

基于地物光谱特征的成像光谱遥感矿物识别方法

张宗贵^{1,2}, 王润生^{1,2}, 郭小方², 甘甫平², 杨苏明²

(1. 中国地质大学,北京 100083;2. 中国国土资源航空物探遥感中心,北京 100083)

摘 要 成像光谱技术是遥感技术发展的前沿技术之一,它是在可见光、近红外及短波红外上,集图像、光谱于一体的具有高光谱分辨率的纳米遥感技术。文中从岩矿光谱特性的研究入手,通过光谱特征识别准则,利用机载的可见光、近红外及短波红外成像光谱(HyMap)数据,开展成像光谱遥感矿物识别的试验研究。试验识别的矿物有绿泥石、绿帘石、橄榄石、绢云母、滑石、石膏及黑云母等。试验结果表明,通过矿物光谱特征分析与其识别原则进行成像光谱遥感矿物识别获得了很好的效果。因此,基于地物光谱特征进行成像光谱矿物直接识别确实可行,有利于矿产资源评价中成矿物源和矿化蚀变信息分析。

关键词 矿物光谱特性;高光谱分辨率的成像光谱;遥感新方法技术

中图分类号:P237 文献标识码:A 文章编号:1005-2321(2003)02-0437-07

1 成像光谱技术特点

成像光谱是在多光谱遥感技术基础上,基于地物光谱特征研究,发展成为遥感地物高光谱特性的方法技术。众所周知,在可见光、近红外和短波红外波长上,自然界的地物在绝对零度(-273°C)以上都要向其周围反射、辐射能量。在入射光能量的相互作用下,一些物质的分子、原子中的电子、原子基团、离子或离子团因电子能级跃迁和离子或分子基团振动吸收能量而产生一系列的吸收谱带。实验室的紫外、红外光谱分析就是利用物质光谱特性进行分析与鉴别。遥感地质从实验室岩矿等样品光谱测试分析、野外实测地物光谱与分析发展到多光谱遥感技术。遥感地物光谱信息在基础地质研究、矿产资源勘查以及地质灾害与环境监测等领域发挥了很好的应用效果。由于多光谱遥感波段的光谱分辨率低(μm 级),只能对岩矿等大的地物类型进行遥感识别。基于此,遥感地质填图上也就只能进行三大岩类的岩性鉴别,遥感与矿化蚀变有关的蚀变带及蚀变矿物的效果不理想。

但是,随着科学技术日新月异的发展,兴起于 20 世纪 80 年代成像光谱技术,于 90 年代得到了迅速发展,不仅极大地增强了遥感对地观测和对地物的鉴别能力,而且促使遥感由对地物的鉴别发展到可对地物或对地物组分进行直接识别。这样,在遥感地质中,遥感与矿化蚀变有关的蚀变带及蚀变矿物的光谱特性,直接进行岩矿识别成为可能。目前乃至今后,成像光谱遥感技术是遥感对地观测技术发展的前沿之一。目前因受成像光谱数据获取的限制,开展此项工作的成果不多,仍然处在航空成像光谱技术示范应用试验阶段^[1,2]。

成像光谱技术经过 20 年的飞速发展,基本形成了自身的特点。许多国家都作了大量航空飞行试验、方法研究和应用示范工作。在数据获取、辐射定标、光谱重建、应用数据处理等技术方面都有了很大的进步,建立了各种数据处理与识别模型,形成了包括辐射校正、光谱重建、波形分析、光谱识别、定量反演等的数据处理技术,发展了一些专用处理软件或软件模块,如美国地质调查所的 IRIS 数据系统、喷气推进实验室(JPL)的 SPAM 光谱分析管理系统等^[3-5]。所有这些工作,无论是成像光谱数据获取、数据处理,还是示范应用,都是围绕着地物的光谱特性采集、提取和识别,同时辅助地物的空间影像特性。尽管成像光谱技术是在多光谱遥感技术基础上发展起来的,但是与多光谱遥感技术相比,具有下列特点(1)数据特性:

收稿日期:2002-12-20;修订日期:2003-1-13

基金项目:国家 863 计划项目(2001AA136020-5);国土资源部重点科技项目(9505301)

作者简介:张宗贵(1964—),男,博士研究生,高级工程师,从事遥感地物光谱特性、方法技术研究。

多光谱遥感数据的光谱波段少,一般在十几个以内;光谱分辨率低,微米级,数据量少,一般一景陆地卫星 TM (185 km × 185 km) 遥感影像的数据量为数百兆 (MB)。而成像光谱因具有图像-光谱合二为一的特性,因此,数据具有高光谱分辨率、超光谱波段和海量的特点。目前,成像光谱数据的光谱分辨率达到纳米级,光谱波段一般在一百以上,乃至数百;因波段多、光谱分辨率高和像元的量化值大 (10 ~ 16 bit),数据量以 GB (1 000 MB) 单位,乃至数百个 GB 的数据,因此,称成像光谱数据为海量数据。(2) 数据处理:由于成像光谱数据具有上述特性,因此在数据处理上除了与常规的多光谱数据处理方法 (统计分析、信息增强、分类、融合和识别) 以外,发展了自身的地物光谱重建处理技术。目前,成像光谱遥感数据的光谱重建方法主要有统计模型法、同步光谱定标法、大气传输理论模型法和光学模型。这些方法也称作地物光谱特征反演处理技术。(3) 应用:基于成像光谱数据及和处理的特点,在应用上以采用光谱特征匹配法直接进行遥感地物识别。以实验室实测地物光谱,或野外实测光谱作为模板采用各种光谱度量、匹配准则进行与成像光谱数据反演的地物光谱特征直接识别具体的岩石、矿物、土壤、植被、水体等地物,从而进行各种地物识别与制图。目前,在地质矿产资源评价中,开展以矿物、岩石的识别以及矿物组分、丰度制图的示范应用。

地质体岩石、矿物识别和地质找矿勘查是成像光谱技术应用的最能发挥优势的应用领域。根据矿物标型波谱特征应用成像光谱数,有可能直接识别矿物及其组合类型,特别是识别与成矿作用密切相关的蚀变矿物,圈定热液矿化蚀变带,分析蚀变矿物组合,定量或半定量估计相对蚀变强度和蚀变矿物含量,探测一些蚀变矿物和造岩矿物的成分及结构变异特征,分析蚀变带的空间分带、成矿成岩作用的温压条件、热动力过程和热液运移的时空演化,检测植被中毒和油气微渗漏引起的地植物异常,追索矿化热液蚀变中心,有利于找矿靶区的圈定。在地质勘查和矿产 (金、铜等金属矿床,油气,钾盐等) 资源评价以及一些基础地质研究中都能发挥重要作用。成像光谱技术的发展和广泛应用可能使地质找矿,乃至地质找矿理论研究方法都发生重大变化^[6~9]。

2 试验数据与处理

2.1 试验区 HyMap 成像光谱数据获取

试验区位于新疆东天山哈密市东南方向,距市区约 110 km,范围在东经 93°10' ~ 95°20' 和北纬 42°03' ~ 42°26' 之间,试验飞行面积为 3 100 km²。在地理位置上,该区处于西北干旱区,属典型的大陆性气候,年平均降水量在 150 mm 左右,是全国降水量最少的地区,但蒸发量却很大,因而气候特别干燥,岩石风化以物理风化为主。由于长期天气晴朗、污染小,大气散射及水汽吸收较小,缺少植被覆盖,有利于星载、机载高质量图像获取和野外光谱测量。在地质背景上,该区处于哈萨克斯坦—准噶尔板块与塔里木板块的接合部,康古尔大断裂呈近东西向从试验区穿过。出露地层主要有泥盆系、二叠系、石炭系、侏罗系,以石炭系凝灰岩、片岩、英安岩、玄武岩等一套中-基性火山岩为主。区内侵入岩广泛发育,且岩石类型齐全,从正常系列的基性到中酸性 (花岗岩、斑岩、闪长花岗岩等) 均有出露。区内矿点 (床) 多,有金、铜、镍等多金属矿种,如:金山金矿、土墩铜-镍矿、香山铜-镍矿、黄山和黄山东铜-镍等,尤其是试验区周边 (西部) 的土屋—延东超大型斑岩铜矿。因此,该试验区是新疆重要矿产资源远景区。

本次试验研究工作中,获取数据使用的成像光谱仪器是澳大利亚联邦科学工业研究组织 (CSIRO) 的 HyVista 公司最新研制的。成像光谱仪器及数据获取的一些主要参数如下:波长范围:400 ~ 2 500 nm;视场角 (FOV):61°;飞行高度:2 300 m;光谱采样间隔:15 nm;瞬时视场角 (IFOV):2.5 mrad;地面像元尺寸:6 m × 6 m;波段带宽:15 ~ 20 nm;图像宽度 3.07 km, 512 像元;飞行方向:北东 (83°) 至南西 (263°);波段数目:128;搭载平台:运-12 飞机;布设航线:24。在获取航空成像光谱遥感数据的同时,开展了试验区岩矿地质体的光谱特性测量以及典型地标 (包括人工制作的灰色布标,不同反射率的自然目标) 的同步光谱观测。

2.2 数据处理

为了消除因大气成分的辐射吸收、反射与散射效应,仪器系统在获取数据时的几何观测位置变化,地物方向反射等因素所造成成像光谱影像的空间几何畸变和光谱辐射畸变对提取岩矿光谱特征的影响,需要对成像光谱数据进行仪器系统几何纠正,去噪声、辐射畸变纠正和光谱重建。成像光谱数据处理主要进行了图像像元滤波平滑去噪声处理,边缘辐射畸变恢复采用扫描行的归一化处理,辐射标定,光谱重建采用基于地面光谱观测的经验线性法进行光谱反演

处理和提取波形光谱特征信息^[10~14]。

由于在蓝光(400~450 nm)波段内数据受大气吸收影响十分严重以及仪器的原因,波段12和短波红外1600~1644 nm上的85、86波段影像质量极差,应予以剔除。实际使用124个波段。本次试验光谱重建结合地面定标点的光谱测量,采用经验线性法,在影像辐射纠正的基础上通过ENVI 3.5软件中的定标功能生成相应的地面光谱反射率图像。在HyMap航空数据获取的同时,对表1中的6个相对均质、大面积的地面定标点地物采用ASD-FR地物光谱仪器进行了野外光谱测量,光谱数据如图1,3个偏亮的定标点地物类型为黄泥土,3个偏暗的定标点地物类型为凝灰岩、片岩风化后的坡积物。

表1 自然地标定标点的位置
Table1 The spectral measurement location
of the natural target for calibration

点号	纬度	经度	光谱编号
ㄨ 偏暗)	42°16.580 2'	94°30.369 4'	127-136
ㄨ 偏亮)	42°16.008 9'	94°30.053 2'	113-125
ㄨ 偏暗)	42°16.369 5'	94°43.368 1'	154-162
ㄨ 偏亮)	42°16.269 1'	94°43.341 4'	163-170
ㄨ 偏暗)	42°15.619 6'	94°52.669 6'	172-178
ㄨ 偏亮)	42°15.595 7'	94°52.825 6'	179-193

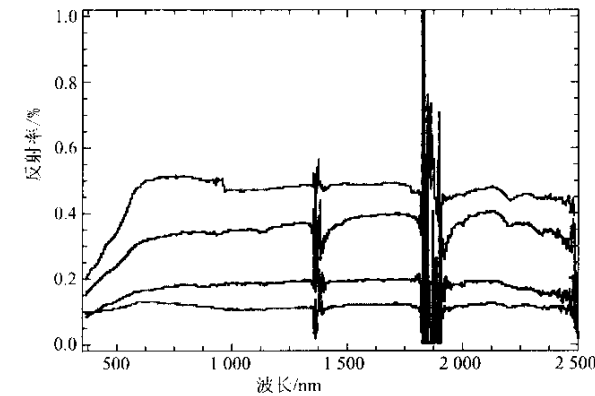


图1 定标点光谱曲线

Fig.1 The field spectral curves for calibration
(上面2条为白色地标;下面2条为暗色地标)

相应124波段对定标点的平均光谱进行光谱重采样,辐射定标后(利用实验室内定标数据对DN值进行辐射亮度值的转化)的图像上提取相应的辐射亮度值L值,并通过下式将辐量度图像转化为地面反射率值图像:

$$\rho_j(i) = A_j \cdot L_j(i) + B_j$$

其中; $\rho_j(i)$:传感器第j通道,第i像元的反射率;

$L_j(i)$:传感器第j通道,第i像元的辐亮度值; A_j, B_j :传感器第j通道的线性回归系数。

A_j 反映了大气传输及仪器设备的放大比等综合因素, B_j 为偏移项,反映了大气程辐射及仪器的零点偏移等因素。由此可看出,进行地面光谱反射率图像生成的过程,也就是对地物反射率光谱特征的反演。图2是成像光谱数据反演后的地物光谱反射率图像,图像合成的三波段为红(R):19波段;绿(G):9波段;蓝(B):3波段。

3 成像光谱遥感矿物识别方法与结果讨论

(1)矿物识别方法:矿物光谱特征分析以美国地质调查局(USGS)和JPL提供的标准数字光谱库为基础数据,并结合本次试验研究中获取的矿物光谱和单矿物光谱数据进行综合分析,光谱数据的主要处理工作是:光谱数据去噪声处理;光谱数据波段按HyMap波段中心波长的重采样;光谱去外壳归一化处理;光谱特征提取(吸收谱带位置,吸收深度,谱带宽度,对称性,按吸收强度的谱带排序等)^[15,16]。

根据所选试验区第19航带上的混合岩化片岩、黑云母片岩、绢云片岩、花岗岩、玄武岩、凝灰岩、花岗斑岩、橄榄岩和一些蚀变(如绢云母化、滑石化、褐铁矿化、绿泥石化、绿帘石化等)岩性特点,结合标准矿物光谱库中含上述这些蚀变矿物的光谱特征(见图3),本次光谱特征分析与识别原则只在2.00~2.50 μm 短波红外(SWIR2)上进行。①黑云母在2.000~2.500 μm 短波红外(SWIR2)上,反射率光谱曲线总体上呈上升趋势,变化缓慢,在2335 nm、2400 nm有较弱的特征吸收峰,其中2335 nm(114波段)处为其主吸收峰。②绿泥石在短波红外(SWIR2)上,该谱线有5个光谱特征吸收峰,它们是2245 nm、2260 nm、2325 nm、2386 nm和2466 nm。其中以2325 nm处(113波段)的吸收份最强且较宽,呈对称性,其它吸收峰中2245 nm处的特征的强度位居第二,非对称。③绿帘石在短波红外(SWIR2)上,只有两个最清晰的特征吸收峰:

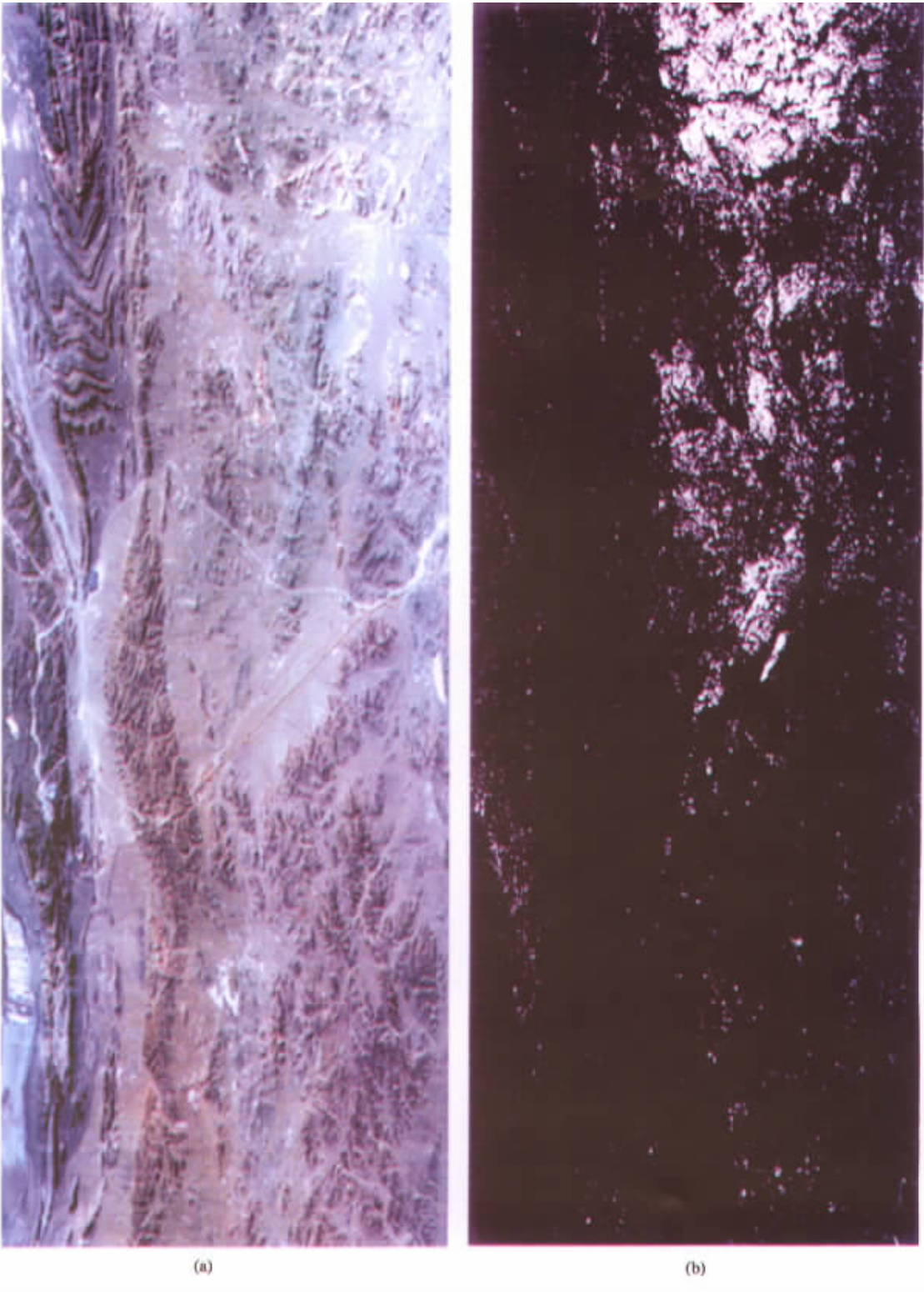


图 2 (a)第 19 航带 HyMap 3 个波段合成的反射率图像 (b)提取的绿帘石矿物分布图

Fig.2 (a)The color image combined with three bands of HyMap in the 19th line ;

(b)epidote distribution situation extracted from reflectance image

2 255 nm 和 2 335 nm。特征峰 2 335 nm(114 波段) 的吸收深度较深 ,宽度大且呈对称 ,次级吸收峰 2 255 nm是附加在主特征峰 2 335 nm 上 ,中等吸收深度 ,非对称。④橄榄石在短波红外(SWIR2)上的光谱

曲线几乎是一条直线,略呈上升变化。⑤滑石在短波红外(SWIR2)上有4个明显的特征吸收峰:2 245 nm, 2 315 nm, 2 386 nm, 2 466 nm。其中以2 315 nm(113波段)特征吸收峰最强,呈对称性;2 386 nm的吸收峰相对较弱,其它峰更弱。⑥石膏在短波红外(SWIR2)上,也有4个明显的特征吸收峰:2 175 nm, 2 215 nm, 2 265 nm, 2 440 nm。其中以2 440 nm(121波段)特征吸收峰最强而宽,呈对称性;2 215 nm的吸收峰相对较弱,但其特征峰较宽且对称,其它峰更弱。⑦绢云母在短波红外(SWIR2)上有两个特征吸收峰:2 350 nm和2 440 nm。115波段2 350 nm处的特征峰吸收最强而对称,2 440 nm处的相对较弱,但是较宽非对称[17~20]。在上述矿物光谱特征分析基础上,经过对试验区成像光谱反射率数据的初步分析,以库中矿物样品作为模板按照下列识别原则进行识别:①按照有无光谱特征进行矿物分类组合;②对有光谱特征的矿物含有Al-OH和Mg-OH的特征吸收峰进行分组;③按照具有不

云母、滑石、石膏及黑云母等矿物组合的识别准则,有效地填绘出这些矿物在该航带上的内分布情况(见图4b)图4)。



图4 第19航线矿物识别图

Fig.4 Minerals distribution recognition results in the 19th flight-line

图例:黄色—绢云母;红色—不同含量的绿泥石;绿色—绿帘石;蓝色—橄榄石;浅粉红色—石膏;浅蓝色—滑石;白色—黑云母

图4a)的西南角是黄山东铜-镍的部分采矿部位,从图4b)提取的绿帘石分布来看有一定含量的绿帘石矿物存在,从图4识别的数种矿物分布情况来看该矿位于有含Al-OH和Mg-OH矿物组合的矿化蚀变带上。含Al-OH和SO₄²⁻等蚀变矿物有绢云母、石膏和滑石等,含Mg-OH(Fe-OH)基团的矿物有绿帘石、绿泥石和黑云母等。在近围岩-基性辉长岩中存在有黑云母、橄榄石等矿物。除此之外还有十分明显的褐铁矿化等。图4显示的矿化蚀变矿物以绿帘石和绿泥石等组合为主,次级组合为绢云母、石膏和滑石等。按照此类矿化蚀变组合模式,在整个62 km长的第19航带上有3处类似。这3处矿化蚀变组合

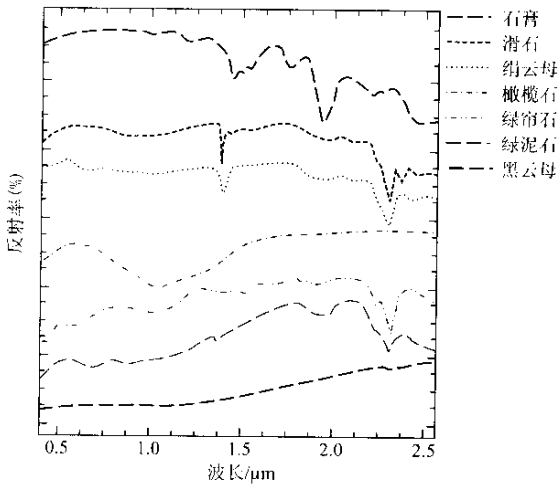


图3 模板样品矿物光谱特征曲线

Fig.3 Feature spectral curves of standard minerals

同特征吸收峰波长位置,选择不同的谱带组合;④根据特征吸收峰的宽度,进行波段组合;⑤以特征吸收峰的深度及对称性的度量指标值大小进行排序,进一步进行矿物归类;⑥在②,③,④的基础上,结合各种矿物的主、次光谱特征吸收峰的位置进行具体矿物识别。

(2)结果讨论:根据区内存在的主要Al-OH和Mg-OH的特征吸收峰矿物类型,通过对矿物光谱特征的综合分析,分别建立绿泥石、绿帘石、橄榄石、绢

是否有铜-镍矿床或矿化点,有待于进一步开展具体的验证工作。不管怎样,通过对试验区第19航带成像光谱数据处理和试验提取的矿物表明基于地物光谱特征进行成像光谱矿物直接识别确实可行,有利于矿产资源评价中成矿物源分析和寻找矿化蚀变信息。

本次试验中由于在可见光及近红外波段上,定标的成像光谱数据存在一定的问题,因此对试验航带上的含 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 离子的赤铁矿、针铁矿、磁铁矿、褐铁矿等矿物的识别,尤其是褐铁矿的识别没能进行。实际上,位于试验航带上黄山东铜-镍矿的褐铁矿蚀变现象十分明显。不过通过下一步工作的开展,结合含 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 离子的矿物提取,更有利于试验区的矿产资源评价。

References[参考文献]:

- [1] DING Xuan, TONG Qingxi, ZHENG Lanfen, et al. The theory, technology and application of the remote sensing exploration on spectra[J]. *Geochemistry*, 1992(1): 1-8(in Chinese). [丁暄, 童庆禧, 郑兰芬, 等. 光谱遥感找矿理论、技术与应用[J]. 地球化学, 1992(1): 1-8.]
- [2] PU Ruiliang, GONG Peng. *The Remote Sensing and Application on the Hyperspectra*[M]. Beijing: High Education Press, 2001. 20-35(in Chinese). [浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. 20-35.]
- [3] ZHU Shulong, ZHANG Zhankui. *The Image Acquisition and Analysis of Remote Sensing*[M]. Beijing: Science Press, 2000. 6-13(in Chinese). [朱述龙, 张占睽. 遥感图像获取与分析[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 6-13.]
- [4] COUTIS B A. Remote sensing of cold deserts: spectral reflectance properties of weathered rock surfaces[A]. *Proceedings of the Seventh Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology*[M]. Albert, Canada: ERIM, Calgary, 1989. 478-500.
- [5] SCHOWENGERD R A. *Remote Sensing Models and Methods for Image Processing, Chapter One and Chapter Three*[M]. New York: Academic Press, 1998. 40-70.
- [6] GOETZ A F H, ROWAN L C. Geological remote sensing[J]. *Science*, 1981, 211: 781-791.
- [7] HUNT G R. Electromagnetic radiation: The communication link in remote sensing[A]. SINGAL B, GILLESPIE A. *Remote Sensing in Geology*[M]. New York: Wiley, 2000. 702-720.
- [8] CURRAN P J. Imaging spectrometry[J]. *Progress in Physical Geography*, 1994, 18(2): 247-266.
- [9] <http://speclib.jpl.nasa.gov>
- [10] CLAEK R N, ROUSH T L. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing application[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89(B-7): 6329-6340.
- [11] <http://speclab.cr.usgs.gov>
- [12] <http://asterweb.jpl.nasa.gov>
- [13] XU Zhiyong. ENVI 3.4 version software user's guide[Z]. Boulder: American Research Systems Inc. Press, 2001. 899-907(in Chinese). [徐志勇. ENVI 3.4 版本的图像处理软件用户指南[Z]. 布尔德市: 美国研究系统公司出版社, 2001. 899-907.]
- [14] COLLINS W, HUNT G R, SHENG H C, et al. Airborne bio-geophysical mapping of hidden mineral deposits[J]. *Economic Geology*, 1983, 78: 737-749.
- [15] DRAKE N A. Reflectance spectra of evaporite minerals(400-2500 nm): applications for remote sensing[J]. *Int J Remote Sensing*, 1995, 16: 2555-2571.
- [16] CROWLEY J K. Visible and near-infrared(0.4 ~ 2.5 μm) reflectance spectra of playa evaporite minerals[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(16): 231-240.
- [17] KONDRATYEV K Y. *Radiation in the Atmosphere*[M]. New York: Academic Press, 1989. 68-97.
- [18] VEVERKA J, ROUSH T L, ROWAN L C, et al. NEAR at Eros: imaging and spectral results[J]. *Science*, 2000, 289: 2088-2097.
- [19] CARLSON R W, ANDERSON M S, JOHNSON R E, et al. Hydrogen peroxide on the surface of Europe[J]. *Science*, 1999, 283: 2062-2064.
- [20] CLARK R N. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy[A]. *Manual of Remote Sensing*[C]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1999. 10-25.

MINERAL RECOGNITION METHOD BY SPECTROMETRY REMOTE SENSING BASED ON MATERIAL SPECTRAL CHARACTERISTICS

ZHANG Zong-gui^{1,2}, WANG Run-sheng^{1,2}, GUO Xiao-fang²,
GAN Fu-ping², YANG Su-ming²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. China Aero-geophysical
and Remote Sensing Center of Land & Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: The imaging spectrometry technology is one of the frontier techniques in remote sensing development. It is the nanometer remote sensing method-technique combined with imaging, spectra and high spectral resolution function in 0.40 ~ 2.50 μm wavelength. By analyzing the spectral features of minerals, creating the discrimination standard of characteristics and using the airborne imaging spectrometry (HyMap) data, we have carried out the mineral recognition trial and successfully discriminated the minerals of serpentine, chlorite, epidote, olivine, gypsum, talc and biotite. The results show that the method of direct recognition of minerals based on material spectral characteristics is useful and practicable, and can be used in the analysis of the original material of deposit, and of the mineralization alteration information for mineral resource investigation.

Key words: mineral spectral properties; hyperspectral resolution imaging spectrometry; new method technology of remote sensing

《地学前缘》投稿期预告

本刊为主题期刊, 10个主题5年一轮回, 每个主题内容具有基础性、交叉渗透性和大跨度性。此外, 另设“非主题来稿选登”栏目, 欢迎投稿。现预告近年投稿内容:

- (1) 岩石学主题 "专辑投稿截止期为2003年4月底, 2003年9月、10月连出两期。
- (2) 矿床学主题 "专辑投稿截止期为2003年10月底, 2004年3月、4月连出两期。
- (3) 构造地质学主题 "专辑投稿截止期为2004年4月底, 2004年9月、10月连出两期。
- (4) 地球物质科学主题 "专辑投稿截止期为2004年10月底, 2005年3月、4月连出两期。

Announcement of *Earth Science Frontiers*

Contributions to *Earth Science Frontiers* are welcome:

- (1) The deadline for submitting manuscript to the special issue on "Petrology": The end of April 2003.
- (2) The deadline for submitting manuscript to the special issue on "Ore Deposit": The end of October 2003.
- (3) The deadline for submitting manuscript to special issue on "Tectonic Geology": The end of April 2004.
- (4) The deadline for submitting manuscript to special issue on "Material Science of Earth": The end of October 2004.