

伟晶岩型稀有金属矿的遥感找矿方法 ——以西昆仑大红柳滩地区为例

金谋顺,高永宝,李侃,宋忠宝*,燕洲泉

(中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心,自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室,陕西 西安 710054)

摘要:锂等稀有金属矿是国家重要的战略新兴矿产资源,在西昆仑大红柳滩一带显示较好的找矿潜力。但由其于海拔高、切割深,地表调查难度极大。通过分析地质矿产资料确定含矿层位,对Worldview-2高分遥感影像进行伟晶岩脉的识别,采用主成分变换对ASTER遥感影像提取与伟晶岩型锂矿成矿相关的遥感异常,结合稀有金属化探异常,圈定找矿靶区,能够为快速发现伟晶岩型锂矿资源提供支撑。笔者对该方法进行了系统介绍,并在西昆仑大红柳滩一带应用该方法发现505、507、俘虏沟南1号、俘虏沟南2号等多处大型锂铍矿产地,初步估算氧化锂资源量100万t以上,实现了高寒、高海拔、深切割地区伟晶岩型稀有金属矿的快速找矿突破。对方法的有效性进行了评价,其对西昆仑地区伟晶岩型矿床提供了重要的技术方法支撑,对于下一步外围找矿具有重要的借鉴意义。

关键词:遥感找矿;伟晶岩型锂矿;遥感异常;西昆仑

中图分类号:P627

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2019)04-0222-10

Remote Sensing Prospecting Method for Pegmatite Type Rare Metal Deposit ——Taking Dahongliutan Area in Western Kunlun for Example

JIN Moushun, GAO Yongbao, LI Kan, Song Zhongbao, SONG Zhongbao, YAN Zhouquan

(Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant ore Deposits, MNR, Xi'an Center of China Geological Survey/Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Rare metal mines, like lithium, rubidium, and cesium, are important emerging strategic mineral resources in China. The Dahongliutan area of West Kunlun shows great potential for prospecting these mines. However, because of its high altitude and deep cutting, the surface geological survey is extremely difficult and seldom done. In this study, the geological mineral data for this area have been analyzed to determine the location of the ore-bearing layer. The diacritic veins have been identified by using Worldview-2 remote sensing images. Through using the principal component transform method, the remote sensing anomalies related to pegmatite lithium mineralization have been extracted from ASTER remote sensing images. And then, the prospecting targets have been determined by combing with the geochemical anomalies of rare metals, which can provide a support for rapid discovery of pegmatite lithium mineral resources. By using this prospecting method, many large lithium-beryllium mines in Western Kunlun have been dis-

收稿日期:2019-08-02;修回日期:2019-09-09

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JM4030)、陕西省青年科技新星项目(2015KJXX-71)、第二次青藏高原综合科学考察研究专题(2019QZKK0807-02)、中国地质调查局地质调查项目(DD20160004、DD20160346、DD20190143)联合资助

作者简介:金谋顺(1984-),男,高级工程师,主要从事遥感地质研究工作。E-mail:370231652@qq.com

* 通讯作者:宋忠宝(1963-),男,陕西人,研究员,主要从事矿产地质研究工作。

coverd, such as 505·07 \ south fulugou 1[#] \ south fulugou 2[#], with the preliminary estimated Li_2O resource of over 1 million tons. This method is a breakthrough for rapidly prospecting the pegmatite rare metals deposits in deep cutting, high altitude and cold regions areas, and its availability has been appraised in this paper, which provides important technical support for pegmatite mineral in West Kunlun and has important significance for the next prospecting in peripheral area.

Keywords: remote sensing prospecting; pegmatite type lithium deposit; remote sensing anomaly; West Kunlun

稀有金属矿产包括锂、铷、铯、铌、钽、铍等,在地壳中丰度较低,其各具不同的物理化学性质,在宇航、原子能、电子、国防工业等高科技方面应用广泛。随着中国国民经济发展和高新产业升级换代,稀有金属矿的需求量越来越大,逐渐呈现供不应求的局面。近年来,随着卫星传感器的发展,遥感技术得到快速发展。1999年日本发射 ASTER 遥感卫星,在短波红外谱段相对于 Landsat7 进一步细分;2009年美国 Digital globe 公司成功发射 Worldview-2 遥感卫星,相对于传统高分遥感影像光谱分辨率得到进一步细化;2014年发射 Worldview-3 遥感卫星,分辨率 0.3 m,将短波红外纳入波谱范围,相对于其他高分遥感卫星取得突破。

遥感技术在地质矿产中的应用日益广泛,前人针对沉积变质型铁矿、斑岩型铜矿、矽卡岩型多金属矿等多个成矿类型提取相关遥感蚀变异常,建立了中国西部重要成矿带遥感找矿异常提取的方法(杨金中等,2003;陈建平等,2009;姚佛军等,2009),但是只是进行了铁染、羟基等一般性的遥感蚀变异常提取,未对伟晶岩稀有金属矿产做针对性的异常提取工作。前人在川西甲基卡地区进行了锂辉石等伟晶岩稀有金属矿床相关矿石矿物的波谱测试研究和伟晶岩遥感地质填图(代晶晶等,2017,2018)。对于西昆仑大红柳滩地区开展已知矿床阿克塔斯锂矿的伟晶岩脉解译,未形成系统的伟晶岩型稀有金属矿遥感技术方法(范玉海等,2018;王辉等,2018)。

本次研究通过分析地质矿产资料确定含矿层位,对 Worldview-2 高分遥感影像进行伟晶岩脉的识别,采用主成分变换对 ASTER 遥感影像提取与伟晶岩型锂矿成矿相关的遥感异常,结合 Li、Be 等稀有金属化探异常,圈定找矿靶区,并在西昆仑大红柳滩一带应用该方法发现 505、507、俘虏沟南 1 号、俘虏沟南 2 号等多处大型锂铍矿产地,初步估算 Li_2O 资源量 100 万 t 以上,实现高寒、高海拔、深切割地区伟晶岩型稀有金属矿的快速找矿突破。笔者对

该方法进行了系统介绍,对方法的有效性进行了评价,以期对西昆仑地区寻找伟晶岩型矿床提供技术方法支撑,并指导下一步外围找矿工作。

1 研究区地质概况

研究区位于青藏高原西北部,塔里木南缘的西昆仑—喀喇昆仑地区,行政区划隶属于新疆维吾尔自治区和田地区和田县管辖,东北部有叶城县—拉萨市的 219 国道通过,整体交通较为困难。

研究区主要位于青藏高原北缘印度板块与欧亚板块结合部位的中央造山带西部,主体位于巴颜喀拉晚古生代—中生代边缘裂陷盆地,康西瓦—苏巴什蛇绿构造混杂岩带以南,大红柳滩—郭扎错断裂带以北地区,呈向西尖灭的楔状体,向东延伸到巴颜喀拉山盆地。地层由三叠系巴颜喀拉山群(TB)地层和二叠系黄羊岭群($P_{1-2}H$)组成,两者以奇台大板断裂为界,呈断裂接触关系。二叠系黄羊岭群($P_{1-2}H$)岩性主要为灰—土黄色厚层状变质不等粒长石岩屑杂砂岩、变质长石岩屑杂砂岩、灰绿色变质细粒长石岩屑杂砂岩、灰褐色变质厚层状变质细粒长石石英杂砂岩、灰色变质中—薄层状粉砂岩、泥质板岩、变泥质粉砂岩夹灰色中—薄层状泥灰岩等。三叠系巴颜喀拉山群(TB)分布于中部,呈北西—南东向展布,区域上伟晶岩型锂矿主要分布在该套地层中,主要为一套碎屑岩夹少量碳酸盐岩建造,依据岩石组合,可进一步划分为上、中、下 3 个组。下组岩性主要为细粒长石石英砂岩、含钙石英砂岩夹少量粉砂质板岩,该套地层总体以砂岩为主;中组岩性主要为深灰色粉砂质板岩、绢云母板岩夹变质中细粒长石砂岩;上组岩性主要为灰褐色变质细粒石英砂岩夹石英粉砂岩、粉砂质板岩及泥灰岩等,以泥质灰岩的出现为主要特征。此外在研究区西南分布长城系甜水海岩群,位于大红柳滩—郭扎错断裂带以南,岩性为绢云石英片岩、含碳质绢云石英片岩等。

研究区断裂以北西向构造行迹为主,构造对伟晶岩分布有一定控制作用,区内伟晶岩也主要以北西向分布为主。区内大红柳滩-郭扎错断裂和奇台达坂断裂控制着地层、岩体的分布情况,也间接控制着伟晶岩的分布情况,目前已知的矿床和伟晶岩主要位于上述 2 个断裂之间。

研究区侵入岩较为发育,主要分布于大红柳滩-

郭扎错断裂东侧,三十里营房-泉水沟构造岩浆岩带内,以三叠纪侵入体最为发育,岩石类型复杂多样。出露于北部及中部、大红柳滩-郭扎错断裂东侧,整体呈不规则状的岩基产出,北西南东向展布,一直可以延伸到三十里营房一带,主要为黑云母二长花岗岩,脉岩以花岗伟晶岩为主,少量花岗岩脉、石英脉(图 1)。

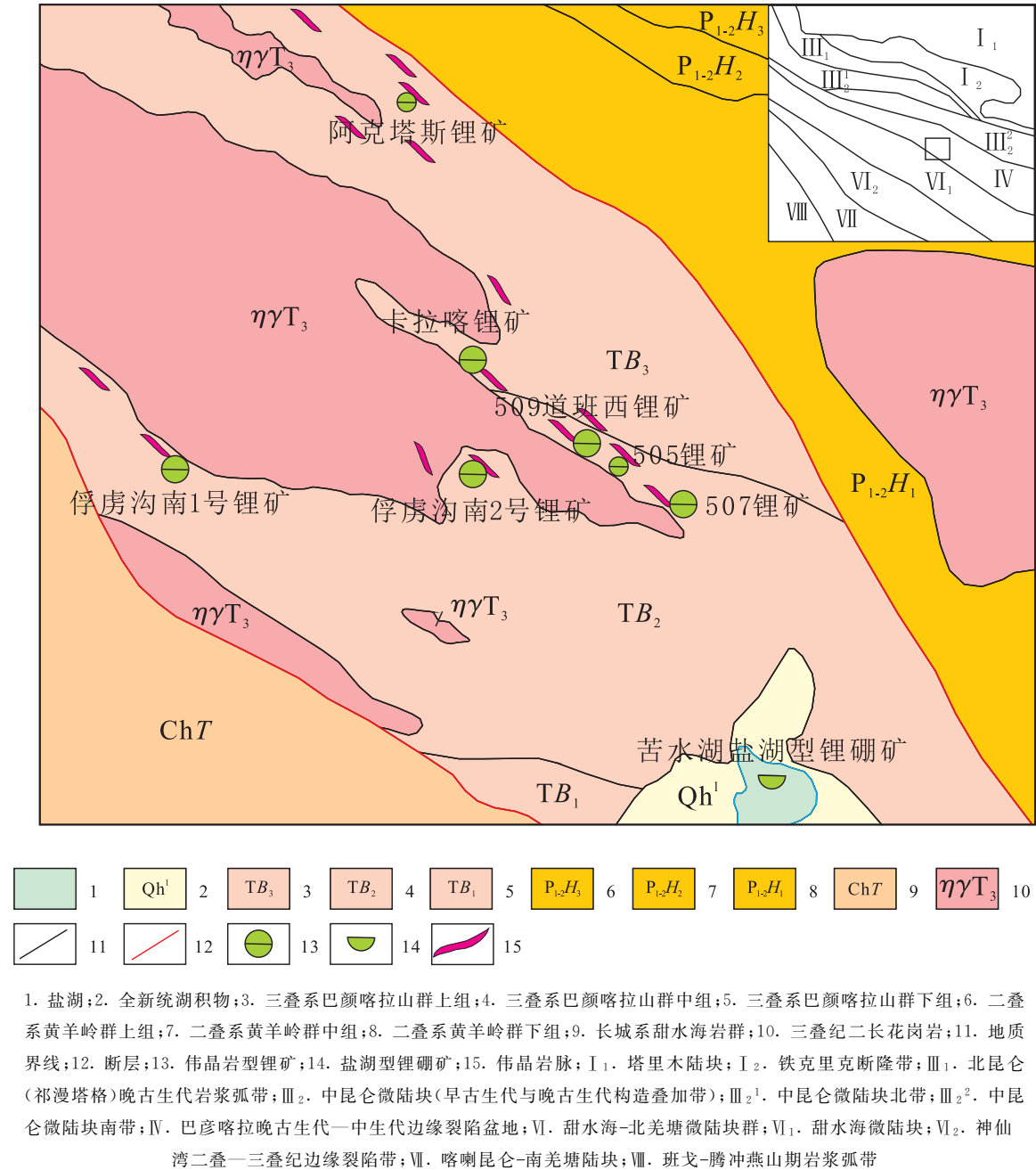


图 1 研究区地质矿产图

Fig. 1 Geological mineral map in research area

花岗伟晶岩集中分布于康西瓦一大红柳滩一带,围绕三叠纪花岗岩大量出露。目前,发现的含锂辉石伟晶岩脉主要侵入于三叠系巴颜喀拉山群(TB)中,少量位于三叠纪花岗岩中。伟晶岩主要呈脉状、透镜状、串珠状产出于围岩的节理裂隙中,北西—南东走向,主要矿物为钠长石、微斜长石、石英、锂辉石、锂白云母、电气石、绿柱石等。矿化以锂为主,Be、Rb、Nb、Ta 等普遍达到伴生品位。黑云母石英花岗岩、似斑状黑云母花岗闪长岩的内接触带的片理化裂隙中发育电气石花岗伟晶岩脉,而外接触带上多发育锂辉石伟晶岩脉,且相对电气石伟晶岩脉而言离岩体较远。部分花岗伟晶岩脉在垂直走向上表现分带性,由外向内为长英质带、白云母带、锂辉石带 3 个带,长英质带和白云母带厚度一般较小,核部锂辉石带厚度不一。花岗伟晶岩与围岩接触带上蚀变较强,常见片理化、角岩化,靠近岩体边缘部地层中可见堇青石化、红柱石化。

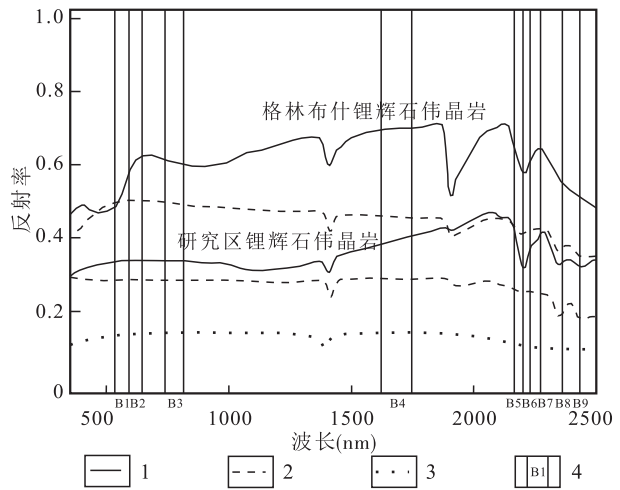
2 地质依据及波谱基础

Li 元素常形成氧化物赋存于硅酸盐类矿物中,主要聚集于岩浆结晶分异晚期的伟晶作用阶段和气成热液阶段,尤其是在伟晶作用阶段晚期,常形成有价值的伟晶岩型锂矿床。锂矿物主要包括锂辉石、锂云母、锂磷铝石、透锂长石、铁锂云母等。锂辉石是重要含锂矿物之一,单斜晶系,晶体常呈柱状、粒状或板状。颜色呈灰白、灰绿、翠绿、紫色或黄色等。玻璃光泽,条痕无色。硬度为 6.5~7,密度为 3.03~3.22 g/cm³。锂辉石主要赋存于富锂花岗伟晶岩中。

不同的岩石矿物反射的波谱曲线不尽相同,部分岩石矿物具有吸收和反射的特征谱段。根据其吸收和反射谱段的特征与遥感影像波段对应,通过数学运算的方法对信息进行增强,提取出相关信息,进而指导找矿工作(KENDALL M, 1975; HUNT G R, 1979; 甘甫平等, 2003)。通过对西澳大利亚格林布什和西昆仑大红柳滩的锂辉石伟晶岩进行波谱测试,发现锂辉石伟晶岩在 2 200 nm 左右呈较强的吸收特征,在 2 350 nm 左右具有次一级的吸收特征,在 560~760 nm 具有反射特征。电气石云母伟晶岩在 2 350 nm 左右具有较强的吸收特征,在 2 200 nm 的吸收特征不明显。砂岩、板岩等围岩不具备 2 200 nm、

2 350 nm 的吸收特征(图 2)。

前人在四川甲基卡地区也做了大量波谱测试工作,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、绿柱石等。通过波谱测试表明,围岩整体反射率较低,且没有特殊吸收波段;而伟晶岩及花岗岩反射率稍高,在 1 413 nm、1 911 nm、2 197 nm 等波段具有吸收特征,这些特征可以作为区分围岩与岩体的标志。另外,含锂辉石的伟晶岩与不含锂辉石的伟晶岩在 1 911 nm 及 2 197 nm 处根据吸收特征的差异可以区分(代晶晶等, 2017)。



1. 锂辉石伟晶岩; 2. 电气石云母伟晶岩; 3. 研究区围岩; 4. ASTER 各波段波谱范围

图 2 含锂辉石伟晶岩波谱曲线(数据来源:实测)
Fig. 2 Spectrum curve of spodumene pegmatite (Data sources: measured)

把含锂辉石伟晶岩的吸收特征与 ASTER 遥感影像各波段分别对应,含锂辉石伟晶岩在 ASTER 遥感影像中 B2 呈反射特征, B5、B6 呈强吸收特征, B8 呈次级吸收特征。根据以上的特征,通过不同的波段组合和主成分变换方法对 ASTER 遥感影像提取相关的遥感异常,识别含矿伟晶岩脉。

3 伟晶岩型锂矿遥感找矿方法

伟晶岩型锂矿遥感找矿方法以 Worldview-2 等高分影像为基础,识别伟晶岩信息,调查伟晶岩的分

布情况,结合 ASTER 影像数据提取伟晶岩的稀有金属矿产含矿信息,圈定含矿伟晶岩;结合地质矿产、化探等资料,圈定找矿靶区,通过野外调查验证,寻找稀有金属矿产(图 3)。



图 3 伟晶岩型锂矿遥感找矿方法技术流程图
Fig. 3 Technical process of remote-sensing prospecting for pegmatite type Lithium deposit

3.1 遥感数据源

低分辨率遥感卫星包括 Landsat5、Landsat7、ASTER 等,其特点是光谱分辨率较高,波谱范围包括了可见光、近红外和短波红外,但空间分辨率较低,为 15~30 m。

中等分辨率遥感卫星包括 SPOT-5、高分一号等,其特点是分辨率为 2~2.5 m,仅有 4 个波段,波谱范围包括了可见光、近红外,不包括短波红外。高分遥感卫星包括 IKONOS、QUICKBIRD、高分二号、Worldview-2、Worldview-3 等,分辨率优于 1 m,IKONOS、QUICKBIRD、高分二号有 4 个波段,Worldview-2 有 8 个波段,Worldview-3 有 16 个波段。Worldview-3 的波谱范围包括了可见光、近红外、短波红外,其他高分遥感卫星仅包括了可见光、近红外,不包括短波红外。各类卫星基本情况见表 1。

表 1 各类卫星基本情况对比表
Tab. 1 Contrast the basic Situation of Remote Sensing Satellites

编号	卫星名称	波谱范围 (nm)	波段数	空间分辨率 (m)
1	Landsat5	450~2 350	7	30
2	Landsat7	450~2 350	7	15
3	ASTER	520~2 430	14	15
4	SPOT-5	490~1 780	4	2.5
5	高分一号	450~890	4	2
6	IKONOS	450~850	4	1
7	QUICKBIRD	450~900	4	0.6
8	高分二号	450~890	4	1
9	Worldview-2	400~1 040	8	0.5
10	Worldview-3	400~2 365	16	0.3

根据以上分析,Landsat5、Landsat7、ASTER 和 Worldview-3 遥感卫星的波谱范围都包括可见光、近红外、短波红外,适于进行遥感异常提取,但 ASTER 比 Landsat5 和 Landsat7 在近红外及短波红外波段对光谱进行了进一步细分,Worldview-3 空间分辨率比其他几个遥感卫星高出 2 个数量级,因此 ASTER 和 Worldview-3 遥感卫星用于提取遥感异常效果较好。本地区地表出露的伟晶岩脉大多规模不大,因此在选用高分遥感卫星解译伟晶岩脉时,应尽量选用空间分辨率较高的遥感卫星。例如,QUICKBIRD、Worldview-2、Worldview-3 等。其中,Worldview-2、Worldview-3 的波段范围比 QUICKBIRD 进一步细分,效果优于 QUICKBIRD。

Worldview-3 比其他遥感卫星更有利于伟晶岩脉识别和遥感异常提取,但 Worldview-3 遥感卫星新发射,存档数据较少,本地区没有相关数据,所以本次研究采用 Worldview-2 遥感影像进行伟晶岩脉识别,采用 ASTER 遥感影像进行遥感异常提取。

Worldview-2 遥感影像星载多光谱传感器不仅具有 4 个标准谱段(红、绿、蓝、近红外),还包括 4 个额外谱段(海岸、黄、红边和近红外 2),相对于传统高分遥感影像光谱分辨率得到进一步细化。空间分辨率高,达到 0.5 m,而作为矿体的伟晶岩脉大多有 1~40 m 宽度,Worldview-2 影像经过处理后能够较清晰的反映伟晶岩脉的信息,而中低分辨率影像空间分辨率低,伟晶岩脉只能呈现为混合像元,不易识别。ASTER 遥感影像是新一代的对地观测卫星遥感数据,在近红外及短波红外波段对光谱进行了进一步细分,具有 14 个波段,分辨率为 15 m,岩石

在短波红外谱段具有吸收反射特征,ASTER 影像具有光谱分辨率较高的特点,在短波红外谱段具有 6 个波段,易于识别稀有金属相关信息(金谋顺等,2015)。

3.2 高分影像识别伟晶岩信息

以遥感图像处理软件 PCI、ENVI、ERDAS 等为图像数据处理平台,采用易于伟晶岩识别的图像处理方案,对 Worldview-2 影像进行处理。

根据 Worldview-2 影像特点,选择 532 波段组合,所含信息量丰富,易于伟晶岩识别。对图像进行融合和正射纠正,获得供伟晶岩解译的基础图像。对 Worldview-2 影像以 532 波段组合进行去相关分析,突出伟晶岩的信息。去相关分析是对图像的主成分进行对比度拉伸处理,该方法能有效的降低不同波段之间的相关性,增大不同地质体信息之间的反差(张微等,2011;金谋顺等,2014)。

步骤是:①主成分正变换:对 Worldview-2 影像 532 波段组合图像进行统计特征分析,进行主成分变换。②线性增强:对主成分变换得到的各个主分量按照 0~255 灰度值进行线性拉伸,提高不同信息之间的反差。③主成分逆变换:将增强后的主成分变换图像进行逆变换,由于各主分量之前已经经过线性拉伸,主成分逆变换还原至 532 波段组合图像后,3 个波段之间的相关性小,形成信息量丰富的图像。在处理后的图像中伟晶岩在影像上色调为白色,北西向条带状展布,周边围岩为红色、灰褐色色调,两者差异明显。根据以上解译标志的不同,对区内的伟晶岩进行解译(图 4)。

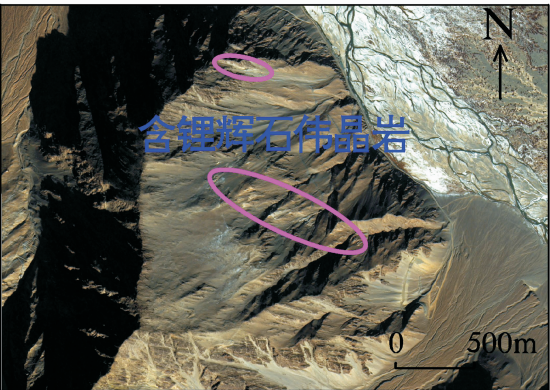


图 4 典型矿床锂辉石伟晶岩遥感影像特征图
Fig. 4 Remote sensing image characteristics of spodumene pegmatite in typical deposits

3.3 提取伟晶岩的稀有金属矿产含矿信息

在进行遥感蚀变信息提取时,遥感影像覆盖范围内的干扰地物。例如,干河道、冲积扇、冰、雪、云、湖水、雪域周边湿地、河道两测的湿地、沼泽以及阴影等与蚀变矿物无关的地物参与计算,会对蚀变信息提取产生干扰。去干扰工作的目的是通过波谱特征观察,灵活选用不同的数学方法(比值分析、高端切割和低端切割等方法),将非目标区及非目标地物经过数字处理归入干扰窗,通过掩膜获得基础图像,以便进行主分量分析,尽可能地减少干扰物对异常提取工作产生的影响。

主成分分析是通过特定的几个波段进行主成分分析,去除波段之间的相关性,降低数据维数,使尽可能多的有用信息集中到少量的影像波段中。各个主分量常常代表一定的地质意义,且互不重复,地质意义具有其独特性。如果提取遥感异常的原则是以大型矿(常含有高值异常)为主要目标,提取方法首选应是主成分分析法(张玉君等,2009)。研究区伟晶岩脉大量出露,分布广泛,Li、Be 等化探异常较好,显示该区锂铍等稀有金属具有较好的找矿潜力,所以本次采用主成分变换方法。

采用 ASTER 影像 B1、B2、B3、B4、B5、B6、B7、B8、B9 等 9 个波段进行主成分变换,得到 PC1-PC9 共 9 个主分量,在变换后的图像中,PC1、PC3、PC5 等主分量与稀有金属矿产成矿有关的信息均呈现高值或者低值,与周边围岩差异明显,采用 PC5、PC3、PC1 按照 R、G、B 的顺序进行假彩色合成,将多波段单色影像合成为假彩色影像,合成后的图像中目标信息清晰,较好反映了伟晶岩的稀有金属矿产含矿信息(图 5)。

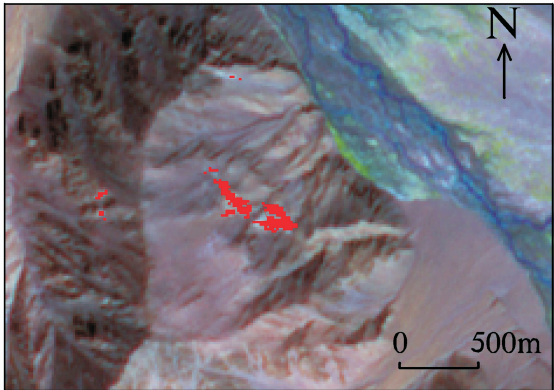


图 5 典型矿床锂辉石伟晶岩遥感异常特征图
Fig. 5 Remote sensing anomaly characteristics of spodumene pegmatite in typical deposits

3.4 圈定含矿伟晶岩

将解译的伟晶岩信息与提取的反映伟晶岩稀有金属矿产含矿信息进行对比,既在 Worldview-2 影像上解译出伟晶岩,又在 ASTER 影像上提取出稀有金属矿产含矿信息;将 Worldview-2 影像和 ASTER 影像空间配准,使解译出伟晶岩与提取出的含矿信息空间位置重叠,即圈定为含矿伟晶岩。

3.5 圈定找矿靶区

综合分析地质矿产资料,确定含矿层位与成矿规律,将遥感圈定的含矿伟晶岩与地质信息对应,叠加化探异常,综合圈定找矿靶区。

3.6 野外调查验证,寻找稀有金属矿产

对圈定的含矿伟晶岩开展野外查证工作,验证提取信息的可靠性和准确性。

4 遥感异常评价及方法有效性评价

4.1 遥感地质解译及遥感异常提取

伟晶岩脉多见于三叠系巴颜喀拉山群(TB),一部分位于晚三叠世侵入岩,往往成群成带出现,单脉呈透镜状、串珠状产出,多数顺层侵入,走向与区域构造线大体相一致。脉长 5~80 m,宽 3.5~5 m,由微斜长石及酸性斜长石、石英、云母和少量电气石、石榴子石组成。稀有金属矿化伟晶岩脉主要由锂辉石、锂云母、钠长石、石英组成。遥感影像特征:影像色调为白色,脉状纹理,中等侵蚀,高山地貌。通过 Worldview-2 遥感影像解译出黄草沟伟晶岩脉群和俘虜沟南伟晶岩脉群。

黄草沟伟晶岩脉群位于三叠纪岩体北侧,解译出 120 条伟晶岩脉,由北向南依次发现卡拉喀、509 道班西、505、507 等 4 处稀有金属矿床,伟晶岩呈北西向带状分布,影像特征呈灰白色,脉状影纹特征,与围岩地层影像特征差异明显。卡拉喀、509 道班西锂矿位于伟晶岩脉群北西部,前人已经在开展调查评价工作。505、507 等 2 处矿产地为本次新发现。伟晶岩脉在遥感影像上清晰,呈灰白色,脉状影纹特征,北西向展布,侵入于三叠系巴颜喀拉山群(TB),地层呈灰黑色色调,两者影纹差异明显。俘虜沟南伟晶岩脉群位于三叠纪岩体南侧,解译出 110 条伟晶岩脉,在伟晶岩脉群中段发现俘虜沟南 1 号、俘虜沟南 2 号 2 处矿产地。解译伟晶岩呈北西西向带状分布,影像特征呈灰白色,脉状影纹特征,

与围岩地层影像特征差异明显。利用 ASTER 遥感影像对研究区开展与伟晶岩型稀有金属矿有关的遥感异常提取,通过已知资料和典型矿床特征,对区内遥感异常进行筛选、分类,圈定 5 个遥感异常包,对提取的异常、圈定的异常包和解译的伟晶岩进行野外查证(图 6)。

1 号异常包分布在研究区北部,岩体末端与三叠系巴颜喀拉山群(TB)接触带附近,呈北西向条带状展布。利用高分遥感影像在该区解译出多条伟晶岩脉,呈北西向分布,异常包内已经发现阿克塔斯锂矿。

2 号异常包分布在研究区中部,岩体末端与三叠系巴颜喀拉山群(TB)接触带附近,呈北西向条带状展布。利用高分遥感影像在该区解译出多条伟晶岩脉,呈北西向分布,侵入三叠系巴颜喀拉山群(TB),显示该区有较好的成矿地质条件。异常北端已经发现 509 道班西锂矿,经过野外查证,在异常包南部新发现多条含锂辉石伟晶岩脉,经过地质填图和槽探、钻探等工作,新发现 505、507 锂矿矿产地。

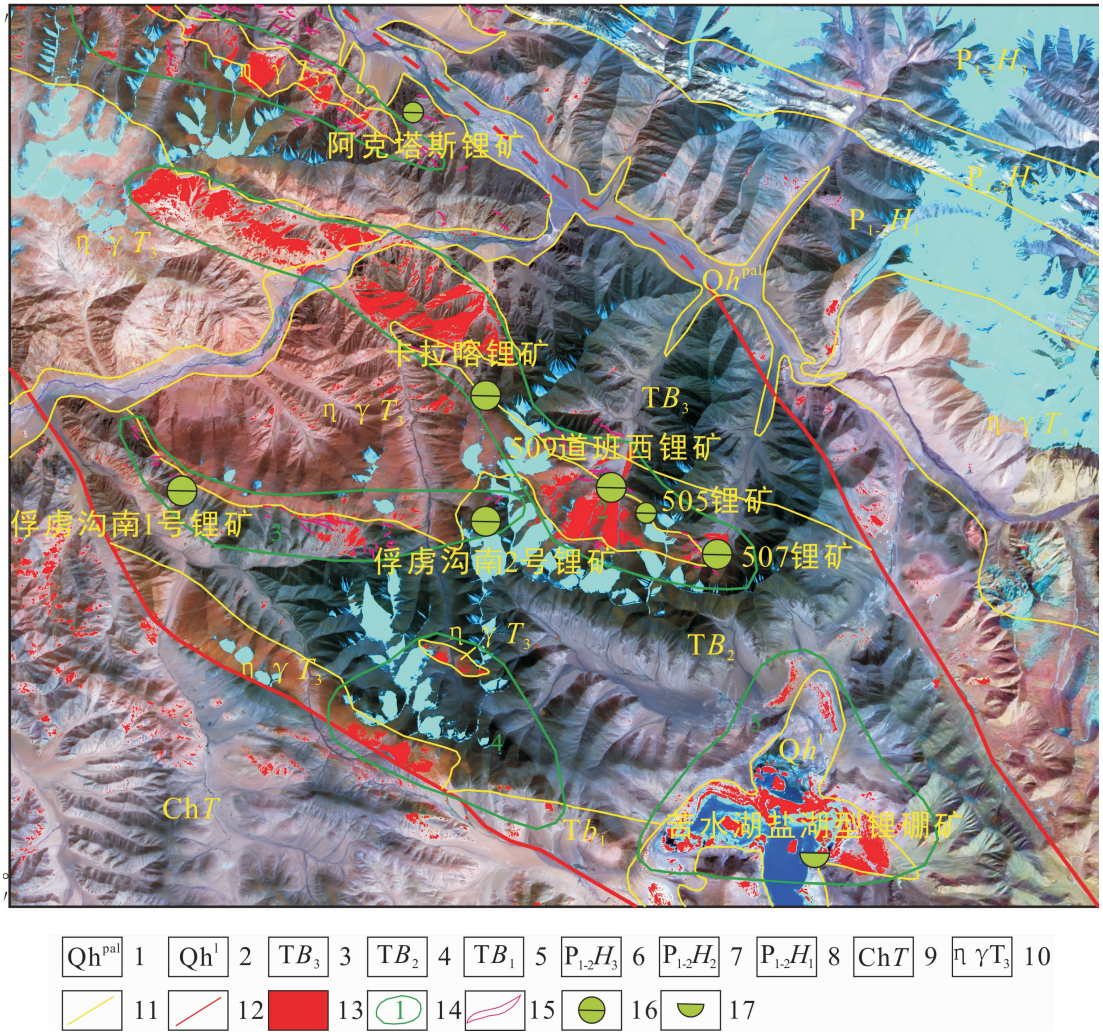
3 号异常包分布在研究区西北角,岩体与三叠系巴颜喀拉山群(TB)接触带附近,成矿地质条件与已知矿床可以类比,异常沿岩体接触带呈北西向分布。利用高分遥感影像在该区解译出多条伟晶岩脉,呈北西向分布,侵入三叠系巴颜喀拉山群(TB),显示该区有较好的成矿地质条件。对该区进行遥感异常查证,在异常包西侧和东侧外围新发现多条含锂辉石伟晶岩脉,经过地质填图和槽探等工作,新发现俘虜沟南 1 号、俘虜沟南 2 号锂矿矿产地。

4 号异常包分布在研究区西南部,异常位于岩株内部,异常则呈北西向条带状分布,周边岩体异常较弱,而该区岩株异常较强,显示岩相分异。高分影像在该区解译出多条伟晶岩脉,对该区进行野外查证,发现异常位于岩体内,解译的岩脉为石英脉,不具备伟晶岩型矿床成矿条件。

5 号异常包分布在研究区东南角盐湖一带,遥感异常较强,异常主要位于苦水湖的盐湖和周边盐壳。

4.2 新发现矿产地特征

在靶区查证过程中,通过大比例尺填图新发现 505 锂矿、507 锂矿、俘虜沟南 1 号锂矿、俘虜沟南 2 号锂矿等 4 处大型锂矿矿产地,通过槽探、钻探工程控制, Li_2O 品位为 1.1%~3.8%,估算资源量(334?)100 万 t 以上。



1. 全新统冲洪积物;2. 全新统湖积物;3. 三叠系巴颜喀拉山群上组;4. 三叠系巴颜喀拉山群中组;5. 三叠系巴颜喀拉山群下组;6. 二叠系黄羊岭群上组;7. 二叠系黄羊岭群中组;8. 二叠系黄羊岭群下组;9. 长城系甜水海岩群;10. 三叠纪二长花岗岩;11. 地质界线;12. 断层;13. 遥感异常;14. 遥感异常包及编号;15. 遥感解译伟晶岩脉;16. 伟晶岩型锂矿;17. 盐湖型锂硼矿

图 6 研究区遥感异常及遥感解译图

Fig. 6 Remote sensing interpretation and Anomaly in research area

505 锂矿位于 219 国道 505 南侧 8 km 处,区内西部中酸性侵入体大量发育,岩性主要为花岗闪长岩、石英闪长岩及二长花岗岩,侵入时代为晚三叠世。岩体与围岩接触带上蚀变较强,常见片理化、堇青石、红柱石角岩化蚀变,蚀变带宽 3~30 m,含矿脉岩分布多,成矿潜力好。特别是稀有金属伟晶岩脉,为黑云母石英花岗岩、似斑状黑云母花岗闪长岩的分异产物,二者的化学成分非常接近。黑云母石英花岗岩、似斑状黑云母花岗闪长岩的内接触带的片理化裂隙中发育电气石花岗伟晶岩脉,而外接触带上多发育锂辉石伟晶岩脉,且相对电气石伟晶岩

脉而言离岩体较远,而伟晶岩脉是稀有金属矿的母岩。共发现伟晶岩脉 20 条,其中新发现锂辉石伟晶岩脉 11 条、电气石花岗伟晶岩脉 7 条、长英质岩脉 2 条。呈浅灰白色或青灰色,花岗伟晶结构,块状构造,主要由伟晶和基质组成,伟晶矿物主要为锂辉石、白云母等,锂辉石呈灰白色或青灰色。锂辉石含量由外带向内带增多,核部锂辉石含量相对较多。通过大比例尺填图和槽探控制,Li₂O 品位为 1.1%~3.3%,平均品位为 2.2%;RbO 品位为 0.04%~0.06%,平均品位为 0.05%。

507 锂矿位于 219 国道 507 南侧 10 km 处,成

矿地质特征与 505 类似。新发现伟晶岩脉 28 条,按照岩脉所含矿物成分将花岗伟晶岩脉分为 3 类,即电气石伟晶岩脉 3 条、长英质伟晶岩脉 12 条及锂辉石伟晶岩脉 13 条。锂辉石伟晶岩脉走向呈北西—南东向,产状为 $182^{\circ}\sim 240^{\circ}\angle 38^{\circ}\sim 78^{\circ}$,延伸 3 300~1 200 m 不等,脉宽约 0.7~8 m 不等。通过大比例尺填图、槽探、钻探控制, Li_2O 品位为 1.2%~2.5%,平均品位为 1.74%。

俘虏沟南 1 号锂矿位于俘虏沟中部,区内出露地层主要为巴颜喀拉山群中组(TB_2)和下组(TB_1)地层,岩浆岩主要为浅灰白色中细粒英云闪长岩。岩体在区内有 2 处出露,分别位于巴颜喀拉山群地层南北两侧。岩体野外露头良好,风化面呈浅灰褐色,新鲜面为浅灰白色,中细粒结构,块状构造,未见矿化蚀变。岩体与地层呈侵入接触,接触面产状约为 $36^{\circ}\angle 38^{\circ}$,岩体边部地层蚀变变质程度较强,沿着岩体边部向南依次出现:堇青石红柱石角岩化带—红柱石角岩化带—绢云母化。越靠近岩体红柱石颗粒变大且含量增高,距离岩体约 100 m 的位置开始出现堇青石。伟晶岩脉赋存在岩体边部巴颜喀拉山群中组地层,岩脉延伸方向为北西—南东向,倾向北东,与地层层理产状基本一致。新发现锂辉石伟晶岩脉 10 条,锂辉石伟晶岩脉宽约 2~16 m,个别可达 20 m 宽,北西—南东向延伸最长可达 2.4 km。岩脉产状为 $43^{\circ}\angle 46^{\circ}$ 。通过大比例尺填图和槽探控制, Li_2O 品位为 1.4%~3.8%,平均品位为 1.9%; BeO 品位为 0.04%~0.14%,平均品位为 0.07%。

俘虏沟南 2 号锂矿位于俘虏沟南 1 号锂矿东侧,地质特征与其类似,新发现锂辉石伟晶岩脉 9 条,产状为 $40^{\circ}\sim 55^{\circ}\angle 35^{\circ}\sim 41^{\circ}$ 。延伸长约 120~1 100 m 不等,脉宽约 0.2~12 m 不等。呈浅灰白色,伟晶结构,块状构造。通过大比例尺填图和槽探控制, Li_2O 品位为 1.4%~3.8%,平均品位为 1.9%。

4.3 方法有效性评价

分析地质矿产资料确定含矿层位,通过对高分遥感影像进行伟晶岩脉的识别,对亚高光谱遥感影像提取与伟晶岩型锂矿成矿相关的遥感异常,结合 Li、Be 等稀有金属化探异常,圈定找矿靶区。通过野外查证和后续地质矿产工作,在西昆仑高寒高海拔深切地区应用效果较好,能够快速经济的发现伟晶岩型稀有金属矿。

在有典型矿床的地区,采用该方法,结合地质、

化探等资料能够较好的圈定伟晶岩脉,发现相关矿产资源;在空白区,由于没有典型矿床的波谱特征,需要不断的测试训练样本的波谱曲线来进行遥感异常的提取,需要多次测试并进行野外查证,圈定伟晶岩脉;对于基岩被植被、残坡积物、风成砂、黄土等覆盖严重的地区,由于伟晶岩脉和矿体的主体被覆盖,地表反映的遥感特征为覆盖物的特征,采用该方法效果一般。

5 结论

(1)通过波谱测试表明,含锂辉石伟晶岩在 2 200 nm 左右呈较强的吸收特征,在 2 350 nm 左右具有次一级的吸收特征,在 560~760 nm 具有反射特征。将吸收反射特征与 Worldview-2、ASTER 等遥感影像各波段分别对应,含锂辉石伟晶岩在 Worldview-2 数据 B4 呈反射特征,在 ASTER 遥感影像中 B2 呈反射特征, B5 呈强吸收特征, B8 呈次级吸收特征。根据以上特征采用主成分变换方法提取与稀有金属矿有关的遥感异常。

(2)在西昆仑地区基岩出露条件较好,基本无覆盖,该方法能够较好的圈定伟晶岩脉,提取相关异常,辅助地质找矿工作。对于基岩被植被、残坡积物、风成砂、黄土等覆盖严重的地区,由于伟晶岩脉和矿体被覆盖,地表反映的遥感特征为覆盖物的特征,采用该方法效果一般。

(3)分析地质矿产资料确定含矿层位,对高分遥感影像进行伟晶岩脉的识别,对亚高光谱遥感影像提取与伟晶岩型锂矿成矿相关的遥感异常,结合稀有金属化探异常,圈定找矿靶区。在西昆仑大红柳滩一带应用该方法新发现 505、507、俘虏沟南 1 号、俘虏沟南 2 号等多处大型锂铍矿产地,实现高寒、高海拔、深切地区伟晶岩型稀有金属矿的快速找矿突破,对西昆仑地区伟晶岩型矿床提供了重要的技术方法支撑,对于下一步外围找矿具有重要的借鉴意义。

参考文献(References):

- 陈建平,王倩,董庆吉,等. 青海沱沱河地区遥感蚀变信息提取[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2009, 34(2): 314-318.

- CHEN Jianping, WANG Qian, DONG Qingji, et al. Extraction of remote sensing alteration information in Tuotuohe, Qinghai Province[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2009, 34(2): 314-318.
- 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, 57(3): 50-53.
- YANG Jinzhong, FANG Hongbin, ZHANG Yujun, et al. Remote sensing anomaly extraction in important metallogenic belts of western china[J]. *Remote Sensing For Land & Resources*, 2003, 57(3): 50-53.
- 姚佛军, 杨建民, 张玉君, 等. 三种不同类型矿床分类型蚀变遥感异常提取及其应用[J]. *岩石学报*, 2009, 25(4): 971-976.
- YAO Fojun, YANG Jianmin, ZHANG Yujun, et al. Extraction of remote sensing alteration anomalies of three types of oredeposits and its application[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(4): 971-976.
- 代晶晶, 王登红, 代鸿章, 等. 川西甲基卡锂矿基地典型岩石及矿物反射波谱特征研究[J]. *岩矿测试*, 2018, 37(5): 507-517.
- DAI Jingjing, WANG Dengheng, DAI Hongzhang, et al. Reflectance Spectral Characteristics of Rocks and Minerals in Jiajika Lithium Deposits in West Sichuan[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2018, 37(5): 507-517.
- 代晶晶, 王登红, 代鸿章, 等. 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*, 2017, 44(2): 389-398.
- DAI Jingjing, WANG Dengheng, DAI Hongzhang, et al. Geological mapping and ore-prospecting study using remote sensing technology in Jiajika area of Western Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 2017, 44(2): 389-398.
- 范玉海, 王辉, 杨兴科, 等. 基于高分辨率遥感数据的稀有金属矿化带勘查[J]. *国土资源遥感*, 2018, 30(1): 128-134.
- FAN Yuhai, WANG Hui, YANG Xingke, et al. Application of high-resolution remote sensing technology to the prospecting for rare metal mineralization belt[J]. *Remote Sensing For Land & Resources*, 2018, 30(1): 128-134.
- 王辉, 秦绪文, 范玉海, 等. 高分遥感技术在西昆仑大红柳滩一俘房沟地区地质找矿中的应用[J]. *中国地质*, 2018, 45(6): 1289-1301.
- WANG Hui, QIN Xuwen, FAN Yuhai, et al. The application of high resolution remote sensing technology to ore-prospecting in Dahongliutan-Fulugou area of West Kunlun Mountains[J]. *Geology In China*, 2018, 45(6): 1289-1301.
- 甘甫平, 王润生, 马蔼乃. 基于特征谱带的高光谱遥感矿物谱系识别[J]. *地学前缘*, 2003, 10(2): 445-454.
- GAN Fuping, WANG Runsheng, MA Ainai. Spectral identification tree(sit) for mineral extraction based on spectral characteristics of minerals[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(2): 445-454.
- 金谋顺, 王辉, 张微, 等. 高分辨率遥感数据铁染异常提取方法及其应用[J]. *国土资源遥感*, 2015, 27(3): 122-127.
- JIN Moushun, WANG Hui, ZHANG Wei, et al. Method for extraction of ferric contamination anomaly from high-resolution remote sensing data and its applications[J]. *Remote Sensing For Land & Resources*, 2015, 27(3): 122-127.
- 金谋顺, 王辉, 乔耿彪, 等. 利用高分遥感技术发现西昆仑黑恰铁矿矿化带及其地质意义[J]. *西北地质*, 2014, 47(4): 221-226.
- JIN Moushun, WANG Hui, QIAO Genbiao, et al. The Discovery of Heiqia Iron Mineralization Belt in West Kunlun by High Resolution Remote Sensing Technology and Its Geological Significance[J]. *Northwestern Geology*, 2014, 47(4): 221-226.
- 张微, 张伟, 刘世英, 等. 基于核 PCA 方法的高分辨率遥感图像自动解译[J]. *国土资源遥感*, 2011, 90(3): 82-87.
- ZHANG Wei, ZHANG Wei, LIU Shiyong, et al. Automatic interpretation of high resolution remotely sensed images by using kernel method[J]. *Remote Sensing For Land & Resources*, 2011, 90(3): 82-87.
- 高永宝, 滕家欣, 陈登辉, 等. 新疆西昆仑玛尔坎苏锰矿带成矿地质特征及找矿方向[J]. *西北地质*, 2017, 50(1): 261-269.
- GAO Yongbao, TENG Jiaxin, CHEN Denghui, et al. Metallogenic Geological Characteristics and Prospecting Direction of Maerkansu Manganese Ore Belt in West Kunlun, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(1): 261-269.
- 张玉君, 姚佛军. 应用多光谱 ASTER 数据对 ETM 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, 25(4): 963-970.
- ZHANG Yujun, YAO Fojun. Application study of multi-spectral ASTER data for determination of ETM remote sensing anomaly property: Taking Wulonggou region of eASTERn KunLun mountain range as example[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(4): 963-970.
- KENDALL M. *Multivariate Analysis* [M]. England: Charles Griffin and Company Limited, 1975.
- HUNT G R, ASHLEY R P. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared[J]. *Economic Geology*, 1979, 74: 1613-1629.