

基于 Aster 和 Landsat8 数据在青海 赛什腾地区蚀变信息提取研究

王曦,程三友,林海星,陈静,肖良

长安大学,地球科学与资源学院,西安,710054



内容提要: 青海赛什腾地区位于无人区,穿越条件极差,传统地质找矿勘探工作难以开展,因其植被稀少,有利于多光谱遥感数据提取矿化蚀变信息。本文以 Landsat8 和 Aster 数据为数据源,利用成像光谱法和主成分分析法对赛什腾地区进行矿化蚀变信息的提取,成像光谱法包括最小噪声变换(MNF),像元纯净指数(PPI), n 维可视化端元识别(n -Dimensional Visualization)和光谱角匹配(SAM),最终获得了赛什腾地区矿物信息分布图。利用主成分分析法对 Landsat8 和 Aster 数据分别提取黄铁矿、褐铁矿等铁染蚀变矿物和绢云母等羟基蚀变矿物,通过对 Aster 和 Landsat8 两种数据提取的蚀变信息进行空间叠加分析,定量地分析对比两种数据的蚀变信息提取效果,具有提高提取蚀变信息准确性的优势。通过样品实测光谱及镜下鉴定特征验证了研究区铁染和羟基蚀变存在的真实性,并将矿化蚀变信息分布图与野外调查已知矿(化)点坐标进行叠加验证,结果显示矿(化)点坐标基本落在提取的矿化蚀变范围内,说明基于这两种遥感数据的处理方法和提取结果是可靠的,为圈定找矿靶区和扩大找矿范围提供了重要的指导意义。

关键词: 青海赛什腾地区; Aster; Landsat8; 叠加分析; 矿化蚀变信息

自 20 世纪以来,国内外学者将遥感技术运用到地质调查中,尤其在矿化蚀变信息提取中不断创新方法,尝试新技术。近年来,随着遥感技术突飞猛进的发展,矿化蚀变信息的提取技术愈发成熟,与传统地质结合进行找矿勘探,取得巨大的进展和丰硕的研究成果(Abrams et al., 1977; 张玉君等, 1998, 2003; 杨建民等, 2003, 2006; 甘甫平, 2001; 杨斌等, 2015; 李守麟等, 2015; 武慧智等, 2019)。Loughlin (1991)利用主成分分析方法获取了巴西某矿集区羟基及铁染蚀变异常信息分布情况; Ducart 等(2005)利用混合像元解混法对阿根廷热液矿床蚀变矿物分带现象进行解译; Pour 等(2012)利用波段比值法对伊朗斑岩型铜矿床进行研究,获取了研究区蚀变矿物分布特征; Emam 等(2016)利用 Aster 数据,运用波段比值法(BR)和相对吸收波段深度技术(RBD),解译了 Allaqi—Heiani 缝合线东部的蛇绿岩,取得了良好的效果; Rajendran 等(2017)基于 Aster 数据,研究了阿曼苏丹国 Shinas 地区硫化物矿床,利用光谱角和线性光谱分解绘制了蚀变带分布

图; Pour 等(2019)基于 Landsat8、Aster 和 Worldview-3 数据,利用直接主成分分析法(DPCA)提取了 Inglefield 岛铜金矿化点附近热液蚀变矿物,并用线性光谱分解法识别该地区蚀变矿物端元,进行了岩性填图; 汪子义等(2018)基于 Landsat8 数据,利用 MTMF 识别了多龙矿集区斑岩铜矿区绿泥石、白云母、赤铁矿等蚀变矿物; 茹菲娜·阿力木江等(2021)基于 Aster 数据在西天山穆龙套地区,运用矿物指数法分析提取了硅化蚀变并取得良好的效果。然而运用遥感手段在青海赛什腾多金属矿区进行找矿研究的报道非常少,因此本文基于 Landsat8 和 Aster 两种数据,根据其提供的可见光、近红外等多个适应于地质应用的波段,利用成像光谱法和主成分分析方法在赛什腾多金属矿区进行矿化蚀变信息的提取,通过对比两种数据提取结果,定量分析提取的矿物种类及含量,通过岩石样品实测光谱分析和薄片镜下鉴定证明了蚀变存在的真实性,并结合野外实地调查进行异常点验证,为更好地圈定找矿靶区和扩大找矿范围提供参考。

注: 本文为中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20190069)、国家自然科学基金资助项目(编号: 41872017)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号: 300102279105)的成果。

收稿日期: 2021-07-16; 改回日期: 2021-11-24; 网络首发: 2021-12-20; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.12.055

作者简介: 王曦,女,1998年生。硕士,主要从事遥感地质应用方面的研究工作; Email: wangxi9825@126.com。通讯作者: 程三友,女,1977年生,博士,副教授,主要从事遥感地质研究; Email: chengsanyou@126.com。

1 研究区概况

研究区赛什腾山位于青海省西北部,南接祁连山,北毗邻柴达木盆地,大地构造位置隶属东昆仑造山带(提振海等,2017;潘志民等,2017)。区内发育金矿、铁矿、铜矿等多金属矿床,包括滩间山金矿床、千枚岭金矿床、野骆驼泉金矿床和小赛什腾斑岩型铜矿床(沈文成等,2015),矿体主要赋存于褶皱、断裂和岩体与地层接触带中(张志强等,2013)。

区内地层从古元古界到第四系均有出露,古元古界达肯大坂群,分布在曲金沟至噉唠山一带,是为本区出露最老的地层,主要发育深变质片岩(赵子基等,1997;高永宝等,2017)。与金矿有关的滩间山群出露最为广泛,分为两个岩组,上奥陶统滩间山群红

旗沟组(O_3h)主要出露火山岩建造,由安山岩、凝灰岩等火山岩以及千枚岩、砂质板岩等变质岩组成(沈文成等,2015);上奥陶统滩间山群团结沟组(O_3t)为一套海相碳酸盐岩建造,主要为变砂屑生物碎屑灰岩(保广普等,2021)。区内发育着多条脆韧性断裂,分布在赛什腾西段,总体呈北西向展布,南北向的断裂是多金属矿床的主要控矿构造,赛什腾山的千枚岭一带发育一向斜,北翼被断层截切。研究区中酸性侵入岩分布广泛,呈北西向的岩株和岩基(杜承文等,2017),受构造控制明显,还可见大量的石英脉以及中酸性岩脉分布其中。矿床以及矿化点周围围岩蚀变类型主要为黄铁矿化、褐铁矿化、绿泥石化和绢云母化等。

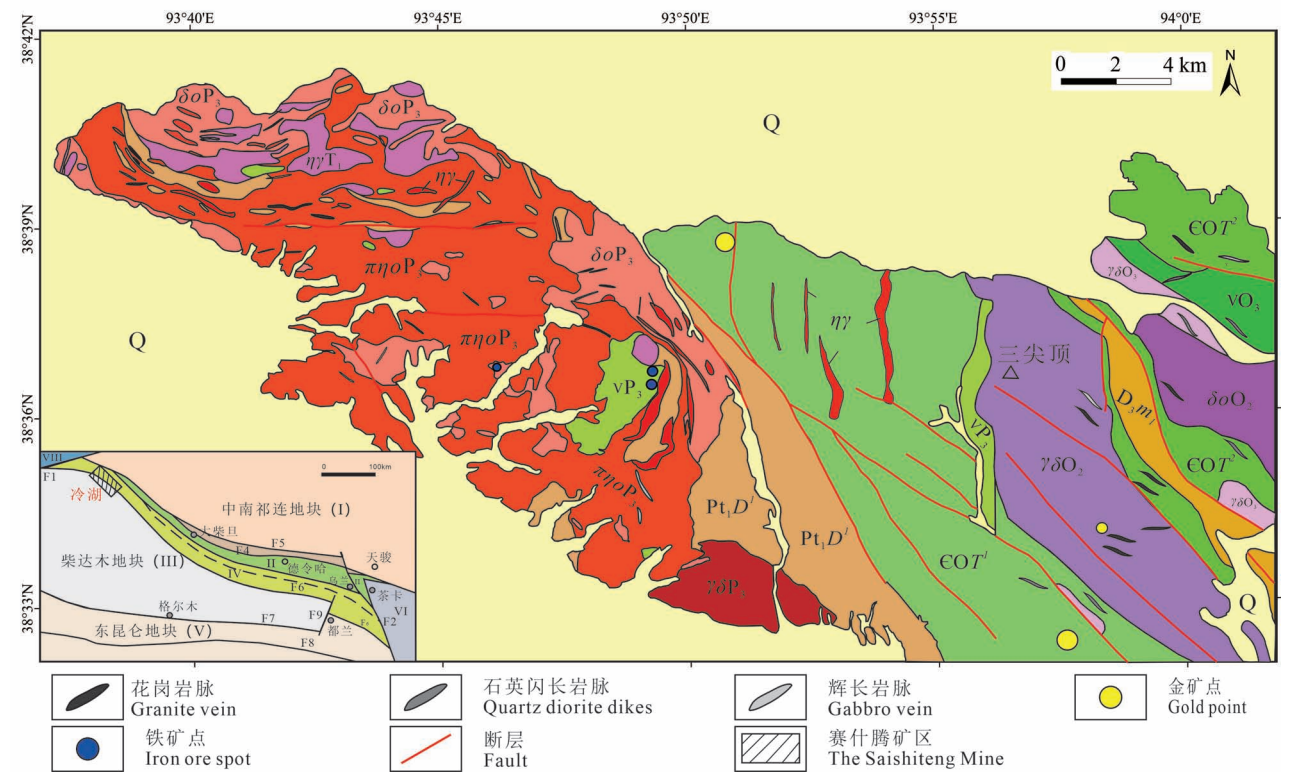


图 1 赛什腾地区地质简图(改自高万里等,2019)

Fig. 1 Geological sketch map of Saishiteng area(modified from Gao Wanli et al. , 2019&)

Q—第四系; D_3m^1 —泥盆系托牛山组; ϵOT^1 —奥陶系滩间山群碳酸盐岩组; ϵOT^2 —奥陶系滩间山群碎屑岩组; Pt_1D^1 —达肯达坂(岩)群第一岩组; $\eta\gamma T_1$ —中细粒二长花岗岩; $\eta\gamma$ —灰红色二长花岗岩; $\pi\eta oP_3$ —中粒斑状石英二长岩; $\gamma\delta O_2$ —浅灰色片麻状中细粒花岗闪长岩; δoP_3 —中细粒石英闪长岩; $\gamma\delta P_3$ —中细粒花岗闪长岩; νO_3 —灰绿色蚀变中细粒辉长岩; δoO_2 —灰色细粒石英闪长岩; $\gamma\delta O_3$ —灰色中粒黑云母花岗闪长岩; νP_3 —中细粒辉长岩

Q—Quaternary; D_3m^1 — Maoniushan Formation of Devonian; ϵOT^1 —carbonate rocks of the Ordovician Tanjianshan Group; ϵOT^2 —clastic rocks of the Ordovician Tanjianshan Group; Pt_1D^1 — the first formation of Daken Daban Group; $\eta\gamma T_1$ —medium fine grained monzogranite; $\eta\gamma$ —greyish red monzogranite; $\pi\eta oP_3$ —medium grained porphyritic quartz monzonite; $\gamma\delta O_2$ —light gray gneissic medium—fine grained granodiorite; δoP_3 —medium—fine grained quartz diorite; $\gamma\delta P_3$ —medium—fine grained granodiorite; νO_3 — grayish green altered medium—fine grained gabbro; δoO_2 —gray fine grained quartz diorite; $\gamma\delta O_3$ —gray medium grained biotite granodiorite; νP_3 — medium—fine grained gabbro

2 遥感数据处理

2.1 遥感数据的选取

Aster 数据有 14 个光谱通道,光谱波长范围为 0.52~11.65 μm,其中 VINR 波段可以获取铁和稀土元素等过渡族金属元素的光谱特征(杨佳佳等,2008);SWIR 波段可诊断绢云母、绿泥石等羟基蚀变矿物的光谱特征(李进波,2019);TIRS 波段与 Ca、SiO₂ 的含量相关系数较大,可以分辨石英、长石等矿物(杨斌等,2015)。Landsat8 携带了陆地成像仪和热红外传感器两种传感器,光谱波长覆盖范围 0.43~12.51 μm,OLI 陆地成像仪包括 9 个波段,空间分辨率(Band1~Band7,Band9)为 30 m,其中包括一个 15 m 的全色波段(Band8),热红外传感器 TIRS 包括 2 个单独的热红外波段(Band10~Band11),分辨率 100 m(陈瑞卿,2018)。本次研究采用的 Landsat8 OLI 影像景号为 LC08_L1TP_137033_20180426_20180502_01_T1_ANG,时间为 2018 年 4 月 26 日;Aster 影像景号为 AST-L1T-00310162000045758_20150412093415_63953,时间为 2000 年 10 月 16 日,分别来自地理空间数据云和 USGS。本次选择的 Landsat8 和 Aster 数据无云,植被稀少,Aster 数据仅采用 1 至 9 九个波段。

2.2 数据的预处理

2.2.1 串扰校正

Aster 传感器的设计存在一定的不足,其 SWIR 波段存在探测器单元的光子泄露,来自第 4 波段探测器的光散布到与之相邻的第 5 波段和第 9 波段探测器中,传感器间相互干扰产生光学“串扰”效应(Pour et al.,2011;成功等,2016;刘建宇等,2019),以至于两个波段反射率值与实际值发生偏差,影响矿化蚀变信息的提取,因此在预处理时进行了串扰校正。

2.2.2 辐射定标

辐射定标是将传感器记录的电压或数字量化值转化为绝对辐射亮度值(DN)的过程(李长伟,2017),以消除传感器自身存在的误差。使用 ENVI5.3 中辐射定标工具选取待处理文件,设置定标类型以及大气校正所需的数据类型,完成辐射定标。因 Aster 数据空间分辨率不相同,VINR 波段为 15 m,SWIR 波段为 30 m,需要对 SWIR 波段重采样至 15 m,再进行辐射定标。Landsat8 OLI 数据在 ENVI5.3 中用对应工具完成辐射定标。

2.2.3 大气校正

传感器接收到的信息一部分来自大气反射,一部分来自地物自身辐射,对影像造成辐射失真,因此需要对其进行大气校正(Moike,1987;顾哲衍等,2014)。为了获得较好的反射率反演效果,本文使用 ENVI5.3 中 FLAASH 大气校正工具对 Landsat8 OLI 和 Aster 数据进行大气校正,设置传感器基本参数,包括传感器类型、平均地面高程、影像成像时间和大气模型参数等,大气校正完之后对两种图像数据进行配准并裁剪,得到稍大于研究区范围遥感影像。

2.2.4 干扰地物的去除

因影像存在水体和第四系等干扰地物,会对遥感矿化蚀变信息的提取造成影响,进行蚀变信息提取前需去除这些干扰地物。本文采用波段比值法
$$\left[\frac{\text{float}(b1) - \text{float}(b2)}{\text{float}(b1) + \text{float}(b2)} \right]$$
, (b1 和 b2 分别对应的 Aster 和 Landsat8 数据的绿光波段和近红外波段),构建掩膜文件,利用二值化图像掩膜的方式去除了水体。研究区第四系覆盖多,且位于岩体周围,沿着岩体勾画 ROI 后构建掩膜文件,生成二值影像,反向掩膜去掉第四系,得到预处理后的图像。

3 成像光谱处理与分析方法 提取矿化信息

随着光谱识别技术的发展,通过识别端元波谱可提取矿化信息。所谓端元,是指单一成分的像元,可以通过成像光谱和光谱解混技术获取单一端元,得到各个端元的的光谱信息,从而达到判别地物的目的(Boardman,1989;Ichoku et al.,1996;Bioucas et al.,2012;Plaza et al.,2004;陶秋香等,2004)。本文基于最小噪声变换、纯净像元指数和 n 维可视化获取端元,并通过光谱角匹配获得研究区部分矿物分布图。

3.1 最小噪音分量的变换(MNF)

最小噪声分离(MNF)是将图像的信息主要集中在前几个波段的线性变换过程,为了确定遥感图像的维数,达到影像噪声分离的效果,从而降低后续处理中的计算工作量。其本质是两次主成分变换,首先是分离并调节遥感数据中的噪声,该过程是基于主成分中噪声协方差矩阵实现的,其次通过标准主成分变换处理噪声数据,最终获得图像数据的维数(张琳珊,2019)。根据预处理后 Aster 的 3 个 VINR 波段和 6 个 SWIR 波段完成最小噪声变换,得

到特征值较大的波段 1~3 灰度图像(图 2)。由图可得,MNF 波段特征值越大,说明图像包含有价值的信息就越多,图像就越清晰,噪声就越少。

3.2 像元纯度指数(PPI)

纯净像元指数(PPI)是基于 MNF 变换后的结果进行的,通过该工具获得遥感图像波谱的极端像元,生成“像元纯度图像”。具体过程是在 n 维散点图中迭代映射一个随机单位向量,并记录单次映射的像元值以及该像元被标记为极值的总次数,像元被标记为极值的次数用像元的亮度值来表示,亮度值越大,说明该像元的纯度越高(于艳梅,2010;李

孟倩等,2018)。在进行 PPI 计算时,要视情况设置三个参数,包括参与运算的波段数目、迭代次数和阈值。在本次处理中选择前 5 个波段,迭代次数选择 10000 次,阈值设置为 2.5,生成的 PPI 图像如图 3 所示。

3.3 n 维可视化进行端元识别

进行 n 维可视化识别端元是在 ENVI5.3 中使用 n 维可视化工具(n -D Visualizer),利用 MNF 变换和 PPI 纯净像元指数处理后的结果,来标定识别图像中的最纯净的单一像元,并且获得其波谱曲线。

其原理是将波谱看作一系列散点投影到二维平面中, n 维散点的坐标是每个波段对应的像元值,根据散点的聚集分散程度来确定端元个数,并获得端元对应的波谱曲线。

本文采用了 5 维可视化散点图,输入 MNF 变换之后的数据,经过像元纯净指数勾勒出潜在纯净端元的 ROI 后对 n 维散点图进行分析。具体过程是将代表图像的全部波段的散点置于 n 维空间中,通过旋转,观察散点的聚集分散情况来定位波谱的极端单元,一般几何形状较好的,聚集的端元会在 n 维散点图的拐角或者顶点处(图 4)。勾勒获取的极端单元后,通过收集终端单元技术来获得终极单元的波谱曲线图(图 5)。本文通过输入 ROI 得到感兴趣区平均光谱曲线。

3.4 光谱角匹配(SAM)

光谱角匹配(SAM)是通过对比参考对象光谱曲线特征和待确定地物光谱特征之间的相似性,进行地物类型识别的一种光谱匹配方法(王玉,2013)。原理是在 n (n =波段数)维空间中,将光谱视为一系列矢量,进行投影,彼此之间形成的夹角称为光谱角(刘灿等,2011),光谱角分类后获得的图像称为光谱角图像。在一定光谱角角度阈值范围内每个角度图像对应一个类型的像元。光谱匹配的方法主要有以下两种:第一,将图像中提取出来的纯净像元光谱与标准光谱数据库中的光谱曲线进行对比匹配,通过与标准光谱对比,找到与纯净像元的曲线形态和吸收反射位置基本一致的波谱曲线,从而确定该纯净像元的地物类别。第二,是通过对

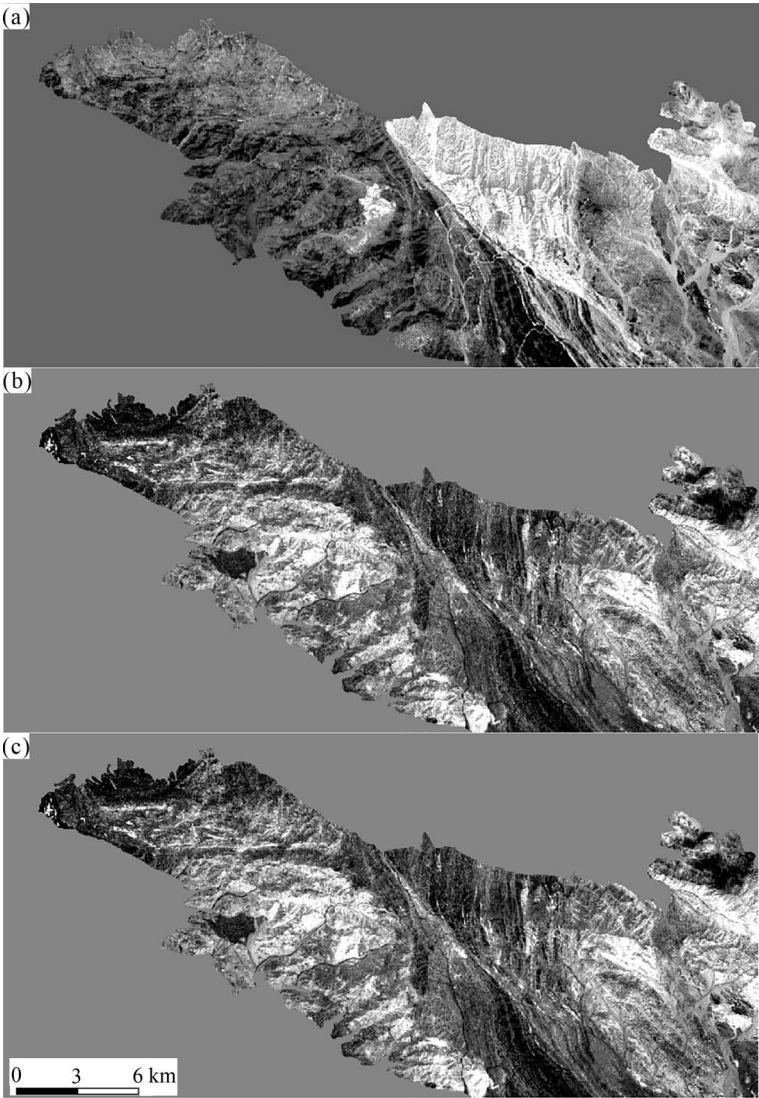


图 2 MNF 变换后的波段 1~3 的灰度图:(a) MNF 变换后波段 1 灰度图;(b) MNF 变换后波段 2 灰度图;(c) MNF 变换后波段 3 灰度图
Fig. 2 Grayscale image of band 1~3 after MNF transformation: (a) grayscale image of the band 1 after the MNF transformation; (b) grayscale image of the band 2 after the MNF transformation; (c) grayscale image of the band 3 after the MNF transformation



图 3 像元纯度指数生成的 PPI 图像

Fig. 3 PPI image generated by pixel purity index

比提取出纯净像元光谱与参考光谱数据库中的波谱曲线的相似程度,定位到最相似的波谱曲线从而确定端元类别。本文通过对比纯净像元波谱和 USGS 波谱库中的光谱曲线来确定端元的地物类别。根据反复试验,确定角度阈值为 0.12 效果最好,得到研究区矿物信息分布图(图 6)。

4 主成分变换提取矿化信息

主成分分析法是矿化蚀变信息提取中成熟有效的方法之一,是将原始的 Aster 或者 Landsat8 数据通过正交变换成不相关性变量,并保留原始数据的大部分信息,是一种重要的图像增强手段(高万里等,2010; Liu Lei et al., 2014; Poumamdari et al., 2014)。想要合理地选择相匹配波段并利用主成分分析有效提取矿化蚀变信息,必须了解围岩蚀变矿物的诊断波谱特征。通过项目组野外地质调查了解到研究区蚀变类型主要为羟基(OH^-)离子和铁染离子(Fe^{2+} 、 Fe^{3+})蚀变,而这些离子团所构成的矿物在 Landsat8 和 Aster 数据的波段上存在明显的光谱诊断特征(图 7)。

由 USGS 标准波谱库中典型蚀变矿物波谱曲线可知(Clark et al., 2007),铁染离子(Fe^{2+} 、 Fe^{3+})蚀变的典型矿物具有一致的波谱诊断特征,其在 Aster 数据的 Band1 和 Band3 处呈现弱吸收谷特征,在 Band2 和 Band4 处具有较高的反射峰,因此选择 Aster 数据的 Band1、Band2、Band3、Band4 提取铁染矿化蚀变。对应的 Landsat8 铁

染类矿物在 Band2 和 Band5 两处为较为明显吸收谷,在 Band4 和 Band6 附近有较为强烈的反射峰,选择 Landsat8 数据的 Band2、Band4、Band5、Band6 提取铁染异常信息。在 Aster 数据上 Band6 处有明显吸收谷,在 Band4 和 Band7 处有明显反射峰,该位置可以诊断代表 $\text{Al}-\text{OH}$ 基团的绢云母、明矾石、高岭石、蒙脱石等典型矿物组合,因此 Band3、Band4、Band6、Band7 可用来提取含 $\text{Al}-\text{OH}$ 基团的蚀变矿物异常信息;代表 $\text{Mg}-\text{OH}$ 基团的绿泥石、绿帘石、方解石等典型矿物在 Band1 和 Band8 处具有强吸收谷,在 Band4 处具有高反射峰,因此选 Band1、Band3、Band4、

Band8 进行 $\text{Mg}-\text{OH}$ 离子团蚀变矿物的异常信息。相对应的 Landsat8 数据羟基团矿物(如泥化类矿物)在第 7 波段附近表现为吸收谷,在第 6 波段附近表现为反射峰,因此选择 Band2、Band5、Band6、Band7 提取羟基蚀变信息。

4.1 Aster 数据遥感异常提取

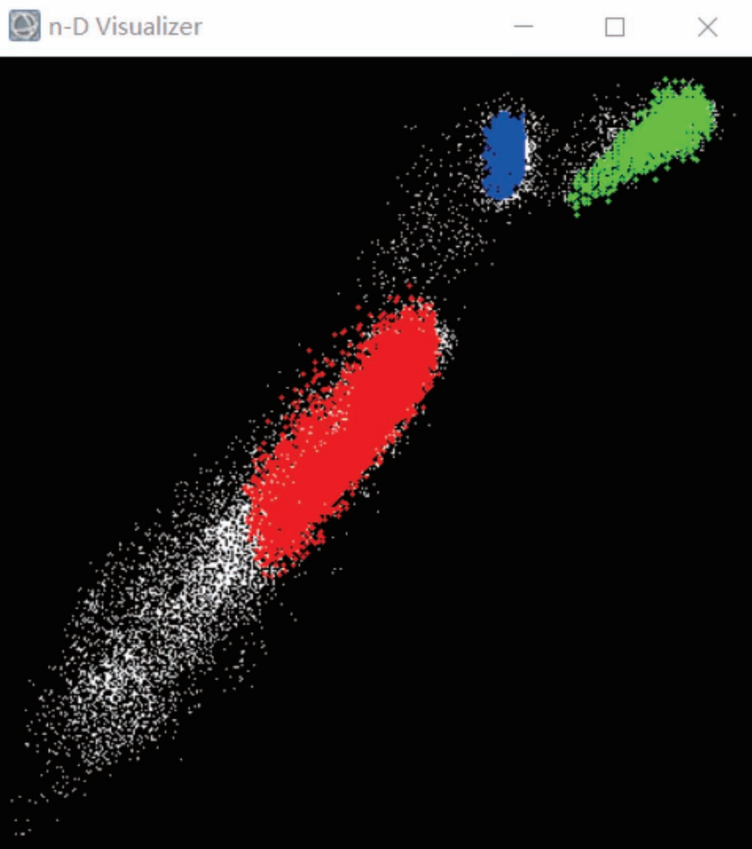


图 4 n-D Visualization 窗口提取端元

Fig. 4 End element in the n-D visualizer window

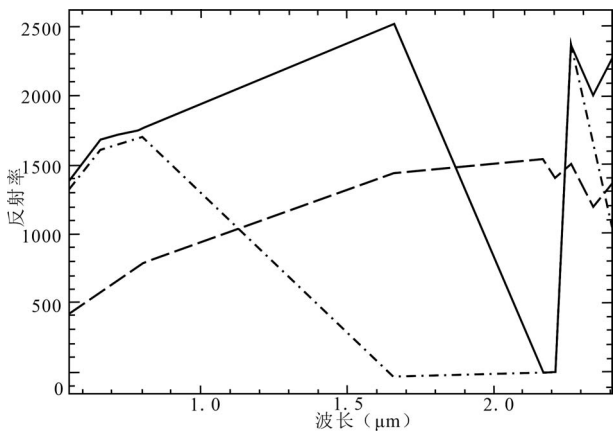


图 5 *n*-D Mean 绘图窗口获取的平均波谱曲线
Fig. 5 Average spectral curve obtained by the *n*-D
Mean drawing window

4.1.1 铁染蚀变信息提取

铁离子(Fe^{2+} 、 Fe^{3+})基团在 Aster3 处呈现反射谷特征,Aster2 和 Aster4 呈现反射峰,因此基于 Aster 数据,本文选择 Aster1、Aster2、Aster3、Aster4 四个波段做主成分变换,构建特征向量矩阵,提取铁染矿化蚀变。根据 Crosta 判定法则判断代表铁离子基团的主分量,对铁离子(Fe^{2+} 、 Fe^{3+})基团主成分分析表以及参考值(表 1a)进行分析,可知 PC4 对 Aster3 的特征系数贡献值为正,对 Aster2 及 Aster4 的特征系数贡献值为负,需要取反使得特征向量符号得正。因此选择 PC4 作为提取 Fe^{2+} (Fe^{3+})离子基团蚀变的主分量。

据标准差的倍数,对研究区 PC4 图像进行阈值分割,表示蚀变程度不同的铁染蚀变。通过计算 PC4 主分量的平均值和标准差,以“平均值+ n ×标准差”对研究区 PC4 图像进行阈值分割,分别取 $n=2, 2.5, 3$ 。将数值>(平均值+3×标准差)定义为高级蚀变异常区,将数值介于(平均值+2.5×标准差)与(均值+3×标准差)之间定义为中级蚀变异常区,将数值介于(平均值+2×标准差)与(平均值+2.5×标准差)之间定义为低级蚀变异常区(张玉君等,2003)。在 ENVI5.3 中使用计算统计工具(Statistics)得出 PC4 主分量的标准差为 25.33,平均值(mean)为 0, $2\sigma + \text{mean}$ 为 50.66, $2.5\sigma + \text{mean}$ 为 63.33, $3\sigma + \text{mean}$ 为 75.99。依据以上数值来进行阈值切割,最终得到研究区铁染蚀变遥感异常信息,将铁染蚀变异常划分为高、中、低三个等级,整体来看呈现北西向展布(图 8a)。

表 1 Aster 和 Landsat8 数据铁染及羟基的主成分变换特征向量矩阵

Table 1 Principal component transformation eigenvector matrix of ferric contamination anomaly and hydroxy alterations in Aster and Landsat8 data

Band	PC1	PC2	PC3	PC4
(a) Aster 数据铁染				
1	0.37	0.36	-0.75	0.42
2	0.49	0.43	0.02	-0.76
3	0.50	0.27	0.66	0.50
4	0.61	-0.78	-0.09	-0.06
(b) Aster 数据 Mg 羟基				
1	0.37	0.59	-0.16	0.70
3	0.49	0.54	0.08	-0.68
4	0.61	-0.51	-0.61	-0.03
8	0.50	-0.34	0.77	0.19
(c) Aster 数据 Al 羟基				
3	0.44	0.89	0.03	0.11
4	0.54	-0.19	-0.68	-0.45
6	0.50	-0.34	-0.04	0.80
7	0.51	-0.23	0.73	-0.38
(d) Landsat8 数据铁染				
2	0.28	0.26	0.87	-0.31
4	0.47	0.43	-0.01	0.77
5	0.52	0.41	-0.50	-0.55
6	0.65	-0.76	0.03	0.02
(e) Landsat8 数据羟基				
2	0.26	0.38	0.70	-0.54
5	0.48	0.73	-0.23	0.43
6	0.60	-0.24	-0.52	-0.56
7	0.58	-0.52	0.42	0.46

4.1.2 羟基蚀变信息提取

提取 Mg—OH 蚀变选取 Aster1、Aster3、Aster4、Aster8 四个波段做主成分变换,构建特征向量矩阵。根据 Crosta 判定法则判断代表 Mg—OH 基团的主分量,对 Mg—OH 基团主成分分析表以及参考值(表 1b)进行分析,可知 PC3 对 Aster3 和 Aster8 的特征系数贡献值为正,且贡献大,对 Aster4 的特征系数贡献值为负,因此 PC3 符合条件,作为提取 Mg—OH 基团蚀变的主分量。

Al—OH 类蚀变矿物在 Aster6 处呈现吸收谷特征,Aster4 和 Aster7 呈现反射峰,因此基于 Aster 数据选择 Aster3、Aster4、Aster6、Aster7 四个波段做主成分变换,构建特征向量矩阵,提取 Al—OH 基团蚀变。根据 Crosta 判定法则判断代表 Al—OH 基团的主分量,对 Al—OH 基团主成分分析表以及参考值(表 1c)进行分析,可知 PC4 对 Aster6 的特征系数贡

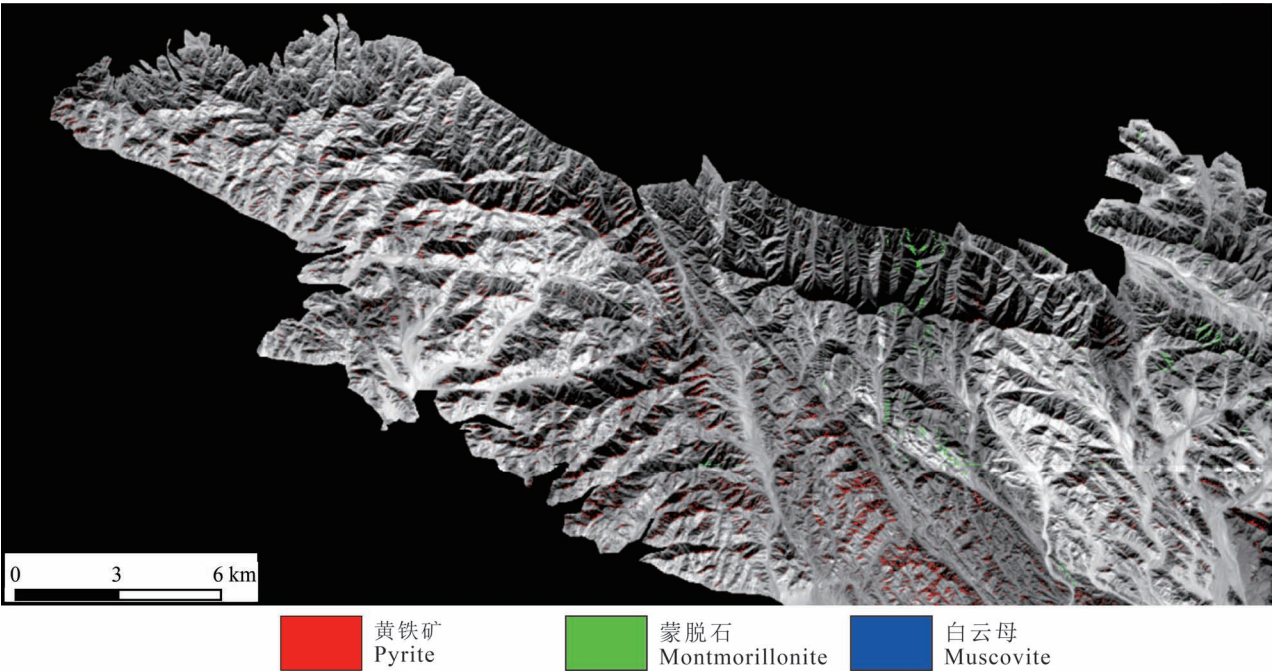


图 6 光谱角分类矿物信息分布图

Fig. 6 Mineral information distribution map after spectral angle classification

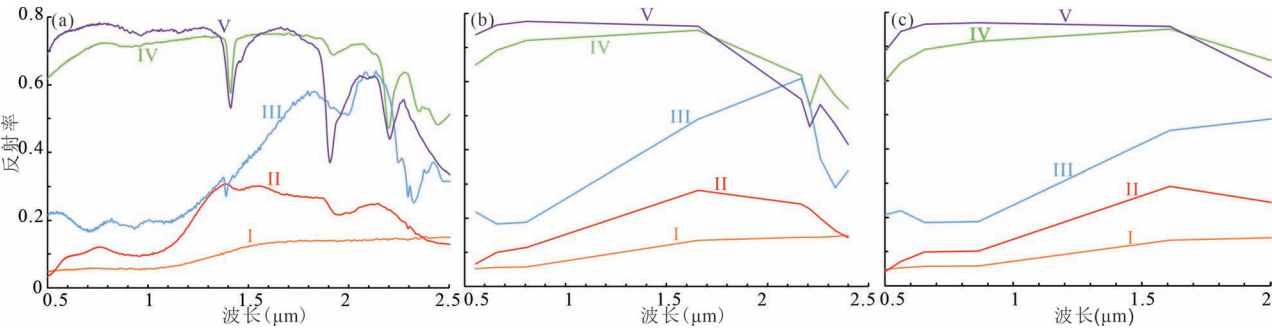


图 7 USGS 标准光谱库典型矿物光谱和研究区 Aster、Landsat8 数据主要蚀变矿物光谱：(a) USGS 标准光谱库典型矿物光谱；(b) Aster 数据主要蚀变矿物光谱；(c) Landsat8 数据主要蚀变矿物光谱

Fig. 7 Typical mineral spectra in USGS standard spectrum library and main altered mineral spectra of Aster and Landsat8 data in the study area: (a) typical mineral spectra in USGS standard spectrum library; (b) spectra of major altered minerals from Aster Data; (c) spectra of major altered minerals from Landsat8 data

I—黄铁矿；II—褐铁矿；III—白云母；IV—绿泥石；V—蒙脱石
I—Pyrite；II—Limonite；III—Muscovite；IV—Chlorite；V—Montmorillonite

献值为正,且贡献大,对 Aster4 及 Aster7 的特征系数贡献值为负,因此选择 PC4 作为提取 Al—OH 基团蚀变的主分量。

通过计算“平均值+标准差的倍数”,对研究区 PC4 图像和 PC3 图像分别进行阈值分割,分别取 $\sigma=2,2.5,3$ 作为 Al—OH 和 Mg—OH 基团等级划分的阈值。在 ENVI5.3 中进行计算统计后得出 Al—OH 基团第 4 主分量的标准差为 81.16,平均值为 0,

计算 $2\sigma+\text{mean}$ 为 162.32, $2.5\sigma+\text{mean}$ 为 202.9, $3\sigma+\text{mean}$ 为 243.48,Mg—OH 基团第 3 主分量的标准差为 110.01,平均值为 0, $2\sigma+\text{mean}$ 为 220.02, $2.5\sigma+\text{mean}$ 为 275.03, $3\sigma+\text{mean}$ 为 330.03。根据以上数值来进行阈值切割,将 Mg—OH 和 Al—Mg 基团矿化异常划分高级、中级和低级三个等级,得到研究区地区 Mg—OH 和 Al—Mg 基团蚀变信息空间分布特征(图 8b)。

4.2 Landsat8 数据遥感异常提取

4.2.1 铁染蚀变信息提取

铁染类矿物在 OLI2 和 OLI5 两处为吸收谷, OLI4 处呈现反射峰。因此对 OLI2、OLI 4、OLI5、OLI6 四个波段做主成分变换, 构建特征向量矩阵。利用 Crosta 法则判定代表异常存在的主分量, PC4 对 OLI4 及 OLI6 的特征系数贡献值为正, 对 OLI2 与 OLI5 特征系数的贡献值为负。由表 1d 可知, 选择 PC4 作为铁离子蚀变的主分量。

通过计算, PC4 主分量平均值是 0, 标准差为 24. 18, 依据“平均值+标准差的倍数”划分, 对研究区 PC4 图像进行阈值分割, 分别取 $\sigma=2, 2.5, 3$ 作为铁染蚀变等级划分的阈值, 计算 $2\sigma+\text{mean}$ 为 48. 36, $2.5\sigma+\text{mean}$ 为 60. 45, $3\sigma+\text{mean}$ 为 72. 54, 划分高级、中级和低级三个等级, 得到研究区 Fe^{2+} (Fe^{3+}) 离子基团蚀变信息空间分布特征, 整体来看蚀变分布较为零散, 研究区西北角和东南角均有分布(图 8a)。

4.2.2 羟基蚀变信息提取

含羟基矿物(蒙脱石、伊利石、绿泥石、透闪石等)在 OLI7 附近为吸收谷, 在 OLI6 附近呈现反射峰。因此对 OLI2、OLI5、OLI6、OLI7 四个波段做主成分变换, 构建特征向量矩阵, PC4 对 OLI5 和 OLI7 特征系数符号相同, 都为正值, 对 OLI2 和 OLI6 特征系数为负值。由表 1e 可知, PC4 符合条件, 将 PC4 作为提取蚀变波段。

通过计算, PC4 主分量平均值是 0, 标准差为 70. 57, 依据“平均值+标准差的倍数”划分, 对研究区 PC4 图像进行阈值分割, 分别取 $\sigma=2, 2.5, 3$ 作为羟基蚀变等级划分的阈值, 计算得出 $2\sigma+\text{mean}$ 为 141. 14, $2.5\sigma+\text{mean}$ 为 176. 43, $3\sigma+\text{mean}$ 为 211. 71。将铁染蚀变异常划分为高、中、低三个等级, 蚀变主要分布在研究区的西侧, 主要以低级异常为主, 高级异常较少(图 8b)。

4.3 异常的中值滤波处理

提取的铁染蚀变和羟基蚀变异常在图像上会出现分布孤立、零星的点, 可以除掉图中过于分散的异常像元或者将其合并至周围聚集的像元中(王晓鹏, 2015)。本文通过中值滤波方法, 采用 3×3 像元的窗口对所得的异常进行中值滤波处理, 最终得到研究区铁染和羟基蚀变遥感异常信息图。

4.4 异常信息综合分析

为了更清楚直观地对比 Aster 和 Landsat8 遥感影像提取的铁染和羟基蚀变异常空间分布特征, 将

Aster 提取的铁染和 Al—OH 、 Mg—OH 异常与 Landsat8 提取的铁染异常和羟基异常在 Arcgis10. 6 中进行不同数据源的信息叠加, 得到 Fe^{2+} (Fe^{3+}) 离子基团蚀变信息叠加分布图(图 8a)和 OH^- 离子基团蚀变信息叠加分布图(图 8b)。分别对 Aster 和 Landsat8 提取的铁染和羟基蚀变面积及重叠面积统计计算, 得到铁染和羟基蚀变叠加面积统计表(图 9)以及蚀变信息叠加扇形统计图(图 10)。

由图表可知, Aster 影像提取的铁染蚀变面积为 7.42 km^2 , Landsat8 提取的铁染蚀变面积为 6.35 km^2 , 重叠面积 1.62 km^2 , 蚀变重叠率为 10. 52%。基于 Aster 数据提取出 Mg—OH 和 Al—OH 这两种羟基蚀变异常, 其中提取出来的 Mg—OH 基团蚀变面积 8.08 km^2 , 提取的 Al—OH 基团蚀变面积为 2.49 km^2 , 两者相加得到总的羟基蚀变面积为 10.56 km^2 , Landsat8 所提取的羟基蚀变面积 14.77 km^2 。通过叠置分析, Aster 提取的 Mg—OH 和 Landsat8 提取的羟基蚀变重叠率为 18. 55%; 提取的 Al—OH 和 Landsat8 提取的羟基蚀变重叠率为 0. 83%。两种数据提取的羟基蚀变面积从大到小依次排序为 Landsat8-OH、Aster-Mg—OH、Aster-Al—OH, 重叠面积由大到小依次排序为 Aster-Mg—OH + Landsat8-OH、Aster-Al—OH + Landsat8-OH、Aster-Mg—OH Aster-Al—OH +Landsat8-OH。

Aster 和 Landsat8 两种数据提取的铁染和羟基蚀变在空间分布上相交、相邻, 说明它们具有相互辅助、补充和验证的作用。两种数据提取的铁染和羟基蚀变经过空间叠置分析, Landsat8 提取出来的蚀变范围较大, Aster 提取出来的蚀变范围小, 重合的区域可能为蚀变异常强烈的区域, 为扩大找矿范围和寻找富集矿区提供了很好地参考, 两种数据相辅相成, 结合了由于自身不足带来的差异性, 提高蚀变信息提取的准确性。

5 结果分析与验证

5.1 岩石的实测光谱特征分析对比

根据沈文成等(2015)、任文恺等(2018)、保广普等(2021)前人资料和野外实地踏勘资料显示, 研究区主要以金矿和铁矿为主。为了检验矿化蚀变提取的准确性, 笔者等所在项目组 2020 和 2021 年夏对研究区进行野外实地验证。为了验证提取的铁离子蚀变矿物、羟基蚀变矿物类型是否与实际情况吻合, 项目组成员在研究区典型蚀变带、矿化带和蚀变围岩附近采集了大量岩石样品。通过 ASD 地物光

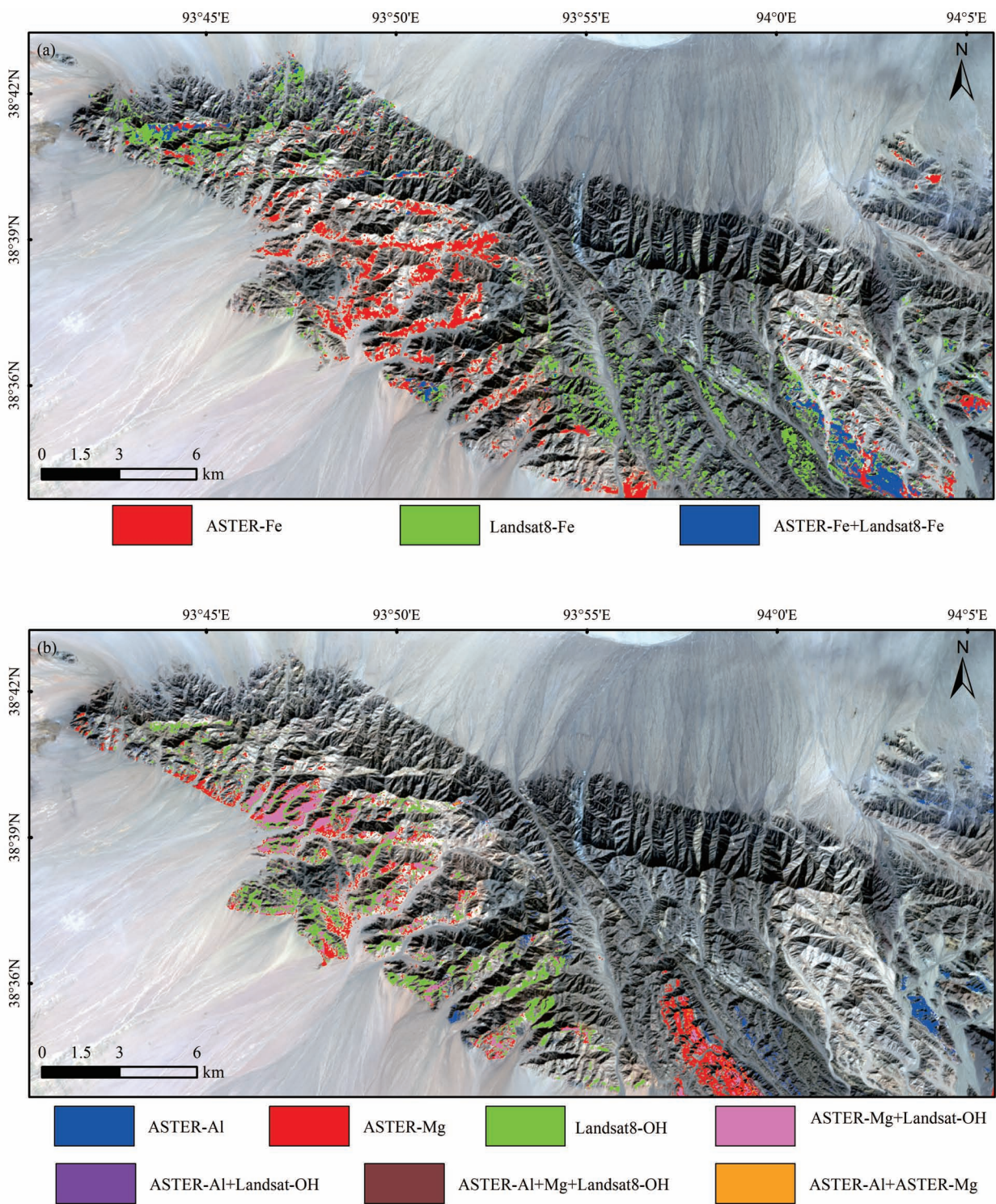


图 8 铁染和羟基蚀变叠加遥感异常信息图：(a) 铁染蚀变信息叠加图；(b) 羟基蚀变信息叠加图

Fig. 8 Remote sensing anomaly information map of ferric contamination anomaly and hydroxyl alteration superposition: (a) superposition diagram of ferric contamination anomaly information; (b) superposition diagram of hydroxyl alteration information

谱仪 FieldSpec (350~2500 nm) 对 21 个典型的岩石样品 (表 2) 进行光谱实测, 得到岩矿样本的连续光谱曲线, 本文挑选 5 个典型样品 (A—E) 的实测光

谱, 通过对其详细分析对比, 得出如下结果。
蚀变大理岩的实测光谱曲线如图 11A 所示, 主要表现为 4 个特征光谱吸收带。在 0.9~1.1 μm 范

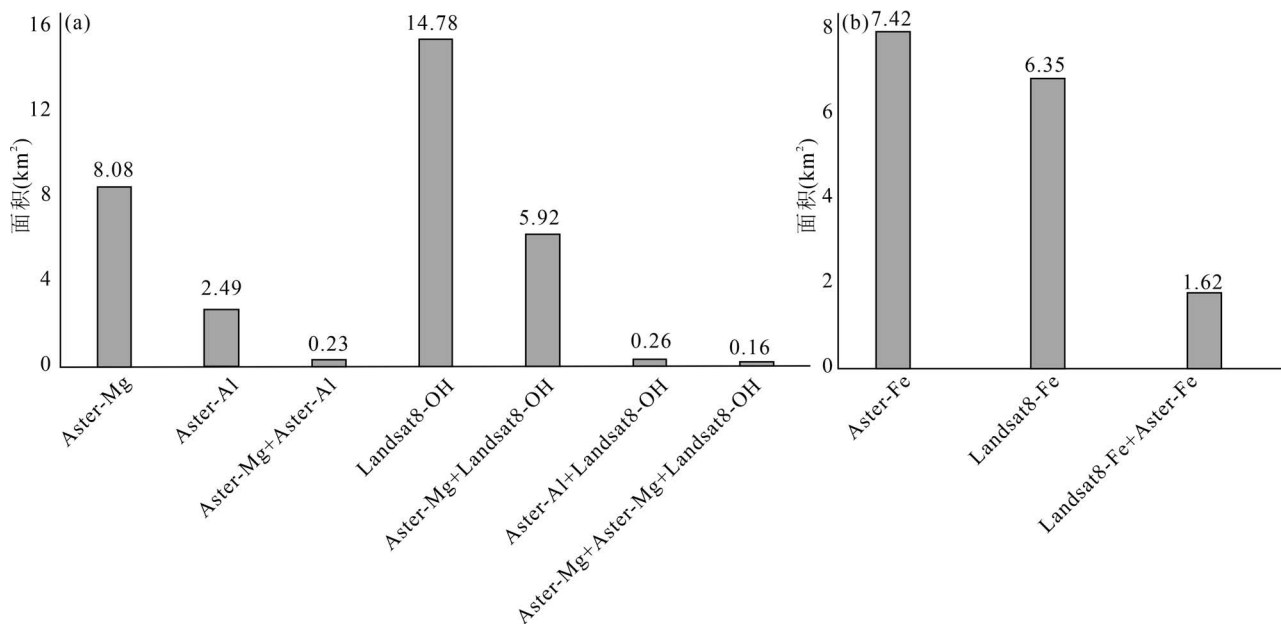


图 9 羟基和铁染蚀变叠加面积统计表: (a) 羟基蚀变叠加面积统计表; (b) 铁染蚀变叠加面积统计表

Fig. 9 Statistical table of superposition area of hydroxyl alteration and ferric contamination anomaly alteration: (a) statistical table of stacking area of hydroxyl alteration; (b) statistical table of superimposed area of ferric contamination anomaly alteration

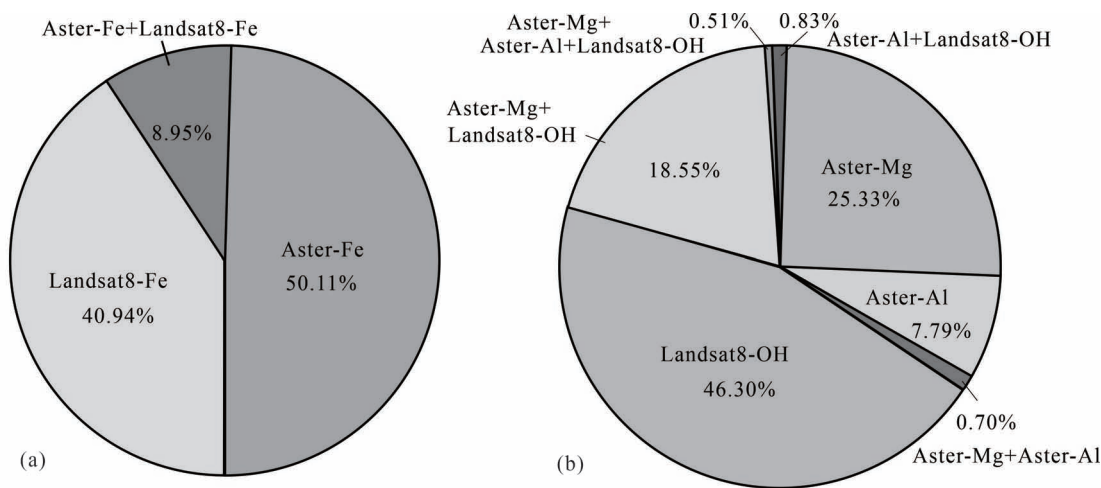


图 10 铁染及羟基蚀变信息叠加统计图: (a) 铁染蚀变信息叠加统计图; (b) 羟基蚀变信息叠加统计图

Fig. 10 Information superposition statistical diagram of ferric contamination anomaly and hydroxyl alteration: (a) information superposition statistical diagram of ferric contamination anomaly alteration; (b) information superposition statistical diagram of hydroxyl alteration

围内可见一个长并且宽的吸收波谱带,中心位置在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 附近,可观察到明显的吸收峰,该位置与 Fe^{2+} 离子的吸收峰位置相对应;在 $2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $2.16\text{ }\mu\text{m}$ 附近可见明显的吸收峰,峰形较浅,该位置与 CO_3^{2-} 离子特征吸收位置相对应;在 $2.35\text{ }\mu\text{m}$ 附近具有峰形较深的吸收峰,这是 Mg-OH 的特征吸收峰位置。

为了进一步验证分析的准确性,将蚀变大理岩实测光谱曲线与褐铁矿、绿泥石和白云母的标准光谱曲线进行叠加对比,发现蚀变大理岩实测光谱曲线在 $2\sim 2.4\text{ }\mu\text{m}$ 与白云母的光谱曲线相似程度较高,在 $0.4\sim 1.4\text{ }\mu\text{m}$ 范围内与褐铁矿的光谱曲线具有相似性,在 $1.9\sim 2.2\text{ }\mu\text{m}$ 区间内与方解石的光谱曲线可

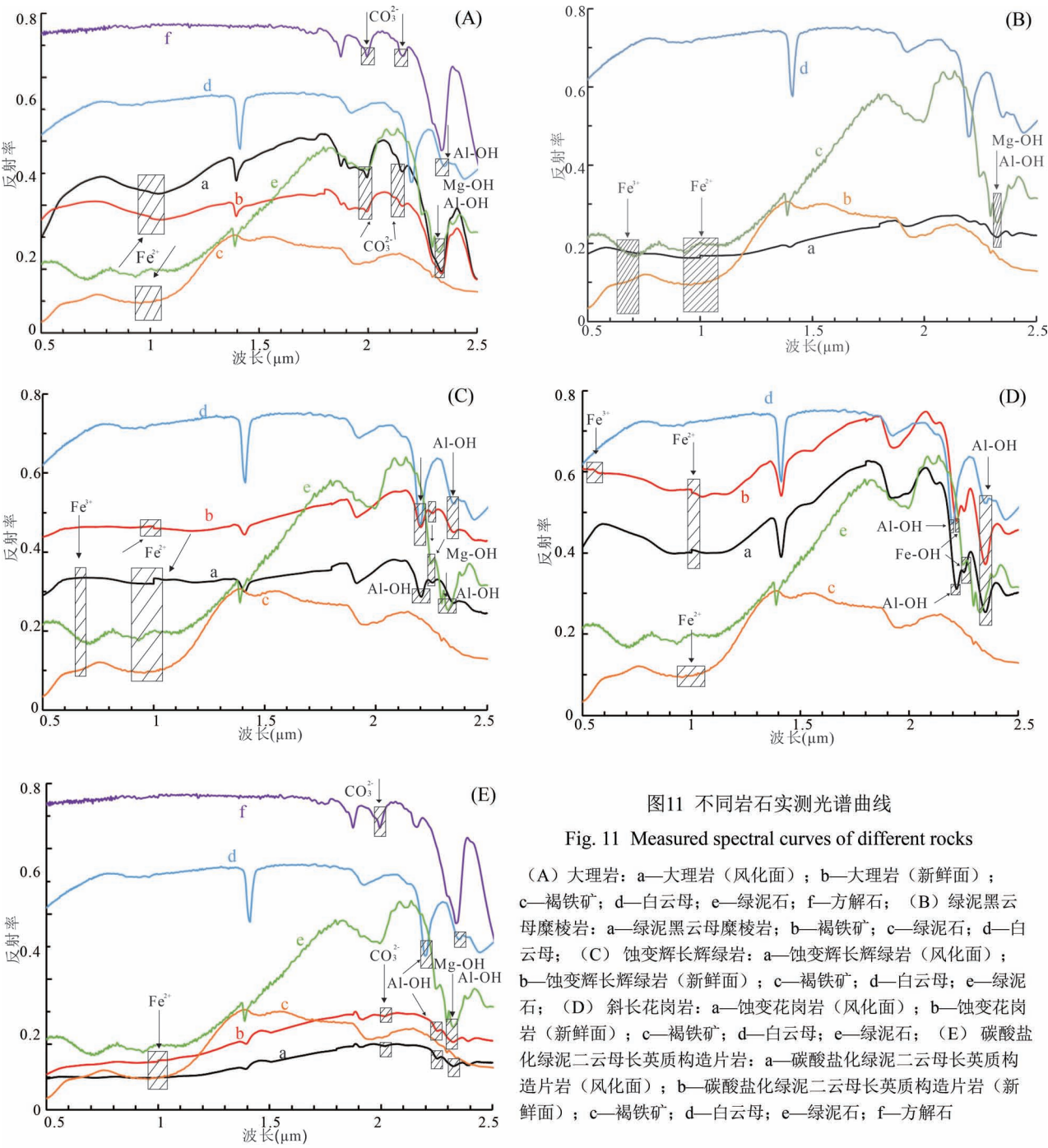


图11 不同岩石实测光谱曲线

Fig. 11 Measured spectral curves of different rocks

(A) 大理岩: a—大理岩(风化面); b—大理岩(新鲜面); c—褐铁矿; d—白云母; e—绿泥石; f—方解石; (B) 绿泥黑云母糜棱岩: a—绿泥黑云母糜棱岩; b—褐铁矿; c—绿泥石; d—白云母; (C) 蚀变辉长辉绿岩: a—蚀变辉长辉绿岩(风化面); b—蚀变辉长辉绿岩(新鲜面); c—褐铁矿; d—白云母; e—绿泥石; (D) 斜长花岗岩: a—蚀变花岗岩(风化面); b—蚀变花岗岩(新鲜面); c—褐铁矿; d—白云母; e—绿泥石; (E) 碳酸盐化绿泥二云母长英质构造片岩: a—碳酸盐化绿泥二云母长英质构造片岩(风化面); b—碳酸盐化绿泥二云母长英质构造片岩(新鲜面); c—褐铁矿; d—白云母; e—绿泥石; f—方解石

(A) Marble: a—marble(weathering surface); b—marble(fresh surface); c—limonite; d—muscovite; e—chlorite; f—calcite; (B) chlorite biotite mylonite: a—chlorite biotite mylonite; b—limonite; c—chlorite; d—muscovite; (C) altered gabbro diabase: a—altered gabbro diabase (weathering surface); b—altered gabbro diabase(fresh surface); c—limonite; d— muscovite; e—chlorite; (D) plagioclase granite: a—plagioclase granite (weathering surface); b—plagioclase granite (fresh surface); c—limonite; d—muscovite; e—chlorite; (E) carbonated chlorite mica felsic structural schist: a—carbonated chlorite mica felsic structural schist (weathering surface) (weathering surface); b—carbonated chlorite mica felsic structural schist (fresh surface); c—limonite; d—muscovite; e—chlorite; f—calcite

相对应。通过以上对比分析并结合野外实地勘查,发现在蚀变区域处可见褐铁矿化、绿泥石化、方解石化和绢云母化,因此由上述分析可推断,研究区存在

褐铁矿等铁染蚀变、绿泥石等羟基蚀变以及部分碳酸盐化。

绿泥黑云母糜棱岩的实测光谱曲线如图 11B

所示,具有 3 个特征吸收谱带,在 0.6~0.8 μm 具有较弱的吸收带谱,吸收峰较浅,但可模糊识别,这是 Fe³⁺ 离子的特征吸收位置;在 0.9~1.1 μm 范围内可见一个长并且宽的吸收波谱带,中心位置在 1 μm 附近,可观察到明显的吸收峰,该位置与 Fe²⁺ 离子的吸收峰位置相对应;在 2.3~2.35 μm 波长区间具有峰形较明显的 Mg—OH 吸收峰,中心位置大概在 2.3 μm 左右;在 2.355 μm 附近具有 Al—OH 强吸收峰。将绿泥黑云母糜棱岩实测光谱曲线与褐铁矿、绿泥石和白云母的标准光谱曲线进行叠加对比发现具有较高的相似性,其特征吸收位置具有大体一致性,并且通过野外实地查证,发现绿泥黑云母糜棱岩的地表接触带具有绿泥石化和褐铁矿化的存在。

表 2 实测光谱样品采集点坐标

Table 2 Coordinates of acquisition points of measured spectral samples

序号	E	N	岩石名称
A	93°56'40"	38°36'19"	大理岩
C	93°59'36	38°34'50"	绿泥黑云母糜棱岩
B	93°51'43"	38°37'6"	蚀变辉长辉绿岩
D	93°58'47	38°38'31"	斜长花岗岩
E	93°59'3"	38°34'26"	碳酸盐化绿泥二云母长英质构造片岩
F	93°59'27	38°34'47"	含石榴子石黑云母长英质糜棱片岩
G	93°56'29"	38°35'16"	硅化云母石英片岩
H	93°58'52"	38°36'55"	二云母绿泥石英长英质糜棱片岩
I	93°59'21"	38°33'1"	云母石英变粒岩
J	93°55'54"	38°38'15"	硅化长英质糜棱岩
K	93°58'24"	38°36'19"	长英质超糜棱岩
L	93°55'40"	38°37'41"	灰白色硅化花岗闪长岩
M	93°58'16"	38°36'1"	含石英绢云母千糜岩
N	93°56'34"	38°36'4"	绿泥二云母石英糜棱片岩
O	93°56'37"	38°35'26"	绿泥石英片岩
P	93°53'29"	38°38'8"	含石英黑云母石英糜棱片岩
Q	93°58'39"	38°35'31"	含石英黑云母石英片岩
R	93°59'34"	38°38'39"	蚀变闪长玢岩
S	93°59'9"	38°32'43"	灰色黑云斜长片麻岩
T	93°56'37"	38°35'27"	绿泥石英片岩
U	93°59'5"	38°39'15"	绿泥黄铁绢英岩化英安岩

在蚀变辉长辉绿岩的实测光谱曲线上图 11C, Fe³⁺ 离子的特征吸收峰不显著,但是在 1 μm 附近处明显可见 Fe²⁺ 离子的吸收峰;在 2.2 μm 和 2.335 μm 附近可见吸收峰,这与 Al—OH 的吸收峰位置相一致;在 2.24 μm 附近有一个峰形较浅的吸收峰,这是 Mg—OH 的特征吸收峰位置。通过与白云母、

褐铁矿和绿泥石标准光谱曲线对比,发现蚀变辉长辉绿岩与褐铁矿的光谱曲线在 0.4~1.4 μm 之间有一定的相似性,与白云母的光谱曲线在 2~2.4 μm 之间较为相像,进一步证明了研究区存在铁染和羟基蚀变。

从斜长花岗岩的实测光谱曲线图 11D 可知,在 0.5~0.6 μm 之间存在特征吸收带,吸收峰的位置在 0.55 μm 附近,峰形不明显,但是模糊可识别,该位置与 Fe³⁺ 离子的吸收峰位置相对应;在 1 μm 附近存在 Fe²⁺ 离子的吸收峰;在 2.2 μm 和 2.335 μm 附近存在 Al—OH 的吸收峰;在 2.25 μm 附近可见 Mg—OH 的吸收峰,峰形较浅,但清晰可识别。通过斜长花岗岩实测光谱曲线与褐铁矿、绿泥石和白云母的标准光谱曲线叠加对比,发现实测光谱曲线与白云母光谱曲线在 2.2~2.4 μm 之间,与褐铁矿在 0.4~1.4 μm 之间具有一致的峰形和走势,并且结合野外查证,验证了该地区的蚀变矿物为白云母和褐铁矿。

碳酸盐化绿泥二云母长英质构造片岩的实测光谱曲线如图 11E 所示,在 1 μm 附近具有 Fe²⁺ 离子的吸收峰,在 2 μm 附近可见明显的吸收峰,峰形较浅,该位置与 CO₃²⁻ 离子特征吸收位置相一致;在 2.23 μm 附近和 2.335 μm 附近存在 Al—OH 的特征吸收峰,在 2.3 μm 附近存在 Mg—OH 的特征吸收峰。与矿物标准曲线进行对比,发现碳酸盐化绿泥二云母长英质构造片岩的实测光谱与矿物标准光谱曲线的特征吸收位置具有较高的相似性,验证了方解石、绿泥石、褐铁矿的存在。

5.2 岩矿鉴定

为了确保蚀变矿物判定的准确性,通过显微镜下观察样品薄片的镜下特征,进一步证明了研究区存在褐铁矿化、黄铁矿化为主的铁染蚀变和绿泥石化、绢云母化为主的羟基蚀变。本文选取了 5 个典型薄片样本进行分析阐述(图 12),具体的镜下特征如下。

长英质超糜棱岩:超糜棱结构。可以观察到由细小的长英质碎基和较少的长石碎斑组成,碎基粒径一般小于 0.01 mm,呈微粒状,碎斑粒径一般小于 0.1 mm,是长英质岩石受到强韧性突变作用形成的,形似酸性熔岩。岩石中含少量金属矿物,含量大概在 2%左右,由黄铁矿和褐铁矿组成。黄铁矿矿物晶体呈粒状,常产生褐铁矿化。由于岩石受脆性变形作用发生破碎,石英、方解石充填于裂隙之间,局部还产生碳酸盐化,也出现轻绢云母化。

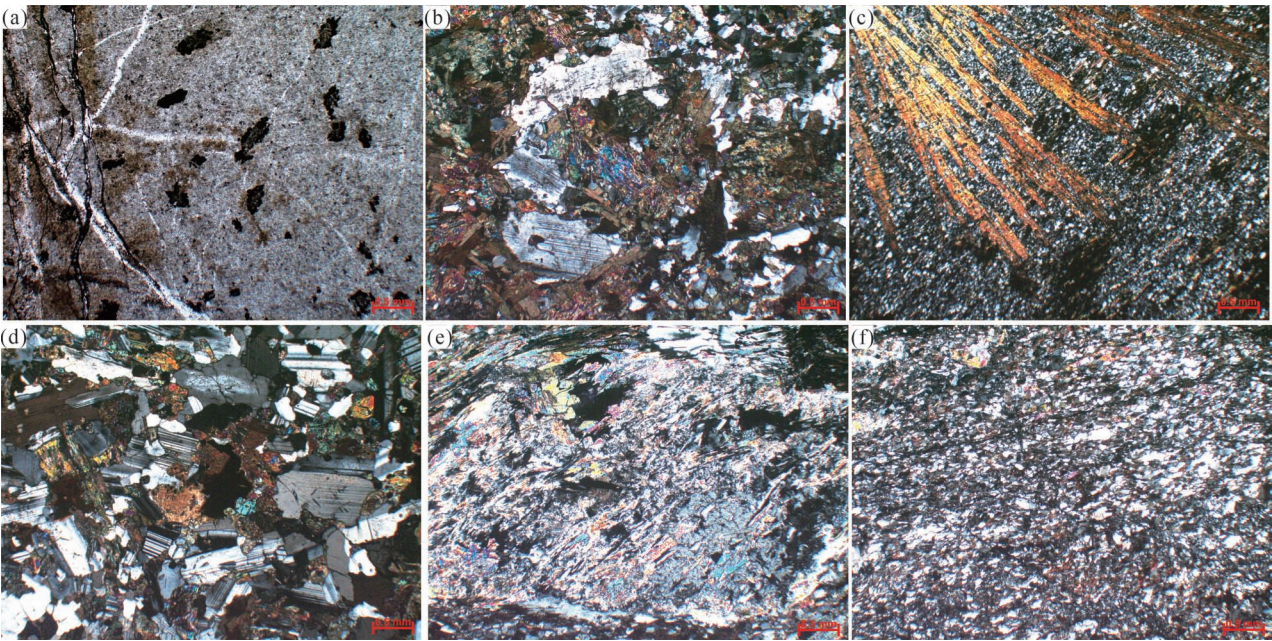


图 12 采样岩石显微镜下特征照片：(a) 长英质超糜棱岩(褐铁矿化)；(b) 蚀变辉长辉绿岩(绢云母化、钛铁矿、褐铁矿)；(c) 角闪黑云绿泥长英质糜棱片岩(绿泥石化、绢云母化)；(d) 中细粒辉长闪长岩；(e)，(f) 绿泥二云母糜棱片岩(绢云母化)

Fig. 12 Microscopic characteristic photos of the sampled rocks: (a) supermylonite (limonitization) ; (b) altered gabbro diorite (sericitization, ilmenite and limonite) ; (c) hornblende biotite chlorite felsic mylonite schist (chloritization and sericitization) ; (d) medium fine grained gabbro diorite ; (e) , (f) chlorite mica mylonite schist (sericitization)

蚀变辉长辉绿岩:具有明显变余结构、辉绿结构。可以观察到斜长石、辉石,副矿物为钛铁矿。斜长石自形程度不同,自形程度较高的斜长石呈柱状,形成斜长石格架,粒度为2~4 mm,他形的斜长石和辉石充填于斜长石格架间形成辉绿结构。岩石发生较强蚀变,斜长石呈絮状,辉石被角闪石交代。金属矿物含量约占8%~10%,零星分布,多呈粒状,粒度约0.06~0.5 mm之间,少数呈板状。

角闪黑云绿泥长英质糜棱片岩:片状粒状变晶结构。可观察到长石、石英和绿泥石、黑云母、角闪石等新生矿物,偶见少量黄铁矿和石榴子石。片状矿物呈条带状,与长英质矿物相间定向分布,角闪石呈放射状集合体横穿片理分布。

中细粒辉长闪长岩:辉长结构。由斜长石、辉石和少量金属矿物组成,斜长石粒度约0.5~2.5 mm,晶型多见板状,主要为中长石,双晶普遍发育,蚀变严重,部分长石被绢云母化。辉石多见交代残留结构,是辉石被角闪石和黑云母交代的结果。金属矿物呈细小粒状,分布零散。

绿泥二云母糜棱片岩:粒状、柱状变晶结构,原岩为糜棱岩。主要由碎斑和碎基组成,碎斑粒径大

小在4~10 mm,由斜长石和石英组成,斜长石晶体呈现柱状,石英碎斑多呈现粒状,原岩中的斜长石碎斑多次生蚀变,常被绢云母化和绿泥石交代,为透镜状或眼球状残留体。白云母、黑云母、绿泥石为主要的片状矿物,含量大于50%,与长英质矿物相间定向分布。

5.3 野外验证点与遥感影像叠加分析

为了验证运用遥感手段提取出的铁染蚀变和羟基蚀变的位置和范围与实际情况的是否一致,特进行野外实地验证(图13),将验证点坐标(表3)运用Arcgis10.6叠置在铁染及羟基蚀变异常分布图上(图14),发现在铁染异常验证点附近发育强褐铁矿化,可见褐铁矿条带;羟基蚀变验证点附近可见绢云母化、硅化和泥化现象,常见于大理岩中。对比野外实地验证的矿点位置和遥感提取矿化蚀变分布范围,可看出提取的蚀变异常区域与野外验证点吻合度较高,发现大部分蚀变主要集中在已知铁矿区、金矿区、花岗岩岩脉附近以及断裂构造边缘、断层破碎带中,并且与断裂构造的发育方向一致。说明本次提取的矿化蚀变信息与矿化点的位置相关性较好,可以很好地指示矿化点的信息,对矿产预测具有较

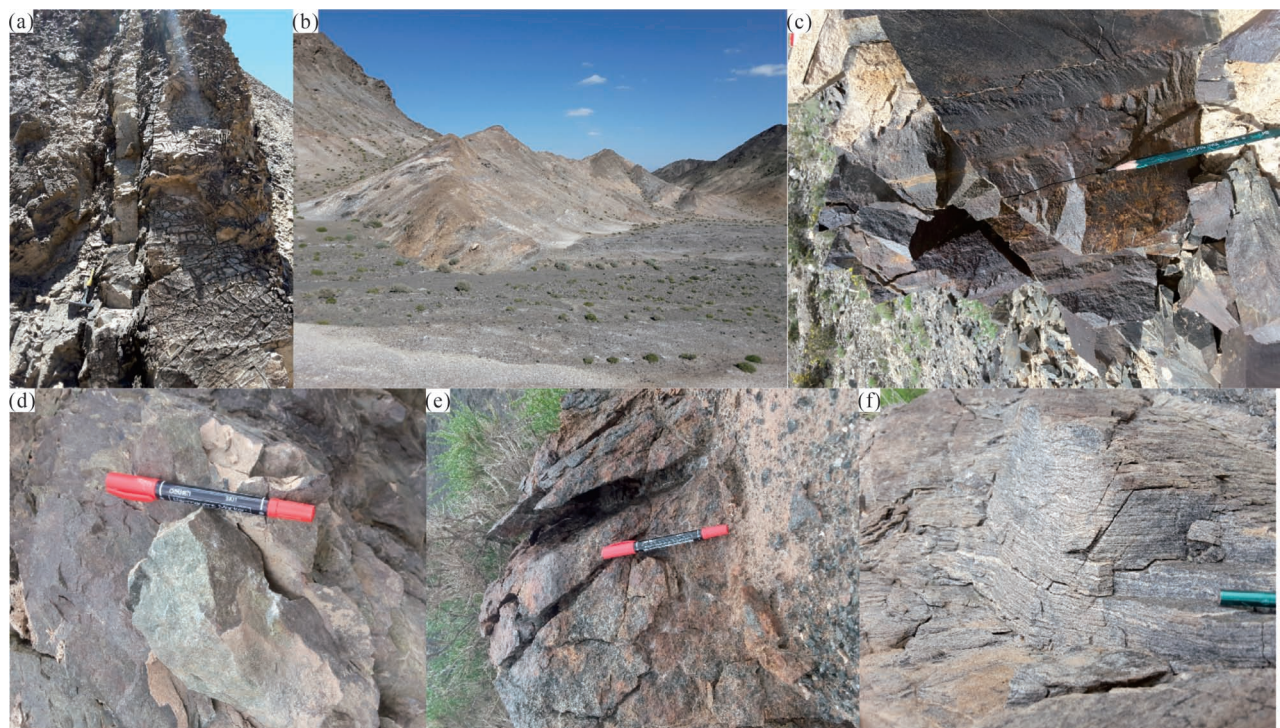


图 13 野外验证点围岩蚀变照片：(a) 浅灰绿色花岗闪长岩(硅化)；(b) 灰褐色粗粒辉长岩风化面(褐铁矿化明显)；(c) 灰色黑云斜长片麻岩(绿泥石化发育)；(d) 白色花岗细晶岩脉体及灰白色硅化大理岩；(e) 褪色蚀变带；(f) 灰黑色砂板岩,可见褐铁矿条带

Fig. 13 Photos of surrounding rock alteration at field verification points: (a) light gray-green granodiorite (silicified); (b) weathering surface of grey-brown coarse-grained gabbro (obvious limonite mineralization); (c) gray biotite plagioclase gneiss (green mud petrification); (d) white granodiorite dyke and gray and white silicified marble; (e) fading alteration zone; (f) grey black sandy slate, and limonite bands can be seen

表 3 赛什腾矿区岩性/矿化点坐标

Table 3 Lithology/mineralization point coordinates of Saishiteng Mining Area

点号	E	N	岩性/矿化类型
1	93°46'35"	38°39'57"	闪长质包体特征
2	93°53'49"	38°38'25"	肉红色中细粒正长岩脉侵入灰黑色中粗粒闪长岩
3	93°49'44"	38°37'22"	浅肉红色似斑状黑云二长花岗岩
4	93°58'37"	38°35'34"	浅灰绿色石英闪长岩
5	93°57'32"	38°35'35"	长英质细脉与石英脉
6	93°58'57"	38°35'36"	绿泥石化
7	93°58'57"	38°35'37"	灰黑色含石榴子石黑云母长石英片岩
8	93°59'08"	38°35'40"	中粗粒灰绿色石英闪长岩
9	93°56'41"	38°39'13"	变质粉砂岩
10	93°50'56"	38°35'22"	灰黑色斜长角闪片麻岩
11	93°58'43"	38°35'47"	褪色蚀变带
12	93°56'01"	38°37'41"	硅化
13	93°56'39"	38°37'57"	褐铁矿条带
14	93°56'53"	38°34'18"	硅化
15	93°57'05"	38°37'36"	绿泥石化

好地指导意义,也为缩小找矿靶区和扩大找矿范围提供了参考依据。

6 结论

(1) 基于成像光谱法和主成分分析法,运用 Aster 和 Landsat8 两种数据对赛什腾多金属矿集区提取矿化蚀变信息。将岩石样品实测光谱曲线和白云母、褐铁矿、绿泥石和方解石的 USGS 标准光谱曲线进行对比,发现样品实测光谱曲线与矿物标准光谱曲线的特征吸收位置具有较高的相似性,并且通过镜下薄片标本鉴定,鉴别出辉石、角闪石绿泥石化、长石绢云母化、白云母以及褐铁矿、黄铁矿等副矿物,进一步证明了研究区存在铁染、羟基等围岩蚀变现象。将提取出来的蚀变信息与野外实地调查矿点位置叠加对比,发现野外验证点基本都落在提取蚀变范围内,具有高度的一致性和重叠性,说明基于遥感数据的处理方法和提取结果是有效的,为缩小找矿靶区和扩大找矿范围提供了重要的指导意义。

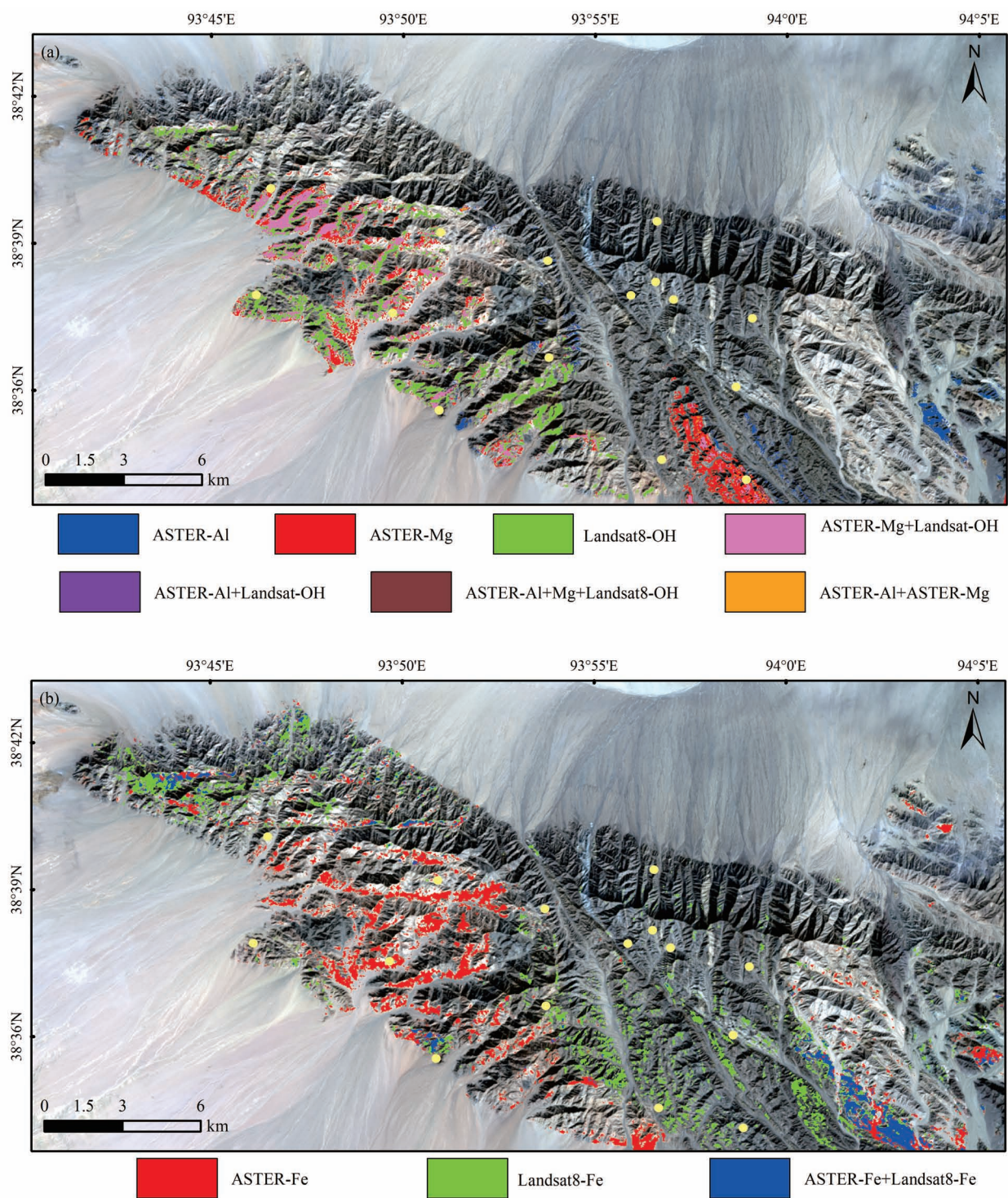


图 14 提取羟基和铁染蚀变与野外验证点叠加图：(a) 提取的羟基蚀变与野外验证点叠加图；
(b) 提取的铁染蚀变与野外验证点叠加图

Fig. 14 Superposition of extracted hydroxyl alteration and ferric contamination anomaly with field verification points: (a) superposition diagram of extracted hydroxyl alteration and field verification points; (b) superposition diagram of extracted ferric contamination anomaly and field verification points

(2) 对比成像光谱法和主成分分析法,成像光谱法对于矿物提取的灵敏度不是很高,只能提取出部分矿物;主成分分析法对于蚀变矿物取的灵敏度较高,可以较为准确地提取出铁染和羟基蚀变矿物。

两种方法提取的结果可以相互验证蚀变矿物的分布位置。

(3) 对比 Aster 与 Landsat8 两种数据提取的蚀变信息效果图,空间分布特征基本一致,并且重叠范围较多,通过图表定量分析重叠区域,铁染蚀变重叠率约为 10.52%,羟基蚀变重叠率为 19.38%,说明数据提取出来的蚀变效果吻合,具有一致性。

(4) Aster 数据在 VNIR—SWIR 部分的波段数较多,可分别提取出 Al—OH 基团蚀变和 Mg—OH 基团蚀变,而 Landsat8 数据在 VNIR—SWIR 部分的波段数较少,对于两类羟基的区分具有局限性,获取的 OH⁻离子基团矿化蚀变范围较广泛。因此利用 Landsat8 数据可以扩大找矿范围,结合 Aster 数据集中富集矿区,两类数据信息互相补充了各自影像自身不足带来的蚀变信息提取的差异性,提高信息提取的准确性。

致谢:岩石薄片由中国地质调查局西安地质调查中心提供,岩石薄片的镜下鉴定由叶芳研究员完成,在此表示感谢。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

保广普, 张林, 张海龙. 2021. 青海赛什腾地区石英脉型金矿特征及找矿前景分析. 西北地质, 54 (1): 139~146.

成功, 朱佳玮, 毛先成. 2016. 基于 ASTER 数据的金川铜镍矿床外围遥感找矿预测. 国土资源遥感, 28 (1): 15~21.

陈瑞卿. 2018. 近 20 年江汉平原耕地种植强度的时空格局. 导师: 陶建斌. 武汉: 华中师范大学硕士学位论文: 1~54.

杜承文, 苗敏强, 祁贞明, 金鹏. 2017. 北祁连加里东期多金属成矿带地质特征及找矿潜力. 中国锰业, 35 (3): 24~26.

甘甫平. 2001. 遥感岩矿信息提取基础与技术方法研究. 国土资源遥感, (3): 59.

高万里, 张绪教, 王志刚, 张紫程, 张耀玲. 2010. 基于 ASTER 遥感图像的东昆仑造山带岩性信息提取研究. 地质力学学报, 16 (1): 59~69.

高万里, 王宗秀, 李磊磊, 崔明明, 钱涛, 胡俊杰. 2019. 柴达木盆地北缘小赛什腾山二叠纪花岗岩的发现及其构造意义. 地质学报, 93 (4): 816~829.

高永宝, 李文渊, 李侃, 钱兵. 2017. 东昆仑祁漫塔格早中生代大陆地壳增生过程中的岩浆活动与成矿作用. 矿床地质, 36 (2): 463~482.

顾哲衍, 张金池, 汪春林, 林杰, 刘鑫, 韩诚. 2014. 退耕还林对皖西金寨县森林景观格局演变的影响. 水土保持通报, 34 (1): 149~153, 181.

李守麟, 杨锋杰, 姜楠, 胡贵增, 丛顺明. 2015. 基于 Aster 数据的矿化蚀变信息提取. 山东科技大学学报(自然科学版), 34 (1): 16~21.

李长伟. 2017. 内蒙古古鲁台地区遥感地质调查研究. 导师: 邢立新. 长春: 吉林大学硕士学位论文: 1~91.

李进波. 2019. 基于 ASTER 影像的滇东北灰岩岩性提取方法研究. 导师: 温兴平, 李定平. 昆明: 昆明理工大学硕士论文: 1~70.

李孟倩, 陈凯江. 2018. 波谱分离在成矿预测中的应用. 华北理工大学学报(自然科学版), 40 (2): 30~36.

刘建宇, 陈玲, 李伟, 王根厚, 王博. 2019. 基于 ASTER 数据韧性剪切带型金矿蚀变信息提取方法. 国土资源遥感, 31 (1): 229~236.

刘灿, 王宏伟. 2011. 高植被覆盖区遥感岩性识别研究. 矿物学报, 31 (S1): 966~967.

潘志民, 提振海, 季天伊, 许健. 2017. 青海省野骆驼泉地区二叠纪侵入岩地球化学特征及构造意义. 中国锰业, 35 (5): 40~43.

茹菲娜·阿力木江, 陈川, 高玲玲, 李顺达. 2021. 基于 ASTER 数据的遥感蚀变信息提取——以西天山穆龙套地区为例[J/OL]. 地球学报: 1~11 [2021-07-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3474.P.20210524.1826.002.html>.

任文恺, 晁海德, 王生云, 吴少锋, 丁成旺. 2018. 青海省赛什腾山地区三角顶金矿区地质、地球化学特征及找矿方向. 黄金地质, 39 (9): 13~17.

沈文成, 刘红梅, 万占奎, 谭渭源. 2015. 浅析青海省赛什腾山西段地区金矿成矿机制及成矿模式. 四川地质学报, 35 (z1): 120~122.

陶秋香, 赵长胜, 张连蓬. 2004. 植被高光谱遥感分类中一种新的非线性混合光谱模型及其解算方法. 矿山测量, (1): 28~29, 4.

提振海, 潘志民, 季天伊, 许健. 2017. 青海省野骆驼泉地区三叠纪侵入岩地球化学特征及构造意义. 中国锰业, 35 (6): 35~37, 41.

武慧智, 陈俊魁, 白朝军, 龚若飞, 袁晶. 2019. 基于 ASTER 与 Landsat8 的遥感蚀变信息提取——以新疆西昆仑塔什库尔干地区老井铁矿区为例. 矿产勘查, 10 (10): 2667~2673.

汪子义, 张廷斌, 易桂花, 钟康惠, 别小娟, 王继斌, 孙姣姣. 2018. Landsat8 OLI 数据斑岩铜矿遥感蚀变矿物组合提取研究. 国土资源遥感, 30 (3): 89~95.

王玉. 2013. 基于时序光谱库的棉花种植面积信息提取研究. 导师: 付梅臣, 王力. 北京: 中国地质大学硕士学位论文: 1~65.

王晓鹏. 2015. 西昆仑成矿带中段遥感信息综合找矿预测方法研究. 导师: 杨志强. 西安: 长安大学博士学位论文: 1~153.

杨建民, 张玉君, 陈薇, 王志良, 姜立丰, 姬厚贵, 韩春明. 2003. ETM~+(TM)蚀变遥感异常技术方法在东天山戈壁地区的应用. 矿床地质, (3): 278~286.

杨建民, 张玉君, 姚佛军, 吴华, 邓刚, 傅旭杰. 2006. 在荒漠戈壁浅覆盖区进行多光谱蚀变遥感异常提取的思考. 见矿床学研究面向国家重大需求新机遇与新挑战. 第八届全国矿床会议论文集: 784~786.

杨斌, 李茂娇, 王世举, 高桂胜, 何兆培, 汪峥. 2015. ASTER 数据在塔什库尔干地区矿化蚀变信息的提取. 遥感信息, 30 (4): 109~114.

杨佳佳, 姜琦刚, 赵静, 陈凤臻. 2008. 基于 ASTER 和 ETM+数据的遥感蚀变信息提取——以内蒙古塔日根敖包地区为例. 吉林大学学报(地球科学版), 38 (S1): 153~158.

于艳梅. 2010. 遥感技术在月球、火星岩矿信息提取中的研究与应用. 导师: 周萍, 甘甫平. 北京: 中国地质大学硕士学位论文: 1~75.

张玉君, 杨建民. 1998. 基岩裸露区蚀变岩遥感信息的提取方法. 国土资源遥感, (2): 48~55.

张玉君, 曾朝铭, 陈薇. 2003. ETM~+(TM)蚀变遥感异常提取方法研究与应用——方法选择和技术流程. 国土资源遥感, (2): 44~49, 78.

- 张志强, 王平, 何俊江, 徐欢, 施根洪. 2013. 龙洼杂当铁多金属矿成矿条件及找矿方向. 城市建设理论研究(电子版), (3): 1~9.
- 赵子基, 陈树旺, 国家辉. 1997. 赛什腾山地区构造地质特征及金矿化. 贵金属地质, (3): 39~43.
- 张琳琳. 2019. 基于高光谱技术的唐卡矿物颜料信息定量提取研究. 导师: 邵怀勇, 戴晓爱, 岑奕. 成都: 成都理工大学硕士学位论文: 1~87.
- Abrams M J, Ashley R P, Rowan L C, Goetz A F H, Kahle A B. 1977. Mapping of hydrothermal alteration in the Cuprite mining district, Nevada, using aircraft scanner images for the spectral region 0.46 to 2.36 μm . *Geology*, 5(12).
- Bao Guangpu, Zhang Lin, Zhang Hailong. 2021. Characteristics and Prospecting Potential of Quartz Vein-Type Gold Deposits in Saishiteng Area, Qinghai Province. *Northwestern Geology*, 54(1): 139~146.
- Boardman J W. 1989. Inversion of Imaging Spectrometry Data Using Singular Value Decomposition. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1989. IGARSS '89. 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, 1989 International. 1989: 2069~2072.
- Bioucas-Dias J M, Plaza A, Dobigeon N, Parente M, Du Q, Gader P. 2012. Hyperspectral unmixing overview: Geometrical, statistical, and sparse regression-based approaches. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(2): 354~379.
- Cheng Gong, Zhu Jiawei, Mao Xiancheng. 2016. Remote sensing prospecting prediction in periphery of the Jinchuan copper—nickel deposit based on ASTER data. *Remote Sensing for Land and Resources*, 28(1): 15~21.
- Chen Ruiqing. 2018. Temporal and spatial pattern of cultivated land planting intensity in Jiangnan Plain in recent 20 years. Instructor; Tao Jianbin. Wuhan: Master's thesis of central China Normal University: 1~54
- Clark R N, Swayze G A, Wise R A, Livo K E, Hoefen T M, Kokaly R F, Sutley S J. 2007. USGS Digital Spectral Library Splib06a (No. 231). US Geological Survey.
- Du Chengwen, Miao Mingqing, Qi Zhengming, Jin Peng. 2017. Geological characteristics and prospecting potential analysis of Caledonian polymetallic metallogenic belt in north Qilian. *China's Manganese Industry*, 35(3): 24~26.
- Ducart D F, Álvaro Penteado Crósta, Roberto C, Filho S. 2005. Mapeamento de alteração hidrotermal no distrito Los Menucos, Argentina, por meio de imagens multiespectrais ASTER. In: *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, Brasil, 16~21 Abril 2005, INPE: 4057~4064.
- Emam A, Zoheir B A, Johnson P. 2016. ASTER-based mapping of ophiolitic rocks: examples from the Allaqi - Heiani suture, SE Egypt. *International Geology Review*, 58(5): 525~539.
- Gan Fupin. 2001. Research on the Fundamentals and Technical Methods of Remote Sensing Rock and Mineral Information Extraction. *Remote Sensing for Land and Resources*, (3): 59.
- Gao Wanli, Zhang Xujiao, Wang Zhigang, Zhang Zhicheng, Zhang Yaoling. 2010. Extraction of lithologic information from the East Kunlun Orogenic Belt using ASTER remote sensing image. *Journal of Geomechanics*, 16(1): 59~69.
- Gao Wanli, Wang Zongxiu, Li Leilei, Cui Mingming, Qian Tao, Hu Junjie. 2019. Discovery of the permian granite in saishiteng mountain of the northern qaidam basin and its tectonic significance. *Acta Geologica Sinica*, 93(4): 816~829.
- Gao Yongbao, Li Wenyuan, Li Kan, Qian Bing. 2017. Magmatism and mineralization during early Mesozoic continental crustal accretion in Qimantag, East Kunlun Mountains. *Deposit Geology*, 36(2): 463~482.
- Gu Zheyang, Zhang Jinchi, Wang Chunlin, Lin Jie, Liu Xin, Han Cheng. 2014. Evolution of forest landscape pattern as affected by "Grain for Green" project in Jinzhai County, eastern Anhui Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 34(1): 149~153, 181.
- Ichoku C, Karnieli A. 1996. A review of mixture modeling techniques for sub-pixel land cover estimation. *Remote Sensing Reviews*, 13(3): 161~186.
- Li Shoulin, Yang Fengjie, Jiang Nan, Hu Guizeng, Cong Shunming. 2015. Extraction of mineralized alteration anomalies based Aster remote sensing data. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 34(1): 16~21.
- Li Changwei. 2017. Research on Remote Sensing Geological Survey in Bilutai Inner Mongolia. Instructor; Xin Lixin. Changchun: Master's thesis of Jilin University: 1~91.
- Li Jinbo. 2019. Research on Lithology Extraction Method of Limestone in Northeast Yunnan Based on ASTER Image. Instructor; Wen Xingpin, Li Dingpin. Kunming: Master's thesis of Kunming University of Science and Technology: 1~70.
- Li Mengqian, Chen Kaijiang. 2018. Application of spectrum separation in metallogenic prediction. *Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 40(2): 30~36.
- Liu Jianyu, Chen Lin, Li Wei, Wang Hougen, Wang Bo. 2019. An improved method for extracting alteration related to the ductile shear zone type gold deposits using ASTER data. *Remote Sensing for Land and Resources*, 31(1): 229~236.
- Liu Can, Wang Hongwei. 2011. Study on remote sensing lithology identification in high vegetation coverage area. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(S1): 966~967.
- Loughlin W. 1991. Principal component analysis for alteration mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(9): 1163~1169.
- Liu Lei, Zhou Jun, Jiang Dong, Zhuang Dafang, Mansaray L R. 2014. Lithological discrimination of the mafic—ultramafic complex, Huitongshan, Beishan, China: Using ASTER data. *Journal of Earth Science*, 25(3): 529~536.
- Moike J G. 1987. *Remote Sensing Image Digital Process*. Beijing: Meteorological Publishing: 1~372
- Pan Zhiming, Ti Zhenhai, Ji Tianyi, Xu Jian. 2017. Geochemical characteristics and tectonic significance of Permian intrusive rocks in wild Camel Spring area of Qinghai Province. *China's Manganese Industry*, 35(5): 40~43.
- Pour A B, Hashim M. 2011. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews: Journal for Comprehensive Studies of Ore Genesis and Ore Exploration*, 44: 1~9.
- Pour A B, Hashim M. 2012. Identifying areas of high economic—potential copper mineralization using ASTER data in the Urumieh—Dokhtar Volcanic Belt, Iran. *Advances in Space Research*, 49(4): 753~769.
- Pour A B, Park T S, Park Y, Hong J K, Muslim A M, Läufer A, Crispini L, Pradhan B, Zoheir B, Rahmani O, Hashim M, Hossain

- M S. 2019. Landsat-8, advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer, and WorldView-3 Multispectral Satellite imagery for prospecting copper—gold mineralization in the NortheAster Ingfield Mobile Belt (IMB), Northwest Greenland. *Remote Sensing*, 11(20): 2430.
- Plaza A, Antonio, Martínez P, Pablo R, Pérez J. 2004. A quantitative and comparative analysis of endmember extraction algorithms from hyperspectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(3): 650~633.
- Pournamdari M, Hashim M, Pour A B. 2014. Spectral transformation of ASTER and Landsat TM bands for lithological mapping of Soghan ophiolite complex, south Iran. *Advances in Space Research*, 54(4): 694~709.
- Rufeina Alimujiang, Chen Chuan, Gao Lingling, Li Shunda. 2021&. The extraction of remote sensing alteration information based on ASTER data; A case study of Muruntau area in Western Tianshan Mountains[J/OL]. *Acta Geoscientia Sinica*: 1~11 [2021-07-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3474.P.20210524.1826.002.html>.
- Ren Wenkai, Chao Haide, Wang Shengyun, Wu Shaofeng, Ding Chengwang. 2018&. Geological, geochemical characteristics and prospecting direction of the Sanjiaoding Gold District in Saishiteng Mountain area, Qinghai Province. *Gold Geology*, 39(9): 13~17.
- Rajendran S, Nasir S. 2017. Characterization of ASTER spectral bands for mapping of alteration zones of volcanogenic massive sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, 88(5):317~335.
- Shen Wencheng, Liu Hongmei, Wan Zhankui, Tan Weiyun. 2015#. Metallogenic mechanism and metallogenic model of gold deposits in the western part of Saishiteng, Qinghai Province. *Sichuan Geological Journal*, 35(S1): 120~122.
- Tao Qiuxiang, Zhao Changsheng, Zhang Lianpeng. 2004&. A new nonlinear mixed spectral model and its solution for hyperspectral remote sensing classification of vegetation. *Mine Surveying*, (1): 28~29,4.
- Ti Zhenhai, Pan Zhiming, Ji Tianyi, Xu Jian. 2017&. An application of radioactive elements in geology—An example of Chuxiong Basin. *China's Manganese Industry*, 35(6): 35~37,41.
- Wu Huizhi, Chen Junkui, Bai Chaojun, Gong Ruofei, Yuan Jing. 2019&. Remoted-sensing mineralization information extracted based on ASTER and Landsat 8 data; A case study on Laobing iron deposit in Taxkorgan area of western Kunlun, Xinjiang. *Mineral Exploration*, 10(10): 2667~2673.
- Wang Ziyi, Zhang Tingbin, Yi Guihua, Zhong Kanghui, Bie Xiaojuan, Wang Jibin, Sun Jiaojiao. 2018&. Extraction of hydrothermal alteration mineral groups of porphyry copper deposits using Landsat8 OLI data. *Remote Sensing for Land and Resources*, 30(3): 89~95.
- Wang Yu. 2013&. Extraction of Cotton Planting Area Information Based on Time Series Spectral Database. Instructor: Fu Meicheng, Wang Li. Bei Jing; Master's thesis of China University of Geosciences; 1~65.
- Wang Xiaopeng. 2015&. Study on Mineral Resource Prediction Method from Synthetically Remote Sensing Geological Information in Middle Part of West Kunlun Mountain Metallogenic Belt. Instructor: Yang Zhiqiang. Xi'an; Doctoral Dissertation of Chang'an University; 1~153.
- Yang Jianmin, Zhang Yujun, Chen Wei, Wang Zhiliang, Jiang Lifeng, Ji Hougui, Han Chunming. 2003&. Application of ETM (TM) remote sensing alteration anomaly extraction technique to gobi area, East Tianshan Mountains. *Mineral Deposits*, 22(3): 278~286.
- Yang Jianmin, Zhang Yujun, Yao Fojun, Wu Hua, Deng Gang, Fu Xujie. 2006#. Thinking of extracting multi spectral alteration remote sensing anomaly in desert gobi shallow covered area; See new opportunities and new challenges of mineral deposit research facing national major needs. In: Proceedings of the 8th National Conference on Mineral Deposits, 2006; 784~786.
- Yang Bin, Li Maojiao, Wang Shiju, Gao Guisheng, He Zhaopei, Wang Zheng. 2015&. Anomaly information extraction of mineralization alteration in Taxkorgan with ASTER. *Remote Sensing Information*, 30(4): 109~114.
- Yang Jiajia, Jiang Qigang, Zhao Jing, Chen Fengzhen. 2008&. Remoted sensing mineralization infomation extracted based on ETM⁺ and ASTER data; A case study in Tarigenaobao, Inner Mongolia. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38(S1):153~158.
- Yu Yanmei, 2010&. A Study and Application on the Information Extraction of Rock and Mineral on the Moon and Mars Based on Remote Sensing. Instructor: Zhou Pin, Gan Fupin. Beijing: China University of Geosciences master's thesis; 1~75.
- Zhang Yujun, Yang Jianbin. 1998&. The method of abstracting remote sensing information of altered rocks in the uncovered bedrocks area. *Remote Sensing for Land and Resources*, (2): 48~55.
- Zhang Yujun, Zeng Zhaoming, Chen Wei. 2003&. The methods for extraction of alteration anomalies from the ETM⁺(TM) data and their application; Method selection and technological flow chart. *Remote Sensing for Land and Resources*, (2): 44~49,78.
- Zhang Zhiqiang, Wang Ping, He Junjiang, Xu Huan, Shi Genhong. 2013#. Metallogenic conditions and prospecting direction of gadang iron polymetallic deposit in longwaga. *Theoretical Research in Urban Construction*, (3): 1~9.
- Zhao Ziji, Chen Shuwang, Guo Jiahui. 1997&. Structural geology and gold mineralization of saishiteng mountain area. *Journal of Precious Metallic Geology*, 6(3): 39~43.
- Zhang Linshan. 2019&. Research on Quantitative Extraction of Tangka Mineral Pigments Information Based on Hyperspectral Technology. Instructor: Shao Huaiyong, Dai Xiaoi, Cen Yi. Chengdu; Master's thesis of Chengdu University of Technology; 1~87.

Research on alteration information extraction in Saishiteng area of Qinghai based on Aster and Landsat8 data

WANG Xi, CHENG Sanyou, LIN Haixing, CHEN Jing, XIAO Liang
Chang'an University, School of Earth Sciences and Resources, Xi'an, 710054

Objective: The Saishiteng area in Qinghai province is located in a depopulated zone with poor environment, which can be difficult to carry out geological prospecting through traditional methods. However, multi-spectral remote sensing data provide the great potential for extracting mineralization alteration information in such areas owing to abundant spectrum and continuous space information. This paper extracts remote sensing alteration anomaly information of Saishiteng mining area using Aster and Landsat8.

Methods: Some minerals in the study area were identified from Aster data using imaging spectroscopy techniques such as minimum noise transform (MNF), pixel purity index (PPI), *n*-dimensional endmember recognition visualization (*n*-dimensional visualization) and spectral angle matching (SAM). For mineralization alteration information, principal component analysis (PCA) was used. Specifically, the band 1, 2, 3 and 4 of Aster data are used to extract the ferric contamination anomaly alteration, band3, 4, 6 and 7 were selected to extract the anomaly information of Al—OH altered minerals, and band 1, 3, 4 and 8 were used to extract the anomaly information of Mg—OH altered minerals. Meanwhile, the band 2, 4, 5 and 6 of Landsat8 were selected to extract ferric contamination anomaly, and band 2, 5, 6 and 7 were used to extract hydroxyl alteration.

Results: The distribution map of mineral information in the study area was obtained through imaging spectroscopy techniques using Aster data. Through principal component analysis of Aster and Landsat8 data, the ferric contamination anomaly alteration minerals such as pyrite and hydroxyl alteration minerals such as sericite were extracted respectively, and then the distribution map of mineralization alteration information in the study area was obtained.

Conclusion: Through the spatial superposition analysis of the alteration information extracted from Aster and Landsat8 data, it can not only quantitatively analyze the extraction effects, but also improve the extraction accuracy, and the ferric contamination anomaly alteration and hydroxyl alteration were demonstrated through measured spectrum profiles and microscopic characteristics of the samples, in addition, the alteration information was verified by the mineralization points of field investigation. Therefore, it can be feasible to extract alteration information based on the two remote sensing data, which has the important guiding significance for delineating prospecting targets.

Keywords: Qinghai Saishiteng area; Aster; Landsat8; superposition analysis; mineralization alteration information

Acknowledgement: This paper is the achievements of the geological survey project of China Geological Survey (No. DD20190069), the National Natural Science Foundation of China (No. 41872017) and the special fund for basic scientific research business expenses of Central Universities (No. 300102279105)

First author: WANG Xi, female, born in 1998, master degree, mainly engaged in the research of remote sensing geological applications; Email: wangxi9825@126.com

Corresponding author: CHENG Sanyou, female, born in 1977, doctor, associate professor, mainly engaged in the research of remote sensing geology; Email: chengsanyou@126.com

Manuscript received on: 2021-07-16; Accepted on: 2021-11-24; Network published on: 2021-12-20
Doi: 10.16509/j.georeview.2021.12.055 **Edited by:** ZHANG Yuxu