

doi: 10.12029/gc20170213

代晶晶, 王登红, 代鸿章, 刘丽君, 吴亚楠. 2017. 遥感技术在川西甲基卡大型锂矿基地找矿填图中的应用[J]. 中国地质, 44(2): 389–398.

Dai Jingjing, Wang Denghong, Dai Hongzhang, Liu Lijun, Wu Yanan. 2017. Geological mapping and ore-prospecting study using remote sensing technology in Jiajika area of Western Sichuan Province[J]. Geology in China, 44(2): 389–398(in Chinese with English abstract).

遥感技术在川西甲基卡大型锂矿基地 找矿填图中的应用

代晶晶¹ 王登红¹ 代鸿章¹ 刘丽君² 吴亚楠²

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

2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:四川甲基卡矿田是中国乃至世界上锂矿资源最集中的地区之一, 目前运用遥感技术开展甲基卡型锂矿的研究工作尚较为薄弱, 文章运用遥感技术在甲基卡特殊地貌区开展找矿填图应用研究, 建立了研究区典型岩石及矿物的波谱数据库, 总结了研究区黑云母片岩、十字石片岩、十字石堇青石片岩、角闪岩、二云母花岗岩、含锂辉石伟晶岩、无矿伟晶岩、石英脉、长石斑晶、锂辉石单晶、云母、绿柱石的波谱特征; 之后分别基于中等分辨率遥感数据 Landsat 8 和高空间分辨率遥感数据 Geosy-1 进行图像处理和信息提取, 开展了地质填图应用初步研究。研究结果表明遥感技术作为一种新兴的技术手段, 对甲基卡型锂矿的填图及找矿具有重要的指导意义, 可以作为今后地质找矿工作的“排头兵”。

关键词: 甲基卡; 波谱; Landsat 8; Geosy-1; 填图; 锂矿

中图分类号: P627; P618.41 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2017)02–0389–10

Geological mapping and ore-prospecting study using remote sensing technology in Jiajika area of Western Sichuan Province

DAI Jingjing¹, WANG Denghong¹, DAI Hongzhang¹, LIU Lijun², WU Yanan²

(1. *MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 2. *School of Earth Science and Resource, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: The Jiajika ore deposit has become one of the areas with the richest Li resources in China and even in the world; nevertheless, remote sensing research on Li resources remains very insufficient. In this paper, geological mapping and ore-prospecting studies in Jiajika area were conducted using remote sensing technology. Spectral library of typical rocks and minerals collected in this area was built, and spectral characteristics of rocks and minerals including biotite schist, granatite schist, granatite

收稿日期: 2017–03–20; 改回日期: 2017–04–15

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20160055、DD20160056)、国家自然科学基金项目(4140020641)联合资助。

作者简介: 代晶晶, 女, 1982年生, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 遥感地质专业, 主要从事遥感地质找矿及矿山监测研究工作;

E-mail: daijingjing863@sina.com。

cordierite schist, hornstone, granite, spodumene-bearing pegmatite, pegmatite without spodumene, quartz vein, feldspar, spodumene monocrystal, biotite, and aquamarine were analyzed. Then geological mapping and ore prospecting were studied based on image processing and interpretation of middle spatial resolution remote sensing data Landsat 8 and high spatial resolution remote sensing data Geoeye-1. The results indicate that remote sensing technology is instructive for geological mapping and ore prediction of Jiajiaka type lithium ores and is likely to be a good indicator before geological study.

Key words: Jiajiaka; spectrum; Landsat 8; Geoeye-1; geological mapping; lithium ores

About the first author: DAI Jingjing, female, born in 1982, doctor, associate professor, supervisor of master candidates, mainly engages in the study of geological study using remote sensing technology; E-mail: daijingjing863@sina.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Projects (No. DD20160055, DD20160056) from; National Natural Science Foundation of China (No. 4140020641).

1 引 言

甲基卡一带处于青藏高原的东部地区,工作区海拔4200 m以上,该地区属于雷击区,气候寒冷,有效工作时间较短。因此,如何提高工作效率又不漏掉重要的矿化信息,如何区别冰漂砾(及其他第四系残坡积物)与矿化露头等等,都需要高新技术手段支撑(秦宇龙等,2015;王登红等,2016),宏观地质调查中的遥感技术作为一种新兴的监测手段,可以迅速、动态地提供多时相、大范围的实时信息,具有常规调查难以比拟的优势,通过与地质等信息的密切结合,可以实现既保护环境、提高工作效率又能发现异常、查证异常的目标。

甲基卡稀有矿田地质矿产资源遥感工作程度总体偏低。2003年,在开展1:25万康定幅区域地质调查的同期,开展了1:25万康定县幅遥感解译,初步圈定了区域环形和线性构造。2013年,四川扎坝—龙古地区矿产远景调查项目应用ETM遥感数据在研究区开展了1:5万遥感解译,初步对区内构造格架、地层层序、岩体及羟基、铁染两类遥感异常信息等地质内容进行了解译,为区内矿产调查提供了遥感找矿信息。2015年“四川三稀资源综合研究与重点评价”项目组在地质综合分析的基础上,初步对甲基卡地区进行了Geoeye高分遥感数据解译,圈定了一些构造及岩脉信息。目前而言,甲基卡地区的遥感工作还有许多科学问题没有解决,如含矿岩体、围岩及其他岩体、地层之间能否通过遥感技术进行区分?甲基卡及外围有多少条伟晶岩脉,这些伟晶岩脉哪些有矿化,能否通过遥感技术进行识别?能否建立川西甲基卡型锂矿的遥感找矿模

型?这些问题就要求必须探索一套有效的遥感技术方法,结合成矿理论,进行示范研究及找矿实践。本文针对甲基卡特殊地貌景观区,建立了不同地质体和典型矿物波谱特征模型,开展多源遥感数据的处理与信息提取工作,综合波谱信息和图像特征总结出一套快速、有效地识别不同地表地质体的技术方法,初步建立了遥感找矿模型,为整个川西地区甲基卡型锂矿的调查评价提供了示范。

2 研究区及遥感数据源简介

2.1 研究区介绍

甲基卡花岗伟晶岩型锂多金属矿床位于四川省西部康定、雅江、道孚三县交界处,面积约62 km²,距国道川藏公路塔公站25 km,有简易公路相通。矿床地处青藏高原东南缘,松潘甘孜地槽褶皱系东缘、石渠雅江地向斜核心部位四级构造单元甲基卡穹隆状短轴背斜中(郝雪峰等,2015;刘丽君等,2015)。矿区内出露地层为三叠系西康群砂页岩,经区域变质和接触变质作用而形成的黑云母石英片岩、二云母石英片岩和红柱石、十字石石英片岩等中浅变质岩系。围绕花岗岩内、外接触带派生出一系列花岗伟晶岩脉,目前已发现含锂、铍、铌、钽的伟晶岩矿脉114条(王登红等,2005)。

2.2 遥感数据源简介

2.2.1 波谱测试数据

光谱测量技术是近年来发展的一种高光谱测量技术,可以快速准确地获取岩体及蚀变信息,是开展区域遥感调查的理论基础(连长云等,2005; Moghtaderi et al., 2007; Yang et al., 2011)。岩性光谱是岩石、矿物对特定波长范围的电磁波的反射、

吸收和辐射的综合反映,在可见-近红外光谱区(0.4~1.3 μm),岩石吸收光谱的产生机理主要是内部金属阳离子的电子跃迁或振动过程;在短波红外光谱区(1.3~2.5 μm),吸收光谱由羟基、水分子和碳酸根等基团的分子振动引起(徐庆生等,2011;Biel et al., 2012)。本次光谱测量使用的仪器为ASDFieldspec-4光谱仪,该仪器的探测波长范围为350~2500 nm,光谱分辨率为3 nm(350~1000 nm)和10 nm(1000~2500 nm)(代晶晶等,2013;陈圣波等,2015)。

2.2.2 Landsat 8 卫星数据

2013年2月11号,NASA成功发射了Landsat 8卫星,Landsat 8上携带有2个主要载荷:OLI和TIRS。其中OLI(全称:Operational Land Imager,陆地成像仪)包括9个波段,空间分辨率为30 m,其中包括一个15 m的全色波段,成像宽幅为185 km \times 185 km(祝佳,2016)。本文收集到的数据获取时间为2015年1月2日。

2.2.3 Geoeye-1 卫星数据

Geoeye-1卫星是美国的一颗商业卫星,于2008年9月6日从美国加州范登堡空军基地发射。Geoeye-1卫星不仅能以0.41 m黑白(全色)分辨率和1.65 m彩色(多谱段)分辨率搜集图像,而且还能以3 m的定位精度精确确定目标位置(张华等,2011)。本文收集到的数据获取时间为2012年10月25日。

3 典型岩体及矿物的波谱特征研究

甲基卡矿区三叠纪地层经历了多期次、多类型、多相叠加的变质作用,生成以岩体为中心的透辉石带、十字石带、红柱石带、石榴石带、黑云母带等蚀变晕圈,构成较完整的蚀变带序列。对伟晶岩而言,其围岩有明显的接触变质及气液蚀变作用,形成由脉壁向外电气石带、堇青石带和绢云母绿泥石化带(王登红等,2005)。本文野外采样共计179个点,基本覆盖了甲基卡地区的主要矿脉,共采集样品750件,采样点的位置如图1所示。对其中的320件不同类型的岩石及单矿物标本进行波谱测试与分析,建立了甲基卡矿床的典型岩石及矿物的波谱库。

波谱测试时,为使测量的样品波谱尽量精确,

白板定标时间为每隔10 min定标一次;为使样品的波谱尽量消除外界干扰的因素,针对每个样品测量5个数据,对于测量的5个数据求平均得到每个样品的光谱。最后对于每一件样品都建立了一张样品信息的记录表,内容主要包括序号、样品编号、样品地点、样品照片、样品岩性鉴定、波谱测试结果,与USGS波谱库中对比、分析及结论。根据初步总结,甲基卡地区岩性主要可以分为黑云母片岩、十字石片岩、十字石堇青石片岩、角岩、二云母花岗岩、含锂辉石伟晶岩、无矿伟晶岩、石英脉、长石斑晶、锂辉石单晶、云母、绿柱石等。对典型岩石及矿物的波谱特征进行了总结,如表1所示。对测量结果进行了归类,可以得出以下结论:

(1)甲基卡地区主要的岩石及矿物类型包括黑云母片岩、十字石片岩、十字石堇青石片岩、角岩、二云母花岗岩、含锂辉石伟晶岩、无矿伟晶岩、石英脉、长石斑晶、锂辉石单晶、绿柱石等。每种岩性都具有其独特的波谱特征,可作为区分每种岩性的标志。

(2)3种围岩波谱特征基本一致,整体反射率较低,在0.2以下。整体波谱比较平缓,没有明显的特征吸收。

(3)角岩的波谱在1500 nm之前的波段反射率较低,之后有一个明显的抬升。因含有电气石,故具有电气石的特征吸收。

(4)含锂辉石的伟晶岩与锂辉石单晶的波谱相似,具有锂辉石独特的吸收特征。

(5)含锂辉石伟晶岩、不含锂辉石伟晶岩、花岗岩波谱特征可以区分。含锂辉石伟晶岩在1413 nm处吸收谷较为宽缓,不含锂辉石伟晶岩与花岗岩在1413 nm处吸收谷较窄;含锂辉石伟晶岩吸收谷在2207 nm,不含锂辉石伟晶岩与花岗岩吸收谷有10 nm的偏移,在2197 nm处。花岗岩在2247 nm处具有一处小的吸收谷。

4 基于多源遥感数据的地表露头不同地质体的圈定与区分

遥感图像真实地记录了岩石光(波)谱辐射特征及其形态特征。根据岩石的成分和结构构造对光谱的响应,通过图像处理,如比值分析、主成分分析、对应分析等,增强岩石光谱特征的差别,可进行岩性识别与区分(甘甫平等,2004;刘颖璠等,2012;

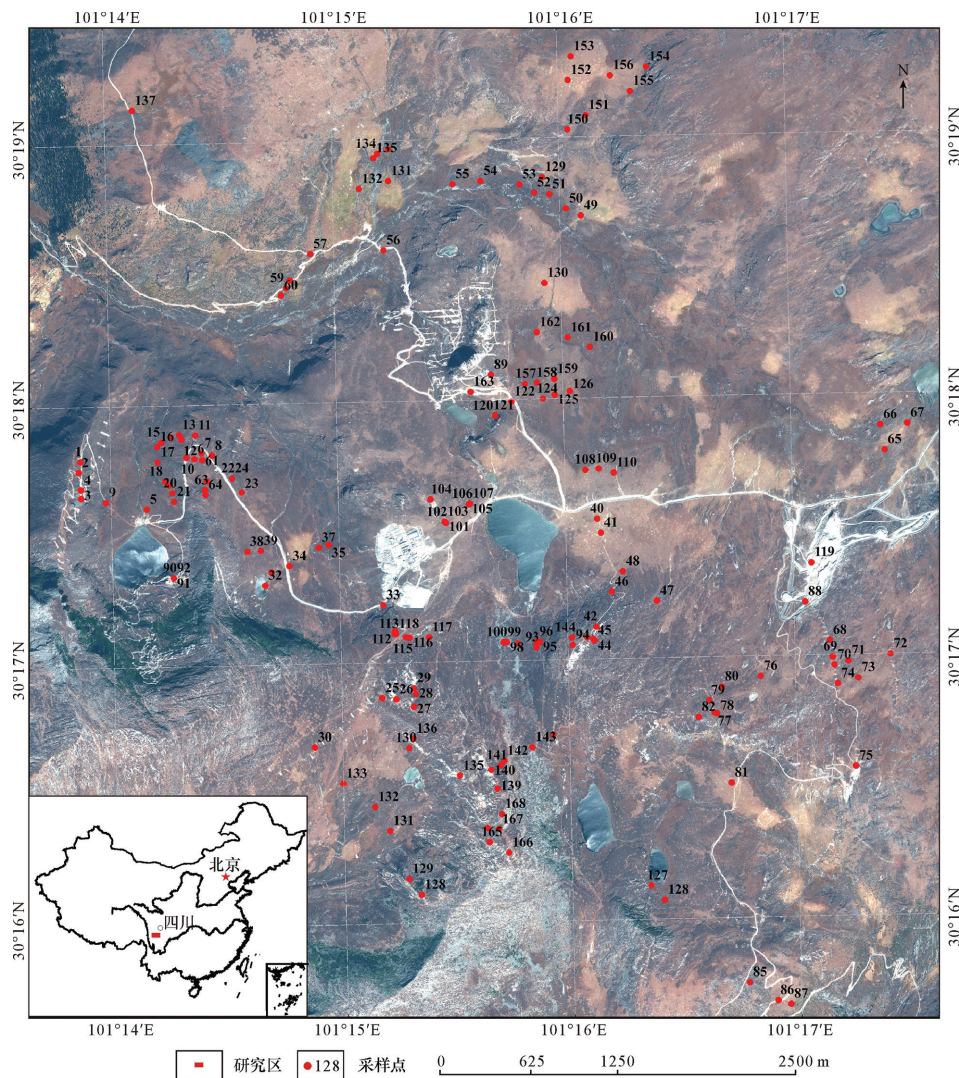


图1 野外采样点分布图

Fig.1 The distribution of samples collected in the field

雷天赐等,2012)。工作区第四系分布约占工作区面积的60%以上,主要有坡积物、残坡积物、沼泽堆积物及冰碛物等,其厚度一般在7~10 m。广泛分布的第四系堆积物给本区地质找矿工作带来了很大的难度,但X03矿体发现的过程表明,区内第四系残积物、残坡积物中的伟晶岩脉、含锂辉石伟晶岩脉,以及堇青石角岩化黑云母片岩的碎块和岩块,对隐伏的基岩有一定的指示意义,特别是部分具残积特征的含锂辉石伟晶岩块,在区内成带密集分布,经遥感解译具明显的特征影像,部分经钻探验证,其下基岩多为含锂辉石伟晶岩脉。因此运用多尺度遥感技术对区内伟晶岩露头进行圈定对于找

矿具有重要意义。本文选用Landsat 8、Geoeye两种不同分辨率遥感数据,结合不同地质体谱测试结果,尝试对区域不同地质体进行圈定,并重点圈定了伟晶岩岩块及近水平产状的片岩岩块等作为重点野外找矿线索,为地面综合调查和重点异常的查证聚焦目标,提高工作效率,指明方向。

4.1 基于中等空间分辨率遥感数据Landsat 8的信息提取及解译

本项目收集的Landsat 8原始数据为USGS网站下载,针对原始数据,做了多光谱与全色波段的融合、几何校正等处理,处理后的数据基本满足解译的需求,选取波段752彩色合成图像进行地物信

表1 甲基卡主要岩石及矿物的波谱特征
Table 1 Spectral characteristics of main rocks and minerals in the Jiajika ore deposit

岩石矿物名称及其波谱特征		波谱图	岩石矿物名称及其波谱特征		波谱图
黑云母片岩	反射率较低,一般在0.2以下。整体波谱较为平缓,吸收特征不明显,在2205 nm处有轻微吸收		二云母花岗岩	整体反射率中等,在0.5以下。在1413 nm、2197 nm处具有明显吸收特征,在1911 nm处吸收特征较弱或不明显,在2247 nm、2345 nm处有小的吸收谷	
十字石片岩	反射率较低,一般在0.2以下。整体波谱较为平缓,吸收特征不明显,在2205 nm处有轻微吸收		石英	整体反射率中等,在0.4以下。反射率曲线整体较为平缓,某些在1420 nm、1930 nm有小的吸收特征	
十字石膏青石片岩	反射率较低,一般在0.2以下。整体波谱较为平缓,吸收特征不明显,在2205 nm处有轻微吸收		长石	整体反射率中等,在0.6以下。反射率曲线整体较为平缓,在1865 nm处反射率有一个明显的下降趋势,在1413 nm、2000 nm、2102 nm、2200 nm、2349 nm处有几处小的吸收谷	
角岩	反射率在0.3以下,在1500 nm之前的波段反射率较低,在0.1以下。整体波谱呈上升趋势,在2205 nm、2247 nm、2297 nm、2370 nm处有四处明显的吸收特征,与电气石的波谱特征吻合		云母	整体反射率中等偏下,在0.4以下。在1410 nm、2200 nm具有明显的吸收特征,在2120 nm具有一个小的吸收肩,在1910 nm反射率明显下降的陡坡	
含锂辉石伟晶岩	整体反射率中等,在0.5以下。在1413 nm、1911 nm、2207 nm处具有明显吸收特征,与锂辉石的吸收特征吻合		锂辉石	整体反射率中等,在0.5以下。在1413 nm、1911 nm、2207 nm处有吸收谷,在1000 nm处有一宽缓的吸收特征	
不含锂辉石伟晶岩	整体反射率中等偏上,在0.7以下。在1413 nm、2197 nm处具有明显吸收特征,在1911 nm、2345 nm处有次一级的吸收特征		绿柱石	整体反射率中等,在0.6以下。主要吸收谷在1405 nm、1896 nm,另外在959 nm、1150 nm、1463 nm、2059 nm、2151 nm、2202 nm处具有次一级吸收谷,在1374 nm、1792 nm、1835 nm处有吸收肩	

息的解译。根据野外情况及数据的可解译性,主要解译的类型包括花岗岩、伟晶岩、地层、第四系、植被(树木及草地)、河流、湖泊等,解译结果如图2。

4.2 基于 Geoeye-1 高空间分辨率遥感数据的信息提取及解译

针对购买的 Geoeye-1 数据,主要进行了正射校正、几何配准、几何校正、数据融合等。结合甲基卡地区地质图(1:10000),对重点研究区开展了不同地质体类型的解译工作,根据 Geoeye 数据对不同地质体的表现及其可解译性,解译的主要地物类型包括花岗岩、伟晶岩、地层、第四系、河流、湖泊等,解译结果图如图3所示。

通过对基于遥感数据解译的结果与1:1万地质图进行对比,可见地质图存在边界不准确等问题,基于遥感数据可以较为准确地确定不准确边界的位置,并对其进行修正。根据不同岩性的遥感图像特征,对前人的地质图岩性边界进行修正。其中地层界线大部分比较准确,但是一些地层边界存在误差(图4a),一些岩体界线存在一定的坐标位置偏差(图4b)。

4.3 基于 Geoeye-1 遥感数据的伟晶岩靶区圈定

前人研究表明,伟晶岩转石对于甲基卡地区锂矿的寻找意义重大,故根据高分遥感数据的优势,重点对研究区的伟晶岩转石进行了信息提取。伟晶岩转石一般在高分遥感数据真彩色合成图像上呈高亮度白色图斑显示,一般成群出现,根据这一特性可进行圈定,在研究区共圈定了65个遥感异常,对34个遥感异常进行了野外异常验证,共计20个图斑为含锂辉石的伟晶岩露头或转石。

根据野外验证结果,遥感图像上的白色图斑可以分为两种,其中一种为伟晶岩或花岗岩,另外一种为近似水平产状的片岩。区分两者的标志一方面可以根据图斑形状,伟晶岩或花岗岩一般棱角不太明显,为独立不规则圆形图斑,片岩一般棱角较为明显,为多边形图斑;另外可以根据图斑周边的位置来判别,片岩图斑一般周边有地层的图像特征,而伟晶岩或花岗岩一般没有(图5)。对圈定的白色图斑可进一步划分,共在研究区圈定了8处找矿有利靶区,结果如图6所示。

5 讨 论

5.1 遥感技术区分各类岩石的精度

利用不同的遥感数据在不同地貌区区分各类岩石的能力是有差异的,主要取决于遥感数据的空间分辨率、波谱分辨率及地表岩石的裸露程度等几个方面。甲基卡地区地表植被覆盖较为严重,遥感技术对围岩及伟晶岩转石的识别具有一定难度,相对于多光谱遥感数据(Landsat 8、Geoeye-1等),高光谱遥感数据对地层及伟晶岩转石的区分效果较好;相对于中等空间分辨率遥感数据 Landsat 8, Geoeye-1 遥感数据对地层及伟晶岩转石的解译效果较好。

5.2 找矿效果

伟晶岩转石对于甲基卡型锂矿找矿具有重要意义,故本文遥感找矿研究中重点开展了伟晶岩转石的解译与识别工作,通过野外验证,具有较好的找矿效果,野外验证的34个遥感异常基本为伟晶岩转石,其中20个图斑为含锂辉石的伟晶岩露头或转石。故利用本文得出的认识在川西其他相同地质背景下进行锂矿找矿实践具有重要的推广借鉴意义。

6 结 论

本文对甲基卡锂矿集区采集的岩体及矿物的波谱特征开展了全面的测试与分析研究,每种岩体及矿物都具有其独特的波谱特征,从波谱层面上可以作为区分每种岩石及矿物的理论基础及依据。基于对岩石波谱特征分析的认识,对 Landsat 8、Geoeye 两种不同空间分辨率的遥感数据开展遥感地质填图研究,并针对锂辉石转石密集区域圈定了有利靶区,为整个川西地区甲基卡型锂矿的调查评价提供了示范。尽管取得了一些初步的成果,还需要对一些科学问题进行深入的研究,如根据不同岩性的波谱特征的表现可见片岩与伟晶岩(花岗岩)具有明显的波谱差异,但是在 Geoeye-1 遥感图像上由于片岩水平产状,导致两者都是高反射,无法很好区分,今后可收集波谱分辨率较高的 Worldview3 数据将其进行区分;又如由于甲基卡处于高原地区,野外工作条件较为恶劣,道路较少,对

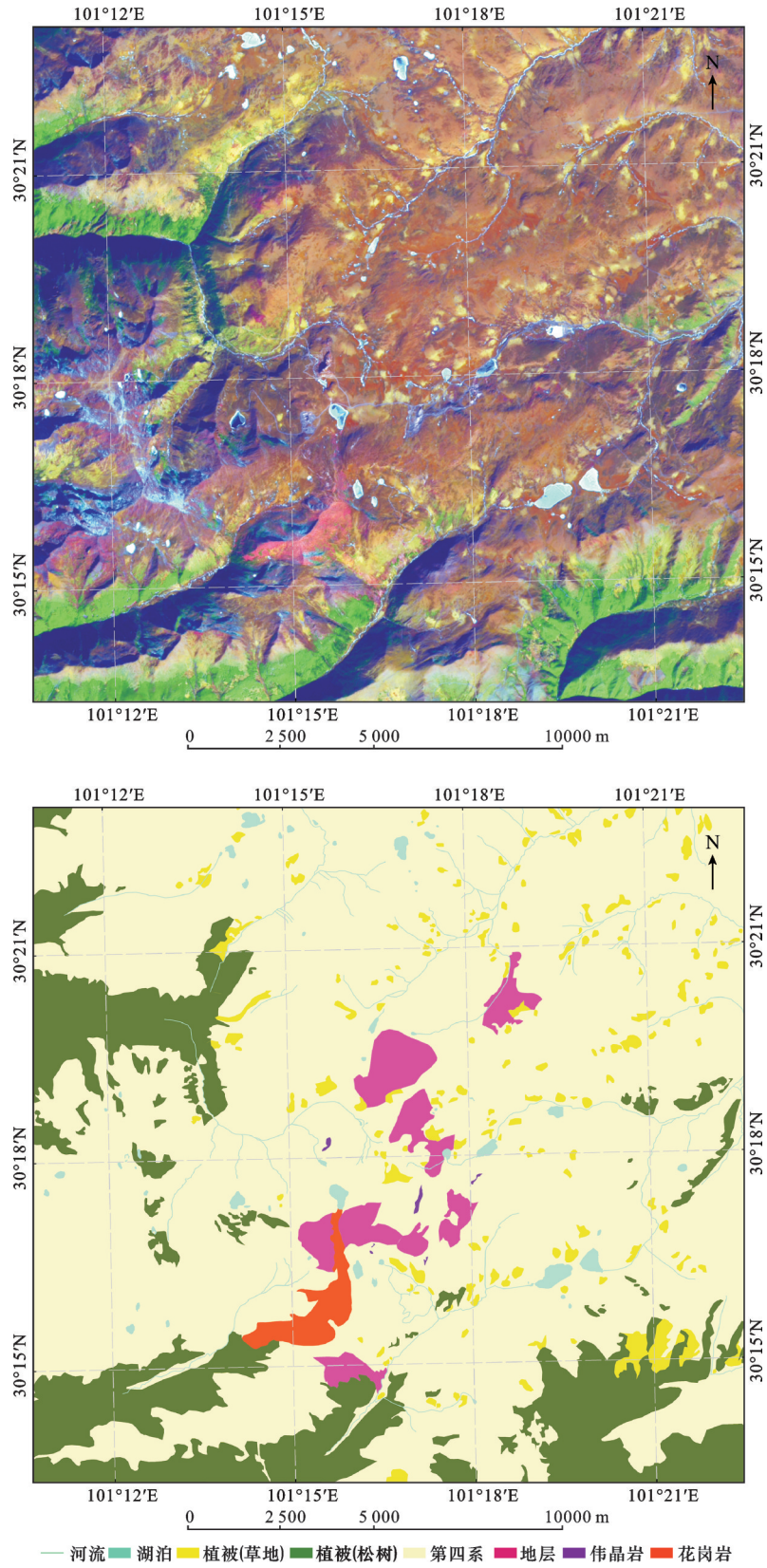


图2 Landsat 8 752波段彩色合成图像及其解译结果图

Fig.2 Color composition image of 752 bands of Landsat 8 and the result of interpretation

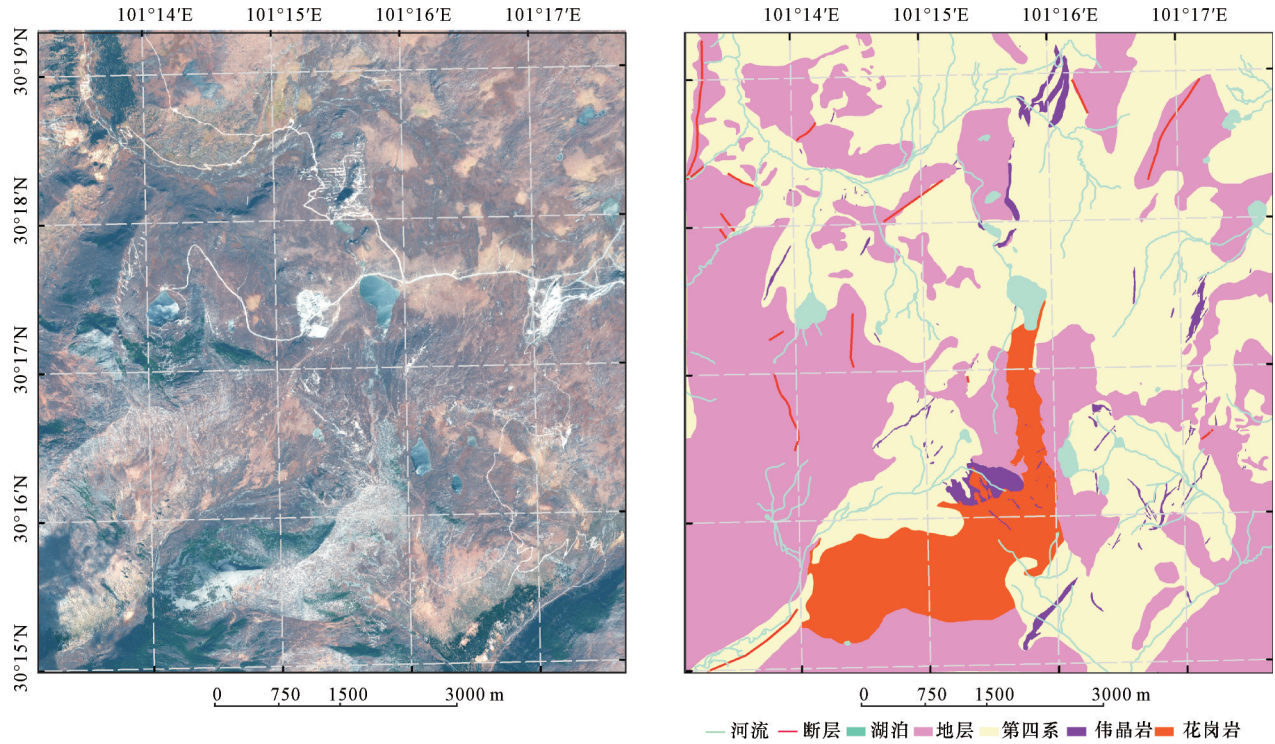


图3 Geosyde-1 遥感影像图(432波段组合)及其解译结果图
 Fig.3 Color composition image of 432 bands of Geosyde-1 and the result of interpretation

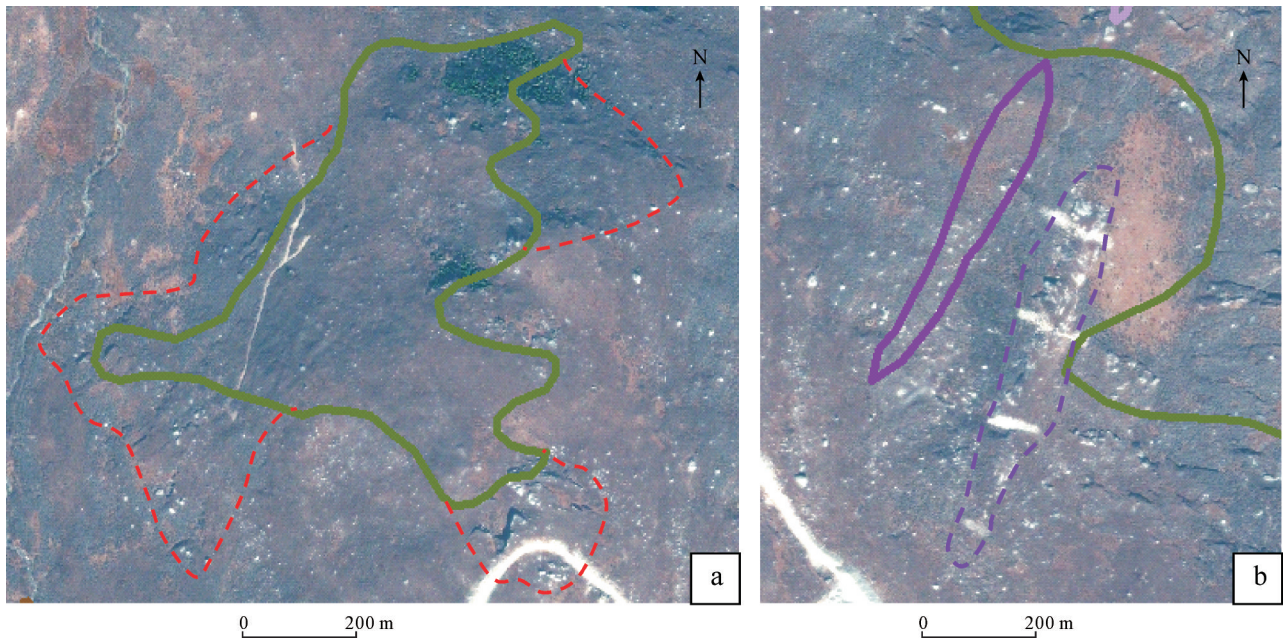


图4 地层界线的修正(图a绿色实线为原地质图地层界线,红色虚线为修正后的地层界线;
 图b紫色实线为原地质图岩脉界线,紫色虚线为修正后的岩脉界线)

Fig. 4 The correction of geological boundary (Green lines in image a represent stratigraphic boundary in original geological map, and red dotted lines represent the corrected stratigraphic boundary; purple lines in image a represent vein in original geological map, and purple dotted lines represent the corrected vein boundary)

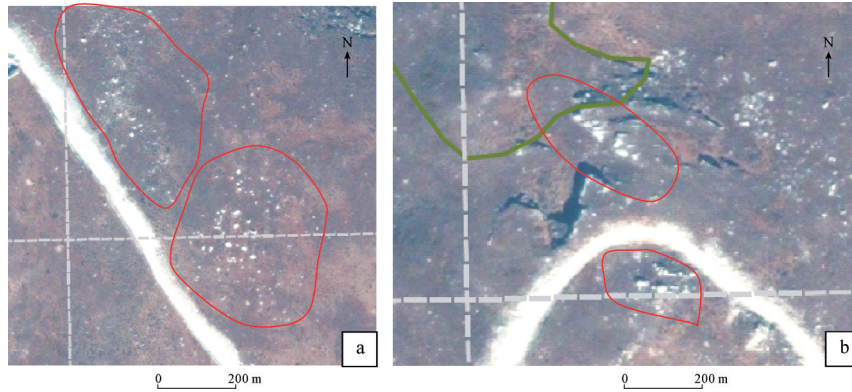


图5 白色图斑解译结果图(a图中红色区域的亮白色图斑为含锂辉石的伟晶岩,b图中红色区域的亮白色图斑为片岩)
 Fig.5 White spot in remote sensing image (White spot in image a is spodumene-bearing pegmatite, white spot in image b is schist)

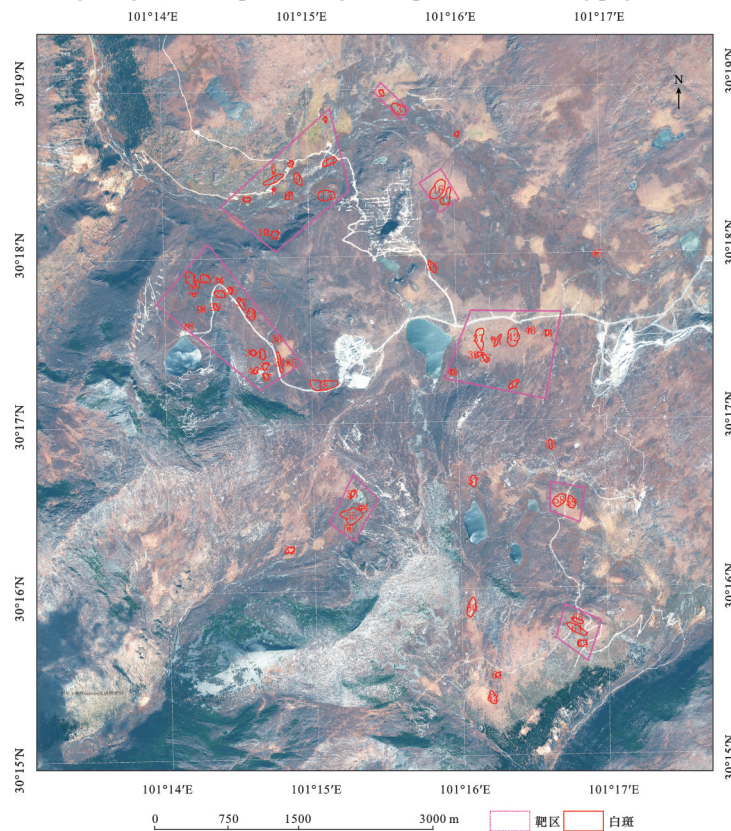


图6 甲基卡地区伟晶岩转石及找矿靶区提取结果图

Fig.6 The interpretation image of pegmatite boulder and ore-prospecting areas in Jiaguka

于圈定的某些有利区域,无法进行野外验证,建议今后对更多的靶区进行野外验证。

致谢:审稿专家及编辑部老师提出的建设性意见对于提高文章水平很有裨益,在此一并表示感谢。

References

Biel C, Subias I, Acevedo R D, Yusta I, Velasco F. 2012. Mineralogical

IR- spectral and geochemical monitoring of hydrothermal alteration in a deformed and metamorphosed Jurassic VMS deposit at Arroyo Rojo, Tierra delFuego, Argentina[J]. Journal of South American Earth Sciences, 35: 62-73.

Chen Shengbo, Zhang Ying, Guo Pengju, Zhao Ying, Xie Minghui. 2015. Rock spectral measurements and their characterization analysis in Xincheng area, Liaoning Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 45(1): 320- 326(in Chinese)

- with English abstract).
- Dai Jingjing, Wang Runsheng. 2013. Spectral characteristics of typical transparent mineral groups[J]. Geological Science and Technology Information, 32(2): 8–14(in Chinese with English abstract).
- Gan Fuping, Wang Runsheng. 2004. Remote Sensing Principle and Technology for Rocks and Minerals Information Extraction [M]. Beijing: Geological Publishing House, 19–42(in Chinese).
- Hao Xuefeng, Fu Xiaofang, Liang Bin, Yuan Linping, Pan Meng. 2015. Formation ages of granite and X03 pegmatite vein in Jiajika, western Sichuan and their geological significance[J]. Mineral Deposits, 34(6):1199–1208(in Chinese with English abstract).
- Lei Tianci, Cui Fang, Yu Fengming. 2012. The application of multi-source information fusion based on remote sensing to ore prospecting prediction in southern Yongzhou of Hunan Province[J]. Geology in China, 39(4):1069–1080(in Chinese with English abstract).
- Lian Changyun, Zhang Ge, Yuan Chunhua. 2005. Application of SWIR reflectance spectroscopy to Pulang porphyrycopper ore district, Yunnan Province[J]. Mineral Deposits, 24(6):621–636(in Chinese with English abstract).
- Liu Lijun, Fu Xiaofang, Wang Denghong, Hao Xuefeng, Yuan Linping. 2015. Geological characteristics and metallogeny of Jiajika–style rare metal deposits[J]. Mineral Deposits, 34(6): 1187–1198(in Chinese with English abstract).
- Liu Yingfan, Chen Jianping, Hao Junfeng, Liang Lixin, Cui Laiwang. 2012. Researches on metallogenic remote sensing information extraction and metallogenic prediction in Zhulazhaga area of Inner Mongolia[J]. Geology in China, (4):1062–1068(in Chinese with English abstract).
- Moghtaderi A, Moore F, Mohammadzadeh A. 2007. The application of advanced space-borne thermal emission and reflectance (ASTER) radiometer data in the detection of alteration in the Chadormalu paleocrater, Bafq region, Central Iran[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 30: 238–252.
- Qin Yulong, Hao Xuefeng, Xu Yunfeng, Wang Xianfeng. 2015. Metallogenic regularity and prospecting criteria of granite type rare metal deposits in Jiajika area, Sichuan Province[J]. Geological Survey of China, 2(7): 35–39.
- Wang Denghong, Li Jiankang, Fu Xiaofang. 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating for the Jiajika pegmatite–type rare metal deposit in western Sichuan and its significance[J]. Geochemica, 34(6): 541–546(in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Wang Ruijiang, Fu Xiaofang, Sun Yan, Hao Xuefeng, Liu Lijun, Pan Meng, Hou Jianglong, Dai Jingjing, Tian Shihong, Yu Yang. 2016. A discussion on the major problems related to geological investigation and assessment for energy metal resources base: a case study of the Jiajika large lithium mineral resource base[J]. Acta Geoscientica Sinica, 37(4): 471–480(in Chinese with English abstract).
- Xu Qingsheng, Guo Jian, Liu Yang, Huang Shufeng, Li Qiushui, Chen Yushui. 2011. Application of shortwave infrared spectrum mineral analyzer(BJKF–1) to alteration mineral mapping at Pannan Tibet[J]. Geology and Exploration, 47(1): 107–112(in Chinese with English abstract).
- Yang K, Huntington J F, Gemell J B, Scott K M. 2011. Variations in composition and abundance of white mica in the hydrothermal alteration system at Hellyer, Tasmania, as revealed by infrared reflectance spectroscopy[J]. Journal of Geochemical Exploration, 108(2):143–156.
- Zhang Hua, Zhao Chuanyan, Zhang Bo, Peng Shouzhong. 2011. The application of high resolution satellite Imagery GeoEye–1 on the Biomass Estimation of Tamarix Ramosissima in Lower Reaches of Heihe River Basin[J]. Remote Sensing Technology and Application, 26(6): 713–718(in Chinese with English abstract).
- Zhu Jia. 2016. Analysis of Landsat 8 satellite remote sensing data preprocessing[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 28(2): 21–27(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈圣波, 张莹, 郭鹏举, 赵莹, 谢明辉. 2015. 辽宁兴城地区岩石光谱测试及特征分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 45(1): 320–326.
- 代晶晶, 王润生. 2013. 常见透明矿物类波谱特征研究综述[J]. 地质科技情报, 32(2): 8–14.
- 甘甫平, 王润生. 2004. 遥感岩矿信息提取基础与技术方法研究[M]. 北京:地质出版社, 19–42.
- 郝雪峰, 付小方, 梁斌, 袁蕾平, 潘蒙. 2015. 川西甲基卡花岗岩和新三号矿脉的形成时代及意义[J]. 矿床地质, 34(6): 1199–1208.
- 雷天赐, 崔放, 余凤鸣. 2012. 基于遥感的多源信息融合在湖南永州南部地区找矿预测中的应用[J]. 中国地质, 39(4): 1069–1080.
- 连长云, 章革, 元春华. 2005. 短波红外光谱矿物测量技术在普朗斑岩铜矿区热液蚀变矿物填图中的应用[J]. 矿床地质, 24(6):621–636.
- 刘丽君, 付小方, 王登红, 郝雪峰, 袁蕾平. 2015. 甲基卡式稀有金属矿床的地质特征与成矿规律[J]. 矿床地质, 34(6): 1187–1198.
- 刘颖璠, 陈建平, 郝俊峰, 梁丽新, 崔来旺. 2012. 内蒙古朱拉扎嘎地区成矿遥感信息提取及成矿预测研究[J]. 中国地质, (4): 1062–1068.
- 秦宇龙, 郝雪峰, 徐云峰, 王显峰. 2015. 四川甲基卡地区花岗岩型稀有金属矿找矿规律及标志[J]. 中国地质调查, 2(7): 35–39.
- 王登红, 李建康, 付小方. 2005. 四川甲基卡伟晶岩型稀有金属矿床的成矿时代及其意义[J]. 地球化学, 34(6): 541–546.
- 王登红, 王瑞江, 付小方, 孙艳, 王成辉, 郝雪峰, 刘丽君, 潘蒙, 侯江龙, 代晶晶, 田世洪, 于扬. 2016. 对能源金属矿产资源基地调查评价基本问题的探讨——以四川甲基卡大型锂矿基地为例[J]. 地球学报, 37(4): 471–480.
- 徐庆生, 郭健, 刘阳, 黄树峰, 李秋平, 陈玉水. 2011. 近红外光谱矿物分析技术在帕南铜–钼–钨矿区蚀变矿物填图中的应用[J]. 地质与勘探, 47(1): 107–112.
- 张华, 赵传燕, 张勃, 彭守璋. 2011. 高分辨率遥感影像 GeoEye–1 在黑河下游怪柳生物量估算中的应用[J]. 遥感技术与应用, 26(6): 713–718.
- 祝佳. 2016. Landsat8 卫星遥感数据预处理方法[J]. 国土资源遥感, 28(2): 21–27.