

基于可拓理论的区域水资源承载力评价

吴永斌

(新疆塔里木河流域希尼尔水库管理局, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 水资源是社会和经济可持续发展的最重要支撑之一。本文采用物元模型和可拓关联度进行区域水资源承载力的评价。根据评价区实际数据建立评价方案和理想方案的物元模型,然后通过可拓关联度直接评价方案的优劣。关联度是评价区域水资源承载力的重要标准,越接近理想方案则关联度越大,表明该区域水资源承载力值越大。实例表明:基于可拓理论的水资源承载力评价是可行的,结论是合理的;这为区域水资源承载能力评价提供了一种新方法。

关键词: 水资源承载力; 可拓理论; 物元模型; 塔里木河流域

中图分类号: TV213 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2012)05-0162-04

Evaluation of regional water resources carrying capacity based on extension theory

WU Yongbin

(Xinier Reservoir Management Bureau of Xinjiang Tarim River Basin, Korla 841000, China)

Abstract: Water resources is one of the most important supports for the sustainable development of society and economy. The paper proposed matter – element model and extended relation degree in evaluation of water resources carrying capacity (WRCC). The matter – element model of evaluation scheme and ideal scheme were established according to observed data, and then the schemes were evaluated by the extended relation degree. The relation degree is an important index to evaluate regional water resources carrying capacity. The bigger the relation degree is, the better the close degree with the ideal scheme is. The results showed that evaluation of WRCC based on extension theory is feasible and reasonable, and it is a new model for the comprehensive evaluation of WRCC.

Key words: water resources carrying capacity; extension theory; matter element model; Tarim river basin

0 引言

水资源是人类社会不可替代的重要资源,随着水资源的日益紧张,水资源承载力的研究成为水资源科学领域的一个重点与热点问题。迄今,水资源承载力的研究已取得丰硕的成果,但由于其系统的复杂性和模糊性,仍未形成统一的系统、科学的理论体系。但内涵上也有其统一的认识:水资源承载力受社会经济、技术以及人口和自然生态及环境等因素的共同制约而处在动态变化中,水资源承载力是有限度的,必须以可持续发展为原则。

水资源承载能力是指在某一历史发展阶段,以可预见的技术、经济和社会发展水平为依据,以可持续发展为原则,以维护生态环境良性发展为条件,在水资源得到合理的开发利用下,某一研究区域人口增长与经济发展的最大容量^[1]。目前,关于区域水资源承载力的评价方法有很多,如背景分析法^[2]、层次分析

法、模糊综合评判法^[3]、DPSIR 模型^[4]、主成分分析法^[5]、多目标决策分析法^[6]、系统动力学模型(System Dynamic,简称 SD 模型)^[7]与极大熵权法^[8]等,这些方法各有特点,但在具体的分析过程中都存在一定的局限性,且模型精度较难控制。考虑到水资源承载力评价中,各评价指标之间可能存在不相容性,模糊性和矛盾性的情况,并在一定条件下不能直接解决。为了解决这些矛盾问题和不相容问题,蔡文教授首先提出了可拓理论的概念^[9-10]。可拓理论由两部分组成,即物元模型和可拓集理论。目前,可拓集理论已在许多领域取得了较好的应用。本文在前人研究的基础上,提出一种可拓理论在区域水资源承载力综合评价中的应用方法,首先建立水资源承载力评价方案和理想方案的物元模型,然后引入关联函数,通过可拓关联度直接评价区域水资源承载力状况。研究以新疆塔里木河流域为例,以期建立一种对流域水资源承载力较为适用的综合评价方法。

收稿日期:2012-05-09; 修回日期:2012-06-15

作者简介:吴永斌(1970-),男,新疆库尔勒人,工程师,主要从事水利工程运行管理工作。

1 可拓学的理论基础^[11]

1.1 物元理论

在可拓理论中,物元是描述事物的基本元,它以有序的三元组 $R = (N, c, v)$ 来表达。其中, N 表示事物, c 表示特征的名称, v 表示 N 关于 c 所取的量值,这三者称为物元的三要素。

一个事物可以有多个特征,设 $R = (N, C, V)$ 是一个多维物元, $C = [c_1, c_2, \dots, c_n]$ 是特征向量, $V = [v_1, v_2, \dots, v_n]$ 是特征向量 C 的量值,则多维物元定义为:

$$R = (N, C, V) = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \dots \\ R_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N, c_1, v_1 \\ c_2, v_2 \\ \dots \\ c_n, v_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $R_i = (N, c_i, v_i) (i = 1, 2, \dots, n)$ 被定义为 R 的分物元。用物元模型多维物元的引入,可以对物元作定性和定量描述,也为建立区域水资源承载力评价的物元模型提供了理论依据。

1.2 可拓集理论

为了把解决问题的过程量化,可拓学建立了与之相适应的数学工具,其基础就是可拓集合理论。

设 U 为论域,若 x 是 U 中的任一元素,则 U 中的可拓集 A 被定义为:

$$A = \{ (x, y) \mid x \in U, y = K(x) \in (-\infty, +\infty) \} \quad (2)$$

式中: $y = K(x)$ 被称作可拓集 A 的关联函数, $K(x)$ 把 U 中的每个元素映射到 $[-\infty, +\infty]$ 之间的关联度。

关联函数在应用中有许多种形式,如果设 $X_0 = \langle a, b \rangle, X = \langle a_p, b_p \rangle$, 且 $X_0 \in X$, 则初等关联函数为:

$$K(x) = \frac{\rho(x, X_0)}{D(x, X_0, X)} \quad (3)$$

$$\text{其中: } \rho(x, X_0) = \left| x - \frac{a+b}{2} \right| - \frac{b-a}{2}$$

$$D(x, X_0, X) = \begin{cases} \rho(x, X) - \rho(x, X_0) & (x \notin X_0) \\ -1 & (x \in X_0) \end{cases}$$

关联函数用来计算 x 关于区间 X_0, X 的关联度,其中 X_0 和 X 分别称为经典域和节域。当 $K(x) \geq 0$ 时,表示 x 属于 X_0 的程度;当 $K(x) < -1$ 时,表示 x 不属于 X_0 ;当 $-1 < K(x) < 0$ 时,被称作可拓域,意味着当条件改变时, x 仍有机会属于 X_0 , 并且数值越大, x 越容易转化到 X_0 中。

当式(3)分母为0时,取 $K(x) = -\rho(x, X_0)/l_{X_0}$, l_{X_0} 是 X_0 的长度。

2 区域水资源承载力的可拓评价

区域水资源承载力的综合评价一般含有多个评价指标,这些评价指标之间往往是相互矛盾、相互制约的。如何兼顾各个指标,综合考虑各种因素,对研究区水资源承载力情况进行实事求是的科学评价,是水资源管理者常常遇到的问题。可拓学中多维物元的概念实质上提供了一个描述区域水资源承载力评价问题的新思路,评价问题可以用一个多维物元定性地表征,而可拓集中的关联函数,又为定量评价水资源承载力的高低提供了一个有力的数学工具。

2.1 确定水资源承载力评价集(评价方案)的物元模型

设 $F = \{F_1, F_2, \dots, F_m\}$ 是评价方案集,与之相应的特征集为 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$, 各特征分别与方案评价指标相对应,对于备选方案 F_i , 则可确定相应的备选方案物元模型为:

$$R_i = (F_i, C, V_i) = \begin{bmatrix} F_i & C_1 & v_{i1} \\ & C_2 & v_{i2} \\ & \dots & \\ & C_n & v_{in} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: $V_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}]$ 为备选方案 F_i 时关于特征 $C_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 给定的量值向量。

为了能评价区域水资源承载力的高低,给出理想方案的物元模型为:

$$R^* = (F^*, C, V) = \begin{bmatrix} F^* & C_1 & V_1 \\ & C_2 & V_2 \\ & \dots & \\ & C_n & V_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中: F^* 为理想方案, $V_j = \langle a_j, b_j \rangle$ 为期望方案 F^* 时关于特征 $C_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 给定的期望量域,即经典域;记 $V_{pj} = \langle a_{pj}, b_{pj} \rangle (j = 1, 2, \dots, n)$ 为特征 $C_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 所容许的量域,即节域,可根据每个特征的可能最大量值范围来确定。

2.2 计算关联函数值

对以上物元模型,计算待评价方案的关联函数值。

$$K_{ij}(v_{ij}) = \begin{cases} -\rho(v_{ij}, V_j) & (v_{ij} \in V_j) \\ \frac{\rho(v_{ij}, V_j)}{\rho(v_{ij}, V_{pj}) - \rho(v_{ij}, V_j)} & (v_{ij} \notin V_j) \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

其中: $V_j = \langle a_j, b_j \rangle, V_{pj} = \langle a_{pj}, b_{pj} \rangle$ 。

如果考虑每个特征的重要性,可给予权重为 $w_j (j = 1, 2, \dots, n)$, 其中 $w_j \in [0, 1]$ 且各特征权重之和为

1. 则各备选设计方案与期望设计方案的关联度:

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^n w_j K_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

由于关联度是反映评价方案接近理想方案的度量, 关联度越大, 评价方案就越接近理想方案, 即评价区域水资源承载力值就越大, 反之则越小。

3 熵值法计算评价指标权重

水资源承载力评价指标权重的计算对评价结果的准确性与否有着重要影响, 为了保证评价结果的客观、科学与准确, 本文采用熵值法来计算评价指标的权重, 权重计算步骤介绍如下:

(1) 将原始数据进行归一化处理:

$$b_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (8)$$

式中: x_{\max} 、 x_{\min} 为不同方案中同一指标下最优者和最劣者(包括指标越小越满意或越大越满意两种情况)。

(2) 根据熵的定义, m 个方案 n 个评价指标, 可以确定评价指标的熵为:

$$H_j = \frac{(1 + b_{ij})}{-\ln m} \left(\sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \right) \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

$$f_{ij} = (1 + b_{ij}) / \sum_{i=1}^m (1 + b_{ij}) \quad (10)$$

则评价指标的权重 w 为:

$$w_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j}, \quad W = (w_j)_{1 \times n}, \quad \sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (11)$$

4 模型应用

本文根据文献[12]数据, 利用可拓理论对新疆塔里木河流域各分区水资源承载力进行评价。

4.1 流域概况

新疆塔里木河流域位于新疆南部的塔里木盆地, 是阿克苏河、喀什噶尔河、叶尔羌河、和田河、开都河-孔雀河、迪那河、渭干河与库车河、克里雅河和车尔臣河九大水系 144 条河流的总称, 流域总面积 102 万 km^2 , 包括克孜勒苏柯尔克孜自治州(以下简称克州)、巴音郭楞蒙古自治州(以下简称巴州)、阿克苏、喀什和和田等 5 个地、州 42 个县(市)和新疆生产建设兵团农一师、农二师、农三师、农十四师所属的 55 个农牧团场^[13]。

4.2 评价指标的选取

根据文献[12], 选取耕地灌溉率 x_1 、水资源利

用率 x_2 、水资源开发程度 x_3 、供水模数 x_4 、需水模数 x_5 、人均供水量 x_6 和生态环境用水率 x_7 这 7 个因素作为研究区水资源承载力的评价指标, 各评价指标的分级标准见表 1。

表 1 综合评价因素的分级指标^[12]

| 评价因素 | %, 万 m^3/km^2 , $\text{m}^3/\text{人}$ | | |
|---------|---|-------------|--------|
| | 1 级 | 2 级 | 3 级 |
| 灌溉率 | > 80 | 80 ~ 40 | < 40 |
| 水资源利用率 | > 80 | 80 ~ 30 | < 30 |
| 水资源开发程度 | > 70 | 70 ~ 20 | < 20 |
| 供水模数 | > 70 | 70 ~ 10 | < 10 |
| 需水模数 | > 60 | 60 ~ 10 | < 10 |
| 人均供水量 | < 2500 | 2500 ~ 4500 | > 4500 |
| 生态环境用水率 | < 0.5 | 0.5 ~ 2 | > 2 |

表 1 中, 1 级属于水资源承载力状况较差; 3 级属于情况较好; 2 级介于两者之间, 表明流域水资源已经开发到相当规模, 但仍有开发利用潜力。

4.3 水资源承载力评价

按照行政分区将塔里木河流域分成五个区域分别对其进行水资源承载力评价, 这五个行政区域分别是阿克苏地区、和田地区、克州地区、喀什地区和巴州地区。各分区评价指标值以及水资源承载力等级临界值见表 2。由表 2 可以看出, 其实际构成了水资源承载力评价方案集。

表 2 塔里木河流域各行政区水资源指标特征值^[12]

| 行政区划 | %, 万 m^3/km^2 , $\text{m}^3/\text{人}$ | | | | | | |
|--------|---|--------|---------|------|------|--------|---------|
| | 灌溉率 | 水资源利用率 | 水资源开发程度 | 供水模数 | 需水模数 | 人均供水量 | 生态环境用水率 |
| 阿克苏地区 | 98.19 | 49.5 | 80.4 | 7.8 | 7 | 4958.9 | 1 |
| 和田地区 | 94.67 | 22.4 | 37.8 | 1.6 | 1.3 | 2390.7 | 1 |
| 克州地区 | 101.69 | 4.9 | 8.2 | 1.2 | 1.3 | 1843.4 | 1 |
| 喀什地区 | 95.88 | 38.1 | 62.4 | 8.6 | 8.1 | 2844.2 | 1 |
| 巴州地区 | 98.99 | 18 | 28.4 | 0.8 | 0.7 | 3670.4 | 1 |
| 1 级临界值 | 80 | 80 | 70 | 70 | 60 | 2500 | 0.5 |
| 3 级临界值 | 40 | 30 | 20 | 10 | 10 | 4500 | 2 |

(1) 评价指标权重求解。利用式(8)对原始数据进行归一化处理, 则:

$$b_{ij} = \begin{matrix} 0.0567 & 0.4061 & 0.0000 & 0.8988 & 0.8938 & 1.0000 & 0.3333 \\ 0.1138 & 0.7670 & 0.5900 & 0.9884 & 0.9899 & 0.1757 & 0.3333 \\ 0.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 0.9942 & 0.9899 & 0.0000 & 0.3333 \\ 0.0942 & 0.5579 & 0.2493 & 0.8873 & 0.8752 & 0.3212 & 0.3333 \\ 0.0438 & 0.8256 & 0.7202 & 1.0000 & 1.0000 & 0.5864 & 0.3333 \\ 0.3516 & 0.0000 & 0.1440 & 0.0000 & 0.0000 & 0.2108 & 0.0000 \\ 1.0000 & 0.6658 & 0.8366 & 0.8671 & 0.8432 & 0.8527 & 1.0000 \end{matrix}$$

利用式(9)与式(10)得到评价方案集的熵值:

$$H_j = \begin{pmatrix} 0.1394 & 0.1881 & 0.1148 & 0.2779 & 0.2773 & 0.3290 & 0.1872 \\ 0.1510 & 0.2643 & 0.2331 & 0.2973 & 0.2982 & 0.1509 & 0.1872 \\ 0.1281 & 0.3159 & 0.3241 & 0.2986 & 0.2982 & 0.1174 & 0.1872 \\ 0.1470 & 0.2195 & 0.1623 & 0.2754 & 0.2733 & 0.1802 & 0.1872 \\ 0.1368 & 0.2772 & 0.2615 & 0.2999 & 0.3004 & 0.2365 & 0.1872 \\ 0.2014 & 0.1107 & 0.1417 & 0.1032 & 0.1034 & 0.1578 & 0.1206 \\ 0.3479 & 0.2424 & 0.2874 & 0.2711 & 0.2664 & 0.2956 & 0.3350 \end{pmatrix}$$

利用式(11)得到评价指标的权重:

$$w_j = (0.0646, 0.1587, 0.1348, 0.2115, 0.2098, 0.12, 0.1006)$$

(2) 水资源承载力计算。根据表 2,理想方案为:

$$F^* = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7) = (30 \sim 50, 3 \sim 10, 5 \sim 20, 0.5 \sim 2, 0.5 \sim 2, 4500 \sim 5000, 2 \sim 2.5)$$

根据各评价指标的可能最大量值范围,节域为:

$$V_{p1} = (20, 110), V_{p2} = (0, 100), V_{p3} = (0, 100), V_{p4} = (0, 80), V_{p5} = (0, 80), V_{p6} = (1000, 6000), V_{p7} = (0, 3)$$

由式(6)与式(7)得关联度评价结果为:

$$\lambda_1 = 0.754, \lambda_2 = 1.273, \lambda_3 = 1.459, \lambda_4 = 0.618, \lambda_5 = 1.592, \lambda_6 = 0.516, \lambda_7 = 1.136$$

塔里木河流域各分区水资源承载力状况及排序见表 3,水资源承载力等级判别标准见表 4。

表 3 分区水资源承载力评价结果

| 序号 | 分区 | 关联度 | 水资源承载力 | 排序 |
|----|-------|-------|--------|----|
| 1 | 阿克苏地区 | 0.754 | 2 级 | 4 |
| 2 | 和田地区 | 1.273 | 3 级 | 3 |
| 3 | 克州地区 | 1.459 | 3 级 | 2 |
| 4 | 喀什地区 | 0.618 | 2 级 | 5 |
| 5 | 巴州地区 | 1.592 | 3 级 | 1 |

表 4 水资源承载力等级判别标准

| 水资源承载力 | 1 级 | 2 级 | 3 级 |
|--------|--------------|--------------------|--------------|
| 关联度 | ≤ 0.516 | $0.516 \sim 1.136$ | ≥ 1.136 |

由表 3 与表 4 可知,塔里木河流域各分区的水资源承载力排序,即:巴州地区 > 克州地区 > 和田地区 > 阿克苏地区 > 喀什地区,同时也可以看出塔里木河流域巴州地区、克州地区与和田地区水资源承载力均处于 3 级,流域水资源仍有很大使用空间,其供给情况较为乐观;阿克苏地区与喀什地区水资源承载力均处于 2 级,水资源承载能力趋于饱和,会出现短缺,阻碍经济发展。本文研究结果与文献[12]的结果完全一致。

5 结 语

本文基于可拓理论提出了一种水资源承载力的

可拓评价方法。可拓评价法是建立在评价方案和理想方案物元模型上,并以可拓关联函数的关联度来评价水资源承载力状况。实例证明,借助可拓理论来评价区域水资源承载力是可行的,这为水资源承载力综合评价问题提供了一种定性与定量相结合的新方法。

(1) 本文将可拓理论应用于区域水资源承载力的综合评价中,建立了基于熵权与可拓理论的水资源承载力综合评价模型,且计算简单、方便。

(2) 模型权重计算中,引入熵值理论,从评价指标数据本身所反映的信息无序化效用值来计算权重系数,可有效地减少其计算的主观性,提高了水资源承载力计算的准确性。

参考文献:

- [1] 王顺久,侯玉,张欣莉,等. 流域水资源承载能力的综合评价方法[J]. 水利学报,2003,34(1):88-92.
- [2] 姚治君,王建华,江 东,等. 区域水资源承载力的研究进展及其理论探析[J]. 水科学进展,2002,13(1):111-115.
- [3] 陈洋波,李长兴,冯智瑶,等. 深圳市水资源承载能力模糊综合评价[J]. 水力发电,2004,33(3):1-14.
- [4] 陈洋波,陈俊合,李长兴,等. 基于 DPSIR 模型的深圳市水资源承载能力评价指标体系[J]. 水利学报,2004,35(7):98-103.
- [5] 周亮广,梁 虹. 基于主成分分析和熵的喀斯特地区水资源承载力动态变化研究—以贵阳市为例[J]. 自然资源学报,2006,21(5):827-831.
- [6] Fang G H, Hu Y G, Xu Y. Research on the multi-objective evaluation model of regional water resources carrying capacity and its application[J]. Water Resour Protect, 2006,22(6):9-13.
- [7] Feng L H, Zhang X C, Luo G Y. Application of system dynamics in analyzing the carrying capacity of water resources in Yiwu City, China[J]. Math Comput Simulat,2008,79:269-278.
- [8] Chen N X, Ban P L, Zhang W B. Fuzzy evaluation of the water resources carrying capacity based on the maximum entropy theory[J]. J Irrig Drain,2008,27(2):57-60.
- [9] 蔡 文. 可拓集合和不相容问题[J]. 科学探索学报,1983(1):83-97.
- [10] 蔡 文. 可拓学概述[J]. 系统工程理论与实践,1998,18(1):76-84.
- [11] 叶 军. 基于可拓理论的机械设计方案评价方法[J]. 农业机械学报,2007,38(11):107-110.
- [12] 魏光辉,杨鹏年. 基于主成分分析的塔里木河流域水资源承载力评价[J]. 广东水利水电,2012(4):34-36.
- [13] 杨丽雯,何秉宇,张力猛. 基于 ESV 对塔里木河流域生态环境问题成因的重新认识[J]. 干旱区资源与环境,2004,18(5):24-28.