高光谱热红外遥感技术在地质找矿中的应用

刘德长1),邱骏挺1),闫柏琨2),田丰1)

1)核工业北京地质研究院遥感信息与图像分析技术国家级重点实验室,北京,100029;

2)中国国土资源航空物探遥感中心,北京,100083

内容提要:高光谱热红外遥感技术用于地质找矿,目前国内外都在探索,由于热红外发射光谱的混合为线性混合,利用线性解混技术可以对硅酸盐类矿物,如石英进行识别和提取。这是其优于可见光—近红外和短波红外之处。大多数金属矿床与石英脉—硅化带的关系密切。另外,石英脉与硅化带的控矿作用又有差异。因此,利用高光 谱遥感技术提取石英脉—硅化带,并将二者区分开来,对于金属矿的找矿具有极其重要的意义。航空高光谱热红外 遥感技术由于可以获取高空间分辨率(亚米级)的高光谱热红外数据,可以进行热红外矿物精细填图,提取规模小的 石英脉或硅化带,从而更具地质找矿价值。本文利用核工业北京地质研究院遥感信息与图像分析技术国家级重点 实验室的航空热红外成像系统(TASI),在甘肃北山柳园—方山口和新疆雪米斯坦地区获取了高空间分辨率的高光 谱热红外遥感数据,从开展实用化热红外大气校正与光谱重建技术入手,探索了石英脉—硅化带提取与区分,解决 了地质找矿中石英脉—硅化带的提取与区分这一具普遍性的关键技术难题,并通过示范应用,取得了明显的找矿效 果。

关键词:高光谱遥感;热红外;石英脉--硅化带;地质找矿

大多数金属矿床(如金、银、铀、铜、铅锌、钨钼 等)与石英脉—硅化带,以及相关的蚀变作用关系 极为密切,是找这类矿床的重要标志性目标(毛光 周等,2008;宋扬等,2011;孙振明等,2015)。此外, 石英脉和硅化带对金属矿床的控制作用有明显的差 异性,石英脉和硅化带往往与金、钨钼、铜、铅锌等矿 床关系密切(杨立强等,2014;王小飞等,2011;彭慧 娟等,2012: 刘德长等,2015a,b), 铀矿与石英脉无 关,而与硅化带关系密切,受硅化带控制(指硅化带 类型铀矿)(王联魁, 1986;刘德长等, 2015a, b, 2016)。因此,利用热红外遥感技术对石英脉——硅 化带进行识别和区分具有重要的找矿意义(王俊虎 等,2010;黄照强等,2010),但石英脉一硅化带在可 见光—近红外/短波红外矿物填图中不能被识别和 提取出来,更谈不上区分开来。相比而言,热红外发 射光谱的混合为线性混合(Hamilton et al., 2001;闫 柏琨等,2006)。利用线性解混技术可以对石英脉 进行识别和提取,并在此基础上,进行石英脉与硅化 带的区分。航空高光谱热红外遥感技术,由于可以 获取高空间分辨率(亚米级)的高光谱热红外数据, 可以进行热红外的矿物精细填图,从而将规模较小 的石英脉和硅化带识别出来,故具有很高的找矿价 值。目前,利用热红外数据提取石英脉——硅化带信 息的技术还没有成熟的方法和软件。本文依托中国 地质调查局航空物探遥感中心的工作项目,利用核 工业北京地质研究院遥感信息与图像分析技术国家 级重点实验室的 TASI 航空高光谱成像系统,在甘肃 北山柳园—方山口和新疆雪米斯坦地区获取了高空 间分辨率的高光谱热红外遥感数据(地面分辨率 2.25m;光谱范围 8~11.54 µm;波段数 32),从开展 实用化热红外大气校正与光谱重建技术入手,探索 找矿中石英脉——硅化带的提取与区分这一具普遍性 的关键难题。之后开展应用实验,取得了较好的找

注:本文为中国地质调查局航空物探遥感中心工作项目(编号:1212011220277)和 HNKF"松辽盆地砂岩型铀矿综合预测评价技术研究"的成果。

收稿日期:2017-07-22;改回日期:2018-08-12;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2018.05.011

作者简介:刘德长,1938年生,男,研究员,博士生导师。长期从事核领域遥感技术应用研究,目前正在从事高光谱遥感的地质应用研究。 通讯地址:100029,核工业北京地质研究院。Email:liudc@yeah.net。

矿效果。

1 实用化热红外大气校正技术

大气效应是岩矿信息提取过程中主要的干扰因 素之一,在反演地表温度和发射率之前,必须先对遥 感数据进行大气校正,以剔除大气效应的影响。本 文利用 MODTRAN4.0 软件计算了大气透过率、上行 辐射和下行辐射(图1)。输入 MODTRAN4.0 软件 的参数(表1)主要根据 TASI 数据获取时的地理位 置、日期等确定。

2 实用化热红外光谱重建技术

将 MODTRAN4.0 软件计算出的大气透过率、上 行辐射、下行辐射输入到图 2 所示的计算机处理流 程中。现将整个处理流程简述如下:

第一步进行大气下行辐射校正。根据普朗克定 律,设定所有波段的发射率为0.99,每个波段均计 算一个地面温度,以所有波段计算得到的最高温度

表 1 MODTRAN4.0 软件输入输出参数表 Table 1 Input and output parameters for MODTRAN4.0 software

| 序号 | 参数 | 输入 |
|----|---------|--------|
| 1 | 大气模式 | 中纬度夏天 |
| 2 | 气溶胶类型 | 乡村 |
| 3 | 能见度 | 23 km |
| 4 | 传感器高程 | 2.0 km |
| 5 | 地面高程 | 0.9 km |
| 6 | 工作区地理坐标 | 略 |

作为地表实际温度的估计值,并将该值代入公式 (1)中,计算出地面辐射亮度值(去除大气透过率与 上行辐射)。

 $R' = L' - (1 - \varepsilon) R' = L' - (1 - \varepsilon') \cdot L_{down}$ (1) 式中, R 为地表辐射亮度, L 为辐射能量, ε 为发射 率。

第二步计算发射率的β谱。



图 1 采用 MODTARN4.0 计算的大气上行辐射、下行辐射、透过率 Fig. 1 Upward radiation, downward radiation, and transmittance calculated by MODTARN4.0





图 2 TASI 数据大气校正与光谱重建流程 Fig. 2 Flow chart of atmosphere correction of TASI data



图 3 柳园地区北部航空 TASI 数据(a)TASI 原始影像;(b)发射率影像;(c)温度影像 Fig. 3 (a)Raw TASI image;(b)Emissivity image;(c)Temperature image

$$\boldsymbol{\beta}_{\rm b} = \frac{N \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{\rm b}}{\sum \boldsymbol{\varepsilon}_{\rm b}} \tag{2}$$

式中: $\beta_{\rm b}$ 为计算得到的 β 谱; N 为波段数; $\varepsilon_{\rm b}$ 为发射

率。 第三步,根据公式(3),计算得到最小发射率, 将所有波段的相对发射率减去最小发射率,即为最





图4 柳园地区北部野外验证点 温度-发射率分离结果对比图 Fig. 4 Temperature and emissivity separation results of field points of Liuyuan area 终得到的发射率。

 $\varepsilon_{\min} = -0.9174 \cdot MMD^{0.9723} + 0.9924$ (3)

 ε_{min} 为最小发射率, MMD 为 β 谱的最大 - 最小值的差。

将处理后获取的发射率影像 (图3)中的波谱与地面实测波谱 作了验证,二者吻合很好(图4)

3 石英脉—硅化带的 提取与区分

3.1 石英脉和硅化带的光谱特征

石英脉和硅化带的主要成分 都是 SiO₂,其发射光谱如图 5 所 示。SiO₂的振动频率和对称性是 已知的,8~16 μm 范围为最强吸 收区。该强吸收区由一个强吸收 带(8.6~9.7 μm)和一稍弱的吸 收带(12~14 μm)组成,其中强吸 收带中心位于 9.1 μm,稍弱的吸

收带的中心位于 13 μm 处。强吸收带由 Si—O—Si 非对称伸缩振动导致,稍弱的吸收带则由 Si—O—Si 的对称伸缩振动导致。

石英脉的成分,除含一些金属硫化物的成分外, 一般为均一的 SiO₂,其结晶度和纯净度均高;硅化 带是断裂带中破碎岩块被硅质胶结形成的构造角砾 带,其 SiO₂的结晶度和纯净度均差。由于石英脉与 硅化带的地质特征不同,造成了二者光谱特征的差 异:石英脉由于结晶度和纯净度高,吸收带位置稳定 在 9.1 μm 处,光谱整体形态光滑;硅化带由于结晶 度低,所含角砾成分岩性和含量变化大,导致主要吸 收带的位置变化大(从 9.1 μm 向长波方向移动)。 石英脉的 SiO₂对称性高,导致在 13.0 μm 附近的吸 收带的深度大,而硅化带的 SiO₂对称性差,导致在 13.0 μm 附近吸收带深度变小(图 5)。

3.2 石英脉—硅化带信息提取与制图

由于高光谱数据的复杂性和海量性,采用光谱 变换技术对于减少冗余信息。本次研究通过最小噪 音分量(MNF)变换进行降维和压缩,进而利用像元 纯度指数(Pixel Purity Index, PPI)进可端元选择。 端元被提取出来和识别后,采用混合谐调匹配滤波 (mixture tuned matched filtering, MTMF)方法实现对 端元赋存及丰度的填图。





3.2.1 最小噪音分量(MNF)变换

MNF 变换实质上是两个阶梯式的主组分变换。 第一次变换是基于一个近似的噪声协方差矩阵,对 数据中的噪声进行去相关和重新调节,变换后的数 据中噪声具有单位方差并且无波段相关。

第二个步骤是噪声数据的一个标准主组分变 换,数据空间可以被分为两部分,前者与大特征值和 相关特征图像有关,后者为补充部分,具有近于均一 的特征值和噪声优势图像。最终通过观察最终特征 值和相关图像来确定数据的固有维数。



Fig. 6 Spectral of extracted quartz mineral



图 7 柳园地区石英脉—硅化带分布图 Fig. 7 Distribution of quartz vein—silicified belt in theLiuyuan area



图 8 石英脉—硅化带的野外查证点照片 Fig. 8 Photographs of quartz vein—silicified belt in the field

3.2.2 像元纯度指数(Pixel Purity Index, PPI)

反复投影 n 维散点图到随机单元矢量来计算 PPI,通过记录每次投影的极值像元,注记每个像元 被标定为极值的总次数。PPI 图像被产生。这些图 像的直方图显示被 PPI"击中"(hit)的分布。从直 方图中选取阈值,用于选择最纯的像元,以保证被分 析的像元数最小。这些像元被输入到分离特定光谱 端元的交互式可视化算法中。

3.2.3 N 维可视化中进行端元识别

在 N 维可视化中,光谱被视为 N 维散点图中的 一个点,N 是波段数。对给定的像元,N 维空间中组 成 N 值点的坐标是每个波段对应像元的光谱反射 率。这些点在 N 维空间的分布可用于估计光谱端 元数和它们的纯光谱特征。

3.2.4 混合谐调匹配滤波

本次研究采用的混合谐调匹配滤波技术可以最 大化突出目标,通过最大化一个已知端元的响应,并 抑制混合未知背景的响应来去除要对所有端元已知 的需求,从而与已知特征进行匹配。它提供了一个 基于与特定光谱库或图像端元光谱相匹配而迅速识 别特定物质的方法。该技术产生的图像与光谱分解 的结果相似,但计算量显著减少,而且不需要对所有 端元均有已知的条件。通过上述研究,提取石英的 影像波谱见图 6;所填的石英一硅化带的分布图见 图 7。石英脉一硅化带的野外查证照片如图 8 所 示。

3.3 石英脉与硅化带区分的填图实验

石英脉和硅化带有单独存在的,也有混合存在 的,为了更好的对比研究,选择了柳园—方山口地区 花西山多金属矿区的两条混合型石英脉—硅化带进 行了区分的填图试验。

填图的方法是在热红外矿物填图技术的 MTMF 算法改进基础上进行的,直接从 TASI 图像上寻找不 同的富含 SiO₂端元值,分析岩石、矿物发射波谱特 征,从发射光谱角度区分石英脉和硅化带,并以此为 基础,按同一阈值进行信息提取,得到不同 SiO₂端 元的石英脉和硅化带图(图 9)。

图 10 是甘肃柳园花西山金矿及外围不同富含 SIO₂端元的光谱特征图,不同富含 SIO₂端元提取的 信息以不同颜色表示,黑色代表黑色石英端元,绿色 代表绿色石英端元,蓝色代表蓝色石英端元,它们的 光谱特征见图 5,其共同特征是在 8.3~9.5 μm 波 长范围内主要吸收带特征是随着 SiO₂含量变化(硅 化程度及蚀变发育的不同),吸收峰位置和深度也



图 9 柳园花西山金多金属矿区石英脉 与硅化带区分识别图

Fig. 9 Distribution of quartz vein—silicified belt in the Huaxishan goldand multi-metal area of the Liuyuan area

1—蓝色端元;2—绿色端元;3—黑色端元 1—blue end member;2—green end member;

3-black end member



图 10 甘肃柳园花西山矿区不同富含 SIO₂端元光谱特征 Fig. 10 Spectral characteristics of different quartz end members in the Huaxishan deposit of the Liuyuan area

会随之发生明显的改变。

经光谱分析和野外查证,黑色富含 SiO₂端元矿 化蚀变线状体为石英脉,产于印支期黑云母花岗岩 中,其外围绿色和蓝色受杂质影响大的线状体为硅 化带。

4 地质找矿效果

利用航空高光谱热红外技术,通过石英脉—硅 化带的提取与区分,在柳园—方山口地区发现了与 石英脉有关的金矿和与石英脉—硅化带有关的铅、 银矿。此外,在雪米斯坦地区还发现了与硅化带有 关的铀矿化等。

4.1 石英脉型金矿

本文中发现的石英脉型金矿产出于柳园—方山 口地区的黑石山—花牛山深大断裂带的南侧。从航 空高光谱遥感图像上可以看到呈 NWW 向带状展布 的蚀变带。主要蚀变类型为硅化、绢云母和黄铁矿 组成(图 11a)。野外查证表明,该矿床受蚀变的(主 要为赤铁矿化和绢云母化)海西期黑云母花岗岩之 中的—条石英脉控制。石英脉长 3.5 km,宽 2 m,其 中含金属硫化物(图 11b)。化学分析结果显示,石 英脉中金含量高达 10 g/t。此外,还伴有铜、铅、银等异常。

4.2 石英脉—硅化带型铅银矿

发现的石英脉—硅化带型铅银矿,位于柳园— 方山口地区,邻近黑石山—花牛山区域深大断裂带 从 NE 转向 EW 的拐弯地段。从航空高光谱遥感图 像上观察,该石英脉—硅化带总体呈 EW 向展布。 野外查证表明,石英脉受同方向断裂带控制,在地貌 上呈陡峭山脊,

产状近于直立(图 11c)。采集的手标本上可见 方铅矿和黄铁矿(图 11d)。化学分析,银达到 56



图 11 (a) 航空高光谱遥感蚀变矿物填图结果;(b) 野外查证为含金石英脉(镜向北西); (c) EW 硅化断裂带的断裂构造野外照片;(d) 硅化带中方铅矿和黄铁矿照片

Fig. 11 (a) Alteration mapping result using airborne hyperspectral image; (b) Quartz veins identified in the field; (c) Photographs of the EW trending silicified belt in the field; (d) Photograph of galena and pyrite observed in the silicified belt



图 12 研究区蚀变矿物分布示意图 Fig. 12 Distribution of alteration minerals

μg/g;铅含量达到 1.49%。

4.3 硅化带与接触带复合型铀(铍)矿

本文中发现的硅化带与接触带复合型铀矿化位 于新疆雪米斯坦地区的查干陶勒盖—巴音布拉克控 岩大断裂的北侧。矿床出露于断裂带向北呈弧形拐 弯的地段。在航空高光谱矿物分布图显示,这一地 区赤铁矿化和绢云母化较为发育(图 12)。硅化蚀 变带与花岗斑岩的接触带重接复合,其特征与邻近 的白杨河铀(铍)矿床控矿特征相似。

经野外查证,该区的岩石类型为似斑状花岗岩。 通过放射性测量,在硅化蚀变带与花岗岩接触带复 合地段发现两处放射性异常,西部异常区伽马辐射 强度为 650 Uγ;东部异常区伽马辐射强度为 105 Uγ,围岩的伽马强度一般仅为 45 Uγ。

5 结语

石英脉—硅化带的大面积、快速提取与区分是 地质找矿中具普遍性的关键难题,对金属矿的找矿 突破具有重要作用。相比可见光—近红外和短波红 外,高光谱热红外遥感技术在提取和识别硅酸盐类 矿物方面具有更加优秀的效果。利用线性解混技 术,可以对石英进行定量化的识别和提取。本文利 用航空高光谱热红外遥感技术,探讨了这一地质找 矿的科学难题,并为其解决探索出了一条新路。

目前利用热红外数据提取和区分石英脉—硅化 带还没有成熟的方法和软件。通常采用的是基于匹 配滤波和基于光谱特征参数的识别方法。本文采用 基于匹配滤波的方法,首先利用大气辐射传输模型 计算大气上行辐射、下行辐射、透过率等大气辐射参 数,得到了发射光谱与地面实测光谱相一致的效果, 之后再利用换算得到的发射光谱提取地物信息。这 种方法可满足提取的需要,因为石英脉与硅化带具 有明显不同的地质特征和光谱特征,运用高空间分 辨率的高光谱热红外(TASI)遥感数据,并从方法和 软件开发方面,不仅实现了石英脉一硅化带的大面 积、快速提取,而且进行了示范性的区分。

通过找矿应用,取得了明显的效果,表明高光谱 热红外遥感技术在地质找矿中具有很好的找矿前 景,对其深入研究和应用,将会从新技术,新方法的 角度推动地质找矿的新突破。

致谢:感谢方洪宾、聂洪峰和叶发旺对本项目的 支持和帮助。

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)

- 黄照强,赵珍梅,闫东川,马伟. 2010. 基于热红外遥感数据的西藏冈 底斯东段岩性识别.地质与勘探,46(6):1092~1098.
- 刘德长,闫柏琨,邱骏挺.2016. 航空高光谱遥感固体矿产预测方法 与示范应用.地球学报,37(3):349~358.
- 刘德长,邱骏挺,田丰,孙雨.2015a.区域控矿断裂带的航空高光谱遥 感技术研究——以黑石山—花牛山深大断裂带为例.地质与勘 探,51(2):366~375

- 刘德长,叶发旺,赵英俊,田丰,邱骏挺. 2015b. 航空高光谱遥感金 矿床定位模型及找矿应用——以甘肃北山六院—方山口地区为 例.地球信息科学学报,17(12):1545~1553.
- 毛光周,华仁明,龙光明,陆慧娟. 2008. 江西金山金矿成矿时代讨论. 地质学报, 82(4):532~539.
- 彭惠娟,汪雄武,侯林,秦志鹏,周云.2012.西藏甲玛铜多金属矿床石 英脉特征.矿床地质,31(3):465~497.
- 宋扬,王瑞江,胡建中,谭应佳,石成龙,王涛. 2011. 河北金厂峪金矿 控矿构造特征与成矿物质来源.地质学报,85(1):78~87
- 孙振明,任云生,李才,李兴奎,王明,范建军.2015.西藏班—怒带西 段荣那铜(金)矿床流体包裹体特征及矿床成因.地质学报,89 (3):608~617
- 王俊虎,张杰林,张静波. 2010. 基于热红外数据的花岗岩铀矿田地 表 SiO2 含量反演及其铀成矿要素识别.地球信息科学学报,12 (1):126~132.
- 王联魁. 1986.华南花岗岩铀矿中硅化带—绿泥石化带—碱长交代体 三位一体的演化模式.岩石学报,2(1):1~14.
- 王小飞, 咸华文, 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂. 2011. 粤北石英脉型钨多 金属矿床中钨锡铋银钼的赋存状态研究. 地质学报, 85(3):405 ~421.
- 闫柏琨,刘圣伟,王润生,甘甫平,陈伟涛,杨苏明. 2006. 热红外遥感 定量反演地表岩石的 SiO₂含量.地质通报, 25(5):639~643.
- 杨立强,邓军,王中亮,张良,郭林楠,宋明春,郑小礼. 2014. 胶东中 生代金成矿系统.岩石学报, 30(9):2447~2467.
- Hamilton V E, Wyatt M B, Mesween H Y. 2001. Analysis of terrestrial and Martian volcanic composition using thermal emission spectroscopy: 2. Application to Martian surface spectral from the Mars global surveyor thermal emission spectrometer. Journal of Geophysical Research, 106(E7):14733~14746.
- Huang Zhaoqiang, Zhao Zhenmei, Yan Dongchuan, Ma Wei. 2010&. Lithological identification of eastern Gangdise in Tibet using ASTER thermal infrared data. Geology and Exploration, 46(6): 1092 ~ 1098.
- Liu Dechang, Qiu Junting, Tian Feng and Sun Yu. 2015a&. Application of airborne hyper-spectral remote sensing to mapping of orecontrolled faults: A case study of the Heishishan—Huaniushan fault. Geology and Exploration, 51(2):366~375
- Liu Dechang, Ye Fawang, Zhao Yingjun, Tian Feng, and Qiu Junting. 2015b&. Airborne Hyperspectral remote sensing for gold prospecting around Liuyuan—Fangshankou area, Gansu province, China. Journal of Geo-information Science, 17(12): 1545~1553.

- Liu Dechang, Yan Bokun, and Qiu Junting. 2016&. The application of airborne hyper-spectral remote sensing technology to mienral resources exploration. Acta Geoscientica Sinica, 37(3):349~358.
- Mao Guangzhou, Hua Renming, Long Guangming, and Lu Huijuan. 2008&. Discussion on the Mineralogenetic Epoch of the Jinshan Gold deposit, Jiangxi Province—Based on the Quartz Fluids Inclusion Rb-Sr Dating. Acta Geologica Sinica, 82(4):532~539.
- Peng Huijuan, Wang Xiongwu, Hou Lin, Qin Zhipeng, and Zhou Yun. 2012&. Characteristics of quartz in stock work veins from Jiama copper polymetallic deposit, Tibet. Mineral Deposit, 31(3):465~ 497.
- Song Yang, Wang Ruijiang, Hu Jianzhong, Tan Yingjia, Shi Chenglong, and Wang Tao. 2011&. Ore-controlling structure characteeristic and the sources of ore forming material in the Jinchangyu gold deposit, Hebei Province. Acta Geologica Sinica, 85(1):78~87
- Sun Zhenming, Ren Yunsheng, Li Cai, Li Xinkui, Wang Ming, Fan Jianjun. 2015&. Fluid inclusion characteristics and ore genesis of the Rongna Cu (Au) Deposit in the western part of the Bangong Lake—Nujiang Suture Zone, Tibet. Acta Geologica Sinica, 89(3): 608~617
- Wang Junhu, Zhang Jielin, Zhang Jinbo.2010&. SiO₂ content retrieving and metallogenic factors identification of a granite-type uranium orefield based on thermal infrared data. Journal of Geo-information Science, 12(1):126~132.
- Wang Liankui.1986&. "Three- in -one" evolution model for granite type U-ore deposits in south China: silicified zone—chloritized zone alkali feldspar. Acta Petrologica Sinica, 2(1):1~14.
- Wang Xiaofei, Qi Huawen, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, and Peng Jiantang. 2011&. Occurrence modes of tungsten, tin, bismuth, silver and molybdenum from the vein type tungsten polymetallic deposits in northern Guangdong, China. Acta Geologica Sinica, 85 (3):405~421.
- Yan Bokun, Liu Shengwei, Wang Runsheng, Gan Fuping, Chen Weitao, Yang Suming. 2006&. Quantitative inversion of the SiO₂ content in surface rocks using thermal infrared remote sensing . Geological Bulletin of China, 25(5):639~643.
- Yang Liqiang, Deng Jun, Wang Zhongliang, Zhang Liang, Guo Linnan, Song Chunming, and Zhen Xiaoli. 2014&. Mesozoic gold metallogenic system of the Jiaodong gold province, eastern China. Acta Petrologica Sinica, 30(9):2447~2467.

Application of Thermal Inferred Hyperspectral Remote Sensing in Ore Exploration

LIU Dechang¹⁾, QIU Junting¹⁾, YAN Bokun²⁾, TIAN Feng¹⁾

 National Key Laboratory of Science and Technology on Remote Sensing Information and Image Analysis, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing, 100029;

2) China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing, 100083

Abstract: The application of thermal inferred hyperspectral remote sensing in ore exploration is a hot topic worldwide. In contrast to the visible and near inferred spectrum, thermal inferred spectrum of mixed materials can be easily unmixed using linear unmixed theory, which permits the content of silicate mineral to be qualitatively estimated. Since lots of ore deposits are spatially associated with quartz and silicate veins, the recognition of these

two kinds of veins contribute to ore exploration work. The airborne thermal inferred hyperspectral remote sensing images due to its high spatial and spectral resolutions, can recognize quartz and silicate veins in small scales, thus benefits geological ore exploration. In this study, we acquired the thermal inferred hyperspectral remote sensing data covering the Liuyuan—Fangshankou and Xiemistian areas based on the TASI imager of National Key Laboratory of Science and Technology on Remote Sensing Information and Image Analysis, in an attempt to identify quartz and silicate veins. An application example was used to evaluate the capability of thermal inferred hyperspectral remote sensing in ore prospecting.

Keywords: Hyperspectral remote sensing; thermal inferred; quartz-silicate vein; ore exploration

Acknowledgements: This study was supported by project (No. 1212011220277) of China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources

First author: LIU Dechang, born in 1938, male, senior researcher, supervisor of doctor candidate, majors in structural geology, engages in the study of remote sensing for unclear security and geology. Email: liudc@yeah.net

Manuscript received on: 2017-07-22; Accepted on: 2018-08-12; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2018.05.011

(上接第1104页) 高的稀土元素含量,平均约600×10⁻⁶。 可见,煌斑岩体及其风化壳中具备发育稀土、铌元素超常富 集甚至成矿的基础条件。因此,在稀土资源,特别是风化壳 型稀土矿床找矿时,应加强基性、超基性岩,特别是煌斑岩类 及其风化壳中的稀土资源调查评价工作,有望取得稀土资源 找矿新突破。

参考文献 / References

- 柴凤梅,帕拉提·阿布都卡迪尔,张招崇,毛景文,董连慧,木哈塔 尔·扎日.2007.塔里木板块西南缘钾质煌斑岩地球化学及源 区特征.地质论评,53(1):11~21.
- 方维萱,胡瑞忠,苏文超,肖加飞,漆亮,蒋国豪. 2002.贵州镇远地 区钾镁煌斑岩类的侵位时代.科学通报,47(4):307~312.
- 管涛,黄智龙,许成,张振亮,严再飞,陈觅.2006.云南白马寨镍矿 区煌斑岩⁴⁰Ar-Ar³⁹定年和地球化学特征.岩石学报,22(4): 873~883.
- 和文言,莫宣学,喻学惠,董国臣,和中华,黄雄飞,李小伟,姜丽 莉.2014. 滇西北衙煌斑岩的岩石成因及动力学背景:年代学、 地球化学及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素约束.岩石学报,30(11): 3287~3300.
- 刘畅,赵泽辉,郭召杰. 2006. 甘肃北山地区煌斑岩的年代学和地球 化学及其壳幔作用过程讨论. 岩石学报, 22(5): 1294~1306.
- 邱检生, 王德滋, 曾家湖, McInnes B I A. 1997. 鲁西中生代富钾火 山岩及煌斑岩微量元素和 Nd-Sr 同位素地球化学. 高校地质学 报, 3(4): 384~395.

- 任怀翔,张光文. 1993. 贵州麻江金云火山岩(钾镁煌斑岩)的地质 特征. 贵州地质, 10(3): 189~191.
- 王登红,李华芹,陈毓川,屈文俊,梁婷,应立娟,韦可利,刘孟宏. 2005. 桂西北南丹地区大厂超大型锡多金属矿床中发现高稀土 元素方解石. 地质通报,24(2):176~180.
- 王亮,陶平.2012.贵州东南部含金刚石钾镁煌斑岩找矿远景区预测.地质与勘探,48(4):775~783.
- 张连昌, 卢登蓉, 王淑荣, 梅厚钧. 1998. 山西大同钾镁煌斑岩地质 地球化学特征. 矿物岩石, 18(4): 22~30.
- Owen J P. 2008. Geochemistry of lamprophyres from the Western Alps, Italy: implications for the origin of an enriched isotopic component in the Italian mantle. Contributions to Mineralogy and Petrology, 155 (3): 341~362.
- Rock N M S. 1987.The nature and origin of lamprophyres: an overview. Geological Society, London, Special Publications, 30(1): 191 ~ 226.
- Taylor W R, Rock N M S, Groves D I, Perring C S, Golding S D. 1994. Geochemistry of Archean shoshonitic lamprophyres from the Yilgarn Block, Western Australia: Au abundance and association with gold mineralization. Applied Geochemistry, 9(2): 197~222.

GAO Junbo, YANG Ruidong, YANG Guanghai, YANG Guangzhong, XU Hai, FENG Kangning:

Super – enrichment of Rare Earth Element in the Lamprophyres in Southesatern Guizhou

Doi:10. 16509/j.georeview.2018.05.021