

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2020.02.007

雷家地区沙四段致密油储层特征研究

尹浪^{1,2}, 赵峰^{1,2}, 唐洪明^{1,2}, 舒润^{1,2}, 彭东宇^{1,2}

(1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500;

2. 西南石油大学油气藏地质用开发工程国家重点实验室, 成都 610500)

摘要: 雷家地区沙四段致密油的开采和研究刚刚起步,在地质认识方面尚不够深刻。本文通过对雷家地区沙四段岩芯观察、XRD衍射、铸体薄片、场发射扫描电镜、氩离子抛光扫描电镜、CT扫描及氮气吸附等方法对沙四段储层地质特征展开系统分析,结果发现:该区主要发育白云岩,根据组成矿物含量的不同可分为白云岩类、方沸石岩类和泥岩类3大类15种岩;孔隙度分布范围1.68%~11.65%,渗透率介于0.01~6.35 mD,属于特低孔特低渗型储层;储集空间类型多样,主要发育溶蚀孔、晶间孔、有机质孔裂缝,该区孔隙结构较复杂,存在少量大孔,但主要由纳米孔组成,孔隙分布较为分散,喉道数量少,连通性差;根据该段储层孔隙结构及储集空间分布特征,将该段储层分为孔隙型、裂缝型和裂缝-孔隙型3类,其中孔隙型储层孔隙分布较为分散、连通性较差,裂缝型储层岩性主要为泥岩类,裂缝-孔隙型储层物性相对较好且主要发育在杜家台段。

关键词: 致密油;沙四段;储层特征;孔隙结构;储集空间;辽河盆地

中图分类号: TE121.1 **文献标识码:** A

0 引言

致密油是非常规油气资源的主要类型之一,继页岩油气之后,已成为全世界非常规石油勘探开发的重点^[1-6],它开发难度大,但赋存一定资源^[7-10],被石油工业界誉为“黑金”^[11]。我国有着丰富的致密油资源,广泛分布于各大盆地中^[4,12-15]。近年来,虽然国内一些油田对该类油藏的勘探开发已取得一些成功经验,但总体来说在致密油勘探方面起步较晚,中国致密油目前在地质认识方面尚不够深刻,对于致密油地的开发还存在很多挑战^[16-17]。鉴于此,本文以辽河油田雷家地区沙河街组四段为研究对象,通过岩芯观察、铸体薄片鉴定、SEM扫描电镜、氮气吸附以及CT扫描等方法,力图对该区的储层地质

特征进行研究,以期能明确研究区储层岩性、物性、孔隙结构特征以及储集空间特征,希望能够为沙四段致密油后续的开发提供参考。

1 区域概况

雷家地区位于辽河盆地西部凹陷西斜坡中北段(图1),面积为300 km²,向东延伸至陈家断层,北面与高升鼻状隆起相邻,西接斜坡带,南至冷家堡构造带。该区在沙四段时期为深湖一半深湖—滨浅湖相沉积,四周物源供给充足,湖湾相对封闭。因此,该区石油地质条件优越、油气资源丰富;形成了一套以碳酸盐岩为主的沉积地层,纵向上可分为杜家台油层和高升油层上下两段,一直是辽河油田油气的主要产区之一^[19-21]。

收稿日期: 2019-09-23; **责任编辑:** 王传泰

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“页岩纳米尺度非均质性研究”(编号:51674211)、国家自然科学基金重点项目“致密气藏储层干化、提高气体渗流能力的基础研究”(编号:51534006)联合资助。

作者简介: 尹浪(1993—),男,硕士研究生,主要从事储层地质与储集层保护研究工作。通信地址:成都市新都区新都大道8号,西南石油大学地球科学与技术学院;邮政编码:610500;E-mail:1907870745@qq.com

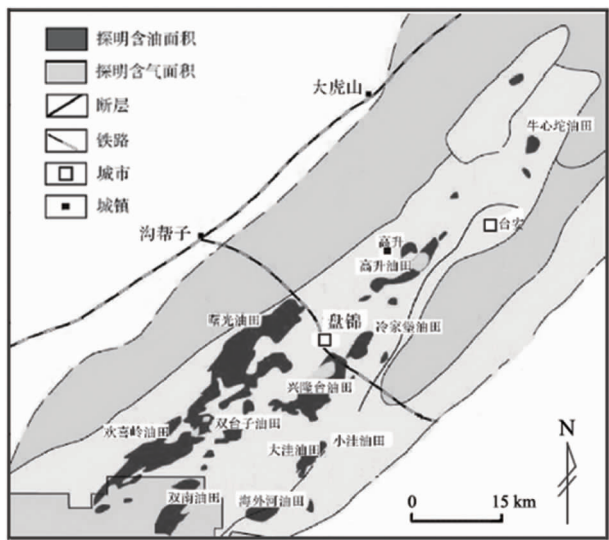


图 1 研究区地理位置^[18]

Fig. 1 Geographical location of the research area

2 岩石学特征

2.1 矿物组成

雷家地区沙四段整体矿物成分较为复杂,采用 X-射线衍射仪全岩定量分析岩石矿物组分如表 1 所述。由表 1 可知,沙四段矿物成分主要为白云石和黏土矿物,石英、长石、方沸石次之,此外还含有少量方解石、黄铁矿、菱铁矿。其中,白云石含量 21.1%~86.5%,平均 32.81%;黏土矿物 2.9%~46.8%,平均 20.75%;石英 1.4%~22.9%,平均 19.83%;长石 1.45%~59.2%,平均 16.09%;方沸石 2.2%~59.4%,平均 10.37%,黄铁矿和菱铁矿含量之和不足 1%。黏土矿物主要发育伊利石和伊蒙混层。伊利石百分含量为 19%~33%,平均 24.1%;伊蒙混层发育程度较高,相对含量可达 63%~81%,平均 71.2%。此外还发育少量高岭石和绿泥石,二者平均相对百分含量分别为 2.5%和 2.1%。

2.2 岩石类型

根据对沙四段 112 块岩芯观察及铸体薄片鉴定结果,将研究区岩性主要归纳为 3 大类,即白云岩类、方沸石岩类和泥岩类(图 2)。其中,白云岩类 49.11%;泥岩类 39.29%;方沸石岩类最少,占 11.61%。

白云岩类主要呈灰黄色—灰褐色—灰色,包括泥晶云岩、含泥泥晶云岩、泥质泥晶云岩、含泥含方沸石泥晶云岩、含泥方沸石质泥晶云岩、泥晶粒屑云岩及含泥粒屑泥晶云岩等 7 种岩石类型。其具有粒屑结构、块状构造,泥晶结构、层理构造;矿物成分以白云石为主(含量一般在 70%~85%),次为黏土矿物、方沸石、石英和长石细碎屑。方沸石呈泥晶和胶粒状,纹层状分布;泥质为黏土及石英、长石细碎屑。该类岩石粒间孔发育相对较好,存在裂缝,为较好—中等储集岩。

方沸石岩类主要包括含泥含云方沸石岩、含泥云质方沸石岩、泥质含云方沸石岩及泥质云质方沸石岩等 4 种岩石类型。岩石呈灰色、深灰色,具有泥晶结构、泥质结构,具有层理构造。矿物成分以方沸石为主,次为泥质和白云石;方沸石呈泥晶或胶粒状,黄铁矿和菱铁矿普遍存在。该类岩石硬度大,较致密,裂缝及溶孔发育差,储集性能较差。

泥岩类主要包括含云方沸石质泥岩、碳酸盐质页岩、云质泥岩及含碳酸盐泥岩等 4 种岩石类型。深灰色,泥质结构,局部显层理构造。矿物成分以泥质为主(含量大于 60%),次为碳酸盐矿物。泥质为黏土矿物及粒径小于 0.01 mm 石英、长石细碎屑;碳酸盐以白云石为主,次为文石、方解石,白云石以泥晶为主。该类岩石形成的储层储集性能较差。

3 物性特征

本次研究选取雷家沙四段直径为 2.5 cm 的标准岩芯 52 块,测试其孔隙度、渗透率,实验结果如图 3 所示。

表 1 沙四段储层岩石 X-全岩分析矿物含量统计

Table 1 Statistics of mineral content in X-whole rock analysis of reservoir in Sha4 member

层位	黏土矿物/%	石英/%	钾长石/%	斜长石/%	方解石/%	白云石/%	方沸石/%	黄铁矿/%	菱铁矿/%
杜 I	32.39	33.35	4.91	9.22	4.80	12.09	2.50	0.38	0.35
杜 II	13.68	13.05	7.57	11.68	5.80	44.05	3.27	0.73	0.16
杜 III	10.26	10.21	4.26	3.82	3.29	35.52	31.51	0.85	0.28
高升	19.59	15.01	3.56	5.10	11.81	39.57	4.19	0.75	0.42

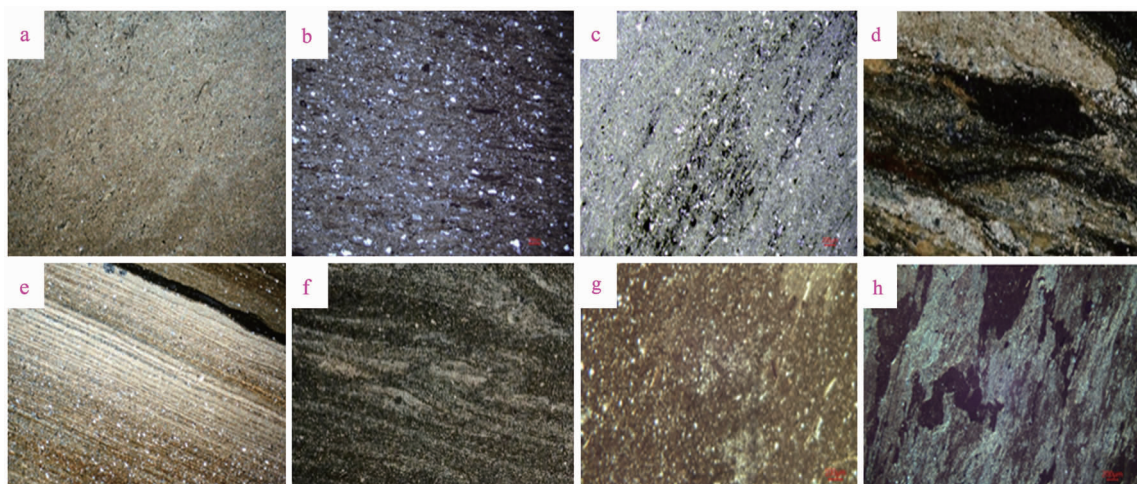


图2 雷家地区沙四段主要岩石类型

Fig. 2 Main rock types in Sha4 member of Leijia area

- a. 泥质泥晶云岩, 雷 88 井, 3486.02 m; b. 泥晶粒屑云岩, 雷 86 井, 1654.38 m, 正交偏光 25×;
c. 含泥晶云岩, 雷 88 井, 2573.93 m, 正交偏光 25×; d. 泥质含云方沸石岩, 雷 57 井, 2382.0 m, 正交偏光 50×;
e. 雷 88 井, 3492.27 m, 碳酸盐质页岩;
f. 含云方沸石质泥岩, 雷 57 井, 2347.6 m, 正交偏光 25×; g. 云质泥岩, 雷 84 井, 2656.10 m, 正交偏光 50×;
h. 含碳酸盐泥岩, 雷 84 井, 2661.76 m, 正交偏光 25×

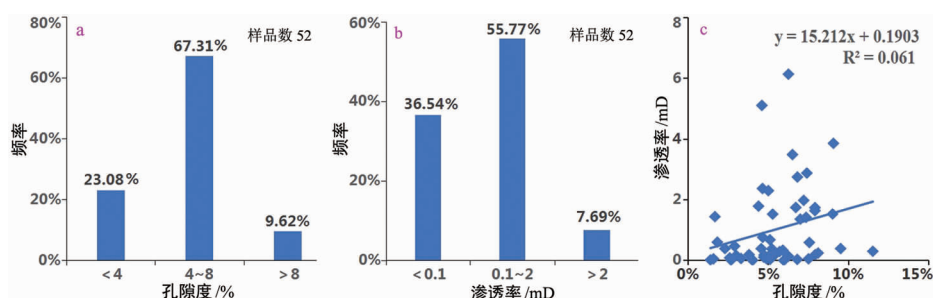


图3 沙四段实测孔隙度、渗透率分布直方图及孔渗交会图

Fig. 3 Histogram of the Measured porosity, and permeability and Intercore permeability diagram of Sha4 member

沙四段岩芯孔渗分析结果表明,岩芯孔隙度分布于 1.68%~11.65%之间,平均值 6.01%,主要集中于 4%~8%,且占比达 67.31%(图 3a);渗透率分布于 0.01~6.35 mD,平均 1.12 mD,主要集中于 0.1~2 mD,占比 55.77%,渗透率小于 0.1 mD 的占 36.54%(图 3b),总体来说属于特低孔特低渗型储层。从沙四段储层的孔渗交汇图中可以看出,储层孔隙度与渗透率相关性并不明显(图 3c),相关系数 $R^2=0.0611$ 。

4 孔隙结构特征

4.1 储集空间类型

根据对雷家沙四段微观铸体薄片、场发射扫描电镜和氩离子抛光扫描电镜等图象观察分析,雷家沙四段广泛发育多尺度孔隙和裂缝,储集空间类型丰富多样(表 2)。按照储集空间几何形态、大小和成因进行分类,储集空间类型以晶间溶孔、粒间溶孔、粒内溶孔、晶间微孔等次生孔隙及裂缝为主;此外还发育有机质孔和溶蚀孔洞(图 4a—图 4i)。

4.2 氮气吸附法分析孔隙结构特征

(1) 孔隙形态

本次对雷家地区沙四段样品进行铸体薄片和扫描电镜的观察及氮气吸附测试。

表 2 雷家沙四段致密油储层主要储集空间类型

Table 2 Main reservoir space types of dense oil reservoirs in Sha4 member in Leijia area

储集空间类型	发育特征	主要岩性	发育程度
次生溶孔	由溶蚀作用形成,分布广泛,形态各异,孔径为纳米~微米级	泥晶粒屑云岩、含泥方沸石质泥晶云岩	高
晶间微孔	形状不规则,孔径较小,多为纳米级孔,黄铁矿晶体中多有发育	粒屑泥晶云岩	高
有机质孔	由有机质生烃演化所形成孔径 100~800 nm,呈不规则形状,连通性差	云质泥岩、泥质泥晶云岩	中
溶蚀孔洞	孔径大于 2 mm,肉眼可见,由溶蚀作用形成,发育较少,连通性较差	泥质泥晶云岩、泥晶粒屑云岩	低
构造缝	由构造应力作用岩石破裂所形成,具有较好的储渗能力	泥质含云方沸石岩、含泥方沸石质泥晶云岩	中
溶蚀缝	由溶蚀作用形成,多被泥质、有机质填充	泥质泥晶云岩、含泥泥晶云岩	高
微裂缝	裂缝宽度微米级纳米级均有,是该区重要的渗流通道	碳酸岩质页岩、含云方沸石质泥岩	高

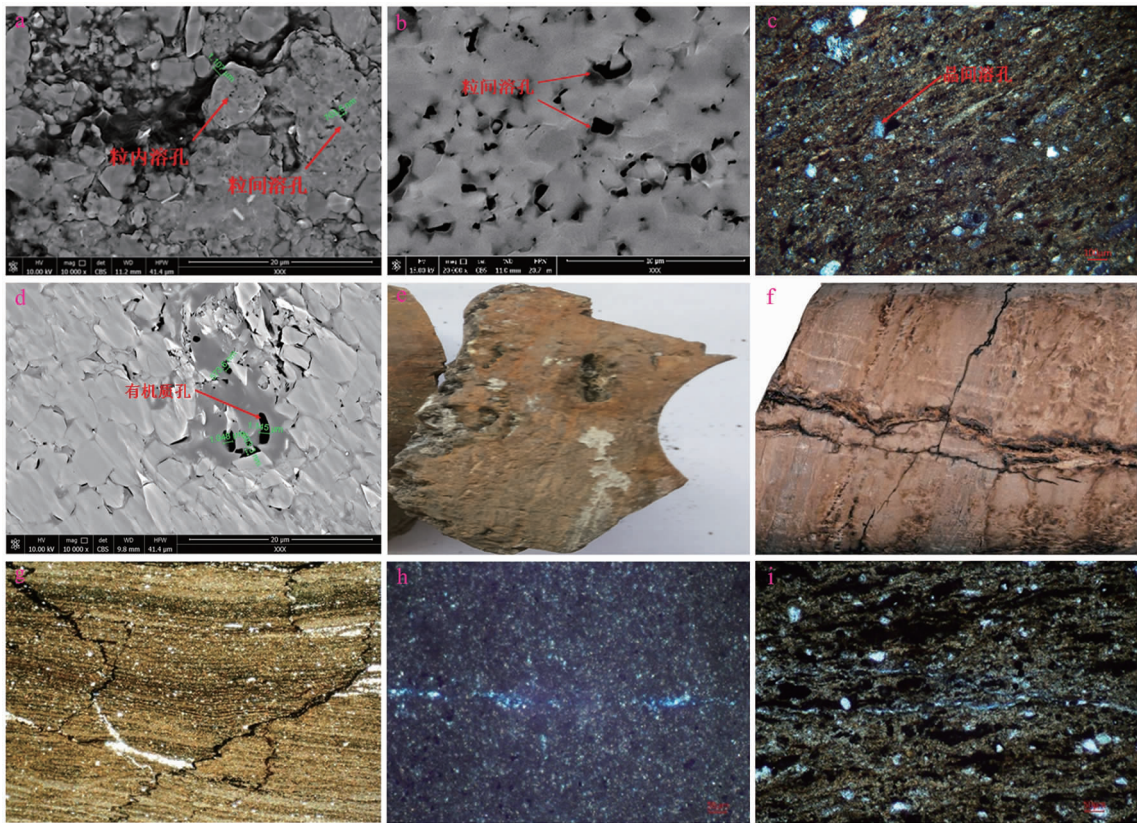


图 4 雷家沙四段致密油储层主要储集空间类型

Fig. 4 Main reservoir space types of dense oil reservoirs in Sha4 member

- a. 粒间溶孔、粒内溶孔,雷 88 井,2634.75 m;b. 粒间溶孔,雷 86 井,656.70 m;
c. 晶间微孔,雷 96 井,3128.3 m,单偏光 10×;d. 有机质孔,雷 88 井,3483.18 m;
e. 溶孔及溶洞,雷 88 井,2573.55 m,自然光;f. 构造交叉裂缝,雷 84 井,2636.15 m,自然光;
g. 压溶缝,有机质和泥质充填,雷 84 井,2652.20 m,单偏光 20×;
h. 溶蚀缝,雷 88 井,3485.68 m,正交光 20×;i. 溶蚀缝,雷 96 井,3126.7 m,单偏光 20×

从低温氮气吸附脱附等温曲线(图 5)可以看出,吸附曲线在形态上差别不大,整体上呈现出反 S 型的形状;根据 2015 年国际纯化学与应用化学联合会(IUPAC)对等温线进行的分类^[22]方法,本次研究获得的曲线接近于Ⅱ型吸附等温线。从图中可以看

出,当接近饱和蒸汽压时,曲线并没有呈现出吸附饱和现象,表明样品在吸附氮气的过程中孔道中吸附气体转化为液体,发生了毛细管凝聚现象,即样品中含有一定量的中孔和大孔。样品吸附曲线和脱附曲线在压力较高时并不重合,形成吸附回线,吸附回线

的形态在一定程度上能够反映出孔隙结构特征和类型,IUPAC 将滞后环分为 5 类^[22]:H1 型、H2 型、H3 型、H4 型和 H5 型。沙四段回滞环可以分为两种类型,1、23、64、80 号样品的回滞环较宽大,吸附曲线在相对压力接近 1 时笔直上升,脱附曲线在相对压力为 0.4~0.5 处下降很快(图 5a),与 IUPAC 推荐的 H2 型回线接近,对应于细颈广体的墨水瓶形孔隙;42 号样品回滞环狭小细长,吸附曲线与脱附曲线几乎平行(图 5b),属于 H3 型回滞环,反映了样品中存在平行板状的狭缝型孔隙。

(2) 孔径分布

将氮气吸附得到的数据分为小于 9.54、9.54—20.84、20.84—32.26、32.26—45.63、45.63—60.94 nm 等 5 个孔径范围,计算各范围所对应的孔体积占总孔体积的比例。从孔径分布直方图(图 6a)上可以看到,孔径小于 9.54 nm 所贡献的孔体积最大,占总孔体积的 60.12%~83.41%,平均为 77.20%,可认为沙四段致密储层纳米孔中的主孔位于小于 9.54 nm 范围内,提供了主要的孔隙

体积。

4.3 CT 扫描技术分析孔隙结构特征

本次选取沙四段 4 块岩心进行三维 CT 扫描,通过对 4 块岩芯样品选定区域进行微-纳米级尺度测试,并重构 3D 微观孔隙结构(图 7)。从图 7 可以看出,沙四段岩芯裂缝、孔隙均有发育。26 号样品发育一条较为明显的裂缝(图 7a),其它三个样品则主要发育孔隙。基质内部微米级和纳米级孔隙都有发育,且纳米孔隙的数量远远高于微米级孔隙;以 35 号岩芯样品为例,微米级孔隙提取数量为 1859 条,纳米级孔隙提取数量为 16300 条(图 7b)。

将 CT 扫描得到的纳米孔的孔径分布进行分析,并按照 IUPAC 分类标准^[22],将孔径大小划分为小于 2 nm(微孔)、2~50 nm(中孔)、大于 50 nm(大孔)3 个范围,同样分别计算它们各自所贡献的孔隙体积占总孔体积的比例,孔径分布直方图见图 6b 所示。可以看到,4 个样品中均无孔径小于 2 nm 的微孔;2~50 nm 的中孔贡献的孔体积占总体积的 57.44%~87.07%,平均 73.94%;大于 50 nm 的大

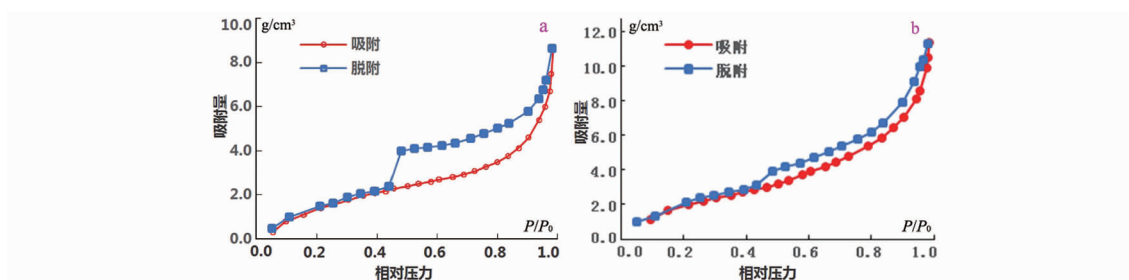


图 5 雷家地区沙四段致密油储层样品氮气吸附等温线

Fig. 5 Nitrogen adsorption isotherms of dense oil reservoir samples in Sha4 member of Leijia area

a. 1 号样; b. 42 号样

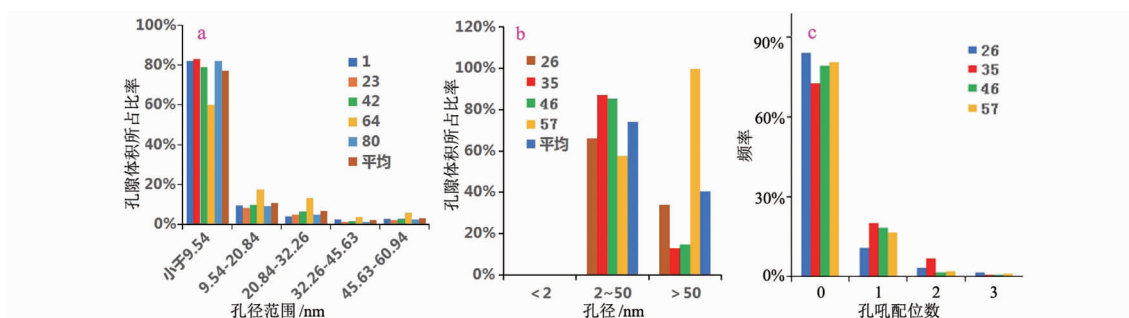


图 6 沙四段孔径分布直方图及纳米级孔喉配位

Fig. 6 Histogram of pore size distribution and coordination of nanometer pore throat in Sha4 member

a. 孔径分布直方图(氮气吸附); b. 孔径分布直方图(CT); c. 纳米级孔喉配位数

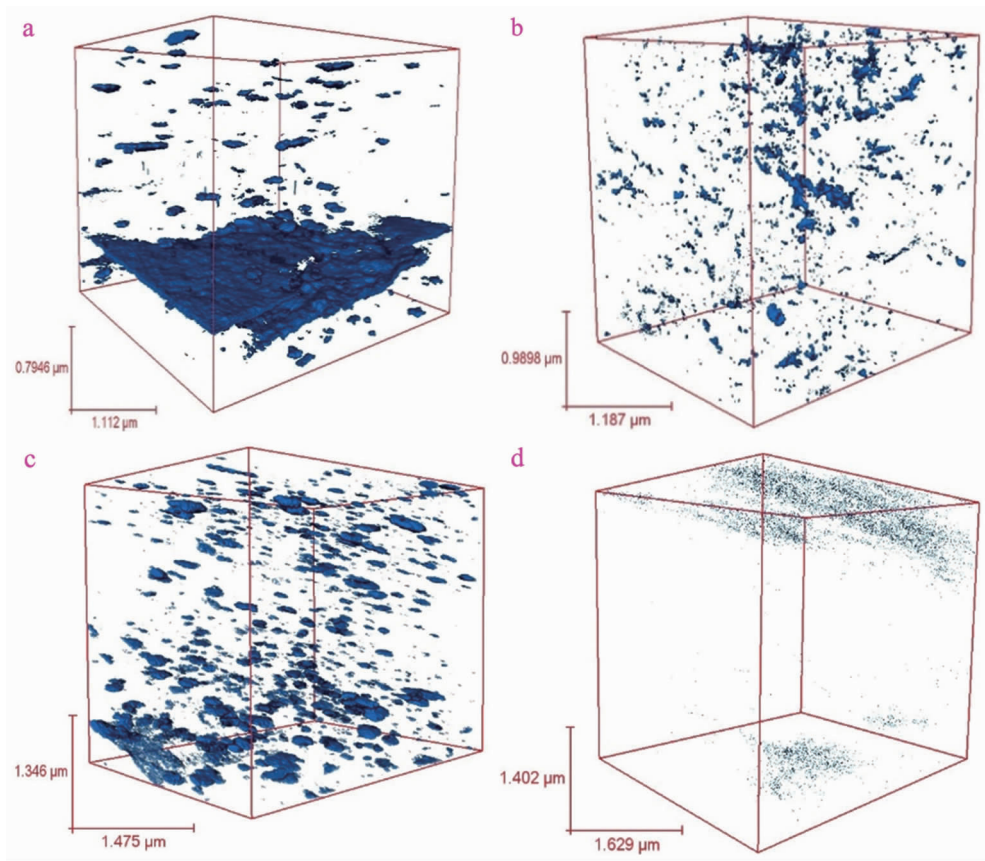


图 7 沙四段致密油储层储集空间三维模型图

Fig. 7 Three-dimensional model of dense oil reservoir space in Sha4 member

- a. 26 号, 雷 88, 3500.37 m, 孔隙度 6.25%, 渗透率 1.31 mD;
- b. 35 号, 雷 96, 3402.00 m, 孔隙度 5.27%, 渗透率 0.07 mD;
- c. 46 号, 雷 88, 3508.5 m, 孔隙度 4.64%, 渗透率 0.14 mD;
- d. 57 号, 雷 93, 3080.02 m, 孔隙度 2.02%, 渗透率 0.01 mD

孔的孔体积占总孔体积 12.93%~42.56%, 平均为 26.06%。因此, 可认为沙四段致密储层纳米级孔隙体积主要由中孔提供, 大孔次之, 微孔对孔体积贡献最少, 接近于无。

本次提取了 4 个样品纳米级扫描区域的孔喉配位数以分析孔喉连通性(见图 6c)。分析结果表明, 4 个样品扫描区域孔喉配位数高峰区间为 0~1, 即样品中每个孔隙普遍与 0~1 个喉道连通, 与 0 个喉道连通的比例最高, 平均 73.15%, 表明该区孔隙分布较为分散, 孔喉配位差, 储集空间彼此连通性较差, 可见该区并不具备良好的渗流通道。

4.4 压汞法分析孔隙结构特征

对于特低孔特低渗型岩芯, 恒压压汞法能够更多地检测到岩芯中的细小孔喉分布^[23]。因此本次研究采用恒压压汞法对沙四段储层 9 块岩芯进行测试, 得到研究区储层孔喉参数如表 3 所述。

从表 3 可以看出, 沙四段储层基质孔隙排驱压

力并不大, 介于 0.009~0.209 MPa 之间, 平均 0.06 MPa, 最大孔喉半径 3.51~85.72 μm, 平均 33.42 μm, 可见该区存在较大孔隙。但中值压力 5.76~24.34 MPa, 平均 15.42 MPa, 中值半径 0.03~0.19 μm, 平均 0.07 μm, 可见该区大孔隙并不多见, 普遍发育的是微小孔隙。最大进汞饱和度 74.06%~89.73%, 平均 82.76%, 进汞量较高, 残余汞饱和度 11.62%~65.53%, 退汞效率 4.32%~65.53%, 平均退汞效率 39.58%。分选系数为 0.27~4.32, 平均 2.12, 总体分选中等较差。

5 储层类型

在以上研究的基础上, 本文根据雷家地区沙四段储层的储集空间类型及孔隙结构特征, 将沙四段储层分为孔隙型、裂缝型和裂缝-孔隙型 3 类储层(表 4)。

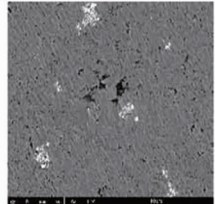
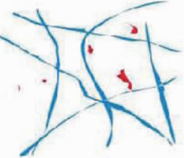
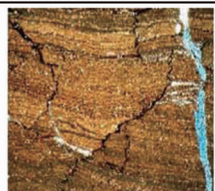
表 3 沙四段储层岩芯恒压压汞参数

Table 3 constant pressure mercury injection parameters of reservoir core in Sha4 member

样号	孔喉最大半径/ μm	排驱压力/ MPa	中值压力/ MPa	中值半径/ μm	半径均值/ μm	汞饱和度/%		退汞效率/%	均质系数/%	分选系数/%
						最大	残余			
3	3.51	0.209	10.98	0.07	0.61	75.71	24.23	68	0.17	4.32
8	14.29	0.051	23.44	0.03	1.12	80.97	39.94	47.24	0.08	0.42
9	14.04	0.052	3.83	0.19	2.98	80.7	35.43	53.2	0.21	3.34
11	14.09	0.052	24.34	0.03	0.83	87.81	50.98	32.66	0.06	0.27
14	4.714	0.156	5.76	0.13	0.95	89.73	11.62	84.65	0.2	4.12
29	56.19	0.013	24.13	0.03	1.43	80.93	61.61	18.63	0.05	0.51
33	56.17	0.013	15.89	0.05	1.24	88.63	63.52	16.10	0.08	1.12
37	85.72	0.009	10.3	0.07	2.3	74.06	58.84	22.28	0.26	3.42
93	52.27	0.014	20.11	0.04	1.36	86.31	65.53	13.44	0.19	1.57

表 4 沙四段储层类型及特征

Table 4 Reservoir types and characteristics of Sha4 member

储层类型	储集空间类型	主要岩石类型	物性特征	模型图	典型照片
孔隙型	溶蚀孔、晶间孔、有机质孔	泥晶粒屑云岩、含泥粒屑泥晶云岩	孔隙度 7%~10%，渗透率 0.01~0.1 mD		
裂缝型	构造缝、溶蚀缝、微裂缝	泥质泥晶云岩、碳酸盐质页岩、泥岩类	孔隙度小于 4.0%，裂缝渗透率 2~6 mD		
裂缝-孔隙型	溶蚀孔、微裂缝、溶蚀缝	泥质含云方沸石岩、含泥方沸石质泥晶云岩、含泥泥晶云岩	孔隙度 4%~7%，渗透率 0.1~2 mD		

(1) 孔隙型储层

沙四段孔隙型储层储集空间主要为溶蚀孔洞、晶间微孔，次生溶孔和有机质孔，孔隙形状很不规则且分布较为分散。部分含微裂缝，但整体发育程度低。喉道细小，连通性较差。该类储层饱和中值压力大于 20 MPa，中值半径小于 0.05 μm ，孔隙度相对较高，可达 7%~10%，渗透率却很低，在 0.01~0.1 mD 之间。以泥晶粒屑云岩和含泥含砂粒屑泥晶云岩居多，该类储层的形成发育受沉积和成岩作用影响，沉积环境为滨浅湖水动力条件强的高能环境，溶解作用在泥晶云岩、粒屑云岩中形成溶蚀孔隙，改善了储集层性能。孔隙型储层在高升油层段、杜Ⅱ和杜Ⅲ段均有发育，含油性较好，储层单层厚度 1

~4 m。

(2) 裂缝型储层

裂缝型储层储集空间以裂缝和少量沿裂缝分布的溶蚀孔隙为主，裂缝既可以作为渗流通道又可以作为储集空间，主要发育构造缝、溶蚀缝及各种微裂缝，裂缝发育程度高且呈网状延伸；裂缝宽度纳米级、微米级均有。由于其形成于浅湖-半深湖环境，水动力条件较弱，岩性较纯，主要发育泥质结构的岩石，如泥质泥晶云岩、泥岩和碳酸盐质页岩，岩石脆性大、层薄，储层基质岩块渗透率极低。但此类储层饱和中值压力小于 10 MPa，中值半径 0.1~0.2 μm ，裂缝物性相对较好，孔隙度小于 4.0%、裂缝渗透率 2~6 mD，含油性好，主要发育在高升油层段及

杜I段,储层厚度一般大于10 m。

(3) 裂缝-孔隙型储层

裂缝-孔隙型储层综合了孔隙型和裂缝型储层的特征,既发育孔隙又发育有裂缝。其中,孔隙为主要储集空间,包括溶蚀孔、晶间孔和有机质孔;裂缝主要为渗流通道,但同时也具有一定储集能力。裂缝沟通了不同尺度溶蚀孔、晶间孔和有机质孔,连通性相对较好。裂缝和孔隙的同时发育对改善地层渗流能力以及提高储层的储集能力具有重大贡献。该储层形成受多种地质环境影响,发育于高能水体环境,多为含泥晶云岩、含泥方沸石质泥晶云岩和泥质含云方沸石岩。该类储层饱和中值压力10~20 MPa,中值半径0.05~0.1 μm ;该类储层物性相对较好,孔隙度4%~7%,渗透率0.1~2 mD,含油性好;主要发育在杜家台段,高升油层段偶有发育,储层单层厚度一般大于5 m。

6 结语

通过对雷家地区沙四段致密油储层特征研究,得出了以下结论:

(1)雷家地区沙四段致密油储层岩石类型多样,既发育碳酸盐岩,同时又有碎屑岩发育,根据组成矿物含量的不同将雷家地区沙四段储层岩性划分为:白云岩类、方沸石岩类、泥岩类3大类。

(2)沙四段岩芯孔隙度平均值6.01%,渗透率平均1.12 mD,总体来说属于特低孔低渗型储层;孔隙度与渗透率相关性并不明显,相关系数 $R^2=0.611$,孔隙结构较复杂,具有少量微米级孔隙,但主要由纳米孔组成,纳米孔主孔位于2~20 nm,多呈开放状态,孔隙分布较为分散,喉道数量少,孔喉配位差。

(3)根据沙四段储层储集空间类型及孔缝分布特征,将沙四段储层分为孔隙型、裂缝型、裂缝-孔隙型3类储层。其中,孔隙型储层孔隙分布较为分散,连通性较差;裂缝型储层岩性主要为泥岩类;裂缝-孔隙型储层物性相对较好,主要发育在杜家台段。

参考文献:

- [1] 赵文智. 石油地质理论与方法进展[M]. 北京:石油工业出版社,2006.
- [2] 邹才能,陶士振,侯连华. 非常规油气地质[M]. 北京:地质出版社,2011.
- [3] 许怀先,李建忠. 致密油勘探进展与资源潜力研讨会在西安召开致密油——全球非常规石油勘探开发新热点[J]. 石油勘探与开发,2012,39(1):99.
- [4] 贾承造,邹才能,李建忠,等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报,2012,33(3):343-350.
- [5] 汪少勇,王社教,李登华,等. 致密油地质风险分析方法与流程初探[J]. 特种油气藏,2015,22(3):1-7+151.
- [6] 孙赞东,贾承造,李相方. 非常规油气勘探与开发(上册)[M]. 北京:石油工业出版社,2011.
- [7] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C. Morphology,genesis and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett shale [J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79: 848-861.
- [8] Schmoker J W, Hester T C. Organic carbon in Bakken Formation United States portion of Williston Basin [J]. AAPG Bulletin, 1983, 67(12): 2165-2174.
- [9] Webster R L. Petroleum source rocks and stratigraphy of Bakken Formation in North Dakota [J]. AAPG Bulletin, 1984, 68(7): 953.
- [10] Miller B, Paneitz J, Mullen M. The successful application of a compartment completion technique used to isolate multiple-hydraulic-fracture treatments in horizontal shale wells in North Dakota [R]. SPE, Series, 116469, 2008.
- [11] Johnstone B. Bakkenblackgold [N]. Leader-Poster, 2017, 10(6).
- [12] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报,2012,33(2):173-187.
- [13] 刘红岐,李博,王拥军,等. 川中大安寨段致密油储层储集特征研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2018(6):47-55.
- [14] 邹才能,张国生,杨智,等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学[J]. 石油勘探与开发,2013,40(4):385-399.
- [15] 赵政璋,杜金虎,邹才能. 致密油气[M]. 北京:石油工业出版社,2012.
- [16] 巨世昌. 松辽盆地齐家地区高台子油层致密油成藏动力研究[D]. 西安:西安石油大学,2015.
- [17] 张威,刘新,张玉玮. 世界致密油及其勘探开发现状[J]. 石油科技论坛,2013,32(1):41-44+68.
- [18] 赵会民. 辽河西部凹陷雷家地区古近系沙四段混合沉积特征研究[J]. 沉积学报,2012,30(2):283-290.
- [19] 单俊峰,黄双泉,李理. 辽河坳陷西部凹陷雷家湖相碳酸盐岩沉积环境[J]. 特种油气藏,2014,21(5):7-11+151.
- [20] 刘世瑞,李杨,张子明. 雷家地区沙四段致密油储层改造因素分析[J]. 特种油气藏,2016,23(1):58-61+153-154.
- [21] 王海生. 雷家地区湖相碳酸盐岩致密油储层微观特征[J]. 特种油气藏,2016,23(5):26-29+152.
- [22] Thommes M, Kaneko K, Neimar K A V. Physisorption of Gases, with Special Reference to the Evaluation of Surface Area and Pore Size Distribution [J]. Pure and applied chemis-

try, 2015, 87(9-10): 1051-1069.

评价中的应用[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(7): 1316-

[23] 朱华银, 安来志, 焦春艳. 恒速与恒压压汞差异及其在储层

1322.

Research on the characteristics of the dense oil reservoir in the Sha4 member of the Shahejie Formation in Leijia area

YIN Lang^{1,2}, ZHAO Feng^{1,2}, TANG Hongming^{1,2}, SHU Run^{1,2}, PENG Dongyu^{1,2}

(1. School of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. State key laboratory of reservoir geology and development engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: The exploitation and research of dense oil in Sha4 member of Leijia area has just started and geological understanding of the reservoir is not deep enough. In this paper, the geological characteristics of Sha4 member reservoir are systematically analyzed by means of core observation, XRD diffraction, casting thin section, field emission scanning electron microscope, argon ion polishing scanning electron microscope, CT scanning and nitrogen adsorption. Dolomite is the main rock here. According to mineral content three types of rock, dolomitoid, zeolitoid and mudstonoid and 15 sub-types are identified in the reservoir. The porosity is in range 1.68% ~ 11.65%, and the permeability 0.01~6.35 mD. It belongs to ultra-low porosity and ultra-low permeability reservoir. There are many types of reservoir space, such as dissolution pore, intercrystal pore and organic matter pore fracture. The pore structure is complex. Although a small number of macropores occur nano-pores is dominant. The pores are scattered and the number of throat is small thus the connectivity poor. According to the pore structure and the space distribution characteristics of the reservoir, the reservoir can be divided into three types: pore type, fracture type and fracture-pore type. Among them, the pore distribution of pore type reservoir is scattered and the connectivity is poor. The lithology of fracture reservoir is mainly mudstone, and the physical properties of fracture-pore reservoir are relatively good, which are mainly developed in Dujiatai section.

Key Words: tight oil; fourth member of Shahejie Formation; reservoir characteristics; pore structure; reservoir space; Liaohe Basin