

# 地下水环境质量评价 —基于粗糙集理论和灰色关联系数矩阵的TOPSIS模型

许峰<sup>1</sup>, 秦成<sup>2</sup>

(1. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 西安 710054; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039)

**摘要:** 提出用粗糙集(RS)理论的属性约简筛选地下水环境质量评价指标,通过主客观组合赋权确定各评价指标的权重,再利用理想解法(TOPSIS)和灰色关联度相结合的方法确定各样本的相对贴近度,从而建立了地下水环境质量评价的RS-TOPSIS模型。将RS-TOPSIS模型应用于淮河流域某研究区的地下水环境质量评价,结果表明,13个采样点中水质为Ⅱ类、Ⅲ类、Ⅳ类的采样点各有两个,其余各采样点为Ⅴ类,与未约简指标通过理想解法和灰色关联度相结合的评价模型得出的结果是一致的。

**关键词:** 粗糙集;理想解法;灰色关联度;水质评价;淮河流域

**中图分类号:** P641   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2015)06-1097-04

## Evaluation of groundwater environment quality based on rough set and TOPSIS model of gray correlation coefficient matrix

XU Feng<sup>1</sup>, QIN Cheng<sup>2</sup>

(1. CCTEG Xi'an Research Institute, Xi'an 710054, China;

2. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China)

**Abstract:** Attribute reduction of rough set (RS) theory was applied to select the evaluation indexes of groundwater environment quality. AHP and entropy methods were used to decide the weight of each evaluation index, and the relative similarity degree of each sample was determined based on the combination method of TOPSIS and gray correlation. Then, the RS-TOPSIS model was developed to perform the evaluation of groundwater environment quality. The evaluation model was applied to assess groundwater environment quality in the Huaihe River Basin. The results showed that among 13 groundwater sampling sites, 2 sampling sites belong to level I, II, and III respectively and the remaining 5 sampling sites belong to level IV, which is consistent with the results obtained from the evaluation model with TOPSIS and gray correlation.

**Key words:** rough set theory; TOPSIS; gray correlation; water quality evaluation; Huaihe River Basin

作为地下水环境保护和治理的一项基础性工作,地下水环境质量评价是进行地下水环境管理的重要手段之一。随着测试手段和计算技术的发展,水质评价的方法也在日益增多,如:灰色关联法、模糊评判法、层次分析法、人工神经网络法<sup>[1-6]</sup>。然而由于地下水环境质量评价指标繁多而带来的评价工作量大、计算复杂、评价主观性强;水质指标信息的如何最大利用以及水质评价中权重的确定,这些都是水质评价工作过程中所要面临和解决的问题。

针对上述问题,本文拟首先利用粗糙集理论中的属性约简方法对评价指标进行筛选,其次利用约简后的指标构成最初的评价矩阵并构造多指标问题的理想解,计算各方案与理想方案的灰色关联系数矩阵,以灰色关联系数矩阵作为新的决策矩阵,再利用TOPSIS法进行方案排序<sup>[7-12]</sup>。通过对淮河流域某研究区进行实证研究,得出了比较合理的评价结果。

## 1 评价指标的约简

### 1.1 约简思路

水环境质量评价中多指标会导致评价工作的繁杂,因此需要在不影响评价结果的基础上,采用粗糙集理论对水质评价指标进行约简。

粗糙集理论是建立在分类机制的基础上的,它将分类理解为在特定空间上的等价关系,而等价关系构成了对该空间的划分。知识约简是粗糙集理论的核心问题之一,它是基于知识的分类能力不变的前提下的约简<sup>[13]</sup>。具体的思路如下:

步骤1 建立评价指标信息系统。根据粗糙集理论,在做任何粗糙集计算之前,都应建立一个信息系统  $S = \{U, A,$

$V, f\}$ 。其中  $U$  为对象的非空有限集合, 称为论域;  $A = C \cup D$  是属性集合, 子集  $C$  和子集  $D$  分别称为条件属性和决策属性;  $V$  是对象属性的值域;  $f$  是信息函数, 指定每个对象属性的属性值。具体到本次研究中, 则是建立一个评价指标信息系统, 条件属性  $C$  在本次研究中为各指标, 这里进行属性约简, 不用建立决策属性。

步骤 2 数值离散。粗糙集的数学基础是集合论, 难以直接处理连续型的属性值, 一般要求由实际数据构成的信息系统中各个属性值必须用离散值表达。因此粗糙集计算中需要对所有的数据进行离散后方能计算。目前对连续数据进行离散化的方法有多种: 等距离划分、等频率划分, 但是使用这些方法需用户对数据特征有较清楚的认识, 所以本文采用具有动态聚类特性和一定的自适应性的  $K$ -均值聚类算法对连续数据进行离散化。

步骤 3 约简指标。识别和删除无助于给定训练数据分类的属性即冗余的指标。

### 1.2 粗糙集理论

波兰学者 Pawlak Z1982 年提出粗糙集理论, 该理论基于分类机制的基础, 将分类理解为在特定空间上的等价关系, 而等价关系构成了对该空间的划分。属性(知识) 约简是粗糙集理论的核心问题之一, 是基于知识的分类能力不变前提下的约简<sup>[7-12]</sup>。

定义 1: 令  $R$  为一族等价关系,  $r \in R$ , 如果  $\text{ind}(R) = \text{ind}(R - r)$ , 则称  $r$  为  $R$  中不必要的; 否则称  $r$  为  $R$  中必要的。如果每一个  $r \in R$  都为  $R$  中必要的, 则称  $R$  为独立的; 否则称  $R$  为依赖的。

定义 2: 设  $Q \subseteq P$ , 如果  $Q$  是独立的, 且  $\text{ind}(Q) = \text{ind}(P)$ , 则称  $Q$  为  $P$  的一个约简。

### 1.3 K-均值聚类算法

粗糙集理论易于处理离散数据, 然而应用中大部分数据都是连续的。要实现连续数据的粗糙集约简处理, 前提就是要寻求将连续数据进行离散化的方法, 将连续数据离散成有限的语义变量或符号。为此, 这里引用了具有动态聚类特性和一定的自适应性的  $K$ -均值聚类算法对连续数据进行离散化, 其算法如下<sup>[18]</sup>。

(1) 选取  $K$  个聚类中心:  $Z_1^1, Z_2^1, \dots, Z_k^1$  (上角数字为聚类中的迭代次数)。

(2) 对于样本  $X$  (设进行到第  $K$  次迭代) 如果  $|X - Z_j^k| < |X - Z_i^k|$  则  $X \in S_j^k$ , 其中  $S_j^k$  是以  $Z_j^k$  为聚类中心的样本集。

(3) 计算各聚类中心的新向量值。

$$Z_j^{k+1} = \frac{1}{n_j} \sum_{x \in S_j^k} X, (j = 1, 2, \dots, k)$$

式中:  $n_j$  为  $S_j$  所包含的样本数。

(4) 如果  $Z_j^{k+1} \neq Z_j^k, j = 1, 2, \dots, k$ , 则回到第二步, 将全部样品重新分类, 重新迭代计算。

如果  $Z_j^{k+1} = Z_j^k, j = 1, 2, \dots, k$ , 则结束。

数据样本在应用  $K$  均值聚类后, 可将样本数据对应的离散类别作为该数据对应的离散类别。

## 2 水质评价模型建立的基本思路

设有  $m$  个评价对象, 经上述粗糙集理论约简后有  $n$  个评

价指标, 则得到最初的评价矩阵:  $X = (x_{ij})_{m \times n}$

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

### 2.1 指标权重的确定

对决策指标进行赋权是理想解法的一个前提工作, 这里采用主观与客观组合赋权的方式给决策指标进行赋权, 因此专家的主观经验和较强的数学理论依据相结合使得指标赋权更加合理, 其基本思路如下。

(1) 利用 AHP 法确定主观权重向量  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \dots)$ 。具体计算过程本文从略<sup>[14-15]</sup>

(2) 将最初的决策矩阵标准化后, 利用熵值法确定指标的客观权重向量  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \dots)$ 。具体计算过程本文从略<sup>[16-17]</sup>

(3) 将上述主、客观赋权法确定的权重向量对应相乘, 然后归一化, 其公式如下:

$$\omega_j = \frac{\alpha_j \times \beta_j}{\sum_{j=1}^n \alpha_j \times \beta_j} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中:  $\alpha_j$  和  $\beta_j$  分别为利用 AHP 和熵值法确定的第  $j$  个指标的权重<sup>[18]</sup>。

### 2.2 基于灰色关联分析的 TOPSIS 评价步骤

步骤 1 灰色关联系数矩阵的确定。

(1) 通过向量归一化方法对决策矩阵  $X = (x_{ij})_{m \times n}$  标准化处理, 得到标准矩阵  $B = (b_{ij})_{m \times n}$ , 其中,

$$b_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n \quad (3)$$

(2) 计算加权标准化矩阵  $U$  公式如下:

$$U = (u_{ij})_{m \times n} = (\omega_j b_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1(1) & u_1(2) & \dots & u_1(n) \\ u_2(1) & u_2(2) & \dots & u_2(n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_m(1) & u_m(2) & \dots & u_m(n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $\omega_j$  为组合赋权的指标权重。

(3) 确定理想解  $U_0$ 。

$$U_0 = \left\{ \begin{matrix} \max_{1 \leq i \leq m} u_i(j) / j \in J^+, \min_{1 \leq i \leq m} u_i(j) / j \in J^- \\ \{u_0(1), u_0(2), \dots, u_0(j), \dots, u_0(n)\} \end{matrix} \right\} = \quad (5)$$

式中:  $J^+$  是值越大越好的指标集合, 即“效益型”指标;  $J^-$  是值越小越好的指标集合, 即“成本型”指标。

(4) 计算第  $i$  个方案与理想解关于第  $j$  个指标的灰色关联系数  $r_i(j)$  如下:

$$r_i(j) = \frac{m + \xi M}{V_i(k) + \xi M} \quad \xi \in (0, 1) \quad (6)$$

式中:  $V_i(k) = |u_0(k) - u_j(k)|, m = \min_i \min_k V_i(k), M = \max_i \max_k V_i(k)$ 。  $\xi$  为分辨系数, 一般取值 0.5。则各方案与理想方案的灰色关联系数矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} r_1(1) & r_1(2) & \dots & r_1(n) \\ r_2(1) & r_2(2) & \dots & r_2(n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_m(1) & r_m(2) & \dots & r_m(n) \end{bmatrix}$$

步骤2 以灰色关联系数矩阵  $R$  为新的决策矩阵构造理想解模型。

(1) 确定理想和负理想解。

$$r_0^+ = \left\{ \max_{1 \leq i \leq m} r_i(j), j = 1, 2, \dots, n \right\} = \left\{ r_0^+(1), r_0^+(2), \dots, r_0^+(j), \dots, r_0^+(n) \right\} \quad (7)$$

$$r_0^- = \left\{ \min_{1 \leq i \leq m} r_i(j), j = 1, 2, \dots, n \right\} = \left\{ r_0^-(1), r_0^-(2), \dots, r_0^-(j), \dots, r_0^-(n) \right\} \quad (8)$$

(2) 计算第  $i$  个方案到理想解和负理想解的距离。

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n [r_i(j) - r_0^+(j)]^2} \quad (1 \leq i \leq m) \quad (9)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n [r_i(j) - r_0^-(j)]^2} \quad (1 \leq i \leq m) \quad (10)$$

(3) 计算各方案的相对贴近度。

$$C_i^* = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (1 \leq i \leq m) \quad (11)$$

(4) 最后按照贴近度的大小对方案进行排序。贴近度越大方案越优, 贴近度越小方案越劣。

### 3 实例分析

以淮河流域某研究区 13 个采样点的地下水水质为例, 监测的指标有氟、亚硝酸盐、硝酸盐、总砷、钴、锰、PAHs、敌敌畏、阿特拉津和马拉硫磷。

#### 3.1 指标约简

因指标较多, 首先利用第 1 节中的步骤进行指标的约简。

根据步骤 1 建立评价指标信息系统, 即各采样点实测数据见表 1。

表 1 评价指标信息系统

Tab. 1 Information system of evaluation indexes

采样点	氟	亚硝酸盐氮	硝酸盐	总砷	钴	锰	PAHs	敌敌畏	阿特拉津	马拉硫磷
S1	0.23	0.006	25.3	1.5	0.003 4	0.002 47	0.23	0.02	0.004	0.124
S2	0.41	0.009	54.5	1.5	0.003 4	0.003 21	0.17	0	0	0.094
S3	0.51	0.005	17.9	1	0.003 73	0.003 21	0.203	0	0.008	0.088
S4	0.2	0.004	57.2	1	0.003 48	0.138	0.75	0.02	0	0
S5	0.23	0.006	0.346	1	0.003 29	0.361	0.495	0.019	0.005	0.099
S6	0.51	0.009	27.9	1.5	0.003 81	0.003 74	0.421	0	0.172	0.017
S7	0.3	0.014	70.3	1	0.004 39	1.98	0.378	0	0	0.07
S8	0.45	0.014	8.36	1	0.003 42	1.19	0.259	0.019	0.005	0.069
S9	0.53	0.008	13.9	1	0.003 61	0.548	0.282	0	0	0.058
S10	0.21	0.008	11.6	1	0.004 09	0.016	0.442	0.019	0	0.076
S11	0.31	0.003	1.71	1	0.003 91	0.002 55	0.309	0	0	0.067
S12	0.44	0.003	3.8	1	0.003 94	0.005 16	0.441	0.019	0.066	0.077
S13	0.33	0.03	0.889	1	0.003 53	0.141	0.588	0.019	0	0.07

$U = \{S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S11, S12, S13\}$ , 条件属性  $C$  为各指标。

根据步骤 2 采用  $K$ -均值聚类的方法将数据离散化。利用表 1 数据, 采用 SPSS 软件, 可计算各个聚类中心  $R1(0.38, 0.30)$ ,  $R2(0.009, 0.009)$ ,  $R3(11.2, 60.7)$ ,  $R4(1.1, 1.2)$ ,  $R5(0.0037, 0.0038)$ ,  $R6(0.227, 0.707)$ ,  $R7(0.37, 0.43)$ ,  $R8(0.01, 0.01)$ ,  $R9(0.026, 0.00)$ ,  $R10(0.075, 0.055)$ , 其中  $R$  代表各评价指标。依据此聚类中心将各指标数据离散为两类数据, 用数字“1”和“2”来表示所划分的类别。离散后的数据见表 2。

表 2  $K$ -均值离散化后的样本数据

Tab. 2 Sample data by  $K$ -means clustering

采样点	氟	亚硝酸盐氮	硝酸盐	总砷	钴	锰	PAHs	敌敌畏	阿特拉津	马拉硫磷
S1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	1
S2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	1
S3	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1
S4	2	1	2	1	1	1	2	2	2	2
S5	2	1	1	1	1	1	2	2	2	1
S6	1	1	1	2	2	1	2	1	1	2
S7	2	2	2	1	2	2	1	1	2	1
S8	1	2	1	1	1	2	1	2	2	1
S9	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2
S10	2	1	1	1	2	1	2	2	2	1
S11	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1
S12	1	1	1	1	2	1	2	2	2	1
S13	2	2	1	1	1	1	2	2	2	1

得到表 2 的离散数据后就可以进行属性约简, 删除冗余指标。综合考虑后得到比较理想的约简后指标为: 氟, 亚硝酸盐氮, 硝酸盐, 总砷, 钴和锰, 这 6 个指标组成集合  $Q$ 。利用集合  $Q$  对空间的划分与集合  $P$  是一致的, 因此, 依据粗糙集理论定义 2 可知  $Q$  为  $P$  的一个约简。

#### 3.2 原始决策矩阵的建立

根据《地下水环境质量标准》的规定, 将水质标准分为 5 级, 其评价标准见表 3。

表 3 地下水评价标准

Tab. 3 Evaluation standard of groundwater quality

级别	氟	亚硝酸盐氮	硝酸盐	总砷	钴	锰
$\tilde{N}$	1	0.001	2	0.005	0.005	0.05
$\hat{0}$	1	0.01	5	0.05	0.05	0.05
$\acute{0}$	1	0.02	20	0.05	0.05	0.1
$\hat{0}$	2	0.1	30	1	1	1
$\bar{0}$	2	0.1	30	1	1	1

将表 3 中各分级标准值与约简后指标值一起形成推广矩阵, 构成原始的决策矩阵  $X = (x_{ij})_{m \times n}$ ,  $1 \leq i \leq 18$ ,  $1 \leq j \leq 6$ 。

#### 3.3 确定权重

根据 AHP 法以及熵值法得到的指标主客观权重分别为  $\alpha_j = (0.066, 0.383, 0.0426, 0.2468, 0.159, 0.1025)$ ,  $\beta_j = (0.0286, 0.1181, 0.2614, 0.0087, 0.0018, 0.5813)$ 。然后依

据公式(2) 计算得组合权重:  $\omega_j = (0.0157, 0.3762, 0.0925, 0.0178, 0.0024, 0.4954)$ 。

### 3.4 确定相对贴进度

根据式(3) - 式(11) 计算得贴进度为  $C^* = (0.8756, 0.7925, 0.9048, 0.7689, 0.7170, 0.8462, 0.3748, 0.4625, 0.6224, 0.8880, 0.9607, 0.9577, 0.6720, 0.9462, 0.8640, 0.8731, 0.2049, 0.2049)$

各采样点与污染标准相对贴进度对比后可知: S11 与 S12 水质最好为  $\bar{N}$  类, S1、S3 为  $\bar{0}$  类, S2、S10 为  $\bar{0}$  类, 其余各采样点为  $\bar{0}$  类, 这与未约简指标通过水质评价模型得出的结果是一致的(表 4)。

表 4 采样点所属类别对比

采样点	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
约简后所属类别	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{N}$	$\bar{N}$	$\bar{0}$
未约简所属类别	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{N}$	$\bar{N}$	$\bar{0}$

## 4 结论

(1) 应用粗糙集理论方法对原始的指标进行了约简, 且在数值离散中结合了  $K$ -均值聚类法, 约简后的指标进行评价的结果与未约简的指标得出的评价结果是一致的, 因此在不影响评价结果的基础上很大程度的减轻了评价工作的繁琐度。

(2) 应用基于灰色关联系数的 TOPSIS 评价模型对约简后的指标进行了评价, 其计算思路清晰, 充分挖掘了数据的内在规律, 并且引入了组合赋权的方法, 避免了权重计算时过于主观和客观。因此两者得结合使得地下水质量评价更加的科学与准确。

(3) 粗糙集理论和理想解法相耦合的 RS TOPSIS 评价模型思路清晰、计算简便、评价结果合理, 可应用于多指标项目的决策以及水资源承载力评价等方面, 具有广泛的应用前景。

### 参考文献(References):

[1] 门宝辉, 梁川. 水质量评价的物元分析法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(3): 358-361. (MEN Bao hui, LIANG Chuan. Matter element method for evaluating water quality[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(3): 358-361. (in Chinese))

[2] 李正最. 区域水环境质量模糊灰色评价探讨[J]. 水资源保护, 1998, (1): 37-42. (LI Zheng zui. Fuzzy-grey evaluation model study of regional water environment quality[J]. Water Resources Protection, 1998, (1): 37-42. (in Chinese))

[3] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8): 2041-2046. (LIU Si feng, CAI Hua, YANG Ying jie, et al. Advance in grey incidence analysis modelling[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2013, 33(8): 2041-2046. (in Chinese))

[4] 曹洪洋, 王禹, 满兵. 基于改进灰色关联分析的泥石流危险性评价[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 13(1): 31-34. (CAO Hong yang, WANG Yu, MAN Bing. Risk evaluation of potential debris flow based on the improved grey correlation method[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 13

(1): 31-34. (in Chinese))

[5] 刘博, 肖长来, 田浩然, 等. 灰色关联和层次分析法在地下水评价中的应用——以吉林市为例[J]. 节水灌溉, 2013, (1): 26-29. (LIU Bo, XIAO Chang lai, TIAN Hao ran, et al. Application of Method Combining Grey Relation with Analytic Hierarchy Process for Groundwater Quality Evaluation in Jilin City [J]. Water saving Irrigation, 2013, (1): 26-29. (in Chinese))

[6] 徐兵兵, 张妙仙, 王肖肖. 改进的模糊层次分析法在南苕溪临安段水质评价中的应用[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9): 2066-2072. (XU Bing bing, ZHANG Miao xian, WANG Xiao xiao. Application of an improved fuzzy analytic hierarchy process in water quality evaluation of the South Tiaoxi River, Lin'an Section [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(9): 2066-2072. (in Chinese))

[7] 孙晓东. 基于灰色关联分析的几种决策方法及应用[D]. 青岛: 青岛大学, 2006. (SU N Xiao dong. Some decision methods and Applications based on grey incidence analysis [D]. Qingdao: Qingdao University, 2006. (in Chinese))

[8] 张军, 梁川. 基于灰色关联系数矩阵的 TOPSIS 模型在水环境质量评价中的应用[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(4): 97-101. (ZHANG Jun, LIANG Chuang. Application of TOPSIS Model Based on Gray Correlation Coefficient Matrix in the Evaluation of Water Environmental Quality [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(4): 97-101. (in Chinese))

[9] 李灿, 张凤荣, 朱泰峰, 等. 基于熵权 TOPSIS 模型的土地利用绩效评价及关联分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 217-227. (LI Can, ZHANG Feng rong, ZHU Tai feng, et al. Evaluation and correlation analysis of land use performance based on entropy weight TOPSIS method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(5): 217-227. (in Chinese))

[10] 龚剑, 胡乃朕, 崔翔, 等. 基于 AHP TOPSIS 评判模型的岩爆倾向性预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1442-1448. (GONG Jian, HU Nai zhen, CUI Xiang, et al. Rockburst tendency prediction based on ahp topsis evaluation model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1442-1448. (in Chinese))

[11] 韦俊敏, 胡宝清. 基于改进 TOPSIS 法的土地整治合理性评价——以广西农垦国有金光等 4 个农场为例[J]. 资源科学, 2013, 35(7): 1407-1414. (WEI Jun min, HU Bao qing. Reasonability degree evaluation of land consolidation based on improved topsis method a case study of Guangxi Jinguang etc Four Farms [J]. Resources Science, 2014, 33(7): 1442-1448. (in Chinese))

[12] 杨皓翔, 梁川, 侯小波. 改进的 TOPSIS 模型在地下水水质评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5): 51-55. (YANG Hao xiang, LIANG Chuan, HOU Xiao bo. Application of improved topsis model in the comprehensive evaluation of groundwater quality [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(5): 51-55. (in Chinese))

[13] 李升. 地下水环境健康预警研究——以黄河下游悬河段(河南)为例[D]. 长春: 吉林大学, 2008. (LI Shen, Study on groundwater environment health early-warning A case study of Yellow River lower reaches suspend river section (Henan Province) [D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese))

(下转第 1109 页)

- Lin, QIU Xir yun, NIE Jin, et al. Experiment on the water sediment separation by turbid water hydraulic separation device Based on drip irrigation[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010, 21(6): 37-40. (in Chinese)
- [3] 邱秀云, 龚守远, 严跃成, 等. 一种新型水沙分离装置的研究[J]. 新疆农业大学学报, 2007, 30(1): 68-70. (QIU Xir yun, GONG Shou yuan, YAN Yao cheng, et al. The research on a new separator device for water sediment[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2007, 30(1): 68-70. (in Chinese))
- [4] 严跃成, 邱秀云, 张翔, 等. 两相流分离鳃泥沙下沉通道宽度对水沙分离影响的试验研究[J]. 新疆农业大学学报, 2011, 34(6): 526-528. (YAN Yao cheng, QIU Xir yun, ZHANG Xiang, et al. Experimental study on influence of sediment settling access width in two phase flow separation device on water sediment separation. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2011, 34(6): 526-528. (in Chinese))
- [5] 朱超, 邱秀云. 垂向异重流式分离鳃适用泥沙的试验研究[J]. 人民长江, 2009, 40(5): 60-61. (ZHU Chao, QIU Xir yun. Experimental study of sediment on vertical density flow gill piece separation device[J]. Yangtze River, 2009, 40(5): 60-61. (in Chinese))
- [6] 陶洪飞, 邱秀云, 李巧, 等. 不同鳃片间距下的分离鳃内部流场三维数值模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 183-189. (TAO Hong fei, QIU Xir yun, LI Qiao, et al. 3-D numerical simulation of internal flow field in gill piece separation device under different gill piece spacing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014(6): 183-189. (in Chinese))
- [7] 陶洪飞, 邱秀云, 何照青, 等. 含沙量对分离鳃的水沙分离影响试验[J]. 水电能源科学, 2013, 31(7): 93-95. (TAO Hong fei, QIU Xir yun, HE Zhao qing, et al. Sediment concentration on water sediment separation effect test of separation device[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(7): 93-95. (in Chinese))
- [8] 陶洪飞, 邱秀云, 赵丽娜, 等. 水沙分离鳃内部流场数值模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 38-46. (TAO Hong fei, QIU Xir yun, ZHAO Li na, et al. Numerical simulation and PIV display of internal flow field in gill piece separation device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(17): 38-46. (in Chinese))
- [9] 江帆, 黄鹏. FLUENT 高级应用与实例分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010. (JIANG Fan, HUANG Peng. FLUENT Advanced Applications and Case Analysis[M]. Beijing: Tsinghua Press, 2010. (in Chinese))
- [10] 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2003: 193-207. (REN Lu quan. Optimum design and analysis of experiments[M]. Second Edition. Beijing: Higher Education Press, 2003: 193-207 (in Chinese))
- [11] 侯杰, 赵涛, 牧振伟, 等. 悬栅消能率的 PPR 因子贡献率分析及优化仿真[J]. 水力发电, 2005, 31(2): 38-40. (HOU Jie, ZHAO Tao, MU Zhen wei, et al. Analysis and optimization simulation of PPR factors contribution ratio of suspension girder dumping ratio[J]. Water Power, 2005, 31(2): 38-40. (in Chinese))
- [12] 冯勇, 何建新, 刘亮, 等. 冻融循环作用下细粒土抗剪强度特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(6): 1013-1017. (FENG Yong, HE Jian xin, LIU Liang, et al. Experimental Study of the Shear Strength Characteristics of Fine Grained Soil under Freezing and Thawing Cycles[J]. Journal of glaciology and geocryology, 2008, 30(6): 1013-1017. (in Chinese))
- [13] 何建新, 郭鹏飞, 刘录录, 等. 阳离子乳化沥青混凝土配合比设计的优选方法研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(3): 96-98. (HE Jian xin, GUO Peng fei, LIU Lu lu, et al. Study on Optimal Method for Mix Design of Cation Emulsified Asphalt Concrete[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013, 11(3): 96-98. (in Chinese))
- [14] 吴素芬, 韩萍, 李燕, 等. 塔里木河源流水资源变化趋势预测[J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 708-711. (WU Shu fen, HAN Ping, LI Yan, et al. Predicted Variation Tendency of the Water Resources in the Headwaters of the Tarim River[J]. Journal of glaciology and geocryology, 2003, 25(6): 708-711. (in Chinese))
- [15] 周新民, 李嘉, 赵文谦, 等. 确定固液两相流扩散系数的投影追踪模型[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2001, 16(2): 175-180. (ZHOU Xin min, LI Jia, ZHAO Wen qian, et al. Project pursuit regression model for diffusion coefficient of suspended particles in liquid solid two phase flow[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser A, 2001, 16(2): 175-180. (in Chinese))

(上接第 1100 页)

- [14] 董智. 基于层次分析法的城市电网电缆化改造的研究[D]. 天津: 天津大学. 2005. (DONG Zhi. Power network and cable transformation of city based on AHP[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese))
- [15] 朱茵, 孟志勇. 用层次分析法计算权重[J]. 北方交通大学报, 1999, 23(5): 119-122. (ZHU Yin, MENG Zhi yong. Determination of weight value by AHP[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 1999, 23(5): 119-122. (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 Xian qi, LIANG Chuan. 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] 陈昊, 杨俊安, 庄镇泉. 变精度粗糙集的属性核和最小属性约简算法[J]. 计算机学报, 2012, 35(5): 1011-1017. (CHEN Hao, YANG Jun an, ZHUANG Zhen quan. The core of attributes and minimal attributes reduction in variable precision rough set[J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(5): 1011-1017. (in Chinese))
- [18] 徐袭, 祝力, 范学鑫. 基于粗糙集与 K-均值聚类的故障知识挖掘[J]. 微计算机信息, 2007, 23(5-3): 141-143. (XU Xi, ZHU Li, FAN Xue xin. Fault Knowledge mining based on rough set and k-means clustering[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(5-3): 141-143. (in Chinese))