

引用格式:姜德娟,余灏哲,李丽娟. 基于综合赋权和TOPSIS模型的山东省水资源承载力动态评价[J]. 资源科学, 2024, 46(3): 538–548. [Jiang D J, Yu H Z, Li L J. Dynamic evaluation of water resources carrying capacity in Shandong Province based on the comprehensive weight and TOPSIS model[J]. Resources Science, 2024, 46(3): 538–548.] DOI: 10.18402/resci.2024.03.08

基于综合赋权和TOPSIS模型的山东省水资源承载力动态评价

姜德娟^{1,4}, 余灏哲², 李丽娟³

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 烟台 264003; 2. 陕西理工大学人文学院, 汉中 723001; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环与地表过程重点实验室, 北京 100101; 4. 山东省海岸带环境过程重点实验室, 烟台 264003)

摘要:【目的】山东省GDP稳居全国前列, 战略地位十分重要, 然而水资源短缺一直严重制约着经济社会的快速发展。水资源承载力作为水资源刚性约束的重要体现, 对其研究是区域经济社会可持续发展的迫切需求。【方法】本文结合综合赋权法和TOPSIS模型对2011—2020年山东省16个地市的水资源承载能力进行定量评价, 并探讨水资源承载力在不同水平年的分布特征, 最后应用障碍度模型对水资源承载力障碍因子进行诊断。【结果】①2011—2020年, 山东省水资源承载力呈先下降后上升的趋势, 但总体较低(0.39); 其在丰水年最高(0.68)、枯水年最低(0.19)。②空间上, 水资源承载力表现出明显的区域差异。从多年平均状况来看, 全省水资源承载力总体较差, 即使水资源承载力最高的济南市也仅0.51, 威海市更是低至0.24。从不同水平年来看, 丰水年大部分地市水资源承载力偏高, 而鲁西北地区 and 烟台市较低(<0.60); 平水年水资源承载力自西南向东北总体呈降低态势; 枯水年所有地市水资源承载力均较低(<0.40), 空间差异不大。③水资源总量、产水模数、生态用水率、地表水资源占比、废水排放量是水资源承载力的主要障碍因子, 尤其水资源禀赋是制约水资源承载力提升的最大障碍。【结论】针对全省水资源匮乏及水资源承载力较弱的特点, 开源节流和提质增效是当前及未来山东省生态优先保护和经济社会高质量发展的关键。

关键词: 水资源承载力; 综合赋权; TOPSIS模型; 障碍度模型; 山东省

DOI: 10.18402/resci.2024.03.08

1 引言

随着人口增长、经济社会发展、城市化快速推进和人们生活水平的不断提高, 水资源供需矛盾日益突出, 水资源紧缺越来越成为制约经济社会发展的重要因素。作为衡量区域水资源与经济社会、生态环境之间协调性的重要指标, 水资源承载力(WRCC)能反映区域水资源在社会、经济和生态多重压力下的支撑能力^[1,2]。因此, 科学评价水资源承载力是强化水资源刚性约束和区域经济社会可持

续发展的迫切需求, 其研究成果可有效引导区域发展规模和产业结构优化调整, 促进水资源、经济社会与生态环境之间协调发展^[3,4]。

概括而言, 国外对水资源承载力的研究较少, 更多将其纳入可持续发展理论中^[4,5], 且主要以可利用水量、水资源紧缺程度、水资源供需比等概念出现^[6–9], 如Tramblay等^[6]评价了气候变化对北非水资源未来可利用性的影响; Rijsberman等^[7]在城市水资源评价和管理体系评估中把承载力作为水资源安

收稿日期: 2023-09-01 修订日期: 2024-02-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(72050001); 山东省自然科学基金项目(ZR2022ME100); 陕西省社会科学基金项目(2021D066)。

作者简介: 姜德娟, 女, 山东日照人, 副研究员, 研究方向为环境水文过程与模拟。E-mail: djjiang@yic.ac.cn

通讯作者: 李丽娟, 女, 吉林吉林人, 研究员, 研究方向为水文与水资源。E-mail: lilj@igsnnr.ac.cn

2024年3月

全的衡量标准;Milano等^[8]、Widodo等^[9]分别应用水资源分配指数(即水资源供需比)评价了埃布罗河流域和印度尼西亚日惹区的水资源承载能力。相对而言,国内对水资源承载力的研究较多,主要围绕水资源承载力的概念、评价指标体系和评价方法等方面开展大量研究^[1,10]。其中,水资源承载力的概念最初是由新疆水资源软科学课题调研组于1980s提出,此后许多学者对水资源承载力进行了重新定义,但截至目前仍未形成统一的概念^[1,11-13]。在水资源指标体系方面,主要构建了水资源-社会-经济-生态环境系统^[13-15]、驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)系统^[16]、承压-压力-协调-管理系统^[17,18]、量-质-域-流系统^[4,5,19]等基本框架。在水资源承载力定量研究方面,常用的评价方法主要包括主成分分析法(PCA)、投影寻踪法、模糊综合评价法(PCE)、逼近理想解排序法(TOPSIS)、系统动力学法(SD)、云模型等,这些方法的提出及应用大大推动了水资源承载力的研究进展^[5,20-25]。其中,TOPSIS模型凭借其计算简单、评价结果准确合理等优势得到了广泛应用^[26,27]。如田培等^[14]、左其亭等^[26]、Deng等^[10]、李少朋等^[27]、阳斌成等^[28]、马继敏等^[3]和Zhang等^[23]均采用TOPSIS模型对中国典型流域或区域(长江、黄河、洞庭湖等流域;江苏、云南、河北、湖南等省份)的水资源承载力进行了评价,取得了较好的估算效果。然而,目前研究主要针对某年或某一时期的水资源承载力进行评估和探讨,很少考虑水资源承载力在不同水平年的分布及动态,亟待就此进行科学探索。

山东省是中国的经济大省,也是黄河流域经济最发达的省份,GDP和实体经济规模均位居全国前列,因此在全国具有重要战略地位。但该省人口多、水资源少,人均水资源量(380.3 m^3)不足全国平均水平的1/5,水资源短缺一直是制约山东省经济发展的重要因素。科学评价山东省水资源承载力,认清水资源现状及承载状态,对“四水四定”、强化水资源刚性约束、落实最严格水资源管理制度以及合理确定产业规模和城市布局具有重要意义。早期学者多采用模糊综合评价法、系统动力学模型、减法集对势和支持向量机等方法对山东省水资源承载力进行评价^[20,29-32],但研究时期较早且很少考虑到各地市,难以准确反映山东省水资源承载力的现状

水平及趋势特征。因此,本文基于2011—2020年数据资料并结合综合赋权法和TOPSIS模型对山东省16个地市的水资源承载力进行定量评价,进而探讨其在丰、平、枯等典型年的分布特征,研究结果将有助于深刻认识山东省水资源承载力的动态变化及其驱动因素,从而为全省水资源可持续利用和经济社会的高质量发展提供决策支持。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 水资源承载力指标体系构建

按照全面性与代表性相结合、系统性和独立性相结合、科学性和可操作性相结合等原则,参考国内相关政策文件及前人研究成果^[15,31],并充分考虑山东省的区域特点,从水资源、社会、经济和生态环境4个方面选取16个指标构建山东省水资源承载力综合评价指标体系(表1)。其中,水资源子系统包括水资源总量(x_1)、地表水资源占比(x_2)、产水模数(x_3)、水资源开发利用率(x_4)和供水模数(x_5)等5个指标;社会子系统包括人口密度(x_6)、城镇化率(x_7)、城市人均日生活用水量(x_8)等3个指标;经济子系统包括人均GDP(x_9)、第三产业占比(x_{10})、万元GDP用水量(x_{11})、万元工业增加值用水量(x_{12})等4个指标;生态环境子系统包括生态用水率(x_{13})、废水排放量(x_{14})、城市污水处理率(x_{15})和建成区绿化覆盖率(x_{16})等4个指标。

2.1.2 水资源承载力评价模型

首先结合层次分析法(AHP)和熵权法对水资源承载力的16个评价指标进行综合赋权,然后应用TOPSIS模型估算16个地市2011—2020年的水资源承载力。

(1) 评价指标综合赋权

为有效避免对评价指标进行单一赋权的弊端,结合层次分析法(AHP)和熵权法对16个水资源承载力评价指标进行综合赋权。AHP为主观赋权法,主要通过专家打分计算各指标的权重,但该方法主观性较强,会使计算结果存在较大的波动性。熵权法为客观赋权法,能客观反映数据携带信息量的大小,避免主观因素造成的误差,但有脱离指标本质意义与价值的可能^[17-20]。为此,本文通过对主客观权重进行线性叠合获得综合权重^[20],计算公式如下:

表1 山东省水资源承载力指标体系

Table 1 Evaluation indicator system of water resources carrying capacity in Shandong Province

目标层	准则层	指标层	单位	计算方法	指标含义	指标属性
山东省 水资源 承载力	水资源子系 统	水资源总量(x1)	亿 m³	统计数据	水资源整体水平	正向指标
		地表水资源占比(x2)	%	地表水资源量/水资源总量	水资源的分布状况	正向指标
		产水模数(x3)	万 m³/km²	水资源总量/区域面积	区域单位面积产水能力	正向指标
		水资源开发利用率(x4)	%	供水量/水资源总量	水资源的开发利用程度	负向指标
		供水模数(x5)	万 m³/km²	供水量/区域面积	区域单位面积供水能力	负向指标
	社会子系统	人口密度(x6)	人/km²	总人口/区域面积	人口聚集程度	负向指标
		城镇化率(x7)	%	城镇人口/总人口	城镇化水平	正向指标
		城市人均日生活用水量(x8)	m³	统计数据	城市居民人均用水压力	负向指标
	经济子系统	人均GDP(x9)	万元/人	GDP总量/总人口	区域经济发展状况	正向指标
		第三产业占比(x10)	%	统计数据	区域经济结构优化程度	正向指标
		万元GDP用水量(x11)	m³/万元	用水总量/GDP总量	水资源与经济协调度	负向指标
		万元工业增加值用水量(x12)	m³/万元	工业用水量/工业增加值	工业用水水平	负向指标
	生态环境子 系统	生态用水率(x13)	%	生态用水量/用水总量	生态用水状况	正向指标
		废水排放量(x14)	万 t	统计数据	经济社会发展对水环境的压力	负向指标
		城市污水处理率(x15)	%	统计数据	污水处理水平	正向指标
		建成区绿化覆盖率(x16)	%	统计数据	城市绿化程度	正向指标

$$W_j = \alpha W_{j1} + (1 - \alpha)W_{j2} \tag{1}$$

式中： W_j 为第j个指标的综合权重； W_{j1} 为主观权重； W_{j2} 为客观权重； α 为层次分析法所占比例，一般取值为0.5。

(2)TOPSIS模型

TOPSIS模型是由Hwang等于1981年提出的一种多目标决策分析方法，又称逼近理想解排序法^[22]。该方法能充分利用原始数据的信息，精确反映各评价方案之间的差距，实现评价目标的优劣排序^[22,28]。TOPSIS模型估算的基本过程为：通过归一化后的数据规范化矩阵，计算评价对象与最优、最劣方案之间的距离和贴近度(C)，然后对评价对象进行排序，进而得出各评价对象的优劣状况^[16]。贴近度C越大表示评价结果越好。

2.1.3 水资源承载力与评价指标的相关性分析

应用SPSS19.0软件对2011—2020年山东省所有地市的水资源承载力与各评价指标(即表1中的各指标以及降水量，合计17项指标)的相关性进行Pearson分析，判别影响水资源承载力的重要因素。当 $p<0.05$ 时，表示水资源承载力与该项指标的相关性显著；当 $p<0.01$ 时，表示水资源承载力与该项指标的相关性极显著。

2.1.4 水资源承载力的障碍因子诊断

运用障碍度模型对水资源承载力障碍因子进行诊断，可判断出不同地市障碍因子及其障碍度，这对调整水资源利用方向、提高水资源管理水平和提升水资源承载力具有重要意义^[3,26,27]。障碍因子的障碍度越大，表示该障碍因子对水资源承载力的阻碍作用越强。

2.2 数据来源

本文对水资源承载力评价所用指标的原始数据主要来源于2010—2020年《山东省水资源公报》和2011—2021年《山东省统计年鉴》等资料。部分指标(x1、x8、x10、x14—x16)由原始数据直接获得，其他指标通过原始数据计算而得，计算方法详见表1。

3 结果与分析

3.1 水资源承载力的时间变化分析

2011—2020年，山东省水资源承载力总体上呈先下降后上升的趋势(图1)。其中，2014年(枯水年)水资源承载力最低，全省平均仅0.19。2014年以后，水资源承载力呈现波动式上升，并于2020年(丰水年)达到最高(0.68)。大部分地市的水资源承载力与全省平均水平的变化趋势一致，也于2011—2014年下降、2014—2020年上升。

2024年3月

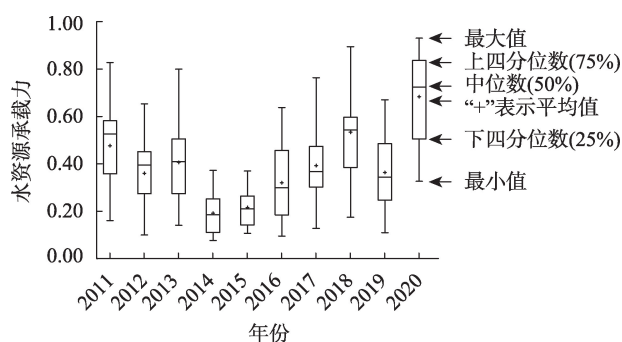


图1 2011—2020年山东省水资源承载力变化

Figure 1 Change of water resources carrying capacity in Shandong Province, 2011-2020

3.2 水资源承载力的空间格局分析

从2011—2020年平均状况来看,山东省各地市水资源承载力在0.24~0.51之间,平均值为0.39,说明近10年来山东省水资源承载力总体较低,即使水资源承载力最高的济南市也仅0.51,其次为胶东半岛(威海市除外)和鲁西南地区的部分地市,水资源承载力在0.40~0.50之间,其他地市水资源承载力多介于0.30~0.40之间,威海市最低,为0.24(图2a)。

基于对全省降水量和水资源总量数据的分析,分别将2020、2016和2014年作为研究期典型的丰、平、枯水年,以揭示不同水平年水资源承载力的空间格局。其中,在丰水年,青岛市、济宁市、泰安市、枣庄市和临沂市水资源承载力 >0.80 (图2b),说明这些地市水资源承载力较好;相对而言,鲁西北(东营、滨州和德州市)水资源承载力较低(<0.60);烟台市水资源承载力为最低(0.30);其他地市水资源承载力多位于0.60~0.80之间,水资源承载力良好(图2b)。在平水年,水资源承载力总体由西南向东北呈降低态势,其中济南市水资源承载力最高(0.64)、威海市最低(<0.10)(图2c)。枯水年,各地市水资源承载力均较低(<0.40)(图2d)。

3.3 各子系统承载力评价结果分析

山东省水资源承载力4个子系统的评价结果如图3所示。2011—2020年,水资源子系统、生态环境子系统承载力均与水资源承载力变化一致,即丰水年最高、枯水年最低,总体呈现先下降后上升的趋势(图3a和3d),两个子系统承载力均在2014年最

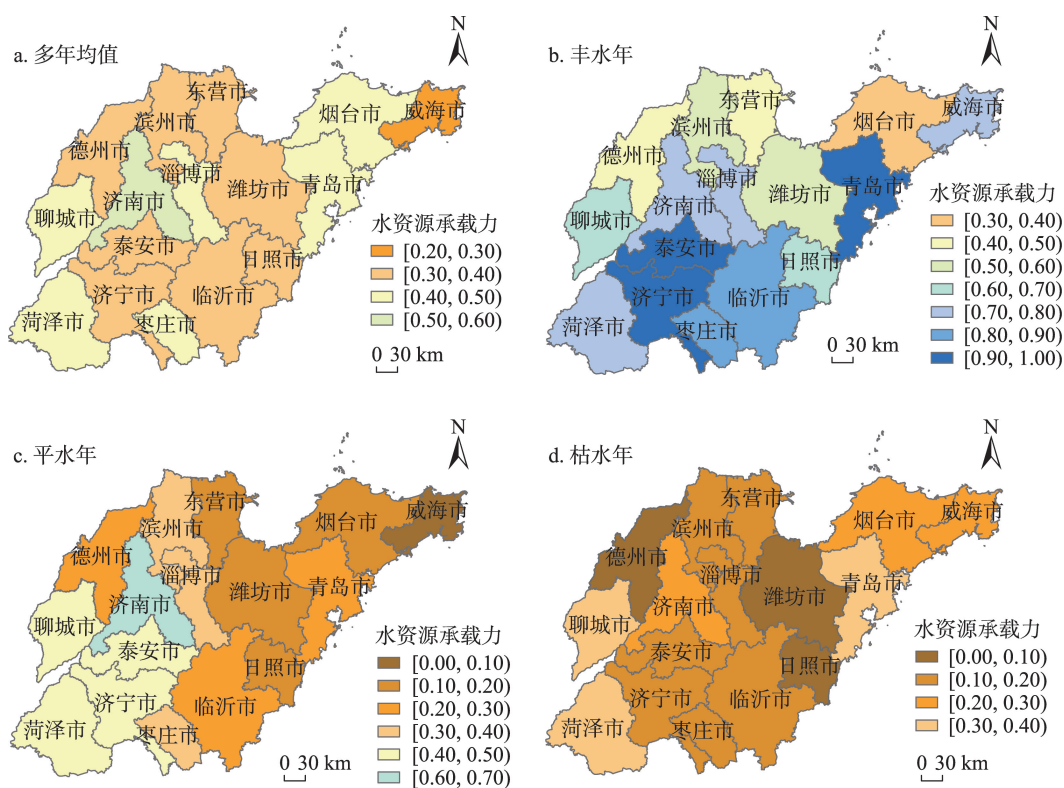


图2 山东省水资源承载力空间分布

Figure 2 Spatial distribution of water resources carrying capacity in Shandong Province

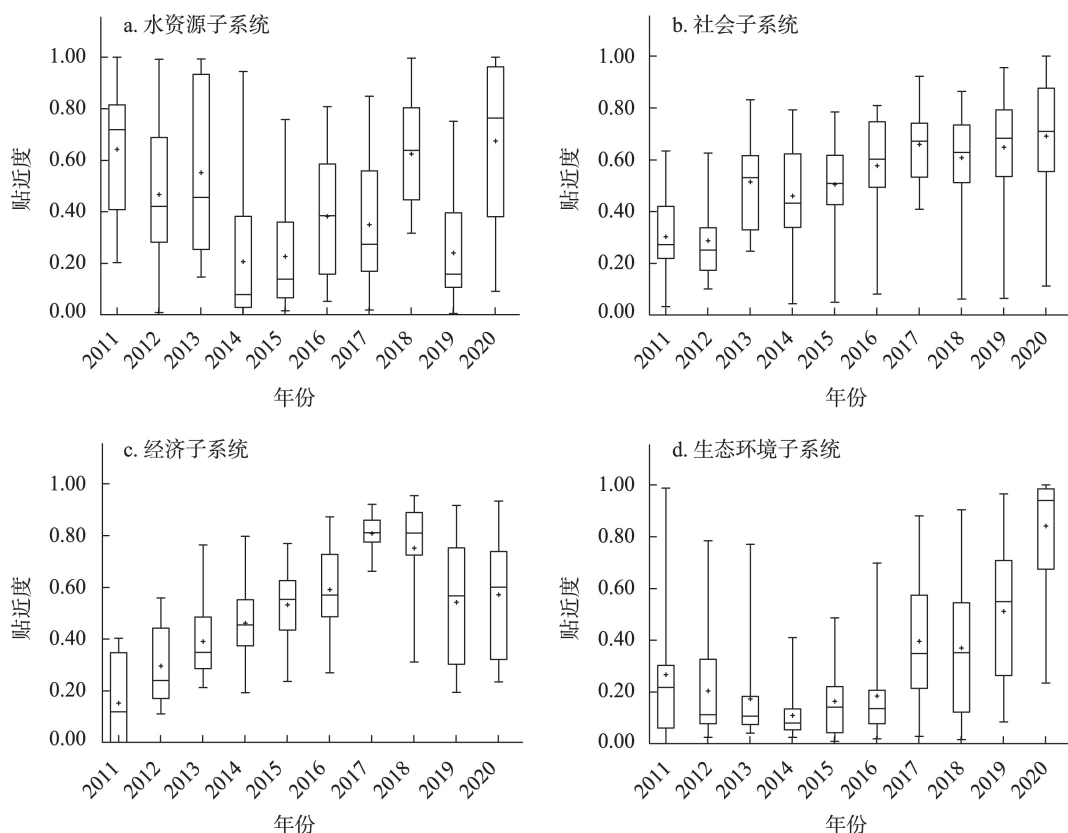


图3 2011—2020年山东省各子系统承载力评价结果

Figure 3 Evaluation results of carrying capacity for each subsystem in Shandong Province, 2011–2020

低(分别为0.21、0.11),而在2020年最高(分别为0.67、0.84),2014—2020年期间的年均增长率分别为32.2%和95.3%,说明两个子系统承载力在2014年之后增加较快,尤其是生态环境子系统承载力增长迅速,这与山东省近年来高度重视生态文明建设密切相关。2011—2020年,社会子系统承载力整体呈波动上升趋势(图3b),年均增长率为12.8%,表明山东省社会发展呈稳中向好的良好趋势。2011—2020年,经济子系统承载力呈先上升后下降的趋势,其在2017年达到最高(0.81)(图3c),年均增长27.5%。

2011—2020年,山东省水资源子系统、社会子系统、经济子系统和生态环境子系统承载力多年均值分别为0.44、0.53、0.51和0.32,说明各个子系统承载力之间存在较大差异。其中,水资源和生态环境子系统承载力较低,主要因为山东省水资源先天禀赋不足且年际波动较大,导致水资源和生态环境子系统较为薄弱。相对而言,社会和经济子系统承载

力较高且总体呈上升趋势,主要是因为山东省经济发展水平较高,经济社会子系统较为稳定,抗干扰能力较强。

3.4 水资源承载力障碍因子诊断

基于障碍度模型对山东省水资源承载力障碍因子的障碍度进行估算(图4)。由图4可知,障碍因子的障碍度排在前5位的是水资源总量、产水模数、生态用水率、地表水资源占比、废水排放量,全部集中在水资源和生态环境子系统。其中,水资源总量是11个地市的第一障碍因子,废水排放量是青岛、淄博和济宁市的第一障碍因子,生态用水率为威海、滨州市的第一障碍因子。从时间变化来看,水资源总量在大多年份保持第1位,生态用水率在2011、2013年为第1位,废水排放量在2018年为第1位,供水模数在2020年为第1位(图5)。障碍因子的障碍度出现在前5位的频次中,水资源总量有10次,产水模数8次,生态用水率7次,地表水资源占比6次,废水排放量5次,进一步说明水资源和生态

2024年3月

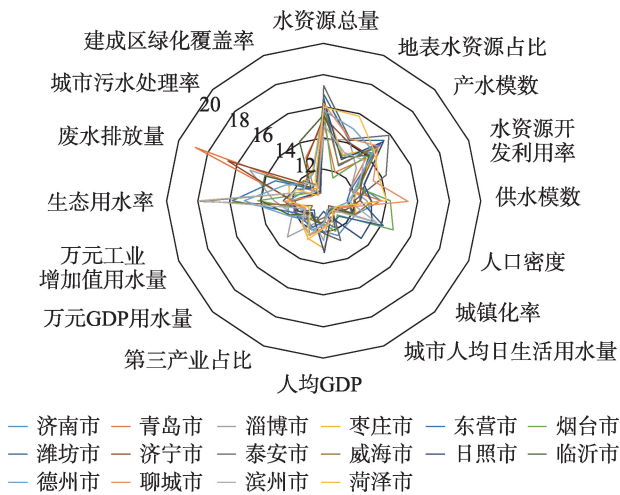


图4 山东省16地市各障碍因子障碍度雷达图

Figure 4 Radar chart of obstacle degree for all factors in 16 cities of

Shandong Province

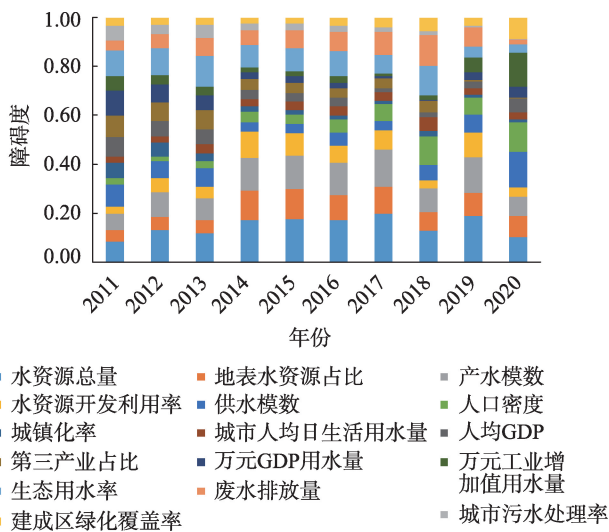


图5 2011—2020年山东省各障碍因子障碍度时间变化

Figure 5 Temporal change of obstacle degree for all factors in Shandong Province, 2011-2020

环境是制约水资源承载力提升的主要障碍。此外,近几年人口密度、供水模数和万元工业增加值用水量对水资源承载力的影响也日趋显著,值得关注。

4 讨论

4.1 TOPSIS模型估算结果合理性分析

水资源承载力指标的选取、指标体系的构建、权重的核算以及应用的定量评价方法等均会给水资源承载力的估算结果带来不确定性。为此,有必要对本文估算结果的合理性进行分析。基于早期研究成果(山东部分地市)对TOPSIS模型估算的

结果进行检验,发现本文对潍坊市水资源承载力的估算结果与Yang等^[33]基于多准则妥协解排序法(VIKOR)的估算结果,以及本文对青岛市水资源承载力的估算结果与Yang等^[34]基于系统动力学模型的估算结果基本一致,这说明本文构建的水资源承载力指标体系及应用TOPSIS模型对山东省水资源承载力的估算结果是比较理想的。

4.2 水资源承载力时间变化原因分析

山东省水资源承载力的时间变化与水资源子系统承载力基本一致(图1和图3a),丰水期最高、枯水期最低,说明水资源承载力受水资源丰枯变化影响显著(图6、表2)。2014、2015年全省降水量明显偏低(图7),较2011—2020年均值分别偏少22.2%、12.8%,导致水资源总量也急剧下降,进而使得该时期水资源承载力较低。2015年后,年降水量总体呈增长趋势,水资源总量也逐渐增加,使得水资源承载力呈现上升趋势,至丰水年(2020年)达到最高。

除受降水量和水资源总量的影响外,山东省水资源承载力也受到产水模数、生态用水率、地表水资源占比、废水排放量等其他障碍因子的影响,虽然它们与水资源承载力之间的相关性不显著(表2)。另外,经济社会发展水平、产业结构布局、水资源利用效率等因素也会对水资源承载力产生影响。例如,近年来,山东省高度重视产业绿色转型提升和节水型社会与生态文明建设,大力推动产业结构优化升级、节水技术进步及污水处理提质增

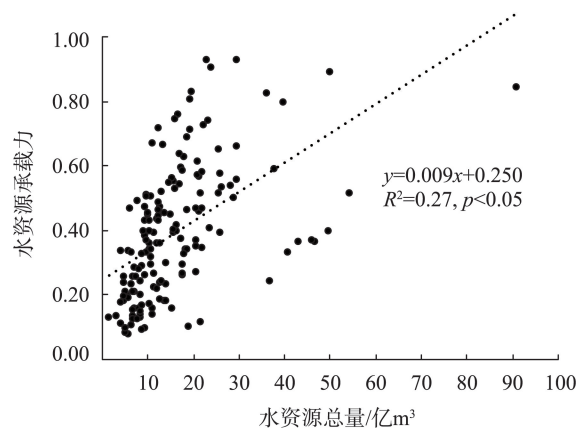


图6 2011—2020年山东省水资源承载力与水资源总量的关系

Figure 6 Relationship between water resources carrying capacity and total amount of water resources in Shandong Province, 2011-2020

表2 2011—2020年山东省水资源承载力与各指标之间的相关性分析结果

Table 2 Relationships between water resources carrying capacity and various factors in Shandong Province, 2011-2020

指标	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9
相关系数	0.52**	-0.11	0.05	-0.01	0.18*	0.08	-0.09	0.04	-0.15
指标	x10	x11	x12	x13	x14	x15	x16	降水量	
相关系数	0.08	0.25**	0.08	0.09	-0.03	-0.13	0.01	0.34**	

备注：*表示显著性水平 $p<0.05$ ，**表示显著性水平 $p<0.01$ 。

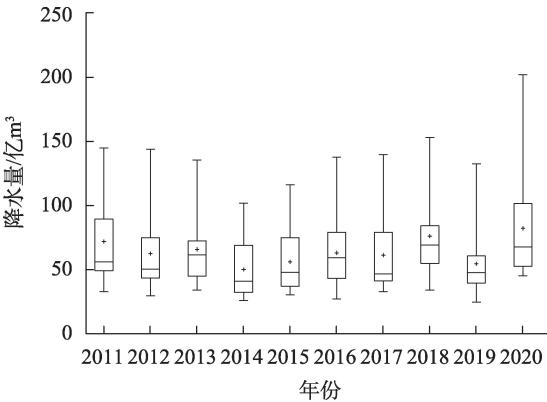


图7 2011—2020年山东省降水量年际变化

Figure 7 Change of precipitation amount in Shandong Province, 2011-2020

效,使得水资源利用效率得到显著提升^[35]。以2020年为例,山东省万元GDP用水量 29.7 m^3 ,万元工业增加值用水量 7.7 m^3 ,分别较2011年下降69.6%、45.6%,规模以上工业企业用水重复利用率达到92%,均位居全国前列^[35]。用水效率的提升相应地提高了水资源承载力。由表2、图8可见,山东省水

资源承载力与万元GDP用水量呈显著正相关关系,由此证明用水效率对水资源承载力有明显促进作用。

4.3 水资源承载力空间差异原因分析

丰水年(2020年),鲁西北地区水资源承载力总体较低(图2b)主要是因为鲁西北农业发达,经济发展水平不高,用水效率在全省最低^[35]。对照而言,胶东半岛(烟台市除外)、鲁南以及鲁中大部分地市水资源承载力较高(图2b),主要因为其水资源利用效率总体较高或水资源量相对较为丰富^[35]。分地市来看,青岛市水资源承载力最大(图2b),主要因为青岛市经济发展水平高(图9),产业结构合理,用水效率在全省最高^[35]。对照而言,烟台市经济发展水平虽然也较高(图9),但水资源总量是该市水资源承载力的第一障碍因子,尤其是近几年明显偏低的水资源量阻碍了水资源承载力的提升。烟台市属于全省严重缺水城市^[36],水资源短缺问题异常突出,这也使得该市水资源承载力相对较低。但从多年平

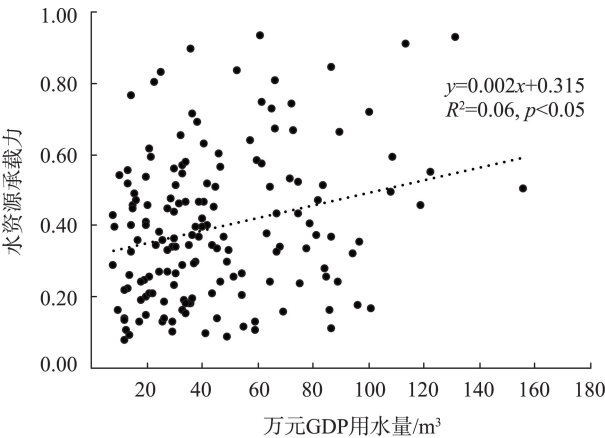


图8 2011—2020年山东省WRCC与万元GDP用水量的关系

Figure 8 Relationship between water resources carrying capacity and water consumption per 1×10^4 yuan GDP in Shandong Province, 2011-2020

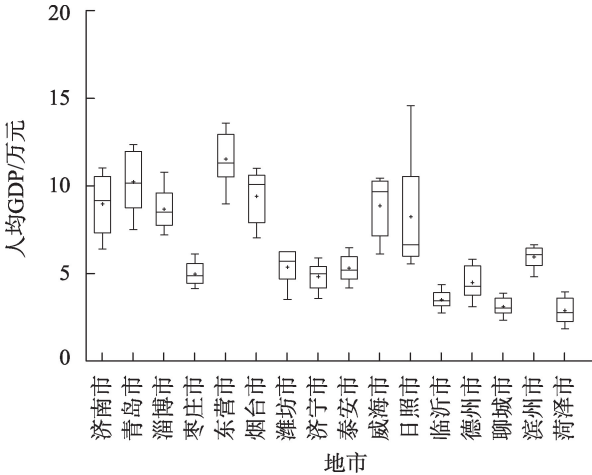


图9 2011—2020年山东省16地市人均GDP分布

Figure 9 Distribution of per capita GDP of 16 cities in Shandong Province, 2011-2020

2024年3月

均状况来看,烟台市水资源承载力相对其他地市而言尚可(图2a)。平水年(2016年),山东省水资源承载力自西南向东北降低,主要是与产水模数等水资源禀赋条件的空间分布密切相关($p<0.01$)。枯水年,全省水资源承载力因受水资源条件的约束而偏低,空间差异不明显。

4.4 未来展望与建议

综上所述,丰水年(2020)山东省水资源承载力尚好(图2b),但就多年平均水平而言,水资源承载力总体较低,遇枯水年则极低。虽有黄河客水资源的补充(70亿 m^3/a),但全省水资源依然匮乏。尤其是黄河流域近年来自然条件及流域用水结构、供水格局均发生显著变化^[37-40],黄河天然径流量已由“八七”分水方案时的580亿 m^3/a 减少至2001—2017年的456亿 m^3/a (-21.4%),可供水量也由370亿 m^3 减少至330亿 m^3 以下^[41],相应地,山东省分配的黄河用水指标可能不足70亿 m^3/a 。2013年开通的南水北调东线工程能为山东省提供重要水源补充,有学者也倡议山东省多用南水北调水和海水淡化水,从而替换出部分黄河耗水量指标^[42],但南水北调水水价偏高且水质不稳定,使得山东省水资源紧张形势仍将难以缓解。针对全省水资源匮乏及水资源承载力较弱的特点,开源节流和提质增效是当前及未来山东省生态优先保护和经济社会高质量发展的关键。为保障经济社会高质量发展的用水安全,全省应严格落实水资源管理制度和“三条红线”,充分挖掘和进一步提升水资源利用效率,尤其要加大鲁西北和鲁南地区的农业和工业节水力度^[35]。另外,山东省应发挥地域优势加大微咸水、海水淡化水等非常规水资源的利用水平,同时逐步提升再生水的利用比例,多措并举补充淡水资源、缓解用水压力。

5 结论

本文结合综合赋权法和TOPSIS模型、障碍度模型对2011—2020年山东省16个地市的水资源承载能力进行了定量评价,并探讨了其在不同水平年的分布特征,最后对其障碍因子进行诊断。主要结论如下:

(1)2011—2020年,山东省水资源承载力呈先下降后上升的趋势,但总体较低。其在丰水年最高

(0.68)、枯水年最低(0.19)。水资源和生态环境子系统承载力的变化趋势与水资源承载力基本一致且也较低,而社会和经济子系统较为稳定,其承载力总体呈上升趋势。

(2)水资源承载力表现出明显的区域差异。就多年平均水平,全省水资源承载力总体较差,即使水资源承载力最高的济南市也仅0.51,威海市更是低至0.24。从丰水年(2020年)来看,青岛、泰安、济宁、枣庄和临沂市水资源承载力较高(>0.80);烟台市最低(0.30),主要因为烟台市水资源尤为短缺;鲁西北水资源承载力在全省也较低,主要因为较低的经济水平发展和较低的水资源利用效率。平水年,山东省水资源承载力自西南向东北总体呈降低态势。枯水年,全省各地市水资源承载力均较低,空间差异不明显。

(3)水资源总量、产水模数、生态用水率、地表水资源占比、废水排放量是水资源承载力的主要障碍因子,因此水资源和生态环境是制约水资源承载力提升的主要障碍;水资源总量为第一障碍因子,因此水资源短缺是山东省水资源承载力提升的最大障碍。针对全省水资源匮乏的特点,开源节流和提质增效是当前及未来山东省生态优先保护和经济社会高质量发展的关键。

参考文献(References):

- [1] Wu C G, Zhou L Y, Jin J L, et al. Regional water resource carrying capacity evaluation based on multidimensional precondition cloud and risk matrix coupling model[J]. Science of the Total Environment, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136324.
- [2] Li Y Q, Zhang J, Song Y Y. Comprehensive comparison and assessment of three models evaluating water resource carrying capacity in Beijing, China[J]. Ecological Indicators, 2022, DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109305.
- [3] 马继敏, 脱云飞, 王倩, 等. 基于GRA-TOPSIS法云南省水资源承载力评价及障碍因子诊断[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(2): 11-17. [Ma J M, Tuo Y F, Wang Q, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in Yunnan Province based on GRA-TOPSIS and diagnosis of its obstacle factors[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2022, 33(2): 11-17.]
- [4] 丁相毅, 石小林, 凌敏华, 等. 基于“量-质-域-流”的太原市水资源承载力评价[J]. 南水北调与水利科技, 2022, 20(1): 9-20.

- [Ding X Y, Shi X L, Ling M H, et al. Evaluation of water resources carrying capacity based on quantity-quality-domain-flow in Taiyuan City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(1): 9-20.]
- [5] 黄昌硕, 耿雷华, 颜冰, 等. 水资源承载力动态预测与调控: 以黄河流域为例[J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 59-67. [Huang C S, Geng L H, Yan B, et al. Dynamic prediction and regulation of water resource carrying capacity: A case study on the Yellow River basin[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(1): 59-67.]
- [6] Trambly Y, Jarlan L, Hanich L, et al. Future scenarios of surface water resources availability in North African Dams[J]. Water Resources Management, 2018, DOI: 10.1007/s11269-017-1870-8.
- [7] Rijsberman M A, van de Ven F H M. Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water systems[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2000, 20(3): 333-345.
- [8] Milano M, Ruelland D, Dezetter A, et al. Modeling the current and future capacity of water resources to meet water demands in the Ebro basin[J]. Journal of Hydrology, 2013, 500: 114-126.
- [9] Widodo B, Lupyanto R, Sulistiono B, et al. Analysis of environmental carrying capacity for the development of sustainable settlement in Yogyakarta urban area[J]. Procedia Environmental Sciences, 2015, 28: 519-527.
- [10] Deng Z H, Dai L Q, Deng B, et al. Evaluation and spatial-temporal evolution of water resources carrying capacity in Dongting Lake Basin[J]. Journal of Water and Climate Change, 2021, 12(5): 2125-2135.
- [11] Hartmann A, Goldscheider N, Wagener T, et al. Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches[J]. Reviews of Geophysics, 2014, 52(3): 218-242.
- [12] Zuo Q T, Guo J H, Ma J X, et al. Assessment of regional-scale water resources carrying capacity based on fuzzy multiple attribute decision-making and scenario simulation[J]. Ecological Indicators, 2021, DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108034.
- [13] Wang T Z, Jian S Q, Wang J Y, et al. Dynamic interaction of water-economic-social-ecological environment complex system under the framework of water resources carrying capacity[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133132.
- [14] 田培, 王瑾钰, 花威, 等. 长江中游城市群水资源承载力时空格局及耦合协调性[J]. 湖泊科学, 2021, 33(6): 1871-1884. [Tian P, Wang J Y, Hua W, et al. Temporal-spatial patterns and coupling coordination degree of water resources capacity of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(6): 1871-1884.]
- [15] 张凯, 陆海曙, 陆玉梅. 三重属性约束的承载力视角下中国省际水资源利用效率测度[J]. 资源科学, 2021, 43(9): 1778-1793.
- [Zhang K, Lu H S, Lu Y M. Measurement of inter-provincial water resource use efficiency in China from the perspective of carrying capacity with triple attribute constraints[J]. Resources Science, 2021, 43(9): 1778-1793.]
- [16] 赵磊, 王立权, 戴长雷, 等. 基于DPSIRM模型的太原市水资源承载力研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(2): 105-108. [Zhao L, Wang L Q, Dai C L, et al. Research on water resources carrying capacity of Taiyuan City based on DPSIRM model[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2021, 32(2): 105-108.]
- [17] 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 Y H, Li Y B, Liang X Y, 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.]
- [18] 张樨樨, 曹正旭, 张仁杰, 等. 黄河三角洲生态经济区水资源承载力评价及趋势预测[J]. 世界地理研究, 2022, 31(3): 549-560. [Zhang X X, Cao Z X, Zhang R J, et al. Evaluation and prediction of water resource carrying capacity in eco-economic zone of Yellow River Delta[J]. World Regional Studies, 2022, 31(3): 549-560.]
- [19] 余灏哲, 李丽娟, 李九一. 基于量-质-域-流的京津冀水资源承载力综合评价[J]. 资源科学, 2020, 42(2): 358-371. [Yu H Z, Li L J, Li J Y. Evaluation of water resources carrying capacity in the Beijing-Tianjin-Hebei Region based on quantity-quality-water bodies-flow[J]. Resources Science, 2020, 42(2): 358-371.]
- [20] 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 Q L, Dong Z C, Yang Y F, 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.]
- [21] 金菊良, 刘东平, 周戎星, 等. 基于投影寻踪权重优化的水资源承载力评价模型[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 1-6. [Jin J L, Liu D P, Zhou R X, et al. Evaluation model of water resources carrying capacity based on projection pursuit weight optimization[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 1-6.]
- [22] 林龙圳, 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 L Z, Li D, Lin Z. 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.]
- [23] Zhang J, Dong Z C. Assessment of coupling coordination degree and water resources carrying capacity of Hebei Province (China) based on WRESP2D2P framework and GTWR approach[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, DOI: 10.1016/j.scs.2022.103862.

2024年3月

- [24] Zhou K. Comprehensive evaluation on water resources carrying capacity based on improved AGA-AHP method[J]. Applied Water Science, 2022, DOI: 10.1007/s13201-022-01626-2.
- [25] Liu H Y, Xia J, Zou L, et al. Comprehensive quantitative evaluation of the water resource carrying capacity in Wuhan City based on the “human-water-city” framework: Past, present and future [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro. 2022.132847.
- [26] 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 Q T, Zhang Z Z, Wu B B. 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.]
- [27] 李少朋, 赵衡, 王富强, 等. 基于AHP-TOPSIS模型的江苏省水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 20-25. [Li S P, Zhao H, Wang F Q, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Jiangsu Province based on AHP-TOPSIS model[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 20-25.]
- [28] 阳斌成, 张家其, 罗伟聪, 等. 基于TOPSIS及耦合协调度的湖南省2009-2018年水资源承载力综合评价[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 357-364. [Yang B C, Zhang J Q, Luo W C, et al. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Hu'nan Province during 2009-2018 based on TOPSIS and coupling correlation development[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 357-364.]
- [29] 张衍广, 林振山, 陈玲玲. 山东省水资源承载力的动力学预测[J]. 自然资源学报, 2007, (4): 596-605. [Zhang Y G, Lin Z S, Chen L L. Prediction on the dynamics of water resource carrying capacity in Shandong Province[J]. Journal of Natural Resources, 2007, (4): 596-605.]
- [30] 黄佳, 徐晨光, 满洲. 基于生态足迹的山东省水资源承载力研究[J]. 人民长江, 2019, 50(2): 115-121. [Huang J, Xu C G, Man Z. Research on water resources carrying capacity of Shandong Province based on ecological footprint[J]. Yangtze River, 2019, 50(2): 115-121.]
- [31] 武毅, 李祥, 马中雨, 等. 基于支持向量机的山东省水资源承载力评价[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(2): 893-901. [Wu Y, Li X, Ma Z Y, et al. Water resources carrying capacity evaluation based on the support vector machine in Shandong Province[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(2): 893-901.]
- [32] 赵强, 李秀梅, 高倩, 等. 基于模糊综合评判的山东省水资源承载力评价[J]. 生态科学, 2018, 37(4): 188-194. [Zhao Q, Li X M, Gao Q, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in Shandong Province based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Ecological Science, 2018, 37(4): 188-194.]
- [33] Yang H Y, Tan Y N, Sun X B, et al. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity and analysis of obstacle factors in Weifang City based on hierarchical cluster analysis-VIKOR method[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(2): 1-17.
- [34] Yang L, Wang L. Comprehensive assessment of urban water resources carrying capacity based on basin unit: A case study of Qingdao, China[J]. Water Supply, 2022, 22(2): 1347-1359.
- [35] 姜德娟, 李丽娟. 2011-2020年山东省水资源利用效率及动态分析[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(3): 10-18. [Jiang D J, Li L J. Analysis of water use efficiency and its dynamics in Shandong Province during 2011-2020[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2023, 34(3): 10-18.]
- [36] 刘晓军. 烟台市套子湾污水厂双膜法再生水工程设计[J]. 中国给水排水, 2022, 38(10): 79-82. [Liu X J. Design of double membrane reclaimed water project of Yantai Taiziwan wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(10): 79-82.]
- [37] 陈琛, 郭甲嘉, 沈大军. 黄河流域水量分配和再分配[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 799-812. [Chen C, Guo J J, Shen D J. Water resources allocation and re-allocation of the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 799-812.]
- [38] 王煜, 彭少明, 周翔南, 等. 基于增量动态均衡配置的黄河分水方案优化方法研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 48-55. [Wang Y, Peng S M, Zhou X N, et al. Water allocation scheme optimization in the Yellow River based on incremental dynamic equilibrium configuration[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 48-55.]
- [39] 王煜, 彭少明, 尚文绣, 等. 基于水-沙-生态多因子的黄河流域水资源动态配置机制探讨[J]. 水科学进展, 2021, 32(4): 534-543. [Wang Y, Peng S M, Shang W X, et al. Study on the dynamic allocation mechanism of water resources in the Yellow River basin considering runoff, sediment and ecosystem[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(4): 534-543.]
- [40] 王忠静, 娄俊鹏. 关于黄河“八七”分水方案调整的几点思考[J]. 人民黄河, 2022, 44(8): 1-5. [Wang Z J, Lou J P. Some thoughts on the adjustment of water resources allocation of “87 Scheme” of Yellow River[J]. Yellow River, 2022, 44(8): 1-5.]
- [41] 刘晓燕, 王瑞玲, 张原锋, 等. 黄河河川径流利用的阈值[J]. 水利学报, 2020, 51(6): 631-641. [Liu X Y, Wang R L, Zhang Y F, et al. Threshold of the runoff utilization of the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(6): 631-641.]
- [42] 贾绍凤, 梁媛. 新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 29-36. [Jia S F, Liang Y. Suggestions for strategic allocation of the Yellow River water resources under the new situation[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 29-36.]

Dynamic evaluation of water resources carrying capacity in Shandong Province based on the comprehensive weight and TOPSIS model

JIANG Dejuan^{1,4}, YU Haozhe², LI Lijuan³

(1. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, CAS, Yantai 264003, China; 2. School of Humanities, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China; 3. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 4. Shandong Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, Yantai 264003, China)

Abstract: [Objective] The GDP of Shandong Province ranks among the top in China, and the province has an important strategic position in the regional development of China. However, water shortage has been restricting the rapid socioeconomic development in Shandong Province. The research on water resources carrying capacity (WRCC), as an important indicator of rigid constraint of water resources, is crucial for regional sustainable development. [Methods] This study quantitatively evaluated the WRCC of 16 cities in Shandong Province during 2011-2020 and explored its distribution in different hydrological years, using the comprehensive weighting method and TOPSIS model. Then, the obstacle degree model was applied to diagnose the main obstacle factors of WRCC. [Results] This research found that: (1) Water resources carrying capacity was the highest (0.68) for the wet year (2020) but lowest (0.19) for the dry year (2014), which was overall weak (0.39) in Shandong Province. From 2011 to 2020, WRCC decreased first and then increased, which changed with the water resources endowment. (2) Spatially, WRCC showed an obvious regional difference. Annual average WRCC over the whole province was overall low, with the the highest in Jinan City (0.51) and the lowest in Weihai City (0.24). In the wet year, WRCC of most cities were relatively high, but the lowest was found in Yantai City (0.30) and WRCC was also low in northwest Shandong Province. In the normal year, WRCC overall decreased from the southwest to the northeast of the province. In the dry year, WRCC for all cities was low and thus showed insignificant difference. (3) Total amount of water resources, water production modulus, ecological water use ratio, surface water resources proportion, and wastewater discharge were the main obstacle factors of WRCC. Accordingly, water resources and ecological environment were the main obstacles to WRCC improvement. [Conclusion] Due to the water scarcity and low WRCC, at present and in the future, expanding water sources and reducing expenditure as well as improving quality and increasing efficiency will be crucial for the ecological priority protection and high-quality socioeconomic development in Shandong Province.

Key words: water resources carrying capacity; comprehensive weight; TOPSIS model; obstacle degree model; Shandong Province