基于模糊综合评价模型的天山北坡经济带水资源承载力评价

王 艳[1,2], 石荣媛[3], 乔长录[1,2]

(1. 石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000; 2. 现代节水灌溉兵团重点实验室, 新疆 石河子 832000; 3. 新疆生产建设兵团 第八师炮台土壤改良试验站, 新疆 石河子 832066)

摘 要: [目的] 综合评价天山北坡经济带水资源承载力,为今后水资源开发利用提供依据。[方法] 根据天山北坡经济带水资源现状,构建由 3 层 12 项指标组成的综合评价指标体系;基于状态变权向量进行指标权重分配,确定评价标准和两级模糊综合评判模型(FCE),对该经济带水资源承载力进行综合评价。[结果] 评价结果显示该经济带乌鲁木齐、石河子、吐鲁番、哈密、塔城、伊犁、克拉玛依、昌吉、博州市的水资源承载力综合评分值分别为 0.41,0.49,0.43,0.45,0.76,0.56,0.45,0.51,0.48。[结论] 天山北坡经济带水资源承载力已经达到了一定规模,应通过采取节水技术和产业结构调整等综合措施,提高水资源承载力水平,合理规划并有效利用水资源,为"十三五"天山北坡经济带社会经济发展提供保障。

关键词: 水资源承载力; 模糊综合评判; 天山北坡经济带; 水资源系统; 生态环境系统

文献标识码: B **文章编号**: 1000-288X(2018)05-0206-07 **中图分类号**: TV213.4

文献参数: 王艳, 石荣媛, 乔长录. 基于模糊综合评价模型的天山北坡经济带水资源承载力评价[J]. 水土保持通报,2018,38(5):206-212. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.20180913.001. Wang Yan, Shi Rongyuan, Qiao Changlu. Evaluation of water resources carrying capacity based on fuzzy comprehensive evaluation method in northern slope economic belt of Tianshan Mountains[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(5):206-212.

Evaluation of Water Resources Carrying Capacity Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method in Northern Slope Economic Belt of Tianshan Mountains

WANG Yan[1,2], SHI Rongyuan[3], QIAO Changlu[1,2]

(1. *School of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang* 832000, *China*; 2. *The Key Water Saving Irrigation Laboratory of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi, Xinjiang* 832000, *China*; 3. *Soil Improvement Test Station, Eighth Division of Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi, Xinjiang* 832066, *China*)

Abstract: [Objective] The water resources carrying capacity of the economic belt in the north slope of Tianshan Mountain was eveluated in order to provide the basis for the development and utilization of water resources in the future. [Methods] According to the current situation of water resources in the northern slope economic belt of Tianshan Mountain, a comprehensive evaluation index system consisting of three hierarchies and 12 individual evaluation indexes was established. The weight for each evaluation index was determined based on state variable weight vector, and then the evaluation criteria and two-level comprehensive fuzzy evaluation method were developed. [Results] Comprehensive score of water resources carrying capacity of Urumqi, Shihezi, Turpan, Hami, Tacheng, Yili, Karamay, Changji and Bozhou cities was 0.41, 0.49, 0.43, 0.45, 0.76, 0.56, 0.45, 0.51 and 0.48, respectively. [Conclusion] The carrying capacity of water resources in the northern slope of Tianshan Mountain has reached a certain scale. Comprehensive measures

收稿日期:2018-03-23 **修回日期**:2018-04-21

资助项目:新疆生产建设兵团科技计划项目"新疆玛河流域蒸散发时空演变规律及其对气候变化的响应研究"(2016AG014); 国家自然科学基金项目"膜下滴灌绿洲棉田蒸散机理与棉花需水模型研究"(51769030)

第一作者:王艳(1993—),女(汉族),江苏省涟水市人,硕士研究生,研究方向为水文、水资源优化配置与调度。E-mail:wangyan930510@qq.com。

通讯作者:石荣媛(1967—),女(汉族),江苏省邳州市人,本科,高级农艺师,主要从事农业水资源方面的研究工作。E-mail:491083191@qq.com。

such as water-saving technology and industrial structure adjustment should be adopted to improve the water resources carrying capacity. Rational plan and effective utilization of water resources will promote the social and economic development on the northern slope economic belt of Tianshan Mountains during the "13th five-year plan".

Keywords: water resources carrying capacity; fuzzy comprehensive evaluation; northern slope economic belt of Tianshan Mountain; water resources system; ecological environment system

水资源在自然资源中占有重要的地位,其不仅是人类赖以生存和社会经济发展的基础,也是制约人类生活质量与社会经济发展的重要因素。随着人口的增长、社会经济的快速发展和生态环境问题的不断突出,水资源的合理开发利用越来越引起社会各层面的重视。水资源承载力作为水资源开发利用的前提条件,近年来已开展了众多的研究。水资源承载力的评价方法,目前主要有常规趋势法、模糊综合评判法、主成分分析法、系统动力学法、多目标分析评价核心模型法、多目标线性规划方法、多目标决策分析方法和密切值法等[1]。

关于新疆水资源承载力的研究已有多位学者针对不同的流域开展了众多研究,如许有鹏[2]对和田流域进行了综合分析,李吉玫[3]分析了伊犁河流域的水资源承载力,张占江等[4]分析了阿克苏河流域水资源承载力,杨广等[5]对玛纳斯河流域水资源承载力进行了研究,董雯等[6]分析了艾比湖流域水资源承载力;王暄[7]评价了塔里木河流域水资源承载力,段新光等[8]则对整个新疆的水资源承载力做出了评价。而针对天山北坡经济带的水资源承载力研究目前还少有报道。

天山北坡经济带资源丰富,是新疆经济可持续发展的强劲资源储备和动力,承担着向内陆开放重要的桥梁和纽带作用[9]。然而,天山北坡经济带所处的特殊地理环境,该地区水资源短缺且生态环境脆弱,加之频繁的人类活动以及对水资源的不合理开发利用,使得水资源供需矛盾日益突出。在国家"一带一路"倡议下,天山北坡经济带迎来了千载难逢的发展机遇,因此,合理评价天山北坡经济带水资源承载力,对该经济带产业布局等总体规划具有非常重要的意义。

本文拟根据社会统计年鉴资料,采用状态变权向量对水资源承载力评价指标体系进行指标权重分配,构建模糊评价模型,对天山北坡经济带水资源承载力进行评价,以期为其今后水资源开发利用提供依据。

1　研究区概况

天山北坡经济带东起哈密,西至伊宁,是以乌鲁木齐、石河子、克拉玛依为轴心的新疆准噶尔盆地南缘天山北坡地带,地理位置为:东经 79°53′—96°23′,北纬 40°43′—47°15′。行政区划包括乌鲁木齐、石河子、克拉玛依、昌吉、吐鲁番、哈密、伊犁、塔城和博州;该经济带东西相距约 1 000 km,面积约 9.54×10^4 km^2,人口总量约为 4.58×10^6,占全疆人口的 23.3%;属典型内陆干旱区,年均气温 6.9 ℃,多年平均降水量 220 mm,蒸发潜力 1 817 mm[10]。该带是新疆经济最发达的地区,资源禀赋好,区位条件优越,是"一带一路"面向中亚和欧洲的重要枢纽[11]。

2　模糊综合评价模型(FCE)

模糊综合评价模型(fuzzy comprehensive evaluation, FCE)的基本思想是利用模糊线性变换原理和最大隶属度原则,充分考虑与被评价事物相关的各个因素以及各因素之间的关联性,采用具有易于量化、针对性、代表性、便于互相比较的因素,弥补了过多考虑单因素的不足,对其作出合理的综合评价。

模糊综合评价的数学模型:

(1) 因素集。设与被评价对象相关的因素有 m 个,则因素集 $U=\{u_1,u_2,\cdots,u_m\}$。

(2) 评判集。设所有可能出现的评语有 n 个,则评判集 $V=\{v_1,v_2,\cdots,v_n\}$。

(3) 单因素评判。即对单个因素 $u_i(i=1,2,\cdots,m)$ 的评判,得到 V 上的 F 集,即为从 U 到 V 上的一个 F 映射 $f:U\to F(V)$。

综合评价的单因素评价矩阵为:

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mm} \end{bmatrix}$$

(4) 变权向量 W 的确定。$W(\mu)=(w_1,w_2,\cdots,w_m)$,本文采用基于隶属度的 Hardarmard 乘积变权模型:

$$\boldsymbol{W}(\mu)=\frac{[a_is_i(\mu),a_2s_2(\mu),\cdots,a_ms_m(\mu)]}{\sum_{j=1}^{n}[a_js_j(\mu)]}=\frac{A\cdot S_\mu}{\sum_{j=1}^{n}[a_js_j(\mu)]} \tag{1}$$

其中 $\boldsymbol{A}$ 为常权向量:$A=(a_1,a_2,\cdots,a_m)$;S_μ 为状态影响量:

$$S_j(\mu)=\begin{cases}2-\log_{b_j}^{\mu(x_j)} & \mu(x_j)>b_j \\ 1 & \mu(x_j)\leqslant b_j\end{cases} \tag{2}$$

(5) 模糊综合评价。根据权重 W 得到 F 综合评价值 B 为：

$$B=W\cdot R=(W_1,W_2,\cdots,W_m)\cdot\begin{bmatrix}r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n}\\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn}\end{bmatrix}=(b_1,b_2,\cdots,b_n) \tag{3}$$

3 模糊综合评价

水资源系统是一个巨大而复杂的系统，并且水资源承载力等级的划分具有不确定性和模糊性[12]。影响天山北坡经济带水资源承载力的因素很多[13]，如水资源条件及其开发利用现状、生态环境、产业结构等。因此，本文采用模糊综合评价法对天山北坡经济带水资源承载力进行应用研究。在水资源承载力的评价中，选取适合该经济带水资源承载力的评价指标，利用模糊综合评价理论[14]建立数学模型，对天山北坡经济带水资源承载力做出全面综合评价。

3.1 评价指标体系建立

水资源承载力评价最关键的是指标体系的建立。在水资源这个复杂的系统中，不仅要考虑到自然环境因素，还需要考虑到社会经济发展因素[15]。本文天山北坡经济带水资源承载力研究中特将其评价指标体系分为 3 个层次，分别为目标层、系统层和指标层[16]。其中，目标层(A)为“水资源承载力”；系统层(B)分为“水资源系统”(B_1)、“社会经济发展系统”(B_2)和“生态环境系统”(B_3)；指标层(C)为 3 个系统层所包括的相应的指标。

评价指标的选取应以科学为依据，能够科学客观的反映所研究经济带的水资源承载力，尽量选取容易进行数据收集、易于解释、易于定量化且具有代表性的评价指标[12]。结合天山北坡经济带自然条件、人类活动以及城市发展现状等因素考虑[17]，依据 2015 年《新疆维吾尔自治区统计年鉴》，根据水资源承载力评价指标选取的原则，确定 12 个指标为评价因素集，即 $U=\{u_1$ 产水模数，u_2 供水模数，u_3 水资源开发利用率，u_4 人均水资源量，u_5 年降水量，u_6 人口密度，u_7 人口自然增长率，u_8 GDP 增长率，u_9 万元 GDP 用水量，u_{10} 城镇化率，u_{11} 生态环境用水率，u_{12} 植被覆盖率$\}$(表 1)。

表 1 天山北坡经济带水资源承载力评价指标体系

目标层	系统层	指标层
水资源承载力 A	水资源系统 B_1	C_1 产水模数 u_1/(10^4 m^3 · km^{-2})
		C_2 供水模数 u_2/(10^4 m^3 · km^{-2})
		C_3 水资源开发利用率 u_3/%
		C_4 人均水资源利用 u_4(m^3/人)
		C_5 年降水量 u_5/mm
	社会经济发展系统 B_2	C_6 人口密度 u_6/(人 · km^{-2})
		C_7 人口自然增长率 u_7/%
		C_8 GDP 增长率 u_8/%
		C_9 万元 GDP 用水量 u_9/m^3
		C_{10} 城镇化率 u_{10}/%
	生态环境系统 B_3	C_{11} 生态环境用水率 u_{11}/%
		C_{12} 植被覆盖率 u_{12}/%

3.2 评价指标分级

按照行政区划将天山北坡经济带划分为 9 个单元：乌鲁木齐(A_1)、石河子(A_2)、吐鲁番(A_3)、哈密(A_4)、伊犁(A_5)、塔城(A_6)、克拉玛依(A_7)、昌吉(A_8)、博州(A_9)，分析各单元的水资源承载力。

根据天山北坡经济带水资源承载力评价指标体系中各指标的实际情况，并结合西部半干旱地区水资源、生态、环境等的研究成果，将上述 12 个水资源承载力评价指标划分为 v_1，v_2，v_3 这 3 个等级[5]，各评价指标及其分级标准详见表 2。

其中 v_1 表示被评价对象水资源承载力较高，且可开发利用空间大及潜力较大，为可持续发展状态；v_3 表示被评价对象水资源承载力较弱，水资源开发情况接近饱和状态，且易发生水资源短缺、环境恶化等问题，将影响社会经济的稳定发展；v_2 介于 v_1，v_3 之间，表示被评价对象的水资源承载力一般，水资源开发利用已有一定规模但任具有开发利用的空间和潜力[18]。

表 2 各评价因素分级评价指标

指标层	u_1/(10^4 m^3 · km^{-2})	u_2/(10^4 m^3 · km^{-2})	u_3/%	u_4/(m^3/人)	u_5/mm	u_6/(人 · km^{-2})	u_7/%	u_8/%	u_9/m^3	u_{10}/%	u_{11}/%	u_{12}/%
v_1	>45	<10	<30	>2 500	>450	<25	<0.8	>8	<20	<40	>15	>60
v_2	20~45	10~60	30~80	2 500~4 000	300~450	25~100	0.8~1.6	8~2	20~100	40~80	15~25	40~60
v_3	<20	>60	>80	<4 000	<300	>100	>1.6	<2	<100	>80	<25	<40

3.3　隶属度函数的确定

在进行模糊综合评判过程中,科学合理的定义隶属度函数是综合评判成功的关键,定义隶属度函数常用的主要有二元比较排序法、三角形模糊分布法、待定系数法和模糊统计法[19]。三角形模糊分布法是较为简单实用的方法,在对天山北坡经济带水资源承载力的研究中,对上述 12 项指标采用三角形模糊分布法,定义了其隶属度函数(图 1)。

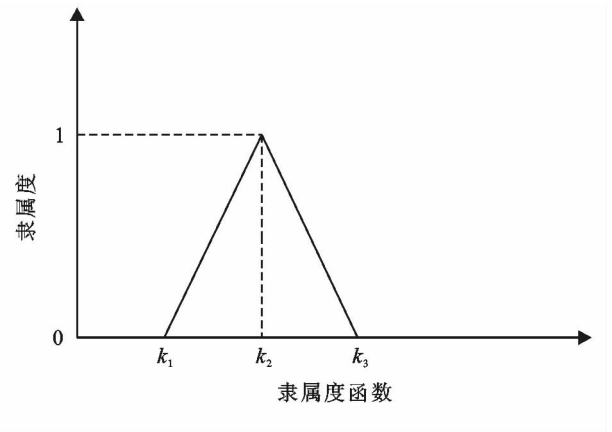


图 1　三角形分布法隶属度函数的定义过程

三角形模糊分布法定义隶属度函数的评语等级界定值为 k_1,k_2,k_3 表示,即各因素指标等级 v_1 与 v_2 的临界值为 k_1;v_2 与 v_3 的临界值为 k_3;v_2 区间中点值为 k_2〔即 $k_2=(k_1+k_3)/2$〕[17]。

即对于因素 C_1,C_5,C_8,C_{12}数值越大水资源承载力水平越高的各指标等级单因素评判矩阵计算公式为:

$$\mu_{v_1}=\begin{cases}0.5\left(1+\dfrac{k_1-C_i}{k_2-C_i}\right) & (C_i\geqslant k_i)\\ 0.5\left(1-\dfrac{C_i-k_1}{C_i-k_2}\right) & (k_2\leqslant C_i<k_1)\\ 0 & (C_i\geqslant k_2)\end{cases} \tag{4}$$

$$\mu_{v_2}=\begin{cases}0.5\left(1-\dfrac{k_1-C_i}{k_2-C_i}\right) & (C_i\geqslant k_1)\\ 0.5\left(1+\dfrac{C_i-k_1}{k_2-k_1}\right) & (k_2\leqslant C_i<k_1)\\ 0.5\left(1+\dfrac{k_3-C_i}{k_3-k_2}\right) & (k_3\leqslant C_i<k_2)\\ 0.5\left(1-\dfrac{k_3-C_i}{k_2-C_i}\right) & (C_i\leqslant k_3)\end{cases} \tag{5}$$

$$\mu_{v_3}=\begin{cases}0.5\left(1+\dfrac{k_3-C_i}{k_2-C_i}\right) & (C_i<k_3)\\ 0.5\left(1-\dfrac{C_i-k_3}{k_2-k_3}\right) & (k_3\leqslant C_i<k_2)\\ 0 & (C_i\geqslant k_2)\end{cases} \tag{6}$$

反之,对于因素 C_2—C_4,C_6,C_7,C_9—C_{11}数值越小,水资源承载力水平越高的指标,各等级相对隶属度函数的计算公式只需将以上公式右端“≤”改为“≥”,“<”改为“>”,“>”改为“<”即可。

根据评价标准建立的各评语等级 v_1,v_2,v_3 的等级界定值详见表 3。

表 3　三角形模糊分布法定义隶属函数的等级界定值

指标层	u_1/(10^4 m^3·km^{-2})	u_2/(10^4 m^3·km^{-2})	u_3/%	u_4/(m^3/人)	u_5/mm	u_6/(人·km^{-2})	u_7/%	u_8/%	u_9/m^3	u_{10}/%	u_{11}/%	u_{12}/%
k_1	45	10	30	2 500	450	25	0.8	8	20	40	15	60
k_2	32.5	35	55	3 250	375	62.5	1.2	5	60	60	20	50
k_3	20	60	80	4 000	300	100	1.6	2	100	80	25	40

根据单因素评价矩阵计算公式得到各地区各等级隶属度矩阵 $\boldsymbol{R}$,即乌鲁木齐 $\boldsymbol{R}_1$,石河子 $\boldsymbol{R}_2$,吐鲁番 $\boldsymbol{R}_3$,哈密 $\boldsymbol{R}_4$,伊犁 $\boldsymbol{R}_5$,塔城 $\boldsymbol{R}_6$,克拉玛依 $\boldsymbol{R}_7$,昌吉 $\boldsymbol{R}_8$,博州 $\boldsymbol{R}_9$。

$$\boldsymbol{R}_1=\begin{bmatrix}0.000 & 0.270 & 0.730\\ 0.544 & 0.456 & 0.000\\ 0.000 & 0.488 & 0.512\\ 0.867 & 0.133 & 0.000\\ 0.726 & 0.774 & 0.000\\ 0.691 & 0.309 & 0.000\\ 0.000 & 0.031 & 0.969\\ 0.727 & 0.273 & 0.000\\ 0.866 & 0.634 & 0.000\\ 0.000 & 0.269 & 0.731\\ 0.848 & 0.152 & 0.000\\ 0.000 & 0.173 & 0.827\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{R}_2=\begin{bmatrix}0.870 & 0.130 & 0.000\\ 0.000 & 0.274 & 0.726\\ 0.000 & 0.278 & 0.722\\ 0.859 & 0.141 & 0.000\\ 0.000 & 0.254 & 0.746\\ 0.615 & 0.385 & 0.000\\ 0.000 & 0.206 & 0.794\\ 0.847 & 0.153 & 0.000\\ 0.000 & 0.220 & 0.780\\ 0.000 & 0.250 & 0.750\\ 0.744 & 0.256 & 0.000\\ 0.000 & 0.291 & 0.709\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{R}_3=\begin{bmatrix}0.000 & 0.206 & 0.794\\ 0.622 & 0.378 & 0.000\\ 0.000 & 0.340 & 0.660\\ 0.694 & 0.306 & 0.000\\ 0.000 & 0.105 & 0.895\\ 0.700 & 0.300 & 0.000\\ 0.000 & 0.014 & 0.986\\ 0.000 & 0.950 & 0.050\\ 0.000 & 0.036 & 0.964\\ 0.000 & 0.695 & 0.305\\ 0.863 & 0.137 & 0.000\\ 0.000 & 0.107 & 0.893\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_4=\begin{bmatrix}0.000 & 0.201 & 0.799\\ 0.634 & 0.366 & 0.000\\ 0.000 & 0.916 & 0.084\\ 0.730 & 0.270 & 0.000\\ 0.000 & 0.127 & 0.873\\ 0.700 & 0.300 & 0.000\\ 0.000 & 0.039 & 0.961\\ 0.900 & 0.100 & 0.000\\ 0.000 & 0.116 & 0.884\\ 0.000 & 0.349 & 0.651\\ 0.868 & 0.132 & 0.000\\ 0.000 & 0.105 & 0.895\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{R}_5=\begin{bmatrix}0.000 & 0.842 & 0.158\\ 0.543 & 0.457 & 0.000\\ 0.557 & 0.443 & 0.000\\ 0.794 & 0.206 & 0.000\\ 0.717 & 0.783 & 0.000\\ 0.699 & 0.301 & 0.000\\ 0.000 & 0.015 & 0.985\\ 0.789 & 0.211 & 0.000\\ 0.000 & 0.079 & 0.921\\ 0.593 & 0.908 & 0.000\\ 0.873 & 0.127 & 0.000\\ 0.000 & 0.203 & 0.797\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{R}_6=\begin{bmatrix}0.000 & 0.258 & 0.742\\ 0.577 & 0.423 & 0.000\\ 0.000 & 0.782 & 0.218\\ 0.000 & 0.223 & 0.777\\ 0.671 & 0.829 & 0.000\\ 0.700 & 0.300 & 0.000\\ 0.000 & 0.041 & 0.959\\ 0.694 & 0.306 & 0.000\\ 0.000 & 0.030 & 0.970\\ 0.000 & 0.542 & 0.458\\ 0.871 & 0.129 & 0.000\\ 0.000 & 0.130 & 0.870\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_7=\begin{bmatrix}0.000 & 0.197 & 0.803\\ 0.554 & 0.446 & 0.000\\ 0.000 & 0.327 & 0.673\\ 0.695 & 0.305 & 0.000\\ 0.000 & 0.143 & 0.857\\ 0.698 & 0.302 & 0.000\\ 0.000 & 0.030 & 0.970\\ 0.000 & 0.333 & 0.667\\ 0.000 & 0.982 & 0.019\\ 0.000 & 0.250 & 0.750\\ 0.000 & 0.970 & 0.030\\ 0.000 & 0.274 & 0.726\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{R}_8=\begin{bmatrix}0.000 & 0.231 & 0.769\\ 0.567 & 0.433 & 0.000\\ 0.000 & 0.278 & 0.722\\ 0.511 & 0.989 & 0.000\\ 0.000 & 0.424 & 0.576\\ 0.699 & 0.301 & 0.000\\ 0.000 & 0.082 & 0.918\\ 0.786 & 0.214 & 0.000\\ 0.000 & 0.064 & 0.934\\ 0.000 & 0.313 & 0.688\\ 0.868 & 0.132 & 0.000\\ 0.000 & 0.298 & 0.702\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{R}_9=\begin{bmatrix}0.000 & 0.286 & 0.714\\ 0.562 & 0.438 & 0.000\\ 0.000 & 0.892 & 0.108\\ 0.000 & 0.932 & 0.068\\ 0.718 & 0.282 & 0.000\\ 0.699 & 0.301 & 0.000\\ 0.000 & 0.041 & 0.959\\ 0.786 & 0.214 & 0.000\\ 0.000 & 0.041 & 0.959\\ 0.544 & 0.956 & 0.000\\ 0.856 & 0.144 & 0.000\\ 0.000 & 0.959 & 0.041\end{bmatrix}$$

3.4 指标权重集确定

在水资源承载力的研究中，除考虑各个评价因子自身性质对其的相对重要性，也要考虑它们组态对水资源承载力的影响。因此，本文采用常规权重与变权方法相结合的方式来确定诸因子的取值状况对水资源承载力的影响[12,15]。

(1) 常权的确定。在综合评价中，考虑各评价因子对水资源承载力的影响不同以及各个评价指标之间的各个量纲不同一，故采用主成分分析法[20]。

基于天山北坡经济带水资源承载力的原始数据，运用 SPSS 软件进行主成分分析，确定各个评价指标的权重值，得出权重(表 4)。

(2) 最低评语等级隶属度向量。诸评价因子的状态隶属于天山北坡经济带水资源承载力综合评价最低评语等级的隶属度组成的向量：

$$\mu=[\mu(u_1),\mu(u_2),\cdots,\mu(u_n)] \tag{7}$$

(3) 状态影响向量。

$$S_j(\mu)=\begin{cases}2-\log_{b_j}\mu(x_j) & \mu(x_j)>b_j\\ 1 & \mu(x_j)\leqslant b_j\end{cases} \tag{8}$$

其中 b_j 为调整水平($j=1,2,\cdots,n$)，即某一因子的状态隶属于天山北坡水资源承载力综合评价最低评语等级的隶属度受调整的阈值，本文取 $b_j=80\%$。

表 4 天山北坡经济带水资源承载力各指标常权向量

目标层	系统层	系统层权重	指标层	指标层权重	W
A	B_1	0.46	C_1	0.24	0.111
			C_2	0.19	0.098
			C_3	0.29	0.098
			C_4	0.08	0.043
			C_5	0.20	0.113
	B_2	0.27	C_6	0.17	0.098
			C_7	0.08	0.028
			C_8	0.26	0.001
			C_9	0.28	0.098
			C_{10}	0.21	0.049
	B_3	0.26	C_{11}	0.50	0.106
			C_{12}	0.50	0.152

(4) 基于隶属度的 Hardarnard 乘积变权模型。

$$W(\mu)=\frac{[a_1s_1(\mu),a_2s_2(\mu),\cdots,a_ns_n(\mu)]}{\sum_{j=1}^{n}[a_js_j(\mu)]}$$

$$=\frac{A\cdot S_{\mu}}{\sum_{j=1}^{n}[a_j s_j(\mu)]} \tag{9}$$

根据上述步骤得出天山北坡经济带各单元变权，详见表 5。

表 5　天山北坡经济带各区域水资源综合评价变权向量

地区名称	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}
乌鲁木齐 W_1	0.106	0.093	0.093	0.041	0.108	0.093	0.050	0.001	0.100	0.047	0.045	0.048
石河子 W_2	0.134	0.118	0.118	0.052	0.136	0.118	0.034	0.001	0.118	0.060	0.056	0.053
吐鲁番 W_3	0.119	0.105	0.105	0.046	0.182	0.105	0.058	0.001	0.107	0.053	0.050	0.070
哈密 W_4	0.121	0.107	0.107	0.047	0.171	0.107	0.056	0.001	0.107	0.054	0.051	0.072
伊犁州 W_5	0.130	0.115	0.115	0.050	0.132	0.115	0.063	0.001	0.115	0.058	0.055	0.052
塔城 W_6	0.128	0.113	0.113	0.050	0.130	0.113	0.058	0.001	0.113	0.057	0.054	0.070
克拉玛依 W_7	0.127	0.110	0.110	0.048	0.167	0.110	0.059	0.001	0.110	0.056	0.053	0.050
昌吉 W_8	0.131	0.116	0.116	0.051	0.134	0.116	0.053	0.001	0.116	0.059	0.055	0.052
博州 W_9	0.117	0.104	0.104	0.046	0.120	0.104	0.054	0.001	0.203	0.052	0.050	0.047

3.5　综合评价计算

根据模糊综合评判模型 $B=W\cdot R$ 得到天山北坡经济带各区域水资源承载力模糊综合评价结果 B_1—B_9：

$$B_1=W_1\cdot R_1=(0.016,0.093,\cdots,0.048)\cdot\begin{bmatrix}0.000 & 0.270 & 0.730\\ 0.544 & 0.456 & 0.000\\ 0.000 & 0.488 & 0.512\\ 0.867 & 0.133 & 0.000\\ 0.726 & 0.774 & 0.000\\ 0.691 & 0.309 & 0.000\\ 0.000 & 0.031 & 0.969\\ 0.727 & 0.273 & 0.000\\ 0.000 & 0.188 & 0.812\\ 0.000 & 0.269 & 0.731\\ 0.848 & 0.152 & 0.000\\ 0.000 & 0.173 & 0.827\end{bmatrix}=(0.268,0.283,0.329)$$

$$B_2=W_2\cdot R_2=(0.134,0.118,\cdots,0.053)\cdot\begin{bmatrix}0.870 & 0.130 & 0.000\\ 0.000 & 0.274 & 0.726\\ 0.000 & 0.278 & 0.722\\ 0.859 & 0.141 & 0.000\\ 0.000 & 0.254 & 0.746\\ 0.615 & 0.385 & 0.000\\ 0.000 & 0.206 & 0.794\\ 0.847 & 0.153 & 0.000\\ 0.711 & 0.289 & 0.000\\ 0.000 & 0.250 & 0.750\\ 0.744 & 0.256 & 0.000\\ 0.000 & 0.291 & 0.709\end{bmatrix}=(0.361,0.256,0.382)$$

B_3—B_9 计算方法与上述步骤一致。为了更好地反映水资源承载力的情况，对各指标影响程度做定量化，对等级 v_1，v_2，v_3 评分取 $\alpha_1=0.95$，$\alpha_2=0.5$，$\alpha_3=0.05$[18]。即：$A=v_1\cdot\alpha_1+v_2\cdot\alpha_2+v_3\cdot\alpha_3$，数值越高，表示水资源承载力潜力越大。计算结果详见表 6。

表 6 天山北坡经济带各区域水资源综合评价结果

地区名称	v_1	v_2	v_3	综合评分值 A
乌鲁木齐	0.268	0.283	0.329	0.41
石河子	0.361	0.256	0.382	0.49
吐鲁番	0.299	0.240	0.463	0.43
哈密	0.307	0.284	0.409	0.45
伊 犁	0.529	0.499	0.124	0.76
塔 城	0.359	0.405	0.301	0.56
克拉玛依	0.279	0.320	0.456	0.45
昌 吉	0.320	0.376	0.387	0.51
博 州	0.288	0.385	0.352	0.48

3.6 综合评价分析与讨论

结合选取的原始数据，得到天山北坡经济带各地区水资源承载力模糊综合评价结果，根据计算的综合评价值来对水资源承载力进行评价，综合评价值越大，说明水资源承载力越强，水资源承载力开发潜力越大，反之，综合评价值越小，水资源承载力越弱，水资源继续开发潜力越小。

根据研究结果可知，天山北坡经济带各地区综合评价值除伊犁均小于 0.6，说明天山北坡经济带大部分地区水资源开发已具有一定的规模，超过承载力极限将造成流域的生态环境恶化[21]。伊犁水资源承载力对 v_1 的隶属度均大于 v_2，v_3，说明该地区水资源承载力较强，水资源开发利用潜力大，该地区水资源有较高的开发利用空间；塔城地区水资源承载力对 v_2 的隶属度均大于 v_1，v_3，说明该地区水资源承载力属于适中程度，任具有可持续开发的能力，生活、生产、生态用水相对于平衡，暂不会发生水资源短缺现象；而乌鲁木齐、石河子、克拉玛依、昌吉、吐鲁番、哈密地区水资源承载力对 v_3 的隶属度均大于 v_1，v_2，水资源供需矛盾突出，需要对水资源利用上采取相应措施，使水资源可持续利用，为社会经济的协调发展提供保障。

从水资源系统来看，各地区评价值由高到低分别为：伊犁、石河子、塔城、昌吉、哈密、克拉玛依、吐鲁番、博州、乌鲁木齐，其中伊犁、乌鲁木齐评分值分别为 0.529，0.268；从社会发展系统来看，各地区评分值由高到低分别为伊犁、塔城、博州、昌吉、克拉玛依、哈密、乌鲁木齐、石河子、吐鲁番，其中伊犁、吐鲁番分别为 0.499，0.24，评分低的地区应该合理规划产业结构，减少社会发展带给水资源的压力；从生态环境系统来看，各地区评分值由高到低分别为：克拉玛依、吐鲁番、哈密、昌吉、石河子、博州、乌鲁木齐、塔城、伊犁，其中克拉玛依、伊犁评分值分别为 0.456，0.124，评分高的地区应注重生态的保护，减少生态恶化的危机。

从综合评分值来看，天山北坡经济带各地区水资源承载力由大到小排名依次为：伊犁、塔城、石河子、哈密、克拉玛依、吐鲁番、乌鲁木齐。天山北坡经济带中部乌鲁木齐、石河子以及西部博州、克拉玛依水资源承载力综合评分值分别为 0.41，0.49，0.48，0.45 均小于 0.5，水资源供需矛盾较为突出，应提高农业用水效率，调整产业布局，尽快采取相应措施，以保证社会经济发展与生态环境的协调发展；天山北坡经济带东部伊犁、塔城和中部地区昌吉水资源承载力综合评分值为 0.76，0.56，0.51 均大于 0.5，水资源开发潜力较大，但是为了水资源的可持续利用应注意进一步的水资源开发利用规划；天山北坡经济带西部（吐鲁番、哈密）水资源承载力综合评分值为 0.43，0.45，水资源开发潜力较差，生态环境脆弱，为了加强生态建设需合理规划水资源利用和保护。

4 结 论

本文采用模糊综合评价法从水资源、社会经济发展、生态环境 3 个系统上选取了供水模数、水资源开发利用率、人均水资源利用量等 12 项指标对天山北坡经济带各经济带水资源承载力进行了多因素综合评价，从评判结果来看，天山北坡经济带中乌鲁木齐、石河子、吐鲁番、哈密、塔城、伊犁、克拉玛依、昌吉、博州的水资源承载力综合评分值分别为：0.41，0.49，0.43，0.45，0.76，0.56，0.45，0.51，0.48。天山北坡经济带的水资源开发已具有一定的规模，但水资源仍有一定的开发利用潜力，且东西部水资源承载力相差较大，应合理规划水资源开发利用和保护。在“十三五”时期不仅要完善水源保护体系还应注重对水资源的深度和跨经济带开发，深化产业结构调整，做到从源头上节约用水、循环利用，加强水资源开发利用规划与管理，防止水质污染，科学合理利用有限的水资源。

[参 考 文 献]

[1] 刘佳骏，董锁成，李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究[J]. 自然资源学报，2011，26(2)：258-269.

[2] 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.

[3] 李吉玫. 伊犁河流域水资源承载力的综合评价[J]. 干旱区资源与环境，2007，21(3)：39-43.

[4] 张占江，李吉玫，石书兵. 阿克苏河流域水资源承载力模糊综合评价[J]. 干旱区资源与环境，2008，22(7)：138-143.

（下转第 219 页）

Environmental Engineering(UNESCO-IHE): Delft, the Netherlands, 2003.

[9] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Globalization of Water: Sharing the Plante' S Freshwater Resources [M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2008.

[10] Hoekstra A Y, Mekonnen M M. The water footprint of humanity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012,109(9):3232-3237.

[11] Sun Caizhi, Liu Yuyu, Chen Lixin, et al. The spatial-temporal disparities of water footprints intensity based on Gini coefficient and Theil index in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010,30(5):1312-1321.

[12] 钟文婷,张军,蔡立群,等.疏勒河流域 2001—2010 年水足迹动态特征及评价[J].草原与草坪,2015,35(6):27-34.

[13] 王博.基于水足迹理论的吉林省辽河流域城市化进程中水资源可持续利用评价与优化配置研究[D].长春:吉林大学,2015.

[14] 刘楚烨,赵言文,马群宇,等.基于水足迹理论的江苏省水资源可持续利用评价[J].水土保持通报,2017,37(6):313-320.

[15] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard[M]. London, U K: Earthscan, 2011.

[16] Hill M S. Understanding Enviromental Pollution[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997.

[17] 杨淑静,张爱平,杨世绮,等.农业非点源污染现状分析及国内外研究进展[J].中国农业气象,2009,30(S1):82-85.

[18] 曾昭.基于水足迹的水资源短缺评价[D].北京:北京林业大学,2014.

[19] Hoekstra A Y, Mekonnen M M, Chapagain A K, et al. Global monthly water scarcity: blue water footprints versus blue water availability[J]. Plos One, 2012, 7(2):1-9.

[20] 胡彬,刘俊国,赵丹丹,等.基于水足迹理念的水资源短缺评价:以 2022 年冬奥会雪上项目举办地为例[J].灌溉排水学报,2017,36(7):108-116.

[21] 张楠,李春晖,杨志峰,等.基于灰水足迹理论的河北省水资源评价[J].北京师范大学学报:自然科学版,2017,53(1):75-79.

(上接第 212 页)

[5] 杨广,何新林,付杨,等.玛纳斯河流域水资源承载力综合评价研究[J].人民黄河,2009,31(1):55-56.

[6] 董雯,刘志辉.艾比湖流域水资源承载力综合评价[J].干旱区地理,2010,33(2):217-223.

[7] 王暄.基于模糊综合评判法的塔里木河流域水资源承载力评价[J].广东水利水电,2010(8):46-48.

[8] 段新光,栾芳芳.基于模糊综合评判的新疆水资源承载力评价[J].中国人口·资源与环境,2014,24,(S1):119-122.

[9] 向秀容.基于生态足迹的天山北坡经济带生态承载力评价与预测[J].地理研究,2016,35(5):875-884.

[10] 新疆统计局.新疆统计年鉴[M.].乌鲁木齐:新疆统计出版社,2012.

[11] 张新时.天山北部山地—绿洲—过渡带—荒漠系统的生态建设与可持续农业范式[J].植物学报:英文版,2001,43(12):1294-1299.

[12] 雷艳娇,葛强.云南省地市(州)水资源承载力模糊综合评判[J].人民珠江,2016,37(4):21-24.

[13] 乔长录,刘昭.干旱区流域水文生态系统质量综合评价研究:以新疆自治区玛纳斯河流域为例[J].水土保持通报,2012,32(2):215-221.

[14] 王根绪,程国栋,徐中民.中国西北干旱区水资源利用及其生态环境问题[J].自然资源学报,1999,14(2):109-116.

[15] 冯兰刚,焦彦臣,都沁军.基于 AHP 的河北省水资源承载能力分析[J].工业技术经济,2009,28(7):90-93.

[16] 蒋春林.基于模糊综合评判模型的区域水资源承载力评价[J].水利科技与经济,2015,21(12):1-3.

[17] 张占江,李吉玫,石书兵.阿克苏河流域水资源承载力模糊综合评价[J].干旱区资源与环境,2008,22(7):138-143.

[18] 卜楠楠,唐德善,尹笋.基于 AHP 法的浙江省水资源承载力模糊综合评价[J].水电能源科学,2012(3):42-44.

[19] 荣跃,刘志斌,冯吉燕.基于模糊聚类分析的地下水环境质量评价[J].辽宁工程技术大学学报,2006(S2):309-311.

[20] 韩小孩,张耀辉,孙福军,等.基于主成分分析的指标权重确定方法[J].兵器装备工程学报,2012,33(10):124-126.

[21] 宋丹丹,郭辉.新疆水资源承载力综合评价研究[J].新疆师范大学学报:自然科学版,2014(4):1-8.