文章编号：1009-9603(2018)05-0104-06　　DOI：10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2018.05.015

古油藏低矿化度水驱微观剩余油动用机理实验研究

李俊键[1]，姜汉桥[1]，周代余[2]，杨子浩[1]，陈文滨[1]

（1.中国石油大学（北京）油气资源与探测国家重点实验室，北京 102249；
2.中国石油塔里木油田分公司 勘探开发研究院，新疆 库尔勒 841000）

摘要：低矿化度水驱因成本较低，在低油价环境下成为近年来中外学者研究的热点，但针对低矿化度水驱的微观剩余油动用机理，目前仍存在一定争议。为此，以塔中4古油藏岩心为研究对象，借助CT扫描技术和D-T_2二维谱技术进行定量表征，将剩余油分为连片状、网络状、孤岛状和油膜状4种类型，研究低矿化度水驱对4种剩余油类型的动用情况，并通过能谱实验进行验证。结果表明：在地层水驱阶段，连片状剩余油逐渐减少，而网络状、孤岛状和油膜状剩余油增多；转注低矿化度水后，连片状剩余油所占比例进一步减小，网络状和孤岛状剩余油所占比例继续增大，但油膜状剩余油所占比例减小，说明低矿化度水促使原油从岩石表面解吸，对油膜状剩余油进行了有效动用，是采收率提高的主要原因。

关键词：古油藏 低矿化度水驱 微观剩余油类型 D-T_2二维谱 能谱测试
中图分类号：TE319　　**文献标识码**：A

Experimental study on the microscopic displacement mechanism of remaining oil by low salinity water flooding in the paleo-oil reservoir

LI Junjian[1], JIANG Hanqiao[1], ZHOU Daiyu[2], YANG Zihao[1], CHEN Wenbin[1]

(1.*State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City*, 102249, *China*; 2.*Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang*, 841000, *China*)

Abstract: Low salinity water flooding, characterized by low cost, has become the research focus of the scholars at home and abroad due to the low oil price in the recent years. However, the microscopic displacement mechanism of remaining oil by the low salinity water flooding is not clear. The cores from Tazhong4 paleo-oil reservoir were tested. The remaining oil was divided into four types (block, net, island and membrane type) with the help of CT scanning technique and D-T_2 two-dimensional NMR techniques. The production of the four types of remaining oil by the low salinity water flooding was analyzed and verified by energy spectrum experiment. The results show that the block-type remaining oil decreases gradually and the other types of remaining oil increase in the process of formation water flooding. When the low salinity water was injected, the proportion of the membrane-type remaining oil begins to decrease and the proportions of the other types remain the previous tendencies. The results indicate that the low salinity water can promote the desorption of crude oil from the surface of the rock and displace more membrane-type remaining oil, which eventually improves the recovery efficiency.

Key words: paleo-oil reservoir; low salinity water flooding; microscopic remaining oil type; D-T_2 2D NMR spectrum; energy spectrum experiment

塔中4古油藏虽然剩余油饱和度不高，但分布范围广，总量较大，具备较大的挖潜价值。国外常采用二氧化碳与表面活性剂的复合体系开发此类古油藏，目前应用低矿化度水驱也取得了较好的效

收稿日期：2018-05-21。
作者简介：李俊键（1983—），男，山东青州人，副教授，博导，从事油藏数值模拟及提高采收率研究。联系电话：(010)89732163，E-mail：ljjcupb@outlook.com。
基金项目：国家“973”计划“陆相致密油高效开发基础研究”（2015CB250905），国家自然科学基金项目“复杂裂缝潜山油藏水平井堵水封堵机理研究”（51404280）。

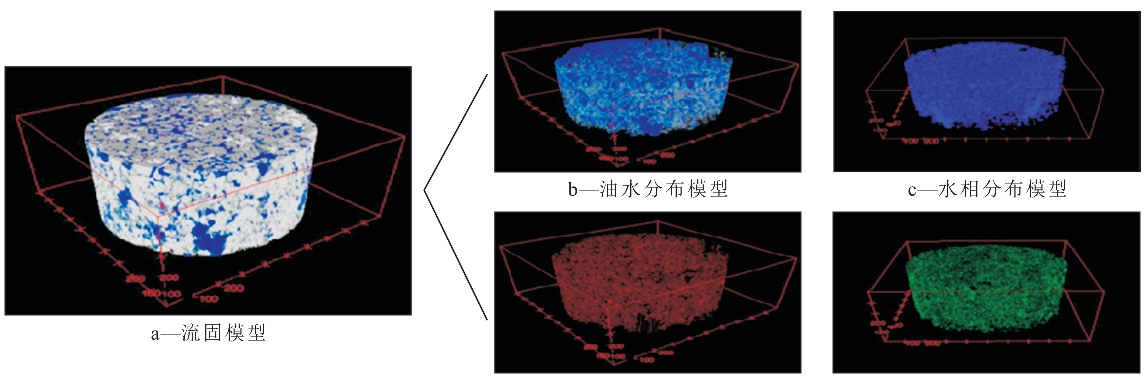
果。但中国塔里木地区暂无合适的二氧化碳气源，无法进行注气开采，且从施工成本及施工难度上考虑表面活性剂驱更难以实现，故选用低成本、易操作、污染小、见效快的低矿化度水驱较为适宜[1]。

低矿化度水驱是利用低矿化度水改变储层物化特征，促使原油解吸，最终改善水驱油效率的提高采收率技术[2]。对于其提高采收率的机理目前仍存在一定争议，为此，笔者从微观剩余油类型入手，分析了低矿化度水的驱油机理。目前，对于微观剩余油动用机理的研究主要有3种方法：基于玻璃刻蚀模型的微观驱替技术、基于CT的在线扫描技术以及基于核磁共振的在线驱替技术。其中，玻璃刻蚀模型无法体现岩石的界面特征，而CT和一维核磁共振扫描技术需要加入显影剂和屏蔽剂，势必严重影响油水系统的离子组成，所以常规技术均无法应用于低矿化度水驱微观剩余油动用机理研究。为此，笔者借助最新的D-T_2二维谱技术，对岩心进行在线驱替测试，在准确区分油水信号的基础上，对岩心孔隙中油水赋存形态进行统计，进而分析低矿化度水驱动用的剩余油类型[3-6]，探究低矿化度水驱对塔中4古油藏高含水期微观剩余油动用机理，最后借助能谱测试实验进行分析验证。

1　可行性分析

对塔中4古油藏的原油、地层水和岩心进行现场取样，分别进行水样分析、原油四组分分析以及XRD岩石矿物组成测定。结果显示，塔中4古油藏地层水中含有高价阳离子，NaCl，$CaCl_2$，$MgCl_2$，K_2SO_4和$FeCl_3$的质量浓度分别为73.720，14.320，1.728，0.722和0.051 g/L。原油中含有极性组分，通过原油四组分分析得到饱和分、芳香分、胶质和沥青质含量分别为43.45%，12.97%，3.80%和0.54%。粘土矿物含量为3.2%。

对塔中4古油藏钻取岩心进行CT扫描，经降噪、三值化处理后，重建三维孔隙网络模型[7-9]。根据流固模型（图1a），计算得到样品孔隙度为10.76%；通过拆分油水分布模型（图1b）可得到水相分布模型（图1c）和油相分布模型（图1d，1e），计算得到剩余油饱和度为13%，其中，游离态占8%（图1d），吸附态占5%（图1e），即塔中4古油藏储层流体剩余油饱和度较低，并以吸附和游离2种状态存在[10]。



a—流固模型　b—油水分布模型　c—水相分布模型　d—游离态油相分布模型　e—吸附态油相分布模型

图1　岩心数字化分析结果

Fig.1　Digital core analysis results

综上所述，塔中4古油藏中地层水含有高价阳离子，原油中含有极性组分，岩石中含有粘土矿物以及岩石表面含有吸附油，满足低矿化度水驱提高采收率的必要条件[11]，说明此技术用于塔中4古油藏具有可行性。

2　实验材料与方法

2.1　实验材料

实验岩样选自塔中4古油藏标准岩心TZ4-7-17，渗透率为200 mD。

实验用油选自塔中4古油藏地层原油，密度为0.85 g/cm³，粘度为12.7 mPa·s。

实验用水为油藏地层水和配制的低矿化度水，低矿化度水中NaCl和$CaCl_2$的质量浓度分别为0.9和1.5 g/L。

2.2　实验方法

基于D-T_2二维谱和能谱技术设计了低矿化度水在线驱替实验，具体步骤包括：①岩心准备。将岩心洗油后在100 ℃下烘干12 h，称干重，记录岩心直径和长度。②饱和水。岩心抽真空5 h，高压饱和地层水，对饱和水岩心进行称重，计算含水饱和度，并

对岩心进行D-T_2二维谱以及能谱测试。③饱和油。采用0.1 mL/min的恒定速度饱和油，直至不出水为止，记录出水量，计算含水饱和度，老化60 h后对岩心进行D-T_2二维谱以及能谱测试。④地层水驱。采用0.25 mL/min恒定速度水驱，记录注入压力、产水量和产油量，实时计算含油饱和度，直至为油藏含油饱和度，扫描D-T_2二维谱；继续水驱至含水率为98%，对岩心进行D-T_2二维谱以及能谱测试。⑤低矿化度水驱。低矿化度水驱至含水率再次达到98%，并对岩心进行D-T_2二维谱以及能谱测试。

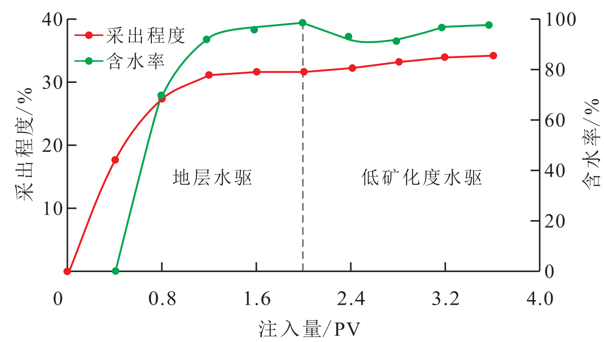


图2 采出程度和含水率与注入量的关系

Fig.2 Relationship of injection volume multiple with recovery rate and water cut

3 实验结果与分析

3.1 岩心驱替结果分析

由采出程度和含水率与注入量的关系（图2）可以看出，地层水驱至含水率为98%时，采收率为32.4%，后期转注低矿化度水至含水率再次达到98%，最终采收率为35%，即低矿化度水驱较地层水驱阶段采收率提高了2.6%，且当注入低矿化度水后，含水率明显降低，说明低矿化度水驱能够改善油水流动状态，提高采收率。

3.2 D-T_2二维谱分析

由不同阶段岩心的D-T_2二维谱测试结果（图3）可以看出：随着水驱的进行，岩心内产油量减少，产水量增加；低矿化度水驱后水相扩散系数减小，这是由于水相润湿性增强，导致扩散受限增强[12]。在D-T_2二维谱中，不同区域代表油水不同的存在位置和赋存形态。水驱后，根据油水赋存形态，孔隙可分为水膜孔隙、油膜孔隙和混合孔隙3类[13-15]。水相弛豫时间和扩散系数能够反映水相所处的孔隙尺度和赋存形态，进而可以反推剩余油的赋存形

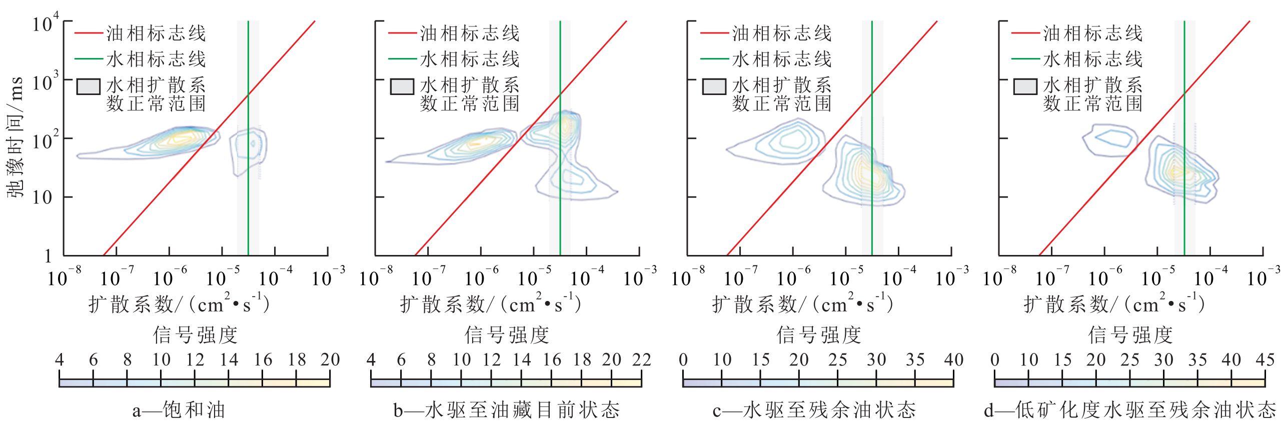


图3 不同阶段岩心D-T_2二维谱测试结果

Fig.3 D-T_2 two-dimensional spectrum of the core at different stages

态。T_c和T_o分别代表孔隙束缚水截止时间及油膜孔隙水截止时间（图4），弛豫时间小于T_c值，水相包括小孔隙水相和水膜孔隙水相；弛豫时间大于T_o值，水相包括大孔隙水相和油膜孔隙水相。通过与饱和水状态水相图谱的差谱，可以得到水膜孔隙和油膜孔隙的水相图谱，进而计算剩余油相关参数。

水的正常扩散系数为1.5×10^{-5}~2.5×10^{-5} cm²/s，据此可将水相分为扩散受限、扩散正常和扩散增强3部分，其指示着不同赋存形态的水相。根据地层水驱后的D-T_2二维谱和饱和水状态D-T_2二维谱得到水相差谱（前谱减后谱取正值，图5a），可得到T_c

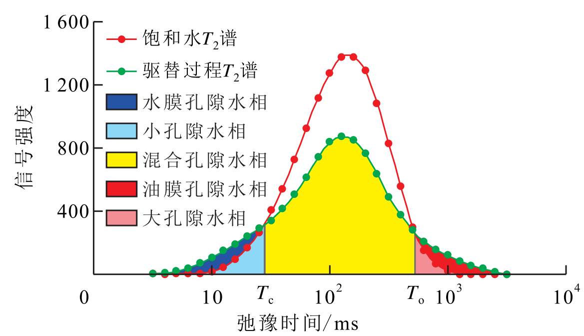


图4 不同水相形态在T_2谱上的响应特征

Fig.4 Reflection of different states of the water on T_2 spectrum

和T_o值，进而通过分析图5a和图5b，计算水膜孔隙、

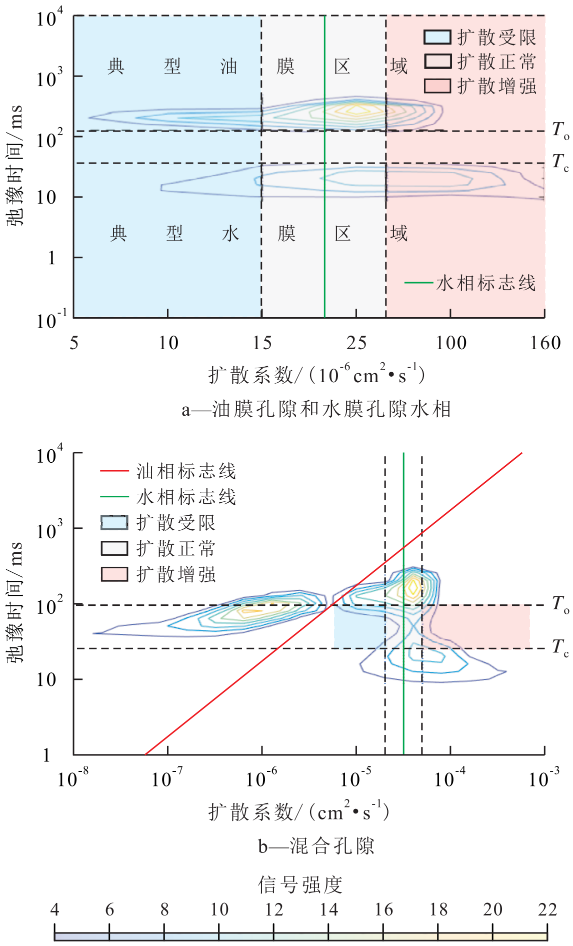


图5　不同孔隙类型水相 D-T_2二维谱分析

Fig.5　Analysis of D-T_2 two-dimensional spectrum of various pore types

油膜孔隙和混合孔隙中的油水赋存量及赋存形态。

按照上述方法对D-T_2二维谱进行分析，统计存在于油膜孔隙、水膜孔隙及混合孔隙中不同扩散区域的赋存水量，根据相应图中水相信号总量对其无因次化得到不同扩散区域无因次赋存水量(表1)。

表1　不同孔隙类型在不同扩散区域的赋存水量统计

Table1　Statistics of the water content in different diffusion regions in different pores

统计类型	扩散受限	扩散正常	扩散增强	数据来源
全饱和水	0.450 98	0.306 37	0.242 65	饱和水 D-T_2二维谱图
油膜孔隙	0.134 23	0.112 75	0.182 55	图5a
水膜孔隙	0.458 52	0.056 11	0.055 84	图5a
混合孔隙	0.280 95	0.358 54	0.360 51	图5b

3类孔隙中的剩余油以多种微观形态存在，主要分为油膜状、孤岛状、连片状和网络状[16-17]，首先根据判断条件确定剩余油形态，再根据建立的相关关系式(表2)对其相对含量进行定量计算[18]。

通过分析D-T_2二维谱实验数据，对所有孔隙中不同形态的剩余油进行分类统计，结果(图6)表明：在地层水驱阶段(含油饱和度为24.70%)，连片状剩余油所占比例逐渐减小，而网络状、孤岛状和油膜状剩余油所占比例增大；在低矿化度水驱阶段(含油饱和度为18.84%)，连片状剩余油所占比例进一步减小，同时网络状剩余油和孤岛状剩余油所占比例增大，但油膜状剩余油所占比例减少，这说明低矿化度水驱促使原油从岩石表面解吸，主要对油膜状剩余油进行了有效动用。

表2　不同孔隙中剩余油形态判断条件剩余油类型数学式

Table2　Mathematical expression for determination of remaining oil type under various judge conditions of remaining oil state in pores

孔隙类型	剩余油微观形态	判断条件	剩余油含量
水膜孔隙	连片状	$pld_{ww} > ped_{ww}\frac{pld}{ped}$	$\frac{1-pld}{pld}\left(pld_{ww}-ped_{ww}\frac{pld}{ped}\right)$
	孤岛状	$pld_{ww} < ped_{ww}\frac{pld}{ped}$	$\frac{1-pld}{pld}\left(ped_{ww}\frac{pld}{ped}-pld_{ww}\right)$
	网络状	$ped_{ww} > pcd_{ww}\frac{ped}{pcd}$	$\frac{pcd}{ped}\left(ped_{ww}-pcd_{ww}\frac{ped}{pcd}\right)$
油膜孔隙	油膜状		$\frac{pcd_{ow}(1-pcd)}{pcd}-ped_{ow}$
混合孔隙	网络状	$pld_{mw} > ped_{mw}\frac{pld}{ped}$	$\frac{1-pld}{pld}\left(pld_{mw}-ped_{mw}\frac{pld}{ped}\right)$
	油膜状	$pcd_{mw} > ped_{mw}\frac{pcd}{ped}$	$\frac{pld}{pcd}\left(pcd_{mw}-ped_{mw}\frac{pcd}{ped}\right)$
	孤岛状	$pcd_{mw} < ped_{mw}\frac{pcd}{ped}$	$\frac{pld}{pcd}\left(ped_{mw}\frac{pcd}{ped}-pcd_{mw}\right)$

注：pld_{ww}，ped_{ww}和pcd_{ww}分别为水膜孔隙中水相扩散受限、扩散正常、扩散增强部分所占比例；pld，ped和pcd分别为饱和水时水相扩散受限、扩散正常、扩散增强部分所占比例；pcd_{ow}和ped_{ow}分别为油膜孔隙中扩散正常和扩散增强部分所占比例；pld_{mw}，ped_{mw}和pcd_{mw}分别为混合孔隙中水相扩散受限、扩散正常、扩散增强部分所占比例。

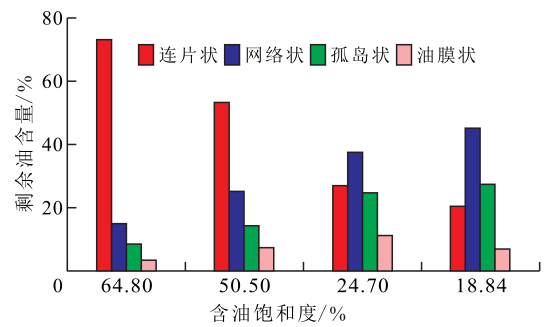


图6　不同类型剩余油含量随含油饱和度变化

Fig.6　Variation of contents of different types of remaining oil with oil saturation

3.3　能谱测试分析

能谱测试可进一步证实低矿化度水对油膜状剩余油的动用情况。测试结果(图7)表明：饱和水状态时岩石表面存在大量Si元素；饱和油后，原油

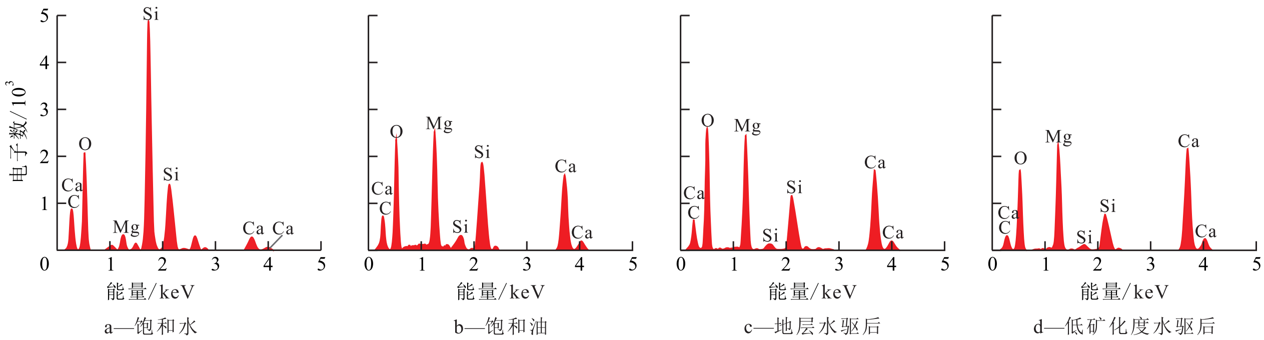


图7　水驱过程不同阶段能谱特征

Fig.7　Energy spectrum characteristics at different stages of water flooding

吸附在岩石表面上，改变了岩石表面的元素种类和含量，岩石表面的C和O元素含量增加；地层水驱后，由于油相减少，岩石表面的C元素随之减少；低矿化度水驱后，岩石表面的C元素进一步减少，说明低矿化度水能够驱替地层水无法动用的孔隙表面的油膜状剩余油。

4　结论

塔中4古油藏的储层流体条件适合应用低矿化度水驱技术，低矿化度水驱可提高采收率2.6%，并在一定程度上降低含水率。在整个水驱过程中，连片状剩余油所占比例持续减小，网络状和孤岛状剩余油所占比例增大；与地层水驱相比，转注低矿化度水后油膜状剩余油能够被继续有效动用。D-T_2二维谱及能谱测试结果表明，低矿化度水能够促使原油从岩石表面解吸，剥离地层水驱中难以动用的油膜状剩余油，从而进一步提高采收率。

参考文献：

[1]　王平，姜瑞忠，王公昌，等.低矿化度水驱研究进展及展望[J].岩性油气藏，2012，24(2)：106-110.
WANG Ping，JIANG Ruizhong，WANG Gongchang，et al.Research advance and prospect of low salinity water flooding[J].Lithologic Reservoirs，2012，24(2)：106-110.

[2]　孔若水.低矿化度水驱油机理研究[D].北京：中国地质大学(北京)，2017.
KONG Ruoshui.Research on the mechanism of low-salinity water flooding[D].Beijing：China University of Geoscience(Beijing)，2017.

[3]　李扬，张凤生，李建玉，等.川中大安寨段致密灰岩储层核磁共振T_2谱特征与解析[J].油气地质与采收率，2017，24(1)：11-18，42.
LI Yang，ZHANG Fengsheng，LI Jianyu，et al.Characterization and evaluation of NMR T_2 spectrum of the tight limestone reservoir in the Daanzhai Formation，Central Sichuan Basin[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency，2017，24(1)：11-18，42.

[4]　公言杰，柳少波，赵孟军，等.核磁共振与高压压汞实验联合表征致密油储层微观孔喉分布特征[J].石油实验地质，2016，38(3)：389-394.
GONG Yanjie，LIU Shaobo，ZHAO Mengjun，et al.Characterization of micro pore throat radius distribution in tight oil reservoirs by NMR and high pressure mercury injection[J].Petroleum Geology & Experiment，2016，38(3)：389-394.

[5]　曲岩涛，姜志敏，史京生，等.水驱油过程的核磁共振二维谱研究[J].波谱学杂志，2012，29(1)：51-59.
QU Yantao，JIANG Zhimin，SHI Jingsheng，et al.Water flooding studied by measuring NMR two-dimensional distribution function[J].Chinese Journal of Magnetic Resonance，2012，29(1)：51-59.

[6]　陈挺，杨正明，王学武，等.致密油藏活性水采油机理[J].大庆石油地质与开发，2017，36(5)：169-174.
CHEN Ting，YANG Zhengming，WANG Xuewu，et al.Oil displacing mechanism for the active water flooding in tight oil reservoirs[J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing，2017，36(5)：169-174.

[7]　张浩，陈刚，朱玉双，等.致密油储层微观孔隙结构定量表征：以鄂尔多斯盆地新安边油田长7储层为例[J].石油实验地质，2017，39(1)：112-119.
ZHANG Hao，CHEN Gang，ZHU Yushuang，et al.Quantitative characterization of microscopic pore throat structure in tight sandstone oil reservoirs：A case study of Chang7 reservoir in Xin'anbian oil field，Ordos Basin[J].Petroleum Geology & Experiment，2017，39(1)：112-119.

[8]　曹绪龙，李玉彬，孙焕泉，等.利用体积CT法研究聚合物驱中流体饱和度分布[J].石油学报，2003，24(2)：65-68.
CAO Xulong，LI Yubin，SUN Huanquan，et al.Determination of fluid saturation in polymer flooding by volume-CT method[J].Acta Petrolei Sinica，2003，24(2)：65-68.

[9]　张顺康，陈月明，侯健，等.岩石孔隙中微观流动规律的CT层析图像三维可视化研究[J].石油天然气学报，2006，28(4)：102-106.
ZHANG Shunkang，CHEN Yueming，HOU Jian，et al.Three dimensional visualization for CT tomographic image of microscopic flow law of rock pore[J].Journal of Oil and Gas Technology，2006，28(4)：102-106.

[10]　侯健，罗福全，李振泉，等.岩心微观与油藏宏观剩余油临界描

述尺度研究[J].油气地质与采收率,2014,21(6):95-98.
HOU Jian,LUO Fuquan,LI Zhenquan,et al.The critical description scale study on core microscopic and reservoir macroscopic remaining oil [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2014,21(6):95-98.

[11] 李磊.XM油田低矿化度注水提高采收率可行性研究[D].成都:西南石油大学,2015.
LI Lei.Feasibility study on enhanced oil recovery by low salinity water injection in XM oilfield[D].Chengdu:Southwest Petroleum University,2015.

[12] 顾兆斌,刘卫,孙佃庆,等.2D NMR技术在石油测井中的应用[J].波谱学杂志,2009,26(4):560-568.
GU Zhaobin,LIU Wei,SUN Dianqing,et al.Application of 2D NMR techniques in petroleum logging[J].Chinese Journal of Magnetic Resonance,2009,26(4):560-568.

[13] 贾丽华.用核磁共振技术研究特高含水期剩余油分布[J].油气田地面工程,2011,30(1):40-42.
JIA Lihua.Remaining oil distribution in high water cut stage by NMR technique[J].Oil-Gas Field Surface Engineering,2011,30(1):40-42.

[14] 苏娜,黄健全,韩国辉,等.微观水驱油实验及剩余油形成机理研究[J].断块油气田,2007,14(6):50-51.
SU Na,HUANG Jianquan,HAN Guohui,et al.Microscopic waterflood test and study on remaining oil forming mechanism [J].Fault-Block Oil & Gas Field,2007,14(6):50-51.

[15] 殷代印,房雨佳,辛勇亮.低渗透油藏改变驱替方向微观机理研究[J].特种油气藏,2017,24(3):59-63.
YIN Daiyin,FANG Yujia,XIN Yongliang.Study on microscopic mechanism of changing displacement direction in low-permeability reservoirs[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2017,24(3):59-63.

[16] 吴晨宇,侯吉瑞,赵凤兰,等.三元复合体系启动水驱后剩余油微观机理[J].油气地质与采收率,2015,22(5):84-88.
WU Chenyu,HOU Jirui,ZHAO Fenglan,et al.Study on the microscopic mechanism of driving remaining oil by ASP compound system after water flooding[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2015,22(5):84-88.

[17] 郑泽宇,朱倘仟,侯吉瑞,等.碳酸盐岩缝洞型油藏注氮气驱后剩余油可视化研究[J].油气地质与采收率,2016,23(2):93-97.
ZHENG Zeyu,ZHU Tangqian,HOU Jirui,et al.Visible research on remaining oil after nitrogen flooding in fractured-cavity carbonate reservoir[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2016,23(2):93-97.

[18] 张振涛.核磁共振二维谱识别微观剩余油方法研究[D].北京:中国石油大学(北京),2017.
ZHANG Zhentao.Identification of microscopic remaining oil by two-dimensional nuclear magnetic resonance[D].Beijing:China University of Petroleum(Beijing),2017.

编辑 常迎梅

(上接第86页)

ZHOU Fengjun,LI Jinyi,QU Zhaozhao,et al.Laboratory core experiments of remaining oil distribution at the early polymer flooding in offshore thick reservoirs[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2017,24(6):92-96.

[22] 孟科全,唐晓东,邹雯炆,等.稠油降粘技术研究进展[J].天然气与石油,2009,27(3):30-34.
MENG Kequan,TANG Xiaodong,ZOU Wenwen,et al.Progress in research on heavy oil viscosity reduction technology [J].Natural Gas and Oil,2009,27(3):30-34.

[23] 孙建芳.氮气及降粘剂辅助水平井热采开发浅薄层超稠油油藏[J].油气地质与采收率,2012,19(2):47-49,53.
SUN Jianfang.Study and application on HDNS technology to develop shallow and thin super heavy oil reservoirs [J].Petroleum Geology & Recovery Efficiency,2012,19(2):47-49,53.

[24] 曹嫣镔,于田田,林吉生,等.热复合化学方法改善极强敏感性稠油油藏开发效果机理[J].石油学报,2013,34(1):128-132.
CAO Yanbin,YU Tiantian,LIN Jisheng,et al.A study on a thermal compound chemical method for improving development efficiency of heavy- oil reservoirs with strong sensitivity [J].Acta Petrolei Sinica,2013,34(1):128-132.

[25] 康万利,刘延莉,孟令伟,等.永平油田稠油自发乳化降粘剂的筛选及驱油效果评价[J].油气地质与采收率,2012,19(1):59-61.
KANG Wanli,LIU Yanli,MENG Lingwei,et al.Screening of emulsified viscosity reducer on heavy crude oil and effect evaluation of oil displacement,Yongping oilfield in Jilin[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2012,19(1):59-61.

编辑 邹潋滟