

文章编号: 1001-1986(2010)01-0054-04

# 基于离差加权的煤矿突水水源判别模型及应用

潘 婧, 钱家忠, 马 雷

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 矿井突(涌)水水源的快速识别是矿井水害有效防治的前提条件。针对应用模糊综合评判方法解决水源判别常用的“超标加权法”和“偏标加权法”确定判别因子的权重系数方面存在的不足, 结合方差分析中的离差分解法, 提出了矿井突水水源判别权重系数确定的离差加权法; 利用 SPSS 软件, 并以淮南潘三矿为例, 对上述 3 种模型进行对比分析研究。结果表明: 基于离差加权的模糊综合评判能够有效的判别突水水源, 比“超标加权法”和“偏标加权法”有更高的判别率; 基于离差加权的模糊综合评判具有原理清晰、结构简单、运算量小、更为合理等优点, 适合快速识别水源, 为矿井水害防治提供了一种辅助决策手段。

**关键词:** 突水水源判别; 模糊综合评判; 离差加权方法; 模型

**中图分类号:** TD74 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.01.013

## The discrimination model based on the deviation weighing method of intrushed water sources in coal mine and its application

PAN Jing, QIAN Jiazhong, MA Lei

(School of Natural Resources and Environmental Engineering, Anhui Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Rapid discrimination of the water bursting sources is the precondition of preventing water-inrush from coal floor effectively. This paper puts forward a method for determining the weighting coefficient, deviation weighing method with reference to a deviation decomposition method in variance analysis, in the light of the shortages of the “super weighting method” and “biasing weighting method” that are commonly used to determine the weighting coefficient of the judging factors for solving the discrimination of the water bursting sources with the fuzzy comprehensive evaluation; Using SPSS, the example of Huainan Pansan mine had been studied with the three fuzzy models. The results show that the fuzzy comprehensive evaluation based on the deviation weighing method which has an advantage of “super weighting method” and “biasing weighting method” can make the discrimination of the water bursting sources more effective. Considering its characters such as clear principle, simple structure and more suitability, the fuzzy comprehensive evaluation based on the deviation weighing method suits for rapid discrimination of the water bursting sources and provides an assistant means for decision-making to prevent water-inrush from coal floor.

**Key words:** discrimination of intrushed water sources; fuzzy comprehensive evaluation; deviation weighing method; model

矿井突水是煤矿生产过程中最具威胁的自然灾害之一, 对矿井突(涌)水水源的快速识别是矿井水害防治的前提条件。为此, 有必要建立科学有效的矿井突水水源判别模式。目前, 根据水化学成分判别水源的方法很多, 如模糊综合评判法、人工神经网络、灰色关联分析等。每种方法有其自身的特点, 同时也存在一定的局限性<sup>[1]</sup>。对于煤矿地下各含水层之间的水质特征没有明确的界限, 因而它的划分和归属是一个模糊问题<sup>[2]</sup>, 很难根据单个因子进行

判别, 需综合多个因素的综合效果进行判别。模糊综合判别是一种应用模糊数学原理研究问题的方法, 它在描述和解决诸如矿井水源判别这类具有模糊性的问题上具有较大的优越性<sup>[3]</sup>。而在模糊综合评判模型中, 最关键的就是代表因素权重的确定和隶属度函数的确定<sup>[4]</sup>。离差最大化客观赋权法已经较广泛的应用于多属性决策模型中, 若各个方案的某个属性值没有差别, 则该属性对于方案排序将不起作用, 在多属性决策中该属性没有意义。所以, 属

收稿日期: 2009-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(40672154; 40872166); 新世纪优秀人才计划项目(NCET-06-0541)

作者简介: 潘 婧(1985—), 女, 安徽宿州人, 硕士研究生, 从事环境科学和地下水模拟研究。

性对于各个方案而言差异越大, 则该属性在方案排序过程中的区分度越大, 属性越重要, 应该赋予该属性较大的权重<sup>[5-6]</sup>。本文将模糊综合评判最常用的超标和偏标定权法加以改进, 结合多属性决策模型中常用到的离差加权, 提出了新的突水水源判别的权重系数确定方法, 并应用到潘三煤矿突水水源判别实例中。

## 1 基于超标和偏标加权的模糊综合评判模型

设  $U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  为  $n$  种因素(或指标),  $V=\{v_1, v_2, \dots, v_m\}$  为  $m$  种评判, 它们的元素个数和名称均可根据实际问题需要由人们主观规定<sup>[7]</sup>。由于各种因素所处的地位不同, 作用也不一样, 当然权重也不同, 因此评价也就不同。人们对  $m$  种评判并不是绝对地肯定或否定, 因此综合评价应该是  $V$  上的一个模糊子集  $B=(b_1, b_2, \dots, b_m) \in \mathcal{G}(V)$ , 其中  $b_j(j=1, 2, \dots, m)$  反映了第  $j$  种评判  $V_j$  在综合评判中所占的地位(即  $V_j$  对模糊集  $B$  的隶属度,  $B(V_j=b_j)$ ), 综合评判  $B$  依赖于各个因素的权重, 它应该是  $U$  上的模糊子集  $A=(a_1, a_2, \dots, a_n) \in \mathcal{G}(U)$ , 且  $\sum_{i=1}^n a_i = 1$ , 其中  $a_i$  表示第  $i$  种因素的权重, 因此, 一旦给定权重  $A$ , 相应地可得到一个综合评判  $B$ 。

如果对每一个因素  $u_i$  单独作一个评判  $f(u_i)$ , 就可以看作是  $U$  到  $V$  的模糊映射  $f$ , 即

$$f: U \rightarrow \mathcal{G}(V),$$

$$u_i \mapsto f(u_i) \in \mathcal{G}(V),$$

由  $f$  可诱导出一个  $U$  到  $V$  的模糊线性变换  $T_f$ , 就可以把  $T_f$  看作是由权重  $A$  得到的综合评判  $B$  的数学模型。

从以上分析可知, 模糊综合决策的数学模型由 3 个要素组成, 其步骤分为 4 步:

- a. 因素集  $U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 。
- b. 评判集(评价集或决断集)  $V=\{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 。
- c. 单因素评判

$$f: U \rightarrow \mathcal{G}(V),$$

$$u_i \mapsto f(u_i) = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}) \in \mathcal{G}(V),$$

模糊映射  $f$  可诱导出模糊关系  $R_f \in \mathcal{G}(U \times V)$ , 即

$$R_f(u_i, v_j) = f(u_i)f(v_j) = r_{ij}, \quad (1)$$

因此  $R_f$  可由模糊矩阵  $R \in \mu_{n \times m}$  表示:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

称  $R$  为单因素评判矩阵,  $r_{ij}$  表示  $u_i$  对  $v_j$  的隶属度 ( $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m$ ), 模糊关系  $R$  可诱导出  $U$  到  $V$  的模糊线性变换  $T_f$ 。称  $(U, V, R)$  构成一个模糊综合决策模型,  $U, V, R$  是此模型的 3 个要素。

d. 综合评判 对于权重  $A=(a_1, a_2, \dots, a_n)$ , 取 max-min 合成运算, 即用模型  $M(e, \oplus)$  计算, 可得综合评判:

$$B = A \circ R, \quad b_j = \sum_{i=1}^n a_i r_{ij}^{[8]}. \quad (3)$$

其中, 最重要的部分就是代表因素权重的确定和隶属度函数的确立。隶属度函数一般采用“降半阶梯形”分布函数, 函数表达式如下:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x \leq a_1 \\ \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1} & a_1 < x \leq a_2 \\ 0 & x > a_2 \end{cases}. \quad (4)$$

计算权重的方法有很多, 在水源判别中应用较多的为超标加权法和偏标加权法。

超标加权法:

$$e_i = x_i / a_i, \quad (5)$$

式中  $x_i$  为突水点采样中第  $i$  个因素指标的实测值;  $a_i$  为第  $i$  个因素指标在各含水层中的统计平均值。

因模糊运算需归一化:

$$e_i = (x_i / a_i) / \sum (x_i / a_i). \quad (6)$$

偏标加权法:

$$e_i = (x_i - a_i) / a_i, \quad (7)$$

因模糊运算, 各单项权重值还需归一化:

$$e_i = (|x_i - a_i| / a_i) / \sum (|x_i - a_i| / a_i), \quad (8)$$

式中各变量所代表的意义与超标加权法中相同<sup>[9]</sup>。

## 2 离差加权法

方差分析是从观测变量的方差分解入手, 通过推断控制变量各水平下各观测变量总体的均值是否存在显著差异, 分析控制变量是否给观测变量带来了显著影响, 进而再对控制变量各个水平对观测变量的影响程度进行剖析<sup>[12]</sup>。为了在煤矿突水水源判别的模糊综合评判模型中找到更适宜的定权方法, 考虑利用方差分析中的离差分解法设置各个因素在判别突水含水层中的比重。

组内离差平方和:

$$SSE = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2; \quad (9)$$

组间离差平方和:

$$SSA = \sum_{i=1}^r n_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2. \quad (10)$$

式中  $r$  为判别因子的水平数;  $X_{ij}$  为判别因子第  $i$  水平下第  $j$  个样本值;  $n_i$  为判别因子第  $i$  个水平下的样本个数;  $\bar{X}_i$  为判别因子第  $i$  个水平的均值;  $\bar{X}$  为判别因子的总均值, 即:

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}, \quad i=1, 2, \dots, r \quad (11)$$

$$\overline{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}, \quad n = \sum_{i=1}^r n_i \quad (12)$$

由此，给出方差分析表(表 1)。

表 1 方差分析表<sup>[10]</sup>  
Table 1 Analysis of variance table

组	离差平方和	自由度	均方离差
组间	$SSA = \sum_{i=1}^r n_i (\overline{X}_i - \overline{X})^2$	$r-1$	$MSA = \frac{SSA}{r-1}$
组内	$SSE = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \overline{X}_i)^2$	$n-r$	$MSE = \frac{SSE}{n-r}$

用  $MSA/MSE$  来表示组间均方离差与组内均方离差的比值，其比值越大，表明组间差异越大，组内差距越小，即该判别因子的权重越大。

### 3 实例分析与讨论

#### 3.1 实例分析

现分别应用超标、偏标<sup>[8-9]</sup>、离差加权的模糊综合判别模型对淮南潘三煤矿井下未知水样进行水源判别。潘三矿隶属淮南矿业集团(图 1)，井田内主要含水层为新生界孔隙含水组，煤系砂岩裂隙含水组及灰岩岩溶裂隙含水组 3 部分组成。本井田煤系地层赋存于巨厚松散层之下，煤系砂岩水与地表水、大气降水无水力联系。矿坑充水以煤系砂岩裂隙含水层为直接充水含水层，新生界下部含水组，太原组含水组分别为上、下部间接充水含水层。根据对潘三矿的水质以及现有材料分析，选取下含水、煤系砂岩水、灰岩水 3 类型的水为评价集。研究中通过常规水化学特征分析，选择  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^{+}+Na^{+}$ 、 $HCO_3^{-}$ 、 $Cl^{-}$ 、 $SO_4^{2-}$ 、TDS 这 7 个指标作为水源判别的特性指标。对所抽选的 40 个水样的各指标的实测值进行分析，计算它们的平均值，得到各含水层的标准值(表 2)。

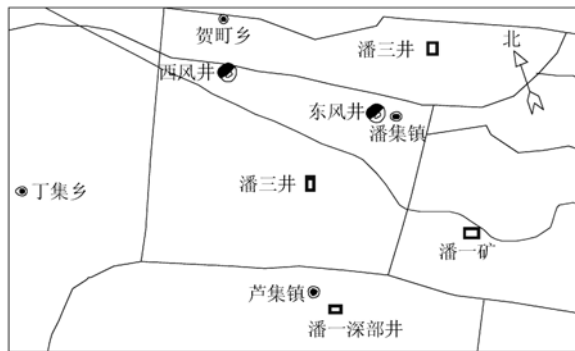


图 1 潘三矿示意图

Fig. 1 Sketch map of Pansan mine

表 2 各含水层离子背景值 mmol/L  
Table 2 Major ion contents of each aquifer

层位	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$K^{+}+Na^{+}$	$HCO_3^{-}$	$Cl^{-}$	$SO_4^{2-}$	TDS
下含	1.13	1.01	35.87	5.45	28.56	2.92	75.08
煤系砂岩	0.19	0.13	46.51	23.42	19.27	0.28	90.18
灰岩	2.22	1.34	38.91	5.95	29.86	4.99	83.27

通过从井下突水点取样，测试水样中主要离子的常规化学指标(见表 3)，并建立水源判别模糊超标综合评判模型，来判别该未知水样所属含水层。

表 3 未知水样所含离子测试结果 mmol/L  
Table 3 Major ion contents of unknown water samples

编号	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$K^{+}+Na^{+}$	$HCO_3^{-}$	$Cl^{-}$	$SO_4^{2-}$	TDS
水样 1	1.08	1.00	35.59	5.45	27.73	2.81	73.66
水样 2	0.26	0.16	31.41	7.68	23.34	0.14	63.30

根据超标加权法(式 3—式 6)和偏标加权法(式 3、式 4、式 7、式 8)计算的隶属度列入表 4。根据离差加权法求得的各因子权重见表 5。对于水样 1 和水样 2，将模糊离差法所求得的隶属度(式 3—式 4 和表 5)列入表 6。

表 4 超标、偏标加权法计算隶属度  
Table 4 Subjection on super weighting and biasing weighting methods

水样编号	超标加权法计算的隶属度			偏标加权法计算的隶属度			判属类别
	下含水	煤系砂岩水	灰岩水	下含水	煤系砂岩水	灰岩水	
水样 1	0.968 9	0.031 1	0	0.992 2	0.007 8	0	下含水
水样 2	0.548 8	0.284 1	0.167 0	0.759 1	0.150 7	0.090 2	下含水

表 5 离差加权法求得的各因子权重 \*  
Table 5 Each factor weight on deviation weighting method

判别因子	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$K^{+}+Na^{+}$	$HCO_3^{-}$	$Cl^{-}$	$SO_4^{2-}$	TDS
权重	0.310 7	0.100 1	0.011 6	0.043 0	0.045 0	0.484 0	0.005 7

\*各因子权重是根据式 9—式 12 和表 1 计算出组间均方离差与组内均方离差，然后将两者的比值归一化所得。

表 6 模糊离差法所求得的隶属度  
Table 6 Subjection on the fuzzy comprehensive evaluation of the deviation weighing method

水样编号	水样本对于水样类别下含水、煤系砂岩水、灰岩水的隶属度			判属类别
	下含水	煤系砂岩水	灰岩水	
水样 1	0.958 2	0.041 9	0	下含水
水样 2	0.063 6	0.897 8	0.038 7	煤系砂岩

### 3.2 讨论

通过实际的调查和专家分析, 水样 1 的真正来源正是下含水, 模型判别情况与实际相符, 而水样 2 的真正来源为煤系砂岩, 超标和偏标的评判结果与实际情况均出现偏差。

对于水样 2, 超标加权法计算出的权重为  $A=(0.061\ 7, 0.054\ 2, 0.217\ 7, 0.185\ 4, 0.252\ 5, 0.014\ 4, 0.214\ 1)$ ; 偏标加权法计算出的权重为  $A=(0.023\ 5, 0.017\ 0, 0.230\ 0, 0.100\ 1, 0.065\ 2, 0.066\ 0, 0.498\ 3)$ 。

超标加权法侧重于正偏, 即对于大于平均值较多的数值分配的权重大; 而对于小于平均值较多的数值分配的权重小, 这在影响因子呈递增、递减变化直接决定其水质、污染程度等综合评价中是可行的。而在水源判别上是不合理的, 应该是偏差大的, 权重大, 不管是正偏还是负偏, 否则将会出现判别错误。偏标加权法较超标加权法的优越性在于对不具有递增或递减关系的水源判别模型, 低浓度因子同样具有对判别结果产生重要影响的权重, 不会丢失判别分析的主要信息<sup>[3-4]</sup>。

然而, 为什么偏标判别的结果也会出现偏差呢? 这是由于当水样所测实际数据中某一因素较其他因素接近于平均值时, 该因素所占的比重明显变小, 即权重明显较小, 这样就降低了对所测水源判别的准确性, 使判别结果与实际出现偏差<sup>[3-4]</sup>。

再看模糊离差法的判别结果, 水样 1 来自下含水, 水样 2 来自煤系砂岩水, 与实际完全吻合。模糊离差法的定权方法是根据判别因子的组间均方离差与组内均方离差比值的大小赋予相应的权值, 即哪个因子的组间均方离差与组内均方离差的比值大, 其权值就大。这样做的好处是能够从权值的大小直观反应出各因子判别能力的大小。这是因为该比值反应的是组间差异与组内差异的程度。当某个因子与其他因子的组间差异愈大, 其子样的组内差距愈小的时候, 该因子的组间均方离差与组内均方离差的比值愈大, 那么它就具有较高的判别能力。根据潘三矿 40 个水样的离子数据, 利用表 1 中的方法计算所选取的判别因子的组间均方离差与组内均方离差的比值( $MSA/MSE$ ), 列入表 7。

表7 判别因子的组间均方离差与组内均方离差的比值  
Table 7  $MSA/MSE$  of discrimination factors

判别因子	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$K^{+}+Na^{+}$	$HCO_3^{-}$
$MSA/MSE$	126.509 5	40.738 4	4.729 6	17.495 1
判别因子	$Cl^{-}$	$SO_4^{2-}$	TDS	
$MSA/MSE$	18.322 6	197.043 4	2.309 0	

很明显,  $SO_4^{2-}$  和  $Ca^{2+}$  的  $MSA/MSE$  值较其它几个因子大很多。结合表 5, 赋予  $SO_4^{2-}$  和  $Ca^{2+}$  的权值

较大, 其次是  $Mg^{2+}$ , 说明  $SO_4^{2-}$  和  $Ca^{2+}$  相对其他因子具有较高的判别能力。根据组间均方离差与组内均方离差的比值确定因子的定权方法, 较之上述两种定权方法即超标和偏标, 更加合理些, 因此在结合隶属度函数之后的判别结果更为准确。

### 4 结 论

综上所述, 通过对模糊超标加权法与偏标加权法的改进, 将计算出的各判别因子的权重分配以及突水水源评判结果分析比较, 发现应用改进后的模糊离差加权法使得评判结果更加符合实际, 证明该方法比较合理有效。

基于离差加权的模糊综合判别方法是将方差分析中的离差分解法应用到判别因子权重的分配中, 有效反应了各判别因子的组内差距与组间差距, 使得所赋予的权值更加合理。

在研究中, 基于离差加权的模糊综合判别方法能够较准确的判别突水水源, 丰富了模糊综合评判的原理与方法, 也是矿井突水水源判别的一种有效手段。在今后的研究中, 可以尝试将其与其他方法相结合, 为矿井防治水工作提供更好的判别依据。

### 参考文献

- [1] 李世峰, 李耀华. 模糊综合判别矿井突(涌)水水源[J]. 煤炭工程, 2006(9): 71-73.
- [2] 王建花, 钱家忠, 李如忠, 等. Fuzzy 概率法的改进及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(5): 173-176.
- [3] 贲旭东, 郭英海, 解奕伟, 等. 模糊综合评判在矿井突水水源判别中的应用及探讨[J]. 矿业安全与环保, 2006, 33(3): 57-59.
- [4] 顾士玲. 逐差加权法在水源判别中的应用[J]. 科技情报开发与经济, 2007, 17(23): 164-166.
- [5] 张荣, 刘思峰, 刘斌. 基于离差最大化客观赋权法的一般性算法[J]. 统计与决策, 2007(24): 29-31.
- [6] 成兰, 郭瑞林. 基于离差最大化原理的灰色综合评判方法及其应用[J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(20): 94-100.
- [7] SHENG G X, RONG D W, GUO H J, et al. Fuzzy comprehensive evaluation on the quality of different mixed feeds for fattening lambs by using in vitro method [J]. Livestock Science, 2008, 2(3): 137-143.
- [8] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006: 144-150.
- [9] 贲旭东, 郭英海, 任印国, 等. 模糊综合评判在水源判别应用中对权重确定的探讨[J]. 中国煤田地质, 2005, 17(5): 58-60.
- [10] 汪荣鑫. 数理统计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986: 122-130.
- [11] 薛薇. SPSS 统计分析方法及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 143-148.