

# 基于独立性权 - 灰色局势决策理论的突水水源判别研究

崔雨\*, 刘启蒙, 谢志钢, 朱敬忠

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南  
Email: \*1750394718@qq.com

收稿日期: 2021年5月15日; 录用日期: 2021年6月17日; 发布日期: 2021年6月25日

## 摘要

矿井水害事故的发生往往会造成重大人员伤亡和财产损失, 为有针对性地投入到水害治理工作中, 快速准确地判别突水水源显得至关重要。选取淮南潘谢矿区某矿第四系孔隙水、二叠煤系砂岩水、石炭系太原组灰岩水等三类水样, 进行水质分析, 采用灰色系统理论, 分析各种离子与水样的内在规律, 综合求出突水水源目标测度的计算公式, 再应用独立性权确定各判别因素的权重, 从而将多因子判别归结于单目标决策。结果表明: 三类水质(第四系孔隙水、二叠煤系砂岩水、石炭系太原组灰岩水)判别准确率依次为75%, 83%, 71%。将灰色决策方法应用到矿井突水水源识别中, 具有准确、方便和快捷的特点。

## 关键词

突水水源, 灰色系统理论, 独立性权, 水质, 灰色局势决策

# Water Inrush Source Discrimination Study Based on Independence Weight-Grey Situation Decision Theory

Yu Cui\*, Qimeng Liu, Zhigang Xie, Jingzhong Zhu

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui  
Email: \*1750394718@qq.com

Received: May 15<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jun. 17<sup>th</sup>, 2021; published: Jun. 25<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Mine water disasters often cause significant casualties and property losses. It is very important to quickly and accurately identify the water inrush source for the water disaster treatment work.

\*通讯作者。

Three types of water samples, namely Quaternary pore water, Permian sandstone water and Carboniferous Taiyuan Formation limestone water, are selected from a mine in Panxie mining area of Huainan for water quality analysis. The grey system theory is used to analyze the internal laws of various ions and water samples, and the calculation formula for the target measure of water inrush source is comprehensively obtained. Then the weight of each discriminant factor is determined by the independent weight, so that the multi-factor discrimination is attributed to the single-objective decision-making. The results show that the discrimination accuracy of water quality (Quaternary pore water, Permian sandstone water and Carboniferous Taiyuan Formation limestone water) is 75%, 83% and 71% respectively. It is accurate, convenient and fast to apply grey decision method to mine water inrush source discrimination.

## Keywords

Water Inrush, Gray System Theory, Independence Weight, Water Quality, Grey Situation Decision

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

矿井突水是矿井生产期间中较常见的水文地质灾害,是仅次于煤矿瓦斯灾害的第二大安全灾害。根据武强[1][2][3][4][5]等学者对于矿井水害类型的划分其中依据充水含水层特征主要划分为:孔隙水型水害、裂隙水型水害、岩溶水型水害。在煤矿生产过程中,往往需要对突水水源进行快速的判别分析,从而采取有效的治理措施。

近些年来,许多专家学者通过对突水水源的信息提取和分析,用数学建模的方式构建有效的突水水源判别方法,而其中利用水化学方法进行分析的方法则较为成熟,如神经网络、距离判别分析、模糊综合评判等方法[6]-[11]。矿井水化学特征表示主要有六种常规离子(如 $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $HCO_3^-$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 等)以及水质的综合指标(如电导率、酸碱度、矿化度等)。水中各离子含量组分的多少,通过分析方法来对水体类型进行分类,在实践中证明其切实有效。成春奇、桂和荣[12][13][14]等就分别对百善矿区和皖北矿区的矿井水水化学性质进行了分析,并利用水化学元素富集特性来判别水源类型。

矿井水源判别在模型的建立过程中,容易忽视各离子之间的内在的关联性,导致结果不易区分,判别误差增大。主成分分析方法会将重复表征的因子指标进行剔除,从而达到降维计算的目的。然而在矿井水源识别中,多种水源的水化学特征各因子之间既有相互影响的关系也存在相互独立的关系。目前比较常用的决策方法有:模糊决策、灰色局势决策等。用模糊决策处理问题时,往往需要建立隶属函数,这是其应用的难点和关键;而灰色局势决策则回避了这一难点,引入效果测度,使问题大为简化;另外灰色局势决策不仅可以解决单个事件的问题,还可以解决多个事件的问题。笔者把独立性权系数法和灰色关联度理论相结合创建突水水源识别模型。利用独立权法对水化学指标进行赋权——将多个指标变量利用适当的线性组合转换为相互独立的指标。然后结合灰色局势决策理论将处理过的样本数据进行识别,建立基于独立性权-灰色局势决策理论的突水水源判别模型。

## 2. 独立性权系数法与灰色局势决策法理论

### 2.1. 独立性权系数法概述

独立性权重系数模型是根据各指标与其他指标之间的共线性强弱来确定指标权重的[15]。设有指标项

$a_1, a_2, \dots, a_n$ , 分析  $a_x (x=1, 2, 3, \dots, n)$  与其它指标之间的复相关性, 若复相关系数越大则指标  $a_x$  与其它指标的共线性关系越强, 这样的判别信息就会相互叠加干扰, 因此认为该指标参与判别的权重值应相对减小[16]。计算公式为:

$$R_i = \frac{\sum (a_i - \bar{a}_i)(\hat{a} - \bar{a}_i)}{\sqrt{\sum (a_i - \bar{a}_i)^2 \sum (\hat{a} - \bar{a}_i)^2}} \quad (1)$$

对于  $R$  与权重之间的负相关关系, 因此选取复相关系数的倒数作为评分, 经过归一化处理得到权重值, 最终的权重表示为:

$$W_i = \left[ \frac{1}{R_1}, \frac{1}{R_2}, \frac{1}{R_3}, \dots, \frac{1}{R_n} \right] \quad (2)$$

## 2.2. 灰色决策方法概述

灰色局势决策是指对含有灰元的决策。灰元是指信息不完全或者内涵难以穷尽的元素称为灰元。在矿井突水水源判别中可以把评价因子视为灰元, 即以水化学成分含量视为评价因子, 把已知水源数据视为事件, 不同的水源点作为对策, 通过决策分析来确定最优局势, 最优局势所对应的水源即为突水水源。一般将事件、对策、效果和目标称为是决策的四要素。该方法主要是对复杂系统进行系统分析[17][18][19]。

定义: 设事件为  $a$ , 对策为  $b$ , 局势为  $S$ , 那么  $S = (a, b)$ 。

事件集  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , 对策集  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ , 局势集为  $S = \{s_{ij} = (a_i, b_j) | a_i \in A, b_j \in B\}$ 。

事件与对策的二元组合构成局势, 以某一事件为核心, 其他相近事件聚集在核心事件的周围, 构成灰事件以研究对策, 这就是灰色局势决策思想。在突水水源判别中, 把判别指标视为灰元, 把判别对象作为事件, 不同的水源类别作为对策, 通过决策分析确定最优局势, 其对应的水源类别即为评价结果。

其步骤为:

- 1) 确定事件  $a_i (i=1, 2, \dots, n)$  与对策  $b_j (j=1, 2, \dots, m)$ 。
- 2) 构造局势, 建立局势阵。
- 3) 给出目标  $p (p=1, 2, \dots, q)$ 。
- 4) 按不同目标  $p$  构造不同的局势效果测度矩阵。

$$D^{(p)} = (r_{ij}^p / S_{ij})_{m \times n} \quad (3)$$

- 5) 求出综合决策矩阵。根据单目标决策效果测度  $r_{ij}^{(p)}$ , 可以得到多目标的综合效果测度  $r_{ij}^{(\Sigma)}$ :

$$r_{ij}^{(\Sigma)} = \frac{1}{q} \sum_p r_{ij}^{(p)} \quad (4)$$

从而求得综合决策矩阵为:

$$D^{(\Sigma)} = \begin{bmatrix} r_{11}^{\Sigma} & r_{12}^{\Sigma} & \cdots & r_{1m}^{\Sigma} \\ r_{21}^{\Sigma} & r_{22}^{\Sigma} & \cdots & r_{2m}^{\Sigma} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1}^{\Sigma} & r_{n2}^{\Sigma} & \cdots & r_{nm}^{\Sigma} \end{bmatrix} \quad (5)$$

- 6) 按最佳效果选择最佳局势, 进行决策。如果  $b_j^*$  为最佳对策, 则有式(6), 若  $a_i^*$  为最佳对策, 则有式(7)。

$$\begin{cases} r_{ij}^{*(\Sigma)} = \max_j \{r_{ij}^{(\Sigma)}\} & (6) \\ r_{ij}^{*(\Sigma)} = \max_i \{r_{ij}^{(\Sigma)}\} & (7) \end{cases}$$

### 3. 应用实例

#### 3.1. 潘谢矿区井田地质与水文地质特征

潘谢矿区主体位于淮河中游北岸，矿区为石炭-二叠系煤田，上覆巨厚松散层，局部古近系砂砾岩发育，下伏太原组灰岩和奥陶系灰岩。自上而下淮南煤田主要发育新生界松散砂层孔隙含水层、二叠系砂岩裂隙含水层、石炭系太原组石灰岩岩溶裂隙含水层、奥陶系石灰岩岩溶裂隙含水层。

##### 1) 新生界含水层

上部含水层层厚 1.10~45.0 m，平均厚度为 27.11 m。全区发育完全，本组以土黄-灰黄色粉、细砂为主，夹薄层粘土和砂质粘土。砂层颗粒较细、松散，接受大气降水和地表水补给，水位随季节变化，属于潜水-弱承压水。据抽水试验资料，含水层单位涌水量  $q = 0.781 \sim 1.429 \text{ L/(s}\cdot\text{m)}$ ，矿化度 TDS 范围为 0.207~1.0 g/L，水质类型为  $\text{HCO}_3\text{-Na + K}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na + K}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Mg}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Na + K}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 。中部含水层层厚 0~331.76 m，平均厚度为 76.68 m。含水层单位涌水量  $q = 0.00185 \sim 1.866 \text{ L/(s}\cdot\text{m)}$ ，富水性弱-中等，局部富水较强，矿化度 TDS 范围为 1.07~2.439 g/L，水质类型以  $\text{Cl-Na + K}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na + K}$ 、 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Na + K}$  为主。

下部含水层层厚 0~228.75 m，平均 35.80 m，煤田内整体自西向东增厚，东南部缺失。含水层(组)由上部灰白、灰黄色中、细砂层(西部)和下部棕红色砂砾层、砾石层、粘土砾石构成，砾石层间有棕红色粘土，砂质粘土分布。据区域抽水试验资料，含水层单位涌水量  $q = 0.000101 \sim 1.915 \text{ L/(s}\cdot\text{m)}$ ，矿化度 TDS 范围为 0.522~2.81 g/L，水质类型以  $\text{Cl-Na + K}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na + K}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na + K}$  为主。

##### 2) 二叠系煤系砂岩裂隙水

淮南潘谢矿区主要煤层分布在山西组与上、下石盒子组。煤系砂岩分布于煤层、粉砂岩和泥岩之间，岩性、厚度变化均较大，是煤层开采的直接充水含水层，一般裂隙不发育。各主要可采煤层顶、底板砂岩含水层之间均有泥岩、砂质泥岩、粉砂岩和煤层等隔水层，阻隔砂岩含水层之间的水力联系。煤系砂岩含水层富水性弱，一般具有储存量消耗型特征。矿化度范围为 0.711~3.128 g/L，水质类型以  $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na + K}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na + K}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na + K}\cdot\text{Mg}$  为主。

##### 3) 太原组灰岩含水层

淮南煤田太原组整合或假整合于本溪组之上，整合于山西组之下的一套由海陆交互的页岩夹砂岩、煤、石灰岩构成的旋回层。本组的  $\text{C}_3^1$  灰岩、 $\text{C}_3^2$  灰岩、 $\text{C}_3^{3\text{上}}$  灰岩、 $\text{C}_3^{3\text{下}} \sim \text{C}_3^{11}$  灰岩，在空间分布上基本连续，层位稳定。其中  $\text{C}_3^1 \sim \text{C}_3^{3\text{下}}$  (太原组第 I 组灰岩)为淮南煤田 A 组煤开采直接充水含水层，故为本区重要含水层。钻孔揭露资料显示，淮南煤田石炭系太原组  $\text{C}_3\text{I}$  组灰岩厚度在 13.52~31.87 m，平均厚度为 22.58 m。潘谢矿区内的太原组  $\text{C}_3\text{I}$  组含水层单位涌水量  $q = 0.00045 \sim 0.107 \text{ L/(s}\cdot\text{m)}$ ，渗透系数  $k = 0.0013 \sim 0.609 \text{ m/d}$ ，矿化度 TDS 范围为 0.509~2.987 g/L，水质类型以  $\text{Cl-Na + K}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na + K}$  为主，富水性弱-中等。

##### 4) 奥陶系灰岩含水层

灰岩含水层平均厚约 180 m。以灰色隐晶质及细晶、厚层状白云质灰岩为主，局部夹角砾状灰岩或夹紫红色、灰绿色泥质条带。岩溶裂隙发育极不均一，且在中下部比较发育，具水蚀现象，以网状裂隙为主，局部岩溶裂隙发育，具方解石脉充填，富水性一般弱-中等，其水文地质参数：单位涌水量  $q =$

0.000119~13.732 L/(s·m), 渗透系数  $k = 0.00014 \sim 9.233$  m/d, 水质类型以  $\text{Cl-Na} + \text{K}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na} + \text{K}$  为主, 富水性弱 - 极强, 具有不均一性特点。

### 3.2. 水质检验结果

本文以淮南潘谢矿区某矿为例, 总共选取了 20 组水化学数据, 分别来自第四系松散层水(I 表示)、二叠系煤系砂岩水(II 表示)、太原组灰岩水(III 表示), 所选数据如表 1 所示。通过独立性分析, 得到加权水样离子浓度表, 如表 2 所示。

**Table 1.** Ion concentration table of water sample (mg/L)

**表 1.** 水样离子浓度表(mg/L)

序号	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+ + \text{Na}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	类型
1	36.79	11.16	450.11	64.84	559.79	645.00	I
2	16.35	13.64	892.63	89.54	727.72	634.67	I
3	23.42	10.67	451.98	444.07	341.48	201.73	I
4	62.46	78.58	974.08	287.71	993.50	896.35	I
5	29.28	34.38	160.64	243.93	77.80	205.47	I
6	65.41	45.89	908.32	280.97	985.62	670.68	I
7	53.15	7.44	890.05	243.92	1045.60	398.56	I
8	24.85	13.74	878.68	502.19	964.59	247.37	II
9	55.91	24.68	673.84	374.05	978.42	19.14	II
10	16.83	8.39	835.46	389.31	985.51	148.18	II
11	44.09	29.18	754.30	462.53	982.32	102.08	II
12	49.65	34.06	975.35	302.66	1037.00	299.70	II
13	70.14	49.73	714.30	314.25	1029.11	195.10	II
14	81.68	33.10	1100.58	351.48	1052.95	737.74	III
15	76.08	42.82	1063.34	390.53	1029.91	691.63	III
16	38.44	25.30	962.83	663.90	1019.27	138.33	III
17	85.69	22.41	995.33	351.48	1100.82	438.03	III
18	87.29	22.41	975.83	351.48	1076.00	438.03	III
19	86.49	21.44	932.08	380.77	1063.60	341.97	III
20	84.89	24.35	981.58	390.53	1088.41	403.45	III

**Table 2.** Weighted water sample ion concentration table (mg/L)

**表 2.** 加权水样离子浓度表(mg/L)

权值	0.178114	0.212779	0.136871	0.176847	0.1378094	0.157579
序号	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+ + \text{Na}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$
1	6.6222	2.3436	63.0154	11.6712	78.3706	103.2
2	2.943	2.8644	124.9682	16.1172	101.8808	101.5472
3	4.2156	2.2407	63.2772	79.9326	47.8072	32.2768
4	11.2428	16.5018	136.3712	51.7878	139.09	143.416
5	5.2704	7.2198	22.4896	43.9074	10.892	32.8752
6	11.7738	9.6369	127.1648	50.5746	137.9868	107.3088

Continued

7	9.567	1.5624	124.607	43.9056	146.384	63.7696
8	4.473	2.8854	123.0152	90.3942	135.0426	39.5792
9	10.0638	5.1828	94.3376	67.329	136.9788	3.0624
10	3.0294	1.7619	116.9644	70.0758	137.9714	23.7088
11	7.9362	6.1278	105.602	83.2554	137.5248	16.3328
12	8.937	7.1526	136.549	54.4788	145.18	47.952
13	12.6252	10.4433	100.002	56.565	144.0754	31.216
14	14.70276	6.95142	154.0815	63.2655	147.41356	118.0386
15	13.6944	8.9922	148.8676	70.2954	144.1874	110.6608
16	6.9192	5.313	134.7962	119.502	142.6978	22.1328
17	15.4242	4.7061	139.3462	63.2664	154.1148	70.0848
18	15.7122	4.7061	136.6162	63.2664	150.64	70.0848
19	15.5682	4.5024	130.4912	68.5386	148.904	54.7152
20	15.2802	5.1135	137.4212	70.2954	152.3774	64.552

### 3.3. 突水水源识别

#### 1) 确定事件集及目标集

待判水样共 20 个, 如表 1 所示, 则其构成事件  $A$ , 则:  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_{20}\}$ 。

根据表 1 中的水样的各离子成分特征, 将训练样本各指标的 Huber 的 M 估计量作为最优值, 则对策集  $B = \{b_1, b_2, b_3\}$  的分级标准表如表 3 所示。

Table 3. The grading standard table of the countermeasure set

表 3. 对策集的分级标准表

突水水源	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup> + Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
I	41.20	22.73	657.10	241.74	705.57	445.48
II	43.65	25.44	795.46	388.04	986.36	173.08
III	83.05	24.73	994.44	375.95	1060.48	436.75

#### 2) 目标效果测度计算

采用线性降半阶含水作为目标测度计算公式, 以 Ca<sup>2+</sup> 指标隶属度函数为例, 表示如图 1 所示。

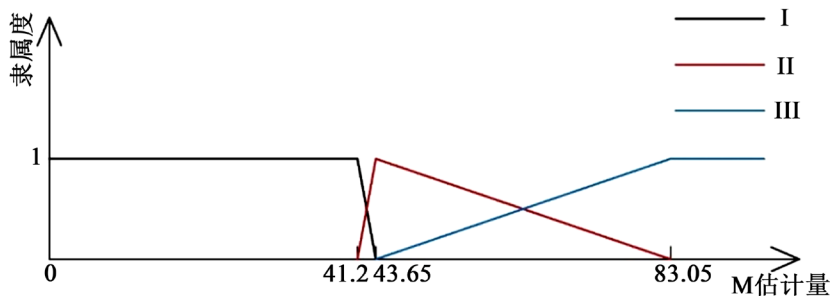


Figure 1. Ca<sup>2+</sup> index membership function diagram

图 1. Ca<sup>2+</sup> 指标隶属度函数图

根据图 1 可得  $\text{Ca}^{2+}$  指标的隶属度函数如下:

$$f_{\text{I}} = \begin{cases} 1 & 0 \leq x < 41.2 \\ -0.40816x + 17.81633 & 41.2 \leq x \leq 43.65 \\ 0 & x > 43.65 \end{cases} \quad (8)$$

$$f_{\text{II}} = \begin{cases} 0 & 0 \leq x \leq 41.2 \\ 0.408163x - 16.8163 & 41.2 \leq x \leq 43.65 \\ -0.02538x + 2.107868 & 43.65 \leq x \leq 83.05 \\ 0 & x > 83.05 \end{cases} \quad (9)$$

$$f_{\text{III}} = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 43.65 \\ 0.025381x - 1.10787 & 43.65 \leq x \leq 83.05 \\ 0 & x > 83.05 \end{cases} \quad (10)$$

用同样的方法建立  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  指标分别对三类水源的隶属度函数。将表 2 代入方程得到各目标效果测度矩阵  $r_{ij}(\text{Ca}^{2+})$ 、 $r_{ij}(\text{Mg}^{2+})$ 、 $r_{ij}(\text{K}^+ + \text{Na}^+)$ 、 $r_{ij}(\text{HCO}_3^-)$ 、 $r_{ij}(\text{Cl}^-)$ 、 $r_{ij}(\text{SO}_4^{2-})$ 。

### 3) 计算综合测度矩阵

根据各目标效果的测度矩阵  $r_{ij}(p)$  计算综合效果测度, 即,  $r_{\text{总}} = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n r_{ij}(p)$ ,  $n=3$ 。得到的综合矩阵为式(11)。

$$r_{ij}(\text{Ca}^{2+}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.522633 & 0.477427 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.447762 & 0.552301 \\ 0 & 0.758921 & 0.24113 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.688872 & 0.311182 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.988864 & 0.011178 \\ 0 & 0.847751 & 0.152297 \\ 0 & 0.327715 & 0.672353 \\ 0 & 0.034779 & 0.965301 \\ 0 & 0.176958 & 0.823116 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$r_{ij}^{(\Sigma)} = \begin{bmatrix} 0.166633 & 0 & 0 \\ 0.142028 & 0.013391 & 0.01115 \\ 0.110917 & 0.052878 & 0.002854 \\ 0.045632 & 0.073993 & 0.046976 \\ 0.10446 & 0.05849 & 0.003707 \\ 0.047204 & 0.081423 & 0.037956 \\ 0.064445 & 0.042888 & 0.0059307 \\ 0.066945 & 0.082702 & 0.016948 \\ 0.022013 & 0.071775 & 0.07285 \\ 0.065234 & 0.096752 & 0.004594 \\ 0.007107 & 0.159185 & 0.000332 \\ 0.0161 & 0.083685 & 0.066841 \\ 0.0269 & 0.088448 & 0.051327 \\ 0.031634 & 0.038854 & 0.096207 \\ 0.02625 & 0.07968 & 0.060753 \\ 0.029683 & 0.100512 & 0.036397 \\ 0.044688 & 0 & 0.09225 \\ 0.044688 & 0.002037 & 0.090124 \\ 0.03545 & 0.028266 & 0.07321 \\ 0.006735 & 0.034186 & 0.09597 \end{bmatrix} \quad (12)$$

#### 4) 突水水源识别

从综合效果测度矩阵  $c_{ij}^{(\Sigma)}$  的行分析中得出各行的最优局势为： $c_{11}^{(\Sigma)}$ 、 $c_{11}^{(\Sigma)}$ 、 $c_{31}^{(\Sigma)}$ 、 $c_{42}^{(\Sigma)}$ 、 $c_{51}^{(\Sigma)}$ 、 $c_{62}^{(\Sigma)}$ 、 $c_{71}^{(\Sigma)}$ 、 $c_{82}^{(\Sigma)}$ 、 $c_{93}^{(\Sigma)}$ 、 $c_{102}^{(\Sigma)}$ 、 $c_{112}^{(\Sigma)}$ 、 $c_{122}^{(\Sigma)}$ 、 $c_{132}^{(\Sigma)}$ 、 $c_{143}^{(\Sigma)}$ 、 $c_{152}^{(\Sigma)}$ 、 $c_{162}^{(\Sigma)}$ 、 $c_{173}^{(\Sigma)}$ 、 $c_{183}^{(\Sigma)}$ 、 $c_{193}^{(\Sigma)}$ 、 $c_{203}^{(\Sigma)}$ 。如表 4 所知，第四系孔隙水、二叠系裂隙水及太原组灰岩水判别准确率为 75%、83%，71%。

**Table 4.** Discrimination results of water samples to be judged

**表 4.** 待判水样的判别结果

待判水样编号	实际类型	判别类型
1	I	I
2	I	I
3	I	I
4	I	II
5	I	I
6	I	II
7	I	I
8	II	II
9	II	III
10	II	II
11	II	II
12	II	II
13	II	II



Continued

14	III	III
15	III	II
16	III	II
17	III	III
18	III	III
19	III	III
20	III	III

#### 4. 结论

1) 矿井突水水源判别中对于多种水质的判别分析的过程中, 其相关因子指标之间既有相互影响也存在相互独立的关系, 利用独立性权系数法对各因子指标进行单独赋权, 避免了因子指标之间的相互干扰, 使得判别模型更加精准。

2) 灰色局势决策理论可对一个存在的未知影响因素的系统进行评价得到最优化的目标。对于矿井突水水源判别这一类复杂因子指标的系统, 可以利用灰色局势决策理论将多因子指标进行综合分析, 进而得到最优化的目标, 有效的解决了矿井突水水源判别中单因子分析不全面的问题。

3) 采用独立性权 - 灰色局势决策方法对淮南潘谢矿区某矿水样判别结果为第四系孔隙水判别结果准确率为 75%, 二叠系裂隙水判别结果准确率为 83%, 石炭系太原组灰岩水判别结果准确率为 71%, 整体判别结果准确率为 75%, 可以认为基于独立性权的灰色局势决策方法在矿井突水水源识别的模型建立上稳定可靠, 具有一定的应用价值。

#### 基金项目

安徽省自然科学基金项目: (1908085ME145); 校研究生创新基金项目(2020CX2004)。

#### 参考文献

- [1] 武强, 崔芳鹏, 赵苏启, 等. 矿井水害类型划分及主要特征分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 561-565.
- [2] 陈红颖. 矿井突水水源判别研究现状与进展[J]. 内蒙古煤炭经济, 2018(8): 20-30.
- [3] 郭江峰, 姚多喜, 黄河, 等. 基于 Bayes 算法的煤矿井下突水水源判别系统的设计与实现[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2): 153-158.
- [4] 邓清海, 曹家源, 张丽萍, 等. 基于主成分分析的矿井突水水源 Bayes 判别模型[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(6): 20-25.
- [5] 官凤强, 鲁金涛. 基于主成分分析与距离判别分析法的突水水源识别方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(2): 236-242.
- [6] 王心义, 赵伟, 刘小满, 等. 基于熵权-模糊可变集理论的煤矿井突水水源识别[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2433-2439.
- [7] 李垣志, 牛国庆, 刘慧玲. 改进的 GA-BP 神经网络在矿井突水水源判别中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(7): 77-81.
- [8] 高卫东. 熵权模糊综合评价法在矿井突水水源判别中的应用[J]. 矿业安全与环保, 2012, 39(2): 22-24.
- [9] 高武霖, 戴国华, 史晓静, 等. 基于数学模型的中医临床疗效评价终点指标构建[J]. 中医杂志, 2016, 57(20): 1746-1749.
- [10] 余克林, 杨永生, 章臣平. 模糊综合评判法在判别矿井突水水源中的应用[J]. 金属矿山, 2004, 28(1): 36-38.
- [11] 汪洋, 左文喆, 王斌海, 等. 矿井突水水源判别方法研究进展[J]. 现代矿业, 2018, 34(1): 69-73.
- [12] 成春奇, 葛晓光, 柴登榜. 百善矿区水文地球化学特征及其在矿井涌水来源判别中的应用[J]. 淮南矿业学院

- 学报, 1994, 14(1): 25-32.
- [13] 桂和荣, 陈陆望, 彭子成, 等. 皖北矿区深层岩溶水微量元素主成分分析[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(6): 31-34.
- [14] 张好, 姚多喜, 鲁海峰, 等. 主成分分析与 Bayes 判别法在突水水源判别中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(5): 87-93.
- [15] 廖东良, 路保平. 页岩气工程甜点评价方法——以四川盆地焦石坝页岩气田为例[J]. 天然气工业, 2018, 38(2): 43-50.
- [16] 琚棋定, 胡友彪. 加权灰色局势决策法预测导水裂隙带高度[J]. 山东工业技术, 2018(19): 71-72.
- [17] 樊庆铤, 郭威, 孟宪林. 加权灰色局势决策法在环境空气质量评价中的应用[J]. 环境保护科学, 1999(5): 45-48.
- [18] 邓聚龙. 灰预测与灰决策[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 183-186.
- [19] 罗党. 灰色决策问题分析方法[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005: 43-56.