新型遥感技术的铀资源勘查应用

刘德长 杨旭 张杰林

（核工业北京地质研究院，北京，100029）

摘　要：一系列对地观测遥感卫星成功发射，新型传感器相继问世，不断增添具有更高空间分辨率、光谱分辨率和更多极化方式的新型遥感数据源。这些数据源正以传统遥感数据源不具有的优势在国民经济各领域应用，取得了许多良好的应用效果。本文从新型多光谱遥感、高空间分辨率遥感、高光谱遥感、雷达遥感等四个方面介绍一下新型遥感数据在铀资源勘查中的应用情况及效果。

关键词：新型遥感技术；铀资源勘查；应用

中国分类号：　　文献标志码：A　　文章编号：

Application of New Types of Remote Sensing Technology in Uranium Deposit Prosecting

LIU Dechang, YANG Xu, ZHANG Jielin

（Beijing research institute of uranium geology, Beijing 100029）

Abstract: With the development of remote sensing, there are a few new types of sensors from which can acquire abundance new types of remote sensing data. These data has been applied succeedly in many different fields of national economy construction. In this paper, applications of four types remote sensing in uranium deposit prosecting, multi-spectral, high-spatial-resolution, hyperspectral and radar data, have been summarized .

KeyWords: new types of remote sensing technology；uranium deposit prosecting；application

1 引言

进入 21 世纪前后近十年，遥感技术得到了快速发展。1999 年，NASA 成功发射了承载多种传感器的 Terra 卫星；美国 Space Imaging 公司成功发射了全球第一颗高分辨率商业化遥感卫星 IKONOS；我国与巴西合作发射了我国第一颗数字传输型资源卫星 CBERS-1。2000 年，美国 NASA 发射了 EO-1 卫星，其上搭载了高光谱成像仪 Hyperion；2001 年，美国数字全球公司成功发射商用高分辨率卫星 QuickBird，2002 年法国发射了 SPOT-5 卫星，2003 年中巴资源卫星 02 星

成功发射，2006 年 1 月日本发射了 ALOS 卫星，2007 年我国又发射了中巴资源卫星 02B 星。这些卫星的成功发射，使得 CBERS-02B，ASTER，ALOS，IKONOS，QuickBird，OBVIEW，Hyperion，TerraSAR，Lidar 等多种新型传感器相继出现，继而产生了多种具更高光谱分辨率、空间分辨率，以及更多极化方式的新型遥感数据。这些新型遥感数据的出现促进了遥感技术在国民经济各领域的进一步渗透，并已在地球科学、农业、林业、城市规划、土地利用、环境监测、考古、军事等各个领域有了更加广泛而深入的应用[1]。本文将从新型多光谱遥感、高光谱遥感、高空间分辨率遥感、雷达等四个方面简要介绍一下新型遥感数据在铀资源勘查中的应用情况及效果。

2 新型遥感技术的应用

2.1 新型多光谱遥感技术的应用

过去的二三十年，多光谱遥感技术应用的数据源主要是 MSS、TM、ETM 和 SPOT。新世纪 CBERS-02/02B、ASTER 和 ALOS 等新型多光谱遥感技术的出现为多光谱遥感技术在国民经济各领域的应用提供了新的数据源。当前，在铀资源勘查中应用最多的是 CBERS-02/02B 和 ASTER 等数据。

（1）CBERS-02/02B

中巴地球资源 02B 星（CBERS-02B）搭载有 CCD 多光谱相机、高分辨率相机、宽视场成像仪等遥感传感器。利用其传回的高质量影像数据，在江西桃山铀矿田开展了矿田构造格架、成矿岩体和热液蚀变带等主要成矿要素的遥感信息的提取与分析。

在矿田构造格架研究方面，由于 CBERS-02B 多光谱影像的空间分辨率为 19.5 米，比 ETM 多光谱波段数据的 30 米的空间分辨率高，识别断裂的效果好。在 342 波段彩色合成影像图中（图 1），可以明显看出桃山矿田产于桃山断裂、罗坑断裂、钓峰断裂的构造夹持和交汇区，受这三条主干断裂控制。在岩体划分方面，通过地面光谱测量结果表明，不同期次岩体的光谱特征主要是由 Fe3+、Fe2+、钙-OH 等引起的，吸收峰波长位置主要集中在 0.5 ~ 0.9μm 光谱范围内。由于 CBERS-02B 多光谱数据光谱范围为 0.48-0.89μm。因此，利用由金属离子引起的可诊断吸收光谱信息，划分出不同岩体，并圈定了分布范围。在热液蚀变信息提

取方面，利用 CBERS-02B 多光谱数据，通过光谱指数计算（B1/B2），可提取 Fe3+蚀变信息，桃山矿田范围为高值区，代表铁的含量高，与矿田形成的强烈的碱交代现象相吻合[2]。



图 1 桃山铀矿田构造格架 02B 星遥感影像构造解译图

Fig. 1 CBERS-02B image of framework in Taoshan uranium deposit

（2）ASTER 数据

ASTER 传感器提供了包括可见光一近红外(VNIR)、短波红外(SIR)、热红外(TIR)共 14 个波段的地物波谱数据。其中最高分辨率在 VNIR 波段达到了 15m。另外，在获得地物波谱数据的同时，它还能利用在 03N 波段和 03B 波段以不同视角获得的图像组成立体像对，从而获得同一地区的高程数据。这些特点为该数据的地质应用提供了很大的方便。在铀矿找矿中，主要用于控矿构造识别、蚀变信息提取和岩性划分等方面的研究。下面以控矿断裂的识别和蚀变信息的提取为例，说明 ASTER 数据在发现萨克铀矿化带上的应用效果。

先是在塔里木盆地北缘萨克地区，用 ETM 图像研究已知航放异常点的控制因素，但由于图像上所显示的断裂构造不明显，其受断裂带控制未能引起足够的重视。后来采用 ASTER 图像研究，由于其空间分辨率比 ETM 提高一倍，断裂构造显示非常清楚，当将航放异常点投到 ASTER 图像上，明显看出受一条 NW 向断裂带控制（图 2）。

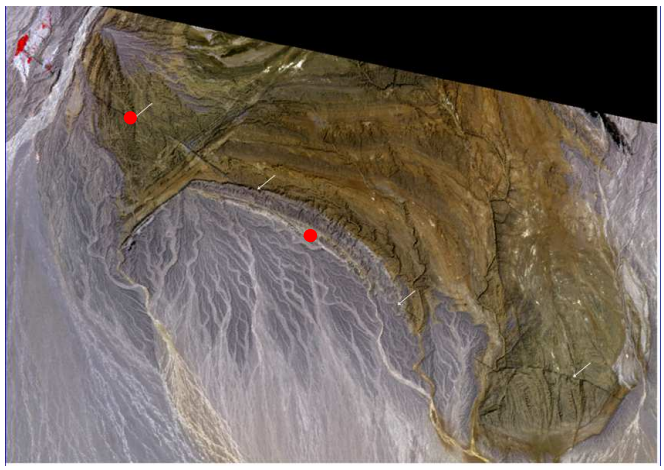


图 2　塔里木盆地北缘萨克地区 ASTER 遥感影像

Fig. 2　ASTER image of Sake ares in north of Tarim Basin

（箭头指向断裂带；红点示已知航放异常点）

根据岩石裸露区相同的地质体或地质现象具有相同的光谱特征，因而在遥感图像上会显示出相同的特征影像的原理，开发了多光谱遥感影像特征类比提取技术。利用 ASTER 具有 14 个波段，且地质上常用的 ETM7 波段被划分为 4 个波段的优势，先选定上述断裂带上的两个航放异常点为目标，对其特征影像进行提取。当两个航放异常点处都出现红色斑点（蚀变）时，在该图像上又出现两处红色斑点区（图 3）。这两处红色斑点（蚀变）地段，作为野外地质检查的重点地段。

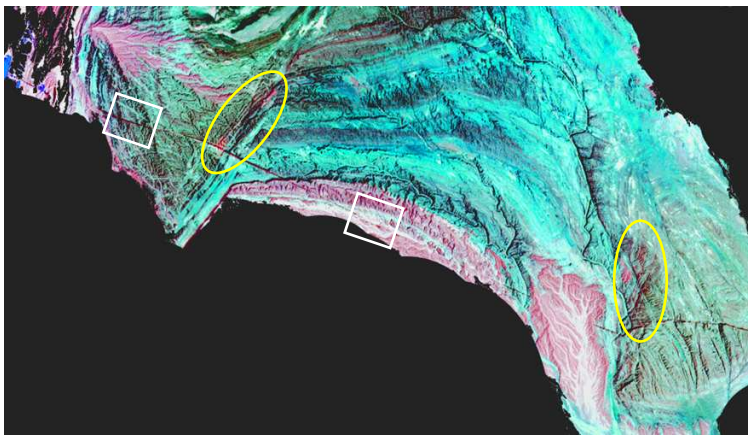


图 3　矿化信息影像特征类比技术处理效果图

Fig. 3　Ore-search Information extraction based on analogy the Image Features method

（方框内为已知航放异常点的红色斑点；圆圈内为具有与已知矿化点相似影像特征的地段）

经在上述蚀变地段（圆圈范围）的重点追索和地面能谱测量，沿带又发现了 5 处地面能谱异常，最高 1000ppm，其余 100-500ppm。从而利用 ASTER 数据发现了一条铀的矿化带。

2.2 高空间分辨率数据的应用

IKONOS、QuickBird 等高空间分辨率数据不仅具有多光谱波段的特点，更重要的是具有很高的空间分辨率。因此，这类数据的应用既可以充分发挥高空间分辨率的优势（1m 和 0.6m），又可以发挥高空间分辨率与多光谱相结合的优势，大大提高了人们对地物目标的精细观测水平和解译分析能力。在铀资源勘查中，利用这一优势，可以精细研究铀矿化带的组合和蚀变带的强弱程度。

从 IKONOS 真彩色合成遥感图像上可以看出，上述萨克铀矿化带的断裂由黑色线性体和白色线性体重接复合组成。从 QuickBird 真彩色合成遥感图像上，除此之外，还可看到矿化地段图像色调呈灰白色斑点。但是，在放大的 ETM 图像上连断裂带的构造痕迹都看不清，更不要说断裂带的内部结构和旁侧的蚀变现象（图 4）。



图 4　新型与传统遥感图像萨克铀矿化带影像特征对比图

Fig. 4　New and traditonal remote sensing contrastive image of Sake area uranium zone

左图：QuickBird 遥感图像；右图：ETM 遥感图像

（①黑色线性体；②白色线性体；③灰白色斑点；红点示已知航放异常点；白框示高分辨率数据对应范围）

经野外检验，黑色线性体为基性岩脉，白色线性体为断裂带，反映控矿断裂由基性岩脉和断裂带组成，断裂带形成在后，破坏了基性岩脉，二者为重接复合关系。断裂的活动导致了深部含铀热流体的上升，造成断裂上盘泥盆系红色砂岩褪色蚀变（图 5）。蚀变的特点是水云母化、碳酸盐化和少量硅化，并使三价铁减少，从而导致原红色砂岩变为灰白色。因此，矿化地段在 QuickBird 真彩色图像上显示浅色调。

对高空间分辨率图像的精细分析，不仅符合野外观察的铀矿化带呈基性岩脉+断裂带+蚀变带的地质组合特点，而且为该铀矿化带的区域搜索建立了影像识别

模式。利用此影像模式和高空间分辨率遥感数据，经蚀变信息提取，并通过野外验证，在其外围又发现了 2 条新的类似的铀矿化带（图 6）。



图 5　萨克铀矿化带野外剖面照片（镜头向东南摄）

Fig. 5　Profile phote of Sake area uranium zone

（Ⅰ辉绿岩脉；Ⅱ 硅化带；Ⅲ 蚀变围岩）

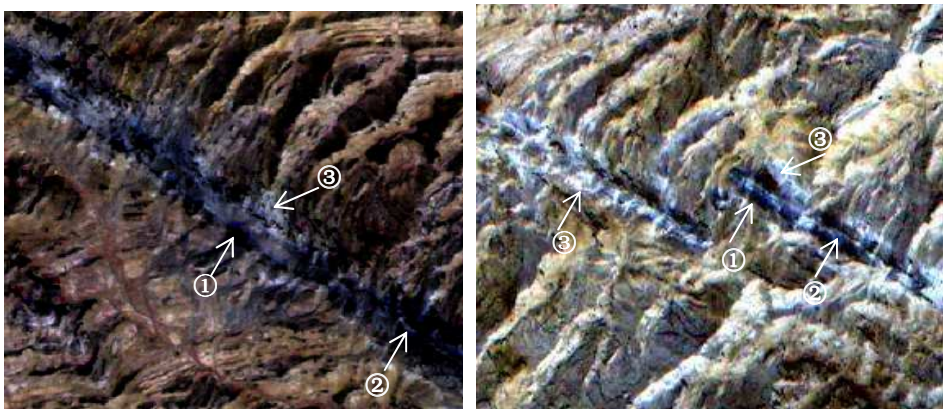


图 6　新发现的铀矿化带（局部）的 QuickBird 遥感影像图

Fig. 6　QuickBird remote sensing image of new fined uranium zones

（①黑色线性体为基性岩脉；②白色线性体为断裂带；③灰白色斑点为褪色蚀变）

从高分辨率的遥感图像上还可以精细的解译出蚀变带内残留体的多少，从而有利于判断蚀变的强弱程度[3]。某蚀变带是由下白垩统红色砂岩经油气还原蚀变为灰色和黄色（灰色遭二次氧化）带。当还原作用不充分时，仍可见到未蚀变的红色砂岩。因此，可以根据红色砂岩的残留体的多少来判断蚀变的强烈程度。利用 QuickBird 数据提取该蚀变带内的残留体，可以将蚀变带分为强烈蚀变、较强烈蚀变和弱蚀变的地段。

2.3 高光谱遥感数据的应用

高光谱与多光谱遥感技术相比的明显优势在于窄波段成像，光谱分辨率可达纳米级。因此，波段数可达几百个。对于不同的应用目的，选择适当的波段，可以取得研究对象图谱合一的信息。借助高光谱遥感信息的上述优势，不仅可以提取铀矿化的蚀变信息，而且可以区分蚀变带的蚀变矿物。

黏土化是铀成矿过程中常见的蚀变现象。组成黏土化的矿物成分，在进行蚀变带对比时十分重要。高岭石和蒙脱石同为黏土矿物，在 2205nm 处都有一个明显的吸收峰，但高岭石在 2165nm 处还有一个明显的次级吸收峰（图 7），利用其就可将高岭石与蒙脱石区分开来。

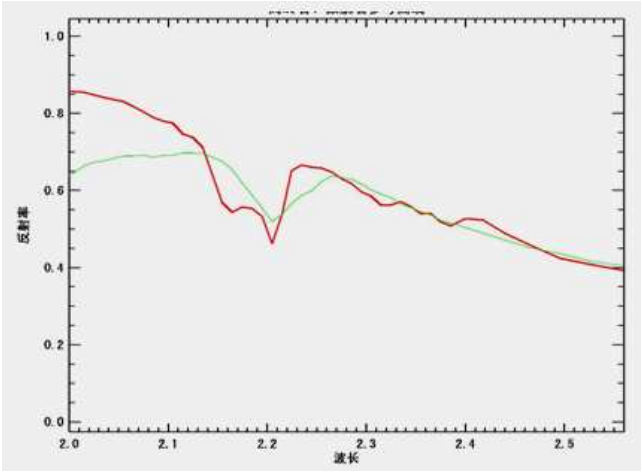


图 7　高岭石、蒙脱石参考光谱曲线（USGS 光谱库）

Fig. 7　Spectrum of Kaolinite and montmorillonite

（红色示高岭石；绿色示蒙脱石）

采用的高光谱遥感数据是 Hyperion 卫星高光谱遥感数据，分辨率为 30 米，由于空间分辨率太低，不宜进行矿物的精确区分。为此，先采用 Daubechies 小波变换将 Hyperion 数据与 IKONOS 卫星遥感数据（空间分辨率为 1 米）融合，得到的融合波段不仅很好地保留了空间信息，更重要的是其光谱信息非常完整，为该区黏土化带矿物成分的精确区分奠定了基础[4]。

为了防止误分和漏分，采用改进式多波段特征拟合技术进行高岭石和蒙脱石矿物的分类提取研究。改进式波谱特征拟合的矿物识别模式与波谱特征拟合技术的区别在于：波谱特征拟合技术是针对单一谱带特征进行的矿物识别[5]，而改进式波谱特征拟合技术充分考虑了具有复杂成分的矿物在波谱特征上的谱系效应，即在对最典型的吸收特征进行拟合的基础上，进一步利用离子或基团的次要吸收特征进行矿物识别，如果还是无法达到较好的区别效果，再可以对第三级特征进

行拟合。改进式波谱特征拟合的矿物识别技术既能在细节上针对特征谱带进行拟合，又能考虑到整体波形的影响作用，因此提取离子或基团组合复杂的蚀变矿物具有独特的优势。经用该项技术对上述 Hyperion 的 Band205 处理，在黏土化内不仅将高岭石（红色）和蒙脱石（绿色）区别开来（图 8），而且说明该黏土化带主要由高岭石和蒙脱石组成。

2.4 新型雷达数据与光学数据的融合应用

近年来，星载雷达遥感的发展比较快，出现了许多新的传感器，总的趋势是向高分辨率、多极化的方向发展。同时，雷达遥感数据与光学遥感数据的融合也是其新的应用方向。

研究区属于南方多云多雨地区，依靠太阳光源的光学传感器在数据采集过程中受到一定限制，而雷达传感器具有全天时、全天候的技术优势，并对植被具有穿透性。本文基于 ETM 影像数据与 Radarsat 精细模式成像雷达数据，利用纹理分析和光学与微波信息融合技术，开展了研究区已知铀矿化分布规律的研究[6]。

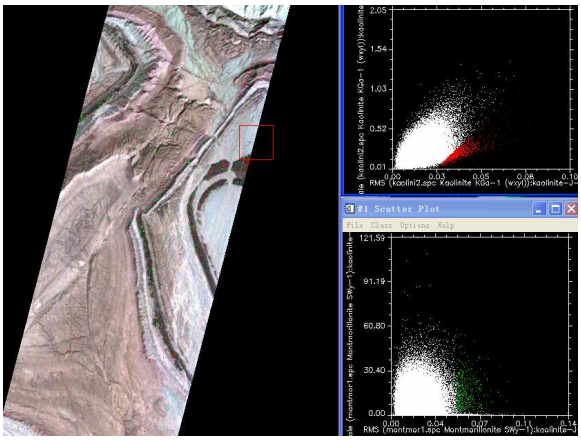


图 8 改进式波谱特征二级拟合结果图

Fig. 8 Result of multi-range spectral feature fitting

（红色—高岭石；绿色—蒙脱石）

雷达数据纹理分析算法主要采用二阶概率统计、计算及提取多种纹理参数（平均值、变异性、对比度、相异性、熵、二阶矩及相关性等），分析雷达影像中不同尺度纹理特征的分布规律，研究矿田构造发育特征及其与铀成矿的关系。在此基础上，利用雷达图像与 ETM 图像信息融合技术，获得既包含地形地貌特征和地质构造等纹理信息，又包含不同岩石光谱信息的光学和微波信息融合图像，提高了影像对构造和岩性的综合识别能力。在融合图像（图 9 右图）中，可以明

显看出该区呈 NE 向展布的铀矿床、矿点是沿 NE 向大断裂带分布。显然，该 NE 向大断裂为本区的主干控矿断裂，但是在光学和雷达图像上，该断裂是不清楚的（图 9 左图和中图）。

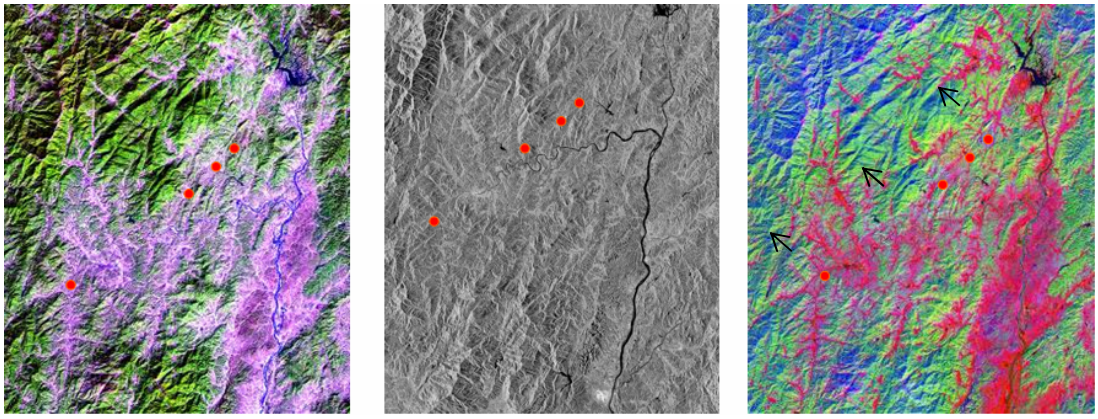


图 9 光学与雷达数据融合图

Fig. 9　ETM and Radarsat fusion image

左：ETM 图像；中：Radarsat 雷达图像；右：ETM 与 Radarsat 融合图像

3 结语

新型遥感数据与传统遥感数据相比，具有更高的空间分辨率、光谱分辨率和更多极化方式等技术优势。这些遥感数据源的出现，为遥感技术在资源勘查、土地利用、城市规划、灾害预测、环境监测、考古研究和军事等领域的应用注入了更强的活力，也促进了遥感技术在铀资源勘查领域的深入应用。

实践表明，新型遥感数据的采用，往往会发现传统遥感数据不能或很难发现的地质体或地质现象，从而促进了地质人员的创新思维，导致新概念的产生和铀矿化规律新认识的形成，从而提高了遥感技术的应用效果。

参考文献：

[1] 刘德长，叶发旺. 新型卫星遥感数据的应用现状[J]. 卫星应用，中国空间技术研究院，北京：2009 年第 1 期

[2] 张杰林，赵英俊，张静波等. CBERS-02B 星数据质量评价及铀成矿要素解译应用研究[J]. 国土资源遥感，2009，79（1）：69-73

[3] 杨旭，刘德长，张杰林. 基于高分辨率卫星数据铀矿找矿信息提取[J]. 世界核地质科学，2008，25（3）：167-171

[4] 杨旭. 新疆乌恰-库车地区铀成矿要素多源遥感信息提取技术研究及集成应用[D]. 核工业北京地质研究院博士论文，2008

[5] 甘甫平，王润生著.遥感岩矿信息提取基础与技术方法研究[M]. 北京，地质出版社，2004

[6] 张杰林，刘德长.曹代勇.基于信息融合的铀矿床遥感数据挖掘技术[J]. 地理与地理信息科学，2004，(3)：89-91

作者简介：刘德长，（1938 年— ），男，汉族，陕西三原人，研究员，博士生导师，长期从事遥感技术在铀资源、核军事等领域的应用研究。目前正在从事后遥感应用技术的开拓研究。
E-Mail: liudc@yeah.net