

doi:10.3799/dqkx.2015.161

秘鲁南部斑岩铜矿典型蚀变带矿物信息 提取及找矿远景区圈定

吴小娟¹, 肖晨超², 杨日红², 李志忠³, 崔振营⁴

1. 武汉大学遥感信息工程学院, 湖北武汉 430027

2. 中国地质调查局国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083

3. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100029

4. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083

摘要: 不同斑岩铜矿的构造地质、成矿时代和控矿因素具有其特殊性, 所以需要针对具体的矿区开展地质调查以获取矿区标志性蚀变矿物组合信息, 从而利用遥感技术手段提取矿区蚀变信息, 确定找矿远景区. 通过综合分析秘鲁南部斑岩铜矿地质特征、控矿因素, 确立了以泥化—绢英岩化和青磐岩化组合蚀变矿物带为遥感找矿指示标志, 并以 ASTER 数据为遥感数据源开展蚀变矿物信息提取技术研究, 结合已有矿区地质资料、高光谱影像和实地勘查结果, 验证了典型蚀变带矿物信息提取结果的可靠性, 另圈定了 2 处找矿远景区. 在综合分析、梳理已有研究基础上, 构建了多光谱遥感找矿模式, 并在智利、阿根廷等其他多个斑岩铜矿区取得了较好的应用效果.

关键词: 秘鲁南部; 斑岩铜矿; 典型蚀变带; 矿物信息提取; 找矿远景区圈定; 矿床地质.

中图分类号: P61

文章编号: 1000-2383(2015)11-1802-08

收稿日期: 2015-04-07

Information Extraction of Typical Alteration Zone of Porphyry Copper Deposit and Delineation of Prospective Areas in Southern Peru

Wu Xiaojuan¹, Xiao Chenchao², Yang Rihong², Li Zhizhong³, Cui Zhenying⁴

1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430027, China

2. China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Land and Resources, China Geological Survey, Beijing 100083, China

3. Oil and Gas Resources Survey Center, China Geological Survey, Beijing 100029, China

4. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: Every porphyry copper deposit has different geological structure, metallogenic epoch and ore controlling factors. Therefore, it is necessary to carry out geological investigation to obtain the information of the iconic alteration mineral assemblage to extract the alteration information by using remote sensing technology and determine prospective areas. A comprehensive analysis of geological characteristics and ore controlling factors of porphyry copper deposit in southern Peru is carried out in this study. The combined information of argillic- and phyllic-alteration and propylitic alteration is established as the ore prospecting indicator and the technology of alteration information extraction is explored with ASTER data. Combined with existing mining geological data, hyperspectral image and field survey results, alteration extraction results are confirmed as reliable and effective and the other two prospective areas are delineated. The multi-spectral remote sensing prospecting model is constructed and its application proves successful in other porphyry copper districts such as Chile, Argentina.

Key words: southern Peru; porphyry copper deposit; typical alteration zone; mineral information extraction; delineation of prospective area; ore geology.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(Nos. 2008AA121100, 2012AA12A308); 国家自然科学基金项目(No. 41402293).

作者简介: 吴小娟(1986—), 女, 博士研究生, 主要从事遥感数据地质应用方面的研究工作. E-mail: wuxiaojane@163.com

引用格式: 吴小娟, 肖晨超, 杨日红, 等, 2015. 秘鲁南部斑岩铜矿典型蚀变带矿物信息提取及找矿远景区圈定. 地球科学——中国地质大学学报, 40(11): 1802-1809.

“斑岩铜矿”最早源于 20 世纪初美国西南部的斑岩铜矿带,其原意是指产于强烈绢云母和石英化长英斑状侵入岩中的细脉浸染型铜矿床,目前统指规模巨大(几百万吨)、品位相对较低(一般小于 1%)的与侵入岩有关的网脉铜矿床(Misra, 2000). 据统计,斑岩铜矿床为全球提供了约 3/4 的铜、1/2 的钼、1 的锌、铅等金属(John *et al.*, 2010; Sillitoe, 2010). 斑岩铜矿在成矿过程中产生的矿化蚀变在水平和垂直方向均存在分带现象,主要有钾化蚀变带、泥岩化蚀变带、绢英岩化蚀变带和青磐岩化蚀变带(芮宗瑶等, 2006; 施俊法等, 2010). 基于斑岩铜矿蚀变特征,国内外学者发展了多种遥感蚀变矿物信息方法,提取出与成矿作用密切相关的羟基、碳酸盐、铁染等蚀变信息异常(Crosta *et al.*, 2003; John and Rowan, 2006; Rowan *et al.*, 2006; 张玉君等, 2007; 郭娜等, 2012; 李忠烈等, 2012; Pour and Hashim, 2012; 王岩等, 2013; 杨日红等, 2013), 为斑岩铜矿找矿工作提供了示矿信息.

然而,不同斑岩铜矿的构造地质、成矿时代和控矿因素具有其特殊性(赖建清等, 2015), 所以需要针对具体的矿区开展地质调查以获取矿区标志性蚀变矿物组合信息,从而通过遥感技术手段提取矿区蚀变信息,圈定找矿靶区. 本文以富含斑岩铜矿的秘鲁南部为研究区,在充分收集、整理研究区地质资料和文献的基础上,系统地研究了该区斑岩铜矿的成矿地质特征,着重分析了斑岩铜矿典型蚀变矿物光谱特征,确立了研究区斑岩铜矿典型蚀变带矿物组合信息标志:泥化—绢英岩化带和青磐岩化带,并以 ASTER 卫星数据为遥感数据源,通过数据预处理、主成分变换、数据拉伸、阈值切割及滤波优化等处理提取了研究区蚀变矿物信息,制作了研究区蚀变矿物信息分布图,最后结合已有矿区地质资料和实地野外调查结果,验证了提取结果的可靠性,并圈定了 2 处找矿靶区.

1 研究区成矿地质特征

秘鲁所处的安第斯成矿带,位于与西部太平洋深海槽(俯冲带)平行的 NW 向和近 SN 向的主干断裂边缘,是全球最重要的斑岩铜矿成矿带,其境内分布多个特大型斑岩铜矿:里奥布兰科(Rio Blanco)、拉格兰贾(La Granja)、托罗莫乔(Toromocho)、塞罗维德/塞罗尼罗(Cerro Verde/Cerro Negro)、夸霍内(Cuajone)、奎拉维科(Quellaveco)和托克帕拉

(Toquepala)(图 1). 矿区内赋矿岩体在水平方向上具有典型的蚀变分带,从内向外依次为钾化蚀变带、泥化—绢英岩化带和青磐岩化带,蚀变带面积小者数平方公里,大者达十几平方公里(朱关祥, 1980; Schwartz, 1981, 刘伟等, 2010). 钾化蚀变带常位于含矿斑岩的中心,包含的蚀变矿物主要有钾长石、黑云母、绢云母及浸染状黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿、辉铜矿等. 然而钾化蚀变带含矿少或者含矿较富集,但规模不大. 泥化—绢英岩化蚀变带主要位于斑岩铜矿主矿体,由石英、绢云母、高岭土及少量绿泥石组成,包含的金属矿物有黄铜矿、黄铁矿、辉铜矿及少量辉钼矿、方铅矿、闪锌矿等,是斑岩铜矿的重要找矿标志. 青磐岩化蚀变带主要分布于斑岩铜矿最外围,范围较大,主要蚀变矿物有绿泥石、绿帘石、方解石等,还有少量绢云母、石英、硬石膏等,包含的金属矿物主要是黄铁矿. 除上述典型的蚀变分带外,研究区还有部分次生黑云母化及硅化带发育. 通过分析成矿地质特征,笔者认为适宜将泥化—绢英岩化蚀变和青磐岩化蚀变的矿物组合作为研究区找矿指示标志.

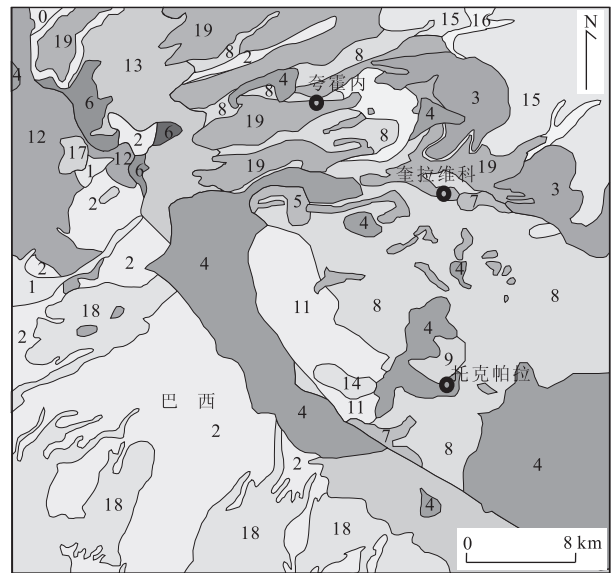


图 1 研究区位置及 1 : 10 万地质图

Fig. 1 Study area location and 1 : 100 000 geological sketch
 1. Q-fl. 冲积和崩积; 2. Q-al. 河流沉积物; 3. Qp-m. 冰碛沉积; 4. KTi-di/gd. 花岗岩闪长岩; 5. KTi-gr. 花岗岩; 6. KTi-in. Inogoya 地层; 7. KTi-qp. Quellaveco 斑岩; 8. KTi-qa. Alta 系列; 9. KTi-qst. Toquepala 系列; 10. KTi-qt. Tinajones 流纹岩; 11. KTi-qy. Yarito 流纹岩; 12. KTi-to. Toquepala 地层; 13. KTi-vpa. Paralaque 火山岩; 14. Ti-da/mz. 英安岩和二长岩; 15. TQ-vba. Barroso 火山岩; 16. Ts-ca. Capillune 地层; 17. Ts-moi. 下 Moquegua 地层; 18. Ts-mos. 上 Moquegua 地层; 19. Ts-vhu. Huailillas 火山岩

2 斑岩铜矿蚀变矿物波谱特征

几十年来,国内外学者进行了大量的岩石和矿物波谱特性研究工作,涉及了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(张玉君和曾朝铭,2012).在前人对常见蚀变矿物波谱特征研究的基础上,笔者着重分析了斑岩铜矿典型蚀变带蚀变矿物在 ASTER 数据中对应的波谱特征,并基于 USGS 标准波谱数据库,重建泥化—绢英岩化和青磐岩化蚀变矿物在 ASTER 卫星数据可见光、近红外和短波红外波段的反射率曲线(图 2).绢云母、高岭石、蒙脱石、伊利石、明矾石等组成的泥化—绢英岩化带矿物在 Band 6(2.2 μm)附近有明显吸收谷,而在 Band 4 有高反射峰,Band 7 有相对较高反射峰特征.绿泥石、绿帘石、方解石和白云石等青磐岩化带蚀变矿物在 Band 8(2.3 μm)附近具有吸收特征,同时在 Band 4 有高反射峰.

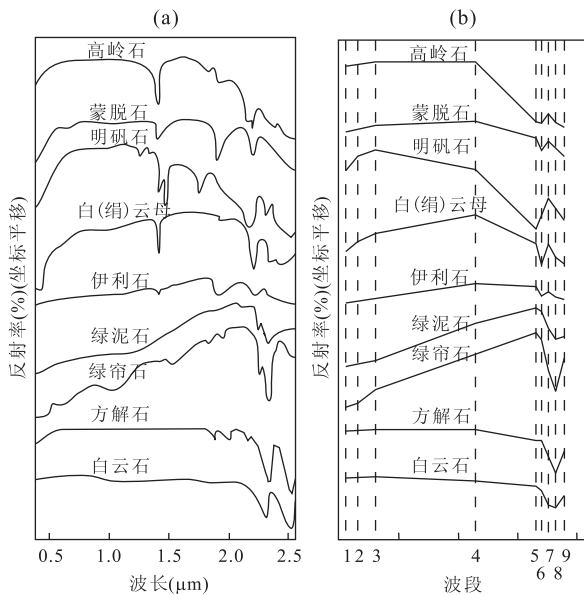


图 2 标准波谱库中蚀变矿物光谱曲线(a)及重采样至 ASTER 波段后波谱曲线(b)

Fig. 2 The spectral curves of alteration minerals in USGS (a) and in ASTER bandpasses (b) after resample

3 蚀变矿物提取方法

目前常用的多光谱遥感蚀变信息提取方法主要有波段代数运算法、主成分分析法和光谱角法(Tommaso and Rubinstein, 2007; 耿新霞等,2008; 姚佛军等,2012; 于岩等,2015).波段代数运算法通

过对波段数据进行运算以增加地物波谱特征间的差别.波段代数运算简便易行,却常受到干扰因素的影响,存在假异常现象.主成分分析法在保持信息总量不变的前提下,通过对多个波段进行主成分变换的方式将高度相关的多维信息集中到少数相互独立的变量中,从而减少信息的重复和冗余(张志军等,2012).主成分分析法是多光谱遥感蚀变矿物最常用的方法之一.光谱角法通过计算影像像元光谱与参考光谱间的矢量夹角确定其相似性.夹角越小,相似程度越高(陈晔等,2014).然而由于 ASTER 数据波段数有限,光谱角法提取蚀变矿物效果一般.

经过前人大量的研究,多光谱遥感蚀变矿物信息提取技术已日趋成熟.本文利用 Crosstalk 3.0 软件进行串扰校正,采用 FLAASH 大气校正模型进行大气校正,通过掩膜应用去除干扰信息(边框、植被、水体、阴影和云),并采用主成分分析法提取蚀变矿物信息,根据图 1 中斑岩铜矿典型蚀变带矿物在 ASTER 数据中的波谱特征,分别选取 Band 1、Band 4、Band 6、Band 7 和 Band 1、Band 3、Band 4、Band 8 波段组合进行主成分变换,泥化—绢英岩化类蚀变矿物信息所在的主分量特征是 Band 7 和 Band 4 的贡献系数与 Band 6 的贡献系数符号相反,且 Band 6 的贡献系数绝对值相对较大;青磐岩化蚀变矿物信息所在的主分量特征是 Band 3 和 Band 8 的贡献系数与 Band 4 的贡献系数符号相反,且二者对应的绝对值相加最大,将蚀变矿物所在的主分量线性拉伸到 0~255,再采用门限化法确定阈值进行蚀变异常分级切割(张玉君等,2002),并通过高斯低通滤波消除异常噪声,优化蚀变信息提取结果,最终得到蚀变矿物信息分布图(图 3).

4 典型斑岩铜矿区蚀变带矿物信息提取

4.1 研究区蚀变带矿物信息提取

研究区位于秘鲁南部阿雷基帕省和莫克瓜省斑岩铜矿区.遥感数据为 3A01 级 ASTER 数据两景(AS11A 0607271504480607300378 和 AS11A 0508251504250508280382,分别简称为 AST_01 和 AST_02);AST_01 数据覆盖塞罗维德/塞罗尼罗斑岩铜矿区,AST_02 数据覆盖夸霍内、奎拉维科、和托克帕拉 3 个斑岩铜矿区.基于上述典型蚀变矿物信息提取的方法与流程,本文分别对两景数据进行处理.

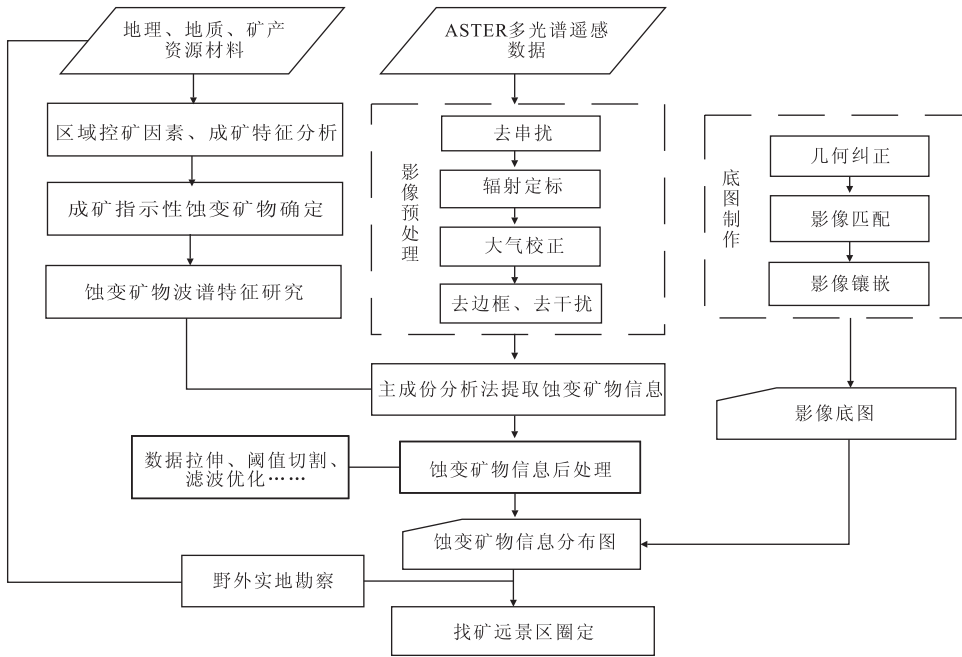


图 3 多光谱遥感找矿流程

Fig. 3 Flow of multi-spectral remote sensing prospecting deposits

表 1 AST_01 数据主成分分析特征向量矩阵

Table 1 Eigenvector matrix of principal component analysis of AST_01 data

	Band 1	Band 4	Band 6	Band 7		Band 1	Band 3	Band 4	Band 8
PC1	-0.505 593	-0.505 047	-0.469 697	-0.518 351	PC1	0.511 250	0.479 195	0.506 965	0.501 979
PC2	-0.818 415	0.534 061	0.175 795	0.118 624	PC2	0.763 555	-0.102 731	-0.636 456	-0.036 810
PC3	0.271 987	0.674 424	-0.412 340	-0.548 772	PC3	0.001 662	-0.764 375	0.088 434	0.638 677
PC4	-0.024 388	0.069 702	-0.760 564	0.645 050	PC4	0.394 469	-0.418 987	0.574 535	-0.582 026

表 2 AST_02 数据主成分分析特征向量矩阵

Table 2 Eigenvector matrix of principal component analysis of AST_02 data

	Band 1	Band 4	Band 6	Band 7		Band 1	Band 3	Band 4	Band 8
PC1	0.447 876	0.560 978	0.477 413	0.506 742	PC1	0.408 123	0.513 387	0.563 064	0.502 821
PC2	0.893 562	-0.284 518	-0.261 890	-0.228 059	PC2	0.559 064	0.513 116	-0.492 022	-0.426 701
PC3	-0.003 431	-0.777 332	0.449 850	0.439 748	PC3	0.481 901	0.466 604	-0.450 188	0.589 392
PC4	-0.030 705	-0.010 386	-0.707 903	0.705 566	PC4	0.537 266	-0.505 397	0.488 061	-0.466 599

根据图 2 中斑岩铜矿典型蚀变带矿物在 ASTER 数据中的波谱特征,两种蚀变矿物主分量判别原则为:泥化—绢英岩化类蚀变矿物信息所在的主分量特征是 Band 7 和 Band 4 的贡献系数与 Band 6 的贡献系数符号相反,且 Band 6 的贡献系数绝对值相对较大;青磐岩化蚀变矿物信息所在的主分量特征是 Band 3 和 Band 8 的贡献系数与 Band 4 的贡献系数符号相反,且二者对应的绝对值相加最大。从表 1 和表 2 中可以看出,两景 ASTER 数据蚀变矿物信息均在第四主分量。由于多光谱数据异常信息提取为半定量化产品,所以本研究依据经验采用平

均值加 1.5 倍标准差作为异常信息阈值对拉伸后的第四主分量数据进行切割(张玉君等,2002)。初步提取的蚀变矿物信息多存在异常噪声现象,可以利用滤波优化提取结果。研究区泥化—绢英岩化和青磐岩化蚀变矿物分布图见图 4 和图 5。矿物蚀变强弱用渐变色表示,底图采用经过几何校正后的 Band 9 波段。

4.2 结果与讨论

结合研究区已有地质资料及实地野外勘察信息,通过综合分析蚀变信息提取结果,结论如下:

(1)研究区内的 4 个已知斑岩铜矿均发育有条

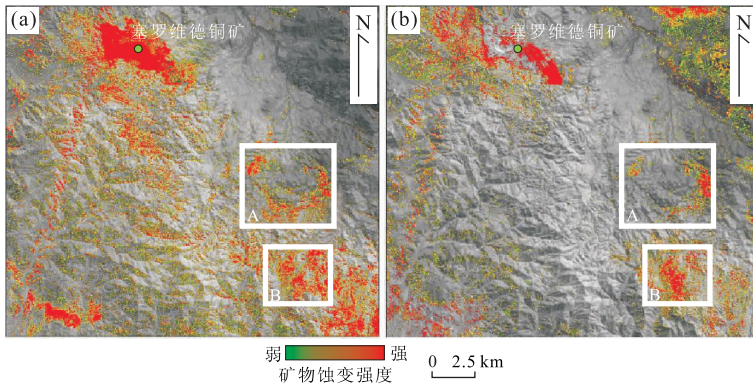


图 4 AST_01 泥化-绢英岩化类(a)和青磐岩化带(b)蚀变矿物信息分布

Fig. 4 The argillic- and phyllic-altered mineral assemblage (a) and propylitic altered mineral assemblage (b) with AST_01 data

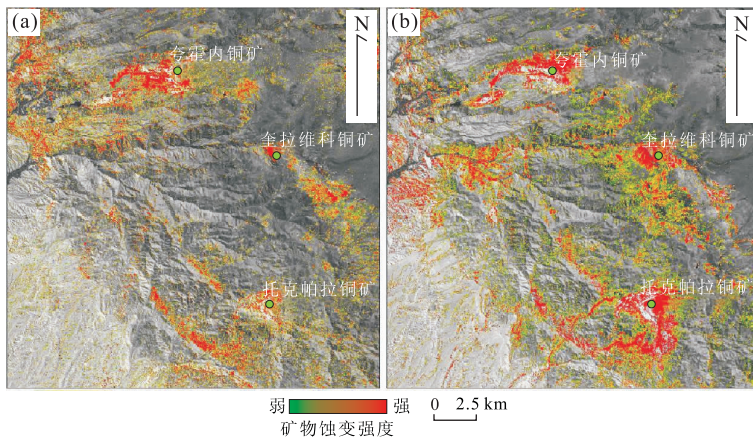


图 5 AST_02 泥化-绢英岩化类(a)和青磐岩化带(b)蚀变矿物信息分布

Fig. 5 The argillic- and phyllic-altered mineral assemblage (a) and propylitic altered mineral assemblage (b) with AST_02 data

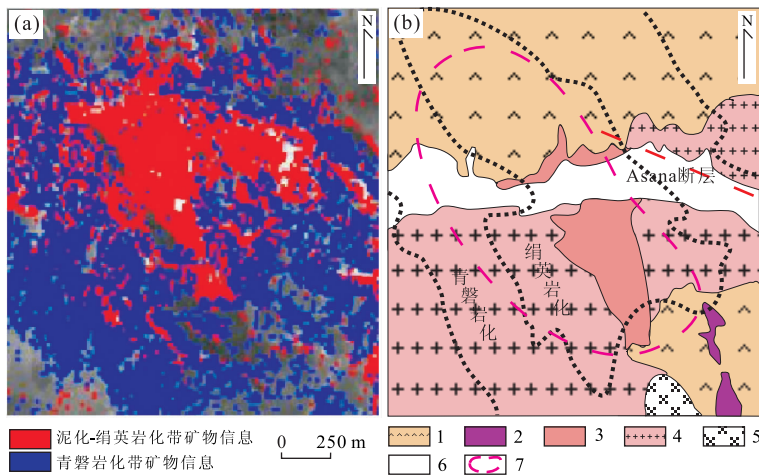


图 6 奎拉维科斑岩铜矿区蚀变带矿物信息分布(a)和地质图(b)

Fig. 6 The alteration mineral assemblage (a) and geological map (b) of porphyry copper deposit in Quellaveco

1. 流纹质凝灰岩; 2. 角砾岩; 3. 二长斑岩; 4. 花岗闪长岩; 5. 流纹岩; 6. 第四系; 7. 矿化范围

带状金字塔特征的泥化-绢英岩化和青磐岩化蚀变带矿物信息,其中,泥化-绢英岩化蚀变带集中分布在矿区主矿体部位,青磐岩化蚀变带在矿区外围也

有大量分布,与研究区地质矿化蚀变带组合特征相吻合(图 4 和图 5)。

(2)通过与矿区大比例尺地质资料对比,笔者发

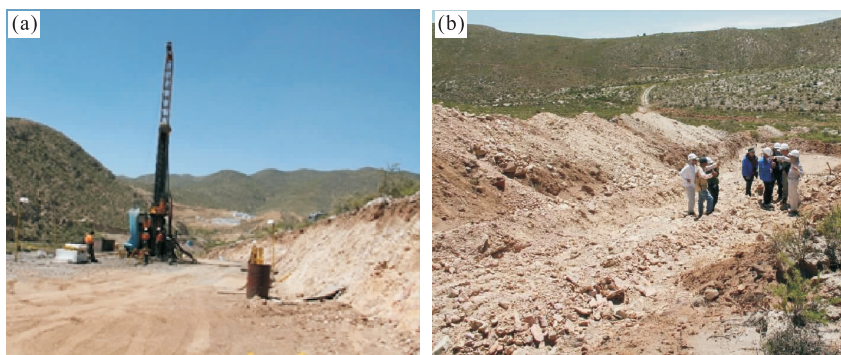


图 7 4-A 区东部浅层腐殖土下的大面积泥化—绢英岩化蚀变

Fig. 7 A large area of argillic and phyllic alteration under humus surface in the eastern part of 4-A region

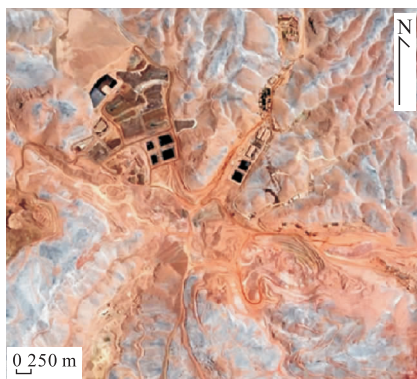


图 8 4-B 区斑岩铜矿蚀变带 Quick Bird 高分辨率卫星影像
Fig. 8 Quick Bird hyperspectral image of typical alteration of porphyry copper deposit in 4-B region

现奎拉维科斑岩铜矿区泥化—绢英岩化和青磐岩化蚀变带信息呈 NW-SN 方向分布,与地质图上蚀变带分布界线及其趋势基本一致(图 6)。其他 3 个矿区也有同样的可比性(杨日红等,2012),验证了遥感蚀变蚀带结果的可靠性。

(3)AST_01 蚀变结果图中另发现 2 处效果较好的泥化—绢英岩化和青磐岩化组合蚀变带(图 7 和图 8)。经过实地野外调查验证,4-A 区发育大面积与斑岩铜矿有关的泥化—绢英岩化蚀变矿物(图 7)。区域内斑岩铜矿控制储量初步勘查已超过 300 万吨,属特大型规模斑岩铜矿床。4-B 区在 Quick Bird 高分辨率卫星图像上发现地面采矿痕迹(图 8),表明该处蚀变矿物带也具有一定的示矿意义。

5 结论

本文以秘鲁南部斑岩铜矿区为研究区,通过分析该区地质背景、控矿因素和成矿类型,确定了泥化—绢英岩化和青磐岩化蚀变矿物组合信息为研究

区最佳找矿指示标志;泥化—绢英岩化蚀变带位于斑岩铜矿主矿区,是重要的成矿标志;青磐岩化蚀变带主要分布在矿区外围区域。

本文遥感数据源为 ASTER 数据,通过数据预处理、主成分变换、数据拉伸、阈值切割、滤波优化等操作,获取了研究区蚀变矿物信息分布图。结合研究区地质资料、高分影像资料及实地勘察结果对比,笔者发现 4 个已有矿区均存在泥化—绢云母化和青磐岩化蚀变矿物带,验证了遥感蚀变矿物信息组合带找矿的可靠性;圈定的 2 处找矿远景区均有较大的找矿潜力。

总而言之,遥感蚀变信息提取与找矿远景区圈定需要与地质调查相结合,充分利用已有地质背景资料,针对特定区域分析其控矿因素,选取标志性成矿蚀变带,并选择合适遥感数据处理方法提取蚀变矿物信息,圈定找矿远景区。

References

- Crosta, A. P., deSouza, F. C. R., Azevedo, F., et al., 2003. Targeting Key Alteration Minerals in Epithermal Deposits in Patagonia, Argentina, Using ASTER Imagery and Principal Component Analysis. *Internal Journal of Remote Sensing*, 24 (21): 4233 — 4240. doi: 10. 1080/0143116031000152292
- Chen, Y., He, Z. W., Deng, H., et al., 2014. Identification and Extraction of Mineralized Alteration Information by ASTER Remote Sensing Data. *Journal of Guilin University of Technology*, 34(1): 51—57 (in Chinese with English abstract).
- Geng, X. X., Yang, J. M., Zhang, Y. J., et al., 2008. The Application of ASTER Remote Sensing Data for Extraction of Alteration Anomalies Information in Shallow Overburden Area—A Case Study of the Baoguto Porphyry Copper Deposit Intrusion in Western Junggar,

- Xinjiang. *Geological Review*, 54(2): 184—191 (in Chinese with English abstract).
- Guo, N., Guo, K., Hu, J. R., et al., 2012. Application of Integrated Remote Sensing Techniques to Mineral Exploration in Tangga, Tibet. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 29(6): 70—74 (in Chinese with English abstract).
- John, C. M., 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. *Geosphere*, 2(3): 161—186. doi: 10.1130/GES00044.1
- John, D. A., Ayuso, R. A., Barton, M. D., et al., 2010. Porphyry Copper Deposit Model. *Scientific Investigations Report*, 2010—5070—B.
- Lai, J. Q., Huang, M., Song, W. B., et al., 2015. Geochemical Characteristics and Source of Ore-Forming Materials of Kaerqueka Copper Polymetallic Deposit in Qinghai Province, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(1): 1—16 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. L., Zhang, X. Y., Cheng, J. L., et al., 2012. Application of Remote Sensing Technology in Ultra-Large Type Porphyry Copper in Chile. *Mineral Exploration*, 3(4): 549—557 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W., Yu, Y., Zhang, M. H., 2010. An Analysis of IP Sounding Anomalies in the Quellaveco Copper Deposit of Southern Peru. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 34(4): 444—447 (in Chinese with English abstract).
- Misra, K. C., 2000. Understanding Mineral Deposits. Kluwer Academic Publishing, London, 353—413.
- Pour, B. A., Hashim, M., 2012. The Application of ASTER Remote Sensing Data to Porphyry Copper and Epithermal Gold Deposits. *Ore Geology Reviews*, 44: 1—9.
- Rowan, L. C., Robert, G. S., John, C., et al., 2006. Distribution of Hydrothermally Altered Rocks in the Reko Diq, Pakistan Mineralized Area Based on Spectral Analysis of ASTER Data. *Remote Sensing of Environment*, 104(1): 74—87. doi: 10.1016/j.rse.2006.05.014
- Rui, Z. Y., Zhang, H. T., Chen, R. Y., et al., 2006. An Approach to Some Problems of Porphyry Copper Deposits. *Mineral Deposits*, 25(4): 491—499 (in Chinese with English abstract).
- Schwartz, M. O., 1981. The Geochemistry of the Leached Capping of the La Granja Porphyry Copper Deposit. *Peru Journal of Geochemical Exploration*, 15(1): 93—113. doi: 10.1016/0375—6742(81)90058—3
- Shi, J. F., Tang, J. R., Zhou, P., et al., 2010. The Worldwide Exploration Model and Mineral Exploration. Geological Publishing House, Beijing, 119—132 (in Chinese).
- Sillitoe, R. H., 2010. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105(1): 1—41. doi: 10.2113/gsecongeo.105.1.3
- Tommaso, I. D., Rubinstein, N., 2007. Hydrothermal Alteration Mapping Using ASTER Data in the Infiernillo Porphyry Deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews*, 32(1): 275—290. doi: 10.1016/j.oregeorev.2006.05.004
- Wang, Y., Zhang, T. B., Qin, Y. B., et al., 2013. Remote Sensing Prospecting Prediction of Porphyry Copper Deposit in Kahucuo Region of Tibet. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 30(4): 54—61 (in Chinese with English abstract).
- Yang, R. H., Chen, X. F., Li, Z. Z., 2013. RS Comprehensive Evaluation for Porphyry Copper in South of Arequipa Province of Peru Based on RS Mine-Indicating Information. *Remote Sensing Information*, 28(2): 35—41, 46 (in Chinese with English abstract).
- Yang, R. H., Li, Z. Z., Chen, X. F., 2012. Information Extraction of Typical Alteration Mineral Assemblage in Porphyry Copper Using ASTER Satellite Data, Arequipa Province of South Peru. *Journal of Geo-Information Science*, 14(3): 411—418 (in Chinese with English abstract).
- Yao, F. J., Zhang, Y. J., Yang, J. M., et al., 2012. Application of ASTER Remote Sensing Data to Extraction of Alteration Zoning Information from Dexing Porphyry Copper Deposit. *Mineral Deposits*, 31(4): 881—890 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Y., Li, J. G., Chen, S. B., et al., 2015. ASTER Image Alteration Minerals Information Extraction Based on Different Lithology Backgrounds. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(8): 1391—1395 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. J., Yang, J. M., Chen W., 2002. A Study of the Method for Extraction of Alteration Anomalies from the ETM⁺ (TM) Data and Its Application; Geologic Basis and Spectral Precondition. *Remote Sensing for Land & Resources*, (4): 30—36 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. J., Yang, J. M., Yao, F. J., 2007. 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*, 14(5): 63—70 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. J., Zeng, Z. M., 2012. Study of Optimum Discrimi-

nator of Multi-Channel Remote Sensing Anomaly for Recognition of Porphyry Cu Deposits in Gangdese Belt. *Mineral Deposits*, 31(4): 671—698 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Z. J., Gan, F. P., Li X. Q., et al., 2012. The Extraction of Altered Mineral Information Based on ASTER Data: A Case Study of the Huangshan Copper-Nickel Ore District in Hami. *Remote Sensing for Land & Resources*, (2): 85—91 (in Chinese with English abstract).

Zhu, G. X., 1980. Some Geological Features of Cu-Porphyry Belt in Chile and Peru. *Geology and Prospecting*, (3): 77—81 (in Chinese).

附中文参考文献

陈晔,何政伟,邓辉,等 2014. 利用 ASTER 影像识别和提取矿化蚀变信息. 桂林理工大学学报, 34(1): 51—57.

耿新霞,杨建民,张玉君,等,2008. 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. 地质论评, 54(2): 184—191.

郭娜,郭科,胡敬仁,等,2012. 多源遥感分析技术在西藏唐嘎幅找矿中的应用. 国土资源科技管理, 29(6): 70—74.

赖健清,黄敏,宋文彬,等,2015. 青海卡尔却卡铜多金属矿床地球化学特征与成矿物质来源. 地球科学——中国地质大学学报, 40(1): 1—16.

李忠烈,张晓永,成静亮,等,2012. 遥感技术在智利超大型斑岩型铜矿勘查中的应用研究. 矿产勘查, 3(4): 549—557.

刘伟,余友,张明会,2010. 南秘鲁 QUELLAVECO 铜矿激电测深异常. 物探与化探, 34(4): 444—447.

芮宗瑶,张洪涛,陈仁义,等,2006. 斑岩铜矿研究中若干问题

探讨. 矿床地质, 25(4): 491—499.

施俊法,唐金荣,周平,等,2010. 世界找矿模型与矿产勘查. 北京:地质出版社, 119—132.

王岩,张廷斌,秦岩宾,等,2013. 西藏喀湖错地区斑岩铜矿遥感找矿预测. 国土资源科技管理, 30(4): 54—61.

杨日红,陈秀法,李志忠,2013. 基于遥感示矿信息的秘鲁阿雷基帕省南部斑岩铜矿遥感综合评价. 遥感信息, 28(2): 35—41, 46.

杨日红,李志忠,陈秀法,2012. ASTER 数据的斑岩铜矿典型蚀变矿物组合信息提取方法——以秘鲁南部阿雷基帕省斑岩铜矿区为例. 地球信息科学学报, 14(3): 411—418.

姚佛军,张玉君,杨建民,等,2012. 利用 ASTER 提取德兴斑岩铜矿遥感蚀变分带信息. 矿床地质, 31(4): 881—890.

于岩,李建国,陈圣波,等,2015. 基于不同岩性背景的遥感影像蚀变矿物信息提取. 地球科学——中国地质大学学报, 40(8): 1391—1395.

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. 国土资源遥感, (4): 30—36.

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. 地学前缘, 14(5): 63—70.

张玉君,曾朝铭,2012. 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. 矿床地质, 31(4): 671—698.

张志军,甘甫平,李贤庆,等,2012. 基于 ASTER 数据的蚀变矿物信息提取——以哈密黄山铜镍矿区为例. 国土资源遥感, (2): 85—91.

朱关祥,1980. 智利、秘鲁斑岩铜矿带的若干地质特征. 地质与勘探, (3): 77—81.