

DOI:CNKI:61-1390/S. 20110810. 1100. 022 网络出版时间:2011-08-10 11:00
网络出版地址:http://www. cnki. net/kcms/detail/61. 1390. S. 20110810. 1100. 022. html

模糊集对分析法在水资源安全评价中的应用

王宏伟,张 鑫,邱俊楠

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] **【目的】**建立基于熵权法和模糊集对分析法的水资源安全评价模型,为水资源安全的评价及管理提供决策支持。**【方法】**结合评价区域的实际情况,遵循科学性、系统性、代表性等指标选取原则,构建水资源安全评价指标体系及评价等级标准,并由熵权法确定指标权重,进而利用模糊集对分析法建立水资源安全评价模型。将该模型应用到榆林市水资源安全评价中,并分别与多目标决策分析和模糊聚类评判法的评价结果进行对比分析。**【结果】**应用基于熵权法和模糊集对分析法的水资源安全评价模型对榆林市水资源安全的评价结果表明,榆阳区的水资源处于较安全范围,神木、靖边和定边属于临界安全范围,其余 8 县均属于较不安全范围;榆林市整体处于较不安全状态,水资源安全形势严峻。不同方法评价结果的对比分析表明,利用模糊集对分析法与其他 2 种方法得到的评价结果基本一致。**【结论】**模糊集对分析法的评价结果客观合理,方法简单,易实现计算机编程,对区域水资源安全评价具有一定的应用价值。

[关键词] 熵权法;模糊集对分析法;水资源安全;水资源评价;安全等级
[中图分类号] TV211.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-9387(2011)10-0209-06

Application of fuzzy set pair analysis method in safety evaluation of water resources

WANG Hong-wei,ZHANG Xin,QIU Jun-nan

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** Based on entropy method and fuzzy set pair analysis evaluation method, a safety evaluation model of water resources is established, which provides decision support for the safe evaluation and management of water resources. **【Method】** This paper combines actual situation of evaluation area, follows the indicator select principle which includes scientificity, systematicness, representativeness and so on, constructs a water resources safety evaluation index system and evaluation grading standard, determines index weight by the entropy method, then establishes the safety evaluation model of water resources by fuzzy set pair analysis evaluation method. The model is applied to evaluate safety of water resources in Yulin City, and the evaluation results are compared and analyzed by means of multi-objective decision analysis and fuzzy cluster evaluation respectively. **【Result】** The water resources' safety in Yulin is evaluated by the safety evaluation model based on entropy method and fuzzy set pair analysis evaluation method. The results show that Yuyang's water resources belong to a relatively safe range, Shenmu, Jingbian and Dingbian are critically safe, and the others are less safe. In general, Yulin is not safe and the water resources have a grim

* [收稿日期] 2011-03-18
[基金项目] 国家“863”高技术研究发展计划项目(14110209);国家重大科技支撑项目(2006BAD11B05);西北农林科技大学博士科研启动基金项目(01140504);西北农林科技大学科研专项(08080230)
[作者简介] 王宏伟(1985—),男,山西忻州人,在读硕士,主要从事水资源利用与保护研究。E-mail:welfare2000@139.com
[通信作者] 张 鑫(1968—),男,河南淅川人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事水资源开发利用及合理配置研究。
E-mail:zhxm@163.com

situation. Results of different methods are compared, showing that the evaluation results which are obtained by the fuzzy set pair analysis evaluation method and the other two methods are the same basically.

【Conclusion】 The fuzzy set pair analysis evaluation method is simple and easy to realize computer programming, meanwhile the results are objective and reasonable. So this method has a very good application value in safety evaluation of regional water resources.

Key words: entropy method; fuzzy set pair analysis method; water resources safety; water resources evaluation; safety grading standard

区域水资源安全问题是指区域水量及其时空分布与人的合理需求之间的差异超过相应阈值时所产生的各种现象,是区域水安全问题的一个重要方面^[1]。水资源作为基础性的自然资源、战略性的经济资源、社会经济可持续发展的基本保障条件,其安全问题已成为人们关注的焦点^[2-3]。因此,研究水资源安全问题,对进一步提高水资源的开发利用水平、缓解水资源供需矛盾、建立健全区域水资源保障体系、实现水资源和社会经济的和谐发展有着十分重要的意义,也可以为水资源的安全管理提供决策支持。

目前,集对分析法在水文水资源评价中已经得到了广泛应用。高军省等^[4]将集对分析法应用于水安全评价中;尹志杰等^[5]将集对分析法与层次分析法相结合,对南京市的水资源安全进行了综合评价;金菊良等^[6]用集对分析法建立了基于联系数的流域水安全评价模型,较好地了对巢湖流域进行了评价。虽然集对分析法的应用效果较好,但也有不足之处,如在评价时未充分利用样本信息和考虑等级标准边界的模糊性及评价指标的权重,没有避免差异不确定系数的取值问题^[7],并且评价结果不尽客观合理,未能充分体现水资源安全问题的重要性和紧迫性。为此,本研究结合研究区域的实际情况,广泛研究国内外水资源安全评价文献,在遵循科学性、系统性、代表性等指标选取原则的基础上,构建了水资源安全评价指标体系及评价等级标准,并利用熵权法确定指标权重,进而利用模糊集对分析法建立了水资源安全评价模型,并将其应用于榆林市的水资源安全评价实例中,以期为不同区域的水资源安全评价提供技术支持。

1 模糊集对评价模型^[8-10]

1.1 模糊集对分析法的原理

设评价对象为集合 $D(x_1, x_2, \dots, x_t)$ ($t=1, 2, \dots, T$, T 为指标数), x_t 为指标,评价等级标准为

s_k ($k=1, 2, \dots, K$, K 为等级标准数),第 k 级等级标准用集合 B_k 表示。

D 与 B_k 可构成一个集对 $H(D, B_k)$,将评价对象 D 和等级标准 B_k 进行符号量化处理。对于 k 级评价标准,记为 $B_k=(k, k, \dots, k)$ 。将 D 中各指标值与对应指标的各级标准值进行比较,如落入第 k 级,则该指标属于 k 级,可符号量化为“ k ”,以此类推逐指标比较。将 D 和 B_k 对应的符号元素相对照,统计符号相同的个数记为 S ,相差 1 级的记为 F_1 ,统计符号相差 2 级的记为 F_2 ,相差 $K-2$ 级的记为 F_{K-2} ,相差 $K-1$ 级的记为 P ,由此可得到集对 $H(D, B_k)$ 的 K 元联系度为:

$$\mu_{D \sim B_k} = a + b_1 I_1 + b_2 I_2 + \dots + b_{K-2} I_{K-2} + c J. \quad (1)$$

式中: $a=S/T$,表示 D 与 B_k 的同一度; $b_1=F_1/T$, $b_2=F_2/T$, $b_{K-2}=F_{K-2}/T$, $b_1, b_2, \dots, b_{K-2}$ 称为差异度分量,即差异度有不同级别或层次; $c=P/T$,表示 D 与 B_k 的对立度; $a+b_1+b_2+\dots+b_{K-2}+c=1$; $I_1, I_2, \dots, I_{K-2}$ 称为差异不确定分量系数,可由均匀取值法确定,具体计算公式为 $I_k=1-2k/(K-1)$; $J=-1$,为对立系数。

a 越接近于 1,表明 2 个集合的关系越趋向于同一; c 越接近于 1,表明 2 个集合的关系越趋向于对立。

1.2 指标联系度的计算

设水资源安全评价指标体系为 X ,将评价对象指标值 x_t ($t=1, 2, \dots, T$, T 为指标数)看成一个集合 A_t ,将第 k 级等级标准看成集合 B_k ,则 A_t 与 B_k 可构成一个集对 $H(A_t, B_k)$ 。

为了充分利用信息,提高评价结论的分辨率,避免因各评价指标的作用相差较大而产生差异,在评价时将 B_k 特定为某指标 1 级评价标准构成的集合 B_1 ,由于等级标准边界具有模糊性,则联系度 $\mu_{A_t \sim B_1}$ 可由式(2)、(3)计算得到。

1)对于越小越优型指标(反向指标),当 $K>2$ 时,集对 $H(A_t, B_1)$ 的 K 元联系度为:

$$\mu_{A_t \sim B_1} = \begin{cases} 1+0I_1+0I_2+\cdots+0I_{K-2}+0J, & x_t \leq s_1; \\ \frac{s_1+s_2-2x_t}{s_2-s_1} + \frac{2x_t-2s_1}{s_2-s_1} I_1+0I_2+\cdots+0I_{K-2}+0J, & s_1 < x_t \leq \frac{s_1+s_2}{2}; \\ 0+\frac{s_2+s_3-2x_t}{s_3-s_1} I_1+\frac{2x_t-s_1-s_2}{s_3-s_1} I_2+\cdots+0I_{K-2}+0J, & \frac{s_1+s_2}{2} < x_t \leq \frac{s_2+s_3}{2}; \\ \cdots & \\ 0+0I_1+\cdots+\frac{2s_{K-1}-2x_t}{s_{K-1}-s_{K-2}} I_{K-2}+\frac{2x_t-s_{K-1}-s_{K-2}}{s_{K-1}-s_{K-2}} J, & \frac{s_{K-2}+s_{K-1}}{2} < x_t \leq s_{K-1}; \\ 0+0I_1+0I_2+\cdots+0I_{K-2}+1J, & x_t > s_{K-1}。 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $s_1 \leq s_2 \leq \cdots \leq s_{K-1}$ 。时,集对 $H(A_t, B_1)$ 的 K 元联系度为:

2)对于越大越优型指标(正向指标),当 $K > 2$

$$\mu_{A_t \sim B_1} = \begin{cases} 1+0I_1+0I_2+\cdots+0I_{K-2}+0J, & x_t \geq s_1; \\ \frac{2x_t-s_1-s_2}{s_1-s_2} + \frac{2s_1-2x_t}{s_1-s_2} I_1+0I_2+\cdots+0I_{K-2}+0J, & \frac{s_1+s_2}{2} \leq x_t < s_1; \\ 0+\frac{2x_t-s_2-s_3}{s_1-s_3} I_1+\frac{s_1+s_2-2x_t}{s_1-s_3} I_2+\cdots+0I_{K-2}+0J, & \frac{s_2+s_3}{2} \leq x_t < \frac{s_1+s_2}{2}; \\ \cdots & \\ 0+0I_1+\cdots+\frac{2x_t-2s_{K-1}}{s_{K-2}-s_{K-1}} I_{K-2}+\frac{s_{K-1}+s_{K-2}-2x_t}{s_{K-2}-s_{K-1}} J, & s_{K-1} \leq x_t < \frac{s_{K-2}+s_{K-1}}{2}; \\ 0+0I_1+0I_2+\cdots+0I_{K-2}+1J, & x_t < s_{K-1}。 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $s_1 \geq s_2 \geq \cdots \geq s_{K-1}$ 。

1.3 指标权重的熵权法确定

利用熵权法确定的指标权重具有绝对的客观性,可以避免主观随意性。故本研究采用熵权法确定评价指标体系的指标权重,其步骤如下^[11]:

1)对评价指标进行标准化处理:

对正向指标:

$$y_{tr} = \frac{x_{tr} - x_{\min r}}{x_{\max r} - x_{\min r}}。 \quad (4)$$

对负向指标:

$$y_{tr} = \frac{x_{\max r} - x_{tr}}{x_{\max r} - x_{\min r}}。 \quad (5)$$

式中: x_{tr} 、 y_{tr} 分别为样本 $r(r=1,2,\cdots,R,R$ 为样本总数)中指标 t 的原始值和标准值, $x_{\max r}$ 、 $x_{\min r}$ 为所有评价样本中指标 t 的最大值和最小值。

2)权重 $p(y_{tr})$ 及差异性因子 g_t 的计算公式为:

$$p(y_{tr}) = y_{tr} / \sum_{r=1}^R y_{tr}。 \quad (6)$$

$$g_t = 1 + \frac{1}{\ln R} \sum_{r=1}^R p(y_{tr}) \ln p(y_{tr})。 \quad (7)$$

式中,当 $p(y_{tr})=0$ 时, $p(y_{tr}) \ln p(y_{tr})=0$ 。

(3)熵权 ω_t 按下式计算:

$$\omega_t = g_t / \sum_{t=1}^T g_t。 \quad (8)$$

1.4 样本联系度的计算

设评价样本为集合 A ,所有指标 1 级评价等级标准的集合为 B ,则集对 $H(A, B)$ 的 K 元联系度可

定义为:

$$\mu_{A \sim B} = \sum_{i=1}^T \omega_i \mu_{A_i \sim B_1} = \sum_{i=1}^T \omega_i a_i + \sum_{i=1}^T \omega_i b_{i,1} I_1 + \sum_{i=1}^T \omega_i b_{i,2} I_2 + \cdots + \sum_{i=1}^T \omega_i b_{i,K-2} I_{K-2} + \sum_{i=1}^T \omega_i c_i J。 \quad (9)$$

若令 $f_1 = \sum_{i=1}^T \omega_i a_i$, $f_2 = \sum_{i=1}^T \omega_i b_{i,1}$, $\cdots$, $f_{K-1} = \sum_{i=1}^T \omega_i b_{i,K-2}$, $f_K = \sum_{i=1}^T \omega_i c_i$, 则式(7)可变为:

$$\mu_{A \sim B} = f_1 + f_2 I_1 + f_3 I_2 + \cdots + f_{K-1} I_{K-2} + f_K J。 \quad (10)$$

式中: f_1 为评价样本隶属于 1 级标准的可能性, f_2 为评价样本隶属于 2 级标准的可能性, f_K 为评价样本隶属于 k 级标准的可能性。

1.5 评价等级的确定

由于联系度差异不确定分量系数的确定具有一定主观性,为避免这种主观性,可采用置信度准则^[12]进行判断,即:

$$h_k = (f_1 + f_2 + \cdots + f_k) > \lambda, k=1,2,\cdots,K。 \quad (11)$$

式中: h_k 为属性测度, λ 为置信度。 λ 不宜过大,否则评价结果趋向于保守、稳妥; λ 亦不宜过小,否则结果可靠性变差,风险变大。一般建议 λ 在 $[0.5, 0.7]$ 取值。利用式(11)判断评价样本所属的等级,即样本属于 h_k 对应的 k 级。

2 应用实例

榆林市位于陕西省的最北部,其能源矿产资源

十分丰富,是我国重要的能源化工基地,也是陕西省水资源较为贫乏的地区之一。该市水资源总量为 31.89 亿 m^3 ,可利用总量为 16.02 亿 m^3 ,人均水资源占有量为 893 m^3 ,远低于全国平均水平。2008 年全市需水量为 9.14 亿 m^3 ,供水量为 7.08 亿 m^3 ,缺水率达到 22.5%。全市废水排放量为 0.28 亿 m^3 。随着社会经济的发展,榆林市水资源供需矛盾日益突出,水资源时空分布不均,水污染进一步加剧了水资源短缺的矛盾,水资源安全问题已经成为制约榆林市可持续发展的一大瓶颈,因此对其开展相关研究已经迫在眉睫。本研究以榆林市为例,对其 2008 年的水资源安全进行了评价。

2.1 榆林市水资源安全评价指标体系的构建及评价等级标准和指标权重的确定

建立水资源评价指标体系是进行水资源安全评价的基础。遵循科学性、系统性、代表性等指标选取原则,结合榆林市的实际情况以及资料收集的可行性,在参考水资源安全评价指标体系相关文献^[13-14]

并经实践调查分析和专家咨询后,选取以下 15 个指标,即人均水资源量 x_1 ($\text{m}^3/\text{人}$)、产水模数 x_2 (万 m^3/km^2)、产水系数 x_3 、年径流深 x_4 (mm)、水资源开发利用 率 x_5 (%)、万元工业产值用水量 x_6 ($\text{m}^3/\text{万元}$)、工业用水重复利用率 x_7 (%)、万元农业产值用水量 x_8 ($\text{m}^3/\text{万元}$)、灌溉水综合利用系数 x_9 (%)、灌溉面积占耕地面积比例 x_{10} (%)、人均综合用水量 x_{11} ($\text{m}^3/\text{人}$)、人均有效灌溉面积 x_{12} ($\text{hm}^2/\text{人}$)、森林覆盖率 x_{13} (%)、干旱指数 x_{14} 和人口密度 x_{15} ($\text{人}/\text{km}^2$),由此构成榆林市水资源安全评价指标体系,具体如表 1 所示。

根据各指标的物理含义及其对流域经济、社会、资源与环境可持续发展的作用,按照国内外水资源安全指标标准及临界值的研究成果^[8,15-16]、地方政府颁布的标准和规划目标、河流水系保护要求等,建立了榆林市水资源安全评价等级标准以及由熵权法确定的各指标的权重,均列于表 1。

表 1 榆林市水资源安全评价指标体系、评价等级标准及指标权重

评价指标 Evaluation index	评价等级标准 Evaluation grading standard					指标权重 Index weight
	1 级(安全) Level 1 (safety)	2 级(较安全) Level 2 (little safety)	3 级(临界安全) Level 3 (criticality safety)	4 级(较不安全) Level 4 (less safety)	5 级(不安全) Level 5 (unsafety)	
x_1	[3 000, +∞)	[1 700, 3 000)	[1 000, 1 700)	[500, 1 000)	[0, 500)	0.120
x_2	[30, +∞)	[10, 30)	[5, 10)	[1, 5)	[0, 1)	0.074
x_3	[0.6, +∞)	[0.5, 0.6)	[0.2, 0.5)	[0.1, 0.2)	[0, 0.1)	0.093
x_4	[900, +∞)	[200, 900)	[50, 200)	[10, 50)	[0, 10)	0.042
x_5	[0, 10]	(10, 20]	(20, 30]	(30, 50]	(50, +∞)	0.028
x_6	[0, 10]	(10, 30]	(30, 90]	(90, 200]	(200, +∞)	0.021
x_7	[90, +∞)	[80, 90)	[70, 80)	[50, 70)	[0, 50)	0.103
x_8	[0, 500]	(500, 1 000]	(1 000, 1 500]	(1 500, 2 000]	(2 000, +∞)	0.041
x_9	[0.5, +∞)	[0.4, 0.5)	[0.25, 0.4)	[0.15, 0.25)	[0, 0.15)	0.055
x_{10}	[60, +∞)	[50, 60)	[40, 50)	[30, 40)	[0, 30)	0.116
x_{11}	[0, 300]	(300, 500]	(500, 800]	(800, 1 100]	(1 100, +∞)	0.034
x_{12}	[0.07, +∞)	[0.06, 0.07)	[0.04, 0.06)	[0.03, 0.04)	[0, 0.03)	0.105
x_{13}	[30, +∞)	[20, 30)	[15, 20)	[10, 15)	[0, 10)	0.077
x_{14}	[0, 1]	(1, 1.5]	(1.5, 2]	(2, 4]	(4, +∞)	0.027
x_{15}	[0, 100]	(100, 200]	(200, 350]	(350, 500]	(500, +∞)	0.064

2.2 榆林市水资源的安全评价

以 2008 年为例,在 Matlab 中编程进行计算及评价。将榆林市各县区及全市的评价指标值、等级标准代入式(2)、(3)中,可得到各县区及全市各集对 $H(A_i, B_1)$ 的联系度值,在此基础上由式(6)、(7)、(8)求得各评价指标的权重,根据式(9)、(10)得到各县区及全市集对 $H(A, B)$ 的联系度值,结果如表 2 所示。取置信度 $\lambda=0.5$,根据置信度准则,求得榆林市各区县的水资源安全等级,结果见表 2。

为了检验评价结果的合理性,本研究还分别应用多目标决策分析法和模糊聚类评判法对榆林市的水资源安全进行了评价,结果见表 3。

表 2 表明,榆林市各县区的水资源安全形势不一,安全等级均偏低。榆阳区的水资源安全等级为 2 级,属于较安全范围,占 8.3%;神木县、靖边县和定边县均为 3 级,属于临界安全范围,占 25.0%;其余 8 县均为 4 级,属于较不安全,占 66.7%。就榆林市整体而言,水资源安全等级为 4 级,较不安全,

形势不容乐观。

表 2 榆林市及各区县集对联系度计算结果及水资源安全等级的确定

行政区划 Administrative division	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	安全等级 Safety grade
榆阳区 Yuyang district	0.418	0.089	0.202	0.131	0.161	2
神木县 Shenmu county	0.200	0.146	0.213	0.339	0.103	3
府谷县 Fugu county	0.153	0.053	0.105	0.341	0.348	4
横山县 Hengshan county	0.189	0.044	0.125	0.354	0.289	4
靖边县 Jingbian county	0.342	0.117	0.200	0.298	0.043	3
定边县 Dingbian county	0.174	0.034	0.317	0.246	0.230	3
绥德县 Suide county	0.062	0.130	0.118	0.219	0.472	4
米脂县 Mizhi county	0.106	0.106	0.113	0.203	0.472	4
佳 县 Jia county	0.159	0.093	0.069	0.320	0.360	4
吴堡县 Wubao county	0.152	0.039	0.180	0.158	0.472	4
清涧县 Qingjian county	0.189	0.068	0.169	0.130	0.443	4
子洲县 Zizhou county	0.065	0.122	0.128	0.193	0.492	4
榆林市 Yulin city	0.153	0.093	0.123	0.404	0.226	4

表 3 基于不同方法的榆林市水资源安全评价结果的比较

行政区划 Administrative division	评价方法 Evaluation method		
	模糊集对分析法 Fuzzy set pair analysis method	多目标决策分析法 Multi-objective decision analysis	模糊聚类评判法 Fuzzy clustering judgment
榆阳区 Yuyang district	2	2	2
神木县 Shenmu county	3	3	4
府谷县 Fugu county	4	4	4
横山县 Hengshan county	4	4	4
靖边县 Jingbian county	3	2	3
定边县 Dingbian county	3	3	4
绥德县 Suide county	4	4	4
米脂县 Mizhi county	4	4	4
佳 县 Jia county	4	4	4
吴堡县 Wubao county	4	3	4
清涧县 Qingjian county	4	4	4
子洲县 Zizhou county	4	4	4
榆林市 Yulin city	4	3	4

由表 3 可知,模糊集对分析法与多目标决策分析法对榆林市各县区水资源安全等级的评价结果有 10 个相同(占 76.9%),有 3 个相差 1 级(占 23.1%);与模糊聚类评判法相比较,有 11 个相同(占 84.6%),有 2 个相差 1 级(占 15.4%)。由此可见,模糊集对分析法与其他 2 种方法的评价结果基本接近,表明模糊集对分析法的评价结果可靠合理,方法可行有效。

3 结 论

本研究结合榆林市的实际情况,在遵循指标选取原则的基础上,参照国内外水资源安全评价的研究成果,构建了榆林市水资源安全评价指标体系及评价等级标准,由熵权法确定指标权重,利用模糊集对分析法建立了水资源安全评价模型,并对榆林市的水资源安全进行了评价,进而分别与多目标决策

分析法和模糊聚类评判法的评价结果进行了对比分析。实例研究结果表明:1)榆林市 2008 年的水资源整体安全形势严峻,处于较不安全状态,全市各县区中仅榆阳区的水资源安全状态属于较安全等级,其余各县均在较安全状态以下,需引起有关部门注意并采取措施提高榆林市的水资源安全等级。2)模糊集对分析法的评价结果合理可靠,计算简单,可操作性强,易实现计算机编程。

在进行水资源安全评价时,将模糊集对分析法与熵权法耦合,不仅考虑了等级标准边界的模糊性和各评价指标的不同权重的差异性,而且避免了主观随意性,在同类评价中具有一定的推广应用价值。

[参考文献]

[1] 畅明琦,黄 强.水资源安全理论与方法 [M].北京:中国水利

- 水电出版社,2006.
- Chang M Q, Huang Q. Water security theory and methods [M]. Beijing: China Water Power Press, 2006. (in Chinese)
- [2] 畅明琦, 刘俊萍, 黄 强. 水资源安全 Vague 集多目标评价及预警 [J]. 水力发电学报, 2008, 27(3): 81-100.
- Chang M Q, Liu J P, Huang Q. Multiobjective assessment and early warning of water resources security based on Vague set [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(3): 81-100. (in Chinese)
- [3] 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.
- Han Y P, Ruan B Q. Research on evaluation index system of water safety [J]. Acta Scientiae Rcumstantiae, 2003, 23(2): 267-272. (in Chinese)
- [4] 高军省, 高绣纺, 潘红忠. 基于集对分析理论的水安全评价方法研究 [J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2009, 6(3): 44-47.
- Gao J S, Gao X F, Pan H Z. Research on the assessment method of water security by set pair analysis [J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2009, 6(3): 44-47. (in Chinese)
- [5] 尹志杰, 管玉卉. 南京市水资源安全综合评价方法研究 [J]. 水电能源科学, 2010, 28(6): 16-18.
- Yin Z J, Guan Y H. Research on comprehensive evaluation method of water resources security in Nanjing city [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(6): 16-18. (in Chinese)
- [6] 金菊良, 吴开亚, 魏一鸣. 基于联系数的流域水安全评价模型 [J]. 水利学报, 2008, 39(4): 401-409.
- Jin J L, Wu K Y, Wei Y M. Connection number based assessment model for watershed water security [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 401-409. (in Chinese)
- [7] 王文圣, 金菊良, 丁 晶, 等. 水资源系统评价新方法: 集对评价法 [J]. 中国科学: E 辑, 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 [J]. Science in China: Series E, 2009, 39(9): 1529-1534. (in Chinese)
- [8] 王文圣, 李跃清, 金菊良, 等. 水文水资源集对分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- Wang W S, Li Y Q, Jin J L, et al. Set pair analysis for hydrology and water resources systems [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [9] 卢 敏, 张展羽, 石月珍. 集对分析法在水安全评价中的应用研究 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(5): 505-508.
- Lu M, Zhang Z Y, Shi Y Z. Application of set pair analysis to evaluation of water safety [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences Edition, 2006, 34(5): 505-508. (in Chinese)
- [10] 陈 晶, 王文圣, 陈 媛. 基于集对分析的全国生态环境质量评价研究 [J]. 水电能源科学, 2009, 27(2): 40-43.
- Chen J, Wang W S, Chen Y. Study on nation wide ecological environment level evaluation based on set pair analysis [J]. Water Resources and Power, 2009, 27(2): 40-43. (in Chinese)
- [11] 杨操静. 水安全评价及其在渭河中的应用研究 [D]. 西安: 长安大学, 2007.
- Yang C J. Study on the water security assessment and its application in Wei River [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007. (in Chinese)
- [12] 程乾生. 属性识别理论模型及其应用 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1997, 33(1): 12-20.
- Cheng Q S. Attribute recognition theoretical model with application [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis: Natural Sciences Edition, 1997, 33(1): 12-20. (in Chinese)
- [13] 左东启, 戴树声, 袁汝华, 等. 水资源评价指标体系研究 [J]. 水科学进展, 1996, 7(4): 367-374.
- Zuo D Q, Dai S S, Yuan R H, et al. Study on the water resources assessment indexes system [J]. Advances in Water Science, 1996, 7(4): 367-374. (in Chinese)
- [14] 袁 伟, 楼章华, 田 娟. 富阳市水资源承载能力综合评价 [J]. 水利学报, 2008, 39(1): 103-108.
- Yuan W, Lou Z H, Tian J. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Fuyang City [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(1): 103-108. (in Chinese)
- [15] 吴开亚, 金菊良, 魏一鸣, 等. 基于指标体系的流域水安全诊断评价模型 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 47(4): 105-113.
- Wu K Y, Jin J L, Wei Y M, et al. Diagnosis assessment model of watershed water security based on index system [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni: Natural Sciences Edition, 2008, 47(4): 105-113. (in Chinese)
- [16] 宋松柏. 区域水资源可持续利用指标体系及评价方法研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2003.
- Song S B. Study of indicators system and assessment methods for regional sustainable utilization in relation to water resources [D]. Yangling, Shaanxi: Journal of Northwest A&F University, 2003. (in Chinese)