

Research on Application of ETM+ and ASTER Remote Sensing Data in the Prospecting of Lateritic Bauxite in Laos

Gong Cheng, Zerun Gao, Zhanjun Zhu

Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha
Email: chenggongx@126.com

Received: Apr. 28th, 2012; revised: May 12th, 2012; accepted: May 28th, 2012

Abstract: Lot of lateritic bauxite mine area is directly exposed to the surface in Boloven plateau of southern Laos. During the exploration process, using ETM+ and ASTER multi-spectral remote sensing data, the lateritic bauxite mineralization alteration information was extracted respectively by two different methods “ratio + principal component analysis + supervised classification” and “ratio + principal component analysis + spectral angle mapping”, and then the bauxite orebodies were directly blocked out on the basis of the extracted mineralization information, which greatly improved the exploration efficiency, saved time and labor, and provided a quick and effective economic method and way for the exploration of the same lateritic bauxite and nickel.

Keywords: ETM+; ASTER; Lateritic Bauxite; Image Processing; Mineralized Information

ETM+与 ASTER 数据在老挝红土型铝土矿勘查中的应用

成 功, 高泽润, 朱战军

中南大学地球科学与信息物理学院有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙
Email: chenggongx@126.com

收稿日期: 2012 年 4 月 28 日; 修回日期: 2012 年 5 月 12 日; 录用日期: 2012 年 5 月 28 日

摘 要: 老挝南部波罗芬高原红土型铝土矿大面积直接裸露地表。在铝土矿勘查过程中, 利用 ETM+和 ASTER 多光谱遥感数据, 分别采用“比值 + 主成分分析 + 监督分类”和“比值 + 主成分分析 + 光谱角填图”两种不同的方法提取了红土型铝土矿矿化蚀变信息, 并利用所提取的矿化信息直接圈定铝土矿矿体, 大大提高铝土矿勘查效率, 省时省力, 为同类型的铝土矿和红土型镍矿的勘查提供了一种快速有效经济的方法和途径。

关键词: EMT+; ASTER; 红土型铝土矿; 图像处理; 矿化信息

1. 引言

基于 ETM+/TM 数据提取矿化蚀变遥感异常已经有 30 多年的历史, 其理论和技术都已趋于成熟^[1]。1999 年 12 月份发射的 Terra 卫星上得 ASTER 传感器, 在空间分辨率和光谱分辨率上都比 ETM+/TM 数据有较大的优势, 尤其在短波红外光谱范围内, ASTER 数据对粘土化蚀变有较好的分辨能力, 已成为唯一可以与 ETM+/TM 相媲美的新型遥感数据。在国外利用

ETM+和 ASTER 数据进行地质填图和提取矿化蚀变信息已经相当广泛^[2,3], 我国遥感地质工作者也开展大量的应用研究工作^[1,4,5]。2006 年, 作者与高光明教授在承担老挝波罗芬高原铝土矿勘查项目中, 利用 ETM+数据进行地质填图取得了很好的找矿效果^[6]。而后, 又在该区开展了 ASTER 数据铝土矿信息提取研究。本文在上述的基础上, 针对 ETM+和 ASTER 两种不同的遥感数据, 分别运用“比值 + 主成分分析 + 监督分类”和“比值 + 主成分分析 + 光谱角

填图”两种不同的方法提取了红土型铝土矿矿化蚀变信息,并进行了对比研究。

2. 研究区概况

研究区位于老挝南部占巴塞省的波罗芬高原上。波罗芬高原为一北西向展布的宽缓台地,坐落在平均海拔 1.0~1.2 km 左右的平台上,其基底由三叠系-白垩系碎屑沉积岩系地层组成,上覆盖为高原喷发及逸流的玄武岩。高原内部,地势起伏平缓,高原的周边,为陡峻险要且切割很深的悬崖和峡谷地貌。波罗芬高原属于热带季风气候,年平均气温大致在 20℃~30℃ 之间,年平均降水量为 3743 毫米,旱季为 11 月~次年的 4 月,具备现代铝土矿形成的必要条件^[6,7]。

研究区大地构造位置处于印支微板块与掸泰澜沧微板块结合带,即澜沧江-清莱-吉保山缝合线以东呵叻盆地东侧。区内岩浆活动强烈,与区内红土型铝土矿有关的岩浆岩主要是古近纪以来喷发和溢流的玄武岩。根据老挝 1:100 万地质图,波罗芬高原玄武岩喷发可划分为四期:即 vPz3、vPg、vNg 和 vQ。vPz3,主要分布于波罗芬高原南部老柬边界一带;vPg,零星分布于波罗芬高原四周;vNg,主要分布在帕克松穹隆及其周边,构成波罗芬高原玄武岩的主体,与区内红土型铝土矿成矿关系密切;vQ,主要分布在波罗芬高原外围塞公河以东安南山脉西部的山间火山盆地^[6-8]。

据有关专家预测,波罗芬高原可能蕴藏着约 20 亿吨的红土型铝土矿^[9,10]。该区铝土矿含矿构造为第四系玄武岩,岩石经风化、淋滤后,由黄褐色、褐红色含砾腐植土残坡积层和褐红色、土黄色含粘土质铝土矿残积层以及风化、半风化玄武岩组成红土风化壳。经分析该矿床类型为硅酸盐岩上红土风化壳残余型三水铝石矿床类型,主要矿相为:三水铝石、赤铁矿、针铁矿;次要矿物:高岭石、石英、钛铁矿;另外还有磷铁矿、绿泥石、锆石等稀散矿物^[7,11]。区内铝土矿矿体大面积直接裸露地表,矿化信息强,易于从背景中分离,适合于 ETM+和 ASTER 等中低分辨率的多光谱遥感数据提取矿化信息。

3. 矿化蚀变信息提取过程与结果分析

3.1. 影像数据源

ETM+是安装在 1999 年 4 月 15 日发射升空的美

国 Landsat-7 卫星上的多光谱成像仪。ETM+数据包括从可见光到热红外共 7 个多光谱波段和 1 个全色波段,其中 ETM1-5、7 波段分辨率为 30 米,ETM6_H和 ETM6_L为热红外波段,分辨率为 60 米,ETM8 为全色波段,分辨率为 15 米。ASTER 是安装在 Terra 卫星上的多光谱成像仪^[12],ASTER 数据包括从可见光到热红外共 14 个多光谱通道,其中 3 个可见光-近红外(VNIR)波段,分辨率为 15 米,可以获取过渡族金属元素的特征波谱,如铁和稀土元素;6 个短波红外(SWIR)波段,分辨率为 60 米,可获取含羟基和碳酸盐化蚀变矿物的特征光谱;5 个热红外(TIR)波段,分辨率为 90 米,具有鉴别岩石主要成分的能力,包括石英、长石和石榴石等矿物^[13]。

根据对比分析,选择了 2002 年 2 月 13 日景号为 p125r050_7t20020213 的 ETM+数据和 2008 年 11 月 11 日景号为 ASTL1B0701260330290811110011 的 ASTER 数据作为这次信息提取的遥感数据源,具有云量少,植被干扰较小,质量佳的特点。

3.2. 信息提取方法

利用遥感提取铝土矿的矿化信息,主要提取 Al³⁺离子和 OH⁻离子的信息,但由于 Al³⁺离子和 OH⁻离子在遥感影像中信号较弱,难以单独分离出来。而铝土矿往往跟针铁矿与赤铁矿伴生在一起,它们之间存在一定的相关性,可以说在铝土矿分布区有铁的地方就有铝土矿^[8]。

本文在综合考虑了老挝南部波罗芬高原地区的具体情况,经过多次试验,最终针对 ETM+和 ASTER 两种不同数据分别选用“比值+主成分分析+监督分类”和“比值+主成分分析+光谱角填图”两种不同的方法提取铝土矿矿化蚀变信息,均取得了较好的效果。

“比值+主成分分析+监督分类”是先选择合适波段进行比值和主成分分析,再将比值图像和反映矿化信息的主分量合成假彩色影像,然后利用监督分类方法将不同信息进行分类和统计;光谱角度填图方法将光谱数据视为多维空间的矢量,利用解析方法计算像元光谱与光谱数据库光谱或像元训练光谱之间矢量的夹角,根据夹角的大小来确定光谱间的相似程度,以达到识别地物的目的。“比值+主成分分析+光谱角填图”是以主成分分析法为主,比值法为辅,

经多次实验及分析后, 选取最佳的波段组合, 合成假彩色影像, 该影像较好地增强了铝土矿的矿化蚀变信息。然后结合目视解译, 对照地质矿产图, 在上述合成影像中分别选取已经增强的铝土矿、铁矿化、河流、森林、砂岩信息作为分类参考的端元, 运用光谱角填图法对遥感影像进行分类, 进一步将矿化蚀变信息提取出来(图 1)。

3.3. “比值 + 主成分分析 + 监督分类”法

ETM+数据中, ETM2, 3, 4 波段都有二价铁和三价铁离子的吸收谱带, 尤为明显的是 0.9 μm 处三价铁离子的吸收带, ETM4 波段恰好处于这个波谱带范围, 而 ETM5 波段则是强反射, 所以 ETM5/4 可以提取出含铁矿物信息, 同时, ETM3/1 亦可以提取出铁矿化信息, 但铁矿化与铝矿化不易区分, 故在合成假彩色影像时未采用。

ETM 多波段数据通过主成分分析(PCA)所获每一主分量常常代表一定的地质意义, 且互不重复, 即各

主分量的地质意义有其独特性。用 ETM1、ETM4、ETM5、ETM7 等 4 个波段进行主成分分析, 本征向量 ETM5 波段的系数与 ETM7 及 ETM4 波段的系数符号相反, ETM1 波段一般与 ETM5 波段的系数符号相同的主分量为羟基异常主分量。用 ETM1、ETM3、ETM4、ETM5 等 4 个波段进行主成分分析, 本征向量 ETM3 波段的系数与 ETM1 及 ETM4 波段的系数符号相反, ETM3 波段一般与 ETM5 波段的系数符号相同的主分量为铁染异常主分量^[14]。由于异物同谱现象的存在, 这些异常主分量还包含着非蚀变的地质因素, 有待用其它计算方法乃至借助地质知识经目视解译加以区分。

从 PCA 特征值(见表 1)分析, 第一主组分占整个信息量的 76.02%, 高亮度值特征向量载荷为 0.711330 和 0.64848, 主要反映了 ETM 图像 5、7 波段的波谱特征, 为铝土矿、铁矿化和砂岩的信息; 第二主组分高亮度值特征向量载荷为 0.91591, 反映了 ETM4 波段的信息, 主要为森林植被信息; 第三主组分 ETM5

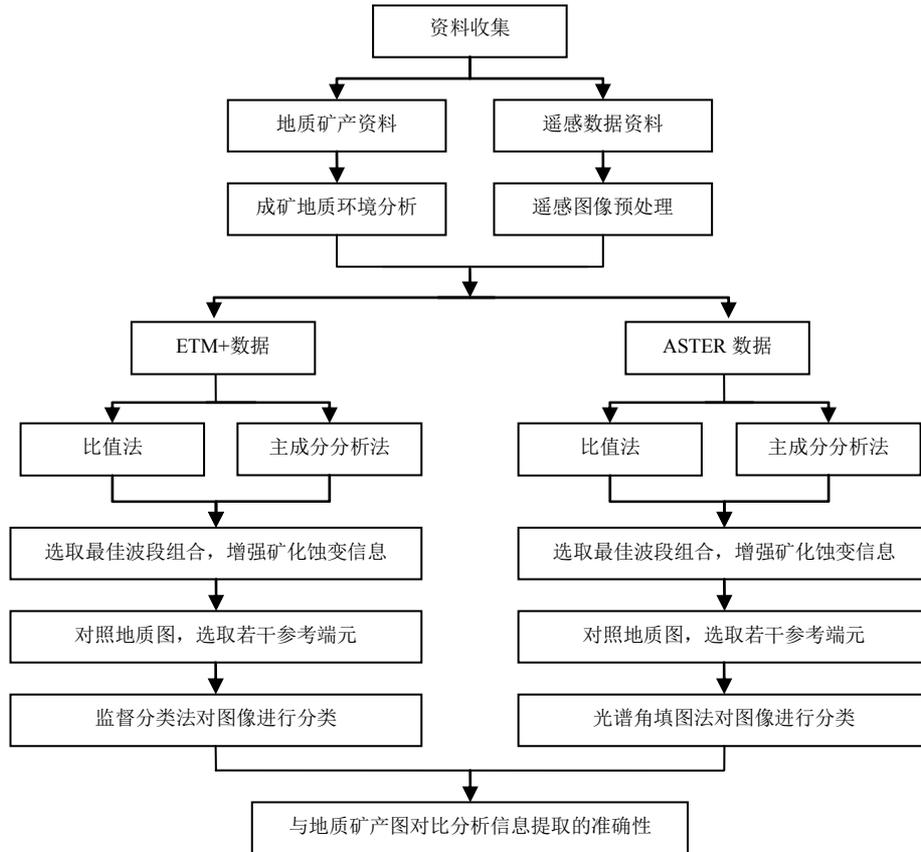


Figure 1. Flow chart of mineralization and alteration information extraction of bauxite
图 1. 铝土矿矿化蚀变信息提取流程图

Table 1. Eigenvector matrix of PCA
表 1. 主成分变换的特征向量矩阵

主成分	通道参数 EC				V	通道参数 EC				V
	ETM1	ETM4	ETM5	ETM7		ASTER1	ASTER3	ASTER4	ASTER(5+6)/2	
均值	63.4179	67.4481	69.8499	40.1503		60.3638	69.7048	45.2539	33.5178	
方差	5.6917	17.0399	23.2562	20.5443		6.0219	15.6097	8.8884	10.1450	
PC1	0.15526	-0.22219	0.71133	0.64848	76.02%	0.20092	-0.77277	0.34197	0.49628	73.24%
PC2	0.04314	0.91591	0.38198	-0.11552	22.31%	0.39338	0.60626	0.56935	0.39183	24.62%
PC3	-0.06009	-0.33332	0.58257	-0.73885	1.01%	-0.87522	0.05422	0.46609	0.11754	1.38%
PC4	-0.98510	0.02542	0.09330	0.14222	0.66%	0.19717	-0.18196	0.58451	-0.76574	0.76%

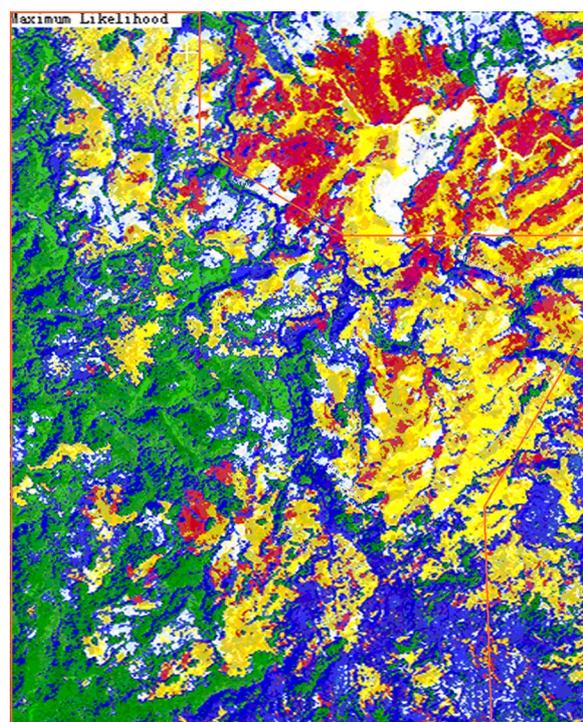
波段特征向量载荷为 0.58257，高亮度值反映了砂岩的信息，低亮度值反映了 ETM7 波段的信息，主要为铝土矿、铁矿化的信息，且主要为铁矿化信息。

波罗芬高原子区遥感图像矿化信息提取，采用了比值处理和主组分分析组合的方法，主成份分析采用 ETM+波段 1, 4, 5, 7 组合提取与羟基为主的基团异常；ETM+波段 1, 3, 4, 5 组合提取以铁染为主的变价元素异常。比值合成采用 ETM5/1 提取与铝土矿化有关的蚀变信息、采用 ETM3/1 提取与铁矿化有关的蚀变信息、同时采用采用 ETM5/7、4/3，然后再通过与主组分分析图像进行新的波段组合，选择了既反映地貌特征，又能够区铝土矿化、铁矿化及砂岩植被信息的 PCA1(1457)、PCA3(1457)波段和 ETM5/1 波段组合，合成了假彩色信息提取图像。图像上提取出来的矿化信息与填图所确定的矿体边界十分吻合。

为了确定子区范围内铝土矿的矿化分布、含铁矿化分布面积；我们根据填图过程中实地确认的地物分布特征，对图像进行了监督分类，参加分类的图像以主成分 + 比值合成图像 PCA1(1457) + 5/1 + PCA3(1457)为基础，选已知铝土矿分布区、铁矿化分布区；砂岩分布区；植被覆盖(热带雨林)区；河流水系五个类型为训练靶区进行分类，分类目的方面确定了子区铝、铁矿体的分布范围(包括工作区和外围)，另一方面，通过分类，定量地计算出矿体的分布面积。监督分类采用了最大似然法、平行六面体法和最小距离法。经对比分析，最大似然法分类与实际情况吻合较好(见图 2)。

3.4. “比值 + 主成分分析 + 光谱角填图(SAM)”法

针对 ASTER 数据，先利用“比值 + 主成分分析”



图例 森林 水体 砂岩 铝土矿 铁矿

Figure 2. Mineralization information supervised classification map of ETM+ image

图 2. ETM+影像矿化信息监督分类图

组合的方法，增强波罗芬高原子区矿化蚀变信息，然后利用“光谱角填图”进一步将该区矿化蚀变信息提取出来。

在波罗芬高原子区的 ASTER4/6 比值图像上，热流体蚀变带、粘土矿物富集带、碳酸盐类岩石以及含铁石英砂岩都呈现高比值，可以利用这一波谱特征来提取含 OH 的蚀变矿物信息。

在区域矿产预测中，通常用 ASTER1、ASTER3、ASTER4、ASTER(N)的波段组合主成分分析法提取含羟基(OH⁻)的蚀变矿物，N 的选择由研究区的蚀变矿物

的波谱特征决定^[10], PC3 与 PC4 反映岩石矿物的信息^[15]; 用 ASTER1、ASTER2、ASTER3、ASTER4 波段组合提取含 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 等的蚀变矿物异常。

因为本区含羟基的蚀变矿物(如 Al-OH、蒙脱石、伊利石等)在 ASTER5、ASTER6 波段有共同的吸收谷, 故选择 ASTER1、ASTER3、ASTER4、ASTER(5+6)/2 组合进行主成分分析, PC1 与 PC2 分别反映地形地貌和森林植被信息; PC3 主要为砂岩的信息; PC4 高亮度值反映了砂岩的信息, 低亮度值反映了 ASTER5、6 波段的信息, 主要为铝土矿、铁矿化的信息。

由上述分析可知, PC4(见表 1)为含有羟基的蚀变矿物信息的主向量, 虽然信息微弱, 但仍能成功地分离提取出来, 然而提取的异常信息, 有相当一部分仍是假异常信息。因此, 还需要与地质资料相结合, 通过后处理加以取舍。

本文采用“比值 + 主成分分析”组合的方法, 增强波罗芬高原子区矿化蚀变信息。比值法采用 ASTER4/6 提取与铝土矿有关的蚀变信息; 主成分分析法采用 ASTER1, 3, 4, (5+6)/2 波段组合提取与羟基为主的基团异常。经过多次实验比较, 选择了能够区分铝土矿、铁矿化的 PC1[1, 3, 4, (5+6)/2](R) + ASTER4/6(G) + PC4[1, 3, 4, (5+6)/2](B)波段组合, 合成了假彩色影像, 该影像很好地增强了铝土矿的矿化蚀变信息。

以 PC1(R) + ASTER4/6(G) + PC4(B)合成的假彩色图像为底图, 结合目视解译, 对照已知地质矿产图, 选已经增强的铝土矿、铁矿化、河流、森林、砂岩等信息为分类参考的端元, 运用光谱角填图法来进行分类。为了提高视觉效果, 应用邻区处理法对生成的光谱角填图(SAM)分类结果进行 3×3 的分类平滑处理, 去掉一些碎屑, 得到最终的分类图(见图 3)。

3.5. 矿化蚀变信息提取对比分析

为了对提取矿化蚀变信息进行评价, 分别将 ETM+数据和 ASTER 数据提取的铝土矿矿化信息图与已知地质图进行对比, 发现两张铝土矿矿化信息图上铝土矿矿体及砂岩野外地质填图所圈出的铝土矿矿体及砂岩的形状与分布范围基本一致。其中, 黄色部分表示铝土矿分布区, 与野外勘查结果十分吻合; 红色部分表示含铁较高区域, 与野外勘查结果吻合程

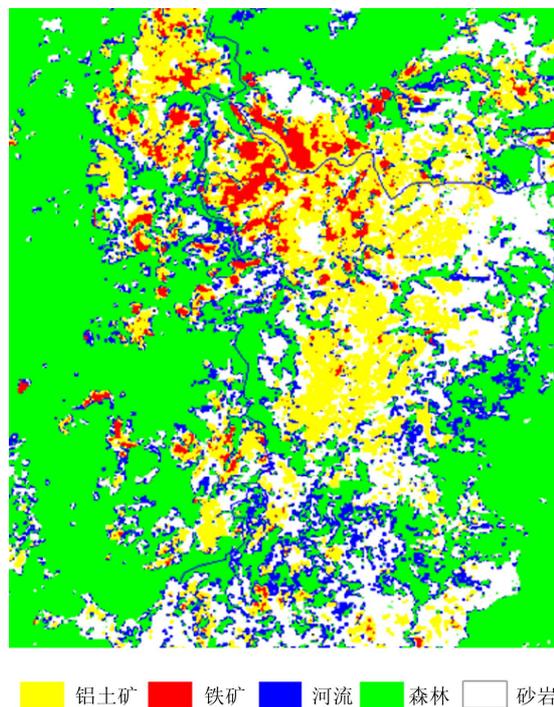


Figure 3. mineralization information SAM classification map of ASTER image
图 3. ASTER 影像矿化信息 SAM 分类图

度较高; 白色部分表示砂岩分布区, 与野外勘查结果基本吻合。比较图 2 与图 3 可以看出, 图 3 中铝土矿与砂岩的界线更清楚, 与野外调查的结果更吻合, 这主要是因为 ASTER 数据的地面分辨率和波谱分辨率均较 ETM+数据要高, ASTER 数据区分矿物的能力更强, 因而 ASTER 数据提取的铝土矿矿化信息更准确。

4. 结论

本文针对 ETM+和 ASTER 两种不同的多光谱卫星遥感数据, 分别采用“比值 + 主成分分析 + 监督分类”和“比值 + 主成分分析 + 光谱角填图”的矿化蚀变信息提取模型, 有效提取了研究区红土型铝土矿的矿化信息, 由此圈出的铝土矿矿体与野外勘查结果十分吻合。说明不仅可以利用 ETM+数据和 ASTER 数据提取红土型铝土矿矿化信息, 而且可以根据提取的矿化信息直接圈定矿体, 大大提高了红土型铝土矿的勘查效率, 省时省力。ASTER 数据因为地面分辨率和波谱分辨率均较高, 所提取的信息更准确, 因而更具有优势。两种方法在两种遥感数据的成功应用, 为其他地区的同类型矿床及红土型镍矿的勘查提供了一种快速有效经济的方法和途径。

参考文献 (References)

- [1] 邓吉秋, 谢阳, 张宝一等. ETM+图像锰矿化蚀变信息提取与找矿预测[J]. 国土资源遥感, 2011, 23(1): 102-105.
- [2] F. F. Sabins. Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 1999, 14(3-4): 157-183.
- [3] F. B. Henderson 等著, 范法明(译), 顾皓民(校). 卫星勘查铝土矿[J]. 轻金属, 1995, 32(1): 1-13.
- [4] 吕凤军, 郝跃生, 石静等. ASTER 遥感数据蚀变遥感异常提取研究[J]. 地球学报, 2009, 2(30): 271-276.
- [5] 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.
- [6] 高光明, 成功, 杨牧等. 老挝占巴塞省帕克松地区铝土矿资源潜力评价[R]. 长沙: 中南大学地学与环境工程学院, 2006.
- [7] 成功, 高光明, 陈松龄. 老挝波罗芬高原铝土矿地质特征与成矿规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 2(39): 380-386.
- [8] 胡静波, 高光明. 老挝波罗芬高原红土型铝土矿成矿控制因素分析[J]. 科技创新导报, 2008, 30: 16-17.
- [9] 国土资源部信息中心. 世界矿产资源年评(2000~2001)[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [10] 宋国明. 我国与周边国家进行矿业投资合作的前景分析[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [11] 仓向辉. 老挝铝土矿中铁矿物微观结构及反应特性的研究[J]. 冶金分析, 2010, 30(7): 16-20.
- [12] 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.
- [13] 丛丽娟, 岑况, 朱所等. 利用 ASTER 数据提取蚀变异常方法研究——以内蒙古朱拉扎嘎金矿为例[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2007, 266: 652-658.
- [14] 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. 国土资源遥感, 2002, 54(4): 30-36.
- [15] A. P. Crosta, F. C. R. Desouza. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(21): 4233-4240.