杨维磊,李新宇,徐 志,等. 鄂尔多斯盆地安塞地区长7段页岩油资源潜力评价[J].海洋地质前沿,2019,35(4):48-56.

鄂尔多斯盆地安塞地区长7段 页岩油资源潜力评价

杨维磊,李新宇,徐 志,李二党

(中国石油长庆油田公司第一采油厂,陕西延安 716000)

摘 要:鄂尔多斯盆地安塞地区三叠系延长组长7段油页岩在西南部较为发育,厚度可达 到10m以上,氯仿沥青"A"平均值达到0.87%,具备形成页岩油的地质基础。利用CT 扫描电镜技术、核磁共振等技术对长7段油页岩储集空间及储集性能进行定量表征,揭示 纳米级黏土颗粒片状孔隙是长7段页岩油的主要孔隙类型,平均有效孔隙度4.86%,平 均含油饱和度为44.63%。安塞地区长7段具有页岩油赋存与聚集成藏的物质基础,大 规模分布的黑色油页岩、良好的储集空间和充足的烃类,原油黏度低、油页岩可压裂性好、 高角度裂缝发育等有利于页岩油在纳米级孔喉中流动和开采,预测资源潜力达到4.42× 10⁸m³,并指出了水平井+体积压裂提高单井产量的攻关方向。

0 引言

油页岩(又称油母页岩)是一种高灰分的含可 燃有机质的沉积岩,其中含有尚未排出的成熟、低 熟或未熟原油。本文重点研究的对象是油页岩中 尚未排出的成熟石油,即油气地质界所称的页岩 油^[1],是残存在油页岩内部层理面或者纳米级基 质孔隙内的油气聚集,其含量可以用油页岩氯仿 沥青"A"含量近似代表。

常规向非常规油气藏理念的转变,推动了全 球非常规油气勘探开发快速发展,正在逐渐改变 全球能源供应格局。2010年,加拿大学者基于 "能源三角"理论,评价认为北美25个盆地非常规 油气可采资源总量大约是常规油气的4倍^[2]。页 岩油作为一种非常规油气资源也越来越受到重视,国外在页岩油开发上进展较快,其中美国威灵 斯顿盆地 Barken 页岩层系中页岩油的开发取得 明显进展,产量已经达到美国石油产量的1.7%。 国内相对页岩气而言,页岩油的研究还在发展之 中,页岩油开发还在探索^[3]。

鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 期在盆地中 沉积了分布广泛、富含有机质的张家滩页岩^[4-5], 因其有机质丰度高(TOC 多数大于 2%,最高达 30%)、有机质类型好(I—II1型),成熟度适中 (Ro为0.7%~1.3%),是延长组的主力烃源岩, 据杨华等^[6]研究,长 7 烃源岩也是一套优质油页 岩,目前已成为鄂尔多斯盆地页岩油气勘探的重 要层位,姬源一华池一正宁一带油页岩累计厚度 >20 m。而对于安塞地区油页岩分布特征及资 源潜力分析研究较少。大量钻探、岩心分析测试 表明,安塞地区西南部长 7 油页岩发育,厚度较大 (6~12 m),且天然裂缝发育。本文基于岩心样 品地球化学分析、CT 扫描电镜技术、核磁共振等

收稿日期:2018-12-03

作者简介:杨维磊(1981一),男,本科,主要从事油田开发方面的 研究工作. E-mail:108448595@qq.com

技术分析测试的基础上,综合取心资料、常规测 井、成像测井解释方法,分析研究和评价了安塞地 区页岩油资源潜力。

1 研究区油气地质概况

鄂尔多斯盆地边缘断裂褶皱较为发育,而盆 地内部构造简单,可分为6个二级构造单元,研究 区位于其中的陕北斜坡中部(图1)。晚三叠世该 盆地为一大型内陆差异性沉积盆地,期间沉积了 一套河流一三角洲一湖泊相地层,层位归属上三 叠统延长组,自上而下划分为10段(长1一长 10)。其中,长7段沉积期为湖盆最大湖泛期,气 候温暖潮^[7],沉积了一套厚度较大、分布较广优质 烃源岩,俗称张家滩页岩。研究区长7段烃源岩 层在以往的油气勘探活动中曾发现过高产工业油 流,预示着长7段有良好的油气勘探前景。

安塞地区长 7 油页岩有机质类型为 I 型和 $\prod_1 2$, TOC 值为 0.87% ~ 7.16%, 平均值为 2.79%, $S_1 + S_2$ 值为 1.5~24.7 mg/g, 平均值为 9.8 mg/g, 与盆地南部和陇东地区相比, 相对较低(表 1), 主要受沉积环境影响, 安塞地区为滨浅 湖沉积, 受三角洲物源和水动力影响, 泥岩中粉砂 质含量较高, 有机质被生物分解^[8], 未熟或低熟油 潜力较小,而盆地南部、陇东地区主要为半深湖、 深湖沉积,有利于有机质的保存;但氯仿沥青"A" 值相对较高,一般为 0.29%~1.89%,平均达到 0.87%,表明研究区页岩油含量较高,潜力较大。



图 1 鄂尔多斯盆地构造分区及安塞地区勘探开发区位置

Fig. 1 Tectonic map of the Ordos Basin and the studied area

表 1 研究区与盆地其他区域有机地球化学特征对比表

Table 1 Comparison of organic geochemical characteristics between the study area and other areas of the basin

区域	TOC/ $\%$	$S_1 + S_2 / (mg/g)$	HI/(mg/g)	氯仿沥青"A"/%	$\mathrm{Ro}/\frac{0}{2}$	干酪根类型
安塞地区	0.87~7.16	1.5~24.7	$146\!\sim\!326$	0.29~1.89	0.9~1.2	I— II 1
	2.79	9.8	298	0.87	1.01	
盆地南部[9]	3.9~22.5	23.1~120.1	$356\!\sim\!752$	0.19~1.38	0.53~0.6	Ι
	11.9	66.1	568	0.88	0.62	
陇东地区[10]	2.0~18.0	17.77~100.99	75~350	0.20~1.70	0.68~1.08	I— II 1
	8.6	52.21	178	0.6	0.82	

2 油页岩发育规模

按照石油地质理论和干酪根生烃理论,传统的 油藏均经过二次运移,划归源外体系,页岩油只有 初次运移,属于源内体系,页岩油在空间上受油页 岩的分布特征控制,两者空间分布特征基本一致。

2.1 油页岩的识别

长7段油页岩与贫有机质的湖相(粉砂质)泥 岩(TOC<2%)间极易区分^[5],测井响应特征显 示,长7油页岩在测井曲线上表现为"三高一低" 的特征(图 2),为高电阻率、高自然伽马、高声波 时差和低密度^[11]。油页岩中的有机质不具有导 电性,在测井曲线上表现为电阻率测井值高于泥 岩和页岩电阻率测井值;干酪根含量增加会引起 油页岩中铀、针、钾含量增大,导致油页岩的自然 伽马测井值比泥岩和页岩的自然伽马测井值高; 有机质的声波时差(70 μs/m)大于岩石骨架的声 波时差,有机质富集的岩石有较大的声波时差值, 油页岩的声波时差要高于泥岩和页岩的声波时 差;有机质的密度近于 1.0 g/cm³,黏土质矿物的 骨架密度为 2.7 g/cm³,当有机质取代岩石骨架时, 就会使岩石的密度减小,研究区油页岩电阻率为 $40 \sim 110 \Omega \cdot m$,自然伽马为 $110 \sim 140 \text{ API}$,声波时 差为 $280 \sim 340 \mu s/m$,密度为 2.42 $\sim 2.53 g/cm^3$ (图 3)。取心显示研究区油页岩厚度在 $5 \sim 10 m$ 之间, 页理发育,见鱼类化石,属于滨浅湖沉积。



图 2 丹 214 井长 7 段油岩页测井综合图

Fig. 2 Integrated logging column of the oil shale in the Chang 7 Member from Dan 214 Well



图 3 丹 165 井长 7 油页岩岩性剖面和地球化学综合柱状图 Fig. 3 Integrated stratigraphic column of the Chang 7 Member from Dan 165 Well

2.2 油页岩平面分布特征

地质录井、测井识别相结合,刻画了研究区长 7 油页岩平面分布特征。长 7 油页岩的发育厚度 与湖盆中心的展布密切相关,研究区西南方向靠 近湖盆中心,油页岩厚度可达到 10 m 以上,NE 方向远离湖盆中心,页岩油不发育(图 4~6)。张 渠一王窑一沿河湾一线西南部油页岩厚度>4 m,面积约 2 220×10⁴ km²,采用先分别计算各厚 度级别泥页岩体积再累计的方法,得出长 7 段油 页岩体积为 20×10⁸ m³。

3 油页岩储集性能

3.1 油页岩孔隙类型

高分辨率扫描电镜图像分析结果表明(图 7),研究区长7油页岩中主要发育矿物颗粒内片 状孔隙和溶蚀孔,但2种孔隙的丰度、分布和孔隙 连通性存在较大的差异。矿物颗粒内片状孔隙主



图 4 安塞地区长 7 段油页岩分布特征

Fig. 4 Distribution pattern of oil shale in the Chang 7 Member of the Ansai area



图 5 安塞地区桥 146一桥 108 井长 7 段油页岩连井对比剖面





图 6 安塞地区丹 11一化 21 井长 7 段油页岩连井对比剖面

Fig. 6 Well correlation showing the oil shale in Chang 7 Member from well Dan 11 to Hua 21 in the Ansai area



(a) 丹 165 井,1 173 m,矿物颗粒内片状孔隙;(b) 丹 165 井,1 173 m,矿物颗粒溶蚀孔隙;(c) 丹 165 井,1 170 m, 矿物颗粒内片状孔隙;(d) 丹 165 井,1 170 m,矿物颗粒内片状孔隙

图 7 鄂尔多斯盆地安塞地区长 7 段油页岩中发育的孔隙类型

Fig. 7 Pore types of the oil shale in the Chang 7 Member of the Ansai area, Ordos Basin

要为黏土颗粒片状孔,在黏土内分布广泛,平行分 布、成组出现,孔内均有有机质充填,随着有机质 的收缩,形成纳米级互为连通的孔隙群(图 7c); 与以碳酸盐岩溶蚀孔为主要孔隙类型的陆相咸水 型烃源岩不同^[12],研究样品中颗粒溶蚀孔数量相 对较少,且多为长石溶蚀孔(图 7b),孔隙受体腔 形状的控制,数量少、多为孤立状。有机质孔不发 育,基于温压模拟与纳米 CT 三维表征技术的研 究发现 Ro 值>1.2%时盆地长 7 油页岩有机质 孔大量发育,而研究区 Ro 值<1.2%。

3.2 油页岩孔隙度

长7油页岩主要发育纳米级孔隙,常规测试 方法不能有效反映其真实孔隙度,核磁共振测井 在油田勘探开发中发挥着重要作用^[13],MRT 核 磁共振测井仪性能稳定可靠,计算的储层参数重 复误差在行业标准允许范围内^[14],研究区采用 MRT 核磁共振测井仪测井 3 口,显示长 7 油页岩 地层总孔隙度为 3.97% ~ 5.74%,平均为 5.11%,有效孔隙度为 3.78% ~ 5.47%,平均为 4.86%,计算研究区页岩油有效孔隙体积为 9.9 ×10⁸ m³。

3.3 页岩油含油饱和度

核磁共振技术能对岩石孔隙中流体所含的氢 核¹H进行探测,通过对岩心样品添加饱和氯化锰 溶液屏蔽水的 T₂ 信号,可以反映岩心孔隙中油 含量^[15],计算公式:

含油饱和度=饱锰信号量/饱水信号量× 100%

对研究区 2 块样品测试(图 8),结果显示含 油饱和度为 38.49%、50.76%,平均为 44.63%, 研究区长 7 页岩油体积系数 1.21,计算研究区页 岩油资源潜力 4.42×10⁸ m³。



图 8 安塞地区长 7段油页岩岩心不同饱和度溶液下的 T2 弛豫时间分布

Fig. 8 Distribution of T₂ relaxation time under the solutions of different saturation of the oil shale core in the Chang 7 Member of the Ansai area

4 页岩油开发可行性分析

4.1 页岩油可流动性

岩石中可溶有机物及原油簇组分分析表明, 长7段页岩油总体具有油质轻、黏度小的特征,并 伴生油型热解气,非常有利于页岩油在纳米孔喉 中的流动和开采(表 2)。岩样中"非烃+沥青质" 含量 19.55%,饱和烃含量平均值 72.13%,而原 油中"非烃+沥青质"含量 3.66%,含量较低,主 要是因为"非烃+沥青质"不易被采出;饱和烃含 量平均值 78.47%,与岩样接近;地面页岩油密度 平均值 0.85 g/cm³,运动黏度值 10.6 mPa・s(测 试温度为 50 ℃),凝固点 10.6 ℃,汽油比 117.31 m³/t。

表 2 安塞地区长 7 段原油簇组分分析对比

Table 2 Components of oil clusters in the Chang 7 Member of the Ansai area

井号	深度/m	层位	样品	TOC/ %	氯仿沥青/%	饱和烃/%	芳烃/%	非烃/%	沥青质/%
丹 165	1 172.6	长 72	油页岩	4.52	1.854	58.47	13.66	8.77	10.78
招 26-36	1 206.0	长 72	原油			56.94	21.53	3.23	0.43

4.2 油页岩可压裂性

元素俘获测井表明,研究区长7段油页岩黏 土矿物含量39.68%,石英、碳酸盐含量等刚性组 分含量59.28%,与盆地周边基本接近(表3),脆 性矿物含量相对偏高,可压裂性好;岩心、成像测 井显示,长7段油页岩中高角度构造裂缝较为发 育(图9、10),压裂改造后,天然裂缝与水力压裂 缝的结合可形成网状输导体系;针对长7油页岩, 采用大液量、大排量、小砂比,泵入滑溜水和表而 活性肌胶压裂液混合水进行压裂,产生网状裂缝, 大幅度地扩大泄油体积,提高致密油单井产量,在 研究区该技术已成功应用7口井,液量495~959 m³,排量4~8 m³/min,砂比3.1%~11.8%,地 层破压28.6~34.6 MPa,5口井获得工业油流, 日产油最高达到 15.9 t/d。

4.3 开发方式探讨

页岩油物性差,传统直井开发,单井产量低, 研究区 5 口直井开发试验表明,单井产量 0.41~ 0.96 t/d,经济效益较差。近年来开采技术的创 新和进步为这类油藏开发提出了新的方向,李忠 兴等^[16]和何崇康等^[17]研究表明,鄂尔多斯盆地长 7 段致密油采用水平井开发,配套"大排量、大液 量、低砂比"的体积压裂改造工艺技术,能够有效 提高单井产量,当直井产量达到 1.0 t/d 的区域, 水平井单井产量可达到 6.0 t/d 以上;同时长庆 油田创新形成的水力喷砂分段多簇体积压裂技 术,较引进国外同类技术,开采成本大幅度下 降^[16],这都为页岩油效益开发提出了方向,下一

表 3 安塞地区长 7 段油页岩与其他地区油页岩矿物组成对比

Table 3 Comparison of mineral composition of oil shale in the Chang 7 Member of Ansai with other areas

	矿物含量/%						
产层						赤トー	
	石英	长石	碳酸盐	黄铁矿	合计	输工	
鄂尔多斯盆地长7段油页岩[6]	28.78	16.5	8.38	16.89	70.55	29.19	
安塞地区长7段油页岩	31.42	19.67	3.33	4.86	59.28	39.68	



图 9 安塞地区丹 214 井长 7 段成像测井成果图

Fig. 9 Imaging log picture of the Chang 7 Member from well Dan 214 in the Ansai area



图 10 安塞地区丹 214 井长 7 段裂缝面照片 Fig. 10 Photograph of the cracks of the Chang 7 Member from well Dan 214 in the Ansai area 步主要在研究区西南部页岩油厚度>10 m 的区域,开展水平井开发试验。

由于页岩油的特殊性,目前尚无完善的理论 计算水平井水平段长度、井距的方法。理论上,水 平段长度越大,单井产量越高,目前长庆长7致密 油采用1.5~2.0 km水平段水平井开发,单井产 能可达到20 t/d,试验井水平段长度设定为2.0 km;试验井要进行体积压裂,压裂后地层形成一 个复杂的裂缝箱体,如若井距太近,两口井裂缝之 间会产生干扰,不但不会增加产量,反而会使产能 减小,因此可以将压裂时裂缝的长度作为水平井 的井距,长庆长7致密油裂缝半长300 m,考虑到 油页岩脆性较致密砂岩要差一些,预计裂缝半长 不超过200 m,因此井距设定为400 m。

北美体积压裂技术已经向缩短段间距、簇间 距,降低每段压裂规模,提高人工裂缝密度的模式 转变。借鉴国外开发经验,试验井采用多段多簇 的方式压裂改造,段间距设定为 20~30 m,簇间 距设定为 10~15 m。

5 结论

(1)鄂尔多斯盆地安塞地区三叠统延长组7 段油页岩总有机碳含量平均为2.79%,与盆地其 他区域相比较低,但氯仿沥青"A"值相对较高平 均达到0.87%,含页岩油较高,具备形成页岩油 的地质基础。

(2)安塞地区长7段油页岩测井响应特征明显,空间上分布连片,西南方向靠近湖盆中心,油 页岩厚度可达到10m以上,总体积20³×10⁸m³, 展布规模较大。

(3)安塞地区长7页岩油储集空间以纳米级
黏土颗粒片状孔为主,平均有效孔隙度为
4.86%,平均含油饱和度为44.63%,预测页岩油
资源潜力达4.42×10⁸ m³。

(4)安塞地区具有较大的页岩油勘探开发潜力,基于油页岩空间展布特征、储集体积以及开发 试验等方面分析,认为研究区西南方向西河口地 区为有利的勘探开发区带,下一步开展水平井+ 体积压裂提高单井产量试验,可望获得页岩油勘 探的重大突破。

参考文献:

- [1] 丁 敏,姚志刚,张狄杰.鄂尔多斯盆地延长组长7页岩油 存在的可能性分析[J].石油化工应用,2011,30(12):59-63.
- [2] Cheng K, Wu W, Holditch S A, et al. Assessment of the distribution of technically recoverable Resources in north American basin [C] // Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2010.
- [3] 李玉喜,张金川.我国非常规油气资源类型和潜力[J].国际 石油经济,2011,19(3):61-67.
- [4] 张文正,杨 华,杨奕华,等.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.
- [5] 杨 华,张文正.论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗 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.
- [6] 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.
- [7] 吉利明,吴 涛,李林涛.陇东三叠系延长组主要油源岩发 育时期的古气候特征[J].沉积学报,2006,24(3):426-431.
- [8] 刘 群,袁选俊,林森虎,等.湖相泥岩、页岩的沉积环境和 特征对比——以鄂尔多斯盆地延长组7段为例[J].石油与 天然气地质,2018,39(3):531-540. DOI:10.11743/ ogg20180310.
- [9] 骆垠山,张哨楠,张枝焕,等.鄂尔多斯盆地南部油页岩矿有 利勘探区预测[J].中国矿业,2014,23(1):83-108.
- [10] 高 岗,刘显阳,王银会,等.鄂尔多斯盆地陇东地区长7 段页岩油特征与资源潜力[J].地学前缘,2013,20(2): 140-146.
- [11] 朱建伟,赵 刚,刘 博,等.油页岩测井识别技术及应用 [J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(2):289-295.
- [12] 章新文,余志远,黄 庆. 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.
- [13] 肖立志.核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用 [M].北京:科学出版社,1998.
- [14] 陈木银,陈江浩,曹孟鑫,等. MR 核磁共振测井仪可靠性 及应用效果分析[J].测井技术,2018,42(1):107-112.
- [15] 王学武,杨正明,李海波,等.利用核磁共振研究特低渗透 油藏微观剩余油分布[J].应用基础与工程科学学报, 2013,21(4):702-709.
- [16] 李忠兴,李 健,屈雪峰,等.鄂尔多斯盆地长7致密油开 发试验及认识[J].天然气地球科学,2015,26(10):1933-1940.
- [17] 何崇康,成良丙,陈旭峰,等.鄂尔多斯盆地新安边油田长 7致密油有效储层识别与甜点优选[J].石油实验地质, 2017,39(6):812-818.

SHALE OIL RESOURCES ASSESSMENT FOR THE MEMBER CHANG 7 IN ANSAI AREA OF ORDOS BASIN

YANG Weilei, LI Xinyu, XU Zhi, LI Erdang

(The First Oil Production Plant of PetroChina Changqing Oilfield Company, Yanan 716000, Shanxi, China)

Abstract: The oil shale of the Chang 7 Member of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin mainly occur in the southwest Ansai area, with a thickness of more than 10 meters. The average content of chloroform asphalt "A" reaches 0.87%, that found the basis for shale oil formation. CT SEM, NMR and other techniques have been used to quantitatively characterize the storage space and storage performance of the oil shale. It's revealed that the nano-sized clay granules flake pores are the main types of pores for shale oil storage. The average effective porosity approaches 4.86% and the average oil saturation 44.63%. The Chang 7 Member of the Ansai area has provided excellent material basis for shale oil accumulation. There are great amount of and widely distributed black oil shale, sufficient hydrocarbon, low viscosity of crude oil, excellent high-angle fracture system and reservoir space, all of which are beneficial to the oil flowing through the nanoscale pore throat. Resource assessment suggests that a resource potential of 4.42×10^8 m³ is expected. Using horizontal well and volume fracturing, single-well production will be improved.

Key words: Ansai area; Triassic Chang 7 Member; oil shale; shale oil; Ordos Basin

TECTONIC FEATURES OF THE MALAY BASIN AND THEIR CONTROL OVER HYDROCARBON ACCUMULATION

WANG Yongzhen¹, TANG Shuheng¹, ZHENG Qiugen²

(1 School of Energy resource, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;2 College of Ocean Science, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The Malay Basin is a Cenozoic fault basin. The structural characteristics and tectonic mechanism of the Basin are studied in this paper in order to understand the control of structure over hydrocarbon accumulation. The basin has experienced three evolutionary stages: the Eocene fault depression stage, the Oligocene depression stage, and the Miocene tectonic inversion stage. In Middle-Late Miocene, a positive inverted structure is observed with a gradual change from left lateral rotation to right lateral rotation. The inverse is stronger in the center and southeastern parts of the Basin. The trap formation time is earlier in the southern part of the Basin. Oil accumulated in the south and escapes to the north in the early stage; and gas generated in the later stage and effectively accumulated in the north. The source rocks in the north were formed under a rapid sedimentation rate in a large depth and conducive to a mature and gas phase. Due to the later uplifting of the southeast part of the basin, hydrocarbon generation is suppressed and there is less gas accumulation. Oil fields are mainly distributed in the southeast, and gas field in the north. In this paper, the Malay Basin is divided into six exploration areas, and the southeast, the main producing area extruded anticline oil area is the richest one. The deep H and J groups located in the overpressure belts are recommended as future exploration targets.

Key words: tectonic inversion; genetic mechanism; control effect; Malay Basin; exploration direction