

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

牛小兵^{1,2}, 冯胜斌^{1,2}, 刘飞^{1,2}, 王成玉^{1,2}, 郑庆华^{1,2}, 杨孝³, 尤源^{1,2}

(1. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西西安 710018; 2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西西安 710018; 3. 中国石油长庆油田分公司油藏评价处, 陕西西安 710018)

摘要:明确低渗透储层孔隙分布及不同尺度孔隙中石油微观赋存状态是认识致密油特征的关键。应用核磁共振测试技术对鄂尔多斯盆地延长组低渗透致密砂岩储层进行研究,发现了鄂尔多斯盆地延长组低渗透致密砂岩储层普遍发育纳米孔隙,具大孔、中孔、小孔、微孔及纳米孔多尺度孔隙发育特征。通过对近源与远源油藏储层多尺度孔隙中石油的微观赋存状态分析,明确了近源油藏储层具从大孔到纳米孔隙连续性赋存石油特征,且微孔至纳米孔隙含油饱满;远源油藏储层石油有选择性地赋存在大至中孔隙中,纳米孔隙不含油。延长组7段(长7)生烃增压产生的异常压力,控制石油在具多尺度孔隙的低渗透致密砂岩储层中差异性赋存,这为认识盆地致密油分布规律提供了理论依据。由此指出长7烃源岩分布区的长8油层组上部、长7油层组和长6油层组下部致密砂岩是今后致密油研究和勘探开发的主要目标。

关键词:核磁共振技术;多尺度孔隙;微观赋存状态;致密油;低渗透储层;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.1 **文献标识码:**A

Microscopic occurrence of oil in tight sandstones and its relation with oil sources —a case study from the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin

Niu Xiaobing^{1,2}, Feng Shengbin^{1,2}, Liu Fei^{1,2}, Wang Chengyu^{1,2}, Zheng Qinghua^{1,2}, Yang Xiao³, You Yuan^{1,2}

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China;
2. National Engineering Laboratory of Exploration and Development of Low Permeability Oil-Gas Fields, Xi'an, Shaanxi 710018, China;
3. Department of Reservoir Evaluation, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China)

Abstract: Identifying pore distribution of tight reservoirs and the microscopic occurrence of oil in pores of different scales is critical to understand the characteristics of tight oil. In this study, tight sandstone samples from Yanchang Formation, Ordos Basin, were investigated through Nuclear Magnetic Resonance (NMR) experiment. Nano-scale pores are common in the tight sand of Yanchang Fm and macro-scale, medium-scale, small-scale, micro-scale and nano-scale pores co-exist in the samples. The microscopic occurrence of oil in multiple-scale pores are compared between near-source reservoir and far-source reservoir. In near-source reservoirs, oil exists in all kinds of pores and the micro-pores and nano-pores are saturated with oil. In contrast, in far-source reservoirs, oil selectively occur in macro-scale and medium-scale pores and nano-pores contains no oil. The abnormal pressure caused by hydrocarbon-generation in Chang 7 layer is believed to be the main controlling factor for different occurrences of oil in multi-scale pores in tight reservoir. This provides a theoretical basis for understanding the distribution of tight oil reservoir. It is concluded that the upper Chang 8, the Chang 7 and lower Chang 6 reservoirs within the distribution area of Chang 7 source rock are the main potential targets for tight oil exploration in the future.

Key words: Nuclear Magnetic Resonance, multi-scale pore, microscopic occurrence, tight oil, low permeability reservoir, Ordos Basin

随着北美地区页岩气、致密油的成功开发,可利用的油气赋存的孔隙由毫米级和微米级孔延伸到纳米级

孔隙^[1-2]。鄂尔多斯盆地中生界延长组砂岩储层以特低渗透-超低渗透为主,储层具有微米-纳米级孔隙

收稿日期:2012-06-28;修订日期:2013-01-08。

第一作者简介:牛小兵(1977-),男,高级工程师,石油地质与油藏评价。E-mail: nxb_cq@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油天然气股份公司重大科技专项(2011E-2602);鄂尔多斯盆地大型岩性地层油气藏勘探开发示范工程(2008ZX05044)。

组合特征^[1]。这类储层由于孔隙小、喉道细、矿物颗粒表面粗糙,带来石油运聚阻力大、渗流能力低及启动压力梯度高等制约石油运移充注及聚集成藏的不利因素^[3-6],因而石油在该类储层中的微观赋存状态具有多样性,其在很大程度上将影响到低渗透油藏的地质储量计算,尤其是对致密油分布规律认识和资源评价具有重要的影响^[7]。但是,尽管目前该盆地在这类储层中已取得了重大勘探开发成果及一系列地质理论认识^[8-11],但对石油在不同尺度孔隙中的微观赋存特征及形成机理研究较少。本文试图采用核磁共振测试技术,来分析鄂尔多斯盆地延长组储层孔隙分布特征、不同大小孔隙中石油微观赋存状态及其与源储距离关系,以期对该盆地低渗透致密储层石油运移充注特征及聚集成藏机理有更深入的认识,并为盆地致密油的研究和勘探开发提供借鉴。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北地台西南部。该盆地晚三叠世为一个大型内陆差异性沉积盆地,期间沉积了一套厚千余米的黄绿、灰绿色砂岩夹暗色泥岩、黑色油页岩的湖泊-三角洲相地层,是该盆地中生界重要的生油层和产油层。该套地层归属上三叠统延长组,自下而上划分为长10至长1共10个油层组。其中,长7油层组发育优质烃源岩,是盆地中生界最主要的油源岩。

该套地层10个油层组均发育砂岩储层,但油层组之间及同一油层组在不同地区砂岩储层物性存在较大差异。总体上,长4+5以上油层组和北东物源沉积区储层物性相对较好^[12-13],渗透率(K)多变化于 $0.3 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间;而长7油层组砂岩储层平均渗透率小于 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,是典型的致密油储层。目前,延长组10个油层组均有油藏发现,具多层系含油的特点。

2 样品采集及分析方法

主要围绕长7优质烃源岩分布区采集延长组砂岩储层样品。在长8油层组上部 and 长7油层组中部各选择2块代表近源储层的样品,在长6油层组上部和长2油层组上部各选择1块代表远源储层的样品。所有样品均采自新鲜的、含油性好的钻井岩心,样品规格为 $2.5 \text{ cm} \times 5.0 \text{ cm}$ 的短岩心柱(表1)。

明确储层孔隙分布特征是开展储层中石油微观赋存状态研究的前提。高压压汞法是研究储层孔喉分布特征的常用方法,但其因进汞饱和度常小于100%,不

表1 鄂尔多斯盆地低渗透致密砂岩样品采集位置及特征
Table 1 Sample locations and characteristics of tight sandstones with low permeability in Ordos Basin

井号	深度/m	层位	岩性描述	含油级别
A228-37	2 264.5	长7中部	灰褐色细砂岩	油斑
A224-41	2 341.6	长7中部	灰褐色细砂岩	油斑
X246	1 815.6	长8上部	深灰色中砂岩	油斑
G286	2 500.5	长8上部	灰褐色细砂岩	油斑
G286	2 269.1	长6上部	灰色细砂岩	油斑
L101	2 154.0	长2上部	褐灰色中砂岩	油斑

能反映微小孔隙、复杂孔隙的分布^[14]。岩心饱和水时的核磁共振 T_2 谱分布能反映岩心内所有孔隙孔径分布^[14-16],并且该测试技术具有通过使用弛豫剂消除水信号干扰,获取油相 T_2 谱分布特征的优势^[17-18]。因而,可以采用核磁共振技术分析石油在不同尺度孔隙中的微观赋存特征^[19-20]。另外,核磁共振测试技术在致密油气储层研究中已得到了广泛应用^[21],且在油气勘探与开发中取得良好的应用效果。为此,本文使用Magnet 2000型核磁共振岩样分析仪分析该盆地低渗透致密砂岩储层石油微观赋存状态。

实验步骤为:首先,对未经处理的新鲜样品,测试反映岩心原始流体信息的核磁共振 T_2 谱分布特征;其次,对岩心样品进行盐水饱和和处理,分析获取孔隙度、渗透率、可动流体饱和度、束缚流体饱和度及孔隙结构特征参数;最后,用氯化锰溶液浸泡岩心样品,测得岩心石油 T_2 谱分布,并将测得的 T_2 谱弛豫时间按照文献^[14]的方法转化为孔径分布值。

3 分析结果及讨论

3.1 近源油藏储层石油微观赋存状态

图1为盆地近源油藏储层岩心核磁共振测试结果。4个样品的饱和水流体和油流体分布曲线为双峰模式,原始流体分布曲线既有单峰模式又有双峰模式。从饱和水流体分布曲线看,研究区储层的孔隙孔径分布范围较宽,按照低渗透储层孔隙类型的分类标准^[1,7,22]划分,包含大孔($r > 20 \mu\text{m}$)、中孔($r = 20 \sim 10 \mu\text{m}$)、小孔($r = 10 \sim 2 \mu\text{m}$)、微孔($r = 2.0 \sim 0.5 \mu\text{m}$)及纳米孔($r < 0.5 \mu\text{m}$)各种不同尺度孔隙类型;油流体分布曲线揭示研究区储层中不同尺度的孔隙中均赋存石油,即大孔至纳米孔均储集石油。比较特殊的是,原始流体与饱和水流体分布曲线在大孔径一侧相差较大,这可能是由于该盆地原油油质轻^[23],岩心脱离了地下的温度和压力条件,在钻井取心、制样及分析过程

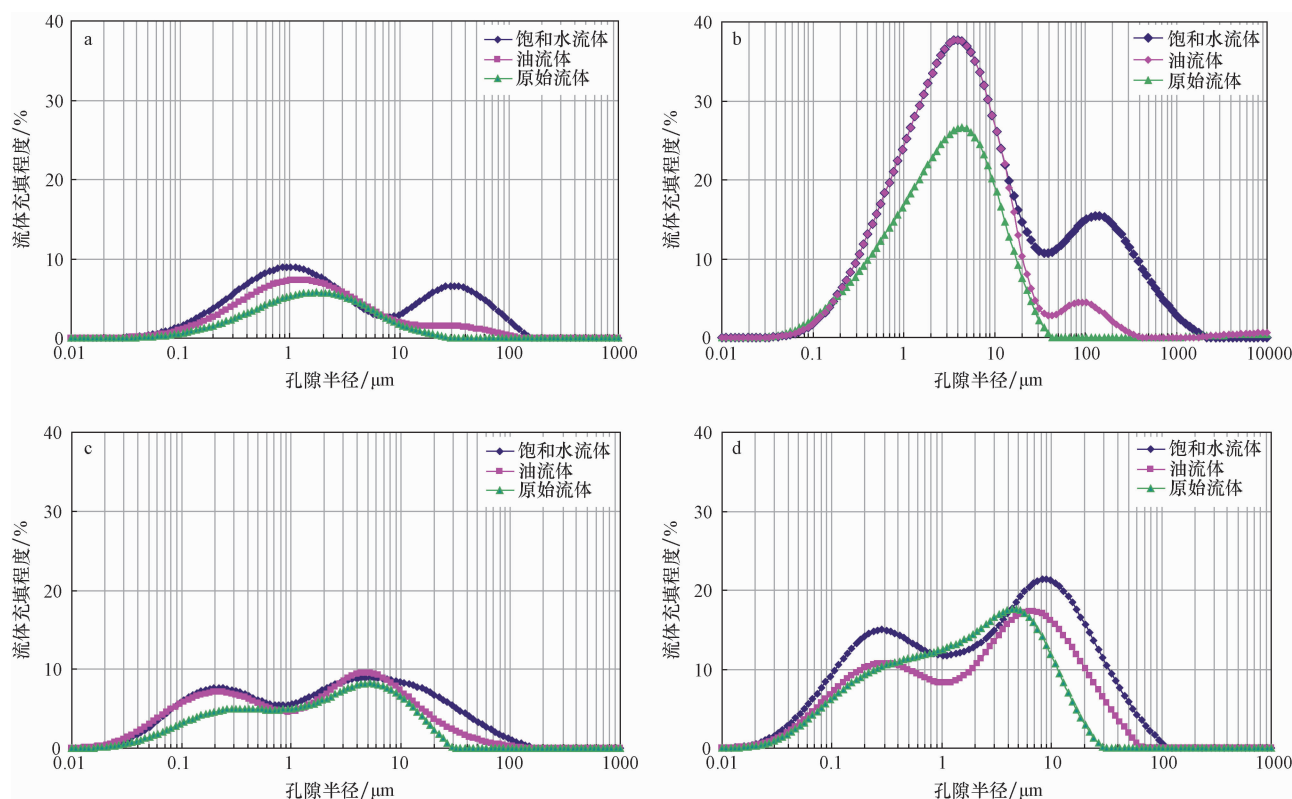


图1 鄂尔多斯盆地近源油藏储层岩心核磁共振 T_2 谱图

Fig. 1 T_2 spectra on NMR of the cores from reservoirs near source rocks in the Ordos Basin

a. G286 井, 2 500.5 m, 长 8 上部, $K=0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; b. X246 井, 1 815.6 m, 长 8 上部, $K=5.66 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;
c. A228-37 井, 2 264.5 m, 长 7 中部, $K=0.20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; d. A224-41 井, 2 341.6 m, 长 7 中部, $K=0.21 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$

中大孔隙中油流体发生了逸散^[24]。油流体和饱和水流体分布曲线在小孔径一侧趋于一致, 揭示储层微孔隙-纳米孔隙含油饱满, 且受喉道微细控制流体保存好^[25]。上述特征表明, 该盆地近源油藏储层中大孔至纳米孔均储集石油。

3.2 远源油藏储层石油微观赋存状态

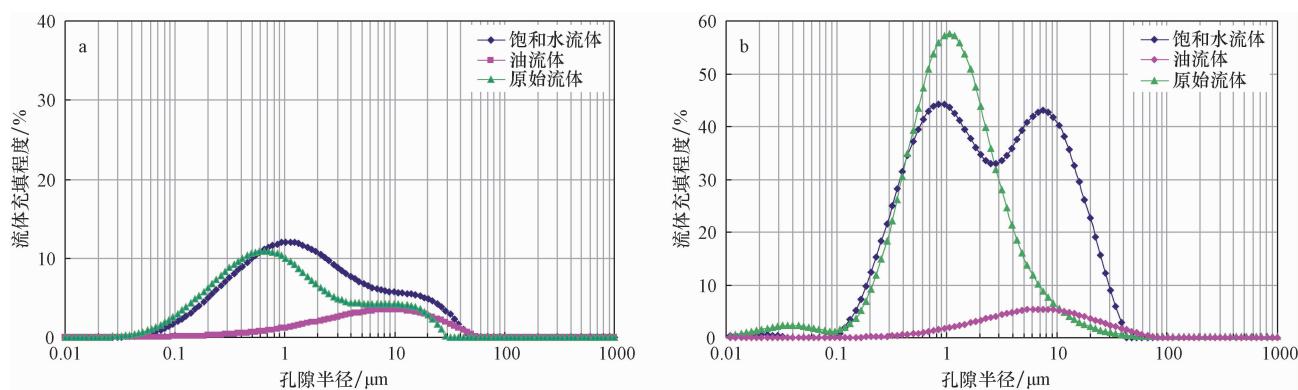
图2所示为盆地远源油藏储层岩心核磁共振测试结果。对照图1显示, 盆地远源油藏储层与近源油藏储层孔隙孔径分布特征相似, 大孔至纳米孔均发育, 也具有石油逸散的现象; 不同的是, 远源油藏储层油流体分布曲线为单峰模式, 且油流体分布峰明显偏向大孔径一侧, 表明远源油藏储层具有纳米孔隙不含油、小孔隙含油性差、中孔隙至大孔隙含油性好的微观赋存状态。

3.3 石油微观赋存状态控制因素

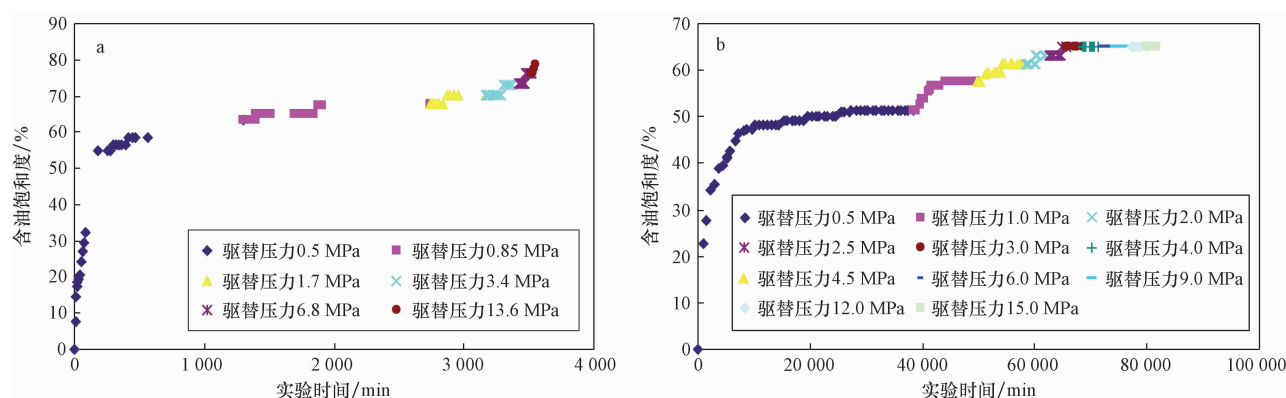
鄂尔多斯盆地近源与远源油藏储层中石油微观赋存状态差异明显, 近源油藏储层不仅大、中孔隙储集油, 且半径小于 $0.5 \mu\text{m}$ 的纳米孔隙含油饱满(图1), 而远源油藏储层石油主要赋存在大、中孔隙, 小孔隙至微孔隙含油差, 纳米孔隙不含油。已有资料表明, 石油常赋存在孔隙半径大于 $0.1 \mu\text{m}$ 的储集空间^[20], 研究

区内近源的长7致密砂岩储层中存在小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的储集空间赋存石油的现象(图1c, d), 远源储层则无, 这显示盆地近源储层与远源储层具有不同的石油运移充注、成藏条件。

由盆地延长组砂岩储层石油充注成藏过程与成藏机理模拟实验分析^[26](图3), 当驱动压力达到 3 MPa 时, 超低渗透储层($K=0.3 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 含油饱和度达到 70% 以上, 并随压力增大有增高趋势(图3a); 此时致密储层($K < 0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 含油饱和度也可达到 60% 以上(图3b)。这揭示盆地低渗透储层石油充注强度与物性关系不大, 而主要取决于驱动压力, 这与朱志强等^[5]对松辽盆地的模拟结果一致。勘探实践亦证实, 盆地长7优质烃源岩生烃增压形成的异常压力是油气运移成藏的主动力量^[8-11, 27], 异常压力恢复显示该烃源岩与近源储层之间普遍存在 5 MPa 以上的异常压力。这些证据充分证明, 对于近源储层, 由于受异常压力控制, 石油运移驱动压力大, 石油充注强, 含油饱和度高, 储层中大孔至纳米孔均赋存石油; 而远源储层由于运移距离远, 异常压力在运移路径中被消耗, 石油充注成藏主导作用力为浮力^[11, 28], 浮力远低于异常压力, 故远源储层中石油主要赋存在毛细管阻力较小的中至大孔喉储集空间。

图2 鄂尔多斯盆地远源油藏储层岩心核磁共振 T_2 谱图Fig. 2 T_2 spectra on NMR of the cores from reservoirs far from source rocks in the Ordos Basin

a. G286 井, 2 269.1 m, 长 6 上部, $K=0.27 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; b. L101 井, 2 154.0 m, 长 2, $K=4.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$

图3 鄂尔多斯盆地低渗透岩心含油饱和度与压力关系^[26]Fig. 3 Oil saturation vs. pressure for core samples from low permeability sandstones in the Ordos Basin^[26]

a. $K=0.75 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; b. $K=0.17 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$

3.4 对盆地致密油研究和勘探开发的启示及意义

致密油已成为北美等地区非常规油气资源发展的新热点。但目前国内致密油的勘探开发和相关研究仍处于准备阶段^[29-30]。邹才能等对我国致密砂岩油气储层研究中,应用场发射扫描电镜与 Nano-CT 技术发现了孔隙半径小于 $0.5 \mu\text{m}$ 的纳米级孔隙类型^[1]。本文采用核磁共振技术亦发现鄂尔多斯盆地延长组低渗透储层、致密油储层普遍发育半径小于 $0.5 \mu\text{m}$ 的纳米级孔隙类型。更为重要的是,这些近源储层中纳米级孔隙普遍含油,该发现进一步丰富和完善了纳米孔隙的生产意义^[1,7]。

另外,由于致密油是近几年提出和引起石油勘探者与学者广泛关注的新生事物,综合文献调研来看,目前对致密油术语的定义存在分歧,需不断完善致密油术语的定义^[1,7,30-32]。本文近源与远源油藏储层不同尺度孔隙石油微观赋存状态差异的发现表明,致密油定义中致密油层不仅包括烃源岩和砂岩、碳酸盐岩夹层系统,还应包括紧邻源岩的上、下层致密砂岩或碳酸盐岩储层。需说明的是:由于受烃源岩厚度、生排烃强

度、排烃动力、储层特征等多因素的影响,紧邻烃源岩的致密油层分布的顶低界线难以制定统一的标准,不同的盆地需具体分析。

上述初步认识对盆地致密油的研究和勘探开发具有一定的启示意义:①盆地长 7 油层组厚度达 90 ~ 110 m,纵向上岩性组合为泥岩(油页岩)与砂岩互层分布,具有源储共生或自生自储的有利成藏条件。砂岩储层中大孔至纳米级孔隙均赋存石油,实测含油饱和度高达 70% 以上,致密砂岩油业已成为现实的非常规资源;页岩随着纳米孔隙作为油气储集空间新认识的提出和勘探开发技术的发展^[1,7,33-34],盆地长 7 分布面积达 $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、厚 10 ~ 40 m 的油页岩储集的丰富石油资源,是今后重要的勘探开发攻关目标。②紧邻源岩的上下层致密砂岩发育致密油的新认识的提出,拓宽了盆地致密油勘探开发的领域,即盆地长 8 油层组上部和长 6 油层组下部发育的砂层薄、岩性致密、渗透率低的以往不具开发效益的致密砂岩储层,将成为致密油勘探的范畴。③盆地长 9、长 6、长 4 + 5 油层组在盆地局部凹陷发育有不同规模、不同性质的烃源岩,具有一定的生烃潜力,结合近源储层石油微观赋存

特征及形成机理分析,推测这几套源岩发育层位也可形成类似长7油层组的致密油层。

4 结论

1) 鄂尔多斯盆地延长组低渗透储层孔隙孔径分布范围宽、孔隙类型复杂,储层中大孔、中孔、小孔、微孔及纳米孔隙类型均发育。

2) 盆地近源与远源油藏储层中石油微观赋存状态差异明显。近源储层受高异常压力控制石油充注强,大孔隙至纳米孔隙均含油,且微孔至纳米孔隙含油饱满;远源储层石油运移充注动力小,石油有选择性赋存在中至大孔隙,纳米孔隙不含油。

3) 鄂尔多斯盆地致密油层分布广、资源潜力大。其中,长7烃源岩分布区的延长组长8油层组上部、长7油层组和长6油层组下部致密砂岩是今后致密油研究和勘探开发的主要目标;对长9、长6和长4+5油层组烃源岩需再认识生烃能力,评价形成致密油的前景。

致谢:样品测试在中国石油勘探开发研究院廊坊分院与长庆油田勘探开发研究院分析试验中心完成,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 邹才能,朱如凯,白斌,等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. 岩石学报,2011,27(6):1857-1864.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. First discovery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1857-1864.
- [2] 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.
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.
- [3] 杨琼,聂孟喜,宋付权. 低渗透砂岩渗流启动压力梯度[J]. 清华大学学报(自然科学版),2004,44(12):1650-1652.
Yang Qiong, Nie Mengxi, Song Fuquan. Threshold pressure gradient of low permeability sandstone[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2004, 44(12): 1650-1652.
- [4] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京:石油工业出版社,1998:1-160.
Huang Yanzhang. Research on percolation mechanism of low permeability reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 1-160.
- [5] 朱志强,曾濂辉,吴河勇,等. 低渗透砂岩石油运移及成藏特征模拟实验[J]. 石油与天然气地质,2007,28(2):229-234.
Zhu Zhiqiang, Zeng Jianhui, Wu Heyong, et al. An experimental study on oil migration and accumulation in low-permeability sandstone[J]. Oil and Gas Geology, 2007, 28(2): 229-234.
- [6] 熊伟,雷群,刘先贵,等. 低渗透油藏拟启动压力梯度[J]. 石油勘探与开发,2009,36(2):232-236.
Xion Wei, Lei Qun, Liu Xiangui, et al. Pseudo threshold pressure gradient to flow for low permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(2): 232-236.
- [7] 邹才能,杨智,陶士振,等. 纳米油气与源储共生型油气聚集[J]. 石油勘探与开发,2012,39(1):12-25.
Zou Caineng, Yang Zhi, Tao Shizhen, et al. Nano-hydrocarbon and the accumulation in coexisting source and reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 12-25.
- [8] 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,2005,37(1):59-64.
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]. Geochemica, 2005, 37(1): 59-64.
- [9] 张文正,杨华,李剑锋,等. 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——强生排烃特特征及机理分析[J]. 石油勘探与开发,2006,33(3):289-293.
Zhang Wenzheng, Yang Hua, Li Jianfeng, et al. 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—hydrocarbon generation and expulsion mechanism[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 289-293.
- [10] 赵文智,胡素云,汪泽成,等. 鄂尔多斯盆地基底断裂在上三叠统延长组石油聚集成藏中的控制作用[J]. 石油勘探与开发,2003,30(5):1-5.
Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Key role of basement fault control on oil accumulation of Yanchang Formation, Upper Triassic, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(5): 1-5.
- [11] 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,2011.
Deng Xiuqing. Accumulation mechanism research on ultra-low-permeability and large scale lithological reservoirs of Triassic Yanchang Formation in Ordos basin[D]. Northwest University, 2011.
- [12] 贺静,冯胜斌,黄静,等. 物源对鄂尔多斯盆地中部延长组长6砂岩孔隙发育的控制作用[J]. 沉积学报,2011,29(1):80-86.
He Jing, Feng Shengbin, Huang Jing, et al. Effects of provenance on porosity development of Chang 6 sandstone of the Yanchang Formation in the center of Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(1): 80-86.
- [13] 贺静,冯胜斌,袁效奇,等. 鄂尔多斯盆地周缘延长组露头剖面砂岩组分及地质意义分析[J]. 岩性油气藏,2011,23(6):30-36.
He Jing, Feng Shengbin, Yuan Xiaoqi, et al. An analysis of sandstone composition of outcrops of Yanchang Formation in the margin of Ordos Basin and its geological significance[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(6): 30-36.
- [14] 李海波,朱巨义,郭和坤. 核磁共振 T_2 谱换算孔隙半径分布方法研究[J]. 波谱学杂志,2008,25(2):273-279.
Li Haibo, Zhu Juyi, Guo Hekun. Methods for Calculating Pore Radius Distribution in Rock from NMR T_2 Spectra[J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2008, 25(2): 273-279.
- [15] 何雨丹,毛志强,肖立志,等. 核磁共振 T_2 分布评价岩石孔喉分布的改进方法[J]. 地球物理学报,2005,48(2):373-378.
He Yudan, Mao Zhiqiang, Xiao Lizhi, et al. An improved method of using NMR T_2 distribution to evaluate pore size distribution[J]. Chi-

- nese Journal of Geophysics, 2005, 48(2): 373–378.
- [16] Coates G, 肖立志, Prammer M. 核磁共振测井原理与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 1–172.
- Coates G, Xiao Lizhi, Prammer M. Logging principle and application of nuclear magnetic resonance technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007: 1–172.
- [17] 王志战. 核磁共振岩石物性录井技术新进展[J]. 录井技术, 2002, 13(2): 8–16.
- Wang Zhizhan. The new development in NMR petrophysical property mud logging technology[J]. Mud Logging Technology, 2002, 13(2): 8–16.
- [18] 王志战. 国外核磁共振录井技术新进展[J]. 录井技术, 2004, 15(3): 13–16.
- Wang Zhizhan. New progress with overseas NMR logging technology[J]. Mud Logging Technology, 2004, 15(3): 13–16.
- [19] 刘曰强, 朱晴, 梁文发, 等. 利用核磁共振技术对丘陵油田低渗透储层可动油的研究[J]. 新疆地质, 2006, 24(1): 52–54.
- Liu Yueqiang, Zhu Qing, Liang Wenfa, et al. Research on the movable oil in reservoirs with low permeability in qiuling oilfield with nuclear magnetic resonance technology[J]. Xinjiang Geology, 2006, 24(1): 52–54.
- [20] 王学武, 杨正明, 时宇, 等. 核磁共振研究低渗透砂岩油水两项渗流规律[J]. 科技导报, 2009, 27(15): 56–58.
- Wang Xuewu, Yang Zhengming, Shi Yu, et al. Experimental study of water-oil two-phase fluid flow in low permeability reservoir by nuclear magnetic resonance[J]. Review Science and Technology, 2009, 27(15): 56–58.
- [21] 杨平, 郭和坤, 姜鹏, 等. 长庆超低渗透砂岩储层可动流体实验[J]. 科技导报, 2010, 28(16): 48–51.
- Yang Ping, Guo Hekun, Jiang Peng, et al. Experimental study of the movable fluid of super-low permeability reservoir sandstone reservoirs in Changqing[J]. Review Science and Technology, 2010, 28(16): 48–51.
- [22] 李道品. 低渗透油田高效开发决策论[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 3–258.
- Li Daopin. Effective development technique of low permeability oil-field[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 3–258.
- [23] 胡文瑞. 低渗透油气田概论(上册)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 84–86.
- Hu Wenrui. Theory of low permeability reservoir(I) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 84–86.
- [24] 王志战, 许小琼, 周宝洁. 孔隙流体核磁共振弛豫特征及油水层识别方法[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(2): 41–44.
- Wang Zhizhan, Xu Xiaoqiong, Zhou Baojie. Relaxation features of pore fluid and water-oil bed recognition with NMR technology[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(2): 41–44.
- [25] 侯启军. 深盆油藏——松辽盆地扶杨油层油藏形成与分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 1–142.
- Hou Qijun. The formation and distribution of Fuyang reservoir of deep basin oil in the Songliao basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 1–142.
- [26] 长庆油田勘探开发研究院. 鄂尔多斯盆地延长组砂岩储层石油充注成藏过程与成藏机理模拟实验研究报告[R]. 陕西, 西安: 长庆油田档案馆, 2011.
- Research Institute of Exploration and Development of Changqing Oilfield Company. The study on tight sandstone reservoir of Triassic Yanchang Formation for the process and mechanism of oil accumulation in Ordos basin [R]. Xi'an: Changqing Oilfield Archives, 2011.
- [27] 李维莲, 刘震, 王伟, 等. 镇泾地区延长组八段低渗透岩性油藏形成过程动态分析[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 845–852.
- Li Weilian, Liu Zhen, Wang Wei, et al. Hydrocarbon accumulation process of Chang-8 low-permeability lithological reservoirs in Zhenjing area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 845–852.
- [28] 席胜利, 刘新社, 王涛. 鄂尔多斯盆地中生界石油运移特征分析[J]. 石油实验地质, 2006, 26(3): 229–235.
- Xi Shenli, Liu Xinshe, Wang Tao. Analysis on the migration characteristics of the Mesozoic petroleum in the Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2006, 26(3): 229–235.
- [29] 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, (3): 60–67.
- Li Yuxi, Zhang Jinchuan. Types of unconventional oil and gas resources in China and their development potential [J]. International Petroleum Economics, 2011, 3: 60–67.
- [30] 林森虎, 邹才能, 袁选俊, 等. 美国致密油开发现状及启示[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(4): 25–29.
- Lin Senhu, Zou Caineng, Yuan Xuanjun, et al. Status of tight oil exploitation in the United States and its implication [J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4): 25–29.
- [31] 贾承造, 邹才能, 李建中, 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): 343–349.
- Jia Chenzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in china [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 33(3): 343–349.
- [32] 周庆凡, 杨国丰. 致密油与页岩油的概念与应用[J]. 石油与天然气地质, 2012, 23(4): 541–570.
- Zhou Qingfan, Yang Guofeng. Definition and application of tight oil and shale oil terms [J]. Oil and Gas Geology, 2012, 23(4): 541–570.
- [33] 李娟, 于炳松, 张金川, 等. 黔北地区下寒武统黑色页岩储层特征及其影响因素[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 364–374.
- Li Juan, Yu Bingsong, Zhang Jinchuan, et al. Reservoir characteristics and their influence factors of the Lower Cambrian dark shale in northern Guizhou [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 364–374.
- [34] 杨侃. 岩石微孔隙中气体吸附—链状分子运移的计算模拟及其油气地质意义[D]. 南京大学, 2011.
- Yang Kan. Simulations of gas adsorption and chain-molecules transportation in microscaled pores of rock sand its preliminary application in petroleum geology [D]. Nanjing University, 2011.