

# 基于三标度法的区域水资源综合评价

沈晓娟<sup>1,2</sup>, 徐向阳<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水资源及环境学院, 江苏 南京 210098)

**摘要** : 总结出评价区域水资源可持续发展程度的若干主要指标, 运用三标度法, 确定各评价指标对于评价目标的影响程度。以模糊数学为工具, 建立二级综合评价的数学模型, 对区域水资源可持续发展程度进行定性和定量的综合评价。应用该方法对江苏省张家港市的水资源状况进行综合评价并得出结论。

**关键词** : 区域水资源; 评价指标体系; 三标度法

**中图分类号** : TV213      **文献标识码** : A      **文章编号** : 1004-693X(2006)04-0036-04

## Comprehensive evaluation on regional water resources based on three-demarcation method

SHEN Xiao-juan, XU Xiang-yang

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract** Several main indexes on assessing sustainable utilization of regional water resources were summarized, and three-demarcation method was used to determine the importance of each index. A mathematical model based on fuzzy mathematics theory was established for qualitative and quantitative evaluation of sustainable development of regional water resources. Taking Zhangjiagang City of Jiangsu Province as an example, the present situation of water resources was evaluated and some conclusions were drawn.

**Key words** : regional water resources; system of evaluation indexes; three-demarcation method

水资源的可持续利用是社会、经济可持续发展的基础条件。从我国社会经济发展来看, 水资源已迅速接近承载力的上限, 水资源短缺问题越来越成为我国社会经济发展的制约因素。区域水资源综合评价主要是对区域水资源可持续利用程度的评价, 水资源可持续利用就是在维持水的持续性和生态系统整体性的前提下, 支持人口、资源、环境与经济协调发展, 满足代内、代际人用水需要的全部过程。水资源可持续利用既要使水资源的开发利用尽量满足社会与经济不断发展的需求, 又要保证水资源开发利用的连续性和持久性, 两者必须密切配合。区域水资源综合评价的诸多构成要素之间相互影响, 相互制约, 属于多准则、多属性的问题。本文运用三标度法将区域水资源综合评价问题分解成递阶层次结

构, 确定每一层各个指标的权重值, 然后通过专家评分, 运用模糊综合评价对水资源可利用程度进行综合评价, 从而得出结论。

### 1 区域水资源综合评价方法

#### 1.1 评价指标体系的建立

以水资源为主体的资源、社会经济和环境这三个子系统组成的大系统, 结构复杂, 层次多变, 子系统间既相互作用, 又有相互之间的输入和输出。指标体系作为一个有机的整体是多种因素综合作用的结果, 应在众多的指标中筛选出最灵敏的、最能反映系统特征的、最易度量的、内涵最丰富的主导性指标作为评价指标。区域水资源综合评价指标体系不仅要体现该区域水资源本身的发展水平, 还要反映与

水有关的社会、经济、环境系统的发展水平,以及各子系统间的协调发展状况和复合系统的可持续发展能力。

根据研究的对象和目的以及评价方法的需要,确立指标选取原则如下:

a. 全面性原则。指标体系作为一个有机整体,应该能比较全面地反映和测度被评价区域的水资源可持续利用状态,反映水资源利用所包含的各个子系统及其构成要素,不能遗漏那些反映水资源系统重要特征或包含大量信息的指标。

b. 显著性原则。选取的指标应能最大限度地揭示水资源系统之间的差异,反映整个系统的基本特征。指标体系应尽可能简洁,选择有代表性的综合指标和主要指标,单一指标应能反映尽可能多的信息,每一指标对被替代的原系统的贡献率尽可能大。

c. 可操作性原则。影响水资源系统的因素十分繁杂,在实际调查评价中不可能收集所有的数据。所以,指标的设置要尽可能利用现有的统计资料和能够获取的资料,具有可测性和可比性,易于量化。

d. 科学性原则。指标概念必须明确,具有一定的科学内涵,能够较客观地反映复合系统内部结构关系,并能较好地度量可持续水资源管理目标实现的程度。

根据上述原则,建立二层评价指标体系(图1)评价当前区域水资源的可持续利用程度。选择区域水资源的可持续利用程度作为评价指标体系的最高层,即目标层 $u$ 。一层评价指标反映了与水资源可持续利用程度密切相关的主要影响因素,包括水资源条件 $u_1$ 、供水需水系统 $u_2$ 、社会经济发展水平 $u_3$

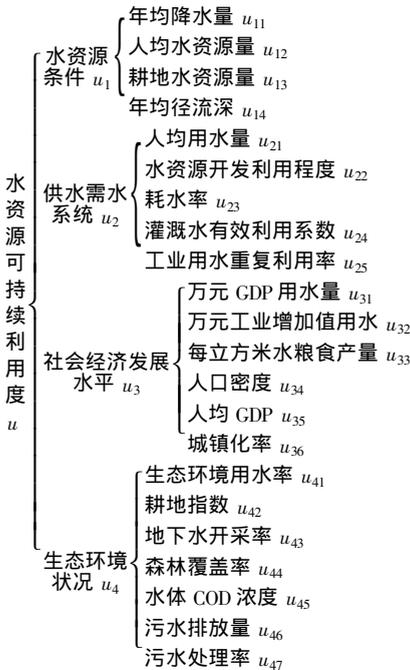


图1 区域水资源综合评价的评价指标体系

和生态环境状况 $u_4$ 。这四个因素分别从不同角度体现了整个水资源系统的主要特征和状况。经过分析,认为水资源条件 $u_1$ 包括年均降水量 $u_{11}$ 、人均水资源量 $u_{12}$ 、耕地水资源量 $u_{13}$ 和年均径流深 $u_{14}$ 4个二层指标。同样可以得到其他因素的二层指标。

## 1.2 运用三标度法确定指标权重

综合评价指标体系是对区域水资源可持续利用系统的合理抽象和模拟,各个指标对系统的贡献是不同的,用权重来表示。确定各层次指标权重最关键的是建立各层次的判断矩阵。用三标度法构建判断矩阵,相对于传统的九标度法,降低了专家的判断难度,增强了判断矩阵的逻辑性。

### 1.2.1 建立判断矩阵

由专家根据图1给出在每一层次上各元素之间重要性程度的直接比较矩阵 $D=(d_{ij})_{n \times m}$ ,其中:

$$d_{ij} = \begin{cases} 2 & i \text{ 元素比 } j \text{ 元素重要} \\ 1 & i \text{ 元素和 } j \text{ 元素同样重要} \\ 0 & i \text{ 元素没有 } j \text{ 元素重要} \end{cases} \quad (1)$$

三标度比较矩阵 $D$ 的行要素之和: $r_i =$

$\sum_{j=1}^n d_{ij}, i=1, 2, \dots, n$ ,由 $r_i$ 中的 $r_{\max}$ 和 $r_{\min}$ 所对应的2个基点比较要素,可以得出基点比较标度 $b_m$ 。通过下面的变换式将直接比较矩阵 $D$ 变换成间接的判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times m}$ ,其中:

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{r_i - r_j}{r_{\max} - r_{\min}}(b_m - 1) + 1 & r_i \geq r_j \\ \left[ \frac{r_j - r_i}{r_{\max} - r_{\min}}(b_m - 1) + 1 \right]^{-1} & r_i < r_j \end{cases} \quad (2)$$

### 1.2.2 构造拟优传递矩阵

上述间接的判断矩阵 $A$ 不一定满足思维判断的一致性,需要进行一致性检验。如果不满足要求,必须重新调整其中元素的标度值,计算量大且带有一定的盲目性。因此在这一步对算法进行改进,利用拟优传递矩阵的概念,对矩阵 $A$ 进行变换,得到一个自然满足一致性要求的判断矩阵,直接求出权重。

上一步构建的判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times m}$ 是互反矩阵,求解与 $A$ 对应的反对称矩阵 $E=\lg A$ ,构造矩阵 $A^*=[10^{c_{ij}}]$ ,其中 $c_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (e_{ik} - e_{jk})$ ,则矩阵 $A^*$ 是 $A$ 的拟优传递矩阵,且 $A^*$ 是一致的。

### 1.2.3 计算相对权重

构造得到的拟优传递矩阵 $A^*=(a_{ij}^*)_{n \times m}$ 的特征向量 $W=(w_1, w_2, \dots, w_n)$ 经归一化处理,即为其相对上一层指标的权重。

## 1.3 二级区域水资源综合评价模型

$(U, V, R)$ 构成一个区域水资源综合评价的数

学模型。以特征向量  $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  作为权重集,通过模糊矩阵  $R = (r_{ij})_{n \times m}$  将其变换为评语集  $V$  上的评价集  $B = W \cdot R = (b_1, b_2, \dots, b_p)$ ,即为综合评价的结果。

评语集是对评价对象可能作出的评价结果所组成的集合,可表示为  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_p\}$ 。其中  $v_k$  ( $k = 1, 2, \dots, p$ ) 是可能作出的第  $k$  个评价结果。根据对区域水资源可持续利用度可能的评价表述,确定评语集为  $V = \{\text{很高, 较高, 一般, 差}\}$ 。

### 1.3.1 一级综合评价

设对目标层即区域水资源可持续利用度考虑第二层次子指标  $u_{ij}$  作出评价结果  $v_k$  的隶属度为  $r_{ijk}$  ( $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, p$ ),则第二层次的模糊矩阵可表示为

$$R_i = \begin{bmatrix} R_{i1} \\ R_{i2} \\ \vdots \\ R_{im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \dots & r_{i1p} \\ r_{i21} & r_{i22} & \dots & r_{i2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{im1} & r_{im2} & \dots & r_{imp} \end{bmatrix}$$

由于水资源可持续利用度涉及因素众多,关系极为复杂且非线性,比较实用的确定  $r_{ijk}$  的方法是通过分析研究或进行定量计算,给出  $r_{ijk}$  的值。采用  $M(\cdot, +)$  模型,则一级区域水资源综合评价集为

$$B_i = W_i \cdot R_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{ip})$$

$$\text{其中 } b_{ik} = \sum_{j=1}^m w_{ij} r_{ijk}$$

### 1.3.2 二级综合评价

同样,采用  $M(\cdot, +)$  模型,则二级区域水资源综合评价集为

$$B = W \cdot R = W \cdot \begin{bmatrix} W_1 \cdot R_1 \\ W_2 \cdot R_2 \\ \vdots \\ W_n \cdot R_n \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_p)$$

$$\text{其中 } b_k = \sum_{i=1}^n w_i b_{ik}$$

求出评价指标  $b_k$  后,按最大隶属度原则就可以得到区域水资源综合评价的结论。

## 2 应用举例

江苏省张家港市是我国沿海和长江两大经济开发带交汇处的一个新兴港口工业城市,全市总面积 998.48 km<sup>2</sup>,2002 年全市总人口 85.27 万人。张家港市近 10 多年来经济高速增长,基础设施全面配套,在第三届全国县域经济基本竞争力百强县(市)评比中名列第三。

根据所建立的区域水资源可持续利用度评价指标体系,运用上述区域水资源综合评价的方法,对张

家港市 2002 年水资源可持续发展程度进行评价。建立 2 个层次的评价指标集(见图 1),目标层张家港市 2002 年区域水资源可持续利用度的指标集为  $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$ ,其中指标  $u_i$  是第一层次中的第  $i$  个指标, $u_i$  由第二层次中的  $m$  个子指标决定,即  $u_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}\}$ ,其中指标  $u_{ij}$  ( $i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, \dots, m$ ) 是第  $i$  个指标的第  $j$  个子指标。具体二层评价指标取值见表 1。

表 1 2002 年张家港市水资源综合评价指标取值

评价指标	取值
年均降水量 $u_{11}/\text{mm}$	1057.0
人均水资源量 $u_{12}/\text{m}^3$	623.0
耕地水资源量 $u_{13}/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	12495.0
年均径流深 $u_{14}/\text{mm}$	380.5
人均用水量 $u_{21}/\text{m}^3$	448.0
水资源开发利用程度 $u_{22}/\%$	59.7
耗水率 $u_{23}/\%$	36.7
灌溉水有效利用系数 $u_{24}$	0.5
工业用水重复利用率 $u_{25}/\%$	50.0
万元 GDP 用水量 $u_{31}/\text{m}^3$	276.0
万元工业增加值用水 $u_{32}/\text{m}^3$	80.9
每立方米水粮食产量 $u_{33}/\text{kg}$	1.0
人口密度 $u_{34}/(\text{人} \cdot \text{km}^2)$	10.9
人均 GDP $u_{35}/\text{元}$	42785.0
城镇化率 $u_{36}/\%$	54.0
生态环境用水率 $u_{41}/\%$	42.9
耕地指数 $u_{42}/\%$	42.6
地下水开采率 $u_{43}/\%$	44.9
森林覆盖率 $u_{44}/\%$	12.1
水体 COD 浓度 $u_{45}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	153
污水排放量 $u_{46}/\text{万 m}^3$	9877.5
污水处理率 $u_{47}/\%$	56.6

利用三标度法分别确定各层次指标权重向量。第一层次指标权重向量为  $W = (w_1, w_2, w_3, w_4)$ ,其中元素  $w_i$  是第一层次中第  $i$  个指标  $u_i$  的权重值。第二层次指标权重向量为  $W_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{im})$ ,其中元素  $w_{ij}$  ( $i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, \dots, m$ ) 是第一层次中第  $i$  个指标的第  $j$  个子指标  $u_{ij}$  的权重值。

在图 1 的层次结构中,以水资源条件  $u_1$  为例,对影响  $u_1$  的二层指标  $u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}$  的相对重要性进行两两比较并给出判断,利用三标度法将这些判断用数值表示出来,建立  $u_1$  关于  $u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}$  的直接比较矩阵

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

计算出三标度直接比较矩阵的行要素之和的最大值  $r_{\max} = 7$ ,最小值  $r_{\min} = 1$ ,取基点比较标度  $b_m = 4$ ,由式(2)得间接判断矩阵

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/2 & 1/4 \\ 3 & 1 & 2 & 1/2 \\ 2 & 1/2 & 1 & 1/3 \\ 4 & 2 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

由  $E = \lg A$  得到反对称矩阵

$$E = \begin{bmatrix} 0 & -0.477 & -0.301 & -0.602 \\ 0.477 & 0 & 0.301 & -0.301 \\ 0.301 & -0.301 & 0 & -0.477 \\ 0.602 & 0.301 & 0.477 & 0 \end{bmatrix}$$

由  $a_{ij}^* = 10^{c_{ij}} = 10^{\frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (e_{ik} - e_{jk})}$  (其中  $i, j = 1, 2, 3, 4$ ) 得:

$$A^* = \begin{bmatrix} 1 & 0.343 & 0.595 & 0.204 \\ 2.915 & 1 & 1.732 & 0.595 \\ 1.681 & 0.577 & 1 & 0.343 \\ 4.898 & 1.681 & 2.915 & 1 \end{bmatrix}$$

矩阵  $A^*$  是  $A$  的拟优传递矩阵,不需要进行一致性检验。用方根法求得  $A^*$  的最大特征根所对应的特征向量  $W_1 = (0.095, 0.278, 0.160, 0.467)$ ,即为二层指标  $u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}$  相对其上一层指标  $u_1$  的权重。

通过对专家评价表的分析和计算,得到关于水资源条件  $u_1$  的一级区域水资源综合评价的模糊矩阵

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.1 \\ 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.2 \\ 0.2 & 0.1 & 0.3 & 0.4 \\ 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.2 \end{bmatrix}$$

由  $b_{ik} = \sum_{j=1}^m w_{ij} r_{ijk}$  ( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, p$ ), 得到关于水资源条件  $u_1$  的一级区域水资源综合评价集为

$$B_1 = W_1 \cdot R_1 = (b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}) = (0.172, 0.315, 0.290, 0.223)$$

同理,可求得:

$$B_2 = W_2 \cdot R_2 = (b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{24}) = (0.302, 0.192, 0.455, 0.051)$$

$$B_3 = W_3 \cdot R_3 = (b_{31}, b_{32}, b_{33}, b_{34}) = (0.266, 0.352, 0.164, 0.218)$$

$$B_4 = W_4 \cdot R_4 = (b_{41}, b_{42}, b_{43}, b_{44}) = (0.210, 0.175, 0.290, 0.325)$$

对图 1 所建立的区域水资源综合评价的两个指标层次的情况,二级区域水资源综合评价即是对于第一层次所有指标  $u_i$  的综合评价,一级区域水资源综合评价集  $(B_1, B_2, \dots, B_n)^T$  就是二级区域水资源综合评价的模糊矩阵  $R$ 。第一层指标的权重向量

$W = (0.312, 0.254, 0.239, 0.195)$ , 由  $b_k = \sum_{i=1}^n w_i b_{ik}$  ( $k = 1, 2, 3, 4$ ), 得到二级区域水资源综合评价向量

$$B = W \cdot R = (0.235, 0.265, 0.302, 0.198)$$

根据以上评价集结果,按照最大隶属度原则,  $B$  向量中最大的评价指标“0.302”所对应的评语集元素“一般”就是评价的结果,即参与的专家们对张家港市水资源可持续利用程度的评价结论为一般。

### 3 结论

本文建立了一套较完善的区域水资源可持续利用度的评价指标体系。通过构建三标度矩阵,结合专家评分法和模糊综合评价方法对多种影响因素进行综合评价,评价的结果科学、客观,能够为区域的发展提供决策依据。运用拟优传递矩阵,得到了拟优意义下的一致阵,最大限度地保留了初始判断矩阵中的专家信息,有效解决了在初始判断矩阵不一致情况下的自动调整问题,简化了综合评价过程。张家港市水资源可持续利用程度的评价实例证明此方法较为简便,可操作性强。

### 参考文献:

- [1] 甘应爱,田丰,李维铮,等.运筹学[M].北京:清华大学出版社,1990:461-466.
- [2] 靳景玉,刘朝明,韩斌.区域风险投资环境的 AHP 模糊综合评价[J].西南交通大学学报,2005,40(3):379-384.
- [3] 李梅霞.AHP 中判断矩阵一致性改进的一种新方法[J].系统工程理论与实践,2000(2):122-125.
- [4] 刘引鸽,郑亚荣.宝鸡市水资源可持续利用评价[J].水资源保护,2005,21(3):61-62.
- [5] 刘恒,耿雷华,陈晓燕.区域水资源可持续利用评价指标体系的建立[J].水科学进展,2003,14(3):265-270.
- [6] 张丽萍,朱钟麟,邓良基.水资源评价指标体系的研究现状及问题探讨[J].国土资源科技管理,2004,21(4):5-9.
- [7] 李春晖,杨志峰.水资源评价进展与存在的几个问题[J].水土保持学报,2004,18(5):189-192.

(收稿日期:2005-08-18 编辑:傅伟群)

