

# 砂体物性对岩性油藏成藏控制作用物理模拟

高永进<sup>1,2</sup>, 田美荣<sup>1,2</sup>, 贾光华<sup>2</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640

2. 胜利油田有限公司地质科学研究院, 山东东营 257015

**摘要:** 以东营凹陷岩性油藏为例, 从地质剖析、物理模拟实验和成藏机理等方面探讨了砂体物性变化对岩性油藏含油饱和度增长的控制作用。东营凹陷下第三系被有效源岩包裹砂体的含油性好于处于源岩之外的砂体的含油性, 而且被源岩包裹砂体的含油饱和度具有随砂体物性变好而增加的趋势。在对东营凹陷岩性油藏剖析的基础之上, 应用岩性油藏成藏模拟实验装置, 开展了不同砂体物性对岩性砂体成藏控制的物理模拟实验。模拟实验表明: 在相同压力条件下, 随着砂体粒度的增加, 砂体电阻率变化相同量所需的时间逐渐变短, 即砂体中的含油饱和度达到一定值的速度逐渐变快。这说明砂体物性越好, 越有利于砂体油藏的形成, 砂体物性是影响油气成藏的重要因素。

**关键词:** 东营凹陷; 岩性油藏; 物理模拟; 含油饱和度; 砂体物性。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2007)02-0273-06

收稿日期: 2006-03-15

## Physical Simulation about Sandbody Physical Property Control on Forming Lithological Reservoirs

GAO Yong jin<sup>1,2</sup>, TIAN Mei rong<sup>1,2</sup>, JIA Guang hua<sup>2</sup>

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Geologic Scientific Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Company, Ltd., Dongying 257015, China

**Abstract:** Taking the lithological reservoir of Dongying sag as an example, this paper discusses how the change of physical property of sandbody controls the increase of oil saturation from geological analysis, physical simulation experiment and reservoir formation mechanism. The petroliferous property of the sandbody enveloped by effective source rock Lower Tertiary is superior to that of the sandbody that lies outside the source rock. And the oil saturation of sandbody enveloped by source rock is inclined to increase when the physical property of sandbody becomes better. Based on the analysis on the lithological reservoir of Dongying sag, physical simulation experiments on controlling the forming of lithological sandbody were conducted with hydrocarbon migration and accumulation simulation facilities. The results show that the resistivity of sandbody changes quickly with the increase of grain size, in other words, the speed of the sandbody's reaching a certain oil saturation becomes faster, which indicates that a better physical property of sandbody is conducive to forming lithological reservoir since the physical property is one of the important factors influencing the reservoir forming of sandbody.

**Key words:** Dongying sag; lithological reservoir; physical simulation experiment; oil saturation; sandbody physical property.

随着我国各大含油气盆地相继进入勘探晚期, 寻找典型的构造油气藏已经变得越来越困难, 岩性油气藏勘探越来越受到国内外石油地质学家的关注。陆相石油地质理论发展至今, 对背斜、断层等构造油气藏的成藏过程及其成藏机理已经比较明了, 但对岩

性油气藏的成藏过程和成藏机理认识还比较模糊。部分学者(曾溅辉等, 2002; 姜振学等, 2003a, 2003b; 陈冬霞等, 2004; 高永进等, 2004)分别在综合研究和数学地质分析的基础上, 得出砂体的沉积微相、储集层物性、烃源岩和储集层的埋深是岩性油藏成藏控制

的主要因素,但开展相关物理模拟验证的文献较少。

实验模拟技术是现代科学发展的一个重要支柱,也是石油地质理论研究,尤其是油气运移和聚集研究的一种极其重要的手段和方法。20 世纪 80 年代以来,模拟实验已成为研究油气成藏过程和成藏机理的重要手段。Demhichi and Anderson(1989)和 Selle *et al.*(1993)都通过物理模拟实验研究过油相运移的临界值、通道、方向、运移速度、运移效率等问题。Lenormand *et al.*(1988)等研究了孔隙介质中非混溶驱替过程。陈章明等(1998)进行了一系列砂岩透镜体油的运移和聚集模拟实验研究。曾溅辉和金之钧(2000)对由低渗透砂岩包围的砂岩透镜体石油聚集过程进行模拟实验,认为油在砂岩透镜体中的充注,除受注入压力影响外,还受毛细管压力和浮力的影响。姜振学等(2003a)利用核磁共振仪器的监测手段模拟透镜状砂体成藏对物性条件的要求,结果表明,在一定温度压力以及相同围岩含油饱和度的条件下,砂体含油性有随砂体物性变好而变好的趋势。目前关于透镜体油气藏成藏的物理模拟实验主要集中于解决成藏动力学机制、成藏过程问题,但关于油气聚集机理、运移输导系统、是否存在围岩临界含油饱和度和砂体临界物性条件的研究相对较少,特别是还未从实验的角度加以证实。由于理论不清而存在的上述问题,是砂岩透镜体类油气藏勘探不足的内在原因,在一定程度上影响着我国油气勘探的进程。本文以东营凹陷为例,利用中国石油大学(北京)自行研制的三维高温高压实验设备,模拟砂岩物性对油气成藏的控制作用,进而探讨岩性油藏的成藏机理。

## 1 地质剖析

东营凹陷主要由牛庄、利津、民丰、博兴 4 个次

级洼陷组成,面积约 5 700 km<sup>2</sup>,是济阳拗陷中油气最为富集的凹陷(张林晔等,2003)。近十几年来,东营凹陷新增探明储量中岩性等隐蔽油气藏储量约占了 50%。从储量增长的趋势可以预见,岩性等隐蔽油气藏的勘探开发是未来东营凹陷增储上产的重要保障(庞雄奇等,2004)。

东营凹陷岩性油气藏主要分布在沙三段和沙四段,下第三系中被有效烃源岩包裹的圈闭,其含油性好于与烃源岩呈侧向接触的岩性圈闭。同样被烃源岩包裹的圈闭,离有效烃源岩中心越近,圈闭含油性越好,反之越差。从图 1 可以看出,当砂体孔隙度小于 24%或渗透率小于  $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  时,东营凹陷岩性油气藏的充满度随物性变好呈现出增大的趋势,而当砂体孔隙度大于 24%或渗透率小于  $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  时,岩性油气藏的充满度却随砂体孔渗增大而降低。其原因主要有以下 3 点:(1)东营凹陷孔渗较大的砂体沉积体系类型多为滨浅湖三角洲前缘亚相,在平面上这些砂体位于湖盆的边缘,距生排烃中心的距离较远,在纵向上,这些砂体往往埋深较浅,其围岩大多没有进入排烃门限,因此油源条件较差;(2)东营凹陷孔渗较大的砂体大多位于沙二段,虽被泥岩所包裹或与泥岩接触,但沙二段泥岩属有机质丰度很低的非源岩,因此这些砂体的围岩供油条件很差。这些砂体之所以成藏是由于断层垂向沟通深部沙三或沙四段油源,油气沿断层运聚其中而成藏;(3)由于这些砂体多为滨浅湖三角洲前缘沉积体系,砂体规模较大,因此围岩充注条件很差,仅在断层沟通油源的情况下,它们要想达到很高的油气充满度是十分困难的。

那么,被烃源岩包裹的砂体的含油饱和度是否随砂体物性变好而增加?成藏机理是什么?本文利用物理模拟实验手段对其进行了验证和探讨。

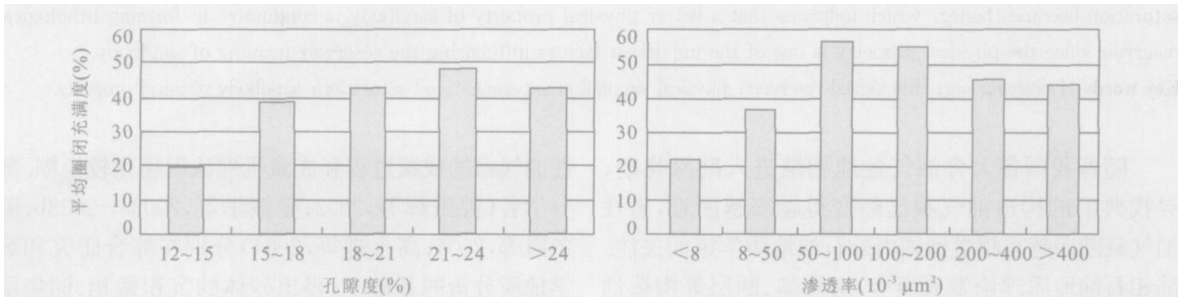


图 1 东营凹陷岩性油藏充满度与砂体物性的关系

Fig. 1 Relationship between the oil charged degree and physical property of sandbody of lithological reservoir in Dongying sag

## 2 物理模拟

### 2.1 模型设计

三维实验装置主要由实验模型、注入系统、检测系统和数据采集处理系统 4 部分组成, 是一种通过测量模型体电性参量变化来研究其内部流体运移规律的实验装置(图 2)。

实验模型主体是模拟实验装置的核心, 模型尺寸为 40 cm × 30 cm × 50 cm。实验中围岩用饱含油的黏土代表, 其初始尺寸为 32 cm × 22 cm × 24 cm; 砂体用饱含水的玻璃珠代替, 其初始尺寸为 24 cm × 16 cm × 18 cm。实验过程中, 围岩中的油和砂体中的水发生驱替交换, 外界不再注入油和水, 只在纵向通过活塞对模型施加压力, 即  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ , 活塞位移量  $x$  即为模型的纵向压实量, 表示压实平衡时施加压力的大小。

实验主要分两部分进行, 一是含油饱和度标定实验, 本实验分别对含有不同量的油及水的粘土进行电压测定和对饱含水或油的砂进行压实过程中的电压变化记录; 二是成藏机理物理模拟实验。

### 2.2 标定实验

**2.2.1 实验模型** 本实验用粒径为 0.1~0.15 mm 的玻璃珠代替石英砂。含油饱和度测定实验通过岩性油气藏成藏机理物理模拟实验三维装置的采集系统。测定实验是为了测定实验粘土中含水、含油率和实验砂中含油饱和度与电阻值变化关系。首先称量一定质量的粘土或石英砂, 然后加入已设定比例的油/水量, 实验模型见图 3a, 电极分布见图 3b。

**2.2.2 含油饱和度测定实验条件** (1) 固定实验粘

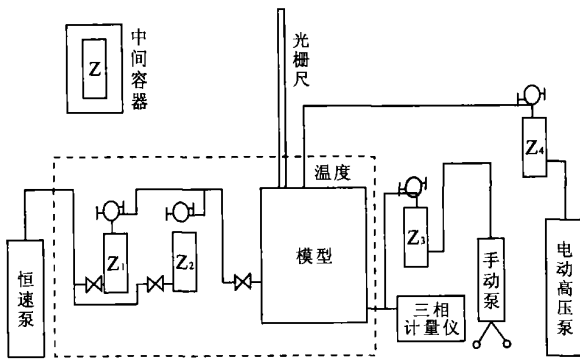


图 2 三维实验装置流程

Fig.2 Flow schematic chart of three dimensional experimenting facilities

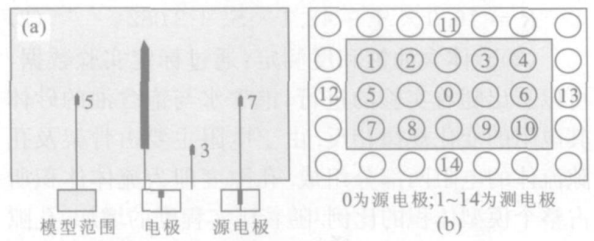


图 3 实验模型剖面图及测试电极分布

Fig.3 Experiment model profile and its electric poles distribution

表 1 粘土测定实验条件

Table 1 Clay determination experimental condition

实验编号	含水率 (%)	含水量 (mL)	含油率 (%)	含油量 (mL)
1	0	0	0	0
2	0	0	2	300
3	0	0	4	600
4	0	0	6	900
5	0	0	8	1 200
6	0	0	10	1 500
7	0	0	12	1 800
8	0	0	14	2 100
9	0	0	16	2 400
10	0	0	18	2 700
11	2	300	0	0
12	4	600	0	0
13	6	900	0	0
14	8	1 200	0	0
15	10	1 500	0	0
16	12	1 800	0	0
17	14	2 100	0	0
18	16	2 400	0	0
19	18	2 700	0	0

土称重 15 kg, 测定实验的实验条件见表 1。实验中分别混合一定量的油和水。实验没有加温和加压。

(2) 加压条件下的测定实验。取 5 kg 玻璃珠代替石英砂, 分别用水和煤油饱和进行 2 组实验, 压力从 0 缓慢增加至 10 MPa。

**2.2.3 含油饱和度测定实验结果分析** (1) 粘土含油饱和度测定: ①含油率  $S_o$  为零, 含水率  $S_w$  变化。在无加压的情况下, 随着含水率的增加, 粘土的电阻呈非线性降低的趋势。根据实验数据拟合电阻随含水率变化的关系, 得式(1):

$$R = 2187S_w^{-1.2836} \quad (1)$$

②含水率  $S_w$  为零, 含油率  $S_o$  变化。在无加压的情况下, 粘土的电阻随含油量的增加而呈非线性增加的趋势, 其关系如下:

$$R = 16.9 \times S_0^2 + 43.1 \times S_0 + 3082. \quad (2)$$

(2) 砂体含油饱和度测定: 通过标定实验数据, 可以看出随着实验的进行, 饱含水与饱含油的砂体其电阻的变化规律相反. 由于电阻主要由骨架及孔隙流体的电阻两部分组成. 孔隙度即为流体体积所占整个模型体积的比例. 随着压实程度的增加, 孔隙度变小, 流体体积也变小, 从而导致电阻的变化. 因此可以利用表中数据作出饱含水或饱含油时的电阻与模型活塞位移量的关系拟合方程, 见式(3)、(4).

通过上述测定实验可以看出, 无论是油还是水对砂体电阻的影响都较对粘土的影响明显得多. 随着压实程度的不断加强, 物理模型中孔隙度不断变小, 由于模型饱和油或水, 因此油或水的量减少, 从而引起模型中电阻的变化. 在本测定实验中, 模型的电阻在  $30 \times 10^3 \sim 60 \times 10^3 \text{ k}\Omega$  之间变化.

模型中饱和水的情况下, 电阻随压实程度的加强逐渐增大, 拟合电阻与位移量的关系如式(3)所示:

$$R = e^{0.000105x^2 + 0.012197x + 9.599078}. \quad (3)$$

模型中饱和油的情况下, 电阻随压实程度的加强逐渐变小, 拟合电阻与位移量的关系如下:

$$R = e^{-0.000273537x^2 - 0.0048305x + 11.053337}. \quad (4)$$

由以上两式联立求解得  $x = 43$ ,  $R = 30263$ ; 即由曲线方程得到当位移量为 43 mm 时, 两方程得到的电阻值相等, 为 30263 kΩ, 此时孔隙度为 0, 砂体厚度为 3.7 cm.

根据骨架不变原理有:  $H_0(1 - \varphi_0) = H(1 - \varphi)$ , 并根据上述拟合公式计算, 当位移量为 0 时, 原始孔隙度为 0.54, 饱含水模型的电阻为 14751 kΩ, 饱含油模型的电阻为 63154 kΩ. 利用串联电路电阻公式  $R = R_1 + R_2$  计算得单一水的电阻为 3328 kΩ, 单一油的电阻为 116216 kΩ. 因此对于位移量  $x$ , 假设含油饱和度为  $S_0$ , 则含水饱和度为  $S_w = 1 - S_0$ , 总电阻为:

$$R = R_g + R_o + R_w = 30263(1 - \varphi) + 116216 \times \varphi \times S_0 + 3328 \times \varphi \times (1 - S_0). \quad (5)$$

因此, 含油饱和度  $S_0$  为:

$$S_0 = \frac{R + 26934\varphi - 30263}{112888\varphi}$$

$$\frac{R + 26934[1 - (0.46H_0/H_0 - x)] - 30263}{112888[(0.46H_0/H_0 - x)]}. \quad (6)$$

式(6)中  $R$  为所测电阻,  $H_0$  为模型原始高度,  $x$  为位移量, 含水饱和度为  $S_w = 1 - S_0$ .

### 2.3 砂体物性与岩性砂体成藏模拟实验

根据实验设计的需要, 在粘土中混合一定比例

表 2 岩性油藏成藏机理物理模拟实验项目

Table 2 Physical simulation experiment item of lithological oil reservoir formation mechanism

序号	含油量 $L_{油}(10 \text{ kg} \pm)$	含水量 $L_{水}(10 \text{ kg} \pm)$	砂粒径 (mm)	压力 (MPa)
1	0.75	0.25	0.1~0.15	10
2	0.75	0.25	0.7~0.8	10
3	0.75	0.25	0.35~0.4	10

的煤油和蒸馏水模拟源岩, 玻璃珠用水浸泡排出内含气体使其饱和来模拟砂体. 具体的实验模型如图 3b 所示, 其中填充部分为砂体, 0 为源电极、1~10 为砂体中电极、11~14 为围岩中电极, 实验项目如表 2 所示.

### 2.4 现象及机理解释

在本组实验中, 分别取 0.1~0.15 mm、0.35~0.4 mm、0.7~0.8 mm 的玻璃珠模拟砂体, 这 3 个实验除了砂体的粒径不同外其他因素均一致. 根据源电极与电极 1、10 之间的电阻和电极 1 与电极 11、12 之间的电阻作图 4. 从图 4 中可以看到, 在实验开始的 7 h 内, 砂体中的电阻与围岩内的电阻都发生了较大的变化. 每个实验中其砂体内的电阻都是由 15000 kΩ 左右上升到 30000 kΩ 以上, 而围岩中的电阻却呈相反的趋势变化. 砂体中的含油饱和度随着实验的进行也在不断的增大. 但是无论是电阻还是含油饱和度的变化都随着砂体物性的不同而呈现出速度的不同.

在实验的过程中, 由于实验模型中孔渗条件很好, 在装入模型的初始阶段油水在毛细管压力及浓度差产生的扩散力的驱使下即发生了运移. 此时砂体中的电阻值发生较大的变化. 从图 4 可以看出, 当玻璃珠粒径分别为 0.1~0.15 mm、0.35~0.4 mm 和 0.7~0.8 mm 时, 含油饱和度上升到 0.3 所需的时间依次为 5 h、2 h、1.5 h, 即在相同压力条件下, 随着砂体粒度的增加, 砂体电阻率变化相同量所需的时间逐渐变短, 即砂体中的含油饱和度达到一定值的速度逐渐变快. 由此可以得出: 随着砂体物性的变好, 其有利于油气聚集成藏的能力也在变强, 砂体物性是影响砂体含油性的重要因素.

## 3 结论

(1) 标定实验表明: 在无加压情况下, 粘土和砂体的电阻随着含水率的增加呈非线性降低的趋势,

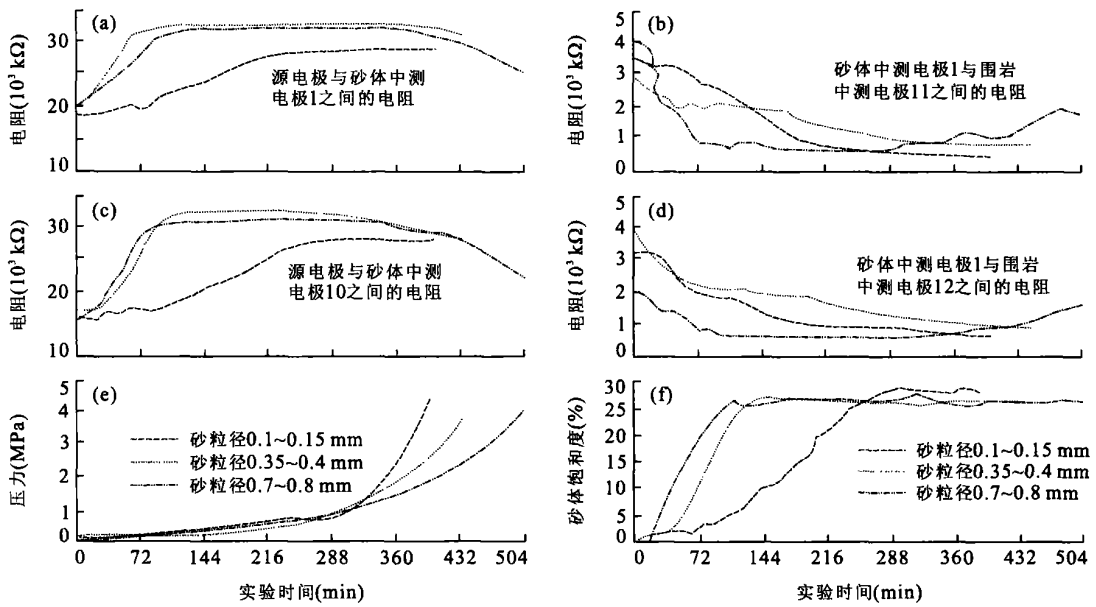


图 4 电极电阻、压力、砂体含油饱和度随时间变化关系

Fig. 4 Relations between electrode resistivity, pressure, oil saturation with time

随着含油量增加而呈非线性增加的趋势, 无论是油还是水对砂体电阻率的影响都较对粘土电阻率的影响明显的多; (2) 模拟实验过程中, 围岩电阻率和砂体电阻率变化规律相反, 围岩电阻率呈非线性降低, 而砂体的电阻率呈非线性增加, 并且电阻率的变化率都是先快后慢, 最后达到平衡. 这种现象说明围岩中油与砂体中的水发生了替换, 并且油水替换速度随着压实程度的增强而不断降低; (3) 在相同压力条件下, 随着砂体粒度的增加, 砂体电阻率变化相同量所需的时间逐渐变短, 即砂体中的含油饱和度达到一定值的速度逐渐变快. 这说明砂体物性越好, 越有利于砂体油藏的形成.

References

Chen, D. X., Pang X. Q., Qiu, N. S., et al., 2004. Accumulation and filling mechanism of lenticular sand body reservoir. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(4): 483–488 (in Chinese with English abstract).

Chen, Z. M., Zhang, Y. F., Han, Y. X., 1998. A modeling experiment and mechanism analysis of oil accumulation in pod like sandbody. *Petroleum Geology and Experiment*, 20(2): 166–170 (in Chinese with English abstract).

Demhichi, H. J., Anderson, M. J., 1989. Secondary migration

of oil experiments supporting efficient movement of separate, buoyant oil phase along limited conduit. *AAPG*, 73(8): 1018–1021.

Gao, Y. J., Qiu, G. Q., Chen, D. X., et al., 2004. Oil/gas shows in lithologic reservoirs in Niuzhuang sag and their main controlling factors. *Oil & Gas Geology*, 25(3): 284–287 (in Chinese with English abstract).

Jiang, Z. X., Chen D. X., Miao S., et al., 2003a. Model test and mechanism interpretation of the petroleum accumulation of lenticular sandstone in Jiyang depression. *Oil & Gas Geology*, 24(3): 223–227 (in Chinese with English abstract).

Jiang, Z. X., Chen, D. X., Qiu, G. Q., et al., 2003b. AHP applied factors for reservoir in the research of main studying formation of controlling sand lens. *Petroleum Exploration and Development*, 30(3): 44–47 (in Chinese with English abstract).

Lenormand, R., Zarcone, E., Touboul, E., 1988. Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media. *Journal of Fluid Mechanics*, 18(9): 165–187.

Pang X. Q., Chen, D. X., Li P. L., et al., 2004. Prediction and its preliminary application in resource potentials of subtle oil/gas reservoirs. *Oil & Gas Geology*, 25(4): 370–376 (in Chinese with English abstract).

Selle, O. M., Jensen J. I., Sylta, O., et al., 1993. Experimental verification of low dip low rate two phase (secondary) migration by means of X ray absorption. *Geofluids*

93; Contributions to an international conference on fluid evolution, migration and interaction in rocks. Torquay, England, 4 - 7.

Zeng, J. H., Jin, Z. J., 2000. Physical simulation for secondary migration and accumulation of oil and gas. Petroleum Industry Press Beijing, 207 - 210 (in Chinese).

Zeng, J. H., Zhang, S. W., Qiu, N. S., et al., 2002. Degree of oil gas charged in lens shaped sand body in Jiyang depression and its main controlling factors. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27 (6): 729 - 732 (in Chinese with English abstract).

Zhang, L. Y., Jiang, Y. L., Liu, H., et al., 2003. Relationship between source rock and oil accumulation in Dongying sag. *Petroleum Exploration and Development*, 30(3): 61 - 64 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈冬霞, 庞雄奇, 邱楠生, 等. 2004. 砂岩透镜体成藏机理. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(4): 483 - 488.

陈章明, 张云峰, 韩有信, 1998. 凸镜状砂体聚油模拟实验及其机理分析. *石油实验地质*, 20(2): 166 - 170.

高永进, 邱桂强, 陈冬霞, 等. 2004. 牛庄洼陷岩性油藏含油气性及主控因素. *石油与天然气地质*, 25(3): 284 - 287.

姜振学, 陈冬霞, 苗胜, 等. 2003a. 济阳拗陷透镜状砂岩成藏模拟实验. *石油与天然气地质*, 24(3): 223 - 227.

姜振学, 陈冬霞, 邱桂强, 等. 2003b. 应用层次分析法研究透镜状砂体成藏主控因素. *石油勘探与开发*, 30(3): 44 - 47.

庞雄奇, 陈冬霞, 李丕龙, 等. 2004. 隐蔽油气藏资源潜力预测方法探讨与初步应用. *石油与天然气地质*, 25(4): 370 - 376.

曾溅辉, 金之钧, 2000. 油气二次运移和聚集物理模拟. 北京: 石油工业出版社, 207 - 210.

曾溅辉, 张善文, 邱楠生, 等. 2002. 济阳拗陷砂岩透镜体油气藏充满度大小及其主控因素. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(6): 729 - 732.

张林晔, 蒋有录, 刘华, 等. 2003. 东营凹陷油源分析. *石油勘探与开发*, 30(3): 61 - 64.

\*\*\*\*\*

(上接 272 页)

韩剑发, 潘文庆, 2003. 塔里木盆地轮南古隆起某井区奥陶系新增石油探明储量报告. 新疆: 中国石油塔里木油田分公司.

韩剑发, 周勇, 2000. 塔里木盆地哈得 4 油田探明储量报告. 新疆: 中国石油塔里木油田分公司.

洪金秀, 2001. 中东地区地理、地质概述. *国外油田工程*, 17(9): 73 - 75.

胡允栋, 关涛, 1998. 储量参数误差对储量精度的影响. *石油勘探与开发*, 25(6): 70 - 73.

林金成, 2003. 正确理解油气储量 6P 分类的 3 个关键问题. *中国海上油气(地质)*, 17(6): 365 - 369.

刘克奇, 金之钧, 2004. 塔里木盆地塔中低凸起奥陶纪油气成藏体系. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(4): 489 - 494.

王捷, 1996. 油气藏描述技术. 北京: 石油工业出版社.

王一刚, 刘划一, 文应初, 等. 2002. 川东北飞仙关组鲕滩储层

分布规律、勘探方法与远景预测. *天然气工业*, 22(增刊): 14 - 18.

徐向华, 周庆凡, 张玲, 2004. 塔里木盆地油气储量及其分布特征. *石油与天然气地质*, 25(3): 300 - 313.

杨金华, 1996. 塔里木盆地羊塔克油气田构造描述与储层横向预测. 新疆: 中国石油塔里木油田分公司.

杨通佑, 范尚炯, 陈元千, 等. 1998. 石油及天然气储量计算方法. 北京: 石油工业出版社.

张抗, 2004. 世界巨型气田近十年的变化分析. *天然气工业*, 24(6): 127 - 130.

张文昭, 1999. 石油天然气储量管理. 北京: 石油工业出版社.

赵良孝, 补勇, 1994. 碳酸盐岩储层油井评价技术. 北京: 石油工业出版社.

邹华耀, 郝芳, 张柏桥, 等. 2005. 准噶尔盆地流体输导格架及其对油气成藏与分布的控制. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(5): 609 - 616.