

基于博弈论-云模型的湖北省汉江中下游地区 水资源承载力评价

邓乐乐, 郭生练, 王 俊, 向 鑫

(武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要:针对现有水资源承载力评价方法单一赋权和主观选择不确定性的局限,构建了水资源承载力综合评价指标体系,考虑到水资源承载力评价的不确定性,采用博弈论融合单一赋权法生成指标权重,基于灰色关联-TOPSIS 法获取贴近度,并对云模型进行优化,提出了基于博弈论-云模型的评价方法,综合评价了湖北省汉江中下游地区 8 市 2010—2020 年水资源承载力时空变化。结果表明:水资源承载力水平上游高于下游,具有较强的聚集特征,空间分异性明显;2011 年水资源承载力水平最低,2020 年最高,总体呈波动上升趋势;各市水资源承载力水平以中等为主,部分年份达警戒水平。

关键词:水资源承载力;博弈论;云模型;汉江中下游;湖北省

中图分类号:X143

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2025)02-0200-09

Water resources carrying capacity assessment for middle-lower reaches of the Hanjiang River in Hubei Province based on game theory-cloud model//DENG Lele, GUO Shenglian, WANG Jun, XIANG Xin (State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To address the limitations of conventional individual weighting methods and subjective selection uncertainties in water resources carrying capacity assessment, a comprehensive evaluation indicator system was established. In consideration of the inherent uncertainties in water resources carrying capacity evaluation, an innovative methodology integrating game theory was developed to optimize individual weighting methods for indicator weighting determination. The improved grey correlation-TOPSIS method was employed to calculate closeness degree, coupled with an enhanced cloud model algorithm. This proposed game theory-cloud model hybrid approach was applied to assess the spatiotemporal evolution of water resources carrying capacity in eight cities within the middle-lower reaches of the Hanjiang River in Hubei Province from 2010 to 2020. The results indicate that the water resources carrying capacity was higher in the upstream areas compared to the downstream areas, exhibiting strong clustering characteristics and significant spatial heterogeneity. The water resources carrying capacity was at its lowest level in 2011 and reached its highest level in 2020, showing an overall fluctuating upward trend. The water resources carrying capacity of each city was primarily at a moderate level, with occasional alert-level occurring in specific years.

Key words: water resources carrying capacity; game theory; cloud model; middle-lower reaches of the Hanjiang River; Hubei Province

水资源可持续利用不仅是经济社会持续发展的先决条件,更是维护生态系统健康与稳定的关键因素。南水北调中线工程通水后丹江口水库下泄流量减少,导致汉江中下游地区水资源开发利用和生态环境保护矛盾更加突出。该地区汇聚了湖北省经济社会发展的核心要素,区域内水资源、水生态、水环境问题日益突出^[1]。研究该地区水资源承载力对

汉江流域水资源管理具有重要意义。

目前关于水资源承载力评价方法,主要有主成分分析法、模糊综合评价法、投影寻踪法、逼近理想解排序法(TOPSIS)等。众多学者开展了水资源承载力评价分析研究,如贾玉博等^[2]从水循环与水代谢理论的角度出发构建了新的水资源承载力评价体系,建立了基于可变模糊算法的综合评价模型,探究

基金项目:国家自然科学基金项目(U20A20317)

作者简介:邓乐乐(1996—),男,博士研究生,主要从事水资源评价研究。E-mail:leledeng@whu.edu.cn

通信作者:郭生练(1957—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:slguo@whu.edu.cn

了石羊河流域的水资源承载力;Wang 等^[3]利用模糊综合评价法对长春市水资源承载力进行了分级评价;赵小勇等^[4]采用最大信息熵原理改进了投影寻踪分类模型,并应用于济宁市水资源承载力动态评估;田培等^[5]运用变权 TOPSIS 模型,定量评估了长江经济带水资源承载力的时空变化格局。

水资源承载力的概念在 20 世纪 80 年代被提出,但至今仍未达成规范的定义和标准。水资源承载力评价是一个多维度的决策过程,存在诸多不确定性^[6]。上述方法得到了一定程度的应用,但都对多属性决策问题中的不确定性考虑不足,可能造成评价结果误差。传统的隶属度函数考虑了指标的模糊特性,但在表征随机性方面有所欠缺^[7]。云模型可实现定性概念与定量值之间不确定关系的相互转换,通过处理模糊性和随机性来支持复杂决策过程^[8],能克服水资源承载力评价中面临的不确定性问题。而云模型的应用一般是先求各指标对各等级的隶属度,再结合指标权重确定综合隶属度,以最大隶属度等级确定水资源承载力最终分级。该方法在定性概念与定量值的转换中,损失了一定的模糊性,且不能实现综合评价云与标准云之间的比较。同时,由于不同方法云熵计算的方式不同,可能会影响最终的判断结果。此外,指标权重的确定是影响水资源承载力评价的重要因素,单一赋权方法往往仅聚焦于信息的某一特定属性,不同赋权方法所得权重系数各异,会影响并导致评价结果的多样性,而融合赋权法可降低单一赋权法所造成的结果不确定性。前人的研究多讨论主观赋权法中人为因素导致的不确定性,忽略了不同方法导致的结果差异性,仅实现了融合赋权的单次应用。

本文在构建水资源承载力综合评价指标体系的基础上,基于博弈论-云模型对湖北省汉江中下游地区 8 市水资源承载力进行综合评价,探究了各市水资源承载力状况,以期为当地水资源管理和可持续利用提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

湖北省汉江中下游地区涉及十堰、襄阳、荆门、天门、潜江、仙桃、孝感及武汉 8 市(图 1),多年平均地表水资源量 135.66 亿 m³,地下水资源量 6.63 亿 m³,水资源总量 142.29 亿 m³。该区域是湖北经济发展的核心地区,也是汉江生态经济带及长江经济带的重点发展及保护区域。随着经济社会的快速发展,汉江中下游区域的用水需求呈现持续增长趋势,水资源供需矛盾日益加剧,对流域内居民饮水安全保

障以及经济社会的可持续发展产生了严重的影响。

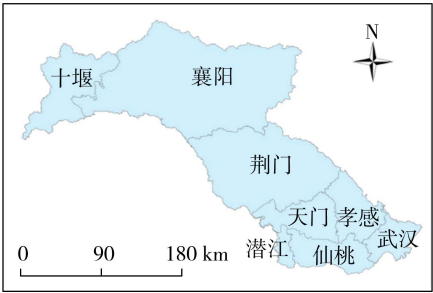


图 1 研究区范围
Fig.1 Scope of study area

1.2 数据来源

选取该区域 2010—2020 年资料系列,水资源数据来源于湖北省及各市水资源公报,社会经济数据来源于湖北省及各市统计年鉴,生态环境数据来源于省市环境状况公报和《中国城市建设统计年鉴》。

2 研究方法

2.1 水资源承载力综合评价指标体系构建

将水资源、社会经济、生态环境子系统作为水资源承载力目标的准则层,构建水资源承载力综合评价指标体系,如图 2 所示,图中括号中正负号分别表示正向和负向指标。

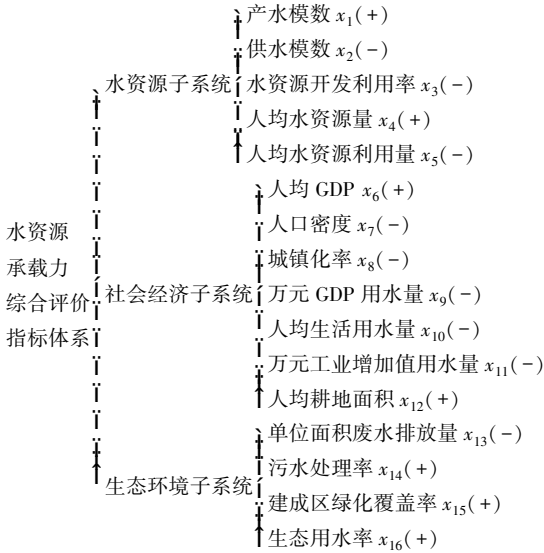


图 2 水资源承载力综合评价指标体系

Fig.2 Comprehensive evaluation indicator system for water resources carrying capacity

2.2 基于博弈论的指标融合赋权集

使用基于遗传算法的层次分析法^[9](analytic hierarchy process based on genetic algorithm, AHPGA)获取主观权重,分别采用改进的 ICRITIC 法^[10](improved criteria importance through intercriteria correlation)、准则去除效果法^[11](method based on removal effects of criteria, MEREC)、客观指标权重

综合确定法^[12] (integrated determination of objective criteria weight method, IDOCRIW)、熵权法^[13] (entropy weight method, EWM) 及变异系数法^[14] (coefficient of variation, COV) 获取 5 类客观权重, 前 3 种方法较为新颖, 而后两种方法应用广泛。基于博弈论对所获取的各类权重进行融合, 主要计算步骤如下:

a. 确定权重集组合。采用第 i 种方法对指标赋权, 得到权重向量 $\mathbf{w}_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in})$, 其中 n 为指标总数。则 L 个权重向量的任意组合为

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^L \alpha_i \mathbf{w}_i^T \tag{1}$$

式中: $\mathbf{w}$ 为一种可能组合权重; α_i 为线性组合系数, $\alpha_i > 0$ 。

b. 优化对策模型。基于博弈论融合赋权的基本思想, 优化的对策模型为

$$\min \parallel \sum_{i=1}^L \alpha_i \mathbf{w}_i^T - \mathbf{w}_j^T \parallel_2 \quad (j = 1, 2, \dots, L) \tag{2}$$

c. 求最优组合系数 α_i 。式(2)的最优化一阶导数条件可转换为如下方程组, 并计算得到组合系数集 $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L\}$:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{w}_1 \mathbf{w}_1^T & \dots & \mathbf{w}_1 \mathbf{w}_L^T \\ \vdots & & \vdots \\ \mathbf{w}_L \mathbf{w}_1^T & \dots & \mathbf{w}_L \mathbf{w}_L^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{w}_1 \mathbf{w}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{w}_L \mathbf{w}_L^T \end{pmatrix} \tag{3}$$

将此步骤计算得到的最优系数组合 α_i 代入式(1)即得融合权重。

2.3 灰色关联-TOPSIS-改进云模型

2.3.1 灰色关联-TOPSIS 法

TOPSIS 法未考虑总体差异对距离的影响^[15], 灰色关联度可以通过综合衡量不同数据序列几何曲线之间的相似程度来判断不同因素之间关系的密切程度。本文利用灰色关联改进 TOPSIS 方法测度水资源承载力, 以更准确客观的方式衡量评价样本与理想方案间的接近程度^[16-17], 计算步骤如下:

a. 求加权规范矩阵。将归一化后的指标矩阵的每一列与其对应的博弈论权重相乘, 得到加权规范矩阵 $\mathbf{V}$:

$$\mathbf{V} = (v_{ij})_{m \times n} \tag{4}$$

式中: v_{ij} 为第 i 市第 j 个指标的加权标准化值; m 为研究区城市总数。

b. 确定最优解和最差解:

$$V_j^+ = \{ \max v_{ij} \mid j = 1, 2, \dots, n \} = \{ v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+ \} \tag{5}$$

$$V_j^- = \{ \min v_{ij} \mid j = 1, 2, \dots, n \} = \{ v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^- \} \tag{6}$$

式中 V_j^+, V_j^- 分别为第 j 个指标最优解和最差解。

c. 计算各评价对象与最优解和最差解的欧氏距离:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \tag{7}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \tag{8}$$

式中: D_i^+ 为第 i 市评价对象与最优解的接近程度, 其值越小, 表明水资源承载力水平越高; D_i^- 为第 i 市评价对象与最差解的接近程度, 其值越小, 表明水资源承载力水平越低。

d. 以加权规范矩阵为基础, 计算第 i 市评价对象与最优解、最差解之间的灰色关联度 γ_i^+ 和 γ_i^- , 具体计算步骤可参见文献[18]。

$$\gamma_i^+ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_{ij}^+ \tag{9}$$

$$\gamma_i^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_{ij}^- \tag{10}$$

式中 $\gamma_{ij}^+, \gamma_{ij}^-$ 分别为第 i 市评价对象与最优解和最差解之间关于第 j 个指标的灰色关联度。

e. 对欧氏距离和灰色关联度进行标准化处理, 综合标准化后的欧氏距离和灰色关联度, 计算各评价对象与最优解和最差解的接近程度:

$$T_i^+ = e_1 d_i^- + e_2 r_i^+ \tag{11}$$

$$T_i^- = e_1 d_i^+ + e_2 r_i^- \tag{12}$$

其中 $d_i^+ = D_i^+ / \max_{1 \leq i \leq m} D_i^+$ $d_i^- = D_i^- / \max_{1 \leq i \leq m} D_i^-$

$$r_i^+ = \gamma_i^+ / \max_{1 \leq i \leq m} \gamma_i^+ \quad r_i^- = \gamma_i^- / \max_{1 \leq i \leq m} \gamma_i^-$$

式中: T_i^+, T_i^- 分别为第 i 市评价对象与最优解和最差解的接近程度; e_1, e_2 分别为决策主体对最优解和最差解空间位置的偏好程度, $e_1 + e_2 = 1$, 一般取 $e_1 = e_2 = 0.5$; $d_i^+, d_i^-, r_i^+, r_i^-$ 分别为 $D_i^+, D_i^-, \gamma_i^+, \gamma_i^-$ 标准化后的值。

f. 计算各评价对象与最优解的贴进度:

$$C_i = T_i^+ / (T_i^+ + T_i^-) \tag{13}$$

式中 C_i 为贴进度, 表示第 i 市水资源承载力水平, 取值介于 0~1 之间。

2.3.2 基于云熵优化算法的正态云模型

正态云模型采用期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 作为特征值, 云数字特征驱动了云模型中定量数据和定性评估之间的转换, 可有效量化水资源承载力的不确定性。本文采用约束区间 $[A_{\min}, A_{\max}]$ 表示各评价指标的等级界限。对于 E_x , 约束空间的中间值最能代表该状态等级的概念, 因此, 各等级云的 E_x 为

$$E_x = (A_{\min} + A_{\max}) / 2 \tag{14}$$

由于云模型中 99.74% 的云滴都落在 $[E_x - 3E_n,$

$E_x + 3E_n$] 之间,而 E_x 为定值,因此, E_n 是影响水滴分布范围和确定度的主要因素。目前确定 E_n 的方法主要基于“ $3E_n$ ”规则和“50%关联度”规则,前者在等级的边界处分隔清晰,而后者分隔模糊,二者分别体现了等级划分的分明性和模糊性。为综合两种划分方式的优点,采用云熵优化算法确定 E_n ,算法具体步骤可参见文献[7]。

将水资源承载力水平分为优质、良好、中等、警戒和低级 5 个等级^[19-20],对应的分级标准阈值分别为 0.8~1.0、0.6~<0.8、0.4~<0.6、0.2~<0.4、0~<0.2。低级表明人类活动对资源和环境造成了严重威胁,水资源极为短缺,水生态环境遭受严重损害,其系统功能已经丧失,难以恢复。优质表示人类活动对资源和环境的影响极小,水资源禀赋良好,水生态系统功能保持良好状态,系统保持稳定。基于分级标准阈值,结合云熵优化算法获取云熵优化值,驱动正向云发生器生成标准云 $C_g(E_{gx}, E_{gn}, H_{ge})$ 。基于灰色关联-TOPSIS 法获取各计算条件下的贴近度,考虑到指标权重对综合评估的不确定性影响,采用不同权重确定方法。利用多步还原逆向云变换算法生成综合评价云 $C_s(E_{sx}, E_{sn}, H_{se})$,基于组合模糊贴近度的云相似度获取综合评价云和标准云的相似度。

2.4 空间自相关分析

空间自相关分析用于分析地理空间数据中某种属性在空间上的相似性或差异性。莫兰指数是最常用的全局空间自相关指标之一,用于衡量整个研究区域内的空间自相关性。为了深入研究区域水资源承载力的高-高和低-低空间聚集特征,了解局部水资源承载力的空间分布特征,采用局部莫兰指数进行局部空间自相关分析,计算方法参照文献[21-22]。

3 结果与分析

3.1 指标赋权结果

图 3 为指标主观权重和客观权重的箱线图。主客观赋权法的结果有较大差异,AHPGA 输出的主观权重多数情景下不在客观赋权法指标权重的箱体内部。指标 x_6 、 x_{13} 、 x_{14} 的主观权重最高,分别为 0.091、0.097、0.104,而 x_{12} 的主观权重最低,表明指标体系中人均耕地面积对水资源承载力的影响最小。从客观权重结果来看,各单一赋权法的结果有较大差异,指标权重呈现明显的不确定性,在生态环境子系统中,指标 x_{14} 、 x_{15} 、 x_{16} 的不确定性尤为明显。以上结果表明,采用单一赋权方法难以捕捉指标权重的不确定性,可能会影响水资源承载力评估的最终结果。

采用博弈论将 AHPGA 输出的主观权重与客观

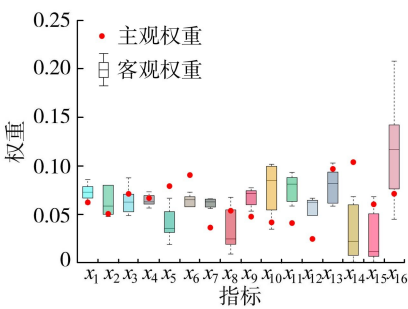


图 3 指标主观权重和客观权重的箱线图
Fig. 3 Subjective weights and box plot of objective weights of indicators

权重融合,分别得到 AHPGA-ICRITIC、AHPGA-MEREC、AHPGA-IDOCRIW、AHPGA-EWM、AHPGA-COV 5 种融合权重,如图 4 所示。AHPGA 和客观赋权法在分配权重时,因计算方法和关注点差异存在明显的区别。如图 4(b) 所示,对于 x_{14} 的权重,AHPGA 得出的结果为 0.104, MEREC 则为 0.022,融合权重为 0.055,有效协调了主客观赋权法之间的矛盾。

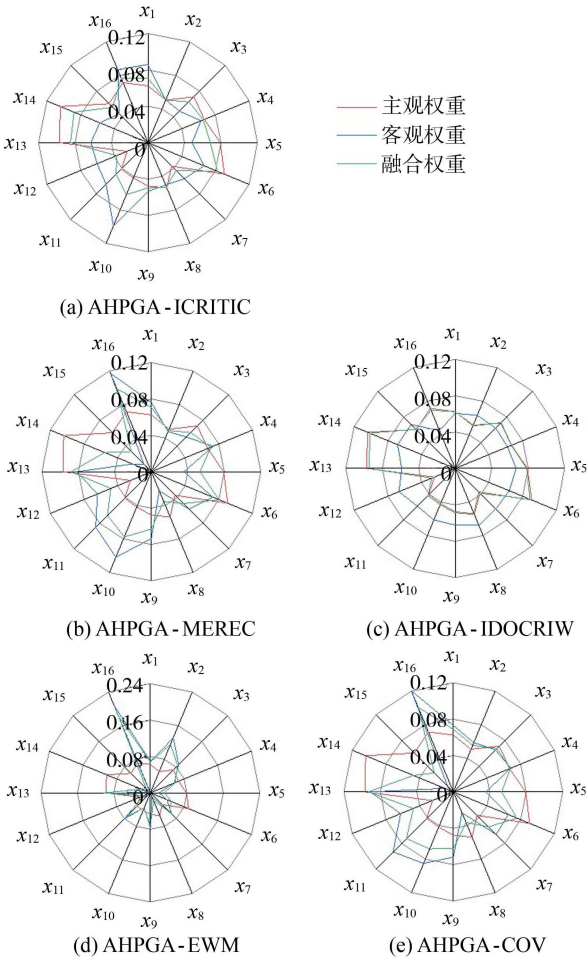


图 4 各指标柱融合权重
Fig. 4 Mixed weights of different indicators

3.2 水资源承载力时序演化特征

将所有指标的融合权重代入灰色关联-TOPSIS

法求得各计算条件下的贴近度,以此表征水资源承载力水平。图 5 为各市水资源承载力时程变化,图中 CM-MW 线为将多种方法计算结果代入逆向云变换算法输出的 E_k 值。

从图 5 可以看出,2011 年大多数市水资源承载力水平下降,2012—2020 年波动上升,2020 年达到最高。十堰市各种评价方法得到的结果中,2010 年 AHP-EWM 得到的水资源承载力水平高于其他方法,而在之后的数年中基本上处于末位,这种差异在 2011—2017 年尤为明显。由 CM-MW 线变化可知,2011 年十堰市水资源承载力水平最低,评分值为 0.509 8,2011—2014 年持续上升,2015 年出现拐点,2017 年到达顶峰,而 2018 年和 2019 年又持续下降,2020 年大幅回升。襄阳市除 2018 年和 2019 年水资源承载力水平下降,其他阶段上升态势明显,尤其是 2020 年水资源承载力水平大幅跃升。除了十堰和襄阳市外,荆门、孝感市 2018 年和 2019 年水资源承载力水平明显下降,而天门、潜江、仙桃、武汉市的变化幅度较小,部分市甚至出现了上升趋势,如 2018 年的天门和潜江市。

对各市水资源子系统评价分析可以发现,水资源子系统承载力水平波动区间明显变宽,震荡幅度较大。说明不同年份水资源禀赋条件差异较大。受到自然天气变化的强烈影响,基本上各市的水资源子系统承载力水平均呈现“下降—上升”的多重循环过程。除武汉市水资源子系统承载力水平在 2020 年达到最高值外,其他市的最高值均出现在 2016 年和 2017 年,说明这两年各市水资源禀赋较为丰裕,能够强有力地支撑社会经济发展。各市水资源子系统承载力水平峰值出现时间不一致,在一定程度反映了水资源空间分布的异质性。天门、潜江、仙桃市水资源子系统承载力水平均值较其他市偏低,一些年份的水资源开发利用率超过 100%,远

超世界公认的 40% 开发利用的安全警戒线。因此,可考虑采用引调水工程或其他手段来缓解这些地区的水资源供需矛盾。

对各市社会经济子系统评价分析可以发现,随着时间推移,社会经济子系统承载力水平逐步提升。社会经济子系统中, x_7 、 x_8 、 x_{12} 在短期内不会出现较大幅度波动, x_7 、 x_8 增长会降低社会经济子系统承载力水平, x_{12} 增长会提高水资源承载力水平,但由于指标整体变化幅度不大,其对子系统的水资源承载力水平影响不明显。另一方面,由于研究期处于社会经济快速发展时期, x_6 逐步攀升,有效提升了水资源承载力水平。同时,国家实施了节水行动,建立了水资源刚性约束制度,用水结构优化,用水效率提升, x_9 、 x_{11} 显著下降,高效保障了社会经济发展。在高质量发展稳步推进时期,各地应进一步加强水资源集约节约利用水平,落实水资源刚性约束制度,强化重点领域的节水管理。

对各市生态环境子系统评价分析可以发现,各市生态环境子系统承载力水平最低年份有所差异,襄阳、荆门、潜江市出现在 2010 年,仙桃、天门市出现在 2011 年,武汉、孝感、十堰市分别出现在 2012 年、2014 年、2015 年,说明各市的生态环境子系统表现具有一定的空间差异。除了潜江市水资源承载力水平峰值出现在 2019 年,其他市的峰值均出现在 2020 年,表明 2020 年生态环境子系统承载力水平最高。一方面随着社会环保意识增强及环保监督及处罚力度加大,废水排放量有所减少,污水处理率及绿化覆盖率有所提高,助推了生态环境子系统的整体表现水平。同时,2020 年由于疫情影响,生产经营活动遭受数月中断,导致废水排放量减少。

图 6 给出了 2010—2020 年湖北省汉江中下游地区水资源承载力均值及标准差。图 6(a) 中综合评价结果显示,该地区水资源承载力水平整体上呈

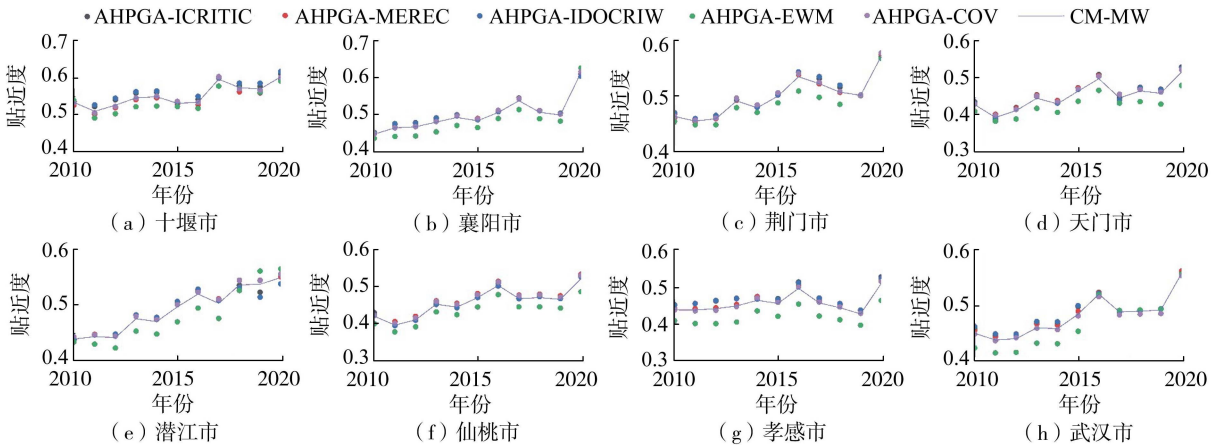


图 5 各市水资源承载力时程变化

Fig. 5 Temporal changes in water resources carrying capacity for each city

波动上升趋势,2011 年承载力水平最低,评分值为 0.4425,随后大致逐年上升,2016 年转为下降趋势,2019 年止跌并大幅反弹,2020 年达到最高,评分值为 0.5575。水资源子系统承载力水平变化剧烈,说明研究期内水资源量年际波动明显,2016 年和 2020 年水资源子系统承载力表现较好,2019 年表现最差。经分析水资源公报中历史记录发现,2016 年和 2020 年地区水资源总量分别达到 220.77 亿、292.73 亿 m^3 ,均属丰水年,2020 年各地水资源量均较多年平均偏多 30% 以上,武汉、荆门、潜江、仙桃市偏多 50% 左右;2019 年水资源总量仅为 77.81 亿 m^3 ,各市均处于枯水年或偏枯水年,其中,襄阳、孝感市较多年平均偏少 30% 以上。水资源子系统中, x_1 、 x_3 、 x_4 受水资源量剧烈变化的直接影响,产生相应的波动变化,而供水量和人口数量在短期内不会发生较大程度的变化,这些指标综合影响了水资源子系统承载力水平的时序演化。社会经济子系统承载力水平基本处于逐年上升的状态,前期增速高于后期,也印证了经济增长逐渐放缓的态势。 x_6 增速减慢, x_9 、 x_{11} 降速放慢,均符合经济增长、产业结构调整及技术发展的客观规律,2020 年国民经济和社会发展面临严峻考验,因此,该年度社会经济子系统承载力水平降低。生态环境子系统承载力水平也波动上升。随着国家政策对环保的密切关注和持续投入,地方政府严格遵守相关环保规定,加大对废水排放的管理及处理力度,因此, x_{13} 、 x_{14} 分别下降和提高;随着经济发展,城市建设中的绿化投资逐渐增加,促进了 x_{15} 的提高。

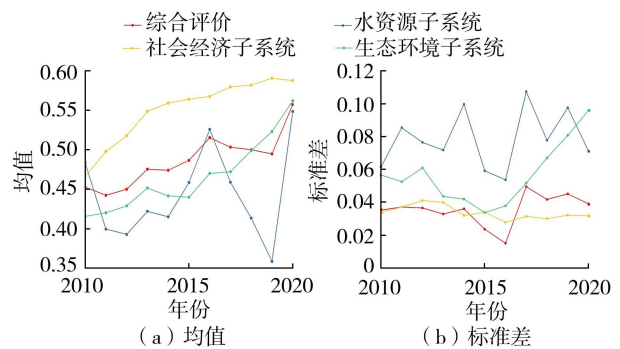


图 6 水资源承载力均值与标准差

Fig. 6 Mean value and standard deviation of water resources carrying capacity

图 6(b) 中综合评价结果显示 2016 年水资源承载力水平标准差最低,2017 年最高;研究期内,水资源承载力水平标准差较小且较为平稳,各市水资源承载力水平的差异较子系统之间的差异小。水资源子系统承载力水平标准差较大且波动显著,尤其在后期呈现上升趋势,表明各市间水资源禀赋及开发利用的差

异在加大。可能是由于部分市的水资源开发利用强度增加,或者水资源禀赋条件在各市间变得不均衡。社会经济子系统承载力水平标准差最小,说明在社会经济发展方面,各市间的差异较小。生态环境子系统后期承载力水平标准差逐渐上升,说明各市间生态环境子系统承载力水平的差异在扩大,可能与不同地区生态保护措施差异或自然条件变化有关。

3.3 水资源承载力空间格局演化

3.3.1 空间分布特征

从图 5 可以看出,2010—2020 年湖北省汉江中下游地区水资源承载力水平整体为 0.4~0.6,差异不大,但各市不同年份得分及相对排序有所变化。2010 年十堰市水资源承载力水平最高,评分值为 0.5342,荆门市紧随其后,而仙桃市评分值最低,仅为 0.4216;2013 年十堰和荆门市仍在所有市中评分靠前,而天门市排名垫底;2016 年孝感市水资源承载力水平在所有市中表现最差,各市承载力水平排序相较 2013 年发生大幅改变,襄阳市由第 3 位滑落至第 5 位,而武汉市则由第 5 位上升至第 3 位;2019 年除十堰和潜江市外,其他市承载力水平均有所降低,孝感市降幅最大,2016 年和 2019 年水资源承载力均弱于其他市。分析孝感市水资源承载力指标体系中各指标发现,2019 年孝感市降水偏少,属枯水年份,该年 x_2 远高于其他市, x_3 达到 130%, x_9 等指标劣于其他市,水资源禀赋条件及社会经济水平欠佳均导致了其水资源承载力的下降。因此,孝感市应制定应急预案和风险管理策略,加速产业结构升级调整,加快水网及其他工程建设,缓解水资源承载压力。

分析 2010 年、2013 年、2016 年、2019 年的水资源承载力空间分布可发现,上游地区水资源承载力一般要高于下游地区,而武汉市由于社会经济发展及城市建设水平明显高于其他市,其水资源承载力也并不垫底。研究期内,十堰、襄阳、荆门、天门、潜江、仙桃、孝感和武汉市的水资源承载力评分均值分别为 0.5525、0.5005、0.4997、0.4511、0.4933、0.4586、0.4574、0.4802,承载力水平由高到低依次为十堰、襄阳、荆门、潜江、武汉、仙桃、孝感、天门市,与上游高于下游的空间分布趋势一致。

3.3.2 空间自相关分析

基于 Queen 邻接关系^[21]构造空间权重矩阵,计算全局莫兰指数(表 1)。可以发现,2011 年、2012 年、2014 年、2017 年、2020 年全局莫兰指数分别为 0.263、0.293、0.284、0.354、0.443,而对应的 P 值分别为 0.036、0.013、0.015、0.010、0.005,在 0.05 的置信水平上均通过了显著性检验,说明这些

年份中湖北省汉江中下游地区各市水资源承载力呈现出较为显著的空间异质性。

表 1 全局莫兰指数
Table 1 Global Moran's I

年份	莫兰指数	Z 值	P 值
2010	0.104	1.671	0.095
2011	0.263	2.097	0.036
2012	0.293	2.476	0.013
2013	0.190	1.952	0.051
2014	0.284	2.443	0.015
2015	0.053	1.022	0.307
2016	-0.264	-0.569	0.570
2017	0.354	2.568	0.010
2018	0.163	1.544	0.123
2019	0.120	1.321	0.187
2020	0.443	2.794	0.005

注:Z 值为标准差,P 值为概率。

图 7 给出了湖北省汉江中下游地区水资源承载力局部莫兰指数聚类图,聚类类型主要包括低-高、高-高、高-低、低-低 4 种类型,即空间正相关和空间负相关两种关联关系。襄阳市 2010 年、2015 年、2016 年为低-高模式,为低值异质中心;2011 年、2013 年、2017 年为高-高模式,为高值聚集中心。研究期内,仙桃市 6 个年份中均为低-低模式,为低值聚集中心,2018 年孝感市也属于该模式。武汉市 2016 年表现为高-低模式,表明该年份武汉市水资源承载力高,而邻近市的水资源承载力低,是高值异质中心。2019 年各市聚类关系均不显著,表明该年份水资源承载力空间差异不明显。

3.4 水资源承载力等级综合评价

以襄阳市为例,2010 年、2013 年、2016 年、

2019 年综合评价云数字特征分别为 (0.447 2, 0.005 7,0.003 2)、(0.480 3,0.013 5,0.008 0)、(0.506 8,0.008 4,0.004 4)、(0.499 6,0.008 4,0.004 3)。同理可以计算各市不同年份的云数字特征。为节省篇幅,本文选取研究区北部襄阳市、中部天门和仙桃市、东部武汉市,分析 2010 年、2013 年、2016 年、2019 年的水资源承载力综合评价云图(图 8)。通过云图比对可以进行部分视觉定性分析,如襄阳市 2010 年云滴分布在最左侧,表明在所绘制的 4 个年份中 2010 年水资源承载力水平最低,而 2016 年水资源承载力水平高于 2019 年。在空间压缩上,各年份云图差异不大,分布相对集中;在初步分类上,基本上可判定为各年份水资源承载力为中等水平。

多属性决策过程中难以回避不确定性,本文采用了多种主客观赋权方法,并结合博弈论确定融合权重,从最终贴近度的分布来看,不确定性得到了较为明显的控制。为了量化各情景下水资源承载力水平对各等级云的隶属关系,进一步计算了综合评价云与标准云的相似度。结果表明,各市水资源承载力综合评价云与中等水平的标准云相似度基本最高,表明大多数情景下可以将各市的水资源承载力划分为中等水平。同时也可以看出,十堰、襄阳市 2020 年水资源承载力为良好水平,天门、仙桃市 2011 年为警戒水平。整体而言,研究期内各市水资源承载力以中等水平为主,部分年份为警戒水平,说明研究区人类活动对资源、环境有一定的影响。汉江中下游地区应结合当地水资源及社会经济发展现

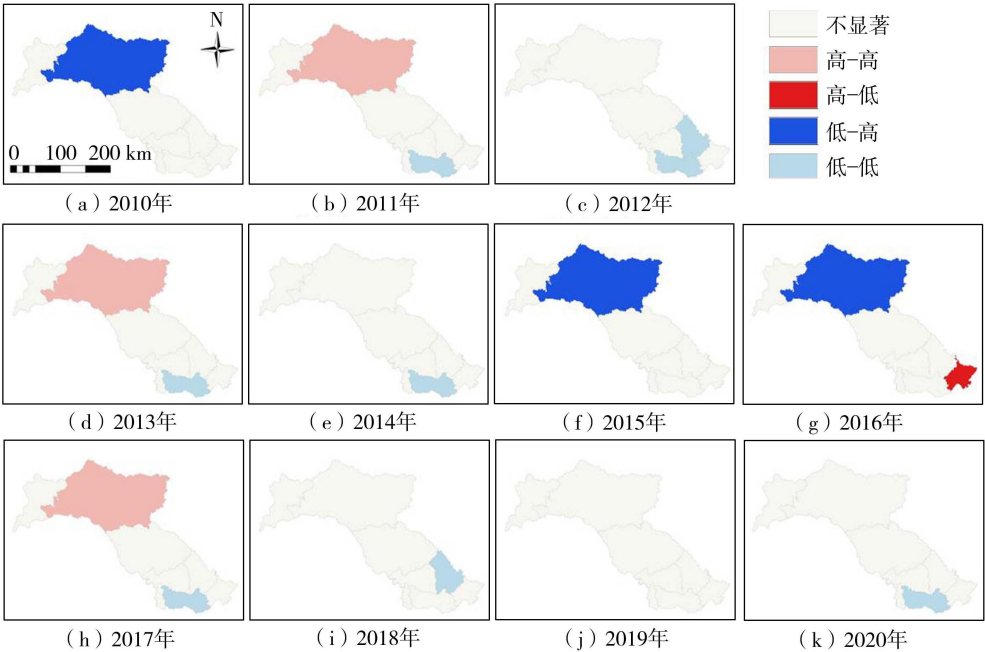


图 7 局部莫兰指数聚类图
Fig.7 Local Moran's I cluster map

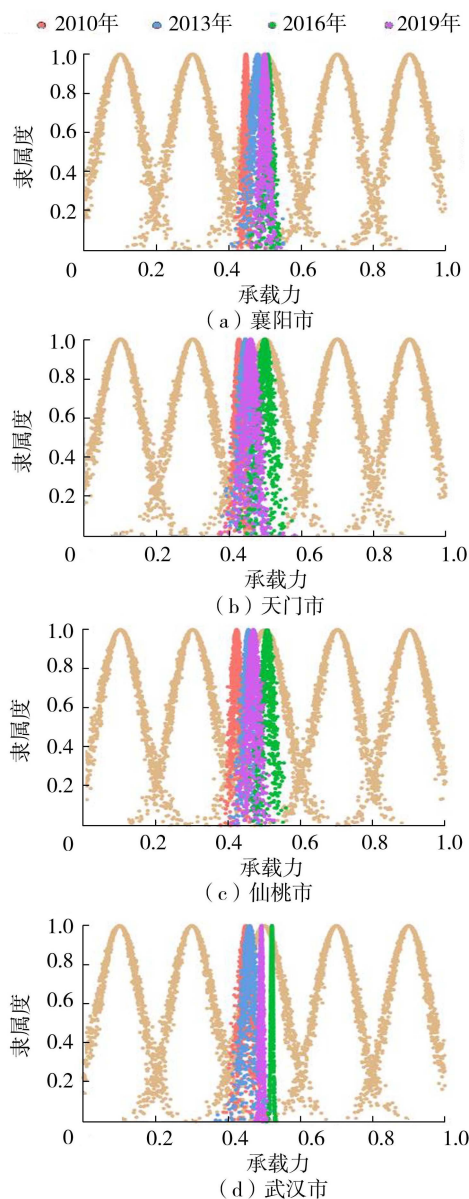


图8 水资源承载力综合评价云图

Fig. 8 Comprehensive evaluation cloud map of water resources carrying capacity

状,强化水网建设,通过引调水等水资源优化分配手段缓解水资源压力,确保区域间水资源利用平衡。同时,应落实水资源刚性约束制度,强化重点领域节水管理,加快构建节水产业发展体系,加强公众节水意识教育,实现水资源高效利用,促进经济社会全面绿色转型。

4 结 论

a. 2010—2020 年湖北省汉江中下游地区水资源承载力水平整体呈波动上升趋势,2011 年水资源承载力水平最低,2020 年最高。汉江中下游 8 市水资源子系统承载力水平变化较为剧烈,社会经济子系统及生态环境子系统承载力水平在波动中上升。

b. 各市不同年份水资源承载力水平相对排序

有所变化,总体上游高于下游。全局莫兰指数计算结果表明 2011 年、2012 年、2014 年、2017 年、2020 年水资源承载力呈现出较为显著的空间异质性。局部自相关分析表明水资源承载力空间上具有较强的聚集特征,空间分异性显著。

c. 综合评价云与标准云的相似度分析结果表明,研究区各市水资源承载力水平以中等为主,部分年份属警戒水平,说明人类活动对资源环境一定的影响。尽管系统功能尚能维持基本运作,但对推动汉江生态经济带高质量发展产生了一些不利的影响。为此,应加快水网建设,通过引调水工程等措施来缓解水资源供需矛盾,确保区域间水资源利用的均衡协调发展。

d. 基于博弈论-云模型评价方法克服了单一赋权方法的局限性和主观选择的不确定性,在实际应用中,可根据研究区具体情况适当调整指标体系及权重确定方法,进一步提升该方法的扩展性和应用潜力。

参考文献:

- [1] DENG Lele, YIN Jiabo, TIAN Jing, et al. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in the Han River Basin[J]. Water, 2021, 13(3): 249.
- [2] 贾玉博,杨宏伟,栗晓玲,等. 基于水代谢和水循环理论的石羊河流域水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2024, 40(5): 86-94. (JIA Yubo, YANG Hongwei, SU Xiaoling, et al. Water resources carrying capacity evaluation in the Shiyang River Basin based on theories of water metabolism and water cycle[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5): 86-94. (in Chinese))
- [3] WANG Ge, XIAO Changlai, QI Zhiwei, 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.
- [4] 赵小勇,余静,张双,等. 基于改进投影寻踪方法的水资源承载力研究[J]. 人民黄河, 2024, 46(5): 74-79. (ZHAO Xiaoyong, YU Jing, ZHANG Shuang, et al. Study on water resources carrying capacity based on improved projection pursuit method[J]. Yellow River, 2024, 46(5): 74-79. (in Chinese))
- [5] 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 Pei, WANG Jinyu, HUA Wei, et al. Temporal-spatial patterns and coupling coordination degree of water resources carrying capacity of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(6): 1871-1884. (in Chinese))
- [6] WANG Hongxiang, HUANG Lintong, GUO Wenxian, et al. Evaluation of ecohydrological regime and its driving forces in the Dongting Lake, China[J]. Journal of Hydrology:

- Regional Studies,2022,41:101067.
- [7] 刘智超,吐松江·卡日,马小晶,等.基于云相似度与证据融合的电力变压器状态评价方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(20):79-90.(LIU Zhichao, KARI Tusongjiang, MA Xiaojing, et al. Condition assessment method for power transformers based on cloud similarity and evidence fusion [J]. Power System Protection and Control,2023,51(20):79-90. (in Chinese))
- [8] 宋亮亮,张劲松,杜建波,等.基于云模型的水利工程运行安全韧性评价[J].水资源保护,2023,39(2):208-214.(SONG Liangliang, ZHANG Jinsong, DU Jianbo, et al. Assessment of operation safety resilience of water conservancy projects based on cloud model [J]. Water Resources Protection,2023,39(2):208-214. (in Chinese))
- [9] ZHANG Zhengxian, LI Yun, WANG Xiaogang, et al. Investigating river health and potential risks using a novel hybrid decision-making framework with multi-source data fusion in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Environmental Impact Assessment Review,2022,96:106849.
- [10] DU Xiaoli, WANG Yan, CHEN Fengxia. Evaluation of coal-resource-based cities transformation based on CRITIC-TOPSIS model [J]. Sustainable Cities and Society,2024,103:105271.
- [11] KESHAVARZ-GHORABAE M, AMIRI M, ZAVADSKAS E K, et al. Determination of objective weights using a new method based on the removal effects of criteria(MEREC) [J]. Symmetry,2021,13(4):525.
- [12] ALAO M A, POPOOLA O M, AYODELE T R. Selection of waste-to-energy technology for distributed generation using IDOCRIW-Weighted TOPSIS method: a case study of the City of Johannesburg, South Africa [J]. Renewable Energy,2021,178:162-183.
- [13] 韩宇平,苏潇雅,曹润祥,等.基于熵-云模型的我国水利高质量发展评价[J].水资源保护,2022,38(1):26-33.(HAN Yuping, SU Xiaoya, CAO Runxiang, et al. Evaluation of high-quality development of water conservancy in China based on entropy-cloud model [J]. Water Resources Protection,2022,38(1):26-33. (in Chinese))
- [14] 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.(LIU Jianting, LIU Ruiyan, XU Yanxue. Evaluation research on water resources carrying capacity of prefecture-level cities in Henan Province [J]. Yellow River,2022,44(3):53-58. (in Chinese))
- [15] 杨志豪,何建新,李志华,等.基于PPR-TOPSIS分析法的沥青混凝土配合比方案优选[J].水利水电科技进展,2023,43(2):82-88.(YANG Zhihao, HE Jianxin, LI Zhihua, et al. Scheme optimization of mix proportion for asphalt concrete based on PPR-TOPSIS analysis [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(2):82-88. (in Chinese))
- [16] 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 Jimin, TUO Yunfei, WANG Qian, 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 and Water Engineering,2022,33(2):11-17. (in Chinese))
- [17] 方国华,李智超,钟华昱,等.考虑供水均衡性的南水北调东线工程江苏段优化调度[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):10-18.(FANG Guohua, LI Zhichao, ZHONG Huayu, et al. Optimal operation of Jiangsu section of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project considering the water supply balance [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3):10-18. (in Chinese))
- [18] 赵宏波,谷天顺,孙东琪,等.“三生”功能视角下黄河流域城市人居环境动态演变与机制[J].地理学报,2023,78(12):2973-2999.(ZHAO Hongbo, GU Tianshun, SUN Dongqi, et al. Dynamic evolution and influencing mechanism of urban human settlements in the Yellow River Basin from the perspective of “production-living-ecological” function [J]. Acta Geographica Sinica,2023,78(12):2973-2999. (in Chinese))
- [19] FAN Wenping, SONG Xueyan, LIU Mengnan, et al. Spatio-temporal evolution of resources and environmental carrying capacity and its influencing factors: a case study of Shandong Peninsula urban agglomeration [J]. Environmental Research,2023,234:116469.
- [20] 任楠波,刘宏权,潘增辉,等.基于DPSIR-博弈论组合赋权TOPSIS模型的河北省水资源保障度演进评价[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(5):873-885.(REN Nanbo, LIU Hongquan, PAN Zenghui, et al. Evaluation on the evolution of water resources security degree in Hebei Province based on DPSIR-game theory combined weighting TOPSIS model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2023,21(5):873-885. (in Chinese))
- [21] 谈灿灿,张润润,邓志民,等.基于暴雨空间自相关性的降水量插值方法比较[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(6):8-14.(TAN Cancan, ZHANG Runrun, DENG Zhimin, et al. Comparison of precipitation interpolation methods considering spatial autocorrelation of rainstorm precipitation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(6):8-14. (in Chinese))
- [22] 张晨钰,王伟,黄莉,等.高度城镇化背景下深圳市易涝点驱动因子分析[J].水资源保护,2024,40(2):35-45.(ZHANG Chenyu, WANG Wei, HUANG Li, et al. Analysis of driving factors for waterlogging points in Shenzhen City under high urbanization background [J]. Water Resources Protection,2024,40(2):35-45. (in Chinese))

(收稿日期:2024-06-13 编辑:施业)