

基于 SE - DEA - IAHP 方法的贵州省岩溶地区 水资源可持续利用效率评价

李腾^{1,2}, 李博^{1,2,3}, 屈伟⁴, 楚靖岩⁵, 罗玉岚^{1,2}, 刘磊^{1,2}

(1. 贵州大学 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学 国土资源部喀斯特
环境与地质灾害重点实验, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025;
4. 贵州交通职业技术学院 道路与桥梁工程系, 贵州 贵阳 550025; 5. 河南省煤田地质局 河南省
自然资源科技创新中心(水土环境修复研究), 河南 郑州 450016)

摘要: 贵州省位于我国西南喀斯特地区的中心,地貌类型以山地为主,河谷深切,水资源开发利用难度大,提高水资源利用效率对于贵州省的可持续发展具有重要意义。基于水资源利用、社会经济、生态环境等 3 个一级指标构建水资源评价指标体系。在此基础上,以次级指标为松弛变量,利用超效率 DEA 模型(SE - DEA)计算一级指标超效率值;采用区间层次分析法(IAHP)计算一级指标权重向量。基于 SE - DEA 和 IAHP 方法建立水资源综合评价模型 SE - DEA - IAHP,得出水资源利用总效率值。结果表明:贵州省水资源利用效率值较低,2015 - 2019 年总效率值在 1 附近动态变化;从一级指标来看,社会经济指标的 IAHP 权重值最大,但水资源转换效率并不高,说明贵州省经济的高速发展也带来了一定程度的水资源浪费;考虑到贵州省特殊的岩溶地质条件,增加相应的经济管理投入、优化产业水量配置结构和提高用水技术手段是贵州省水资源可持续发展的关键。

关键词: SE - DEA; 区间层次分析法; 水资源利用效率; 可持续发展; 岩溶地区

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2022)02-0101-07

Evaluation of sustainable utilization efficiency of water resources in karst areas of Guizhou Province based on SE - DEA - IAHP

LI Teng^{1,2}, LI Bo^{1,2,3}, QU Wei⁴, CHU Jingyan⁵, LUO Yulan^{1,2}, LIU Lei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Key Laboratory of Karst Environment and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 4. Department of Road and Bridge Engineering, Guizhou Communications Polytechnic, Guiyang 550025, China; 5. Henan Natural Resources Science and Technology Innovation Center (Research on Water and Soil Environment Rehabilitation), Coal Field Geology Bureau of Henan Province, Zhengzhou 450016, China)

Abstract: Guizhou Province is located in the center of the karst region in southwest of China, its topography is dominated by mountains with deep river valleys, which makes it difficult for the development and utilization of water resources. So, improving water resources utilization efficiency is of great significance to the sustainable development of Guizhou Province. Here, a water resources evaluation index system was established based on three first-level indicators of water resources utilization, social economy and ecological environment. On this basis, with secondary indicators as slack variables, the super-efficiency DEA model (SE - DEA) was used to calculate the super-efficiency value of the first-level indicators, and the interval analytic hierarchy process (IAHP) is used to calculate the weight vector of the first-level indicators. Based on the super-efficiency DEA and IAHP methods, a comprehensive water resources evaluation

收稿日期:2021-08-09; 修回日期:2021-12-12

基金项目:国家自然科学基金项目(41702270);贵州省科学技术基金项目(黔科合基础[2019]1413、黔科合支撑[2020]4Y048);贵州省教育厅青年项目(黔教合 KY 字[2018]113)

作者简介:李腾(1996-),男,贵州安顺人,硕士研究生,主要从事岩溶水文地质方面的研究。

通讯作者:李博(1982-),男,河南南阳人,博士,教授,主要从事岩溶水文地质方面的研究。

model SE - DEA - IAHP was established, and the overall value of water resources utilization efficiency was obtained. The results show that the efficiency value of water resources utilization in Guizhou Province from 2015 - 2019 was low, which fluctuated dynamically around 1; in view of the first-level indicators, the social and economic IAHP weight value was relatively large, but the water conversion efficiency was not as high as expected, indicating that the rapid economic development brought some waste of water resources; taking into account the special karst geological conditions in Guizhou Province, the key to achieve sustainable development of water resources is to maintain a virtuous cycle of water resources, increase the corresponding economic management investment, optimize the industrial water allocation structure and improve the technical means of water utilization in Guizhou Province.

Key words: super-efficiency DEA model; interval analytic hierarchy process (IAHP); water resources utilization efficiency; sustainable development; karst area

1 研究背景

西南地区作为我国典型岩溶发育区,水资源虽然丰富,但特殊的水文地质条件导致水资源开发难度大、利用程度低。而贵州省位于西南喀斯特地貌中心,岩溶极为发育,沟谷纵横,水资源开采难,成本高这一特点更加凸显。所以,水资源利用效率的提高显得极为重要。

目前对水资源利用效率评价的研究已经取得了大量的成果,其中常用方法有水足迹^[1-4]、生态足迹^[5-8]、层次分析法^[9-12]、熵权法^[13-15],也有学者通过量化相关水资源指标,利用数学方法或多目标规划对水资源的可持续利用进行评价,例如:陈璇璇等^[16]选取用水条件、用水情况和社会经济为指标,采用超效率 DEA 模型对晋陕两省 21 个地区的水资源利用效率进行评价,结果显示,可通过调整水量配置和优化产业结构提升水资源的转化效率;刘俊国等^[17]提出以“水量 - 水质 - 生态”三维模式评价体系对水资源短缺进行评价,旨在有针对性地制定水资源应对策略,对水资源进行综合有效的管理;Li 等^[18]从供水安全、社会安全、经济安全和生态安全等角度建立安全评价指标和等级,采用分析网络法和灰色关联分析建立水资源安全评价模型对贵州省水资源安全状况进行评价,结果显示,该区水资源属于相对安全状态;陈午等^[19]基于改进序关系法来确定指标权重,淘汰一致性检验差的指标排序,利用相邻指标的标准差比值确定指标间的重要性比率,使组合权重体现专家意见和指标数据信息,主客观权重分配的问题也得到了较好的解决。王丽珍等^[20]鉴于复杂水资源系统中的不确定性及相应风险,引入可靠性、弹性和脆弱性 3 个风险性指标来综合表征水资源系统的可持续性,最后加权求和计算区域水资源可持续性指数,结果表明,1989 - 2008 年的

北京市水资源系统可持续性一直处于上升趋势,但仍存在一些相对劣势指标需要进一步改善。

前述方法大多基于客观数据分析,或依据人类主观经验性进行评价,存在一定程度的模糊性。为进一步评价水资源利用效率,本文提出基于超效率数据包络分析(super-efficiency data envelopment analysis, SE - DEA)和区间层次分析(interval analysis hierarchy process, IAHP)方法的水资源可持续利用效率评价模型 SE - DEA - IAHP,该方法融入了 SE - DEA,可真实反映各项水资源利用效率的客观性,又结合了 IAHP 对各目标层重要程度的主观经验性,旨在将主、客观因素相结合,综合而全面地对水资源可持续利用效率做出合理评价。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

贵州省位于西南内陆,是西南地区交通枢纽、长江经济带的重要组成部分。其地理位置界于北纬 24°37' ~ 29°13',东经 103°36' ~ 109°35',境内地势西高东低,自中部向北、东、南三面倾斜,在岩性上以碳酸盐岩广布、喀斯特地貌发育为特征,虽地跨长江和珠江两大水系,但特殊的水文地质条件导致该地区水资源开采难度大,作为岩溶区的典型代表,合理有效地提高水资源利用效率,不仅是保持该地区水资源良性发展的前提,也是保障该地区长久持续发展的基本要务。贵州省行政分区如图 1 所示。

2.2 数据来源

本文选取 2015 - 2019 年贵州省水资源利用状况作为评价对象。数据来源于 2015 - 2019 年《贵州省统计年鉴》和《贵州省水资源公报》。

2.3 研究方法

2.3.1 评价指标体系构建 水资源可持续利用效率评价是一个涉及多水平指标的有机集合体,其体

系构建遵循科学性、可持续性、多水平、动态性、可量性等原则。在 IAHP 的基础上,结合 SE - DEA 模型的多投入与多产出特点,本文拟从水资源利用、社会经济和生态系统 3 个方面构建评价指标体系,具体指标如图 2 所示。

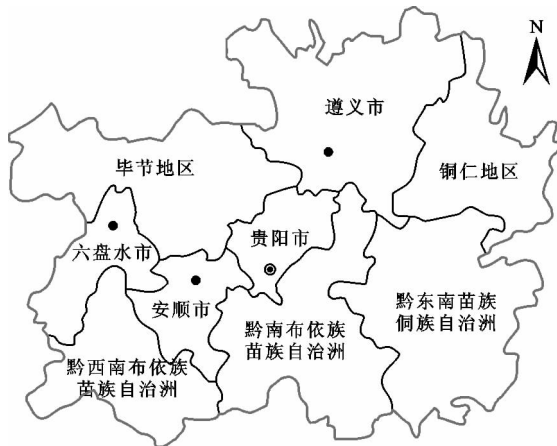


图 1 贵州省行政区划图

2.3.2 SE - DEA 模型 1978 年,Charnes、Cooper、Rhodes 等提出了 DEA 方法,该方法使用数学规划模型,旨在评价“多投入多产出”模式下决策单元间的相对有效性。其中 CCR (Charnes - Cooper - Rhodes) 模型是 DEA 中使用较为广泛的模型之一。

但在实际的应用过程中发现,在利用 CCR 模型评价多个决策单元时,可能会出现多个决策单元同时有效的情况,故不能进一步对决策单元做出有效判断。为解决这一缺点,Nersen 等在 20 世纪末提出了一种 CCR 模型的改进模型,即 SE - DEA 模型^[21-22],从而有效解决了 CCR 模型中的同时有效性问题,避免了不能对多个有效单元做出进一步评价和比较的缺点,使有效决策单元的效率值能够进行比较、排序。其数学表达式如下:

$$\min [\theta - \varepsilon (\sum_{i=1}^m S_i^- + \sum_{r=1}^s S_r^+)] \tag{1}$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1, j \neq k}^n X_{ij} \lambda_j + S_i^- \leq \theta X_{i0} \tag{2}$$

$$\sum_{j=1, j \neq k}^n Y_{rj} \lambda_j - S_r^+ = Y_{r0} \tag{3}$$

$$(\lambda_j, S_r^+, S_i^- \geq 0, j = 1, 2, \dots, n)$$

式中: θ 为 SE - DEA 效率值; ε 为非阿基米德无穷小量; n 为执行决策单元个数; S_i^- 、 S_r^+ 分别为输入和输出的松弛变量; X_{ij} 为第 j 个决策单元在第 i 个输入(投入)指标上的值; Y_{rj} 为第 j 个决策单元在第 r 个输出(产出)指标上的值; λ_j 为指标的权重系数; θ 、 λ_j 、 S_i^- 、 S_r^+ 均为未知参量,可由模型求解。

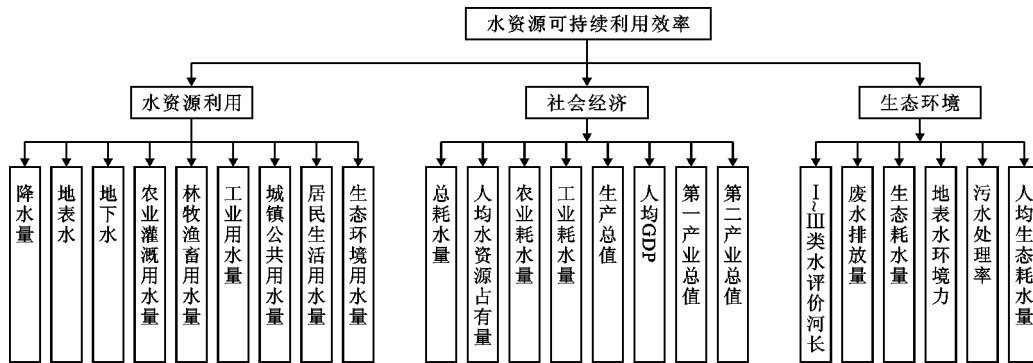


图 2 水资源可持续利用效率评价指标体系

2.3.3 区间层次分析法 区间层次分析法(简称 IAHP)是在层次分析法(简称 AHP)的基础上进行了延伸与改进,两者的基本思想内涵是统一的。IAHP 与传统 AHP 的区别在于其采用一个区间数而非单一值来判别两个因素对总体目标的重要程度,有效弱化了决策者因信息掌握不全而使用单一值评价时的不合理性及主观性,其构造的区间数列矩阵能更加准确、相对客观地反映决策者的经验性,并合理地反映判断的模糊性,给实际使用者提供了一个较为合理的判断空间^[23-24]。但无论是 AHP 还是 IAHP 均在一定程度上依赖于决策者的主观判断,这

一问题还需要在以后的应用过程中不断改进。

IAHP 使用区间数替代单一点值构造判断矩阵,通过对区间数的运算得到指标权重,相应的权重值以区间数的形式表达^[25-26]。设 $\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij})_{n \times n}$, 为一区间矩阵,即 $\tilde{a}_{ij} = [a_{ij}^-, a_{ij}^+]$, 记 $A^- = (a_{ij}^-)_{n \times n}$ 、 $A^+ = (a_{ij}^+)_{n \times n}$, 并记 $\tilde{A} = [A^-, A^+]$, 对区间数向量 $\tilde{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, 即 $\tilde{x}_i = [x_i^-, x_i^+]$, 记 $X^- = (x_1^-, x_2^-, \dots, x_n^-)^T$ 、 $X^+ = (x_1^+, x_2^+, \dots, x_n^+)^T$, $\tilde{X} = [X^-, X^+]$ 。采用 IEM (interval-number eigenvector method) 方法

计算出 A^-, A^+ 的最大特征值所对应的归一化特征向量 X^-, X^+, α, β 的计算公式如下:

$$\alpha = \left[\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^+} \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$\beta = \left[\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^-} \right]^{1/2} \quad (5)$$

根据计算得出的 α, β 值, 由公式(6) 即可得出区间矩阵的权重向量 w 。

$$w = [\alpha X^+, \beta X^-] \quad (6)$$

2.3.4 基于 SE-DEA-IAHP 的水资源可持续利用效率评价模型 根据前述介绍可以清楚地了解到 SE-DEA 模型是一种非参数的线性规划数学模型, 决策者根据实际情况选取评价指标, 对指标数据量化后直接输入模型便可得到需要的输出结果, 不受人为的主观影响, 决策者只需要根据输出结果对有效单元进行比较和排序。而 IAHP 在评价方面采用区间数代替 AHP 中的单一值, 虽然在一定程度上弱

化了决策者由于对实际环境以及先决条件没有明确而产生的模糊性和不确定性, 但 IAHP 毕竟是一种非定量的人为主观评价方法, 其判断主要还是依赖决策者的经验。本文拟将 SE-DEA 模型的客观性与 IAHP 方法的主观性进行融合, 利用 SE-DEA 模型的超效率值和 IAHP 的权重根据公式(7) 计算总效率值。

$$\eta = \bar{w}\theta = \sum_{i=1}^3 \bar{w}_i \theta_{ij} \quad (7)$$

式中: η 为总效率值; \bar{w} 为权重中值; θ 为超效率值。

3 结果与分析

本文从水资源利用、社会经济和生态环境 3 个方面对 2015-2019 年贵州省水资源利用效率进行评价, 具体指标体系及原始数据见表 1。

根据给出的 SE-DEA 模型, 分别对水资源利用、社会经济、生态环境 3 个一级指标下的输入、输出数据使用软件 MATLAB 进行超效率数据包络分析, 具体结果见表 2。

表 1 2015-2019 年贵州省水资源评价系统及原始指标数据

一级评价指标	指标类型	评价指标	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
水资源利用	输入	降水量(S_{11}^-)/ 10^8 m^3	2212.92	2138.12	2070.42	2048.70	2195.00
		地表水(S_{12}^-)/ 10^8 m^3	1153.72	1066.10	1051.51	978.68	1117.00
		地下水(S_{13}^-)/ 10^8 m^3	282.25	251.25	260.76	252.65	267.00
	输出	农业灌溉用水量(S_{11}^+)/ 10^8 m^3	51.57	53.66	56.18	58.01	58.52
		林牧渔畜用水量(S_{12}^+)/ 10^8 m^3	2.65	2.75	2.75	3.17	3.23
		工业用水量(S_{13}^+)/ 10^8 m^3	25.50	25.68	24.85	25.19	25.38
		城镇公共用水量(S_{14}^+)/ 10^8 m^3	5.79	6.01	6.78	7.13	7.41
社会经济	输入	居民生活用水量(S_{15}^+)/ 10^8 m^3	11.23	11.34	12.05	12.36	12.56
		生态环境用水量(S_{16}^+)/ 10^8 m^3	0.74	0.88	0.90	0.94	0.97
		总耗水量(S_{21}^-)/ 10^8 m^3	48.77	50.26	55.21	57.09	57.62
	输出	人均水资源占有量(S_{22}^-)/ m^3	3269.00	2999.00	2937.00	2719.00	3083.00
		农业耗水量(S_{23}^-)/ 10^8 m^3	29.81	30.88	32.36	33.50	33.89
		工业耗水量(S_{24}^-)/ 10^8 m^3	6.41	6.42	13.46	13.80	13.84
		生产总值(S_{21}^+)/ 10^8 元	10541.00	11792.35	13605.42	15353.21	16769.34
生态环境	输入	人均 GDP(S_{22}^+)/元	29956.00	33291.00	38137.00	42767.00	46433.00
		第一产业总值(S_{23}^+)/ 10^8 元	1641.98	1681.81	2156.02	1180.56	2280.56
		第二产业总值(S_{24}^+)/ 10^8 元	4026.71	4468.73	4970.85	5506.24	6058.45
	输出	I~III 类水评价河长(S_{31}^-)/km	6059.70	6538.00	6632.00	7051.50	7294.92
		废水排放量(S_{32}^-)/ 10^8 t	11.28	10.07	11.80	12.84	14.60
		生态耗水量(S_{33}^-)/ 10^4 m^3	5800.00	6900.00	7100.00	7300.00	7600.00
		地表水环境力(S_{31}^+)/%	81.00	88.00	89.00	95.00	98.00
输出	污水处理率(S_{32}^+)/%	90.00	90.50	90.80	93.80	94.60	
	人均生态耗水量(S_{33}^+)/ 10^4 m^3	0.61	0.52	0.50	0.49	0.48	

注:“-”表示输入变量,“+”表示输出变量。

表 2 SE - DEA 模型效率值分析结果

一级评价指标	指标类型	指标	各年份 SE - DEA 对应的松弛变量				
			2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
水资源利用	投入	S_{11}^-	0	103.31	0	141.39	29.44
		S_{12}^-	90.52	95.18	60.96	0	81.36
		S_{13}^-	8.76	0	5.30	20.28	0
	产出	S_{11}^+	7.15	5.48	1.05	0	1.77
		S_{12}^+	0.56	0.48	0.38	0	0.06
		S_{13}^+	0	0	0	0.01	0.80
		S_{14}^+	1.43	1.26	0.25	0.19	0
		S_{15}^+	1.28	1.26	0.14	0.09	0.29
		S_{16}^+	0.21	0.08	0.03	0.02	0.01
		SE - DEA 超效率值	0.94	1.03	0.98	1.13	0.98
社会经济	投入	S_{21}^-	0.18	5.48	0.32	6.55	0
		S_{22}^-	381.56	0	0	0	103.16
		S_{23}^-	0	3.64	0.07	3.77	0.07
		S_{24}^-	0	0	0.27	1.66	0
	产出	S_{21}^+	1.00	0	2.25	0.09	0
		S_{22}^+	2.59	0.12	5.76	0	0.50
		S_{23}^+	0	0.13	0	0.92	0
		S_{24}^+	0.34	0.01	0.76	0.07	0.44
		SE - DEA 超效率值	1.00	1.16	0.99	1.00	1.16
		SE - DEA 超效率值	1.00	1.16	0.99	1.00	1.16
生态环境	投入	S_{31}^-	0.79	1.07	0	0	0
		S_{32}^-	0	0	0	0	0
		S_{33}^-	0	1.15	0.13	0	0.05
	产出	S_{31}^+	22.30	0	0	0	0
		S_{32}^+	16.16	0.50	0	5.50	2.16
		S_{33}^+	0	0	0.01	0.10	0.03
		SE - DEA 超效率值	1.40	1.17	1.00	1.00	1.00

注：“-”表示投入，“+”表示产出。

根据前述 IAHP 计算指标权重的方法与步骤,在广泛听取相关专家的建议和意见后,根据萨迪标度构建水资源利用效率的一级定性评价指标的区间判断矩阵,如表 3 所示;在构造的区间数矩阵基础上,按前述方法计算得出 IAHP 的 $\alpha = 0.9085, \beta = 1.0789, X^- = (0.3508, 0.5069, 0.1423), X^+ = (0.3494, 0.5109, 0.1324)$,进一步得到水资源利用效率的一级评价指标权重向量 $w = [(0.3187, 0.3770), (0.4605, 0.5599), (0.1293, 0.1428)]^T$ 及权重中值,具体结果见表 4。

表 3 水资源利用效率一级评价指标判断矩阵

一级评价指标	水资源利用	社会经济	生态环境
水资源利用	(1,1)	(1/2,1)	(2,3)
社会经济	(2,1)	(1,1)	(3,5)
生态环境	(1/3,1/2)	(1/5,1/3)	(1,1)

表 4 水资源利用效率的一级评价指标权重

一级评价指标	权重	权重中值
水资源利用	(0.3187, 0.3770)	0.3479
社会经济	(0.4605, 0.5599)	0.5102
生态环境	(0.1293, 0.1428)	0.1361

根据表2中求得的SE-DEA超效率值和表4中3个一级指标的权重中值,利用公式(7)计算得出

水资源利用效率3个一级评价指标子系统各年份的总效率值,见表5。

表5 2015-2019年研究区水资源利用总效率值计算结果

一级评价指标	权重中值	各年份SE-DEA超效率值				
		2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
水资源利用	0.3479	0.94	1.03	0.98	1.13	0.98
社会经济	0.5102	1.00	1.16	0.99	1.00	1.16
生态环境	0.1361	1.40	1.17	1.00	1.00	1.00
总效率值 η		1.0278	1.1094	0.9821	1.0394	1.0689
排序结果		4	1	5	3	2

4 讨论

从表2中SE-DEA模型效率值分析结果来看,当输入和输出指标的松弛变量不为0时,说明输入资源投入未得到充分利用而产生了水资源浪费,或产出不足,水资源未得到充分利用;工业用水量转化率最优,其次为生态环境用水量,而农业灌溉用水量利用率最差;从社会经济方面也可以看出,第二产业的水资源利用率也是相对较高的,但整体的水资源转化率不理想,利用率不高;从生态环境方面可以看出,污水的产出并不理想,说明生产力的发展对生态环境造成了一定程度的负面影响。

从表4中IAHP权重值来看,社会经济指标的权重值最大,但其转换效率并不理想,说明近年来随着贵州省经济的高速发展,水资源的开发利用程度也在随之增大,并产生了一定程度的浪费,杨江州等^[15]在研究岩溶城市水资源可持续性评价时也提出GDP比重是影响水资源可持续利用的主要影响因素。虽然贵州省水资源丰富,但是由于特殊的水文地质条件,存在取用难度大、成本高的特点,所以合理科学地使用水资源,才能使整个水资源系统取得合理的良性发展。

从表5中综合SE-DEA模型效率值与IAHP权重值所得到的2015-2019年的贵州省水资源利用总效率值来看,各年份水资源利用效率值相当,其中最优化的是2016年,最差的是2017年。具体每一项水资源指标的利用效率值可查看表2,以此为参考改善水量配置方式,提高水资源利用效率。

5 结论

本文在SE-DEA模型对效率分析的客观性基础之上,融合了区间层次分析法,采用区间权重代替

单值权重,使人为主观因素在对各指标的重要程度打分时有更合理的空间,以弱化主观判断的不确定性和模糊性。本文所提出的SE-DEA-IAHP模型不仅尊重了客观实际数据,而且融入了水资源评价过程中的人类经验,可对水资源的可持续发展做出合理而全面的评价,得出主要结论如下:

(1)从综合结果来看,2015-2019年间贵州省水资源利用效率较低,其总效率值在1附近动态变化。

(2)从各一级指标系统来看,社会经济指标的IAHP权重值最大,但SE-DEA转换率并不理想,说明近年来贵州省经济高速发展的同时也产生了一定程度的水资源浪费。

(3)考虑到贵州省特殊的岩溶地质条件,为了保持水资源的良性循环和可持续发展,增加相应的经济管理投入、优化产业水量配置结构和提高用水技术手段是必要的。本文仅选取了2015-2019年的数据作为评价对象,由于数据获取有限、考虑因素不够全面,评价结果具有一定程度的局限性,后续可增加相应的评价指标,丰富数据,完善评价体系,使评价结果更为合理,从而更好地为地区水资源发展提供参考依据。

参考文献:

- [1] 王雅晴,洗超凡,欧阳志云.基于灰水足迹的中国城市水资源可持续利用综合评价[J].生态学报,2021,41(8):2983-2995.
- [2] 陈莎,吕鹤,李素梅等.面向水资源可持续利用的综合水足迹评价方法[J].水资源保护,2021,37(4):22-28.
- [3] 熊鸿斌,周凌燕.基于水足迹-灰靶的安徽省水资源可持续利用评价[J].环境科学学报,2018,38(8):3329-3338.
- [4] 余灏哲,韩美.基于水足迹的山东省水资源可持续利用时空分析[J].自然资源学报,2017,32(3):474-483.

- [5] 张淑兰,张海军,张鑫傲,等. 陕西省水资源生态足迹及其可持续利用分析[J]. 人民长江,2021,52(4):130-136.
- [6] 王先庆,李 博,李 进,等. 基于生态足迹模型的水资源可持续利用分析[J]. 人民长江,2019,50(5):107-112.
- [7] 李允洁,吕惠进,卜 鹏. 基于生态足迹法的浙江省水资源可持续利用分析[J]. 长江科学院院报,2016,33(12):22-26+32.
- [8] LI Bo, WANG Xianqing, WEI Tao, et al. Analysis of sustainable utilization of water resources in karst region based on the ecological footprint model—Liupanshui city case [J]. Journal of Water Supply, 2018, 67(6): 566-575.
- [9] 李林汉,田卫民,岳一飞. 基于层次分析法的京津冀地区水资源承载能力评价[J]. 科学技术与工程,2018,18(24):139-148.
- [10] 李维乾,解建仓,李建勋,等. 基于 AHP - BN 的陕西经济可持续发展水资源保障研究[J]. 水力发电学报,2012,31(5):6-13.
- [11] 金菊良,张礼兵,魏一鸣. 水资源可持续利用评价的改进层次分析法[J]. 水科学进展,2004,15(2):227-232.
- [12] 温淑瑶,马占青,周之豪,等. 层次分析法在区域湖泊水资源可持续发展评价中的应用[J]. 长江流域资源与环境,2000,9(2):196-201.
- [13] 徐卫红,于福亮,龙爱华. 基于熵权的模糊物元模型在水资源可持续利用评价中的应用[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(S2):157-160.
- [14] 张 杰,邓晓军,翟禄新,等. 基于熵权的广西水资源可持续利用模糊综合评价[J]. 水土保持研究,2018,25(5):385-389+396.
- [15] 杨江州,周 旭,蔡振饶,等. 岩溶城市(贵阳市)水资源可持续利用评价研究[J]. 水电能源科学,2018,36(2):36-39.
- [16] 陈璇璇,张旖旎,刘 莉,等. 基于超效率 DEA 模型的陕晋两省水资源利用效率评价[J]. 灌溉排水学报,2020,39(10):138-144.
- [17] 刘俊国,赵丹丹. “量 - 质 - 生” 三维水资源短缺评价: 评述及展望[J]. 科学通报,2020,65(36):4251-4261.
- [18] LI Bo, WU Qiang, ZHANG Wenping, et al. Water resources security evaluation model based on grey relational analysis and analytic network process: A case study of Guizhou Province[J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 37: 101429.
- [19] 陈 午,许新宜,王红瑞,等. 基于改进序关系法的北京市水资源可持续利用评价[J]. 自然资源学报,2015,30(1):164-176.
- [20] 王丽珍,黄跃飞,王光谦. 基于不确定性的区域水资源可持续性评价[J]. 水力发电学报,2013,32(6):83-91.
- [21] 牛冲槐,曹海曼. 中部六省高技术产业研发创新的相对效率分析——基于超效率 DEA 方法[J]. 工业技术经济,2015,34(2):111-116.
- [22] 赵 前,焦 捷,王以华. 中国省际科技竞争力评价——基于超效率 DEA 的分析[J]. 清华大学学报(自然科学版),2011,51(6):820-826.
- [23] 岳 进,郭 辉. 基于区间层次分析法和专家群决策的 MOOC 适切性评价[J]. 电化教育研究,2019,40(3):54-58.
- [24] 李建林,马会萌,田春光,等. 基于区间层次分析法的电化学储能选型方案[J]. 高电压技术,2016,42(9):2707-2714.
- [25] 肖 峻,王成山,罗凤章. 区间层次分析法的权重求解方法初探[J]. 系统工程与电子技术,2004,26(11):1597-1600.
- [26] 肖 峻,罗凤章,王成山,等. 区间层次分析法的权重求解方法比较研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2004(3):12-16.

(上接第 100 页)

- [17] JIANG Xuechen, ZHANG Jing, SONG Yongyu, et al. Comparative study on the dynamic calculation method of river ecological water demand [J]. Earth and Environmental Science, 2020, 569(1): 012081.
- [18] 任 朋,齐 进. 基于改进 Tennant 法的南渡江生态基流计算 [J]. 中国农村水利水电,2020(9):182-184+189.
- [19] 姚云泽,姜翠玲,万福涛. 基于多种水文学方法的滦河典型断面生态基流研究[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(5):941-949.
- [20] 何 兵,高 凡,覃 珊,等. 基于多种水文学方法的干旱区内陆河流健康流量重构[J]. 水土保持通报,2019,39(1):160-166.
- [21] MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3):885-900.
- [22] 王钰双,陈芸芝,卢文芳,等. 闽江流域不同土地利用情景下的径流响应研究[J]. 水土保持学报,2020,34(6):30-36.
- [23] 林若兰,卓文珊,高延康,等. 基于 SWAT 模型的北江流域生态径流调节服务评估[J]. 水资源保护,2020,36(6):131-136.
- [24] 曹 灿,孙 瑞,吴志祥,等. 基于 SWAT 模型的南渡江上游流域径流对气候变化的响应[J/OL]. 水土保持研究,2022,29(2):255-264.
- [25] 刘卫林,黄一鹏,万一帆,等. 盱江流域径流模拟及其对气候变化的响应[J]. 水电能源科学,2020,38(8):18-21+78.
- [26] 岳广涛,祝雪萍,杨军生,等. 汾河兰村 - 二坝流域径流模拟及气候变化对径流影响研究[J]. 中国农村水利水电,2021(3):46-52.