

基于熵权可拓模型的水资源承载能力评价

陈南祥, 徐 敏

(华北水利水电学院 资源与环境学院, 河南 郑州 450011)

[摘要] **【目的】**探索水资源承载能力评价方法,为水资源的合理开发利用提供依据。**【方法】**鉴于物元可拓的概念,引入改进的可拓方法——最大贴近度法,并用熵值法确定权重系数,避免了权重系数确定过程中的主观性,由此提出了熵权可拓模型。以河南省禹州市为例,利用该模型对禹州市不同频率年的不同规划年份水资源承载力进行评价。**【结果】**利用熵权可拓模型对禹州市水资源承载能力进行评价,得出禹州市不同频率年的不同规划年份水资源承载力距离各等级值的远近,表明该地区水资源开发利用已有相当规模,但仍有一定的开发利用潜力,水资源的供给在一定程度上能满足该区的社会发展。**【结论】**与禹州市社会发展及水资源利用的实际情况相比,该评价结果合理,说明所建立的熵权可拓模型适用于水资源承载力的评价。

[关键词] 水资源承载力;熵权;可拓模型;评价体系

[中图分类号] TV213.9

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2010)06-0205-06

Evaluation of water resources carrying capacity based on entropy-weight and extension model

CHEN Nan-xiang, XU Min

(Resources and Environment College of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou, Henan 450011, China)

Abstract: **【Objective】** An evaluation method of water resources carrying capacity is explored to provide a basis for rational development and utilization of water resources. **【Method】** In view of matter-element extension of the concept, a model is established by the introduction of improved extension method—the greatest close-degree method and entropy method to determine the weight factor with the support of entropy-weight and extension theory. This avoids the weight coefficients determined by subjective issue. And the model can be used to evaluate water resources carrying capacity for different frequencies in different planning years in Yuzhou. **【Result】** Applying entropy-weight and extension model to evaluate water resources carrying capacity in Yuzhou, water resources carrying capacity of annual value of the distance from each grade is obtained for different frequencies in different planning years. The water resources exploitation and utilization of Yuzhou has considerable scale, but there is a potential for exploitation. Water supply demanding can meet the region's social development to a certain extent. **【Conclusion】** Compared with social development and practical situation, the results are reasonable and the model adapts to water resources carrying capacity assessment.

Key words: water resources carrying capacity; entropy-weight; extension model; evaluation system

进入 21 世纪,我国经济、社会迅速发展,工、农业生产需水量急剧增加,水资源短缺已经成为制约

* [收稿日期] 2009-12-04

[基金项目] 国家科技支撑计划项目(2006BAD11B09-2)

[作者简介] 陈南祥(1958—),男,江苏张家港人,教授,博士,主要从事水资源和水文地质研究。

E-mail: chennanxiang@ncwu.edu.cn

城市发展的瓶颈,因此,开展水资源承载力研究具有重要的意义。水资源承载力是指在某一具体历史发展阶段下,以可预见的技术、经济和社会发展水平为依据,以可持续发展为原则,以维护生态环境良性循环发展为条件,在水资源得到合理开发利用的条件下,某地区的水资源(包括数量、质量)持续支持人类社会发展规划(即一定生活质量的人口数量)的最大支撑能力与限度^[1]。研究一个地区的水资源承载力,是为了揭示水资源、区域经济、人口之间的关系,以便实现水资源的合理利用和优化配置,目前对水资源承载力的研究方法很多,主要有综合指标法、模糊综合评价法、主成分分析法、系统动力学法等。高彦春等^[2]、傅湘等^[3]分别采用模糊综合评判和主成分分析法,对陕西关中地区的水资源承载力进行了研究;王顺久等^[4]提出了水资源承载力的“投影寻踪”综合评价法,该方法避免了各评价因素权重确定时人为因素的影响;孙才志等^[5]在灰色系统理论基础上,根据信息论中极大信息熵原理,提出了信息熵评价模型,为水资源承载力的研究提供了新的思路与方法。这些方法均具有较强的理论依据,但由于有效度不高或权重受主观因素影响,且承载力各因素间相互影响、作用和制约,常使评价结果具有矛盾性、不确定性和不相容性^[6],而物元可拓理论是解决矛盾问题的规律和方法。

可拓方法是我国学者蔡文^[7]提出的,现在已形成了基本的理论框架,并逐步向应用领域发展。本研究利用物元分析方法,建立了改进的水资源承载力可拓模型,并将熵值法引入到权重的计算中,克服了传统的由于人为主观因素而形成的偏差,使评价结果更符合实际,并以河南省禹州市为例,对该模型的评价结果进行了比较,以期水资源承载能力评价提供方法上的支持。

1 熵权物元可拓模型

1.1 改进的可拓模型的建立^[8]

对于事物 N ,可以特征 C 及事物关于该特征的量值 V 所组成的三元组来表示。记做 $R_0 = (N, C, V)$,如果事物 N 以 n 个特征 c_1, c_2, \dots, c_n 和相应的量值 v_1, v_2, \dots, v_n 描述,则经典域物元 R_{0j} 可表示为:

$$R_{0j} = (N_{0j}, C, V_{0j}) = \begin{bmatrix} N_{0j} & c_1 & v_{0j1} \\ & c_2 & v_{0j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{0jn} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} N_{0j} & c_1 & \langle a_{0j1}, b_{0j1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{0j2}, b_{0j2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{0jn}, b_{0jn} \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: N_{0j} 表示事物 N_0 的第 j 个评价类别; $v_{0j1}, v_{0j2}, \dots, v_{0jn}$ 分别为 N_{0j} 关于 c_1, c_2, \dots, c_n 规定的量值范围; a_{0j}, b_{0j} 分别为 c_1, c_2, \dots, c_n 取值范围的上限和下限。

对于评价指标的节域物元,即各评价指标对应的所有取值范围 R_p 有:

$$R_p = (P, C, V_p) = \begin{bmatrix} P & c_1 & v_{p1} \\ & c_2 & v_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & c_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: P 表示类别的全体; $v_{pn} = \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle$,为 P 关于 C 所取量值的范围,即 P 的节域,且 $\langle a_{0j}, b_{0j} \rangle \subset \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle$; a_{pn}, b_{pn} 分别为 C 所取量值范围的上限和下限。

待评物元是将所收集的指标数据或分析结果用物元表示,有:

$$R_g = \begin{bmatrix} G & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: R_g 为待评物元; G 为待评事物; v_i 为 G 关于 c_i 的量值,即待评事物相对于各指标的具体数据。

本研究利用文献^[9]改进的可拓方法中的最大贴近度法,进行关联度计算和等级评定,该法可对经典域矩阵 R_0 中的元素进行标准化,即对每个经典域的量值都除以 V_p 右端点数值,得到新的经典域物元矩阵,表示如下:

$$R'_{0j} = (N', C, V') = \begin{bmatrix} N' & c_1 & \langle a_{0j1}/b_{p1}, b_{0j1}/b_{p1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{0j2}/b_{p2}, b_{0j2}/b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{0jn}/b_{pn}, b_{0jn}/b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: N' 为标准化后的经典域物元事物, V' 为标准化后的量值。

同理,将待评物元体的量值也除以右端点数值 V_p ,可得到新的待评物元体,即:

$$R'_g = \begin{bmatrix} G' & c_1 & \langle v_1/b_{p1} \rangle \\ & c_2 & \langle v_2/b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle v_n/b_{pn} \rangle \end{bmatrix}. \quad (5)$$

式中, G' 为标准化后的待评事物。

1.2 权重的确定

在确定指标权重时,以前采用的方法可能由于受主观因素影响而使评价结果出现偏差,现在采用改进的信息熵法^[10-14]确定指标权重,不需要添加任何主观信息,是一种完全意义上的客观赋权法,减少了极端值对综合评价的影响,比传统的主成分分析法、因子层次分析法等更为可靠和有效。

1) 标准化。对于有 m 个评价指标和 n 个评价对象的情况,得到的原始数据矩阵为:

$$X = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

将上述矩阵标准化得 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

式中: x_{ij} 为第 j 个评价对象在第 i 个评价指标的数值; $r_{ij} \in [0, 1]$,为第 j 个评价对象在第 i 个评价指标上的标准值。

对于越大越优型的指标,有:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j \{x_{ij}\}}{\max_j \{x_{ij}\} - \min_j \{x_{ij}\}}. \quad (7)$$

对于越小越优型的指标,有:

$$r_{ij} = 1 - \frac{x_{ij} - \min_j \{x_{ij}\}}{\max_j \{x_{ij}\} - \min_j \{x_{ij}\}}. \quad (8)$$

2) 定义熵。表达式为:

$$H_i = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}, \quad i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

式中: H_i 为评价指标的熵值; $f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}}$,其中 n 表示评价对象的个数; $k = \frac{1}{\ln n}$ 。当 $f_{ij} = 0$ 时,令 $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。

3) 求熵权。计算公式为:

$$w_i = \frac{1 - H_i}{\sum_{i=1}^m (1 - H_i)}. \quad (10)$$

式中: w_i 为权重系数, m 为评价指标的个数。

1.3 关联度的计算和等级评定

令 $D_j(v'_i) = \rho(v'_i, V'_{ij})$, 其中 $\rho(v'_i, V'_{ij}) = |v'_i - \frac{b'+a'}{2}| - \frac{b'-a'}{2}$ 。待评对象 N 关于等级 j 的隶属度为:

$$K_j(N) = 1 - \sum_{i=1}^n w_i D_j(v'_i). \quad (11)$$

式中: $D_j(v'_i)$ 、 $\rho(v'_i, V'_{ij})$ 为待评物元体与各个经典域的距,其中 j 为评价等级, v'_i 表示点值; a' 、 b' 分别表示区间左端点及右端点的值。 $K_j(N)$ 为待评对象 N 关于等级 j 的隶属度,进而根据隶属度的大小判定评价结果,若 $K_{j_0} = \max_j \{K_j(N)\}$,则评价对象 N 属于等级 j_0 。令:

$$\bar{K}_j(N) = \frac{K_j(N) - \min_j K_j(N)}{\max_j K_j(N) - \min_j K_j(N)}, \quad (12)$$

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^m j \bar{K}_j(N)}{\sum_{j=1}^m \bar{K}_j(N)}. \quad (13)$$

式中, j^* 为级别 N 的级别变量特征值。由 j^* 数值的大小可以判断待评物元偏向相邻级别的程度。

2 实例分析

河南省禹州市位于东经 $113^\circ 03' \sim 113^\circ 39'$ 和北纬 $33^\circ 59' \sim 34^\circ 24'$,处于伏牛山余脉与豫东南平原的交接部位,北部、西部为山地丘陵,中部和东南部为冲积平原,整个地势由西北向东南倾斜。

近年来,随着城市化人口的增长、社会经济的发展和人民生活水平的提高,有限的水资源供给量和不断增长的需求量之间已形成尖锐矛盾;水资源短缺、水污染和水资源浪费并存,这是禹州市水资源供需矛盾形成的主要原因。因此,正确评价该地区的水资源承载力,进而掌握水资源利用现状,有利于社会的可持续发展、水资源的持续利用及生态环境的改善。

2.1 评价指标与分级标准

评价指标的选取要根据可操作性、动态性、生态性、区域性和战略性原则,从多方面、多角度、多层次考虑,从众多的因素中选取能够反映问题本质的因素,同时除去可重复因素的作用。按照评价因素对水资源承载力的影响程度,并参考其他水资源评价标准^[15],选取了 8 个评价因素,并将这些因素对水资源承载力的影响程度划分为 V_1 、 V_2 和 V_3 3 个等级,以确定每个因素各等级的数量指标,得到的水资源承载力评价标准如表 1。

在水资源承载力的 3 个等级中, V_1 属情况较好,表示本区水资源仍有较大的承载潜力,水资源利用程度、发展规模较小,因而这时本区发展对水资源的需求是有保障的,本区水资源供给情况较为乐观; V_2 属状况一般,表示本区水资源开发利用已有相当

规模,但仍有一定的开发利用潜力,区内国民经济发展对水资源供给需求有一定保障;V₃ 属较差,表示

水资源承载力已接近饱和值,进一步开发利用的潜力较小,发展下去将发生水资源短缺。

表 1 综合评价指标的分级值

Table 1 Hierarchical value of comprehensive evaluation index

评价因素 Evaluation factor	V ₁	V ₂	V ₃
人均水资源量(C ₁)/(m ³ ·人 ⁻¹) Per capita water resources (C ₁)	>10 000	≤10 000~≥3 000	<3 000
人均供水量(C ₂)/(m ³ ·人 ⁻¹) Per capita water supply (C ₂)	>900	≤900~≥500	<500
水资源利用率(C ₃)/% Utilization rate of water resources (C ₃)	<40	≥40~≤80	>80
需水量模数(C ₄)/(万 m ³ ·km ⁻²) Water demand modulus (C ₄)	<40	≥40~≤100	>100
生活用水定额(C ₅)/(L·人 ⁻¹ ·d ⁻¹) Domestic water quota (C ₅)	<280	≥280~≤520	>520
工业万元产值用水量(C ₆)/(万 m ³ ·万元 ⁻¹) Million yuan output value of industrial water consumption (C ₆)	<20	≥20~≤100	>100
耕地灌溉率(C ₇)/% The rate of farmland irrigation (C ₇)	<40	≥40~≤80	>80
生态环境用水率(C ₈)/% Ecological and environmental water rate (C ₈)	>5	≤5~≥2	<2

综合禹州市的自然、社会和经济状况及水资源开发利用的预测结果,将与水资源承载力各评价因

素有关的资料进行统计,结果见表 2。

表 2 禹州市水资源承载力评价因素表

Table 2 Assessment factors of city water resources carrying capacity

频率年/% Frequency year	规划年份 Planning year	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
50	2010	588.85	348.83	59.24	17.68	106.20	80	26.49	0.28
	2015	580.89	331.29	57.03	23.59	115.22	78	34.76	0.34
	2020	567.27	327.41	57.72	23.21	124.98	50	35.86	0.41
75	2010	476.19	317.15	66.60	18.75	106.20	80	43.54	0.34
	2015	471.55	300.55	63.74	24.62	115.22	78	46.35	0.41
	2020	462.19	297.86	64.45	24.26	124.98	50	47.82	0.50
95	2010	375.99	361.59	96.17	30.63	106.20	80	19.59	2.56
	2015	374.16	350.82	93.76	30.34	115.23	78	22.74	2.29
	2020	368.43	338.89	91.98	29.77	124.98	50	25.44	2.10

2.2 水资源承载力的计算

标准化后的经典域和节域为:

1)将表 1 中的数据按公式(4)、(5)进行标准化,

$$R'_0 = \left\{ \begin{matrix} V_1 & V_2 & V_3 \\ C_1 & \langle 0.833, 1 \rangle & \langle 0.25, 0.833 \rangle & \langle 0.025, 0.025 \rangle \\ C_2 & \langle 0.818, 1 \rangle & \langle 0.455, 0.818 \rangle & \langle 0.291, 0.455 \rangle \\ C_3 & \langle 0.3, 0.4 \rangle & \langle 0.4, 0.8 \rangle & \langle 0.8, 1 \rangle \\ C_4 & \langle 0.167, 0.267 \rangle & \langle 0.267, 0.667 \rangle & \langle 0.667, 1 \rangle \\ C_5 & \langle 0.167, 0.467 \rangle & \langle 0.467, 0.867 \rangle & \langle 0.867, 1 \rangle \\ C_6 & \langle 0.125, 0.167 \rangle & \langle 0.167, 0.833 \rangle & \langle 0.833, 1 \rangle \\ C_7 & \langle 0.18, 0.4 \rangle & \langle 0.4, 0.8 \rangle & \langle 0.8, 1 \rangle \\ C_8 & \langle 0.833, 1 \rangle & \langle 0.333, 0.833 \rangle & \langle 0.167, 0.333 \rangle \end{matrix} \right\}, \quad R'_p = \left\{ \begin{matrix} P \\ C_1 & \langle 0.025, 1 \rangle \\ C_2 & \langle 0.291, 1 \rangle \\ C_3 & \langle 0.3, 1 \rangle \\ C_4 & \langle 0.167, 1 \rangle \\ C_5 & \langle 0.167, 1 \rangle \\ C_6 & \langle 0.125, 1 \rangle \\ C_7 & \langle 0.18, 1 \rangle \\ C_8 & \langle 0.167, 1 \rangle \end{matrix} \right\}.$$

将 3 个频率年分别作为待评物元,标准化后得:

$$R'_1 = \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \end{matrix} \begin{pmatrix} 0.049 & 0.048 & 0.047 \\ 0.32 & 0.30 & 0.298 \\ 0.592 & 0.570 & 0.577 \\ 0.118 & 0.157 & 0.155 \\ 0.177 & 0.192 & 0.208 \\ 0.667 & 0.65 & 0.417 \\ 0.265 & 0.348 & 0.359 \\ 0.047 & 0.057 & 0.068 \end{pmatrix}, R'_2 = \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \end{matrix} \begin{pmatrix} 0.04 & 0.039 & 0.039 \\ 0.288 & 0.273 & 0.271 \\ 0.666 & 0.637 & 0.645 \\ 0.125 & 0.164 & 0.162 \\ 0.177 & 0.192 & 0.208 \\ 0.667 & 0.65 & 0.417 \\ 0.435 & 0.464 & 0.478 \\ 0.057 & 0.068 & 0.083 \end{pmatrix}, R'_3 = \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \end{matrix} \begin{pmatrix} 0.031 & 0.031 & 0.031 \\ 0.329 & 0.319 & 0.308 \\ 0.962 & 0.938 & 0.920 \\ 0.204 & 0.202 & 0.198 \\ 0.177 & 0.192 & 0.208 \\ 0.669 & 0.65 & 0.417 \\ 0.196 & 0.227 & 0.254 \\ 0.35 & 0.382 & 0.427 \end{pmatrix}。$$

2)应用公式(6)–(10),根据信息熵权重法确定各指标的权重系数,结果见表 3。

表 3 各指标权重的确定结果

Table 3 Results of index weight

评价指标 Evaluation index	频率年/% Frequency year		
	50	75	95
C ₁	0.087	0.092	0.100
C ₂	0.139	0.160	0.111
C ₃	0.085	0.089	0.108
C ₄	0.177	0.177	0.129
C ₅	0.094	0.094	0.111
C ₆	0.170	0.170	0.205
C ₇	0.155	0.114	0.115
C ₈	0.092	0.095	0.120

3)关联度和等级的计算

根据表 3 的权重,利用式(11)、(12)、(13)进行计算,得到的评价结果如表 4 所示。

2.3 评价结果分析

1)从评价结果可以看出,不同频率年不同规划年份的水资源承载力均维持在第 2 等级,说明本地区水资源开发利用已具有一定的规模,但仍有一定的开发利用潜力。

2)在水资源承载力的评价方法中,由于一般方法^[16]的局限性,不能体现不同的评判程度。但是在可拓评价中,评价的关联度可以解决这一问题。从表 4 中可以看出,尽管 j_0 均维持在第 2 等级,但 j^* 并不一致。尽管该地区水资源仍有一定的开发潜力,但从 j^* 值可以看出,不同规划年的开发潜力不同,并且该值可以真实地反映各指标对各等级的归属情况。

3)普通的可拓评价方法无法解决待评物元超出节域的情况,但用改进的可拓法可以解决这一问题,且该方法具有计算简单、操作方便的特点。

4)从整体上来看,禹州市水资源承载力呈逐渐上升趋势,可见,通过提高工业高 eff 用水水平,推动节水型社会建设,整个禹州市的水资源承载能力也将得到提高。综合考虑禹州市的经济、社会等因素,根据禹州市水资源承载力分析结果,应因地制宜地构建流域与区域相结合的水资源调配体系,通过水资源调配体系实现丰枯互济、量质互补,增强对水资源时空分布不均的调控能力,从而促进禹州市水资源的可持续利用。

表 4 禹州市水资源承载力不同频率年不同规划年份的评价结果

Table 4 Evaluation results of different frequencies in different planning years in Yuzhou city

频率年/% Frequency year	规划年份 Planning year	V ₁	V ₂	V ₃	V _{max}	j ₀	j*
50	2010	0.693	0.908	0.704	0.908	2	2.05
	2015	0.700	0.927	0.719	0.927	2	2.08
	2020	0.740	0.944	0.682	0.940	2	1.82
75	2010	0.657	0.919	0.641	0.919	2	1.95
	2015	0.659	0.935	0.753	0.935	2	2.25
	2020	0.698	0.950	0.718	0.950	2	2.07
95	2010	0.652	0.928	0.767	0.928	2	2.29
	2015	0.666	0.933	0.766	0.933	2	2.27
	2020	0.724	0.957	0.718	0.957	2	1.98

3 结 论

用改进的可拓方法对水资源承载力进行评价,分辨率高,即 j^* 值比较精确,所得的结论更具科学

性;同时应用信息熵权重,从数据本身所反映的信息无序化效用值来计算权重系数,可以有效地减少计算的主观性。本研究与模糊综合评判得出了相同的结论^[17],但利用熵权可拓法可以更直接地看出水资

源承载力偏离各等级值的程度。

本研究将改进的可拓方法应用于河南省禹州市水资源承载力的评价中,对不同频率年不同规划年份分别进行了评价,结果表明,禹州市水资源总体较为丰沛,水资源承载能力较强,可以保证城市发展所需要的水资源供给。根据经济社会可持续发展和生态环境保护对水资源的要求,在保证经济持续发展的前提下,提出水资源合理开发、高效利用、有效节约、优化配置、积极保护和综合治理的总体布局及实施方案,以促进禹州地区人口、资源、环境和经济的协调发展,以水资源的可持续利用支持经济社会的可持续发展。

熵权可拓法不仅原理简单、计算简便,而且对水资源承载力的评价结果也是科学、客观、合理的,评价结果表明,这种方法是可行的。

[参考文献]

- [1] 张 丽. 水资源承载能力与生态需水量理论及应用 [M]. 郑州:黄河水利出版社,2005:6-16.
Zhang L. Water resources carrying capacity and ecological water demand of theory and application [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2005:6-16. (in Chinese)
- [2] 高彦春,刘昌明. 区域水资源开发利用的阈限研究 [J]. 水利学报,1997(8):73-79.
Gao Y C, Liu C M. Limit analysis on the development and utilization of regional water resources [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(8):73-79. (in Chinese)
- [3] 傅 湘,纪昌明. 区域水资源承载能力综合评价-主成分分析法的应用 [J]. 长江流域资源与环境,1999,8(2):168-172.
Fu X, Ji C M. A comprehensive evaluation of the regional water resource carrying capacity-application of main component analysis method [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 1999,8(2):168-172. (in Chinese)
- [4] 王顺久,侯 玉,张欣莉,等. 流域水资源承载力的综合评价方法 [J]. 水利学报,2003(1):88-92.
Wang S J, Hou Y, Zhang X L, et al. Comprehensive evaluation method for water resource carrying capacity in river basins [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(1):88-92. (in Chinese)
- [5] 孙才志,左海军,杨 静. 基于极大熵原理的黄河流域水资源承载力研究 [J]. 资源科学,2004,26(2):17-22.
Sun C Z, Zuo H J, Yang J. Water resource carrying capacity in Yellow River watershed based on the theory of maximum entropy [J]. Resources Science, 2004,26(2):17-22. (in Chinese)
- [6] 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 [J]. 四川大学学报:工程科学版,2003,35(1):34-37.
Men B H, Wang Z L, Liang C, et al. Application of matter element model to evaluation on resources carrying capacity of regional groundwater [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2003,35(1):34-37. (in Chinese)
- [7] 蔡 文. 可拓工程方法 [M]. 北京:科学出版社,1997:202-209.
Cai W. Extension engineering method [M]. Beijing: Science Press, 1997:202-209. (in Chinese)
- [8] 汤亚林,朱帅帮. 物元模型在新疆水资源承载力综合评价中的应用 [J]. 水资源保护,2006,22(3):40-42.
Tang Y L, Zhu S B. Application of matter-element model to the evaluation of water resources carrying capacity in Xinjiang [J]. Water Resources Protection, 2006,22(3):40-42. (in Chinese)
- [9] 胡宝清,张 轩,卢兆明. 可拓评价方法的改进及其应用研究 [J]. 武汉大学学报,2003,36(5):79-84.
Hu B Q, Zhang X, Lu Z M. Research on assessment of building fire safety by improved extension assessment method [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003,36(5):79-84. (in Chinese)
- [10] 王艳芳. 灌溉水质综合评价的熵权可拓模型 [J]. 灌溉排水学报,2009,28(3):73-76.
Wang Y F. Matter-element model based on coefficients of entropy for comprehensive evaluation of irrigation water quality [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009,28(3):73-76. (in Chinese)
- [11] 吴冠岑,刘友兆,付光辉. 基于熵权物元可拓模型的土地整理项目社会效益评价 [J]. 中国土地科学,2008,22(5):40-46.
Wu G C, Liu Y Z, Fu G H. Social benefit evaluation of land reconsolidation projects based on entropy-weighted extentic matter-element model [J]. China Land Science, 2008,22(5):40-46. (in Chinese)
- [12] 潘竞虎,冯兆东. 基于熵权物元可拓模型的黑河中游生态环境脆弱性评价 [J]. 生态与农村环境学报,2008,24(1):1-4.
Pan J H, Feng Z D. Evaluation of eco-environmental fragility in middle reaches of Heihe river using information entropy and matter-element model [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2008,24(1):1-4. (in Chinese)
- [13] 陈南祥,申 瑜. 基于熵权属性识别模型的地下水资源承载力评价 [J]. 灌溉排水学报,2008,27(4):48-50.
Chen N X, Shen Y. Evaluation of groundwater resources carrying capacity based on attribute recognition model [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008,27(4):48-50. (in Chinese)
- [14] 张美玲,梁 虹,祝 安,等. 贵州水资源承载力基于熵权的模糊物元评价 [J]. 人民长江,2007,38(2):54-57.
Zhang M L, Liang H, Zhu A, et al. Evaluation of water resources carrying capacity based on entropy-fuzzy matter-element in Guizhou [J]. Yangtze River, 2007,38(2):54-57. (in Chinese)
- [15] SL/T 238—1999 水资源评价导则 [S]. 北京:中国水利水电出版社,1999.
SL/T 238—1999 A guide to water resources assement [S]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese)