

利用 ASTER 提取德兴斑岩铜矿遥感蚀变分带信息*

姚佛军¹ 张玉君² 杨建民¹ 耿新霞¹

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2 中国国土资源部航天遥感物探中心, 北京 100083)

摘要 在遥感光谱分析的基础上, 结合德兴斑岩铜矿矿床地质特征, 利用 ASTER 遥感数据提取了德兴斑岩铜矿的遥感蚀变分带信息。德兴斑岩铜矿蚀变分带根据蚀变矿物特征来分析, 主要的蚀变矿物为白云母、伊利石、绿泥石、方解石、白云石。根据光谱特征, 采用比值、斜率、相关吸收和主成分分析 4 种提取方法提取各蚀变矿物的信息, 并采用叠加法对各蚀变矿物信息进行叠加, 从而形成各个蚀变分带的遥感信息。各蚀变分带的遥感信息总体特征比较明显。最后, 根据矿床成矿模式对蚀变分带信息进行了分析。

关键词 地质学; ASTER 遥感数据; 斑岩铜矿; 蚀变分带

中图分类号: P614; P627

文献标志码: A

Application of ASTER remote sensing data to extraction of alteration zoning information from Dexing porphyry copper deposit

YAO FoJun¹, ZHANG YuJun², YANG JianMin¹ and GENG XinXia¹

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;

2 China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China)

Abstract

Remote sensing alteration zoning information of the Dexing porphyry copper deposit was extracted by using ASTER data on the basis of remote sensing spectral analysis and geological features of the Dexing porphyry copper deposit. The main alteration minerals of the alteration zone in the Dexing porphyry copper deposit include muscovite, illite, chlorite and calcite, dolomited by characteristics of alteration minerals. According to the spectral characteristics of main alteration minerals, their remote sensing anomaly information was extracted by using four extraction methods: the ratio, the slope, the related absorption and the principal component analysis, and the information of each remote sensing alteration zone was extracted with the superposition method. Finally, according to the metallogenic model of the ore deposit, the alteration zoning information was analyzed.

Key words: geology, ASTER, remote sensing data, porphyry copper deposit, alteration zoning

遥感技术从诞生开始就应用于各个领域。20 世纪 70 年代, 遥感已经应用在地质找矿中, Abrams 等人(1977)利用陆地卫星多光谱(0.5~1.1 μm)提取了含三价铁的蚀变岩, Hunt(1977)和 Hunt 等(1979)

通过系统的蚀变矿物光谱测试分析, 总结了羟基矿物在可见光-短波红外的波谱响应。此后, 遥感技术逐步应用在地质矿产勘查中, 1:5 万、1:20 万和 1:100 万区域地质调查中遥感方法已列入规范(徐冠华

* 本文是自然科学基金项目(41102205)、国家重大基础研究计划项目(编号:2007CB411406-06)和国家科技支撑专题(编号:2006BAB07B00-7-2)联合资助的成果

第一作者简介 姚佛军, 男, 1980 年生, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事遥感地质研究。Email: fjayao@sina.com

收稿日期 2012-05-07; 改回日期 2012-06-07。秦思婷编辑。

等,1996),多光谱遥感一般应用在蚀变遥感异常提取中(吕凤军等,2008;汪润生等,2010),常用的异常提取方法为比值法、主成分分析等方法,张玉君等(2003)建立的“去干扰异常主分量门限化”技术,在 ASTER 和 ETM 遥感数据异常提取中取得了比较好的成果(耿新霞等,2008;代晶晶等,2010;吕凤军等,2009)。Mohammadzadeh 等(2006)利用主分量分析法研究斑岩铜矿蚀变矿物填图,通过 Crosta 方法成功提取异常,并提取了 30%~50% 植被覆盖区的异常,分为黏土带和铁氧化物带。ETM 波段数量较少,仅有 7 个,不能区别更多的矿物或矿物组合;而 ASTER 传感器提供了较高波谱分辨率的数据,包含 14 个波段,其中 9 个为光学遥感数据,5 个为热红外遥感数据,通常是利用 ASTER 的近红外和短波红外区进行蚀变矿物的分带研究。Ducart 等(2006)利用 ASTER 的可见光-短波红外数据,根据 MTMF 方法研究了阿根廷 Cerro La Mina Epithermal 矿产预测区石英、高岭石、地开石、伊利石、白云母等的分带性;Mars 等(2006)利用 ASTER 的可见光-短波红外数据研究了斑岩铜矿的羟基蚀变矿物分带;Kratt 等(2010)通过 ASTER 的可见光-短波红外数据结合矿物填图,研究了地热资源;Rajendran 等(2011)利用 ASTER 的可见光-短波红外数据研究了印度南部的铁矿;Safwat 等(2010)利用 ASTER 的波段比值和 N 维三度分析研究了金矿化,这些都表明该方法对矿化蚀变分带的研究有效。ASTER 也可用在单矿物的区分,利用已知单矿物的实验室波谱特征,通过波段比值和 CEM(约束能量最小化)(Zhang et al., 2007)区分高岭石、白云母、蒙脱石和明矾石 4 种矿物。目前,ASTER 数据已应用在矿产地质勘察工作中,蚀变异常提取方法主要以比值法为主。而在实际应用中,主成分分析方法在多光谱蚀变异常提取的效果比较好,且该方法对 ASTER 数据大气校正质量要求不高(或者不用做大气校正直接应用就可取得比较好的效果),可以作为异常提取的主要方法。本文拟从蚀变矿物光谱的分析上,以主成分分析等方法提取德兴斑岩铜矿的遥感蚀变分带信息。

1 矿区地质特征

德兴斑岩铜矿地处环太平洋金属成矿带的外带,位于中国江西省德兴县境内,区域构造上位于扬子地块与华夏地块构造缝合带的碰撞拼接部位扬子

地块一侧(Zhou et al., 1993; Li et al., 1997; 2002),是钦杭成矿带中重要矿床之一(毛景文等,2010; 2011)。矿田内主要分布九岭群九都组地层,上段以千枚岩和凝灰质千枚岩为主,夹变质沉凝灰岩、粉砂质千枚岩、变质粉砂岩和凝灰质粉砂岩;下段以变质沉凝灰岩为主,夹凝灰质千枚岩、千枚岩、砂质千枚岩、变质凝灰质粉砂岩、变质凝灰质细砂岩、变质粗砂岩和变质含砾砂岩,偶夹变质安山岩或变质英安岩。矿田主要构造特征为:异向褶皱横跨,不同断裂交叉,多组裂隙网织,多次复合叠加。九都组地层构成一个近 EW 向的泗洲庙向斜,是矿田主要的褶皱构造, NW 向的次级褶皱构造有西源岭背斜、官帽山向斜、富家坞鼻状构造、朱砂红鼻状构造。主要发育 EW 向断裂、NE 向断裂和 NNE 向断裂。矿区内岩浆活动频繁,与成矿关系最密切的是花岗斑岩,主要为 3 个沿 NWW 方向的花岗闪长斑岩。含矿岩浆在分异过程中使得侵入岩从中酸性向中性演化,成矿后期广泛分布石英闪长玢岩。矿田内主要的围岩蚀变有钾长石化、硅化、绢云母-水云母-伊利石化、绿泥石化、方解石化、白云石化和含铁白云石化(朱训等, 1983)。

德兴铜矿区域上受多次岩浆活动的影响,晋宁期以角闪辉长岩为代表,新元古代雪峰期岩浆活动以海相和陆相火山喷发、喷溢为主,加里东期岩浆活动仅有花岗(斑)岩和辉石闪长岩;华力西期岩浆活动可见零星出现的中酸性-基性小岩体;印支期发育花岗岩侵入,燕山期岩浆活动从超基性到酸性各类岩石都有发育,喜马拉雅期岩浆活动以玄武岩为主。德兴铜矿主要的含矿岩体为花岗闪长斑岩、石英二长闪长玢岩、石英闪长玢岩,还有部分花岗细晶岩脉。占主要部分的岩体为中性岩浆岩,酸性-基性岩浆也有出露(图 1)。

2 ASTER 数据的主要特征

先进的空间热辐射反射辐射计(ASTER)传感器是日本研制的搭载在美国 TERRA 卫星的一个多光谱传感器。ASTER 传感器分成 3 个独立的子系统,分别处于可见光/近红外、短波红外、热红外波段。ASTER 数据由 14 个波段组成,1、2、3 波段为可见光/近红外波段,3B 波段为后视成像波段(为卫星飞过几十秒后对先前垂直成像区域的重新成像),3N 波

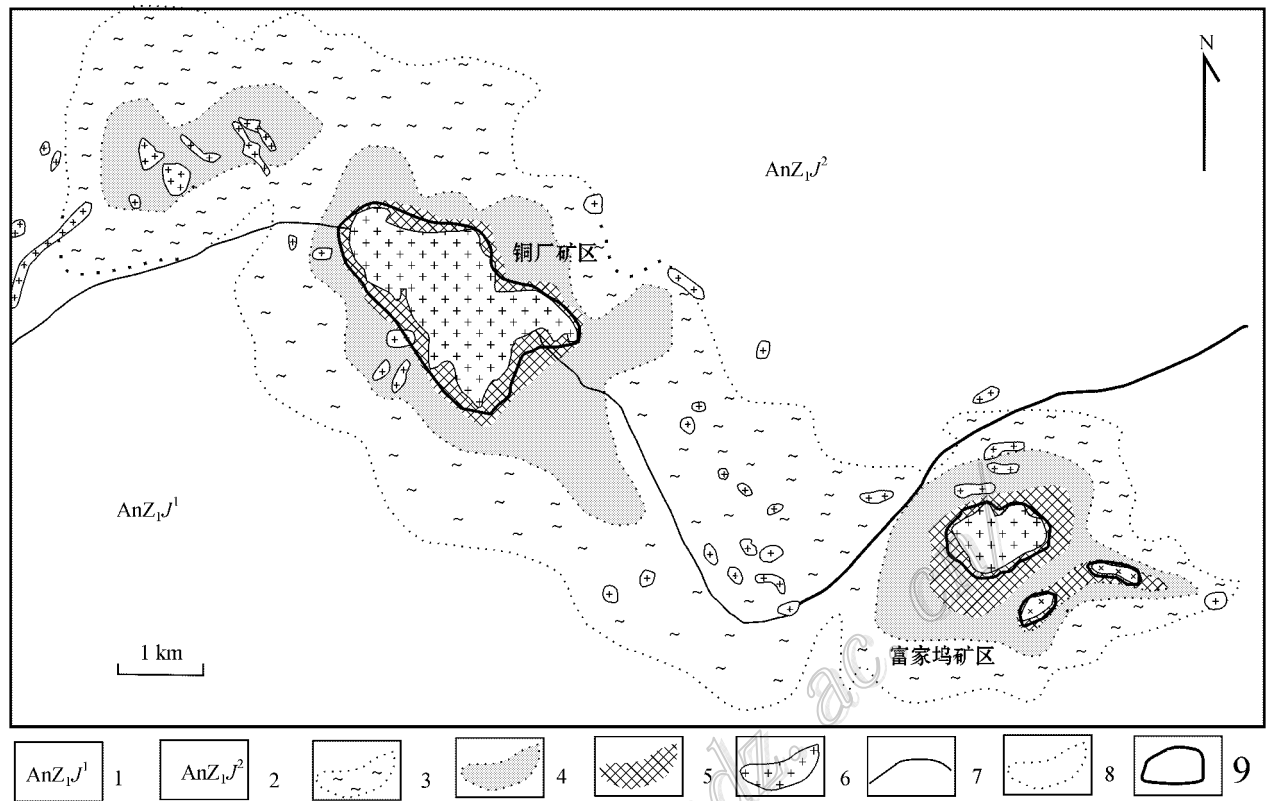


图 1 德兴铜矿区矿床地质简图(据朱训等,1983;潘小菲等,2009 修改)

1—九岭群九都组上段千枚岩等;2—九岭群九都组下段沉凝灰岩等;3—绿泥石(绿帘石)伊利石化带;4—绿泥石(绿帘石)水云母化带;
5—石英绢云母化带;6—花岗闪长斑岩;7—地层界线;8—蚀变界线;9—钾化带

Fig. 1 Geological sketch map of the Dexing copper deposit(modified after Zhu et al.,1983;Pan et al.,2009)

1—Phyllite et al. of upper member of Jiudou Formation, Jiuling Group;2—Meta tuffite et al. of lower member of Jiudou Formation, Jiuling Group;3—Chlorite (epidote) illite zone;4—Chlorite (epidote) hydromica zone;5—Quartz sericite zone;6—Granodiorite porphyry;
7—Stratigraphic boundary;8—Alteration boundary;9—Potassic zone

段与 3B 波段是一样的波段范围成像,区别在于 3N 是垂直成像而 3B 为后视成像,3N 波段与 3B 波段组成立体像,用于 ASTER 立体测图生成 DEM。制作调绘片采用 1、2、3 波段,空间分辨率为 15 m;4~9 波段为短波红外波段,空间分辨率为 30 m;10~14 波段为热红外波段,空间分辨率为 90 m(见表 1)。ASTER 传感器可获取从可见光到热红外谱段范围的地表影像数据,拥有光学传感器各波段较高的几何分辨率和辐射分辨率,且在单条轨上可以获取近红外立体影像数据。传感器有侧视功能,在 SWIR 和 TIR 谱段,侧视角精度可达±8.55°(垂直轨道方向),而在 VNIR 谱段,侧视角为±24°(垂直轨道方向)。ASTER 传感器每条轨道平均每 8 分钟采集一次数据,每天大约传回地面 780 景观测数据。

表 1 ASTER 传感器各系统特征					
Table 1 Characteristics of each ASTER sensor system					
子系统	谱段 序号	谱段宽度 /μm	辐射灵敏度	空间分 辨率/m	量化等级 /比特
VNIR	1	0.52-0.60	NEΔr≤0.5%	15	8
	2	0.63-0.69			
	3N	0.78-0.86			
	3B	0.78-0.86			
SWIR	4	1.600-1.700	NEΔr≤0.5%	30	8
	5	2.145-2.185	NEΔr≤1.3%		
	6	2.185-2.225	NEΔr≤1.3%		
	7	2.235-2.285	NEΔr≤1.3%		
	8	2.295-2.365	NEΔr≤1.0%		
	9	2.360-2.430	NEΔr≤1.3%		
TIR	10	8.125-8.475	NEΔr≤0.3%	90	12
	11	8.475-8.825			
	12	8.925-9.275			
	13	10.25-10.95			
	14	10.95-11.65			

3 电磁波与矿物岩石作用机理

物质与电磁波时时刻刻发生着作用,物质自身也在不断的发射电磁波。电磁波按波长可分为超长波、长波、中波、微波、无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线和 γ 射线等,波长如下: γ 射线: $10^{-10} \sim 10^{-14} \text{ m}$;X 射线: $2 \times 10^{-9} \sim 6 \times 10^{-12} \text{ m}$;紫外线: $100 \sim 400 \text{ nm}$;可见光: $400 \sim 750 \text{ nm}$;近红外: $750 \sim 3\,000 \text{ nm}$;中红外: $3\,000 \sim 8\,000 \text{ nm}$;热红外: $4\,000 \sim 50\,000 \text{ nm}$;微波: $0.3 \sim 10^{-3} \text{ m}$;无线电波: $N \times 10^6 \sim 0.3 \text{ m}$ 。物质与电磁波相互作用能够吸收和发射电磁波,这与电磁波的能量级别有关,详见表 2。

物质都是由原子或分子(离子、基团)构成的,电磁波照射到原子(或分子、离子、基团)上,其原子(或分子、离子、基团)从低能级(E_1)状态跃迁到高能级(E_2),电子向上一级轨道移动,造成了能量(λH)的吸收,能量差为 $\Delta E = E_2 - E_1 = hc/\lambda H$ 。根据量子物理理论(王正行,2008),如果一个分子有 N 个原子组成,就有 $3N - 6$ 个正常的振动方式,通过基频可以组成合频和倍频。如水(H_2O)有 3 个基频振动:O-H 对称伸缩振动 $2.738 \mu\text{m}$,H-O-H 弯曲振动 $6.27 \mu\text{m}$,O-H 非对称伸缩振动 $2.663 \mu\text{m}$ 。倍频 $1/(2 \times (1/2.738)) = 1.369 \mu\text{m}$,合频 $1/(1/2.738 + 1/6.27) = 1.906 \mu\text{m}$ 。 CO_3^{2-} 有 3 个基频 $9.407 \mu\text{m}$ (对称伸缩振动), $11.4 \mu\text{m}$ (平面外弯曲振动), $7.067 \mu\text{m}$ (非对称伸缩振动)和 $14.7 \mu\text{m}$ (平面内弯曲振动),可求出合频 $1/(1/9.407 + 2/7.067) = 2.57 \mu\text{m}$,倍频 $1/(3/7.067) = 2.356 \mu\text{m}$ 。含羟基矿物弯曲振动出现在 $10 \mu\text{m}$ 左右,对于硅酸盐叠加在 Si-O 强其频上,对于

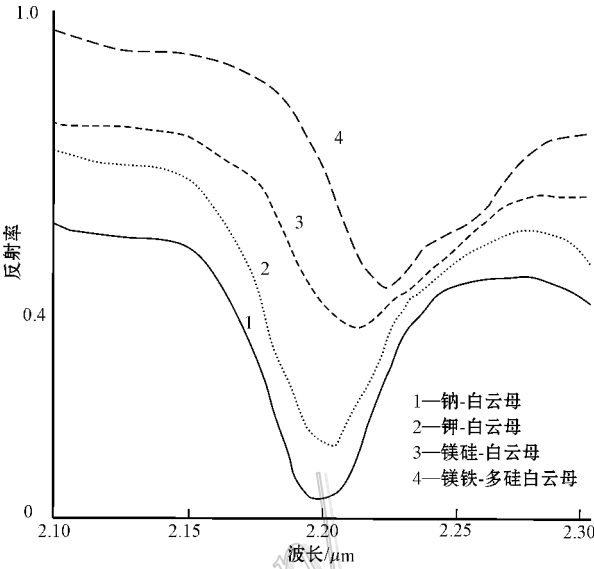


图 2 白云母基性及酸性成分与主要吸收峰的偏移

Fig. 2 Main absorption peak offset of muscovite spectrum with its basic and acid composition

羟基矿物,OH 弯曲振动加上 OH 的伸缩振动,使得许多矿物诊断吸收出现在 $2.2 \sim 2.3 \mu\text{m}$ 之间。

矿物(或岩石)因分子振动和电子跃迁能够对电磁波产生吸收或发射。矿物(或岩石)中的阳离子因电子跃迁在可见光或近红外区域产生特征谱带,而阴离子因分子振动在短波红外区域产生特征吸收谱带。

相同的阴离子在不同的阳离子作用下,随着矿物(或岩石)成分从酸性向基性过渡,主要吸收峰在短波红外区域向波长较长的区域偏移。如钠-白云母、钾-白云母、镁硅白云母、镁铁-多硅白云母,吸收峰依次在 $2\,115 \text{ nm}$ 、 $2\,205 \text{ nm}$ 、 $2\,220 \text{ nm}$ 和 $2\,230 \text{ nm}$ (图 2)。

岩石(或矿物)发射率的低发射谷在热红外低发射率随着基性程度的增高向波长较长的方向偏移,如石英、钠长石、白云母、辉石、角闪石和橄榄石等矿物,从石英到橄榄石,主要吸收谷向长波方向偏移(图 3)。酸性岩石,如英安岩、花岗岩;中性岩石,如石英花岗岩、霞石花岗岩、紫苏辉石安山岩、安山质斑岩、石英闪长岩;基性岩石,如辉绿岩、斜长玄武岩;超基性岩石,如蛇纹岩、陨石、纯橄岩。低发射率谷在热红外区域从波长较短区域向波长较长区域偏移(图 4)。

总之,分子振动能量对电磁波所表现的吸收或发射与矿物岩石的物质成分有关,物质成分越基性,

表 2 物质内部状态与对应电磁波及能量关系

Table 2 Relationship between internal state of materials and their electromagnetic waves

物质内部状态	能量/eV	对应电磁波
原子核内相互作用	$10^7 \sim 10^5$	伽马射线
内层电子电离作用	$10^4 \sim 10^2$	X 射线
外层电子电离作用	$10^2 \sim 4$	紫外线
外层电子激发	$4 \sim 1$	可见光
分子振动、晶格振动	$1 \sim 10^{-5}$	红外线
分子旋转及反转	$10^{-3} \sim 10^{-5}$	微波
电子自旋及磁场相互作用	$10^{-3} \sim 10^{-5}$	微波
电磁场相互作用	10^{-7}	米波

注: $1 \text{ eV} = 1.602189 \times 10^{-19} \text{ J}$; 1 eV 光波长 $= 1.23985 \mu\text{m}$ 。

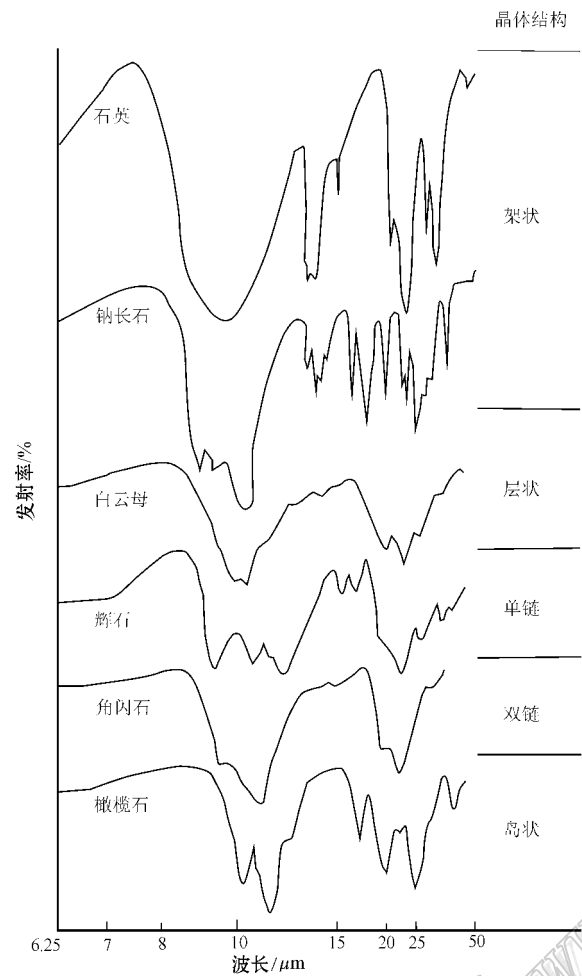


图 3 矿物与光谱特征吸收关系
(据 Kahle et al. ,1997 修改)

Fig. 3 Relationship between minerals and their spectral characteristics(modified after Kahle et al. ,1997)

主吸收特征越往波长较长的方向偏移。

当矿物偏酸性时,由于在低温下形成,稳定性较好,分子间键能较大;反之,当矿物偏基性时,在温度较高条件下形成,分子间键能较小。当形成蚀变矿物时,偏酸性物质组合的羟基键键能大于偏基性物质,从而激发所需要的能量较大。根据电磁波能量原理,能量与频率成正比,而与波长呈反比,因此,酸性物质能够吸收波长较短的电磁波,而基性物质能够吸收波长较长的电磁波。

4 蚀变矿物波谱特征及分析结果

德兴斑岩铜矿主要的岩体为中性岩浆岩,主要的围岩蚀变有钾长石化、硅化、绢云母-水云母-伊利石化、绿泥石化、方解石化、白云石化和含铁白云石

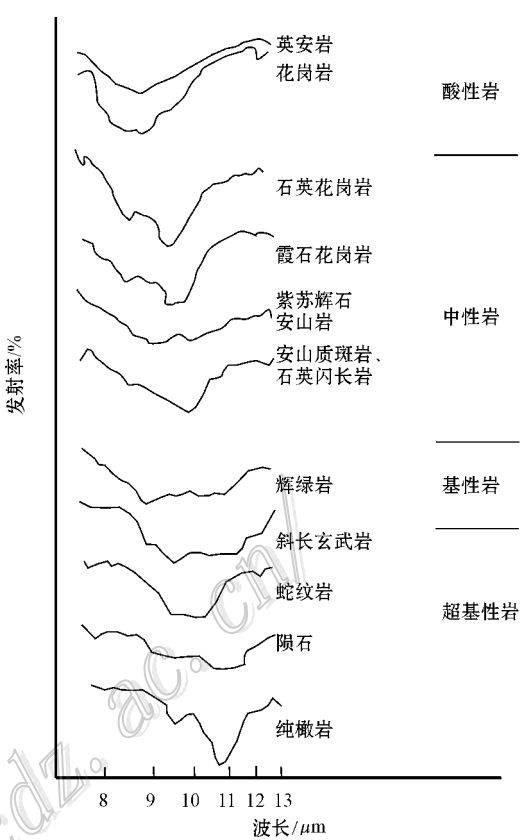


图 4 岩石酸-基性及低发射率谷的偏移
(据 Vickers et al. ,1967 修改)

Fig. 4 Low emissivity peak offset of rock spectra with their basic and acid composition(modified after Vickers et al. ,1967)

化。蚀变矿物白云母、伊利石、绿泥石、方解石和白云石各波段特征如下:白云母主要的吸收谷在 2 205 nm,在 2 345 nm 和 2 440 nm 处有 2 个较小的吸收谷;伊利石主要的吸收谷在 2 215 nm,在 2 345 nm 和 2 418 nm 处有 2 个小的吸收谷;绿泥石主要的吸收谷在 2 315 nm,在 2 466 nm 处有 1 个小的吸收谷;方解石在 2 345 nm 和 2 528 nm 处有 2 个较大的吸收谷;白云石在 2 315 nm 和 2 496 nm 处有 2 个较大的吸收谷(图 5a)。由于 ASTER 数据光谱分辨率较低,根据其数据的光谱响应函数重采样后,白云母和伊利石在 ASTER 的第 6 波段有特征吸收,绿泥石和方解石在 ASTER 的第 8 波段有吸收,白云石在 ASTER 的第 7 和第 8 波段都有低值(图 5b)。特征见表 3。

德兴斑岩铜矿主要的岩体为花岗闪长斑岩、石英二长闪长玢岩、石英闪长玢岩,围绕花岗闪长斑岩和围岩发育不同程度的蚀变作用,从内向外依次为:

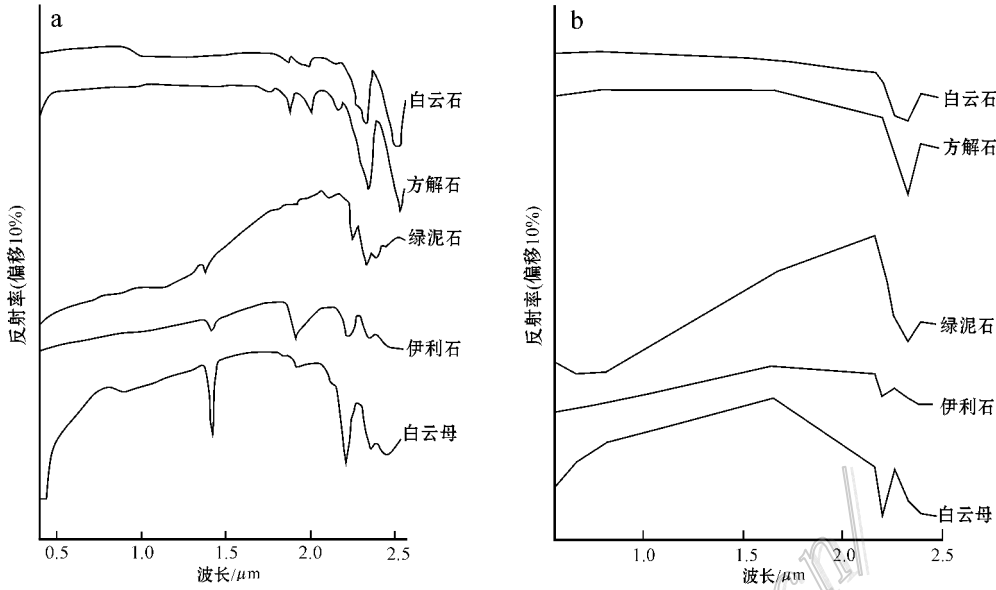


图 5 德兴斑岩铜矿蚀变矿物波谱特征

a. 蚀变矿物的连续光谱 b. 蚀变矿物连续光谱对应 ASTER 各波段特征

Fig. 5 Alteration mineral spectral characteristics of the Dexing porphyry copper deposit

a. Continuous spectrum of the altered minerals ; b. ASTER each band characteristics corresponding to continuous spectra of altered minerals

表 3 德兴斑岩铜矿蚀变矿物波谱特征表
Table 3 Alteration mineral spectral characteristics
of the Dexing porphyry copper deposit

序号	矿物名称	波谱特征吸收谷及强度/nm	ASTER 对应波段
1	白云母	220(强) 234(弱) 244(弱)	6
2	伊利石	221(强) 234(弱) 241(弱)	6
3	绿泥石	231(强) 246(弱)	8
4	方解石	234(强) 252(强)	8
5	白云石	231(强) 249(强)	7, 8

ASTER 数据图像采样光谱特征。

5 异常提取及分析

因时间和仪器的限制,德兴铜矿没有做野外工作,也没有岩石样品可进行分析。因此,建立遥感蚀变模型主要根据矿床地质特征,而且,德兴处于植被覆盖区,蚀变分带模型建立工作难度较高。

矿区岩浆岩在分异过程中使得侵入岩从中酸性向中性演化,中性岩浆占主要部分。围岩蚀变总体上表现为,以岩体接触带为中心向内外两侧环带分布,蚀变类型组合具对称性,主要蚀变有钾长石化、硅化、绢云母-水云母-伊利石化、绿泥石化、方解石化、白云石化和含铁白云石化等。近岩体接触带内为硅化-绢云母化蚀变带,为铜矿化覆盖;远离接触带,内带为伊绢石化-水绢石化,以黄铁矿、黄铜矿为主,浸染状矿化,外带主要为(硅化)(水绢云母化)-绢云母化带,浸染状-细脉状、细脉状黄铁矿、黄铜矿化构成了铜矿体;再向外,黄铁矿发育、黄铜矿细脉零星分布,伊绢云母-绿泥石化带蚀变。

根据德兴斑岩铜矿的围岩蚀变特征,采取主成分分析、比值法、斜率、相关吸收、多项式等多种方法进行信息提取(图 7),同时,结合热红外和可见光-短波红外 2 种遥感数据进行蚀变分带的填图。根据各

① 以石英绢云母化为主的强淋滤蚀变带;② 绿泥石-水云母化中等程度蚀变带;③ 绿泥石-伊利石-钾长石化弱蚀变带。这些蚀变岩石中,发生中等或强烈的花岗闪长斑岩蚀变,原岩中大部分铁镁质矿物和长石类矿物遭受分解。花岗闪长斑岩中的绢云母、水云母和伊利石均由长石类矿物蚀变而成,强蚀变岩石中的长石已经全部发生蚀变,大部分蚀变为绢云母。绿泥石化发生在中等蚀变和弱蚀变岩石中。由于岩体主要为中性岩,长石类矿物蚀变主要为绢云母,绢云母最强的吸收波段为 ASTER 遥感数据的第 6 波段,根据该特征并利用主成分分析提取蚀变遥感异常,主要异常为第 6 波段的异常(图 6)。利用主成分分析(PCA)提取的 ASTER 波段 1345 异常为图 6a,图 6b 为 ASTER 波段 1346 异常,图 6c 为 ASTER 波段 1347 异常,图 6d 为 ASTER 波段 1348 异常,图 6e 为 ASTER 波段 1349 异常,图 6f 为

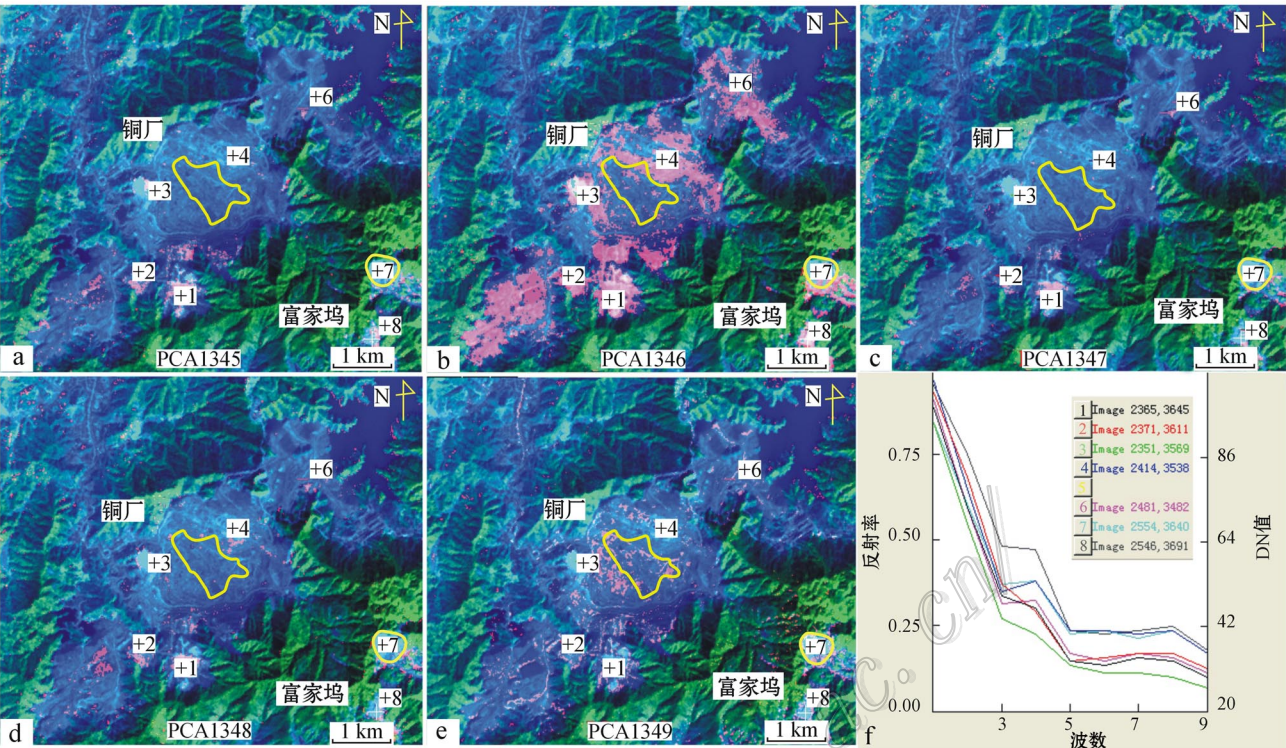


图 6 德兴斑岩铜矿 PCA 各类蚀变异常对比图

a. PCA1345 提取异常; b. PCA1346 提取异常; c. PCA1347 提取异常; d. PCA1348 提取异常; e. PCA1349 提取异常; f. 图像采样点光谱; 黄线为地表岩体边界

Fig. 6 Comparative diagram of PCA various types of altered anomalies in the Dexing porphyry copper deposit
a. Anomalies extracted by PCA1345; b. Anomalies extracted by PCA1346; c. Anomalies extracted by PCA1347; d. Anomalies extracted by PCA1348; e. Anomalies extracted by PCA1349; f. Image sampling point spectrum; Yellow lines—Rocks boundaries

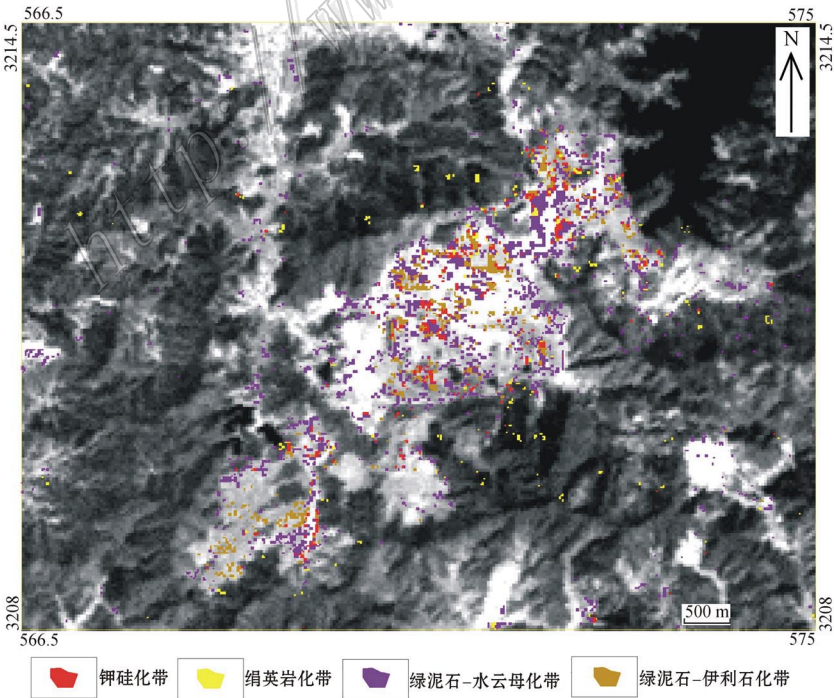


图 7 德兴斑岩铜矿遥感蚀变分带信息

Fig. 7 Remote sensing alteration zoning information of the Dexing porphyry copper deposit

表 4 德兴斑岩铜矿各(蚀变)矿物信息提取算法及阈值表

Table 4 Extraction algorithm and threshold table of information for various(alteration) mineral anomalies of the Dexing porphyry copper deposit

方法矿物	比值法	斜率	相关吸收	主成分分析 第四主分量
石英	$B5/B6 > 1.1$ $B12/B14 < -0.35$	$(B4 - B6) / B4 > 0.75$ $(B12 - B14) / B12 < 2.5$	$(B4 - B6) \times (B4 - B5) > 1.03$ $(B12 - B11) \times (B12 - B10) < 1.2$	PCA1346 PC4>0
绿泥石	$1.6 < B5/B8 < 1.8$ $B12/B10 > 0.8$	$(B5 - B8) / B5 > 0.37$	$(B4 - B9) \times (B4 - B8) > 1.04$	PCA1348 PC4>0
钾长石	$B7/B6 > 1.0$ $B11/B14 > -0.75$	$(B4 - B6) / B4 > 0.75$	$(B4 - B6) \times (B4 - B7) > 0.97$	PCA1346 PC4>0
白云母	$B4/B6 > 3.45$ $B12/B10 < 0.8$	$(B4 - B6) / B4 > 0.75$	$(B4 - B6) \times (B4 - B7) > 0.95$	PCA1346 PC4>0
方解石	$(B6 + B7) \times (2 \times B8) > 1.4$	$(B4 - B8) / B4 > 0.75$	$(B4 - B8) \times (B4 - B6) > 1.19$	PCA1348 PC4>0
白云石	$B13/B14 > 0.75$	$(B4 - B8) / B4 > 0.75$	$(B13 - B10) \times (B13 - B11) < 1.1$	PCA1348 PC4>0
伊利石	$(B7 + B5) \times (B6 + B9) > 1.4$ $B12/B10 > 0.75$	$(B4 - B6) / B4 > 0.75$ $(B4 - B9) \times (B4 - B6) > 1.15$	$(B12 - B10) \times (B12 - B11) > 0$	PCA1349 PC4>0

蚀变矿物的波谱特征,总结了各个蚀变矿物信息提取的主要方法(表 4)。

根据德兴斑岩铜矿地质特征和围岩蚀变特征,选用石英、绿泥石、钾长石、白云母、方解石、白云石、伊利石作为蚀变分带的主要矿物特征。主要的(蚀变)矿物根据其波谱特征和遥感图像采样波谱特征,石英采用比值法 $B5/B6 > 1.1$, $B12/B14 < -0.35$,斜率 $(B4 - B6) / B4 > 0.75$ ($B12 - B14$)/ $B12 < 2.5$,相关吸收 $(B4 - B6) \times (B4 - B5) > 1.03$ ($B12 - B11$)/ $(B12 - B10) < 1.2$,主成分分析 PCA1346 第四主分量 $PC4 > 0$ 提取;绿泥石采用比值法 $1.6 < B5/B8 < 1.8$, $B12/B10 > 0.8$,斜率 $(B5 - B8) / B5 > 0.37$,相关吸收 $(B4 - B9) \times (B4 - B8) > 1.04$,主成分分析 PCA1348 第四主分量 $PC4 > 0$ 提取;钾长石采用比值法 $B7/B6 > 1.0$, $B11/B14 > -0.75$,斜率 $(B4 - B6) / B4 > 0.75$,相关吸收 $(B4 - B6) \times (B4 - B7) > 0.97$,主成分分析 PCA1346 第四主分量 $PC4 > 0$ 提取;白云母采用比值法 $B4/B6 > 3.45$, $B12/B10 < 0.8$,斜率 $(B4 - B6) / B4 > 0.75$,相关吸收 $(B4 - B6) \times (B4 - B7) > 0.95$,主成分分析 PCA1346 第四主分量 $PC4 > 0$ 提取;方解石、白云石采用比值法 $(B6 + B7) \times (2 \times B8) > 1.4$, $B13/B14 > 0.75$,斜率 $(B4 - B8) / B4 > 0.75$,相关吸收 $(B4 - B8) \times (B4 - B6) > 1.19$ ($B13 - B10$)/ $(B13 - B11) < 1.1$,主成分分析 PCA1348 第四主分量 $PC4 > 0$ 提取;伊利石采用比值法 $(B7 + B5) \times (B6 + B9) > 1.4$, $B12/B10 > 0.75$,斜率 $(B4 - B6) / B4 > 0.75$,相关吸收 $(B4 - B9) \times (B4 - B6) > 1.15$ ($B12 - B10$)/ $(B12 - B11) > 0$ 主成分分析

PCA1349 第四主分量 $PC4 > 0$ 提取。这 4 种方法提取的异常信息在空间分布上具有一致性,主成分分析效果最好,相关吸收法效果次之,比值法效果最差,结合起来可以较之单一方法精确圈定蚀变矿物的分布。

蚀变分带信息是这些信息的叠加处理,根据前文分析,钾硅化带主要矿物为石英(硅化)和白云母;绢英岩化带主要(蚀变)矿物为石英和白云母;绿泥石-水云母化带主要矿物为绿泥石和白云母;绿泥石-伊利石化带主要(蚀变)矿物为绿泥石和伊利石。信息提取后的蚀变分带遥感模型见图 7 和图 8,显示出各个遥感蚀变分带的分布情况。

6 讨论与结论

从提取结果来看,利用 ASTER 提取的蚀变分带信息钾硅化带、绢英岩化带与岩体关系密切,基本上是在岩体的中心和岩体与外围接触区,主要的外围蚀变带为绿泥石-水云母化带,其外为绿泥石-伊利石化带。绢英岩化带和钾硅化带为主要赋矿部位(图 9)。

根据遥感提取的蚀变分带信息,结合德兴斑岩铜矿的矿床地质特征,做出德兴斑岩的遥感蚀变分带模型。首先,地下的岩浆在上升浅成侵位过程中,伴随着岩浆热液涌入,在岩体和靠近岩体的围岩发生了钾化、绢英岩化的蚀变,形成以硅化和钾长石、绢云母为主的钾硅化带和绢英岩化带,在绢英岩化带外围是绿泥石-水云母的蚀变分带和绿泥石-伊利石的蚀变分带,主要蚀变矿物为绿泥石、水云母和伊

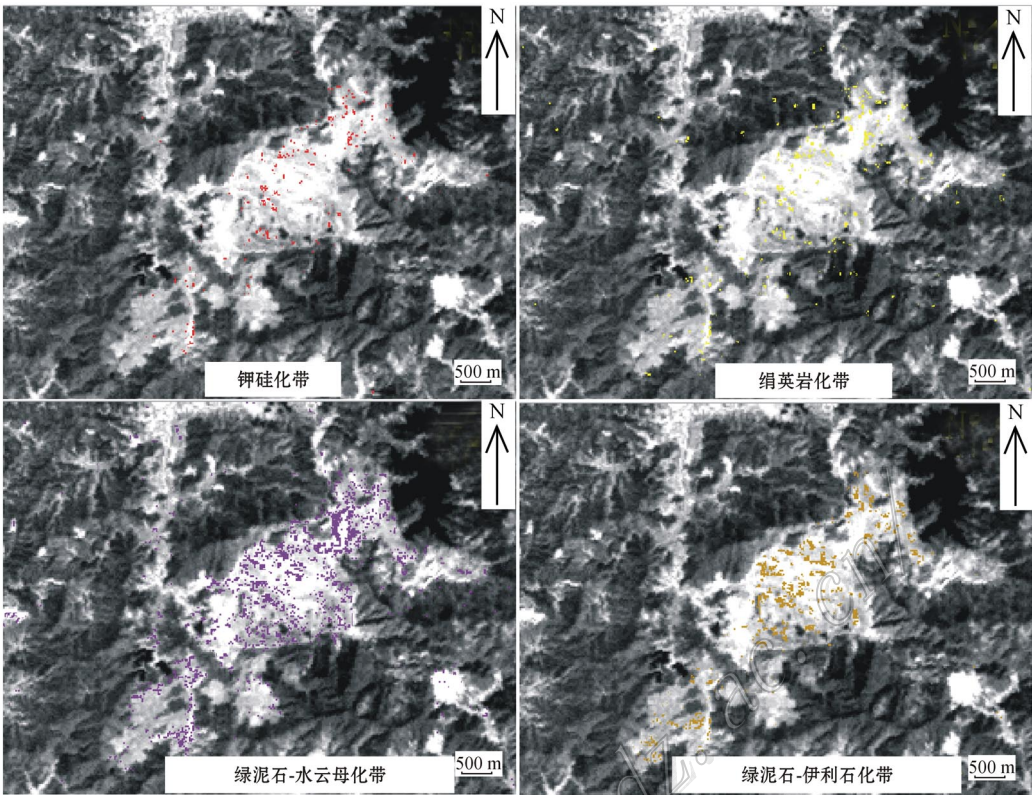


图 8 各个遥感蚀变分带信息分布

Fig. 8 Information distribution of various remote sensing alteration zones

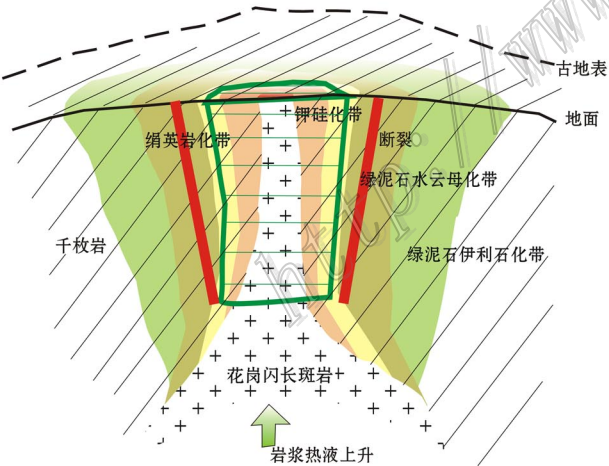


图 9 德兴斑岩铜矿遥感蚀变分带模型

Fig. 9 Remote sensing alteration zoning model of the Dexing porphyry copper deposit

利石, 还有部分方解石、白云石等, 围岩凝灰岩和千枚岩也为热液提供了部分元素来源。

提取的蚀变分带信息是基于蚀变矿物的光谱分析, 结果显示, 各个蚀变分带的信息比较明显, 覆盖

范围较小, 这可能与新鲜的采矿坑有关系, 而且由于处于植被覆盖, 植被对蚀变分带信息的影响作用较大。因此, 需要野外地质工作与植被覆盖区植被影响抑制方法相结合, 才能取得较好的结果。

参考文献/References

代晶晶, 曲晓明, 辛洪波. 2010. 基于 ASTER 遥感数据的西藏多龙矿集区示矿信息的提取[J]. 地质通报, 29(5): 752-759.

耿新霞, 杨建民, 张玉君, 姚佛军. 2008. ASTER 数据在浅覆盖区蚀变遥感异常信息提取中的应用[J]. 地质论评, 54(2): 184-192.

吕凤军, 郝跃生, 王 娟, 王会平, 石 静, 李 斌. 2008. 多光谱蚀变遥感异常提取方法研究[J]. 遥感信息, 4: 98-108.

吕凤军, 郝跃生, 石 静, 王 娟. 2009. ASTER 遥感数据蚀变异常提取研究[J]. 地球学报, 30(2): 271-276.

毛景文, 张建东, 郭春丽. 2010. 斑岩铜矿-浅成低温热液银铅锌-远接触带热液金矿床模型: 一个新的矿床模型—以德兴地区为例[J]. 地球科学与环境学报, 32(1): 1-14.

毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 郭春丽. 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. 地质学报, 85(5): 636-658.

潘小菲, 宋玉财, 王淑贤, 李振清, 杨志明, 侯增谦. 2009. 德兴铜厂斑岩型铜金矿热液演化过程[J]. 地质学报, 83(12): 1929-1950.

- 王润生,甘甫平,闫柏琨,杨苏明,王青华. 2010. 高光谱矿物填图技术与应用研究[J]. 国土资源遥感, 1:1-13.
- 王正行. 2008. 量子力学原理[M]. 北京: 北京大学出版社.
- 徐冠华,田国良,王超,牛铮,郝国威,黄波,刘震. 1996. 遥感信息科学的进展和展望[J]. 地理学报, 51(5):385-397.
- 张玉君,曾朝明,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, 2:44-50.
- 朱训,黄崇珂,芮宗瑶,周耀华,朱贤甲,胡淙声,梅占魁. 1983. 德兴斑岩铜矿[M]. 北京: 地质出版社.
- Abrams M J, Ashley R P, Brown L C, Rowan L C, Goetz A F H and Kahle A B. 1977. Mapping of hydrothermal alteration in the cuprite mining district, Nevada, using aircraft scanning images for the spectral region 0.46 to 2.36 μm [J]. *Geology*, 5:713-718.
- Ducart D F, Crósta A P and Filho S C R. 2006. Alteration mineralogy at the Cerro La Mina epithermal prospect, Patagonia, Argentina: Field mapping, short-wave infrared spectroscopy, and ASTER images[J]. *Econ. Geol.*, 101:981-996.
- Hunt G R. 1977. Spectral signature of particular minerals in the visible and infrared[J]. *Geophysics*, 42:501-513.
- Hunt G R and Ashley R P. 1979. Spectra of altered rocks in the visible and near-infrared[J]. *Econ. Geol.*, 74:1613-1629.
- Kahle A B, Palluconi F D and Christensen P R. 1997. Thermal emission spectroscopy: Application to the Earth and Mars, in remote geochemical analysis: Elemental and mineralogical composition[M]. New York: Cambridge University Press. 99-120.
- Kratt C, Calvinb W M, and Coolbaughb M F. 2010. Mineral mapping in the pyramid lake basin: Hydrothermal alteration, chemical precipitates and geothermal energy potential[J]. *Remote Sensing of Environment*, 114(10):2297-2304.
- Li X H, Zhao J X, McCulloch M T, Zhou G Q and Xing F M. 1997. Geochemical and Sm-Nd isotopic study of neoproterozoic ophiolites from southeastern China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Precambrian Research*, 81(1/2):129-144.
- Li Z X, Li X H, Zhou H W and Peter D K. 2002. Grenvillian continental collision in south China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia[J]. *Geology*, 30(2):163-166.
- Mars J C and Rowan L C. 2006. Regional mapping of phyllic- and argillic-altered rocks in the zagros magmatic arc, Iran, using advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms[J]. *Geosphere*, 2(3):161-186.
- Mohammadzadeh A, Tavakoli A and ValadanZoej M. 2006. Road extraction based on fuzzy logic and mathematical morphology from pan-sharpened ikonos images[J]. *The Photogrammetric Record*, 21(113):44-60.
- Rajendran S, Thirunavukkarasu A, Balamurugan G and Shankar K. 2011. Discrimination of iron ore deposits of granulite terrain of southern Peninsular India using ASTER data[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1):99-106.
- Safwat G, Abduwasit G and Timothy K. 2010. Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data[J]. *Ore Geology Reviews*, 38:59-69.
- Vickers R S and Lyon R J. 1967. Infrared Sensing from Spacecraft: A geologic interpretation, in thermophysics of spacecraft and planetary bodies[M]. New York: Academic Press. 585-607.
- Zhang X F, Pazner M and Duke N. 2007. Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California) [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62:271-282.
- Zhou X M and Zhu Y H. 1993. Late proterozoic collisional orogen and geosuture in southeastern China: Petrological evidence[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 12(3):239-251.