

邹志红, 孙靖南, 任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用 [J]. 环境科学学报, 2005, 25(4):552-556

ZOU Zhihong, SUN Jingnan, REN Guangping. Study and Application on the Entropy method for Determination of Weight of evaluating indicators in Fuzzy Synthetic Evaluation for Water Quality Assessment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(4):552-556

# 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用

邹志红<sup>\*</sup>, 孙靖南, 任广平

北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100083

**摘要:** 针对模糊综合评价方法中对多因子赋权时计算繁琐、工作量大、未考虑多个评价对象间联系等缺陷, 提出利用熵权法对多评价目标因子赋权的新思路. 利用三峡库区城市江段 13 个监测断面的水质监测数据, 比较了利用熵权法与传统的评价因子赋权的差异. 结果表明, 当涉及多个评价对象时, 采用熵权法对各因子赋权, 只需 1 次计算即可, 无需对每个监测点进行权重计算, 从而使模糊评价过程大大简化, 评价的结果客观、合理.

**关键词:** 水质评价; 模糊; 权重; 熵权法

文章编号: 0253-2468(2005)04-0552-05 中图分类号: X824 文献标识码: A

## Study and Application on the Entropy method for Determination of Weight of evaluating indicators in Fuzzy Synthetic Evaluation for Water Quality Assessment

ZOU Zhihong<sup>\*</sup>, SUN Jingnan, REN Guangping

School of Economics and Management, BeiHang University, Beijing 100083

**Abstract:** Considering the difficulties of calculation using fuzzy synthetic evaluation method and the relationship among evaluators are ignored a new weight evaluation process using entropy method was established. Aiming at the water quality assessment of the Three Gorges reservoir area, the differences of Entropy method and traditional method was compared in the weight calculation of evaluating indicators by using the fuzzy mathematics. The results showed that when there were one more evaluators using this method was very convenient for fuzzy synthetic evaluation. Only one calculation was enough and it need not to calculate every monitoring point. This method predigested the fuzzy synthetic evaluation process greatly and the evaluation results were reasonable.

**Keywords:** water quality evaluation; fuzzy; weight of evaluating indicator; entropy method

近年来, 模糊综合评价方法在天然水体的水质评价中得到广泛的研究与应用<sup>[1~3]</sup>. 利用模糊数学理论, 结合水质指标及其评价原理, 针对现有方法的优点和存在的问题, 利用水质污染程度由轻到重逐渐变化的模糊特性, 可以获得更科学和更合理的评价结果. 在水质模糊综合评价中, 需确定影响水质的各主要因素, 确定评价因子集、评价集、隶属函数, 然后通过计算各因素的权重和隶属度, 得到综合隶属度, 确定水质级别.

在模糊综合评价中, 权重的设计是一项重要的内容, 对评价的结果有重要影响. 现有模糊综合评价方法一般是通过计算超标比来确定各因子的权重, 即根据某待评价对象的各评价指标的监测值相对于

水质标准均值的超标程度经过归一化计算所获得的结果作为因子权重<sup>[4]</sup>. 此方法存在以下不足之处: 当存在多个评价对象时, 每个评价对象都要分别计算一次在该对象下每个评价指标的权重值, 工作量过大; 计算得到的权重值仅考虑了个体因子的特征, 而对多个评价对象的相互联系却无法描述. 因此, 现行的模糊综合评价方法在水质评价中受到限制.

为解决以上问题, 可将熵的概念应用到水质评价中. 熵本是热力学中的概念, 后由申农 (C. E. Shannon) 引入信息论, 现已在工程技术、社会经济等领域得到广泛应用<sup>[5~14]</sup>, 如周梅华将熵权方法应用于可持续消费测度<sup>[11]</sup>, 徐森泉等应用于区域物流发展竞争态势分析<sup>[12]</sup>. 在环境科学方面, 汤瑞凉等在

收稿日期: 2004-07-21; 修订日期: 2005-01-24

基金项目: 国家自然科学基金 (50378008)

作者简介: 邹志红 (1958-), 女, 副教授 (博士), zouzhihong@buaa.edu.cn; \* 通讯作者 (责任作者)

水资源优化调配<sup>[13]</sup>中, 林运东等在水体营养化评价<sup>[14]</sup>中均使用了熵权方法, 取得了较好的结果. 本文尝试将“熵权法”用于河流水质模糊综合评价中各因素的赋权, 并应用该方法对长江三峡库区城市江段的水质进行了综合评价, 以验证该方法的可行性.

### 1 用熵权法确定评价因子权重的基本方法

人们在评价决策中所获信息的多少, 是评价精度和可靠性大小的决定因素之一. 在信息论中, 熵是系统无序程度的度量, 它还可以度量数据所提供的有效信息量<sup>[15]</sup>. 因此, 可以用熵来确定权重. 当评价对象在某项指标上的值相差较大时, 熵值较小, 说明该指标提供的有效信息量较大, 该指标的权重也应较大; 反之, 若某项指标的值相差越小, 熵值较大, 说明该指标提供的信息量较小, 该指标的权重也应较小. 当各被评价对象在某项指标上的值完全相同时, 熵值达到最大, 这意味着该指标未向决策提供任何有用的信息, 可以考虑从评价指标体系中去除<sup>[16]</sup>. 所以, “熵权”理论是一种客观赋权方法. 在水质模糊评价中, 通过对“熵”的计算确定权重, 就是根据各项监测指标值的差异程度, 确定各指标的权重.

设有  $m$  个评价指标,  $n$  个评价对象, 则形成原始数据矩阵  $X = (x_{ij})_{m \times n}$ , 对于某项指标  $i$ , 指标值  $x_{ij}$  的差异越大, 则该指标在综合评价中所起的作用越大. 如果某项指标的指标值全部相等, 则该指标在综合评价中几乎不起作用.

使用熵权法确定权重主要有以下 3 个步骤<sup>[16]</sup>:

1) 原始数据矩阵进行标准化 设  $m$  个评价指标,  $n$  个评价对象得到的原始数据矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n} \\ x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n} \\ \vdots \\ x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

对该矩阵标准化如下得到

$$R = (r_{ij})_{m \times n} \quad (2)$$

式中  $r_{ij}$  为第  $j$  个评价对象在第  $i$  个评价指标上的标准值  $r_{ij} \in [0, 1]$ . 其中对大者为优的收益性指标而言, 有

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j \{x_{ij}\}}{\max_j \{x_{ij}\} - \min_j \{x_{ij}\}} \quad (3)$$

而对小者为优的成本性指标而言, 有

$$r_{ij} = \frac{\max_j \{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max_j \{x_{ij}\} - \min_j \{x_{ij}\}} \quad (4)$$

2) 定义熵 在有  $m$  个指标,  $n$  个被评价对象的评估问题中, 第  $i$  个指标的熵定义为

$$H_i = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

式中  $f_{ij} = r_{ij} / \sum_{j=1}^n r_{ij}$ ,  $k = 1 / \ln n$ , 当  $f_{ij} = 0$  时, 令  $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ .

3) 定义熵权 定义了第  $i$  个指标的熵之后, 可得到第  $i$  个指标的熵权定义, 即:

$$w_i = \frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^m H_i} \quad (6)$$

其中  $0 \leq w_i \leq 1$ ,  $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ .

需要说明的是, 熵权并不是表示决策评估问题中某指标实际意义上的重要性系数, 而是在给定评价对象集后各种评价指标值确定的情况下, 各指标在竞争意义上的相对激烈程度. 从信息角度考虑, 它代表该指标在该问题中, 提供有效信息量的多寡程度<sup>[16]</sup>.

## 2 基于熵权法赋权的水质模糊综合评价实例

### 2.1 评价对象及其数据来源

本文选择三峡库区重庆、长寿等城市江段的 13 个监测断面 (见图 1) 平水期进行水质模糊综合评价及熵权法赋权研究. 所用水质监测数据引自文献 [17].

### 2.2 评价因子和评价集

在原始的监测数据中共有十几项监测指标, 经过筛选, 去除在水质标准中无法直接进行评判的几项监测指标, 如 pH、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 等, 再去除所有监测断面监测值都低于水质 I 级标准限值的指标, 如 NH<sub>3</sub>、挥发性酚、砷、汞、铅、镉等. 最后选择了溶解氧 (DO)、高锰酸盐指数 (COD<sub>Mn</sub>)、化学耗氧量 (COD<sub>Cr</sub>)、五日生化耗氧量 (BOD<sub>5</sub>)、总磷 (TP) 等 5 项非生物代表性指标作为评价因子, 即,  $U = \{DO, COD_{Mn}, COD_{Cr}, BOD_5, TP\}$ . 根据国家地表水环境质量标准<sup>[18]</sup> (GB3838-2002) 的规定, 将水质级别定为 5 级, 故评价集为  $V = \{I, II, III, IV, V\}$ . 上述 5 项评价指标在 13 个监测段面的监测数据如表 1 所示.

### 2.3 单因子评价矩阵的确定<sup>[3, 19~21]</sup>

按照国家标准确定的限值<sup>[18]</sup>, 确定各指标属于

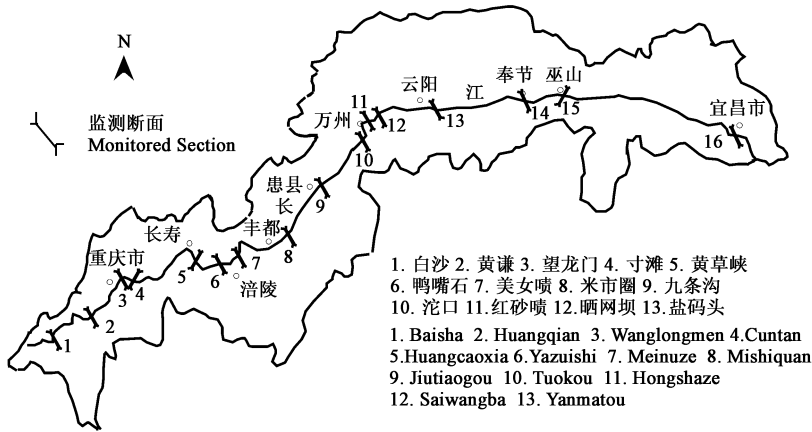


图 1 三峡库区城市江段水质监测断面位置

Fig. 1 The location of the monitoring sections in the main cities of the Three Gorges reservoir area

各水质级别的隶属函数,从而确定单因子隶属度,得到单因子评价矩阵  $R$ . 以白沙监测断面为例,其隶属矩阵为:

$$R = \left\{ \begin{array}{ccccc|c|c} 0.47 & 0.53 & 0 & 0 & 0 & DO & 6.7 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & COD_{Mn} & 3 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & COD_{Cr} & 9.2 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & BOD_5 & 0.9 \\ 0.05 & 0.95 & 0 & 0 & 0 & TP & 0.096 \end{array} \right\} \quad (7)$$

对盐码头段面,其隶属矩阵为:

$$R = \left\{ \begin{array}{ccccc|c|c} 0.33 & 0.67 & 0 & 0 & 0 & DO & 6.5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & COD_{Mn} & 4 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & COD_{Cr} & 10 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & BOD_5 & 1.1 \\ 0 & 0.53 & 0.47 & 0 & 0 & TP & 0.147 \end{array} \right\} \quad (8)$$

限于篇幅,其它监测断面的隶属矩阵不一一列出.

### 2.4 权重计算

首先将监测数据构成的原始矩阵进行初始化(表 2). 数据经过整理后,根据熵权法公式计算出各评价指标的熵和熵权(表 3).

### 2.5 评价结果

综合评价结果见表 4. 利用熵权法赋权的模糊综合评价结果表明,三峡库区主要城市江段各监测断面的水质级别大部分为 II 级,说明水体尚清洁,综合污染程度不严重. 在各评价指标中化学耗氧量(COD<sub>Cr</sub>)的权重较大,说明库区城市江段受耗氧有机物污染所占比重较大. 根据熵权的定义,可以说明多个监测点的该指标存在明显差异,黄谦、望龙门、寸

滩等重庆境内的江段工业污染比较严重,而长寿江段污染程度相对较轻.

表 1 5 项评价因子在 13 个监测段面的检测值

Table 1 The measured values of the 5 indicators in the monitoring sections  $mg \cdot L^{-1}$

评价断面	DO	COD <sub>Mn</sub>	COD <sub>Cr</sub>	BOD <sub>5</sub>	TP
白沙	6.7	3.0	9.2	0.9	0.096
黄谦	7.4	3.0	14.0	2.8	0.200
望龙门	7.2	3.2	16.7	1.7	0.244
寸滩	7.1	3.3	17.7	1.8	0.207
黄草峡	7.1	1.9	16.2	2.6	0.148
鸭嘴石	6.8	4.0	6.7	2.1	0.137
美女喷	7.4	3.7	5.7	1.9	0.142
米市圈	7.2	3.0	10.5	2.3	0.143
九条沟	8.1	4.3	16.9	2.5	0.018
沱口	7.7	4.6	9.5	2.1	0.142
红砂喷	8.4	4.3	13.0	2.1	0.139
晒网坝	8.3	3.5	13.7	2.3	0.147
盐码头	6.5	4.0	10.0	1.1	0.147

表 2 原始数据初始化

Table 2 Initialization of the original data

编号	断面	DO	COD <sub>Mn</sub>	COD <sub>Cr</sub>	BOD <sub>5</sub>	TP
1	白沙	0.105	0.593	0.708	1.000	0.655
2	黄谦	0.474	0.593	0.308	0.000	0.195
3	望龙门	0.368	0.519	0.083	0.579	0.000
4	寸滩	0.316	0.481	0.000	0.526	0.164
5	黄草峡	0.316	1.000	0.125	0.105	0.425
6	鸭嘴石	0.158	0.222	0.917	0.368	0.473
7	美女喷	0.474	0.333	1.000	0.474	0.451
8	米市圈	0.368	0.593	0.600	0.263	0.447
9	九条沟	0.842	0.111	0.067	0.158	1.000
10	沱口	0.632	0.000	0.683	0.368	0.451
11	红砂喷	1.000	0.111	0.392	0.368	0.465
12	晒网坝	0.947	0.407	0.333	0.263	0.429
13	盐码头	0.000	0.222	0.642	0.895	0.429

表 3 各指标熵及熵权

Table 3 The entropies and its weights of the indicators

评价指标	信息熵	熵权
DO	0.9 056	0.2 025
COD <sub>Mn</sub>	0.9 057	0.2 023
COD <sub>Cr</sub>	0.8 835	0.2 498
BOD <sub>5</sub>	0.9 052	0.2 033
TP	0.9 338	0.1 421

表 4 综合评价结果

Table 4 The results of the synthetic evaluation

监测断面	对各级别的隶属度					所属级别
	I	II	III	IV	V	
白沙	0.429	0.571	0.000	0.000	0.000	II
黄谦	0.348	0.510	0.142	0.000	0.000	II
望龙门	0.345	0.428	0.165	0.063	0.000	II
寸滩	0.260	0.463	0.267	0.010	0.000	II
黄草峡	0.412	0.460	0.128	0.000	0.000	II
鸭嘴石	0.334	0.613	0.053	0.000	0.000	II
美女喷	0.446	0.494	0.060	0.000	0.000	II
米市圈	0.490	0.449	0.061	0.000	0.000	I
九条沟	0.426	0.449	0.125	0.000	0.000	II
沱口	0.429	0.451	0.120	0.000	0.000	II
红砂喷	0.379	0.535	0.086	0.000	0.000	II
晒网坝	0.409	0.524	0.067	0.000	0.000	II
盐码头	0.294	0.639	0.067	0.000	0.000	II

为验证熵权法的有效性, 本文还将熵权法与传统的模糊综合评价方法进行了对比(表 5)。结果表明, 熵权法和传统的综合评价方法得到的评价结果基本一致。用传统方法确定的各评价因子权重见表 6。根据传统的权重计算方法, 以上 13 个监测点分别确定了 13 次权重。而且, 对于同指标的相同监测值来说, 确定的权重却有很大不同。如望龙门和米市圈, 溶解氧(DO)的监测值同样为 7.2, 确定的权重却分别为 0.199 和 0.247, 差别达 20%, 误差较大。

### 3 结论

1) 与传统的模糊综合评价方法相比, 通过熵权法给各评价因子赋权, 并对以上 13 个监测点进行水质评价时, 只需计算 1 次就能得到适用于所有点的权重, 大大减少了评价工作所需的工作量。

2) 使用熵权法赋权, 可将同一监测指标的多个监测样本点结合确定权重, 考虑了多个样本间的联系, 可削弱异常值的影响, 使评价结果更准确、合理。

3) 实例计算结果表明, 熵权法是一种比较有效的赋权方法, 在水质模糊综合评价中有重要应用价值。

表 5 评价结果对比

Table 5 Results compare of different approaches

评价结果	白沙	黄谦	望龙门	寸滩	黄草峡	鸭嘴石	美女喷	米市圈	九条沟	沱口	红砂喷	晒网坝	盐码头
熵权结果	II	II	II	II	II	II	II	I	II	II	II	II	II
传统结果	II	II	II	III	II	II	II	II	II	II	II	II	II

表 6 传统赋权方法的赋权结果

Table 6 Weights by Traditional approach

评价指标	白沙	黄谦	望龙门	寸滩	黄草峡	鸭嘴石	美女喷	米市圈	九条沟	沱口	红砂喷	晒网坝	盐码头
DO	0.329	0.202	0.198	0.206	0.235	0.267	0.261	0.247	0.238	0.224	0.202	0.204	0.277
COD <sub>Mn</sub>	0.190	0.129	0.131	0.139	0.091	0.209	0.205	0.154	0.239	0.228	0.210	0.171	0.207
COD <sub>Cr</sub>	0.180	0.186	0.211	0.230	0.239	0.108	0.098	0.166	0.289	0.145	0.196	0.206	0.159
BOD <sub>5</sub>	0.081	0.171	0.099	0.108	0.177	0.156	0.150	0.168	0.197	0.148	0.146	0.160	0.081
C <sub>TP</sub>	0.221	0.312	0.362	0.316	0.257	0.260	0.286	0.266	0.036	0.255	0.246	0.260	0.276

### 参考文献(References):

- [1] Qin S K. The Principle and Application of Synthetic Evaluation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003: 120—132 (in Chinese)
- [2] Liang D H, Jiang H H. Unifying and Improving the Comprehensive Assessment Methods of River Water Quality [J]. Environmental Monitoring in China, 2002, 18(2): 63—66 (in Chinese)
- [3] Zhu L, Liu H X. An Overall Evaluation of Surface Water Quality by Fuzzy Method [J]. Water Resources & Water Engineering, 1994, 5 (2): 27—33 (in Chinese)

- [4] Fan B D. Fuzzy Comprehensive Evaluation Model for Groundwater Quality [J]. Zhongguo Nongchun Shuili Shuidian, 1998(9): 29—32 (in Chinese)
- [5] Tian Q H, Du Y X. Study of Performance Evaluation for Mechanical Products Based on Entropy Fuzzy Comprehensive Review [J]. China Manufacturing Information, 2004, 33(3): 97—99 (in Chinese)
- [6] Cheng T, Zhang C X. Application of Fuzzy AHP Based on Entropy Weight to Site Selection of Solid Sanitary Landfill [J]. Environmental and Sanitary Engineering, 2003, 12(2): 64—67 (in Chinese)
- [7] Guo C Z. Study on the Evaluating Method of Entropy Coefficient for Stock Investment Value [J]. Nankai Economics Studies, 2001(5): 65—67 (in Chinese)

- [ 8 ] Zhao D Y, Song H. A method of Ameliorative Multi-Objective Synthetic Evaluation Based on Entropy Weight and its Application [ J ] . Journal of Ordnance Engineering College, 2001, 13(3): 47—51 (in Chinese)
- [ 9 ] Fang D C, Liu G L, Zhang L P, *et al.* The Application of Information Entropy in Investment Decision[ J ] . Value Engineering, 2004(2): 115—117 (in Chinese)
- [ 10 ] Li X H, Li Y M, Gu Z H, *et al.* Competitive Situation Analysis of Regional Logistics Development Based on AHP and Entropy Weight [ J ] . Journal of Southeast University, 2004, 34(3): 398—401 (in Chinese)
- [ 11 ] Zhou M H. The Research about Method of Sustainable Consumption System Measure [ J ] . Systems Engineering—Theory & Practice, 2003(12): 25—31 (in Chinese)
- [ 12 ] Xu S Q, Hu Z G, Liu Q, *et al.* Multi-Objective Decision Analysis of Diversion Standards Based on Entropy[ J ] . Zhongguo Nongchun Shuili Shuidian, 2004(8): 45—47 (in Chinese)
- [ 13 ] Tang R L, Guo C Z, Dong X J. An Optimazition Model with Entropic Coefficients for Management in Irrigation Water Resources[ J ] . Journal of HoHai University, 2000, 28(1): 18—21 (in Chinese)
- [ 14 ] Lin Y D, Men B H, Jia W S. Application of Entropy Coefficient Method to Evaluating on Alimentative Type of Water[ J ] . Northwest Water Resources & Water Engineering, 2003, 13(3): 27—28 (in Chinese)
- [ 15 ] Meng Q S. Information Theory[ M ] . Xi' An: Xi' An Jiaotong University Press, 1989, 19—36 (in Chinese)
- [ 16 ] Qiu W H. Management Decision and Applied Entropy[ M ] . Beijing: China Machine Press, 2002, 193—196 (in Chinese)
- [ 17 ] Liu H J, Qu J H. Water Quality Evaluation of the Three Gorges Reservoir Area[ J ] . Environmental Science, 2002, 23(1): 74—77 (in Chinese)
- [ 18 ] State Environmental Protection Administration of China. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China. GB3838-2002 Environmental quality standards for surface water[ S ] . Beijing: China Environmental Science Press, 2002 (in Chinese)
- [ 19 ] Pan F, Fu Q, Liang C. Applying Fuzzy Synthesize Judgment in the Study of Water Environment Quality Evaluation[ J ] . Environmental Engineering, 2002, 20(2): 58—61 (in Chinese)
- [ 20 ] Hu Q G, Chen H X, Xu X D. Fuzzy Judgement on the Environmental Quality of Surface Water[ J ] . Water Resources & Water Engineering, 2000, 11(2): 19—23 (in Chinese)
- [ 21 ] Qiu L P, Du M A, Zhang D Q. A Research on Fuzzy Composite Appraisal of Various Biological Indexes[ J ] . Journal of Harbin University of C E & Architecture, 2003, 33(6): 50—54 (in Chinese)

## 附中文参考文献:

- [ 1 ] 秦寿康. 综合评价原理与应用[ M ] . 北京: 电子工业出版社, 2003: 120—132
- [ 2 ] 梁德华, 蒋火华. 河流水质综合评价方法的统一与改进[ J ] . 中国环境监测, 2002, 18(2): 63—66
- [ 3 ] 朱林, 吕宏兴. 地面水水质的模糊综合评价[ J ] . 西北水资源与水工程, 1994, 5(2): 27—33
- [ 4 ] 樊保东. 地下水水质模糊综合评价模型[ J ] . 中国农村水利水电, 1998(9): 29—32
- [ 5 ] 田启华, 杜义贤. 基于熵权模糊综合评判法的机械产品性能评价研究[ J ] . 中国制造业信息化, 2004, 33(3): 97—99
- [ 6 ] 程天, 张彩香. 基于熵权的模糊 AHP 法在填埋场选址中的应用[ J ] . 环境卫生工程, 2003, 12(2): 64—67
- [ 7 ] 郭存芝. 股票投资价值的熵权系数评价方法研究[ J ] . 南开经济研究, 2001(5): 65—67
- [ 8 ] 赵德勇, 宋辉. 基于熵权的改进型多指标综合评估方法及应用[ J ] . 军械工程学院学报, 2001, 13(3): 47—51
- [ 9 ] 方大春, 刘国林, 张连蓬, 等. 信息熵在投资决策中的应用[ J ] . 价值工程, 2004(2): 115—117
- [ 10 ] 李旭宏, 李玉民, 顾正华, 等. 基于层次分析法和熵权法的区域物流发展竞争态势分析[ J ] . 东南大学学报(自然科学版), 2004, 34(3): 398—401
- [ 11 ] 周梅华. 可持续消费测度中的熵权法及其实证研究[ J ] . 系统工程理论与实践, 2003(12): 25—31
- [ 12 ] 徐森泉, 胡志根, 刘全, 等. 基于熵权的导流标准多目标决策分析[ J ] . 中国农村水利水电, 2004(8): 45—47
- [ 13 ] 汤瑞凉, 郭存芝, 董晓娟. 灌溉水资源优化调配的熵权系数模型研究[ J ] . 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(1): 18—21
- [ 14 ] 林运东, 门宝辉, 贾文善. 熵权系数法在水体营养化类型评价中的应用[ J ] . 西北水资源与水工程, 2003, 13(3): 27—28
- [ 15 ] 孟庆生. 信息论[ M ] . 西安: 西安交通大学出版社, 1989: 19—36
- [ 16 ] 邱宛华. 管理决策与应用熵学[ M ] . 北京: 机械工业出版社, 2002: 193—196
- [ 17 ] 刘会娟, 曲久辉. 三峡库区城市江段总体水环境质量综合评价[ J ] . 环境科学, 2002, 23(1): 74—77
- [ 18 ] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB3838-2002 地表水环境质量标准[ S ] . 北京: 中国环境科学出版社, 2002
- [ 19 ] 潘峰, 付强, 梁川. 模糊综合评价在水环境质量综合评价中的应用研究[ J ] . 环境工程, 2002, 20(2): 58—61
- [ 20 ] 胡群革, 陈海雄, 许晓东. 地面水环境质量模糊综合评价[ J ] . 西北水资源与水工程, 2000, 11(2): 19—23
- [ 21 ] 邱立平, 杜茂安, 张大庆. 多项生物指数模糊综合评价的综合探讨[ J ] . 哈尔滨建筑大学学报, 2003, 33(6): 50—54