

# 水资源系统评价新方法——集对评价法

王文圣<sup>\*</sup>, 金菊良, 丁晶, 李跃清

四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065;  
中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610072;  
合肥工业大学土木与水利工程学院, 合肥 230009

\* E-mail: wangws70@sina.com

收稿日期: 2008-07-01; 接受日期: 2008-12-28

国家自然科学基金资助项目(批准号: 50739002, 50779042, 50679047)

**摘要** 基于集对原理提出了水资源系统评价新方法——集对评价法. 系统地给出了集对评价法的基本思路和步骤. 该方法考虑了等级标准边界的模糊性, 避免了直接确定联系度中的差异不确定(分量)系数. 该方法概念清晰, 结构简单, 计算简洁, 易操作. 以水资源可持续利用协调能力评价和区域地下水资源承载力评价为例, 探讨了集对评价法在水资源系统评价中的应用. 研究表明, 集对评价法的评价结果可靠, 是行之有效的办法.

**关键词**  
水资源  
系统评价  
集对分析  
联系度

受区域自然地理、社会经济和科学技术等众多因子的影响, 区域水资源系统评价是一个复杂的动态系统<sup>[1]</sup>. 区域水资源系统评价必须解决两个关键问题, 一是合理确定水资源评价指标体系及其评价等级标准, 二是根据各种指标等级标准和实际的相应样本指标值间的关系建立评价方法或模型. 关于水资源评价方法, 目前主要有主成分分析法、灰色分析法<sup>[2]</sup>、模糊分析法<sup>[3]</sup>、投影寻踪法<sup>[4]</sup>、物元分析法<sup>[5]</sup>等. 这些方法在实际工作中得到了一定程度的应用, 但都存在共有的缺陷, 即方法本身比较复杂, 需要很多的数学知识, 而且实施困难, 应用不便. 我国学者赵克勤<sup>[6]</sup>基于对立统一观点提出了集对分析法(Set Pair Analysis, SPA), 该法一经面世, 便在数学、物理、信息管理、经济、资源与环境等众多领域得到了广泛的应用<sup>[6]</sup>. 通过我们研究发现, SPA 是一种新的不确定性分析途径, 能从整体和局部上剖析研究系统内在的关系. 基于 SPA 的优势, 近几年作者等将 SPA 引入

到水文水资源领域并开展了系统的应用研究<sup>[7]</sup>, 其中 SPA 在水文水资源系统评价中取得了可喜进展<sup>[7~11]</sup>. 但就 SPA 评价方法而言, 尚未形成系统的体系和构架, 还没充分显示出 SPA 的简单性和有效性. 本文试图建立一种简单的、有效的水资源系统评价方法——集对评价法并将之应用于水资源系统评价中.

## 1 集对分析原理

SPA 的核心思想是先对不确定性系统中的两个有关联的集合构造集对, 再对集对的特性做同一性、差异性、对立性分析, 然后建立集对的同异反联系度. SPA 的基础是集对, 关键是联系度.

设有联系的集合  $A$  和  $B$ .  $A$  有  $n$  项表征其特性, 即  $A=(a_1, a_2, \dots, a_n)$ ,  $B$  亦有  $n$  项表征其特性, 即  $B=(b_1, b_2, \dots, b_n)$ .  $A$  和  $B$  构成集对  $H(A, B)$ . 若要探讨  $H(A, B)$  的关系并判断其关系的优劣程度, 可计算  $H(A, B)$  的联系度, 即

**引用格式:** 王文圣, 金菊良, 丁晶, 等. 水资源系统评价新方法——集对评价法. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(9): 1529—1534  
Wang W S, Jin J L, Ding J, et al. A new approach to water resources system assessment set pair analysis method. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(10): 3017—3023, doi: 10.1007/s11431-009-0099-z

$$\mu_{A\sim B} = \frac{s}{n} + \frac{f}{n}i + \frac{p}{n}j, \quad (1)$$

其中  $s$  为同一性的个数;  $f$  为差异性的个数;  $p$  为对立性的个数.  $i$  为差异不确定系数, 在  $(-1, 1)$  区间视不同情况取值, 有时仅起差异标记作用;  $j$  为对立系数, 且  $j=-1$ , 有时起对立标记作用. 记  $a=s/n$ ,  $b=f/n$ ,  $c=p/n$ . 称  $a, b, c$  为某特性下的同一度、差异度和对立度, 则 (1) 式可写成

$$\mu_{A\sim B} = a + bi + cj, \quad (2)$$

其中  $a+b+c=1$ .

(1) 和 (2) 式就是常用的联系度, 即 3 元联系度. 将 (2) 式中的  $bi$  进一步拓展为  $bi=b_1i_1+b_2i_2+\dots+b_ki_k$ , 可以得到多元联系度, 如  $k=3$  时, 可得 5 元联系度表达式

$$\mu_{A\sim B} = a + b_1i_1 + b_2i_2 + b_3i_3 + cj, \quad (3)$$

其中  $a+b_1+b_2+b_3+c=1$ ;  $b_1, b_2, b_3$  称为差异度分量, 即差异度有不同级别, 如轻度差异、中度差异、重度差异等;  $i_1, i_2, i_3$  称为差异不确定分量系数.

从 (2) 和 (3) 式可以看出,  $\mu_{A\sim B}$  的表达式简单, 但却反映了  $A$  和  $B$  关系的整体结构, 同时  $a, b$  (或  $b_1, b_2, b_3$ ),  $c$  又反映了  $A$  和  $B$  关系的内部细致结构. 因此, 联系度突破了以相关系数、隶属度和灰色关联度单一指标表征关系的传统框框, 具有独特的优势. 这种优势至少可归纳如下几点: 清晰地显示了关系结构; 形象地定量揭示了复杂关系中的三种或多种秉性; 动态地给出了综合关系值 (按要求取不同的标准或者选取适当的  $i$  值或  $i_1, i_2, i_3, \dots$  值).

通过对联系度  $\mu_{A\sim B}$  的分析, 从而可实现水文水资源系统分析计算、评价、预测之目的. 集对在水文水资源学中大量存在, 例如降雨与径流、蓄水与泄水、气温和蒸发、输入与输出、丰和枯等等. 这为 SPA 在水文水资源中的应用研究创造了先决条件.

## 2 集对评价方法

水资源评价的实质是比较两个对象在特性上的相似性程度, 如果相似则可归为一类, 否则纳入另一类. 如参证流域的选择, 就是选择在流域特性、水文气象条件等方面与设计流域相似的流域作为参证流域. 又如水质评价, 就是根据监测样本与水质标准的相似性进行分类.

从系统性和代表性角度选择水资源系统评价指

标体系并确定等级评价标准. 将评价样本某指标值  $x_l (l=1, 2, \dots, m; m$  为评价指标数) 看成一个集合  $A_l$ , 把相应指标的评价标准看成另一个集合  $B_k (k=1, 2, \dots, K; K$  为评价等级数), 则  $A_l$  与  $B_k$  可构成一个集对  $H(A_l, B_k)$ . 根据 SPA 原理, 可用  $K$  元联系度  $\mu_l$  描述集对  $H(A_l, B_k)$  的关系, 即

$$\mu_l = \mu_{A_l \sim B_k} = a_l + b_{l,1}i_1 + b_{l,2}i_2 + \dots + b_{l,K-2}i_{K-2} + c_lj, \quad (4)$$

其中  $a_l$  为指标值  $x_l$  与该指标第  $k$  级标准的同一度 (等级相同),  $b_{l,1}$  为指标值  $x_l$  与该指标第  $k$  级标准相差 1 级的差异度,  $b_{l,2}$  为指标值  $x_l$  与该指标第  $k$  级标准相差 2 级的差异度,  $a_{l,K-2}$  为指标值  $x_l$  与该指标第  $k$  级标准相差  $K-2$  级的差异度,  $c_l$  为指标值  $x_l$  与该指标第  $k$  级标准的对立度 (相差  $K-1$  级).

为了评价方便, 可将  $B_k$  特定为某指标 1 级评价标准构成的集合. 则 (4) 式中的各参数意义可理解为:  $a_l$  为  $x_l$  隶属于 1 级标准的可能程度,  $b_{l,1}$  为  $x_l$  隶属于 2 级标准的可能程度,  $b_{l,2}$  为  $x_l$  隶属于 3 级标准的可能程度,  $b_{l,K-2}$  为  $x_l$  隶属于  $K-1$  级标准的可能程度,  $c_l$  为  $x_l$  隶属于  $K$  级标准的可能程度.

设评价样本为集合  $A$ , 1 级评价标准为集合  $B$ , 则集对  $H(A, B)$  的  $K$  元联系度  $\mu$  可定义为

$$\begin{aligned} \mu = \mu_{A\sim B} &= \sum_{l=1}^m w_l \mu_l \\ &= \sum_{l=1}^m w_l a_l + \sum_{l=1}^m w_l b_{l,1} i_1 + \sum_{l=1}^m w_l b_{l,2} i_2 + \dots \\ &\quad + \sum_{l=1}^m w_l b_{l,K-2} i_{K-2} + \sum_{l=1}^m w_l c_l j, \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $w_l$  为指标  $l$  的权重. 一个评价系统中不同指标的作用是不同的, 有的作用显著一些, 有的作用弱一些, 因此各指标对  $\mu$  的贡献不同, 可分别赋予不同的权重.  $w_l$  可用主观赋权法 (如层次分析法)、客观赋权法 (如投影寻踪法) 或主客观组合赋权法确定.

采用置信度准则<sup>[12]</sup>

$$h_k = (f_1 + f_2 + \dots + f_k) > \lambda, k = 1, 2, \dots, K, \quad (6)$$

可判断样本所属的评价等级, 即样本属于  $h_k$  对应的  $k$  级.

其中  $f_1 = \sum_{l=1}^m w_l a_l$ ,  $f_2 = \sum_{l=1}^m w_l b_{l,1}$ ,  $\dots$ ,  $f_{K-1} = \sum_{l=1}^m w_l b_{l,K-2}$ ,

$f_K = \sum_{l=1}^m w_l c_l$ ;  $\lambda$  为置信度, 一般在  $[0.50, 0.70]$  内取值,

$\lambda$  越大则评价结果越倾向于保守、稳妥<sup>[12]</sup>.

这就是本文提出的集对评价法的基本原理. 评价时避免了差异不确定系数( $i_1, i_2, \dots, i_{K-2}$ )的取值问题, 大大降低了问题的复杂性.

对于  $K$  级水资源系统评价一般有两种情况: 一种情况是有  $K$  个门限值  $s_1, s_2, \dots, s_K$ , 各门限值为一个等级的聚类中心; 另一种情况是有  $K-1$  个门限值  $s_1, s_2, \dots, s_{K-1}$ , 各门限值区间内对应一个等级. 如表 1 所示. 水资源评价一般多为 3 类或 5 类, 如径流分为丰、中、枯或特丰、丰、中、枯、特枯; 水资源安全分为安全、临界安全、不安全或安全、较安全、临界安全、较不安全、不安全; 洪水分为大、中、小或特大、大、中、小、特小; 等等. 也就是说, 一般  $K$  取 3~5 较常见.

表 1 评价指标等级标准示意

等级标准值(情况 1)					等级标准值(情况 2)				
1	2	...	$K-1$	$K$	1	2	...	$K-1$	$K$
$s_1$	$s_2$	...	$s_{K-1}$	$s_K$	$< s_1$	$s_1 \sim s_2$	...	$s_{K-2} \sim s_{K-1}$	$> s_{K-1}$

在进行水资源系统评价时, 关键在于确定(4)式中的  $\mu_l$ . 由于门限值的边界具有模糊性, 因此借助模糊分析法, 提出了两种情况下联系度  $\mu_l$  计算的新思路.

### 2.1 情况 1

对于越小越优指标, 某样本值  $x_l$  与该指标 1 级评价标准的联系度  $\mu_l$  为

$$\mu_l = \begin{cases} 1+0i_1+0i_2+\dots+0i_{K-2}+0j, & x_l \leq s_1, \\ \frac{s_2-x_l}{s_2-s_1} + \frac{x_l-s_1}{s_2-s_1} i_1+0i_2+\dots+0i_{K-2}+0j, & s_1 < x_l \leq s_2, \\ 0 + \frac{s_3-x_l}{s_3-s_2} i_1 + \frac{x_l-s_2}{s_3-s_2} i_2 + \dots + 0i_{K-2} + 0j, & s_2 < x_l \leq s_3, \\ \dots \\ 0+0i_1+0i_2+\dots+\frac{s_K-x_l}{s_K-s_{K-1}} i_{K-2} + \frac{x_l-s_{K-1}}{s_K-s_{K-1}} j, & s_{K-1} < x_l \leq s_K, \\ 0+0i_1+0i_2+\dots+0i_{K-2}+1j, & x_l > s_K, \end{cases} \quad (7)$$

其中  $s_1, s_2, \dots, s_{K-1}, s_K$ . 当  $K=3$  时, (7)式变为

$$\mu_l = \begin{cases} 1+0i+0j, & x_l \leq s_1, \\ \frac{s_2-x_l}{s_2-s_1} + \frac{x_l-s_1}{s_2-s_1} i+0j, & s_1 < x_l \leq s_2, \\ 0 + \frac{s_3-x_l}{s_3-s_2} i + \frac{x_l-s_2}{s_3-s_2} j, & s_2 < x_l \leq s_3, \\ 0+0i+1j, & x_l > s_3. \end{cases} \quad (8)$$

对于越大越优指标, 某样本值  $x_l$  与该指标 1 级评价标准的联系度  $\mu_l$  为

$$\mu_l = \begin{cases} 1+0i_1+0i_2+\dots+0i_{K-2}+0j, & x_l \geq s_1, \\ \frac{x_l-s_2}{s_1-s_2} + \frac{s_1-x_l}{s_1-s_2} i_1+0i_2+\dots+0i_{K-2}+0j, & s_2 \leq x_l < s_1, \\ 0 + \frac{x_l-s_3}{s_2-s_3} i_1 + \frac{s_2-x_l}{s_2-s_3} i_2 + \dots + 0i_{K-2} + 0j, & s_3 \leq x_l < s_2, \\ \dots \\ 0+0i_1+0i_2+\dots+\frac{x_l-s_K}{s_{K-1}-s_K} i_{K-2} + \frac{s_{K-1}-x_l}{s_{K-1}-s_K} j, & s_K \leq x_l < s_{K-1}, \\ 0+0i_1+0i_2+\dots+0i_{K-2}+1j, & x_l < s_K, \end{cases} \quad (9)$$

其中  $s_1, s_2, \dots, s_{K-1}, s_K$ . 当  $K=3$  时, (9)式变为

$$\mu_l = \begin{cases} 1+0i+0j, & x_l \geq s_1, \\ \frac{x_l-s_2}{s_1-s_2} + \frac{s_1-x_l}{s_1-s_2} i+0j, & s_2 \leq x_l < s_1, \\ 0 + \frac{x_l-s_3}{s_2-s_3} i + \frac{s_2-x_l}{s_2-s_3} j, & s_3 \leq x_l < s_2, \\ 0+0i+1j, & x_l < s_3. \end{cases} \quad (10)$$

(7)和(9)式中的联系度  $\mu_l$  可以用图 1(以  $K=5$  为例)来描述.

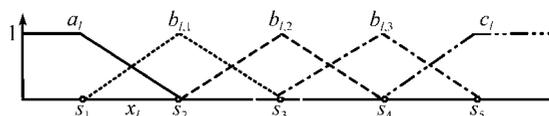


图 1 情况 1 下联系度  $\mu_l$  确定示意图

### 2.2 情况 2

对于越小越优指标, 某样本值  $x_l$  与该指标 1 级评价标准的联系度  $\mu_l$  为

$$\mu_l = \begin{cases} 1+0i_1+0i_2+\dots+0i_{K-2}+0j, & x_l \geq s_1, \\ \frac{s_1+s_2-2x_l}{s_2-s_1} + \frac{2x_l-2s_1}{s_2-s_1}i_1+0i_2+\dots+0i_{K-2}+0j, & s_1 < x_l < \frac{s_1+s_2}{2}, \\ 0 + \frac{s_2+s_3-2x_l}{s_3-s_1}i_1 + \frac{2x_l-s_1-s_2}{s_3-s_1}i_2+\dots+0i_{K-2}+0j, & \frac{s_1+s_2}{2} < x_l < \frac{s_2+s_3}{2}, \\ \dots \\ 0+0i_1+\dots+\frac{2s_{K-1}-2x_l}{s_{K-1}-s_{K-2}}i_{K-2}+\frac{2x_l-s_{K-2}-s_{K-1}}{s_{K-1}-s_{K-2}}j, & \frac{s_{K-2}+s_{K-1}}{2} < x_l < s_{K-1}, \\ 0+0i_1+0i_2+\dots+0i_{K-2}+1j, & x_l > s_{K-1}, \end{cases} \quad (11)$$

其中  $s_1, s_2, \dots, s_{K-1}, s_K$ . 当  $K=3$  时, (11)式变为

$$\mu_l = \begin{cases} 1+0i+0j, & x_l \geq s_1, \\ \frac{s_1+s_2-2x_l}{s_2-s_1} + \frac{2x_l-2s_1}{s_2-s_1}i+0j, & s_1 < x_l < \frac{s_1+s_2}{2}, \\ 0 + \frac{2s_2-2x_l}{s_2-s_1}i + \frac{2x_l-s_1-s_2}{s_2-s_1}j, & \frac{s_1+s_2}{2} < x_l < s_2, \\ 0+0i+1j, & x_l > s_2. \end{cases} \quad (12)$$

对于越大越优指标, 某样本值  $x_l$  与该指标 1 级评价标准的联系度  $\mu_l$  为

$$\mu_l = \begin{cases} 1+0i_1+0i_2+\dots+0i_{K-2}+0j, & x_l \geq s_1, \\ \frac{2x_l-s_1-s_2}{s_1-s_2} + \frac{2s_1-2x_l}{s_1-s_2}i_1+0i_2+\dots+0i_{K-2}+0j, & s_1 < x_l < \frac{s_1+s_2}{2}, \\ 0 + \frac{2x_l-s_2-s_3}{s_1-s_3}i_1 + \frac{s_1+s_2-2x_l}{s_1-s_3}i_2+\dots+0i_{K-2}+0j, & \frac{s_1+s_2}{2} < x_l < \frac{s_2+s_3}{2}, \\ \dots \\ 0+0i_1+\dots+\frac{2x_l-2s_{K-1}}{s_{K-2}-s_{K-1}}i_{K-2}+\frac{s_{K-2}+s_{K-1}-2x_l}{s_{K-2}-s_{K-1}}j, & \frac{s_{K-2}+s_{K-1}}{2} < x_l < s_{K-1}, \\ 0+0i_1+0i_2+\dots+0i_{K-2}+1j, & x_l < s_{K-1}, \end{cases} \quad (13)$$

其中  $s_1, s_2, \dots, s_{K-1}, s_K$ . 当  $K=3$  时, (13)式变为

$$\mu_l = \begin{cases} 1+0i+0j, & x_l \geq s_1, \\ \frac{2x_l-s_1-s_2}{s_1-s_2} + \frac{2s_1-2x_l}{s_1-s_2}i+0j, & \frac{s_1+s_2}{2} < x_l < s_1, \\ 0 + \frac{2x_l-2s_2}{s_1-s_2}i + \frac{s_1+s_2-2x_l}{s_1-s_2}j, & s_2 < x_l < \frac{s_1+s_2}{2}, \\ 0+0i+1j, & x_l < s_2. \end{cases} \quad (14)$$

(11)和(13)式中的联系度  $\mu_l$  可以用图 2(以  $K=5$  为例)来描述.

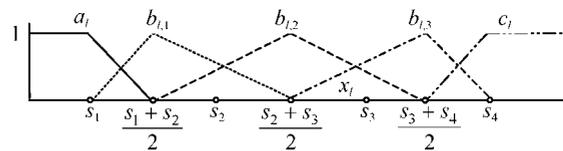


图 2 情况 2 下联系度  $\mu_l$  确定示意图

上面联系度  $\mu_l$  计算充分考虑了等级标准边界的模糊性. 这种模糊性本文采用简单折线形式(如图 1、图 2 所示)描述, 当然也可采用其它函数形式(如半正态函数)描述.

### 3 实例分析

将集对评价法尝试应用于水资源系统评价中, 以探讨其适用性.

#### 3.1 在水资源可持续利用协调能力评价中的应用

东莞市是广东省经济发达地区, 但该市人口稠密, 水资源缺乏. 分析东莞市水资源可持续利用协调能力, 对东莞市社会经济的可持续发展具有重要意义. 建立东莞市水资源可持续利用协调能力评价指标体系<sup>[13]</sup>: 人均水资源量  $x_1/m^3$ , 人均用水量  $x_2/m^3$ , 万元 GDP 用水量  $x_3/m^3$ , 万元工业产值增加值用水量  $x_4/m^3$ , 水资源开发利用率  $x_5/\%$ , 全年水功能区达标率  $x_6/\%$ . 东莞市水资源可持续利用协调能力分为 4 级: 1 级(好)、2 级(一般)、3 级(较差)、4 级(差), 详见表 2. 表 2 中同时给出了现状年(2000 年)和规划水平年(2010 年、2020 年)上述指标值.

此例为情况 1, 根据 2.1 节的公式计算各指标与该指标第 1 级标准的联系度  $\mu_l$ , 见表 3. 由客观法确定指标权重<sup>[13]</sup>分别为 0.220, 0.074, 0.111, 0.449, 0.079, 0.067. 计算各年样本与第 1 级标准的联系度  $\mu$ , 见表 3 最后一列.

表 2 东莞市水资源可持续利用协调能力评价样本指标值及分级标准

评价指标	评价样本			分级标准			
	2000 年	2020 年	2030 年	1 级(好)	2 级(一般)	3 级(较差)	4 级(差)
$x_1$	3814	2278	2369	5000	3000	1500	500
$x_2$	257	213	225	200	400	600	800
$x_3$	337	64	42	60	200	500	1000
$x_4$	280	46	24	10	50	100	200
$x_5$	13.67	18.0	18.3	10	20	30	40
$x_6$	32.35	80	100	100	80	60	40

表 3 联系度计算

样本	2000 年				2020 年				2030 年				
	联系度	$a$	$b_1$	$b_2$	$c$	$a$	$b_1$	$b_2$	$c$	$a$	$b_1$	$b_2$	$c$
$\mu_1$	0.407	0.593	0	0	0	0.519	0.481	0	0	0.579	0.421	0	0
$\mu_2$	0.715	0.285	0	0	0.935	0.065	0	0	0.875	0.125	0	0	0
$\mu_3$	0	0.543	0.457	0	0.971	0.029	0	0	1	0	0	0	0
$\mu_4$	0	0	0	1	0.100	0.900	0	0	0.650	0.350	0	0	0
$\mu_5$	0.633	0.367	0	0	0.200	0.800	0	0	0.17	0.830	0	0	0
$\mu_6$	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0
$\mu$	0.192	0.243	0.051	0.516	0.238	0.657	0.106	0	0.548	0.359	0.093	0	0

由置信度准则( $\lambda=0.5$ ), 可得各年水资源可持续利用协调能力的等级: 2000 年水资源可持续利用协调能力为 4 级(差), 2020 年东莞市水资源可持续利用协调能力为 2 级(一般), 2030 年东莞市水资源可持续利用协调能力为 1 级(好). 其评价结果与模糊评价法<sup>[13]</sup>完全一致. 可见集对评价法是简洁、可行而有效的; 同时也说明, 东莞市水资源可持续利用经过节水水资源保护、水污染防治、增加供水、非工程等一系列措施后, 水资源与经济社会发展之间的协调能力不断提高, 实现了水资源与社会经济协调发展.

### 3.2 在区域地下水资源承载力评价中的应用

以关中平原地下水资源承载力为例说明应用. 将关中平原分为西安、咸阳、宝鸡和渭南 4 个子区域, 选取与该区域地下水资源承载力密切相关的 8 个评价指标组成评价指标体系<sup>[3]</sup>: 1) 地下水耕地灌溉率(地下水资源灌溉面积与耕地面积之比) $x_1/\%$ ; 2) 地下水利用率(现状年地下水供水量与可利用地下水资源总量之比) $x_2/\%$ ; 3) 地下水开发利用程度(现状年地下水供水量与地下水资源总量之比) $x_3/\%$ ; 4) 供水模数(地下水资源年供给量与土地面积之比) $x_4/(10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2)$ ; 5) 需水模数(现状年需水量与土地面积之比) $x_5/(10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2)$ ; 6) 重复利用率(重复用水量与总用水量之比) $x_6/\%$ ; 7) 单位地下水人口负荷(总人口数

与地下水年供给量之比) $x_7/(\text{人}/10^3 \text{ m}^3)$ ; 8) 生态环境需水负荷(生态环境用水量与总水量之比) $x_8/\%$ . 表 4 给出了各区域样本指标值以及地下水资源承载力分级标准. 表 4 中 1 级为较好状况, 表示地下水资源仍有较大的承载力, 供给情况较为乐观; 2 级为一般状况, 表示本区地下水资源开发利用已有相当的规模, 但仍有一定的开发利用潜力, 水资源在一定程度上能满足该区内社会经济发展; 3 级为较差状况, 表示地下水资源承载能力已接近饱和值, 进一步开发利用的潜力较小, 长期下去将发生水资源短缺, 制约社会经济的发展.

此例为情况 2, 根据 2.2 节的公式计算各地区各指标与该指标第 1 级标准的联系度 $\mu_i$ , 见表 5 所示. 由客观法确定指标权重分别为 0.081, 0.240, 0.179, 0.077, 0.077, 0.228, 0.072, 0.046. 计算各地区样本与第 1 级标准的联系度 $\mu$ , 见表 5 最后一行.

由置信度准则( $\lambda=0.5$ ), 可得各区地下水资源承载能力的等级, 结果见表 6.

为对比, 表 6 同时给出投影寻踪法<sup>[4]</sup>和物元法<sup>[5]</sup>的评价结果. 可以看出, 评价等级基本接近, 但本文建议的集对评价法考虑了等级标准边界的模糊性, 而且避免了差异不确定(分量)系数的取值这一困难问题, 同时该法原理清晰, 计算简洁. 因此, 集对评价法的结果是可接受的, 方法是可行而有效的.

表 4 评价样本指标值及分级标准

评价指标	评价区域					分级标准		
	西安	咸阳	宝鸡	渭南	关中平原	1 级	2 级	3 级
$x_1$	53.79	22.09	16.17	20.52	26.15	<15	15~50	>50
$x_2$	92.00	88.24	67.18	79.94	82.53	<50	50~75	>75
$x_3$	89.00	80.76	22.75	62.61	60.12	<30	30~70	>70
$x_4$	13.94	6.32	2.12	5.52	6.12	<10	10~15	>15
$x_5$	17.52	8.37	3.37	6.3	7.61	<10	10~15	>15
$x_6$	44.4	44.1	41.6	29.6	41	<50	50~80	>80
$x_7$	48.9	7.19	8.81	6.98	6.35	<6.7	6.7~10	>10
$x_8$	50	50	50	50	50	<20	20~50	>50

表 5 联系度计算

地区	西安			咸阳			宝鸡			渭南			关中平原		
	$a$	$b$	$c$												
$\mu_1$	0	0	1	0.595	0.405	0	0.933	0.067	0	0.685	0.315	0	0.363	0.637	0
$\mu_2$	0	0	1	0	0	1	0	0.626	0.374	0	0	1	0	0	1
$\mu_3$	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0.370	0.630	0	0.494	0.506
$\mu_4$	0	0.424	0.576	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
$\mu_5$	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
$\mu_6$	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
$\mu_7$	0	0	1	0.703	0.297	0	0	0.721	0.279	0.830	0.170	0	1	0	0
$\mu_8$	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
$\mu$	0.228	0.033	0.739	0.482	0.053	0.465	0.637	0.207	0.156	0.497	0.104	0.399	0.483	0.140	0.377

表 6 不同方法评价结果对比

地区	投影寻踪评价	物元评价	本文评价
西安	3	3	3
咸阳	2	2	2
宝鸡	1	2	1
渭南	2	2	2
关中平原	2	1	2

## 4 结论

本文建立了水资源系统集对评价新方法。本方法考虑了等级标准分界的模糊性, 避免了直接确定联系度中差异不确定(分量)系数。该方法概念清晰, 结构简单, 计算简洁, 易操作, 评价结果可靠。两个水资源系统评价实例分析表明, 集对评价法是可行而有效的, 可在水文水资源评价中广泛应用。

## 参考文献

- 金菊良, 王文圣, 洪天求, 等. 流域水安全智能评价方法的理论基础探讨. 水利学报, 2006, 37(8): 918—925
- 陈意平, 韩金瑛. 年径流系列划分的灰色评估方法. 见: 夏军, 编. 现代水科学不确定性研究与进展. 北京: 中国水利水电出版社, 1994
- 张鑫, 王纪科, 蔡焕杰, 等. 区域地下水资源承载力综合评价研究. 水土保持通报, 2001, 21(3): 24—27
- 王顺久, 杨志峰, 丁晶. 关中平原地下水资源承载力综合评价的投影寻踪方法. 资源科学, 2004, 26(6): 104—110
- 门宝辉, 王志良, 梁川, 等. 物元模型在区域地下水资源承载力综合评价中的应用. 四川大学学报: 工程科学版, 2003, 35(1): 34—37
- 赵克勤. 集对分析及其初步应用. 杭州: 浙江科技出版社, 2000
- 万星, 王文圣, 丁晶. 集对分析在水文水资源中的应用. 水利水电科技进展, 2006, 26(4): 9—11
- 金菊良, 吴开亚, 魏一鸣. 基于联系数的流域水安全评价模型. 水利学报, 2008, 39(4): 401—409
- 王文圣, 向红莲, 丁晶. 集对分析在水文地质单元相似性选择中的应用. 见: 高丹盈, 左其亭, 编. 人水和谐理论与实践. 北京: 中国水利水电出版社, 2006
- 王红芳, 丁晶, 王文圣, 等. 集对分析在频率曲线拟合度定量评价中的应用. 水利水电技术, 2007, 38(4): 1—3, 15
- 王栋, 朱元生生, 赵克勤. 基于集对分析和模糊集合论的水体营养化评价模型应用研究. 水文, 2004, 24(3): 9—13
- 程乾生. 属性识别理论模型及其应用. 北京大学学报(自然科学版), 1997, 33(1): 12—20
- 钱挹清. 应用模糊综合评判法进行东莞市水资源规划宏观经济社会效益评价. 珠江现代建设, 2006, 6: 1—4