

文章编号:1673-5005(2014)06-0018-06

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2014.06.003

鄂尔多斯盆地延长组长7致密油储层 微观孔隙特征研究

尤源^{1,2}, 牛小兵^{1,2}, 冯胜斌^{1,2}, 王芳^{1,2}, 王成玉^{1,2}, 李卫成^{1,2}

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

摘要:利用场发射扫描电镜、微米CT、自动矿物识别系统(QEMSCAN)、微图像拼接(MAPS)等测试新技术结合常规分析方法对鄂尔多斯盆地延长组长7致密油储层孔隙特征进行综合研究。结果表明:致密油储层具有微米—纳米级多尺度孔隙连续分布的特征,大于2 μm的微米级孔隙构成主要的储集空间;颗粒间充填胶结物质剩余的各尺度残余粒间孔及溶蚀形成的各尺度溶蚀孔隙是最重要的孔隙类型;致密油储层各尺度孔隙连通性较好,可以作为有效的储集空间及渗流通道;深湖细粒沉积及后期强压实、强胶结及强溶蚀为主的成岩作用是现今长7致密油储层微孔隙发育的主要控制因素;由于具备源储近邻或互层配置及异常高压驱动优势条件,致密油储层微孔隙中形成了富集石油的特征。

关键词:鄂尔多斯盆地;致密油;长7油层组;细粒沉积;纳米孔隙

中图分类号:TE 122.2 **文献标志码:**A

引用格式:尤源,牛小兵,冯胜斌,等.鄂尔多斯盆地延长组长7致密油储层微观孔隙特征研究[J].中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(6):18-23.

YOU Yuan, NIU Xiaobing, FENG Shengbin, et al. Study of pore features in Chang7 tight oil reservoir, Yanchang layer, Ordos Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(6): 18-23.

Study of pore features in Chang7 tight oil reservoir, Yanchang layer, Ordos Basin

YOU Yuan^{1,2}, NIU Xiaobing^{1,2}, FENG Shengbin^{1,2}, WANG Fang^{1,2}, WANG Chengyu^{1,2}, LI Weicheng^{1,2}

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

Abstract: The pore features of Chang7 tight oil reservoir, Yanchang layer, Ordos Basin, were studied using new pore measuring methods, such as FESEM, Micro-CT, QEMSCAN, MAPS, and were comprehensively analyzed combining conventional testing results. The results show that pores in tight oil reservoir are found continuously distributed from micro- to nano-scales. Pores being larger than 2 μm in radius constitute the primary reservoir storage space. The main types of pores are residual intergranular pores and dissolved pores. Different scale of pores and throats are well connected as a net, which works as effective flow channels for fluid. Fine-grained lake deposition and subsequent complex diagenesis characterized by strong compaction, strong cementation and strong solution, are the main reasons that micro-pores exist extensively in Chang7 tight oil reservoir. As the results of superior configuration relationships between the source and the formation and the high pressure injection condition, Chang7 tight oil reservoir is well saturated with oil.

Key words: Ordos Basin; tight oil; Chang 7 oil-bearing layer; fine-grained sediment; Nano-pores

随着“连续性油气聚集”、“纳米孔隙”等理论^[1-3]的提出及“水平井+体积压裂”技术^[4]的进步,

收稿日期:2014-02-11

基金项目:国家“973”重点基础研究发展计划(2014CB239003);国家自然科学基金重大项目(41390451);中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2011E-2602)

作者简介:尤源(1982-),男,博士,工程师,主要从事低渗透油田开发及储层评价工作。E-mail: youy_cq@petrochina.com.cn。

致密油已成为非常规油气资源勘探开发的现实领域。鄂尔多斯盆地致密油是中国陆相湖盆致密油的典型代表,分布范围广、含油饱和度高,总资源量大^[5-6],但这种致密油储层异常致密,平均面孔率小于2%,储层孔隙特征及油气在孔隙空间中的赋存机制及渗流规律受到人们普遍关注^[5,7]。由于致密油储层孔隙微小、结构复杂,常规储层孔隙测试技术表征难度较大^[1-2],国外在致密油研究过程中开发了许多新的测试方法^[8-11],应用效果较好。开展致密油储层微观孔隙特征,包括孔隙类型、孔隙尺度、孔隙成因等研究,对认识致密油储层储集空间类型和通过储层改造及相应的配套开发技术形成长期可持续发展的致密油工业化开发具有重要意义。笔者采用场发射扫描电镜、微米CT、自动矿物识别系统(QEM-

SCAN)和微图像拼接(MAPS)等新技术方法,对鄂尔多斯盆地致密油储层致密砂岩样品进行研究,旨在揭示致密油储层微观孔隙特征,为致密油的勘探、开发提供理论依据。

1 研究新方法

1.1 测试方法的原理及特点

致密油储层与常规低渗透储层孔隙特征不同,利用铸体薄片、扫描电镜等常规储层孔隙测试方法只能观察到少量微孔隙或者看不到可见孔隙。针对致密油储层小尺度孔隙特征,借鉴国外致密(页岩)储层研究方法^[8-11],采用了先进的测试技术。这些测试技术的技术特点、研究尺度、图像形式、定量效果等见表1。

表1 致密油储层微观孔隙测试方法及特点

Table 1 Methods and their features for testing micro-pores in tight oil reservoir

参数分类	场发射扫描电镜 (SEM)	双束电镜 (FIB-SEM)	微(纳)米CT (Micro or Nano CT)	矿物识别和分析 (QEMSCAN)	图像拼接 (MAPS)
技术特点	场发射电子束+(离子束抛光)	粒子束切割+电子束扫描	无损测试+数字岩心计算	能谱矿物识别+高分辨率扫描图像拼接	高精度扫描+图像拼接
最小尺度	0.8 nm	0.5 nm	45 nm(纳米CT), 0.8 μm (微米CT)	1 μm	1 nm
视域范围	小	小	小	大、小	任意缩放
图像类型	二维	二维、三维	二维、三维	二维	二维
定量参数	孔喉尺寸	孔喉尺寸 连通体积	孔喉尺寸分布、孔喉数量、孔喉连通性、物性、渗流特征	孔隙度 矿物种类及分布 各类成因孔隙比例	孔喉尺寸

由表1可以看出,相比常规孔隙测试方法,这些新方法在研究尺度上更加精细;视域范围上兼顾宏观与微观;图像展示形式上由二维向三维扩展;定量效果上更加准确、多样。实际研究过程中发现,这些方法对致密油储层微观孔隙特征的研究具有独特功能和较好的效果,可根据不同的测试目的和需求选取相应的测试方法或者组合不同的测试方法,以满足致密油储层研究需要。

1.2 测试样品

研究过程中选取了鄂尔多斯盆地不同区块延长组长7致密油储层致密砂岩样品,具有较强的代表性。样品基本信息见表2。

1.3 测试流程

使用表1所示的主要测试手段,依次对致密油储层样品进行测试,测试方法为:通过场发射扫描电镜对样品进行精细扫描,得到微孔隙二维图像,识别孔隙类型,表征孔隙尺度;通过微米CT扫描测试,结合数字岩心计算,建立致密油储层样品孔隙网络模型,进一步统计得到孔隙及喉道的分布特征;对孔

隙结构参数进行统计,分析孔隙、喉道的连通性;通过微图像拼接获得微孔隙的全景图像;通过自动矿物识别系统对样品进行扫描分析,获得孔隙类型与赋存矿物的关系;综合各项测试结果对致密油储层孔隙特征进行综合分析。

表2 致密油储层致密砂岩样品基本参数

Table 2 Information for tight oil reservoir samples

样品编号	地区	深度 H/m	孔隙度 φ/%	渗透率 k/10 ⁻³ μm ²	岩性
Z1	合水	1 673.15	10.0	0.060	粉砂岩
Z2	镇北	2 199.06	8.2	0.070	粉砂岩
Z3	合水	1 833.69	11.0	0.100	细砂岩
Z4	合水	1 878.05	7.3	0.030	粉砂岩
Z5	姬塬	2 355.20	8.9	0.120	粉砂岩
Z6	合水	1 992.60	10.0	0.190	细砂岩
Z7	合水	2 013.84	10.1	0.160	细砂岩
Z8	合水	2 061.47	11.9	0.160	粉砂岩
Z9	合水	2 066.28	10.2	0.054	粉砂岩
Z10	合水	1 730.59	8.9	0.055	细砂岩
Z11	姬塬	2 209.22	10.1	0.057	细砂岩
Z12	合水	1 748.09	7.8	0.060	粉砂岩

2 微观孔隙特征

2.1 孔隙尺度分布特征

鄂尔多斯盆地长7致密油储层平均面孔率小于2%,常规铸体薄片观察发现储层致密、可见孔隙不

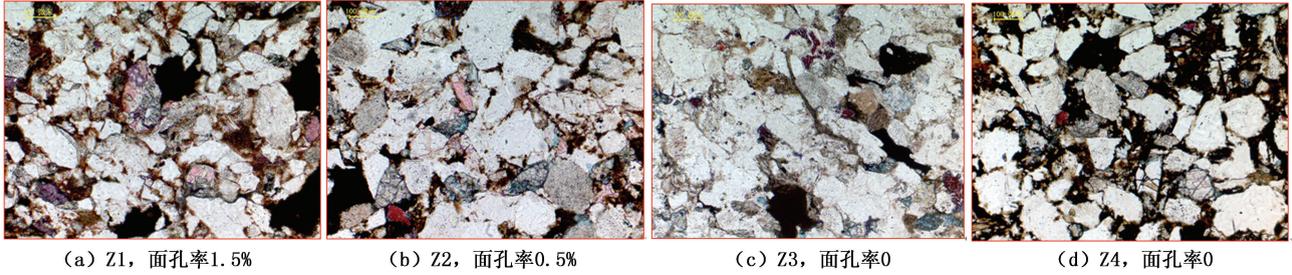


图1 鄂尔多斯盆地长7致密油储层样品铸体薄片图像

Fig.1 Thin sections for Chang7 tight oil reservoir samples in Ordos Basin

2.1.1 微(纳)米级孔隙特征

通过场发射扫描电镜测试,在鄂尔多斯盆地致密油储层中发现丰富的微(纳)米级孔隙。微(纳)

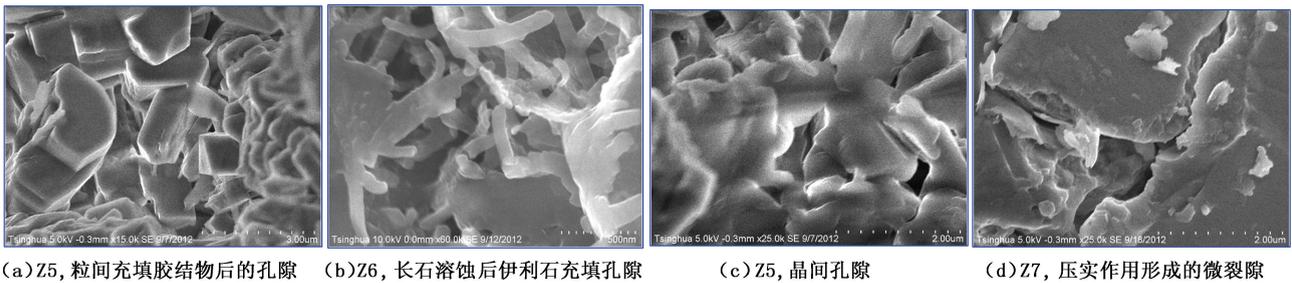


图2 鄂尔多斯盆地致密油储层微(纳)米级孔隙图像

Fig.2 Pictures for micro-pores or Nano-pores in tight oil reservoir in Ordos Basin

2.1.2 孔隙尺度分布特征

通过微米CT扫描识别出致密油储层各尺度孔隙,并进行统计分析。致密油储层孔隙半径分布特征见图3。其中,计算单元平均体积为2.11 mm³,识

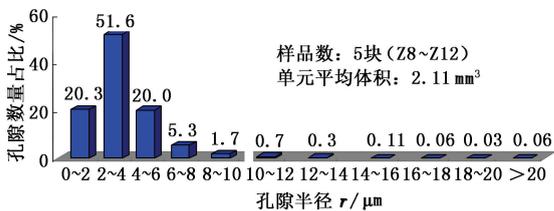


图3 致密油储层孔隙数量百分比构成

Fig.3 Composition histogram for numbers of pores with different radius

别出的孔隙总数约30000个。由图3可见,致密油储层具有各尺度孔隙连续分布的特征,从几十微米到纳米级别都有。其中大孔隙(大于20 μm)和中孔隙(10~20 μm)数量较少,小孔隙和微孔隙(小于2 μm)数量最多。

多(图1)。致密油储层是否发育更小的微孔隙需要通过新技术进一步研究。

采用场发射扫描电镜技术对致密油储层进行研究,识别其中的微孔隙,并进一步分析各种微孔隙在致密油储层中的分布特征及所占的比例。

米级孔隙形态见图2。

由图2可见,致密油储层广泛发育微(纳)米级孔隙,并且纳米级孔隙类型多样,形态各异。

通过微图像拼接技术获得了致密油储层样品Z8的微孔隙全景图像(图4)。致密油储层发育多尺度孔隙,其中大孔隙主要以残余粒间孔隙为主;小尺度孔隙主要是原生孔隙填充胶结物后的残余粒间孔隙和溶蚀产生的微孔隙。

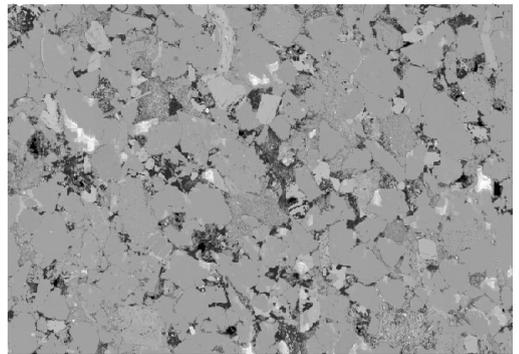


图4 致密油储层样品孔隙全景图像 (Z8, 视域1 mm×0.7 mm)

Fig.4 MAPS for tight oil sandstone sample (Z8, field of vision 1 mm×0.7 mm)

2.1.3 主要储集空间尺度特征

考虑到各尺度孔隙所占有的孔隙体积是储集空间的重要反映,对样品不同半径的孔隙所占有的孔隙体积进行统计(图5)。

对比图3所示孔隙数量分布及图5所示孔隙体积分布可以看出,大孔隙(大于20 μm)数量虽然不多,但所占的孔隙体积比重并不小;小孔隙(2~10 μm)所占的孔隙体积最大;微孔隙和纳米孔隙(小于2 μm)虽然数量较多,但所占有的孔隙体积很小。测试样品中,大于2 μm的孔隙所占体积超过95%。综合以上分析,2 μm以上孔隙是致密油储层储集空间的主体。

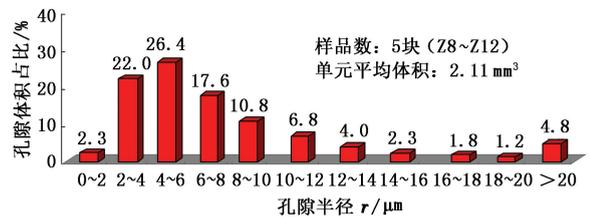


图5 致密油储层孔隙体积百分比构成

Fig.5 Composition histogram for volumes of pores with different radius

2.2 孔隙类型及成因分析

2.2.1 孔隙类型

对场发射扫描电镜识别出的致密油储层各种孔隙进行统计分析。各种孔隙尺度分布情况及孔隙类型见表3。

表3 鄂尔多斯盆地致密油储层孔隙尺度及孔隙类型

Table 3 Pores scale and type for tight oil reservoir in Ordos Basin

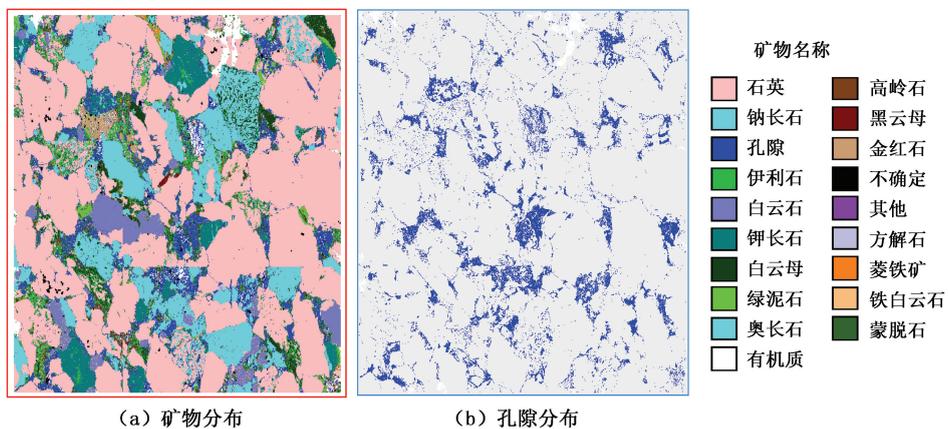
孔隙特征	大孔隙	中孔隙	小孔隙	微孔隙	纳米孔隙
孔隙半径	>20 μm	10~20 μm	2~10 μm	0.5~2 μm	<0.5 μm
孔隙类型	粒间孔、长石颗粒溶孔	粒间孔、长石颗粒溶孔	粒间孔、长石颗粒溶孔	粒间孔、长石颗粒溶孔、晶间孔、黏土矿物间孔	粒间孔、长石颗粒溶蚀孔、晶间孔、晶内孔、黏土矿物间孔
孔隙数量	少	较少	多	丰富	很丰富

由表3可知,致密油储层孔隙以小孔隙、微孔隙和纳米孔隙最多,孔隙类型主要是各类溶蚀孔隙、残余粒间孔隙和晶间孔隙。

2.2.2 孔隙成因分析

通过自动矿物识别系统对致密油储层样品进行测试,获得致密油储层矿物组成及孔隙分布图像

(图6)。致密油储层致密砂岩样品主要由石英、长石等构成颗粒骨架,由伊利石、白云石等各类填隙物充填孔隙,胶结致密,但通过图6(b)可见,主要的孔隙仍然是分布于颗粒间隙及颗粒边缘接触线上的各类残余粒间孔隙(虽然孔隙尺度较小)及颗粒内的溶蚀孔隙。对这种微孔隙发育的原因分析如下:鄂



(a) 矿物分布

(b) 孔隙分布

图6 致密砂岩矿物、孔隙分布(Z8, 视域1 mm×1 mm)

Fig.6 Distributions of minerals and pores in tight oil sandstone sample

(Z8, field of vision 1 mm×1 mm)

尔多斯盆地长7期深湖细粒沉积背景^[12-13]导致原始的粒间孔隙相对较小;强烈的压实作用使颗粒间紧密接触;同时胶结作用使大的粒间孔隙消失,残留

了小尺度的粒间孔隙。此外,长7层紧邻烃源岩,生烃过程中形成的酸性流体容易发生大范围的溶蚀作用,在此基础上产生各种尺度的溶蚀孔隙,盆地延长

组主力层位中,长7层溶蚀孔隙所占比例最高(达到了19.63%);以上过程造成现今长7致密油储层各尺度孔隙连续分布的特征。

2.3 孔隙连通性

通过CT扫描技术对致密油储层致密砂岩样品进行扫描,重新构建样品的三维结构;结合数字岩心技术对致密油储层致密砂岩样品建立微观孔隙网络模型(图7);对孔隙网络模型中各孔隙配位数的统计发现,致密油储层孔隙网络具有一定的连通性。配位数统计结果见图8。

由图7可见,致密油储层各尺度孔隙相互连通,构成孔隙网络,成为流体渗流通道。由图8可见,致密油储层样品的配位数从0~20及以上均有分布,致密油储层不同尺度级别的孔隙配位数不同,总体趋势为大孔隙可以达到较高的配位数。

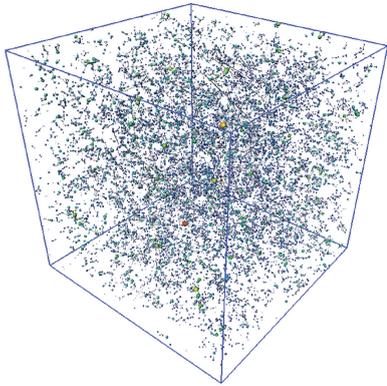


图7 致密油储层微观孔隙网络模型(Z8,1 mm³)

Fig.7 Pore network model for tight oil reservoir (Z8,1 mm³)

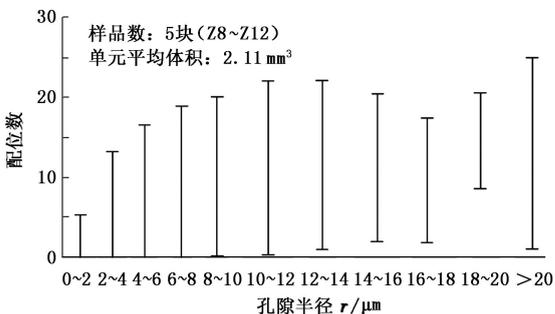


图8 致密油储层分孔隙区间配位数分布

Fig.8 Distribution of coordination number for pore with different scope of radius in tight oil sandstone samples

3 石油勘探意义及建议

鄂尔多斯盆地致密油储层具有多尺度孔隙连续分布的特征。大量发现的纳米级孔隙,改变了以往对储层孔隙半径下限的界定,极大地拓宽了具有储

集空间的岩石范围。以往被视为非储层的烃源岩及与烃源岩互层共生的各类致密砂岩都可以作为潜在的储层考虑^[14-16]。各尺度孔隙的存在充分证明致密油储层具有储集空间;有了储集空间,又具备与源岩近邻或者互层共生的特点,致密油储层具备成藏条件。同时也要认识到,发育纳米级孔隙并不一定可以作为有效的储集空间,目前文献报道纳米级孔隙含油的证据还不多。鄂尔多斯盆地致密油储层对储集空间贡献最大的还是微米级孔隙。考虑到致密油储层具有一定的非均质性,总体来说这种微米级孔隙总量还是比较可观的。致密油储层中发育的微孔隙类型仍然以残余粒间孔隙和溶蚀孔隙为主,在储层评价和预测过程中对储层经历的成岩作用需要特别重视,尤其关注相对压实作用不强烈,残余粒间孔隙较多的区域。此外,需要重点刻画溶蚀作用对储层的影响;对溶蚀作用的控制因素进行研究,总结溶蚀孔隙的分布规律,从而预测溶蚀孔隙发育的位置。

4 结论

(1)鄂尔多斯盆地致密油储层表现出微米—纳米级多尺度孔隙连续分布的特征。

(2)受深湖细粒沉积及强胶结、强溶蚀影响,致密油储层形成各尺度溶蚀孔隙及残余粒间孔为主的孔隙类型。

(3)各尺度孔隙相互配置形成连通孔隙网络,半径大于2 μm的孔隙构成主要的储集空间。

(4)源储近邻或源储一体的优势条件下,致密油储层微孔隙中具备富集石油和大规模成藏的条件,具有较大勘探潜力。

致谢 与数岩科技公司合作完成了部分测试及数字岩心计算工作,与中国石油勘探开发研究院廊坊分院、清华大学北京电子显微镜中心合作完成了场发射扫描电镜测试工作;在制定样品测试方案及后续数据分析时,以上合作单位对本文研究提出许多宝贵意见,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 赵政璋,杜金虎. 致密油气[M]. 北京:石油工业出版社,2012.
 - [2] 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): 1858-1864.
- ZOU Caineng, ZHU Rukai, BAI Bin, et al. First discov-

- ery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(6):1857-1864.
- [3] 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):13-26.
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):13-26.
- [4] 王文东,苏玉亮,幕立俊,等. 致密油藏直井体积压裂储层改造体积的影响因素[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2013, 37(3):93-97.
WANG Wendong, SU Yuliang, MU Lijun, et al. Influencing factors of stimulated reservoir volume of vertical wells in tight oil reservoirs[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(3):93-97.
- [5] 姚泾利,邓秀琴,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, 4(2):150-158.
YAO Jingli, DENG Xiubin, ZHAO Yande, et al. Characteristics of tight oil in Triassic Yanchang formation, Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 4(2):150-158.
- [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 Petrologica Sinica*, 2013, 34(1):1-11.
- [7] PHILIP H N. Pore-throat sizes in sandstones, tight sandstones and shales [J]. *AAPG Bulletin*, 2009(3):329-340.
- [8] 尤源,牛小兵,辛红刚,等. 国外致密油储层微观孔隙结构研究及其对鄂尔多斯盆地的启示[J]. *石油科技论坛*, 2013(1):12-18.
YOU Yuan, NIU Xiaobing, XIN Honggang, et al. Research on micro pore structure of overseas tight oil reservoir and its influence on Ordos Basin [J]. *Oil Forum*, 2013(1):12-18.
- [9] GOLAB A, KNACKSTEDT M, AVERDUNK H, et al. 3D porosity and mineralogy characterization in tight gas sandstones [J]. *The Leading Edge*, 2010(12):1476-1483.
- [10] SOK R M, VARSLOT T, GHOU S A, et al. Pore scale characterization of carbonates at multiple scales; integration of micro-CT, BSEM and FIBSEM; 23rd International Symposium of Core Analysts, Noordwijk, The Netherlands [C]. New Brunswick Canada: SCA Society of Core Analysts, 2009.
- [11] ROBERT G L, ROBERT M R, STEPHEN C R, et al. Morphology genesis and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett Shale [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009(79):848-861.
- [12] 邹才能,赵政璋,杨华,等. 陆相湖盆深水砂质碎屑流成因机制与分布特征:以鄂尔多斯盆地为例[J]. *沉积学报*, 2009, 27(6):1065-1075.
ZOU Caineng, ZHAO Zhengzhang, YANG Hua, et al. Genetic mechanism and distribution of sandy debris flows in Terrestrial lacustrine basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(6):1065-1075.
- [13] 李相博,刘化清,陈启林,等. 大型拗陷湖盆沉积坡折带特征及其对砂体与油气的控制作用:以鄂尔多斯盆地三叠系延长组为例[J]. *沉积学报*, 2010, 28(4):718-727.
LI Xiangbo, LIU Huaqing, CHEN Qilin, et al. Characteristics of slope break belt in large depression lacustrine basin and its controlling effect on sandbody and petroleum; taking the Triassic Yanchang formation in the Ordos Basin as an example [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(4):718-727.
- [14] 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 resources prospects of the tight oil in China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 33(3):343-350.
- [15] 邹才能. 非常规油气地质 [M]. 北京:地质出版社, 2013.
- [16] 庞雄奇,周新源,董月霞,等. 含油气盆地致密砂岩类油气藏成因机制与资源潜力[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2013, 37(5):28-37.
PANG Xiongqi, ZHOU Xinyuan, DONG Yuexia, et al. Formation mechanism classification of tight sandstone hydrocarbon reservoirs in petroliferous basin and resources appraisal [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(5):28-37.

(编辑 徐会永)