

基于综合赋权法的叶尔羌河流域水资源 承载力可变模糊综合评价

时佳¹, 薛联青^{1,2}, 陈新芳¹, 张洛成³, 孙超³

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 石河子大学 水利建筑工程学院,
新疆 石河子 832003; 3. 新疆塔里木河流域管理局, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 针对传统水资源承载力评价方法在计算指标贡献程度时存在主观局限性, 以及评价结果稳定性差等问题, 基于流域复合系统特性, 建立并完善了水资源承载力量化指标体系, 引入综合赋权思想, 进一步改进可变模糊评价方法, 并构建系统承载力评价模型应用于干旱区叶尔羌河流域。对比不同方法评分情况, 分析得出该流域目前水资源复合系统承载力为2~3级, 临近饱和值, 供需矛盾显著; 规划年水资源利用率提高, 第一产业比例下降, 评价为2级, 流域水资源供需矛盾得到缓解。评价结果稳定, 相对客观, 避免了级别跳跃现象, 对流域规划和水资源供需配给提供了参考。

关键词: 水资源承载力; 评价指标; 可变模糊综合评价模型; 综合赋权法; 叶尔羌河流域

中图分类号: TV213; X37

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)05-0032-05

Variable fuzzy comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Yarkant River watershed based on comprehensive empowerment

SHI Jia¹, XUE Lianqing^{1,2}, CHEN Xinfang¹, ZHANG Luocheng³, SUN Chao³

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 3. Xinjiang Tarim River Basin Management Bureau, Kuerle 841000, China)

Abstract: In this paper, according to the limitation of the traditional water resources carrying capacity evaluation method and instability of strong jump in evaluation result, carrying capacity of water resources quantitative evaluation index was established and improved based on the characteristics of complex system in the basin. The comprehensive empowerment was introduced into the index, and variable fuzzy assessment was improved furthermore. The established assessment model of regional system carrying capacity was applied in Yarkant river basin. The comparison result of different evaluation methods shows that the regional system carrying capacity is level 2-3 which is close to the saturation, and there is a serious contradiction between supply and demand. The utilization rate of basin water resources is improved in the planning year. The carrying capacity in the planning year is level 2 with a decreasing trend in primary industry and increasing trend in water utilization rate. The supply and demand contradiction is alleviated in the planning year. The division of evaluation grade is obvious and objective, and the grade jump phenomenon is avoided, which provided reference in watershed planning and supply and demand rationing of basin water resources.

Key words: water resources carrying capacity; evaluation index; variable fuzzy comprehensive evaluation model; comprehensive empowerment; Yarkant river watershed

收稿日期: 2017-04-09; 修回日期: 2017-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371052、U1203282); 水利部公益性行业专项(201501059); 江苏省“青蓝”工程及江苏省高校优秀中青年教师和校长境外研修项目

作者简介: 时佳(1993-), 女, 河北保定人, 硕士研究生, 主要从事水资源系统方向研究。

通讯作者: 薛联青(1973-), 女, 新疆石河子人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事流域水文模拟及水资源规划方面的研究工作。

1 研究背景

水资源承载力是针对特定的社会经济发展时期,以生态环境不被破坏为前提,区域水资源可支撑的工、农业水平及人口规模^[1]。它对区域社会经济的发展进程有着调控意义,现阶段水资源承载力的评价计算为区域发展规划提供了重要依据^[2]。外国学者一般将水资源承载力评价归入可持续发展研究中讨论,如 Harris 等^[3]把区域水资源农业承载力作为区域发展潜力的一项衡量标准; Manandhar 等^[4]通过计算流域水贫困指数评价其水资源承载状况。目前,国内研究中主要采用不同的方法从各个角度评价水资源承载力,并取得了大量成果^[5]。宰松梅等^[6]在对新乡市水资源承载力评价时采用支持向量机模型进行评价;王西琴等^[7]基于 SD 模型进行水生态承载力模拟优化与例证;左其亭等^[8]首次提出基于预测-模拟-优化的控制目标反推模型(PSO-COIM)对塔里木河水资源承载力进行评价,使水资源系统、经济社会系统及生态系统本身的复杂性和相互制约关系得以体现。

现阶段,关于水资源承载力的相关研究常采用系统动力学法、背景分析法、常规趋势分析法等进行计算,在这些方法的实际应用中,评价指标的相关计算是很重要的环节^[9-12]。一般方法中普遍存在两方面问题:一是量化不同类型指标对系统的贡献度,

即指标权重的分析计算,一般采用客观赋权法或是主观赋权法进行相关计算,但两类方法均具有一定局限性,不能对指标进行合理赋权;二是在实际应用中评价规范是区间评价模式,而大多数的方法将参照标准处理成点的形式,造成数据分级明显,在客观反映实际情况方面存在一定不足。针对上述问题,基于可变模糊集理论,引入综合赋权法建立的改进模型,能够科学确定指标权重以及对各级标准区间的相对隶属度。此外,调整模型相关参数,能够更加合理地划分水资源承载力的评价等级,提高结果稳定性,为区域水资源的高效开发利用提供相关依据。

2 研究方法

2.1 水资源复合系统承载力评价体系

水是人类社会发展的基础物质,与人类的生产,生活以及生态等活动都密切相关^[13]。因此,水资源承载能力评价指标体系的构建,需要考虑体系的完整性、评价指标的代表性和可行性,旨在全面有效地描述复合系统特性。本研究借鉴相关研究^[13-17],基于干旱区特性,从水资源,社会经济以及生态环境 3 方面考虑,选取了 12 项指标作为评价因素,建立复合系统下水资源承载力的评价指标体系(表 1)。该体系可以很好地描述流域水资源利用特点,以及各子系统间的相关联系,充分反映了影响水资源承载力的相关影响要素。

表 1 水资源复合系统承载力评价指标体系

目标层	系统层	指标层	指标内涵
水资源承载力	社会经济	人口密度/(人·km ⁻²)	反映区域人口的密集程度
		人均 GDP/元	反映区域经济发展水平
		第一产业比例/%	反映区域生产力发展水平与产业结构协调性
		人均可供水量/m ³	反映水资源供水系统对区域发展的支持水平
		生活用水定额/(L·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	反映区域社会发展水平
		供水模数/10 ⁴ (m ³ ·km ⁻²)	反映供水工程设施对经济社会发展的支撑能力
	水资源	需水模数/10 ⁴ (m ³ ·km ⁻²)	反映社会经济发展情况及对水资源的需求程度
		耕地灌溉率/%	反映区域农业发展水平
		工业万元 GDP 用水量/m ³	反映区域工业发展及用水水平
		水资源开发利用程度/%	反映区域水资源的开发潜力和利用水平
	生态	生态用水率/%	从用水量角度反映区域生态状况
	环境	森林覆盖率/%	反映区域水资源涵养情况和生态环境现状

在评价体系中将各指标对水资源复合系统承载力的影响贡献程度用 3 个级别来划分,其中: V₁ 为状况良好级别,表明该区域水资源的发展规模、利用程度属于初级阶段,有很大的开发空间; V₂ 则代表该区域水资源的开发规模已经相对可观,但局部地

区仍具有发展潜力; V₃ 表示区域水资源达到超载状态,其承载能力已经达到饱和值,若继续发展下去势必会导致水资源短缺、环境恶化的结果^[18]。

2.2 水资源系统承载力评价模型

在众多水资源承载力研究中,模糊综合评价模

型应用较为广泛,但它属于传统模糊学范畴,评价结果稳定性差。可变模糊集理论是在传统模糊学基础上加以改进,由静态计算转变为动态评价的研究方法^[18,20]。本研究正是采用可变模糊集理论以及相对差异函数模型,改进赋权方法,构建评价模型。

2.2.1 构建模型模糊可变集合 设流域水资源复合系统承载力评价指标体系论域为 U , 其中每一个模糊概念即评价指标为 A , 所有模糊概念的集合构成了可变集合 V 。 $S_0 = [a, b]$ 是实轴上 V 的吸引范围区间, $S = [c, d]$ 则表示含 S_0 ($S_0 \in S$) 的某一上、下界的阈值区间。 $[c, a]$ 与 $[b, d]$ 表示模糊可变集合 V 的排斥范围区间, 见图 1。其中, S 对于代表吸引特性 A 的隶属程度为 $\mu_A(u)$, 对于代表排斥特性 A^c 的隶属程度为 $\mu_{A^c}(u)$, $\mu_A(u) \in [0, 1]$, 有 $\mu_{A^c}(u) \in [0, 1]$ 。设:

$$D_A(u) = \mu_A(u) - \mu_{A^c}(u) \quad (1)$$

$D_A(u)$ 称为 u 对 A 的相对差异度, $D_A(u) \in [-1, 1]$

根据:

$$\mu_A(u) + \mu_{A^c}(u) = 1 \quad (2)$$

有:

$$\mu_A(u) = (1 + D_A(u))/2 \quad (3)$$

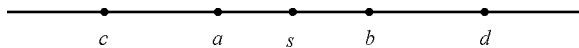


图 1 点 s 与区间 S_0 、 S 的位置关系

2.2.2 相对差异函数模型 利用相对差异函数模型计算各评判因素对标准区间的隶属度, 可以避免分级计算时出现级别跳跃现象, 保证指标计算样本在相邻级别间平稳过渡^[21]。

根据流域水资源承载力评价指标计算情况构建评价指标特征值矩阵:

$$S = (s_{ij}) \quad (4)$$

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

流域水资源承载力将依据评价指标特征值矩阵按照 c 个级别的指标标准特征值 K 进行计算:

$$K = (k_{ih}) \quad (5)$$

式中: k_{ih} 为当 i 指标处于 h 级时的标准特征值, 其中 $h = 1, 2, \dots, c$ 。

对照评价指标的标准值矩阵和流域的实际情况得到水资源承载能力可变集合的吸引区间矩阵 R_{ab} 与范围区间矩阵 R_{cd} :

$$R_{ab} = ([a_{ih}, b_{ih}]) \quad (6)$$

$$R_{cd} = ([c_{ih}, d_{ih}]) \quad (7)$$

设 M 为吸引特性区间 $[a, b]$ 内, 满足 $D_A(u) = 1$ 的点, 实践中通常用 3 个等级来划分水资源承载水平, 由此确定吸引区间 $[a_{ih}, b_{ih}]$ 中 $D_A(S_{ij})_h = 1$ 的值 M_{ih} 的矩阵。

s 是 S 区间中的任意一点, 若 s 位于 M 点左边, 则相对差异函数为:

$$\begin{cases} D_A(u) = (\frac{s-a}{M-a})^\theta, & s \in [a, M] \\ D_A(u) = (\frac{s-a}{c-a})^\theta, & s \in [c, a] \end{cases} \quad (8)$$

若 s 位于 M 点右边, 则相对差异函数为:

$$\begin{cases} D_A(u) = (\frac{s-b}{M-b})^\theta, & s \in [M, b] \\ D_A(u) = (\frac{s-b}{c-b})^\theta, & s \in [b, d] \end{cases} \quad (9)$$

式(8)~(9)中: θ 是非负指数, 一般取 $\theta = 1$, 满足: (1) 当 $s = M$ 时, $D_A(u) = 1$; (2) 当 $s = a$ 或 $s = b$ 时, $D_A(u) = 0$; (3) 当 $s = c$ 或 $s = d$ 时, $D_A(u) = -1$ 。当 s 不在区间 $[c, d]$ 时, $D_A(u) = -1$, $\mu_A(u) = 0$ 。

判别特征值 s_{ij} 在相应吸引区间中与 M_{ih} 以及范围区间矩阵的位置关系, 利用式(8)~(9) 计算其差异度 $D_A(x_{ij})_h$, 由式(7) 得到计算评价指标关于 h 级的相对隶属程度 $\mu_A(x_{ij})_h$, 计算得到当 j 值为 1 至 3 时对级别 h 的指标隶属度矩阵。

2.2.3 改进的综合赋权法 权重是指各指标对上层准则影响程度大小的量化值^[20], 对评价指标赋权是承载力评价过程中的重要内容。本研究采取综合赋权法, 利用熵权法与层次分析法对各评价指标进行组合赋权, 该方法既保障了人为重视指标项的权重又可以客观整合数据, 取长补短, 从而令赋权结果科学合理, 切合实际。

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \alpha\omega_i + (1 - \alpha)w_i \\ 0 &\leq \alpha \leq 1 \end{aligned} \quad (10)$$

$$0 < \sigma_i, \omega_i, w_i < 1, i = 1, 2, \dots, n$$

式中: σ_i 为综合计算权重; ω_i 为层次分析法对各评判因素的赋权情况; w_i 为利用熵权法所得权重; α 为决策相关系数, 本研究认为两种赋权方法同样重要, 故 α 取 0.5。

2.2.4 求解相对隶属度矩阵 计算样本于各级别的相对隶属度。

$$U'_h = 1 / \left[1 + \left(\frac{d_{hg}}{d_{hb}} \right)^\alpha \right]$$

(11)

其中: $d_{hg} = \left\{ \sum_{i=1}^m [\sigma_i (1 - u_A(u_{ih}))]^p \right\}^{1/p}$

(12)

$$d_{hb} = \left[\sum_{i=1}^m (\sigma_i u_A(u_{ih}))^p \right]^{1/p}$$

(13)

式中: U'_h 为指标样本关于 h 的相对隶属度; α 和 p 分别为优化准则参数和距离参数。

通过对 U'_h 归一化处理得到 U :

$$U = (u_h)$$

(14)

其中: $u_h = u'_h / \sum_{h=1}^c u'_h$

(15)

由于模糊概念在分级条件下,不能遵循最大隶属度准则,故应用下式进行样本级别分值计算。

$$H = (1, 2, 3) \cdot U$$

(16)

为了保证结果的合理性,改变模型参数,取不同的模型优化参数及距离参数,得到评价结果。

3 叶尔羌河流域水资源复合系统承载力评价

3.1 研究区概况

叶尔羌河流域地处新疆塔里木盆地西南面,位于北纬 $34^{\circ}50' \sim 40^{\circ}31'$ 与东经 $74^{\circ}28' \sim 80^{\circ}54'$ 区域范围

内。该流域源于喀喇昆仑山,以叶尔羌河为主,包括其东侧的提孜那甫河等四条河流。叶尔羌河是新疆境内第 4 大河流,总长度为 1 281 km,流量为 $76.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。流域降水稀少,多年平均降水量只有 $39.4 \sim 53.2 \text{ mm}$,年蒸发量则达到 $2\,108 \sim 2\,480 \text{ mm}$,流域总面积为 $8.58 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。2013 年 GDP 为 287.05×10^8 元,总人口为 231.72 万人。现阶段,社会经济持续发展,耕地不断扩大,人口快速增加,导致叶尔羌河流域向塔里木河干流的输水量逐年减少,严重时甚至断流。流域下游植被大面积衰败死亡,生态环境逐步恶化,水资源短缺危机日益加重,因此,合理评估水资源承载水平对该流域规划发展意义重大。

3.2 水资源复合系统承载力计算

参照国内外地区经济社会、生态环境及水资源相关发展水平,结合干旱区具体情况,并借鉴其他研究中的评价因素分级情况给出相应分级标准^[14-19]。本研究以 2013 年为现状年,综合叶尔羌河流域水资源、社会经济以及生态环境等多方面因素对其进行水资源承载力评价,同时参照相关规划纲要对叶尔羌河流域进行了 2020 年及 2025 年的水资源、社会经济、生态环境等方面的预测工作,并对相应指标进行计算(表 2)。

表 2 叶尔羌河流域评价指标各水平年计算及分级标准

评价指标	各水平年情况			分级标准		
	2013	2020	2025	V_1	V_2	V_3
人口密度/(人·km ⁻²)	19.04	21.52	23.91	<10	10~20	>20
人均 GDP/元	12387.63	40761.99	83963.99	>57220	57220~19075	<19075
第一产业比例/%	42.25	20.20	12.38	<4	4~15	>15
人均可供水量/m ³	2947.41	2625.77	2479.28	>4500	2500~4500	<2500
生活用水定额/(L·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	73.22	87.87	98.35	<70	70~130	>130
供水模数/10 ⁴ (m ³ ·km ⁻²)	5.61	5.69	5.93	<1	1~15	>15
需水模数/10 ⁴ (m ³ ·km ⁻²)	11.40	11.07	10.83	<1	1~15	>15
耕地灌溉率/%	98.02	98.51	98.99	<20	20~60	>60
工业万元 GDP 用水量/m ³	132.00	102.00	80.00	<90	90~270	>270
水资源开发利用程度/%	87.36	89.17	92.86	<30	30~70	>70
生态用水率/%	0.38	0.37	0.36	>5	5~1	<1
森林覆盖率/%	13.86	14.42	17.43	>40	10~40	<10

3.3 评价结果

将指标计算数值带入改进模型进行评价计算,得到现状年叶尔羌河流域特征级别值分别为 2.37、2.41、2.59、2.61,分值稳定在 2.37~2.61 之间。该结果表明现状年叶尔羌河流域水资源承载力评价为 2~3 级,说明水资源危机已经严重影响了社会经济发展,情况不容乐观。规划年叶尔羌河流域水资源利用率提高,第一产比例下降,人均 GDP 增加等因素都有利于水资源

承载力的提高,但是人口密度增加也在一定程度上阻碍了该流域的可持续发展。故 2020 年和 2025 年评价分值降低,分别稳定在 2.37~2.52 和 2.37~2.49,评价等级均为 2 级,表明该流域水资源承载水平有所提高。

为了展示改进模型的优越性,将其评分与传统方法评分比对(表 3),评价结果基本一致,说明改进模型具有良好的可靠性。其中,模糊综合评价法计算结果以点值的形态表示,稳定性差;另外两组模型

结果均以置信区间形式表示,但改进模型结果的置信区间更加精准。可以看出改进模型可以保证级别

特征值稳定在一个比较小的范围内,提高了模型的精度和稳定性,令评价结果更加科学合理。

表3 不同评价方法计算分值对比

年份	改进模型		模糊综合评价模型		可变模糊综合评价模型	
	分值	评价等级	分值	评价等级	分值	评价等级
2013	2.37 ~ 2.61	2 ~ 3	2.65	3	2.21 ~ 2.67	2 ~ 3
2020	2.37 ~ 2.52	2	2.57	2 ~ 3	2.26 ~ 2.62	2 ~ 3
2025	2.36 ~ 2.49	2	2.43	2	2.30 ~ 2.53	2

4 结 论

(1)叶尔羌河流域实例表明,目前该流域水资源复合系统承载力综合评分为 2.37 ~ 2.61,评价为 2 ~ 3 级,表明其承载水平到达超载的边缘。规划年计算分值降低,分别达到 2.37 ~ 2.52 和 2.36 ~ 2.49,级别均为 2 级,水资源承载水平提高,情况有所好转。说明叶尔羌河流域应控制人口发展,调整产业结构,发展节水灌溉相关技术,提高水资源利用率,从而改善流域的水资源复合系统承载情况。

(2)利用改进模型评价叶尔羌河流域水资源承载力,评价结果科学合理。模糊综合评价模型评分以点值形式呈现,导致评价分级不稳定。可变模糊综合评价模型评价分值波动区间较大,高达 0.46 分,而改进模型可以保证级别特征值稳定在一个比较小的范围内,分值波动不超过 0.25 分,使评价结果的稳定程度和精准程度都有了进一步的提升。因此,该模型应用性良好,可全面描述复合系统相关影响因素及其影响程度并且将评价结果进行合理分级,能够很好地反映实际水资源复合系统的承载能力,为流域的发展与规划提供了决策依据。

参考文献:

- [1] 夏 军,朱一中. 水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战(一)[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3):262-269.
- [2] 朱一中,夏 军,谈 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] Harris J M, Kennedy S. Carrying capacity in agriculture: global and regional issues [J]. Ecological Economics, 1999, 29(3):443-461.
- [4] Manandhar S, Kazama F. Application of water poverty index (WPI) in nepalese context: A case study of Kali Gandaki River Basin (KGRB)[J]. Water Resources Management, 2012, 26(1):89-107.
- [5] 韩运红,唐德善,李奥典,等. 模糊熵权综合评价模型在阜阳市水资源承载力综合评价中的应用[J]. 水电能源科学,2015,33(5):26-29.
- [6] 宰松梅,温 季,仵 峰,等. 河南省新乡市水资源承载力评价研究[J]. 水利学报,2011,42(7):783-788.
- [7] 王西琴,高 伟,曾 勇. 基于 SD 模型的水生态承载力模拟优化与例证[J]. 系统工程理论与实践,2014,34(5):1352-1360.
- [8] 左其亨,张修宇. 气候变化下水资源动态承载力研究[J]. 水利学报, 2015, 46(4):387-395.
- [9] 秦耀辰,赵秉栋. 河南省持续发展系统动力学模拟与调控[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(7):124-131.
- [10] 何仁伟,刘邵权,刘运伟. 基于系统动力学的中国西南岩溶区的水资源承载力——以贵州省毕节地区为例[J]. 地理科学, 2011, 31(11):1376-1382.
- [11] 侯 剑. 基于系统动力学的港口经济可持续发展[J]. 系统工程理论与实践,2010,30(1):56-61.
- [12] 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.
- [13] 陈亚宁. 新疆塔里木河流域生态水文问题研究[M]. 北京:科学出版社,2010:390-392.
- [14] 段春青,刘昌明,陈晓楠,等. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J]. 地理学报,2010,65(1):82-90.
- [15] 许有鹏. 干旱区水资源承载能力综合评价研究——以新疆和田河流域为例[J]. 自然资源学报, 1993, 8(3):229-237.
- [16] 黄永基,马滇珍. 区域水资源供需分析方法[M]. 南京:河海大学出版社,1990:244-257.
- [17] 孟丽红,陈亚宁,李卫红. 干旱区内陆河流域水资源可持续利用的生态经济研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(12 专刊):121-124.
- [18] 陈守煜,胡吉敏. 可变模糊评价法及在水资源承载能力评价中的应用[J]. 水利学报,2006,37(3):264-271.
- [19] 李怀林. 基于模糊综合评价方法的干旱区水资源承载力研究[J]. 中国水运月刊,2014,14(8):206-208.
- [20] 陈守煜,胡吉敏. 地下水资源承载能力评价模糊可变模型与方法[J]. 水资源保护, 2006, 22(6):1-5.
- [21] 陈守煜. 工程可变模糊集理论与模型——模糊水文水资源学数学基础[J]. 大连理工大学学报,2005,45(2):308-312.