DOI:10.3969/j.issn.1001-5485.2013.11.007 2013,30(11):28-31,38

基于模糊理论的宁波市水资源承载力评价应用

王 颖
(浙江同济科技职业学院,杭州 311231)

摘要:水资源可持续承载能力涉及到整个资源、经济、环境等复杂系统,越来越受到广泛关注。以水资源承载力的若干指标作为评价因子,构建综合评判模糊数学模型,并将其应用于宁波市水资源承载能力评价,针对评价结果进行分析,验证评判模型的可靠性。结果表明,目前宁波市水资源开发利用已达到一定规模,但水资源承载力较低。应采用节水、外调水工程、调整产业结构、加强污水处理、改善水质等措施。

关 键 词:模糊识别;水资源承载力;评价指标体系; 宁波市
中图分类号:TV213 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-5485(2013)11-0028-04

水资源承载力是一个国家或地区持续发展过程中各种自然资源承载力的重要组成部分,对一个国家或地区的综合发展及其发展规模有着非常重大的影响,目前已经引起了众多学者的关注。

水资源承载力的定义虽然各家说法不尽相同,但均具有如下的特点:有限性、可增强性、动态性、模糊性、不确定性、多目标性等[1]。目前研究水资源承载力的方法有很多,如系统动力学方法、多目标分析法、背景分析法、简单定额估算法、综合指标法、模糊综合评价法等,本文采用模糊综合评价法,该方法充分考虑影响因素的不确定性及边界不清所带来的评价时难于归类的难题,在对水资源承载力评价中,可以防止遗漏任何信息和信息的中途损失,该方法具有独特的优越性[2]。

1 水资源承载力评价指标

水资源承载力研究涉及到社会、经济、环境、生态及资源在内的一个复杂系统。在这个系统内既有自然因素影响,又有社会、经济、文化等因素的影响。其主要影响因素包括水资源的数量、质量及开发利用程度、生产力水平、消费水平与结构、科学技术、人口与劳动力、其他资源潜力、政策、法规、市场、宗教、传统、心理等,水资源承载力指标体系也同样是一个复杂的系统。本文结合宁波市水资源的特点,构建其水资源承载力评价指标体系[3],各指标的定义与评价对象见表1。

表1 水资源承载力评价指标体系

Table 1 Assessment index system for the carrying capacity of water resource

评价指标	定义	评价对象
耕地灌溉率/%	灌溉面积与耕地面积之比	农业产业结构与用水量
水资源开发利用率/%	75%水文年型的开发利用量与水资源可利用量之比	水资源、工程能力
生活需水定额/(L·(d·人)$^{-1}$)	城镇与农村日用水定额	水资源、经济、社会、工程能力
供水模数/(万 m^3·km^{-2})	75%水文年型的供给量与土地面积之比	水资源、工程能力、经济、社会
需水模数/(万 m^3·km^{-2})	75%水文年型的需水量/土地面积	人口、经济、社会、环境
人均年综合供水指标/m^3	75%水文年型的供给量与总人口之比	人口、经济、社会、环境、工程能力、政策制度
生态环境用水率/%	生态环境用水量/总水量	水资源、生态环境

2 水资源承载力评价数学模型

模糊综合评价法是以模糊数学为基础,应用模糊关系合成原理,将一些边界不清、不易定量的因素定量化,从而进行模糊识别评价的方法[4]。

设有对水资源可持续利用承载力 $\tilde{A}$ 作识别的 n 个样本集合 $\boldsymbol{X}=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$,样本 j 的特征用 m 个指标特征值表示,即 $x_j=\{x_{1j},x_{2j},\cdots,x_{mj}\}^{\mathrm{T}}$,则 $\boldsymbol{X}$ 样本集可表示为 $m\times n$ 阶指标特征值矩阵:

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}=(x_{ij})。\quad(1)$$

收稿日期:2012-09-10; **修回日期**:2012-09-28
作者简介:王 颖(1965-),女,辽宁辽中人,副教授,硕士,研究方向为水文与水资源,(电话)13819162305(电子信箱)wangyingedu@163.com。

式中 x_{ij} 为样本 j 指标 i 的特征值，$i=1,2,\cdots,m$；$j=1,2,\cdots,n$。

样本集根据 m 个指标按 c 个级别的指标标准特征值进行识别，则有 $m\times c$ 阶指标特征值矩阵：

$$\boldsymbol{V}=\begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1c} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2c} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \cdots & v_{mc} \end{bmatrix}=(v_{ih})。\quad(2)$$

式中 v_{ih} 为级别 h 指标 i 的标准特征值，$h=1,2,\cdots,c$。

将两集合作相应的模数变换，其模糊数学模型为：

$$r_{ij}=\begin{cases} 0, & x_{ij}\leqslant v_{ic}\ 或\ x_{ij}\geqslant v_{ic}; \\ \dfrac{x_{ij}-v_{ic}}{v_{i1}-v_{ic}}, & v_{i1}>x_{ij}>v_{ic}\ 或\ v_{i1}<x_{ij}<v_{ic}; \\ 1, & x_{ij}\geqslant v_{i1}\ 或\ x_{ij}\leqslant v_{i1}。 \end{cases}\quad(3)$$

$$b_{ik}=\begin{cases} 0, & v_{ik}=v_{ic}; \\ \dfrac{v_{ik}-v_{ic}}{v_{i1}-v_{ic}}, & v_{i1}>x_{ik}>v_{ic}\ 或\ v_{i1}<x_{ik}<v_{ic}; \\ 1, & v_{ik}=v_{i1}。 \end{cases}\quad(4)$$

式中：r_{ij} 为样本 j 指标 i 的特征值对 $\tilde{A}$ 的相对隶属度；v_{i1} 和 v_{ic} 分别为指标 i 的 1 级、c 级标准值及标准值的相对隶属度；b_{ik} 为级别 k 指标对 i 的标准值对 $\tilde{A}$ 的相对隶属度。其标准特征值符合相对隶属度的定义。

根据上述模糊变换，得到相对隶属度的 $\boldsymbol{R}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 集合，用矩阵形式表示为：

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}=(r_{ij})\ ;\quad(5)$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1c} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2c} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mc} \end{bmatrix}=(b_{ik})\ 。\quad(6)$$

对以上两相对隶属度矩阵，利用二元对比定性排序原则，确定该论域 X 上评价指标的归一化权向量 $\boldsymbol{W}=(w_1,w_2,\cdots,w_m)$，由此建立模糊模式识别模型：

$$u_{kj}=\begin{cases} 0, & k<g_j\ 或\ k>q_j; \\ \left(d_{kj}^2\sum\limits_{l=g_j}^{q_i}d_{lj}^2\right)^{-1}, & d_{kj}\neq 0\ 或\ g_j\leqslant k\leqslant q_j; \\ 1, & d_{kj}=0\ 或\ r_{ij}=b_{ik}。 \end{cases}\quad(7)$$

式中：u_{kj} 为样本 j 对 $\tilde{A}$ 级别 k 的相对隶属度；d_{kj} 为 j 与级别 k 间的权距离；d_{kj} 采用欧式距离，$d_{jk}=\left\{\sum\limits_{i=1}^{m}[w_i(r_{ij}-b_{ik})]^2\right\}^{1/2}$；$g_j$ 及 q_j 分别为评价指标相对隶属度下限与上限值，$1\leqslant g_j<q_j\leqslant c$；根据矩阵 R 得样本 j 的 m 个指标相对隶属度为 $r_j=(r_{1j},r_{2j},\cdots,r_{mj})^{\mathrm{T}}$，分别与矩阵 $\boldsymbol{B}$ 中的行向量逐一对比，可得 r_j 落入矩阵 $\boldsymbol{B}$ 的级别下限为 g_j 及级别上限 q_j，且 g_j,q_j 满足约束条件，$\sum\limits_{h=g_j}^{q_j}u_{kj}=1$ 及 $\sum\limits_{k=1}^{c}u_{kj}=1$ 。$\boldsymbol{U}$ 的矩阵形式表示为

$$\boldsymbol{U}=\begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1c} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2c} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{m1} & u_{m2} & \cdots & u_{mc} \end{bmatrix}=(u_{ik})。\quad(8)$$

则水资源可持续利用承载力 $\tilde{A}$ 的 n 个样本归属于各级别[5-6]的级别特征值向量

$$\boldsymbol{H}=(1,2,\cdots,c)\cdot(u_{ik})=(\boldsymbol{H}_1,\boldsymbol{H}_2,\cdots,\boldsymbol{H}_n)\ 。\quad(9)$$

由以上模糊模式识别模型计算出相应的该区域水资源承载力评价结果，由此可以判定该区域水资源可持续利用下的承载能力状况，为水资源开发利用以及经济的发展提供依据。

3　应用实例分析

宁波位于我国海岸线中段，浙江省宁绍平原东端，即东经 120°55′~122°16′，北纬 28°51′~30°33′。东有舟山群岛为天然屏障，北濒杭州湾，西接绍兴市的嵊县、新昌、上虞，南临三门湾，并与台州的三门、天台相连。全市总面积 9 365 km^2，其中市区面积为 1 033 km^2。宁波属亚热带季风气候，温和湿润，四季分明，年平均气温16.2 ℃，平均气温以 7 月份最高，为28.8 ℃，1 月份最低，为 -4.2 ℃。多年平均降水量为1 517.1 mm，全市多年平均天然径流总量为73.36亿 m^3，地下水多年平均总量19.05亿 m^3。区内水系众多，由甬江流域和象山港、三门湾地区独流入海水系组成。水利设施类型齐全，中型以上水库 26 座，合计水库、河网兴利库容12.7亿 m^3。

随着宁波市水资源条件的变化和工业化、城镇化的蓬勃发展，以及产业结构、水资源开发利用规模与格局的调整，一定程度上加剧了宁波市水资源的短缺。分析研究区域水资源承载力显得十分重要。宁波市各分区现状年水资源的资料列于

表 2 中。

根据表 1 得到宁波市各分区水资源系统的指标特征值列于表 3。

根据研究区水资源禀赋条件、用水现状以及《浙江省行业用水定额》,并借鉴了他人成果[5],本次研究确定水资源承载力评价标准等级见表 4。

表 2 宁波市水资源资料

Table 2 Data of water resources in Ningbo city

分区	人口/万人	土地面积/万 hm^2	灌溉面积/万 hm^2	供水量/亿 m^3	可利用水量/亿 m^3	需水量/亿 m^3	水资源总量/亿 m^3	生态环境需水量/亿 m^3	评价区面积/km^2
市 区	322	5.88	5.79	14.05	6.95	14.40	19.87	1.23	2 393.4
余姚市	105	3.63	3.53	2.09	6.56	2.20	16.41	0.31	1 660.3
慈溪市	125	4.05	3.02	2.03	2.50	3.25	6.40	0.31	1 003.5
奉化市	60	2.00	1.85	1.05	4.70	0.98	11.66	0.17	1 341.0
宁海县	60	2.12	1.73	1.76	3.75	1.76	9.37	0.17	1 187.9
象山县	58	1.87	1.62	1.63	3.36	1.67	11.60	0.16	1 249.3
合计	730	19.55	17.53	22.61	27.82	24.26	75.31	2.35	8 835.4

表 3 宁波市现状年水资源承载力评价指标特征值

Table 3 Eigenvalues of the indexes of water resource's carrying capacity in the present year in Ningbo city

分区	耕地灌溉率/%	水资源开发利用率/%	生活需水定额/(L·(d·人)$^{-1}$)	供水模数/(万 m^3·km^{-2})	需水模数/(万 m^3·km^{-2})	人均年综合供水指标/m^3	生态环境用水率/%
市区	98.41	34.98	207.0	58.70	60.17	617.08	6.19
余姚市	97.61	39.98	172.5	12.60	13.30	1 562.86	1.89
慈溪市	74.51	39.06	155.0	20.20	32.40	512.00	4.84
奉化市	91.33	40.31	172.5	7.80	7.30	1 943.33	1.46
宁海县	81.76	40.02	172.5	14.80	14.80	1 561.67	1.81
象山县	86.79	29.00	155.0	13.00	13.40	2 000.00	1.38

表 4 宁波市水资源承载力评价指标等级取值

Table 4 Values of the assessment level of water resource's carrying capacity in Ningbo city

评价指标	耕地灌溉率/%	水资源开发利用率/%	生活需水定额/(L·(d·人)$^{-1}$)	供水模数/(万 m^3·km^{-2})	需水模数/(万 m^3·km^{-2})	人均年综合供水指标/m^3	生态环境用水率/%
1 级	100	40	180.0	40.0	100.0	600.0	2.0
2 级	95	35	160.0	60.0	80.0	1 750.0	3.0
3 级	90	30	140.0	80.0	60.0	2 250.0	4.0
4 级	85	25	120.0	100.0	40.0	3 000.0	5.0

评价标准等级中,1 级属于状况较差,表示水资源承载力已接近其最大值,水资源进一步开发利用的潜力很小,水资源利用率高,发展下去将发生水源短缺,制约社会经济的发展,这时应采取寻找新水源的对策。2 级对应水资源承载力中级水平,此时水资源还有一定的开发潜力,水资源利用率达到中等以上水平,应采取开源节流对策缓解水资源紧缺的压力。3 级对应水资源还有较大的承载潜力,水资源开发利用已具有一定规模,水资源利用率较低,但进一步开发的潜力较大,水资源的供给需求在一定程度上能满足其流域内的社会经济发展。4 级属情况较好,表示研究区水资源仍有较大的承载潜力,此时水资源开发规模很小、开发程度低、水资源利用率低、工农业及整个经济类型属耗水型,其供给情况较为乐观。

从上述资料可以建立评价影响因素矩阵 $\boldsymbol{X}$、对应的评价标准矩阵 $\boldsymbol{V}$:

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} 98.4 & 97.6 & 74.5 & 91.3 & 81.8 & 86.8 \\ 35.0 & 40.0 & 39.1 & 40.3 & 40.0 & 29.0 \\ 207.0 & 172.5 & 155.0 & 172.5 & 172.5 & 155.0 \\ 58.70 & 12.59 & 20.23 & 7.83 & 14.82 & 13.05 \\ 60.17 & 13.25 & 32.39 & 7.31 & 14.82 & 13.37 \\ 617 & 1\,563 & 512 & 1\,943 & 1\,562 & 2\,000 \\ 6.19 & 1.89 & 4.84 & 1.46 & 1.81 & 1.38 \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{V}=\begin{bmatrix} 100 & 95 & 90 & 85 \\ 40 & 35 & 30 & 25 \\ 180 & 160 & 140 & 120 \\ 40 & 60 & 80 & 100 \\ 100 & 80 & 60 & 40 \\ 600 & 1\,750 & 2\,250 & 3\,000 \\ 2 & 3 & 4 & 5 \end{bmatrix}。$$

应用模糊理论变换,式(3)、式(4)可得水资源可持续利用承载力 1 级标准对应的相对隶属度矩阵为:

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}0.106 & 0.159 & 1.000 & 0.578 & 1.000 & 0.881\\ 0.335 & 0.002 & 0.063 & 1.000 & 0.000 & 0.733\\ 0.000 & 0.125 & 0.417 & 0.125 & 0.125 & 0.417\\ 0.312 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000\\ 0.664 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000\\ 0.007 & 0.401 & 1.000 & 0.560 & 0.401 & 0.583\\ 1.000 & 0.000 & 0.948 & 0.000 & 0.000 & 0.000\end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}0.000 & 0.333 & 0.667 & 1.000\\ 0.000 & 0.333 & 0.667 & 1.000\\ 0.000 & 0.333 & 0.667 & 1.000\\ 0.000 & 0.333 & 0.667 & 1.000\\ 0.000 & 0.333 & 0.667 & 1.000\\ 0.000 & 0.479 & 0.688 & 1.000\\ 0.000 & 0.333 & 0.667 & 1.000\end{bmatrix}。$$

通过对以上矩阵分析及相关专家意见[2,6]。用二元对比定性排序原则,再经检验得到以上 7 项指标重要性排序一致性标度矩阵,从而计算出该 7 项评价指标的归一化权向量为

$$\boldsymbol{W}=(0.150,0.204,0.098,0.150,0.150,0.150,0.098)。$$

采用模糊模式识别模型式(7),计算得样本各级别的相对隶属度集合为

$$\boldsymbol{U}=\begin{bmatrix}0.180 & 0.100 & 0.163 & 0.129 & 0.000 & 0.162\\ 0.652 & 0.655 & 0.320 & 0.266 & 0.000 & 0.345\\ 0.117 & 0.169 & 0.313 & 0.392 & 0.228 & 0.343\\ 0.052 & 0.089 & 0.204 & 0.213 & 0.125 & 0.150\end{bmatrix}=(u_{ik})。$$

则各分区的水资源可持续利用承载力的级别特征值为

$$\boldsymbol{H}=(1,2,3,4)\cdot(u_{ik})=(2.04,2.227,2.56,2.69,1.19,2.48)。$$

该地区各分区的水资源承载力评价结果见表5。

表5　宁波市现状年水资源承载力评价结果

Table 5　Results of the assessment of water resource's carrying capacity in the present year in Ningbo city

分区	级别评价结果	分区	级别评价结果
市 区	2.04	奉化市	2.69
余姚市	2.27	宁海县	1.19
慈溪市	2.56	象山县	2.48

从评价结果可以看出,现状年宁波市各分区水资源承载力综合评价特征值最小值为宁海县1.19,而最大值为奉化市2.69。说明宁海县的水资源承载力已经较低,处于 1 级及 2 级之间,属于状况较差,表示水资源承载力已接近其最大值,水资源进一步开发利用的潜力很小,水资源利用率高,发展下去将发生水源短缺,应采取寻找新水源的对策。其他区域的水资源承载力处于 2 级及 3 级之间,对应水资源承载力中级水平及偏上,尤其是市区水资源承载力基本处于 2 级水平,此时水资源还有一定的开发潜力,水资源利用率达到中等以上水平,应采取相应的措施。

4　结　语

宁波市各水资源分区中宁海县水资源承载力水平较低,水资源开发利用率高,不适宜再开发,应采用节水、调整产业结构、水利工程措施、外调水工程、加强污水处理提高水的利用效率、改善水质等措施。其他分区水资源承载力相对处于中等及偏上水平,水资源还有一定的开发潜力,应采取开源节流对策缓解水资源紧缺的压力。总之,宁波市区域水资源可持续利用承载力总体偏低,除上述措施外还应考虑外调水源缓解水资源承载力不足的问题。

参考文献:

[1] 徐中民,程国栋. 运用多目标决策分析技术研究黑河流域中游水资源承载力[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2000,36(2):122 - 132. (XU Zhong-min, CHENG Guo-dong. A Study on the Water Resources Carrying Capacity by Using the Method of Multiobjective Optimization Model—Taking the Heihe River as an Example[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2000,36(2):122 - 132. (in Chinese))

[2] 秦　奋,张喜旺,刘剑锋. 基于模糊分析法的水资源承载力综合评价[J], 水资源与水工程学报,2006,16(1):1 - 6. (QIN Fen, ZHANG Xi-wang, LIU Jian-feng. Comprehensive Evaluation of the Water Resources Carrying Capacity Based on Fuzzy Analysis Method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2006,16(1):1 - 6. (in Chinese))

[3] 陈守煜. 系统模糊决策理论与应用[M]. 大连:大连理工大学出版社,1994:85 - 86. (CHEN Shou-yu. System Fuzzy Decision Theory and Application[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1994:85 - 86. (in Chinese))

[4] 王　颖,方　航. 模糊识别法在水库水质评价中的应用[J]. 人民黄河,2010,32(7):40 - 41. (WANG Ying, FANG Hang. Reservoir Water Quality Assessment Based on Fuzzy Identification Method[J]. Yellow River, 2010,32(7):40 - 41. (in Chinese))

[5] 陈守煜. 工程水文水资源系统模糊集分析理论与实践[M]. 大连:大连理工大学出版社,1998:101 - 109. (CHEN Shou-yu. Theory and Practice of Fuzzy Set Analysis for Engineering Hydrology and Water Resources System[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1998:101 - 109. (in Chinese))

[6] 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 Zhi-hong, SUN Jing-nan, REN Guang-ping. 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. (in Chinese))

(编辑:赵卫兵)

(下转第 38 页)