



基于数字岩心技术的陆相页岩油微观结构特征及主控因素 ——以松辽盆地白垩系青山口组一段泥页岩为例

董 虎¹, 杨建国², 吴国强¹, 马 克¹, 李 想¹

1. 数岩科技股份有限公司, 北京 100094; 2. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

摘 要: 数字岩心技术为大庆齐家-古龙地区青山口组一段的页岩油评价提供了可靠的基础数据, 助力了松辽陆相盆地页岩油的勘探突破。针对泥页岩储层超低孔、超低渗的物性特征, 综合利用微纳米 CT、MAPS 和 QEMSCAN 等数字岩心配套实验, 对泥页岩储层岩石学特征、岩相类型、孔隙结构等进行了研究。将青山口组一段划分为 5 种岩相类型, 分别为低有机质纹层状黏土质灰岩相、低有机质纹层状长英质灰岩相、中有机质纹层状长英质页岩相、中有机质夹层粉砂岩相、高有机质纹层状硅质页岩相。青山口组一段主要孔隙类型包括粒间孔、粒内孔和有机质孔。岩石相是青山口组一段孔隙、层理缝发育的主控因素。高有机质纹层状硅质页岩相储集空间主要由粒内孔和层理缝所构成, 其孔隙-裂缝系统是青山口组一段页岩油甜点开发的重点层段。

关键词: 数字岩心; 孔隙结构; 页岩岩相; 青山口组; 松辽盆地

DIGITAL CORE TECHNOLOGY-BASED MICROSTRUCTURE CHARACTERISTICS AND MAIN CONTROLLING FACTORS OF CONTINENTAL SHALE OIL: A Case Study of Shale in Cretaceous Qingshankou Formation in Songliao Basin

DONG Hu¹, YANG Jian-guo², WU Guo-qiang¹, MA Ke¹, LI Xiang¹

1. iRock Technologies Co., Ltd., Beijing 100094, China; 2. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: Digital core technology, with reliable fundamental data for the evaluation of shale oil in the first member of Qingshankou Formation in Qijia-Gulong Sag, northern Songliao Basin, supports the breakthrough of shale oil exploration in Songliao continental basin. According to the physical properties of ultra-low porosity and ultra-low permeability of shale reservoir, the digital core experiments of micro-nano CT, MAPS and QEMSCAN are used comprehensively to study the lithological characteristics, lithofacies type and pore structure of shale reservoir. The first member of Qingshankou Formation is divided into 5 lithofacies types, including low-TOC lamellar clayey limestone, low-TOC lamellar felsic limestone, medium-TOC lamellar felsic shale, medium-TOC interbedded siltstone and high-TOC lamellar siliceous shale facies. The main pore types are intergranular pore, intragranular pore and organic matter pore. Lithofacies is the main controlling factor for the development of pores and bedding fractures. The reservoir space of high-TOC lamellar siliceous shale facies is mainly composed of intragranular pores and bedding fractures, which is the sweet spot for development of shale oil in the first member of Qingshankou Formation.

Key words: digital core; pore structure; shale lithofacies; Qingshankou Formation; Songliao Basin

收稿日期: 2021-04-12; 修回日期: 2021-04-22. 编辑: 李兰英.

基金项目: 中国地质调查局项目“松辽盆地北部页岩油战略调查”(编号 DD20190114-07).

作者简介: 董虎(1980—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事油气储层数字岩心方面研究, 通信地址 北京市海淀区永丰产业基地丰秀中路 3 号院 3 号楼, E-mail//779576547@qq.com

通信作者: 杨建国(1967—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事页岩油调查与石油地质综合研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//yangjianguo@mail.cgs.gov.cn

0 引言

近年来,以致密油、页岩油、页岩气为代表的非常规油气资源逐渐成为我国油气勘探和开发的重要领域. 相应的非常规油气储层成为了我国学者重要的研究对象^[1-3]. 在前人研究^[4-5]的基础上,中国地质调查局沈阳地质调查中心围绕松辽盆地齐家-古龙地区白垩系青山口组页岩油开展了系统性综合研究. 松辽盆地白垩系青山口组受大规模湖侵影响,广泛发育了大套黑色富有机质泥页岩,特别是青山口组一段(K_2qn^1 ,青一段),因其优质的有机质已成为研究重点^[6]. 与海相泥页岩相比,陆相碎屑湖盆沉积背景下形成的青一段泥页岩在矿物组分含量、岩性特征与接触关系等方面存在较大的差异. 在沉积过程中,三角洲成为主要陆源物源,湖盆自身还能够成为碳酸盐物源,因此导致在近陆源地区形成碎屑含量较高的沉积相带. 随着水体逐渐加深,在半深湖—深湖沉积区则由碳酸盐矿物和黏土矿物构成了较为质纯的泥页岩.

研究表明,页岩油储层发育有多种类型的纳米级孔喉系统,是构成页岩油气储层的主要储集空间^[7-9]. 随着表征技术的快速发展,基于数字岩心技术的先进表征技术被大范围应用于孔喉与矿物的定量、可视化研究^[10]. 数字岩心技术主要利用微纳米 CT、扫描电镜图像拼接 (Modular Automated Processing System, MAPS)、岩石矿物定量分析 (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy, QEMSCAN) 等技术针对非常规储层进行精细表征^[11-15]. 因此,针对松辽盆地青山口组陆相页岩油储层复杂的矿物成分、分布特征和多尺度孔喉系统构成的储集空间,利用数字岩心技术进行岩石相的精细划分并开展多尺度孔喉系统的量化表征就显得尤为重要.

1 区域地质概况

松辽盆地位于中国东北部,在晚白垩世青山口组一段沉积期发生了大规模的湖侵,最大湖泊面积可达 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[6],在半深湖—深湖区稳定沉积了青一段的厚层泥页岩,同期在湖泊边缘存在西部、西南、东南 3 个主要的三角洲物源^[16].

青一段泥页岩有机质丰度与热演化程度均较高,是页岩油发育的重点层系^[4]. 在页岩油资源潜力评价中,青一段页岩油资源量评价可达 $55.93 \times 10^8 \text{ t}$ ^[17]. 沈

阳地质调查中心以青一段泥页岩为风险勘探目标,在齐家南、古龙北和三肇凹陷分别部署了风险探井(图 1),平面上距离 3 个主要的陆源物源较远,沉积环境相对简单,区域上存在稳定分布的页岩层系. 在开展了 3 口页岩油井改造试验后均获得了工业油流,在青一段取得了页岩油的重大突破,展现了松辽盆地齐家-古龙凹陷及三肇凹陷青一段页岩油资源的巨大潜力^[17-18].

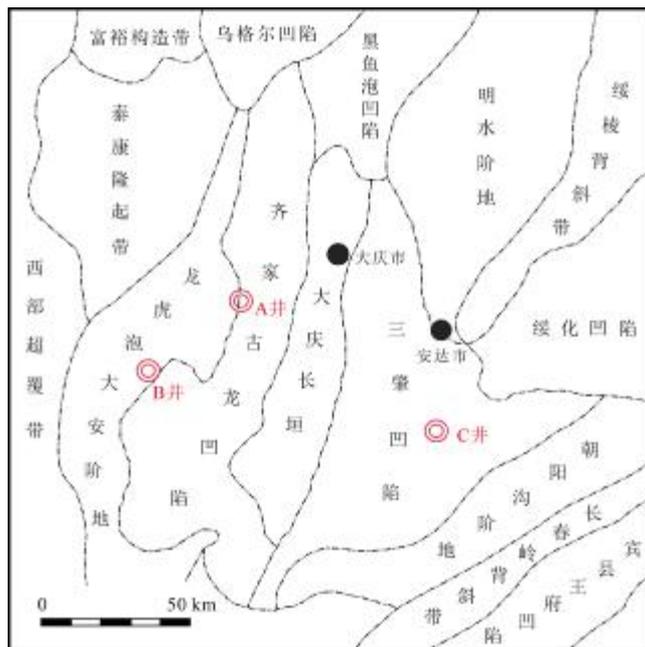


图 1 研究区构造单元划分及井位部署图

Fig. 1 Tectonic division and well locations in the study area

2 岩石相特征

2.1 岩性基本特征

齐家-古龙凹陷及三肇凹陷青一段以泥岩-泥页岩沉积为主,垂向上在局部区域可见薄层的泥质粉砂岩、粉砂质泥岩及灰质泥岩. 泥岩-泥页岩颜色多为深灰色至灰黑色,通过岩心观察及全直径岩心 CT 扫描在青山口组识别出 2 种典型的沉积构造:一是层理十分发育,呈现出明显的片状分布的页岩薄层水平层理构造(图 2a,b);二是较为均质的块状构造,岩心表面未见裂缝及明显层理,整体均质性较强,水平纹层十分发育(图 2c,d).

整体上,齐家-古龙凹陷与三肇凹陷青一段泥页岩脆性矿物(陆源碎屑矿物、碳酸盐矿物、黄铁矿)含量为 40%~70%,碳酸盐矿物含量较低(<10%),黏土矿物含量为 30%~60%,以伊利石为主,占黏土矿物总量的

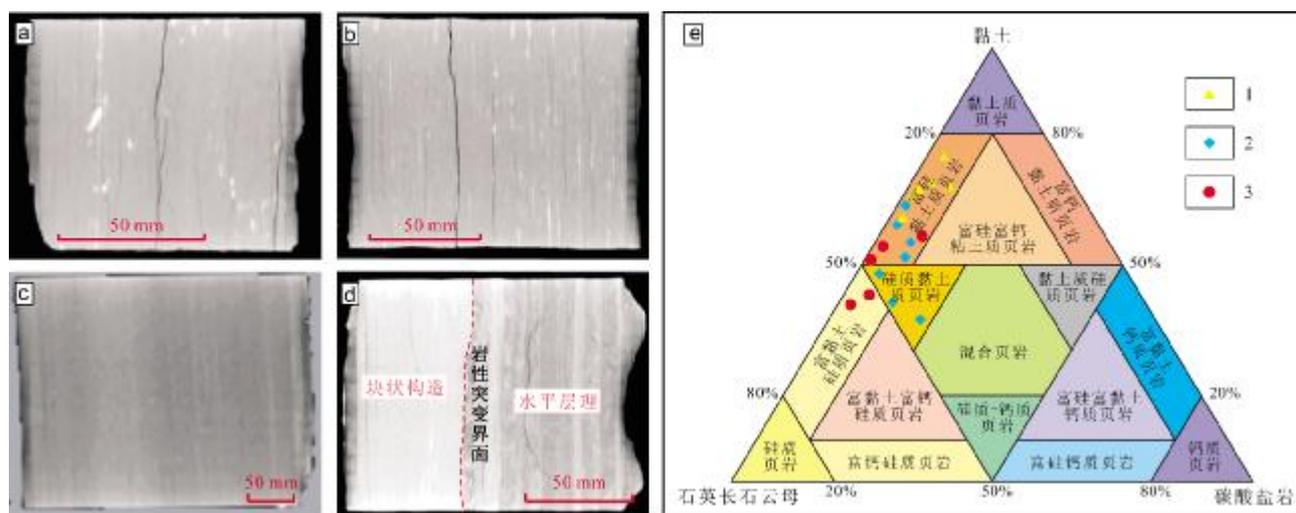


图2 齐家古龙-三肇凹陷青一段典型沉积构造及页岩类型

(据文献[19]修改)

Fig. 2 Typical sedimentary structures and shale types of K_2qn^1 in Qijiagulong-Sanzhao Sag

(Modified from Reference [19])

a—水平层理 (horizontal bedding at 2397.5 m in well A); b—水平层理 (horizontal bedding at 2105.5 m in well B); c—块状构造 (massive structure at 2028.63 m in well C); d—块状构造和水平层理突变接触 (abrupt contact between massive structure and horizontal bedding at 2112.5 m in well B); e—页岩类型 (shale type); 1—A井 (well A); 2—B井 (well B); 3—C井 (well C)

40%~60%。根据页岩分类,青一段页岩主要为富硅黏土质页岩、硅质黏土质页岩以及富黏土硅质页岩(图2e)。受物源、水深与水动力影响,在局部还发育长英质灰岩与黏土质灰岩。

2.2 有机质分布特征

通过 MAPS 与 QEMSCAN 实验数据分析,青一段页岩有机质体积百分含量为 1%~9.22%。实验结果表明,沉积作用通过控制矿物组分间接控制了有机质丰度及分布特征,在不同类型页岩中有机质存在不同的赋存状态。根据有机质发育形态及充填特征将有机质划分为 2 种类型:①条带状有机质,呈薄片状充填于页岩层理之间,几乎不存在有机质孔隙;②集块状有机质,呈块状构造充填于独立的孔隙内,局部发育少量有机质孔隙。

2.3 岩石相分类

由于不同类型页岩矿物组分含量、有机质含量、分布特征 3 方面存在差异,且受控于沉积作用,因此,依据“有机质含量-沉积特征-矿物含量”3 方面特征,在齐家古龙凹陷-三肇凹陷青一段划分出 5 种岩石相类型,分别为低有机质纹层状黏土质灰岩相、低有机质纹层状长英质灰岩相、中有机质纹层状长英质页岩相、中

有机质夹层粉砂岩相、高有机质纹层状硅质页岩。

(1) 低有机质纹层状黏土质灰岩相

多为灰黑色,纹层较为发育。矿物成分以方解石和伊利石为主,其中方解石含量大于 50%,黏土矿物含量大于 20%,石英和长石含量低于 20%。有机质含量低,体积百分含量一般小于 3%。水平微层理发育,矿物颗粒具有明显的定向排列特征(图 3a)。

(2) 低有机质纹层状长英质灰岩相

多呈深灰色,块状构造。方解石含量大于 50%,石英和长石含量大于 20%,黏土矿物含量小于 20%。主要发育在 B 井,更靠近湖盆边缘,处于湖相碳酸盐沉积相带与陆源碎屑沉积相带过渡。陆源碎屑含量略高,有机质含量低。扫描电镜观察矿物分布均匀,粒径在 5 种岩石相中最粗(图 3b)。

(3) 中有机质纹层状长英质页岩相

多为灰黑色,以黏土矿物为主。其中伊利石含量大于 50%,石英和长石含量大于 20%,碳酸盐矿物和黄铁矿含量低,有机质体积百分含量一般为 3%~6%。纹层十分发育,具有明显的定向排列特征(图 3c)。

(4) 中有机质夹层粉砂岩相

以浅灰-深灰色粉砂岩条带为主,沉积构造近似脉

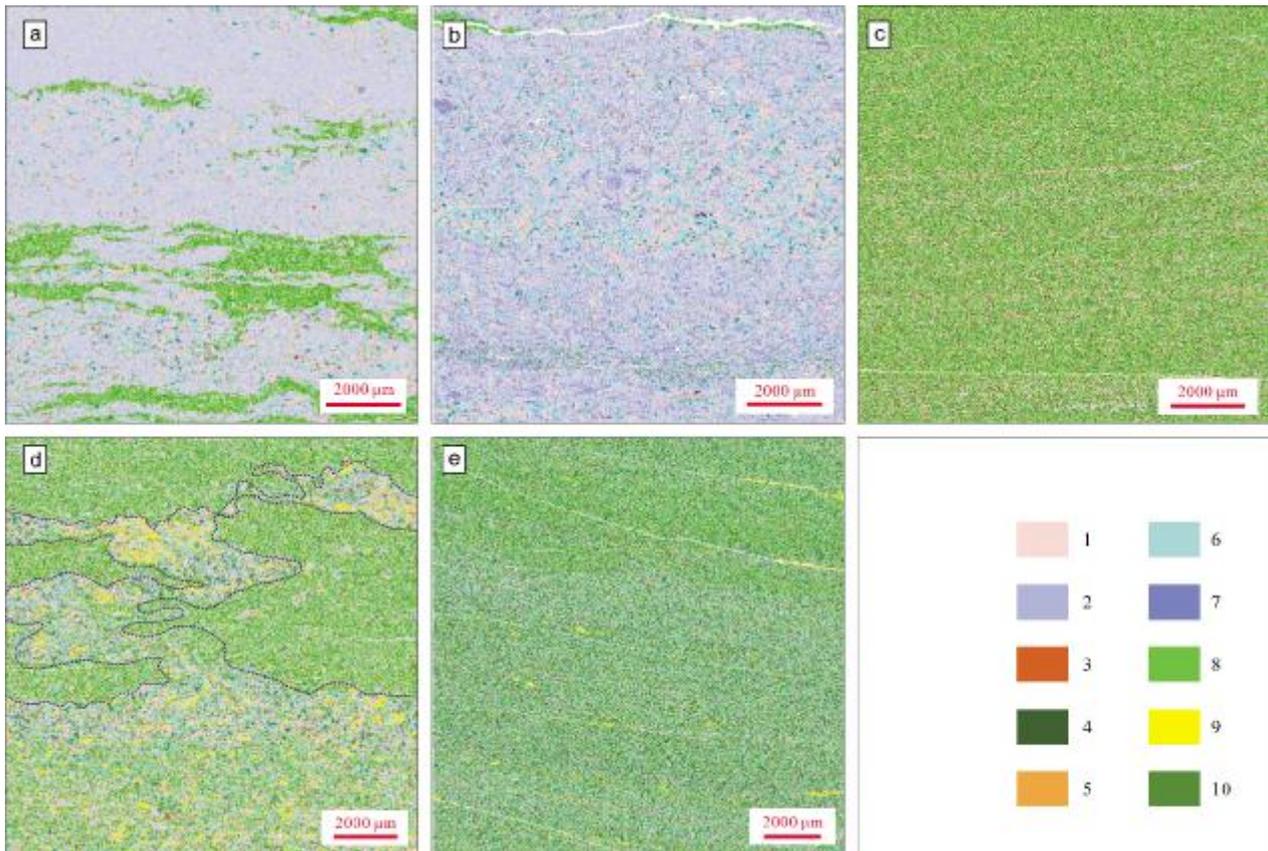


图3 齐家古龙-三肇凹陷青一段岩石相类型(基于 QEMSCAN)

Fig. 3 Lithofacies of the K_{2qn}^1 rocks in Qijiagulong-Sanzhao Sag by QEMSCAN

a—低有机质纹层状黏土质灰岩相 (low-TOC lamellar clayey limestone facies at 2112.50 m in well B); b—低有机质纹层状长英质灰岩相 (low-TOC lamellar felsic limestone facies at 2099.50 m in well B); c—中有机质纹层状长英质页岩相 (medium-TOC lamellar felsic shale facies at 2123.50 m in well B); d—中有机质夹层粉砂岩相 (medium-TOC interbedded siltstone facies at 1992.06 m in well C); e—高有机质纹层状硅质页岩相 (high-TOC lamellar siliceous shale facies at 2009.5 m in well C); 1—石英 (quartz); 2—方解石 (calcite); 3—高岭石 (kaolinite); 4—白云母 (muscovite); 5—菱铁矿 (siderite); 6—钠长石 (albite); 7—白云石 (dolomite); 8—伊利石 (illite); 9—黄铁矿 (pyrite); 10—绿泥石 (chlorite)

状层理, 砂质条带内石英和长石含量大于 50%. 砂质条带内可见大量黄铁矿及钙质生物壳体, 有机质体积百分含量在为 3%~6%, 黏土矿物含量相对较低. 碎屑颗粒粒级较粗, 薄层粉砂质条带一般形成于近陆源物源沉积相带内或由于洪水等事件性沉积形成(图3d).

(5) 高有机质纹层状硅质页岩相

多为纯黑色, 页理十分发育. 伊利石含量大于 50%, 有机质体积百分含量一般大于 6%, 长石和石英含量一般小于 30%. 主要发育水平层理, 各类矿物具有十分明显的颗粒定向性, 主要形成于半深湖—深湖的安静水体环境(图 3e).

3 青一段储集物性特征

基于 MAPS 实验表征结果, 齐家-古龙凹陷与三

肇凹陷青一段各类岩石相样品的孔隙面孔率为 0.71%~8.23%, 平均面孔率为 4.18%. 纳米级孔隙面孔率分布在 0.58%~6.61%之间, 微米级孔隙面孔率分布在 0.13%~1.86%之间. 整体上青一段各岩相储集空间均以纳米级孔隙为主, 在总孔隙含量占比中普遍大于 50%. 尽管纳米级孔喉系统构成了储集空间的主体, 但不同类型岩石相存在多类型储集空间, 岩石相控特征明显.

3.1 储集空间特征

从孔隙成因、发育特征、孔隙大小及充填状态 4 个角度可将青一段储集空间划分为 3 个大类, 分别为粒间孔、粒内孔和有机质孔. 并能够进一步细分: 粒间孔包括未充填的颗粒溶蚀孔、有机质半充填的复合孔及未充填的粒缘溶蚀孔; 粒内孔包括粒内溶孔、黏土矿物

晶内孔和黄铁矿晶内孔;有机质孔包括有机质孔、有机质微裂隙及有机质边缘孔(图 4)。

(1) 粒间孔

典型的粒间孔主要发育在石英、长石等脆性矿物含量较高的岩石相内,几乎全部为成岩作用控制形成的孔隙,还存在部分原生残余粒间孔与次生孔隙构成复合孔和酸性流体导致颗粒完整溶蚀形成的溶蚀孔。孔隙半径在数十纳米至数微米之间。

(2) 粒内孔

粒内孔主要为黏土矿物片状晶体或黄铁矿晶体形成的颗粒内部的粒内孔,同时还有少量长石矿物形成的微量纳米级粒内溶蚀孔,基本全部处于未充填-半充填状态。

(3) 有机质孔

有机质孔隙可呈不规则气泡状或长条状赋存于有机质内部或块状有机质边缘。在纹层状泥页岩中,呈条带状分布的有机质内部还有长条状微裂隙的存在。

青一段不同岩相的主力储集空间类型有所不同,高有机质纹层状硅质页岩相是青一段最有利的岩石相类型,储集空间主要由粒内孔和有机质孔构成,中有机质纹层状长英质页岩相则更多地为复合孔、粒间孔和有机质孔,两种低有机质的灰岩相更多以未充填或半充填的粒间孔为主。

3.2 孔隙结构特征

由于青一段地层储集空间大小普遍为微纳米级,本次研究采用了微纳米 CT 相结合的方式联合表征孔隙结构。微纳米 CT 扫描结果同样能够表明青一段岩石相类型是页岩储集层孔隙结构的主控因素之一(图 5)。

高有机质纹层状硅质页岩相与中有机质纹层状长英质页岩相中的孔隙在具有层理缝处集中发育,微米级孔隙在裂缝发育区沿裂缝发育带定向分布(图 5a、b),裂缝构成了主要的连通空间。低有机质纹层状长英质灰岩相尽管孔隙比较发育,由于层理缝发育程度

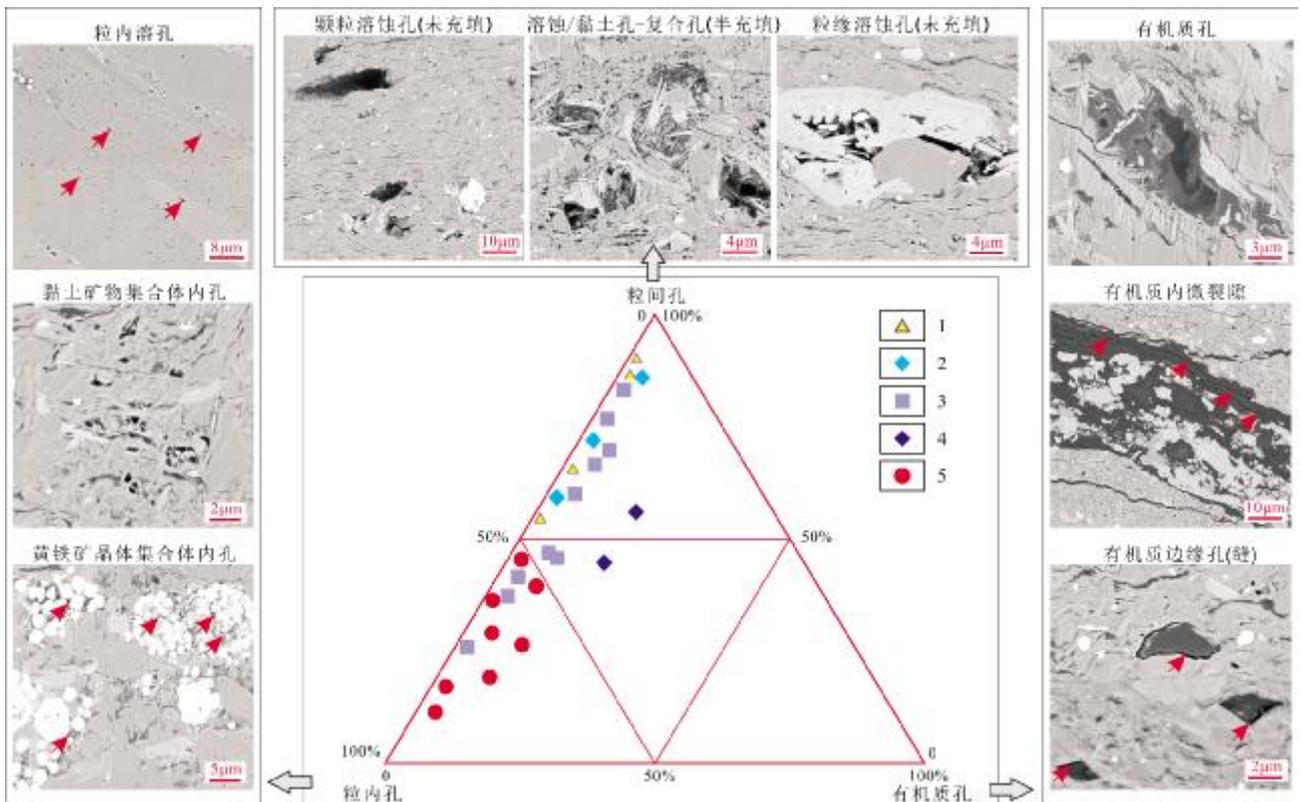


图 4 齐家古龙-三肇凹陷青一段储集空间类型(基于 MAPS 孔隙分析)

Fig. 4 Reservoir space types of K_2qn^1 in Qijiagulong-Sanzhao Sag by MAPS pore analysis

1—低有机质纹层状黏土质灰岩相 (low-TOC lamellar clayey limestone facies); 2—低有机质块状长英质灰岩相 (low-TOC lamellar felsic limestone facies); 3—中有机质纹层状长英质页岩相 (medium-TOC lamellar felsic shale facies); 4—中有机质夹层粉砂岩相 (medium-TOC interbedded siltstone facies); 5—高有机质纹层状硅质页岩相 (high-TOC lamellar siliceous shale facies)

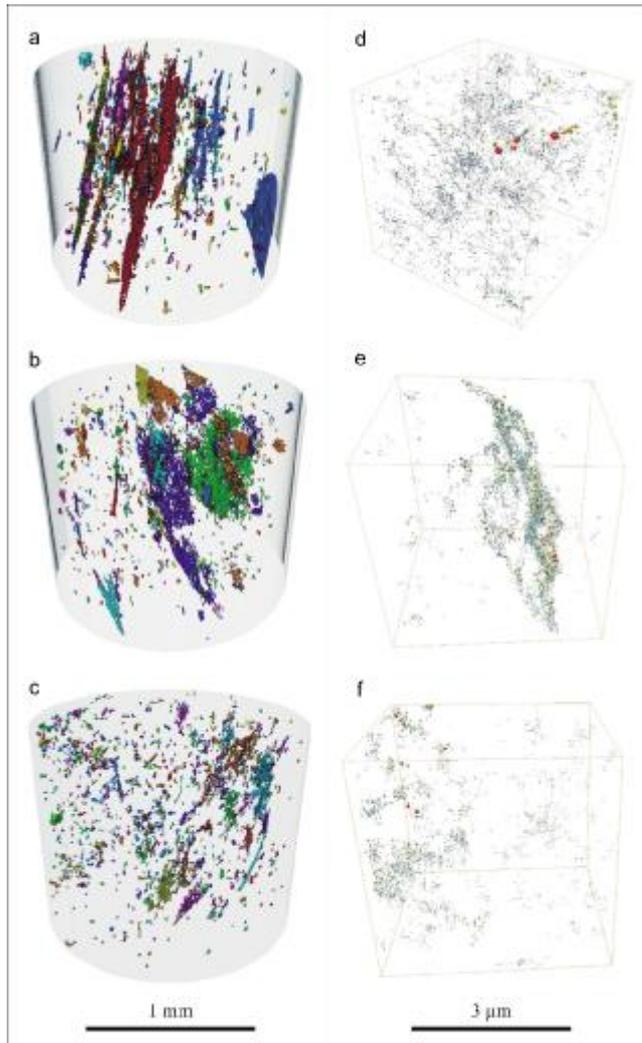


图5 不同岩石相微纳米孔隙结构特征
(基于微纳米CT孔隙-裂缝分析)

Fig. 5 Micro- and nano-pore structures of different lithofacies
by micro-nano CT pore and fracture analysis

a—高有机质纹层状硅质页岩相连通孔隙特征, 微米CT (connected pores of high-TOC lamellar siliceous shale facies by micro-CT); b—中有机质纹层状长英质页岩相, 微米CT (medium-TOC lamellar felsic shale facies by micro-CT); c—低有机质纹层状长英质灰岩相, 微米CT (low-TOC lamellar felsic limestone facies by micro-CT); d—高有机质纹层状硅质页岩相孔隙网络模型, 纳米CT (pore network model of high-TOC lamellar siliceous shale facies by nano-CT); e—中有机质纹层状长英质页岩相孔隙网络模型, 纳米CT (pore network model of medium-TOC lamellar felsic shale facies by nano-CT); f—低有机质纹层状长英质灰岩相孔隙网络模型, 纳米CT (pore network model of low-TOC lamellar felsic limestone facies by nano-CT)

弱, 孔隙连通性差, 多呈孤立状, 与MAPS实验图像结果比较一致(图5c)。

本次研究采用的纳米CT最大分辨率可达65 nm,

综合纳米孔隙三维表征结果与二维电镜结果, 分析认为高有机质纹层状硅质页岩相样品内部纳米级孔隙十分发育, 主要为通过纳米级喉道连通形成的纳米级黏土矿物孔, 与半充填的层理缝共同构成了主要储集空间(图5d); 而中有机质纹层状长英质页岩相则更依赖于层理缝的发育, 纳米级孔隙往往伴随着层理缝的发育(图5e); 低有机质纹层状长英质灰岩相随机性强, 电镜图像结果表明其内部零星可见大孔隙(红色), 主要为未充填溶蚀孔, 在微米、纳米2个级次下孔隙连通性均较差(图5f)。

3.3 裂缝发育特征

微米CT扫描结果能够三维量化、可视化表征储层的裂缝发育特征^[20]。青一段层理缝产状相似, 但层理缝的发育同样明显受控于岩石相类型(图6)。整体上, 3种类型的纹层状岩石相层理缝主要分布区间为1~100 μm, 均具有明显的双峰状分布特征。在不同开度区间的裂缝分布频率有所差异, 相应可划分为2个区间。有机质含量与裂缝的分布频率存在一定的相关性, 高有机质与中有机质页岩相在区间A的分布频率明显高于低有机质灰岩相, 相应地在区间B的分布频率低于低有机质灰岩相, 即页岩相内部开度相对较大的裂缝更为发育(图6a), 这也与MAPS实验图像表征的结果一致。

在裂缝体积占比方面则明显体现出了少量大裂缝(>10 μm)明显占据了更多的裂缝, 裂缝体积主要由大裂缝贡献。在1~10 μm分布区间内, 各纹层状岩石相类型差异不大。对于开度在10 μm以上的裂缝来说, 页岩相发育有开度更大的裂缝。与中有机质纹层状长英质页岩相相比, 高有机质纹层状硅质页岩相开度在10 μm以上的裂缝体积占比达70%以上(图6b)。在纹层界面形成的层理缝不仅能够贡献主要的储集空间, 同时黄铁矿具有明显的沿裂缝分布的特征(图3e), 表明开度较大的层理缝是青一段重要的渗流通道。

4 结论

(1) 根据有机质含量-沉积特征-矿物含量将齐家古龙-三肇凹陷青一段划分为低有机质纹层状黏土质灰岩相、低有机质纹层状长英质灰岩相、中有机质纹层状长英质页岩相、中有机质夹层粉砂岩相、高有机质纹层状硅质页岩相。

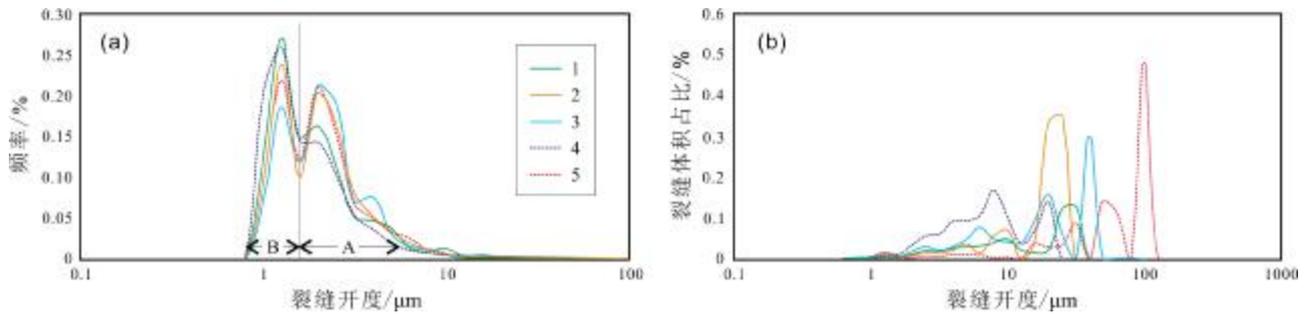


图6 青一段纹层状岩石相裂缝发育特征(基于微米CT裂缝分析)

Fig. 6 Fracture characteristics of lamellar lithofacies in K_2qn^1 by micro-CT fracture analysis

a—不同开度裂缝分布频率 (distribution frequency of different fracture aperture); b—不同开度裂缝体积占比 (volume proportion of different fracture aperture); 1—低有机质纹层状黏土质灰岩相 (low-TOC lamellar clayey limestone facies); 2—低有机质块状长英质灰岩相 (low-TOC massive felsic limestone facies); 3—中有机质纹层状长英质页岩相 (medium-TOC lamellar felsic shale facies); 4—中有机质夹层粉砂岩相 (medium-TOC interbedded siltstone facies); 5—高有机质纹层状硅质页岩相 (high-TOC lamellar siliceous shale facies)

(2)青一段储集空间可以划分为粒间孔、粒内孔和有机质孔, 优质页岩相主要以有机质孔和粒内孔或复合孔构成, 普遍为有机质充填。不同岩石相类型储集物性差异明显, 2种灰岩相存在相对较大的溶蚀孔隙, 但层理缝发育程度弱, 孔隙连通性差, 基本处于未充填状态。高有机质纹层状硅质页岩相层理缝最为发育, 开度大于 $10\ \mu\text{m}$ 的层理缝是主要的渗流通道, 有效改善了储渗物性。

(3)纹层状页岩相有机质含量和层理缝发育程度优于其他类型岩石相, 是形成页岩油聚集最为有利的岩石相。夹层粉砂岩相内部具有多种尺度孔隙且多与页岩相伴生, 沿沉积层理方向具有一定的定向连通性, 与紧邻的泥页岩共同构成了青一段页岩油开发的重要层段。

参考文献(References):

[1] 赵文智, 胡素云, 侯连华. 页岩油地下原位转化的内涵与战略地位[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 537-545.
Zhao W Z, Hu S Y, Hou L H. Connotation and strategic role of in-situ conversion processing of shale oil underground in the onshore China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 537-545.

[2] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 致密油与页岩油内涵、特征、潜力及挑战[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(1): 1-17.
Zou C N, Zhu R K, Bai B, et al. Significance, geologic characteristics, resource potential and future challenges of tight oil and shale oil[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(1): 1-17.

[3] 柳波, 孙嘉慧, 张永清, 等. 松辽盆地长岭凹陷白垩系青山口组一段页岩油储集空间类型与富集模式[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48

(3): 521-535.
Liu B, Sun J H, Zhang Y Q, et al. Reservoir space and enrichment model of shale oil in the first member of Cretaceous Qingshankou Formation in the Changling sag, southern Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 521-535.

[4] 吴河勇, 林铁锋, 白云凤, 等. 松辽盆地北部泥(页)岩油勘探潜力分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(5): 78-86.
Wu H Y, Lin T F, Bai Y F, et al. Analyses of the mudstone (shale) oil exploration potential in North Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(5): 78-86.

[5] 聂海宽, 张培先, 边瑞康, 等. 中国陆相页岩油富集特征[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 55-62.
Nie H K, Zhang P X, Bian R K, et al. Oil accumulation characteristics of China continental shale[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 55-62.

[6] 柳波, 吕延防, 冉清昌, 等. 松辽盆地北部青山口组页岩油形成地质条件及勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 280-285.
Liu B, Lü Y F, Ran Q C, et al. Geological conditions and exploration potential of shale oil in Qingshankou Formation, northern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 280-285.

[7] 杜金虎, 胡素云, 庞正炼, 等. 中国陆相页岩油类型、潜力及前景[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 560-568.
Du J H, Hu S Y, Pang Z L, et al. The types, potentials and prospects of continental shale oil in China[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 560-568.

[8] 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 C N, Zhu R K, Bai B, 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.

[9] 杨华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜

- 力[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 1-11.
- Yang H, Li S X, Liu X Y. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(1): 1-11.
- [10] 韩辉, 钟宁宁, 焦淑静, 等. 泥页岩孔隙的扫描电子显微镜观察[J]. 电子显微学报, 2013, 32(4): 325-330.
- Han H, Zhong N N, Jiao S J, et al. Scanning electron microscope observation of pores in mudstone and shale[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2013, 32(4): 325-330.
- [11] 查明, 尹向烟, 姜林, 等. CT 扫描技术在石油勘探开发中的应用[J]. 地质科技情报, 2017, 36(4): 228-235.
- Zha M, Yin X Y, Jiang L, et al. Application of CT technology in petroleum exploration and development[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2017, 36(4): 228-235.
- [12] 白斌, 朱如凯, 吴松涛, 等. 利用多尺度 CT 成像表征致密砂岩微观孔喉结构[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(3): 329-333.
- Bai B, Zhu R K, Wu S T, et al. Multi-scale method of nano(micro)-CT study on microscopic pore structure of tight sandstone of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(3): 329-333.
- [13] 姚宜同, 李士祥, 赵彦德, 等. 鄂尔多斯盆地新安边地区长 7 致密油特征及控制因素[J]. 沉积学报, 2015, 33(3): 625-632.
- Yao Y T, Li S X, Zhao Y D, et al. Characteristics & controlling factors of Chang 7 tight oil in Xin'anbian area, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(3): 625-632.
- [14] 冯子辉, 方伟, 李振广, 等. 松辽盆地陆相大规模优质烃源岩沉积环境的地球化学标志[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(9): 1253-1267.
- Feng Z H, Fang W, Li Z G, et al. Depositional environment of terrestrial petroleum source rocks and geochemical indicators in the Songliao Basin[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(9): 1304-1317.
- [15] 朱如凯, 金旭, 王晓琦, 等. 复杂储层多尺度数字岩石评价[J]. 地球科学, 2018, 43(5): 1773-1782.
- Zhu R K, Jin X, Wang X Q, et al. Multi-scale digital rock evaluation on complex reservoir[J]. *Earth Science*, 2018, 43(5): 1773-1782.
- [16] 柳波, 石佳欣, 付晓飞, 等. 陆相泥页岩层系岩相特征与页岩油富集条件: 以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段富有机质泥页岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 828-838.
- Liu B, Shi J X, Fu X F, et al. Petrological characteristics and shale oil enrichment of lacustrine fine-grained sedimentary system: a case study of organic-rich shale in first member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 828-838.
- [17] 王玉华, 梁江平, 张金友, 等. 松辽盆地古龙页岩油资源潜力及勘探方向[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(3): 20-34.
- Wang Y H, Liang J P, Zhang J Y, et al. Resource potential and exploration direction of Gulong shale oil in Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(3): 20-34.
- [18] 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 L Z, Wang Z Z, Zhang G, 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.
- [19] 吴蓝宇, 胡东风, 陆永潮, 等. 四川盆地涪陵气田五峰组-龙马溪组页岩优势岩相[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(2): 189-197.
- Wu L Y, Hu D F, Lu Y C, et al. Advantageous shale lithofacies of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling gas field of Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(2): 189-197.
- [20] 薛华庆, 胥蕊娜, 姜培学, 等. 岩石微观结构 CT 扫描表征技术研究[J]. 力学学报, 2015, 47(6): 1073-1078.
- Xue H Q, Xu R N, Jiang P X, et al. Characterization of rock microstructure using 3D X-ray computed tomography [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(6): 1073-1078.