

河南省铝土矿的数理统计研究

陈廷臻

武耀诚

(河南地质研究所)

(南京大学地质系)



工作方法

我国铝土矿十分发育。数十年来积累了大量地质资料,但真正用定量(数学)方法研究铝土矿的形成及其发育规律者至为罕见。为提高铝土矿的研究程度,增加其科学性、客观性,使蕴藏于原始地质资料中丰富的信息得以充分发挥作用,我们在研究河南省铝土矿成矿条件过程中,综合了多种地质因素的影响和与之有关的数量指标,运用多元统计分析方法,对铝土矿的物质成份、矿石类型、发育规律、沉积环境及成矿预测等方面作了初步研究。因系尝试,错误难免,敬祈指正。

划分矿石类型

这次共收集到全省范围内有地质资料和矿石储量的铝(粘)土矿床(矿点)共56个。为了查清其地质、地球化学特征和分布规律,进行了分类研究。在这方面,群分析和对应分析具有较高的分辨能力,因此,用矿石中的4个主成份— Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , Al/Si 作变量,对56个矿床进行对应分析,并作因子平面点聚图(图1)。由图1看出,铝(粘)土矿床(石)可分为4大类:粘土型矿床(石),粘土质铝土型矿床(石),高铁低硅铝土型矿床(石)和高铁低硅铝土型矿床(石)。

I类矿石位于 F_1 轴右端,与 SiO_2 对应并点聚在一起,以 Si 高为特征,故称粘土型矿石。II类矿石和III类紧邻,两者分界不明,但前者靠近I类区,含 Si 略高,称粘土质铝土型矿石;后者靠近

F_1 轴左端,以 Al/Si 高为其特征,是为高铝低铁低硅的富铝矿石。IV类矿石位于 F_2 轴上部左侧,与 Fe_2O_3 对应,富 Fe 又富 Al ,为高铁低硅型铝土矿石。但在此平面图上, I类矿石与后3类矿石又明显地发生偏离,说明粘土矿石与铝土矿石的物质成分有明显差异。

另外,用Q—型群分析对56个矿床(点)进行分类,也得到同样结果。

在此基础上,为进一步搞清每类矿石的物质成分特征,又从各类矿石中筛选出若干个有代表性的样品,以主成分 Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 和微量元素 Ga , B , Sr , K , Li 为变量进行R—型群分析,其结果见图2。从中可知:

1.在低铁低硅型铝土矿群中, Al 与 Sr 密切相关,与 Ga 则较密切。说明在外生条件下, Ga , Sr 以其相似的地球化学性质共同参与了铝土矿的成矿作用(这对喀斯特型铝土矿很重要)。此外, K 与 Si 也有较显著的(在信度5%下)正相关,而富 K (平均含量13975 ppm)又是其明显特点,表明与此类矿床中富含的白云母有关。

2.在粘土矿群中, Al 与 B 有较显著的正相关关系。已知 B 为亲海元素,由此推断它们可能是在海相条件下形成。 Li 与 Si 也表现为密切的正相关,这与豫北焦作一带粘土矿中的 Li 含量很高(Li_2O 一般在0.1~0.5%左右, Li_2O 储量可在百万吨以上*)的事实相一致。但是 K 则具较强的独立性,表明其形成条件或阶段有所不同。事实是,豫北焦作地区粘土矿床中普遍发育叶腊石化、

*据胡安国1985年资料。

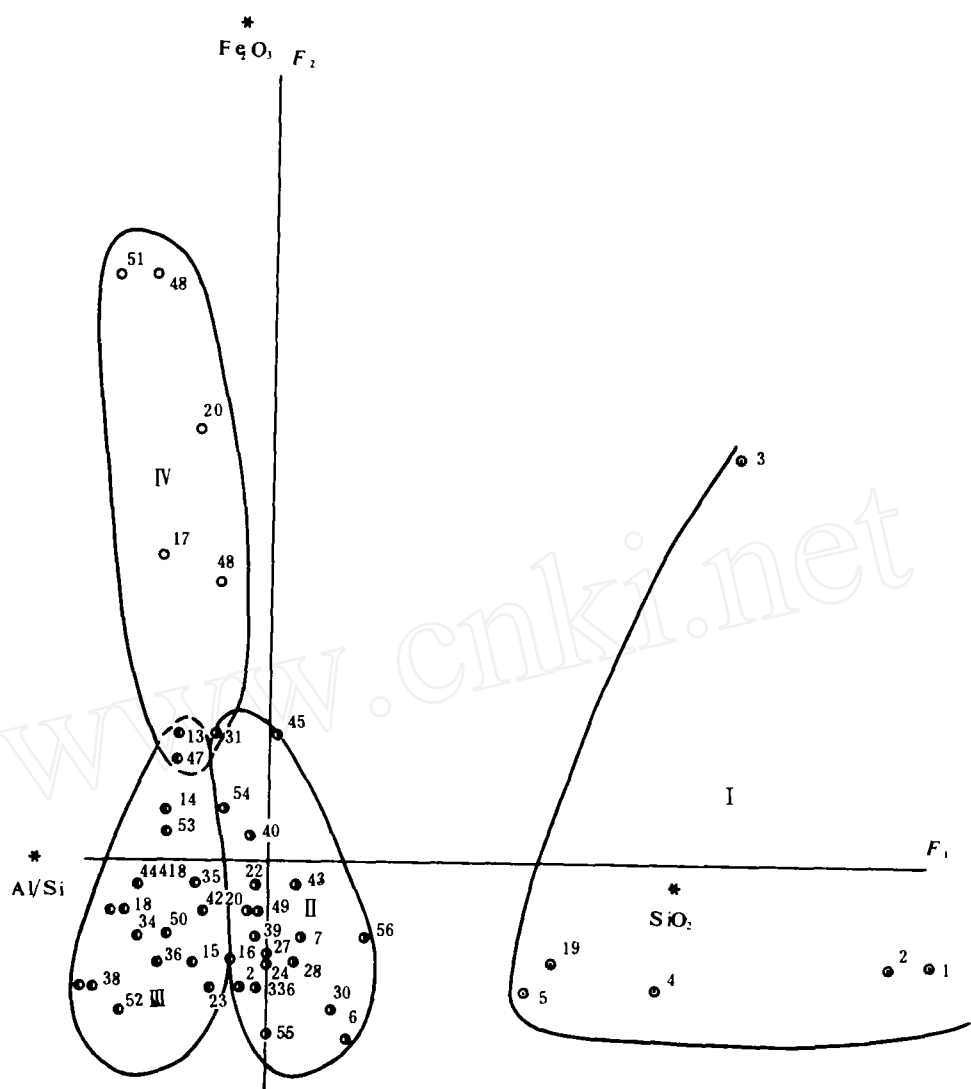


图1 铝、粘土矿类型对应分析平面图
 I—粘土矿；II—粘土质铝土矿；III—低铁低硅铝土矿；
 IV—高铁低硅铝土矿。（图中号码为各类矿区编号）

伊利石化，镜下观察发现这些富钾矿物系交代石英、高岭石及绢云母等先期矿物而形成。

3. 粘土质铝土型矿群是相对富含Ga, B, Li的一类矿石。从高水平相关阶看, Ga与Sr, Li与K具显著正相关, 但Al, Si, B又与Ga, K, Li, Sr等呈显著负相关, 这似乎表明主要的水铝石、高岭石等矿物形成于同沉积成岩(矿)阶段, 而后再经受了热液蚀变, 遂形成富K, Li的伊利石、叶腊石等矿物, 这与上述粘土型矿石有相似之处。

总观上述各类矿石(床)的化学成分及其间相互关系的变化, 从中可抽出几个明显的沉积作用地球化学信息:

1. 形成水铝石的 Al_2O_3 和形成粘土矿物的 SiO_2 , K_2O 等普遍具明显的负相关关系, 这意味着两类矿物形成的地质条件有所不同, 或是 Al_2O_3 与 SiO_2 在成矿作用中呈互为消长关系。

2. Al_2O_3 在I, II类矿石中与B具较明显的(在信度5%下)正相关性, 而在III, IV类铝土型矿石中则表现为显著的负相关, 这反映了前

正则化相关系数

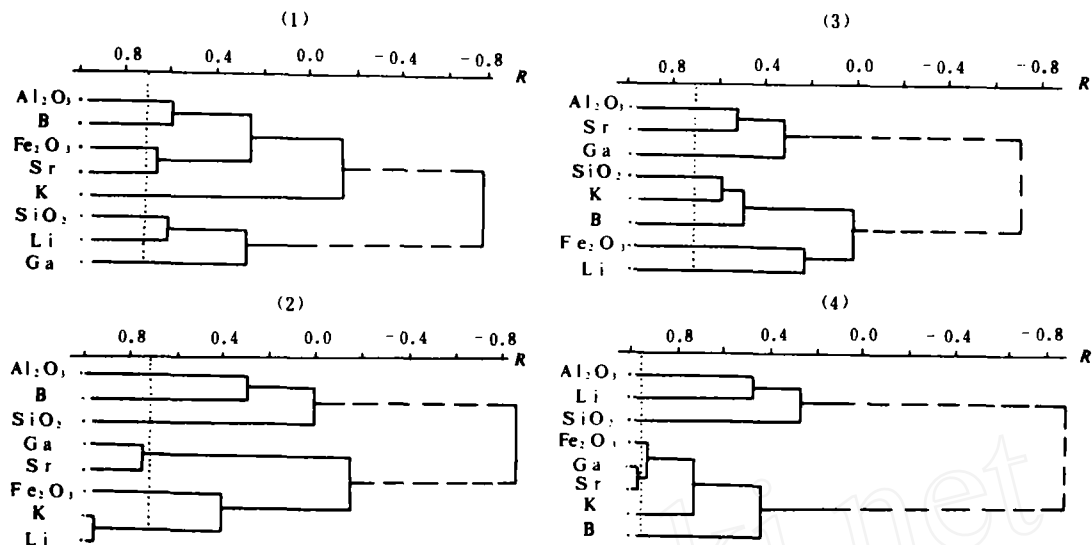


图2 铝、粘土矿主要成分点群分析谱系图

(1) — 粘土矿; (2) — 粘土质铝土矿; (3) — 低铁低硅铝土矿; (4) — 高铁低硅铝土矿

两类矿石和后两类矿石形成于不同的环境。前者与海相关系密切,后者则与陆相关系紧密(B是亲海的指相元素)。

3. Sr与低铁低硅型铝土矿石的成矿作用呈较明显的正相关。已知该类矿石在岩溶凹斗中发育且矿体多与基底(O_2)灰岩直接接触。由于Sr与Ca的化学性质相似,在地球化学场中与 CO_2 正相关密切,主要呈碳酸盐形式出现,故灰岩中富含的Sr可通过岩溶地下水的循环进入凹斗中参与成矿作用。实际资料证明,从粘土矿过渡到铝土矿, Sr含量渐增且多富集于富钾的优质铝土矿石中(如岩溶发育区的方山、张窑院矿区等)。由此得知,本省铝土矿中Sr的高含量(背景值)并不完全表明是海相沉积所致(尤其在嵩箕、陕县—渑池地区),反而说明古岩溶在铝土矿形成过程中的重要作用。

判别沉积环境

由于铝、粘土矿层本身缺乏明显的指相标志,已有的标志又难以说明问题,因此,为了探讨全省铝土矿层的沉积环境及其与古地理的关系,并借以研究成矿规律,我们以某地业以存在的、有

指相生物化石为标志的矿层为标准样品,用各地含矿层中指向微量元素(B, Ga, Sr, Ba, Rb, K)的分析数据为变量进行R—型因子分析,取得了较为满意的结果。简介如下:

1. 选择变量和主因子

某些学者指出,用指相微量元素判别沉积环境一般以其比值大小加以区别。经试验,用6个微量元素(B, Ga, Sr, Ba, Rb, K) %的测定数据和用其比值(B/Ga, Sr/Ba, Rb/K)的数据所计算的结果明显不同:前者对环境的分辨能力远高于后者,且与其他资料吻合较好,易于进行地质解释,故用之。

根据正规化了的6个变量相关矩阵(表1)求出的特征值的累积百分比(方差累积贡献)大小,选出4个主因子(见表2),它们代表了原始变量的92.7%的信息,故可用。

2. 计算正交因子解

对6个变量(元素)求出的初始因子解是不确定的。它未能使同一因子轴上的数据明显分化故又将初始因子轴进行正交旋转,其结果为正交因子解(表2)。由表2可知,这4个主因子能稳定地代表着总体,因而可据以进行地质解释。

3. 地质解释——沉积相的划分

从因子相关矩阵看, $\gamma_{F_1 F_3} = 0.2497$, $\gamma_{F_2 F_4} = 0.0744$, $\gamma_{F_3 F_4} = 0.1324$, 它们都小于信度为5%时的临界值 $R = 0.300$, 故为显著不相关, 说明这4个主因子是相互独立的地质因素, 用它们来解释, 效果将是最佳的, 也是可信的。

由表2看出, F_1 主要反映了Rb, K的作用, 它对总体的方差贡献又很大, 这意味着粘土矿物尤其是富钾的伊利石类矿物在含矿系中不仅含量占优势, 而且在矿(岩)石形成的各阶段, 它都占有重要地位。事实上, 铝、粘土矿石中不同成

变量相关系数矩阵 表1

变量	B	Ga	Rb	K	Sr	Ba
B	1	0.0789	0.2297	0.2737	0.1979	0.1593
Ga		1	-0.2011	-0.1204	0.0578	0.4809
Rb			1	0.9594	0.3291	0.5211
K				1	0.3096	0.4591
Sr					1	0.2186
Ba						1

正交旋转因子解 表2

变量	F_1	F_2	F_3	F_4	公因子方差
B	0.1368	0.0097	-0.9810	0.0810	0.99
Ga	-0.0183	-0.9148	0.0932	0.0991	0.86
Rb	0.9534	0.1936	-0.0831	0.1183	0.98
K	0.9665	0.1025	0.1287	0.1208	0.98
Sr	0.1767	0.0072	0.0856	0.9753	0.99
Ba	0.3969	0.7431	0.1356	0.1850	0.76
因子方差贡献	2.0512	1.1165	1.0263	1.0389	
累计系数%	41.7	66.1	79.7	92.7	

因的伊利石(类)普遍发育就是证据。

F_2 因子主要由Ba起作用。但 F_1 , F_2 两因子又呈负相关, 表明二者所代表的地质因素互相对立(排斥)。根据实际情况, 选用了 F_1 , 舍掉 F_2 。

F_3 因子明显地由B的作用来表征。有趣的是, 在这一因子轴上的所有变量都是负载荷; 它与其他各变量的相关系数都小于信度为5%时 $R = 0.300$ 的临界值, 为显著不相关, 具有明显的独立性。鉴于B具有重要的指相意义, 故可作为相因子进行沉积环境的分析。

F_4 主要是Sr的成因因子。从表1看出, Sr与Rb, K具有一定的相关性, 说明它们曾经在相似的地质作用下共处于一个统一体中(矿体或岩层

中); 但 F_1 与 F_4 又呈负相关, 可能表明它们的形成条件或物源不同: 前者是亲陆元素, 主要赋存于古陆结晶岩系中; 后者是亲海元素, 主要与碳酸盐岩共生。它们在表生作用条件下, 经过复杂的地质地球化学作用, 共同参与并构成了铝、粘土矿的主要成分。

前已述及, F_3 相因子B的指相作用很大, 因此, 以豫北某地含海相动物化石的粘土矿层的样品为标准, 对全省15个地(矿)区含铝岩系的44个样品进行了因子得分计算, 并以 F_1 F_3 组合构成了全部样品在主因子平面上的聚点图(图3)——全省铝(粘)土矿区各层位沉积环境的分类。此图将各矿区划分为海相(以博爱为代表)、

过渡相以浍池、禹县为代表)和陆相(以宝丰边庄为代表)3个沉积相范畴, 与以其他沉积标志(如沉积构造、粘土矿物组合等)为准则而得到的结果是很相近的, 具有一定的实践意义。

矿化规模统计预测

在深入研究全省铝(粘)土矿成矿地质条件和主要物质成分的基础上, 根据不同类型矿床的定性变量和定量变量的综合分析, 通过电算处理, 建立了铝土矿的“事件概率回归分析”和“对应分析”两个矿化统计预测模型。

1. 事件概率回归模型

依据40个已知矿床(大型铝土矿10个, 中小型铝土矿19个, 粘土矿11个)的10项地质特征(包括30个不同的属性)和6项化学组份的定量数据, 采用逐步回归的方法(检验值 $F = 0.5$)建立起铝土矿矿化规模的(混合)预测模型, 用公式表达如下:

$$\hat{y}_1 = a_0^1 + a_1^1 x_1 + a_2^1 x_2 + a_3^1 x_3 + \dots + a_b^1 x_b \quad (1)$$

$$\hat{y}_2 = a_0^2 + a_1^2 x_1 + a_2^2 x_2 + a_3^2 x_3 + \dots + a_b^2 x_b \quad (2)$$

$$\hat{y}_3 = a_0^3 + a_1^3 x_1 + a_2^3 x_2 + a_3^3 x_3 + \dots + a_b^3 x_b \quad (3)$$

式中, $\hat{y}_1$, $\hat{y}_2$, $\hat{y}_3$ 分别为大型、中小型铝土矿和粘土矿出现的概率; a_0^1 , a_0^2 , a_0^3 分别为方程式(1), (2), (3)的常数项; $a_1^1 - a_b^1$, $a_1^2 - a_b^2$, $a_1^3 - a_b^3$ 分别为方程式(1), (2), (3)各项的回归系数(其中 $b = 36$); $x_1 - x_{30}$ 为用二态变量(0, 1)表示的成矿条件的属性;

x_{31-36} 为物质组份 (含量) 的正规化数据。

正规化数据的转换公式为:

$$\text{正规化数据 } (x_{\text{正}}) = \frac{\text{原始数据 } (x) - \text{模型用的最小值 } (x_{\min})}{\text{模型用的最大值 } (x_{\max}) - \text{模型用的最小值 } (x_{\min})}$$

建立模型所采用的最大值和最小值见表 3。

备矿区定量变量的最大、最小值数据表 表 3

定量变量	建立模型的 40 个矿床		
	最大值	最小值	最大值—最小值
矿层厚度 (m)	10.6	0.3	10.3
铝硅比值 (Al/Si)	9.9	0.84	9.06
镓铝比值 (Ga/Al)	0.0014	0.000014	0.001386
硼 (B)	1750	123	1627
锶 (Sr)	1500	50	1450
钾 (K)	50100	700	49400

当建立方程 (1) 时, $\hat{y}_1$ 取值为 1, $\hat{y}_2, \hat{y}_3$ 取值为 0;

当建立方程 (2) 时, $\hat{y}_2$ 取值为 1, $\hat{y}_1, \hat{y}_3$ 取值为 0;

同理, 建立方程 (3) 时, $\hat{y}_3$ 取值为 1, $\hat{y}_1, \hat{y}_2$ 取值为 0。

对某一个具体的矿床 (点) 而言, 则有:

$$\hat{y}_1 + \hat{y}_2 + \hat{y}_3 = 1$$

欲对某一个未知矿床 (点) 进行预测评价, 只需将其有关地质特征 (定性变量) 和组份特征 (定量变量) 按模型中对 x 的要求, 分别代入上述 3 个方程, 即可求出其概率回归值, 概率值最大者即是未知矿床 (点) 最大可能的矿化规模 (或类型)。

本文建立的 3 个 “事件概率回归方程” 的回归系数 (a 值) 列于表 4, 以供评价矿床 (点) 进行回代时使用 (某地一未知矿床的回代举例也附列此表内)。

2. 对应分析模型

在建立此模型前, 根据第一模型所提供的信息, 把全部变量进行了对比, 最后优选出 18 个定性变量和 6 个定量变量参与计算。

计算分析结果给出下列几点信息:

(1) 样品 (矿床) 或变量之间的关系, 可在对应分析因子平面图上明显看出, 邻近的样品或变量点具有成因上的联系, 归属为同一类型。

它反映了某种 (些) 主要地质特征。

(2) 同一类型的样品 (矿床) 点群特征可由其邻近的变量 (地质因素) 点群所表达。换言之, 同类样品 (矿床) 由其邻近的变量所代表的地质条件 (作用) 来解释。

(3) 可对未知样品 (矿床、点) 进行因子得分计算, 把计算结果投影到对应分析因子平面图上, 便可知样品 (矿床、点) 归属哪一类, 从而达到预测的目的。

对全省铝土矿床 (点) 的对应分析结果示于 F_1-F_2 对应分析因子平面图 (图 4) 中。

由图 4 不难看出:

(1) 铝土矿和粘土矿明显地分别位于左区和右区; 而左区之下部和上部又分别是大型铝土矿和中小型铝土矿分布区。即 I 区为大型铝土矿预测区, II 区为中小型铝土矿预测区, III 区为粘土矿预测区 (I, II 区之间为大中型铝土矿的过渡地带, 主要反映了大、中、小型铝土矿的共同控制因素)。

(2) 以 F_1 轴为准, 铝土矿主要位于其负端, 粘土矿则位于其正端, 故 F_1 轴可谓矿床类型 (演化) 轴; 以 F_2 轴为准, 大型铝土矿床主要位于其负端, 中小型铝土矿则靠近正端, 故 F_2 轴可谓矿床规模 (变化) 轴。

(3) 铝土矿预测区范围内的地质变量反映了铝土矿床的地质特征 (或成矿因素)。其中与大型铝土矿有关的因素主要是矿床位于海陆过渡区的平缓斜坡地带, 矿体规模 (长) 大于 1000 米, 矿石具稀鲕结构且富含高岭石类和伊利石类矿物以及 K 元素等; 与中小型铝土矿有关的因素则是矿床位于岩溶凹斗发育区, 与物源距离在 30 公里左右, 矿体多呈透镜状且厚度较大, 矿石较富且 Sr 含量较高。而与粘土矿相关的因素则主要是成矿物质经过长距离 (50 公里左右) 搬运后在弱水

事件概率回归预测模型表 ($F = 0.5$)

表 4

回归系数	地质特征	大型 铝土矿	中小型 铝土矿	粘土矿	某未知矿床回代实例			
					变量(x)	大型矿	中小型矿	粘土矿
a_0	常数项	0.293	0.602	-0.507	1	0.293	0.602	-0.507
a_1	物源距>50公里	0.683	0	0	1	0.683	0	0
a_2	物源距=30~50公里	-0.399	0	0	0	0	0	0
a_3	物源距<30公里	0	-0.294	0.212	0	0	0	0
a_4	海相	0	0	0	0	0	0	0
a_5	过渡相	0.459	-0.473	0	1	0.459	-0.473	0
a_6	陆相	0.384	-0.351	0	0	0	0	0
a_7	铝质岩/铁质岩>1	0.286	-0.332	0	1	0.286	-0.332	0
a_8	铝质岩/铁质岩=1	0	0	0	0	0	0	0
a_9	铝质岩/铁质岩<1	0	-0.177	0	0	0	0	0
a_{10}	基底地形为凹、盆	0	-0.177	0.216	0	0	0	0
a_{11}	基底地形为缓坡	-0.971	0	0.227	1	-0.971	0	0.227
a_{12}	基底地形为隆起(高地)	0	-0.888	0	0	0	0	0
a_{13}	水动力较强	0	0	0	1	0	0	0
a_{14}	水动力中等	0	0	0	0	0	0	0
a_{15}	水动力较弱	0	-0.278	0.166	0	0	0	0
a_{16}	矿体长度>1000米	0.732	-0.540	0	0	0	0	0
a_{17}	矿体长度为100~1000米	0	0	0	1	0	0	0
a_{18}	矿体长度<100米	0	-0.257	0.262	0	0	0	0
a_{19}	矿石结构为豆鲕、碎屑状	0	0	0	1	0	0	0
a_{20}	矿石结构为稀鲕、致密状	0.483	0	0	0	0	0	0
a_{21}	矿石结构为致密胶状	0	0	0.848	0	0	0	0
a_{22}	粘土矿物为高岭石	0	0	0	0	0	0	0
a_{23}	粘土矿物为高岭石、伊利石	0	0	0.313	1	0	0	0.313
a_{24}	粘土矿物为伊利石、叶腊石、绿泥石	0	0.323	0	0	0	0	0
a_{25}	煤层(线)在矿层底部	0.659	0	0	0	0	0	0
a_{26}	煤层(线)为矿层夹层	0	0.718	0	1	0	0.718	0
a_{27}	煤层(线)在矿层顶板	0	0.887	-0.041	0	0	0	0
a_{28}	底板有工业黄铁矿体	0	-0.156	0.078	0	0	0	0
a_{29}	底板有黄铁矿化	0	0	0	1	0	0	0
a_{30}	底板无黄铁矿化	0	0	0	0	0	0	0
a_{31}	矿体(层)厚度(米)	0	0	-0.180	0.301	0	0	-0.054
a_{32}	Al/Si	-0.870	0.534	0.254	0.437	-0.380	0.233	0.111
a_{33}	Ga/Al	0.446	0	-0.122	0.089	0.039	0	-0.010
a_{34}	B	0.304	-0.490	0.201	0.526	0.159	-0.257	0.106
a_{35}	Sr	0	0	0	0.206	0	0	0
a_{36}	K	0	0.0002	-0.0003	0.319	0	0.00006	-0.0002
回代结果					$\sum a x$	0.568	0.491	0.186
					$\hat{y}$	0.456	0.394	0.149

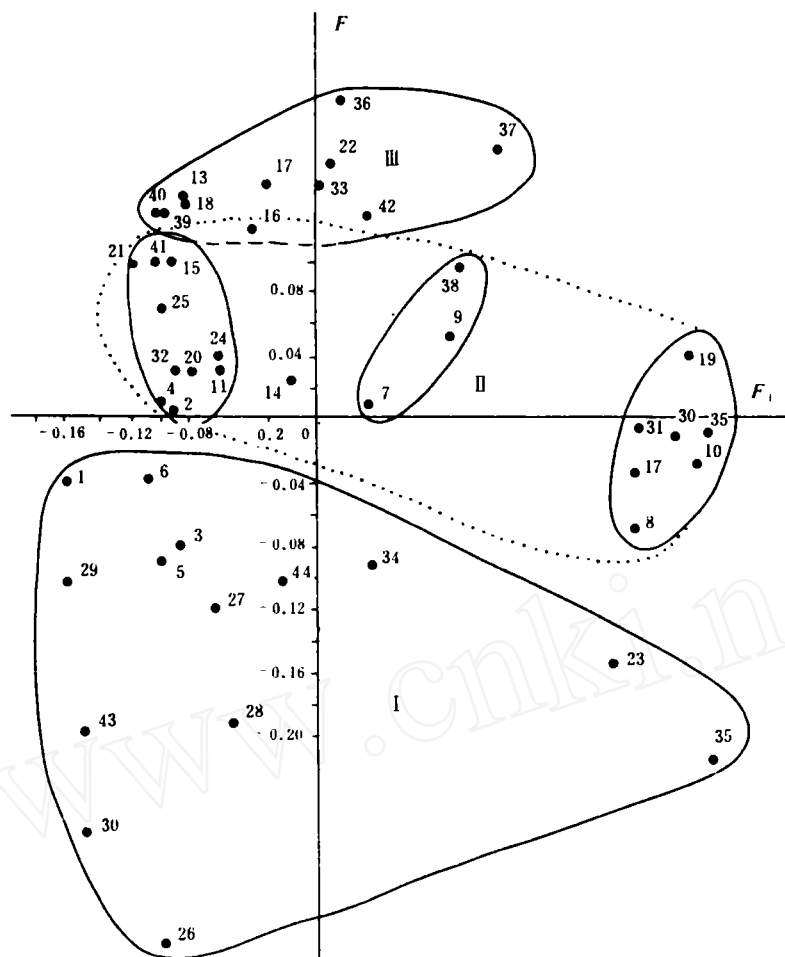


图3 铝、粘土矿在指相元素主因子平面上的聚点图

I—海相(区); II—过渡相(区); III—陆相区

动力条件下于弱还原环境中与黄铁矿、菱铁矿等相伴沉积成矿(岩), 矿石多呈致密结构, 且 $Al/Fe < 1$ 。

综上所述, 可认为: 嵩箕地区(登封、密县、禹县、临汝北部、汝阳—伊川东部的嵩山—箕山腹地)和陕县—渑池地区是较好的富铝成矿区, 尤其禹县—登封一带更为优越。此两地区的主要成矿有利条件是:

(1) 位于古陆(岛)或高地边缘的凹陷区, 岩溶发育, 有丰富的物源和适宜的沉积场所;

(2) 地处滨岸泥沼环境, 水动力能量较低, 很少或没有掺合作用;

(3) 由于岩溶地貌(凹斗)的控制, 矿体多为中小型, 以透镜状为主, 厚度多变, 矿石较富, 一般 $Al/Si > 7$; 在水流的搬运、筛选、沉积

过程中, 因凹斗的“捕集”作用, 可形成粗碎屑状和豆鲕状结构的富矿石, 易选易碎, 具有较高的工业价值。

(4) 由于中、新生代断块构造运动的影响, 此区长期缓慢上升, 相对处于高位; 多体系的构造形迹和断裂交织如网; 地下水位又长期波动于矿层底面以下并处于不断流动(排泄)交换状态, 因而使矿体脱硅的表生作用不断进行, 形成了蜂窝状、土状构造的(富铝)氧化矿石。如禹县方山矿、登封大冶矿即是。

根据两个矿化预测模型得知, 能表征各类矿床成矿特征的主要地质变量与已知的有利成矿条件基本相符, 说明运用数学统计分析方法进行成矿预测是行之有效的找矿手段。

两个预测模型适用于全省范围内的任何一个

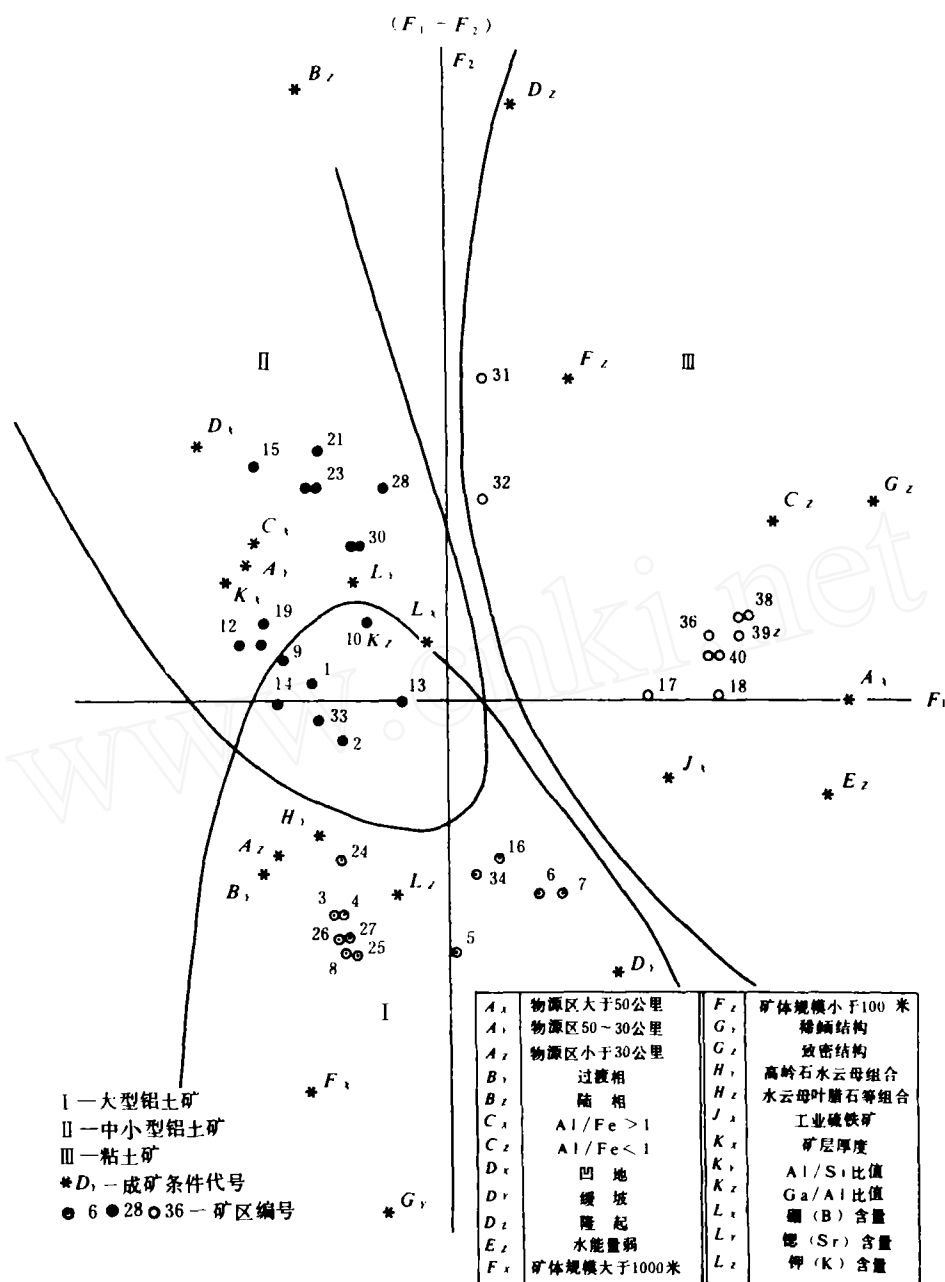


图4 铝、粘土矿 F_1 — F_2 对应分析因子平面图

规模不明的铝(粘)土矿点,在进行初步矿点检查的基础上,只要取得某些必须的地质信息,便可按照模型的要求,对其矿床规模作出初步评价。

本文提出的铝土矿的两个预测模型,是建立在实际资料统计规律基础之上的,由于有些资料不全或精度不够,因而未能列入计算,但这并不影响两个预测模型的实用价值。而模型的可靠程度则有待在生产实践中加以检验。

文中原始资料系河南省地质研究所岩相古地理组集体劳动成果,南京大学冯祖钧副教授曾给予热情指导,全文经董有工程师审阅提出宝贵意见,在此一并致谢。

主要参考文献

- [1] 刘承祚、孙惠文:《数学地质基本方法及应用》,地质出版社,1981年