文章编号:1001-6112(2017)02-0180-06　　doi:10.11781/sysydz201702180

渤海湾盆地沾化凹陷沙河街组页岩油微观储集特征

刘　毅[1],陆正元[1],戚明辉[2],田同辉[1,3],冯明石[1]

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学),成都　610059;
2. 页岩气评价与开采四川省重点实验室(四川省煤田地质局),成都　610091;
3.中国石化 胜利油田分公司,山东 东营　257000)

摘要:页岩油储层微观孔隙储集特征是勘探开发的重要基础资料。采集渤海湾盆地沾化凹陷罗 69 井沙河街组三段页岩油层段 18 块岩心样品,利用氩离子抛光—场发射扫描电镜实验,研究页岩油储层孔隙发育特征。沾化凹陷沙三段页岩油层段为泥岩和灰岩的过渡岩性,以灰质泥岩、泥质灰岩和含泥灰岩为主,夹少量灰岩薄层。页岩油层段主要孔隙类型包括泥质碎片间微孔和碳酸盐矿物的溶蚀孔、晶间孔和晶内孔。页岩油层段的储层孔隙主要由泥质部分提供,泥质粒间孔提供的面孔率贡献最大,方解石溶蚀孔对面孔率有一定贡献,晶间孔和晶内孔的面孔率贡献最低。页岩油储层孔隙的孔径属于纳米级和微米级,纳米级孔隙数量占绝对优势,然而储层孔隙面积主要由数量较少的微米级孔隙提供,即页岩油开发的储集空间应该以微米级孔隙为主要对象。

关键词:孔径;孔隙贡献;页岩油;沙河街组;沾化凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.2　　**文献标识码**:A

Microscopic characteristics of shale oil reservoirs in Shahejie Formation in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

Liu Yi[1], Lu Zhengyuan[1], Qi Minghui[2], Tian Tonghui[1,3], Feng Mingshi[1]

(1. *State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir and Exploitation* (*Chengdu University of Technology*), *Chengdu*, *Sichuan* 610059, *China*; 2. *Sichuan Key Laboratory of Shale Gas Evaluation and Exploitation* (*Sichuan Coalfield Geology Bureau*), *Chengdu*, *Sichuan* 610091, *China*; 3. *SINOPEC Shengli Oilfield Company*, *Dongying*, *Shandong* 257000, *China*)

Abstract: The microscopic pore characteristics of shale oil reservoirs are important basic data for exploration and development. Eighteen core samples were collected from the third member of Shahejie Formation (Es_3) in well Luo 69 in the Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin, and were analyzed using argon-ion polishing Scanning Electron Microscopy (SEM) to discuss the pore development characteristics of shale oil reservoirs. The shale oil layer in Es_3 showed a transitional lithology of mudstone and limestone, dominated by limy mudstone, argillaceous limestone and mud bearing limestone, with minor thin layers of limestone. Argillaceous inter-particle pores, carbonate dissolved pores, inter-crystal pores and intra-crystal pores are the main pore types of the shale oil layer. Argillaceous pores provided most of reservoir pores of the shale oil layer. Most of the plane porosity was argillaceous inter-particle pores, while calcite dissolved pores made a smaller contribution and inter-crystal pores and intra-crystal pores were less important. The pore diameters of shale oil reservoirs were classed as nano scale and micron scale, and the nano scale pores have an absolute dominance quantitatively. The reservoir pore area was mainly provided by non-dominant micro-scale pores, which should be focused on in shale oil exploration.

Key words: pore size; porosity contribution; shale oil; Shahejie Formation; Zhanhua Sag; Bohai Bay Basin

页岩油气作为非常规油气资源受到越来越多的关注和重视[1-6]。页岩油气储层具有非均质性极强、渗透率低、微纳米级孔隙复杂等特点,页岩微观结构特征(包括形态、孔径大小、分布)影响储层的有效孔隙度、渗透率、流体赋存运移和储层特征[7-9]。现有研究成果表明,采用多种分析技术研

收稿日期:2016-07-18;**修订日期**:2017-01-11。

作者简介:刘毅(1988—),女,博士研究生,从事油气田开发地质研究。E-mail:Liuyi49@cdut.edu.cn。

通信作者:陆正元(1963—),男,教授,博士生导师,从事油气田开发地质研究。E-mail:lzy@cdut.edu.cn。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目"陆相页岩油储集性能与流动机理"(2014CB239103);中国石化重点科技攻关课题"页岩油开发基础研究"(P13059)联合资助。

究孔隙的孔径大小,有助于描述复杂泥页岩中的孔隙网格[10]。国内外已经广泛运用场发射扫描电子显微镜、背散射电子成像、X-射线衍射、氩离子抛光及环境扫描电子显微镜、低温氮气吸附等技术手段,来定量研究页岩微观孔隙结构[11-16]。中国东部渤海湾盆地古近系沙河街组三段下亚段和四段上亚段泥页岩为优质烃源岩,沙河街组广泛的钻井油气显示和一些井获得工业油流已经展现出较好的页岩油开发潜力。前人已经对沾化凹陷页岩油储层的生烃条件、储集条件及含油气性等方面进行了研究[17-20],但页岩油储层微观孔隙储集特征缺乏必要的定量研究。

本文以渤海湾盆地沾化凹陷罗 69 井沙河街组页岩油储层为对象,借助场发射环境扫描电镜观察氩离子抛光样品,结合高分辨率背散射电子图像孔隙参数分析,定性描述并定量表征页岩油储层孔隙类型、孔径分布及其对孔隙储集特征的贡献,为页岩油储层勘探开发提供基础地质资料。

1　区域概况

沾化凹陷为渤海湾盆地重要的含油气三级构造单元,其南部为近东西向的陈家庄凸起,北部为北东向的义和庄凸起,构成一个向北东敞开的山间箕状盆地。罗家鼻状构造带位于沾化凹陷北部(图 1)。沙河街组沙三下亚段沉积时期处于半干旱半湿润气候条件下的咸水封闭湖泊,属于还原—强还原半深湖—深湖环境[21]。为沾化凹陷页岩油勘探开发的研究需要,在罗 69 井对沙河街组沙三下亚段主要烃源岩段进行了取心(图 2)。根据罗 69 井岩心观察、薄片鉴定、X-衍射全岩矿物分析、有机地球化学和物性分析资料,沙三下亚段烃源岩段以灰质泥岩、泥质灰岩和含泥灰岩为主。黏土矿物主要为伊—蒙混层,伊利石次之,少量高岭石及绿泥石。物性分析孔隙度为 1.2%~15.3%,渗透率一般为 $(0.1\sim10)\times10^{-3}$ μm^3,渗透性较高的岩样多为裂缝发育。有机碳含量为 2%~6%,镜质体反射率(R_o)为 0.7%~0.93%,为处于成熟阶段的优质烃源岩。

2　实验分析方法

18 块样品采自罗 69 井沙三下亚段烃源岩层段,其中灰质泥岩样品 6 块,含泥灰岩和泥质灰岩样品各 5 块,另有灰岩夹层样品 2 块。对样品断面进行氩离子抛光处理。采用 Quanta FEG 250 场发射环境扫描电子显微镜,结合背散射电子衍射成像(BSED)和 X-射线能谱分析系统,实现微纳米级孔隙特征的高分辨率(1~2 万倍)背散射电子图像孔隙观察。为避免单个视域过小引起的代表性差等问题,选取岩性样品的典型区域按顺序连续采集 16 个视域,并拼接得到一个较大区域的分析图像(图 3a)。结合能谱分析辨别矿物成分,将人工识别的不同孔隙类型采用不同颜色充填,再利用图像处理软件计算出各单一孔隙的面积和孔径大小等参数,测量孔径范围为 3 nm~10 μm(图 3b)。这里测量的孔隙孔径为孔隙的长轴长度,单位统一为 nm。利用这些分析测试结果,提出页岩油层段储集空间类型,定量分析不同岩性各类型孔隙的贡献大小,确认不同孔径的孔隙贡献。测试研究均在油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学)完成。

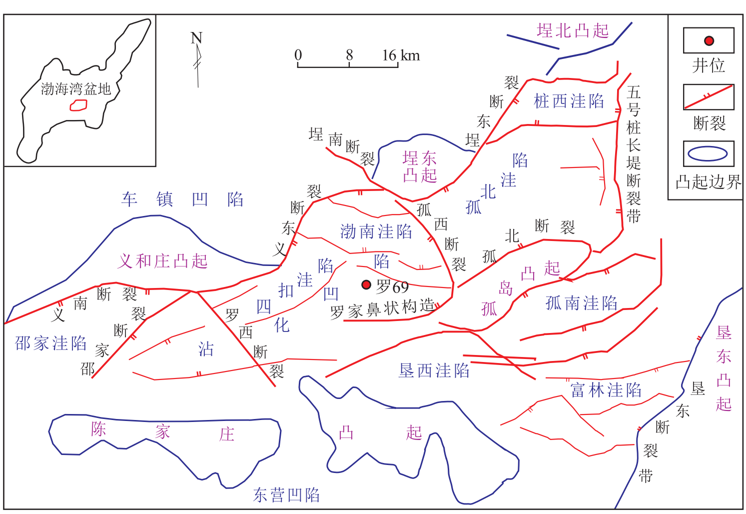


图 1　渤海湾盆地沾化凹陷构造单元及罗 69 井位置

Fig.1　Tectonic units of Zhanhua Sag in Bohai Bay Basin and location of well Luo 69

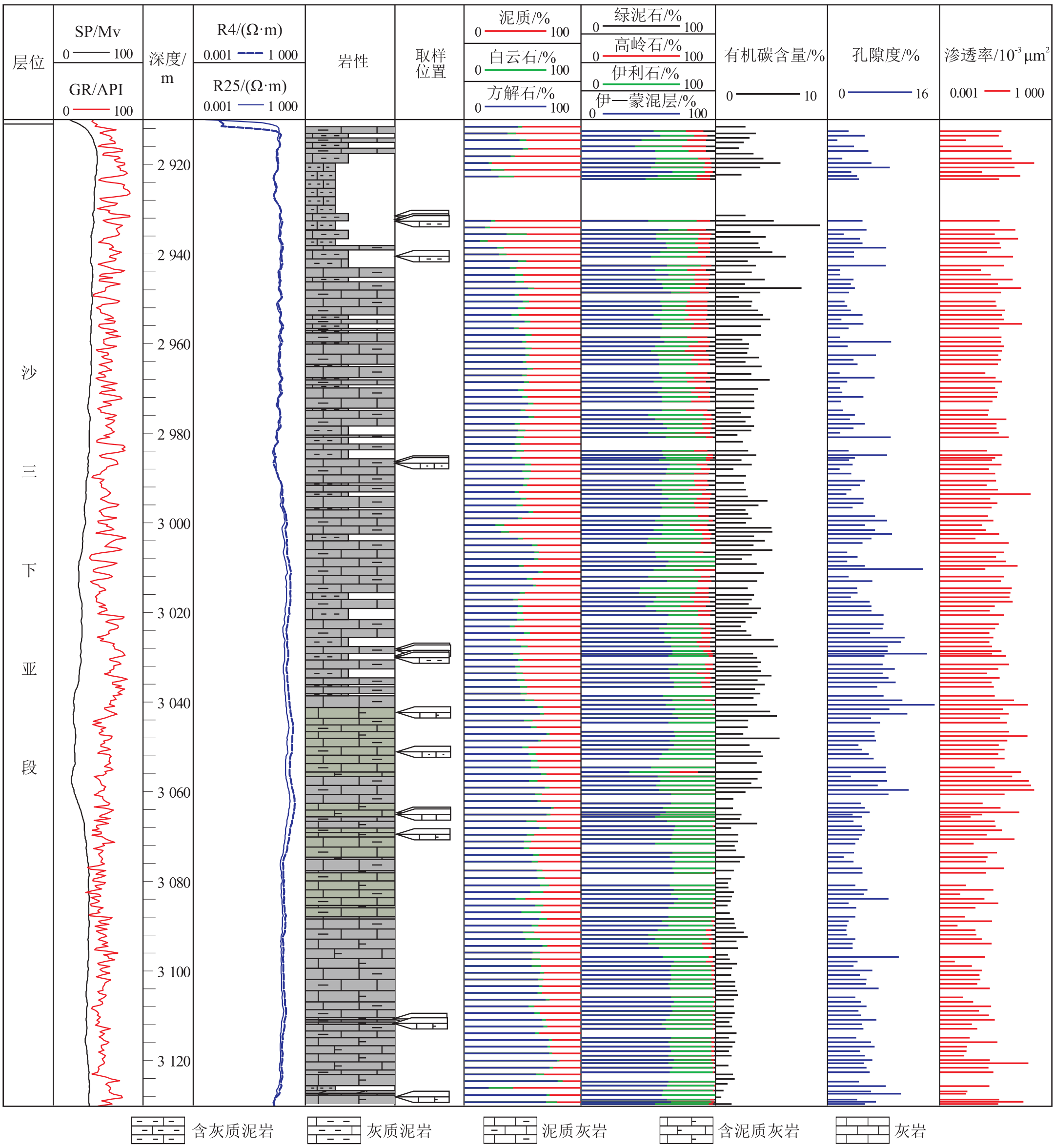


图 2　渤海湾盆地沾化凹陷罗 69 井沙三下亚段综合柱状图

Fig.2　Synthetic column of the lower section of Es_3 in well Luo 69, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

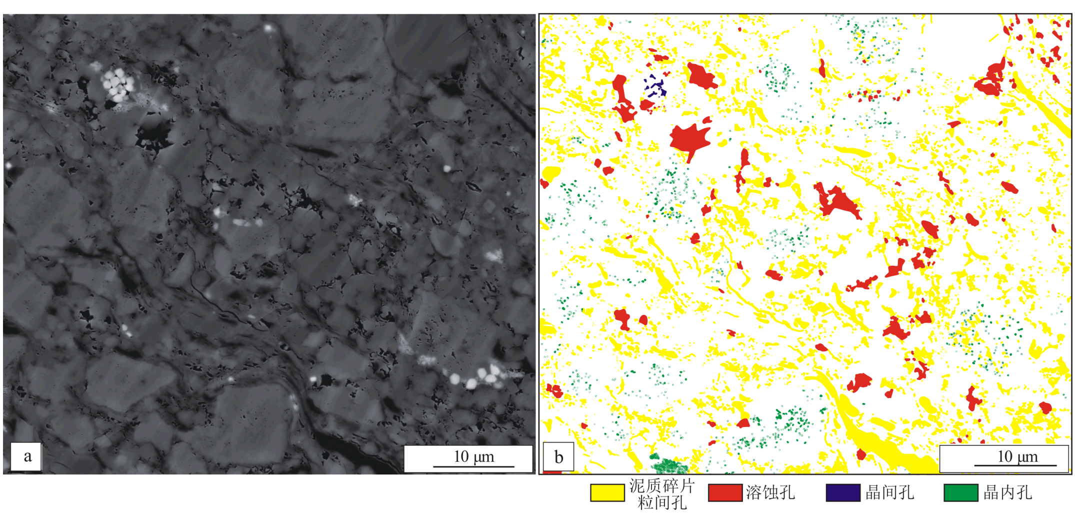


图 3　扫描电镜拼接图像及孔隙类型标识图像

Fig.3　SEM composed image (a) and pore type image filled with colors (b)

3　页岩油微观孔隙类型

沾化凹陷沙三下亚段页岩油层段孔隙类型主要包括泥质碎片间微孔、碳酸盐矿物溶蚀孔、晶间孔和晶内孔等(图 4),不同程度发育层间微裂缝和成岩收缩缝。与高成熟烃源岩地区页岩气储层相比,页岩油层段孔隙中未见沥青质充填,也不发育与之相关的有机质孔。

(1)粒间孔。主要包括泥质碎片间微孔、泥质碎片与陆源碎屑间微孔或微隙等(图 4a),主要发育在黏土矿物和泥质级的陆源碎屑之间,泥质岩类粒间孔面孔率较高。

(2)溶蚀孔。主要是方解石等不稳定矿物溶蚀形成的粒间溶蚀孔和粒内溶蚀孔(图 4b),与有机质生烃过程有关。溶蚀孔的孔径一般较大,方解石含量较高时面孔率可能发育。

(3)晶间孔。主要是草莓状黄铁矿晶间孔、黏土矿物晶间孔和方解石或白云石晶间孔(图 4c,d)。黄铁矿整体含量少,提供的面孔率较低。方解石晶间微孔较发育,晶间孔数量多,但面孔率较低。

(4)晶内孔。是指矿物晶体内部的微小孔隙,主要发育方解石晶内孔(图 4e,f)。晶内孔的孔径较小,面孔率最低。

4　页岩油储层面孔率贡献分析

利用高分辨率扫描电镜下微纳米级孔隙结构图像,可以统计出孔隙类型和孔隙面积大小,扫描电镜下的面孔率和岩样孔隙度分析结果具有一致性。利用高分辨率图像资料分析了不同岩性、不同类型的孔隙贡献和不同孔径的孔隙贡献,页岩油层段的储层孔隙主要由泥质部分提供,泥质含量越高的岩样具有较高的面孔率。

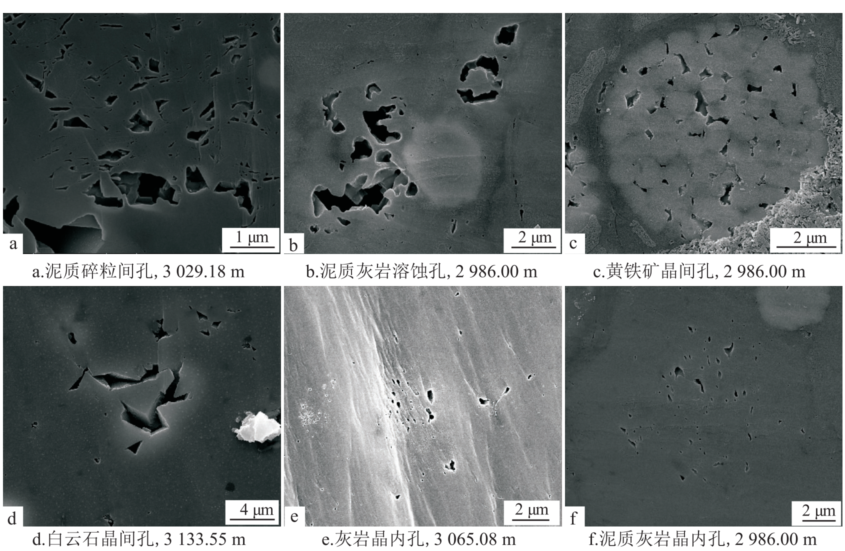
4.1　不同岩性的孔隙类型及其面孔率贡献

页岩油层段的不同岩性具有不同的孔隙类型和面孔率,定量统计表明泥质粒间孔提供的孔隙贡献最大,方解石溶蚀孔有一定的孔隙贡献,而方解石晶间孔和晶内孔孔隙贡献最差。

(1)灰质泥岩。6 个灰质泥岩样品扫描电镜定量分析总面孔率为 5.39%~10.05%,平均为 7.195%。主要储集空间为泥质粒间孔,数量占 67.6%~98.9%,泥质粒间孔提供的面孔率为 3.54%~6.96%,平均为 5.435%。次要储集空间为方解石溶蚀孔,数量占 1.1%~29.1%,溶蚀孔提供的面孔率为 0.25%~4.36%,平均为 1.717%。另外发育少量的晶间孔和晶内孔。

(2)泥质灰岩。5 个泥质灰岩样品扫描电镜定量分析总面孔率为 3.56%~6.64%,平均为 4.81%。泥质灰岩主要储集空间为泥质粒间孔,数量占 64.3%~99.3%,粒间孔提供的面孔率为 2.82%~5.77%,平均为 3.906%。次要储集空间为方解石溶蚀孔,数量占 0.4%~33.99%,面孔率为 0.82%~1.78%,平均面孔率为 1.0%。方解石晶间孔数量有所增加,占 0.4%~14.65%,但提供的面孔率均小于 0.3%。

(3)含泥灰岩。5 个含泥灰岩样品扫描电镜定量分析总面孔率为 1.68%~4.77%,平均为 3.246%。含泥灰岩主要储集空间为泥质粒间孔,孔隙数量占 57.94%~90.57%,面孔率为 0.38%~1.56%,平均面



a.泥质碎粒间孔, 3 029.18 m　b.泥质灰岩溶蚀孔, 2 986.00 m　c.黄铁矿晶间孔, 2 986.00 m
d.白云石晶间孔, 3 133.55 m　e.灰岩晶内孔, 3 065.08 m　f.泥质灰岩晶内孔, 2 986.00 m

图 4　渤海湾盆地沾化凹陷沙三下亚段页岩微观孔隙类型

Fig.4　Microscopic pore types of shale in the lower section of Es_3 in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

孔率为 1.106%。次要储集空间为方解石溶蚀孔,孔隙数量占 0.4%~33.99%,面孔率为 0.82%~1.78%,平均为 1.0%。方解石晶间孔数量占 6.16%~41.7%,提供的面孔率均小于 0.6%。

(4)灰岩夹层。页岩油层段中灰岩一般呈夹层分布,2 个泥质灰岩样品扫描电镜定量分析总面孔率为 0.54%和 0.51%,孔隙发育很差。孔隙数量以方解石晶间孔为主,数量百分比分别为 94.98%和 97.83%,提供的面孔率分别为 0.31%和 0.24%。数量较少的溶蚀孔提供的面孔率可达 0.23%和 0.27%。

4.2　不同岩性的孔径分布及其孔隙面积贡献

利用岩样微观孔隙类型图像处理获得了每个单一孔隙的孔径及其面积大小,统计了页岩油层段典型岩性不同孔径的孔隙数量和孔隙面积百分比分布(图 5)。页岩油储层孔隙数量上主要由纳米级和微米级孔隙组成,数量上纳米级孔隙占绝对优势[1],孔隙数量随孔径增大呈指数式急剧下降,但储层孔隙面积主要由不占数量优势的微米级孔隙提供,即页岩油层段的主要储集空间属于微米级孔隙。

(1)灰质泥岩。根据 6 个灰质泥岩样品 29 088 个孔隙的孔径及孔隙面积资料统计(图 5a),孔隙孔径小于 100 nm 的孔隙数量占 52.22%,但孔隙面积贡献仅为 1.4%。孔径小于 1 000 nm 的孔隙数量占 97.2%,孔隙面积贡献仅为 28.3%。孔径大于 1 000 nm的孔隙数量只占 2.8%,孔隙面积贡献为 71.7%。孔径大于 3 000 nm 的孔隙数量只占 0.3%,孔隙面积贡献为 40.1%。显然,灰质泥岩孔隙面积贡献主要由孔径大于 1 000 nm 的微米级孔隙所提供。

(2)泥质灰岩。根据 5 个泥质灰岩样品 17 141 个孔隙的不同孔径孔隙数量及其孔隙面积分布统计(图 5b),孔径小于 100 nm 的孔隙数量占 49.5%,孔隙面积贡献仅 3.0%。孔径小于 1 000 nm 的孔隙数量占 98.1%,孔隙面积贡献为 47.8%。孔径大于 1 000 nm的孔隙数量只占 1.9%,但孔隙面积贡献为 52.2%。孔隙面积贡献较大的孔径范围为 2 000~5 000 nm,这一孔径范围的孔隙面积贡献为 26.0%。

(3)含泥灰岩。根据 5 个含泥灰岩样品 10 320 个孔隙的不同孔径孔隙数量及其孔隙面积分布统计(图 5c),孔径小于 100 nm 的孔隙数量占 58.8%,孔隙面积贡献仅为 2.2%。孔径小于 1 000 nm 的孔隙数量占 98.2%,但孔隙面积贡献仅为 41.2%。而孔径大于 1 000 nm 的孔隙数量只占 1.8%,但孔隙面积贡献为 58.8%。孔隙面积贡献较大的孔径范围为 2 000~5 000 nm,这一孔径范围的孔隙面积贡献为 31.1%。

5　结论

渤海湾盆地沾化凹陷沙三下亚段页岩油层段

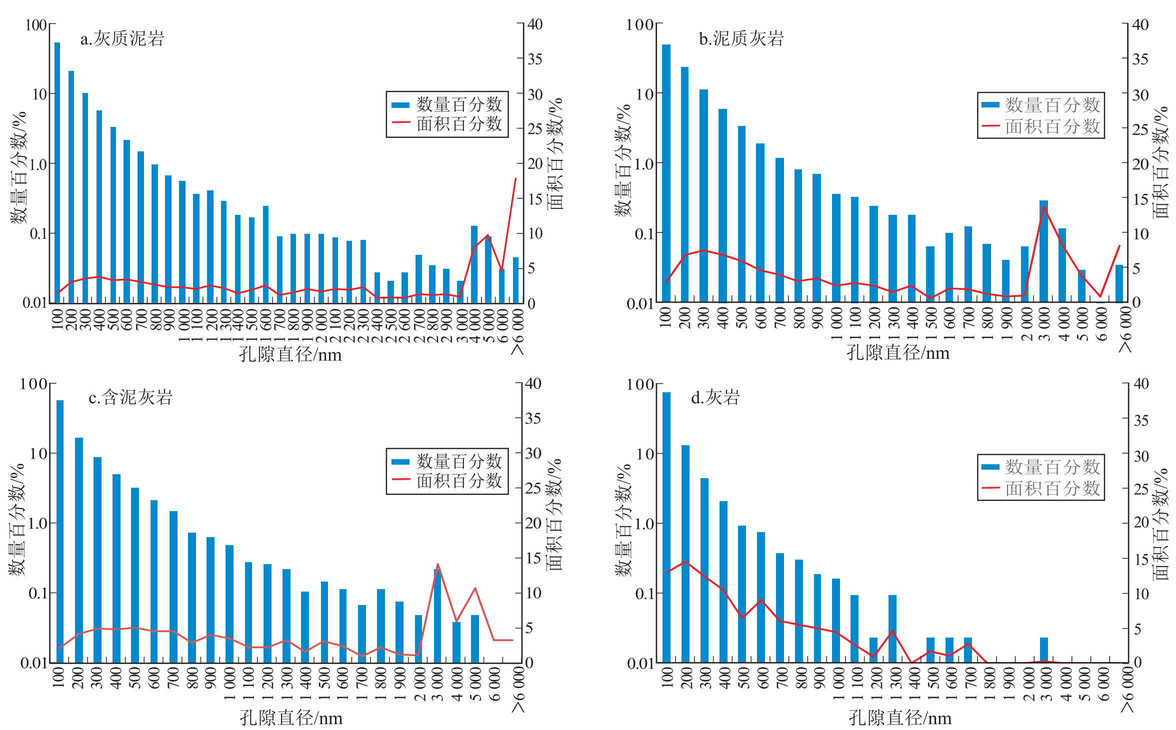


图 5　沾化凹陷沙三下亚段不同岩性的孔隙数量和孔隙面积分布统计

Fig.5　Pore quantity and area distribution of different lithologies in the lower section of Es_3 in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

以灰质泥岩、泥质灰岩和含泥灰岩为主,夹少量灰岩薄层,主要包括泥质碎片间微孔和碳酸盐矿物的溶蚀孔、晶间孔和晶内孔等孔隙类型。泥质部分的泥质粒间孔构成了页岩油储层的主要孔隙。灰质泥岩孔隙发育优于泥质灰岩,灰岩孔隙发育最差。页岩油储层孔隙孔径均为纳米级和微米级,纳米级孔隙数量占绝对优势,数量较少的微米级孔隙提供了页岩油储层的孔隙面积。微米级孔隙应该作为页岩油勘探开发的主要对象。

参考文献:

[1] 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):1857-1864.
Zou Caineng,Zhu Rukai,Bai Bin,et al.First discovery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value[J]. Acta Petrologica Sinica,2011,27(6):1857-1864.

[2] 聂海宽,唐玄,边瑞康.页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J].石油学报,2009,30(4):484-491.
Nie Haikuan,Tang Xuan,Bian Ruikang. Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China[J].Acta Petrolei Sinica,2009,30(4):484-491.

[3] Cusack C,Beeson J,Stoneburner D,et al.The discovery,reservoir attributes,and significance of the Hawkville field and Eagle Ford shale trend,Texas[J].Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions,2010,60:165-179.

[4] Keller L M,Schuetz P,Erni R,et al. Characterization of multi-scale microstructural features in Opalinus clay[J]. Microporous and Mesoporous Materials,2013,170:83-94.

[5] 贾承造,郑民,张永峰.中国非常规油气资源与勘探开发前景[J].石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.
Jia Chengzao,Zheng Min,Zhang Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J].Petroleum Exploration and Development,2012,39(2):129-136.

[6] 张林晔,李钜源,李政,等.北美页岩油气研究进展及对中国陆相页岩油气勘探的思考[J].地球科学进展,2014,29(6):700-711.
Zhang Linye,Li Juyuan,Li Zheng,et al. Advances in shale oil/gas research in North America and considerations on exploration for continental shale oil/gas in China[J].Advances in Earth Science,2014,29(6):700-711.

[7] Slatt R M,O'Brien N R.Pore types in the Barnett and Woodford gas shales:Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12):2017-2030.

[8] Nelson P H.Pore-throat sizes in sandstones,tight sandstones,and shales[J].AAPG Bulletin,2009,93(3):329-340.

[9] Kuila U,Prasad M.Specific surface area and pore-size distribution in clays and shales[J]. Geophysical Prospecting, 2013, 61(2):341-362.

[10] 杨超,张金川,李婉君,等.辽河坳陷沙三、沙四段泥页岩微观孔隙特征及其成藏意义[J].石油与天然气地质,2014,35(2):286-294.
Yang Chao,Zhang Jinchuan,Li Wanjun,et al. Microscopic pore characteristics of Sha-3 and Sha-4 shale and their accumulation significance in Liaohe Depression[J].Oil & Gas Geology,2014,35(2):286-294.

[11] 刘伟新,朱晓军,马安林,等.不同泥岩相有机质赋存特征及对比表面积的影响:以渤海湾盆地沾化凹陷古近系为例[J].石油实验地质,2016,38(2):204-210.
Liu Weixin,Zhu Xiaojun,Ma Anlin,et al.Occurrence of organic matter in different mudstone lithofacies and its influence on specific surface area:A case study of the Paleogene in the Zhanhua Sag,Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016,38(2):204-210.

[12] 张盼盼,刘小平,王雅杰,等.页岩纳米孔隙研究新进展[J].地球科学进展,2014,29(11):1242-1249.
Zhang Panpan,Liu Xiaoping,Wang Yajie,et al. Research progress in shale nanopores[J].Advances in Earth Science,2014,29(11):1242-1249.

[13] 李钜源.渤海湾盆地东营凹陷古近系泥页岩孔隙特征及孔隙度演化规律[J].石油实验地质,2015,37(5):566-574.
Li Juyuan.Pore characteristics and their evolution in Paleogene mud shales,Dongying Sag,Bohai Bay Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2015,37(5):566-574.

[14] Sondergeld C H,Ambrose R J,Rai C S,et al. Micro-structural studies of gas shales[C]//Society of Petroleum Engineers Unconventional Gas Conference.Pittsburgh,Pennsylvania:SPE, 2010:17.

[15] 聂海宽,张金川.页岩气储层类型和特征研究:以四川盆地及其周缘下古生界为例[J].石油实验地质,2011,33(3):219-225.
Nie Haikuan,Zhang Jinchuan.Types and characteristics of shale gas reservoir: A case study of Lower Paleozoic in and around Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(3):219-225.

[16] 白志强,刘树根,孙玮,等.四川盆地西南雷波地区五峰组—龙马溪组页岩储层特征[J].成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(5):521-531.
Bai Zhiqiang,Liu Shugen,Sun Wei,et al.Reservoir characteristics of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in southwest of Sichuan Basin,China[J].Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition),2013,40(5):521-531.

[17] 刘惠民,张守鹏,王朴,等.沾化凹陷罗家地区沙三段下亚段页岩岩石学特征[J].油气地质与采收率,2012,19(6):11-15.
Liu Huimin,Zhang Shoupeng,Wang Pu,et al.Lithologic characteristics of lower Es_3 shale in Luojia area,Zhanhua Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2012,19(6):11-15.

[18] 王永诗,李政,巩建强,等.济阳坳陷页岩油气评价方法:以沾化凹陷罗家地区为例[J].石油学报,2013,34(1):83-91.
Wang Yongshi,Li Zheng,Gong Jianqiang,et al.Discussion on an evaluation method of shale oil and gas in Jiyang Depression: A case study on Luojia area in Zhanhua Sag[J].Acta Petrolei Sinica,2013,34(1):83-91.

(下转第 194 页)

in a field in the southwestern Malay Basin[J].SPE Drilling & Completion,2015,30(3):198-211.

[15] 刘金水.西湖凹陷平湖构造带地层压力特征及与油气分布的关系[J].成都理工大学学报(自然科学版),2015,42(1):60-69.
Liu Jinshui.Characteristics of formation pressure and their relationship with hydrocarbon distribution in Pinghu tectonic belt of Xihu Sag,East China Sea[J].Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition),2015,42(1):60-69.

[16] 叶加仁,顾惠荣,贾健谊.东海陆架盆地西湖凹陷油气成藏动力学[J].天然气工业,2005,25(12):5-8.
Ye Jiaren, Gu Huirong, Jia Jianyi. Research on the hydrocarbon accumulation dynamics of Xihu Sag,East China Sea Shelf Basin[J]. Natural Gas Industry,2005,25(12):5-8.

[17] 姜文斌,陈永进,李敏.东海盆地西湖凹陷成藏动力系统特征[J].特种油气藏,2011,18(5):33-36.
Jiang Wenbin,Chen Yongjin,Li Min.Characteristics of migration-accumulation dynamic system in the Xihu Depression,East China Sea Basin[J].Special Oil and Gas Reservoirs,2011,18(5):33-36.

[18] Chow Y K,Yong D M,Yong K Y,et al.Dynamic compaction analysis[J].Journal of Geotechnical Engineering,1992,118(8):1141-1157.

[19] Tingay M R P,Hillis R R,Swarbrick R E,et al.Origin of overpressure and pore-pressure prediction in the Baram province,Brunei[J].AAPG Bulletin,2009,93(1):51-74.

[20] 何将启.东海西湖凹陷构造—热历史分析[D].上海:同济大学,2004:92.
He Jiangqi.Tectono-thermal history of Xihu Depression,East China Sea[D].Shanghai:Tongji University,2004:92.

[21] Yang Fengli,Yu Haixiao,Zhang Qinglin,et al.Correlations between shortening rate,uplift rate,and inversion rate in central inversion zone of Xihu Depression,East China Sea Basin[J].Journal of Earth Science,2009,20(4):699-708.

[22] 胡望水,蔡峰,胡芳,等.东海西湖凹陷平湖斜坡带裂陷期变换构造特征及其演化规律[J].石油天然气学报,2010,32(3):7-12.
Hu Wangshui,Cai Feng,Hu Fang,et al.The characteristics of tectonic transform evolutional rules of chasmic cycles in Pinghu Slope of Xihu Depression of East China Sea[J].Journal of Oil and Gas Technology,2010,32(3):7-12.

[23] 陈琳琳,王文强.东海陆架盆地西湖凹陷深层烃源岩探讨[J].海洋石油,1999(2):1-8.
Chen Linlin,Wang Wenqiang.Discussion on the source rock of deep strata in Xihu trough,the East China Sea[J].Offshore Oil,1999(2):1-8.

[24] 仝志刚,贺清,何仕斌,等.东海西湖凹陷地温场及其对烃源岩的作用[J].石油实验地质,2009,31(5):466-471.
Tong Zhigang,He Qing,He Shibin,et al.Geothermal field and its effecton source rock in the Xihu Sag,the East China Sea Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2009,31(5):466-471.

[25] 徐国盛,赵莉莉,徐发,等.西湖凹陷某构造花港组致密砂岩储层的渗流特征[J].成都理工大学学报(自然科学版),2012,39(2):113-121.
Xu Guosheng,Zhao Lili,Xu Fa,et al.Seepage flow characteristics of tight sandstone reservoirs in Huagang Formation in a certain structure of Xihu Depression in East China Sea Basin[J].Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition),2012,39(2):113-121.

[26] 蔡全升,胡明毅,胡忠贵,等.东海盆地西湖凹陷中央隆起带古近系花港组储层特征及成岩孔隙演化[J].天然气地球科学,2013,24(4):733-740.
Cai Quansheng,Hu Mingyi,Hu Zhonggui,et al.Reservoir characteristics and evolution of diagenetic porosity of Huagang Formation of Paleogene in the central anticlinal belt of Xihu Sag,Donghai Basin[J].Natural Gas Geoscience,2013,24(4):733-740.

[27] 张远兴.东海西湖凹陷流体动力场演化及其对油气成藏的影响作用[D].武汉:中国地质大学(武汉),2009:1-6.
Zhang Yuanxing.The evolution of fluid dynamic field and its impaction on hydrocarbon accumulation in Xihu depression,East China Sea Shelf Basin[D].Wuhan:China University of Geoscience(Wuhan),2009:1-6.

[28] Eadington P J,Hamilton P J,Bai G P.Fluid history analysis:A new concept for prospect evaluation[J].APEA Journal,1991,31(1):282-294.

[29] Oxtoby N H,Mitchell A W,Gluyas J G.The filling and emptying of the Ula Oilfield:Fluid inclusion constraints[M]//Cubitt J M,England W A.The geochemistry of reservoirs.London,UK:Geological Society Special Publications,1995:141-157.

[30] 王飞宇,金之钧,吕修祥,等.含油气盆地成藏期分析理论和新方法[J].地球科学进展,2002,17(5):754-762.
Wang Feiyu,Jin Zhijun,Lv Xiuxiang,et al.Timing of petroleum accumulation:Theory and new methods[J].Advance in Earth Sciences,2002,17(5):754-762.

(编辑 徐文明)

(上接第 185 页)

[19] 王鸿升,胡天跃.渤海湾盆地沾化凹陷页岩油形成影响因素分析[J].天然气地球科学,2014,25(1):141-149.
Wang Hongsheng,Hu Tianyue.Analysis of influence factors of shale oil formation in Zhanhua Depression of Bohai Bay Basin[J].Natural Gas Geoscience,2014,25(1):141-149.

[20] 武晓玲,高波,叶欣,等.中国东部断陷盆地页岩油成藏条件与勘探潜力[J].石油与天然气地质,2013,34(4):455-462.
Wu Xiaoling,Gao Bo,Ye Xin,et al.Shale oil accumulation conditions and exploration potential of faulted basins in the east of China[J].Oil & Gas Geology,2013,34(4):455-462.

[21] 康仁华,刘魁元,赵翠霞,等.济阳坳陷渤南洼陷古近系沙河街组沉积相[J].古地理学报,2002,4(4):19-29.
Kang Renhua,Liu Kuiyuan,Zhao Cuixia,et al.Sedimentary facies of the Shahejie Formation of Paleogene in Bonan Sag of Jiyang Depression[J].Journal of Palaeogeography,2002,4(4):19-29.

(编辑 韩 彧)