基于多层次模糊综合评价模型的沙漠绿洲水资源承载力评价与预测

张天宇[1,2], 卢玉东[1,2], 王正川[3]

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 深圳市广汇源水利勘测设计有限公司, 广东 深圳 518000)

摘　要: [目的] 对腰坝绿洲未来水资源承载力进行评价和预测研究,为该地区水资源的可持续利用及合理管理政策的制定提供决策依据。[方法] 取 2016 年为现状水平年,2020,2025,2030 年为规划水平年,根据绿洲发展历史和现状及相关规划,对社会经济发展进行预测,进而对各水平年的需水进行预测。选取 9 个评价指标构建水资源承载力评价指标体系,建立水资源承载力模糊综合评价模型,对各水平年水资源承载力进行评价分析。[结果] 水资源承载力综合评判值 2016 年仅为 0.251 2,表明水资源承载力已达到饱和;至 2030 年,上升至 0.434 4,水资源承载力处于较高的可承载水平,但区内地下水资源开发潜力仍然有限。[结论] 现状年水资源承载力处于超载状态,水资源供需矛盾突出,社会经济子系统是水资源承载力提高的主要压力源,通过采取一系列的措施,未来水资源承载力状况将逐渐好转,需采取全面有效的措施使水资源承载力提升至较高水平,将研究区打造成为和谐高效的绿洲。

关键词: 水资源承载力; 模糊综合评价; 沙漠绿洲; 社会经济系统

文献标识码: A　　**文章编号**: 1000-288X(2018)02-0275-06　　**中图分类号**: S156.4

文献参数: 张天宇, 卢玉东, 王正川. 基于多层次模糊综合评价模型的沙漠绿洲水资源承载力评价与预测[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 275-280. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.02.045. Zhang Tianyu, Lu Yudong, Wang Zhengchuan. Water resources carrying capacity in desert oasis areas based on multilevel fuzzy comprehensive evaluation model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2): 275-280.

Water Resources Carrying Capacity in Desert Oasis Areas Based on Multilevel Fuzzy Comprehensive Evaluation Model

ZHANG Tianyu[1,2], LU Yudong[1,2], WANG Zhengchuan[3]

(1. *School of Environment Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*; 2. *Key Laboratory of Surface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*; 3. *Shenzhen Guanghuiyuan Water Conservancy Exploration Survey & Design Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong* 518000, *China*)

Abstract: [Objective] To provide reference for management decision of sustainable utilization of water resources, an evaluation and prediction research with respect to the carrying capacity of typical Yaoba oasis water resources was conducted. [Methods] We took 2016 as the actuality year and 2020, 2025, 2030 as planning level year. According to the oasis development history, current situation and related planning, we forecasted the water demand of each level year. Nine evaluation indexes were selected to construct evaluation index system of water resources carrying capacity, and to establish a fuzzy comprehensive evaluation model of the water resources carrying capacity and made an analysis of the water resources carrying capacity of each level year. [Results] The fuzzy synthetic evaluation value of 2016 was only 0.251 2, which showed the carrying capacity of water resources had reached saturation; in 2030, it will reach on 0.434 4, which is a higher bearing level. However, the development potential of groundwater resources in Yaoba oasis is still limited. [Conclusion] The evaluation result showed that actuality year of water resources carrying capacity

收稿日期: 2017-10-07　　**修回日期**: 2017-11-06

资助项目: 国家自然科学基金项目"灌溉区包气带氮素生物地球化学动态对水分的响应过程研究"(41273104); 阿拉善 SEE 生态协会基金项目(220029150182)

第一作者: 张天宇(1987—),男(汉族),山东省滨州市人,博士研究生,研究方向为西部特殊环境地质问题。E-mail: 497217406@qq.com。

通讯作者: 卢玉东(1969—),男(汉族),河北省唐山市人,教授,博士生导师,主要从事水文地质方面的研究。E-mail: 18631061634@163.com。

was in overload condition and the contradiction of supply and demand of water resources was obvious. The social economy system was the main stress-source of the improvement of water resource carrying capacity. Through taking a series of measures, the future situation of water resources carrying capacity will gradually improve. It need to take comprehensive measures to raise water resources carrying capacity to a higher level, and to build the study area into a harmonious and efficient oasis.

Keywords: water resources carrying capacity; fuzzy comprehensive evaluation; desert oasis; social economy system

绿洲是我国西北干旱荒漠地区的沃土,在稳定水源的支持下具有较高的生产力,承载着地区绝大部分的人口和财富。腰坝绿洲属于西北干旱荒漠区典型的农业绿洲,为内蒙古阿拉善左旗重要的农畜产品生产基地。区内绝大多数沟谷只存在季节性间歇流水,沟系平均年径总流量为 7.10×10^6 m^3,地下水年补给量为 2.20×10^7 m^3,地下水允许开采量为 2.00×10^7 m^3[1]。从 20 世纪 70 年代末开始大规模开发以来,由于不合理的开发利用及缺乏科学的地下水管理,地下水位不断下降,近 40 a 来区内地下水位总体下降了 5 m 以上,导致邻近湖泊萎缩,周边咸水入侵,水质恶化,土地盐碱化加重。因此,对腰坝绿洲未来水资源承载力进行评价和预测研究刻不容缓。本研究考虑到绿洲水资源系统的复杂性与不确定性,综合评价采用定性分析的模糊综合评价法,而指标权重则引入层次分析法。本文基于建立的研究情景,取 2016 年为现状水平年,2020,2025,2030 年为规划水平年,分别计算水资源承载力。旨在通过评价预测未来影响水资源系统承载力变化的关键因素,为腰坝绿洲水资源的可持续利用及合理管理政策的制定提供决策依据,以期实现腰坝绿洲水资源和社会经济的可持续协调发展。

1 研究方法

1.1 水资源承载力评价指标体系构建

水资源承载力指标体系是以简明、综合和全面的方式,体现被评价地区的水资源对社会经济和生态环境的承载内容和过程,其总体效应能反映被承载对象的总体状况,可为水资源可持续利用和水资源合理配置以及其他政策的制定提供支持[2]。影响区域水资源承载力的因素主要有:水资源数量、质量以及开发利用程度、生态环境状态、社会经济技术条件、社会消费水平和结构、社会生产力水平、区际交流[3]。根据科学性、全面性和概括性相结合、系统性与独立性相结合、定性与定量相结合、可比性与可操作性相结合的原则[4],借鉴全国水资源供需分析中的评价指标体系[5],参考专家建议,根据腰坝绿洲的实际情况和特点,构建包括水资源、社会经济、生态环境 3 个子系统,森林覆盖率、草地覆盖率、水资源供需比、人均水资源可利用量、单位 GDP 用水量、城镇化率、灌溉用水定额、第一产业比例、人均 GDP 共 9 个评价指标的多层次水资源承载力评价指标体系。根据绿洲发展历史、现状及相关规划,对社会经济发展进行预测,进而对各水平年的需水进行预测,限于文章篇幅,具体预测方法见文献[6-8],各指标现状值及预测值详见表 1。

表 1 水资源承载力评价指标现状值及预测值

系 统	评价指标	计算公式	预测值			
			2016 年	2020 年	2025 年	2030 年
生态环境子系统 B_1	森林覆盖率 C_1/%	林地面积/绿洲面积	5.65	6.40	7.39	8.37
	草地覆盖率 C_2/%	草地面积/绿洲面积	20.78	29.87	38.41	38.41
水资源子系统 B_2	水资源供需比 C_3	可供水量/总需水量	0.55	0.74	0.96	1.02
	人均水资源可利用量 C_4/m^3	水资源可利用量/总人口	1 920.49	1 890.07	1 852.72	1 816.10
社会经济子系统 B_3	单位 GDP 用水量 C_5(m^3/万元)	总需水量/GDP 总量	1 389.41	860.37	520.72	383.80
	城镇化率 C_6/%	城镇人口/总人口	10.99	12.65	15.08	17.99
	灌溉用水定额 C_7/(m^3 · hm^{-2})	灌溉用水量/灌溉面积	481.32	366.54	267.50	241.94
	第一产业比例 C_8/%	第一产业增加值/GDP 总量	32.91	30.22	28.18	25.32
	人均 GDP C_9/元	GDP 总量/总人口	2.52	2.97	3.72	4.62

1.2 评价指标分级标准确定

按照以上 9 个指标对水资源承载力的影响程度划分为 3 个等级,构建评语集 $V=\{v_1,v_2,v_3\}$。其中 v_1 级表示情况较好,水资源承载力较强,研究区水资源开发潜力较大,水资源供给情况较好,处于可持续利用的状态;v_3 级表示情况较差,水资源承载力已达到极限,水资源进一步开发利用的潜力十分有限,存在水资源短缺问题,社会经济发展受到制约;v_2 级的

情况介于 v_1 和 v_3 两级之间,表示区域水资源开发利用已经达到相当的规模,仍具有一定程度的开发利用潜力,区域社会经济发展对水资源的需求有一定的保证。

根据腰坝绿洲的地域特点和现有研究成果[9-12],确定各分级指标对应评语集 V 的阈值,具体分级值详见表 2。为定量表达各等级因素对水资源承载力的影响程度,对评判集等级进行一分制数量化:$\alpha_1=0.95$,$\alpha_2=0.5$,$\alpha_3=0.05$,数值越高,表示水资源承载能力越强[13]。

表 2 水资源承载力评价指标及其分级值

目标层	准则层	指标层	v_1	v_2	v_3
水资源承载力 A	生态环境子系统 B_1	森林覆盖率 C_1/%	>10	3～10	<3
		草地覆盖率 C_2/%	>60	15～60	<15
	水资源子系统 B_2	水资源供需比 C_3	>1.2	1～1.2	<1
		人均水资源可利用量 C_4/m³	>3 000	1 700～3 000	<1 700
	社会经济子系统 B_3	单位 GDP 用水量 C_5(m³/万元)	<80	80～500	>500
		城镇化率 C_6/%	<20	20～70	>70
		灌溉用水定额 C_7(m³/hm²)	<5250	5 250～10 950	>10 950
		第一产业比例 C_8/%	<12	12～30	>30
		人均 GDP C_9/元	>8	2.6～8	<2.6

1.3　评价模型原理及评价步骤

模糊综合评价模型的原理为[14]:建立评判因素(指标)集 $C=\{c_1,c_2,\cdots,c_n\}$ 和评语集 $V=\{v_1,v_2,\cdots,v_m\}$,模糊综合评判为:

$$B=A\cdot R \tag{1}$$

式中:A——C 的模糊子集,$A=\{a_1,a_2,\cdots,a_n\}$,其中 $0\leqslant a_i\leqslant 1$,$a_i$——$C$ 对 A 的隶属度,表示单因素 c_i 在评判因素中所起到的作用的大小;"·"——模糊算子,采用普通矩阵算法;B——V 的模糊子集,$B=\{b_1,b_2,\cdots,b_m\}$,其中 $0\leqslant b_i\leqslant 1$,$b_i$——等级 v_i 对综合评判所得到的模糊子集 B 的隶属度,其表示综合评判的结果。隶属度(评判)矩阵为:

$$\boldsymbol{R}=\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{pmatrix} \tag{2}$$

式中:r_{ij}——c_i 的评价对等级 v_j 的隶属度,因此评判矩阵 $\boldsymbol{R}$ 的第 i 行 $R_i=(r_{i1},r_{i2},\cdots,r_{im})$——对第 i 个元素 c_i 的评价结果。在评价计算中,$A=\{a_1,a_2,\cdots,a_n\}$——各个元素对综合评判重要性的权系数,满足 $\sum_{i=1}^{n}a_i=1$,与此同时模糊变换可变换为普通矩阵计算,即为:$b_j=\min\{1,\sum_{i=1}^{n}a_ir_{ij}\}$。

1.4　基于层次分析法指标权重的确定

层次分析法是一种定性与定量分析相结合的系统分析方法。该方法把复杂的问题分解为不同的组成因素,通过两两比较的方式确定同层次中各因素的相对重要性的排序权值,最后进行综合判断确定各因素的相对重要性的总排序权值[15]。首先建立层次结构模型(目标层、准则层和措施层),然后采用相对尺度的方法构造两两指标比较判断矩阵,矩阵元素根据 1—9 标度法确定(具体标度准则详见表 3),并借助近似效果较优的根法推导出相应排序权向量,再对判断矩阵大体上的一致性进行检验,若检验结果满足要求,上述排序权向量(均一化后)可作为指标权重;否则修改判断矩阵再次进行检验,直至满足要求为止。具体过程不再赘述,下面将指标权重汇总于表 4 中。

表 3　水资源评价指标体系的标度划分及准则详解

标度	含义
1	表示两个因素相比,具有同样重要性
3	表示两个因素相比,因素 i 比因素 j 稍微重要
5	表示两个因素相比,因素 i 比因素 j 明显重要
7	表示两个因素相比,因素 i 比因素 j 强烈重要
9	表示两个因素相比,因素 i 比因素 j 极端重要
2,4,6,8	上述两相邻判断的中值
倒数	因素 i 与 j 比较的判断为 a_{ij},则因素 j 与 i 比较的判断 $a_{ji}=1/a_{ij}$

表 4 水资源承载力各指标权重

目标层	准则层	准则层权重	指标层	指标层权重	权重
水资源承载力 A	生态环境子系统 B_1	0.126 0	森林覆盖率 C_1	0.666 7	0.084 0
			草地覆盖率 C_2	0.333 3	0.042 0
	水资源子系统 B_2	0.416 1	水资源供需比 C_3	0.666 7	0.277 4
			人均水资源可利用量 C_4	0.333 3	0.138 7
	社会经济子系统 B_3	0.457 9	单位 GDP 用水量 C_5	0.310 9	0.142 4
			城镇化率 C_6	0.037 5	0.017 2
			灌溉用水定额 C_7	0.166 6	0.076 3
			第一产业比例 C_8	0.174 1	0.079 7
			人均 GDP C_9	0.310 9	0.142 4

1.5 隶属度矩阵的构造

单因素模糊评价是单独对一个因素进行评价，以确定评价对象对评价集合 V 的隶属度的评价。具体操作为根据评价因素 c_i 的实际值，推求其对应等级 v_j 的隶属度函数 r_{ij} 的值，最后得到隶属度矩阵 R。对隶属度函数[16]进行模糊化处理，使其在各级间平滑过渡。对于 v_2 级即中间区间，将评价因素落在评价中点的隶属度定为 1，区间两端点的隶属度定为 0.5，并令隶属度由中点向两端线性递减。对于 v_1 或 v_3 级一侧区间，在临界值对两侧等级的隶属度均为 0.5，而距临界值越远对该侧区间的隶属度越大。按以上规则构造各等级隶属度函数计算公式，令 v_1 和 v_2 级的临界值为 k_1，v_2 级区间中点为 $k_2=(k_1+k_3)/2$，v_2 和 v_3 级的临界值为 k_3。各评价因素对各等级隶属度函数的计算公式不再赘述。根据各评价指标不同水平年额预测数据可以计算整理得各水平年的各评价指标值(表 5)及相应的各水平年的隶属度矩阵。

表 5 各水平年评价指标值

年份	森林覆盖率 C_1	草地覆盖率 C_2	水资源供需比 C_3	人均水资源可利用量 C_4	单位 GDP 用水量 C_5	城镇化率 C_6	灌溉用水定额 C_7	第一产业比例 C_8	人均 GDP C_9
2016	5.65	20.78	0.55	1 920	1 389	10.99	481	32.91	2.52
2020	6.4	29.87	0.74	1 890	860	12.65	367	30.22	2.97
2025	7.39	38.41	0.96	1 853	521	15.08	267	28.18	3.72
2030	8.37	38.41	1.02	1 816	384	17.99	242	25.32	4.62

$$\boldsymbol{R}_{2016}=\begin{bmatrix}0.0000 & 0.8779 & 0.1221\\ 0.0000 & 0.6285 & 0.3715\\ 0.0000 & 0.0907 & 0.9093\\ 0.0000 & 0.6696 & 0.3304\\ 0.0000 & 0.0955 & 0.9045\\ 0.6325 & 0.3675 & 0.0000\\ 0.1544 & 0.8456 & 0.0000\\ 0.0000 & 0.3780 & 0.6220\\ 0.0000 & 0.4856 & 0.5144\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{2020}=\begin{bmatrix}0.0000 & 0.9858 & 0.0142\\ 0.0000 & 0.8304 & 0.1696\\ 0.0000 & 0.1388 & 0.8612\\ 0.0000 & 0.6462 & 0.3538\\ 0.0000 & 0.1841 & 0.8159\\ 0.6136 & 0.3864 & 0.0000\\ 0.4565 & 0.5435 & 0.0000\\ 0.0000 & 0.4882 & 0.5118\\ 0.0000 & 0.5685 & 0.4315\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{2025}=\begin{bmatrix}0.1266 & 0.8734 & 0.0000\\ 0.0202 & 0.9798 & 0.0000\\ 0.0000 & 0.3474 & 0.6526\\ 0.0000 & 0.6175 & 0.3825\\ 0.0000 & 0.4551 & 0.5449\\ 0.5822 & 0.4178 & 0.0000\\ 0.6514 & 0.3486 & 0.0000\\ 0.0000 & 0.6013 & 0.3987\\ 0.0000 & 0.7077 & 0.2923\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{2030}=\begin{bmatrix}0.2673 & 0.7327 & 0.0000\\ 0.0202 & 0.9798 & 0.0000\\ 0.0000 & 0.6240 & 0.3760\\ 0.0000 & 0.5893 & 0.4107\\ 0.0000 & 0.7767 & 0.2233\\ 0.5372 & 0.4628 & 0.0000\\ 0.6813 & 0.3187 & 0.0000\\ 0.0000 & 0.7597 & 0.2403\\ 0.0000 & 0.8736 & 0.1264\end{bmatrix}$$

1.6　综合评判值的计算

根据权重矩阵 A 和各水平年的隶属度矩阵 $\boldsymbol{R}$,对 $\boldsymbol{B}=\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{R}$ 采用普通矩阵算法求得各水平年的综合评判结果矩阵 B,并根据公式(1.3)计算综合评判结果矩阵 B 的水资源承载力的综合评判值 α,其值越大表示水资源承载力越强。计算结果详见表 6。

$$\alpha=\frac{\sum_{i=1}^{3}b_i^k g\alpha_j}{\sum_{i=1}^{3}b_i^k} \tag{3}$$

式中:K——起到突出占优势等级的作用,对于干旱区一般取值为 1[17]。

表 6　各水平年水资源承载力综合评价结果

年份	b_1	b_2	b_3	综合评判值 α
2016	0.022 6	0.401 9	0.575 5	0.251 2
2020	0.045 4	0.440 0	0.514 7	0.288 8
2025	0.071 2	0.543 8	0.385 0	0.358 8
2030	0.084 5	0.685 3	0.230 2	0.434 4

水资源承载力综合评价指数是衡量水资源承载程度的综合性指标,评价指数越高,水资源承载力的状况越好。根据相关研究成果[18-20],腰坝绿洲自然生态环境特点及社会经济发展状况,确定综合评价指数分级标准(表 7)。

表 7　水资源承载力评价指数分级标准

评价指数值	状态	状态含义描述
0	不可承载	水资源矛盾极为突出,水资源供给无法满足生产生活的需要
[0,0.2]	准不可承载	水资源供需矛盾有所缓解,基本满足生产生活用水
[0.2,0.5]	可承载	水资源较丰富水环境质量有所提高,区域缺水问题得到解决
[0.5,0.8]	良好可承载	水资源丰富水利设施齐全,水污染治理效果明显
[0.8,1]	理想可承载	水资源与生态、经济、社会协调发展,成为该区域发展的优势资源

2　结果与分析

根据最大隶属度原则和综合评判值,对评判结果进行分析,可以得出,2016 年水资源承载力综合评价结果对 v_3 级的隶属度最大,为 0.575 5,而对 v_1 级的隶属度最小,为 0.022 6,综合评判值 α 仅为 0.251 2,表明水资源承载力已达到饱和,处于较差的状态。至 2020 年,水资源承载力综合评判值 α 上升至 0.288 8,综合评价结果对 v_3 级的隶属度仍为最大,为 0.514 7,水资源承载力仍处于超载状态。至 2025 年,综合评判值 α 进一步上升至 0.358 8,综合评价结果对 v_2 级的隶属度最大,为 0.543 8。水资源承载力较 2020 年有较大的提高,处于可承载的状态。至 2030 年,综合评判值 α 上升至 0.434 4,水资源承载力状况处于较高可承载水平,水资源供需比增至 1.02,社会经济对水资源的需求有一定的保障,但综合评价结果对 v_1 级的隶属度仍比 v_3 级小,表明区内地下水资源开发潜力仍然有限。

3　讨 论

在生态环境系统中,在评价时间段内,森林覆盖率由 5.65%,提高到 8.37%,草地覆盖率由 20.78%,提高到 38.41%。总的来说,研究区生态环境将得到明显的改善,对水资源承载力的贡献率不断提高。在水资源系统中,人均水资源可利用量由 1 920 m^3/人,降至 1 816 m^3/人,水资源供需比由 0.55,上升至 1.02,说明该阶段研究区资源性缺水问题不突出,但应考虑到未来人口增长速度加快可能会给水资源的供需平衡带来压力。在社会经济系统中,灌溉用水定额大幅度下降,由 7 215 m^3/hm^2 降至 3 630 m^3/hm^2,灌溉水利用率达到较高水平。第一产业比例由 32.91%降至 25.32%,第一产业比例依然偏大。单位 GDP 用水量由 1 389 m^3/万元降至 384 m^3/万元,距先进水平还有较大的距离。由此看来,腰坝绿洲的水资源问题主要是结构性缺水。综上分析讨论可知,今后 14 a 内通过采取以节水为核心的多种措施,研究区水资源承载力复合系统将呈良性的趋势发展。

4　结论及建议

(1) 目前,研究区水资源承载力处于超载状态,咸水入侵,生态环境形势严峻,绿洲系统稳定性受到严重威胁。2016—2030 年水资源承载力呈上升趋势,其中生态环境质量的改善是主要驱动因素,而社会经济子系统是主要压力源,水资源系统中需关注未来人口迅速增长带来的压力。

(2) 社会经济子系统中,经济结构的不合理是水资源承载力提高的主要限制因素,未来应从这方面提高水资源承载能力,如,加快发展第二、三产业,限制发展高耗水、高污染工业,积极发展乡村游、风电游等旅游业。

(3) 针对腰坝绿洲地区特殊的水文环境和社会经济结构,未来应加快调整产业结构,推广节水灌溉技术,加强水资源科学管理,加强生态环境保护,提高水资源可利用量。

[参 考 文 献]

[1] 师伟.阿拉善腰坝绿洲地下水资源开发利用及其合理配置研究[D].陕西 西安:长安大学.2007.

[2] 孙富行.水资源承载力分析与应用[D].江苏 南京:河海大学,2006.

[3] 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.

[4] 段新光,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(3):119-122.

[5] 黄永基,滇真.区域水资源供需分析方法[M].江苏 南京:河海大学出版社,1990.

[6] 刘秀屏.区域水资源合理配置研究[D].江苏 南京:河海大学,2005.

[7] 贺丽媛,夏军,张利平.水资源供需预测的研究现状及发展趋势[J].长江科学院院报,2007,24(1):61-64.

[8] 余卫东.黄土高原地区水资源承载力研究:以山西省河津市为例[D].江苏 南京:南京气象学院,2003.

[9] Zhang Junyi, Wang Lachun. Assessment of water resource security in Chongqing City of China: What has been done and what remains to be done? [J]. Natural Hazards, 2015,75(3):2751-2772.

[10] 苏永红,冯起,刘蔚,等.应用模糊综合评判方法评价石羊河流域水资源承载力[J].干旱区研究,2009,26(2):169-175.

[11] 张美玲,梁虹,祝安,等.贵州水资源承载力基于熵权的模糊物元评价[J].人民长江,2007,38(2):54-57.

[12] Meng Lihong, Chen Yaning, Li Weihong, et al. Fuzzy comprehensive evaluation model for water resources carrying capacity in Tarim River Basin, Xinjiang, China[J]. Chinese Geographical Science, 2009,19(1):89-95.

[13] 王学全,卢琦,李保国.应用模糊综合评判方法对青海省水资源承载力评价研究[J].中国沙漠,2005,25(6):944-949.

[14] 陈守煜.系统模糊决策理论与应用[M].辽宁 大连:大连理工大学出版社,1994.

[15] 许雪燕,模糊综合评价模型的应用及研究[D].四川 成都:西南石油大学,2011.

[16] 谢季坚,刘承平.模糊数学方法及其应用[M].湖北 武汉:华中理工大学出版社,1999:37-52.

[17] 施雅风,曲耀光.乌鲁木齐河流域水资源承载力及去合理利用[M].北京:科学出版社,1992.

[18] 张兴榆,曹明明,黄贤金.基于综合评判模型的干旱半干旱地区水资源承载力评价研究:以黄河中游延安市为例[J].南京大学学报:自然科学,2008,44(6):674-682.

[19] 吕萍,刘东,赵菲菲.基于熵权的建三江分局水资源承载力模糊物元评价模型[J].水土保持研究,2011,18(2):246-250.

[20] 王江,李靖,魏红义,等.基于 TOPSIS 法的区域水资源承载力预测评价:以陕西省关中地区为例[J].水土保持研究,2008,15(3):161-163.

(上接第 274 页)

[18] Fryrear D W, Krammes C A, Williamson D L, et al. Computing the wind erodible fraction of soils[J]. Journal Soil Water Conservation, 1994,49(2):183-188.

[19] Hagen L J, Skidmore E L, Saleh A. Wind erosion: Prediction of aggregate abrasion coefficients [J]. Transactions of the ASAE, 1992,35(6):1847-1850.

[20] Shangguan Wei, Dai Yongjiu, Liu Baoyuan, et al. A soil particle-size distribution dataset for regional land and climate modelling in China[J]. Geoderma, 2012, 171-172:85-91.

[21] Zobeck T M, Popham T W, Skidmore E L, et al. Aggregate-mean diameter and wind-erodible soil predictions using dry aggregate-size distributions[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003,67(2):425-436.

[22] Chepil W S. A compact rotary sieve and the importance of dry sieving in physical soil analysis[J]. Soil Science Society of America Journal, 1962,26(1):4-6.

[23] Belnap J, Eldridge D. Disturbance and Recovery of Biological Soil Crusts[M]// Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management. Berlin Heidelberg: Springer, 2003:363-383.

[24] Jimenez A, Huber-Sannwald E, Belnap J, et al. Biological soil crusts exhibit a dynamic response to seasonal rain and release from grazing with implications for soil stability[J]. Journal of Arid Environments, 2009, 73(12):1158-1169.

[25] Kurosaki Y, Mikami M. Threshold wind speed for dust emission in east Asia and its seasonal variations [J]. Journal of geophysical research, 2007, 112, D17202, doi:10.1029/2006 JD007988.

[26] Zobeck T M, Popham T W. Modification of the wind erosion roughness index by rainfall[J]. Soil Tillage Research, 1997,42(1/2):47-60.