

文章编号: 1001-1986(2011)02-0042-05

焦作矿区地下水水化学特征及涌水 水源判别的 FDA 模型

黄平华^{1,2}, 陈建生¹

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098;
2. 河南理工大学资源环境学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 运用统计学 Fisher 判别分析(FDA)理论, 根据含水层涌水水样的水化学分析结果, 建立焦作矿区涌水水源的数学识别模型, 分析了矿区地下水水化学特征及形成机制, 确定了含水层涌水的补给来源, 并对它们进行判别分析及结果验证。结果表明: FDA 模型预测涌水水源与常规水化学方法分析结果基本一致; 矿区奥灰水补给太灰水特征明显, 煤层顶板砂岩水与深部岩溶水联系较弱。FDA 模型利用回代估计法所得到的误判率小, 适用性强, 简易方便, 具有较强的涌水水源判别能力。

关键词: 涌水; 矿井; 水化学方法; FDA 模型

中图分类号: TD741;P641.4 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2011.02.010

The chemical features of ground water and FDA model used to distinguish source of water burst in Jiaozuo mine area

HUANG Pinghua^{1,2}, CHEN Jiansheng¹

(1. College of Civil Engineering, Hehai University, Nanjing 210098, China;
2. Institute of Resources and Environment, Henan University of Science and Technology, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Using the Fisher Discrimination Analysis Theory(FDA), and according to the analysis results of the water sample, the authors establish the mathematical recognition model of the source of water burst in the Jiaozuo mining area and do its discriminatory analysis and result verification. Using synthetic water chemical analytical method and the FDA model discriminatory analytical method of the source of water, and analyzing chemical characteristic of groundwater and forming mechanism in the mining area, the authors confirm source of water burst in the water-bearing strata. The research result shows that the result of FDA predicated water bursting source agrees with that of the chemical methods analysis of normal water; Ordovician groundwater recharges limestone in a remarkable way; the connection between sandstone water of the seam roof and deep karst water is weak; the FDA model is very powerful in identifying the source of water burst; by using back substitution estimation method, the error decreases continuously and it is of great applicability, easy to handle. It may offer scientific basis for the countermeasures of mine water burst.

Key words: water burst; mine; water chemical research; Fisher discrimination model

如何及时准确地判断矿井突(涌)水成因, 查找突(涌)水水源, 是防治突水灾害的关键。人们通常采用地下水化学、同位素、水温等方法判别突(涌)水水源, 这些方法对突(涌)水水源通常仅能作出定性判断。例如, 水化学方法主要依据地下水常规离子含量的对比分析来确定, 离子含量差异性较大的地下水, 其水文地球化学成因及来源都不相同^[1-2], 北方煤矿煤层底板岩溶水主要水化学特征是 Na^+ 含

量低, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量高, 而封闭砂岩水则刚好相反, 水化学类型以 HCO_3-Na 为主。因此, 分析地下水常规离子特征, 仅可以定性判断地下水的来源。目前, 有学者借助于水化学资料, 采用模糊综合评判法、人工神经网络技术、灰色系统理论、数量化理论等数理统计方法对矿井突水水源的判别进行了一些探讨, 效果明显。为此, 本文提出基于焦作矿区地下水水化学组分数据, 运用统计学 Fisher 判别分

收稿日期: 2010-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(50809024)

作者简介: 黄平华(1978—), 男, 江西临川人, 博士研究生, 从事水文水资源研究。

析(FDA)理论，建立矿井涌(突)水水源识别模型^[3-6]，FDA 模型能准确判别过渡类型地下水，能区分出由于混合作用所形成的过渡类型水质组分，具有较强的涌水水源判别能力。传统的突(涌)水水源识别方法对此很难做出判断。

1 区域水文地质条件

焦作矿区位于太行山隆起带的东南缘，新华夏构造体系与秦岭纬向构造体系的复合部位、晋东南山字型构造体系的前弧东翼。由于受太行山隆起和武陟隆起控制，区内以断裂构造为主，褶皱构造不甚发育，总体为一倾向南东的单斜构造。断裂构造主要以高角度正断层为主，按走向主要发育有 EW、NE 和 NW 向 3 组，断裂构造的发育，没有破坏奥陶系灰岩的连续性，使各井田奥灰水力联系密切，形成统一水位。地下水自北和西北方向向区内径流，在矿区南部受到武陟隆起的阻挡，使地下

水在矿区内排泄，导致矿区煤层底板频繁突水。根据矿区地层的岩性、厚度、含水空间特征及埋藏条件，矿区主要含水层自上而下可分为 4 大类：**a.** 松散类孔隙含水层(简称“第四系”含水层)。**b.** 二叠系砂岩裂隙含水层(简称“砂岩”含水层)，砂岩裂隙水下部是二₁煤顶板。**c.** 石炭系薄层灰岩岩溶裂隙含水层(组)(简称“太灰”含水层)，该组的灰岩层是区的主要岩溶裂隙水含水层。**d.** 奥陶系中统厚层灰岩裂隙溶洞含水层(简称“奥灰”含水层)，为煤系地层沉积基底。

2 地下水化学过程

本次在研究区域共采集水样 31 组，通过井下放水孔、长观孔及井下含水层出水点取样，包括第四系水、砂岩水、奥灰水和太灰水及待判断涌水水样(A1—A9)。水样分析结果见表 1。由于研究区内不同含水层在地质、水文地质结构、地下水循环条件、

表 1 水样水化学分析结果
Table 1 Chemical analyses of water samples

水样编号	取样地点	TDS	pH	K ⁺ +Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	F ⁻	SO ₄ ²⁻
1	位村矿	303.7	9.08	97.6	9.2	6.5	42.4	7	1.5	145
2	演马矿	435.1	7.36	17.1	24.9	64.5	290.2	7	3	25
3	中马村矿	351.1	7.19	13.3	15.3	59.1	212.2	5	1.5	33
4	九里山矿	474	7.74	34.3	23.4	64.9	301.8	9.5	4	36.5
5	九里山矿	441.7	7.4	17.6	23.9	66.7	285.8	6.5	2.5	27.5
6	位村矿	565.3	7.8	172.3	2.2	2.9	367.7	11	3.5	19
7	演马矿	404.5	7.31	4.2	27.8	62	295.4	9	3	2.5
8	古汉山矿	477.9	8.18	119.6	6.8	16.2	307.3	11.5	2	23
9	朱村矿	632.4	7.42	9.7	43.8	108.9	307.5	53.5	5.5	103
10	位村矿	425.7	7.67	15.4	26.3	61.7	260.9	7.5	2.5	35.5
11	冯营矿	378.7	7.46	7.4	24.8	55.2	256.6	5	1	19.5
12	苏林村	748.4	7.68	54.4	26.7	114	430.1	34	1.5	63.5
13	高村	643.9	7.62	2.6	77.3	56.1	420.7	21	3.5	56.5
14	立交桥	1 233.5	7.52	189.8	69.1	92	473.1	68	6.5	354
15	王母村	945.3	7.49	89.9	30.2	120.9	401.9	34	2.5	133.5
16	九里山矿	611.8	8.36	74.1	28	59.9	214.3	29	2	131.5
17	古汉山矿	892.2	8.9	266.6	6.1	24.9	503.9	26.5	2.5	69.5
18	九里山矿	989.7	8.56	303.6	0.5	4.3	685.2	15	5.5	1.5
19	中马村矿	787.3	7.23	157.5	13.8	54.1	535.7	27.5	2.5	2
20	朱村矿	892.2	6.87	225.2	17	41.1	659.4	61	5	133
21	冯营矿	660.7	7.41	2.8	46.7	98.2	495.3	12.5	2	3
22	古汉山矿	891.6	8.8	263.3	2.2	4.7	630.3	8	2	2.5
A1	西村	451.2	5.81	30.3	16.2	72.5	248.7	16	2	52.5
A2	中马村矿	421.1	7.31	4.7	27.1	68.6	255.2	6.5	2.5	43.5
A3	冯营矿	365.6	7.56	13.3	14.6	67	185.5	7.5	1.5	74.5
A4	朱村矿	838.3	7.15	58	30.5	145.4	319.7	69.5	2	217
A5	张建屯	1 728.6	7.67	274.7	110.9	113.7	510.8	246.5	6.5	351
A6	中马村矿	365.8	7.6	2.5	31.6	53.2	194.7	14	3	60
A7	冯营矿	366.1	8.05	39.8	13.8	42.9	215.1	10	1	29.5
A8	中马村矿	484	8.17	60.3	21.4	54.5	193.8	33	3	85
A9	演马矿	469.7	8.35	120.8	4.1	16.9	288.9	9.5	1.5	38

岩相古地理等方面存在较大差异,导致其地下水水化学场也明显不同。因此,对矿区不同含水层地下水水化学特征进行分析,可以定性判断各含水层之间的水力联系及补给关系。Piper 三线图(图 1)表明奥灰水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{—Ca}\cdot\text{Mg}$;太灰水水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{—Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{—Na}$ 及过渡型 $\text{CO}_3\text{—Ca}\cdot\text{Na}$ 为主;而煤层顶板砂岩水水化学类型全部为 $\text{HCO}_3\text{—Na}$ 型。图 2 显示奥灰水与太灰水常规离子含量较为接近,煤层底板岩溶水 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 HCO_3^- 及 TDS 含量明显低于顶板砂岩水,随着地下水的运移,Cl 含量逐渐富集, TDS 含量逐渐增大, Ca^{2+} 含量逐渐减小,而 Na^++K^+ 离子含量逐渐增大,说明深层地下水主要以阳离子交换作用和混合作用为主。

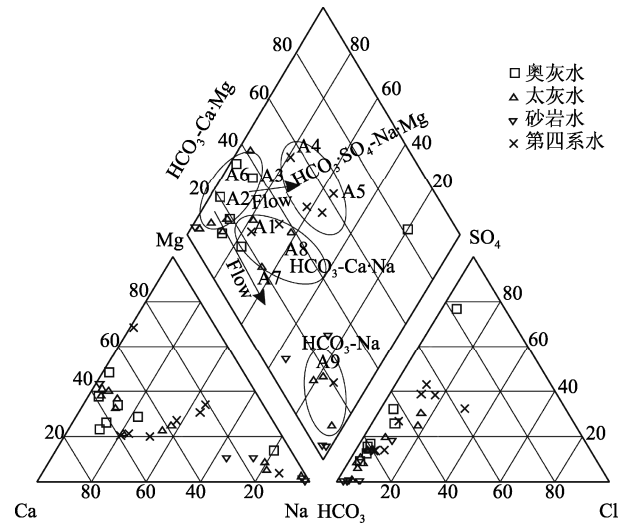


图 1 焦作矿区地下水样 Piper 三线图

Fig. 1 Piper plot of groundwater samples from the Jiaozou mining district

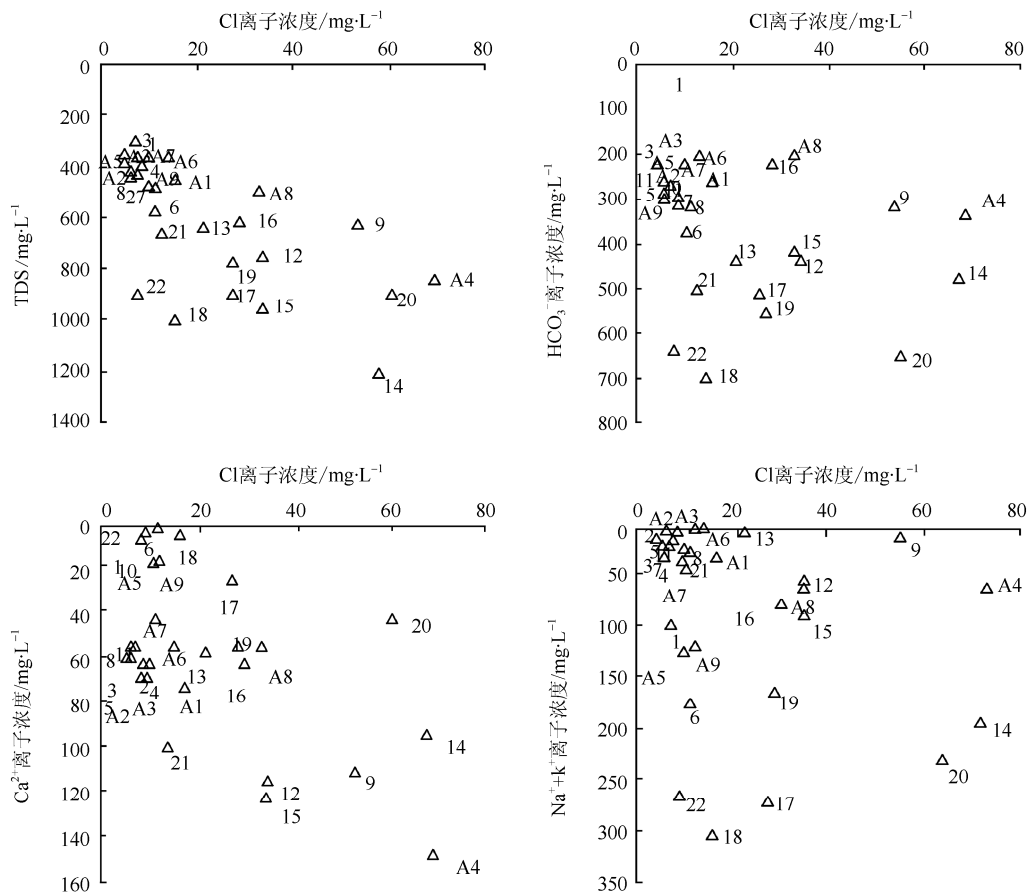


图 2 地下水中 Cl^- 与 TDS、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Na^++K^+ 关系

Fig. 2 Plots of Cl^- versus TDS、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Na^++K^+ of the groundwater

以上分析表明矿区奥灰水与太灰水之间水力联系紧密,奥灰水补给太灰水特征明显,矿区岩溶水与煤层顶板砂岩水水联系较弱。水样 A4 和 A5 水化学类型为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{—Na}\cdot\text{Mg}$,水化学特征与第四系水

基本一致,可以判断其来源于第四系含水层。水样 A2、A3 和 A6 水样的 TDS 含量及 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 及 Na^++K^+ 的特征与奥灰水完全一致,因此可以认为它们来源于奥陶系灰岩含水层。水样 A1、A7、A8

和 A9 的水化学类型及 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 HCO_3^- 等离子含量特征值介于奥灰水与砂岩水之间, 在 Piper 三线图上位于径流路径上, 以过渡型 HCO_3^- — $\text{Ca}\cdot\text{Na}$ 为主, 可以定性认为其来源太原组灰岩含水层, 下面通过 FDA 模型精确计算出未知水样的涌水水源。

3 FDA 模型计算理论

FDA 法的基本思想是将高维数据点投影到低维空间上, 根据类间距离最大、类内距离最小的原则确定判别函数, 得出判别式之后, 依据相应的判别准则就可以建立待判样品的类别^[7-10]。

3.1 FDA 模型的求解

设从总体 $M_i(i=1, \dots, k)$ 分别抽取 m 元样本如下: $X_i^t = (x_{i1}^{(t)}, \dots, x_{im}^{(t)})'$, $(i=1, \dots, n_t)$ 。令 $a = (a_1, \dots, a_m)'$ 为 m 维空间的任一向量 $\mu(x) = a'X$ 为 X 向以 a 为法线方向上的投影。上述 k 个组中的 m 元数据投影后为

$$M_k: a'X_1^k, \dots, a'X_{n_k}^k, \text{ 记 } \bar{X}^k = \frac{1}{n_k} \sum_{j=1}^{n_k} X_j^k。$$

每个总体的数据投影后均为一元数据。对这 k 组一元数据进行一元方差分析, 其组间平方和为

$$\begin{aligned} B_0 &= \sum_{t=1}^k n_t (a' \bar{X}^t - a' \bar{X})^2 \\ &= a' \left[\sum_{t=1}^k n_t (\bar{X}^t - \bar{X})(\bar{X}^t - \bar{X})' \right] \\ &= a' B a。 \end{aligned}$$

式中 \bar{X}^t 和 \bar{X} 分别为 M_t 的样本均值和总样本均值,

并记 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^k \sum_{j=1}^{n_t} X_j^k$, 而 B 为组间离差阵,

$$B = \sum_{t=1}^k n_t (\bar{X}^t - \bar{X})(\bar{X}^t - \bar{X})'。$$

合并的组内平方和为

$$\begin{aligned} A_0 &= \sum_{t=1}^k \sum_{j=1}^{n_t} X_j^k (a'X_j^t - a' \bar{X}^t)^2 \\ &= a' \left[\sum_{t=1}^k \sum_{j=1}^{n_t} (X_j^t - \bar{X}^t)(X_j^t - \bar{X}^t)' \right] a \\ &= a' A a。 \end{aligned}$$

其中合并的组内离差阵 A 为

$$A = \sum_{t=1}^k \sum_{j=1}^{n_t} (X_j^t - \bar{X}^t)(X_j^t - \bar{X}^t)'。$$

因此, 若 k 个总体的均值有显著差异, 则比值

$H = \frac{a' B a}{a' A a}$ 应充分大, 为了使 H 有极大值, 且使解唯

一, 通常附加一约束条件, $a' A a = 1$ 。因此, 问题又化为求 a , 使 $H = \frac{a' B a}{a' A a}$ 在 $a' A a = 1$ 条件下达到极大。为此, 用拉格朗日乘子法来求条件极值问题的解。令

$$\begin{cases} \varphi(a) = a' B a - \lambda(a' A a - 1), \\ \frac{\partial \varphi}{\partial a} = 2(B - \lambda A)a = 0 \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} = 1 - a' A a = 0 \end{cases} ,$$

由方程可知, λ 是 $A^{-1}B$ 的特征根, a 是相应的特征向量, 即通过求解特征方程 $|A^{-1}B - \lambda I| = 0$ 的最大特征值 λ_{\max} 所对应的特征向量 l , 可以求出 Fisher 线性判别函数。

3.2 判别效率的检验

为考察上述判别方法是否优良, 采用以训练样本为基础的回代估计法来计算误判率。来自总体 M_t , 容量为 n_t 的样本为:

$X_j^t = (x_{j1}^{(t)}, \dots, x_{jm}^{(t)})'$, $(t=1, \dots, k; j=1, \dots, n_t)$, 以所有的训练样本作为 $n_1 + n_2 + \dots + n_k$ 个新样本, 依次代入建立的判别函数并且利用判别准则进行判别, 这个过程称为回判。误判样本个数 N 与所有样本的比即为误判率 η , 利用 η 可进行回判检验,

$$\eta = N / \sum_{i=1}^k n_i。$$

4 矿区突水水源的 FDA 判别指标体系

地下水在形成过程中, 由于受到含水层的沉积期地层岩性、建造和地化环境等诸多因素的影响, 使储存在不同含水层中的地下水主要化学成分有所不同, 因而矿区各主要含水层因水文地质条件和水文地球化学环境的不同, 各含水层的水化学特征也存在差异。由于不同含水层地下水-岩石相互作用的不一致, 水化学成分有明显区别, 因此, 本文选取 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 F^- 这 8 种离子组分的含量作为矿井突水水源识别的判别分析变量进行判别分析。

5 矿区突水水源预测的 FDA 模型及实例

5.1 模型的建立

根据焦作矿区 22 组确定来源的地下水样(含水层出水点水样)水化学组分数据, 运用 FDA 模型计算理论, 建立矿区地下水突水水源 FDA 模型。结合 Matlab, 求出 Fisher 判别函数为

$$\begin{aligned} y_1 &= 0.871x_1 + 3.123x_2 + 1.182x_3 + 0.088x_4 - \\ &\quad 1.91x_5 - 10.953x_6 - 1.549x_7 - 5.560, \end{aligned}$$

$$y_2 = 0.979x_1 + 2.761x_2 + 1.909x_3 - 1.317x_4 + 0.347x_5 - 2.609x_6 - 1.75x_7 + 0.417,$$

$$y_3 = 0.403x_1 + 1.619x_2 + 0.11x_3 - 0.769x_4 + 3.675x_5 + 0.167x_6 - 3.397x_7 + 1.314。$$

式中 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 、 x_7 分别为 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 F^- 、 SO_4^{2-} 的离子浓度(单位为 mmol/L)，Fisher 判别函数的最后一项为常数项。

从判别函数可以看出， Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 为最重要的判别指标，以下依次为 HCO_3^- 、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 F^- 、 Cl^- ，与水化学分析结果基本一致，可以为焦作矿区涌水水源判别提供参考。

5.2 模型的验证与运用

为了考察矿区突水水源预测模型的有效性和准确性，用建立的模型对 22 组数据逐一回判，并与实际含水层地下水比较。其中只有 1 个样本的预测结果与实际结果不符，其误判率为 4.5%，正确率高；表 2 显示第 1 类和第 2 类 Fisher 判别函数方差贡献率分别为 79.9%和 18.4%，合计为 98.3%。表明第一类 Fisher 判别函数可以解释地下水水化学离子中绝大部分信息，结合第二类 Fisher 判别函数可以完成绝大多数水样来源的识别。运用 Fisher 判别函数求出未知水样(A1—A9)判别函数值，确定所属类型。

表2 Fisher判别函数附加特征值
Table 2 Eigenvalues of Fisher iscriminant function

函数	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%	典型相关系数
1	8.556	79.9	79.9	0.946
2	1.969	18.4	98.3	0.814
3	0.180	1.7	100.0	0.391

据表 3 建立研究区地下水样的第一类和第二类 Fisher 判别函数值的二维空间图(图 3)，从图上可以清晰地区分出未知水样的涌水来源。通过垂向剖面分析可以判断，从第四系水到奥灰水，随着深度的增加，地下水化学离子浓度逐渐降低，第一类 Fisher 判别函数值逐渐减小，表明矿区地下水在垂向上分带特征明显。奥灰水与太灰水 Fisher 函数值较接近，其第 1 类函数值全部小于 0，而顶板砂岩水及第四系水的第 1 类函数值都大于 0，表明奥灰水与太灰水力联系较紧密，与上层砂岩水及第四系联系较弱。Fisher 判别模型预测结果与常规水化学方法分析结果完全一致，由此可知，Fisher 判别函数分类预测性能良好，组内距离小，组间距离大，证明所建立的模型稳定可靠。

表3 Fisher函数判别分析结果
Table 3 Results of Fisher discriminate analysis

样品	Fisher 函数值			实测类型	预测类型
	第 1 类	第 2 类	第 3 类		
1	-4.250	1.998	-1.242	奥灰水	奥灰水
2	-3.041	-0.484	-0.314	奥灰水	奥灰水
3	-3.163	-0.043	-0.560	奥灰水	奥灰水
4	-3.803	-0.619	-0.386	奥灰水	奥灰水
5	-2.624	-0.294	-0.483	太灰水	奥灰水
6	-2.131	-1.067	0.371	太灰水	太灰水
7	-2.765	-0.502	0.552	太灰水	太灰水
8	-1.410	-0.475	0.427	太灰水	太灰水
9	-1.365	1.412	2.835	太灰水	太灰水
10	-2.643	0.053	-0.229	太灰水	太灰水
11	-1.339	0.048	-0.139	太灰水	太灰水
12	2.869	0.646	0.253	第四系水	第四系水
13	2.675	1.044	1.582	第四系水	第四系水
14	3.964	2.850	-1.834	第四系水	第四系水
15	2.484	1.926	-0.988	第四系水	第四系水
16	-0.058	2.280	0.333	第四系水	第四系水
17	4.025	1.032	0.459	第四系水	第四系水
18	1.207	-2.661	-0.386	砂岩水	砂岩水
19	2.948	-0.782	1.236	砂岩水	砂岩水
20	2.322	-3.630	-0.120	砂岩水	砂岩水
21	2.368	-0.687	-0.285	砂岩水	砂岩水
22	3.728	-2.043	-1.081	砂岩水	砂岩水
A1	-2.222	0.261	-0.186	未知	太灰水
A2	-2.950	-0.019	-0.655	未知	奥灰水
A3	-3.609	0.090	-1.484	未知	奥灰水
A4	3.124	2.515	0.286	未知	第四系水
A5	22.893	13.223	20.613	未知	第四系水
A6	-3.397	0.624	0.504	未知	奥灰水
A7	-1.848	0.346	0.331	未知	太灰水
A8	-1.859	1.724	1.948	未知	太灰水
A9	-1.509	-0.465	-0.232	未知	太灰水

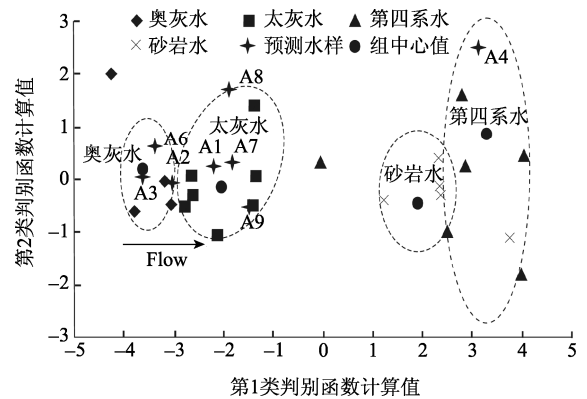


图 3 第 1 类和第 2 类判别函数的分组图

Fig. 3 Map of grouping using first and second discriminant function

6 结论

a. 焦作矿井涌(突)水水源 FDA 识别模型识别率较高，误判率为 4.5%。该模型分析表明，矿区奥灰水补给太灰水特征明显，煤层顶板砂岩水与深部岩溶水联系较弱。

(下转第 51 页)

变形, 势必出现试样与活塞的脱离从而使位移传感器测得拉半周的变形值比实际变形量大, 而实际的变形量又难以分离, 只能用直接测得的变形值计算应变, 进而分析阻尼特性可能不会有明显的规律性。

3 结 论

a. 列车振动荷载作用下原状黄土的动三轴试验表明: 原状黄土在一定的动应力作用下, 应变随着振次的增大而增大, 随固结应力的增大而减小, 随动弹性模量的增大而减小, 随频率的增大而增大; 应变与动应力、动弹性模量在一定条件下近似为双曲线模型。

b. 本次试验得到的阻尼比均在 0.10~0.30 范围内, 但并未发现其与动应变有明显的规律性。分析其原因, 认为除了黄土结构性自身的影响外, 可能是在黄土应变测定方法上存在着问题。

c. 在动三轴试验的基础上, 分析了不同动应力、不同围压、不同振次、不同固结比、不同动荷载频率等对原状黄土动力特性的影响, 所得结论可为高速铁路沿线黄土路基、滑坡和边坡的防治工作提供理论基础。

d. 本次动三轴试验仅局限于等向固结应力状态, 得到的一些规律是否也适用于不等向固结应力状态, 是一个值得继续研究的问题。

参考文献

- [1] 王兰民, 袁中夏, 王峻, 等. 强夯处理后黄土地基的动力特性

与地震性能[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增 2): 2840-2847.

- [2] 田堪良, 张慧莉, 张伯平, 等. 动扭剪荷载作用下非饱和黄土动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4151-4155.
- [3] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003.
- [4] 唐益群, 张曦, 叶为民, 等. 地铁列车振动荷载作用下土体的动力特性和动强度研究[J]. 工程地质学报, 2004, 12(增): 98-101.
- [5] FRANCOIS S, PYL L, MASOUMI H R, et al. The influence of dynamic soil-structure interaction on traffic induced vibrations in buildings[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27: 655-674.
- [6] EDINCLILER A, BAYKAL G, DENGILI K. Determination of static and dynamic behavior of recycled materials for highways Resources[J]. Conservation and Recycling, 2004, 42(3): 223-237.
- [7] PAOLUCCI R, MAFFEIS A, SCANDELLA L, et al. Numerical prediction of low-frequency ground vibrations induced by high-speed trains at Ledsgaard[J]. Sweden Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(6): 425-433.
- [8] 骆亚生, 田堪良. 非饱和黄土动力特性试验方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(6): 1042-1045.
- [9] 骆亚生, 田堪良. 非饱和黄土的动剪模量与阻尼比[J]. 水利学报, 2005, 36(7): 830-834.
- [10] 陈存礼, 胡再强. 强夯地基黄土的动力特性参数及其与振动频率的关系[J]. 西安理工大学学报, 1998, 14(2): 217-220.
- [11] 王建荣, 张振中, 王峻, 等. 振动频率对原状黄土动本构关系的影响[J]. 西北地震学报, 1999, 21(3): 310-314.

(上接第 46 页)

b. 常规水化学方法分析结果与 FDA 模型预测结果基本一致, 表明利用所建立的判别分析模型对矿井涌(突)水水源进行判别是合理可行的。然而, 该矿井突水水源判别模型建立在有限数据基础上, 受数据随机性、代表性、准确性的影响。因此, 有必要广泛收集实测数据资料, 建立相应的样本数据库, 对模型进行训练, 增强该模型的适用性。

参考文献

- [1] HELENA B, PARDO R, VEGA M, et al. Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial (Pisuerga river, Spain) by principal component analysis [J]. Water Research, 2000, 34(3): 807-816.
- [2] JIANG Y, YUAN D, XIE S, et al. Groundwater quality and land use change in a typical karst agricultural region[J]. Journal of Geographical Sciences, 2006, 16(4): 405-414.
- [3] 王连国, 宋扬. 矿井突水危险性评价模型[J]. 工程地质学报,

2000, 8(2): 160-163.

- [4] 刘伟韬, 张文泉, 李加祥. 用层次分析—模糊评判进行底板突水安全性评价[J]. 煤炭学报, 2000, 25(3): 278-282.
- [5] 徐忠杰, 杨永国, 汤琳. 神经网络在矿井水源判别中的应用[J]. 煤矿安全, 2007(2): 4-6.
- [6] 闰志刚, 杜培军, 郭达志. 矿井涌水水源分析的支持向量机模型[J]. 煤炭学报, 2007, 32(8): 842-847.
- [7] 陈果. 图像阈值分割的 Fisher 准则函数法[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(6): 564-567.
- [8] 曹苏群, 王士同, 陈晓峰, 等. 基于模糊 Fisher 准则的半模糊聚类算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(9): 2162-2165.
- [9] DAVID C. K-means Iterative Fisher (KIF) unsupervised clustering algorithm applied image texture segmentation [J]. Pattern Recognition, 2002, 35(9): 1959-1972.
- [10] FHKUYAMA Y, SUGENO M. A new method of choosing the number of clusters for the fuzzy c-means method[C]. Proceedings of the 5th Fhzy System Symposium. Kobe, Japanese: [s.n.], 1989: 247-250.