

# 模糊模式识别模型在古交矿区汾河 支流水质评价中的应用

陈姣艳, 李洪建, 严俊霞, 杨永刚

(山西大学 黄土高原研究所, 山西 太原 030006)

**摘 要:** 汾河古交段是太原市地下水源地的主要补给区,污染比较严重,而其支流是污染源之一。本研究采用相关系数法确定指标权重,应用模糊模式识别模型对该段主要支流水质进行了综合评价。结果表明:该段汾河9条支流地表水质的级别特征值均在1~2之间,水质较好。大川河、狮子河、天池川3条支流的水质类别近似为Ⅰ类,其它6条支流的水质类别近似为Ⅱ类。该评价结果比较合理和客观,为汾河古交段水资源的污染控制和综合治理提供理论依据。

**关键词:** 水质评价; 模糊识别模型; 古交矿区; 汾河支流

中图分类号: X824

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)01-0096-05

## Application of fuzzy pattern recognition model in water quality assessment of Fenhe River tributary at Gujiao mining section

CHEN Jiaoyan, LI Hongjian, YAN Junxia, YANG Yonggang

(Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Gujiao mining section in Fenhe River is a main recharge area of groundwater source of Taiyuan, and the pollution in the section is more serious. The tributaries in the section is one of several pollution sources. The paper applied the fuzzy pattern recognition model with the method of correlation coefficient to determine the index weights so as to assess the water quality of the tributaries of Gujiao mining section in Fenhe River comprehensively. The results showed that the level characteristic value of water quality of nine tributaries is between 1 and 2, and the water quality of the section is better. The water quality level in Dachuan, Shizi and Tianchi river is approximate level I, and that of other 6 tributaries is level II. The evaluation result is reasonable and objective, which can provide academic reference for the pollution control and comprehensive management of water resources in Gujiao section of Fenhe river.

**Key words:** water quality assessment; fuzzy recognition model; Gujiao mining section; Fen River tributary

水质评价是水环境评价的重要内容,也是进行水环境治理和规划管理的重要环节。目前,常用的水质评价方法有:集对分析法<sup>[1]</sup>、人工神经网络法<sup>[2]</sup>、模糊综合评判法<sup>[3]</sup>和灰色聚类法<sup>[4]</sup>等。各种方法都有其特点与适用范围<sup>[5]</sup>,因而要根据研究区的实际情况选择合理的水质评价模型。河流水质评价,其范围广,动态性和随机性比较明显,存在一定的过渡性与连续性,模糊性较高。为了克服主观因素的干扰,很好地解决河流水质评价中客观存在的

模糊边界问题,本文应用模糊模式识别模型,基于相关系数法确定综合指标权重,对古交矿区汾河支流的水质进行综合评价,阐明其污染程度,掌握该段水质污染现状,以期为汾河古交段水环境保护和水质管理提供参考。

## 1 模糊模式识别理论与模型

### 1.1 指标相对隶属度公式

设有对水质评价A作识别的n个样本的m项指

收稿日期:2015-07-17; 修回日期:2015-08-28

基金项目:山西省科技厅软科学项目(2014041016-1); 国家国际科技合作专项项目(2012DFA20770)

作者简介:陈姣艳(1986-),女,山西曲沃人,在读硕士研究生,研究方向:区域生态学。

通讯作者:李洪建(1958-),男,山西洪洞人,教授,主要从事植物生理生态及水资源研究。

标特征值矩阵  $X = [x_{ij}]_{m \times n}$ ,各指标按  $c$  个水质级别的标准特征值进行识别,则有指标标准特征值矩阵  $Y = [y_{ih}]_{m \times c}$ 。根据相对隶属函数定义<sup>[6-7]</sup>,建立对研究区水质评价  $A$  进行识别的参考连续统。根据递减型与递增型指标的性质,确定  $A$  的两个极点 0 和 1,其指标与指标标准值相对隶属度  $r_{ij}$ 、 $S_{ih}$  公式如下:

$$r_{ij} = \begin{cases} 0, & x_{ij} \leq y_{ic} \text{ 或 } x_{ij} \geq y_{ic} \\ \frac{x_{ij} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}}, & y_{i1} > x_{ij} > y_{ic} \text{ 或 } y_{i1} < x_{ij} < y_{ic} \\ 1, & x_{ij} \geq y_{i1} \text{ 或 } x_{ij} \leq y_{i1} \end{cases} \quad (1)$$

$$S_{ih} = \begin{cases} 0, & y_{ih} = y_{ic} \\ \frac{y_{ij} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}}, & y_{i1} > y_{ij} > y_{ic} \text{ 或 } y_{i1} < y_{ij} < y_{ic} \\ 1, & y_{ih} = y_{i1} \end{cases} \quad (2)$$

1.2 综合指标及样本权重的确定

一般地,在水质评价中,各指标对模式识别的影响程度不同,故不同水质污染因子应具有不同的权重。考虑到各指标之间的关系、在水质污染中的“贡献”和各样本的污染状况,本文采用相关系数法<sup>[8-9]</sup>对各水质污染指标权重进行计算。

相关系数法计算公式:

$$V = (v_1, v_2, \dots, v_m)$$
$$= \left[ \frac{|r_1|}{\sum_{i=1}^m |r_i|}, \frac{|r_2|}{\sum_{i=1}^m |r_i|}, \dots, \frac{|r_m|}{\sum_{i=1}^m |r_i|} \right],$$
$$\sum_{i=1}^m v_i = 1 \quad (3)$$

式中:  $v_1, v_2 \dots, v_m$  为水质指标本身的权重;  $r_1, r_2, \dots, r_m$  为某水质污染物指标与各水质评价指标的相关系数。

综合指标及样本权重矩阵<sup>[10]</sup> 计算如下:

$$W = \begin{bmatrix} v_1 r_{11} & v_1 r_{12} & \dots & v_1 r_{1n} \\ v_2 r_{21} & v_2 r_{22} & \dots & v_2 r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_m r_{m1} & v_m r_{m2} & \dots & v_m r_{mn} \end{bmatrix} = (v_i r_{ij}) \quad (4)$$

将矩阵  $W$  中的元素按列进行归一化,可得:

$$\overline{W} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m1} & w_{m2} & \dots & w_{mn} \end{bmatrix} = (w_{ij})$$

$$\sum_{i=1}^m w_{ij} = 1, \quad \forall j \quad (5)$$

1.3 模糊模式识别模型<sup>[9-10]</sup>

将样本  $j$  中  $m$  个指标的相对隶属度  $r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{mj}$  分别与矩阵  $S$  中的第 1, 2,  $\dots, m$  行的行向量式逐一地进行比较,可得样本  $j$ 、 $m$  项指标的级别下限  $a_j$  与级别上限  $b_j$ 。

样本  $j$  隶属于  $h$  级水质标准的相对隶属度矩阵  $U = u_{hj}$ ,满足归一化约束条件

$$\sum_{h=a_j}^{b_j} u_{hj} = 1 \quad (6)$$

相同的水质污染指标在不同的样本中污染的程度不同,  $u_{hj}$  在模糊理论中可定义为权重,用加权广义权距离  $D_{hj}$  表示样本  $j$  与级别  $h$  之间的差异:

$$D_{hj} = u_{hj} d_{hj} = u_{hj} \left\{ \sum_{i=1}^m [w_{ij}(r_{ij} - S_{ih})]^p \right\}^{\frac{1}{p}},$$
$$h = a_j, \dots, b_j \quad (7)$$

式中:  $p$  为距离参数,  $p = 1$  为海明距离,  $p = 2$  为欧式距离;  $d_{hj}$  为广义权距离;  $w_{ij}$  为样本  $j$  指标  $i$  的权重。

通过建立目标函数  $\min\{F(u_{hj}) = \sum_{h=a_j}^{b_j} D_{hj}^2\}$  求解

样本  $j$  的最优相对隶属度  $u_{hj}$ 。

根据目标函数式、约束式构造拉格朗日函数解极值问题,最终求得样本  $j$  对水质评价  $A$  级别  $h$  的模糊模式识别模型的完整形式:

$$u_{hj} = \begin{cases} 0, & h < a_j \text{ 或 } h > b_j \\ \frac{1}{\sum_{i=a_j}^{b_j} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m [w_{ij}(r_{ij} - s_{ih})]^p}{\sum_{i=1}^m [w_{ij}(r_{ij} - s_{ih})]^p} \right\}^{\frac{2}{p}}}}, & a_j \leq h \leq b, d_{hj} \neq 0 \\ 1, & d_{hj} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

因而,样本  $j$  对水质评价  $A$  各级别的相对隶属向量为:

$$U_j = (u_{1j}, u_{2j}, \dots, u_{hj})$$

最后应用级别特征值公式

$$H_j = (1, 2, \dots, c) \times (u_{1j}, u_{2j}, \dots, u_{hj})^T \quad (9)$$

根据  $H_j$  的大小可得出最终的水质污染程度隶属级别<sup>[9-10]</sup>。

2 实例应用

2.1 汾河古交段支流概况

汾河古交段属于汾河地表水的一级防护区,全长 46 km,自西向东经过古交市,从李八沟一直到一步岩,汾河水库为其上游,下游进入汾河二库、上兰村水

源地,中间有原平川、屯兰川、天池河、磨石沟等季节性支流汇入其中<sup>[11]</sup>。作为太原市地下水源地的主要补给区,该段水质污染已经较严重,现大都在Ⅳ~Ⅴ级水平上,而该区支流是其污染的主要因素之一,其支流排入汾河的主要形式有排污沟、次级河流<sup>[11]</sup>。

从该研究区的实际情况出发,选取 2004 年该区 9 条支流的水质监测结果作为评价样本(见表 1),表中数据为年均值,摘自文献[11]。

| 表 1 古交矿区汾河支流水质监测成果表(2004) |                   |       |        |       |        |                |        | mg/L   |
|---------------------------|-------------------|-------|--------|-------|--------|----------------|--------|--------|
| 评价指标                      | COD <sub>Cr</sub> | 石油类   | 氨氮     | 挥发酚   | 氰化物    | F <sup>-</sup> | Pb     | Cd     |
| 大川河                       | 49.73             | 3.64  | 2.736  | 0.024 | 0.0034 | 0.4353         | 0.0011 | 0.039  |
| 屯兰川                       | 43.01             | 5.28  | 15.451 | 0.048 | 0.007  | 0.5684         | 0.014  | 0.004  |
| 原平川                       | 17.47             | 1.34  | 0.589  | 0.416 | 0.002  | 0.4035         | 0.0001 | 0.0029 |
| 狮子河                       | 125.82            | 0.000 | 2.544  | 0.024 | 0.006  | 0.3012         | 0.000  | 0.0018 |
| 矾石沟                       | 471.64            | 5.98  | 0.376  | 0.005 | 0.002  | 0.4486         | 0.0319 | 0.004  |
| 磨石沟                       | 200               | 3.65  | 7.893  | 0.019 | 0.0021 | 0.4507         | 0.0289 | 0.0063 |
| 半 沟                       | 72                | 46.30 | 1.460  | 0.021 | 0.0026 | 0.5263         | 0.0111 | 0.0079 |
| 长峪沟                       | 25                | 0.54  | 2.263  | 0.009 | 0.0018 | 0.3841         | 0.000  | 0.000  |
| 天池川                       | 462.87            | 2.895 | 0.859  | 0.016 | 0.003  | 0.4533         | 0.000  | 0.0013 |

## 2.2 汾河古交矿区支流水质模糊模式识别评价

### 2.2.1 建立指标特征值矩阵和指标标准值矩阵

由表 1 中的监测数据可建立指标标准值矩阵 X:

$$X = \begin{bmatrix} 49.73 & 43.01 & 17.47 & 125.82 & 471.64 & 200 & 72 & 25 & 462.87 \\ 3.64 & 5.28 & 1.34 & 0.000 & 5.98 & 3.65 & 46.3 & 0.54 & 2.895 \\ 2.736 & 15.451 & 0.589 & 2.544 & 0.376 & 7.893 & 1.46 & 2.263 & 0.859 \\ 0.024 & 0.048 & 0.416 & 0.024 & 0.005 & 0.019 & 0.021 & 0.009 & 0.016 \\ 0.0034 & 0.007 & 0.002 & 0.006 & 0.002 & 0.0021 & 0.0026 & 0.0018 & 0.003 \\ 0.4353 & 0.5684 & 0.4035 & 0.3012 & 0.4486 & 0.4507 & 0.5263 & 0.3841 & 0.4533 \\ 0.0011 & 0.014 & 0.0001 & 0.000 & 0.0319 & 0.0289 & 0.0111 & 0.000 & 0.000 \\ 0.039 & 0.004 & 0.0029 & 0.0018 & 0.004 & 0.0063 & 0.0079 & 0.000 & 0.0013 \end{bmatrix}$$

参照地表水环境质量标准(GB3838-2002)对该区的水质情况进行分析,评价指标标准限值如下(表 2):

| 表 2 地表水环境质量分类标准 |                   |      |        |       |       |                |      | mg/L  |
|-----------------|-------------------|------|--------|-------|-------|----------------|------|-------|
| 类型              | COD <sub>Cr</sub> | 石油类  | 氨氮     | 挥发酚   | 氰化物   | F <sup>-</sup> | Pb   | Cd    |
| Ⅰ               | ≤15               | 0.05 | ≤0.150 | 0.002 | 0.005 | ≤1.0           | 0.01 | 0.001 |
| Ⅱ               | ≤15               | 0.05 | 0.500  | 0.002 | 0.050 | 1.0            | 0.01 | 0.005 |
| Ⅲ               | 20                | 0.05 | 1.000  | 0.005 | 0.200 | 1.0            | 0.05 | 0.005 |
| Ⅳ               | 30                | 0.50 | 1.500  | 0.010 | 0.200 | 1.5            | 0.05 | 0.005 |
| Ⅴ               | 40                | 1.00 | 2.000  | 0.100 | 0.200 | 1.5            | 0.10 | 0.010 |

根据表 2 可得指标标准值矩阵 Y:

$$Y = \begin{bmatrix} 15 & 15 & 20 & 30 & 40 \\ 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.5 & 1.0 \\ 0.150 & 0.500 & 1.000 & 1.500 & 2.000 \\ 0.002 & 0.002 & 0.005 & 0.010 & 0.100 \\ 0.005 & 0.05 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.5 & 1.5 \\ 0.01 & 0.01 & 0.05 & 0.05 & 0.1 \\ 0.001 & 0.005 & 0.005 & 0.005 & 0.01 \end{bmatrix}$$

2.2.2 计算相对隶属度 由指标特征值矩阵 X 和公式(1)可计算出指标对水质评价 A 的相对隶属度(表 3)。

由指标标准值矩阵 Y 和公式(2)可计算出指标标准值对水质评价 A 的相对隶属度(表 4)。

2.2.3 求解综合指标权重 通过表 2 计算 COD<sub>Cr</sub>与各指标 COD<sub>Cr</sub>、石油类、氨氮、挥发酚、氰化物、F<sup>-</sup>、Pb、Cd 的相关系数  $R = (1.000, 0.978, 0.965, 0.866, 0.747, 0.926, 0.944, 0.838)$ ,由公式(3)归

一化得指标权向量  $V = (0.1377, 0.1346, 0.1328, 0.1192, 0.1028, 0.1275, 0.13, 0.1154)$ 。根据公式(4)得矩阵  $W$ 。

2.2.4 得出模糊模式识别结果 取距离参数  $p = 2$ ,将已知数据分别代入公式(8)、(9)得到级别隶属度向量与级别特征值(表5):

表 3 指标对 A 的相对隶属度

| 类型  | COD <sub>Cr</sub> | 石油类   | 氨氮    | 挥发酚   | 氰化物   | F <sup>-</sup> | Pb    | Cd    |
|-----|-------------------|-------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|
| 大川河 | 0                 | 0     | 0     | 0.776 | 1     | 1              | 1     | 0     |
| 屯兰川 | 0                 | 0     | 0     | 0.531 | 0.99  | 1              | 0.956 | 0.667 |
| 原平川 | 0.901             | 0     | 0.763 | 0     | 1     | 1              | 1     | 0.789 |
| 狮子河 | 0                 | 1     | 0     | 0.776 | 0.995 | 1              | 1     | 0.911 |
| 矾石沟 | 0                 | 0     | 0.878 | 0.969 | 1     | 1              | 0.757 | 0.667 |
| 磨石沟 | 0                 | 0     | 0     | 0.827 | 1     | 1              | 0.79  | 0.411 |
| 半 沟 | 0                 | 0     | 0.292 | 0.806 | 1     | 1              | 0.988 | 0.233 |
| 长峪沟 | 0.6               | 0.484 | 0     | 0.929 | 1     | 1              | 1     | 1     |
| 天池川 | 0                 | 0     | 0.617 | 0.857 | 1     | 1              | 1     | 0.967 |

表 4 指标标准值对 A 的相对隶属度

| 水质等级 | COD <sub>Cr</sub> | 石油类   | 氨氮    | 挥发酚   | 氰化物   | F <sup>-</sup> | Pb    | Cd    |
|------|-------------------|-------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|
| I    | 1                 | 1     | 1     | 1     | 1     | 1              | 1     | 1     |
| II   | 1                 | 1     | 0.811 | 1     | 0.769 | 1              | 1     | 0.556 |
| III  | 0.8               | 1     | 0.541 | 0.969 | 0     | 1              | 0.556 | 0.556 |
| IV   | 0.4               | 0.526 | 0.27  | 0.918 | 0     | 0              | 0.556 | 0.556 |
| V    | 0                 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0              | 0     | 0     |

$$W = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.1241 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0826 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1346 & 0 & 0 & 0 & 0.0651 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1013 & 0 & 0.1166 & 0 & 0.0388 & 0 & 0.0819 \\ 0.0925 & 0.0633 & 0 & 0.0925 & 0.1155 & 0.0986 & 0.0961 & 0.1107 & 0.1022 \\ 0.1028 & 0.1018 & 0.1028 & 0.1023 & 0.1028 & 0.1028 & 0.1028 & 0.1028 & 0.1028 \\ 0.1275 & 0.1275 & 0.1275 & 0.1275 & 0.1275 & 0.1275 & 0.1275 & 0.1275 & 0.1275 \\ 0.13 & 0.1243 & 0.13 & 0.13 & 0.098 & 0.1027 & 0.1284 & 0.13 & 0.13 \\ 0 & 0.077 & 0.0911 & 0.1051 & 0.077 & 0.0474 & 0.0269 & 0.1154 & 0.1116 \end{bmatrix}$$

按照公式(5) 对矩阵  $W$  进行归一化,得综合指标权重矩阵  $\overline{W}$ :

$$\overline{W} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.1834 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1125 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1945 & 0 & 0 & 0 & 0.0887 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1497 & 0 & 0.1829 & 0 & 0.0745 & 0 & 0.1248 \\ 0.2043 & 0.1282 & 0.1519 & 0.1478 & 0.1613 & 0.2146 & 0.1975 & 0.14 & 0.1567 \\ 0.2816 & 0.2581 & 0.1884 & 0.1842 & 0.2 & 0.2662 & 0.245 & 0.1737 & 0.1944 \\ 0.2871 & 0.2517 & 0.1921 & 0.1879 & 0.1537 & 0.2144 & 0.2467 & 0.1771 & 0.1982 \\ 0 & 0.1559 & 0.1346 & 0.1519 & 0.1208 & 0.099 & 0.0517 & 0.1572 & 0.1701 \end{bmatrix}$$

表 5 古交矿区汾河支流水质评价结果

| 汾河支流 | 隶属度向量                                            | 级别特征值          |
|------|--------------------------------------------------|----------------|
| 大川河  | $u_1 = (0.6732, 0.2910, 0.0203, 0.0095, 0.0059)$ | $H_1 = 1.3836$ |
| 屯兰川  | $u_2 = (0.4428, 0.4664, 0.0516, 0.0235, 0.0157)$ | $H_2 = 1.7029$ |
| 原平川  | $u_3 = (0.4898, 0.4519, 0.0358, 0.0145, 0.0080)$ | $H_3 = 1.599$  |
| 狮子河  | $u_4 = (0.7846, 0.1723, 0.0264, 0.0114, 0.0053)$ | $H_4 = 1.2805$ |
| 矾石沟  | $u_5 = (0.4328, 0.4876, 0.0495, 0.0193, 0.0107)$ | $H_5 = 1.6872$ |
| 磨石沟  | $u_6 = (0.4251, 0.4777, 0.0573, 0.0237, 0.0161)$ | $H_6 = 1.7277$ |
| 半沟   | $u_7 = (0.4371, 0.4794, 0.0476, 0.0223, 0.0136)$ | $H_7 = 1.6959$ |
| 长峪沟  | $u_8 = (0.6078, 0.2535, 0.0773, 0.0419, 0.0195)$ | $H_8 = 1.6118$ |
| 天池川  | $u_9 = (0.6599, 0.2550, 0.0494, 0.0235, 0.0122)$ | $H_9 = 1.4731$ |

分析表 5 结果可知:2004 年古交矿区汾河 9 条支流的级别特征值均在 1~2 之间,大川河、狮子河、天池川 3 条支流的水质近似为Ⅰ类,对古交段汾河有较轻度影响;其他 6 条支流的水质近似为Ⅱ类,对汾河古交段有轻度影响。总体上,2004 年汾河古交段各支流水质较好。这 9 条支流的非雨季水量主要来源于沿河密集分布的煤矿、铁厂、焦化厂、选煤厂等排放的工业废水和周边居民排放的生活污水。其污染程度由污染源强度的不同而不同。在各项污染指标中,COD<sub>Cr</sub>、石油类有机物对支流的污染贡献最大,其次是无机物氨氮。监测结果显示 SS 超标浓度也很高,是各支流沿岸分布煤矿所排放的矿坑水导致的。为了不影响太原居民的健康,应该落实国家及地方相关部门的方针政策,查找支流污染源,提高水资源利用率,结合各种生态措施,对研究区水质进行有效治理。

3 结 论

本文应用模糊模式识别模型对 2004 年古交段汾河支流水质监测成果进行分析,将相关系数法与污染因子超标状况相结合确定了综合指标权重,避免了主观因素的干扰,提高了评价模型的精度,评价结果比较合理和客观。该水质评价为太原居民饮用水安全提供了保障,同时对汾河古交段水系甚至整个汾河流域水环境的改善具有一定的现实意义。由于搜集到的监测数据有限,应该对古交段汾河支流继续跟踪,得到连续的、充分的数据,以期对该段水质进行动态分析和年际间趋势分析,从而对矿区汾河支流的整体情况进行综合评价。此外,水质监测数据显示各大支流中 SS 浓度很高,但地表水环境质

量标准(GB3838-2002)中没有设置悬浮物(SS)类别标准,因而没有将其纳入评价指标中,这在一定程度上会影响本次模型识别的准确性。同时,该模型还可以应用到其他环境质量评价和各种规划影响评价研究中。

参考文献:

[1] 李永乐,潘 登.熵权集对分析法在沁河水质评价中的应用[J].人民黄河,2012,34(6):56-60.

[2] 李 雪,刘长发,朱学慧,等.基于 BP 神经网络的海水水质综合评价[J].海洋通报,2010,29(2):225-230.

[3] 张永珍,刘 玲.模糊综合评判法在水质评价中的应用——以松花江流域为例[J].环境科学与管理,2011,36(3):163-165.

[4] 张 旭,江长胜,郝庆菊.灰色聚类法在重庆北碚区境内支流水质评价中的应用[J].中国农学通报,2010,26(2):241-245.

[5] 张宏富.基于指标规范值的综合水质标识指数法[J].成都信息工程学院学报,2013,28(1):85-89.

[6] 陈守煜.工程模糊集理论与应用[M].北京:国防工业出版社,1998:30-58.

[7] 陈守煜.系统模糊决策理论与应用[M].大连:大连理工大学出版社,1994.

[8] 吕明捷,杜 云,荣 超,等.基于相关系数定权的集对分析法在湖泊富营养化评价中的应用[J].南水北调与水利科技,2011,9(1):96-98+138.

[9] 周维博,郭小砾.塔里木河水质模糊模式识别评价[J].水资源保护,2007,23(4):33-36.

[10] 景晓林.济南市锦绣川水库水质评价及风险分析[D].济南:济南大学,2014:13-34.

[11] 徐晓毅.汾河古交段水质现状评价及污染物总量控制规划研究[D].合肥:合肥工业大学,2007.