

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.05.005

基于协调性的区域水资源承载力评估模型

郑江丽^{1,2}, 李兴拼^{1,2}

(1. 水利部珠江河口治理与保护重点实验室, 广东 广州 510611;

2. 珠江水利科学研究院水资源研究所, 广东 广州 510611)

摘要:基于水资源、社会、经济和生态环境 4 个系统提出了水资源承载力评价指标体系,以系统宏观行为为研究对象,通过引入影响系统演变过程的序参量,构建了基于系统协调性的水资源承载力评估模型,并以 2019 年广州市水资源承载力评估为例对模型进行了验证。结果表明,从化区、中心区以及番禺区区域处于水资源超载水平,黄埔区和南沙区具有较好的水资源承载力,花都区、增城区在不同程度上面临着水资源紧张的问题,存在超载的风险,该评价结果符合广州市实际,验证了模型的有效性和适用性,可为区域水资源规划与管理提供参考。

关键词:水资源承载力;协调指数;压力指数;序参量;评估模型;广州市

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)05-0030-06

Evaluation model of regional water resources carrying capacity based on coordination // ZHENG Jiangli^{1,2}, LI Xingpin^{1,2} (1. Key Laboratory of the Pearl River Estuary Regulation and Protection of Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China; 2. Water Resources Institute, Pearl River Water Resources Research Institute, Guangzhou 510611, China)

Abstract: The evaluation index system of water resources carrying capacity was proposed based on four systems including water resources system, social system, economic system and ecological environment system. Taking the macro behavior of the system as the research object, the evaluation model of water resources carrying capacity based on system coordination was constructed by introducing the order parameters that affected the evolution process of the system. The model was validated by taking the assessment of water resources carrying capacity of Guangzhou in 2019 as an example. The results show that Conghua District, Central District and Panyu District are in the level of water resources overload. Huangpu District and Nansha District have better water resources carrying capacity. Huadu District and Zengcheng District are facing the problem of water resources shortage in varying degrees, and there is the risk of water resources overload. The evaluation results are in line with the actual situation of Guangzhou City, and verify the effectiveness and applicability of the model, which can provide reference for regional water resources planning and management.

Key words: water resources carrying capacity; coordination index; pressure index; order parameter; evaluation model; Guangzhou City

水资源是我国区域经济社会持续健康发展的重要制约因素,在开展区域水资源规划与管理的相关工作,尤其是处理水资源供需问题时,应充分考虑区域水资源承载力,以保证区域水资源的可持续发展。因此,建立适宜的区域水资源承载力评价模型,对区域经济发展、生态环境保护、水资源状况改善,以及水资源可持续利用都具有重要的理论和实践意义。目前,关于区域水资源承载力量化的研究已取得了

一定的成果,如:王顺久等^[1]以人均占有水资源量、单位 GDP 占有水资源量、单位耕地占有水资源量等指标为输入数据,利用投影寻踪方法评价了全国 30 个省(区、市)和淮河流域水资源承载力;夏军等^[2]通过探讨城市化地区水资源承载力的内涵和特性,采用目标综合分析多级灰关联评价相结合的方法,建立了城市化地区水资源承载力模型。不少学者通过建立反映水资源承载力的指标评价体

基金项目:广西重点研发计划(902229136010)

作者简介:郑江丽(1985—),女,高级工程师,硕士,主要从事水资源规划与农业灌溉研究。E-mail: 1307xiaoli@163.com

系识别和诊断水资源承载力状况,其中评价指标体系以基于压力-状态-响应模型(PSR)的水资源承载力评价指标体系研究较多^[3]。可见,水资源承载力的评价是在构建相应的水资源承载力评价指标体系基础上,通过评估模型阐明水资源承载力的量化表达形式,从而使水资源承载力具有可衡量性与可操作性。

目前关于水资源承载力的评估模型和方法较多,主要有线性模型、目标规划模型、模糊评价模型、主成分分析模型、系统动力学模型、投影寻踪评价模型和综合评价法等^[4]。由于区域水资源承载力涉及水资源系统、社会系统、经济系统和生态环境系统,通过压力指数和协调指数,结合综合评价模型,能较为全面地评价某一区域水资源的承载能力。协调指数与水资源状况、社会经济水平、生态环境优劣状况相关,不少学者从系统角度考察各要素的协调性,并计算协调指数,以实现量化区域水资源承载力的目的。王友贞等^[5]采用协调指数评价水资源社会经济系统的协调状况,通过计算协调指数来分析区域水资源承载力;刘佳骏等^[6]认为水资源系统、社会系统、经济系统和生态环境系统的有序度反映了复合系统协调发展程度,有序度越高协调发展程度越高;王照亮^[7]以郑州市为研究对象,采用变异系数对社会、经济、水资源和生态的协调程度进行了计算,解析了郑州市水资源综合承载力变化情况;叶海焯等^[8]为了更好地研究南京市水资源承载状态及其变化趋势,引入离差系数反映水资源承载力各系统间的协调发展度,评价了南京市2015年、2020年和2030年的水资源承载状态;鲍庆煜等^[9]利用离差系数反映系统间组合协调的程度,以及系统间运动轨迹的相似程度和接近程度,通过计算离差系数来划分区域水资源承载状态等级。

对水资源承载力研究的目的主要是解决区域经济、社会、生态与水资源系统协调发展的问題,这4个系统共同构成一个复合整体系统,构成的过程体现了协同性,从各系统演化的协同性角度分析水资源承载力,可以更准确地调控复合系统的演化过程,使复合系统更加趋于合理。本文利用协同学原理构建综合评价模型评估区域经济、社会、环境与水资源系统的协调程度,以期为区域水资源的合理利用及经济社会与生态环境可持续协调发展政策的制定提供参考。

1 水资源承载力评价指标筛选

根据影响水资源承载力的主要因素^[10-15],结合水资源、社会、经济及生态环境系统特征,通过综合

比较,筛选了各系统反映区域水资源承载力的评价指标如图1所示。

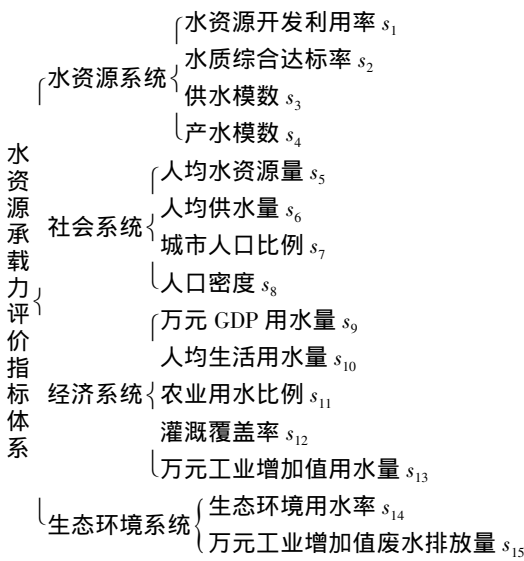


图1 水资源承载力评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system of water resources carrying capacity

2 模型构建

一般地,区域水资源承载力 M 为压力指数 Y 和协调指数 X 的函数:

$$M = f(Y, X) \quad (1)$$

压力指数包括社会系统压力指数 Y_1 、经济系统压力指数 Y_2 、区域水资源复合系统承载压力指数 Y_3 ;协调指数由水资源系统、社会系统、经济系统和生态环境系统的协同程度决定。

2.1 压力指数

系统的压力指数反映了评价期内该系统承受的压力大小。压力指数越大区域水资源对应承载的压力越大。

a. 社会系统压力指数。社会系统压力指数反映了评价期内社会系统承受的压力大小,计算公式为

$$Y_1 = P/P_{\max} \quad (2)$$

其中

$$P_{\max} = G/\bar{G}_{\min}$$

式中: P 为评价期人口规模; $P_{\max}$ 为区域在某一社会发展水平下,可利用水资源量转化成全部产品所能供养的人口规模,即区域内水资源所能承载的最大人口规模; G 为评价期区域的经济生产总值; $\bar{G}_{\min}$ 为该区域在评价期社会发展水平时人均国内生产总值的下限值。

b. 经济系统压力指数。经济系统压力指数反映了评价期内经济系统承受的压力大小,计算公式为

$$Y_2 = G/G_{\max} \quad (3)$$

其中

$$G_{\max} = G_w W_{\max}/W_{\min}$$

式中: $G_{\max}$ 为区域内水资源可承载的最大经济规模; G_w 为对应于 $W_{\min}$ 时的国内生产总值; $W_{\min}$ 为区域内社会系统和经济系统的最低用水总量; $W_{\max}$ 为区域水资源最大可利用总量。可以看出, 为实现区域经济社会的可持续发展, Y_1 与 Y_2 均应小于 1。

c. 区域水资源复合系统承载压力指数。区域水资源复合系统承载压力指数反映了区域经济、社会及生态环境系统给水资源系统的综合压力大小, 计算公式为

$$Y_3 = Y_{CP}/Y_{CR} \quad (4)$$

式中: Y_{CP} 为区域水资源面临的综合压力指数; Y_{CR} 为水资源系统的综合承压指数。 Y_{CP} 和 Y_{CR} 可利用加权平均方式得到^[16]:

$$\begin{cases} Y_{CR} = \sum_{j=1}^J w_j s_j \\ Y_{CP} = \sum_{k=1}^K w_k z_k \end{cases} \quad (5)$$

式中: s_j 为反映水资源系统压力的指标; w_j 为因素 j 的权重; J 为反映水资源系统压力的指标总数; z_k 为反映水资源承受的社会系统、经济系统和生态环境系统压力的指标; w_k 因素 k 的权重; K 为反映水资源承受的社会系统、经济系统和生态环境系统压力的指标总数。本文采用熵权法计算 w_j 和 w_k 。

2.2 协调指数

系统的协调指数反映了区域内水资源系统、社会系统、经济系统和生态环境系统之间协调发展的程度。一般地, 系统的协调指数越大, 表明该区域的水资源复合系统协调发展程度越高, 即水资源的利用水平越高。

区域水资源承载力与水资源系统、社会系统、经济系统和生态环境系统的协调程度息息相关。各系统之间良好的动态平衡, 是实现水资源系统良性循环和演化的基础^[17-18]。本文基于协同学的序参量原理, 假定水资源承载力为水资源系统、社会系统、经济系统和生态环境系统 4 个系统协同作用形成, 则各系统的序参量变量组成为

$$A_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{iL}\} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (6)$$

式中: A_i 为系统 i 的序参量集合, 这些序参量蕴含在水资源系统、社会系统、经济系统和生态环境系统中; a_{il} 为系统 i 第 l 个序参量, $l = 1, 2, \dots, L$; L 为序参量总数, $L \geq 2$ 。

若 α_{imax} 和 α_{imin} 为系统 i 达到稳定临界点的上限和下限, 即 $\alpha_{imin} \leq \alpha_{il} \leq \alpha_{imax}$, 该上下限由所有序参量共同决定; 假定围绕某一稳定值上下波动, 当序参量

小于该值时, 取值越大, 即越靠近稳定值, 该系统的有序程度越高; 当序参量大于该值时, 取值越大, 即越远离该稳定值, 该系统的有序程度越低。由于各系统的序参量对该系统有序度的“贡献”不应为 0, 因此为了处理 0 结果的出现, 本文采用下式计算有序度^[19]:

$$\zeta_{il} = \begin{cases} \frac{a_{il} - a_{imin}}{a_{imax} - a_{imin}} \times 0.99 + 0.01 & a_{il} \leq \bar{a}_{il} \\ \frac{a_{imax} - a_{il}}{a_{imax} - a_{imin}} \times 0.99 + 0.01 & a_{il} > \bar{a}_{il} \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\bar{a}_{il} = \frac{\sum_{l=1}^L a_{il}}{L}$$

式中 ζ_{il} 为系统 i 第 l 个序参量的有序度, ζ_{il} 越大, 系统 i 第 l 个序参量对该系统有序度的“贡献”越大。

利用贡献率计算模型^[20], 以各系统中各评价指标贡献率占总贡献率大小的比值为权重, 建立相应的评价公式(式(8))计算系统有序度 B_i 。 B_i 反映序参量对各系统的总有序度, B_i 越大, 系统有序度越高。

$$B_i = \sum_{l=1}^L w_l \zeta_{il} \quad (8)$$

式中 w_l 为系统 i 第 l 个序参量的权重, 采用熵权法计算。

区域水资源承载力与水资源系统、社会系统、经济系统和生态环境系统相关, 各系统的协同程度共同决定区域水资源承载力大小。

一般地, 各系统在发展过程中相互促进、共同发展, 然而各系统均有自身的动态性和不平衡性, 可通过计算各系统间的协调指数来衡量区域水资源承载力在各系统间的协同情况。各系统间的协调指数 X 计算公式^[21]为

$$X = \sqrt{CT} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} T &= \sum_{i=1}^n w_i B_i \\ C &= n \frac{\left[\prod_{i=1}^n B_i \right]^{1/n}}{\left[\left(\sum_{i=1}^n B_i \right)^n \right]} \end{aligned}$$

式中: T 为系统整体的综合评价指数; C 为各系统间的协调系数; n 为系统个数, 本文 n 取 4; w_i 为各系统的权重, 本文 4 个系统的协调程度决定区域水资源承载力, 且 4 个系统的重要程度相同, 权重均为 0.25。

2.3 区域水资源承载力

区域水资源承载力受水资源系统、社会系统、经

济系统和生态环境系统的共同影响,区域水资源承载力反映了区域内各系统承载压力的状况和区域内各系统间的协调情况。根据压力指数和协调指数计算结果,采用以下公式计算区域水资源承载力^[6]:

$$M = \sqrt[3]{(w_1Y_1 + w_2Y_2)Y_3X} \quad (10)$$

式中: M 为区域水资源承载力; w_1 、 w_2 分别为社会系统与经济系统压力指数的权重,本文对两系统采用相同的权重。

3 实例验证

3.1 研究区概况

广州市位于广东省中南部(东经 112°57' ~ 114°03', 北纬 22°26' ~ 23°56'),地处珠江三角洲中北部,接近珠江流域下游入海口,区域南北长约 155 km,东西宽约 106 km,市域总面积 7 434. 4 km²。2019 年全市地区生产总值达 23 628 亿元,第一、二、三产业结构比例为 1. 06: 27. 32: 71. 62,其中工业增加值 5 723 亿元,占全市 GDP 的 24. 22%,但全市经济发展不均衡。为了深入分析广州市水资源承载力,结合广州市各行政区水资源开发利用与经济发展的差异,将广州市划分为中心区(包括天河区、越秀区、海珠区、荔湾区和白云区)、黄埔区、花都区、从化区、增城区、番禺区、南沙区 7 个区域。所用数据来源于 2019 年的《广州市水资源公报》和《广州市统计年鉴》。

3.2 评估结果与分析

3.2.1 系统压力指数

广州市各区域的社会系统压力指数、经济系统压力指数、区域水资源复合系统承载压力指数计算结果如表 1 所示。

a. 整体上,广州市社会系统压力呈现由北向南递减的特征。从化区的社会系统压力指数最大,压力值达 1,主要是因为从化区人均 GDP(5. 5 万元)在各区中最小,说明该区社会发展状况已经超出了该区域的水资源支撑能力;增城区的社会系统压力指数次之,压力值为 0. 683,表明增城区社会发展规模已接近该区域内水资源最大支撑能力;中心区、花

都区和番禺区的社会系统压力指数在 0. 347 ~ 0. 482 之间,3 个区域水资源能够支撑其社会规模;黄埔区的社会系统压力指数最小,仅为 0. 180,主要是因为黄埔区人均 GDP(30. 4 万元)最大,该区社会发展规模较小,水资源足以支撑其现有社会发展规模。

b. 广州市经济系统压力指数空间分布呈现中心向周边递减的特征,其中,中心区是广州市的主要经济中心,因其万元 GDP 用水量在各区中最小(10. 24 m³),经济压力指数最大(1. 000),表明中心区经济发展对水资源的利用已经大大超出本区域的水资源支持能力;番禺区经济压力指数次之(0. 484),表明番禺区水资源的承载能力接近支持该区经济发展的边缘;花都区经济压力较小(0. 327),表明该区水资源对该区经济发展的支撑能力较强;黄埔、从化、南沙和增城区的经济压力较小,主要是因为万元 GDP 用水量均超过 50 m³,经济系统压力指数均小于 0. 2,说明这 4 个区水资源承载力较强,对它们的经济发展仍有较大的支撑潜力。

c. 广州各区域水资源复合系统承载压力指数均超过 2,其中中心区是广州经济最发达的区域,水资源利用已经达到较高的水平,同时经济压力指数较高,因此水资源复合系统承载压力指数高达 9. 240;从化区主要因为现状水资源开发利用率低,导致承载能力弱,属于工程性承载能力弱,水资源复合系统承载压力指数亦较大(10. 684);番禺区与增城区水资源复合系统承载压力指数相对较高,分别为 6. 038 和 5. 237;黄埔区和花都区水资源复合系统承载压力指数为 2. 158 和 4. 619,说明这两个区在一定程度上受到了来自经济和社会方面的压力。

3.2.2 水资源复合系统协调指数

整体上广州市水资源复合系统协调指数呈现中间向南北两侧递增的特征(表 1),其中花都区、南沙区和番禺区的水资源复合系统协调指数较高,接近 0. 5,表明花都区、南沙区和番禺区水资源的利用水平较高;从化区和增城区的水资源复合系统协调指数次之,为 0. 396 和 0. 430,表明从化区和增城区的

表 1 广州市不同区域水资源承载力评价结果

Table 1 Evaluation results of water resources carrying capacity in different districts of Guangzhou City

区 域	社会系统压力指数	经济系统压力指数	水资源复合系统承载压力指数	水资源复合系统协调指数	水资源承载力
中心区	0. 347	1. 000	9. 240	0. 297	1. 227
黄埔区	0. 180	0. 197	2. 158	0. 265	0. 476
花都区	0. 388	0. 327	4. 619	0. 499	0. 937
从化区	1. 000	0. 170	10. 684	0. 396	1. 352
增城区	0. 683	0. 136	5. 237	0. 430	0. 974
番禺区	0. 482	0. 484	6. 038	0. 482	1. 120
南沙区	0. 259	0. 154	2. 811	0. 490	0. 658

社会、经济、生态与水资源复合系统协调发展程度较高;而中心区和黄埔区的水资源复合系统协调指数均小于 0.3,说明中心区和黄埔区在开发利用水资源时,社会系统、经济系统、生态环境系统的协调程度弱于其他各区,可能因为这两个区域过于依赖过境水资源。

3.2.3 区域水资源承载力

由表 1 可知,广州市 2019 年区域水资源承载力呈由南向北递增的特征,其中从化区、中心区以及番禺区水资源承载力较大,分别为 1.352、1.227 和 1.120,均大于 1,处于水资源超载水平;黄埔区水资源承载力最小(0.476),南沙区水资源承载力略高于黄埔区,表明黄埔区和南沙区具有较好的水资源承载力;花都区、增城区水资源承载力在 1 附近,表明花都区、增城区在不同程度上面临着水资源紧张的问题,存在超载的风险。

广州市中心区本地水资源并不丰富,主要通过外调供水,支撑了广州市 55% 以上的人口、经济规模,从化区为广州市水资源开发利用率最低的区域,在水资源保护大背景下,现阶段实际可承载的人口、经济规模有限。番禺区人口密度仅次于中心区,且水污染形势严峻,现阶段番禺区正大力整治黑臭水体。增城区水资源开发利用率仅高于从化区,且承担了广州中心区、黄埔区的部分供水任务,使得增城区实际可承载的本地人口、经济规模有限,现阶段水资源承载力接近临界状态,增城区正努力通过海绵城市建设和加强非常规水源的利用,来支撑未来的社会经济发展。花都区水资源开发利用率和人口密度均高于增城区,万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量等处于各区域中间水平,花都区水资源状况接近紧缺。南沙区和黄埔区有外调水的支撑,作为广州市的新兴发展区域,未来仍然是人口经济发展的重要区域。可见模型评价结果与实际情况相符,构建的评估模型能够反映广州市区域水资源承载力。

4 结 语

水资源承载力涉及水资源系统、社会系统、经济系统和生态环境系统,各系统之间相互紧密联系、相互协调是水资源可持续利用的必要条件。本文基于水资源系统、社会系统、经济系统和生态环境系统 4 个系统提出了水资源承载力评价指标体系,并在评价指标体系的基础上计算了社会系统压力指数、经济系统压力指数、区域水资源复合系统承载压力指数;基于协同学的序参量原理和贡献率计算模型,计算了水资源系统、社会系统、经济系统和生态环境系

统间的协调指数;最终,构建了基于系统协调性的水资源承载力评价模型。将构建的模型应用于 2019 年广州市水资源承载力评价,评价结果基本反映了广州市区域水资源承载力,验证了模型的有效性和适用性,评价结果可为区域水资源规划与管理提供参考。

参考文献:

- [1] 王顺久,侯玉,张欣莉,等.流域水资源承载能力的综合评价方法[J].水利学报,2003(1):88-92. (WANG Shunjiu, HOU Yu, ZHANG Xinli, et al. Comprehensive evaluation method for water resources carrying capacity in river basins[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(1):88-92. (in Chinese))
- [2] 夏军,张永勇,王中根,等.城市化地区水资源承载力研究[J].水利学报,2006,37(12):1482-1488. (XIA Jun, ZHANG Yongyong, WANG Zhonggen, et al. Water carrying capacity of urbanized area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,37(12):1482-1488. (in Chinese))
- [3] 陈洋波,陈俊合,李长兴,等.基于 DPSIR 模型的深圳市水资源承载能力评价指标体系[J].水利学报,2004,35(7):98-103. (CHEN Yangbo, CHEN Junhe, LI Changxing, et al. Indicators for water resources carrying capacity assessment based on driving forces-pressure-state-impact-response model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004,35(7):98-103. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 王友贞,施国庆,王德胜.区域水资源承载力评价指标体系的研究[J].自然资源学报,2005,20(4):597-604. (WANG Youzhen, SHI Guoqing, WANG Desheng. Study on evaluation indexes of regional water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 2005,20(4):597-604. (in Chinese))
- [6] 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. (LIU Jiajun, DONG Suocheng, LI Zehong. Comprehensive evaluation of China's water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 2011,26(2):258-269. (in Chinese))
- [7] 王照亮.基于综合评价法的水资源承载能力研究[J].能源与环保,2019,41(4):125-130. (WANG Zhaoliang. Research on water resources carrying capacity based on comprehensive evaluation method[J]. China Energy and Environmental Protection, 2019,41(4):125-130. (in

- Chinese))
- [8] 叶海焯,董增川,罗晶,等. 基于协调发展度的南京市水资源承载状态评价[J]. 水电能源科学,2019,37(10): 41-43. (YE Haichao, DONG Zengchuan, LUO Jing, et al. Assessment of carrying status of water resources in Nanjing based on coordinated development degree [J]. Water Resources and Power, 2019, 37 (10): 41-43. (in Chinese))
 - [9] 鲍庆煜,周强,陈霞,等. 基于协调发展的南京市水资源承载状态评价与障碍因子诊断[J]. 江苏水利,2020(11):9-14. (BAO Qingyu, ZHOU Qiang, CHEN Xia, et al. Evaluation of water resources carrying state and diagnosis of obstacle factors in Nanjing City based on coordinated development [J]. Jiangsu Water Resources, 2020(11):9-14. (in Chinese))
 - [10] 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))
 - [11] 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. (in Chinese))
 - [12] 徐翔宇,酆建强,金菊良,等. 基于风险矩阵的多要素水资源承载力综合评价方法[J]. 水利水电科技进展,2020,40(1):1-9. (XU Xiangyu, LI Jianqiang, JIN Juliang, et al. Comprehensive evaluation method of multi-factor water resources carrying capacity based on risk matrix [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1):1-9. (in Chinese))
 - [13] 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))
 - [14] 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))
 - [15] 胡晓雨,陆隼,蒋咏,等. 江阴市水资源承载力综合评价[J]. 水利经济,2018,36(4):45-49. (HU Xiaoyu, LU Jun, JIANG Yong, et al. Comprehensive evaluation of carrying capacity of water resources in Jiangyin City [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(4): 45-49. (in Chinese))
 - [16] 王友贞. 区域水资源承载力评价研究[D]. 南京:河海大学,2004
 - [17] 戴明宏,王腊春,魏兴萍. 基于熵权的模糊综合评价模型的广西水资源承载力空间分异研究[J]. 水土保持研究,2016,23(1):193-199. (DAI Minghong, WANG Lachun, WEI Xingping. Spatial difference of water resource carrying capacity of Guangxi using fuzzy comprehensive evaluation model based on entropy weight method [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1):193-199. (in Chinese))
 - [18] 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))
 - [19] 汪丽娜,陈晓宏. 洪水形成过程的协同性探究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版),2017,49(6):77-83. (WANG Lina, CHEN Xiaohong. Synergy degree of flood process on flood changes [J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2017, 49(6):77-83. (in Chinese))
 - [20] WANG Lina, LIAN Yanqing, CHEN Xiaohong. Quantifying the contribution of flood intensity indicators with the projection pursuit model [J]. Hydrology Research, 2018, 49(1):60-71.
 - [21] 田时中,方眉玉,李光龙. 人口-土地-经济-社会城镇化水平测度及耦合协调分析:基于31个省份面板数据的实证[J]. 河北地质大学学报,2017,40(4):49-57. (TIAN Shizhong, FANG Meiyu, LI Guanglong. Measurement of population-land-economy-society urbanization level and coupling coordination analysis: empirical research based on panel data of 31 provinces [J]. Journal of Hebei GEO University, 2017, 40(4):49-57. (in Chinese))

(收稿日期:2021-01-06 编辑:熊水斌)

