

# 基于热红外数据的花岗岩铀矿田地表 $\text{SiO}_2$ 含量反演及其铀成矿要素识别

王俊虎, 张杰林, 张静波

(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:** ASTER 遥感成像仪发射以来, 提供了廉价的多光谱热红外遥感数据, 为热红外遥感技术在诸多领域的应用注入了新的活力。本文在分析热红外技术在岩矿领域应用潜力的基础上, 将热红外遥感技术应用于花岗岩铀矿找矿中, 并以华南某花岗岩铀矿田为例, 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, 及其不同波段比值组合模拟的反演算法, 对发射率数据进行  $\text{SiO}_2$  含量的定量反演, 在反演图上识别出了研究区内明显的硅化断裂带、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成矿要素提取中效果良好, 并将在铀矿找矿工作中发挥积极的指导作用。

**关键词:** ASTER; 热红外遥感;  $\text{SiO}_2$  含量反演; 花岗岩铀矿

## 1 引言

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。目前, 我国花岗岩型铀矿床找矿难度日益加大, 故用新型成矿理念与热红外遥感铀矿探测新技术研究, 成为铀矿勘查领域的研究热点<sup>[1-2]</sup>。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活力, 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。

$\text{SiO}_2$  是地质体分类及分析其成因演化的重要化学参量。硅化蚀变是花岗岩型铀矿蚀变中一种重要的矿化蚀变类型, 且石英脉, 硅化带等硅化信息也常作为野外重要的找矿标志。因此, 铀成矿区地表  $\text{SiO}_2$  含量的确定, 不但有着重要的地质意义, 还有着重要的矿产勘查与找矿预测作用。

在遥感应用的波段范围中, 810~1410  $\mu\text{m}$  作为热红外大气窗口在对地观测系统中具有重要的应用价值<sup>[3]</sup>。许多重要的造岩及热液蚀变矿物在热红外光谱发射率谱带, 具有明显的诊断特征,

硅酸盐矿物的发射率光谱特征与  $\text{SiO}_2$  含量也有良好的对应关系, 利用 ASTER 热红外发射率影像可以建立表征硅酸盐矿物  $\text{SiO}_2$  含量的  $\text{SiO}_2$  指数与  $\text{SiO}_2$  含量的定量关系<sup>[4-5]</sup>, 进而对地表岩石的  $\text{SiO}_2$  含量进行定量反演。

对此, 笔者在实施 / 十一五 0 部级 / 铀资源勘查高分辨率遥感信息识别技术研究 0 项目时, 在华南某花岗岩铀矿区内采用 ASTER 热红外数据对研究区地表  $\text{SiO}_2$  含量进行了定量反演, 识别出了与铀成矿密切相关的硅化断裂带、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新的探索。

## 2 研究区地质概况及 ASTER 热红外数据预处理

### 2.1 研究区地质概况

研究区经历了多期次构造岩浆活动, 区内主要出露印支 - 燕山期的花岗岩及其外围震旦纪变质岩, 局部分布晚白垩世的红色碎屑岩。产铀花岗岩体均为复式岩体, 其主体形成于三叠纪-早白垩世, 规模较大, 活动铀比例高<sup>[6]</sup>。区内分布有

收稿日期: 2009-05-07; 修回日期: 2009-11-20

基金项目: 国家 / 十一五 0 部级科研项目 / 铀资源勘查高分辨率遥感信息提取技术研究 0 (2005060107)。

作者简介: 王俊虎 (1982-), 男, 山西阳泉人, 硕士, 助理工程师, 主要从事遥感与 GIS 在铀成矿研究及预测方面的应用。E-mail: towjh2001@163.com

NNE、NE、NWW和近EW向的深大断裂及次级断裂,它们相互切割,构成了本区主要的构造格架<sup>[7]</sup>。这些深大断裂经历了多次活动,不断扩大、加深,控制着研究区内岩体,红盆、温泉和铀矿的空间展布。

## 2.1.2 ASTER热红外数据辐射定标

研究区ASTER影像是Level1B级产品,图像的数据仍是亮度(DN)值,DN值与光谱辐射亮度之间具有很好的线性度,因此,利用热红外数据进行地表温度/发射率反演之前,首先,需要把DN值定标为光谱辐射亮度值,在ASTER User Handbook Version 10中给出了用ASTER热红外波段的增益、偏差及Level2B数据所有波段DN值计算星上光谱辐射亮度的公式<sup>[8]</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#um)),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2所示:

表2 ASTER热红外波段辐射定标系数

Table 2 The radiometric calibration coefficients of ASTER thermal infrared bands

定标值	Band 10	Band 11	Band 12	Band 13	Band 14
Gain	0.01006882	0.006780	0.006590	0.005693	0.005225
Offset	0.01006882-	0.006780-	0.006590-	0.005693-	0.005225

## 2.1.3 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>[9]</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。

鉴于ASTER热红外数据同步的大气参数不易获得及反演的发射率仅需要较高的相对值而非绝对值,本文采用In-Scene大气补偿算法(ISAC)。该算法假设数据源表面上空的大气均一,并将表面近似为黑体。如不进行黑体假设,可以使用大

气中的一个近似的单一薄层来计算,并假设没有反射的下行辐射,大气上行辐射和大气透射可以根据以下方法近似计算:首先,从数据中估计出每个像元的表面温度,使用普朗克公式(假设发射率为1)来估算亮度温度。然后,使用上述两种方法之一,绘制辐射率与亮度温度的散点图,从而确定一条曲线,可以从该曲线的倾斜和偏移得出大气的上行辐射和大气透射的值<sup>[10]</sup>。鉴此原理,本文利用ENVI中的ThermalAtm Correction模块消除了大气影响。

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In-Scene大气补偿算法进行大气校正后的辐射影像分离出的发射率数据保持了较高的相对值,而且削弱了由地形、植被等影响所造成的亮度反差,实地应用效果良好。

## 3 花岗岩铀矿区地表SO<sub>2</sub>含量反演

### 3.1.1 铀矿区地表温度/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>[11]</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>[12]</sup>。

ASTER热红外通道具有五个波段,不仅可以反演地表温度,还可反演地物的发射率信息,而发射率数据在硅化信息提取方面有着极其重要的作用,所以,本文选用了以发射率波谱为主要目标的分离算法。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、A剩余法、MMD法等<sup>[13]</sup>,由于研究区多数含Si岩石的最大发射率为0.96<sup>[14]</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)的原理即用一个固定的发射率值计算每一个像元和波段的温度值,每个像元的最高温度被用于普朗克公式,从而计算

发射率值<sup>[15]</sup>。具体的思路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  $E_{max}$ ，于是可用发射率为  $E_{max}$  的灰体辐射亮度做包络线，具体的计算：(1)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：

$$T_K = B^{-1} \left[ \frac{L(K)}{E_{max}} \right] = c_2 \left[ K \lg \left( \frac{c_1 E_{max}}{K5PL(K)} \right) + \right] \quad (2)$$

$T_K$  为  $E_{max}$  (最大发射率) 一定的情况下，不同波长 (K) 计算出的黑体温度， $L(K)$  为传感器不同波段获取的辐射亮度； $B(K, T)$  为黑体的辐射亮度； $c_1 = 317418 \times 10^{-16} W \# m^2$ ， $c_2 = 14388 \mu m \# K$ 。

(2)找到所有波段中最高的一个黑体温度：

$$T_K = \max(T_K) \quad (3)$$

(3)在假设上述温度是目标真实温度的前提下，求解所有通道的发射率：

$$E(K) = L(K) / B(K, T) \quad (4)$$

NEM法计算并不复杂，而且在原理上也较为合理，特别是与经验系数相结合时，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 0.196 ( $E = 0.196$ ) 的经验，依据公式 (2)、(3)、(4) 联立方程组，基于 ENVI/IDL 编程对 AS2 TER 10214 波段进行了温度 / 发射率分离，得到了研究区 ASTER 10- 14 波段的发射率影像。针对发射率影像水平噪声的严重，本文对其进行了中值滤波处理，处理后的 10、11 波段的发射率影像如图 1 所示：

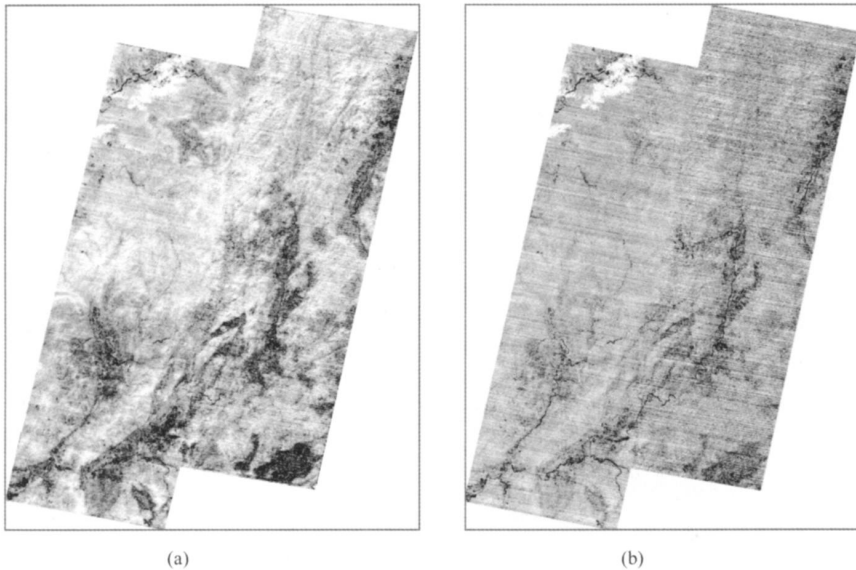


图 1 ASTER 10(a)、11(b)波段发射率影像图

Fig 1 The band 10 (a) and 11(b) emissivity image of ASTER

### 3.1.2 铀矿区地表 $SO_2$ 含量反演

#### (1) $SO_2$ 含量反演的理论基础

在遥感地质应用中，人们一直努力寻找光谱特征与矿物岩石中  $SO_2$  含量的相关关系，并以此作为  $SO_2$  含量遥感定量反演的依据<sup>[16]</sup>。Si-O 键在可见光-反射红外波段 (0.4~ 21.5 $\mu m$ ) 并没有明显的光谱特征，但在热红外大气窗口 (8~ 12 $\mu m$ ) 有强烈的基频振动，导致了不同岩类的发射率曲线千差万别，相同岩性不同矿物类型的发射率曲线也不尽相同，具有明显的诊断性特征，其中，典型

硅酸盐类矿物光谱发射率曲线图如下图 3 所示：

从图 2 可以看出，不同硅酸盐矿物的发射率波谱特征明显不同，特别是本文要反演的石英 (图 3 中的红色曲线所示) 与其他矿物相比，在 8~ 12 $\mu m$  波段内的发射率曲线具有明显的诊断特征，为两个高发射肩夹一个低发射肩，正好对应 AS2 TER 热红外影像的第 10、12、13 波段，这就为利用 ASTER 热红外不同波段的比值运算和识别硅酸盐矿物信息，尤其是  $SO_2$  含量信息提供了可能。

#### (2) $SO_2$ 含量的定量反演

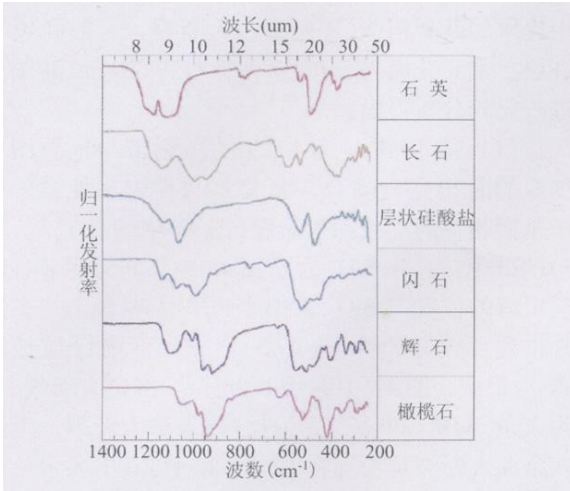


图 2 典型硅酸盐类矿物光谱发射率曲线图

(引自 TES Data User's Workshop)

Fig 2 The spectral emissivity curve of typical silicate minerals (cited from TES Data User's Workshop)

对 ASTER 热红外波段, 进行  $SO_2$  含量的反演, 许多人作了定性、半定量到定量的基础研究, 并取得了一定的效果。Ninomiya<sup>[17]</sup> 利用人工神经网络对 ASTER 模拟数据进行了  $SO_2$  含量的定量反演; 二宫芳树<sup>[18]</sup> 针对 ASTER 数据提出了可以定性表征硅酸盐  $SO_2$  含量的光谱指数, 但只是定性研究,

没有达到量化; 陈江<sup>[19]</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 ( $SO_2$  等) 含量最大相关系数, 进行对数模拟, 从而确定出发射率光谱与化学成分的数值关系。其  $SO_2$  的定量反演公式<sup>[19]</sup> 如下:

$$SO_2 = 28176 @ \log(6156 @ B13 @ B14 / (B10 @ B12)) \quad (5)$$

总之, 现有的  $SO_2$  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  $SO_2$  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, 但其实际应用仅仅限制在酸碱岩性的划分上, 并没有结合具体的找矿实际予以拓展。本文基于上文分离的 ASTER 10-14 波段的发射率数据及公式 (5), 在 ENVI/DL 中编程实现了铀矿区地表  $SO_2$  含量的定量反演 (如图 4a), 将反演结果应用在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, 取得了良好的效果。

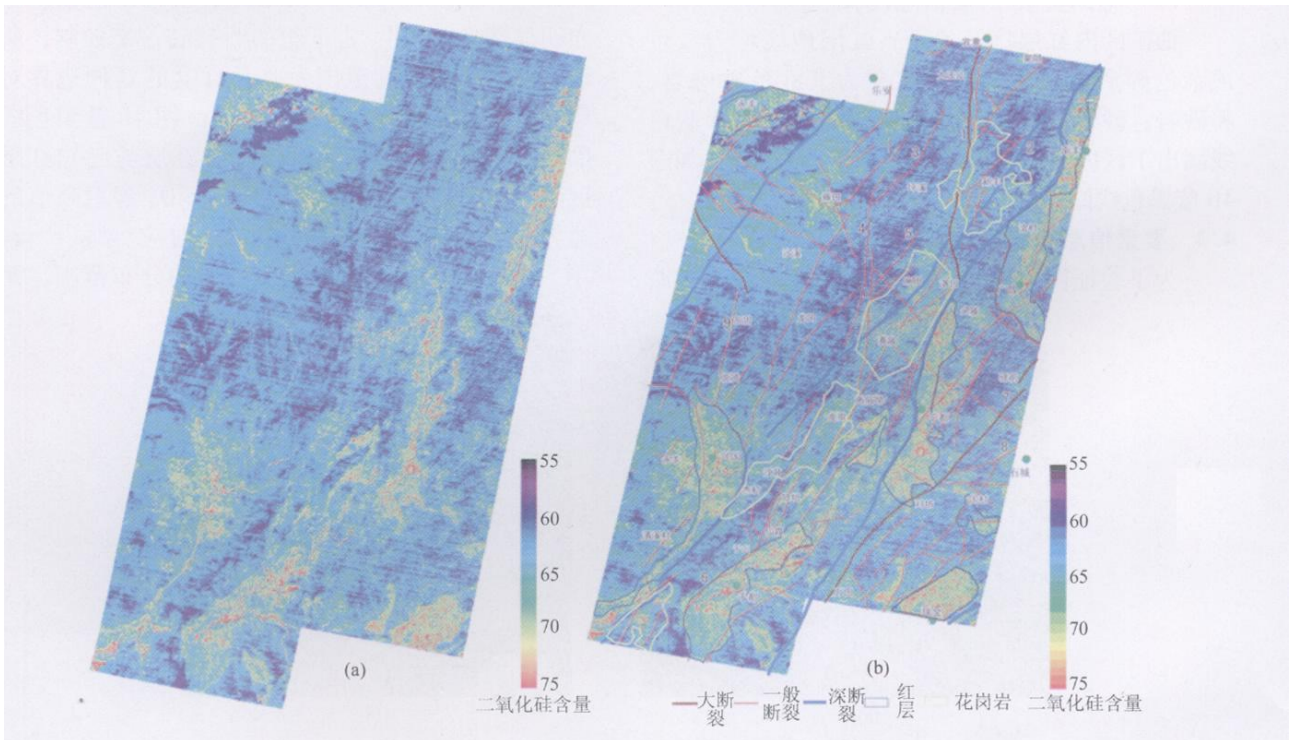


图 4  $SO_2$  含量彩色密度分割图 (a) 与成矿要素信息叠合图 (b)

Fig 4 The color density slice image of  $SO_2$  content (a) and the overlay of mineralogenic factors information (a)

## 4 铀成矿要素信息提取

### 4.1.1 要素信息识别

上文反演的地表  $\text{SO}_2$  含量图仅仅是灰度图像, 不利于成矿要素信息提取, 为了突出异常信息, 本文根据  $\text{SO}_2$  含量百分数(酸度)将灰度图像进行彩色密度分割, 分割后的图像见图 4a。

#### (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  $\text{SO}_2$  含量图上会呈现一定的线性特征, 而且  $\text{SO}_2$  含量值明显高于两侧。据此, 本文在图 4a 中提取出了明显的硅化断裂带 9 条, 编号为 1-9(如图 4b)。

#### (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(1982)研究<sup>[20]</sup>, 区内产铀主体花岗岩的  $\text{SO}_2$  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 4b 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  $\text{SO}_2$  含量最高的区域为红层区(如图 4b 蓝黑色线圈)。

### 4.1.2 要素信息验证及铀成矿相关性分析

为了验证图中信息提取的准确性, 将地质图

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>[19]</sup>叠加到  $\text{SO}_2$  反演图中进行比较分析得出:

(1) 图 4b 编号为 1-9 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 4b 中编号为 1, 2, 3)的硅化信息在  $\text{SO}_2$  含量图 4a 中, 非常明显, 断裂出露的位置与  $\text{SO}_2$  高值带也非常吻合, 并在野外得到了较好的验证(图 5)。据江西省区域地质志<sup>[21]</sup>记载, 图 4b 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, 上述三条深大断裂延长均在 120km 以上(其中大余-南城深断裂延长达 330km), 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。

(2) 图 4b 黄色线圈出的区域与已知花岗岩分布区基本一致, 分布区内  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  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(2006)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 4b 蓝黑色线圈出的区域, 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  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  含量图基本可以圈定红层的分布范围, 尤



(a)



(b)

图 5 2号硅化断裂带远景(a)、近景(b)图

Fig 5 Regional (a) and Local (b) view of the second silicified fault

其是红层的边界走势。

## 5 结语

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硅化信息。再者,  $SO_2$  含量反演公式的模拟上没有消除土壤、植被等地物的影响, 反演结果与实际情况相比,  $SO_2$  含量值整体有所下降。

尽管存在着上述许多的不确定性, 但本文反演的  $SO_2$  含量图清晰地突显了一些大的硅化断裂带、酸性岩及  $SO_2$  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  $SO_2$  含量图, 完全可以用来解译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、找矿工作中发挥常规遥感不可比拟的重要作用。

## 参考文献:

- [1] 张杰林. 桃山铀矿田铀成矿要素光谱特征分析 [J]. 世界核地质科学, 2007, 24(4): 216-2171
- [2] 黄净白, 黄世杰, 张金带, 等. 中国铀成矿带概论 [M]. 石家庄: 航遥印刷出版社, 2005.
- [3] 傅碧宏, 丑晓伟. 利用热红外多光谱遥感技术提取和识别岩石、矿物信息 [J]. 遥感技术与应用, 1994, 9(1): 56.
- [4] 闫柏琨, 刘圣伟, 王润生, 等. 热红外遥感定量反演地表岩石的  $SO_2$  含量 [J]. 地质通报, 2006, 25(5): 639-641.
- [5] 闫柏琨, 王润生, 甘甫平, 等. 热红外遥感岩矿信息提取研究进展 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(10): 1116-1118.
- [6] 张万良. 桃山铀矿田桃山断裂及其保矿作用 [J]. 地质论评, 2008, 54(6): 769-770.
- [7] 柯丹, 韩绍阳, 刘祜, 等. 某花岗岩型铀矿田断裂构造的分形特征 [J]. 世界核地质科学, 2009, 26(1): 55.

- [8] Y Yamaguchi, H Fujisada, M Kudoh. ASTER Instrument Characterization and Operation Scenario [J]. Advances in Space Research, 1999, 23(8): 1415-1424.
- [9] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2002, 110-115.
- [10] Johnson B R. N2Scene Atmospheric Compensation Application to SEBASS Data Collected at the ARM Site [J]. Technical Report, Space and Environment Technology Center, The Aerospace Corporation, May 1998.
- [11] 王品清. 热红外发射率对热红外成像及其图像判读的影响 [J]. 遥感学报, 1988(3): 207.
- [12] 田国梁, 柳钦火, 李小文, 等. 热红外遥感 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007, 172-174.
- [13] 程洁, 柳钦火, 李小文, 等. 基于相关性的热红外温度与发射率分离算法 [J]. 中国科学 D 辑, 2008, 38(2): 261-262.
- [14] 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 [D]. 中国地质大学 (北京) 博士论文, 2006.
- [15] Gillespie A R. Lithologic Mapping of Silicate Rocks Using TMS [M]. The TMS Data Users Workshop, June 18-19, 1985. JPL Publication 86-38, 1985, 29-44.
- [16] Christensen P R, Bandfield J L, Hamilton V E. A Thermal Emission Spectral Library of Rock-forming Minerals [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(E4): 9735-9739.
- [17] Nominia Y. Quantitative Estimation of  $SO_2$  Content in Igneous Rocks Using Thermal Infrared Spectral with a Neural Network Approach [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(3): 684-691.
- [18] Yoshiki Nominia, Binghong Fu. Detecting Lithology with AS2 TER Multispectral Thermal Infrared / Radiance2a2sensor0 Data [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 127-130.
- [19] 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 [J]. 遥感学报, 2007, 11(4): 171-178.
- [20] 杜乐天. 花岗岩型铀矿文集 [M]. 北京: 原子能出版社, 1982, 29.
- [21] 江西省地质矿产局. 江西省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1984, 286-357.

## SiO<sub>2</sub> Content Retrieving and Metallogenic Factors Identification of a Granite-Type Uranium Ore-field Based on Thermal Infrared Data

WANG Junhu, ZHANG Jielin, ZHANG Jingbo

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

**Abstract** Since the sensor of ASTER was launched, low-cost multi-spectral thermal infrared data were available. It injects energy to thermal infrared technology application on many fields. On the basis of analyzing the thermal infrared technology application potential on minerals and rocks, in this paper we apply this technology for extracting of information on granite-type uranium deposits. Taking the granite-type uranium deposits in south China as an example, based on thermal infrared data of ASTER, mosaic, radiometric calibration, atmospheric correction were made and the temperature and emissivity data were separated from the thermal infrared data. Then, we quantitatively retrieve SiO<sub>2</sub> content in the rocks from emissivity data by inversion algorithm simulated from different band ratio combination. According to the inversion map view, we can't extract information of small-scale silicification alteration due to the spatial resolution limitation of ASTER thermal infrared data, but the map clearly shows many large silicified fault zones, the distribution area of acid rocks and the red beds area that have highest content of the silica. 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 thermal infrared data will play an important role in the extraction and analysis of the metallogenic essential factors even in the prospecting target of granite-type uranium deposits.

**Key words** ASTER; thermal infrared remote sensing; SiO<sub>2</sub> content retrieving; granite-type uranium deposits