

DOI: 10.3969/j.issn.1672-0636.2011.01.007

# 热红外遥感技术在铀矿勘查中的应用潜力探讨

王俊虎, 张杰林, 刘德长

(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] 随着新型热红外传感器的相继问世及热辐射相关理论不断发展, 热红外遥感在资源勘查尤其是铀矿勘查领域呈现出了巨大的应用潜力。从地表温度、热惯量和热红外光谱 3 个方面对热红外遥感在资源勘查应用中的理论依据、研究现状进行了阐述, 对其在铀矿勘查应用中的研究目标、研究内容进行了详细论述, 并以 ASTER 热红外波段为数据源在华南某花岗岩铀矿区进行了实例应用, 取得了良好的效果。实践表明, 热红外遥感技术在铀矿勘查领域具有良好的应用前景和独特的应用价值, 必将在铀矿找矿工作中发挥重要的指导作用。

[关键词] 热红外遥感; 地表温度; 热惯量; 热红外光谱; 铀矿勘查

[中图分类号] TP79 [文献标志码] A [文章编号] 1672-0636(2011)01-0032-10

## Discussion on the application potential of thermal infrared remote sensing technology in uranium deposits exploration

WANG Jun-hu, ZHANG Jie-lin, LIU De-chang

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

**Abstract:** With the continual development of new thermal infrared sensors and thermal radiation theory, the technology of thermal infrared remote sensing has shown great potential for applications in resources exploration, especially in the field of uranium exploration. The paper makes a systemic summary of the theoretical basis and research status of the thermal infrared remote sensing applications in resources exploration from the surface temperature, thermal inertia and thermal infrared spectrum. What's more, the research objective and the research content of thermal infrared remote sensing in the uranium deposits exploration applications are discussed in detail. Besides, based on the thermal infrared ASTER data, the paper applies this technology to the granite-type uranium deposits in South China and achieves good result. Above all, the practice proves that the thermal infrared remote sensing technology has a good application prospects and particular value in the field of uranium prospecting and will play an important role in the prospecting target of the uranium deposits.

**Key words:** thermal infrared remote sensing; land surface temperature; thermal inertia; thermal infrared spectrum; uranium deposits exploration

[基金项目] 国家“十一五”部级科研项目, 铀资源勘查遥感信息提取技术研究(项目编号:2005040107)。

[收稿日期] 2010-08-18; [修回日期] 2010-12-02

[作者简介] 王俊虎(1982—), 男, 山西阳泉人, 硕士, 工程师, 主要从事遥感和 GIS 在铀成矿研究及预测方面的应用。

2010 年是我国核电发展新的上升期, 其装机量将达到 2008 年的 4 倍, 随着我国核电站的迅速发展, 铀资源供给的缺口将越来越大, 再加上境外对我国铀矿石出口的诸多限制, 这就对我国立足国内的铀矿找矿工作提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。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。早期的热红外遥感影像均是宽谱带的单波段影像, 如 TM6 等, 由于影像空间分辨率较低, 较多应用于大区域的地热资源调查、水文地质调查和火山与地震预报等方面<sup>[2]</sup>。而在岩性识别与找矿领域, 理论上依据岩石自身热惯量及发射率的不同, 具有进行岩性或热量散出矿种(如煤矿和铀矿)识别的可能性, 但由于热红外传感器成像光谱精度不高, 以及遥感估算热惯量算法实用性较差, 造成其应用程度大大降低, 在地矿领域的应用效果也不理想。20 世纪 80 年代初, 美国国家宇航局成功研制了热红外多光谱扫描仪(TIMS)。90 年代末, 美国 NASA 成功发射了 Terra 卫星, 星上装载的 ASTER 热红外传感器涵盖了 8~12  $\mu\text{m}$  的 5 个热红外波段。近年来, 随着高光谱成像光谱技术的发展, 加拿大研制的 TASI 航空热红外成像光谱测量系统, 在 8~12  $\mu\text{m}$  的光谱范围内波段数可达 32 个, 从而开创了热红外多-高光谱遥感地质应用的新时代。目前, 常用的热红外传感器又增加了 AVHRR、MODIS、TM6、MASTER、SEBASS、ASTER 和 TASI 等种类, 而且随着传感器技术的不断发展, 热红外波段的空间和波谱分辨率不断提高, 必将受到地学专家的青睐。

基于上述背景, 笔者针对核工业北京地质研究院国家级遥感重点实验室刚引进的 TASI 航空热红外成像光谱测量系统, 可分别就热红外温度、热惯量和热红外光谱在地质应用领域, 特别是铀矿勘查中的应用潜力进行预先研究, 并以华南某花岗岩铀矿田为试验样区, 对热红外光谱进行了实例应用, 取得了良好的应用效果。这表明热红外遥感技

术在铀矿勘查领域具有良好的应用潜力, 它必将为铀矿找矿工作提供新的技术支持。

## 1 热红外温度地质应用

### 1.1 理论依据

地球是一个热的球体, 由地表向深处逐渐增温, 研究表明, 不同地质构造单元具有不同的热流值, 随着构造单元的年龄由老至新, 构造活动由弱至强, 热流值有依次增高的趋势(Lee, 1970)。一般说来, 古老而稳定的地盾或地台区具有较低而均一的热流值, 而年轻的造山区和裂谷带则具有较高而分散的热流值, 深大断裂作为深部热源的上升通道, 断裂活动时会产生一定的摩擦热, 张开的断裂带沿线势必在地表形成一定热异常<sup>[3]</sup>。因此, 大地热流值和岩石的生热率与地质构造特点的相关性, 奠定了据地温异常判释地质构造的基础。另外, 按地球理论热模型估计, 来自地球内部的热流有 4/5 是由放射性热所提供的<sup>[4]</sup>, 因此, 岩石中放射性元素的衰变热也是地壳内热的一个重要来源, 是地表热流的一个重要组成部分, 而铀(钍)矿化使得铀、钍等放射性元素大量富集, 更加对当地的大地热流产生明显的影响, 这就为铀矿床周围有明显的热异常提供了依据。

热液型铀矿床是特定地质构造环境中古水热系统活动的产物, 它们的形成不仅需要丰富铀源和迁移富集的介质(水源), 而且还应具有良好的热源条件。但在过去的研究中, 热源条件往往被忽略。20 世纪 80 年代中后期, 李学礼提出“铀、水、热”三源结合研究铀矿成因的思路, 大地热流是反映地球内部热状态的一个重要的地球物理参数, 大地热流与铀矿的关系则是应当解决的基础课题之一<sup>[5]</sup>, 热液铀矿床不仅在形成时与地热异常有关, 而且在形成后还会对其附近的大地热流产生一定的影响, 即在地表势必造成一定程度的热异常。这就为地表热异常值高的温泉等地热点与铀矿在空间上分布的一致性提供了理论基础。

热红外遥感是获取地表热状况信息的一种非常重要的手段, 分析热红外遥感反演出的地表温度可以解译区域基底隆起、凹陷、

断裂和火山等区域构造特征<sup>[6]</sup>。用热红外遥感探测地热资源则能克服传统物探方法的周期长、投资大、盲目勘探和投资风险过大等缺点,有利于地热资源的可持续发展。经过遥感地质学家多年的研究实践得出,热红外遥感解译的地质构造单元划分与传统地质方法划分的构造单元往往是吻合的,在地热及水分布的探测中优势也是突出的。随着热红外遥感技术的发展,将在寻找地热资源、热源散出型矿产(如铀矿)中发挥更大的作用。

## 1.2 国内、外研究现状及存在问题

国外地表温度反演算法的研究是从 20 世纪 80 年代开始的。按照使用的热红外通道,反演算法可以分为:单窗算法、劈窗算法和多波段算法。比较经典的单窗算法是覃志豪等针对只有一个热红外波段的 TM/ETM 数据提出来的地表温度反演方法<sup>[7]</sup>,Sobrino 等也提出了一种普适性单通道算法<sup>[8]</sup>。相对而言,劈窗算法比较成熟,到目前为止,已经提出了至少有 18 种劈窗算法。在应用实践方面,M.F. Coolbaugh 等利用 ASTER 热红外数据对美国内华达州布雷迪斯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<sup>[9]</sup>。Melanie J. Hellman 等人利用 ASTER 热红外数据对黄石公园的温泉及其沉积物进行了探测,这为地球和火星上已经灭绝了的地热矿化沉积物的研究提供了途径。

我国在热红外温度定量反演上的研究比较多,李小文对热红外的遥感机理作了比较深入的研究<sup>[10]</sup>,讨论了地表非同温像元的发射率的定义问题及对分离真实温度和发射率的影响,同时强调了先验知识在反演中的作用。毛克彪等针对地观测卫星(TERRA)多传感器的特点提出了适合于 MODIS 和 ASTER 数据的地表温度的反演方法<sup>[11]</sup>。在应用实践方面,傅碧宏等利用 NOAA-11 的热红外通道数据计算了地面的温度场,依据各构造层的地热特征解译鄂尔多斯高原第四系覆盖下的隐伏地质构造<sup>[12]</sup>;戴文晗等(2004)从西安地区多波段和热红外波段遥感图像上提取了隐伏构造及热异常信息,结合地质解译,为该区活动构造的分析和地热的勘察研究提供了依据<sup>[13]</sup>。

区域地表温度空间差异信息提供了新的途径,但热红外地表温度的反演受大气影响非常大。从美国国家航空和航天管理局(NASA)提供的温度产品分析可知,大部分温度产品 60%以上的地区受云的影响,这对实际应用产生了很大的影响。目前,热红外应用研究在运用 Modtran 4 等大气纠正模型进行大气校正时,多以标准大气剖面为基础,依据研究区实际情况进行适当的参数调整,或者是通过与遥感平台上遥感器的同步观测试验来获得各种同步的大气探测资料和地面辐射值。即使如此,在通常情况下,热红外数据的大气纠正都无法真正得以实现,都只是尽可能地逼近现实。因此,最大限度地消除大气影响是近年来获取较高温度反演精度一直研究的问题。

在铀矿领域,李学礼<sup>[14]</sup>于 1982 年对江西省温泉的成生分布规律与铀矿化富集的成生分布做了详细研究,指出地表具有热异常信息的温泉等地热资源与铀矿的产出有着紧密关系,但当时由于技术的限制,地表的地温异常只能靠人工实地探测,费时、费力,而且容易造成地热异常点的疏漏,不能从宏观上对地表的地热异常点与铀成矿要素的热异常信息进行综合分析。近年来,许多学者利用热红外影像的辐射亮度值对控矿构造的热异常进行解译分析取得了一定的效果,如黄贤芳等<sup>[15]</sup>利用 ETM 热红外影像解译出了鄂尔多斯盆地西南部陇县地区隆起和拗陷构造格局。但上述研究没有考虑到地物发射率对热红外影像光谱辐射亮度的影响,而在某些特定条件下,这一因素的影响十分明显。因此,如果直接利用热红外影像的辐射亮度值进行热异常解译很可能会漏掉某些重要的异常信息,而某些直观反映出的热异常信息也可能是伪信息。

因此,笔者开展地表温度热红外遥感定量反演及其在铀矿找矿应用中的研究显得愈加重要。

## 1.3 热红外温度应用于铀矿勘查中的研究目标

(1) 基于最新的 TASI 高空间、高光谱热红外数据,选取典型铀成矿区为研究区,开展热红外辐射定标、大气校正和地表温度定量反演研究;

(2) 采用密度分割、彩色增强和影像分



类等技术对研究区的铀成矿要素进行热异常信息的提取及分析;

(3) 结合野外实际及已知铀矿(温泉)点的成矿(泉)点位、成矿(泉)机理, 研究上述热异常信息的分布规律, 探讨其与铀矿化富集的关系, 为优选找矿靶区提供依据。

#### 1.4 热红外温度应用于铀矿勘查中的研究内容

##### (1) 热红外数据的获取及预处理

获取研究区的昼夜热红外数据, 并对其进行辐射校正、几何校正和镶嵌处理, 利用定标参数进行辐射定标, 为下一步温度反演奠定良好基础。

##### (2) 热红外数据大气校正

收集热红外传感器成像时研究区的大气参数, 代入 Modtran 4 大气纠正模型模拟大气透过率及大气程辐射, 代入大气辐射传输方程进行计算, 获取近真实的地面辐射影像。

##### (3) 热红外数据地表温度反演

针对不同热红外数据的波谱特点, 开展像元平均温度的遥感定量反演研究, 优选反演精度较高的算法并结合实际情况进行算法改进, 获取满足研究区实际应用的温度影像数据。

##### (4) 地表温度影像增强及热异常信息提取分析技术

对温度影像进行密度分割、彩色增强, 并对像元温度数据进行监督分类, 划分新(老)断裂构造、各构造层、成矿岩体、温泉和铀矿区等铀成矿要素的温度异常级次, 初步提取研究区内铀成矿要素的热异常信息, 并对其所反映的地质体和地质现象进行野外验证。

##### (5) 多源地学数据集成分析及地温热异常信息的铀矿找矿应用

结合地质、物化探和水文等地学数据, 分析控岩、控盆、控泉和控矿构造的热异常特征, 综合已知铀矿(温泉)点的成矿(泉)点位、成矿(泉)机理, 研究热异常信息的分布规律, 探讨其与铀矿化富集的关系, 为优选找矿靶区提供依据。

## 2 热惯量地质应用

### 2.1 理论依据

物体的热学性质, 这种热学性质便可用物体的热惯量加以表述。热惯量( $P$ )是物体对环境温度变化的热反应灵敏性的一种量度, 热惯量越大, 对环境温度变化的热反应越迟钝<sup>[16]</sup>。它是物体的体内特征, 是描述物体热特性的一个宏观物理量。对于质地均匀的地物, 热惯量与物体的密度及热学参量的关系定义如下:

$$P = (\kappa \rho c)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中:  $P$ ——热惯量,  $J \cdot m^{-2} \cdot s^{\frac{1}{2}} \cdot K^{-1}$ ;  $\kappa$ ——热导率,  $J \cdot (m \cdot s \cdot K)^{-1}$ ;  $\rho$ ——密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $c$ ——比热容,  $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$ 。

热惯量是一个体参量, 确定了物体温度变化的阻抗。对于相同的热量交换, 低热惯量的物体温度变化大于高热惯量的物体。由(1)式也可看出, 当岩石的密度、热传导率和热容量各不相同, 其积的方根也就不同。因此, 不同岩性的岩石的热惯量也就不同。对热惯量量测最原始的方法就是采集岩石样品, 测出其热传导率、密度和热容量, 再根据(1)式计算出岩石的热惯量。显然, 这种做法耗费的时间、人力和物力都大, 而且存在样点稀疏, 代表范围有限, 数据的实时性及动态性较差等缺点, 在现实中大范围开展工作不切实际。

在热红外波段, 岩石性质、热惯量和反射率对岩石热辐射有重要的影响, 对于反射率相同的岩石来说, 那些具有高热惯量的岩石比那些具有低热惯量的岩石温度变化要小些。对于具有相同热惯量但反射率不同的岩石而言, 最大的热反差出现在中午前后, 最小的热反差在黎明, 另外深色岩石(低反射率)比浅色岩石(高反射率)有较高的温度和较大的温度范围。因此, 黎明前后的热红外图像反映出各种物体的热特性, 热惯量大的物体在图像中显示出“暖”特征, 热惯量小的物体则显示出冷特征; 中午的图像反映出地物的反射特征, 并且显示出地形特征, 用上述两种图像的信息特征, 便可以达到鉴别、区分岩性的目的。因此, 从 20 世纪 70 年代开始, 随着热红外遥感获取地表温度技术的不断提高, 利用遥感手段反演区域热惯量的方法被人们提出并得到了发展, 从而在一定程度上克服了地面测量的局限性。这样, 快

速、大面积地获取岩石的热惯量,进行岩性识别成为可能。随着遥感估算热惯量研究的深入,热惯量的作用越来越受到地质工作者的重视,在探测土壤湿度、圈定含水带,识别岩性、断层和褶皱的描绘等方面取得了很大的进展,特别是对于识别一些地表露头较少或差异不明显的岩性时,热惯量更有独到的优势,甚至可以依据地表岩石热惯量昼夜的变化规律来预测石油和放射性矿产(如铀矿)。

## 2.2 国内、外研究现状及存在问题

Watson(1973)<sup>[17]</sup>最先开展了将热惯量估计模型应用于地质领域的研究;Kahle等(1975)<sup>[18]</sup>基于热红外和可见光波段生成了第 1 幅热惯量影像。接着,Kahle 于 1977 年<sup>[19]</sup>修改了最早的热惯量模型,除热辐射转换模型外,还引入了在大气-地面之间潜在的可感知的热能量转换。Gillespie 和 Kahle (1977)<sup>[20]</sup>利用这个模型生成了 Pisgah Crater 地区的热惯量影像。1978 年 NASA 发射热容量制图卫星(HCMM)开始获取 500 m 分辨率的热红外数据,并研究解释这些数据的方法。HCMM 数据的获取为利用红外温度数据计算地表热惯量提供了可能,并且显示出热惯量是进行地质填图的一种有效工具<sup>[21]</sup>。而后不断更新换代到 NOAA 卫星数据、Terra 卫星数据、新型热红外传感器 AVHRR、ASTER、MODIS 和 SEBASS 等数据的应用,为热惯量的应用研究开拓了新的局面。之后,Nasipuri 等(2005)<sup>[22]</sup>利用古吉拉特地区的 AVHRR 昼夜数据生成了热惯量影像图,分析了热惯量变化的特点,并对该区的主要岩性和断裂构造进行了地质填图;Nasipuri 等人(2006)<sup>[23]</sup>利用较高分辨率的 ASTER 数据生成的印度西部古吉拉特地区的热惯量影像图,对坎贝山谷的含油性进行了研究,圈出了储油远景区。

我国在热惯量方面的研究起步较晚,可查的文献不多。张向前等(1986)<sup>[24]</sup>对热惯量的制图原理及方法进行了研究,并利用航空数据对研究区的土壤含水量进行了探测;崔承禹(1994)<sup>[16]</sup>阐述了热惯量的物理意义及其在地质遥感中的作用前景,在测得 23 种岩石热物理性质的有关参数——热传导率、热容量和密度的基础上,计算并列表给出了岩石

的热惯量值和热扩散系数等基础数据,分析讨论了沉积岩、变质岩和岩浆岩岩石的热惯量变化由高到低的规律,取得了碳酸盐岩和砂岩类等沉积岩及沉积浅变质岩的热惯量差异的结果;张霄羽(2008)等<sup>[25]</sup>对遥感估算热惯量的 3 种方法进行了评述,提出从加强机理研究、尺度转换及采用多时相多光谱数据等角度进一步完善遥感估算热惯量方法,提高其估算精度的设想。

热惯量在现实中发挥的作用毋庸置疑,但由于我国民用热红外传感器的研发较晚,数据质量较差等原因,我国将热惯量应用于地质领域方面的研究很少。在铀矿领域,更未见相关报道。但是,铀矿是一种放射性矿产,经过长年累月的放射性衰变,必然会对上覆至地表的岩石盖层产生一定热影响,造成地表热惯量异常。随着核工业北京地质研究院国家级遥感重点实验室高分辨率的 TASI 航空热红外成像仪器的引进,通过对铀成矿区地表热惯量进行细致研究,找出其中的相关规律,便可为铀成矿预测提供一种新的技术。

## 2.3 热惯量应用于铀矿勘查中的研究目标

热惯量制图是热红外成像光谱技术中一门极具发展潜力的应用科学技术,以 ASTER、TASI 等热红外数据为数据源,选取典型铀成矿区开展地表热惯量制图研究;对该区地表岩石热惯量的变化进行定量分析,提取与铀矿有关的地层、构造和蚀变等成矿要素信息;分析铀矿点或矿化高值区与地表热惯量值对应的关系;探讨热惯量信息的分布规律与铀矿化富集的关系,为成矿远景区的预测提供依据。

## 2.4 热惯量应用于铀矿勘查中的研究内容

### 2.4.1 热红外数据的获取、预处理、大气校正及地表温度反演

收集研究区实时、实地的大气参数,代入大气辐射传输方程进行计算,获取地表近真实的热辐射影像。

### 2.4.2 热红外昼夜温差数据及地表反照率计算技术

对上述得到的热红外昼夜温度影像进行几何配准,对其进行差值运算,得到研究区的昼夜温差图。利用其不同波段,不同权重

因子的反照率计算公式, 对其可见光—近红外多光谱数据进行计算, 形成研究区的地表反照率图。

### 2.4.3 热惯量制图技术

采用地表温度日较差法热惯量制图技术, 依据反照率、日夜温差值对应热惯量所建立的查找表计算出研究区的热惯量影像, 并根据研究区实地的地形、地貌进行 DEM 的叠加及对热惯量查找表进行改进, 绘制研究区热惯量图。

### 2.4.4 基于热惯量的岩矿信息提取及定量统计分析技术

对地表热惯量进行野外验证, 将典型样品的热惯量值与热惯量影像进行对比分析, 评价热惯量制图精度; 对热惯量影像数值的变化差异进行定量分析, 提取与铀成矿有关的地层、构造、蚀变等成矿要素信息; 热惯量图上叠合研究区已知的铀矿点或矿化高值点, 并对其热惯量值进行统计分析, 找出内在规律, 分析其与铀成矿的关系; 结合已知铀矿点的成矿背景及其他地学数据, 探讨热惯量的变化规律与铀矿化富集的关系, 为进一步遴选预测区提供依据。

## 3 热红外光谱地质应用

### 3.1 理论依据

在遥感对地观测的波段范围, 热红外波段(8.0~14.0  $\mu\text{m}$ )作为重要的大气窗口, 可以探测 Si—O 键、C—O 键的振动光谱以及  $\text{Si}_n\text{O}_k$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{PO}_4^{3-}$  等原子基团基频振动及其微小变化, 可以识别出硅酸盐(包括不含水造岩矿物)、硫酸盐、碳酸盐、磷酸盐、氧化物和氢氧化物等矿物种类<sup>[26]</sup>, 从而大大拓宽了遥感矿物识别的广度(矿物大类)与深度(矿物种属)。此外, 矿物在该波段区间的发射光谱更接近于线性混合, 可以对矿物混合光谱进行线性解混, 从而确定矿物的体积分数。因此, 热红外遥感便可与可见光—反射红外遥感相互补充, 增加矿物识别的种类, 提高识别的定量化程度及可靠性。

热红外遥感光谱地质填图主要是依靠地物热红外发射率光谱的诊断性特征, 如组成岩石的矿物在热红外谱域具有选择性发射的

特征, 同一矿物在不同谱域具有不同的发射率, 不同矿物在同一谱域也可能具有不同的发射率, 矿物的选择发射特性在岩石发射光谱曲线上表现为矿物的特征发射谷等。典型硅酸盐类矿物的发射率曲线如图 1 所示。

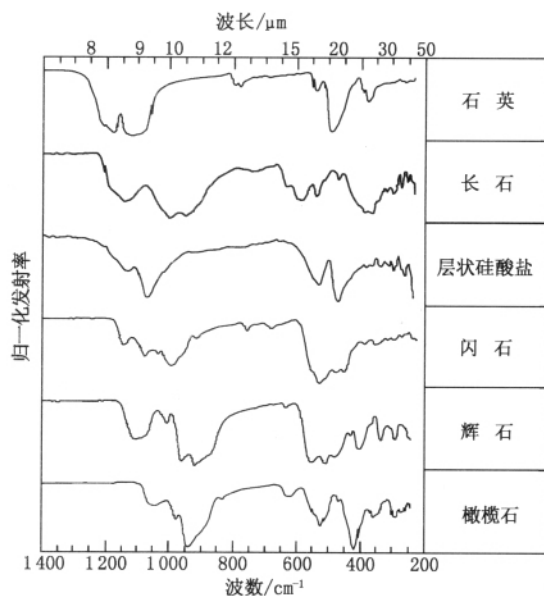


图 1 典型硅酸盐类矿物光谱发射率曲线图

(据 TES 数据用户工作站)

Fig. 1 The spectral emissivity curve of typical silicate minerals (After TES data user's workshop)

由图 1 可知, 硅酸盐矿物的低发射率带出现在 8~11  $\mu\text{m}$  之间, 低发射率带的深度和位置与组成矿物的结晶结构有关; 低发射率带的中心波长显示出随石英体积分数的降低以及铁镁质矿物体积分数的增加而向长波方向移动, 并且呈现出低发射率带强度降低的特点。这些具有诊断特征的低发射率带是利用热红外光谱技术提取和识别岩石和矿物信息的光谱基础。

随着野外常见岩类, 矿物热红外光谱库的建立及不断完善, 许多光谱库如 ASU、ASTER 等在提供多种矿物热红外发射率波谱的同时, 还提供了矿物的化学成分即电子探针所测氧化物质量分数的分析结果, 这就为岩矿波谱特征与化学成分之间的定量分析提供了可能。

$\text{SiO}_2$  是地壳的主要成分, 其质量分数是地体分类及分析其成因演化的重要化学参量。在铀矿领域, 硅化是热液型铀矿围岩蚀变中一种重要的蚀变类型, 硅酸盐矿物热红外发



射率光谱特征与其  $\text{SiO}_2$  质量分数也具有良好的对应关系<sup>[27]</sup>, 如果利用热红外发射率光谱建立表征硅酸盐矿物  $\text{SiO}_2$  质量分数的  $\text{SiO}_2$  指数与  $\text{SiO}_2$  质量分数的定量关系, 再对研究区地表的  $\text{SiO}_2$  质量分数进行定量反演, 进而提取硅化断裂带、酸性岩、基性岩、红层和矿化蚀变等重要的铀成矿要素信息, 这对于寻找热液型铀矿有着重要的价值。

### 3.2 国内、外研究现状及存在问题

自 1983 年世界上第 1 台可见光—近红外成像光谱仪问世以来, 成像光谱技术高速发展, 许多国家投入巨资开发成像光谱仪及数据处理方法软件。现今, 数据的获取、处理和应用各个环节的技术方法都比较成熟, 在矿物填图、资源勘查、环境污染监测中发挥了重要作用<sup>[28]</sup>, 但该技术最大的缺点是成像光谱的波长范围大多在 400~2 500 nm, 只覆盖一些含水矿物基频振动的合频与倍频, 而对于热红外振动强度更大的基频振动无法检测。热红外遥感正好弥补这一缺陷, 美国及欧美国家在这一领域投资最大, 开发了一系列热红外传感器, 新型热红外传感器的成功应用为热红外光谱地质找矿研究开拓了新的局面。Lawrence 等(2003)<sup>[29]</sup>利用 ASTER 数据在加利福尼亚地区进行了岩性填图, 结果表明, ASTER 热红外数据可以识别出 AVIRIS 数据无法识别的石英岩、碳酸岩、花岗闪长岩、中基性岩、碳酸岩与硅酸岩的混合岩等; Lawrence 等人(2005)<sup>[30]</sup>利用 ASTER 热红外数据在澳大利亚 Mordor 超镁铁质杂岩地区进行了岩性填图, 通过 2 个 SAM 分类识别出了该区的镁铁质—超镁铁质岩石, 以及 4 类由石英质向中性岩过渡的岩石, 区别出了 3 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; 丑晓伟等<sup>[31]</sup>利用 TIMS 数据在塔里木盆地进行了地层分类识别试验, 利用去相关拉伸技术压制地表温度信息, 突出发射率信息来达到区分岩性的目的, 区分出了灰岩、黏土岩、泥灰岩和钙质粉砂岩等不同岩性; 陈江<sup>[32]</sup>等人基于 ASTER 热红外数据研究了 ASU 波谱库矿物的发射率光谱与化学成分的数值关系, 分别对  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{CaO}$  等氧化物进行了数值分析及公式模拟, 模拟

结果结合野外验证表明,  $\text{SiO}_2$  质量分数定量反演精度较高, 其他氧化物质量分数反演的精度不足。

在铀矿领域, 目前, 多偏重于可见光—近红外—短波波段的应用研究, 极少有利用热红外发射率光谱进行铀成矿要素提取。但通过调研国内、外相关文献可知, 地物发射率光谱在地矿领域已表现出巨大的应用潜力, 尤其是地表  $\text{SiO}_2$  质量分数的定量反演研究对于提取铀成矿要素信息有着重要的应用价值。因此, 开展热红外发射率光谱在铀成矿领域的应用研究具有广阔的前景, 将为研究区铀成矿条件评价及远景区预测提供重要的依据。

### 3.3 热红外光谱应用于铀矿勘查中的研究目标

以 AVHRR、ASTER 和 TASI 等热红外波段为数据源, 选取典型铀成矿区, 利用高光谱遥感数据挖掘技术、弱信息提取技术、光谱建模及分类技术, 开展热红外发射光谱岩石、矿物识别及  $\text{SiO}_2$  质量分数定量反演研究; 提取研究区硅化断裂带、成矿岩体、含矿层和矿化蚀变等成矿要素信息, 结合各种地学数据的集成分析与野外验证, 分析上述信息提取的精确性, 力争有新的发现; 综合已知铀矿点的成矿点位、成矿机理, 探索上述成矿要素信息的分布规律与铀矿化富集的关系, 为圈定找矿靶区提供依据。

### 3.4 热红外光谱应用于铀矿勘查中的研究内容

#### 3.4.1 研究区热红外数据获取

采用 ASU、JHL 和 ASTER 等发射率光谱库结合地面热红外发射仪及航空、航天热红外高光谱数据, 系统获取研究区发射率光谱数据和空间结构信息, 建立与铀成矿相关的岩石、矿物发射光谱数据库。

#### 3.4.2 热红外数据大气校正(同 2.4)

#### 3.4.3 热红外数据温度/发射率分离算法研究, 获取地物发射率影像

针对不同热红外数据的波谱特点, 开展温度/发射率分离算法研究, 对现有各种算法的分离结果进行精度评价, 优选发射率反演精度较高的算法并结合实际情况进行改进, 获取满足研究区实际应用的地物发射率影像数据。

#### 3.4.4 热红外发射率数据挖掘及岩矿诊断光谱信息的提取

依据与铀成矿作用相关岩矿发射光谱的不同吸收特征(吸收峰位置、深度, 对称性等), 选取用于特征识别的诊断光谱参数; 利用去相关拉伸、假彩色合成、比值分析和光谱建模等技术进行蚀变信息的地质填图, 提取硅化、石英岩化和碳酸盐岩化等岩矿蚀变信息。

### 3.4.5 地表 SiO<sub>2</sub> 质量分数定量反演及铀成矿要素信息提取

研究 SiO<sub>2</sub> 质量分数定量反演的新算法, 结合野外定点的样品分析结果进行精度评价, 分析评价结果并对算法进行改进, 获取满足实际应用的地表 SiO<sub>2</sub> 质量分数反演图。依据 SiO<sub>2</sub> 质量分数的相对多少结合经验知识, 解译研究区的硅化断裂带、成矿岩体、含矿层和矿化蚀变作用等铀成矿要素信息, 并对上述提取的信息进行野外验证。

### 3.4.6 多源地学数据集成分析及热红外光谱铀成矿要素信息的铀矿找矿应用

在上述工作基础上, 结合地质、物化探和水文等多源地学数据, 综合已知铀矿点的

成矿点位、成矿机理, 分析上述成矿要素信息的分布规律与铀矿化富集的关系, 优选找矿靶区。

### 3.5 热红外光谱在铀矿勘查中的应用实例

本文以华南某花岗岩铀矿田为例, 基于 ASTER 热红外数据进行辐射定标、大气校正、温度/发射率分离获取发射率影像。利用 ASTER 不同波段比值组合模拟的反演公式 [ $SiO_2\% = 28.76 \times \log(6.56 \times B13 \times B14 / (B10 \times B12))$ ]<sup>[32]</sup> 对发射率进行 SiO<sub>2</sub> 质量分数的定量反演, 得到了研究区地表 SiO<sub>2</sub> 质量分数图(图 2A), 依据 SiO<sub>2</sub> 质量分数的相对多少并结合经验知识在反演图上识别出了研究区内明显的硅化断裂带、酸性岩和红层分布信息(图 2B)。

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)、红层和花岗岩分布区叠加到 SiO<sub>2</sub> 反演图中进行比较分析, 得出以下几点认识:

(1) 图 2B 编号①~⑨断裂带为 SiO<sub>2</sub> 质量分数图, 图 2A 中能够明显解译出的硅化断裂

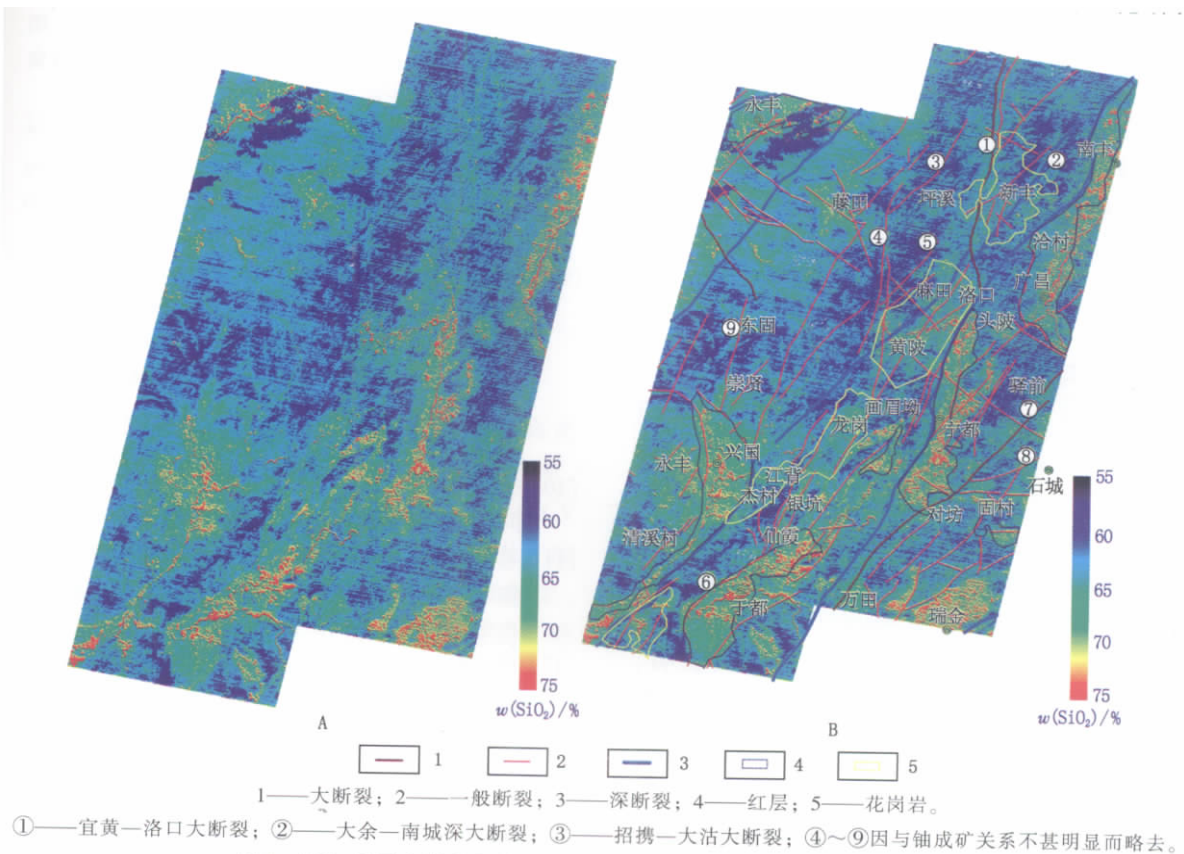


图 2 SiO<sub>2</sub> 质量分数彩色密度分割图(A)与铀成矿要素信息叠合图(B)

Fig. 2 The color density slice image of SiO<sub>2</sub> content (A) and the overlay map of metallogenic information (B)



带,尤其是与控岩、控盆和控矿紧密相关的3条深大断裂(图2B中编号为①、②和③)的硅化信息在SiO<sub>2</sub>质量分数图2A中表现非常明显,断裂出露的位置与SiO<sub>2</sub>高值带也非常吻合。据江西省区域地质志<sup>[32]</sup>记载,图2B中3条深大断裂延长均在120 km以上,且均为硅化破碎发育带,对铀成矿起着极其重要的作用。

(2) 图2B黄色线圈圈出的区域为花岗岩分布区,分布区内SiO<sub>2</sub>质量分数一般为65%~70%,两者取得了较好的吻合。这些花岗岩为铀成矿母岩,在其内已发现多个铀矿点,说明SiO<sub>2</sub>质量分数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起着积极的作用。

(3) 据黄世杰(2006)研究,我国华南铀矿省铀矿分布明显受晚白垩世至古近纪的裂隙红盆带控制,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2B蓝黑色线圈圈出的区域为研究区已知的红层区,红层均为红色或杂色碎屑岩、砂岩和粉砂岩建造,硅质质量分数最高,从图中圈出红层区的SiO<sub>2</sub>质量分数来看,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SiO<sub>2</sub>质量分数高值的边界与红层的边界范围有很好的对应。所以,利用SiO<sub>2</sub>质量分数图基本可以圈定红层的分布范围尤其是红层的边界走势。

#### 4 结论与探讨

本文从地表温度、热惯量和热红外光谱3个方面对热红外遥感在资源勘查中应用的进展进行了潜力分析,对其在铀矿勘查中应用的目标、研究内容进行了论述,并以华南某花岗岩铀矿田为例进行了试验研究。研究表明,尽管目前热红外遥感在这些方面的应用还存在诸多不确定性,但已有的实例表明,定量反演的地表温度可以突出研究区深大断裂、一般断裂和红层区的地温异常;本文反演的SiO<sub>2</sub>质量分数反演图可以解译出硅化断裂带、酸性岩和红层的分布范围及边界走势。另外,通过铀矿上覆地表岩石的热惯量异常来预测铀矿远景区具有极大的诱惑力与应用前景。所以,随着热红外成像技术的发展及

研究的不断深化,热红外遥感技术在地质找矿特别是铀矿找矿工作中将发挥常规遥感不可替代的作用。

#### [参考文献]

- [1] 李子颖. 科技兴院 再铸辉煌: 核工业北京地质研究院李子颖院长致辞[J]. 铀矿地质, 2009, 25(2): 扉页.
- [2] 丑晓伟, 傅碧宏, 郑建京. 沉积岩石信息的热红外多光谱遥感探测及有效性评价[J]. 遥感技术与应用, 1996, 11(1): 7-8.
- [3] 葛碧如, 滕吉文, 郑新江, 等. 诺阿卫星探查隐伏构造、地热及其水分布[M]. 北京: 气象出版社, 1998: 1-2.
- [4] 刘时彬. 地热资源及其开发利用和保护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 78-80.
- [5] 李学礼, 周文斌, 张卫民. 江西省大地热流与铀矿关系的初步研究[J]. 铀矿地质, 1999, 9(4): 23-25.
- [6] 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: 408-409.
- [7] 覃志豪, Zhang Minghua, Arnon Karnieli. 用NOAA-AVHRR热通道数据演算地表温度的劈窗算法[J]. 国土资源遥感, 2001(2): 33-42.
- [8] Jiménez-Muñoz Juan C, Sobrino José A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data[J]. J. Geophys. Res., 2003, 108: ACL 2-1.
- [9] 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[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 106(3): 350-359.
- [10] 李小文, 王锦地. 地表非同温像元发射率的定义问题[J]. 科学通报, 1999, 44(15): 1 612-1 617.
- [11] 毛克彪. 基于热红外和微波数据的地表温度和土壤水分反演算法研究[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2007: 79-81.
- [12] 傅碧宏, 滕吉文. 热红外遥感鄂尔多斯高原隐伏地质构造[J]. 地球物理学进展, 1996, 11(2): 17-25.
- [13] 戴文晗. 西安地区隐伏构造-热红外场遥感信息及三维建模与应用[J]. 遥感信息, 2005(1): 40-43.
- [14] 李学礼. 江西温泉成生分布规律与铀矿关系研究报告[R]. 抚州: 华东地质学院, 1983.
- [15] 黄贤芳, 刘德长, 董秀珍, 等. 覆盖区光-能谱数据归一化集成的铀资源勘查技术研究(国防科

- 学技术报告)[R]. 北京: 核工业北京地质研究院, 2004: 15-18.
- [16] 崔承禹. 岩石的热惯量研究 [J]. 遥感学报, 1994, 9(3): 177-183.
- [17] Watson K. Periodic heating of a layer over semi-infinite solid[J]. *J. Geophys. Res.*, 1973, 78: 5 904-5 910.
- [18] Kahle A B, Gillespie A R, Goetz A F H, *et al.* Thermal inertia mapping[C]//Proceedings of the tenth International Symposiums on Remote Sensing of Environment. London: IEEE, 1975: 985-994.
- [19] Kahle A B. A simple thermal model of the earth's surface for geologic mapping by remote sensing[J]. *J. Geophys. Res.*, 1977, 82: 1 673-1 680.
- [20] Gillespie A R, Kahle A B. Construction and interpretation of digital thermal inertia image [J]. *Photogramm. Eng. Rem. Sens.*, 1977, 43: 983-1 000.
- [21] Short N M, Stuart Jr L M. The heat capacity mapping mission (HCMM)anthology (NASA SP-565) [R]. Washington, DC: US Government Printing Office, 1982.
- [22] Nasipuria P, Mitra D S, Majumdar T J. Generation of thermal inertia image over a part of Gujarat: A new tool for geological mapping [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005, 7(2): 129-139.
- [23] Nasipuria P, Majumdar T J, Mitra D S. Study of high-resolution thermal inertia over western India oil fields using ASTER data[J]. *Acta Astronautica*, 2006, 58(5): 270-278.
- [24] 张向前, 马藹乃, 崔承禹. 热惯量成像研究[J]. 遥感信息, 1986(2): 19-24.
- [25] 张霄羽, 毕于运, 李召良. 遥感估算热惯量研究的回顾与展望[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(3): 166-172.
- [26] 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): 9 735-9 739.
- [27] 闫柏琨, 刘圣伟, 王润生, 等. 热红外遥感定量反演地表 SiO<sub>2</sub> 含量研究 [J]. *地质通报*, 2006, 25(5): 639-643.
- [28] 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): 1 116-1 125.
- [29] Rowan L C, Mars J C. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(3): 350-366.
- [30] Rowan L C, Mars J C, Simpson C J. Lithologic mapping of the Mordor, NT, australia ultramafic complex by using the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 99 (1-2): 105-126.
- [31] 丑晓伟, 傅碧宏, 郑建京. 干旱区热红外遥感多光谱遥感岩石地层信息提取与分析方法研究[J]. *科学通报*, 1994, 39(18): 1 693-1 695.
- [32] 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): 601.
- [33] 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.

(上接第 31 页, Continued from page 31)

叠率仅为 70%。而在使用 SVM 算法进行高光光谱影像目标检索时, 没有获得预期的结果, 究其原因, 初步认为是 C++ 调用 Open CV 动态库过程中的参数设置存在错误。该方法已在两个实际应用课题中取得了良好的效果。在其后的工作中将完善 SVM 算法的测试, 并引进更多的算法进行应用。

#### [参考文献]

- [1] 童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光光谱遥感: 原理、技术与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] 耿修瑞, 赵永超. 高光光谱遥感图像小目标探测的基本原理[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(8): 1 081-1 087.
- [3] Claudio Persello. Advanced techniques for the classification of very high resolution and hyperspectral remote sensing images[D]. Trento: DISI-University of Trento, 2010.
- [4] Marconcini M, Camps-Valls G, Bruzzone L. A composite semisupervised SVM for classification of hyperspectral images[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(2): 234-238.
- [5] Gualtieri J A, Chettri S. Support vector machines for classification of hyperspectral data [C]//Proc. of IEEE-IGARSS 2000. Hawaii: IEEE-IGARSS, 2000: 813-815.
- [6] Skaloud J, Lichti D. Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 61(1): 47-59.