

# 基于近红外光谱技术的烃类与粘土矿物识别及其地质意义

卢燕<sup>1,2</sup>, 杨凯<sup>2</sup>, 修连存<sup>3</sup>

LU Yan<sup>1,2</sup>, YANG Kai<sup>2</sup>, XIU Liancun<sup>3</sup>

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中科遥感科技集团有限公司, 天津 300384;  
3. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016

1. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

2. *China RS Geoinformatics Co., Ltd., Tianjin 300384, China;*

3. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China*

**摘要:**沉积岩中自生粘土矿物受成岩过程中物化条件控制,是成岩系统物化条件的指示。近红外反射光谱技术对粘土矿物反应灵敏,在金属矿产勘探中已经得到了日益广泛的应用。首次对油气勘探地质井的试验工作,验证了近红外光谱数据不仅可以第一时间从岩石样品中直接提取微量烃信息,还能解译详细的粘土矿物组合及其变化,从而获取对油气勘探有价值的成岩温度和热成熟度信息。对鄂尔多斯富县地区试验样品的数据分析表明,生油和储油层中的粘土矿物组合(包括铵伊利石、绿泥石、高岭石)变化直接反映了成岩和构造演化物化条件的变化,对于全面理解盆地的环境条件并且判断油气生成的有利区位具有实际应用意义。

**关键词:**近红外反射光谱;粘土矿物;烃;铵;热成熟度

**中图分类号:**P585.2;P588.2;P618.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2017)10-1884-08

**Lu Y, Yang K, Xiu L C. Identification of hydrocarbon and clay minerals based on near-infrared spectroscopy and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(10):1884-1891**

**Abstract:** Authigenic clay minerals are controlled by, and therefore indicative of, physiochemical conditions of the diagenetic process. In oil and gas exploration, timely acquisition of the information on clay minerals and hydrocarbon is of direct application value in terms of understanding the evolution process and diagnosing the existence of hydrocarbon. The experimental work reported in this paper has shown that near-infrared reflectance spectroscopy is useful for extracting the information on hydrocarbon present in a minor to trace amount in sedimentary rocks and detecting the fact that the spatial variations of a series of clay minerals such as (ammonium-bearing) illite, chlorite and kaolinite can directly reflect the changes in temperature and pore fluid composition during the diagenetic process. The results obtained by the authors, therefore, will contribute to improving the understanding of environmental conditions and thermal maturity of organic matter in diagenesis.

**Key words:** near-infrared reflectance spectroscopy; clay minerals; hydrocarbon; ammonium; thermal maturity

鉴于O-H、C-H、H-N、C-O等共价键振动的组合频和倍频在1000~2500nm波长区间有明显的吸收特征<sup>[1-2]</sup>,近红外光谱技术在地质上被广泛地用

于粘土类矿物和烃类物质的分析和鉴定。而基于反射信号的近红外光谱分析,因仪器小型化、样品测定无需制样工序、数据获取简单快速、综合运行

收稿日期:2017-01-21;修订日期:2017-05-30

资助项目:国防科工局项目《GF-5卫星数据岩矿信息定量反演与矿床蚀变信息智能化识别技术》(编号:04-Y20A35-9001-15/17)和科技部项目《岩心光谱扫描仪研发与产业化》(编号:2012YQ050250)

作者简介:卢燕(1985-),女,在读博士生,工程师,从事高光谱遥感地质和岩心光谱扫描技术研究。E-mail:luy@chinarsgeo.com

成本低等优点,尤其适合作为生产现场的实时物相分析技术用于标定大批量的岩矿样品,因而具有良好的商业应用价值,在矿产勘探和开发方面得到了迅速推广<sup>[3-4]</sup>。

沉积岩中自生粘土矿物的形成与转化受制于沉积-成岩系统的环境条件<sup>[5]</sup>,因此可以作为沉积盆地中油气生成和储藏的物化条件直接标志<sup>[6]</sup>。详细鉴定自生粘土矿物组合并追索其空间分布变化,是对沉积盆地进行远景评价和油气勘探的重要工作内容之一。在油气田钻探现场,实时监测钻过过程中岩石样品中的粘土矿物和油烃显示及其变化,具有直接的生产应用意义。

油气勘探中常规的烃测定方法是采集钻井中的气-液相物质,在实验室中采用气相色谱技术测定烃。作为试验,基于实验室的傅里叶红外光谱技术在长庆油田录井试验效果良好<sup>[7]</sup>。本文所采用的近红外反射光谱技术是基于野外和钻井现场进行实时监测钻井岩石样品的油气显示,实现普查性的现场第一时间快速发现异常,为后续详细而有选择性的实验室分析测定提供预示并增强目的性,因而该方法在油气勘探初期具有更直接的生产应用价值。本次工作是针对油气勘探前期的地质井钻探,从岩石样品中获取粘土矿物和油气信息,为地质评价提供综合信息。本文所做的工作是检验该方法对岩石样品中粘土矿物和微量油烃的检测灵敏性和结果可靠性,进一步验证近红外反射光谱技术在快速测量样品和简便提取信息的前提下用于常规生产的物相分析方法的有效性。

## 1 研究区概况

鄂尔多斯盆地是发育在华北地台基底之上的中生代陆相盆地。盆地内主要为三叠系—白垩系碎屑沉积岩。总体轮廓为一个北高、南低的宽缓向斜构造,其中含油层位为三叠系延长组和侏罗系延安组<sup>[8-9]</sup>。直罗油田位于陕北斜坡中南部的富县境内,基本构造形态为一向北西

倾向的单斜。在中生界一下古生界已发现多套含油气层系,延长组是其中的勘探目的层之一<sup>[10]</sup>。

本次所分析样品主要来自富县延长组(图1)。富县勘探区延长组砂岩主要为岩屑长石细砂岩和长石细砂岩,主要成岩相有绿泥石薄膜胶结相、泥质胶结相、石英、长石胶结相、碳酸盐胶结相及浊沸石溶蚀相,其中绿泥石薄膜胶结相和浊沸石溶蚀相发育区物性较好,而碳酸盐胶结相发育区常为成岩致密带<sup>[11-12]</sup>。

## 2 样品及其反射光谱测定

本次研究所测的岩石样品采自鄂尔多斯盆地

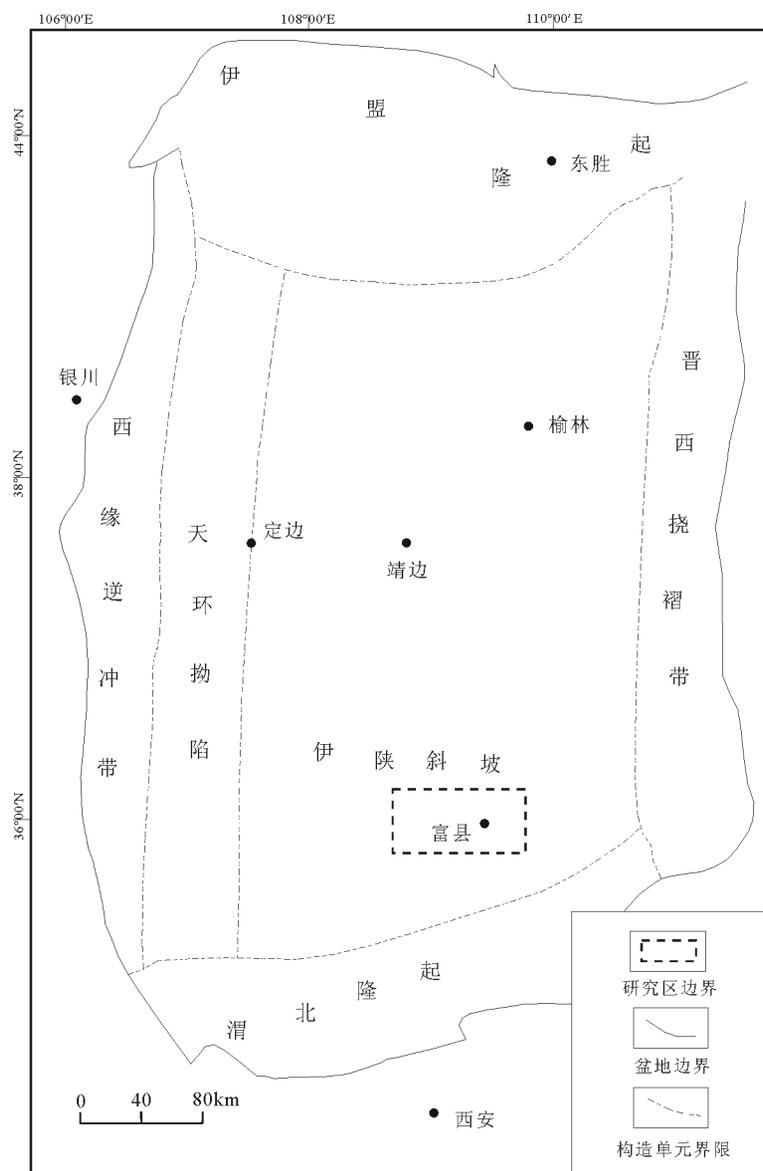


图1 研究区位置

Fig. 1 The location of the study area

中次级构造单元伊陕斜坡的直罗油区的3个水平井MP1(水磨沟井区)、MP3(水磨沟井区)和ZP1(渭家河油区)。样品均为岩石碎屑和粉末,主要岩性为砂岩、粉砂岩和泥岩。粒度分布主要为0.5~5mm。共测定了分属3个钻井的59件样品,每个样品代表8~20m钻孔长度的岩石,所测样品见表1。岩石碎屑样品呈自然干燥状态。目视检查,全部样品无任何油染的迹象。由于粘土矿物的粒度极细,无法在样品中目视辨别。

反射光谱测定采用南京地调中心研制的CSD350A野外便携式光谱仪。该仪器的光谱采样区间为400~2500nm,采样间距为2nm,平均光谱分辨率为8nm。所测样品粒度较细,混合均匀后每个样品测定3条光谱。测样采用主动光源(40W石英卤素灯),反射率标准采用国际标准Spectrlon白板。

### 3 光谱数据处理

在检验每个样品的3条光谱数据之间的基本一致性后,将单个样品的3条原始光谱合并成一个平

均光谱(图2)进行数据处理和信息提取。

光谱数据处理流程为:降噪平滑、拟合包络线后剔除光谱背景、计算一阶和二阶导数、曲线拟合与目标矿物匹配。矿物鉴定和信息提取采用了目视辨认(参照矿物标准图谱,图3)、自动识别(采用TSG软件)和特征吸收谱带相结合的方法。烃类物质的识别参考标准谱图。矿物和烃类物质的含量以光谱数据标准化后的特征吸收强度为量化指标。依据光谱学上最基本的Beer定律:

$$A_i = a_i \times b \times c$$

式中, $A_i$ 为波长 $j$ 的吸收量,可用光谱仪测定; $a_i$ 是波长 $j$ 的吸收系数,对于已知物质是个常数; $b$ 是光程(是光在样品中传播的距离); $c$ 是样品中吸收物质的浓度(含量)。

理论上,矿物的光谱吸收强度与吸收物质含量之间的正比关系是确定的,并且这种关系在前人实际工作中已经得到充分验证和普遍应用<sup>[4,13-14]</sup>。

光谱标准化的方法是:①拟合每条原始光谱的背景线;②每个波长位置的原始反射率除以其对应

表1 所测样品表及其对应的地层岩性特征  
Table 1 The samples and their corresponding stratigraphic lithology

水磨沟区				渭家河油区		系	组	油层	岩性	湖盆演化阶段 <sup>[12]</sup>
MP1		MP3		ZP1						
样品号	深度/m	样品号	深度	样品号	深度/m					
MP1-18	560~570	MP3-24	577~586			侏罗系	延安组	深灰色泥岩夹灰色、浅灰色细砂岩,局部夹煤层及煤线,局部砂岩为含油、气砂岩		
MP1-17	675~682	MP3-23	705~713				富县组	棕红、紫红、灰黑、深灰等杂色泥岩,深灰色砂质泥岩夹灰白、浅灰色细砂岩,底部砂岩局部为含油、气砂岩		
MP1-16	734~742	MP3-22	664~672			三叠系	延长组	长1	灰黑色、深灰色砂质泥岩、深灰色泥岩夹浅灰色粉砂岩、细砂岩不等厚互层,砂岩局部为含油、气砂岩	
MP1-15	815~824	MP3-21	740~749					长2	浅灰色细岩为主,与深灰色泥岩、砂质泥岩互层。中、底部砂岩为油水同层	湖盆消亡
MP1-14	865~873	MP3-18	865~875	ZP1-16	442~452			长3	灰、深灰色泥岩与浅灰色细砂岩互层,下部砂岩层增多增厚	
MP1-13	944~952	MP3-17	902~911	ZP1-15	533~546			长4+5	暗色泥质岩,砂质页岩与浅灰色粉、细砂岩互层	
MP1-12	985~995	MP3-16	955~965	ZP1-14	585~595			长6	浅灰色粉砂岩、褐灰色块状细砂岩夹暗色泥岩、泥质粉砂岩、细砂岩互层,夹薄层凝灰岩,砂岩局部为含油、气砂岩	逐渐萎缩
MP1-11	1121~1130	MP3-15	983~996	ZP1-13	665~673			长7	暗色泥岩、炭质泥岩、油页岩夹细砂岩,中、上部砂岩为含油、气砂岩	强烈拗陷
MP1-10	1165~1175	MP3-14	1015~1023	ZP1-12	712~720			长8	暗色泥岩、砂质泥岩、油页岩夹薄层粉细砂岩	湖盆扩张
MP1-9	1191~1203	MP3-13	1072~1083	ZP1-11	753~733			长9	暗色泥岩、页岩、灰绿色粉-细砂岩,局部地区发育油页岩,中上部夹薄层凝灰岩	
MP1-8	1262~1270	MP3-12	1092~1101	ZP1-10	933~942			长10	肉红色、灰绿色中-粗粒长石砂岩夹粉砂质泥岩,具有麻斑结构	湖盆形成
MP1-7	1285~1296	MP3-11	1115~1125	ZP1-9(1)	998~1012			纸坊组	上部为灰绿、棕色、紫色泥岩夹砂岩,下部为灰绿色砂岩、砂砾岩	
MP1-6	1356~1363	MP3-10	1150~1159	ZP1-9	998~1012					
MP1-5	1446~1459	MP3-9	1208~1219	ZP1-8	1068~1078					
MP1-4	1517~1529	MP3-8	1228~1236	ZP1-7	1106~1115					
MP1-3	1570~1586	MP3-7	1272~1280	ZP1-6	1169~1183					
MP1-2	1778~1786	MP3-6	1315~1323	ZP1-5	1307~1316					
MP1-1	1953~1972	MP3-5	1372~1380	ZP1-4	1423~1431					
		MP3-4	1466~1476	ZP1-3	1595~1605					
		MP3-3	1516~1526	ZP1-2	1706~1715					
		MP3-2	1601~1605	ZP1-1	1840~1845					

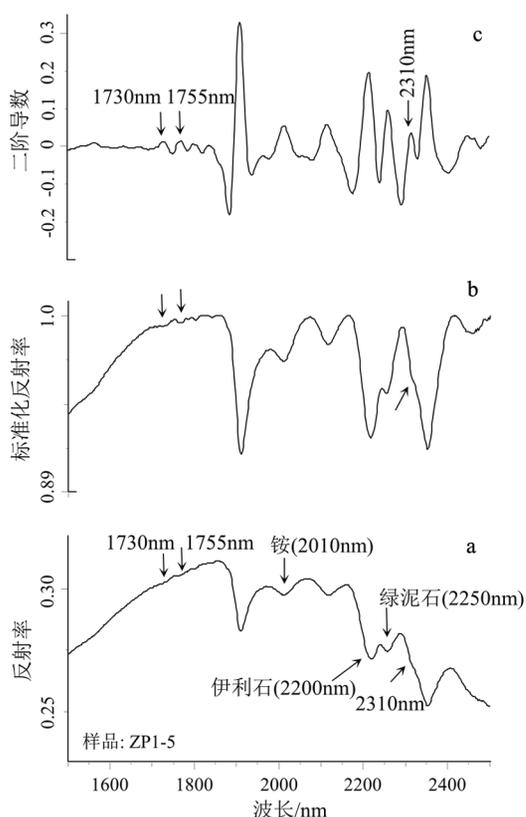


图2 同一样品的反射光谱(a)、标准化光谱(b)、导数光谱(c)  
(伊利石、绿泥石、铵、烃的吸收谱带标在反射光谱上)  
Fig. 2 Reflectance (a), normalized (b) and derivative (c)  
spectra of the same sample

波长位置的反射背景值。标准化后每个波长位置的光谱数据在0~1之间(图4)。数据标准化的物理意义是消除或减低以下2个对原始吸收强度的影响因素<sup>[2]</sup>:①样品之间亮度的差别;②样品之间的粒度差别。粘土矿物信息提取在标准化反射光谱上完成,以标准化反射光谱测定的谱带吸收强度(即谱带中心位置的深度)作为所涉及的粘土矿物的含量指标(正相关)。

由于油烃类在所测样品中含量低(多数样品低于本光谱方法的检测限),其特征吸收的强度很有限,不足以反映为成型的特征谱带,在反射光谱上难以准确鉴定和测量。为提高探测灵敏度,采用了二阶导数光谱(图2-C)。由于导数对原始光谱曲线的局部形态和斜率变化尤其敏感,微量烃的存在得以在导数光谱数据中识别。本工作以二阶导数光谱上测得的吸收谱带的高度作为烃含量的指标

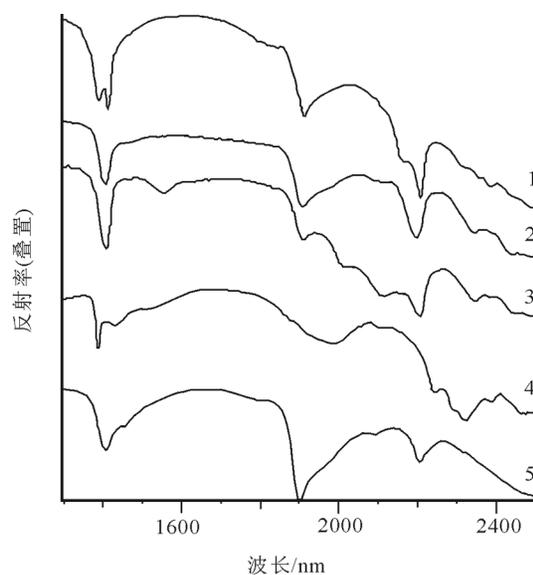


图3 矿物的标准反射光谱(选自 SpecMIN 光谱库)  
Fig. 3 Standard reflectance spectrum of minerals  
1—高岭石;2—伊利石;3—铵伊利石;4—绿泥石;5—蒙脱石

(二者为正相关)。

对于粘土矿物,结晶度是一个重要的环境参数,其主要受粘土矿物形成时的温度控制,即温度越高结晶程度越好。参照通常做法,以吸收谱带深度的一半位置的谱带宽度(半深宽)作为矿物结晶度的度量(越宽则结晶度越低)<sup>[14]</sup>。本工作中,考虑到所测的为全岩样品(多种矿物混合物),选用粘土矿物共有的结晶水的2个吸收谱带(谱带中心分别位于1410nm和1910nm)作为度量粘土矿物综合结晶度的参数。由于本次是采用了混合粘土矿物的综合结晶度而不是通常采用的单矿物的结晶度,可能存在一定程度的误差(如果与X光衍射结果对比)。

本工作采用吸收强度作为所测目标的含量指标。对粘土矿物,以反射光谱剔除背景后测得谱带深度作为吸收强度,用作粘土矿物的含量指标;对于烃类,在二阶导数光谱上测得其谱带的波高作为烃类含量指标。虽然没有采用定标样品获得两者间的定量关系,可以认为吸收强度与吸收物质含量之间为接近线性的正相关<sup>[13]</sup>,直接采用吸收强度作为含量指标是可靠的。

## 4 结果及其分析

### 4.1 烃

1730nm、1755nm和2310nm是石油中烃类物质

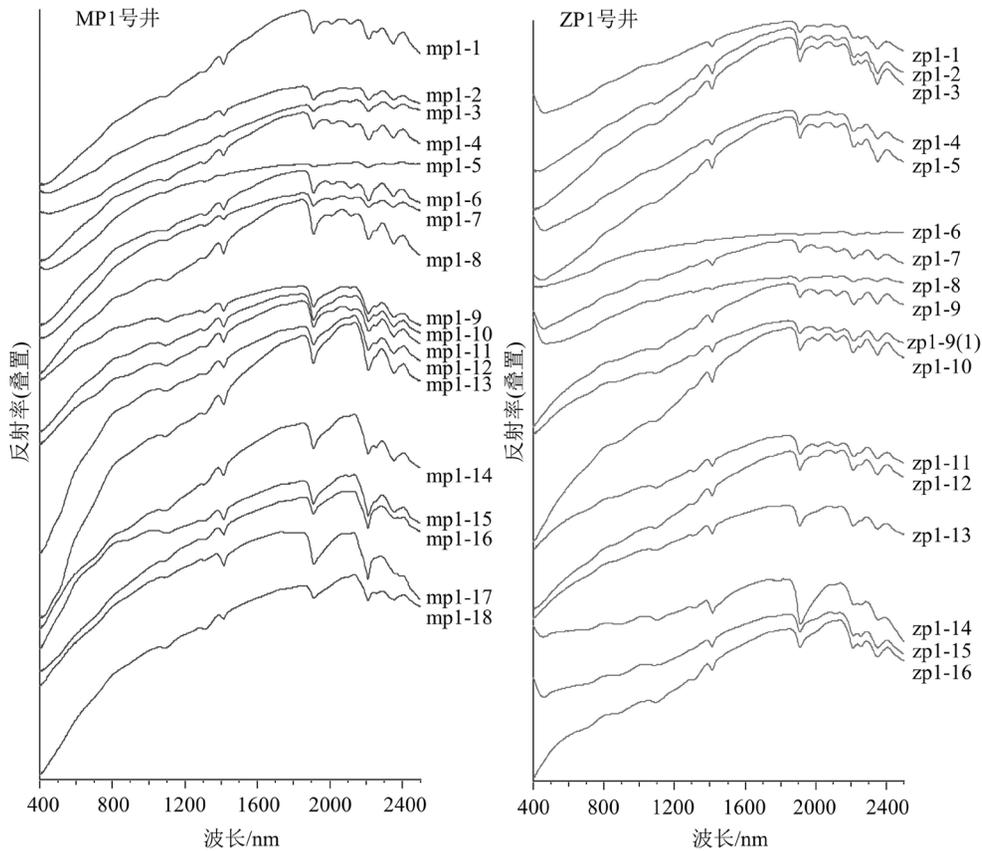


图4 MP1与ZP1号井样品的反射光谱(叠置)

Fig. 4 Reflectance spectra (stacked) of samples from wells MP1 and ZP1

的3个特征性的近红外吸收<sup>[1,15]</sup>。考虑到样品中可能共存的粘土矿物和碳酸盐类,2310nm位置会叠加其他矿物光谱特征,因此实际能观察到的碳氢化合物

的吸收主要应在1730nm和1755nm这2个波长位置(图5),其中1730nm附近的吸收谱带尤其重要,因为在这个波长位置不存在矿物吸收的干扰。而

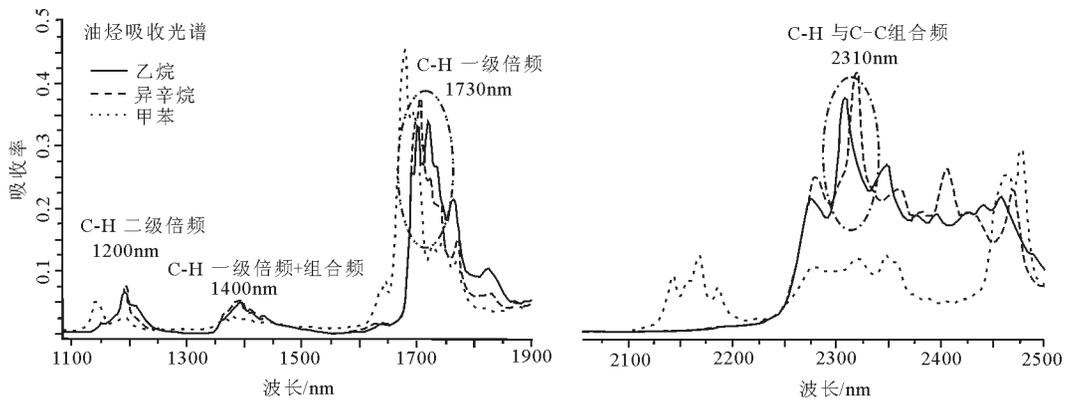


图5 烃的吸收光谱(引自Texas大学红外吸收光谱库)

(中心波长位于1730nm和2310nm的2个吸收谱带常用于鉴定岩石中的石油。图中显示的是吸收(A)光谱,而本次所测的是反射(R)光谱。对于不透明表面(如岩石),吸收A与反射R的关系为  $A \approx 1 - R$ )

Fig. 5 Absorption spectrum of hydrocarbon

2310nm 特征吸收是否源于烃类,则需要结合 1730nm 位置进行交叉验证。

本次所测的 59 个岩石样品中,9 个样品的反射光谱显示了微弱的 1730nm 和 1755nm 吸收,根据上述矿物的光谱吸收强度与吸收物质含量的近似正相关关系,反映可能含低量的油烃信息。而对于油烃信息吸收强度更高的 2310nm 波长位置,与岩石样品中绿泥石和伊利石的吸收谱带部分重合,通常只反映为反射光谱曲线上的一个不明显的转折(图 2-a 中以斜箭头所示),因此不具有诊断性意义。

通过对 1730nm 和 2310nm 的吸收强度进行互检,两者间高度正相关性证实了该两段吸收均来自于同一种物质,而参考已知标准光谱,表明只可能是油烃信息(图 6)。因此,在样品含油量低的情况下,本工作采用该 2 个吸收的平均值作为度量油气含量的指标是一个可取的方式。

针对微弱的光谱吸收特征进行油烃信息含量的标定,需采用导数光谱方法来放大微弱的油烃吸收特征,以便准确地分辨和量化油烃信息。在二阶导数曲线上,矿物和烃之间相互叠加的信息被分开,其中微弱的烃吸收特征被放大成独立的波峰(图 2-c)。

二阶导数结果表明,所测的 59 个岩石样品中,

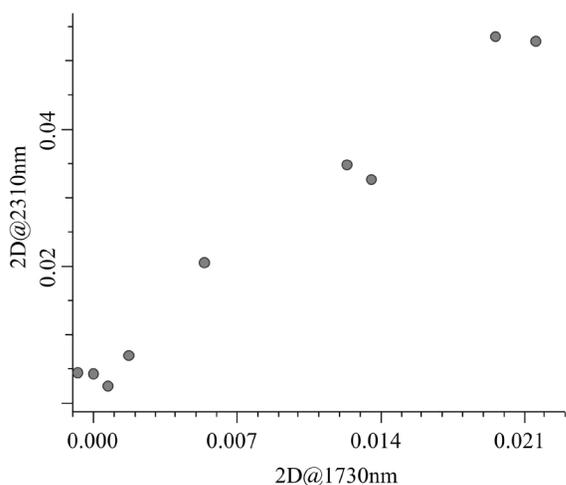


图 6 样品 1730nm 与 2310nm 吸收强度的相关性  
(吸收强度以二阶导数(2D)标定。1730nm 和 2310nm 的 2 个吸收谱带的高度相关性指示着二者源于同一物质(烃)的吸收)

Fig. 6 Correlation of absorption intensity between 1730nm and 2310nm bands

多数所含的烃都低于本文所采用的反射光谱方法的检测下限,只有 9 个样品高于所采用方法的检测限(如图 2 中 ZP1-5 是烃光谱记录最强的样品)。从这 2 个油类吸收的波长区间的强度判断,该 9 个样品的含油量均很低。

综合考虑矿物组成与油烃关系,统计显示,含油的样品主要与碳酸盐类(方解石)关系密切(图 7),说明含油层为碳酸盐岩或是含碳酸盐的砂岩,符合该区地质特征。根据前人对三叠系延长组储集层中流体包裹体的研究得出,铁碳酸盐胶结是造成湖盆中部地区长 6-长 8 砂岩储层致密化的决定性因素,生排烃高峰期储层物性较好,湖盆中部长 6-长 8 油藏经历了边致密边成藏的成藏过程<sup>[12]</sup>。

#### 4.2 铵

本次测定的 3 个钻井的样品统计结果显示,铵含量与粘土结晶度之间虽然相关性不强,但是存在正相关的趋势(图 8),表明铵趋于在粘土结晶度高的岩石中。在沉积岩中, $\text{NH}_4^+$ 主要在伊利石中替换  $\text{K}^+$ 。随着沉积物成岩作用过程中温度的逐渐升高,伴随着蒙脱石往伊利石的转化, $\text{NH}_4^+$ 替换  $\text{K}^+$  进入伊利石的层间位置。可以预料, $\text{NH}_4^+$  固化在伊利石中指示着沉积物的埋藏达到较深程度,温度接近生油条件峰值区。除受温度控制外,孔隙流体的高  $\text{NH}_4^+$  含量、酸性和还原条件都有利于在成岩过程中固化铵到伊利石中<sup>[16]</sup>。

$\text{NH}_4^+$  在沉积岩中主要来源之一是有机物转化<sup>[6]</sup>。在墨西哥湾油田观察到,作为生油层的泥岩中铵浓度与泥岩的热成熟度大致正相关,而最高的铵量是

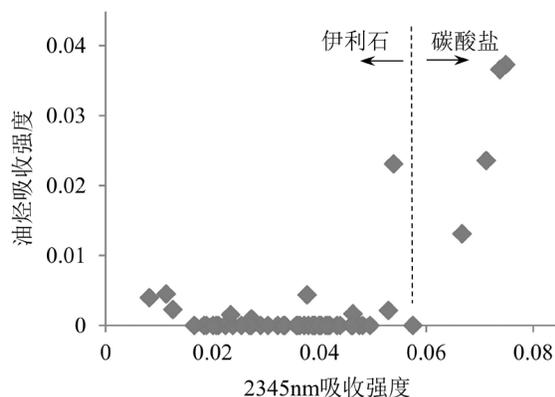


图 7 烃与矿物组成的关系

Fig. 7 Relationship between hydrocarbon and mineral composition

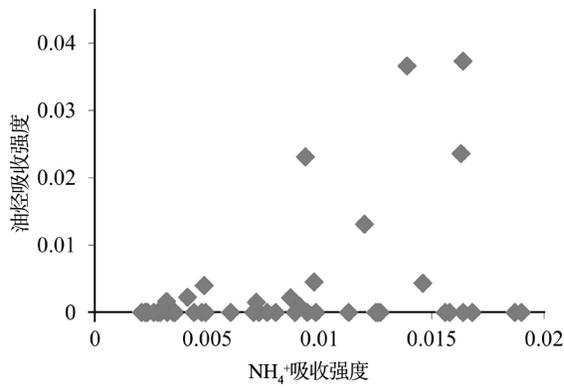


图8 烃类(1730nm与2310nm强度平均值)与铵(2010nm强度)吸收关系

Fig. 8 Relationship between the average intensity of 1730nm and 2310nm bands and the absorption intensity of ammonium

在储油层的砂岩中,因此粘土中的铵含量可能作为石油生成和运移的指示之一<sup>[17-18]</sup>。同样的现象在北海油田的泥岩中也有报道,即泥岩中粘土矿物的铵含量与埋深(温度)呈正相关<sup>[19]</sup>。固态铵矿物在中国含油盆地中的报道很少,但在华北含煤地层中发现了类似于墨西哥湾油田中的情况<sup>[20]</sup>,即铵伊利石趋向形成于成熟度高的煤层中。虽然本工作涉及的样品数量有限,不足以统计出量化的相关性,油偏高的样品的确表现出趋向于铵含量高区间(图9),可能指示了两者之间的联系,这与资料报道吻合。

这里的粘土结晶度增高指示粘土形成温度升高,与墨西哥湾油田观察到的现象相似,说明铵趋向于成熟度高的成岩环境。

#### 4.3 粘土矿物

富县勘探区延长组填隙物组分总体含量高,变化较大,其中以胶结物为主,杂基含量较少,胶结物主要为绿泥石、碳酸盐、伊利石,并含有少量的高岭石、硅质<sup>[11-12]</sup>。所测样品结果显示,粘土矿物主要是伊利石、绿泥石、蒙脱石和少量高岭石,这与该区的储层填隙物的矿物特征一致。以伊利石和绿泥石为主要粘土矿物而蒙脱石较少,说明该区经历的成岩作用的温度(和埋深)比较高,即热成熟度高,主要处于生油条件的峰值区偏下。由此可以判断,环境条件(温度)进一步升高可能导

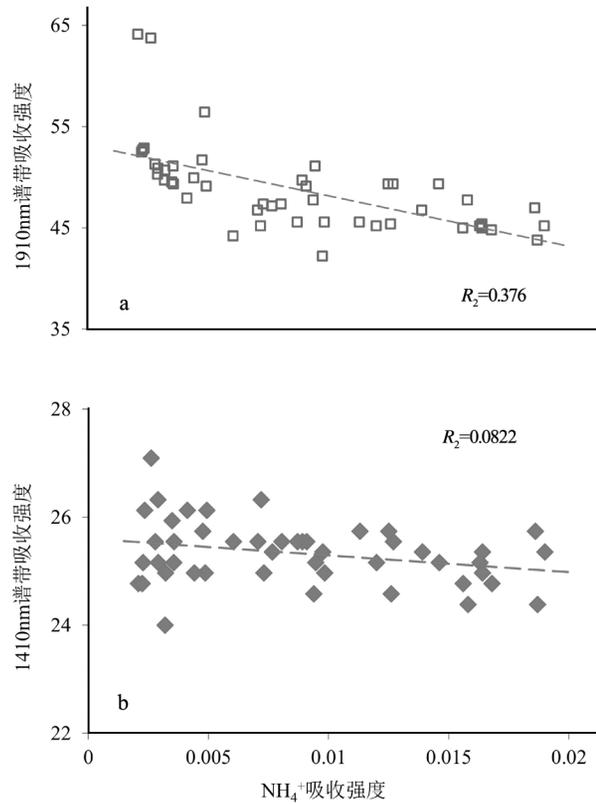


图9 粘土矿物结晶度与铵含量关系(虚线为拟合的线性关系)

Fig. 9 Relationship between crystallinity of clay minerals and absorption intensity of ammonium  
a—1910nm吸收谱带的半深宽;b—1410nm吸收谱带的半深宽

致油气迁移。本区油气勘探值得参考这种地质环境条件信息。

部分样品中,绿泥石成为主要层状矿物之一,与伊利石共生,其光谱显示非常接近于浅成热液体系的蚀变绢云母+绿泥石组合。这种特征性组合指示,局部的沉积-成岩环境开始向内生热液作用过渡(温度可能接近150~200°C),似乎进入不利于油烃保存的环境条件。

此外,方解石是常见的碳酸盐矿物,尤其在含油样品中碳酸盐明显升高(图7),指示含油岩层的岩性特点(灰岩、灰质砂岩)。

## 5 结语

(1)MP1、MP3和ZP1井中的砂岩和泥岩热成熟度较高,在粘土矿物组成上表现为以伊利石为主,蒙脱石较少。

(2)部分伊利石样品含铵,并且显示含烃高的趋势。铵固化进入伊利石反映了沉积岩较高的热成熟度,可能指示温度已经处于有机质完全成熟区间(生成烃)。铵与粘土矿物的结晶度存在正相关,表明铵趋于形成在结晶度高的成岩环境,也从另一方面证实了铵与热成熟度的关系。含铵高的岩层可能邻近含油砂层或代表完全成熟的生油泥质岩。本次工作的结果表明,有必要进一步研究和测试盆地中沉积层序中的铵伊利石及其对盆地局部环境和热演化的意义。虽然本次样品测试结果不足以对区域上热演化和油气生成及运移做出客观判断,但是结果表明,值得对鄂尔多斯盆地生油和含油层位的含铵粘土做进一步工作,全面掌握其对沉积和成岩环境的指示意义。

(3)砂岩中绿泥石的普遍存在(为伊利石-绿泥石组合)说明,碎屑沉积岩系中的岩屑较多,在成岩过程中形成了铁-镁层状矿物。部分样品显示的伊利石-绿泥石组合,代表着成岩环境的温度进一步升高,可能已经超出了最佳油烃生成区。

(4)近红外光谱对岩石中微量的油烃有灵敏反应。采用适当的数据处理方法,可以从全岩样品富含粘土的近红外反射光谱数据中提取出可靠的油烃信息。

(5)近红外反射光谱技术作为一种野外工作现场(如钻井机台)的快速物相分析手段,简单、便捷、无需制样,可以在第一时间为生产应用提供丰富且可靠的矿物和油烃信息,也为后续的实验室详细测定提供预示和增强目的性。

**致谢:**中石油勘探开发研究院提供试验用钻井样品,南京地质调查中心光谱仪器室提供了光谱测试仪器,南京地质调查中心郑志忠研究员审阅并修改了本文初稿,在此一并表示感谢。

### 参考资料

[1]Cloutis E A. Spectral reflectance properties of hydrocarbons: remote-sensing implications[J]. *Science*, 1989, 245:165-168.  
 [2]Clark R N, King T V V, Klejwa M, et al. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95B:12653-12680.  
 [3]Huntington J, Quigley M, Yang K, et al. Geological Overview of HyLogging 18000m of Core from the Eastern Goldfields of Western Australia[C]//Proceedings of 6th International Mining Geology Conference, Darwin, NT, 2006: 21-23.

[4]Yang K, Whitbourn L B, Mason P. Mapping the chemical composition of nickel laterites with reflectance spectroscopy at Koniambo[J]. *Economic Geology*, 2013, 108(6): 1285-1299.  
 [5]Velde B. Clay minerals: A Physico-Chemical Explanation of their Occurrence, Developments in Sedimentology[M]. Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo, 1985: 427.  
 [6]Van Keer I, Muchez P H, Viaene W. Clay mineralogical variations and evolutions in sandstone sequences near coal seam and shales in the Westphalian the Campine Basin[J]. *Clay Minerals*, 1998, 33(1): 159-169.  
 [7]崔子岳, 张晓刚, 张涛, 等. 红外光谱录井技术在长庆油田三低油气藏中的应用与实践[J]. *录井工程*, 2012, 23(3): 6-11.  
 [8]罗健强, 何忠明. 鄂尔多斯盆地中生代构造演化特征及油气分布[J]. *地质与资源*, 2008, 17(2): 135-138.  
 [9]王建民, 王佳媛. 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡上的低幅度构造与油气富集[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(1): 49-57.  
 [10]白霁, 张金功, 李渭, 等. 陕北富县地区直罗油田上三叠统延长组长6储层成岩作用与有利成岩相带[J]. *地质通报*, 2013, 32(5): 790-798.  
 [11]郭艳琴. 富县探区延长组储层微观特征研究[D]. 西北大学博士学位论文, 2006.  
 [12]邓秀芹. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组超低渗透大型岩性油藏成藏机理研究[D]. 西北大学博士学位论文, 2011.  
 [13]Yang K, Huntington J F, Gemmel J B, et al. Variations in composition and abundance of white mica in the hydrothermal alteration system at Hellyer, Tasmania, as revealed by infrared reflectance spectroscopy[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, 108(2): 143-156.  
 [14]Cudahy T, Jones M, Thomas M, et al. Next Generation Mineral Mapping: Queensland airborne HyMap and satellite ASTER surveys 2006-2008[C]//CSIRO Report P2007/364, 2007: 161. <http://c3dmm.csiro.au/NGMM/>.  
 [15]Allen C S, Krekeler M P S. Reflectance spectra of crude oils and refined petroleum products on a variety of common substrates[C]. *Spie Defense, Security, & Sensing*, 2010, 7687: 61-64.  
 [16]罗泰义. 高振敏. 固定铵的矿物学研究[J]. *矿物学报*, 1994, 14(4): 404-407.  
 [17]Williams L B, Ferrell R E Jr, Chinn Elizabeth W, et al. Fixed ammonium in clays associated with crude oils[J]. *Applied Geochemistry*, 1989, 4(6): 605-616.  
 [18]Williams L B, Wilcoxon B R, Ferrell R E, et al. Diagenesis of ammonium during hydrocarbon maturation and migration, Wilcox Group, Louisiana, U.S.A.[J]. *Applied Geochemistry*, 1992, 7(2): 123-134.  
 [19]Lindgreen H. Ammonium fixation during illite-smectite diagenesis in Upper Jurassic shale, North Sea[J]. *Clay Minerals*, 1994, 29(4): 527-537.  
 [20]刘钦甫, 郑启明, 申琦. 含煤地层中铵伊利石矿物特征及成因[J]. *矿物学报*, 2011, S1: 719-720.