

# 模糊数学在矿井突水水源识别中的应用

## ——以百善煤矿为例

彭大琰<sup>1,2</sup>, 戴洪宝<sup>1</sup>, 汪志杰<sup>3</sup>, 韩淑新<sup>3</sup>, 许继影<sup>3</sup>, 王晓悦<sup>3</sup>, 高力<sup>3</sup>, 汝文强<sup>1</sup>

<sup>1</sup>宿州学院环境与测绘工程学院, 安徽 宿州

<sup>2</sup>宿州星火空间信息有限公司, 安徽 宿州

<sup>3</sup>宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

收稿日期: 2023年5月8日; 录用日期: 2023年6月30日; 发布日期: 2023年7月11日

### 摘要

矿井水害一直以来是制约我国煤炭生存发展的重要因素之一, 快速、准确地判别矿井突水水源对保证矿井安全生产具有重要意义, 有利于我国煤炭产业的发展。本课题以百善煤矿为例, 针对百善煤矿四大类突水水源, 即煤系水、三含水、四含水、太灰水, 选取 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 共6大指标作为判别指标, 通过运用模糊数学的方法, 建立突水水源模糊识别模型, 对矿井突水水源进行判别, 并结合实际的煤矿水文地质资料对评判结果进行验证, 得到模糊识别的正确率为78.57%, 判别效果良好。最后利用该模型对百善矿未知水样进行判别, 结果表明, 模糊数学判别法在识别矿井突水水源具有一定的可行性, 并具有判别精准度高、模型结构稳定的优点, 为防治矿井突水提供了有力的依据。

### 关键词

突水水源, 模糊数学, 矿井突水

# Application of Fuzzy Mathematics in Mine Water in Inrush Water Source Identification

## —A Case Study of Baishang Coal Mine

Dalong Peng<sup>1,2</sup>, Hongbao Dai<sup>1</sup>, Zhijie Wang<sup>3</sup>, Shuxin Han<sup>3</sup>, Jiying Xu<sup>3</sup>, Xiaoyue Wang<sup>3</sup>, Li Gao<sup>3</sup>, Wenqiang Ru<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Environment and Surveying Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

<sup>2</sup>Suzhou Xinghuo Space Information Co., Ltd., Suzhou Anhui

<sup>3</sup>College of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

Received: May 8<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jun. 30<sup>th</sup>, 2023; published: Jul. 11<sup>th</sup>, 2023

文章引用: 彭大琰, 戴洪宝, 汪志杰, 韩淑新, 许继影, 王晓悦, 高力, 汝文强. 模糊数学在矿井突水水源识别中的应用[J]. 自然科学, 2023, 11(4): 588-597. DOI: 10.12677/ojns.2023.114070

## Abstract

Mine water damage has always been one of the important factors restricting the survival and development of coal in China. It is of great significance to quickly and accurately identify the water source of mine water to ensure the safe production of mines, which is conducive to the development of coal industry in China. Taking Baishan Coal Mine as an example, this project selects coal-based water, three water-containing, four water-containing and too gray water for four major water inrush sources in Baishan Coal Mine. Six indicators,  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , are used as a discriminating indicator. By using fuzzy mathematics method, the fuzzy identification model of inrush water source is established, and the water source of the mine water is discriminated. The actual coal mine hydrogeological data is used to verify the evaluation results. The correct rate of fuzzy recognition is 78.57%. Finally, the model is used to distinguish unknown water samples from Baishan Mine. The recognition results show that the fuzzy mathematics method has certain feasibility in identifying the water inrush from the mine, and has the advantages of high accuracy and stable model structure, which provides a powerful basis for preventing mine water inrush.

## Keywords

Water Inrush Source, Fuzzy Mathematics, Mine Water Inrush

Copyright © 2023 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

我国的煤矿水文地质条件复杂多样, 矿井水害事故频繁发生, 一直是制约我国煤炭生产发展的重要因素之一。在煤矿开采过程中, 矿井突水事故会淹没巷道, 造成巨大的经济损失和人员伤亡, 进而影响到煤矿的开采产量、矿井使用年限、毁坏矿井周围的水文地质条件和环境。在我国煤矿重特大事故中, 突水事故在发生次数和死亡人数上, 仅次于瓦斯事故, 给国家造成的直接经济损失一直位列在首位[1]。事故的起因大多数是因为没有及时查明矿井的水文地质条件, 所以开展对矿井突水问题的研究是必不可少的。

在矿井突水研究中, 对于突水水源识别尤为重要, 由于突水水源可能来源于多个含水层, 并且各含水层间水质特征界限较模糊。因而, 应用模糊数学判别突水水源是最优的选择[2] [3]。根据煤矿水化学数据, 应用模糊数学原理建立数学模型, 进行模糊评判, 其操作简单、准确度高、结构稳定, 在判别突水水源方面有着良好的效果[4]。

通过收集和整理百善矿的水文地质资料, 建立模糊数学模型, 对突水水源进行判别, 验证模糊数学在识别突水水源上的可行性, 对矿井水害的预测和防治有着重要的指导作用。

## 2. 研究区概况

### 2.1. 地理位置

百善煤矿位于安徽省淮北市中心西南约 20 km, 宿州市西北约 35 km 处, 南北长约 8 km, 东西宽 2~4 km, 含煤面积约 24 km<sup>2</sup>, 见图 1。百善煤矿地处淮北平原, 地势平坦, 地面海拔标高+28~+32 m。区内

气候温和湿润，属于季风暖温带半湿润气候。

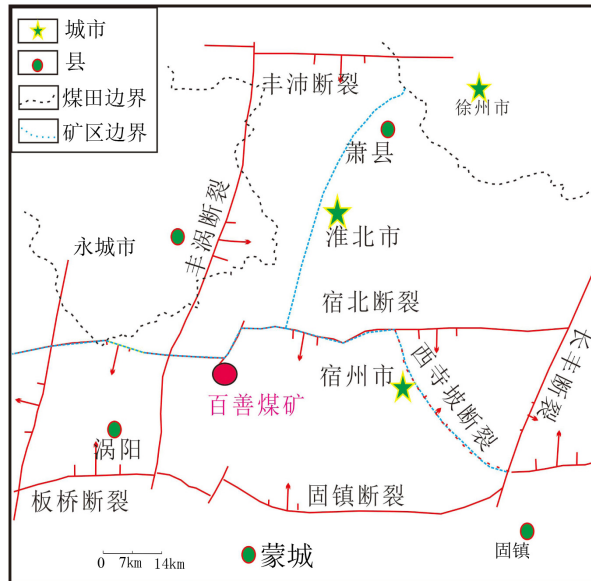


Figure 1. Traffic diagram of Baishan Mining Area  
图 1. 百善矿区交通示意图

## 2.2. 地质条件

### 2.2.1. 煤层

矿井含煤地层为石炭系(C)、二叠系(P)，根据相关区域地质资料以及煤矿工程揭露情况，石炭系煤层并不具备开采条件。二叠系含 3、4、5、6、7 共五个煤层(组)，煤层总厚度达 7.09 m，含煤系数为 3.14%。52、6 煤层为可采煤层，平均厚度为 5.38 m；主要可采煤层为 6 煤层，平均厚度 2.85 m，还有局部可采煤层 52 [5]。另外，由于 3、4、51、53、6 上、6 下、7 煤层岩浆侵蚀严重，为不可采煤层。

### 2.2.2. 构造

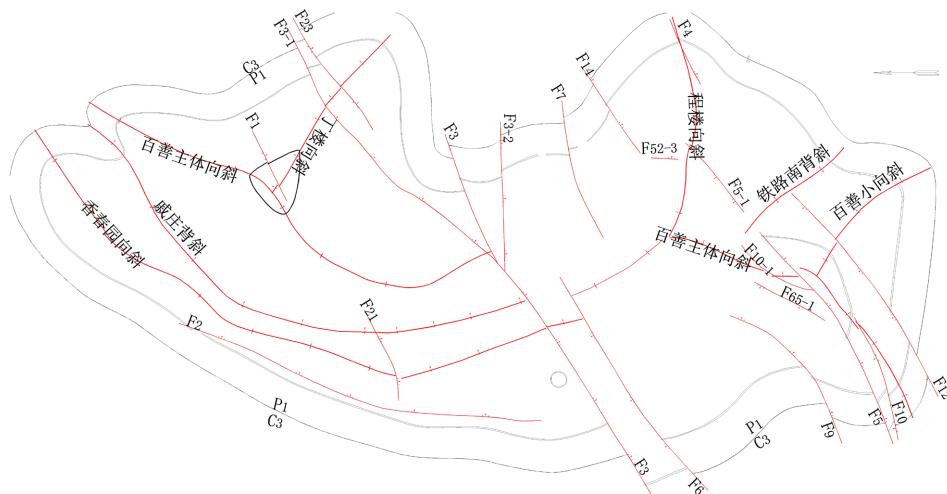


Figure 2. Structure diagram of Baishan Mine  
图 2. 百善矿井构造示意图

百善煤矿位于淮北煤田中部，百善煤矿位于淮北煤田濉肖矿区西南部的一个孤立小向斜盆地中，主体结构为一轴向 NNE 的向斜，发育有断裂构造和次级褶曲，两翼的地层产状平缓，局部煤系地层有岩浆岩侵入，见图 2。

## 2.3. 水文地质条件

### 2.3.1. 水文地质概况

百善煤矿为隐伏矿床，由新地层覆盖。新地层由两大部分组成：一个是由砂、砂砾、裂隙硬泥灰岩等构成的含水层，另一个则是由粘土、砂质粘土、软泥灰岩等构成的隔水层。煤系地层含水层以裂隙、孔隙含水为特征，含水性不均匀，有比较大的变化[6]。煤矿中大多数断层含水性和导水性相对较弱，但是诱发断层导水的可能性还是存在的，特别是煤矿北部西翼，断层松张性较好，导水性比较强，对矿井开采有着严重的水患威胁。

### 2.3.2. 矿井含水层水文地质特征

根据区域地层岩性的含水情况及含水赋存空间分布特征，本矿区含水层可划分为新生界松散层类孔隙含水层(组)、碎屑岩和局部地区分布的岩浆岩类裂隙含水层(段)、碳酸盐岩类裂隙深隙含水层(段)。含水层的水文地质特征见表 1。

**Table 1.** Table of main hydrogeological characteristics of mine aquifer (formation, section)

**表 1.** 矿井含水层(组、段)主要水文地质特征表

含水层(组)名称	厚度(m)	Q (1/s.m)	K(m/d)	富水性	水质类型
新生界一含	15~30	0.1~5.35	1.03~8.67	中~强	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Na.Mg
新生界二含	10~60	0.1~3	0.92~10.95	中~强	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> Na.Ca HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Na.Ca
新生界三含	20~80	0.143~1.21	0.513~5.47	中等	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Na.Ca HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> Na.Ca
新生界四含	0~57	0.00024~2.635	0.0011~5.8	弱~中	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Na.Ca HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Cl <sup>-</sup> Na.Ca
3 煤砂岩(K3)含水层	20~60	0.02~0.87	0.023~2.65	弱	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Cl <sup>-</sup> Na.Ca SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> Ca.Na
7-8 煤砂岩含水层	20~40	0.0022~0.12	0.0066~1.45	弱	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Cl <sup>-</sup> Na.Ca SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> Ca.Na
10 煤上下砂岩含水层	25~40	0.003~0.13	0.009~0.67	弱	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Cl <sup>-</sup> Na HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Na
太原组灰岩含水层	47~135	0.0034~11.4	0.015~36.4	弱~强	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> Ca.Mg SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> Cl <sup>-</sup> Na.Ca
奥陶系灰岩含水层	约 500	0.0065~45.5	0.0072~60.24	强	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Ca.Mg SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Ca.Mg

#### 1) 新生界松散层类孔隙含水层(组)

含水层(组)主要由第四系、第三系砂层、砾石层夹粘土层组成，由上到下依次为一、二、三、四含(部分地区缺失四含或三含)，因受大气降水和地表水补给，三含水质情况较好，富水性较强[7]。由于其沉积厚度受古地形控制，厚度变化不一，厚度为 40~500 m，自北向南、自东向西厚度逐渐增长。

### 2) 碎屑岩和局部地区分布的岩浆岩类裂隙含水层(段)

主要由二叠系沉积岩、燕山期火成岩组成, 一般情况下, 富水性较弱, 主采煤层分为 3 煤(K3)、7-8 煤、10 煤上下三个砂岩裂隙含水层(段)。

### 3) 碳酸盐岩类裂隙深隙含水层(段)

根据碳酸盐岩含量的多少可划分为三个类型: 1) 碎屑岩夹碳酸盐岩含水层(段): 由中上石炭统地层组成, 碳酸盐岩厚度占 40% 左右, 此含水层距 10 (或 6 煤层) 煤层较近, 在隔水层相对薄弱地带, 开采 10 煤层底板有较大的可能性突水, 是造成矿井生产危害的主要含水层。2) 碳酸盐岩含水层(段): 碳酸盐岩占比 90% 以上, 主要组成地层为寒武系上统和奥陶系中统, 该含水层一般含水丰富, 距主采煤层较远, 对煤矿无直接充水影响, 但如果与断层或导水陷落柱存在水力联系, 会给矿井造成极大危害[8]。3) 碳酸盐岩夹碎屑岩含水层(段): 碳酸盐岩占总厚度的 60~90%, 由寒武系中下统组成, 区域内只有小范围分布。

## 2.3.3. 矿井隔水层水文地质特征

### 1) 新生界松散层隔水层(组)

新生界一、二、三含下分别有一、二、三隔与之对应, 直接覆盖在煤系之上只有四含。主要由粘土、砂质粘土及钙质粘土组成, 厚度 13~158 m, 分布较稳定, 隔水性能较好, 尤其是第三隔水层(组), 是区域内重要的隔水层(组)。

### 2) 二叠系隔水层(段)

主要由泥岩及粉砂岩夹少量砂岩组成。主采煤层砂岩裂隙含水层(段)可分为四个隔水层(段): 1~2 煤层隔水层(段)、4~6 煤隔水层(段)、8 煤下铝质泥岩隔水层(段)和 10 煤下海相泥岩隔水层(段), 其隔水性能较好。

## 3. 百善煤矿模糊数学突水水源识别模型

### 3.1. 模糊数学评判法的基本原理

根据收集和整理的有关百善矿的水文地质资料, 矿井主要突水水源可能来源于煤系水、三含水、四含水、太灰水, 因为水质特征界限不明显, 为模糊数学评判奠定了基础。现今, 模糊数学理论已经广泛应用于社会的各个领域里, 并得到越来越多学者的认同, 对诸多研究顺利进行和产业发展有重要的价值。地学领域的各种理论、表达方式以及重要概念带有模糊的特点, 因而模糊数学理论在地学领域中广泛应用[9] [10] [11]。模糊判别问题就是用已知事物的各种类别, 来判断给定的未知对象是属于哪一个类别的问题[12]。

模糊识别直接方法的基本思想: 设  $U$  是已知待识别对象的全体集合,  $U$  中的各个对象有  $P$  个特性指标:  $U_1, U_2, \dots, U_p$ 。  $P$  个特性指标分别对应对象  $u$  的某一个特征, 因而依据  $P$  个特性指标可以确定唯一的对象  $u$ , 可记为:  $u_{A_1}(u), u_{A_2}(u), u_{A_n}(u)$ , 此式称作对象  $u$  的特征向量。集合  $U$  分为  $n$  个类别, 且每一类别均为  $U$  上的一个模糊集, 记作:  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  (则称它们为模糊模式)。模糊识别是把对象  $u = (u_1, u_2, u_3, \dots, u_p)$  划分一个与其相似的类别  $A_i$  中。当一个识别算法作用于对象  $u$  时, 相应产生一组隶属度,  $u_{A_1}(u), u_{A_2}(u), u_{A_n}(u)$ 。它们分别表示对象  $u$  隶属于类别  $A_1, A_2, \dots, A_n$  的程度。建立了相关模糊的隶属函数后判别对象  $u$ , 从而判定它应归属于哪一类[13]。

采用样板法构造隶属函数。具体如下:

$$a_{ij} = (a_{ij1}, a_{ij2}, \dots, a_{ijp}), i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m_i \quad (1)$$

式中:  $a_{ij}$  为第  $i$  个模糊模式的第  $j$  个样板的特性向量;  $a_{ijp}$  为第  $i$  个模糊模式  $A_i$  中第  $j$  个样板的第  $k$  个特性指标的实测数据,  $k = 1, 2, \dots, p$ 。

计算模糊模式  $A_i$  中的  $m_i$  个特性向量  $a_{ij} = (i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m_i)$  的平均值  $a_i$ , 即:

$$a_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ip}) \quad (2)$$

式中:  $a_{ik} = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} a_{ijk}, k=1, 2, \dots, p$ , 称  $a_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ip})$  为模糊模式  $A_i$  的均值样板。

计算对象  $u = (u_1, u_2, \dots, u_p)$  与均值样板  $a_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ip})$  之间的普通距离:

$$d_i(u, a_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^p (u_j - a_{ij})^2} = \sqrt{(u_1 - a_{i1})^2 + (u_2 - a_{i2})^2 + \dots + (u_p - a_{ip})^2} \quad (3)$$

令:  $D = \sum_{i=1}^n d_i(u, a_i)$ , 则模糊模式  $A_i$  的隶属函数[14]为:

$$u_{A_i}(u) = 1 - \frac{d_i(u, a_i)}{D} \quad (4)$$

设  $A_1, A_2, \dots, A_n$  是给定的论域  $U$  上  $n$  个模糊子集,  $u_0 \in U$  是一被识别对象, 若  $u_{A_i}(u_0) = \max(u_{A_1}(u_0), u_{A_2}(u_0), \dots, u_{A_n}(u_0))$ , 则认为  $u_0$  优先隶属于  $A_i$ 。

### 3.2. 模糊识别模型的建立

#### 3.2.1. 确定判别指标

根据百善煤矿的水质分析资料, 对百善煤矿突水水源进行分类, 分类如下: 煤系水  $A_1$ ; 三含水  $A_2$ ; 四含水  $A_3$ ; 太灰水  $A_4$ 。设  $U$  为所有水样的集合, 则煤系水  $A_1$ ; 三含水  $A_2$ ; 四含水  $A_3$ ; 太灰水  $A_4$  是  $U$  上的模糊集[15]。根据水样的水质分析资料选择含量较高, 识别能力较强的 6 个特性指标, 即:  $K^+ + Na^+(u_1)$ ,  $Mg^{2+}(u_2)$ ,  $Ca^{2+}(u_3)$ ,  $Cl^-(u_4)$ ,  $SO_4^{2-}(u_5)$ ,  $HCO_3^-(u_6)$ , 突水水源的特性向量为:  $U = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6)$ 。

#### 3.2.2. 建立判别模型

利用样板法建立四类水源的隶属函数。在四类突水水源中选取 14 个样品, “煤系水  $A_1$ ” 有 4 个, “三含水” 有 6 个, “四含水” 有 2 个, “太灰水” 有 2 个。

$$\begin{aligned} a_i &= (a_{i1}; a_{i2}; a_{i3}; a_{i4}; a_{i5}; a_{i6}), i=1, 2, 3, 4 \\ b_i &= (b_{i2}; b_{i3}; b_{i3}; b_{i4}; b_{i5}; b_{i6}), i=1, 2, 3, 4, 5, 6 \\ c_i &= (c_{i1}; c_{i2}; c_{i3}; c_{i4}; c_{i5}; c_{i6}), i=1, 2 \\ d_i &= (d_{i1}; d_{i2}; d_{i3}; d_{i4}; d_{i5}; d_{i6}), i=1, 2 \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中:  $a_{ij}$ 、 $b_{ij}$ 、 $c_{ij}$ 、 $d_{ij}$  分别代表煤系水、三含水、四含水、太灰水中第  $i$  个水样第  $j$  个特性指标的实测数据。14 个水样的指标实测数据见表 2。

Table 2. Measured data of each indicator in water samples

表 2. 水样各指标实测数据

水源类别	水样编号	$Na^+ + K^+(u_1)$	$Mg^{2+}(u_2)$	$Ca^{2+}(u_3)$	$Cl^-(u_4)$	$SO_4^{2-}(u_5)$	$HCO_3^-(u_6)$
		毫克当量%					
煤系水 $A_1$	1	37.05	30.73	26.55	19.31	55.14	19.18
	2	40.08	33.37	32.22	28.40	82.86	23.36
	3	37.27	19.16	43.57	15.99	72.28	11.73
	4	43.41	20.25	36.34	21.85	57.95	20.20
均值		39.45	25.88	34.67	21.38	67.06	18.62

Continued

三含水 $A_2$	1	42.39	24.89	32.69	22.17	58.58	19.14
	2	50.67	24.09	25.21	26.55	36.82	36.63
	3	48.04	24.38	27.47	19.94	49.12	30.94
	4	44.62	23.93	31.17	18.80	60.38	20.22
	5	50.48	27.82	21.64	26.22	56.00	37.78
	6	53.15	18.58	28.27	26.94	47.91	25.14
均值		48.23	24.95	27.74	23.47	51.47	28.31
四含水 $A_3$	1	32.66	35.24	32.10	16.72	52.14	17.52
	2	36.15	32.06	34.98	22.10	63.40	25.76
	均值	34.41	33.65	33.54	19.41	57.77	21.64
太水水 $A_4$	1	27.25	18.82	42.3	5.64	20.91	41.30
	2	30.40	30.13	52.5	29.88	37.27	70.04
	均值	28.83	24.48	47.40	17.76	29.09	55.67

计算模糊模式中的特征向量的平均值:

$$\begin{aligned}
 a &= (a_1, a_2, a_3, \dots, a_6) \\
 b &= (b_1, b_2, b_3, \dots, b_6) \\
 c &= (c_1, c_2, c_3, \dots, c_6) \\
 d &= (d_1, d_2, d_3, \dots, d_6)
 \end{aligned} \tag{6}$$

式(6)中:

$$\begin{aligned}
 a_j &= \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 a_{ij}, j = 1, 2, \\
 b_j &= \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 b_{ij}, j = 1, 2, \\
 c_j &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 c_{ij}, j = 1, 2, \\
 d_j &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 d_{ij}, j = 1, 2,
 \end{aligned} \tag{7}$$

计算实测水样  $u = (u_1, u_2, u_3, \dots, u_6)$  与  $a = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_6)$ 、 $b = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_6)$ 、 $c = (c_1, c_2, c_3, \dots, c_6)$ 、 $d = (d_1, d_2, d_3, \dots, d_6)$  之间的普通距离, 有:

$$\begin{aligned}
 d_1(u, a) &= \sqrt{\sum_{j=1}^6 (u_j - a_j)^2} \\
 d_2(u, b) &= \sqrt{\sum_{j=1}^6 (u_j - b_j)^2} \\
 d_3(u, c) &= \sqrt{\sum_{j=1}^6 (u_j - c_j)^2} \\
 d_4(u, d) &= \sqrt{\sum_{j=1}^6 (u_j - d_j)^2}
 \end{aligned} \tag{8}$$

令:

$$D = d_1(u, a) + d_2(u, b) + d_3(u, c) + d_4(u, d) \tag{9}$$



将(7)式、(8)式、(9)式代入，得到各模糊子集的隶属函数为：

$$\begin{aligned} u_{A_1}(u) &= 1 - \frac{d_1(u, a)}{D} \\ u_{A_2}(u) &= 1 - \frac{d_2(u, b)}{D} \\ u_{A_3}(u) &= 1 - \frac{d_3(u, c)}{D} \\ u_{A_4}(u) &= 1 - \frac{d_4(u, d)}{D} \end{aligned} \quad (10)$$

### 3.2.3. 模型验证与结果

将表 3 中的各水样数据代入上述隶属函数公式，计算出各水样对“煤系水”、“三含水”、“四含水”和“太灰水”的隶属度，再依据最大隶属度原则，得出判别结果，见表 3。

**Table 3.** Discriminatory attribution of each water sample

**表 3.** 各水样的判别归属

原属类别	水样编号	水样本对于水样类别 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、的隶属度				判属类别
		$u_{A_1}(u)$	$u_{A_2}(u)$	$u_{A_3}(u)$	$u_{A_4}(u)$	
煤系水 $A_1$	1	0.746781	0.700499	0.926111	0.626609	四含水
	2	0.975518	0.923753	0.899271	0.201459	煤系水
	3	0.991311	0.524238	0.977787	0.506663	煤系水
	4	0.907644	0.819267	0.726911	0.546178	煤系水
三含水 $A_2$	5	0.971585	0.935562	0.957073	0.135779	煤系水
	6	0.660514	0.930012	0.74561	0.663863	三含水
	7	0.788661	0.991259	0.844781	0.375299	三含水
	8	0.970028	0.94071	0.942543	0.14672	煤系水
	9	0.796515	0.955852	0.916668	0.430965	三含水
	10	0.814915	0.977352	0.813618	0.394115	三含水
四含水 $A_3$	11	0.90031	0.85481	0.976906	0.267974	四含水
	12	0.947669	0.847593	0.977229	0.227508	四含水
太灰水 $A_4$	13	0.604654	0.736664	0.719041	0.939641	太灰水
	14	0.624414	0.724163	0.696323	0.95510	太灰水

### 3.2.4. 判别分析

各水样判属类别的正确率见表 4。

**Table 4.** Accuracy rate of water sample identification attribution

**表 4.** 水样判别归属正确率

水样类别	煤系水 $A_1$	三含水 $A_2$	四含水 $A_3$	太灰水 $A_4$
正确率	75%	66.6%	100%	100%

从表 3 判属类别和表 4 中可以看出，煤系水判别正确率为 75%，水样 1 判属类别为四含水，煤系水的隶属度较接近，说明水样 1 中混有四含水，有可能为混合水源。

三含水的判别正确率为 66.6%。水样 5 和水样 8 判属为煤系水，它们采样点位于碎屑岩和局部地区分布的岩浆岩类裂隙含水层，依据该地区地层岩性的含水情况，三含水、四含水和煤系水通过裂隙带相



互渗透,且三含水、四含水和煤系水隶属度较接近,有可能是三含水、四含水和煤系水的混合水源。

四含水和太灰水判别正确率为 100%,区内该类含水层稳定,混有其它水源地可能性较小,且隶属度之间相差较大。

整体上来说,该模型判别的正确率为  $11/14 = 78.57\%$ ,应用该模型识别本区矿井未知水样具有一定的可靠性。由于水样的数量相对较少,造成准确率较低,但模型的准确率还是可靠的。

### 3.3. 模型的应用

在百善煤矿采集的 B38 钻孔四含水样中,水样主要离子含量见表 5。用模糊判别模型来预测其水样的来源,并验证。

Table 5. Measured data of water samples taken on site

表 5. 实地采取的水样实测数据

水样对于水样类别 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 的隶属度					
编号	$u_{A1}(u)$	$u_{A2}(u)$	$u_{A3}(u)$	$u_{A4}(u)$	类别
I	0.755951889	0.848554106	0.925251	0.4702	四含水

运用前面介绍的模糊判别方法,经计算得判别结果见表 6。

Table 6. Discriminatory attribution of unknown water samples

表 6. 未知水样的判别归属

水源类别	水样编号	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ (u_1)$	$\text{Ca}^{2+} (u_2)$	$\text{Mg}^{2+} (u_3)$	$\text{Cl}^- (u_4)$	$\text{SO}_4^{2-} (u_5)$	$\text{HCO}_3^- (u_6)$
		毫克当量%					
四含水	I	32.66	32.1	35.24	18.43	58.27	15.3

根据最大隶属度原则,由表 6 可以看出,水样判属四含水,同时也可以看出,四含水和三含水隶属度相差不大,从而可以得出这两种水样有一定的相似性,此类水样有混入三含水的可能。

## 4. 结论

通过本论文的研究,可以得出以下结论:

1) 依据百善煤矿实际水质分析资料,选取  $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  共 6 个指标作为判别指标,建立模糊识别模型。经过回判,模型判别正确率为 78.57%,判别效果比较理想,可以应用于百善煤矿矿井突水水源识别。

2) 利用该模型对百善煤矿未知水样进行模糊识别,识别结果显示,三含水和四含水的隶属度较为接近,可能此处水样突水水源来自多个含水层,为混合突水水源,在矿井防治水工作中应尤为关注突水部位,及时识别水源。

## 基金项目

国家级大学生创新创业训练项目(202210379014S, 202210379055S),宿州学院 2023 年国家级大学生创新创业训练计划项目(宿州千博地质技术服务有限公司),宿州学院校级项目(KYLXYBXM22-024, szxy2022ctzy01, szxy2022jyxm29, szxy2020hhkc02),2022 年省级大学生创新创业训练计划项目(宿州地源地勘技术服务有限公司)。

## 参考文献

- [1] 肖建于. 证据理论研究及其在矿井突水预测中的应用[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- [2] Yang, W.F., Shen, D.Y. and Ji, Y.B. (2012) Discrimination of Mine Water Bursting Source Based on Fuzzy System. *Applied Mechanics and Materials*, **182-183**, 644-648. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.182-183.644>
- [3] Běhounek, L. and Cintula, P. (2005) From Fuzzy Logic to Fuzzy Mathematics: A Methodological Manifesto. *Fuzzy Sets and Systems*, **157**, 642-646. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2005.10.011>
- [4] 马雷. 基于 GIS 的矿井突水水源综合信息快速判别系统[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [5] 崔喜. 基于 GIS 的淮南孔集矿地下水化学特征分析及突水水源判别模型[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [6] 桂和荣. 皖北矿区地下水水文地球化学特征及判别模式研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005.
- [7] 潘婧. 基于 Matlab 的潘三矿地下水水化学场分析及突水水源判别模型[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [8] 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.
- [9] 刘剑民, 王继仁, 刘银朋, 等. 基于水化学分析的煤矿矿井突水水源判别[J]. *安全与环境学报*, 2015, 15(1): 31-35
- [10] 杨海军, 王广才. 煤矿突水水源判别与水量预测方法综述[J]. *煤田地质与勘探*, 2012, 40(3): 48-54.
- [11] 李再兴, 张凤鸣, 庞良, 等. 有关矿井突水水源判别方法的探讨[J]. *地下水*, 2009, 31(5): 16-20.
- [12] 肖盛燮. 模糊数学与应用[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1993.
- [13] 李帅, 王震, 史继彪, 等. 模糊数学在矿井突水水源判别中的应用[J]. *煤矿安全*, 2012, 43(7): 136-139.
- [14] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 2000.
- [15] 桂和荣, 陈陆望. 皖北矿区主要突水水源水文地质特征研究[J]. *煤炭学报*, 2004, 29(3): 323-327.