

断层输导下储集层排驱压力对油气成藏影响作用

刘 刚¹, 张义杰¹, 姜 林^{1,2a,2b}

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油天然气集团公司 a. 盆地构造与油气成藏重点实验室;
b. 提高采收率国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要:利用油气成藏物理模拟方法,从排驱压力角度研究了断层输导下的油气藏形成过程。研究表明,储集层排驱压力控制与断层侧向配置不同储盖组合的成藏次序,即排驱压力小的储盖组合优先成藏,排驱压力较大的储盖组合次之,这种控制作用与储盖组合的空间相对位置无关;排驱压力影响不同储盖组合的含油或含气饱和度,排驱压力越小,含油或含气饱和度越高,这种影响作用会因储集层空间相对位置的不同而有所差异;断层与储集层的对接与否是储盖组合成藏的先决条件,与断层对接具备成藏的可能性,而未与断层对接则难以成藏。研究结论可用于勘探实践中对断层输导下多套储盖组合试油层位进行评价优选。

关键词:排驱压力;断层输导;物理模拟;成藏次序;含油饱和度

中图分类号:TE122.1

文献标志码:A

文章编号:1000-7849(2015)01-0118-05

现阶段大量的石油地质研究及油气勘探实践表明,断层是油气运移的一种重要的输导通道,对油气的运聚成藏具有重要的影响作用^[1-5]。我国东部、中部及西部含油气盆地许多油气藏的形成和分布均与断层相关,大部分盆地断层断到哪,油气就分布到哪,例如渤海湾盆地沾化凹陷断层对新近系油气运移和聚集具重要的影响作用^[6]。新近系自身没有烃源岩,古近系沙河街组暗色泥岩为其主要烃源岩。沾化凹陷新近系最重要的油气藏输导通道为断层,断层活动到哪个层位,油气就能运移至哪个层位,且断层侧向配置的馆陶组和明化镇组中发育于断层两侧的油气藏,也能清楚地反映油气主要是沿油源断层垂向运移而进入馆陶组和明化镇组聚集成藏的^[7-8]。虽然与断层对接的多套储盖组合在一定程度上均含油,但其成藏性能却不尽相同,表现为不同层位成藏有早有晚,含油饱和度有高有低。那么,究竟是什么因素在控制这些储盖组合的成藏性能?分析发现与同一条断层侧向配置的这些储盖组合中,其流体属性、充注及保存条件基本相似,最主要的差异是不同储集层的排驱压力值。而排驱压力这一参数又是油气成藏研究中重要的控制参数,在特定的成藏条件下,对单一储集层而言,它控制油气能否突破储集层界面而聚集成藏^[9-11]。关于排驱压力对与断层侧向配置多套储盖组合的成藏性能及含油饱和度是否也具有重要的影响作用这一问题,前人^[12-13]对这种断层输导下的成藏机理研究相对较少,故进一步明确和解决这一问题具有重要的理论和现实意义。笔者基于渤海湾沾化凹陷断层成藏模式,结合

实验目的,设计实验模型,利用成藏物理模拟方法,分别模拟煤油和原油沿断层带运移及成藏过程,观察现象,分析原因,探索排驱压力对断层输导下不同储盖组合成藏性能的影响作用。

1 实验模型设计

根据断裂输导作用下油气成藏模式,在充分考虑断层与储集层的配置关系、储集层排驱压力等因素基础上,设计了概念实验模型1(图1-a),为消除空间位置的影响,保持其他参数不变,调整各储集层的相对位置,得到实验模型2(图1-b)。模型中断裂顶部被厚层泥岩封盖,侧向配置了3套不同排驱压力的储盖组合,其属性见表1。表1中排驱压力(数值上等于最大孔喉处毛细管压力的大小)是基于Berg^[14]提出的毛细管压力求取模型计算得到。油

表1 断层输导下油气成藏物理模拟实验模型属性

Table 1 Model parameters of experiment of physical simulation to oil and gas reservoir forming with fault transportation

储集层	粒径/mm	平均粒径/mm	孔隙度/ $\phi/\%$	渗透率/ $k/10^{-3}\mu\text{m}^2$	排驱压力/kPa
储集层 1,2	0.70~0.88	0.79	42.5	46 183.4	0.52
储集层 3,4	0.21~0.27	0.24	40.5	4 262.4	1.70
储集层 5,6	0.048	0.048	39.5	170.5	8.49
储集层 7	0.70~0.88	0.79	42.5	46 183.4	0.52
储集层 8	0.21~0.27	0.24	40.5	4 262.4	1.70

注:渗透率 k 是基于 $k=74\ 000D^210^{-3}\mu\text{m}^2$ 计算所得, D 为粒径;孔隙度为测量孔隙体积及储集层体积后计算所得

收稿日期:2014-01-09

编辑:禹华珍

作者简介:刘 刚(1988—),男,助理工程师,主要从事油气成藏研究。E-mail:liugsky@126.com

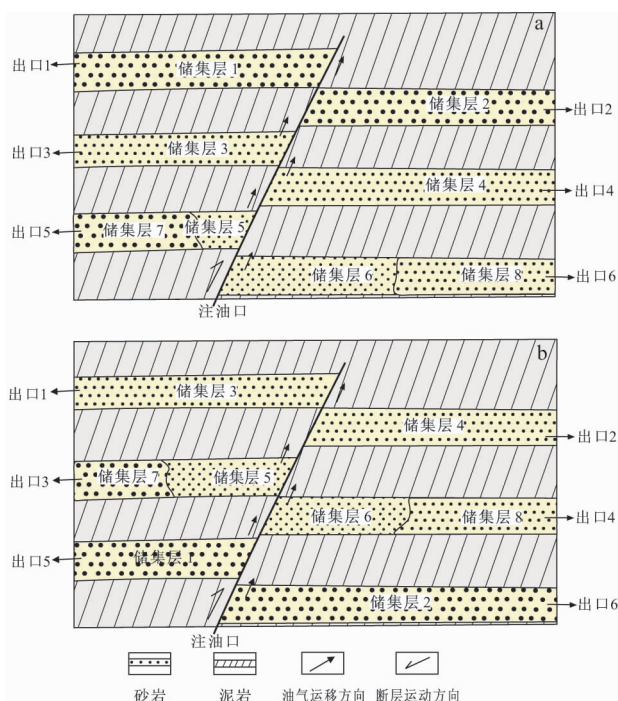


图 1 断层输导下油气成藏物理模拟实验模型 1(a)和模型 2(b)
Fig.1 Models experiment 1 (a) and 2(b) of physical simulation to oil and gas reservoir forming with fault transportation

水界面张力的大小为 $0.025 \text{ N/m}^{[15]}$ 。通过两组成藏模拟实验,对比分析实验过程,探索排驱压力对断层输导下油气成藏的影响作用。流体的注入方式采用单一油相稳态充注。

2 实验过程及结果分析

2.1 实验装置及材料

实验装置包括直玻璃管(长 30 cm, 外径 24 mm, 内径 20 mm)、四氟管线(外径 3 mm, 内径 1 mm)、三通接头若干、不同粒径玻璃珠若干、恒流注射泵 1 台、混合气 1 瓶、数码相机 1 台、固定架 1 个、恒温箱 1 个,实验装置如图 2 所示。为了便于观察实验现象,实验采用玻璃管为容器;实验用砂为玻璃珠厂生产的各种粒径纯净白色石英砂,确保填料与玻璃容器材料相同,可以尽量避免边界效应。石英砂为亲水性,润湿接触角接近 0° ,其吸附原油的能力较差,吸附煤油同样较差,但稍强于原油。用四氟管线模拟开启性的断裂,输导油气首先沿断裂带由深部向浅部运移,运至顶部后侧向调整,突破储集层界面而运聚成藏。实验用油为用天然色素染色的中性煤油和原油。填料过程中,先将玻璃管中充满水,然后将玻璃珠装入容器中,边装边震荡,以保证容器中玻璃珠充分压实及完全饱和水。实验开始前确保实验装置中完全饱和水。实验过程中断裂带始终处于封闭状态,各储集层的出口始终处于开启状态。

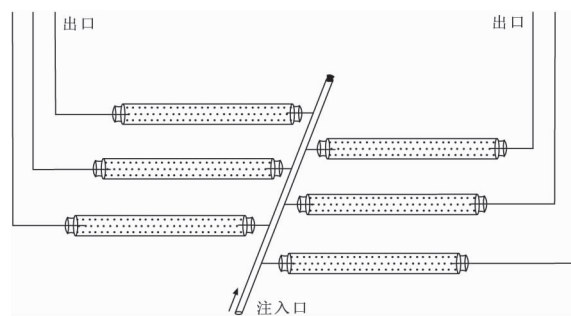


图 2 断层输导下油气成藏物理模拟实验装置

Fig.2 Experiment device of physical simulation oil and gas reservoir forming with fault transportation

基于实验模型 1,2,分别注入染色煤油、原油,模拟油气在断层输导作用下的成藏过程及结果(表 2)。

表 2 断层输导下油气成藏物理模拟实验方案

Table 2 Experimental schemes of physical simulation of reservoir accumulation with fault transportation

实验编号	实验模型	注入流体	注入方式	注入流量/($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)
实验 1	模型 1	染色煤油	单相恒流	0.1
实验 2	模型 1	原油	单相恒流	0.1
实验 3	模型 2	原油	单相恒流	0.1

2.2 实验现象

(1)实验 1 注油开始后,煤油首先沿断层带由底部向顶部运移,运至顶部后,煤油发生侧向调整,最先突破储集层 1,2 运聚(图 3-a),其中煤油在储集层 1 中的运移速率快于储集层 2(图 3-b)。102 min 后,煤油突破储集层 3(图 3-c),但运移速率明显小于储集层 1,2。216 min 后,煤油缓慢突破储集层 4(图 3-d)。255 min 后,煤油充满储集层 1,2,并在其溢出点溢出,煤油不再进入其他储集层,停止注油,

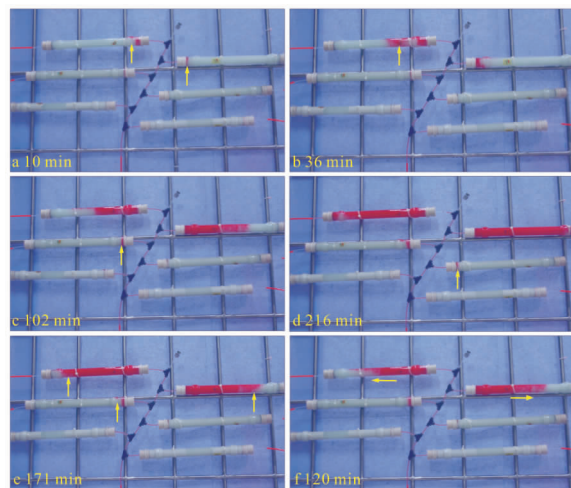


图 3 断层输导下油气成藏物理模拟实验 1 现象

Fig.3 Experiment 1 process of physical simulation to oil and gas reservoir forming with fault transportation

实验结束。实验过程中,煤油始终未突破储集层 5~8;煤油在每个储集层中的突进面,顶部总是超前于底部(图 3-e),各储集层中含油饱和度由靠近断层带向远离断层带方向不断增大(图 3-f)。

实验结果显示,除储集层 1,2 外,其余储集层没有或者只有少量的煤油充注,这与实际情况差异较大,分析原因,这可能是由于煤油黏度和密度较低,运移过程中黏滞力过小,导致煤油在储集层 1,2 中成藏后直接沿出口溢出,而难以在其他储集层中运聚。

基于以上分析,选用实际原油代替染色煤油重复以上实验,黑色原油 20℃ 时密度为 0.795 1 g/cm³,50℃ 时密度为 0.772 9 g/cm³,50℃ 时黏度为 1.85 mPa·s,凝固点为 13℃。实验用水密度为 1.0 g/cm³,黏度为(25℃)1 mPa·s。实验装置安装后,将原油加热至 50℃,并放置于 50℃ 恒温箱中,用恒流泵以 0.1 mL/min 的流量将原油从断层底部注入口注入实验装置中,模拟原油成藏过程。

(2)实验 2 注油开始后,原油最先突破储集层 1,2 运聚(图 4-a)。350 min 后,原油突破储集层 3,4(图 4-b),但运移速率小于储集层 1,2(图 4-b,c)。910 min 后,原油充满储集层 1,2(图 4-c),此后原油加速在储集层 3,4 中运聚。1 440 min 后,原油以缓慢速率突破储集层 5,6(图 4-d,e)。2 840 min 后,原油充满储集层 3。此后,原油在储集层 4 中的运移速率也有所增大,3 210 min 后,储集层 1,2 出口处有原油溢出,各储集层中含油量不再变化,停止注油,实验结束。各储集层含油情况如图 4-f 所示。实验过程中,原油在各储集层中整体向远离断裂带方向运移,运移的油具前缘平整、前端没有指状变化的活塞式运移特征(图 4)。

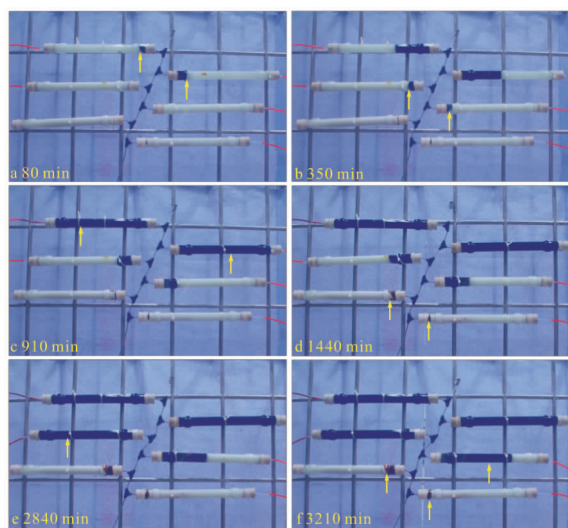


图 4 断层输导下油气成藏物理模拟实验 2 现象

Fig. 4 Experiment 2 process of physical simulation to oil and gas reservoir forming with fault transportation

(3)实验 3 注油开始后,原油最先突破储集层 1,2 运聚(图 5-a)。280 min 后,突破储集层 3,4,但运移速率均小于储集层 1,2(图 5-b,c)。680 min 后,原油最先充满储集层 1(图 5-c)。750 min 后,原油以缓慢的运移速率突破储集层 5(图 5-d,e)。此后,原油在储集层 2 的运移速率增大,970 min 后,原油充满储集层 2(图 5-e)。随着原油的继续注入,原油加速在储集层 3,4 中运聚(图 5-f)。1 480 min 后,储集层 1,2 出口处有原油溢出,各储集层中的含油量不再变化,停止注油,实验结束。各储集层最终含油情况如图 5-f 所示。实验过程中,原油几乎未充注储集层 5~8,在其余各储集层中原油呈活塞式运移(图 5)。

2.3 实验结果分析

油气在断层输导下的成藏过程中,主要受 4 种力的作用:注入压力、浮力、排驱压力和黏滞力^[16]。其中注入压力和浮力是动力,排驱压力和黏滞力是阻力。黏滞力会随着注入储集层中油量增加而增大。对确定的储盖组合,只有当注入压力与浮力之和大于排驱压力和黏滞力时,油气方可突破储集层界面而聚集成藏。二次运移过程中,油气总是沿阻力最小的路径运移成藏^[17-22]。

2.3.1 排驱压力对成藏次序的控制

油气突破储集层界面时,需要克服的黏滞力均较小,其主要的阻力是储集层排驱压力。与断层对接的 3 套储集层,排驱压力最小的为储集层 1,2 (0.52 kPa),其次为储集层 3,4 (1.70 kPa) 及储集层 5,6 (8.49 kPa)。依据沿阻力最小路径运聚成藏的原则,油气最先突破储集层 1,2,其次为储集层 3,4 及储集层 5,6。油气突破储集层 1,2 后,快速地在

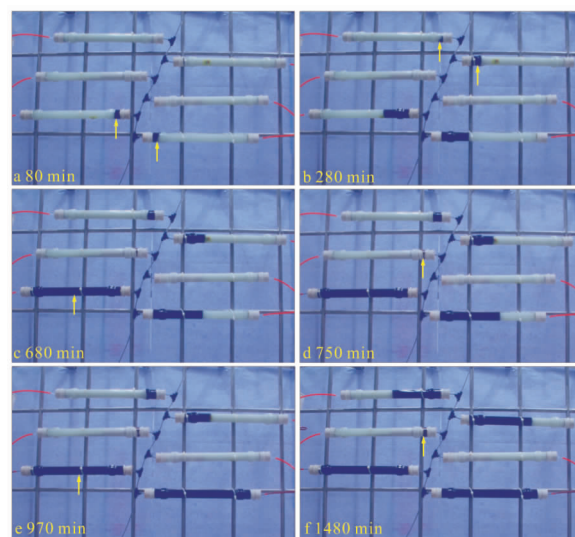


图 5 断层输导下油气成藏物理模拟实验 3 现象

Fig. 5 Experiment 3 process of physical simulation to oil and gas reservoir forming with fault transportation

其中运聚,随着进油量的增大,其所受的黏滞力增大,当其黏滞力与排驱压力之和大于储集层 3,4 的排驱压力时,油气开始进入储集层 3,4,且运移速率逐渐增大。随着储集层 3,4 中进油量的增大,黏滞力逐渐增大,当其黏滞力与排驱压力之和大于储集层 1,2 时,油气又继续充注储集层 1,2,直至充满后,储集层 3,4 的排驱压力与黏滞力之和再次变回最小,油气便快速在储集层 3,4 中运聚。随着储集层 3,4 中运移阻力逐渐增大,当其大于储集层 1,2 的阻力之和时,油气便不再进入储集层 3,4,而是直接在储集层 1,2 的出口处溢出,此时各储集层中含油量便不再发生变化。如此导致 3 组实验中最先成藏的均是储集层 1,2,其次为储集层 3,4。而储集层 5,6 因其排驱压力过大,油气难以突破或只有很少量的油气进入,导致其最终没有成藏。

从以上分析可知,黏滞力对油气运移成藏具有重要的影响,但因同一断层对接的不同储盖组合油气属性基本相同,故黏滞力不是决定油气成藏次序的关键因素。控制断层输导下不同储盖组合成藏次序的关键因素是储集层的排驱压力值,排驱压力越小,成藏越早;排驱压力较大的储集层次之,而排驱压力过大的储集层则难以成藏。这种控制作用不会因各储盖组合相对位置的不同而发生变化。

2.3.2 排驱压力对含油饱和度的影响

实验结束后,计量各储集层含油饱和度。分析发现 3 组实验中储集层 1,2 的含油饱和度明显高于储集层 3,4(图 6)。而排驱压力最大的储集层 5,6,仅有少量或未有油注入,未将其绘入图 6 中。究其原因,这是由于在油气成藏过程中,须克服排驱压力这一阻力,显然排驱压力越小,储集层孔隙结构越好,油气越容易驱替地层水进入储集层,储集层中残余水量也就越少,当油气源供给充足且保存条件较好时,最终的含油气饱和度也越高。对于排驱压力相同的储集层,在 3 组不同的实验中,含油气饱和度也有所差异,这可能是储集层排驱压力、黏滞力和储

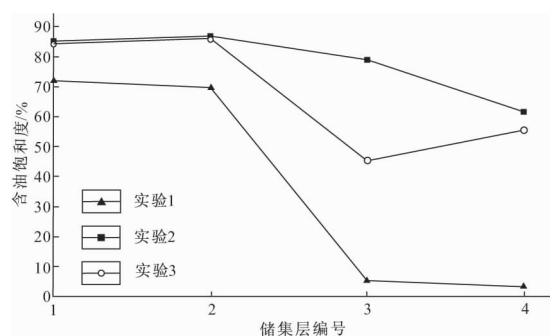


图6 实验中部分储集层含油饱和度

Fig. 6 Oil or gas saturation in some reservoir units in all experiments

集层相对位置等因素综合作用的结果。

综上所述,在确定的流体属性、充注及保存条件下,排驱压力对储集层的含油气饱和度有重要影响,排驱压力越小,含油饱和度越高。含油饱和度除受排驱压力的影响外,还会因储集层间相对位置及流体属性变化而有所差异。

2.3.3 储集层与断层连通性对成藏性能的影响

3 组实验中,排驱压力同为 0.52 kPa 的储集层,与断层连通的储集层 1,2 可以成藏,且含油饱和度较高,但未与断层连通的储集层 7 难以成藏;排驱压力同为 1.70 kPa 的储集层,与断层连通的储集层 3,4 可以成藏,但是未与断层连通的储集层 8 难以成藏,故储集层与断层的连通性是控制其成藏性能的先决条件。与断层连通且排驱压力较小的储集层成藏早,含油饱和度也高,但未与断层连通的储集层,不管其排驱压力大小,都较难成藏。这种连通既可以是直接与断层对接,也可以是通过高效输导层间接连通。

2.3.4 活塞式运聚原因分析

实验 2 和 3 中,原油在每个储集层中整体向远离断裂带方向运移,运移的油呈前缘平整、前端没有指状变化的活塞式运移特征运聚。分析原因,这主要是由于玻璃管的直径较小,原油在储集层内运移时所受的浮力作用较小,原油密度较大,其主要依靠注油动力克服排驱压力和黏滞力向玻璃珠孔隙内充注,而又因玻璃珠的粒径变化较小,充填相对均一,因此充注率很高,几乎充满每个孔隙,使得管内形成一个黑色的油柱,呈活塞式不断地充注每个储集层。实验 1 中,煤油在各储集层中呈顶部超前于底部的运移突进特征。这是因为煤油与天然气密度与黏度均较小,在竖直向上的浮力和水平方向的注入压力作用下,使得油气总是在储集层中顶部的运移超前于其底部。

3 结 论

(1)排驱压力对与断层侧向配置的多套储盖组合成藏次序具有明显的控制作用,排驱压力越小,成藏越早,这种控制作用不会因储集层相对位置的改变而变化。

(2)排驱压力对与断层侧向配置的多套储盖组合的含油气饱和度具有重要的影响,排驱压力越小,含油气饱和度越高。储集层相对位置的变化,含油气饱和度也会有所差异。

(3)储集层与断层的连通性是控制其成藏性能的先决条件。与断层连通、较小排驱压力的储集层成藏早,且含油气饱和度也高,但未与断层连通的储

集层,不管其排驱压力大小,都较难成藏。这种连通性既可以是直接与断层对接,也可以是通过高效输导层间接与断层连通。

(4)上述研究结论可用于断层输导下不同储集层试油层位的评价优选。

参考文献:

- [1] 罗群. 中国东北地区断层系统及其控藏特征[J]. 石油实验地质, 2010, 32(3): 205-210.
- [2] 张义杰. 准噶尔盆地断层控油特征与油气成藏规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 1-160.
- [3] 张善文, 王永诗, 石砥石, 等. 网毯式油气成藏体系: 以济阳拗陷新近系为例[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(1): 1-10.
- [4] 白忠凯, 吕修祥, 于红枫, 等. 塔中地区下古生界碳酸盐岩输导体系特征及成藏意义[J]. 地质科技情报, 2011, 30(5): 60-68.
- [5] Jones V T, Drozd R J. Predictions of oil or gas potential by near-surface geochemistry[J]. AAPG Bulletin, 1983, 67(6): 932-952.
- [6] 单宝杰, 徐刚, 刘魁元. 滑脱型潜山成藏研究: 以沾化凹陷渤深6潜山为例[J]. 地质科技情报, 2005, 24(1): 65-68.
- [7] 曾澌辉, 金之钧. 油气二次运移和聚集物理模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- [8] 张善文. 沾化凹陷浅层勘探的思考[J]. 复式油气田, 1999(3): 6-7.
- [9] 王永诗. 油气成藏“相一势”耦合作用探讨: 以渤海湾盆地济阳拗陷为例[J]. 石油实验地质, 2007, 29(5): 472-476.
- [10] 蒋有录, 万涛, 林会喜, 等. 成藏期剩余压力与储集层排驱压力下限耦合恢复油气成藏过程[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 265-272.
- [11] 王宁, 陈宝宁, 翟剑飞. 岩性油气藏形成的成藏指数[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(6): 4-8.
- [12] 丁文龙, 金之钧, 张义杰, 等. 准噶尔盆地腹部断层控油的物理模拟实验及其成藏意义[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2011, 36(1): 73-82.
- [13] 尚尔杰, 金之钧, 丁文龙, 等. 断层控油的物理模拟实验研究: 以准噶尔盆地西北缘红车断层带为例[J]. 石油实验地质, 2005, 27(4): 414-418.
- [14] Berg R R. Capillary pressures in stratigraphic traps[J]. AAPG Bulletin, 1975, 59(6): 939-956.
- [15] 包茨. 天然气地质学[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 212-217.
- [16] Tokunaga T, Mogi K, Matsubara O, et al. Buoyancy and Interfacial Force Effects on Two-Phase Displacement Patterns: An Experimental Study[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(1): 65-74.
- [17] 孙永河, 付晓飞, 吕延防, 等. 地震泵抽吸作用与油气运聚成藏物理模拟[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(1): 98-104.
- [18] 孙永河, 吕延防, 付晓飞, 等. 库车坳陷的断层有效运移通道及其物理模拟[J]. 地质科学, 2008, 43(2): 389-401.
- [19] 姜振学, 庞雄奇, 曾澌辉, 等. 油气优势运移通道的类型及其物理模拟实验研究[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 507-516.
- [20] 罗晓容. 油气运聚动力学研究进展及存在问题[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(5): 337-346.
- [21] 常波涛, 于开平, 孙连浦, 等. 基于流体势约束的潜山油气二次运移优势方向选择: 以胜利油田桩海地区古生界潜山为例[J]. 地质科技情报, 2005, 24(2): 39-44.
- [22] Liu K, Eadington P. A new method for identifying secondary oil migration pathways[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2003, 78: 389-394.

Effect of Displacement Pressure to Oil and Gas Reservoir Forming with Fault Transportation

Liu Gang¹, Zhang Yijie¹, Jiang Lin^{1,2a,2b}

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China;

2a. Key Laboratory of Basin Structure and Petroleum Accumulation;

2b. State Key Laboratory of EOR, CNPC, Beijing 100083, China)

Abstract: Physical simulation method is used to study the process of oil and gas forming with fault transportation. The results show that displacement pressure controls the forming sequence of different reservoirs which are lateral configuration with fault. The reservoir, with lower displacement pressure, is more early to form oil and gas pools than the higher displacement pressure reservoir. This effect has nothing to do with the space position of reservoir. Displacement pressure has important effluence on the oil or gas saturation that lower displacement pressure means higher oil saturation. This effect can be changed with the variation of reservoir spatial location. The connectivity of fault and reservoir controls the forming of oil and gas pool. For two reservoirs with same value of displacement pressure, the one connecting with fault can form oil and gas pools, and another not connecting with fault can't form oil and gas pool. The research results can be used to evaluate and choose the foremost testing layer forming by fault transportation in exploration.

Key words: displacement pressure; fault transportation; physical simulation; forming sequence; oil saturation