

渤海湾盆地沾化凹陷沙三下亚段页岩油层段 微观孔隙结构

张磊磊¹, 陆正元¹, 王 军², 田同辉², 王兴建¹

(1. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 中国石化 胜利油田分公司, 山东 东营 257000)

摘要:通过岩心观察、薄片鉴定、X-衍射、物性和有机质等分析测试工作,揭示了页岩油储层矿物成分、物性、有机质和岩性等地质特征,并在此基础上利用氩离子抛光-扫描电镜技术,分析研究了页岩油储层孔隙类型、结构等特征及其对储集性的影响。测试和研究表明,渤海湾盆地沾化凹陷沙河街组三段下亚段(沙三下亚段)矿物成分主要为粘土矿物、碳酸盐矿物和陆源碎屑,孔隙度和渗透率均很低,有机碳含量为0.52%~9.32%,干酪根类型为I型,镜质体反射率(R_o)为0.7%~0.93%,岩性主要为泥质灰岩、灰质泥岩和含泥质灰岩,含少量灰质白云岩。通过氩离子抛光-扫描电镜实验,对罗69井10块钻井岩心样品进行了定性观察和定量统计。根据孔隙特征将孔隙分为微孔隙和微裂缝,微孔隙包括粒间孔、晶间孔、溶蚀孔和晶内孔。微裂缝、溶蚀孔、大孔径晶间孔和粒间孔是页岩油储层的主要储集空间。因主要孔隙类型和发育情况不同,不同岩性的岩石储集性存在差异,灰质白云岩储集性最好,灰质泥岩、泥质灰岩和含泥质灰岩依次变差,灰岩最差。

关键词:氩离子抛光;扫描电镜;孔隙结构;页岩油;沾化凹陷

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Microscopic pore structure of shale oil reservoirs in the Lower 3rd Member of Shahejie Formation in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

Zhang Leilei¹, Lu Zhengyuan¹, Wang Jun², Tian Tonghui², Wang Xingjian¹

(1. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China)

Abstract: Core observation, thin section identification, X-ray diffraction, physical property and organic matter testing are integrated to reveal the mineral composition, physical properties, organic matter and lithology of the shale oil reservoirs in the Lower 3rd Member of Shahejie Formation in Zhanhua Sag, the Bohai Bay Basin. And the characteristics of pore types and structure and their influences on reservoir property are analyzed by using Argon-ion milling and scanning electron microscope (SEM) technique. The mineral compositions of the target strata are dominated by clay, carbonate and terrigenous clastics. Both the porosity and permeability are low. The kerogen belongs to type I with high total organic carbon (TOC) content in the range of 0.52%~9.32% and vitrinite reflectance (R_o) in the range of 0.7%~0.93%. The lithologies are dominated by argillaceous limestone, limy mudstone and mud bearing limestone, with minor limy dolomite. With Argon-ion milling and SEM method, we studied 10 core samples from Well Luo 69 via qualitative analysis and quantitative statistics. According to the pore characteristics, pores can be divided into micropores and microcracks. The micropores can be further subdivided into intergranular pore, intercrystalline pore, dissolved pore and intracrystalline pore. The microcracks, dissolved pores, large intercrystalline pores and intergranular pores provide the main reservoir space for the shale oil reservoir. Pore types and distribution vary with different reservoir lithologies, which control the reservoir storage capacity. The limy dolomite is the best in storage capacity, followed by limy mudstone, argillaceous limestone and mud bearing limestone, and the limestone is the least.

Key words: Argon-ion milling, SEM, pore structure, shale oil, Zhanhua Sag

收稿日期:2015-03-11;修订日期:2016-01-05。

第一作者简介:张磊磊(1990—),男,硕士研究生,油气田开发地质。E-mail:498385409@qq.com。

通讯作者简介:陆正元(1963—),男,教授、博士生导师,油气田开发地质。E-mail:lzy@cdut.edu.cn。

基金项目:中国石化页岩油开发基础研究项目(P13059)。

作为常规油气资源的有效接替,页岩油气在非常规能源中异军突起,成为全球油气资源勘探开发的新亮点,而页岩油也成为近期研究热点^[1-3]。页岩油是指富有机质泥页岩层系中,主要以游离态和吸附态赋存于泥页岩及粉砂岩、砂岩、碳酸盐岩等夹层的孔隙、裂缝中,通过水平井多段压裂等技术手段才能实现规模经济开采的烃类资源^[4-5]。储层研究是页岩油基础地质研究的重点,其中孔隙类型、大小及组合等影响了储层的储集性和渗透性^[6-7]。

济阳拗陷具有丰富的页岩油气资源^[8-10]。沾化凹陷罗家地区古近系沙河街组三段下亚段(沙三下亚段)泥页岩厚度大,为该段工业油流、解释油层最多的地区。罗69井是沾化凹陷的1口重点取心井。前人对罗69井矿物组成、有机质、孔隙度和渗透率等方面进行了大量的分析化验和研究工作^[11-16],但在孔隙类型及其对储层储集性能的影响等方面缺乏深入研究。

本文主要通过氩离子抛光-扫描电镜实验,对沾化凹陷页岩油储层不同孔隙类型进行定性观察和定量统计,研究页岩油储层的孔隙类型、特征及其对储集性的影响。

1 区域概况

沾化凹陷为渤海湾盆地济阳拗陷内的一个三级构造单元。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^[17]。罗家鼻状构造带位于沾化凹陷北部(图1)。罗家地区沙三下亚段沉积时处于半干旱、半湿润气候条件下的咸水封闭湖泊的半深湖-深湖亚相,属于还原-强还原环境。

2 地质特征

2.1 矿物组分

岩心观察、薄片鉴定及X-衍射全岩矿物分析显示,罗69井沙三下亚段矿物成分主要为粘土矿物、碳酸盐矿物和陆源碎屑,含少量黄铁矿(图2)。

粘土矿物主要为伊-蒙混层,伊利石次之,少量高岭石及绿泥石,平均相对含量分别为61.4%、29.6%、6.2%和2.8%,且随着深度的加深,伊-蒙混层和伊利石的含量增加,高岭石和绿泥石的含量减少。粘土矿物呈鳞片结构,常与泥级陆源碎屑混合,总体呈层状产出,并常常混含隐晶碳酸盐矿物和有机质。

碳酸盐矿物主要是方解石和白云石,平均含量分

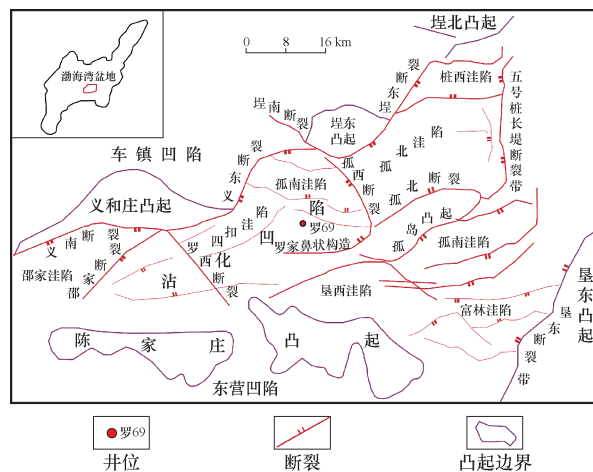


图1 沾化凹陷位置及罗家地区井位分布

Fig. 1 Location of the Zhanhua Sag and well distribution in Luo family area

别为52.07%和5.85%。方解石以隐晶结构为主,次为显微晶和微晶结构,主要呈层状产出,常以泥晶状纹层存在。部分层段存在方解石重结晶现象。白云石大多呈自形晶体,且大多存在于粘土层内。

陆源碎屑主要是石英,含有少量长石。据X-衍射数据统计,石英含量一般为10%~30%,可能是由于陆源碎屑输入量的增加,随着埋深逐渐变浅,石英含量逐渐增加。

2.2 物性和有机质特征

罗69井沙三下亚段孔隙度为1.2%~15.3%,主要集中在2%~10%,孔隙度低(图2)。渗透率为 $0.0067 \times 10^{-3} \sim 760 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,一般为 $1 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其次为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,渗透率低(图2),渗透率受裂缝影响较大。

罗69井沙三下亚段富含有机质,有机碳含量为0.52%~9.32%,主要为2%~6%(图2)。干酪根类型为I型,镜质体反射率 R_o 为0.7%~0.93%,热裂解峰温 $T_{\max}$ 为424~466℃,主要处于生油阶段,整体上以液态烃为主。

2.3 岩性特征

罗69井沙三下亚段岩性以泥质灰岩、灰质泥岩和含泥质灰岩为主,含少量含灰质泥岩、灰岩、灰质白云岩等其他岩性。

泥质灰岩为灰色和深灰色,有机质含量较高时为灰黑色-深灰色,碳酸盐含量大于50%,粉砂质陆源碎屑含量低,单层厚度较大,是沙三下亚段的主要岩石类型。方解石含量较高,多以泥晶形式出现,与泥质相互混杂。受有机质生烃演化的影响,泥质灰岩孔隙结构复杂,孔隙度主要为2%~9%。

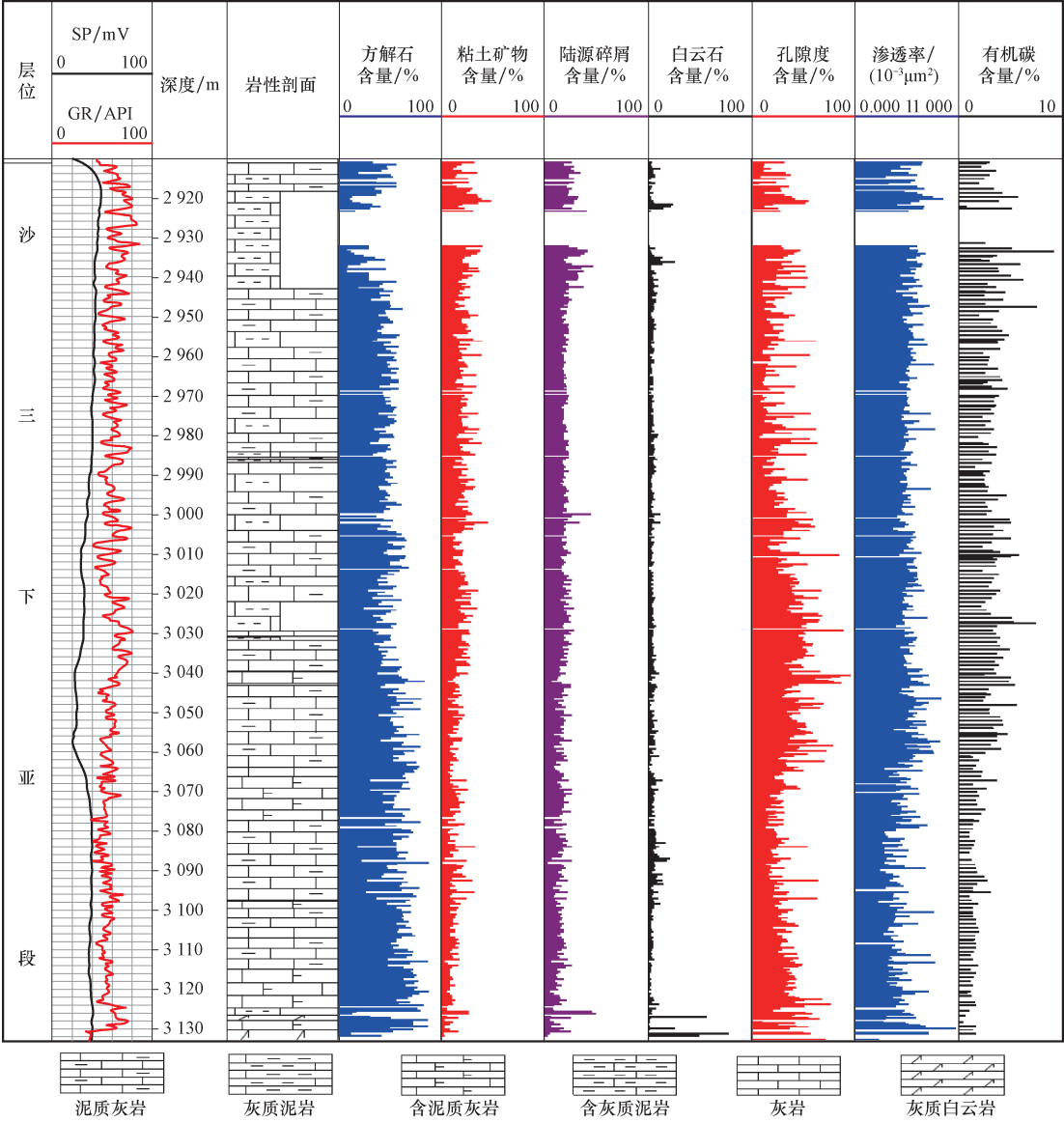


图 2 沾化凹陷罗 69 井沙三下亚段地层综合柱状图

Fig. 2 Stratigraphic diagram of the Lower 3rd Member of Shahejie Formation in Well 69, the Zhanhua Sag

灰质泥岩为深灰色,泥晶方解石与泥质组分混杂分布,泥质含量较高,碳酸盐矿物含量低。灰质泥岩富含有机质,生烃时释放的有机酸会溶蚀长石、方解石等矿物,改善岩石储集性,其孔隙度主要为 5%~10%。

含泥质灰岩颜色为灰色、深灰色,方解石含量可达 70% 以上,粘土矿物以及粉砂质陆源碎屑含量低,岩石较致密,孔隙发育较差,孔隙度主要为 3%~7%。

灰岩为深灰色,方解石含量最高,致密化程度高,少量泥质组分,孔隙发育差,孔隙度低。

灰质白云岩为深灰色,主要由白云石和方解石、泥质组成,白云石、方解石多为隐晶结构,泥质混含于白云质中。

对罗 69 井沙三下亚段主要岩性的孔隙度进行了统计(图 3),灰质白云岩孔隙度最高,灰质泥岩、泥质灰岩和含泥质灰岩依次降低,灰岩孔隙度最低。

3 实验和样品

实验采用仪器为油气藏地质及开发工程国家重点

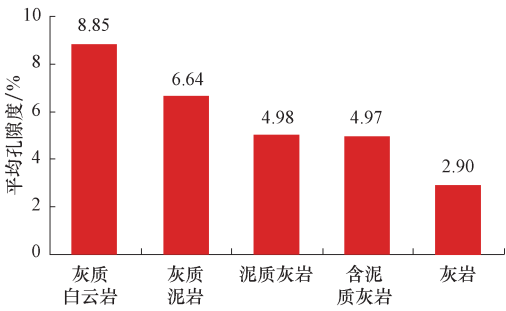


图 3 沾化凹陷罗 69 井沙三下亚段不同岩性孔隙度直方图

Fig. 3 Porosity histogram of different lithologies in the Lower 3rd Member of Shahejie Formation in Well 69, the Zhanhua Sag

实验室 Quanta 250 FEG + Inca X-max20 场发射扫描电镜。将氩离子抛光后的样品薄片放入仪器中进行观察,并选取具代表性的横截面拍照生成二维平面图像^[18-20]。FIB-SEM 二维平面图像有利于纳米级微观孔隙的观察。通过 CorelDRAW 软件将二维平面图像中各类型孔隙进行识别,用不同颜色加以圈定、区分和定量分析,得出所分析样品的孔隙类型及其相应的面孔率等数据。

选取罗 69 井沙三下亚段不同岩性具有代表性的 10 块样品,进行了氩离子抛光-扫描电镜实验。根据孔隙特征,将孔隙分为微孔隙和微裂缝两大类,其中微孔隙包括粒间孔、晶间孔、溶蚀孔和晶内孔,微裂缝包括异常压力缝、层间微裂缝和成岩收缩缝,并将镜下可以观察到的各类孔隙进行统计(表 1)。

4 孔隙特征

4.1 微孔隙

4.1.1 粒间孔

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等(图 4a,b)。因颗粒大小、形态、接触关系等不同,粒间孔的大小和形态各异。粒间孔最小 24 nm,最大为 4 318 nm,主要分布在 60 ~ 800 nm。

不同岩性样品的粒间孔数量和粒间孔占总孔隙数的比例差异较大。4 号样品灰质泥岩粒间孔个数为 8 048 个,孔隙数比例为 57.78%;12 号样品泥质灰岩粒间孔个数为 2 302 个,孔隙数比例为 64.95%,且 4 号样品比 12 号样品面孔率大。受矿物成分含量、颗粒大小和形态、埋深及成岩作用等影响,相同岩性样品的粒间孔发育情况也不同,如 3 号样品和 4 号样品。从整体上看,泥质含量较高样品的粒间孔面孔率大,表明

泥质含量高的岩石易发育粒间孔。

4.1.2 晶间孔

晶间孔多为晶体生长过程中不紧密堆积形成。晶间孔主要是草莓状黄铁矿晶间孔、粘土矿物晶间孔和方解石晶间孔,灰质白云岩中可见到白云石晶间孔(图 4c—e)。晶间孔最小为 19 nm,最大为 3 846 nm,主要分布在 200 ~ 1 200 nm。

方解石含量较高的岩石,晶间孔数量多,但面孔率比例小。方解石多以泥晶形式出现,晶间孔较小,同时在压实作用和泥质填充作用下,晶间孔进一步减小。因方解石含量高且致密,8 号、13 号灰岩样品没有观察到晶间孔。12 号泥质灰岩样品晶间孔发育较差,可能由于泥质与方解石相互混杂,泥质抑制了晶间孔的形成。如果方解石发生白云石化,则会形成孔径较大的白云石晶间孔。

虽然粘土矿物间可以形成晶间孔,但粘土矿物易发生塑性变形,在压实作用下,粘土矿物晶间孔较难保存。泥质含量高的岩样中,晶间孔多见黄铁矿晶间孔和方解石晶间孔。

沙三下亚段为半深湖-深湖沉积,为缺氧的还原环境,伴生较多黄铁矿。黄铁矿多为草莓状,簇状生长,有利于形成黄铁矿晶间孔。

4.1.3 溶蚀孔

深埋藏下不稳定矿物(如长石、碳酸盐矿物等)常发育溶蚀孔,多与有机质生烃有关。溶蚀孔主要包括粒间溶蚀孔和粒内溶蚀孔(图 4f,g)。溶蚀孔的发育受矿物成分和溶蚀强度决定,最小为 24 nm,最大为 6 960 nm,孔径大小分布较分散。4 号样品灰质泥岩的溶蚀孔共 4 047 个,面孔率为 0.25%;14 号样品含泥质灰岩的溶蚀孔共 1 083 个,面孔率为 3.77%。4 号样品

表 1 沾化凹陷罗 69 井沙三下亚段样品中各类孔隙数量、面孔率及总面孔率统计

Table 1 Quantity and surface porosity of various pores and total surface porosity of samples from the Lower 3rd Member of Shahejie Formation in Well 69, the Zhanhua Sag

样品号	深度/ m	岩性	粒间孔		晶间孔		溶蚀孔		晶内孔		微裂缝		总面孔率/%
			孔隙 个数	面孔 率/%	孔隙 个数	面孔 率/%	孔隙 个数	面孔 率/%	孔隙 个数	面孔 率/%	孔隙 个数	面孔 率/%	
1	2 932.57	灰质泥岩	3 495	2.97	166	0.01	1 453	3.01	2 242	0.07	4 571	3.99	10.05
3	2 985.97	灰质泥岩	7 569	0.68	—	—	39	0.80	1 955	0.07	567	5.07	6.62
4	3 029.18	灰质泥岩	8 048	3.05	—	—	4 047	0.25	445	0.01	1 389	2.21	5.52
6	3 129.45	含泥质灰岩	—	—	2 708	1.12	22	0.76	113	—	2 197	0.80	2.68
8	3 065.08	灰岩	188	0.06	—	—	59	0.23	5 487	0.19	141	0.06	0.54
9	3 069.57	含泥质灰岩	5 565	0.17	5	0.55	168	1.57	881	0.02	2 191	0.62	2.93
12	2 985.47	泥质灰岩	2 302	0.80	23	0.03	179	0.62	388	0.01	652	2.17	3.63
13	3 028.90	灰岩	497	0.07	—	—	44	0.27	5 470	0.12	1 464	0.05	0.51
14	3 041.65	含泥质灰岩	1 730	0.33	—	—	1 083	3.77	1 294	0.02	927	0.05	4.17
19	3 133.55	灰质白云岩	—	—	847	7.26	41	5.28	—	—	—	—	12.54

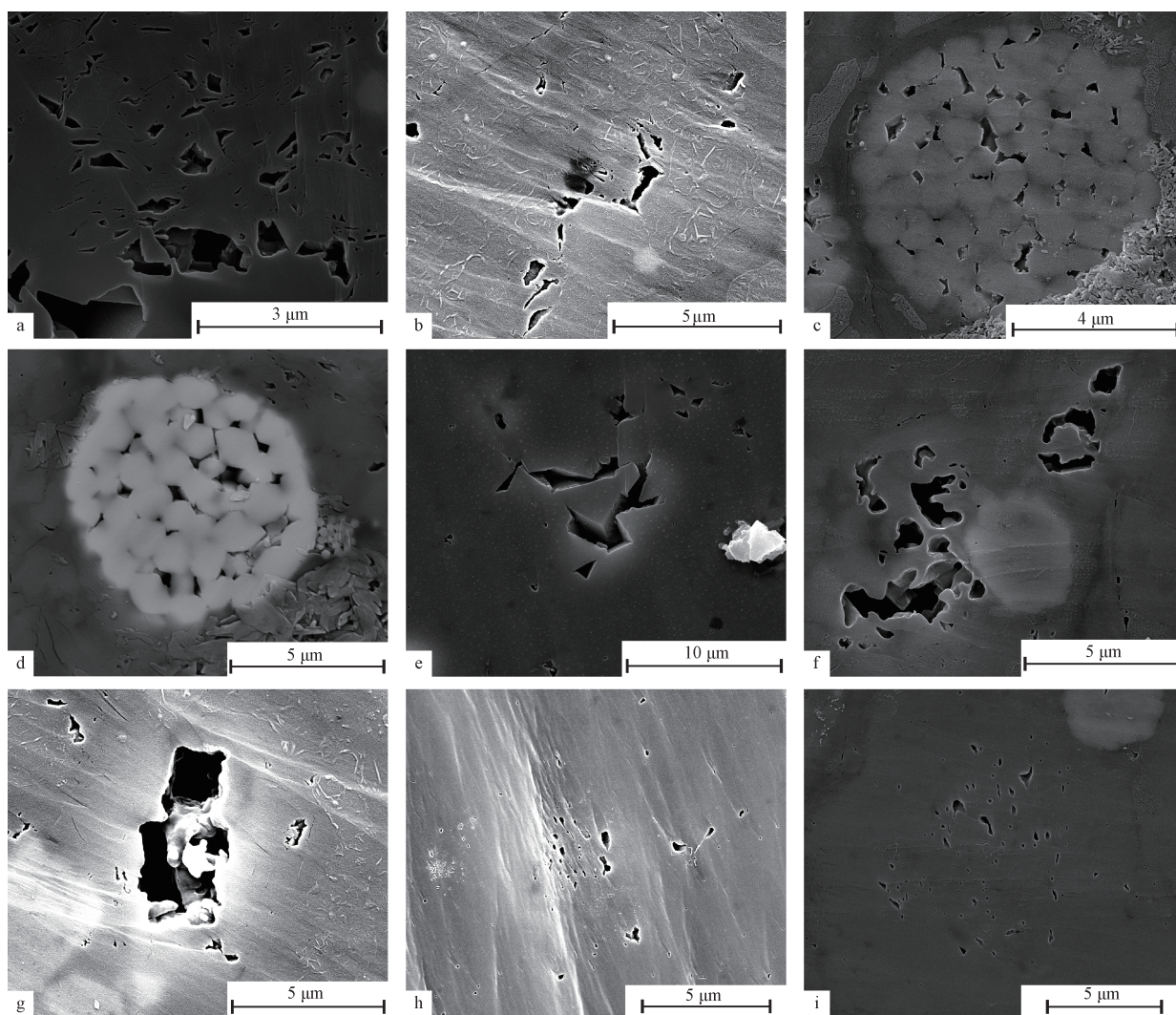


图4 沾化凹陷罗69井沙三下亚段不同岩性微观孔隙结构特征

Fig. 4 Microscopic pore structure characteristics of different lithologies in the Lower 3rd

Member of Shahejie Formation in Well 69, the Zhanhua Sag

a. 灰质泥岩, 泥质碎片间粒间孔, 埋深3 029.18 m, FIB-SEM; b. 灰岩, 泥质碎片间微孔, 埋深3 028.9 m, FIB-SEM; c. 泥质灰岩, 黄铁矿晶间孔, 埋深2 986 m, FIB-SEM; d. 灰质泥岩, 草莓状黄铁矿晶间孔, 埋深2 932.57 m, FIB-SEM; e. 灰质白云岩, 白云石晶间孔, 埋深3 133.55 m, FIB-SEM; f. 泥质灰岩, 溶蚀孔, 埋深2 986 m, FIB-SEM; g. 灰岩, 溶蚀孔, 见油迹, 埋深3 028.9 m, FIB-SEM; h. 灰岩, 晶内孔, 埋深3 065.08 m, FIB-SEM; i. 泥质灰岩, 方解石晶内孔, 埋深2 986 m, FIB-SEM

溶蚀孔的数量约为14号样品的3.7倍, 但面孔率仅为14号样品的1/15左右。

泥质含量较高的岩石中易发育小孔径的溶蚀孔, 方解石含量较高的岩石中则常见大孔径的溶蚀孔。整体而言, 溶蚀孔有利于改善储层的储集性。

4.1.4 晶内孔

晶内孔是指晶体内部的微小孔隙。在一些晶体内部存在许多微小孔隙, 孔径小, 难以观察。本文中的晶内孔多指粘土矿物晶内孔和方解石晶内孔(图4h, i)。晶内孔的主要特点是分布不均, 数量差异性大, 孔径小, 面孔率低。晶内孔最小为19 nm, 最大为346.6 nm, 大部分不超过80 nm, 对储层储集性的影响小。

4.2 微裂缝

沾化凹陷沙三下亚段微裂缝十分发育。微裂缝主要包括异常压力缝、层间微裂缝和成岩收缩缝3种类型。微裂缝长度大小不一, 最小为19 nm, 最大为13 204 nm, 差异性较大。

层间微缝发育于层状、纹层状灰质泥岩、泥质灰岩、含泥质灰岩等岩性互层的层理面上, 长度为100~500 nm, 部分长度约1 μm, 多见油迹充填, 是有利的储集空间及运移通道。异常压力缝和成岩收缩缝一般缝面不规则, 长度在200~800 nm, 多见油迹充填, 是泥岩、灰质泥岩中主要的储集空间类型之一(图5)。

泥质含量较高的岩石具有较大的微裂缝面孔率。3号样品灰质泥岩微裂缝数量为567条, 面孔率为

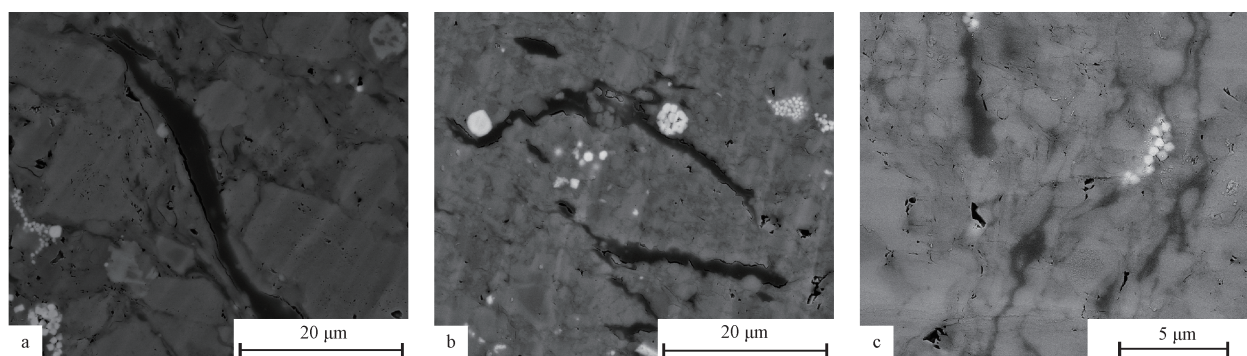


图5 沾化凹陷罗69井沙三下亚段液态烃在微裂缝中的赋存特征

Fig. 5 Occurrence characteristics of liquid hydrocarbon in micro-cracks in the Lower 3rd

Member of Shahejie Formation in Well 69, the Zhanhua Sag

- a. 灰质泥岩,微裂缝充填有机质,埋深2 932.57 m, FIB-SEM; b. 灰质泥岩,微缝较发育,充填有机质,埋深2 985.97 m, FIB-SEM;
c. 泥质灰岩,油迹较发育,主要充填微缝,埋深2 986 m, FIB-SEM

5.07%;12号样品泥质灰岩微裂缝数量为652条,面孔率为2.17%;14号样品含泥质灰岩微裂缝个数为927条,面孔率仅为0.05%。

在页岩油储层中,微裂缝不仅可以改善储层的渗透性,还是有利的储集空间,面孔率越大的微裂缝,越有利于液态烃的赋存。

4.3 孔隙结构对储集性的影响

根据样品分析和统计结果,并结合储层岩性特征表明,灰质泥岩孔隙类型主要为粒间孔、溶蚀孔及微裂缝,并且各种类型的孔隙均具有较大的面孔率。灰质泥岩中含有较多的泥质,而粘土矿物中的伊-蒙混层和伊利石易形成纳米-微米级微孔隙,特别是伊-蒙混层,可发育大量的成岩收缩缝;石英等脆性矿物颗粒有较强的抗压能力,利于原生孔隙的保存;长石等易溶矿物则在溶蚀性流体作用下可形成次生孔缝,有利于油气的储存。

泥质灰岩孔隙类型主要为粒间孔、微裂缝及晶内孔。泥质灰岩碳酸盐含量高于粘土矿物,粉砂质陆源碎屑含量低。方解石多呈泥晶,并与泥质组分混杂分布,在压实作用下,岩石致密化程度较高,小孔径粒间孔和晶内孔较多,面孔率较小。泥质灰岩的微裂缝面孔率较大,是主要储集空间。

含泥质灰岩孔隙类型主要为溶蚀孔、粒间孔及晶间孔。在埋藏过程中,石英和方解石等脆性矿物颗粒使原生孔隙得以保存,长石等因溶蚀作用而形成次生孔隙,有利于油气保存。受矿物含量和溶蚀作用等因素的影响,不同岩样的溶蚀孔面孔率具有较大的差异。因方解石含量较高,岩石致密,粒间孔和晶间孔孔径小,虽然数量多,但对储集性影响较小。

灰岩孔隙类型主要为晶内孔和溶蚀孔。因为灰岩的方解石含量最高,且多为泥晶方解石,岩石致密化程

度高,所以晶内孔数量多,但孔径细小。溶蚀孔具有较大的孔径,但是数量少,改善灰岩储集性的程度有限。总体而言,灰岩储集性差。

灰质白云岩孔隙类型主要为晶间孔和溶蚀孔。在白云石化作用下,方解石晶间孔变为白云石晶间孔,晶体颗粒和孔径变大,数量多。溶蚀孔数量少。灰质白云岩储集性一般较好。

5 结论

1) 沾化凹陷罗69井沙三下亚段页岩油层段岩性以泥质灰岩、灰质泥岩和含泥质灰岩为主,少量灰质白云岩等其他岩性;发育纳米-微米级孔隙,根据孔隙特征分为微孔隙和微裂缝两类,其中微孔隙主要为粒间孔、晶间孔、溶蚀孔和晶内孔。

2) 微裂缝、溶蚀孔、大孔径晶间孔和粒间孔是沙三下亚段页岩油储层的主要储集空间,孔径较小的孔隙(如晶内孔)对储集性贡献较小。因主要孔隙类型和发育情况不同,不同岩性的岩石储集性存在差异,其中灰质白云岩储集性最好,灰质泥岩、泥质灰岩、含泥质灰岩依次变差,灰岩最差。

致谢:中国石化胜利油田地质研究院徐耀东、晁静和油气藏地质及开发工程国家重点实验室冯明石、孟祥豪等老师对本项研究提供了支持与帮助,特此感谢!

参 考 文 献

- [1] 黄文彪,邓守伟,卢双舫,等.泥页岩有机非均质性评价及其在页岩油资源评价中的应用-以松辽盆地南部青山口组为例[J].石油与天然气地质,2014,35(5):704-711.
Huang Wenbiao, Deng Shouwei, Lu Shuangfang, et al. Shale organic heterogeneity evaluation method and its application to shale oil resource evaluation-a case study from Qingshankou Formation, southern Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 704-711.
- [2] 杨振恒,韩志艳,李志明,等.北美典型克拉通盆地页岩气成藏特

- 征、模式及启示[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 463–470.
- Yang Zhenheng, Han Zhiyan, Li Zhiming, et al. Characteristics and patterns of shale gas accumulation in typical North American cratonic basins and their enlightenments[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 463–470.
- [3] 聂海宽, 张金川, 包书景, 等. 四川盆地及其周缘上奥陶统–下志留统页岩气聚集条件[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 335–345.
- Nie Haikuan, Zhang Jinchuan, Bao Shujing, et al. Shale gas accumulation conditions of the Upper Ordovician–Lower Silurian in Sichuan Basin and its periphery[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 335–345.
- [4] 武晓玲, 高波, 叶欣, 等. 中国东部断陷盆地页岩油藏条件与勘探潜力[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.
- [5] 周庆凡, 杨国丰. 致密油与页岩油的概念与应用[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 541–544.
- Zhou Qingfan, Yang Guofeng. Definition and application of tight oil and shale oil terms[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 541–544.
- [6] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the mississippian Barnett shale[J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79(12): 848–861.
- [7] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071–1098.
- [8] 张林晔, 李政, 朱日房, 等. 济阳坳陷古近系存在页岩气资源的可能性[J]. 天然气工业, 2008, 28(12): 26–29.
- Zhang Linye, Li Zheng, Zhu Rifang, et al. Resource potential of shale gas in paleogene in Jiyang Depression[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(12): 26–29.
- [9] 张林晔, 李政, 李钜源, 等. 东营凹陷古近系泥页岩中存在可供开采的油气资源[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(1): 1–13.
- Zhang Linye, Li Zheng, Li Juyuan, et al. Feasibility analysis of existing recoverable oil and gas resource in the Palaeogene shale of Dongying Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(1): 1–13.
- [10] 张善文, 张林晔, 李政, 等. 济阳坳陷古近系页岩油气形成条件[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(6): 1–5.
- Zhang Shanwen, Zhang Linye, Li Zheng, et al. Formation conditions of Paleogene shale oil and gas in Jiyang depression[J]. Petroleum Geology and Recovering Efficiency, 2012, 19(6): 1–5.
- [11] 王永诗, 王伟庆, 郝运轻. 济阳坳陷沾化凹陷罗家地区古近系沙河街组页岩储集特征分析[J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 657–662.
- Wang Yongshi, Wang Weiqing, Hao Yunqing. Shale reservoir characteristics analysis of the Formation in Luojia area of Zhanhua sag Paleogene Shahejie Jiyang Depression[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 657–662.
- [12] 宋梅远, 张善文, 王永诗, 等. 沾化凹陷沙三段下亚段泥岩裂缝储层岩性分类及测井识别[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(6): 18–22.
- Song Meiyuan, Zhang Shanwen, Wang Yongshi, et al. Lithology classification and prediction of favorable areas of Sha III mudstone-fractured reservoir in Zhanhua depression[J]. Petroleum Geology and Recovering Efficiency, 2011, 18(6): 18–22.
- [13] 刘惠民, 张守鹏, 王朴, 等. 沾化凹陷罗家地区沙三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 Es₃ shale in Luojia area, Zhanhua sag[J]. Petroleum Geology and Recovering Efficiency, 2012, 19(6): 11–15.
- [14] 刘华, 蒋有录, 谷国翠, 等. 沾化凹陷渤南洼陷古近系压力特征及成因机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(4): 46–51.
- Liu Hua, Jiang Youlu, Gu Guocui, et al. Pressure characteristics and formation mechanisms of Paleogene in Bonan sag, Zhanhua depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(4): 46–51.
- [15] 邓美寅, 梁超. 渤南洼陷沙三下亚段泥页岩储集空间研究: 以罗69井为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 173–181.
- Deng Meiyin, Liang Chao. Studies on reservoir space of mud stone and shale of the lower section of Es₃ in Bonan Sub-sag: An example from Well Luo 69[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 173–181.
- [16] 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.
- [17] 袁静. 沾化凹陷罗家地区沙四段顶部至沙三段泥质岩裂缝特征及其影响因素[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(4): 20–23.
- Yuan Jing. Characteristics of fractures in Argillaceous rocks of Luojia area in Zhanhua sag[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003, 27(4): 20–23.
- [18] 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.
- [19] 吴建国, 刘大猛, 姚艳斌. 鄂尔多斯盆地渭北地区页岩纳米孔隙发育特征及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4): 542–550.
- Wu Jianguo, Liu Dameng, Yao Yanbin. Characteristics and controlling factors of nanopores in shales in Weiwei, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4): 542–550.
- [20] 马勇, 钟宁宁, 黄小艳, 等. 聚焦离子束扫描电镜(FIB-SEM)在页岩纳米级孔隙结构研究中的应用[J]. 电子显微学报, 2014, 33(3): 251–256.
- Ma Yong, Zhong Ningning, Huang Xiaoyan, et al. The application of focused ion beam scanning electron microscope (FIB-SEM) to the nanometer-sized pores in shales[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2014, 33(3): 251–256.

(编辑 张亚雄)