

doi: 10.6046/zrzyyg.2023155

引用格式: 祁昌炜,董基恩,程旭,等. ZY-1 02D 高光谱数据在柴北缘荒漠区蚀变矿物填图及找矿中的应用[J]. 自然资源遥感, 2024,36(4): 31-42. (Qi C W, Dong J E, Chen X, et al. Application of ZY-1 02D hyperspectral data to altered mineral mapping and ore prospecting in desert areas along the northern margin of the Qaidam Basin[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024,36(4): 31-42.)

ZY-1 02D 高光谱数据在柴北缘荒漠区 蚀变矿物填图及找矿中的应用

祁昌炜¹, 董基恩^{1,2}, 程旭³, 叶高峰², 何书跃⁴, 代威⁴, 汪冰³

(1. 青海省地质调查局自然资源部高原荒漠区战略性矿产勘查开发技术创新中心, 西宁 810000; 2. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 3. 核工业航测遥感中心, 石家庄 050002; 4. 青海省第三地质勘查院, 西宁 810008)

摘要: 青海省地质勘查工作区位于典型的高原荒漠区, 地形切割大、植被覆盖率低、基岩出露面积广、地表调查难度大。为研究卫星高光谱数据在柴北缘荒漠区蚀变矿物填图及找矿中的应用, 基于高光谱分辨率的国产遥感卫星资源一号(ZY-1)02D数据, 通过精细的辐射定标、大气校正、数据修复与正射校正等处理后, 获得青海省柴北缘赛坝沟等荒漠地区的高光谱遥感影像; 经过详细的野外调查采样并使用FieldSpec Pro FR光谱仪进行波谱测试, 构建了研究区包含绿泥石化等12种主要矿物蚀变的标准实验室光谱数据集; 最后开展了研究区蚀变矿物提取及找矿研究。结果发现, 研究区的蚀变矿物主要有绿帘石、绿泥石、钠长石、绢云母、硅化、高岭土、碳酸盐、褐铁矿、阳起石、蛇纹石、赤铁矿、黄铁矿和孔雀石等13类, 蚀变信息分布与地层、侵入岩岩性及韧性剪切构造密切相关。通过对赛坝沟等典型矿床的蚀变特征研究发现, 孔雀石化、褐铁矿化、黄铁矿化、绢云母化、硅化等蚀变信息与成矿关系十分密切, 具有重要的找矿指示意义; 部分钾长石化、绿泥石化、绿帘石化、钠长石化也与成矿作用有一定的关系, 可作为找矿参考信息。最终, 通过上述方法, 结合配套开展的1:2.5万地球化学测量成果, 在托莫尔日特地区发现了铜金矿化点1处。因此, 高光谱蚀变矿物填图在我国自然条件恶劣的西部荒漠地区能够弥补传统地质调查和矿产勘查手段的局限性, 可用于快速了解区域地质背景、成矿地质条件, 进而提取矿物光谱信息等, 为地质找矿工作提供大范围的丰富、精细的信息, 具有广泛的应用前景。

关键词: 高光谱遥感; 蚀变矿物填图; 找矿预测; 柴周缘; 荒漠区

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2024)04-0031-12

0 引言

在区域性的找矿预测中, 围岩蚀变的类型和蚀变信息空间分布特征等信息是重要的找矿线索, 高光谱遥感技术可以宏观、快速、大面积地获取这些信息, 而且在快速发现矿化蚀变、分析标志性的蚀变矿物组合和蚀变带的空间展布方面具有一定的优势^[1], 为基础地质调查和矿产资源勘查提供了重要的遥感信息^[2]。而且, Cu-Au等成矿系统通常与热液蚀变带有关, 而高光谱遥感技术可以快速提取与热液成矿相关的蚀变信息, 重点解析蚀变与成矿的

关系, 圈定以蚀变为标志的成矿有利区, 聚焦勘探重点。在国外及中国西部的荒漠区和裸露基岩发育的地区, 该方法都取得了很多成功的先例, 是一种现代矿产资源找矿中的重要方法^[3-9]。特别是在我国自然条件恶劣的西部地区, 由于地形、气候条件以及自然资源保护区等多方面因素制约, 传统地质调查和矿产勘查手段存在一定局限性; 但高分遥感具有范围广、成本低、光谱信息丰富、空间形状清晰、定位精准等特有属性, 可以通过提取矿物光谱特征等, 为地质找矿工作提供丰富、精细的信息。

在高分遥感中, 对成像高光谱遥感的研究, 也是当前遥感研究前沿之一。将成像技术与光谱技术结

收稿日期: 2023-06-02; 修订日期: 2024-01-31

基金项目: 青海省省级财政地质勘查专项资金项目“青海省乌兰县阿哈大洼地区1:2.5万地质矿产调查”(编号: 2022012015jc009)、青海省省级财政地质勘查专项资金项目“青海省阿尔金-柴北缘成矿带1:2.5万地球化学测量成果集成及靶区优选”(编号: 2024524031ky005)和青海省“昆仑英才·科技领军人才计划”项目(2023QHSKXRCTJ47)共同资助。

第一作者: 祁昌炜(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事物化探勘探技术研究。Email: qichangwei1182@163.com。

通信作者: 董基恩(1992-), 男, 博士研究生, 中级工程师, 主要从事地质资源与地质工程研究。Email: dje@email.cugb.edu.cn。

合,可以获取完整连续的地物光谱曲线,实现根据光谱特征进行地物分类识别^[10]。其主要技术手段是利用很多窄幅的电磁波谱段,从目标物体获取近似连续的光谱数据,最终将光谱与图像融合^[11]。目前,高光谱数据主要包括航空成像高光谱数据、地面高光谱数据及卫星遥感数据;但航空遥感数据昂贵且稀少^[12],卫星遥感数据则具有价格低廉、容易获取且覆盖面积大等特点,适合用于开展区域地质矿产调查应用研究^[10, 13]。可供民用的高光谱卫星数据主要是我国的 GF-5 数据^[14-15]、TG-1 数据^[16-17]和 ZY-1 02D 数据^[18-20]以及美国的 Hyperion 卫星遥感数据^[21-22]。

本次研究使用高光谱分辨率的 ZY-1 02D 遥感卫星数据,针对青海省柴北缘阿哈大洼、赛坝沟等荒漠地区,开展高光谱遥感数据处理、蚀变矿物提取及找矿预测工作;结合野外调查、光谱测量及高分遥感地质解译,分析典型矿床蚀变特征,总结金矿蚀变矿物组合特征,为研究区提供遥感技术支撑和基础资料。

1 研究区概况

研究区位于青海省中北部、柴达木盆地北缘山区,属高寒山区地貌,少部分地区为冲积平原区。地

势中南部高,中部、北部低,总体呈东高西低地势格局。区内海拔最高为 4 711 m,最低为 2 937 m,大部分地区海拔介于 3 200~4 150 m 之间,海拔高差大,整体坡度跨度较大,其中区内 60%的地区为坡度大于 40°的山体及陡坎地段(图 1),为典型的高寒深切割区,交通困难。而且研究区属明显的大陆高原性气候,昼夜温差大,部分山顶常年积雪。该区地形复杂、交通不便及气候条件恶劣使传统地质路线调查及矿产勘查工作面临巨大挑战,制约了对区内地质体和构造信息的全面调查研究及找矿成果的取得。

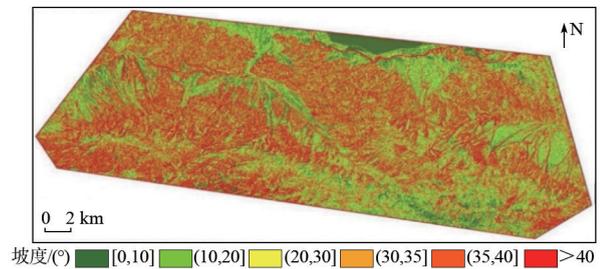


图 1 研究区坡度示意图

Fig.1 Slope of study area

研究区地质构造图如图 2 所示。研究区大地构造处于柴北缘结合带二级构造单元,跨及滩间山岩浆弧、柴北缘蛇绿混杂岩带 2 个三级构造单元。柴北缘构造带位于祁连造山带与柴达木地块之间,也被称为柴北缘超高压变质带或增生杂岩带^[23],以乌

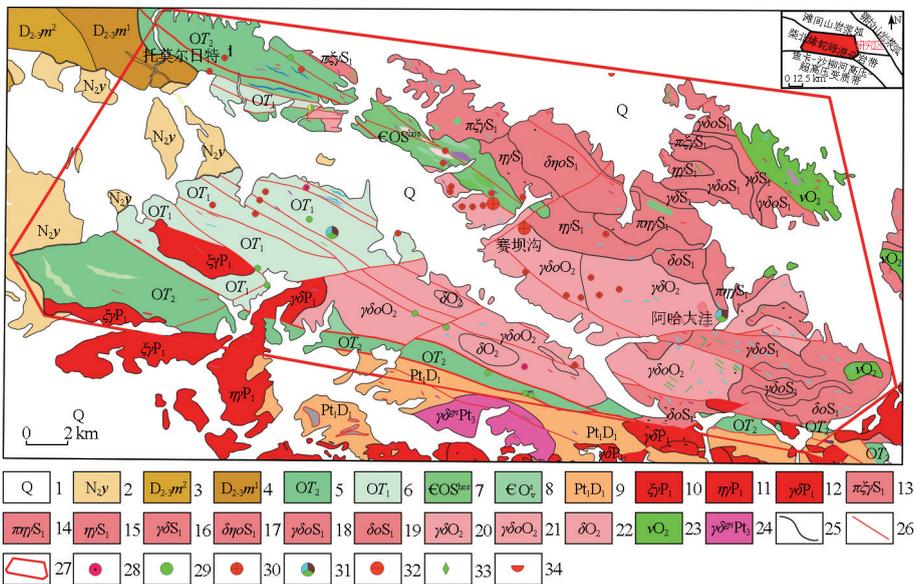


图 2 研究区地质构造图

Fig.2 Geological map of study area

1-第四系; 2-油砂山组; 3-牦牛山组火山岩段; 4-牦牛山组碎屑岩段; 5-滩间山群火山岩组; 6-滩间山群碎屑岩组; 7-赛坝沟蛇绿岩组合; 8-辉长岩; 9-达肯大坂岩群; 10-早二叠世正长花岗岩; 11-早二叠世二长花岗岩; 12-早二叠世花岗闪长岩; 13-早志留世似斑状正长花岗岩; 14-早志留世似斑状二长花岗岩; 15-早志留世二长花岗岩; 16-早志留世花岗闪长岩; 17-早志留世石英二长闪长岩; 18-早志留世英云闪长岩; 19-早志留世石英闪长岩; 20-中奥陶世花岗闪长岩; 21-中奥陶世英云闪长岩; 22-中奥陶世石英闪长岩; 23-中奥陶世辉长岩; 24-新元古代眼球状片麻状花岗闪长岩; 25-地质界线; 26-断层; 27-研究区; 28-铁矿点; 29-铜矿点; 30-金矿点; 31-多金属矿; 32-钼钨矿; 33-石棉矿; 34-盐矿

兰-鱼卡断裂为界分为北侧的欧龙布鲁克微陆块和南侧的早古生代俯冲杂岩^[24]。区内主要出露达肯大坂岩群、滩间山群、赛坝沟蛇绿混杂岩。达肯大坂岩群变基性火山岩类型相对复杂,以绿泥石化的角闪岩和片岩为主,其中可见古元古代火山岩,呈夹层、似透镜状产出,岩性主要为斜长角闪岩。原岩恢复为一套基性火山岩,不具原有的火山岩特征,形成于新元古代晚期—早古生代早期的弧后盆地环境^[25-27]。滩间山群是柴北缘构造带的一套海相火山-沉积岩系,分为火山岩组和碎屑岩组,是重要岩石构造单元^[28-30],也是硫化物矿床和造山带型金矿床最主要的含矿岩系^[31-32]。在滩间山群中分布有蛇绿岩块,主要由蛇纹石化橄榄岩、蚀变辉长岩、堆晶岩及辉绿辉长岩墙群组成,被称之为托莫尔日特-赛坝沟蛇绿混杂岩带^[33]。它们在空间上与岛弧火山岩伴生,可能形成于削减带之上,为SSZ型蛇绿岩^[28, 31-34],记录了地壳物质从俯冲到构造折返的动力学过程,提供造山带演化的重要信息^[35-36]。复杂的地质背景及构造活动为区内的成矿成岩及蚀变发育提供了重要的物质来源,区域韧性动力变质作用使岩石金、铜多金属成矿元素活化、迁移,所形成的韧性剪切带为含矿溶液运移提供通道和沉积的场所,因此在区内形成了著名的赛坝沟金矿、阿哈大洼金铜多金属矿等矿床。其中赛坝沟金矿是柴北缘成矿带重要的金矿产地,该矿床为与岩浆热液作用相关的造山型金矿床^[37],认为成矿物质和成矿热液来源于深部^[38],矿化蚀变主要有硅化、黄铁矿化、绢英岩化、绿泥石化、绿帘石化和碳酸盐化等^[39]。阿哈大洼金多金属矿床为热液型,加里东—印支期岩浆活动为成矿提供了热源与矿源物质,北西—近东西向断裂构造严格控制矿体的形态、规模及产状^[40],围岩具褐铁矿化、硅化、黄铁矿化、绢云母化和孔雀石化等蚀变特征,并且蚀变强度与矿体规模、品位高低具有正相关关系^[41]。

以往遥感工作主要是在1:5万区域调查矿产调查中利用中等空间分辨率的ETM+数据(空间分辨率为30m)仅开展构造及重要地质体提取研究。在区域GF-2卫星图像中达肯大坂岩群呈灰白色,斑点状纹理,以发育与片理走向基本一致的平行状纹形、色带为典型特征;滩间山群碎屑岩组呈淡灰绿色、灰白色等色调,具较好的成层性,片理表现出平行纹理,显斑状纹理,火山岩组多为灰黑色、黑褐或暗绿色,可见节理发育,显示出一定的成层性,显致密斑点状影纹^[42],未进行过蚀变信息提取等研究工作。

综上所述,研究区为青海省典型的高原荒漠区,地形切割大、植被覆盖率低、基岩出露面积广,同时区内成矿事实显著,特别是与热液蚀变相关、韧性剪切带等构造控制的Cu-Au等成矿系统在区内已有成矿事实,而且发育了孔雀石化等蚀变,为本次进行基于高空间、高光谱分辨率的遥感卫星数据的蚀变矿物填图及找矿应用研究提供了基础和条件。

2 数据处理及分析

2.1 高光谱数据

为开展研究区高光谱遥感蚀变矿物提取与矿物填图工作,采用ZY-1 02D卫星遥感数据。ZY-1 02D卫星是我国自主研发并成功运行的首颗民用、商用高光谱卫星,高光谱空间分辨优于30m、多光谱优于10m。高光谱相机充分继承了国产高光谱卫星GF-5号的技术,针对自然资源主体业务进一步优化了信噪比等核心参数。

2.2 数据预处理

采用国内2020年最新商用ZY-1 02D卫星的改进的高光谱成像仪(advanced hyperspectral imager, AHSI)获取的影像数据开展高光谱蚀变矿物信息提取(即蚀变矿物填图)。在应用中发现AHSI数据在灰度范围方面优势明显,且短波红外谱段的清晰度和信息量优于GF-5 AHSI数据^[43]。

高光谱数据预处理主要包括辐射定标、大气校正、数据修复与正射纠正等流程。目的是降低因辐射度失真、大气消光和几何畸变等因素造成的影像质量的衰减^[19, 44-45],为进一步开展波谱匹配与信息提取奠定数据基础。

2.2.1 大气校正

高光谱数据是地物光谱反射辐射信息与大气辐射传输效应、地形效应、传感器扫描系统等多种因素影响的结果,其像元光谱是上述因素相互作用的综合反映^[46]。成像光谱对地物的识别依赖于地物精细的光谱特征,为了获取地物真实光谱特征,必须进行相关数据的辐射定标与大气校正,以消除大气和无关地物光谱辐射影响^[47]。本次采用6S-FLAASH大气校正方法开展高光谱数据大气校正处理;为了进一步验证大气校正结果,在研究区选取了都兰湖和长石砂岩覆盖的大面积纯净像元作为大气校正的验证对象,提取其影像光谱曲线与地物标准光谱进行对比。结果表明,本次高光谱数据预处理还原地表真实反射率效果较好(图3)。

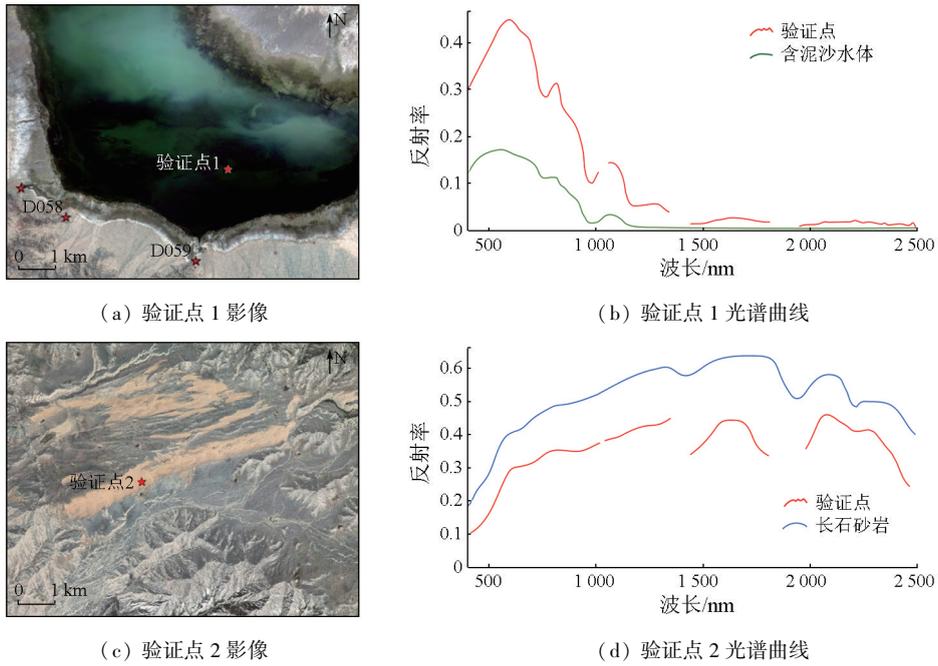


图3 都兰湖及长石砂岩覆盖区验证点光谱特征对比

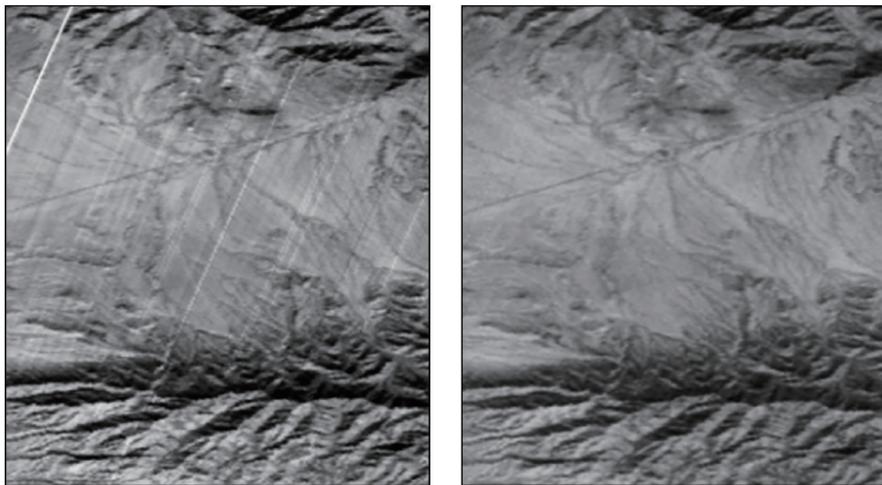
Fig.3 Comparison between spectral characteristics of validation sites in Dulan Lake and arkose-sandstone covered areas

2.2.2 数据修复

由于 ZY-1 02D 卫星的 AHSI 高光谱传感器 CCD 存在坏的探测元件,致使高光谱影像存在一定程度的坏波段、坏线、条带噪声与 smile 效应等问题,会出现明显的条纹现象,需通过开展数据修复技术处理解决上述问题。辐射能量在到达传感器时,部分波段会受水汽吸收的影响。光谱波长范围为 1 356~1 447 nm 和 1 800~1 982 nm 的波段主要受水汽影响较大,在利用高光谱数据获取地面信息时,首先要把这些波段剔除^[42,48]。对 ZY-1 02D 卫星的 AHSI 数据来说,受水汽影响的波段为:波段 98—103 和波段 125—135 共 17 个波段,在大气校

正之后,反射率小于等于 0 的需剔除。另外,由于近红外波段 72—76 与短波红外波段 77—79 重叠,且可见光近红外波段的信噪比较高,所以保留波段 72—76,而去除波段 77—79。波段 163 之后的波段信噪比过低,无法提取有用信息,因此也将其删除。最终,满足工作质量要求的波段数为 143 个。

其次,对高光谱遥感影像中出现的坏线现象要采用查找坏线、计算像元值以及替换像元值的方式进行处理;对条纹噪声则要利用局部平均滤波去条带法进行重新计算。经过修复后,影像中坏线与条带噪声现象明显消失(图 4)。



(a) 修复前影像 (b) 修复后影像

图4 数据修复处理效果对比

Fig.4 Comparison of data repair processing effect

2.2.3 正射纠正

采用 ZY-1 02D 号数据自带的 RPC 开展正射纠正,同时结合美国 USGS 发射的陆地卫星系列 Landsat8 OLI 的 L1 级数据产品进行同名地物位置对比匹配,发现在 RPC 校正之后仍然存在影像位置偏离的现象,因此,在高光谱影像正射校正的过程中,追加 Landsat8 L1 级数据产品作为辅助参考影像,选取地面 RPC 控制点进行精纠正;以 NASA 发布的 STREEM_DEM 作为高精度的数字高程模型(digital elevation model, DEM),用以消除光照导致的地形误差;选用二次多项式模型对 2 景影像进行配准,最后以地理精度较高的国产 GF-2 影像的数字正射影像(digital orthophoto map, DOM)作为参考标准,对比 ZY-1 02D 正射纠正影像校正位置,均方根误差均小于 1 个像元。

2.3 标准参考光谱库构建

为构建研究区标准参考光谱库,根据研究目的进行野外调查。主要开展了岩层、构造的调查与验证、典型岩矿石样波谱测试、典型矿床矿点及蚀变信息的调查验证。调查路线以穿越典型矿床、矿点为主,重点穿越了赛坝沟韧性剪切带型金矿、阿哈大洼构造蚀变岩型金铜矿,同时兼顾研究区主要成矿地层与岩体,完成了寒武系—奥陶系赛坝沟蛇绿混杂岩、奥陶系滩间山群,古元古界达肯大坂岩群和上泥盆统牦牛山组等区内主要出露的地层。调查的岩体主要包括华力西期二长花岗岩和加里东期英云闪长岩、花岗闪长岩、正长花岗岩等,同时对沿线重要的断裂、韧性剪切构造和侵入脉体进行了调查研究。共完成野外调查路线 5 条,完成调查点 61 个(图 5),完成岩矿石采样 83 件。

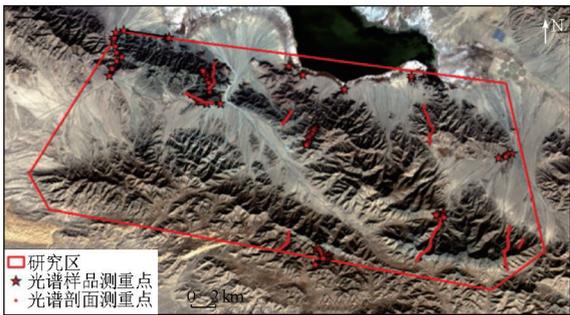


图 5 野外地质路线及岩矿石采样点分布

Fig.5 Field survey geological routes and distribution of rock and ore sampling points

本次路线调查结果,基本覆盖了区内重要成矿地层、岩体和主要构造,验证了初步解译成果,完善了遥感解译标志,为进一步详细解译准备了基础。根据野外地质调查成果,同时利用美国 ASD 公司的 FieldSpec Pro FR 光谱仪对采集的重要岩矿石和蚀

变矿物进行了波谱测试,将研究区主要发育的碱性长石、绿泥石、绿帘石、赤铁矿、褐铁矿、黄铁矿、石英、云母等蚀变矿物作为重点对象,构建了包括蛇纹石化、钠长石化、钾长石化、绢云母化、绿泥石化、绿帘石化、赤铁矿化、褐铁矿化、黄铁矿化、白云母化、硅化、孔雀石化共计 12 种主要矿物蚀变的标准参考光谱数据集(图 6),为开展高光谱蚀变信息提取提供了重要依据。

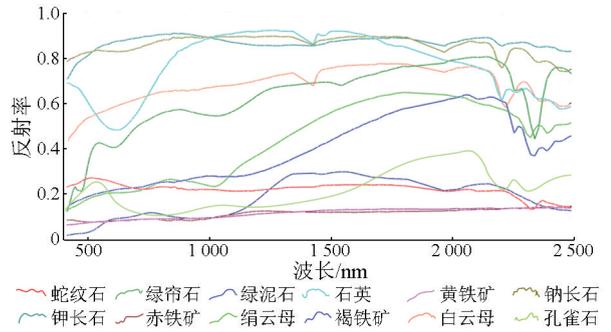


图 6 研究区标准参考光谱数据集

Fig.6 Standard reference spectral dataset of study area

2.4 蚀变信息提取

首先将调查区常见的绿泥石、赤铁矿、褐铁矿等主要蚀变矿物的光谱特征进行逐一比较,包括吸收峰、反射谷的位置、幅度等参量,总结了区内蚀变矿物类型的诊断光谱特征,然后使用纯像元指数(pure pixel index, PPI)与光学实时自适应特征码识别系统(optical real time adaptive signature identification system, ORASIS)开展纯净像元提取工作,采用光谱匹配技术,通过已建立的标准参考光谱库与目标矿物进行光谱匹配,获得了研究区矿物类型分布,达到高光谱矿物填图目的,最后通过掩模筛选等处理,最终获得了研究区蚀变矿物分布信息特征(图 7),提取出了研究区铁的氧化物 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 等、铁的硫化物、羟基类 $Fe-OH$, $Al-OH$, $Mg-OH$ 等蚀变矿物,即黄铁矿、褐铁矿、赤铁矿、钠长石、钾长石、绿帘石、绿泥石等。

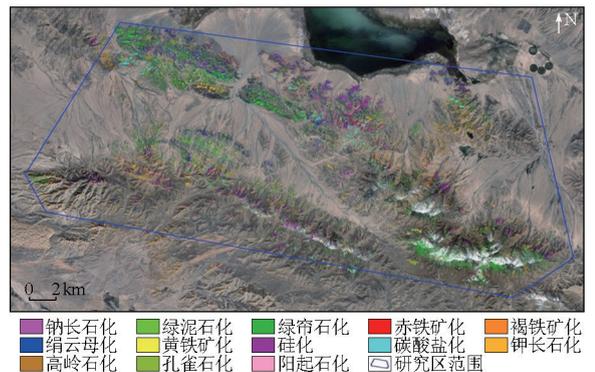


图 7 研究区高光谱矿物蚀变分布图

Fig.7 Distribution of hyperspectral mineral alteration in study area

同时开展了野外调查进行对比验证研究,选取 15 个典型的验证点进行了验证,其中 11 个点的所

在位置均有对应的蚀变矿物分布(图 8),说明蚀变信息提取精度较高。

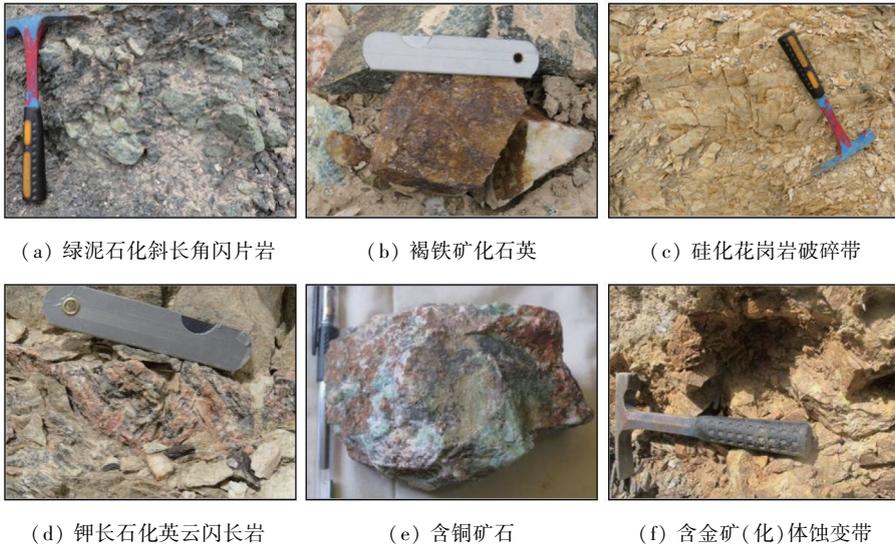


图 8 野外验证点的典型蚀变岩石及矿石特征

Fig.8 Characteristics of typical alteration rocks and ore at field verification site

3 结果分析

3.1 高光谱异常分布特征

利用高光谱遥感数据提取的各类蚀变信息,其分布基本体现了研究区蚀变矿物的大致分布格局。对研究区普遍发育的蚀变矿物,利用本次采用的高光谱数据能较好地进行识别,而对研究区内不甚发育的蚀变矿物则识别效果相对较差。

对研究区利用高光谱提取的蚀变信息包括绿帘石化、绿泥石化、钠长石化、绢云母化、硅化、高岭土化、碳酸盐化、褐铁矿化、赤铁矿化、黄铁矿化、阳起石化、蛇纹石化和孔雀石化共 13 类。其中:绿帘石化是区内普遍发育的一类蚀变,利用高光谱提取的绿帘石信息分布具有很好的规律性,主要分布于滩间山群及赛坝沟蛇绿混杂岩带中的绿帘角闪片岩中,而在岩体及其他地层中分布很少。绿泥石化相对于绿帘石发育较少,这一特点与高光谱提取的绿帘石信息基本一致。受构造单元或地域的限制,绿泥石化主要分布于滩间山岩群和赛坝沟蛇绿混杂岩带,但发育程度低于绿帘石化。钠长石化的调查研究较少,本次根据光谱特征对其进行了提取试验。根据高光谱提取的钠长石信息,在本区分布较为广泛,可能为造岩矿物,而非蚀变矿物。绢云母化在研究区较为发育,但粒度普遍很细,利用高光谱对其识别的难度较大。区内该类蚀变信息主要分布在赛坝沟蛇绿混杂岩带中,其次在滩间山岩群也有分布,岩体中分布极少。对于硅化蚀变信息,受石英矿物的

影响,难以区别硅化与造岩矿物中的石英信息。但硅化与成矿关系较为密切,为此对其进行了试验性提取,以供找矿预测参考。该种信息在本区牦牛山组分布较多,主要分布碎屑岩段,可能与石英含量较多的石英砂岩相关;在花岗闪长岩、英云闪长岩等侵入岩中分布相对较多,在其他侵入岩中也有少量分布,但大多与造岩矿物石英相关。高岭土化在研究区分布最为广泛,其分布显著受到第四系黏土矿物的影响,与蚀变无关。但是在研究区西北部的牦牛山组中分布最为密集的高岭土化,显著多于其他岩性,推测其主要是因为牦牛山组为砾岩-含砾砂岩-砂岩-黏土岩的沉积组合导致。碳酸盐化在研究区较为发育,在各类地质体中均有分布,在研究区南部的达肯大坂岩群中有明显分布,其可能大多与大理岩密切相关。在研究区北部的早志留世正长花岗岩和石英二长闪长岩中分布相对较多,其他岩体中也有少量分布。褐铁矿化在区内分布相对广泛,主要分布在研究区中部及西北部等海拔较低、覆盖相对较少的地区,受地形地貌的影响而显示出分布不均衡特点。褐铁矿化在赛坝沟蛇绿混杂岩和滩间山岩群中分布较多,在牦牛山组和油砂山组中也有少量分布;但在侵入岩中,主要分布在研究区中部和北部的二长花岗岩、正长花岗岩及英云闪长岩中,而在东南、西南侵入岩中分布极少。赤铁矿化、黄铁矿化在全区零星分布,无明显分布特点。阳起石化、蛇纹石化及孔雀石化在区内分布很少,其可靠性相对较差,需进一步调查验证。

3.2 蚀变与构造、地层及岩浆岩的关系

本次研究发现大多数蚀变分布与地层、侵入岩

岩性及构造密切相关,尤其是绿帘石、绿泥石、钾长石、钠长石等。研究区地层以变质岩组合为主,当区域变质或地层岩石矿物叠加热液蚀变矿物时,或当热液蚀变矿物叠加区域变质矿物信息时,单从矿物的分布特征上来看,并不能区分两者。但是热液蚀变矿物多发生在一定的范围内,且矿物含量较周边有一定的富集,这就使得该矿物的丰度较高。研究区的矿化蚀变在地层中的分布以小团块、长条状为主要特征,少量为星散状,空间展布特征与地层层理特征一致、协调性较差。

同时发现,不同时代、不同期次的侵入岩体形成的围岩蚀变不同,其中早志留世、中奥陶世的侵入岩主要为钾长石化、钠长石化、碳酸盐化、高岭土化,其次有少量的绿帘石化、褐铁矿化。但早二叠世侵入岩中分布的蚀变信息类型很少,推测这主要是由其造岩矿物、含矿物质、矿物成分、风化程度等差异所导致的。

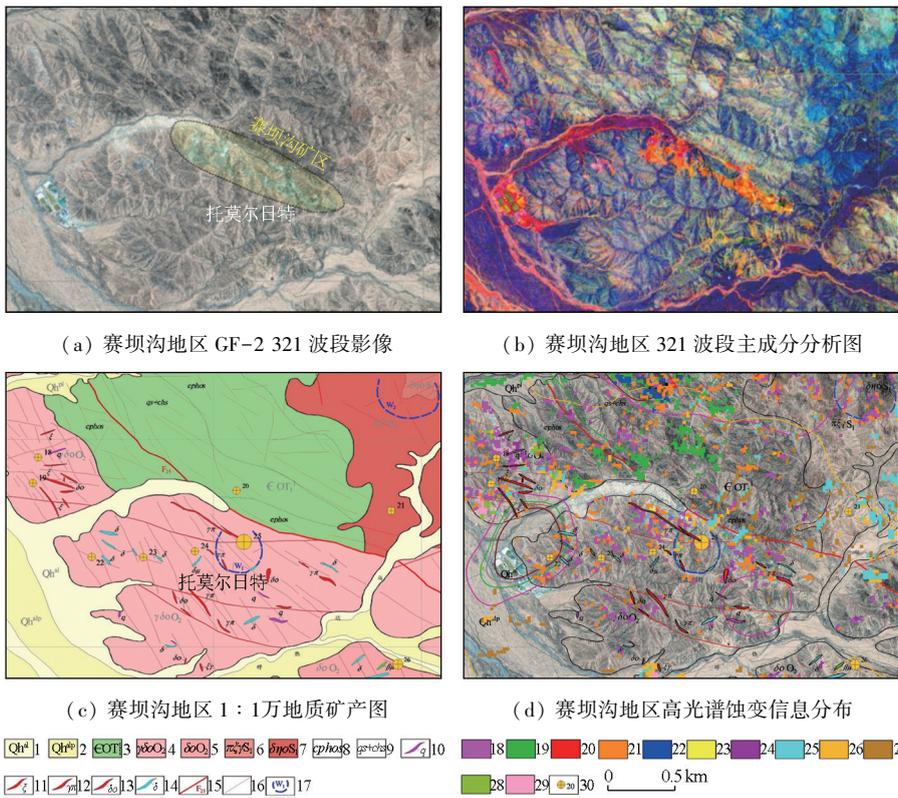
韧性剪切带、断裂构造在遥感影像上主要表现为线性的色调差异,且不同色调的分界面呈线状延伸。研究区的韧性剪切带、断裂构造在 GF-2 高分解译图和高光谱影像 MNF 变换信息增强解译图上

都呈现出明显的线状特征。在研究区内,利用高光谱提取的蚀变信息与韧性剪切构造有一定的关系,但与断裂构造的关系不明显。在研究区西北部有几类蚀变信息呈带状分布,一方面表现出与岩性的相关性,另一方面也表现出与韧性剪切带相关。其中,绿泥石化、钠长石化和碳酸盐化沿着韧性剪切带呈现带状分布特征。

4 典型矿床研究及找矿分析

赛坝沟金矿为构造蚀变岩型、石英脉型。含金石英脉赋存于 NWW 向脆-韧性断裂带中,产状与区内断裂基本一致,与围岩界线清晰,矿化不均匀^[49]。绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年结果表明,赛坝沟金矿成矿时间(425.5±2.1) Ma,小于矿体围岩年龄,为后生矿床^[50]。赋矿围岩以寒武-奥陶系滩间山群和中奥陶世英云闪长岩为主,赋矿岩性不具有选择性,矿化与韧性剪切作用具有同期特点。

本次研究发现,矿区内普遍存在高岭土化、绿泥石化,与金矿化关系密切的主要有褐铁矿化、绢云母化、硅化、黄铁矿化等(图 9)。



1-全新统冲积物; 2-全新统冲洪积物; 3-滩间山群片岩段; 4-中奥陶世英云闪长岩; 5-中奥陶世石英闪长岩; 6-早志留世正长花岗岩; 7-早志留世石英二长闪长岩; 8-角闪片岩; 9-斜长角闪片岩; 10-石英脉; 11-正长岩脉; 12-花岗斑岩脉; 13-石英闪长岩脉; 14-闪长岩脉; 15-解译主干断裂; 16-解译次级断裂; 17-环形构造; 18-钠长石化; 19-绿泥石化; 20-赤铁矿化; 21-褐铁矿化; 22-绢云母化; 23-黄铁矿化; 24-硅化; 25-碳酸盐化; 26-钾长石化; 27-高岭土化; 28-孔雀石化; 29-阳起石化; 30-金矿点

图 9 赛坝沟金矿区蚀变及成矿信息综合分析图

Fig.9 Comprehensive analysis of alteration and mineralization information in Saibagou gold mining area

金矿化主要与铁质氧化紧密伴生,具蚀变叠加类型的含金普遍较高,如糜棱岩中有褐铁矿化,又有绢云母化(即褐铁绢云岩化),金品位往往达到工业品位。褐铁矿化与后期硅化蚀变叠加时,局部地段可见浸染状、细脉状明金^[51]。前人的研究认为,赛坝沟金矿区强糜棱岩化绿泥石化英云闪长岩为强烈的韧性剪切和脆性断裂叠加改造作用产物,糜棱岩化绿泥石化带可能对流体成矿物质的运移形成了一定的屏障,使得成矿物质大部分沉淀在硅化、绢英岩化带内^[39]。

同时发现高光谱提取的赤铁矿化、碳酸盐化、黄铁矿化、孔雀石化和阳起石化蚀变信息分布很少,在实地不易发现,且全区也很少见到,其吻合程度差。这一特征也客观反映了高光谱数据的客观特性。受遥感数据空间分辨率(30 m)的影响,当某类蚀变矿物分布的面积越大时,提取的该类信息越准确;反之,区内发育很少的蚀变矿物难以提取。特别是黄铁矿化、孔雀石化等近矿蚀变,不但在矿化带上分布相对较少,而且大多难以出露,因而高光谱遥感数据难以测到其特征光谱信息。

基于上述特征综合来看,荒漠区金矿区利用高光谱提取的褐铁矿化、硅化、绢云母化、黄铁矿化和孔雀石化蚀变信息与成矿关系密切,具有重要的找矿指示意义;部分钾长石化、绿泥石化、绿帘石化、钠长石化也与成矿作用具有一定的关系,可作为找矿参考信息。根据上述参考信息指示,结合配套开展的1:2.5万地球化学测量成果,在托莫尔日特地区发现了铜金矿化点1处。经地表调查,发现含矿石英脉目估地表出露长约10 m,宽约1.4 m,北西端被第四系覆盖,南东端尖灭;石英脉呈褐色、白色,局部孔雀石、黄铁矿、黄铜矿矿脉相对富集,围岩为绿片岩。前期拣块样显示Cu的品位22.33%;后期采集的1.4 m的刻线样显示Cu含量3.91%、Au含量0.22 g/t。因此本文方法在青海等我国自然条件恶劣的西部地区,能够弥补传统地质调查和矿产勘查的局限性,可以快速了解区域地质背景、成矿地质条件、提取矿物光谱信息等,为地质找矿工作提供丰富、精细的信息,具有广泛的应用前景。

5 结论

利用ZY-1 02D遥感数据,在柴北缘荒漠区开展了蚀变矿物填图研究,通过精细的数据处理分析提取了研究区的蚀变信息,基于该数据的应用效果得出如下结论:

1)研究区利用高光谱提取的蚀变信息主要有

绿帘石化、绿泥石化、钠长石化、绢云母化、硅化、高岭土化、碳酸盐化、褐铁矿化、阳起石化、蛇纹石化、赤铁矿化、黄铁矿化和孔雀石化等13类,大多数蚀变分布与地层、侵入岩岩性及构造密切相关,尤其是绿帘石化、绿泥石化、钾长石化、钠长石化等,而且蚀变信息与韧性剪切构造有一定的关系。

2)研究发现褐铁矿化、硅化、绢云母化、黄铁矿化和孔雀石化蚀变信息与成矿关系密切,具有重要的找矿指示意义;赛坝沟等金矿区存在金矿化与铁质氧化紧密伴生的现象,而且蚀变叠加类型的地段含金普遍较高,褐铁矿化、绢云母化的糜棱岩中金品位往往达到工业品位。并且,部分钾长石化、绿泥石化、绿帘石化、钠长石化也与成矿作用具有一定的关系,可作为找矿参考信息。

3)在青海柴周缘荒漠区等我国自然条件恶劣的西部地区,高光谱蚀变矿物填图工作能弥补传统地质调查和矿产勘查手段的局限性,该方法可以快速了解区域地质背景、成矿地质条件、提取矿物光谱信息等,为地质找矿工作提供丰富、精细的信息,在新一轮找矿突破战略行动中具有广泛的应用前景。

4)下一步工作应基于调查区地貌条件和找矿目的,对找矿重点地段开展大比例尺遥感地质解译,并配套无人机高光谱测量,针对性开展对应成矿类型蚀变信息精细化提取工作,为进一步找矿与评价提供详细依据。

参考文献(References):

- [1] 赵佳琪.甘肃花牛山矿集区高光谱蚀变矿物分析及找矿预测[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
Zhao J Q. Analysis of hyperspectral remote sensing alteration mineral and prospecting of ore concentration area in Huanishan, Gansu Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [2] 孙雨,刘家军,赵英俊,等.航空高光谱CASI-SASI数据蚀变矿物信息提取与应用——以甘肃省敦煌市小金窝子地区为例[J].地质与勘探,2022,58(3):653-664.
Sun Y, Liu J J, Zhao Y J, et al. Extraction of alteration minerals based on the airborne hyperspectral CASI-SASI data and the application to the Xiaojinwozi area in Dunhuang City, Gansu Province[J]. Geology and Exploration, 2022, 58(3): 653-664.
- [3] 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 B K, Dong X F, Wang Z, 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.
- [4] 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 X F, Yan B K, Li N. Prospecting prediction of sedimentary metamorphic type iron deposits based on airborne hyperspectral remote sensing: A case study of the Jingtieshan area in the northern Qilian Mountains [J]. *Geology and Exploration*, 2018, 54(5): 1013-1023.
- [5] Sheikhrhimi A, Pour A B, Pradhan B, et al. Mapping hydrothermal alteration zones and lineaments associated with orogenic gold mineralization using ASTER data: A case study from the Sanandaj-Sirjan Zone, Iran [J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(10): 3315-3332.
- [6] Pour A B, Hashim M, Park Y, et al. Mapping alteration mineral zones and lithological units in Antarctic regions using spectral bands of ASTER remote sensing data [J]. *Geocarto International*, 2018, 33(12): 1281-1306.
- [7] Noori L, Pour A B, Askari G, et al. Comparison of different algorithms to map hydrothermal alteration zones using ASTER remote sensing data for polymetallic vein-type ore exploration: Toroud-Chahshirin magmatic belt (TCMB): North Iran [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(5): 495.
- [8] Bolouki S M, Ramazi H R, Maghsoudi A, et al. A remote sensing-based application of Bayesian networks for epithermal gold potential mapping in Ahar-Arasbaran area, NW Iran [J]. *Remote Sensing*, 2019, 12(1): 105.
- [9] Abdelnasser A, Kumral M, Zoheir B, et al. REE geochemical characteristics and satellite-based mapping of hydrothermal alteration in Atud gold deposit, Egypt [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2018, 145: 317-330.
- [10] 孙雨, 刘家军, 赵英俊, 等. 基于GF-5高光谱数据的蚀变矿物填图及地质应用——以甘肃省瓜州县花牛山地区为例 [J]. *中国地质*, 2022, 49(2): 558-574.
- Sun Y, Liu J J, Zhao Y J, et al. Alteration mineral mapping based on the GF-5 hyperspectral data and its geological application: An example of the Huanishan area in Guazhou County of Gansu Province [J]. *Geology in China*, 2022, 49(2): 558-574.
- [11] 牛海威, 李名松, 汪冰, 等. 甘肃花牛山金矿区热红外高光谱遥感特征分析与找矿预测 [J]. *矿产与地质*, 2017, 31(2): 371-377, 388.
- Niu H W, Li M S, Wang B, et al. Characteristic analysis of thermal infrared hyperspectral remote sensing and prospecting prognosis of Huanishan gold mining area in Gansu [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2017, 31(2): 371-377, 388.
- [12] 修连存, 郑志忠, 杨彬, 等. 机载高光谱成像技术在长江经济带苏、皖、浙地区生态环境保护中的应用 [J]. *中国地质*, 2021, 48(5): 1334-1356.
- Xiu L C, Zheng Z Z, Yang B, et al. Application of airborne hyperspectral imaging technology to the ecological environment protection of Jiangsu, Anhui and Zhejiang Provinces at Yangtze River Economic Belt [J]. *Geology in China*, 2021, 48(5): 1334-1356.
- [13] Wang D H, Zhao Z, Yu Y, et al. Exploration and research progress on ion-adsorption type REE deposit in South China [J]. *China Geology*, 2018, 1(3): 415-424.
- [14] 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 X F, Gan F P, Li N, et al. Fine mineral identification of GF-5 hyperspectral image [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(4): 454-464.
- [15] Ye B, Tian S, Cheng Q, et al. Application of lithological mapping based on advanced hyperspectral imager (AHSI) imagery onboard Gaofen-5 (GF-5) satellite [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(23): 3990.
- [16] 覃帮勇, 刘志天, 李盛阳. 天宫一号高光谱数据的陆地应用 [J]. *载人航天*, 2018, 24(4): 546-552.
- Qin B Y, Liu Z W, Li S Y. Application of Tiangong-1 hyperspectral data in land [J]. *Manned Spaceflight*, 2018, 24(4): 546-552.
- [17] Wu J J, Gao Z H, Li Z Y, et al. Estimation for sparse vegetation information in desertification region based on Tiangong-1 hyperspectral image [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(3): 751-756.
- [18] 孙雨, 刘家军, 翟德高, 等. 基于资源一号02D卫星高光谱数据的甘肃头吊泉-南大滩地区蚀变矿物填图及金矿化带识别 [J]. *地质与勘探*, 2022, 58(2): 399-409.
- Sun Y, Liu J J, Zhai D G, et al. Alteration minerals mapping and identification of gold mineralization belt based on ZY1-02D hyperspectral data in the Toudiaoquan-nandan area, Gansu Province [J]. *Geology and Exploration*, 2022, 58(2): 399-409.
- [19] 李根军, 杨雪松, 张兴, 等. ZY1-02D高光谱数据在地质矿产调查中的应用与分析 [J]. *国土资源遥感*, 2021, 33(2): 134-140. doi: 10.6046/gtzyyg.2020190.
- Li G J, Yang X S, Zhang X, et al. Application and analysis of ZY1-02D hyperspectral data in geological and mineral survey [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2021, 33(2): 134-140. doi: 10.6046/gtzyyg.2020190.
- [20] 崔成玲, 张宏伟, 范松滔, 等. 资源一号02D高光谱数据大气校正及应用 [J]. *遥感信息*, 2022, 37(5): 45-50.
- Cui C L, Zhang H W, Fan S T, et al. Atmospheric correction and application of ZY-1-02D hyperspectral data [J]. *Remote Sensing Information*, 2022, 37(5): 45-50.
- [21] Zhang C, Qin Q, Chen L, et al. Rapid determination of coalbed methane exploration target region utilizing hyperspectral remote sensing [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 150: 19-34.
- [22] Hu B, Xu Y, Wan B, et al. Hydrothermally altered mineral mapping using synthetic application of Sentinel-2A MSI, ASTER and Hyperion data in the Duolong area, Tibetan Plateau, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 101: 384-397.
- [23] 付长垒, 闫臻, 王秉璋, 等. 柴北缘托莫尔日特古元古代变质基底发现——对早古生代缝合线位置的约束 [J]. *地质通报*, 2021, 40(8): 1215-1230.
- Fu C L, Yan Z, Wang B Z, et al. Discovery of the Paleoproterozoic metamorphic basement in the Tuomoerrite area of North Qaidam: Constraint on the location of early Paleozoic suture [J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(8): 1215-1230.
- [24] 曹泊, 闫臻, 付长垒, 等. 柴北缘赛坝沟增生杂岩组成与变形特征 [J]. *岩石学报*, 2019, 35(4): 1015-1032.
- Cao B, Yan Z, Fu C L, et al. Component and deformation of the Saibagou accretionary complex in the northern margin of the Qaidam block [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(4): 1015-1032.
- [25] 张建新, 许志琴, 杨经绥, 等. 阿尔金西段榴辉岩岩石学、地球化学和同位素年代学研究及其构造意义 [J]. *地质学报*, 2001, 75

- (2):186-197.
- Zhang J X, Xu Z Q, Yang J S, et al. Petrology, geochemistry and geochronology of eclogites from the western segment of the Altun tectonic belt, Northwestern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(2):186-197.
- [26] 王惠初, 陆松年, 莫宣学, 等. 柴达木盆地北缘早古生代碰撞造山系统[J]. *地质通报*, 2005, 24(7):603-612.
- Wang H C, Lu S N, Mo X X, et al. An Early Paleozoic collisional orogen on the northern margin of the Qaidam Basin, Northwestern China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(7):603-612.
- [27] 王惠初, 李怀坤, 陆松年, 等. 柴北缘鱼卡地区达肯大坂岩群的地质特征与构造环境[J]. *地质调查与研究*, 2006, 29(4):253-262.
- Wang H C, Li H K, Lu S N. Geological characteristics and tectonic setting of the Dakendaha Group in Iqe area, northern margin of Qaidam Basin[J]. *Geological Survey and Research*, 2006, 29(4):253-262.
- [28] 王惠初, 陆松年, 袁桂邦, 等. 柴达木盆地北缘滩间山群的构造属性及形成时代[J]. *地质通报*, 2003, (7):487-493.
- Wang H C, Lu S N, Yuan G B, et al. Tectonic setting and age of the "Tanjianshan Group" on the northern margin of the Qaidam Basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(7):487-493.
- [29] 李峰, 吴志亮, 李保珠, 等. 柴达木盆地北缘滩间山群新厘定[J]. *西北地质*, 2006, 39(3):83-90.
- Li F, Wu Z L, Li B Z, et al. Revision of the Tanjianshan Group on the northern margin of the Qaidam Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2006, 39(3):83-90.
- [30] 李峰, 吴志亮, 李保珠. 柴达木北缘滩间山群时代及其地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2007, (2):226-233.
- Li F, Wu Z L, Li B Z. Recognition on formation age of the Tanjianshan Group on the northern margin of the Qaidam Basin and its geological significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2007, 31(2):226-233.
- [31] 张德全, 王富春, 李大新, 等. 柴北缘地区的两类块状硫化物矿床——I. 锡铁山式 SEDEX 型铅锌矿床[J]. *矿床地质*, 2005, 24(5):471-480.
- Zhang D Q, Wang F C, Li D X, et al. Two types of massive sulfide deposits on northern margin of Qaidam Basin, Qinghai Province: I. Xitieshan style SEDEX lead-zinc deposits[J]. *Mineral Deposits*, 2005, 24(5):471-480.
- [32] 张德全, 党兴彦, 李大新, 等. 柴北缘地区的两类块状硫化物矿床——II. 青龙滩式 VHMS 型 Cu-S 矿床[J]. *矿床地质*, 2005, 24(6):575-583.
- Zhang D Q, Dang X Y, Li D X, et al. Two types of massive sulfide deposits along northern margin of Qaidam Basin, Qinghai Province: II. Qinglongtan style VHMS Cu-S deposits[J]. *Mineral Deposits*, 2005, 24(6):575-583.
- [33] 王振强, 张照伟, 丁培超, 等. 柴北缘托莫尔日特地区变基性火山岩年代学、地球化学特征及地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2022, 41(3):491-503.
- Wang Z Q, Zhang Z W, Ding P C, et al. Geochronology, geochemistry and significance of the metabasic volcanic rocks in Tuomoerrite area, North Qaidam[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2022, 41(3):491-503.
- [34] 朱小辉, 陈丹玲, 刘良, 等. 柴北缘绿梁山地区早古生代弧后盆地型蛇绿岩的年代学、地球化学及大地构造意义[J]. *岩石学报*, 2014, 30(3):822-834.
- Zhu X H, Chen D L, Liu L, et al. Geochronology, geochemistry and significance of the Early Paleozoic back-arc type ophiolite in Luliangshan area, North Qaidam[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(3):822-834.
- [35] 宋述光, 牛耀龄, 张立飞, 等. 大陆造山运动: 从大洋俯冲到大陆俯冲、碰撞、折返的时限——以北祁连山、柴北缘为例[J]. *岩石学报*, 2009, 25(9):2067-2077.
- Song S G, Niu Y L, Zhang L F, et al. Time constraints on orogenesis from oceanic subduction to continental subduction, collision, and exhumation: An example from North Qilian and North Qaidam HP-UHP belts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(9):2067-2077.
- [36] Yang J S, Song S G, Xu Z Q, et al. Discovery of coesite in the North Qaidam early Paleozoic ultrahigh-high pressure (UHP-HP) metamorphic belt, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(2):175-179.
- [37] 张德全, 王富春, 余宏全, 等. 柴北缘—东昆仑地区造山型金矿床的三级控矿构造系统[J]. *中国地质*, 2007, 34(1):92-100.
- Zhang D Q, Wang F C, She H Q, et al. Three-order ore-controlling structural system of orogenic gold deposits in the northern Qaidam margin-East Kunlun region[J]. *Geology in China*, 2007, 34(1):92-100.
- [38] 张拴宏, 周显强, 纪占胜. 韧—脆性剪切带构造控矿演化模式——以青海省乌兰县托莫尔日特金矿区为例[J]. *矿物岩石*, 2003, 23(1):37-41.
- Zhang S H, Zhou X Q, Ji Z S. Ore-controlling model of ductile-brittle shear zones: Examples from the gold deposits in Tomorite region, Wulan County, Qinghai Province[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2003, 23(1):37-41.
- [39] 王炜晓, 唐名鹰, 丁正江, 等. 柴北缘赛坝沟金矿深部热液蚀变作用[J]. *地质与勘探*, 2022, 58(5):917-928.
- Wang W X, Tang M Y, Ding Z J, et al. Deep hydrothermal alteration of the Saibagou gold deposit in the northern margin of the Qaidam Basin[J]. *Geology and Exploration*, 2022, 58(5):917-928.
- [40] 杨延乾, 李碧乐, 王佳音, 等. 青海省阿哈大洼金多金属矿床地质特征及矿床成因[J]. *黄金*, 2017, 38(7):23-25, 43.
- Yang Y Q, Li B L, Wang J Y, et al. Geological characteristics and genesis of Ahadawa gold polymetallic deposit, Qinghai Province[J]. *Gold*, 2017, 38(7):23-25, 43.
- [41] 张海青, 王军, 吴少锋, 等. 青海省乌兰县阿哈大洼地区铅锌银找矿模式及远景分析[J]. *青海大学学报(自然科学版)*, 2018, 36(5):97-103.
- Zang H Q, Wang J, Wu S F, et al. Prospecting mode and prospect analysis of lead zinc silver at Ahadawa area in Wulan County, Qinghai[J]. *Journal of Qinghai University*, 2018, 36(5):97-103.
- [42] 张焜, 马世斌, 李根军, 等. 基于国产卫星数据的遥感找矿预测——以青海省柴北缘地区为例[J]. *遥感信息*, 2019, 34(1):58-68.
- Zhang K, Ma S B, Li G J, et al. Ore prediction based on remote sensing data from Chinese-made satellite: Taking northern border of Qaidam as an example[J]. *Remote Sensing Information*, 2019, 34(1):58-68.
- [43] 孙培宇, 柯樱海, 钟若飞, 等. 资源一号 02D 可见近红外和高光谱影像辐射质量评价[J]. *遥感技术与应用*, 2022, 37(4):938-

- 952.
- Sun P Y, Ke Y H, Zhong R F, et al. Radiance quality assessment of ZY-1-02D VNIC/AHSI image data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2022, 37(4): 938-952.
- [44] 王茂芝. 高光谱遥感影像处理与地质应用若干关键问题研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- Wang M Z. Researches on several critical problems of hyperspectral remote sensing image processing and geologic application[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [45] 郭帮杰. 准噶尔盆地东缘铀及多金属勘查高光谱遥感应用研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院, 2016.
- Guo B J. Application of hyperspectral remote sensing to uranium and polymetal exploration in the eastern margin of Junggar Basin[D]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology, 2016.
- [46] 王伏林. 基于机载 CASI/SASI 高光谱数据矿物填图方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- Wang F L. Study on mineral mapping method based on hyperspectral data of CASI / SASI[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.
- [47] 刘圣伟, 甘甫平, 闫柏琨, 等. 成像光谱技术在典型蚀变矿物识别和填图中的应用[J]. *中国地质*, 2006, 33(1): 178-186.
- Liu S W, Gan F P, Yan B K, et al. Application of the imaging spectroscopic technique in mineral identification and mapping[J]. *Geology in China*, 2006, 33(1): 178-186.
- [48] 季超. GF-5 高光谱数据预处理及地物特征提取方法分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- Ji C. GF-5 hyperspectral data preprocessing and analysis of feature extraction methods[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [49] 朱德全, 唐名鹰, 丁正江, 等. 柴北缘赛坝沟金矿床花岗岩斑岩脉的成因及动力学背景: 来自年代学和地球化学的证据[J]. *现代地质*, 2022, 36(3): 898-910.
- Zhu D Q, Tang M Y, Ding Z J, et al. Petrogenesis and geodynamic setting of granite porphyry dike in Saibagou gold deposit, northern margin of Qaidam; Evidence from geochronology and geochemistry[J]. *Geoscience*, 2022, 36(3): 898-910.
- [50] 张德全, 党兴彦, 余宏全, 等. 柴北缘—东昆仑地区造山型金矿床的 Ar-Ar 测年及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2005, 24(2): 87-98.
- Zhang D Q, Dang X Y, She H Q, et al. Ar-Ar dating of orogenic gold deposits in northern margin of Qaidam and East Kunlun Mountains and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 2005, 24(2): 87-98.
- [51] 张玉瑜, 王启蒙, 任瑞鹏, 等. 青海省乌兰县赛坝沟地区金成矿地质特征及找矿方向[J]. *地质调查与研究*, 2018, 41(3): 191-197.
- Zhang Y Y, Wang Q M, Ren R P, et al. Metallogenic geological characteristics and prospecting direction of the Saibagou area in Wulan County, Qinghai Province[J]. *Geological Survey and Research*, 2018, 41(3): 191-197.

Application of ZY-1 02D hyperspectral data to altered mineral mapping and ore prospecting in desert areas along the northern margin of the Qaidam Basin

QI Changwei¹, DONG Ji'en^{1,2}, CHENG Xu³, YE Gaofeng², HE Shuyue⁴, DAI Wei⁴, WANG Bing³

(1. Geological Survey of Qinghai Province, MNR Technology Innovation Center for Exploration and Exploitation of Strategic Mineral Resources in Plateau Desert Region, Xining 810000, China; 2. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 3. Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China; 4. No.3 Exploration Institute of Geology Resources of Qinghai Province, Xining 810008, China)

Abstract: The geological exploration in Qinghai Province is conducted in typical highland desert areas characterized by significant terrain cutting, low vegetation cover, extensive bedrock outcrops, and challenging surface investigations. To investigate the application of hyperspectral data from a satellite in altered mineral mapping and ore prospecting in desert areas along the northern margin of the Qaidam Basin, this study utilized hyperspectral remote sensing images with high spatial and spectral resolutions obtained from the domestic ZY1-02D satellite. Following fine-scale radiometric calibration, atmospheric correction, data restoration, and orthorectification, high-quality hyperspectral remote sensing images were acquired for desert areas, such as Saibagou, along the northern margin of the Qinghai Province. After comprehensive field survey sampling and spectral testing using a FieldSpec Pro FR spectrometer, a standard laboratory spectral dataset of the surveyed areas was established, containing 13 major altered minerals such as chlorite. Finally, the extraction of altered minerals and ore prospecting were conducted. The results indicate that the primary altered minerals in the areas include 13 types: epidote, chlorite, albite, sericite, silicification, kaolinite, carbonate, limonite, actinolite, serpentine, hematite, pyrite, and malachite. The distribution of these altered minerals is closely associated with the strata, lithology of intrusions, and ductile shear structures. The analysis of the alteration characteristics of typical mineral deposits such as Saibagou

reveals that malachitization, limonitization, pyritization, sericitization, and silicification are closely related to mineralization, being indicative of ore prospecting. Partial potassium feldspathization, chloritization, epidotization, and sodium feldspathization are also somewhat related to mineralization, serving as a valuable reference for ore prospecting. As a result of applying the above methods, combined with the 1:25 000 geochemical survey data, one copper-gold mineralized point was discovered in the Tuomoerrite area. Therefore, hyperspectral data-based alteration mineral mapping compensates for the limitations of traditional geological surveys and ore prospecting methods in the western desert areas of China with harsh natural conditions. This allows for rapid assessment of the regional geological setting and mineralization conditions, enabling the extraction of mineral spectral information. The hyperspectral data-based alteration mineral mapping provides abundant, fine-scale information for large-scale geological prospecting, offering broad application potential.

Keywords: hyperspectral remote sensing; altered mineral mapping; ore prospecting prediction; periphery of Qaidam Basin; desert area

(责任编辑: 陈庆)