

doi:10.3799/dqkx.2015.120

# 协同利用高光谱与多光谱遥感技术提取油气异常信息

刘佳<sup>1</sup>,汪大明<sup>2\*</sup>,刘德长<sup>3</sup>,郑鸿瑞<sup>4</sup>,李志忠<sup>2</sup>,隋正伟<sup>5</sup>

1.中国科学院遥感与数字地球研究所,北京 100101

2.中国地质调查局油气资源调查中心,北京 100029

3.核工业北京地质研究院,北京 100029

4.中国科学院上海技术物理研究所启东光电遥感中心,江苏启东 226236

5.中国资源卫星应用中心,北京 100094

**摘要:** 为了在缺少地面实测数据的情况下对遥感油气异常结果进行验证,利用多光谱遥感数据和高光谱遥感数据对同一地区进行油气异常解译,针对同一位置使用两种不同数据的异常结果进行相互验证.并提出了利用高光谱异常提取结果作为先验知识的多光谱异常主分量阈值确定方法,将该方法与传统主分量阈值方法提取的异常结果,分别与高光谱提取出的粘土异常区域结果进行重叠率计算,发现该方法提取出的异常区与高光谱提取的结果重叠率达 98.808%,高于传统主分量阈值方法的 98.198%.结果表明利用该方法确定的阈值划分出的异常区具有较高的精度.

**关键词:** 高光谱;多光谱;遥感;油气异常信息提取;异常阈值;异常验证.

**中图分类号:** P627

**文章编号:** 1000-2383(2015)08-1371-10

**收稿日期:** 2015-04-30

## Oil and Gas Anomaly Extraction by Combining Hyperspectral Image Data with Multispectral Image Data

Liu Jia<sup>1</sup>, Wang Daming<sup>2\*</sup>, Liu Dechang<sup>3</sup>, Zheng Hongrui<sup>4</sup>, Li Zhizhong<sup>2</sup>, Sui Zhengwei<sup>5</sup>

1. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

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

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

4. Qidong Center of Photoelectricity and Remote Sensing, Chinese Academy of Sciences, Qidong 226236, China

5. China Centre for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China

**Abstract:** In order to verify the anomalies without any field survey data in remote sensing image caused by hydrocarbon micro seepage phenomenon, the multispectral image and hyperspectral image anomaly interpretation results are used to verify each other in this paper. A new method to confirm the multispectral principal component aberrant threshold value by counting the multispectral pixel value located in the hyperspectral anomaly area is proposed. The overlap rate between the multispectral image anomalies divided by the new method and the hyperspectral image anomaly area is computed at 98.808%, higher than the traditional principal component threshold technology.

**Key words:** hyperspectral image; multispectral image; remote sensing; oil and gas anomaly extraction; anomaly threshold; anomaly verification.

遥感找油的发展是随着遥感技术的发展而发展的.随着 20 世纪 70 年代初美国地球资源卫星的成

功发射,通过从宏观角度根据卫星影像上地物的几何形态和纹理色调等要素分析地表的线——环形构

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

**作者简介:** 刘佳(1982-),女,助理研究员,主要研究方向为高光谱遥感分类与识别及遥感环境应用.E-mail: liujia@radi.ac.cn

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

**引用格式:** 刘佳,汪大明,刘德长,等.2015.协同利用高光谱与多光谱遥感技术提取油气异常信息.地球科学——中国地质大学学报,40(8): 1371-1380.



碎屑岩及中、新生界陆相磨拉石建造。工作区地层属于南准噶尔—北天山地区地层分区的吉木萨尔地层小区,主要出露中上二叠统至新生界,缺失古生界泥盆系、石炭系。工作区及周边的主要褶皱构造包括:沙帐凸起内的褶皱有沙丘河背斜、芦苇沟向斜、火烧山背斜、西大沟向斜和帐篷沟背斜。大井凹陷内褶皱构造不发育,仅有一条长达 92 km 的奥塔乌克日什向斜,其西部轴向为 EW 向,继续向东延伸轴向变为了 NEE 向。准噶尔盆地东部构造单元划分如图 1 所示。

## 2 数据及预处理

本次研究采用两景 SASI(shortwave infrared airborne spectrographic imager)航空高光谱数据以及一景 ASTER(advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer)航天多光谱数据对油气异常信息进行提取。SASI 影像覆盖范围为  $88^{\circ}44' \sim 88^{\circ}58' E$ ,  $43^{\circ}57' \sim 43^{\circ}58' N$ , 面积为  $44 \text{ km}^2$ ; ASTER 影像覆盖范围为  $88^{\circ}36' \sim 89^{\circ}33' E$ ,  $43^{\circ}49' \sim 44^{\circ}28' N$ , 面积为  $3900 \text{ km}^2$ 。SASI 航空高光谱数据凭借其超高的光谱分辨率、空间分辨率以及在短波红外区间超高的信噪比为精确识别油气微渗漏造成蚀变异常信息创造了良好的条件; ASTER 航天多光谱数据在短波红外区间拥有 6 个波段(叶发旺等, 2008), 虽然光谱精细程度无法与高光谱数据媲美, 但是其波段设置也能很好的满足油气资源

勘探的需求, 且其图幅面积大大超过 SASI, 获取成本更低。

### 2.1 SASI 航空高光谱数据及其预处理

SASI 数据由加拿大 ITRES 公司研制生产的 CASI(compact airborne spectrographic imager)/SASI 航空高光谱测量系统获取得到, 该系统采用推扫式成像方式, 在可见光—短波红外波段成像(叶发旺等, 2011)。其中 CASI 光谱区间主要位于可见光至近红外, 光谱范围为  $380 \sim 1050 \text{ nm}$ , 空间分辨率为  $1.5 \text{ m}$ , 波段数为 144; SASI 光谱区间主要位于近红外至短波红外, 光谱范围为  $950 \sim 2450 \text{ nm}$ , 空间分辨率为  $3.6 \text{ m}$ , 波段数为 101(刘丽娟等, 2011)。

由于得到的数据已经根据获取时测量的相关参数, 利用系统自带辐射校正和几何校正软件进行过辐射校正和几何校正, 因此对 SASI 影像的预处理只需进行大气校正。本文利用地面线性回归经验模型对 SASI 数据进行大气校正。该模型假设在影像覆盖区域内有一个或多个不同反射特征, 并假设地面目标的反射率与遥感器探测的信号之间满足线性关系。通过建立遥感影像成像时, 特定地物的光谱反射值与影像上对应地物像元 DN 值间的线性回归方程, 并以此方程为基础对整幅影像进行辐射校正(李颖等, 2011)。从图 2 中可以看出经过大气校正后的植被光谱吸收特征已经凸显, 并与美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)标准光

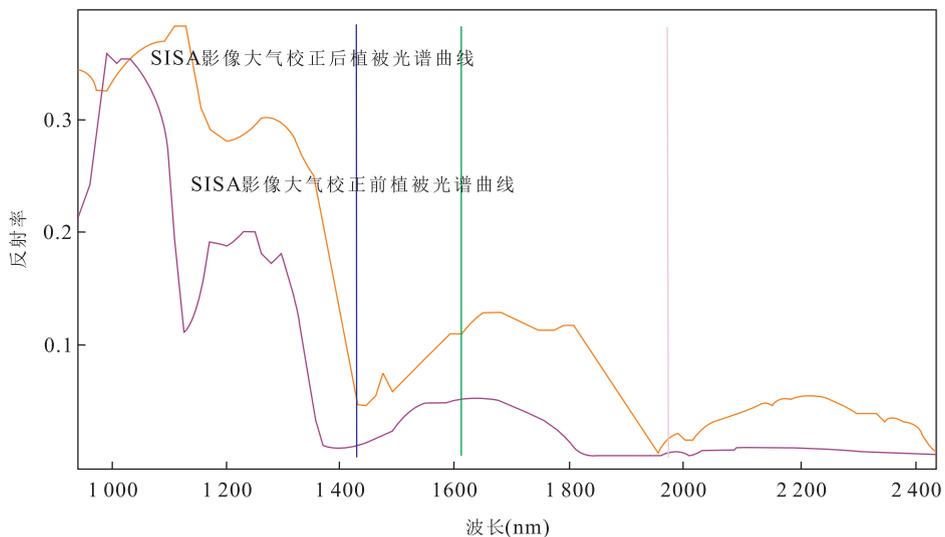


图2 SASI 影像大气校正前后植被覆盖地区光谱曲线对比

Fig.2 The comparison of the SASI image spectral curves in the area of vegetation cover before & after the process of atmospheric correction

三条竖线分别代表植被的三个光谱特征位置

表 1 ASTER 文件信息参数

Table 1 The parameters information of the ASTER image

波段	增益	偏差	波长( $\mu\text{m}$ )	波谱 Max 值( $\mu\text{m}$ )	波谱 Min 值( $\mu\text{m}$ )	中心波长半极值宽度( $\mu\text{m}$ )
1	0.676 0	-0.676 0	0.556 0	0.600	0.520	0.080
2	0.708 0	-0.708 0	0.661 0	0.690	0.630	0.080
3	0.862 0	-0.862 0	0.807 0	0.860	0.780	0.080
4	0.217 4	-0.217 4	1.656 0	1.700	1.600	0.100
5	0.069 6	-0.069 6	2.167 0	2.185	2.145	0.040
6	0.062 5	-0.062 5	2.209 0	2.225	2.185	0.040
7	0.059 7	-0.059 7	2.262 0	2.285	2.235	0.050
8	0.041 7	-0.041 7	2.336 0	2.365	2.295	0.070
9	0.031 8	-0.031 8	2.400 0	2.430	2.360	0.070

谱库里的植被标准光谱具有很高的相似性,证明利用地面线性回归方程对 SASI 影像进行大气校正取得了很好的效果。

## 2.2 ASTER 航天多光谱数据及其预处理

ASTER 是美国宇航局(NASA)与日本 METI (经贸及工业部)合作参与研制,由 METI 制造并搭载在 Terra 卫星上的星载热量散发和反辐射仪,于 1999 年 12 月由美国宇航局发射升空。其主要任务是利用 14 个频道以 4~16 d 的重访周期获取整个地表的高分辨黑白立体照片。ASTER 前 3 个波段为可见光/近红外波段部分,其中增加一个立体后视波段(Band3N);第 4~9 波段位于短波红外光谱区间;第 10~14 波段位于热红外部分。ASTER 数据的空间分辨率随光谱波段的不同而不同,其可见光/近红外波段部分空间分辨率为 15 m,短波红外部分为 30 m,热红外部分为 90 m(王春兰和陈建飞,2004;于彩虹等,2012)。

ASTER 数据的预处理需要分别经过串扰去除、辐射定标、大气校正以及干扰信息去除等步骤(吕凤军等,2009;代晶晶等,2010;靳娟,2013)。串扰是指 ASTER 短波红外波段存在因探测器单元的光子泄露而引起的辐射率偏移或附加误差现象,考虑到串扰效应有可能引起数据的反射率失真,本文采用 Crosstalk 软件对 ASTER L1B 数据的短波红外波段数据进行了去串扰处理。在进行辐射定标前,需要统一 ASTER 数据在可见光/近红外波段区间与短波红外区间的空间分辨率,对其第 4 至第 9 波段空间分辨率进行重采样至 15 m,再跟第 1 至第 3 波段进行波段合成。

对 ASTER 数据进行辐射校正时,需要用到其中心波长半极值宽度、增益和偏差等信息,而这些信息在头文件中并不完善,因此需要根据表 1 对相应信息进行补充(陈建明等,2009),最后将经过辐射定

标后的数据在 ENVI(the environment for visualizing images)中利用 FLAASH 大气校正模型进行大气校正。

## 3 油气异常信息的提取

### 3.1 SASI 高光谱影像油气蚀变异常信息提取

SASI 高光谱数据可以探测到的油气微渗漏异常蚀变信息主要有粘土蚀变矿物异常、碳酸盐蚀变异常矿物及烃异常。赵欣梅(2007)、周密(2007)和于彩虹等(2012)对常见的粘土蚀变矿物如高岭土、伊利石、绢云母、明矾石和蒙脱石等矿物的标准光谱进行分析后得到粘土矿物的吸收特征位于 1.4  $\mu\text{m}$ 、2.2  $\mu\text{m}$  及 2.35  $\mu\text{m}$  附近。不同的粘土矿物在光谱上也存在着细微差异,如高岭土除在 2 210 nm 处具有吸收特征以外,在 2 165 nm 处也存在一个较小的吸收,形成一个明显的肩部吸收特征;明矾石在 2 165 nm、2 320 nm 附近存在吸收特征,并且在

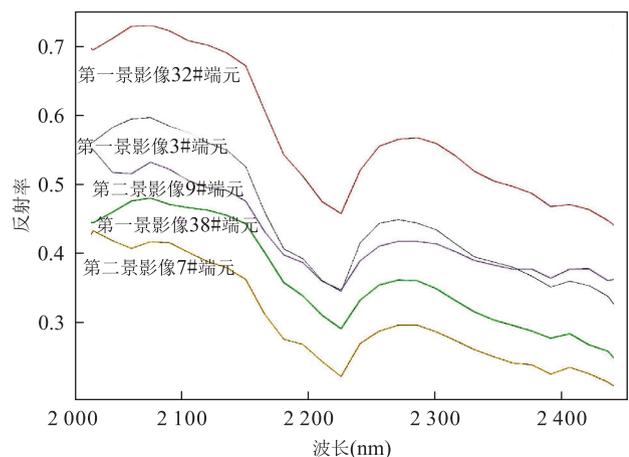


图 3 高岭土端元对应光谱曲线

Fig.3 Endmember spectral curves of the kaolinite

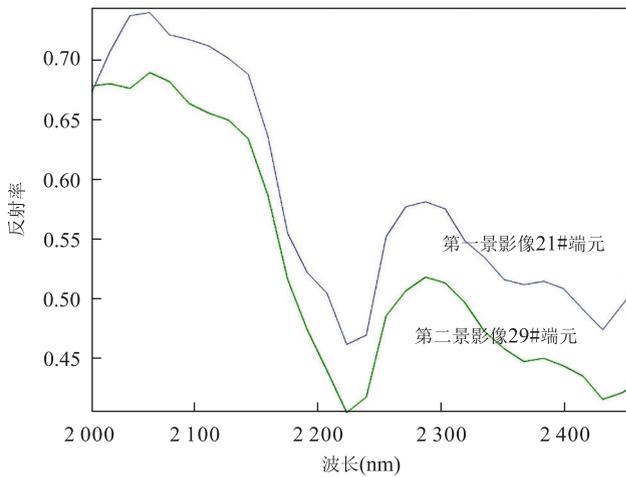


图 4 绢云母端元光谱曲线

Fig.4 Endmember spectral curves of the sericite

2 210 nm 存在微弱吸收;蒙脱石在 2 210 nm、2 345 nm 及 2 420 nm 处均存在较明显的吸收特征;伊利石相比蒙脱石在 2 420 nm 处无吸收反应.对烃类物质标准光谱曲线分析后得知烃在 1 725 nm、1 760 nm 以及 2 311~2 360 nm 处存在吸收反应,并且在 2 311~2 360 nm 处的吸收特征呈现双峰式,但该吸收位置与其他类型蚀变异常矿物如方解石的吸收特征存在重合,因此 1 725 nm 附近的吸收峰为烃类物质的特征吸收.

采用光谱代数的方法提取、基于图像光谱的矿

物端元提取与填图方法提取相比较,填图方法提取由烃类微渗漏引起的蚀变异常信息可以取得较好的效果.对烃及其他蚀变矿物吸收特征进行比较,确定利用烃类物质在 2 070 nm 处具有较强反射以及在 1 725 nm 处具有较强吸收的反射吸收特性,对烃异常信息进行提取.对两景 SASI 反射率数据进行光谱沙漏处理后,笔者发现第一景数据第 3 #、32 # 及 38 # 端元,第二景数据 7 #、9 # 端元符合高岭土的吸收特征;发现第一景数据第 21 # 端元、第二景数据第 29 # 端元光谱符合绢云母的吸收特征(图 3 和图 4 中为各蚀变矿物对应端元光谱曲线).分别将这些端元光谱作为该类蚀变异常矿物参考光谱进行混合调制匹配滤波(mixture tuned matched filtering, MT-MF)异常填图,得到这两景 SASI 高光谱数据的高岭土异常和绢云母异常分布图,再跟烃异常信息进行叠加形成综合异常叠加(图 5 和图 6).

#### 4 基于高光谱异常提取先验知识的多光谱异常主分量阈值确定方法

目前常用的异常阈值确定方法是主分量阈值法,此方法表明大范围自然地物的遥感影像亮度值概率密度分布曲线(简称直方图)呈正态分布,在绝大多数情况下背景地物等非异常信息占据影像的绝

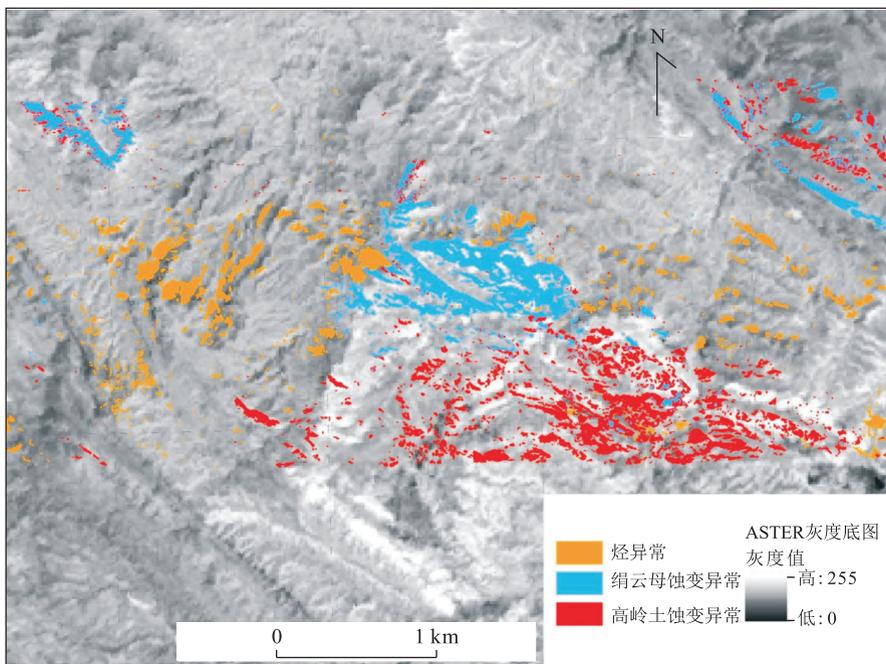


图 5 SASI 影像各蚀变矿物异常解译叠加

Fig.5 The overlay of SASI image with the different alteration mineral anomaly interpretations

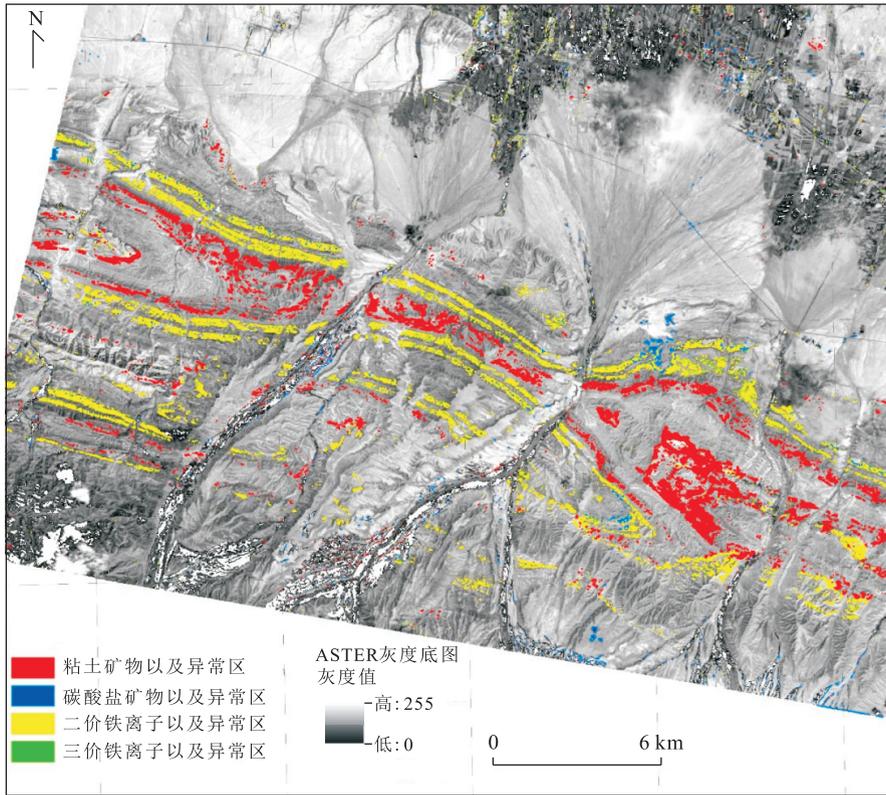


图 6 ASTER 影像各蚀变矿物异常解译叠加

Fig.6 The image of overlay the different alteration mineral anomaly interpretations of the ASTER image

大部分,对应像元位于直方图中间部分,而异常像元则分布于直方图两侧概率较低部分.利用均值和标准差的  $N$  倍确定的异常分割阈值可以对遥感影像上的蚀变异常进行分割(张玉君等,2003).

然而该方法是基于整幅影像亮度值统计结果确定异常分割阈值,在实际应用中具有一定的局限性,对于范围较小、亮度值直方图不规律的遥感影像范围可能出现较大误差,导致异常圈定出现偏差.针对这种局限性,从多源数据结合应用的角度,提出了一种基于高光谱异常提取先验知识的多光谱异常主分量阈值确定方法(以下简称新方法).该新方法主要思想是针对高光谱和多光谱同时存在的异常,利用高光谱对蚀变矿物的精确识别能力,提取出其准确的异常区,将这些异常区作为标准异常区对多光谱该类异常主分量进行统计,获得异常像元先验知识从而确定异常分割阈值.新方法与传统主分量阈值法的主要区别是:传统主分量阈值法统计的是整幅遥感影像,影像中的异常像元属于微弱信息,在直方图中所占比例很小;而基于高光谱异常获取先验知识的过程即统计所有已知异常像元的过程,通过统计信息确定异常像元值分布规律从而进行多光谱异

常主分量阈值划分.

新方法有两个关键步骤,分别是高光谱异常提取结果正确性验证和非异常像元干扰信息去除.作为多光谱异常分量阈值确定的先验知识区,验证高光谱异常提取结果的正确性是确保得到的先验知识正确合理的前提.而因为高光谱异常提取精度以及两种影像空间分辨率不同必然导致将非异常像元带入统计过程,形成干扰信息,因此通过一定方法对这些干扰信息进行去除也是十分必要的.本研究区内高光谱和多光谱同时识别出了粘土异常,且两者异常结果具有较好的一致性,因此以粘土矿物异常提取为例进行说明.

#### 4.1 无地面验证数据区高光谱异常提取结果正确性验证

在地质调查中,常出现研究区处于境外、高海拔、高寒或沙漠无人区的情况,使得对遥感提取异常信息的地面验证难以进行.在缺少地面验证数据的情况下,对同一区域利用不同遥感数据源,对比不同提取方法获得的异常结果能起到一定的验证作用.同一位置利用多光谱遥感数据通过主成分分析或光谱代数的方法提取出的蚀变矿物异常与利用高光谱

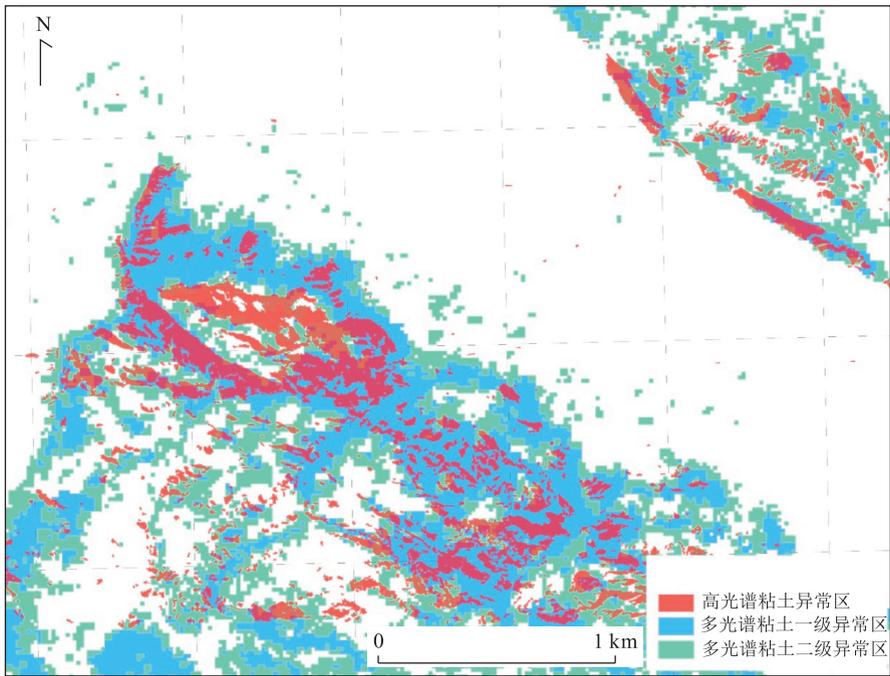


图 7 SASI 粘土异常提取结果与 ASTER 粘土异常叠加

Fig.7 The anomaly results of the clay minerals in the SASI and the ASTER

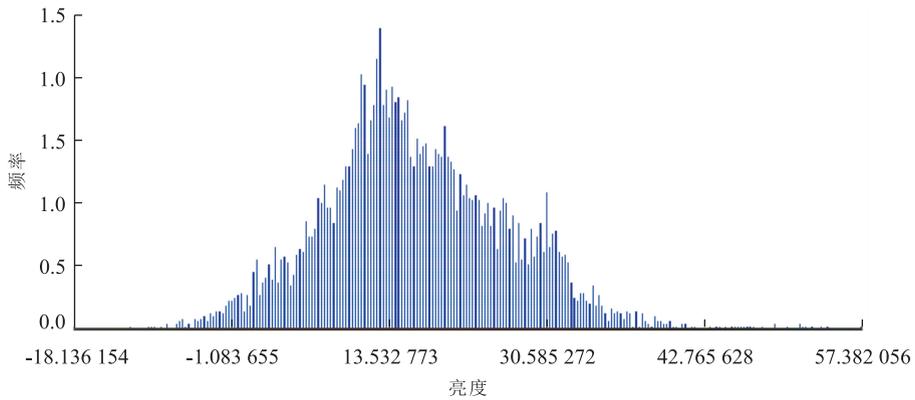


图 8 高光谱粘土异常范围内多光谱异常主分量像元直方图

Fig.8 The histogram of the ASTER image clay anomaly principal components which located in the area of hyperspectral clay anomaly

数据通过基于图像光谱的矿物端元提取蚀变矿物异常具有一致性,即同为异常或同为非异常,那么可以从某种程度上说明高光谱和多光谱的异常矿物信息提取结果正确合理.

图 7 为高光谱与多光谱粘土异常提取结果叠加对比,图 7 中红色区域代表高光谱粘土异常,蓝色和碧绿色分别代表多光谱粘土一级和二级异常,通过目视分析可以看出 SASI 影像提取出的粘土异常与 ASTER 影像提取出的粘土异常位置十分吻合,红色区域基本落在蓝色区域内,少部分与碧绿色区域重合.说明两者提取出的异常区准确度较高,利用该

高光谱异常结果进行多光谱异常阈值确定时能提供正确的先验知识.

#### 4.2 非异常干扰像元去除

在高光谱数据与多光谱数据空间分辨率一致,且高光谱异常提取完全准确等理想状态条件下,由高光谱异常提取结果统计信息的多光谱异常分量确定的分割阈值(即为统计值中的最小值),大于该最小值的都为异常像元.然而由于空间分辨率差异以及高光谱异常提取精度等限制,在对高光谱异常提取结果区域内的多光谱异常主分量进行统计时不可避免会将非异常像元带入统计,引入误差.

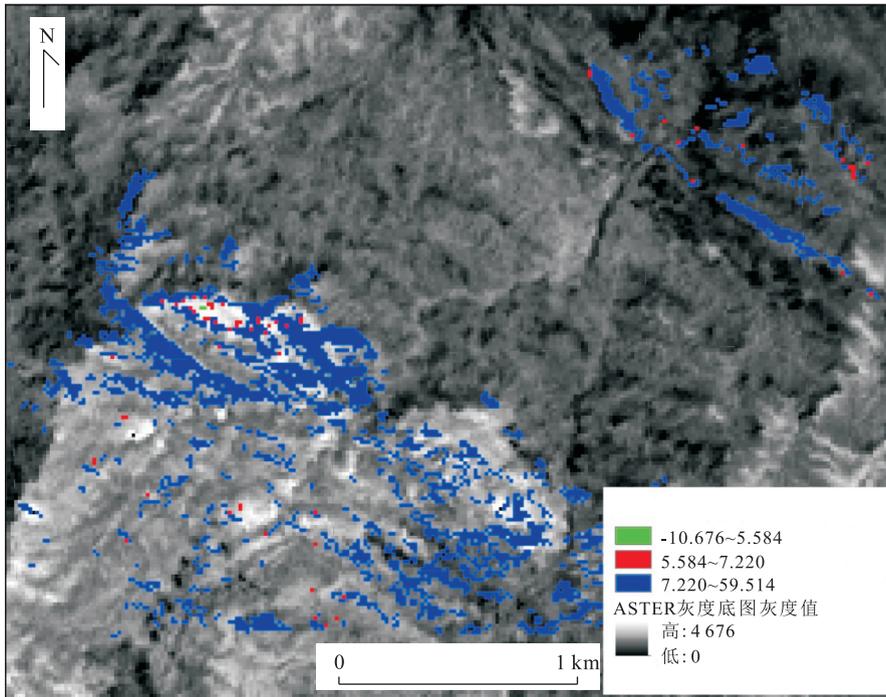


图 9 两种不同异常阈值确定方法提取出的粘土异常区对比

Fig.9 The comparison chart of the two clay anomaly area which extracted by two different methods

在对高光谱粘土异常区内多光谱粘土异常主分量进行统计后得到该区域内多光谱粘土异常主分量像元直方图(图 8),从图 8 可以看到参与统计像元亮度值呈正态分布,最大值为 57.382 056,最小值为 -18.136 154.因混入的非异常像元占所统计像元部分较小,属于高光谱异常提取结果范围内的微弱信息,且都小于异常分割阈值,在图 8 上应位于异常分割阈值左侧低值区部分.考虑到采用的高光谱数据和多光谱数据空间分辨率差别较大,引入的干扰像元较多,因此将累计 10%的像元亮度值 5.006 523 作为异常分割阈值,应用高端切割去除干扰信息得到多光谱影像粘土异常(杨金中,2007).

#### 4.3 结果验证

笔者对新方法提取出的粘土异常结果进行精度验证,主要是将其异常结果与传统主分量阈值法提取出的异常结果进行对比.在精度验证过程中,笔者将两倍标准差 7.219 850 作为传统主分量阈值法异常阈值,基于高光谱提取出的标准粘土异常区,分别计算传统主分量阈值法和新方法提取出的粘土异常区占标准异常区的比例,比例越高则精度越高.经过计算得出,主分量阈值法确定出的多光谱粘土异常区占标准异常区的 98.198%,而新方法则占 98.808%,可以看出两种方法提取出的异常区都具有很高的精度,但是新方法略优于传统主分量阈值

法.图 9 中蓝色代表主分量阈值法提取出的粘土异常区,红色部分为新方法相比主分量阈值法多识别出的异常位置,绿色代表因图像分辨率差异和高光谱异常区提取精度所圈定的误差像元.通过对图 9 分析可知新方法在提取出传统主分量阈值法圈定的异常区之外还在异常区边缘位置识别出一些异常,符合异常分布规律,取得了较好效果.

## 5 结语

多光谱遥感技术与高光谱遥感技术在遥感地质方面的应用都已相当成熟,且两者间的优劣势也都被大家所熟知,但是从遥感地质应用的方向研究多光谱与高光谱结合的具体方法却较少.随着高光谱遥感影像空间分辨率的大幅提高以及多光谱遥感影像波段设置的不断提升,以及对遥感地质应用验证方法的不断追求和创新,相关的研究应该会逐步增多.笔者同时利用多光谱和高光谱遥感数据对吉木萨尔地区油气异常信息进行了提取,得出在缺少地面验证数据的情况下协同利用两种数据对它们的异常结果进行正确性验证的可行性,并提出一种基于高光谱异常提取先验知识的多光谱异常主分量阈值确定方法,通过与传统主分量阈值方法异常结果进行对比,并对其精度

进行了验证,取得了较好的效果。

由于采用多光谱和高光谱数据空间分辨率差别较大,且高光谱异常提取结果也存在误差,将高光谱异常提取结果作为标准异常区对多光谱异常主分量进行统计时会带入一定误差。因此,在提高精度方面应该尽可能使用空间分辨率相同或相近的数据,或者提供更加精密的高光谱异常提取技术方法,进一步减少提取的误差。

## References

- Chen, J. M., Sun, W. D., Yan, B. K., et al., 2009. The Application and Research of the Anomaly Extraction Process Base on the ASTER Multi-Spectral Remote Sensing in Tianhu Iron Ore Mine. *Xinjiang Geology*, 27(4): 368—372 (in Chinese with English abstract).
- Dai, J. J., Qu, X. M., Xin, H. B., 2010. Extraction of Alteration Mineral Information Using ASTER Remote Sensing Data in Duolong Area, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 29(5): 752—759 (in Chinese with English abstract).
- Guan, Z., Tian, Q. J., 2006. A Summary of Oil/Gas Optical Remote Sensing. *Natural Gas Industry*, 26(11): 44—48 (in Chinese with English abstract).
- Hou, W. G., 2002. Research of Geochemical and Remote-Sensing Techniques to the Exploration of Oil and Gas in Northern Tarim Basin. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 24(1): 6—11 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3321/j.issn: 1000—0976.2006.11.014
- Jin, J., Yang, R. H., Li, J. C., 2013. Research and Application of ASTER Data Alteration Minerals Information Extraction Technology. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 30(4): 62—69 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1009—4210.2013.04.010
- Khan, S. D., Jacobson, S., 2008. Remote Sensing and Geochemistry for Detecting Hydrocarbon Microseepages. *Geological Society of America Bulletin*, 120(1—2): 96—105. doi: 10.1130/0016—7606(2008)120[96:rsagfd]2.0.co;2
- Li, Y., He, Y., Lan, G. X., 2011. Atmospherical Correction of Hyperion Hyperspectral Imagery Based on Empirical Line Calibration Method. *Journal of Dalian Maritime University*, 37(2): 117—119 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L. J., Pang, Y., Fan, W. Y., et al., 2001. Integration of Airborne Hyperspectral CASI and SASI Data for Tree Species Mapping in the Boreal Forest, China. *Remote Sensing Technology and Application*, 26(2): 129—136 (in Chinese with English abstract).
- Lü, F. J., Hao, Y. S., Shi, J., et al., 2009. Alteration Remote Sensing Anomaly Extraction Based on ASTER Remote Sensing Data. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(2): 271—276 (in Chinese with English abstract).
- Shang, L., 2011. Structural Features and Depositional Systems in Southeastern Junggar Basin (Dissertation). China University of Petroleum, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Singhroy, V., Stanton-Gray, R., Springer, J., 1986. Spectral Geobotanical Investigation of Mineralized till Sites. Proceedings of the Fifth Thematic Conference, Remote Sensing for Exploration Geology, Reno.
- Tan, Q., 2004. Remote Sensing Prediction Technique in Oil and Gas Exploration. *Natural Gas Industry*, 24(3): 44—48 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3321/j.issn: 1000—0976.2004.03.013
- Wang, C. L., Chen, J. F., 2004. Extracting the Information of Concrete/Urban Development from High Spectrum Resolution Image of ASTER. *Geo-Information Science*, 6(2): 106—108, 124 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. Z., 2007. The Technical System of Multispectral Remote Sensing Anomaly Extraction. *Remote Sensing for Land & Resources*, (4): 43—48 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1001—070X.2007.04.009
- Ye, F. W., Liu, D. C., Zhao, Y. J., 2011. Airborne Hyperspectral Survey System CASI/SASI and Its Preliminary Application in Uranium Exploration. *World Nuclear Geoscience*, 28(4): 231—236 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1672—0636.2011.04.008
- Ye, F. W., Liu, D. C., Zhao, Y. J., et al., 2008. Extraction and Analysis of Reducing Alteration Information of Oil-Gas in Bashibulake Uranium Ore District Based on ASTER Remote Sensing Data. *World Nuclear Geoscience*, 25(4): 223—230 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1672—0636.2008.04.006
- Yu, C. H., Wu, X. B., Yan, S. X., 2012. Research on ASTER Band Ratio to Extract Red Clay in Southwest Guizhou. *Remote Sensing Information*, (2): 96—102. doi: 10.3969/j.issn.1000—3177.2012.02.019 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. J., Zeng, Z. M., Chen, W., 2003. The Methods for Extraction of Alteration Anomalies from the ETM+ (TM) Data and Their Application: Method Selection and Technological Flow Chart. *Remote Sensing for Land & Resources*, 56(2): 44—50 (in Chinese with

English abstract).doi:10.6046/gtzyyg.2003.02.11

Zhao, X. M., 2007. Study on Using Hyperspectral Remote Sensing to Explore Oil & Gas Resources Based on Hydrocarbon Microseepage Theory (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).

Zhou, M., 2007. Study on the Hyperspectral Information Extraction of Oil and Gas Microseepage—Take the Eastern Inner Mongolia Region for Example (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

陈建明, 孙卫东, 闫柏琨, 等, 2009. Aster 多光谱遥感异常提取在新疆天湖铁矿中的应用. 新疆地质, 27(4): 368—372.

代晶晶, 曲晓明, 辛洪波, 2010. 基于 ASTER 遥感数据的西藏多龙矿集区示矿信息的提取. 地质通报, 29(5): 752—759.

管仲, 田庆久, 2006. 油气光学遥感研究综述. 天然气工业, 26(11): 44—48.

侯卫国, 2002. 塔北地区化探遥感技术探测油气藏的研究. 物探化探计算技术, 24(1): 6—11.

靳娟, 杨日红, 李家存, 2013. ASTER 数据蚀变矿物信息提取技术研究及其应用综述. 国土资源科技管理, 30(4): 62—69.

刘丽娟, 庞勇, 范文义, 等, 2011. 整合机载 CASI 和 SASI 高光谱数据的北方森林树种填图研究. 遥感技术与应用,

26(2): 129—136.

李颖, 何莹, 兰国新, 2011. 基于经验线性法的 Hyperion 影像大气校正. 大连海事大学学报, 37(2): 117—119.

吕凤军, 郝跃生, 石静, 等, 2009. ASTER 遥感数据蚀变遥感异常提取研究. 地球学报, 30(2): 271—276.

商琳, 2011. 淮东南部地区构造沉积体系研究 (硕士学位论文). 北京: 中国石油大学.

谭青, 2004. 油气勘探中的遥感预测技术. 天然气工业, 24(3): 44—48.

王春兰, 陈健飞, 2004. ASTER 高光谱影像提取地面人工建筑物信息的应用. 地球信息科学, 6(2): 106—108, 124.

杨金中, 2007. 多光谱遥感异常提取技术方法体系研究. 国土资源遥感, (4): 43—48.

叶发旺, 刘德长, 赵英俊, 2011. CASI/SASI 航空高光谱遥感测量系统及其在铀矿勘查中的初步应用. 世界核地质科学, 28(4): 231—236.

叶发旺, 刘德长, 赵英俊, 等, 2008. 基于 ASTER 数据的巴什布拉克铀矿区油气还原蚀变信息提取与分析. 世界核地质科学, 25(4): 223—230.

于彩虹, 武晓波, 燕守勋, 2012. 提取黔西南红粘土的 ASTER 波段比值技术研究. 遥感信息, (2): 96—102.

张玉君, 曾朝铭, 陈薇, 2003. ETM+(TM) 蚀变遥感异常提取方法研究与应用——方法选择和技术流程. 国土资源遥感, 56(2): 44—50.

赵欣梅, 2007. 基于烃类微渗漏理论的高光谱遥感油气异常探测方法研究 (博士学位论文). 北京: 中国地质大学.

周密, 2007. 油气微渗漏的高光谱信息提取研究——以内蒙东胜地区为例 (硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.