

基于 ASTER 数据的烃蚀变信息增强与提取^{*}

章桂芳^{1,2}, 王远华¹, 郑卓¹

(1. 中山大学地球科学与地质工程学院, 广东 广州 510275;
2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 烃类微渗漏蚀变信息是地下深部油气藏储层在地表和近地表的直观证据, 通过遥感图像进行烃蚀变解译是遥感油气勘探中的一项高效、快速和安全的高新技术。该研究采用 ASTER 近红外数据, 以烃渗漏蚀变产生的碳酸盐矿物为目标, 采用主成分分析、密度分割和假彩色合成等信息增强和提取方法, 获得了 1589-PC3、1689-PC3、1348-PC3 和 5689-PC2 等四个对碳酸盐具有较好增强效果的主成分因子, 以 $X + 2\sigma$ 为阈值, 从 4 幅主成分因子图像上提取了碳酸盐区域, 并根据叠合结果划分为一级富集区和二级富集区。结果显示碳酸盐富集与展布结果与该区的地层分布紧密相关, 与已有研究的解译结果较为一致。

关键词: ASTER; 烃蚀变; 碳酸盐矿物; 信息增强与提取

中图分类号: P627 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2014)06-0078-07

The Information Enhancement and Interpretation of Hydrocarbon Microseepage Induced Minerals Based on ASTER Data

ZHANG Guifang^{1,2}, WANG Yuanhua¹, ZHENG Zhuo¹

(1. School of Earth Science and Geological Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Guangdong Key Laboratory of Mineral Resources & Geological Processes, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Hydrocarbon microseepage induced anomaly of surface and near surface is the direct evidence for oil & gas deposit. The detection of hydrocarbon-induced anomaly by remote sensing image interpretation is fast, efficient and safe. ASTER Near Infrared data were used to interpret hydrocarbon-induced carbonate minerals. Principal component analysis (PCA), density slicing and false color composition were adopted to distinguish the goal area of clay and carbonate minerals. Four principal components showed outstanding spectral response of hydrocarbon-induced clay and carbonate minerals: 5689-PC2 (the second principal component of input bands 5689), 1589-PC3, 1689-PC3 and 1348-PC3. Then, density slicing ($X + 2\sigma$) was used to highlight the pixels with the largest DN (digital number) of PC images as the area of carbonate minerals. The distinguished area was categorized into the first and second classes due to the frequencies of overlay. The result suggests that hydrocarbon microseepage induced mineral assemblage is related closely to the surface sediments. Compared with the anomalous area of ETM+ data, the distinguished area from ASTER data has almost the same distribution.

Key words: ASTER; hydrocarbon microseepage; carbonate minerals; information enhancement and interpretation

* 收稿日期: 2014-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41230101, 41402297); 中国博士后科学基金资助项目(20100470044); 中国地质调查局资助项目(1212011120099)

作者简介: 章桂芳(1981年生), 女; 研究方向: 遥感、资源与环境; E-mail: zhgfang@mail.sysu.edu.cn

目前认为所有的含油气盆地都有地表（近地表）烃渗漏存在。烃类渗漏分为宏观和微观（或主动与被动）渗漏两类，而微渗漏的分布较宏渗漏广而普遍，据 Rechters 等人以及美国达拉斯城的地球化学勘探公司 40 多年的经验表明，世界上超过 85% 以上的油田都存在烃类物质微渗漏现象，美国石油地质学家学会通报《AAPG》在 1996 年出版专著《Hydrocarbon migration and its near-surface expression》对其进行了详细论述。现有的油气微渗漏模型的共识为：油气藏中的轻烃类物质在各种驱动力作用下，呈气相以垂直方式为主向地表运移；烃类运移途径是地层中发育的微裂隙、节理、层面网络系统等；烃类物质运移过程中和到达地表后产生一系列地球化学、地球物理、微生物及地形地貌异常；地表异常呈环状或顶端晕状于油气藏上方^[1]。地表或近地表由烃类微渗漏引起的蚀变异常是地下油气藏存在的标志，Schumacher (1999) 和 Saunders et al. (1999) 等提出的烃渗漏异常识别模型也已成功应用于商业油气勘探，预测油气的成功率达 60% - 85%^[2-4]，因此研究烃渗漏信息的探测具有及其重要的勘探意义。

遥感技术可以宏观、快速、高效地获取地球资源信息，在烃类微渗漏信息的直接勘探中发挥着不可替代的重要作用，主要探测目标是二价铁、红层褪色、粘土化和碳酸盐岩化等蚀变信息。目前应用最广泛的遥感数据是陆地卫星 (Landsat MSS / TM / ETM +)^[5-8]，ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer，即先进星载热发射和反射辐射仪) 数据相比陆地卫星具有高光谱分辨率以及高辐射分辨率的特点^[9] (图 1)，ASTER 在地质领域的岩性制图和矿物识别能力已经获得很多学者的肯定^[9-14]。ASTER 在短波红外有 6 个波段 (图 1)，对于探测烃渗漏蚀变中的碳酸盐岩化信息十分有用^[15-18]。相对烃蚀变产生的微弱的二价铁和红层褪色来说，碳酸盐岩化信息更加普遍和强烈，因此本次研究以 ASTER 短波红外波段为数据源，以碳酸盐岩化为烃蚀变信息提取目标。

1 研究区域和数据预处理

1.1 研究区域

本次研究选取松辽盆地西部斜坡区作为研究区域 (图 2 (b))，采用 ASTER 短波红外数据，通过图像增强和阈值法提取碳酸盐岩化信息。松辽盆地是中国第二大含油气盆地 (图 2 (a))，西部斜坡

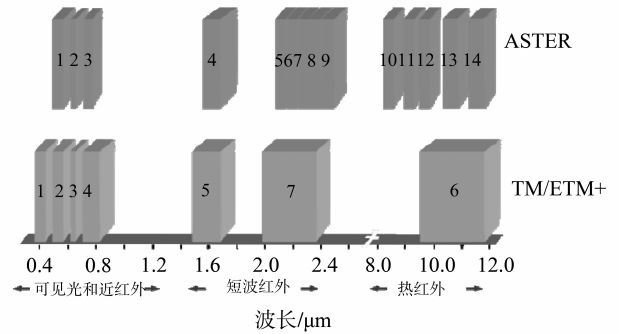


图 1 TM 和 ASTER 的波段设置对比
Fig. 1 The band setting of TM and ASTER

区是松辽盆地西缘的一级构造单元 (图 2 (b))。西部斜坡区主要含油气层白垩纪砂岩厚度 1 000 - 1 500 m，其萨尔图和高台子油层油气显示良好，已发现多处稠油油藏 (富拉尔基、平洋和套保稠油藏及图牧吉油砂等) 和小型气田 (阿拉新、二站、白音诺勒等)。已有研究显示该区的稠油油藏埋深均很浅，富拉尔基和套保油藏埋深约 300 ~ 400 m，图牧吉油砂埋深仅 5 ~ 58 m^[19]。

1.2 数据预处理

遥感影像选取 2002 年 9 月 22 日的一幅 level 1B 数据，软件平台采用 ENVI (Environment for Visualizing Images) 4.3。在进行图像增强之前，首先进行图像预处理：

1) 数据存储格式转换

将数据的存储顺序由 BSQ 转换为 BIL。

2) 大气校正

从头文件中获取影像拍摄的时间和中心点信息，结合研究区的特性和要求，采用 FLAASH 大气校正模型设置校正参数进行大气校正。

3) 去干扰

分别提取云、阴影、植被和水体等干扰像元，采用图像掩膜方法从原始图像中去除干扰。① 去云：采用 ASTER 1 波段做掩膜，将掩膜应用于所有波段，采用 ASTER 1 的高端切割，去除云的干扰；② 去阴影：地形起伏常会遮挡住阳光的照射，形成阴影区，通过对阴影区的反射光谱特征的分析，采用 ASTER 9 / ASTER 1 来去除由于地形起伏引起地形阴影；③ 去植被：分析植被光谱反射特征，结合前人研究成果，根据试验结果，本文采用 ASTER 4 / ASTER 3 去除明显的植被干扰；④ 去水体：分析水体的光谱反射特性及 ASTER 数据的特征，结合前人研究结果，本文采用 MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) 提取水体信息，其公式

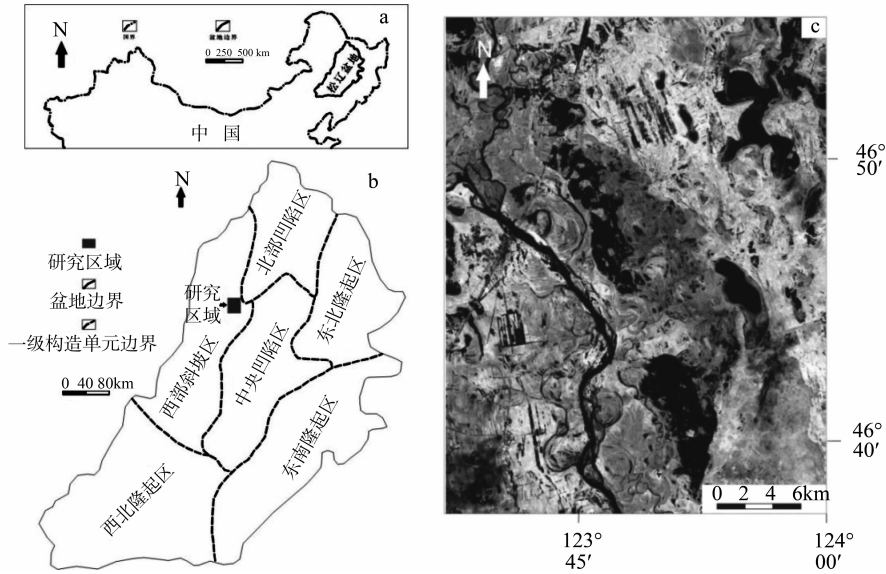


图 2 (a) 松辽盆地在中国的区域位置; (b) 松辽盆地一级构造单元划分及研究区域位置; (c) 研究区域 ASTER 影像

Fig. 2 (a) Location of Songliao Basin in China; (b) The first class tectonic units of Songliao Basin and study area; (c) ASTER image of study area

为: $MNDWI = (Green - MIR) / (Green + MIR)$
 $= (Band 1 - Band 4) / (Band 1 + Band 4)$.

将以上所述干扰因素一并归入干扰窗内, 与原始图像做掩膜处理, 得到用于蚀变信息提取的基础图像。

4) 图像剪裁

在以上预处理的基础上, 选取西部斜坡区 26 km × 34 km 的区域作为感兴趣区进行图像剪裁 (左上角坐标 X = 548 000, Y = 5 196 000, 右下角坐标 X = 574 000, Y = 5 162 000), 其 ASTER 假彩色合成影像如图 2 (c) 所示。

2 图像处理方法

根据碳酸盐矿物的实验室波谱及 ASTER 短波红外波段设置, 碳酸盐矿物在近红外波段的波谱曲线 (ASTER band 4 ~ ASTER band 9) 如图 3 所示, 总结其波谱特征如表 1 所示。本次研究通过主成分分析增强碳酸盐岩化信息, 对增强处理后得到的图像, 分别进行线性灰度值拉伸, 并选取合适的阈值进行密度分割。在选取阈值时, 采用门限化

技术进行信息提取的标准误差分级。此外, 为了更直观地显示碳酸盐矿物信息, 本次研究对主成分因子图像进行了假彩色合成。

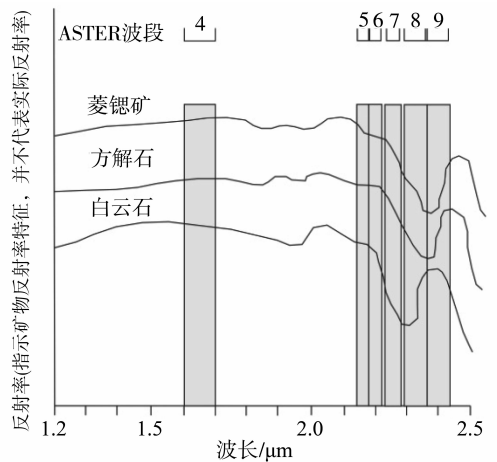


图 3 碳酸盐矿物在近红外波段的波谱曲线 (ASTER band 4 ~ ASTER band 9)

Fig. 3 The spectrums of carbonate minerals of Near Infrared (ASTER band 4 ~ ASTER band 9)

表 1 碳酸盐矿物在 ASTER band 4 ~ ASTER band 9 上的波谱特征

Table 1 Spectral characteristics of carbonate minerals on ASTER band 4 ~ ASTER band 9

波段	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
波段范围/μm	1. 60 - 1. 70	2. 145 - 2. 185	2. 185 - 2. 225	2. 235 - 2. 285	2. 295 - 2. 365	2. 360 - 2. 430
碳酸盐矿物	反射 (+)	反射 (+)	反射 (+)	吸收 (-)	吸收 (-)	反射 (+)

2.1 主成分分析

在油气遥感探测中,主成分分析方法常用于烃蚀变信息提取^[5, 20-21],通过多光谱空间中向量的旋转,增强特定波段的光谱信息,从而增强特定地物。根据参与主成分分析的波段数,可以分为所有波段参与的和特定波段参与的选择主成分分析^[5, 22],2种主成分分析均可以根据特征向量矩阵和地物的光谱特征预测目标像元的明暗状况。本次研究针对特征波段进行主成分分析,同时尝试标准主成分分析和选择主成分分析方法,经过多种波段组合尝试以期选取增强效果较好的主成分。

2.2 门限化阈值

门限化是采用化探异常分级的办法,以标准差 σ 做为尺度,用数倍 σ 值做为阈值,限定异常水平。一般认为 ASTER 数据及其线性处理结果均有近似正态分布的直方图,异常切割时便可借用 σ 这个表征正态分布曲线的尺度。例如主成分分析结果可以把均值(X)理解为代表区域背景,利用($X + k\sigma$)划分异常强度等级, k 值一般取 1.5~3 左右。

2.3 假彩色合成

由于人类的视觉对于彩色色调的敏感远胜于灰度,所以假彩色合成显示方法可以更好地表现色调异常,从而更好地用于异常解译^[23-25]。对于 RGB 色彩空间,选择其中的三个波段,分别赋予红、绿、蓝三种原色,即可在屏幕上合成彩色图像,这是一种最有效的用于显示多波段遥感图像的方法之一^[26],由于合成的图像并不表示地物真实的颜色,这种合成称为假彩色合成。

3 结果与讨论

根据蚀变碳酸盐岩在短波红外波段的波谱特性,通过判读不同波段组合的主成分分析的特征向量和特征值,本次研究筛选出 4 个对碳酸盐岩化具有较好增强作用的主成分,分别为 1589-PC3 (1589 的第 3 主成分)、1689-PC3、1348-PC3 和 5689-PC2,其特征向量和特征值如表 2 所示。由表 2 可知,1589-PC3 主要由波段 5 (0.670) 和波段 8 (-0.727) 的像元值决定,而碳酸盐矿物在 ASTER 波段 5 上表现为反射特征,在波段 8 上表现为吸收特征,因此,碳酸盐矿物信息在 1589-PC3 将得到增强,并且其增强后的信息应以高值像元表现。通过类似的分析,碳酸盐矿物信息在其他三个主成分因子中也均表现为高值像元(特征

波段的值在表 2 中以下划线突出)。需要注意的是,在 1348-PC3 主要由波段 4 (-0.626) 和波段 8 (0.746) 的像元值决定,而碳酸盐矿物在 ASTER 波段 4 上表现为反射特征,在波段 8 上表现为吸收特征,因此,碳酸盐矿物信息在 1348-PC3 以低值像元表现,为了与其他主成分中的碳酸盐信息保持一致,将 1348-PC3 作取反处理。因此,在 4 幅主成分因子图像中,碳酸盐矿物信息均表现为亮值。

表 2 主成分分析特征向量与特征值

Table 2 Eigenvalue and eigenvector of principal component analysis

主成分波段组合	PC1	PC2	PC3	PC4
1589				
band 1	0.298	0.947	-0.108	-0.029
band 5	0.594	-0.124	<u>0.670</u>	-0.425
band 8	0.564	-0.269	<u>-0.727</u>	-0.279
band 9	0.488	-0.116	0.091	0.860
特征值/%	99.401	0.370	0.179	0.048
1689				
band 1	0.295	0.948	-0.105	0.042
band 6	0.607	-0.132	<u>0.674</u>	0.398
band 8	0.558	-0.267	<u>-0.728</u>	0.293
band 9	0.482	-0.104	0.057	-0.867
特征值/%	99.424	0.362	0.153	0.059
1348				
band 1	0.242	-0.587	0.098	-0.767
band 3	0.388	-0.664	-0.206	0.604
band 4	0.642	0.402	<u>-0.626</u>	-0.185
band 8	0.615	0.230	<u>0.746</u>	0.113
特征值/%	98.657	0.824	0.386	0.132
5689				
band 5	0.523	<u>0.464</u>	0.255	-0.667
band 6	0.541	<u>0.349</u>	-0.635	0.425
band 8	0.497	<u>-0.811</u>	-0.185	-0.244
band 9	0.429	-0.066	0.704	0.560
特征值/%	99.755	0.161	0.050	0.032

用门限化阈值法对主成分因子图像进行密度分割提取碳酸盐信息。由于碳酸盐信息表现为高值,因此阈值取为 $X + 2\sigma$ (X 像元均值, σ 为标准差),将大于 $X + 2\sigma$ 的像元提取为碳酸盐富集区。通过该阈值从每幅主成分因子图像上提取碳酸盐信息,与 ASTER 假彩色影像叠加,并以红色显示,结果如图 4 所示。

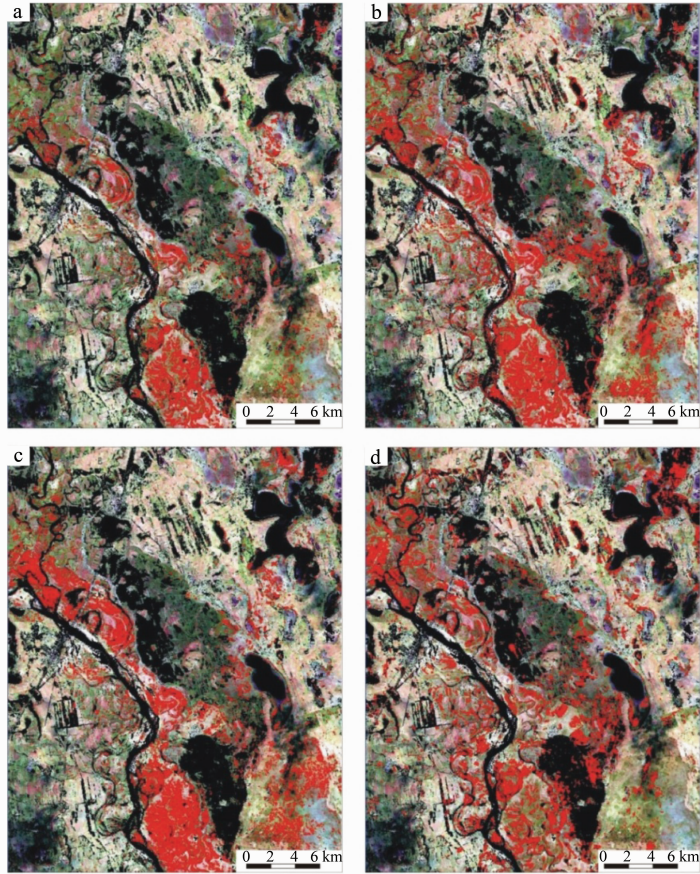


图 4 各个主成分因子图像中提取的碳酸盐信息 (红色区域) 与 ASTER 假彩色影像叠加

Fig. 4 Overlay of the area extraction from PC image and ASTER false color composition

- (a) 5689 - PC2 主成分因子中提取; (b) 1589 - PC3 主成分因子中提取; (c) 1689 - PC3 主成分因子中提取;
(d) 1348 - PC3 主成分因子中提取

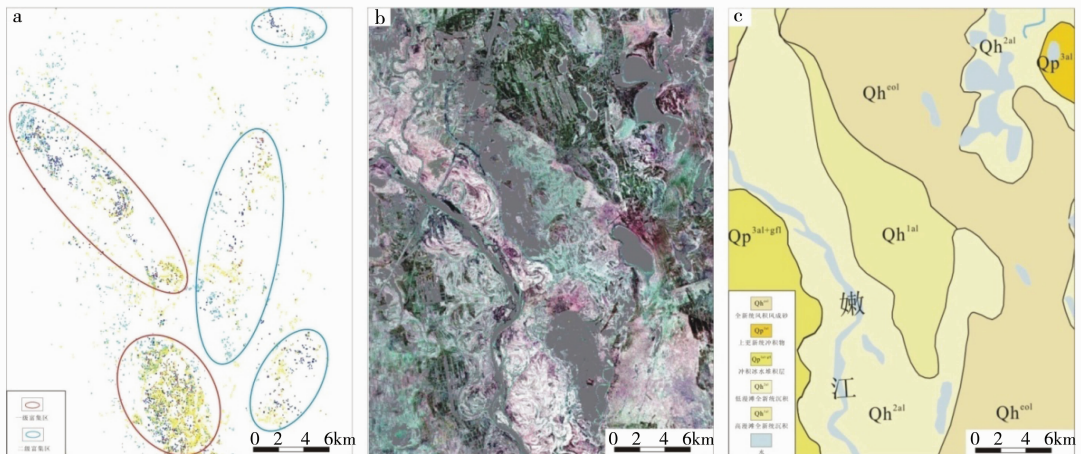


图 5 (a) 密度分割提取的碳酸盐区域分级; (b) 主成分因子假彩色合成
(R: 1689 - PC3、G: 1589 - PC3、B: 5689 - PC2); (c) 研究区域地质图

- Fig. 5 (a) Hydrocarbon-induced area of clay and carbonate minerals extracted from four PC images respectively;
(b) False color composition of PC images (R: 1689 - PC3, G: 1589 - PC3, B: 5689 - PC2); (c) Surface geological map

我们将 4 幅主成分因子图像中提取的碳酸盐信息进行叠加显示 (图 5 (a)), 某片区域的像元重叠越多, 则说明该区域在不同的主成分因子图像上均显示为碳酸盐富集区, 利用像元重叠频率分为一级富集区 (频率最高, 红色椭圆区域) 和二级富集区 (频率次高, 蓝色椭圆区域), 如图 5 (a) 所示。

为了更好地显示碳酸盐信息, 本研究尝试将不同主成分因子进行 RGB 假彩色合成。由于碳酸盐信息在 4 幅主成分因子图像上均表现为高值, 如果某片区域在 3 个输入波段中均有碳酸盐信息显示, 那么在假彩色合成影像上应为偏白的亮色调, 选取 1689 - PC3 (R)、1589 - PC3 (G) 和 5689 - PC2 (B) 假彩色合成影像如图 5 (b) 所示。

对比分析碳酸盐富集区以及主成分因子假彩色合成图 (图 5 (a) 和图 5 (b)) 可以发现, 碳酸盐富集区在假彩色合成图上显示为较为明亮的白色或粉白色, 而一级富集区的色调比二级富集区更为明亮, 这与碳酸盐信息为高值相符。

对比研究区域的地质图 (图 5 (c)) 可知, 几乎所有的富集区都集中在全新世沉积 (Qh^{1al} 和 Qh^{2al}) 和全新统风成风积砂 (Qh^{eol})。富集区的展布与地层方向一致, 说明该区的碳酸盐富集与地层分布紧密联系, 该结果与已有的 ETM + 研究成果吻合^[24-25]。另外, 对比 ETM + 解译结果^[24-25], ASTER 碳酸盐富集区域的分布与之展布情况类似, 但在区域上面更为广泛。主要原因可能是: ETM + 的解译结果是二价铁、红层褪色、黏土和碳酸盐的综合区域, 而本次研究解译的仅仅是碳酸盐富集区。

4 结 论

本次研究的主要结论如下:

1) 通过对 ASTER 近红外波段进行主成分分析, 获取了 1589 - PC3、1689 - PC3、1348 - PC3 和 5689 - PC2 四个对碳酸盐具有较好增强效果的主成分因子。

2) 以 $X + 2\sigma$ 为阈值分别从 4 幅主成分因子图像上提取了碳酸盐区域, 并将其叠加后将碳酸盐富集区划分为一级富集区和二级富集区, 划分结果与主成分因子假彩色合成影像的色调吻合。

3) 碳酸盐富集展布区域与该区的地层分布紧密相关, 与已有研究结果一致。

4) ASTER 近红外波段解译的碳酸盐富集与已有的 ETM + 解译的烃渗漏区展布情况类似, 但是

范围更广, 可能是 ETM + 解译结果为多种烃蚀变异常叠加所致。

本次研究表明利用 ASTER 近红外波段提取与烃蚀变相关的碳酸盐信息是可行的, 但是, 为了更准确地提取该区域的烃蚀变信息, 还应该进一步研究利用 ASTER 数据提取其它烃蚀变信息的方法, 比如二价铁、红层褪色和黏土化等。另外, 高光谱传感器对矿物特征波谱具有更好的分辨能力, 是今后烃渗漏变信息遥感提取的发展方向, 值得遥感工作者进行深入研究。

参考文献:

- [1] 汤玉平, 王国建, 程同锦. 烃类垂向微渗漏理论研究现状及发展趋势 [J]. 物探与化探, 2008, 32(5): 465 - 469.
- [2] SCHUMACHER D. Surface geochemical exploration for petroleum [C] // Beaumont E A, Foster N F. Exploring for Oil and Gas Traps: Treatise of Petroleum Geology. Handbook of Petroleum Geology, The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1999, 18: 18 - 27.
- [3] SAUNDERS D F, BURSON K R, THOMPSON C K. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations [J]. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1999, 83(1): 170 - 185.
- [4] SCHUMACHER D. Seepage-induced magnetic anomalies associated with oil and gas field [M]. AAPG Annual Conversion, Houston, Texas, 2006.
- [5] TANGESTANI M H, MOORE F. Iron oxide and hydroxyl enhancement using the Crosta Method; a case study from the Zagros Belt, Fars Province, Iran [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2000, 2(2): 140 - 146.
- [6] 祝民强, 刘德长, 赵英俊. 鄂尔多斯盆地伊盟隆起区东部微烃渗漏区的遥感识别及其意义 [J]. 遥感学报, 2007, 11(6): 882 - 890.
- [7] 郝振纯, 苏振宽, 鞠琴. 土地利用变化对阜平流域的径流影响研究 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2014, 53(3): 128 - 133.
- [8] 王树功, 黎夏, 刘凯, 等. 环内伶仃洋河口湾湿地动态变化 (1988 - 2004) [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2007, 46(2): 105 - 109.
- [9] YAMAGUCHI Y, KAHLE A B, KAWAKAMI T, et al. Overview of the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(4): 1062 - 1071.
- [10] ABDEEN M M, ALLISON T K, ABDELSALAM M G, et al. Application of ASTER band-ratio images for geo-

- logical mapping in arid regions: the Neoproterozoic Allaqi Suture, Egypt [J]. Abstract with Program Geological Society of America, 2001, 3(3): 289.
- [11] CECILE G, CHRISTOPHE D, PASCAL A, et al. Using ASTER remote sensing data set for geological mapping in Namibia [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2005, 30(1/2/3): 97–108.
- [12] QIU F, ABDELSALAM M, THAKKAR P. Spectral analysis of ASTER data covering part of the Neoproterozoic Allaqi-Heiani suture, Southern Egypt [J]. Journal of African Earth Sciences, 2006, 44(2): 169–180.
- [13] GAD S, KUSKY T. ASTER spectral ratioing for lithological mapping in the Arabian-Nubian shield, the Neoproterozoic Wadi Kid area, Sinai, Egypt [J]. Gondwana Research, 2007, 11(3): 326–335.
- [14] AMER R, KUSKY T, GHULA A. Lithological mapping in the Central Eastern Desert of Egypt using ASTER data [J]. Journal of African Earth Sciences, 2010, 56(2/3): 75–82.
- [15] NINOMIYA Y. A stabilized vegetation index and several mineralogic indices defined for ASTER VNIR and SWIR data [C] // Proc. IEEE 2003 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'03), 2003, 3: 1552–1554.
- [16] ROWAN L C, SCHMIDT R G, MARS J C. Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 104(1): 74–87.
- [17] FU B H, ZHENG G D, NINOMIYA Y, et al. Mapping hydrocarbon-induced mineralogical alteration in the northern Tian Shan using ASTER multispectral data [J]. Terra Nova, 2007, 9(4): 225–231.
- [18] 叶发旺, 刘德长, 赵英俊. 基于 ASTER 数据的巴什布拉克铀矿区油气还原蚀变信息解译与分析 [J]. 世界核地质科学, 2008, 25(4): 223–330.
- [19] 邹才能, 王兆云, 徐冠军, 等. 松辽盆地西斜坡稠油特征及成因 [J]. 沉积学报, 2004, 22: 700–706.
- [20] 刘建军. 努和廷地区古河道砂岩型铀矿遥感信息提取 [J]. 铀矿地质, 2000, 16: 52–57.
- [21] KARIUKI P C, WOLDAI T, MEER F. The role of remote sensing in mapping swelling soils [J]. Asian Journal of Geoinformatics, 2004, 5: 1–11.
- [22] CROSTA A, MOORE J. Geological mapping using Landsat Thematic Mapper imagery in Almeria Province, south-east Spain [J]. International Journal of Remote Sensing, 1989, 10: 505–514.
- [23] ALMEIDA-FILHO R. Remote detection of hydrocarbon microseepage-induced soil alteration [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23: 3523–3524.
- [24] ZHANG G F, ZOU L J, SHEN X H, et al. Remote sensing detection of heavy oil through spectral enhancement techniques in Western slope zone of Songliao basin, China [J]. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2009, 93: 31–49.
- [25] ZHANG G F, ZHENG Z, SHEN X H, et al. Remote sensing interpretation of areas with hydrocarbon microseepage in northeast China using Landsat-7/ETM+ data processing techniques [J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(21): 6695–6711.
- [26] NOVAK I D, Soulakellis N. Identifying geomorphic features using LANDSAT-5 TM data processing techniques on Lesbos, Greece [J]. Geomorphology, 2000, 34: 101–109.