

基于熵值和模糊贴近度的区域水资源承载力评价

朱记伟, 解建仓, 黄银兵, 肖瑜

(西安理工大学 教育部西北水资源与环境生态重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 水资源承载力分析评价是区域水资源开发利用及社会经济协调发展的前提和关键。本研究构建了基于“水资源-社会经济-生态环境”的水资源承载力评价指标体系,采用熵值法与非对称模糊贴近度分别计算评价各指标权重与承载力等级,并结合庆阳地区水资源现状进行了实例分析。评价结果表明:熵值法和非对称模糊贴近度相结合,用于区域水资源承载力分析评价的方法可行而有效;生态环境因素、水资源因素与社会经济因素在研究区水资源承载力中的影响比重分别为0.4162、0.351、0.2328;同时,庆阳地区水资源承载力等级为 v_4 (贴近度为0.9907),表明该地区水资源现状承载力十分脆弱,迫切需要进行水资源科学规划和合理利用。

关键词: 熵值法; 模糊贴近度; 区域水资源; 水资源承载力

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)05-0001-05

Evaluation of regional water resources carrying capacity based on entropy value and fuzzy nearness

ZHU Jiwei, XiE Jiancang, HUANG Yinbing, XIAO Yu

(Northwest Key Laboratory of Water Resource and Environment Ecology of Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Water resources carrying capacity evaluation is the premise and key of regional water resources development and utilization and social economic coordinated development. The water resources carrying capacity evaluation index system was constructed based on the "water resources - social economy-ecological environment", and the entropy value and fuzzy nearness were used to evaluate the weight of each index and carrying capacity grade respectively. Finally, practical example of the water resources present situation in Qingyang is given to show the application of the methods. The evaluation results indicate that the combination of entropy method and non symmetric fuzzy nearness for regional water resources carrying capacity evaluation is feasible and effective; the factors of ecological environment water resources and social economic in the water resources carrying capacity of the study area account for effect ratios 0.4162, 0.351, 0.2328 respectively; at the same time, the Qingyang region resource carrying capacity grade is v_4 (fuzzy nearness was 0.9907), which indicates that the region water resources carrying capacity is very weak, scientific planning and rational utilization of water resources are need to carry out urgently.

Key words: entropy method; fuzzy nearness; regional water resources; carrying capacity of water resources

水资源是决定区域经济发展基础性的自然资源和战略性的经济资源,水资源开发、生态环境保护和经济社会发展相协调,是区域稳健可持续发展的基本前提。同时,城市化进程过快、工业规模发展、产业结构失调等造成水资源成为诸多区域发展的“瓶颈”因素。在一定技术水平、生产条件、人口数量、水资源总量背景下,科学评价水资源承受区域经济活动的能

力,即水资源承载力,对有效缓解区域水资源的战略性作用和严峻性现状之间的矛盾意义重大。

对水资源承载力分析评价方面,国内外诸多学者开展了相关研究,其成果主要分为以下两个方向:其一,从承载力的概念和内涵分析出发,为水资源承载力研究提供新思路和理论基础。研究代表者有 P. Duarte (2003)、Megan Konar (2012)、刘登伟

收稿日期:2012-07-11; 修回日期:2012-07-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51079120);陕西省科学计划研究项目(2012JQ5014);西安理工大学博士启动基金(118-211103)资助

作者简介:朱记伟(1982-),男,山东日照人,博士,讲师,主要从事水文水资源、水资源管理方向研究。

通讯作者:解建仓(1963-),男,陕西眉县人,教授,博士生导师,主要从事水文及水资源研究。

(2011)、颜莹莹等^[1-4]。其二,以某区域或城市为研究对象,研究其水资源承载力能力。研究代表者有:王海兰、牛晓耕(2011),宰松梅、温季等(2011),张国飞、刘廷玺等(2011),许朗、黄莺等(2012),王彬、何通国等(2012)等^[5-9]。在已有研究成果中,研究者主要采用层次分析法(AHP)、RBF神经网络模型以及最大隶属度原则等,源于上述方法的主观性、收敛速度慢及信息考虑不全等局限,造成了对水资源承载力评价的不准确或失效。鉴于此,本文采用熵值法和模糊非对称贴近度原则法,分别进行水资源承载力体系构建及等级评价研究,二者组合可以有效规避已有研究方法的主观偏差、信息遗漏等缺陷,从而确保水资源承载力研究的精确性。

1 区域水资源承载力指标体系构建

水资源系统的开发利用,受多重因子的动态影响,从而决定了水资源承载力研究指标的复杂性、难以量化性及动态性。而准确、客观、全面、科学的指标体系,是水资源承载力评价的前提和保障。因此,必须坚持科学性和简约性原则,构建一套指标间相互联系、相互制约,科学性与实用性、完备性与可操作性、静态性动态性相结合的综合评价体系。

结合已有研究成果,分析水资源系统-社会经济系统-生态系统的耦合关系,依据水资源支持-压力-响应原则,本文构建了基于“水资源-经济社会-生态环境”的区域复合水资源承载力指标体系。其中,水资源因素,即从水资源自身角度分析其承载力,主要指水资源利用经济效益、水资源安全程度、水资源分配程度、水源地水质安全性;经济社会因素,即在特定科学技术水平、生产力水平前提下,区域发展情况,主要指粮食水平、人口增长状况、GDP水平、各行业产值;生态环境因素,即在水资源与区域经济发展的协调程度,主要指水资源生态安全度、土地盐碱化程度、区域水资源经济环境生态发展关系,具体指标体系框架如表1。

表2 区域水资源承载力等级划分及等级特征

等级划分	等级特征
I (v_1)	水资源承载强,做到了水资源开发利用、经济发展、生态保护的协调发展,在这种情况下,可以在保持三者协调度的前提下适当加大水资源开发利用和经济发展力度;
II (v_2)	水资源承载力较强,水资源、经济发展、生态保护处于较协调的发展状态,此时,应加大对水资源保护力度,否则,将可能破坏区域发展与水环境的协调;
III (v_3)	水资源承载力较弱,水资源、经济发展、生态保护已处于非协调发展的状态,此时,必须加大环保投资额度及水资源治理工作力度;
IV (v_4)	水资源承载力弱,水资源、经济发展、生态保护处于严重非协调状态,水生态系统严重失调,极有可能引发水环境危机,此时,对高耗水、高污染行业,进行停业整顿。

表1 区域水资源承载力评价指标体系

目标层	准则层 (1级指标)	子准则层 (2级指标)
区域水资源承载力评价指标体系 F	水资源因素 F_1	水资源利用经济效益 F_{11} , 水资源安全程度 F_{12} , 水资源分配程度 F_{13} , 水源地水质安全性 F_{14}
	经济社会因素 F_2	粮食水平 F_{21} , 人口增长状况 F_{22} , GDP水平 F_{23} , 各行业产值 F_{24}
	生态环境因素 F_3	水资源生态安全度 F_{31} , 土地盐碱化程度 F_{32} , 区域水资源经济环境, 生态发展关系 F_{33}

2 区域水资源承载力评价研究方法

2.1 确定因素集

因素集 F 即评价对象或评价指标组成的集合, 设 $F = (F_1, F_2, F_3, \dots, F_m)$, 其中, $F_i \cap F_j = 0 (i, j \in m, \text{且 } i \neq j)$, $F_i = (F_{i1}, F_{i2}, F_{i3}, \dots, F_{im}) (i = 1, 2, 3, \dots, k)$, F 为目标层因素集, F_i 为准则层因素集, F_{in} 为子准则层因素集^[10], 具体到表1的区域水资源承载力评价体系中。

2.2 确定评语集

评价对象等级的集合组成评语集, 针对区域水资源的不同具体情况, 建立不同等级的评语级, 有利于理清区域水资源承载力所处的具体水平层次, 为制定科学合理的需水、供水、排水方案具有奠定基础。鉴于影响水资源承载力因子的复杂性, 并参考《国家环保局城市环境综合整治定量考核目标》将评语级划分为4个等级: 等级I、等级II、等级III、等级IV^[11], 并设 v_1, v_2, v_3, v_4 分别代表上述4个等级, 可知评语集 $V = (v_1, v_2, v_3, v_4)$ 各等级具体含义如表2。

2.3 确定隶属度矩阵

设 C 为区域水资源承载力评价指标体系, 由上述分析可知, 系统中共有11项具体评价指标, 由此可定义区域水资源承载力评价指标特征值为 $C = [c_1, c_2, c_3, \dots, c_i]$, 其中 c_i 为指标 i 的特征值, 且 $i = 1, 2, 3, \dots, 11$ 。依据隶属度函数定义^[10], 分别计算各特

征值 c_i 对应的隶属度 m_{ij} , 实现了个指标值对区域水资源承载力最终值解释程度量化, 从而可以得到区域水资源承载力评价指标的隶属度模糊评价矩阵:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1t} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2t} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ m_{k1} & m_{k2} & \cdots & m_{kt} \end{bmatrix} = (m_{ij})_{k \times t} \quad (1)$$

式中: m_{ij} 为承载力指标 i 的 j 级隶属度值, $i = 1, 2, 3, \dots, k; j = 1, 2, \dots, t$; 且 $k = 11, t = 4$ 。

2.4 熵值法确定评价指标权重

对于评价指标权重的确定, 国内外学者已经提出了多种计算权重的方法, 如德尔菲法、AHP 方法、熵值法、主成分分析法、因子分析法等^[12]。在信息论中, 熵是对不确定性的一种度量。信息量越大, 不确定性就越小, 熵也就越小; 信息量越小, 不确定性越大, 熵也越大。它是用客观的信息量的大小来确定权重^[13], 该方法在很大程度上规避了评价指标权重计算的主观因素, 使得评价结果更贴近实际, 具有客观性与科学性。该方法计算步骤为^[14]:

(1) 构建 k 个评价指标 t 个事物的判断矩阵。

$$M_{kt} = [m_{ij}] \quad (\text{其中}, i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, t)$$

(2) 将判断矩阵归一化处理。得到归一化判断矩阵 N 。处理原则:

$$N_{ij} = \begin{cases} \frac{(v_{ij} - v_{\min})}{(v_{\max} - v_{\min})} & \text{对大者为优的指标} \\ \frac{(v_{\max} - v_{ij})}{(v_{\max} - v_{\min})} & \text{对小者为优的指标} \end{cases} \quad (2)$$

(3) 定义评价指标的熵及模糊熵:

$$\textcircled{1} \text{ 定义熵。} H_i = \frac{1}{\ln k} \left(\sum_j f_{ij} \ln f_{ij} \right) \quad (i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, t) \quad (4)$$

$$f_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{j=1}^t n_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, t) \quad (5)$$

其中: n_{ij} 代表归一化判断矩阵 N 中的元素。当 $f_{ij} = 0$ 或 1 时, $\ln f_{ij} = 0$, 这显然与水资源信息的无序性、复杂性及不确定性相违背, 因此根据区域水资源信息的特征, 对 f_{ij} 做如下修正:

$$f_{ij} = \frac{1 + n_{ij}}{\sum_{j=1}^t (n_{ij} + 1)} \quad (i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, t) \quad (6)$$

② 定义模糊熵^[15]。为了开展下文模糊贴近度评价水资源承载力等级研究, 这里对描述模糊集模糊性程度的模糊熵定义为 $D = \{d_1, d_2 \cdots d_k\}$, 其中, 第 i

个个指标的模糊熵值为:

$$d_i = \frac{1}{t} \sum_j u(m_{ij}) \quad (7)$$

式中: $u(m_{ij}) = -m_{ij} \log m_{ij} - (1 - m_{ij}) \log (1 - m_{ij})$ 。

(4) 计算熵权。界定了第 i 个水资源承载力评价指标的熵后, 可计算第 i 个评价指标的熵权值, 令指标权重向量为 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$ 即:

$$w_i = \frac{1 - H_i}{k - \sum_{i=1}^k H_i} \quad (0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^k w_i = 1) \quad (8)$$

2.5 基于模糊贴近度水资源承载力等级评价

贴近度是衡量两个模糊子集接近程度的一种度量方法, 分为对称贴近度和非对称贴近度^[16]。张晓平^[17]、魏德才^[10]都证明了非对称贴近度在等级界定计算中呈有效性, 因此本文采用非对称贴近度计算区域水资源承载力等级。

(1) 确定模糊评价集。设模糊综合评价集为 B , 则:

$$B = W \times M = (b_j) \quad (9)$$

式中: $b_j = \sum_i w_i u_{ij}, j = 1, 2, \dots, t$ 。

(2) 运用非对称贴近度确定水资源承载力等级。确定步骤如下^[17]:

① 定义非对称贴近度。

$$N(A, B) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |u_A^{1/p}(u_k) - u_B^{1/p}(u_k)|^k \quad (10)$$

若 $b_i = \max_{1 \leq j \leq c} (b_j)$, 则 D_i 是 v_k 的特征子集。

② 对 B 进行标准化。标准化原则为, 先把 b_i 排到第 c 位, $i \in i_c$, 对任何 $i_1, i_2 \in i_c$, 若 $|i_1 - i| > |i_2 - i|$ 或当 $i_1 > i_2$ 时, $|i_1 - i| = |i_2 - i|$, 则把 b_{i_1} 放到 b_{i_2} 的前面。标准化后记为: $B^{(i)} = (b_1^i, b_2^i, \dots, b_c^i)$, 同理对 D_i 进行标准化, 记为:

$$D_c = (d_1^c, d_2^c, d_3^c, d_4^c) \quad (11)$$

③ 计算非对称贴近度 $N(B, D_i)$ 。

$$N(B, D_i) = N(B^{(i)}, D_c) = 1 - \frac{1}{c} \sum_{r=1}^c |(b_r^i)^p - (d_r^c)^p|^{1/r} \quad i \in i_c \quad (12)$$

④ 判断承载力等级。若 $N(B, D_k) = \max_{1 \leq i \leq c} N(B, D_i)$, 则水资源承载力评价结果为 v_k 。 (13)

3 庆阳地区水资源承载力分析评价

3.1 研究区概况

庆阳市位于甘肃省的东部, 介于东经 $106^\circ 22' \sim 108^\circ 42'$, 北纬 $35^\circ 16' \sim 37^\circ 19'$ 之间, 总土地面积 2.71 万 km^2 。市内流域面积为 2.36 万 km^2 , 占全市总面积的

86.9%,境内较大的支流有马莲河、蒲河、洪河、四郎河、葫芦河等。全市多年平均降水量 505 mm,且存在地域分布不均,季节分布不匀特征;河川多年平均径流量只有 14.5 亿 m^3 ,其中入境水 6.7 亿 m^3 ,自产水仅为 7.8 亿 m^3 ,水资源人均占有量 360 m^3 ,是全省的 25%,是全国的 13%。在极其有限的水资源中,由于马莲河上游约 2 500 万 m^3 的苦水下泄,造成整个干流 4.75 亿 m^3 (占全市河川年径流总量的三分之一)的水质变差,不能利用,使得本就十分贫乏的水资源愈加紧缺。庆阳地区石油天然气储量相当丰富,陇东油区总面积达 5 万 km^2 ,石油天然气总资源量 40 亿 t,现已探明石油地质 5.16 亿 t。庆阳市石油开采及化工产业的发展壮大,对区域经济社会的发展起到了积极的推动作用。资源开发与地方经济发展、水资源开发及环境保护之间的矛盾日益突出,严重制约和影响着经济社会的全面协调可持续发展和全面建设小康社会目标的实现。科学分析评价庆阳地区水资源承载力对区域水资源科学规划及合理利用具有重要的意义。

3.2 研究区承载力影响因素调查统计

为了更好协调庆阳市经济发展和水资源开发利用的关系,课题组与中国水科院水资源所联合承担《庆阳市水资源规划》期间,由 30 位水资源专家组成了评价调查小组,以问卷调查及实地考察的方式对表 1 中各子因素进行了单因素分析,每个因素在相应等级下的专家评价结果如表 3 所示。

表 3 庆阳市影响水资源承载力指标调查统计结果

统计指标	v_1	v_2	v_3	v_4
水资源利用经济效益 F_{11}	5	12	10	3
水资源安全程度 F_{12}	2	6	9	13
水资源分配程度 F_{13}	1	3	11	15
水源地水质安全性 F_{14}	0	2	10	18
粮食水平 F_{21}	6	10	12	2
人口增长状况 F_{22}	7	11	11	1
GDP 水平 F_{23}	22	5	3	0
各行业产值 F_{24}	12	13	4	1
水资源生态安全度 F_{31}	4	9	12	5
土地盐碱化程度 F_{32}	9	7	9	5
区域水资源经济环境生态发展关系 F_{33}	2	4	10	14

3.3 研究区承载力指标权重及贴近度计算

(1) 构造模糊评判矩阵。根据隶属度函数定义及表 3 构造模糊评判矩阵如下:

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0.139 & 0.346 & 0.295 & 0.220 \\ 0 & 0.427 & 0.403 & 0.170 \\ 0.214 & 0.344 & 0.301 & 0.141 \\ 0.285 & 0.242 & 0.291 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} 0.168 & 0.441 & 0.272 & 0.119 \\ 0.069 & 0.376 & 0.393 & 0.162 \\ 0.298 & 0.165 & 0.537 & 0 \\ 0 & 0.346 & 0.267 & 0.387 \end{bmatrix}$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} 0.205 & 0.266 & 0.372 & 0.157 \\ 0 & 0.418 & 0.472 & 0.110 \\ 0 & 0.514 & 0.267 & 0.219 \end{bmatrix}$$

(2) 指标权重计算。由公式(2)~(6)以及公式(8)可计算得各指标的权重如下:

$$W_1 = [0.1590 \quad 0.1730 \quad 0.3957 \quad 0.2720]$$

$$W_2 = [0.1051 \quad 0.3511 \quad 0.4047 \quad 0.1391]$$

$$W_3 = [0.4247 \quad 0.2108 \quad 0.3645]$$

$$W = [0.3500 \quad 0.2328 \quad 0.4162]$$

再由公式(9)可通过加权平均,可以计算出:

$$B_1 = W_1 M_1 = [0.1347 \quad 0.2162 \quad 0.3795 \quad 0.2696]$$

$$B_2 = W_2 M_2 = [0.0835 \quad 0.1762 \quad 0.3908 \quad 0.3495]$$

$$B_3 = W_3 M_3 = [0.1083 \quad 0.2148 \quad 0.3022 \quad 0.3747]$$

$$B = WM = [0.0753 \quad 0.1841 \quad 0.3403 \quad 0.4003]$$

(3) 基于非对称贴近度的评价。

① 由公式(11)对 B 进行标准化处理得:

$$B^{(1)} = [0.0272 \quad 0.1514 \quad 0.2293 \quad 0.5921]$$

$$B^{(2)} = [0.0272 \quad 0.2293 \quad 0.1514 \quad 0.5921]$$

$$B^{(3)} = [0.1514 \quad 0.0272 \quad 0.5921 \quad 0.2293]$$

$$B^{(4)} = [0.0272 \quad 0.2293 \quad 0.1524 \quad 0.5921]$$

② 由公式(12)计算得:

$$N(B^{(1)}, D_4) = 0.5862 \quad N(B^{(2)}, D_4) = 0.7275$$

$$N(B^{(3)}, D_4) = 0.9103 \quad N(B^{(4)}, D_4) = 0.9907$$

③ 由公式(13)得到:

$$N(B, D_4) = \max_{1 \leq i \leq 4} N(B, D_4) = N(B^{(4)}, D_4) = 0.9907$$

由计算过程得知,50%左右的调查对象都认为庆阳市水资源安全程度、分配程度、水质安全程度以及区域水资源经济环境生态发展关系矛盾十分尖锐,而且通过熵值法计算可得知,这三项二级指标对水资源承载力的影响重大,对一级指标的影响权重分别高达:0.4247、0.3957、0.3645。这一调查计算结果与庆阳市水资源分布不均、化工业发展引起严重水质性缺水以及水资源问题已成该市经济发展的严重桎梏相吻合,结果可信。由非对称模糊贴近度计算可知,庆阳市水资源承载力等级为 v_4 ,即区域水资源承载力弱,水资源、经济发展、生态保护处于严重非协调状态。

4 计算结果讨论

通过对已有研究成果的综述分析,本文结合熵值法

和模糊贴近度对区域水资源承载力问题进行了探讨,并结合甘肃省庆阳地区进行了实例分析,得到结论:

(1)熵值法和非对称模糊贴近度相结合能较有效解决水资源承载力分析问题。影响水资源的开发利用因子的复杂性、多重性、动态性与不确定性,增加了供需量平衡关系分析难度。而水资源承载力分析要兼顾其数量、质量、承载量等,其难度远胜于供需平衡分析。将具有客观性特征的熵值法与具有有效性的非对称贴近度相结合,是解决水资源承载力复杂问题的方法路径。通过实例分析,得出了庆阳水资源承载力脆弱的结论,与其水资源矛盾现状相吻合、结论可信,同时也验证了两种方法相结合分析水资源承载力难题可行而有效。

(2)提升区域水资源承载力生态环境因素、水资源因素与社会经济因素都不可轻视。通过熵值法的权重求解可知,上述三因素对水资源承载力影响权重分别为:0.4162、0.351、0.2328。结论表明,承载力评价时不能单从水资源自身因素出发,而必须保障上述三因素都处于良性状态。三因素中关键影响因子分别为:水资源生态安全度(0.4247)、区域水资源经济环境生态发展关系(0.3645);水资源分配程度(0.3957)、水源地水质安全性(0.272)、水资源安全程度(0.1732);GDP水平(0.4047)、人口增长状况(0.3511)、各行业产值(0.1391)。

(3)庆阳水资源综合规划及严格管理势在必行。通过非对称贴近度计算可知,庆阳地区水资源承载力等级与标准承载力等级 v_4 贴近程度高达0.9907,即该市水资源现状承载力已十分脆弱,水生生态系统严重失调,极有可能引发水环境危机。对该地区水资源进行综合规划已亟不可待,结合小组调研实践、已有研究成果及国际宏观政策,本文提出以下参考建议:其一,进行水资源开发利用和保护规划。严格审查取水许可,新建、改建和扩建项目,须按规定进行水资源论证,并对不同行业取水实施分级动态监测,此外,不断引进和改进污水处理设备和技术,提高污水复用率;其二,须加强庆阳市区域水资源合理配置和优化调度,实现资源优化配置,从时间和空间上提升承载力,如盐环靖工程等;其三,加大对马莲河苦咸水的开发利用。马莲河为庆阳市第一大支流,但水质破坏致使其成为“苦水河”,加大政策支持力度与资金扶持额度对其进行处理和利用对解决区域水资源危机意义重大;其四,制定庆阳市区域,尤其是石化行业水资源严格管理“三条红线”量化目标,综合经济、法律、行政、技术、信息化

等手段实现其严格管理。

参考文献:

- [1] Duarte P, Meneses R, Hawkins A J S, et al. GrantMathematical modelling to assess the carrying capacity for multi-species culture within coastal waters[J]. Ecological Modelling, 2003, 168(1-2): 109-143.
- [2] Megan Konar, Jason Todd M. Hydrology as a driver of biodiversity: Controls on carrying capacity, niche formation, and dispersal[J]. Advances in Water Resources, 2012, 3: 2-9.
- [3] 刘登伟. 水资源承载力概念中的二元属性——水资源承载力研究的新突破[J]. 水利发展研究, 2011, 11(9): 14-17.
- [4] 颜莹莹. 城市水资源承载力的概念和内涵[C]//中国城市规划学会. 规划50年——2006中国城市规划年会论文集(下册). 中国城市规划学会, 2006: 621-625.
- [5] 王海兰, 牛晓耕. 基于水资源承载力的东北三省虚拟水贸易实证研究[J]. 国际贸易问题, 2011(5): 69-79.
- [6] 宰松梅, 温季, 仵峰, 等. 河南省新乡市水资源承载力评价研究[J]. 水利学报, 2011, 41(7): 783-788.
- [7] 张国飞, 刘廷玺, 姜慧琴, 等. 海拉尔河流域水资源承载力模糊综合评价[J]. 人民黄河, 2011, 31(10): 48-50.
- [8] 许朗, 黄莺, 刘爱军. 基于主成分分析的江苏省水资源承载力研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(12): 1468-1474.
- [9] 王彬, 何通国, 李燕群, 等. 基于水资源承载力的城市再生水利用研究——以四川省德阳市为例[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 242-245.
- [10] 魏德才, 张争敏, 李闯, 等. 基于模糊贴近度和熵权的航空装备维修安全综合评价[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(2): 107-111.
- [11] 王俭, 孙铁珩, 李培军, 等. 基于人工神经网络的区域水环境承载力评价模型及其应用[J]. 生态学杂志, 2007, 26(1): 139-144.
- [12] 陈林, 许其功, 李铁松, 等. 模糊物元识别模型在巢湖水体富营养化评价中的应用研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(4): 729-736.
- [13] 陈雷, 王延章. 基于熵权系数与TOPSIS集成评价决策方法的研究[J]. 控制与决策, 2003, 18(4): 456-459.
- [14] 张会涓, 陈然, 赵言文. 基于模糊物元模型的区域水环境承载力研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 186-189.
- [15] Deluca A, Termin S. A definition of non-probabilistic entropy in the setting of fuzzy set theory[J]. Information and Control, 1972, 20(4): 301-312.
- [16] 于兆吉, 胡祥培, 毛强. 基于贴近度的模糊非线性信贷优化问题研究[J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(3): 453-457.
- [17] 张晓平. 基于贴近度的模糊综合评判结果的集化[J]. 山东大学学报(理学版), 2004, 39(2): 25-29.