

高光谱遥感岩矿端元提取与分析方法研究

刘汉湖^{1,2}, 杨武年^{1,2}, 杨容浩²

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;
2. 成都理工大学 国土资源部地学空间信息技术重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 端元提取是高光谱遥感信息提取与分析的基础,也是解决高光谱图像混合像元分解的关键。本文针对研究区高光谱遥感数据特点,进行了辐射校正、最小噪声分离变换(MNF)及纯净像元指数(PPI)处理,在此基础上,应用二维散点图和三维散点图分别提取了端元波谱,并开展了端元属性的判别研究。岩矿端元的提取与分析为后续岩矿种类识别奠定了基础,直接影响最终成果的准确度。

关键词: 高光谱遥感, 端元, 最小噪声分离变换, 纯净像元指数

中图分类号: P575.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)02-0213-08

The end-member extraction and analysis method for rocks and minerals using hyperspectral remote sensing image

LIU Han-hu^{1,2}, YANG Wu-nian^{1,2} and YANG Rong-hao²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Ministry of Land and Resources Key Laboratory of Geological Spatial Information Technology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The end-member extraction is the foundation of the hyperspectral remote sensing information extraction and analysis and is also the key to pixel unmixing. In view of hyperspectral remote sensing data characteristics of the study area, the authors carried out the digital image processing of the radiance correction, minimum noise fraction (MNF) and pixel purity index (PPI) and, on such a basis, extracted the end-member spectra by using two-dimensional scatter diagram and three-dimensional scatter diagram, and conducted the research on the discrimination of end-member attributes. The extraction and analysis of rocks and minerals constitute the foundation for the recognition of rocks and minerals and directly affect the accuracy of the results.

Key words: hyperspectral remote sensing; end-member; minimum noise fraction (MNF); pixel purity index (PPI)

高光谱遥感是当今国内外遥感领域,特别是遥感地质界重点研究和发展的应用高科技技术之一。传统的多光谱遥感由于波谱分辨率有限,难以区分地物独特而丰富的波谱信息。上世纪 80 年代以来,高光谱遥感技术在地质找矿、地物波谱信息提取等

方面做了大量工作,取得了许多成果(Abrams and Ashley, 1980; 杨凯, 2001; 章革, 2004; 甘甫平等, 2004; 燕守勋等, 2004; 张宗贵, 2004; 连长云等, 2004; 耿修瑞, 2005; 唐攀科, 2006; 王润生等, 2007)。研究表明,利用纳米级的高光谱遥感数据提

收稿日期: 2012-10-20; 修订日期: 2012-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(41102225) 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主课题(SKLG2011Z013)

作者简介: 刘汉湖(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 遥感地质, E-mail: liuhanhu@cdu.cn.

取成矿地质体的标识性光谱信息已成为可能。

纵观国内外遥感地质学应用研究, 高光谱遥感地质仍处于试验研究阶段, 虽然取得一些研究成果, 但完全未进入实用阶段。因此, 岩矿高光谱遥感数据处理方法、信息提取技术与应用在一定程度上还不成熟。本文针对美国内华达州 Cuprite 矿区高光谱遥感数据特点, 开展了岩矿端元信息提取与分析研究。

1 研究区与数据情况

Cuprite 矿区位于美国内华达州 Esmeralda 县 Goldfield 镇南约 15 km 处, 95 号高速公路北西—南东向贯穿全区。主要出露岩层有寒武系沉积岩和变

沉积岩、第三系火山岩和第四系冲积层(图 1)。其中第三系火山岩热液蚀变广泛, 在 95 号公路两边形成两个南北向拉长的蚀变区, 明显可分为硅化带、蛋白石化带和泥化带。硅化区主要蚀变矿物为石英和少量的方解石、明矾石和高岭石; 蛋白石化带分布广泛, 主要为明矾石、浸染状蛋白石、方解石置换的蛋白石和高岭石; 泥化带主要有高岭石、蒙脱石和少量由火山玻璃生成的蛋白石(Abrams and Ashley, 1980)。

本次使用的数据来源于机载可见光-红外成像光谱仪(AVIRIS)(图 1), 成像时间为 1997 年 6 月 19 日, 空间分辨率 20 m, 获取地址为 <http://aviris.jpl.nasa.gov/html/aviris.freedata.html>。图像为辐射能量数据, 单位为 $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$ 。

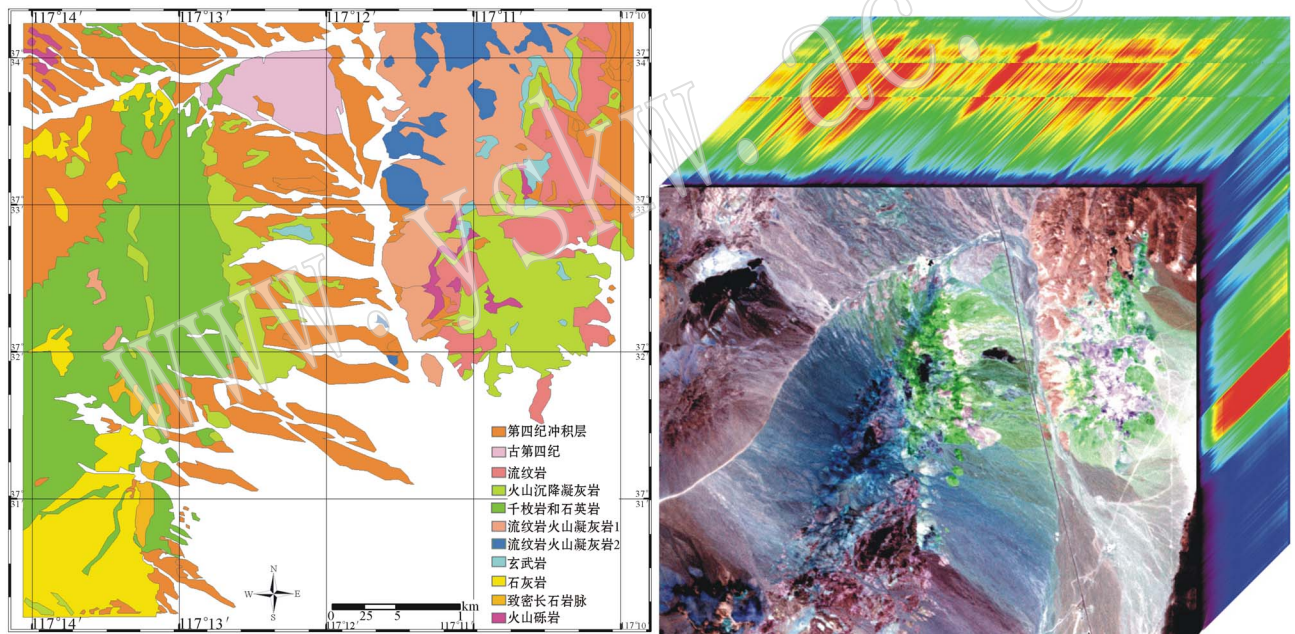


图 1 研究区地质图(a, Abrams and Ashley, 1980)及 AVIRIS 高光谱遥感图像(b)

Fig. 1 Geological map(a, after Abrams and Ashley, 1980) and the AVIRIS hyperspectral image of the study area (b)

2 辐射校正

辐射校正是地物识别和定量分析不可缺少的环节。只有经过辐射校正, 剔除由于大气散射、吸收、地形起伏以及传感器本身不稳定带来的各种失真, 将记录的图像值转换为地面的反射率值, 重建像元地面波谱, 才能根据波谱特征有效的识别地物, 反演

地物成分。

辐射校正包括三部分内容: 辐射定标、地形校正和大气校正。本次获取的 AVIRIS 数据已经经过定标, 研究区海拔最高约为 1 430~1 730 m, 未见阴影, 因此, 本文重在开展大气校正。

文中大气校正采用的是 ENVI 中校正模型 FLAASH。FLAASH 能够精确补偿大气影响, 其适用的波长范围包括可见光至近红外及短波红外, 最

大波长为 $3 \mu\text{m}$ 。FLAASH 模块中,在输入辐射能量数据时,同时要求输入尺度转换因子。模块中要求辐射能量的量纲是 $\text{mW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$,而经辐射定标 AVIRIS 数据的量纲为 $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$,所以后者还需通过换算关系式 $1 \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr}) = 0.001 \text{mW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$ 进行量纲转换。因此,利用 FLAASH 模块校正 AVIRIS 数据时,其尺度转换因子为 0.001。同时还需要输入其他一些参数,如表 1。

表 1 研究区 AVIRIS 数据 FLAASH 模型校正的相关参数
Table 1 The relevant parameters about FLAASH model of AVIRIS data

参数名称	校正值
图像中心点坐标	$-117^{\circ}2'51.80''; 37^{\circ}2'28.44''$
传感器类型	AVIRIS
水气反演	1 135 nm
平均海拔高度	1.55 km
气溶胶模型	rural
传感器高度	21.032 km
能见度	40 km
卫星过境时间	1997 年 6 月 19 日 19:47:18
大气模型	Mid-latitude summer

3 端元波谱提取

对于一个地区的未知岩矿信息,一般要进行端元信息的提取。所谓端元,指的是成分单一的像元。目前端元选择的方式主要有 2 种:① 根据野外波谱测量或从已有的地物波谱信息库中选择端元。通过这种途径选择的端元称为“参考端元”。② 直接从待分类的图像上选择端元,然后不断对其修改、调整,确定端元。通过这种方式选择的端元称为“图像端元”。对于大部分研究区域而言,有与研究区对应的实际地物波谱库的区域很少,也很少投入大量人力、物力进行野外波谱测量。因此在缺乏野外波谱测量数据情况下,从影像本身获取端元是目前获取端元的主要方式。

3.1 MNF 变换

MNF 变换的目的主要是分离数据中的噪声,减少随后处理中的计算需求量。岩矿地物波谱差异主要体现在短波红外区间,因此这里选择使用的数据为 AVIRIS 图像波段 170 ($1.9646 \mu\text{m}$) ~ 219 ($2.4539 \mu\text{m}$),共 50 个波段。对 50 个波段进行 MNF 变换,图 2 为 50 个波段经 MNF 变换后的特征图,特征值高表明图像信息丰富,特征值低表明图像信息匮乏。MNF 变换后的特征图表明,图像信息量

主要包括在前面几个特征波段。就本次研究区而言,随波段序号增大,信息量急剧下降,到了 10 波段以后,图像信息量变化不大。

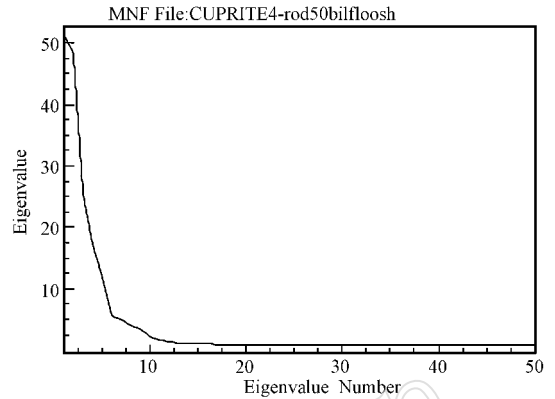


图 2 MNF 变换后特征图

Fig. 2 MNF transformation characteristics of chart

3.2 端元波谱提取

散点图是端元波谱提取的一个重要而有效的方式。目前,由于受空间表达方式的限制,可视化的散点图有二维和三维两种。

3.2.1 纯净像元指数 (PPI)

PPI 技术可计算并表征遥感图像中每个像元的“纯度”,PPI 数值越大,说明对应的像元越“纯”,因为图像像元在 N 维空间中对应的点所形成的“云”的外围包裹着一个最小的单形体,而越纯的像元越靠近这个单形体的顶点,PPI 的计算过程就是寻找其中单形体顶点的过程。在进行 PPI 计算时,要注意参与运算的波段数目、迭代次数和阈值这 3 个参数的设置问题。

3.2.2 二维散点图端元选择

地物反射波谱特性表明,不同地物具有不同的反射波谱特性。也就是说,某一地物总是有区别于其他地物的波谱反射特征,这些特征能将这一地物与其他地物区分开来。相应的,经过 MNF 变换后的图像波谱也能依据不同波段识别不同地物。而且,地物反射波谱特征越明显、越独特,其由特定两个波段组成的散点图也越独立。根据凸面几何理论,经过试验证实:位于散点图中的犄角像元可以作为端元。所以,端元信息主要集中在散点图的拐角处,对于组成散点图的两个波段的选择,应注意选择 MNF 变换后前面的 10 个波段。在前 10 个波段间变换组成散点图的两个波段,最终可将研究区端元提取出来(图 3),并可提取出相应的端元波谱(图 4)。

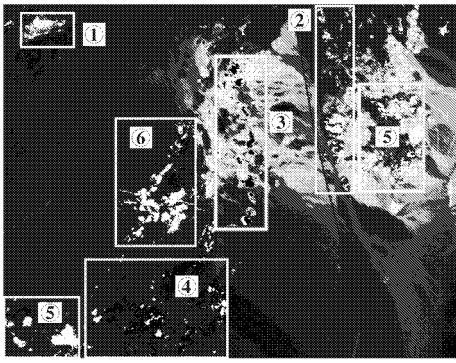


图 3 与散点图对应的图像

Fig. 3 The image corresponding to scatter diagram

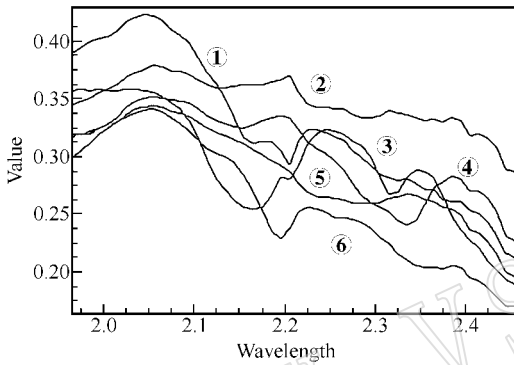


图 4 研究区端元波谱

Fig. 4 The end-member spectrum of the study area

3.2.3 三维散点图端元提取

为了提高样本精度,ENVI 提供 N-D 散点图法来进一步提纯样本。N-D 散点图不仅利用了最新的可视化技术使我们可以真实 N 维样本空间中进行样本分离,而且可以使样本精度大大提高,减少由于肉眼识别造成的误差。本文 N-D 散点图用于最小噪声部分(MNF)的数据,将经过 PPI 后选出的感兴趣区(ROI)进行 N 维散点图分析,使所有波段的散点(由于三维空间和视觉效应限制,一般选用三个波段)在 N 维空间适时旋转,散点的运动使得我们能使用图像的多个波段做分析,通过散点的几何形状,可以定位图像的波谱终端单元(图 5)。

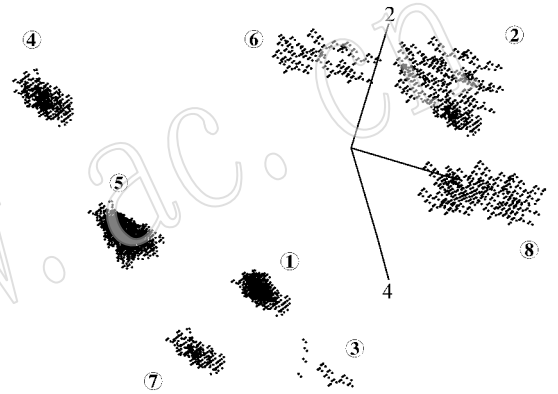


图 5 研究区 N 维散点图选取的端元

Fig. 5 The selected end-member based N-D scatter graph

散点图在提取出与散点图相对应的图像像元后,可以使用收集终端单元技术来生成端元波谱曲线(图 6)。收集终端单元技术是一种从用于波谱处

理技术中的各种来源搜索波谱终端单元的工具。终端单元可以从 ASCII 文件、波谱库、统计文件或 ROI 均值输入,论文中为从 ROI 中输入。从最后成果可

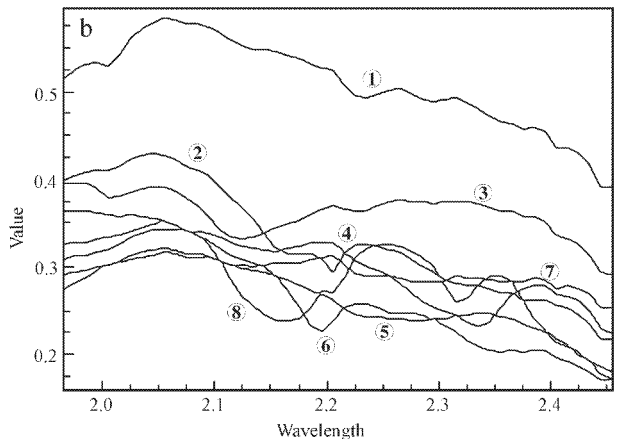
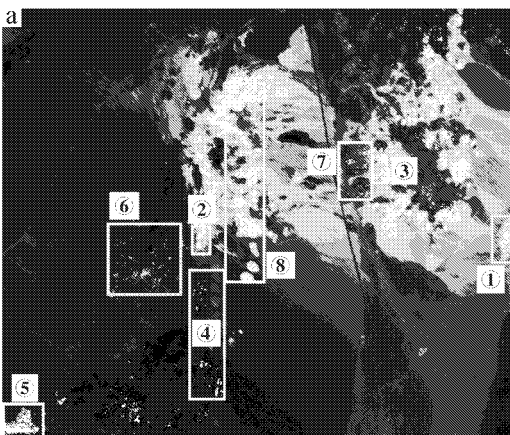


图 6 与散点图对应的图像像元(a)和对应的端元波谱(b)

Fig. 6 The distribution of sample data consistent with N-D scatter graph(a) and the corresponding end-member spectrum(b)

以看出,基于三维散点图提取的端元数目比基于二维散点图提取的端元数据多了两个。这表明,维数越多,地物之间的差异性就越明显,选择的端元种类就越齐全。

4 波谱分析

前面我们可以根据散点图将地物端元波谱提取出来,但并不知道这些波谱代表哪类地物,要想判别出这些波谱的类型,这就需要用到波谱分析技术。ENVI 软件中的波谱分析主要是根据地物的波谱特征识别它们。它运用 ENVI 技术,如二进制编码、波谱角度制图仪以及波谱特征拟合等,对未知地物波谱和已有标准波谱(实测数据或者来自波谱数据库)进行匹配,然后根据匹配得分大小排序。波谱分析的输出是一张输入波谱库中的每类地物的得分排序或赋有权重的得分。最高得分为 1,表示匹配最好,波谱相似度(近似度)的可信度高。类似的地物也许得分相对较高,不相关的地物也有得分,只是较低而已。

在 ENVI 支持下,对三维散点图提取的 8 个端元波谱进行分析,图 7①~⑧为各个地物的波谱特征拟合分析图,左边为特征拟合得分,右边为经过包络线去除后的波谱线,其中虚线为评价分数最高的地物波谱曲线,实线为待测地物的波谱曲线。从这些波谱形态对比上也可以看出其相似程度。

将各个未知波谱匹配的成果与收集到的矿物分布图对比来看,对方解石、石英、明矾石、高岭石、水铍长石的分析是正确的。其中,按照这些匹配得分第一名与第二名之间的差距,可以将匹配效果分为三个层次。第一层次为明矾石,它的分析效果最好,第一名得分与第二名得分之间相差最大,为 0.248,数量级为十分之一,其特征波形匹配也最好,这表明其波谱特征的独特性。第二层次为水铍长石、石英、高岭石,匹配得分第一名和第二名之间的差距分别为 0.047、0.029、0.028,数量级为百分之一,其特征波形匹配也较好。第三层次为方解石,匹配得分第一名与第二名之间差距分别是 0.006,数量级为千分之一。三个匹配错误的为奥长石、铁斧石、方石英,它们匹配得分第一名和第二名之间差距分别为 0.008、0.007、0.004,处于第三层次上,数量级为千分之一。从匹配波形上看,这三个波谱与标准波谱之间差别也较大,但这三个又各自不同。图 7a 分析

结果为奥长石,实际为云母,虽然第一得分为奥长石,但其第二得分为云母,另外,从波谱与标准波谱之间的波形上看,得分第二的云母波谱特征更贴适于待测波谱。从这个角度上来看,匹配分析也是正确的。图 7d 分析结果为方石英,实际应为富钠蒙脱石,其分子式为 $\text{Na}_x(\text{H}_2\text{O})_4\{\text{Al}_2[\text{Al}_x\text{Si}_{4-x}\text{O}_{10}](\text{OH})_2\}$,由于钠含量变化及水和氢氧根离子的存在,使得其波谱变化不定,因此,对 JPL 波谱数据库中的蒙脱石评价分数靠后,为此,论文还选用了 USGS 数据库做了匹配分析,发现匹配得分的第二名为蒙脱石,这说明波谱库建库的标准和数据源对一些地物的波谱有一定的影响。通过以上分析,可以看出,匹配得分第一名与第二名之间差距的数量级为千分之一的,应对波谱匹配正确与否慎重考虑,要从多个方面进行检查验证。

波谱分析建立在波谱匹配技术的应用上。通过以上的波谱匹配分析与应用,发现有以下两个关键因素影响到波谱匹配效果:

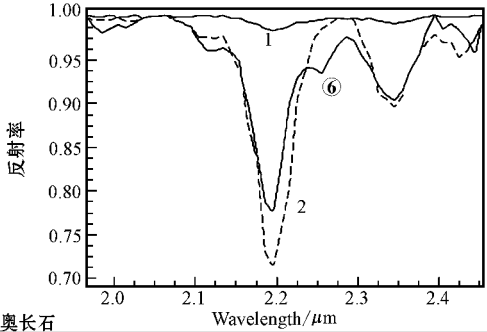
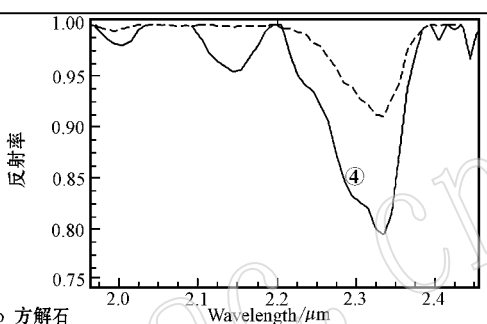
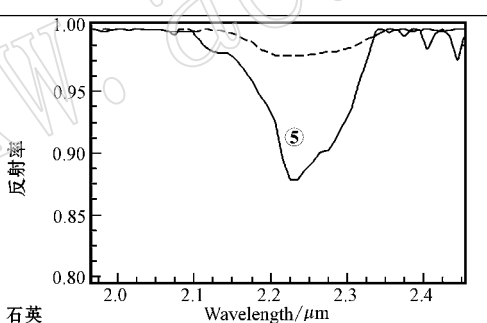
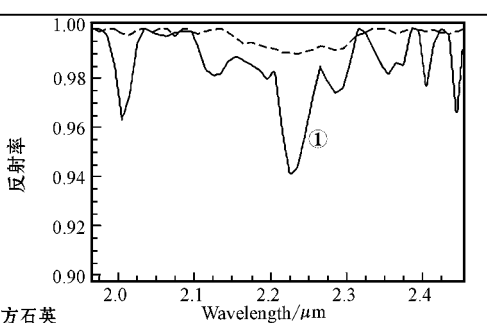
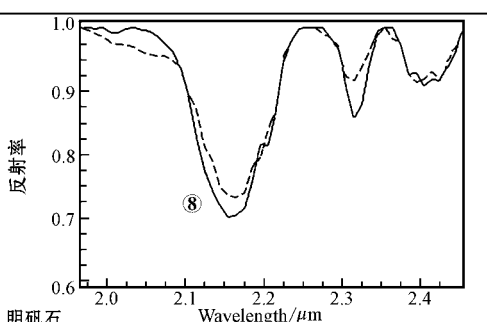
(1) 数据来源: 图像波谱和标准参考波谱。由图像反演地物反射率的正确与否直接影响了匹配效果。因此,前期高光谱遥感图像的预处理至关重要。而标准波谱数据的好坏也会影响匹配效果,不同的波谱库含有的波谱类型不同,有的波谱库中某一地物波谱会有很多相似的波谱,这就大大影响了对该类地物的识别效果,即便是不同波谱库中波谱类型相同,但由于获取方式、处理方式不同,也会导致同一地物波谱有异。最理想的状况是能获取和图像成像同步的波谱数据。

(2) 波长范围: 许多地物波谱在一个波长范围内是类似的,但是在其他范围具有很大差异。包含诊断吸收特征的波长范围将产生最好的结果。因此,匹配时,尽量选择具有特征的波谱范围。如果判定地物波谱有吸收特征,最好用波谱特征拟合。此外,波谱角度制图仪和二进制编码也能得到较好的结果。

5 结论

论文应用 ENVI 软件开展了高光谱遥感岩矿端元信息提取与分析方法研究,主要结论如下:

(1) 高光谱遥感数据波段众多,而二维和三维散点图应用到的波段数目有限,在散点图分析之前,必须通过一定的变换(如 MNF)在不降低信息的情

<p>Unknown: n_D Class #8 [Sea Green] 13 points</p> <p>Library Spectrum Score SFF</p> <p>-----</p> <p>BUDDINGTONITE [0.776]:{0.776}</p> <p>FELDS [0.729]:{0.729}</p> <p>COLEMANITE B-1A [0.716]:{0.716}</p> <p>ALUNITE SO-4A [0.714]:{0.714}</p> <p>GAHNITE O-11A [0.674]:{0.674}</p> <p>SCORODITE A-2A [0.643]:{0.643}</p> <p>PYRITE S-2A [0.643]:{0.643}</p> <p>MAGNETITE O-4A [0.616]:{0.616}</p>	 <p>a 奥长石</p>
<p>Unknown: n_D Class #2 [Green] 661 points</p> <p>Library Spectrum Score SFF</p> <p>-----</p> <p>CALCITE C-3D[0.819]:{0.819}</p> <p>CALCITE C-3E[0.813]:{0.813}</p> <p>CALCITE C-3A[0.808]:{0.808}</p> <p>CHLORITE PYROCHLORI[0.797]:{0.797}</p> <p>STRONTIANITE C-1A[0.795]:{0.795}</p> <p>GLAUCOPHANE IN-3A[0.789]:{0.789}</p> <p>ANTLERINE SO-11A[0.775]:{0.775}</p>	 <p>b 方解石</p>
<p>Unknown: n_D Class #3 [Blue] 785 points</p> <p>Library Spectrum Score SFF</p> <p>-----</p> <p>QUARTZ CHRYSOPRASE T[0.886]:{0.886}</p> <p>CRISTOBALITE TS-7A[0.857]:{0.857}</p> <p>NATROJAROSITE SOO-7C[0.846]:{0.846}</p> <p>LABRADORITE TS-2A[0.844]:{0.844}</p> <p>STIBNITE S-6A[0.839]:{0.839}</p> <p>QUARTZ ROSE TS-1C[0.836]:{0.836}</p> <p>ORTHOCLASE TS-12A[0.828]:{0.828}</p>	 <p>c 石英</p>
<p>Unknown: n_D Class #4 [Yellow] 448 points</p> <p>Library Spectrum Score SFF</p> <p>-----</p> <p>CRISTOBALITE TS-7A[0.882]:{0.882}</p> <p>ZINCITE SYNTHETIC O-[0.878]:{0.878}</p> <p>FORSTERITE SYNTHETI[0.875]:{0.875}</p> <p>LABRADORITE TS-2A[0.874]:{0.874}</p> <p>HEMATITE O-1A[0.872]:{0.872}</p> <p>QUARTZ SMOKY TS-1B[0.872]:{0.872}</p> <p>CHALCOPTRITE S-4A[0.871]:{0.871}</p>	 <p>d 方石英</p>
<p>Unknown: n_D Class #5 [Cyan] 309 points</p> <p>Library Spectrum Score SFF</p> <p>-----</p> <p>ALUNITE SO-4A[0.804]:{0.804}</p> <p>ULEXITE B-3A[0.556]:{0.556}</p> <p>KAOLINITE WELL ORDER[0.425]:{0.425}</p> <p>HOWLITE B-5A[0.409]:{0.409}</p> <p>DICKITE PS-3A[0.396]:{0.396}</p> <p>PYROPHYLLITE PS-7A[0.379]:{0.379}</p> <p>KAOLINITE DISORDERED[0.364]:{0.364}</p>	 <p>e 明矾石</p>

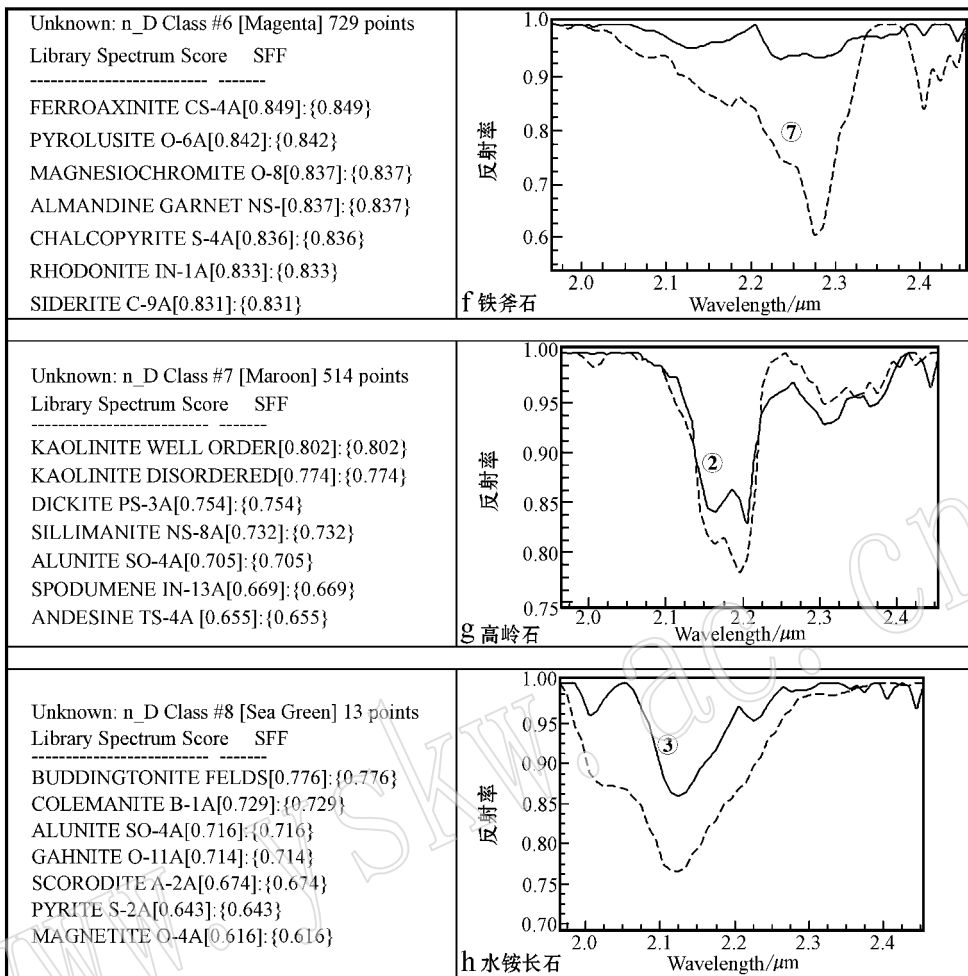


图 7 研究区待测地物波谱与 JPL 数据库波谱特征拟合分析图

Fig. 7 The spectrum character fitting analysis chart of the feature spectrum to be tested with JPL database spectrum

况下减少波段数目。在散点图分析过程中,要多变换采用的波段,确保尽可能不遗漏的区分出不同地物波谱端元。

(2) 对于选择出的岩矿端元类别的确定,要针对岩矿特征波谱区段来选择参与分析的波段区间,特征性越明显,越容易判别。判别过程中,对于匹配分数前两名差距较少的,要根据实际情况多方面分析。岩矿端元波谱的提取与分析工作是基础,其准确程度直接影响着后面高光谱遥感图像上岩矿类别的识别判断。

References

Abrams M J and Ashley R P. 1980. Alteration mapping using multispectral images-Cuprite Mining District, Esme.
 Gan Fuping and Wang Runsheng. 2004. Remote Sensing Information

Extraction Basis and Technique Study of Rock and Mineral [M]. Geological Publishing House, 68-69 (in Chinese).
 Geng Xiurui. 2005. Target Detection and Classification for Hyperspectral Imagery [D]. Beijing: Inst. of Remote Sensing Applications, Chinese Acad. of Sci. (in Chinese).
 Lian Changyun, Yang Kai, Zhang Ge, et al. 2004. Imaging and spectroscopy of portable near infrared mineral mapping application Test Research Report [R]. Beijing: Development Research Center of China Geological Survey Bureau (in Chinese).
 Tang Panke. 2006. Study on Similar Mineral Identification and Uncertainty of Mineral Mapping of Imaging Spectrometry [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese).
 Wang Runsheng, Yang Suming and Yan Baikun. 2007. A review of mineral spectral identification methods and models with imaging spectrometer [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 71(1): 1-9 (in Chinese).
 Yan Shouxun, Zhang Bing, Zhao Yongchao, et al. 2004. Summarizing the technical flow and main approaches for discrimination and map-

- ping of rocks and minerals using hyperspectral remote sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 19(1): 52 ~ 63(in Chinese).
- Yang Kai. 2001. The application of hyperspectral remote sensing in geological survey and mineral exploration[A]. China Geological Survey. Mineral Resources Investigation and Technical Proceedings [C]. Beijing : China Geological Survey, 118 ~ 125(in Chinese).
- Zhang Ge. 2004. Applications study of SWIR mineral mapping at the Tuwu, Qulong and Pulang copper prospects, China[D]. Beijing : China University of Geosciences(in Chinese).
- Zhang Zonggui. 2004. Imaging spectroscopy identification method technology research and influencing factors analysis of rock and mineral [D]. Beijing : China University of Geosciences(in Chinese).
- 附中文参考文献
- 甘甫平,王润生. 2004. 遥感岩矿信息提取基础与技术方法研究 [M]. 地质出版社, 68 ~ 69.
- 耿修瑞. 2005. 高光谱遥感图像目标探测与分类技术研究[D]. 北京 : 中国科学院遥感应用研究所.
- 连长云,杨凯,章革,等. 2004. 成像光谱和便携式近红外光谱矿物填图应用试验研究成果报告[R]. 北京 : 中国地质调查局发展研究中心.
- 唐攀科. 2006. 成像光谱相似矿物识别及其矿物填图的不确定性研究 [D]. 北京 : 中国地质大学.
- 王润生,杨苏明,阎柏琨. 2007. 成像光谱矿物识别方法与识别模型评述 [J]. 国土资源遥感, 7(1): 1 ~ 9.
- 燕守勋,张兵,赵永超,等. 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 [J]. 遥感技术与应用, 19(1): 52 ~ 63.
- 杨凯. 2001. 高光谱遥感在地质调查与矿产勘探上的应用[A]. 中国地质调查局. 矿产资源调查与方法技术论文集 [C]. 北京 : 中国地质调查局, 118 ~ 125.
- 张宗贵. 2004. 成像波谱岩矿识别方法技术研究和影响因素分析 [D]. 北京 : 中国地质大学.
- 章革. 2004. 高光谱短波红外技术在矿区矿物填图中的应用研究——以新疆土屋铜矿、西藏驱龙铜矿和云南普朗铜矿为例 [D]. 北京 : 中国地质大学.

www.yskw.ac.cn