

# 新疆西昆仑大红柳滩矿集区含锂伟晶岩脉识别 与找矿预测\*

高一航<sup>1,3</sup>, 陈川<sup>1,2\*\*</sup>, 马华东<sup>3</sup>, 邱林<sup>3</sup>, 王聪聪<sup>1</sup>, 高玲玲<sup>1,2</sup>, 李顺达<sup>1,2</sup>, 王利波<sup>1</sup>  
(1 新疆大学地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2 新疆中亚造山带地球动力学过程与成矿预测重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830047; 3 新疆自然资源与生态环境研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要** 锂矿是新兴战略矿产资源。位于西昆仑造山带的大红柳滩地区是近几年中国新发现的又一世界级规模的锂多金属矿集区。矿集区自然条件差, 常规的技术方法难以开展有效的伟晶岩脉识别, 一定程度上影响了区域进一步找矿预测工作。文章在进行典型岩矿波谱实测分析的基础上, 利用资源一号 02D 卫星 (ZY1E) 高光谱数据和高分二号 (GF-2) 高空间分辨率数据, 识别有一定规模的伟晶岩脉; 采用端员波谱法对 ZY1E 数据的矿物信息进行了提取, 获取锂辉石、钠长石、白云母的端员波谱及空间分布范围, 圈定锂矿化异常区, 并识别含锂伟晶岩脉。基于 ArcGIS 平台, 将锂矿化异常区与该矿集区内已知矿点叠加分析, 发现矿化异常区范围与已知含锂伟晶岩脉矿点分布范围基本一致, 以此为依据预测了一个新的找矿靶区, 该方法可以作为类似高海拔、浅覆盖区开展伟晶岩型锂矿找矿预测有效的技术方法。

**关键词** 地质学; 伟晶岩型锂矿; “高空间+高光谱”遥感; 端员波谱; 找矿预测; 西昆仑大红柳滩  
**中图分类号**: P618.71 **文献标志码**: A

## Identification and prediction of lithium bearing pegmatite dikes in Dahongliutan ore concentration area in West Kunlun, Xinjiang

GAO YiHang<sup>1,3</sup>, CHEN Chuan<sup>1,2</sup>, MA HuaDong<sup>3</sup>, QIU Lin<sup>3</sup>, WANG CongCong<sup>1,2</sup>, GAO LingLing<sup>1,2</sup>,  
LI ShunDa<sup>1,2</sup> and WANG LiBo<sup>1</sup>

(1 College of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, Xinjiang, China; 2 Xinjiang Key Laboratory of Geodynamic Process and Metallogenic Prediction of Central Asian Orogenic Belt, Urumqi 830047, Xinjiang, China; 3 The Research Center Resource and Environment of Xinjiang, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

### Abstract

Lithium is an emerging strategic mineral resource. Located in the West Kunlun orogenic belt, the Dahongliutan area is another world-scale lithium polymetallic ore concentration area newly discovered in China in recent years. Lithium-bearing pegmatite are mainly developed near the contact zones between the Late Triassic acidic intrusions and the Triassic Bayankalashan Group meta-sedimentary rocks, accompanied by albite, with obvious mineral zoning. Due to the harsh natural environment in the ore concentration area, it is difficult to carry out effective identification on the pegmatite dykes by conventional technical methods, which affects the further prospecting and prediction work in the region to a certain extent. Based on the actual measurement and analysis of

\* 本文得到国家重点研发计划“战略性矿产资源开发利用”(编号:2021YFC2901904)、“喀喇昆仑成矿带稀有金属典型矿床和成矿规律研究”(编号:2018A03004-2)和“新疆地矿局自然资源卫星应用技术分中心建设及应用示范”(编号:XGMB202146)共同资助

第一作者简介 高一航,男,1997年生,硕士研究生,矿产普查与勘探专业。Email: 2351628927@qq.com

\*\* 通讯作者 陈川,男,1972年生,副教授,从事资源遥感图像数字处理、综合信息成矿预测、地球探测与信息技术方向研究。Email: xjzyc2017@163.com

收稿日期 2022-06-27; 改回日期 2023-01-05。秦思婷编辑。

typical rock and mineral spectrum, this paper uses ZY1E hyperspectral data and GF-2 high spatial resolution data to establish the identification signatures of pegmatite dykes by RGB combination method; endmember spectroscopy is used to extract minerals from ZY1E data. To obtain the endmember spectrum and spatial distribution range of spodumene, albite and muscovite, so as to delineate the anomalous area of lithium mineralization and identify the ore-bearing pegmatite veins. Based on the ArcGIS platform, the anomalous lithium mineralization area and the known ore occurrences in the ore concentration area are superimposed and analyzed, and it is found that the range of the anomalous lithium mineralization area is basically the same as the distribution scope of the known ore-bearing pegmatite veins. A new prospecting target area is predicted, this method can be used as an effective technical method for prospecting and prediction of pegmatite-type lithium deposits in similar high-altitude and shallow coverage areas.

**Key words:** geology, pegmatite type lithium ore, "high space + hyperspectral" remote sensing, end-member spectrum, ore prediction, Dahongliutan area West Kunlun

锂是重要的能源金属,在高性能锂电池、可控热核反应中的运用,使其成为解决人类长期能源供给的重要原料,各国对锂的需求持续增大,勘查投入持续增加,重视程度前所未有(Vikstrom et al., 2013; 李健康等, 2014; 胡晓君等, 2021)。大红柳滩地区是西昆仑造山带花岗岩伟晶岩分布最集中,稀有金属矿化最好的地区(王核等, 2021; 李永等, 2022),区域海拔高、地形切割剧烈、常规技术方法难以开展大范围识别与预测。区内基岩出露但部分地区存在残坡积物覆盖,适于遥感找矿技术的应用(王辉等, 2018)。近些年,国内外众多学者将光学遥感技术成功应用在伟晶岩型锂矿找矿勘探中(Moradi et al., 2014; Cardoso-Fernandes et al., 2019)。中国陆地遥感卫星发展迅猛,组建资源、高分、环境、小卫星等对地观测卫星系列(孙伟伟等, 2020)。高分二号(GF-2)卫星突破亚米级和宽幅成像技术。2019年资源一号02D卫星(ZY1E)成功发射,其高光谱数据在395~2501 nm 波段范围内有166个波段,可支持地物精细化光谱信息调查,利用国产高光谱数据对岩矿石类别进行有效的探测变为了可能(王润生等, 2011; 王建宇等, 2021)。

前人在大红柳滩地区利用ASTER、Landsat8等多光谱数据,采用主成分分析、RGB组合、波段比值等方法开展铁染、羟基等传统的遥感蚀变信息及锂矿化异常的识别(金谋顺等, 2019)。多光谱数据光谱分辨率较低,受异物同谱的影响较大,对识别伟晶岩锂矿化和非锂矿化存在一定的局限性,高光谱数据具有超高光谱分辨率能有效降低异物同谱的影响,董新丰(2020)利用GF-5数据在多个地区开展高光谱数据矿物精细化识别研究,其矿物识别结果与

机载HyMap、AVIRIS相一致,证明国产高光谱数据充分具备了从空间大尺度上精确识别分析地表岩矿石类别的能力(董新丰等, 2020)。

本文以新疆西昆仑大红柳滩锂矿集区为研究区域,实测典型矿床岩矿石样品波谱,为遥感异常提取奠定基础。基于ZY1E和GF-2数据,对较大规模伟晶岩脉群进行初步识别;采用高光谱示矿技术中的端元波谱法对ZY1E数据中矿物信息进行了提取,获取锂辉石、钠长石、白云母等矿物的端元波谱及空间范围。将伟晶岩脉识别结果与高光谱示矿技术反映的矿化信息进行空间叠合分析,实现区内含锂伟晶岩脉的高精度识别。并结合区内已知典型矿床及野外样品采集分析结果,对方法的可行性进行分析,以期预测找矿靶区提供依据,也为外围类似的区域伟晶岩型锂矿找矿工作提供经济高效的遥感找矿方法。

## 1 成矿地质背景

大红柳滩成矿带地处青藏高原西北部,塔里木南缘的西昆仑和喀喇昆仑结合地区,经历了多期复杂构造演化(王威等, 2021a; 2021b),火山活动时间长且剧烈。康西瓦断裂、大红柳滩-郭扎错断裂是该成矿带主要控矿构造。在大红柳滩地区发现了大红柳滩南锂矿、505锂矿、509锂矿等,展现出巨大的找矿潜力(王核等, 2017; 金谋顺等, 2019)。

本文研究区位于西昆仑大红柳滩地区,处于甜水海地块东段,麻扎-康西瓦缝合带南侧,大红柳滩断裂北部(图1a、b)。区内地层主要为三叠系巴颜喀拉山群,上部为灰色中层长石石英砂岩夹灰黑色泥

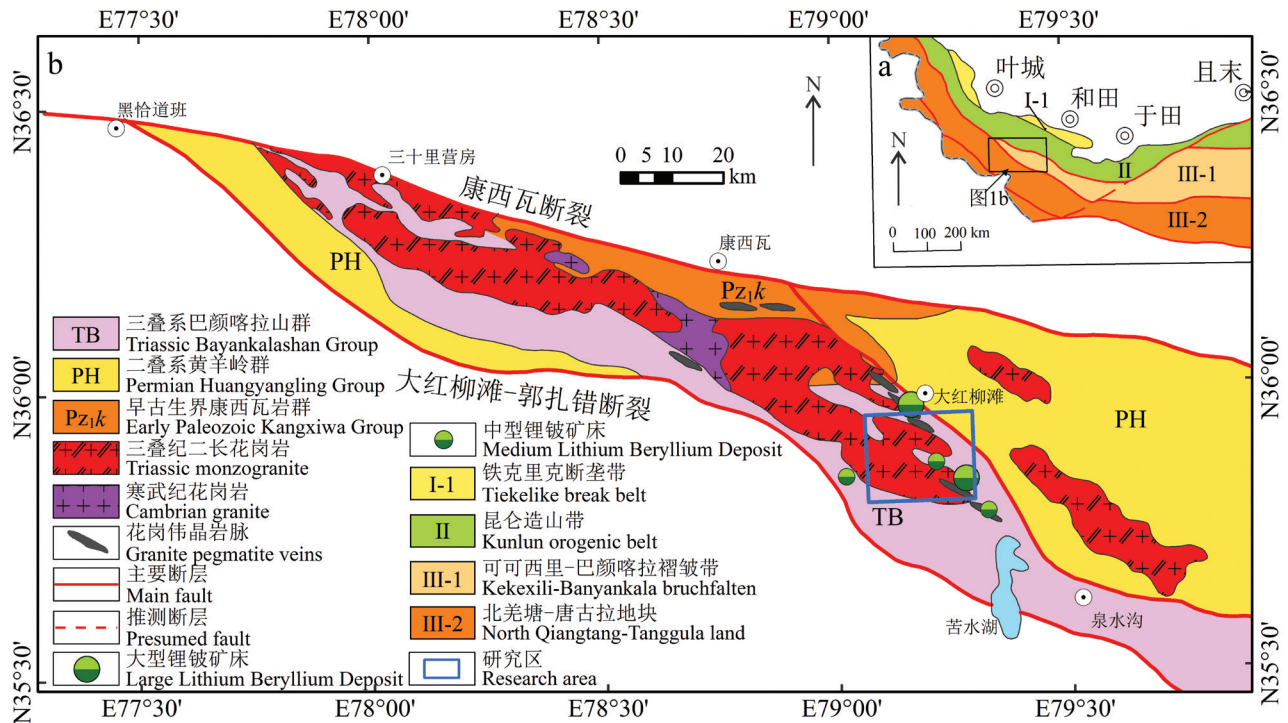


图 1 新疆西昆仑构造分区图(a)和康西瓦大红柳滩一带地质矿产简图(b)(据李侃,2019)

Fig. 1 Tectonic setting of West Kunlun, Xinjiang (a) and sketch map of geology and mineral resources in the area of Dahongliutan-Kangxiwa (b) (after Li, 2019)

质粉砂岩,下部为灰褐色中-厚层变细粒长石石英砂岩夹互灰黑色薄层状粉砂岩。古元古界康西瓦岩群在研究区东北部少量出露经历了强烈的变质作用,第四系现代雪被及更新世-全新世冲洪积层在研究区有少量分布。地层单元之间大都发育有断裂构造,构成了近东西向延伸的巨型构造隆起带(涂其军等,2019)。

大红柳滩侵入体十分发育,呈NW-SE向延伸,侵入体形成时代为晚三叠世,显示出强烈的岩相分带特征,由北往南顺次可见中细粒二长花岗岩体、中细粒英云闪长岩体。乔耿彪(2015)获得大红柳滩地区二长花岗岩锆石U-Pd年龄为(220±2.2)Ma~(217±2.2)Ma,属晚三叠世。大红柳滩花岗岩体属高分异的S型花岗岩,是同碰撞条件下壳源物质部分熔融的产物。研究区内育有大量花岗伟晶岩脉,主要分布于侵入体与三叠系巴颜喀拉山群地层接触部位,靠近侵入体的部位更容易出现较为密集的伟晶岩脉,伟晶岩脉形态一般呈较为规则的脉状或扁豆状,部分具有膨胀收缩现象,岩体在空间上大都近NW-SE向延伸(王核等,2021;冯京等,2021)。含锂伟晶岩主要发育在晚三叠世酸性侵入体与三叠纪巴彦喀拉山群接触带附近,伴有钠长石化,具有明显的

分带现象。李永(2022)对大红柳滩509矿区伟晶岩脉中的白云母进行了精确的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学测定,结果表明509道班西锂辉石伟晶岩形成于185~179 Ma,精确限定该区成矿时代。

研究区内现有5处已知锂矿点处于预查或普查阶段,研究区内伟晶岩型锂矿主要分布于印支期酸性侵入岩外接触带的伟晶岩脉中,主要矿石矿物有锂辉石、锂白云母、锡石、绿柱石、铌钽铁矿等,脉石矿物可见石英、钠长石、白云母等。锂辉石是主要富锂矿物,锂白云母次之,地表矿脉中可见锂辉石,(涂其军等,2019;冯京,2021)。白龙山典型矿区伟晶岩脉群有较为明显的分带现象,509锂矿伟晶岩脉群最为明显,由北向南顺次为石英-锂辉石脉群、钠长石-石英-锂辉石脉群、钠长石-石英-白云母脉群(王核,2021),并表现出外接触带远离岩体锂矿化强,近岩体不含锂矿的特征。

## 2 数据预处理及波谱基础

### 2.1 遥感数据源及数据预处理

研究选取ZY1E高光谱数据1景,影像编号为

ZY1E\_AHSI\_E78.93\_N35.73\_20200930\_005512\_L1A000170438, 影像获取时间为2020年9月30日; GF-2数据4景, 影像编号分别为GF2\_PMS2\_E79.0\_N35.8\_20200812\_L1A0004986347、GF2\_PMS2\_E79.1\_N36.0\_20200812\_L1A0004986345、GF2\_PMS1\_E79.3\_N35.8\_20201015\_L1A0005140021、GF2\_PMS1\_E79.3\_N36.0\_20201015\_L1A0005140013, 影像获取时间分别为2020年8月12日、2020年8月12日、2020年10月15日、2020年10月15日。ZY1E数据光谱范围395~2501 nm, 可见光近红外(VNIR)范围内波谱分辨率为10 nm, 分布有76个谱段, 短波红外(SWIR)内波谱分辨率较低为20 nm, 分布有90个谱段, 空间分辨率为30 m, 幅宽60 km。GF-2数据波谱覆盖范围在0.45~0.90  $\mu\text{m}$ 之间, 拥有4个多光谱波段以及1个全色波段, 幅宽45 km。

在ENVI与MATLAB软件下进行影像预处理, 对原始影像进行辐射定标、FLAASH大气校正、正射校正等基本处理操作。高光谱数据由于光谱带宽度减小导致影像数据的信噪比(SNR)降低, 致使部分波段存在条带噪声(图2a), 笔者利用一种快速、无参数的高光谱图像混合噪声去除的方法(简称FastHy-

Mix), 该方法利用高斯混合模型表征混合噪声的复杂分布(Lina et al., 2021), 通过MATLAB软件对高光谱数据进行条带噪声修复, 条纹去除效果显著(图2b)。研究区海拔较高, 部分地区存在常年积雪, 河道由于受到冲刷作用, 在影像中反射率过高均会对地物信息提取造成影响, 为了将这一影响降到最低, 对研究区内的常年雪被区和大型的河道进行裁剪处理。

## 2.2 波谱基础

岩石及矿物的波谱特征是开展区域遥感地质调查的基础, 近年来岩矿高光谱实测技术快速发展, 为获取准确的区域岩矿石波谱数据提供了方便快捷的技术手段。研究使用美国ore Xpress近红外全光谱矿物分析仪对大红柳滩地区509道班西锂矿区的234份岩矿石及单矿物样品中的典型样品进行波谱实测与分析(图3a~c)。

典型矿物实测波谱结果显示(图3d~f), 相较于矿区内的其他矿物, 锂辉石波谱在波长1910 nm、2200 nm附近显示出明显的吸收特征, 在1300 nm、2100 nm附近具有明显的反射特征, 二长花岗岩样品波谱(可见大量的白云母)在1936 nm处不具备明显

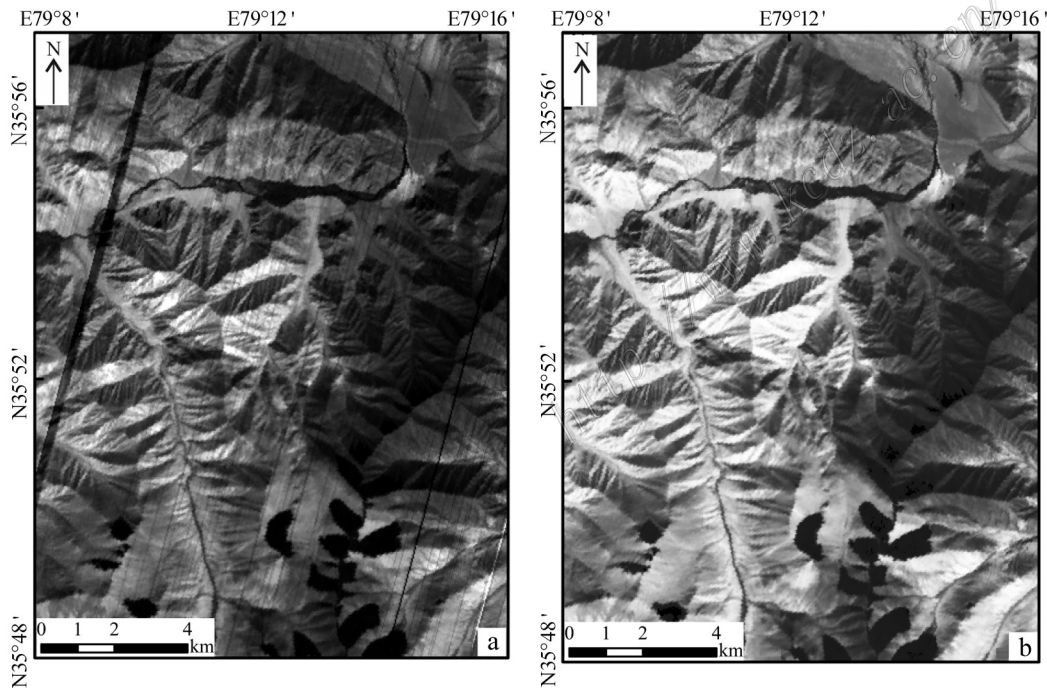


图2 大红柳滩地区ZY1E数据FastHyMix去条纹对比图

a. 去条纹前B166数据; b. 去条纹后B166数据

Fig. 2 ZY1E data FastHyMix stripe comparison image

a. B166 data before striping; b. B166 data after striping

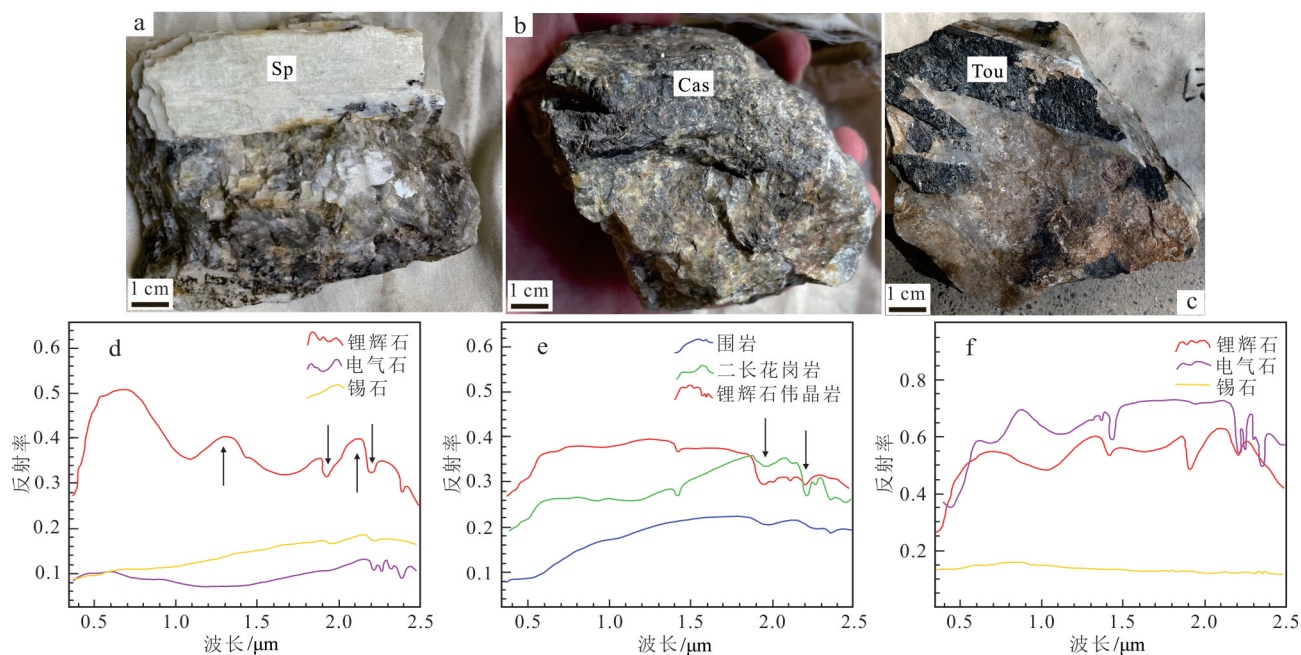


图3 野外岩矿石样品及实测波谱图

a. 含锂辉石样品; b. 含锡石样品; c. 含电气石样品; d. 矿物实测波谱曲线; e. 岩石实测波谱曲线; f. USGS矿物光谱曲线  
Sp—锂辉石; Cas—锡石; Tou—电气石

Fig. 3 Field rock and ore samples and measured spectra

a. Spodumene-containing samples; b. Cassiterite sample; c. Tourmaline-containing samples; d. Mineral measured spectral curve;  
e. Measured spectrum curve of rock; f. USGS mineral spectrum curve  
Sp—Spodumene; Cas—Cassiterite; Tou—Tourmaline

的吸收特征,在2200 nm左右有较为明显的吸收特征,锂辉石伟晶岩波谱在波长1910 nm形成极为明显的吸收谷,2200 nm处出现次一级吸收谷,砂岩围岩波谱在波长1910 nm、2200 nm附近均不具备明显的吸收反射特征,反射率较低。

### 3 含锂伟晶岩脉识别

#### 3.1 识别伟晶岩脉信息

大红柳滩地区伟晶岩主要分布在三叠纪侵入体与巴颜喀拉山群接触部位,脉体在空间上大都近北西-南东向延伸,一般呈浅色调,远离脉体观察时色调较深(姜琪,2021)。此次研究对具有一定规模的伟晶岩脉进行圈定,伟晶岩脉的含矿情况还须根据高光谱数据矿物识别结果进一步判断。选取GF-2号数据作为底图进行伟晶岩脉的识别,进行全色和多光谱数据融合,分辨率优于1 m,可识别具有一定规模的伟晶岩脉。

本文综合利用GF-2和ZY1E数据识别伟晶岩

脉,GF-2号数据进行伟晶岩脉解译时采用RGB(321)组合的真彩色影像具有一定的局限性,无法清晰显示地层与岩体的接触边界。波谱实测结果显示,区内二长花岗岩与围岩在610 nm、2060 nm、2290 nm左右反射率差异较大(图3b),对应ZY1E的B26、B140、B153,将以上波段进行RGB假彩色合成(图4a),巴颜喀拉山群呈现为紫色,二长花岗岩显示为绿色,接触边界清晰。在解译过程中发现雪被覆盖区域反射率过高,对区内伟晶岩脉的干扰较大,对雪被进行了裁剪。伟晶岩脉影像特征更为明显,伟晶岩脉在影像上呈灰白色与周围灰褐色地层存在较明显的区别,在基岩出露部位伟晶岩脉呈断续条带状脊状突起,在残坡区呈块状断续出露,大红柳滩部分地区地表风化剥蚀较为严重,伟晶岩脉影像特征不明显。伟晶岩脉形态多样,如网状(图4b)、树杈状(图4c)。以此为依据,识别具有一定规模的伟晶岩脉,共解译出6处伟晶岩脉群。

#### 3.2 基于高光谱数据的含矿信息提取

大红柳滩地区伟晶岩型锂矿主要矿石矿物有锂

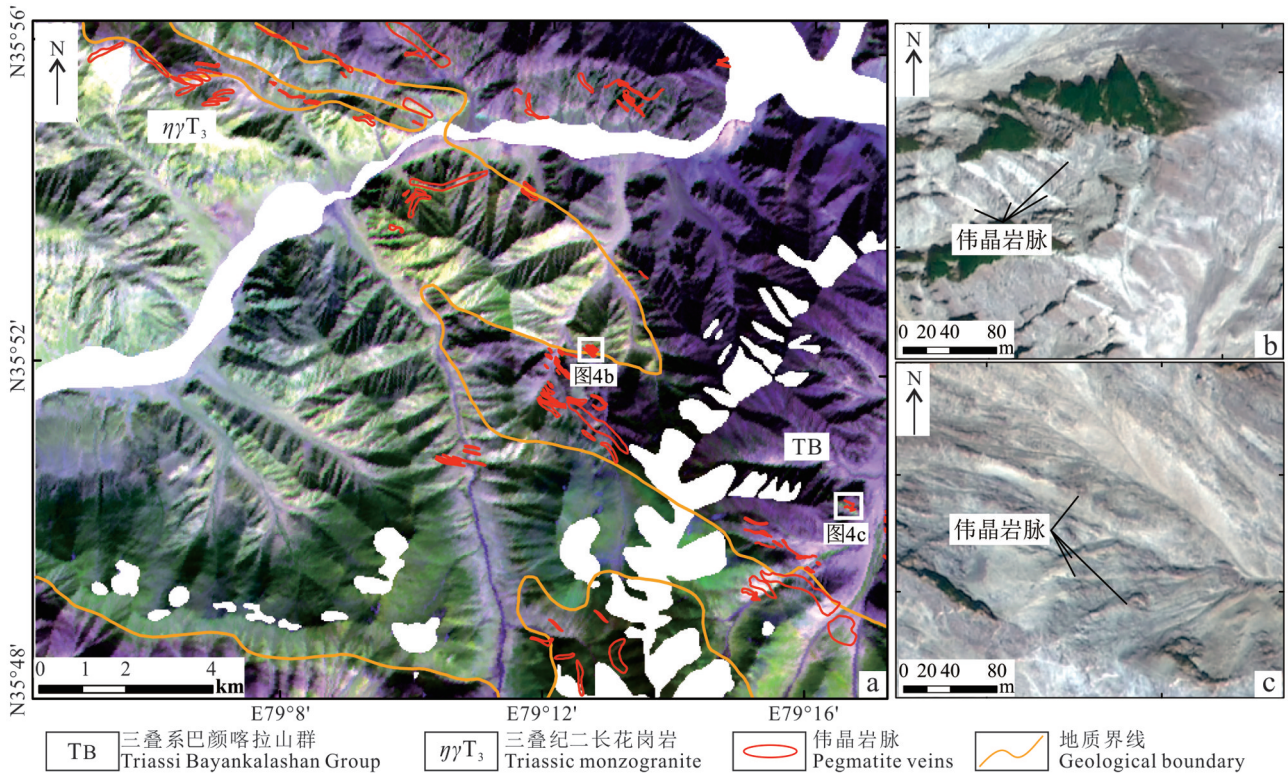


图4 研究区伟晶岩脉解译结果图

a. 解译结果图(ZY1E假彩色合成); b. 网状伟晶岩脉解译标志(GF-2真彩色合成); c. 树状伟晶岩脉解译标志(GF-2真彩色合成)

Fig. 4 Interpretation result of pegmatite dikes in the study area

a. Interpretation result image (ZY1E False Color Compositing); b. Reticulated pegmatite dike interpretation image (GF-2 True Color Compositing); c. Interpretation image of branched pegmatite veins (GF-2 True Color Compositing)

辉石、锂白云母、锡石等,脉石矿物可见石英、钠长石、白云母等(涂其军等,2019),伟晶岩脉分带现象较为明显。509 锂矿伟晶岩脉群最为明显,由北向南顺次为石英-锂辉石脉群、钠长石-石英-锂辉石脉群、钠长石-石英-白云母脉群,并表现出外接触带远离岩体锂矿化强,近岩体不含锂矿的特征(王核,2021)。其中,锂辉石、钠长石、白云母、石英的矿物组合分布特征展现出重要的成矿指示意义。通过对区内典型伟晶岩型锂矿实地查证和研究发现,地表含矿伟晶岩脉中可见锂辉石、绿柱石、石英钠长石等示矿矿物(图5a、b)。

高光谱数据具有超高的光谱分辨率,为矿物遥感识别提供支撑。选取 ZY1E 高光谱数据为数据源,对研究区锂矿化有关矿物进行精确识别。对预处理后的 ZY1E 数据进行端元波谱提取,以标准矿物波谱库和实测岩矿石波谱为参考进行相似度识别,确定端元波谱矿物种类,进行高光谱矿物识别。

### 3.2.1 端元波谱提取

ZY1E 高光谱数据空间分辨率为 30 m,对应到地表单个像元中包含有多种特征地物,该种像元就是混合像元,像元所具有的波谱特征是由多种地物综合叠加所展示的结果,在进行矿物提取时需要以获取纯净的像元为基础(曾福等,2015;王平平,2017)。本文选取纯净像元指数法进行高光谱数据的端元波谱提取,主要流程见图6。

最小噪声分离变换减弱影像噪声的同时,对数据进行降维处理,使地物信息分布在个别谱段中,各波段特征值越大包含信息量越大(林娜,2011);选取较大特征值的波段在多维空间对数据进行多次迭代,然后进行散点投影变换(PPI),得纯净像元指数图,此时像元值越大意味着纯净度越高,利用 ROI 工具对像元值在 10 以下的像元进行剔除,提高像元的纯净度,提升端元波谱与标准矿物波谱的相似度;最后利用 ENVI 的 N 维可视化工具选取 PPI 指数在 10 以上的 MNF 变换结果数据,通过选取合适

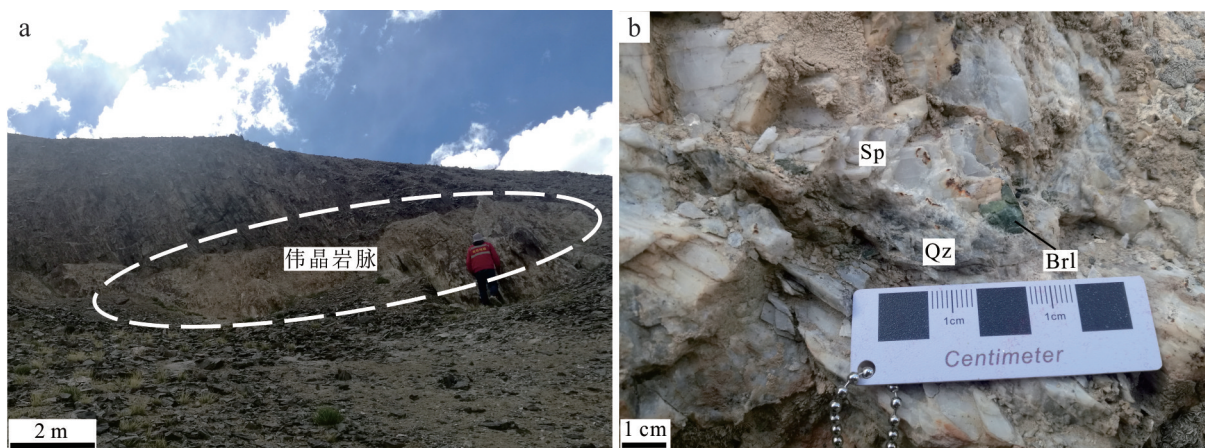


图5 509道班西锂矿伟晶岩脉特征照片

a. 伟晶岩脉示意; b. 含矿伟晶岩矿物组合

Qz—石英; Sp—锂辉石; Brl—绿柱石

Fig. 5 Field photos of pegmatite dikes in 509 Daobanxi lithium deposit

a. Pegmatite dike schematic; b. Ore-bearing pegmatite mineral assemblages

Qz—Quartz; Sp—Spodumene; Brl—Berylite

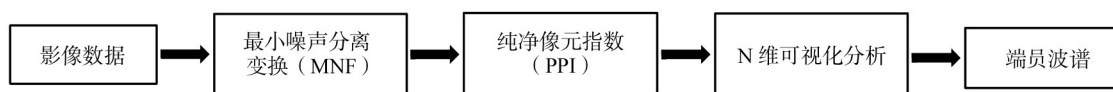


图6 PPI算法端员提取流程图(据王平平, 2017)

Fig. 6 PPI algorithm endmember extraction flow char (after Wang, 2017)

的波段并进行N维可视旋转,圈定任何角度均聚集在一起的点共15个类别,并计算各类别在原始影像中的平均波谱。

综合利用光谱角(SAM)和二值编码匹配(BE)法将收集到的端员波谱与标准矿物波普库(USGS)和实测岩矿石波谱库进行匹配。由于地表的强风化作用,影像端员波谱与标准波谱库及实测波谱存在一定的差异,故而此次端员波谱所表示矿物种类的确定,在综合利用SAM和BE的基础上,对矿物的吸收反射特征进行了对比判断,提高矿物种类的划分精度,降低异物同谱的发生概率,成功识别出锂辉石、白云母和钠长石的端员波谱(表1)。

### 3.2.2 端员波谱提取典型矿物

通过影像端员波谱提取及矿物种类识别,获取区内锂辉石、白云母、钠长石等矿物ZY1E数据端员波谱,运用光谱角法来进行矿物识别。光谱角填图法以目标波谱为参考谱线与影像数据波谱共同部署N维空间中的向量并求取向量间的广义夹角,夹角

越小,两者拟合程度越高,在一定程度上提升了数据中光谱较弱部分信息分类的作用(何中海等,2011;刘汉湖等2013)。

矿物填图结果(图7)显示,锂辉石呈断续的带状分布,北西-南东向延伸。锂辉石、钠长石、白云母在白龙山一带有较为明显的分带性,由北向南依次为锂辉石-白云母(少量)带、白云母-钠长石-锂辉石带、钠长石-锂辉石(少量)带。钠长石在近岩体部位却有着较为广泛的分布,这是由于该区域范围内主要岩体为二长花岗岩,导致钠长石在近岩体部位有着较广泛分布。此外钠长石端员波谱吸收特征不明显,浅吸收特征在2200 nm附近,容易受到其他含有铝羟基的矿物的影响,为矿化异常识别带来了一定的影响。

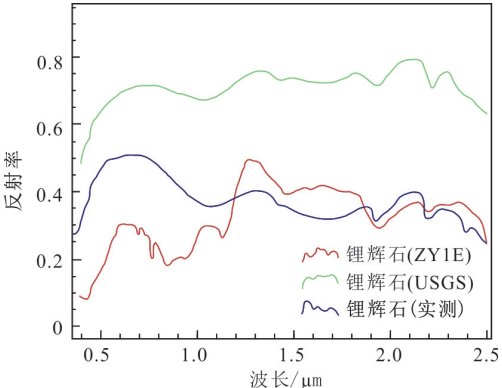
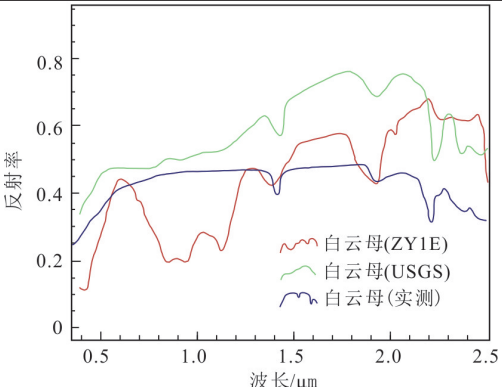
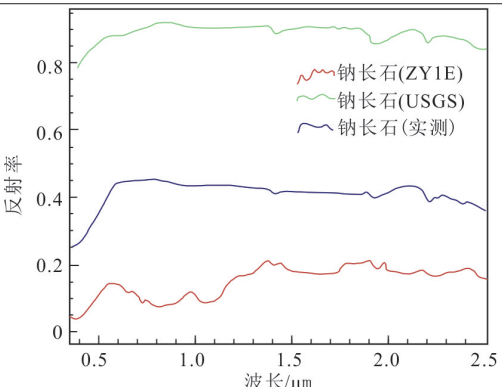
## 4 遥感异常及方法可行性讨论

### 4.1 遥感异常区及野外验证

利用高光谱矿物识别技术在大红柳滩地区成功

表1 矿物端员波谱及特征描述表

Table 1 Mineral endmember spectrum and characteristic description table

矿物端员波谱对比图	特征描述
	<p>锂辉石 ZY1E 端员波谱与实测波谱拟合程度较高,端员波谱在波长 1929 nm、2230 nm 具有明显的吸收特征,在波长 1257 nm、2100 nm 左右具有明显的反射特征,与实测锂辉石波谱特征基本相符,矿物识别准确度较高</p>
	<p>白云母端员波谱在可见光近红外范围内波谱特征与标准波谱库及实测波谱库波谱特征差别较大,短波红外范围内相似程度较高,在 1930 nm、2284 nm 处具有明显的吸收特征,与标准波谱库白云母的光谱吸收特征相符</p>
	<p>钠长石端员波谱各波长范围内波谱反射率均小于 0.2,波谱起伏度较小,浅吸收特征在 2200 nm 左右,容易受到含有铝羟基的矿物的影响。但与标准波谱及实测波谱所展现出的整体走势拟合程度较高</p>

识别出锂辉石、钠长石、白云母等矿物的端员波谱,并进行光谱角填图。依据矿物组合分带及分布特征圈定出 6 处含锂矿异常区,其中, I 异常区所在地区勘探研究程度较低,矿物信息提取结果显示出较强的含矿特征, II、III、IV、V、VI 异常区包括已经发现阿克塔斯锂矿、大红柳滩北锂矿、大红柳滩南锂矿、俘虏沟南 2 号锂矿、509 锂矿(图 7)。

II 号异常区距离岩体距离较远,位于巴颜喀拉山群地层中,区内分布有阿克塔斯锂矿点,该异常区锂矿化较弱,白云母、钠长石分布较广。高光

谱数据受山体阴影的影响反射率过低,未能有效识别北部上体中的矿物信息。在利用 GF-2 影像在异常区内解译出多条脉状伟晶岩脉,呈北西向展布。

III 号异常区位于阿克塔斯锂矿南部,区内包括大红柳滩北锂矿,处于侵入体与地层接触部位。光谱角填图结果显示,锂辉石主要分布于侵入体与地层接触的边部,区内矿物分带现象明显,并且具有一定的对称性,由北向南依次为锂辉石-白云母、锂辉石(少量)-钠长石、锂辉石-白云母。在异常区北部解



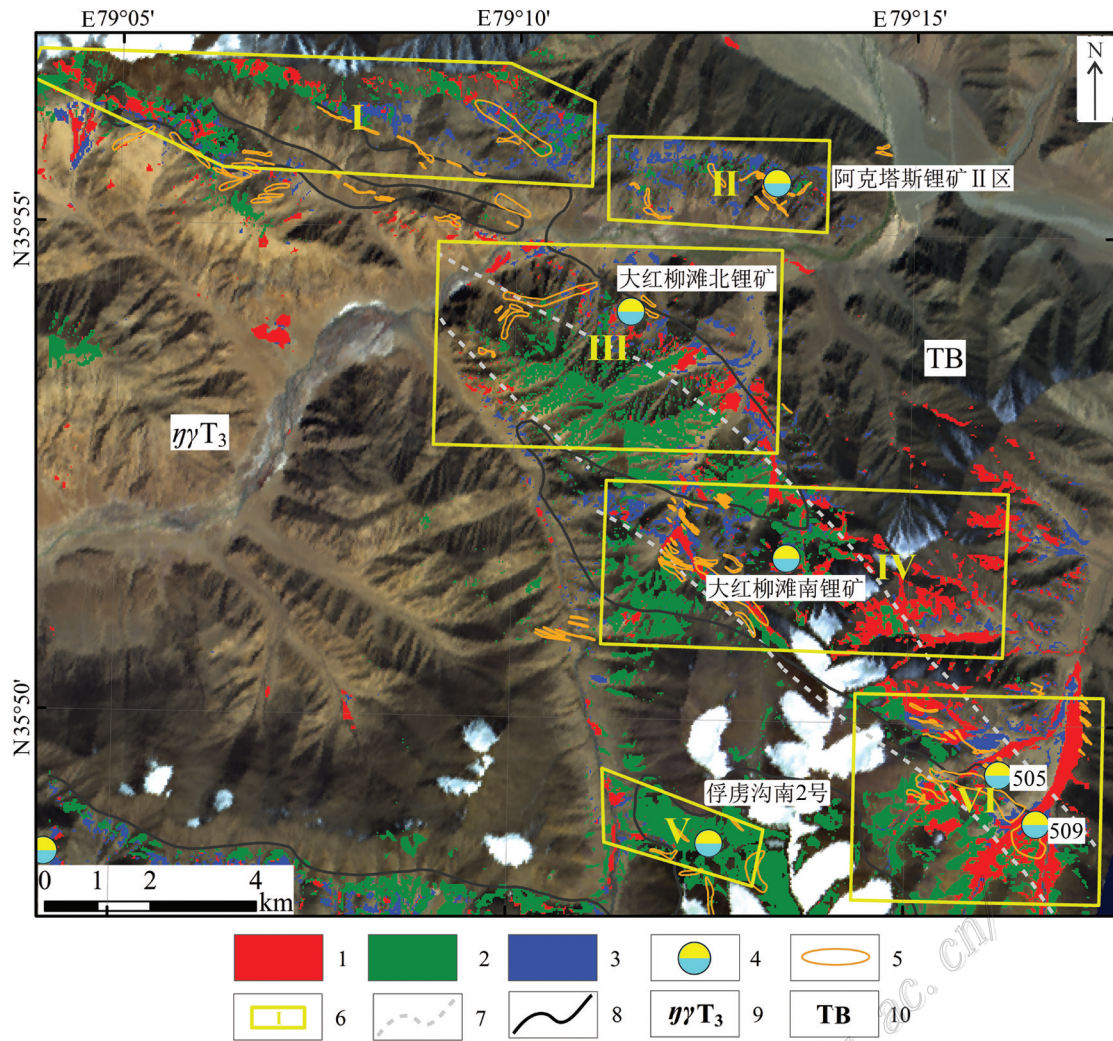


图 7 研究区典型矿物端元波谱提取结果

1—锂辉石;2—钠长石;3—白云母;4—锂矿;5—伟晶岩脉;6—异常区及编号;7—矿物分带;8—地质界线;9—二长花岗岩;10—巴颜喀拉山群

Fig. 7 Endmember spectral extraction results of typical minerals in the study area

1—Spodumene; 2—Albite; 3—Muscovite; 4—Lithium deposit; 5—Pegmatite veins; 6—Anomalous area; 7—Mineral zoning; 8—Geological boundary; 9—Monzogranite; 10—Banyankalashan Group

译出多条具有一定规模的伟晶岩脉,并且显示出良好的锂矿化异常。

IV号含矿异常区处于岩体与巴颜喀拉山群地层接触部位,矿物填图结果(图7)显示,区内具有明显的矿物组合分带现象,由北向南依次为白云母(少量)-锂辉石带、钠长石-白云母-锂辉石带、钠长石-锂辉石(少量)带,矿物提取结果显示南部为晚三叠系二长花岗岩,靠近侵入体的部位成矿较差,利用GF-2影像在异常区及外围识别出一系列的伟晶岩脉,异常区内锂矿化范围能较好区分含矿与不含矿伟晶岩脉。

V号异常区分布范围处于岩体与巴颜喀拉山群

地层接触部位,包含俘虏沟南2号锂矿,光谱角填图结果(图7)显示,该异常区内锂矿化强度较弱,仅在异常区西部有少量分布,但异常区内展现出极强的钠长石化异常。利用GF-2影像分析发现,该区地表风化剥蚀较为严重,所在位置海拔较高,地表有雪被残留,基岩出露条件较差,是致使矿化异常较弱的原因。

VI号含矿异常区锂辉石分布范围较广,包括了505锂矿及部分509道班西锂矿。矿物填图结果(图7)显示,区内具有明显的矿物组合分带现象,由北往南依次为白云母(少量)-锂辉石带、白云母-钠长石-锂辉石带、钠长石-锂辉石(少量)带,越靠近岩体锂辉石的分布范围越小。利用GF-2影像在

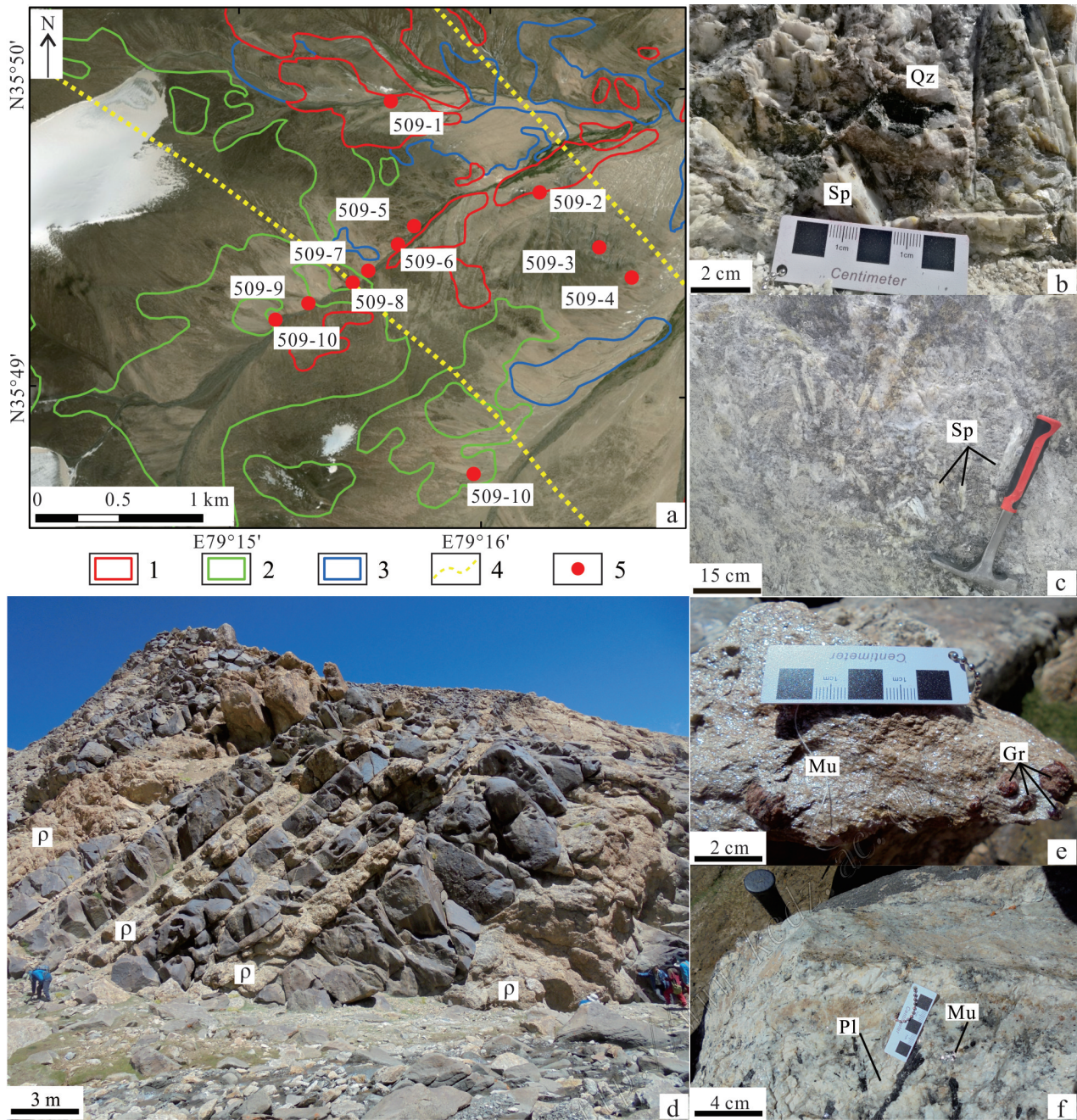


图8 VI号含矿异常区野外验证图

a. VI号异常区野外验证点分布图; b. 509-2验证点含矿伟晶岩; c. 509-1验证点含矿伟晶岩体; d. 509-5验证点不含矿伟晶岩脉群;

e. 509-6验证点石榴云母伟晶岩; f. 509-9验证点电气石伟晶岩

1—锂辉石分布范围; 2—钠长石分布范围; 3—白云母分布范围; 4—矿物分带界线; 5—野外验证点及编号

Qz—石英; Sp—锂辉石; Mu—白云母; Gr—石榴子石; Pl—斜长石; ρ—不含矿伟晶岩脉

Fig. 8 Field verification map of ore bearing anomaly area VI

a. Distribution map of field verification points in No. VI abnormal area; b. Ore-bearing pegmatite at verification point 509-2; c. Ore-bearing pegmatite at verification point 509-1; d. 509-5 verification point non-ore pegmatite group; e. 509-6 verification point garnet mica pegmatite;

f. 509-9 verification point tourmaline pegmatite

1—Distribution range of spodumene; 2—Distribution range of albite; 3—Distribution range of muscovite; 4—Mineral zonation boundary;

5—Field verification point and number

Qz—Quartz; Sp—Spodumene; Mu—Muscovite; Gr—Garnet; Pl—Plagioclase; ρ—Ore-free pegmatite veins

区内识别出一系列北西-南东向延伸的伟晶岩脉,其中位于岩体北部的伟晶岩脉展现出较好的锂矿化异常,发育在近岩体或岩体中伟晶岩脉锂矿化较差。对该异常区内花岗伟晶岩脉含矿性的野外查证工作如下:

沿垂直于矿物分带的方向,对VI号异常区内含矿和不含矿伟晶岩脉进行野外调查(图8a)。在509-1和509-2号野外验证点均发现大量的锂辉石伟晶岩(图8b、c),岩体中可见锂辉石、电气石和石英等矿物,锂辉石呈淡灰色、白色,多为半自行板状,周围常伴有石英发育,伟晶岩脉多被更新统残坡积物覆盖,浅色伟晶岩脉露头在地表断续显现。在509-5、509-6号验证点处出现石榴云母伟晶岩和伟晶岩脉群(图8d、e),脉体呈北西或北北西向延伸,脉体填充地层裂隙,规模相差较大,伟晶岩脉中锂辉石的含量较少,斜长石含量增多(图8f)。这与锂矿化异常由北向南逐渐较少的规律相符。通过野外验证点位与高光谱矿物填图结果(图8a)叠合分析发现,野外样品所含矿物种类与矿物填图及矿物组合分带结果基本相符,证明此次高光谱数据矿物填图结果具有较高的准确性。

#### 4.2 方法可行性讨论

在北昆仑造山带碰撞末期至后碰撞演化阶段,大红柳滩地区形成了一系列北西向韧性断裂带、次级断裂和节理裂隙,组成一个大型右行走滑转换构造带,为岩浆及后期热液运移提供通道(冯京等,2021)。研究区范围内与巴颜喀拉山群接触的主要为二长花岗岩,正如大红柳滩南锂铍矿V号勘探线剖面图所示,伟晶岩脉分布在二长花岗岩的内外接触带上并向深部延伸(图9)。

在充分把握区域地质资料和典型矿区成矿规律的基础上,基于“高空间+高光谱”遥感技术,利用GF-2真彩色和ZY1E数据进行RGB假彩色合成,识别区内伟晶岩脉;利用ZY1E高光谱数据进行端元波谱提取并判定矿物种类,完成矿物识别。根据锂辉石及相关矿物组合的空间分布特征,圈定锂矿化异常区并识别含矿伟晶岩脉,成功识别出区内已知的阿克塔斯锂矿、大红柳滩北锂矿、大红柳滩南等锂矿。对VI号异常区内含矿伟晶岩脉和不含矿伟晶岩脉的野外查证结果显示,“高空间+高光谱”遥感找矿技术在大红柳滩地区具有良

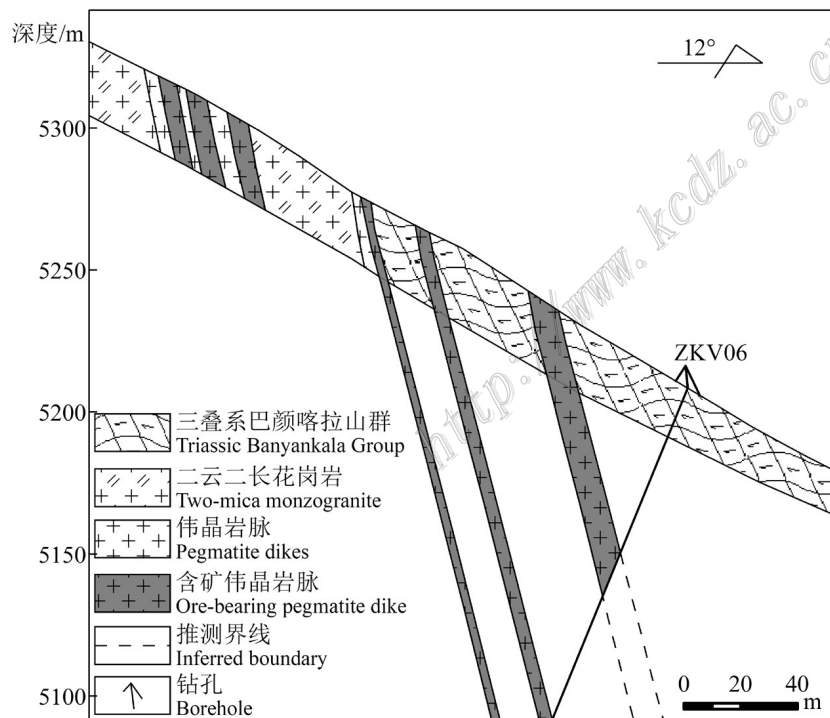


图9 大红柳滩南锂铍矿床V号剖面图(据新疆有色地质矿产勘查研究院,2021)

Fig. 9 Cross section V through the South of Dahongliutan of lithium-beryllium deposit(after Xinjiang Institute of Nonferrous Metals Geology and Mineral Exploration, 2021)

好的应用效果,可对区内典型矿区伟晶岩脉矿物组合分带特征研究起到辅助作用,以及对典型矿区以外含矿伟晶岩脉的初步识别工作,有较高的圈定精度。

潜在锂矿化异常区位于研究区西北部,区内暂无已知矿点。矿物填图(图7)结果显示,异常区内锂辉石大量分布在三叠系巴彦喀拉山群中,地层在异常区内呈北西向西向带状延伸,南部为晚三叠系中细粒二长花岗岩。矿物组合为锂辉石-钠长石-白云母带状展布具有明显的矿物分带现象,钠长石和白云母在岩体与地层结合部位分布较多,异常区北部主要矿物组合为钠长石-锂辉石,在近岩体部位则为钠长石-白云母-锂辉石(少量)。利用GF-2影像在侵入体与地层接触部位识别出一定数量的伟晶岩脉,呈北西-南东向展布,多为透镜状和脉状,部分发育在地层中的伟晶岩脉内锂矿化异常明显,在岩体中存在一定数量的小规模非锂矿化伟晶岩脉, I号异常区是后期外围找矿的重点区域。

## 5 结 论

(1) 在大红柳滩地区对ZY1E数据进行端员波谱提取,获取锂辉石、钠长石、白云母的端员波谱,锂辉石端员波谱在波长1929 nm、2230 nm附近形成吸收谷,在1257 nm、2100 nm左右呈明显的反射特征,与研究区锂辉石实测波谱在1500~2500 nm范围内拟合程度较高。结果表明,矿物端员波谱在可见光近红外范围内与实测波谱拟合程度较低,短波红外范围内拟合程度较高。

(2) ZY1E数据端员波谱提取矿物分布,展现出明显的规律性,一是锂辉石呈北西-南东向延伸,主要分布于岩体与地层接触部位;二是锂辉石、钠长石、白云母的空间分布在白龙山附近有较为明显的分带性。ZY1E高光谱数据矿物识别在一定程度上解决了异物同谱的问题,提高锂矿化有关矿物的提取精度。

(3) 根据锂辉石、钠长石和白云母等矿物分布及分带特征结合高分影像伟晶岩脉识别结果,识别出5处存在已知锂矿点异常区,对部分异常区内含矿与不含矿伟晶岩脉进行野外验证,结果显示异常区内锂矿化范围能较好地指示已知含矿伟晶岩脉的分布范围,并预测了1个外围找矿工作重点区域。

## References

- Cardoso-Fernandes J, Teodoro A C and Lima A. 2019. Remote sensing data in lithium (Li) exploration: A new approach for the detection of Li-bearing pegmatites[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 76:10-25.
- Dong X F, Gan F P, Li N, Yan B K, Zhang L, Zhao J Q, Yu J C, Liu R Y and Ma Y N. 2020. Fine mineral recognition of GF-5 hyperspectral image[J]. *Journal of Remote Sensing*, 24(4): 454-464(in Chinese with English abstract).
- Feng J, Jia H X, Xu S Q, Chen J Z, Tan K B, Wang H F and Zhang P. 2021. Prospecting model and significance of pegmatite-type lithium-beryllium deposit in Dahongliutan ore concentration area of West Kunlun[J]. *Xinjiang Geology*, 39(3): 410-417(in Chinese with English abstract).
- He Z H and He B B. 2011. Hyperspectral mineral mapping method based on weighted spectral angle mapping[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 31(8): 2200-2204(in Chinese with English abstract).
- Hu X J and Li H. 2021. Research progress and prospect of granite pegmatite-type lithium deposits[J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 31(11): 3468-3488(in Chinese with English abstract).
- Jiang Q, Dai J J, Wang D H and Tian S F. 2021. Application of optical remote sensing in identifying granite pegmatite-type lithium deposits[J]. *Mineral Deposits*, 40(4): 793-804(in Chinese with English abstract).
- Jin M S, Gao Y B, Li K, Song Z B and Yan Z Q. 2019. Remote sensing prospecting method for pegmatite rare metal deposits: A case study of Dahongliutan area in West Kunlun[J]. *North-West Geology*, 52(4): 222-231(in Chinese with English abstract).
- Li J K, Liu X F and Wang D H. 2014. Summary of the metallogenic regularity of lithium deposits in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(14): 2270-2283(in Chinese with English abstract).
- Li Y, Wang W, Du X F, Chen Z L, Ma H D, Qiu L, Liu W, Zhang Y F and Huo H L. 2022. Muscovite of Banxi pegmatite-type rare metal deposit, Dahongliutan Road 509, West Kunlun  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating and its limitation on regional mineralization[J/OL]. *Geology in China*, 1-6(in Chinese with English abstract).
- Lin N, Yang W N and Liu H H. 2011. Recognition and information extraction of rock and mine endmembers based on hyperspectral remote sensing[J]. *Remote Sensing Information*, (5): 114-117(in Chinese with English abstract).
- Liu H H, Yang W N and Yang R J. 2013. Research on endmember extraction and analysis methods of hyperspectral remote sensing rocks and minerals[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32 (2): 213-220(in Chinese with English abstract).
- Moradi M, Basiri S, Kananian A and Kabiri K. 2014. Fuzzy logic modeling for hydrothermal gold mineralization mapping using geochemical, geological, ASTER imageries and other geo-data a case

- study in Central Alborz, Iran[J]. *Earth Science Informatics*, 8(1): 197-205.
- Qiao G B, Zhang H D, Wu Y Z, Jin M S, Du W, Zhao X J and Chen D H. 2015. Geological and geochemical characteristics of the Dahongliutan pluton in West Kunlun and its constraints on petrogenesis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(7): 1180-1194(in Chinese with English abstract).
- Sun W W, Yang G, Chen C, Chang M H, Huang K, Meng X Z and Liu L Y. 2020. Development status and literature analysis of earth observation remote sensing satellites in China[J]. *Journal of Remote Sensing*, 24(5): 479-510(in Chinese with English abstract).
- Tu Q J, Han Q, Li P, Wang D H and Li J K. 2019. Basic characteristics of spodumene deposits and new progress in exploration in the Dahongliutan area of West Kunlun[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(11): 2862-2873. DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019202(in Chinese with English abstract).
- Vikstrom H, Davidsson S and Hook M. 2013. Lithium availability and future production out looks[J]. *Applied Energy*, 110: 252-266.
- Wang H, Li P, Ma H D, Zhu B Y, Qiu L, Zhang X Y, Dong R, Zhou K L, Wang M, Wang Q, Yan Q H, Wei X P, He B, Lu H and Gao H. 2017. Discovery and significance of Bailongshan superlarge pegmatite type lithium rubidium polymetallic deposit in Hetian County, Xinjiang Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(6): 1053-1062(in Chinese with English abstract).
- Wang H, Qin X W, Fan Y H, Yang J Z, Jin M S, Zhang S P, Liao Y Y, Yang C, Cui S, He X H, Kuang J S and Guo P C. 2018. Application of high-resolution remote sensing technology in geological prospecting in Dahongliutan-Fulugou area of West Kunlun[J]. *Geology in China*, 45(6): 1289-1301(in Chinese with English abstract).
- Wang H, Xu Y G, Yan Q H and Zhang X Y. 2021. Research progress of the Bailongshan pegmatite-type lithium deposit in Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 3085-3098. (in Chinese with English abstract).
- Wang J Y and Li C L. 2021. Development and prospect of hyperspectral remote sensing imaging technology[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 41(1):22-33(in Chinese with English abstract).
- Wang P P. 2017. Research and application of skarn deposit information extraction based on hyperspectral data Tibet[D]. Supervisor: Tian S F. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Wang R S, Xiong S Q, Nie H F, Liang S N, Qi Z R, Yang J Z, Yan B K, Zhao F Y, Fan J H, Tong L Q, Lin J, Gan F P, Chen W, Yang S M, Zhang R J, Ge D Q, Zhang X K, Zhang Z H, Wang P Q, Guo X F and Li L. 2011. Research on remote sensing geological exploration technology and application[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(11): 1699-1743(in Chinese with English abstract).
- Wang W, Ma H D, Wang J X, Zhu B Y and Liu X J. 2021a. The age of rare metal-bearing pegmatite-carbonatite in Tashkurgan County, Xinjiang: Enlightenment on rare metal mineralization of Pamir tectonic structures[J]. *Geological Review*, 67(4):1119-1128(in Chinese with English abstract).
- Wang W, Wang J X, Ma H D, Zhu B Y and Liu X J. 2021b. The metallogenic age of the Luobugai large lead-zinc deposit in Karakoram: Enlightenment from the prospecting and exploration of the Tianshuihai-Kalakunlun giant lead-zinc deposit[J]. *Northwest Geology*, 54(3): 155-162.(in Chinese with English abstract).
- Zeng F, Wang G W and Du W H. 2015. Application of hyperspectral remote sensing technology in geological and mineral resources mapping[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(Supp.): 972-973(in Chinese with English abstract).
- Zhuang L N and Michael K N. 2021 FastHyMix: Fast and parameter-free hyperspectral image mixed noise removal[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 33(9): 1-15.

#### 附中文参考文献

- 董新丰,甘甫平,李娜,闫柏琨,张磊,赵佳琪,于峻川,刘榕源,马燕妮. 2020. 高分五号高光谱影像矿物精细识别[J]. *遥感学报*, 24(4): 454-464.
- 冯京,贾红旭,徐仕琪,陈建中,谭克彬,王厚方,张朋. 2021. 西昆仑大红柳滩矿集区伟晶岩型锂铍矿床找矿模型及意义[J]. *新疆地质*, 39(3): 410-417.
- 何中海,何彬彬. 2011. 基于权重光谱角制图的高光谱矿物填图方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 31(8): 2200-2204.
- 胡晓君,李欢. 2021. 花岗伟晶岩型锂矿床研究进展及展望[J]. *中国有色金属学报*, 31(11): 3468-3488.
- 姜琪,代晶晶,王登红,田淑芳. 2021. 光学遥感在识别花岗伟晶岩型锂矿床中的应用[J]. *矿床地质*, 40(4): 793-804.
- 金谋顺,高元宝,李侃,宋忠宝,燕洲泉. 2019. 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[J]. *西北地质*, 52(4): 222-231.
- 李建康,刘喜方,王登红. 2014. 中国锂矿成矿规律概要[J]. *地质学报*, 88(14): 2270-2283.
- 李永,王威,杜晓飞,陈正乐,马华东,邱林,刘伟,张雅芳,霍海龙. 2022. 西昆仑大红柳滩 509 道班西伟晶岩型稀有金属矿白云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 定年及其对区域成矿的限定[J/OL]. *中国地质*, 1-6.
- 林娜,杨武年,刘汉湖. 2011. 基于高光谱遥感的岩矿端员识别及信息提取研究[J]. *遥感信息*, (5): 114-117.
- 刘汉湖,杨武年,杨容浩. 2013. 高光谱遥感岩矿端员提取与分析方法研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 32(2): 213-220.
- 乔耿彪,张汉德,伍跃中,金谋顺,杜玮,赵晓健,陈登辉. 2015. 西昆仑大红柳滩岩体地质和地球化学特征及对岩石成因的制约[J]. *地质学报*, 89(7): 1180-1194.
- 孙伟伟,杨刚,陈超,常明会,黄可,孟祥珍,刘良云. 2020. 中国地球观测遥感卫星发展现状及文献分析[J]. *遥感学报*, 24(5): 479-510.
- 涂其军,韩琼,李平,王登红,李建康. 2019. 西昆仑大红柳滩一带锂辉石矿基本特征和勘查新进展[J]. *地质学报*, 93(11): 2862-2873.

- 王核,李沛,马华东,朱炳玉,邱林,张晓宇,董瑞,周楷麟,王敏,王茜,闫庆贺,魏小鹏,何斌,卢鸿,高昊. 2017. 新疆和田县白龙山超大型伟晶岩型锂铷多金属矿床的发现及其意义[J]. 大地构造与成矿学, 41(6): 1053-1062.
- 王核,徐义刚,闫庆贺,张晓宇. 2021. 新疆白龙山伟晶岩型锂矿床研究进展[J]. 地质学报, 95(10): 3085-3098.
- 王辉,秦绪文,范玉海,杨金中,金谋顺,张少鹏,廖友运,杨晨,崔胜,贺小龙,匡经水,郭鹏程. 2018. 高分遥感技术在西昆仑大红柳滩-俘虏沟地区地质找矿中的应用[J]. 中国地质, 45(6): 1289-1301.
- 王建宇,李春来. 2021. 高光谱遥感成像技术的发展与展望[J]. 空间科学学报, 41(1): 22-33.
- 王平平. 2017. 基于高光谱数据的矽卡岩矿床信息提取研究及应用[D]. 导师:田淑芳. 北京:中国地质大学.
- 王润生,熊盛青,聂洪峰,梁树能,齐泽荣,杨金中,闫柏琨,赵福岳,范景辉,童立强,林键,甘甫平,陈微,杨苏明,张瑞江,葛大庆,张晓坤,张振华,王品清,郭小方,李丽. 2011. 遥感地质勘查技术与应用研究[J]. 地质学报, 85(11): 1699-1743.
- 王威,马华东,王家鑫,朱炳玉,柳献军. 2021a. 新疆塔什库尔干县含稀有金属伟晶岩-碳酸岩的时代——对帕米尔构造结稀有金属成矿作用的启示[J]. 地质论评, 67(4): 1119-1128.
- 王威,王家鑫,马华东,朱炳玉,柳献军. 2021b. 喀喇昆仑罗布盖大型铅锌矿成矿时代:对甜水海-喀喇昆仑巨型铅锌矿带找矿勘查的启示[J]. 西北地质, 54(3): 155-162.
- 曾福,王功文,独文惠. 2015. 高光谱遥感技术在地质矿产填图中应用[J]. 矿物学报, 35(增): 972-973.