



引用格式:李 景, 何文社, 台书雅, 等. 基于组合权重-灰色关联逼近理想解排序法的甘肃省水资源承载力评价[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(17): 7327-7333.

Li Jing, He Wenshe, Tai Shuya, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in Gansu Province based on combined weight and grey correlation TOPSIS method[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(17): 7327-7333.

## 水利工程

# 基于组合权重-灰色关联逼近理想解排序法的 甘肃省水资源承载力评价

李 景<sup>1</sup>, 何文社<sup>1\*</sup>, 台书雅<sup>1</sup>, 苗开元<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省景泰川电力提灌管理局, 景泰 730400)

**摘要** 构建了涵盖水资源、经济社会和生态环境3个子系统的评价指标体系,采用层次分析法和熵权法确定评价指标的组合权重,利用灰色关联-逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)对甘肃省2010—2019年水资源承载力进行了综合评价,并利用障碍度模型诊断了影响甘肃省水资源承载力的主要障碍因子。结果表明:2010—2019年甘肃省水资源承载力整体呈逐步上升的趋势,但仍处于超载状态;水资源子系统对甘肃省水资源承载力的制约影响最大,其中人均水资源量和产水模数是最主要的障碍因子。

**关键词** 水资源承载力; 组合权重; 灰色关联TOPSIS法; 障碍因子; 甘肃省

中图法分类号 TV213.4; 文献标志码 A

## Evaluation of Water Resources Carrying Capacity in Gansu Province Based on Combined Weight and Grey Correlation TOPSIS Method

LI Jing<sup>1</sup>, HE Wen-she<sup>1\*</sup>, TAI Shu-ya<sup>1</sup>, MIAO Kai-yuan<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Jingtaichuan Irrigation Management Bureau, Jingtai 730400, China)

**[Abstract]** The evaluation index system covering three subsystems of water resources, economic society and ecological environment was constructed. The combined weight of evaluation indexes was determined by analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight method. The comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Gansu Province from 2010 to 2019 was carried out using grey correlation technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) method, and the obstacle degree model was used for diagnosis the main obstacle factors affecting the water resources carrying capacity in Gansu Province. The results show that the overall water resources carrying capacity of Gansu Province is gradually increasing from 2010 to 2019, but it is still in the state of over-load. The water resources subsystem has the greatest impact on the water resources carrying capacity of Gansu Province, among which the water resources per capita and water production modulus are the main obstacle factors.

**[Keywords]** water resources carrying capacity; combined weight; grey correlation TOPSIS method; obstacle factors; Gansu Province

水资源是人类生存和社会可持续发展不可替代的战略资源。中国是世界上21个贫水和最缺水的国家之一,全国有400多座城市供水不足,110座城市严重缺水。改革开放以来,中国社会经济快速发展,但早期的粗放发展模式使水资源遭受严重污染,加剧了水资源供需矛盾,水资源短缺问题已成为制约社会经济发展的主要阻碍<sup>[1]</sup>。水资源承载力是水资源、社会、经济、生态环境的综合反映,研

究水资源承载力可以优化配置水资源,促进社会经济的可持续发展<sup>[2]</sup>。关于水资源承载力的研究方法主要有背景分析法、常规趋势法、模糊综合评价法、主成分分析法、系统动力学法、多目标决策法等,目前对甘肃省水资源承载力的研究主要是对指标进行综合分析评价得出评价结果,如曹丽娟等<sup>[3]</sup>运用主成分分析法对甘肃省水资源承载力进行评价,得出影响甘肃省水资源承载力的主要因子有经

收稿日期: 2020-11-09; 修订日期: 2021-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(51969011, 51669010)

第一作者: 李 景(1990—), 女, 满族, 黑龙江桦南人, 硕士, 助教。研究方向: 水资源。E-mail: ygmm1212@163.com。

\*通信作者: 何文社(1966—), 男, 汉族, 甘肃宁县人, 博士后, 教授。研究方向: 河流动力学和水资源。E-mail: hws\_@163.com。

济发展、人口、水资源供需平衡和农业生产用水因子;张宁宇等<sup>[4]</sup>运用扩展傅里叶振幅敏感性分析(extended Fourier amplitude sensitivity test, EFAST)法及联系熵模型,构建了“量-质-域-流”的评价指标体系,对黄河流域各地市的水资源承载力进行评价,得出甘肃全省处于超载和严重超载状态。苏贤保等<sup>[5]</sup>结合水资源和水环境阈值,采用相对水资源承载力的方法对甘肃省17个流域的水资源承载力进行评价,得出甘肃省大部分区域的水资源承载力呈超载状态。在众多水资源承载力评价的研究方法<sup>[6-10]</sup>中,灰色关联-逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)法计算简便,能很好地克服传统TOPSIS法评价过程中可能出现的逆序现象导致评价结果失真的局限性<sup>[11]</sup>,客观准确地对水资源承载力进行评价。

因此,在前人研究的基础上,现建立甘肃水资源承载力综合评价指标体系,采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)-熵权法组合赋权,克服传统赋权方法存在的主观局限性及不稳定的问题,利用灰色关联TOPSIS法对各评价对象进行优劣排序,得出甘肃省2010—2019年水资源承载力的等级以及总体变化趋势,并运用障碍度模型对障碍因子进行诊断,得出影响甘肃省水资源承载力的主要因素,以期为甘肃省水资源的合理开发利用提供依据。

## 1 研究区域概况

甘肃省位于黄土高原、青藏高原、内蒙古高原三大高原和西北干旱区、青藏高寒区、东部季风区三大自然区域的交汇处,总土地面积为42.58万km<sup>2</sup>,地形呈狭长状,东西长1655 km,南北宽530 km。地貌复杂多样,山地、高原、平川、河谷、沙漠、戈壁交错分布。大部分地区气候干燥,属大陆性很强的温带季风气候。甘肃跨长江、黄河、内陆河三大流域,涉及12个水系,其中长江流域面积

3.83万km<sup>2</sup>,黄河流域面积14.27万km<sup>2</sup>,内陆河流域面积24.48万km<sup>2</sup>。全省多年平均水资源总量270.9亿m<sup>3</sup>,其中地表水资源量259.4亿m<sup>3</sup>,与地表水不重复的地下水资源量11.5亿m<sup>3</sup>。水资源总量为全国倒数第4,人均水资源量不足全国平均水平的1/2,耕地亩均水资源量不足全国平均水平的1/4,全省10个市人均水资源量位于严重缺水标准以下。全省共划分14个行政分区。2019年末,甘肃省人口达2 647.43万,地区生产总值8 718.3亿元,仅占全国的0.880%,属国内经济落后省份。

## 2 评价指标体系的构建

### 2.1 指标选取

水资源承载力不仅与水资源的自然状况密切相关,还与经济社会的发展状况、生态环境状况紧密相连。因此,参考前人研究<sup>[12-13]</sup>和全国水资源供需分析指标体系,结合甘肃省水资源实际状况,最终选定了以水资源、经济社会、生态环境3个子系统为准则层的10个评价指标,如表1所示。

### 2.2 评价指标等级划分

参考国家规范及前人研究中较为公认的指标分级标准,结合甘肃省水资源实情,本研究将各评价指标分为可承载(I级)、弱可承载(II级)、临界(III级)、超载(IV级)、严重超载(V级)5个级别,具体分级标准如表2所示。

## 3 评价模型的建立

### 3.1 权重确定

评价指标的合理赋权是水资源承载力评价的重要内容。研究采用时佳等<sup>[14]</sup>提出的综合赋权法,该方法综合了层次分析法<sup>[15]</sup>和熵权法<sup>[16]</sup>特点,既能采用经验分配权重,又能大幅降低主观因素的影响,同时避免单纯使用数学赋权得到的权重与实际不符的情况。

表1 甘肃省水资源承载力综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system of water resources carrying capacity in Gansu Province

子系统	标号	指标	类别	计算方法
水资源	X <sub>1</sub>	人均水资源量	+	水资源总量/总人口
	X <sub>2</sub>	产水模数	+	水资源总量/土地总面积
	X <sub>3</sub>	供水模数	+	供水量/土地总面积
	X <sub>4</sub>	年降水量	+	水资源公报
经济社会	X <sub>5</sub>	人均生活用水量	-	水资源公报
	X <sub>6</sub>	万元GDP用水量	-	用水量/GDP
	X <sub>7</sub>	万元工业增加值用水量	-	工业用水量/工业增加值
生态环境	X <sub>8</sub>	万元GDP废水排放量	-	废水排放量/GDP
	X <sub>9</sub>	水功能区达标率	+	水资源公报
	X <sub>10</sub>	生态用水率	+	生态环境用水量/用水总量

注:类别列的+、-分别表示正向和负向指标;GDP为国内生产总值(gross domestic product)。

表 2 评价指标等级划分标准

Table 2 Classification standard of evaluation indexes

等级	$X_1 / (\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1})$	$X_2 / (\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	$X_3 / (\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	$X_4 / \text{mm}$	$X_5 / (\text{L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$
I 级	$\geq 3000$	$\geq 60$	$\geq 20$	$\geq 800$	$< 60$
II 级	[1 700, 3 000)	[35, 60)	[15, 20)	[600, 800)	[60, 80)
III 级	[1 000, 1 700)	[20, 35)	[10, 15)	[400, 600)	[80, 120)
IV 级	[500, 1 000)	[10, 20)	[5, 10)	[200, 400)	[120, 140)
V 级	$< 500$	$< 10$	$< 5$	$< 200$	$\geq 140$
等级	$X_6 / \text{m}^3$	$X_7 / (\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1})$	$X_8 / \text{m}^3$	$X_9 / \%$	$X_{10} / \%$
I 级	$< 24$	$< 10$	$< 5$	$\geq 90$	$\geq 6$
II 级	[24, 60)	[10, 20)	[5, 10)	[80, 90)	[4, 6)
III 级	[60, 140)	[20, 40)	[10, 15)	[70, 80)	[2, 4)
IV 级	[140, 220)	[40, 100)	[15, 20)	[60, 70)	[1, 2)
V 级	$\geq 220$	$\geq 100$	$\geq 20$	$< 60$	$< 1$

$$w_i = \lambda \delta_i + (1 - \lambda) \varepsilon_i \quad (1)$$

式(1)中: $w_i$ 为组合权重; $\delta_i$ 为采用层次分析法所得权重; $\varepsilon_i$ 为采用熵权法所得权重; $\lambda$ 为决策系数,且 $0 \leq \lambda \leq 1$ 。两种赋权方法同等重要,因此决策系数 $\lambda$ 取0.5。

### 3.2 灰色关联 TOPSIS 法

TOPSIS 法是一种逼近理想解的排序法,通过计算各评价对象与正负理想解的距离,从而求出相对接近程度进行排序,评价各项指标的相对优劣程度。灰色关联理论的引入可以克服传统 TOPSIS 法在评价时可能出现区分度不高的问题。灰色关联 TOPSIS 法计算过程如下。

(1) 建立初始评价指标矩阵及无量纲化处理。假设有 $m$ 个评价对象,每个评价对象又有 $n$ 个评价指标,建立初始评价指标矩阵 $\mathbf{X}$ 为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

为消除各指标量纲不同的影响,对初始评价指标矩阵 $\mathbf{R}$ 进行平方和归一化处理,得到归一化矩阵 $\mathbf{S}$ 为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \cdots & s_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$s_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (4)$$

式(4)中: $s_{ij}$ 为初始评价指标数值经过归一化的数值。

(2) 计算加权判断矩阵。将归一化后的矩阵与

求得的各指标组合权重相乘得到加权判断矩阵 $\mathbf{V}$ 为

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} s_{11}w_1 & s_{12}w_2 & \cdots & s_{1n}w_n \\ s_{21}w_1 & s_{22}w_2 & \cdots & s_{2n}w_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{m1}w_1 & s_{m2}w_2 & \cdots & s_{mn}w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \cdots & v_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

(3) 确定正负理想解。对越大越优型指标,正负理想解分别为

$$\begin{cases} v_j^+ = \max(v_{1j}, v_{2j}, \dots, v_{nj}) \\ v_j^- = \min(v_{1j}, v_{2j}, \dots, v_{nj}) \end{cases} \quad (6)$$

对越小越优型指标,正负理想解分别为

$$\begin{cases} v_j^+ = \min(v_{1j}, v_{2j}, \dots, v_{nj}) \\ v_j^- = \max(v_{1j}, v_{2j}, \dots, v_{nj}) \end{cases} \quad (7)$$

(4) 计算距离。

$$\begin{cases} d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_j^+ - v_{ij})^2} \\ d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_j^- - v_{ij})^2} \end{cases} \quad (8)$$

(5) 计算灰色关联系数。

$$\begin{cases} f_{ij}^+ = \frac{\min_{i=1}^m \min_{j=1}^n |v_j^+ - v_{ij}| + \rho \max_{i=1}^m \max_{j=1}^n |v_j^+ - v_{ij}|}{|v_j^+ - v_{ij}| + \rho \max_{i=1}^m \max_{j=1}^n |v_j^+ - v_{ij}|} \\ f_{ij}^- = \frac{\min_{i=1}^m \min_{j=1}^n |v_j^- - v_{ij}| + \rho \max_{i=1}^m \max_{j=1}^n |v_j^- - v_{ij}|}{|v_j^- - v_{ij}| + \rho \max_{i=1}^m \max_{j=1}^n |v_j^- - v_{ij}|} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: $\rho$  为分辨系数,通常取 0.5。

#### (6) 计算灰色关联度。

$$\begin{cases} r_i^+ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n f_{ij}^+ \\ r_i^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n f_{ij}^- \end{cases} \quad (10)$$

#### (7) 公式无量纲化处理。

$$\begin{cases} D_i^+ = \frac{d_i^+}{\max_{i=1}^m d_i^+} \\ D_i^- = \frac{d_i^-}{\max_{i=1}^m d_i^-} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} R_i^+ = \frac{r_i^+}{\max_{i=1}^m r_i^+} \\ R_i^- = \frac{r_i^-}{\max_{i=1}^m r_i^-} \end{cases} \quad (12)$$

#### (8) 计算综合距离。

$$\begin{cases} E_i^+ = \alpha_1 D_i^- + \alpha_2 R_i^+ \\ E_i^- = \alpha_1 D_i^+ + \alpha_2 R_i^- \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中:  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ , 一般取  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ 。

#### (9) 计算相对贴近度。

$$C_i = \frac{E_i^+}{E_i^+ + E_i^-} \quad (14)$$

$C_i$  值越大,则评价对象与理想解越接近,水资源承载力越高。

### 3.3 障碍度模型

运用障碍度模型<sup>[17]</sup>可以诊断影响水资源承载力的主要障碍因子,对于提高区域水资源承载力水平具有积极意义。计算步骤如下。

#### (1) 计算因子贡献度 $F_j$ 。

$$F_j = w_j o_j \quad (15)$$

式(15)中:  $o_j$  为指标  $j$  所属子系统的权重。

#### (2) 计算偏离度 $G_j$ 。

$$G_j = 1 - s_{ij} \quad (16)$$

#### (3) 计算障碍度。

$$H_j = \frac{\sum_{j=1}^n F_j G_j}{\sum_{j=1}^n F_j} \times 100\% \quad (17)$$

## 4 甘肃省水资源承载力评价

### 4.1 评价指标

数据资料来源于 2010—2019 年《甘肃省水资源公报》和 2010—2019 年《甘肃发展年鉴》,并经计算整理获得。初始评价指标数据如表 3 所示。

### 4.2 评价结果

利用式(1)计算得到组合权重,各指标权重计算结果如表 4 所示。运用灰色关联 TOPSIS 法计算甘肃省 2010—2019 年水资源承载力,相对贴近度结果如表 5 所示。其中,相对贴近度在  $(0, 0.2700]$ 、 $(0.2700, 0.3880]$ 、 $(0.3880, 0.5797]$ 、 $(0.5797, 0.6501]$ 、 $(0.6501, 1]$  范围内分别代表 V 级(严重超载)、IV 级(超载)、III 级(临界)、II 级(弱可承载)和 I 级(可承载)。

由表 5 可知,2010—2011 年、2014—2015 年甘肃省水资源承载力为 V 级,即严重超载状态;2012—2013 年、2016—2019 年水资源承载力为 IV 级,即超载状态。2019 年相对贴近度  $C_i$  值最高,2010 年  $C_i$  值最低;2014—2015 年  $C_i$  值出现了小幅下降,但近十年整体呈现逐渐上升的趋势,由 2010 年的 0.2581 上升至 2019 年的 0.3320,表明近些年甘肃省水资源承载力有一定程度的提升。

统计数据显示,甘肃省人均水资源量在 2010 年、2014—2016 年均不足  $1000 \text{ m}^3$ ,其中 2015 年仅有  $764.79 \text{ m}^3$ ,远低于全国平均水平,而 2018 和 2019 年人均水资源量比 2010—2017 年平均水平值分别增长 36% 和 24%,增幅明显;2018 年和 2019 年产水模数较 2010—2017 年平均值分别增长 40% 和 36%;供水模数保持在  $(2.58 \sim 2.89) \text{ 万 m}^3/\text{km}^2$ ,无显著变化;甘肃省水资源短缺,多年平均降水量仅 279 mm,而 2018 年和 2019 年降水量较多年平均降

表 3 初始评价指标数据

Table 3 Initial evaluation index data

年份	$X_1/(\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1})$	$X_2/(\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	$X_3/(\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	$X_4/\text{mm}$	$X_5/(\text{L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	$X_6/\text{m}^3$	$X_7/(\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1})$	$X_8/\text{m}^3$	$X_9/\%$	$X_{10}/\%$
2010	994.74	5.60	2.87	263.90	180	302.65	89.56	21.99	52.70	2.48
2011	1 061.29	5.99	2.89	272.90	174	244.79	78.89	13.72	50.59	2.43
2012	1 166.57	6.62	2.89	287.70	170	217.84	73.73	15.42	64.58	2.43
2013	1 174.20	6.67	2.86	297.00	153	194.62	58.87	11.56	51.43	1.46
2014	890.99	5.08	2.83	266.70	155	176.40	56.40	9.38	70.83	1.49
2015	764.79	4.38	2.80	251.40	150	175.49	65.12	9.82	71.10	2.63
2016	802.91	4.61	2.78	270.40	147	165.48	64.47	9.30	60.76	3.48
2017	1 069.40	6.18	2.73	289.70	150	151.18	58.49	8.12	75.97	4.07
2018	1 345.68	8.33	2.64	347.20	154	136.20	47.46	8.36	72.90	4.16
2019	1 231.00	7.65	2.58	357.90	156	126.00	38.00	8.19	82.60	4.72



人均水资源量、产水模数、供水模数、降水量，均属于水资源子系统，是主要障碍因子，表明水资源要素是影响甘肃省水资源承载力的主要障碍因素，其中人均水资源量和产水模数障碍度分别为 27.02% 和 23.61%，与甘肃省水资源总量全国倒数第 4，人均水资源量不足全国平均水平的 1/2 的水资源现状相呼应。其他指标障碍度相对较小，说明近些年经济社会子系统和生态环境子系统对甘肃省水资源承载力的负面影响较小。综上所述，在今后的发展中，可以通过节水、调水等措施缓解甘肃水资源短缺的现状，以提高甘肃水资源承载力。

## 5 结论

(1) 通过层次分析法和熵权法确定评价指标组合权重，并采用灰色关联 TOPSIS 法对甘肃省 2010—2019 年水资源承载力进行综合评价，结果表明：2010—2019 年甘肃省水资源承载力整体虽呈现逐步增长的趋势，但仍然处于超载状态。

(2) 采用障碍度模型进行障碍因子诊断，结果表明：影响甘肃省水资源承载力的主要障碍因子为水资源子系统中的人均水资源量、产水模数、供水模数和降水量，其中人均水资源量和产水模数对甘肃省水资源承载力的制约影响最大。

(3) 应采取行政与经济措施加强用水管理，大力推行节约用水措施，加强节水宣传，提高全民节水意识，减少人均生活用水量；开发、采用先进技术，提高工农业用水效率，减少水资源的浪费；严格控制废污水排放，保证供水安全；完善水利工程，推进调水工程的建设，建立供水保障体系，为甘肃省经济社会的可持续发展提供支撑。

## 参 考 文 献

- [1] 王熹，王湛，杨文涛，等. 中国水资源现状及其未来发展方向展望[J]. 环境工程，2014, 32(7): 1-5.  
Wang Xi, Wang Zhan, Yang Wentao, et al. Shortage of water resources in China and countermeasures [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(7): 1-5.
- [2] 张琦，李松森，夏慧琳. 基于模糊综合评判模型的东北三省水资源承载力研究[J]. 水土保持通报，2019, 39(5): 179-188, 193.  
Zhang Qi, Li Songsen, Xia Huilin. A study on water resource carrying capacity of three provinces in northeast China based on fuzzy comprehensive evaluation model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 179-188, 193.
- [3] 曹丽娟，张小平. 基于主成分分析的甘肃省水资源承载力评价[J]. 干旱区地理，2017, 40(4): 906-912.  
Cao Lijuan, Zhang Xiaoping. Assessment of water resources carrying capacity in Gansu Province based on principal component analysis [J]. Arid Land Geography, 2017, 40(4): 906-912.
- [4] 张宁宁，栗晓玲，周云哲，等. 黄河流域水资源承载力评价[J]. 自然资源学报，2019, 34(8): 1759-1770.  
Zhang Ningning, Su Xiaoling, Zhou Yunzhe, et al. Water resources carrying capacity evaluation of the Yellow River Basin based on EFAST weight algorithm [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(8): 1759-1770.
- [5] 苏贤保，李勋贵，赵军峰. 水资源-水环境阈值耦合下的水资源系统承载力研究[J]. 资源科学，2018, 40(5): 1016-1025.  
Su Xianbao, Li Xungui, Zhao Junfeng. Carrying capacity of water resources system coupling water resources with water environment thresholds [J]. Resources Science, 2018, 40(5): 1016-1025.
- [6] 柴乃杰，贾鼎元，曾小雪. 水资源承载力的灰色模糊可变决策模型及应用[J]. 水资源与水工程学报，2020, 31(1): 70-76.  
Chai Naijie, Jia Dingyuan, Zeng Xiaoxue. Grey fuzzy variable decision model and its application for water resources carrying capacity [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(1): 70-76.
- [7] 李林汉，田卫民，岳一飞. 基于层次分析法的京津冀地区水资源承载能力评价[J]. 科学技术与工程，2018, 18(24): 139-148.  
Li Linhan, Tian Weimin, Yue Yifei. Evaluation of water resources carrying capacity in Beijing-Tianjin-Hebei region based on analytic hierarchy process [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(24): 139-148.
- [8] 田相俊，李翠平，曹志国，等. 基于 TOPSIS 法的西部矿区水资源承载力综合评价[J]. 矿业研究与开发，2020, 40(9): 170-175.  
Tian Xiangjun, Li Cuiping, Cao Zhiguo, et al. Evaluation on water resources carrying capacity in western mining areas based on TOPSIS method [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(9): 170-175.
- [9] 李治军，董智，陈末，等. 基于模糊分析法的合肥市水资源承载力评价[J]. 水电能源科学，2020, 38(2): 44-46, 43.  
Li Zhijun, Dong Zhi, Chen Mo, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in Hefei City based on fuzzy analysis method [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(2): 44-46, 43.
- [10] 林龙坤，李达，林震. 基于熵权-TOPSIS 模型的库布齐沙漠地区水资源承载力评价[J]. 华中师范大学学报(自然科学版)，2020, 54(4): 640-648.  
Lin Longzhen, Li Da, Lin Zhen. Evaluation of water resources carrying capacity in Kubuqi desert area based on entropy weight and TOPSIS model [J]. Journal of Central China Normal University(Natural Sciences), 2020, 54(4): 640-648.
- [11] 李少朋，赵衡，王富强，等. 基于 AHP-TOPSIS 的江苏省水资源承载力评价[J/OL]. 水资源保护[2020-09-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20200723.1209.004.html>.  
Li Shaopeng, Zhao Heng, Wang Fuqiang, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Jiangsu Province based on AHP-TOPSIS [J/OL]. Water Resources Protection [2020-09-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20200723.1209.004.html>.
- [12] Li B, Wu Q, Zhang W, et al. Water resources security evaluation model based on grey relational analysis and analytic network process: a case study of Guizhou Province [J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 37: 101429.

- [13] Wu C, Zhou L, Jin J, et al. Regional water resource carrying capacity evaluation based on multi-dimensional precondition cloud and risk matrix coupling model[J]. Science of the Total Environment, 2020, 710: 136324.
- [14] 时 佳, 薛联青, 陈新芳, 等. 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[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5): 32-36.  
Shi Jia, Xue Lianqing, Chen Xinfang, et al. Variable fuzzy comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Yarkant River watershed based on comprehensive empowerment [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(5): 32-36.
- [15] 张修宇, 秦 天, 孙菡芳, 等. 基于层次分析法的郑州市水安全综合评价[J]. 人民黄河, 2020, 42(6): 42-45, 52.  
Zhang Xiuyu, Qin Tian, Sun Hanfang, et al. Comprehensive eval-
- uation of water safety in Zhengzhou City based on analytic hierarchy process[J]. Yellow River, 2020, 42(6): 42-45, 52.
- [16] 朱玲燕, 苏维词. 基于熵权法及灰色关联模型的水资源承载力研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(5): 233-236.  
Zhu Lingyan, Su Weici. Research on carrying capacity of water resources based on entropy-weight and grey-correlation model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25 (5): 233-236.
- [17] 左其亭, 张志卓, 吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2020, 36 (2): 1-7.  
Zuo Qiting, Zhang Zhizhuo, Wu Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 1-7.