

基于短波红外成像光谱仪的矿石光谱测量

孙 慈¹ 姚雪峰^{1,2} 崔继承¹ 尹 禄^{1,2} 杨 晋^{1,2}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了实现对不同矿物成分的识别,研制了一台用于矿石光谱分析的短波红外成像光谱仪,并基于此台仪器获取了多种矿石的图像信息和光谱信息。阐述了设计原理,并对整个系统的光学设计结果进行了成像质量分析。采用单色准直光法对该系统进行了测试,得到各光谱通道的中心波长以及光谱分辨率等光谱性能参数,测试结果显示,该仪器光谱分辨率优于 10 nm,满足应用需求。利用研制出的成像光谱仪对岩石样品进行了实验,并对获得的光谱曲线进行了光谱分析。实验分析结果表明,该仪器具有良好的性能,能够较为准确地判断不同矿石。设计的短波红外成像光谱仪具有高分辨率、结构简单、小型化、重量轻等优点,便于机载成像,有益于其在地质勘探领域的应用。

关键词 光谱学; 成像光谱仪; 性能测试; 矿石光谱识别

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0230001

Mineral Spectrum Measurement Based on Shortwave Infrared Imaging Spectrometer

Sun Ci¹ Yao Xuefeng^{1,2} Cui Jicheng¹ Yin Lu^{1,2} Yang Jin^{1,2}

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin, 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

Abstract In order to achieve the identification of different mineral compositions, a shortwave infrared imaging spectrometer for spectral analysis of the ore are developed. Based on this instrument, the image information and spectral information of the various minerals are obtained. The design principle of imaging spectrometer is described and image quality of the entire system is analyzed based on the result of optical design. The system performance is tested using monochromatic collimated light method and the center wavelength and spectral resolution for each spectral channel are obtained. Test results show that the spectral resolution is better than 10 nm which meets the application requirements. The rock samples are tested using the developed imaging spectrometer and the spectral curves of rock are obtained for spectral analysis. The experimental results show that the imaging spectrometer can identify different components of ore with high accuracy. The new designed shortwave infrared imaging spectrometer has the advantages of high resolution, simple structure, small size, light weight which is facilitate the application in airborne imaging, and it is useful for the application in geological exploration.

Key words spectroscopy; imaging spectrometer; performance test; ore spectral identification

OCIS codes 300.6340; 000.3110; 110.3080

1 引 言

随着人们对矿物资源的需求日益增长,矿物资源勘测的难度也相应地不断增大。在固体矿产普查和矿床评价工作中,如何快速识别与判断矿物的种类是一项基本的,又必不可少的重要工作内容。传统找矿工作是通过人工识别和单一光谱识别的方法来完成,难以实现大范围的瞬态检测,这种工作模式工作量大且效率低,已不能满足实际需求。

收稿日期: 2015-07-15; 收到修改稿日期: 2015-09-21

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项项目(2014YQ120351)、国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2008-1)、吉林省重大科技攻关项目(09ZDGG005)

作者简介: 孙 慈(1988—),女,硕士,研究实习员,主要从事光谱仪器设计与开发方面的研究。E-mail:sunci1822@163.com

成像光谱仪可同时获得地物图像信息和光谱信息,这种“图谱合一”的特点使其在军事侦查、天文观测、自然灾害、环境科学、医学诊断治疗等多方面领域具有广泛的应用^[4],尤其是随着光谱分辨能力的提高,成像光谱技术在矿物普查工作中有着成功的应用,并逐渐成为必要的辅助设备。目前,国外利用高光谱成像光谱仪已率先建立了多个波谱数据库^[5-6],其中,极具有代表性的成像光谱仪包括澳大利亚研制的 HyMap 成像光谱仪^[7]、加拿大研制的 CASI^[8]系列成像光谱仪、美国研制的 AVIRIS 成像光谱仪^[9]等,而 HyMap 作为机载成像光谱仪已在全球范围内开启了商业运营的模式^[10]。国内较为成熟的仪器有上海技物所研制的机载 OMIS^[11]系列成像光谱仪、MAIS^[12]成像光谱仪、PHI^[13]成像光谱仪以及干涉成像光谱仪^[14]等,这些仪器的应用光谱波段大多在可见近红外波段,然而,含羟基或阴性离子团的矿物表现出的吸收特征主要集中在短波红外光谱区^[15],利用这一谱段可以区分绿泥石、蛇纹石、绿帘石、明矾石、黄铁甲矾、方解石、白云石等多种矿物。因此,矿物短波红外光谱的特点在野外地质调查研究具有特别重要的意义。但是国内的矿物光谱数据的获得长期依赖国外仪器,数据获取能力严重不足,难以提供长期、稳定的数据保障^[16]。研制一台可用于矿物短波红外光谱分析且拥有自主知识产权的成像光谱仪系统已势在必行。

本文研制了一台基于棱镜-光栅(PG)为分光元件的短波红外成像光谱仪,此套系统具有高分辨率、结构简单、小型化、重量轻等优点,并利用此套系统获得了多种矿石的光谱数据,显示的矿物的光谱特征与形态与美国喷气推进实验室(JPL)波谱库数据吻合。实验证明本系统适用于矿石的光谱分析,也为进一步开展相关的基础研究工作奠定了基础。

2 成像光谱仪工作原理及设计

2.1 成像光谱仪工作原理

棱镜-光栅成像光谱仪由物镜、狭缝、准直镜、分光模块、成像镜和接收系统组成。物镜将入射到成像光谱仪的光线会聚到入射狭缝,使地物目标成像,经过准直镜后光线入射到分光模块,复色光线色散成为单色光线,地物目标成为一系列的单色像,然后光线通过成像镜的会聚作用,成像在接收元件上,完成系统的成像,并记录地物目标的光谱信息。由于应用于矿石光谱分析的成像光谱仪需进行野外工作实验,所以对仪器的体积结构都有很高的要求。以棱镜-光栅为分光元件的成像光谱仪,同时具有棱镜和光栅色散分光的优点,保证了光线直进直出的同时,还具备高分辨率、高效率的仪器性能,使得仪器在结构设计和系统装校上都具有很大的优势,满足野外矿物光谱分析的应用需求,结构如图1所示。

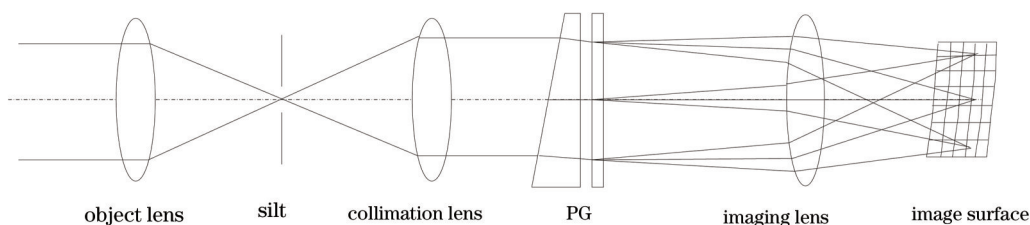


图1 棱镜-光栅成像光谱仪结构示意图

Fig.1 Optical structure of PG imaging spectrometer

根据矿物在短波红外区域的吸收特征可区分不同含羟基或阴性离子团的矿物,而同一种矿物的结晶度不同也可通过光谱的吸收带宽窄鉴别,因此短波红外波段对多种矿石的光谱研究有重要作用。很多地表物质在吸收峰处半峰全宽为 20~40 nm,因此,只要光谱分辨率在 20 nm 以内即可区分出不同的地表物质^[17],鉴于此,棱镜-光栅成像光谱仪的主要技术指标如表1所示。

表1 棱镜-光栅成像光谱仪系统的主要参数

Table 1 Main parameters of PG imaging spectrometer

System parameter	Value
Spectral range	1000~2500 nm
Spectral resolution	10 nm
Focal length	30 mm
Field angle	18°
F#	2

2.2 光学系统设计

棱镜-光栅成像光谱仪采用对称式结构,即准直物镜和成像物镜为完全相同的结构,结构简单且利于实现仪器的小型化,便于应用在野外的矿石普查工作。对该仪器进行光学设计的基本思想是通过成像光谱仪的前置望远系统以及后端分光成像系统各个参数的匹配,包括数值孔径的匹配、前后视场的匹配以及光瞳位置、大小的匹配,防止渐晕现象的出现和光能量不被充分利用的问题,同时通过棱镜对光线的折转,保证在主光轴偏转很小或保持直线的前提下,使光线符合布拉格条件入射到光栅上,从而使其衍射效率达到最大,并通过分光元件的整体设计,使得光线能够直进直出,且光束相对于主光轴形成中心对称。光学设计结果如图2所示。

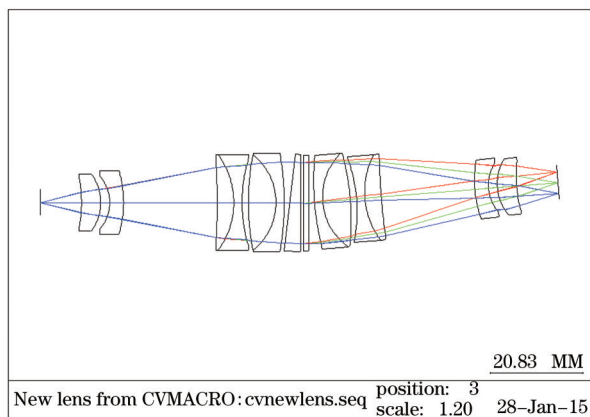


图2 棱镜成像光谱仪光学设计结果

Fig.2 Optical design result of PG imaging spectrometer

2.3 光学设计结果评价

利用光学设计软件对棱镜-光栅成像光谱仪的光学设计结果进行了评价分析。系统的调制传递函数(MTF)曲线如图3所示。经计算,系统的奈奎斯特频率为17 lp/mm,由图3可知,在全视场范围,MTF在探测器奈奎斯特频率处均大于0.8。系统在整个波段的光谱分辨率优于10 nm。

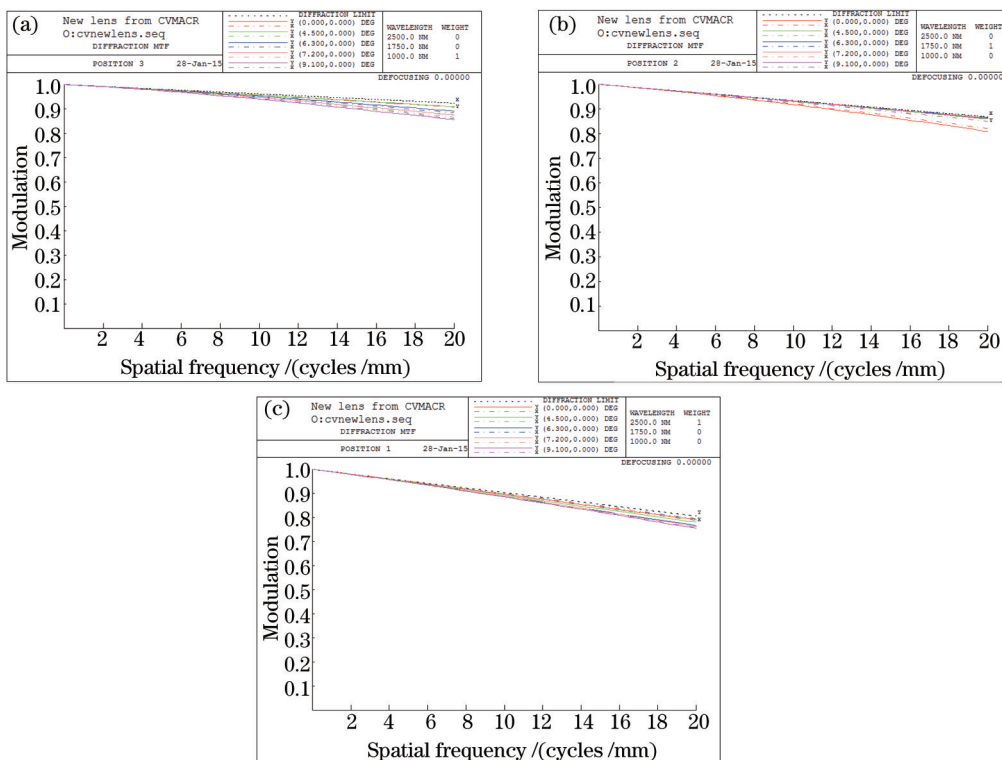


图3 MTF曲线。(a) 1000 nm MTF曲线;(b) 1750 nm MTF曲线;(c) 2500 nm MTF曲线

Fig.3 MTF curves. (a) MTF curves of 1000 nm; (b) MTF curves of 1750 nm; (c) MTF curves of 2500 nm

2.4 成像光谱仪系统测试

利用单色准直光法对研制的棱镜-光栅成像光谱仪进行了系统测试。测试系统由连续光源、标定后的单色仪、平行光管以及棱镜-光栅成像光谱仪组成,具体结构如图4所示。

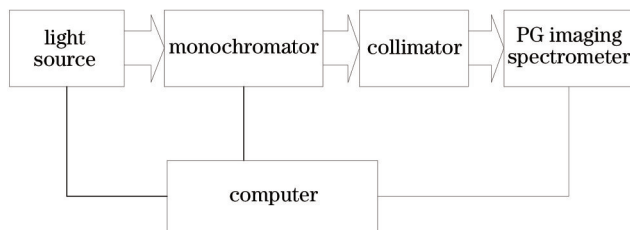


图4 测试结构示意图

Fig.4 Conspectus of test system

测试流程为:打开钨灯光源,调整棱镜-光栅成像光谱仪与平行光管的相对位置,使其能接收到光强信号,测试过程中,光源的连续光经过单色仪的扫描后变为连续的单色光,通过平行光管准直后入射到待测成像光谱仪中,记录棱镜-光栅成像光谱仪对单色光的响应值,如图所示,经过数据拟合后,便可得到棱镜-光栅成像光谱仪的光谱响应曲线,实时测试曲线软件界面如图5所示。各光谱通道的光谱响应曲线半高宽为光谱分辨率,峰值为其中心波长。测量结果如图6所示。由图6可知,棱镜-光栅成像光谱仪的光谱线性度很好,且各光谱通道的光谱分辨率都小于10 nm。

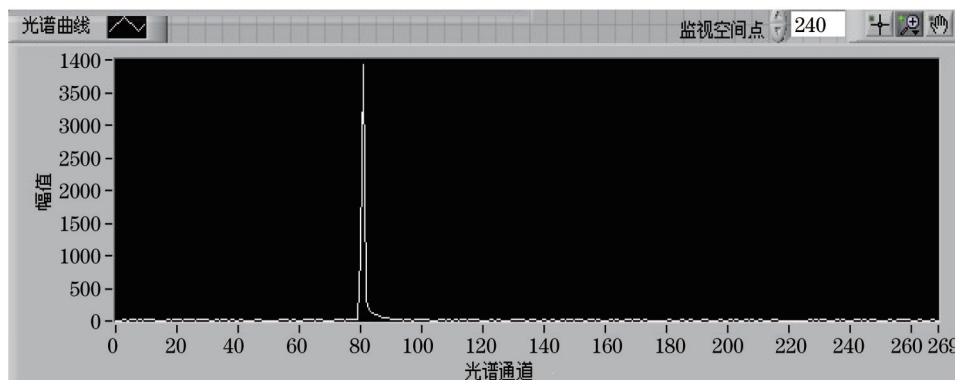


图5 单色仪输出单色光的光谱曲线

Fig.5 Spectral curves of monochromatic light output by monochromator

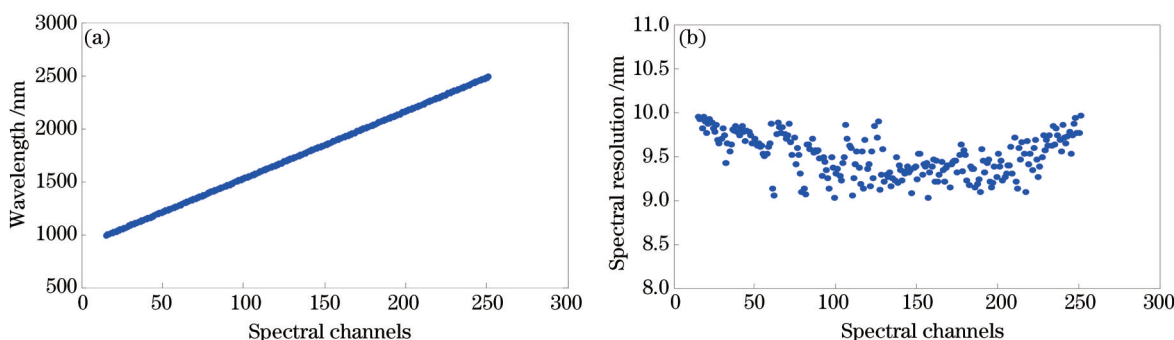


图6 棱镜-光栅成像光谱仪性能测试结果。(a) 各光谱通道中心波长;(b) 各光谱通道光谱分辨率

Fig.6 Performance test result of PG imaging spectrometer. (a) Central wavelength of different spectral channels; (b) spectral resolution of different spectral channels

3 实 验

矿物的光谱分析逐渐成为进行地质勘探、矿物普查的必要辅助手段,而获取矿石光谱数据的能力严重影响着我国地质勘探事业的发展。利用所研制的短波红外成像光谱仪对多种矿石进行了矿物的光谱数据采集,并进行了数据处理及分析,为进一步对矿石的光谱数据的研究提供参考。

3.1 实验材料与过程

准备了5件单矿物标准样,其中4件为粉末样,1件为碎块样,4件为粉末样分别为褐铁矿、蒙脱石、绿帘石、方解石,1件为碎块样为白云母。4件岩石块样岩性分别为硅化蚀变岩、方解石晶体、褐铁矿化蚀变岩、青盘岩化花岗斑岩。采用研制的成像光谱仪进行了光谱测试,实验系统主要包括普通照明灯光、移动平台输送装置、测试架、标准反射率板成像光谱仪和计算机等部件。

实验过程中将成像光谱仪安装在测试架上,待测矿石与标准反射率板放置在移动平台上,并设定合适的积分时间与扫描速度,数据采集过程中,使移动平台在成像光谱仪的沿轨方向运动,完成矿石样品的图像及光谱采集。测试实物图如图7所示。

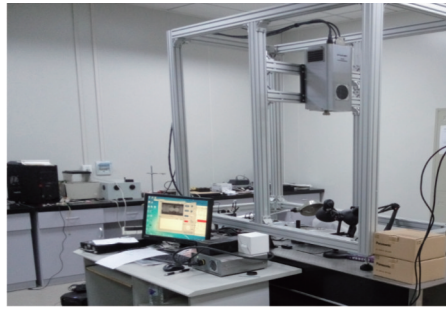


图7 测试实物图

Fig.7 Photograph of test system

3.2 实验结果及分析

实验矿石的单矿物样品纯度高,光谱稳定,实验获得的图像如图8所示。

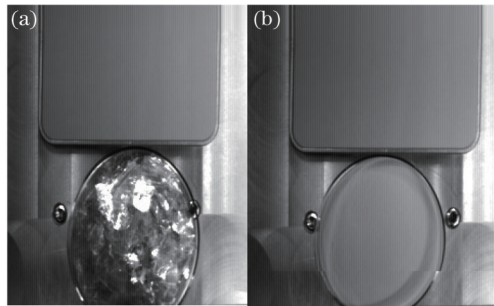


图8 灰板与样品 1505 nm 谱段图像。(a) 灰板与白云母;(b) 灰板与蒙脱石

Fig.8 Spectral image at 1505 nm of gray plate and sample. (a) Gray plate and muscovite; (b) gray plate and montmorillonite

在样品中,褐铁矿在短波红外谱段无吸收谷,白云母粒度偏大,光谱稳定性较差。综合考虑,数据分析时仅采用了蒙脱石、绿帘石、方解石3件样品。将短波红外成像光谱仪获得的图谱信息导入到数据处理软件中进行分析,由于采用的矿物为均匀度与纯度很高的单矿物,所以运用数据处理软件选择样品图像信息的任意区域,并将此区域的光谱信息进行统计平均,从而获得矿物的光谱曲线,然后经过标准反射率板校正处理提取后,将得到各矿石的光谱曲线并进行了对比,对比曲线来源于美国喷气推进实验室光谱库,对其进行了重采样,使其采样间隔与所使用仪器的采样点相同,以保证对比的合理性,对比结果如图9所示。

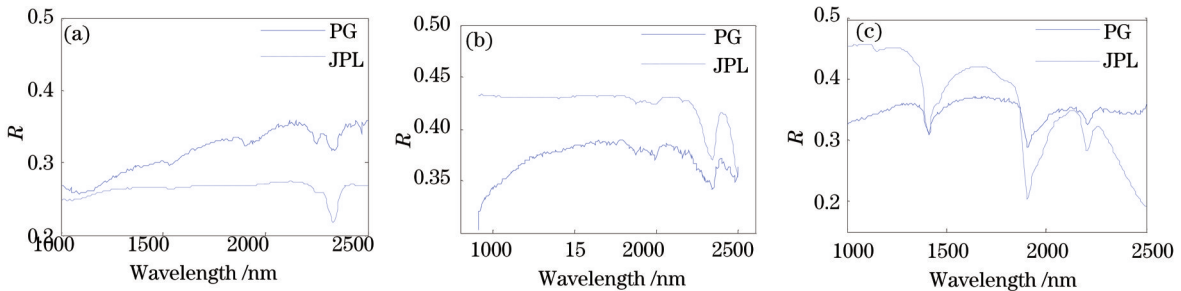


图9 各矿石光谱曲线。(a) 蒙脱石样品光谱;(b) 绿帘石样品光谱;(c) 方解石样品光谱

Fig.9 Spectra of ores. (a) Spectra of montmorillonite; (b) spectra of epidote; (c) spectra of calcite

由图9可知,获得的各类矿石的光谱曲线与相应JPL光谱库的光谱曲线在吸收谷位置以及整体形态上一致。从对比的结果可看出,通过研制的短波红外成像光谱仪可以同时获取矿石的图像以及光谱曲线,并通过矿物的不同反射率曲线可较为准确的判断和识别各种矿物,验证了仪器的性能。以此为基础,若能够进行矿物光谱数据库的建立,那么便可以成为地质勘探、矿物普查非常有效的手段。

4 结 论

以棱镜-光栅分光元件为基础,设计了一台用于矿石光谱分析的短波红外成像光谱仪,并对此台仪器进行了基本的性能测试,利用成像光谱仪采集了多种矿石的光谱反射率曲线。经过对获得到的光谱曲线的处理与分析对比,证明此台成像光谱仪能够较为准确地判断和辨别不同成分的矿石。

所研制的短波红外成像光谱仪采用推扫成像的方式对目标进行扫描,具有结构紧凑、体积小、光谱分辨率高、重量轻等优点,利用此系列特点可进行机载成像,通过航空的方式提高地质勘探、矿物普查的工作效率。此台短波红外成像光谱仪的研制成功,将大大促进对矿石光谱曲线分析的研究,推动我国成像光谱仪在地质勘探领域的应用。

参 考 文 献

- 1 Xue Qingsheng, Duan Minzheng. Development of limb imaging spectrometer for atmospheric trace gas sounding[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0522001.
薛庆生, 段民征. 用于大气痕量气体探测的临边成像光谱仪[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0522001.
- 2 Liu Yujuan, Cui Jicheng, Bayanheshig, *et al.*. Design and application of imaging spectrometer with convex grating[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(1): 52-57.
刘玉娟, 崔继承, 巴音贺希格, 等. 凸面光栅成像光谱仪的研制与应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 52-57.
- 3 Chen Shaojie, Bayanheshig, Pan Mingzhong, *et al.*. Efficient algorithms for echelle spectrograph design and cross-dispersed spectra analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1030001.
陈少杰, 巴音贺希格, 潘明忠, 等. 中阶梯光栅光谱仪快速设计与谱图分析的数学模型[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1030001.
- 4 Ren Zhong, Liu Guodong, Huang Zhen. A spectrometer splitting-light system based on volume phase holographic transmission grating [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0608004.
任 重, 刘国栋, 黄 振. 一种体相位全息透射式光栅的光谱仪分光系统[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0608004.
- 5 Yi Weining, Lu Yihuai, Luo Ming. Ground object spectra database and it's applications in remote sensing [J]. Optoelectronic Technology & Information, 1998, 11(5): 25-27.
易维宁, 陆亦怀, 罗 明. 地物光谱数据库及其在遥感中的应用[J]. 光电子技术与信息, 1998, 11(5): 25-27.
- 6 A R Gillespie. Lithologic mapping of silicate rocks using TIMS[J]. California Institute of Technology, 1985, N87: 29-44.
- 7 Veronika Kopacková, Stephane Chevrel, Anna Bourguignon. Spectroscopy as a tool for geochemical modeling[C]. SPIE, 2011, 8181: 818106.
- 8 Fumio Yamazaki, Konomi Hara, Liu Wen. Urban land-cover classification based on airborne hyperspectral data and field observation [C]. SPIE, 2014, 9244: 92440P.
- 9 Gan Fuping, Wang Runsheng, Ma Ainai. Spectral identification tree (SIT) for mineral extraction using AVIRIS data[C]. SPIE, 2003, 4897: 203-210.
- 10 A K Fred, J W Boardman, A B Lefkoff, *et al.*. The 1999 AIG/HyVista HyMap group shoot: commercial hyperspectral sensing is here[C]. SPIE, 2000, 4049: 201-217.
- 11 Du Peijun, Tan Kun, Su Hongjun. Feature extraction for target identification and image classification of OMIS hyperspectral image[J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(6): 835-841.
- 12 Liu Qingsheng, Liu Suhong, Yan Shouxun, *et al.*. Extract the auriferous alteration zones from MAIS data in the Hadamengou gold ore deposit[J]. Scientia Geological Sinica, 2000, 35(1): 91-95.
刘庆生, 刘素红, 燕守勋, 等. 利用对应分析方法从MAIS数据提取内蒙古哈达门沟含金矿化带[J]. 地质科学, 2000, 35(1): 91-95.
- 13 Shu Rong, Xue Yongqi, Yang Yide. Calibration and application of airborne pushbroomhyperspectral imager (PHI)[J]. SPIE, 2004, 5234: 668-675.

- 14 Jin Xizhe, Yu Bingxi. Field Fourier transform spectral imaging experiment of Sagnac type imaging Fourier transform spectrometer[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(1): 493-498.
金锡哲, 禹秉熙. Sagnac型干涉成像光谱仪外场干涉成像光谱实验[J]. 遥感学报, 2004, 8(1): 493-498.
- 15 Zhang Meng, Zhao Huijie, Li Na. Analysis of the influence of hyperspectral spectral resolution on the mineral recognition[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(s): 1-12.
张 萌, 赵慧洁, 李 娜. 高光谱数据光谱分辨率对矿物识别的影响分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(s): 1-12.
- 16 Wang Runsheng. On the development strategy of remote sensing technology in geology[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2008, (1): 1-12.
王润生. 遥感地质技术发展的战略思考[J]. 国土资源遥感, 2008, (1): 1-12.
- 17 Hunt G R. Near-infrared (1.3 μm -2.4 μm) spectral of alteration minerals-potential for use in remote sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1979, 44(12): 1974-1986.

栏目编辑: 韩 峰