

# 鄂尔多斯盆地延长组长7湖相页岩油地质特征评价

张文正<sup>1,2,3</sup>, 杨华<sup>2,4</sup>, 杨伟伟<sup>1,2\*</sup>, 吴凯<sup>1,2</sup>, 刘飞<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西西安 710021; 2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西西安 710018; 3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640; 4. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司, 陕西西安 710021)

**摘要:** 页岩油是重要的非常规油气资源之一。利用地球化学、测井、X射线衍射、扫描电镜等资料对鄂尔多斯盆地延长组长7页岩油的地质特征展开了研究。研究表明, 鄂尔多斯盆地延长组长7湖相页岩层十分发育, 根据岩性组合、地球化学等特征可以将长7页岩划分为“砂岩-页岩互层”、“厚层状类页岩”与“厚层状类页岩”等三种类型。长7湖相页岩层分布范围广且厚度较大, 提供了页岩油成藏的基本地质条件; 岩石中脆性矿物含量高, 为页岩油勘探开发的必要条件; 有机质丰度高、有机质类型好且有机质热演化程度适中, 奠定了页岩油聚集成藏的物质基础; 虽然长7页岩十分致密, 但在扫描电镜下可见微米级裂隙, 并且湖盆中部等地区发育物性相对较好的薄砂岩夹层, 提供了页岩油的储集空间。分析测试资料显示, 长7页岩含油性较好, 并具有一定的含气量; 薄砂岩夹层油源充足, 紫外光下具有较强的荧光显示。综合地质条件及含油气性研究, “砂岩-页岩互层”分布区被评价为最有利的页岩油勘探目标区, “类页岩”较“类页岩”生烃条件更好, 脆性更强, 微米级裂缝更为发育, 含油气性较好, 为第二类有利勘探目标区。

**关键词:** 页岩油; 薄砂岩夹层; 地质条件; 延长组; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: P593 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2015)05-0505-11

## Assessment of geological characteristics of lacustrine shale oil reservoir in Chang7 Member of Yanchang Formation, Ordos Basin

ZHANG Wen-zheng<sup>1,2,3</sup>, YANG Hua<sup>2,4</sup>, YANG Wei-wei<sup>1,2\*</sup>, WU Kai<sup>1,2</sup> and LIU Fei<sup>1,2</sup>

1. Changqing Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710021, China;
2. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an 710018, China;
3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
4. Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710021, China

**Abstract:** Shale oil is one of the important abnormal hydrocarbon resources. The geological conditions of Chang7 lacustrine shale oil reservoir in Yanchang Formation of Ordos Basin were studied by geochemical analysis, well logging, X ray diffraction, SEM, etc. The results show that the Chang7 lacustrine shale was well developed, and it can be divided into three types including “sand-shale interbed”, “thick shale of class ” and “thick shale of class ”, based on the lithological combination and geochemical characteristics. The Chang7 lacustrine shale extends widely with large thickness, which provides the basic geological conditions for shale oil accumulation. The shale has high content of brittle minerals which are necessary for shale oil exploration and development. High abundance of organic matter, fine organic matter types and appropriate thermal stage of the shale, lay a material foundation for shale oil accumulation. Although the Chang7 shale is very tight, micro-fractures can be found under SEM, and many thin sand interlayers with better physical properties are well developed in the central part of the basin. Analytical data display that the Chang7 shale has good oil-bearing property and some extent of gas, and the thin sand interlayers show strong fluorescence under ultraviolet light owing to adequate oil source. Based on the geological conditions and oil-gas bearing properties, “sand-shale interbed” area are considered as the most

收稿日期(Received): 2015-01-30; 改回日期(Revised): 2015-03-19; 接受日期(Accepted): 2015-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(41473046); 国家重点基础研究发展计划项目(2014CB239003); 长庆油田分公司科研项目(2014-6-5)

作者简介: 张文正(1960-), 男, 学士、教授级高级工程师, 有机地球化学专业。E-mail: zzw\_cq@petrochina.com.cn

\* 通讯作者(Corresponding author): YANG Wei-wei, E-mail: yww\_0101@sina.com; Tel: +86-29-86590643

favorable target for shale oil exploration. Compared with “class shale”, “class shale” has better conditions of hydrocarbon generation, stronger brittleness, much more micro-fractures and better oil-gas bearing properties, so it is considered as the second favorable target for shale oil exploration.

**Key words:** shale oil; thin sand interlayer; geological conditions; Yanchang Formation; Ordos Basin

## 0 引言

页岩油是指以游离(含凝析态)、吸附及溶解态(可溶解于天然气、干酪根和残余水等)等多种方式赋存于有效生烃泥页岩地层系中且具有勘探开发意义的非气态烃类,属于典型的自生自储型原地聚集油气类型<sup>[1-3]</sup>。储集层岩性主要为富有机质泥页岩及其夹有的薄层致密砂岩、碳酸盐岩等。目前页岩油已在美国、加拿大、澳大利亚等国家得到了商业性的开发<sup>[2,4-9]</sup>,在我国渤海湾、鄂尔多斯、松辽、南襄等多个中生代陆相湖盆中,也已不同程度地获得了工业页岩油流<sup>[10-13]</sup>,显示出良好的勘探开发前景。以往研究认为富有机质黑色页岩主要是提供油气来源的生油岩,或为阻止油气继续运移、逸散的封盖层,并非油气储集层,故长期未被纳入油气勘探开发之列,但在大量钻遇黑色富有机质页岩地层中发现了丰富的石油显示,证明富有机质页岩中存在页岩油资源。

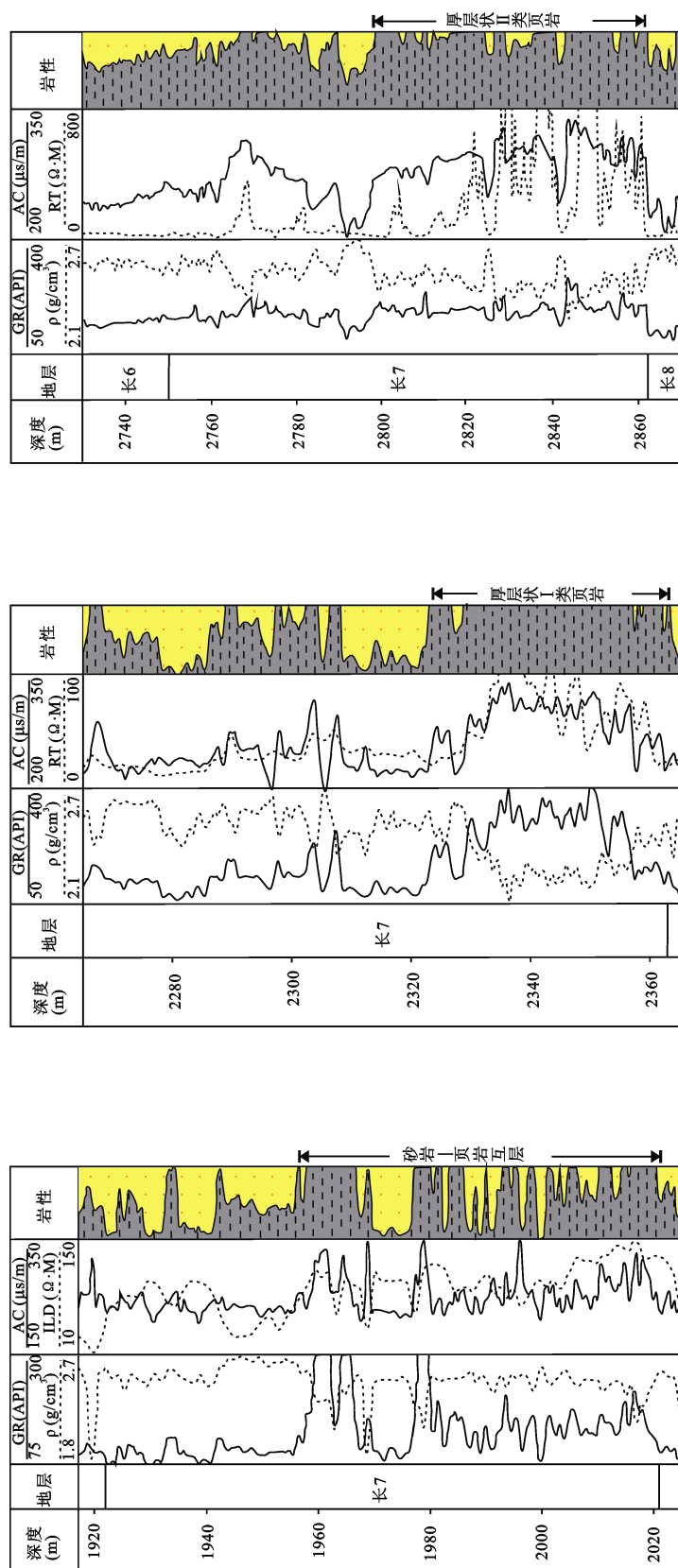
鄂尔多斯盆地为我国第二大沉积盆地,中生界石油资源十分丰富。晚三叠世时期,华北陆块与扬子陆块碰撞拼接,受秦岭造山活动的影响,在华北陆块西南部的鄂尔多斯地区形成了大型陆相湖盆<sup>[14-16]</sup>,中生界延长组记录了整个湖盆发生、发展到消亡的全过程<sup>[14-16]</sup>。根据岩性、沉积特征,可以将延长组自上而下划分为长1—长10等10个油层组,其中长7期为湖泊发展的鼎盛时期,大范围发育了一套深湖-半深湖相页岩层<sup>[14-16]</sup>,为页岩油生烃成藏奠定了物质基础。目前已有学者对鄂尔多斯盆地长7页岩油展开初步探讨<sup>[17-18]</sup>,并利用测井资料预测了页岩油储层裂缝的展布<sup>[19]</sup>,但尚未对页岩油形成的地质条件、含油气性特征等方面展开详细研究。本工作拟利用测井、地球化学、岩石薄片、扫描电镜等资料对鄂尔多斯盆地延长组长7湖相页岩层的发育与分布特征、矿物岩石学及有机地球化学等特征进行研究,对鄂尔多斯盆地延长组湖相页岩油的地质特征展开评价,以期对页岩油藏富集区评价、资源潜力分析等深入研究奠定基础,从而有效指导鄂

尔多斯盆地页岩油的勘探开发。

## 1 长7页岩油的定义与分类

在晚三叠世长7早期,强烈的构造活动使得湖盆快速扩张<sup>[20]</sup>,形成了大范围的深水沉积,发育了大规模的湖相页岩层,同期存在的地震活动诱发了盆地内重力流沉积,即震浊积岩<sup>[21]</sup>,其最大特点是页岩与薄夹层砂岩呈频繁互层沉积。因此,长7底部发育深湖-半深湖相泥页岩;长7中上部发育致密砂岩、暗色泥岩与粉砂质泥岩(图1)。就鄂尔多斯盆地而言,可以将页岩油定义为长7湖相页岩层内的油气聚集,储集层以黑色富有机质页岩为主,同时包括不能单独作为油藏单元开发的单个或多个薄砂岩夹层,属典型的源内油(气)藏。与其相对应,长7中上段致密砂岩内的油气聚集被称为致密油。从岩性组合特征来看,长7湖相页岩层发育“砂岩-页岩互层”(图1a)与“厚层状页岩层”两种地层组合类型(图1b、图1c)。

根据有机质丰度特征、元素地球化学特征可以将长7湖相页岩层划分为类页岩与类页岩。类页岩富含有机质,扫描电镜下常见有机质纹层与大量黄铁矿,TOC含量一般大于6%,最高可达30%以上,异常富集放射性铀元素(平均铀含量为 $50 \times 10^{-6}$ ,最高可达 $140 \times 10^{-6}$ ,61个样品), $S^{2-}$ 含量极高(平均为8.2%,最高为18.26%,61个样品),而稀土元素含量较低(平均含量为 $148 \times 10^{-6}$ ,61个样品),反映了有机质快速堆积、陆源碎屑补给速度慢的深湖相缺氧沉积,该类页岩在中国乃至全世界都较为少见,为优质烃源岩,也叫富铀页岩(hot shale)。类页岩(又称黑色泥岩)有机碳含量主要为2%~6%,扫描电镜下未见有机质纹层,黄铁矿含量也降低,铀元素含量平均为 $7.2 \times 10^{-6}$ (40个样品), $S^{2-}$ 含量平均为1.36%(35个样品),稀土元素含量平均为 $221 \times 10^{-6}$ (40个样品),说明其形成于陆源补给速度相对较快的湖泊环境中。基于此,两类页岩在平面分布、厚度展布、岩石矿物学特征、储集空间类型等方面都具有一定的规律性与差异性(下文



(c) G135井, “厚层状 II 类页岩” 为主

(b) L57井, “厚层状 I 类页岩” 为主

(a) B251井, “砂岩-页岩互层” 为主

图 1 鄂尔多斯盆地延长组长 7 页岩油类型划分图  
Fig.1 Classification of shale oil from Chang7 of Yanchang Formation, Ordos Basin

介绍), 所以我们将“厚层状页岩层”页岩油进一步划分为以“厚层状 类页岩”为主的页岩油(图 1b)与以“厚层状 类页岩”为主的页岩油(图 1c)。需要指出的是, “砂岩-页岩互层”中的页岩绝大多数属于 类页岩。

## 2 长 7 页岩油形成的地质条件

### 2.1 页岩层展布特征

大规模广泛分布且有一定厚度的页岩层奠定了页岩油形成的物质基础, 控制了页岩油的资源量。长 7 页岩段富铀、富有机质的特征使其在测井综合图上表现出高伽马(GR)、高电阻率(RT 或 ILD)、高声波时差(AC)、低密度( $\rho$ )等显著特征, 与砂质、粉砂质泥岩明显不同(图 1b、图 1c)。由于 类页岩与

类页岩的有机质丰度、铀含量差别较大, 其测井响应特征差异明显, 类页岩的测井响应幅度较大。数据统计表明, 利用伽马与密度测井可以将两类页岩区分开来, 类页岩伽马值多大于 200 API, 密度多小于 2.4 g/cm<sup>3</sup>。相反, 类页岩伽马值一般小于 200 API, 密度大于 2.4 g/cm<sup>3</sup>。但在对长 7 湖相页岩层的实际应用中, 这个数值也不是完全绝对的, 需要结合岩芯、录井以及有机碳测试数据等进行有效识别。

大量钻井统计结果表明, 长 7 湖相页岩层大规模发育, 厚度大于 10 m 的页岩分布范围可达  $3 \times 10^4$  km<sup>2</sup>, 但是厚度变化较大, 最厚可达 130 m(图 2)。不同类型的页岩油在平面上的分布具有一定的规律性。“砂岩-页岩互层”型页岩油主要分布于湖盆中部的白豹-华池以及桐川-庆阳、正宁等地区, 平面上呈条带状展布, 其厚度较大, 湖盆中部的白豹-华池地区厚度为 50~110 m; 桐川-庆阳、正宁地区页岩厚度为 20~70 m(图 2)。“厚层状 类页岩”为主的页岩油主要分布湖盆西南部, 与“砂岩-页岩互层”型页岩油相间展布, 厚度多小于 50 m(图 2)。“厚层状 类页岩”为主的页岩油主要分布于湖盆东部、西北部与盆地边缘, 厚度较大, 塔尔湾以东地区页岩厚度可达 130 m, 大水坑-麻黄山-耿湾一带页岩厚度最厚可达 120 m, 盆地边缘地区厚度变薄(图 2)。总之, 长 7 湖相页岩层规模展布, 厚度较大, 提供了页岩油成藏的基本地质条件。

### 2.2 岩石矿物学特征

北美页岩油气开采经验表明, 富含石英及碳酸盐等脆性矿物的页岩具有较好的可压性, 在外力作

用下利于形成天然裂缝和诱导裂缝, 有利于页岩油开采<sup>[10,12]</sup>。岩芯观察与岩样粗磨显示, 长 7 湖相页岩质硬、性脆, 类页岩(富铀页岩)脆性较高。X 射线衍射分析结果证实了这一点, 长 7 湖相页岩中石英、长石、碳酸盐(方解石与白云石)、黄铁矿等脆性矿物含量较高, 占总矿物含量的 43.9%~85.3%(图 3)。有机质极为富集的 类页岩中黄铁矿含量较高, 黏土矿物含量较低, 占总矿物含量的 40%以下, 平均为 30%; 类页岩(黑色泥岩)的黏土矿物含量分布于 30.9%~56.1%之间, 平均约为 42.8%, 较 类页岩脆性低(图 3)。另外, “砂岩-页岩互层”中的薄砂岩夹层矿物组分以石英、长石等刚性颗粒为主, 石英矿物含量多在 55%以上, 黏土矿物含量通常低于 20%, 平均为 10.5%, 脆性强。因此, 鄂尔多斯盆地长 7 页岩层脆性矿物较为富集的特征, 奠定了页岩油勘探评价的基础, 有利于页岩油的储集和开采。

### 2.3 生烃条件

页岩层的有机质丰度与热成熟度决定了页岩层的生烃能力, 有机质丰度高、有机质类型好(倾油性母质)、热演化程度适中是页岩油形成的重要因素。

#### 2.3.1 有机质丰度

有机碳测试结果显示, 长 7 段页岩层有机质十分丰富, 残余有机碳含量高—极高。统计结果表明, 类页岩的残余有机碳含量大都在 6%以上, 最高可达 30%~40%, 平均有机碳含量为 13.81%; 类页岩的残余有机碳多为 2%~6%, 平均有机碳含量为 3.75%。

#### 2.3.2 有机质类型

长 7 湖相页岩层具有较高氢指数(主要分布于 150~600 mg/g 范围)与低氧指数(大都小于 20 mg/g)的特征。两类页岩在热解  $I_H$  与  $T_{max}$  图上均分布在有机质类型 —<sub>1</sub> 型区域, 说明长 7 段湖相页岩有机质类型较好, 为倾油性母质(图 4)。干酪根的镜下观察表明, 长 7 湖相页岩干酪根以无定形体为主(85%~99%), 见有少量形态组分(源于刺球藻)和孢子体, 很难找到镜质体等陆源有机组分, 说明其母质主要为湖生低等生物(藻类), 利于生油。

#### 2.3.3 有机质成熟度

有机质成熟度为页岩油成藏的决定性因素, 当镜质体反射率( $R^0$ )值小于 1.5%时, 以生油为主。已有的镜质体反射率资料表明, 长 7 段湖相页岩层分布的绝大部分地区已经成熟( $R^0$  为 0.9%~1.2%), 处于生油高峰阶段。



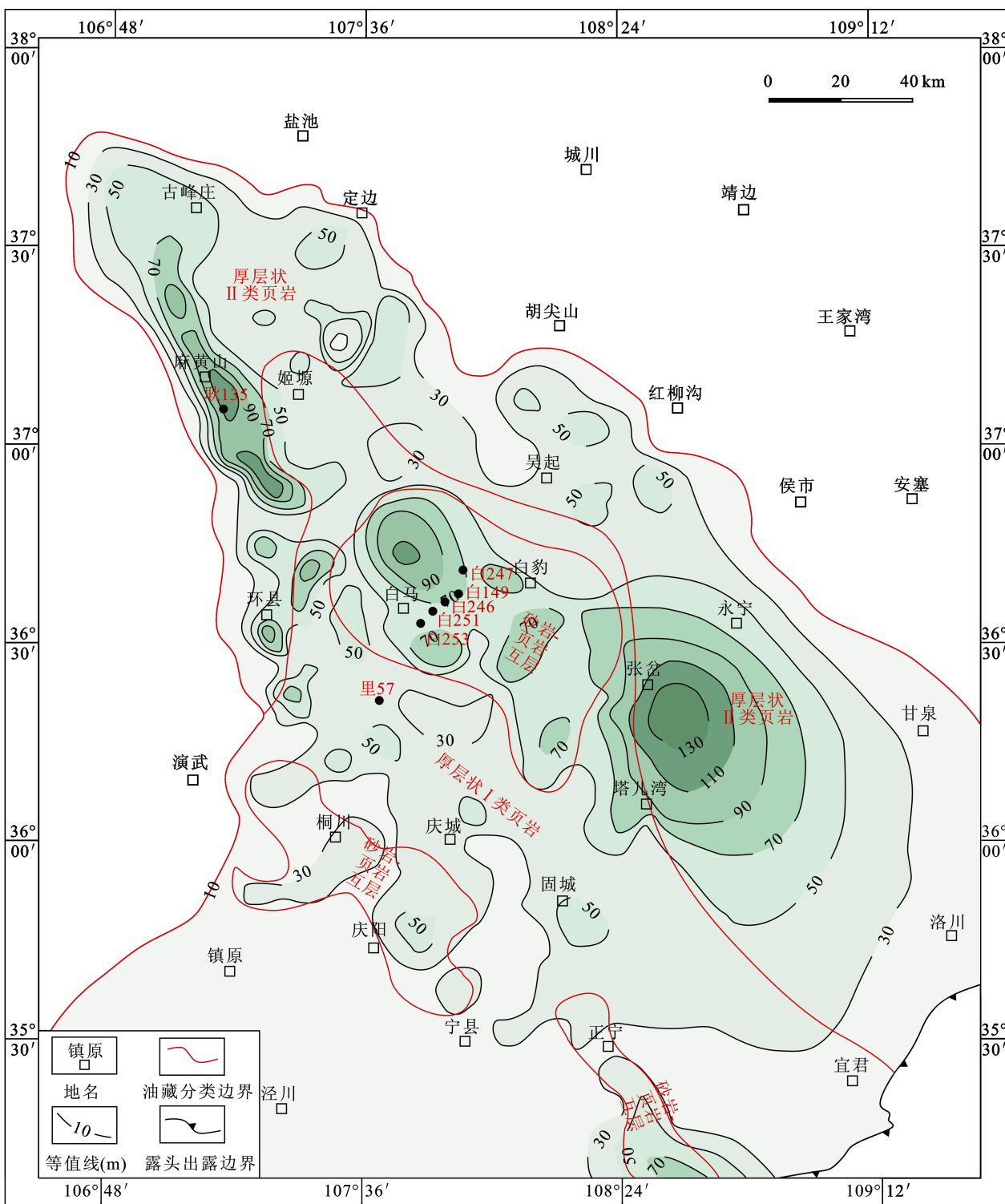


图 2 长 7 湖相页岩层厚度展布及各类页岩油分布图

Fig.2 Contour showing Chang7 lacustrine shale thickness and distribution of various shale oil in Ordos Basin

2.4 储集条件

2.4.1 厚层状页岩

采用饱和液体法(无水乙醇)与核磁共振测试法对长 7 页岩孔隙度的测试结果相近, 均显示页岩孔

隙度较低, 主要分布于 0.8%~1.8%之间, 平均在 1%左右。相应地, 其渗透率也极低, 一般为 0.026~0.6 mD, 属于超低渗储层。

氩离子抛光-场发射扫描电镜观测发现, 长 7 湖相页岩结构十分致密, 可见孔极少, 但在有机质、

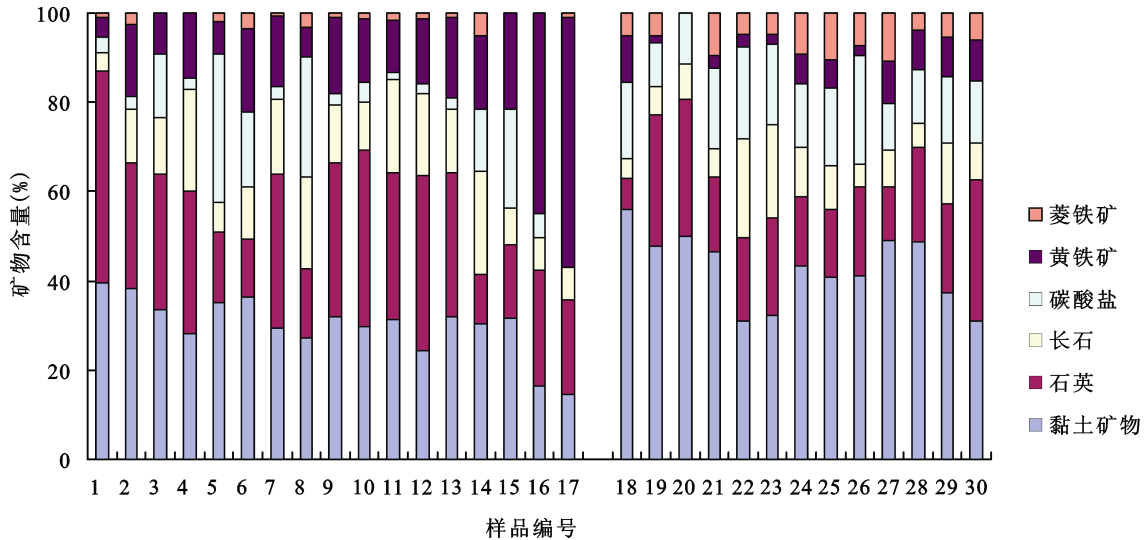


图3 长7湖相页岩矿物百分含量直方图

Fig.3 Histograms showing mineral contents of lacustrine shale from Chang7 Member  
1~17号样品属于 I类页岩, TOC 7.06%~32.41%; 18~30号样品属于 II类页岩, TOC 1.5%~6.18%

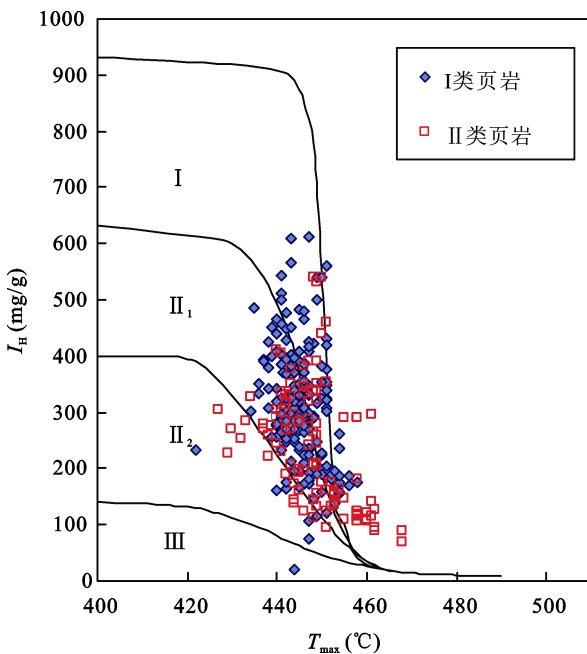


图4 长7湖相页岩有机质类型划分图

Fig.4 Diagram showing classification of organic matter types of lacustrine shale from Chang7 Member

黄铁矿以及有机质与无机矿物的接触面见到了不同产状的微裂隙,长一般几微米到几十微米,宽为几十纳米到几百纳米(图5),为页岩油的主要储集空间。其中较多的微裂隙与有机质有关,主要分布于纹层状有机质、团块状有机质中或沿着有机质与矿物接触面展布;部分微裂隙分布于黄铁矿晶体及草莓状黄铁矿中;还有一些微裂隙分布于石英、长石、云母等矿物中。因此,有机质与黄铁矿十分富集的

类页岩中微裂隙更为发育,该类页岩样品(如L57, 2348.2 m, TOC为20.68%)中的局部地区还可见到密集分布的微裂隙(图5d),为页岩油提供了有效的储集空间。

#### 2.4.2 薄砂岩夹层

“砂岩-页岩互层”中的薄砂岩夹层十分发育,厚度较薄,但层数较多,分布具有一定的规律性,集中分布于湖盆中部的白豹-华池以及桐川-庆阳、正宁等地区(图2)。从B253—B247联井剖面图可以看出,这些薄砂岩夹层与富有机质页岩频繁互层,“砂岩-页岩互层”在横向上连续展布(图6)。

从孔隙度、渗透率统计结果来看,薄砂岩夹层储层物性总体较差,其中52%的样品孔隙度小于6%,平均孔隙度约为5.6%(324个样品),少数样品的孔隙度为13%左右;70%的储层渗透率小于0.1 mD,平均渗透率约为0.16 mD(313个样品),属于超低渗储层(图7)。虽然该类储层致密,物性较差,但相对于长7厚层状页岩而言(孔隙度在1%左右),孔渗性相对较好。铸体薄片镜下观察可见长石溶孔、岩屑溶孔、微裂隙等多种储集空间类型(图8),因此,这些薄致密砂岩夹层可以成为页岩油非常重要的储层类型。

#### 2.5 埋深适宜

长7页岩油层底的埋深主要分布在1200~2600 m之间,较为适中。与北美地区页岩油埋藏深度(小于2000 m)具有一定的可比性<sup>[22]</sup>。适宜的埋深确保了有机质处于适当的成熟条件(生油窗),有利于页岩油的成藏。

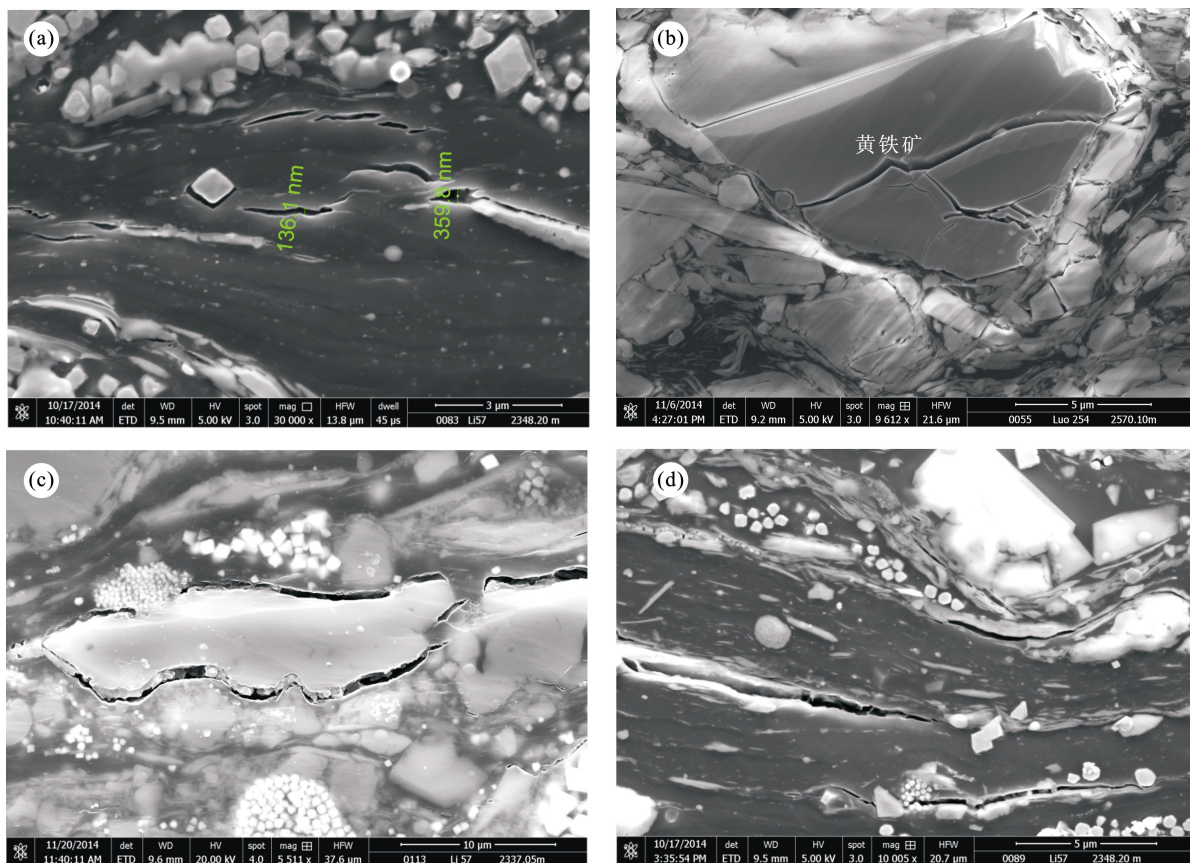


图 5 长 7 页岩储集空间类型

Fig.5 Various types of reservoir space in Chang7 shale

(a) 纹层状有机质中微裂隙, L57 #, 2348.2 m; (b) 黄铁矿晶体中微裂隙, LU254 #, 2570.1 m; (c) 沿有机质与无机矿物接触面分布的微裂隙, L57 #, 2337.05 m; (d) 局部密集分布的微裂隙, L57 #, 2348.2 m

### 3 长 7 页岩含油气性分析

#### 3.1 厚层状页岩

厚层状页岩中的页岩油实质上是滞留烃, 其含量取决于自身的生油能力与储集性能, 常常用氯仿沥青“A”与热解  $S_1$  来表征。分析测试资料统计表明, 长 7 厚层状页岩具有较好的含油性: 生烃能力较强的 I 类页岩含油性也较好, 平均沥青“A”含量为 0.8392%(89 个样品), 平均热解  $S_1$  为 4.11 mg/g (226 个样品); II 类页岩的平均沥青“A”含量为 0.6171%

(63 个样品), 平均热解  $S_1$  为 2.19 mg/g (135 个样品), 含油性好。

钻井过程中长 7 页岩普遍显示高气测异常, 现场浸水试验可见断续状气泡冒出, 显示出良好的含气性。为进一步证实其含气性, 在两类页岩中各选取两块样品进行密闭岩芯解吸气试验(表 1), 结果显示对整块岩芯一次解吸后 I 类页岩平均含气量为  $1.5 \text{ m}^3/\text{t}$ , II 类页岩平均含气量为  $1.2 \text{ m}^3/\text{t}$ , 若粉碎后进行二次解吸, 还有一定的含气量。较高的含气量除了页岩气的自身潜力外, 还可以增加页岩层系的气油比, 提高原油的流动性与可采性。

表 1 长 7 页岩密闭岩芯解吸气试验结果

Table 1 Analytical results of desorbed gas from closed core samples form Chang7 shale

井号	井深 (m)	TOC(%)	$T_{\text{max}}$ (°C)	层位	岩性	一次解吸(整块岩芯)			二次解吸(粉碎后)			总含气量 ( $\text{m}^3/\text{t}$ )
						气体体积 (mL)	岩样质量 (g)	含气量 ( $\text{m}^3/\text{t}$ )	气体体积 (mL)	岩样质量 (g)	含气量 ( $\text{m}^3/\text{t}$ )	
Z233	1795.71	19.86	442	长 7	I 类页岩	946	565	1.67	175	157	1.11	2.78
LU254	2561.76	14.09	454	长 7	I 类页岩	946	736	1.29				
LU254	2545.30	5.02	431	长 7	II 类页岩	757	736	1.03				
LU254	2553.70	12.14	446	长 7	II 类页岩	876	591	1.48				

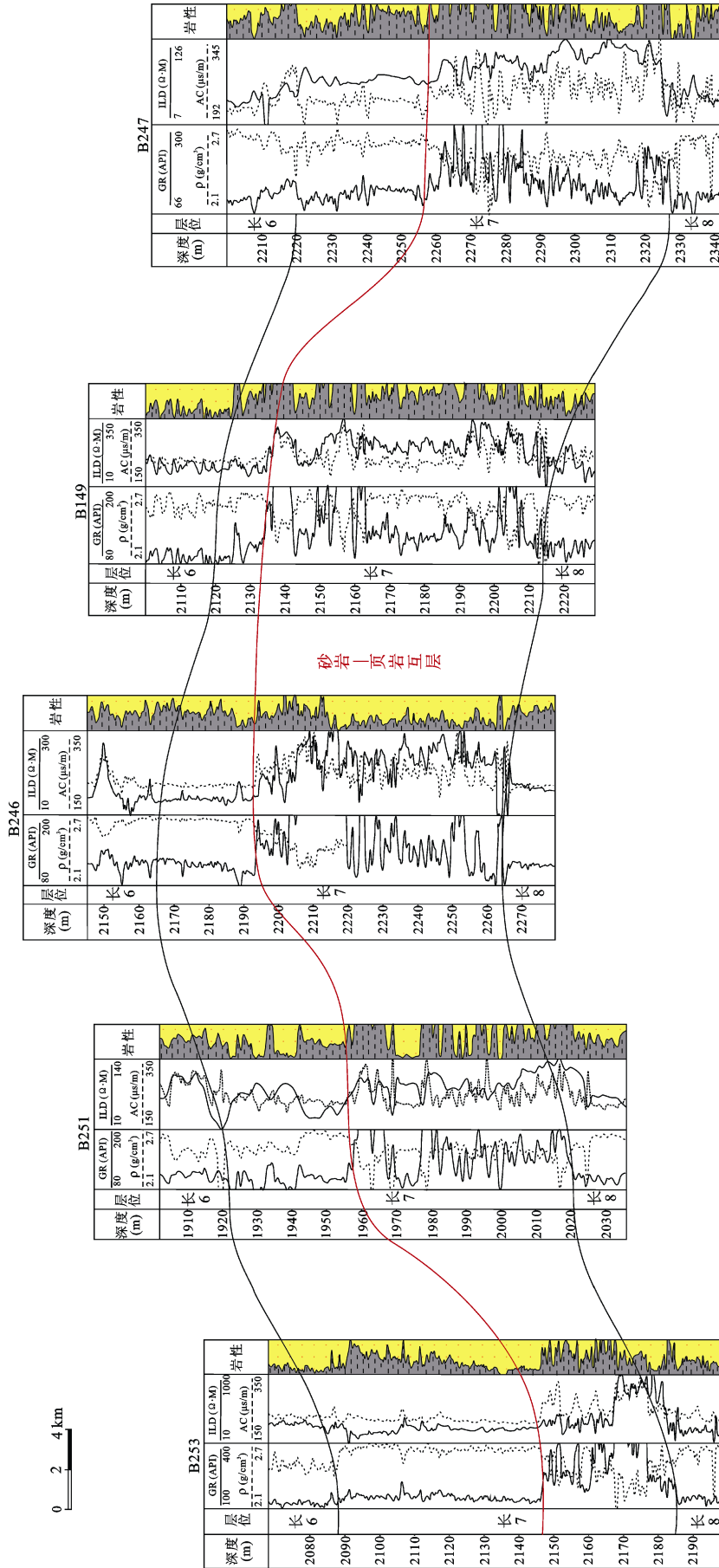


图 6 B253-B251-B246-B149-B247 联井剖面图(剖面位置见图 2)  
 Fig.6 Profile of B253-B251-B246-B149-B247 (the position is shown in Fig.2)



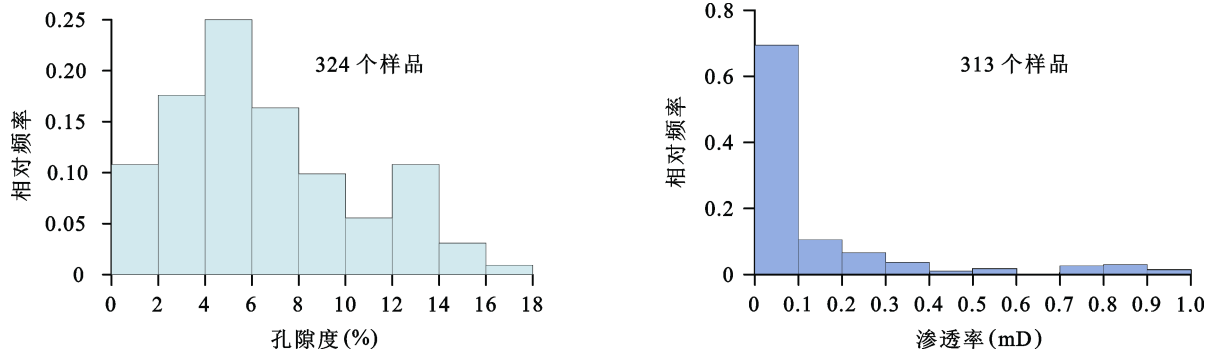


图 7 长 7 薄砂岩夹层孔隙度、渗透率直方图

Fig.7 Histogram of porosity and permeability of Chang7 thin sand interlayers

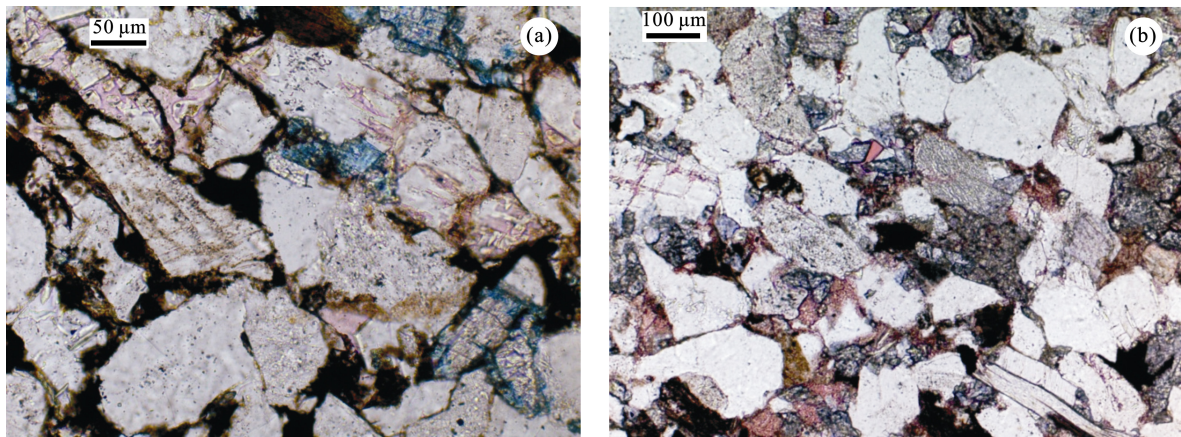


图 8 长 7 薄砂岩夹层铸体薄片特征

Fig.8 Characteristics of cast thin sections of thin sand interlayers in Chang7 Member

(a)长石溶孔、岩屑溶孔。B251 井, 1941.4 m, 薄砂岩夹层; (b) 微裂隙、方解石溶孔。L231 井, 2073.74 m, 薄砂岩夹层

### 3.2 薄砂岩夹层

由于薄砂岩夹层分布于富有机质页岩层内, 油源条件优越, 页岩中所生成的石油只需经过极短距离的运移即可进入砂岩夹层聚集, 加之自身混有一定数量的沉积有机质, 具有一定的生烃能力(氯仿抽

提后, 平均 TOC 为 1.2%), 使得极致密的砂岩也具有良好的含油性。Z233 井长 7 富有机质页岩层内砂岩薄片在单偏光(图 9, 左图)下孔隙不发育, 但在紫外光下(图 9, 右图)具有较强的荧光显示, 表明薄砂岩夹层具有良好的含油性。

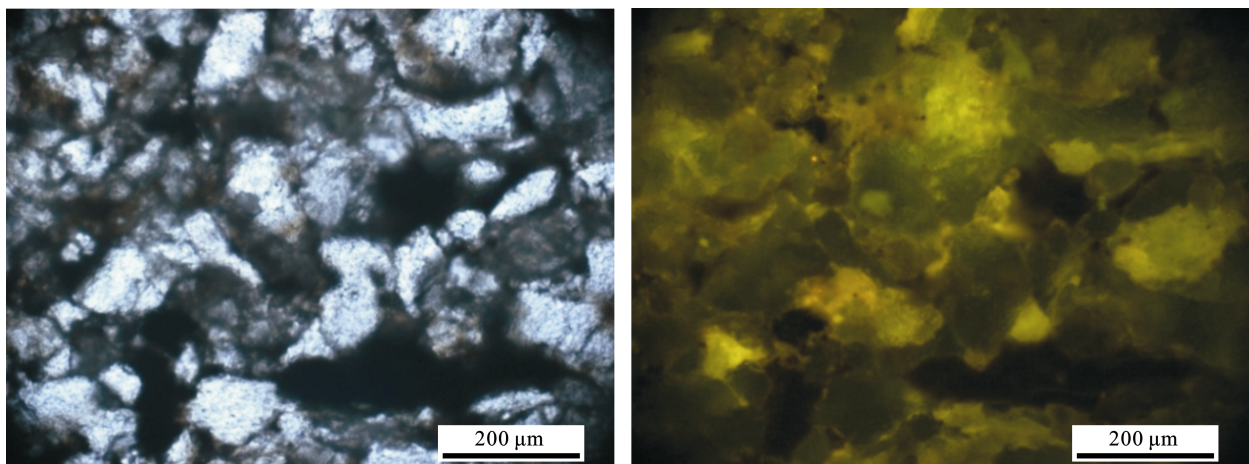


图 9 长 7 富有机质页岩层中薄砂岩夹层薄片照片(左)与荧光照片对比(右)

Fig.9 Contrast between the thin cast photo (left) and fluorescence photo (right) of sand interlayers in Chang7 organic-rich shale  
Z233 井, 长 7, 1725.87 m, 砂岩

## 4 长7页岩油勘探有利区评价

综合页岩层展布特征、岩石矿物学特征、生烃条件、储集空间类型及含油气性,认为长7“砂岩-页岩互层”分布区为鄂尔多斯盆地延长组页岩油勘探开发的有利目标区,其中的薄砂岩夹层具有层数多、厚度薄、物性好、脆性强、含油性好的特征,易于形成页岩油流,同时这些“砂岩-页岩互层”在平面上连续展布,有利于页岩油的勘探开发。该类页岩油与落基山脉地区的 Niobrara 页岩油十分相似,属于夹层富集型页岩油, Fort Hays 泥灰岩和 Smoky Hill 白垩为页岩油的主要产出层段,孔隙度为4%~13%,渗透率为0.1~3.0 mD<sup>[2]</sup>。目前已有数口探井经压裂改造后在“砂岩-页岩互层”中获得了工业油流(高达13 t/d),展现了良好的勘探开发前景。所获得石油的油质较轻,密度约为0.8 g/cm<sup>3</sup>,沥青“A”族组分中饱和烃含量高达80%以上、沥青质含量极低,原油性质好,流动性好,有利于页岩油的开发。

处于生油窗内的“厚层状页岩层”含油普遍,但由于页岩十分致密,使得该类页岩油的勘探开发相对困难,只有含油率较高时才具有工业开发价值。目前国内外已经形成工业产能的实例相对较少,以福特沃斯盆地 Barnett 页岩为典型代表,页岩厚度为60~90 m,埋藏深度为1980~2600 m,有机碳含量为4%~8%,有机质热演化程度( $R^0$ )分布于0.6%~1.4%,干酪根类型为Ⅰ、Ⅱ型,页岩油的储集空间以亚微米级-微米级孔裂隙为主<sup>[2]</sup>。鄂尔多斯盆地长7“厚层状页岩”的热演化程度、埋藏深度与 Barnett 页岩基本相当,“Ⅰ类页岩”的有机碳含量更高,“Ⅱ类页岩”的有机碳含量稍低,考虑到“Ⅰ类页岩”的含油气性较好、脆性更强且微米级裂缝更为发育,初步评价认为“厚层状Ⅰ类页岩”分布区为次于“砂岩-页岩互层”的另一页岩油勘探有利区,但“厚层状Ⅱ类页岩”的厚度较大,其页岩油的总体资源量也不容小觑。不过今后还需对页岩油气组成性质、赋存状态、可流动性等方面对鄂尔多斯盆地长7页岩油展开详细研究,对页岩油的资源潜力展开精细评价,以有效指导页岩油的勘探开发。

## 5 结论

(1) 鄂尔多斯盆地延长组长7湖相页岩层分布

范围广、厚度较大,刚性矿物组分含量较高、脆性较强,有机质丰度高—很高、有机质类型好、有机质成熟—高成熟早期,致密页岩中可见微米级裂隙同时湖盆中部等地区发育物性相对较好的薄砂岩夹层,具备了页岩油形成的有利地质条件。

(2) 鄂尔多斯盆地页岩油为长7湖相页岩层内的油气聚集,储集层以黑色富有机质页岩为主,同时包括不能单独作为油藏单元开发的单个或多个薄砂岩夹层,属典型的源内油(气)藏。根据岩性组合、地球化学特征可以将长7页岩油划分为“砂岩-页岩互层”、“厚层状Ⅰ类页岩”与“厚层状Ⅱ类页岩”等三种类型。

(3) 综合各项地质条件及含油气性分析,认为长7“砂岩-页岩互层”分布区为鄂尔多斯盆地延长组最为有利的页岩油勘探目标区,其中的薄砂岩夹层层数多、厚度薄、物性好、脆性强、含油性好,易于形成页岩油流;“厚层状Ⅰ类页岩”生烃条件更好、脆性更强、微米级裂缝更为发育、含油气性较好,为第二类有利勘探目标区。

文中相关测试数据在长庆油田分公司勘探开发研究院分析试验中心(低渗透油气田勘探开发国家工程实验室)完成;参加实验与分析测试的人员还有解丽琴、咎川莉、孔庆芬、罗丽荣等高级工程师,在此衷心感谢!

### 参考文献(References):

- [1] 邹才能,朱如凯,吴松涛,杨智,陶士振,袁选俊,侯连华,杨华,徐春春,李登华,白斌,王岚. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187.  
Zou Cai-neng, Zhu Ru-kai, Wu Song-tao, Yang Zhi, Tao Shi-zhen, Yuan Xuan-jun, Hou Lian-hua, Yang Hua, Xu Chun-chun, Li Deng-hua, Bai Bin, Wang Lan. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张金川,林腊梅,李玉喜,唐玄,朱亮亮,邢雅文,姜生玲,荆铁亚,杨升宇. 页岩油分类与评价[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 322-331.  
Zhang Jin-chuan, Lin La-mei, Li Yu-xi, Tang Xuan, Zhu Liang-liang, Xing Ya-wen, Jiang Sheng-ling, Jing Tie-ya, Yang Sheng-yu. Classification and evaluation of shale oil[J]. Earth Sci Front, 2012, 19(5): 322-331 (in Chinese with English abstract).
- [3] 张金川,金之钧,袁明生,张杰. 油气成藏与分布的递变序列[J]. 现代地质, 2003, 17(3): 323-330.  
Zhang Jin-chuan, Jin Zhi-jun, Yuan Ming-sheng, Zhang Jie. Mechanic spectrum for the migration and accumulation of hydrocarbons[J]. Geoscience, 2003, 17(3): 323-330 (in Chinese with English abstract).
- [4] Sonnenberg S A, Pramudito A. Petroleum geology of the giant Elm

- Coulee field, Willston Basin[J]. AAPG Bull, 2009, 93(9): 127-153.
- [5] Mullen J, Lowry J C, Nwabuoku K C. Lessons learned developing the Eagle Ford shale[C]. Proceedings of Tight Gas Completions Conference. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2010. SPE-138446-MS.
- [6] 林森虎, 邹才能, 袁选俊, 杨智. 美国致密油开发现状及启示[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(4): 25-30.  
Lin Sen-hu, Zou Cai-neng, Yuan Xuan-jun, Yang Zhi. Status quo of tight oil exploitation in the United States and its implication.[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4): 25-30 (in Chinese with English abstract).
- [7] 卢雪梅. 美国致密油成开发新热点[N]. 中国石化报, 2011-12-30(5).  
Lu Xue-mei. Tight oil become new development hotspot in US[N]. Sinopec Newspaper, 2011-12-30(5) (in Chinese).
- [8] 邹才能, 陶士振, 侯连华. 非常规油气地质[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 1-310.  
Zou Cai-neng, Tao Shi-zhen, Hou Lian-hua. Unconventional Petroleum Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 1-310 (in Chinese).
- [9] 罗承先, 周韦慧. 美国页岩油开发现状及其巨大影响[J]. 中外能源, 2013, 18(3): 3-40.  
Luo Cheng-xian, Zhou Wei-hui. Shale oil development in US and implications[J]. Sino-Global Energy, 2013, 18(3): 3-40 (in Chinese with English abstract).
- [10] 陈祥, 王敏, 严永新, 章新文, 罗曦, 张永华. 泌阳凹陷陆相页岩油气成藏条件[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4): 568-576.  
Chen Xiang, Wang Min, Yan Yong-xin, Zhang Xin-wen, Luo Xi, Zhang Yong-hua. Accumulation conditions for continental shale oil and gas in the Biyang Depression[J]. Oil Gas Geol, 2011, 32(4): 568-576 (in Chinese with English abstract).
- [11] 笪立声. 松辽盆地新北区泥岩裂缝油气藏的成因及分布[J]. 大庆石油地质与开发, 1986, 5(4): 25-28.  
Zan Li-sheng. Origin and distribution of shale fractured reservoirs in Xinbei area, Songliao Basin[J]. Pet Geol Oilfield Develop Daqing, 1986, 5(4): 25-28 (in Chinese with English abstract).
- [12] 章新文, 余志远, 黄庆, 谭静娟, 王优先, 江本宏. 泌阳凹陷陆相页岩油富集主控因素分析[J]. 石油地质与工程, 2013, 27(3): 5-11.  
Zhang Xin-wen, Yu Zhi-yuan, Huang Qing, Tan Jing-juan, Wang You-xian, Jiang Ben-hong. Discussion on main controlling factors of continental shale oil enrichment in Biyang Depression[J]. Pet Geol Eng, 2013, 27(3): 5-11 (in Chinese with English abstract).
- [13] 武晓玲, 高波, 叶欣, 边瑞康, 涅海宽, 卢福长. 中国东部断陷盆地页岩油成藏条件与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 455-462.  
Wu Xiao-ling, Gao Bo, Ye Xin, Bian Rui-kang, Nie Hai-kuan, Lu Fu-chang. Shale oil accumulation conditions and exploration potential of faulted basins in the east of China[J]. Oil Gas Geol, 2013, 34(4): 455-462 (in Chinese with English abstract).
- [14] 杨华, 张文正. 论鄂尔多斯盆地长7优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用: 地质地球化学特征[J]. 地球化学, 2005, 34(2): 147-154.  
Yang Hua, Zhang Wen-zheng. Leading effect of the Seventh Member high-quality source rock of Yanchang Formation in Ordos Basin during the enrichment of low-penetrating oil-gas accumulation: Geology and geochemistry[J]. Geochimica, 2005, 34(2): 147-154 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张文正, 杨华, 李剑峰, 马军. 论鄂尔多斯盆地长7优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用——强生排烃特征及机理分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 289-293.  
Zhang Wen-zheng, Yang Hua, Li Jian-feng, Ma Jun. Leading effect of high-class source rock of Chang 7 in Ordos Basin on enrichment of low permeability oil-gas accumulation[J]. Pet Explor Develop, 2006, 33(3): 289-293 (in Chinese with English abstract).
- [16] 张文正, 杨华, 杨奕华, 孔庆芬, 吴凯. 鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩的岩石学、元素地球化学特征及发育环境[J]. 地球化学, 2008, 37(1): 59-64.  
Zhang Wen-zheng, Yang Hua, Yang Yi-hua, Kong Qing-fen, Wu Kai. Petrology and element geochemistry and development environment of Yanchang Formation Chang-7 high quality source rocks in Ordos Basin[J]. Geochimica, 2008, 37(1): 59-64 (in Chinese with English abstract).
- [17] 杨华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 1-11.  
Yang Hua, Li Shi-xiang, Liu Xian-yang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 1-11 (in Chinese with English abstract).
- [18] 张妮妮, 刘洛夫, 苏天喜, 吴康军, 赵园园. 鄂尔多斯盆地延长组长7段与威利斯顿盆地 Bakken 组致密油形成条件的对比及其意义[J]. 现代地质, 2013, 27(5): 1120-1130.  
Zhang Ni-ni, Liu Luo-fu, Su Tian-xi, Wu Kang-jun, Zhao Yuan-yuan. Comparison of Chang7 Member of Yanchang Formation in Ordos Basin with Bakken Formation in Williston Basin and its significance[J]. Geoscience, 2013, 27(5): 1120-1130 (in Chinese with English abstract).
- [19] 唐晓梅, 曾联波, 岳峰, 赵向原, 王晓东, 李向平. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组页岩油储层裂缝特征及常规测井识别方法[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(6): 95-99.  
Tang Xiao-mei, Zeng Lian-bo, Yue Feng, Zhao Xiang-yuan, Wang Xiao-dong, Li Xiang-ping. Fracture characterization and identification by conventional logs of shale reservoirs in Ordos Basin[J]. J Oil Gas Technol, 2012, 34(6): 95-99 (in Chinese with English abstract).
- [20] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 36-37.  
Yang Jun-jie. Structural Evolution and Hydrocarbon Distribution of Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 36-37 (in Chinese).
- [21] 张文正, 杨华, 傅锁堂, 孔庆芬. 鄂尔多斯盆地晚三叠世湖相优质烃源岩发育段中震积岩的发现及其地质意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2006, 36(1): 31-37.  
Zhang Wen-zheng, Yang Hua, Fu Suo-tang, Kong Qing-fen. Discovery and significance of seismites from high-quality lacustrine source rock in Late Triassic period in Ordos Basin[J]. J Northwest Univ (Nat Sci), 2006, 36(1): 31-37 (in Chinese with English abstract).
- [22] 聂海宽, 张金川, 张培先, 宋晓燕. 福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏特征及启示[J]. 地质科技情报, 2009, 28(2): 87-93.  
Nie Hai-kuan, Zhang Jin-chuan, Zhang Pei-xian, Song Xiao-yan. Shale gas reservoir characteristics of Barnett shale gas reservoir in FortWorth Basin[J]. Geol Sci Technol Inf, 2009, 28(2): 87-93 (in Chinese with English abstract).