

doi: 10. 6046/gtzyyg. 2020. 01. 19

引用格式: 韩海辉,王艺霖,姚安强,等. 协同处理方式在遥感蚀变异常成因分析中的应用——以北山方山口地区为例[J]. 国土资源遥感,2020,32(1):138 – 147. (Han H H, Wang Y L, Yao A Q, et al. Application of collaborative processing method to the analysis of remote sensing alteration abnormal causes: A case study of Fangshankou area in Beishan[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(1): 138 – 147.)

协同处理方式在遥感蚀变异常成因分析中的应用

——以北山方山口地区为例

韩海辉, 任广利, 王艺霖, 杨 敏, 姚安强, 张 转

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

摘要: 遥感蚀变异常是重要的示矿指标。但以往研究对遥感蚀变异常的地质成因及其示矿意义探讨不足, 导致对遥感蚀变异常的分析往往具有多解性, 影响了遥感蚀变异常在地质找矿中的先导作用。为此建立了能定量解释遥感蚀变异常地质成因和示矿意义的多源数据、多方法协同处理方式。该方式基于不同光谱分辨率和空间分辨率的多源遥感数据, 采用光谱分析与岩矿测试相融合的方法分析不同尺度(不同矿物类型、不同成矿类型、不同地质剖面、不同空间区域) 遥感蚀变异常的特征, 即利用多光谱遥感宏观分析遥感蚀变异常区域分布特征; 利用高光谱遥感分解典型地质体的遥感蚀变异常信息发育模式; 利用 X 射线衍射分析、岩矿鉴定和光谱解算准确鉴别蚀变矿物类型并解释其地质成因与示矿意义。通过对北山方山口地区的测试, 发现遥感蚀变异常的类型与地表发育的蚀变矿物类型基本一致, 且不同成矿类型矿床的围岩蚀变可以被特定的遥感蚀变矿物信息组合有效反映, 据此规律进行遥感蚀变异常查证, 新发现多处矿化线索, 较好地实现了遥感信息向地质信息的转化应用。研究表明, 本研究中提出的多源数据、多方法协同处理的方式可有效克服单一数据源或单一方法分析结果的不完备性, 提高遥感蚀变异常在地质应用中的可信度。

关键词: 协同处理; 光谱分析; X 射线衍射, 岩矿鉴定; 遥感蚀变异常

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001 – 070X(2020)01 – 0138 – 10

0 引言

近矿蚀变作用形成的蚀变矿物能为地质找矿提供重要依据。因此, 如何有效应用遥感数据提取的蚀变异常信息发现矿化蚀变线索已成为一个研究热点^[1-3]。但近年大量研究多集中于遥感蚀变异常的信息提取方法^[1, 4-5], 而对其地质特征(地质成因和示矿意义等) 分析不足, 导致对遥感蚀变异常的分析与解释往往具有多解性^[6-8], 影响了遥感蚀变异常在地质找矿中的先导作用。

北山成矿带是我国西北地区重要的矿产资源勘查地之一, 但多年的大规模资源开采, 金、钨、铜等多种矿种亟待解决如何在老矿山深部及外围寻找新的矿(化) 体的问题。由于该区域遥感图像能够较为准确地反映出蚀变矿物的分布情况, 因此如何定量

解释所获取的遥感蚀变异常的成因和示矿意义, 对直接或间接判断可能存在的矿化或矿床信息有重要理论意义和实用价值。

针对此问题, 本文以北山方山口地区为研究区, 在应用和综合研究已有遥感蚀变异常提取方法的基础上, 从宏观分析(基于多光谱 ASTER 数据) 遥感蚀变异常的区域分布特征、典型分析(基于高光谱 CASI – SASI 数据) 遥感蚀变异常的发育模式、微观分析(包括 X 射线衍射分析、岩矿鉴定、光谱解算和实地验证) 鉴别蚀变矿物类型等 3 个层面, 建立多源数据、多方法协同处理方式, 旨在定量解释遥感蚀变异常地质成因和示矿意义, 为促进遥感信息向地质信息的转化提供理论依据。

1 研究区地质概况

研究区位于甘肃省北山方山口地区, 自 20 世纪

收稿日期: 2019 – 01 – 18; 修订日期: 2019 – 04 – 24
基金项目: 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”(编号: 41802096) 与中国地质调查局项目“天山 – 北山成矿带那拉提 – 营毛沱地区地质矿产调查”(编号: DD20160009) 和“黄河源地区生态地质调查”(编号: DD20190539) 共同资助。
第一作者: 韩海辉(1983 –), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为资源与环境遥感。Email: hanhh06@ hotmail. com。

80 年代以来相继发现了方山口、明金沟、新老金厂、明水河和白峡尼山等多个金、铜、钨、铀等矿种的矿床(点),呈现出矿床(点)数量多、分布集中、成矿类型多样、矿化蚀变特征明显等地质特征,是北山成矿带上研究金、铜、钨成矿地质问题的代表性区域;同时该区域植被覆盖稀疏,基岩出露较好,地表碎石残留原地,也是开展遥感地质研究的理想场所。

区内主要分布热液型矿床,尤以金矿化为主。与成矿关系密切的地层、岩体、构造的特征如下^[9-10]:新太古-古元古界敦煌杂岩群以中深变质碎屑岩夹大理岩为主,靠上部夹多层变质中基性火山岩,且该地层中构造变形强烈,是区内金、铜、钨矿产的重要赋矿地层;岩体以侵入岩为主,岩性以中酸性岩居多,基性岩较少,多期次岩浆活动导致了围岩的矿化蚀变,为成矿元素的富集提供了热源条件,具有良好的金、钨、铀等成矿潜力;区域主构造线走向为近 EW 向,多以平行排列的断裂带或断裂组形式产出,规模较大,但沿走向局部可向 NNW 或 NNE 向偏离,形成了一些弧形构造线,这些区域断裂构造从宏观上控制了研究区内地层的展布及岩浆岩和矿产的空间分布,已知各类金属矿床(点)、矿(化)点多集中在断裂交汇部位和弧形断裂顶端。

野外调查发现研究区岩石蚀变强烈,多沿岩体接触带和硅化断裂带发育,主要有:与花岗岩有关的围岩蚀变,包括钾化、高岭土化、绢云母化和黄铁矿化;与超基性有关的围岩蚀变,包括蛇纹石化、滑石化、碳酸盐岩化和菱镁矿化;与矽卡岩型有关的围岩蚀变,包括角岩化、矽卡岩化和硫化物化(磁黄铁矿、黄铁矿等);与石英脉有关的围岩蚀变,包括硅化、黄铁矿化、高岭土化和绢云母化;以及与破碎带有关的围岩蚀变,包括粘土化和黄铁矿化。

2 遥感蚀变异常提取

2.1 遥感数据选择及预处理

ASTER 数据具有 3 个可见光和近红外波段(VNIR, 0.52 ~ 0.86 μm)、6 个短波红外波段(SWIR, 1.6 ~ 2.43 μm)和 5 个热红外波段(TIR, 8.125 ~ 11.65 μm),较宽的光谱覆盖范围可供提取多种遥感蚀变矿物信息^[11]。本文使用的 ASTER 数据获取时间为 2000 年 10 月 16 日,数据级别为 L1B,已经过辐射校正和几何纠正,无云及阴影遮盖,影像质量较好。本研究中对该图像数据进行了串扰校正^[12]、大气校正和重采样处理(空间分辨率重采样至 30 m),并选择对河流、植被及第四系等干

扰地物敏感的波段进行掩模处理,以降低干扰地物对遥感蚀变矿物提取精度的影响。

CASI 和 SASI 数据共有 388 个波段,波段 1 ~ 288(0.380 ~ 1.050 μm)为可见光-近红外波段(VNIR),属于 CASI 数据范围,光谱分辨率为 2.4 nm,空间分辨率为 0.6 m;波段 289 ~ 388(0.950 ~ 2.450 μm)为短波红外波段(SWIR),属于 SASI 数据范围,光谱分辨率为 15 nm,空间分辨率为 1.8 m^[13]。本文使用的高光谱数据来源于核工业北京地质研究院,是通过将 CASI/SASI 成像仪搭载在固定翼飞机上,经飞行拍摄获取的。飞行时间为 2011 年 7 月 6—15 日,分不同航带多天采集完成。采集日天气晴朗、能见度不小于 30 km、风力小于 4 级、无浓积云。数据获取时段约为 10:00—15:00(以确保足够的太阳高度角),同时在地面对应区域利用手持全球定位系统(global positioning system, GPS)同步进行控制点采集工作。对获取的 CASI/SASI 数据进行了预处理与光谱重建,包括辐射定标、大气校正、正射校正、CASI/SASI 波段合并和干扰去除。其中辐射定标和正射校正利用系统自带的软件和飞行测量时获取的控制点数据进行。另外,采取敏感波段比值计算的方式突出水体、植被和白泥地信息,然后进行高端阈值切割和图像掩模处理,以去除上述干扰地物,同时对图像中的空值无效像元予以删除。

2.2 遥感蚀变异常提取结果

本研究分别利用比值-分维变点模型法^[14-15]和 MTMF SFF-SID SAM_{tan}(MSSS_i)法提取了研究区内的 ASTER 多光谱蚀变异常信息与 CASI/SASI 高光谱蚀变异常信息。其中, MSSS_i组合方法是将波谱特征拟合(spectral feature fitting, SFF)和混合调制匹配滤波(mixture tuned matched filtering, MTMF)加入光谱信息散度(spectral information divergence, SID)-光谱角制图(spectral angle mapping, SAM_{tan})算法中。该方法在计算时既考虑了光谱整体的形状和信息熵特征,又通过包络线处理有效突出了光谱曲线的局部吸收和反射特征,同时使用背景的协方差对光谱变化进行线性组合建模,从而最大化地放大与目标波谱匹配的像元信号。假设存在 2 组光谱信号 X 和 Y , 其可分别表示为 n 维向量 $(X_1, \dots, X_i, \dots, X_n)^T$ 和 $(Y_1, \dots, Y_i, \dots, Y_n)^T$, 则 MSSS_i 模型计算 X 和 Y 相似性可定义为

$$MSSS_i = \frac{MTMF(X,Y) \times SFF(X,Y)}{SID(X,Y) \times \tan[SAM(X,Y)]} \quad (1)$$

研究区多光谱和高光谱蚀变异常信息分布情况如图 1 所示。

蚀变表现为强烈的褐铁矿化和硅化,外围岩体伴有钾化和绿泥石化。

ASTER 数据蚀变矿物信息提取结果(图 3(a))显示该区域有褐铁矿化、铝羟基、镁羟基和少量硅化。CASI/SASI 数据蚀变矿物信息提取结果显示矿区有高铝绢云母、中铝绢云母、绿帘石、绿泥石、褐铁矿和少量黄钾铁矾与方解石,异常主要呈条带状分布(图 3(b))。区内广泛分布的绿泥石化和方解石主要沿 3 个井组变砂岩(岩性主要为变砂岩、砾岩、砂砾岩等)和辉长岩产出。线状或脉状展布的绢云

母化和绿帘石化异常与产出的花岗岩脉的分布位置相吻合,主要是后期花岗岩脉侵入至石英闪长岩中发生蚀变所致。矿区东侧见有一石英脉,受断层控制呈近 NS 走向,其周围分布有褐铁矿、绿泥石、绿帘石、方解石、黄钾铁矾等蚀变矿物,表现出强而丰富的蚀变矿物信息组合。经查证该异常带是区内主要的赋矿区段,且蚀变矿物信息组合有较好的分带性,自矿化体向外依次表现出硅化-褐铁矿化(黄铁矿化)-绿帘石化-绿泥石化-绢云母化等蚀变序列。

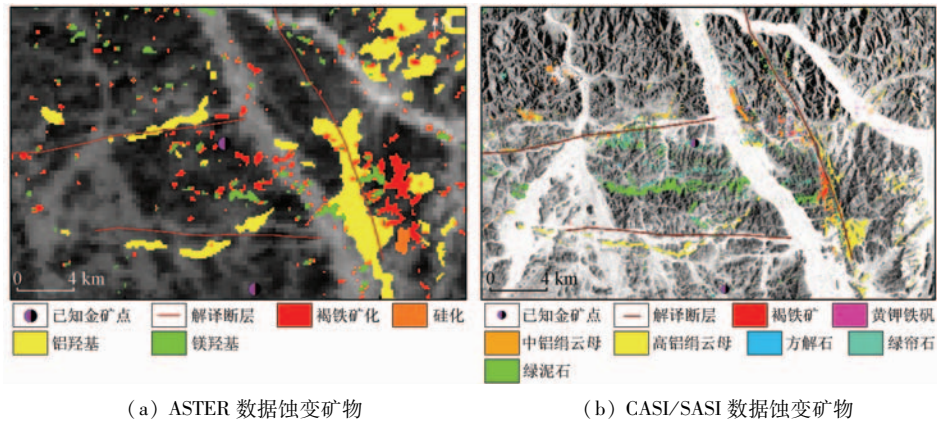


图 3 明水河金矿区 ASTER 和 CASI/SASI 数据蚀变矿物异常信息分布

Fig.3 Altered mineral information extracted from ASTER and CASI/SASI images in Mingshuihe gold deposit

WBS010-3 样品为矿区含金的蚀变闪长围岩(图 4(a)), WBS010-1 与 WBS010-4 样品为矿区

外围的蚀变闪长岩体(图 4(b)),从三者光谱曲线(图 5)可以看出, WBS010-3 主要有 0.6~0.8 μm

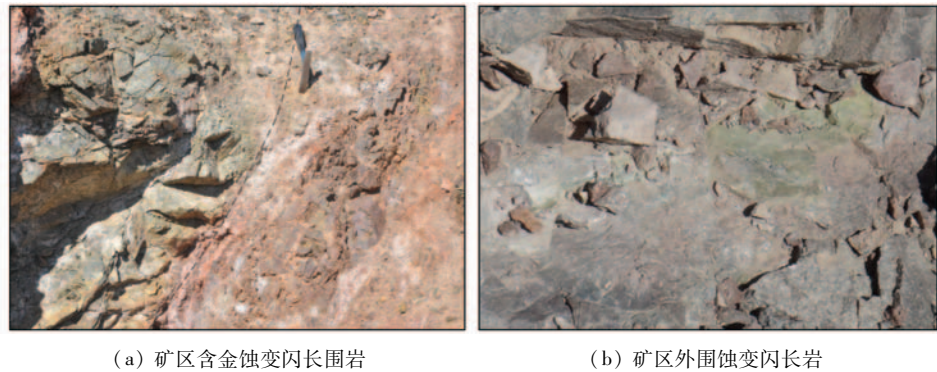


图 4 明水河金矿区蚀变闪长围岩与外围绿帘石化闪长岩

Fig.4 Different altered rocks in Mingshuihe gold deposit

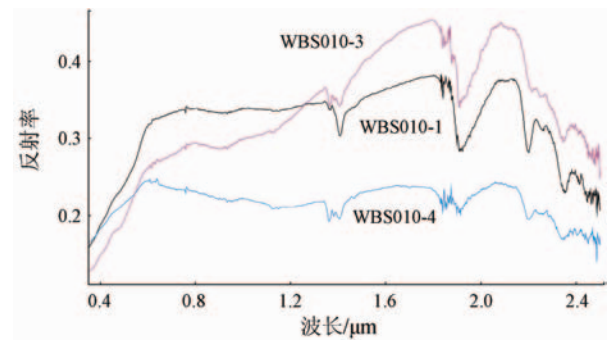


图 5 明水河金矿区蚀变闪长围岩光谱曲线

Fig.5 Spectral curves of different altered rocks in Mingshuihe gold deposit

和 0.8~1 μm 的铁离子吸收峰,反映出褐铁矿化蚀变; 2.212 μm 附近有 Al-OH 吸收峰; 2.250 μm 处的 Fe-OH 吸收峰和 2.345 μm 处的 Mg-OH 吸收峰主要由绿泥石引起;经 Specmin 软件计算得出其蚀变矿物主要有绿泥石、蒙脱石、黄钾铁矾和白云母等。而外围 WBS010-1 和 WBS010-4,二者吸收峰相近,反射率低,铁离子吸收峰不明显,Al-OH 吸收峰较深,经 Specmin 软件计算得出其蚀变矿物有绿泥石、蒙脱石、绿帘石和白云母等矿物。综合来看,含金的蚀变岩体与非矿化蚀变岩体在光谱吸收特征上有较大区别,表现为矿化蚀变样品光谱曲线

上铁离子的吸收峰相对要强。选择 4 个样品进行 X 射线衍射分析。矿体褐铁矿化蚀变样品 (BS010 - 5) 的分析结果显示其矿物成分以石英、斜长石和钾长石为主,后期蚀变矿物为伊利石、绿泥石、方解石和蒙脱石等,少量赤铁矿可能为黄铁矿氧化以及碳酸盐岩化所致;而外围褐铁矿化蚀变花岗岩 (BSY - 113) 的矿物成分主要以石英和斜长石为主,少量钾长

石,后期蚀变矿物仅为伊利石(表 1)。从表 1 可以看出,矿化蚀变破碎带明显富集方解石、绿泥石、伊利石、赤铁矿等矿物,且蚀变矿物的含量要比未矿化地段的含量高。另外,在明水河金矿西侧的金滩子金矿(蚀变岩型)也发现矿体附近的蚀变破碎带样品 (BSY - 227)比矿区外围的蚀变破碎带样品 (BSY - 221)富集方解石、绿泥石、伊利石和蒙脱石等。

表 1 明水河金矿与金滩子金矿区样品的 X 射线衍射分析矿物成分^①

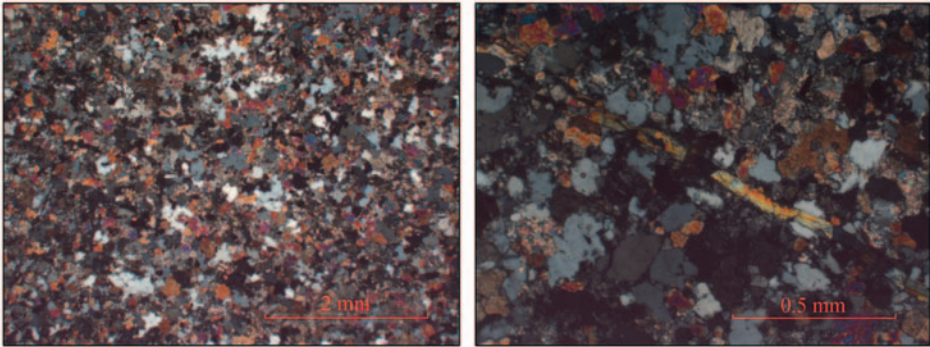
Tab.1 X-ray diffraction mineral composition of samples in Mingshuihe and Jintanzi gold deposit

样品	地点	石英	斜长石	钾长石	方解石	赤铁矿	石膏	蒙脱石	伊利石	绿泥石
BS010 - 5	明水河	38.5	19.5	15.5	2.8	1.3	0	2.0	15.0	5.0
BSY - 113	明水河	74.2	11.2	1.0	0	0	0.6	0	13.0	0
BSY - 227	金滩子	30.7	3.3	0.4	28.8	1.4	2.4	6.0	22.0	5.0
BSY - 221	金滩子	43.3	5.0	0.3	4.2	0	35.2	0	11.0	1.0

①: 表内数据由西安地质调查中心实验测试中心提供。

样品 BS009 采于明水河金矿西侧,岩性为中细粒蚀变石英闪长岩,该采样点发育较强的中 - 高铝绢云母化、绿帘石化和褐铁矿化遥感蚀变异常。岩矿鉴定结果显示该样品经历了气液变质作用,发生绢云母化、绿帘石化和硅化等作用。岩石现主要由石英、绿帘石、绢云母、绿泥石及少量磷灰石组成

(图 6(a))。绿帘石为原岩中斜长石或暗色矿物的蚀变产物,另外还可见细小的绿帘石脉(图 6(b))。绿泥石由原岩中黑云母退变质而成。绢云母呈细小鳞片状,由原岩中斜长石蚀变而来。鉴定结果显示其蚀变类型包括硅化、绿帘石化、绢云母化,这与该点处发育的蚀变矿物类型相一致。



(a) 石英、绿帘石、绢云母等

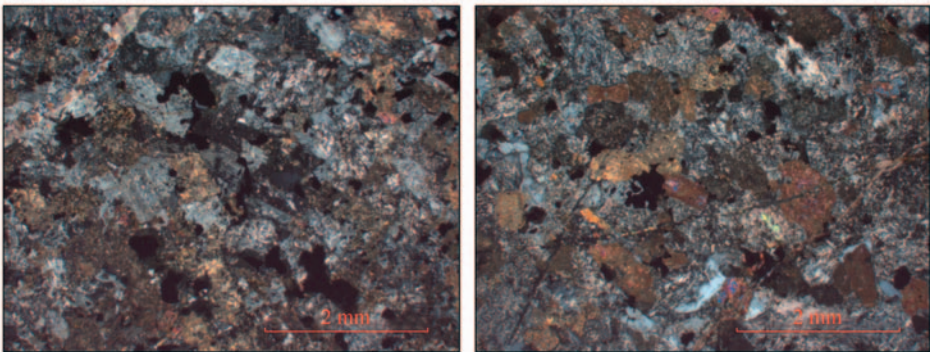
(b) 绿帘石脉

图 6 样品 BS009 镜下岩矿鉴定照片

Fig.6 Lithologic identification photos of sample BS009

样品 BS008 亦采于明水河金矿西侧,岩性为细粒蚀变闪长岩,该采样点发育较强的绢云母化、绿帘石化和绿帘石化。岩矿鉴定结果显示,该岩石中斜

长石次生蚀变明显,多被绢云母交代,保留其斑状晶形假象(图 7(a))。角闪石多呈短柱状(图 7(b)),蚀变明显,被黝帘石和绿帘石交代。岩石中还有少



(a) 斜长石

(b) 角闪石

图 7 样品 BS008 镜下岩矿鉴定照片

Fig.7 Lithologic identification photos of sample BS008

量黑云母,现已变质成绿泥石。鉴定结果认为该样品中斜长石发生绢云母化,角闪石发生绿帘石化,这与该点处提取的蚀变矿物类型一致。

3.1.2 白峡尼山钨矿区典型矿床

白峡尼山钨矿是一个火山沉积-岩浆热液型钨矿床^[14]。矿体南部见石英闪长岩侵入,呈侵入接触关系,北部见花岗斑岩、正长花岗岩侵入呈断层接触关系,NW 向断层穿过矿区,沿断层有后期二长花岗岩脉侵入(图 8)。前人研究表明,矿区墩墩山群和华力西中期二长花岗岩是白峡尼山钨矿床形成的物源基础,而 NW 向断裂构造和墩墩山群火山岩建造控制了矿化带及矿体的分布^[16]。

ASTER 蚀变矿物信息提取结果(图 9(a))显示白峡尼山钨矿区主要有硅化、镁羟基、铝羟基、褐铁矿化;CASI/SASI 蚀变矿物信息提取结果(图 9(b))显示该矿区主要分布有褐铁矿、绿帘石和绢云母化,少量绿泥石与白云石,各类异常与地表构造线方向一致,NW 向断裂附近褐铁矿化和中铝绢云母化明显增强。在实地调查中发现,在断层破碎蚀变带、矿化带及其附近蚀变矿物尤为发育,矿化蚀变主要有白钨矿化和黄铁矿

化,地表见孔雀石化和褐铁矿化;钨矿体多位于绿泥石化英安岩、石英脉与云英岩化或碳酸盐岩化地层的接触部位(图 10(a)),主要的蚀变矿物信息组合为硅化+绿泥石化+绿帘石化+碳酸盐岩化,硅化以细脉状为主,绿泥石化和绿帘石化多呈粒状或脉状,局部团块状或叶片状,且蚀变越强的地段矿化越好。

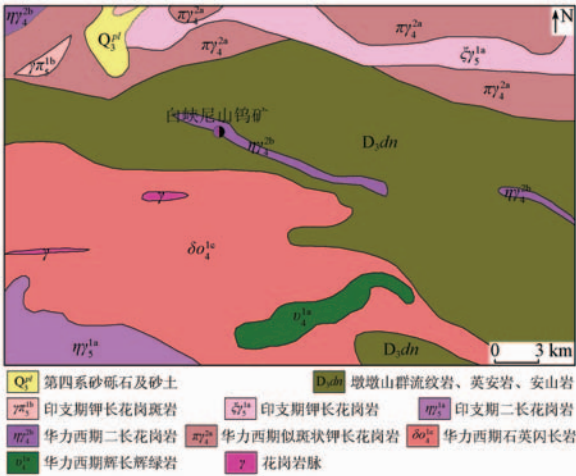
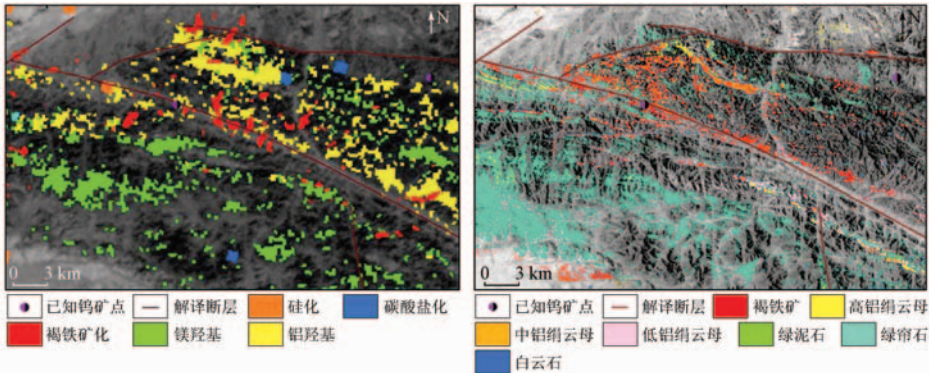


图 8 白峡尼山钨矿区地质简图

Fig. 8 Geological map of Baixianishan tungsten deposit

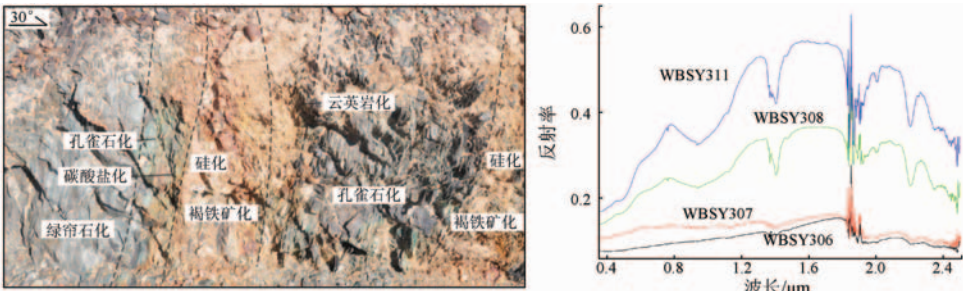


(a) ASTER 数据蚀变矿物

(b) CASI/SASI 数据蚀变矿物

图 9 白峡尼山钨矿 ASTER 与 CASI/SASI 数据蚀变矿物信息异常分布

Fig. 9 Altered mineral information extracted from ASTER and CASI/SASI images in Baixianishan tungsten deposit



(a) 钨矿蚀变矿物照片

(b) 钨矿光谱曲线

图 10 白峡尼山钨矿蚀变矿物照片及其光谱曲线

Fig. 10 Altered minerals' photo and spectra of Baixianishan tungsten deposit

光谱测量显示矿区内的英安岩具有 2 种不同的光谱特征(图 10(b)),一类为风化蚀变弱的样

品,其光谱曲线表现为低的光谱反射率,仅具有 2.210 μm 处的 Al-OH 吸收峰(绢云母化特征),

弱的 2.340 μm 处 $\text{Mg}-\text{OH}$ 吸收峰(绿泥石化特征);另一类为蚀变发育强的样品,其光谱曲线具有 4 处吸收峰,除了具有 2.210 μm 处的 $\text{Al}-\text{OH}$ 吸收峰和 2.340 μm 处的 $\text{Mg}-\text{OH}$ 吸收峰,另外还有 0.6~0.8 μm 和 0.8~1 μm 的铁离子吸收峰,表现出较强的褐铁矿化特征。该矿区位于断裂发育处,糜棱岩化和黄铁绢英岩化蚀变发育,因此褐铁矿化和绢云母化蚀变异常类型与区内地质蚀变类型一致。

矿区蚀变英安岩样品(BZ-071)镜下鉴定显示

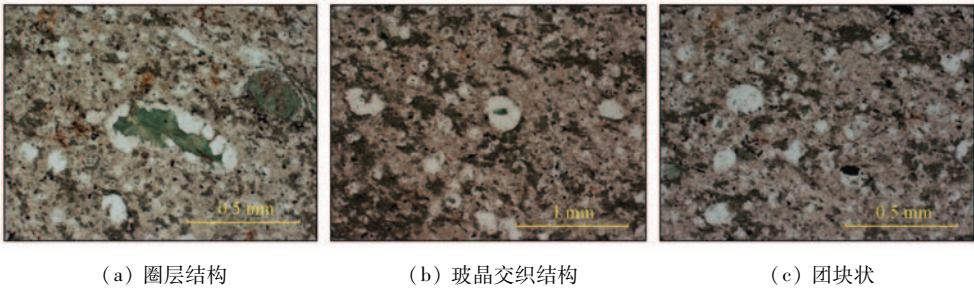


图 11 杏仁状英安岩(BZ-071)镜下鉴定照片

Fig. 11 Lithologic identification photos of almond-shaped Yingyan (sample BZ-071)

X 射线衍射分析结果显示矿区褐铁矿化石英脉(BSY-189 样品)主要组成矿物为石英、斜长石、钾长石,少量的方解石、伊利石等,而糜棱岩化破碎带(BSY-190 样品)主要组成矿物为石英、斜长石、伊

岩石为杏仁状构造,主要组成矿物为长英质、玻璃质等。原岩发育气孔构造,其中部分气孔被石英充填,部分气孔被方解石充填,部分气孔被石英与绿泥石充填,形成圈层结构,即内圈为绿泥石,外圈为石英(图 11(a))。另外岩石中细小的斜长石镶嵌在玻璃质中,其中玻璃质多蚀变成绿泥石(图 11(b))。岩石蚀变以绿泥石化为主,还发生轻微的碳酸盐岩化,碳酸盐以团块状(图 11(c))及条带状分布。这与该区英安岩中发育的绿帘石和绿泥石遥感蚀变异常类型基本一致。

利石,少量方解石、石膏、蒙脱石(表 2)。测试结果反映出 2 个样品在后期均发生了一定的碳酸盐岩化,与样品采集区主要发育碳酸盐岩化(白云石)的遥感蚀变异常类型一致。

表 2 白峡尼山钨矿区样品的 X 衍射矿物成分^①

Tab.2 X-ray diffraction mineral composition of samples in Baixianishan tungsten deposit

样品	地点	石英	斜长石	钾长石	方解石	石膏	蒙脱石	伊利石	高岭石
BSY-189	白峡尼山	56.2	19.7	15.0	5.7	0	0	2.0	1.0
BSY-190	白峡尼山	57.9	15.2	0	1.9	5.0	3.0	17.0	0

①: 表中数据由西安地质调查中心实验测试中心提供。

3.2 不同类型矿床蚀变矿物组合分析

通过分析典型破碎蚀变岩型金矿床以及火山沉积-岩浆热液型钨矿床上蚀变矿物的分布特征、地质成因以及与成控矿要素的关系,本文发现基于遥感图像提取的蚀变矿物类型、地面岩矿光谱测量反映的蚀变矿物类型以及岩相鉴定获取的蚀变矿物类型三者基本一致,且不同成矿类型矿床的围岩蚀变往往可以被某类蚀变矿物信息组合有效反映。

明水河金矿为破碎蚀变岩型金矿,矿体主要赋存在闪长岩体边部的破碎蚀变带中,特别是断裂蚀变破碎带中的硅化石英脉、黄铁矿化以及糜棱岩化的地段,自矿化体向外可依次表现出硅化、褐铁矿化(黄铁矿化)、绿帘石化-绿泥石化、绢云母化等蚀变信息,因此其有利的蚀变矿物信息组合也为硅化+褐铁矿+绿帘石化-绿泥石化+绢云母化。前人对本区金矿床的包裹体测温研究显示,该区金矿化石英脉形成于高温阶段,硫化物形

成于中-高温阶段,显示其成矿为中-高温环境^[17]。成因矿物学认为这种环境十分有利于铝以类质同象替代其他阳离子进入矿物中,从而形成绢云母化,这有力地诠释了研究区金矿区周围能够形成带状中铝绢云母和高铝绢云母蚀变矿物的原因。

火山沉积-岩浆热液型钨矿化具有多期性,其中火山-沉积期的成矿作用主要与晚泥盆世的中-基性火山岩的形成相关,而构造岩浆热液成矿作用与华力西期的中酸性侵入岩有关^[14]。野外观察发现,白峡尼山钨矿床受地层、构造和侵入岩等 3 大因素的控制,矿化带总体呈 NWW 向带状展布,长数 km,宽几百 m,走向与墩墩山群地层方向一致,大部分矿体赋存于断层破碎蚀变带中,含矿岩性为英安岩和石英安山岩,部分大理岩和二长花岗岩中也见有钨矿化。断层破碎带和矿化带上的遥感蚀变异常信息十分发育,主要组合为硅化+绿泥石化+绿帘石化+碳酸盐岩化,遥感蚀变异常的发育明显受到

NW 向断裂构造的控制,其中硅化以线型的细脉状为主,局部聚集为块状;而绿泥石化和绿帘石化呈脉状、斑块状和叶片状,矿体化上的遥感蚀变异常无明显的分带规律。

4 蚀变矿物信息组合查证

依据不同成矿类型矿床的蚀变矿物信息组合规律,本研究筛选出蚀变矿物信息标志性组合发育好,并伴有物化探异常,同时成矿地质条件与已知矿床具有一致性或相似性的区段开展野外查证研究。通过野外查证与测试分析,新发现多处金、银、铅、锌等矿种的矿化线索,现对其中一处金成矿元素异常值的查证区开展分析。

该查证区内华力西晚期黑云母花岗岩侵入至华力西中期二长花岗岩边部(图 12),在遥感图像中可见该区发育 NW 向和 NE 向线性构造; ASTER 蚀变

矿物信息提取结果显示该区域主要有褐铁矿化、铝羟基和镁羟基蚀变异常(图 13); CASI/SASI 蚀变矿物信息提取结果显示该处发育 2 种蚀变矿物异常组合,其中主要为沿区内花岗岩体及岩脉产出的褐铁矿 + 中铝绢云母 + 高铝绢云母异常组合,多呈面状或线状;其次为绿泥石 + 绿帘石组合,多呈 NW 向斑块状分布(图 13)。

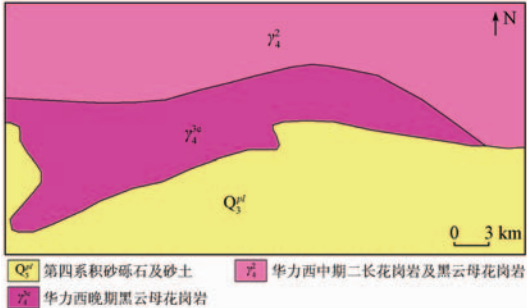


图 12 II 号查证区地质简图

Fig. 12 Geological map of verification area II

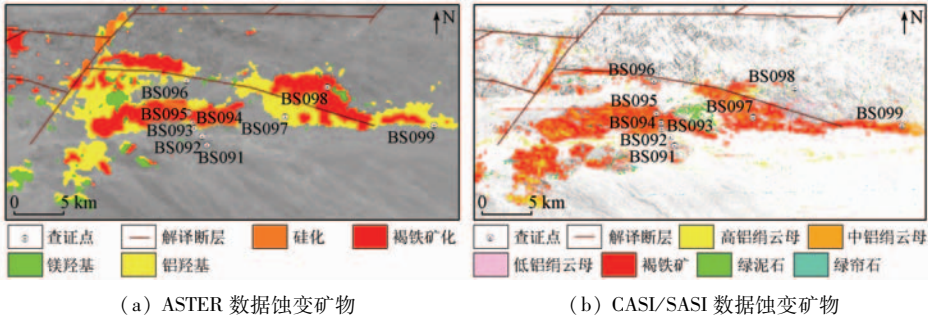


图 13 II 号查证区 ASTER 与 CASI/SASI 数据蚀变矿物信息异常分布

Fig. 13 Altered mineral information extracted from ASTER and CASI/SASI images in Number two verification area

蚀变矿物信息查证点验证结果表明,该区主要以肉红色中—粗粒花岗岩为主(查证点 BS091 和 BS092),其中见有灰白色细粒闪长岩,闪长岩发育绿帘石和绿泥石化蚀变;向北发育另一期浅褐红色花岗岩,褪色蚀变发育,高岭土化、绢云母化强(查证点 BS093),再向北为钾化、硅化蚀变发育的花岗岩(查证点 BS094 和 BS095),其中发育褐铁矿化石英脉;在 BS095 北侧见有少量辉绿辉长岩脉,其上发育绿泥石化;最北部位岩性为褐红色花岗岩,矿物具定向性,与岩脉接触部位绿帘石化发育(见查证点 BS096),以上岩石分布情况表明该区具有多期次的岩浆活动。

BS094 查证点岩性为花岗岩,发育的蚀变矿物信息为硅化、绢云母化和褐铁矿化,向东见绿泥石和绿帘石化,野外查证发现该处花岗岩发育钾化、绢英岩化和绿帘石化,其中可见多条宽度不等的黄钾铁矾破碎蚀变带和褐铁矿化石英脉。对采集的褐铁矿化石英脉样品(BSY-114)进行成矿元素分析,结果显示 Au 品位达 1.75 g/t; 根据这一分析结果,本研

究后续又对该矿化石英脉进行系统的揭露控制,结果显示该石英脉露头长约 80 m,宽约 30 ~ 50 cm,其中褐铁矿化和黄钾铁矾化发育,两侧花岗岩围岩发育绿泥石化、绿帘石化、绢云母化和钾化蚀变,按照约 15 ~ 20 m 的间距连续取样(FSK-01 至 FSK-06 共 6 个样品)测试,大部分 Au 品位达 1.88 ~ 4.70 g/t(表 3)。该区段蚀变花岗岩分布面积较广,且区内见有多条褐铁矿化石英脉,分析认为本区域具有较好的金成矿潜力。

表 3 II 号查证区样品测试分析结果^①
Tab. 3 Test results of samples in
Number two verification area

送样号	岩性	Au/(g·t ⁻¹)
BSY-114	褐铁矿化石英脉	1.75
FSK-01	碎裂花岗岩	0.062
FSK-02	褐铁矿化石英脉	2.26
FSK-03	褐铁矿化石英脉	1.88
FSK-04	褐铁矿化石英脉	3.52
FSK-05	褐铁矿化石英脉	4.70
FSK-06	褐铁矿化石英脉	<0.05

①：表中数据由西安地质调查中心实验测试中心提供。

5 结论

1) 通过对光谱分析、实验测试(岩矿鉴定、X 射线衍射分析等)和野外调查结果的对比,发现从遥感图像提取的蚀变矿物类型、岩矿光谱测量反映的蚀变矿物类型以及岩石岩相鉴定获取的蚀变矿物类型三者具有很好的吻合性,且矿区蚀变围岩样品比矿区外围同类型蚀变样品要更富集蚀变矿物。

2) 通过实验测试发现,不同成矿类型矿床的围岩蚀变可以被某类蚀变矿物信息组合有效反映,且矿区蚀变围岩更富集方解石和绿泥石等蚀变矿物;其中破碎蚀变岩型金矿床的有利蚀变矿物组合为硅化+褐铁矿化+绿帘石化-绿泥石化+绢云母,火山沉积-岩浆热液型钨矿床的有利蚀变矿物组合为硅化+绿泥石化+绿帘石化+碳酸盐岩化。

3) 根据遥感蚀变矿物示矿标志进行找矿预测分析,新发现多处较好的矿化线索,表明本文提出的多源数据、多方法的协同处理方式可提高遥感蚀变异常在地质应用中的可信度、精确度和适用性,并且该方式能克服单一方法或单一数据源易产生不完全性和不确定性结果的不足,可为今后利用遥感蚀变异常指导地质找矿提供理论依据和技术参考。

4) 尽管本文提出的协同处理方式为定量解译遥感蚀变异常的成因和示矿意义提供了帮助,但其有效性取决于实验测试方法、遥感数据源、样品采集、蚀变矿物矿化指示标志等多个指标。下一步将在前期基础上结合更多的典型矿床实例,量化各个指标的贡献率,进一步提高方法的可靠性。

参考文献(References):

- [1] Van Der Meer F D, Van Der Werff H M A, Van Ruitenbeek F J A, et al. Multi- and hyperspectral geological remote sensing: A review [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 14(1): 112-128.
- [2] Bishop C, Rivard B, De Souza Filho C, et al. Geological remote sensing[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 64: 267-274.
- [3] Asadzadeh S, De Souza F C R. A review on spectral processing methods for geological remote sensing[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 47: 69-90.
- [4] Boissieu F F, Sevin B, Cudahy T. Regolith-geology mapping with support vector machine: A case study over weathered Ni-bearing peridotites, New Caledonia[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 64: 377-385.
- [5] Carrino T A, Crósta A P, Toledo C L B, et al. Hyperspectral remote sensing applied to mineral exploration in southern Peru: A multiple data integration approach in the Chapi Chiara gold prospect[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 64: 287-300.
- [6] 汪子义, 张廷斌, 易桂花, 等. Landsat8 OLI 数据斑岩铜矿遥感蚀变矿物组合提取研究[J]. *国土资源遥感*, 2018, 30(3): 89-95. doi:10.6046/gtzyyg. 2018. 03. 13.
- Wang Z Y, Zhang T B, Yi G H, et al. Extraction of hydrothermal alteration mineral groups of porphyry copper deposits using Landsat8 OLI data[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2018, 30(3): 89-95. doi:10.6046/gtzyyg. 2018. 03. 13.
- [7] 王瑞军, 闫柏琨, 李名松, 等. 甘肃红山地区重要控矿地质单元 GF-1 数据遥感解译与应用[J]. *国土资源遥感*, 2018, 30(2): 162-170. doi:10.6046/gtzyyg. 2018. 02. 22.
- Wang R J, Yan B K, Li M S, et al. Remote sensing interpretation of important ore controlling geological units in Hongshan region of Gansu Province using GF-1 image and its application[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2018, 30(2): 162-170. doi:10.6046/gtzyyg. 2018. 02. 22.
- [8] 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. doi:10.6046/gtzyyg. 2018. 01. 18.
- Fan Y H, Wang H, Yang X K, et al. Application of high-resolution remote sensing technology to the prospecting for rare metal mineralization belt[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2018, 30(1): 128-134. doi:10.6046/gtzyyg. 2018. 01. 18.
- [9] 江思宏. 北山地区岩浆岩活动与金的成矿作用[D]. 北京: 中国地质科学院, 2004.
- Jiang S H. Magmatism and Gold Metallogeny in Beishan Mt., Northwestern China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2014.
- [10] 杨合群, 李英, 杨建国, 等. 北山造山带的基本成矿特征[J]. *西北地质*, 2006, 39(2): 78-94.
- Yang H Q, Li Y, Yang J G, et al. Main metallogenic characteristics in the Beishan orogen[J]. *Northwestern Geology*, 2006, 39(2): 78-94.
- [11] Kalinowski A, Oliver S. ASTER Mineral Index Processing Manual Compiled by Aleks Kalinowski[M]. Australia: Geoscience Australia, 2004: 36.
- [12] 袁金国, 牛铮, 王锡平. 基于 FLAASH 的 Hyperion 高光谱影像大气校正[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(5): 1181-1185.
- Yang J G, Niu Z, Wang X P. Atmospheric correction of Hyperion hyperspectral image based on FLAASH[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(5): 1181-1185.
- [13] 叶发旺, 刘德长, 赵英俊. CASI/SASI 航空高光谱遥感测量系统及其在铀矿勘查中的初步应用[J]. *世界核地质科学*, 2011, 28(4): 231-236.
- Ye F W, Liu D C, Zhao Y J. Airborne hyper-spectral survey system CASI/SASI and its preliminary application in uranium exploration[J]. *World Nuclear Geoscience*, 2011, 28(4): 231-236.
- [14] 韩海辉, 王艺霖, 任广利, 等. 遥感蚀变异常非线性分析方法研究——以北山新、老金厂为例[J]. *国土资源遥感*, 2017, 29(1): 43-49. doi:10.6046/gtzyyg. 2017. 01. 07.
- Han H H, Wang Y L, Ren G L, et al. Nonlinear analysis method for remote sensing alteration anomalies: A case study of Xinjinchang and Laojinchang in Beishan[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2017, 29(1): 43-49. doi:10.6046/gtzyyg. 2017. 01. 07.
- [15] 韩海辉, 王艺霖, 杨敏, 等. 分维变点法在遥感蚀变异常提取中的应用[J]. *国土资源遥感*, 2017, 29(3): 137-142. doi:10.

6046/gtzyyg. 2017. 03. 20.

Han H H, Wang Y L, Yang M, et al. Application of fractal dimension – change point method to the extraction of remote sensing alteration anomaly [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29 (3) : 137 – 142. doi:10. 6046/gtzyyg. 2017. 03. 20.

[16] 孙永君, 李大民. 甘肃白峡尼山钨矿床成矿模式 [J]. 甘肃科技, 2009, 25 (12) : 23 – 26.

Sun Y J, Li D M. Metallogenic model of the Baixianishan tungsten deposit in Gansu [J]. Gansu Science and Technology, 2009, 25 (12) : 23 – 26.

[17] 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.

Application of collaborative processing method to the analysis of remote sensing alteration abnormal causes: A case study of Fangshankou area in Beishan

HAN Haihui, REN Guangli, WANG Yilin, YANG Min, YAO Anqiang, ZHANG Zhuan

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

Abstract: Remote sensing alteration anomaly is an important indicator of ore deposits. However, the previous studies of the geological genesis of remote sensing alteration anomaly and its indicative significance are insufficient and, as a result, the interpretation of remote sensing anomalies is often uncertain. In this paper, the authors established a multi – data source and multi – method collaborative processing method that can quantitatively explain the geological genesis and indication significance of remote sensing alteration anomaly. In this method, multi – spectral remote sensing is used to analyze the distribution characteristics of remote sensing alteration anomaly, hyperspectral remote sensing is used to decompose the remote sensing alteration anomaly information development pattern of typical geological bodies, and X – diffraction – rock identification – spectral solution is used to accurately identify altered mineral types. On the basis of the above experimental results, the geological genesis and indication significance are comprehensively explained. The test conducted in Fangshankou area of Beishan shows that the types of remote sensing alteration anomalies are basically consistent with the types of altered minerals developed on the surface, and the surrounding rock alterations of different ore – forming types of deposits can be effectively reflected by the specific altered mineral information combination. According to this regularity, lots of mineralization clues were discovered in this experiment, which realized the rapid transformation of remote sensing information into geological information. The study results show that this collaborative processing method would overcome the incompleteness of the analytical results of a single data source or a single method, and could improve the credibility of remote sensing alteration anomalies in geological applications.

Keywords: collaborative processing; spectral analysis; X – diffraction; rock identification; remote sensing alteration anomaly

(责任编辑: 李 瑜)