

利用地表土壤的反射光谱勘探油气的方法研究

徐大琦, 倪国强, 沈渊婷, 贺金平, 蒋丽丽

北京理工大学信息科学技术学院光电工程系, 北京 100081

摘要 反射光谱分析提供了一种高效和低成本的鉴别物质成分和结构的方法, 油气微渗漏理论则建立了油气藏与其上部地表特定蚀变之间的因果关系, 因此, 可以通过检测地表蚀变的反射光谱来勘探油气。野外实地测量和高光谱遥感均能够实现反射光谱的检测。文章首先提出了典型含气区测点的光谱曲线的宏观特征; 然后, 给出了一种基于野外测量的反射光谱来确定特定蚀变的地表分布(即分类)的方法。将本方法应用于青海 $\times \times$ 地区野外测量的反射光谱的分析中, 得到的蚀变异常区与该地区的已有气田成功吻合。本方法的鲁棒性实验表明, 当分类过程中选用不同的参数组合(例如: 分类样本, 研究波段范围和相似度阈值)时, 均能得到较好的分类结果。为该地区进行中的 Hyperion 高光谱遥感油气勘探项目提供了有效的分类样本和参考算法。

关键词 反射光谱; 油气勘探; 光谱角填图; 蚀变

中图分类号: O434.3 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-0593(2007)03-0521-04

引言

反射光谱学(Reflectance spectroscopy)就是基于某个波长区域电磁波与物质的相互作用来分析物质的一种技术。到目前, 国内还没有开展过利用地表土壤的反射光谱勘探油气的方法研究。2000年以来, 国外利用 ASD 等野外和 Hymap, AVIRIS 等航空高光谱传感器进行油气勘探, 出现了较为成功的应用案例^[1-3], 但基于 Hyperion 数据的航天遥感油气勘探尚处于探索完善阶段。

文中对青海 $\times \times$ 地区地面测量的 799 条光谱进行了分析和分类, 从而为该地区进行中的 Hyperion 高光谱遥感油气勘探项目提供了分类样本和参考算法。同时, 本文算法可作为地表综合勘探方法中的一部分, 对于寻求“共生异常”、降低钻探风险, 以及提高勘探效率具有显著的实际意义。

1 理论和方法

利用地表土壤的反射光谱进行油气勘探是建立在反射光谱学和油气微渗漏理论的基础上^[4, 5]的一种方法。

运用反射光谱学原理, 根据物质的诊断性光谱吸收特征, 可以鉴别物质成分和结构。常用的高光谱探测波长区间一般为 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 。

关于油气微渗漏理论, Saunders 做了精辟的总结^[1]: 非常小的轻烃分子快速、垂直地上升, 进入土壤空隙中, 部分被细菌分解, 生成 H_2S , CO_2 , 在地下水中的 CO_2 形成 H_2CO_3 , H_2CO_3 与粘土矿物反应生成更多的 CaCO_3 , 从而引起了地表物质的坚硬和难于侵蚀。在 H_2S 制造的还原环境中钾长石、斜长石被还原为粘土矿物, 同时三价铁被还原为二价铁。

由此, 烃类物质^[6, 7]和蚀变矿物^[8]的诊断性光谱吸收特征分别构成了反射光谱勘探油气的直接和间接证据。

2 野外观测和样品分析

2.1 工作区概况

工作区面积约 2100 km^2 , 地表多为盐碱滩, 植被稀少, 渺无人烟; 地面海拔约 2750 m , 属内陆高原地貌。工作区位于 $\times \times$ 坳陷北斜坡上, 区内构造主要为第四系内部构造, 地面出露地层为第四系。

2.2 野外观测

在工作区内, 按 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 测网, 自南西向东北布设 12 方位测线 26 条, 每条测线 21 个测点, 在已知含气区加密至 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 测网, 总计 601 个测点。每个测点所测的光谱数据的组数, 由地质状况的复杂程度决定。因此共获得 799 条反射光谱曲线。本文中所提及的光谱数据均以测线_测

收稿日期: 2006-02-22, 修订日期: 2006-07-08

基金项目: 多传感器图像的目标特性提取及识别技术预研基金(51483040104BQ0101)项目资助

作者简介: 徐大琦, 1979 年生, 北京理工大学信息科学技术学院博士 e-mail: rufus7@bit.edu.cn

点_组数的格式标识,例如:L7_14_0表示第7线第14测点的第一组数据。野外观测采用ASD公司FieldSpec Pro FR光谱仪。由于工作区主要蚀变矿物特征吸收峰集中在 $2.0\ \mu\text{m}$ 之后的波段,考虑到光谱仪和Hyperion遥感数据的光谱范围,我们选择 $2.0\sim 2.396\ \mu\text{m}$ 为研究波段。

2.3 样品分析

对于在工作区内采集的119个地表样品的矿物学和地球化学检测报告,我们进行了统计分析,发现规律:(1)粘土矿物总量超过28%(均值18.4%与一倍标准偏差9.6%之和)的样品中,采自含气区的样品占78.9%,粘土矿物总量最高的11个样品均采自含气区;(2)方解石含量超过10.1%(均值6.5%与一倍标准偏差3.6%之和)的样品中,采自含气区的样品占79.2%;(3)粘土矿物与碳酸盐(包括方解石、文石、白云石)之和的统计:二者之和超过54.1%(均值38.1%与一倍标准偏差16.0%之和)的样品中,采自含气区的样品占76.5%;(4)粘土矿物中以伊利石化(均值为63.2%)、绿泥石化(均值为17.8%)为主;(5)样品中,石盐含量的均值为29.0%。

已知含气区土壤中粘土矿物和碳酸盐矿物含量明显高于非含气区,具有典型的“粘土矿化”和“碳酸盐化”特征,而且整个工作区含盐量很高。

3 光谱分析和分类

3.1 典型含气区测点的光谱曲线的宏观特征

典型含气区、非含气区测点光谱曲线如图1所示,其中位于下方的由实线表示的光谱曲线取自含气区。对 \times 地区野外测量的799条光谱曲线进行目视观察,发现典型的含气区光谱曲线在 $2.2, 2.33\ \mu\text{m}$ 附近呈现明显的复杂的双吸收峰,吸收峰宽度达到40 nm以上;而且,在 $2.3\sim 2.4\ \mu\text{m}$ 光谱曲线下下降趋势趋缓,甚至微向上倾斜(是烃类物质富集的标志)^[5],整体曲线形状呈现台阶状。

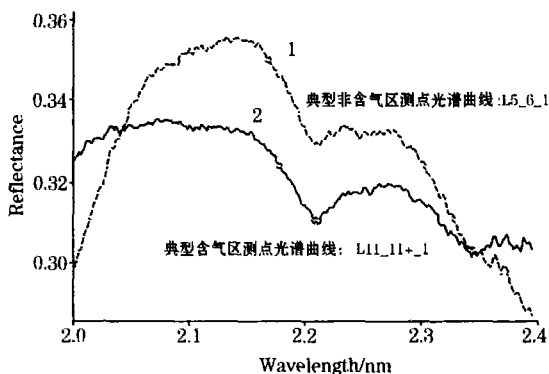


Fig 1 Typical reflectance spectra of observation points

1: L5_6_1; 2: L11_11+1

3.2 分析和分类算法

光谱数据能够提供地物丰富的光谱信息,但同时也存在着数据维数过多、数据冗余等数据处理过程中的瓶颈问题。将小波变换和PCA结合形成了一种新的特征提取和特征选

择算法,有助于数据降维和更好地进行地物分类^[9]。

SAM根据光谱曲线与参考光谱的相似性来决定一个光谱数据的类别^[10]。SAM对照明和反照率(Albedo)的影响相对不灵敏,这一点对反射光谱分析十分重要。因为野外测量时,样品无法在统一的标准下测量,例如湿度的变化会强烈影响反照率的大小。图2中不同湿度情况下的粉砂壤土的反射率曲线验证了上述观点。工作区内,南边临近盐湖,非常潮湿,而北边则非常干燥。因此,反照率对于分类是不利特征,需要剔除。光谱分类过程中,我们还尝试了光谱特征匹配(SFF)和二进制编码分类,发现SAM分类效果最好。

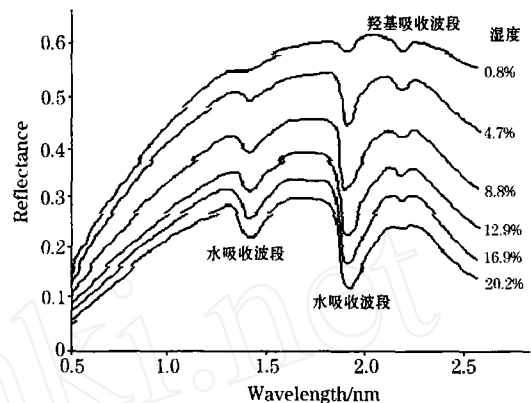


Fig 2 Spectral reflectance curves for silt loam at various moisture

3.3 光谱分类

采用基于小波变换的PCA降维和k均值聚类进行粗分类,从而剔除误差点。误差点出现原因为:(1)野外观测误差; (2)该测点的石盐成分含量过高,超过40%,将油气特征掩盖;(3)部分井口点,经过大量的人工修整。

在粗分类的基础上,以测线为单位,在该测线内选择油气特征相对明显和相对不明显的光谱数据作为样本进行多次SAM细分类。从线内分类的结果中,我们可以得出每条测线中测点的油气特征的相对强弱。

在粗分类的基础上,选择一个典型含气区测点作为样本,选用统一阈值,进行全局高精度的SAM细分类。以相同的高精度标准进行分类,相对客观公正。选择全局分类样本的条件:(1)样品分析报告中,该测点粘土矿物含量与方解石的含量都较高(高于含量均值与一倍标准偏差之和); (2)该测点位于已有气田中;(3)其光谱具有上文给出的典型含气区测点的光谱曲线的宏观特征。

将上述两种细分类方法的聚类结果取交集作为最后的分类结果,显然,交集的测点可作为蚀变异常点,我们将其称为GAP(gas-anomaly-points)。

3.4 算法实现

我们编写了接口程序、基于小波的PCA降维和高精度SAM等ENVI用户函数,将反射光谱数据写成图像格式,读入ENVI,进行降维、k均值聚类和高精度SAM等运算,最后,将分类结果自动输出到文档中。

Table 1 Different choices of classification parameters

分类方法	样本点	阈值/ rad	波段/ μm
SAM1	L7_14_1	0.01, 0.02	2.0 ~ 2.396
SAM2	L7_14_1	0.01, 0.02	2.1 ~ 2.396
SAM3	L11_11+_1	0.01 ~ 0.015	2.0 ~ 2.396
SAM4	L11_11+_1	0.01, 0.02	2.1 ~ 2.396
SAM5	L5_14_1	0.01, 0.02	2.0 ~ 2.396
SAM6	L6_14_0	0.01, 0.02	2.0 ~ 2.396

Table 2 Analysis report of global classified samples

样本点	粘土矿物/ %	方解石/ %
L7_14_1	35.7	9.2
L11_11+_1	34.3	12.4
L5_14_1	30.6	14.4
L6_14_0	41.2	9.0

4 实验设计和结果分析

4.1 实验设计

为了验证算法鲁棒性，我们在分类过程中，选用了不同的样本、研究波段以及分类阈值，如表 1 所示。所选的全局

分类样本的样品分析见表 2。图 3 表示阈值选为 0.01 rad、波段为 2.0 ~ 2.396 μm 时，选用 4 个不同样本的全局分类结果。当选择表 1 中 SAM3 的参数组合，分类结果示意图见图 4。

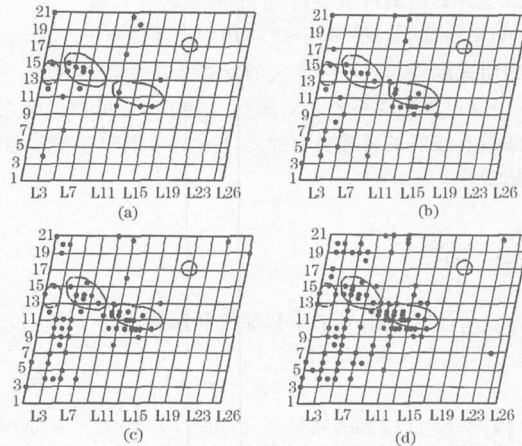


Fig 3 Result sketch map of choosing four different samples to classify globally

(a) : L11_11+_1; (b) : L7_14_1; (c) : L6_14_0; (d) L5_14_1

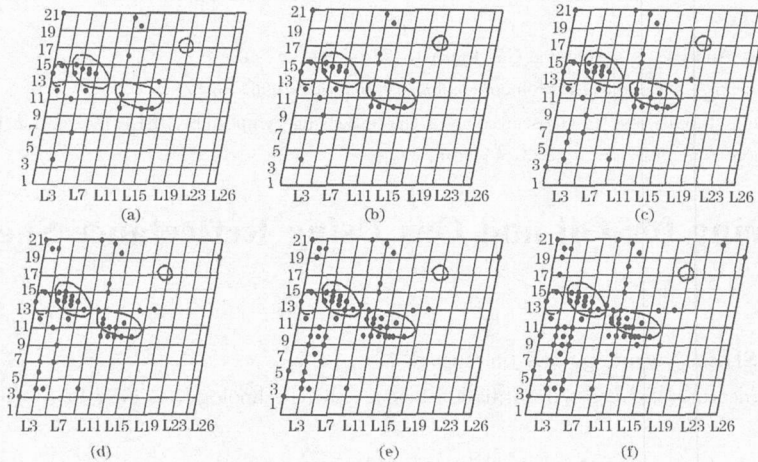


Fig 4 Influence of threshold upon classification result

Thresholds/ rad - (a) : 0.01; (b) : 0.011; (c) : 0.012; (d) : 0.013; (e) : 0.014; (f) : 0.015

图 3 和图 4 中，绿色和红色标记都表示油气异常点 (GAP)，前者表示该测点只有 1 组光谱数据被分为含气区数据；后者则表示该测点有超过 1 组光谱数据被分为含气区数据。显然 GAP 相对密集的地方就是蚀变异常区。4 个红色虚线圈出的地带，从西到东依次是零号、一号、二号、东北部小气田。

4.2 实验结果分析

(1) 图 3 中，GAP 与测区的已有区田成功吻合，3 个较大含气区 (零号、一号、二号气田) 均被圈出，说明地面反射光谱已经实现了含气区的圈定。

(2) 测区东北的小气田未被检出，原因如下：由样品分析报告可知，小气田中，粘土矿物和方解石含量均低于含量

均值，例如 L19_17_0，二者的含量分别为 17.0% 和 6.5%；同时，其天然气探明储量远低于其他 3 个气田。

(3) 由样品分析报告可知，测区内石盐的成分很高，同时，在研究波段内，石盐的反射率数值较高而且均一。分析 799 条光谱曲线，可得出结论：混杂较高含量的石盐使得光谱曲线整体趋于平滑，减弱了 2.2, 2.33 μm 附近明显的复杂双吸收峰特征，导致某些含气区测点未被检出。

(4) 测区地表植被稀少，渺无人烟，有利于高光谱数据的观测和分析。

(5) 如图 4 所示，随着阈值的提高，除含气区内 GAP 逐渐增加以外，其他区域的 GAP 的增加呈现出明显的规律性，即这些测点空间分布相对密集于西南部、西北部、正北部，

而且样品分析报告显示三者的粘土矿物和碳酸盐的含量均较高。因此确定三者分别为蚀变异常区 A, B, C。随着阈值的增加, GAP 首先在 3 个已有气田和正北部的异常区 C 出现 [见图 4(a)], 然后, 西南部的异常区 A [见图 4(b), (c)] 和西北部的异常区 B [见图 4(d), (e), (f)] 依次被分出, 由此可观察蚀变异常区的蚀变程度的相对强弱。

(6) 实验证明, 将 $2.1 \sim 2.396 \mu\text{m}$ 和 $2.0 \sim 2.396 \mu\text{m}$ 分别作为研究波段时, 本文算法的分类结果变化不大。

(7) 通过不断改变参数, 观察分类结果, 可得出结论, 本文算法具有较好的鲁棒性, 最终分类结果不随参数的改变而发生剧烈变化。

5 总 结

本文算法以反射光谱学和油气微渗漏理论为基础, 结合

参 考 文 献

- [1] Saunders D F, Burson K R, Branch J F, et al. *Oil and Gas Journal*, 1993, 91(38): 104.
- [2] Ellis J, Davis H H, Zamudio J A. *Oil and Gas Journal*, 2001, 99(37): 49.
- [3] Hörig B, Kühn F, Oschütz F, et al. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(8): 1413.
- [4] Goetz A F H, Vane G, Solomon J E, et al. *Science*, 1985, 228: 1147.
- [5] Cloutis E A. *Science*, 1989, 245: 165.
- [6] HE Mo-chun, L Ü Xin-biao, LIU Yan-rong(何谋春, 吕新彪, 刘艳荣). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2004, 24(11): 1363.
- [7] McCoy R M, Blake J G, Andrews K L. *Oil and Gas Journal*, 2001, 99(22): 40.
- [8] Schumacher D F. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1996, 66: 71.
- [9] Kaewpajit S, Le Moigne J, El-Ghazawi T. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International*, 2002, 5: 2581.
- [10] Kruse F A, et al. *Remote Sens. Environ.*, 1993, 44: 145.

Study on Exploring for Oil and Gas Using Reflectance Spectra of Surface Soils

XU Da-qi, NI Guo-qiang, SHEN Yuan-ting, HE Jin-ping, JIANG Li-li

Department of Optical Engineering, School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract Reflectance spectra in the visible and near-infrared wavelength region provide a rapid and inexpensive means for determining the mineralogy of samples and obtaining information on chemical composition. Hydrocarbon microseepage theory sets up a cause-and-effect relation between oil and gas reservoirs and some special surface alterations. Therefore the authors can explore for oil and gas by determining the reflectance spectra of surface alterations. This determination can be fulfilled by means of field work and hyperspectral remote sensing. In the present paper, firstly a macroscopical feature of reflectance spectra of typical observation points in gas fields is presented. Then a method is proposed in order to provide surface distribution information (e. g., classification) of alterations based on the reflectance spectra determined from the field, and obtain anomaly zones of the special alterations. This method has been applied to the analysis of the reflectance spectra determined in the field of Qinghai $\times \times$ area, and the classification results tally with the existent gas fields in this area. A robustness analysis of the method shows that good results can be obtained when different combinations of parameters, such as samples, study band regions and thresholds, have been chosen in the process of classification. The valid classification samples and algorithms can be provided for the oil and gas exploration in progress in this area using NASA experimental hyperion hyperspectral satellite.

Keywords Reflectance spectra; Oil and gas exploration; Spectral angle mapper; Alterations

(Received Feb. 22, 2006; accepted Jul. 8, 2006)