

城市化影响下区域水资源承载力评价

高玉琴,吴迪,刘海瑞,Intriago Gordillo Jhandre Ronald,朱洁

(河海大学水利水电学院,江苏南京 210098)

摘要:通过研究城市化下水资源承载力作用机理及特性,分析了城市化下水资源承载力的主要影响指标,构建了基于“量-质-域-流”4 个维度的区域水资源承载力评价指标体系及评价模型,并应用混沌粒子群遗传算法(CPSGA)进行模型求解。以江苏省南京市为应用实例,对 2015—2018 年南京市水资源承载力状况进行了评价,结果表明:构建的综合评价模型应用于城市化影响下区域水资源承载力评价较为合理,CPSGA 算法能够高效地优化指标权重,降低了传统评价方法进行指标赋权时的主观性,使评价结果更为科学合理。

关键词:城市化;水资源承载力评价;量-质-域-流;混沌粒子群遗传算法(CPSGA)

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)03-0001-08

Evaluation of regional water resources carrying capacity under urbanization//GAO Yuqin, WU Di, LIU Hairui, Intriago Gordillo Jhandre Ronald, ZHU Jie(*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Through studying the mechanism and characteristics of water resources carrying capacity under urbanization, the leading factors of water resources carrying capacity under urbanization was analyzed. The evaluation index system and evaluation model of regional water resources carrying capacity based on the four dimensions of quantity-quality-space-stream were constructed. The proposed evaluation model was solved by chaotic particle swarm genetic algorithm (CPSGA). Taking Nanjing city of Jiangsu Province as the research object, the water resources carrying capacity of Nanjing from 2015 to 2018 was evaluated. The results show that the comprehensive evaluation model is more reasonable to be applied to the evaluation of regional water resources carrying capacity under urbanization, and the CPSGA algorithm can effectively optimize the weight of indexes, which reduces the subjectivity of the traditional evaluation method in index weighting, making the evaluation results more scientific and reasonable.

Key words: urbanization; water resources carrying capacity evaluation; quantity-quality-space-stream; chaotic particle swarm genetic algorithm

近年来,随着城市化进程的不断推进,我国水资源短缺与社会经济发展的矛盾不断加剧,水资源短缺、水环境污染、水生态恶化等问题日益突出^[1],对我国经济社会的可持续发展影响较大。因此,深刻理解城市化对区域水资源承载力的影响,科学合理地评价城市化影响下区域水资源承载力,对更加合理地规划城市建设、保障区域的可持续发展具有重大意义。

水资源承载力定性和定量地反映出一个地区水的数量、质量以及不同时段、不同空间地点供需协调状况^[2],同时反映社会可持续发展在水利行业的具体表现,最终反映人口、资源、社会经济和生态环境的复合系统特点。由于水资源承载力具有区域性、可增强性、动态性和模糊性的特点,传统评价方法如

主成分分析法^[3]、模糊综合评价法及系统动力学法^[4]等由于存在不确定性、主观随意性的缺点,难以满足水资源承载力评价的要求。因此,许多专家学者在传统评价方法的基础上提出改进策略,构建新的评价模型,降低了指标权重不确定性带来的评价结果不合理的风险。例如:李少朋等^[5]提出一种改进的层次分析法确定评价指标权重,利用改进的 TOPSIS 模型综合评价江苏省水资源承载力;金菊良等^[6]提出采用投影寻踪方法优化 AHP 确定的指标权重,再结合减法集对势理论,构建了基于 PP-AHP 方法定权的水资源承载力评价模型;袁艳梅等^[7]用变异系数法及层次分析法计算组合权重,结合定性、定量分析,对模糊综合评价模型进行改进;左其亭

基金项目:国家自然科学基金(52079039);江苏省自然科学基金(BK20181310);江苏省水利科技项目(2020050)
作者简介:高玉琴(1978—),女,教授,博士,主要从事水利水电工程研究。E-mail: yqgao@hhu.edu.cn
水利水电科技进展,2022,42(3) Tel:025-83786335 E-mail:jz@hhu.edu.cn http://jour.hhu.edu.cn

等^[8]采用层次分析法和熵权法组合赋权的 TOPSIS 模型对九省区的水资源承载力进行了综合评价;徐翔宇等^[2]提出了一种基于风险矩阵的多要素水资源承载力综合评价方法。

本文根据城市化影响下区域水资源承载力的作用机理及特性,从水量、水质、水域和水流状态 4 个维度出发,分析城市化影响下区域水资源承载力的主要影响指标,构建了评价指标体系。分别采用物元可拓模型^[9]、集对分析模型^[10]、投影寻踪模型^[11]、层次分析模型^[12]对水量、水质、水域和水流要素进行评价,构建了水资源承载力综合评价模型,并采用混沌粒子群遗传算法(chaotic particle swarm genetic algorithm, CPSGA)进行水资源承载力综合评价模型求解。以南京市为研究对象对构建的模型进行实例验证。

1 评价指标体系

1.1 城市化影响下区域水资源承载力的基本特性

城市化区域水资源系统是一个复杂的非封闭性系统,它的内部和对外都存在着物质能量交换。水资源承载力受区域内水资源分布情况、水量水质条件、用水效率、排污能力等因素的影响,涉及社会经济、自然资源、生态环境等诸多领域。人类科技水平的进步使得城市地区人民的生活生产活动更加剧烈,水资源系统的物质能量交换也愈发频繁。因此,城市化区域水资源承载力具有区域性、客观性、动态性、有限可控性、模糊性及被承载模式的多样性的特征。

1.2 城市化影响下区域水资源承载力的作用机理

水资源是人类不可替代的重要的自然资源之一,水资源系统承载着生态环境和经济社会系统两大系统^[13],水资源承载力的大小不仅受水资源系统影响,还与人类社会的经济发展模式、用水效率、产业用水结构等方面息息相关^[14-15]。社会生产力与经济水平的不同、自然水循环是否能够正常进行、生物多样性与完整性是否健全,这些因素都会对区域水资源承载力水平的高低产生不同程度的影响。

自然因素直接影响水资源产生和运移,决定了天然水资源量和本底水质,新构造运动、气候变化等自然因素影响了水系连通和水流更新;水资源开发相关的环节影响了水资源的耗散和排放,改变了水资源的可利用量和水质。社会经济系统的影响来自人类活动^[16],人类通过对水资源的开发利用引起水量的变化,从而产生水量压力;通过污染物排放引起水资源质量变化,从而产生供水水质压力,量质变化进而影响了水域空间格局的变化和水流更新的状态。生态环境系统在水资源承载力量化中与水资源系统一样,同样存在支撑压力,又受到来自社会经济

系统和水资源系统的排放与污染压力,既是承载体,又是受压体。良好的生态环境对水资源承载力有着正效应,可以涵养水源,反之,则对水资源的量与质有负面影响。社会经济系统、自然水循环系统及生态环境系统对水资源承载力的“三重”约束如图 1 所示。

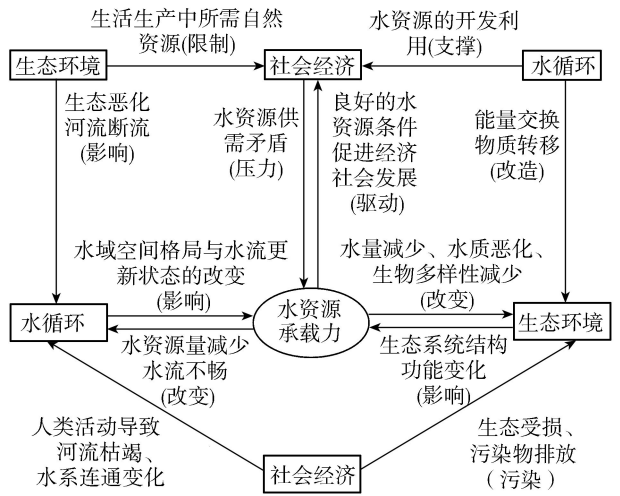


图 1 社会经济系统、自然水循环系统及生态环境系统对水资源承载力的“三重”约束示意

1.3 评价指标体系构建

从“量、质、域、流”4 个维度选取具有社会经济内涵和生态环境内涵的评价指标,采用专家咨询法对指标进行初选,剔除无法衡量、重复或错误的指标,采用主成分分析法对指标进行优选,以提高评价指标体系的显著性。最终得到水量、水质、水域、水流要素的评价指标如表 1 所示。

2 评价模型

2.1 数据归一化

由于各评价指标数值的单位不一致以及取值范围的大小相差较大,为消除指标间因单位和量级带来的影响,需对评价指标进行标准化处理。

运用极差法对定量指标进行标准化处理,得到水资源承载力现状水平标准值。正向指标和负向指标标准化公式分别为

$$x_{ij} = \frac{x_{ij}^* - x_{\max j}}{x_{\max j} - x_{\min j}} \quad (1)$$

$$x_{ij} = \frac{x_{\max j} - x_{ij}^*}{x_{\max j} - x_{\min j}} \quad (2)$$

式中: x_{ij} 为评价指标标准值; x_{ij}^* 为第 i 个样本的第 j 项评价指标值; $x_{\max j}$ 、 $x_{\min j}$ 分别为第 j 项评价指标的最大值和最小值。

对于定性指标主要采用专家打分的方式对指标进行等级评定,再根据模糊统计的方法对专家的打分结果进行分析处理:

表 1 水资源承载力评价指标

要素	评价指标	单位	正/负向性质	选取意义
水量	单位面积水资源量 I_1	万 m^3/km^2	+	反映水资源量的多少
	水资源利用率 I_2	%	-	反映水资源有效开发利用和管理程度
	万元工业增加值用水量 I_3	m^3	-	反映工业用水水平
	产水模数 I_4	万 m^3/km^2	+	反映区域水资源状况
	万元 GDP 用水量 I_5	m^3	-	反映国家、地区、行业总体经济用水状况
	单位农田灌溉面积用水量 I_6	m^3/hm^2	-	反映农业发展水平和水资源利用效率
	人均水资源占有量 I_7	m^3	+	反映区域水资源丰、缺状态及发展的潜力
	城镇人均生活用水定额 I_8	L/d	-	反映城市居民生活的用水水平
	城市生产用水重复利用率 I_9	%	+	反映城市节水、用水发展水平
	地下水开采系数 I_{10}		-	反映地下水资源开采现状和潜力
水质	水功能区达标率 I_{11}	%	+	反映水资源质量
	污径比 I_{12}	%	-	反映污水排放状况
	万元产值污水排放量 I_{13}	m^3	-	反映区域经济发展与水资源协调状况
	COD 超排程度 I_{14}		-	反映区域水系污染情况
	氨氮超排程度 I_{15}		-	反映区域水系污染情况
水域	植被覆盖率 I_{16}	%	+	反映生态系统完整性
	生态环境用水率 I_{17}	%	+	反映人类社会与生态可持续发展程度
	水土流失治理率 I_{18}	%	+	反映生态环境的健康程度
	湿地比率 I_{19}	%	+	反映水资源更新状态与绿色可持续情况
水流	河网密度 I_{20}	km/km^2	+	反映水系连通度
	水域面积率 I_{21}	%	+	反映满足防洪排涝需求的能力
	黑臭河道率 I_{22}	%	-	反映区域河道水生态状况、淤积状况
	亲水舒适度 I_{23}		+	反映整体水系环境与生物和谐程度

$$r_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_p} \tag{3}$$
式中: r_{ij} 为对应评语的隶属度, $r_{ij} \in [0,1]$; m_{ij} 为第 i 项评价指标的第 j 级评语的频数; n_p 为专家人数。将隶属度 r_{ij} 与评价尺度进行点乘运算即可得到对应定性指标的标准化值。

2.2 “量-质-域-流”4 维度评价模型

2.2.1 物元可拓模型

水资源承载力评价具有模糊性和复杂性的特点,评价指标体系中既有定量评价指标又有定性评价指标,且不同指标缺乏可比性。物元分析法在解决不相容问题上比较高效可靠,通过构建简单物元可拓模型,物元分析可以实现质和量转换,对研究对象进行系统评价,使得水资源承载力等级更加明确。物元可拓模型计算步骤可参考文献[17],其中权重采用后文提出的 CPSGA 算法计算得出。

2.2.2 集对分析模型

水质评价是一项需要综合考虑多项指标性质的系统工程,水质状况具有动态变化的特征,影响水质评价的诸多物理化学生物因素具有不确定性,集对分析模型通过引入联系度及其数学表达来描述各种不确定性,从而将不确定性转化为数学运算,因此选用集对分析模型对水资源承载力水质要素进行评价。集对分析模型构建步骤包括:

a. 计算样本与评价等级 i 之间的综合联系度 u_i

$$u_i = \sum_{j=1}^n A_j u_{ji} \tag{4}$$

式中: n 为指标数; A_j 为第 j 指标的权重; u_{ji} 为第 j 指标第 i 评价等级的联系度。

b. 计算评价样本隶属于评价等级 i 的隶属度 R_i 。评价样本隶属于评价等级 i 的相对隶属度 v_i 为

$$v_i = 0.5 + 0.5u_i \tag{5}$$

归一化处理得:

$$R_i = \frac{v_i}{\sum_{i=1}^m v_i} \tag{6}$$

式中: R_i 为评价样本隶属于评价等级 i 的隶属度; m 为评价等级数。

c. 通过置信度准则评判法进行整体评价等级判别:

$$h = \min \left\{ i^* \mid \sum_{i=1}^{i^*} R_i > \lambda \right\} \tag{7}$$

式中: i^* 为满足于不等式的最小值; λ 为置信度,一般取值区间为 $[0.5, 0.7]$,取值越大越保守,此处取为 0.6; h 为评价等级。

2.2.3 投影寻踪模型

投影寻踪方法可以较好地处理多因素复合问题,适用于先验信息缺乏的高维数据,并且采用投影寻踪技术能够获得具有较高稳定性和可靠性的评价结果,适用于对水资源承载力水域要素部分进行评价。投影寻踪模型构建步骤包括:

步骤 1 计算投影值。投影方向的单位长度向量用 $a = (a_1, a_2, \dots, a_p)$ 表示,并将 x_{ij} 在该方向做线性

投影得:

$$z_i = \sum_{j=1}^p a_j x_{ij} \quad (8)$$

步骤2 建立投影目标函数:

$$Q(a) = S_z D_z \quad (9)$$

其中

$$S_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z}_i)^2}{n-1}}$$

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p (R - r_{aij}) \mu(R - r_{aij})$$

式中: $Q(a)$ 、 S_z 、 D_z 分别为各样本 z_i 投影值的投影指数函数标准差和局部密度; $\bar{z}_i$ 为各样本投影特征值 z_i 的平均值; R 为局部密度窗口半径; $r_{aij} = |z_i - z_j|$ 为样本投影值间的距离; $\mu(R - r_{aij})$ 为单位阶跃函数。

步骤3 优化投影目标函数。最佳投影方向可通过求解投影指标函数的最大值来估计,即:

$$\max Q(a) = S_z D_z \quad (10)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^p a_j^2 = 1 \quad (11)$$

2.2.4 层次分析模型

层次分析模型可以把复杂且难以定量描述的多目标决策问题转化为简单的多层次单目标问题,主要从评价者对评价问题的本质、要素的理解出发,比一般的定量方法更讲求定性的分析和判断,能在分析定量指标的同时,又能够更好地统筹水资源承载力水流要素层面的定性指标,因此采用层次分析模型对水流要素部分进行评价。模型构建步骤包括:

步骤1 构造层次判断矩阵。将各层次指标的重要性进行两两比较,构造判断矩阵,矩阵元素的确定采用九分位标度法。

步骤2 计算指标权重。采用方根法计算指标权重:

$$w_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n b_{ij} \right)^{1/n}}{\sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^n b_{ij} \right)^{1/n}} \quad (12)$$

式中: b_{ij} 为判断矩阵 B 的元素; w_i 为权重向量 W 的元素。

步骤3 一致性检验。为检验判断矩阵 B 的一致性,引入一致性指标 C_1 和平均随机一致性指标 R_1 :

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (13)$$

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (14)$$

式中: C_R 为判断矩阵的随机一致性比率,当 $C_R < 0.1$ 时,表明可以接受判断矩阵 B 的一致性; $\lambda_{\max}$ 为判断

矩阵 B 的最大特征值。

2.3 综合评价模型

城市化影响下区域水资源承载力综合评价模型采用的是综合评价法。采用物元可拓模型、集对分析模型、投影寻踪模型、层次分析模型分别对水量、水质、水域、水流4要素进行评价分析,得出相应的评价分数(p_1, p_2, p_3, p_4),并计算4要素权重($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$),水资源承载力综合评价分数 S 为

$$S = (p_1, p_2, p_3, p_4) \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{bmatrix} \quad (15)$$

按照上述评价方法,逐一分析评价单元水资源承载状况,并结合区域水资源条件、开发利用状况、经济社会发展现状与趋势,以及区域现状水生态状况(河流断流、湖泊湿地萎缩)等情况,综合分析评价结果的合理性。

城市化下的区域水资源承载力水平可划分为5个评价等级: $0 \leq S < 0.2$ 为Ⅰ级严重超载, $0.2 \leq S < 0.4$ 为Ⅱ级超载, $0.4 \leq S < 0.6$ 为Ⅲ级临界, $0.6 \leq S < 0.8$ 为Ⅳ级弱可承载, $0.8 \leq S < 1.0$ 为Ⅴ级可承载。

3 CPSGA 算法

3.1 算法原理

遗传算法^[18](genetic algorithm, GA)由美国教授 John Holland 于1975年首次提出,是目前学术界使用率较高的一种群体智能算法。遗传算法凭借计算效率高、易于实现的优点,已被成功应用于很多复杂问题寻找最优解的过程中。然而该算法存在收敛过早、计算不精确的缺点,为提高计算性能,需要对其进行一定的改进。针对GA算法的瑕疵,将粒子群算法^[19](particle swarm optimization, PSO)与混沌算法(chaos optimization algorithm, COA)的进化策略嵌入到GA算法框架中,结合各算法的优势,提出一种高效的全局搜索算法——CPSGA算法。

GA、COA、PSO算法特点鲜明:GA具有良好的全局搜索能力,但不擅长于局部寻优;COA拥有混沌运动遍历性、随机性的特点,但局部寻优能力较弱,计算精度差;PSO具有良好的局部寻优能力,但易陷入局部最优解。目前,也有很多学者做了一些将2种或3种算法融合成新算法的研究工作^[20-22]。结合这3种算法的优势,本文将COA的混沌映射和PSO的速度位置更新策略引入GA算法框架中,提出CPSGA算法。CPSGA算法引入了初始种群混沌化策略、基于COA与PSO的扰动进化策略、次适应

度策略三大改进策略,以强化种群质量,最终达到提高算法效率的目的。该算法利用 GA 的选择、交叉、变异操作实现个体进化;利用 COA 的混沌映射和载波实现种群混沌化,利用二次载波实现精英个体的混沌扰动进化;利用 PSO 实现较劣个体的扰动进化;利用次适应度策略维持进化末期的寻优效率。

3.2 计算步骤

城市化区域水资源承载力综合评价模型的求解即求解权重。应用 CPSGA 算法进行城市化下区域水资源承载力综合评价模型求解的步骤如下:

步骤 1 在算法中设置好合适的迭代次数、种群规模等基本参数后,以水量、水质、水域、水流要素的权重 α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 为优化变量,输入“量-质-域-流”4 维度下水资源承载力分部模型评价分数 p_i 以及历史水资源承载力评价等级数据 S_k (维度 $i=1,2,3,4$;数据组数 $k=1,2,\cdots,n$) 构建目标函数如下:

$$f = \min \left(\left\| \begin{bmatrix} p_{1,1} \\ p_{1,2} \\ \vdots \\ p_{1,n} \end{bmatrix} \alpha_1 + \begin{bmatrix} p_{2,1} \\ p_{2,2} \\ \vdots \\ p_{2,n} \end{bmatrix} \alpha_2 + \begin{bmatrix} p_{3,1} \\ p_{3,2} \\ \vdots \\ p_{3,n} \end{bmatrix} \alpha_3 + \begin{bmatrix} p_{4,1} \\ p_{4,2} \\ \vdots \\ p_{4,n} \end{bmatrix} \alpha_4 - \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_n \end{bmatrix} \right\|_1 \right) \quad (16)$$

步骤 2 将混沌变量引入到优化变量中,并把混沌运动的遍历范围放大到优化变量的取值范围,然后进行编码形成种群。任选 nm 个不同个体,通过 Logistic 映射得到 nm 个混沌变量序列 λ_i ($i=1,2,\cdots,nm$),利用载波将各混沌变量放大到相应的优化变量的取值范围,最后计算个体的适应度并对种群进行排序,选取前 m 个个体生成初始种群,从而实现了初始种群的混沌化过程。

步骤 3 当种群个体间的适应度相差过小时收敛速度会变慢,此时计算个体的次适应度并对其进行排序,筛选更优个体更新外部精英集。

步骤 4 对群体进行选择、交叉、变异操作。

步骤 5 计算适应度,对种群进行排序,根据适应度的排序结果将个体进行分级,排序前 10% 的个体为精英个体,进入扰动点集 I,排序后 20% 的个体为较劣个体,进入扰动点集 II,排序中间 70% 的个体不发生扰动,进入步骤 6。对扰动点集 I 的个体进行混沌扰动,利用混沌映射产生混沌变量序列,并进行载波使得精英个体发生微小的混沌扰动。对扰动点集 II 的个体进行扰动,若满足较劣个体混沌

操作条件,则重新生成扰动点集 II 的个体;如果不满足,则对扰动点集 II 的个体更新速度向量、位置向量实现搜索空间的压缩。

步骤 6 计算次适应度。判断上一代最优个体进化后是否劣于原先个体,若劣于原先个体,则进化后的个体被外部精英集记录的上一代最优个体所替代;若不劣于原先个体,则进入步骤 7。

步骤 7 判断是否满足结束条件:若到达最大迭代次数或一定迭代次数内最优个体适应度不再降低,则进入步骤 8;否则,进入步骤 3 重新计算个体的次适应度并对其进行排序,并筛选个体进入外部精英集。

步骤 8 输出最优解,结束。

4 实例验证

4.1 研究区概况

南京地处我国东部、长江下游中部地区,位于北亚热带湿润气候区,不同季节温度差异明显,雨水较为充盈。常年平均降水 118 d,年平均降水量约 1 107 mm,多年平均气温约为 15.5℃。南京是江苏省的行政中心,是长江经济带战略和“一带一路”倡议交汇的重要城市,近年来南京的经济发展迅速,2018 年的地区生产总值约为 12 821 亿元,比上年增长 8.1%,三大产业相较上年分别增长 0.7%、6.6% 和 9.2%。2015—2018 年南京城市化发展程度稳步提高,整体城市化水平不断提高,城市人口数由 670.42 万人增长至 695.99 万人,城市化水平由 81.40% 提高到 82.50%。

为了深入分析南京市水资源承载能力,统筹考虑区域发展与水资源的协调状况,从 2015—2018 年的《江苏省统计年鉴》《中国统计年鉴》和《江苏省水资源公报》等统计资料中收集该市水资源承载力评价指标数据,构建南京市在高度城市化发展情景下水资源承载力评价指标体系和综合评价模型,并采用 CPSGA 算法对综合评价模型进行求解,确定最终评价等级。由于篇幅限制,仅以 2018 年为例展示计算过程。

4.2 计算结果

a. 水量要素水资源承载力计算结果。应用物元可拓模型对南京市水量要素水资源承载力进行评价,在水量层面上统筹考虑取耗水情况、用水效率情况、产业结构及水资源配置的变化。根据各评价指标的现状数据,计算得到南京市水量要素水资源承载力各相关指标关于各等级的关联度,计算结果见表 2。

根据表 2 得综合评价指标为 0.138 4,此时评价

单元的评价等级为Ⅳ级弱可承载,故 2018 年南京市水量要素水资源承载力处于弱可承载程度。

表 2 水量要素各评价指标对各评价等级的关联度

指标	I 级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	V 级	单因子评价结果
I_1	-0.4706	-0.4375	-0.3077	0.2000	-0.1000	弱可承载
I_2	0.2450	-0.7550	-0.8367	-0.8693	-0.8911	严重超载
I_3	-0.8900	-0.6700	-0.3400	0.4857	-0.3529	弱可承载
I_4	-0.4090	-0.3708	-0.2196	0.4520	-0.1883	弱可承载
I_5	-0.8691	-0.7943	-0.5200	0.1333	-0.1429	弱可承载
I_6	-0.4658	-0.3158	-0.0250	0.3333	-0.0488	弱可承载
I_7	0.2529	-0.2529	-0.6152	-0.7772	-0.8260	严重超载
I_8	-0.1978	0.3724	-0.2935	-0.3262	-0.3559	超载
I_9	-0.4157	-0.1820	0.4550	-0.2104	-0.4304	临界
I_{10}	-0.9623	-0.9500	-0.9259	-0.8000	0.2000	可承载
综合关联度	-0.4874	-0.4628	-0.2501	0.1384	-0.2347	弱可承载

b. 水质要素水资源承载力计算结果。应用集对分析模型对南京市水质要素水资源承载力进行评价,将评价指标数据标准化处理后计算评价样本与各评价等级之间的综合联系度和相对隶属度,将相对隶属度归一化处理,通过置信度准则评判法,根据式(7)和表 3 进行整体评价等级评判,当评价等级为 V 级时 $R_k=0.7066>0.6$,满足置信度评判要求,故 2018 年南京市水资源承载力水质要素评价等级为 V 级可承载。

表 3 水质要素水资源承载力 R_k

V 级	Ⅳ级	Ⅲ级	Ⅱ级	I 级
0.7066	0.2872	0.0058	0.0004	0

c. 水域要素水资源承载力计算结果。应用投影寻踪模型对南京市水域要素水资源承载力进行评价,对训练样本进行归一化处理,计算最佳投影方向的单位长度向量为(0.3804,0.6901,0.4667,0.4015),以标准等级样本点的投影值划分新的评价等级(表 4),将水域要素评价指标归一化后作为样本进行预测,得到投影值为 1.361,评价等级为Ⅳ级弱可承载。

表 4 水域要素评价指标投影结果

I 级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	V 级
0	0.5546	1.0510	1.9387	>1.9387

d. 水流要素水资源承载力计算结果。应用层次分析法对南京市水资源承载力水流要素进行评价,根据专家打分法,得到判断矩阵:

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \frac{1}{3} & 3 \\ \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{3} & 3 \\ 3 & 3 & 1 & 4 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

权向量 $\boldsymbol{W}=(0.2425,0.1718,0.5019,0.0838)$,最大特征值 $\lambda_{\max}=4.1440, C_R=0.0539<0.10$,表示此矩阵的一致性可以接受,此时评价分数 $p=0.7631$,故 2018 年南京市水流要素评价等级为Ⅳ级弱可承载。

e. 综合评价计算结果。水量、水质、水域、水流 4 要素的水资源承载力评价分数见表 5。

表 5 评价分数计算结果

年份	水量	水质	水域	水流
2015 年	0.83	0.853	0.722	0.758
2016 年	0.88	0.861	0.714	0.759
2017 年	0.793	0.868	0.725	0.762
2018 年	0.77	0.88	0.74	0.763

根据前述内容,运用 CPSGA 算法求解水资源承载力综合评价模型,代入已知数据样本后得出水量、水质、水域、水流 4 要素的权重($\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3,\alpha_4$),迭代约 9 000 次左右时,函数值已经收敛,优化过程见图 2,权重计算结果见表 6。

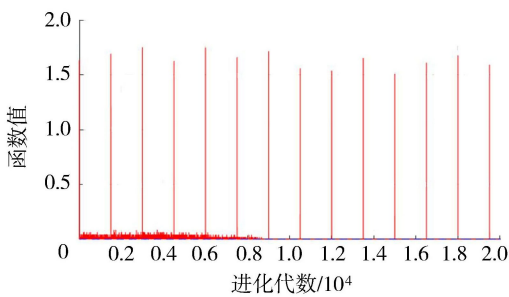


图 2 权重优化示意

表 6 指标权重计算结果

年份	水量	水质	水域	水流
2015 年	0.310	0.350	0.198	0.142
2016 年	0.450	0.279	0.213	0.058
2017 年	0.357	0.324	0.205	0.114
2018 年	0.298	0.352	0.190	0.160

通过水资源承载力综合评价模型分析得到南京市 2015—2018 年的水资源承载力综合评价分数分别为 0.806、0.832、0.800、0.802,故南京市 2015—2018 年的水资源承载均处于可承载等级,但 2015 年、2017 年和 2018 年都临近弱可承载等级边界。

4.3 评价结果分析

根据水资源承载力评价分数结果可以看出,2015—2018 年南京市水资源承载力相对较为稳定,处于可承载与弱可承载的临界水平上。

评价体系中的水量要素子系统评分 2015—2018 年出现了一定的下降波动。这是由多方面因素共同作用导致的,一方面 2015 年和 2016 年降水量相对较多,导致地表地下水资源量更为充沛,从水量层面会使得相关数据出现一定下滑。另一方面节水、合理用水观念的宣传普及,促进了农业和生活两

方面用水效率不断提高,使得万元 GDP 用水量迅速下降,从水量、经济层面改善了水资源承载力。

评价体系中的水质要素子系统评分在 2015—2018 年城市化进程中没有出现明显的变化。随着水质管理相关工作的推进,南京市水功能区达标率逐年上涨,污水处理率和生活用水效率显著提高。然而伴随着城市化的推进,社会经济迅速发展,大量污染物被排放到河道中,因此南京市的水质问题愈发严峻,水污染问题在一定程度上阻碍了现阶段南京水资源承载力的提高。

评价体系中的水域要素子系统评分在 2015—2018 年城市化进程中出现缓慢增加。尽管近年来南京市生态环境用水率略微下降,但在城市化进程中,为保障自然条件和经济社会发展,制定了相适应的南京市水土保持体系布局,为实现全市水土资源可持续利用、生态环境有效保护和改善民生提供重要支撑,从而促进了水土流失治理率逐年上升,为南京市水资源承载力提供了重要支撑。

评价体系中的水流要素子系统评分在 2015—2018 年城市化进程中出现增长较为平缓。2015—2018 年南京市的河网密度与水域面积率总体较为稳定,黑臭河道的治理在稳中推行,现已基本消除市区黑臭河道,对提高南京市水资源承载力起到了积极的作用。

2015—2018 年,随着南京城市化水平的提升,地表水资源开发程度提高,工业生产用水、居民生活用水量大幅度增加,也产生了更多的生活污水和工业污水排向河道,南京市水资源承载力面临着更大的压力。但同时南京市也致力于优化水资源配置,提高用水效率,严格监控污染物的排放,加强河道生态整治以及推进城市管网改造等工作,促进了社会经济与水资源保护协调发展,使得整体水资源承载力处于可承载状态。模型评价结果与南京市实际情况相符,表明构建的评价模型是合理的,能够反映南京市城市化进程下的水资源承载力水平。

5 结 语

水资源承载力涉及生态环境、水循环和社会经济三大系统,水资源承载力不仅受水资源系统影响,还与人类社会的经济发展模式、用水效率、污水排放情况等息息相关。本文基于城市化下区域水资源承载力的作用机理及特性,从“量-质-域-流”4 个维度构建了城市化区域水资源承载力评价模型,分别采用物元可拓模型、集对分析模型、投影寻踪模型、层次分析模型对水量、水质、水域、水流状态 4 类水资源承载力要素进行评价。将构建的模型应用于

2015—2018 年南京市水资源承载力评价,评价结果符合南京市水资源承载力状况,验证了评价模型的有效性和适用性,评价结果可为南京市优化水资源配置,保持社会经济与水资源保护协调发展提供参考。

参考文献:

[1] 唱彤,郦建强,金菊良,等. 面向水流系统功能的多维度水资源承载力评价指标体系[J]. 水资源保护,2020,36(1):44-51. (CHANG Tong, Li Jianqiang, JIN Juliang, et al. Multi-dimensional water resources carrying capacity evaluation index system for water flow system function [J]. Water Resources Protection,2020,36(1):44-51. (in Chinese))

[2] 徐翔宇,郦建强,金菊良,等. 基于风险矩阵的多要素水资源承载力综合评价方法[J]. 水利水电科技进展,2020,40(1):1-9. (XU Xiangyu, Li Jianqiang, JIN Juliang, et al. Comprehensive evaluation method of multi-factor water resources carrying capacity based on risk matrix[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(1):1-9. (in Chinese))

[3] 程芳芳. 基于主成分分析法的太原市水资源承载力评价[J]. 中国管理信息化,2021,24(1):212-215. (CHENG Fangfang. Evaluation of water resources carrying capacity in Taiyuan City based on principal component analysis[J]. China Management Informationization,2021,24(1):212-215. (in Chinese))

[4] 高亚,章恒全. 基于系统动力学的江苏省水资源承载力的仿真与控制[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(4):103-109. (GAO Ya, ZHANG Hengquan. Simulation and control of water resource carrying capacity in Jiangsu Province based on system dynamics[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2016,27(4):103-109. (in Chinese))

[5] 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 Shaopeng, ZHAO Heng, WANG Fuqiang, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in Jiangsu Province based on AHP-TOPSIS model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3):20-25. (in Chinese))

[6] 金菊良,刘东平,周戎星,等. 基于投影寻踪权重优化的水资源承载力评价模型[J]. 水资源保护,2021,37(3):1-6. (JIN Juliang, LIU Dongping, ZHOU Rongxing, et al. Evaluation model of water resources carrying capacity based on projection pursuit weight optimization [J]. Water Resources Protection,2021,37(3):1-6. (in Chinese))

[7] 袁艳梅,沙晓军,刘煜晴,等. 改进的模糊综合评价法在水资源承载力评价中的应用[J]. 水资源保护,2017,33

- (1):52-56. (YUAN Yanmei, SHA Xiaojun, LIU Yuqing, et al. Application of improved fuzzy comprehensive evaluation method to water resources carrying capacity evaluation[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 52-56. (in Chinese))
- [8] 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 Qiting, ZHANG Zhizhuo, WU Binbin. 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. (in Chinese))
- [9] 屈豪. 基于物元可拓模型的流域水环境承载力研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.
- [10] 杨兰, 白夏, 戚晓明, 等. 基于集对分析法的淮北市水资源承载力评估[J]. 蚌埠学院学报, 2019, 8(2): 125-128. (YANG Lan, BAI Xia, QI Xiaoming, et al. Assessment of water resources carrying capacity in Huaibei City based on set pair analysis [J]. Journal of Bengbu University, 2019, 8(2): 125-128. (in Chinese))
- [11] 金菊良, 杨通竹, 酆建强, 等. 投影寻踪方法在水资源承载力评价与预测中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2020(4): 10-16. (JIN Juliang, YANG Tongzhu, LI Jianqiang, et al. Application of projection pursuit method in assessment and prediction of water resources carrying capacity[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(4): 10-16. (in Chinese))
- [12] 邓正华, 戴丽琦, 邓冰, 等. 洞庭湖流域水资源承载力时空演变分析[J]. 经济地理, 2021, 41(5): 186-192. (DENG Zhenghua, DAI Liqi, DENG Bing, et al. Spatial-temporal evolution of water resources carrying capacity in Dongting Lake Basin[J]. Economic Geography, 2021, 41(5): 186-192. (in Chinese))
- [13] 赵军凯, 李九发, 戴志军, 等. 基于熵模型的城市水资源承载力研究: 以开封市为例[J]. 自然资源学报, 2009, 24(11): 1944-1951. (ZHAO Junkai, LI Jiufa, DAI Zhijun, et al. Study on water resources carrying capacity of urbanized area based on entropy model: a case study in Kaifeng City[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(11): 1944-1951 (in Chinese))
- [14] 郑德凤, 徐文瑾, 姜俊超, 等. 中国水资源承载力与城镇化质量演化趋势及协调发展分析[J]. 经济地理, 2021, 41(2): 72-81. (ZHENG Defeng, XU Wenjin, JIANG Junchao, et al. Analysis on the evolution trend and coordinated development of water resources carrying capacity and urbanization quality in China[J]. Economic Geography, 2021, 41(2): 72-81. (in Chinese))
- [15] 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 Hailiang, SHI Chenling, WANG Lei. Research on water resources carrying capacity in Jiangsu Province in the process of urbanization: based on combination weighting and rising half Γ type distribution function[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(11): 1697-1703. (in Chinese))
- [16] 吕爱锋, 韩雁, 张士锋, 等. 水资源承载风险的理论、方法与实践[J]. 中国水利, 2020(19): 47-51. (LYU Aifeng, HAN Yan, ZHANG Shifeng, et al. The theory, method and practice of water resources carrying risk[J]. China Water Resources, 2020(19): 47-51. (in Chinese))
- [17] 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. (SU Yongjun, WANG Hui, KONG Shuqin. Evaluation of regional water resources carrying capacity based on projection pursuit and matter-element extension model [J]. Water Saving Irrigation, 2017(2): 80-84. (in Chinese))
- [18] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence [M]. 2nd ed. Cambridge: MIT Press, 1992.
- [19] ANGELINE P J. Evolutionary optimization versus particle swarm optimization: philosophy and performance differences [C]// Processes Seventll Annual Conference On Evolutionary Programming. Berlin: Springer, 1998: 256-260.
- [20] GANDOMI A H, YANG X S, TALATAHARI S, et al. Firefly algorithm with chaos [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2013, 18(1): 89-98.
- [21] 陈晓楠. 农业干旱灾害风险管理理论与技术[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- [22] 吴昊. 基于双层并行算法的水电站群优化调度方法及应用研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020.

(收稿日期: 2021-06-28 编辑: 郑孝宇)

