

## 花岗岩铀矿热红外遥感信息提取技术研究

王俊虎 张杰林 赵英俊

(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)

**摘 要** 能源与环境问题已成为全世界关注的热点, 核能作为一种无碳、经济型的清洁能源已成为全球能源发展的主流, 同时也带来了全球铀资源市场大规模扩展的机遇。本文在分析热红外遥感技术在岩矿领域应用潜力的基础上, 将热红外技术应用到了花岗岩铀矿找矿工作中, 并以桃山花岗岩铀矿田及其外围成矿区为例, 基于 ASTER 热红外数据进行了影像镶嵌、辐射定标、大气校正、温度/发射率分离。对分离后的温度数据进行地温异常信息提取, 对发射率数据进行了地表  $\text{SiO}_2$  含量的定量反演。从结果图上识别出了研究区重要的硅化断裂带、酸性岩及红层分布信息, 识别结果与地质事实相符, 并在野外得到了验证。实践表明, 热红外遥感技术在花岗岩铀矿成矿要素提取等领域应用效果显著, 并将在铀矿找矿工作中发挥重要的作用。

**关键词** 核能 热红外遥感 花岗岩铀矿 成矿要素提取

## Study on Thermal Infrared Data Mining Technology of Granite - Type Uranium Deposits

Wang Junhu, Zhang Jieli, Zhao yingjun

(Beijing Research institute of Uranium Geology, National Key Laboratory of Remote Sensing Information and Image Analysis Technology, Beijing 100029)

**Abstract** The Energy and environmental issues have become the focus of attention around the world, Nuclear energy as a non-carbon, clean and economy energy has become the mainstream of global energy development, It also brings the large-scale expansion opportunity of the global uranium market. On the basis of analyzing the thermal infrared technology application potential on the minerals and rocks, the paper applied this technology to the information extraction of granite-type uranium deposits. Taking the granite-type uranium deposits in south china for example, based on the thermal infrared data of ASTER, the paper made mosaic,

基金项目: 遥感信息与图像分析国家级重点实验室基金项目 (DYY-20080103) 资助。

radiometric calibration, atmospheric correction and separated the temperature and emissivity from the thermal infrared data. Afterward, the paper extracted the temperature anomaly information of the research area, furthermore, the paper quantitatively retrieved the  $\text{SiO}_2$  content of the rocks from emissivity data. The inversion map clearly shows many important silicified fault zones, the distribution area of acid-rocks and the red beds, what's more, the results conform to the geological facts and they are validated in the field. Above all, the practice proves that information mining technology of the thermal infrared data will play an important role in the extraction and analysis of the metallogenic essential factors even in the prospecting target of the granite-type uranium deposits.

**Keywords** nuclear energy, thermal infrared remote sensing, granite-type uranium deposits, metallogenic essential factors extraction

## 1 引言

随着全球能源需求的不断增长及温室效应、气候变化的加剧,核能作为一种无碳、经济、安全的清洁能源,越来越得到世界各国的重视,同时也为全球铀资源市场带来了大规模扩展的机遇<sup>[1]</sup>。花岗岩型铀矿床是我国最重要的矿化类型,作为重要的战略和能源资源,在国民经济建设中具有举足轻重的地位。持续高效的开展铀资源勘查新技术研究,不断探明和增加铀资源储量,具有重要意义<sup>[2]</sup>。目前,我国花岗岩型铀矿床找矿难度日益加大,为了提高铀资源对核电可持续发展的保障能力,不断提高铀资源勘查的应用水平,进一步挖掘铀矿地质遥感的应用潜力,探索热红外遥感在铀矿勘查领域的应用将成为遥感新技术应用的研究热点。

热红外遥感技术在地质领域的应用已有数十年的历史,但由于热红外传感器光谱分辨率较低,在地矿领域的应用效果一直不理想。自 ASTER 遥感成像仪发射以来,提供了廉价的多光谱热红外数据,为热红外技术在岩矿领域的应用注入了新的

活力。M. F. Coolbaugh 等<sup>[3]</sup>利用 ASTER 热红外温度数据对美国内华达州 Bradys 地区的温泉进行了地热异常探测,并预测了该区的地热远景区;Lawrence 等<sup>[4]</sup>利用 ASTER 热红外发射率数据在澳大利亚 Mordor 超镁铁质杂岩地区进行了岩性填图,区别出了三类冲积-洪积物沉积及一个重要的填图更加完整的石英岩单元。众多研究成果表明,热红外遥感技术在地矿领域已经成为一种重要的辅助找矿方法并发挥着积极作用。

花岗岩型铀矿是在特定地质构造环境中古水热活动的产物,它的形成不仅需要丰富的铀源和迁移富集的介质(水源),而且还应具有良好的热源。深大断裂作为深部热源的上升通道,势必在地表形成一定热异常; $\text{SiO}_2$ 是地壳的主要成分,硅化是花岗岩铀矿围岩蚀变中重要的矿化类型,如果利用发射率光谱对地表  $\text{SiO}_2$  含量进行定量反演,结合地温异常提取研究区的硅化断裂带、酸性岩、基性岩、红层等与铀成矿相关要素的信息,这对于寻找花岗岩型铀矿有着重要的价值。

基于上述背景,本文以桃山花岗岩铀矿田及其外围成矿区为例,基于 ASTER 热红外数据开展了热红外遥感信息提取技术

研究,依据地温异常和 SiO<sub>2</sub> 含量识别出了研究区的硅化断裂带、酸性岩及红层分布信息,旨在能为花岗岩铀矿的找矿工作提供有益参考。

2 研究区地质概况

桃山花岗岩型铀矿田位于华南铀成矿省桃山—诸广铀成矿带的北端。区内的桃山岩体为一复成因多期次多阶段复式岩体,主要由加里东期、印支期和燕山期花岗岩组成。区内分布有 NNE、NE、NWW 和近 EW 向的深大断裂及次级断裂,这些深大断裂经历了多次活动,不断扩大、加深,控制着研究区内的岩体,红盆、温泉和铀矿的空间展布。桃山铀矿田的主要热液蚀变包括硅化、碱交代、赤铁矿化、绿泥石化、萤石化及水云母化等<sup>[5]</sup>。

3 ASTER 热红外数据预处理

3.1 ASTER 热红外数据辐射定标

本次研究选用了涵盖研究区的六景 ASTER 影像,影像处理级别是 Level 1B 级,此级别的产品系把 Level 1A 级的数据作了几何校正及辐射校正后所得,图像的数据仍是亮度(DN)值。DN 值与光谱辐射亮度之间一般存在很好的线性度。因此,利用热红外数据进行地表温度/发射率反演之前,需要把 DN 值定标为光谱辐射亮度值,在《ASTER User Handbook Version 1》中给出了计算星上光谱辐射亮度的公式<sup>[6]</sup>:

$$\text{Radiance} = \text{Gain} * \text{DN} + \text{offset} \quad (1)$$

式中,Radiance 指星上光谱辐射亮度(单位为 W/(m<sup>2</sup> · sr · μm)),Gain 与 Offset 分别为传感器本身的增益与偏差,热红外波段具体的增益和偏差值如表 1 所示。

表 1 ASTER 热红外波段辐射定标系数

定标值	Band 10	Band 11	Band 12	Band 13	Band 14
Gain	0.006 882	0.006 780	0.006 590	0.005 693	0.005 225
Offset	-0.006 882	-0.006 780	-0.006 590	-0.005 693	-0.005 225

3.2 ASTER 热红外数据的大气校正

在辐射温度及地物发射率的遥感测量中,大气效应一般不能忽视。它使遥感器所记录的热红外信号失真,造成遥感信息偏离地面实况。因此,热红外遥感器接收到的信号包括两部分:一部分是被测物体自身发射的热辐射,另一部分是周围环境的辐射,这两部分混在一起称为表观温度<sup>[7]</sup>。要精确地反演地表温度及发射率,仅有表观辐射亮度是不够的,必须要经过进一步大气校正以消除大气的影响。

大气校正中,需要获得关键参数大气透过率及大气程辐射,这两个参数的计算对地表温度/发射率反演精度有着重要影

响。目前,大气透过率和大气辐射精度最高的估算方法是利用研究区地面气象观测点的实测数据及大气探空廓线来进行推算。但准确获取实测气象数据比较困难,而且也不能满足快速监测的要求。因此,本文利用 MODTRAN 4 标准大气模型来计算大气透过率及大气辐射。研究区处于中纬度地区,且所获取影像时间为 10 月份,故大气廓线等参数均选择中纬度夏季大气模式。将 MODTRAN4 辐射传输模式模拟得到的大气透过率及大气程辐射代入大气辐射传输方程(假设地表发射率为 1)进行计算,获得了大气校正后的热红外数据。

后文的研究结果表明,在没有实地的大气温度、湿度廓线等大气参数的情况下,

用上述方法得到的辐射影像分离出的温度/发射率数据保持了较高的相对值,而且削弱了由地形、植被等影响造成的亮度反差,实地应用效果良好。

#### 4 地表温度/发射率分离

从地物表面发出的热红外辐射是表面温度和发射率的函数,发射率与地表成分有关,因此热红外遥感反演必然要进行温度和发射率分离(TES)<sup>[8]</sup>。一般在发射率完全未知的情况下, $N$ 个波段的观测有 $N$ 个数据,再加上目标温度未知,就有 $N+1$ 个未知数据,这始终是欠定方程问题。为了求解这个方程,必须引入额外的条件,这种条件通常是对目标发射率波谱形状具有某种先验知识,根据先验知识约束条件的不同决定了不同的TES算法类别<sup>[7]</sup>。

ASTER热红外通道具有5个波段,不仅可以反演地表温度,还可以反演地物的发射率。目前常用的分离算法有参考通道法、发射率归一化法、比值法等<sup>[9]</sup>,由于研究区多数含Si岩石的最大发射率为0.96<sup>[10]</sup>,即可以设定主要目标地物的最大发射率一定,在此约束条件的限定下采用了发射率归一化法进行分离。

发射率归一化法(NEM)的原理即假设对高光谱观测总存在某个波段,在此波段上发射率达到已知的最大值 $\epsilon_{\max}$ ,于是可用发射率为 $\epsilon_{\max}$ 的灰体辐射亮度做包络线,具体的计算分3步:首先计算所有通道测量的辐射亮度值对应的黑体温度,不考虑环境辐射时的公式为

$$T_{\lambda} = B^{-1} \left( \frac{L(\lambda)}{\epsilon_{\max}} \right) = c_2 / \left[ \lambda \lg \left( \frac{c_1 \epsilon_{\max}}{\lambda^5 \pi L(\lambda)} \right) + 1 \right] \quad (2)$$

$T_{\lambda}$ 为 $\epsilon_{\max}$ (最大发射率)一定的情况下,不同波长( $\lambda$ )计算出的黑体温度, $L(\lambda)$ 为传感器不同波段获取的辐射亮度, $B(\lambda, T)$ 为黑体的辐射亮度, $c_1 = 3.7418 \times$

$$10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2, c_2 = 14\,388 \mu\text{m} \cdot \text{K}.$$

然后,找到所有波段中最高的一个黑体温度:

$$T_{\lambda} = \max(T_{\lambda}) \quad (3)$$

最后,在假设上述温度就是目标真实温度的前提下,求解所有通道的发射率:

$$\epsilon(\lambda) = L(\lambda) / B(\lambda, T) \quad (4)$$

NEM法计算并不复杂,而且在原理上也比较合理,特别是与经验关系结合时,就具有相当高的实用价值。本文针对研究区含Si岩石最大发射率为0.96( $\epsilon = 0.96$ )的经验,依据公式(2)、(3)、(4)联立方程组,基于ENVI/IDL编程对ASTER10-14波段进行了温度/发射率分离,得到了研究区的温度影像及ASTER10-14波段的发射率影像。

#### 5 研究区地表SiO<sub>2</sub>含量定量反演及铀成矿要素提取

##### 5.1 SiO<sub>2</sub>含量定量反演

自从ASTER传感器问世以来,许多学者对利用ASTER热红外波段进行SiO<sub>2</sub>含量的反演作了定性、半定量到定量的基础研究,并取得了一定的效果。Ninomiya<sup>[11]</sup>针对ASTER数据提出了可以定性表征硅酸盐SiO<sub>2</sub>含量的光谱指数,但只是定性研究,没有达到定量化;陈江<sup>[12]</sup>等人把ASU波谱库的矿物波谱重采样至ASTER各热红外波段,对矿物的波谱进行波段比值处理,并与各矿物成分进行相关分析,选择波段比值与各氧化物(SiO<sub>2</sub>等)含量的最大相关系数,进行对数模拟,从而确定出发射率光谱与化学成分の数値关系。其SiO<sub>2</sub>的定量反演公式为

$$\text{SiO}_2 \% = 28.76 \times \ln[6.56 \times B_{13} \times B_{14} / (B_{10} \times B_{12})]$$

总之,现有的SiO<sub>2</sub>含量反演思路均是利用ASU波谱库中提供的矿物发射率曲线及其对应的SiO<sub>2</sub>含量值进行统计分析,得

出反演公式。这一过程陈江等人已经做了细致的工作,笔者不再重复,但其实际应用仅限制在酸碱岩性的划分上,并没有结合具体的找矿实际拓展开来。本文基于上文分离的 ASTER10~14 波段的发射率数据及公式 (5),在 ENVI/IDL 中编程实现了铀矿区地表  $\text{SiO}_2$  含量的定量反演 (如图 1 (a) 所示),将反演结果应用在了与铀成矿相关的硅化断裂带、成矿母岩及辅助要素——红层信息的提取中,在研究区内取得了良好的效果。

5.2 基于  $\text{SiO}_2$  含量的铀成矿要素信息提取

上文反演的地表  $\text{SiO}_2$  含量图仅是灰度图像,不利于成矿要素信息提取,为了突出异常信息,本文根据  $\text{SiO}_2$  含量百分数 (酸度) 将灰度图像进行彩色密度分割,分割后的图像如图 1 (a) 所示,基于分割后的图像进行如下要素信息提取。

(1) 硅化断裂带信息提取

研究区的硅化断裂带是本区热液活动的重要体现,尤其是大型的断裂活动导致

热液上升形成硅化断裂带 (有明显石英脉)。该硅化带延伸较长,宽度不等。因此在  $\text{SiO}_2$  含量图上会呈现一定的线性特征,而且  $\text{SiO}_2$  含量值明显高于两侧。据此,本文在图 1 (a) 中提取出了明显的硅化断裂带 9 条,编号为 1~9 (如图 1 (b) 所示)。

(2) 酸性岩信息提取

铀矿区内岩浆活动强烈,尤以燕山早期为最,该期岩类以酸性花岗岩为主,是区内重要的成矿母岩。据杜乐天研究<sup>[13]</sup>,区内产铀主体花岗岩的  $\text{SiO}_2$  含量在 70%~73%之间。据此含量,在矿区范围内用黄色线圈圈出了区内的花岗岩体 (如图 1 (b) 中黄色线圈)。

(3) 辅助要素——红层信息提取

铀矿区内红层广泛发育,红层地表均为红色或杂色碎屑岩建造,岩性主要为紫红色砂砾岩、粉砂岩、砂岩,石英含量最高。据此,用深蓝色线圈圈出了区内  $\text{SiO}_2$  含量最高的区域为红层区 (如图 1 (b) 中蓝黑色线圈)。

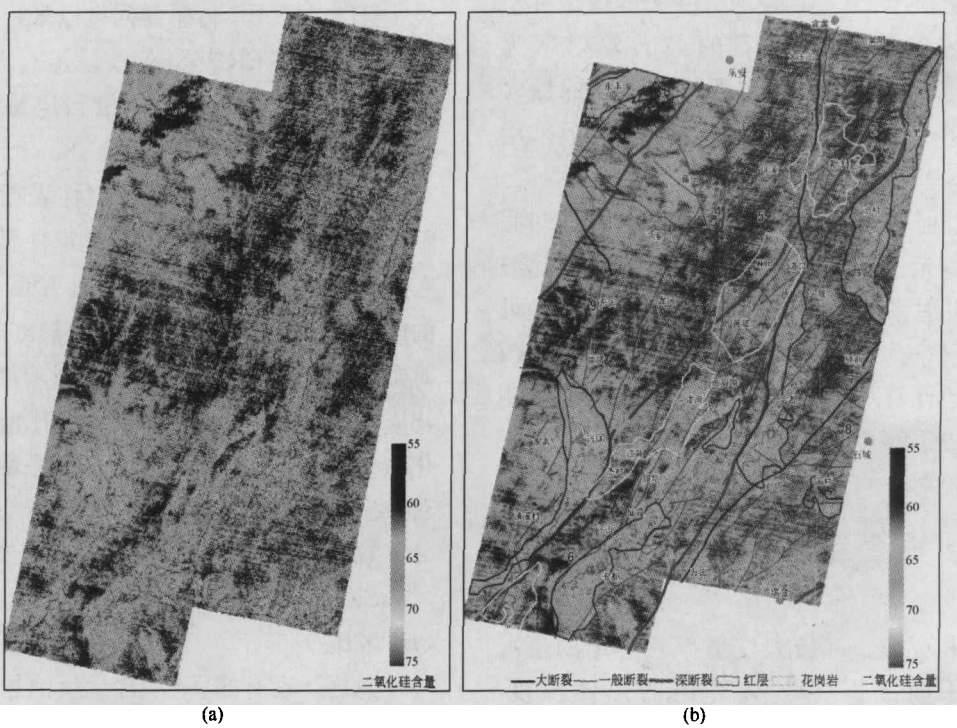


图 1 (a)  $\text{SiO}_2$  含量彩色密度分割图; (b) 与成矿要素信息叠合图

5.3 基于地温异常的断裂信息提取

为了与基于地表 SiO<sub>2</sub> 含量提取的成矿要素信息进行对比分析,本文基于地表温度异常进行了铀成矿的重要要素——断裂信息的提取。上文得到的温度数据是灰度影像,像元灰度层次模糊,不利用要素信息识别。本文在对像元温度值统计分析的基础上,进行密度分割并赋以彩色色标得到了研究区的地表温度异常图(如图 2(a)所示)。按照断裂带温度值明显高于两侧并呈现一定的线性特征,以及其地温值低于居民区的经验知识,提取了研究区的断裂分布图(如图 2(b)所示)。

6 要素信息验证及铀成矿相关性分析

为了验证上述信息提取的准确性,将

该区地质图中提取的断裂构造(深断裂、大断裂、一般断裂)、红层、重要花岗岩分布区<sup>[14]</sup>叠加到图 1(a)及图 2(a)中进行对比分析,得出以下几点认识。

① 图 1(b)编号为 1~9 及图 2(b) 1~6 的断裂带与地质图中提取的断裂完全吻合,尤其是与控岩、控盆、控矿紧密相关的三条深大断裂(图 1(b)、图 2(b)中编号为 1, 2, 3)的硅化及地温高异常信息在两图中表现非常明显,断裂出露的位置与 SiO<sub>2</sub> 高值带及地温高异常也非常吻合,并在野外得到了较好的验证(图 3)。据江西省区域地质志<sup>[21]</sup>记载,图 1(b)中编号 1 为宜黄—洛口大断裂、2 为大余—南城深断裂、3 为招携—大沽大断裂。上述 3 条深大断裂延长均在 120 km 以上(其中大余—南城深断裂延长达 330 km),沿线挤压构造透镜体,均为硅化破碎发育带,对铀成矿起着极其重要的作用。

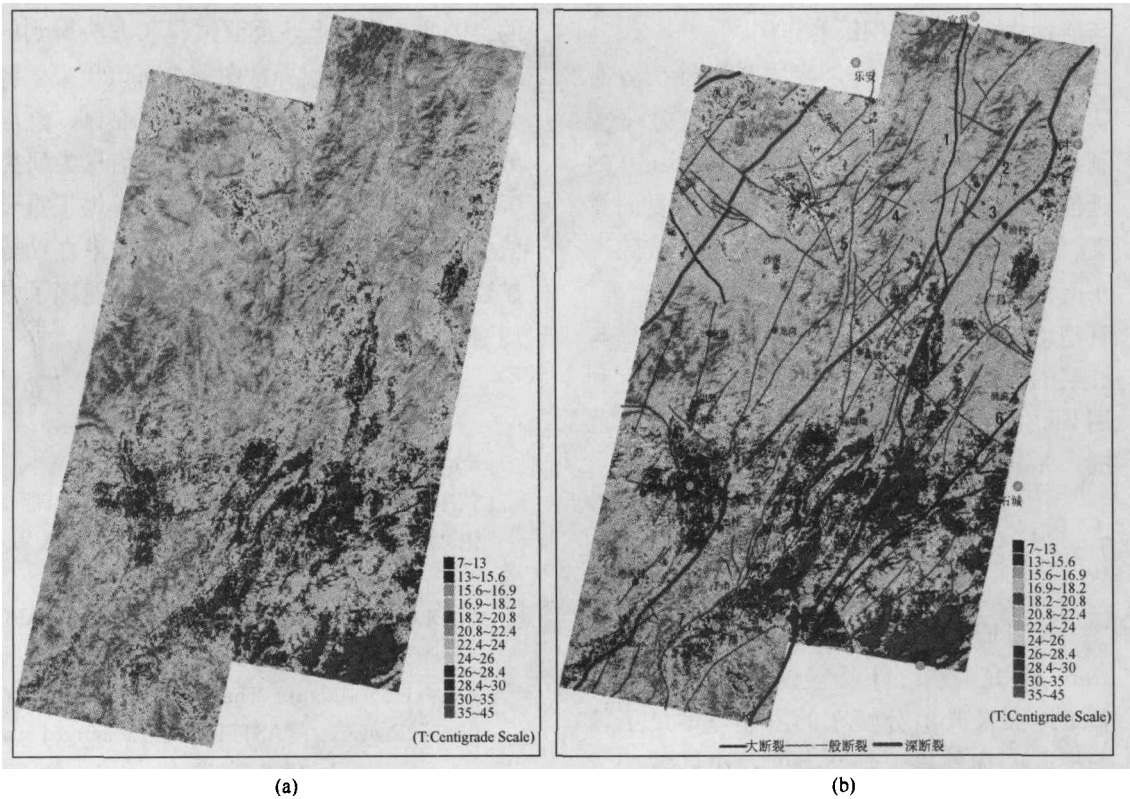


图 2 (a) 表温度彩色密度分割图; (b) 地温与断裂信息叠合图

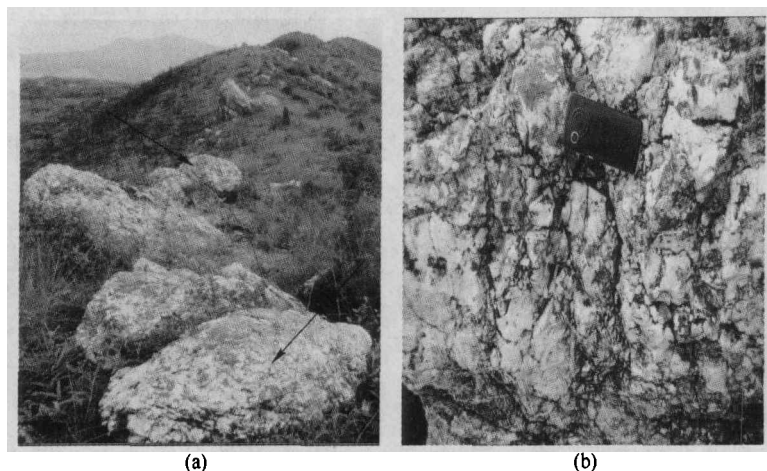


图3 (a) 2号硅化断裂带远景图; (b) 近景图

② 图1(b)黄色线圈圈出的区域与已知花岗岩分布区基本一致,分布区内 $\text{SiO}_2$ 含量值基本在70%左右,两者取得了较好的吻合。圈出的花岗岩为铀成矿的重要母岩,在其内已发现多个矿点,说明 $\text{SiO}_2$ 含量图可以用来提取酸性岩信息,这对于识别华南地区与铀成矿密切相关的花岗岩与酸性火山岩有着积极的作用。

③ 据黄世杰研究,我国华南铀矿分布明显受晚白垩世—古近纪的断裂红盆带控制,所以圈定红盆区的范围尤其是红盆的延伸边界对于铀矿找矿工作有着重要的意义。图1(b)蓝黑色线圈圈出的区域除了东南角的瑞金红层与已知红层区不一致外,其他均吻合,而且 $\text{SiO}_2$ 含量高值的边界与红层的边界范围有很好的对应。所以,利用 $\text{SiO}_2$ 含量图基本可以圈定红层的分布范围,尤其是红层的边界走势。

## 7 结论与探讨

ASTER热红外波段的空间分辨率为90m,多光谱热红外遥感数据有5个波段,鉴于地面及光谱分辨率的限制,不足以精确提取矿物种属、矿物丰度及小区域的成矿要素信息。再者, $\text{SiO}_2$ 含量反演公式的模拟上及地温异常信息的提取上没有消除

土壤、植被等外物的影响,反演结果与实际情况相比有一定偏差,但保持了较高的相对值。

尽管存在着许多的不确定性,但本文反演的 $\text{SiO}_2$ 含量图及地温异常图清晰地突出了一些大的硅化断裂带、酸性岩及 $\text{SiO}_2$ 含量较高的红层区,达到了铀成矿要素提取的目的。因此,运用上述反演过程和方法得到的 $\text{SiO}_2$ 含量图及地温异常图完全可以用来解释大的硅化断裂破碎带、酸性岩分布区、红层分布范围及边界走势。这些重要信息为研究区铀成矿条件评价及远景区预测提供了重要依据,同时也证明了热红外遥感技术在铀成矿要素提取甚至在铀矿找矿工作中发挥了常规遥感不可替代的重要作用。

## 参考文献

- [1] <http://www.bmlink.com/newslit/107745/>
- [2] 黄净白,黄世杰,张金带. 中国铀成矿带概论. 石家庄: 石家庄航遥印刷出版社, 2005: 1.
- [3] COOLBAUGH M F, KRATT C, FALLACARO A, et al. Detection of geothermal anomalies using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) thermal infrared images at Bradys Hot Springs, Nevada, USA. Remote Sensing of Environment, 2007 (106): 350 - 359.
- [4] ROWAN L C, MARS J C, Simpson C J. Lithol-

- ogic mapping of the Mordor, NT, Australia ultramafic complex by using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *Remote Sensing of Environment*, 2005, 99: 105 - 126.
- [5] 颜裕民. 桃山岩体地质特征及对铀成矿的控制作用. *华东铀矿地质*, 1996 (3): 9 - 18.
- [6] YAMAGUCHI Y, FUJISADA H, KUDOH M. ASTER Instrument Characterization and Operation Scenario. *Advances in Space Research*, 1999, 23 (8): 1415 - 1424.
- [7] 田国梁, 柳钦火, 李小文. 热红外遥感. 北京: 电子工业出版社, 2007: 172 - 174.
- [8] 王品清. 热红外发射率对热红外成像及其图像判读的影响. *环境遥感*, 1988, 3 (3): 207.
- [9] 程洁, 柳钦火, 李小文. 基于相关性的热红外温度与发射率分离算法. *中国科学: D 辑*, 2008, 38 (2): 261 - 262.
- [10] 闫柏琨. 热红外遥感岩矿波谱机理及信息提取技术方法研究. 中国地质大学 (北京) 博士论文, 2006 (11).
- [11] NINOMIYA Y, FU Bihong. Detecting lithology with ASTER multispectral thermal infrared "radiance-at-sensor" data. *Remote sensing of Environment*, 2005: 127 - 130.
- [12] 陈江, 王安建. 利用 ASTER 热红外遥感数据开展岩石化学成分填图的初步研究. *遥感学报*, 2007, 11 (4): 1.
- [13] 杜乐天. 花岗岩型铀矿文集. 北京: 原子能出版社, 1982: 29.