

致密砂岩储集空间多尺度表征 ——以松辽盆地齐家地区高台子油层为例

李易霖^{1,2}, 张云峰^{1,2}, 尹淑丽³, 丛琳^{1,2}, 闫明^{1,2}, 田肖雄^{1,2}

(1. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318;

2. 非常规油气成藏与开发省部共建国家重点实验室培育基地, 黑龙江 大庆 163318;

3. 中国石油 新疆油田公司 工程技术研究院, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:以松辽盆地齐家地区高台子油层三、四段致密砂岩储层为研究对象,利用纳米与微米CT、自动矿物识别系统(QEMSCAN)、MAPS图像拼接技术以及环境扫描电镜(ESEM)等非常规测试新技术,从宏观和微观两个尺度对齐家地区高台子致密储层空间进行表征。研究表明:①宏观尺度下,储层岩性主要以粉砂岩与泥质粉砂岩为主;层理构造多样,以块状层理、槽状交错层理、楔状层理和透镜状层理为主;砂泥间互特征明显,层理构造的多样性增强了致密储层的非均质性,块状层理最有利于致密油富集。②微观尺度下,孔隙具有微米-纳米连续分布的特征,微米孔隙峰值主要集中在2~3 μm,纳米孔主体孔喉分布在200~300 nm。不同三维建模区域孔喉空间分布及连通性特征具有明显的微观非均质性;微观孔隙结构类型以粒间溶孔、粒内溶孔和微裂缝为主,孔隙度高值区对应有机酸高值区,存在较明显的耦合关系,受溶蚀作用控制显著。

关键词:纳米孔喉;微米孔喉;微观非均质性;致密砂岩;齐家地区;松辽盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characterization of the pore space in tight sandstone reservoirs from macroscopic and microscopic perspectives: A case study of Gaotaizi reservoir in Qijia area, the Songliao Basin

Li Yilin^{1,2}, Zhang Yunfeng^{1,2}, Yin Shuli³, Cong Lin^{1,2}, Yan Ming^{1,2}, Tian Xiaoxiong^{1,2}

(1. College of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China;

2. Unconventional Oil and Gas Reservoir Forming and Exploitation Key Laboratory Cultivation Base Co-sponsored by Province and Ministry, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 3. Engineering Technology Research Institute of Xinjiang Oilfield Company,

PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: Comprehensive analyses are conducted to characterize the Gaotaizi tight reservoir in Qijia area from macroscopic and microscopic perspectives, through Nano Micron CT, automatic mineral identification system (QEMSCAN), MAPS image mosaic technology, and environmental scanning electron microscopy (ESEM). From the macroscopic perspective, lithologies are mainly siltstone and argillaceous siltstone. The sedimentary bedding structures are diversified-massive bedding are the majority but cross-bedding, wedge bedding and lenticular bedding are also present. The obvious sand-shale interlayer and complicated sedimentary beddings commonly contribute to the heterogeneity of the tight reservoirs, even though the massive bedding is the most favorable for the enrichment of tight oil. The microscopic perspective reveals more interesting characteristics. Pores are continuously distributed in the micro to nano meter level, with the peak of micro pore sizes concentrated in the range of 2-3 μm, and that of nano pores around 200-300 nm. Microscopic heterogeneity can be obviously displayed in the pore-throat spatial distribution and connectivity features of different 3D modeling areas. The main pore spaces are intergranular dissolved pore, intragranular dissolved pore and micro cracks. Moreover, high porosity generally corresponds to high concentration of organic acids, indicating the controlling of porosity by dissolution.

Key words: nano pore-throat, micro pore-throat, microscopic heterogeneity, tight sandstone, Qijia area, Songliao Basin

收稿日期:2016-01-21;修订日期:2016-10-20。

第一作者简介:李易霖(1988—),男,博士研究生,沉积与储层地质学。E-mail:liyilindaqing@163.com。

通讯作者简介:张云峰(1968—),男,教授,博士生导师,沉积与储层地质学。E-mail:yunfeng4510@163.com。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41572132);国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA064903);黑龙江省自然科学基金项目(重点项目)(ZD2016007)。

致密油是指以吸附或游离状态赋存于生油岩中,或存在于与生油岩互层、紧邻的致密储集岩中,未经过大规模长距离运移,单井无自然产能,需要借助包括水平钻井和水力压裂在内的增产技术进行开发的原油^[1-4]。致密油是继页岩气之后全球非常规油气勘探开发又一重大发现,被石油工业界誉为“黑金”^[5]。以北美的威利斯顿盆地 Bakken 致密油^[6]、德克萨斯南部 Eagle Ford 致密油^[7]以及德克萨斯州中北部 Fort Worth 盆地 Barnett 致密油^[8]为代表的致密油勘探开发获得重大进展。国内致密油资源丰富,主要分布在鄂尔多斯盆地延长组^[9-10]、四川盆地侏罗系^[11-12]、松辽盆地青山口组^[13]、准噶尔盆地乌夏地区风城组^[14-15]和吐哈盆地侏罗系^[16]等,勘探前景广阔。以鄂尔多斯盆地延长组为典型代表,率先建成了国内首个工业化生产致密油区。近年来,松辽盆地北部致密油勘探在齐家地区青山口组高台子油层三、四段中取得了新突破^[17],成为大庆油田重要的接替资源。施立志等人对齐家地区高台子油层三、四段致密油的地质特征,形成条件,分布规律进行了深入研究^[13],而在致密砂储层空间多尺度表征方面研究相对薄弱。中国致密油储层以陆相沉积、分布面积相对小、物性差、多微-纳米级孔隙以及非均质性强等为主要特征^[18-19],有效开发面

临产量低、采收率低以及效益差等方面的挑战^[20-21]。常规储层测试分析技术不能直观反映储层内部孔吼大小、形态、分布与空间连通性,同时存在实验周期长与实验数据不全面等问题。恒速压汞、高压压汞、Maps 成像分析技术与微纳米 CT 扫描技术等非常规储层测试方法成为精细刻画致密储层微观孔隙结构的主要解决手段^[22]。

在前人研究的基础上,从宏观和微观两个尺度揭示了松辽盆地齐家地区高台子油层致密砂岩的非均质性。致密砂岩储集空间多尺度精细表征是揭示非常规油气富集规律的基础,同时也为致密储层的有效开发与准确评价致密储层甜点区提供了有力的技术保障。

1 地质概况

研究区位于松辽盆地中央拗陷,主要包括齐家凹陷及龙虎泡-大安阶地(图1),是一个区域鼻状构造背斜之上的穹隆背斜构造,表现为西高东低的单斜形态,断层走向为北北东向。临近齐家凹陷的生油中心,油源充足,致密油主要分布在青山口组高台子油层三、四段,为大型的河流三角洲平原-三角洲前缘沉积,源储匹配关系好,为致密油形成提供了良好的地质基础^[13]。

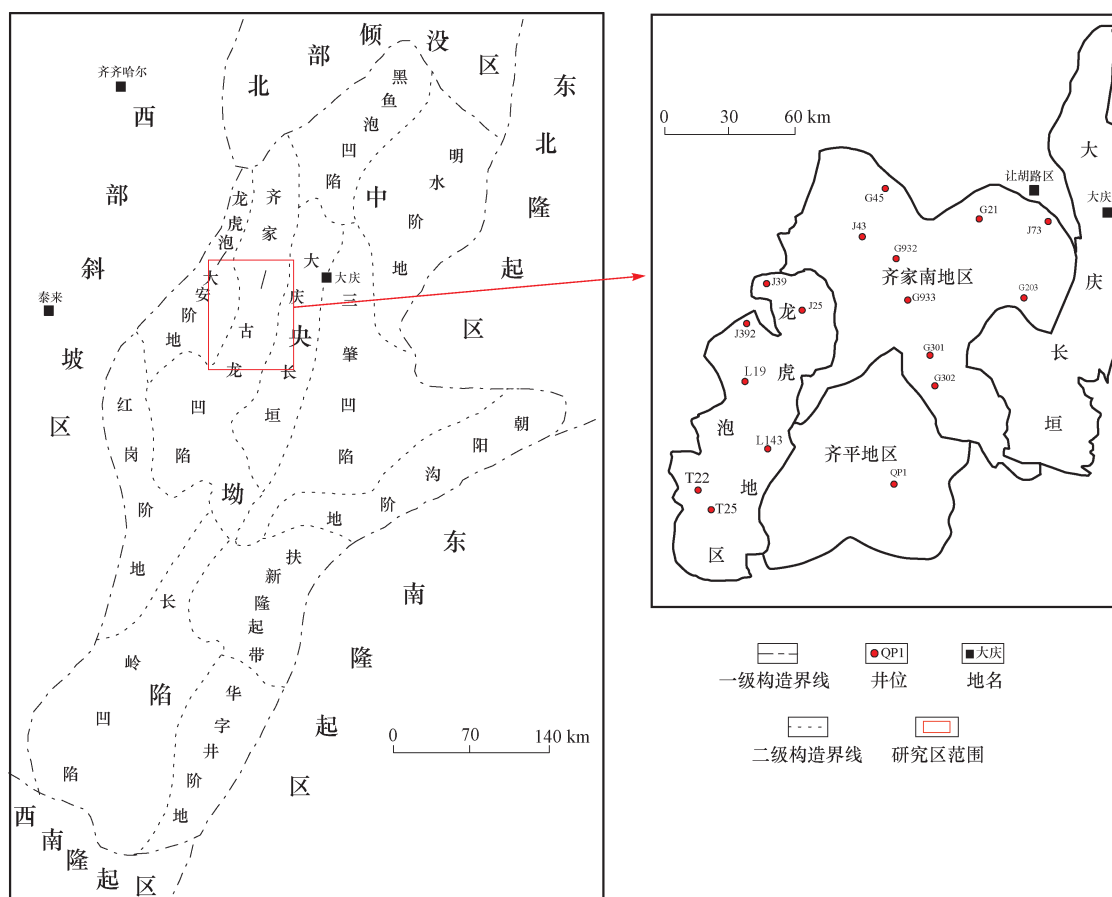


图1 松辽盆地齐家地区地理位置^[23]

Fig. 1 Location of Qijia area, the Songliao Basin^[23] (modified)

2 样品与实验

2.1 样品分布与采集

对研究区 30 口探评井进行了 3 100 m 取心段观察描述,利用岩心物性统计结果,优选了齐家地区高台子油层三、四段致密砂岩样品,具有较强的代表性(表 1)。

2.2 实验

铸体薄片等常规储层测试分析技术已无法满足致密砂岩储集空间的研究需求。本次研究采用 Maps 成像分析实验、QEMSCAN 矿物识别分析实验以及微纳米 CT 扫描成像实验等方法,综合分析齐家地区高台子油层致密砂岩储集空间孔隙类型及成因。

2.2.1 Maps 成像分析

Maps 图像拼接技术是利用美国 FEI 公司生产的 Helios 650 双束电镜,在选定区域内扫描出数千张超高分辨率的大小相同的小图像,利用小图像拼接成一张超高分辨率、超大面积的二维背散射电子图像(可任意缩放,便于观察)(图 2),最高分辨率达 10nm。利用 Maps 图像分析结果,可对二维尺度下的孔吼进行定性分析和评价,实现从微米-纳米级多尺度连续定量表征,对致密砂岩微观非均质的研究至关重要,为准确认识致密储集层微观孔隙结构提供了依据。

2.2.2 QEMSCAN 矿物识别分析

利用美国 FEI 公司生产的 QEMSCAN 650F 矿物自动识别及分析系统(最高分辨率达 1.2nm),对样品进行矿物种类分类、定量分析、矿物嵌布特征、矿物粒级分布以及矿物解离度等重要参数进行自动定量分析。通过 QEMSCAN 数据与 MAPS 成像分析结果叠加,可得到孔吼分布与矿物赋存的关系(图 3)。矿物定量识别及其空间分布,为地应力、井筒稳定性分析、工程力学甜点以及脆性评价等提供了岩石物理模型参数。

2.2.3 微-纳米 CT 扫描

采用中国石油大学(北京)纳米岩石物理实验室 MicroXCT-200 型微米 CT 扫描仪和 Ultra-XRM-L200 型纳米 CT 扫描仪,最高分辨率达 65 nm。利用 avizo 软件内置的先进数学算法,建立了松辽盆地齐家地区高台子油层致密储集空间三维孔隙网络模型(图 4,图 5)。微纳米 CT 扫描技术与常规岩心测试手段相比具有结果直观、数据丰富、简单易行等优势,实现了岩石原始状态无损三维成像,成为微观刻画致密储层微纳米孔隙结构及微观渗流模拟的主要解决手段。

表 1 松辽盆地齐家地区高台子油层样品信息
Table 1 Sample information about Gaotaizi reservoir in Qijia area, the Songliao Basin

样品编号	井号	取样深度 /m	孔隙度 /%	渗透率 /($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	岩性
Z1	G933	2 205.26	10.80	0.41	粉砂岩
Z2	G933	2 210.68	6.48	0.03	粉砂岩
Z3	G933	2 184.31	10.66	0.12	粉砂岩
Z4	J18	2 307.58	7.82	0.04	粉砂岩
Z5	J393	1 977.05	9.49	0.08	粉砂岩

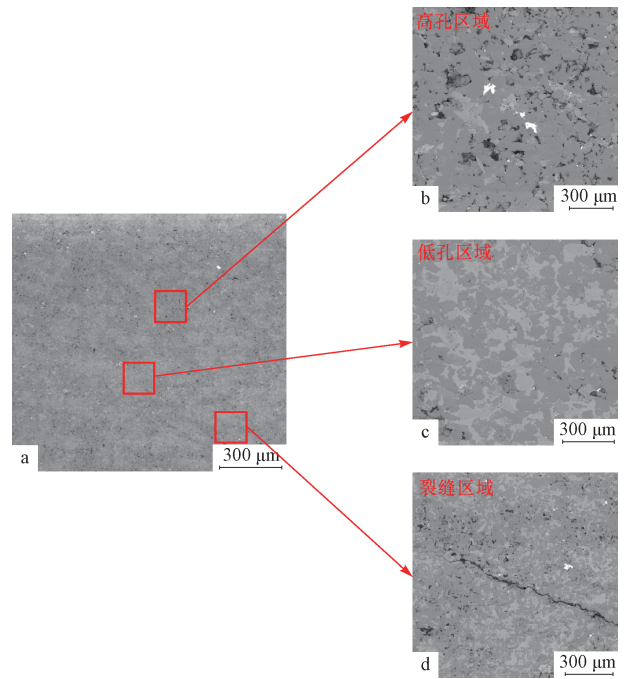


图 2 松辽盆地齐家地区 G933 井 Z1 样品 Maps 成像分析结果
(图像大小为 17.96 mm × 16.76 mm)

Fig. 2 MAPS imaging analysis results of Sample Z1 from Well G933 in Qijia area, the Songliao Basin (image size 17.96 mm × 16.76 mm)

3 结果与讨论

3.1 致密砂岩储层宏观孔隙结构特征

3.1.1 岩石学特征

齐家地区高台子油层三、四段沉积期以三角洲相和湖泊相为主,砂体类型以水下分流河道、河口坝、席状砂与滨浅湖为主,各类砂体在平面上分布范围广,砂体厚度大,连续性较好,平面分布稳定^[12,24]。岩心观察描述结果显示,①高三、高四段宏观裂缝不发育,以层理缝、粒内缝与粒缘缝等为主。②层理构造多样,可见块状层理(图 6a),槽状交错层理(图 6b),楔状层理(图 6c)与透镜状层理(图 6f),同时可见斜层理(图 6h),波状层理(图 6e)与平行层理(图 6d)等,砂岩底部见冲刷突变面(图 6i),砂泥间互特征明显(图 6l)。岩心内部普遍存在的钙质胶结,可见动植物化石(图 6j),

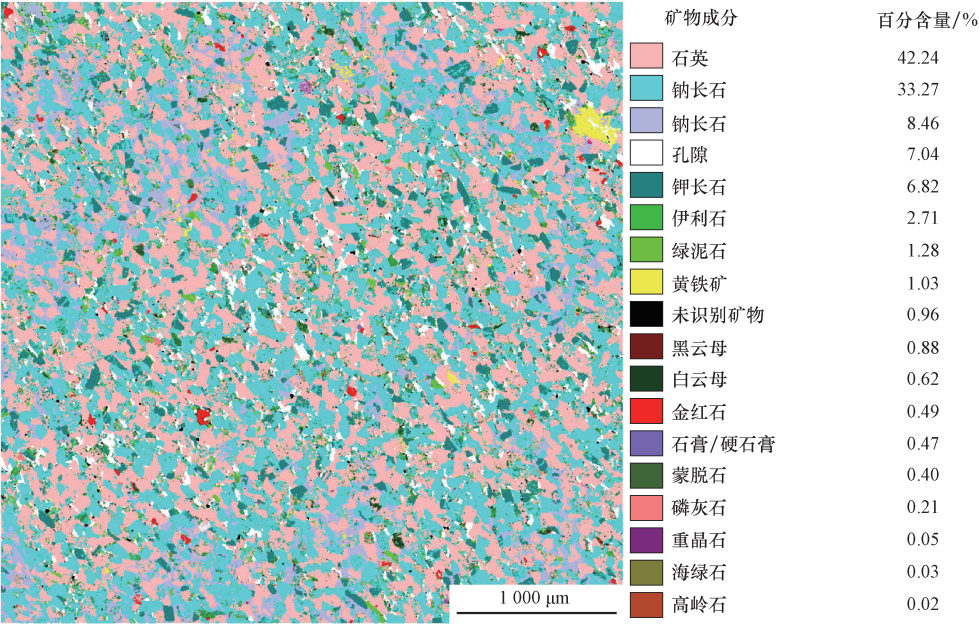


图 3 齐家地区松辽盆地 G933 井 Z1 样品 QEMSCAN 分析结果

Fig. 3 QEMSCAN analysis results of Sample Z1 from Well G933 in Qijia area, the Songliao Basin

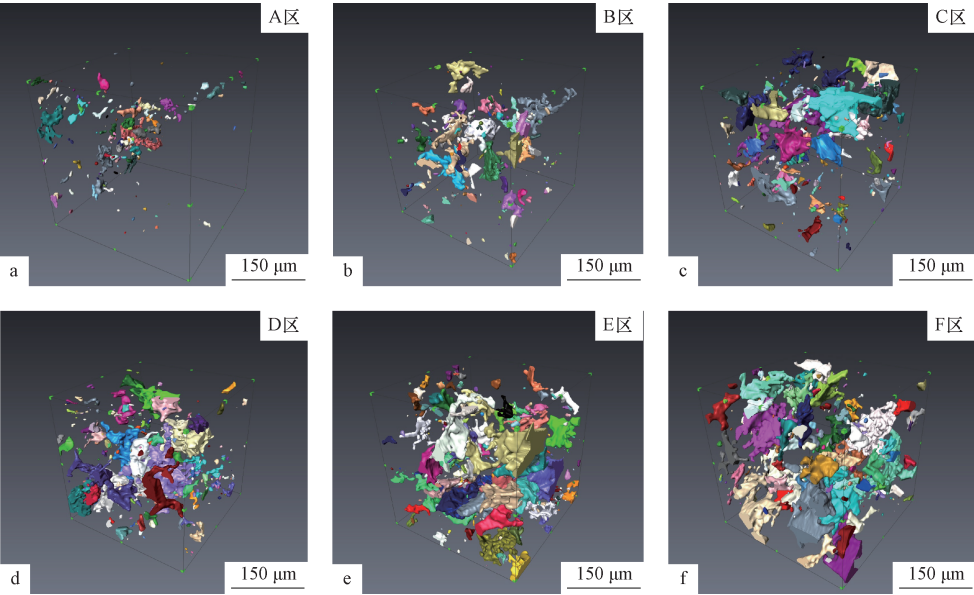


图 4 松辽盆地齐家地区 G933 井 Z1 样品微米尺度下不同建模区域孔隙网络模型

Fig. 4 Micro scale pore model for different modeling zones in Sample Z1 from Well G933 in Qijia area, the Songliao Basin

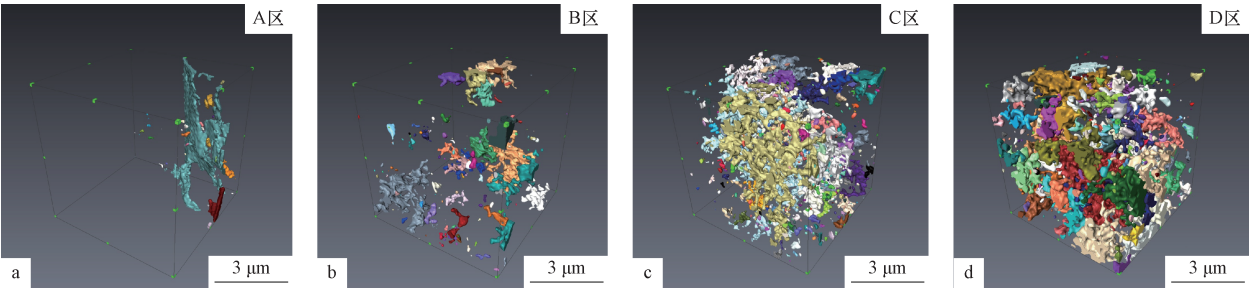


图 5 松辽盆地齐家地区 G933 井 Z1 样品纳米尺度下不同建模区域孔隙网络模型

Fig. 5 Nano scale pore model for different modeling zones in Sample Z1 from Well G933 in Qijia area, the Songliao Basin



图6 松辽盆地齐家地区高台子油层高三、高四段沉积层理构造

Fig. 6 Sedimentary bedding structures of G3 and G4 members of Gaotaizi reservoir in Qijia area, the Songliao Basin

a. 块状层理; b. 槽状交错层理; c. 楔状交错层理; d. 平行层理; e. 波状层理; f. 透镜状层理;
g. 包卷层理; h. 斜层理; i. 冲刷突变面; j. 生物化石; k. 介形虫层; l. 脉状砂质条带

介形虫等生物层(图6k)发育。大量岩心观察结果表明,层理构造使致密储层增加了含油非均质性。根据致密油的富集程度,将齐家地区高台子油层三、四段划分为油侵、油斑与油迹三种含油级别。块状层理含油性最好,有利于油气的聚集,多见油侵(图6a)。

岩心观察及岩石薄片鉴定结果显示,齐家地区高台子致密砂岩储层岩石类型以长石岩屑砂岩和长石岩屑砂岩为主,岩性主要以粉砂岩与泥质粉砂岩为主,普遍含油,砂泥互层现象较为明显。利用美国 FEI 公司生产的 QEMSCAN 650F 矿物自动识别及分析系统进行矿物种类分类与定量分析,进而得到岩石中矿物的百分比含量信息。实验结果表明,齐家地区高台子油

层致密砂岩样品颗粒骨架由石英与钠长石等构成,平均面积百分比约为 75.51%;填隙物主要以碳酸盐胶结为主,胶结物主要为方解石,平均面积百分比约为 8.46%,同时还伴有少量伊利石、绿泥石胶结(图3)。胶结作用对致密砂岩储层孔渗影响较为复杂,通过统计发现,方解石含量与孔隙度呈明显的负相关,受到烃源岩成熟后排出酸性流体的影响,部分方解石溶蚀可形成粒间溶孔、粒内溶孔等有效孔隙。

3.1.2 物性特征

利用 132 口探评井 6216 块样品,分别对松辽盆地齐家地区高台子油层孔隙度和水平渗透率进行了统

计,结果表明高台子油层三、四段平均孔隙度为8.4%,小于10%的样品约占40%。水平渗透率一般在 $(0.01 \sim 0.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,小于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品约占70%。参照我国石油天然气行业物性分级标准SY/T 6285—2011,高台子油层主要为低孔-超低孔、超低渗-致密储层,物性较差。

3.2 致密砂岩储层微观孔隙结构特征

松辽盆地齐家地区高台子致密储层孔隙具有微米-纳米级多尺度连续分布的特征,微观非均质性显著,可分为高孔区、低孔区以及裂缝发育区三种分布类型(图2)。对致密储层孔隙半径进行了统计分析,结果表明微米孔隙主要集中在 $2 \sim 3 \mu\text{m}$,约占总孔隙的30%,纳米级孔隙也较为发育,主要集中在 $200 \sim 300 \text{ nm}$,约占总孔隙的20%(图7)。利用微纳米CT扫描测试,进一步构建致密砂岩储层孔吼三维网络模型,从而对致密储层孔吼形状、大小与分布进行定性分析与定量表征,综合各项测试结果对致密油储集空间孔隙类型及成因进行综合分析。

3.2.1 微米级孔隙结构

微米尺度下,对在相同建模尺度 $(300 \times 300 \times 300) \text{ pixel}^3$ 下(分辨率 $1 \mu\text{m}$),选取典型区域进行三维孔隙网络模型构建。不同三维建模区,对储集空间微观孔隙结构进行定性分析和评价。分析结果显示:①微米尺度下,建模区域最大孔隙度为10.1%,最小孔隙度为1.1%,平均孔隙度为6.58%,不同建模区域孔隙度有一定差异;②不同建模区域孔喉半径分布范围差异较大,孔喉半径分布介于 $0.5 \sim 5.0 \mu\text{m}$,主体孔喉半径分布 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ (图8a);③从建模a区到f区(图4),孤立状粒内溶蚀微孔隙逐渐减少,条带状粒间溶蚀孔隙逐渐增多,连通性逐渐变好(图4)。物性最差的a区,以孤立状粒内溶蚀微孔隙为主,孔隙大多不连通(图4a),物性最好的F区,以条带状的粒间溶蚀孔隙为主,连通孔隙占50%以上(图4f)。

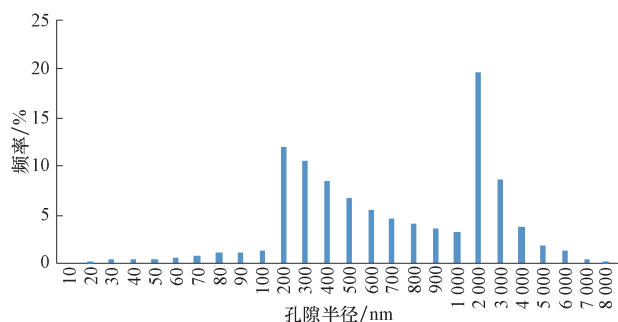


图7 松辽盆地齐家地区G933井不同孔隙半径频率分布直方图
Fig. 7 Pore radius distribution histogram in Sample Z1 from Well G933 in Qijia area, the Songliao Basin

3.2.2 纳米级孔隙结构

纳米尺度下,同样在 $(100 \times 100 \times 100) \text{ pixel}^3$ 建模尺度下(分辨率 65 nm),选取典型区域进行三维孔隙网络模型构建。分析结果显示:①建模区域最大孔隙度为10.1%,最小孔隙度为1.6%,平均孔隙度为6.45%,不同建模区域孔隙度有一定差异。纳米级建模区域平均孔隙度和微米级建模区域平均孔隙度相差不大。②孔喉半径分布介于 $30 \sim 250 \text{ nm}$,主体孔喉存在 $100 \sim 150 \text{ nm}$ 和 $200 \sim 250 \text{ nm}$ 两个峰值区(图8b)。③微观非均质性与微米尺度基本相同(图5),不同的是纳米尺度多以粒内溶蚀孔隙为主,纳米孔隙之间的连通程度受微裂缝控制明显(图5a),微裂缝缝宽为 200 nm 左右,延伸长度为 $4 \mu\text{m}$ 左右。

3.2.3 致密砂岩微观孔隙结构类型与成因

利用微纳米CT扫描成像技术与Maps成像分析技术同时结合铸体薄片和ESEM(环境扫描电镜)对松辽齐家地区高台子致密油层孔隙类型(图9)及成因进行了分析。结果表明,齐家地区高台子三、四段储集空间以粒间溶蚀孔隙(图9a,f)、粒内溶蚀孔隙(图9d,e)和微裂缝(图9b,c)为主。溶蚀型孔隙在CT二维灰度图像上形状不均匀,孔隙界面模糊;粒间溶蚀孔隙三维空间呈条带状分布;粒内溶蚀孔隙三维空间多呈小球状分布,长石和岩屑遭受的溶蚀作用明显。微裂缝对

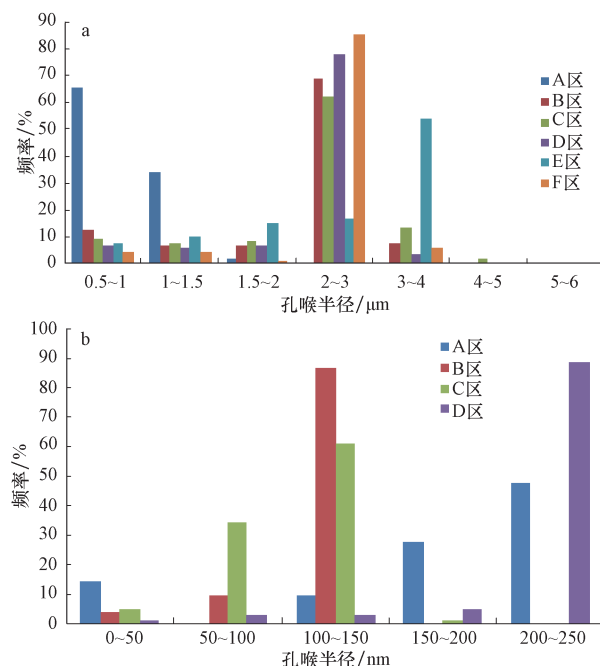


图8 松辽盆地齐家地区G933井Z1样品
不同建模区域孔喉半径分布

Fig. 8 Nano scale pore throat model for different modeling zones in Sample Z1 from Well G933 in Qijia area, the Songliao Basin
a. 微米级孔喉半径分布; b. 纳米级孔喉半径分布

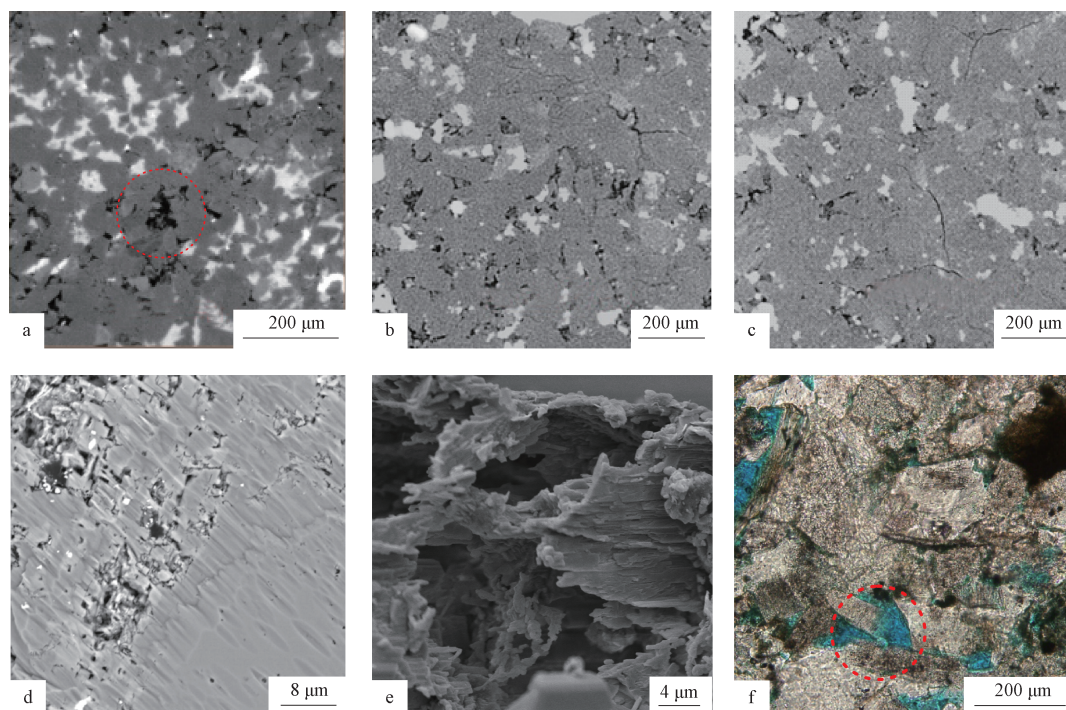


图9 松辽盆地齐家地区高台子致密砂岩储空间孔隙类型

Fig. 9 Pore types of tight sandstone reservoir space in Qijia area, the Songliao Basin

- a. 粒间溶蚀孔隙,Z1,微米 CT,粉砂岩;b. 溶蚀型微裂缝,Z4,微米 CT,泥质粉砂岩;c. 构造型微裂缝,Z5,微米 CT,泥质粉砂岩;d. 粒内溶蚀孔隙,Z1,Maps 成像分析,粉砂岩;e. 长石沿解理溶蚀,粒内纳米孔,Z5,ESEM,粉砂岩;f. 粒间溶蚀孔隙,Z3,铸体薄片,单偏光,粉砂岩

渗透的贡献作用明显,纳米孔隙之间的连通性主要受微裂缝控制。微米缝宽度为 $2.73 \sim 10.35 \mu\text{m}$,平面最大延伸为 $1700 \mu\text{m}$ 。纳米缝宽度为 170 nm 左右,延伸长度为 $4 \mu\text{m}$ 左右。微裂缝主要分为构造型微裂缝(图9c)和溶蚀型微裂缝(图9e)。构造型微裂缝主要是由脆性物质破碎而形成的狭小裂隙。利用 X 衍射确定了高三、高四段储层全岩矿物成分,计算得致密层段脆性指数主体在 $45\% \sim 60\%$,易形成构造型微裂缝。溶蚀型微裂缝及溶蚀型孔隙主要由中成岩阶段产生的有机酸溶蚀作用引起,高三、高四段有机质处于高成熟阶段,孔隙水溶液中含有大量有机酸物质,对岩石溶蚀较为强烈。

4 结论

1) 宏观尺度下,松辽盆地齐家地区高台子致密储层岩性主要以粉砂岩和泥质粉砂岩为主;层理构造多样,以块状层理与槽状交错层理、楔状层理、透镜状层理为主,其中块状层理最有利于致密油富集;砂泥间互特征明显,沉积层理的存在,增加了致密储层的非均质性。

2) 微观尺度下,齐家地区高台子油层三、四段储集空间以粒间溶孔、粒内溶孔和微裂缝为主,孔隙具有微米~纳米多尺度连续分布的特征;微米孔隙峰值主

要集中在 $2 \sim 3 \mu\text{m}$,纳米孔主体孔吼分布在 $200 \sim 300 \text{ nm}$;不同三维建模区域孔隙空间分布及连通性特征具有明显的微观非均质性。

参 考 文 献

- [1] 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.
Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 343-350.
- [2] 耳闻,赵靖舟,姚泾利,等. 鄂尔多斯盆地延长组长7油层组页岩-致密砂岩储层孔隙特征[J]. 石油与天然气地质,2016,37(2):341-353.
Er Chuang, Zhao Jingzhou, Yao Jingli, et al. Characterization of pores and fracture networks in organic-rich shale and tight sandstone of the Chang-7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 341-353.
- [3] 赵向原,曾联波,祖克威,等. 致密储层脆性特征及对天然裂缝的控制作用——以鄂尔多斯盆地陇东地区长7致密储层为例[J]. 石油与天然气地质,2016,37(1):62-71.
Zhao Xiangyuan, Zeng Lianbo, Zu Kewei, et al. Brittleness characteristics and its control on natural fractures in tight reservoirs: A case study from Chang 7 tight reservoir in Longdong area of the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 62-71.
- [4] 曹喆,柳广弟,柳庄小雪,等. 致密油地质研究现状及展望[J]. 天然气地球科学,2014,25(10):1499-1508.
Cao Zhe, Liu Guangdi, Liu Zhuangxiaoxue, et al. Research status on tight oil and its prospects[J]. Natural Gas Geoscience. 2014, 25

- (10):1499-1508.
- [5] Brue J. Bakeken black gold[N]. Leader-Poster,2007-12-10(6).
- [6] Dou H, Ma S. Lessons learned from oil production of tight oil reservoirs in Bakken play[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012,34(2):120-124.
- [7] Hwang I G. Geological characteristics and the current state of tight oil development of the Eagle Ford Shale, Texas, USA[J]. Current Topics in Developmental Biology, 2013,50(6):875.
- [8] Hill R J, Zhang, E, Katz B J, et al. Modeling of gas generation from the Barnett shale, Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007,91(4):501-521.
- [9] 贾俊, 司马立强, 孟军田, 等. 双重介质致密砂岩储集层有效性综合评价——以鄂尔多斯盆地西南部红河油田长81油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2016,37(2):238-244.
- Jia Jun, Sima Liqiang, Meng Juntian, et al. Comprehensive evaluation of effectiveness of dual-porosity sandstone reservoir: A case study from Chang 81 reservoir in Honghe oilfield in southwest of the Ordos Basin. [J]. Oil & Gas Geology, 2016,37(2):238-244.
- [10] 白玉彬, 赵靖舟, 赵子龙, 等. 鄂尔多斯盆地志丹地区延长组长7致密油成藏条件与成藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2013,34(5):631-639.
- Bai Yubin, Zhao Jingzhou, Zhao Zilong, et al. Accumulation conditions and characteristics of the Chang 7 tight oil reservoir of the the Yanchang Formation in Zhidan area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013,34(5):631-639.
- [11] 彭军, 吴慧明, 韩浩东, 等. 巴楚地区东河塘组致密砂岩储层成岩相研究[J]. 石油与天然气地质, 2016,37(2):245-255.
- Peng Jun, Wu Huiming, Han Haodong, et al. Study on diagenetic facies of the Donghetang tight sandstone reservoirs in Bachu area. [J]. Oil & Gas Geology, 2016,37(2):245-255.
- [12] 廖群山, 胡华, 林建平, 等. 四川盆地川中侏罗系致密储层石油勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2011,32(6):815-822.
- Liao Qunshan, Hu Hua, Lin Jianping, et al. Petroleum exploration prospect of the Jurassic tight reservoirs in central Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011,32(6):815-822.
- [13] 施立志, 王卓卓, 张革, 等. 松辽盆地齐家地区致密油形成条件与分布规律[J]. 石油勘探与开发, 2015,42(1):44-50.
- Shi Lizhi, Wang Zhuozhuo, Zhang Ge, et al. Distribution and formation of tight oil in Qijia area, Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015,42(1):44-50.
- [14] 王伟明, 卢双舫, 田伟超, 等. 吸附水膜厚度确定致密油储层物性下限新方法——以辽河油田大民屯凹陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2016,37(1):135-140.
- Wang Weiming, Lu Shuangfang, Tian Weichao, et al. A new method to determine porosity and permeability cutoffs of tight oil reservoirs by using thickness of adsorption water film: A case study from the Damintun Sag, Liaohe oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1):135-140.
- [15] 张国印, 王志章, 郭旭光, 等. 准噶尔盆地乌夏地区风城组云质岩致密油特征及“甜点”预测[J]. 石油与天然气地质, 2015,36(2):219-229.
- Zhang Guoyin, Wang Zhizhang, Guo Xuguang, et al. Characteristics and ‘sweet spot’ prediction of dolomitic tight oil reservoirs of the Fengcheng Formation in Wuxia area, Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015,36(2):219-229.
- [16] 朱有信, 李新宁, 蒲振山, 等. 吐哈盆地侏罗系七克台组致密油储集层特征[J]. 新疆石油地质, 2014,35(2):168-171.
- Zhu Youxing, Li Xinning, Pu Zhenshan, et al. The Qiketai tight oil reservoir characteristics of Jurassic in Tuha Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014,35(2):168-171.
- [17] 王玉华, 蒙启安, 梁江平, 等. 松辽盆地北部致密油勘探[J]. 中国石油勘探, 2015,20(4):44-53.
- Wang Yuhua, Meng Qi'an, Liang Jiangping, et al. Tight oil exploration in northern Songliao Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2015,20(4):44-53.
- [18] 田景春, 刘伟伟, 王峰, 等. 鄂尔多斯盆地高桥地区上古生界致密砂岩储层非均质性特征[J]. 石油与天然气地质, 2014,35(2):183-189.
- Tian Jingchun, Liu Weiwei, Wang Feng, et al. Heterogeneity of the paleozoic tight sandstone reservoirs in Gaoqiao Area of Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014,35(2):183-189.
- [19] 杨智峰, 曾溅辉, 冯泉, 等. 致密砂岩储层小尺度非均质性与石油富集特征[J]. 中国矿业大学学报, 2016,45(1):1-9.
- Yang Zhifeng, Zeng Jianhui, Feng Xiao, et al. Small-scaled heterogeneity of tight sandstone reservoirs and oil accumulation characteristics [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016,45(1):1-9.
- [20] 盛英帅, 张玉广, 顾明勇, 等. 原位条件下致密储层岩体力学动态参数校正[J]. 石油与天然气地质, 2016,37(1):109-116.
- Sheng Yingshuai, Zhang Yuguang, Gu Mingyong, et al. Static and dynamic mechanical parameter calibration of tight reservoir rock mass under in-situ condition [J]. Oil & Gas Geology, 2016,37(1):109-116.
- [21] 杜金虎, 刘合, 马德胜, 等. 试论中国陆相致密油有效开发技术[J]. 石油勘探与开发, 2014,41(2):198-205.
- Du Jinhu, Liu He, Ma Desheng, et al. Discussion on effective development techniques for continental tight oil in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014,41(2):198-205.
- [22] 蒋裕强, 陈林, 蒋婵, 等. 致密储层孔隙结构表征技术及发展趋势[J]. 地质科技情报, 2014,19(3):63-70.
- Jiang Yuqiang, Chen Lin, Jiang Chan, et al. Characterization techniques and trends of the pore structure of tight reservoirs [J]. Geological Science and Technology Information, 2014,19(3):63-70.
- [23] 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: 西安石油大学地球科学学院, 2015.
- Ju Shichang. Tight oil reservoir forming-dynamic of Gaoaizi oil layer in Qijia area, the Songliao Basin [D]. Xi'an: College of Earth Sciences, Xi'an Shiyou University, 2015.
- [24] 刘娜娜. 齐家—古龙凹陷高台子油层储层成岩作用及其对储层质量的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- Liu Nana. The reservoir diagenesis and its influence on reservoir quality in Gaoaizi formation of Qijia-Gulong Depression [D]. Changchun: Jilin University, 2014.