

浙江武义萤石矿床遥感找矿预测

朱亮璞 包献华

(北京大学地质系)

摘要 在分析了武义地区构造、岩性、地球化学和现有萤石矿床蚀变类型和编制出1:50000遥感解译地质图基础之上,提出本区的萤石控矿因素及遥感找矿标志,建立遥感找矿模型。用主成分分析方法提取与萤石矿化密切相关的硅化、高岭土化蚀变信息,用“证据权重模型”法进行区域找矿预测;找到了断裂硅化蚀变带。

关键词 萤石矿床,定向主成分分析,证据权重模型

浙江武义地区是我国当前萤石矿生产、出口和储量最大的基地。地区内已有大中型矿床十多处,小型矿床及矿化地点百余处。为扩大生产需要,开展了包括遥感方法在内的综合找矿工作。本区萤石矿主要产出在侏罗纪西山头组四、五段(X^3J_4 , X^4J_5)、九里坪组(JJ_9)、白垩纪朝川组二段(C^2K_2)中酸性流纹质、英安质熔岩及熔结凝灰质砂岩、钙质砂岩内。区域NE—NNE向断裂为主要导/容矿构造。区内矿床矿点大体成北西向串列展布,主要分布在区域地球化学F、CaO的高值异常区上。韩文彬等^[1]在包括上述认识基础之上,提出包括武义地区在内的区域“地热水再造型萤石矿床”成矿模型。

1 武义矿田的萤石遥感找矿模型

研究是以TM资料多源信息复合处理,及航空、卫星象片解译编图为主,并辅以较多地面观测与地物波谱测试,在“地热水再造型萤石矿床”的认识基础上,补充、深化总结出遥感成矿模型来。模型的特点是:(1)北西走向的温州—淳安区域大断裂把武义萤石矿田的导矿容矿构造分为两种形式,北东部分与原来认识相同,即NE向断裂为主要控矿构造;西南部分则为NE断裂与NW断裂分割成的菱格状小断块,断块东南角断裂共轭点控矿(如溪里矿床)。(2)NW向串列的矿床点或矿体膨胀地段,主要产出在压扭性NE向断裂的局部弯曲与引张地段上。(3)矿田内硅化为远矿围岩蚀变,只有强烈硅化加高岭土化才是近矿围岩蚀变。(4)矿化主要发育在CaO、F元素的区域化探异常边缘梯度带上。(5)火山岩或次火山岩发育的环形构造的边部为矿化有利地段。(6)TM矿化蚀变专题图象上的高亮度地段,尤其是呈NE向线性延伸的高亮度区,也是矿化的有利区。

2 萤石矿化蚀变信息定向主成分分析

用定向主成分分析技术来提取武义矿田萤石矿化蚀变的遥感信息, 技术措施与步骤如下:

1. 以硅化、高岭土化蚀变的波谱信息作为萤石矿化信息的标志。实际工作中, 又是把硅化的硅元素及高岭土的 $[\text{OH}]^-$ 原子基团的波谱特征作为上述蚀变的代表标志。实测蚀变岩与矿石波谱曲线表明, 蚀变在 TM5 和 TM7 分别为高与低反射值, 因而用 TM5 / TM7 比值图象有利于增强上述蚀变信息。

2. 用高值 OIF 指数 TM 波段作主成分分析来提取矿化蚀变信息。统计表明, TM1、4、7 及 TM1、4、5 (RGB) 的 OIF 指数最大(分别为 43.47 及 41.70)。故选用 TM1、4、5、7 四个波段作地质解译图彩色合成图象(图版 I 图 1)主成分分析(PCA)。PCA 是一种多元统计技术, 通过正交线性变换, 将波段空间中的数字图象信息, 映射到所选取主成分空间中, 对原有波段信息进行归并与增强, 以达到压缩数据、识别某些特征信息的目的。A. P. Crosta 和 Mc. M. Moore^[2]提出称为“特征主成分选择(FPCS)”技术, 它对 PCA 特征向量载荷进行分析, 以确定哪个主成分(PC)更集中地反映某个波谱(或某种目标地物)的特征波段的信息, 并具有更直接相关的关系。FPCS 技术的应用价值是, 可以预测出目标地物将以高反射值或低反射值在图象中显示。TM1、4、5、7 波段主成分分析的数据表明(表 1), PC1 的特征值最大(72.2), 信息量最多, 且 TM4、TM5 的载荷较大(分别为 0.61 和 0.70), 因此 PC1 中主要反映了 TM4 和 TM5 波段的信息。PC2 中 TM4 贡献最大(0.77), 主要反映 TM4 的信息。PC3 则主要反映 TM1 的信息。而在 PC4 特征向量矩阵中 TM7、5 分别为 0.82 和 -0.48, 是 PC4 贡献最大和次大的波段, 且两者特征向量符号相反, 表明 TM7 和 TM5 分别以高反射和低反射出现。相反, 贡献最小的是以反映植被信息为主的 TM4 波段(0.19)。因而 PC4 取反图象正好增强了萤石矿化蚀变信息的同时又适当压抑了植被的干扰, 这正是本次图象处理要达到的要求。

表 1 TM4 个波段与比值波段的特征值和特征向量表
Table 1 The TM ratio band of eigenvalue and eigenvector

输入波段	TM1	TM4	TM5	TM7		TM5 / 7	TM4 / 3	
波段均值	84.60	56.73	64.83	27.79		125.2	127.5	
标准差	5.16	12.70	13.38	7.70		57.8	61.4	
	特征向量矩阵				特征值	特征向量矩阵		特征值
PC1	0.18	0.61	0.70	0.3	72.2	0.42	0.9	66.4
PC2	-0.05	0.77	-0.44	-0.46	21.3	-0.91	0.42	33.6
PC3	0.95	-0.02	-0.29	0.13	5.9			
PC4	-0.25	0.19	-0.48	0.82	0.6			

3. 选用 TM5 /7, TM4 /3 比值波段进行定向主成分分析以进一步减弱植被干扰。上面提到 TM5 /7 可以增强矿化蚀变信息, 而 TM4 /3 则是常用来识别植被的比值波段, 且比值能减弱地形的影响, 故用上述两比值波段作定向主成分分析, 其目的、意义就更加明确。表 1 中 TM5 /7 的 PC2 载荷绝对值大(-0.91), 表明其蚀变信息强, TM4 /3 的 PC2 载荷值小(0.42), 而且上述两者符号相反, 表明植被信息较弱, 比值图象特征向量在 PC2 取反拉伸图象上, TM5 /7、TM4 /3 将分别以高反射值与低反射值显现。

4. 利用尾砂池作图象处理的训练区, 来确定分割蚀变信息的阈值。要对 PC2 图象的蚀变与其他信息进行分离, 要领是分割阈值的选定。由于矿区尾砂池是脉石蚀变矿物相对集中的地区, 它的反射率数据可以作为矿化蚀变的标准反射率来使用。我们以武义矿田尾砂池作训练区, 设计出信息提取窗口为[训练区均值 $\pm(\epsilon \times$ 该主成分图象的标准差)]。对 TM1、4、5、7 波段 PC4 负图象 ϵ 分别取值为 1.0、1.5、2.0 及 TM5 /7 和 TM4 /3 比值波段 PC2 负图象。 ϵ 分别取值为 0.5、1.0、1.5, 生成二值图象并作假彩色合成(图版 I 图 2)。

所得到的图象大大增强了矿化蚀变的信息, (同时还包含着部分的水干扰的信息), 矿化蚀变信息将以高反射(亮)在图象上显示。结合本区萤石区域成矿的特点, 在图象上沿断裂带分布的矿化蚀变信息, 即亮度区呈线性展布, 尤其是 NE 与 NW 向主要控(容)矿断裂带分布, 更具有实际意义, 如下陈—下屋一带及黄泥岗—横店一线等地区的构造蚀变破碎带, 在野外都发现有矿化现象。

3 武义萤石矿床的证据权重模型法找矿预测

结合研究区已有的地质、遥感、物化探等资料, 选用“证据权重模型”法^[3, 4]来进行武义地区萤石矿的区域找矿预测。

3.1 证据权重模型方法简介

证据权重模型法是将控矿有利的地质因素, 表示为控矿地质证据的二值指示图形, 根据矿(化)点的空间分布, 求出它们的权重, 并在判断它们之间两两满足控矿条件相互独立的前提下, 根据贝叶斯(Bayes)的判别法则, 求出这些地质证据迭合时的矿化后验概率的分布来预测找矿远景区。

首先, 把整个研究区分割成大小相同的 T 个单元, 其中 D 个单元包含有且只有一个矿(化)点($D \leq T$), 根据 Bayes 法则, 一个对成矿有利的特征 B_j 对矿化 D 的影响可表示为条件概率: $P(D|B_j) = P(B_j|D) \cdot P(D) / P(B_j)$, 其中 $P(D) = D / T$ 为矿化的先验概率, k 表示该特征存在或不存在。定义某特征(B_j) 存在或不存在 (\bar{B}_j) 对于矿化 D 的权重系数分别为:

$$W_j^+ = \ln [p(B_j|D) / P(B_j|\bar{D})], W_j^- = \ln [p(\bar{B}_j|D) / P(\bar{B}_j|\bar{D})]$$

其中 \bar{D} 表示无矿(化)点单元, 若存在两个特征变量 B_1 、 B_2 , 它们相对于矿化 D 存在条件独立, 那么, 可推导出

$\ln O(D|B_1^{k_1}B_2^{k_2})=W_1^{k_1}+W_2^{k_2}+\ln O(D)$ 其中 $O(D)=P(D)/[1-P(D)]$, k_1, k_2 分别代表特征 B_1, B_2 存在或不存在。

同样, 对于 n 个特征, 若它们之间两两满足对于矿化 D 存在条件独立, 则它们叠合时,

$$\ln O(D|B_1^{k_1} \cap B_2^{k_2} \cap \dots \cap B_n^{k_n}) = \sum_{j=1}^n W_j^{k_j} + \ln O(D)$$

其中, k_j 为正, 表示 B_j 特征存在, 为负则不存在, 若 B_j 特征未知或数据缺失, 则 W_j 等于 0。据此我们可得到 n 个特征迭合时矿化的后验概率。

上面所得到的矿化后验概率的误差主要来自每个特征权重计算所带来的方差和参与预测的特征数据的缺失或不全。若不存在特征数据的缺失, 则可直接用矿化后验概率分布的高值来预测远景区, 否则就要对后验概率与总误差的比值进行显著性检验, 确定某一阈值, 用大于这阈值的高值后验概率区来指定远景区。

3.2 武义地区萤石找矿预测复合特征的选择

根据研究区成矿特点及找矿标志的分析, 初步选定地层、岩浆岩、线性构造、环形构造、F、CaO 元素地球化学异常作为萤石找矿预测的特征。

首先分别计算各个特征变量相对于研究区矿化点分布的权重大小(W^+ 和 W^-)。对于有一定异常级别 F、CaO 地化异常特征(图版 I 图 3)及有一定控制范围的线性、环形构造等线状分布的特征, 分别计算其不同异常级别和不同“膨胀”结果的权重值及其方差 $\sigma(C)$, 用这样一个参量 $C/\sigma(C)$, 其中衬度 $C=W^+-W^-$, 使得其达到最大值或某一极大值时, 即反映了衬度的误差相对较小, 而 C 值较大的那个阈值分别作为 F、CaO 地球化学异常阈值和线性特征的最佳控制范围。因为对于每一个特征变量, 其求出的 W^+ 与 W^- 总得符号相反, 那么可用衬度 C 来度量此特征变量与矿化点的关系的密切程度, C 值及 $C/\sigma(C)$ 值越大, 其与矿化点的关系就越密切。计算结果为线性、环形构造的最佳控制范围分别为 210m, 330m。F、CaO 地球化学异常阈值分别为 1600×10^{-6} 和 0.63%, 与本区 F、CaO 的平均丰度(F 为 1725.97×10^{-6} , CaO 为 0.67%)相一致。对地层变量, 根据其衬度 C 的大小, 选出对成矿较为有利的地层, 其排列顺序也与本区萤石矿赋矿地层频率的大小基本一致, 显示了证据权重模型预测方法的有效性和可行性。

对于所选定的特征变量要检验它们在统计上是否符号两两之间相对于矿化点存在条件独立, 以对特征进一步筛选, 删除相对于矿化点相关性大的特征变量。可利用两两特征与矿化点 D 叠合时, 可能出现的 8 种叠合情况的观察概率与期望概率进行 X^2 分布的显著性检验, 来判别两特征相对于矿化 D 条件独立的假设是否成立。通过显著性检验, 最后确定研究区的 F 异常 ($>1600 \times 10^{-6}$)、线性构造(210m 控制范围)、环形构造(330m 控制范围), 及朝川组二段(C^2K_2)、九里坪组(JJ₃)、西山头组四、五段($C_x^4J_3, C_x^4J_3$) 地层这 7 个特征变量作为研究区萤石成矿后验概率计算的复合特征变量(表 2)。

3.3 武义矿田萤石找矿预测及效果评估

分别对选定的特征变量进行二值化处理, 生成控矿因素的二值指示图象, 并按其权

表2 选中的特征变量的权重及其方差表
Table 2 Selected the weight of characteristic variate and variance

特征变量	级别	W^+	$\sigma(W^+)$	W^-	$\sigma(W^-)$	C	$\sigma(C)$	$C/\sigma(C)$
F 地球化学	$>1600 \times 10^{-6}$	0.71711	0.02523	-0.32454	0.02168	1.04165	0.03327	31.31259
线性构造	210m	0.51983	0.02154	-0.45209	0.02544	0.97192	0.03334	29.15565
环形构造	30m	0.57848	0.05689	-0.03949	0.01715	0.61797	0.05942	10.40041
C^*K_1		0.30427	0.05114	-0.02983	0.01734	0.33409	0.05400	6.18699
JJ_3		1.04743	0.07465	-0.03313	0.01684	1.080573	0.0765	14.11973
X^*J_3		0.33707	0.02382	-0.23194	0.02268	0.56901	0.03289	17.29973
X^*J_3		0.89319	0.04460	-0.09006	0.01767	0.98325	0.04798	20.49398

重大小进行复合, 通过计算出研究区的矿化后验概率分布图。通过计算预测后的整个区域上矿化点出现频率与实际已知矿化点的出现频率进行 X^2 分布的显著性检验, 来判断计算出的后验概率分布的有效性。由于采用的特征数据不存在缺失情况, 后验概率其结果有效性的检验也没有出现显著性。因而可以用萤石矿化后验概率分布图(图版 I 图 4), 直接预测萤石找矿的远景区。

研究工作根据后验概率值的大小, 萤石矿化蚀变的专题图象的高亮度区, 以及区域地质和遥感成矿模型的认识, 优选出 4 个一级、7 个二级萤石找矿远景区。验证表明, 已知的大中型矿床均落在圈定的远景区内, 并且对优选出的其中 3 个地段的野外验证, 都找到断裂硅化蚀变带, 显示预测工作有较好的实效。

参 考 文 献

- [1] 韩文彬等. 萤石矿床地质及地球化学特征——以浙江武义矿田为例. 北京: 地质出版社, 1991.
- [2] A. P. Crosta, Mc. M. Moore. 1989 Proceedings of the 7th (ERIM) Thematic Conference: Remote Sensing for Exploration Geology. Calgary, Oct., 2— 6, 1173— 1181
- [3] G. F. Bonham—Carter, F. P. Agterberg etc. Statistical. Applications in the Earth Sciences. Paper 89— 9. 1989, 171— 183
- [4] F. P. Agterberg, G. F. Bonham etc. Computer Application in Resource Estimation Prediction and Assessment for Metals and Petroleum. Pergamon Press, 1990, 1— 21.

作 者 简 介

朱亮璞, 男, 生于 1931 年 10 月, 毕业于北京地质学院普查勘探专业, 现为北京大学地质系教授。从事遥感地质与区域构造地质研究。发表论文 11 篇, 专著(合著)6 本, 主编高校统编教材遥感地质学 2 本。

Prediction of Fluorite Deposits Using Remote Sensing Data in Wuyi Area Zhejiang Province

Zhu Liangpu Bao Xianhua

(Geology Department of Peking University)

Abstract On the basis of geological interpretation of TM images, the relationships between fluorite deposits and structures, lithologies, volcanic features and geochemistry in Wuyi area, Zhejiang Province, were analyzed. The fluorite metallogenic model was established. The method of feature oriented principal component analysis was used to extract silicic and kaolinitic alteration information from the TM data, which are important alteration types for regional mineralization. Finally, the method of “Weights of evidence modeling” was used to integrate information derived from remote sensing, geology and geochemistry, which was then applied to map fluorite deposit potentials.

Key words Fluorite deposits, Feature oriented principal component analysis, Weights of evidence modeling

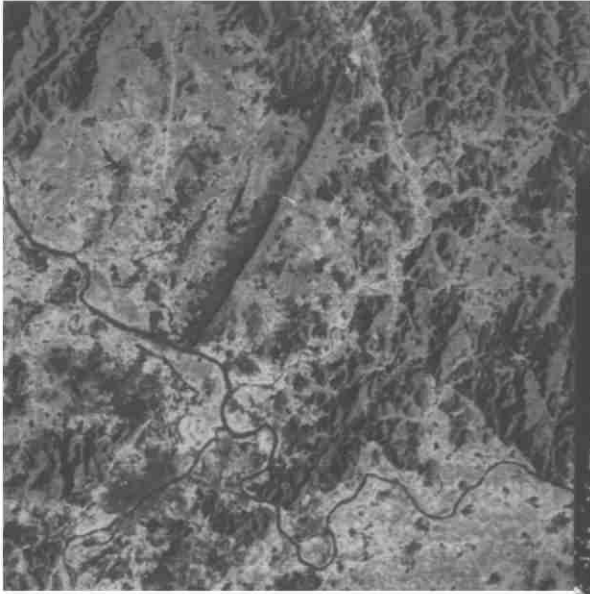


图1 TM 1, 4, 7 合成图象, 经直方图均衡化处理

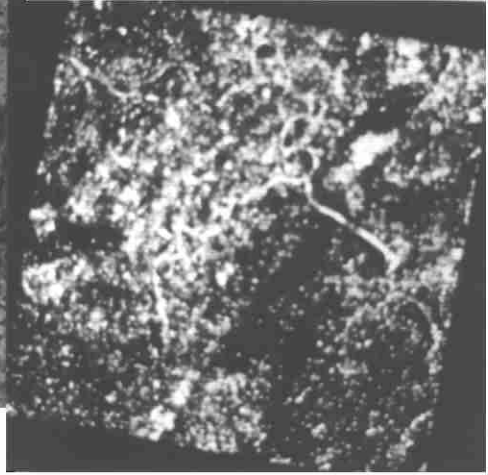


图2 TM 1, 4, 5, 7 的 KL 变换 PC4 取反 ϵ 值分别为 1.0, 1.5, 2.0 的合成图象

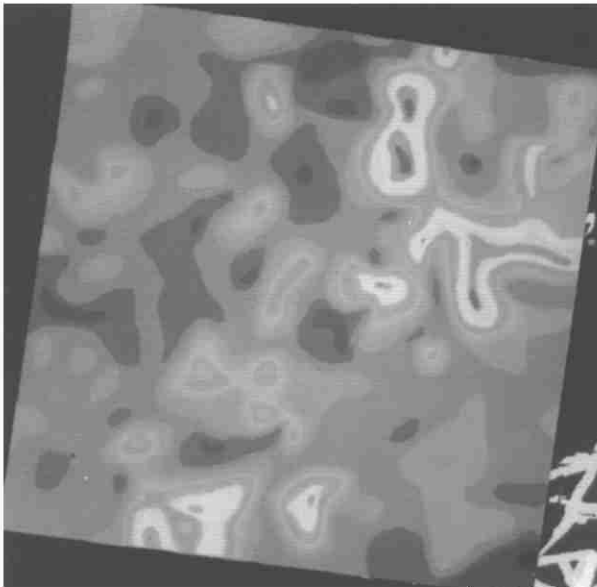


图3 氟元素地球化学异常图



图4 计算出的萤石矿化后验概率分布图 (叠加上矿点)