

致密砂岩油可动量及其主控因素

——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 为例

崔景伟¹, 朱如凯¹, 李士祥², 杨智¹, 张忠义²

(1. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油 长庆油田公司 勘探开发研究院, 西安 710018)

摘要: 中国致密油地质储量超过 100×10^8 t, 但确定可采资源量难度较大。通过改进耗散型石英微天平分析仪(QCM-D)实现地层条件下岩心的单位原油吸附量, 利用高压压汞和 N_2 吸附手段对含油孔隙下限和有效比表面积测试, 最后结合密闭取心含油量测试结果, 对鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 油层组可动油开展评价。结果显示长 7 致密砂岩表面吸附油厚度 15.6 nm, 吸附质量 13 mg/m^2 ; 含油孔径下限为 18 nm 左右, 比表面积平均为 $1 \text{ m}^2/\text{g}$; 孔隙度 6%~10%, 游离态原油比例为 14.3%~48.6%, 结论与核磁共振实验测定结果具有可比性。控制致密砂岩原油可动量的地质因素包括原油密度、黏度、有效孔隙表面积、有效孔隙体积以及储层矿物组成, 针对特定区域和层系, 可动量主要受孔比表面积控制。

关键词: 吸附态; 游离态; 致密油; 延长组; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122

文献标识码: A

Movable oil and its controlling factors in tight sandstones:

A Case study of the Triassic Chang7 reservoir, Yanchang Formation, Ordos Basin

Cui Jingwei¹, Zhu Rukai¹, Li Shixiang², Yang Zhi¹, Zhang Zhongyi²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Changqing Oilfield, CNPC, Xi'an, Shaanxi 710018, China)

Abstract: Tight oil in place in China has been estimated over 10 billion tons, but it is difficult to define the available producible reserves. Several efficient ways, including perfecting Quartz Crystal Microbalance with Dissipation (QCM-D) to evaluate adsorption ratio per unit in subsurface cores, applying mercury injection capillary pressure (MICP) and nitrogen adsorption to define the lower oily limit and the effective specific surface area, and combining oil testing results in confined cores, were utilized to evaluate the movable oil in the Triassic Chang7 reservoir, Yanchang Formation, Ordos Basin. The results indicated that the thickness of oil adsorbed on tight sandstone surfaces was 15.6 nm with an intensity around 13 mg/m^2 , the lowest oily limit was around 18 nm, the effective specific surface area was around $1 \text{ m}^2/\text{g}$, the porosity was around 6%~10%, and the ratio of free oil was around 14.3%~48.6%. All these results were comparable with the NMR experiments. Several factors controlled the movable oil amounts in tight sandstones, including crude oil density and viscosity, effective specific surface area, effective porosity volume and mineral constituents. For specific region or layer, the amounts of movable oil is parametrically controlled by pore surface area/effective porosity volume.

Keywords: adsorbed state; free state; tight oil; controlling factor; Ordos Basin

2008 年以来, 美国、加拿大、俄罗斯等先后在美国和西西伯利亚等地开展致密油的勘探和评价。国内专家预测中国的致密油地质资源量在 $(106.7 \sim 111.5) \times 10^8$ t, 技术可采资源量达到 $(13 \sim 14) \times 10^8$ t; 美国 EIA 2013 年则评价中国致密油的可采资源量达到 $50.9 \times 10^8 \text{ m}^3$, 仅次于俄罗斯和美国, 是中国未

来油气增储和非常规油气勘探最现实的领域^[1-4]。中国已经在鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 6—长 7 油层组、准噶尔盆地二叠系芦草沟组、四川盆地川中侏罗系大安寨组、柴达木盆地扎哈泉地区早中侏罗统、松辽盆地白垩系青山口组开展致密油的勘探或先导示范区并获重要发现, 2015 年发现了中国

收稿日期: 2015-12-14; 修订日期: 2016-05-06。

作者简介: 崔景伟 (1980—), 男, 工程师, 从事成藏地球化学和非常规油气地质研究。E-mail: cuijingwei@petrochina.com.cn。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目“中国陆相致密油 (页岩油) 形成机理与富集规律” (2014CB239000)、国家油气重大专项“岩性地层油气藏成藏规律、关键技术及目标评价项目” (2011ZX05001) 资助。

首个亿吨级大型致密油田(新安边致密油田),展现出致密油良好的勘探前景^[5-11]。

国内致密油评价主要是采用小面元容积法、分级资源丰度类比法和盆地模拟法等计算地质资源量。致密储层普遍具有低孔、低渗、纳米级孔喉发育等特征^[12-14]。尽管通过大规模水平井和压裂等储层改造技术实现了致密油的开采,但国内外勘探证实,其产量呈早期高产、迅速降低的“L”型分布^[15-16]。国外通过单井产量长时间的监测计算EUR,利用FORSPAN方法实现区域可采资源量的估算;然而中国致密油产量缺少长时间监测,产量曲线影响因素复杂,短期内不能采用该方法定量评价可采资源量。因存在地质、工程技术工艺和流体性质的差异,国外的产量变化曲线只能作参考^[16-18]。

事实上只有理清原油与岩石之间的相互作用,才能剖析致密储层内原油赋存状态、可采资源量以及石油采收率偏低的机理。本文根据流—固作用模型,将地下原油分为游离态和吸附态,通过界面吸附理论和先进的超微量检测技术,实现吸附态原油的定量评价,提出吸附态原油和游离态原油定量评价流程,初步评价鄂尔多斯盆地延长组长7致密油中2种赋存状态原油的比例。研究方法和结果可为其他岩性致密储层可动性研究提供思路和借鉴,对致密油可动性以及可采资源的评价也具有重要参考意义。

1 石油地质背景

据基底和断裂特征将鄂尔多斯盆地分为渭北

隆起、伊陕(陕北)斜坡、天环坳陷、伊蒙隆起、西缘冲断带和晋西扰褶带5个二级构造单元,其中伊陕斜坡整体上呈现向西倾斜,坡度约1℃。三叠系成为独立的陆相湖盆沉积,延长组长7段沉积时期处于湖盆最大湖泛期,在盆地中南部形成深湖—半深湖相为主的沉积体系,发育大面积的优质烃源岩和类型丰富的砂体,构成致密油勘探的主体^[6,19-20]。湖盆中央长7段主要存在东北和西南两大物源,两者在沉积微相、岩石类型、矿物组成、成岩作用、孔隙类型等方面均存在明显差异(图1)。东北体系以长石砂岩为主,低石英、高长石,重矿物组合主要为锆石+石榴石;孔隙以残余粒间孔和长石溶孔为主,自生的成岩矿物以绿泥石、高岭石等为主,胶结作用较强。西南体系以岩屑长石砂岩为主、低长石、高杂基(软组分),重矿物组合为硬绿泥石+锆石+石榴石;孔隙以长石溶孔为主,自身矿物少,黏土矿物以陆源伊利石为主,胶结作用相对较弱^[21]。

据240余块砂岩物性统计,长7致密砂岩孔隙度介于4%~10%之间,约90%的孔隙度小于10%,平均9.12%;90%以上的样品渗透率小于 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,一般介于 $(0.16 \sim 0.19) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,按照油气储层评价方法行业标准(SY/T 6285-2011)划分方案,长7砂岩储层属于低孔—超低渗砂岩。长7页岩有机碳含量高,主要分布在6%~22%,最高达到30%~40%; $R_o = 0.6\% \sim 1.2\%$,平均生烃强度为 $495 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ ^[6,22]。强生烃作用和近源聚集导致长7致密砂岩普遍含油,纳米级孔隙内均含油气^[20,23-24]。密闭取心分析平均含油饱和度为74%,

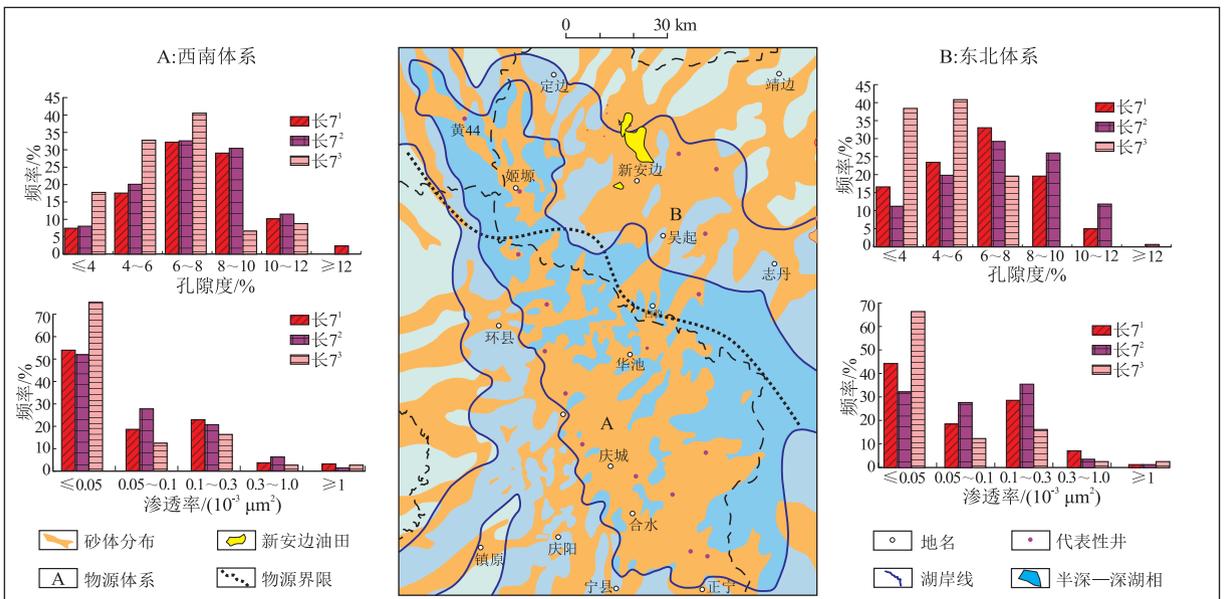


图1 鄂尔多斯盆地三叠系长7油层组两大物源体系岩石类型、物性

Fig.1 Rock type and physical characteristics of two sedimentary source systems in the Triassic Chang7 reservoir, Yanchang Formation, Ordos Basin

气油比(GOR)约 $102 \text{ m}^3/\text{m}^3$,地层条件下原油密度平均为 $0.727 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。长 7 油层组地面原油密度一般为 $0.84 \text{ g}/\text{cm}^3$,黏度为 $6.12 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,凝固点为 $17.6 \text{ }^\circ\text{C}$,初馏点为 $76.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。与国内外其他油田对比,原油性质相对较好,具有低密度、低黏度、低含硫、低凝固点的特点。现今地层压力 $7.0 \sim 18 \text{ MPa}$,据盆地中 20 余个开发区块的原始地层压力和油藏埋深统计,压力系数为 $0.6 \sim 0.8$,属于低压油藏^[25]。长 7 油层组致密砂岩油主要发育在长 7¹亚段、长 7²亚段,平面上主要分布在东北体系的三角洲前缘砂体和西南体系的重力流砂体,初步评价长 7 油层组致密砂岩地质资源量约 $9 \times 10^8 \text{ t}$ ^[6]。

2 关键技术和评价思路

目前研究流体可动体积的主要方法是核磁共振技术,可动流体比是致密储层开发潜力评价的一个重要参数。孔隙大小与氢核弛豫率成反比关系是利用核磁共振 T_2 谱研究岩石孔隙结构的理论基础。尽管目前核磁共振技术存在 T_2 转化成孔隙半径时常忽略表面弛豫和扩散弛豫以及 T_2 截止值识别影响可动流体的定量等问题,但仍然是目前研究致密油可动量的主要技术手段。核磁共振技术的主要缺点是没有考虑流体和岩石之间的相互作用机制等。

本文通过水浴加热实验原油和 QCM 吸附器件加热方法,保证实验原油的温度、仪器体系温度与原油的地下温度一致,从而实现考虑温度对原油密度、黏度特征影响的在线处理方法。因砂岩和长石均属于硅氧四面体型晶体结构,假定表面等吸附,对 QCM 吸附芯片表面进行石英修饰后开展吸附研究,实验原理和计算见文中的公式(1)-(3)^[26-27]。

QCM-D 是基于石英晶体的压电效应对其电

极表面质量变化进行测定的仪器,相当于一个超微量电子天平,石英晶体电极表面沉积的膜质量和石英晶体频率变化之间的线性关系如下:

$$\Delta m = -\frac{\rho_q t_q \Delta f}{f_0 n} = -\frac{\rho_q v_q \Delta f}{2 f_0^2 n} = -\frac{C \Delta f}{n} \quad (1)$$

式(1)中, Δm 是吸附质量; ρ_q 和 v_q 是石英密度和横波速度; t_q 是石英厚度; Δf 是频率变化值; f_0 是基础共振频率 ($n = 1$); C 是常数,取值为 $17.8 \text{ (ng}/\text{cm}^2)/\text{Hz}$; n 是奇数的整数倍 ($1, 3, 5 \dots$)。吸附薄膜非刚性会引起与晶体振荡频率不匹配,故耗散因子是反映薄膜刚性程度的重要参数。耗散值 D 和变化值 ΔD 计算公式如下:

$$D = \frac{E_d}{2\pi E_s} \quad (2)$$

$$\Delta D = \frac{1}{\rho_a t_q} \sqrt{\frac{\rho_a \eta}{2\pi f}} \quad (3)$$

式中: E_d 代表一次振荡能量的耗散; E_s 是振荡系统的储存能量; ρ_a 和 η 分别是流体的密度和黏度。因此,刚性物质吸附不会引起耗散值变化,而疏松的吸附层导致耗散值增加。

致密油可流动部分(游离态)的评价流程如图 2。首先根据区域内的地层温度和地层压力恢复原油地下状态的原油密度和黏度,判断物源矿物组成并提取主要孔隙的矿物类型,利用改进的 QCM-D 方法进行吸附实验确定单位面积吸附量;再根据 CT 成像技术、高压压汞以及 N_2 气体吸附,确定总比表面积以及比表面积—孔径分布,结合有效储集下限确定有效吸附比表面积;最后确定吸附

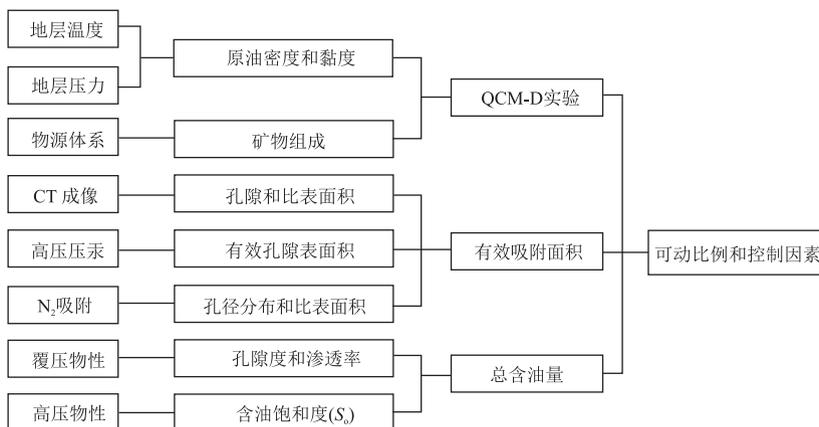


图 2 致密油可动量评价方法流程

Fig.2 Appraisal methods for the movable amount of tight oil

态含量。根据覆压物性分析的孔隙度和高压物性测定的含油饱和度确定总含油量。最后根据上述吸附实验、有效吸附面积和总含油量计算出吸附态和游离态的比例。

3 致密油可动性评价

3.1 吸附厚度和吸附量确定

砂岩表面吸附原油成分主要是原油中极性较强的非烃化合物和沥青质组分。由于非烃和沥青质具有较大的分子量和较强极性与砂岩表面发生吸附,地球化学界提出利用原油中含氮和含氧的极性化合物进行成藏充注方向的研究,并在国内外广泛应用^[28-29]。然而很少有关于从油藏角度定量评价原油在岩石表面吸附厚度的报道,目前国外在该领域的研究主要是在不同体系(配置标准沥青溶液)或者不同材料(金属或者氧化物)吸附表面吸附量以及吸附动力学的差异,然而配置的沥青溶液明显不同于正常状态下的原油体系,本文主要是考虑影响原油密度和黏度的温度。选择3个代表性原油(H42、S113和W87)开展密度和黏度随温度变化实验,实验发现原油的密度和黏度随着温度的升高降低,特别是黏度在温度低于30℃时,黏度大幅度降低;温度高于30℃以后黏度降低缓慢,基本稳定。而密度则是随着温度的增加线性降低(图3)。长7致密油目前的地温约为60℃左右,本文采用该温度下原油密度值和黏度值进行吸附质量的计算。

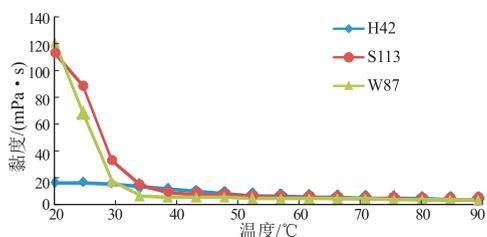


图3 鄂尔多斯盆地三叠系长7原油密度和黏度随温度变化

Fig.3 Oil density and viscosity changing with temperature of crude oils from the Triassic Chang7 reservoir, Ordos Basin

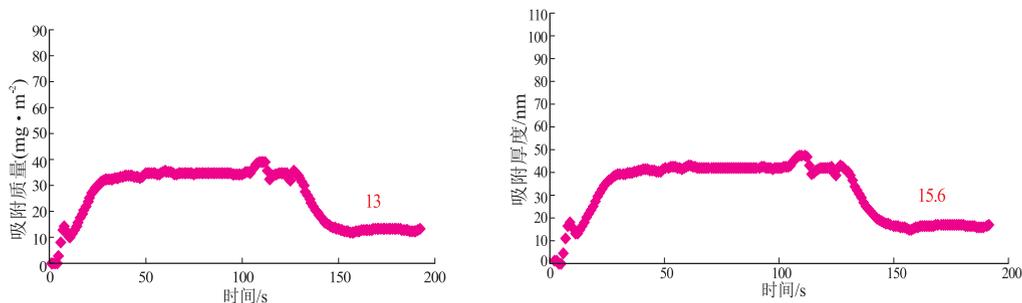


图4 鄂尔多斯盆地三叠系长7原油石英表面吸附厚度和吸附曲线

Fig.4 Oil film thickness and adsorption curve of Triassic Chang7 oil on quartz, Ordos Basin

采用改进 QCM-D 工作方法,使原油吸附体系维持在 60℃,利用甲苯作为体系溶液,对石英表面的原油吸附质量进行测定,并计算相应的吸附厚度(图4)。实验表明石英表面吸附的质量系数(K_a)和厚度(h)分别为 13 mg/m²和 15.6 nm。吸附质量高于金属表面吸附量(0.25~10 mg/m²)和石英表面胶质的吸附量(10.5 μg/m²)^[30-31]。

3.2 砂岩最小含油孔隙下限与有效孔隙比表面积

致密砂岩中含油孔隙下限的确定对于精确计算有效孔隙表面积(S)以及计算吸附量具有重要的影响。目前对于孔隙度下限的方法主要包括理论计算方法、实际生产曲线确定法、抽提前后孔径变化法等。本文在多口井密闭取心测试结果确定原油饱和度基础上,反推致密砂岩孔隙的分布法确定含油孔隙下限。长7致密砂岩普遍具有较高的含油饱和度,多口井密闭取心分析显示,含油饱和度一般处在60%~80%,平均值在74%。这与国外典型的致密油层含油饱和度相当,如 Bakken 油田含油饱和度平均68%、Eagle Ford 页岩区带含油饱和度区间为55%~85%、二叠盆地 Wolfcamp 含油饱和度区间为65%~80%^[32]。

根据31块长7含油砂岩高压压汞资料确定致密砂岩孔隙半径和控制体积的百分比,按照含油饱和度平均值74%计算,含油喉道半径下限在5~18 nm,平均9 nm,直径区间为10~36 nm左右,这与利用抽提前后对比法推测的含油孔隙下限在15 nm的

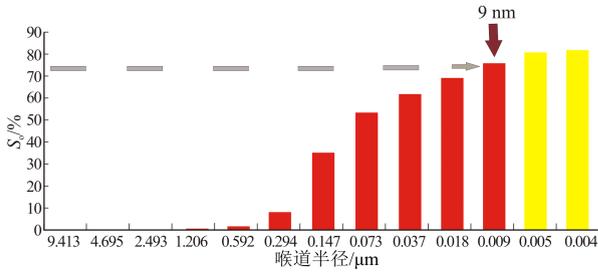


图 5 鄂尔多斯盆地三叠系长 7 致密砂岩喉径控制体积比例以及含油下限

Fig.5 Throat size controlling volume and the lowest oily limit of Chang7 sandstones, Ordos Basin

结论具有可比性^[20]。

气体吸附方法测定多块长 7 砂岩的比表面积平均为 1 m²/g;压汞分析实验分析长 7 致密砂岩的比表面积在 0.65~0.84 m²/g 之间。

3.3 不同状态原油定量公式与控制因素

根据流—固作用模型将地下原油分为游离态和吸附态。吸附态原油比例(W_a)和游离态原油比例(W_f)分别依据公式(4)和(5)计算:

$$W_a = \frac{SK_a\rho_{岩}}{\Phi S_o\rho_o} \times 100\% \quad (4)$$

$$W_f = 100\% - W_a \quad (5)$$

公式中,S 为单位质量砂岩有效孔隙的比表面积;K_a为单位面积吸附质量系数;ρ_岩为岩石的密度;Φ为总孔隙度;S_o为砂岩含油饱和度;ρ_o为原油地下的密度。

若长 7 致密砂岩吸附面积平均为 1 m²/g,长 7 砂岩的密度取 2.4 g/cm³,含油饱和度取平均值 74%,原油密度取值为 0.82 g/cm³。孔隙度取 6%,吸附态比例为 85.7%,对应的游离态比例为 14.3%;孔隙度取 10%,吸附态比例为 51.4%,对应的游离态

比例为 48.6%。研究结果与前人研究得出的长庆油田平均可动流体最高分布在 42.26%~52.58%之间具有可比性。

根据公式 4 可以确定控制致密砂岩原油赋存状态的地质因素包括原油密度、黏度、有效储集空间比表面积(S)以及有效孔隙体积(V),其中,V=ΦS/ρ_岩。针对特定的流体和层系,原位吸附油的比例主要取决于 S/V,即孔隙比表面积。事实上,孔隙度的比表面积不仅决定了原油的赋存状态比例,还影响渗透率。致密砂岩渗透率与比表面积的平方成反比^[33]。此外,岩石中不同矿物提供的储集空间吸附性能可能存在差异,特别是有机质和黏土矿物具有更高的吸附性能,可能导致砂岩吸附态原油含量增加。

3.4 游离态原油可采性分析

鄂尔多斯盆地长 7 致密砂岩普遍具有较高的含油饱和度,孔隙度 5%~11%,选取孔隙度 10%和渗透率 0.35×10⁻³ μm²的样品进行离心实验+核磁共振检测技术确定可流动体积比例。核磁共振技术测试结果显示,可动流体主要受 100~1 000 nm 之间的纳米孔喉控制,累积可动流体比例 44.1% (图 6)。利用图 5 测试结果、公式(4)和(5)联合计算游离态原油比例为 50%,研究结果与核磁共振实验方法确定的可动油比例 44.1%基本一致,显示了致密油赋存状态分析方法的可行性。

值得注意的是,致密砂岩中游离态原油的采收率受压裂工艺影响,例如有效压裂体积、井网密度、支撑剂吸附、管壁吸附等,以及压裂过程中导致的微生物蚀变、水洗等影响。此外,原油开采过程中温度压力变化导致的原油脱蜡、沥青沉淀、轻烃组分分散失等均影响原油的密度、黏度、甚至影响原油胶体体系稳定性,进而影响游离态原油的采收率。全球典型盆地致密油采收率低于 10%,个别盆地

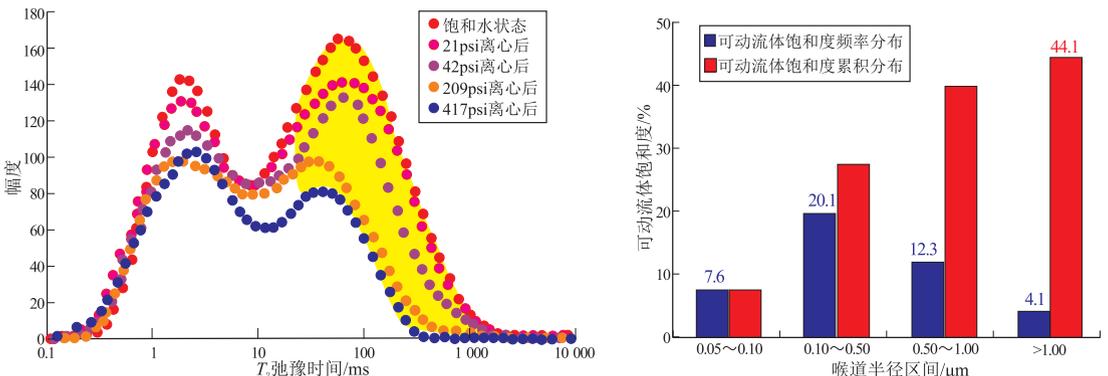


图 6 鄂尔多斯盆地三叠系长 7 致密砂岩油核磁共振确定可流动量

Fig.6 Movable oil percent in Chang7 tight sandstones determined by NMR, Ordos Basin

如福特沃斯盆地密西西比阶地层致密油采收率仅为1.5%~1.8%^[34],可能除原油游离态比例低外,还与渗透率、井网设计密度和成本考虑等因素有关。吸附实验方法确定游离态原油是致密油极限可采量,游离态原油比例决定了最终的累积产量。

原油游离态和吸附态的比例不仅有利于评价致密油的极限可采量,还可以根据两者比例进一步优化开采方式,例如游离态比例较大的致密储层可以使用驱替开采方式,而吸附态比例较大时可采取化学驱油或者高分子聚合物驱。

4 结论

(1)致密油可动量确定方法在技术上具有可行性,克服了核磁共振技术中忽视流体岩石相互作用、纳米孔隙内的核磁识别的缺点。尽管不同类型岩石的吸附厚度和吸附量可能存在一定的差异,但仍不失为一种宏观定量的办法,特别是对这样一种新技术方法的尝试。

(2)孔隙度—比表面积的关系客观上决定了吸附量和游离量的比例,也是影响渗透率的重要参数。对于吸附机理的研究仍需要加强,特别是在吸附壁润湿性、吸附膜中分子的排列和吸附动力学等方面是未来重要的研究方向。

(3)孔隙度10%的长7砂岩吸附态原油量达到51.4%,游离态原油占48.6%;与磁共振结果显示的可流动的比例在44.1%基本一致,证实该方法的实用性和准确性。如长7致密油孔隙度6%~10%,游离态原油比例为14.3%~48.6%,游离态比例取中间值36%,按地质资源量 9×10^8 t计算,致密油的极限可采资源为 3.24×10^8 t。

参考文献:

- [1] EIA US. Annual energy outlook 2013[M]. Washington: US Energy Information Administration, 2013: 60-62.
- [2] 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.
- [3] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.
Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [4] 康玉柱. 中国非常规致密岩油气藏特征[J]. 天然气工业, 2012, 32(5): 1-4.
Kang Yuzhu. Characteristics of tight hydrocarbon reservoirs in China[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(5): 1-4.
- [5] 马洪, 李建忠, 杨涛, 等. 中国陆相湖盆致密油成藏主控因素综述[J]. 石油实验地质, 2014, 36(6): 668-677.
Ma Hong, Li Jianzhong, Yang Tao, et al. Main controlling factors for tight oil accumulation in continental lacustrine basins in China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(6): 668-677.
- [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.
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.
- [7] 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 and Development, 2013, 40(2): 150-158.
- [8] 匡立春, 唐勇, 雷德文, 等. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相云质岩致密油形成条件与勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 657-667.
Kuang Lichun, Tang Yong, Lei Dewen, et al. Formation conditions and exploration potential of tight oil in the Permian saline lacustrine dolomite rock, Junggar basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 657-667.
- [9] 汪少勇, 李建忠, 李登华, 等. 川中地区公山庙油田侏罗系大安寨段致密油资源潜力分析[J]. 中国地质, 2013, 40(2): 477-486.
Wang Shaoyong, Li Jianzhong, Li Denghua, et al. The potential of tight oil resource in Jurassic Da'anzhai Formation of the Gongshanmiao oil field, Central Sichuan Basin[J]. Geology in China, 2013, 40(2): 477-486.
- [10] 付锁堂, 张道伟, 薛建勤, 等. 柴达木盆地致密油形成的地质条件及勘探潜力分析[J]. 沉积学报, 2013, 31(4): 672-682.
Fu Suotang, Zhang Daowei, Xue Jianqin, et al. Exploration potential and geological conditions of tight oil in the Qaidam basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 672-682.
- [11] 黄薇, 梁江平, 赵波, 等. 松辽盆地北部白垩系泉头组扶余油层致密油成藏主控因素[J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 635-644.
Huang Wei, Liang Jiangping, Zhao Bo, et al. Main controlling factors of tight oil accumulation in the Fuyu Layer of Cretaceous Quantou Formation in Songliao basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 635-644.
- [12] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 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 Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. 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.
- [13] 林潼, 冉启贵, 魏红兴, 等. 库车坳陷迪北地区致密砂岩孔喉形态特征及其对储层的影响[J]. 石油实验地质, 2015, 37(6): 696-703.
Lin Tong, Ran Qigui, Wei Hongxing, et al. Pore-throat characteristics of tight sandstones and its influence on reservoirs in Dibe

- area of the Kuqa Depression [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(6): 696-703.
- [14] 肖开华,冯动军,李秀鹏.川西新场须四段致密砂岩储层微观孔喉与可动流体变化特征[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(1): 77-82.
Xiao Kaihua, Feng Dongjun, Li Xiupeng. Micro pore and throat characteristics and moveable fluid variation of tight sandstone in 4th member of Xujiahe Formation, Xinchang Gas Field, western Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(1): 77-82.
- [15] 邹才能,张国生,杨智,等.非常规油气概念、特征、潜力及技术:兼论非常规油气地质学[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(4): 385-399.
Zou Caineng, Zhang Guosheng, Yang Zhi, et al. Geological concept, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(4): 385-399.
- [16] Clarkson C R, Pedersen P K. Tight oil production analysis: Adaptation of existing rate-transient analysis techniques [C]//Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference. Calgary, Alberta, Canada; Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [17] Kabir S, Rasdi F, Igboalisi B. Analyzing production data from tight oil wells [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2011, 50(5): 48-58.
- [18] Yu Shaoyong, Miocevic D J. An improved method to obtain reliable production and EUR prediction for wells with short production history in tight/shale reservoirs [C]//Unconventional Resources Technology Conference. Denver, Colorado, USA; Society of Petroleum Engineers, 2013.
- [19] 崔景伟,朱如凯,崔京钢.页岩孔隙演化及其与残留烃量的关系:来自地质过程约束下模拟实验的证据[J]. *地质学报*, 2013, 87(5): 730-736.
Cui Jingwei, Zhu Rukai, Cui Jinggang. Relationship of porous evolution and residual hydrocarbon: Evidence from modeling experiment with geological constrains [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(5): 730-736.
- [20] 崔景伟,朱如凯,吴松涛,等.致密砂岩层内非均质性及其含油下限:以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段为例[J]. *石油学报*, 2013, 34(5): 877-882.
Cui Jingwei, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Heterogeneity and lower oily limits for tight sandstones: A case study on Chang-7 oil layers of the Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 34(5): 877-882.
- [21] 杨华,窦伟坦,刘显阳,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7沉积相分析[J]. *沉积学报*, 2010, 28(2): 254-263.
Yang Hua, Dou Weitan, Liu Xianyang, et al. Analysis on sedimentary facies of member 7 in Yanchang Formation of Triassic in Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(2): 254-263.
- [22] 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.
Yang Hua, Zhang Wenzheng. 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.
- [23] 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: A case study from the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(3): 288-293.
- [24] 冯胜斌,牛小兵,刘飞,等.鄂尔多斯盆地长7致密油储层储集空间特征及其意义[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(11): 4574-4580.
Feng Shengbin, Niu Xiaobing, Liu Fei, et al. Characteristics of Chang7 tight oil reservoir space in Ordos Basin and its significance [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2013, 44(11): 4574-4580.
- [25] 李士祥,施泽进,刘显阳,等.鄂尔多斯盆地中生界异常低压成因定量分析[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(5): 528-533.
Li Shixiang, Shi Zejin, Liu Xianyang, et al. Quantitative analysis of the Mesozoic abnormal low pressure in Ordos Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(5): 528-533.
- [26] Sauerbrey G Z. Use of quartz vibration for weighing thin films on a microbalance [J]. *Zeitschrift für Physik*, 1959, 155(2): 206-222.
- [27] Ekholm P, Blomberg E, Claesson P, et al. A quartz crystal microbalance study of the adsorption of asphaltene and resins onto a hydrophilic surface [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2002, 247(2): 342-350.
- [28] Larter S R, Senftle J T. Improved kerogen typing for petroleum source rock analysis [J]. *Nature*, 1985, 318(6043): 277-280.
- [29] Cui Jingwei, Wang Tieguan, Li Meijun, et al. Oil filling history of the Bashituo Oilfield in the Markit Slope, SW Tarim Basin, China [J]. *Petroleum Science*, 2013, 10(1): 58-64.
- [30] Alboudwarej H, Pole D, Svrcek W Y, et al. Adsorption of asphaltene on metals [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005, 44(15): 5585-5592.
- [31] Balabin R M, Syunyaev R Z. Petroleum resins adsorption onto quartz sand: Near infrared (NIR) spectroscopy study [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2008, 318(2): 167-174.
- [32] 崔景伟,朱如凯,杨智,等.国外页岩层系石油勘探开发进展及启示[J]. *非常规油气*, 2015, 2(4): 68-82.
Cui Jingwei, Zhu Rukai, Yang zhi, et al. Progresses and enlightenment of overseas shale oil exploration and development [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2015, 2(4): 68-82.
- [33] Chilingar G V, Main R, Sinnokrot A. Relationship between porosity, permeability, and surface areas of sediments [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1963, 33(3): 759-765.
- [34] Kuuskraa V, Stevens S H, Moodhe K D. Technically recoverable shale oil and shale gas resources: An assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States [M]. Washington: US Energy Information Administration, 2013.