

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.004

基于 AHP-TOPSIS 模型的江苏省水资源承载力评价

李少朋¹, 赵 衡^{1,2}, 王富强^{1,2}, 杨东明¹

(1. 华北水利水电大学水资源学院, 河南 郑州 450046;
2. 河南省黄河流域水资源节约集约利用重点实验室, 河南 郑州 450046)

摘要:采用江苏省 2008—2017 年统计资料,从经济、生态环境和水资源三方面构建水资源承载力评价指标体系;采用改进的层次分析法确定评价指标权重,利用改进的 TOPSIS 模型综合评价江苏省水资源承载力,并利用障碍度模型系统诊断了影响江苏省水资源承载力的障碍因子。结果表明:2008—2017 年江苏省水资源承载力整体呈逐渐上升趋势,水资源的可持续利用有效支撑了经济社会的高质量发展;供水模数和耗水率是制约水资源承载力水平的两个主要障碍因子。

关键词:水资源承载力;层次分析法;TOPSIS 模型;障碍度模型;江苏省

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)03-0020-06

Evaluation of water resources carrying capacity of Jiangsu Province based on AHP-TOPSIS model//LI Shaopeng¹, ZHAO Heng^{1,2}, WANG Fuqiang^{1,2}, YANG Dongming¹ (1. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Henan Key Laboratory of Water Resources Conservation and Intensive Utilization in the Yellow River Basin, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Using statistical data of Jiangsu Province from 2008 to 2017, a water resources carrying capacity evaluation index system was constructed from three aspects including economy, ecological environment and water resources. The improved analytic hierarchy process was used to determine the weight of the evaluation index. The improved TOPSIS model was used to comprehensively evaluate the water resources carrying capacity of Jiangsu Province, and the obstacle degree model was used to systematically diagnose the obstacle factors affecting the water resources carrying capacity of Jiangsu Province. The results show that the overall water resources carrying capacity of Jiangsu Province has gradually increased from 2008 to 2017. The sustainable utilization of water resources has effectively supported the high-quality development of economic society. The water supply modulus and water consumption rate are two main obstacle factors restricting the level of water resources carrying capacity.

Key words: water resources carrying capacity; analytic hierarchy process; TOPSIS model; obstacle degree model; Jiangsu Province

水资源是人类社会赖以生存和发展的重要资源之一。随着经济的快速发展和人口规模的增大,人类对水资源的需求量逐渐增加^[1],经济发展受水资源的影响日益显著^[2-3],水资源短缺、水环境污染、水生态退化等已经成为经济发展中不可忽视的问题^[4],不少学者开始重视对区域水资源承载力的研究。正确评价水资源承载力对于保障水资源可持续利用和促进经济社会高质量发展具有重要意义^[5-6]。水资源承载力是指在一定经济社会和科学

技术发展水平条件下,以生态、环境健康发展和经济社会可持续发展协调为前提的水资源系统能够支撑经济社会可持续发展的合理规模^[7]。目前对水资源承载力评价采用的方法较多,主要有模糊综合评价法^[8]、系统动力学法^[9-10]、主成分分析法^[11]、对数函数法^[12]和 TOPSIS 模型^[13-14]等。例如,袁艳梅等^[8]运用改进的模糊综合评价法评价了江阴市水资源承载力状况;杨光明等^[9]基于系统动力学理论设计了 4 种方案,通过对比得到重庆市水资源承载

基金项目:国家自然科学基金(51879106);中原科技创新领军人才计划(214200510001);河南省高校科技创新团队支持计划(20IRTSTHN010)

作者简介:李少朋(1995—),男,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail: 2794477308@qq.com

通信作者:王富强(1979—),男,教授,博士,主要从事水循环模拟与调控、生态水文学等研究。E-mail: wangfuqiang@ncwu.edu.cn

力可持续发展的最优方案;高亚等^[10]基于系统动力学法通过4种方案模拟对比得到提高江苏省水资源承载力的最优方案;许朗等^[11]运用主成分分析法得出2000—2009年江苏省水资源承载力总体呈上升趋势的结论;张巧丽^[12]采用对数函数构建模型,模拟结果表明2004—2016年江苏省水资源承载力有逐年改善的趋势;田培等^[13]运用变权TOPSIS模型从时间和空间角度对长江经济带水资源承载力进行了综合评价。不同水资源承载力评价方法各具特点,水资源承载力评价研究发展迅速,是当前水资源科学研究中的重点和热点问题之一^[15]。与其他水资源承载力评价方法相比,TOPSIS模型计算简单,对数据及指标数目等没有严格要求,既能充分利用指标信息,又具有良好的客观性,因而在区域水资源承载力评价研究中使用较多。

对于水资源承载力评价问题,除采用不同评价方法的研究外,有些学者还从相关概念和理论、资源可持续发展、环境要素和承载标准等视角进行了探讨。例如,Yang等^[16]从承载规模的角度对中国西南喀斯特地区的水资源承载力进行了评价;Zhang等^[17]基于自然界的视角分析了湖南湘潭岳塘区的水资源-水环境承载力;Ren等^[18]将生物代谢的相关概念及理论引入甘肃武威市的水资源承载力评价研究中;Milano等^[19]对地中海盆地的水资源利用情况进行了分析,从可持续发展的角度提出了优化水资源利用水平的措施;Wang等^[20]对海河流域进行了可持续发展评估和生态环境承载力评价,并从可持续发展的角度估算了承载规模;金菊良等^[21]构建了不同承载标准下的水资源承载力评价模型,并以陕西省为例进行了分析研究。

本文构建包含人均GDP、万元GDP用水量、生态环境用水率等10个指标的评价指标体系,采用改进的TOPSIS模型综合评价江苏省2008—2017年水资源承载力,并利用障碍度模型诊断了影响江苏省水资源承载力水平的障碍因子,以期为未来江苏省水资源开发利用提供参考。

1 评价指标体系

评价指标的选取直接关系到区域水资源承载力

评价结果的准确性和真实性。本文遵循科学性、整体性、层次性、动态性及可操作性等原则,在综合考虑相关研究中选用频次较高的指标的基础上,参考全国水资源供需分析中的指标体系,并结合江苏省水资源条件和开发利用现状,综合分析影响水资源承载力的因素,构建了由经济、生态环境和水资源3个子系统10个评价指标组成的综合评价指标体系(图1)。10个评价指标中,万元GDP用水量、生态环境用水率和耗水率3个指标为负向指标,其他7个指标为正向指标。综合评价指标体系中,经济子系统重点考虑区域经济及经济发展用水水平,生态环境子系统主要反映区域污水处理水平、环境状况及对水资源的需求情况,水资源子系统主要考虑区域水资源禀赋条件和用水效率水平。



图1 水资源承载力综合评价指标体系

Fig.1 Comprehensive evaluation index system of water resources carrying capacity

依据国家规范及相关标准,参考已有研究中的评价指标分级标准^[22-24]和评判准则,同时考虑经济社会发展及水资源利用等制约因素^[25],结合江苏省水资源特点,将评价指标划分为极高(I级)、较高(II级)、中等(III级)、较差(IV级)、极差(V级)5个等级,分级标准见表1。

2 评价模型

2.1 改进的层次分析法

层次分析法(analytic hierarchy proces, AHP)是一种将定性定量相结合的决策方法。基于指数标度的层次分析法能够较好地解决传统层次分析法存在的一致矩阵构造能力弱、标度值与排序方法不一

表1 评价指标分级标准

Table 1 Index grading standards

等级	x_1 /万元	x_2 /m ³	x_3 /%	x_4 /万t	x_5 /%	x_6 /%	x_7 /(万m ³ ·km ⁻²)	x_8 /(万m ³ ·km ⁻²)	x_9 /%	x_{10} /m ³
I	≥7.74	<40	<1	≥2000	≥90	≥45	≥60	≥20	<10	≥3000
II	[3.40,7.74)	[40,130)	[1,2)	[1600,2000)	[80,90)	[40,45)	[35,60)	[15,20)	[10,25)	[1700,3000)
III	[2.50,3.40)	[130,170)	[2,3)	[1100,1600)	[70,80)	[35,40)	[20,35)	[10,15)	[25,40)	[1000,1700)
IV	[0.66,2.50)	[170,200)	[3,5)	[500,1100)	[60,70)	[30,35)	[10,20)	[5,10)	[40,60)	[500,1000)
V	<0.66	≥200	≥5	<500	<60	<30	<10	<5	≥60	<500

致等问题,构造的判断矩阵一致性好,计算结果准确,具有一定的优越性。本文采用基于指数标度的层次分析法确定指标权重,指数标度法的评分规则和计算步骤详见文献[26]。

2.2 改进的 TOPSIS 模型

逼近理想点的 TOPSIS 模型^[27-28]以评价系统中的正、负理想解为基点,通过计算各评价对象与正、负理想解的距离和贴适度并进行排序,进而得出各评价对象的优劣状况。然而传统 TOPSIS 模型可能存在逆序现象,基于加权距离的 TOPSIS 模型改变了加权的环节,直接将权重用于距离的计算,保持原数据间的关系结构不变化,克服了传统 TOPSIS 模型因权重改变可能产生逆序现象的缺点。此外,传统 TOPSIS 模型在应用过程中,当评价对象到正、负理想解的距离恰好相同时,欧式距离法通常无法准确地评价各评价对象的优劣状况。基于虚拟负理想解的 TOPSIS 模型改进了距离的计算,不再计算评价对象到正、负理想解的距离,而是计算评价对象到正理想解和虚拟负理想解的距离^[29],可有效解决传统 TOPSIS 模型评价结果可能区分度不高的问题。因此,本文采用加权距离和虚拟负理想解相结合的方式对 TOPSIS 模型进行改进,改进后的 TOPSIS 模型可有效克服传统 TOPSIS 模型存在的逆序和评价结果区分度不高的缺点,计算步骤为:

a. 对于正向和负向指标数据 x_{ij} 按极差法分别进行处理,再加 1 后得到标准化矩阵 $Y = (y_{ij})_{m \times n}$, 其中 i 为年份,取值为 $1, 2, \dots, m$; j 为指标,取值为 $1, 2, \dots, n$ 。

b. 标准化矩阵数据归一化后得到归一化矩阵 $Z = (z_{ij})_{m \times n}$ 。

c. 由归一化后的矩阵 Z 与各指标的权重 w_j 相乘得到加权决策矩阵 $V = (v_{ij})_{m \times n}$ 。

d. 确定正理想解 (Z_j^+, V_j^+) 和负理想解 (Z_j^-, V_j^-) :

$$\begin{cases} Z_j^+ = \max\{z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{mj}\} \\ Z_j^- = \min\{z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{mj}\} \end{cases} \quad (1)$$

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

e. 正负加权距离 C_i^+, C_i^- 为

$$\begin{cases} C_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j (z_{ij} - Z_j^+)^2} \\ C_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j (z_{ij} - Z_j^-)^2} \end{cases} \quad (3)$$

f. 虚拟负理想解 V_j^* 和正、负传统距离 D_i^+, D_i^- 分别为

$$V_j^* = 2V_j^- - V_j^+ \quad (4)$$

$$\begin{cases} D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - V_j^+)^2} \\ D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - V_j^*)^2} \end{cases} \quad (5)$$

g. 正负合成距离 L_i^+, L_i^- 为

$$\begin{cases} L_i^+ = \alpha C_i^+ + \beta D_i^+ \\ L_i^- = \alpha C_i^- + \beta D_i^- \end{cases} \quad (6)$$

式中 α, β 为系数,且 $\alpha + \beta = 1$, 这里取 $\alpha = \beta = 0.5$ 。

h. 贴适度 T_i 是 L_i^- 与 L_i ($L_i = L_i^- + L_i^+$) 的比值,取值在 $0 \sim 1$ 之间,越接近 1,表明水平越优,反之亦然。

基于表 1 和改进的 TOPSIS 模型,得到江苏省水资源承载力等级为 V 级、IV 级、III 级、II 级时贴适度临界值分别为 0.262、0.439、0.610 和 0.800,也即当 $0 < T_i \leq 0.262$ 、 $0.262 < T_i \leq 0.439$ 、 $0.439 < T_i \leq 0.610$ 、 $0.610 < T_i \leq 0.800$ 、 $0.800 < T_i < 1$ 时分别表示水资源承载力等级为 V 级(极差)、IV 级(较差)、III 级(中等)、II 级(较高)和 I 级(极高)。

2.3 障碍度模型

障碍度测度是对水资源承载力评价后的进一步分析,利用障碍度模型可以诊断和测算影响水资源承载力的障碍因子及障碍度^[30],有助于提高区域水资源承载力水平。某项指标的障碍度越小,说明区域水资源承载力受该项指标的阻碍作用越弱,反之亦然。障碍度计算公式为

$$U_{ij} = \frac{F_j P_{ij}}{\sum_{j=1}^n F_j P_{ij}} \times 100\% \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

其中 $F_j = w_j W_j$ $P_{ij} = 1 - z_{ij}$

式中: U_{ij} 为障碍度; F_j 为因子贡献度; P_{ij} 为指标偏离度; w_j 为指标 j 的权重; W_j 为指标 j 所属子系统的权重; z_{ij} 为归一化后的指标数值。

3 江苏省水资源承载力评价

3.1 评价结果

研究数据来源于 2009—2018 年的《江苏省统计年鉴》《中国统计年鉴》和 2008—2017 年的《江苏省水资源公报》。运用改进的层次分析法计算得到 $x_1 \sim x_{10}$ 10 个评价指标的权重分别为 0.086、0.113、0.132、0.082、0.076、0.055、0.085、0.153、0.134 和 0.084。运用改进的 TOPSIS 模型对江苏省 2008—2017 年的水资源承载力进行评价,结果见表 2。由表 2 可知,2008—2014 年江苏省水资源承载力等级为 III 级,即中等水平,2015—2017 年上升为 II 级,即较高水平。2008—2017 年江苏省水资源承载力贴

表2 江苏省水资源承载力评价结果

Table 2 Evaluation results of water resources carrying capacity of Jiangsu Province

年份	L_i^-	L_i^+	T_i
2008 年	0.024	0.022	0.522
2009 年	0.025	0.021	0.543
2010 年	0.026	0.020	0.565
2011 年	0.027	0.018	0.600
2012 年	0.027	0.018	0.600
2013 年	0.026	0.020	0.565
2014 年	0.027	0.019	0.587
2015 年	0.028	0.017	0.622
2016 年	0.030	0.016	0.652
2017 年	0.029	0.018	0.618

近年度值有所波动,2008 年最低,2016 年最高,2013 年和 2017 年出现下降,但整体上呈逐渐上升的趋势,由 2008 年的 0.522 上升到 2017 年的 0.618,表明江苏省水资源仍有一定的开发利用空间。

从统计资料来看,2013 年生态环境用水率为 0.65%,比 2012 年的 0.60% 上升了 8.33%,生态环境改善需要的水量增加,表明生态环境治理对水资源承载力的影响具有一定迟缓性;产水模数由 2012 年的 36.60 万 m^3/km^2 减少到 27.80 万 m^3/km^2 ,人均水资源量由 2012 年的 471.38 m^3 减少到 357.11 m^3 ,降幅均超过 20%;而人均 GDP 为 76563 元,比 2012 年的 69397 元增加了 10.33%,耗水率为 55.52%,比 2012 年的 50.14% 增加了 10.73%,在水资源量减少的情况下,经济社会高速发展,相应的水资源管理措施滞后,易造成水资源承载力下降。2017 年产水模数为 38.50 万 m^3/km^2 ,是 2016 年产水模数 72.80 万 m^3/km^2 的 52.88%;人均水资源量为 489.66 m^3 ,是 2016 年人均水资源量 927.41 m^3 的 52.80%;人均 GDP 为 107189 元,比 2016 年的 96887 元增加 10.63%,在水资源量减少明显的情况下,虽然经济社会发展规模仍处于水资源可承载的范围内,但水资源承载力系统内部的矛盾缓解力度不足仍会使水资源承载力下降。

3.2 障碍因子诊断

为甄别对水资源承载力产生负面影响的障碍因子,采用障碍度模型对江苏省水资源承载力障碍因子进行测度,结果见图 2。从图 2 可知,障碍因子障碍度排序前 5 位的是供水模数、耗水率、生态环境用水率、产水模数和人均水资源量,全部集中在水资源和生态环境 2 个子系统,是主要的障碍因子。各年份中,供水模数和耗水率 2 个指标始终保持在第 1 位和第 2 位,这 2 个指标对江苏省水资源承载力的影响较大,生态环境用水率指标一直居于第 3 位,产水模数和人均水资源量交替出现在第 4 位或第 5

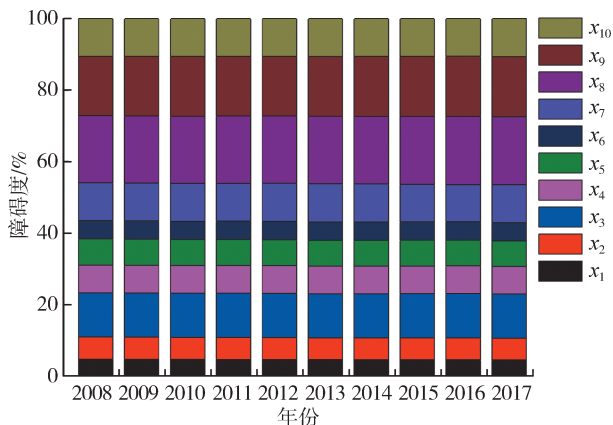


图2 江苏省水资源承载力障碍因子障碍度

Fig.2 Obstacle degree of obstacle factors of water resources carrying capacity of Jiangsu Province

位,从出现的频次来看,产水模数对水资源承载力的影响更大。水资源子系统的 4 个指标全部排在前 5 位,也说明目前水资源要素是制约水资源承载力提升的主要障碍因子之一。进一步分析发现,水资源子系统障碍度较大,需要采取以下措施:①严格控制用水总量,强化用水监管;②优化产业布局,提升用水水平;③掌握水资源动态变化,合理用水;④大力推进节水工作,提高用水效率。此外,还应重视生态环境保护,保障生态环境用水,严格控制污水排放量,逐步改善水环境。2008—2017 年生态环境子系统除生态环境用水率指标外,其余 3 个指标障碍度相对较小,表明生态环境子系统对水资源承载力起到一定的积极作用,但仍不可忽视对生态环境的关注和保护。经济子系统 2 个指标的障碍度排在最后两位,数值小,对江苏省水资源承载力的贡献度较大,表明经济子系统的指标不是影响江苏省水资源承载力的主要障碍因子。

综上所述,江苏省水资源承载力近年来整体表现为逐渐上升的趋势,但耗水率、供水模数等障碍因子对水资源承载力的负面影响仍然存在,政府和社会各界必须综合考虑上述因素,并为进一步提高水资源承载力积极努力。

4 结 论

a. 采用改进的 TOPSIS 模型构建江苏省水资源承载力评价模型,结合改进的层次分析法确定指标权重,对江苏省水资源承载力进行了综合评价。评价结果表明,2008—2017 年江苏省水资源承载力呈现逐步上升的趋势,仍有一定的开发利用潜力。

b. 供水模数、耗水率、生态环境用水率、产水模数和人均水资源量这 5 个指标为江苏省水资源承载力的主要障碍因子,其中耗水率和供水模数影响

最大。

c. 应加强水资源管理,严格落实最严格水资源管理制度,加强用水过程监管;增强全社会节水意识,大力推进全社会节水工作,精准施策,切实提高水资源利用效率;强化生态环境保护与修复,逐步消除环境风险隐患,提升水环境质量。

参考文献:

- [1] 左其享,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. (ZUO Qiting, ZHANG Xiuyu. Dynamic carrying capacity of water resources under climate change[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2015,46(4):387-395. (in Chinese))
- [2] YANG J, LEI K, KHU S, et al. Assessment of water resources carrying capacity for sustainable development based on system dynamics model: a case study of Tieling City, China[J]. Water Resources Management, 2015, 29(3):885-899.
- [3] SONG X, KONG F, ZHANG C. Assessment of water resources carrying capacity in Tianjin City of China[J]. Water Resources Management,2011,25(3):857-873.
- [4] 唱彤,酆建强,金菊良,等. 面向水流系统功能的多维度水资源承载力评价指标体系[J]. 水资源保护,2020,36(1):44-51. (CHANG Tong, LI Jianqiang, JIN Juliang, et al. Multi-dimensional water resources carrying capacity evaluation index system for water flow system function[J]. Water Resources Protection,2020,36(1):44-51. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] 彭岳津,卞荣伟,邢玉玲,等. 我国用水总量确定的方法与结果[J]. 水利经济,2018,36(2):36-43. (PENG Yuejin, BIAN Rongwei, XING Yuling, et al. Method for determining total water consumption in China and discussion about its results[J]. Journal of Economics of Water Resources,2018,36(2):36-43. (in Chinese))
- [7] 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. (DUAN Chunqing, LIU Changming, CHEN Xiaonan, et al. Preliminary research on regional water resources carrying capacity conception and method[J]. Acta Geographica Sinica,2010,65(1):82-90. (in Chinese))
- [8] 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))

- [9] 杨光明,时岩钧,杨航,等. 基于系统动力学的水资源承载力可持续发展评估:以重庆市为例[J]. 人民长江,2019,50(8):6-13. (YANG Guangming, SHI Yanjun, YANG Hang, et al. Assessment of sustainable development of water resources carrying capacity based on system dynamics model: case of Chongqing City[J]. Yangtze River,2019,50(8):6-13. (in Chinese))
- [10] 高亚,章恒全. 基于系统动力学的江苏省水资源承载力的仿真与控制[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(4):103-109. (GAO Ya, ZHANG Hengquan. Simulation and control of water resource carrying capacity in Jiangsu Province based on system dynamics[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2016,27(4):103-109. (in Chinese))
- [11] 许朗,黄莺,刘爱军. 基于主成分分析的江苏省水资源承载力研究[J]. 长江流域资源与环境,2011,20(12):1468-1474. (XU Lang, HUANG Ying, LIU Aijun. Study on the carrying capacity of water resources in Jiangsu Province based on the principal component analysis[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2011,20(12):1468-1474. (in Chinese))
- [12] 张巧丽. 江苏省水资源承载力计算分析与评价研究[J]. 人民珠江,2019,40(3):71-76. (ZHANG Qiaoli. Calculation analysis and evaluation research of water resources carrying capacity in Jiangsu Province[J]. Pearl River,2019,40(3):71-76. (in Chinese))
- [13] 田培,张志好,许新宜,等. 基于变权 TOPSIS 模型的长江经济带水资源承载力综合评价[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2019,53(5):755-764. (TIAN Pei, ZHANG Zhihao, XU Xinyi, et al. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt based on variable weight TOPSIS model[J]. Journal of Central China Normal University(Natural Sciences),2019,53(5):755-764. (in Chinese))
- [14] 屈吉鸿,陈南祥,黄强,等. 改进的逼近理想解在地下水资源承载力评价中的应用[J]. 水利学报,2008,39(12):1309-1315. (QU Jihong, CHEN Nanxiang, HUANG Qiang, et al. Improved TOPSIS method for evaluating groundwater carrying capacity[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,39(12):1309-1315. (in Chinese))
- [15] 金菊良,陈鹏飞,陈梦璐,等. 基于知识图谱的水资源承载力研究的文献计量分析[J]. 水资源保护,2019,35(6):14-24. (JIN Juliang, CHEN Pengfei, CHEN Menglu, et al. Bibliometric analysis of research progress on water

- resources carrying capacity based on knowledge map[J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (6): 14-24. (in Chinese))
- [16] YANG Q,ZHANG F,JIANG Z,et al. Assessment of water resource carrying capacity in karst area of Southwest China [J]. Environmental Earth Sciences,2016 75(1):1-8.
- [17] ZHANG J, ZHANG C, SHI W, et al. Quantitative evaluation and optimized utilization of water resources-water environment carrying capacity based on nature-based solutions[J]. Journal of Hydrology,2019,568:96-107.
- [18] REN C, GUO P, LI M, et al. An innovative method for water resources carrying capacity research-metabolic theory of regional water resources [J]. Journal of Environmental Management,2016,167:139-146.
- [19] MILANO M, RUELLAND D, FERNANDEZ S, et al. Current state of Mediterranean water resources and future trends under climatic and anthropogenic changes [J]. Hydrological Sciences Journal,2013,58(3):498-518.
- [20] WANG Z G, LUO Y Z, ZHANG M H, et al. Quantitative evaluation of sustainable development and eco-environmental carrying capacity in water-deficient regions: a case study in the Haihe River Basin, China[J]. Journal of Integrative Agriculture,2014,13(1):195-206.
- [21] 金菊良,董涛,郦建强,等. 不同承载标准下水资源承载力评价[J]. 水科学进展,2018,29(1):31-39. (JIN Juliang,DONG Tao,LI Jianqiang,et al. Water resources carrying capacity evaluation method under different carrying standards[J]. Advances in Water Science,2018,29(1):31-39. (in Chinese))
- [22] 安强,魏传江,贺华翔,等. 基于模糊综合评价法的河南省中原城市群水资源承载力评价研究[J]. 节水灌溉,2019(12):65-71. (AN Qiang, WEI Chuanjiang, HE Huaxiang, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of central plains urban agglomeration in Henan Province based on fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Water Saving Irrigation, 2019 (12): 65-71. (in Chinese))
- [23] 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))
- [24] 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. (in Chinese))
- [25] 王建华,翟正丽,桑学锋,等. 水资源承载力指标体系及评判准则研究[J]. 水利学报,2017,48(9):1023-1029. (WANG Jianhua, ZHAI Zhengli, SANG Xuefeng, et al. Study on index system and judgment criterion of water resources carrying capacity [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2017,48(9):1023-1029. (in Chinese))
- [26] 孙东生,朱懿,周水兴. 基于指数标度的层次分析法在桥梁评定中的应用[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2010,29(6):867-870. (SUN Dongsheng, ZHU Yi, ZHOU Shuixing. Application of exponential scale of AHP in bridge evaluation [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2010 29 (6): 867-870. (in Chinese))
- [27] LI P, QIAN H, WU J, et al. Sensitivity analysis of TOPSIS method in water quality assessment: I. sensitivity to the parameter weights [J]. Environmental Monitoring and Assessment,2013,185(3):2453-2461.
- [28] LI Z, YANG T, HUANG C S, et al. An improved approach for water quality evaluation: TOPSIS-based informative weighting and ranking(TIWR) approach[J]. Ecological Indicators,2018,89:356-364.
- [29] 杨文海,张宏洋,黄腾. 基于改进 TOPSIS 模型的河道整治优选方案评价[J]. 水电能源科学,2013,31(6):153-155. (YANG Wenhai, ZHANG Hongyang, HUANG Teng. Scheme optimization evaluation of river regulation based on improved TOPSIS model [J]. Water Resources and Power,2013,31(6):153-155. (in Chinese))
- [30] 李文正,刘宇峰,张晓露,等. 陕西省城市绿色发展水平时空演变及障碍因子分析[J]. 水土保持研究,2019,26(6):280-289. (LI Wenzheng, LIU Yufeng, ZHANG Xiaolu, et al. Spatial-temporal evolution of urban green development level and its obstacle factors in Shanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(6):280-289. (in Chinese))

(收稿日期:2020-02-18 编辑:熊水斌)

