

文章编号:1000-0550(2011)04-0793-05

# 东濮凹陷浅层砂岩的微观输导性能及其油气地质意义<sup>①</sup>

张丽霞<sup>1</sup> 范昌育<sup>2</sup>

(1. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院 西安 710075; 2 西北大学地质学系 西安 710069)

**摘 要** 砂体作为东濮凹陷浅层发育的主要输导体之一,其微观输导特征,决定了输导性能的优劣。利用场发射环境扫描电镜下的 Scandium 孔径测量软件,从微观尺度,较为系统地测量了东濮凹陷浅层砂体的孔隙、喉道大小,并总结了它们在纵向上的分布特征,分析了不同层段砂岩的输导性能及其纵向变化,这为研究孔隙结构和砂岩输导性能提供了一种新的方法。研究认为,喉道宽度和孔喉比是影响东濮凹陷浅层砂体输导性的主要因素,在层位上从深到浅,由沙一段→东营组→馆陶组输导性能越来越好,再向上至明化镇组时又变差。据此分析,如果满足油气运移、成藏的其它条件,浅层油气极有可能运移至馆陶组聚集、成藏。

**关键词** 微观输导性 孔隙结构 孔喉比 浅层 东濮凹陷

**第一作者简介** 张丽霞 女 1962 出生 高级工程师 E-mail: zlxycq999@sina.com

**中图分类号** TE122.1 **文献标识码** A

## 0 引言

砂岩的输导性是构成流体输导系统的基础,也在一定程度上影响了油气运移的路径和聚集成藏的地区。目前,国内外学者对其它输导体类型如断层、不整合面等给予了较多的关注,但对砂体这一最为基础性的输导体,如何进行评价,还是一个非常薄弱的环节。

自 Washburn 首次利用实验室压汞实验测定岩石孔喉分布以来<sup>[1]</sup>,前人在储层孔隙结构的研究方面做了大量工作,近年来,有学者提出应用分形理论<sup>[2,3]</sup>,反映储层微观孔隙结构的复杂性,并出现了很多新技术新方法,如 X-CT 扫描成像技术<sup>[4]</sup>、测井解释技术<sup>[5]</sup>及激光扫描共聚焦显微技术<sup>[6]</sup>等。但在揭示孔隙结构与油气运聚关系方面的研究较少。而这二者关系研究的核心问题是成藏动力与孔喉特征匹配下限条件问题。Katz 和 Thompson 把门限压力定为汞能形成整个岩样连通通道时的压力,并指出实测门限压力对应于压汞曲线图上的拐点(压汞曲线上凸的地方)<sup>[7]</sup>。林景晔利用砂岩储层孔隙结构参数“峰点孔喉半径”(r<sub>峰</sub>)的新概念,研究了砂岩储层孔隙结构与油气运聚关系<sup>[8]</sup>。张小莉利用 Edword D Pittman 方法通过对储层的压汞曲线重新处理,确定了峰点孔喉半径,建立了峰点孔喉半径与孔隙度、渗

透率之间的关系,分析其孔喉半径与含油性间的关系<sup>[9]</sup>。

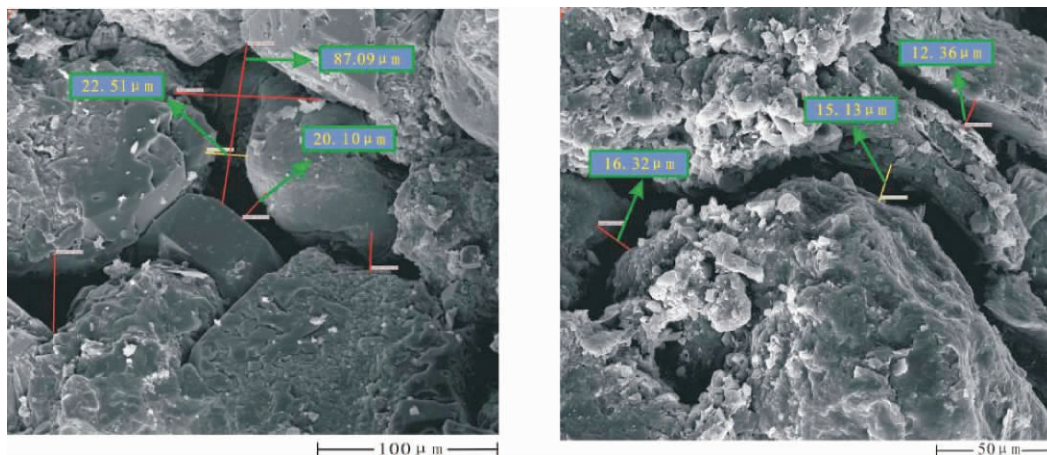
东濮凹陷主力储油层为古近系沙河街组的沙三、沙四段。本文所指的浅层,自下而上为沙一段、东营组、馆陶组和明化镇组,目前已发现较多油气显示和少量探明储量,借鉴济阳、渤中等拗陷的勘探实践,应该具有一定的勘探潜力。

本文立足砂岩的微观输导性能研究,在英国牛津公司 Quanta 400 FEG 场发射环境扫描电镜下,首次利用 FEI 公司开发的 Scandium 孔径测量软件,尝试通过直接测量孔隙、喉道直径的方法,了解微观孔隙结构的分布特征。

与常规的压汞方法相比,压汞方法获得孔、喉数据主要是通过压汞驱替实验获得排驱压力,结合毛细管压力公式反推孔喉大小,一方面这种方法计算的数据无法区分孔隙喉道的大小;另一方面毛细管压力公式中,界面张力和润湿角的获得也有误差。扫描电镜测试最大优势在于可以直观地区分并测量孔隙、喉道的大小,同时减小了利用压汞方法间接计算所带来的误差。

据此通过测量统计大量孔、喉数据,筛选出与影响砂岩输导性的渗透率相关性最大的参数,对这些参数进行详尽分析,结合与浅层有重大发现的济阳拗陷对比,最终评价东濮凹陷浅层砂岩的微观输导性能及其对油气运聚、成藏的影响。

<sup>①</sup>中国石油化工集团公司重点科技攻关项目(编号:P02084)资助。  
收稿日期:2010-04-02; 收修改稿日期:2010-09-01



梁2井 东营组 2060.35m

胡5-11井 明化镇组 1183.38m

图1 东濮凹陷浅层砂岩储层孔隙、喉道宽度测量示意

Fig. 1 The sketch map showing measurement of the pore and throat of sandstone in the shallower strata of Dongpu sag

## 1 砂岩孔隙结构与渗透性的关系

研究过程中,据形状的不同,测量了大量的近椭圆形孔隙的长轴和短轴的长度,近圆形的孔隙直径的大小以及喉道宽度(图1),并进一步计算了反映孔喉组合特征的孔喉比等参数。

从砂岩的物性角度来看,那些高孔,特别是高渗带,往往是油气运移的优势输导区域,因此,与砂岩输导性关系最为密切的物性参数是渗透率,而渗透率又与砂岩的微观孔隙结构密切相关,从而孔喉结构参数中与渗透率关系密切者,即是决定砂岩输导性的主要微观参数。

由实测渗透率与众多孔喉结构参数的相关性分析来看,喉道宽度与孔喉比与渗透率的相关性较好(图2,图3)。

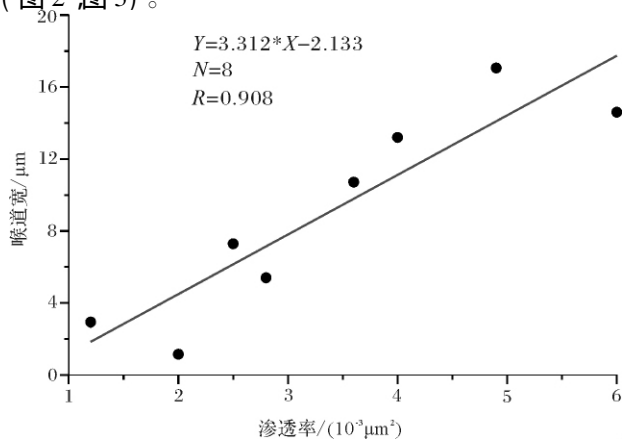


图2 东濮凹陷浅层喉道宽度与渗透率的关系

Fig. 2 Relationship between permeability and throat width in shallower strata of Dongpu sag

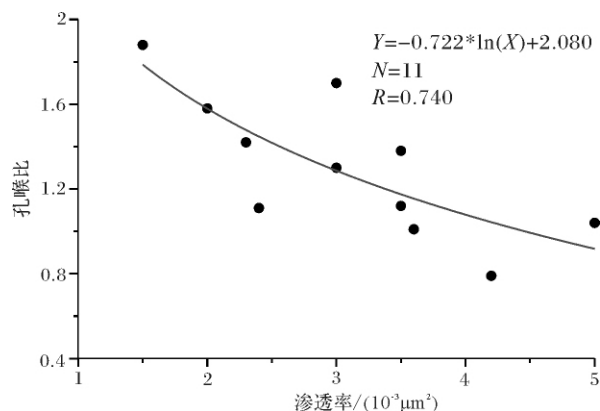


图3 东濮凹陷浅层孔喉比与渗透率的关系

Fig. 3 Relationship between permeability and pore-to-throat ratio in shallower strata of Dongpu sag

喉道宽度与渗透率正相关。众所周知,输导层砂岩的喉道是连接孔隙的纽带。毛细压力和喉道直径成反比。如果近似用喉道宽度代表喉道直径,则喉道宽度越大,流体在其中输导时所受的毛细管阻力就越小,渗透率越大,输导能力越强,这也是二者正相关性好的内在原因。

此外,孔喉比与渗透率之间呈负相关关系,意味着孔喉比越大,与大孔隙连通的喉道宽度越小,大孔隙内的油(气)越难通过小喉道,此时的贾敏效应越明显,气泡通过狭小喉道需要克服更大的毛细管阻力,导致渗透率降低,输导性变差。

因此,喉道宽度和孔喉比是影响砂岩输导性的主要微观参数,下文以此为依据进行浅层砂岩输导性的分析。

## 2 反映微观输导性能的特征参数

### 2.1 喉道宽度的分布特征

从喉道分布的直方图中可以看出(图 4),沙一段喉道分布呈峰值较高的单峰状,喉道宽度主要集中在 0~5 μm;东营组喉道的分布也呈峰值较高的单峰状,喉道宽度主要集中在 2.5~5 μm,喉道明显较沙一段宽,峰值优势明显,分选较沙一段好;馆陶组喉道分布呈多峰状,以喉宽在 10~12.5 μm 区间的峰值最高,喉道的宽度较东营组大,但分选较差;明化镇组喉道的分布呈单峰状,喉宽在 0~10 μm 之间的峰值较高,峰值优势不明显。总体上喉道宽度较馆陶组小,但其分选较馆陶组好,较沙一段和东营组差。

浅层砂岩喉道能否输导油气,除喉道大小外,还受运移动力的影响。东濮凹陷浅层为常压地层,运移动力主要为浮力,浮力主要取决于油水密度差和油柱高度。因同一地区的油水密度差相差不大,浮力的不同主要由油柱高度引起。东濮凹陷浅层油气要在砂体中发生大规模运移成藏,油柱高度产生的浮力必须满足克服各层段直方图峰值喉道所对应的毛管压力大小这一条件。

济阳坳陷目前在浅层已有重大油气发现,东濮凹陷与济阳坳陷同属于渤海湾盆地,二者在地质环境上有很多相似之处,济阳坳陷最小含油喉道半径与油柱

高度的关系(表 1),体现了石油在最小含油喉道半径中输导所需的最小动力条件,即油柱高度产生的浮力大小。

对比济阳坳陷惠民凹陷最小含油喉道半径与油柱高度的关系,发现东濮凹陷浅层油气大规模运移的动力条件:沙一段油气的进入喉道约需要 10 m 以上的连续油柱浮力;东营组油气的进入约需 5 m 以上的连续油柱浮力;馆陶组油气的进入约需 2 m 以上的连续油柱浮力;明化镇组油气的进入约需 4 m 以上的连续油柱浮力。

表 1 济阳坳陷惠民凹陷沙三段储层最小含油喉道半径与油柱高度关系<sup>[9]</sup>

**Table 1 Relationship between minimum oil-bearing throat radius and oil column height of reservoir in Es<sub>3</sub> in Huimin sag belonging to Jiyang depression**

油柱高度/m	孔喉半径/μm	油柱高度/m	孔喉半径/μm
0.46	59.877	91.20	0.299
0.50	54.608	100.00	0.273
2.00	13.652	125.00	0.218
4.56	5.988	136.80	0.200
5.00	5.461	150.00	0.182
10.00	2.730	175.00	0.156
15.00	1.820	182.40	0.150
20.00	1.365	200.00	0.137
22.80	1.198	225.00	0.121
25.00	1.092	250.00	0.109
50.00	0.546	275.00	0.099
75.00	0.364	300.00	0.091

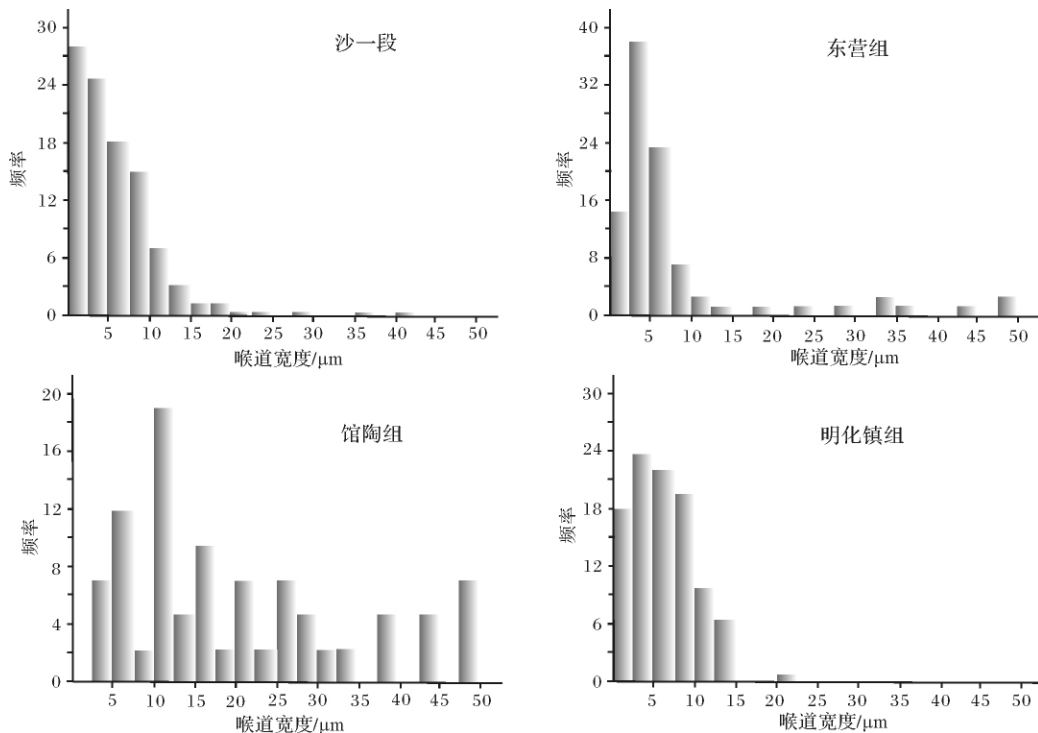


图 4 东濮凹陷浅层砂岩喉道宽度分布直方图

Fig.4 The distribution of the throat width of the sandstone in shallower strata of Dongpu sag

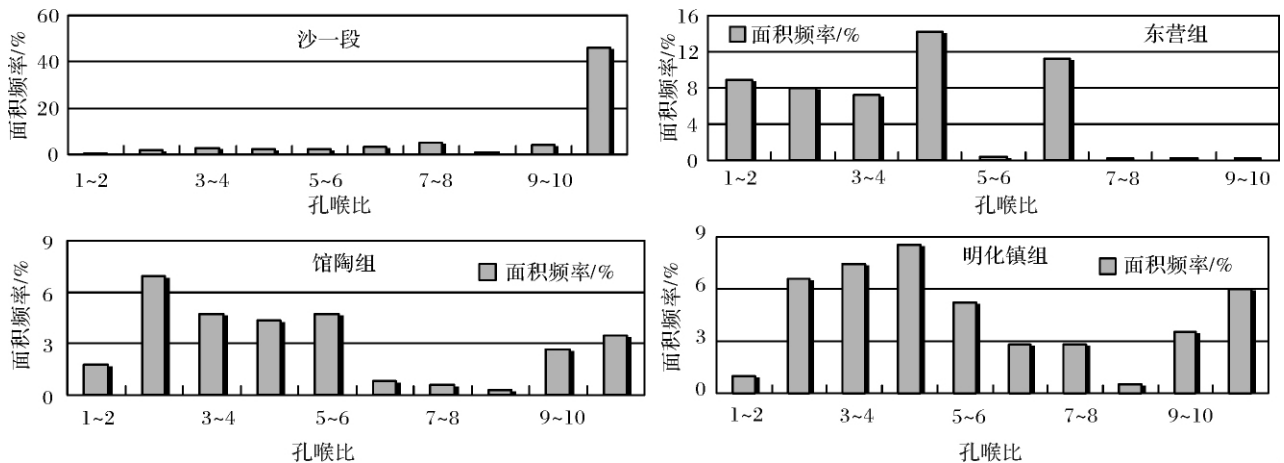


图5 东濮凹陷浅层砂岩孔喉比分布直方图

Fig. 5 The distribution of the pore-to-throat ratio in shallower strata of Dongpu sag

## 2.2 孔喉比的分布特征

沙一段孔喉比呈单峰状,主峰的孔喉比大于10,孔喉比属于超大型;东营组的孔喉比分布呈多峰状,孔喉比在4~5区间的峰值最高,孔喉比明显较沙一段低;馆陶组的孔喉比分布也呈多峰状,其中2~3区间的峰值最高,孔喉比较东营组低;明化镇组孔喉比也呈现出双峰状分布,孔喉比值较小的峰以4~5区间的峰值最高,孔喉比较馆陶组高(图5)。

综合喉道宽度与孔喉比分布特征可知,东濮凹陷浅层输导层砂体输导性能,自深而浅,由差到好的顺序为:沙一段→东营组→馆陶组输导性能越来越好,再向上至明化镇组又变差。

## 3 油气地质意义

东濮凹陷浅层的油气主要来自深层沙河街组三段。由浅层砂体的输导性来看,油气在沙一段砂岩中的输导难度最大,向上至东营组、馆陶组输导条件越来越好,运移的速率和效率将越来越高,而从馆陶组再向上至明化镇组,输导条件又变差,增加油气继续运移的难度,推断油气似应难以穿越明化镇组继续向上运移。东濮凹陷浅层砂岩输导性的这种垂向变化特征,使得在其它运移、成藏条件满足的情况下,油气极有可能在物性、输导性最好的馆陶组内发生停聚成藏。

## 4 主要认识和结论

(1) 通过与体现砂岩输导性最重要的参数渗透率进行相关性分析,发现影响东濮凹陷浅层砂体输导性的微观孔隙结构因素是喉道宽度和孔喉比。喉道

宽度越大,孔喉比越小,砂体的输导性能越好。

(2) 自深而浅即自沙一段→东营组→馆陶组,输导性由差变好,再向上至明化镇组又变差。

(3) 浅层地层压力为常压,垂向运移的动力主要为浮力,砂岩微观输导性决定了油气垂向运移的动力下限以沙一段最高,东营组、馆陶组逐渐降低,至明化镇组又变高。

(4) 东濮凹陷浅层砂岩垂向输导性能的变化,为油气的垂向输导提供了可能,并最终有可能促成油气在馆陶组内成藏。

## 参考文献 (References)

- 1 Edward D P. Relationship of porosity and permeability to various parameters derived from mercury injection capillary pressure curves for sandstone [J]. AAPG Bulletin, 1992, 76 (2): 191-198
- 2 陈程,孙义梅. 砂岩孔隙结构分维及其应用[J]. 沉积学报, 1996, 14(4): 108-113 [Chen Cheng, Sun Yimei. Fractional dimension of the pore-texture in sandstones and its application [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14(4): 108-113]
- 3 马占旗,任晓娟,张宁生,等. 特低渗储集层砂岩孔隙结构的分形研究——以安塞油田Y区块和Z区块为例[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(1): 88-91 [Ma Zhanqi, Ren Xiaojuan, Zhang Ningsheng, et al. A fractal study on pore structure of sandstone in extra low permeability reservoirs: An example of Y and Z blocks in Ansai oil field [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(1): 88-91]
- 4 孙卫,史成恩,赵惊蛰,等. X-CT扫描成像技术在特低渗透储层微观孔隙结构及渗流机理研究中的应用[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 775-779 [Sun Wei, Shi Chengen, Zhao Jingzhe, et al. Application of X-CT Scanned Image Technique in the research of micro-pore texture and percolation mechanism in ultra-permeable oilfield: Taking an example from Chang 8<sup>2</sup> formation in the Xifeng oilfield [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 775-779]

- 5 祝总祺, 严衡文, 魏郑铁. 利用测井资料解释砂岩储集层孔隙结构的方法[J]. 石油学报, 1988, 9(2): 57-68 [Zhu Zongqi, Yan Hengwen, Wei Zhengtie. Method of interpreting pore-structure of sand-reservoirs, using log information [J]. Acta Petrolei Sinica, 1988, 9(2): 57-68]
- 6 应凤祥, 杨式升, 张敏, 等. 激光扫描共聚焦显微镜研究储层孔隙结构[J]. 沉积学报, 2002, 20(1): 75-79 [Ying Fengxiang, Yang Shisheng, Zhang Min, et al. Application of laser scanning confocal microscope to the measurement of pore texture in reservoirs [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(1): 75-79]
- 7 Katz A J, Thompson A H. Quantitative prediction of permeability in porous rock [J]. Physical Review Bulletin, 1986, 34(3): 8179-8181
- 8 林景晔. 砂岩储集层孔隙结构与油气运聚的关系[J]. 石油学报, 2004, 25(1): 44-47 [Lin Jingye. Relationship of pore structure of sand reservoir with hydrocarbon migration and accumulation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(1): 44-47]
- 9 张小莉, 查明, 杨懿. 惠民凹陷沙河街组三段岩性油藏储层孔隙结构特征及油气意义[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(2): 287-292 [Zhang Xiaoli, Zha Ming, Yang Yi. Pore structure features of lithologic reservoirs in the third member of Shahejie Formation in Huimin sag and their significance in petroleum exploration [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(2): 287-292]

## Micro-Transporting Capability of Sandstones in the Shallower Strata of Dongpu Sag and Its Significance

ZHANG Li-xia<sup>1</sup> FAN Chang-yu<sup>2</sup>

(1. Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co. Ltd., Xi'an 710075; 2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069)

**Abstract** There has no the ability of generating oil and gas in the shallower strata of Dongpu sag. Developed as one of the most important transporting body, the sandstone connects deeper hydrocarbon source rocks and shallower trap, so sandstone transporting capability directly determines if or not the hydrocarbon accumulation can happen in the shallower strata. The evaluation of sandstone transporting capability is one of weak links in the study of transporting body; the micro-transporting characteristics determine quality of sandstone transporting capability. Since there has defects in microscopic property measurement techniques of conventional sandstone, this article by means of the measuring software on pore diameter named Scandium in scanning electron microscope for the first time, the sizes of pore and throat of shallower strata in Dongpu sag are distinctively measured systematically in microscopic scaling. Then the longitudinal distributing characteristics are summarized. The transporting capability of the sandstone and its change are analyzed. All of these offer a new method in the study of pore structure and sandstone transporting capability. It shows those throat width and pore-to-throat ratios are the main factors influencing the transporting capability of shallower strata. The sequence of sandstone transporting capability more and more better are the first segment of Shahejie Fm. ( $E_{s1}$ ), to Dongying Fm. ( $E_d$ ) and Guantao Fm. ( $N_g$ ). However, the transporting capability in Minghuazhen Fm. ( $N_m$ ) upon Guantao Fm. ( $N_g$ ) is worse again; Hereby, if the others conditions of migration and accumulation are satisfied, hydrocarbon may migrate to the Guantao Formation and accumulate here.

**Key words** micro-transporting capability; pore structure; pore-to-throat ratio; shallower strata; Dongpu sag