

干旱区水资源承载力分析及应用

苑 涛,何秉宇  
(新疆大学资源与环境学院, 乌鲁木齐 830046)

**摘 要:**分析了干旱区水资源承载力的特点, 综合考虑水资源、生态、社会经济方面相互影响, 从中选取评价干旱区水资源承载力指标, 构建了基于极大熵原理的干旱区水资源承载力模糊评价模型。同时将干旱区水资源承载力指标体系和模糊评价模型应用于克拉玛依市水资源承载力评价, 得出了克拉玛依市未来 20 a 的水资源承载力虽处在不可承载状态, 但有向良性发展的趋势, 水资源缺乏是制约地区发展的主要因素的结论。  
**关键词:**干旱区; 水资源承载力; 模糊综合评价模型; 克拉玛依市  
**中图分类号:** S727. 21      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1005-3409(2007)03-0341-02

Research and Application of Water Resources Carrying Capacity in Arid Area

YUAN Tao, HE Bing-yu  
(Resource and Environment Institute, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** Shortage of water resources is a key factor restricting the social and economic development and the ecological environmental conservation in arid area. Carrying capacity of water resources is an important component in the carrying capacity of all the natural resources in achieving the national and regional sustainable development, especially in arid area. The influence factors of water resources carrying capacity were analyzed, and fuzzy synthetic evaluation model of water resources carrying capacity was built up on the basis of the Jaynes maximum entropy information theory on the base of fuzzy mathematics. At last the model was adapted to analyse and to predict water resources carrying capacity in Karamay City in the 15 future years.  
**Key words:** water resources carrying capacity; fuzzy synthetic evaluation; arid area

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, 而且也是水资源紧缺地区制约人类社会发展的“瓶颈”因素, 它对一个国家或地区综合发展和发展规模有至关重要的影响<sup>[1, 2]</sup>。因而对水资源承载力的研究已引起学术界高度关注, 并成为当前水资源科学中的一个重点和热点研究问题。

目前, 对水资源承载力的定义还不统一, 存在多种表述形式, 本文采用的水资源承载力定义较适合目前干旱区状况, 即“某一区域的水资源条件在自然- 人工二元模式影响下, 以可预见的技术、经济、社会发展水平及水资源的动态变化为依据, 以可持续发展为原则, 以维护生态良性循环发展条件, 经过合理优化配置, 对该地区社会经济发展所能提供的最大支撑能力”<sup>[3]</sup>。

1 干旱区水资源承载力特点及研究方法

1.1 干旱区水资源承载力特点

由于水资源系统、社会经济发展系统和生态环境系统各有不同的运行规律, 相互之间又存在不同的制约条件, 涉及的问题和影响因素比较多, 因此, 不同的内陆河流域的水资源承载力研究既有共性又有个性。整体来说, 干旱区水资源承载力体现出动态性、极限性、社会性、不确定性、振荡性等特点<sup>[4]</sup>。

1.2 干旱区水资源承载力评价指标体系

水资源承载力研究是属于评价、规划与预测一体化性质

的综合研究<sup>[4]</sup>。由于受水资源总量、社会经济发展水平和技术条件以及水环境质量的影响, 在研究过程中, 必须充分考虑水资源系统、宏观经济系统、社会系统以及水环境之间的相互协调与制约的关系。基于以上分析, 本文采用模糊综合评判方法在对影响水资源承载能力的各个因素进行单因素评价的基础上, 可通过综合评判矩阵对水资源承载力作出多因素综合评价, 从而得出水资源承载能力的大小程度。

1.2.1 评价模型

设有  $m$  项评价指标的  $n$  个样本及  $k$  级  $m$  项评价指标的评价标准, 于是有  $k$  级水资源承载力评价标准矩阵和  $n$  个区域样本矩阵:

$$s = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1k} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \cdots & s_{mk} \end{bmatrix} = [s_{ih}]_{m \times k} (i = 1, 2, 3 \cdots m, h = 1, 2, 3 \cdots k)$$

(1)

$$c = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \cdots & c_{mn} \end{bmatrix} = [c_{ij}]_{m \times k} (i = 1, 2, 3 \cdots m, h = 1, 2, 3 \cdots n)$$

(2)

\* 收稿日期: 2006-08-09  
作者简介: 苑 涛(1978- ), 新疆大学资源与环境学院研究生, 研究方向为地理管理信息系统。

这是进行水资源承载力评价的基本资料, 为进行模糊评价, 需将矩阵(1)(2)规格化, 转化为模糊矩阵, 按线性

公式(3) 确定  $e_{ih}$ :

$$e_{ih} = \frac{s_{ik} - s_{ih}}{s_{ik} - s_{il}} \quad (3)$$

式中:  $s_{il} \setminus s_{ih} \setminus s_{ik}$  —— 1、h、k 级水资源承载力的标准值。

区域样本值按公式(4)转换。

$$f_{il} = \begin{cases} 1 (c_i \leq s_{i1}) \\ \frac{s_{i2} - c_i}{s_{i2} - s_{i1}} (s_{i1} < c_i < s_{i2}) \\ 0 (c_i \geq s_{i2}) \end{cases}$$
$$f_{i2} = \begin{cases} \frac{c_i - s_{i1}}{s_{i2} - s_{i1}} (s_{i1} \leq c_i \leq s_{i2}) \\ \frac{s_{i3} - c_i}{s_{i3} - s_{i1}} (s_{i1} < c_i < s_{i3}) \\ 0 (c_i \leq s_{i1} \text{ 或 } c_i \geq s_{i3}) \end{cases} \quad (4)$$
$$f_{i3} = \begin{cases} 0 (c_i \leq s_{i2}) \\ \frac{c_i - s_{i2}}{c_{i3} - c_{i2}} (s_{i2} < c_i < s_{i3}) \\ 1 (c_i < s_{i3}) \end{cases}$$

这样可以将区域样本值矩阵(2) 转换为模糊矩阵(5):

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{m1} & f_{m2} & \cdots & f_{mn} \end{bmatrix} = [f_{ij}]_{m \times n} \quad (5)$$

设  $n$  个样本对  $k$  级承载力标准的隶属度模糊矩阵为

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ u_{k1} & u_{k2} & \cdots & u_{kn} \end{bmatrix} [u_{ij}]_{k \times n} \quad (6)$$

其中模糊矩阵(6) 的约束条件为:

$$\sum_{h=1}^k u_{ij} = 1, u_{ij} \geq 0, j = 1, 2, \dots, n$$

为消除随机性和模糊性, 根据极大熵原理, 应用拉格朗日函数得到基于最大熵原理的水资源承载力模糊评价模型(7):

$$u_{ij} = \frac{\exp[-B \sum_{i=1}^m (w_i | e_{ih} - f_{ij} |)]}{\sum_{h=1}^k \exp[-B \sum_{i=1}^m (w_i | e_{ih} - f_{ij} |)]} \quad (7)$$

式中:  $w_i$  —— 各项指标的权重, 且满足  $w_i = 1$ ,  $w_i \geq 0$ ,  $B$  —— 正参数, 一般取 10。

### 1.2.2 水资源承载力评价指标体系及评价标准的建立

根据干旱区的地形地貌、水利条件以及地区可持续发展战略, 采用模糊数学中的“隶属度”构建水资源承载力评价指标, 从水资源、生态环境、社会经济三方面选取评价指标<sup>[5-7]</sup> (如表 1)。根据专家的意见并借鉴国内权威可发展相关指标, 构造评价指标重要性的比较判断矩阵, 运用层次分析法确定指标权重值。

表中的  $V_1, V_2, V_3$  是水资源承载力的三级标准, 是结合干旱区水资源的特点, 并借鉴了其它区域水资源承载能力的一些评价标准确定的, 其中  $V_1$  级劣于  $V_2$  级,  $V_2$  级劣于  $V_3$  级。  $V_1$  状态是不可承载状态,  $V_2$  状态是可承载状态,  $V_3$  状态是可承载理想状态。

## 2 干旱区水资源承载力模型的应用

### 2.1 研究区概况

克拉玛依市处于准格尔盆地西北边缘。地理坐标: 东经  $84^{\circ}44' \sim 86^{\circ}01'$ , 北纬  $44^{\circ}07' \sim 46^{\circ}08'$ , 属典型的大陆性气候,

干燥少雨, 年均降水量 109 mm, 年蒸发量平均在 2 958 mm。干旱指数 14.5, 属于典型干旱区。

表 1 水资源承载力评价指标

准则层	因素层	权重	$V_1$	$V_2$	$V_3$
水资源	人均水资源 $e_{11}/(\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1})$	0.1517	< 1700	1700~ 4000	> 4000
子系统	水资源利用率 $e_{12}/\%$	0.0506	> 40	40~ 20	< 20
$C_1$	人均用水量 $e_{13}(\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1})$	0.0303	> 800	800~ 400	< 400
生态环境	林草覆盖率 $C_{21}/\%$	0.1425	< 15	15~ 60	> 60
子系统	污水处理达标率 $C_{22}/\%$	0.0626	< 20	20~ 90	> 90
$C_2$	生态需水率 $C_{23}/\%$	0.1437	< 25	25~ 50	> 50
社会经	人口自然增长率 $C_{31}/\%$	0.0795	> 9.5	9.5~ 2.1	< 2.1
	城市化水平 $C_{32}/\%$	0.0203	< 20	20~ 70	> 70
济发展	人均 GDP $C_{33}(\text{美元} \cdot \text{人}^{-1})$	0.1139	< 400	400~ 4000	> 4000
子系统	第三产占 GDP 比重 $C_{34}/\%$	0.0609	< 30	30~ 60	> 60
$C_3$	人均粮食占有量 $C_{35}/\%$	0.0119	< 300	300~ 590	> 590
	用水效益 $C_{36}/(\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$	0.1321	< 3	3~ 400	> 400

全市面积  $7.73 \times 10^3 \text{ km}^2$ , 其中荒漠草地  $2.334 \times 10^3 \text{ km}^2$ , 耕地面积  $0.25 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , 水资源总量  $6.31 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2004 年底全市总人口  $3.058 \times 10^5$  人, 其中农业人口  $4.67 \times 10^4$  人; 国内生产总值  $1.68 \times 10^{10}$  元, 其中第、二、三产业分别为  $6.8 \times 10^7$  元,  $1.39 \times 10^{10}$  元,  $2.88 \times 10^9$  元。2004 年全市总用水量  $2.53 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。现状用水结构为工业用水  $7.144 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 占总用水量的 28.2%, 生活用水  $2.144 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 占总用水量的 8.4%, 农业灌溉用水量  $1.61 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 占总用水量的 63.4%。城市绿化覆盖面积  $18.34 \text{ km}^2$ , 占城市建成区面积的 36.26%。城镇化水平为 99.2%。

### 2.2 水资源承载力指标评价结果分析

根据上述水资源承载力评价模型计算 2010 年, 2020 年克拉玛依市水资源承载力, 计算结果表明克拉玛依市水资源承载状况总体上朝良性方向发展。

在水资源子系统中, 人均水资源量在 2010 年和 2020 年均处在可承载临界状态, 但其他因子评价指标值各年度均属于不可承载范畴。这意味着由于过高的水资源开发利用水平, 克拉玛依市水资源子系统实际上已处于超载状态, 并在短时期内难以有显著改观。

生态环境子系统中, 除污水处理达标率的值为 99%, 达到了可承载的理想状态外, 其余各因子评价指标值在各年度均处于可承载状态, 林草覆盖率 2010 年为 37%, 预计 2020 年为 39%; 2010 年生态需水率指标值为 31%, 到 2020 年上升到 44%。林草覆盖率及生态需水率两个指标受城市扩张规模及水资源量的限制, 短期内不可能凭借改善生态环境子系统改善整个系统的水资源承载能力。

社会经济子系统中城市化水平、人均 GDP 指标值达到了可承载力理想状态。人均 GDP 指数值从 2010 年的 99 934 元提高到 2020 年的 161 282 元, 城镇化水平指数值从 93.05% 提高到 2010 年的 99%; 人口自然增长率保持 4.05‰, 第三产占 GDP 比重由 2010 年的 20.14% 提高到 2020 年的 22.27%; 2010、2020 年的人均粮食占有量保持在 50 kg; 用水效益从 2010 年 116 元提高到 2020 年的 131 元。通过对社会经济子系统的各项影响因素的分析说明, 影响研究区对水资源承载力的经济关键因子是用水结构、产业层次和用水效益。以 2004 年为例, 研究区的工业产值占 GDP 的 84% 之多, 农业产值占 GDP 仅为 0.37%, 但用水量的农业却占整个用水量的 63%, 但根据克拉玛依的城市发展战略,

(下转第 345 页)

林,整个林分多为其它林分遭受破坏后次生演替过程中的一个过渡序列,没有了原始乔木层的遮荫,林内光照增加,阔叶阳性树种黑桦、大叶白蜡(*Fraxinus rhynchophylla*)等迅速入侵,并形成林冠层,灌木如:六道木、土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、太平花(*Philadelphus pekinensis*)等开始迅速发育,草本层除了原有的耐荫种类外,也出现了银背风毛菊(*Saussurea nivea*)、委陵菜(*Potentilla spp*)等喜光种类,植物种类最为丰富,物种多样性也就最高。

2.2 天然林群落间多样性分析

群落间多样性指在不同地点或群落中的更替或转换,可以定义为沿着环境梯度的变化物种替代的程度以及群落间物种组成的差异。不同群落或其环境梯度上不同点之间的共同种越少,群落间多样性越大。通过群落间多样性的分析可以指示生境被物种分隔的程度和不同地段的生境多样性。

从表 2 可以得出以下结论:  
(1) 在彼此不同的植被类型之间,相比较而言,白梨山丁子林和核桃楸林群落中 Sorenson 指数最小,共有种最少,群落间多样性最大。

(2) 乔木层黑桦林与其它群落之间的 Sorenson 指数最高,相似性系数最高,则群落间多样性最低,杂木林次之,糠椴林第三,白梨山丁子林第四,核桃楸林与其它群落之间的 Sorenson 指数最低,也就是相似性系数最低,群落间多样性最高。

(3) 灌木层糠椴林-核桃楸林之间的相似性指数最高,群落间多样性最低;白梨山丁子林-核桃楸林之间的相似性

参考文献:

[ 1 ] 陈廷贵,张金屯.十五个物种多样性指数的比较研究[ M ]. 郑州:河南科技出版社,1999.  
[ 2 ] 李景文.森林生态学(第 2 版)[ M ]. 北京:中国林业出版社,1995.  
[ 3 ] 黄忠良,孔国辉,何道泉.鼎湖山植物群落多样性的研究[ J ].生态学报,2000,20(2):193-198.  
[ 4 ] 马克平,黄建辉,于顺利,等.北京东灵山地区植物群落多样性研究[ J ].生态学报,1995,15(3):268-277.

(上接第 342 页)

2020 年前要完成 3.3 万 hm<sup>2</sup> 的生态农业的任务,笔者认为在产业层次及用水效率没有较大提高的前提下,发展大农业的战略是不明智的。因此在产业层次及用水效率的提高前提下,用水结构的调整,是提高区域水资源承载力的途径。

表 2 克拉玛依市水资源承载力综合评价结果		
级别	2010 年	2020 年
V <sub>1</sub>	0.6032	0.5827
V <sub>2</sub>	0.1999	0.2204
V <sub>3</sub>	0.1969	0.1969

由表 2 可知,2010 年和 2010 年克拉玛依市水资源承载力的级别为 V<sub>1</sub> 级,属于不可承载状态。2010 年对 V<sub>1</sub> 的隶属度为 0.603 2,2020 年对 V<sub>1</sub> 的隶属度为 0.582 7,说明虽然两个时段的水资源承载力都隶属于不可承载状态,但 2020 年的水资源承载力要好于 2010 年,呈现出良性发展的势态。总的来说,克拉玛依市水资源承载力复合系统状态

参考文献:

[ 1 ] 梁春玲,张祖陆.肥城市水资源承载力评价[ J ].水土保持研究,2006,13(2):223-225.  
[ 2 ] 朱一中,夏军,淡戈.关于水资源承载力理论与方法的研究[ J ].地理科学进展,2002,21(2):180-188.  
[ 3 ] 惠泱河,蒋晓辉,黄强,等.水资源承载力评价指标体系研究[ J ].水土保持通报,2001,20(6):30-34.  
[ 4 ] 马金珠,李相虎,贾新颜.干旱区水资源承载力多目标层次评价[ J ].干旱区研究,2005,22(1):11-16.  
[ 5 ] 朱一中,夏军,王纲胜.张掖地区水资源承载力多目标情景决策[ J ].地理研究,2005,24(5):732-740.  
[ 6 ] 贾惠艳,马云东,张忠永.半干旱地区水资源承载力研究及应用[ J ].辽宁工程技术大学学报,2003,22(suppl):46-48.  
[ 7 ] 邱林,段春青,陈晓南.区域水资源承载力分析[ J ].华北水利水电学报,2005,26(1):10-13.

指数最低,群落间多样性最高;核桃楸林与其它群落的 Sorenson 指数都比较低。

表 2 Sorenson 指数比较表			
群落	乔木层	灌木层	草本层
杂木林-白梨山丁子林	0.7106	0.5903	0.7225
杂木林-黑桦林	0.6658	0.6011	0.6351
杂木林-糠椴林	0.2398	0.3547	0.5014
杂木林-核桃楸林	0	0.2956	0.2384
白梨山丁子林-黑桦林	0.3125	0.3647	0.5963
白梨山丁子林-糠椴林	0.1568	0.3689	0.4658
白梨山丁子林-核桃楸林	0	0.2014	0.2009
黑桦林-糠椴林	0.6847	0.7106	0.6387
黑桦林-核桃楸林	0.6514	0.7004	0.6022
糠椴林-核桃楸林	0.6965	0.7332	0.7043

(4) 草本层杂木林-白梨山丁子林之间的相似性指数最高,群落间多样性最低;白梨山丁子林-核桃楸林之间的相似性指数最低,群落间多样性最高;其它群落之间相似性居于二者之间。

3 小 结

天然群落类型中的森林群落内部各层次物种多样性指数的顺序依次为:草本层>灌木层>乔木层,但在糠椴林和核桃楸林中由于特殊的生境表现为:灌木层>草本层>乔木层。白梨山丁子林和核桃楸林群落中 Sorenson 指数最小,共有种最少,群落间多样性最大。