

# 致密油充注过程中储层润湿性变化对含油性影响

——以川中侏罗系致密油为例

公言杰<sup>1,2</sup>, 柳少波<sup>1,2</sup>, 刘可禹<sup>1,2,3</sup>, 姜林<sup>1,2</sup>, 袁选俊<sup>1,2</sup>, 陶士振<sup>1</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 提高石油采收率国家重点实验室, 北京 100083;  
3. CSIRO Earth Science and Resource Engineering, Perth WA 6000, Australia)

**摘要:**以四川盆地川中侏罗系致密油储层岩心样品为例,开展了致密油微观充注物理模拟实验。实验模型采用砂岩薄片模型(尺寸为 2.5 cm×2.5 cm,厚度约 0.6 mm),将实验用油注入模型引槽中,压力由小到大逐步增加至每个模型出口端只出油不出水为止,观测渗流特征并计算含油饱和度。实验结果显示,充注前样品束缚水饱和度与充注后含油饱和度总和大于 100%,基于核磁共振法对储层束缚水等流体饱和度与储层润湿性的分析,提出了充注前后储层润湿性的改变(水润湿转变为油润湿)使得最终含油饱和度高于被驱替的动水饱和度。致密油运聚过程中储层润湿性改变抵消了致密油储层高束缚水饱和度对致密油含油性的抑制作用,利于致密油运聚,是致密油成藏含油饱和度提高的重要原因。

**关键词:**致密油;润湿性;含油性;侏罗系;四川盆地

**中图分类号:**TE122.2

**文献标志码:**A

## Influence of reservoir wettability changes on oil-bearing features during tight oil accumulation:

A case study of Jurassic tight oils in Sichuan Basin

Gong Yanjie<sup>1,2</sup>, Liu Shaobo<sup>1,2</sup>, Liu Keyu<sup>1,2,3</sup>, Jiang Lin<sup>1,2</sup>, Yuan Xuanjun<sup>1,2</sup>, Tao Shizhen<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China;  
2. State Key Laboratory of Oil Recovery, Beijing 100083, China;  
3. CSIRO Earth Science and Resource Engineering, Perth, WA 6000, Australia)

**Abstract:** A physical simulation of tight oil microcosmic filling was carried out with core samples from the Jurassic tight oil reservoirs in the central Sichuan Basin. A sandstone thin section model (2.5 cm×2.5 cm×0.6 mm) was adopted. Oil for the experiment was filled through a chute, and the pressure gradually increased until oil instead of water flowed out of each outlet end. Percolation characteristics were observed and oil saturation was calculated. Experiment results showed that the sum of irreducible water saturation before filling plus oil saturation after filling was more than 100%. Reservoir wettability changed from water wet to oil wet after filling, so the final oil saturation degree is higher than the displaced moveable water saturation according to magnetic resonance analyses. The change of reservoir wettability during tight oil migration and accumulation counteracted the inhibition function of irreducible water saturation of a tight oil reservoir on the saturation of tight oil, and was favorable for tight oil migration and accumulation, which explained the high oil saturation of tight oil reservoirs.

**Key words:** tight oil; wettability; oil-bearing ability; Jurassic; Sichuan Basin

致密油是指以吸附或游离状态赋存于生油岩中,或与生油岩互层、紧邻的致密砂岩、致密碳酸盐岩等储集岩中,未经过大规模长距离运移的石油聚集<sup>[1]</sup>。致密油作为非常规油气的重要构成部分,是目前国内外勘探热点<sup>[2-15]</sup>。与常规油气相比,致

密油具有低孔低渗<sup>[16-19]</sup>、低含油饱和度<sup>[20-21]</sup>的特点,致密油含油饱和度研究对于明确致密油含油性资源量具有重要意义,而致密储层高束缚水饱和度是制约致密油含油性的重要因素。致密油充注实验显示致密油充注前储层束缚水饱和度与

收稿日期:2014-06-16;修订日期:2015-05-06。

作者简介:公言杰(1986—),男,工程师,博士生,从事非常规油气与实验技术研究。E-mail:gongyanjie2008@petrochina.com.cn。

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973 计划”项目(2014CB239000)、国家科技重大专项(2011ZX05001)和中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目(11.2011A-02.x.01)资助。

充注后含油饱和度总和大于100%，致密储层在充注初期主要是水润湿<sup>[22]</sup>。本文从储层充注前后润湿性改变的角度对含油性进行分析。

### 1 川中侏罗系致密油地质概况

川中侏罗系区域构造位置处于盆地中部川中古隆起中部斜坡平缓构造带北部，区域上称“川中古隆中斜平缓带”。目前川中侏罗系勘探程度较高的地区主要集中在桂花、金华、中台山、莲池、公山庙油田以及仪陇、鲜渡河等含油构造<sup>[23-24]</sup>（图1a）。川中侏罗系共发育8个组（段）：上统包括蓬莱镇组、遂宁组；中统为沙溪庙组；下统包括凉高山组、大安寨段、马鞍山段、东岳庙段和珍珠冲段（图1b）。其中沙溪庙组的沙一段砂岩与凉高山组的凉上段砂岩为2套已发现的重要致密砂岩产油层<sup>[25-26]</sup>，孔隙度主要集中在3%~6%之间，渗透率在 $(0.001 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，总体为低孔低渗<sup>[27]</sup>。凉下段泥岩为沙溪庙组与凉高山组油藏主要烃源岩，源储配置上属于“下生上储”配置关系（图1c）。

### 2 储层束缚水饱和度与润湿性

Brown 和 Fatt<sup>[28]</sup>于1956年首先研究了多孔介质中水的核磁共振弛豫特征，发现多孔介质中水的

弛豫时间远小于其自由状态的流体弛豫时间，储层孔隙与流体界面效应是影响孔隙流体弛豫时间减小的根本原因。其中，束缚水饱和度与润湿性可以有效影响多孔介质中液固相互作用，从而在核磁测试信号中表现出来。

选取研究区2口典型井的10个样品（表1），样品长度集中在2.7~5.4 cm，直径为2.4~2.51 cm，主要为粉砂岩、中砂岩；总体孔隙度介于2.2%~4.5%，渗透率介于 $(0.001 \sim 1.9) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

对上述样品进行核磁实验测定，设备型号NM12，共振频率12.854 MHz，探头线圈直径25 mm，磁体温度为 $(32 \pm 0.01) \text{ }^\circ\text{C}$ 。样品洗油之后放入真空饱和装置中饱和8 h。实验参数采用CPMG序列，序列参数为： $P_1 = 3 \mu\text{s}$ ， $TD = 102\ 688$ ， $DR = 1$ ， $P_2 = 7 \mu\text{s}$ ， $NECH = 2\ 000$ ， $DL_1 = 0.035 \text{ ms}$ ， $SW = 666.667 \text{ kHz}$ ， $RFD = 0.002 \text{ ms}$ ， $TW = 1\ 000 \text{ ms}$ ， $RG_1 = 10$ ， $PRG = 3$ ， $NS = 64$ ， $SF = 11 \text{ MHz}$ ， $O_1 = 826\ 590.9 \text{ Hz}$ 。结果显示 $T_2$ 弛豫时间主要集中在0.1~100 ms。1~10号样品顺序按照孔隙度由大至小逐渐降低。其中 $T_2$ 截止值采取离心前后曲线交点对应的 $T_2$ 时间值约为13 ms。孔隙表面束缚水含量越高，可动水含量就越低，水的作用越弱，则水的弛豫时间就越长。通过弛豫时间截止值前后信号强度对应不可动与

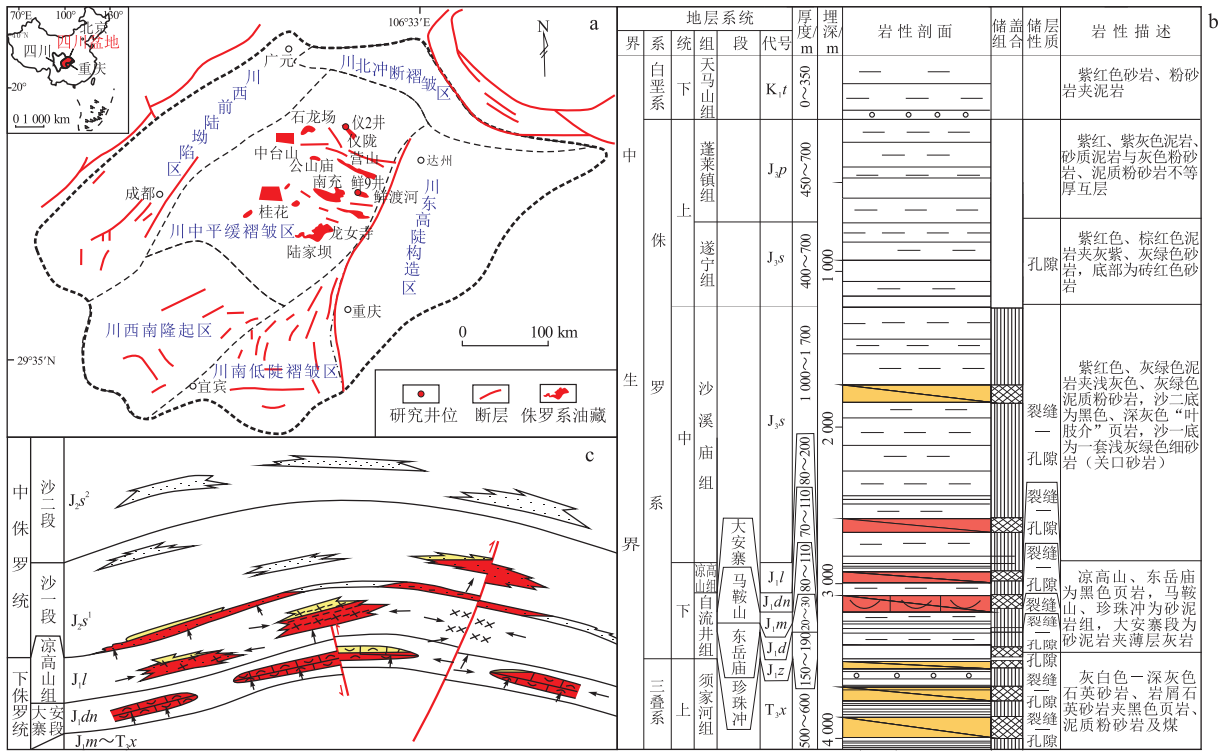


图1 四川川中公山庙侏罗系致密油藏分布

a. 油藏平面分布; b. 侏罗系地层柱状图; c. 公山庙侏罗系致密油藏剖面

Fig. 1 Distribution of Jurassic tight oils in Gongshanmiao, Sichuan Basin

表1 四川川中公山庙侏罗系致密油样品统计

Table 1 Jurassic tight oil samples from Gongshanmiao, Sichuan Basin

样品号	取心资料				常规分析结果				
	井位	层位	岩性	长度/cm	直径/cm	视密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	气测孔隙度/%	气测渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	
1	仪2	沙一段	绿灰色细砂岩	3.171	2.491	2.61	2.20	1.941	
2	仪2	沙一段	灰色细砂岩	4.249	2.488	2.62	2.28	0.000 28	
3	鲜9	凉上段	泥质粉砂岩	4.755	2.502	2.59	2.67	0.001 0	
4	仪2	沙一段	灰色粉砂岩	2.753	2.484	2.62	2.71	—	
5	鲜9	凉上段	细砂岩	5.068	2.499	2.61	2.71	0.005 4	
6	仪2	沙一段	青灰色细砂岩	5.301	2.501	2.59	2.90	—	
7	仪2	沙一段	灰色细砂岩	5.208	2.476	2.62	2.92	0.520	
8	仪2	沙一段	灰色细砂岩	5.275	2.491	2.58	3.24	0.023	
9	鲜9	凉上段	中砂岩	5.358	2.509	2.57	3.62	0.058	
10	仪2	凉上段	中砂岩	5.381	2.517	2.51	4.54	0.001 0	

可动流体饱和度的计算,样品的束缚水饱和度主要集中在 50% ~ 80% 之间,平均值 73.5%, 与此相比,可动流体饱和度较小,主要集中在 20% ~ 50% 之间,平均值 26.5%。

在分析了研究区样品束缚水饱和度之后,采用接触角测定法对上述样品洗油后水润湿性进行了测定。由于油藏平均埋深在 2 200 ~ 2 600 m,平均地温约为 70 ~ 80 °C<sup>[29]</sup>,故测定实验条件设为 70 °C 和 80 °C。结果显示 70 °C 条件下接触角介于 20° ~ 40° 之间,在 80 °C 条件下,接触角更低,介于 15° ~ 25° (图 2),这说明洗油后储层呈现良好的水黏附润湿<sup>[30]</sup>。

### 3 致密油充注过程

在明确了研究区样品具有高束缚水饱和度、水黏附润湿的性质之后,选取了 4 个样品(1,3,5,6号)进行注油实验。实验用水参照  $\text{CaCl}_2$  型地层水的矿化度 10 g/L,黏度约为 1 mPa · s (常温)。为了便于观察,配制的地层水加入甲基蓝。实验用油参照侏罗系原油配制而成后加入油溶红。由于油藏温度为 80 °C,对实验用油与侏罗系原油的黏度

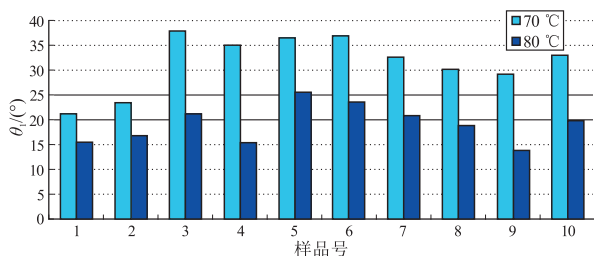


图2 四川川中公山庙侏罗系致密油样品接触角统计  
 $\theta_1$  代表样品充注实验前与水接触角

Fig. 2 Contact angles of Jurassic tight oil samples from Gongshanmiao, Sichuan Basin

随温度变化进行了实际测定,结果表明,实验用油与侏罗系原油的黏度随温度变化总体一致,无较大差别。当温度从常温逐渐升高至 40 °C,实验用油黏度已经快速下降至 11 mPa · s,在 80 °C 状态下黏度值为 4 mPa · s。对该油样品的黏度指数进行了计算,40 °C 动力黏度为 11 mPa · s,对应运动黏度 11 mm<sup>2</sup>/s,黏度指数 VI 为 187,表示实验用油黏度在 40 ~ 80 °C 条件下黏度已经较小,受温度的影响不大。

具体实验方法如下:将岩心洗油、烘干、切片、磨平等工序后黏在 2 块玻璃之间,制作成砂岩微观模型,尺寸为 2.5 cm × 2.5 cm,厚度约 0.6 mm。利用抽真空压力泵对模型进行抽真空,饱和水。通过气源注气将中间容器中实验用油注入引槽中,压力由小到大逐步增加,当第一滴油由左引槽进入模型时,记录注入压力,此压力便是饱和油的启动压力。结果显示,真实砂岩模型的饱和油启动压力在 30 ~ 100 kPa 之间,平均值为 65 kPa。至每个模型出口端只出油不出水为止,饱和油过程结束,观察其渗流特征并统计模型的原始含油饱和度(图 3)。

实验过程显示,储层样品的非均质性控制致密油聚集过程。当油流经连通较好的大孔隙和微裂缝时,便很快在此形成通道,连续相的油绕过小孔

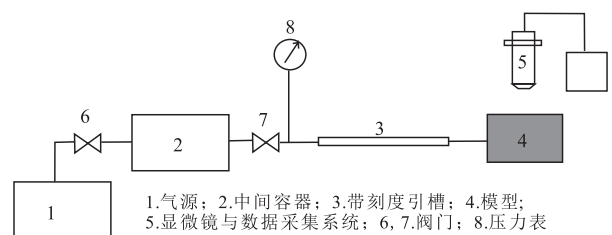


图3 实验装置流程

Fig. 3 Flow diagram of experimental apparatus

隙,使连通较好的渗流通道逐渐形成并稳定,而周边较小孔隙中的水残留下来,形成一定的残余水,即在模型中油的分布是不均匀的(图4)。随着驱替压力逐渐增大,油驱水通道不断增多,油从大孔隙逐渐进入小孔隙,由单一的渗流通道逐渐形成网状或连片状,使其中的水不断被排出。但在部分孔隙盲端或角隅、颗粒边缘夹缝和矿物破裂解理缝中的水,由于毛细管力和岩石表面物理性质(润湿性、界面张力)的作用,仍被残留下来形成残余水。由此看出,实验过程中非均质性导致储层中的部分可动水并没有被排出。

实验结果显示,4个砂岩模型的饱和油启动压力在30~100 kPa之间,平均值为65 kPa。最终含油饱和度采用称重法进行计算,实验最终含油饱和度在40%~52%之间,平均值45%。针对测试后样品的流体饱和度测定,尝试采用核磁实验测试方法进行测试。核磁共振设备为MesoMR23-060H-1,共振频率23 MHz左右,探头线圈直径为60 mm,实验温度控制在31.99~32.00 °C。测试参数为 $SF = 23 \text{ MHz}$ ,  $O_1 = 15 \text{ 6115.1 Hz}$ ,  $P_1 = 17 \text{ }\mu\text{s}$ ,  $TD = 42 \text{ 362}$ ,  $P_2 = 34 \text{ }\mu\text{s}$ ,  $DL_1 = 0.11 \text{ ms}$ ,  $SW = 333.333 \text{ kHz}$ ,  $NECH_1 = 500$ ,  $RFD = 0.002 \text{ ms}$ ,  $TW = 1 \text{ 000 ms}$ ,  $RG_1 = 20 \text{ db}$ ,  $DRG = 3$ ,  $NS = 256$ ,  $PRG = 3$ 。

实验过程如下:首先对注油后样品进行测试,分别将4个砂岩薄片放入设备特定容器(无核磁信号)中进行测试;之后将4个砂岩薄片置于50%浓度的 $\text{MnCl}_2$ 溶液中进行饱和, $\text{MnCl}_2$ 溶液可以有

效抑制孔隙中水的信号,因此在核磁中可以测定出含油饱和度。由于实验样品薄片很薄(几百微米),薄片两侧玻璃对信号干扰很大,因此取薄片进行信号测试以便对上述两侧测试信号进行玻璃信号去除。最后取1%的孔隙度标样( $\text{CuSO}_4$ 溶液和重水配制,10 mL),放入设备中进行测试,进行实验标定。

对比各样品信号量(表2)可知,原样 $\approx$ 空白 $<$ 饱锰样 $\ll <$ 1%孔隙度标样,由此可知由于样品中核磁信号太小,我们所检测到的信号量基本完全来源于噪音。所以核磁实验显示充注实验后样品中的油水信息难以采用核磁实验进行测试分析。

对视域范围内没有被排除的可动水进行流体面统计显示,1,3,5,6号样品分别占40%,15%,25%,20%,则可计算出被驱替的可动水饱和度为12.53%,14.16%,23.79%,14.14%。而最终含油饱和度为40%~52%,很明显高于被驱替的可动水饱和度,因此致密油在充注过程中通过连通较好的孔隙形成稳定渗流通道时,储层中一部分束缚水被驱替掉,使得最终含油饱和度高于被驱替的动水饱和度。通过计算,1~6号样品驱替掉的束缚水饱和度在20.21%~37.86%之间,具体数据见表3。

#### 4 储层润湿性变化与含油性分析

对注油实验后的1~6样品进行了油接触角测定,油采用实验用油,测定实验条件设为70 °C和80 °C。结果显示70 °C条件下接触角在30°~50°

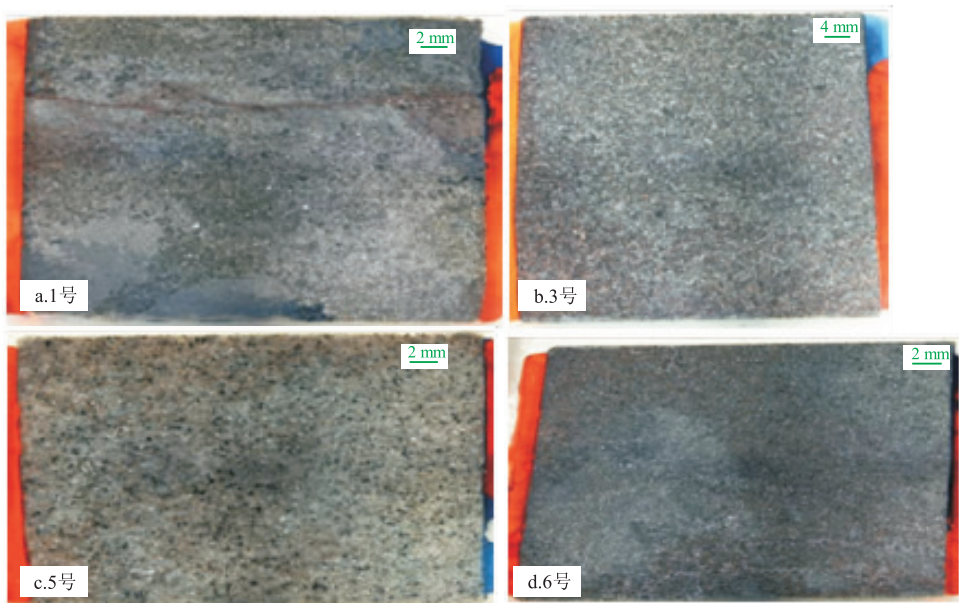


图4 实验模型饱和油全视域特征

浅红色部分为油

Fig.4 Full view features of experimental model (light red indicates for oil)

表2 充注实验结束后样品核磁信号量

Table 2 Magnetic resonance signals of tight oil samples after charging

样品	序号	信号量				
		充注实验结束后	泡锰后(3次)			
			第1次	第2次	第3次	平均
实验样品	1	662.19	871.00	899.17	938.50	902.89
	3	730.69	837.54	924.30	890.93	884.26
	5	769.53	865.26	946.73	897.57	903.19
	6	622.57	843.37	861.02	797.76	834.05
薄片玻璃		737.40	715.37	646.64	699.80	
1%孔隙度标样		1 707.21	1 770.16	1 779.31	1 752.23	

表3 实验模型流体饱和度统计

Table 3 Fluid saturations of experimental models

样品号	井位	气测孔隙度/%	孔隙体积/ cm <sup>3</sup>	启动压力/ kPa	束缚水 饱和度/%	可动水 饱和度/%	驱替掉的 可动水 比例/%	驱替掉的 可动水 饱和度/%	含油饱 和度/%	驱替掉的 束缚水 饱和度/%	残余束缚水 饱和度/%
1	仪2	2.20	0.006	100	79.11	20.89	60.00	12.53	40	27.47	51.64
3	鲜9	2.67	0.008	30	74.79	16.66	85.00	14.16	46	31.84	42.95
5	鲜9	2.71	0.011	50	83.34	31.71	75.00	23.79	44	20.21	63.13
6	仪2	2.90	0.012	61	72.81	17.68	80.00	14.14	52	37.86	34.95

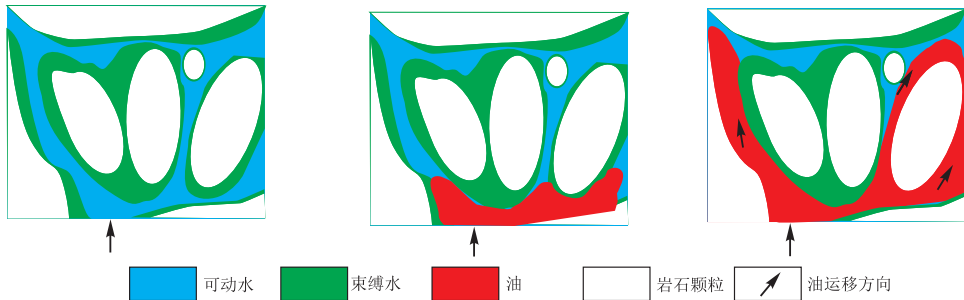


图5 致密油充注过程储层润湿性变化模式

Fig. 5 Changing pattern of reservoir wettability during tight oil accumulation

之间;在80℃条件下,接触角更低,介于30°~40°,这说明洗油后储层呈现良好的油黏附润湿。

致密砂岩高束缚水含量虽不利于致密油运移聚集,但致密油运移过程中通过连通较好的孔喉形成稳定渗流通道时,储层中一部分束缚水被驱替掉,并改变致密储层润湿性(水润湿转变为油润湿),使得最终含油饱和度高于被驱替的动水饱和度,部分抵消了高束缚水饱和度对致密油含油性的抑制作用,利于致密油运聚(图5)。

## 5 结论

(1)川中侏罗系致密油储层样品核磁实验显示束缚水饱和度很高,平均值73.5%,不利于致密油运移聚集。致密油微观充注物理模拟实验显示,最终含油饱和度在40%~52%之间,平均值45%,

束缚水饱和度与最终含油饱和度之和高于100%,同时最终含油饱和度高于被驱替的可动水饱和度。

(2)润湿性测定实验显示,充注前储层样品水接触角介于15°~25°,充注后样品油接触角测定显示,80℃条件下接触角介于30°~40°,表明致密油在充注过程中通过连通较好的孔喉形成稳定渗流通道时,储层中一部分束缚水被驱替掉,并改变致密储层润湿性(水润湿转变为油润湿),使得最终含油饱和度高于被驱替的动水饱和度,利于致密油运聚。

## 参考文献:

- [1] 贾承造,邹才能,李建忠,等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报,2012,33(3):343-350.  
Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight

- oil in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(3): 343-350.
- [2] 斯春松, 陈能贵, 余朝丰, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层沉积特征[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(5): 528-533.  
Si Chunsong, Chen Nenggui, Yu Chaofeng, et al. Sedimentary characteristics of tight oil reservoir in Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(5): 528-533.
- [3] 王震亮. 致密岩油的研究进展、存在问题和发展趋势[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(6): 587-595, 650.  
Wang Zhenliang. Research progress, existing problem and development trend of tight rock oil[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(6): 587-595, 650.
- [4] Snow N. Continued R & D essential to tap US tight oil, panel told[J]. *Oil & Gas Journal*, 2012, 110(4c): 25-27.
- [5] 邹才能, 陶士振, 杨智, 等. 中国非常规油气勘探与研究新进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2012, 31(4): 312-322.  
Zou Caineng, Tao Shizhen, Yang Zhi, et al. New advance in unconventional petroleum exploration and research in China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2012, 31(4): 312-322.
- [6] 刘传虎, 王永诗, 韩宏伟, 等. 济阳坳陷致密砂岩储层油气成藏机理探讨[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(2): 115-119, 126.  
Liu Chuanhu, Wang Yongshi, Han Hongwei, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism of tight sandstone reservoir in Jiyang Depression[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(2): 115-119, 126.
- [7] 魏海峰, 凡哲元, 袁向春. 致密油藏开发技术研究进展[J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(2): 62-66.  
Wei Haifeng, Fan Zheyuan, Yuan Xiangchun. Review on new advances in foreign tight oil development technology and their enlightenment[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(2): 62-66.
- [8] 刘国全, 贾丽. 沧东凹陷致密油形成条件及勘探潜力[J]. *特种油气藏*, 2014, 21(5): 55-59.  
Liu Guoquan, Jia Li. Forming conditions and potential of tight oil in Cangdong Sag[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2014, 21(5): 55-59.
- [9] 刘国全, 贾丽, 李凤霞, 等. 沧东凹陷致密油岩性识别方法研究[J]. *特种油气藏*, 2014, 21(3): 18-22.  
Liu Guoquan, Jia Li, Li Fengxia, et al. Study on identification methods of tight oil lithology in Cangdong Sag[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2014, 21(3): 18-22.
- [10] 任战利, 李文厚, 梁宇, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组致密油成藏条件及主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(2): 190-198.  
Ren Zhanli, Li Wenhou, Liang Yu, et al. Tight oil reservoir formation conditions and main controlling factors of Yanchang Formation in southeastern Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(2): 190-198.
- [11] 陈志明, 汪伟英, 蔡雨桐, 等. 致密砂岩和页岩渗透率实验研究[J]. *断块油气田*, 2013, 20(1): 80-84.  
Chen Zhiming, Wang Weiyong, Cai Yutong, et al. Experimental study on permeability for tight sandstone and shale[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2013, 20(1): 80-84.
- [12] 白玉彬, 赵靖舟, 赵子龙, 等. 鄂尔多斯盆地志丹地区延长组长7致密油成藏条件与成藏特征[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(5): 631-639.  
Bai Yubin, Zhao Jingzhou, Zhao Zilong, et al. Accumulation conditions and characteristics of the Chang 7 tight oil reservoir of the Yanchang Formation in Zhidan area, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(5): 631-639.
- [13] 王延山, 董焱昊, 陈乃申, 等. 陆东凹陷致密油形成条件及资源潜力探讨[J]. *特种油气藏*, 2014, 21(4): 53-57.  
Wang Yanshan, Dong Yin hao, Chen Naishen, et al. Forming conditions and potential of tight oil in Ludong Sag[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2014, 21(4): 53-57.
- [14] 牛小兵, 冯胜斌, 刘飞, 等. 低渗透致密砂岩储层中石油微观赋存状态与油源关系: 以鄂尔多斯盆地三叠系延长组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(3): 288-293.  
Niu Xiaobing, Feng Shengbin, Liu Fei, et al. Microscopic occurrence of oil in tight sandstones and its relation with oil sources: case study from the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(3): 288-293.
- [15] Snow N. Shale gas, tight oil to reshape global markets by 2030[J]. *Oil & Gas Journal*, 2013, 111(2B): 25.
- [16] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质[M]. 2版. 北京: 地质出版社, 2013: 22-32.  
Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua, et al. *Unconventional petroleum geology*[M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2013: 22-32.
- [17] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 10-14.  
Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua, et al. *Unconventional petroleum geology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 10-14.
- [18] 姚泾利, 邓秀芹, 赵彦德, 等. 鄂尔多斯盆地延长组致密油特征[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(2): 150-158.  
Yao Jingli, Deng Xiuqin, Zhao Yande, et al. Characteristics of tight oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2013, 40(2): 150-158.
- [19] 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 Shixiang, Liu Xianyang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(1): 1-11.
- [20] 白玉彬, 赵靖舟, 方朝强, 等. 鄂尔多斯盆地长6油层组准连续型致密砂岩油藏形成机理[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(1): 65-71.  
Bai Yubin, Zhao Jingzhou, Fang Chaoqiang, et al. Forming mechanism of quasi-continuous tight sandstone reservoir of Chang 6 oil-bearing formation, Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(1): 65-71.
- [21] 周守信, 徐严波, 李士伦, 等. 致密泥质砂岩储层的物性预测方法及应用[J]. *天然气工业*, 2004, 24(1): 40-43.  
Zhou Shouxin, Xu Yanbo, Li Shilun, et al. Prediction methods for physical properties of compacted argillaceous sandstone re-

- reservoir and its application [J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(1):40-43.
- [22] 张厚福,方朝亮,高先志,等. 石油地质学[M]. 北京:石油工业出版社,2008.  
Zhang Houfu, Fang Zhaoliang, Gao Xianzhi, et al. *Petroleum geology* [M]. Beijing, Petroleum Industry Press, 2008.
- [23] 梁狄刚,冉隆辉,戴弹申,等. 四川盆地中北部侏罗系大面积非常规石油勘探潜力的再认识[J]. *石油学报*, 2011, 32(1):8-17.  
Liang Digang, Ran Longhui, Dai Danshen, et al. A re-recognition of the prospecting potential of Jurassic large-area and unconventional oils in the central-northern Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(1):8-17.
- [24] 廖群山,胡华,林建平,等. 四川盆地川中侏罗系致密储层石油勘探前景[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(6):815-822, 838.  
Liao Qunshan, Hu Hua, Lin Jianping, et al. Petroleum exploration prospect of the Jurassic tight reservoirs in central Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(6):815-822, 838.
- [25] 刘占国,斯春松,寿建峰,等. 四川盆地川中地区中下侏罗统砂岩储层异常致密成因机理[J]. *沉积学报*, 2011, 29(4):744-751.  
Liu Zhanguo, Si Chunsong, Shou Jianfeng, et al. Origin mechanism of anomalous tightness of middle and lower Jurassic sandstone reservoirs in Central Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(4):744-751.
- [26] 谢继容,唐大海. 川中公山庙构造沙一段油藏成藏条件[J]. *天然气工业*, 2002, 22(S1):23-26.  
Xie Jirong, Tang Dahai. Member Sha-1 oil reservoir formation conditions of Gongshanmiao structure in Central Sichuan [J]. *Natural Gas Industry*, 2002, 22(S1):23-26.
- [27] 谢继容,张健,魏小薇,等. 公山庙沙一段油气藏低孔渗储层产油机理研究[J]. *天然气工业*, 2003, 23(3):34-37.  
Xie Jirong, Zhang Jian, Wei Xiaowei, et al. Study of oil producing mechanism for reservoirs with low porosity and permeability [J]. *Natural Gas Industry*, 2003, 23(3):34-37.
- [28] Brown R J, Fatt I. Measurement of fractional wettability of oil-field rocks by the nuclear magnetic relaxation method [C]//Fall Meeting of the Petroleum Branch of AIME. Los Angeles, California, 1956:262-264.
- [29] 徐明,朱传庆,田云涛. 四川盆地钻孔温度测量及现今地热特征[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(4):1052-1060.  
Xu Ming, Zhu Chuanqing, Tian Yuntao, et al. Borehole temperature logging and characteristics of subsurface temperature in the Sichuan Basin [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(4):1052-1060.
- [30] 国家发展和改革委员会. SY/T 5153-2007 油藏岩石润湿性测定方法[S]. 北京:石油工业出版社,2007.  
National Development and Reform Commission. SY/T 5153-2007 Test method of reservoir rock wettability [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.

(编辑 黄娟)

(上接第422页)

- [10] 王世谦. 四川盆地侏罗系—震旦系天然气的地球化学特征[J]. *天然气工业*, 1994, 14(6):1-5.  
Wang Shiqian. Geochemical characteristics of Jurassic-Sinian gas in Sichuan basin [J]. *Natural Gas Industry*, 1994, 14(6):1-5.
- [11] 肖芝华,谢增业,李志生,等. 川中—川南地区须家河组天然气同位素组成特征[J]. *地球化学*, 2008, 37(3):245-250.  
Xiao Zhihua, Xie Zengye, Li Zhisheng, et al. Isotopic characteristics of natural gas of Xujiahe Formation in southern and middle of Sichuan Basin [J]. *Geochimica*, 2008, 37(3):245-250.
- [12] 戴金星. 我国有机烷烃气的氢同位素的若干特征[J]. *石油勘探与开发*, 1999, 17(5):27-32.  
Dai Jinxing. Characteristics of hydrogen isotopes of paraffinic gas in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1999, 17(5):27-32.
- [13] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J]. *天然气地球科学*, 1993, 4(2/3):1-40.  
Dai Jinxing. Carbon and hydrogen isotopes in natural gas and their application in gas type identification [J]. *Natural Gas Geoscience*, 1993, 4(2/3):1-40.
- [14] 王晓峰,刘文汇,徐永昌,等. 不同成因天然气的氢同位素组成特征研究进展[J]. *天然气地球科学*, 2006, 17(2):163-169.  
Wang Xiaofeng, Liu Wenhui, Xu Yongchang, et al. The hydrogen isotopic composition of natural gases generated from different pathway [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2006, 17(2):163-169.
- [15] 王万春. 天然气、原油、干酪根的氢同位素地球化学特征[J]. *沉积学报*, 1996, 14(增刊):131-135.  
Wang Wanchun. Geochemical characteristics of hydrogen isotopic compositions of natural gas, oil and kerogen [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1996, 14(S):131-135.
- [16] 王顺玉,戴鸿鸣,王廷栋,等. 磨溪气田高成熟天然气的气源与运移[J]. *勘探家*, 1998, 3(2):5-8.  
Wang Shunyu, Dai Hongming, Wang Yandong, et al. Gas source and migration of high-mature natural gas in Moxi gas field [J]. *Petroleum Explorationist*, 1998, 3(2):5-8.

(编辑 徐文明)