

基于模糊数学法的湖南洞庭湖区居民生活用水水资源价值评估

李康勇¹, 陈向^{1*}, 胡佳², 盛东¹, 张勇¹, 徐义军¹

¹湖南省水利水电科学研究院, 湖南 长沙

²湖南省娄底水文水资源勘测中心, 湖南 娄底

收稿日期: 2025年11月21日; 录用日期: 2025年12月23日; 发布日期: 2026年2月26日

摘要

水资源价格是其价值的重要表现形式之一, 可为各地水价制定提供重要参考依据。为估算湖南洞庭湖区居民生活用水水资源价值, 本研究以岳阳市为典型区域, 基于模糊数学综合评价方法, 从水量、水质、人口和经济四个因素出发, 结合层次分析法和熵权法确定各因素综合权重, 利用水费承受指数估算岳阳市2019年至2023年居民生活用水水资源价格。结果显示岳阳市水资源模糊综合指数2019至2022年处于中等偏低水平, 2023年达到中等偏高水平, 说明岳阳市水资源价值总体提升; 居民生活用水水资源价格先减小后增大, 在6.1元/m³至10.0元/m³间变化, 人均可支配收入增加和水环境改善是居民生活用水水资源价格提升的主要原因; 按理论水价计算的人均水费约占可支配收入1.40%至1.79%, 远高于岳阳市目前水资源费和用水水价标准, 说明其居民生活用水水资源价格存在较大的提升空间, 相关管理部门可以通过适当提高水价进一步促进水资源优化配置和高效利用。

关键词

洞庭湖区, 水资源价值, 水价, 模糊数学

Evaluation of the Value of Water Resources for Domestic Use in Dongting Lake Area of Hunan Province Based on Fuzzy Mathematics

Kangyong Li¹, Xiang Chen^{1*}, Jia Hu², Dong Sheng¹, Yong Zhang¹, Yijun Xu¹

¹Hunan Research Institute of Water Resources and Hydropower, Changsha Hunan

²Loudi Hydrological and Water Resources Survey Center of Hunan Province, Loudi Hunan

作者简介: 李康勇, 男, 工程师, 硕士, 主要从事水资源高效利用研究, Email: 1204056987@qq.com

*通讯作者 Email: 120547068@qq.com

文章引用: 李康勇, 陈向, 胡佳, 盛东, 张勇, 徐义军. 基于模糊数学法的湖南洞庭湖区居民生活用水水资源价值评估[J]. 水资源研究, 2026, 15(1): 44-51. DOI: 10.12677/jwrr.2026.151006

Received: November 21, 2025; accepted: December 23, 2025; published: February 26, 2026

Abstract

Water resource price is an important manifestation of its value and can provide an important reference basis for water price formulation in various regions. To estimate the value of residential domestic water resources in the Dongting Lake area of Hunan Province, this study takes Yueyang City as a typical region. Based on the fuzzy mathematics comprehensive evaluation method and considering four factors (water quantity, water quality, population, and economy), the comprehensive weights of each factor were determined by combining the analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight method. The water resource price for residential domestic use in Yueyang City from 2019 to 2023 was estimated using the water fee affordability index. The results indicate that the fuzzy comprehensive index for water resources in Yueyang City remained at a medium-low level from 2019 to 2022 and reached a medium-high level in 2023, suggesting an overall improvement in water resource value. The water resource price first decreased and then increased, fluctuating between 6.1 and 10.0 RMB/m³. The increase in per capita disposable income and improvement in water environment quality are the main reasons for the rise in water resource prices. The per capita water fee calculated based on the theoretical water price accounts for approximately 1.40% to 1.79% of disposable income, which is far higher than the current water resource fees and water pricing standards in Yueyang City, indicating substantial room for upward adjustment in residential water resource prices. Relevant administrative departments can appropriately increase water prices to further promote the optimal allocation and efficient utilization of water resources.

Keywords

Dongting Lake Area, Water Resources Value, Water Price, Fuzzy Mathematics

Copyright © 2026 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国社会经济快速发展,水资源供需矛盾愈发凸显,从水资源费征收到提出自然资源资产负债表编制、水资源费改税等措施出台,体现出国家对水资源价值属性的重视,水资源价值评估也成为学者研究的热点之一。

水资源是作为人类社会和经济活动不可缺少的资源,具有经济和社会价值双重属性,居民生活用水关乎民生大事,水价虽采取完全成本法制定,但水资源费占居民生活用水水价比例低,若用现行水价评估居民生活用水价值会导致结果偏低[1]。目前水资源资产价值评估方法主要有重置成本法、收益现值法、现行市价法、等效替代法、影子价格法、模糊数学法等。模糊数学法能有效处理模糊性和主观判断,在综合多指标、多层次的复杂系统具有较强适应性,但在权重确定、标准划分等方面仍存在一定主观性。在水资源价值评估方面,模糊综合评价法因综合考虑自然条件、人口、经济发展等多因素影响而被广泛应用,但目前仍缺乏通用标准化评估模型,不同地区应用模糊评价方法得到的结果差异明显[2]-[4]。如李朝霞[5]选取水质、人均水资源量、人口密度、人均可支配收入、人均GPD等5个因素,采用层次分析确定权重,估算2003年林芝地区水资源价格为2.65元/m³;韦林均等[6]、钦丽娟等[7]选取人均水量、水质、人口密度、人均GPD等4个因素,采用主观和客观组合权重,估算2006年兰州市和2005年郑州市水资源价格为1.7和2.11元/m³;李国成[8]等、龚杰等[9]、胡绵好等[10]从人均水量、水质、人口密度、人均GPD、生态环境等5个因素,采用主观和客观组合权重,估算得2020

年海南州、2018年绵阳市水资源价格分别为 5.36 元/m³ 和 4.97 元/m³，江西省 2013~2018 年水资源价格为 3.27 至 6.31 元/m³；赵晨晨等[11]从人均水量、水质、人口、GPD、生态环境、政治等 6 个因素出发估算信阳市 2018~2021 年水资源价格为 7.7 至 11.6 元/m³。

洞庭湖地区地处长江中游，是湖南省重要的经济腹地，是国家粮食安全保障核心区，环洞庭湖经济圈也是湖南省经济总量最强的经济圈，岳阳市是该区域最具代表性的城市之一，目前对该地区水资源价值评估的研究较少。近年来，随着社会经济的迅速发展和气候变化，岳阳市水资源供需矛盾不断加剧。合理水资源价值评估结果能充分反映不同地区水资源禀赋状况，促进水资源的合理配置和节约用水。因此，本研究拟基于模糊数学法对湖南洞庭湖区岳阳市开展居民生活用水水资源价值评估，以为当地水资源利用与管理提供参考。

2. 研究区概况

岳阳市位于湖南东北部，是洞庭湖地区主要城市之一，地处北纬 28°25'31.65"~29°51'6.23"，东经 112°18'33.13"~114°09'11.64"之间；属湿润的大陆性季风气候，年平均降水量为 1304.4~1582.5 毫米，春夏多、秋冬少。该地区水资源丰沛，多年平均降水年径流总量 95.2 亿 m³，过境水量 6381.8 亿 m³，地下水可采量 131.6 亿 m³，全市可利用水资源总量 6608.6 亿 m³。2019 至 2023 年岳阳市人均地区生产总值为 6.53 至 9.67 万元，平均人口 517 万。

3. 评价模型构建

本研究采用水资源模糊综合评价模型对岳阳市居民生活用水水资源价值进行评估。模糊综合评价法模型构建主要包括建立因素及评价集、确定权重、构建模糊矩阵、价值评估等。具体步骤如下：

1) 综合评价因素及评价标准

构建综合评价因素 $U = [U_1, U_2, U_3, \dots, U_k]$ ， k 为因素数量。确定各因素指标的评价标准 $V = [V_1, V_2, V_3, \dots, V_m]$ ， m 为评价等级数。

2) 因素权重 W

本次采用层次分析法和熵权法两种方法结合计算权重，层次分析法体现了人在决策思维中的分解、判断与综合的过程；熵权法是一种客观赋权的方法，可以避免主观因素的影响，两种方法结合一定程度上可以弥补各自的缺陷，最终各因素权重取两种方法计算结果的均值。层次分析法权重确定通过专家打分构建判断矩阵，采用和积法计算权重，并需通过一致性检验 $CR < 0.1$ 。

熵权法计算权重步骤如下：

(一) 原始数据标准化：

正向指标：

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (1)$$

负向指标：

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (2)$$

其中 x_{ij} 、 x'_{ij} 为第 j 因素第 i 个原始值和标准化处理后的值， $\max(x_{ij})$ 、 $\min(x_{ij})$ 为第 j 指标最大和最小原始值。

(二) 计算熵值 e_j ：

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_i^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (3)$$

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (4)$$

式中 e_j 为第 j 个因素的熵值, P_{ij} 为第 j 个因素第 i 项指标权重, n 为各因素的指标项数。

(三) 计算因素权重:

$$w_j = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j} \quad (5)$$

式中 w_j 为第 j 个因素权重。

3) 确定模糊关系矩阵

计算各因素对评价标准的隶属程度, 因素 i 第 j 个评语等级隶属度为 r_{ij} , 得到模糊关系矩阵 R 如下所示。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{k1} & r_{k2} & \cdots & r_{km} \end{bmatrix}$$

其中隶属度计算方法如下:

当 $j = 1$ 时:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & x \leq x_{i1} (x \geq x_{i1}) \\ \frac{x_{i2} - x}{x_{i1} - x_{i2}} & x_{i1} < x < x_{i2} (x_{i1} > x > x_{i2}) \\ 0 & x \geq x_{i2} (x \leq x_{i2}) \end{cases} \quad (6)$$

当 $j = 2, 3, 4$ 时:

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{x - x_{i,j-1}}{x_{ij} - x_{i,j-1}} & x_{i,j-1} \leq x \leq x_{ij} (x_{i,j-1} \geq x \geq x_{ij}) \\ \frac{x_{i,j+1} - x}{x_{i,j+1} - x_{i,j}} & x_{ij} < x < x_{i,j+1} (x_{i,j-1} > x > x_{ij}) \\ 0 & x \leq x_{i,j-1} (x \geq x_{i,j+1}) \end{cases} \quad (7)$$

当 $j = 5$ 时:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & x \geq x_{i5} (x \leq x_{i5}) \\ \frac{x - x_{i4}}{x_{i5} - x_{i4}} & x_{i4} < x < x_{i5} (x_{i4} > x > x_{i5}) \\ 0 & x \leq x_{i4} (x \geq x_{i4}) \end{cases} \quad (8)$$

4) 模糊综合评价向量

采用加权平均计算模糊综合评价向量, 公式如下:

$$A = W \circ R \quad (9)$$

式中: A 为水资源价值综合评价向量, W 为各因素权重向量, R 同上。

5) 水资源价值评估

$$V = A \cdot S \quad (10)$$

式中 V 为水资源评估价格, S 为价格向量, $S = [I, 3I/4, 2I/4, I/4, 0]$ 。 I 为水资源价格上限, 按下式计算:

$$I = \frac{E * N}{B} - G \tag{11}$$

式中: E 为居民人均年均可支配收入, 元/人; N 为水费承受指数, 取 0.03; B 为年人均用水量, $m^3/人 \cdot 年$, G 为供水成本及利润, 取 2 元/ m^3 。

4. 岳阳市居民生活用水水资源价值评估

4.1. 水资源价值综合评估

选取水质、人均水量、人口密度、人均 GDP 4 个因子进行综合评估, 评价集分为{高、较高、中、较低、低} 5 个级别, 各因子评价级别标准如表 1 所示, 其中水质采用《国家地表水环境质量标准》(GB3838-2002)水质等级划分, 评判等级由高到低依次对应 I 类、II 类、III 类、IV 类、V 类水质, 其它因素依据湖南省 14 个市州值统计值, 参考相关文献进行划分。

表 1. 指标划分标准

指标名称	高	较高	一般	较低	低
水质	I	II	III	IV	V、劣V
人均供水量/ $(m^3/人)$	300	500	600	700	800
人均 GDP/ $(万元/人)$	14	11.5	9	6.5	4
人口密度/ $(人/km^2)$	900	700	500	300	100

根据 2019 至 2023 年《岳阳市统计年鉴》《岳阳市水资源公报》《岳阳市国民经济和社会发展统计公报》《岳阳市生态环境质量公报》等资料, 整理数据如表 2 所示, 其中地表水质达标率是指达到 III 类及以上标准水质比例。

表 2. 各指标实际值

指标名称	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
地表水质达标率/%	84.3	84.3	82.4	80.4	74.5
人均供水量/ $(m^3/人)$	628.2	670.4	719.9	715.3	683.0
人均 GDP/ $(万元/人)$	6.5	7.4	8.7	9.4	9.7
人口密度/ $(人/km^2)$	343	340	339	338	336

采用层次分析法和熵权法计算各指标权重, 经检验层次分析法中 CI 为 0.007, 满足要求。计算结果如表 3 所示, 与层次分析比较, 熵权法计算人均 GDP、人口密度权重较大, 其他 2 个指标结果较小, 两者中水量综合权重均最大。综合权重取两者均值, 权重由大到小依次为人均供水量、水质、人口密度、人均 GDP。

表 3. 各评价指标权重

因素	熵权法权重	层次分析法权重	综合权重
水质	0.1731	0.3199	0.2465
人均供水量	0.3577	0.3914	0.3745
人均 GDP	0.2251	0.1443	0.1847
人口密度	0.2441	0.1443	0.1942

根据历年各指标实际数据和等级划分标准计算确定各年份的模糊关系矩阵 R ，如以 2023 年为例计算结果如下，其中水质模糊关系按各类水质占比计算，其它指标按上述公式计算，结果如下 R_{2023} 所示。

$$R_{2023} = \begin{bmatrix} 0 & 0.6471 & 0.1961 & 0.1372 & 0.0196 \\ 0 & 0 & 0.1703 & 0.8297 & 0 \\ 0 & 0.2247 & 0.7752 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1796 & 0.8204 & 0 \end{bmatrix}$$

将权重向量与模糊评价矩阵进行运算，得到模糊综合评价向量 $A_{2023} = [0, 0.2648, 0.5366, 0.1938, 0.0048]$ ；同理计算其它年份各模糊综合评价结果如表 4 所示。

表 4. 各年份综合评价结果

年份	高	较高	一般	较低	低
2023	0	0.2648	0.5366	0.1938	0.0048
2022	0	0.0900	0.3376	0.5099	0.0624
2021	0	0.0920	0.3134	0.5149	0.0796
2020	0	0.1575	0.3736	0.4641	0.0048
2019	0	0.1002	0.5781	0.3072	0.0145

计算水资源价值模糊综合指数 $L_{2023} = A \cdot [1, 2, 3, 4, 5]$ ， L 结果范围为 1 至 5 之间，其中 1、2、3、4、5 分别表示高、较高、中等、偏低、低 5 个水平。岳阳市 2019 年至 2023 年水资源价值模糊综合指数如图 1 所示，2019 年至 2023 年岳阳市水资源模糊综合评价指数呈先增大后下降趋势，2021 年达到最大 3.582，2019 年至 2022 年岳阳市水资源价值处中等偏下水平，2023 年模糊综合评价指数为 2.939，转为中等偏上水平，说明在加强水环境保护和用水管理等措施下，岳阳市水资源价值呈现上升趋势。

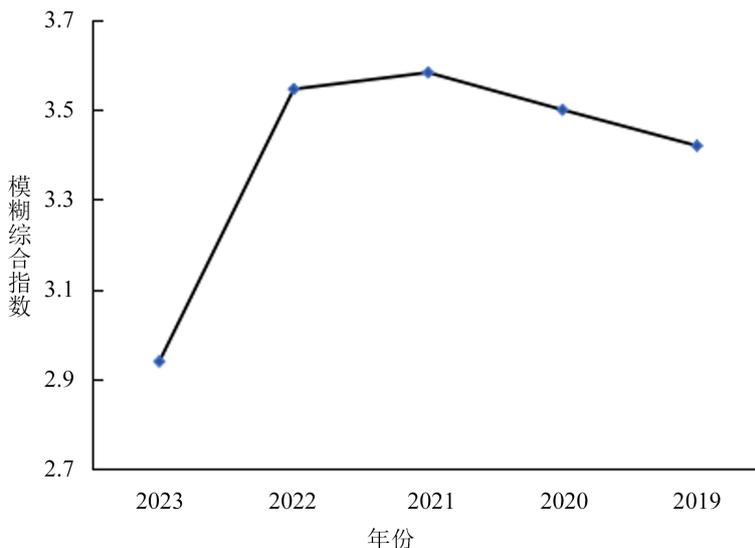


图 1. 岳阳市水资源模糊综合指数变化

4.2. 居民生活用水水资源价格估算

根据岳阳市居民人均可支配收入、居民人均生活用水量计算岳阳市 2019 年至 2023 年居民生活用水水资源

价格如表 5 所示, 随着人均可支配收入的增加, 价格上限明显上升, 居民生活用水水资源价格呈先减少后增加趋势, 2023 年达到最大值, 由 2019 年 6.1 元/m³ 增加到 2023 年 10.0 元/m³, 按供水成本和污水处理 2.8 元/m³ 算, 理论水价为 8.3 至 12.8 元/m³, 人均水费约占可支配收入 1.40% 至 1.79%, 而目前岳阳市居民生活用水水资源为 0.08 元/m³, 2019 年至 2023 年居民生活用水水价约为 3.38 元/m³ (月用水量 ≤ 15 m³), 说明岳阳市居民生活用水水资源价值存在被低估现象, 相关管理部门通过适当水价调整进一步促进水资源优化配置和集约节约利用。

表 5. 岳阳市 2019 年至 2023 年居民生活用水水资源价格评估结果

项目	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
人均年可支配收入/元	27,051	28,577	31,236	33,285	35,202
人均年用水量/m ³	51.3	55.2	53.7	50.3	49.5
价格上限/元·m ⁻³	13.8	13.5	15.5	17.8	19.3
水资源价格/元·m ⁻³	6.1	5.7	5.5	6.5	10.0
理论水价/元·m ⁻³	8.9	8.5	8.3	9.3	12.8
理论水费占收入比/%	1.69	1.64	1.42	1.40	1.79

注: 理论水价为水资源价格、供水成本与利润、污水处理费三者之和。

5. 讨论与结论

5.1 讨论

1) 权重计算

权重是影响水资源价值的主要因素之一, 不同方法计算权重可能存在较大差异。本研究考虑水质、水量、人口和经济 4 个因素, 取层次分析法和熵权法计算权重均值作为综合权重, 其结果显示水量权重最大, 其次分别为水质、人口和经济, 这与胡绵好[10]、张旭宗[12]、曹健[13]等研究结果一致。但不同地域水资源价值研究中权重并不都相同, 大多数研究结果显示水量因素权重占比最大, 与本研究权重计算结果相符[14] [15]。权重计算受主观因素、地区及评价指标选取差异等因素影响, 其他因素权重大小并无明显规律[6] [7] [9] [16]。本研究层次分析法计算权重结果显示各因素权重中水量最大, 其次为水质, 经济和人口相对较小, 这与客观评价结果基本保持一致, 说明该权重结果比较符合岳阳市实际情况。

2) 居民生活用水水资源价格估算

本研究对岳阳市 2019 年至 2023 年居民生活用水水资源价格评估结果显示, 该地区水资源价格先减少后增加, 变化范围为 6.1 元/m³ 至 10.0 元/m³。以往研究结果显示水资源价格时空差异明显, 整体上水资源价格随社会经济发展而升高, 不同区域间无明显变化规律。居民生活用水水资源价格主要受人均可支配收入、人均居民生活用水量、模糊综合评价向量影响, 人均可支配收入越高、人均用水量越小、模糊综合评价向量中高等级占比越大则水资源价格越高[15]-[18]。人均可支配收入增加和生活用水量下降是水资源价格提高的主要原因, 其次是近年水环境保护使得水质提升, 使得水资源价值提升。2019 年至 2023 年岳阳市人均可支配收入逐步提高, 2020 年人均居民生活用水量上升导致水资源价格上限和水资源价格下降, 2021 年价格上限提高, 但受供水量显著增加影响, 使模糊综合评价向量中一般和较高等级数值均明显下降, 最终导致居民生活用水水资源价格下降。

5.2. 结论

本研究基于模糊数学综合评价方法, 考虑水量、水质、人口和经济四个因素, 采用主观与客观方法结合综合权重, 对 2019 年至 2023 年岳阳市居民生活用水水价值进行评估, 得出居民生活用水水资源价格, 主要结论

如下:

1) 2019年至2023年岳阳市水资源模糊综合评价指数先增后减,2019年至2022年岳阳市水资源价值处于中等偏下水平,2023年为中等偏上水平,说明在加强水环境保护和用水管理等措施下,岳阳市水资源价值呈现上升趋势。

2) 岳阳市2019年至2023年居民生活用水水资源价格先减少后增加,变化范围为6.1元/m³至10.0元/m³。人均可支配收入增加和生活用水量下降是水资源价格提高的主要原因。

3) 按理论水价为8.3至12.8元/m³,人均水费约占可支配收入1.40%至1.79%,而目前岳阳市居民生活用水水资源费为0.08元/m³,2019年至2023年居民生活用水水价约为3.38元/m³(月用水量≤15m³),说明岳阳市水资源价值存在被低估现象,通过进一步加强定额用水管理和实行阶梯水价机制,适当提高水价基础水价,加大各阶梯水价差距,确保基本生活用水需求成本在合理范围内,同时提高超额用水成本,以促进水资源保护与集约节约利用。

基金项目

湖南水利科技项目(XSKJ2025056-23)。

参考文献

- [1] 刘德智,李瑞彩.基于模糊数学的水资源价值评估及应用——以滹沱河流域河北段为例[J].石家庄经济学院学报,2015(3):44-49.
- [2] 冯欣,姜文来,刘洋,等.水资源价值模糊数学模型研究进展[J].资源科学,2021,43(9):1834-1848.
- [3] 顾圣平,林汝颜,刘红亮.水资源模糊定价模型[J].水利发展研究,2002,2(2):9-12.
- [4] 简富绩,宋晓谕,虞文宝.水资源资产价格模糊数学综合评价指标体系构建——以黑河中游张掖市为例[J].冰川冻土,2016,38(2):567-572.
- [5] 李朝霞.水资源价值评估模型在尼洋河流域的应用[J].水利经济,2007,25(4):10-12.
- [6] 韦林均,包家强,伏小勇.模糊数学模型在水资源价值评价中的应用[J].兰州交通大学学报(自然科学版),2006,25(3):73-76.
- [7] 钦丽娟,曹剑峰,平建华,等.模糊数学在郑州市水资源价值评价中的应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2005,35(4):487-490.
- [8] 李国成,海新权.基于模糊综合评价的水资源价值评估[J].热带农业工程,2023,47(4):7-12.
- [9] 龚杰,赵起超,娄华超,等.模糊层次分析法在水资源价值评估中的应用——以绵阳市为例[J].长江科学院院报,2022,39(4):34-40.
- [10] 胡绵好,袁菊红.基于AHP-EWM组合权重的模糊数学模型对江西省水资源价值核算研究[J].环境保护与循环经济,2021(3):21-28.
- [11] 赵晨晨,李恒,陈鹏飞,等.基于改良组合确权法的信阳市水资源价值计算[J].海河水利,2025(3):62-67.
- [12] 张旭宗.大兴区农村水资源价值评价与水价计算方法[J].中国农村水利水电,2014(2):112-114.
- [13] 曹健,刘松焰,李彦.基于模糊数学的水资源价值研究——以克拉玛依市为例[J].经济理论与实践,2023(4):135-139.
- [14] 付巧峰.模糊综合评判在水资源价值评估中的应用[J].西北大学学报(自然科学版),2008,38(2):187-191.
- [15] 刘芳芳,连华,王建兵,等.基于模糊数学模型的张掖市水资源价值计算研究[J].中国农学通报,2016,32(2):87-91.
- [16] 魏锋,郭胜浩,周慧.柳州市水资源资产价值综合评估与运用研究[J].无形资产评估,2023(4):31-42.
- [17] 刘可心.基于模糊数学模型的乌鲁木齐市水资源价值评价与定价研究[J].陕西水利,2024(2):7-9.
- [18] 田成方,冯利华.基于模糊数学模型的浙江省金华市水资源价值分析[J].安徽农业科学,2009,45(7):2827-2829.