新疆西准噶尔包古图斑岩铜矿蚀变岩石的光谱特征及其意义

耿新霞[1]，杨建民[1]，张玉君[2]，姚佛军[1]，张 锐[3]

（1. 中国地质科学院 矿产资源研究所，北京 100037；2. 中国国土资源航空物探遥感中心，北京 100083；
3. 新疆有色地质研究所，新疆 乌鲁木齐 830000）

摘要：地物的光谱特征是遥感识别地物的主要依据，不同地物的反射光谱具有其特定的吸收特征谱带。利用ASD和PIMA反射光谱测试仪对新疆西准噶尔包古图斑岩铜矿Ⅱ号、Ⅴ号斑岩铜矿岩体的蚀变围岩（地表采样与钻井采样）进行测试，并对结果进行分析总结。根据反射光谱特征谱带获得蚀变矿物的种类，确定了岩体的蚀变矿物组合，得到反射光谱的吸收谷在ASTER数据中所处的波段；对反射光谱曲线进行数学积分，获得ASTER数据中的强吸收波段。将以上2种分析得到的吸收性波段组合应用于蚀变遥感异常信息提取，结果表明蚀变遥感异常与野外地质特征吻合程度较高。反射光谱分析表明确定岩石矿物的反射光谱特征谱带是进行遥感信息提取工作的前提，波段组合选取对提取蚀变遥感异常信息非常重要。

关键词：蚀变矿物；光谱测试；光谱特征谱带；遥感波段组合；包古图斑岩铜矿；新疆
中图分类号：P627；TP79 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8527(2008)01－0116－07

Spectral Characteristics and Its Significance of Altered Rocks of Baogutu Porphyry Copper Deposit in Western Junggar, Xinjiang

GENG Xin-xia[1], YANG Jian-min[1], ZHANG Yu-jun[2], YAO Fo-jun[1], ZHANG Rui[3]

(1. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*;
2. *China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Land & Resources, Beijing* 100083, *China*;
3. *Xinjiang Non-ferrous Metals Institute of Geology, Urumqi, Xinjiang* 830000, *China*)

Abstract: Spectral characteristics of ground objects are the main information for target recognition by remote sensing. Being different special reflection spectra in each object, reflection spectra provide lots of important information for remote sensing information extraction. In this paper, the reflection spectra of altered rocks from intrusions(No. 2 and No. 5) in Baogutu porphyry copper deposit have been tested by ASD and PIMA. The mineral recognition of samples from surface and drills has been detailedly studied. Altered mineral assemblages and the special bands of absorptive vale of reflectance spectra have been obtained from ASTER data. Mathematic integral method has been carried on the reflectance spectra and obtained the strong absorptive bands from ASTER data. Based on analyzing reflectance spectra and the mathematic integral, absorptive band assemblages give lots of information for extracting alteration remote sensing anomalies. The results show that alteration remote sensing anomalies and the geological feature have a good comparability. Ascertaining spectral characteristics of altered minerals is the principle and basis for remote sensing information extraction.

Key words: altered mineral; spectrum analysis; spectrum band on spectral characteristic; remote sensing bands assemblage; Baogutu porphyry copper deposit; Xinjiang

收稿日期：2007－09－10；**改回日期**：2007－12－02；**责任编辑**：楼亚儿。
基金项目：国家"305"项目(2006BAB07B07－02)；科技部"973"项目(2007CB411406－06)。
作者简介：耿新霞，女，硕士研究生，1979年出生，矿产普查与勘探专业，主要从事遥感找矿方面的研究工作。
Email：gengxinxia0536@sina.com。

万方数据

0 引　言

不同地物(岩石、土壤、植被、冰雪等)具有其独特的反射光谱特征谱带，因此地物的光谱特征是遥感识别地物的主要依据[1-3]。测定地物的反射光谱对遥感识别地物有举足轻重的作用。野外地物光谱仪对地物目标的测量在航天传感器定标、遥感数据解译、遥感应用潜力的研究及地质填图方面得到了广泛应用[4]。利用遥感图像处理技术，根据光谱特征可去除某些干扰地物(相对于要提取的地物信息而言)，提取感兴趣区内符合处理者需要的信息，实现地物识别及信息提取的目的。

鉴于地物的反射光谱测量在遥感图像信息提取中的重要作用，遥感技术的发展带动并激励专业人员对地物光谱特征的研究。20 世纪 70 年代，Hunt 等系统地发表了岩石波谱测试结果的文章；80 年代中后期，以 Clark 为代表的学者进行了岩石矿物的光谱特征及处理技术的研究[5-6]；近十几年来，国内外众多单位进行了大量的波谱数据库建设工作，地物波谱数据库可以为对地观测数据综合处理系统及大型地理信息技术系统提供不可缺少的基础信息和技术支持[7]。越来越多的证据表明光谱测试在遥感信息提取中的重要性，地物光谱测试分析成为遥感信息提取的基础[8-9]。

本文对新疆西准噶尔包古图斑岩铜矿床Ⅱ号、Ⅴ号岩体的蚀变围岩样品进行反射光谱测试，得出不同类蚀变岩石的光谱吸收特征及蚀变矿物组合，并总结蚀变矿物的反射光谱吸收特性与遥感数据各波段的对应关系，为蚀变遥感信息提取提供波段组合的依据。

1 地质背景

包古图斑岩铜矿床位于新疆阿尔马累克—巴尔喀什斑岩铜矿成矿集中区的东延部分。区内主要地层为下石炭统的希贝库拉斯组、包古图组(图 1)，这些地层为一套巨厚的半深海—大陆坡相火山—火山碎屑沉积建造。海西期花岗岩类广泛分布，岩体多呈岩株状产出，岩性较为复杂。区域出露地层主要是石炭统的火山碎屑岩，自下而上为希贝库拉斯组(C_1x)、包古图组(C_1b)、太勒古拉组(C_1t)。岩浆岩主要是华力西中晚期的中酸性—酸性花岗质侵入体。区域构造以断裂和褶皱为主，断裂主要是北东向的达尔布特深大断裂，褶皱为近南北向的希贝库拉斯背斜。达尔布特断裂为区内主要控岩、控矿构造。

按照岩体出露面积大小，前人对包古图矿区岩体进行了编号，其中Ⅱ号和Ⅴ号斑岩体与铜、金矿化关系较为密切。因此，本文选择包古图斑岩铜矿床的Ⅱ号和Ⅴ号斑岩体进行研究。Ⅱ号斑岩体主要为花岗闪长斑岩、石英闪长斑岩。岩体蚀变分带不明显，主要发生伊利石化、绿泥石化、绢云母化，其次为高岭石化和黝帘石化；Ⅴ号斑岩体主要为花岗闪长斑岩、花岗斑岩，斑岩体自岩体向围岩蚀变分带依次为钾化、石英绢云母化、青磐岩化，钾化和石英绢云母化主要在花岗闪长斑岩体的内接触带，而青磐岩化则在岩体与围岩中都有，矿化在花岗闪长斑岩和凝灰质粉砂岩中都有不同程度的发育。

近年来，随着找矿勘查工作的深入，在包古图矿区内相继发现了许多铜(金)矿化点，如在包古图Ⅱ号斑岩体西南侧和Ⅴ号斑岩体西侧均发现铜(金)矿化点。2002—2004 年，新疆有色金属工业(集团)有限责任公司、甘肃建新实业集团有限公司和新疆乌鲁木齐聚隆矿业开发有限公司联合对包古图地区铜矿进行了风险勘探，在包古图矿床Ⅴ号斑岩体的内外接触带首次发现斑岩型铜(金)矿化体，经深部钻探工程验证，发现了厚大的斑岩型铜矿(化)体①。

2 样品光谱测试及分析

2.1 样品简述与测试仪器

本次工作选取了Ⅱ号与Ⅴ号斑岩体的块状和粉末状 2 种不同状态的样品进行测试。块状样品采自Ⅱ号与Ⅴ号斑岩体的地表及探槽中，所采用光谱测试仪器为美国 Analytical Spectral Devices Incorporated 公司生产的 ASD(Analytical Spectral Devices)分析光谱仪，利用 FR 分光辐射计模型进行光谱采样，反射光谱的波段范围是 350 ~ 2 500 nm，光谱分辨率为 2 nm；粉末状样品取自Ⅴ号斑岩体的 4 个钻孔(ZK101、ZK102、ZK107、ZK202)岩心，测试仪器为澳大利亚 Intergrated Spectronics Pty Ltd 公司生产的 PIMA(Portable Infrared Mineral Analyser)便携式短波红外矿物分析仪，反射光谱的波段范围是 1 300 ~ 2 500 nm，光谱分辨率为 7 ~ 10

① 新疆有色地质勘查局. 托里县包古图地区斑岩铜矿铜金矿预查. 2005.

万方数据

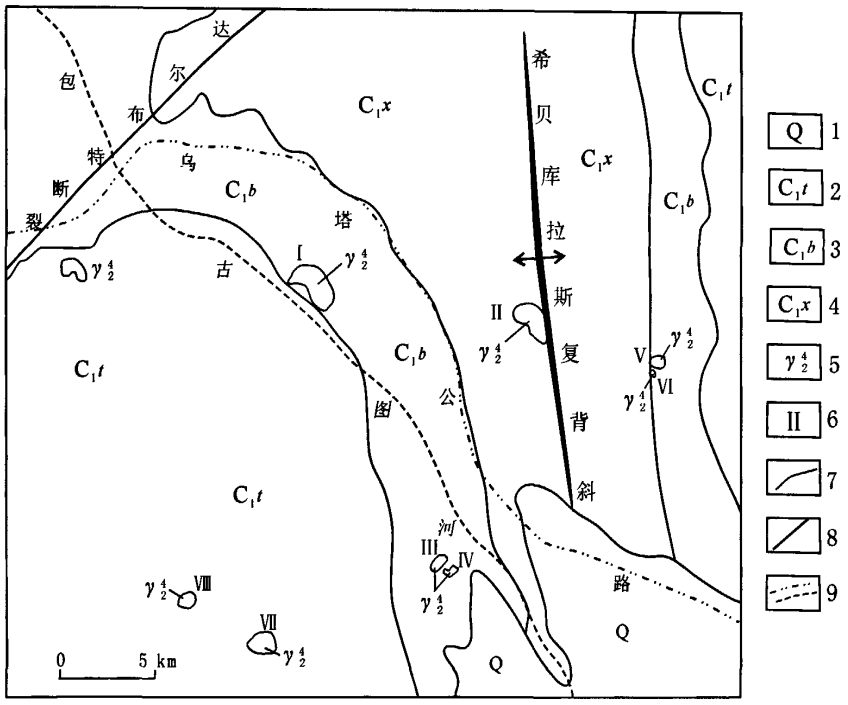

图 1 包古图地区岩体分布图(据新疆有色地质勘查局资料修改)

Fig. 1 Sketch map of intrusions in Baogutu area (modified from Xinjiang Non-ferrous Metals Institute of Geology)

1. 第四系冲积层、砾岩、砂岩、泥岩; 2. 太勒古拉组凝灰岩、玄武岩; 3. 包古图组凝灰质粉砂岩 ; 4. 希贝库拉斯组火山角砾岩、凝灰质砂岩; 5. 花岗岩; 6. 岩体编号; 7. 岩层界线; 8. 断层; 9. 公路、河流

nm。2 种测试仪器所测的样品反射率数据均用 PIMA 光谱仪自带的 Pimaview3. 1 软件进行处理分析，因 Pimaview3. 1 软件处理光谱数据的波段范围是 1 300 ~ 2 500 nm，因此对 ASD 所测的数据分析处理时，仅选用 1 300 ~ 2 500 nm 范围内的光谱反射率值[8]。

2.2 蚀变岩石光谱测试

由于样品的光谱测试结果受多种因素影响，例如：光照条件(太阳高度角、太阳方位角)、大气特性(风、云)、样品的物理性质及几何形状、扫描速度等，因此为了得到目标物的反射率，首先应对标准白板进行反射光谱测量，令其为参考光谱，然后对目标物进行反射谱测量，目标物的光谱反射率是目标光谱测量值与参考光谱的比值。为了避免错误，减少误差，白板与目标物的反射光谱测试环境要求一致。本次使用 ASD 光谱仪的测试环境如下：室内进行测量，以白板为标准对仪器进行校正，利用 ASD 仪器配置的类似于手电筒的探头人工光源进行照射；测试样品为块状，样品的几何形状要规则，探头直接垂直放在白板及目标物上以确保二者与光源的距离相等，测量位置需将整个探头盖住；每次扫描时间间隔为 5 s，并将测试曲线保存。本次使用 PIMA 光谱仪的测试环境为：室内测量，以白板为标准对仪器进行校正，使用仪器内部的内置光源作为照射源；粉末状样品装满样品盒的二分之一以上，将内装样品的样品盒放置于测试平台上；每次扫描时间间隔为 1 min，并将测试曲线保存。

2.2.1 地表及探槽样品的光谱测试

在包古图Ⅱ号、Ⅴ号斑岩体采集 25 件块状样品，均利用 ASD 光谱测试仪进行样品测试。为提高信噪比，降低外界不确定因素的影响，达到随机噪声中和的目的，需对每件样品进行多次测试，本次测试过程中对每件样品测量 10 次，根据描述反射光谱曲线的特征参数(吸收特征、矿物识别的可靠程度、波段相关、斜方差等)进行曲线评价，得到较优曲线 89 条，列出部分具有代表性的光谱曲线(图 2，Bgt2 表示Ⅱ号斑岩体，Bgt5 表示Ⅴ号斑岩体)，在图 2 上标注出在测试波长范围内 ASTER (Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer，高级星载热发射反照辐射计)遥感数据中涵盖的波段位置，有利于对样品反

万方数据

射光谱的吸收位置与 ASTER 波段进行比较，快速得到岩石样品在 ASTER 数据各波段中的吸收性。虽然图 2 中所示的不同岩石的反射光谱曲线的吸收谷、反射峰的位置不同，但总体显示相似的变化趋势：大多数样品在 ASTER 数据的 ASTER4 波段处斜率的变化率几乎不变，属于平高反射峰；在 ASTER5、ASTER7、ASTER9 波段内具有弱—中吸收性；在 ASTER6、ASTER8 波段内具有中—强吸收性。

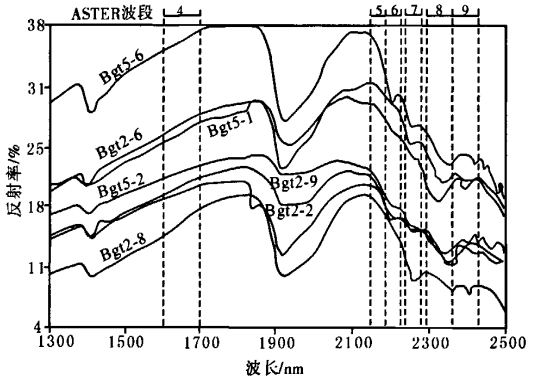

图 2　包古图斑岩铜矿Ⅱ号和Ⅴ号斑岩体地表采样光谱曲线图

Fig. 2　Spectrum curves of surface samples from intrusions (No. 2 and No. 5) in Baogutu porphyry copper deposit

由于采用 PIMA 测试仪自带的 Pimaview3. 1 程序进行蚀变矿物的种类分析时，首先需人为设定程序可分析出的蚀变矿物的数量。依据经验设定分析数量为 3(Pimaview3. 1 软件推荐值)，即能识别的矿物最多为 3 种。本文利用 PIMA 测试仪对 25 件地表或探槽样品进行了测试，分析出这些样品中蚀变矿物的种类及相对含量百分比见表 1。根据蚀变矿物出现的频率及含量的高低，得出蚀变矿物以绿泥石、埃洛石、方解石、伊利石等为主。

2.2.2　钻孔样品光谱测试

35 件用于 PIMA 测试的粉末状样品采自Ⅴ号斑岩体的 4 个钻孔，每件样品测试 2 次。根据 Pimaview3. 1 程序测试的多种性能评价，从中选出较好的曲线进行蚀变矿物光谱吸收特征及成分分析。

从钻孔样品中选择部分样品的反射光谱曲线(图 3)，分析光谱曲线的特征，确定 ASTER 数据各波段的吸收特性。从钻孔样品光谱测试结果中可以发现，随采样位置的不同，样品光谱曲线的吸收特征谱带表现不同，样品中蚀变矿物组合也不同，反映出不同深度岩石遭受蚀变的不均一性。从图 3 可看出，在 ASTER5、ASTER6、ASTER7、ASTER8、ASTER9 波段处各样品的吸收性不同。相对来说，在 ASTER8、ASTER6 波段内具有中—强吸收性，在 ASTER5、ASTER9 波段处具有弱—中吸收性，在 ASTER7 波段处的吸收性显示微弱，ASTER4 波段位于各反射光谱的高平位置，即谱线的斜率变化小，曲线近于平缓，通常认为属于反射峰位置。

与钻孔样品分析相似，地表样品光谱测试的蚀变矿物组成及含量见表 2。由表 2 看出，蚀变矿物以绿泥石、埃洛石、伊利石、蒙脱石为主，部分样品出现绢云母、黑云母、角闪石、多硅白云母等。

2.3　蚀变矿物提取

标准蚀变矿物的提取可参考 Pimaview3. 1 中的参考库，该库文件(REFLIB)子目录包含了由 PIMA 所测得的 36 种可识别的矿物的光谱数据，其目的主要用于矿物识别和其他一些统计功能。

2.3.1　蚀变矿物光谱曲线

由表 1、表 2 可以看出，Ⅱ号斑岩体的蚀变矿物主要是绿泥石、方解石、埃洛石、伊利石，Ⅴ号斑岩体的蚀变矿物主要是伊利石、绿泥石、埃洛石、白云母、蒙脱石。从标准蚀变矿物的反射光

表 1　包古图斑岩铜矿Ⅱ号和Ⅴ号斑岩体地表样品蚀变矿物成分分析(w_B/%)

Table 1　Analysis results of alteration mineral composition from intrusions(No. 2 and No. 5) in Baogutu porphyry copper deposit

样号	岩性	绿泥石	埃洛石	伊利石	方解石	角闪石	绢云母	黑云母
Bgt5-6	钾化花岗斑岩	66	34					
Bgt5-1	孔雀石化石英花岗斑岩		23					77
Bgt2-5	孔雀石化花岗闪长斑岩	70					29	
Bgt2-8	孔雀石化花岗闪长斑岩	58	42					
Bgt2-6	绿帘石化花岗闪长斑岩				51	49		
Bgt2-9	钾化绿泥石化斑岩	72				28		
Bgt2-2	钾化花岗闪长斑岩			42	58			

万方数据

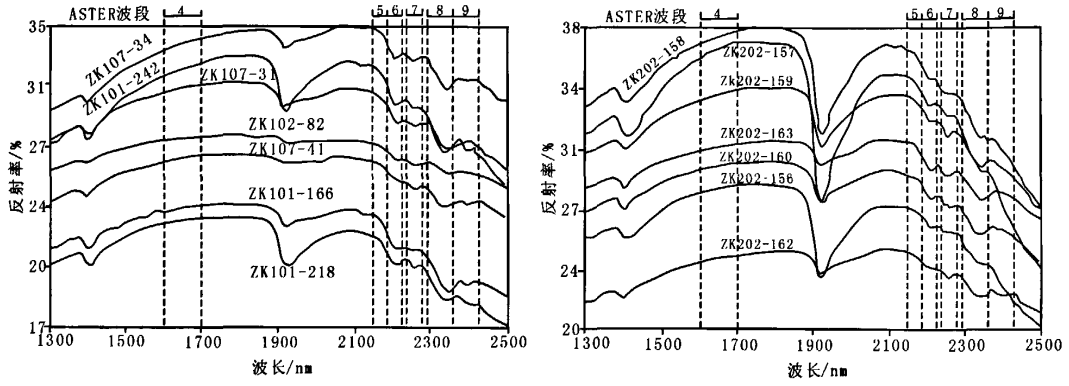

图3 包古图斑岩铜矿Ⅴ号斑岩体钻孔样品的光谱曲线

Fig. 3 Spectrum curves of samples from drilling holes of No. 5 intrusion in Baogutu porphyry copper deposit

表2 包古图斑岩铜矿Ⅴ号斑岩体钻孔样品的蚀变矿物成分分析(w_B/%)

Table 2 Analysis of alteration mineral composition of samples from drilling holes of No. 5 intrusion in Baogutu porphyry copper deposit

样号	岩性	绿泥石	埃洛石	伊利石	角闪石	绢云母	多硅白云母	蒙脱石	黑云母
ZK107-34	花岗闪长斑岩	46	29	25					
ZK101-242	花岗闪长斑岩	46	54						
ZK107-31	花岗闪长斑岩	42	34	24					
ZK102-82	闪长玢岩	43		25			32		
ZK107-41	花岗闪长斑岩	56		33	11				
ZK101-166	花岗闪长斑岩	45		44	12				
ZK101-218	花岗闪长斑岩	35				65			
ZK202-158	似斑状花岗闪长岩							100	
ZK202-157	似斑状花岗闪长岩							100	
ZK202-159	似斑状花岗闪长岩	49	51						
ZK202-163	似斑状花岗闪长岩	56		44					
ZK202-160	似斑状花岗闪长岩	55	45						
ZK202-156	似斑状花岗闪长岩		89					11	
ZK202-162	似斑状花岗闪长岩			40					60

谱数据库中选出Ⅱ号、Ⅴ号斑岩体中的主要蚀变矿物，根据所选蚀变矿物的光谱特征，将其分为2组(图4)：第一组有蒙脱石、埃洛石、伊利石、绢云母，其特点是在ASTER5、ASTER6波段具有中—强吸收性；第二组为方解石、黑云母、绿泥石，其特点是在ASTER8、ASTER9波段具有中—强吸收性。

2.3.2 蚀变矿物的光谱吸收特性

根据矿物反射光谱的吸收谱带，可确定矿物在ASTER数据各波段范围内的吸收强弱特征，由图4可以列出蚀变矿物在ASTER各波段中的吸收强度(表3)。根据图4和表3可以看出：伊利石、蒙脱石、埃洛石、绢云母矿物的反射光谱在ASTER5、ASTER6波段有中—强吸收性；方解石、黑云母、绿泥石矿物的反射光谱在ASTER8、ASTER9波段有中—强吸收性。蚀变矿物的反射光谱曲线在ASTER4位置处谱线斜率变化小，属于平高反射峰。

2.4 Ⅱ号、Ⅴ号斑岩体的蚀变岩石样品反射率积分

在遥感影像中，像元是基本单位，是成像过程中或计算机处理时的基本采样点，假若一个像元仅包含一类地面目标的信息，那么这种像元称为纯像元，一个像元往往包含有多类地物的信息，这种像元称为混合像元。自然界的地质体是复杂产物，遥感数据中每一像元对应的地面面积较大，

万方数据

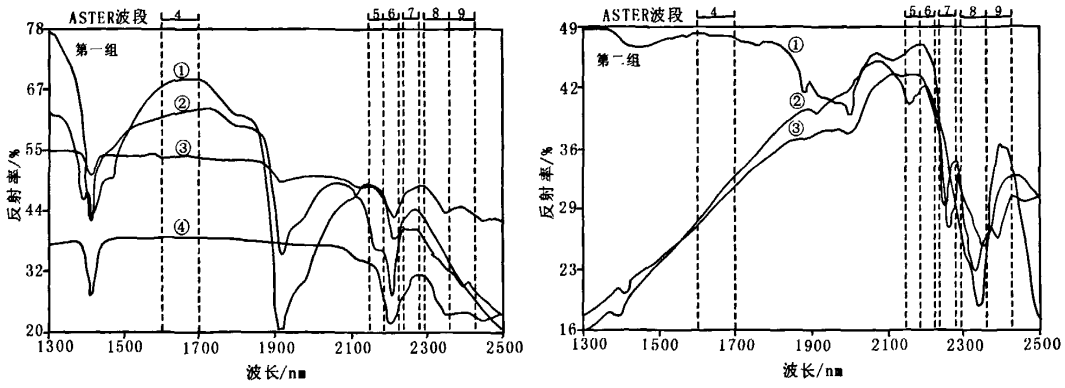

图 4　部分标准蚀变矿物光谱曲线图

Fig. 4　Standard spectral curves of partial altered minerals

第一组：①蒙脱石，②埃洛石，③伊利石，④绢云母；第二组：①方解石，②黑云母，③绿泥石

表 3　部分标准蚀变矿物在 ASTER 各波段中的吸收强度

Table 3　The absorption intensity of partial altered minerals from the bands of ASTER

标准蚀变矿物	波段/nm					
	ASTER4	ASTER5	ASTER6	ASTER7	ASTER8	ASTER9
	1 600 ~ 1 700	2 145 ~ 2 185	2 185 ~ 2 225	2 235 ~ 2 285	2 295 ~ 2 365	2 360 ~ 2 430
伊利石	-	+ + +	+ + + +	+	+ +	+ +
蒙脱石	-	+ +	+ + + +	+	+	+ +
埃洛石	-	+ + +	+ + + +	+	+ +	+ +
绢云母	-	+ + +	+ + + +	+	+ +	+
方解石	-	+ +	+	+ +	+ + + +	+ +
黑云母	-	+	+ +	+	+ + + +	+ + + +
绿泥石	-	+	+ +	+	+ + + +	+ + +

注：- 表示平高；+ 吸收不明显；+ + 弱吸收；+ + + 中等吸收；+ + + + 强吸收。

位于多类地物交界处或纹理区域内的像元，受地物散射等因素的影响，绝大部分像元代表混合地物的信息，属于混合像元[1]。自然界几乎不存有纯像元，因此在确定某地区的光谱信息时，不能仅以某一类地物的特征来分析，需要对区域范围内的岩石样品的光谱特征进行综合分析。

光谱测试仪相对于 ASTER 数据的采集波段来说，具有高的光谱分辨率，ASD 的采样间距为 2 nm，PIMA 的采样间距为 7 ~ 10 nm。在本文中，首先对单条岩石光谱曲线的反射率值在 ASTER 波段范围内做积分处理[10]，利用数学积分模型在 ASTER 数据各波段范围内对反射率值进行积分，利用图表表示反射率积分值与 ASTER 波段的关系（图 5），对工作区内样品进行数学统计，确定反射光谱吸收谷在 ASTER 数据的哪个波段的概率更高。图 5 反映了样品在测试波长范围内的反射率对所属 ASTER 数据波段的吸收性贡献大小。由积分结果可以看出：Ⅱ号斑岩体样品的光谱反射率在 ASTER8 波段有强吸收性，在 ASTER6 波段具有弱吸收性；Ⅴ号斑岩体样品的光谱反射率在 ASTER5、ASTER6 波段具有中—强吸收性。

3　光谱测试结果在蚀变异常提取中的运用

以上光谱数据结果表明，Ⅱ号斑岩体在 ASTER8 波段显示强吸收性，Ⅴ号斑岩体在 ASTER5、ASTER6 波段有中—强吸收性，因此，在利用主成分（PCA）分析法提取 2 个斑岩铜矿岩体的蚀变遥感异常信息时，应选择不同的波段组合进行主成分分析，即对Ⅱ号斑岩体的蚀变异常进行提取时应采用 ASTER1、ASTER3、ASTER4、ASTER8 波段组合处理；对Ⅴ号斑岩体的蚀变异常提取时应采用 ASTER1、ASTER3、ASTER4、ASTER（5 + 6）/2 波段组合处理[11]。

利用上述波段组合提取蚀变遥感异常的结果与野外勘查实际情况相比，异常的位置及范围与

万方数据

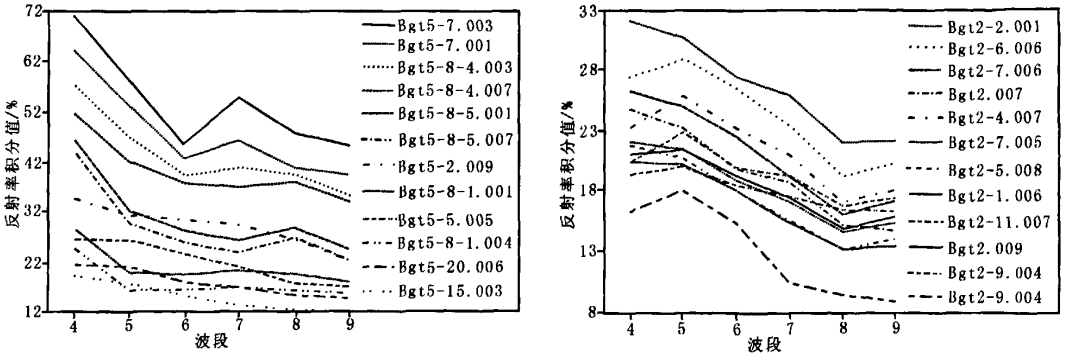

图5 包古图斑岩铜矿Ⅱ号、Ⅴ号斑岩体样品的反射率积分值

Fig. 5 The reflectivity integral value of the samples from intrusions(No. 2 and No. 5) in Baogutu porphyry copper deposit

(Bgt 5-7.003：Bgt 5 代表岩体编号；7 代表样品编号；003 代表谱线编号；其余类推)

地质情况吻合较好，表明信息提取比较成功。鉴于工作区属于浅覆盖负地形地貌，所以异常没有大片出露，但所检查的几处异常点在覆盖之下都有强弱不同的岩石蚀变，即异常提取的结果可以表明波段选择的正确性，换言之，反射光谱测试的结果可以成为波段选择的基础。受篇幅限制，对蚀变遥感异常信息提取的过程及分析结果将另文讨论。

4 结 语

对新疆西准噶尔包古图斑岩铜矿的Ⅱ号、Ⅴ号斑岩体的岩石样品进行了反射光谱测试分析，主要得到以下几点结论。

(1)反射光谱测试分析表明，Ⅱ号斑岩体主要的蚀变矿物组成为绿泥石、方解石、埃洛石、伊利石；Ⅴ号斑岩体主要蚀变矿物组成为伊利石、绿泥石、埃洛石、白云母、蒙脱石。

(2)利用数学积分模型对 ASTER 数据不同波段内的反射率值进行积分，结果表明：Ⅱ号斑岩体样品在 ASTER8 波段具有强吸收性；Ⅴ号斑岩体样品在 ASTER5、ASTER6 波段具有中—强吸收性。

(3)对Ⅱ号、Ⅴ号斑岩体选择不同的波段组合进行主成分分析来提取蚀变遥感异常信息，提取的异常信息与野外勘查实际情况吻合较好。

参考文献：

[1] 邢立新，刘嘉宜. 岩石反射波谱与其化学成分关系研究[J]. 遥感技术与应用，1999，14(3)：24-29.

[2] 章革，连长云，元春华. PIMA 在云南普朗斑岩铜矿矿物识别中的应用[J]. 地学前缘，2004，11(4)：460.

[3] 刘峰，张继贤，靳奉祥，等. 地物波谱研究现状及方法的初步探讨[J]. 北京测绘，2005，(3)：1-6，10.

[4] 王树东，刘素红，李向，等. 野外波谱测试应注意的几个问题[J]. 遥感信息，2006，(1)：29-33.

[5] Clark R N，King T V V，Klejwa M，et al. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals [J]. Geophysics，1990，(95)：12653-12680.

[6] Clark R N. Spectroscopy of rocks and minerals，and principles of spectroscopy [J]. Remote Sensing for the Earth Sciences：Manual of Remote Sensing，1999，(3)：3-58.

[7] 田庆久，王世新，王乐意，等. 典型地物标准波谱数据库系统设计[J]. 遥感技术与应用，2003，18(4)：185-190.

[8] 张建国，杨自安，胡祥昭，等. 基于光谱特征的遥感信息提取及成矿预测[J]. 矿产与地质，2004，18(4)：346-349.

[9] 张玉君，杨建民，陈薇. 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，2002，(4)：30-37.

[10] 姚佛军，杨建民，张玉君，等. 新疆土屋斑岩铜矿与沙泉子夕卡岩铅锌矿矿区岩矿波谱特征的研究及其应用前景[M]// 陈毓川. 第八届全国矿床会议论文集. 北京：地质出版社，2006：790-793.

[11] 张玉君，杨建民，姚佛军. 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，2006，25(增刊)：507-510.

万方数据