

文章编号: 1007 4619 (2005) 06 0717 08

# 矿化信息提取定量遥感模型的建立 ——以鹰嘴山硅化蚀变为例

杨 波<sup>1</sup>, 吴德文<sup>2,3</sup>, 赖健清<sup>4</sup>, 李 京<sup>1</sup>, 朱谷昌<sup>3</sup>, 陈云浩<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学 资源学院, 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100085;

2. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 有色金属矿产地质调查中心 北京遥感中心, 北京 065201;

4. 中南大学 地学与环境工程学院, 长沙 4100834)

**摘 要:** 研究选择围岩蚀变复杂, 种类丰富的甘肃鹰嘴山金矿, 目的是建立该区硅化信息提取的定量遥感模型。通过对实测地物光谱数据、岩矿石化学组分分析、微量金分析结果等岩矿石多元数据的聚类分析、相关分析和因子分析, 找到了提取硅化蚀变的最佳组合变量, 并通过建立它们之间线性回归方程的方式, 建立了该区硅化蚀变的定量遥感模型:  $SiO_2 = 85.047TM5/TM7 - 4.348TM5/TM4 + 16.51TM5/TM3 - 41.866$   $R = 0.703$ 。以该模型为指导, 对 Landsat TM 遥感影像数据进行增强处理, 定量提取出了该区金矿化异常信息。经实际验证, 其结果与实际情况吻合度好, 可为与该区地质背景类似的阿尔金东段和北祁连西段早古生代海相火山岩地区的金矿普查与勘探提供参考依据。

**关键词:** 矿化(蚀变); 定量遥感模型; 硅化; 甘肃鹰嘴山; 金矿; PLS回归

中图分类号: TP79 文献标识码: A

## 1 引 言

在中国乃至整个世界, 很多金矿与硅化蚀变密切相关, 且一般硅化越强, 矿化越显著。但地质上对于硅化蚀变的研究, 长期以来仅停留在对蚀变程度和范围的定性描述上, 遥感上也少有定量建模进行研究的先例。

众所周知, 矿床是发生在地球局部区域(带)的地质现象。矿床在生成、演化的全过程中, 其成矿条件表现为地质演化过程中的地质异常事件<sup>[1]</sup>。也就是说, 矿床与地质体的各种异常属性相关联。而这些异常属性又不同程度地偏离于相对均一的地质体背景属性。因此, 寻找地质体各种属性的异常就成为预测矿床的必要条件之一。这些地质体的各种属性异常大多以微弱的信息形式包含于遥感数据之中, 就构成了所谓的矿化蚀变异常遥感信息。对于矿化蚀变异常信息遥感提取方法的研究, 也成为近年来发展较快的遥感应用热点之一。

近 30 年来, 国内外发展了很多提取矿化蚀变异常信息的方法。早在 1976 年, 戈茨就用  $1.6\mu m$  和  $2.2\mu m$  波长两谱带反射比的比值, 定量划分蚀变岩和非蚀变岩<sup>[2]</sup>; Crosta 和 Loughin 利用美国 Landsat 5 TM 数据, 选择 4 个波段(如 TM1, TM3, TM4, TM5 或 TM1, TM4, TM5, TM7)设计了: 主成分变换 + 特定主因子求反的方法填制巴西热带地区残积土壤中的三价铁和羟基蚀变岩信息图<sup>[3]</sup>; Timothy 等利用 TM5/TM7, TM5/TM1, (TM5/TM4) × (TM3/TM4) 的假彩色合成及分析, 在阿拉伯努比亚地盾的干旱气候下提取金矿化蚀变信息<sup>[4]</sup>。马建文提出了“TM 掩膜 + 主成分变换 + 分类”的识别提取矿化弱信息方法, 在辽宁二道沟金矿提取三价铁蚀变火山碎屑岩信息, 在河北华北地台北缘提取含金钾化带信息<sup>[5]</sup>。有色地质遥感中心, 2000 年在青海锡铁山铅锌矿山, 利用 TM、ETM+、SPOT 4、SPIN 2 及航空红外片等遥感数据资料, 提取与铅锌矿化有关的蚀变岩遥感信息, 通过与地物化资料的综合分析, 不仅为重新厘定矿区一些基础地质问题提供依据, 而且

收稿日期: 2004 06 08; 修订日期: 2004 09 24

基金项目: 国土资源大调查项目, 用于地质矿产调查的“遥感信息多层次分离提取技术”的研制 (No. 20002010004106)。

作者简介: 杨波 (1974—), 男, 湖南张家界人, 中南大学遥感地质专业硕士毕业, 现为北京师范大学资源学院在读博士, 主要从事遥感与地理信息系统在资源和灾害动态监测方面的研究。已发表论文 6 篇。E-mail: ytb@ires.cn, yangbo7483@sohu.com, cyrb@ires.cn

还为矿山深部及边部找矿提供了找矿信息,提供了遥感技术在矿山二轮找矿中应用的一个范例<sup>[6]</sup>。

这些方法用得较多的是比值、主成分分析、掩膜等组合图像处理方法,但略显不足的是考虑实验区地物光谱数据较少,很少有人建立基于实验区光谱特征的定量遥感找矿模型<sup>[7,8]</sup>。故本文探讨的就是如何建立基于实测光谱数据分析的、多种矿化蚀变信息提取遥感模型的方法和流程,从而指导在同一成矿域中的找矿工作更有针对性地进行。

研究以岩矿石的电磁波特征反射谱带作为提取岩石蚀变带信息的理论基础<sup>[9]</sup>,通过岩矿石多元数据(岩矿石光谱测试数据、组分分析和微量金分析结果)分析,较为深入地研究工作区矿化蚀变类型、蚀变岩矿成分与实测岩矿石光谱数据波段及其派生比值变量之间的关系,以及岩矿石实测光谱数据中对应于遥感影像的各波段及其比值、蚀变岩矿石成分两组变量自身的相关组合特征。在此基础上,根据不同的矿化蚀变类型,选择识别矿化蚀变信息的最佳特征变量组合,建立不同矿化蚀变类型信息提取的定量遥感模型。本文以硅化为例。

通过对甘肃鹰嘴山地区的研究,建立了该区硅化蚀变信息提取的定量遥感模型,并在该模型的指导下进行异常信息的提取,所提取异常经野外验证,发现效果较好,证明该模型在阿尔金东段和北祁连西段同类地区的找矿勘探中有一定推广价值。

## 2 研究区概况

以 1:10 万地形图石包城幅(编号为 10 47 1)范围内的鹰嘴山为研究区。研究区地理坐标为 96° 00' E—96° 24' E, 39° 43' N—39° 56' N。东西长 34 km,南北宽 24 km,面积 816 km<sup>2</sup>。隶属于甘肃省安西县和肃北蒙古族自治县。

鹰嘴山地区,是近年来新发现的金矿集中区,鹰嘴山金矿已达大型规模。该金矿的成因十分复杂,成矿期可划分为 5 个成矿阶段<sup>[10]</sup>。是由各种不同类型的岩石经过多期次、多阶段强烈的构造变动,再加上硅化、铁氧化物蚀变、绿泥石化、碳酸盐化、绢云母化等多种类型的围岩蚀变而形成,矿床类型基本定义为是与超基性岩有关的构造蚀变岩型金矿<sup>[11]</sup>。

## 3 研究方法和步骤

的采集;②多源数据的分析处理;③遥感模型的建立与异常信息的提取;④区域成矿预测。由于本文主要是对定量遥感模型构建方法和流程进行说明,故重点放在对地物实测光谱数据和岩矿石采样样本的分析处理以及由此而得到的矿化蚀变遥感模型上。

(1)要构建基于实测光谱数据的矿化蚀变异常信息提取的定量遥感模型,首先就要进行实地光谱测试。测试采用美国 Analytical Spectral Devices 公司生产的 Field Spec FR 3 型便携式野外波谱仪,测试的波谱范围为 350—2500 nm,即从可见光到短波红外,包括了 ETM+和 TM1—TM5、TM7 共 6 个波段的波谱范围。在鹰嘴山金矿进行的岩矿石光谱测试,主要横切金矿带,由顶板—矿体—底板岩石进行,岩矿石光谱测试分野外剖面(点)测试和场地测试两种。野外测试采用自然光,测定时间为每天 10—16 时,天空云量 < 10%,仪器高度 1.2 m,测点视角为 5°,测场为 25°。共测试剖面 4 条,全长 2340 m,测点 54 个,测场 5 处,面积共 1600 m<sup>2</sup>。在每个新测试点(场),均先对波谱仪进行初始化以消除环境因素干扰。

(2)进行地物光谱测试的同时,进行 GPS 定点测量(获取 GPS 点 65 个,其中包括样品采集点 54 个和测场点 5 处)、岩性及产状测量与描述、采集岩矿石标本并照相、登记造册。

(3)岩矿石多元数据的分析处理。主要包括对实测光谱数据的预处理,目的是实现数据转换、误差消除和求平均运算等,最终得到去除了大气影响所造成毛刺现象、比较光滑的波谱曲线;对 54 个岩矿石采样样本进行实验室分析,包括对岩矿石进行鉴定,标本的化学组分分析和微量金分析等(对其中 29 件样品进行了微量金分析,10 件进行了化学全分析)。在此基础上,对实测波谱数据按岩矿类别进行分类,建立成矿域典型岩矿石的波谱数据库<sup>[12]</sup>。

(4)为了与不同传感器遥感图像数据(如 TM)进行类比,按照不同仪器的光谱响应函数对测得的岩矿石光谱数据进行分段加权平均,如在光谱范围 450—520 nm(TM1), 520—600 nm(TM2), 630—690 nm(TM3), 760—900 nm(TM4), 1550—1750 nm(TM5)和 2080—2350 nm(TM7)分别求平均值,使其与 TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 和 TM7 的值相对应。从而得到对应于各传感器波段范围的实测光谱反射率值。其具体公式为:

$$R_B = \frac{\sum R_i w_i}{\sum w_i} \quad (1)$$

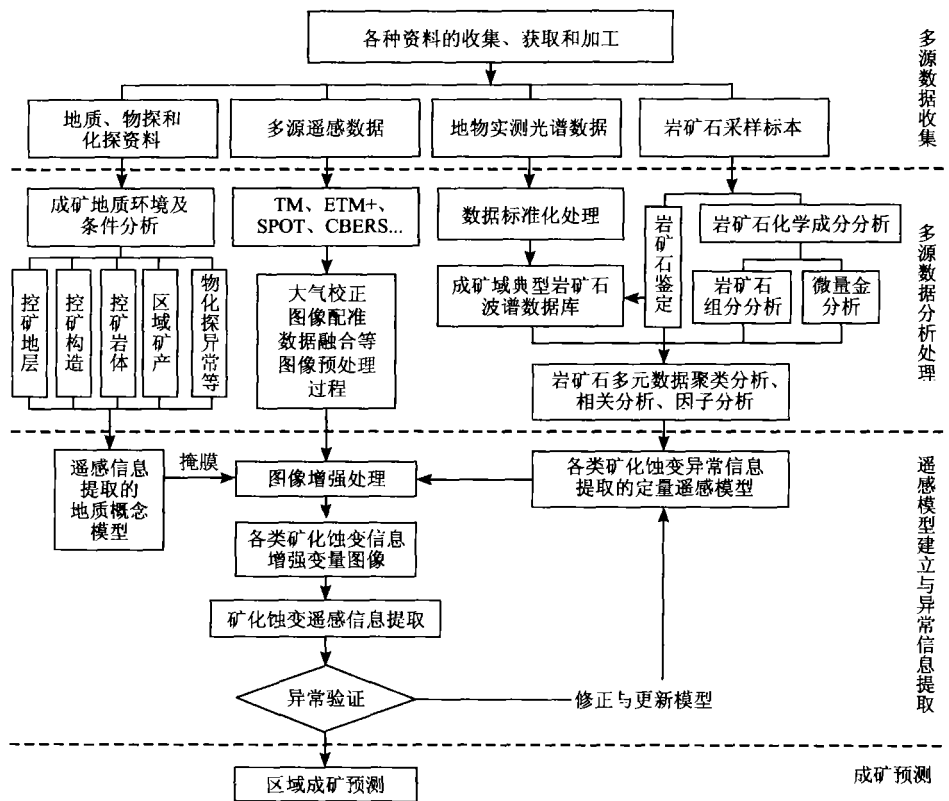


图 1 矿化(蚀变)异常信息提取定量遥感模型的建立及整体研究流程

Fig 1 The set up of quantificational remote sensing models for the extraction of mineralization (alteration) abnormal information and its whole research flowchart

其中,  $r_b$  为 B 波段范围内的光谱平均反射率,  $r_\lambda$  为该波段范围内  $\lambda$  波段的实际反射率值,  $w_\lambda$  为该  $\lambda$  波段的权重值。而后对处理后的光谱数据求取比值: TM3/TM1、TM3/TM2、TM3/TM4、TM5/TM7、TM5/TM3、TM5/TM4、TM7/TM3、TM7/TM4 等, 并把它们作为参与岩矿石多元数据数理统计的系列光谱变量。

(5) 岩矿石多元数据聚类分析、相关分析和因子分析。将 TM1—TM5, TM7 及其派生变量 TM3/TM1, TM3/TM2, TM3/TM4, TM5/TM7, TM5/TM3, TM5/TM4, TM7/TM3, TM7/TM4, 岩矿石组分分析和微量金分析结果参与多元数据统计分析(具体变量见表 1)。由聚类分析可对岩矿石进行分类, 有利于同一成矿域内典型岩矿石光谱数据库建设; 由多元数据相关分析可以研究参与分析各变量直接的相关程度, 获取相关矩阵, 并得到诸如 R 型聚类树状图等, 找到与各矿化蚀变关系密切的光谱变量及其派生变量; 这也可通过因子分析予以实现, 并且往往效果更好。通过上述分析, 最终可以分别得到与各单类矿化蚀变(如硅化)关系密切的特征变量或变量

组合<sup>[13]</sup>。

(6) 对与各单类矿化蚀变(如硅化蚀变)关系密切的特征变量或变量组合进行多元回归分析, 采用线性回归得到的回归方程作为该类矿化蚀变异常提取的遥感信息模型。

## 4 具体建模实例

### 4.1 模型概述

以线性回归数学模型作为遥感信息提取模型:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + \dots + a_n x_n \quad (2)$$

其中,  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  为一组识别某类蚀变的特征变量, 参数  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$  可根据需要采用多元线性回归、偏最小二乘(PLS)回归、因子分析、Fisher 准则等方法来估计。当选择不同的组合变量或采用不同的方法来估计模型参数时, 都会得到不同的结果模型。

### 4.2 模型特征变量的选取

本区已有 ETM+ 和 TM 数据, 为了向这些遥感

多源数据收集

多源数据分析处理

遥感模型建立与异常信息提取

成矿预测

图像数据进行类比,对每个样品的波谱数据在与 TM 数据相对应的光谱范围分别求加权平均值,使其与 TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 和 TM7 的值相对应。而后求取比值  $TM3/TM1$ ,  $TM3/TM2$ ,  $TM3/$

$TM4$ ,  $TM5/TM7$ ,  $TM5/TM3$ ,  $TM5/TM4$ ,  $TM7/TM3$ ,  $TM7/TM4$ , 并把岩矿石组分分析和微量金分析结果也作为变量参与多元数据统计分析。具体见表 1。

表 1 正交旋转因子矩阵  
Table 1 Rotated orthogonal component matrix

特征变量	第 1 主因子	第 2 主因子	第 3 主因子	第 4 主因子	第 5 主因子	第 6 主因子	第 7 主因子	第 8 主因子
TM1	0.772	-0.469	0.178	-0.344	-8.937E-02	-0.120	-3.880E-02	5.550E-02
TM2	0.857	-0.504	6.556E-02	-4.186E-02	1.911E-02	-6.500E-02	-2.388E-02	-5.160E-03
TM3	0.873	-0.457	5.971E-02	0.111	3.852E-02	-9.509E-02	-1.654E-03	3.784E-02
TM4	0.882	-0.406	8.415E-02	9.978E-02	2.867E-02	-0.173	-1.938E-02	9.152E-02
TM5	0.888	-3.928E-02	-9.559E-02	0.352	0.264	-5.720E-02	-4.341E-02	2.662E-02
TM7	0.955	-4.248E-03	5.997E-02	0.263	5.912E-02	-9.378E-02	3.775E-02	2.499E-02
$TM3/TM1$	0.199	-0.112	-0.154	0.904	0.267	0.108	-4.751E-02	-0.138
$TM3/TM2$	0.159	-8.614E-02	0.175	0.926	0.101	-0.148	1.370E-03	0.190
$TM5/TM7$	-3.964E-02	-0.265	-0.501	0.237	0.692	0.154	-0.341	-1.998E-02
$TM7/TM4$	-0.236	0.944	-0.113	-1.404E-02	-6.978E-02	8.934E-02	0.140	-6.239E-02
$TM7/TM3$	-0.238	0.948	-9.367E-02	-0.101	-9.678E-02	1.552E-02	0.119	7.295E-04
$TM3/TM4$	0.132	-0.782	-0.121	0.185	0.160	0.389	4.142E-02	-0.362
$TM5/TM3$	-0.242	0.943	-0.202	-1.617E-02	5.657E-02	5.155E-02	5.460E-02	-1.201E-02
$TM5/TM4$	-0.234	0.907	-0.251	9.653E-02	0.127	0.142	5.279E-02	-8.844E-02
金	0.216	2.945E-02	-0.131	0.238	0.882	0.152	-1.322E-02	0.267
二氧化硅	-0.217	0.215	-0.915	3.733E-02	0.160	-7.445E-02	0.112	-0.158
氧化铝	9.137E-02	-0.224	0.903	-6.130E-04	-0.184	-0.265	-0.122	6.348E-02
氧化钙	0.701	3.805E-02	0.440	-0.141	-0.453	0.278	-3.065E-03	9.069E-02
氧化镁	-0.217	-0.536	0.562	-0.525	0.143	0.159	6.391E-02	-0.153
三氧化二铁	-0.262	0.273	0.529	0.423	0.156	0.397	0.352	0.295
氧化亚铁	-0.430	-3.469E-02	0.704	0.237	0.100	-3.072E-02	-0.486	0.123
氧化钾	0.167	-8.069E-03	0.409	0.104	0.271	4.554E-02	-6.355E-02	0.843
氧化钠	0.342	-6.575E-02	0.240	0.102	-0.194	-0.839	-0.251	-5.264E-02
氧化钾 + 氧化钠 + 氧化铝	0.188	-0.184	0.826	4.843E-02	-0.119	-0.384	-0.165	0.235
氧化钙 + 氧化镁	0.422	-0.267	0.651	-0.400	-0.271	0.303	3.294E-02	-1.422E-02
三氧化二铁 / 氧化亚铁	-2.946E-02	0.209	-0.321	2.717E-04	-0.128	0.232	0.883	-5.099E-02

### 4.3 岩矿石多元数据统计分析

对岩矿石多元数据进行聚类分析、相关分析和因子分析,由于篇幅限制,本文仅以因子分析(结果见表 1)为例,对与单类矿化蚀变关系密切的特征变量和变量组合的选择问题进行探讨说明。

表 1 正交旋转因子矩阵揭示了如下信息:

(1) 硅化(二氧化硅)岩矿成分因子与铁氧化物蚀变(氧化亚铁等氧化物)和粘土矿物蚀变(氧化铝等氧化物)岩矿成分因子以高度负相关的组合关系出现在第 3 主因子轴的两端,同时与比值  $TM5/TM7$ ,  $TM5/TM4$ ,  $TM5/TM3$ ,  $TM3/TM1$ ,  $TM3/TM4$  和  $TM1$  波段有较好的相关性。分析结果直接反映出本区的矿化信息与该区较强烈的铁氧化物蚀变和粘土矿物蚀变直接相关。同时间接伴生着强烈的硅化蚀变,并且它们对多个波段的光谱特征有非常明显的影响。因此,在该区提取硅化蚀变,其实质就是提取硅化蚀变(含铁氧化物蚀变)。

(2) 含金量(金)形成了自己的主因子轴(第 5 主因子),其次在第 4 第 8 主因子也有较大的权重。第 4、5 主因子主要与  $TM5/TM7$ ,  $TM3/TM1$ ,  $TM3/TM2$  和  $TM5$  有较高的正相关性。表明岩石光谱反映了金的矿化(蚀变)信息。

(3)  $TM1-TM5, TM7$  以高度的正相关集中形成了第 1 主因子,反映的应该主要是与背景相关的信息,除碳酸盐化的岩矿成分因子与它们有较明显的正相关性外(表明本地区存在碳酸盐化蚀变),其他蚀变岩矿成分因子与其相关性均不明显。而比值变量已基本独立于派生它们的原始波段,它们的权重没有集中在某个主因子上,而是贡献在多个主因子轴上,并与蚀变岩矿成分因子存在显著的“亲和性”。由此说明比值变量已基本消除了背景干扰,确实能在提取(矿化)蚀变信息方面起着重要作用。

因子分析与 R 型聚类分析揭示的主要信息是一致的,但是因子分析所反映的信息更深层次,更具内涵,更能解释成因和机理性的问题。最主要的是它解决了用 R 型聚类分析所不易区分的微弱区别,使在化学全分析样品不多(对 54 件采样样品中的 10 件样品进行了化学全分析)的情况下进行实测光谱与蚀变类型关系的研究仍然能得以实现,解决了一大难题。

### 4.4 硅化(含铁氧化物蚀变)蚀变定量遥感模型的建立

研究,发现研究区金矿化带普遍存在强烈的硅化、褐铁矿化和粘土矿物蚀变作用,它们之间关系密切,并且硅化越强,矿化就越显著,可以作为最直接的金矿找矿标志。本区硅化蚀变和铁氧化物蚀变及粘土矿物蚀变常常混杂在一起,其中铁的蚀变矿物(主要是  $Fe^{2+}$ 、 $Fe^{3+}$ )在岩石光谱上具有很强的光谱响应,并且在  $TM$  比值图像上具有很好的聚类效果,因此,本区矿化蚀变信息提取以硅化(含铁氧化物蚀变)信息为主。

综合分析相关矩阵、R 型聚类树状图和正交旋转因子矩阵(表 1),识别硅化蚀变的最佳变量组合(以同二氧化硅变量相关系数的大小排序)为:  $TM5/TM7$ ,  $TM5/TM4$ ,  $TM5/TM3$ ,  $TM3/TM1$ ,  $TM3/TM4$ ,  $TM1$ 。

当把这些变量分别与含金量(Au)利用 SPSS 软件绘制成二维散点图(图 2)时,发现  $TM5/TM7$ ,  $TM5/TM4$  和  $TM5/TM3$  三个比值变量比其他几个变量更能反映样品中的硅化蚀变的聚类特征。如图 2,  $TM5/TM7$  的高值部分,正是含金量高的岩矿石,并且这些岩矿石样本以硅化和铁氧化物蚀变及其它们的混合蚀变为主。所以可以用这些波段组合建立本区遥感找矿的信息模型,进行岩矿石的蚀变信息提取。

因子分析的目的是从诸多影响因素中优选出与矿化蚀变密切相关的变量或变量组合,从而使矿化异常信息提取更有针对性,并增强其准确性。而后再对选定的变量组合进行多元回归分析,获得回归

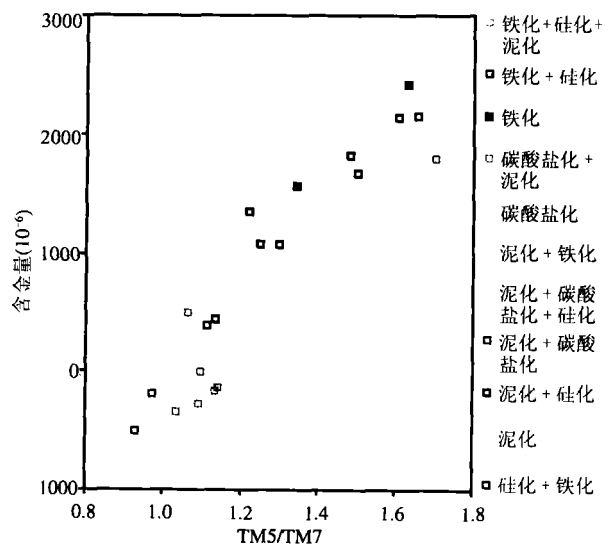


图 2 含金量与  $TM5/TM7$  比值构成的二维散点图

Fig 2 The 2 dimension scatter plot between

方程并作为单类矿化蚀变类型信息提取的定量遥感模型。

下面是二氧化硅变量分别与  $TM5/TM7$ ,  $TM5/TM4$ ,  $TM5/TM3$  等比值变量组合采用多元回归分析后 (具体过程略) 得到的回归方程:

$$SiO_2 = 85.047TM5/TM7 - 4.348TM5/TM4 + 16.51TM5/TM3 - 41.866 \quad R=0.703 \quad (3)$$

这就建立了在本区进行硅化 (含铁氧化物蚀变) 蚀变异常信息提取的定量遥感模型。同理, 还

可以建立其他矿化蚀变类型异常信息提取的定量遥感模型。

## 5 基于模型的信息提取结果

基于上面的方程, 对遥感图像中与之对应的波段进行算术运算, 通过一系列的图像增强处理, 最后提取出本区占主导地位的硅化蚀变 (含铁氧化物蚀变) 异常信息, 具体见图 3。

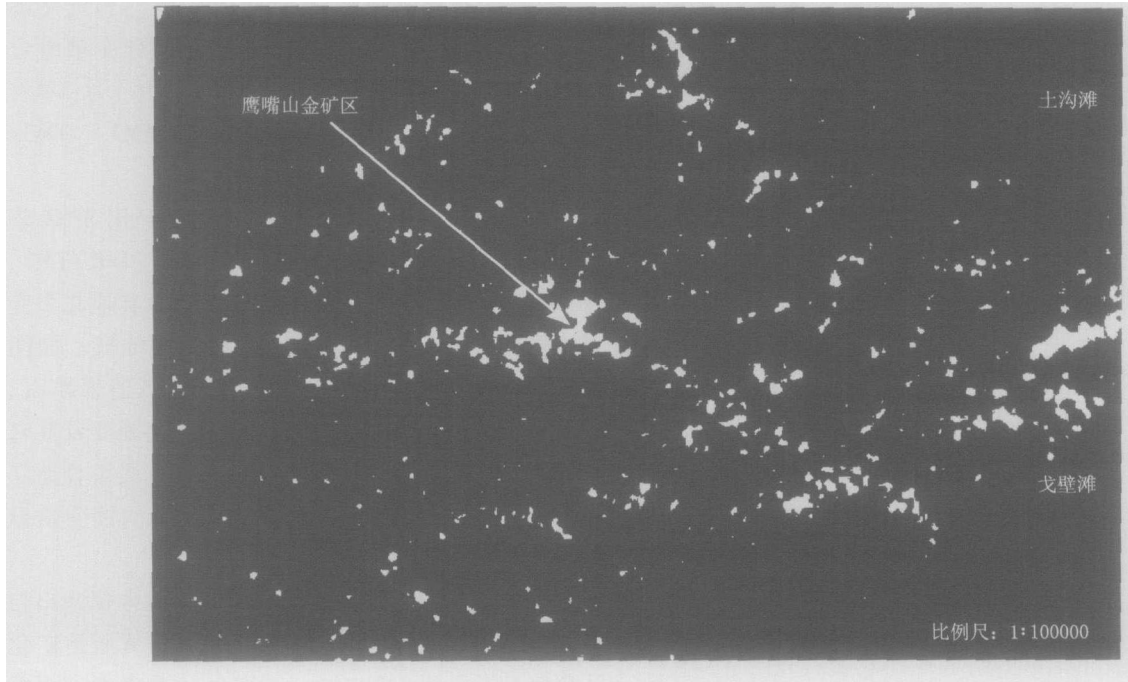


图 3 硅化蚀变信息增强图像

Fig 3 Enhanced image of Silification information

从图 3 可以很明显地发现: 正在开采的金矿区及其近圆形堆场在图中呈高亮显示, 同时还可以看到矿区有进一步向 SE—NW (SW) 方向延伸成大型金矿带的可能, 在矿区向东大约两千米处有一从 NW 折向 SW 方向的弧形高亮带与之交汇, 其向北一直延伸到加里东期斜长花岗岩体东南部, 根据“岩体边缘成矿理论”<sup>[14]</sup>, 该弧形带及其与“可能金矿带”交汇处有很大的找矿前景。

## 6 结论与讨论

本研究以岩矿石的电磁波特征反射谱带作为提取岩矿石蚀变带信息的理论基础, 试图通过对岩矿石光谱测试数据、组分分析和微量金分析结果的多元数据统计分析, 建立在本区用以提取金矿带硅化

蚀变信息的定量遥感模型。结果证明, 此假设切实可行。不仅系统阐明了建模的技术流程, 建立了硅化 (含铁氧化物蚀变) 蚀变异常信息提取的定量遥感模型, 而且用所建模型对研究区进行实际信息提取, 取得了较好效果, 找到了矿区外围硅化蚀变分布的一般规律。对于样品比较少少的情况, 利用偏最小二乘 (PLS) 回归建模是目前最新的比较好的方法之一<sup>[15]</sup>, 但由于用因子分析、多元回归分析等方法所建模型在本区已被证明效果不错, 故本次研究没有用 PLS 进行建模的尝试。在以后的工作中, PLS 应该不失为最理想的选择之一。

另外, 本次研究是在有地物波谱测试数据的基础上进行的, 且所建模型只适合于与鹰嘴山有共同成矿地质背景的地区使用。对于那些没有足够地质资料, 更没有实测地物波谱地区如何建立矿化蚀变

遥感模型,还有待进一步研究。是否可以找到某种分类原则和方法,将全国按岩矿石的光谱特征划分成若干成矿域,同一成矿域内共用一套矿化蚀变异常信息提取的定量遥感模型?

致 谢 本文得到了有色金属矿产地质调查中心北京遥感中心的大力支持和帮助,中国地质科学院国家地质测试中心对岩矿样品进行了精确分析,在此一并感谢!

## 参 考 文 献 (References)

- [1] Zhao P D, Chen Y Q, Liu J P, et al Theory and Practice of Geologic Anomaly Metallogenic Prognosis [M]. Beijing University of Geosciences Press 1999. [赵鹏大,陈永清,刘吉平等. 地质异常成矿预测理论与实践 [M]. 北京:地质大学出版社, 1999.]
- [2] Compiled by the Institute of Information of the former Department of Geology. Remote Sensing Special Mineral and Rock's Visible & Mid Infrared Spectra and their Application [M]. Geology Press 1980. [地质部情报研究所. 遥感专辑——矿物岩石可见光—中红外光谱及其应用 [M]. 北京:地质出版社, 1980.]
- [3] Loughlin W P. Principal Component Analysis for Alteration Mapping [C]. Published by the Eighth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Denver, Colorado, U. S. A. 1991.
- [4] Timothy M K, Talaat M R. Structural Controls on Neoproterozoic Mineralization in the South Eastern Desert Egypt An Integrated Field, Landsat TM, and SIR C/X SAR Approach [J]. Journal of African Earth Sciences 2002, 35 (1): 107—121.
- [5] Ma J W. Research of Alteration Zones' s Quickly Extraction by Use of TM Data [J]. Journal of Remote Sensing, 1997, 1 (3): 208—213. [马建文. 利用 TM 数据快速提取含矿蚀变带方法研究 [J]. 遥感学报, 1997, 1 (3): 208—213.]
- [6] Compiled by China Geological Survey. Remote Sensing Technology in Earth Surface Observation and its Application Actuality & Development in Geosciences [R]. 2002. [中国地质调查局编. 遥感对地观测技术及其地学应用现状及发展 [R]. 2002.]
- [7] Ma A N. Remote Sensing Information Model [M]. Beijing Peking University Press 1997. [马蔼乃. 遥感信息模型 [M]. 北京:北京大学出版社, 1997.]
- [8] Chen S P, Tong Q X, Guo H D, et al Remote Sensing Information Mechanism Research [M]. Beijing Science Press 1998. [陈述彭,童庆禧,郭华东等. 遥感信息机理研究 [M]. 北京:科学出版社, 1998.]
- [9] Tong Q X, Tian G L. China Typical Spectra of Earth Objects and their Characteristic Analysis [M]. Beijing Science Press 1990. [童庆禧,田国良. 中国典型地物波谱及其特征分析 [M]. 北京:科学出版社, 1990.]
- [10] Yin X M. Rocky Gold Deposit Geology in Gansu Province [C]. Lanzhou Gansu Science & Technology Press 2000. [殷先明. 甘肃省岩金矿床地质 [C]. 兰州:甘肃省科学技术出版社, 2000.]
- [11] Mao J W, Zhang Z H, Yang J M, et al Gansu Yingzuishan Gold Deposit Geology and Mineralization Geochemistry [J]. Deposit Geology, 1998, 17 (4): 297—306. [毛景文,张作衡,杨建民等. 甘肃鹰嘴山金矿床地质和成矿地球化学 [J]. 矿床地质, 1998, 17 (4): 297—306.]
- [12] Su L H, Li X W, Liang S L, et al Data System and Spectral Simulation of the Spectral Database of the Typical Objects of Land Surface [J]. Earth Information Sciences 2002, (4): 7—15. [苏理宏,李小文,梁顺林等. 典型地物波谱库的数据体系与波谱模拟 [J]. 地球信息科学, 2002, (4): 7—15.]
- [13] Wu D W. Remotely Sensed Ore Prospecting Information Extraction Method and Application Research in Mangya Area, Qinghai Province [D]. Master Thesis of China University of Geosciences 2001. [吴德文. 青海芒崖地区遥感找矿信息提取方法及应用研究 [D]. 中国地大研究生论文, 2001.]
- [14] Chen J M, Cun G. China Gold Mine Geology Conspectus [M]. Beijing Geology Press 1997. [陈纪明,寸珪. 中国金矿地质概论 [M]. 北京:地质出版社, 1997.]
- [15] Li S L. The Variable Selection Based on PLS Component [J]. Information and Electronic Engineering, 2003, 1 (2): 31—35. [李世玲. 基于 PLS 成分的变量筛选法 [J]. 信息与电子工程, 2003, 1 (2): 31—35.]

## The Set up of Quantitation Remote Sensing Models for Mineralization and Alteration: Take Silicification in Yingzuishan Gold Mine as an Example

YANG Bo<sup>1</sup>, WU De wen<sup>2,3</sup>, LAI Jian qing<sup>4</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, ZHU Gu chang<sup>3</sup>, CHEN Yun hao<sup>1</sup>

- (1. College of Resources Science and Technology, Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of the Ministry of Education of China, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
3. Remote Sensing Centre of China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 065201, China;
4. School of Geoscience and Environment Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

**Abstract** Many gold mines in China and even around the world are in close relationship to silicification, and the more silicification, the more mineralization. But geological researches on silicification about alteration's degree and scope only stand still and keep qualitative for a long time, and still yet very seldom quantitative Remote Sensing Models have been set up. Therefore, we choose Yingzuishan gold mine which is complex and has many kinds of wall rock alterations in the research area, aiming to set up quantitative Remote Sensing Model for silicification. By cluster analysis, correlation analysis and factor analysis etc, and also by the use of in situ spectral survey data and the results of rock & minerals component analysis and microanalysis of Au etc, finally we found out the optimal variable sets to extract the silicification information, and set up the Linear Regression Equation of them:  $SD_2 = 85.047TM5/TM7 - 4.348TM5/TM4 + 16.51TM5/TM3 - 41.866$   $R = 0.703$ , which just was the quantitative Remote Sensing Model for silicification we wanted. With the help of this model, we took an enhancement treatment for Remote Sensing data of Landsat TM and extracted out gold mineralization abnormal information in this area. Through actual verification, the proved the results have good correspondence to the actual condition. This model can also provide reference to geological investigation and prospecting for gold mines in those area with the similar geologic background as Yingzuishan, such as in the east of Altun mountain and the west of Northern Qilianshan mountain, where early Paleozoic sea facies volcanic rocks spread widely.

**Key words** mineralization (alteration); quantitative remote sensing model; silicification; yingzuishan in Gansu province; gold mine; PLS (partial least squares regression)