

文章编号: 0258-7106(2012)04-0671-28

# 西藏冈底斯地区斑岩铜矿识别的最佳多光谱 遥感异常判据研究\*

张玉君<sup>1,2</sup>, 曾朝铭<sup>1</sup>

(1 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

**摘要** 文章应用多光谱遥感技术,对冈底斯斑岩铜矿带的实例(驱龙、甲玛、朱诺、冲江、夏玛日等矿床)进行了研究和总结,包括 ASTER 和 ETM<sup>+</sup> 数据技术特征、蚀变异常找矿的地质依据、蚀变异常提取的波谱前提、多光谱矿致遥感异常提取的常见技术方法、去干扰异常主分量门限化技术流程、冈底斯斑岩铜矿带找矿模型最佳遥感异常判据研究等。确定了 ASTER 主分量分析提取的羟基异常 OHA6、OHA5 同心套合异常可做为斑岩铜矿的最佳多光谱遥感异常判据,在从夏玛日至朱诺的 13 景共 4.6 万平方公里的 ASTER 提取异常中,依此判据圈定了冈底斯 20 处有潜能的斑岩铜矿异常。此外,还对夏玛日景遥感异常进行了解译,并提出了 3 处钻孔位建议。

**关键词** 地质学;多光谱遥感;主分量分析;光谱角填图;羟基异常;铁染异常;门限化;冈底斯  
中图分类号: P618.41; P627 文献标志码: A

## Study of optimum discriminator of multi-channel remote sensing anomaly for recognition of porphyry Cu deposits in Gangdese belt

ZHANG YuJun<sup>1,2</sup> and ZENG ZhaoMing<sup>1</sup>

(1 China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China;  
2 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

### Abstract

Exemplified by Qulong, Jiama, Zhunuo, Chongjiang and Xiamari deposits, the authors summarized the techniques for the porphyry Cu deposits of Gangdise belt in Tibet and studied the optimum discriminator of multi-channel remote sensing anomaly for recognition of porphyry Cu deposits in Gangdese belt. The problems studied included the technical characteristics of the ASTER and ETM data, the geological basis and the spectral precondition for extraction of alteration anomaly, the common methods for the extraction of the remote sensing anomaly related to mineralization, and the technical flow chart of de-interfered principle component thresholding. the concentric anomaly of OHA6 and OHA5 by PCA was defined as the optimum discriminator of multi-channel remote sensing anomaly for recognition of porphyry Cu deposits in Gangdise belt. With this discriminator, 20 anomalies were delineated as the potential targets in an area of 46 000 km<sup>2</sup> from Xiamari to Zhunuo within Gangdese belt. Geological interpretation was made for Xiamari ASTER data and 3 drilling spots were suggested.

**Key words:** geology, multi-channel remote sensing, PCA (principle component analysis), SAM (spectral angle mapper), OHA (hydroxylate anomaly), FCA (ferric contamination anomaly), thresholding, Gangdese

\* 本文得到国土资源部项目“中国大陆环境典型斑岩型矿床成矿规律和找矿模型”(编号:201011011)的资助

第一作者简介 张玉君,女,1933年生,教授级高工,博士生导师,长期从事地质勘查新方法(物、化、遥)研究。Email: zyj-6233@sina.com  
收稿日期 2012-05-14; 改回日期 2012-06-01。张绮玲编辑。

遥感就是遥远的感知,航天遥感是指从卫星上对地球表面的感知,所测光谱实为地面物质对入射辐射的光谱响应和自身的电磁辐射。自从1982年7月美国发射的地球资源卫星 Landsat 4 增设了2个短波红外波段:TM 5(1.55~1.75  $\mu\text{m}$ )和 TM 7(2.08~2.35  $\mu\text{m}$ )以来,为找矿提供了崭新的手段,提取具找矿标志意义的热液蚀变岩石信息。美国1999年4月15日的 Landsat7 携带的对地资源观测传感器提供 ETM<sup>+</sup>数据,1999年12月8日再发射美国 Terra 卫星搭载日本研发的 ASTER 多光谱仪高级星载热发射和反射辐射计(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer,简称 ASTER),使多光谱遥感找矿得以本质提高。30多年来,国内外遥感工作者为开发利用这种信息进行了卓有成效的试验研究和应用,证实蚀变岩石 TM、ASTER 遥感信息与多数金属矿床以及某些非金属矿床有着非常好的相关性,所提取的蚀变遥感异常作为一种找矿标志的参数是具有独立性的。

应将蚀变遥感异常作为一个与地球化学、地球物理同等重要的找矿独立参数。笔者认为独立参数应具备的条件是,其所依据的物理化学特性是独特的(不重复性),其所获结果是其他方法不能取代的(不可替代性),其涵盖的研究内容是极其丰富的(可构成学科分支)。

航天遥感数据中的飞行高度、空间分辨率、光谱覆盖、谱分辨率、幅宽等基本技术参数是相互关联、矛盾并制约的。目前已有十多种航天遥感数据,适宜蚀变遥感异常找矿的却不多。例如,IKONOS 虽有好的空间分辨率(1 m、4 m),但其光谱不包括短波红外,而不被选中;再如,Hyperion 虽因其高光谱分辨率(10 nm)可进行某些矿物填图,却因其幅宽仅为7.5 km,而降低了其普查找矿中的实用性。究其种种折中权衡,笔者选择了多光谱遥感(ASTER, ETM<sup>+</sup>)作为方法研究和应用的主攻方向。

地质找矿日益艰巨,物、化、遥领域中的各种方法技术若能对举步维艰的找矿任务有些许帮助,都弥足珍贵。多光谱遥感异常作为一种地质找矿技术,具备普适性,能有效地用于多种矿种和广泛地区(刘波等,2004;倪忠云等,2011;杨建民等,2007;杨志明等,2009;Fujisada,1995;Gillespie,1992;Gillespie et al.,1986;1998;Iwasaki et al.,2002;Rencz,1999)。国内多光谱遥感找矿大面积扫面研究始于2001年,笔者首先成功提取了冈底斯驱龙、甲玛两矿

区的 TM 多光谱遥感异常,2002年航遥中心又提取了驱龙矿区的高光谱异常(甘甫平等,2002)。笔者在20年中,积累了国内外众多地区(中国东天山、西天山、云南、江西、藏北、冈底斯,蒙古的欧玉淘勒盖和哈萨克斯坦的科翁腊德)十多个矿种(铜、镍、金、菱锌矿、菱铁矿、石膏、天青石、硼砂、瓷土等)的较丰富的经验和应用实例,其中为数最多的是斑岩铜矿。利用笔者提取的遥感异常,已发现中等规模的罗东铜-镍矿床、云南中甸地区的地苏嘎和松诺2个斑岩型铜矿床。遥感异常提取方法被列入2006年启动的国土资源部全国矿产资源潜力评价推广技术之一,遥感信息提取已成为地质矿产勘查不可或缺的重要手段(Kypek,1954;丰茂森,1992;冯师颜,1964;朱述龙等,2000)。新一轮覆盖全国陆域的地质矿产遥感勘查成果(唐文周等,2012)不仅扩大了应用矿种,如锰矿(邓吉秋等,2011)、锡矿(王蔚等,2012)和稀土元素矿(章钦瑜等,2012),而且部分省还使用了 ASTER 等新型数据。

由于斑岩铜矿占全球铜资源量的半数以上,且具有明显的蚀变分带,使其更适合用多光谱遥感来找矿,加之已积累为数众多的成功实例,及时总结、提高、推广,有利于推动多矿种、多地区遥感地质勘查的进展。

## 1 ASTER 和 ETM<sup>+</sup> 数据技术特征

中国2004年7月开始有偿提供 ASTER 数据。美国1999年发射的2个卫星轨道高度都是705 km,倾角98.2°,为圆形近极地太阳同步,重复周期16天,ETM<sup>+</sup>和 ASTER 幅宽分别为185 km和60 km。ASTER 由3个探测器分别提供3个光谱区数据,共有14个波段:3个可见光-近红外波段(15 m分辨率),6个短波红外波段(30 m分辨率),5个热红外波段(90 m分辨率)。ASTER 研制的主要目的之一即改善资源探测。现将这2种数据的波段设置、波段宽度、空间分辨率、数据长度等归纳于表1。

ASTER 数据的主要优点是将 ETM<sup>+</sup> 短波红外区2分为6,这对于研究羟基矿物吸收有了新的潜能,并增设了5个热红外波段,扩大了多光谱遥感研究岩性的可能。此外,为了能制作立体图像增设了立体后视波段(VNIR3B),这一特点被充分利用在 Google-earth 的全球立体遥感图中。ETM<sup>+</sup> 和 ASTER 已经积累了覆盖全球足够的数据库,前者可从

表 1 ASTER 和 ETM+ 数据技术参数

Table 1 Technical characteristics of ASTER and ETM data

ETM <sup>+</sup>			ASTER				
波段	波段范围/ $\mu\text{m}$	分辨率/m	波段	波段范围/ $\mu\text{m}$	波段宽度	分辨率/m	数据长度/bit
1	0.45~0.52						
2	0.52~0.60		VNIR 1	0.52~0.60	80		
3	0.63~0.69		VNIR 2	0.63~0.69	60	15	8
4	0.76~0.86		VNIR 3N	0.76~0.86	80		
			VNIR3B 后视波段	0.76~0.86	80		
5	1.55~1.75		SWIR 4	1.600~1.700	100		
			SWIR 5	2.145~2.185	40		
7	2.08~2.35	30	SWIR 6	2.185~2.225	40	30	8
			SWIR 7	2.235~2.285	50		
			SWIR 8	2.295~2.365	70		
			SWIR 9	2.360~2.430	70		
			TIR 10	8.125~8.475	350		
			TIR 11	8.475~8.825	350		
			TIR 12	8.925~9.275	350	90	12
			TIR 13	10.25~10.95	700		
6	10.4~12.5	120 60	TIR 14	10.95~11.65	700		
8	0.50~0.90	15					

网上免费下载,由 ETM<sup>+</sup>(TM)7、4、2 波段数据构成的全球 UTM 图,按横 6 度、纵 5 度分幅,也可以从网上免费下载,这极大方便了遥感应应用。本工作使用了一幅 UTM(N-46-25) 8 景 ETM<sup>+</sup>(13739、13839 等)和 13 景 ASTER 数据,后者为 1B 级格式,1B 级由 1A 级经辐射校正和几何纠正得到。

## 2 蚀变异常找矿的地质依据

近矿围岩蚀变现象作为找矿标志已有数百年历史,根据围岩蚀变发现的大型金属、非金属矿床更是不胜枚举,如北美、俄罗斯的大部分斑岩铜矿、美国许多钨矿、犹他州的大型铝矿、中国铜官山铜矿、西澳大利亚的大型金矿、墨西哥的铂矿、世界大多数锡矿、哈萨克斯坦的刚玉矿床等。

岩石的交代蚀变主要是不同类型的热液与原生岩石相互作用的产物。最常见的蚀变为硅化、绢云母化、绿泥石化、云英岩化、矽卡岩化、白云岩化、重晶石化及锰铁碳酸盐化。某种有用元素的逐步富集是形成矿床的必要条件,而这种成矿物质通常由成矿热液进行迁移搬运和卸载沉淀。近矿围岩蚀变是成矿物质逐步富集成矿过程中留下的印迹。地质学家断言绝大多数内生矿床都伴随围岩的交代蚀变现象,且蚀变带范围大于矿体分布范围的数倍至数十倍。

在研究近矿蚀变围岩的基础上进行找矿是十分

复杂的问题,能够肯定的是热液蚀变岩石的发现,可以指示找矿方向,增加找到矿床的机会。地质学家还认为,有蚀变岩存在不一定有矿,然而大型-特大型内生矿床一般均有强烈且较大范围的围岩蚀变。

遥感获得的是地表信息,只要有一定面积的蚀变岩石出露,就可能被遥感检测,也就是说即便矿体隐伏,只要有足够面积的强蚀变岩出露,也可能用遥感发现。

依据矿物组合,常可将斑岩铜矿蚀变分为钾硅酸盐化、绢英岩化、泥化及青磐岩化 4 种类型(图 1, Lowell et al., 1970),图 2 和图 3 为 2 个矿床的简化蚀变分带情况。由于 ASTER,ETM<sup>+</sup> 是从 705 km 高空获取的,所能测到的应是强度很高的蚀变。为了说明热液蚀变可能达到的强度,根据文献(Шехтман, 1982)归纳成表 2,蚀变强度越大,对遥感蚀变信息提取越为有利。图 3 中的江西德兴县铜厂铜矿的强蚀变带中,新生蚀变矿物占蚀变岩总量的 80% 以上。这便是以找矿(首先是大矿、富矿)为最终目的提取蚀变遥感异常的地质依据。

为了展示斑岩铜矿区遥感异常提取的矿物前提,图 4 汇集了 3 个斑岩铜矿区的实际波谱测试结果,这 3 个矿区是:东天山的土屋、滇北的普朗、冈底斯的驱龙,由章革现场探槽或地表(采样)用 PIMA 谱仪测得。主要矿物有:白云母、伊利石、埃洛石、多硅白云母、高岭石等,这些矿物在短波红外区均有可

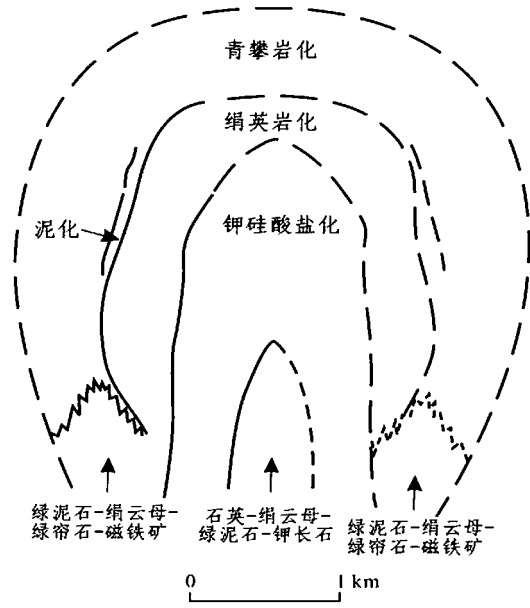


图1 斑岩铜矿床成矿模型(据 Lowell et al., 1970)

Fig. 1 Typical porphyry copper deposit model  
(after Lowell et al., 1970)

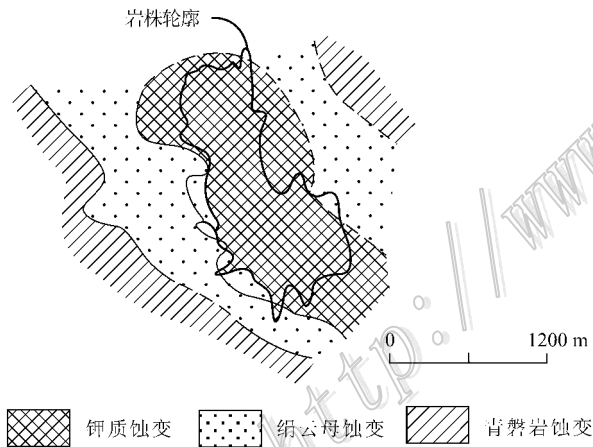


图2 主要蚀变类型在美国新墨西哥的 Santa Rita 斑岩铜矿的分布情况(据 Rose, 1970)

Fig. 2 Alteration distribution in the Santa Rita porphyry copper deposit, the USA (after Rose, 1970)

诊断的特征吸收谷。

### 3 蚀变异常提取的波谱前提

近40年来有一批学者进行了岩石和矿物波谱特性的大量研究工作,这些研究涉及到晶体场理论的矿物学、固体物理学、量子力学、遥感岩石学等众多领域及应用(地质情报所,1980)。最引人注意的是 Hunt 和他领导的实验室在20世纪70年代系统

发表的关于矿物岩石波谱测试结果的文章,Hunt 等(1979)利用近300个粒状矿物的测定结果成功地制成一张“光谱特征标记图(Spectral Signature Diagram)”(图5A),参照该图可以较简便地解释和理解多光谱遥感数据中常遇到的光谱特征。Hunt(1982)以上述实验研究为基础,归纳出下述对遥感解释极为重要的结论:

(1)主要造岩矿物的主要成分,即硅、铝、镁和氧,其振动基频在中红外和远红外区,波长位于 $10\mu\text{m}$ 附近或更长区域,第一倍频也在 $5\mu\text{m}$ 附近或更长区域,高倍频谱带强度太弱,所以在可见-近红外(VNIR)区不产生具有诊断性的谱带。

(2)岩石中的次要成分,如铁杂质或蚀变矿物,可形成岩石谱带中的优势地位。换言之,在可见及近红外区中,天然矿物和岩石最常见的光谱特征是由这样或那样形式存在的铁产生的,或者是由水、 $\text{OH}^-$ 基团或 $\text{CO}_3^{2-}$ 基团产生的。关于它们的波谱以下将较细致地讨论。

(3)热液蚀变矿物在短波近红外波段具有诊断性强吸收特征,它们是纯矿物本身固有的特征。不同矿物组成的岩石并不能改变矿物的波谱特征,因此,岩石的波谱是组成岩石的纯矿物波谱的线性组合,但某种矿物吸收特征的强弱不但取决于其含量,还取决于辐射能量的可接近程度。例如某一矿物被透明矿物所包围时,其吸收特征就较强,反之亦然。吸收特征的尖锐程度取决于矿物的结晶程度,结晶程度越好,吸收特征越明显。

(4)绝对反射率和谱带的光谱对比度,对矿物颗粒大小非常敏感。对透明物质来说,一般的规律是:粒级越小,总反射率越高,但光谱对比度降低;不透明物质,粒级越小,反射率越低。

本项目所用数据以 ASTER 和  $\text{ETM}^+$  为主,对于以太阳作为遥感光源的信息,大气吸收带内(如 $1.4\mu\text{m}$ 和 $1.9\mu\text{m}$ 附近)有些蚀变矿物虽也有诊断性的吸收特征谱,却不可能被利用。为了便于讨论,图5C列出了太阳光谱辐射照度分布曲线,图5B中还标出了波段的 ASTER 和  $\text{ETM}^+$  波长位置,但为了表达方便,略去了 ASTER-TIR 及  $\text{ETM} 6$ 。

矿物岩石的各种光谱特征均起因于电子过程或振动过程。Hunt 之所以能够将不同种类性质各异的300种矿物的光谱特征在同一张图上表示出来,就是因为大多数矿物的主要成分在 VNIR 区不产生吸收谱带,因此, VNIR 区所获信息来自为数不多

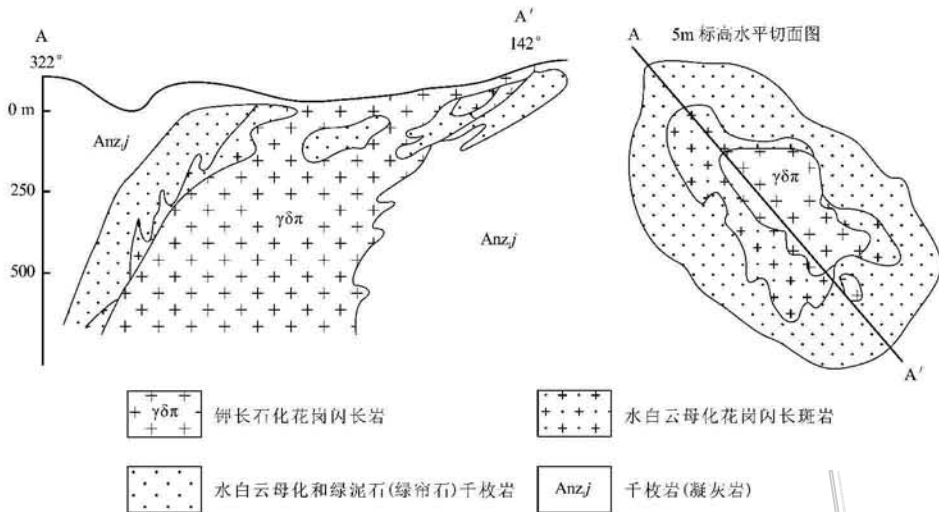


图 3 江西德兴铜厂铜矿分带模型(据黄崇轲等,2001)

Fig. 3 Alteration zoning in the Tongchang Cu deposit of Dexing, Jiangxi (after Huang et al., 2001)

表 2 热液蚀变强度分级

Table 2 Intensity gradation of hydrothermal alteration

蚀变部分占岩石体积	未蚀变 0%	弱蚀变 <10%	中蚀变 >10%~50%	强蚀变 >50%	形成新岩石
钾化	长石	出现新的钾长石、黑云母	大量钾长石细脉、钾长石团块和钾长石集合体	新生钾长石约占岩石的50%以上,可见原始矿物和结构残留	淡玫瑰色钾长石岩
绢云母化	斜长石	斜长石颗粒部分被绢云母交代	斜长石大部被绢云母交代,绢云母沿暗色矿物发育,在基质中呈现为团块和细脉	斜长石全部被绢云母交代,岩石褪色,保留了原生结构	退色的绢云母岩
青磐岩化	暗色矿物和长石	绿帘石、绿泥石交代暗色矿物及长石	绿帘石、绿泥石交代暗色矿物和长石,出现绿帘石、绿泥石团块及细脉	完全交代了暗色矿物和长石,原岩仅少量残留	绿帘石岩 绿泥石岩

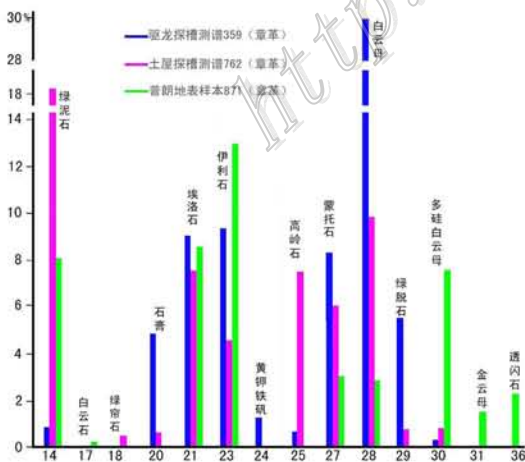


图 4 三个斑岩铜矿区的实际波谱测试矿物频数统计 (由章革测定)

Fig. 4 Statistics of spectral analyzed minerals in ground samples for 3 porphyry Cu deposits (measured by Zhang Ge)

的几种结构离子和置换离子的电子过程,以及数目有限的阴离子基团的振动过程。电子过程中  $Fe^{2+}$ 、 $Fe^{3+}$  占主要地位,也就是说,在矿物(当然也包括岩石和土壤)的 VNIR 光谱中,最常遇到的电子特征是以某种形式存在的铁产生的。振动过程中占主要地位的有水羟基( $OH^-$ ),此外还有碳酸根( $CO_3^{2-}$ )。具体分析如下。

**电子过程** VNIR 区所覆盖的能量范围相当宽,足以包括电子过程所产生的不同效应:晶体场效应、电荷转移、色心、导带跃迁。矿物或岩石中阳离子吸收一定能量,产生电子跃迁,在可见光或近红外区域显示特征谱带。

$Fe^{2+}$  产生的光谱特征,其波长因矿物不同而异,数据主要与离子所在位置的性质有关,分布在  $1.1\sim 2.4\ \mu m$  范围内。 $Fe^{3+}$  在  $0.76\sim 0.90\ \mu m$  (TM 4, ASTER3)波段有较强的吸收(图6)。图中赤铁矿、

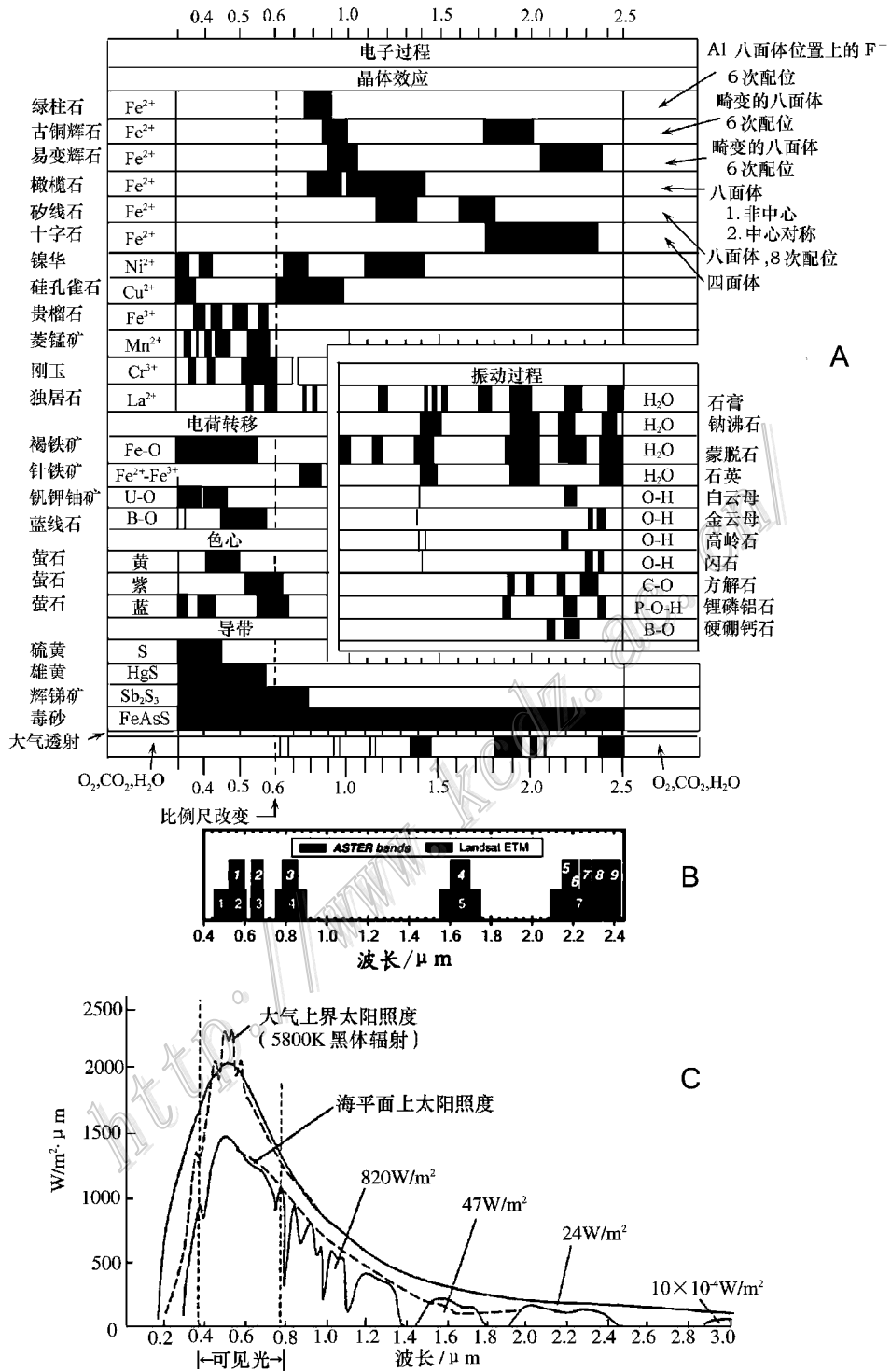


图 5 多光谱波段设置与矿物可见光-近红外光谱及大气窗口的关系

A. 典型矿物可见光与近红外光谱特征标识图(据 Hunt 等,1979); B. ASTER 和 ETM+ 波段设置,图中省略了 ASTER-TIR 和 ETM 6;  
C. 太阳光谱辐射照度分布曲线(据美国摄影测量和遥感协会的遥感手册)

Fig. 5 Mineral spectral signature diagram in VNIR, location of multi-channel bands, and atmospheric windows  
A. Spectral signature diagram(after Hunt et al., 1979); B. Location of ASTER and ETM bands, the ASTER-TIR and ETM 6 bands were omitted; C. Atmospheric windows(from remote sensing handbook of American Society of Photogrammetry and Remote Sensing)

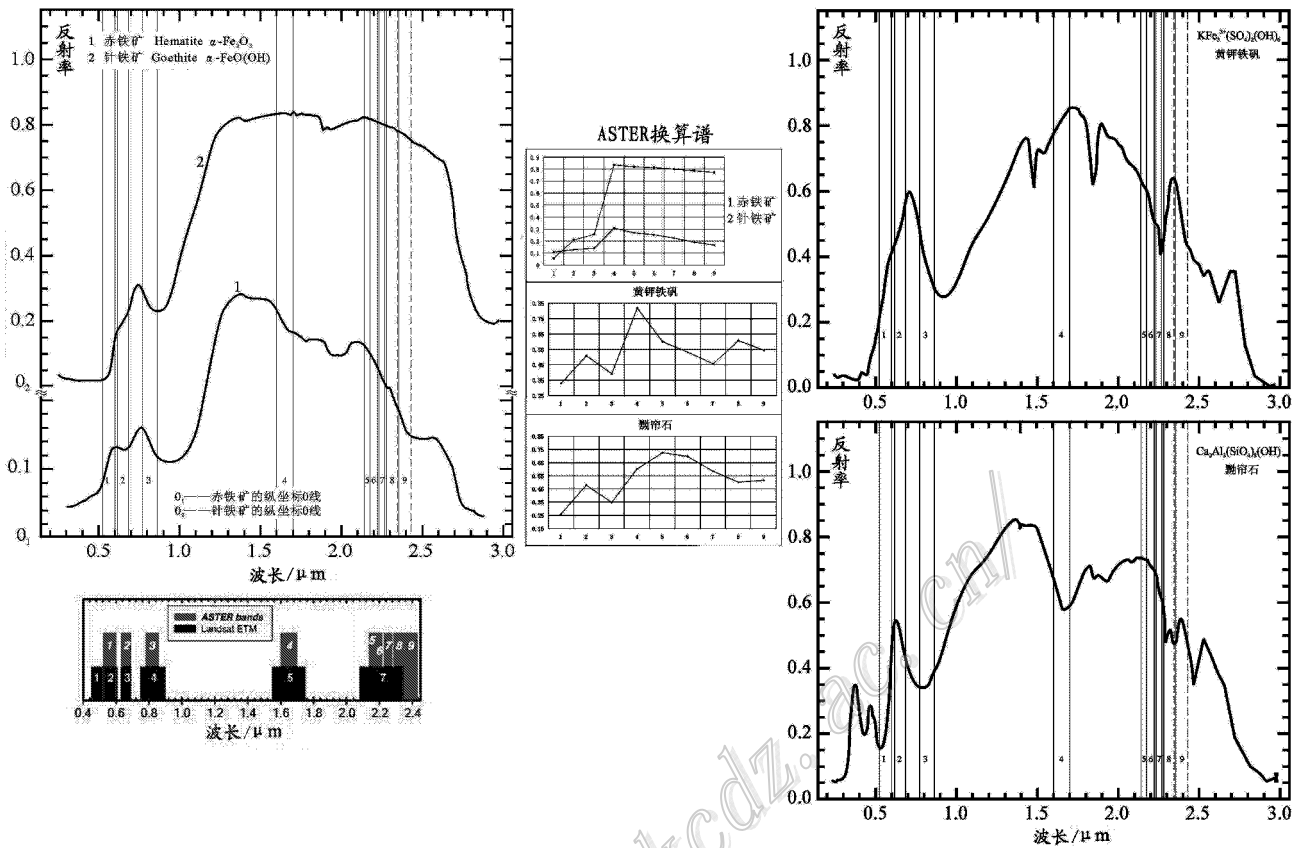


图 6 含 Fe<sup>3+</sup> 矿物的反射波谱曲线 (据 Clark et al. , 2003 ; ASTER 波段位置和换算由笔者加入)

Fig. 6 Reflection spectra of minerals with Fe<sup>3+</sup> (after Clark et al. , 2003 ; ASTER bands are added by the authors)

黄钾铁矾、针铁矿的 Fe<sup>3+</sup> 特征吸收波段中心分别在 0.85 μm、0.90 μm 和 0.94 μm 此外,在中心为 0.45 μm、0.55 μm 等波段亦有吸收,对应的波段为 TM 1 (0.45~0.52 μm) TM 2 和 ASTER1(0.52~0.60 μm) ,应注意的是 ASTER 没有相当于 TM 1 的蓝波段,这在制定铁染异常提取技术时必须给予重视。图 6 还给出了黝帘石的波谱,它可能对铁染异常形成干扰,图 6 中部的 ASTER 谱是这 4 个谱按 ASTER 相应波段换算的。

**振动过程** 振动过程产生的谱带较之电子过程产生的谱带要尖锐得多,而且典型的振动特征以多重谱带的形式出现。

任何一个振动系统的表观无规则运动,是由数目有限的简单运动(称为简正模式或基本模式)构成的。一个由 N 个粒子组成的系统有 3N-6 个简正振动。每一种基本振动有其基频  $\nu_1$ 。

如水分子 H<sub>2</sub>O 只有 3 种 (N=3, 3×3-6=3) 基本振动:对称的 OH 伸缩振动( $\nu_1$ ) HOH 弯曲振动( $\nu_2$ ) 和非对称的 OH 伸缩振动( $\nu_3$ )

当一个基本模式被 2 个或 2 个以上的能量子所激发,就会产生倍频,其谱带位于基频的整数倍(即 2 $\nu_1$ 、3 $\nu_1$ 、4 $\nu_1$  等)处附近。当 2 个或 2 个以上不同基频或倍频振动发生时,就出现合频谱带,位于基频与倍频之和之处或附近。

在 NIR 区所观察到的是具有很高基频基团的合频及倍频谱带,且具有如此高频率的基团相当少,最重要的是 OH<sup>-</sup> 基团。因为许多蚀变矿物都含 OH<sup>-</sup> 基团,而且只要有水存在,羟基特征就出现,所以在地球物质的光谱中,OH<sup>-</sup> 基团信息比其他基团的多得多,这就是 TM 蚀变遥感异常填图的波谱前提。

羟基(OH<sup>-</sup>)只有一个基本伸缩振动模式,约在 2.75 μm 附近。在 NIR 区中观察到的是 OH<sup>-</sup> 伸缩振动的第一倍频谱带 1.4 μm。OH<sup>-</sup> 基本伸缩振动与 X—OH(X 通常为 Al 或 Mg)基本弯曲振动的合频谱带通常成对地出现,即其合频谱带通常有一个伴随谱带。较强的合频带一般在 2.2 μm(若为 Al—OH)或 2.3 μm(若为 Mg—OH)附近,而伴随谱带相



应位于 2.3  $\mu\text{m}$  或 2.4  $\mu\text{m}$  附近。由于在 2.2~2.3  $\mu\text{m}$  附近的较强吸收谱带,使得含羟基的岩石和矿物(如高岭石、蒙脱石、明矾石、绿帘石、绿泥石等)在 ASTER-SWIR 的 5、6、7、8、9 波段和 TM 7 波段产生低值,在 ASTER4 和 TM 5 波段有相对高值(见图 7A、B)

液态水具有上面所述的 3 种基本振动模式:  $\nu_1$  在 3.106  $\mu\text{m}$ ,  $\nu_2$  在 6.08  $\mu\text{m}$ ,  $\nu_3$  在 2.903  $\mu\text{m}$ 。在 NIR 区中可出现的倍频与合频谱带是: ( $\nu_2 + \nu_3$ ) 在 1.875  $\mu\text{m}$  附近 ( $2\nu_2 + \nu_3$ ) 在 1.454  $\mu\text{m}$  附近 ( $\nu_1 + \nu_3$ ) 在 1.38  $\mu\text{m}$  附近 ( $\nu_1 + \nu_2 + \nu_3$ ) 在 1.135  $\mu\text{m}$  附近; ( $2\nu_1 + \nu_3$ ) 在 0.942  $\mu\text{m}$  附近。在矿物和岩石的光谱中,只要有水存在,总会出现 2 个特征谱带: 1.4  $\mu\text{m}$

和 1.9  $\mu\text{m}$  附近。这两个吸收带从左右两侧影响到 TM 5 波段,可使其有所降低,故水与羟基在 TM 5 与 TM 7 是有区别的。

碳酸根离子  $\text{CO}_3^{2-}$  的内振动的倍频或合频在 NIR 光谱 1.6~2.5  $\mu\text{m}$  区间出现 5 个非常特征的谱带: 较强的在 2.55  $\mu\text{m}$  附近和 2.35  $\mu\text{m}$  附近,其他位于 2.16  $\mu\text{m}$  附近、2.00  $\mu\text{m}$  附近及 1.9  $\mu\text{m}$  附近的 3 个相对较弱。因此碳酸盐同样会在 TM 7 波段产生低值,无疑蚀变带中的碳酸盐化起到增强的作用,而无矿化的大理岩、石灰岩则可能产生干扰异常。

现将对岩石矿物在可见光-近红外区反射光谱特征起主导作用的离子和基团的重要吸收谱带及其对 ETM 的反应列入表 3。

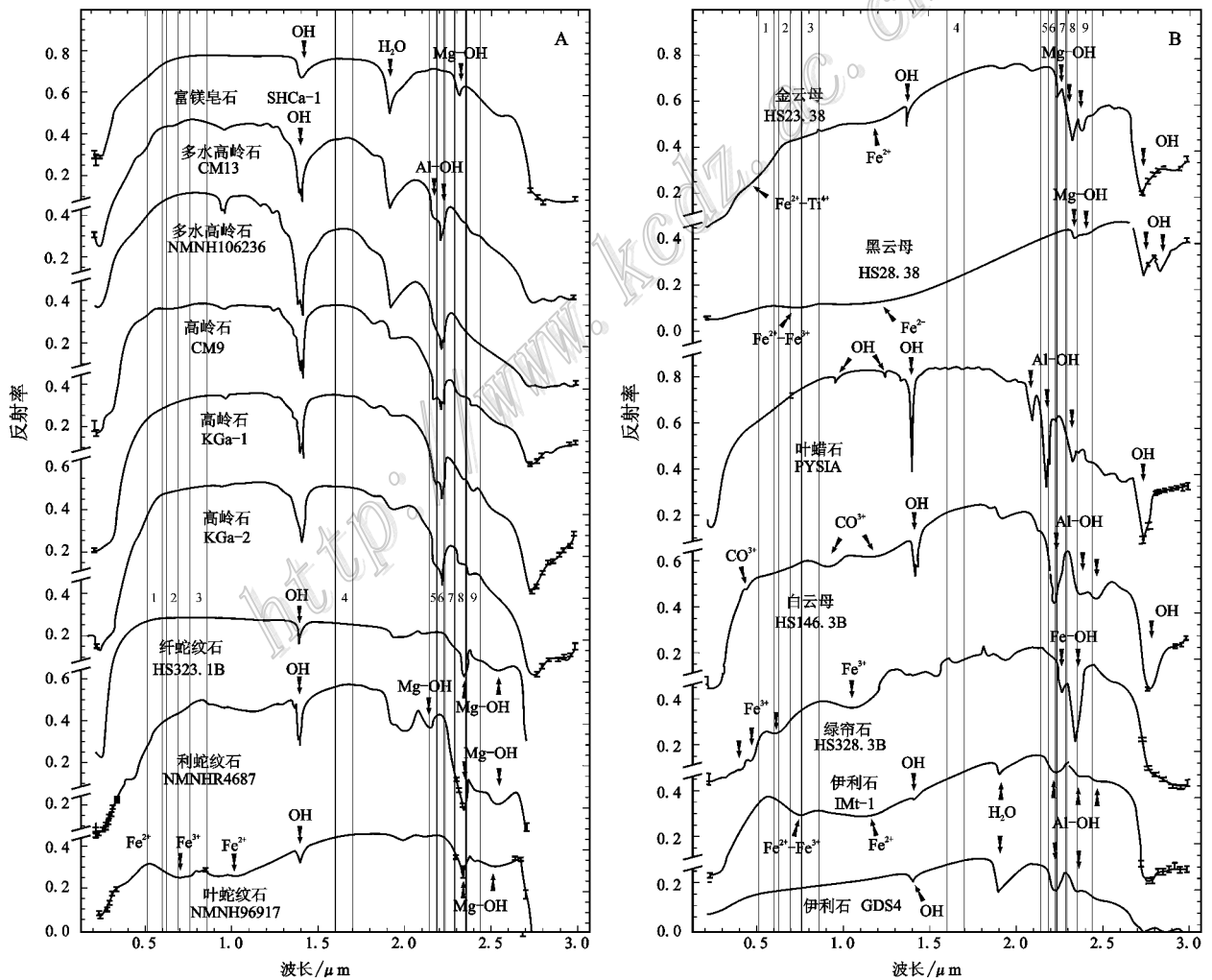


图 7 A、B 显示由于 OH 和  $\text{H}_2\text{O}$  引起的吸收谱带不同矿物的反射光谱(据 Clark et al., 2003, 作者加上 ASTER 波段)

Fig. 7 A & B: reflection spectra of mineral, showing vibration bands due to OH and  $\text{H}_2\text{O}$  (after Clark et al., 2003; ASTER bands are added by the authors)



表 3 岩矿起主导作用的离子和基团在可见光-近红外区反射光谱特征吸收谱带对 ETM 的反应

Table 3 Specific absorption zones on ETM due to ions and groups, which play a leading role in minerals in VNIR region

离子或基团	特征吸收波段中心/ $\mu\text{m}$	对应的 TM 波段/ $\mu\text{m}$	异常提取依据	典型矿物及分子式
$\text{Fe}^{2+}$	1.1~2.4 之间,因矿物不同而异			
$\text{Fe}^{3+}$	0.45 0.55 吸收较强 (0.85, 0.92) 0.94	TM 1 (0.45~0.52) TM 2 (0.52~0.62) TM 4 (0.76~0.90)	TM 3 (0.63~0.69) 偏高, 而 TM 1、2、4 偏低	赤铁矿 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 针铁矿 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 黄钾铁矾 $\text{KFe}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$
羟基 ( $\text{OH}^-$ )		TM 7 (2.08~2.35)	TM 5 (1.55~1.75) 高于 TM 7	高岭石 $\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ 叶蜡石 $\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ 白云母 $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ 滑石 $\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ 蛇纹石 $\text{Mg}_3[\text{Si}_2\text{O}_5](\text{OH})_6$
液态水 $\text{H}_2\text{O}$	1.4, 1.9			
$\text{CO}_3^{2-}$	1.9 2.0 2.16 2.35 2.55	TM 7 (2.08~2.35)		方解石 $\text{CaCO}_3$ 白云石 $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$

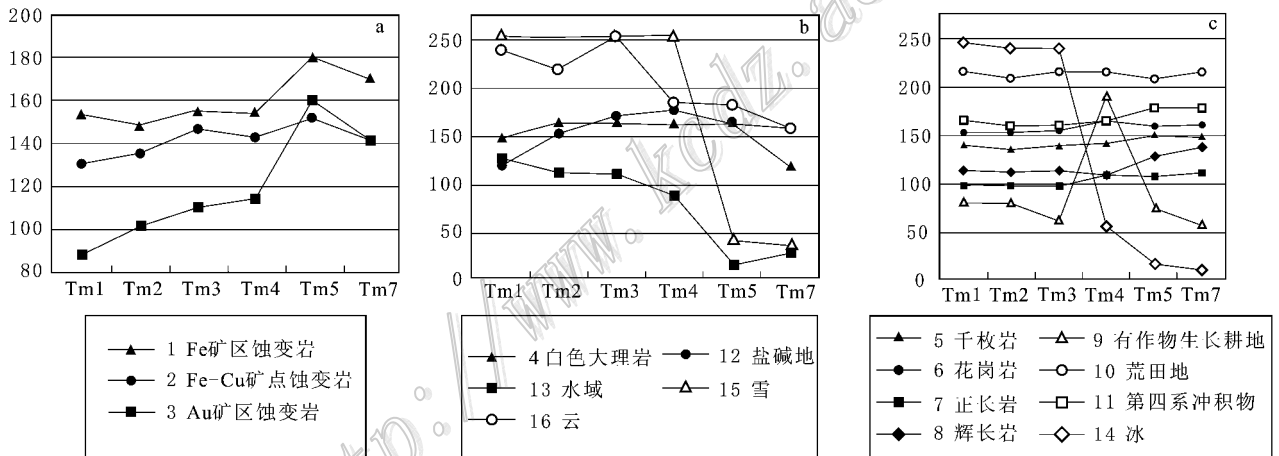


图 8 中国西部某些地区典型地质体及地物 TM 各波段像元亮度值曲线图

a. 铜、铁、金矿床蚀变岩石反射波谱特征曲线; b. 干扰地物反射波谱特征曲线; c. 不同围岩与植被等地物的反射波谱特征曲线

Fig. 8 Curves for TM bands DN data of typical geological bodies and ground objects, taken by image sampling in certain areas of western China

a. For alteration rocks with Cu, Fe, Au; b. For interfering ground objects; c. For rocks and vegetation

张玉君等对甘肃柳沟峡地区和东天山典型地质体及地物用 TM 图像采样统计各波段像元亮度值, 绘制成为曲线图(图 8)。

从图 8 可以看出: ① 1、2、3 号曲线反映了不同类型矿床(铜、铁和金)蚀变岩波谱特征, 曲线具双峰现象, 它由于蚀变带中  $\text{OH}^-$  离子对 TM 7 波段的强吸收和  $\text{Fe}^{3+}$  离子对 TM 1、TM 2 和 TM 4 波段的吸收造成, 是进行蚀变异常提取的依据。② 曲线 5~8 为不同围岩的波谱特征曲线, 其特征明显区别于上

述各蚀变岩石, 故一般不会对蚀变岩提取造成干扰异常。③ 4 号曲线对应白色大理岩, 由于  $\text{CO}_3^{2-}$  离子的作用, 曲线具有 TM 5 大于 TM 7 的特征, 故可能造成干扰异常。④ 13 号曲线(水域)及 14 号曲线(冰)的特点是可见光(TM 1、TM 2、TM 3)区高, 以蓝光波段(TM 1)为最强, 在近红外区急剧下降, 以 TM 5 和 TM 7 为最低, 形成很特殊的曲线形态, 利用此特征可以消除水域(水库、湖泊、河流)及冰面可能造成的干扰。⑤ 曲线 15(雪)及曲线 16(云)在

TM 1~TM 4 有高值,曲线 12(盐碱地)在 TM 4 有高值,曲线 10(荒田地)在各波段均有高值,可据此特征消除(或减少)雪、云、盐碱地和荒田地的干扰。⑥ 冲积扇(曲线 11)在不同条件下波谱曲线变化较大,是形成干扰异常的重要因素之一。⑦ 9 号曲线是生长茂盛的农田,在 TM 4 有强亮度值,是由于植被在近红外波段的“陡坡效应”所形成的,故在植被茂盛区可能给异常提取带来一定影响。对于各类干扰(水、冰、云、雪、雾、植被、盐碱地、阴影等)的去除,是预处理和后处理的重要研究内容。

为了探讨 ASTER 短波红外的 6 个波段对于提取蚀变异常的能力,笔者编制了表 4,表中根据 USGS 波谱(Clark et al., 2003)对高、中、低温热液矿床含羟基或碳酸根的主要矿物作了异常潜力打分评价,针对某矿物光谱,如图 9 所示,首先对其 ASTER 4 平坦高低程度用 1~3 个‘+’号打分,然后对 5、6、7、8、9 ASTER 波段与 ASTER 4 做比较,视其吸收谷

的深度分别打分,用‘#’号(对 5、6)@’号(对 7、8、9)或‘-’号(对非主峰)。

表 4 反映依按照 5 至 9 波段吸收谷的强弱,蚀变矿物可分为 3 组:第一组是在 ASTER 5 和 ASTER 6 有强吸收,如高岭石、伊利石、绢云母等;第二组是在 ASTER 7 和 ASTER 8 有强吸收,如蛇纹石、斜绿泥石、方解石等;其他有些矿物在 ASTER 9 有强吸收,如滑石,可列为第三组。此外,黄钾铁矾与众不同,在 ASTER 6 和 ASTER 7 都具强吸收。结合图 6、图 7、图 9 可得出以下认识:

- (1)通过 PCA(1,3,4,(5+6)/2)可提取泥化、绢云母化、次生石英岩化等蚀变信息,用于寻找斑岩铜矿;
- (2)铁染异常可用 PCA(1,2,3,4)或 PCA(1,2,3)对广泛存在黄钾铁矾的地区(如戈壁荒漠的东天山),PCA(1,3,4,6),PCA(1,3,4,7),PCA(1,3,4,5),PCA(1,3,4,8)都应获得异常信息,且前两者强

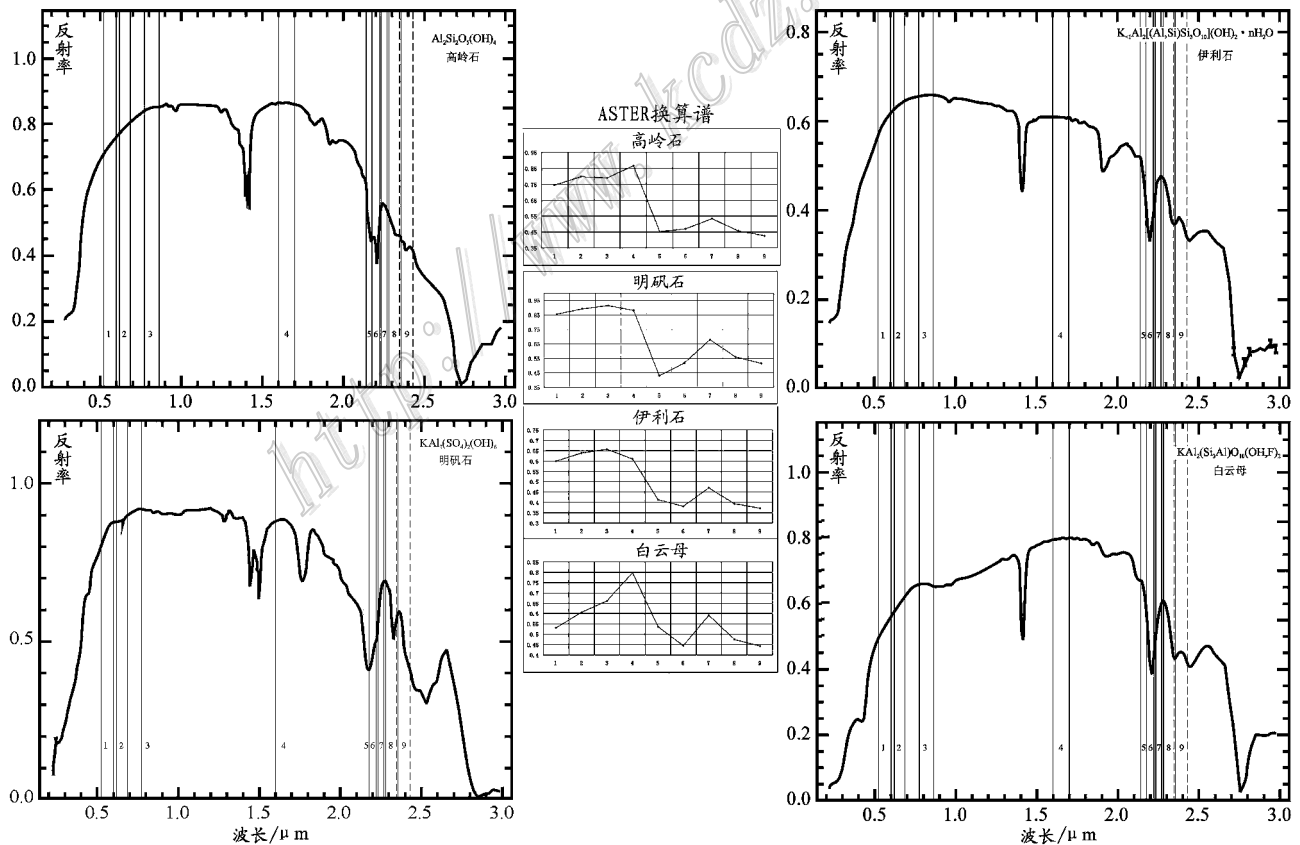


图 9 斑岩铜矿常见羟基矿物的波谱对比图(由 Clark USGS-2003a 谱组成;ASTER 波段位置和换算由笔者加入)

Fig.9 Spectral comparison of hydroxylate minerals with (OH<sup>-</sup>) in Cu deposit (after Clark et al., 2003a. ASTER bands are added by the authors)

表 4 利用 ASTER 数据提取蚀变遥感信息及蚀变遥感异常进行地质解译的波谱依据

Table 4 Spectral basis for identification of specific alteration assemblages and for their geological interpretation

成矿热液 的温度	蚀变矿物 (OH 或 CO <sub>3</sub> )	分子式	ASTER SWIR 波段号							利用 ASTER 已获 验证实例及备注	
			4	5	6	7	8	9			
中低温热液	云英岩化	白云母	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub>	+++	#	#	#	@	@@		
		方解石	CaCO <sub>3</sub>	+++						沙泉子铅锌矿	
		角闪石	NaCa <sub>2</sub> (Mg, Fe, Al) <sub>5</sub> [(Si, Al) <sub>4</sub> O <sub>11</sub> ] <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>	+++							
	气化高温热液	黑云母	K(Mg, Fe) <sub>3</sub> (Al, Fe)Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH, F) <sub>2</sub>	+++							可用 PCA(1378)提取
		透闪石	Ca <sub>2</sub> (Mg, Fe) <sub>5</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	+++							
		斜绿泥石	(Mg, Fe) <sub>5</sub> Al(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	+++	@						
		电气石	NaMg <sub>3</sub> Al <sub>3</sub> (BO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>18</sub> (OH) <sub>4</sub>	+++		@@					
		明矾石	KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	+++	#	#	#		@@		
		叶蜡石	Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	+++	#	#	#		@@		
		高岭石	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	+++	#	#	#		@@		
	绢云母	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH, F) <sub>2</sub>	+++	#	#	#	@	@@			
	黄钾铁矾	KFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	+++	@@	@@	@@			PCA(1234), (1, 2), (5+6)/(2, 8)		
	绢云母化	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH, F) <sub>2</sub>	+++	#	#	#	@	@@			
中低温热液	高岭石	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	+++	#	#	#	#	#	#	蒙古碧玉铜金矿 土屋斑岩铜矿	
	埃洛石	Al <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	+++	#	#	#	#	#	#		
	蒙脱石	(Na, Ca) <sub>0.33</sub> (Al, Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> · nH <sub>2</sub> O	+++	#	#	#	#	#	#		
	伊里石	K <sub>&lt;1</sub> Al <sub>2</sub> [(Al, Si) <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ](OH) <sub>2</sub> · nH <sub>2</sub> O	+++	#	#	#	#	#	#		
	绢云母	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH, F) <sub>2</sub>	+++	#	#	#	#	#	#		
	叶绿泥石	(Mg, Fe) <sub>3</sub> Al[AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ](OH) <sub>8</sub>	+++	@							
	斜绿泥石	(Mg, Fe) <sub>5</sub> Al(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	+++	@							
	蛇纹石	Mg <sub>6</sub> [Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ](OH) <sub>6</sub>	+++	@							
	叶蛇纹石	(Mg, Fe) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	+++	@							
	碳酸盐化	方解石	CaCO <sub>3</sub>	+++							黄山东铜镍矿 披十、罗东铜镍矿
	白云石	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	+++								
	阳起石	Ca <sub>2</sub> (Mg, Fe) <sub>5</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	+++	@							
青磐岩化	绿帘石	Ca <sub>2</sub> (Al, Fe) <sub>3</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH)	+							PCA(1358)	
	黝帘石	Ca <sub>2</sub> Al <sub>3</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH)	+							PCA(1234)	
	叶绿泥石	(Mg, Fe) <sub>5</sub> Al[AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ](OH) <sub>8</sub>	+++	@							
	滑石	Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	+++	@							
滑石菱镁片岩化	菱铁矿	MgCO <sub>3</sub>	+++	@							

注：此外尚有属气化高温热液的钠长石化和方柱石化、属中低温热液的硅化和重晶石化，因含羟基或碳酸根蚀变矿物不典型，故而未列入本表。4 波段高平程度用“+”号多少表示，5 至 9 波段吸收谷强弱用“#”、“—”、“@”、“@”（对 7、8、9）或“@”（对非主峰）号多少表示。

于后两者；

(3) 绿帘石用 PCA(1 3 4 7)、PCA(1 3 4 8)、PCA(1 3 5 8) 都应获得异常信息；

(4) 绢云母的特点是 PCA(1 3 4 6) 所获异常最强；

(5) 高岭石及明矾石与绢云母及伊利石的区别在于 ASTER 5, 前两个的吸收强于后两个, 可用 PCA(1 3 4 5)、PCA(1 3 4 6) 区别；

(6) 对某些 ASTER 4 欠佳的含 Mg-OH 羟基基团的矿物, 可用 PCA(1 3 5 (7+8)/2) 或 PCA(1 3, 6 (7+8)/2) 代替 PCA(1 3 4 (7+8)/2)。

## 4 多光谱矿致遥感异常提取的常见技术方法

目前, 利用多光谱 TM 和 ASTER 遥感数据进行蚀变信息提取的方法已有很多, 如比值分析、克罗斯塔技术、彩色空间变换、光谱角技术等。对于遥感异常提取基本的方法为克罗斯塔技术, 即主分量分析, 光谱角技术的应用也日见增多。

### 4.1 波段比值法

比值法, 或叫比值增强, 是增强不同岩石、土壤之间的差别, 研究地物类型及分布的最简便、最常用的方法。一种地物或岩石在两个波段上波谱辐射量的差别称为波谱曲线的坡度。不同的地物在同一波段曲线上坡度有大有小, 有正有负。比值法在增强不同地物或岩性之间这种“坡度”的微小差别的同时, 还会消除或减弱地形信息和亮度(反照率)的差别。在植被分布较少的基岩裸露地区, 比值分析技术可增强热液蚀变典型矿物的光谱响应, 是圈定可能与成矿围岩蚀变矿物分布有关的遥感异常的常用方法。目前, 利用 ETM 多波段遥感数据的比值能提取的热液蚀变矿物类型主要有: ① 用 ETM 3/ETM 1 提取由铁的氧化物和硫酸盐, 包括褐铁矿、黄铁矿、黄钾铁钒等引起的遥感异常; ② 用 ETM 5/ETM 7 提取由羟基矿物, 包括黏土矿物、云母及水合硫酸盐矿物(石膏和明矾石)等引起的遥感异常。利用 ASTER 数据则可采用 AST 4/AST 5、AST 4/AST 6 或 AST 4/(AST 5+AST 6) 提取 Al-OH 蚀变矿物, 用 AST 4/AST 7、AST 4/AST 8 或 AST 4/(AST 7+AST 8) 提取 Mg-OH 蚀变矿物, 用 AST 4/AST 8 提取含碳酸根矿物。此外, 比值分析常用于干扰的判断。

### 4.2 主分量分析

主分量分析方法是多光谱蚀变异常提取最常用的方法, 1989 年首先由巴西地学家 Crosta 提出并成功用于 TM 数据处理, Crosta 称其为 FPCS 法 (Feature orientated principal component selection), 可译为特征导向选择主分量法, 但这一名称并未普及。次年, Loughlin 进一步将此方法提做 Crosta 技术, 此后的 30 年该方法被广泛应用, 是因为其有效性和稳健性 (Bastianelli et al., 1993; Tangestani et al., 2001; Crosta et al., 2003)。

#### 4.2.1 主分量分析的原理

主分量分析又称为 K-L 变换或霍特林变换。K-L 变换方法是以最小均方误差为准则, 将原特征向量作变换后压缩维数的方法。

图象处理技术大量地应用多元分析方法 (袁志发等, 2003; Kendall, 1975)。主分量分析便是基于变量之间的相互关系, 在信息总量守恒的前提下, 利用线性变换的方法来实现去相关性的, 由于所获各主分量之间不相关, 故各主分量之间信息没有重复或冗余。

遥感信息各波段相互之间存在有一定相关性, 甚至对某些岩性这种相关性还很强。通常主分量分析被用于压缩维数, 但在遥感蚀变异常提取中却是反其道而行之: 避开表征高维数复杂集合的前几个主分量, 而用排列在后面的能表征蚀变信息的分量。

主分量分析法用另一组多维空间, 使数据之间的变异最大程度地显现出来。每一个参数可用其平均值和变异来表示, 单变量的变异表现出数据在平均值周围的分布; 用协方差来衡量两个变量的互变异 (jointvariation), 当协方差为正, 则有正相关性; 当协方差为负, 则存在负相关性; 当协方差为零时, 两参数完全独立, 互不相关。

主分量分析或主分量变换第一步是移动座标点, 使平均值为零, 然后将座标旋转, 使一个座标轴与数据具有最大分布的方向相符合, 这个旋转后的新轴即第一主分量。垂直于它的另一个座标轴则代表其余变异的方向, 这就是第二主分量。在两维以上的多维空间里, 这样的处理将继续进行, 以确定一组直角座标轴, 这些轴逐渐将全部变异 (消耗) 掉, 它并不能全部包含在一个次一级主分量中, 而是有几个原始参数就会有几个主分量。具体公式在此省略。

某主分量的本征值就是消去该主分量后, 对本征向量所引入的均方误差值。可见它表征各

主分量的重要性。主分量分析是去相关性处理。第一主分量的确定原则：使其取向代表信息量最大；第一主分量是各个波段的加数和，反映总体的反射值；第二主分量与其正交，以此类推。实验证明，当仅用 4 个波段做分量分析时，表征蚀变信息的分量一般为第 4（第 3）主分量，其特征值甚小，一般仅在 1% 左右。

如果说，为了彩色图的制作，通过 3 个以上波段数据的主分量变换，保留 3 个主分量，赋以红、绿、蓝 3 基色，舍弃第 3 以后的次要分量，达到“从树木看森林”为目的。那么，取次要分量表征蚀变信息，则可比喻为“从树叶看病虫害”了。首先想到这一点的是巴西人 Crosta (Crosta et al., 1989)，故遥感界将用以进行蚀变信息提取的主分量分析称为克罗斯塔技术。

4.2.2 用 ETM 做主分量分析的波段选择

ETM 在可见光、近红外和短波红外共有 6 个波段 (1、2、3、4、5、7)，ASTER 有 9 个波段 (1、2、3、4、5、6、7、8、9)，为了阐明参与主分量分析的最佳波段选择，以笔者用 ETM-13739 景对驱龙甲玛子区

13 739 ms 所做的实际试分析结果为例，用 6 种波段选择分别进行了主分量分析：PCA(1、2、3、4、5、7)，PCA(1、3、4、5、7)，PCA(1、4、5、7)，PCA(4、5、7)，PCA(5、7)，PCA(1、3、4、5)，现从各协方差矩阵的本征向量对比 (表 5)，并根据本征向量的组成，判断该主分量主要反映的地物。

从表 5 可以看出，一般情况下，ETM 经主分量分析，可以反映 4 类地物：总体背景、和水相关地物、植被、蚀变矿物。因此波段选择 4 个为佳，羟基矿物异常提取的最优方案是 PCA(1、4、5、7) 的 PC4 (或 PC3)，提取铁染异常的最优方案是 PCA(1、3、4、5)。

4.2.3 用 ASTER 做主分量分析的波段选择

基于上述 ETM 做主分量分析的波段选择，由于 ASTER 无对应于 ETM 1 的蓝波段，故提取铁染异常可用 ASTER 的 (1、2、3)。ASTER 的短波红外共有 6 个波段，这使得羟基矿物异常提取增加了新的能力。从驱龙子区异常提取 ASTER 波段选择 (图 10)，用 ASTER 数据提取斑岩铜矿蚀变异常的最佳方案是 PCA(3、4、6) 或 PCA(3、4、5+6)。

表 5 不同波段组合主分量分析本征向量对比

Table 5 Comparison of eigenvectors of PCA with different band combinations

		1	2	3	4	5	7	说明
PCA 1 2 3 4 5 7	PC1	0.16183	0.23488	0.3735	0.37934	0.62937	0.48901	主要反映黑白背景图
	PC2	0.52416	0.50425	0.47194	0.0187	-0.45192	-0.20899	主要反映冰、雪、水
	PC3	0.18023	0.15979	-0.13509	-0.72722	-0.07249	0.62421	主要反映植被
	PC4	-0.07757	-0.08313	-0.17431	0.53359	-0.60064	0.55785	主要反映羟基矿物
	PC5	-0.68404	-0.02678	0.67207	-0.19304	-0.17764	0.10429	主要反映铁染
	PC6	0.43893	-0.8108	0.37075	-0.07013	-0.04557	0.07407	主要反映燥声
PCA 1 3 4 5 7	PC1	0.16304		0.38106	0.39009	0.64978	0.50381	主要反映黑白背景图
	PC2	0.62925		0.61014	0.10195	-0.43153	-0.18751	主要反映冰、雪、水
	PC3	0.27237		-0.04319	-0.71235	-0.10862	0.63617	主要反映植被
	PC4	-0.11806		-0.21896	0.54336	-0.58953	0.54345	主要反映羟基矿物
	PC5	-0.69953		0.6578	-0.18644	-0.17952	0.10474	主要反映铁染
PCA 1 4 5 7	PC1	0.16931			0.41966	0.7054	0.54555	主要反映黑白背景图
	PC2	-0.90098			-0.26629	0.3395	0.04548	主要反映冰、雪、水
	PC3	-0.21325			0.73974	0.09874	-0.63052	主要反映植被
	PC4	-0.33778			0.45361	-0.61433	0.55023	主要反映羟基矿物
PCA 4 5 7	PC1				0.42482	0.71658	0.55322	
	PC2				0.85262	-0.11133	-0.51053	主要反映植被
	PC3				-0.30424	0.68857	-0.65827	主要反映羟基矿物
PCA 5 7	PC1					-0.78894	-0.61447	
	PC2					0.61447	-0.78894	主要反映羟基矿物
PCA 1 3 4 5	PC1	-0.1908		-0.44372	-0.4536	-0.74897		
	PC2	0.63126		0.57412	0.0322	-0.52044		主要反映冰、雪、水
	PC3	0.33574		0.04406	-0.85014	0.40324		主要反映植被
	PC4	-0.6726		0.6867	-0.26547	-0.07471		主要反映铁染

注：PCA：Principal Component Analysis；F ①3739ms. pix [1200P 820L]；Eigenvectors of covariance matrix (arranged by rows)



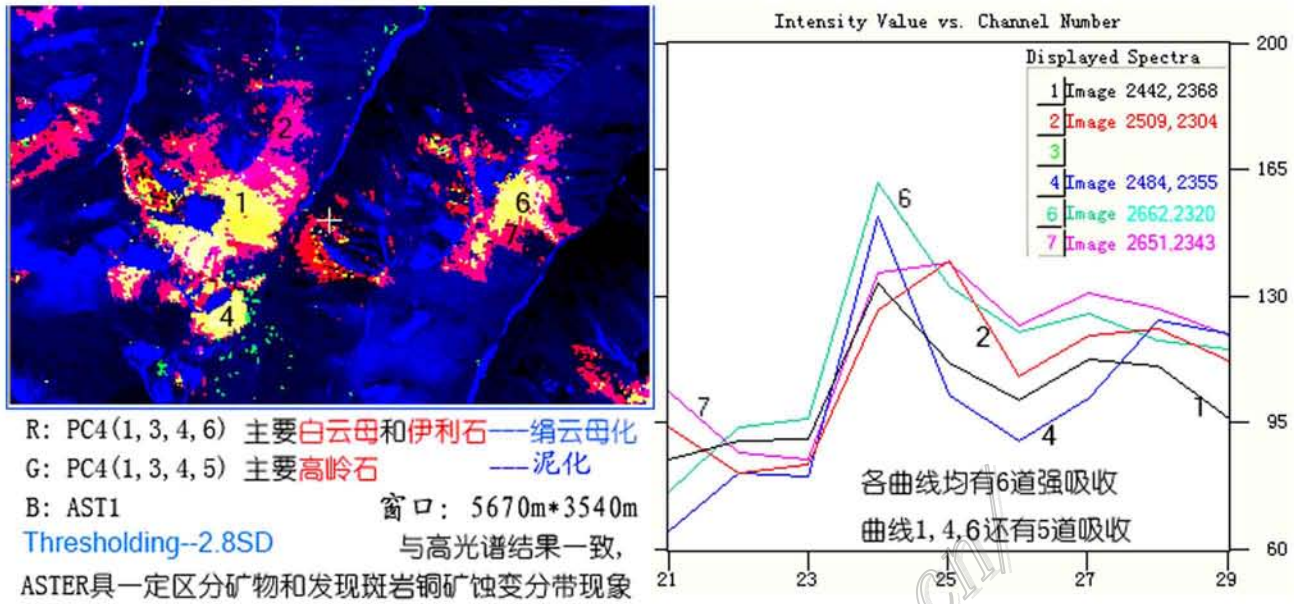


图 10 驱龙子区异常提取 ASTER 5、6 波段对比

Fig. 10 Comparison between OHA(5) and OHA(6) in Qulong area

从图像采样波谱图 10 可知, PCA(3, 4, 6) 主要反映白云母和伊利石, 谱线 2、7 以 6 波段吸收为主; 而 PCA(3, 4, 5) 主要反映高岭石, 谱线 1、4、6 不仅有 6 波段还有 5 波段的吸收, 这符合图 9 展示的标准谱, 而且与高光谱的结果一致(甘甫平等, 2002)。

#### 4.3 光谱角法(SAM)

光谱角法把每一个多维空间点以其空间向量来表征, 对比空间向量角的相似性。它是一种监督分类。要求对每一类别有一个已知参考谱。此参考谱可以是地面测得存入参考谱库的, 也可以从已知条件的图面单元做感兴趣区统计, 存入参考谱库。

在多光谱遥感数据处理中常将 SAM 法用于监督分类、优化异常、剔除干扰等, 所用波段可以是全体(如 ETM 的 1、2、3、4、5、7 波段), 也可以是部分(如 ASTER 的 VNIR 和 SWIR 的 9 个波段)。笔者曾用 SAM 法对 13 739 景数据, 分别以驱龙和甲玛羟基异常为样本谱线, 用 SAM 法进行监督分类, 再分别和驱龙和甲玛羟基异常做与操作, 得到驱龙型和甲玛型羟基异常(张玉君等, 2004), 从而减少了假异常; 还曾成功地用 SAM 法剔除云和植被的剩余干扰(张玉君等, 2007)。笔者还用 SAM 法为夏玛日异常区剔除了黝帘石对铁染的干扰。

## 5 去干扰异常主分量门限化技术

蚀变遥感异常提取和应用研究中, 形成了一套独具特色的方法技术, 即“去干扰异常主分量门限化技术”(Deinterfered Anomalous Principal Component Thresholding Technique), 其流程(张玉君等, 2003)包括预处理、信息提取和后处理三大部分, 已在 PCI、ENVI 和 ER-Mapper 3 种系统上运行成功, 并已用它处理了数百万平方公里的 ETM<sup>+</sup>(TM)数据, 针对 ASTER 数据处理特点进行了增进, 示于图 11。

### 5.1 多种干扰的去除

多种干扰图区的剔除是异常提取的关键, 必须在预处理中首先解决。

常见的干扰地物有 8 种: 植被、地形阴影、云、云影、冰、雪、水体(包括湿地)、盐碱地(童庆禧, 1990)。现以 14729 景为例, 将 8 种干扰地物的 ETM 波谱展示于图 12。其中冈底斯少见盐碱地, 以下将对植被和其他干扰分别进行讨论。

#### (1) 植被

植被是矿致遥感异常提取过程中的常见干扰因素。蓝、红光波段的光辐射被叶绿素全部吸收而进

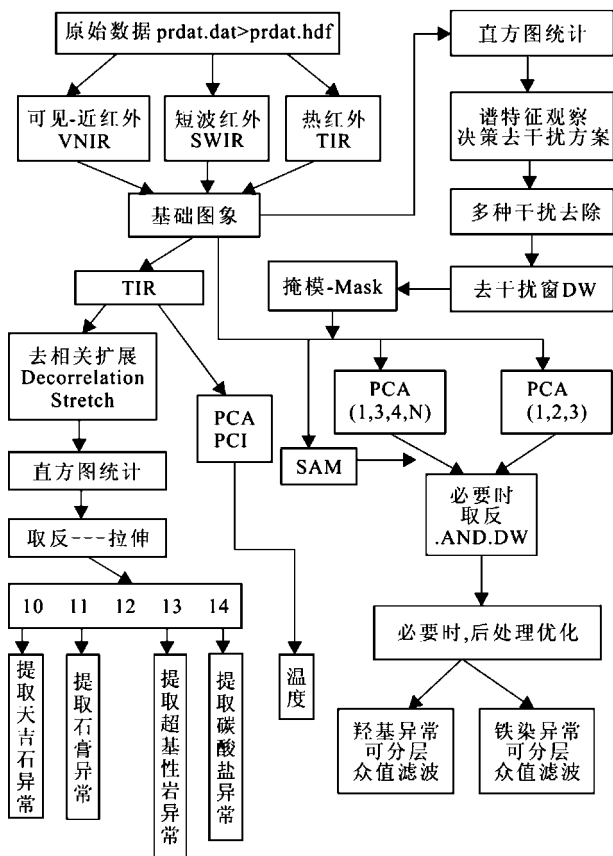


图 11 去干扰异常主分量门限化技术流程图

Fig. 11 Flow chart of de-interfering anomalous principal component thresholding technique

行光合作用 绿光的大部分也被吸收,但仍有一部分被反射,所以叶子呈绿色,而近红外波段(TM 4 波段的波长为  $0.76 \sim 0.90 \mu\text{m}$ ,属近红外波段)可以穿透叶绿素,被多孔薄壁细胞组织所反射,因此,在近红外波段上形成强反射,所以对绿色植被来讲,它们在可见光蓝、绿、红及近红外波段处的反射率是不同的。从图 13(Lawn-Grass 谱取自 PCI 谱库)可见,植物在绿光波段(TM 2 波段的波长为  $0.52 \sim 0.60 \mu\text{m}$ )有一个反射小峰,峰值约为 10% 左右,所以看上去它呈绿色,在近红外波段反射率很大,可达 60%~75%。在短波红外区 1.42 和 1.96 附近有 2 个宽吸收谷,这是由叶子中水成分的强吸收造成。

从图 13 可以看到 TM 5 高于 TM 7,这说明用 PCA(1, 4, 5, 7)提取羟基异常时,植被的存在有可能对异常形成假贡献,故应去除植被干扰。判断植被的反射特性有以下几点:A、在 TM 5 波段反射率低于在 TM 4 波段的反射率;只有当除了植被外尚有其他地物的作用下, TM 5 才能超出 TM 4;B、在 TM

4 波段反射率高于在 TM 3 波段反射率的倍数更大,若使 TM 3 超出 TM 4,除了植被外必须有更多其他地物的参与下,才能出现。因此(TM 5/TM 4)和(TM 3/TM 4)都可以做为去除植被干扰的判据,但前者更佳。当  $\text{TM 5/TM 4} \leq S$ ,可视为植被全覆盖区;当  $\text{TM 5/TM 4} > S$ ,可视为植被半覆盖区,  $S$  为某一  $\leq 1$  的数,其值通过累试法确定。若用  $S = 1$ ,以  $(\text{TM 5/TM 4}) \leq 1$  消除植被干扰,较之  $(\text{TM 4/TM 3}) > 1$  的优点是保留了植被半覆盖区,缺点是可能伤害部分暗色岩,但未伤及异常。 $(\text{TM 4/TM 3}) > 1$  处理不伤暗色岩,后者所获异常无一受损。此判断同理可用于 ASTER 的羟基异常提取。

## (2) 地形阴影、云、云影、冰、雪、水体、湿地

地形起伏常常遮挡阳光的照射,形成阴影区,阴影区可分为全阴影区和半阴影区,如图 14 所示,全阴影区数值太低,提取异常误差太大,仅部分半阴影区有此意义。根据阴影区的反射光谱特征,笔者设想可以用  $(\text{TM 7/TM 1} \text{ 或 } \text{AST 7/AST 1}) < R$ ,做为全阴影区的判据,消除其影响,  $R$  为某一  $\leq 1$  的数,其值通过累试法确定,将  $(\text{TM 7/TM 1}) < R$  的像素划入干扰窗。这一判据还可同时消除许多其他干扰。现列表 6 分别说明。

从表 6 及图 14 可以认为  $(\text{TM 7/TM 1} < R)$  是消除干扰的很好的判据,唯一应慎重的是,如果图面上有需要保护不受伤害的暗色岩,则此比值不适用,改用 TM 1 和 TM 7 独立处理。

此外,还可以利用高端切割的方法,来消除雪、冰等的干扰;用比值切割的办法,来消除湖泊、湿地等的干扰。

## 5.2 门限化(Thresholding)

在图像处理中经常使用概率密度分布曲线(简称直方图),于是产生 2 个问题:① 如何理解 ASTER 和 ETM 数据直方图经常接近正态分布?② 是否可以使用标准离差  $\sigma$  做为遥感异常切割的尺度?经研究,采取化探异常分级的办法,以  $\sigma$  做为尺度,用数倍  $\sigma$  值做为阈值,限定异常水平。目的是对异常强度进行分级,获得分级异常图。

## 5.3 PCA 的检出限及对植被的容限度

通过模型实验探讨了 PCA 的检出限及对植被的容限度问题(张玉君等,2007)。根据检出限模型实验结果,可以认为用 PCA 提取蚀变信息的检出限优于两万分之一或十万分之五。这意味着在面积为两万平方公里的图幅上,只要蚀变岩(有强有弱)的



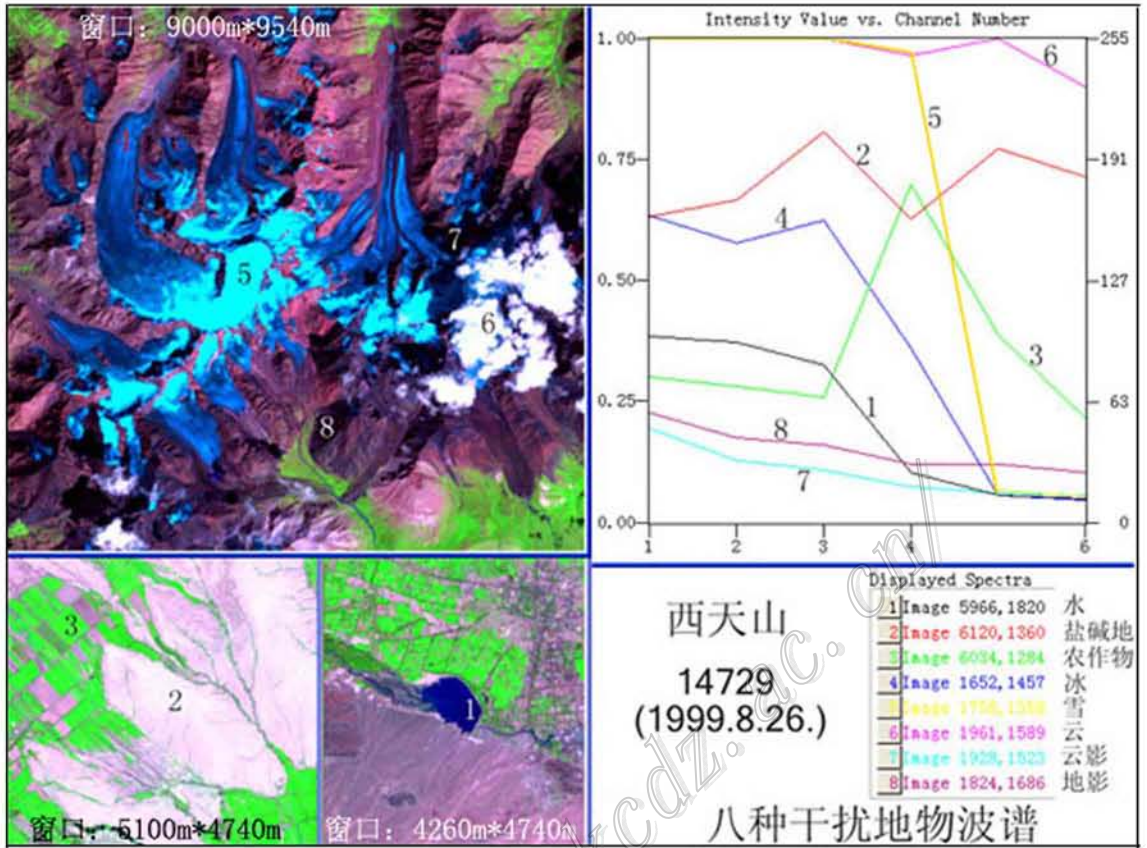


图 12 8 种干扰地物 ETM 波谱图  
 Fig. 12 ETM spectral plot of 8 interfering ground objects

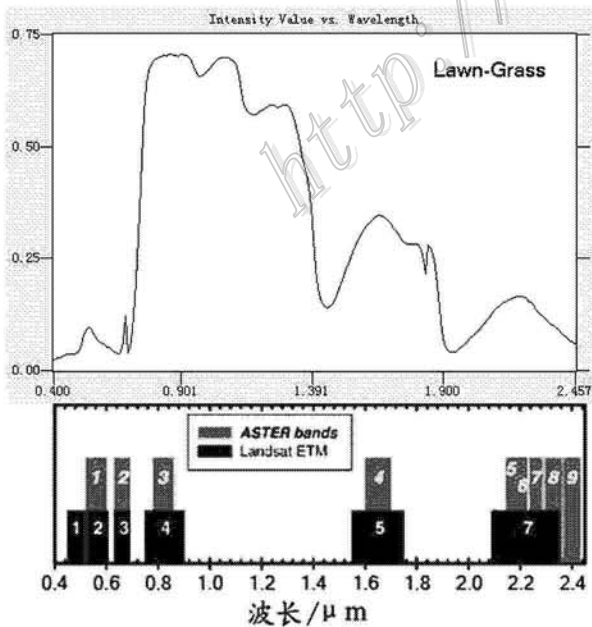


图 13 植物的光谱曲线图  
 Fig. 13 Spectral plot for vegetation

总面积不小于 1 km<sup>2</sup>, 即可被 PCA 提取出来。当然, 做为模型, 条件被大大简化了, 实际地质情况十分复杂, 岩性变化万千, 干扰问题更是扑朔迷离; 此检出限模型实验结果仅仅具有参考意义。

植被是矿致遥感异常提取过程中的常见干扰因素。为了探讨对植被干扰的容限度问题, 设计了数个模型, 实验结果都表明, 当混合像素中植被成分达到或超过 50% 的时候, 蚀变异常就很难提取了, 这一结果与澳大利亚飞机上所做测量是一致的。

## 6 冈底斯斑岩铜矿带找矿模型最佳遥感异常判据研究

为冈底斯斑岩铜矿带找矿模型遥感异常提取研究, 拟以 ASTER 数据为主。整景 ASTER 矿致遥感异常信息的提取以 Crosta 主分量分析(Crosta et al., 1989; Loughlin, 1991; 李昌国等, 1997; 张玉君等, 2002; 2003; 2004; 2006a; 2006b; 2007; 2009)为主

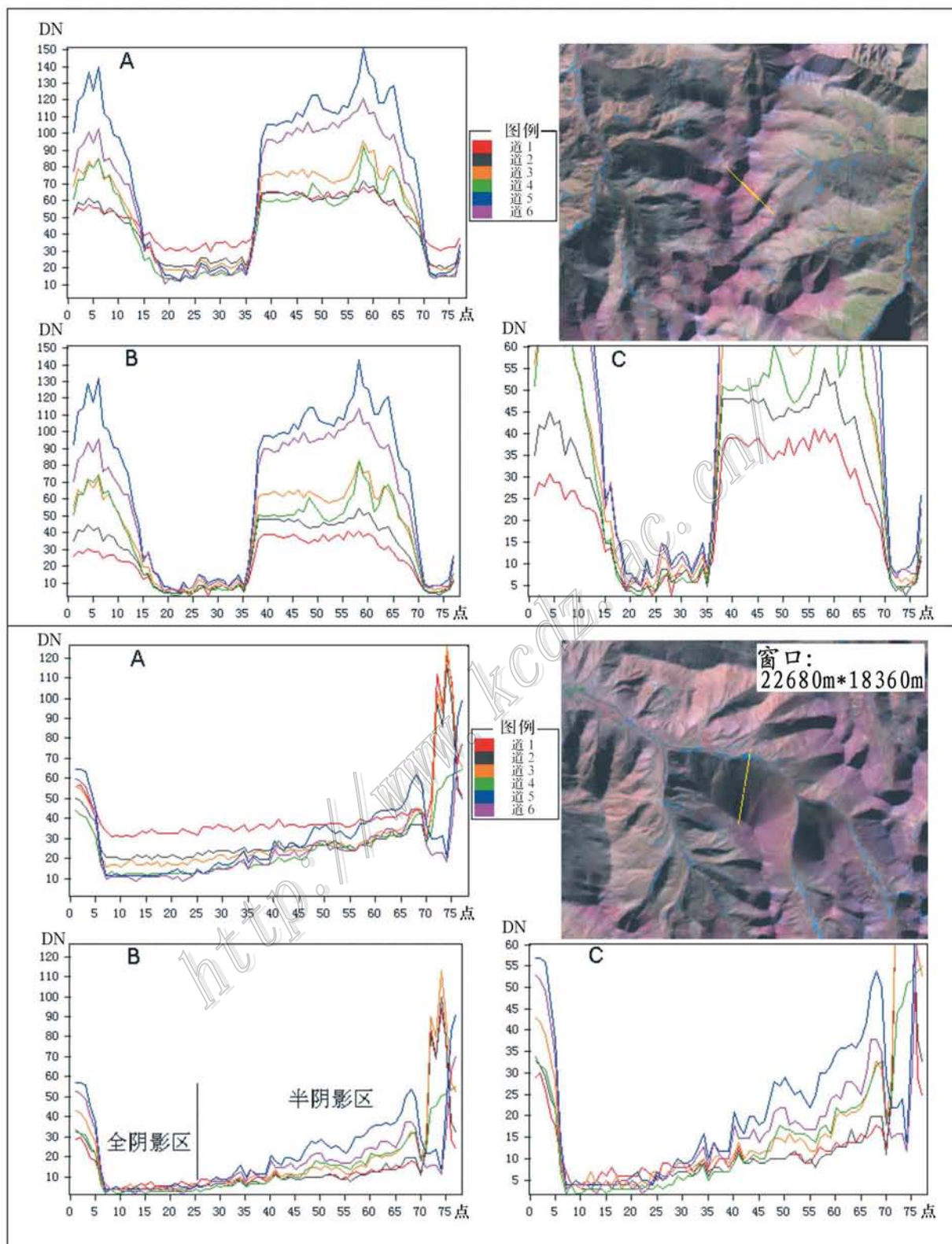


图 14 地形阴影区波谱剖面(13739)

上图：剖面穿过两个全阴影区；下图：剖面穿过全阴影区和半阴影区

A: 原始数据 DN; B: DN-MIN; C: (DN-MIN) \* 2

Fig. 14 Spectral plot for relief shadow (13739)

A: Original DN; B: DN-MIN; C: (DN-MIN) \* 2



表6 利用(TM 7/TM 1&lt;R)判据消除干扰情况分析

Table 6 De-interfering discriminator(TM 7/TM 1&lt;R)

名称及特征	TM各波段高低排列	补充说明	可用性
地形、阴影	全阴影 半阴影	1-2、3-4、5、7 1>7 经常出现	可以 多数可以
云影	厚云影 薄云影	类似全阴影 类似半阴影	可以 多数可以
云	厚 薄	一般为1>7 13931-5 例外, 7>1 1>7 经常出现 有时有变化	多数可以 多数可以
雪		1、2、3、4、5、7	可以
冰雪		2、1、3、4、5、7	可以
湖水		1、2、3、4、5、7	可以
沼泽		4、3、1、2、5、7	可以
暗色岩	13931-6 14130-10	5、7、4、1、3、2 1、3、2、4、5、7	不受到伤害 受损, 但此岩无异常

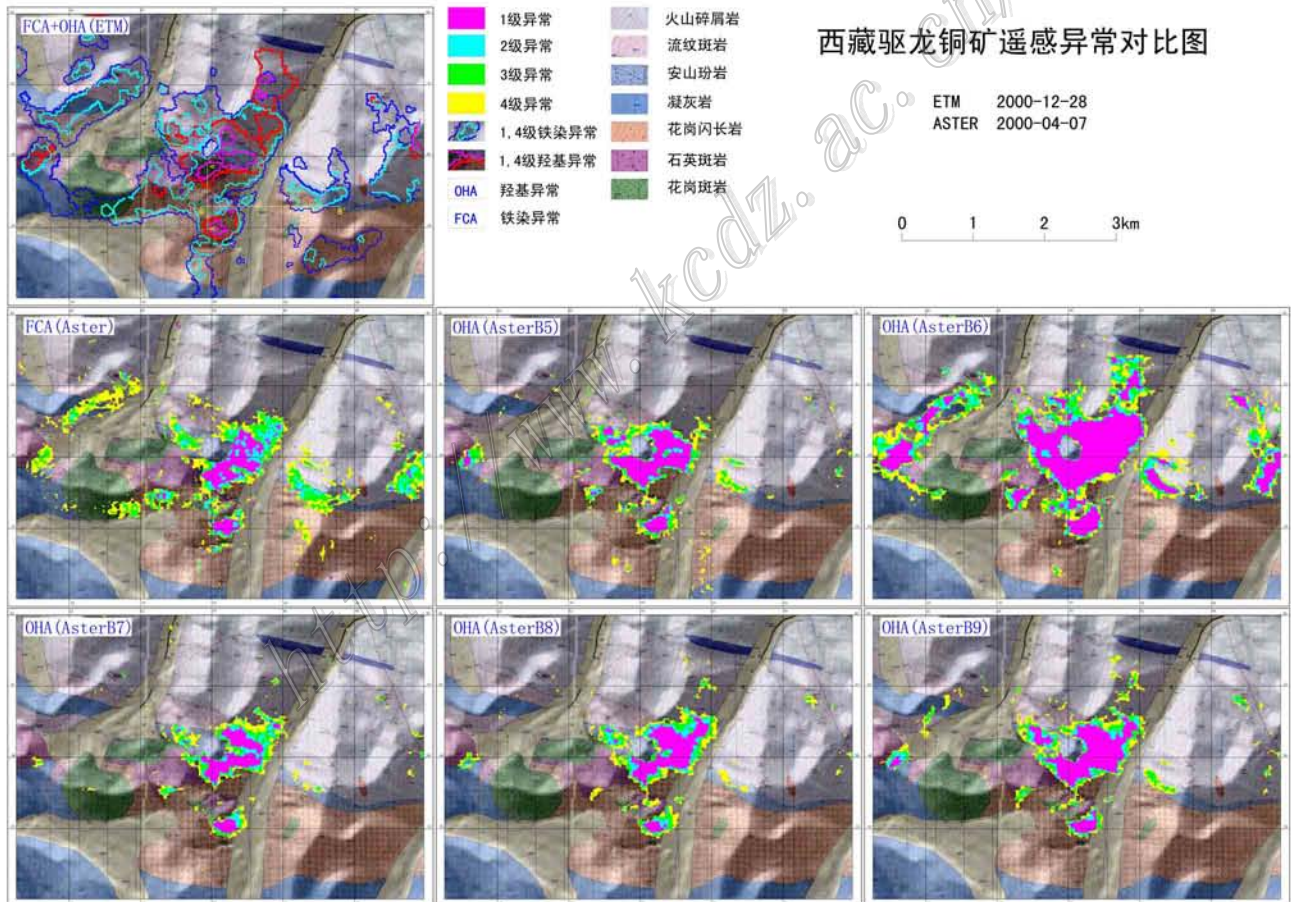


图 15 西藏驱龙铜矿 ASTER、ETM 遥感异常对比图

Fig. 15 Comparison of ASTER and ETM remote sensing anomalies for the Qulong Cu deposit

要方法,有条件的地区利用光谱角填图法(SAM, Spectral Angle Mapper)对所获得的主分量异常进行筛选或分类。由于 ASTER 景号无规律排列,只能通过 UTM-N-46-25、ETM-13739 景和 13839 景确定所需

查找区,已处理夏玛日至朱诺的 13 景 ASTER 数据。

对每一景 ASTER 都进行了羟基和铁染异常提取,已知矿床(如驱龙、甲玛、朱诺、冲江等)均反映良好。驱龙、甲玛、朱诺和夏玛日还利用光谱角法对

表 7 冈底斯斑岩铜矿带找矿模型遥感异常推荐靶区  
Table 7 Recommended Cu targets by remote sensing anomaly

编号	经度	纬度	ASTER 时相	说明
1	92°19'32.0"E	29°50'44.4"N	2007.05.10	夏玛日北
2	92°13'17.2"E	29°44'11.2"N	2007.05.10	夏玛日西
3	92°09'25.6"E	29°50'20.1"N	2007.05.10	夏玛日西
4	92°05'28.3"E	29°47'32.1"N	2007.05.10	夏玛日西
5	91°38'15.7"E	29°37'53.7"N	2000.04.07	驱龙东
6	91°30'43.2"E	29°38'49.4"N	2000.04.07	驱龙西
7	91°44'35.8"E	29°40'19.6"N	2000.04.07	甲玛南
8	89°57'50.7"E	29°37'45.7"N	2001.11.04	冲江北
9	89°57'23.9"E	29°38'11.1"N	2001.11.04	冲江北
10	89°56'30.8"E	29°36'37.8"N	2001.11.04	冲江西
11	89°44'40.7"E	30°15'41.3"N	2000.11.01	87126 北
12	89°26'30.8"E	29°58'18.6"N	2000.11.01	87126 中北
13	89°23'56.1"E	30°11'18.6"N	2000.11.01	87126 中北
14	89°18'05.7"E	30°10'51.5"N	2000.11.01	87126 中北
15	89°30'20.0"E	29°47'10.7"N	2004.03.01	95110 最北
16	89°10'20.6"E	29°36'32.3"N	2000.11.01	83126 西中
17	89°19'20.3"E	30°05'20.8"N	2001.12.13	201027 东北
18	87°29'31.2"E	29°49'53.2"N	2001.04.24	朱诺北
19	87°29'51.2"E	30°08'24.8"N	2001.04.24	朱诺北
20	87°08'13.12"E	29°47'43.34"N	2001.04.24	朱诺西

异常进行了优化(图 15)。现以驱龙为例展示 ASTER 与 ETM 羟基和铁染异常的对比,视立体地质图做为背景,羟基异常(OHA)和铁染异常(FCA)各分为 4 个异常层,而且羟基异常还分为 5 种不同的波段组合提取:OHA(5)、OHA(6)、OHA(7)、OHA(8)、OHA(9);见图 15。其解译见张玉君等(2004)文献。

这 13 景 ASTER 数据总面积为 4 万多平方公里,全面的地质解译工作量庞大,在第 7 章中将以夏玛日景为例展示地质解译内容,地质解译的主要目的是确定找矿靶区,根据辨认斑岩铜矿的最佳遥感异常判据,从 13 景 ASTER 异常提取结果,初步确定了 20 处靶区,列入表 7 中(冈底斯斑岩铜矿带找矿模型遥感异常推荐靶区)。做为方法研究的重点,以下将展示 ASTER 较 ETM 的优越性。

### 6.1 用 ASTER 对斑岩铜矿异常提取更为准确和灵敏

ASTER 由于将对应于 ETM 7 的短波红外区 1 分为 5,使斑岩铜矿异常提取更为准确和灵敏。以下用冲江和夏玛日 2 个地区为例说明之。十年前用 ETM 提取冲江矿区(图 16)遥感异常曾遇到困难,主要矿体在 ETM-13839 A 处(图 17 左上)未能出现异常,而现在用 ASTER(图 17 下)则有很明显的异常,究其原因在于 AST 6 更突出显示斑岩铜矿蚀变带的绢云母、高岭石等含 Al-OH 矿物,图 17 右上角的波

谱曲线充分显示 ASTER 数据在 6 和 5 波段存在强吸收。

### 6.2 用 ASTER 研究斑岩铜矿蚀变类型及辨认斑岩铜矿的最佳遥感异常判据

据中国地质大学、西藏地质局、中国地质科学院矿产资源所等单位的地质学家对冈底斯巨型斑岩铜矿床长时间的研究,认为冈底斯斑岩铜矿带的多数矿床都存在中心式、面状、环带分布的蚀变特征。这一特征得到驱龙、甲玛、朱诺等已知矿区遥感异常的证实(图 19、20、21、22)。对于这些异常提取绢云母化(可能包括埃洛石、叶蜡石、明矾石)羟基异常用 PCA(1,3,4,6)或 PCA(3,4,6)或 PCA(4,6);对于这些异常提取高岭石化(可能包括伊利石、蒙脱石)羟基异常用 PCA(1,3,4,5)或 PCA(3,4,5)或 PCA(4,5),其特征是兼有 5、6 波段的强吸收;这两种 ASTER 羟基异常 OHA 6、OHA 5 的同心出现构成辨认斑岩铜矿的最佳遥感异常判据。为了提取斑岩铜矿经常存在的绿泥石化现象,笔者参考了姚佛军博士论文中的做法,并做了改进,依据图 19 中的波谱特性,用 PCA(1,3,5,8)提取 ASTER 8 有强吸收的矿物异常,再用(AST 4 > AST 5)做判据去除黝帘石、绿帘石的影响(见表 8),所得到的绿泥石化异常中可能还包括有在青磐岩化中可能共生的方解石化的贡献。



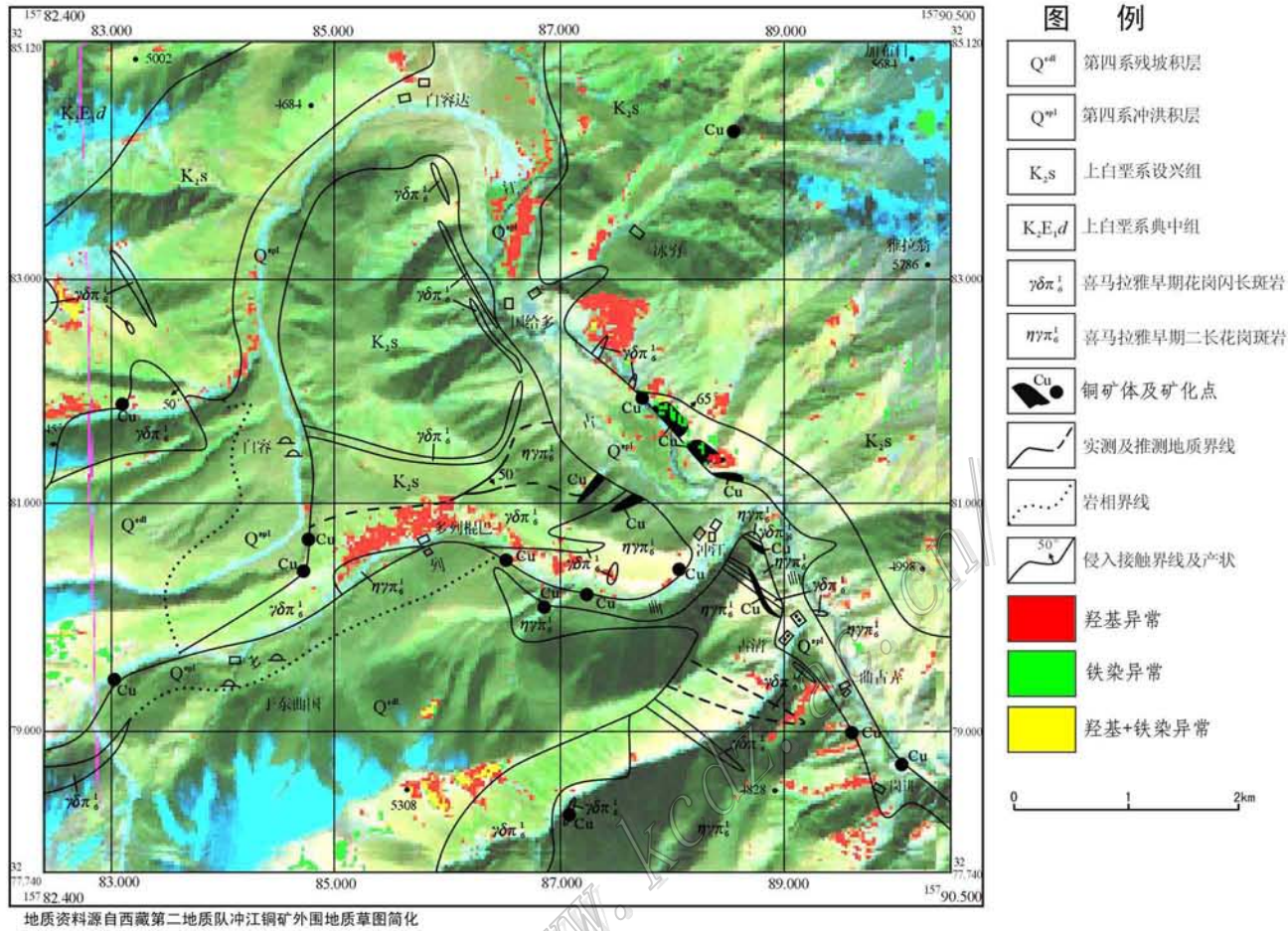


图 16 冲江铜矿地质草图(据郑有业等,2004 改编)及 ASTER 异常叠加图

Fig. 16 Geological map of the Chongjiang deposit (modified after Zheng et al., 2004) with overlying ASTER anomaly

另一实例是 2002 年所做 13739 景 ETM 异常图中原编号为 20 的夏玛日异常,其西部经 ASTER 异常提取得到补充(见图 18),对 ASTER 扩充的异常取 1、2 图象采样波谱分析(图 18 左上),ASTER-6 的强吸收可证实其斑岩铜矿异常性质。

以上几个典型矿区的遥感异常蚀变分带研究表明,除冲江外,已知矿区遥感异常蚀变分带明显, OHA 6 和 OHA 5 以同心状呈现,可做为辨认斑岩铜矿的最佳遥感异常判据,绿泥石化异常以不规则状分布在其外部,对于判别遥感异常可起参考作用。各异常实例均经图象采样波谱证明其性质。冲江矿区比较特殊,从图 21 中可见地质已知 1 号矿体 A 处无 ETM 羟基异常,ASTER 虽有所改善,但异常仍偏小,铁染异常差,绿泥石化异常分布离已知矿体较远;但在北部和西部有较佳的遥感异常。

### 6.3 可消除黝帘石对铁染的干扰

在讨论多光谱矿致遥感异常提取的常见技术方法时,曾提到可用 SAM 法优化铁染异常。此处将讨论另一个方法,从图 7 可知形成铁染异常的黄钾铁矾、赤铁矿、针铁矿和黝帘石的共同特征是  $AST\ 1 < AST\ 2 > AST\ 3$  所以用 PCA(1,2,3)提取的铁染异常中包含了黝帘石的贡献,而黝帘石并不是含铁矿物;其波谱特征是  $AST\ 4 < AST\ 5$  而 3 个含铁矿物(黄钾铁矾、赤铁矿、针铁矿)则是  $AST\ 4 > AST\ 5$ ;利用在 4、5 波段的这一差异,可优化铁染异常,见图 22,图中谱线 2 在 AST 6 有强吸收,符合绢云母化特征;曲线 2、3、5 都具  $AST\ 1 < AST\ 2 > AST\ 3$  条件,但曲线 4 是  $AST\ 4 < AST\ 5$  更接近黝帘石特征,而被从铁染异常中区分出来,从而优化了铁染异常。



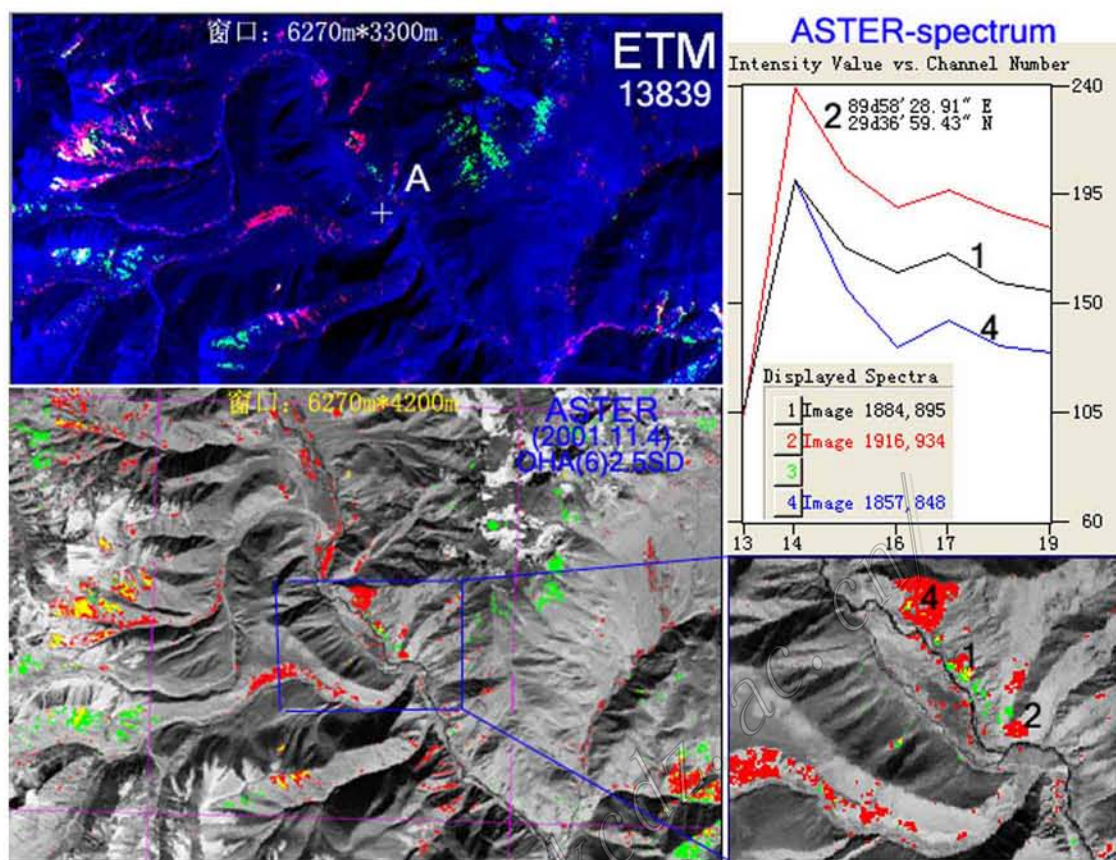


图 17 冲江地区 ASTER 和 ETM 异常对比  
 Fig. 17 Comparison between ASTER and ETM anomalies for the Chongjiang deposit

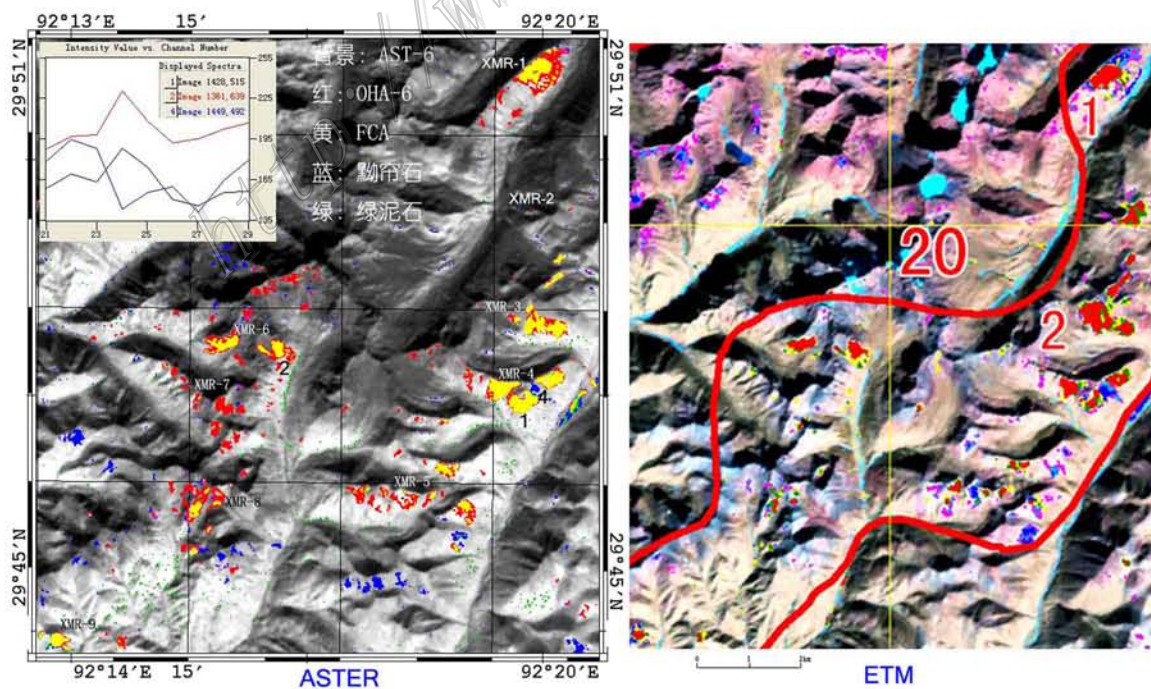


图 18 夏玛日地区 ASTER 和 ETM 异常对比  
 Fig. 18 Comparison between ASTER and ETM anomalies for the Xiamari deposit



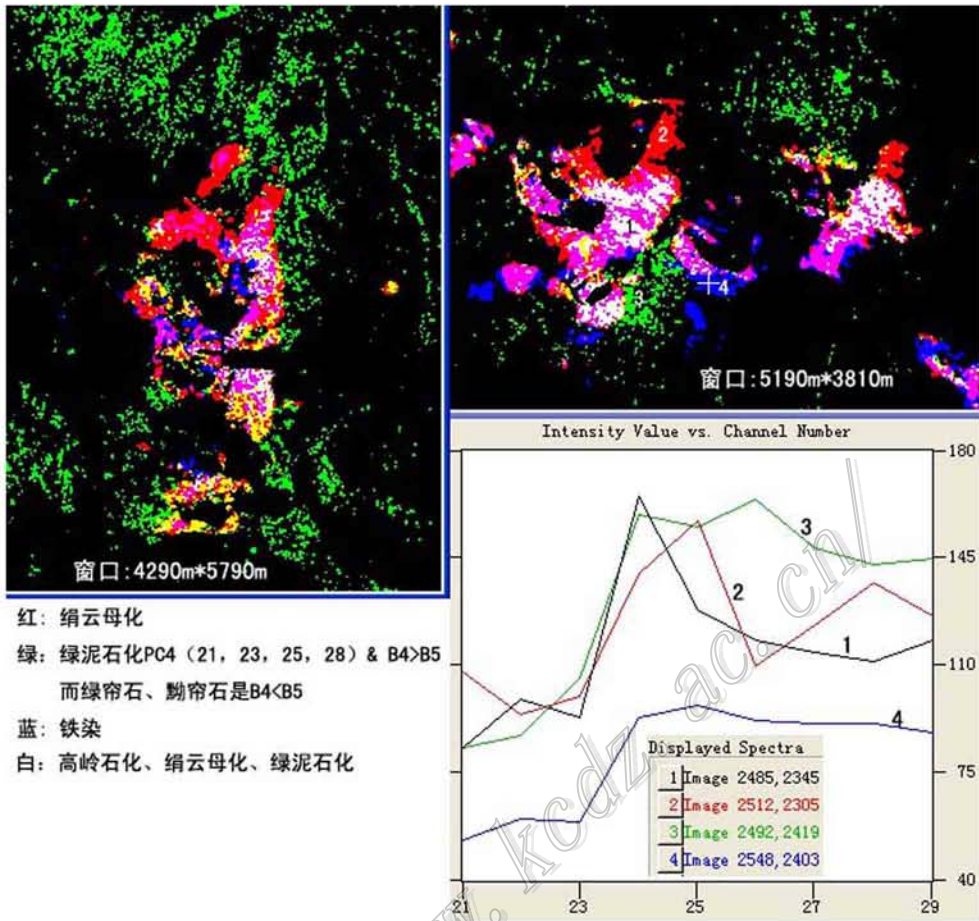


图 19 驱龙、甲玛矿区蚀变中心式分带现象的遥感异常显示

Fig. 19 Concentric alteration zoning of remote sensing anomaly for the Qulong and Jianma deposits

表 8 绿泥石提取参数表

Table 8 Parameters of anomaly extraction for chlorite

矿床	本征向量 PCA4(1,3,5,8)				AND. (AST 4 > AST 5)	SD 阈值
	AST 1	AST 3	AST 5	AST 8		
朱诺	-0.234	-0.268	0.658	-0.663		1.2
驱甲	0.100	-0.027	0.682	-0.724		0
冲江	0.210	-0.119	0.657	-0.714		1.2
夏玛日	0.039	-0.015	0.694	-0.719		1.5

## 7 夏玛日遥感异常解译和钻孔孔位建议

通过 4 万 6 千多平方公里面积异常提取,在冈底斯成矿带上发现了大量遥感异常,现以夏玛日地区异常为例,对遥感异常进行地质解译推断,以及对即将进行钻探验证的钻孔孔位提出具体建议。

### 7.1 夏玛日异常解译、推断

夏玛日地区,使用了 ETM 和 ASTER 两种遥感

数据进行异常提取,前者因冰雪仅少量见在沟谷中,所提取的铁染、羟基异常完整,基本上揭示了本区蚀变全貌,后者因冰雪覆盖区较大,在一定程度上影响了分水岭附近异常的完整性和铁染异常提取。

夏玛日遥感异常,大致呈 NNE 向带状分布,由东、西 2 个异常带共 9 个主要异常组成。所有异常都在山体东南坡(阳坡)中上部,可能与本区山体高大陡峻,阴坡的阴影区未进行异常提取,而阳坡下部又多被坡积物、高山草甸和河流冲积物覆盖有关。

根据多波段异常呈带状分布、规模很小,异常主体大多见在分水岭附近,地形地貌陡峭,影像色调明显比南部近东西向的巨大花岗岩带偏暗等特征推断,本区异常为浅成侵入的中酸性斑岩体引起,主要岩性为花岗闪长斑岩、闪长岩,此外还可能有少量花岗斑岩出露,全区岩体被剥蚀深度普遍很浅,出露地



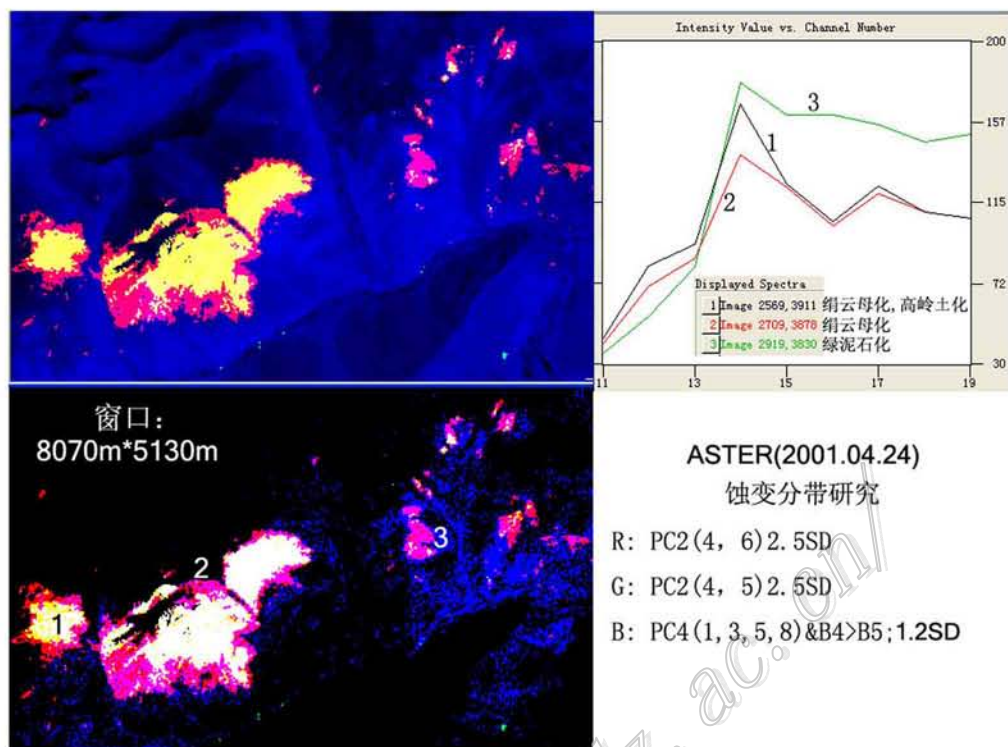


图 20 朱诺矿区蚀变中心式分带现象的遥感异常显示  
 Fig. 20 Concentric alteration zoning of remote sensing anomaly for the Zhunuo deposit

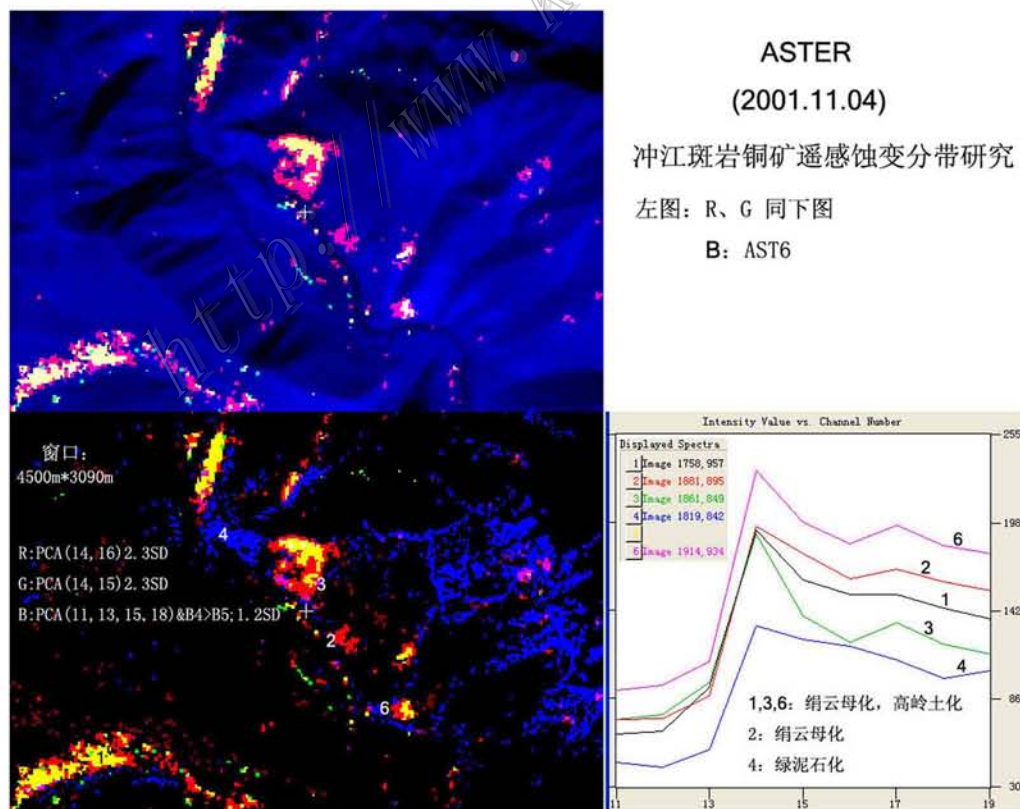


图 21 冲江矿区蚀变中心式分带现象的遥感异常显示  
 Fig. 21 Concentric alteration zoning of remote sensing anomaly for the Chongjiang deposit

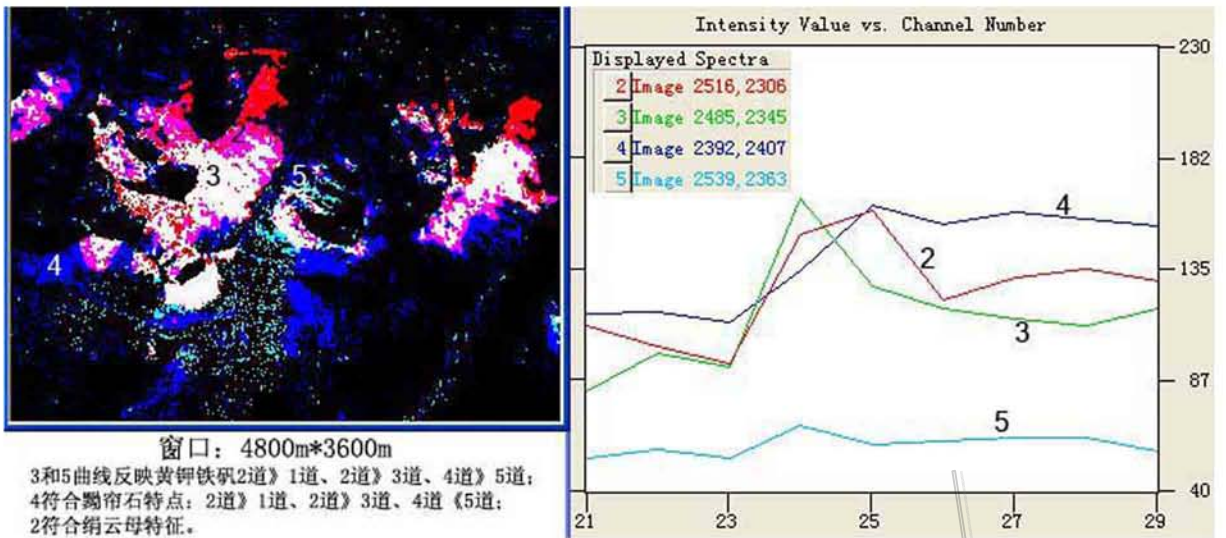


图 22 利用 ASTER 波段特征优化铁染异常  
Fig. 22 Optimizing of FCA for the Qulong deposit

表的岩体边界,在阳坡大致可以用异常边界表征,在阴坡出露地表的岩体一般也不会超出山体阴影区。

异常的组合特征表明,岩体大多发生蚀变,但蚀变类型、强度则有较大差异,其中:XMR-1、XMR-3、XMR-4、XMR-9等4个异常比较强烈,XMR-2、XMR-5异常区岩体次之,其余较差,遥感异常基本上由基岩内生蚀变矿物及表生风化矿物综合引起,纵观驱-甲地区(拉抗俄-驱龙异常带、象背山-甲玛异常带)(张玉君等,2004)和本区异常带展布特征,认为本区岩浆上侵明显受NNE走向的拉张断裂控制,岩体就位与近东西向扭张断裂关系较为密切,成矿过程则可能发生在构造活动相对比较稳定的阶段。从带中异常具有多中心蚀变、不同蚀变类型叠加、异常强度差异显著以及岩体被剥蚀程度较浅等特征综合分析,认为本区浅成岩体分布区存在低温成矿叠加(呈水平或垂直分带)的可能性,其中XMR-1、XMR-3、XMR-4、XMR-9等4个异常在铜、金矿方面有较大找矿前景,其余岩体可能在寻找铅锌多金属矿方面有些参考价值。

XMR-3、XMR-4异常区目前正在准备进行地质勘探,它是本次遥感研究的重点。

XMR-3、XMR-4异常的5个波段相比(图24):1级异常之间,以6波异常范围最大、蚀变矿物最为浓集,其余依次为9、5、8、7等波段。

## 7.2 夏玛日岩石蚀变

对异常区岩体氧化带特征蚀变矿物,已进行过

大量岩石标本测定,遥感与一般地表或钻孔岩心岩石样品蚀变矿物实验室光谱法检测不同,ASTER光谱信息来自太空连续无缝取样,在短波红外区采样像元(样品尺寸)为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ ,样品面积巨大,更因遥感探测深度限制,异常信息全部取决于出露地表物质特征光谱响应,亦即它是由氧化带基岩中那些出露地表的、表生带中那些出露地表的残、坡积(以及风积、洪冲积、冰水堆积)矿物等混合引起,因此,绝大部分样品都是多种矿物的复杂混合体,这一被称为混合像元的重要特征,使ASTER各波段异常在绝大多数情况下所表征的并不是某一蚀变矿物,它所代表的是具有该波段特征光谱的一组矿物的混合光谱响应,这些矿物可以是同一种蚀变类型矿物,也可以是多种蚀变类型矿物之集合,矿物信息提取或推断完全基于像元中主导特征矿物的种类和数量。

上述特点表明,希望通过遥感信息准确推断某一具体蚀变矿物是比较困难的,目前比较可行的做法是:将某一波段有特征吸收谱的那些矿物组成“特征矿物组”,在结合其他波段的“特征矿物组”进行组合分析,建立异常区推断蚀变类型,之后结合遥感图像解译,从中抽取若干矿物作为异常区推断蚀变矿物组,提供地质调查参考。

这些经遥感组合分析、解译推断的矿物信息,尽管具有相当的不确定性,甚至可能被之后的勘探结果完全否定,但它是“勘查遥感”应提供的必不可



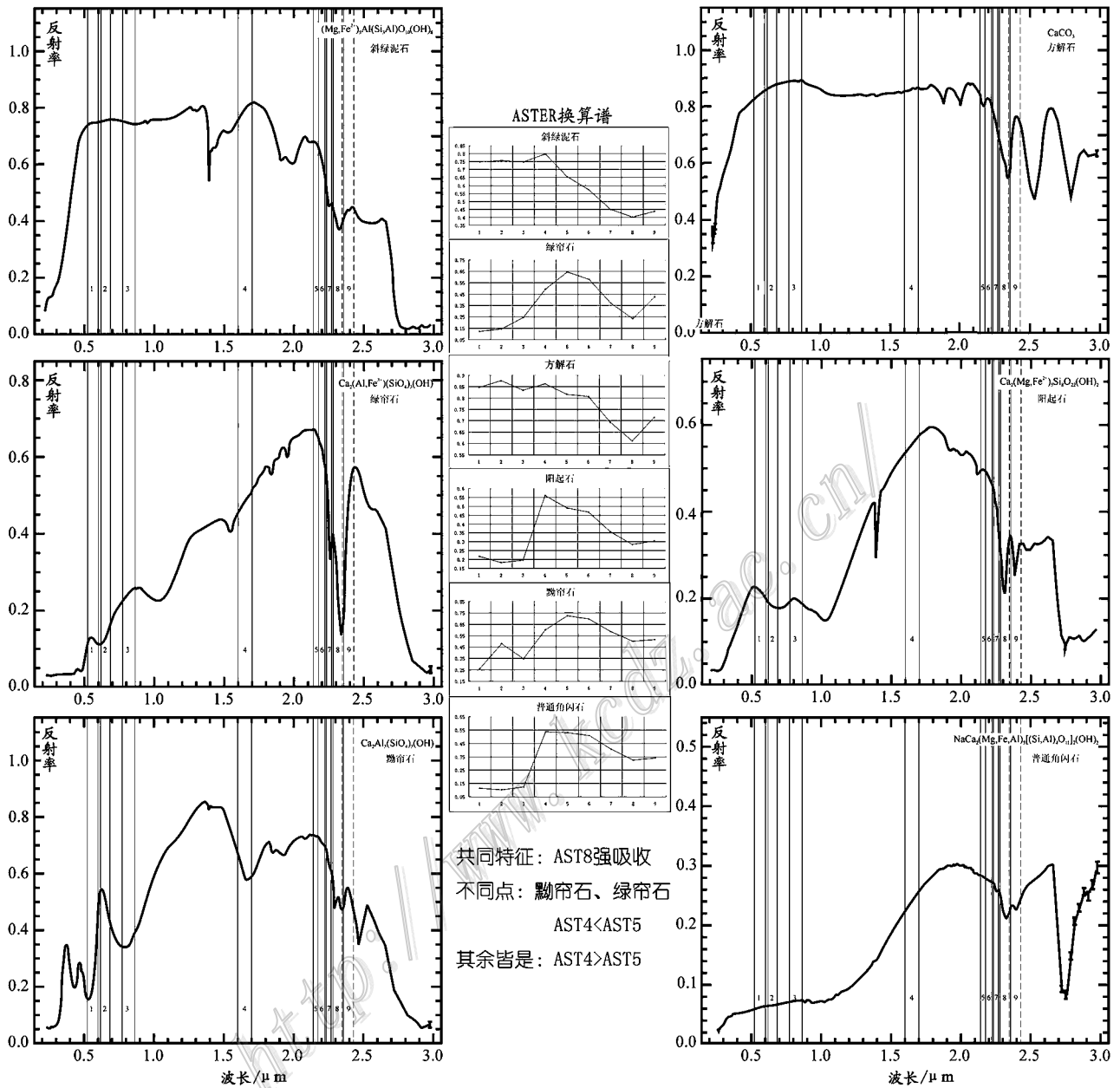


图 23 斑岩铜矿青磐岩化相关矿物的波谱对比图

(由 Clark USGS-2003a 谱组成; ASTER 波段位置和换算由笔者加入)

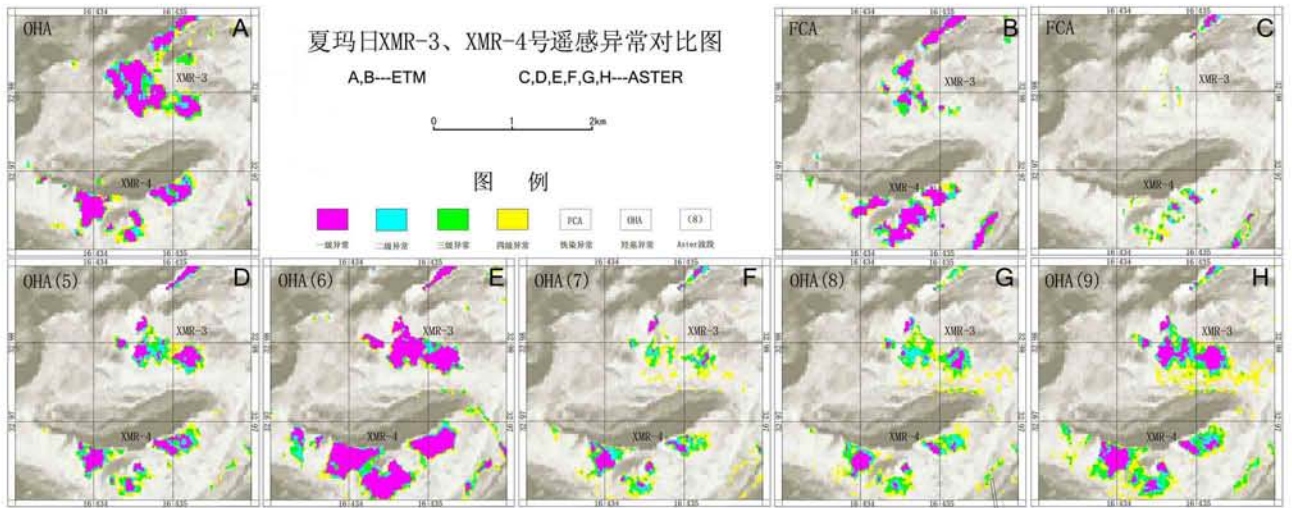
Fig. 23 Spectral comparison of propylitic and other minerals in porphyry Cu deposit

(after Clark USGS- 2003a. ASTER bands are added by the authors)

缺的信息,是进行实地地质调查之前对资源潜力评估和实施野外调查中的重要参考资料。

矿区岩石三维(地面、钻孔)蚀变矿物光谱高密度快速检测,是遥感非常有发展前景的应用领域,它在指导矿床勘探和成矿过程研究方面可以发挥重要作用。根据蚀变矿物实验室检测结果,结合多波段异常结构(单波段异常在 2.5 维空间变化)、构造(多波段异常组合特点)特征,推断本区斑岩体具有多中

心面型蚀变特点,全区以青磐岩化为主,黄铁绢英岩化、黏土岩化仅局部出现在分水岭附近蚀变中心地段。两个异常区的地表均缺失钾化的特征异常,推测可能与本区岩体普遍被剥蚀程度很浅有关。黄钾铁矾广布于异常区地表氧化带中,为黄铁矿风化产物。在山体斜坡中下部地带分布的 6 波段低缓异常,可能与多水高岭土、微晶高岭土等有关,它可能主要是钠长石(化)风化的产物。



夏玛日XMR-3、XMR-4号遥感异常对比图  
A,B--ETM C,D,E,F,G,H--ASTER

图例

一级异常 二级异常 三级异常 四级异常 FCA OHA Aster轨道

图 24 夏玛日 XMR-3 和 XMR-4 号遥感异常对比图

Fig. 24 Comparison between XMR-3 and XMR-4 anomalies

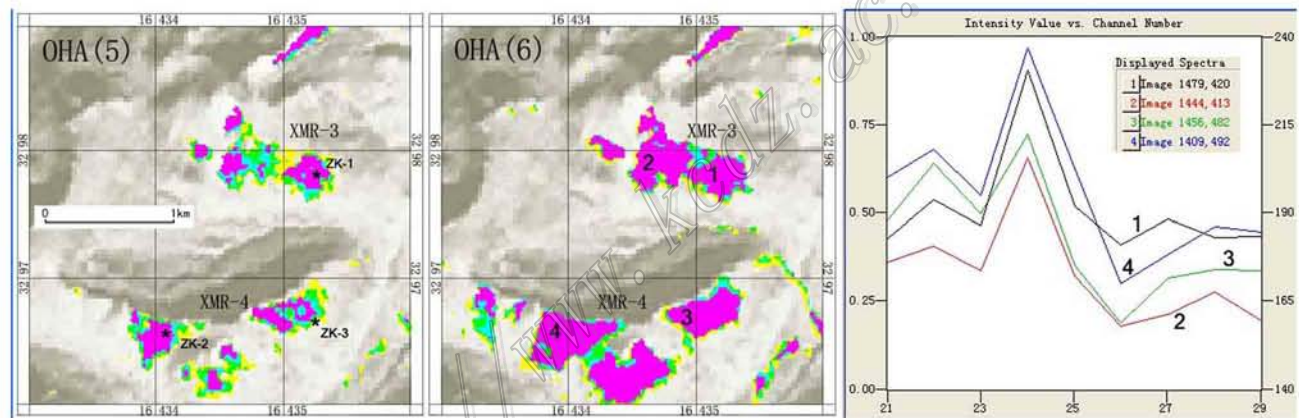


图 25 夏玛日图像采样波谱点及推荐钻孔孔位图

Fig. 25 Image sampling points and suggested drilling sites

### 7.3 OHA(6)与斑岩铜矿遥感找矿最优参数

OHA(6)的代表性蚀变之一绢云母化,是矿床围岩蚀变作用中分布最广的一种蚀变。绢云母化带通常比矿体的厚度要大得多,矿体一般多位于绢云母化岩石之间或其附近,是一种重要的找矿标志。

从图 24 可见 OHA 大小顺序依次也是(6)、(9)、(5)、(8)、(7);遥感异常区斑岩铜矿蚀变矿物组合中,伊利石、白云母、高岭土等占主导地位,图像采样波谱图也证实了此判断(图 25 右)。这就是以羟基异常 OHA(6)做为斑岩铜矿遥感找矿最优参数的依据。

### 7.4 探矿钻孔孔位

根据遥感异常结构(强度高、变化梯度小、异常

稳定)、构造特点,认为首批钻孔应选在一级异常区,遥感建议的首孔可以选自一级异常区地势较低地段。

若首孔钻探结果见矿良好,可沿南北方向按孔距 80 m 间隔向南或向北追踪,或向东西方向按 80 m × 80 m 网展开。

首孔孔深建议按千米设计,按 600 m 或 800 m 施工,若见矿较好则加深至千米,以便为尔后的勘探决策提供依据。

首孔钻孔孔位:

XMR-3 异常 ZK1:92°19'49.83"E,29°47'49.11"N

XMR-4 异常 ZK2:92°19'06.85"E,29°47'06.74"N

XMR-4 异常 ZK3:92°19'49.96"E,29°47'10.72"N

## 8 结 论

冈底斯斑岩铜矿带找矿模型多光谱遥感异常提取研究,10年前主要利用 ETM 数据,近年以 ASTER 数据为主。完成从夏玛日至朱诺的 13 景 ASTER 数据处理,得出以下结论。

(1) ASTER 较 ETM 优越性表现为:对斑岩铜矿异常提取更为准确和灵敏;可进行斑岩铜矿蚀变分带异常提取,可以祛除黝帘石对铁染的干扰。

(2) ASTER 主分量分析 AST6、AST5 的同心异常可做为辨认斑岩铜矿的最佳遥感异常判据。

(3) 研究了绿泥石的 ASTER 异常提取方法:PCA( AST1、AST3、AST5、AST8 )AND( AST4 )AST5),所获绿泥石异常虽可能含方解石、角闪石等的贡献,但这无妨与青磐岩化的识别。

(4) 以此判据圈出 20 处冈底斯斑岩铜矿带找矿模型遥感异常推荐靶区。

(5) 当前航天高光谱尚难广泛用于地质找矿,无疑应不失时机地推广 ASTER 技术。

志 谢 本工作在 ETM 阶段得到中国国土资源航空遥感中心陈薇高工的帮助,中国地质科学院矿产资源所姚佛军博士为 USGS 标准谱线换算为 ASTER 谱线进行了编程和计算,中国地质科学院矿产资源所李振清博士提供了朱诺地质资料,中国地质科学院地质研究所杨志明博士对本文提出了许多宝贵意见,在此一并志谢。

## 参考文献/References

邓吉秋,谢 杨,张宝一,毛先成. 2011. ETM+ 图像锰矿蚀变遥感信息提取与找矿预测[J]. 国土资源遥感, 1:102-105. 地质情报所. 1980. 遥感专辑,第一辑:矿物岩石的可见-中红外光谱及应用[M]. 1-391.

甘甫平,王润生,杨苏明. 2002. 西藏 Hyperion 数据蚀变矿物识别初步研究[J]. 国土资源遥感, 4:44-50.

丰茂森. 1992. 遥感图像数字处理[M]. 北京:地质出版社.

冯师颜. 1964. 误差理论与实验数据处理[M]. 北京:科学出版社.

黄崇轲,白 冶,朱裕生,王惠章,尚修志. 2001. 中国铜矿床(上,下)[M]. 北京:地质出版社. 1-705.

李昌国,张玉君. 1997. 试用主分量分析方法提取澜沧江兰坪地区铜矿蚀变遥感信息[J]. 国土资源遥感, 1:20-30.

刘 波,李光明,李胜荣. 2004. 西藏冲江铜矿含矿岩体与非含矿岩体区分探讨[J]. 沉积与特提斯地质, 24(4):55-58.

倪忠云,何政伟,吴 华,刘婷婷. 2011. 西藏矿产资源潜力评价遥感专题中典型问题初探[J]. 国土资源遥感, 1:97-101.

唐文周,于学政. 2012. '全国矿产资源潜力评价遥感应应用成果专栏'序言[J]. 国土资源遥感, 1:110.

童庆禧. 1990. 中国典型地物波谱及其特征分析[M]. 北京:科学出版社.

王 蔚,张世涛,尹光侯,许 东. 2012. 应用 ASTER 数据提取矽卡岩型锡矿蚀变遥感异常信息——以滇东南马关都龙锡矿为例[J]. 国土资源遥感, 1:155-159.

袁志发,周静宇. 2003. 多元统计分析[M]. 北京:科学出版社.

杨建民,张玉君,姚佛军,吴 华,邓 刚,陈 疆. 2007. 遥感找矿信息在新疆罗东镍矿发现中的主导作用[J]. 岩石学报, 23(10):2647-2652.

杨志明,侯增谦. 2009. 初论碰撞造山环境斑岩铜矿成因模型[J]. 矿床地质, 28(5):515-538.

张玉君,杨建民,陈 薇. 2002. ETM+(TM)蚀变遥感异常提取方法研究与应用——地质依据和波谱前提[J]. 国土资源遥感, 4:30-36.

张玉君,曾朝铭,陈 薇. 2003. ETM+(TM)蚀变遥感异常提取方法研究与应用——方法选择和技术流程[J]. 国土资源遥感, 2:44-49.

张玉君,曾朝铭,陈 薇. 2004. ETM+(TM)蚀变遥感异常提取方法技术. 航天遥感图像数据索引及应用实例[R]. 中国地质调查局.

张玉君. 2006a. 用 ETM 数据提取'蚀变遥感异常'引人关注的几个技术问题[A]. 国土资源遥感技术发展文集[C]. 长春遥感应用会议.

张玉君,杨建民,姚佛军. 2006b. 用 ASTER 数据进行不同类型矿床蚀变异常提取研究[J]. 矿床地质, 25(增刊):507-510.

张玉君,杨建民,姚佛军. 2007. 多光谱遥感技术预测矿产资源的潜能——以蒙古国欧玉陶勒盖铜金矿床为例[J]. 地学前缘, 14(5):63-70.

张玉君,姚佛军. 2009. 应用多光谱遥感 ASTER 数据对 ETM 遥感异常的定性判别研究——以东昆仑五龙沟为例[J]. 岩石学报, 25(4):963-970.

章钦瑜,张登荣,黄国成,朱 骏. 2012. 板桥稀土矿遥感找矿信息提取与矿产预测研究[J]. 国土资源遥感, 1:120-126.

郑有业,多 吉,王瑞江,程顺波,张刚阳,樊子琿,高顺宝,代芳华. 2004. 西藏冈底斯巨型斑岩铜矿带研究最新进展[J]. 中国地质, 34(2):324-334.

朱述龙,张占睦. 2000. 遥感图像获取与分析[M]. 北京:科学出版社. 1-176.

Bastinelli L, Bela G D and Tarsi L. 1993. Alteration mapping: A case study in mid-south Bolivia[A]. In: Proceedings of the 9th(ERIM) thematic conference on remote sensing for exploration geology[C]. Pasadena. 1133-1144. 未见?

Clark R N, Swayze G A, Wise R Livo K E, Hoefen T M, Kokaly R F and Sutley S J. 2003. USGS digital spectral library splib05a[R]. U. S. Geological Survey: Open File Report: 03-395.

Crosta A P and Moore J M. 1989. Enhancement of landsat thematic mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerain State

- Brazil : A prospecting case history in greenstone belt terrait[ A ]. In : Proceedings of the 7th( ERIM ) thematic conference on remote sensing for exploration geology , Calgary. 1173-1187.
- Crosta A P , Souza Filho C R , Azevedo F and Brodie C. 2003. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia , Argentina , using ASTER imagery and principal component analysis[ A ]. Int. J. Remote Sensing , 24( 21 ) : 4233-4240.
- Fujisada H. 1995. Design and performance of ASTER instrument[ A ]. In : Proceedings SPIE ( International Society for Optical Engineering ) , 2583 :16-25.
- Gillespie A R , Kahle A B and Walker. 1986. Color enhancement of highly correlated images : 1. Decorrelation and HIS contrast stretches [ J ]. Remote Sensing Environ. , 20 : 209-235.
- Gillespie A R. 1992. Enhancement of multispectral thermal infrared images : Decorrelation contrast stretching[ J ]. Remote Sensing Environ. , 42 :147-156.
- Gillespie A R , Rokugawa S , et al. 1998. A temperature and emissivity separation Algorithm for advanced space-borne thermal emission and reflection radiometer ( ASTER ) images[ J ]. IEEE Transactions on Geo-science and Remote Sensing. 36 ( 4 ) :1113-1126.
- Hunt G R and Ashley P. 1979. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared[ J ]. Econ. Geol. , 74 :1613-1629.
- Hunt G R. 1982. Spectroscopic properties of rocks and minerals [ A ]. In : Carmichael R S , ed. Practical handbook of physical properties of rocks and minerals , Volume 1[ C ]. Boca Raton : CRC Press. 295-385.
- Iwasaki A , Fujisada H , Akao H , Sindou O and Akagi S. 2002. Enhancement of spectral separation performance of ASTER/SWIR [ A ]. In : Proceedings SPIE ( International Society for Optical Engineering ) , infrared spaceborne remote sensing IX[ C ]. 4486 :42-50.
- Kendall M. 1975. Multivariate analysis [ M ]. England : Charles Griffin and Company limited.
- Loughlin W P. 1991. Principal component analysis for alteration mapping[ A ]. In : Proceedings of the 8th thematic conference on geologic remote sensing[ C ]. Denver , USA. 293-306.
- Lowell J D and Guilbert J M. 1970. Lateral and vertical alteration mineralization zoning in porphyry ore deposits[ J ]. Econ. Geol. , 65 : 373-408.
- Rencz A N. 1999. Remote sensing for the earth sciences[ M ]. 3rd ed. New York : Wiley. 1-707.
- Tangestani M H and Moore F. 2001. Comparison of three principal component analysis techniques to porphyry copper alteration mapping : A case study in Meiduk area , Kerman , Iran[ J ]. Canadian Journal of Remote Sensing , 27 , 176-182
- Курек Н Н. 1954. Измененные околорудные породы и их поисковое значение[ М ]. Госгеотехиздат , Москва. 中译本 :蚀变围岩及其找矿意义. 1955. 1-356.
- Шехтман. 1982. 热液矿床详细构造预测图[ М ]. 北京 地质出版社.

<http://www.kcm.cn/>