

doi:10.3799/dqkx.2015.110

# 高光谱遥感油气探测技术

汪大明<sup>1</sup>, 肖晨超<sup>2</sup>, 李志忠<sup>1</sup>, 倪国强<sup>3</sup>, 吴小娟<sup>4</sup>, 隋正伟<sup>5</sup>

1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100029
2. 中国地质调查局国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083
3. 北京理工大学光电学院, 北京 100081
4. 武汉大学遥感与信息工程学院, 湖北武汉 430027
5. 中国资源卫星应用中心, 北京 100094

**摘要:** 高光谱遥感探测技术已成为探测油气藏的前沿新技术之一。研究以油气微渗漏地表共生异常理论为基础, 采用基于小波主成份分析(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方法, 对榆林典型稀疏植被地区的进行油气勘探, 提取了与烃异常相关的粘土、碳酸盐、植被异常等相关的专题信息产品, 得出综合异常区图。对照分析已知气井与油气异常区分布, 证明了油气微渗漏信息的提取与识别方法的有效性。

**关键词:** 高光谱遥感; 油气探测; 小波 PCA; 端元提取; 光谱库; 植被指数; 遥感; 决策树分类。

中图分类号: P627

文章编号: 1000-2383(2015)08-1301-09

收稿日期: 2015-09-15

## Hyperspectral Remote Sensing Technology in Oil and Gas Exploration

Wang Daming<sup>1</sup>, Xiao Chenchao<sup>2</sup>, Li Zhizhong<sup>1</sup>, Ni Guoqiang<sup>3</sup>, Wu Xiaojuan<sup>4</sup>, Sui Zhengwei<sup>5</sup>

1. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100029, China
2. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China
3. School of Opto-electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
4. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430027, China
5. China Centre for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China

**Abstract:** Hyperspectral remote sensing technology is new in oil and gas exploration. Based on the theory of abnormal surface symbiosis with oil and gas microseepage, four typical classifications, maximum likelihood classification in the wavelet-based principal component analysis, endmember extraction, typical alteration classification with spectral libraries and decision tree classification based on vegetation indices are chosen to carry a case study of Hyperion images in Yulin, to obtain the related thematic maps such as clay, carbonate, vegetation and determine six comprehensive anomalous areas. A comprehensive analysis of the distribution of existing gas well and oil-gas anomalous areas show that the information extraction method of oil and gas microseepage is valid.

**Key words:** hyperspectral remote sensing; oil and gas exploration; wavelet-based PCA; endmember extraction; spectral library; vegetation index; remote sensing; decision tree classification.

## 0 引言

随着科技高速发展, 早期仅靠地面油气显示探测油气藏的传统方式方法正逐步被地震、油气化探、

遥感探测等方法所代替(Schaepman *et al.*, 2009; 杨燕杰和赵英俊, 2011; van der Meer, 2012; Tong *et al.*, 2014)。通过国内外众多学者多年研究, 已经证实油气微渗漏能够改变地表矿物, 且与烃类蚀变

**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:** 汪大明(1982-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事遥感卫星、通讯导航等技术在矿产和能源领域应用研究。E-mail: daming82@qq.com

**引用格式:** 汪大明, 肖晨超, 李志忠, 等, 2015. 高光谱遥感油气探测技术. 地球科学——中国地质大学学报, 40(8): 1301-1309.

有关的土壤矿物组成在空间分布上具有一致性,因此可通过影像信息提取技术对高光谱数据进行蚀变矿物聚集位置的填绘,以识别油气的宏观或微渗漏,进一步圈定油气勘探靶区(Everett *et al.*, 2002; Noomen *et al.*, 2003; 王永, 2010; 李倩倩等, 2013)。高光谱遥感传感器的更新换代和信息处理方法的改进,为油气探测提供了更加高效便捷、经济安全的技术渠道(Cloutis, 1996; Goetz, 2009)。

高光谱遥感影像处理技术日益成熟,国内外已取得许多成功应用实例。Everett *et al.* (2002) 在美国加利福尼亚南部圣巴巴拉地区成功利用高光谱数据处理技术确定了油气渗漏造成的植被异常区范围。Khan and Jacobson (2008) 利用监督分类对怀俄明州 Hyperion 数据进行处理,验证了岩石与土壤中的矿物蚀变和油田的烃微渗漏有关,并解析出烃微渗漏区。倪国强等(2007)采用基于小波主成分分析法提取了中国某地区烃类物质微渗漏蚀变特征,运用聚类 K-均值法/最大似然法混合训练的方式,完成了天然气蚀变异常区的分类。李倩倩等(2013)对油气微渗漏造成的地表蚀变矿物碳酸盐含量与其光谱吸收峰深度、宽度等特征参数进行了相关分析,建立并评价了测定碳酸盐含量的方法,提出了利用碳酸盐含量表征油气微渗漏程度的新方法。然而高光谱遥感探测油气技术还存在许多技术难点,如高光谱遥感影像数据的预处理效果将直接影响到后续研究;岩石矿物的特征谱带与烃类物质特征吸收带重合,造成信息干扰;针对特定研究区石油地质状况,需要寻找适用的高光谱遥感信息提取技术方法。

本文利用我国西部榆林油气区 Hyperion 数据,分别采用基于小波主成份分析(principal component analysis, PCA)最大似然分类、基于端元提取分类、基于光谱库典型蚀变光谱分类和基于植被指数决策树分类 4 种方法进行试验区油气蚀变信息提取,并结合地面光谱测量和地面地质调查,开展高光谱遥感油气勘探方法的探索性研究,建立示范区域的蚀变矿物的光谱特征库和识别模型,实现高光谱卫星图像的预处理和图像分析,为油气勘探靶区的圈定和进一步的油气勘探工作部署提供依据。

## 1 研究区概况及数据

本文研究区选取在油气藏丰富的榆林油气田区。榆林分属鄂尔多斯盆地,区内盆地断层多、具有良好的富集条件,分割性较强。具有一个隆起,5 个

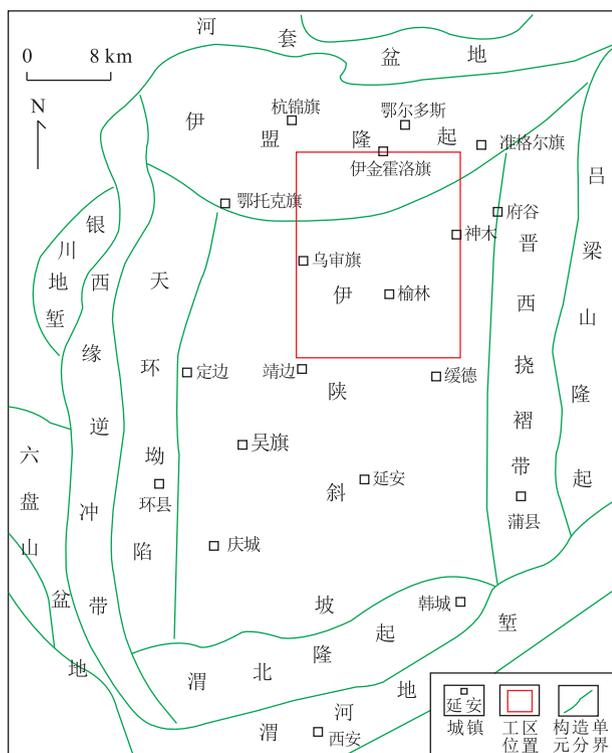


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location of study area

坳陷,细分成 42 个凹陷,其凹陷发育早,继承性好,沉积环境比较稳定。地层发育,沉陷幅度较大,成熟状况好,有地质沉积的基础。境内石油天然气储量丰富,是陕甘宁油气田和鄂尔多斯气田的主储区。该地区石油预测储量 6 亿 t,探明储量 3 亿 t,含油面积 2 300 km<sup>2</sup>;天然气累计探明储量达 1 632.81 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,天然气控制储量 629.86 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,预测地质储量 2 032.68 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,三级储量达到 4 295.35 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。

研究数据采用 EO-1 卫星搭载的 Hyperion 高光谱成像仪所摄的榆林地区高光谱数据。去除坏线及噪声严重的条带,选取效果较好的 180 个谱段作为研究对象,图像域尺寸为 256 × 1 100 像素。谱段中心波长从 427 ~ 2 395 nm。

## 2 高光谱遥感油气探测技术方法

### 2.1 高光谱遥感油气探测工作思路

笔者通过研究,首先掌握研究区自然地理、地质、构造背景、主要生油气层系、主要油气藏类型、勘探资源潜力等信息;在此基础上进行野外工作,完成地面光谱测量、样品采集以及地质调查工作;开展基

于野外实测光谱和高光谱遥感图像的预处理及分析研究,建立典型稀疏植被地区油气微渗漏特征光谱模型和高光谱图像分类系统;最后对野外实测光谱和高光谱遥感数据的分析结果进行综合分析,最终圈定油气勘探靶区。

## 2.2 高光谱数据预处理

油气引发的地表共生效应属于微弱信息,油气异常信息的提取与分类对图像源空间域、光谱域信噪比均提出了较高的要求。高光谱图像的信噪比、空间分辨率均较低,光谱混叠严重,数据源的质量很大程度上影响了高光谱遥感油气勘探结果的精度,所以应采取积极措施,尽量消除噪声等各种因素对图像数据源质量的影响。笔者在充分考虑高光谱图像空间域、光谱域噪声特性的基础上,采用基于小波分解及最小二乘法的高光谱图像空间-光谱去噪方法和基于全变差的高光谱图像空间-光谱混合去噪方法进行数据预处理,在保留原始图像空间和光谱细节信息的基础上,同时提高了图像空间域和光谱域信噪比。

(1)基于小波分解和最小二乘法的高光谱图像噪声去除方法。噪声去除采取先空间维、再光谱维的顺序进行,在对传统的小波阈值方法进行改进的基础上,首先对各波段图像采用小波阈值方法进行单波段噪声去除;随后,光谱维的去噪采用基于最小二乘的 Savitzky-Golay 滤波方法,通过适当选择平滑窗宽度,在平滑光谱曲线的同时,有效保存了光谱吸收特征。

(2)基于全变差的高光谱图像空间-光谱混合去噪方法。与普通的二维图像不同,高光谱数据是具有“图谱合一”特点的数据立方体。因此,将 TV 算法应用于高光谱图像的去噪,首先要将问题从二维空间扩展到三维空间,并在三维空间中提出新的目标函数,并对其进行推导求解。推导过程为:

①针对高光谱图像三维数据立方体噪声特性提出新的目标函数;②将目标函数离散化;③基于优化-最小化(MM)算法寻找目标函数的优化函数;④通过迭代将目标函数最小化。

## 2.3 高光谱遥感油气异常信息提取方法

针对无植被覆盖区,将碳酸盐及粘土的异常富集作为主要指示标志,分别采用基于小波 PCA 的分类和基于端元提取的分类对油气微渗漏引起的矿物蚀变异常信息进行提取,此外基于典型地物波谱服务软件提供的光谱数据,采用光谱匹配方法进行油气蚀变信息提取。针对有植被覆盖区,将植被红边位

置异常作为主要指示标志,设计了基于最大似然法及植被指数的混合决策树,通过对决策树各节点判决准则和阈值的选择,实现植被异常提取(甘甫平等,2003;倪国强等,2007;潘琛等,2009;王晓玲等,2010)。

(1)基于小波 PCA 最大似然分类。小波 PCA 降维方法采用 K-Mean 及最大似然法建立监督/非监督混合训练分类系统,实现油气微渗漏地表共生异常的识别。此分类系统是在地物粗分类结果的基础上建立的。分类系统中以粗分→细分→精分为基本思想流程,利用基于小波 PCA 的特征提取算法完成特征图像的提取,采用 K-Mean 及最大似然法进行非监督/监督混合训练,最终完成高光谱图像的分类。

(2)基于端元提取分类。基于端元提取的高光谱图像分类方法,首先通过最小噪声分离变换降低原始数据的维数;随后通过数学方法(纯净像元指数)交互式地从图像中提取纯净端元作为矿物端元;最后运用光谱角制图和混合调制匹配滤波等方法进行矿物填图及异常识别。

(3)基于光谱库典型蚀变光谱分类。典型地物波谱服务软件里收录了国内学者在我国西部戈壁滩进行油气探测研究时获取的典型气田区光谱信息,可以将其作为参考光谱,与实验数据进行光谱角制图,进行研究区高光谱数据的油气蚀变信息匹配。

(4)基于植被指数决策树分类。为了满足典型稀疏植被地区基于高光谱遥感影像的油气信息大面积普查的需求,研究基于对图像中的植被覆盖区域的分析,设计了基于最大似然法及植被指数的多层混合决策树分类流程,用于提取植被叶绿素和叶面积指数等生化参量的异常,并通过对植被异常提取结果与土壤及岩石蚀变异常分类结果的综合分析,考量二者的匹配程度,验证该方法的有效性,最终确定一套有效的高光谱图像植被油气信息提取方法流程,对基于植被光谱异常的油气信息提取进行探索性研究。

## 3 高光谱遥感油气异常信息提取结果分析

针对无植被覆盖区,将碳酸盐及粘土的异常富集作为主要指示标志,分别采用基于小波 PCA 的分类系统和基于端元提取的分类系统对油气微渗漏引起的矿物蚀变异常信息进行提取,两种方法所得的

结果具有较高的匹配度.此外基于典型地物波谱服务软件提供的光谱数据,采用光谱匹配方法进行试验区的油气蚀变信息提取,验证了光谱库在不同地貌下的有效性.针对有植被覆盖区,将植被红边位置异常作为主要指示标志,设计了基于最大似然法及植被指数的混合决策树,通过对决策树各节点判决准则和阈值的选择,实现了试验区植被异常提取.通过比较和分析植被异常分类结果与基于蚀变矿物的油气异常信息分类结果可知:利用植被进行辅助油气微渗漏异常信息的实验是成功的,但在利用基于植被指数的决策树进行分类时需通过大量实验,选择合适的植被指数和阈值.

本文采用上述方法对榆林地区 Hyperion 数据提取出 4 种相关的专题信息产品,最后通过分析得出综合异常区产品.

### 3.1 基于小波 PCA 的最大似然分类

研究区主要蚀变矿物和烃类物质的诊断性吸收峰集中在  $2.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ ,包括碳酸盐矿物 ( $2.3 \sim 2.35 \mu\text{m}$ )、粘土矿物 ( $2.2 \mu\text{m}$  附近)和烃类物质 ( $2.3 \sim 2.35 \mu\text{m}$ ).在进行分类之前,首先对原始高光谱数据进行特征选择,选定 B193~B222 共 30 个波段图像为研究对象,其对应的波段范围为  $2.082 \sim 2.375 \mu\text{m}$ .

采用小波 PCA 系统进行细分的分类如图 2a 所示,不同颜色代表不同地物.各类地物均值和标准差统计曲线见图 2c 和 2d.观察均值曲线,可看出各类地物均值曲线依据绝对反射率高低的不同依次排列.各条均值曲线之间均存在差异,说明在分类过程中,绝对反射率及光谱特征都参与了分类.图 2d 中各类地物的标准差曲线在一定程度上表征了各类地物的类内距离,通过对标准差曲线的分析,可了解每一类中各点的特征相似度.

比较分析图 2c 中的各条均值曲线可看出,若不考虑绝对反射率的差异,黄色和桔色两类曲线相似度高,且均值曲线中存在与碳酸盐矿物、粘土矿物相对应的吸收峰.因此,将其作为后续“精分”研究的重点.“精分”分类结果见图 2b,共生异常点密集分布于毛乌素沙漠地区,异常去呈现团块状聚集;同时,在研究区北部的草滩地区及南部的黄土塬地区也存在散点状的异常分布.

### 3.2 基于端元提取分类

由于混合像元大量存在于高光谱遥感图像中,基于 K-Mean 粗分结果提取的各类光谱曲线并不一定代表纯净地物,因此,首先采用纯像元指数(pixel

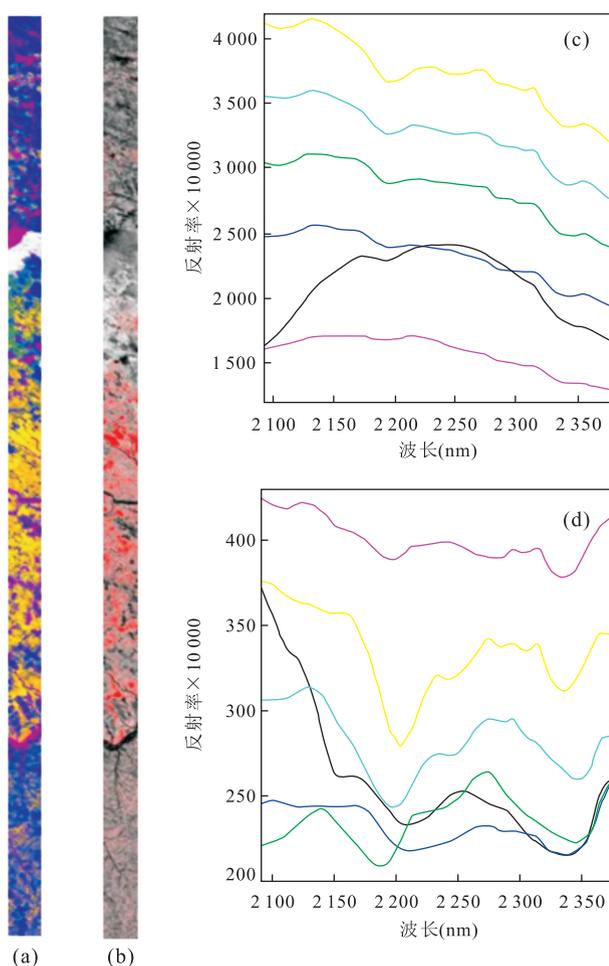


图 2 基于小波 PCA 分类填图

Fig.2 Mineral mapping by wavelet-based principal components analysis classifications

a.细分结果;b.精分结果;c.各类均值曲线;d.各类标准差曲线

purity index, PPI)端元提取方法从图像中提取相对纯净的地物光谱(图 3).

选取短波红外(short-wave infrared, SWIR)波段作为特征波段,从图像中提取碳酸盐和粘土矿物的信息,进行 MNF 降维及 PPI 端元提取(图 4).油气蚀变信息属于微弱信息,为保证基于矿物端元的填图精度,必须保证矿物端元的正确提取与识别.本研究对美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)标准光谱库按特征波段范围进行重采样,然后采用波谱特征拟合法将未知端元波谱与波谱库中的标准波谱进行匹配,将拟合后的相似度排序结果与实验区地质调查资料相结合,最终确定端元波谱所代表的矿物类型(图 5).

为进一步确认粘土矿物及碳酸盐的富集情况,用光谱角提取伊利石、蒙脱石和方解石的信息.参考端元光谱从 USGS 中选取.光谱角匹配(spectral an-

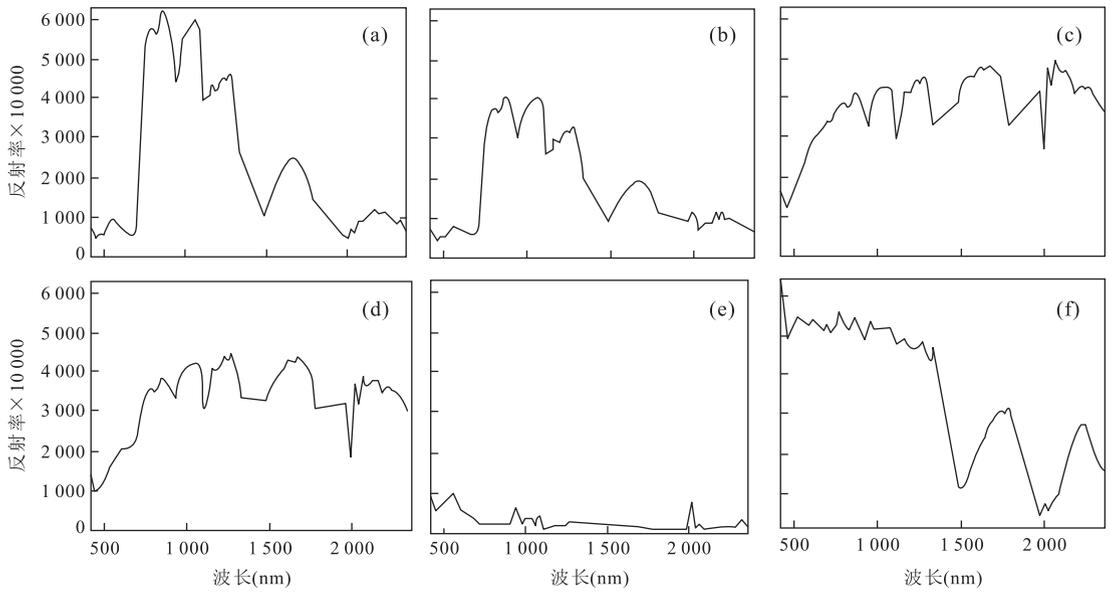


图 3 6 种图像端元

Fig.3 Six end members

a. 植被 1 端元; b. 植被 2 端元; c. 沙地端元; d. 耕地边缘端元; e. 水体端元; f. 云端元

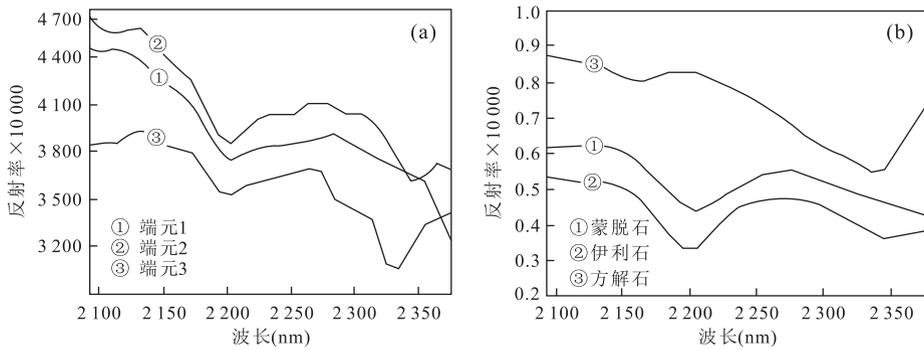


图 4 图像端元光谱(a)与 USGS 标准光谱(b)

Fig.4 End members spectrum (a) and standard spectrum in USGS (b)

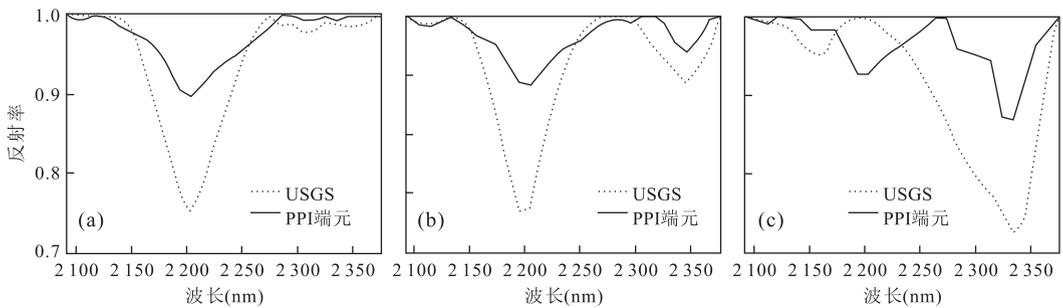


图 5 包络线去除后的图像端元光谱与 USGS 标准光谱

Fig.5 End members spectrum and standard spectrum in USGS after the continuum-removal

a. 端元 1 与蒙脱石; b. 端元 2 与伊利石; c. 端元 3 与方解石

gle matching, SAM)填图结果中(图 6),蒙脱石、伊利石的富集区域比较集中,呈现块状分布,而方解石在图像覆盖区域中的富集区则呈现斑点状,主要集

中在图像的中部和下部.

### 3.3 基于光谱库典型蚀变光谱分类

柴达木盆地的油气勘探研究表明,气田区光谱



图 6 基于端元提取矿物填图

Fig.6 Mineral mapping by endmember extraction classifications

a.蒙脱石;b.伊利石;c.方解石

曲线在 2.20 mm 和 2.33 mm 附近呈现明显的复杂的双吸收峰,吸收峰半宽度达到 40 nm 以上;而且在 2.3~2.4 mm 光谱曲线下降趋势趋缓,甚至微向

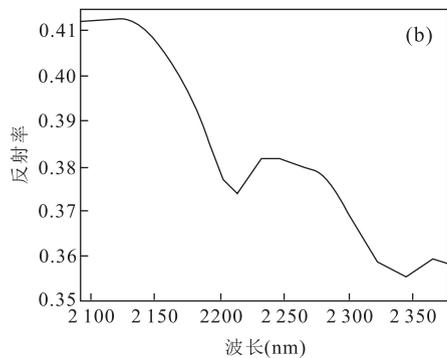
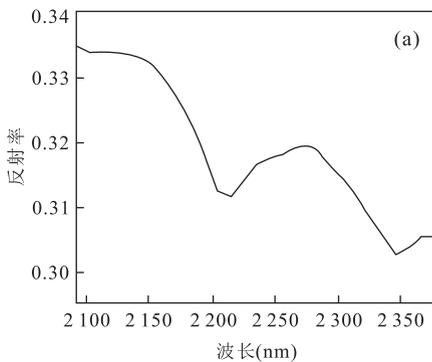


图 7 典型气田区光谱

Fig.7 Typical gas field spectrum

a.气田区光谱 1;b.气田区光谱 2

上倾斜(烃类物质富集的标志),整体曲线呈现台阶状.其典型的气田区光谱如图 7 所示.采用光谱角制图法衡量图像中各点光谱与蚀变矿物光谱数据集中光谱曲线的相似程度.

通过光谱角制图法,两条典型气田区矿物蚀变光谱的 SAM 结果较为相似,均在图像上部和中部有团块状聚集,在图像下部的黄土塬区域中也呈现小规模散点状聚集(图 8).其中,图像中部沙漠的异常点聚集情况与图像端元分类法得到的结果有极高的匹配度,显示了此蚀变矿物光谱库的有效性.

### 3.4 基于植被指数决策树分类

Hyperion 航天高光谱图像的光谱分辨率为 10 nm,因此,采用 Hyperion 图像计算植被指数时,仅可近似取得各植被指数所需波长处的反射率数值,其计算结果的精度优于宽波段遥感图像,但与地面光谱仪 1~2 nm 的光谱采样间隔相比稍差.分类树研究结果如图 9 所示.其中,图 9a 为进行基于最大似然分类的图像细分后结果,可能具有植被覆盖的区域;图 9b 为第二层 NDVI 的计算结果,图 9b 中绿色圈出的区域为具有植被覆盖的区域;图 9c 为决策树分类结果,红色表示异常区.

为进一步评价分类树识别方法的有效性,将植被异常分类结果与蚀变矿物异常提取结果相结合,分析二者在异常分布区域上的匹配程度.根据每个空间子集中都应包含一定面积的植被覆盖区和两子集的蚀变矿物异常程度应尽量有所差别,通过该标准选取两个空间子集,进行匹配度分析.综合分析结果如图 10 所示.其中图 10a 和 10d 分别所选择空间子集的真彩色图像,两区域均为荒漠地貌,且具有一定面积比例的植被覆盖,符合选择标准.图 10b 和 10e 为蚀变矿物异常与植被异常的空间叠加结果,

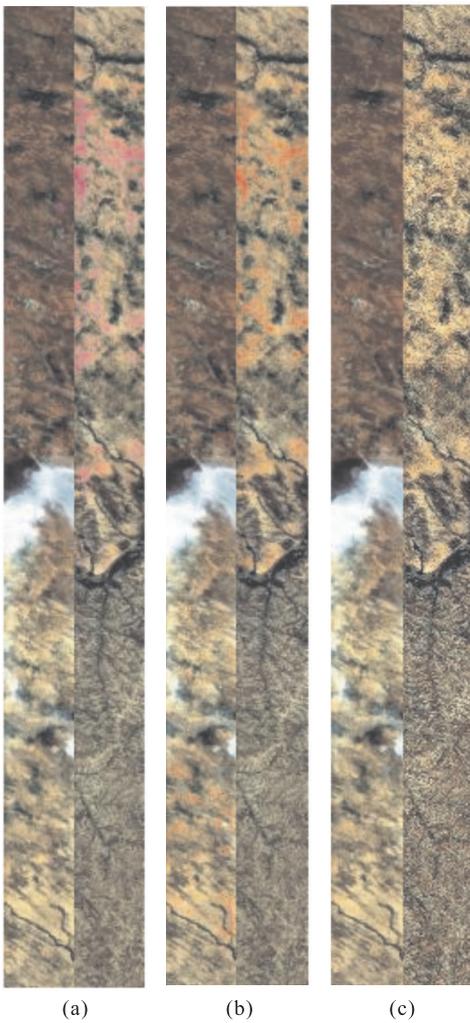


图 8 基于光谱库典型蚀变光谱分类填图

Fig.8 Mineral mapping by typical alteration classification with spectral libraries

a.蒙脱石;b.伊利石;c.方解石

红色的点表示该像素点在蚀变矿物分类中表现为某种程度的异常,黄色的点则表示该像素点为植被分类中的异常点.分析图 10 可以得出以下结论:(1)选区 1 中包含的蚀变矿物异常点数量少且分散,不存在明显聚集的区域,而选区 2 中存在明显的团块状蚀变矿物异常聚集区;(2)选区 1 内仅存在极少数得植被异常点,而选区 2 中的大部分植被覆盖区都表现出了某种程度的异常.将分类结果叠加在原始图像中,明确各异常点的空间分布,得到图 10c 和 10f.从图 10c 和 10f 中可以看到,选区 2 中存在大量的蚀变矿物及植被异常点,且在空间分布上具有较高的匹配程度.

通过以上分析可知,采用分类树方法对试验区进行植被生化参量异常分析,得到的异常点分类结

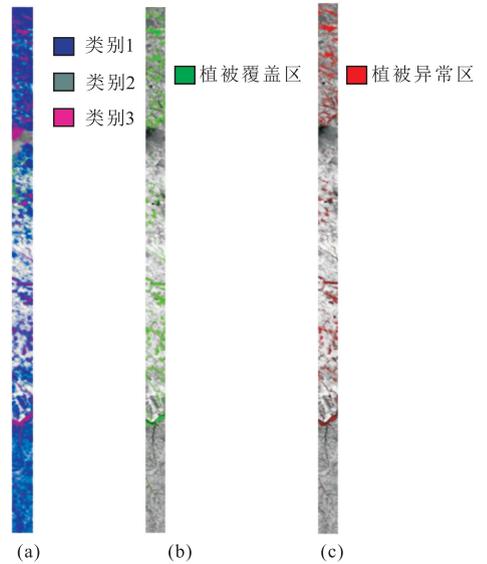


图 9 研究区植被分类

Fig.9 Alteration mineral vegetation classification a.ML 植被区域;b.NDVI 植被区域;c.决策树植被异常区

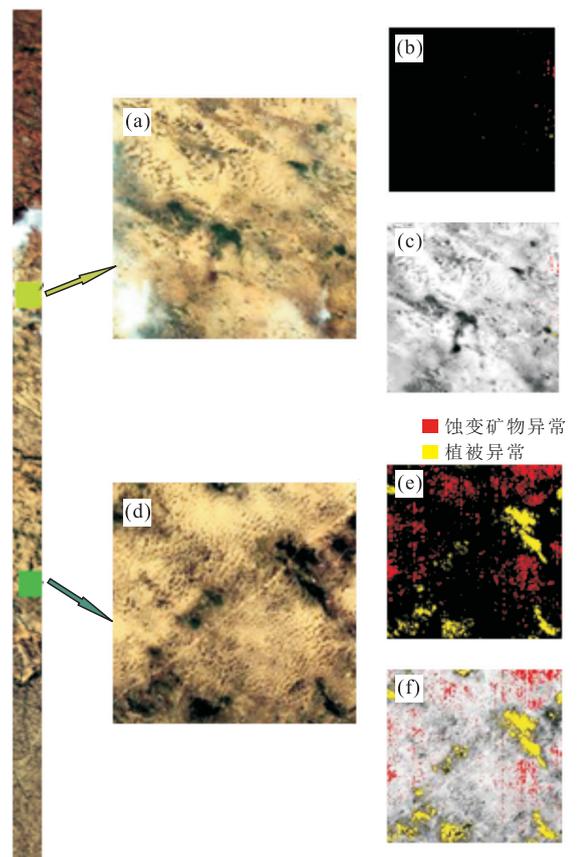


图 10 蚀变矿物异常与植被异常综合分析

Fig.10 Distribution of vegetation abnormal area and exposed surface abnormal area

a.选区 1 真彩色图像;b.选区 1 分类结果;c.选区 1 异常点分类;d.选区 2 真彩色图像;e.选区 2 分类结果;f.选区 2 异常点分类

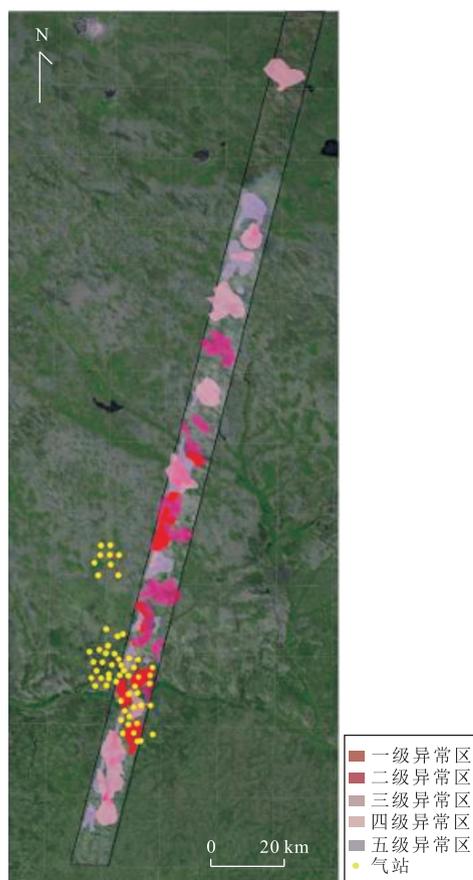


图 11 高光谱数据油气异常区的综合圈定

Fig.11 Comprehensive oil and gas anomaly area

果与蚀变矿物异常分类结果在空间分布上具有较高的一致性,在一定程度上说明了其有效性,因此可以将其作为典型稀疏植被地区高光谱遥感油气勘探的一种手段。

### 3.5 结果分析

综合分析 Hyperion 影像上的植被异常区和裸露地表异常区的分布,按照异常区的圈定准则,可得航天高光谱数据的油气异常区的圈定如图 11 所示。从油气异常区的圈定结果来看,笔者提出的针对稀疏植被地区 Hyperion 遥感影像上油气微渗漏信息的提取与识别方法具有较好的有效性。

采用本文提出的各种分类方法,对此区域进行分类处理所得的航天遥感图像的综合异常区,在此处共分出 6 级异常区。已知的落入该景航天遥感图像区域的 26 个气井有 12 个落入所圈的一级异常区内,1 个落入所圈定的二级异常区内,3 个分别落入 3、4 级异常区,7 个落入 5 级异常区,3 个虽未被圈进异常区,但也是在所圈定的异常区的边缘地带。

## 4 结论与展望

基于油气微渗漏地表共生异常理论,笔者采用基于小波 PCA 最大似然分类、基于端元提取分类、基于光谱库典型蚀变光谱分类和基于植被指数决策树分类 4 种方法对榆林典型稀疏植被地区的 Hyperion 高光谱图像油气勘探方法进行了探索性研究,结论如下。

(1)针对无植被覆盖区,将碳酸盐及粘土的异常富集作为主要指示标志,分别采用基于小波 PCA 的分类系统、基于端元提取的分类系统对油气微渗漏引起的矿物蚀变异常信息进行提取,两种方法所得的结果具有较高的匹配度。

(2)对取自柴达木盆地三湖地区某气田区的光谱样本进行收集,建立了蚀变矿物光谱库,并采用光谱匹配方法将此光谱库用于本文试验区的油气蚀变信息提取,验证了该光谱库在不同地貌下的有效性。

(3)针对有植被覆盖区,将植被红边位置异常作为主要指示标志,设计了基于最大似然法及植被指数的混合决策树,通过对决策树各节点判决准则和阈值的选择,实现了试验区植被异常提取。通过比较、分析植被异常分类结果与基于蚀变矿物的油气异常信息分类结果可知:利用植被进行辅助油气微渗漏异常信息的实验是成功的,但在利用基于植被指数的决策树进行分类时需通过大量实验,选择合适的植被指数和阈值。

通过综合分析 Hyperion 影像上的植被异常区和裸露地表异常区的分布,从油气异常区的圈定结果可以看出,提出的针对稀疏植被地区 Hyperion 遥感影像上油气微渗漏信息的提取与识别方法具有较好的有效性。然而也存在少许不足,如高光谱图像数据海量和非流程化的处理导致人力及时间成倍增长,油气微渗漏的地表蚀变信息在光谱上的表现比较微弱,需有针对性地采用预处理、特征提取、分类算法,以提高数据源质量,实现地物宏观、局部吸收特性的精细提取,进而获得高精度的分类结果。

## References

- Cloutis, E. A., 1996. Hyperspectral Geological Remote Sensing: Evaluation of Analytical Techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 17 (12): 2215 - 2242. doi: 10.1080/01431169608948770
- Everett, J.R., Staskowski, R.J., Jengo, C., 2002. Remote Sensing and GIS Enable Future Exploration Success. *World*

- Oil*, 223(11):59—65.
- 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
- Goetz, A. F. H., 2009. Three Decades of Hyperspectral Remote Sensing of the Earth: A Personal View. *Remote Sensing of Environment*, 113(1): 5—16. doi:10.1016/j.rse.2007.12.014
- Khan, S. D., Jacobson, S., 2008. Remote Sensing and Geochemistry for Detecting Hydrocarbon Microseepage. *Geological Society of America Bulletin*, 120(1—2): 96—105. doi:10.1130/0016—7606(2008)120[96:rsagfd]2.0.co;2
- 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
- Ni, G. Q., Shen, Y. T., Xu, D. Q., 2007. Wavelet-Based Principal Components Analysis Feature Extraction Method for Hyperspectral Images. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 27(7): 621—624 (in Chinese with English abstract). doi:10.3969/j.issn.1001—0645.2007.07.014
- Noomen, M. F., Skidmore, A. K., van der Meer, F., 2003. Detecting the Influence of Gas Seepage on Vegetation, Using Hyperspectral Remote Sensing. *Proceedings of 3rd EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy*, Herrsching, 252—256.
- 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
- 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., Harald, M. A., Hecker, C. A., 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).
- Yang, Y. J., Zhao, Y. J., 2011. The Hyperspectral Research Status at Home and Abroad in the Oil Exploration. *Science Technology and Engineering*, 11(6): 1290—1299 (in Chinese with English abstract).

#### 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.
- 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.
- 倪国强, 沈渊婷, 徐大琦, 2007. 一种基于小波 PCA 的高光谱图像特征提取新方法. *北京理工大学学报*, 27(7): 621—624.
- 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.
- 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.
- 杨燕杰, 赵英俊, 2011. 高光谱在油气勘探中的国内外研究现状. *科学技术与工程*, 11(6): 1290—1299.