

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

张玉君¹, 杨建民², 姚佛军²

1. 中国国土资源部 航天遥感物探中心, 北京 100083

2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037

Zhang Yujun¹, Yang Jianmin², Yao Fojun²

1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China

2. Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China

Zhang Yujun, Yang Jianmin, Yao Fojun. The potential of multi-spectral remote sensing techniques for mineral exploration—taking the Mongolian Oyu Tolgoi Cu-Au deposit as an example. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5): 063-070

Abstract: In this paper, we propose a new parameter-alteration remote sensing anomalies for predicting mineral resources. The geological basis and the spectral features for alteration anomalies are discussed. Based on the deposit geology and spectral characteristics of alteration minerals, we have constructed a table of remote sensing alteration anomalies and related geological interpretations. We have developed an advanced system for the identification of hydrothermal alteration assemblages using ETM⁺ (Enhanced Thematic Mapper) and ASTER (Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection radiometer) data, which is called the “De-interfered Anomalous Principal Component Thresholding Technique”. In this paper, a simplified flow chart of this system is provided, in which the five main blocks of the system are illustrated. These five main blocks are: pre-processing, sub-normalization, anomaly-identification, post-processing and thresholding. The ETM⁺ data were used for studying lithologic characteristics of the Hanbogd igneous complex of intermediate-felsic rocks in the northeast of Oyu Tolgoi Cu-Au deposit. The ASTER VNIR and SWIR data were used to identify hydroxyl anomalies for Oyu Tolgoi Cu-Au deposit and nearby areas. The Oyu Tolgoi Cu-Au deposit is recognized as a porphyry system by the selective principal component analysis of ASTER data. The hydroxyl anomalies for all known ore bodies are well displayed; in addition, three new prospective hydroxyl anomalies were discovered to the west of the deposit. This work demonstrates that multi-spectral remote sensing techniques have excellent potentials for the prospecting of metallic minerals.

Key words: ETM⁺ (Enhanced Thematic Mapper); ASTER (Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection radiometer); principal component analysis (PCA); spectral angle mapper (SAM); hydroxylate anomaly (OHA); visible and near-infrared (VNIR); short wave infrared (SWIR)

摘 要: 建议把蚀变遥感异常作为一个新的找矿参数,文中讨论了蚀变遥感异常的地质基础和光谱前提。在矿床地质学和蚀变矿物光谱参数特征的基础上,编制了一张用于蚀变遥感异常提取及其地质解释的表格。设计了从ETM⁺和ASTER数据中提取羟基蚀变矿物组合信息的独特流程方案。这个方案称之为“去干扰异常主分量门限化技术”,文中示以简化的流程图。ETM⁺数据用来研究位于欧玉陶勒盖铜金矿床东北部的汉

收稿日期:2007-08-17;修回日期:2007-09-12

基金项目:国家科技攻关项目(2003BA612A-06-04);地质调查项目(科[2005]017-02-02);国家科技支撑计划重点项目(2006BAB07B07-02);国家重点基础研究发展计划项目(2007CB411406-06)

作者简介:张玉君(1933—),女,教授级高工,目前主攻多光谱遥感异常提取技术研究。E-mail: zyj_6233@sina.com

保各德中酸性火成杂岩体岩性特征,ASTER 近红外和短波红外数据用来提取欧玉陶勒盖斑岩铜金矿矿床及其近区的羟基异常,通过选择性主分量分析判断欧玉陶勒盖铜金矿矿床的矿床类型为斑岩型。已知矿区各矿体的羟基异常都十分清晰,此外在矿床西部还发现了三个新的有希望的羟基异常。此工作进一步展示出多光谱遥感技术对于金属矿床的预测具有极好的潜能。

关键词:ETM⁺(增强型专题制图);ASTER(先进星载热发射和反射测量仪);主分量分析(PCA);光谱角填图(SAM);羟基异常(OHA);可见和近红外(VNIR);短波红外(SWIR)

中图分类号:P618.5;TP75 文献标识码:A 文章编号:1005-2321(2007)05-0063-08

0 引言

自 20 世纪 80 年代末开始,利用多光谱遥感技术勘查金属矿产资源的方法就已引起全球的关注^[1-2]。由于这种技术易于应用和稳健性的原因,我国在过去 15 年里成功地应用在矿产资源勘查与评价中。2001—2005 年我国已经完成西部大区域蚀变遥感异常提取的两个项目(>2 000 000 km²)。我们把蚀变遥感异常作为独立的找矿参数来研究^[3-7],基于以下三个理由:

- (1)蚀变遥感异常有其独特的物理化学基础;
- (2)它所获得的结果是用其他参数方法不能获得的;
- (3)作为遥感学科的分支,它仍然有很大的发展空间。

到 2004 年底,我们应用蚀变遥感异常已经发现了 5 个新的矿床(点):罗东铁镁质镍矿,沙泉子夕卡岩铅锌矿,笔架山岩浆热液型铜矿,雅满苏热液脉型铜矿,地苏嘎斑岩铜矿。其中,罗东镍矿经钻探验证达到中型规模。这些突出结果说明多光谱遥感技术在矿产资源潜力勘查与评价中能够发挥重要作用,并且显示出利用多道光谱遥感数据(ETM⁺和 TM)进行蚀变矿物填图的潜能远未穷尽。

ASTER 有较高的空间分辨率(近红外区域为 15 m),与 ETM⁺和 TM 相比有较多的通道。ASTER 是由美国国家航天局 1999 年 12 月发射的对地观测系统卫星(Terra)携带的多光谱观测仪^[8];ASTER 传感器由日本制造。研制 ASTER 主要目的之一是为了提高资源勘查效率,它是对 ETM⁺和 TM 的补充和增强。由于它在短波红外区,把蚀变谱带光谱设为 6 个波段(见表 1),使得对于特定的蚀变矿物组合的识别更为现实。在热红外区设计的 5 个波段,使有可能利用 ASTER 数据进行岩性识别研究。因此,ASTER 数据能用于解决一些新的地质问题:区分不同矿床类型,有进行蚀变矿物填图和岩性填图的潜力。我们已经成功地区分了三种类

型的矿床:斑岩铜(铜、金)矿、镁铁质铜镍(镍)矿和夕卡岩型铅锌矿。

表 1 ASTER 和 ETM(TM)数据的波段对比

ASTER		ETM ⁺ (TM)	
波段	波长范围/μm	波段	波长范围/μm
VNIR 1 VNIR 2 VNIR 3 VNIRB SWIR 4	0.52~0.60 0.63~0.69 0.76~0.86 0.76~0.86 1.600~1.700	1	0.45~0.52
		2	0.52~0.60
		3	0.63~0.69
		4	0.76~0.86
		5	1.55~1.75
SWIR 5 SWIR 6 SWIR 7 SWIR 8 SWIR 9	2.145~2.185 2.185~2.225 2.235~2.285 2.295~2.365 2.360~2.430	7	2.08~2.35
TIR 10	8.125~8.475		
TIR 11	8.475~8.825		
TIR 12	8.925~9.275		
TIR 13	10.25~10.95		
TIR 14	10.95~11.65	6	10.4~12.5

在 21 世纪初,Ivanhoe 矿业有限公司^[9]勘查了蒙古南戈壁区域欧玉陶勒盖矿床,证实为一个大型斑岩铜金矿床,该矿床显著地提高了中亚成矿带的巨大经济潜力。这个信息激发了我们利用 ETM⁺和 ASTER 多光谱遥感数据提取欧玉陶勒盖矿床蚀变异常的兴趣,以检验多光谱遥感技术对于矿产预测的潜能。

1 羟基异常提取的光谱依据和地质基础

每一种岩石由数种(或一种)矿物组成,而每一种矿物有其特征光谱。一种岩石的(甚至一种矿物的)光谱可能是非常复杂的。为了提取蚀变矿物组合的信息,并为了依据这些信息区分矿床类型,我们必须极大地简化研究目标,试图找出可以表征某种类型矿床起主导或基本作用的蚀变矿物组合。我们利用 USGS 数字光谱库 splib05a 编制了光谱特征分析表(见表2)。岩石矿物的各种光谱吸收特征均

表 2 利用 ASTER 数据提取蚀变遥感信息及对蚀变遥感异常进行地质解译的波谱依据

Table 2 Spectral basis for identification of specific alteration assemblages and for their geological interpretation

成矿热液 的温度	围岩蚀变类型	蚀变矿物 (OH 或 CO ₃)	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	
气化高温热液	云英岩化	白云母	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$	+++	##	###	@	@@		沙泉子铅锌矿
		方解石	CaCO_3	+++			—	---		
	夕卡岩化	角闪石	$\text{NaCa}_2(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_5[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$	++			—	---	---	
		黑云母	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{Al}, \text{Fe})\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$					—	—	可用 PCA(1378)提取
		透闪石	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	+++				---	---	
		斜绿泥石	$(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	+++	@	@	---	---	—	
	电气石化	镁电气石	$\text{NaMg}_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$	+++		@@	---	---	—	
	次生硅化	明矾石	$\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	+++	###	###		@@		PCA(1234), (1, 2, (5+6)/2, 8)
		叶蜡石	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	+++	###	#		@@		
		高岭石	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	+++	###	###				
	黄铁矿绢云母化	绢云母	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$	+++	##	###	@	@@		
		黄钾铁矾	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	+++	@@	@@@	---	---		
	绢云母化	绢云母	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$	+++	##	###	@	@@		
		高岭石	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	+++	###	###				
	泥质化	埃洛石	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	+++	###	###	@			
		蒙脱石	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0.33}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	+++	#	###		@@		
		伊里石	$\text{K}_{<1}\text{Al}_2[(\text{Al}, \text{Si})\text{Si}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	+++	##	###	@	@@		
		绢云母	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$	+++	##	###				
		叶绿泥石	$(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Al}[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_8$							
中低温热液	绿泥石化	斜绿泥石	$(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	+++	@	@	---	---	—	黄山东铜镍矿 坡十、罗东铜镍矿
		蛇纹石	$\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$	+++	@	@	—	---		
	蛇纹石化	叶蛇纹石	$(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Si}_2\text{O}_8(\text{OH})_4$	++		@	---	---		
		方解石	CaCO_3	+++			—	---	—	PCA(1358) PCA(1234)
	碳酸盐化	白云石	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	+++		@	---	---		
		阳起石	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	++	@	@	—	---	---	
	青磐岩化	绿帘石	$\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$	+			---	---	---	
		黝帘石	$\text{Ca}_2\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$	+			—	---	—	
		叶绿泥石	$(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Al}[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_8$							
	滑石菱镁片岩化	滑石	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	+++	@	@	—	---	---	
		菱镁矿	MgCO_3							

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 5、6)、“—”(对 7、8、9)或“@”(对非主峰)号多少表示。

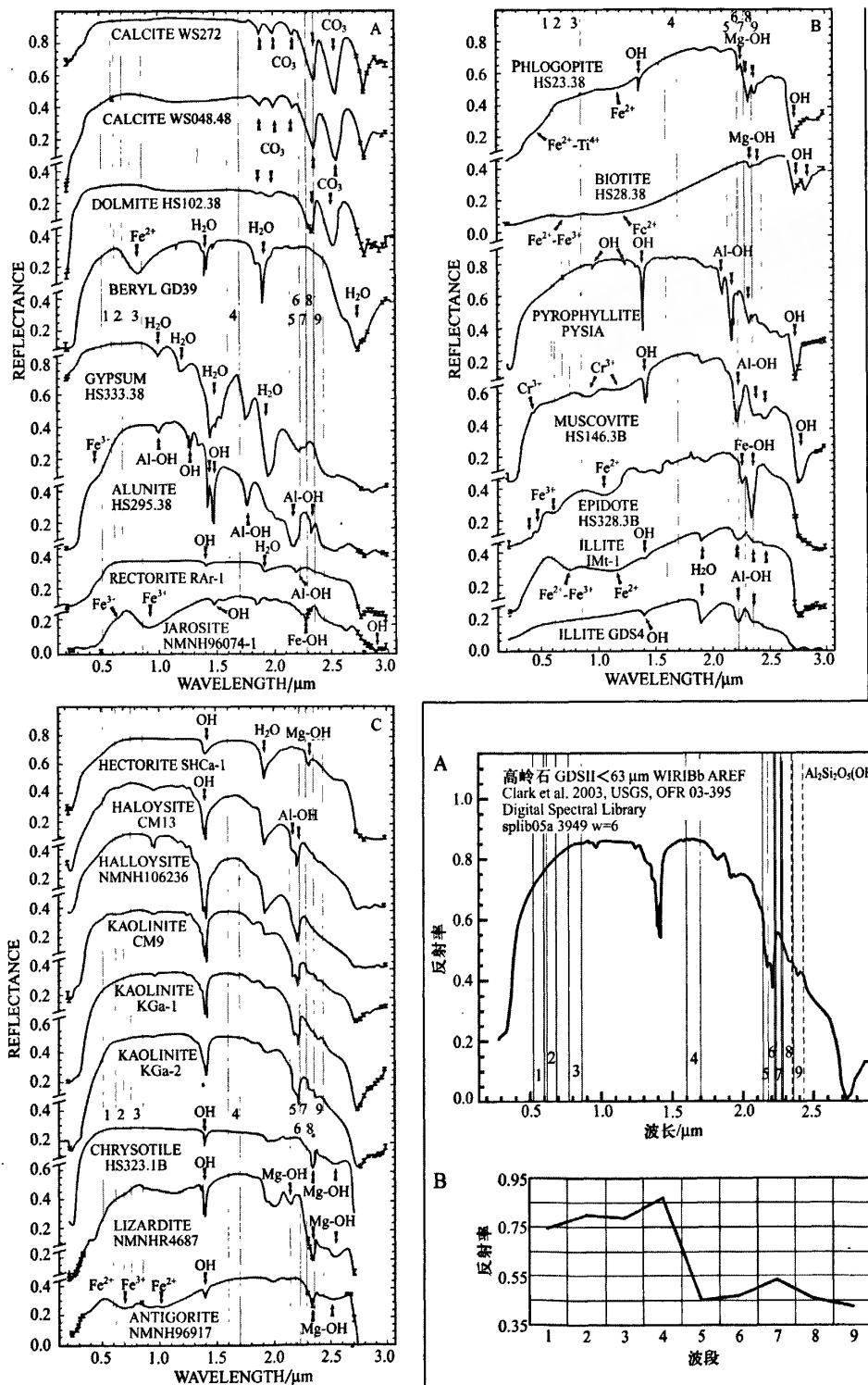


图 1 (A,B,C)显示由于OH,CO₃和H₂O引起的吸收谱带不同矿物的反射光谱
Fig.1 (A, B, C) Reflectance spectra of different minerals, showing vibration bands due to OH, CO₃ and H₂O

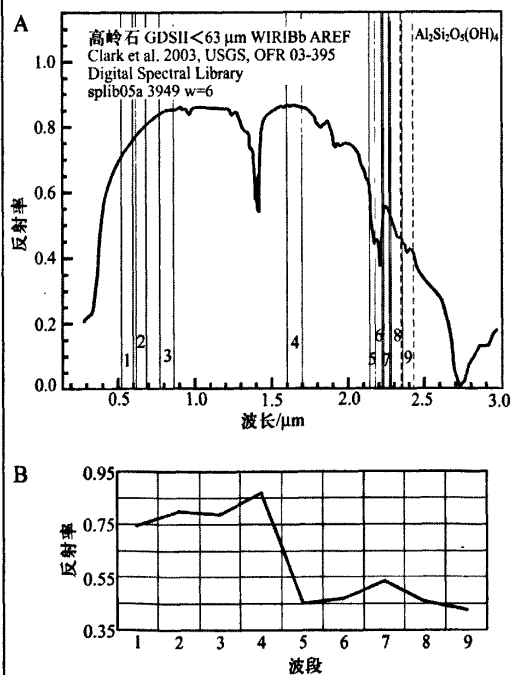


图 2 从 USGS 光谱库光谱计算出的 ASTER 光谱
Fig.2 ASTER spectrum, calculated from USGS spectrum
B图是利用A图 USGS 光谱库计算出的对应 ASTER 波段的光谱

起因于电子过程和振动过程。对蚀变矿物来说,振动过程最重要。我们在 Clark^[10-11] 所做不同矿物反射光谱的三个表中,增加了对应于 ASTER 波段的竖线,图 1A—C 显示由 OH、CO₃ 和 H₂O 引起的振动谱带。为了更准确、细致的讨论,我们计算了光谱对应 ASTER 波段的光谱积分值(见图 2 所示高岭土反射光谱的例子),得到了每一矿物的 ASTER 波段。波段 4 作为其他短波红外波段与之比较的基准,第 4 波段的光谱应具有高值和平坦形态,我们依据它的优劣程度做了三种标记:+++、++、+。根据短波红外不同波段的吸收程度设计两类各三种不同的标记:对 4、5、6 波段以###、##、#表示;对 7、8、9 波段以---、--、-表示。此外对混合波段以@@、@表示。

表 2 给出不同矿物 ASTER 5—9 波段的吸收特征,可以将表中蚀变矿物分为三组:第一组在 AST5 和 AST6 有强的吸收,例如高岭石、伊利石、绢云母;第二组在 AST7 和 AST8 有强吸收,例如蛇纹石、绿泥石,方解石;第三组在 AST9 有强吸收,例如滑石。除了以上三组外,像黄钾铁钒有特别的光谱吸收特征:AST6 和 AST7 强吸收,AST1 和 AST3 吸收明显。

2 利用多光谱数据提取羟基蚀变异常的流程

张玉君^[3-5,7]提出了一种新的从利用 ETM⁺ 和 ASTER 数据提取蚀变遥感异常的方案——“去干扰异常主分量门限化技术”(见图 3)。它由 5 个主要部分组成:预处理、准归一化、异常提取、后处理及门限化。准归一化是为了改进毗邻地区图像之间和不同时相图像之间对比性的需要。经准归一化获得视反射率,准归一化包括径辐射校正、增益校正、日地距离校正、太阳高度角校正和大气层上辐照度校正。SAM 和 PCA^[12] 用来提取异常。预处理和后处理是为了去除水、冰、云、雪、植被、地形阴影、云影、盐碱地等干扰的影响。以协方差矩阵的标准离差为尺度切将异常割成三级。

3 多光谱遥感技术在蒙古国欧玉陶勒盖铜金矿床的应用

为了利用多光谱遥感技术研究欧玉铜金矿床,

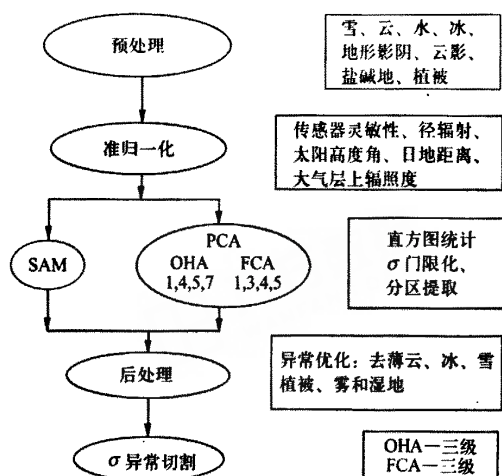


图 3 去干扰异常主分量门限化技术

Fig. 3 De-interfered anomalous principal component thresholding technique

我们从中国遥感卫星地面站购买了 ETM⁺ 数据 13030 景(1999 年 10 月 22 日接受)和 ASTER 数据 13092 景(2004 年 09 月 04 日接受)。数据处理在图像处理系统上进行。我们利用 ETM⁺ 数据 13030 制成遥感影像图,用它研究岩性;ASTER 13092 景数据用于提取欧玉陶勒盖 Cu-Au 矿区和近区的羟基遥感异常,并判别其矿床类型。

3.1 汉保各德火成杂岩体的遥感影像图

利用 ETM⁺ 数据 13030 制成假彩色遥感影像图(红:ETM⁺ 7、绿:ETM⁺ 4、蓝:ETM⁺ 1)很好地展示出岩性特征,位于欧玉陶勒盖矿床北东部的汉保各德中酸性火成杂岩体在图 4 上被清晰地显示出来,且与网上下载^[9] 的 Ivanhoe 矿业有限公司所作地质略图有很好的相似性。

3.2 欧玉陶勒盖 Cu-Au 矿床羟基蚀变异常的提取

为了提取欧玉斑岩铜矿羟基异常,我们用前面所述技术处理了 ASTER 数据。预处理时我们去除了盐碱地和空白图边的干扰。选用 AST1、AST3、AST4、AST(5+6)/2(或 AST5、AST6)进行 PCA,提取斑岩铜矿羟基异常。如果针对夕卡岩或超基性岩,则利用 ASTER 数据的 AST1、AST3、AST4、AST(7+8)/2(或 AST7、AST8)进行 PCA,提取羟基异常。这两种方案可以帮助区分矿床类型。

图 5 对比利用不同方案的 PCA 提取的羟基异常图像并展示波谱图。点 1、2 显示出在 5 和 6 通道有强吸收。点 3 波谱说明由于植被通道(3 通道)反射偏高而存在一定植被影响。该图还展示出在欧玉

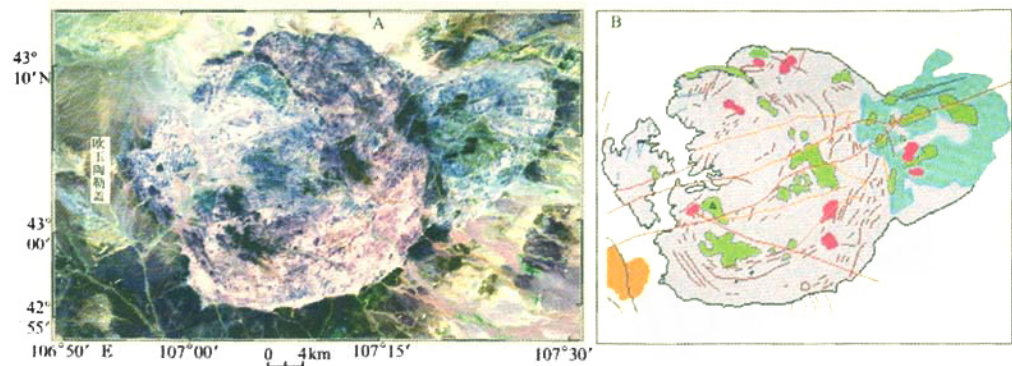


图4 欧玉矿区西北部汉保各德中酸性火成杂岩体岩性特征对比
A—汉保各德杂岩体 ETM⁺ (R:1, G:4, B:7) 遥感图像;B—Ivanhoe 矿业有限公司所作汉保各德杂岩体地质略图
Fig. 4 Comparison of remote sensing image with geological scheme for Hanbogd complex

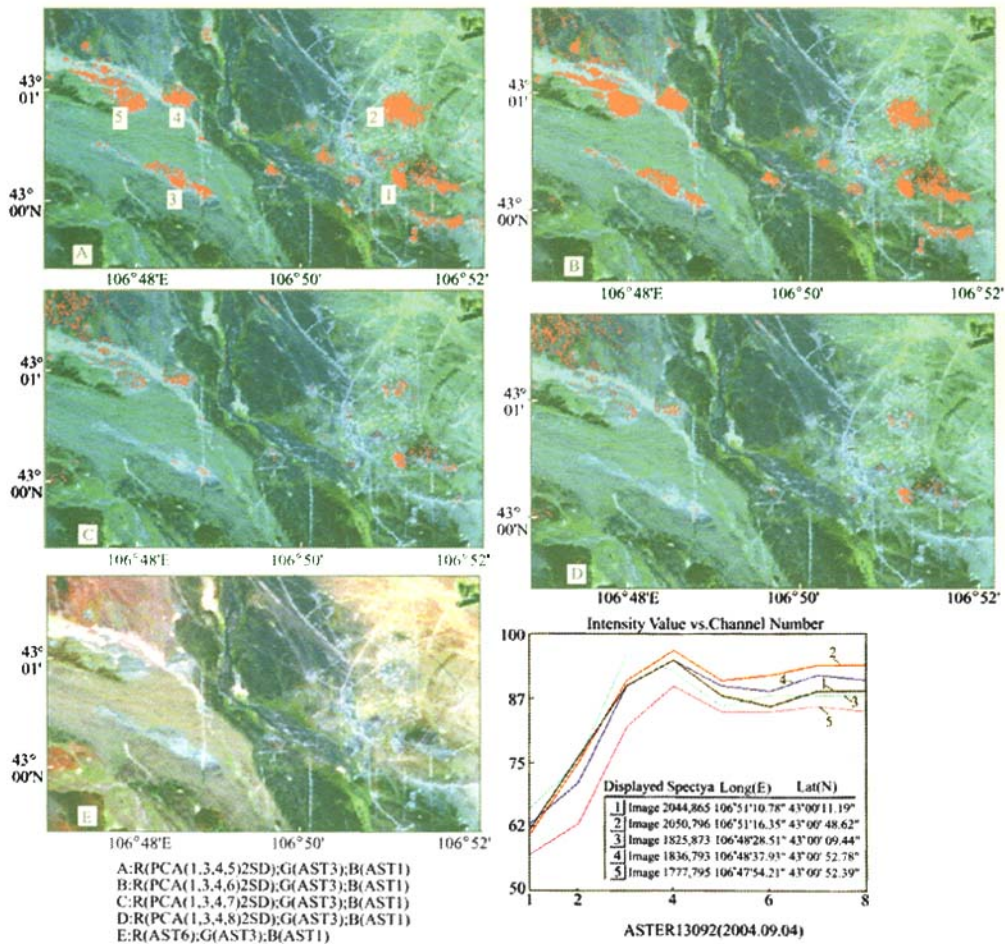


图5 欧玉矿床不同波段 PCA 对比关系图
Fig. 5 Comparative image of selective PCA results using ASTER data for Oyu Tolgoi deposit

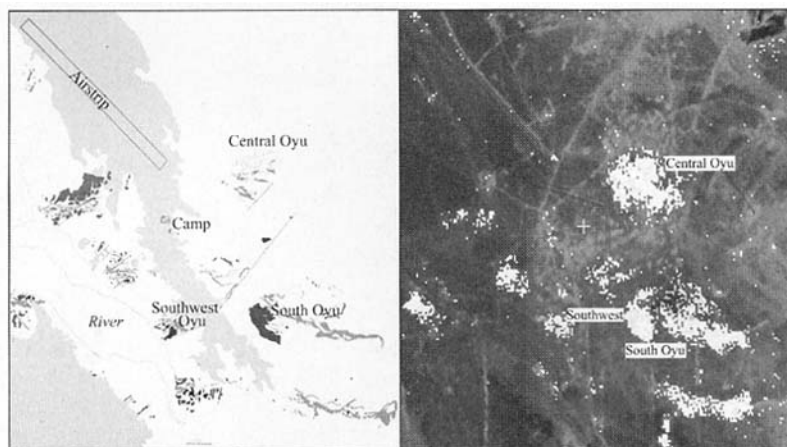


图6 羟基异常和 Ivanhoe Mines Ltd 矿床地质图的对比

A—Ivanhoe Mines Ltd 的欧玉陶勒盖矿床矿体图;B—以 2σ

切割 PCA(AST1,AST3,AST4,AST6)的羟基异常

Fig.6 Comparison of hydroxylated anomalies by us with ore bodies by Ivanhoe Mines Ltd

矿床的近西部存在三个有希望的新异常。图6给出我们提取的羟基异常和网上 Ivanhoe 矿业有限公司^[9]所作的矿床分布图的对比,图6说明两者位置对应关系非常好,每个已知矿体(中央欧玉、西南欧玉、南欧玉、等等)都存在对应的羟基异常。

3.3 欧玉陶勒盖矿床矿化类型的确定

图5中 PCA(AST1,AST3,AST4,AST5)和 PCA(AST1,AST3,AST4,AST6)的强异常及反射光谱曲线特征使我们有把握确定欧玉陶勒盖矿床属于斑岩类型。依据图1和图2中的反射谱线特征,并依据表3中确定蚀变矿物组合的波谱基础,可以解译出引起异常的主要矿物为高岭石组矿物(高岭石、埃洛石、地开石等)。

4 结论

基于矿床地质学和蚀变矿物反射光谱特征,我们制作了提取蚀变遥感异常和地质解译的专用表。用 ETM⁺ 数据制成能反映岩性特征的遥感影像图,用 ASTER 的 VNIR 数据提取羟基异常。我们曾利用 ASTER 短波红外数据来区分用铜(铜金)矿(用 PCA(1,3,4,(5+6)/2))、超基性岩铜镍(镍)矿(用 PCA(1,3,4,(7+8)/2)及底背景值)和夕卡岩铅锌矿(用 PCA(1,3,4,(7+8)/2)及高背景值)。所概述的这种方法在蒙古欧玉斑岩铜金矿做了应用尝试,并且取得了完全成功。本工作不仅提取了与已

知矿体对应良好的蚀变遥感异常,确定了其矿床类型为斑岩型,而且还在欧玉陶勒盖矿床近西部发现了三个有希望的新异常,其类型和欧玉矿相同。

众所周知,斑岩铜矿的特征是低品位但范围大,并占据寻找金、锰和铜的最佳地位。根据统计信息,铜矿资源有一半是斑岩铜。本文所述技术和成果能够提高多光谱遥感技术在斑岩铜矿的勘查与评价中的作用。

References:

- [1] Crosta A P, McM Moore J. Enhancement of landsat thematic mapper imagery for residual soil mapping in SW Minais Gerain[C]//Proceedings of the 7th (ERIM) thematic conference; Remote Sensing for Exploration Geology Calgary. 1989; 1173-1187.
- [2] Loughlin W P. Principal component analysis for alteration mapping[C]//Proceedings of the 8th thematic conference on Geologic Remote Sensing. USA;Denver, 1991; 293-306.
- [3] Zhang Y J, Yang J M, Chen W. The methods for extraction of the alteration remote sensing anomaly from ETM⁺ (TM) data and their application: geological basis and spectral precondition[J]. Journal of Remote Sensing for Land & Resources, 2002(4): 30-36(in Chinese).
- [4] Zhang Y J, Zeng Z M, Chen W. The methods for extraction of the alteration remote sensing anomaly from ETM⁺ (TM) data and their application: method selection and technological flow-cart[J]. Journal of Remote Sensing for Land & Resources, 2003(2): 44-49(in Chinese).

- [5] Zhang Y J, Yang J M. Extraction methods for the alteration remote sensing information in the area with outcropping rocks [J]. Journal of Remote Sensing for Land & Resources, 1998 (2): 46-53(in Chinese).
- [6] Zhang Y J, Yang J M. A new exploration parameter for metallic deposits: the alteration remote sensing anomaly[C]// Proceedings of the Eighth Biennial SGA Meeting, "Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge". 2005(2): 1513-1516.
- [7] Li C G, Zhang Y J. The probation of extraction of the Cu-mineralized alteration remote sensing information in Lancangjiang-Lanping area using principal component analysis (PCA) [J]. Journal of Remote Sensing for Land & Resources, 1997(1): 20-30(in Chinese).
- [8] Abrams M, Hook S. Simulated ASTER data for geologic studies[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33: 692-699.
- [9] Kirwin D J. The giant Oyu Tolgoi porphyry copper-gold deposit discovery history and exploration implications, south Gobi. [EB/OL]. <http://www.ivanhoe-mines.com/s./OyuTolgoi.asp>.
- [10] Clark R N, Swayze G A, Wise R, et al. USGS digital spectral library splib05a[R]. U. S. Geological Survey, Open File Report, 2003(3):395.
- [11] Rencz A N. Remote sensing for the earth sciences[M]. Canada: John Wiley & Sons, Inc, Geological Survey of Canada, 1999.
- [12] Kendall M. Multivariate analysis[M]. England: Charles Griffin and Company, limited, 1975.

参考文献:

- [3] 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):30-36.
- [4] 张玉君,曾朝铭,陈薇. 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, 2003(2):44-49.
- [5] 张玉君,杨建民. 基岩裸露区蚀变遥感信息的提取方法[J]. 国土资源遥感,1998(2):46-53.
- [7] 李昌国,张玉君. 试用主分量分析方法提取澜沧江兰坪地区铜矿化蚀变遥感信息[J]. 国土资源遥感,1997(1):20-30.

《地学前缘》征订启事

致《地学前缘》订户:

《地学前缘》自 2007 年起由天津全国非邮发报刊联合征订服务部负责征订工作(联订代号:5198),需要订购我刊的客户可直接与天津联合征订服务部联系。

联系地址:天津市大寺泉集北里别墅 17 号

邮政编码:300385

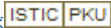
电 话:022-23962479,022-23973378

传 真:022-23973378

网 址:www. LHZD. com

E-mail:LHZD@public. tpt. tj. cn

盖铜金矿床为例

作者: 张玉君, 杨建民, 姚佛军, Zhang Yujun, Yang Jianmin, Yao Fojun
作者单位: 张玉君, Zhang Yujun(中国国土资源部, 航天遥感物探中心, 北京, 100083), 杨建民, 姚佛军, Yang Jianmin, Yao Fojun(中国地质科学院, 矿产资源研究所, 北京, 100037)
刊名: 地学前缘 
英文刊名: EARTH SCIENCE FRONTIERS
年, 卷(期): 2007, 14(5)
被引用次数: 6次

参考文献(16条)

1. Crosta A P, McM Moore J Enhancement of landsat thematic mapper imagery for residual soil mapping in SW Minais Gerraín 1989
2. Loughlin W P Principal component analysis for alteration mapping 1991
3. Zhang Y J, Yang J M, Chen W The methods for extraction of the alteration remote sensing anomaly from ETM+ (TM) data and their application: geological basis and spectral precondition 2002(04)
4. Zhang Y J, Zeng Z M, Chen W The methods for extraction of the alteration remote sensing anomaly from ETM+ (TM) data and their application: method selection and technological flow-chart 2003(02)
5. Zhang Y J, Yang J M Extraction methods for the alteration remote sensing information in the area with outcropping rocks 1998(02)
6. Zhang Y J, Yang J M A new exploration parameter for metallic deposits: the alteration remote sensing anomaly 2005
7. Li C G, Zhang Y J The probation of extraction of the Cu mineralized alteration remote sensing information in Lancangjiang-Lanping area using principal component analysis (PCA) 1997(01)
8. Abrams M, Hook S Simulated ASTER data for geologic studies 1995
9. Kirwin D J The giant Oyu Tolgoi porphyry copper-gold deposit discovery history and exploration implications, south Gobi
10. Clark R N, Swayze G A, Wise R USGS digital spectral library splib05a 2003
11. Rencz A N Remote sensing for the earth sciences 1999
12. Kendall M Multivariate analysis 1975
13. 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[期刊论文]-国土资源遥感 2002(04)
14. 张玉君, 曾朝铭, 陈薇 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[期刊论文]-国土资源遥感 2003(02)
15. 张玉君, 杨建民 基岩裸露区蚀变遥感信息的提取方法[期刊论文]-国土资源遥感 1998(02)
16. 李昌国, 张玉君 试用主分量分析方法提取澜沧江兰坪地区铜矿化蚀变遥感信息[期刊论文]-国土资源遥感 1997(01)

引证文献(6条)

1. 吕凤军, 郝跃生, 石静, 王娟 ASTER遥感数据蚀变遥感异常提取研究[期刊论文]-地球学报 2009(2)
2. 张玉君, 姚佛军 应用多光谱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[期刊论文]-岩石学报

2009(4)

3. 陈建平, 陈勇, 王全明. [基于GIS的多元信息成矿预测研究——以赤峰地区为例](#) [期刊论文] - [地学前缘](#) 2008(4)
4. 吕凤军, 郝跃生, 李密文, 石静, 王娟, 李彬. [ASTER遥感数据蚀变遥感异常提取](#) [期刊论文] - [河北遥感](#) 2008(1)
5. 耿新霞, 杨建民, 张玉君, 姚佛军. [ASTER数据在浅覆盖区蚀变遥感异常信息提取中的应用——以新疆西准噶尔包古图斑岩铜矿岩体为例](#) [期刊论文] - [地质论评](#) 2008(2)
6. 陈建明, 孙卫东, 闫柏琨, 于浩. [Aster多光谱遥感异常提取在新疆天湖铁矿中的应用](#) [期刊论文] - [新疆地质](#) 2009(4)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_dxqy200705007.aspx

授权使用: 中南大学(zndx), 授权号: dc318c7b-c4f9-4ce2-807e-9da4009771d3, 下载时间: 2010年6月29日