

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.04.009

# 新疆喀喇昆仑大红柳滩一带锂矿光谱特征 及其找矿指示意义

任广利<sup>1,2</sup>, 孔会磊<sup>1,2</sup>, 赵凯东<sup>3</sup>, 杨敏<sup>3</sup>, 李侃<sup>1,2</sup>, 赵晓健<sup>1,2</sup>, 金谋顺<sup>1,2</sup>, 李文渊<sup>1,2</sup>

(1. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 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, 陕西 西安 710054; 3. 西安建筑科技大学资源工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**近年来, 新疆喀喇昆仑大红柳滩地区锂铍矿取得重大找矿发现, 显示良好的成矿潜力。受其高寒深切割环境的制约, 矿区外围的地质找矿工作推进不易。前人利用高分、多光谱遥感数据及高光谱技术在该区花岗伟晶岩型锂铍矿找矿工作中发挥出积极作用, 发现了505、507、俘虏沟南1号、俘虏沟南2号等多处大型锂铍矿产地。笔者通过对区内花岗伟晶岩型锂矿床中岩、矿石开展地面光谱测试, 系统对比不同岩性赋矿地层、岩体、含矿伟晶岩、不含矿伟晶岩的光谱特征。通过光谱解算剖析其矿物组合, 分析显示含矿伟晶岩中含锂矿物以锂辉石、锂云母为主, 少量锂绿泥石。含矿伟晶岩具有高反射率, 发育强Al-OH吸收峰, 受其接触交代蚀变影响, 发育Mg-OH吸收峰, 二者共同构成区内含矿伟晶岩的标志性遥感异常组合。采用国产高光谱遥感卫星数据, 利用匹配滤波方法提取上述异常组合, 圈定找矿有利区7处, 为该区下一步锂铍找矿工作提供了依据。

**关键词:**光谱解算; 伟晶岩型锂矿; 找矿预测; 大红柳滩地区; 喀喇昆仑

**中图分类号:**P627 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-6248(2022)04-0103-12

## Spectral Characteristics and Prospecting Implications of Lithium Deposits in Dahongliutan Area, Karakoram, Xinjiang

REN Guangli<sup>1,2</sup>, KONG Huilei<sup>1,2</sup>, ZHAO Kaidong<sup>3</sup>, YANG Min<sup>3</sup>, LI Kan<sup>1,2</sup>,  
ZHAO Xiaojian<sup>1,2</sup>, JIN Moushun<sup>1,2</sup>, LI Wenyuan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an 710054, Shaanxi China;  
2. Xi'an Center of China Geological Survey/Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi,  
China; 3. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

**Abstract:** In recent years, mineral exploration of Lithium(Li)-Beryllium(Be) deposit in Dahongliutan area of Karakoram, Xinjiang, has been greatly improved and showed good metallogenic potential. However, because of the high cold and deep cutting environment, the mineral prospecting work in this area is hard whereas urgently needs to develop. Our group has played a positive role in the exploration of pegmatite type Li-Be deposit by using high-resolution, multi-spectral

收稿日期:2022-01-26;修回日期:2022-06-20;网络发表日期:2022-11-15;责任编辑:贾晓丹

基金项目:深地资源勘查开采专项课题“西部锂、铍等战略性金属矿产资源成矿规律与预测评价”(2019YFC0605201)、国家自然科学基金项目“喀喇昆仑多宝山矿床非硫化铅锌矿物形成机制研究”(41802096)、第二次青藏高原综合科学考察研究专题(2019QZKK0806)联合资助。

作者简介:任广利(1984-),男,博士,高级工程师,主要从事矿床学、成矿预测研究。E-mail:renguangli9977@163.com。

remote sensing data and hyperspectral technology in this area, and several large Li-Be deposits, such as 505, 507, south fulugou 1<sup>#</sup> and south fulugou 2<sup>#</sup> have been discovered. In this study, we carried out the ground spectral testing of rock and ore deposits in pegmatite type lithium deposits in this area. The spectral characteristics of bearing ore stratum, rock mass, ore bearing pegmatite and ore without pegmatite of different lithology are systematically compared. The mineral assemblages are calculated and analyzed. It is considered that the lithium-bearing pegmatite in the ore bearing pegmatite is mainly composed of spodumene and lepidolite, and a small amount of lithium chlorite, with high reflectivity and shows strong Al-OH absorption peak. Mg-OH absorption peak is also developed under the influence of the later hydrothermal alteration, which together constitute the symbolic remote sensing anomaly assemblage of ore bearing pegmatite in the area. Basing on the domestic hyperspectral remote sensing satellite data, the above anomaly combinations were extracted by matching filtering method, and 7 prospecting targets were delineated, which is important for the further lithium beryllium prospecting in this area.

**Keywords:** Spectrum resolving; pegmatite type lithium deposit; ore-prospecting; Dahongliutan area; Karakoram Mountain

近年来,新疆喀喇昆仑大红柳滩一带取得锂铍铷等稀有金属矿床重大找矿发现,展现出良好成矿潜力(李侃等,2019;涂其军等,2019)。该锂铍多金属矿带整体位于新疆和田地区 219 新藏公路沿线,海拔 4 300~6 000 m,切割强烈,交通不便。恶劣的自然环境制约着区内地质勘查工作的推进。随着遥感技术在空间分辨率和光谱分辨率方面的精度提升,其在高寒艰险山区的矿产勘查工作中逐渐发挥重要作用,在成矿带、矿集区、矿区等不同空间尺度的应用日益广泛。例如,在成矿带尺度,采用 DEM+多光谱卫星遥感数据开展大型构造解译、成矿远景区综合划定等(杨金中等,2003;陈建平,2009;高万里等,2010;代晶晶等,2012);在矿集区尺度,采用高分卫星、星载高光谱遥感数据等开展矿集区控矿构造解译、含矿地质体识别、蚀变带圈定等(Bierwirth et al., 2002;赵玲等,2008;代晶晶等,2010;张紫程等,2011;金谋顺等,2014;任广利等,2017a;杨金中等,2017;王辉等,2018;Yang et al., 2018;董新丰等,2018,2020);在矿区尺度,采用高分遥感数据、机载高光谱、高分雷达数据等遥感异常信息指导地面查证,快速进行矿(化)体圈定、蚀变带识别及含矿构造带解译等(Ruitenbeek et al., 2012;任广利等,2013;闫柏琨等,2016,2017b,2018;刘德长等,2018;陈喆等,2019)。在稀有金属矿产勘查方面,前人利用高分、多光谱遥感、高光谱技术在伟晶岩型锂铍矿的矿物填图、蚀变信息提取和找矿勘查

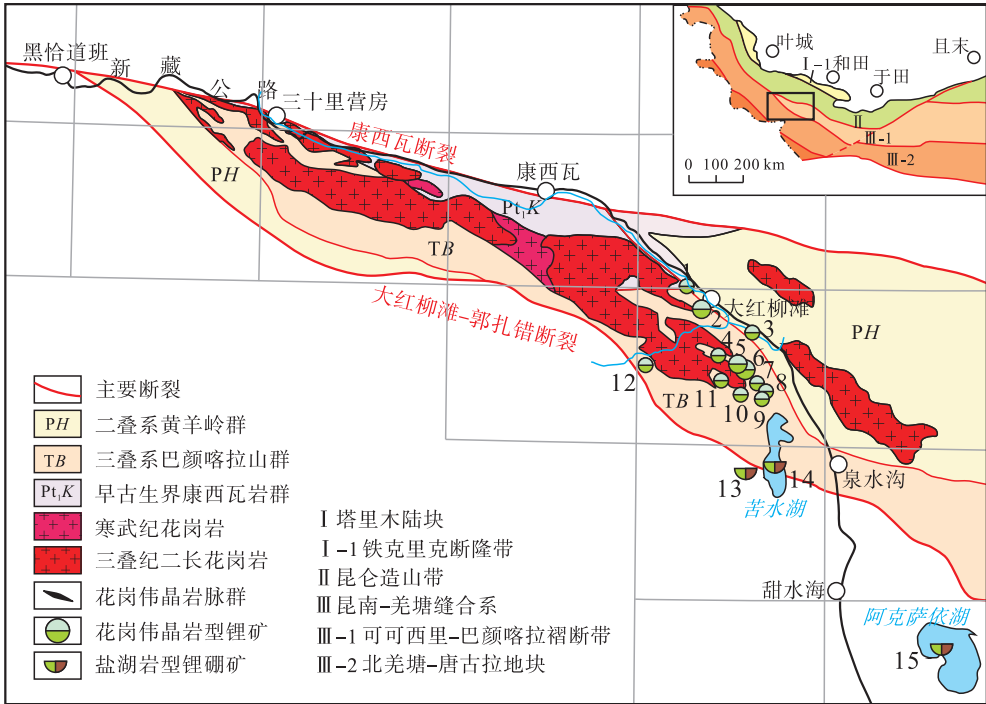
等方面,取得较多研究成果,并助推重要找矿发现(王辉等,2018;范玉海等,2018;金谋顺等,2019;Gao et al., 2020;代晶晶等,2017,2018),但是对成矿岩体、不含矿伟晶岩及岩脉、含矿伟晶岩的光谱特征及其遥感识别机理有待进一步深化。笔者在新疆喀喇昆仑大红柳滩地区已发现锂矿床成矿地质条件调查基础上,开展典型岩、矿石光谱测量分析,总结其光谱特征;通过光谱解算,梳理区内花岗岩体、不同赋矿地层、含矿伟晶岩和不含矿伟晶岩的矿物组成,统计其蚀变矿物类型;进而确定标志性蚀变矿物组合,指导高分、高光谱遥感数据的遥感解译、异常提取,为矿区外围稀有金属矿产找矿工作提供支撑。

## 1 区域成矿地质背景

大红柳滩锂铍多金属矿带大地构造上属巴颜喀拉褶断带(图 1),南北分别以大红柳滩-郭扎错断裂与康西瓦-苏巴什断裂为界,北部为昆仑造山带,南部属北羌塘地块,该成矿带位于两断裂夹持区域。区内地层主要为古元古界基底岩系康西瓦岩群、二叠系黄羊岭群和三叠系巴颜喀拉山群。康西瓦岩群岩性为黑云石英片岩、黑云斜长石英粒岩、片麻岩、大理岩等,呈构造岩片状展布。黄羊岭群为一套变质细碎屑岩夹少量碳酸盐岩及中基性火山岩。巴颜喀拉山群为一套浅变质碎屑岩夹少量碳酸盐岩建造,具复理石建造特征。

大红柳滩一带中酸性侵入岩规模较大,其中大红柳滩复式岩体呈北西—南东向带状展布,走向与康西瓦断裂一致;该岩体岩性为中-细粒黑云母二长花岗岩,二云母二长花岗岩、黑云母花岗闪长岩、黑云母石英闪长岩等,规模上以黑云母二长花岗岩为主;其形成时代为晚三叠世(李侃等,2019)。大红柳滩一带伟晶岩呈带状分布于黑云母二长花岗岩体外接触带中,延伸稳定,含矿伟晶岩脉成群成带分布、分段集中,断续长约 30 km。目前,区内共发现阿克沙依锂矿点、阿克塔斯锂矿、大红柳滩东锂矿、卡拉

喀锂矿、白龙山锂铷多金属矿、509 道班西锂矿、505 锂矿、507 锂矿、雪风岭锂矿、双牙锂矿、俘虏沟南 1 号和俘虏沟南 2 号等十余处伟晶岩型锂矿床(点)(彭海练等,2018;李侃等,2019;Gao et al., 2020;王核等,2017,2020,2021)。上述伟晶岩型锂矿围岩多以巴颜喀拉山群变碎屑岩为主,仅大红柳滩东锂矿围岩为黄羊岭群变质砂岩。另外,在锂矿带南部分布有苦水湖、黄草湖、阿克萨依湖等大-中型盐湖型锂硼盐矿,是中国少有的硬岩型与盐湖型锂矿同时产出的区域(李侃等,2019)。



1. 阿克沙依锂矿点;2. 阿克塔斯锂矿;3. 大红柳滩东锂矿;4. 卡拉喀锂矿;5. 白龙山锂铷矿;6. 509 道班西锂矿;7. 505 锂矿;8. 507 锂矿;9. 雪风岭锂矿;10. 双牙锂矿;11. 俘虏沟南 2 号锂矿;12. 俘虏沟南 1 号锂矿;13. 黄草湖锂硼矿;14. 苦水湖锂硼矿;15. 阿克萨依湖锂硼矿

图 1 大红柳滩地区伟晶岩型锂铷矿床分布图(据李侃等,2019;王核等,2021 修改)

Fig. 1 Distribution map of lithium deposits in Dahongliutan area

## 2 样品、遥感数据选择及数据处理

光谱测试样品选择区内 509 道班西锂矿、大红柳滩东锂矿和 507 锂矿等,涵盖了不同围岩类型的锂铷矿床。样品岩性包括巴颜喀拉山群变长石石英细砂岩、黑云母石英细砂岩、黄羊岭群变砂岩、细粒闪长岩、花岗闪长岩、黑云母二长花岗岩、长英质伟晶岩、含电气石伟晶岩、含锂辉石伟晶岩和含矿蚀变

伟晶岩等。

光谱测量采用 ASD FieldSpec-4 光谱仪,其波长范围为 350~2 500 nm,在 350~1 000 nm 波段范围和 1 000~2 500 nm 波段范围光谱分辨率分别为 3 nm、10 nm,采样间隔分别为 1.4 nm、2 nm。矿物光谱解算采用 SpecMin Demo 软件进行矿物的可见光-近红外波段光谱解释工作。首先,根据谱带特征峰位置选择相关的矿物种类,再逐个比对 USGS 光谱库中单矿物谱带形貌与被测样品谱带形貌相似

性,选定解算矿物种类;其次,根据选定矿物的USGS光谱库文件,通过不同矿物的相对含量将光谱库数据拟合到与被测光谱相似度最高为止,这时所得到的相对含量即相当于各个蚀变矿物的相对含量。研究表明利用光谱测量及解算出的蚀变矿物组合可为高光谱、多光谱遥感异常的提取提供依据,为下一步找矿工作提供参考(任广利等,2017a;韩海辉等,2018;代晶晶等,2018;董新丰等,2020)。

高光谱数据利用国产资源一号 02D 卫星数据,该卫星于 2019 年 9 月 12 日成功发射,搭载两台相机,可有效获取 115 km 幅宽的 9 谱段多光谱数据及 60 km 幅宽的 166 谱段高光谱数据,其中,全色谱段分辨率可达 2.5 m,多光谱为 10 m,高光谱相机分辨率优于 30 m,高光谱载荷可见近红外和短波红外光谱分辨率分别达到 10 nm 和 20 nm,为区内遥感异常的提取提供支撑;本次选择了区内一景资源一号 02D 高光谱数据。高分数据利用国产高分一号卫星数据,该卫星于 2013 年 4 月 26 日成功发射入轨,突破了高空间分辨率(全色分辨率 2 m)、多光谱(6 波段)与宽覆盖相结合的光学遥感等关键技术。以上遥感数据采用 ENVI 5.3 进行了辐射校正和 FLAASH 大气校正。

### 3 典型岩、矿石光谱特征

光谱测量显示区内围岩地层普遍具有较低光谱反射率。黄羊岭群受热变质作用,1 400 nm 处发育 H<sub>2</sub>O 和 Al-OH 弱的叠加吸收峰,2 205 nm 处有弱 Al-OH 吸收峰,2 250 nm 处有 Fe-OH 吸收峰,2 340 nm 有 Mg-OH 吸收峰(图 2a)。光谱解算显示其白云母含量为 57.03%~91.97%,斜绿泥石含量为 8.03%~42.87%,少量蒙脱石与接触变质引起的绢云母化、绿泥石化有关。巴颜喀拉山群黑云母石英砂岩具低反射率,表现出弱蚀变特征,与黄羊岭群变砂岩光谱特征相近,发育弱 Al-OH、Fe-OH、Mg-OH 吸收峰(图 2b),光谱解算显示其蚀变矿物由伊利石、石英、斜绿泥石组成;片理化黑云母石英细砂岩蚀变不发育,表现出极低反射率,在 2 200 nm 处反射率有缓降趋势(图 2b),解算显示主要由伊利石、石英组成。X 衍射结果显示巴颜喀拉山群黑云母石英砂岩主要有石英、云母,次为斜长石、绿泥石,个别样品见碳酸盐化,发育方解石、白云石。在阿克塔斯矿区近矿巴颜喀拉山群围岩中见石榴子石、闪石(表 1),且近矿围岩中云母含量明显较矿区外围含量高。

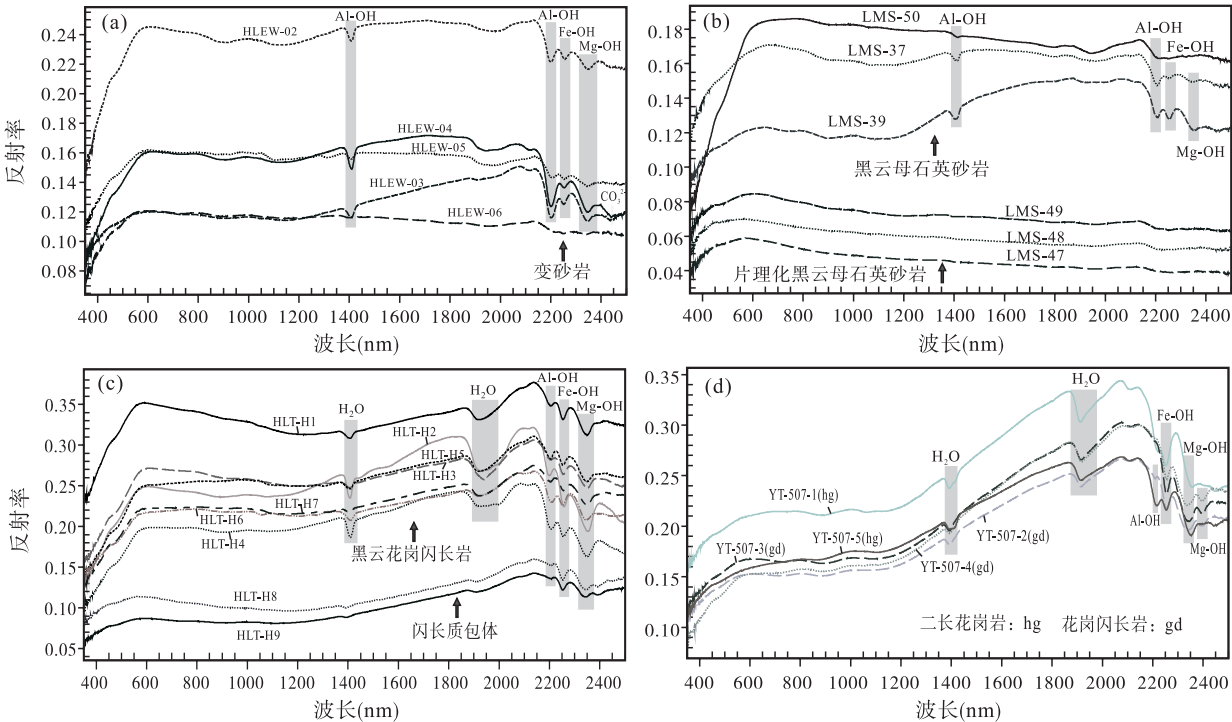


图 2 大红柳滩一带地层、岩体光谱曲线图

Fig. 2 Spectral curves of wall rock and granite in Dahongliutan area

表 1 大红柳滩地区岩、矿石 X 衍射分析结果表  
Tab. 1 X-ray diffraction data of the rocks in Dahongliutan area

| 样号  | AKTS-01        | AKTS-02 | AKTS-05 | AKTS-13                     | BY-01                   | BY-02 | BY-03 | BY-04 | LMS-47         | LMS-48 | LMS-49              | LMS-50 |
|-----|----------------|---------|---------|-----------------------------|-------------------------|-------|-------|-------|----------------|--------|---------------------|--------|
| 岩性  | 黑云母石英砂岩<br>(%) |         |         | 含石榴<br>子石黑<br>云母石英<br>砂岩(%) | 片理化黑云母石英<br>砂岩(矿区外围)(%) |       |       |       | 黑云母石英砂岩<br>(%) |        | 黑云母石<br>英粉砂岩<br>(%) |        |
| 石英  | 41.2           | 50.1    | 33.1    | 52.5                        | 62.0                    | 57.1  | 55.6  | 53.4  | 55.4           | 47.4   | 50.1                | 54.3   |
| 斜长石 | 9.9            | 7.9     | 13.4    | 12.1                        | 5.9                     | 6.2   | 5.2   | 4.7   | 16.2           | 15.7   | 16.0                | 9.5    |
| 钾长石 | /              | /       | /       | /                           | 0.7                     | 1.4   | /     | /     | /              | /      | /                   | /      |
| 方解石 | 0.2            | /       | /       | /                           | 12.0                    | 17.4  | 14.7  | 13.0  |                |        |                     |        |
| 云母  | 48.7           | 42.0    | 51.0    | 27.1                        | 5.4                     | 5.4   | 15.7  | 18.8  | 23.2           | 28.5   | 32.7                | 28.3   |
| 绿泥石 | /              | /       | 1.6     | 1.1                         | 4.0                     | 3.7   | 8.8   | 10.1  | 5.2            | 8.4    | 1.2                 | 7.9    |
| 锂辉石 | /              | /       | /       | /                           | /                       | /     | /     | /     | /              | /      | /                   | /      |
| 闪石  | /              | /       | 0.9     | 6.0                         | /                       | /     | /     |       |                |        |                     |        |
| 石榴石 |                |         |         | 1.2                         | /                       | /     | /     |       |                |        |                     |        |
| 白云石 |                |         |         | /                           | 10.0                    | 8.8   | /     |       |                |        |                     |        |

| 样号     | AK-09b                  | AK-09d                    | AK-08a                   | AK-08C                      | LMS-40       | LMS-42 | LMS-43 | LMS-44 | LMS-45          | LMS-46 | 507-7       | 507-9 |
|--------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------|--------|--------|--------|-----------------|--------|-------------|-------|
| 岩性     | 锂辉石<br>花岗伟<br>晶岩<br>(%) | 蚀变锂<br>辉石花岗<br>伟晶岩<br>(%) | 富锂辉<br>石花岗<br>伟晶岩<br>(%) | 蚀变锂<br>辉石石<br>英长石伟<br>晶岩(%) | 花岗伟晶岩<br>(%) |        |        |        | 白云母花岗伟晶岩<br>(%) |        | 长英质脉<br>(%) |       |
| 石英     | 57.8                    | 63.3                      | 58.2                     | 48.7                        | 43.2         | 30.6   | 33.7   | 38.7   | 42.5            | 39.2   | 43.6        | 42.0  |
| 斜长石    | 1.1                     | 15.0                      | 10.4                     | 32.9                        | 37.9         | 32.5   | 30.9   | 27.6   | 38.7            | 18.6   | 38.5        | 49.8  |
| 钾长石    | /                       | 5.0                       | /                        | /                           | 5.1          | 16.9   | 17.3   | 10.8   | 2.1             | 25.7   | 6.2         | 0.9   |
| 方解石    | /                       | /                         | /                        | 4.1                         | 0.8          | /      | /      | /      | /               | /      |             |       |
| 白(锂)云母 | 2.0                     | 3.0                       | 2.6                      | 7.3                         | 1.6          | /      | 2.0    | 3.7    | 7.9             | 3.6    | 4.8         | 7.3   |
| 绿泥石    | /                       | /                         | /                        | /                           | /            | /      | /      | /      | /               | /      | /           | /     |
| 锂辉石    | 39.1                    | 13.7                      | 28.8                     | 4.0                         | 11.4         | 18.2   | 16.1   | 19.2   | 8.8             | 12.9   | 6.9         | /     |
| 绿柱石    |                         |                           | /                        | 3.0                         | /            | 1.8    | /      | /      | /               | /      |             |       |

侵入岩样品包括矿区外围黑云母花岗闪长岩、闪长岩,矿区内花岗闪长岩、二长花岗岩。矿区外围黑云母花岗闪长岩光谱在 1 400 nm 处发育弱 H<sub>2</sub>O 吸收峰,在 1 900 nm 处发育宽缓的 H<sub>2</sub>O 吸收峰,2 205nm 处发育弱 Al-OH 吸收峰,2 250 nm 处有 Fe-OH 吸收峰,2 340 nm 有 Mg-OH 吸收峰(图 2c);光谱解算显示主要有白云母、斜绿泥石,少量蒙脱石、绿帘石。细粒闪长岩多以包体分布在花岗闪长岩中,其具低光谱反射率(图 2c),仅发育弱 Fe-OH 和 Mg-OH 吸收峰,解算显示主要为斜绿泥石、蒙脱石。矿区内花岗闪长岩在 1 400 nm 处发育弱 H<sub>2</sub>O 吸收峰,1 900 nm 处发育波形较为尖锐的 H<sub>2</sub>O 吸收峰,在 2 250 nm 处发育较深的 Fe-OH 吸收峰,另外在 2 340 nm、2 400 nm 有 2 处 Mg-

OH 吸收峰,部分样品见 2 205 nm 处弱 Al-OH 吸收峰(图 2d);解算显示蚀变矿物有斜绿泥石、白云母、钙铁榴石等。而与伟晶岩关系密切的黑云母二长花岗岩则在 2 205 nm 处较前者发育较明显的 Al-OH 吸收峰(图 2d),在 2 400 nm 处 Mg-OH 吸收峰不发育;解算显示有白云母、斜绿泥石等。

大红柳滩一带不含矿伟晶岩包括花岗伟晶岩、长英质伟晶岩和含电气石伟晶岩等。通过对其光谱测试显示,不含矿花岗伟晶岩部分整体均在 1 400 nm、1 900 nm 表现出强弱不等的 H<sub>2</sub>O 吸收峰,在 2 197 nm 处发育 Al-OH 吸收峰(图 3a、图 3b、图 3c)。其中,含电气石伟晶岩(图 3c)明显较近矿花岗伟晶岩蚀变弱(图 3a、图 3b)。赋存在黄羊岭群中的花岗伟晶岩在 2 340 nm、2 430 nm 处发育 Mg-

OH、-OH 吸收峰(图 3a),这与该区矿石中白云母单矿物光谱相近(图 3d),推测与周围黄羊岭群变砂岩围岩接触变质形成绿泥石化有关;光谱解算结果与此相吻合。赋存在巴颜喀喇山群中不含矿伟晶岩光谱特征较为简单(图 3b),仅发育 Al-OH、H<sub>2</sub>O 吸收峰;解算结果显示主要为白云母、石英、钠长石、

伊利石、高岭石,少量锂云母、累托石。含电气石伟晶岩光谱解算显示,发育有堇青石、钠长石、条纹长石、石英、白云母、高岭石、针柱石等,整体与热接触交代蚀变相关,部分矿物在地层中也有发育,如堇青石、针柱石等,此类伟晶岩脉与地层物质交换更为强烈。

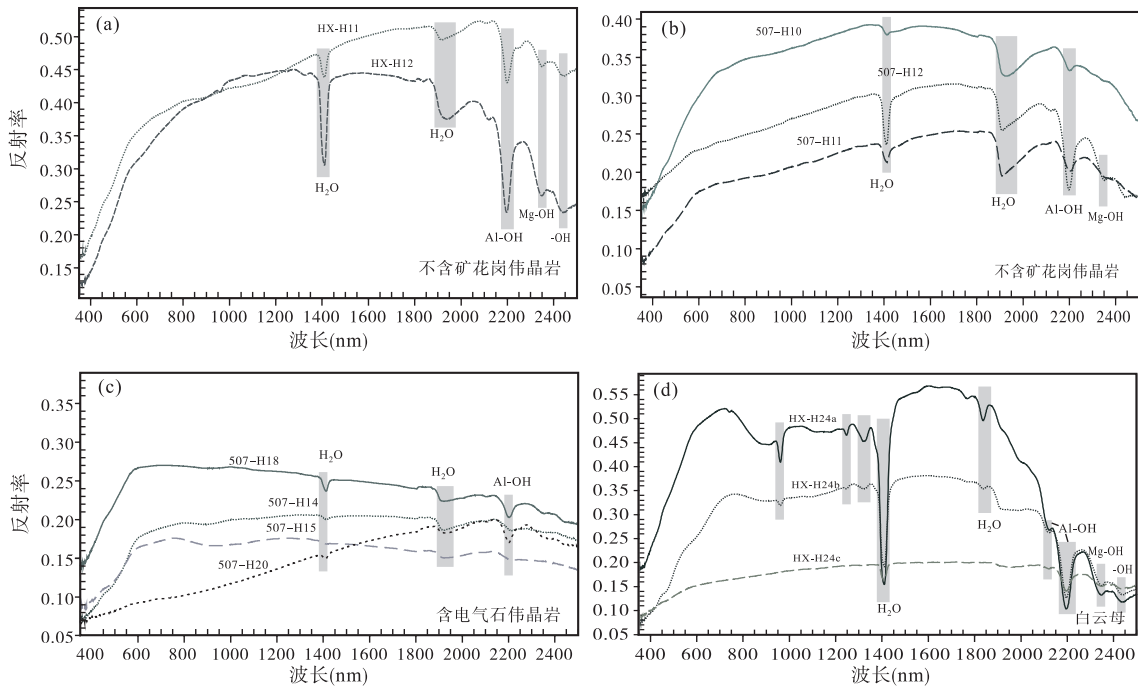


图 3 大红柳滩一带不含矿伟晶岩及白云母光谱曲线图

Fig. 3 Spectral curves of non-mineral pegmatite and muscovite in Dahongliutan area

不同矿区内含锂辉石伟晶岩光谱测量显示,其反射率较高,均在 1 400 nm、1 900 nm 表现出明显 H<sub>2</sub>O 吸收峰,整体较不含矿花岗伟晶岩的峰形深。其次,具有 2 197 nm 处的强 Al-OH 吸收峰(图 4),峰形尖锐,深度大,明显与不含矿伟晶岩、侵入岩体等不同。部分见有 2 340 nm,该处发育 Mg-OH、-OH 吸收峰,此特征在赋存黄羊岭群(图 4c)、巴颜喀拉山群(图 4b)锂矿中的含矿伟晶岩均有表现,这与含锂辉石伟晶岩边部多见绿泥石化、绿帘石化蚀变吻合(图 4d)。光谱解算显示主要为锂辉石、锂云母、钠长石、钠云母、石英、白云母、伊利石,个别见钠闪石、钙铁榴石、堇青石等。X 衍射结果显示,含锂辉石伟晶岩的矿物组成主要有石英、锂辉石、斜长石、钾长石,次为白(锂)云母、绿柱石,个别出现方解石等(表 1),X 衍射分析中绿泥石出现较少,推测与选择新鲜未蚀变样品有关。

#### 4 矿物光谱解算分析

本次共解算 118 个样品,共解释出 49 种矿物。其中,白云母、锂云母、钠云母等云母类矿物出现最为频繁,达 73 次,其次是斜绿泥石 32 次,伊利石 26 次,钠长石 15 次;风化矿物伊利石、蒙脱石也出现较多,分别为 25 次、13 次。含 Li 元素矿物主要是锂云母 20 次、锂辉石 8 次、锂绿泥石 1 次。含 Li 元素矿物光谱分析如下。

锂云母光谱表现为:在 1 000 nm 波长以内可见光-近红外波段分别在 440 nm、550 nm 和 800 nm 处产生吸收谱带,为 Fe、Mg 阳离子置换引起的电子转动谱带;在 1 000~2 000 nm 近红外-短波红外区域,分别在 1 400 nm 和 1 900 nm 附近产生尖锐吸收谱带,为结构水中 O-H 伸缩振动倍频产生的吸

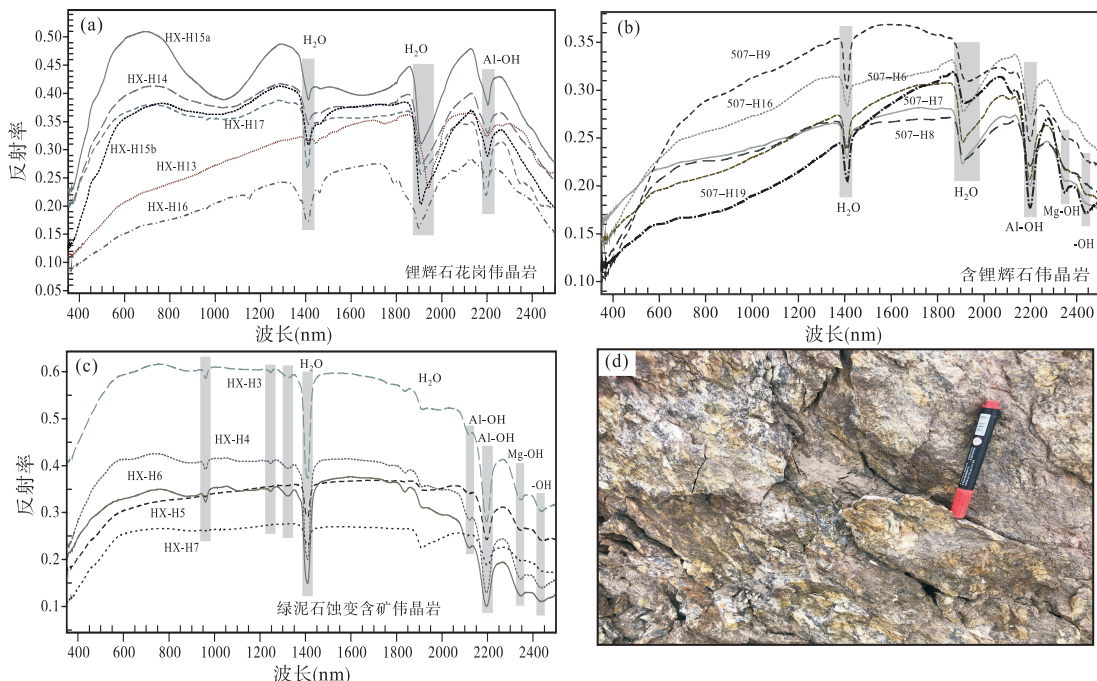


图4 大红柳滩一带含锂辉石伟晶岩光谱曲线图

Fig. 4 Spectral curves of mineral pegmatite in Dahongliutan area

收谱带;在 2 000~2 500 nm 短波红外范围内,受 Al-Si-O 配位不同,伟晶岩中云母类吸收谱带出现在 2 197 nm 附近,较岩体中 Al-OH 的 2 205 nm 处吸收峰向短波方向偏移,为 Al-OH 弯曲-伸缩振动的组合频谱带,2 340 nm 附近为 Mg(Fe,Li)-O-H 弯曲-伸缩振动的组合频谱带,另外在 1 280 nm、1 330 nm、2 030 nm 附近吸收深度微弱,是含 O-H 八面体晶格变形的吸收谱带(图 4a)。

锂辉石是富锂花岗岩伟晶岩的特征矿物,含有锂辉石的光谱表现为:通常不具有广泛的成分范围,但若含有足够的亚铁离子,使得锂辉石在 1 000 nm 附近出现弱的宽谱带,并在可见光下呈现蓝色。在 1 400 nm 和 1 900 nm 的近红外-短波红外波段区域,具有明显结合水 O-H 倍频谱带;在 2 197 nm 附近出现尖锐明显的 Al-OH 特征谱带(图 4),为 Al-O-H 弯曲-伸缩振动的组合频谱带,该谱带是由于锂辉石微裂隙中多充填的黏土矿物所致。

锂绿泥石多为锂云母蚀变的产物,其光谱表现为:在可见光范围 370 nm 和 450 nm 具有弱吸收谱带,这是  $\text{Fe}^{3+}$  的电子自旋跃迁吸收,表明  $\text{Fe}^{3+}$  置换了  $\text{Al}^{3+}$  离子;在近红外波段 1 400 nm 附近出现结构水倍频吸收谱带;在 2 250 nm 附近出现较为复杂 Fe-O-H 弯曲-伸缩振动的组合频谱带;在 2 340 nm 附近

为 Mg(Fe,Li)-O-H 弯曲-伸缩振动的组合频谱带。

野外调查显示伟晶岩的抗风化能力强于围岩,常常形成突出的地貌或白色陡坎,影像上呈高反射灰白色色调。含矿伟晶岩脉群受构造活动、地表风化影响较为破碎,尤其在接触部位多见破碎蚀变带,形成较为宽大的坡积带,有利于高分遥感影像的识别。同时,含锂辉石伟晶岩具有较为复杂的矿物组成,光谱测量显示其具有强 Al-OH 吸收峰,且其吸收峰位向短波方向有偏移,受岩浆热液蚀变影响,伴有绿泥石、绿帘石化蚀变(王核等,2017),形成弱 Mg-OH 吸收峰。因此,可以利用具有强 Al-OH 和相对弱 Mg-OH 等 2 类不同矿物组合指导遥感异常提取工作。

## 5 异常信息提取及找矿预测

在资源一号 02D 高光谱影像上选择了大红柳滩阿克塔斯锂矿伟晶岩和含白(锂)云母伟晶岩脉的图像光谱,并与 ASD 采样实测光谱、USGS 光谱库中锂辉石、白(锂)云母和绿泥石矿物光谱进行对比(图 5)。锂矿区含矿伟晶岩图像光谱、锂辉石实测和光谱库光谱曲线在 2 210 nm 附近具强 Al-OH 振动组合频谱带,该谱带是由于锂辉石裂缝中填充

的黏土矿物引起。含白(锂)云母伟晶岩岩脉图像光谱、岩样实测光谱和白云母光谱库的光谱曲线除了在 2 210 nm 附近具有明显 Al - OH 振动组合频谱带以外,在 2 340 nm 和 2 440 nm 附近还出现 2 处吸收深度较小的 - O - H 组合频谱带,与实测光谱相似(图 3d)。绿泥石图像光谱和光谱库中主要在 2 250 nm附近具弱 Fe - O - H 吸收谱带,在 2 340 nm 附近为弱 Mg(Fe,Li) - O - H 组合频谱带。综合上述,地面光谱分析及资源一号 02D 卫星遥感数据的识别效果,选择发育 Al - OH、Mg - OH 的锂辉石、绿泥石作为遥感异常提取的标志性矿物组合。

利用国产高分一号进行目视解译,对区内花岗岩体、伟晶岩脉识别效果见图 6a。利用主成分分析(PCA)和最小噪声分离(MNF)方法对该区资源一号 02D 高光谱影像进行图像增强处理,对比显示,利用 MNF 方法,选择 10 - 11 - 12 波段组合能够有效区分伟晶岩和地层(图 6b)。结合野外查证结果及前人工作完成研究区遥感解译(图 7)。

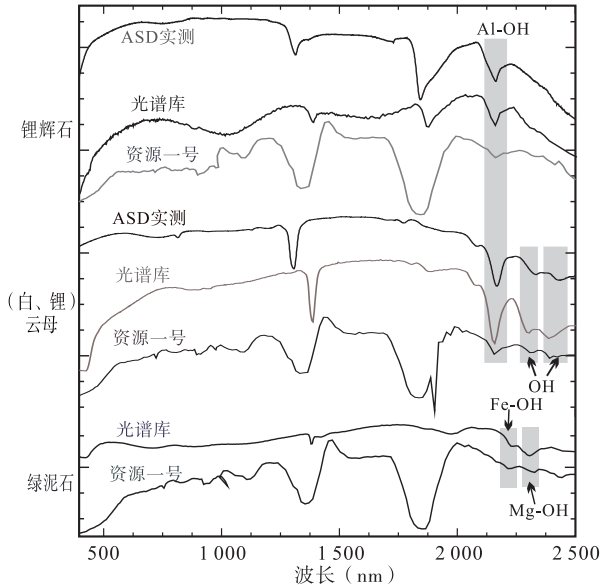


图 5 锂辉石、白(锂)云母、绿泥石光谱曲线对比图

Fig. 5 Comparison of spectral curves of spodumene, muscovite and chlorite

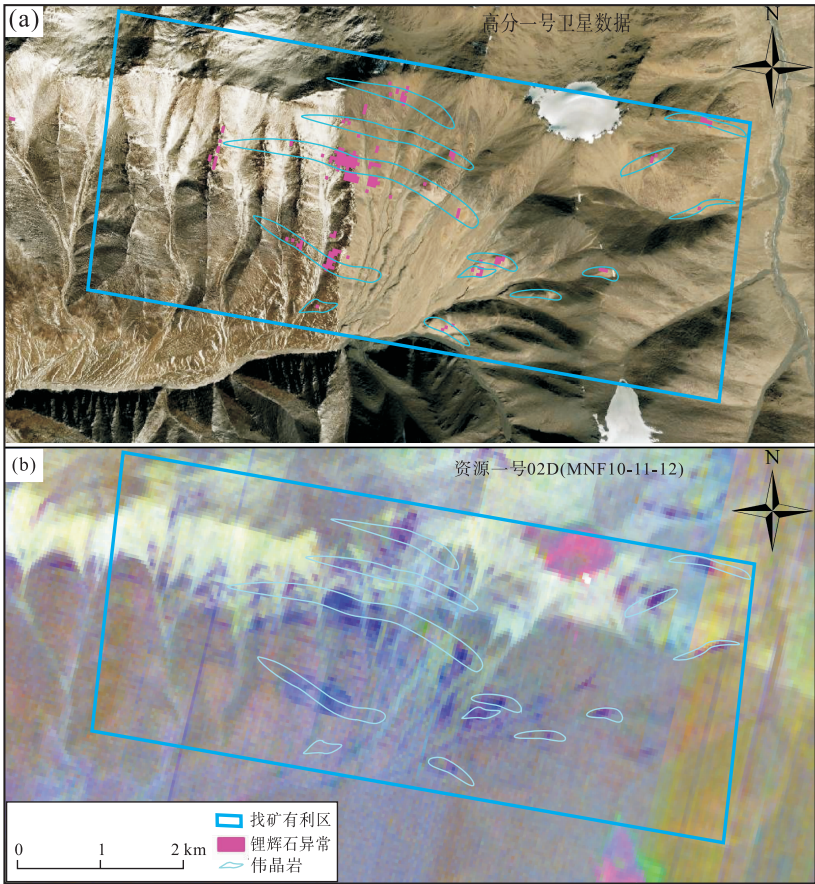
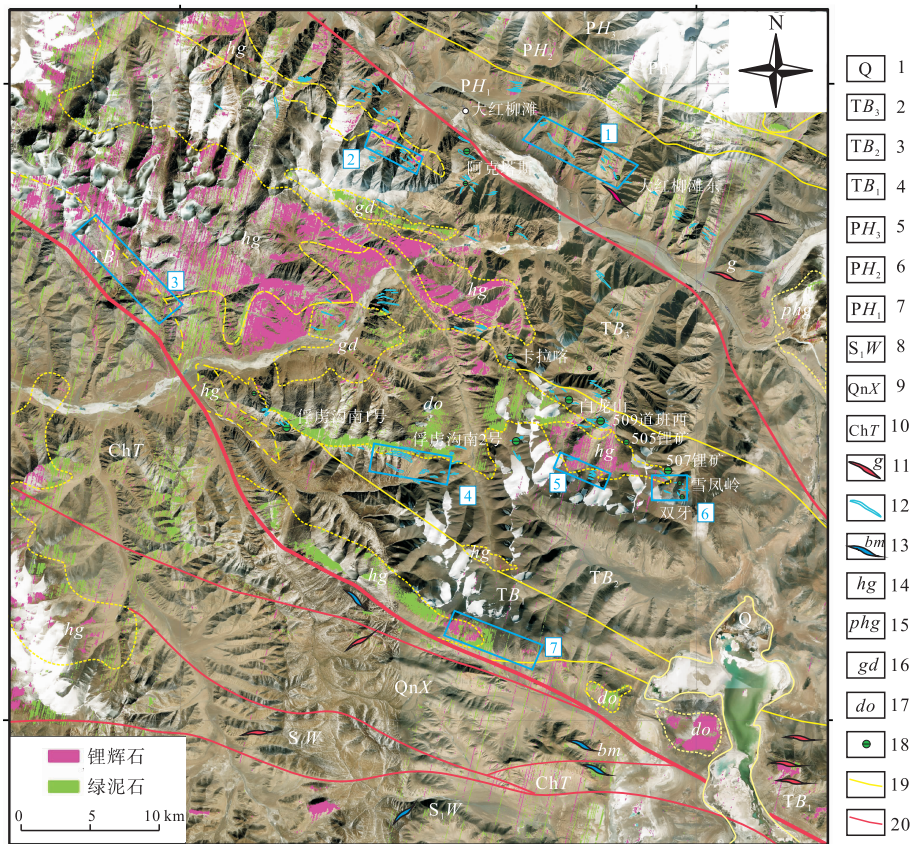


图 6 俘虻沟中段东一带遥感解译图

Fig. 6 Remote sensing interpretation map in the eastern section of the Fulugou Gully



1. 全新统冲洪、湖积物;2. 三叠系巴颜喀拉山群上组;3. 三叠系巴颜喀拉山群中组;4. 三叠系巴颜喀拉山群下组;5. 二叠系黄羊岭群上组;6. 二叠系黄羊岭群中组;7. 二叠系黄羊岭群下组;8. 志留系温泉沟群;9. 青白口系肖尔克谷地岩组;10. 长城系甜水海岩群;11. 花岗岩脉;12. 遥感解译伟晶岩脉;13. 辉绿岩脉;14. 三叠纪黑云母二长花岗岩;15. 三叠纪二长花岗岩斑岩;16. 遥感解译花岗闪长岩;17. 遥感解译石英闪长岩;18. 伟晶岩型锂矿;19. 地质界线;20. 断层

图 7 锂辉石遥感异常分布及找矿预测图

Fig. 7 Distribution of spodumene remote sensing anomaly

根据所选大红柳滩阿克塔斯锂矿点的图像光谱作为识别端元,选取 2 031~2 500 nm 的 29 个短波红外波段参与运算,采用匹配滤波方法(Matched Filtering)进行锂辉石、绿泥石异常提取工作。匹配滤波是最佳滤波的一种,当输入信号具有某一特殊波形时,其输出达到最大;在形式上,一个匹配滤波器由以按时间反序排列的输入信号构成,且滤波器的振幅特性与信号的振幅谱一致。因此,对信号的匹配滤波相当于对信号进行自相关运算。匹配滤波图像是一幅像元值介于 0~1 的单波段影像,1 代表完全匹配,0 代表不匹配。对匹配滤波输出的图像进行统计分析,取 2.5 倍方差值作为阈值进行类别划分,将值大于 2.5 倍方差的像元作为锂辉石、绿泥石含量较高的地段(图 7)。

图 7 显示,区内锂辉石异常主要沿黑云母二长

花岗岩体分布,其异常强度高,面积大,在接触带部位普遍发育绿泥石异常,这与上述光谱测量中发育强 Al-OH,并伴有 Mg-OH 吸收峰相吻合。其中,锂辉石异常面积较大,而伟晶岩脉一般规模较小,考虑到锂辉石在 2 210 nm 附近 Al-OH 特征吸收峰是由于其矿物裂隙内吸附了一定量的黏土矿物所致,峰位置和白(黑)云母相同,因此,提取结果分布区内会有云母类矿物。且结合区内已发现伟晶岩型锂矿产出特征,前人总结认为,在岩体外接触带 200~1 500 m 范围内是找矿有利区域(李侃等, 2019;Gao et al., 2020);异常分布图显示该范围正是锂辉石和绿泥石异常的叠加区域。结合上述找矿标志以及高分遥感解译出的伟晶岩脉分布,圈定出 7 处找矿有利区,分别为:大红柳滩东(1 号)、阿克塔斯西(2 号),俘虏沟中段西(3 号),俘虏沟中段东

(4号),黄草沟北(5号),507 锂矿南(6号)和苦水湖西(7号)等。上述找矿有利区均位于二长花岗岩体外接触带,锂辉石+绿泥石标志性矿物遥感异常组合发育,并见有伟晶岩发育,成矿条件良好,有待于开展进一步的查证工作。

## 6 结论

(1)岩、矿石光谱测量显示大红柳滩一带含矿伟晶岩光谱具有高反射率,在 2 197 nm 处具向短波偏移的强 Al-OH 吸收峰,在 1 400 nm、1 900 nm 附近具强 H<sub>2</sub>O 吸收峰;受接触交代影响,发育绿泥石化、绿帘石化,2 340 nm 发育 Mg-OH 吸收峰,构成与其围岩、岩体不同的吸收谱带。

(2)地质调查和光谱解算显示,花岗伟晶岩型锂矿中含锂矿物以锂辉石、锂云母、锂绿泥石为主,锂辉石中发育较多黏土类矿物,综合其光谱特征,提出“锂辉石+绿泥石”构成区内标志性蚀变矿物组合;利用国土资源一号 02D 高光谱数据,采用匹配滤波方法提取“强 Al-OH+弱 Mg-OH”的遥感异常信息,利用高分遥感影像伟晶岩脉解译,结合找矿模型分析成矿有利部位,圈定出 7 处找矿有利区。

(3)利用国产高光谱、高分卫星遥感数据,构建了高寒、深切割地区的花岗伟晶岩型稀有金属矿的“空-地”一体化找矿技术方法,为喀喇昆仑乃至阿尔金成矿带内此类矿床的寻找提供了多样的技术方法选择,对下一步找矿工作具有借鉴意义。

## 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(02):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(02): 314-318.

陈喆,陈建平. 遥感技术在斑岩铜矿勘查中的应用[J]. 地质学刊, 2019, 43(3):481-490.

CHEN Zhe, CHEN Jianping. Application of remote sensing in porphyry copper exploration [J]. Journal of Geology, 2019, 43(3):481-490.

代晶晶,曲晓明,辛洪波. 基于 ASTER 遥感数据的西藏多

龙矿集区示矿信息的提取[J]. 地质通报, 2010, 29(5):752-759.

DAI Jingjing, QU Xiaoming, XIN Hongbo. Extraction of alteration mineral information using ASTER remote sensing data in Duolong area, Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(5):752-759.

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 Denghong, 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 Denghong, 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.

代晶晶,王登红,王海宇. 我国三稀矿产资源遥感调查综述[J]. 地质学报, 2019. 93(6): 1270-1278.

DAI Jingjing, WANG Denghong, WANG Haiyu. A review of the three type rare mineral resources survey in China using remote sensing [J]. Acta Geologica Sinica, 2019. 93(6): 1270-1278.

代晶晶,王瑞江,王润生,等. 基于蚀变信息提取的西藏班公湖-怒江成矿带中段斑岩铜矿找矿预测[J]. 地球学报, 2012, 33(5):755-762.

DAI Jingjing, WANG Ruijiang, WANG Runsheng, et al. Porphyry Copper Deposit Prognosis in the Middle Part of the Bangong Co-Nujiang River Metallogenic Belt in Tibet Based on Alteration Information Extraction[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33(5):755-762.

董新丰,甘甫平,李娜,等. 高分五号高光谱影像矿物精细识别[J]. 遥感学报, 2020, 24(4):454-464.

DONG Xinfeng, GAN Fuping, LI Na, et al. Fine mineral identification of GF-5 hyperspectral image[J]. Journal of Remote Sensing(Chinese), 2020, 24(4):454-464.

董新丰,闫柏琨,李娜,等. 基于航空高光谱遥感的沉积变质型铁矿找矿预测——以北祁连镜铁山地区为例[J]. 地质与勘探, 2018, 54(5):1013-1023.

DONG Xinfeng, YAN Bokun, LI Na, et al. Prospecting Prediction of Sedimentary Metamorphic Type Iron Deposits Based on Airborne Hyperspectral Remote Sensing: A Case Study of the Jingtieshan Area in the North-

- ern Qilian Mountains[J]. *Geology and Exploration*, 2018, 54(5):1013-1023.
- 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.
- 高万里, 张绪教, 王志刚, 等. 基于 ASTER 遥感图像的东昆仑造山带岩性信息提取研究[J]. *地质力学学报*, 2010(1):59-69.
- GAO Wanli, ZHANG Xujiao, WANG Zhigang, et al. Extraction of lithologic information from the east kulun orogenic belt using aster remote sensing image[J]. *Journal of Geomechanics*, 2010(1):59-69.
- 韩海辉, 任广利, 张转, 等. 北方山山口地区典型蚀变岩矿的光谱特征研究[J]. *西北地质*, 2018, 51(4): 263-275.
- HAN Haihui, REN Guangli, ZHANG Zhuan, et al. Spectral Characteristics of Typical Altered Rocks and Minerals from Fangshankou Area in Beishan [J]. *Northwestern Geology*, 2018, 51(4): 263-275.
- 金谋顺, 高永宝, 李侃, 等. 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*, 2019, 52(4):222-231.
- JIN Moushun, GAO Yongbao, LI Kan, et al. Remote sensing prospecting method for pegmatite type rare metal deposit——taking dahongliutan area in western kunlun for example[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(4): 222-231.
- 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 Gengbiao, 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.
- 李侃, 高永宝, 滕家欣, 等. 新疆和田县大红柳滩一带花岗岩伟晶岩型稀有金属矿成矿地质特征、成矿时代及找矿方向[J]. *西北地质*, 2019, 52(4):206-221.
- LI Kan, GAOYongbao, TENG Jiaxin, et al. Metallogenic Geological Characteristics, Mineralization Age and Resource Potential of the Granite-Pegmatite-Type Rare Metal Deposits in Dahongliutan Area, Hetian County, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(4): 206-221.
- 刘德长, 邱骏挺, 闫柏琨, 等. 高光谱热红外遥感技术在地质找矿中的应用[J]. *地质论评*, 2018, 64(5): 1190-1200.
- LIU Dechang, QIU Junteng, YAN Bokun, et al. Application of thermal inferred hyperspectral remote sensing in ore exploration[J]. *Geological Review*, 2018, 64(5): 1190-1200.
- 彭海练, 贺宁强, 王满仓, 等. 新疆和田县大红柳滩地区 509 道班西稀有多金属矿地质特征与成矿规律探讨[J]. *西北地质*, 2018, 51(3): 146-154.
- PENG Hailian, HE Ningqiang, WANG Mancang, et al. Geological characteristics and metallogenic regularity of WestTrace 509 rear polymetallic deposit in Dahongliutan region, Hetian, Xinjiang [J]. *Northwestern Geology*, 2018, 51(3): 146-154.
- 任广利, 范廷宾, 余元军, 等. 多源遥感信息在喀喇昆仑火烧云一带找矿预测中的应用[J]. *地质与勘探*, 2017a, 53(6):1164-1173.
- REN Guangli, FAN Tingbin, YU Yuanjun, et al. Application of Multi-Source Remote Sensing Information to Metallogenic Prediction in the Huoshaoyun Region of Karakorum, Xinjiang [J]. *Geology and Exploration*, 2017a, 53(6):1164-1173.
- 任广利, 梁楠, 张转, 等. 高光谱标志性蚀变矿物组合在找矿预测中的应用研究——以东昆仑东—西大滩一带金矿床为例[J]. *西北地质*, 2018, 51(02):93-107.
- REN Guangli, LIANG Nan, ZHANG Zhuan, et al. Iconic Altered Mineral Assemblages on Prospecting Prediction by Hyperspectral Remote Sensing: Example from the Gold Deposits in Dongdatan and Xidatan Region of East Kunlun Mountain[J]. *Northwestern Geology*, 2018, 51(02):93-107.
- 任广利, 杨军录, 杨敏, 等. 高光谱遥感异常提取在甘肃北山金滩子-明金沟地区成矿预测中的应用[J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37(4):12:765-776.
- REN Guangli, YANG Junlu, YANG Min, et al. Application of hyperspectral remote sensing anomaly information on metallogenic prediction in Jintanzi-Mingjingou area of Beishan, Gansu[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2013, 37(4):12:765-776.
- 任广利, 杨敏, 李健强, 等. 高光谱蚀变信息在金矿找矿预测中的应用研究——以北山方山口金矿线索为例[J]. *国土资源遥感*, 2017b, 29(3): 182-190.
- REN Guangli, YANG Min, LI Jianqiang, et al. Application of hyperspectral alteration information to gold prospecting: A case study of Fangshankou area, Beishan[J].

- Remote Sensing for Land and Resources, 2017b, 29(3): 182-190.
- 涂其军, 韩琼, 李平, 等. 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, 2019, 93(11): 2862-2873.
- TU Qijun, HAN Qiong, LI Ping, et al. Basic characteristics and exploration progress of the spodumene ore deposit in the Dahongliutan area, West Kunlun[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(11): 2862-2873.
- 王核, 李沛, 马华东, 等. 新疆和田县白龙山超大型伟晶岩型锂铷多金属矿的发现及其意义[J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41(6): 1053-1062.
- WANG He, LI Pei, MA Huadong, et al. Discovery of the Bailongshan superlarge lithium-rubidium deposit in Karakorum, Hetian, Xinjiang, and its Prospecting Implication[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2017, 41(6): 1053-1062.
- 王核, 高昊, 马华东, 等. 新疆和田县雪风岭锂矿床、雪盆锂矿床和双牙锂矿床地质特征及伟晶岩脉群分带初步研究[J]. 大地构造与成矿学, 2020, 44(1): 57-68.
- WANG He, GAO Hao, MA Huadong, et al. Geological characteristics and pegmatite vein group zoning of the Xuefengling, Xuepen, and Shuangya lithium deposits in Karakorum, Hetian, Xinjiang[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2020, 44(4): 57-68.
- 王核, 徐义刚, 闫庆贺, 等. 新疆白龙山伟晶岩型锂矿床研究进展[J]. 地质学报, 2021, 95(10): 3085-3098.
- WANG He, XU Yigang, YAN Qinghe, et al. Research progress on Bailongshan pegmatite type lithium deposit, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(10): 3085-3098.
- 王辉, 秦绪文, 范玉海, 等. 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, 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.
- 闫柏琨, 董新丰, 王喆, 等. 航空高光谱遥感矿物信息提取技术及其应用进展-以中国西部成矿带调查为例[J]. 中国地质调查, 2016, 3(4): 55-62.
- YAN Bokun, DONG Xinfeng, WANG Zhe, et al. Mineral information extraction technology by airborne hyperspectral remote sensing and its application progress: An example of mineralization belts of western China [J]. Geological Survey of China, 2016, 3(4): 55-62.
- 杨金中, 陈薇, 王辉. 西昆仑成矿带黑恰达坂温泉沟群含铁层位的圈定[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(3): 191-195.
- YANG Jinzhong, CHEN Wei, WANG Hui. Delineation of iron formation in Wenquangou Group along Heiqia Pass in West Kunlun metallogenic belt [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29(3): 191-195.
- 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.
- 张紫程, 张绪教, 胡道功, 等. Hyperion 高光谱遥感在青海东昆仑东大滩地区找矿中的应用[J]. 现代地质, 2011, 25(4): 759-767.
- ZHANG Zicheng, ZHANG Xujiao, HU Daogong, et al. Application of hyperspectral remote sensing on mineral exploration in Dongdatan District of East Kunlun, Qinghai Province[J]. Geoscience, 2011, 25(4): 759-767.
- 赵玲, 王核, 刘建平, 等. 西昆仑地区恰尔隆-大同一带 ETM 遥感影像构造解译[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(04): 470-474.
- ZHAO Ling, WANG He, LIU Jianping, et al. The structure interpretation of ETM remote sensing image in Kayizi, Datong region of the West Kunlun [J]. Geotectonica et Metallogenia, 32(04): 470-474.
- Bierwirth P, Huston D and Blewett R. Hyperspectral Mapping of Mineral Assemblages Associated with Gold Mineralization in the Central Pilbara, Western Australia [J]. Economic Geology, 2002, 97: 819-826.
- Ruitenbeek F, Cudahy T J, Meer F, et al. Characterization of the hydrothermal systems associated with Archean VMS-mineralization at Panorama, Western Australia, using hyperspectral, geochemical and geothermometric data[J]. Ore Geology Reviews, 2012, 45: 33-46.
- Gao Yongbao, Leon Bagas, Li Kan, et al. Newly discovered Triassic Li deposits in the Dahongliutan area, NW China: A case study for the detection of Li-bearing pegmatite deposits in rugged terrains using remote-sensing data and images[J]. Frontiers in Earth Science, 2020, 1-24.
- Yang Min, RenGuangli, Han Ling, et al. Detection of Pb-Zn mineralization zones in west Kunlun using Landsat 8 and ASTER remote sensing data[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2018, 12(2): 1-18.