

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.02.001

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

左其亭^{1,2,3}, 张志卓¹, 吴滨滨¹

(1. 郑州大学水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学黄河生态保护与区域协调发展
研究院, 河南 郑州 450001; 3. 郑州市水资源与水环境重点实验室, 河南 郑州 450001)

摘要:针对黄河流域九省区构建了涵盖水资源、生态环境、经济社会 3 个准则层的评价指标体系,采用层次分析法和熵权法组合赋权的 TOPSIS 模型对九省区 2002 年、2007 年、2012 年、2017 年的水资源承载力进行了综合评价,并对 2017 年评价结果进行了障碍因子诊断。结果表明:时间维度上,九省区水资源承载力呈现出增大趋势,河南、山东、内蒙古水资源承载力提升趋势最为明显,水资源承载力的提升与生态环境、经济社会两准则层相关指标的改善密切相关;空间维度上,九省区水资源承载力均未达到 I 级(可承载)水平,空间差异性明显;产水模数、人均水资源量、供水模数、生态用水率、植被覆盖率、万元工业增加值用水量、万元 GDP 用水量为 7 大主要障碍因子,部分障碍因子在不同省区存在明显差异。

关键词:水资源承载力;组合权重;TOPSIS 模型;障碍因子;黄河流域九省区

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)02-0001-07

Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model // ZUO Qiting^{1,2,3}, ZHANG Zhizhuo¹, WU Binbin¹ (1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Yellow River Institute for Ecological Protection & Regional Coordination Development Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Zhengzhou Key Laboratory of Water Resource and Environment, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In view of the nine provinces in the Yellow River Basin, an evaluation index system covering three criteria layers such as water resources, ecological environment and economic and society is constructed. The water resources carrying capacity of nine provinces in 2002, 2007, 2012 and 2017 was evaluated by the TOPSIS model combined with analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight, and the evaluation results of the year of 2017 were diagnosed with obstacle factors. The results show that in the time dimension, the water resources carrying capacity of nine provinces shows an increasing trend, especially in Henan, Shandong and Inner Mongolia, and the improvement of water resources carrying capacity is closely related to the improvement of two criteria level related indicators such as eco-environment, economic society. In the spatial dimension, the water resources carrying capacity of the nine provinces does not reach the level of grade I (carriable level), and the spatial difference is obvious. Water production module, water resources per capita, water supply modulus, ecological water use rate, vegetation coverage rate, water consumption per 10000 RMB of industrial added value and water consumption per 10000 RMB of GDP are seven major obstacles, and there are significant differences of some obstacle factors in different provinces.

Key words: water resources carrying capacity; combining weights; TOPSIS model; obstacle factors; nine provinces of Yellow River Basin

水资源在人类社会进步过程中发挥着不可替代的作用,作为极其关键的基础性资源,其供需矛盾突出^[1],逐渐成为国内外聚焦的热点问题。我国水资

源时空分布不均,尤其是在干旱半干旱地区,水资源条件难以承载迅速增长的经济发展需求,严重制约着地区发展,因此水资源短缺问题尤为显著。水资

基金项目:国家自然科学基金-新疆联合基金重点项目(U1803241);国家自然科学基金(51279183)

作者简介:左其亭(1967—),男,教授,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: zuoqt@zzu.edu.cn

源能否承载社会发展需求,已经成为衡量地区经济、环境、资源能否和谐发展的标准之一。水资源承载力是指某个区域的特定时段内,支撑经济社会发展并能保证生态系统正常运转的水资源系统最大规模^[2],自1989年以来,很多专家学者在水资源承载力的概念、内涵、评价方法等方面进行了综合而全面的研究^[3-5],基本形成了相对完善的理论和方法体系,极大地推动了水资源与经济社会和谐发展进程。

2019年9月18日习近平总书记在河南考察期间提出了黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略,为新时期黄河保护与发展指明了方向^[6]。目前国内外学者针对黄河的研究成果很多,涉及泥沙治理^[7]、流域水质^[8]、洪水管控^[9]等多个方面,其中涉及水资源承载力的研究也很多,目前大多为全流域、个别省份或各地市的水资源承载力研究,例如赵建民等^[10]研究了黄河流域的水土保持对水资源承载力的作用机制,孙才志等^[11]针对黄河流域内的山西省河段进行了评价,张宁宁等^[12]对黄河流域多个地市进行了水资源承载力评价。总体来看,全面对黄河流域九省区(以下简称“九省区”)进行多年水资源承载力评价并对结果进行障碍因子诊断的研究缺乏。

基于上述背景,本文采用高灵敏度的组合权重TOPSIS模型对九省区2002年、2007年、2012年、2017年进行水资源承载力评价,并对评价结果进行障碍因子诊断。研究结果一方面剖析了九省区水资源承载力时空演变特征,另一方面揭示不同省区水资源承载力的障碍因子影响情况,以期为未来黄河流域水资源调配提供一定的依据,为提升九省区水资源承载力起到积极作用。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河发源于青藏高原,流经黄土高原和华北平原,最终汇入渤海,东西跨度亚洲第二,河长跻身世界前五。黄河流域是我国极为重要的经济带与文化带,涵盖多个重要工农业生产基地和国家重点生态功能区,同时黄河也是我国北方基础性供水水源之一。

黄河从上游河源至下游入海口依次经过青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东九省区(89°E~126°E;26°N~54°N),九省区人口占全国的30.3%,地区生产总值占全国GDP的26.5%,耕地面积占全国的34.8%,而黄河径流量不足全国总径流量的2%,严峻的水资源供需矛盾长期存在。

九省区多为半干旱区或干旱区,地理跨度大,海拔差异显著(图1),资源环境禀赋、经济发展水平差异也大,尤其是近20年来,在经济社会迅速发展的大趋势下,九省区的水资源需求量也急剧上升,部分省区用水效率低、水资源短缺、水污染严重的问题仍然突出,水资源供需不平衡已成为部分省区经济社会可持续发展的严峻挑战。

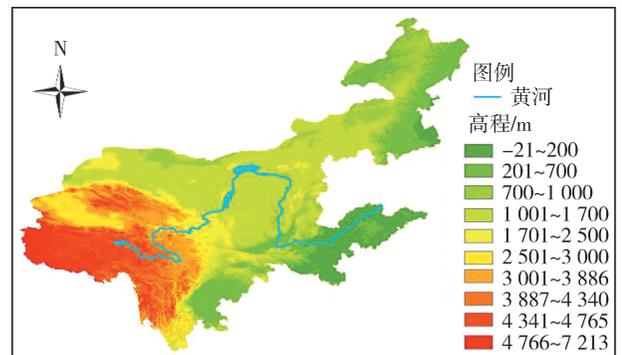


图1 九省区高程分布

Fig. 1 Elevation distribution of nine provinces

1.2 数据来源

以2002年、2007年、2012年、2017年作为评价年份,选取15个代表性指标来评价九省区的水资源承载力。通过对《中国统计年鉴》《新中国60年统计资料汇编》、国家统计局相关数据以及九省区的水资源公报、国土资源公报、统计年鉴中相关数据整理分析得到4个评价年份的九省区原始数据。

2 研究方法

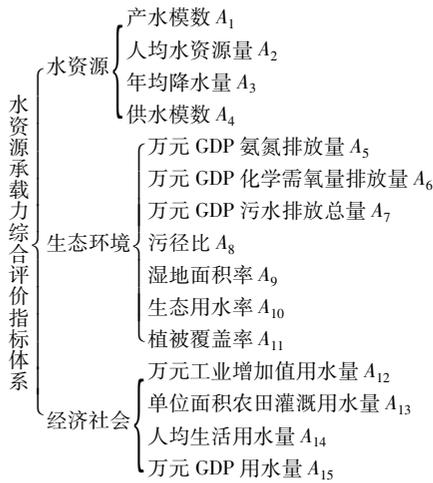
2.1 指标体系构建

水资源承载力不仅仅与地区水资源禀赋关系密切,还与生态环境和经济社会息息相关。黄河流域水资源禀赋相对较差,人均水资源量远低于全国水平,且水资源条件空间差异性明显,部分地区供水安全缺乏保障;黄河一些主要支流普遍受到污染,氨氮、化学需氧量均为主要污染项目,流域内湿地生态系统较为完整,但生态脆弱性明显,中游部分地区植被稀少、土质疏松,水土流失严重;流域经济发展不平衡,用水水平也存在显著地区性差异,例如中游是粮食主产区,灌溉技术成熟,但工业用水水平较低。通过对九省区水资源自然禀赋条件、生态环境状况、经济社会用水水平的综合分析,并参考大量相关研究^[12-14],最终选定15个指标,构建了涵盖水资源、生态环境、经济社会3个准则层的水资源承载力综合评价指标体系如表1所示。

评价指标等级划分的科学与否对最终评价结果影响显著,本文根据九省区及全国水资源状况,参考目前比较公认的水资源承载能力评价指标分级标准

表1 水资源承载力综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system for water resources carrying capacity



及国内外相关规范^[15-16],将各评价指标分为 I ~ V 5 个等级,分别代表可承载、弱可承载、临界、超载、严重超载,具体分级标准如表 2 所示。

2.2 权重确定

2.2.1 层次分析法

层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 可以实现定性与定量相结合确定目标权重,广泛应用于管理与决策领域^[17],主要计算过程分为 3 步:

a. 建立比较矩阵 $U = (a_{uv})_{n \times n}$,其中 a_{uv} 为因素 u 相较于因素 v 的重要程度量化值 ($u, v = 1, 2, \dots, n$),取值范围是 1 ~ 9。

b. 推求比较矩阵 U 的最大特征向量,通过公式 $Uw = \lambda_{\max} w$ 求出比较矩阵 $U = (a_{uv})_{n \times n}$ 的最大特征值 λ_{\max} 和对应特征向量 w ,并进行一致性检验。

c. 若随机一致性比率 $C_R < 0.1$,则可以断定该比较矩阵一致性较强,之后对 w 进行归一化处理,得到最后的权向量 $w' = (w'_1, w'_2, \dots, w'_n)^T$,其中 w'_1, w'_2, \dots, w'_n 即为各指标的权重。

2.2.2 熵权法

相较于层次分析法确定权重,熵权法确定权重

更为客观,其主要原理是根据各指标的差异程度来确定指标权重,主要计算过程^[18]如下:

a. 数据同趋势化与归一化。通过反比法将负向指标正向化;对正向化后的所有指标值按照下式归一化:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为正向化后的第 i 个样本第 j 个指标的值; x'_{ij} 为归一化后的指标值; m 为样本个数; n 为指标个数。

b. 计算第 j 个指标的信息熵 E_j :

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n x'_{ij} \ln x'_{ij} \quad (2)$$

c. 计算第 j 个指标的权重 w''_j :

$$w''_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum_{j=1}^n E_j} \quad (3)$$

主观权重和客观权重确定之后,利用式(4)^[19-20]确定出各指标的组合权重。本文研究对象的指标数据序列差异性较大,不宜单独采用熵权法确定权重,而利用该组合权重法确定权重能很大程度上降低主观因素的干扰,同时又避免单纯客观法确定权重与指标的实际重要程度不符的情况,能够真实地代表评价指标权重。

$$w_j = \frac{w'_j w''_j}{\sum_{j=1}^n w'_j w''_j} \quad (4)$$

2.3 TOPSIS 法计算步骤

TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution) 法又称为“逼近理想解排序法”,是根据评价对象与理想方案的相对接近程度,对众多评价对象整体排序进而确定相对优劣的评价方法,具有计算过程灵活方便、评价结果准确

表2 评价指标分级标准

Table 2 Evaluation index grade standard

评价等级	$A_1 / (\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	A_2 / m^3	A_3 / mm	$A_4 / (\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	A_5 / kg	A_6 / kg	A_7 / m^3	
I 级	≥ 60	≥ 2200	≥ 800	≥ 20	< 0.1	< 1	< 10	
II 级	[35, 60)	[1700, 2200)	[600, 800)	[15, 20)	[0.1, 0.3)	[1, 3)	[10, 25)	
III 级	[20, 35)	[1000, 1700)	[400, 600)	[10, 15)	[0.3, 0.5)	[3, 5)	[25, 40)	
IV 级	[10, 20)	[500, 1000)	[200, 400)	[5, 10)	[0.5, 1)	[5, 10)	[40, 55)	
V 级	< 10	< 500	< 200	< 5	≥ 1	≥ 10	≥ 55	
评价等级	$A_8 / \%$	$A_9 / \%$	$A_{10} / \%$	$A_{11} / \%$	A_{12} / m^3	$A_{13} / (\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	$A_{14} / (\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	A_{15} / m^3
I 级	< 1	≥ 10	≥ 6	≥ 18	< 15	< 5500	< 60	< 24
II 级	[1, 2)	[5, 10)	[3, 6)	[15, 18)	[15, 50)	[5500, 6000)	[60, 80)	[24, 60)
III 级	[2, 5)	[3, 5)	[1, 3)	[12, 15)	[50, 100)	[6000, 8500)	[80, 120)	[60, 140)
IV 级	[5, 10)	[1, 3)	[0.5, 1)	[9, 12)	[100, 300)	[8500, 11000)	[120, 150)	[140, 220)
V 级	≥ 10	< 1	< 0.5	< 9	≥ 300	≥ 11000	≥ 150	≥ 220

合理等优点,对于本文的研究对象有很好的适用性。该方法具体计算步骤^[21]如下:

a. 将样本数为 m 、指标数为 n 的一组数据进行同趋势化(与第 2.2.2 节方法相同)处理后按下式进行数据无量纲化处理,即得到无量纲决策矩阵 $Z = (z_{ij})_{m \times n}$:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (5)$$

b. 确定各指标的最优解 z_j^+ 和最劣解 z_j^- :

$$\begin{cases} z_j^+ = \max\{z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{mj}\} \\ z_j^- = \min\{z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{mj}\} \end{cases} \quad (6)$$

c. 确定各评价对象与最优解及最劣解间的加权欧式距离 D_i^+ 和 D_i^- :

$$\begin{cases} D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n [w_j(z_{ij} - z_j^+)]^2} \\ D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n [w_j(z_{ij} - z_j^-)]^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中 w_j 是指标 j 的组合权重。

d. 确定接近度 C_i :

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (8)$$

C_i 值越接近于 1,证明该对象与最佳方案越靠近,即对象相对较优,最终按各对象接近度由大到小进行排序。

2.4 障碍因子诊断

运用障碍度模型进行障碍因子诊断有利于辨识出不同省区水资源承载力的主要影响因素,对于提高水资源管理水平和提升水资源承载力有积极意义。具体计算步骤^[22]如下:

a. 计算第 j 个评价指标的因子贡献度 F_j :

$$F_j = w_j w_j^* \quad (9)$$

式中 w_j^* 为指标 j 所属准则层的权重。

b. 计算偏离度 I_j :

$$I_j = 1 - x_{ij} \quad (10)$$

c. 计算各评价指标障碍度 P_j :

$$P_j = \frac{F_j I_j}{\sum_{j=1}^n F_j I_j} \quad (11)$$

按照此方法对所有对象进行障碍因子诊断,就能获知所有参与对象的各指标障碍度。

3 计算结果与分析

3.1 计算结果

a. 权重计算结果。采用层次分析法确定主观

权重, $C_R = 0.017 < 0.1$,通过一致性检验;采用熵权法分别确定指标在不同评价年的客观权重;最终通过组合权重公式计算指标组合权重,各指标权重计算结果见表 3。

表 3 各评价年份指标权重

Table 3 Indicator weights for each evaluation year

指标	AHP 法权重	熵权法权重				组合权重			
		2002 年	2007 年	2012 年	2017 年	2002 年	2007 年	2012 年	2017 年
A_1	0.143	0.062	0.074	0.077	0.081	0.126	0.158	0.175	0.184
A_2	0.033	0.117	0.140	0.146	0.154	0.055	0.069	0.077	0.081
A_3	0.035	0.032	0.038	0.040	0.042	0.016	0.020	0.022	0.023
A_4	0.085	0.052	0.062	0.064	0.068	0.063	0.079	0.087	0.092
A_5	0.048	0.096	0.066	0.060	0.047	0.066	0.048	0.046	0.036
A_6	0.048	0.093	0.068	0.060	0.053	0.064	0.049	0.046	0.040
A_7	0.053	0.036	0.039	0.041	0.043	0.027	0.031	0.035	0.036
A_8	0.022	0.117	0.128	0.158	0.149	0.037	0.042	0.055	0.052
A_9	0.028	0.048	0.058	0.060	0.063	0.019	0.024	0.027	0.028
A_{10}	0.067	0.045	0.053	0.056	0.059	0.043	0.054	0.059	0.063
A_{11}	0.107	0.035	0.041	0.043	0.045	0.053	0.066	0.074	0.077
A_{12}	0.081	0.093	0.076	0.061	0.062	0.107	0.092	0.079	0.080
A_{13}	0.042	0.035	0.042	0.042	0.044	0.021	0.026	0.028	0.029
A_{14}	0.036	0.023	0.028	0.028	0.032	0.012	0.015	0.016	0.018
A_{15}	0.172	0.119	0.088	0.063	0.058	0.291	0.226	0.174	0.160

b. 接近度 C_i 计算结果。本文用评价指标值与指标分级临界值共同构造标准化决策矩阵,利用 TOPSIS 模型计算九省区接近度 C_i ,结果见表 4。以 4 个分级临界值的接近度划分水资源承载力等级,能使评价对象的等级评价结果更加客观合理。以 2017 年为例, C_i 在 $(0, 0.104]$ 、 $(0.104, 0.222]$ 、 $(0.222, 0.398]$ 、 $(0.398, 0.660]$ 、 $(0.660, 1]$ 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)。各评价年九省区水资源承载力评价结果见表 5。

表 4 九省区接近度 C_i 计算结果

Table 4 Proximity C_i calculation results of nine provinces

省(自治区)	2002 年	2007 年	2012 年	2017 年
青海	0.180	0.264	0.374	0.402
四川	0.202	0.312	0.421	0.478
甘肃	0.043	0.076	0.090	0.124
宁夏	0.059	0.094	0.129	0.154
内蒙古	0.094	0.154	0.223	0.256
陕西	0.134	0.226	0.344	0.380
山西	0.062	0.198	0.249	0.248
河南	0.156	0.262	0.342	0.405
山东	0.152	0.315	0.382	0.429
I 级临界值	0.845	0.774	0.691	0.660
II 级临界值	0.383	0.390	0.390	0.398
III 级临界值	0.175	0.189	0.208	0.222
IV 级临界值	0.096	0.094	0.098	0.104

3.2 水资源承载力评价结果分析

由表 4 可知,2002 年九省区 C_i 值在 $[0.043, 0.202]$ 区间范围内,跨度最小,说明该评价年九省

表5 九省区水资源承载力评价结果

Table 5 Evaluation results of water resources carrying capacity of nine provinces

省(自治区)	2002年	2007年	2012年	2017年
青海	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅱ级
四川	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅱ级	Ⅱ级
甘肃	V级	V级	V级	Ⅳ级
宁夏	V级	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级
内蒙古	V级	Ⅳ级	Ⅲ级	Ⅲ级
陕西	Ⅳ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级
山西	V级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级
河南	Ⅳ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅱ级
山东	Ⅳ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅱ级

区水资源承载力普遍较弱,差异性不强;2007年九省区 C_i 值在[0.076,0.315]区间范围内,较2002年跨度增大,水资源承载力差异性有所增加;2012年九省区 C_i 值在[0.090,0.421]区间范围内,跨度继续增大;2017年九省区 C_i 值在[0.124,0.478]区间范围内,跨度最大,水资源承载力差异性最为显著。可以看出九省区水资源承载力差异性在时间上呈增大趋势,也说明九省区2002—2017年经济社会发展水平存在较大差异。

时间维度上,九省区水资源承载力呈现出增大趋势,2002—2007年时间段内提升最为明显,不同省区增加速率不同,青海、四川由临界状态上升到弱可承载状态,甘肃、宁夏由严重超载状态改善为超载状态,内蒙古、山西由严重超载状态改善为临界状态,陕西由超载状态提升为临界状态,河南、山东由超载状态提升至弱可承载状态,河南、山东、内蒙古提升趋势最为明显。严重超载省区占比在2002年达到44%,2017年无严重超载省区,临界及以上省区占比从2002年的22%上升到2017年的78%。在评价指标层面对结果进一步分析可发现,九省区2002—2017年的水资源量、降水量、供水模数等指标值并无明显提升,而万元GDP用水量、万元工业增加值用水量、污染物排放量、生态用水率、湿地面积率等指标得到明显改善,说明时间维度上水资源承载力的变化与生态环境、经济社会两准则层相关指标的改善有密切联系,水资源承载力随着经济社会不断发展、生态环境保护力度的加大不断提升,而水资源准则层对水资源承载力提升贡献较弱。

空间维度上,九省区水资源承载力整体偏弱,各省区均未能达到Ⅰ级(可承载)水平,空间差异性明显。2002年除上游青海、四川外,其他7个省区都为超载和严重超载状态;2007年除内蒙古、甘肃、宁夏处于超载和严重超载状态,其他省份水资源承载力均达到了临界状态;2012年上游甘肃、宁夏仍处于严重超载和超载状态,四川达到弱可承载状态;

2017年青海、四川、河南和山东达到弱可承载状态,上游甘肃、宁夏仍处于超载状态。在评价指标层面对结果进一步分析,水资源准则层下,上游青海、四川水资源禀赋较为突出;经济社会准则层下,河南、山东经济社会发展速度较快,供水能力强,用水水平高;生态环境准则层下,九省区差异性相对较小;而甘肃、宁夏水资源短缺、经济社会发展水平较落后,这就解释了水资源承载力呈现出显著空间差异性的原因。

3.3 水资源承载力障碍因子分析

利用公式(9)~(11)计算出2017年九省区的各指标障碍度,选出障碍度较高的指标作为主要障碍因子列于表6,可以看出,产水模数、人均水资源量、供水模数、生态用水率、植被覆盖率、万元工业增加值用水量、万元GDP用水量在各个省区障碍度均较高,为7大主要障碍因子,其中,3个障碍因子属于水资源维度,2个障碍因子属于生态环境维度,2个障碍因子属于经济社会维度。

表6 2017年九省区水资源承载力主要障碍因子障碍度

Table 6 Obstacle degree of main obstacle factors of water resources carrying capacity of nine provinces in 2017 %

省(自治区)	产水模数	人均水资源量	供水模数	生态用水率	植被覆盖率	万元工业增加值用水量	万元GDP用水量
青海	22.45	3.89	12.03	6.54	8.67	7.44	14.91
四川	15.62	9.12	10.92	6.91	7.22	7.59	14.54
甘肃	23.26	10.10	11.56	6.63	8.39	7.70	15.29
宁夏	24.05	10.57	9.98	6.67	8.36	7.55	15.43
内蒙古	23.87	10.02	11.77	5.41	7.91	6.92	14.80
陕西	20.58	10.04	11.14	6.67	6.92	6.80	13.50
山西	22.90	10.47	11.08	6.64	8.06	7.17	13.79
河南	19.98	10.45	9.11	5.98	7.89	7.26	13.34
山东	21.87	10.53	9.27	6.38	8.13	6.00	12.31
平均值	21.62	9.46	10.76	6.43	7.95	7.16	14.21

九省区水资源承载力与各障碍因子关系如图2所示,整体障碍度最大的障碍因子是产水模数,其次是万元GDP用水量。结合表6可以看出:九省区的第一障碍因子均为产水模数,第二障碍因子均为万元GDP用水量,最小障碍因子方面,山东为万元工业增加值用水量,青海为人均水资源量,其余7个省区均为生态用水率。甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西5个省区的障碍因子障碍度排序相同,从大到小均为产水模数、万元GDP用水量、供水模数、人均水资源量、植被覆盖率、万元工业增加值用水量、生态用水率。

产水模数方面,宁夏和四川分别是障碍度最高和最低的省份,原因是宁夏本地区水资源极为匮乏,需要外调水源维持生产生活,而四川是全国水资源总量最多的省份,水资源丰富,故该因子在两省障碍

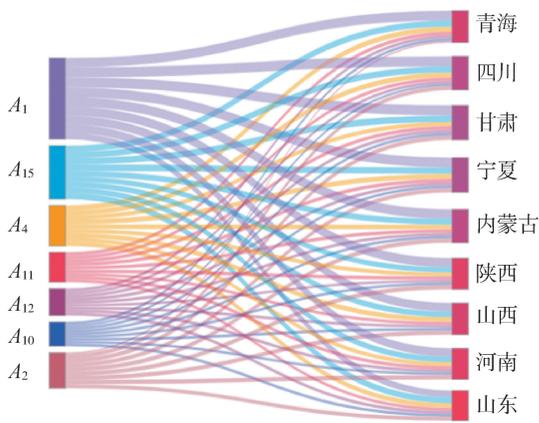


图2 2017年九省区水资源承载力障碍因子分析
Fig.2 Obstacle factors analysis of water resources carrying capacity of nine provinces in 2017

度表现出显著差异;人均水资源量方面,宁夏和青海分别是障碍度最高和最低的省区,后者障碍度显著低于其他8个省区,原因是宁夏水资源匮乏且人口密度大,而青海人口相对较少,人均水资源量相对丰富;供水模数方面,河南、山东的障碍度显著低于其他省区,青海障碍度最高,原因是河南、山东供水水平较高,地区面积相对较小,而青海则相反;生态用水率和植被覆盖率方面,九省区障碍度差别较小,说明生态环境准则层对九省区的水资源承载力影响较为均衡;万元工业增加值用水量和万元GDP用水量方面,上游省区障碍度明显高于中下游省区,山东为障碍度最小省份,而甘肃、宁夏则是两因子对应障碍度最高省区,原因是山东经济社会发展速度快,现代化水平较高,而甘肃、宁夏产业结构相对落后,工业发展水平较低,造成了两因子在不同省区障碍度的显著差异。

结合水资源承载力障碍因子诊断结果提出以下针对性建议,以期能够改善各省区水资源承载力现状,助力九省区水资源与经济社会和谐发展:

a. 水资源方面,各省区把水资源看成发展硬性约束,根据自身实际情况进行优化配置,合理规划地区发展,同时加强节水宣传、发展节水技术。供水能力不足省区通过开源节流保障供用水平衡,保障地区供水安全。

b. 生态环境方面,上游省区注重加强生态环境保护工程建设,提高生态用水率;中游省区严格控制污水排放,增强水土保持,提升植被覆盖率;下游省份关注湿地面积缩减情况,提高生态系统完整性。

c. 经济社会方面,上游省区与中下游省区经济社会发展存在显著差异,要注重调整产业结构,因地制宜,发挥自身优势,提升现代化水平,提高用水效率,缩小经济社会用水水平方面与中下游省区的

差距。

4 结 论

a. 九省区水资源承载力在多年间呈现出逐渐改善趋势,不同省区提升速率存在差异,水资源承载力的提升主要得益于生态环境、经济社会两准则层相关指标的改善。

b. 九省区水资源承载力整体较弱且具有显著的地区差异性,宁夏、甘肃水资源承载力多年处于超载和严重超载状态。

c. 产水模数是影响九省区水资源承载力的首要障碍因子,水资源准则层是影响水资源承载力的主要准则层。

参考文献:

- [1] 左其亭,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] 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))
- [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(2):180-188. (ZHU Yizhong, XIA Jun, TAN Ge. A primary study on the theories and process of water resources carrying capacity[J]. Progress in Geography,2002(2):180-188. (in Chinese))
- [4] 左其亭. 城市水资源承载能力:理论·方法·应用[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [5] WANG Zhonggen, LUO Yuzhou, ZHANG Minghua, 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.
- [6] 左其亭. 黄河流域生态保护和高质量发展研究框架[J]. 人民黄河,2019,41(11):1-6. (ZUO Qiting. Research framework for ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Yellow River,2019,41(11):1-6. (in Chinese))
- [7] 胡春宏,张晓明. 论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题[J]. 水利学报,2018,49(9):1028-1039. (HU Chunhong, ZHANG Xiaoming. Several key questions in the researches of runoff and sediment changes and trend predictions in the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,49(9):1028-1039. (in Chinese))

- [8] SUN Dongpo, LU Ruili, SONG Youngjun, et al. Impact of hydroelectric projects on river environment: analysis of water quality changes in Ningxia Reach of Yellow River [J]. Water Science and Engineering, 2008, 2(1): 66-75.
- [9] CHEN Y Z, OVEREEM I, KETTNER A J, et al. Modeling flood dynamics along the superelevated channel belt of the Yellow River over the last 3000 years [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2015, 120 (7): 1321-1351.
- [10] 赵建民, 陈彩虹, 李靖. 水土保持对黄河流域水资源承载力的影响 [J]. 水利学报, 2010, 41 (9): 1079-1086. (ZHAO Jianmin, CHEN Caihong, LI Jing. Impacts of soil and water conservation on water resources carrying capacity in Yellow River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(9): 1079-1086. (in Chinese))
- [11] 孙才志, 左海军, 杨静. 基于极大熵原理的黄河流域水资源承载力研究: 以山西段为例 [J]. 资源科学, 2004 (2): 17-22. (SUN Caizhi, ZUO Haijun, YANG Jing. Water resource carrying capacity in Yellow River Watershed Based on the theory of maximum entropy: a case of Shanxi Part [J]. Resources Science, 2004(2): 17-22. (in Chinese))
- [12] 张宁宁, 粟晓玲, 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, LI 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))
- [13] 刘雁慧, 李阳兵, 梁鑫源, 等. 中国水资源承载力评价及变化研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28 (5): 1080-1091. (LIU Yanhui, LI Yangbing, LIANG Xinyuan, et al. Study on water resource carrying capacity evaluation and change in China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28 (5): 1080-1091. (in Chinese))
- [14] 唱彤, 郦建强, 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))
- [15] 朱一中, 夏军, 谈戈. 西北地区水资源承载力分析预测与评价 [J]. 资源科学, 2003(4): 43-48. (ZHU Yizhong, XIA Jun, TAN Ge. Measurement and evaluation of water resources carrying capacity of northwest China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(4): 43-48. (in Chinese))
- [16] 孟珍珠, 唐德善, 魏宇航, 等. 和谐论在水资源承载力综合评价中的应用 [J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 54-58. (MENG Zhenzhu, TANG Deshan, WEI Yuhang, et al. Application of harmony theory to evaluation of water resources carrying capacity [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 54-58. (in Chinese))
- [17] 左其亭. 和谐论: 理论·方法·应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [18] 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))
- [19] 闫岩, 雷国平, 谢英楠. 基于 AHP 和熵权法的土地利用生态效益研究 [J]. 水土保持研究, 2014, 21 (6): 134-139. (YAN Yan, LEI Guoping, XIE Yingnan. Study on evaluation of land use ecological efficiency based on AHP and entropy weight method [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21 (6): 134-139. (in Chinese))
- [20] 苏辉东, 贾仰文, 牛存稳, 等. 河流健康评价指标与权重分配的统计分析 [J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 138-144. (SU Huidong, JIA Yangwen, NIU Cunwen, et al. Statistical analysis of river health assessment indicators and weight distribution [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 138-144. (in Chinese))
- [21] 杨亮洁, 杨永春. 甘肃省资源环境承载力时空分异 [J]. 生态学报, 2017, 37(20): 7000-7017. (YANG Liangjie, YANG Yongchun. The spatiotemporal variation in resource environmental carrying capacity in the Gansu Province of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(20): 7000-7017. (in Chinese))
- [22] 孙才志, 吴永杰, 刘文新. 基于熵权 TOPSIS 法的大连市水贫困评价及障碍因子分析 [J]. 水资源保护, 2017, 33 (4): 1-8. (SUN Caizhi, WU Yongjie, LIU Wenxin. Application of TOPSIS method based on entropy weight to water poverty evaluation and obstacle indicator diagnoses for Dalian City [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (4): 1-8. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-01-12 编辑: 熊水斌)

