

基于 AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价

艾亚迪, 魏传江, 马真臻

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要:应用 AHP-熵权法-模糊综合评价法探讨西安市水资源开发利用程度, 并建立水资源开发利用评价模型。结果表明, 西安市水资源开发利用程度整体处于发展阶段, 开发利用潜力指数为 0.552, 具备中等水平的开发利用潜力。除西安市区和临潼的水资源开发利用程度较高之外, 其余分区均处于初始或发展阶段。不同评价方法的对比分析显示, AHP-熵权法-模糊综合评价法可靠、实用。对西安市水资源开发利用状况进行 Arcgis 可视化分析, 发现西安市东部水资源开发利用程度较西部高。

关键词:水资源; 水资源开发利用; AHP; 熵权法; 模糊综合评价; 西安市
中图分类号:TV 213 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)02-0011-06

Evaluation on water resources development and utilization degree based on AHP-entropy weight method// Ai Yadi, WEI Chuanjiang, MA Zhenzhen (*China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*)
Abstract: The AHP-entropy weight method-fuzzy comprehensive evaluation method was applied to discuss the development and utilization degree of the regional water resources in Xi'an City, and the evaluation model of water resources development and utilization was established. The results show that the development and utilization of water resources in Xi'an is in the middle stage, and the development and utilization potential index is 0.552, which has a medium level of exploitation potential. Except for the urban area of Xi'an and Lintong District, the water resources development and utilization in other districts are in the initial or development stage. The AHP-entropy weight method-fuzzy comprehensive evaluation method is reliable and practical compared with other evaluation methods. Finally, Arcgis visualization analysis of water resources development and utilization in Xi'an City was carried out, which shows that the water resources development and utilization degree in the eastern part of Xi'an is higher than the western part.
Key words: water resources; development and utilization of water resources; AHP; entropy weight method; fuzzy comprehensive evaluation; Xi'an City

人类生活水平的不断提高和经济发展导致用水规模扩大, 水资源短缺问题日益显现^[1]。目前水资源短缺的主要原因有两个: 一方面是全球人口的膨胀扩大了水资源的需求程度; 另一方面是人类不够重视合理开发利用水资源。一个区域水资源的开发利用程度, 不仅可以反映当地的生活水平以及社会经济的生产规模, 还可以量化区域的水资源可持续开发利用潜力, 因此客观准确地评价区域水资源可持续开发利用水平, 对进一步缓解区域水资源供需矛盾, 合理开发利用水资源, 实现区域水资源的可持续发展具有指导意义。

目前综合评价水资源可持续开发利用程度的方法有很多种: 物元分析法^[2-5]、集对分析法^[6-9]、灰色关联法^[10]、属性识别理论^[11-12]、模糊综合评价法^[13-18]等。区域水资源可持续开发利用涉及资源、

环境、社会经济, 评价区域的可持续发展程度需要建立合适的评价指标体系, 但是仅仅依靠上述方法不能体现出水资源可持续开发利用系统的复杂性、客观性以及全面性。本文在模糊综合评价的基础上, 建立水资源可持续开发利用综合评价指标体系的递阶层次模型, 然后依托建立的递阶层次模型, 将 AHP 法与熵权法^[19]二者结合确定指标的权重, 得到更为准确且适合研究区域的指标权重, 最后基于建立的 AHP-熵权法-模糊综合评价模型对研究区域的水资源开发利用程度及潜力做出评价。

1 研究方法

1.1 确定权重

采用 AHP 与熵权法相结合的方法确定权重, 将各个指标的重要性程度进行量化。AHP 法有由于

人的主观判断对客观现实产生一定误差的缺点^[16]。信息论中的熵反映信息的无序化程度,熵值越大,系统的无序度就越大,对该系统的贡献就越小,计算得到的权重就越小,反之亦然。因此信息熵可以反映评价指标系统中的有序度,减少人为因素主观臆断的干扰,使评价结果趋于合理化。AHP 法反映专家对指标的偏好,人为的主观因素影响较大,但间接体现了研究区域水资源开发利用的特点。如果将两者结合起来,可以弥补彼此的缺点,更加切实地反映研究区域水资源开发利用的特点。

文献[20-22]已给出 AHP 法的计算步骤,文献[23]已给出熵权法的计算步骤,在此不再赘述。

将 AHP 法得到的权重计为 w^* ,熵权法计算得到的熵权计为 w' ,评价指标的个数计为 $i(i=1,2,\cdots,n)$,则 AHP 与熵权法结合的综合权重 w_i 为

$$w_i = \frac{w_i' w_i^*}{\sum_{i=1}^n w_i' w_i^*} \tag{1}$$

1.2 建立 AHP-熵权法-模糊综合评价模型

AHP-熵权法-模糊综合评价模型先采用 AHP-熵权法确定权重,再通过模糊综合评价模型建立隶属函数,确定隶属度,对水资源可持续开发利用程度进行定量评价。

正向指标隶属度计算公式为
$$x_{V_1}(C_i) = \begin{cases} 0.5\left(1 + \frac{C_i - k_1}{C_i - k_2}\right) & C_i > k_1 \\ 0 & C_i \leq k_2 \\ 0.5\left(1 - \frac{k_1 - C_i}{k_1 - k_2}\right) & k_2 < C_i \leq k_1 \end{cases} \tag{2}$$

$$x_{V_2}(C_i) = \begin{cases} 0.5\left(1 - \frac{C_i - k_1}{C_i - k_2}\right) & C_i > k_1 \\ 0.5\left(1 + \frac{k_1 - C_i}{k_1 - k_2}\right) & k_2 < C_i \leq k_1 \\ 0.5\left(1 + \frac{C_i - k_3}{k_2 - k_3}\right) & k_3 < C_i \leq k_2 \\ 0.5\left(1 - \frac{k_3 - C_i}{k_2 - C_i}\right) & C_i \leq k_3 \end{cases} \tag{3}$$

$$x_{V_3}(C_i) = \begin{cases} 0.5\left(1 + \frac{k_3 - C_i}{k_2 - k_3}\right) & C_i \leq k_3 \\ 0 & C_i > k_2 \\ 0.5\left(1 - \frac{C_i - k_3}{k_2 - k_3}\right) & k_3 < C_i \leq k_2 \end{cases} \tag{4}$$

式中: V_1 、 V_2 、 V_3 分别为划分的水资源开发利用的评价等级; k_1 为评价等级 V_1 与 V_2 的临界值; k_3 为评价等

级 V_2 与 V_3 的临界值; k_2 为评价等级 V_2 的中点值, $k_2 = \frac{k_1 + k_3}{2}$ 。

对于逆向指标隶属度计算公式,只需将式(2)(3)(4)右侧的范围进行逆向即可。

模糊综合评价集 $B=(b_1, b_2, \cdots, b_n)$,其中 b_j 表示某一评价对象从整体上看对评价等级的隶属程度。根据最大隶属度原则, b 的最大值 $b_{\max}$ 所对应的评价等级就是模糊综合评价模型的水资源开发利用程度的等级。

为了更加直观地反映水资源开发利用程度以及当地的水资源可持续开发利用潜力,采取将评价等级进行 1 分制数量化的方法,定量反映各评价等级对水资源可持续利用的影响程度。分别将 V_1 、 V_2 、 V_3 3 个评价等级的评分计为 $\alpha_1=0.05$, $\alpha_2=0.5$, $\alpha_3=0.95$ 。计算公式为

$$a = \frac{\sum_{j=1}^3 b_j^k \alpha_j}{\sum_{j=1}^3 b_j^k} \tag{5}$$

式中: a 为水资源开发利用程度的潜力指数。数值越小,表明水资源可持续开发利用程度越高;数值越高,表明水资源可持续开发利用的潜力也就越大^[24-25]。其中,一般选取 $k=1$ 。

2 西安市水资源开发利用程度评价

西安市是“一带一路”的核心区,是一座历史悠久的文化古城,分西安市区、长安、户县、周至、蓝田、临潼、高陵 7 个区。西安市境内的河网较为密集,但是径流时空分布的严重不均衡是西安市水资源短缺的一个重要原因。研究西安市的水资源开发利用状况对该地区的社会经济如何发展、水资源如何管理、水资源供需矛盾如何缓解、水生态文明如何实现具有重大的意义。

2.1 评价指标的选取

考虑到西安市的水资源情势,参照全国水资源供需分析采用的指标体系,共选取 10 个指标来全面反映西安市及各分区的水资源可持续开发利用状况^[26-27]:水资源开发利用率 C_1 、地表水控制率 C_2 、人均供水量 C_3 、水资源重复利用率 C_4 、客水利用率 C_5 、水资源人均占有量 C_6 、可利用水量模数 C_7 、灌溉率 C_8 、渠系水利用系数 C_9 、水利工程投资比例 C_{10} 。西安市及各分区指标值见表 1。数据来源于文献[7]。

表 1 西安市及各分区的评价指标值

地 区	水资源 开发利用 率 $C_1/\%$	地表水 控制率 $C_2/\%$	人均供水 量 C_3/m^3	水资源重 复利用 率 $C_4/\%$	客水 利用率 $C_5/\%$	人均占有 量 C_6/m^3	可利用水 量模数 $C_7/(\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	灌溉率 $C_8/\%$	渠系水 利用系数 C_9	水利工程 投资比例 $C_{10}/\%$
西安市	64.29	7.30	264.42	44.4	2.02	411.29	17.17	23.52	0.54	0.48
西安市区	84.60	11.56	123.38	58.3	1.98	145.84	34.52	44.75	0.60	0.45
长安	47.79	6.42	248.88	48.6	2.05	520.80	13.65	24.07	0.55	1.82
户县	68.33	1.41	412.83	52.7	2.05	640.18	19.21	30.08	0.52	0.17
周至	51.80	1.83	405.85	35.4	2.01	783.43	8.25	13.10	0.54	0.12
高陵	39.16	0	457.98	37.1	2.08	1169.40	35.52	65.14	0.50	0.17
临潼	68.55	52.21	267.34	38.2	2.00	390.00	18.93	43.72	0.54	1.32
蓝田	83.33	5.25	628.00	40.5	0	753.59	19.22	7.89	0.55	0.01

2.2 构建模型

为反映西安市水资源可持续开发利用系统的复杂性以及全面性,根据上述 10 个指标构建水资源可持续开发利用综合评价指标体系的递阶层次模型,见图 1。同时各个评价指标的划定标准^[28]见表 2。 V_1 、 V_2 、 V_3 分别对应水资源可持续开发利用程度的 3 个阶段; V_1 对应水资源开发利用处于饱和阶段,此时可开发利用的水资源已接近上限,进一步可持续开发利用水资源的潜力小; V_2 对应水资源开发利用处于发展阶段,用水类型发生转变,水资源可持续开发利用潜力中等; V_3 对应水资源开发利用处于初始阶段,人均水资源占有量比较高,水资源可持续开发利用潜力巨大。

依据 AHP 和熵权法计算得到的权重结果见表 3。从表 3 可以看出所选取的 10 个指标中,水资源开发利用率 C_1 、水资源人均占有量 C_6 、可利用水量模数 C_7 、水利工程投资比例 C_{10} ,这 4 个指标的重要性较为凸显,表明这 4 个指标与水资源开发利用的相关性程度较其他指标高。

表 3 综合权重计算结果

评价指标	权重		
	AHP 法	熵权法	综合权重
水资源开发利用率 C_1	0.207	0.079	0.197
地表水控制率 C_2	0.023	0.223	0.062
人均供水量 C_3	0.089	0.062	0.067
水资源重复利用率 C_4	0.061	0.117	0.086
客水利用率 C_5	0.030	0.050	0.019
水资源人均占有量 C_6	0.311	0.059	0.224
可利用水量模数 C_7	0.156	0.085	0.160
灌溉率 C_8	0.013	0.094	0.015
渠系水利用系数 C_9	0.038	0.070	0.032
水利工程投资比例 C_{10}	0.071	0.161	0.138

2.3 评价结果与对比分析

为全面反映西安市及各分区的水资源可持续开发利用程度,采用 AHP-熵权法-模糊综合评价模型进行评价,最终结果见表 4。从表 4 可以直观看出西安市各个地区的水资源开发利用程度存在一定的差异,出现了 3 个不同阶段的水资源开发利用程度。其中水资源开发利用水平较高的是西安市区和临潼,处于饱和阶段;除户县的水资源开发利用程度处于发

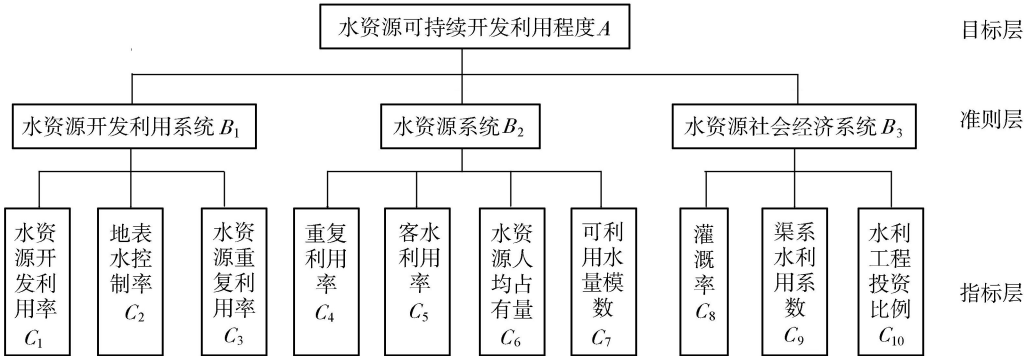


图 1 水资源可持续开发利用综合评价指标体系的递阶层次结构模型

表 2 各评价指标分级标准

评价 等级	水资源 开发利用率 $C_1/\%$	地表水 控制率 $C_2/\%$	人均供水 量 C_3/m^3	水资源重 复利用 率 $C_4/\%$	客水 利用率 $C_5/\%$	水资源 人均占有 量 C_6/m^3	可利用水 量模数 $C_7/(\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	灌溉率 $C_8/\%$	渠系水 利用系数 C_9	水利工程 投资比例 $C_{10}/\%$
V_1	>75	>25	<250	>80	>1	<300	>15	>50	>0.73	>1.5
V_2	[75,50]	[25,5]	[250,345]	[80,50]	[1,0.2]	[300,345]	[15,10]	[50,15]	[0.73,0.55]	[1.5,0.1]
V_3	<50	<5	>345	<50	<0.2	>345	<10	<15	<0.55	<0.1

展阶段,其余分区均处于初始阶段。但综合考虑,西安市的水资源开发利用程度整体处于发展阶段。

表 4 西安市及各分区水资源开发利用程度及潜力指数

区域	隶属度			开发利用程度	水资源开发利用潜力指数
	V_1	V_2	V_3		
西安市	0.212	0.461	0.327	发展阶段	0.552
西安市区	0.550	0.379	0.071	饱和阶段	0.285
长安	0.218	0.375	0.407	初始阶段	0.585
户县	0.192	0.406	0.401	发展阶段	0.594
周至	0.090	0.303	0.608	初始阶段	0.733
高陵	0.179	0.211	0.610	初始阶段	0.694
临潼	0.376	0.372	0.252	饱和阶段	0.444
蓝田	0.269	0.264	0.467	初始阶段	0.589

西安市的水资源可持续开发利用综合潜力指数为 0.552,西安市水资源开发利用程度 3 个级别隶属度的大小排序为 $V_2>V_3>V_1$,说明西安市的水资源开发利用水平处于 V_2 、 V_3 之间,但相对偏向 V_2 ,根据最大隶属度的原则,判断西安市的水资源开发利用水平属于 V_2 级别,即为发展阶段,说明西安市水资源开发利用已经发展到一定规模,但是仍具备一定的发展潜力。在这一阶段,应该加强西安市的水资源综合管理,加大节水力度,实行最严格水资源管理制度,努力实现当地水资源的可持续发展。

根据水资源开发利用潜力指数的含义,可以得到西安市各分区水资源开发利用程度高低排序为:西安市区、临潼、长安、蓝田、户县、高陵、周至。其中西安市区、临潼的开发利用程度较高,高陵和周至的开发利用程度相对较低,开发利用潜力较高。开发利用程度属于 V_1 级别(饱和阶段)的是西安市区和临潼两个分区。处于 V_2 级别(发展阶段)的是户县,表明户县的水资源开发利用已经初具规模,但是尚有一定的开发潜力。处于 V_3 级别(初始阶段)的分区分别是长安、蓝田、高陵和周至,表明这 4 个分区的水资源开发利用水平较低,具有较高的水资源可持续开发利用潜力。以上分析表明西安市几个分区之间的水资源开发利用程度差异较明显,各个地区的水资源开发利用水平参差不齐,但是总体而言,西安市的水资源开发利用程度处于发展阶段,水资源开发利用潜力处于中等水平。

将集对分析法、属性识别法、联系数法的评价结果^[29]与 AHP-熵权法-模糊综合评价法进行对比分析,对比结果见表 5。总体来看,各个方法的评价结果大致相同,没有出现较大的出入,但是评价结果还存在着些微的差异。

集对分析法、属性识别法、模糊综合评价法与 AHP-熵权法-模糊综合评价法均是在两个地区的评价结果相差一级,其余的评价结果完全相同。这主

要是因为各个评价方法的侧重点不同导致部分评价结果存在小的差别,但是总体上评价结果一致。模糊综合评价法权重的确定是采用 AHP 法,具有一定的主观性,而集对分析法存在的一个缺点是如果指标值很大,那么该指标的权重系数就会很大,从而扩大了数值较大的指标对结果判定的影响,缩减了数值小的指标对总体的影响程度;而属性识别法的权重的确定是基于专家打分,具有非常强烈的主观性。总体而言,AHP-熵权法-模糊综合评价法比上述 3 种评价方法较为完善,具有一定的科学性。同时经过对比不同方法的评价结果,证实了 AHP-熵权法-模糊综合评价法对西安市水资源开发利用程度的评价结果的可靠性以及实用性。

表 5 评价结果对比分析

区域	水资源开发利用评价等级			
	集对分析法	模糊综合评价法	属性识别法	AHP-熵权-模糊综合评价法
西安市	V_2	V_2	V_2	V_2
西安市区	V_2 或 V_1	V_1	V_1	V_1
长安	V_2	V_2	V_2	V_3
户县	V_2	V_2	V_3	V_2
周至	V_3	V_3	V_3	V_3
高陵	V_3	V_2	V_3	V_3
临潼	V_2	V_2	V_1	V_1
蓝田	V_3	V_3	V_3	V_3

2.4 ArcGIS 可视化分析

为了直观反映西安市及各分区的水资源开发利用状况及其地理分布规律,将该地区的水资源开发利用潜力指数通过 ArcGIS 进行可视化分析,见图 2。从图 2 可以发现西安市的东部水资源开发利用程度普遍较西部高,开发利用潜力相对来说比较低。同时也可以看出西安市区周围的地区水资源的开发利用状况比较高,远离西安市区的地区开发利用潜力比较高。原因主要是西安市区的开发程度处于饱和阶段,西安市区的经济水平与水资源开发利用模

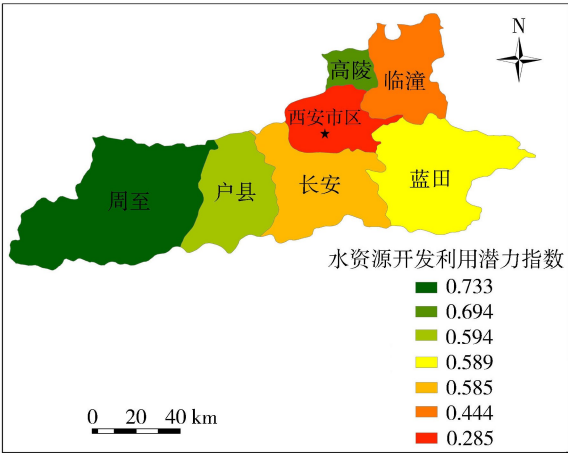


图 2 西安市及各分区水资源开发利用潜力指数

式带动周边地区,这就成了西安市区及周边的水资源开发利用程度相对较高的原因之一,也间接体现了事物相近相似的原理。

3 建 议

a. 对西安市水资源开发利用程度较高的地区,秉承“节水优先,空间均衡,系统治理,两手发力”的十六字方针政策,积极推进节水型城市的建设,普及节水器具,增强居民节水意识,提高城镇生活节水潜力;提高工业用水重复利用率,强化工业节水潜力。根据当地实际情况,考虑工程措施、技术条件、产业结构改革三措并举缓解水资源态势。同时提高水资源的系统管理水平,加强水源地保护,严格控制取用水量,建议开发利用中水、微咸水等非常规水源,淘汰高耗水企业。

b. 对西安市水资源开发利用程度较低的地区,严格控制主要污染物入河湖总量,合理开发利用水资源,积极推行清洁生产,协调好社会经济建设、生态环境建设与水资源管理三者的关系。在城市发展进程中,要加强对生态环境的保护,努力打造人与自然和谐相处的局面。

参考文献:

[1] 左其亭. 水资源承载力研究方法总结与再思考[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37 (3): 1-6. (ZUO Qiting. Review of research methods of water resources carrying capacity [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (3): 1-6. (in Chinese))

[2] 李恩宽,梁川. 物元分析法在西安市水资源开发利用综合评价中的应用[J]. 四川水力发电, 2005, 24 (4): 38-40. (LI Enkuan, LIANG Chuan. Application of matter element analysis in comprehensive assessment on development and utilization of water resources in Xi' an [J]. Sichuan Water Power, 2005, 24 (4): 38-40. (in Chinese))

[3] 黄显峰,钟婧玮,方国华,等. 基于物元分析法的水资源管理现代化评价[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37 (3): 22-28. (HUANG Xianfeng, ZHONG Jingwei, FANG Guohua, et al. Evaluation on water resources management modernization based on matter element analysis [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (3): 22-28. (in Chinese))

[4] 李立铮,董增川. 基于物元可拓模型的水资源开发利用综合评价[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27 (增刊 2): 30-32. (LI Lizheng, DONG Zengchuan. Comprehensive evaluation of water resources development and utilization based on matter-element extension model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27 (Sup2): 30-32. (in Chinese))

[5] 杨阳,方国华,黄显峰,等. 基于改进模糊物元分析法的区域最严格水资源管理评价[J]. 水资源保护, 2014, 30 (6): 19-24. (YANG Yang, FANG Guohua, HUANG Xianfeng, et al. Assessment of strictest regional water resources management system based on improved fuzzy matter-element analysis [J]. Water Resources Protection, 2014, 30 (6): 19-24. (in Chinese))

[6] 邵金花,刘贤赵. 基于集对分析的区域水资源开发利用综合评价[J]. 中国农村水利水电, 2006 (10): 17-19. (SHAO Jinhua, LIU Xianzhao. Comprehensive evaluation of regional water resources development and utilization based on set pair analysis [J]. China Rural Water and Hydropower, 2006 (10): 17-19. (in Chinese))

[7] 储德义,丁爱生,徐得潜,等. 模糊集对分析法在水资源开发利用评价中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30 (增刊 1): 5-6. (CHU Deyi, DING Aisheng, XU Deqian, et al. Application of fuzzy set pair analysis in water resources development and utilization evaluation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30 (Sup1): 5-6. (in Chinese))

[8] 王栋,梁忠民,常文娟,等. 基于模糊集对分析的引江济太调水效益综合评价[J]. 水资源保护, 2017, 33 (1): 35-40. (WANG Dong, LIANG Zhongmin, CHANG Wenjuan, et al. Comprehensive evaluation of benefit of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake based on fuzzy set pair analysis [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (1): 35-40. (in Chinese))

[9] 胡启玲,董增川,杨雁飞,等. 基于联系数的水资源承载力状态评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47 (5): 425-432. (HU Qiling, DONG Zengchuan, YANG Yanfei, et al. State evaluation model of water resources carrying capacity based on connection number [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47 (5): 425-432. (in Chinese))

[10] 谷红梅,郭文献,徐建新,等. 区域水资源开发利用程度的灰色关联分析评价[J]. 人民黄河, 2006, 28 (1): 47-48. (GU Hongmei, GUO Wenxian, XU Jianxin, et al. Grey relational analysis and evaluation of regional water resources development and utilization degree [J]. Yellow River, 2006, 28 (1): 47-48. (in Chinese))

[11] 门宝辉,梁川,刘庆华. 基于属性识别方法的区域水资源开发利用程度综合评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2002, 30 (6): 207-210. (MEN Baohui, LIANG Chuan, LIU Qinghua. Evaluating based on attribute recognition method to on developmental and utilization extensions of region water resources [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2002, 30 (6): 207-210. (in Chinese))

[12] FANG Hongyuan, GAN Shengwei, XUE Chenying. Evaluation of regional water resources carrying capacity based on binary index method and reduction index. method [J]. Water Science and Engineering, 2019, 12 (4): 263-273.

- [13] 陈正虎,唐德善. 新疆水资源可持续利用水平模糊综合分析[J]. 水电能源科学,2005,21(2):18-22. (CHEN Zhenghu,TANG Deshan. Fuzzy comprehensive analysis on sustainable utilization level of water resources in Xinjiang[J]. Water Resources and Power,2005,21(2):18-22. (in Chinese))
- [14] 韩鹏飞,刘超,杨芳,等. 开封市水资源承载能力的模糊综合评价[J]. 人民黄河,2008,30(2):47-48,51. (HAN Pengfei,LIU Chao,YANG Fang,et al. Fuzzy comprehensive evaluation of water resources bearing capacity in Kaifeng City[J]. Yellow River,2008,30(2):47-48,51. (in Chinese))
- [15] 袁艳梅,沙晓军,刘煜晴,等. 改进的模糊综合评价法在水资源承载力评价中的应用[J]. 水资源保护,2017,33(1):52-56. (YUAN Yanmei,SHA Xiaojun,LIU Yuqing,et al. Application of improved fuzzy comprehensive evaluation method to water resources carrying capacity evaluation[J]. Water Resources Protection,2017,33(1):52-56. (in Chinese))
- [16] 崔东文. 基于极限学习机的长江流域水资源开发利用综合评价[J]. 水利水电科技进展,2013,33(2):14-19. (CUI Dongwen. Comprehensive evaluation of water resources development and utilization in Yangtze River Basin based on extreme learning machine[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(2):14-19. (in Chinese))
- [17] 李冰,董增川,杭庆丰,等. 盐城市水资源承载状态量化研究[J]. 水利经济,2019,37(1):65-69 (LI Bing,DONG Zengchuan,HANG Qingfeng,et al. Quantitative study on carrying status of water resources in Yancheng City[J]. Journal of Economics of Water Resources,2019,37(1):65-69. (in Chinese))
- [18] 李如意,束龙仓,鲁程鹏,等. 济宁市水资源承载能力评价方法的应用与对比[J]. 水资源保护,2018,34(6):65-70. (LI Ruyi,SHU Longcang,LU Chengpeng,et al. Application and comparison of water resources carrying capacity evaluation methods in Jining City[J]. Water Resources Protection,2018,34(6):65-70. (in Chinese))
- [19] 王龙宝,李晟,阳晃林,等. 基于历史数据的水利工程建设市场主体信用动态评价与预测模型[J]. 水利经济,2019,37(3):30-36. (WANG Longbao,LI Sheng,YANG Huanglin,et al. Dynamic evaluation and prediction model for credit entities of water conservancy construction market based on history data[J]. Journal of Economics of Water Resources,2019,37(3):30-36. (in Chinese))
- [20] 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. (WANG Xuequan,LU Qi,LI Baoguo. Fuzzy comprehensive assessment for carrying capacity of water resources in Qinghai Province[J]. Journal of Desert Research,2005,25(6):944-949. (in Chinese))
- [21] 杨奇勇,李景保,王克林,等. 湖南省水资源开发利用程度综合评价[J]. 水土保持通报,2007,27(2):150-153. (YANG Qiyong,LI Jingbao,WANG Kelin,et al. Comprehensive evaluation of water resources development on AHP in Hu'nan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2007,27(2):150-153. (in Chinese))
- [22] 潘峰,梁川,王志良,等. 模糊物元模型在区域水资源可持续利用综合评价中的应用[J]. 水科学进展,2003,14(3):271-275. (PAN Feng,LIANG Chuan,WANG Zhiliang,et al. Fuzzy matter-element model for evaluating sustainable utilization of regional water resources[J]. Advances in Water Science,2003,14(3):271-275. (in Chinese))
- [23] 唐新玥,唐德善,常文倩,等. 基于云模型的区域河长制考核评价模型[J]. 水资源保护,2019,35(1):41-46. (TANG Xinyue,TANG Deshan,CHANG Wenqian,et al. Evaluation model of regional river chief system based on cloud model[J]. Water Resources Protection,2019,35(1):41-46. (in Chinese))
- [24] 贾嵘,薛小杰. 区域水资源开发利用程度综合评价[J]. 中国农村水利水电,1999(11):22-24. (JIA Rong,XUE Xiaojie. Comprehensive evaluation of development level of regional water resources[J]. China Rural Water and Hydropower,1999(11):22-24. (in Chinese))
- [25] 徐绪堪,赵毅,成春阳. 西安市水资源可持续利用预警分级[J]. 水资源保护,2017,33(5):25-30. (XU Xukan,ZHAO Yi,CHENG Chunyang. Early-warning grading of sustainable utilization of water resources in Xi'an City[J]. Water Resources Protection,2017,33(5):25-30. (in Chinese))
- [26] 王壬,陈莹,陈兴伟. 区域水资源可持续利用评价指标体系构建[J]. 自然资源学报,2014,29(8):1441-1452. (WANG Ren,CHEN Ying,CHEN Xingwei. Establishment of evaluation index system for sustainable utilization of regional water resources[J]. Journal of Natural Resources,2014,29(8):1441-1452. (in Chinese))
- [27] 来海亮,汪党献,吴涤非. 水资源及其开发利用综合评价指标体系[J]. 水科学进展,2006,17(1):95-101. (LAI Hailiang,WANG Dangxian,WU Difei. Comprehensive assessment indicator system for water resources and its development and use[J]. Advances in Water Science,2006,17(1):95-101. (in Chinese))
- [28] 姚荣. 基于可持续发展的区域水资源合理配置研究[D]. 南京:河海大学,2005.
- [29] 高军省,崔凯. 水资源开发利用程度综合评价的集对分析法[J]. 人民黄河,2010,32(12):94-96. (GAO Junxing,CUI Kai. Set pair analysis method for comprehensive evaluation of water resources development and utilization[J]. Yellow River,2010,32(12):94-96. (in Chinese))

(收稿日期:2019-05-23 编辑:彭桃英)