

引用格式:叶发旺,孟树,张川,等.甘肃龙首山菱岭铀矿床碱交代型铀矿化蚀变航空高光谱识别[J].地球信息科学学报,2019,21(2):279-292. [Ye F W, Meng S, Zhang C, et al. Identification of alkali-metasomatism type alteration associated with uranium mineralization using airborne hyperspectral in Jiling uranium deposit in Longshoushan area, Gansu Province[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(2): 279-292.] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180465

甘肃龙首山菱岭铀矿床碱交代型铀矿化蚀变航空高光谱识别

叶发旺^{1,2}, 孟 树^{1,2*}, 张 川^{1,2}, 邱骏挺^{1,2}, 王建刚^{1,2}, 刘洪成^{1,2}, 武 鼎^{1,2}

1. 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 2. 遥感信息与图像分析技术国家级重点实验室, 北京 100029

Identification of Alkali-metasomatism Type Alteration Associated with Uranium Mineralization Using Airborne Hyperspectral in Jiling Uranium Deposit in Longshoushan Area, Gansu Province

YE Fawang^{1,2}, MENG Shu^{1,2*}, ZHANG Chuan^{1,2}, QIU Juntong^{1,2}, WANG Jiangang^{1,2}, LIU Hongcheng^{1,2}, WU Ding^{1,2}

1. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 2. National Key Lab of Remote Sensing Information and Image Analysis Technology, Beijing 100029, China

Abstract: The Longshoushan uranium metallogenic belt in Gansu Province is an important uranium metallogenic belt in China. Jiling uranium deposit is a representative alkali- metasomatism type uranium deposit in Longshoushan metallogenic belt. There are a wide variety of alterations in Jiling deposit. And these alterations have close relation to the uranium mineralization. The airborne hyperspectral technique can be used to obtain the surface alteration, structure and lithology distribution information of Jiling uranium deposit from a macroscopic perspective, which provides a basis for the uranium and polymetallic mineral exploration in Jiling deposit and its adjacent area. In this article, CASI/SASI/TASI airborne hyperspectral remote sensing techniques have been applied to the identification of hydrothermal alterations in Jiling alkali- metasomatism type uranium deposit as well as its adjacent district in Longshoushan area, Gansu Province. A variety of alteration minerals have been identified including alkali- feldspar, hematite, tremolite, medium- Al sericite, kaolinite, quartz and so on. These minerals are closely related to the alkali- metasomatism hydrothermal action in Jiling deposit. Besides, comprehensive analysis on alteration mineral, structure and lithology information in Jiling uranium deposit has been made. Study shows that the alteration minerals such as alkali- feldspar, tremolite, medium- Al sericite and quartz separately represent the different stages of hydrothermal alteration process in Jiling uranium deposit and its adjacent area, namely the early alkali- metasomatism stage, the middle neutral- metasomatism stage and the late acid- metasomatism stage. The main channel for alkali- metasomatism hydrothermal action is the composite of regional unconformity surface, deep and large faults, and contact zones of different lithologic units. The uranium

收稿日期: 2018-09-14; 修回日期: 2018-11-27.

基金项目: 中核集团龙腾二期项目(遥 LTY1604); 国家自然科学基金项目(41772354)。[**Foundation items:** China National Nuclear Corporation Longteng Project II, No. Yao-LTY1604; National Natural Science Foundation of China, No.41772354.]

作者简介: 叶发旺(1974-), 男, 浙江松阳人, 博士, 研究员级高工, 主要从事铀矿勘查遥感新技术研究及找矿应用。

E-mail: yfwbeijing2008@sina.com

*通讯作者: 孟 树(1989-), 男, 江苏淮安人, 硕士, 工程师, 研究方向为遥感技术在铀矿勘查过程的应用研究。

E-mail: msh.19890217@163.com

mineralization zone in Jiling deposit is controlled by Malugou fault. In the uranium mineralization zone, tremolite, medium-Al sericite, and silicification are evident. And these alteration minerals have close relation to alkali-metasomatism in Jiling deposit. According to the airborne hyperspectral remote sensing characteristics in Jiling deposit, the main prediction criteria for the prospecting of alkali-metasomatism type uranium deposits in the Longshoushan Mountain are proposed. These criteria are of great significance for the prediction of new favorable uranium exploration areas and the new evaluation of old uranium mineralization stations and anomalies in the Longshoushan area.

Key words: CASI/SASI/TASI airborne hyperspectral remote sensing; minerals identification; channels for hydrothermal activity; alkali-metasomatism type uranium deposit; Longshoushan area in Gansu province

***Corresponding author:** MENG Shu, E-mail: msh.19890217@163.com

摘要:甘肃龙首山铀成矿带是中国内陆一条重要的铀成矿带。茆岭铀矿床是龙首山成矿带中典型的碱交代型铀矿床,蚀变种类繁多,且与铀矿化关系密切,利用航空高光谱技术可以从宏观上获取茆岭铀矿床地表蚀变、构造、岩性分布信息,为茆岭矿床及周边铀多金属矿产勘查提供依据。本文采用CASI/SASI/TASI航空高光谱遥感技术,对甘肃龙首山地区茆岭碱交代型铀矿区及周围地表出露的热液蚀变进行了研究,识别出了碱性长石、赤铁矿、透闪石、中铝绢云母、高岭石、石英(硅化)等与碱交代热液作用演化密切相关的蚀变矿物,并将蚀变矿物与构造、岩性等要素进行了综合分析。研究表明,碱性长石、透闪石、中铝绢云母和石英(硅化)等蚀变矿物分别代表了茆岭及周围地区碱交代热液作用过程中早期碱交代、中期中性交代、晚期酸性交代等不同演化阶段的热液蚀变作用;茆岭铀矿区碱交代热液作用的主要通道是区域不整合面、深大断裂、不同岩性接触带的复合体,马路沟矿控矿断裂的茆岭矿区段明显发育透闪石、中铝绢云母、硅化与碱交代作用相关的热液蚀变。根据茆岭铀矿床的航空高光谱遥感特征,提出了龙首山碱交代型铀矿找矿的主要预测判据。这些判据对龙首山的铀矿找矿新区预测和老矿点、异常点的新评价具有重要的意义。

关键词: CASI/SASI/TASI航空高光谱遥感;矿物识别;热液活动通道;碱交代型铀矿;甘肃龙首山地区

1 引言

碱交代型铀矿床是中国热液型铀矿的重要类型之一,研究碱交代型铀矿床的成矿规律和找矿方法对促进中国热液型铀矿勘查具有重要意义。甘肃龙首山铀成矿带是中国内陆一条重要的铀成矿带,在该带不仅发现了典型碱交代型铀矿床,而且还发现了硅质脉型、伟晶状白岗岩型铀矿床,以及一些尚待研究和查明其利用价值的前寒武纪变质热液型、混合热液型的矿化、碱性杂岩中的矿化、沉积变质型矿化等一系列铀矿点、异常点^[1],铀矿找矿前景大。茆岭铀矿床是该成矿带中典型的碱交代铀矿床,前人对茆岭铀矿床地质特征与成矿作用、岩性岩体特征、同位素特征、地球物理-地质模型、围岩蚀变特征等进行了较为全面的研究^[2-9]。研究表明,茆岭铀矿床蚀变种类多样,主要为钠长石化、绿泥石化、碳酸盐化、赤铁矿化,次为绢云母化和硅化,矿化与钠长石化、绿泥石化、赤铁矿化、碳酸盐化“四位一体”的交代蚀变关系密切^[7-9];另外,随着不同的影像分类和端元提取方法被发明和采用^[10-12],航空高光谱遥感技术在热液蚀变带识别、成矿构造、成矿岩性识别方面开始展现明显的技术优

势,已在火山岩型铀矿和国内外其他金属矿床勘查中取得了明显找矿应用效果^[13-20]。利用航空高光谱遥感技术可以从宏观上获取茆岭铀矿床地表蚀变、构造、岩性分布信息,为茆岭矿床及周边矿产勘查提供依据。因此,本文对茆岭钠交代型铀矿床蚀变的航空高光谱特征进行深入剖析,不仅可以为研究区铀矿床外围及区域找矿预测提供依据,也可以为航空高光谱遥感技术在研究典型矿床中的应用思路和应用方法提供借鉴,促进地质矿产勘查领域航空高光谱遥感技术的创新发展和进步。

2 区域地质和矿床地质特征

2.1 区域地质特征

龙首山铀成矿带区域上位于华北板块阿拉善隆起带的西南缘,南接河西走廊、北邻潮水盆地,是早古生代早期祁连板块与华北板块碰撞造山形成的陆缘隆起带^[21](图1)。区内出露最早的地层是下元古界龙首山岩群(Pt₁ln),其上覆地层为中元古界墩子沟群(Pt₂dz)和新元古界韩母山群(Pt₃hm)。下元古界受区域性中等至深变质作用、混合岩化及岩浆活动、构造变动的强烈改造,不仅为显生宙以来

的成岩成矿奠定了物质基础,对古生代铀成矿起预富集作用^[1]。区内早古生界缺失,晚古生界零星分布。从侏罗纪初开始,区内总体呈显著持续隆起,局部接受了中新生代沉积。区内岩浆活动强烈,侵入活动自中条期到燕山期均有发育,以中条期和加里东期最为强烈^[22-23]。侵入岩分布广泛,超基性岩、基性岩、中性岩、酸性岩、碱性岩等各种类型岩体均有发育。花岗岩岩体的分布明显受到北西西向构造控制,形成与构造带方向基本一致的花岗岩带;区内断裂构造极为发育,产状主要有东西、北西、近南北和北东向等,其中以北西向最为发育,近东西向次之,近南北向活动最晚^[2]。

2.2 矿床地质特征

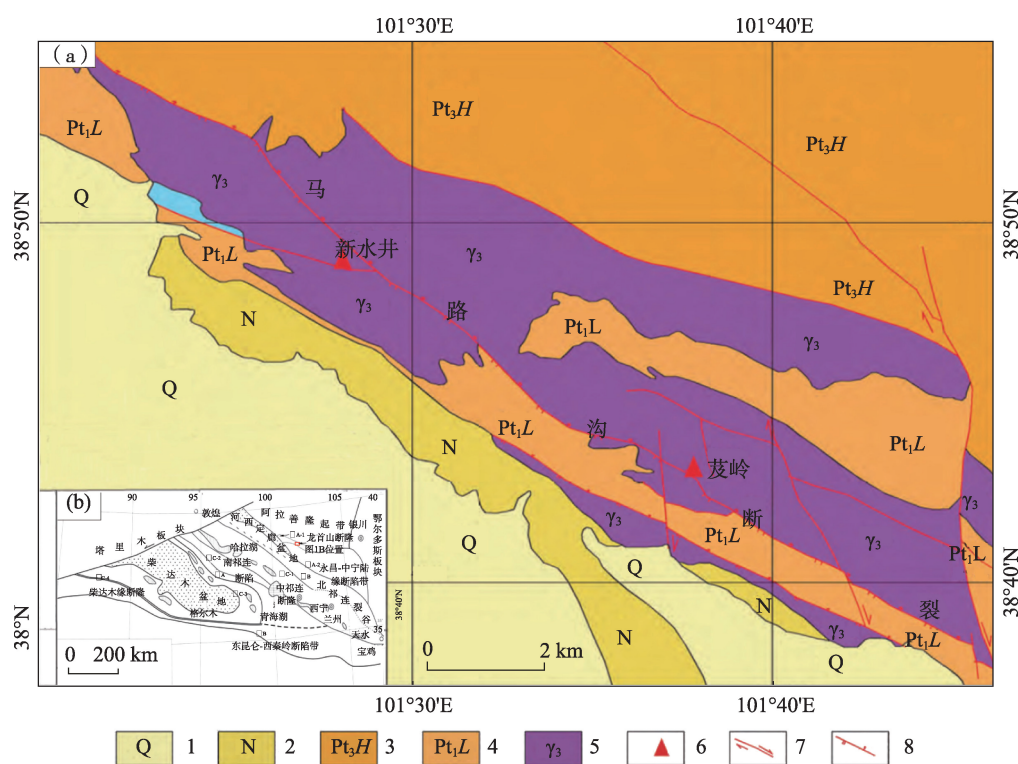
菱岭铀矿床处于龙首山铀成矿带的中段、菱岭岩体的南带和马路沟断裂中部的菱岭地段(图1)。矿床范围内出露的地层主要为下元古界龙首山岩群和上元古界孩母山群。前者主要分在矿区及附近,岩性为条带状大理岩、黑云斜长片麻岩、黑云斜长石英片岩、斜长角闪片岩等,后者主要出露在矿区北侧外围。菱岭花岗岩体是龙首山地区最大的侵入体,在加里东期侵入位于元古代地层中,是由混

合花岗岩、中细粒闪长岩、斑状闪长花岗岩、似斑状粗粒二长花岗岩、中粗粒黑云母花岗岩、正长斑岩、碱性岩等组成的复式岩体^[23]。该岩体由陆壳重熔岩浆经结晶分异形成,岩浆演化成熟度高,后期出现了碱性岩及碱性热液脉体,奠定了龙首山地区铀成矿物质基础。矿区内主要断裂为北西向马路沟断裂,它是一条控矿断裂。矿区发育的蚀变主要为钠交代蚀变及与其相关的绿泥石化、碳酸盐化、赤铁矿化、硅化、高岭土化等^[7-8,24]。铀矿化蚀变具有“钠长石化-碳酸盐化-赤铁矿化-绿泥石化”四位一体的共生矿物组合^[8]。矿体以盲矿体为主,位于次级断裂下盘钠交代中粗粒似斑状二长花岗岩之中,矿化均产于钠交代体内^[22]。矿石主要为暗红色、暗紫色钠交代角砾岩^[3]。

3 数据源与矿物填图

3.1 数据源

本文使用的航空高光谱遥感数据是2017年9-10月采用国际先进的CASI(Compact Airborne Spectrometer Imager)、SASI(Shortwave Airborne Spect-



1-全新统;2-中新统;3-新元古界海母山岩群;4-古元古界龙首山岩群;5-加里东期花岗岩;6-钠交代型铀矿床;7-断层及运动方向;8-逆断层

图1 龙首山构造单元分布(a)及菱岭铀矿床地质图(b)(据文献[2]、[21]修改)

Fig. 1 Distribution map for tectonic unit in Longshoushan mountain and geological map of Jiling uranium deposit

rometer Imager)、TASI(Thermal Airborne Spectrometer Imager)航空高光谱测量系统自主获取的。主要参数如下:CASI数据空间分辨率0.5 m,光谱分辨率19 nm,光谱覆盖范围404~1047 nm;SASI数据空间分辨率1.25 m,光谱分辨率15 nm,光谱覆盖范围950~2450 nm;TASI数据空间分辨率1.25 m,光谱分辨率125 nm,光谱覆盖范围8000~11 500 nm。高光谱数据都是按相关标准和合适测量条件下获取的,具有较高的数据质量,能够满足研究区地质矿产勘查研究需要。

3.2 数据预处理与矿物填图

CASI/SASI/TASI 航空高光谱数据需要分别进行数据预处理和矿物填图,才能为铀矿地质规律研究和找矿预测提供重要信息。CASI/SASI数据预处理主要包括辐射校正、几何校正、大气校正、光谱重建等过程^[25];TASI数据预处理主要包括辐射校正、几何校正、温度与发射率分离等^[26]。在研究过程中,3种数据的辐射校正与几何校正均在航空高光谱测量系统自带的预处理软件中进行;CASI/SASI数据的大气校正和光谱重建采用基于地面准同步测量获得的黑白布光谱的“经验线性法”^[25]进行;TASI数据的温度与发射率分离基于自主研发的温度与发射率分离模块^[26-27]进行。数据预处理之后,采用“沙漏”技术流程和混合调制匹配滤波填图方法对SASI数据进行矿物填图^[28];同时,采用波段比值或比值组方法对CASI、TASI数据进行矿物提取。

4 航空高光谱矿物识别结果及分布特征

4.1 航空高光谱矿物识别结果

利用航空高光谱技术在茆岭铀矿区及周围主要识别出了碱性长石、赤铁矿、中铝绢云母、低铝绢云母、蒙脱石、白云石、方解石、高岭石、透闪石/滑石/蛇纹石等闪石类矿物、以及绢云母绿泥石混合矿物等蚀变矿物信息,结果见图2。识别的各种矿物及光谱特征简述如下:

(1)碱性长石:主要指矿物学中微斜长石、钾长石、钠长石等其中的一种或多种混合。这些矿物在热红外区间的8500 nm和9600 nm等处存在明显的发射率低谷,呈右倾“W”型吸收特征(图3(a))。这些特征在TASI航空热红外高光谱上可明显识别出来(图3(a)),而且TASI航空热红外高光谱识别的碱性长石的发射率光谱特征形态和吸收位置总体上与国外美国亚利桑那州大学(Arizona State University, ASU)光谱库曲线中的发射率吸收特征一致(图3(a))。从图4可看出,虽然微斜长石、正长石、钠长石在ASU曲线有一些细致的差别,但由于TASI光谱分辨率为125 nm,在TASI航空热红外高光谱曲线上无法对它们进行区别。因此,根据TASI航空热红外高光谱数据,只能将微斜长石、正长石、钠长石等笼统地识别为碱性长石。在本次研究识别的碱性长石中,由于是富含钾、或钠等碱金属的长石,是反映可能存在碱交代热液作用的一种直接矿物学依据,因此碱性长石的识别对分析研究区哪些地段、哪

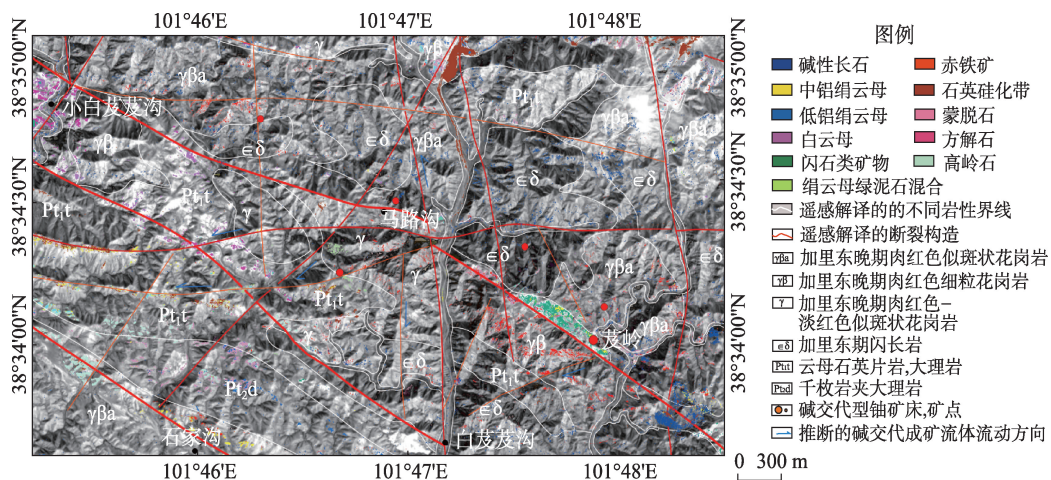


图2 茆岭碱交代铀矿区及周围CASI/SASI/TASI航空高光谱遥感矿物填图结果

Fig. 2 The CASI/SASI/TASI airborne hyperspectral mineral mapping in Jingling uranium deposit and its adjacent area

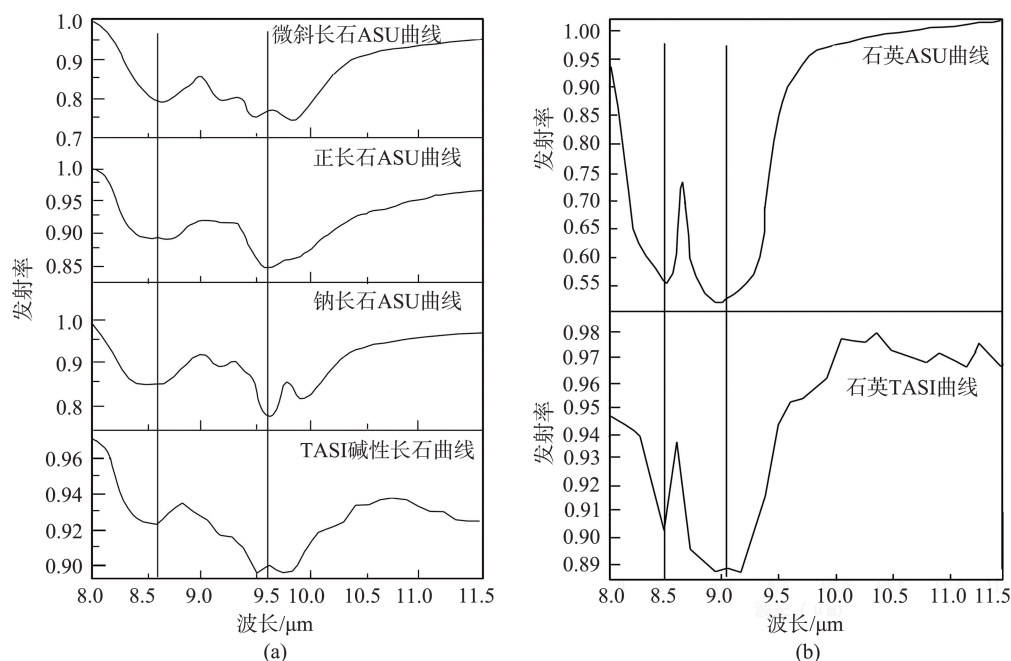


图3 各种碱性长石和石英 ASU 光谱库曲线与 TASI 航空热红外曲线比较

Fig. 3 Comparison between the spectral curves in AUS spectral library and TASI airborne thermal infrared curves for various alkaline feldspar and quartz

些岩性可能曾发生过碱交代流体蚀变作用提供了重要依据,从而为分析研究区的碱交代流体活动规律和碱交代型铀成矿有利区预测非常有意义。

(2) 石英: 本文识别的石英的 TASI 航空热红外发射率光谱曲线如图 3(b) 所示。从图中可看出, 该曲线大体上在 8.5 μm 和 9.2 μm 附近存在明显的发射谷, 显示出深的尖“W”特征。这个曲线形态和吸收谷位置特征与 ASU 光谱库中石英的曲线特征基本相近(图 3(b))。

(3) 闪石类矿物: 本文研究中识别的闪石类矿物主要是指光谱特征相近的几种闪石或其他类矿物中的一种或混合物, 具体可能是透闪石($\text{Ca}_2\text{Mg}_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$)、普通角闪石($\text{NaCa}_2(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_5[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$)、阳起石($\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$)、滑石($\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}]_2(\text{OH})_2$)、蛇纹石($\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$)等矿物中的某一种或多种混合。图 4(a) 是 USGS 光谱库中常见的几种闪石类矿物和滑石、蛇纹石在 2.0~2.55 μm 之间的光谱曲线图。从图中可看出, 除钠闪石($\text{Na}_2\text{Fe}_3^{2+}\text{Fe}_2^{3+}[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$)外, 其他矿物的光谱曲线形态和吸收特征均相近或相似。其中, 角闪石、普通角闪石、阳起石、滑石、透闪石 5 种矿物的光谱曲线形态均呈“W”形, 光谱主要吸收特征位置均在 2.315 μm 附近和 2.386 μm 附近, 透闪石的光谱吸收特征在 2.315 μm 附近和 2.375 μm

附近; 蛇纹石的光谱曲线呈左缓右陡的“不对称 V”形, 光谱主要吸收特征在 2.325 μm ; 钠闪石的光谱特征也呈“W”形, 但其主要光谱特征向长波方向偏移, 在 2.345 μm 和 2.418 μm 等。从上述分析可以看出, 除钠闪石外, 其他各种矿物的光谱吸收特征位置非常相近, 有差异的也只有 0.01 μm 左右(10 nm)。由于 SASI 航空高光谱的光谱分辨率为 15 nm, 因此在 SASI 航空高光谱曲线中, 无法精细区别上述各种矿物之间的差异。

图 4(b) 是龙首山铀成矿带主要飞行区内 SASI 航空高光谱图像中识别出来的 3 类与 USGS 光谱库中闪石类矿物、以及滑石、蛇纹石等相近形态和特征的端员曲线。从图中可看出, 这 3 类端员曲线的形态特征相近, 均呈 W 形, 且光谱吸收位置组合相近, 主要有 2315 nm+2390 nm、2315 nm+2375 nm、2330 nm+2390 nm、2330 nm+2405 nm 共 4 种组合。与 USGS 光谱库中各种闪石类矿物或滑石、蛇纹石等的光谱曲线特征相比, 这些 SASI 端员曲线无法明确识别为具体是哪类矿物。考虑到上述各种闪石类矿物的光谱曲线、物质成分均相近, 且与蛇纹石、滑石等矿物也经常共生于岩浆岩体与大理岩等变质岩的接触带上, 故本文将具有上述 3 类 SASI 端员曲线特征的矿物统一定名为闪石类矿物。经大量的野外验证和样品室内光谱测量分析表明, 菱岭

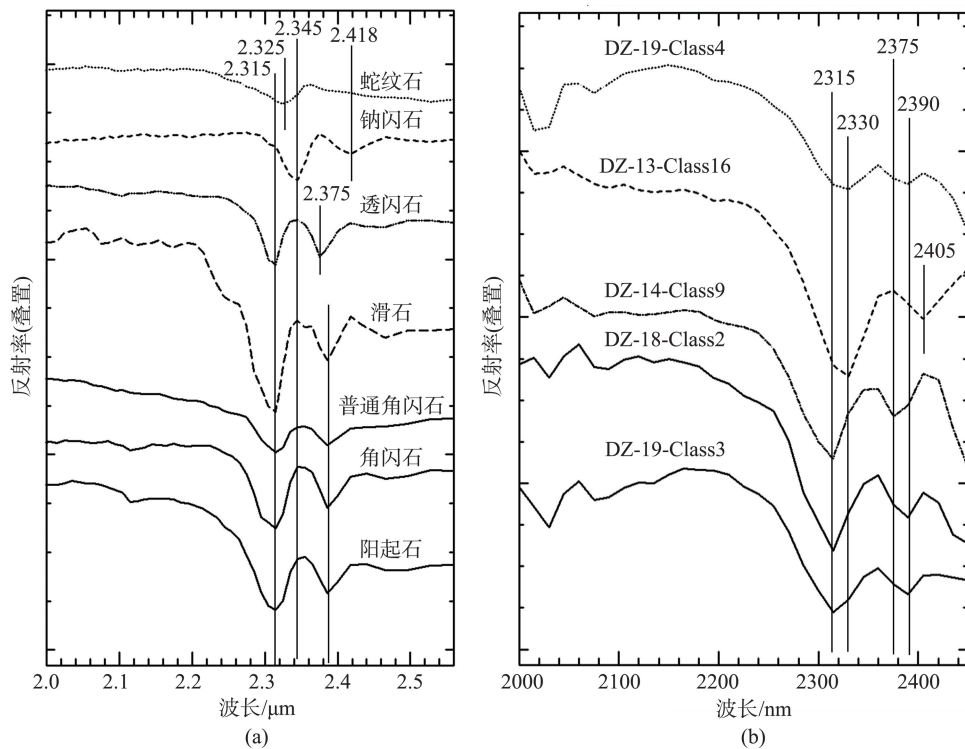


图4 各种闪石类矿物USGS光谱库曲线与SASI航空高光谱端员曲线比较

Fig. 4 Comparison between the spectral curves of amphibole species in USGS spectral library and SASI endmember

矿区及周围发育SASI识别的闪石矿物地段的主要蚀变矿物类型有透闪石、滑石和蛇纹石。

(4)高铝绢云母、中铝绢云母和低铝绢云母:此次航空高光谱识别的高铝绢云母、中铝绢云母和低铝绢云母分别以SASI航空高光谱Al-OH光谱吸收位置处于2195、2210和2225 nm为主要特征^[29]。从矿物属性上看,此类矿物可能是地质矿物学中的绢云母、伊利石中的一种或混合;从矿物成因学角度看,它们可能分别形成于偏酸性、偏中性和偏弱碱性流体条件下的产物^[29]。

(5)其他矿物:除上述介绍的各种矿物外,还有赤铁矿、高岭石、蒙脱石、白云石、方解石、绿泥石与绢云母混合等矿物。这些矿物的SASI航空高光谱曲线特征与以往的研究成果^[25]中阐述的相近。这里就不再详述。

4.2 航空高光谱识别矿物分布特征

航空高光谱识别的矿物空间分布特征可以作为一个地区的热液流体活动和蚀变作用研究提供依据。从茆岭铀矿区及周围的航空高光谱矿物分布图来看(图2),以茆岭铀矿区西侧附近近南北向大沟和东西向断裂为界,总体上具有西部比东部强,

南部比北部强的特点。其中,东部地区主要是茆岭铀矿区及附近,分布有闪石类矿物、中铝绢云母、高岭石、蒙脱石、赤铁矿以及碱性长石等,以强烈的闪石类矿物、中铝绢云母、赤铁矿等蚀变为特征;西部地区主要分布有强烈的中铝绢云母、低铝绢云母、高岭石、石英、蒙脱石、方解石、白云石等;北部地区主要分布有较多的碱性长石、赤铁矿;南部则主要分布有低铝绢云母、赤铁矿、碱性长石、石英等。

从蚀变矿物与构造、岩性的关系来看,处于东部的茆岭铀矿区,其蚀变主要分布在北西向构造带附近(图5)。其中,闪石类矿物、中铝绢云母、白云石、方解石主要分布在F105与F102之间的以大理岩为主、局部夹斜长角闪片岩、花岗岩的下元古界地层中。赤铁矿和碱性长石主要分布在铀矿区西南部的花岗岩中。在西部地区,蚀变矿物空间分布呈现明显的沿断裂构造分布或沿地层、岩体分布的特点。其中,沿东西向略带弧构造明显分布有中铝绢云母、高岭石、石英等矿物及组合;沿北西向构造分布有中铝绢云母、高岭石等矿物;赤铁矿明显分布在花岗岩中,其他如低铝绢云母、方解石、白云石等矿物主要分布中元古界的地层中,可能与地层的斜长角闪片岩、大理岩、白云岩等一定的关系。在

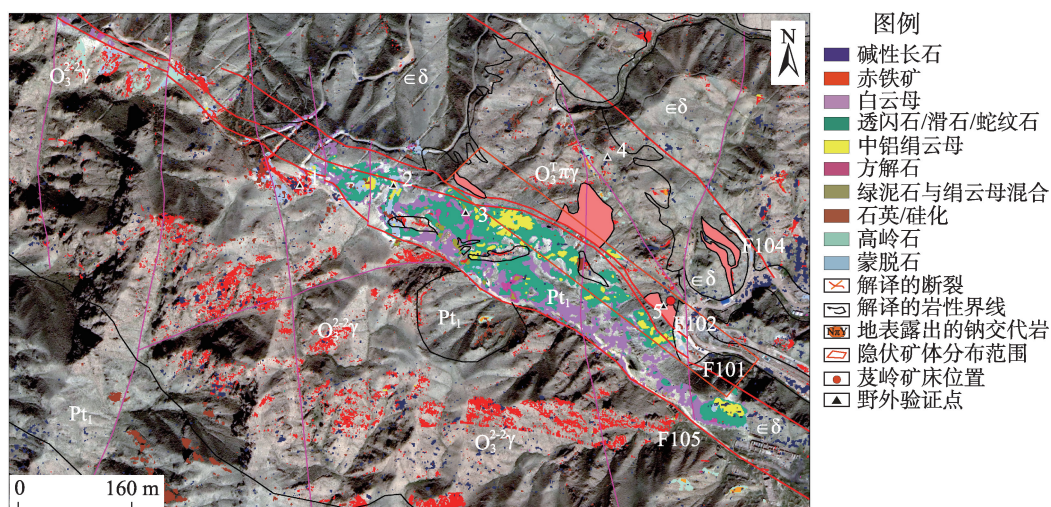


图5 菱岭铀矿区航空高光谱蚀变-构造-岩性综合分析

Fig. 5 Comprehensive map of alteration and structure and lithology identified from airborne hyperspectral in Jingli uranium district

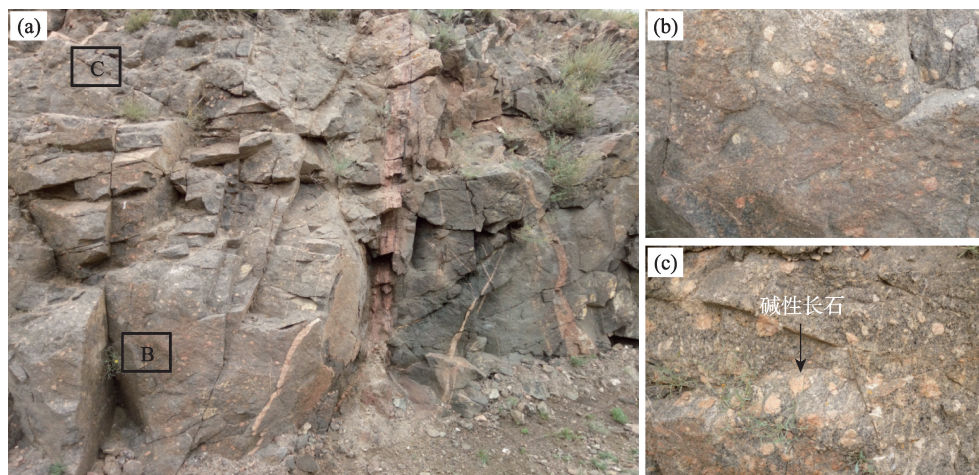
北部,主要在闪长岩中分布有较明显的碱性长石;同时,在花岗岩体内分布有一些赤铁矿。

野外验证表明,菱岭铀矿区北部闪长岩中发育的碱性长石表现为闪长岩中出现的大量碱性长石大斑晶集合体(图6);矿区内发育的闪石类矿物明显可以在大理岩中发现发育有强烈的蛇纹石化、滑石化、以及透闪石等蚀变,尤其是在构造或破碎带附近的大理岩中更加强烈;矿区内的中铝绢云母主要发育于穿插在大理岩中的花岗岩中(图7),同时在矿区东侧花岗岩内的一些小断裂构造部分也有发育;赤铁矿化蚀变主要发育在发生碱交代蚀变的花岗岩中(图8),蒙脱石、高岭石等矿物在菱岭铀矿

区内也大多发育在花岗岩体中。

5 讨论

碱交代热液作用理论^[30]认为,全部的热液作用是从碱性开始的,然后演化为中性到酸性;碱交代作用是由碱交代、中性交代及酸交代三阶段前后联系的全过程,即碱交代只是碱交代作用的第一阶段,后续还有中性交代和酸交代。其中,碱交代蚀变作用主要有钾长石化、钠长石化、白云母化、黑云母化、金云母化等,中性交代蚀变作用主要有绿泥石化、绿帘石化、蛇纹石化、赤铁矿化、石榴子石化



注:图(b)为图(a)B区放大图;图(c)为图(a)C区放大图。

图6 航空高光谱识别的闪长岩中的碱性长石野外照片

Fig. 6 Field photo for the alkali-feldspar identified by airborne hyperspectral in diorite



图7 航空高光谱识别的闪石类矿物和中铝绢云母蚀变野外照片

Fig. 7 Field photo for amphibole species and medium-Al sericite alteration identified by airborne hyperspectral

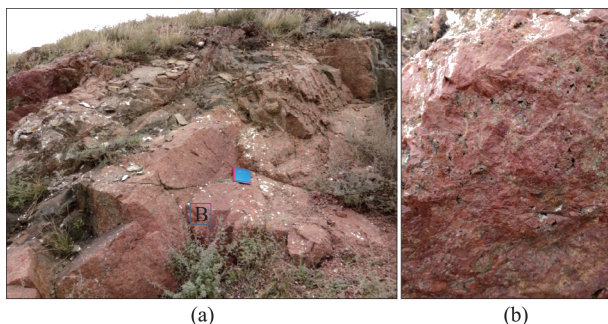


图8 花岗岩内强烈赤铁矿化蚀变野外照片

Fig. 8 Field photo for strong hematite alteration in granite

等,酸交代蚀变交代主要有硅化、萤石化、黄铁矿化、碳酸盐化、硫酸盐化、氢交代黏土矿化(如伊利石、蒙脱石、高岭石、沸石、绿脱石等)等。同时,碱交代理论还认为,在整个碱交代热液演化过程中,由于盐解效应,酸碱发生时间上、空间上的分离,常有早碱晚酸、下碱上酸、下碱上硅、下碱上矿等时空规律;而且根据液-固时差(a值)、酸-碱距(b值)、硅-碱距(b'值)距、矿-碱距(c值)及钾-钠距(d值)5个特征值,可以将碱交代作用分为开放系、半开放封闭系及封闭系^[31];酸-碱分离的一个重要条件是必须有通道,如断裂带、韧性剪切带、推覆面、滑覆面、不整合面、岩体接触带、爆破角砾岩筒、高渗透性地层等。在成矿作用方面,碱交代作用理论认为,碱交代作用的早期碱交代蚀变形成的碱交代岩是矿质浸出场或成矿源提供场,酸交代(又称酸

尾)是碱交代演化到晚期的派生阶段,是酸质沉淀场,是成矿元素的带入场、富集场和成矿场。成矿全部产生于酸尾或酸质沉淀场中^[31]。从上述碱交代热液作用理论可知,与碱交代作用的热液蚀变矿物类型是多样的,不仅仅是钾长石化、钠长石化等少数几种碱性蚀变矿物,还包括各种中性交代蚀变矿物和各种粘土矿物,而且这些蚀变矿物在时空上存在分离和多种空间关系;同时,碱交代作用由于通道的多样性,其作用的地质环境也是多样的。因此,在研究和分析一个地区的碱交代作用,并进行找矿预测时,需要从碱交代理论和各个地区的实际地质情况出发,对识别的蚀变矿物的性质、矿物组合、时空分布、所处地质环境等先进行具体分析,然后判识这些蚀变是否与碱交代作用相关,以及它们在碱交代演化过程中的位置,最后进行区域或矿床外围、深部等不同尺度的找矿预测应用。

5.1 菱岭碱交代型铀矿床蚀变矿物类型的高光谱遥感分析

从菱岭铀矿区航空高光谱识别的蚀变矿物组合及空间分布来看(图6),大致可分为西南呈面状分布的碱性长石-赤铁矿-硅化蚀变区,中部呈北西走向的闪石类矿物及粘土矿物组合区,东部呈面状、局部呈北北西向的碱性长石-赤铁矿化-粘土化组合区。其中,西南部的花岗岩中,明显分布有碱性长石,与其伴生的主要是赤铁矿化,并在其西南附近出现了明显的石英(硅化)。这3种矿物组合出现与花岗岩中的钾交代热液蚀变通常形成钾长石、赤铁矿、以及硅化等地球化学过程是相符的。只是由于这一地段缺少碱交代作用演化过程中的中性、酸性阶段的蚀变产物,因此这一地段或其深部可能只是发育碱交代早期蚀变。东部地区的碱性长石-赤铁矿化-粘土化蚀变区,主要有碱性长石、赤铁矿化、高岭石、中铝绢云母等,发育在花岗岩夹闪长岩中,可能反映碱交代早期到晚期不同阶段的产物,反映深部可能有更多的碱交代岩的存在。

中部呈北西走向的闪石类矿物及粘土矿物组合区,是菱岭铀矿区的主要区域,是菱岭铀矿区蚀变最集中发育的地段,位于花岗岩、闪长岩之间、而且夹于多条断裂之间的元古界变质中。这个变质岩出露的主要是白色大理岩夹少量灰黑色角闪片岩、局部地段出露花岗岩(赤铁矿化发育的局部地段)(图5)。在这个变质岩地层中,明显发育了蛇纹

石、滑石、透闪石等与中性热液交代蚀变作用相关的蚀变矿物和中铝绢云母、绢云母与绿泥石混合、高岭石、硅化等中性-酸性热液交代作用的蚀变矿物。因此,这些蚀变矿物的存在及空间组合,是菱岭铀矿区曾发生强烈碱交代热液蚀变作用的重要矿物学特征。从以下3个方面分析来看,菱岭铀矿区地表出露的各种蚀变矿物与碱交代蚀变作用的相关性非常明显:①闪石类矿物分布强度大,基本上都在白云石分布范围之上发育而来。由于蛇纹石、滑石、透闪石都是含镁的铝硅酸盐矿物,但白云石只是含钙镁的碳酸盐,并不含硅。从地球化学角度上说,在白云石的基础上发育出大量蛇纹石、滑石、透闪石等热液蚀变矿物,必然要求热液中含有大量Si,才能完成这2大类矿物的转变,而热液中大量的硅很可能就是深部碱交代作用产生的;同时,因为钙、镁是弱碱性,只能是从属于钠、钾强碱交代中,不可能有独立的钙镁交代^[31]。因此,菱岭铀矿区中出现的蛇纹石、滑石、透闪石等钙镁铝硅酸盐矿物的形成可以认为是与深部碱交代作用密切相关的证据。②分布范围明显变小出现的绢云母与绿泥石共生、中铝绢云母、高岭石、蒙脱石等都是含钾的矿物,而且是与氢交代密切相关的蚀变矿物。因此,这些蚀变矿物的存在,表明该地段的热液蚀变中含有K⁺的参与,而且是在偏中性-酸性条件下形成的。这不仅直接表明该地段的热液蚀变直接与钾交代参与有关,而且是钾交代作用的相对中后期的产物。③只有局部地段出现的明显硅化,反映了热液作用的最后阶段仍有较多的Si,并在最后酸尾阶段形成石英或硅化,这也反映出深部碱交代作用的存在。

值得指出的是,本文航空高光谱识别过程中,在地表并未发现具有钠闪石光谱特征的矿物。因此,在闪石类矿物中并不含钠闪石。前人微观分析研究也指出并未发现钠闪石。这一方面进一步表明上述蛇纹石、滑石、透闪石等大规模发育的碱交代作用可能是与龙首山地区第二阶段钾交代蚀变作用密切相关的,这与第二阶段钾交代处于半封闭半开放体系,酸-碱分离距离小,使得上述中性、酸性蚀变矿物在空间上具有较好的共存关系的现象是相吻合的;另一方面也表明,与铀矿化有关的第三、第四阶段的钠交代蚀变溶液中钠离子在钠长石阶段早期已经消耗差不多了,在中性、酸性交代的相对中晚期中钠离子已经缺失,因此没有条件形成钠闪石。具有更短波长的、可能反映是钠云母的

高铝绢云母^[29]在矿区地表中没有被高光谱发现,也进一步说明了溶液中钠比较缺失,无法形成有规模的钠云母蚀变,而只是在某些样品的显微分析中看出钠长石表面形成了钠云母。

5.2 碱交代热液蚀变作用通道的高光谱遥感分析

如上所述,碱交代作用发生酸-碱分离的一个重要条件是必须有通道,如断裂带、韧性剪切带、推覆面、滑覆面、不整合面、岩体接触带、爆破角砾岩筒、高渗透性地层等。从龙首山菱岭铀矿床及周围地区的航空高光谱蚀变-构造-岩性综合图来看(图4),蚀变与构造在空间上紧密联系的主要是北西方向的断裂和东西方向的断裂。前者主要是通过菱岭、马路沟等地段的马路沟断裂。蚀变在该断裂发育最强的地段是菱岭矿区地段及其东南部,其次是图2区域西北角的火石岭地段;此外,在图西南角,也有一条北西向断裂,蚀变非常发育。东西向断裂中,具有明显蚀变发育的要属图西侧两条近平行的略呈弧形的东西向断裂。沿断裂明显发育硅化、高岭石、中铝绢云母等,可能是碱交代作用后期的酸性交代作用产物集中产生地段。

从菱岭铀矿床航空高光谱蚀变-构造-岩性综合分析图来看(图5),闪石类矿物、绢云母、高岭石、方解石等绝大多数与碱交代作用相关的热液蚀变均发生在地表以白色大理岩为主的Pt1出露区,它是一个明显的早期元古代变质岩与后期侵入岩体之间的不整合面;同时,这一蚀变明显发育地段也是北西向F105与F101两条断裂通过并夹持的地区,且从含铀矿化钠交代岩体的分布来看,也是位于闪长岩与花岗岩2种不同岩性的接触带。因此,菱岭钠交代型铀矿床碱交代作用的通道,首先是元古界变质岩与晚期岩体的不整合接触带,其次是北西向区域性大断裂通过的地段,最后是不同的岩体的接触带。综合起来说,菱岭钠交代型铀矿床定位于区域不整合面、北西向区域大断裂、不同岩体接触带等不同通道的复合部位,具有独特的碱交代铀成矿条件。对航空高光谱蚀变矿物-构造-岩性综合分布图进一步分析可看出,F101断裂附近闪石类蚀变矿物、中铝绢云母明显更加发育,碱交代岩体也主要分布在F101、F102附近;而F105附近多数白云岩未发生蚀变,尤其是其东南段,除最末端发生了蚀变外,基本上均是白云石,而不是蛇纹石等蚀变矿物。前苏联米丘林铀矿床的构造带中也明显出现了绿泥石、阳起石、透闪石、石英等矿物^[33]。从方

解石、绿泥石与绢云母混合矿物的分布来看,其更靠近在F105断裂的中段,主要位于F105与北东东向断裂交汇区附近的变质岩区;F105断裂在西北段靠近花岗岩一侧与近南北向断裂交汇地段,明显发育高岭石、蒙脱石等蚀变。野外验证也发现,这些发育高岭石、蒙脱石蚀变的地段发育有近南北向的断裂带,断裂带内均充填各种蒙脱石、高岭石等粘土类物质,与其斜交的裂隙中充填有碳酸盐脉。因此,F105附近的高岭石、方解石可能与南北向断裂活动有关。从上述蚀变与构造关系分析表明,茆岭铀矿区F101断裂可能是控制该地区第二阶段区域钾交代和第三期、第四期碱交代作用演化的主要断裂,是控矿断裂;而F105可能是后期切割F101的断裂。这与前人研究^[2]认为茆岭地区控制铀成矿的断裂为F101马路沟断裂,F105是后期切割F101的断裂的认识是一致的。

5.3 碱交代热液蚀变作用阶段航空高光谱遥感分析

前人研究认为龙首山地区碱交代作用非常发育,并有多阶段演化特点,在成因上与该区加里东期大规模的中酸性岩浆活动有密切的联系,大致可分为4个阶段^[2]。

(1)高温钾钠混合交代阶段。该阶段作用范围较小,主要分布在茆岭岩体的范围内,特别是北带的碱性正长岩外围,与断裂构造的关系不明显,红化不显著。

(2)区域性钾交代阶段。该阶段作用不仅涉及岩浆岩,而且涉及到老变质岩。在岩体内部微斜长石和微斜条纹长石强烈交代斜长石,并伴随有轻度红化现象;变质岩中主要表现为云母化,形成一些大片状的黑、白云母片。钾交代作用在区内呈带状分布,主要集中在岩体内外接触带及区域性大断裂带与岩体的交切部位,明显受断裂和岩体的双重控制;被认为其成因较复杂,既有自变质期的产物又有热液期的产物迭加,是本区碱交代作用从封闭式向开放式过渡阶段的产物。

(3)中低温热液钠钙交代阶段。范围大大缩小,多集中在茆岭岩体内外接触带上,严格受断裂构造控制;交代作用可涉及多种围岩,但蚀变岩石的最终矿物组合却趋于一致,即钠长石、绿泥石、方解石(白云石)及赤铁矿组成的钠交代岩。

(4)矿化期钠交代阶段。这次热液活动的范围更加局限,仅限制在早期钠交代岩内部,是一次迭加交代作用,与早期钠交代的差异主要表现在

碳酸盐化及赤铁矿化更强烈。在交代作用的最后阶段硅和钾的活动有明显的显示,表现为细脉状硅质脉的贯入及某些早期钠长石表面出现了弱的绢云母化现象。

从上述第4阶段碱交代作用的特点来看,虽然它们在时间上分开的,但空间上是存在联系的,尤其是第2-4阶段碱交代作用随着体系的开放度不断增强,相互联系也更加紧密。

航空高光谱遥感技术在茆岭铀矿床及周围地区识别出了碱性长石、赤铁矿、中铝绢云母、低铝绢云母、蒙脱石、白云石、方解石、高岭石、闪石、以及绢云母绿泥石混合矿物、石英(硅化)等蚀变矿物。从矿物类型和矿物组合角度来说,这些矿物都与包括碱交代、中性交代、酸性交代3个阶段的碱交代作用密切相关;从蚀变与构造、岩性等关系角度来看,茆岭钠交代型铀矿床各种碱交代蚀变定位于区域不整合面、区域大断裂、不同岩体接触带等多个不同通道的复合部位。因此,航空高光谱遥感技术在茆岭铀矿区及周围识别出来的各种蚀变矿物,是龙首山地区整个4个阶段碱交代热液蚀变作用演化过程中形成的蚀变矿物在现今地表出露的一种综合表现,而且可能是以第2阶段钾交代作用为主,叠加第3、4阶段碱交代蚀变作用的综合产物。

5.4 航空高光谱遥感识别的蚀变-构造-岩性组合与铀矿化关系分析

如上所述,茆岭铀矿区航空高光谱识别的蚀变矿物组合及其空间分布,大致可分为西南呈面状分布的碱性长石-赤铁矿-硅化蚀变区,中部呈北西走向的闪石类矿物及粘土矿物组合区,东部呈面状、局部呈北北西向的碱性长石-赤铁矿化-粘土化组合区。从已发现的地表和深部铀矿化来看,处于西南部的碱性长石-赤铁矿-硅化蚀变区,目前还未发现有铀矿化存在,这可能与该地区主要发育早期碱交代蚀变,而中期和是晚期的中性交代和酸性交代蚀变相对比较缺失有关;中部呈北西走向的闪石类矿物及粘土矿物组合区,是茆岭铀矿区铀矿化发育的主要地段,其地表和深部均发育碱交代铀矿体,而且铀矿体总体呈北西向展布,受F101控制。该地段之所以是铀矿体主要发育地段,与前面所述这个地区是区域不整合面、北西向区域大断裂、不同岩体接触带等不同通道的复合部位,而且发育强烈的中性交代、酸性交代蚀变作用密切相关。东部呈面状、局部呈北北西向的碱性长石-赤铁矿化-粘土化

组合区,也存在地表铀矿化和深部铀矿体,但其规模远比中部的铀矿区小,而且随着与F101断裂的距离不断增加,铀矿化不断降低。对于研究区钠交代岩型铀矿所具有的钠长石化、赤铁矿化、绿泥石化和碳酸盐化四位一体蚀变组合不应割裂分开研究,应作为整个过程联合研究。对铀成矿作用,特别强调钠长石化对铀成矿的作用或者绿泥石化对铀成矿的作用都是不合适的^[34]。多个花岗岩型铀矿床流体包裹体特征研究表明,从成矿前→成矿期→成矿后的高温→中低温成矿溶液“碱、酸、碱”演化规律中的酸性阶段成矿^[24]。菱岭铀矿床主成矿阶段流体包裹体属于典型的沸腾流体包裹体组合,包裹体盐度呈非正态分布特征,与沸腾流体盐度特征基本相符。因此,成矿流体在成矿时期发生沸腾作用^[35]。高铝绢云母、中铝绢云母、高岭石等偏酸性流体蚀变矿物的形成常与沸腾作用相关^[29]。因此,从上述分析来看,航空高光谱识别的透闪石、蛇纹石等中性蚀变和中铝绢云母、高岭石等酸性粘土化蚀变与碱交代铀成矿具有很好的空间相关性,也符合碱交代作用理论中铀成矿作用的地球化学过程,对区域铀成矿预测和已有矿点、异常点的重新评价具有重要作用。

5.5 碱交代型铀矿找矿预测的高光谱遥感判据

龙首山地区碱交代型铀矿找矿历史较长,地表发现的各类铀矿点、异常点很多。对该地区的铀矿找矿来说,航空高光谱遥感对铀成矿要素的识别与分析,一方面是对区域性的铀成矿有利区进行再预测,指出和发现那些以往可能考虑较少或忽略的一些新区;另一方面,对已发现的一些铀矿点和异常点进行再分析,筛选出深部可能有更好成矿前景的那些铀矿点或异常点。因此,综合前述的分析和讨论,从航空高光谱遥感角度对在龙首山地区进一步的区域铀矿找矿,应该更好地关注如下一些找矿信息判据:

(1)明显发育航空高光谱识别的闪石类矿物的地段及其附近。这是以大理岩为主的早元古代地层中曾出现大量增硅热液蚀变作用的有利证据,是元古代变质岩地层与花岗岩体之间的不整合面、或与区域大断裂复合地段等第2阶段区域碱交代作用有利于环境的重要体现。龙首山碱交代型铀矿床主要分布在菱岭复合岩体中,呈北西-东南朝向的“U”展布的菱岭岩体与元古代老地层存在广泛的接

触带;同时,除菱岭岩体外,区域上还存在不少其他岩体与元古界接触带。因此,明显发育闪石类矿物的地段及其附近这一判据,可作为在各种岩体与元古界变质岩接触带中筛选出铀矿找矿有利地段的重要依据。

(2)明显发育航空高光谱识别的中铝绢云母、高岭石等蚀变矿物的地段,尤其是沿断裂构造分布或在花岗岩体内发育的地段。这些矿物的出现是龙首山地区深部碱交代流体作用演化到后期变成中性、酸性流体重要矿物学证据,是与铀成矿密切相关的酸尾阶段的蚀变矿物,常常出现在深部碱交代作用的上部或接近地表处。由于龙首山地区最有利于铀矿产出的围岩是花岗岩,因此,切割花岗岩的断裂或花岗岩体中的中铝绢云母、高岭石等蚀变矿物是重要的找矿信息。

(3)明显发育航空高光谱识别的石英/硅化信息分布地段及附近。这也是热液流体活动中酸尾的重要证据,可能反映深部存在明显的碱交代作用。从龙首山地区实际情况来看,不仅要注意花岗岩体内部可能出现的石英脉或硅化信息,更应该注意与花岗岩体接触带附近变质岩中出现的明显的石英和硅化信息,这往往可能是花岗岩体深部碱交代作用产生的硅沿接触带薄弱面向上运移后沉淀在变质岩中的。前人研究表明,石英帽是钠交代存在的标志,当我们发现石英帽时,就很有可能在深部找到钠交代体。红石矿田斯特列造夫矿床巨大钠交代体外带厚度在500 m左右,碱交代体上端至石英帽下端垂直距离在400~500 m之间,即上部石英帽所处位置远离碱交代体数百米^[32]。

(4)发育航空高光谱识别的各类蚀变矿物的北西向区域性大断裂或不同岩体接触带或不整合面的地段,即北西向区域性大断裂旁侧或附近、或花岗岩体与闪长岩接触带附近、或花岗岩体与元古代变质岩、其他地质时代地层的不整合面附近,发育明显的闪石类矿物、中铝绢云母、高岭石、石英/硅化、赤铁矿等矿物信息的地段。这一判据主要是将龙首山地区与铀成矿作用密切相关的北西向控矿区域大断裂、不整合面、不同岩体接触带等深部流体活动主要通道与热液活动蚀变产物相结合,为那些地表没有出现明显的铀矿化异常或花岗岩体、构造等有利铀成矿因素的情况下,判识深部可能存在隐伏岩体或隐伏碱交代体提供依据。同时,航空高

光谱遥感识别的各种蚀变矿物与区域不整合面、区域大断裂、不同岩体接触带等有利因素的复合部位,更是具有独特的碱交代铀成矿有利条件的地段,是铀矿找矿的重点区段。

6 结论

本文基于CASI/SASI/TASI航空高光谱遥感技术在甘肃龙首山菱岭铀矿区及周围识别出了碱性长石、赤铁矿、中铝绢云母、低铝绢云母、蒙脱石、白云石、方解石、高岭石、闪石类矿物、以及绢云母绿泥石混合矿物等蚀变矿物。这些蚀变矿物的识别对分析研究区热液流体蚀变作用和铀矿找矿有利区预测具有重要作用。

分析研究表明:①龙首山菱岭铀矿床区及周围航空高光谱识别出来的碱性长石、赤铁矿、中铝绢云母、高岭石、闪石类矿物、以及绢云母绿泥石混合矿物、石英(硅化)等蚀变矿物与碱交代蚀变作用密切相关;这些蚀变矿物是研究区整个四期碱交代热液蚀变作用演化过程中形成的蚀变矿物在现今地表出露的一种综合表现,而且这种综合表现可能是以第二期钾交代作用为主、叠加第三、第四期碱交代作用;②菱岭钠交代型铀矿床定位于明显发育航空高光谱闪石类矿物、绢云母、高岭石、方解石等蚀变矿物与花岗岩与元古代大理岩的区域不整合面、F101北西向区域大断裂、以及不同岩体接触带等有利条件的复合地段,航空高光谱蚀变、构造、岩性等组合要素特征明显。

从航空高光谱遥感角度对在龙首山地区进一步铀矿找矿,应该更好地关注如下一些找矿信息判据:明显发育航空高光谱识别的闪石类矿物的地段及其附近;明显发育航空高光谱识别的中铝绢云母、高岭石等蚀变矿物的地段,尤其是沿断裂构造分布或在花岗岩体内发育的地段;明显发育航空高光谱识别的石英/硅化信息分布地段及附近;发育航空高光谱识别的各类蚀变矿物的北西向区域性大断裂或不同岩体接触带或不整合面的地段,尤其是航空高光谱遥感识别的各种蚀变矿物与区域不整合面、北西向区域大断裂、不同岩体接触带等有利因素的复合部位。

参考文献(References):

[1] 施文静,胡俊祯.龙首山铀成矿规律与成矿模式[J].铀矿

地质,1993,9(3):1-8. [Shi W J, Hu J Z. Metallogenic regularities and models of Longshoushan Uranium metallogenic belt[J]. Uranium Geology, 1993,93(3):1-8.]

[2] 赵如意.甘肃省龙首山成矿带菱岭钠交代型铀矿地质特征与成矿作用研究[D].西安:长安大学,2016. [Zhao R Y. The study on geological characteristics and metallogeny of Jiling sodium-metasomatic uranium deposit in Longshoushan metallogenic belt, Gansu province[J]. Xi'an: Chang'an University, 2016:1-155.]

[3] 赵如意,陈云杰,武彬,等.甘肃龙首山菱岭地区钠交代型铀矿成矿模式研究[J].地质与勘探,2013,49(1):67-74. [Zhao R Y, Chen Y J, Wu B, et al. A metallogenic model of the sodic-metasomatic type uranium ore deposit in Jiling area of Longshoushan, Gansu province[J]. Geology and Exploration, 2013,49(1):67-74.]

[4] 聂利,赵如意,陈旭,等.甘肃龙首山成矿带菱岭岩体闪长岩特征及其与铀成矿关系[J].现代地质,2016,30(4):760-769. [Nie L, Zhao R Y, Chen X, et al. Characteristics of diorite from Jiling pluton and its relationship with uranium metallogenic in Longshou mountains, Gansu province[J]. Geoscience, 2016,30(4):760-769.]

[5] 赵亚云,张树明,汤琳,等.龙首山中段菱岭花岗岩体Sr-Nd-Pb同位素特征及意义[J].地球科学,2016,41(6):1016-1030. [Zhao Y Y, Zhang S M, Tang L, et al. Sr-Nd-Pb isotopic characteristics and its geological significance of the Jiling granitic pluton in the middle longshou mountains[J]. Earth Science, 2016,41(6):1016-1030.]

[6] 王志宏,汪冰,邓国武,等.地球物理-地质模型在龙首山地区铀矿勘查中的应用[J].物探化探计算技术,2016,38(6):715-721. [Wang H B, Wang B, Deng G W, et al. The application of geology-geophysical model to exploration of uranium deposit in Longshoushan zone[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical exploration, 2016,38(6):715-721.]

[7] 陈云杰,王伟,王刚,等.甘肃龙首山地区菱岭铀矿区蚀变特征分析[J].矿产与地质,2015,29(2):144-151. [Chen Y J, Wang W, Wang G, et al. Characteristics of alteration in Jiling uranium mining area in Longshoushan area of Gansu[J]. Mineral Resource and Geology, 2015,29(2):144-151.]

[8] 魏正宇,张玮.甘肃菱岭铀矿床围岩蚀变特征及其与铀矿化的关系[J].地质学刊,2014,38(1):150-153. [Wei Z Y, Zhang W. On relationship of wall rock alteration characteristics with uranium mineralization for uranium deposit in Jiling of Gansu[J]. Journal of Geology, 2014,38(1):150-153.]

[9] 陈云杰,赵如意,武彬.甘肃龙首山地区菱岭铀矿床隐爆角砾岩发现及成因探讨[J].地质与勘探,2012,48(6):1101-1108. [Chen Y J, Zhao R Y, Wu B. Discovery of cryptoexplosive breccias in the Jiling uranium deposit of

- the Longshoushan area, Gansu Province and their genesis [J]. *Geology and Exploration*, 2012,48(6):1101-1108.]
- [10] 朱勇,吴波.光谱与空间维双重稀疏表达的高光谱影像分类[J].*地球信息科学学报*,2016,18(2):263-271. [Zhu Y, Wu B. Classification of hyperspectral images with spectral spatial sparse representation. *Journal of Geo-information Science*, 2016,18(2):263-271.]
- [11] 杨可明,魏华锋,刘飞,等.以光谱信息熵改进的N-FINDR高光谱端元提取方法.*地球信息科学学报*,2015,17(8):979-985. [Yang K M, Wei H F, Liu F, et al. Improved N-FINDR algorithm on hyperspectral endmember extraction based on spectral shannon entropy[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2015,17(8):979-985.]
- [12] 李雪轲,王晋年,张立福,等.面向对象的航空高光谱图像混合分类方法[J].*地球科学信息学报*,2014,16(6):941-948. [Li X K, Wang J N, Zhang L F, et al. A hybrid of object-based and pixel-based classification method with airborne hyperspectral imagery[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2014,16(6):941-948.]
- [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铀矿勘查中的初步应用.*世界核地质科学*, 2011,28(4):231-236. [Ye F W, Liu D C, Zhao Y J. Airborne hyperspectral survey system CASI/SASI and its preliminary application in uranium exploration[J]. *World Nuclear Geoscience*, 2011,28(4):231-236.]
- [14] 叶发旺,王存,张川,等.航空高光谱遥感技术在新疆雪米斯坦地区铀多金属矿产勘查中的应用研究[J].*地质论评*,2013,59(增刊):930-931. [Ye F W, Wang C, Zhang C, et al. Application of airborne hyperspectral remote sensing technology to uranium and polymetallic mineral exploration in Xuemisitan area, Xinjiang[J]. *Geological Review*, 2013,59(sup):930-931.]
- [15] 刘德长,叶发旺,赵英俊,等.航空高光谱遥感金矿床定位模型及找矿应用——以甘肃北山柳园-方山口地区为例[J].*地球信息科学*,2015,17(12):1545-1553. [Liu D C, Ye F W, Zhao Y J, et al. Airborne hyperspectral remote sensing for gold prospecting around Liuyuan-Fangshankou Aarea, Gansu Province, China[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2015,17(12):1545-1553.]
- [16] 刘德长,田丰,邱骏挺,等.柳园-方山口地区航空高光谱遥感固体矿产探测及找矿效果[J].*地质学报*,2017,91(12): 2781-2795. [Liu D C, Tian F, Qiu J T, et al. Application of hyperspectral remote sensing in solid ore exploration in the Liuyuan-Fangshankou area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017,91(12):2795-2812.]
- [17] 李志忠,汪大明,刘德长,等.高光谱遥感技术及资源勘查应用进展[J].*中国地质大学学报*, 2015,40(8):1287-1294. [Li Z Z, Wang D M, Liu D C, et al. Hyperspectral remote sensing technology and its process in resources exploration[J]. *Earth Science- Journal of China University of Geosciences*, 2015,40(8):1287-1294.]
- [18] 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. Advances on technique of extracting mineral information from airborne hyperspectral remote sensing data and its application: A case study of survey on the west metallogenic belt[J]. *Chinese Geological Survey*, 2016,3(4):55-62.]
- [19] Kirkland L, Herr K, Keim E, et al. First use of an airborne thermal infrared hyperspectral scanner for compositional mapping[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002,80(3): 447-459.
- [20] Laakso K, Rivard B, Peter J M, et al. Application of airborne, laboratory, and field hyperspectral methods to mineral exploration in the canadian arctic: recognition and characterization of volcanogenic massive sulfide-associated hydrothermal alteration in the Izok Lake deposit area, Nunavut, Canada[J]. *Economic Geology*, 2015,110(4): 925-941.
- [21] 汤中立.华北古陆西南缘(龙首山-祁连山)成矿系统及成矿构造动力学[M].北京:地质出版社,2002. [Tang Z L. Metallogenic system and metallogenic tectonic dynamics for southwest fringe of North China ancient land (longshoushan-Qilianshan)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.]
- [22] 李占游.菱岭花岗岩及铀矿化的地球化学研究[J].*矿物岩石地球化学通讯*,1987(4):232-234. [Li Z Y. Study on geochemistry of Jiling granite pluton and its uranium mineralization[J]. *Bulletin of mineralogy, petrology and geochemistry*, 1987(4):232-234.]
- [23] 汤琳,张树明.龙首山菱岭复式岩体岩石地球化学特征及构造环境探讨[J].*东华理工大学学报(自然科学版)*,2015, 38(3):265-272. [Tang L, Zhang S M. Geochemical characteristics of Jiling composite pluton in Longshou Mountain and tectonic environment discussion[J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 2015,38(3):265-272.]
- [24] 刘正义,王生云,顾大刊,等.龙首山菱岭铀矿床含矿主岩特征及铀矿床成因讨论[J].*西北地质*,2018,51(2):160-170. [Liu Z Y, Wang S Y, Gu D Z, et al. Discussion on the characteristics of ore-bearing rock and the genesis of the Jiling uranium deposit. *Northwest Geology*, 2018,51(2):160-170.]
- [25] 张川,叶发旺,徐清俊,等.新疆白杨河铀矿床航空高光谱矿物填图及蚀变特征分析[J].*国土资源遥感*,2017,29(2): 160-166. [Zhang C, Ye F W, Xu Q J, et al. Mineral map-

- ping and analysis of alteration characteristics using airborne hyperspectral remote sensing data in the Baiyanghe uranium and beryllium ore district, Xinjiang[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2017,29(2):160-166.]
- [26] Liu H C, Zhang C, Ye F W, et al. The software design and development of temperature and emissivity separation based on TASI data[C]. *Proceedings of the 34th Asian Conference on Remote Sensing*, 2013:653-660.
- [27] Fred A K, Sandra L P, Alejandro C. District-level mineral survey using airborne hyperspectral data, Los Menucos, Argentina[J]. *Annals of geophysics*, 2006,49(1):83-92.
- [28] 王润生,杨苏明,闫柏琨.成像光谱矿物识别方法与识别模型评述[J].*国土资源遥感*,2007,71(1):1-9. [Wang R S, Yang S M, Yan B K. A review of mineral spectral identification methods and models with imaging sepectrometer[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2007,71(1):1-9.]
- [29] 叶发旺,孟树,张川,等.航空高光谱识别的高、中、低铝绢云母矿物成因学研究.*地质学报*,2018,92(2):395-412. [Ye F W, Meng S, Zhan C, et al. Minerageny study of high-Al, medium- Al and low- Al sericites identified by airborne hyperspectral remote sensing technology[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018,92(2):395-412.]
- [30] 杜乐天.新地球科学原理导论[M].兰州:兰州大学出版社, 2017. [Du L T. Introduction and principles of new earth sciences[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2017.]
- [31] 杜乐天.碱交代成矿作用的地球化学共性和归类[J].*矿床地质*,1983,2(2): 33-41. [Du L T. Geochemistry of alkali line metasomatism[J]. *Mineral Deposits*, 1983,2(2):33-41.]
- [32] 王传文,赵风民,陈肇博,等.菱岭矿床铀矿化和围岩蚀变特征[R].北京:核工业北京地质研究院研究报告,1963.
- [33] 王龙生,彭爱民译.含铀碱交代体与其构造识别标志[J].*国外铀金地质*,1992(4):6-9. [Wang L S, Peng A M. Identification remarks for uranium-bearing alkali metasomatic body and its structure[J]. *Foreign Uranium and Gold Geology*, 1992(4):6-9.]
- [34] 刘金枝,安伟涛.龙首山钠交代热液型铀矿床的碱交代作用研究[J].*科技广场*,2010(7):187-189. [Liu J Z, An W T. Study of alkali metasomatism on the hydrothermal uranium deposit of sodium metasomatism in Longshou mountain[J]. *Science and Technology Square*, 2010(7):187-189.]
- [35] 苟学明,权建平,刘治国等.流体包裹体特征及其地质意义——以甘肃省菱岭铀矿床为例[J].*地质通报*,2017,36(4):534-540. [Gou X M, Quan J P, Liu Z G, et al. Characteristics of fluid inclusions and their geological significance: A case study of the Jiling uranium deposit in Gansu Province. *Geological Bulletin of China*, 2017,36(4): 534-540.]