

青海省都兰县阿斯哈金矿区 HySpex 高光谱 矿物填图及其找矿意义

孙雨,赵英俊,李瀚波,陆冬华,田丰,秦凯,杨国防,周家晶,刘鹏飞

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

内容提要:地面成像高光谱遥感具有图谱合一的优势,能够根据光谱特征进行地物的直接识别,是遥感领域的前沿方向。本文针对青海省都兰县阿斯哈金矿区蚀变带,建立了 HySpex 地面成像高光谱数据的标准处理流程,采用基于统计学模型的平场域法进行了光谱重建,基于专家知识选取了端元光谱,利用 MTMF 方法开展了矿物填图,在此基础上制作了阿斯哈金矿区蚀变带比例尺 1:100 的真彩色图像和褐铁矿、绢云母等 5 种地物的高光谱地物分布图。总结出阿斯哈金矿区标志性蚀变矿物为褐铁矿和绢云母,并对提取出的地物进行了野外实地 ASD 光谱测量验证,符合程度好。阿斯哈金矿区 HySpex 地面成像高光谱数据应用实践表明该数据在地质领域具有较好的应用效果和广泛的前景。

关键词: 矿物填图;地面成像高光谱;HySpex;阿斯哈金矿;青海省都兰县

成像高光谱遥感是当今遥感领域的前沿方向,它将传统的二维成像遥感技术与光谱技术结合在一起,光谱通道数多达数十甚至数百,具有“图谱合一”的特点(Peterson et al., 1999; 童庆禧等, 2009, 2010),实现了由地物鉴别到地物直接识别的重要转变^①(Baugh et al., 1998),使遥感工作方法由以图为主的图像分析模式转变为以谱为主的图谱结合模式(甘甫平等, 2000; 张宗贵等, 2000)。目前,航天、航空成像高光谱数据已在众多研究领域中得到了广泛应用,取得了较好的应用效果,如地质遥感领域的岩矿识别、油气探测、矿山环境(Sabins, 1999; 刘圣伟等, 2003; 燕守勋等, 2004; Farrand et al., 2005; 甘甫平等, 2007; 张显峰等, 2007; 周密, 2007; 赵欣梅, 2007); 植被遥感领域的植被分类、植被指数、叶绿素反演(Chen Zhengchao et al., 2003; Leckie et al., 2005; 李凤秀等, 2007; 陶秋香, 2007; 郑国强等, 2008); 水体遥感领域的水质反演、水体分类(Wang Shenxin et al., 2005; 王向成等, 2008)等。

地面成像高光谱遥感技术是高光谱遥感技术的重要研究方向,数据源较为匮乏,受此影响,国内外地面成像高光谱遥感技术应用研究工作开展较少。国外利用 HySpex 地面成像高光谱数据在海洋硅藻

和裸藻生物分布^②、皮肤擦伤检测(Lise et al., 2012)、野外和手标本尺度的岩性及矿物区分^③(Kurz et al., 2009; Baissa et al., 2011; Kurz et al., 2012)和高光谱数据与激光雷达数据集成^④方面均取得了一些研究进展。2013 年,核工业北京地质研究院黄艳菊等对江西相山中国铀矿第一科学深钻岩芯的 HySpex 数据利用光谱角填图技术进行了矿物填图,提取出了与铀成矿密切相关蚀变矿物赤铁矿、伊利石、绿泥石等。本文以青海省都兰县阿斯哈金矿区 HySpex 地面成像高光谱数据为例,开展了数据预处理和蚀变矿物填图研究,并对填图结果进行了验证,探索了该数据的地质应用前景。

1 成像高光谱地质应用基本原理

高光谱遥感通常指光谱分辨率很高(达 10^{-2} λ),可以获取地物连续且完整的光谱曲线的遥感技术(Vane et al., 1993; 童庆禧等, 2006),成像高光谱遥感是能够成像的高光谱遥感。光谱识别是高光谱遥感区别于多光谱遥感的主要特征,也是其优势所在,为遥感的深化应用提供了途径(王润生等, 2011)。

高光谱遥感地质应用中,岩矿光谱特征是地物

注:本文为青海省地质勘查基金“青海哈日扎—果洛龙洼地区航空高光谱测量及靶区优选”(2013 年度科研)项目、中国地质调查局“航空高光谱遥感调查”(编号:12120113073000)项目和中国核工业集团公司(2013 年度科研)项目联合资助的成果。

收稿日期:2014-06-13;改回日期:2014-10-18;责任编辑:郝梓国,黄敏。

作者简介:孙雨,男,1983 年生,工程师,主要从事高光谱遥感地质研究。通讯地址:100029,北京市朝阳区小关东里 10 号院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;Email:sunyutectonics@163.com。

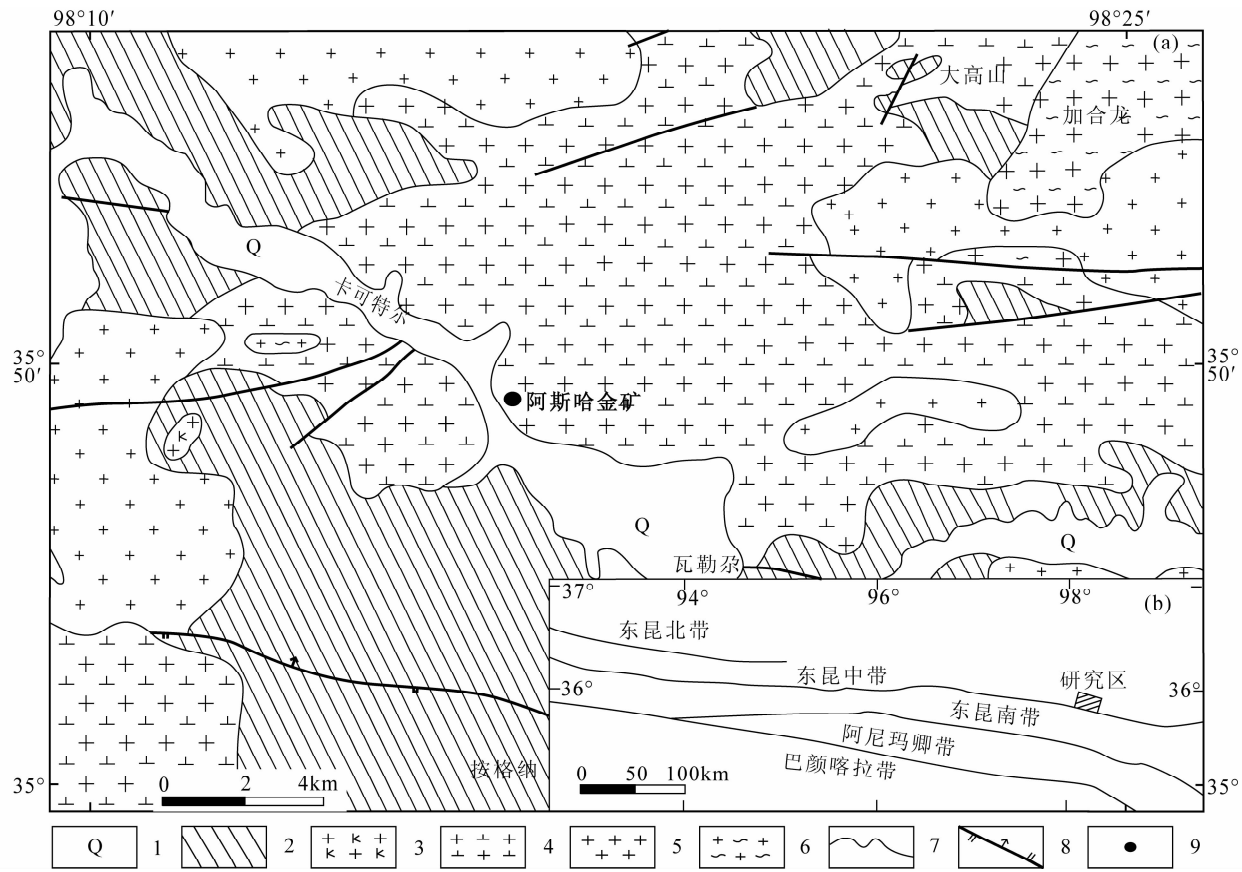


图 1 青海省都兰县阿斯哈金矿区地质简图(据沈鑫,2012 修改)

Fig. 1 Geological sketch map of Asisha gold deposit in Dulan County, Qinghai Province(modified from Shen Xin,2012)

1—第四系;2—古元古代金水口群白沙河组;3—早中生代肉红色钾质花岗岩;4—晚古生代—早中生代灰白色花岗闪长岩;
5—晚古生代—早中生代灰白色—肉红色花岗岩;6—早古生代灰白色片麻状花岗岩;7—地层界线;8—断层;9—金矿点

1—Quaternary;2—Paleoproterozoic Jinshui Kou Group Baishahe Formation;3—Early Mesozoic reddish granite;4—Late Paleozoic-Early Mesozoic gray granodiorite;5—Late Paleozoic-Early Mesozoic gray-reddish granite;6—Early Paleozoic gray gneissic granite;7—stratigraphic boundary;8—fault;9—gold deposit

信息直接提取的基础。在 400~2500nm 光谱区间内,矿物的吸收谱带本质上都可以归结为与其物质组分、内部晶格结构等有关的在可见光—近红外波段的电子过程和离子基团在短波红外波段伸缩或弯曲振动产生倍频与合频的振动过程。常见的阳离子包括 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 和 Cu^{2+} 等,主要的阴离子基团包括铝羟基 (Al-OH)、镁羟基 (Mg-OH) 和碳酸根 (CO_3^{2-}) 等(燕守勋等,2003)。

围岩蚀变现象是重要的找矿标志,只要有热液矿床产出的地方,或多或少均存在一定的近矿围岩蚀变,大型内生矿床周围一般产出有强烈且范围较广的围岩蚀变。岩石中常见的蚀变类型为:云英岩化、绢英岩化、青磐岩化、高岭石化、褐铁矿化、碳酸盐化等,其主要蚀变矿物中含有 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 离子或者 OH^- 、 CO_3^{2-} 等原子团,含有这些离子基团的矿物与主要造岩矿物相比,在 400~2500nm 光谱区间

存在明显的吸收特征谱带(Hunt,1977;刘燕君等,1993;Clark et al.,2003),能够被高光谱遥感技术探测到,从而根据光谱特征识别出矿物类型并在高光谱影像中准确定位,为蚀变带的定性定位和地质勘查提供依据。

2 阿斯哈金矿区地质概况

阿斯哈金矿床位于青海省都兰县,地处秦祁昆成矿域东昆仑成矿带东段,该成矿带素有“金腰带”之称,蕴藏有丰富的铁、铜、金等矿产资源,是青海省重要的矿产资源基地。阿斯哈金矿床(图 1)是近些年新发现的矿床,该矿床位于昆中断裂带北侧,成因类型为中成造山带型金矿(李碧乐等,2012;查道函等,2013),容矿围岩为印支早期灰色中细粒块状花岗闪长岩体内,矿体严格受构造破碎带控制。矿区主要围岩蚀变有硅化、褐铁矿化、绢云母化、高岭石

化、绿泥石化、碳酸盐化、黄铁矿化、孔雀石化,少量方铅矿化和闪锌矿化(沈鑫,2012)。本次工作选取矿区内开矿工程形成的蚀变岩出露带作为研究对象,开展了 HySpex 地面成像高光谱数据获取、处理和分析工作。

3 数据获取

本次数据获取采用的设备为 HySpex 地面成像高光谱测量系统,主要由传感器、主机和控制平台、三脚架等设备构成,该系统拥有一个可见光—近波红外(VNIR)传感器和一个短波红外(SWIR)传感器,能够同时获取 0.4~2.5 μm 的地面成像高光谱数据,传感器主要技术参数如表 1 所示。

表 1 HySpex 地面成像高光谱传感器主要技术参数
Table 1 Main technical parameters of ground-based HySpex imaging spectrometer

技术参数	VNIR-1600	SWIR-320m-e
光谱范围	400~1000nm	1000~2500nm
光谱采样带宽	3.7nm	6.25nm
波段数	160	256
瞬时视场角	17°	14°

本文所使用的阿斯哈金矿区蚀变带的地面成像高光谱数据获取时间为 2013 年 8 月 19 日 13 点,获取的原始数据包括 160 个 VNIR 波段和 256 个 SWIR 波段。数据获取时气象条件好,天空晴朗无云,空气中水汽含量低。数据采集过程中在蚀变岩表面放置了标准白板,对白板数据进行了同步采集,为后续数据处理奠定了基础。

4 数据处理

HySpex 地面成像高光谱数据处理工作包括预处理和矿物填图两部分,前人在这方面未提出明确的步骤和处理方法,针对这一问题,本文建立了 HySpex 地面成像高光谱数据的处理流程,为 HySpex 地面成像高光谱数据大规模工程化处理提供了依据,具体流程如图 2 所示。

4.1 数据预处理

首先,利用 HySpex 地面高光谱成像系统自带软件对原始数据进行辐射校正,从而得到辐亮度数据。然后,对辐亮度数据进行逐波段数据质量检查,去除数据中信噪比低和受水汽影响的坏波段(表 2),坏波段去除后保留了 158 个 VNIR 波段和 228 个 SWIR 波段。最后,采用基于统计学模型的平场域法(Flat Field Method)进行光谱重建工作获得反射率基础数据。平场域法选取标准白板洁净区域作为平场域,通过统计计算获取平场域的平均光谱曲线,将 HySpex 地面成像高光谱数据除以平均光谱即得到了地物反射率基础数据,在假定标准白板在各波段反射率均为 1 的前提下,可以将光谱重建后的数据视为绝对反射率基础数据,能够用于后续矿物填图。

为评价光谱重建后的效果,本文实地选取了在 VNIR 波段光谱特征明显的褐铁矿和在 SWIR 波段光谱特征明显的高岭石两个典型地物。通过对比典型地物光谱重建前后的光谱(图 3)可以看出,光谱重建前地物光谱无明显吸收特征,光谱重建后地物的光谱吸收特征明显:褐铁矿存在 950nm 附近宽展吸收谷和 750nm 附近强反射峰,高岭石存在 2210nm 和 2165nm 的双吸收特征,与 USGS 光谱库中的对应矿物光谱吸收特征十分吻合,表明平场域法对于 HySpex 数据光谱重建的效果较好。

表 2 HySpex 地面成像高光谱数据去除波段一览表
Table 2 Eliminated bands of HySpex ground-based imaging hyperspectral data

波段范围	去除的波段	去除理由
VNIR	255~256	信噪比低
SWIR	67~76,145~160 255~256	受 1300nm、1900nm 附近水汽影响 信噪比低

4.2 矿物填图

预处理后形成的反射率基础数据可以应用于矿物填图工作,本文选择 ENVI 软件推荐使用的流程化光谱沙漏工具(Spectral Hourglass Wizard)进行

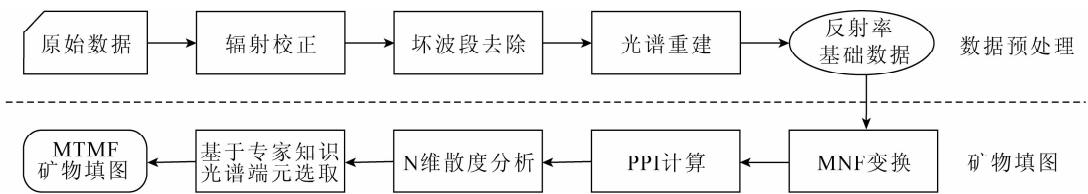


图 2 HySpex 地面成像高光谱数据处理流程
Fig. 2 Processing workflow of HySpex ground-based imaging hyperspectral data

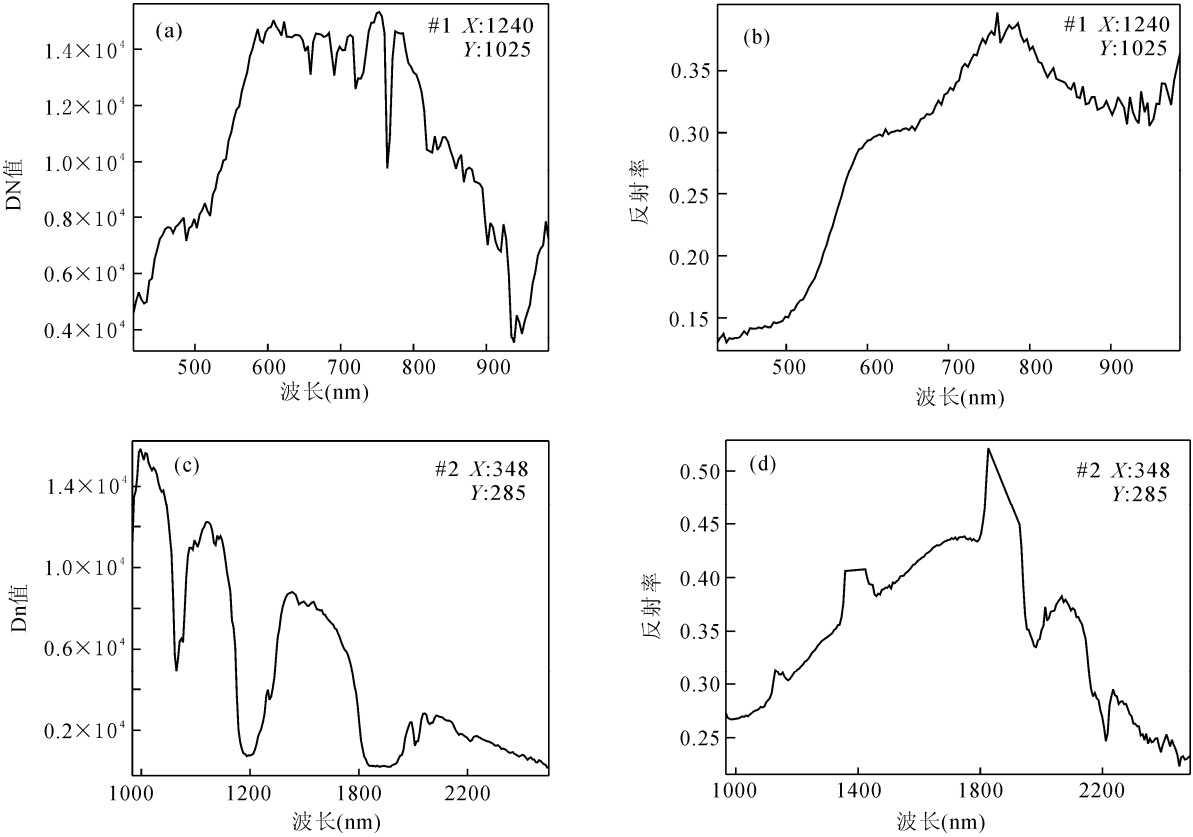


图 3 青海省都兰县阿斯哈金矿区平场域法光谱重建前后矿物光谱对比图

Fig. 3 Comparison chart of minerals spectrum before and after spectral reconstruction using flat field method of Asisha gold ore district in Dulan County, Qinghai province

- (a) — 光谱重建前褐铁矿地物光谱; (b) — 光谱重建后褐铁矿地物光谱; (c) — 光谱重建前高岭石地物光谱; (d) — 光谱重建后高岭石地物光谱
- (a) — The limonite spectrum before spectral reconstruction; (b) — the limonite spectrum after spectral reconstruction; (c) — the kaolinite spectrum before r spectral reconstruction; (d) — the kaolinite spectrum after spectral reconstruction

矿物填图,该流程可以分为 MNF 变换维数判断、PPI 纯净像元计算、N 维散度分析和填图方法选取 4 个部分。在矿物填图过程中,用于矿物识别的端元光谱的选取非常重要,直接影响到矿物填图的效果,因此,本文以阿斯哈矿区蚀变矿物类型和组合为基础,采用基于专家知识的光谱选取方法对光谱沙漏识别出的端元光谱进行逐一判别,选取有地质意义的端元光谱进行矿物填图。本文选用的矿物填图方法为混合调制匹配滤波(MTMF)方法,该方法是将线性混合分解与匹配滤波相结合而形成的一种复合方法,具有矿物检出限低,能探测其他方法不能检测出的岩石中微量矿物成分的优点。HySpex 地面高光谱数据包括 VNIR 数据和 SWIR 数据,二者的光谱分辨率和空间分辨率各不相同,因此,需要对 VNIR 数据和 SWIR 数据分别进行矿物填图。

4.2.1 VNIR 数据矿物填图

对阿斯哈金矿区的 HySpex 地面成像高光谱数

据的 VNIR 波段数据进行处理,光谱沙漏处理后获得了 19 条图像端元光谱,结合矿区地质背景,采用基于专家知识的光谱选择方法,对每条端元光谱进行特征吸收位置、吸收深度、吸收宽度和光谱整体形态等的综合分析,逐一筛选剔除,选取出 1 条植被光谱和 1 条褐铁矿光谱(图 4)。图像端元光谱 14 为植被光谱,与 USGS 光谱库中植被光谱较为接近,具有类根号形的标准植被光谱特征。图像端元光谱 19 为褐铁矿光谱,与 USGS 光谱库中褐铁矿的光谱特征较为相近,具有 950nm 附近的宽展吸收谷和 750nm 处的对称吸收峰。最后,利用这两条端元光谱进行 MTMF 方法矿物填图并选择合适的阈值,制作了植被和褐铁矿分布图。

4.2.2 SWIR 数据矿物填图

对阿斯哈金矿区的地面成像高光谱数据的 SWIR 波段进行处理,光谱沙漏处理后获得了 19 条图像端元光谱,结合矿区地质背景,采用基于专家知

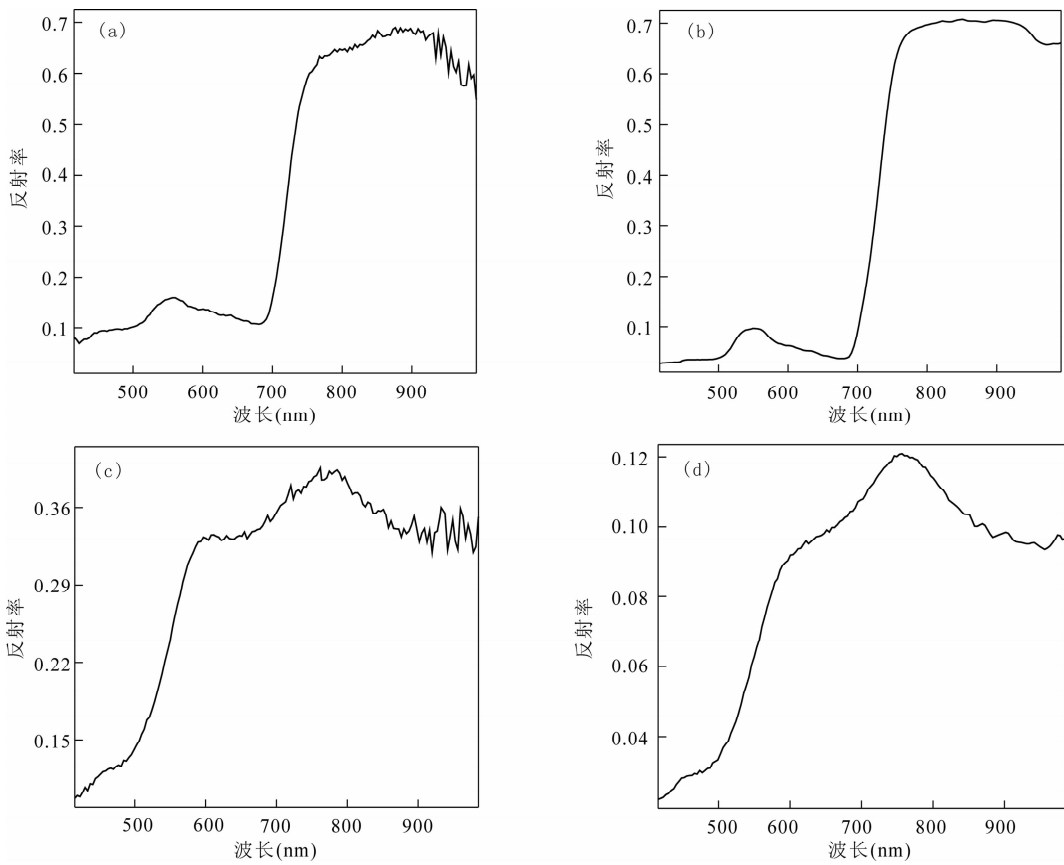


图 4 青海省都兰县阿斯哈金矿区 VNIR 波段数据图像端元光谱与 USGS 光谱库光谱对比图

ig. 4 Comparison chart of image endmember spectrum and their spectrum in the USGS spectral library in VNIR data of Asiha gold ore district in Dulan County, Qinghai Province

(a)—光谱沙漏处理后植被图像端元的光谱;(b)—USGS 光谱库中的植被光谱;(c)—光谱沙漏处理后褐铁矿图像端元的光谱;(d)—USGS 光谱库中的褐铁矿光谱

(a)—The vegetation spectrum of the image endmember after spectral hourglass processing;(b)—the vegetation spectrum in the USGS spectral library;(c)—the limonite spectrum of the image endmember after spectral hourglass processing;(d)—the limonite spectrum in the USGS spectral library

识的光谱选择方法,对每条端元光谱进行特征吸收位置、吸收深度、吸收宽度和光谱整体形态等的综合分析,逐一筛选剔除,最后选取出 1 条绢云母+绿泥石矿物组合、1 条高岭石和 1 条绢云母光谱(图 5)。其中,图像端元光谱 13 为绢云母+绿泥石矿物组合光谱,图像端元光谱 21 为高岭石光谱,图像端元光谱 28 为绢云母光谱。最后,利用这 3 种矿物及矿物组合的端元光谱进行 MTMF 方法填图并选择合适的阈值,制作了绢云母+绿泥石、高岭石和绢云母的分布图。

5 讨论

HySpex 地面成像高光谱数据包括 VNIR 数据和 SWIR 数据,这两个数据分别进行矿物填图后得到的矿物分布图的图像范围和空间分辨率各不相同,需要进行图像配准和裁剪处理。具体操作为以

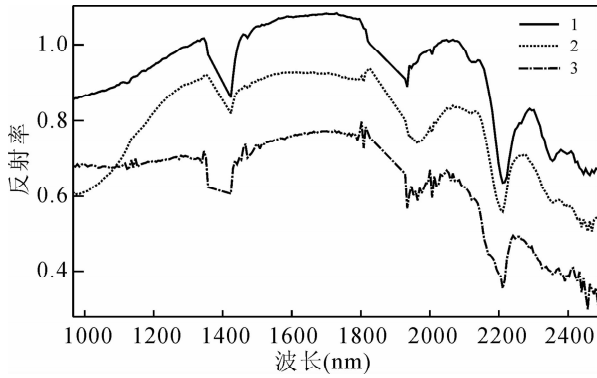


图 5 青海省都兰县阿斯哈金矿区 SWIR 波段数据矿物填图端元光谱曲线图

Fig. 5 Spectrum for mineral mapping in SWIR data of Asiha gold ore district in Dulan County, Qinghai Province

1—绢云母+绿泥石;2—高岭石;3—绢云母

1—Muscovite+chlorite;2—kaolinite;3—muscovite

SWIR 影像为基准,选择同名地物点对 VNIR 数据的真彩色影像和蚀变矿物分布图进行配准并裁剪出数据重合区域,在此基础上,制作了阿斯哈金矿区蚀变剖面的真彩色影像图(图 6)。该影像图高空间分

辨率极高,成图比例尺为 1 : 100,真实客观的展示了地物的空间分布状态。该影像图色彩饱和度高,地物颜色真实自然,不同地物色彩反差大,可以直接用于大比例尺的地物解译。



图 6 青海省都兰县阿斯哈金矿区蚀变带 1 : 100 真彩色影像图
Fig. 6 True color image for the alteration belt of Asiha gold ore district in Dulan County, Qinghai Province, with the scale of 1 : 100

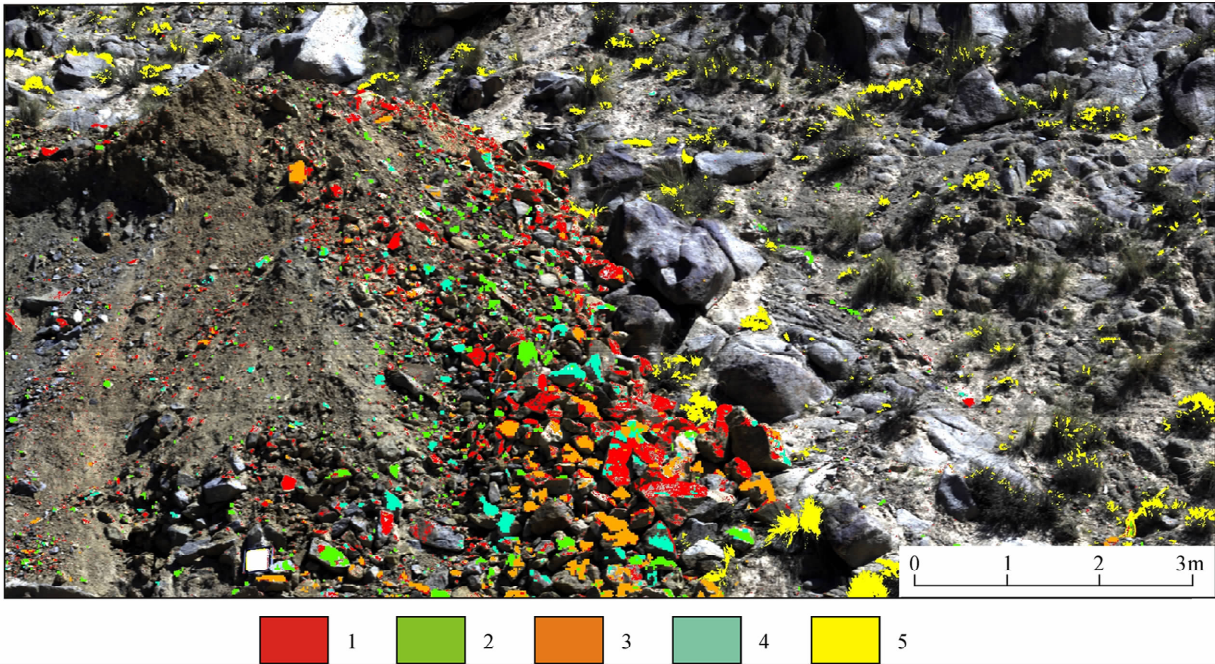


图 7 青海省都兰县阿斯哈金矿区蚀变带 1 : 100 高光谱地物分布图
Fig. 7 Distribution of hyperspectral objects in alteration belt of the Asiha gold ore district in Dulan County, Qinghai Province, with the scale of 1 : 100
1—褐铁矿;2—绢云母+绿泥石;3—绢云母;4—高岭石;5—植被
1—Limonite;2—muscovite+chlorite;3—muscovite;4—kaolinite;5—vegetation

将阿斯哈金矿区蚀变带的地面成像高光谱数据矿物填图结果叠加到真彩色影像上,制作了该区的高光谱地物分布图(图 7)。从图中可以看出,阿斯哈金矿区蚀变岩堆积剖面中蚀变矿物主要分布于蚀变带的中下部,在蚀变岩以外的基岩区和植被分布区几乎没有分布。本次提取出的蚀变矿物类型为褐铁矿、绢云母、绢云母+绿泥石和高岭石,分布广泛且与成矿关系密切的标志性蚀变矿物为绢云母和褐铁矿。这是由于蚀变矿物与原岩花岗闪长岩有密切关系,在成矿热液作用下,长石多蚀变为绢云母和高岭石,角闪石多蚀变为褐铁矿和绿泥石,与金矿关系密切的黄铁矿在热液后期也可氧化形成褐铁矿,从而形成了矿化蚀变岩中以绢云母和褐铁矿为主的现象。此外,本文还对该区广泛分布的植被进行了提取,与植被实际分布情况整体吻合程度较好。

为检验矿物填图结果的准确性,对地面成像高光谱数据提取出的地物开展了野外实地验证。实地验证使用的光谱仪为美国 ASD 公司生产的 FieldSpec Pro FR 便携式分光辐射光谱仪,对提取出的每种地物进行了光谱测量(图 8),对地物 ASD 光谱曲线吸收特征进行分析并与地物标准光谱曲线进行对比,结果表明,HySpex 地面成像高光谱数据提取出的地物与实地符合程度较好,高光谱地物分布图真实客观的反映了地物分布情况,对于地质研究具有重要意义。

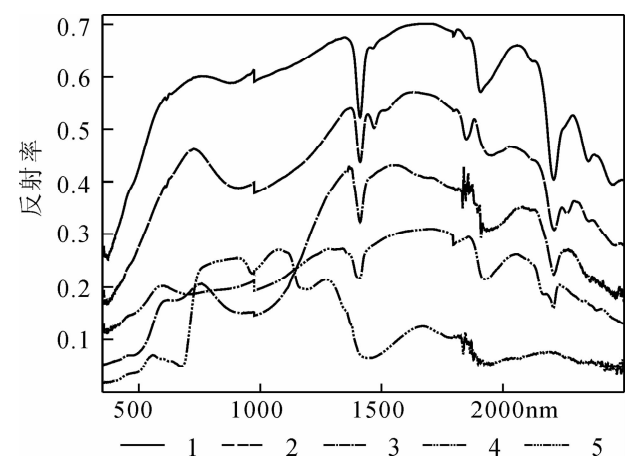


图 8 青海省都兰县阿斯哈金矿区野外验证点 ASD 实测光谱曲线图

Fig. 8 ASD spectrum of field verification points of Asih gold ore district in Dulan County, Qinghai Province

1—绢云母;2—绢云母+绿泥石;3—褐铁矿;
4—高岭石;5—植被

1—Muscovite;2—muscovite+chlorite;3—limonite;
4—kaolinite;5—vegetation

6 结论

本文对 HySpex 地面成像高光谱数据地质应用进行了探索,得出了以下结论:

- (1)建立了 HySpex 地面成像高光谱数据处理流程,利用标准白板采用基于统计模型的平场域法进行了光谱重建,该方法适用于 HySpex 数据,形成的反射率数据质量较高,制作了阿斯哈矿区 1:100 比例尺的高光谱地物分布图。
- (2)在阿斯哈金矿区蚀变带,采用基于专家知识的光谱选择方法,利用 MTMF 矿物填图方法从 HySpex 地面成像高光谱数据中提取出了褐铁矿、绢云母、高岭石、绢云母+绿泥石和植被共 5 种地物,与成矿关系密切的标志性蚀变矿物为褐铁矿和绢云母,与地质资料中的描述一致,野外实地 ASD 光谱测量结果也验证了高光谱地物分布图的准确性。
- (3)HySpex 地面成像高光谱数据具有图谱合一的优势,高空间分辨率可以制作大比例尺影像,高光谱分辨率可以提取蚀变矿物,在青海阿斯哈金矿区的地质应用效果较好,亦可应用于岩性识别、蚀变带精细划分等方面,具有广泛的应用前景。

致谢:感谢核工业北京地质研究院尹力硕士在地面 HySpex 地面成像高光谱数据获取中的帮助,以及黄艳菊高级工程师在数据处理中的帮助。感谢评审专家对本文提出的宝贵意见。

注 释

- ① Clark N R. 1999. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. [http://speclab.cr.usgs.gov/papers.refl-mrs/refl4.html](http://speclab.cr.usgs.gov/papers/refl-mrs/refl4.html).
- ② Kazempour F, Launeau P, Méléder V, Barillé L. 2010. Improved microphytobenthos biomass mapping using hyperspectral images. http://earth.esa.int/workshops/hyperspectral_2010/papers/p_kazemi.pdf.
- ③ Baumgartner A, Gege P, Köhler C, Lenhard K, Schwarzaier T. 2012. Characterisation methods for the hyperspectral sensor HySpex at DLR's calibration home base. http://elib.dlr.de/78685/1-/SPIE_Baumgartner_2012_3.pdf.
- ④ Kurz T H, Buckley S J, Howell J A, Schneider D. 2008. Geological outcrop modeling and interpretation using ground based hyperspectral and laser scanning data fusion. http://www.linkfast.com.tw/file/Example/RIEGL_TLS/RIEGL_2/isprs2008.pdf.

参 考 文 献

查道函,赖建清,陶斤金,鞠培姣,张辰光. 2013. 青海阿斯哈金矿流体包裹体特征及矿床成因. 中国有色金属学报, 14: 23(9): 2641~

- 2648.
- 甘甫平,王润生,郭小方,王青华. 2000. 高光谱遥感信息提取与地质应用前景——以青藏高原为实验区. 国土资源遥感, 12(3): 38~44.
- 甘甫平,王润生. 2007. 高光谱遥感技术在地质领域的应用. 国土资源遥感, 74(4): 57~60.
- 李碧乐, 沈鑫, 陈广俊, 杨延乾, 李永胜. 2012. 青海东昆仑阿斯哈金矿 I 号脉成矿流体地球化学特征和矿床成因. 吉林大学学报(地球科学版), 42(6): 1676~1687.
- 李凤秀, 张柏, 宋开山, 王宗明, 刘焕军, 杨飞. 2007. 玉米叶面积指数与高光谱植被指数关系研究. 遥感技术与应用, 22(5): 586~592.
- 刘圣伟, 甘甫平, 王润生. 2003. 用卫星高光谱数据提取江西德兴铜矿矿山废水的 PH 值污染指标. 地质通报, 22(11-12): 1013~1020.
- 刘燕君, 金丽芳. 1993. 矿产信息的遥感地面模式. 北京: 地质出版社, 1~157.
- 沈鑫. 2012. 青海东昆仑阿斯哈金矿床地质特征及成因研究. 长春: 吉林大学, 1~76.
- 陶秋香. 2007. 植被高光谱遥感分类方法研究. 山东科技大学学报(自然科学版), 26(5): 61~65.
- 童庆禧, 王晋年, 张兵, 郑兰芬. 2009. 立足国内 开拓创新 走向世界——中国科学院遥感应用研究所高光谱遥感发展 30 年回顾. 遥感学报, 13(增刊): 21~33.
- 童庆禧, 薛永祺, 王晋年, 张立福, 方俊永, 杨一德, 刘学, 亓洪兴, 郑兰芬, 黄长平. 2010. 地面成像光谱辐射测量系统及其应用. 遥感学报, 14(3): 416~429.
- 童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 2006. 高光谱遥感——原理、技术与应用, 北京: 高等教育出版社, 1~415.
- 王润生, 熊盛青, 聂洪峰, 梁树能, 齐泽荣, 杨金中, 闫柏琨, 赵福岳, 范景辉, 童立强, 林键, 甘甫平, 陈微, 杨苏明, 张瑞江, 葛大庆, 张晓坤, 张振华, 王品清, 郭小方, 李丽. 2011. 遥感地质勘查技术与应用研究. 地质学报, 85(11): 1699~1743.
- 王向成, 田庆久. 2008. 基于 Hyperion 影像的辽东湾水体信息自动分类. 遥感技术与应用, 23(1): 42~46.
- 燕守勋, 张兵, 赵永超, 郑兰芬, 童庆禧, 杨凯. 2003. 矿物与岩石的可见—近红外光谱特征综述. 遥感技术与应用, 18(4): 191~201.
- 燕守勋, 张兵, 赵永超, 郑兰芬, 童庆禧, 杨凯. 2004. 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. 遥感技术与应用, 19(1): 52~63.
- 张显峰, Pazner Micha. 2007. EO-1 Hyperion 数据的预处理、特征提取和岩性填图研究. 中国图像图形学报, 12(6): 981~990.
- 张宗贵, 王润生. 2000. 基于谱学的成像光谱遥感技术发展与应用. 国土资源遥感, 12(3): 16~24.
- 赵欣梅. 2007. 基于烃类微渗漏理论的高光谱遥感油气异常探测方法研究. 北京: 中国地质大学(北京) 博士论文, 1~99.
- 郑国强, 史同广, 孙林, 初云燕. 2008. 基于 Hyperion 数据的南四湖叶绿素浓度反演研究. 地理与地理信息科学, 24(1): 31~34.
- 周密. 2007. 油气微渗漏的高光谱信息提取研究——以内蒙古胜地区为例. 北京: 中国地质大学(北京) 硕士论文, 1~96.
- Baissa R, Labbassi K, Launeau P, Gaudin A, Ouajhain B. 2011. Using HySpex SWIR —320m hyperspectral data for the identification and mapping of minerals in hand specimens of carbonate rocks from the Ankloute Formation (Agadir Basin, Western Morocco). Journal of African Earth Sciences, 6(1): 1~9.
- Baugh W M, Atkinson W W, Kruse F A. 1998. Quantitative geochemical mapping of ammonium minerals in the Southern Cedar Mountains, Nevada, using airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS). Remote Sensing of Environment, 65: 292~308.
- Chen Zhengchao, Geng Xiurui, Zhang Bing, Tong Qingxi, Zheng Lanfen. 2003. Algorithm for identification based on spectral diagnostic feature matching technology, Third International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition, 5286: 688~691.
- Clark R N, Swayze G A, Livo K E, Kokaly R F, Sutley S J, Dalton J B, McDougal R R, Gent C A. 2003. Imaging spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS Tetracorder and expert systems. Journal of Geophysical Research, 108(E12): 1~44.
- Farrand W H, Seelos A. 2005. Using mineral maps generated from imaging spectrometer data to map faults: An example from Summitville, Colorado. The Eleventh Thematic Conference and Workshops on Applied Geologic Remote Sensing. Las Vegas, Nevada, 1996, II: 222~228. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '05. Proceedings, 2005 IEEE International, 7: 4553~4556.
- Hunt G R. 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. Geophysics, 42: 501~513.
- Kurz T H, Buckley S J, Howell J A, Schenider D. 2009. Close range hyperspectral and lidar data integration for geological outcrop analysis. Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing, WHISPERS '09. First Workshop on Source: IEEE Xplore, 1~4.
- Kurz T H, Buckley S J, Howell J A. 2012. Close range hyperspectral imaging integrated with terrestrial liddar scanning applied to rock characterization at centimeter scale. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXII ISPRS Congress, (XXXIX-B5): 417~422.
- Leckie D G, Gougeon F A, Tinis S, Nelson T, Burnett C N, Paradine D. 2005. Automated tree recognition in old growth conifer stands with high resolution digital imagery. Remote Sensing of Environment, 94(3): 311~326.
- Lise R, Julio H P. 2012. Hyperspectral Imaging of Bruises in the SWIR Spectral Region. Processing. SPIE Photonic West BIOS, San Francisco, USA, 21~26.
- Peterson J Q, Jensen G L, Greenman M E, Kristl J A. 1999. Calibration of the Hyperspectral Imaging Polarimeter. Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing II. SPIE, 296~4556.
- Sabins F F. 1999. Remote sensing for mineral exploration. Ore Geology Reviews, 14(3-4): 157~183.
- Vane G, Goeta A F H. 1993. Terrestrial imaging spectroscopy: Current status, future trends. Remote Sensing of Environment,

44:117~126.

Wang Shixin, Yan Fuli, Zhou Yi, Zhu Lingya, Wang Litao, Jiao Yunqing. 2005. Water quality monitoring using hyperspectral

remote sensing data in Taihu Lake China. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'05. Proceedings. 2005 IEEE International,7:4553 ~ 4556.

HySpex Hyperspectral Mineral Mapping of Asiha Gold Ore District in Dulan County, Qinghai Province and Its Prospecting Implications

SUN Yu,ZHAO Yingjun,LI Hanbo,LU Donghua,TIAN Feng,QIN Kai,
YANG Guofang,ZHOU Jiajing,LIU Pengfei
Beijing Research Institute of Uranium Geology, National Key Laboratory of Remote Sensing Information and Image Analysis Technology, Beijing,100029

Abstract

The ground-based imaging hyperspectral remote sensing, having an advantage of integrated image and spectrum, is a frontier direction in the remote sensing field, and it can be applied to directly identifying surface objects based on spectral characteristics. This study took the imaging hyperspectral data for alteration belts in the Asiha gold ore district of Dulan county as an example, established a standard data processing workflow, in which the flat field method based on statistical models was applied to reconstruct spectrum, and the end member selection based on expert knowledge was utilized for mineral mapping using MTMF method. Based on above, true color images at a scale of 1:100 and distribution of five hyperspectral surface objects (limonite, muscovite, etc.) were mapped. It is concluded that the typical alteration minerals in this ore district are limonite and muscovite, and ideal results are achieved after field verification using ASD spectral measurements. It is suggested that the ground-based imaging hyperspectral data have good application results and show a promising potential in geology.

Key words: mineral mapping;ground based imaging hyperspectral; HySpex;Asiha gold ore district; Dulan County in Qinghai Province