

网络出版时间:2015-12-02 14:25

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2016.01.033

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20151202.1425.066.html

基于模糊物元模型的再生水资源价值评价

李 朦^{1,2}, 汪 妮¹, 解建仓¹, 杨 柳¹, 朱记伟¹

(1 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048;

2 陕西省土地工程建设集团, 陕西 西安 710075)

[摘要] **【目的】**利用模糊物元模型对再生水资源的价值进行评价,为城市的经济发展、水资源的合理利用和节水型社会建设提供参考。**【方法】**依据全面性、科学性、系统性和可操作性原则,建立统筹经济、社会、生态环境和再生水资源价值4个方面的评价指标体系,采用专家调查法和熵权法相结合的方法确定各评价指标的权重,并采用模糊物元法计算西安、咸阳、宝鸡和渭南4个城市的再生水资源价值评价结果,最后采用模糊综合评判法及层次分析法对评价结果进行校验。**【结果】**利用建立的统筹经济、社会、生态环境和再生水资源价值的评价指标体系,对西安、咸阳、宝鸡和渭南4个城市再生水资源价值进行评价,得到上述4个城市的欧式贴近度分别为0.696 8, 0.619 6, 0.513 9, 0.427 6, I~IV等级的欧式贴近度分别为0.864 9, 0.707 4, 0.489 7, 0.380 6,通过计算西安、咸阳、宝鸡和渭南的贴近度与4个等级贴近度的欧式距离,确定4个城市的再生水资源价值等级分别为较高、较高、较低、低。通过模糊综合评判法和层次分析法对4个城市再生水资源价值评价等级进行校验,表明评价结果合理可信。**【结论】**基于模糊物元模型,统筹经济、社会、生态环境和再生水资源的再生水资源价值评价体系客观合理、可信,具有一定的推广应用价值。

[关键词] 再生水资源;价值评价;专家调查法;熵权法;模糊物元模型

[中图分类号] TV213.4

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2016)01-0223-07

Evaluation of reclaimed water resources based on fuzzy matter element model

LI Meng^{1,2}, WANG Ni¹, XIE Jian-cang¹,
YANG Liu¹, ZHU Ji-wei¹

(1 Institute of Hydrology and Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 Shaanxi Land Construction Group, Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: **【Objective】** Value of reclaimed water resources was evaluated to provide reference for economic development, rational use of water resources and construction of water-saving society in cities. **【Method】** Based on comprehensive, scientific, systematic and operative principles, the evaluation index system covering economy, society, environment and renewable water resources was established. The expert investigation method and the entropy method were combined to determine the weight of each evaluation index. The results of Xi'an, Xianyang, Baoji and Weinan were calculated with the fuzzy matter element method and verified by the fuzzy comprehensive evaluation method and analytic hierarchy process. **【Result】** The

[收稿日期] 2014-04-25

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51209170);西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地自主研究基金项目(2013ZZKT-5)

[作者简介] 李 朦(1988—),女,河北保定人,在读硕士,主要从事水文水资源研究。

E-mail: limeng20130912@163.com

[通信作者] 解建仓(1963—),男,陕西眉县人,教授,博士生导师,主要从事水资源及水利信息化研究。

E-mail: jcxie@mail.xaut.edu

established evaluation index system covering economy,society,environment and renewable water resources was used to evaluate the reclaimed water resources values of Xi'an,Xianyang,Baoji and Weinan,and the euclid approach degrees were 0.696 8,0.619 6,0.513 9 and 0.427 6,and the euclid approach degrees of the grades I-IV were 0.864 9,0.707 4,0.489 7 and 0.380 6,respectively. The levels of renewable water resources of the four cities were higher,higher,lower and low,respectively. The fuzzy comprehensive evaluation method and analytic hierarchy process indicated that the assessment results were reasonable,credible, and good for further application. 【Conclusion】 The established system for renewable water resources value evaluation was reasonable,credible,and good for further application.

Key words: renewable water resources; value evaluation; expert investigation method; entropy method; fuzzy matter element model

再生水是指污水经适当处理达到一定的水质标准后,可以满足某种使用要求,能进行有益使用的水^[1]。由于再生水具有水量大、水质稳定、不易受季节和气候影响等特点,其被认为是城市的第二水源,是缓解缺水地区城市供水紧张、减轻水环境污染、改善生态环境的有效途径之一,也是实现水资源可持续利用的重要环节^[2-3]。相对于欧洲^[4]、日本^[5]等发达国家以及以色列^[6]等严重缺水的发展中国家,我国对再生水的利用起步较晚。随着我国对水危机认识的提高,城市污水再生利用越来越受到重视,七五期间污水回用被列入国家重点科技攻关计划,八五期间很多城市新建污水处理厂时均考虑了污水的再生利用^[7]。

再生水主要用于工业、农业、市政杂用、城市景观以及地下水补给等,不仅带来了可观的经济效益,同时还带来了显著的社会效益、环境效益^[8]。目前,我国再生水逐渐市场化,再生水价格是再生水市场的核心要素,但目前的再生水价格远远低于其实际价值,因此制定合理的再生水价格成为目前亟待研究的课题^[9]。再生水资源价值评价能够综合反映再生水的潜在价值,为再生水市场的合理化和规范化提供参考。但是目前国内研究再生水价值评价的学者相对较少,典型代表有熊家晴^[10]、汪妮^[3,11]等。也正因为如此,在水资源承载力、河流生态、水质评价方面国内外目前有很多研究方法^[12-16],但这些方法却较少用于再生水的价值评价。再生水资源价值评价系统是一个涉及多因素的复杂综合系统,使得再生水资源价值评价具有模糊性和随机性等不确定性,且各因素间具有不相容性,而模糊物元理论能够有效解决这些问题。为此,本研究在全面分析再生水资源价值的基础上,建立系统的再生水资源价值评价指标体系,并采用模糊物元模型^[17]进行评价,以为不同区域再生水资源合理评价提供支持。

1 再生水资源价值评价的模糊物元模型

1.1 基本概念

物元分析理论中的事物是用“事物(M),特征(C),量值(q)”3个要素来描述的,这些要素组成的有序三元组 $R=(M,C,q)$ 的基本元为物元^[18]。如果事物 M 有 m 个特征 $C_1,C_2,\cdots,C_m$,并对应量值 $q_1,q_2,\cdots,q_m$,则称 R 为 m 维复合物元。当物元 R 中的量值 q 具有模糊性时,则称 R 为模糊物元;当复合物元 R_m 中的所有量值均为模糊量值时,则称 R_m 为复合模糊物元。对于 n 个事物的 m 维模糊物元,可记作:

$$R_m = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_n \\ C_1 & q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1n} \\ C_2 & q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_m & q_{m1} & q_{m2} & \cdots & q_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: R_m 为 n 个事物的 m 维复合模糊物元; C_j 为第 j 项特征, $j=1,2,\cdots,m$; M_i 为第 i 个事物, $i=1,2,\cdots,n$; q_{ij} 为第 i 个事物的第 j 项特征对应的模糊量值。

1.2 确定模糊隶属度

经计算,可得从优隶属度模糊物元矩阵 R'_m ,记作:

$$R'_m = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_n \\ C_1 & \eta_{11} & \eta_{12} & \cdots & \eta_{1n} \\ C_2 & \eta_{21} & \eta_{22} & \cdots & \eta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_m & \eta_{m1} & \eta_{m2} & \cdots & \eta_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: R'_m 为从优隶属度模糊物元; η_{ij} 为第 i 个评价样本的第 j 个评价指标从属于标准样本的隶属度, $i=1,2,\cdots,n,j=1,2,\cdots,m$ 。

隶属度反映的是各单项指标对应的模糊量值从

属于标准样本相应指标模糊量值的隶属程度。隶属度的表达式为:

$$\begin{cases} \eta_{ij}=q_{ij}/\max q_{ij} \text{ (越大越优型指标)}, \\ \eta_{ij}=\min q_{ij}/q_{ij} \text{ (越小越优型指标)}. \end{cases} \quad (3)$$

$$\eta_{ij}=\min q_{ij}/q_{ij} \text{ (越小越优型指标)}. \quad (4)$$

式中: $\max q_{ij}$ 为评价样本中各项评价指标特征值的最大值; $\min q_{ij}$ 为评价样本中各项评价指标特征值的最小值。

1.3 标准模糊物元及差方复合模糊物元

m 维标准模糊物元 R_{0m} 为从优隶属度模糊物元 R'_{mm} 各评价指标从优隶属度的最大值或最小值, 本研究以最大值为最优, 表示形式为:

$$R_{0m} = \begin{bmatrix} M_0 & & \\ C_1 & \eta_{01} & \\ C_2 & \eta_{02} & \\ \vdots & \vdots & \\ C_m & \eta_{0m} & \end{bmatrix}. \quad (5)$$

式中: M_0 为标准样本; η_{0j} 为 R'_{mm} 第 j 项评价指标从优隶属度的最大值, $j=1, 2, \dots, m$ 。

若以 $\Delta_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ 表示标准模糊物元 R_{0m} 与复合模糊物元 R_{nm} 中各项差平方, 即 $\Delta_{ij} = (\eta_{0j} - \eta_{ij})^2$, 由于本研究隶属度以最大值为最优, 所以 η_{0j} 均为 1, 则差方复合模糊物元 R_{Δ} 可表示为:

$$R_{\Delta} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & \cdots & M_n \\ C_1 & \Delta_{11} & \Delta_{12} & \cdots & \Delta_{1n} \\ C_2 & \Delta_{21} & \Delta_{22} & \cdots & \Delta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_m & \Delta_{m1} & \Delta_{m2} & \cdots & \Delta_{mn} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

1.4 确定评价指标权重

权重衡量的是各个评价指标的重要程度, 权重的确定是评价过程中的重要环节。目前, 评价指标的权重确定方法有很多, 大致可以分为两类: 一是主观赋权法, 如层次分析法^[19]、德尔菲法^[20]等; 二是客观赋权法, 如粗糙集^[21]、熵值法^[22]等。如果采用主观赋权法, 可能会由于人为因素影响过大导致赋权结果过于主观; 如果采用客观赋权法, 可能会出现相对重要指标所赋权重较低, 不能真实反映指标的重要程度。因此, 本研究拟采用主、客观赋权法相结合的方法, 其中客观赋权法采用熵值法, 主观赋权法采用专家调查法, 二者结合确定最终的指标权重, 不仅能够客观反映评价指标的重要程度, 也考虑了相关领域专家对评价指标重要性的经验判断力。其计算步骤如下。

(1) 构建 n 个评价事物 m 个评价指标的判断矩

阵 R , 并对 R 进行归一化处理得到归一化判断矩阵 A 。根据熵的定义确定第 j 个评价指标的熵为:

$$S_j = -\frac{1}{\ln n} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\frac{1+a_{ij}}{\sum_{i=1}^n (1+a_{ij})} \ln \frac{1+a_{ij}}{\sum_{i=1}^n (1+a_{ij})} \right] \right\},$$
$$(i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m). \quad (7)$$

式中: S_j 为第 j 个评价指标的熵; a_{ij} 为归一化判断矩阵 A 中的各项模糊量值。

(2) 计算各指标的熵权。表达式为:

$$w_j = \frac{1-S_j}{m - \sum_{j=1}^m S_j}, (0 \leq w_j \leq 1, \sum_{j=1}^m w_j = 1).$$

$$m - \sum_{j=1}^m S_j \quad (8)$$

式中: w_j 为第 j 项指标的熵权, $j=1, 2, \dots, m$ 。

(3) 确定综合权重。将熵权法确定的客观权重 w_j 与专家调查法确定的主观权重 θ_j 相结合, 最终确定各评价指标的综合权重 w'_j , 表达式为:

$$w'_j = \xi \theta_j + (1 - \xi) w_j, (j=1, 2, \dots, m).$$

$$(j=1, 2, \dots, m). \quad (9)$$

式中: ξ 为决策者对主观权重和客观权重的偏好系数, $\xi \in [0, 1]$, ξ 越大, 表明专家的经验越丰富, 决策者更偏重主观权重; 反之, 表明决策者更偏重客观权重。

1.5 欧式贴近度计算

贴近度表示被评价样本与标准样本之间互相接近的程度, 贴近度越大, 表示被评价样本与标准样本越接近, 反之则越远。计算贴近度的方法很多, 如欧式贴近度^[16]、海明贴近度^[23]等。考虑具体的评价意义, 本研究采用欧式贴近度对评价样本进行优劣排序及综合分析, 欧式贴近度 e_i 的计算公式为:

$$e_i = 1 - \sqrt{\sum_{j=1}^m w'_j \Delta_{ij}},$$
$$(i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m). \quad (10)$$

2 应用实例

2.1 研究区概况

陕西省水资源总量为 390.5 亿 m^3 , 人均水资源量为 1 280 m^3 , 为全国平均水平的 55%。全省废污水排放总量为 11.225 亿 t, 其中城镇居民生活废污水排放量为 4.444 亿 t, 第二产业废污水排放量为 5.637 亿 t, 第三产业废污水排放量为 1.144 亿 t。全省入河废污水总量为 9.854 亿 t。关中平原位于陕西中部, 属暖温带半干旱或半湿润气候, 是陕西乃至中国工业、农业相对发达的地区之一, 用水量及废污水排放量相对于陕北、陕南地区均较高, 人口比较密集, 人均水资源量仅为 300 m^3 , 单位面积水资源量为 2 850 m^3/hm^2 , 远远低于全国平均水平, 缺水形势非常严峻。因此, 本研究以地处陕西关 中平原的代表城市为研究对象进行再生水资源价值评价,

以更好地了解这些地区的再生水资源情况,进而为地区的发展和再生水利用提供参考。本研究选择的代表城市为西安市、咸阳市、宝鸡市和渭南市。

2.2 数据来源

计算时所用的基础数据来源于各评价城市 2012 年统计年鉴、陕西省水资源公报、国民经济和社会发展统计公报、水文实测数据资料及污水处理厂再生水水质实测数据资料。因此,本研究所选用的基础数据具有可靠性和可操作性。

2.3 评价指标选取与等级划分

2.3.1 评价指标的选择 再生水回用不仅可以带来可观的经济效益,还可以带来显著的社会效益、生态环境效益,因此再生水资源具有经济价值、社会价

值和生态环境价值;此外,再生水的价值还受再生水资源自身的影响,如水质、水量等。由此可见,再生水资源价值评价系统是一个涉及经济、社会、生态环境以及再生水资源的复杂系统,其影响因素较多,需要建立一个相互关联,且能够综合反映再生水资源价值的指标体系^[24],因此构建再生水资源价值评价系统的关键问题是评价指标的选取。在已有研究的基础上,本研究坚持全面性、科学性、系统性及可操作性的原则,建立以经济价值、社会价值、生态环境价值以及再生水资源自身价值为准则层的再生水资源价值评价指标体系,并选取 32 个单项指标,通过灰色关联分析法^[25]筛选弱关联指标,筛选后剩余的 20 个主评价指标见表 1。

表 1 关中地区代表性城市再生水资源价值评价指标体系及研究区 2012 年的实际指标值

Table 1 The index system for renewable water evaluation of representative cities in Guanzhong region and the actual index value in 2012					
准则层 Guidelines layer	指标层 Index layer	研究区指标值 Index value of the study area			
		西安市 Xi'an	咸阳市 Xianyang	宝鸡市 Baoji	渭南市 Weinan
经济价值指标(L_1) Economic value index(L_1)	城市平均供水水价(T_1)/(元 $\cdot$ m $^{-3}$) Average water tariff of urban	4.00	3.53	3.10	2.87
	再生水回用项目财务净现值(T_2)/亿元 The FNPV of reclaimed water reuse project	15.04	9.14	5.65	3.28
	水利投资(T_3)/亿元 Investment in water conservancy	25.21	15.62	17.38	24.65
	工业年产值(T_4)/亿元 The annual industrial output value	1 340.75	786.47	771.07	669.32
	农业年产值(T_5)/亿元 The agricultural output value	254.59	283.10	239.97	167.30
社会价值指标 (L_2) Social value index(L_2)	人均水资源量(T_6)/m 3 Per capita water resources	325.14	264.60	993.74	380.31
	万元 GDP 耗水量(T_7)/m 3 Water consumption of per million GDP	76.79	63.87	64.54	78.03
	再生水资源的经济贡献率(T_8)/% The contribution rate of renewable water resources for the economy	14.87	12.07	10.35	7.81
	城市缺水率(T_9)/% The water shortage rate of city	21.80	26.50	10.93	15.36
	工业用水重复利用率(T_{10})/% The repetition rate of industrial water	84.00	85.90	76.30	67.40
生态环境价值 指标(L_3) Ecological and environmental value index(L_3)	再生水资源利用率(T_{11})/% The renewable water use efficiency	19.19	12.08	5.79	3.27
	地下水补给量(T_{12})/(亿 m $^3\cdot$ 年 $^{-1}$) The amount of groundwater feed	15.47	10.46	8.74	9.08
	污水排放量(T_{13})/亿 m 3 Waste water discharge	2.57	1.38	0.86	0.96
	植被覆盖率(T_{14})/% Vegetation coverage	44.99	30.70	35.60	28.70
	水污染指数(T_{15})/% Water pollution index	3.12	3.23	2.61	2.74
再生水资源自身 价值指标(L_4) Renewable water resources value index(L_4)	COD 浓度(T_{16})/(mg $\cdot$ L $^{-1}$) Concentration of COD	29.34	25.67	27.50	36.25
	悬浮物(SS)(T_{17})/(mg $\cdot$ L $^{-1}$) Suspended substance	3.04	4.32	7.21	9.93
	BOD $_5$ 浓度(T_{18})/(mg $\cdot$ L $^{-1}$) Concentration of BOD $_5$	4.37	4.25	9.92	14.53
	TN 浓度(T_{19})/(mg $\cdot$ L $^{-1}$) Concentration of TN	10.98	8.45	11.06	14.82
	色度(T_{20})/($^{\circ}$) Chroma	16.17	17.03	22.14	25.67

2.3.2 等级划分 目前,再生水资源价值评价尚处于探索阶段,在等级划分标准方面还没有统一的方法,可借鉴的研究成果也较少。本研究在参考《再生水水质标准》(SL 368—2006)、《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)及《污水再生水

利用工程设计规范》的基础上,借鉴相关研究成果^[2-3,8,11]并咨询相关专家,将再生水资源价值划分为 4 个等级,分别为高(Ⅰ级)、较高(Ⅱ级)、较低(Ⅲ级)、低(Ⅳ级)。各单项指标的等级评价标准如表 2 所示。

表 2 再生水資源价值评价等级划分标准

Table 2 Grading standards of renewable water resources evaluation

指标 Index	等级 Grade			
	I 级 Grade I	Ⅱ级 Grade Ⅱ	Ⅲ级 Grade Ⅲ	Ⅳ级 Grade Ⅳ
T_1	≥ 6	$<6\sim\geq 5$	$<5\sim>4$	≤ 4
T_2	≥ 12	$<12\sim\geq 9$	$<9\sim>5$	≤ 5
T_3	≥ 20	$<20\sim\geq 10$	$<10\sim>5$	≤ 5
T_4	$\geq 1\ 000$	$<1\ 000\sim\geq 800$	$<800\sim>500$	≤ 500
T_5	≥ 300	$<300\sim\geq 250$	$<250\sim>200$	≤ 200
T_6	$\geq 1\ 500$	$<1\ 500\sim\geq 1\ 000$	$<1\ 000\sim>500$	≤ 500
T_7	≤ 50	$>50\sim\leq 60$	$>60\sim<70$	≥ 70
T_8	≥ 15	$<15\sim\geq 10$	$<10\sim>5$	≤ 5
T_9	≥ 25	$<25\sim\geq 15$	$<15\sim>5$	≤ 5
T_{10}	≥ 90	$<90\sim\geq 80$	$<80\sim>70$	≤ 70
T_{11}	≥ 15	$<15\sim\geq 10$	$<10\sim>5$	≤ 5
T_{12}	≥ 15	$<15\sim\geq 10$	$<10\sim>5$	≤ 5
T_{13}	≥ 3	$<3\sim\geq 2$	$<2\sim>1$	≤ 1
T_{14}	≥ 40	$<40\sim\geq 30$	$<30\sim>20$	≤ 20
T_{15}	≥ 5	$<5\sim\geq 3$	$<3\sim>1$	≤ 1
T_{16}	≤ 10	$>10\sim\leq 20$	$>20\sim<30$	≥ 30
T_{17}	≤ 5	$>5\sim\leq 10$	$>10\sim<15$	≥ 15
T_{18}	≤ 5	$>5\sim\leq 10$	$>10\sim<15$	≥ 15
T_{19}	≤ 5	$>5\sim\leq 10$	$>10\sim<15$	≥ 15
T_{20}	≤ 15	$>15\sim\leq 20$	$>20\sim<25$	≥ 25

2.4 评价结果与分析

分别为:

专家给出的主观权重及熵值法确定的客观权重

$$\theta_j = \begin{pmatrix} 0.050\ 0, 0.070\ 0, 0.050\ 0, 0.030\ 0, 0.030\ 0, 0.030\ 0, 0.050\ 0, 0.070\ 0, 0.030\ 0, 0.070\ 0 \\ 0.070\ 0, 0.050\ 0, 0.050\ 0, 0.030\ 0, 0.050\ 0, 0.070\ 0, 0.050\ 0, 0.050\ 0, 0.050\ 0, 0.050\ 0 \end{pmatrix}。$$

确定偏好系数 ξ 的值为 0.5,通过公式(9)计算 得到评价指标的熵权及综合权重为:

$$w_j = \begin{pmatrix} 0.068\ 7, 0.054\ 8, 0.036\ 2, 0.062\ 2, 0.041\ 3, 0.060\ 9, 0.049\ 5, 0.039\ 9, 0.037\ 2, 0.051\ 7, \\ 0.056\ 7, 0.068\ 2, 0.059\ 4, 0.048\ 1, 0.044\ 4, 0.052\ 2, 0.031\ 6, 0.039\ 9, 0.054\ 1, 0.043\ 0 \end{pmatrix},$$

$$w'_j = \begin{pmatrix} 0.059\ 3, 0.062\ 4, 0.043\ 1, 0.046\ 1, 0.035\ 6, 0.045\ 5, 0.049\ 8, 0.055\ 0, 0.033\ 6, 0.060\ 8, \\ 0.063\ 4, 0.059\ 1, 0.054\ 7, 0.039\ 0, 0.047\ 2, 0.061\ 1, 0.048\ 0, 0.044\ 9, 0.052\ 0, 0.046\ 5 \end{pmatrix}。$$

通过公式(10)计算得到欧式贴近度为:

$$e_i = \begin{bmatrix} \text{西安市} & \text{咸阳市} & \text{宝鸡市} & \text{渭南市} & \text{I 级} & \text{Ⅱ级} & \text{Ⅲ级} & \text{Ⅳ级} \\ 0.696\ 8 & 0.619\ 6 & 0.513\ 9 & 0.427\ 6 & 0.864\ 9 & 0.707\ 4 & 0.489\ 7 & 0.380\ 6 \end{bmatrix}$$

通过计算所得的欧氏距离可知,2012 年西安市和咸阳市再生水資源价值为Ⅱ级,表明西安市和咸阳市的再生水資源价值较高;宝鸡市再生水資源价值为Ⅲ级,表明宝鸡市的再生水資源价值较低;渭南市再生水資源价值为Ⅳ级,表明渭南市的再生水資源价值低。本研究以模糊综合评判法和层次分析法对上述结果进行校验,结果(表 3)表明 3 种方法的

评价结果基本一致。本研究计算的各指标权重中,再生水回用项目财务净现值、工业用水重复利用率、再生水資源利用率和 COD 浓度 4 个指标的权重较高,按照表 1 中 4 个城市对应的这 4 项指标的指标值,结合表 2 可以大概判断西安、咸阳、宝鸡和渭南市的再生水資源价值等级见表 4。

表 3 基于 3 种不同方法的 4 个城市再生水資源价值评价结果的比较

Table 3 Comparison of four cities' renewable water resources values based on three different methods

评价方法 Evaluation method	西安市 Xi'an	咸阳市 Xianyang	宝鸡市 Baoji	渭南市 Weinan
模糊物元法 Fuzzy matter element method	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
模糊综合评判法 Fuzzy comprehensive evaluation method	I	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
层次分析法 AHP	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ

表 4 结果表明,评价结果与模糊物元法的评价结果基本一致。综上可知,再生水资源价值评价结果具有合理性。

在所选取的 4 个城市中,西安、咸阳、宝鸡的再生水资源均具有一定利用价值,只有渭南市的再生水资源价值为Ⅳ级。西安和咸阳市的供水水价较高,再生水回用项目利润较大,缺水比较严重,对再

生水资源的利用较多,因此西安和咸阳市的再生水资源价值较高;渭南市较西安、咸阳、宝鸡的再生水资源利用率低,污水排放量小,出厂水质较其他城市差,污水处理厂的技术不够先进,因此渭南市的再生水资源价值最低。但城市在不断发展变化,污水处理技术在不断改进,人们对再生水的利用也越来越重视,因此各城市的再生水资源均存在潜在价值。

表 4 基于 4 个重要指标实际指标值的 4 个城市再生水资源价值的评价结果

重要指标 Important index	西安市 Xi'an	咸阳市 Xianyang	宝鸡市 Baoji	渭南市 Weinan
T_2	I	II	III	IV
T_{10}	II	II	III	IV
T_{11}	I	II	III	IV
T_{16}	III	III	III	IV

3 结 论

本研究采用模糊物元法对西安、咸阳、宝鸡和渭南市的再生水资源价值进行评价,结果表明,除渭南市外,其他城市的再生水资源均具有一定的价值。所建立的再生水资源价值评价体系涵盖了社会、经济、生态环境以及再生水资源 4 个方面,具有科学性和合理性;所选用的模糊物元评价方法具有可操作性、简便性和实用性。利用专家调查法和熵值法相结合确定的指标权重,同时体现了专家的经验判断和数据中的客观信息。通过模糊综合评判法和层次分析法的校验以及重要指标实际指标值的判断,表明利用所建立的再生水资源价值评价体系得到的 4 个代表性城市的再生水资源价值评价结果合理可信。

鉴于此次评价结果及再生水资源利用现状,建议制定合理的城市供水水价,进一步加强中水管网建设和污水处理厂技术改造,完善再生水资源水质评价标准,以确保再生水资源的推广和利用,使再生水资源价值得到充分发挥。

[参考文献]

[1] 肖 锦. 城市污水处理及回用技术 [M]. 北京:化学工业出版社,2002:13-17.
Xiao J. Sewage treatment and reuse technology of cities [M]. Beijing:Chemical Industry Press,2002:13-17. (in Chinese)

[2] 宋 扬,解建仓,彭党聪,等. 城市污水再生利用发展研究 [M]. 西安:陕西科学技术出版社,2009:1-3.
Song Y,Xie J C,Peng D C,et al. Research of sewage reuse development of cities [M]. Xi'an:Shaanxi Science & Technology Press,2009:1-3. (in Chinese)

[3] 汪 妮,方 正,解建仓. 基于物元分析理论的再生水价值评价

[J]. 武汉大学学报:工学版,2013,46(1):52-56.
Wang N,Fang Z,Xie J C. Reclaimed water value assessment based on matter element analysis theory [J]. Engineering Journal of Wuhan University,2013,46(1):52-56. (in Chinese)

[4] Bixioa D,Thoeyea C,De Koning J,et al. Wastewater reuse in Europe [J]. Desalination,2006,187:89-101.

[5] Hiroaki F. Rainwater and reclaimed wastewater for sustainable urban water use [J]. Physics and Chemistry of the Earth,2008,33:340-346.

[6] Becker N,Zeitouni N,Schechter M. Reallocation water resources in the middle east through market mechanisms [J]. Water Resources Development,2006,1:17-32.

[7] 司新亚,孙守焕. 污水回用:解决水危机的重要途径 [J]. 煤矿现代化,2007,6(3):8-12.
Si X Y,Sun S H. Wastewater reuse:An important way to solve the water crisis [J]. Coal Mine Modernization,2007,6(3):8-12. (in Chinese)

[8] 高旭阔. 城市再生水资源价值评价研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学,2010.
Gao X K. Research on value's evaluation of urban reclaimed water [D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2010. (in Chinese)

[9] 吕荣胜,李 臻. 城市再生水利用及市场化研究 [J]. 华北电力大学学报:社会科学版,2009(6):11-14.
Lü R S,Li C. Reuse water using and market oriented research [J]. Journal of North China Electric Power University: Social Sciences Edition,2009(6):11-14. (in Chinese)

[10] 熊家晴,华莉芳,王 巧. 再生水生命周期综合价值模型与计算 [J]. 建筑科学,2008,24(10):95-99.
Xiong J Q,Hua L F,Wang Q. Life cycle integrated value model and application of reused wastewater product [J]. Building Science,2008,24(10):95-99. (in Chinese)

[11] 汪 妮,方 正,解建仓. 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,2012,28(2):416-420.
Wang N,Fang Z,Xie J C. Application of improved entropy weight method to reclaimed water value assessment [J]. Jour-

nal of Xi'an University of Technology,2012,28(2):416-420. (in Chinese)

[12] 苏永红,冯 起,刘 蔚,等.应用模糊综合评判方法评价石羊河流域水资源承载力 [J]. 干旱区研究,2009,26(2):169-175. Su Y H,Feng Q,Liu W,et al. Evaluation of the carrying capacity of water resources in the Shiyang River Basin using integrated fuzzy assessment [J]. Arid Zone Research,2009,26(2):169-175. (in Chinese)

[13] 门宝辉,王志良,梁 川,等.物元模型在区域地下水资源承载力综合评价中的应用 [J]. 四川大学学报:工程科学版,2003(1):34-37. Men B H,Wang Z L,Liang C,et al. Application of matter element model to evaluating of resources carrying capacity of regional groundwater [J]. Journal of Sichuan University:Engineering Science Edition,2003(1):34-37. (in Chinese)

[14] 蔡 楠,杨 扬,方建德,等.基于层次分析法的城市河流生态修复评估 [J]. 长江流域资源与环境,2010,19(9):1092-1098. Cai N,Yang Y,Fang J D,et al. Evaluation of urban river ecological remediation by using analytical hierarchy process [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2010,19(9):1092-1098. (in Chinese)

[15] 王顺久,杨志辉,丁 晶.关中平原地下水资源承载力综合评价的投影寻踪方法 [J]. 资源科学,2004,26(6):104-110. Wang S J,Yang Z H,Ding J. Projection pursuit method of comprehensive evaluation on groundwater resources carrying capacity in Guanzhong plain [J]. Resources Science,2004,26(6):104-110. (in Chinese)

[16] 张先起,梁 川.基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用 [J]. 水利学报,2005,36(9):1057-1061. Zhang X Q,Liang C. Application of fuzzy matter-element model based on coefficients of entropy in comprehensive evaluation of water quality [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2005,36(9):1057-1061. (in Chinese)

[17] 田静宜,王新军.基于熵权模糊物元模型的干旱区水资源承载力研究:以甘肃民勤县为例 [J]. 复旦大学学报:自然科学版,2013,52(1):86-93. Tian J Y,Wang X J. Assessment of the carrying capacity of water resources in arid areas based on an entropy fuzzy matter element model:A case study in Minqin County,Gansu Province [J]. Journal of Fudan University:Natural Science Edition,2013,52(1):86-93. (in Chinese)

[18] 张 斌,雍歧东,肖芳淳.模糊物元分析 [M]. 北京:石油工业出版社,1997. Zhang B,Yong Q D,Xiao F C. Fuzzy matter-element analysis [M]. Beijing:Petroleum Industry Press,1997. (in Chinese)

[19] 常建娥,蒋太立.层次分析法确定权重的研究 [J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版,2007,29(1):153-156. Chang J E,Jiang T L. Research on the weight of coefficient through analytic hierarchy process [J]. Journal of Wuhan University of Technology:Information & Management Engineering,2007,29(1):153-156. (in Chinese)

[20] 刘明寿.采用德尔菲法评价高校学报学术影响力 [J]. 贵州大学学报:自然科学版,2004,21(4):437-440. Liu M S. Adopt Delphi method think university journal academic influence power [J]. Journal of Guizhou University:Natural Sciences Edition,2004,21(4):437-440. (in Chinese)

[21] 屈吉鸿,陈南祥,黄 强,等.改进的逼近理想解在地下水资源承载力评价中的应用 [J]. 水利学报,2008,39(12):1309-1315. Qu J H,Chen N X,Huang Q,et al. Improved topsis method for evaluating groundwater carrying capacity [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,39(12):1309-1315. (in Chinese)

[22] 邱菀华.管理决策与应用熵学 [M]. 北京:机械工业出版社,2001. Qiu W H. Management decision and the application of entropy [M]. Beijing:Machinery Industry Press,2001. (in Chinese)

[23] 邱 林,任艳婷,王志良.基于熵权的模糊物元模型在地下水环境承载力评价中的应用 [J]. 东北水利水电,2006,24(11):48-51. Qiu L,Ren Y F,Wang Z L. Application of fuzzy matter element model based on entropy weight in groundwater environmental bearing capacity [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China,2006,24(11):48-51. (in Chinese)

[24] 周维博,李佩成.干旱半干旱地域罐区水资源综合效益评价体系研究 [J]. 自然资源学报,2003,18(3):288-293. Zhou W B,Li P C. Study on integrated benefit of water resources in arid and semi-arid irrigated district [J]. Journal of Natural Resources,2003,18(3):288-293. (in Chinese)

[25] 沈珍瑶,杨志峰.灰关联分析方法用于指标体系的筛选 [J]. 数学的实践与认识,2002,32(5):728-732. Shen Z Y,Yang Z F. Gray associate analysis method in screening of index system [J]. Mathematics in Practice and Theory,2002,32(5):728-732. (in Chinese)