辽宁海岸城市水资源紧缺程度量化评价方法研究*

王 耕[1] 吴 伟[2]

(1.辽宁师范大学城市与环境学院 大连 116029; 2.大连理工大学环境与生命学院 大连 116024)

摘 要 针对目前水资源紧缺程度量化评价方法的缺乏以及主客观权重的缺陷，选取区域干旱指数、人均水资源占有量、水资源开发强度、地下水开采模数、水资源利用率、产水模数、灌溉率、万元工业产值耗水量和农田灌溉亩均用水量等9个指标，通过引入模糊二元对比分析法权重与熵权的组合权重，提出了一种新的兼顾主观与客观统一的水资源紧缺程度量化评价模糊模型。模型同时考虑了决策者意图和方案本身属性，因而可使方案排序结果更为合理适用，最后将其应用于辽宁海岸城市水资源紧缺程度评价中。结果表明，辽宁中部海岸城市水资源短缺程度最高，应采取有效的风险管理措施。

关键词 海岸城市；水资源紧缺；熵值；模糊优选；评价

按照环境灾害风险的定义，水资源紧缺程度表示水资源可利用量满足不了环境风险受体对水资源的需求，即供给小于需求(或称负载小于抗力)的程度。水资源紧缺程度属于资源型环境灾害风险的一种，是由于人类盲目开发和利用水资源所致，通常表现为水资源可利用量的时空分布，它是水资源蕴藏量与水资源再生率(对于不可再生资源，其再生率为零)、水资源重复利用率与水资源利用量的函数。水资源紧缺风险形成机理复杂，精确地计算水资源紧缺程度，是实施管理措施的重要前提。目前，关于水资源紧缺程度的评价方法可归纳为两类：(1)采用多指标建立指标系统来评价紧缺程度。如，阮本清等人结合风险分析与模糊评判法进行了水资源短缺风险的综合评价[1]。(2)采用单一指标即系统指标来评价紧缺程度。如，韩宇平，刘涛等人从概率风险角度评价了水资源系统风险[2-3]。对这一基础问题的研究，国内外仍缺乏量化的理论和方法[4-7]。如何建立一个物理意义明确，并能精确计算，以多指标为基础的单一评价指标，是目前水资源紧缺程度评价中仍未解决好的问题。水资源紧缺程度是时间维上的模糊概念，采用模糊数学中隶属度来描述拟评价的水资源紧缺程度在不同时间的中介过渡，并以精确的数学语言表达紧缺程度概念的模糊性是目前水资源紧缺程度评价中一种较好的量化方法。本研究采用陈守煜提出的模糊优选模型[8-9]，将多个评价指标转化为紧缺程度单一指标，并以辽河流域为例进行个案研究。

*国家自然科学基金"海岸带综合管理与区域可持续发展模式研究"资助项目(70573018)；国家教育部科技司"海岸带综合管理与区域经济发展研究"资助项目(105054).

一、水资源紧缺程度的模糊集量化评价方法

(一)紧缺程度相对隶属度

设待评价的 n 个地区 X,有 m 个指标如水资源利用率等构成计算 X 的紧缺程度的指标集,每个指标的实测值为:

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

根据指标与紧缺程度之间呈正相关或负相关两种情况,采用不同的属性规格化公式。当呈正相关时,相对隶属度可按下式确定

$$r_{ij}=\frac{x_{ij}-x_{i\min}}{x_{i\max}-x_{i\min}} \quad (2)$$

相反,呈负相关时,相对隶属度可按下式确定

$$r_{ij}=\frac{x_{i\max}-x_{ij}}{x_{i\max}-x_{i\min}} \quad (3)$$

将矩阵式(3)应用到式(4)和式(5)规格化,得规格化矩阵。取矩阵中的两个极点为$\vec{y}$=(1,1,…,1)与$\vec{g}$=(0,0,…,0)作为构建求解紧缺程度的目标函数的比较基准。

求解紧缺程度是在 m 个指标论域中进行的,设 m 个指标的权重为 w_1、w_2、…、w_m,并满足归一化条件。设第 j 个水资源紧缺度对极点$\vec{y}$=(1,1,…,1)的相对隶属度为 $u_{(j)}$,根据余集定理,对另一极点$\vec{g}$=(0,0,…,0)的相对隶属度为 $1-u_{(j)}$。于是各评价对象与两个极点的差异可分别用加权广义距离:

$$D_{yj}=u_{(j)}\left\{\sum_{i=1}^{m}(w_i(1-r_{ij}))^p\right\}^{1/p} \quad (4)$$

$$D_{gj}=(1-u_{(j)})\left\{\sum_{i=1}^{m}(w_i r_{ij})^p\right\}^{1/p} \quad (5)$$

式中,p 为距离系数。为了确定 u_j,建立目标函数:

$$\min F(u_{(j)})=D_{yj}^2+D_{gj}^2 \quad (6)$$

令 $F(u_j)$对 u_j 的导数为 0,解得评价对象 j 的紧缺程度为:

$$u_{(j)}=\frac{1}{1+\left\{\dfrac{\sum_{i=1}^{m}[w_i(r_{ij}-1)]^p}{\sum_{i=1}^{m}(w_i r_{ij})^p}\right\}^{2/p}} \quad (7)$$

(二)熵值—模糊组合权值法

1.模糊二元对比分析法

设水资源紧缺程度评价有 m 个目标(或指标)组成评价集 D 的评价目标集:

$$D=\{p_1,p_2,\cdots,p_m\} \quad (8)$$

对评价目标集即公式(11)进行二元对比,确定排序标度,根据语气算子与模糊标度值的对应关系,对各目标进行二元对比重要性比较,确定模糊标度值为权值 ω_{fi}。

2.熵值法

根据所给定目标 $B_i(i=1,2,\cdots,m)$的性质和特点,分别对所有方案 D_j 的各目标值 $r_{ij}=(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n)$进行归一化处理,得到规格化后的标准化矩阵 R_{ij},且 $r_{ij}\in[0,1]$,计算各指标的熵:

$$H_i=-k\sum_{j=1}^{n}f_{ij}\ln f_{ij} \quad (9)$$

式中,$f_{ij}=\dfrac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^{n}r_{ij}}$,并且假定当 $f_{ij}=0$ 时,$f_{ij}\ln f_{ij}=0$;$k=\dfrac{1}{\ln n}$也可以选择 k 使得 $0\leqslant H_i\leqslant 1$,则各指标熵权值为:

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

式中，H_i 为第 i 个指标的熵，m 为评价指标的个数。

3.熵值—模糊组合权重法

各评价因素重要程度的组合权值向量

$$\omega_i=\omega_{fi}\cdot\omega_{ei}/\sum_{j=1}^{m}(\omega_{fi}\cdot\omega_{ei}) \tag{11}$$

其中 $0\leqslant\omega_i\leqslant1$ 和 $\sum_{j=1}^{m}\omega_i=1$。

二、辽宁沿海城市水资源紧缺程度计算

近年来辽宁省经济快速发展，各行各业对水资源开发利用都提出了新的要求，水资源供需矛盾日益突出。通过对辽宁省海岸地区水资源影响因素的综合分析，参照全国水资源供需分析中的指标体系，选取海岸 30 个县（市）区的干旱指数、人均水资源占有量、水资源开发程度、地下水开采模数、水资源利用率、产水模数、灌溉率、万元工业产值耗水量和农田灌溉亩均用水量 9 个指标计算水资源紧缺程度的相关指标。基于文献[3]中的有关标准，当前情况下 9 个指标的标准值见表 1。

应用文献[9]的模糊语气算子表，可以得到 9 个指标归一化的权向量为：

$$w_{fi}=(0.079,0.109,0.094,0.094,0.15,0.109,0.117,0.124,0.124) \tag{12}$$

利用式(19)和式(20)，得到指标熵权归一化向量为：

$$\omega_{ei}=(0.005,0.014,0.003,0.167,0.158,0.161,0.16,0.167,0.167) \tag{13}$$

利用式(21)，得到各评价因素熵值—模糊组合权重向量为：

$$\omega_i=(0.003\ 2,0.012\ 5,0.002\ 4,0.131\ 6,0.199\ 5,0.147\ 2,0.156\ 1,0.173\ 8,0.173\ 7) \tag{14}$$

将原始数据规格化值代入式(7)，得到辽宁沿海城市 30 个县(市)区水资源紧缺程度值(表 2)。

三、结论

由表 2 中看出，辽宁长海县、鲅鱼圈区、凌海市、太和区和兴隆台区水资源紧缺程度最大，数值在 0.8 以上；庄河市、普兰店市、金州区和东港市水资源紧缺程度最小，数值在 0.4 以下。计算结果与欧盟环境综合项目的水资源紧缺风险的研究具有高度一致性。辽宁沿海地区经济开发方

表 1　辽宁沿海城市水资源紧缺程度评价指标标准值

评价指标	左极点 x_{imin}，紧缺程度为 0	右极点 x_{imax}，紧缺程度为 1
干旱指数	≤0.5	≥4
人均水资源占有量/m^3	≤100	≥1 000
水资源开发程度/%	≤10	≥40
地下水开采模数/(万 $m^3\cdot a^{-1}\cdot km^{-2}$)	≤0.25	≥4
水资源利用率/%	≤20	≥60
产水模数/(万 $m^3\cdot km^{-2}$)	≤4	≥15
灌溉率/%	≤20	≥60
万元工业产值耗水量/m^3	≤10	≥150
农田灌溉亩均用水量/m^3	≤200	≥800

表2 辽河流域县(市)区水资源紧缺程度

沿海县市区	水资源紧缺程度	沿海县市区	水资源紧缺程度	沿海县市区	水资源紧缺程度
长海县	1.000 0	龙岗区	0.680 2	西市区	0.555 8
鲅鱼圈区	0.999 8	双台子区	0.678 2	站前区	0.545 1
凌海市	0.879 4	旅顺口区	0.636 5	甘井子区	0.544 8
太和区	0.866 6	盘山县	0.635 2	盖州市	0.484 2
兴隆台区	0.791 3	大洼县	0.622 5	瓦房店市	0.480 3
凌河区	0.746 3	中山区	0.604 9	老边区	0.438 6
连山区	0.733 8	沙河口区	0.583 6	庄河市	0.329 9
南票区	0.709 8	绥中县	0.571 6	普兰店市	0.329 8
兴城市	0.707 4	西岗区	0.566 2	金州区	0.301 0
古塔区	0.702 5	大石桥市	0.559 7	东港市	0.282 8

式已经走向深度,水资源紧张,要实现水资源的可持续发展,经济类型必须由耗水型向节水型转变。

本研究利用了熵值法的客观性和模糊评价法的模糊性,提出了对水资源紧缺程度评价的一种组合赋权评价方法。这种赋权方法既能利用原有数据的固有信息,又能考虑评价人员的经验判断力,以得到每个评价因素的重要程度系数,弥补了两种方法的不足,能够得到比较准确的结果。该模型同时考虑了决策者意图和方案本身属性,因而可使方案排序结果更为合理适用,可以适用于水资源可持续发展度、生态安全等评价。

参考文献

[1] 阮本清,韩宇平,王浩,等. 水资源短缺风险的模糊综合评价[J]. 水利学报,2005, 36(8): 906-912.

[2] 刘涛, 邵东国. 水资源系统风险评估方法研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(6):66-71.

[3] 陈守煜. 复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2002:126-138.

[4] 王本德, 于义彬, 王旭华, 等. 考虑权重折中系数的模糊识别方法及在水资源评价中的应用[J].水利学报,2004, 35(1): 6-10.

[5] 王耕, 王利, 吴伟. 基于 GIS 辽河干流饮用水源地生态安全演变趋势研究[J]. 应用生态学报,2007,18(11):2 548-2 553.