

基于 CRITIC-GR-TOPSIS 法的烟台市 水资源承载力综合评价

杨海燕¹, 付凯¹, 孙晓博², 谭轶男¹

[1.北京建筑大学 北京应对气候变化研究和人才培养基地,

北京 100044; 2.中规院(北京)规划设计有限公司生态市政院, 北京 100044]

摘要: [目的] 对山东省烟台市水资源承载具体状况进行定量与定性分析, 提出相应提高水资源承载力的对策和建议, 为实现烟台市水资源可持续发展提供科学参考。[方法] 建立涵盖水资源、社会、经济和水环境 4 个准则层的评价指标体系, 运用 CRITIC-GR-TOPSIS 法, 对 2003—2018 年烟台市水资源承载力进行综合评价, 以相对贴适度 C_j 作为综合评价值, C_j 越大表明水资源承载力越高, 并采用障碍度模型量化各指标对水资源承载力的影响程度。[结果] 2003—2018 年烟台市水资源承载力整体呈现上升趋势, 从 2003 年的 0.449 7 上升至 2018 年的 0.578 3。通过障碍度模型计算发现, 社会和水环境子系统内各指标对于水资源承载力的影响不断加大, 而经济子系统相关指标对烟台市水资源承载力的影响不断减弱, 水资源子系统内各指标则在此期间保持稳定且较高的影响水平。[结论] 2003—2018 年烟台市水资源承载力有所上升, 但其上升幅度并不明显, 未来仍有广阔的提升空间。

关键词: CRITIC 法; TOPSIS 法; 灰色关联度; 障碍度; 水资源承载力; 山东省烟台市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2021)02-0215-07

中图分类号: X32, TX213, F205

文献参数: 杨海燕, 付凯, 孙晓博, 等. 基于 CRITIC-GR-TOPSIS 法的烟台市水资源承载力综合评价[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 215-221. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.02.029; Yang Haiyan, Fu Kai, Sun Xiaobo, et al. Comprehensive evaluation and obstacle factor diagnosis of water resources carrying capacity in Yantai City based on CRITIC-GR-TOPSIS method [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 215-221.

Comprehensive Evaluation and Obstacle Factor Diagnosis of Water Resources Carrying Capacity in Yantai City Based on CRITIC-GR-TOPSIS Method

Yang Haiyan¹, Fu Kai¹, Sun Xiaobo², Tan Yanan¹

[1. Beijing Climate Change Response Research and Education Center, Beijing University of

Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Ecological and Municipal Infrastructure Planning & Design Institute(Beijiang), CAUPD Beijing Planning & Design Consultants LTD, Beijing 100044, China]

Abstract: [Objective] The specific situation of water resources carrying capacity in Yantai City of Shandong Province was quantitatively and qualitatively analyzed, and the corresponding countermeasures and suggestions was put forward to improve the water resources carrying capacity, in order to provide a reference for the sustainable development of water resources in Yantai City. [Methods] The evaluation index system covering water resources, society, economy and water environment was established, and the comprehensive evaluation of the water resources carrying capacity of Yantai City from 2003 to 2018 was carried out by CRITIC-GR-TOPSIS method, with a relative closeness C_j as a comprehensive evaluation value. The larger the C_j , the higher the water resources carrying capacity. The obstacle degree model was used to quantify the impact of each indicator on the water resources carrying capacity. [Results] From 2003 to 2018, the water resources carrying capacity of Yantai City showed an overall upward trend, from 0.449 7 in 2003 to 0.578 3 in 2018. Through the calculation of the obstacle degree model, it was found that the influence of each index of the social and

收稿日期: 2020-11-18

修回日期: 2020-12-16

资助项目: 住房和城乡建设部研究开发项目“建筑排水管道系统卫生性能与安全研究及示范”(K20200746); 北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项资金资助项目“城市尺度范围的水资源与水环境领域的研究(X20066)”

第一作者: 杨海燕(1976—), 女(汉族), 北京市人, 博士, 副教授, 主要从事非传统水源的应用、药品和个人护理品的控制技术方面的研究。
Email: yanghaiyan@bucea.edu.cn.

water environment subsystems on the carrying capacity of water resources continues to increase, while the impact of the related index of the economic subsystem on the carrying capacity of water resources in Yantai City was weakening. Each index of the water resources subsystem maintained a stable and high level of influence during this period. [Conclusion] From 2003 to 2018, the water resources carrying capacity of Yantai City has increased, but the increase rate, is not obvious, and there is still broad space for improvement in the future.

Keywords: CRITIC method; TOPSIS method; grey relational degree; degree; water resources carrying capacity; Yantai City of Shandong Province

水资源作为一种宝贵的基础性自然资源,与人类的生存和社会的发展密切相关,随着社会经济的快速发展,对水资源的需求量持续上升,因此产生了水资源短缺、水资源供需不平衡等一系列水资源安全问题,制约经济社会的可持续发展^[1-2]。水资源承载力综合评价是进行水资源宏观调控和合理配置的主要依据,是对水资源、社会、经济和生态环境的综合反应,对区域水资源的合理开发利用具有指导意义^[3]。关于水资源承载力的定义,国内外诸多学者尽管在具体表述上不尽相同,但在本质上都强调了水资源承载力研究的核心在于确定在一个区域的水资源量能够支撑社会经济系统的最大发展规模^[4-7]。因此,水资源承载力综合评价可以从水资源、社会、经济、水环境等方面进行综合分析。目前研究人员常用的综合评价方法主要包括主成分分析法(PCA)、模糊综合评价法(PCE)、多准则妥协解排序法(VIKOR)、逼近理想解排序法(TOPSIS)等。其中,TOPSIS法因具有简单的计算原理,并能提供直观可靠的结果而被诸多研究人员应用于水资源承载力综合评价领域之中^[8-10]。但TOPSIS法本身也存在一定的缺陷,它通过计算实际方案与理想方案之间的欧氏距离来判断两者的差异程度,此种距离测度方法所得到的数值是一个刚性的解,并未考虑两者形状上的相似关系,并且TOPSIS法对于各指标的偏好程度并不重视,不同的指标赋权方法可能会出现不同的评价结果^[11]。此外,TOPSIS法的评价结果只通过相对贴进度的大小来表示整体水平的发展趋势,无法对评价对象进行深度分析。有研究人员发现,灰色关联度(grey relationa)、CRITIC法和障碍度模型的加入可有效弥补TOPSIS法的不足^[12-13]。灰色关联度可以在TOPSIS法计算欧氏距离的基础之上加入形状上的相似程度分析,CRITIC法可以客观的对指标进行赋权,使结果更具有合理性与真实性。障碍度模型被用来量化各指标对水资源承载力的影响程度,识别影响水资源承载力的主要障碍因素,为未来提高水资源承载力提供理论依据^[14]。目前,CRITIC法、灰色关联度和障碍度模型已在水资源领域有所应用^[15-17],但将其组合分析用于水资源承载力综合评价方面的研究暂未发现。为

此,本文以山东省烟台市为例,构建水资源承载力综合评价指标体系,通过TOPSIS法进行分析,利用CRITIC法确定权重,结合灰色关联度进行形状相似程度分析等方式改进TOPSIS法的不足,对烟台市水资源承载力进行综合评价,并利用障碍度模型识别出其主要障碍因素,对烟台市未来水资源规划和保护提出合理建议。

1 研究方法

1.1 评价指标体系构建

影响水资源承载力的指标因素是复杂多样的,涉及到资源、社会、经济、生态环境等各个方面^[18]。因此,水资源承载力指标的选取应在遵循综合性、动态性、精确性、可获得性和协调性5个原则基础之上选择合理的指标^[19]。本文在依据以上原则并参考其他研究成果的基础上^[20-22],从水资源、社会、经济和水环境4个方面进行了评价指标的选择,共计选取评价指标15个。各评价指标的性质分为效益型指标和成本型指标,效益性指标为越大越优型指标,成本型指标为越小越优型指标。烟台市水资源承载力综合评价指标体系详见表1。

1.2 CRITIC-GR-TOPSIS法

1.2.1 CRITIC法 CRITIC法是通过计算评价指标的变异性和冲突性来确定各个指标的客观权重,可以确保各个指标原始数据中的信息能被充分利用^[23-24]。传统CRITIC法中变异性的用标准差表示,但有研究人员认为使用标准差来反应变异性可能会出现误差较大而导致准确度较低的现象^[25]。并且有研究人员发现改用平均差表示变异性以后,会克服上述缺点,使结果更为客观全面^[26]。故本文采用平均差替换标准差的CRITIC法计算相关指标权重,计算公式为:

$$E_j = AD_j \sum_{i=1}^m (1 - \rho_{ij}) \quad (1)$$

$$\omega_j = \frac{E_j}{\sum_{i=1}^m E_j} \quad (2)$$

式中: E_j 为第 j 个指标所含有的信息量; AD_j 为第 j 个指标的平均差; ω_j 为第 j 个指标的权重系数; ρ_{ij} 代表第 i,j 两个指标的相关系数。

表 1 烟台市水资源承载力综合评价指标体系

目标层	准则层	指标层	计算方法	指标性质
水资源承载力	水资源系统 B ₁	产水模数 C ₁	水资源总量/区域面积	+
		供水模数 C ₂	供水量/区域面积	-
		人均水资源量 C ₃	水资源总量/人口总量	+
		水资源开发利用效率 C ₄	供水量/水资源总量	-
	社会系统 B ₂	人口密度 C ₅	统计数据	-
		城镇恩格尔系数 C ₆	统计数据	-
		城镇化率 C ₇	统计数据	+
		生活用水总量 C ₈	统计数据	-
	经济系统 B ₃	生产总值 C ₉	统计数据	+
		万元生产总值用水量 C ₁₀	总用水量/国内生产总值	-
		万元工业增加值用水量 C ₁₁	工业总用水量/工业总增加值	-
		第三产业占比 C ₁₂	第三产业生产总值/国内生产总值	+
	水环境系统 B ₄	污水排放量 C ₁₃	统计数据	-
		污水处理率 C ₁₄	统计数据	+
		城市绿化覆盖率 C ₁₅	统计数据	+

注：“+”为效益型指标，“-”为成本型指标。

1.2.2 标准化数据 对数据进行标准化处理是为了消除不同指标因为量纲的不同所带来的影响,计算公式为:

对于效益型指标:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (a_{ij}^2)}} \quad (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

对于成本型指标:

$$r_{ij} = \frac{1/a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (1/a_{ij}^2)}} \quad (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad (4)$$

式中: r_{ij} 为标准化后的指标。

1.2.3 构建加权决策矩阵 将各指标权重与标准化后的指标数据相结合,构建加权决策矩阵 R , 计算公式为:

$$R = (r_{ij})_{m \times n} \quad [r_{ij} = \omega_i \times f(i, j); i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n] \quad (5)$$

式中: ω_i 为权重矩阵; $f(i, j)$ 为无量纲化矩阵。

1.2.4 确定正负理想解 根据加权决策矩阵,采用最大最小值法确定各指标的正负理想解,计算公式为:

$$R^+ = \{ \max_{1 \leq i \leq m} R_{ij} \} = [r_1^+, r_2^+, \dots, r_m^+] \quad (6)$$

$$R^- = \{ \max_{1 \leq i \leq m} R_{ij} \} = [r_1^-, r_2^-, \dots, r_m^-] \quad (7)$$

式中: R^+ 为正理想解; R^- 为负理想解。

1.2.5 计算欧式距离 计算各指标值与正负理想解的欧式距离,计算公式为:

$$d_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - r_i^+)^2} \quad (8)$$

$$d_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - r_i^-)^2} \quad (9)$$

式中: d_j^+ 为指标值与正理想解的欧式距离; d_j^- 为指标值与负理想解的欧式距离。

1.2.6 计算灰色关联度(GR) 灰色关联度是通过比较理想数列与实际数列几何形状的相似程度,来度量两者关联性的大小,它可以在有限的数据库之上对研究对象的动态变化过程进行量化处理,非常适合动态过程的分析^[27-28]。本文采用灰色关联度来刻画各评价指标实际值与正负理想解间相对变化趋势的接近程度,计算公式为:

$$v_j^+ = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\min_i \min_j |r_{ij} - r_i^+| + \rho \max_i \max_j |r_{ij} - r_i^+|}{|r_{ij} - r_i^+| + \rho \max_i \max_j |r_{ij} - r_i^+|} \quad (10)$$

$$v_j^- = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\min_i \min_j |r_{ij} - r_i^-| + \rho \max_i \max_j |r_{ij} - r_i^-|}{|r_{ij} - r_i^-| + \rho \max_i \max_j |r_{ij} - r_i^-|} \quad (11)$$

式中: v_j^+ 为各指标与正理想解的灰色关联度; v_j^- 为各指标与负理想解的灰色关联度; ρ 为分辨系数,本文中 ρ 根据经验以及其他研究成果取 0.5。

1.2.7 计算相对贴近度 TOPSIS 法只考虑了距离上的线性关系而未考虑形状上的非线性关系。本文将灰色关联度分析引入到 TOPSIS 法之中,在计算各指标实际值与正负理想解的欧式距离基础之上,计算各指标实际值与正负理想解的灰色关联度,并通过设定好的偏重系数进行组合后得出改良相对贴近度,使分析结果更具有合理性与可靠性,计算公式为:

对已计算出的欧氏距离和灰色关联度进行无量纲化处理。

$$D_j^+ = \frac{d_j^+}{\max d_j^+}, \quad D_j^- = \frac{d_j^-}{\max d_j^-}, \quad (12)$$

$$U_j^+ = \frac{v_j^+}{\max v_j^+}, \quad U_j^- = \frac{v_j^-}{\max v_j^-}$$

计算每个指标的相对贴近度 C_j 。

$$C_j = \frac{(\alpha_1 U_j^+ + \alpha_2 D_j^-)}{[(\alpha_1 U_j^+ + \alpha_2 D_j^-) + (\alpha_1 U_j^- + \alpha_2 D_j^+)]} \quad (13)$$

式中： α_1 ； α_2 为偏重系数，反映决策者对于距离和形状的偏重程度； $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 。本文中， $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ 。

1.3 障碍度模型

水资源承载力的变化是各个指标共同作用的结果，但 TOPSIS 法无法具体分析各个指标对水资源承载力的影响程度。运用障碍度模型可以进一步诊断影响水资源承载力提升的障碍因素，以便有针对性的为未来水资源承载力的提升提供依据。障碍度模型中的因子分析方法包括因子贡献度与指标偏离度，因子贡献度为单一指标对整个指标体系的影响程度，在本文用各评价指标权重值表示，而指标偏离度为各单项指标的实际值与目标最优值的差异程度，本文中用 1 与各评价指标标准化后得出的数值之差表示^[29-30]。基于此，本文对烟台市水资源承载力进行障碍度分析。计算公式为：

$$Q_{ij} = \frac{F_i I_i}{\sum_{i=1}^m F_i I_i} \quad (14)$$

式中： F_i 为因子贡献度； I_i 为指标偏离度； Q_{ij} 为障碍度，表示第 j 个年份中各指标对水资源承载能力的影响程度，数值越大则表明产生负面作用程度越深。

表 2 烟台市水资源承载评价指标权重

评价指标	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}
权重	0.061 2	0.080 3	0.061 3	0.049 8	0.094 2	0.048 0	0.060 9	0.080 0	0.063 0	0.053 1	0.045 8	0.075 3	0.112 9	0.059 6	0.054 8

根据表 2 确定的各指标权重结合公式(3)–(13)计算烟台市 2003—2018 年水资源承载力及各子系统承载力，结果详见表 3。

表 3 烟台市 2003—2018 年水资源承载力综合评价结果

年份	水资源承载力	水资源子系统	社会子系统	经济子系统	水环境子系统
2003	0.449 7	0.678 3	0.489 1	0.194 4	0.644 6
2004	0.434 9	0.483 2	0.489 1	0.325	0.647 2
2005	0.500 3	0.554 2	0.507 9	0.444 8	0.670 5
2006	0.444 9	0.343 7	0.513 5	0.474 2	0.656 4
2007	0.595 0	0.780 6	0.515 6	0.527 1	0.621 9
2008	0.581 3	0.680 7	0.456 0	0.574 3	0.626 1
2009	0.543 3	0.556 4	0.463 1	0.600 3	0.558 5
2010	0.597 2	0.645 3	0.544 0	0.641 7	0.561 2
2011	0.575 2	0.625 2	0.446 1	0.662 9	0.457 3
2012	0.557 3	0.551 9	0.496 7	0.685 5	0.423 7
2013	0.594 2	0.651 8	0.511 5	0.709 4	0.407 9
2014	0.557 9	0.514 2	0.603 7	0.739 4	0.366 7
2015	0.550 0	0.488 1	0.637 5	0.759 4	0.361 1
2016	0.497 0	0.236 2	0.600 8	0.786 0	0.564 7
2017	0.596 8	0.567 0	0.576 2	0.801 3	0.416 2
2018	0.578 3	0.471 8	0.498 9	0.818 3	0.554 4

2 应用实例

2.1 研究区概况

烟台市是我国华东地区环渤海经济圈内重要节点城市。截至 2018 年，全市总面积 13 864.54 km²，常住人口 712.18 万人，全市生产总值 7 832.58 亿元。烟台市多年平均水资源量为 3.2×10⁹ m³，人均水资源占有量为 487 m³，不足全国水平的 1/5，属于资源型缺水地区。此外，受当地气候及地形条件影响，烟台市具有明显的降雨年内分布不均和年际变化大的特点，同时全市河流大部分为山区型雨源河流，易受降雨影响，导致烟台市旱涝灾害频繁发生，不利于烟台市水资源的开发和利用^[31]。

2.2 数据来源

本文所用到的评价指标相关数据主要来源于《烟台市统计年鉴(2003—2018 年)》，对于其中有所缺失的数据，参照《山东省统计年鉴》《山东省水资源公报》《烟台市水资源公报》等环境基础设施资料进行补充。

2.3 数据计算

将所有评价指标的原始数据汇总之后，运用以平均差改进的 CRITIC 法计算各评价指标权重系数，结果详见表 2。

2.4 烟台市水资源承载力综合评价

从图 1 可以看出，在 2003—2018 年，烟台市水资源承载力呈现出波动上升的趋势。水资源承载力从 2003 年的 0.449 7 上升至 2018 年的 0.578 3。从具体年份来看，其变化过程可分为两大阶段。第一阶段为低水平波动阶段，时间为 2003—2006 年，烟台市水资源承载力在此阶段水平较低，在 0.450 0 上下浮动。第二阶段为高水平震荡阶段，时间为 2007—2018 年，烟台市水资源承载力自 2006 年的 0.444 9 上升至 2007 年的 0.595 0，而后在此基础上开始小幅度波动，相较于上一阶段，烟台市水资源承载力在此阶段发生较大幅度上升，整体处于较高水平。值得注意的是，烟台市水资源承载力在第二阶段存在低谷期，年份为 2014—2016 年，在此期间烟台市水资源承载力连续三年呈下降趋势，在 2016 年达到第二阶段的最低值 0.497 0。从图 1 可以看出，水资源、社会、经济和水环境 4 个子系统承载力变化趋势不尽相同。其中，水资源子系统波动变化较为明显，最高时可到 2007 年的 0.780 6，最低时可低至 2016 年的 0.236 2，这主

要是因为烟台市水资源天然条件禀赋的不足,同时结合实际发现,水资源子系统承载力易受特殊灾害天气影响。2007 年烟台市受热带风暴影响,全市普降大到暴雨,当年水资源总量从 2006 年的 $1.38 \times 10^9 \text{ m}^3$ 增至 $5.06 \times 10^9 \text{ m}^3$,使得水资源子系统中各个指标都发生了不同程度的提升,因此 2007 年烟台市水资源承载力相比于前几年发生了较大幅度的提升,而在 2014—2016 年,烟台市又受超强厄尔尼诺事件影响,遭遇了极为严重的旱灾,2014 年年降水量较 2013 年减少了 70%,水资源总量在 2016 年达到了近几十年的最低值 $8.54 \times 10^8 \text{ m}^3$,受此影响,烟台市水资源承载力在 2014—2016 年发生了较大幅度的下降。经济子系统承载力在 2003—2018 年呈逐年上升趋势,从 2003 年的 0.194 4 上升至 2018 年的 0.818 3,这是因为,自 2003 年开始,烟台市加快了产业结构调整步伐,使其在经济快速发展的同时用水结构也得以优化。并且烟台市在不断发展经济的同时也积极引进高新节水技术,提高对资源的利用率,从而降低了经济活动对于自然环境产生的压力,说明经济的快速发展虽然会伴随着大量自然资源的消耗,但是随着经济的增长也会使得更多的经济资源能反哺其自然环境的保护与修复。社会子系统承载力在 16 a 间变化较为平稳,在此期间,烟台市城镇化率从 2003 年的 34.90%

上升到 2018 年的 65.07%,且城镇恩格尔系数逐年降低,说明城市经济社会的快速发展极大提高了居民物质生活水平。但在此期间烟台市生活用水总量上升趋势并不明显,这是因为烟台市制定了严格的水资源管理制度,并积极推动节水型社会的建设,使得社会子系统在 2003—2018 年保持相对稳定的状态。水环境子系统承载力则是在 2003—2015 年呈下降趋势,且 2015 年为该子系统承载力的最低水平 0.361 1,在 2015 年后开始出现小幅度的回升,但仍低于其初期水平。综上分析可知,尽管烟台市水资源承载力在 2003—2018 年整体呈现上升趋势,但是受各个子系统的影响,在不同阶段存在不同程度的波动。2007 年,受洪涝灾害影响烟台市水资源总量大幅度提升,进而使得 2007 年烟台市水资源承载力显著提高。2008—2013 年,烟台市水资源承载力在水资源总量回落的情况下,受经济结构的不断改善以及节水型社会的建设等积极因素的影响保持平稳波动态势。2014—2016 年,受旱情影响烟台市水资源承载力持续下降,而在 2017 年旱情结束后烟台市水资源承载力开始回升。烟台市水资源承载力在整个阶段受经济子系统和社会子系统的积极影响呈上升趋势,但由于水资源子系统中水资源总量的不确定性,烟台市水资源承载力易受洪涝或旱情影响发生短期内的突升与突降。

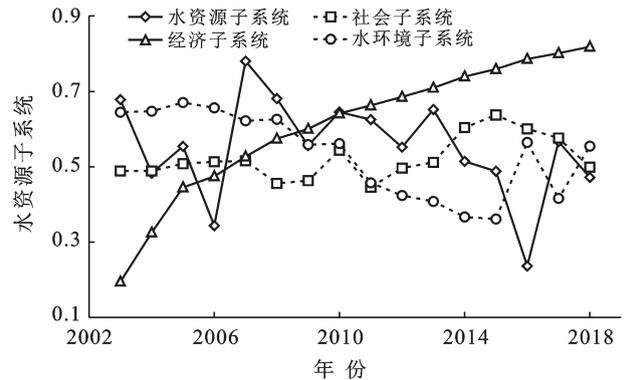
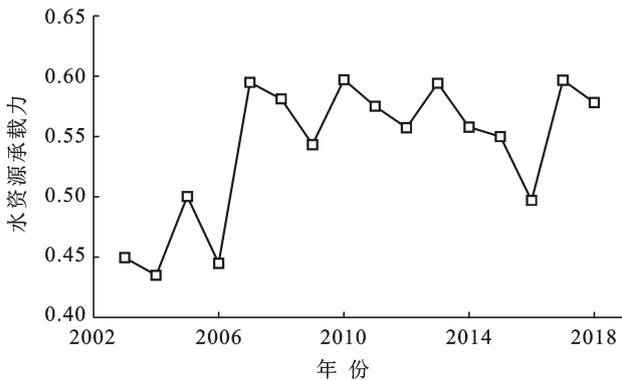


图 1 烟台市 2003—2018 年水资源承载力综合评价结果和各子系统评价结果

2.5 障碍因素分析

为更加准确地分析各评价指标对烟台市水资源承载力影响程度,本文在对烟台市水资源承载力进行综合评价的基础之上,进一步的剖析影响烟台市水资源承载力变化的主要障碍因素。根据障碍度模型,对烟台市 2003—2018 年的水资源承载力障碍度进行计算,计算结果如图 2 所示。

2.5.1 障碍因素变化趋势分析 由图 2 可知,对于水资源子系统而言,除水资源开发利用率的障碍度受当

年水资源量影响变化幅度较大以外,其各个指标障碍度均在相对稳定的区间浮动,且与其他指标相比,处于相对较高的水平,说明水资源因素是制约水资源承载力的最主要障碍因素。就经济子系统而言,其 4 个指标的障碍度均呈现出逐年下降的趋势,尤其是万元生产总值用水量和万元工业增加值用水量,分别从 2003 年 16.51% 和 20.13% 下降至 2018 年的 2.70% 和 3.61%,相比于研究初期和其他指标,下降幅度明显,该趋势表明烟台市经济水平的提高对水资源承载

力的稳固与提升发挥着积极作用(图 2)。由图 2 可知,在社会子系统中,城镇化率和城镇恩格尔系数的障碍度呈下降趋势,而生活用水总量的障碍度一直在稳步上升,从 2003 年的 4.97% 上升至 2018 年的 7.89%,说明随着烟台市城市人口的增加以及居民生活质量的提升,对水资源的需求也会随之提升,导致生活用水总量逐渐成为影响水资源承载力的关键因

素。在水环境子系统中,污水排放量障碍度从 2003 年的 4.49% 上升至 2018 年的 6.23%,且在 2011—2017 年污水排放量的障碍度均超过了 7%,相比于其他指标,处于较高的影响水平(图 2)。说明为进一步提高水资源承载力,不仅要在节水量和利用率等方面进行相应提高,还应加强污水处理厂的提标改造,提高污水处理效率。

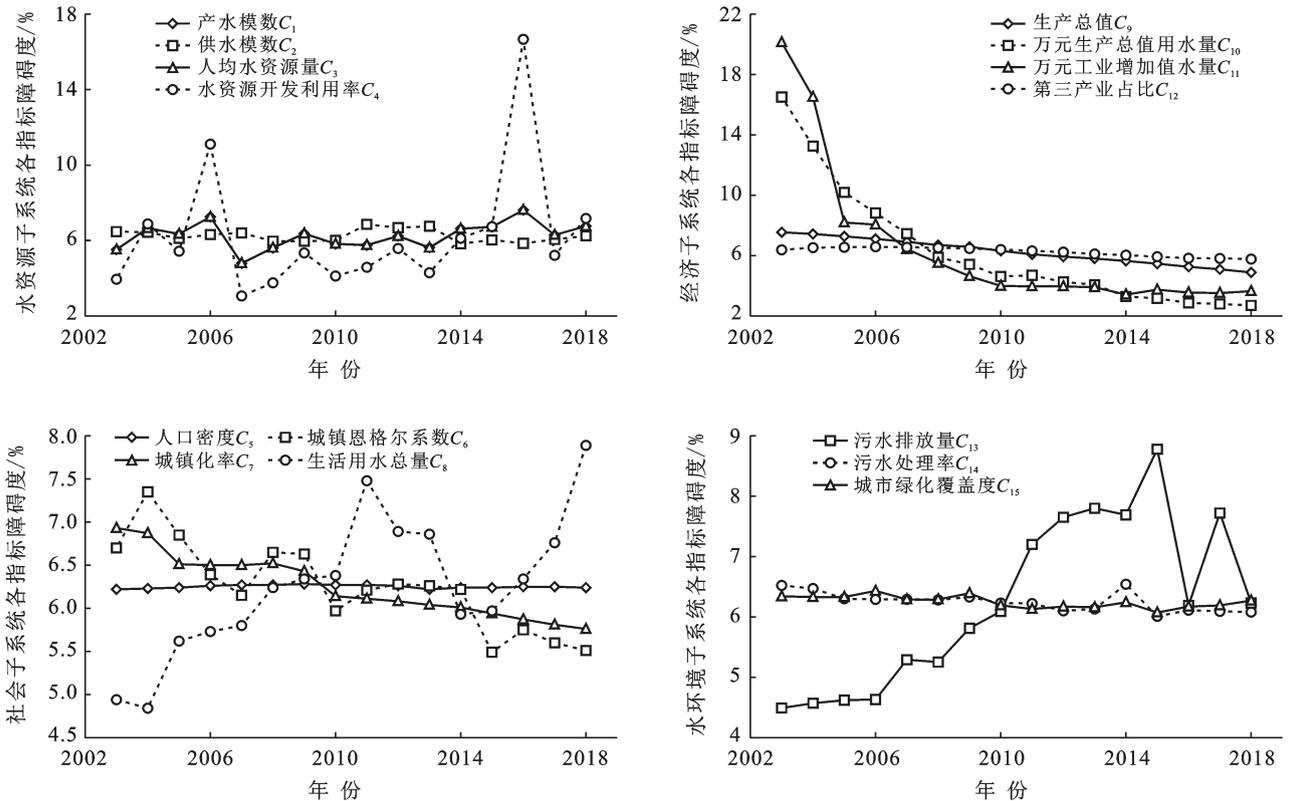


图 2 烟台市 2003—2018 年水资源承载力各子系统障碍因素计算结果

2.5.2 主要障碍因素分析 为使分析出的主要障碍度因素更具有时效性,有利于未来烟台市水资源承载力的进一步提升,本文分析 2014—2018 年近 5 a 的水资源承载力障碍度数据,并以 2003—2007 年水资源承载力障碍度数据作为参照对比,结果详见表 4。由表 4 可知,在研究初期(2003—2007 年),障碍度均值排名前五位的主要障碍因素分别为:万元生产总值用水量、万元工业增加值用水量、生产总值、城镇恩格尔系数、城镇化率,主要涉及经济子系统和社会子系统两方面,这主要与当时经济处于快速上升期,对水资源需求较大以及生产生活用水结构不协调,用水效率较低有关。而在研究后期(2014—2018 年),影响烟台市水资源承载力的主要障碍因素发生显著变化,2014—2018 年障碍度均值排名前 5 位的障碍因素分别为:水资源开发利用率、污水排放量、产水模数、人

均水资源量、生活用水总量,与研究初期经济因素占据较大比重不同,研究后期障碍因素主要涉及水资源子系统、水环境子系统和社会子系统,而经济子系统中各指标均不在前五行列内。结合实际数据分析发现,烟台市万元生产总值用水量与万元工业增加值用水量的五年均值分别从研究初期的 47.91 和 12.83 m^3 下降到研究后期的 12.61 和 4.08 m^3 ,下降幅度分别达到了 379.94% 和 314.46%。而生产总值的五年均值则从研究初期的 2 049.04 亿元上升至研究后期的 6 909.07 亿元,上升幅度达到了 337.19%,上述显著变化说明经济因素影响明显降低,已经不是制约烟台市水资源承载力提升的主要障碍因素,而水资源的开发利用与供给等水资源与社会因素成为未来应着重考虑的方面,此外,还应重视对水环境的关注与保护,严格控制污水排放量,逐步改善水环境。

表 4 烟台市 2003—2007 年和 2014—2018 年水资源承载力前 5 位障碍因素

指标排序	2003—2007 年		2014—2018 年	
	障碍因素	障碍度均值/%	障碍因素	障碍度均值/%
1	万元生产总值用水量	11.25	水资源开发利用率	8.38
2	万元工业增加值用水量	11.23	污水排放量	7.32
3	生产总值	7.25	产水模数	6.80
4	城镇恩格尔系数	6.69	人均水资源量	6.80
5	城镇化率	6.66	生活用水总量	6.58

3 结论

(1) CRITIC-GR-TOPSIS 法可以成为城市水资源承载力综合评价的有效手段。它可以通过对各个指标的数据分析,协调资源、社会、经济以及生态与水资源承载力的相互关系,使得评价结果更加真实合理。

(2) 2003—2018 年,烟台市水资源承载力综合评价价值从 2003 年 0.449 7 上升至 2018 年的 0.578 3,表明烟台市水资源承载力正逐步变好,但是整体上升速度较为缓慢,未来依然有较大程度的提升空间。

(3) 通过障碍度模型分析可知,当前水资源、社会和水环境等方面的因素已代替经济因素成为影响烟台市水资源承载力的主要障碍因素,应作为未来进一步提高烟台市水资源承载力的工作着重点。

(4) 建议通过引进客水、提升再生水回用率以及加强雨水等非常规水源的利用来增加水资源的可利用量;继续推进节水型社会的建设,做到集约高效利用水资源;完善污水收集系统,对污水处理厂进行提标改造,提高处理效率。

[参 考 文 献]

[1] 刘晓,陈隽,范琳琳,等.水资源承载力研究进展与新方法[J].北京师范大学学报(自然科学版),2014,50(3):312-318.

[2] 王红瑞,钱龙霞,赵自阳,等.水资源风险分析理论及评估方法[J].水利学报,2019,50(8):980-989.

[3] 热孜娅·阿曼,方创琳,赵瑞东.新疆水资源承载力评价与时空演变特征分析[J].长江流域资源与环境,2020,29(7):1576-1585.

[4] 王建华,姜大川,肖伟华,等.水资源承载力理论基础探析:定义内涵与科学问题[J].水利学报,2017,48(12):1399-1409.

[5] 惠洪河,蒋晓辉,黄强,等.二元模式下水资源承载力系统动态仿真模型研究[J].地理研究,2001,20(2):191-198.

[6] 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):1-6,54.

[7] Ren Chongfeng, Guo Ping, Li Mo, 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.

[8] 夏欢,陈菁,许杨,等.基于改进 TOPSIS 模型的连云港市水资源承载力研究[J].节水灌溉,2019,282(2):86-90,95.

[9] 孙雅茹,董增川,刘森.基于改进 TOPSIS 法的盐城市水资源承载力评价及障碍因子诊断[J].中国农村水利水电,2018,434(12):101-105.

[10] 刘晓君,付汉良.基于变权信息熵改进 TOPSIS 法的水资源承载力评价:以陕西省地级城市为例[J].水土保持通报,2015,35(6):187-191.

[11] 王砚羽,张卓,王正新.基于灰色关联系数改进的加权 TOPSIS 法及其应用[J].华东经济管理,2011,25(10):139-144.

[12] 吴先明,蔡海滨,邓鹏.基于灰色关联度的改进 TOPSIS 模型在水质评价中的应用[J].三峡大学学报(自然科学版),2018,40(2):24-28.

[13] 吕志鹏,吴鸣,宋振浩,等.电能质量 CRITIC-TOPSIS 综合评价方法[J].电机与控制学报,2020,24(1):137-144.

[14] 傅春,李雅蓉.江西省水资源承载力评价及障碍因子诊断[J].人民长江,2019,50(8):109-114.

[15] 汪顺生,黄天元,陈豪,等.基于 CRITIC 赋权的模糊综合评判模型在水质评价中的应用[J].水电能源科学,2018,36(6):48-51.

[16] 张阳,张橙.基于 TOPSIS-灰色关联度分析的水资源配置方案综合评价[J].统计与决策,2017(18):64-67.

[17] 焦士兴,陈林芳,王安周,等.河南省农业水资源脆弱性时空特征及障碍度诊断[J].农业现代化研究,2020,41(2):312-320.

[18] 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.

[19] 张郁,陈玉洁.山东省水资源承载力分析[J].滨州学院学报,2017,29(3):114-120.

[20] 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.

[21] Yang Zhaoyang, Song Jinxi, Cheng Dandong, et al. Comprehensive evaluation and scenario simulation for the water resources carrying capacity in Xi'an City, China [J]. Journal of Environmental Management, 2019,230:221-233.

2018,38(1):264-269.

- [16] 杨永宇,尹亮,刘畅,等.基于灰关联和BP神经网络法评价黑河流域水质[J].人民黄河,2017,39(6):58-62.
- [17] 王俊莉,刘冬燕,古滨河,等.基于浮游植物群落的安徽太平湖水环境生态评价[J].湖泊科学,2014,26(6):939-947.
- [18] 宋勇军,戚菁,刘立恒,等.程海湖夏季浮游植物群落结构与富营养化状况研究[J].环境科学学报,2019,39(12):4106-4113.
- [19] 陆建芳.山仔水库浮游植物群落特征及水体富营养化研究[J].海峡科学,2017(7):66-69.
- [20] 聂瑜.于桥水库浮游植物群落特征及富营养化现状研究[D].天津:天津科技大学,2016.
- [21] 钱磊,颜志娇,朱江,等.污水处理厂出水受纳水体浮游植物群落结构及水质评价[J].环境科学学报,2020,40(09):3287-3297.
- [22] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范[M].2版.北京:中国环境科学出版社,1990.
- [23] 李延林,郑灿,邱小琮,等.宁夏腾格里湖水质及富营养化现状分析与评价[J].科学技术与工程,2019,19(15):309-315.
- [24] Zhao Changsen, Shao N F, Yang S T, et al. Quantitative assessment of the effects of human activities on phytoplankton communities in lakes and reservoirs [J]. Science of the Total Environment, 2019, 665: 213-225.
- [25] 郭坤.长湖浮游植物生态特征分析及水质评价[D].湖北荆州:长江大学,2017.
- [26] 何锦,张福存,韩双宝,等.中国北方高氟地下水分布特征和成因分析[J].中国地质,2010,37(3):621-626.
- [27] 李小妹,严平,郭金蕊,等.宁夏东南部清水河、苦水河流域苦咸水水质综合评价[J].干旱区资源与环境,2014,28(2):136-142.
- [28] 秦伯强,高光,朱广伟,等.湖泊富营养化及其生态系统响应[J].科学通报,2013,58(10):855-864.

(上接第221页)

- [22] 杨海燕,孙晓博,程小文,等.基于VIKOR法的潍坊市水资源承载力综合评价[J].环境科学学报,2020,40(2):716-723.
- [23] 吴希.三种权重赋权法的比较分析[J].中国集体经济,2016(34):73-74.
- [24] Mohamed Abdel-Basset, Rehab Mohamed. A novel plithogenic TOPSIS-CRITIC model for sustainable supply chain risk management [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,247:119586.
- [25] 朱子云,朱益超.基于精准和解构的标志变异程度算法研究[J].数量经济技术经济研究,2012,29(6):102-114.
- [26] 李宁馨.基于改进的CRITIC和灰色关联模型的区域创新能力评价研究[D].安徽合肥:合肥工业大学,2016.
- [27] Feng Jingchun, Huang Huaai, Yin Yao, et al. Comprehensive security risk factor identification for small reservoirs with heterogeneous data based on grey relational analysis model [J]. Water Science and Engineering, 2019,12(4):330-338.
- [28] 刘君,赵立进,黄良,等.基于TOPSIS和灰色关联分析的变压器状态评价方法[J].电力科学与技术学报,2019,34(4):63-68.
- [29] Wang Yang, Feng Yining, Zuo Jian, et al. From "Traditional" to "Low carbon" urban land use: Evaluation and obstacle analysis [J]. Sustainable Cities and Society, 2019,51:101722.
- [30] 陈彦,陈英,谢保鹏,等.嘉峪关市土地利用绩效评价及障碍因子诊断[J].水土保持研究,2018,25(5):226-233.
- [31] 王燕,王增凯,蔡国文.烟台市水资源现状及保障对策探析[J].地下水,2017,39(4):151-152.