

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

杨日红¹, 李志忠², 陈秀法³

(1. 中国国土资源航空物探遥感中心对地观测技术工程实验室, 北京 100083;

2. 中国地质调查局, 北京 100037; 3. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037)

摘要: 本文利用美国地质调查局(USGS)波谱数据库, 重建了斑岩铜矿典型蚀变带主要蚀变矿物在 ASTER 卫星数据对应的反射率曲线, 综合分析了主要蚀变矿物的波谱曲线特征, 建立了 ASTER 数据 B1、B4、B6、B7 和 B1、B3、B4、B8 主成分分析模型, 分别提取典型蚀变带中泥化-绢英岩化类和青磐岩化蚀变矿物组合信息, 并以秘鲁南部阿雷基帕省斑岩铜矿区为例, 利用研发的技术方法, 分别提取了研究区白(绢)云母、高岭石、蒙脱石、明矾石和伊利石等泥化-绢英岩化类蚀变矿物组合信息, 绿泥石、绿帘石和方解石等青磐岩化蚀变矿物组合信息。同时结合区域化探资料开展了斑岩铜矿靶区遥感综合找矿预测, 经高分辨卫星图像验证, 与已知斑岩铜矿床对比表明, 本文的方法具有较好的效果。

关键词: ASTER 卫星数据; 斑岩铜矿; 泥化-绢英岩化类蚀变矿物组合; 青磐岩化蚀变矿物组合; 信息提取

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2012.00411

1 引言

美国国家航空和宇宙航行局(NASA)与日本经济产业省(MITI)合作的对地观测卫星 TERRA 于 1999 年 12 月 18 日发射成功。由于该卫星所搭载的 ASTER 传感器数据具有从可见光近红外、短波红外到热红外 14 个波段, 相对 TM/ETM+ 具有较高的光谱分辨率, 特别是在短波有 6 个波段、热红外有 5 个波段, 它们分别对粘土矿物、碳酸盐和硅酸岩类矿物具有较好的识别能力。近几年来, 国内外许多专家利用 ASTER 数据分别在伊朗、阿根廷、澳大利亚、巴基斯坦和赞比亚等国的铜或金成矿带, 开展了遥感蚀变信息提取技术与找矿应用^[1-9], 在国内多个铜、金等多金属热液蚀变作用相关的矿床或矿点遥感找矿工作中, 结合地质、化探和物探资料进行遥感找矿综合评价, 取得了很好的应用效果^[9-15]。据统计我国铜矿对外依存度长期处于高位(70%±)。斑岩铜矿是全球铜矿最重要的

成矿类型, 其产量占全球铜矿产量的 70% 以上, 且多为大型-特大型矿床, 具有特定的蚀变组合及其分带性, 俗称“大白菜模式”, 由内到外是: (1) 钾质蚀变带: 蚀变矿物主要为黑云母和钾长石; (2) 似千枚岩化蚀变带(绢英岩化带): 蚀变矿物主要为石英和绢云母; (3) 泥质蚀变带: 蚀变矿物主要为高岭石、蒙脱石、明矾石和石英; (4) 青磐岩化带: 蚀变矿物主要为绿泥石、绿帘石和方解石。前人的研究发现并不是每个矿床都发育 4 个齐全的蚀变带, 但几乎在所有的斑岩型铜矿中均发育有以石英、绢云母为主构成的绢英岩化带, 所有的斑岩型铜矿围岩均广泛发育青磐岩化蚀变带, 且其强度、范围与矿化的规模有直接的关系^[16-20]。笔者在秘鲁南部开展斑岩铜矿遥感综合调查与评价的过程中, 分析了研究区斑岩铜矿蚀变带蚀变矿物组合及其波谱特征, 并以美国地质调查局(USGS)的标准波谱数据库, 重建了蚀变带主要蚀变矿物对应 ASTER 数据 B1-B9 的波谱曲线, 通过建立特定波段组合的主成分

收稿日期: 2011-10-13; 修回日期: 2012-05-20.

基金项目: 国家“863”计划重大项目课题“全球巨型成矿带重要矿产资源与能源遥感探测关键技术”(2012AA12A308); 国土资源大调查项目“中秘合作秘鲁中南部地区区域地球化学数据处理与铜、金找矿远景区优选”(1212010913034)。

作者简介: 杨日红(1974-), 湖南道县人, 男, 博士, 副研究员, 长期从事地质与环境遥感技术研究与应。目前主要从事境外遥感地质矿产调查与评价技术方面的研究与应用。E-mail: yangrihong@sina.com

分析模型,可以有效地提取出泥化-绢英岩化类和青磐岩化带蚀变矿物组合信息,为斑岩型铜矿找矿解译建立直接标志,在研究区取得了很好的效果。下面以秘鲁南部阿里基帕省斑岩铜矿区为例,分析 ASTER 数据的斑岩铜矿典型蚀变矿物组合信息的提取方法。

2 研究区成矿地质特征

秘鲁南部阿雷基帕地区(图 1)所属的安第斯造山带是世界上最重要的铜矿成矿带,全秘鲁大致可以分北部、中部及南部 3 个铜矿带,其中以南部斑岩铜矿带最重要。在南秘鲁铜矿带,阿雷基帕省东南部有塞罗维德(Cerro Verde)、塞罗尼罗(Cerro Negro)、查皮(Chapi)等 3 个矿床,其中,秘鲁塞罗维德铜矿为南秘鲁铜矿带的重要矿床,也是秘鲁最大的斑岩铜矿床之一。往南不远的莫奎巴省附近约 400km² 范围内,还有托克帕拉、夸霍内及盖亚维科 3 个大型铜矿床,构成一个大的矿田。因此,从成矿地质条件分析,研究区具有良好的斑岩铜找矿前景。

主要赋矿岩石。矿体主要赋存于小侵入斑岩中,电气石-石英角砾岩筒也有部分矿体,小部分矿体产于早期的闪长岩、花岗闪长岩及前寒武纪片麻岩中^[21]。

2.2 蚀变带蚀变矿物特征

研究区所处的铜矿成矿带比较典型的是在含矿斑岩的中心及其深部发育钾化蚀变带,蚀变矿物有钾长石、黑云母及绢云母,金属矿物有浸染状黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿及辉铜矿等。这个带往往不含矿,或者虽含矿较富但规模不大。以秘鲁塞罗维德矿床为例,最外带是青磐岩化蚀变带,它围绕着石英绢云母化蚀变带分布,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,有的矿床还有电气石出现。金属矿物主要是黄铁矿,因此,一般也将该带看作黄铁矿晕的范围。除上述典型的蚀变分带外,还经常有次生泥化带(高岭石-蒙脱石化)、次生黑云母化及硅化带发育^[22]。另外,由于南秘鲁斑岩铜矿带地处南半球热带地区,气候炎热干燥,所以,后期的次生淋滤作用比较强烈,矿体大多数具有典型的垂直分带。一般在矿体上部普遍可见有红帽(即铁帽,大部分由黄铁矿或赤铁矿被氧化淋滤而成的褐铁矿帽)及绿帽(有铜的硫化物被淋滤氧化而成的孔雀石、硅孔雀石带)。由于研究区具有良好的蚀变分带及其典型的蚀变矿物组合特征,可为找矿工作提供重要线索,这也是开展蚀变矿物组合信息提取的重要前提条件。

3 蚀变矿物波谱特征分析与提取模型设计

3.1 蚀变带主要蚀变矿物波谱特征

在研究 ASTER 数据蚀变矿物信息提取方法的过程中,利用 USGS 标准波谱数据库,重建了研究区主要蚀变矿物在 ASTER 卫星数据的反射率曲线(图 2),综合分析后发现由绢云母、高岭石、蒙脱石、伊利石和明矾石等组成的泥质岩化和绢英岩化,在 2.2μm 处有明显吸收谷(对应 ASTER 数据的 B6),在 B4 有高反射峰,B7 有较高反射峰等特征(图 2(b))。另外,由绿泥石、绿帘石和碳酸盐化(方解石和白云石)等组成的青磐岩化蚀变矿物,在 2.3μm 附近具有吸收谷,对应 ASTER 数据 B8(图 2(c)),

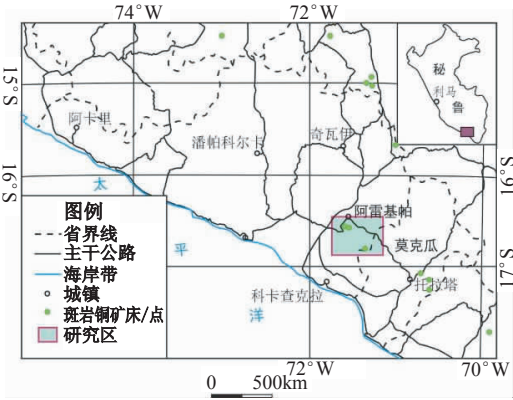


图 1 研究区交通位置示意图

Fig. 1 Location diagram of the study area

2.1 地质构造特征

研究区出露地层有前寒武纪片麻岩,古生代沉积岩和侏罗纪火山-沉积岩,第三纪早期有闪长岩,以及花岗闪长岩(呈岩基沿北 NW 方向侵入),区内塞罗维德铜矿床即位于此岩基的东南端。花岗闪长岩有先后两期,此后有英安斑岩、二长斑岩、石英二长斑岩等小侵入体沿 NW 向构造带分布,随后还有一连串的电气石-石英角砾岩筒产出。英安斑岩、二长斑岩及石英二长斑岩等次火山岩侵入体为

同时具有 B4 高反射峰及在 B9 相对 B8 有较高反射峰特征。另外,从铁染蚀变矿物对应 ASTER 的波谱曲线(图 2(a))表现出在 B4 对应有相对较高反射峰和 B3 对应为吸收谷的特征。

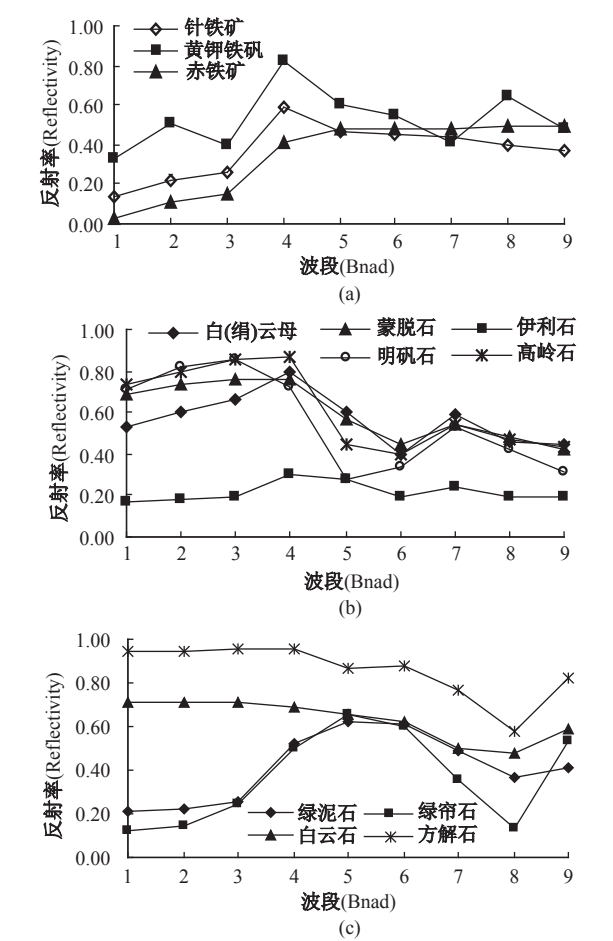


图 2 研究区典型蚀变矿物对应 ASTER 数据的光谱曲线

Fig. 2 Curves of spectrum of the typical alteration minerals in the study area and the corresponding ASTER data

3.2 矿物组合信息提取模型设计

上述综合对比分析了研究区内斑岩铜矿蚀变带主要蚀变矿物在 ASTER 卫星数据反射率曲线特征,同时参考前人对多光谱卫星数据遥感蚀变异常主成分分析提取方法^[23-25],发现构建 ASTER 数据 B1、B 4、B 6 和 B 7 的 4 波段主成分分析模型,可以提取出白(绢)云母、高岭石、蒙脱石、明矾石和伊利石等泥化-绢英岩化类蚀变矿物组合;而构建 ASTER 数据 B1、B 3、B 4 和 B 8 的 4 波段主成分分析模型,同时满足 B9 的反射率大于 B8 的反射率(以免提取出的信息包含图 2(a)和(b)中的蚀变矿物),

可以提取出绿泥石、绿帘石和方解石等青磐岩化蚀变矿物组合。

4 矿物组合信息提取技术方法

根据上述研究所设计的矿物组合信息提取模型,利用 ENVI 4.5 图像处理软件开展了 ASTER 数据蚀变矿物信息提取(见图 3)。关于信息提取具体流程,前人已开展了大量的研究^[26-29]。本文仅对信息提取结果影响较大的关键点,包括数据预处理、特征向量和阈值确定等作了简析。

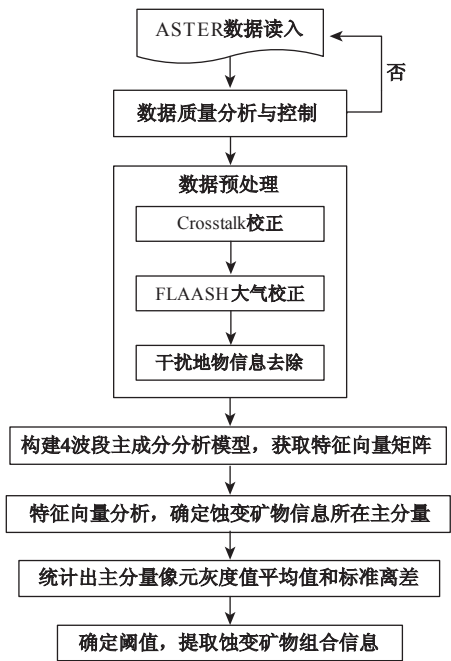


图 3 ASTER 卫星数据遥感蚀变矿物组合信息提取技术流程图

Fig. 3 Technical flow chart of the altered mineral assemblage information extraction based on ASTER data

4.1 数据预处理

由于 ASTER 传感器设计的原因,B5 对 B4 和 B9 具有串扰现象,使得 B4 和 B9 反射率值升高,这里可利用 ASTER 数据管理与发布官网所提供的 Crosstalk 3.0 软件进行串扰校正;然后,采用 FLAASH 大气校正模型,完成 ASTER 数据大气校正^[30];最后,根据数据质量和研究区地物特征,对该研究区而言主要消除边框、植被、冰雪和水体(湖和湿地)边缘等引起的干扰,并制作掩膜层。值得注意的是关于边框的去除,由于 ASTER 传感器可见

光-近红外波长区间与短波红外区间成像时间相差 1 秒,结合传感器探测器设计与卫星飞行轨道特征,采用 B3 和 B7 的反射率等于“0”,获取边框与黑边干扰,作为掩膜层去除。

4.2 特征向量分析

构建 B1、B4、B6 和 B7 主成分分析模型,提取泥化-绢英岩化类蚀变矿物组合信息时,在主成分分析处理后获取的特征向量矩阵中,找出具有 B7 和 B4 的贡献系数与 B6 的贡献系数符号相反,而且 B6 的贡献系数绝对值相对较大的特征的主分量,作为泥化-绢英岩化类蚀变矿物组合信息所在主分量;构建 B1、B3、B4 和 B8 主成分分析模型,提取青磐岩化蚀变矿物组合信息时,在获取的特征向量矩阵中,找出具有 B3 和 B8 的贡献系数与 B4 的贡献系数符号相反的主分量,作为青磐岩化蚀变矿物组合信息所在主分量,同时要求满足 B9 的反射率大于 B8 的反射率(为了去除混合图 2(a)和(b)中的蚀变矿物)。经过大量的试验表明,通常在第四主分量(PC4)具备以上特征,进而判定所要提取的蚀变矿物组合信息所在主分量。这里应注意:当蚀变矿物组合信息所在主分量 B6 和 B8 贡献系数符号为正时,该主分量灰度值越小代表具有蚀变矿物组合信息可能越大。

4.3 阈值的确定

前人在 TM/ETM+数据统计分析得出异常分级的经验值,在本方法的研制过程中,也对数十景 TM/ETM+数据和百余景 ASTER 数据进行了相应的统计分析,发现采用 1.5σ (1.5 倍标准离差,以下类似)、 2.0σ 和 2.5σ 确定阈值,切割出的三级蚀变矿物组合信息,与传统经验值所确定的阈值或分级标准基本一致。另外,也可以根据研究区具体情况,采用二级分级(小区域信息提取采用较高的两个级别)或一级分级(大面积区域性信息提取采用最低一级)标准来编制蚀变矿物信息分布图。应当注意:在进行蚀变矿物信息所在主分量像元灰度值平均值统计和标准离差(σ)计算时,不要统计掩膜层对应的像元。

5 算法的应用实例与分析

在开展跨区域(境外)“863”计划重点项目课题和

地质调查工作项目研究的过程中,运用 2006 年的 2 景 ASTER 数据(ID: ASTL1A 0607271504480607-300378、ASTL1A 060625 1504410606280231)在秘鲁南部阿里基帕省斑岩铜矿区进行了应用,利用上述技术方法分别提取了泥化-绢英岩化类蚀变矿物组合和青磐岩化蚀变矿物组合信息,采用三级分级标准并以 ETM+卫星数据 B7 作为底图分布编制了研究区蚀变带信息分布图(图 4)。

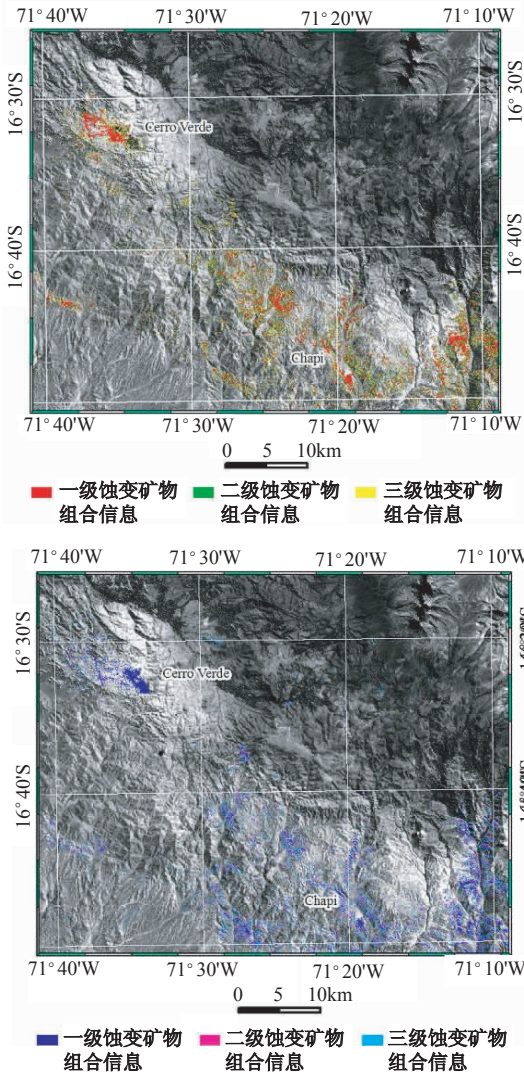


图 4 阿雷基帕地区泥化-绢英岩化类(上)和青磐岩化带(下)蚀变矿物组合信息分布图
Fig. 4 The argillic- and phyllic-altered mineral assemblage (Upper) and propylitization-altered mineral assemblage (Lower) in Arequipa region, Peru

图 4 中显示在已知 Cerro Verde 和 Chapi 斑岩铜矿区具有很好的分级(金字塔型)泥化-绢英岩化类和青磐岩化带蚀变矿物组合信息(图 5);另外,

在研究区西南部一环形构造外围也具有较好的分级泥化-绢英岩化类蚀变矿物组合信息(图 6)

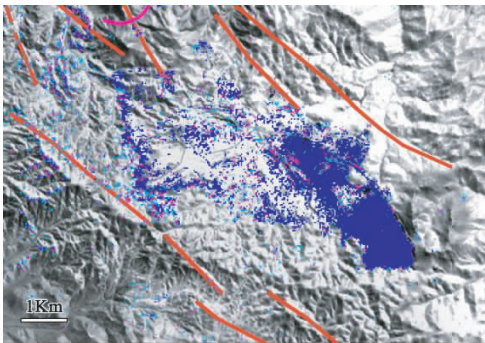


图 5 塞罗维德斑岩铜矿床矿区青磐岩化带蚀变物组合信息分布图(图中红线为遥感解译断裂)

Fig. 5 The propylitization-altered mineral assemblage in the Cerro Verde porphyry copper mine (red lines indicate fractures detected by remote sensing interpretation)

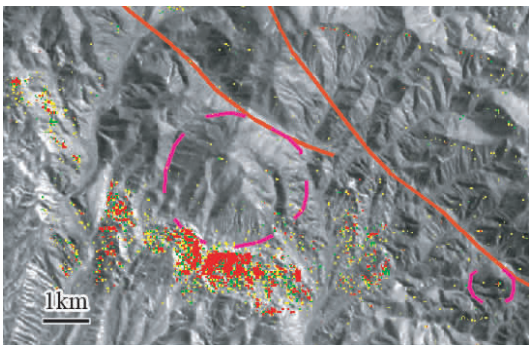


图 6 研究区西南部某环形构造外围泥化-绢英岩化类蚀变矿物组合信息分布图(图中红线为遥感解译断裂,粉红虚线环为遥感解译环形构造)

Fig. 6 The argillic- & phyllic-altered mineral assemblage of the southwest of the study area (red lines indicate fractures and pink circles indicate circular structures, detected by remote sensing interpretation)

以研究区泥化-绢英岩化类和青磐岩化蚀变矿物组合信息,结合研究区的构造地质与其成矿地质特征,即近北西向和北西西向断裂为主要控矿构造,特别是该方向的断裂与其他近南北向或北东向小断裂的交汇部位在研究区与铜矿成矿作用关系密切;另外,研究区内斑岩铜矿床产出部位和大的构造岩浆活动关系密切。再参考遥感地质解译成果和区域化探资料,分析获取的线性与环形控矿构造、矿源层与赋矿岩石、泥化-绢英岩化类和青磐岩化带蚀变矿物组合等遥感示矿信息,划分出 4 个斑岩铜矿预测靶区(图 7),并依据分级蚀变矿物组合

信息和赋矿岩石分布特征,推荐 T-1 和 T-2 为重点遥感找矿靶区,T-3 次之,而 T-4 包括塞罗维德特大型斑岩铜矿床,可为已知矿床外围找矿提供指示信息。

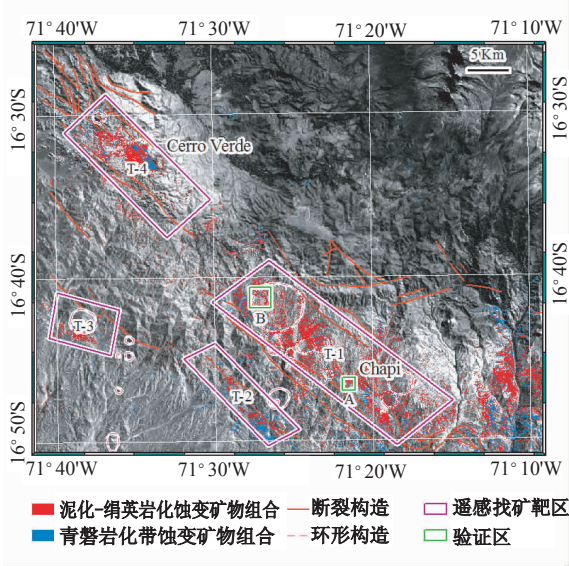


图 7 秘鲁阿雷基帕斑岩铜矿区遥感找矿靶区预测图

Fig. 7 The remote sensing mineral prospecting target of porphyry copper in Arequipa region, Peru

目前,在境外开展遥感示矿信息所圈定的找矿靶区验证仍然是一项尝试性工作。秘鲁阿雷基帕地区斑岩铜矿预测靶区的验证工作,主要是与已有矿床和高分辨率卫星影像进行对比验证。从获取的 Quickbird 高分辨率卫星影像图上显示在已知赛罗维德矿区和查皮斑岩铜矿区(图 7A 区,图 8)具

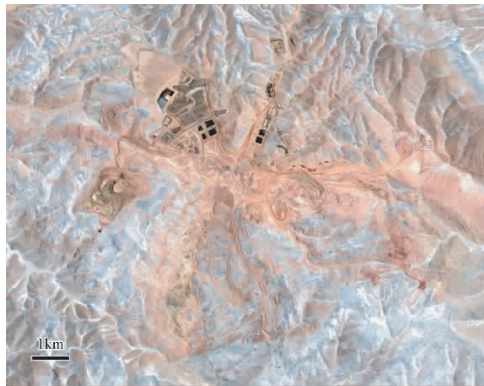


图 8 遥感找矿靶区 T-1 A 区高分辨率卫星影像图(图中褐色为蚀变,并显示该区已处于开采状态)

Fig. 8 The high-resolution satellite image of the remote sensing mineral prospecting target on T-1 A area (the brown area indicates the alteration, and that area is under mining now)

有较好的泥化—绢英岩化类和青磐岩化分级蚀变矿物组合信息分布;另外,在 T-1 重点找矿靶区中左上角环形构造边缘(图 7B 区),地处环形与线性交叉构造部位,在环形构造边缘已大规模的部署了地面勘探工作(图 9)。验证结果表明,斑岩铜矿找矿可利用 ASTER 卫星数据提取出典型蚀变带,即泥化—绢英岩化类和青磐岩化蚀变矿物组合信息,为斑岩铜矿找矿提供重要的解译标志。

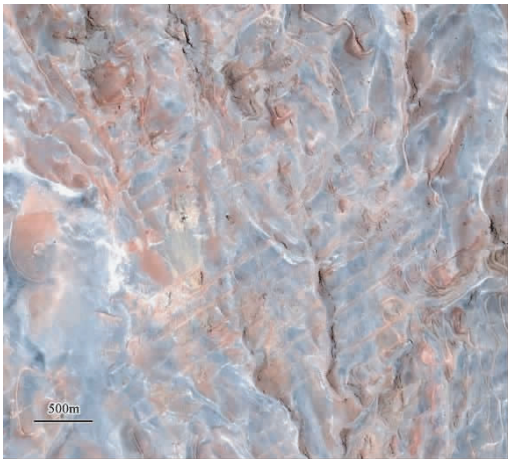


图 9 遥感找矿靶区 T-1 B 区高分辨率卫星影像图
(北东向线性痕迹为勘探线)

Fig. 9 The high-resolution satellite images of the remote sensing mineral prospecting target on T-1 B area (the northeast-southwest linear traces are the exploring routes)

6 结语

斑岩铜矿区典型蚀变带蚀变矿物的诊断性波谱特征是蚀变矿物组合信息提取的理论基础。本文利用美国地质勘查局(USGS)的波谱数据库,重建了斑岩铜矿典型蚀变带主要蚀变矿物反射率在 ASTER 数据对应的波谱曲线,综合分析了泥化—绢英岩化类和青磐岩化蚀变矿物组合信息提取的可行性。主要结论如下:

(1)利用 ASTER 数据 B1,B4,B6 和 B7 的主成分分析模型,可以提取出白(绢)云母、高岭石、蒙脱石、明矾石和伊利石等泥化—绢英岩化类蚀变矿物组合信息;构建 ASTER 数据 B1,B3,B4 和 B8 的主成分分析模型,同时满足 B9 的反射率大于 B8 的反射率,可提取出绿泥石、绿帘石和方解石等青磐岩化蚀变矿物组合信息。通过与已知斑岩铜矿矿区对比和重点部位高分辨率卫星影像图验证,发现所

提取结果具有一定的可靠性。由于全球的斑岩铜矿几乎都发育由以石英、绢云母构成的绢英岩化带,所有斑岩型铜矿中均广泛发育青磐岩化蚀变带,可见利用该方法可以提取斑岩铜矿典型蚀变矿物组合信息,能为斑岩铜矿找矿提供重要的指示标志。

(2)现有 ASTER、TM/TEM+ 等多光谱卫星数据提取出的遥感蚀变矿物信息并非是一种量化信息,而且其阈值主要是通过经验和统计分析而确定,因此,使用者要充分认识与理解遥感蚀变矿物信息的机理。

(3)关于境外遥感综合调查与评价结果的验证需因地制宜,部分有利区采用高分辨率卫星影像验证,或与已有矿床、已有物化探异常相互验证等相结合的方式,以提高蚀变矿物信息提取、综合调查与评价结果的可靠性。

上述研究成果已在秘鲁中南部圣地亚哥德乔科沃斯地区和阿根廷西北部地区,开展斑岩铜矿找矿中得到了应用,为地面勘查工作的部署提供了重要遥感示矿信息。由于研究区域有限,而且开展境外实地验证工作难度大,还未能系统地针对全球不同斑岩铜矿成矿带,开展综合对比分析研究和现场验证,这些工作有待今后进一步完善、提高。

致谢:对中国地质科学院地质研究所卢民杰研究员、中国地质科学院天津地质矿产研究所李建国工程师和河北省遥感中心吕凤军博士等在项目研究过程中给予的帮助深表感谢。

参考文献:

[1] Ranjbar H, Shahriari H, Honarmand M. Comparison of ASTER and ETM+ data for exploration of porphyry copper mineralization: A case study of Sar Cheshmeh areas, Kerman, Iran[J]. Map Asia, 2003.

[2] Crosta A P, De Souza Filho C R, Azevedo F, et al. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003,24(21):4233 - 4240.

[3] Rowan L C, Mars J C, Simpson C J. Lithologic mapping of the Mordor N. T, Anstralia ultramafic complex by using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)[J]. Remote Sensing of Environment, 2005(99):105 - 126.

[4] Resource Finance & Investments Limited. ASTER al-

- teration mineral mapping; Northwest Tasmania; Australia[D], 2005.
- [5] Rowan L C, Schmidt R G, Mars J C. Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data[J]. Remote Sensing of Environment, 2006(104): 74 - 87.
- [6] Mars J C, Rowan L C. 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, 2006, 2(3): 161 - 186.
- [7] 杨建民, 张玉君, 姚佛军. 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, 2007, 14(5): 63 - 70.
- [8] 张玉君, 姚佛军. 应用 ASTER 多光谱数据对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, 2009(6): 963 - 970.
- [9] 耿新霞, 杨建民, 张玉君, 等. 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[J]. 地质论评, 2008, 54(2): 184 - 191.
- [10] 杨长保, 姜琦刚, 刘万崧, 等. 基于 ASTER 数据的内蒙古东乌珠穆沁北部地区遥感蚀变信息提取[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(6): 1164 - 1167.
- [11] 黄照强, 李祥强. 基于 ASTER 和 ETM+ 数据的蚀变信息提取比较研究——以西藏泽当矿田为例[J]. 地质与勘探, 2009, 45(5): 606 - 611.
- [12] 郭娜, 陈建平, 唐菊兴, 等. 基于 RS 技术的西藏甲玛铜多金属矿外围成矿预测研究[J]. 地学前缘, 2010, 17(4): 280 - 289.
- [13] 李建国, 毛德宝. 基于 ETM+ 与 ASTER 数据的矿化蚀变信息提取方法研究——以满都拉地区为例[J]. 国土资源遥感, 2011(3): 54 - 60.
- [14] 余健, 董玉森, 张志, 等. 基于 ASTER 影像的蚀变异常提取方法研究——以赞比亚谦比希铜矿床地区为例[J]. 国土资源遥感, 2011(3): 54 - 60.
- [15] 刘德长, 杨旭, 张杰林. 新型遥感技术数据的铀资源勘查应用[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(3): 269 - 273.
- [16] Lowell J D and Guilbert J M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits [J]. Economic Geology, 1970(65): 373 - 408
- [17] Cox D P, Singer D A. Mineral deposit models[J]. U. S. Geological Survey Bulletin, 1986, 1693.
- [18] Sinclair W D. Porphyry deposits[M]. In: Good - fellow W D (ed.). Mineral deposits of Canada. 2006, 223 - 244.
- [19] 姚凤良, 孙丰月. 矿床学教程[M]. 北京: 地质出版社, 2006, 98 - 106.
- [20] 施俊法, 唐金荣, 周平, 等. 世界找矿模型与矿产勘查 [M]. 北京: 地质出版社, 2010, 119 - 127.
- [21] 姚金炎. 关于斑岩铜矿的找矿 [J]. 矿产与地质, 1999, 13(2): 65 - 69.
- [22] 朱关祥. 智利、秘鲁斑岩铜矿带的若干地质特征[J]. 地质与勘探, 1980(9): 77 - 81, 48.
- [23] 杨金中, 方洪宾, 张玉君, 等. 中国西部重要成矿带遥感找矿异常提取的方法研究[J]. 国土资源遥感, 2003(3): 50 - 53, 9.
- [24] 叶发旺. ASTER 数据与 ETM 数据蚀变信息提取的对比研究——以巴什布拉克铀矿区油气还原蚀变分析为例[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(3): 274 - 281.
- [25] 薛云, 戴塔根, 邹艳红, 等. 基于主成分分析的 SVM 矿化信息提取研究——以青海黄南州阿哇地区为例[J]. 遥感信息, 2007(6): 32 - 35.
- [26] 高景刚, 薛春纪, 吴淦国, 等. 基于知识的蚀变遥感异常信息快速提取及找矿应用实践[J]. 遥感学报, 2008, 12(1): 186 - 192.
- [27] 张满郎. 金矿蚀变信息提取中的主成份分析[J]. 遥感技术与应用, 1996, 12(1): 186 - 192.
- [28] 张守林. 基于 ETM 数据矿化蚀变信息定量提取方法研究[D]. 中国地质大学论文(北京), 2006.
- [29] 张瑞丝. 遥感找矿异常信息提取方法改进与应用[D]. 中国地质大学论文(北京), 2009.
- [30] 郝建亭, 杨武年, 李玉霞, 等. 基于 FLAASH 的多光谱影像大气校正应用研究[J]. 遥感应, 2008(1): 78 - 81.

**Information Extraction of Typical Alteration Mineral Assemblage
in Porphyry Copper Using ASTER Satellite Data,
Arequipa Province of South Peru**

YANG Rihong¹, LI Zhizhong² and CHENG Xiufa³

(1. *Laboratory of the Earth Observation Technology, China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing
Center for Land and Resources, Beijing 100083, China*; 2. *China Geological Survey, Beijing 100037, China*;
3. *Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China*)

Abstract: In this paper we studied the information extraction technology of alteration mineral assemblages. Using the standard laboratory spectral database of U. S. Geological Survey, we rebuilt the reflectivity curve of key alteration minerals in porphyry copper alteration zones with ASTER data. After comparative analysis of these key alteration minerals spectral curves, we found the characteristic of absorption valley at the spectral 2.2 μm (which is corresponding to the B6 of ASTER data) of the argillic- and phyllic-altered mineral assemblage (which include muscovite, kaolinite, montmorillonite, alunite, illite, etc.), and with the characteristic of high reflection peaks at B4 and B7. The characteristic of absorption valley at the spectral 2.3 μm (which is corresponding to the B8 of ASTER data) of the propylitization altered mineral assemblage (which include chlorite, epidote, calcite, etc.), and with the characteristic of a high reflection peaks at B4, while the B9 has a higher reflectivity than the B8. Accordingly, the principal component analysis model was developed. This model can make component analysis based on ASTER B1, B4, B6 and B7 to extract the argillic- and phyllic-altered mineral assemblage; component analysis based on ASTER B1, B3, B4 and B8 to extract propylitization altered mineral assemblage. At the same time, the process was established for the alteration mineral assemblage information extraction. Taking porphyry copper region in Arequipa Province of south Peru as an example, based on comprehensive analysis of the geological background of the study area, especially its typical alteration zoning and alteration mineral assemblages in the area, we found a typical porphyry alteration zonation in Arequipa Province. So we can take advantage of the technical processes and methods, and after ASTER data preprocessing, interfering surface features removal, principal component analysis and threshold setting, to extract argillic- and phyllic-altered mineral assemblage and propylitization altered mineral assemblage. Meanwhile, together with remote sensing interpretation and regional geochemical data, we forecasted the prospecting target of porphyry copper, and delineated 4 remote sensing exploration targets. Comparing with the verified of high-resolution satellite images and the known porphyry copper deposit, the result this study is reliable.

Key words: ASTER satellite data; porphyry copper; argillic- and phyllic-altered mineral assemblage; propylitization altered mineral assemblage; information extraction