprehensive weight; comprehensive evaluation