

DOI: 10.3969/j.issn.1672-0636.2011.04.008

CASI/SASI 航空高光谱遥感测量系统 及其在铀矿勘查中的初步应用

叶发旺, 刘德长, 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] 介绍了我国首次引进的 CASI/SASI 航空高光谱遥感测量系统组成及其主要技术指标, 并以新疆柯坪地区铀矿勘查为例, 阐述了该系统遥感数据获取、数据预处理、铀矿蚀变矿物填图和野外验证等。研究表明, CASI/SASI 航空高光谱遥感测量系统可以获得高空间、高光谱分辨率的遥感数据, 在新疆柯坪地区大比例尺提取铀矿蚀变信息方面取得了很好的效果。

[关键词] CASI/SASI 航空高光谱测量系统; 铀矿勘查; 柯坪地区

[中图分类号] TP79 [文献标志码] A [文章编号] 1672-0636(2011)04-0231-06

Airborne hyper-spectral survey system CASI/SASI and its preliminary application in uranium exploration

YE Fa-wang, LIU De-chang, ZHAO Ying-jun

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

Abstract: In this paper, the components of CASI/SASI system and its technological specifications are presented at first. Then, the acquisition and pre-processing of CASI/SASI data, and alteration minerals mapping for field investigation and uranium exploration are introduced with the case study in Keping area, Xinjiang Uygur Autonomous Region. Studies show that the CASI/SASI airborne hyper-spectral survey system can acquire the data with high spatial and spectral resolution, and good application effects have been reached in extracting alteration mineral information related to uranium mineralization with large scale in Keping area.

Key words: CASI/SASI airborne hyper-spectral survey system; uranium prospecting; Keping area

自 20 世纪 80 年初期, 高光谱技术出现至今, 其已形成一个颇具特色的前沿领域, 并成为当前对地观测的重要前沿技术之一, 广泛应用于地球科学的各个方面, 在地质制图、植被调查、海洋遥感、农业遥感、大气研究、环境监测等领域发挥着越来越重要的作用。世界

各国都高度重视高光谱遥感技术的发展与创新。自 1983 年世界上第一台成像光谱仪 AIS-1 (Aero Imaging Spectrometer-1) 在美国喷气推进实验室研制成功以来, 至今全球有大约 50 多套成像光谱仪投入使用, 其中最具代表性的是: 美国早期研制的可见光红外成像光谱仪

[收稿日期] 2011-04-14; [修回日期] 2011-09-21

[作者简介] 叶发旺(1974—), 男, 浙江松阳人, 高级工程师, 博士, 主要从事遥感图像处理和应用及铀矿地质等工作。

E-mail: yfwbeijing2008@sina.com

(AVIRIS)、澳大利亚的 HyMap、美国的 Probe、加拿大 ITRES 公司的 CASI、SASI、TASI 系列产品等航空成像光谱仪和美国研制的星载成像光谱仪 Hyperion。

2008 年至今,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首次引进了加拿大 ITRES 公司先进的机载成像光谱测量系统 CASI/SASI/TASI,组成了全套的可见光-热红外航空高光谱测量系统,为我国开展地质找矿、环境监测等研究提供了先进的高光谱遥感探测技术手段。2008 年 10 月,以找铀矿为主要目的,在新疆柯坪地区进行了 CASI/SASI 成像光谱测量系统的航空飞行试验,获取了 CASI/SASI 高空间、高光谱分辨率遥感数据,为分析和评价柯坪地区的铀成矿潜力提供了重要的新技术手段。本文以试验飞行的一部分数据为例,阐述该系统的组成、数据处理及铀矿地质应用的初步效果。

1 CASI/SASI 系统组成及主要技术指标

CASI/SASI 航空高光谱测量系统主要由 CASI、SASI 成像光谱传感器、ICU 中央控制器等核心组件和一系列精确几何校正与辐射校正仪器组成(图 1)。CASI/SASI 成像光谱传感器具体参数指标见表 1。精确几何校正与辐射校正仪器设备有:GPS 设备、POS AV310 和 IMU 惯导系统、ILS 太阳辐照度测量仪器、三轴稳定平台 PAV30 等组成(图 1)。除上述硬件外,该系统自带辐射校正和几何校正软件。同时,具备 3 种成像模式:空间模式、光谱模式和全帧模式。

2 新疆柯坪地区 CASI/SASI 数据获取与预处理

2.1 柯坪地区铀矿化基本概况

新疆塔里木盆地北缘是近年来核工业系



图 1 CASI/SASI 航空高光谱测量系统组成

Fig. 1 System components of CASI/SASI airborne hyper-spectral survey system

统铀矿勘查和研究的重要地区之一。柯坪断隆是塔里木盆地北缘的一个古老断隆,主要出露古生代地层^[1]。过去的铀矿地质勘查工作在柯坪断隆地区发现了一些碳硅泥岩型和砂岩型异常点^[2-3],以及 HF-10 等航放异常点^[4]。笔者在基于多光谱遥感数据对柯坪断隆东段开展铀成矿地质条件和铀矿化规律研究时,提出柯坪断隆东段是值得重视的铀成矿区^[5],并发现出露于萨拉姆布拉克地区的一个航放异常点(编号为 HF-10)和一个航放高场点(编号为 HG-6)分布于一条明显的 NW 向线性构造带上(图 2)。这一遥感发现把原本孤立分析和评价的航放异常点和航放高场点联系起来,提升了萨拉姆布拉克地区的铀矿找矿潜力,也为该地区的铀矿找矿提供了重要线索。初步的野外调查表明,上述 NW 向线性构造带是一条约 4~8 m 宽的基性岩脉,而 HF-10 异常点处的铀矿化主要是克兹尔塔格组(S₃-D)红色碎屑岩石受基性岩脉边缘断裂构造和沿断裂上升的多期热流体作用后,发生褪色蚀变和铀矿化作用形成的。根据上述铀矿化野外特征,总结出铀成矿地质要素组合为:基

表 1 CASI/SASI 系列航空成像光谱仪参数

Table 1 Specifications of airborne imaging meter of CASI/SASI

参数	光谱范围	每行像元 数/个	连续光谱通 道数/道	光谱带 宽	帧频(全波 段)/帧·s ⁻¹	总视场 角/(°)	瞬时视场 角/(°)	信噪比	绝对辐射 精度/%
CASI-1500	380~1 050 nm	1 470	288	2.3 nm	14	40	0.028	>1 000	± 5~10
SASI-600	950~2 450 μm	640	100	15 μm	100	40	0.07	>1 000	± 5~10

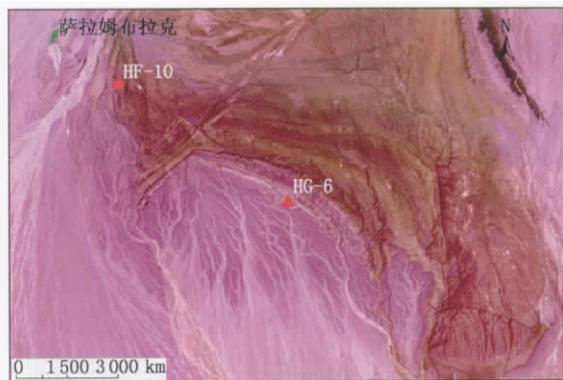


图2 萨拉姆布拉克地区 ASTER 多光谱遥感影像
Fig. 2 ASTER multispectral image of Salamblak area

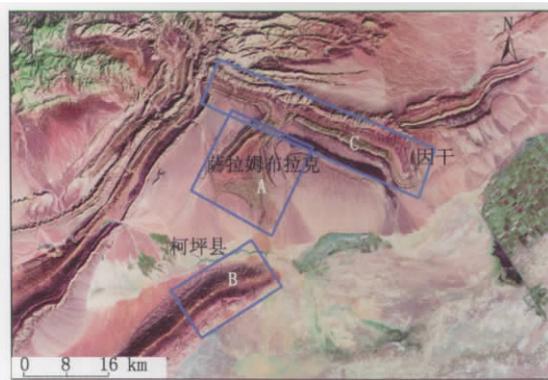


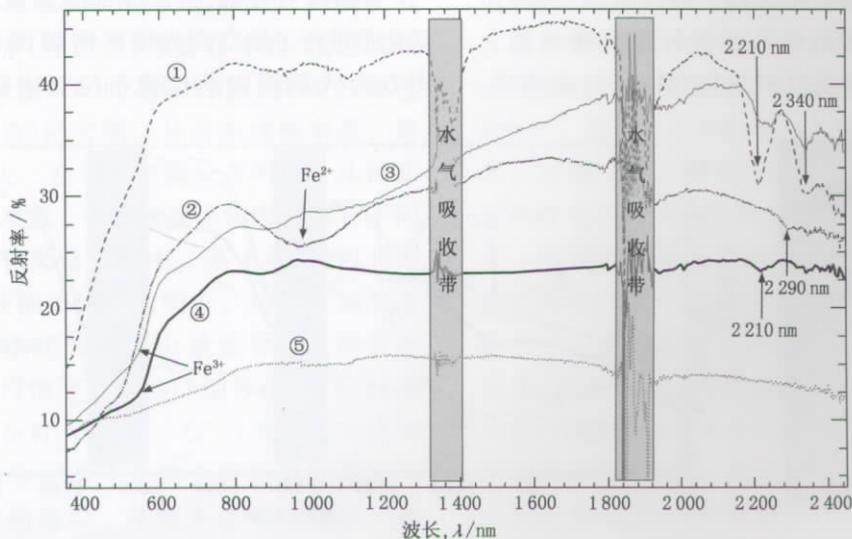
图3 柯坪断隆东段 CASI/SASI 航空高光谱遥感测量范围
Fig. 3 Airborne survey range by CASI/SASI in the east section of Keping faulted Uplift

性岩脉+断裂带+蚀变带。为深入研究与铀矿化有关的灰白色褪色蚀变特征,进一步评价萨拉姆布拉克铀成矿带的找矿潜力;同时,在建立铀矿找矿遥感影像模式的基础上,向外围地区开展区域搜索,从而发现新的铀成矿有利地段,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在柯坪地区开展了 CASI/SASI 航空高光谱遥感测量试验研究。

2.2 CASI/SASI 航空高光谱数据获取与预处理

2008年9月30日~10月4日, CASI/SASI 系统在新疆柯坪地区开展了试验飞行测量。其中,运-5 飞机为搭载平台,飞行相对地面高度为 1 500 m,共获取了柯坪断隆内 3 个区段(图 3 中的 A、B、C 3 个区)33 个航带的

高光谱数据。数据分别包括 CASI 可见光-近红外谱段和 SASI 短波红外谱段。其中, CASI 数据共 48 个波段,光谱覆盖范围为 404~1 047 nm,光谱分辨率为 14 nm,空间分辨率为 1 m; SASI 数据共 101 个波段,光谱覆盖范围为 950~2 450 nm,光谱分辨率为 15 nm,空间分辨率为 2.4 m。航空飞行测量过程中,在地面也同步开展了黑白布测量,并对 HF-10 所在主要矿化区域的岩石进行了野外光谱测量(图 4)。由图 4 可见,灰白色褪色砂岩在 2 210 nm 和 2 340 nm 处存在明显的两个吸收谷,而在灰白色褪色砂岩基础上进一步蚀变而成的浅肉红色砂岩与紫红色砂岩一样,在 530 nm 处存



①——白色褪色砂岩; ②——浅黄色风化基性岩脉; ③——浅肉红色砂岩; ④——紫红色砂岩; ⑤——黑色未风化基性岩脉。

图4 研究区几种岩石野外实测光谱曲线
Fig. 4 Field spectral curve of rocks in study area

在一个反映 Fe^{3+} 的吸收坎；在 2 210 nm 和 2 340 nm 处也存在两个吸收谷，但远没有灰白色褪色砂岩的明显。黑色未风化基性岩的光谱反射率明显比其他岩石偏低，且光谱吸收特征不明显，而风化后成浅黄色的基性岩则存在反映 Fe^{2+} 的明显吸收谷，并且在 2 290 nm 处存在一个较弱的吸收谷。

获取 CASI/SASI 数据后，利用系统自带的辐射校正、几何校正软件和测量时获取的相关数据进行辐射校正和几何校正。另外，由于 CASI 和 SASI 的空间分辨率和光谱覆盖区间存在差异性，因此，在影像合成之前，需进行空间配准和光谱重叠区重采样，以保证同一像元空间属性和光谱特性的一致性。同时，为了开展高光谱蚀变矿物填图，还需要开展大气校正处理，计算高光谱图像的反射率。本次试验研究开展了两种大气校正方法：一种是基于地面同步测量的黑白布光谱数据的经验线性法；另一种是基于大气辐射传输模型 FLAASH 校正方法。从校正后的图像曲线(图 5)来看，404~1 070 nm 区间的光谱曲线较光滑，紫红色砂岩中的 Fe^{3+} 、浅黄色风化基性岩的 Fe^{2+} ，以及未风化黑色基性岩的低反射率等光谱特征均能较好地反映出来；1 047~1 340 nm 区间，效果不好，曲线噪音大；1 445~1 800 nm 区间的效果一般；而 2 000~2 450 nm 区间的效果也是一般，但灰白褪色砂岩的两个吸收峰，以及第四纪灰岩砾石的碳酸盐吸收峰均能较好地反映出来。上述图像光谱曲线反映出来的特征与前述岩

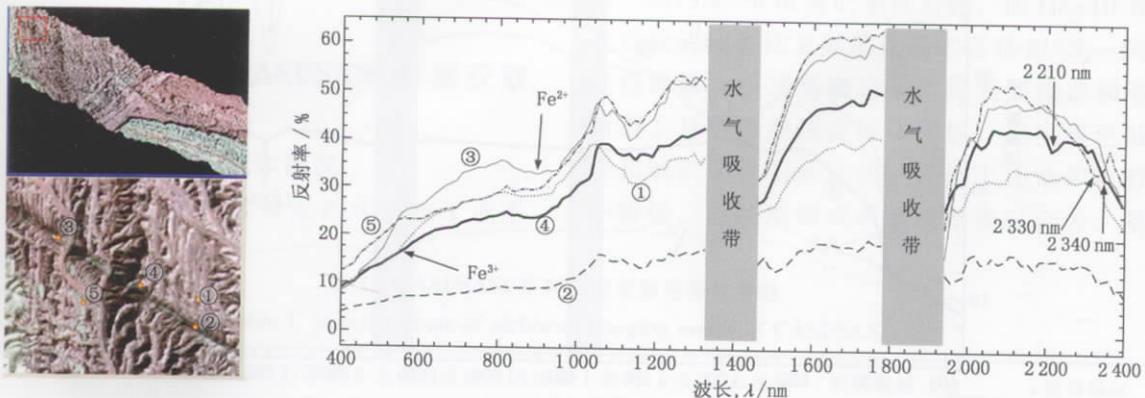
石实测光谱曲线特征能较好地对应，可以满足实际应用需求。

3 CASI/SASI 铀矿化蚀变矿物填图

在众多高光谱矿物填图技术中，基于整体波形的光谱匹配技术是目前利用成像光谱数据进行岩石、矿物信息提取中最为广泛的技术，如光谱角(SAM)技术、混合像元分解技术和混合调制匹配滤波技术等^[6-9]。本文利用光谱角技术开展航空高光谱数据 SASI 在柯坪地区铀矿化蚀变矿物填图时，主要涉及如下处理过程：

(1) 端元选取。利用 ENVI 软件中的沙漏技术(Hourglass)，对校正后的 SASI 数据在 2 000~2 400 nm 区间开展处理和端元提取；(2)光谱分析。即利用野外实测光谱和 USGS 光谱库中的已知矿物曲线对端元进行光谱分析，确定各个端元的矿物种类。如处理过程中，某端元在 2 000~2 400 nm 区间的光谱特征与野外实测灰白色褪色蚀变砂岩的光谱曲线的匹配程度为 90.8%，而野外实测灰白色褪色砂岩光谱与 USGS 光谱库中伊利石曲线最为匹配，匹配程度为 95.3%。因此，认为该端元反映的矿物种类是云母类矿物伊利石，反映的蚀变为伊利水云母化；(3)利用光谱角技术(SAM)或调制匹配滤波(MTMF)或混合像元分解技术(Unmixing)开展矿物填图。

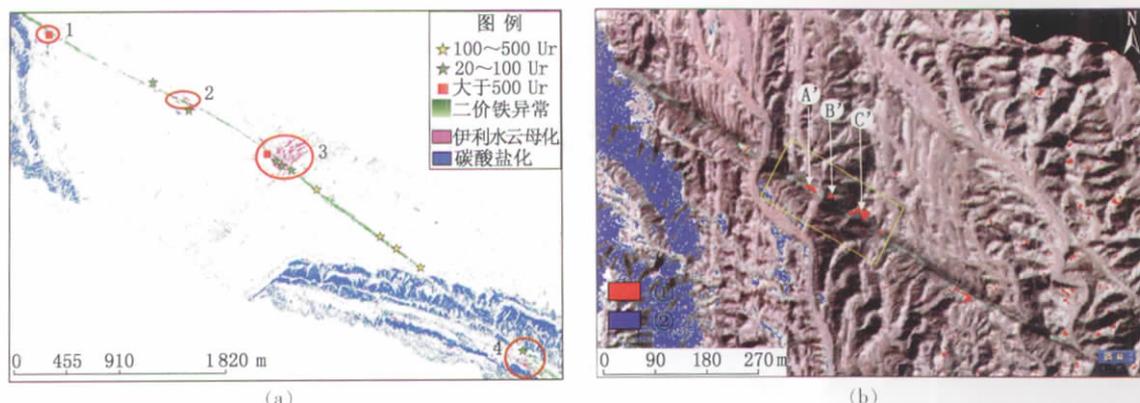
利用上述步骤，对柯坪地区新发现的两条铀矿化带进行了航空高光谱矿物填图(图 6、7)。图 6 为 A 测区内萨拉姆布拉克铀矿化矿物填



①——红色砂岩；②——黑色未风化基性岩；③——浅黄色基性岩风化物；④——灰白色褪色砂岩；⑤——第四纪砾岩。

图 5 HF-10 异常点所在地段 FLAASH 校正后图像曲线

Fig. 5 Spectral curve of FLAASH calibrated image of the HF-10 anomaly area



注: (a)——矿物填图结果与铀矿化叠合图; (b)——第一处蚀变异常放大图; Ur——放射性强度;
①——伊利水云母化; ②——碳酸盐化。

图6 萨拉姆布拉克铀矿化带航空高光谱遥感矿物填图与铀矿化异常叠合图

Fig. 6 Composite map of uranium mineralization and mapping minerals by CASI/SASI in Salamlak

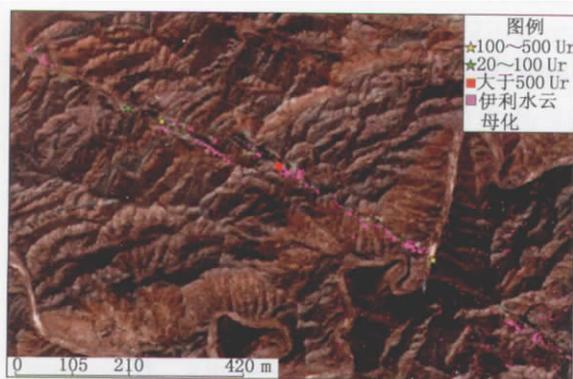


图7 B测区某铀矿化带航空高光谱遥感矿物填图和铀矿化异常与 QuickBird 真彩色叠合图

Fig. 7 Composite map of uranium anomaly, CASI/SASI mapping mineral and QuickBird image

图结果。从图 6-a 中可以看出, 自西北角向东南, 萨拉姆布拉克铀矿化带上, 伊利水云母化蚀变异常(洋红色)主要有 4 处(红色线圈处), 均分布在 NW 向基性岩脉(表现为绿色的二价铁异常)的旁侧。从分布规模来看, 第 3 处规模最大, 在岩脉两侧分布明显; 从铀矿化分布情况来看, 4 处蚀变异常附近均有不同程度的铀矿化异常, 其中, 第 1 处(最西北角处)和第 3 处铀矿化最为明显。第 1 处蚀变分布地段就是前述的 HF-10 航放异常点所在地段。从该地段蚀变异常的详细分布(图 6-b)来看, 明显分布有 A'、B'、C' 3 片水云母化蚀变, 经野外验证这 3 个蚀变所在地也是铀矿化强度最大的地段。从图 6 还可以看出, 碳酸盐化主要呈大片或长条片状分布, 与 NW 向基性岩脉(旁边发育断裂)关系不密切。上

注: 1 Ur=1× 10⁻⁶ g/g

述情况表明, 萨拉姆布拉克铀矿化与水云母化蚀变关系密切。

图 7 为 B 测区内一条铀矿化带矿物填图结果。从该图可以看出, 与萨拉姆布拉克铀矿化带相似, 该带也明显分布有伊利水云母化蚀变异常, 而且蚀变异常处分布有铀矿化异常。在 QuickBird 真彩色图像上, 该蚀变表现为与大片红色影像明显不同的浅白色影像色调异常, 分布于基性岩脉的旁侧。

4 野外验证与室内分析

野外验证表明, 前述航空高光谱遥感伊利水云母异常地段均存在灰白色—灰绿色褪色蚀变, 褪色蚀变外围是未发生蚀变的紫红色砂岩、粉砂岩; 这些褪色蚀变具有如下两方面特征: (1)蚀变类型上, 灰白色—灰绿色蚀变是主体, 规模相对较大, 约 $n \times 10 \sim n \times 100 \text{ m}^2$; 同时, 在灰白色—灰绿色褪色蚀变内部, 还叠加发育有浅肉红色、紫色、灰黑色和褐红色蚀变等(图 8-③~④), 这些叠加蚀变一般规模都很小, 主要叠加在岩脉旁侧近距离的灰白色—灰绿色褪色蚀变中; (2)空间分布上, 各种蚀变主要分布在岩脉的东北侧边缘(图 8-①), 西南侧边缘相对较少; 而且灰白色褪色蚀变基本上均起源于岩脉边缘, 并顺层向外扩散展布, 规模小至 $n \times 10 \text{ cm} \sim 1 \text{ m}$, 大至近 50 多米; (3)放射性特征方面, 发生褪色蚀变的地段放射性强度总体偏高(图 9), 出现灰黑色(有时因地表氧化呈褐红色)叠加蚀

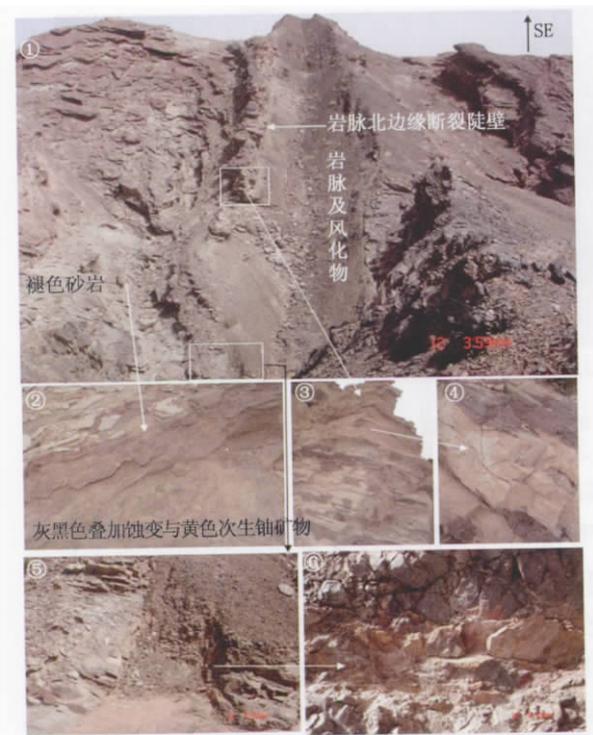


图 8 HF-10 矿化地段 B 剖面矿化蚀变野外地质特征照片

Fig. 8 Field photo of alteration in section B of mineralized district HF-10

变的地方是矿化集中、放射性最高的地方(图 8-②);同时,岩脉边缘的一些地段可见明显的断裂构造特征(图 8-⑤~⑥),这也是放射性较高的地段(图 9)。室内显微观察表明,灰白色褪色蚀变主要表现为水云母化和碳酸盐化,少量绿泥石化,其他叠加蚀变主要为赤铁矿化、水针铁矿化等。

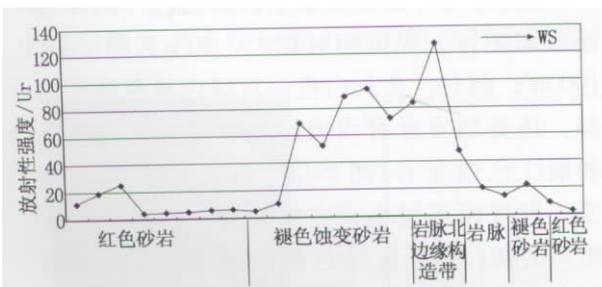


图 9 航空高光谱遥感蚀变异常处地面放射性测量结果图

Fig. 9 Ground radioactive survey map of alteration anomaly by CASI/SASI

5 结论与讨论

(1) 试验研究表明, CASI/SASI 航空高光谱遥感测量系统可以获取高空间、高光谱分

辨率的遥感数据,应用大比例尺可发现和提取与铀矿化有关的蚀变信息,进而为直接发现地表铀矿化提供了一种新的技术方法,值得在铀矿地质勘查领域积极应用,以便挖掘其找矿潜力。

(2) 利用高光谱遥感矿物填图技术,提取出了柯坪地区两条新发现铀矿化带的水云母化蚀变信息,这些蚀变信息与铀矿化关系密切,这一结果为野外地质和室内显微分析所印证。这些信息为重新评价柯坪地区的找矿潜力提供了新证据。

(3) 为了更好地发挥 CASI/SASI 航空高光谱遥感技术在地质找矿中的应用效果,还需要加强不同大气校正方法和不同矿物填图方法的比较研究,筛选出更加适合 CASI/SASI 航空高光谱遥感数据处理和信息提取的最佳方法,以确保矿物填图结果的准确度和可靠性。

[参考文献]

[1] 卢华夏, 贾承造, 贾东, 等. 库车—柯坪再生前陆冲断带构造[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[2] 曹子衡. 新疆铀矿成矿特征与找矿方向探讨[J]. 新疆地质, 1987, 5(1): 1-7.

[3] 段新生, 尹松, 王国荣. 柯坪断隆铀矿化特征与成因分析[J]. 新疆地质, 2010, 28(1): 91-93.

[4] 张吉恒, 李怀渊, 高玉恒, 等. 新疆阿克苏—库车地区航空伽马能谱及磁力综合测量[R]. 石家庄: 核工业航测遥感中心, 1994.

[5] 刘德长, 崔焕敏, 叶发旺, 等. 中国克拉通盆地断隆成矿后遥感研究新证[C].//李子颖. 核地质科技论文集: 庆祝核工业北京地质研究院建院 50 周年. 北京: 地质出版社, 2009: 181-191.

[6] 王润生. 高光谱遥感的物质组分和物质成分反演的应用分析[J]. 地球信息科学, 2009, 11(3): 261-267

[7] 甘甫平, 王润生. 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.

[8] 甘甫平, 王润生, 马蔼乃. 基于特征谱带的高光谱遥感矿物谱系识别[J]. 地学前沿, 2003, 10(2): 445-454.

[9] 燕守勋, 张兵, 赵永超, 等. 高光谱遥感岩矿识别填图的技术流程与主要技术方法综述[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(1): 52-63.