

doi:10.3799/dqkx.2015.108

高光谱遥感技术及资源勘查应用进展

李志忠¹,汪大明^{1*},刘德长²,刘银年³,赵慧洁⁴,党福星⁵

1.中国地质调查局油气资源调查中心,北京 100029

2.核工业北京地质研究院,北京 100029

3.中国科学院上海技术物理研究所,上海 200083

4.北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院,北京 100191

5.中国国土资源航空物探遥感中心,北京 100083

摘要: 高光谱遥感技术在可见光、近红外、中红外和远红外波段范围内可获取上百个窄光谱波段,包含了丰富的空间、辐射和光谱3重信息。极高的光谱分辨率特性可以定性、定量探测在多光谱、宽波段遥感中不能被识别的物质。介绍了当前宽幅高光谱成像仪载荷研制最新进展以及星载高光谱成像数据模拟、定标与处理技术进展,并在矿产资源和油气资源调查方面进行典型应用。高光谱遥感技术在资源勘查中的应用积累、技术研究以及全流程业务化信息系统平台开发对高光谱数据在资源能源勘查中的推广有重要意义。

关键词: 成像仪载荷;高光谱数据处理;波谱服务;遥感;资源勘查应用。

中图分类号: P627

文章编号: 1000-2383(2015)08-1287-08

收稿日期: 2015-05-02

Hyperspectral Remote Sensing Technology and Its Progress in Resources Exploration

Li Zhizhong¹, Wang Daming^{1*}, Liu Dechang², Liu Yinnian³, Zhao Huijie⁴, Dang Fuxing⁵

1.Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100029, China

2.CNNC Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China

3.Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, Shanghai 200083, China

4.School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China

5.China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center of Land and Resources, Beijing 100083, China

Abstract: Hyperspectral remote sensing technology obtains hundreds of narrow spectral bands in the visible, near-infrared, mid-infrared and far-infrared bands and contains a wealth of space, radiation and spectral information. Much materials can be identified that are not recognized in multispectral data. The recent advances in broad width hyperspectral imager, space-borne hyperspectral data digital simulation, calibration and processing and typical applications in the investigation of mineral and oil-gas resources are introduced in the paper. In addition, the information system of hyperspectral data acquisition, storage, management, typical geological application and distribution is established, which shall be of great significance to the application of hyperspectral remote sensing data to the investigation of mineral and energy resources.

Key words: hyperspectral imager; hyperspectral data processing; spectral service; remote sensing; application in resources investigation.

高光谱技术(即成像光谱技术)利用大量很窄的电磁波段从感兴趣的物体获得有关数据,包含了丰富的空间、辐射和光谱3重信息,其最重要的特征

和标志就是光谱与图像组合为一体,这是当前国际遥感技术的前沿领域。由于具有极高的光谱分辨率,许多在宽波段遥感中不能被识别的物质可在高光谱

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(Nos.2008AA121100,2012AA12A308);国家自然科学基金项目(No.41402293)。

作者简介: 李志忠(1963-),男,研究员,主要从事遥感地质研究。

* **通讯作者:** 汪大明, E-mail: daming82@qq.com

引用格式: 李志忠,汪大明,刘德长,等,2015.高光谱遥感技术及资源勘查应用进展.地球科学——中国地质大学学报,40(8):1287-1294.

数据中被探测,并且可进行定量研究(Clark *et al.*, 2003;唐攀科等,2006;Schaeppman *et al.*,2009;Kruse,2012;van der Meer *et al.*,2012).

随着我国经济的发展,矿产资源和能源紧缺的问题进一步凸显,针对资源和能源的精细勘探与节约综合利用已成为当前我国工业化、城镇化、信息化和农业现代化可持续发展的重要内容.自 20 世纪 80 年代初第一台高光谱成像仪问世以来,就在岩矿探测识别与定量分析中得到了广泛应用,随着近来高光谱成像仪研制与应用技术的不断发展,当前高光谱遥感技术在矿产与能源勘查中正发挥着更为重要的作用(甘甫平等,2003;刘圣伟等,2006;Goetz,2009;袁崇谦和周建勋,2010;Tong *et al.*,2014).本文依托国家 863 计划重点项目“宽幅高光谱小卫星载荷关键技术研究”的工作成果,对当前宽幅高光谱成像仪研制最新进展、星载高光谱成像数据模拟、定标与处理技术进展、波谱服务以及在矿产资源和油气资源调查中的典型应用情况进行了介绍.

1 宽幅高光谱成像仪研制

光谱成像技术根据不同的方面可以分成不同的类型.依据波段数量与光谱分辨率类别可分为:在可见光—近红外区间只有几个波段的多光谱成像技术;在可见光—近红外区间有几百个波段的高光谱成像技术;在可见光—近红外区间有数千个波段的超光谱成像技术(郑玉权和禹秉熙,2002).

从国际发展趋势来看,高光谱成像技术发展已经完成了演示验证阶段,正走向任务的业务化和商业化发展阶段.美国国家航天局喷气推进实验室(jet propulsion laboratory,JPL)实验室负责的 EO-1 卫星 Hyperion 仪器在轨演示了星载高光谱成像仪在矿产资源探测、环境监测、城市规划等方面的突出能力.通过 EO-1-Hyperion 以及机载可见光/红外成像光谱仪(airborne visible infrared imaging spectrometer,AVIRIS)的综合应用研究,目前美国产业界和军方均着手于星载高光谱成像仪在商业化运作、军事侦察等方面的业务应用.欧空局以及俄罗斯在星载高光谱成像仪研制与应用方面也给予了极大的关注.为满足业务化运行的需要,高光谱成像仪正向着更宽的光谱覆盖范围、更高的空间分辨率、更大的幅宽和更高的量化水平方向发展(郝爱花等,2013).

我国第一台高光谱成像仪是上海技物所研制的 SZ-3 中分辨率高光谱成像仪,于 2002 年发射,成为

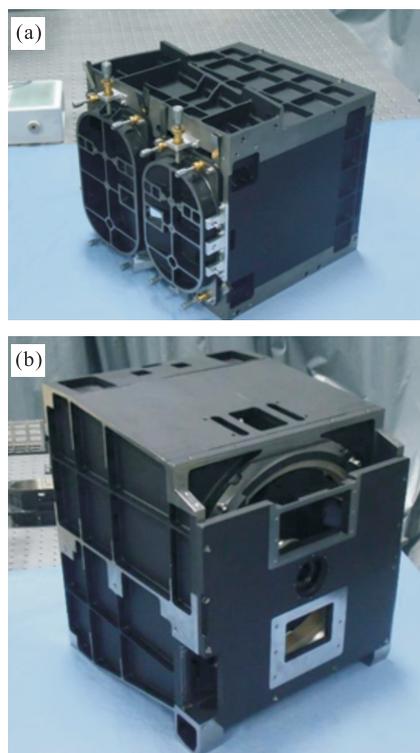


图 1 宽幅高光谱成像仪

Fig.1 Broad width hyperspectral imager
a.VNIR 成像仪;b.SWIR 成像仪

全球第 2 个上天的可见光/红外中分辨率光谱成像仪,其空间分辨率为 500 m,光谱通道数为 30 个,成果获得了 2004 年国家科技进步二等奖.在“九·五”和“十·五”期间,国家部署了星载高光谱成像仪的研究工作,已取得了重大进展.上海技物所承担的星载高光谱成像技术的研究项目,研制出了工程样机,其光谱范围为 400~2 500 nm,光谱分辨率为 5~12 nm;在轨道高度 500 km 下,空间分辨率可达 20 m,幅宽为 20 km,通过了力学试验.2008 年 9 月发射的环境一号 A 卫星上,装载了傅立叶分光的高光谱成像仪,光谱覆盖可见近红外波段,光谱通道数为 115 个,空间分辨率为 100 m,幅宽为 50 km,可以用于环境和灾害的监测.

在国家 863 计划重点项目“宽幅高光谱小卫星载荷关键技术研究”的支持下,我国科学家在面对矿产资源探测等应用需求时,突破了高分辨率光谱精细分光、高光谱宽幅集成、大面阵探测器驱动与应用、大视场光学系统装调检测以及光谱数据高速处理与在轨可编程技术,研制出了成像仪原型样机(图 1).

在高分辨率光谱精细分光方面,根据分光原理和元件的不同,高光谱分光技术可分为棱镜色散(prism)、光栅衍射(grating)和傅立叶干涉(inter-

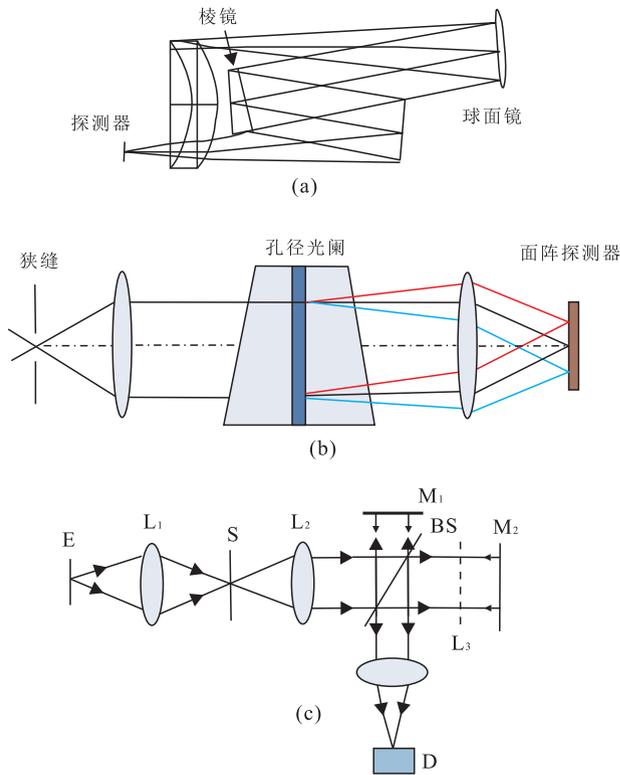


图 2 高光谱成像仪结构

Fig.2 Hyperspectral imager physical design

a.OASIS 离轴全球面棱镜分光系统; b.PGP 光谱仪原理结构; c. 迈克耳逊干涉仪

ferometer)3 类主要的分光技术。色散棱镜用于光谱仪器的历史已经超过一个多世纪,棱镜比光栅制造简单,色散棱镜常用于单个光谱级的光谱仪。衍射光栅按工作原理可以分为透射型和反射型;按照面型又可以分为平面、凹面和凸面光栅。光栅的色散率只取决于光栅常数和光谱级数,与光栅线数无关。傅立叶变换光谱仪利用光谱像元的干涉图与光谱图之间的傅立叶变换关系,通过测量干涉图和对干涉图进行傅立叶变换来获得物体的光谱信息。基于傅立叶分光的高光谱成像仪可以分为时间调制型和空间调制型(图 2)。

高光谱宽幅集成是基于多台光谱仪集成思想,为保障系统的信噪比,在设计时应尽可能让更多的光能量到达焦面,除了在工艺上提高光学零件的反射率、透过率以及光栅的衍射效率之外,最有效的手段就是增大望远镜的口径,大口径小 F 数的光学系统可以在相同的时间内让更多来自目标的能量到达探测器像元,在积分时间固定的情况下,实现更高的信噪比。因此目前最新的高光谱宽幅集成技术都将小 F 数大口径光学系统和离轴非球面加工高精度

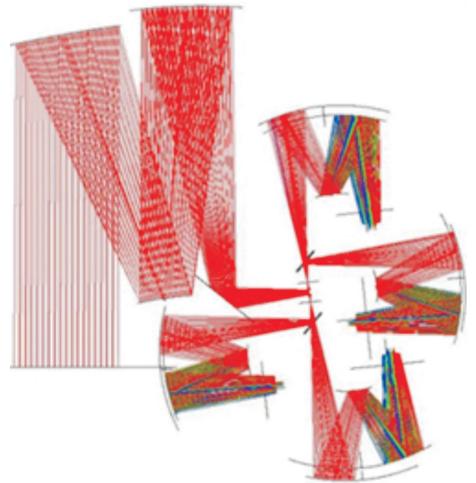


图 3 高光谱成像仪集成

Fig.3 Hyperspectral imager integration

补偿器等作为核心关键技术。

如图 3 设计中,高光谱成像仪由主光学离轴三反望远镜和 2~4 台精细分光光谱仪组成。参照光学基本原理,在焦距确定的情况下,当望远镜口径较小时(约 125 mm),光学系统的 F 数相对更大,而大 F 数的光学系统设计难度相对较低,设计过程中的自由度更大,后截距也可以设计得较长,有利于后光学视场分割以及为 2~4 台光谱仪提供相对充裕的布局空间。

大视场光学系统装调检测方面,同样为了实现高分辨率和信噪比,需要设计出 F 数更小的光学系统以收集更多来自地物目标的能量,高光谱成像仪的 F 数为 2.83,小于目前国际上在轨及在研的绝大多数仪器。小 F 数离轴三反系统焦面与次镜的距离相对更近,无法得到足够的空间放置数量过多的后光学系统,光束张角的增大不利于视场分割,后光学系统的布局难度大大增加。通过优化主次镜参数、结合远心结构、选取合适的光阑位置、采用视场分离技术等实现了光学结构体积的最小化和合理布局,设计出满足使用要求的光学系统。

光谱数据高速处理与在轨可编程工作的重点内容是编写在轨可编程软件,软件首先从可见光和短波红外探测器驱动及信息中获取电路传输的图像数据,由串并模块完成数据的串并转换。通信模块与下位机电路之间的通信,接收下位机传送来的波段选择和图像压缩指令。

在可见光和短波红外探测器驱动及信息获取电路传送至图像在轨可编程电路的串行光谱图像数据中,每个光谱谱段图像前均加入了谱段号。通信模块首先根据下位机发送来的波段选择指令生成依谱段

号排序的选择表(如若为“1”,则表示此谱段数据可传入后续模块,否则丢弃);然后根据数据中的谱段号查找选择表,确定此谱段数据是否丢弃,从而实现波段选择编程功能。经波段选择和编程后的高光谱图像数据,传输至原始数据缓存模块并完成图像数据的缓存。在压缩模式下,压缩模块根据接收图像数据的谱段信息,分类将这些图像数据存到各自的缓存单元中。在图像接收缓存单元中接收到一定量的图像数据后,则向读写仲裁模块发出压缩请求。等待响应后,图像压缩以及读写仲裁模块从图像接收缓存单元中读取数据,进行压缩数据处理,在完成压缩后打包传至压缩图像缓存模块,然后下传。在直传模式下,数据压缩模块则直接根据接收到的图像数据谱段信息,将图像数据直接传送至压缩图像缓存模块,然后下传。

2 高光谱数据处理与波谱服务

由于受到太阳位置、角度条件、大气条件、地形影响及传感器本身性能的影响,传感器所记录的数据与目标的光谱反射率或光谱辐射亮度值并不一致。所以在开展高光谱数据应用时,需先将传感器记录的原始辐射值(DN 值)转化为地物反射率,恢复地物光谱,并通过大气校正等处理消除不良影响(Boardman, 1998; 甘甫平等, 2005; 刘洪英等, 2012)。

2.1 高光谱数据预处理

为了满足高光谱小卫星在矿产资源领域的业务化应用需求,针对星载高光谱成像仪的原理和特点,同时兼顾规模化应用和地矿专业化应用的特殊要求,笔者设计了相应的标准化预处理流程,并对预处理中的关键技术进行研究。数据预处理主要包括辐射亮度还原、系统误差校正、反射率反演等工作。

(1) 辐射亮度还原。该部分主要针对高光谱数据 1 级数据产品(辐射亮度数据)的生成流程展开研究,研究过程中首先对载荷获取的原始数据 DN 值与辐射亮度数据之间的关系进行分析与建模,然后利用辐射定标系数通过 DN 值与辐射亮度之间的模型实现辐射亮度还原,从而得到 1 级数据产品。

(2) 系统误差校正。在进行辐射亮度还原之后,原理上应该完全消除由于载荷本身器件、结构、原理等方面引入的误差。但是在一般情况下,由于辐射亮度还原过程中所采用的处理方法不可能包含对所有系统误差的校正,复原的辐射亮度数据中仍然存在着某些系统误差,例如定标参数误差引起的条带效应、单个

器件失效引起的坏点和坏线等。为了获得高质量的反射率光谱数据,在进行反射率反演等操作之前需要针对载荷原理以及辐亮度复原中所采用的处理方法,开展系统误差校正与消除研究。根据载荷原理,笔者分析复原辐亮度数据中存在的系统误差,设计相应的校正方法对其进行校正,得到高精度的入瞳辐亮度数据。

(3) 反射率反演。反射率反演是将大气层顶辐亮度数据转换为地表反射率的过程。研究过程中,通过辐射校正,将大气吸收与散射、太阳高度角等影响消除,实现星载高光谱数据反射率反演,并生成 2 级反射率数据供用户使用。采用的方法为精度较高的反射率反演方法:基于线性回归模型的经验线性法 FLAASH(fast line-of-sight atmospheric analysis of hypercubes)和基于辐射传输模型的 ACORN(atmospheric CORrection now)两类。利用该两类模型以及模型的组合建立高光谱地质应用小卫星数据反射率的精确反演流程,并通过对比分析其基本原理和具体实现方法,结合地面大气参数、光谱测量等,探索研究以上两类模型的改进方法,进一步提高地物反射率反演的精度。

面向业务化的预处理流程设计如下:

(1) 根据定标系数,由 0 级数据产品 DN 值复原得到辐亮度数据;(2) 对辐亮度数据进行系统误差检测,包括坏点/坏线、条带效应、smile 效应等,若存在上述系统误差则对其进行校正;(3) 系统误差校正后的辐亮度数据作为 1A 级数据产品输出;(4) 由 1A 级数据进行几何粗校正,校正遥感器轨道、姿态和地形的影响,得到地理定位后的辐亮度数据,可作为 1B 级数据产品输出;(5) 由 1A 级数据产品辐亮度反演得到地面反射率数据,作为 2A 级数据产品输出;(6) 由 2A 级数据产品进行几何粗校正,得到地理定位后的反射率数据,可作为 2B 级数据产品输出(图 4)。

2.2 典型岩矿波谱服务

岩矿波谱服务是建立面向特定行业 and 应用的波谱库与知识库,以便为进行岩矿信息提取与目标识别时所需的标准波谱提供参考。然而,在实际应用过程中,往往是基于光谱的特征进行匹配,而不是从整个波谱空间进行标准波谱与未知波谱的比较。因此,为了能够提高匹配的效率,减少数据冗余,笔者运用光谱特征提取方法,对波谱库中的主要矿物进行了特征提取,形成了波谱库中的典型矿物特征库(苏理宏等, 2002)。

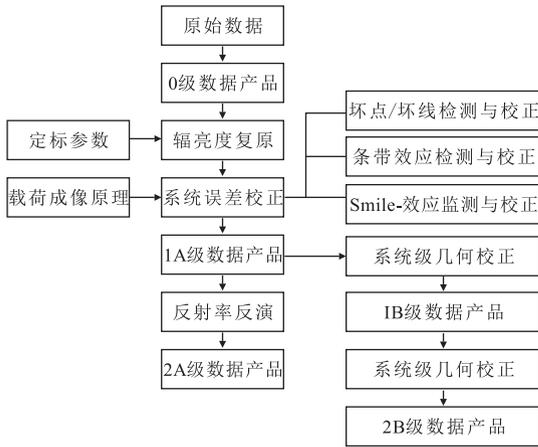


图 4 标准化预处理流程示意

Fig.4 Flow chart of standardization image preprocessing

地物光谱曲线反映了地物的吸收和反射特征,大多数地物具有典型的光谱波形特征.在特征提取的基础上可建立特征库,并进行系统化服务.

3 高光谱矿产资源典型应用

高光谱在矿产资源调查与监测工作中应用得较早,也形成了一套较为完整的工作方法.在典型矿物的提取过程中,运用最大噪声分离变换(maximum noise fraction, MNF)对反射率数据进行波谱降维,然后利用像元纯度指数(pixel purity index, PPI)分析进行空间降维并用 N 维可视化方法进行端元识别,确定矿物波谱,最后利用距离法、光谱角(spectral angle matching, SAM)、混合调制匹配滤波(mixture tuned matched filtering, MTMF)等方法进行矿物填图,并对结果进行优化操作(Jimenez *et al.*, 1999; 梁树能等, 2014).

针对矿产资源的示范应用主要在新疆东天山地区开展,数据选用 EO-1 卫星搭载的 Hyperion 数据进行矿物填图工作.通过前人资料的研究分析(刘圣伟等, 2006; 梁树能等, 2014),本区主要的蚀变矿物为蛇纹石、白云母与绿帘石.

针对上述 3 种矿物的填图,首先利用 MNF 变换进行光谱数据降维,分离数据中的噪声,减小运算量,观察最终特征值和 MNF 图像,确定数据的固有维数,选择合适的 MNF 波段进行 PPI 指数计算;然后计算 MNF 图像的 PPI 指数,最终产生 PPI 图像,图像中像元的 DN 值代表像元被记录为极值的次数,从直方图中选择阈值,仅选择最纯的像元以保证被分析的像元数最小,这些像元被输入到分离特定光谱端元的交

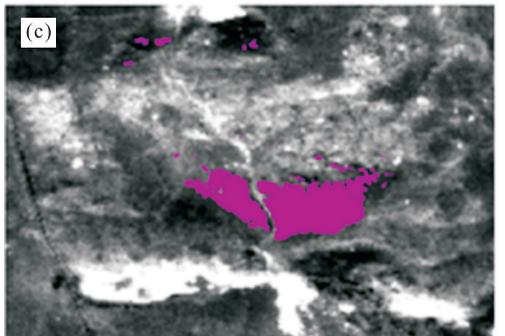
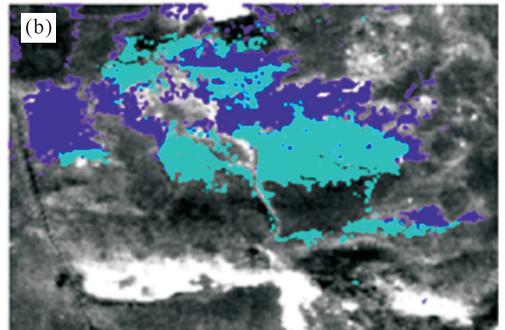
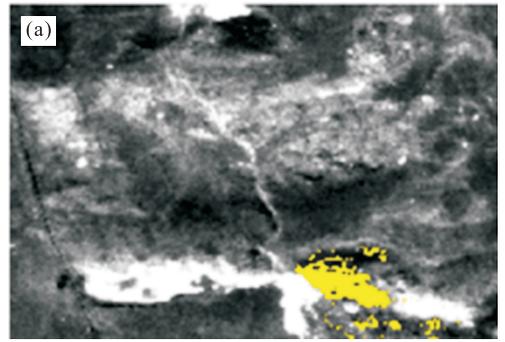


图 5 高光谱典型矿物填图结果

Fig.5 Result of hyperspectral mineral mapping
a.蛇纹石填图结果;b.白云母填图结果;c.绿帘石填图结果

互式可视化算法中;接下来在 N 维可视化中,通过选择 N 维散点图的顶点和拐角,进一步提纯纯净像元.将最终确定的端元输入到图像中的感兴趣区(region of interest, ROI),从图像中提取每个感兴趣区平均反射率光谱曲线作为成像光谱矿物填图的候选端元;随后将采集端元的波谱曲线输出,经过波谱分析(用波谱特征拟合算法与美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)标准波谱库进行匹配识别)得到的波谱曲线图,确定端元矿物并建立该矿物的真实波谱库(王晓玲等, 2010).

应用结果表明(图 5),对于蛇纹石、白云母以及绿帘石 3 种矿物,经过上述数据处理与分析后,矿物信息能够被有效提取,尤其使用 SAM 方法,不仅以快速提取端元采集出的所有地物,并用彩色分类影

像来显示,可以直观的看出该矿物的分布情况。

4 高光谱油气资源典型应用

利用高光谱遥感烃类蚀变以探测油气微渗漏是高光谱遥感技术最新应用之一。笔者以榆林油气区获取的 Hyperion 数据为研究对象,通过对影像预处理,再分别采用基于小波主成分分析(principal component analysis,PCA)最大似然分类、端元提取分类、光谱库典型蚀变光谱分类和植被指数决策树分类 4 种方法进行油气蚀变信息提取,建立了研究区蚀变矿物的光谱特征库和识别模型,经过对野外实测光谱和高光谱遥感探测结果进行综合分析,最终圈定油气勘探靶区(潘琛等,2009;王永,2010;李倩倩等,2013)。

研究采用的 Hyperion 高光谱图像域尺寸为 256×1100 像素,谱段中心波长为 $427 \sim 2395 \text{ nm}$,共有 180 个谱段。图像在采用上述方法分别提取油气异常信息后,按照一定的异常区圈定准则,得到油气异常区的圈定结果,如图 6 所示。

通过实地勘验,所有位于该景区域内的气井均

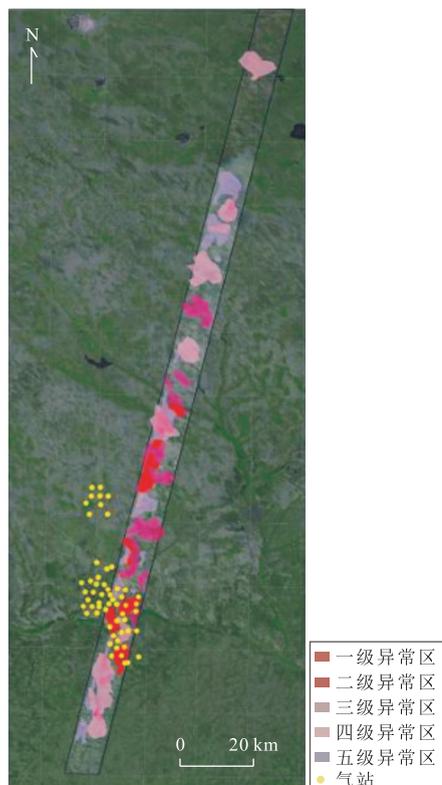


图 6 高光谱数据油气异常区的综合圈定

Fig.6 Comprehensive oil and gas anomaly area

落入异常分级区。从油气异常区的圈定结果来看,利用高光谱遥感探测油气微渗漏信息切实可行。

5 高光谱地质应用系统

在国家 863 计划重点项目“宽幅高光谱小卫星载荷关键技术研究”中,综合现有高光谱遥感数据处理与信息系统建设前沿技术,统筹考虑高光谱载荷的特点,建立集高光谱数据获取、存储、管理、典型地质应用与分发为一体的信息系统平台,有效提升高光谱地质遥感业务的信息化水平,提高工作效率。

地质应用系统从功能角度总体上可以划分为 3 大部分:一是星载高光谱数据处理和管理部分,除包含高光谱卫星下行数据到达地面系统后的快视、检索、处理、存储、管理、访问、发布等功能外,还应包括整个地质应用系统的资源管理和调度;第 2 部分是典型地质应用分系统,体现了地质应用系统针对国土资源应用需求的关键所在,包括矿产资源高光谱遥感探测、油气高光谱遥感探测和热红外高光谱遥感应用 3 个典型应用子系统,可以生成高级数据产品;第 3 部分是典型地物波谱库服务分系统,旨在建立一个针对矿产和能源等地质应用的地物波谱库服务机制,并建立相应标准,进行地物波谱采集,引入先验知识,为典型地质应用提供技术支撑。

上述系统的开发为高光谱数据的流程化、业务化应用搭建了较为完整的框架和系统功能。首先,高光谱遥感数据处理分系统从外部数据接入系统获取数据源,并对数据进行相关处理,生成的结果和元数据信息进入数据及数据库管理分系统进行存档。而存储的经过处理的数据根据需要可进入地质应用分系统,进行进一步的加工处理生成专题数据。这些地质应用产品数据会返回到数据管理分系统再进入发布分系统进行数据分发,或者不用根据用户的需求直接进入用户服务与信息发布分系统进行数据分发。在此过程中,在数据与数据库管理分系统中的高光谱遥感数据根据需要可以在计算机平台中进行可视化处理以得到数据处理人员的确认,数据分发分系统中的数据可以通过网络直接与用户进行交互。

6 结论与展望

地质矿产领域的高光谱遥感应用从其发展伊始就是高光谱应用和发挥应用效益的重要支撑点。矿

产资源与能源勘查、岩石矿物的识别、矿物丰度制图以及成矿远景区和找矿靶区的圈定一直是高光谱技术发展和应用的主要方向。依托国家 863 计划重点项目“宽幅高光谱小卫星载荷关键技术研究”,对成像光谱仪载荷研制和数据处理与应用开展了一系列研究工作,在宽幅高光谱成像仪集成与数据处理、地物光谱的遥感重建、高光谱遥感探测矿产和油气资源等方面开展了全面的研究,并建立了高光谱地质应用系统平台的建设。在新疆东天山多金属成矿区和鄂尔多斯盆地东北部的榆林气田开展的岩矿、油气资源高光谱资源探测实验研究工作,进一步证实了高光谱遥感在岩石分类、矿物识别和油气异常信息探测和提取的有效性,为今后地质矿产和油气资源勘探的业务化应用打下了良好的基础。

由于高光谱遥感数据数据量巨大,复杂运算时需要大量的时间,同时人机交互与并行化处理的衔接也需要针对不同的处理方式采取不同的应对策略,可以通过发展高光谱数据处理并行化技术以获取最佳处理性能,并降低处理难度;另外海量高光谱遥感数据的统一存储、访问及地质应用系统集成技术也是急需解决的问题。

References

- Boardman, J. W., 1998. Post-ATREM Polishing of AVIRIS Apparent Reflectance Data Using EFFORT: A Lesson in Accuracy versus Precision. Pasadena JPL Published, California.
- Clark, R. N., Swayze, G. A., Livo, K. E., et al., 2003. Imaging Spectroscopy: Earth and Planetary Remote Sensing with the USGS Tetracorder and Expert Systems. *Journal of Geophysical Research*, 1008 (E12): 5131. doi: 10.1029/2002JE001847
- Gan, F. P., Wang, R. S., Ma, A. N., et al., 2003. Alteration Extracting Based on Spectral Match Filter(SMF). *Journal of Image and Graphics*, 8(2): 147—150 (in Chinese with English abstract). doi: 10.11834/jig.20030261
- Gan, F. P., Zhang, Z. G., Wang, R. S., et al., 2005. Spectral Application in Spectral Reconstruction and Validation Based on Hyperspectral Imaging Data. *Remote Sensing for Land & Resources*, (1): 12—16 (in Chinese with English abstract). doi: 10.6046/gtzyyg.2005.01.03
- Goetz, A. F. H., 2009. Three Decades of Hyperspectral Remote Sensing of the Earth: A Personal View. *Remote Sensing of Environment*, 113: S5—S16. doi: 10.1016/j.rse.2007.12.014
- Hao, A. H., Hu, B. L., Bai, J. G., et al., 2013. Design of Airborne Dual Channel Ultraviolet-Visible Imaging Spectrometer with Large Field of View, Wide Spectrum, and High Resolution. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 33(12): 3432—3436 (in Chinese with English abstract).
- Jimenez, L. O., Morales-Morell, A., Creus, A., 1999. Classification of Hyperdimensional Data Based on Feature and Decision Fusion Approaches Using Projection Pursuit, Majority Voting, and Neural Networks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(3): 1360—1366. doi: 10.1109/36.763300
- Kruse, F. A., 2012. Mapping Surface Mineralogy Using Imaging Spectrometry. *Geomorphology*, 137(1): 41—56. doi: 10.1016/j.geomorph.2010.09.032
- Li, Q. Q., Chen, X. M., Liu, X., et al., 2013. Quantitative Analysis of Content and Spectrum of Altered Mineral in the Oil and Gas Microseepage Area. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 33(12): 3318—3320 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3964/j.issn.1000—0593(2013)12—3318—03
- Liang, S. N., Gan, F. P., Yan, B. K., et al., 2014. A Study on the Relationship between the Composition and Spectral Feature Parameters in Chlorite. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 34(7): 1763—1768 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. Y., Li, Q. L., Gu, B., et al., 2012. Performance Analysis and Radiometric Correction of Novel Molecular Hyperspectral Imaging System. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 32(11): 3161—3166 (in Chinese with English abstract) doi: 10.3964/j.issn.1000—0593(2012)11—3161—06
- Liu, S. W., Gan, F. P., Yan, B. K., et al., 2006. Application of the Imaging Spectroscopic Technique in Mineral Identification and Mapping. *Geology in China*, 33(1): 178—186 (in Chinese with English abstract).
- Pan, C., Du, P. J., Luo, Y., et al., 2009. Decision Tree Classification of Remote Sensing Images Based on Vegetation Indices. *Journal of Computer Applications*, 29(3): 777—780 (in Chinese with English abstract).
- Schaepman, M. E., Ustin, S. L., Plaza, A. J., et al., 2009. Earth System Science Related Imaging Spectroscopy—An Assessment. *Remote Sensing of Environment*, (113): S123—S137. doi: 10.1016/j.rse.2009.03.001
- Su, L. H., Li, X. W., Liang, S. L., et al., 2002. Data Frame and Spectral Simulation for Remote Sensing Spectral Data Base. *Geo-Information Science*, (4): 7—14 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1560—8999.2002.04.002
- Tang, P. K., Li, Y. L., Li, G. B., et al., 2006. Imaging Spectrometry Remote Sensing Technology and Its Applica-

- tions in *Geology, Mineral Resources and Geology*, 20(2):160–165 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3696/j.issn.1001-5663.2006.02.013
- Tong, Q. X., Xue, Y. Q., Zhang, L. F., 2014. Progress in Hyperspectral Remote Sensing Science and Technology in China over the Past Three Decades. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(1):70–91. doi: 10.1109/jstars.2013.2267204
- van der Meer, F. D. V. D., van der Werff, H. M. A. V. D., van Ruitenbeek, F. J. A. V., et al., 2012. Multi- and Hyperspectral Geologic Remote Sensing: A Review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14(1): 112–128. doi: 10.1016/j.jag.2011.08.002
- Wang, X. L., Du, P. J., Tan, K., et al., 2010. An Automatic Endmember Extraction Algorithm from Hyperspectral Image. *Remote Sensing Information*, (4): 8–12 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2010.04.002
- Wang, Y., 2010. Hydrocarbon Microseepage Information Extracting through Remote Sensing Technology in Front Range of Longmenshan. *Coal Geology of China*, 22(10):10–16 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, C. Q., Zhou, J. X., 2010. Application of Satellite Remote Sensing Technology in Oil and Gas Exploration. *Marine Origin Petroleum Geology*, 15(2): 69–75 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1672-9854.2010.02.009
- Zheng, Y. Q., Yu, B. X., 2002. Overview of Spectrum-Dividing Technologies in Imaging Spectrometers. *Journal of Remote Sensing*, 6(1): 75–80 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3321/j.issn:1007-4619.2002.01.014
- ### 附中文参考文献
- 甘甫平, 王润生, 马嵩乃, 等, 2003. 基于光谱匹配滤波的蚀变信息提取. *中国图像图形学报*, 8(2):147–150.
- 甘甫平, 张宗贵, 王润生, 等, 2005. 光谱重建与光谱真实性检验中地物光谱的作用. *国土资源遥感*, (1):12–16.
- 郝爱花, 胡炳樑, 白加光, 等, 2013. 大视场宽谱段高分辨率分波段机载紫外-可见光成像光谱仪设计. *光谱学与光谱分析*, 33(12):3432–3436.
- 李倩倩, 陈小梅, 刘幸, 等, 2013. 油气微渗漏区蚀变矿物含量与光谱之间的定量分析. *光谱学与光谱分析*, 33(12): 3318–3320.
- 梁树能, 甘甫平, 闫柏琨, 等, 2014. 绿泥石矿物成分与光谱特征关系研究. *光谱学与光谱分析*, 34(7):1763–1768.
- 刘洪英, 李庆利, 顾彬, 等, 2012. 新型分子高光谱成像系统性能分析及数据预处理. *光谱学与光谱分析*, 32(11): 3161–3166.
- 刘圣伟, 甘甫平, 闫柏琨, 等, 2006. 成像光谱技术在典型蚀变矿物识别和填图中的应用. *中国地质*, 33(1):178–186.
- 潘琛, 杜培军, 罗艳, 等, 2009. 一种基于植被指数的遥感影像决策树分类方法. *计算机应用*, 29(3):777–780.
- 苏理宏, 李小文, 梁顺林, 等, 2002. 典型地物波谱库的数据体系与波谱模拟. *地球信息科学*, (4):7–14.
- 唐攀科, 李永丽, 李国斌, 等, 2006. 成像光谱遥感技术及其在地质中的应用. *矿产与地质*, 20(2):160–165.
- 王晓玲, 杜培军, 谭琨, 等, 2010. 一种高光谱遥感影像端元自动提取方法. *遥感信息*, (4):147–150.
- 王永, 2010. 基于遥感技术的龙门山前山带烃类微渗漏信息提取. *中国煤炭地质*, 22(10):10–16.
- 袁崇谦, 周建勋, 2010. 卫星技术在油气勘探中的应用. *海相油气地质*, 15(2):69–75.
- 郑玉权, 禹秉熙, 2002. 成像光谱仪分光技术概览. *遥感学报*, 6(1):75–80.