

基于动态可变模糊综合评判法地下水水质评价

何福娟, 刘永强

(河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对传统模糊综合评判法水质评价标准区间相对静态化和隶属函数简单化存在的问题,采用动态可变模糊综合评判方法,首先建立地下水水质评价指标体系,利用熵权法确定评价指标的客观权重,层次分析法确定主观权重,结合主客观权重确定评价指标的动态综合权重。然后构造适应于地下水水质评价的变动区间,充分考虑该地区地下水的水文地质、空间分布特性以及含水层情况,将以往模糊综合评判法水质评价隶属函数由线性函数拓展为更适合地下水水质评价的非线性函数。将此模型应用于固原市地下水水质评价。结果表明:监测井1、2水质级别为Ⅳ级,监测井3、4、5、6、7水质级别为Ⅲ级,通过分析,符合该地区地下水的实际情况。利用动态可变模糊综合评判法对地下水水质进行评价,结果客观合理,具有较好的实用性。

关键词: 可变模糊集; 动态权重; 地下水水质评价; 隶属函数

中图分类号: X824

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)06-0038-06

Evaluating groundwater quality based on dynamic variable fuzzy comprehensive method

HE Fujuan, LIU Yongqiang

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Aiming at the problem of the relative static state of the standard fuzzy comprehensive evaluation method and the simplification of the membership function, the dynamic variable fuzzy comprehensive evaluation method is used to establish the evaluation index system of groundwater quality first, and the objective weight of the evaluation index is determined by the entropy method. The analytic hierarchy process determines the subjective weight, and combines the subjective and objective weights to determine the dynamic comprehensive weight of the evaluation index. And then constructs the variation range of groundwater quality assessment. Considering the groundwater hydrogeology, spatial distribution characteristics and the actual situation of aquifer, the membership function of water quality evaluation in the past fuzzy comprehensive evaluation method is extended from linear function to non-linear function, which is more suitable for groundwater quality evaluation. This model is applied to the evaluation of groundwater quality in Guyuan City and the results show that the water quality levels of the monitoring wells 1 and 2 are grade IV and the monitoring wells 3, 4, 5, 6 and 7 are of grade III, which is in accordance with the actual situation of groundwater in this area after analysis. The dynamic variable fuzzy comprehensive evaluation method is used to evaluate the groundwater quality. The results are objective and reasonable, and have good practicability.

Key words: variable fuzzy sets; dynamic weights; groundwater quality evaluation; membership function

1 研究背景

水作为生命之源,生产之要,在经济社会可持续发展中起着非常重要的作用^[1]。地下水作为水资

源的重要组成部分,引导着中国农业和社会经济的发展。针对地下水的复杂性、不确定性和模糊性特性,如何对地下水水体质量做出客观、科学合理的评价是国内学者研究的热门话题^[2-3]。

收稿日期:2017-07-11; 修回日期:2017-08-24

作者简介:何福娟(1994-),女,宁夏固原人,硕士研究生,研究方向为水利水电工程管理、水文水资源。

通讯作者:刘永强(1970-),男,甘肃定西人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为水利工程与工程项目管理。

目前地下水评价的方法主要有集对分析法^[4]、模糊综合评判法^[5]以及物元法^[6]等。张宇等^[7]采用T-S神经网络模型,综合考虑水质评价标准的区间形式和地下水系统的不确定性,对吉林省西部地区部分地下水水质进行评价;Vard等^[8]通过R模式因子分析了影响地下水化学成分变化的因素,得出地下水化学受水岩相互作用和密集农业活动的影响较大;Singh等^[9]根据各种监管机构的规定限额和相关专家意见,给出了水质质量的确定性水平,并应用于地下水水质评价。但这些评价方法中有一些不足或缺陷:

(1)以往利用模糊综合评判法进行地下水水质评价时,水质评价标准区间相对固定,评价结果颇为主观;

(2)隶属函数多为直线型与地下水水质评价的实际情况并不相符,影响了评价结果的可靠性;

(3)水质评价结果过分的依赖最大隶属度值,使评价结果失真。

针对现有评价方法的不足,文中根据《地下水质量标准》(GB/T 14848-93)划分原则的基础上,构造适用于地下水水质评价的变动区间,充分考虑该地区地下水空间分布特性、含水层情况以及水文地质情况,将传统的模糊综合评判法的隶属函数由以往的线性分布拓展为更适合地下水水质情况的非线性函数。

在权重方面,采用主观权重与客观权重相结合的方法,建立评价指标的动态权重。

以固原市地下水为例,对其2016年地下水水质进行分析评价,以实现该地区科学合理利用和保护地下水资源。

2 可变模糊综合评判法

2.1 可变模糊综合评判法的原理及方法

模糊性作为模糊集合论中最基本的概念,假设论域 U 上一个模糊事物,分别赋予 A 处于共维差异中介过渡段的左、右端点以0与1的数。在0到1的数轴上构成一个 $[0,1]$ 数的连续系统(相对于某一时空条件下的参考系)。对于 U 中任意元素,都在该连续系统上指定一个数 $\mu_A(u)$ 为 u 对 A 的相对隶属度^[10]。

2.1.1 相对差异度、相对差异函数以及相对平衡界的概念 根据可变模糊综合评判法的原理,当事物 u 具有对模糊概念吸引性质 A 的相对隶属度 $\mu_A(u)$ 与具有排斥性质的相对隶属度 $\mu_A^c(u)$ 相等

时,即 $\mu_A(u) = \mu_A^c(u)$ 可达到相对平衡界。当 $\mu_A(u) > \mu_A^c(u)$ 时,事物以吸引性质 A 为主导地位,排斥性质的 A^c 为次要特性;当 $\mu_A(u) < \mu_A^c(u)$,则相反。当事物从 $\mu_A(u) > \mu_A^c(u)$ 转化为 $\mu_A(u) < \mu_A^c(u)$,必须通过平衡界 $\mu_A(u) = \mu_A^c(u)$ ^[11]。

2.1.2 确定相对差异度 假设论域 U 上的一个模糊概念 A ,对 U 中任意元素 u ,是相对隶属函数的连续数轴任意一点, u 对表示吸引性质的 A 的相对隶属度为 $\mu_A(u)$,对表示排除性质 A^c 的相对隶属度为 $\mu_A^c(u)$,则 u 对 A 的相对差异度为:

$$D_A(u) = \mu_A(u) - \mu_A^c(u) \quad (1)$$

式中: $D_A(u)$ 为 u 对 A 的相对差异度。

2.1.3 确定相对差异函数 将相对差异度映射,即可得相对差异函数。

$$\begin{cases} D_A: D \rightarrow [-1, 1] \\ u \mapsto D_A(u) \in [-1, 1] \end{cases} \quad (2)$$

根据模糊集理论余集概念:

$$\mu_A(u) + \mu_A^c(u) = 1 \quad (3)$$

结合公式(1),即可得:

$$\mu_A(u) = (1 + D_A(u))/2 \quad (4)$$

2.2 基于动态可变模糊评判模型

2.2.1 可变模糊评判模型步骤

(1)设待评价样本数有 n 个,则样本集合可表示为:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\} \quad (5)$$

(2)设待评价样本的特性由 m 个指标特征值表示,则待评价样本的特征值矩阵为:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

(3)将每个样本特征值划分为 c 个级别,则样本 m 个指标 c 个级别的标准区间的矩阵为:

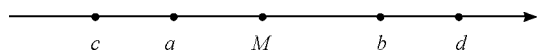
$$I_{ab} = [a, b]_h \quad (7)$$

式中: $h = 1, 2, \dots, c$ (c 为级别数)。

(4)根据标准区间 I_{ab} 构造变动区间的范围矩阵 I_{cd} :

$$I_{cd} = [c, d]_h \quad (8)$$

2.2.2 相对差异函数模型 设 $X_0 = [a, b]$ 为实轴上模糊可变几何 V 的吸引域,即 $0 < D_{A(u)} \leq 1$ 区间, $X = [c, d]$ 为包含 X_0 ($X_0 \subset X$)的某一上下界范围域区间,如图1所示。

图1 点 x 与区间 X_0, X 的位置关系

根据模糊可变集合 V 定义可知 $[a, b]$ 与 $[c, d]$ 均为 V 的排斥域, 即 $-1 \leq D_{A(u)} < 0$ 区间。设 M 为吸引域区间 $[a, b]$ 中的一点, 根据分析, M 一般为区间 $[a, b]$ 的中点值。若 x 为 X 区间内的任意点的量值, 则 x 落入 M 点左侧时的相对差异函数模型可为:

$$\begin{cases} D_{A(u)} = \left| \frac{x-a}{M-a} \right|^U & x \in [a, M] \\ D_{A(u)} = - \left| \frac{x-a}{c-a} \right|^U & x \in [c, a] \end{cases} \quad (9)$$

x 落入 M 点右侧时的相对差异函数模型为:

$$\begin{cases} D_{A(u)} = \left| \frac{x-b}{M-b} \right|^U & x \in [M, b] \\ D_{A(u)} = - \left| \frac{x-b}{d-b} \right|^U & x \in [b, d] \end{cases} \quad (10)$$

公式中 U 为非负指数, 由于考虑到地下水水质优劣与地下水中的化学成分并不成直线分布, 文中取 $U = 2$ 。其中: (1) 当 $x = a$ 或 $x = b$ 时, $D_{A(u)} = 0$; (2) 当 $x = M$ 时, $D_{A(u)} = 1$; (3) 当 $x = c$ 或 $x = d$ 时, $D_{A(u)} = -1$ 。

2.2.3 计算指标动态权重 合理确定指标权重是地下水水质评价的关键因素, 文中结合熵权法与层次分析法确定待评价指标动态权重。通过熵权法计算待评价指标的客观权重 λ_i ^[12], 层次分析法计算评价指标的主观权重 θ_i ^[13], 最后主观客观权重相结合确定一个随待评价指标取值变化而变化的动态综合权重 ω_i ^[14]。

2.2.4 确定动态综合权重 综合权重 ω_i 由待评价指标的客观权重 λ_i 和主观权重 θ_i 综合赋权计算, 即:

$$\omega_i = \lambda_i \theta_i / \sum_{i=1}^m \lambda_i \theta_i \quad (11)$$

2.2.5 计算指标 i 对 h 级的相对隶属度

$$\mu_A(u) = (1 + D_A(u)) / 2 \quad (12)$$

式中: $\mu_A(u)$ 为相对隶属度; $D_A(u)$ 为 u 对 A 的相对差异度。

2.2.6 确定综合相对隶属度 样本 j 对各级别的综合隶属度为:

$$\mu'(u) = \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{i=1}^m [\omega_i (1 - \mu_A(u)_h)]^p / \sum_{i=1}^m [\omega_i (\mu_A(u)_h)]^p \right\}^{\frac{a}{p}}} \quad (13)$$

式中: ω_i 为权重; m 为指标数; a 为模型优化准则。 p 为距离参数; $a = 1$ 为最小一乘方准则, $a = 2$ 为最小二乘准则; $p = 1$ 为海明距离, $p = 2$ 为欧氏距离。

2.2.7 确定级别特征值 级别特征值由以下公式确定

$$H = (1, 2, \dots, c) \mu'_{hj} / \sum_{h=1}^5 \mu'_{hj} \quad (14)$$

3 实例分析

3.1 研究区现状

固原市位于宁夏南部山区, 属于干旱半干旱地区, 地处西北黄土高原中部, 地势南高北低, 该地区属于生态环境脆弱区和水土流失严重区域之一。受地形影响较大, 蒸发强烈, 地表水时空分布特别不均匀, 自然条件差^[15]。年平均降水量 300 ~ 500 mm, 蒸发量大, 地下水资源量为 $2.82 \times 10^8 \text{ m}^3$, 矿化度小于 2 g/L 的地下水资源量为 $2.61 \times 10^8 \text{ m}^3$, 矿化度大于 2 g/L 的地下水资源量为 $0.21 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[16], 水资源来源主要以地下水为主, 地下水类型为第四系砂砾石孔隙潜水和黄土类土孔隙水, 地下水补给来源主要为大气降水^[17]。

近几年由于城镇化速度加快, 地下水开采严重, 造成大幅度的水质污染。供水量与需水量失衡问题日益凸显, 为了更好地反应该地区地下水实际现状, 文中充分考虑该地区的地形地貌、水文地质等因素, 选取具有代表性的 7 口监测井, 对该地区 2016 年地下水水质作为样本对其水质进行评价。为该地区合理高效利用地下水资源打下基础。

3.2 构建评价指标体系

根据地下水模糊性以及不确定性特征, 选取具有代表性的 7 项评价指标。以客观真实的反映实际情况, 文中以宁夏固原市地下水水质评价为例, 借鉴国内外学者现有的研究成果, 充分考虑固原市的自然条件、环境特点以及地下水资源状况; 通过咨询专家以及结合当地地下水资源情况遴选出具有代表性的总硬度 (CaCO_3)、 SO_4^{2-} 、矿化度、 Cl^- 、 Fe^{2+} 、 F^- 、 Ca^{2+} 7 项指标进行评价。

3.3 评价准则

评价基准的制定依据《地下水质量标准》(GB/T 14848-93)^[18], 评价标准包含 I ~ V 个级别; 具体 I ~ V 级评价标准含义见表 1, 评价标准划分见表 2。

3.4 数据来源及权重的确定

(1) 数据来源。为了能够尽可能真实的反映固原市地下水水体状况, 综合考虑该地区地下水资源

空间分布特征、含水层情况以及周围人类活动影响,根据监测井地下水埋深大小以及水文地质情况,选取具有代表性的 7 口监测井的水质作为样本进行水质评价;利用 2016 年的地下水实测数据,对其各月的检测数据取均值,具体各测点取值见表 3。

(2) 确定权重。指标权重确定参考文献 [12-14]。以总硬度计算过程为例,由参考文献 [12]求得客观权重 $\lambda_{\text{总硬度}} = 0.116$,根据参考文献

[13]求得主观权重 $\theta_{\text{总硬度}} = 0.198$,根据公式(11)计算得动态权重 $\omega_{\text{总硬度}} = 0.162$ 。同理可计算其他指标的动态权重。具体见表 4。

根据模糊可变集合理论,由表 2 构造差异函数计算的各项参数 (a, b, c, d, M) 取值矩阵,其中 M 值根据实际情况确定如下。对总硬度和 Ca^{2+} 取标准区间左、右端值,对中间其他的评价指标取区间中点值。具体计算如下:

表 1 不同级别所对应的含义^[15]

级 别	具体含义
I	主要反映地下水化学组分的天然低背景含量,适用于各种用途
II	主要反映地下水化学组分的天然背景含量,适用于各种用途
III	以人类健康基准值为依据,主要集中于生活以及工、农业用水
IV	以农业和工业用水为依据,除适用于农业和部分工业用水外,适当处理可作生活用水
V	不宜饮用,其他用水可根据使用目的选用

表 2 地下水水质评价标准^[15]

等级	总硬度(CaCO_3)	SO_4^{2-}	矿化度	Cl^-	Fe^{2+}	F	Ca^{2+}
I	150	50	300	50	0.1	1	50
II	300	150	500	150	0.2	1	100
III	450	250	1000	250	0.3	1	150
IV	550	350	2000	350	1.5	2	200
V	>550	>350	>2000	>350	>1.5	>2	>200

表 3 各测点实测值

监测井	总硬度(CaCO_3)	SO_4^{2-}	矿化度	Cl^-	Fe^{2+}	F	Ca^{2+}
1	126.10	47.00	352.00	78.00	0.23	1.5	70.00
2	396.32	73.82	457.21	49.68	0.02	0.80	45.00
3	208.05	45.21	1450.69	250.29	0.08	1.8	165.50
4	330.21	341.20	1593.65	148.00	0.88	1	85.55
5	345.00	158.65	249.98	27.62	1.05	1	35.00
6	451.00	250.01	785.60	195.09	1.17	1	125.35
7	468.31	155.85	1750.00	185.50	0.09	1.5	120.85

表 4 评价指标权重

权重	评价指标						
	总硬度(CaCO_3)	SO_4^{2-}	矿化度	Cl^-	Fe^{2+}	F	Ca^{2+}
客观权重(λ_i)	0.185	0.118	0.185	0.115	0.155	0.117	0.125
主观权重(θ_i)	0.195	0.140	0.115	0.155	0.125	0.120	0.150
动态权重(ω_i)	0.251	0.115	0.148	0.125	0.135	0.098	0.130

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} [0,150] & [150,300] & [300,450] & [450,550] & [550,1100] \\ [0,50] & [50,150] & [150,250] & [250,350] & [350,700] \\ [0,300] & [300,500] & [500,1000] & [1000,2000] & [2000,3000] \\ [0,50] & [50,150] & [150,250] & [250,350] & [350,700] \\ [0,0.1] & [0.1,0.2] & [0.2,0.3] & [0.3,1.5] & [1.5,3.0] \\ [0,1] & [1,1] & [1,1] & [1,2] & [2,3] \\ [0,50] & [50,100] & [100,150] & [150,200] & [200,300] \end{bmatrix}$$

$$I_{cd} = \begin{bmatrix} [0,300] & [0,450] & [150,550] & [300,1100] & [450,1100] \\ [0,150] & [0,250] & [50,350] & [150,700] & [250,700] \\ [0,500] & [0,1000] & [300,2000] & [500,3000] & [1000,3000] \\ [0,150] & [0,250] & [50,350] & [150,700] & [250,700] \\ [0,0.2] & [0,0.3] & [0.1,1.5] & [0.2,3] & [0.3,3.0] \\ [0,1] & [0,1] & [1,2] & [1,3] & [1,3] \\ [0,100] & [0,150] & [50,200] & [100,300] & [150,300] \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 225 & 375 & 500 & 1100 \\ 0 & 100 & 200 & 300 & 700 \\ 0 & 400 & 725 & 1500 & 3000 \\ 0 & 100 & 200 & 300 & 700 \\ 0 & 0.15 & 0.25 & 0.9 & 3.0 \\ 0 & 1 & 1 & 1.5 & 3 \\ 0 & 75 & 125 & 175 & 300 \end{bmatrix}$$

根据矩阵 I_{ab} 、 I_{cd} 、 M 判断评价指标落入 M 点的左侧还是右侧,根据公式(9)~(10) 计算评价指标对等级标准的差异函数 $D_A(A_{ih})$ 。其中 $i = 1, 2, \dots, 7$ 代表评价指标, $h = 1, 2, \dots, 5$ 为评价等级。

以监测井 1 计算过程为例,根据公式(9)~(10) 计算其相对差异度值。具体数值如下:

$$D_A(u_{ih})_{7 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.025 & -0.025 & 0 & 0 & 0 \\ 0.004 & -0.004 & 0 & 0 & 0 \\ -0.068 & 0.270 & 0 & 0 & 0 \\ -0.078 & 0.314 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.090 & 0.36 & -0.09 & 0 \\ 0 & 0 & -0.25 & 0 & -0.25 \\ 0.160 & 0.640 & -0.16 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

根据公式(12) 可计算其相对隶属度。具体数值如下:

$$\mu_A(u_{ih})_{7 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.513 & 0.488 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.502 & 0.498 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.466 & 0.635 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.461 & 0.657 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.455 & 0.680 & 0.455 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.375 & 0.5 & 0.375 \\ 0.580 & 0.820 & 0.420 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

按照此方法同理可计算出其他测点各指标对于不同级别的相对隶属度值。由公式(13) 可计算出测点 1 各指标对水质各等级的综合隶属度。

表 5 $P = 1, a = 1$ 监测井 1 对各级别的综合相对隶属度

等级	I	II	III	IV	V
$\mu'(u)$	0.504	0.572	0.502	0.494	0.488

同理可计算出参数的 4 种不同组合情况下,不同监测井对各等级的综合相对隶属度,具体数值见

表 6 所示。

表 6 不同监测点可变模糊综合评价结果

监测井	$a = 1, p = 1$	$a = 1, p = 2$	$a = 2, p = 1$	$a = 2, p = 2$	均值	水质级别
1	2.957	3.040	2.999	3.098	3.024	IV
2	3.121	3.055	2.800	3.025	3.000	IV
3	2.985	2.975	2.965	2.950	2.967	III
4	2.125	3.125	2.687	2.788	2.681	III
5	2.256	2.555	3.120	3.025	2.739	III
6	2.855	2.221	3.125	3.025	2.807	III
7	2.988	2.259	3.015	3.005	2.817	III

通过模型 4 种参数的组合计算,得到 4 种组合级别特征值均值。根据模糊集理论^[8] 关于级别特征值的论述,文中根据地下水实际情况确定水质等级评判标准为: $H < 2.0$ 为 I 级, $2.0 \leq H \leq 2.5$ 为 II 级, $2.5 \leq H \leq 3.0$ 为 III 级, $3.0 \leq H \leq 3.5$ 为 IV 级, $3.5 \leq H \leq 4.0$ 为 V 级。

3.5 讨论与分析

由表 6 可以看出,该地区监测井 1 和监测井 2 地下水水质级别为 IV 级,二监测井 3、4、5、6、7 水质级别为 III 级,考虑该地区水文地质情况、含水层情况以及人类活动的影响。通过分析认为:(1) 在监测井 1、2 水位埋深较大,蒸发程度小,常年受到周边基岩侧向径流补给,致使地下水水质较好。(2) 监测井 3、4、5、6、7 水位埋深较浅,蒸发作用对该地区地下水水质影响程度较大,水分由于蒸发作用而散发,致使地下水盐分增多,水质恶化。再加上周围人口密集,地下水开采量逐渐增多,破坏了地下水的天然承载能力,致使地下水水质恶化。

根据以上分析,利用动态可变模糊综合评判法对地下水水质进行评价,结果客观、可靠。

4 结 论

(1)文中运用动态可变模糊综合评判法对固原市地下水水质进行评价,充分考虑地下水各个指标的实际情况,在《地下水质量标准》(GB/T 14848-93)标准区间的划分基础上,构造适应于地下水实际情况的变动区间,通过建立非线性隶属度函数,客观合理的对该地区地下水水质进行评价。

(2)考虑到影响地下水水质的诸多物理化学生物因素具有很多不确定性,应用可变模糊评判法构造地下水水质评价模型,在确定各项评价指标的权重时引入指标动态权重,使得评价指标权重分配更加合理。

(3)文中结合该地区水文地质以及地下水资源空间分布情况,分析评价结果的科学性及合理性,结果表明基于动态可变模糊综合评判模型的评价结果客观、合理,具有较好的实用性和科学性。由于可变模糊综合评判法在确定隶属度函数时有一定的局限性,还需进一步优化处理以及深入研究。

参考文献:

- [1] 田 浪,刘永强,王 珍,等.基于物元可拓模型的灌区水资源综合效益评价[J].排灌机械工程学报,2016,34(4):351-356.
- [2] 孟宪萌,胡和平.基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用[J].水利学报,2009,40(3):257-262.
- [3] 白玉娟,殷国栋.地下水水质评价方法与地下水研究进展[J].水资源与水工程学报,2010,21(3):115-119.
- [4] 邱 林,李阿龙,武亚斐,等.可变模糊综合评价法在地下水水质评价中的应用[J].农业与技术,2015,35(12):252-253+256.
- [5] 孟宪萌,胡和平.基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用[J].水利学报,2009,40(3):257-262.
- [6] 兰双双,姜纪沂,王 滨.基于物元可拓法的地下水水质评价——以梨树县平原区浅层地下水为例[J].吉林大学学报,2009,39(4):722-727.
- [7] 张 宇,卢文喜,陈社明,等.基于T-S模糊神经网络的地下水水质评价[J].节水灌溉,2012(7):35-38.
- [8] Varol E, Aysen Davraz. Evaluation of the groundwater quality with WQI (Water Quality Index) and multivariate analysis: a case study of the Tefenni plain (Burdur/Turkey)[J]. Environment Earth Sciences, 2015, 73(4):1725-1744.
- [9] Singh B, Dahiya H, Jain S, et al. Use of fuzzy synthetic evaluation for assessment of groundwater quality for drinking usage: a case study of Southern Haryana, India[J]. Environmental Geology, 2008, 54(2):249-255.
- [10] 陈守煜.工程可变模糊集理论与模型——模糊水文水资源学数学基础[J].大连理工大学学报,2005,45(2):308-312.
- [11] 郭 瑜.水资源与防洪系统工程模糊集理论的应用研究[D].大连:大连理工大学,2006.
- [12] 肖俊龙,刘永强,田 浪,等.熵权模糊物元模型在节水灌溉综合效益评价中的应用[J].排灌机械工程学报,2016,34(9):809-814.
- [13] 李晓峰,刘宗鑫,彭清娥. TOPSIS 模型的改进算法及其在河流健康评价中的应用[J].四川大学学报,2011,43(2):14-21.
- [14] 李 英.宁南固原岩盐矿区地下水化学演化及循环规律研究[D].北京:中国地质大学,2015.
- [15] 马秉春.宁夏固原市水资源开发利用现状分析研究[J].水利技术监督,2011,19(6):34-37.
- [16] 闫 滨,钱静宇,郭 超.基于动态权重的综合指标权重确定及应用[J].沈阳农业大学学报,2014,45(1):58-61.
- [17] 陈雯婷.固原市地下水污染调查评价[D].天津:河北工业大学,2016.
- [18] 国家技术监督局. GB/T 14848-93 地下水质量标准[S].北京:国家技术监督局,1994.