



基于博弈论组合赋权-TOPSIS 模型的安康市水资源承载力综合评价

赵 浩¹, 赵立磊¹, 田 辉^{1,2}, 丁廉超¹, 王 凡¹, 王郅睿¹,
韩朝辉¹, 龚文强¹, 侯孝东¹

1. 中国地质调查局 西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100;

2. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

摘 要: 采用陕西省安康市 2011—2020 年统计资料, 基于水资源-社会-经济-生态环境复合系统构建水资源承载力评价指标体系; 以博弈论组合赋权法确定指标权重, 综合运用 TOPSIS 法和障碍度模型对安康市水资源承载力进行评价。结果表明: 2011—2020 年安康市水资源承载力变化趋势呈“W”型, 总体变化不大, 水资源仍有较大开发利用空间; 水资源和生态环境子系统承载力总体呈下降趋势, 社会和经济子系统承载力呈上升趋势; 制约安康市水资源承载力水平的主要是生态环境子系统和经济子系统, 氨氮排放量、化学需氧量排放量、生态环境用水率、城市污水日处理能力和万元工业增加值用水量是主要的障碍因子。

关键词: 水资源承载力; 博弈论; TOPSIS 法; 障碍度模型; 安康市; 陕西省

COMPREHENSIVE EVALUATION OF WATER RESOURCES CARRYING CAPACITY IN ANKANG CITY BASED ON GAME THEORY COMBINATION WEIGHTING-TOPSIS MODEL

ZHAO Hao¹, ZHAO Li-lei¹, TIAN Hui^{1,2}, DING Lian-chao¹, WANG Fan¹, WANG Zhi-rui¹,
HAN Zhao-hui¹, GONG Wen-qiang¹, HOU Xiao-dong¹

1. Xi'an Mineral Resources Survey Center, CGS, Xi'an 710100, China; 2. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: Adopting the statistical data of Ankang City in Shaanxi Province during 2011–2020, the evaluation index system of water resources carrying capacity is constructed on the basis of the composite system of water resources-society-economy-ecological environment. The index weights are determined by the game theory combination weighting method, and the TOPSIS method and obstacle degree model are used to evaluate the water resources carrying capacity in the area. The results reveal that the variation trend of water resources carrying capacity during 2011–2020 shows a “W” shape, with little overall change, and there is still much room for development and utilization of water resources. The carrying capacity of water resources and eco-environment subsystems shows a downward trend, while that of society and economy subsystems is on the rise. The main factors restricting the carrying capacity of water resources are eco-environment and economy subsystems. The main obstacle factors include ammonia nitrogen emission, chemical oxygen

收稿日期: 2022-07-17; 修回日期: 2022-10-14. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“南水北调汉江流域陕西段水生态修复支撑调查”(DD20208068; ZD20220207).

作者简介: 赵浩(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事水文地质及水资源调查评价工作, 通信地址 陕西省西安市长安区凤栖西路 66 号, E-mail// zhaohao1990@126.com

通信作者: 田辉(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水文地质及水资源调查评价工作, 通信地址 陕西省西安市长安区凤栖西路 66 号, E-mail// 359585977@qq.com

demand (COD) discharge, water consumption rate of eco-environment, daily treatment capacity of urban sewage and water consumption by unit industrial added value.

Key words: water resources carrying capacity; game theory; TOPSIS method; obstacle degree model; Ankang City; Shaanxi Province

0 引言

水资源是人类赖以生存和发展的重要基础。随着经济社会的发展、人口规模的增大和城镇化进程的持续推进,人类对水资源的需求不断增加,水资源供需矛盾、水环境污染、水生态退化和地下水超采等突出问题已经成为制约水资源与经济社会可持续发展的重要因素^[1-2]。水资源承载力是反映人水关系可持续发展的重要指标,科学合理地评价区域水资源承载力对于保障水资源可持续开发利用、促进经济社会发展和保护生态环境健康具有重要意义^[3]。

水资源承载力的概念最早于20世纪80年代末由我国学者提出,此后大批学者对此展开了一系列的研究工作,从不同角度给出了水资源承载力的理解和定义,并提出了不同评价方法^[1-8]。本文在施雅风、惠泱河、王建华、左其亭、Peng等学者研究的基础上将水资源承载力定义归纳为:在某一具体的历史发展阶段,以一定的科技水平为依据,以经济社会可持续发展和水资源可持续利用为原则,以维护生态环境良性发展为条件,在水资源合理配置的前提下,一定区域上的水资源可支撑的社会、经济和生态环境协调发展的最大规模。关于水资源承载力的评价方法主要分为经验公式法、综合评价法和系统分析法3类。经验公式法主要围绕水资源,而与经济社会和生态环境之间的系统联系不够,导致其应用较少。系统分析法虽能从水资源系统整体性、动态性和多目标性出发分析水资源-经济-社会-生态环境各个系统的内在联系,但由于计算方法复杂且不直观,难以推广应用。综合评价法由于数学理论应用比较深入,且充分考虑了水资源承载力影响因素以及水资源承载力主体与客体之间的耦合作用^[1,6],是当前应用比较多的评价方法。当前,综合评价法主要包括综合指标法^[9]、主成分分析法^[10]、模糊综合评判法^[11]、TOPSIS法^[12-13]、VIKOR法^[14]、灰色关联法^[15]和物源可拓模型法^[16]等。这些方法在指标体系

选择、评判标准等级构建以及评价计算上均有各自的优势和不足。其中,TOPSIS法由于对样本数量无严格限制、信息失真小且使用便捷等特点被广泛应用于水资源承载力评价中。

基于此,本研究以水资源、社会、经济、生态环境4个子系统构建水资源承载力评价指标体系,运用博弈论组合赋权的TOPSIS模型对安康市2011—2020年水资源承载力进行评价,并结合障碍度模型分析影响水资源承载力的主要障碍因子,为全面掌握安康市水资源承载力状况,促进水资源可持续开发利用和管理,系统协调水资源、社会、经济和生态环境的发展关系提供科学依据。

1 研究区概况

安康市位于陕西省东南部,北依秦岭、南靠巴山,汉江横贯东西,地貌呈现南北高山夹峙、河谷盆地居中的特点。水资源以地表径流为主,区域含水岩组主要为变质岩类裂隙含水岩组和碳酸盐岩类裂隙岩溶含水岩组,同时分布少量的岩浆岩类裂隙含水岩组、碎屑岩类孔隙裂隙含水岩组和松散岩类孔隙含水岩组,各含水岩组富水性以中等富水-弱富水为主,仅在碳酸盐岩和第四系松散地层存在少量强富水地段(见图1)。全市总面积23 529 km²,年平均降水量1 050 mm,多年平均水资源总量和人均水资源量均位于陕西省前列。全市面积92.5%为山地,江河溪沟密布,地质结构复杂,气候环境多变,降水量时空分布不均,丰水期降水占全年总量70%以上,洪涝、泥石流等灾害频发,水资源开发利用率为7.15%。作为南水北调中线工程核心水源区,安康市承担着“一泓清水永续北上”的使命和责任,由于在水资源整体性保护和整治力度上存在不足,水资源开发利用与经济社会发展格局不相匹配,在一定程度上制约了安康市的生态文明建设和可持续发展。

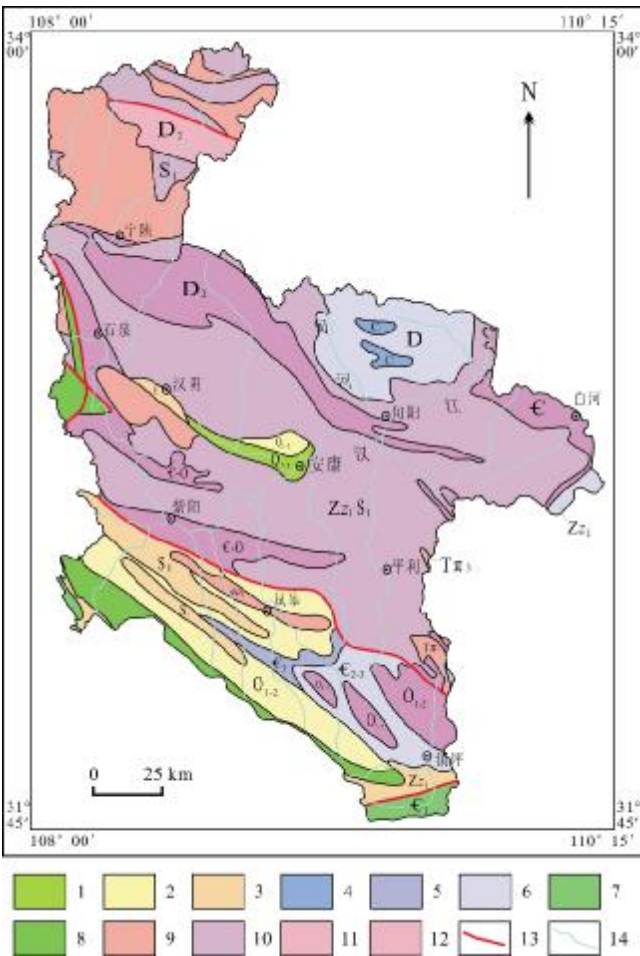


图 1 安康市水文地质简图

Fig. 1 Hydrogeological sketch map of Ankang City

1—富水性强的松散岩类孔隙含水岩组 (loose rock-type porous aquifer formation of high water abundance); 2—富水性弱的松散岩类孔隙含水岩组 (loose rock-type porous aquifer formation of low water abundance); 3—富水性弱的碎屑岩类孔隙裂隙含水岩组 (clastic rock-type porous fissured aquifer formation of low water abundance); 4—富水性强的碳酸盐岩类裂隙岩溶含水岩组 (carbonate rock fissure karst aquifer formation of high water abundance); 5—富水性中等的碳酸盐岩类裂隙岩溶含水岩组 (carbonate rock fissure karst aquifer formation of medium water abundance); 6—富水性弱的碳酸盐岩类裂隙岩溶含水岩组 (carbonate rock fissure karst aquifer formation of low water abundance); 7—富水性强的碳酸盐岩夹碎屑岩类裂隙岩溶含水岩组 (carbonate rock intercalated with clastic rock fissure karst aquifer formation of high water abundance); 8—富水性中等的碳酸盐岩夹碎屑岩类裂隙岩溶含水岩组 (carbonate rock intercalated with clastic rock fissure karst aquifer formation of medium water abundance); 9—富水性弱的岩浆岩类裂隙含水岩组 (magmatic fissure aquifer formation of low water abundance); 10—富水性弱的变质岩裂隙含水岩组 (metamorphic fissure aquifer formation of low water abundance); 11—富水性中等的变质岩夹碳酸盐岩类含水岩组 (metamorphic rock intercalated with carbonate rock aquifer formation of medium water abundance); 12—富水性弱的变质岩夹碳酸盐岩类含水岩组 (metamorphic rock intercalated with carbonate rock aquifer formation of low water abundance); 13—断层 (fault); 14—河流 (river)

2 研究方法

2.1 评价指标体系及数据来源

以水资源-社会-经济-生态环境复合系统理论为基础,按照科学性、客观性和可操作性的原则系统构建水资源承载力评价指标体系. 根据部分学者在陕西省水资源承载力评价^[17]、汉江流域(陕西段)水生态承载力评估^[18]以及汉江流域水资源承载力综合评价研究^[19]的相关成果,结合安康市经济社会发展水平和水资源开发利用现状,全面分析影响水资源承载力的关键因素,选取了 26 个指标构建安康市水资源承载力综合评价指标体系. 针对不同指标在水资源承载力评价中的作用,将其分为正向指标和负向指标. 正向指标即效益型指标,对承载力起促进作用;负向指标即成本型指标,对承载力起反作用. 各指标内容、计算方法及属性类别见表 1.

研究数据来源于 2011—2020 年《陕西省水资源公报》《安康市统计年鉴》《安康市国民经济和社会发展统计公报》等公开资料,各指标经整理计算获得.

2.2 组合权重计算

常用的权重计算方法分为主观赋权、客观赋权和组合赋权. 主观赋权方法主要有层次分析法(AHP)^[12]、古林法(KLEE)^[20]和二项系数法^[21];客观赋权法主要有熵权法^[11]、变异系数法^[22]、CRITIC 法^[23]和最大离差法^[24];组合赋权即对主、客观权重的两种或者三种进行组合计算获得综合权重,在一定程度上降低单独使用某种方法产生的误差,是目前比较常见的赋权方法,主要计算方法有乘积法^[22,25]、遗传算法^[23]、博弈论法^[24]和代数法和^[26]. 本研究结合指标数据特性选择熵权法和 CRITIC 法分别计算权重,运用博弈论获得各指标组合权重. 熵权法能够体现指标数据之间的离散程度,而 CRITIC 法能够反映指标自身的变化和指标间的相关性,两种赋权方法耦合能够更好地反映指标权重^[27].

2.2.1 熵权法

熵权法是根据各评价指标信息效用值的差异程度来确定权重系数的客观赋权法. 指标信息熵越小,则变异程度越大,在评价中重要程度也就越高,因此权重也就越大. 反之,信息熵越大,权重越小^[25]. 主要计算步骤如下:

1)构建原始评价指标矩阵 X

表 1 水资源承载力综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system of water resources carrying capacity

目标层	准则层	指标层	计算方法	类别
水资源承载力 A	水资源子系统 B ₁	产水模数 C ₁ /(10 ⁴ m ³ /km ²)	水资源总量/区域总面积	正
		供水模数 C ₂ /(10 ⁴ m ³ /km ²)	供水量/区域总面积	负
		人均水资源量 C ₃ /(m ³ /人)	水资源总量/常住人口	正
		人均水资源利用量 C ₄ /(m ³ /人)	用水量/常住人口	负
		地表水资源占比 C ₅ /%	地表水资源量/水资源总量	正
		水资源开发利用率 C ₆ /%	供水量/水资源总量	负
	社会子系统 B ₂	人口密度 C ₇ /(人/ km ²)	常住总人口/区域总面积	负
		人口自然增长率 C ₈ /‰	人口自然增长量/年平均总人数	负
		城镇化率 C ₉ /%	城镇人口数/总人口数	正
		城镇人均日生活用水量 C ₁₀ /L	城镇日生活用水量/城镇总人口	负
	经济子系统 B ₃	人均 GDP C ₁₁ /元	地区 GDP/常住人口	正
		第三产业比重 C ₁₂ /%	第三产业 GDP/GDP 总量	正
		万元 GDP 用水量 C ₁₃ /(m ³ /万元)	用水总量/GDP 总量	负
		万元工业增加值用水量 C ₁₄ /(m ³ /万元)	工业用水总量/工业总增加值	负
		万元农业增加值用水量 C ₁₅ /(m ³ /万元)	农业用水总量/农业总增加值	负
		农田灌溉亩均用水量 C ₁₆ /(m ³ /亩)	统计数据	负
	生态环境子系统 B ₄	生态环境用水率 C ₁₇ /%	生态环境用水量/用水总量	负
		森林覆盖率 C ₁₈ /%	森林面积/区域总面积	正
		城市绿化覆盖率 C ₁₉ /%	城市绿化面积/城市总面积	正
		水土流失治理面积 C ₂₀ /10 ⁴ hm ²	统计数据	正
		化学需氧量排放量 C ₂₁ /t	统计数据	负
		氨氮排放量 C ₂₂ /t	统计数据	负
		单位耕地施肥量 C ₂₃ /(kg/亩)	农用化肥折纯量/耕地面积	负
		污水排放量 C ₂₄ /10 ⁴ t	统计数据	负
		城市污水日处理能力 C ₂₅ /(10 ⁴ t/d)	统计数据	正
		城市污水处理率 C ₂₆ /%	污水处理量/污水排放总量	正

设有 m 个评价指标, n 个评价对象, x_{ij} 为第 i 个评价指标在第 j 个评价对象上的对应数值, 则原始评价矩阵为:

$$X=(x_{ij})_{m \times n} \quad (i=1,2,\cdots,m; j=1,2,\cdots,n) \quad (1)$$

2)归一化、正向化处理

由于各指标类型不同、量纲不一,为了排除这些差

异的影响,需要对各指标进行无量纲化处理. 对于熵权法,宜采用极值法^[28]进行处理,得到标准化矩阵 Y .

$$Y=(y_{ij})_{m \times n} \quad (i=1,2,\cdots,m; j=1,2,\cdots,n) \quad (2)$$

正向指标:
$$y_{ij}=\frac{x_{ij}-\min(x_{ij})}{\max(x_{ij})-\min(x_{ij})} \quad (3)$$

负向指标:
$$y_{ij}=\frac{\max(x_{ij})-x_{ij}}{\max(x_{ij})-\min(x_{ij})} \quad (4)$$

式中: y_{ij} 为第 j 个评价对象在第 i 个评价指标上的标准值。

3) 计算第 i 个评价指标的信息熵

$$h_i = \frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n e_{ij} \ln e_{ij} \quad (5)$$

$$e_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{j=1}^n y_{ij}} \quad (6)$$

4) 计算权重 w_{li}

$$w_{li} = \frac{1 - h_i}{m - \sum_{i=1}^m h_i} \quad (7)$$

式中: $0 \leq w_{li} \leq 1$, $\sum_{i=1}^m w_{li} = 1$, $i=1, 2, \dots, m$ 。

2.2.2 改进的 CRITIC 法

CRITIC 法(criteria importance through intercriteria correlation)是由 Diakoulaki 提出的通过计算指标的变异性与冲突性来综合衡量指标权重的一种客观赋权法。变异性指同一指标针对不同对象取值的差异性,通常用标准差来度量。冲突性指各指标之间的相关性大小,通常用相关系数来表示。通用计算方法见文献[23],该计算公式存在两个问题^[29-30]: 1)各指标量纲、数量级不同,用标准差反映差异性存在准确性低、误差大的缺陷; 2)指标间的相关系数有可能存在负值,而绝对值相同的正相关与负相关其相关性相同。针对此问题,本研究采用文献[23]的方法进行改进: 1)运用变异系数度量指标差异性; 2)通过相关系数绝对值来计算指标之间的冲突性。设 C_i 代表第 i 个评价指标的信息量,表达公式为:

$$C_i = \frac{\sigma_i}{X_i} \sum_{j=1}^n (1 - |r_{ij}|) \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

式中: σ_i 为第 i 个评价指标的标准差, X_i 为第 i 个评价指标的均值, σ_i/X_i 即为第 i 个评价指标的变异系数, r_{ij} 为第 i 个评价指标与第 j 个评价指标间的相关系数。则第 i 个评价指标的权重 w_{2i} 计算公式为:

$$w_{2i} = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^m C_i} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

2.2.3 博弈论组合赋权法

基于博弈论将熵权法和改进的 CRITIC 法相结合求得组合权重 w , 计算方法如下^[31]:

1) 通过熵权法和 CRITIC 法计算各指标权重, 分别得到权重集 w_1 和 w_2 , 设 a_1, a_2 为线性组合系数, 将权重集 w_1 和 w_2 进行线性组合:

$$w = a_1 w_1^T + a_2 w_2^T \quad (10)$$

2) 根据博弈论思想, 对(10)式中的线性组合系数 a_1, a_2 进行优化, 以组合权重 w 和 w_1, w_2 离差最小化为目标确定目标函数:

$$\min \left\| \sum_{k=1}^2 a_k w_k^T - w \right\|^2 \quad (k=1, 2) \quad (11)$$

3) 根据矩阵微分性质, 确定(11)式最优化一阶导数条件的线性微分方程组为:

$$\begin{bmatrix} w_1 w_1^T & w_1 w_2^T \\ w_2 w_1^T & w_2 w_2^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 w_1^T \\ w_2 w_2^T \end{bmatrix} \quad (12)$$

4) 由(12)式计算得到优化组合系数 a_1, a_2 , 归一化处理得到 $a_1^* = a_1 / (a_1 + a_2)$, $a_2^* = a_2 / (a_1 + a_2)$, 则基于博弈论组合赋权的综合权重 w 为:

$$w = a_1^* w_1^T + a_2^* w_2^T \quad (13)$$

2.3 TOPSIS 模型

TOPSIS 法(technique for order preference by similarity to an ideal solution)即“逼近理想解排序法”, 是由 C.L. Hwang 和 K. Yoon 于 1981 年首次提出的一种多目标决策分析方法。该方法能够充分利用原始数据信息, 精确地反映各评价方案之间的差距, 对数据分布及样本含量没有严格限制, 数据计算简单易行, 是一种常见的组内综合评价方法。通过构造评价对象与正、负理想解之间的距离来判断评价对象的优劣程度。具体计算步骤如下^[27]:

1) 原始数据同趋势化、归一化。将负向指标进行倒数处理, 然后采用公式(14)计算归一化值, 即由原始矩阵 X 得到无量纲决策矩阵 $Z = (z_{ij})_{m \times n}$

$$z_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (14)$$

2) 构造加权决策矩阵 V

$$v_{ij} = w_i z_{ij} \quad (15)$$

3) 计算正负理想解 A_i^+, A_i^-

$$\begin{cases} A_i^+ = \max_{1 \leq j \leq n} (v_{ij}) & (i=1, 2, \dots, m) \\ A_i^- = \min_{1 \leq j \leq n} (v_{ij}) & (i=1, 2, \dots, m) \end{cases} \quad (16)$$

4) 计算各评价对象与正负理想解的距离 $Ad_j^+,$

$$Ad_j^-$$
$$\left\{ \begin{aligned} Ad_j^+ &= \sqrt{\sum_{i=1}^m (A_i^+ - v_{ij})^2} \quad (j=1, 2, \dots, n) \\ Ad_j^- &= \sqrt{\sum_{i=1}^m (A_i^- - v_{ij})^2} \quad (j=1, 2, \dots, n) \end{aligned} \right. \quad (17)$$

5)计算贴近度 G_j

$$G_j = \frac{Ad_j^-}{Ad_j^+ + Ad_j^-} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (18)$$

式中: G_j 越接近于 1,证明该对象与正理想解越靠近,评价结果越优,反之越差.

2.4 障碍度模型

通过障碍度模型进行障碍因子诊断,是在水资源承载力评价的基础上进一步识别影响水资源承载力的主要障碍因素,有助于认识区域水资源开发利用现状,提高水资源承载力水平.某项指标的障碍度越大,说明该指标对水资源承载力的阻碍作用越强,反之越弱.计算时引入因子贡献度(F_i)、指标偏离度(I_{ij})和障碍度(P_{ij}),公式如下^[32]:

$$P_{ij} = \frac{F_i I_{ij}}{\sum_{i=1}^m F_i I_{ij}} \times 100\% \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (19)$$

$$F_i = w_i T_i \quad (20)$$

$$I_{ij} = 1 - z_{ij} \quad (21)$$

式中: w_i 为各指标所占权重; T_i 为各子系统所占的权重; z_{ij} 为标准化处理后的指标值.

3 计算结果

3.1 权重计算结果

根据 2.2 节熵权法和改进的 CRITIC 法分别计算权重集 w_1 和 w_2 , 通过博弈论法计算出优化组合系数

$a_1^*=0.3688$, $a_2^*=0.6312$,进而计算各指标的组合同权重 w .分配结果列于表 2.

表 2 博弈论组合赋权的指标权重分配结果
Table 2 Index weight distribution results of game theory combination weighting

指标	w_1	w_2	w	指标	w_1	w_2	w
C_1	0.0360	0.0855	0.0672	C_{14}	0.0150	0.1051	0.0719
C_2	0.0320	0.0054	0.0152	C_{15}	0.0220	0.0386	0.0325
C_3	0.0350	0.0834	0.0656	C_{16}	0.0500	0.0419	0.0449
C_4	0.0250	0.0077	0.0141	C_{17}	0.0280	0.0665	0.0523
C_5	0.0280	0.0002	0.0105	C_{18}	0.0650	0.0075	0.0287
C_6	0.0240	0.0788	0.0586	C_{19}	0.0500	0.0149	0.0279
C_7	0.0430	0.0026	0.0175	C_{20}	0.0470	0.0150	0.0268
C_8	0.0390	0.0266	0.0312	C_{21}	0.0610	0.0625	0.0619
C_9	0.0280	0.0156	0.0202	C_{22}	0.0670	0.0604	0.0629
C_{10}	0.0490	0.0166	0.0285	C_{23}	0.0930	0.0142	0.0433
C_{11}	0.0310	0.0518	0.0441	C_{24}	0.0220	0.0595	0.0456
C_{12}	0.0440	0.0101	0.0226	C_{25}	0.0260	0.0642	0.0501
C_{13}	0.0190	0.0572	0.0431	C_{26}	0.0210	0.0080	0.0128

3.2 贴近度 G_j 计算结果

根据各指标组合权重和 TOPSIS 模型评价方法及步骤,对 2011—2020 年安康市水资源承载力及各子系统进行综合评价,并计算水资源承载力复合系统与各子系统评价值的相关性,结果见表 3.

4 评价结果分析

4.1 复合系统水资源承载力分析

由图 2 可知,安康市水资源承载力变化趋势呈

表 3 安康市 2011—2020 年水资源承载力评价结果
Table 3 Evaluation results of water resources carrying capacity in Ankang City during 2011–2020

年份	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	均值	相关系数
G 综合	0.4793	0.3718	0.3292	0.3569	0.4163	0.4514	0.6133	0.5291	0.6265	0.4740	0.4648	1.0000
G 水资源	0.9934	0.3727	0.0343	0.1640	0.3752	0.1662	0.8781	0.2346	0.7697	0.4663	0.4454	0.6989
G 社会	0.3118	0.2849	0.2818	0.4211	0.5525	0.3005	0.3006	0.5917	0.7139	0.6952	0.4454	0.4203
G 经济	0.2635	0.3147	0.3775	0.3674	0.5375	0.5956	0.6717	0.7429	0.7236	0.6051	0.5199	0.7409
G 生态环境	0.4956	0.4356	0.4150	0.4159	0.3322	0.4328	0.4816	0.4608	0.5156	0.3760	0.4361	0.6201



图2 安康市 2011—2020 年水资源承载力评价值

Fig. 2 Evaluation values of water resources carrying capacity in Ankang City during 2011—2020

1—水资源子系统 (water resources subsystem); 2—社会子系统 (social subsystem); 3—经济子系统 (economy subsystem); 4—生态环境子系统 (eco-environment subsystem); 5—复合系统 (compound system)

“W”型,贴适度 2019 年最高,2013 年最低。总体上可分为 3 个阶段:第一阶段为 2011—2013 年,贴适度值从 0.4793 降低至 0.3292,下降 31.32%,下降幅度较大,主要表现为水资源、社会 and 生态环境 3 个子系统承载力评价均呈下降趋势,尤其是水资源子系统,降幅高达 96.55%;第二阶段为 2013—2017 年,贴适度值从 0.3292 上升到 0.6133,增长 86.30%,增长幅度较大,主要表现为 4 个子系统评价均呈上升趋势,水资源、社会、经济 and 生态环境子系统分别增长 2460.06%、6.67%、77.93%、16.05%;第三阶段为 2017—2020 年,贴适度呈波动态势,虽然 2019 年贴适度值最高,但仍处于下降趋势,主要表现为水资源、经济 and 生态环境 3 个子系统评价均呈波动下降趋势,尤其是水资源和生态环境子系统,分别下降 46.90%和 27.08%。从表 3 中的均值和相关系数分析可知,经济子系统对水资源承载力的贡献最大,其次为水资源子系统、社会子系统和生态环境子系统。

综合来看,在 2011—2020 年整个评价期内,安康市水资源承载力总体变化不大,呈波动状态,承载力水平处于中等,表明水资源仍有较大开发利用空间。

4.2 各子系统水资源承载力分析

根据表 3 和图 2 评价结果,对各子系统承载力进行分析。

4.2.1 水资源子系统

水资源子系统承载力波动幅度很大,总体呈下降

趋势,与复合系统水资源承载力变化趋势基本一致。2011—2013 年贴适度由 0.9934 骤降至 0.0343,降幅高达 96.55%,2013—2020 年贴适度呈波动上升趋势,但在 2016、2018、2020 年均较前一年有明显的下降。从统计数据分析可知,水资源子系统贴适度值与产水模数、人均水资源量变化趋势保持一致。2011—2013 年间,产水模数从 $66.17 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 减少到 $28.64 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$,人均水资源量从 $5\,907.63 \text{ m}^3/\text{人}$ 下降到 $2\,576.15 \text{ m}^3/\text{人}$,分别下降 56.72%和 56.39%。该时段内人口密度从 $112.01 \text{ 人}/\text{km}^2$ 降低到 $111.15 \text{ 人}/\text{km}^2$,说明在常住总人口变化不大的情况下,水资源总量的减少,使得水资源供需矛盾加大,从而导致水资源承载力的骤降。

4.2.2 社会子系统

社会子系统承载力呈波动上升趋势,贴适度从 2011 年的 0.3118 增长到 2020 年的 0.6952,增幅达 122.96%。综合来看存在 2 个上升阶段和 3 个下降阶段:上升阶段为 2013—2015 年、2016—2019 年,前者贴适度值从 0.2818 增长至 0.5525,后者从 0.3005 增长至 0.7139,分别增长 96.06%和 137.57%。下降阶段为 2011—2013 年、2015—2016 年、2019—2020 年,贴适度值分别从 0.3118 下降至 0.2818,0.5525 下降至 0.3006,0.7139 下降至 0.6952。从原始数据来看,上升段主要是由于人口密度、人口自然增长率和人均日常生活用水量的降低以及城镇化率的升高综合作用的结果。下降段 2011—2013 年人口自然增长率从 2.57‰ 增长到 2.85‰,相比人口密度、城镇化率和城镇人均日常生活用水量变化幅度大,导致承载力水平略微降低。而 2015—2016 年和 2019—2020 年两个阶段主要是由于人口自然增长和城镇化进程的加快,人均日常生活用水量快速升高,尤其是 2020 年从 115.91 L 增长到 125.56 L,增幅达 8.33%,用水量的增加导致承载力水平下降。表明在城镇化进程加快的过程中大量人口进入城市,随着用水量的增大,政府部门对水资源的节约管控和群众对水资源的节约意识需要加强和提升。

4.2.3 经济子系统

经济子系统承载力呈上升趋势,贴适度值从 2011 年的 0.2635 增长到 2020 年的 0.6051,增长 129.64%。从原始数据分析可知,主要原因是 2011—2020 年人均国内生产总值(GDP)和第三产业比重的增长以及万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量、万元农业增加

值用水量大幅降低综合作用的结果。其中人均 GDP 从 15 107 元增长到 43 666 元, 第三产业比重从 40.00% 增至 45.28%, 万元 GDP 用水量从 184.4 m³/万元下降到 71.4 m³/万元, 万元工业增加值用水量从 69.76 m³/万元下降到 24.55 m³/万元, 万元农业增加值用水量从 935.66 m³/万元下降到 405.35 m³/万元, 变化幅度分别为 +189.04%、+5.28%、-61.28%、-64.81%、-56.68%。

此外, 2014、2020 年贴近度值较上一年有所降低, 2014 年降低的主要原因为农田灌溉亩均用水量较上一年增长达 59.34%, 对承载力水平有较大影响, 而 2020 年主要是因为人均 GDP 降低以及万元 GDP 用水量和万元工业增加值用水量增大所致。

综上可知, 随着经济规模的快速增长和产业结构的调整, 以及水资源利用率的快速提升, 安康市经济子系统承载力能力已经达到一定水平, 但仍需进一步优化产业结构, 降低水资源量的消耗, 使经济发展保持良好的增长态势。

4.2.4 生态环境子系统

生态环境子系统承载力变化趋势总体呈“V”型, 可分为 2011—2015 年的缓慢下降阶段和 2015—2020 年的波动上升阶段。2011—2015 年贴近度值从 0.4956 下降至 0.3322, 降幅 32.97%。从原始数据来看, 生态环境子系统承载力下降的主要原因是生态环境用水率、污水排放量、单位耕地施肥量的增加和水土流失治理面积的减少。计算可知, 2015 年生态环境用水率、污水排放量和单位耕地施肥量较 2011 年分别增长 130.77%、35.93%、16.75%, 可见生态环境用水量的增加加大了对水资源的负载, 虽然此阶段城市污水日处理能力和城市污水处理率有了较大提升, 但仍不足以抵消污水排放量对水资源承载力的影响程度。2015—2020 年贴近度值从 0.3322 上升至 0.3760, 属于波动上升阶段。分析数据可知, 森林覆盖率和城市绿化覆盖率的增加、城市污水日处理能力和城市污水处理率的提升以及化学需氧量、氨氮排放量的大幅降低是承载力上升的主要原因。其中, 森林覆盖率和城市绿化覆盖率分别达到 67.95% 和 40.15%, 污水日处理能力达到 21.47×10⁴ t/d, 城市污水处理率为 96.69%。而化学需氧量排放量和氨氮排放量分别较 2015 年下降 16.38% 和 46.32%。

总体上, 从生态环境用水率、污水日处理能力和城

市污水处理率的快速增长以及化学需氧量和氨氮排放量的大幅度下降, 可见安康市在经济发展过程中对环境保护的重视程度越来越高, 尤其是“十三五”期间对水污染方面的整治力度有了显著增强。然而, 从图 2 可以看出, 2020 年贴近度值较 2019 年有一定的下降。从原始数据分析可知, 2020 年人均 GDP 较 2019 年降低 7.00%, 而化学需氧量排放量和氨氮排放量分别上升 55.35% 和 13.94%。虽然经济处于负增长状态, 但部分污染物排放量反而有所增长, 说明在污染防治方面有所松懈, 应该引起重视。

4.3 水资源承载力障碍度因素诊断

4.3.1 各子系统主要障碍因素分析

利用公式(19)—(21)计算 2011—2020 年各指标障碍度, 可得各子系统承载力主要障碍因子及变化趋势, 如图 3 所示。

从图 3a 可知, 水资源子系统主要障碍因子为产水模数、人均水资源量和水资源开发利用率, 且三者障碍度总体呈上升趋势。从原始数据分析可知, 2011 年以来, 产水模数从 66.17×10⁴ m³/km² 降低至 46.47×10⁴ m³/km², 人均水资源量从 5 907.63 m³/人降低至 4 359.51 m³/人, 二者呈波动下降趋势, 而水资源开发利用率从 4.72% 上升至 7.15%。水资源子系统中承载力受气候变化和人类活动双重影响, 气候变化作为不可抗因素时, 人类活动对水资源的需求在逐步加大, 因此, 应结合水资源量进行合理配置和开发利用。

从图 3b 可知, 社会子系统各指标障碍度总体小于 1.0%, 普遍较小, 承载力主要障碍因子为人口自然增长率和城镇人均日生活用水量, 而人口密度和城镇化率影响相对较小。

从图 3c 可知, 经济子系统各指标障碍度总体呈下降趋势, 主要障碍因子为万元工业增加值用水量、人均 GDP、万元 GDP 用水量和农田灌溉亩均用水量。从原始数据分析可知, 万元工业增加值用水量从 69.76 m³/万元下降至 24.55 m³/万元, 人均 GDP 从 15 107 元增长至 43 666 元, 万元 GDP 用水量从 184.4 m³/万元下降至 71.4 m³/万元, 农田灌溉亩均用水量从 449.0 m³/亩增长至 701.1 m³/亩。可以看出, 随着经济快速发展和人民生活水平的提高, 安康市逐步将高能耗的工矿企业转向绿色低碳的农牧渔产业, 单位 GDP 用水量大幅下降, 而农田灌溉亩均用水量却在大幅上涨。因此在

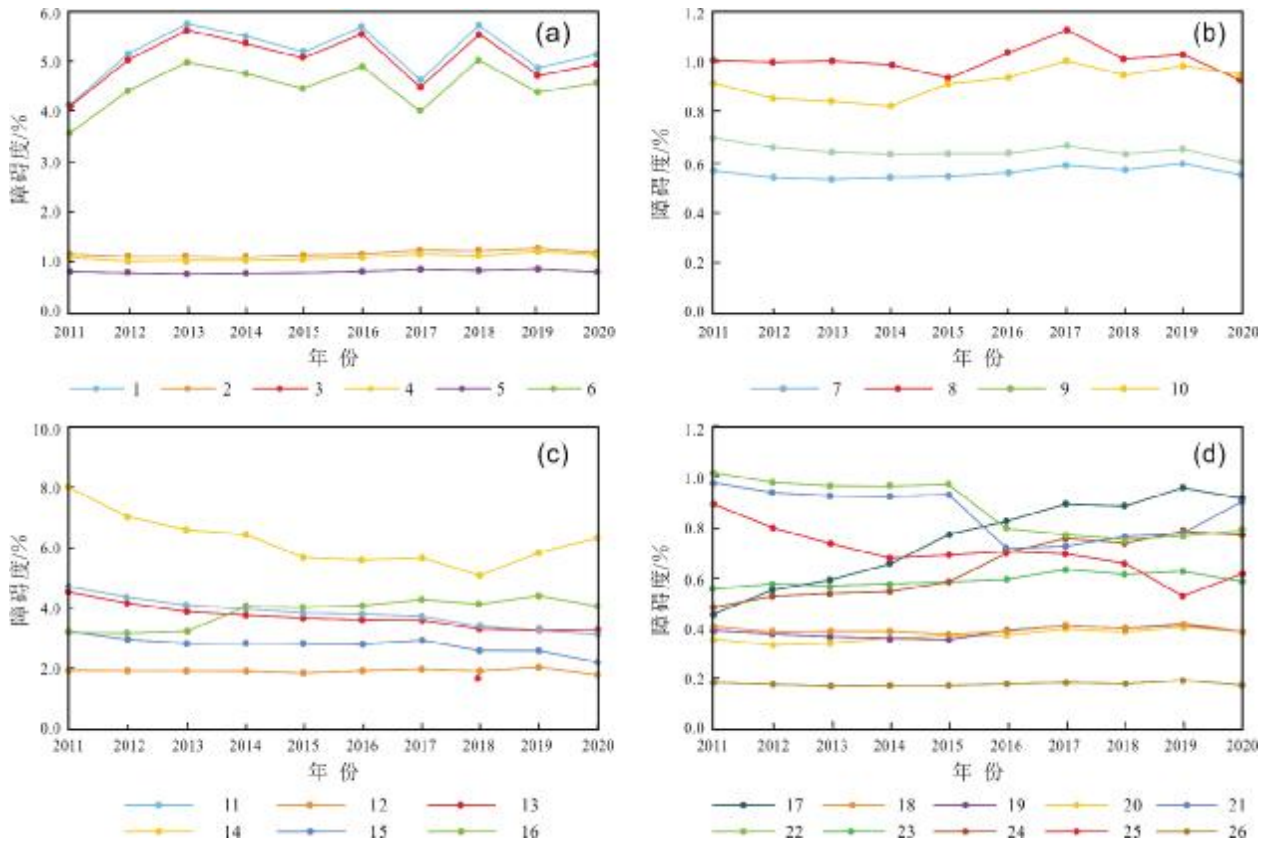


图 3 2011—2020 年安康市水资源承载力各指标障碍度

Fig. 3 Obstacle degrees of indexes for water resources carrying capacity in Ankang City during 2011–2020

a—水资源子系统 (water resources subsystem); b—社会子系统 (society subsystem); c—经济子系统 (economy subsystem); d—生态环境子系统 (eco-environment subsystem); 1—产水模数 (water production modulus); 2—供水模数 (water supply modulus); 3—人均水资源量 (water resources per capita); 4—人均水资源利用量 (water utilization per capita); 5—地表水资源占比 (proportion of surface water resources); 6—水资源开发利用率 (water resources utilization ratio); 7—人口密度 (population density); 8—人口自然增长率 (natural population growth rate); 9—城镇化率 (urbanization rate); 10—城镇人均日生活用水量 (daily domestic water consumption per capita in cities and towns); 11—人均 GDP (GDP per capita); 12—第三产业比重 (proportion of the tertiary industry); 13—万元 GDP 用水量 (water consumption per 10 000 yuan GDP); 14—万元工业增加值用水量 (water consumption per 10 000 yuan of industrial added value); 15—万元农业增加值用水量 (water consumption per 10 000 yuan of agricultural added value); 16—农田灌溉亩均用水量 (average water consumption per mu for farmland irrigation); 17—生态环境用水率 (water consumption rate of eco-environment); 18—森林覆盖率 (forest coverage); 19—城市绿化覆盖率 (urban green coverage); 20—水土流失治理面积 (control area of water and soil loss); 21—化学需氧量排放量 (COD emission); 22—氨氮排放量 (ammonia nitrogen emission); 23—单位耕地施肥量 (fertilization amount per unit cultivated land area); 24—污水排放量 (sewage discharge); 25—城市污水日处理能力 (daily treatment capacity of urban sewage); 26—城市污水处理率 (urban sewage treatment rate)

农业灌溉上要采用节约集约用水技术,提升节水意识,降低农用灌溉用水量.

从图 3d 可知,生态环境子系统各指标障碍度普遍较高,其主要障碍因子为氨氮排放量、化学需氧量排放量、城市污水日处理能力、单位耕地施肥量、生态环境用水率和污水排放量.除生态环境用水率和污水排放量的障碍度逐步增高外,其余指标障碍度均呈下降趋势.从原始数据分析可知,“十二五”到“十三五”期间,

随着生态环境保护意识的增强和环保力度的加大,化学需氧量排放量和氨氮排放量分别降低 22.66%和 50.47%,而生态环境用水率却从 0.39%上升至 1.69%,说明人们对生态环境的重视越来越强,生态环境对水资源的需求在逐步加大.虽然污水排放总量在快速增长,但污水处理率已经达到 96.69%,排入环境中的实际排污量在不断降低.整体来看,生态环境子系统各指标障碍度对水资源承载力作用较强,应继续加大环

境保护力度,不断降低污染物排放量,继续提升污水日处理能力和处理率,减少生态环境污染,提升水资源承载能力.

4.3.2 复合系统主要障碍因素分析

根据各指标障碍度计算可得各子系统相对复合系统障碍度(图 4),并选取障碍度前 10 位的指标作为主要障碍因子列于表 4.

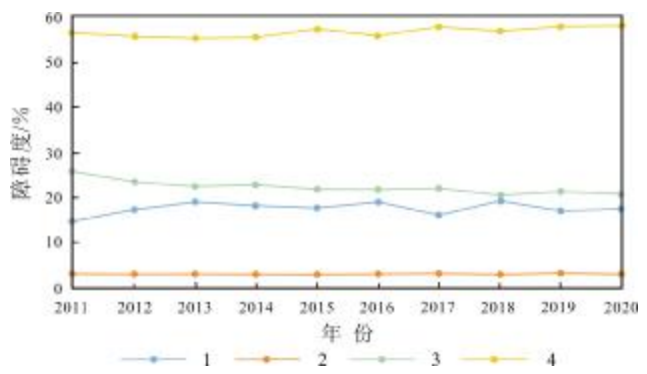


图 4 2011—2020 年安康市水资源承载力各子系统障碍度
Fig. 4 Obstacle degrees of subsystems for water resources carrying capacity in Ankang City during 2011–2020
1—水资源子系统 (water resources subsystem); 2—社会子系统(society subsystem); 3—经济子系统(economy subsystem); 4—生态环境子系统 (eco-environment subsystem)

由图 4 可知,2011—2020 年评价期内,生态环境子系统障碍度最高,其次为经济子系统、水资源子系统和 社会子系统. 其中,生态环境和水资源子系统障碍度分别升高 3.28%和 20.16%,经济和社会子系统障碍度分别下降 18.27%和 4.71%.

从表 4 分析可知,安康市水资源承载力复合系统主要障碍因子为氨氮排放量、化学需氧量排放量、生态环境用水率、城市污水日处理能力、污水排放量和万元工业增加值用水量,其次为单位耕地施肥量、产水模数和人均水资源量,其他指标障碍度相对较小.

总体变化可分为两个阶段:第一个阶段是 2011—2015 年,障碍度以氨氮排放量、化学需氧量排放量、城市污水日处理能力和万元工业增加值用水量为 主,其中氨氮排放量和化学需氧量排放量障碍度基本不变,万元工业增加值用水量和城市污水日处理能力障碍度在逐渐降低,而生态环境用水率和污水排放量的障碍度在快速升高. 从原始数据可知,该时段万元工业增加值用水量从 69.76 m³/万元大幅降低至 20.48 m³/万元,城市污水日处理能力从 6×10⁴ t/d 提升至 16×10⁴ t/d,污水排放量从 1 078.90×10⁴ t/d 增长到 1 466.56×10⁴ t/d,生态环境用水率也从 0.39%提升至 0.90%. 第二阶段

表 4 2011—2020 年安康市水资源承载力主要障碍因子及障碍度

Table 4 Main obstacle factors and obstacle degrees of water resources carrying capacity in Ankang City during 2011–2020

年份	障碍因子及障碍度排序										累积障碍度
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
2011	C ₂₂ 10.10	C ₂₁ 9.71	C ₂₅ 8.83	C ₁₄ 8.02	C ₂₃ 5.50	C ₂₄ 4.76	C ₁₁ 4.68	C ₁₃ 4.54	C ₁₇ 4.51	C ₁ 4.12	64.77
2012	C ₂₂ 9.70	C ₂₁ 9.30	C ₂₅ 7.92	C ₁₄ 7.05	C ₂₃ 5.72	C ₁₇ 5.49	C ₂₄ 5.23	C ₁ 5.12	C ₃ 5.03	C ₆ 4.40	64.97
2013	C ₂₂ 9.62	C ₂₁ 9.16	C ₂₅ 7.31	C ₁₄ 6.65	C ₁₇ 5.99	C ₁ 5.72	C ₂₃ 5.62	C ₃ 5.60	C ₂₄ 5.30	C ₆ 4.95	65.91
2014	C ₂₂ 9.62	C ₂₁ 9.20	C ₂₅ 6.77	C ₁₇ 6.47	C ₁₄ 6.44	C ₂₃ 5.67	C ₁ 5.48	C ₃ 5.36	C ₂₄ 5.36	C ₆ 4.74	65.11
2015	C ₂₂ 9.65	C ₂₁ 9.25	C ₁₇ 7.61	C ₂₅ 6.86	C ₂₃ 5.78	C ₂₄ 5.73	C ₁₄ 5.68	C ₁ 5.17	C ₃ 5.06	C ₆ 4.46	65.24
2016	C ₁₇ 8.15	C ₂₂ 7.78	C ₂₁ 7.13	C ₂₅ 7.00	C ₂₄ 6.96	C ₂₃ 5.89	C ₁ 5.67	C ₁₄ 5.62	C ₃ 5.53	C ₆ 4.91	64.65
2017	C ₁₇ 8.86	C ₂₂ 7.62	C ₂₄ 7.49	C ₂₁ 7.19	C ₂₅ 6.88	C ₂₃ 6.27	C ₁₄ 5.67	C ₁ 4.60	C ₃ 4.49	C ₁₆ 4.32	63.38
2018	C ₁₇ 8.80	C ₂₁ 7.58	C ₂₂ 7.41	C ₂₄ 7.29	C ₂₅ 6.48	C ₂₃ 6.08	C ₁ 5.70	C ₃ 5.55	C ₁₄ 5.10	C ₆ 5.00	64.99
2019	C ₁₇ 9.49	C ₂₄ 7.74	C ₂₁ 7.71	C ₂₂ 7.63	C ₂₃ 6.23	C ₁₄ 5.86	C ₂₅ 5.25	C ₁ 4.86	C ₃ 4.69	C ₁₆ 4.40	63.87
2020	C ₁₇ 9.03	C ₂₁ 9.00	C ₂₂ 7.77	C ₂₄ 7.65	C ₁₄ 6.37	C ₂₅ 6.09	C ₂₃ 5.80	C ₁ 5.13	C ₃ 4.93	C ₆ 4.57	66.33

单位:%.

是 2016—2020 年,生态环境用水率的障碍度提升至首位,其次为氨氮排放量、化学需氧量排放量、污水排放量和城市污水日处理能力。从数据可知,到 2020 年,环境用水率已增长至 1.69%,而氨氮排放量已经从 2015 年的 4 538 t 降低至 2 436 t,化学需氧量排放量也从 34 529 t 降低至 28 872 t,但污水排放量已经增长至 3292×10^4 t。

以上数据表明,“十二五”期间,随着经济的快速发展,安康市开始重视工业用水的控制,在逐步优化工业产业结构,向节水型社会发展,同时也加大了生态环境的管理与建设,但在氨氮、化学需氧量排放量上还未进行有效的控制。而在“十三五”期间,随着生态文明建设的加快推进,建设资源节约型和环境友好型社会以及山水林田湖生命共同体等理念的提升,安康市作为南水北调中线工程水源地核心区对生态环境保护越来越重视。从各子系统障碍度和主要指标障碍度综合来看,应进一步统筹协调水资源、经济、社会和生态环境复合系统,加大环境保护力度,不断优化产业结构,通过技术革新进一步降低水资源消耗量和污染物排放量,使水资源承载力水平在经济社会发展的过程中逐步提升。

5 结论

本研究以水资源-社会-经济-生态环境复合系统理论为基础构建安康市水资源承载力评价指标体系,采用博弈论组合赋权法,运用 TOPSIS 模型和障碍度模型对安康市 2011—2020 年水资源承载力进行综合评价,主要结论如下:

1) 从承载力综合水平来看,2011—2020 年安康市水资源承载力变化趋势呈“W”型,综合评价从 0.4793 下降至 0.4740,总体变化不大,水资源仍有较大开发利用空间。其中,经济子系统对水资源承载力的贡献最大,其次为水资源子系统、社会子系统和生态环境子系统。

2) 从子系统承载力来看,2011—2020 年水资源和生态环境子系统承载力总体呈下降趋势,社会和经济子系统承载力呈上升趋势。在 2020 年,各子系统承载力均有所下降。

3) 障碍度分析表明,生态环境子系统障碍度最高,其次为经济子系统和水资源子系统,社会子系统障碍

度最低。其中,氨氮排放量、化学需氧量排放量、生态环境用水率、城市污水日处理能力和万元工业增加值用水量是主要的障碍因子。

参考文献(References):

- [1] 左其享. 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.
- [2] Zuo Q T. Review of research methods of water resources carrying capacity[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(3): 1-6, 54.
- [3] 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.
- [4] Liu J J, Dong S C, Li Z H. Comprehensive evaluation of China's water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(2): 258-269.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 施雅风, 曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 94-111.
- [8] Shi Y F, Qu Y G. The carrying capacity of water resources and its reasonable use of Urumqi River[M]. Beijing: Science Press, 1992: 94-111.
- [9] 惠洪河, 蒋晓辉, 黄强, 等. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 30-34.
- [10] Hui Y H, Jiang X H, Huang Q, et al. Research on evaluation index system of water resources bearing capacity[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(1): 30-34.
- [11] 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.
- [12] Wang J H, Jiang D C, Xiao W H, et al. Study on theoretical analysis of water resources carrying capacity: Definition and scientific topics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12): 1399-1409.
- [13] 王建华, 何凡, 何国华. 关于水资源承载力需要厘清的几点认识[J]. 中国水利, 2020(11): 1-5.
- [14] Wang J H, He F, He G H. Some understandings about the clarification of water resources carrying capacity[J]. China Water Resources, 2020(11): 1-5.
- [15] Peng T, Deng H W. Comprehensive evaluation on water resource carrying capacity based on DPESBR framework: A case study in Guiyang, southwest China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 268, 122235.
- [16] 程清平, 钟方雷, 左小安, 等. 美丽中国与联合国可持续发展目标(SDGs)结合的黑河流域水资源承载力评价[J]. 中国沙漠, 2020,

- 40(1): 204–214.
- Cheng Q P, Zhong F L, Zuo X A, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Heihe River basin combining beautiful China with SDGs[J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(1): 204–214.
- [10] 张旭, 刘新华, 张桂林, 等. 新疆阿克苏河流域水资源承载力变化分析[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(9): 44–47.
- Zhang X, Liu X H, Zhang G L, et al. Analysis of change of water resources carrying capacity in Aksu River basin of Xinjiang[J]. *Water Resources and Power*, 2020, 38(9): 44–47.
- [11] 李庆贺, 伍博伟, 杨珺丽, 等. 福建省城市水资源承载力综合评价研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(4): 147–151.
- Li Q H, Wu B W, Yang J L, et al. Comprehensive evaluation on urban water resources carrying capacity in Fujian Province [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2014, 25(4): 147–151.
- [12] 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.
- [13] 田培, 张志好, 许新宜, 等. 基于变权 TOPSIS 模型的长江经济带水资源承载力综合评价[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 53(5): 755–764.
- Tian P, Zhang Z H, Xu X Y, et al. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt based on variable weight TOPSIS model[J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 2019, 53(5): 755–764.
- [14] 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.
- Yang H Y, Sun X B, Cheng X W, et al. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Weifang based on the VIKOR method[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(2): 716–723.
- [15] 范嘉伟, 黄锦林, 袁明道, 等. 灰色关联-熵模型在珠三角水资源承载力评估中的应用[J]. *中国农村水利水电*, 2019(7): 35–39.
- Fang J W, Huang J L, Yuan M D, et al. The application of grey correlation-entropy model in water resources carrying capacity evaluation to Pearl River delta[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019(7): 35–39.
- [16] 苏永军, 王慧, 孔淑芹. 基于投影寻踪-物元可拓模型的区域水资源承载力评价[J]. *节水灌溉*, 2017(2): 80–84, 89.
- Su Y J, Wang H, Kong S Q. Evaluation of regional water resources carrying capacity based on projection pursuit-matter-element extension model[J]. *Water Saving Irrigation*, 2017(2): 80–84, 89. (in Chinese)
- [17] 余灏哲, 韩美. 基于 PSR 模型的陕西省水资源承载力熵权法评价[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(1): 27–31.
- Yu H Z, Han M. Entropy weight method evaluation of water resources carrying capacity in Shaanxi based on PSR Model[J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34(1): 27–31.
- [18] 孙佳乐, 王颖, 辛晋峰. 汉江流域(陕西段)水生态承载力评估[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(3): 80–86.
- Sun J L, Wang Y, Xin J F. Water ecology carrying capacity evaluation on Shaanxi section of Hanjiang River basin [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2018, 29(3): 80–86.
- [19] 邓乐乐, 郭生练, 李千珣, 等. 汉江流域水资源承载力综合评价研究[J]. *水资源研究*, 2020, 9(3): 249–258.
- Deng L L, Guo S L, Li Q X, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in the Han River basin [J]. *Journal of Water Resources Research*, 2020, 9(3): 249–258.
- [20] 史有瑜, 曹晓霞, 王秀玲, 等. 河北省城市生态气候宜居性评估[J]. *气象与环境科学*, 2019, 42(3): 102–109.
- Shi Y Y, Cao X X, Wang X L, et al. Evaluation of urban ecological and climatic livability in Hebei Province [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2019, 42(3): 102–109.
- [21] 骆茂林, 罗欢, 李中阳, 等. 基于组合赋权的改进尼梅罗指数法在地下水水质评价中的应用[J]. *节水灌溉*, 2019(5): 83–86, 98.
- Luo M L, Luo H, Li Z Y, et al. Application of the improved Nemerow index method based on combined weights in groundwater quality evaluation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(5): 83–86, 98.
- [22] 马海良, 施陈玲, 王蕾. 城镇化进程中的江苏水资源承载力研究——基于组合赋权和升半 Γ 型分布函数[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(11): 1697–1703.
- Ma H L, Shi C L, Wang L. The research of water environmental carrying capacity in the process of urbanization in Jiangsu: Based on combination of empowerment and half liter of Γ distribution function [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(11): 1697–1703.
- [23] 王晶, 胡贵隆, 张良. 京津冀地区水资源承载力评价与预测[J]. *中国农村水利水电*, 2022(3): 69–74.
- Wang J, Hu G L, Zhang L. Evaluation and prediction of temporal and spatial changes of water resources carrying capacity in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(3): 69–74.
- [24] 柴乃杰, 贾鼎元, 曾小雪. 水资源承载力的灰色模糊可变决策模型及应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(1): 70–76.
- Chai N J, Jia D Y, Zeng X X. Grey fuzzy variable decision model and its application for water resources carrying capacity[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2020, 31(1): 70–76.
- [25] 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.
- [26] 周玲玲, 王琳, 刘伟峰, 等. 基于客观组合赋权法的即墨市水资源

- 可持续利用评价[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(4): 50-55.
- Zhou L L, Wang L, Liu W F, et al. Assessment of sustainable use of water resources based on combination of weighting method in Jimo[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2014, 25(4): 50-55.
- [27] 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.
- Han L B, Men B H. Evaluation of water resources carrying capacity in Haihe River basin based on combinatorial game theory[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(11): 61-64.
- [28] 朱喜安, 魏国栋. 熵值法中无量纲化方法优良标准的探讨[J]. 统计与决策, 2015(2): 12-15.
- Zhu X A, Wei G D. Discussion on the fine standard of dimensionless method in entropy method[J]. Statistics & Decision, 2015(2): 12-15. (in Chinese)
- [29] 张鑫, 梁佩云, 陈茹茹. 区域科技服务业服务创新能力评价——基于改进的 CRITIC-VIKOR 法[J]. 科技管理研究, 2020, 40(16): 60-69.
- Zhang X, Liang P Y, Chen R R. Evaluation of service innovation ability of regional science and technology service industry: Based on the improved CRITIC-VIKOR method[J]. Science and Technology Management Research, 2020, 40(16): 60-69.
- [30] 张立军, 张潇. 基于改进 CRITIC 法的加权聚类方法[J]. 统计与决策, 2015(22): 65-68.
- Zhang L J, Zhang X. Weighted clustering method based on improved CRITIC method[J]. Statistics & Decision, 2015(22): 65-68. (in Chinese)
- [31] 陈婧, 赵敏, 周华, 等. 基于博弈论组合赋权的姜堰区模糊综合水质评价法及应用[J]. 水电能源科学, 2019, 37(9): 32-35, 91.
- Chen J, Zhao M, Zhou H, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation method in evaluation of water quality based game theory[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(9): 32-35, 91.
- [32] 石晓昕, 袁重乐, 钱会, 等. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的河北省水资源承载力评价及障碍因素研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(5): 92-99.
- Shi X X, Yuan C L, Qian H, et al. Evaluation and obstacle factors of water resources carrying capacity in Hebei Province based on DPSIR-TOPSIS model[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2021, 32(5): 92-99.

(上接第 598 页/Continued from Page 598)

- [19] 肖海斌. 人工冻土单轴抗压强度与温度和含水率的关系[J]. 岩土工程界, 2008, 11(4): 62-63, 76.
- Xiao H B. Relationship between uniaxial compressive strength and temperature and water content of artificial frozen soil[J]. Geotechnical Engineering World, 2008, 11(4): 62-63, 76. (in Chinese)
- [20] 蒋代军. 多年冻土地基桩土界面特性及桩基竖向承载性状研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019: 139-140.
- Jiang D J. Study on pile-soil interface property and vertical bearing behavior of pile foundation in permafrost[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019: 139-140.
- [21] 蒋慎. 冻融循环作用对路基粉质粘土抗剪强度的影响分析[J]. 湖南交通科技, 2017, 43(2): 59-62.
- Jiang S. Analysis of influence of freeze-thaw cycles on shear strength of subgrade silty clay[J]. Hunan Communication Science and Technology, 2017, 43(2): 59-62.