

文章编号:1009-3850(2019)04-0014-13

琼东南盆地松南-宝岛凹陷梅山组碎屑岩储集性及成岩作用研究

赵燚林^{1,2,3}, 马遵青⁵, 陈国俊^{1,2}, 杨海长⁴, 李超^{1,2}, 田兵^{1,2}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省油气资源研究重点实验室/中国科学院油气资源研究重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中海油研究总院, 北京 100028; 5. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210000)

摘要:通过岩石铸体薄片和扫描电镜观察,结合压汞测试、微米 CT 扫描技术、X 射线衍射、流体包裹体分析等,刻画琼东南盆地凹陷梅山组碎屑岩的岩石学面貌和物性特征,研究成岩作用以及对储集性能的影响,并通过成岩岩相分析预测了有效储层的可能发育区带。研究表明,琼东南盆地凹陷梅山组碎屑岩岩性以长石质石英细砂岩、粉砂岩为主,点-线接触,颗粒支撑结构。胶结物类型主要是黏土矿物和碳酸盐矿物。孔隙类型主要是粒间溶孔,其次为残余粒间孔和粒内溶孔,孔隙大小中等,以细-特细喉道为主,具有中孔、低渗-特低渗特征。破坏性成岩作用主要是压实作用,其次为胶结作用,主要的建设性成岩作用是溶蚀作用。三角洲前缘可能是研究区梅山组碎屑岩中有效储层发育的有利区带。

关键词:成岩作用;储集性能;梅山组碎屑岩;凹陷;琼东南盆地

中图分类号:GE122.2⁺1

文献标识码:A

引言

琼东南盆地梅山组的研究始于 20 世纪 80 年代,前人对盆地西部地区(如陵水、崖南、崖北等凹陷)的梅山组碎屑岩开展了多方面的油气地质研究,主要集中在烃源岩^[1-3]、储层^[4]、封闭性^[5,6]、圈闭^[7]等方面,研究成果表明,梅山组油气资源前景广阔。然而,目前针对盆地东部的松南-宝岛凹陷梅山组的研究还不够详细,曹立成等^[8]对梅山组进

行了物源研究;张功成等^[9]和王艳^[10]指出梅山组储集层主要是砂岩和碳酸盐岩;姚哲等^[11]指出梅山组海底扇砂体是下一步岩性圈闭的有利勘探区;黄保家等^[12]研究表明,梅山组沉积期,盆地内绝大多数圈闭已经定型,是油气藏形成的有利条件。虽然前人对盆地东部的松南-宝岛凹陷梅山组碎屑岩已经开展了相关研究工作,但是由于研究区钻井布孔少,在实际勘探工作中常将三亚组和陵水组视为主要目的层,导致目前对松南-宝岛凹陷梅山组碎屑岩

收稿日期:2019-08-22; 改回日期:2019-10-12

作者简介:赵燚林(1993-),男,硕士研究生,矿物学、岩石学、矿床学。E-mail:2821015495@qq.com

资助项目:“十三五”国家重大专项子课题“南海北部深水关键成藏期优质储层形成机理及预测技术”(编号 2016ZX05026-007-005)

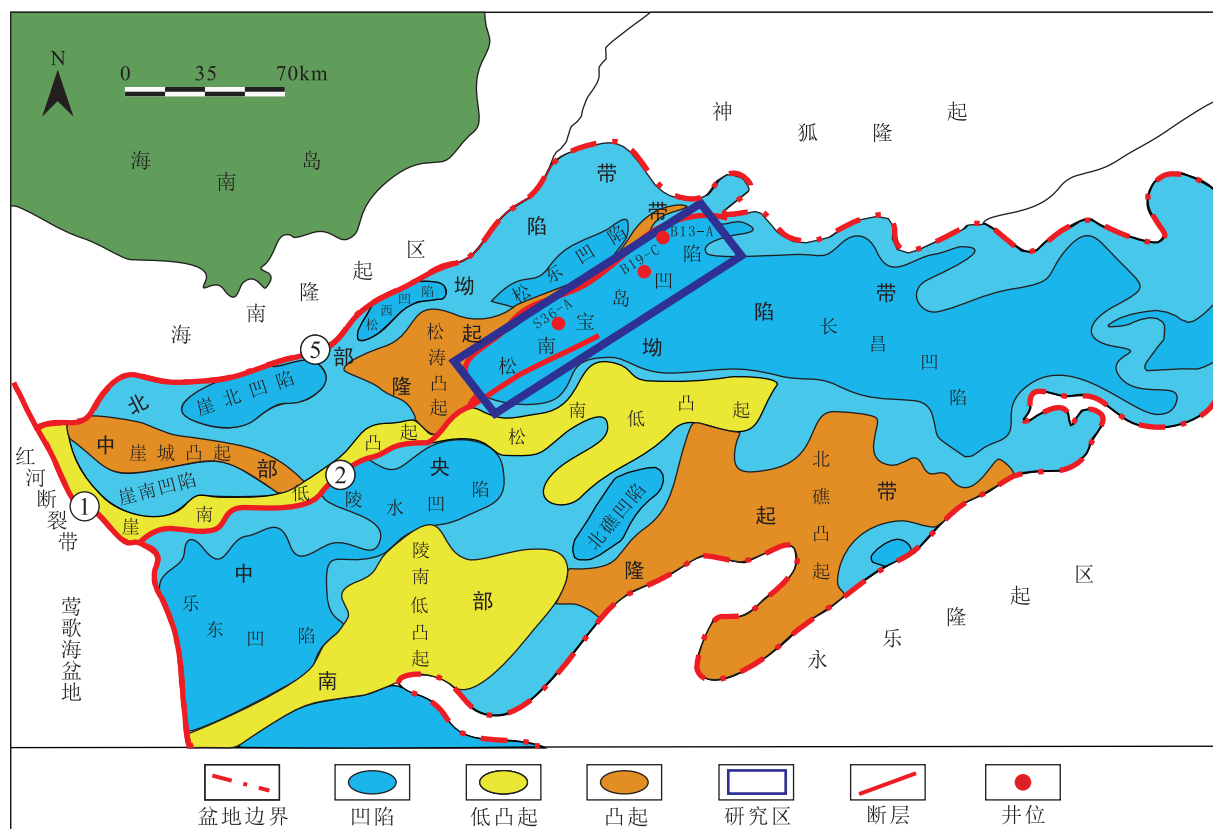


图1 琼东南盆地构造单元位置图

Fig. 1 Tectonic setting of the Qiongdongnan Basin

的研究程度仍然较低。在岩石学特征、成岩作用特征和碎屑岩储集物性的影响因素等方面的研究缺乏针对性和系统性,在一定程度上制约了在松南-宝岛梅山组碎屑岩中寻找有效储层的步伐,也严重影响了琼东南盆地的整体勘探进展。因此,本文通过岩石铸体薄片和扫描电镜观察,结合压汞测试、微米CT扫描、流体包裹体分析等,探讨研究区梅山组碎屑岩的岩石学特征、孔隙结构特征、成岩作用特征以及对储集物性的影响,以期在研究区梅山组碎屑岩中寻找有效储层和对下一步的勘探工作提供理论指导。

1 地质背景

琼东南盆地是南海北部的一个重要新生代陆缘伸展型断陷盆地,其北侧以5号断裂与海南隆起区分开,南侧为永乐隆起区,东侧与珠江口盆地相邻,西侧以1号断裂与莺歌海盆地相隔^[13-14]。琼东南盆地经历了始新世和渐新世两期伸展构造作用,盆地内部自北向南形成了北部

坳陷带、北部隆起带、中央坳陷带和南部隆起带^[15](图1)。

研究区松南-宝岛凹陷位于琼东南盆地东部、中央坳陷带内,2号断裂控制了凹陷内的构造格局和充填样式^[16-17]。中新世时期,盆地发生热沉降,自下而上沉积了三亚组、梅山组和黄流组,其中梅山组为一套以浅海-半深海相为主的地层,岩性以细砂岩、粉砂岩、泥岩和碳酸盐岩为主。受断裂活动、海平面变化以及物源的控制,沉积相类型以三角洲、滨浅海和深水扇为主^[18-19]。

2 岩石学特征

薄片观察表明,琼东南盆地松南-宝岛凹陷梅山组碎屑岩的碎屑成分主要是石英和长石,石英含量为33.0%~79.5%,平均含量为58.8%,以单晶石英为主;长石含量为0.5%~13.0%,平均含量为5.7%,以钾长石为主;岩屑含量为1.0%~12.0%,平均含量为3.0%,以变质岩岩屑为主(平均含量为2.9%),其次为少量的喷出岩岩屑(平均含量为1.0%)

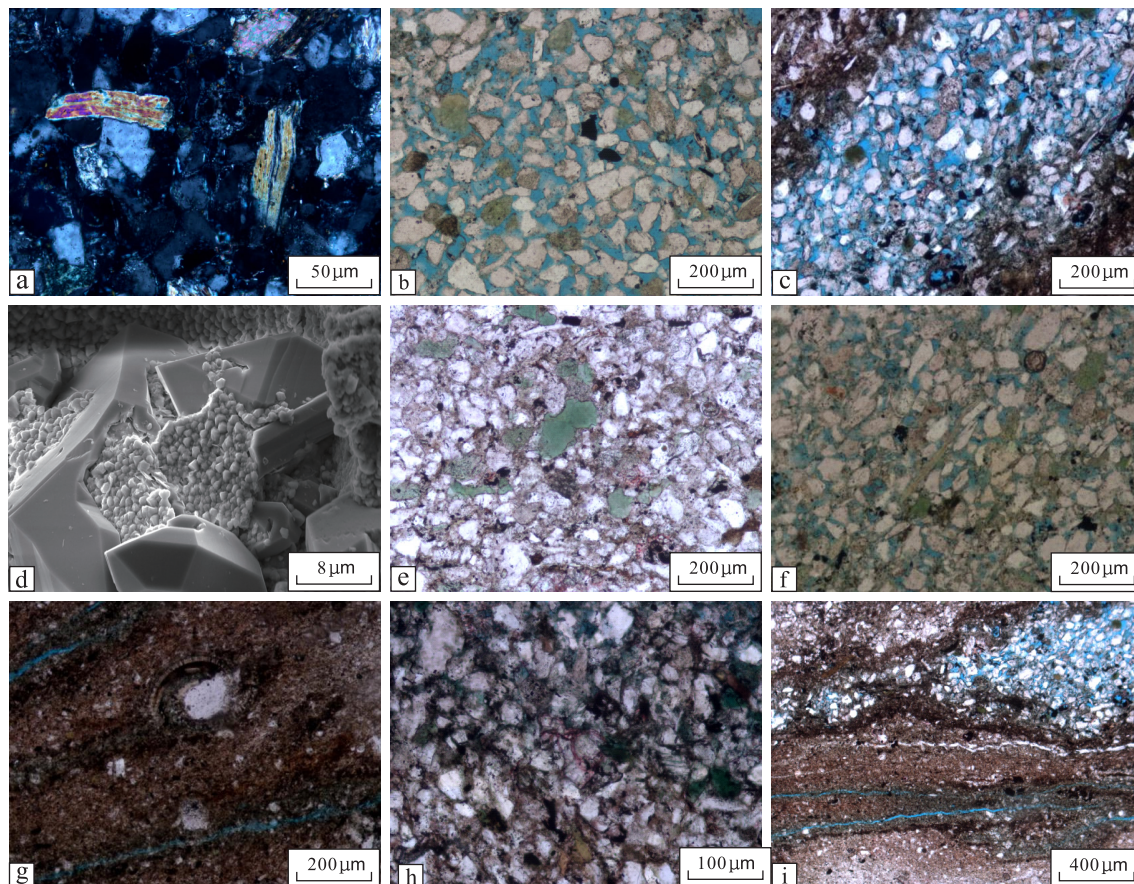


图2 松南-宝岛凹陷梅山组碎屑岩岩石学特征

a. 石英、长石、岩屑, BD13. A井 1578.0m, 正交偏光, $\times 100$; b. 长石质石英细砂岩, 分选性中等, 次棱角-次圆状, 颗粒支撑, 点接触为主, BD13. A井 2434.2m, 单偏光, $\times 50$; c. 泥质长石质石英粉砂岩, 分选性较好, 次棱角-次圆状, ST36-C井 2813.2m, 单偏光, $\times 50$; d. 自生石英晶体, BD19-B井 2436.0m, $\times 3180$; e. 泥质粉细砂岩, 分选性差, 泥质含量高, BD19-B井 2435.83m, 单偏光, $\times 50$; f. 云母片压弯, BD13-A井 1740.0m, 单偏光, $\times 50$; g. 粉砂质泥岩, 有孔虫壳体压碎, 有裂缝, ST36-C井 2726.3m, 单偏光, $\times 100$; h. 方解石充填生物体腔, 分选性差, 泥质含量高, BD19-B井 2419.2m, 单偏光, $\times 50$; i. 粉砂质泥岩夹长石质石英粉砂岩, 非均质性较强, ST36-C井, 2567.6m, 单偏光, $\times 25$

Fig. 2 Petrological characteristics of the clastic rocks from the Meishan Formation in the Songnan-Baodao depression

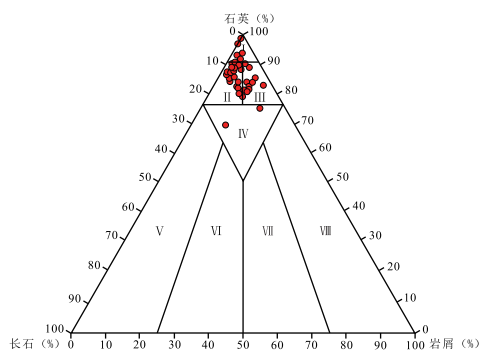


图3 琼东南盆地松南-宝岛凹陷梅山组碎屑岩岩石类型
I. 石英砂岩; II. 长石质石英砂岩; III. 岩屑质石英砂岩; V. 长石砂岩; VI. 岩屑质石英砂岩; VII. 长石质岩屑砂岩; VIII. 岩屑砂岩

Fig. 3 Rock types of the clastic rocks from the Meishan Formation in the Songnan-Baodao depression

和花岗岩岩屑(含量在1.0%以下)(图2a)。总体上,研究区梅山组碎屑岩岩性以长石质石英细砂岩、粉砂岩为主,次为岩屑质石英砂岩(图3)。砂岩粒度偏细,以粉砂为主,兼有少量细砂,颗粒分选中等-较好,磨圆中等,为次棱角-次圆状,颗粒之间以点-线接触为主、颗粒支撑结构(图2b、c)。填隙物以泥质杂基为主,含量为2.0%~40.0%,平均含量为11.3%。胶结物呈孔隙式胶结,主要类型为黏土矿物,以伊/蒙混层矿物、伊利石和绿泥石为主,含少量的高岭石,次为碳酸盐矿物,主要类型为方解石和白云石,扫描电镜下可见少量的自生石英(图2d)。

3 物性特征

琼东南盆地松南-宝岛凹陷梅山组碎屑岩样品孔隙度和渗透率统计结果(图4)表明,研究区梅山组碎屑岩的孔隙度介于4.7%~28.4%之间,平均孔隙度为21.9%;渗透率介于 $0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ~ $62.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,平均渗透率为 $5.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (对数平均值)。不同大小的孔隙度和渗透率所占的比例(图5)表明,样品孔隙度在15.0%~25.0%的最多,约占60.0%,属于中孔;其次为孔隙度在25.0%~30.0%的样品,约占32.0%,属于高孔;孔隙度在10.0%~15%的低孔样品约占7.6%;孔隙度在10.0%以下的特低孔样品极少,仅占0.4%。渗透率小于 $5.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的特低渗样品约占34.0%;渗透率在 $5.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ~ $50.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的低渗样品最多,约占66.0%。根据SY/T6285-2011《中华人民共和国石油天然气行业标准—油气储集层评价方法》^[20],琼东南盆地松南-宝岛凹陷梅山组碎屑岩属于中-高孔、低渗-特低渗岩层。

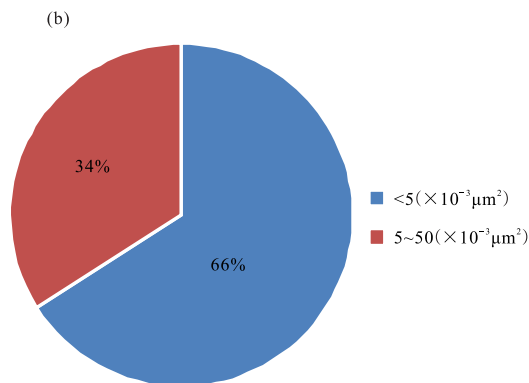
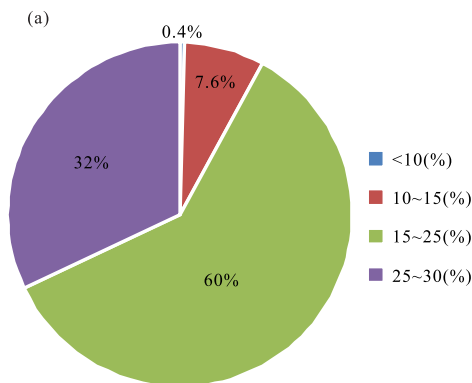


图5 松南-宝岛凹陷梅山组碎屑岩孔隙度(a)和渗透率(b)百分比图

Fig. 5 Pie charts showing the distribution of the porosity (a) and permeability (b) of the clastic rocks from the Meishan Formation in the Songnan-Baodao depression

4 储集空间特征

4.1 储集空间类型

岩石铸体薄片观察分析表明,琼东南盆地松南-宝岛凹陷梅山组碎屑岩的孔隙类型主要是粒间溶孔,其次为残余粒间孔和粒内溶孔,还有少量的有孔虫房室孔。

(1)粒间溶孔:粒间溶孔是研究区梅山组碎屑岩的主要孔隙类型和有效储集空间,由易溶矿物颗

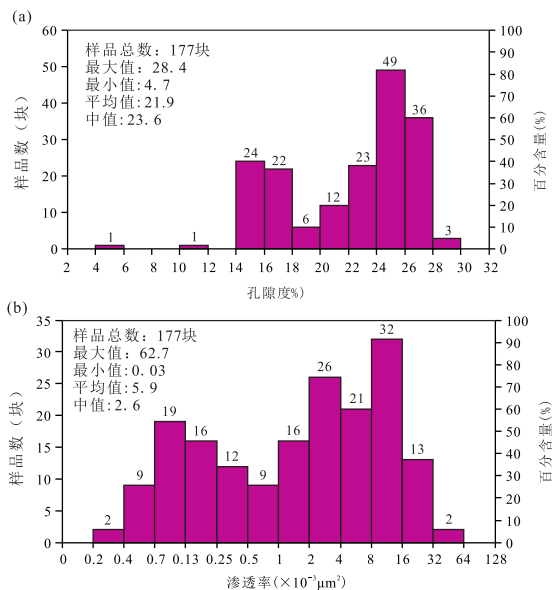


图4 琼东南盆地松南-宝岛凹陷梅山组碎屑岩孔隙度、渗透率统计图

Fig. 4 Bar charts showing the distribution of the porosity (a) and permeability (b) of the clastic rocks from the Meishan Formation in the Songnan-Baodao depression

粒溶蚀形成(图6a、b、c)。

(2)残余粒间孔:残余粒间孔是碎屑颗粒之间的原生孔隙在成岩作用过程中受压实作用改造形成的,多呈点-线接触(图6a、d)。

(3)粒内溶孔:粒内溶孔主要是酸性流体沿着长石解理缝或裂隙贯入,使长石颗粒内部发生溶蚀而形成的(图6a、b、d),粒内溶孔的连通性较差。

(4)有孔虫房室孔:在局部生物相对富集的层位还可见少量有孔虫房室孔(图6b、d)。

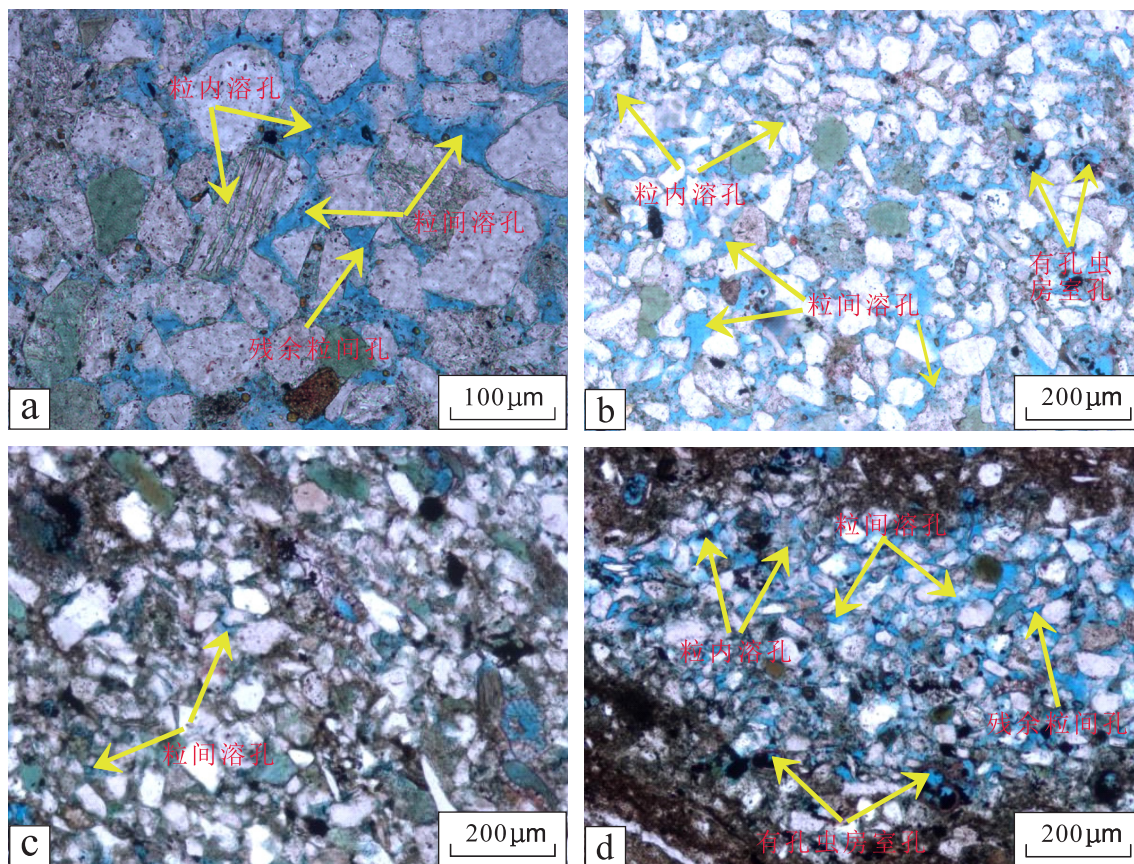


图6 琼东南盆地松南-宝岛凹陷梅山组碎屑岩岩石储集空间类型

a. 粒间溶孔、残余粒间孔、粒内溶孔, BD13-A井, 1578.0m, 单偏光, $\times 100$; b. 粒间溶孔、粒内溶孔、有孔虫房室孔, BD13-A井, 1635m, 单偏光, $\times 50$; c. 粒间溶孔, 溶蚀作用弱, BD19-B井, 2435.8m, 单偏光, $\times 50$; d. 粒间溶孔、残余粒间孔、粒内溶孔、有孔虫房室孔, ST36-C井, 2813.20m, 单偏光, $\times 50$

Fig. 6 Porosity types of the clastic rocks from the Meishan Formation in the Songnan-Baodao depression

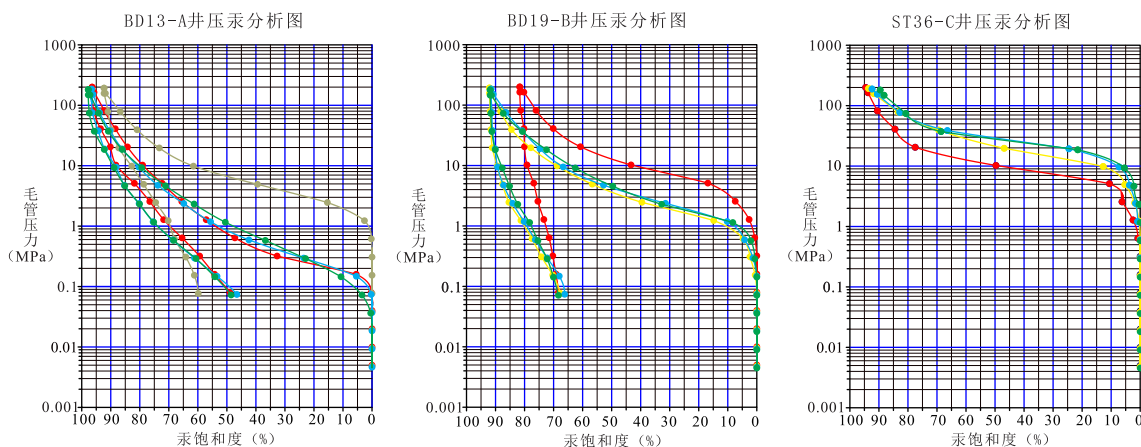


图7 松南-宝岛凹陷梅山组碎屑岩压汞曲线特征

Fig. 7 Mercury injection curves for the clastic rocks from the Meishan Formation in the Songnan-Baodao depression

4.2 孔隙结构

毛管压力曲线的形态主要受孔喉的分选性和喉道大小所控制。对研究区梅山组 BD13-A、BD19-B 和 ST36-C 3 口井的样品进行了压汞分析测试(图 7),压汞资料统计结果(表 1)表明,以 BD13-A 井为代表的三角洲前缘样品孔隙大小中等,孔喉分选性中等,分布一般,以细喉道为主,歪度偏粗,孔隙度为 24.0%,渗透率为 $8.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,碎屑岩层具有中孔低渗的特征;以 BD19-B 井为代表的峡谷水道样品孔喉分选性好,分布均匀,以特细喉道为主,歪度较粗,孔隙度为 16.0%,渗透率为 $0.34 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,碎屑岩层具有中孔特低渗特征;以 ST36-C 井为代表的深水扇样品孔喉分选性好,分布均匀,以特细喉道为主,歪度偏细,孔隙度为 20.7%,渗透率为 $2.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,碎屑岩层具有中孔特低渗特征。

BD13-A 井样品位于三角洲前缘,岩性为粉-细砂岩,ST36-C 井样品位于深水扇,岩性为粉砂质泥岩。将两口井样品的压汞参数进行对比可以看出,随着砂岩粒度变细,孔喉半径变小,孔喉结构变细,排驱压力和饱和中值压力增大,饱和中值半径减小,孔隙度和渗透率变差,表明研究区梅山组碎屑岩储集物性与所属的沉积相带有密切关系。然而,位于峡谷水道的 BD19-B 井样品比较特殊,岩性为泥质粉-细砂岩,压汞资料显示 BD19-B 井样品的

排驱压力、饱和中值压力小于 ST36-C 井样品,但饱和中值半径、孔隙度和渗透率却比 ST36-C 井样品大,泥质粉-细砂岩的孔喉大小和结构反而不如粉砂质泥岩。因此,利用微米 CT 扫描技术对 BD19-B 井和 ST36-C 井岩心样品的孔隙结构进行了三维可视化定量表征(图 8),该实验在天津三英精密仪器股份有限公司完成,所用仪器为该公司 nanoVoxel-3000 系列 X 射线三维显微镜,最高分辨率达 $0.5 \mu\text{m}$,样品的孔隙直径范围及数量和所占百分比如图 9 所示。

CT 扫描得到的孔隙结构参数(表 2)同样证实了位于峡谷水道的 BD19-B 井泥质粉-细砂岩样品在孔隙半径、喉道体积、孔道半径、喉道体积、孔喉配位数等各项孔隙结构参数上均小于位于深水扇的 ST36-C 井粉砂质泥岩样品。对比两个样品的铸体薄片可以发现,ST36-C 井深水扇样品虽然是粉砂质泥岩,但碎屑颗粒分选性较好,压实程度较弱-中等(图 2c),对孔隙结构的破坏较小,而且具有非均质性,在部分层段,杂基含量少,长石含量高,溶蚀作用较强,孔隙较发育(图 2i,图 6d),对碎屑岩层储集物性有改善作用;而 BD19-B 井峡谷水道样品虽然是泥质粉-细砂岩,但碎屑颗粒分选性差,泥质杂基含量较高,压实程度较强(图 2e、h),孔隙迂曲度高,溶蚀强度弱(图 5c)。

表 1 松南-宝岛凹陷梅山组碎屑岩压汞资料统计

Table 1 Statistics of the mercury injection data for the clastic rocks from the Meishan Formation in the Songnan-Baodao depression

孔隙结构参数	BD13-A(三角洲前缘)	BD19-B(峡谷水道)	ST36-C(深水扇)
孔隙度(%)	24.0	16.0	20.7
渗透率($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	8.4	0.34	2.1
排驱压力区间(MPa)	0.1 ~ 1.64	0.84 ~ 12.42	6.95 ~ 14.92
平均排驱压力(MPa)	0.38	2.55	11.29
饱和中值压力区间(MPa)	0.66 ~ 7.13	3.9 ~ 16.79	10.32 ~ 34.67
平均饱和中值压力(MPa)	2.18	7.8	27.2
饱和中值半径区间(μm)	0.1 ~ 1.11	0.04 ~ 0.19	0.02 ~ 0.07
平均饱和中值半径(μm)	0.63	0.12	0.03
最大连通孔道半径区间(μm)	0.45 ~ 7.22	0.21 ~ 1.21	0.05 ~ 4.24
平均最大连通孔道半径(μm)	3.53	0.54	0.53
喉道半径区间(μm)	0.06 ~ 0.75	0.03 ~ 0.12	0.01 ~ 0.04
平均喉道半径(μm)	0.44	0.07	0.02
平均毛管半径(μm)	0.91 ~ 1.87	0.11 ~ 0.32	0.03 ~ 0.18
分选系数	1.02	0.23	0.1

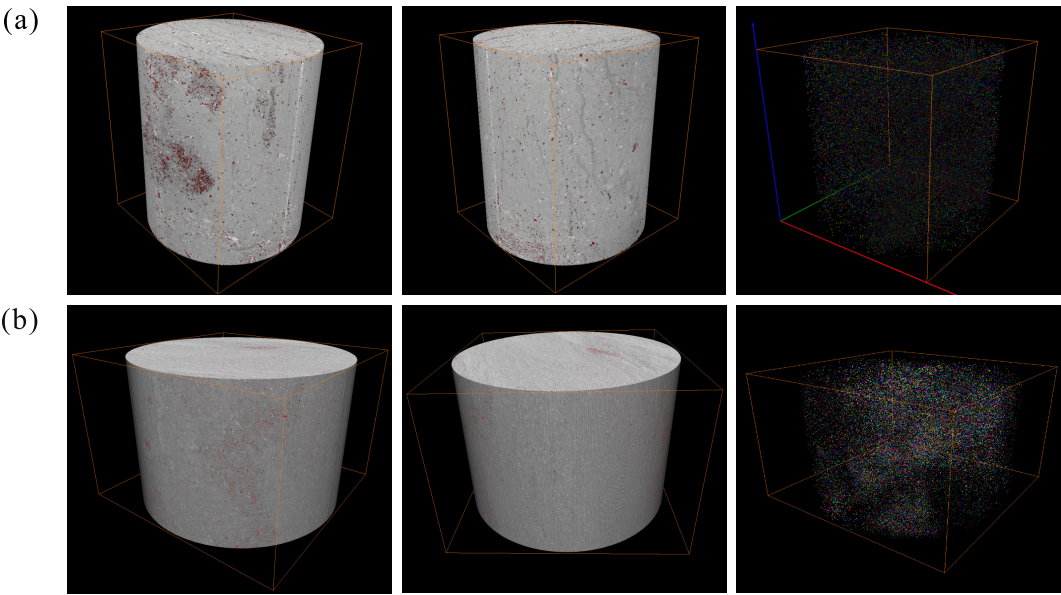


图8 松南-宝岛凹陷梅山组 BD19-B 井(a)和 ST36-C 井(b)样品三维可视化图像
(a)BD19-B 井样品(泥质粉-细砂岩);(b)ST36-C 井样品(粉砂质泥岩)

Fig. 8 3-D visual images of the muddy siltstone and fine-grained sandstone samples from the BD 19-B well (a) and the silty mudstone sample from the ST36-C well (b) in the Meishan Formation in the Songnan-Baodao depression

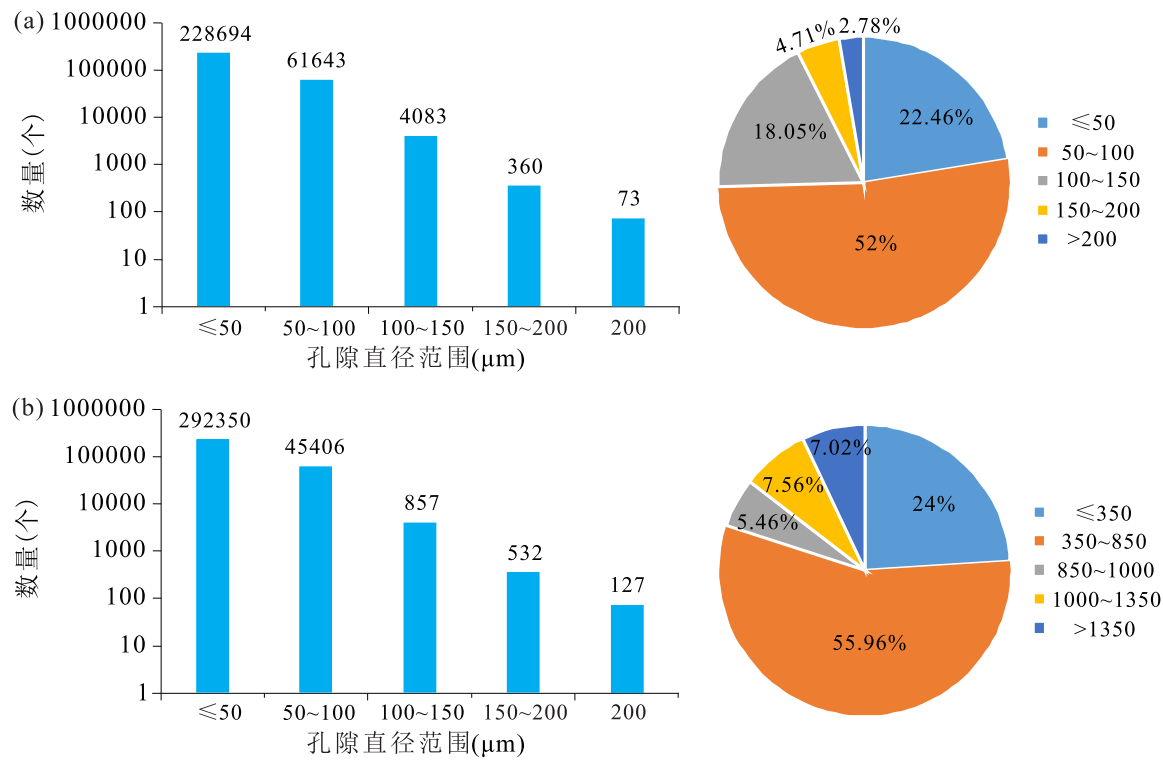


图9 松南-宝岛凹陷梅山组 BD19-B(a)和 ST36-C(b)井样品孔隙统计

Fig. 9 Bar charts and pie charts showing the numbers and percentages of pore diameters of the muddy siltstone and fine-grained sandstone samples from the BD 19-B well (a) and the silty mudstone sample from the ST36-C well (b) in the Meishan Formation in the Songnan-Baodao depression

表 2 BD19-B 井和 ST36-C 井样品 CT 扫描孔隙结构参数

Table 2 Pore textures parameters based on CT scanning technique for the muddy siltstone and fine-grained sandstone samples from the BD 19-B well (a) and the silty mudstone sample from the ST36-C well (b) in the Meishan Formation in the Songnan-Baodao depression

参数	BD19-B(泥质粉 – 细砂岩)	ST36-C(粉砂质泥岩)
最大孔隙半径(μm)	76.68	519.17
平均孔隙半径(μm)	33.19	131.44
最大喉道半径(μm)	56.67	302.34
平均喉道半径(μm)	19.64	28.06
最大喉道长度(μm)	125.20	1906.17
平均喉道长度(μm)	57.31	246.62
最大孔喉比	7.53	7.53
平均孔喉比	0.29	0.83
最大喉道体积($\times 10^5 \mu\text{m}^3$)	22	31400
平均喉道体积($\times 10^5 \mu\text{m}^3$)	8	412
最大孔隙体积($\times 10^5 \mu\text{m}^3$)	122	28000
平均孔隙体积($\times 10^5 \mu\text{m}^3$)	24	1180
孔喉配位数	0 ~ 3	0 ~ 10
孔隙体积与样品总体积比(%)	25	10.7

5 成岩作用

5.1 压实作用

琼东南盆地松南 – 宝岛凹陷梅山组碎屑岩处于弱 – 中压实,并以机械压实为主,薄片镜下观察发现有云母片被挤压弯曲变形,有孔虫壳体被压碎(图 2f、g),颗粒之间呈现点 – 线接触,颗粒支撑为主。BD13-A、BD19-B 和 ST36-C 3 口井的孔隙度和渗透率随埋深变化关系(图 10)表明,随着埋深增加,上覆压力增大,压实作用增强,孔隙度和渗透率整体上均呈现出非线性减小的趋势,物性逐渐变差。然而以 ST36-C 井为代表的深水扇(粉砂质泥岩)样品在 2700m 深度以下,孔隙度和渗透率随深度增加反而呈现变好的趋势,原因是泥岩部位裂隙发育(图 2g),砂岩部位碎屑颗粒分选性较好、压实程度弱、溶蚀作用较强(图 2c,图 6d),产生次生孔隙,并有效改善了原来彼此孤立的孔隙间的连通性,有效改善了岩层的孔隙度和渗透率。

5.2 胶结作用

薄片观察分析和 X 射线衍射资料表明,琼东南盆地松南 – 宝岛凹陷梅山组碎屑岩胶结物含量为 6.0% ~ 11.0%,平均含量为 8.0%。早期碳酸盐胶结物充填在孔隙空间可以降低压实作用强度,后期多遭受溶蚀,镜下观察到的碳酸盐胶结物含量较少,

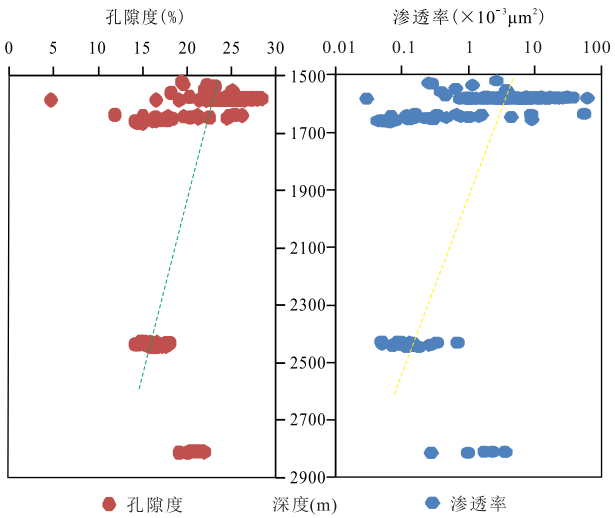


图 10 琼东南盆地凹陷梅山组碎屑岩物性随埋深变化特征
Fig. 10 Porosity vs. depth (a) and permeability vs. depth (b) diagrams of the elastic rocks from the Meishan Formation in the Songnan-Baodao depression

主要为方解石,并充填在有孔虫壳体中阻塞有孔虫房室孔(图 2h,图 11a)。对研究区梅山组碎屑岩胶结作用影响较大的是黏土矿物,黏土矿物中含量最高的是伊/蒙混层矿物(含量为 3.0% ~ 77.0%,平均含量为 35.8%;混层比中蒙皂石占 10.0% ~ 95.0%,平均含量为 33.2%;伊利石占 5.0% ~ 90.0%,平均含量为 66.8%)(图 11b、e、f)和伊利石

(含量为 8.0% ~ 77.0%, 平均含量为 33.4%) (图 11c), 次为绿泥石 (含量为 2.0% ~ 31.0%, 平均含量为 12.8%) (图 11d) 和高岭石 (含量为 7.0% ~ 42.0%, 平均含量为 17.7%) (图 11e)。

扫描电镜观察仅见少量高岭石零星出露, 表面被伊利石、伊/蒙混层等黏土矿物覆盖或包围 (图 11c、e), 对梅山组碎屑岩孔隙空间的影响较小。伊利石和伊/蒙混层黏土矿物广泛生长在孔隙中 (图 11f), 伊利石还可呈片状或丝状在颗粒表面产出 (图

11c)。绿泥石黏土膜多呈叶片状覆盖在碎屑颗粒表面 (图 11d), 堆叠在一起的片状绿泥石也在一定程度上分割和填充孔隙空间, 这些黏土矿物均对孔隙空间有明显的充填和破坏作用。此外, 伊/蒙混层黏土矿物还具有较强的水敏性, 水化膨胀能力强, 分散度较高, 会堵塞喉道, 降低渗透性。此外, 还可见少量硅质胶结现象, 自生石英生长在碎屑颗粒表面或充填粒间孔隙 (图 2d), 对岩石物性的影响能力有限。

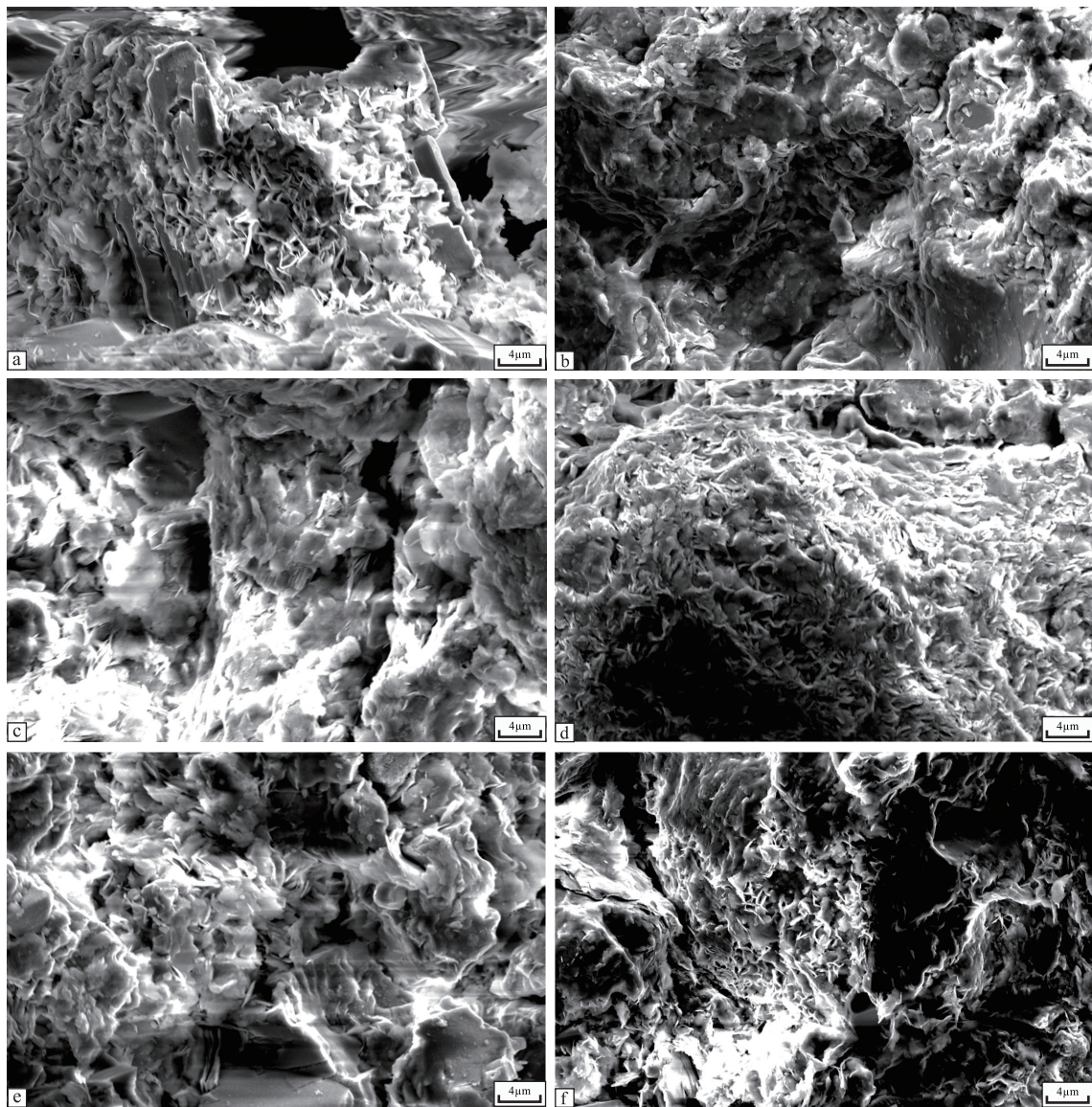


图 11 松南-宝岛凹陷梅山组碎屑岩黏土矿物特征

a. 方解石充填有孔虫生物体腔, BD19-B 井 2423.5m, $\times 2230$; b. 碎屑颗粒表面被伊/蒙混层矿物覆盖, BD19-B 井 2428.7m, $\times 1770$; c. 被伊利石、伊/蒙混层矿物覆盖的高岭石, BD19-B 井 2434.3m, $\times 2750$; d. 碎屑颗粒表面绿泥石黏土膜, BD13-A 井 1578.0m, $\times 2510$; e. 局部见高岭石, 高岭石和碎屑颗粒表面覆盖着伊蒙混层黏土矿物, BD19-B 井 2433.8m, $\times 3210$; f. 孔隙中的伊利石和伊蒙混层, BD19-B 井 2434.3m, $\times 1300$

Fig. 11 Characteristics of the clay minerals in the clastic rocks from the Meishan Formation in the Songnan-Baodao depression

5.3 溶蚀作用

根据岩石薄片观察,研究区梅山组碎屑岩中碳酸盐胶结物含量较少,主要观察到的是长石(主要是钾长石)溶蚀现象,常见钾长石颗粒边缘被溶蚀成港湾状和凹凸状(图 6a、b、d)。

在研究区梅山组碎屑岩中发现有 11 个含烃包裹体(表 3)。含烃包裹体的存在是有机质生烃并向梅山组碎屑岩充注的证据。与烃类充注相伴随的有机酸可以溶蚀易溶颗粒,形成次生孔隙^[21]。同时受有机质生烃高温流体的影响,梅山组碎屑岩自身所含的有机质也成熟生烃释放有机酸,这些有机酸以及地层水中的酸性成分都会溶蚀易溶组分,形成粒间溶孔、粒内溶孔等多种次生孔隙。

反应 1: $2\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ (钾长石) + 2H^+ + H_2O = $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (高岭石) + 4SiO_2 + 2K^+

反应 2: 蒙皂石 + 4.5K^+ + 8Al^{3+} → 伊利石 + Na^{2+} + 2Ca^{2+} + 2.5Fe^{3+} + 2Mg^{2+} + 3Si_4^+

反应 3: $3\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (高岭石) + 2K^+ → $2\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (伊利石) + 2H^+ + $3\text{H}_2\text{O}$

根据前人研究^[22-24],当成岩温度低于 120℃ ~ 140℃ 之间时,发生反应 1 和反应 2 两个相伴生的化学过程,反应 1 导致 K^+ 浓度增加,促进反应 2 的进化的同时消耗了 K^+ 的浓度,反过来又促进钾长石的溶解,改善岩石物性。当地温达到 120℃ ~ 140℃ 以上时,反应 2 停止,反应 3 开始,转化过程中产生的无机酸也会继续促进长石等易溶矿物组分的溶蚀,形成粒间溶孔、粒内溶孔等多种次生孔隙,溶蚀作用是研究区梅山组碎屑岩经历的主要建设性成岩作用。图 10 显示在 2400 ~ 2500m 深度段内,孔隙度和渗透率有所提高。结合薄片(图 2b,图 6c)观察分析,认为溶蚀作用在一定程度上产生了次生孔隙,并有效改善了原来彼此孤立的孔隙间的连通性,提高了碎屑岩储集物性。

表 3 松南 – 宝岛凹陷梅山组碎屑岩含烃流体包裹体特征

Table 3 Description of the hydrocarbon-bearing fluid inclusions in the clastic rocks from the Meishan Formation in the Songnan-Baodao depression

井号	序号	深度(m)	包裹体类型	产状	大小(μm)	气液比(%)	均一温度(℃)
BD19-B	1	2430.5	含烃包裹体	石英裂隙带内	4.3	18	126.3
BD19-B	2	2430.5	含烃包裹体	石英裂隙带内	6.3	35	156.1
BD19-B	3	2430.5	含烃包裹体	石英裂隙带内	7.1	11	136.7
BD19-B	4	3090.0	含烃包裹体	石英裂隙带内	5.7	16	209.6
BD19-B	5	3090.0	含烃包裹体	石英裂隙带内	6.6	14	202.2
ST36-C	6	3246.0	含烃包裹体	石英裂隙带内	7.3	11	149.2
ST36-C	7	3246.0	含烃包裹体	石英裂隙带内	5.2	14	194.8
ST36-C	8	3246.0	含烃包裹体	石英裂隙带内	6.4	16	150.4
ST36-C	9	3246.0	含烃包裹体	石英裂隙带内	14.3	6	148.5
ST36-C	10	3246.0	含烃包裹体	石英裂隙带内	5.4	18	219.2
ST36-C	11	3246.0	含烃包裹体	石英裂隙带内	7.5	12	162.5

5.4 压实作用和胶结作用对孔隙破坏的相对重要性

琼东南盆地松南 – 宝岛凹陷梅山组碎屑岩所经历的成岩作用主要是压实作用、胶结作用和溶蚀作用。根据 Housknecht^[22] 的研究,制作了研究区梅山组碎屑岩压实作用和胶结作用的相对重要性图版(图 12),分析表明:压实作用损失了 13.0% ~ 28.0% 的孔隙度,主要区间为 18.0% ~ 26.0%,胶结作用损失了 1.0% ~ 26.0% 的孔隙度,主要区间为 5.0% ~ 15.0%。因此,压实作用是研究区梅山

组碎屑岩经历的最主要破坏性成岩作用,其次为胶结作用,建设性成岩作用主要是溶蚀作用。

研究区梅山组碎屑岩颗粒以点 – 线接触为主,弱 – 中等压实,在机械压实作用下,原生孔隙空间损失,仅保留一部分残余粒间孔。碳酸盐胶结物多已经被溶蚀,伊/蒙混层矿物、绿泥石黏土膜和伊利石等黏土矿物多附着在颗粒表面、填充孔隙空间以及阻塞喉道,破坏岩石储集物性。长石(主要是钾长石)在有机酸和黏土矿物转化生成的无机酸作用

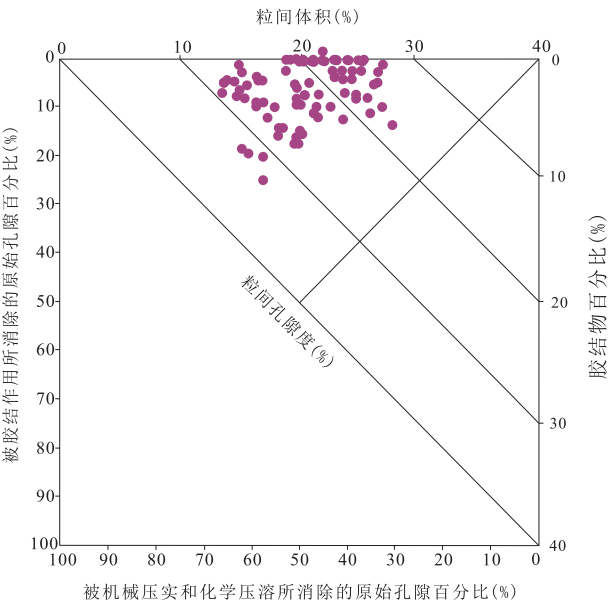


图 12 松南 – 宝岛凹陷梅山组压实作用和胶结作用相对重要性图版^[22]
Fig. 12 Diagram showing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in the clastic rocks from the Meishan Formation in the Songnan-Baodao depression (after Housknecht D W, 1987)

下发生溶蚀,颗粒边缘多被溶蚀成港湾状。碳酸盐胶结物后期也经历了溶蚀作用改造,二者均能形成粒间溶孔。同时酸性流体沿着长石内部的解理缝和裂隙溶蚀形成粒内溶孔,均对改善碎屑岩储集物性起着积极作用。而且溶蚀作用还有效沟通了原来孤立的孔隙,提高孔隙度的同时也改善了渗透率,因此溶蚀作用是改善研究区梅山组碎屑岩储集物性的最主要原因。

5.6 成岩岩相分析

根据钟广发和邬宁芬^[23]提出的成岩岩相划分方法,并结合马遵青^[24]的研究将研究区梅山组碎屑岩的成岩相类型进行了划分(表4)。

弱压实 – 弱胶结 – 强溶蚀相以 BD13-A 井三角洲前缘砂体为代表,岩石压实程度较弱 – 中等,泥

质杂基和胶结物含量较少,溶蚀强度强,以粒间溶孔为主,孔隙大小中等,孔喉分选性中等,以细喉道为主,孔隙度和渗透率相对较好;弱压实 – 弱胶结 – 强溶蚀相以 BD19-B 井峡谷水道砂体为代表,压实程度较强,泥质杂基含量较高,溶蚀强度低,孔隙发育较差,以特细喉道为主,孔隙度和渗透率差;弱压实 – 弱胶结 – 中等溶蚀相以 ST36-C 井深水扇砂体为代表,压实强度较弱 – 中等,溶蚀作用中等,孔喉分选性好,以特细喉道为主,孔隙度和渗透率较差。总体而言,以 BD13-A 井为代表的三角洲前缘砂体物性最好,以 ST36-C 井为代表的深水扇砂体物性较差,但仍好于以 BD19-B 井为代表的峡谷水道砂体。

6 有利区带预测

综合前文对琼东南盆地松南 – 宝岛凹陷梅山组碎屑岩岩石学特征、孔隙类型、孔隙结构特征、成岩作用特征以及对储集物性的影响和成岩岩相分析等,认为在研究区梅山组三角洲前缘碎屑岩中找到可以作为有效储层的砂体的可能性比较大。对深水扇应当继续开展更加深入和详细的研究,以期未来在此区带取得新的更大突破;对于峡谷水道应当加大钻井密度,争取早日在峡谷水道发现优质砂体。

7 结论

(1)琼东南盆地松南 – 宝岛凹陷梅山组碎屑岩岩性以长石质石英细砂岩、粉砂岩为主,次为岩屑质石英砂岩。颗粒分选中等 – 较好,磨圆中等,为次棱角 – 次圆状,以点 – 线接触为主、颗粒支撑结构。胶结物类型主要是黏土矿物,主要类型为伊/蒙混层矿物、伊利石和绿泥石,次为碳酸盐矿物,主要类型是方解石和白云石。

(2)琼东南盆地松南 – 宝岛凹陷梅山组碎屑岩整体上以中孔、细 – 特细喉道为主,属于中 – 高孔、

表 4 松南 – 宝岛凹陷梅山组碎屑岩成岩岩相划分

Table 4 Diagenetic facies division of the clastic rocks from the Meishan Formation in the Songnan-Baodao depression

成岩相	弱压实 – 弱胶结 – 强溶蚀相	弱压实 – 弱胶结 – 强溶蚀相	弱压实 – 弱胶结 – 中等溶蚀相
压实强度	较弱,点接触为主,少量线接触	较强,线接触较多	较弱,点接触为主,少量线接触
胶结程度	弱	强	弱
溶蚀强度	高	低	中等
孔隙类型	粒间溶孔为主	微孔隙	粒间溶孔

低渗—特低渗碎屑岩层。孔隙类型主要是粒间溶孔,其次为残余粒间孔和粒内溶孔。

(3)琼东南盆地松南—宝岛凹陷梅山组碎屑岩经历的主要破坏性成岩作用是压实作用,损失了13.0%~28.0%的孔隙度,次为胶结作用,损失了1.0%~26.0%的孔隙度;建设性成岩作用主要是溶蚀作用,易溶矿物在溶蚀作用下,增加孔隙度的同时还有效沟通了原来孤立的孔隙,提高了渗透率。

(4)琼东南盆地松南—宝岛凹陷梅山组三角洲前缘碎屑岩中寻找到可以作为有效储层的砂体的可能性比较大,下一步应当加大对深水扇的研究力度,并在峡谷水道增加钻井密度,以期将来在这两个地区发现可以作为储层的优质砂体。

参考文献:

- [1] 王飞宇,张泉兴,郝石生,等. 莺—琼盆地梅山组烃源岩的超微树脂体[J]. 中国海上油气地质,1994,(3):3-12.
- [2] 张泉兴,李里,黄保家,等. 莺—琼盆地梅山组的生烃特征[J]. 自然科学进展,1994,(2):220-228.
- [3] 张泉兴,张启明. 莺—琼盆地梅山组海相烃源岩的树脂化合物[J]. 中国海上油气(地质),1992,(3):1-18.
- [4] 朱沛苑,尤丽,元庆涛,等. 乐东—陵水凹陷梅山组海底扇储层物性与孔喉结构[J]. 天然气技术与经济,2018,12(5):1-4+64+81.
- [5] 陈章明,姜振学,郭水生,等. 泥质岩盖层封闭性综合评价及其在琼东南盆地的应用[J]. 中国海上油气地质,1995,(1):1-6.
- [6] 王欢,王琪,张功成,等. 琼东南盆地梅山组泥岩盖层封闭性综合评价[J]. 地球科学与环境学报,2011,33(2):152-158.
- [7] 王振峰,李绪深,孙志鹏,等. 琼东南盆地深水油气成藏条件和勘探潜力[J]. 中国海上油气,2011,23(1):7-13+31.
- [8] 曹立成,姜涛,王振峰,等. 琼东南盆地新近系重矿物分布特征及其物源指示意义[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(5):1971-1981.
- [9] 张功成,米立军,吴景富,等. 凸起及其倾没端—琼东南盆地深水大—中型油气田有利勘探方向[J]. 中国海上油气,2010,22(6):360-368.
- [10] 王艳. 南海琼东南盆地深水层类型及研究意义[J]. 沉积与特提斯地质,2014,34(3):82-87.
- [11] 姚哲,朱继田,左倩媚,等. 琼东南盆地深水重力流沉积体系及油气勘探前景[J]. 天然气工业,2015,35(10):21-30.
- [12] 黄保家. 琼东南盆地天然气潜力及有利勘探方向[J]. 天然气工业,1999,(1):34-39.
- [13] 袁玉松,杨树春,胡圣标,等. 琼东南盆地构造沉降史及其主控因素[J]. 地球物理学报,2008,51(2):376-383.
- [14] 雷超,任建业,李绪深,等. 琼东南盆地深水层结构构造特征与油气勘探潜力[J]. 石油勘探与开发,2011,38(5):560-569.
- [15] 廖计华,王华,吕明,等. 琼东南盆地深水层松南—宝岛凹陷同沉积断裂活动及其对沉积充填的控制[J]. 中国矿业大学学报,2016,45(2):336-346.
- [15] 王亚辉,张道军,陈杨,等. 琼东南盆地三亚组陆架边缘三角洲的发现及其油气勘探意义[J]. 地质科技情报,2018,37(5):30-36.
- [16] 张功成. 中国近海天然气地质特征与勘探新领域[J]. 中国海上油气,2005,(5):3-10.
- [17] 于俊峰,段如泰. 琼东南盆地2号断裂东带发育特征及形成机理[J]. 大地构造与成矿学,2008,32(3):293-299.
- [18] 谭建财,范彩伟,宋鹏,等. 琼东南盆地中中新统古沟谷和坡折带特征及油气勘探意义[J]. 油气地质与采收率,2017,24(03):30-36+43.
- [19] 王亚辉,张道军,陈杨,等. 琼东南盆地三亚组陆架边缘三角洲的发现及其油气勘探意义[J]. 地质科技情报,2018,37(5):36-42.
- [20] 石油地质勘探专业标准化委员会. SY/T 6285-2011 油气储层评价方法[S]. 北京:国家能源局,2011.
- [21] 牛斌,魏璞,张顺存,等. 准噶尔盆地石西地区侏罗系八道湾组储层特征及主控因素分析[J]. 沉积与特提斯地质,2017,37(2):77-87.
- [22] Housknecht D W. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstone [J]. AAPG Bulletin,1987,71(6):633-643.
- [23] 钟广发,邬宁芬. 成岩岩相分析:一种全新的成岩非均质性研究方法[J]. 石油勘探与开发,1997,(5):62-66.
- [24] 马遵青. 琼东南盆地松南—宝岛凹陷梅山组碎屑岩储层特征研究[D]. 北京:中国科学院大学,2019.

Physical properties and diagenesis of the clastic rocks from the Meishan Formation in the Songnan-Baodao depression, Qiongdongnan Basin

ZHAO Yilin^{1, 2, 3}, MA Zunqing⁵, CHEN Guojun^{1, 2}, YANG Haizhang⁴, LI Chao^{1, 2}, TIAN Bing^{1, 2}

(1. Northwest Institute of Ecoenvironment and Environments, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. Key Laboratory of Petroleum Resources, Gansu Key Laboratory of Petroleum Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Research Institute, CNOOC, Beijing 100028, China; 5. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210000, Jiangsu, China)

Abstract: In terms of the examination of thin sections and scanning electron photomicrographs, combined with mercury injection test, micron-scale CT Scanning technique, X-ray diffraction analysis and fluid inclusion analysis, the present paper deals with the petrological features, physical properties of the clastic rocks, diagenesis and its effects on the reservoir quality, and prediction of the potential favourable zones based on the diagenetic facies analysis for the Meishan Formation in the Songnan-Baodao depression, Qiongdongnan Basin. The clastic rocks in the study area consist dominantly of fine-grained feldspathic quartz sandstone and siltstone, with point-line contacts and grain-supported textures. The cement types contain clay minerals and carbonate minerals. The porosity types are composed of intergranular solution openings, residual intergranular solution openings and intragranular solution openings, with fine- to extra-fine throats, and mesopores and low- to extra-low permeability. The destructive diagenesis is represented by compaction and cementation while the constructive diagenesis includes dissolution. The delta front may be the potential favourable zone for the development of the effective reservoir rocks in the Meishan Formation in the study area.

Key words: diagenesis; reservoir quality; clastic rocks from the Meishan Formation; Songnan-Baodao depression; Qiongdongnan Basin