

基于熵权模拟评价模型的西安市水资源价值核算

曹兴达¹, 杨银科^{1*}, 岳斌², 盛强¹, 刘彦利¹, 王金星¹

1. 长安大学 水利与环境学院 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054
2. 甘肃省水文站, 兰州 730000

摘要: 区域水资源价值的准确核算是科学制定水价的基础。针对水资源价值核算体系的复杂性, 本文基于熵权模拟评价模型, 对西安市水资源价值核算进行研究。选取水资源数量、质量以及社会经济影响三个大类指标, 构建了西安市水资源价值模糊评价模型, 综合评价了西安市水资源价值, 估算了居民用水价格。结果表明: 西安市的水资源价格由 2015 年的 $10.46 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 下降到 2019 年的 $10.33 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$, 水资源价格总体变化不大。实际水费支出仅占居民人均可支配收入的 0.5%, 远远低于设定的可承受指数 (3%), 水价仍有部分提升空间。在不破坏水资源的公益性及保障性, 不超过居民承受力的前提下, 水价仍可部分提升, 从而促进市民节约水资源。本文基于对西安市水资源价值的分析, 为西安市今后合理制定水价以及可持续发展提供参考。

关键词: 熵权模拟; 模糊数学模型; 水资源价值; 西安市

The value accounting of water resources in Xi'an based on the simulation evaluation model of entropy right

CAO Xingda¹, YANG Yinke^{1*}, YUE Bin², SHENG Qiang¹, LIU Yanli¹, WANG Jinxing¹

1. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region, Ministry of Education, School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China
2. The Hydrological Station of Gansu Province, Lanzhou 730000, China

Abstract: Background, aim, and scope The basis for scientific formulation of water prices lies in the accurate calculation of the value of regional water resources. As a water-scarce city in western China, Xi'an is relatively lack of water resources, while it needs large water consumption. The aspect of resource liabilities was mainly focused on in previous research on the value of water resources in Xi'an, in which the economic value of water resources was mainly considered, so the little attention had been paid to the social and ecological values of water resources. The value of water resources was analyzed in this thesis. In this way, the scientific and rational

收稿日期: 2021-12-12; 录用日期: 2022-03-31; 网络出版: 2022-04-12

Received Date: 2021-12-12; Accepted Date: 2022-03-31; Online first: 2022-04-12

基金项目: 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金 (SKLLQG1933); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金 (300102292903); 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2017JM4018, 2021SF-497)

Foundation Item: Open Fund of State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology (SKLLQG1933); The Fundamental Research Funds for the Central Universities, CHD (300102292903); Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (2017JM4018, 2021SF-497)

通信作者: 杨银科, E-mail: yangyink@chd.edu.cn

Corresponding Author: YANG Yinke, E-mail: yangyink@chd.edu.cn

引用格式: 曹兴达, 杨银科, 岳斌, 等. 2022. 基于熵权模拟评价模型的西安市水资源价值核算 [J]. 地球环境学报, 13(5): 598–611.

Citation: Cao X D, Yang Y K, Yue B, et al. 2022. The value accounting of water resources in Xi'an based on the simulation evaluation model of entropy right [J]. *Journal of Earth Environment*, 13(5): 598–611.

utilization of water resources can be promoted, the awareness of saving and protecting water resources can be established, and the reference can be provided for the formulation of regional water prices. In this thesis, the comprehensive evaluation of the value of water resources in Xi'an was carried out through the analysis on the ecological, economic and social attributes of water resources in Xi'an. **Materials and methods** Due to the complexity of the water resources value evaluation system, the entropy weight simulation evaluation model was adopted to make the calculation of the water resources value in Xi'an. The quantity, quality and social and economic factors of water resources were chosen to construct a fuzzy evaluation model of water resources value in Xi'an. The value of water resources in Xi'an was comprehensively evaluated, and the price of residential water was estimated. **Results** In accordance with the results, it indicates that the price of water resources in Xi'an had dropped from 10.46 yuan·m⁻³ in 2015 to 10.33 yuan·m⁻³ in 2019, and the overall price change of water resources was not large. **Discussion** The deviation of the evaluation results may be caused by the inconsistency in evaluation data sources. Furthermore, it is difficult for the selected indicators to ensure the comprehensiveness of the evaluation system due to the complexity of the value of water resources, so the further perfection in the future will be needed. The big gap exists between the final evaluation results and the previous research results in other regions. Through the analysis, the reasons may be as follows: (1) the existence of differences in regions. Xi'an is located in the northwest inland of China, which has less water resources in contrast with the eastern and southern cities, so the higher price of water resources is caused to some extent. (2) The failure to consider all water usage ladders. The water usage ladder is not divided in the above research or the calculation is not made in line with the price data of the first ladder water usage with the largest number of water users, so the deviation of the evaluation results with the actual situation is caused. (3) The different selection of the maximum water charge bearing index. In contrast with the above two research areas, Xi'an has differences in terms of economy and actual situation of water resources, and there are differences in the selection of the maximum water charge bearing index, so the differences in the price calculation results of water resources are caused. (4) The failure to achieve the synchronicity in time for the done research. Instead of being unchanging, the price of water resources has close connection with social development. The research done in this thesis lags behind previous studies in terms of time. The differences exist for the actual situation of social development. A certain difference exists in the price of water resources. **Conclusions** The price of water can still be partially improved under the premise of not damaging the public welfare and security of water resources and not exceeding the affordability of residents, so the saving of water resources among citizens can be promoted. **Recommendations and perspectives** By analyzing the value of water resources in Xi'an, the reference can be provided for Xi'an to formulate a reasonable water price and promote the sustainable development of water resources.

Key words: entropy weight method; fuzzy evaluation model; the value of water resources; Xi'an

随着经济发展和人口增长, 区域水资源配置与经济发展的不协调现象越来越明显。近些年随着产业结构调整 and 经济发展速度的下降, 全国水资源需求量发生了阶段性变化, 但是总体水资源紧张的基本态势并未改变 (易信, 2020)。水资源具有自然、社会和经济三种属性 (甘泓等, 2012), 水资源价值的准确核算是评价水资源可持续利用性的关键。水资源价值还深刻影响着水资源代际转移, 在社会的发展过程中具有重要地位。水资源价值核算是经济理论和数学模型的综合应

用 (Cooper et al, 2014), 通过模糊数学模型可以更全面地反映地区水资源价值状况。水价是一个地区水资源价值的重要反映, 通过改变水价可以影响人们对水资源的利用效率与利用方式, 在一定程度上缓解地区水资源的供需矛盾。

学者们在水资源价值的研究方面已取得了一定的成果, 包括采用模糊数学结合层次分析法确定权重进行水资源价值评价 (简富绩等, 2016) 以及运用神经网络理论构建水资源模糊优选网络模型来分析水资源价值 (田一鹏, 2018) 等。但是, 对

比现有水资源价值研究方法发现, 主观赋权法是利用属性本身含义来确定权重, 客观性较差; 而客观赋权法是在不考虑属性实际含义的情况下来确定权重, 不能体现决策者对各属性的重视程度, 会产生确定的权重有时与实际不符的情况。而作为主客观思想兼而有之的组合权重确定方法, 可以很好地弥补单一权重确定方法所存在的缺陷与不足, 提高评价的合理性与科学性。

目前, 学者们对西安市水资源价值的研究主要集中于资产负债 (孙靖陶, 2008) 与水土资源配置方面 (贾雨蔚, 2021), 而对于社会、生态等因素对西安市水资源价值的影响研究较少, 对水资源价值的评价不够全面。2021 年末西安市常住人口约 1300 万 (<http://tjj.xa.gov.cn/tjnj/2021/zk/indexch.htm>), 区域多年平均降水量仅有 618 mm, 在庞大的人口基数下, 西安市水资源相对短缺, 人均水资源占有量与全国其他城市相比处于较低水平 (赵立, 2020)。因此, 探讨区域水资源价值核算的新方法、新模式, 对于科学确定西安市水资源价格, 提高用水效率, 优化水资源配置, 建设节水型社会均具有重要的现实意义。

1 研究区概况

西安市位于黄河流域中部关中盆地, 东经 107°40'—109°49' 和北纬 33°42'—34°45', 北临渭河和黄土高原, 南邻秦岭。东以零河和灞源山地为界, 西以太白山地及青化黄土台塬为界, 与眉县、

太白县接壤, 南至北秦岭主脊。西安市辖境东西长约 204 km, 南北宽约 116 km, 总面积 10108 km² (<http://www.xa.gov.cn/sq/csgk/zrdl/1.html>)。

西安市降雨时空分布不均, 秦岭山地降雨量多, 城区降雨量少, 水资源分配不均易导致水资源供需矛盾; 再加之近几年人口持续增长, 水资源短缺矛盾将日益突出。国际公认的绝对缺水线为 人均水资源量 500 m³, 这一标准也沿用至今 (薛亮和邱国玉, 2013)。根据水资源公报统计数据以及西安市统计年鉴可知: 2017 年西安市水资源总量为 24.45 亿 m³, 常住人口约为 961.67 万人, 人均水资源占有量为 254.25 m³, 相当于全国平均水平 (2093 m³) 的 12.1%。2018 年水资源总量为 21.90 亿 m³, 常住人口为 1000.37 万人, 人均水资源占有量为 218.92 m³。2019 年水资源总量为 27.62 亿 m³, 常住人口为 1020.35 万人, 人均水资源占有量为 270.69 m³。2017—2019 年西安市人均水资源量均低于国际公认的绝对缺水线, 人均水资源占有量虽在 2019 年有所上升, 但该年全国人均水资源量为 2077.7 m³, 在庞大的人口基数下, 西安市人均水资源占有量远低于全国平均水平 (Meng and Wu, 2021)。

西安市境内有渭河、泾河、黑河等 50 多条河流, 其中流域面积在 100 km² 以上的有 30 条, 除渭河、泾河、石川河为过境河流外, 其他河流均为黄河水系, 是全市地表水的主要来源 (王昆, 2018)。西安市主要河流径流量统计见表 1, 主要水系分布特征及高程信息如图 1 所示。

表 1 西安市主要河流径流量统计表
Tab. 1 Runoff statistics of main rivers in Xi'an

河流 River	发源地 The cradle	流域面积 Watershed area/km ²	河长 The length of the river/km	径流量 / 亿 m ³ The volume of runoff / 10 ⁸ m ³
黑河 Heihe River	周至县 Zhouzhi County	2258.0	125.8	3.6260
涝河 Laohe River	鄠邑区 Huyi District	665.0	82.0	1.1310
沣河 Fenghe River	长安区 Chang'an District	1386.0	78.0	2.3830
灞河 Bahe River	蓝田县 Lantian County	2581.0	104.1	2.0040
泾河 Chanhe River	蓝田县 Lantian County	752.8	64.6	0.6601
潏河 Yuhe River	长安区 Chang'an District	687.0	64.2	0.8066

表中数据来源于 2020 年西安市水资源公报 (<http://swj.xa.gov.cn/zyyw/zyhj/618b8605f8fd1c0bdc650cc9.html>)。

The data in the table come from *Xi'an Water Resources Bulletin : 2020* (<http://swj.xa.gov.cn/zyyw/zyhj/618b8605f8fd1c0bdc650cc9.html>).

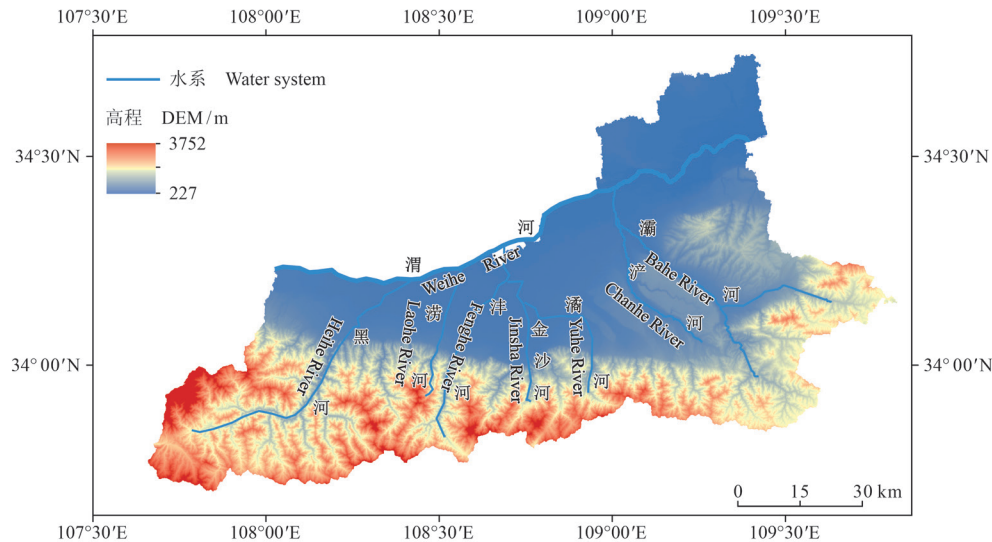


图1 西安市主要水系及高程图
Fig. 1 Xi'an main water system and elevation map

西安市存在水资源开发利用程度不均衡, 水源地周边存在污染风险等问题。艾亚迪等(2020)对西安市各区的水资源开发利用程度进行了研究, 结果表明全市水资源开发利用程度总体处于发展阶段, 但各区水资源开发利用程度存在差异。中心城区与临潼区已处于饱和阶段, 其他地区大都处于初始阶段与发展阶段, 水资源还具有一定的开发利用潜力。另根据西安市人民政府发布的2019年8月西安市饮用水水源地环境问题清理整治进展情况统计表中的数据(<http://www.xa.gov.cn/ztlz/ztlz/yyssydhjbhzhxhd/5d65f02efd85084b85cb54f2.html>): 西安市水源地周边存在一定的水污染风险, 主要存在于蓝田灞河水源地。造成污染的因子主要有生活面源污染、交通穿越、旅游餐饮、农业面源污染、其他问题等五大类。其中: 生活面源污染占14%, 而绝大部分的饮用水水源地污染是由餐饮行业、垃圾堆埋等引起的旅游餐饮污染, 此类污染占52%。交通穿越引起的污染占13%, 农业种植污染占11%, 其他因素引起的饮用水水源地水污染占10%(王启帆, 2019)。

2 水资源价值模糊评价模型构建及评价体系

2.1 水资源价值模糊综合评价模型

水资源价值评价具有天然与现实的特殊性: 首先水资源天然存在, 重置成本不易估计; 其次水资源本身无盈利性质, 收益难以预估也无法折现; 并且资源交易没有成熟活跃的公开市场, 也

不存在可比的资产及交易活动。因此, 传统的资源与资产评估三大方法——成本法、收益法、市场法均不适用于水资源的价值评估, 想要合理评估城市居民用水的水资源价值必须另辟蹊径。前人已采用多种方法评价水资源价值, 模糊综合评价法就是其中之一。模糊综合评价模型能够多层次、多因素地评价水资源价值, 全面客观地反映水资源开发利用状况。模糊综合评价的基本原理为: 针对被评价对象自身属性上的模糊性和不确定性, 以数值方式对评价对象的属性给予定量描述(杨旭等, 2008)。水资源价值主要受水资源的数量、质量和社会经济因素影响。根据贾亦真等(2018)的研究经验与成果, 本文构建了水资源价值评价模型, 其表示如下:

$$WLJ=f(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \quad (1)$$

式中: WLJ为水资源价值, 是关于各个影响因素的函数。 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 是水资源价值的各个影响因素。将各个水资源价值要素整合到一起构成集合 $A=\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ 。评价向量 $B=\{\text{高、稍高、一般、稍低、低}\}$, 则对水资源价值的评价可用下式(刘芳芳等, 2016):

$$U=C \cdot R \quad (2)$$

式中: U 是水资源模糊评价矩阵, C 为综合评价权重值, 各个要素对水资源价值的影响取加权平均值, 通过加权平均值进行评价。

各个要素评价矩阵 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 组合构成综合

矩阵 R (乐姝滢, 2020), 可表示为:

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & \cdots & R_{15} \\ \vdots & & \vdots \\ R_{n1} & \cdots & R_{n5} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: R_{ab} ($a=1, 2, 3, \dots, n; b=1, 2, 3, 4, 5$) 是第 a 个评价要素的第 b 级评价值。使用升(降)半梯形分布的计算方法来确定各个要素的评价隶属函数(贾亦真等, 2018):

$$\mu_{i1} = \begin{cases} 1 & \lambda \leq \lambda_{i1} \text{ 或 } \lambda \geq \lambda_{i2} \\ \frac{\lambda - \lambda_{i2}}{\lambda_{i1} - \lambda_{i2}} & \lambda_{i1} < \lambda < \lambda_{i2} \text{ 或 } \lambda_{i1} > \lambda > \lambda_{i2} \\ 0 & \lambda \geq \lambda_{i2} \text{ 或 } \lambda \leq \lambda_{i1} \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{ij} = \begin{cases} \frac{\lambda - \lambda_{i,j-1}}{\lambda_{ij} - \lambda_{i,j-1}} & \lambda_{i,j-1} \leq \lambda \leq \lambda_{ij} \text{ 或 } \lambda_{i,j-1} \geq \lambda \geq \lambda_{ij} \\ \frac{\lambda - \lambda_{i,j+1}}{\lambda_{i,j+1} - \lambda_{ij}} & \lambda_{ij} < \lambda < \lambda_{i,j+1} \text{ 或 } \lambda_{ij} \geq \lambda \geq \lambda_{i,j+1} \\ 0 & \lambda \leq \lambda_{i,j-1}, \lambda \geq \lambda_{i,j+1} \text{ 或 } \lambda \geq \lambda_{i,j-1}, \lambda \leq \lambda_{i,j+1} \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_{in} = \begin{cases} 1 & \lambda \geq \lambda_{in} \text{ 或 } \lambda \leq \lambda_{i,n-1} \\ \frac{\lambda - \lambda_{i,n-1}}{\lambda_{in} - \lambda_{i,n-1}} & \lambda_{i,n-1} < \lambda < \lambda_{in} \text{ 或 } \lambda_{i,n-1} > \lambda > \lambda_{in} \\ 0 & \lambda \leq \lambda_{i,n-1} \text{ 或 } \lambda \geq \lambda_{in} \end{cases} \quad (6)$$

式中: μ_i 为评价因素 i 的隶属度, λ 为评价因素的数值; i 代表因素类别, 评价标准取 $j=1, 2, 3, 4, 5$; λ_{ij} 为评价因素等级值, $\lambda_{i,j-1}$ 和 $\lambda_{i,j+1}$ 分别为评价因素左右两侧的等级值; 由式(3)可知, 所计算矩阵为 n 行 5 列矩阵, R_{i1} 采用公式(4)进行计算, R_{i5} 采用公式(6)计算, 其他列元素用公式(5)进行计算。

2.2 熵权法确定指标权重

指标权重的确定有多种方法, 熵权法(entropy weight method, EWM)是其中之一(方奕舟等, 2021)。熵权法相比其他方法的优点是利用客观数据的变化情况来计算权重, 其评价结果更为客观(Zhang et al, 2021)。熵权法所使用的数据是决策矩阵, 而所确定的属性权重反映了属性值的离散程度, 符合数学意义, 而且计算过程简便, 避免了人为因素对于权重的干扰(Yang, 2008)。刘红雨等(2022)讨论总结了熵权法在水资源评价中的研究应用, 认为熵权法虽然客观, 但其对数据依赖性较大, 对数据收集和统计过程较为复杂。研究表明: 相比于综合指数法、模糊

综合评价法、可变模糊评价法、层次分析法等(刘友存等, 2021), 熵权法在水资源与水环境评价方面具有明显的优势(高红凯和赵航, 2020), 克服了传统评价方法中由人为主观因素赋权形成的偏差, 更加符合实际, 有利于水资源的合理规划 and 利用(万哲慧等, 2018)。采用熵权法确定权重矩阵 $C=[W_1, W_2, \dots, W_n]$, 按照以下步骤进行计算。

(1) 指标标准化

处理指标 λ_{ij} , 使其标准化, 处理方式如下(付家田, 2020):

对于正向指标:

$$\lambda'_{ij} = (\lambda_{ij} - \min \lambda_{ij}) \div (\max \lambda_{ij} - \min \lambda_{ij})$$

对于负向指标:

$$\lambda'_{ij} = (\max \lambda_{ij} - \lambda_{ij}) \div (\max \lambda_{ij} - \min \lambda_{ij}) \quad (7)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, 5$; λ_{ij} 为指标原值; λ'_{ij} 为 λ_{ij} 经过处理后的数值; $\min \lambda_{ij}$ 为指标的最小值; $\max \lambda_{ij}$ 为指标的最大值。

(2) 计算指标熵值 H_j (贾亦真等, 2018):

$$H_j = \ln n \times \sum_{i=1}^n K_{ij} \times \ln K_{ij}, K_{ij} = \lambda_{ij} \div \sum_{i=1}^n \lambda_{ij} \quad (8)$$

式中: H_j 为指标的熵值, $0 \leq H_j \leq 1$ 。

对于 $K_{ij}=0$ 这种情况, 需对 K_{ij} 进行修正, 处理方法如下:

$$K_{ij} = 1 + \lambda_{ij} \div \sum_{i=1}^n (1 + \lambda_{ij}) \quad (9)$$

(3) 计算各评价指标权值 W_j (汪妮等, 2012):

$$W_j = (1 - H_j) \div \sum_{j=1}^n (1 - H_j) \quad (10)$$

式中: W_j 为指标权值, $0 < W_j < 1$ 。且所有指标权重值总和为 1, 即 $\sum_{j=1}^n W_j = 1$ 。

2.3 水资源价格估算模型

由于水资源模糊评价矩阵 U (上式(2))是一个没有量纲的向量, 所以无法直接计算出区域水资源价值, 需要通过转换来求取水资源价值, 转换公式如下(贾亦真等, 2018):

$$WLJ = US^T \quad (11)$$

式中: S 为水资源价格向量; WLJ 为水资源价格,

S 的表达式如下(李宝萍,2008):

$$S=(L, L_1, L_2, L_3, 0) \quad (12)$$

式中: L 为水资源价值的最高上限, L_1 、 L_2 、 L_3 为对 L 进行等差划分后的值。

已有学者研究指出:亚太经济和社会委员会建议居民最大水费承受指数为可支配收入的3%,在已有研究中共有52次选取该值,占比为63.4%(陈超和郭高轩,2012;冯欣等,2021)。据此,本文居民水费承受指数选为3%。以此数据计算得出的水资源价值普遍高于现行水价,但是这并不意味着该值不合理,而是反映出现行水价过低的现状。在实际社会中,水价的制定除了要考虑水资源自身的资源价值和稀缺性外,还要考虑其公益性和保障性,我国长期采用福利水价,用水定价均以弥补供水成本为目的,因此当前全国范围内水价往往低于其实际价值,使得现行水价与算得的理论水价差距较大,但是该值在应用时与社会实际并不相悖。当水费支出占可支配收入比例达3%时,价格上限计算公式改自于兰(2007):

$$L=B \times E \div C - D - F - G \quad (13)$$

式中: L 为水资源价值的最高上限, B 为居民水费承受指数, E 为居民人均可支配收入, C 为居民人均生活用水量, D 为供水企业合理的成本和利润, F 为污水处理费, G 为水资源费。

对所求得的 L 值进行等差划分,划分值之间的间隔相同,划分后获得水资源价格向量,设其为 $S=[L, 0.75L, 0.50L, 0.25L, 0]$ 。

2.4 水资源价值评价指标

2.4.1 评价指标选取原则

水资源价值评价指标的选取是一个复杂的系统工程,参照前人的研究(左东启等,1996;张丽萍等,2004),本文结合现实情况设立以下评价指标选取原则:

(1)科学性原则。所选取指标必须有据可依、科学合理,对水资源价值存在直接或间接的影响。

(2)全面性原则。应当从所有可能影响水资源价值的因素中选取合理指标,尽可能全面地覆盖水质、人口、经济等方面的内容。

(3)可获得性原则。指标选取过程中优先选择易于获取的,比如有公开网站的数据、公开文献记录或采访可得出的指标,增强指标的可靠性

并降低取得成本。

(4)标准性原则。指标选取过程中优先选择官方认可的、各城市通用的、具有可比性的单位指标,使得水资源价值评估模型标准化且更易于推广。

2.4.2 评价指标选取

水资源价值评价指标的选取不仅需要突出反映该地区实际情况(宋松柏等,2003;来海亮等,2006),而且选用的指标要能够进行量化分析计算。在综合考虑西安市水资源开发利用现状,遵循指标选取原则的前提下,以政府管理部门公布的统计年鉴和水资源公报及其他相关资料为依据,本文选择了水资源数量、水资源质量以及社会经济三大类指标,对西安市水资源价值模糊评价体系进行了构建。选取水资源总量、人均水资源占有量、降水量以及产水模数反映水资源数量;选取饮用水水质达标率、污水处理率来反映水资源质量;选取人均GDP、单位GDP需水量、万元工业增加值用水量、农业耗水率与农田灌溉水有效利用系数来反映社会经济。具体如表2所示。

本文收集整理了西安市2015—2019年各个评价指标的官方数据,数据来源包括西安市水资源公报、西安市统计年鉴、西安市环境状况公报和陕西省水资源公报。各个评价指标数据对应来源信息见表3。

2.5 水资源价值评价标准

根据模糊评价的原理,可将水资源价值评价标准分为5个等级,分别为低、稍低、一般、稍高、高(吴岳玲等,2021)。最高评价标准按照西安市实际情况确定,使用等差间隔对各个等级进行取值划分。各评价指标标准见表4。

3 分析及结果

对水资源价值的分析是一个系统复杂的工程,前人已采用多种方法对水资源价值进行分析,包括影子价格法、供需定价模型、边际效用理论法以及能值方法等。但这些方法相对于模糊评价法都存在一定的不足。影子价格法模型会造成价格偏低,无法反映水资源本身的价值(袁汝华等,2002);供需定价模型过分强调水资源量决定水资源价值且未考虑到用水功能的划分,对水资源价值的评价不够全面(张苑南,2010);边际效用理论认为没有开发利用的水资源和人类没有涉足的水资源的边际效用为零,理论本身不完善

(王欢, 2012); 能值方法在对数据获取及分析方面较为复杂, 实用性不强 (钟绍卓, 2019)。相对于上述方法, 模糊评价方法所需数据都可在

政府管理机构发布的统计信息中获得, 可靠性更高, 理论体系较为完善 (邹洪媛, 2019), 对水资源价值的评价更为科学准确。

表 2 2015—2019 年西安市水资源价值各评价指标值
Tab. 2 Evaluation index values of water resources value in Xi'an from 2015 to 2019

分类 Classification	指标 / 单位 Index/unit	实际值 The actual value				
		2015	2016	2017	2018	2019
水资源量 Water resources quantity	水资源总量 / 亿 m^3 Total water resources / $10^8 m^3$	23.08	21.56	24.45	21.90	27.62
	降水量 Precipitation/mm	691.30	571.78	764.43	583.03	705.17
	产水模数 / (万 $m^3 \cdot km^{-2}$) Water production modulus / ($10^4 m^3 \cdot km^{-2}$)	22.52	21.33	24.20	21.70	28.33
	人均水资源占有量 Per capita water capacity / m^3	265.12	244.11	254.25	218.92	270.69
	饮用水水质达标率 Drinking water quality compliance rate / %	100.0	99.7	98.1	99.7	100.0
水资源质量 Water quality	城市污水处理率 Treatment rate of domestic sewage / %	94.59	95.84	96.07	96.62	96.78
	人均 GDP / 万元 Per capita GDP / 10^4 yuan	6.85	7.29	7.78	8.66	9.23
社会经济 The social and economic	单位 GDP 需水量 / ($m^3 \cdot 万元^{-1}$) Water requirement per unit GDP / ($m^3 \cdot (10^4 \text{ yuan})^{-1}$)	31.42	29.50	27.76	23.51	21.84
	工业增加值用水量 / ($m^3 \cdot 万元^{-1}$) Water consumption of industrial added value / ($m^3 \cdot (10^4 \text{ yuan})^{-1}$)	23.70	21.86	26.46	23.77	22.39
	农业耗水率 Agricultural water consumption rate / %	79.29	80.21	80.04	81.78	82.06
	农田灌溉水有效利用系数 Coefficient of effective utilization of farmland irrigation water	0.705	0.706	0.707	0.708	0.709

表 3 西安市水资源价值各评价指标数据来源
Tab. 3 Data sources of each evaluation index of water resources value in Xi'an

指标 Index	数据来源 Data source
水资源总量 Total water resources	西安市水资源公报 (2015—2019)
降水量 Precipitation	Xi'an Water Resources Bulletin (2015—2019) (http://swj.xa.gov.cn/zyyw/zyhj/1.html)
产水模数 Water production modulus	西安市统计年鉴 (2015—2019)
人均水资源占有量 Per capita water capacity	Xi'an Statistical Yearbook (2015—2019) (http://tjj.xa.gov.cn/tjsj/tjsj/ndsj/1.html)
饮用水水质达标率 Drinking water quality compliance rate	西安市生态环境状况公报 (2015—2019)
城市污水处理率 Treatment rate of domestic sewage	Xi'an Provincial Bulletin of Ecological Environment (2015—2019) (http://xaepb.xa.gov.cn/xxgk/hjzkgb/hjzkgb/1.html)
人均 GDP Per capita GDP	西安市统计年鉴 (2015—2019)
单位 GDP 需水量 Water requirement per unit GDP	Xi'an Statistical Yearbook (2015—2019) (http://tjj.xa.gov.cn/tjsj/tjsj/ndsj/1.html)
工业增加值用水量 Water consumption of Industrial added value	西安市水资源公报 (2015—2019)
农业耗水率 Agricultural water consumption rate	Xi'an Water Resources Bulletin (2015—2019) (http://swj.xa.gov.cn/zyyw/zyhj/1.html)
农田灌溉水有效利用系数 Coefficient of effective utilization of farmland irrigation water	陕西省水资源公报 (2015—2019)
	Shaanxi Water Resources Bulletin (2015—2019) (http://slt.shaanxi.gov.cn/zfxgk/fdzdkgknr/zdgz/)
	西安市水资源公报 (2015—2019)
	Xi'an Water Resources Bulletin (2015—2019) (http://swj.xa.gov.cn/zyyw/zyhj/1.html)

表4 西安市水资源价值评价标准及指标权重
Tab. 4 Evaluation criteria and index weights of water resources value in Xi'an

评价指标 The evaluation index	评价标准 Evaluation standard				
	高 High	稍高 A little higher	一般 General	稍低 Slightly lower	低 Low
水资源总量 / 亿 m ³ Total water resources / 10 ⁸ m ³	10	20	30	40	50
降水量 Precipitation/mm	500	800	1100	1400	1700
产水模数 / (万 m ³ ·km ⁻²) Water production modulus / (10 ⁴ m ³ ·km ⁻²)	40	60	80	100	120
人均水资源占有量 Per capita water capacity/m ³	500	1000	1500	2000	2500
饮用水水质达标率 Drinking water quality compliance rate/%	100	80	60	40	20
城市污水处理率 Treatment rate of domestic sewage/%	100	80	60	40	20
人均 GDP / 万元 Per capita GDP / 10 ⁴ yuan	10	8	6	4	2
单位 GDP 需水量 / (m ³ ·万元 ⁻¹) Water requirement per unit GDP / (m ³ ·(10 ⁴ yuan) ⁻¹)	80	65	50	35	20
工业增加值用水量 / (m ³ ·万元 ⁻¹) Water consumption of industrial added value / (m ³ ·(10 ⁴ yuan) ⁻¹)	80	65	50	35	20
农业耗水率 Agricultural water consumption rate/%	80	65	50	35	20
农田灌溉水有效利用系数 Coefficient of effective utilization of farmland irrigation water	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5

3.1 水资源价值模糊评价

模糊综合评价法是依靠隶属度矩阵与单因素评价向量相乘, 获得水资源价值评价的综合矩阵, 再对综合矩阵与单因素权重进行矩阵运算, 得到水资源价值综合评价值 (杨旭等, 2008; Batina and Galinato, 2017)。

目前运用模糊数学法对水资源价值的研究虽取得一定成果, 但也有一定的改进优化空间。对比其他学者的研究发现: 有的在运用模糊数学法时选取指标过少 (李扬等, 2012), 对水资源价值的分析不够科学; 有的选取指标数量虽然达到一定要求, 但所选指标过于集中于一种影响因素, 对水资源价值的分析不够全面 (张龙云等, 2007; 刘增进等, 2008); 部分研究对指标权重确定采取经验法或咨询他人的方法, 权重计算过于主观 (龚杰等, 2022)。本文充分借鉴前人的研究经验, 整合优势研究方法, 研究面覆盖较广, 采用熵值法, 权重计算更为客观。

通过公式 (7)–(10) 计算了指标权重。首先对

指标进行标准化处理, 然后计算各指标熵值, 进而确定各指标权重。西安市水资源价值综合评价权重计算矩阵为 C :

$$C = [0.0689, 0.0941, 0.0662, 0.1258, 0.0621, 0.0687, 0.1044, 0.0975, 0.1216, 0.1004, 0.0903]$$

以 2019 年为例, 水资源价值模糊评价矩阵如下:

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \\ R_6 \\ R_7 \\ R_8 \\ R_9 \\ R_{10} \\ R_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.238 & 0.762 & 0 & 0 \\ 0.3161 & 0.6839 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.16 & 0.84 \\ 0 & 0 & 0 & 0.385 & 0.615 \\ 0.877 & 0.123 & 0 & 0 & 0 \\ 0.841 & 0.159 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.91 & 0.09 & 0 \end{bmatrix}$$

西安市 2019 年水资源价值模糊综合评价结果如下:

$$U = C \cdot R = [0.409518, 0.112080, 0.134675, 0.059313, 0.284414]$$

按照上述方法, 计算其他年份水资源价值模糊综合评价结果如下:

$$2015 \text{ 年: } U = [0.340481, 0.212398, 0.167036, 0.103233, 0.176852];$$

$$2016 \text{ 年: } U = [0.405857, 0.157495, 0.132692, 0.088115, 0.215841];$$

$$2017 \text{ 年: } U = [0.319450, 0.223989, 0.126124, 0.118636, 0.211801];$$

$$2018 \text{ 年: } U = [0.425780, 0.135229, 0.096167, 0.089783, 0.253041].$$

3.2 水资源价格估算

近年来, 国内开展了许多水价制度改革, 包括 2006 年实行的水资源费征收制度, 2016 年进行了水资源税改革, 2018 年的水资源有偿使用等一系列制度改革。政府希望通过征收水资源费来促进水价更加合理, 使水资源价格更好地体现水资

源价值。目前, 水资源费仍普遍偏低, 征收的水资源费主要以弥补供水成本为目的, 难以反映水资源的真实价值。

全国大部分城市都已实行了阶梯水价 (李云雁和江小平, 2021), 阶梯水价等政策的变化会对水资源的价值产生一定的影响。已有研究表明: 大部分城市的资源水价一般在 $3 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下 (张凯, 2006; 葛佳宁, 2019), 东部沿海城市资源水价甚至在 $2 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下 (张宁和章胜, 2010)。但前人研究或是没有实行阶梯水价, 或是只按用水户数量最集中的第一阶梯用水的价格数据计算, 评价结果会与实际存在一定偏差。本文在参照前人研究成果的基础上, 划分用水阶梯, 采用加权评价法计算全阶梯平均水价, 使估算结果更加科学准确。2019 年, 西安市人均生活用水量为 42.62 m^3 , 供水企业合理成本利润按照供水价格的 68% 计算 (刘兴远等, 2014), 水资源费和污水处理费分别为 $0.40 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.65 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 。西安市实施城区居民阶梯水价 (刘晓君和闫俐臻, 2016), 居民用水价格阶梯制收费详见表 5。

表 5 西安市居民用水阶梯收费表
Tab. 5 Step charge table of residential water in Xi'an

分档 Step	户年用水量 Annual household water consumption / m^3	自来水价格 / ($\text{元} \cdot \text{m}^{-3}$) Tap water price /(yuan · m^{-3})	排水价格 / ($\text{元} \cdot \text{m}^{-3}$) Drainage price /(yuan · m^{-3})	综合水价 / ($\text{元} \cdot \text{m}^{-3}$) Comprehensive water price /(yuan · m^{-3})
第一阶梯 First step	0—220 (含 220) 0—220 (including 220)	1.92	1.70	3.45
第二阶梯 Second step	220—300 (含 300) 220—300 (including 300)	3.30	1.70	4.83
第三阶梯 Third step	300 以上 More than 300	4.30	1.70	5.83

由于供水价格按阶梯制收费, 第一阶梯占总供水量 80%, 第二阶梯占供水 15%, 第三阶梯占供水 5%, 采用加权平均计算平均水价为 $3.776 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 。本文选取居民最大水费承受指数为可支配收入的 3%, 以 2019 年为例, 计算西安市水资源价格的上限 L :

$$L = 34065 \times 3\% \div 48.79 - 1.65 - 0.95 - 0.4$$

经计算, $L = 17.95$ 。

按照价格上限的处理方式划分, 则水资源价格向量 $S = [17.95, 13.46, 8.97, 4.49, 0]$ 。

西安市 2019 年水资源价格为:

$$WLJ = US^T = [0.409518, 0.112080, 0.134675,$$

$$0.059313, 0.284414][17.95, 13.46, 8.97, 4.49, 0] = 10.33 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}。$$

同理可计算出其他年份结果:

$$2018 \text{ 年: } WLJ = 10.37;$$

$$2017 \text{ 年: } WLJ = 11.27;$$

$$2016 \text{ 年: } WLJ = 10.94;$$

$$2015 \text{ 年: } WLJ = 10.46。$$

对比分析表明: 东南部城市水资源价格与西安市水资源价格相差甚远, 分析其原因可能有以下几个方面: (1) 地域存在差别。西安市位于我国西北内陆, 相对于东部以及南部城市水资源量较少, 在一定程度上造成水资源价格较高。(2) 未

考虑全部用水阶梯。上述研究或未划分用水阶梯或是按照用水户数量最集中的第一阶梯用水的价格数据计算, 评价结果会与实际存在一定偏差。

(3) 最大水费承受指数选取不同。西安市与其他地区在经济、水资源现实情况方面存在差别, 最大水费承受指数选取不同, 导致水资源价格计算结果存在差别。(4) 所做研究在时间上不具备同步性。水资源价格并不是一成不变的, 与社会发展息息相关, 本文所做研究在时间上与前人研究不同, 社会发展实际情况有所差别, 水资源价格存在一定差别。

3.3 理论水价计算

完整的水价应由资源水价、工程水价和环境水价组成, 其中资源水价反映稀缺条件下资源的自然价值, 即水资源价格; 工程水价反映供水工程成本费用及利润; 环境水价反映水资源保护与治理的附加外部成本, 包括水资源费与污水处理费(吕翠美等, 2009)。理论水价应为上述价值之和, 水价构成如图2所示。

整理水资源价格计算结果, 结合水价构成图, 将各个构成因素价格与水资源价格汇总到一起, 计算理论水价, 统计如表6所示。

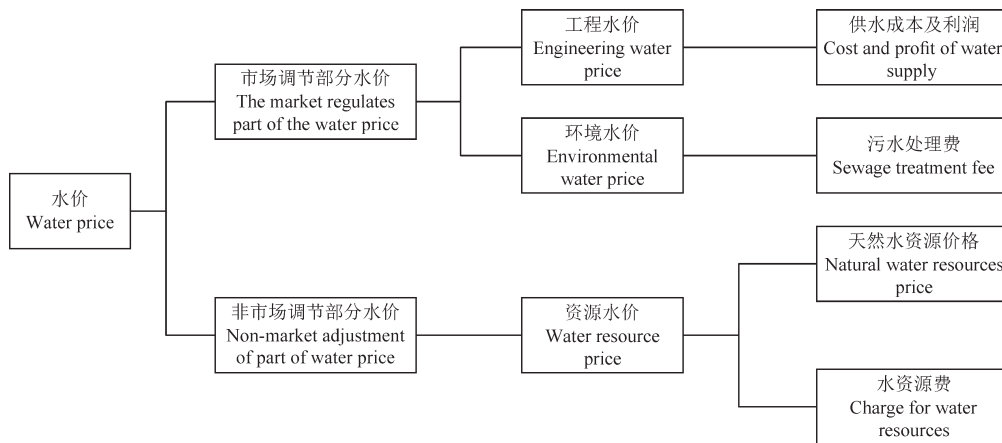


图2 水价构成示意图
Fig. 2 Diagram of water price composition

表6 2015—2019年西安市水资源价格核算结果					
Tab. 6 Water resource price accounting results of Xi'an from 2015 to 2019					
项目 Item	2015	2016	2017	2018	2019
居民用水价格 / (元·m ⁻³) Water price for resident / (yuan · m ⁻³)	3.132	3.776	3.776	3.776	3.776
居民人均可支配收入 / 万元 Annual per capita disposable income of residents / 10 ⁴ yuan	2.7845	3.0032	3.2597	3.1407	3.4064
水费支出占人均可支配收入比例 Water expenditure per capita disposable income ratio	0.48	0.54	0.51	0.55	0.54
人均生活用水量 Annual per capita water consumption / m ³	42.62	43.20	43.61	46.32	48.79
水费承受指数 Water fee bearing index / %	3	3	3	3	3
供水成本及利润 / (元·m ⁻³) Cost and profit of water supply / (yuan · m ⁻³)	1.48	1.65	1.65	1.65	1.65
水资源费 / (元·m ⁻³) Charge for water resources / (yuan · m ⁻³)	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40
污水处理费 / (元·m ⁻³) Sewage treatment fee / (yuan · m ⁻³)	0.65	0.95	0.95	0.95	0.95
水资源价格 / (元·m ⁻³) Water resource price / (yuan · m ⁻³)	10.46	10.94	11.27	10.37	10.33
理论水价 / (元·m ⁻³) Theoretical water price / (yuan · m ⁻³)	12.89	13.49	14.27	13.37	13.33

从表 6 的分析结果可以看出: 2015—2019 年西安市水资源价格波动变化, 由 $10.46 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 下降到 $10.33 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$, 下降幅度不大; 水费占居民人均可支配收入比例波动变化, 呈上升趋势; 水费支出占居民年可支配收入的 0.5% 左右, 低于设定值 3%, 相对于理论水价而言, 居民用水价格仍然偏低, 水价结构不甚合理, 水价仍有部分提升空间。随着社会经济的进一步发展, 西安市人口逐年增加, 在人口基数与人均生活用水量都逐年增加的情况下, 西安市居民生活用水总量也将会逐年增大。适当提升水价, 优化居民用水结构, 有利于增强公众节水意识, 提高用水效率, 缓解城市用水压力。

4 结论

(1) 通过模糊评价的方法来分析西安市水资源价值, 综合了经济属性、社会属性以及生态属性。运用熵值法计算指标权重, 克服了传统评价方法中由人为主观因素赋权形成的偏差, 利用决策矩阵作为数据, 属性权重反映了属性值的离散程度, 符合数学意义, 相对其他方法来说比较客观、准确。

(2) 对西安市近 5 a 的水资源价值进行分析计算表明: 在设定的承受指数下, 西安市理论水价与居民实际用水价格之间还有一定差距, 这可能是由水资源作为人类必需的基础性保障资源, 除其本身经济价值外, 还要考虑水资源的社会公益性与保障性, 政府管理部门制定的居民实际用水价格低于理论水价所致。

(3) 西安市人口数量在近几年持续增长, 人均生活用水量也在逐年提高, 但总体水资源供给量变化不大, 人口的增多会导致人均水资源占有量减少。人口和人均用水量的同步提升导致城市居民生活用水总量的提升, 对城市水资源的利用造成一定压力。西安市实际水费支出仅占居民人均可支配收入的 0.5%, 远远低于设定的承受指数 3%, 水价仍有提升空间。在不破坏水资源的公益性及保障性, 不超过居民承受力的前提下, 优化居民用水结构, 适当提升水价, 可以在一定程度上缓解城市用水压力, 促进市民节约水资源, 促进城市可持续发展。

参考文献

艾亚迪, 魏传江, 马真臻. 2020. 基于 AHP-熵权法的西安

市水资源开发利用程度评价 [J]. *水利水电科技进展*, 40(2): 11–16. [Ai Y D, Wei C J, Ma Z Z. 2020. Evaluation on water resources development and utilization degree based on AHP-entropy weight method [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 40(2): 11–16.]

陈超, 郭高轩. 2012. 北京市第四系地下水资源价值模糊数学综合评价 [J]. *城市地质*, 7(2): 14–17, 5. [Chen C, Guo G X. 2012. Comprehensive evaluation on the quaternary groundwater resource value of Beijing based on the fuzzy mathematics model [J]. *Urban Geology*, 7(2): 14–17, 5.]

方奕舟, 陈志和, 熊育久. 2021. 基于 AHP-模糊综合评价法的中山市水生态文明城市建设评估 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 60(3): 88–98. [Fang Y Z, Chen Z H, Xiong Y J. 2021. Evaluation of water ecological civilization of Zhongshan City based on AHP-fuzzy comprehensive method [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 60(3): 88–98.]

冯欣, 姜文来, 刘洋, 等. 2021. 水资源价值模糊数学模型研究进展 [J]. *资源科学*, 43(9): 1834–1848. [Feng X, Jiang W L, Liu Y, et al. 2021. Progress of research on fuzzy mathematical model of water resources value [J]. *Resources Science*, 43(9): 1834–1848.]

付家田. 2020. 武汉市水资源价值评估研究与应用 [D]. 武汉: 中南财经政法大学. [Fu J T. 2020. Research and application of water resources value assessment in Wuhan [D]. Wuhan: Zhongnan University of Economics and Law.]

甘泓, 秦长海, 汪林, 等. 2012. 水资源定价方法与实践研究 I: 水资源价值内涵浅析 [J]. *水利学报*, 43(3): 289–295, 301. [Gan H, Qin C H, Wang L, et al. 2012. Study on water pricing method and practice I. Discussion on the connotation of water resources value [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 43(3): 289–295, 301.]

高红凯, 赵航. 2020. 全球尺度水文模型: 机遇、挑战与展望 [J]. *冰川冻土*, 42(1): 224–233. [Gao H K, Zhao F. 2020. A review of global hydrological models: the opportunities, challenges and outlook [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 42(1): 224–233.]

葛佳宁. 2019. 基于模糊数学法的城市居民生活用水水资源价值评估——以广州市为例 [D]. 广州: 暨南大学. [Ge J N. 2019. Evaluation of water resource value for urban residents based on fuzzy mathematics—take Guangzhou as an example [D]. Guangzhou: Jinan University.]

- 龚杰,赵起超,姜华超,等. 2022. 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*, 39(4): 34–40. [Gong J, Zhao Q C, Lou H C, et al. 2022. Application of fuzzy analytic hierarchy process to water resource value assessment: case study of Mianyang City [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 39(4): 34–40.]
- 贾亦真,沈菊琴,王 晗,等. 2018. 兰州市水资源价值模糊评价研究 [J]. *人民黄河*, 40(9): 68–73. [Jia Y Z, Shen J Q, Wang H, et al. 2018. Research on fuzzy evaluation of water resources value in Lanzhou City [J]. *Yellow River*, 40(9): 68–73.]
- 贾雨蔚. 2021. 西安市水资源资产负债表编制及应用研究 [D]. 西安: 西安理工大学. [Jia Y W. 2021. Study on the preparation and application of water resources balance sheet in Xi'an [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology.]
- 简富绩,宋晓谕,虞文宝,等. 2016. 水资产负债表编制中水资源资产核算账户的建立与分析——以黑河中游张掖市为例 [J]. *中国沙漠*, 36(3): 851–856. [Jian F H, Song X Y, Yu W B, et al. 2016. Establishment and analysis of water assets accounts for water balance sheet compilation: a case study of Zhangye City in Heihe River Basin [J]. *Journal of Desert Research*, 36(3): 851–856.]
- 来海亮,汪党献,吴涤非. 2006. 水资源及其开发利用综合评价指标体系 [J]. *水科学进展*, 17(1): 95–101. [Lai H L, Wang D X, Wu D F. 2006. Comprehensive assessment indicator system for water resources and its development and use [J]. *Advances in Water Science*, 17(1): 95–101.]
- 李宝萍. 2008. 基于模糊综合评价模型的水价计算 [J]. *水力发电*, 34(8): 88–90. [Li B P. 2008. Calculation of water price based on blurring comprehensive evaluate model [J]. *Water Power*, 34(8): 88–90.]
- 李 扬,孔范龙,李 悦,等. 2012. 基于模糊数学算法的青岛市资源水价估算 [J]. *中国人口·资源与环境*, 22(S1): 180–182. [Li Y, Kong F L, Li Y, et al. 2012. Applying fuzzy mathematics to calculate water resource price of Qingdao City [J]. *China Population, Resources and Environment*, 22(S1): 180–182.]
- 李云雁,江小平. 2021. 我国深化城市供水价格形成机制改革的路径选择——基于激励约束机制及收入校核补偿机制的探索 [J]. *价格理论与实践*, (8): 50–53. [Li Y Y, Jiang X P. 2021. Path choice for deepening the reform of water supply price formation mechanism—exploration based on incentive and restraint mechanism and income check and compensation mechanism [J]. *Price: Theory & Practice*, (8): 50–53.]
- 刘芳芳,连 华,王建兵,等. 2016. 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*, 32(2): 87–91. [Liu F F, Lian H, Wang J B, et al. 2016. Calculation on water resource value of Zhangye City based on fuzzy mathematic model [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 32(2): 87–91.]
- 刘红雨,刘友存,孟丽红,等. 2022. 熵权法在水资源与水环境评价中的研究进展 [J]. *冰川冻土*, 44(1): 299–306. [Liu H Y, Liu Y C, Meng L H, et al. 2022. Research progress of entropy weight method in water resources and water environment [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 44(1): 299–306.]
- 刘晓君,闫俐臻. 2016. 基于内外部全成本视角的居民用水阶梯价格研究——以西安市居民用水实施阶梯水价改革为例 [J]. *价格理论与实践*, (12): 60–63. [Liu X J, Yan L Z. 2016. Research on the tiered pricing of residential water based on the internal and external full cost perspective — by taking the tiered water price reform for residential water usage in Xi'an as an example [J]. *Price: Theory & Practice*, (12): 60–63.]
- 刘兴远,宋小明,周兴华. 2014. 关于城市供水成本与水价的思考 [J]. *中国经贸导刊*, (24): 76–79. [Liu X Y, Song X M, Zhou X H. 2014. Reflections on the cost and price of urban water supply [J]. *China Economic & Trade Herald*, (24): 76–79.]
- 刘友存,邹杰平,尹小玲,等. 2021. HSPF 模型在流域水文与水环境研究中的进展 [J]. *冰川冻土*, 43(1): 225–232. [Liu Y C, Zou J P, Yin X L, et al. 2021. Review on HSPF model in watershed hydrology and water environment research [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 43(1): 225–232.]
- 刘增进,王松林,潘 乐,等. 2008. 模糊数学模型在水价计算中的应用 [J]. *人民黄河*, 30(7): 45–47. [Liu Z J, Wang S L, Pan L, et al. 2008. Application of fuzzy mathematical model in the calculation of water price water price calculation [J]. *Yellow River*, 30(7): 45–47.]
- 吕翠美,吴泽宁,胡彩虹. 2009. 水资源价值理论研究进展与展望 [J]. *长江流域资源与环境*, 18(6): 545–549. [Lü C M, Wu Z N, Hu C H. 2009. Progress and prospect on theory research of water resource value [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 18(6):

- 545–549.]
- 宋松柏, 蔡焕杰, 徐良芳. 2003. 水资源可持续利用指标体系及评价方法研究 [J]. *水科学进展*, 14(5): 647–652. [Song S B, Cai H J, Xu L F. 2003. Indicators system for region sustainable water resources utilization and its assessing methods [J]. *Advances in Water Science*, 14(5): 647–652.]
- 孙靖陶. 2008. 城市化过程中水土资源价值转换机制研究 [D]. 西安: 西安理工大学. [Sun J T. 2008. The study on the value conversion mechanism of water soil resources during urbanization processing [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology.]
- 田一鹏. 2018. 基于铁岭市水资源价值评价研究 [J]. *中国水能及电气化*, (8): 29–33. [Tian Y P. 2018. Evaluation research on water resources value based on Tieling City [J]. *China Water Power & Electrification*, (8): 29–33.]
- 万哲慧, 王 坤, 冯孙林, 等. 2018. 熵权贝叶斯模型在珊溪水库水环境质量评价的应用 [J]. *节水灌溉*, (3): 55–57, 62. [Wan Z H, Wang S, Feng S L, et al. 2018. Application of entropy-weight Bayesian model in Shanxi Reservoir water environment quality evaluation water environment quality assessment of Shanxi Reservoir [J]. *Water Saving Irrigation*, (3): 55–57, 62.]
- 汪 妮, 方 正, 解建仓. 2012. 改进的熵权法在再生水资源价值评价中的应用 [J]. *西安理工大学学报*, 28(4): 416–420. [Wang N, Fang Z, Xie J C. 2012. Application of improved entropy weight method to reclaimed water value assessment [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 28(4): 416–420.]
- 王 欢. 2012. 基于边际效用理论的水资源价值研究 [D]. 北京: 北京工业大学. [Wang H. 2012. Research of water resources value based on the theory of marginal utility [D]. Beijing: Beijing University of Technology.]
- 王 昆. 2018. 西安市东北郊水源地水资源评价及开采方案分析 [D]. 西安: 长安大学. [Wang K. 2018. Water resource evaluation and mining scheme analysis for water supply in the northeastern of Xi'an [D]. Xi'an: Chang'an University.]
- 王启帆. 2019. 西安市水资源现状分析及保护措施 [J]. *现代化农业*, (12): 29–31. [Wang Q F. 2019. Analysis and protection measures of water resources in Xi'an [J]. *Modernizing Agriculture*, (12): 29–31.]
- 吴岳玲, 李世龙, 邱小琮, 等. 2021. 清水河流域水质综合分析评价 [J]. *环境监测管理与技术*, 33(2): 40–45. [Wu Y L, Li S L, Qiu X C, et al. 2021. Analysis and assessment of water quality in Qingshuihe River Basin [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 33(2): 40–45.]
- 薛 亮, 邱国玉. 2013. 快速城市化进程中的西安水资源与水环境问题 [J]. *北方环境*, 25(9): 1–8. [Xue L, Qiu G Y. 2013. Issues of water resources and environment in Xi'an with rapid urbanization [J]. *Northern Environment*, 25(9): 1–8.]
- 杨 旭, 于水利, 由海波. 2008. 模糊数学综合评判在水资源价值评估中的应用 [J]. *海河水利*, (2): 49–51. [Yang X, Yu S L, You H B. 2008. The application of fuzzy math integrated judgment in the evaluation of water resource value [J]. *Haihe Water Resources*, (2): 49–51.]
- 易 信. 2020. 中长期我国经济增长趋势及对水资源需求影响的研究 [J]. *中国水利*, (19): 37–39. [Yi X. 2020. Research on economic growth trend in medium and long term of our country and the water resources demand influences [J]. *China Water Resources*, (19): 37–39.]
- 于 兰. 2007. 基于模糊理论的成都市水资源价值评判 [J]. *水资源与水工程学报*, 18(4): 79–81. [Yu L. 2007. Evaluation of water resources value in Chengdu City based on the Fuzzy theory [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 18(4): 79–81.]
- 袁汝华, 朱九龙, 陶晓燕, 等. 2002. 影子价格法在水资源价值理论测算中的应用 [J]. *自然资源学报*, 17(6): 757–761. [Yuan R H, Zhu J L, Tao X Y, et al. 2002. Application of shadow price method in calculation of water resources theoretical value [J]. *Journal of Natural Resources*, 17(6): 757–761.]
- 乐姝滢. 2020. 生态文明视阈下江西省水资源价值评估研究 [D]. 南昌: 江西财经大学. [Yue S Y. 2020. The research on the evaluation of water resources value in Jiangxi Province from the perspective of ecological civilization [D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics.]
- 张 凯. 2006. 关于天津市水资源价值与水价格的研究——合理的水价与节水型社会建设 [D]. 天津: 天津大学. [Zhang K. 2006. Study on the water resources value and water price of Tianjin—reasonable water price and water-saving society construction [D]. Tianjin: Tianjin University.]
- 张丽萍, 朱钟麟, 邓良基. 2004. 水资源评价指标体系的研究现状及问题探讨 [J]. *国土资源科技管理*, 21(4): 5–9.

- [Zhang L P, Zhu Z L, Deng L J. 2004. Present situation of and problems in water resource evaluation indicator systems in China [J]. *Management Geological Science and Technology*, 21(4): 5–9.]
- 张龙云, 曹升乐, 王兴菊. 2007. 济南市水资源价值综合评价与水价估算 [J]. *水电能源科学*, 25(5): 5–8. [Zhang L Y, Cao S L, Wang X J. 2007. The compositive assessment and calculation of water resources value in Jinan City [J]. *Water Resources and Power*, 25(5): 5–8.]
- 张宁, 章胜. 2010. 基于模糊数学的城市居民资源水价计算研究 [J]. *杭州电子科技大学学报*, 30(6): 82–85. [Zhang N, Zhang S. 2010. Calculation of water resource price of urban household based on the fuzzy mathematic model [J]. *Journal of Hangzhou Dianzi University*, 30(6): 82–85.]
- 张苑南. 2010. 东莞市水资源供需矛盾分析及策略研究 [D]. 广州: 华南理工大学. [Zhang Y N. 2010. Water resource supply & demand conflict analysis and resolution proposal for Dongguan City [D]. Guangzhou: South China University of Technology.]
- 赵立. 2020. 西安市中水利用现状分析及对策研究 [J]. *水资源开发与管理*, 18(3): 49–51, 84. [Zhao L. 2020. Analysis of present situation and countermeasures of reclaimed water utilization in Xi'an [J]. *Water Resources Development and Management*, 18(3): 49–51, 84.]
- 钟绍卓. 2019. 洱海流域水资源价值核算和生态补偿机制研究 [D]. 上海: 上海交通大学. [Zhong S Z. 2019. Study on water resource value accounting and ecological compensation mechanism in Erhai Lake Basin [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University.]
- 邹洪媛. 2019. 基于模糊评价模型的页岩气开采区域水资源承载力评价 [D]. 北京: 中国石油大学(北京). [Zou H Y. 2019. Evaluation of water resources carrying capacity based on fuzzy model in shale gas exploitation area [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing).]
- 左东启, 戴树声, 袁汝华, 等. 1996. 水资源评价指标体系研究 [J]. *水科学进展*, 7(4): 367–374. [Zuo D Q, Dai S S, Yuan R H, et al. 1996. Study on the water resources assessment indexes system [J]. *Advances in Water Science*, 7(4): 367–374.]
- Batina R G, Galinato G I. 2017. The spillover effects of good governance in a tax competition framework with a negative environmental externality [J]. *Environmental and Resource Economics*, 67(4): 701–724.
- Cooper B, Crase L, Pawsey N. 2014. Best practice pricing principles and the politics of water pricing [J]. *Agricultural Water Management*, 145: 92–97.
- Meng X M, Wu L F. 2021. Prediction of per capita water consumption for 31 regions in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 28(23): 29253–29264.
- Yang Y H. 2008. Elements of information theory [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 103(481): 429. DOI: 10.1198/jasa.2008.s218.
- Zhang Y X, Jia R T, Wu J, et al. 2021. Evaluation of groundwater using an integrated approach of entropy weight and stochastic simulation: a case study in east region of Beijing [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(14): 7703. DOI: 10.3390/ijerph18147703.