

基于“四水四定”准则的泰安市水资源承载力评价研究

徐晓芹^{1,2}, 刘彩虹^{2,3}, 范明元^{2,3}, 杨永峰⁴, 孔珂¹, 刘海娇^{2,3}

(1. 济南大学, 山东 济南 250022; 2. 山东省水利科学研究院, 山东 济南 250014;

3. 山东省水资源与水环境重点实验室, 山东 济南 250014; 4. 山东省水利事业综合服务中心, 山东 济南 250013)

摘要:为进一步了解泰安市水资源综合状况,基于“四水四定”准则构建该市水资源承载力评价指标体系,采用改进博弈论云模型对其2010年、2015年、2020年和2023年水资源承载力进行评价,并利用障碍度模型识别影响水资源承载力的主要障碍因子。结果表明:主客观权重中分别位于前列的万元工业增加值用水量(C_{24})和农村居民人均生活用水量(C_{34})等指标,经改进博弈论组合赋权后,使其组合权重处于相对合理区间,有效缓解了单一赋权方法对某一指标的倾斜问题;典型年份泰安市水资源承载能力呈波动上升趋势,评价等级由2010年和2015年的Ⅲ级(临界承载)提升为2020年和2023年的Ⅱ级(紧承载);制约子系统由2010年的“以水定产”向2023年的“以水定人”转变,这与泰安市的经济社会发展阶段相适应;其中,人均水资源量、每公顷工业用地用水量和重点河湖生态流量保障率等指标的障碍度在研究期长期位于前列,未来应通过加强刚性约束、产业结构升级和水资源管理等工作,不断提升泰安市水资源承载能力。

关键词:水资源承载力;四水四定;云模型;改进博弈论;泰安市

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1000-1379.2026.02.014

引用格式:徐晓芹,刘彩虹,范明元,等.基于“四水四定”准则的泰安市水资源承载力评价研究[J].人民黄河,2026,48(2):88-95.

Research on Evaluation of Water Resources Carrying Capacity in Taian City Based on “Basing Four Aspects on Water Resources” Principle

XU Xiaojin^{1,2}, LIU Caihong^{2,3}, FAN Mingyuan^{2,3}, YANG Yongfeng⁴, KONG Ke¹, LIU Haijiao^{2,3}

(1. University of Jinan, Jinan 250022, China; 2. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250014, China;

3. Shandong Provincial Key Laboratory of Water Resources and Environment, Jinan 250014, China;

4. Water Resources Comprehensive Development Center of Shandong Province, Jinan 250013, China)

Abstract: In order to further understand the comprehensive status of water resources in Taian City, this study established a water resource carrying capacity evaluation index system based on the “basing four aspects on water resources” principle. Using an improved game theory cloud model, it evaluated water resource carrying capacity in 2010, 2015, 2020 and 2023. The obstacle degree model was employed to identify key obstacle factors affecting water resource carrying capacity. The results showed that: Key indicators such as water consumption per 10 000 yuan of industrial added value (C_{24}) and per capita domestic water consumption for rural residents (C_{34}), which ranked high in both subjective and objective weighting results, were assigned combination weights within a relatively reasonable range through improved game theory-based combined weighting. This effectively mitigated the bias on certain indicators caused by relying on a single weighting method. During the typical years, the water resources carrying capacity of Taian City showed a fluctuating and improving trend. Its evaluation grade rose from Grade III (critical load) in 2010 and 2015 to Grade II (tightly load) in 2020 and 2023. The constraint subsystem evolved from “basing industrial development on water resources” in 2010 to “basing population development on water resources” in 2023, aligning with Taian’s socio-economic development stage. Key indicators like per capita water resources, water consumption per hectare of industrial land, and ecological flow guarantee rates for major rivers and lakes ranked consistently at the forefront during the study period. In the future, Taian City should continuously enhance its water resources carrying capacity by strengthening rigid constraints, upgrading the industrial structure, and improving water resources management.

Key words: water resources carrying capacity; basing four aspects on water resources; cloud model; improved game theory; Taian City

0 引言

水资源是支撑经济社会发展的基础性资源,其承载力的科学评价对指导和支撑区域良性发展具有重要的现实意义^[1]。近年来,随着气候变化与人类活动加剧,流域水循环的驱动力、结构与过程复杂多变,部分地区水资源开发利用程度已接近甚至超过水资源承载能力^[2],给水资源管理与用水安全带来极大的不确定性。2019年习近平总书记提出“以水定城、以水定地、

以水定人、以水定产”^[3](以下简称“四水四定”),2024

收稿日期:2025-06-09 修回日期:2025-07-31

基金项目:山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2023CXGC010905);山东省自然科学基金资助项目(ZR2021QD043)

作者简介:徐晓芹(2000—),女,山东临沂人,硕士研究生,研究方向为水文水资源

通信作者:范明元(1977—),男,安徽泾县人,正高级工程师,主要从事水资源与水生态研究工作

E-mail: fantina715@126.com

年党的二十届三中全会上明确提出“落实水资源刚性约束制度”，“四水四定”为水资源管理提供了总体的理论指导与战略引领^[4]。

为实现水资源的优化配置与高效利用,探讨“四水四定”的概念内涵和模型方法成为学术界的研究热点。王浩等^[5]探讨了“四水四定”的基本认知与关键技术,形成了水资源保护利用“四水四定”的系统认知;游进军等^[6]构建了“四水四定”多目标协调模型并进行应用,结果表明通过对结果评价不断反馈调整可形成服务于经济社会发展和水资源管控的方案;魏豪杉等^[7]构建水资源空间均衡的“四水四定”动态调控模型,可用于不同时间尺度的未来用水量动态调控。作为“四水四定”实施成效评判的重要基础,水资源承载力评价方法一直是研究重点。其中,评价指标权重确定方法主要分为主观赋权法和客观赋权法,但两种方法均存在局限性。以层次分析法和专家打分法为代表的主观赋权法,评价过程耗时长且主观性强;以熵权法和主成分分析法为代表的客观赋权法,无法反映决策者的意向且易受数据随机性的影响。为了弥补单一赋权方法存在的不足,有些学者利用线性加权法确定组合权重,但对主客观权重的博弈关系研究较少。水资源承载力的评价方法主要有模糊综合评价法^[8]、TOPSIS模型^[9]、支持向量机算法^[10]、多目标综合分析法^[11]和云模型^[12-13]等。模糊综合评价法适用于多指标综合评价,但主观评价依赖性强,指标权重确定缺乏统一标准;TOPSIS模型能充分利用原有数据,但不能通过分级管理反映各系统的相互关系;支持向量机算法难以适用于数据资料缺乏的区域;多目标综合分析法能综合反映各种因素的影响,但对数据需求量大,指标选取复杂;云模型可用于定性描述和定量分析之间的不确定性转换,适用于针对小样本数据进行可视化分析,且应用效果较好。

正确认识“四水四定”的核心要义,统筹协调水资源与城-地-人-产的关系,可为水资源承载力研究提供重要依据。很多学者对“四水四定”的理论内涵和实施路径进行了研究,而基于“四水四定”准则的水资源承载力评价相对较少。本文基于“四水四定”准则,以泰安市为研究对象,以2010年、2015年、2020年和2023年为典型年,采用改进博弈论法确定组合权重,利用云模型对该市水资源承载力变化情况进行研究,并利用障碍度模型对障碍因子进行识别,以期为该市水资源支撑经济社会高质量发展提供参考。

1 研究区概况与数据来源

泰安市位于山东省中部、泰山南麓,总面积7 762 km²,地势北高南低,属于典型的暖温带大陆性季风气候区。全市多年平均降水量为690.6 mm,年均水资源量为16.96亿m³。2024年为丰水年,水资源总量达24.46亿m³,但人均水资源占有量仅为462 m³,属于联合国界定的人均占有水量少于500 m³的极端缺水地区。研究区河流主要有大汶河、柴汶河,年均径流量18.6亿m³,2016—2022年径流变异系数约为0.67,水资源供需矛盾突出。

本研究所用数据主要来源于《泰安市水资源公报》《泰安统计年鉴》《山东统计年鉴》《中国城市城乡建设统计年鉴》和《山东省国民经济和社会发展统计年鉴》等。

2 研究方法

2.1 构建评价指标体系

“四水四定”准则以实现水资源的优化配置与高效利用为目标,并为应对水资源短缺、保障经济社会可持续发展提供了关键路径。遵循科学性、系统性、代表性和独立性等原则,参考文献[14-15],基于“四水四定”准则,选取15项指标,构建水资源承载力评价指标体系,见表1。

表1 基于“四水四定”准则的水资源承载力评价指标体系

Tab.1 Water Resources Carrying Capacity Evaluation Indicator System Based on “Basing Four Aspects on Water Resources” Principle

| 目标 | 子系统 | 指标 | 指标属性 |
|---------------------|--------|--|------|
| 以水定城 A ₁ | | 人均城市建设用地面积 C ₁₁ /m ² | 正向 |
| | | 城镇化率 C ₁₂ /% | 正向 |
| | | 重点河湖生态流量保障率 C ₁₃ /% | 正向 |
| 以水定地 A ₂ | 水资源承载力 | 人均耕地面积 C ₂₁ /hm ² | 正向 |
| | | 每公顷农田灌溉用水量 C ₂₂ /m ³ | 负向 |
| | | 人均工业用地面积 C ₂₃ /hm ² | 正向 |
| | | 每公顷工业用地用水量 C ₂₄ /m ³ | 负向 |
| 以水定人 A ₃ | | 人均水资源量 C ₃₁ /m ³ | 正向 |
| | | 供水模数 C ₃₂ /(万 m ³ /km ²) | 正向 |
| | | 城镇居民人均生活用水量 C ₃₃ /(L/d) | 正态分布 |
| 以水定产 A ₄ | | 农村居民人均生活用水量 C ₃₄ /(L/d) | 正态分布 |
| | | 万元 GDP 用水量 C ₄₁ /m ³ | 负向 |
| | | 万元工业增加值用水量 C ₄₂ /m ³ | 负向 |
| | | 万元第三产业增加值用水量 C ₄₃ /m ³ | 负向 |
| | | 水资源开发利用率 C ₄₄ /% | 负向 |

2.2 基于博弈论的组合赋权法

2.2.1 主观赋权法

采用层次分析法^[16-17]计算主观权重。首先由专家对评价指标体系中的同层次指标进行重要性打分,得到判断矩阵;然后对判断矩阵进行归一化处理,计算

相对权重并进行一致性检验;最后确定第 j 项指标的主观权重 w_{1j} 。

2.2.2 客观赋权法

采用熵权法^[18]计算客观权重 w_{2j} ,步骤如下。

- 1) 利用极差化法对指标数据进行归一化处理。
- 2) 计算信息熵 e_j :

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{z=1}^n f_{zj} \ln f_{zj} \quad (1)$$

其中

$$f_{zj} = \frac{x_{zj}}{\sum_{z=1}^n x_{zj}} \quad (2)$$

式中: x_{zj} 为第 z 个子系统第 j 项指标归一化后的值; n 为子系统数量; f_{zj} 为第 z 个子系统第 j 项指标的权重。

- 3) 计算客观权重 w_{2j} :

$$w_{2j} = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^m (1 - e_j) \quad (3)$$

式中: w_{2j} 为第 j 个指标的客观权重, m 为指标数量。

2.2.3 计算组合权重

利用博弈论组合赋权法^[19-20],通过线性组合融合主客观权重,最小化与理想权重的偏差,计算步骤如下。

- 1) 构建组合权重模型:

$$w_j^* = a_1 w_{1j} + a_2 w_{2j} \quad (a_1 > 0, a_2 > 0; a_1 + a_2 = 1) \quad (4)$$

式中: w_j^* 为组合权重, a_1 、 a_2 分别为主观权重、客观权重的组合系数。

- 2) 建立偏差最小化目标函数:

$$\min F(a_1, a_2) = \sum_{j=1}^m (w_j^* - w_{1j})^2 + \sum_{j=1}^m (w_j^* - w_{2j})^2 \quad (5)$$

- 3) 归一化组合权重:

对目标函数求解得到最优组合系数 a_1 、 a_2 ,归一化组合权重后得到各指标的组合权重。

$$w_j = w_j^* / \sum_{j=1}^m w_j^* \quad (6)$$

式中: w_j 为归一化后的第 j 项指标的组合权重。

2.3 云耦合模型承载力评价方法

2.3.1 等级划分

借鉴已有研究^[19-21]和泰安市水资源现状,将水资源承载力评价指标划分为5个等级,见表2。正向指标值越大则承载力越强,负向指标值越小则承载力越强,正态分布指标值越接近合理区间范围则承载力越强。

表2 水资源承载力评价指标分级标准

Tab.2 Grading Standards of Water Resources Carrying Capacity Evaluation Indicators

| 评价等级 | I级(富承载) | II级(紧承载) | III级(临界承载) | IV级(超载) | V级(严重超载) |
|----------|---------------|--------------------|-------------------|-------------------|------------|
| C_{11} | ≥ 95 | [75,95) | [65,75) | [55,65) | < 55 |
| C_{12} | > 60 | (50,60] | (40,50] | (30,40] | ≤ 30 |
| C_{13} | ≥ 90 | [75,90) | [75,60) | [60,45) | < 45 |
| C_{21} | ≥ 0.200 | [0.087,0.200) | [0.053,0.087) | [0.033,0.053) | < 0.033 |
| C_{22} | $\leq 2\ 400$ | (2\ 400,3\ 000] | (3\ 000,3\ 300] | (3\ 300,3\ 600] | $> 3\ 600$ |
| C_{23} | ≥ 9 | [7,9) | [5,7) | [3,5) | < 3 |
| C_{24} | ≤ 250 | (250,500] | (500,750] | (750,1\ 000] | $> 1\ 000$ |
| C_{31} | $\geq 3\ 000$ | [2\ 000,3\ 000) | [500,2\ 000) | [300,500) | < 300 |
| C_{32} | ≥ 20 | [15,20) | [10,15) | [5,10) | < 5 |
| C_{33} | (110,130] | (95,110],(130,145] | (65,95],(145,165] | (55,65],(165,185] | > 185 |
| C_{34} | (65,75] | (60,65],(75,80] | (45,60],(80,95] | (95,120] | > 120 |
| C_{41} | < 30 | [30,50) | [50,70) | [70,90) | ≥ 90 |
| C_{42} | ≤ 12 | (12,14] | (14,16] | (16,18] | > 18 |
| C_{43} | < 5 | [5,10) | [10,15) | [15,20) | ≥ 20 |
| C_{44} | ≤ 30 | (30,60] | (60,90] | (90,120] | > 120 |

2.3.2 确定云特征参数与评价指标基准云图

云模型^[12,22-24]是一种用于定性描述和定量分析之间不确定性转换的模型,使用期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 等3个特征参数进行表征。其中:期望 E_x 指论域空间上的中心位置,反映隶属度最大值;熵 E_n 用于度量

指标的不确定性,反映定性概念的随机性和模糊性,数值越大则表示指标的离散程度越高;超熵 H_e 通过云滴的分散程度来体现,数值越大则云滴越离散,其确定方法主要有系数比例法^[25]、数据统计法^[26]和专家经验赋值法^[27],本文采用系数比例法进行计算。特征参数

E_x 、 E_n 、 H_e 的计算公式为

$$\begin{cases} E_x = (x_{jmax} + x_{jmin})/2 \\ E_n = |x_{jmax} - x_{jmin}| / (2\sqrt{\ln 2}) \\ H_e = kE_n \end{cases} \quad (7)$$

式中： x_{jmax} 和 x_{jmin} 分别为第 j 项评价指标分级区间的最大值和最小值； k 为超熵系数，取值范围为0.01~0.10，本文取 $k=0.10$ 。

根据评价指标和云模型特征参数，利用 Normrnd 函数随机产生 2 000 个云滴的模拟数据，将这些云滴绘制成云图。对于正向指标，评价等级从左至右依次上升；对于负向指标，评价等级从左至右逐渐下降；对于正态分布指标，评级等级从中部向两边逐渐降低。本文以负向指标中的人均城市建设用地面积、正态分布指标中的农村居民生活用水量为例，利用正向云发生器生成评价指标隶属度云图（见图 1）。各等级指标云模型数字特征计算结果见表 3。

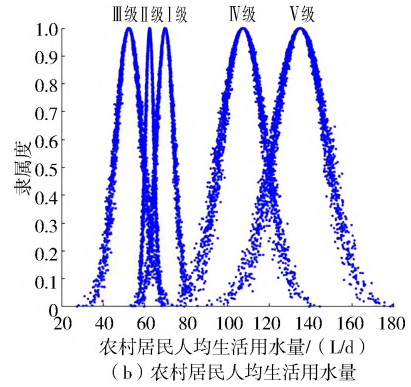
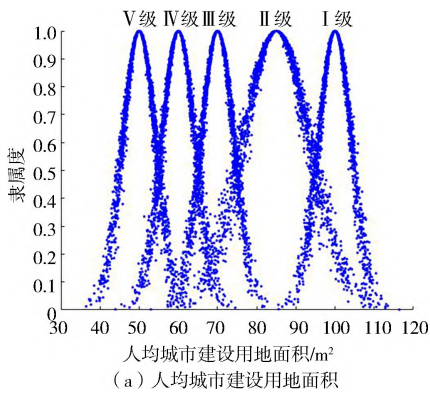


图 1 人均城市建设用地面积和农村居民人均生活用水量指标隶属度云图

Fig.1 Cloud Chart of Membership Degree for Per Capita Urban Construction Land Area and Per Capita Domestic Water Consumption in Rural Areas

2.3.3 计算评价指标隶属度

为准确量化指标的评价等级属性，需计算评价指标隶属度 μ_{ijy} 。根据评价指标 x_{sj} 和云特征参数(E_{sly} , E_{ny} , H_{ey})，基于 Normrnd 函数生成正态分布随机熵 E'_n [$E'_n = \text{Normrnd}(E_{ny}, H_{ey}^2)$]；以 E'_n 为方差，得出正态分布的云滴横坐标 x'_j [$x'_j = \text{Normrnd}(E_{sly}, E_n^2)$]，以 (x'_j, μ_{ijy}) 为一个云滴，重复上述步骤，得到所需数量的云滴。指标隶属度计算公式为

$$\mu_{ijy} = \exp\left[-\frac{(x_{sj} - E'_{sly})^2}{2E_n^2}\right] \quad (8)$$

式中： μ_{ijy} 为第 i 年第 j 项指标对第 y 等级的隶属度， E'_{sly} 为第 j 项指标对第 y 等级的期望值。

表 3 云模型特征数字参数

Tab.3 Numerical Parameters of Cloud Model Features

| 评价指标 | I 级(富承载) | II 级(紧承载) | III 级(临界承载) | IV 级(超载) | V 级(严重超载) |
|----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| C_{11} | (100.00, 4.25, 0.42) | (85.00, 8.49, 0.85) | (70.00, 4.25, 0.42) | (60.00, 4.25, 0.42) | (50.00, 4.25, 0.42) |
| C_{12} | (65.00, 4.25, 0.42) | (55.00, 4.25, 0.42) | (45.00, 4.25, 0.42) | (35.00, 4.25, 0.42) | (25.00, 4.25, 0.42) |
| C_{13} | (95.00, 4.25, 0.42) | (82.50, 6.37, 0.64) | (67.50, 6.37, 0.64) | (52.50, 6.37, 0.64) | (22.50, 19.11, 1.91) |
| C_{21} | (0.25, 0.04, 0) | (0.14, 0.05, 0) | (0.07, 0.01, 0) | (0.04, 0.01, 0) | (0.02, 0.01, 0) |
| C_{22} | (2 100.00, 254.80, 25.48) | (2 700.00, 254.80, 25.48) | (3 150.00, 127.40, 12.74) | (3 450.00, 127.40, 12.74) | (3 750.00, 127.40, 12.74) |
| C_{23} | (9.50, 0.42, 0.04) | (8.00, 0.85, 0.08) | (6.00, 0.85, 0.08) | (4.00, 0.85, 0.08) | (1.50, 1.27, 0.13) |
| C_{24} | (125.00, 106.17, 10.62) | (375.00, 106.17, 10.62) | (625.00, 106.17, 10.62) | (875.00, 106.17, 10.62) | (1 125.00, 106.17, 10.62) |
| C_{31} | (3 500.00, 424.66, 42.47) | (2 500.00, 424.66, 42.47) | (1 250.00, 636.99, 63.70) | (400.00, 84.93, 8.49) | (200.00, 84.93, 8.49) |
| C_{32} | (22.50, 2.12, 0.21) | (17.50, 2.12, 0.21) | (12.50, 2.12, 0.21) | (7.50, 2.12, 0.21) | (2.50, 2.12, 0.21) |
| C_{33} | (120.00, 8.49, 0.85) | (102.50, 6.37, 0.64) | (80.00, 12.74, 1.27) | (60.00, 4.25, 0.42) | (197.50, 10.62, 1.06) |
| C_{34} | (70.00, 4.25, 0.42) | (62.50, 2.12, 0.21) | (52.50, 6.37, 0.64) | (107.50, 10.62, 1.06) | (135.00, 12.74, 1.27) |
| C_{41} | (15.00, 12.74, 1.27) | (40.00, 8.49, 0.85) | (60.00, 8.49, 0.85) | (80.00, 8.49, 0.85) | (100.00, 8.49, 0.85) |
| C_{42} | (11.00, 0.85, 0.08) | (13.00, 0.85, 0.08) | (15.00, 0.85, 0.08) | (17.00, 0.85, 0.08) | (19.00, 0.85, 0.08) |
| C_{43} | (2.50, 2.12, 0.21) | (7.50, 2.12, 0.21) | (12.50, 2.12, 0.21) | (17.50, 2.12, 0.21) | (22.50, 2.12, 0.21) |
| C_{44} | (15.00, 12.74, 1.27) | (45.00, 12.74, 1.27) | (75.00, 12.74, 1.27) | (105.00, 12.74, 1.27) | (135.00, 12.74, 1.27) |

2.3.4 计算水资源承载力综合评价指数

1) 计算子系统综合评价指数:将隶属度 μ_{ijy} 与指标组合权重 w_j 相乘,求和得到第 i 年第 z 个子系统对第 y 等级的综合评价指数。云综合评价指数计算公式为

$$f_{izy} = \sum_{j=1}^{m_z} w_j \mu_{ijzy} \quad (9)$$

式中: f_{izy} 为第 i 年第 z 个子系统对第 y 等级的云综合评价指数; m_z 为第 z 个子系统的指标数量; w_j 为第 z 个子系统第 j 项指标的组合权重; μ_{ijzy} 为第 i 年第 z 个子系统第 j 项指标对第 y 等级的隶属度。

2) 确定水资源承载力评价等级:采用级别变量特征值的方法^[14],通过综合评价指数计算等级特征值 D_i ,确定各年份水资源承载力等级,计算公式为

$$D_i = \sum_{y=1}^5 y f_{iy} / \sum_{y=1}^5 f_{iy} \quad (10)$$

式中: f_{iy} 为第 i 年对第 y 等级的综合评价指数, y 为评价等级对应的量化值(如 I 级 $y=1$), D_i 为第 i 年水资源承载力评价等级特征值。

2.4 障碍度模型

利用障碍度模型^[25],计算各个指标的障碍度,分析各子系统和评价指标对水资源承载力的影响程度,计算公式为

$$H_{ij} = \frac{(1 - x_{ij})w_j}{\sum_{j=1}^m (1 - x_{ij})w_j} \times 100\% \quad (11)$$

式中: H_{ij} 为第 i 年第 j 项指标的障碍度, x_{ij} 为第 i 年第 j 项指标的归一化值。

3 结果与讨论

3.1 改进博弈论指标权重分析

为避免组合系数为负值,利用离差最大化客观赋权法约束条件,建立拉格朗日函数。利用 MATLAB 软件求解最优组合系数,得到层次分析法和熵权法评价指标的组合权重分别为 0.507 和 0.493。由表 4 可知,在改进博弈论综合权重中,“以水定人”子系统权重最大(0.293),其次为“以水定产”子系统(0.272)和“以水定地”子系统(0.235),“以水定城”子系统权重最小(0.200);由于重点河湖生态流量保障率(C_{13})、供水模数(C_{32})和水资源开发利用率(C_{44})等指标的主客观权重都比较大,致使其综合权重较大,而人均工业用地面积(C_{23})的综合权重最小。

在熵权法赋权的指标权重中,每公顷工业用地用水量(C_{24})、人均水资源量(C_{31})和水资源开发利用率(C_{44})指标权重位于前列,组合赋权后分别位于第 5、第 1 和第 6 位;在层次分析法赋权的指标权重中,城镇居民人均生活用水量(C_{33})、农村居民人均生活用水量

表 4 评价指标权重

| 子系统 (权重) | 指标 | 层次分析法 指标权重 w_1 | 熵权法指 标权重 w_2 | 改进博弈论 组合权重 | 排序 |
|---------------------------|-----------------|------------------|----------------|------------|----|
| A ₁ (0.200) | C ₁₁ | 0.063 | 0.061 | 0.062 | 9 |
| | C ₁₂ | 0.024 | 0.069 | 0.046 | 12 |
| | C ₁₃ | 0.110 | 0.071 | 0.091 | 3 |
| A ₂ (0.235) | C ₂₁ | 0.058 | 0.08 | 0.069 | 7 |
| | C ₂₂ | 0.034 | 0.058 | 0.046 | 13 |
| | C ₂₃ | 0.025 | 0.064 | 0.044 | 15 |
| | C ₂₄ | 0.039 | 0.114 | 0.076 | 5 |
| A ₃ (0.293) | C ₃₁ | 0.118 | 0.094 | 0.106 | 1 |
| | C ₃₂ | 0.073 | 0.081 | 0.077 | 4 |
| | C ₃₃ | 0.088 | 0.001 | 0.045 | 14 |
| | C ₃₄ | 0.107 | 0.022 | 0.065 | 8 |
| A ₄ (0.272) | C ₄₁ | 0.129 | 0.06 | 0.095 | 2 |
| | C ₄₂ | 0.033 | 0.078 | 0.055 | 10 |
| | C ₄₃ | 0.033 | 0.062 | 0.047 | 11 |
| | C ₄₄ | 0.066 | 0.085 | 0.08 | 6 |

(C_{34})和万元 GDP 用水量(C_{41})权重位于前列,经博弈论组合赋权后,各指标的权重均有所减小。因此,基于改进博弈论综合赋权方法可有效缓解单一权重方法对某一指标的严重倾斜问题,使指标处于相对合理区间,如图 2 所示。

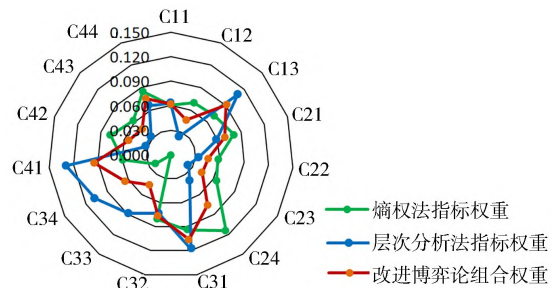


图 2 3 种方法的指标权重雷达图

Fig.2 Radar Chart of Indicator Weights for Three Methods

3.2 泰安市水资源承载力综合分析

3.2.1 水资源承载力评价

为直观展现泰安市水资源承载力与各评价方案等级的评定结果,采用属性识别方法得到泰安市水资源承载力评价云图(见图 3,散点代表分布于各等级的云滴,蓝色代表各等级的综合基准云,红色代表泰安市水资源承载力评价结果)。由图 3 可知:2015 年和 2020 年泰安市水资源承载力介于 II 级(紧承载)和 III 级(临界承载)之间,2010 年水资源承载力为 III 级,2023 年为 II 级;2010—2023 年,泰安市“四水四定”水资源承载能力呈现不断提升趋势,从 III 级逐步向 II 级靠近,持续向好趋势明显。

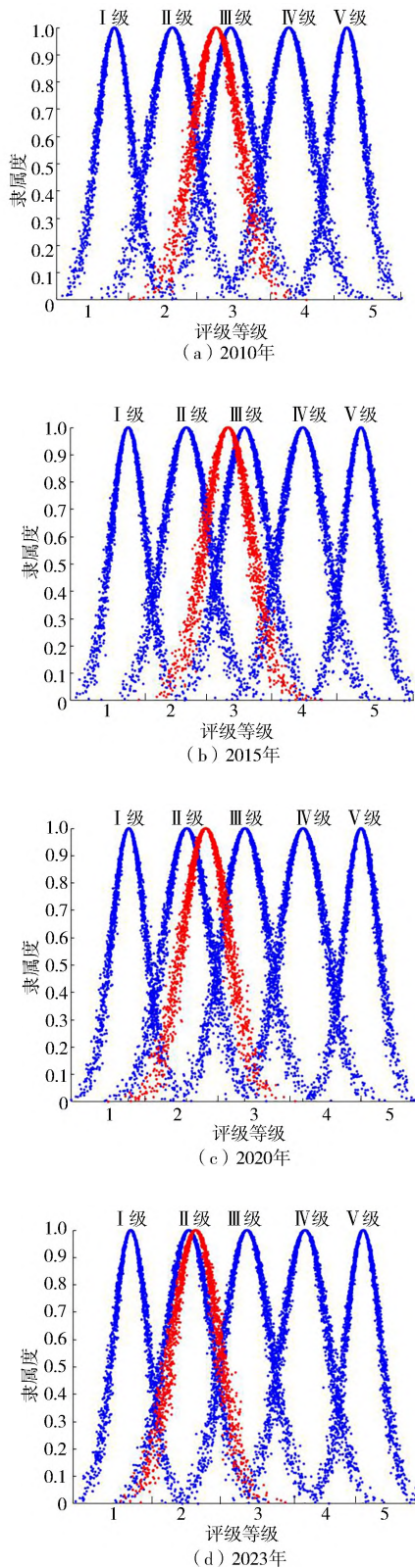


图3 泰安市水资源承载力评价等级云图

Fig.3 Cloud Map of Water Resource Carrying Capacity Evaluation of Taian City

典型年泰安市水资源承载力评价结果见表5。由表5可知,“以水定城”子系统(A_1)等级呈波动上升趋势,2010年为Ⅱ级,2015—2020年为Ⅲ级,2023年上

升为Ⅰ级(富承载);“以水定地”子系统(A_2)与水资源承载力综合评价等级变化趋势相同,由2010年和2015年的Ⅲ级上升为2020年和2023年的Ⅱ级;“以水定人”子系统(A_3)和“以水定产”子系统(A_4)等级没有变化,各典型年始终分别为Ⅲ级和Ⅱ级。综合来看,泰安市水资源承载能力有所提升,但仍存在较大的空间,应重点提升“以水定人”子系统的等级,并不断加强各子系统之间的协调性。

表5 泰安市水资源承载力评价结果

Tab.5 Evaluation Results of Water Resources Carrying Capacity of Taian City

| 年份 | A_1 | A_2 | A_3 | A_4 | 综合评价等级 |
|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 2010 | Ⅱ级 | Ⅲ级 | Ⅲ级 | Ⅱ级 | Ⅲ级 |
| 2015 | Ⅲ级 | Ⅲ级 | Ⅲ级 | Ⅱ级 | Ⅲ级 |
| 2020 | Ⅲ级 | Ⅱ级 | Ⅲ级 | Ⅱ级 | Ⅱ级 |
| 2023 | Ⅰ级 | Ⅱ级 | Ⅲ级 | Ⅱ级 | Ⅱ级 |

3.2.2 水资源承载力主要障碍因子

典型年份泰安市水资源承载力障碍度计算结果见表6。由表6可知:不同指标与子系统对泰安市水资源承载力的影响差异显著,以2023年为例,“以水定人”子系统障碍度最高,“以水定地”和“以水定产”子系统次之,“以水定城”障碍度最低;“以水定城”子系统中人均建设用地面积(C_{11})的障碍度最高,“以水定地”子系统中每公顷工业用地用水量(C_{24})的障碍度最高,“以水定人”子系统中供水模数(C_{32})的障碍度最高,“以水定产”子系统中万元第三产业增加值用水量(C_{43})的障碍度最高。对泰安市水资源承载力影响较大的子系统由2010年的“以水定产”转变为2023年的“以水定人”,这与泰安市的经济社会发展阶段相适应,其中人均水资源量、每公顷工业用地用水量和重点河湖生态流量保障率等指标的障碍度在研究期内长期位于前列,反映出该市水资源承载力受自然因素影响较大,一直存在不同程度的水资源短缺问题。

3.3 讨论

1)区域水资源承载力的评价要与经济社会发展阶段及当地实际情况相适应。本文围绕“四水四定”准则,遴选15项指标构建泰安市“四水四定”水资源承载力评价指标体系,提高了研究的科学性、有效性和可操作性。

2)科学的评价方法是进行水资源承载力评价的基础。随着云计算、大数据、5G等技术的发展,未来可将定性与定量、主观与客观以及多种方法相互融合,进一步提升评价结果的准确性。本文利用改进博弈论、云模型以及障碍度模型等研究方法,揭示泰安市水资

源承载力的变化趋势、障碍因子,可为推动水资源管理的科学化和精细化提供参考。

表6 典型年份泰安市水资源承载力障碍度

| Tab.6 Obstacle Degrees of Water Resource Carrying Capacity of Taian City in Representative Years % | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------|-----------|---------------------------|-----------------|-----------|---------------------------|-----------------|-----------|---------------------------|-----------------|-----------|
| 2010年 | | | 2015年 | | | 2020年 | | | 2023年 | | |
| 子系统 (障碍度) | 指标 | 指标障 碍度 | 子系统 (障碍度) | 指标 | 指标障 碍度 | 子系统 (障碍度) | 指标 | 指标障 碍度 | 子系统 (障碍度) | 指标 | 指标障 碍度 |
| A ₁ (23.44) | C ₁₁ | 12.75 | A ₁ (24.84) | C ₁₁ | 4.00 | A ₁ (15.32) | C ₁₁ | 0.00 | A ₁ (1.83) | C ₁₁ | 1.83 |
| | C ₁₂ | 9.53 | | C ₁₂ | 4.79 | | C ₁₂ | 1.79 | | C ₁₂ | 0.00 |
| | C ₁₃ | 1.15 | | C ₁₃ | 16.06 | | C ₁₃ | 13.53 | | C ₁₃ | 0.00 |
| A ₂ (21.07) | C ₂₁ | 2.63 | A ₂ (8.32) | C ₂₁ | 0.00 | A ₂ (36.24) | C ₂₁ | 16.95 | A ₂ (28.1) | C ₂₁ | 11.38 |
| | C ₂₂ | 9.40 | | C ₂₂ | 0.22 | | C ₂₂ | 0.00 | | C ₂₂ | 0.73 |
| | C ₂₃ | 9.05 | | C ₂₃ | 3.57 | | C ₂₃ | 0.64 | | C ₂₃ | 0.00 |
| | C ₂₄ | 0.00 | | C ₂₄ | 4.52 | | C ₂₄ | 18.66 | | C ₂₄ | 15.99 |
| A ₃ (15.44) | C ₃₁ | 15.20 | A ₃ (45.88) | C ₃₁ | 18.70 | A ₃ (28.06) | C ₃₁ | 0.00 | A ₃ (51.26) | C ₃₁ | 17.05 |
| | C ₃₂ | 0.00 | | C ₃₂ | 7.72 | | C ₃₂ | 12.32 | | C ₃₂ | 17.30 |
| | C ₃₃ | 0.25 | | C ₃₃ | 7.95 | | C ₃₃ | 0.00 | | C ₃₃ | 10.08 |
| | C ₃₄ | 0.00 | | C ₃₄ | 11.51 | | C ₃₄ | 15.75 | | C ₃₄ | 6.83 |
| A ₄ (40.05) | C ₄₁ | 19.45 | A ₄ (20.96) | C ₄₁ | 2.62 | A ₄ (20.37) | C ₄₁ | 6.93 | A ₄ (18.81) | C ₄₁ | 0.00 |
| | C ₄₂ | 7.47 | | C ₄₂ | 4.67 | | C ₄₂ | 13.44 | | C ₄₂ | 0.00 |
| | C ₄₃ | 1.63 | | C ₄₃ | 0.40 | | C ₄₃ | 0.00 | | C ₄₃ | 10.67 |
| | C ₄₄ | 11.51 | | C ₄₄ | 13.27 | | C ₄₄ | 0.00 | | C ₄₄ | 8.13 |

3) 评估结果优化提升是进行“四水四定”水资源承载力评价的基本要求。以系统化治理为支撑,可利用有限的水资源实现区域效益的最大化。关于水资源承载力的提升举措,应统筹兼顾、系统施策,大力挖掘节水潜力,调整用水比例,持续在城、地、人、产等维度发力,通过逐步落实“四水四定”刚性约束机制,有效加大富承载面积,促进水资源的有效利用和区域可持续发展。

4 结论与建议

本文基于“四水四定”准则,以泰安市为研究对象,采用改进博弈论云模型对该市2010—2023年的水资源承载力变化趋势进行了分析,并利用障碍度模型对障碍因子进行识别,可为其水资源调控和可持续发展提供支撑。

利用改进博弈论云模型方法可以使评级指标权重处于相对合理区间,有效减小主观判断和数据随机误差的影响,弥补单一赋权方法对某一指标的严重倾斜问题。典型年份泰安市水资源承载力呈波动上升趋势,评价等级由2010年和2015年的Ⅲ级(临界承载)提升为2020年和2023年的Ⅱ级(紧承载);各子系统对水资源承载能力的影响差异显著,其中“以水定人”子系统权重最高(0.293),是调控的关键因素;人均水资源量、每公顷工业用地用水量和重点河湖生态流量保障率等指标是影响水资源承载力评价的主要障碍因子。

为促进泰安市水资源承载力稳步提升,保证经济社会发展用水安全,提出以下几点建议:一是摸清当地

水资源禀赋,加强水资源调查研究,以获得较为精准全面的水资源量和可开采量,为区域发展提供可靠的决策参考;二是完善储备水源和水网调蓄配置工程,提升人均水资源量、供水模数等指标,解决季节性缺水问题;三是加强生态环境保护,提高重点河湖生态流量保障率;四是优化产业结构,调整行业用水比例,发展节水技术和工艺,提高水资源利用效率,继续降低单位工业用地用水量、每公顷农田灌溉用水量和万元第三产业增加值用水量等指标。展望未来,加快落实“四水四定”刚性约束机制,实现水资源的可持续利用,可结合指标间物理机制的协调性和反馈机制,开展县域层级的水资源承载力评价工作,从而制定更加具体有效的优化措施。

参考文献:

- [1] 左其享,赵衡,马军霞.水资源与经济社会和谐平衡研究[J].水利学报,2014,45(7):785-792,800.
- [2] 王建华,何凡.承载力视域下的水资源消耗总量和强度双控行动认知解析[J].中国水利,2016(23):34-35,40.
- [3] 习近平.在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J].中国水利,2019(20):1-3.
- [4] 左其享,凌敏华,张羽.水资源刚性约束制度研究框架与展望[J].水利水电快报,2024,45(3):6-11.
- [5] 王浩,许新发,成静清,等.水资源保护利用“四水四定”:基本认知与关键技术体系[J].水资源保护,2023,39(1):1-7.
- [6] 游进军,贾玲,杨朝晖,等.协调公平与效率的“四水四定”研究I:方法与模型[J].水利学报,2024,55(2):158-166.
- [7] 魏豪杉,王红瑞,郑鹏鑫,等.基于水资源空间均衡的四水

- 四定调控模型构建[J].水资源保护,2024,40(3):71-77.
- [8] WANG G,XIAO C,QI Z,et al.Development Tendency Analysis for the Water Resource Carrying Capacity Based on System Dynamics Model and the Improved Fuzzy Comprehensive Evaluation Method in the Changchun City,China[J].Ecological Indicators,2021,122:107232.
- [9] 向扬,李治军.基于改进 TOPSIS 模型的山西省水资源承载力与协调发展分析[J].水利水电技术(中英文),2024,55(4):48-58.
- [10] GUPTA A,SINGH V P.Comparative Study of Machine Learning Approaches for Water Resources Carrying Capacity Assessment [J].Journal of Hydrology,2021,603:126961.
- [11] PASCUAL E M,GONZALO G,JOSÉ M P,et al.Multi-Objective Optimization of the Supply Chain of Biofuels from Residues of the Tequila Industry in Mexico[J].Journal of Cleaner Production,2015,108:422-441.
- [12] 王文川,杨柳,郑野,等.基于博弈论和云模型的石羊河流域水资源承载力评价研究[J].水利水电技术(中英文),2021,52(10):35-45.
- [13] CHEN Y,WANG J,LIU Y,et al.Dynamic Evaluation of Water Resources Carrying Capacity Based on Improved Cloud Model:A Case Study of the Yangtze River Economic Belt [J].Journal of Hydrology,2022,607:127540.
- [14] 韩礼博,门宝辉.基于组合博弈论法的海河流域水资源承载力评价[J].水电能源科学,2021,39(11):61-64.
- [15] 刘建厅,刘芮妍,续衍雪.河南省各地级市水资源承载力评价研究[J].人民黄河,2022,44(3):53-58.
- [16] 邓雪,李家铭,曾浩健,等.层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J].数学的实践与认识,2012,42(7):93-100.
- [17] ZHANG Q,LI Y,WANG H,et al.An AHP-DPSIR Framework for Evaluating Water Resources Carrying Capacity in Northwest China[J].Ecological Indicators,2021,121:107086.
- [18] 肖静,袁江棋,罗响,等.基于博弈论和云模型的武汉市水资源承载力变化研究[J].武汉理工大学学报(社会科学版),2022,35(3):86-93.
- [19] 李治军,王美波.基于云模型的西宁市水资源承载力评价[J].吉林水利,2022(7):35-40.
- [20] 吴瑞英,孙怀卫,严冬,等.基于格网数据和博弈论组合赋权的中巴经济走廊洪灾风险评价[J].农业工程学报,2021,37(14):145-154.
- [21] 刘海娇,陈学群,刘彩虹,等.基于 DPSIR 模型的“四水四定”高质量发展协调性评价[J].人民黄河,2022,44(11):72-77.
- [22] XUE W,LI Y,YANG Z,et al.Evaluation of Water Resources Carrying Capacity in the Yellow River Basin Based on the Normal Cloud Model[J].Ecological Indicators,2021,121:107131.
- [23] 李德毅,刘常昱.论正态云模型的普适性[J].中国工程科学,2004(8):28-34.
- [24] ZHAO R,FANG C,LIU H,et al.A Cloud Model-Based Comprehensive Evaluation Method for Water Resources Carrying Capacity[J].Environmental Science and Pollution Research,2022,29(12):17846.
- [25] 王洪利,冯玉强.基于云模型具有语言评价信息的多属性群决策研究[J].控制与决策,2005,20(6):679-681,685.
- [26] 杨洁,王国胤,刘群,等.正态云模型研究回顾与展望[J].计算机学报,2018,41(3):724-744.
- [27] 邓楚妍,牛赟,王顺利,等.基于博弈论-云模型的黑河流域水资源承载力评价[J].淮阴师范学院学报(自然科学版),2025,24(3):225-233.

【责任编辑 张华兴】

(上接第6页)

- [3] 黄静,李想,沈延青,等.黄河上游径流年际变化规律及丰枯统计特征[J].水利水电技术(中英文),2025,56(7):165-176.
- [4] 张玉泽,王爽.黄河流域水资源安全评价及时空格局[J].人民黄河,2023,45(1):25-29.
- [5] 惠婧璇,谭琦璐,侯奕菲.促进黄河流域水-能源-粮食协调发展的水资源管理研究[J].人民黄河,2024,46(增刊2):62-63.
- [6] 牛玉国,王煜,李永强,等.黄河流域生态保护和高质量发展安全保障布局 and 措施研究[J].人民黄河,2021,43(8):1-6.
- [7] 马维斌,王耀辰,寇敬雯,等.沿黄九省(区)水-耕地-粮食协同关系情景分析[J].地球科学进展,2023,38(12):1243-1258.
- [8] 张景翔,王忠静,陈小泽,等.黄河几字弯能源资源型城市发展需水预测[J].人民黄河,2025,47(5):72-79.
- [9] 张金良.黄河流域河湖生态环境复苏研究[J].水资源保护,2022,38(1):141-146.
- [10] 李福生,彭少明,李克飞,等.南水北调西线工程受水区缺水形势研究[J].人民黄河,2023,45(5):19-23.
- [11] 尚文绣,王煜,郑小康,等.黄河百年径流系列连续枯水段识别和用水特征分析[J].人民黄河,2024,46(6):20-25,42.
- [12] 苏振娟,王英.甘肃省白龙江引水工程水利生态补偿机制探讨[J].人民黄河,2023,45(3):85-89,96.
- [13] 张金良.黄河流域生态保护和高质量发展水战略思考[J].人民黄河,2020,42(4):1-6.
- [14] 田海龙,刘晓旭,刘晓民,等.内蒙古黄河干流行业间水权转让效果及对经济社会的影响[J].人民黄河,2024,46(6):74-77,84.

【责任编辑 赵宏伟】