

鄂尔多斯盆地延长组长7油层组页岩-致密砂岩 储层孔缝特征

耳 闯^{1,2}, 赵靖舟^{1,2}, 姚泾利^{3,4}, 叶小闯⁵, 吴伟涛^{1,2}, 白玉彬^{1,2}, 邓秀芹^{3,4}, 孙 勃^{3,4}

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065;
3. 中国石油 长庆油田分公司 勘探开发研究院, 陕西 西安 710018; 4. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710018;
5. 中国石油 长庆油田分公司 第三采气厂, 陕西 西安 710018)

摘要:鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7油层组是富有机质页岩和致密砂岩共生发育的富油层位,富有机质页岩既是生油层又是储层,并为致密砂岩提供油源。揭示页岩储层和致密砂岩储层之间的孔缝特征,对认识页岩油和致密油赋存空间和运移机理具有重要意义。综合岩心描述、场发射扫描电镜、激光共聚焦显微镜、核磁共振实验、高压压汞和低温吸附实验等手段,定性描述和定量表征相结合,刻画了富有机质泥页岩和致密砂岩储层中的孔隙类型和孔径大小。富有机质泥页岩孔隙类型包括粒间孔、粒内孔、有机质孔,页岩中孔隙的孔径范围总体分布在50 nm以下。页岩中的裂缝包括水平缝、低角度缝、高角度缝和近直立缝。致密砂岩储层孔隙类型包括剩余原生粒间孔、晶间孔和次生孔,且次生孔是主要的孔隙类型。致密砂岩孔隙直径多在2 μm以上,孔喉半径多集中在73.5 nm以下,但对渗透率起贡献作用的孔喉半径区间为73.5~735 nm,致密砂岩中同样发育微裂缝和高角度裂缝。页岩和致密砂岩孔隙的形成和演化均受沉积作用和成岩作用的影响,成岩作用流体和烃类流体的运移和充注将页岩和致密砂岩构成了有机整体。延长组长7油层组页岩-致密砂岩系统中存在3类孔缝网络和石油运移路径:①页岩内纳米-微米级孔隙-裂缝网络,形成页岩油的存储空间和石油源内运移的路径;②致密砂岩内纳米级喉道和微米级孔隙的孔隙网络系统,形成致密油的存储空间;③页岩和致密砂岩间差异孔喉结构-微裂缝-裂缝孔喉网络系统,构成源内石油向源外运移的路径。

关键词:孔隙;孔-缝网络;泥页岩;致密砂岩;延长组;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Characterization of pores and fracture networks in organic-rich shale and tight sandstone of the Chang-7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin

Er Chuang^{1,2}, Zhao Jingzhou^{1,2}, Yao Jingli^{3,4}, Ye Xiaochuang⁵, Wu Weitao^{1,2}, Bai Yubin^{1,2},
Deng Xiuqin^{3,4}, Sun Bo^{3,4}

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. Shaanxi Key Lab of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China;

4. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an, Shaanxi 710018, China;

5. No. 3 Gas Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China)

Abstract: Chang-7 member of the Triassic Yanchang Formation is rich in oil and composed of organic-rich shale and tight sandstone. The shale serves both as source rock to nearby tight sandstone and as reservoirs. An improved appreciation of pores and fracture networks in the shale and tight sandstone reservoirs is of great significance to understand storage space characteristics and migration mechanisms of shale oil and tight oil. Through qualitative description and quantitative characterization, pore types and pore size of the organic-rich shale and tight sandstone were studied by comprehensively utilizing methods including core description, field emission scanning electronic microscope, laser scanning confocal microscopy, nuclear magnetic resonance, high pressure Hg injection, and low-temperature thermal adsorption. Organic-rich shale contains intragranular pores, intergranular pores and organic pores, with most pore size less than 50 nm. It also contains micro-fractures. Horizontal, low angle, high angle and vertical fractures can all be observed in the shale. The tight sandstone contains residual primary intergranular pores, inter-crystals pores and secondary pores (the major type). Pore size is

收稿日期:2015-12-10;修订日期:2016-04-20。

第一作者简介:耳闯(1982—),男,博士、讲师,沉积与储层、非常规油气地质。E-mail:erchuang@xsyu.edu.cn。

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2013JQ503);陕西省教育厅重点科研项目(15JS092);国家科技重大专项(2011ZX5018001,2011ZX05001,2011ZX05044)。

mostly larger than 2 μm and pore-throat size is less than 73.5 nm. However, pore-throats that contribute the most to improving permeability are those ranging between 73.5 nm and 735 nm. Microfractures and high angle fractures can also be spotted in the tight sandstone. Forming and evolution of pores both in shale and tight sandstone are suggested to be controlled by sedimentation and diagenesis. Migration and charging of diagenetic fluids and hydrocarbon fluids worked together to forge organic-rich shale and tight sandstone into an organic whole. The study also distinguishes three kinds of pore and fracture networks and pathway of oil migration in shale and tight sandstone of the Chang-7 member: ① nonameter-micrometer pores-fracture networks in organic-rich shale (acting as storage space and migration pathway within source rocks); ② nanometer pore throat-micrometer pores-fracture networks in tight sandstones (acting as storage space of tight oil); ③ differential pore throat structure-microfracture-fracture networks between shale and tight sandstone (acting as migration pathway for oil from source rocks to outside reservoirs).

Key words: pore, pore-fracture network, shale, tight sandstone, Yanchang Formation, Ordos Basin

鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7油层组沉积时期是晚三叠世最大湖泛时期,湖盆沉积范围广,湖盆中心发育大面积的重力流砂体和稳定分布的优质烃源岩^[1-3],具有得天独厚的生油条件,是致密油和页岩油良好的资源潜力区^[4-6]。

长7油层组富有机质页岩孔隙度总体小于4%^[7-8],储层发育有与石英、长石、粘土矿物有关的无机矿物孔,也发育与有机质有关的有机孔,纳米级到微米级孔隙均存在^[7,9-12]。长7致密砂岩储层孔隙度一般为4%~10%,渗透率总体小于 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[4,13-14]。孔隙类型以次生孔隙为主,从大孔到纳米孔隙连续性赋存石油^[13,15-16]。

长7油层组从下至上,由长7³、长7²和长7¹组成,长7¹和长7²主要由厚层块状层理砂岩相和平行层理砂岩相互层构成,泥页岩相厚度较薄;长7³由黑色泥页岩相与薄层块状层理砂岩相互层、薄层平行层理砂岩相和滑塌相。长7¹和长7²是致密油勘探的主力层系^[17-18],长7³的富有机质页岩层段及其相邻的粉砂岩、细砂岩以及砂质条带中发现了良好的油气显示。富有机质页岩既是生油层又是储层,并为致密砂岩提供油源。长7富有机质页岩-砂岩连续发育层系内页岩油和致密油的形成可能是一种连续的成藏过程。将页岩-致密砂岩孔隙和裂缝进行系统研究,对认识页岩油和致密油的聚集和运移具有重要意义。

1 长7富有机质页岩孔隙和(微)裂缝特征

有机质孔与矿物基质孔在成因上存在差异,二者有着本质的不同。首先将长7富有机质页岩孔隙类型划分为矿物基质孔和有机质孔。延长组页岩粘土矿物含量高,抗压实能力差,孔隙保存能力差,形成的孔隙小。判断孔隙产状容易,判断其成因相对困难。因此,在划分矿物基质有关的孔隙时,根据矿物类型、孔隙和其周围无机矿物之间的相对位置及孔隙结构,可以化分为粒

间孔、粒内孔和晶间孔,再根据孔隙成因分成若干亚类。

1.1 矿物基质孔

1.1.1 粒间孔

粒间孔包括碎屑颗粒间孔、粘土矿物片体间孔和颗粒间溶蚀孔。碎屑颗粒粒间孔形态包括近三角形孔(图1a)、多边形孔(图1b,c)、近圆形孔(图1a)以及颗粒间缝(图1b),孔隙边缘较规则,孔径为10~2000 nm。碎屑颗粒以石英和长石为主,碎屑颗粒间、碎屑颗粒与粘土矿物之间的接触关系多为点—线接触,几乎不存在凹凸接触或粘土矿物的弯曲变形(图1a—c)。碎屑颗粒与有机质颗粒之间的接触关系表现为凹凸接触或碎屑颗粒嵌入有机质内部,说明碎屑颗粒和有机质颗粒之间的压实作用很明显。从抗压实性角度考虑,近三角形形状的碎屑颗粒间孔可能更有利于孔隙的保存。

粘土矿物片体间孔为粘土矿物集合体之间的孔隙,孔隙形态包括顺层的伸长状孔隙、近三角形孔隙和近圆形孔隙(图1d,e),孔径为20~240 nm。同样,从抗压实性角度考虑,近三角形形状粘土矿物片体间孔隙的保存能力较强。

碎屑颗粒间溶蚀孔主要为长石和碳酸盐颗粒被溶解而形成的,易溶矿物可能全被溶蚀掉形成铸模孔,也可能还留有原始的矿物残余。溶蚀孔隙具有不规则的边缘形态,粒间溶蚀孔的孔径与原始矿物颗粒的大小有关,可以从几十纳米到微米级别(图1f)。

1.1.2 粒内孔

粒内孔的孔隙类型包括长石颗粒内溶蚀孔和粘土矿物内孔。长石颗粒内溶蚀孔可保留长石颗粒的残余结构,孔隙主要发育在长石颗粒的内部,孔隙边缘不规则,孔径变化范围大,可从十几纳米到微米级别(图1g)。

粘土矿物内孔是粘土矿物集合体内部发育的孔隙,孔隙形态可包括近三角形孔、伸长状孔和近圆形孔(图1h,i),粘土矿物集合体内部可以形成一定的孔隙

网络空间,孔隙可能有一定的连通性,孔径一般为十几纳米到数百纳米。图1h中,可以看到粘土矿物内孔具有一定径深,说明粒内孔有一定的连通性。

1.1.3 晶间孔

黄铁矿是长7富有机质页岩中一种重要的矿物类型,存在单体、条带状和草莓状集合体等多种形式,黄铁矿晶体间孔为球状黄铁矿集合体或条带状黄铁矿集合体内部的孔隙,孔隙平面上多呈三角形,孔径在280nm左右(图1j,2b)。

1.2 有机质孔

延长组长7富有机质页岩中的有机质孔发育程度

较差,在大块的有机质颗粒和顺层分布的条带状有机质内基本不存在类似于海相页岩中的蜂窝状孔隙^[19-23](图2a,b)。在碎屑颗粒包围的有机质颗粒内可见到微裂缝,推测是生烃增压形成的微裂缝在样品后期处理过程中重新开启形成的(图2c)。在粘土矿物包围的较小有机质颗粒内,发育相对离散的近圆形有机质孔,孔径多在30nm以下。黄铁矿单体间的有机质内也发育离散的近圆形或多边形孔隙,孔径多在50nm以下(图2d)。碎屑颗粒和粘土矿物颗粒包围有机质,无机矿物对有机质颗粒的挤压程度相对较弱时,有机质内也存在少量近圆形孔隙和条带状孔隙或裂缝,孔径或宽度在100nm左右(图2e)。

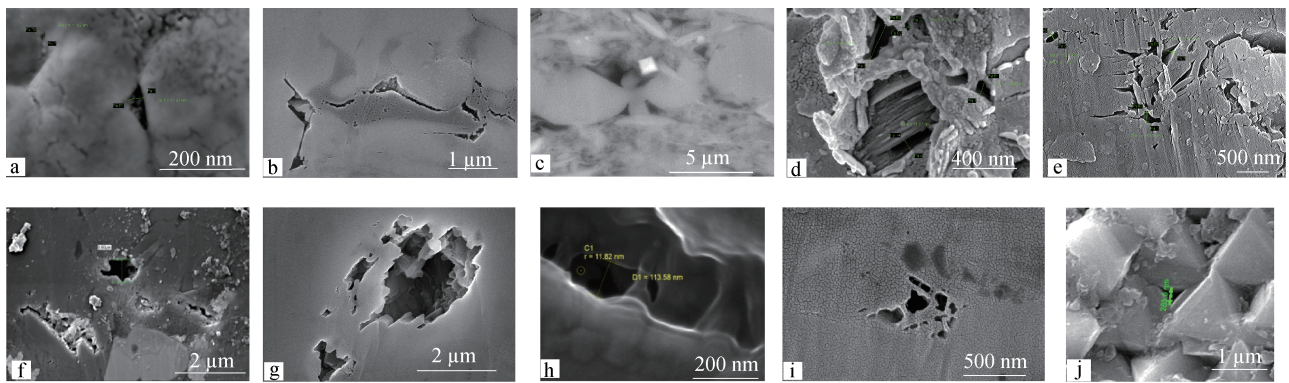


图1 鄂尔多斯盆地延长组长7富有机质页岩内矿物基质孔

Fig. 1 Mineral matrix pores in organic-rich shale of the Chang-7 member, Yanchang Formation, Ordos Basin

a. X58井,埋深969.35 m,长7,碎屑颗粒间孔,左上角孔隙孔径约12nm,中间三角形孔隙孔径约37 nm;b. Y22井,埋深1352.75 m,长7,左下角碎屑颗粒间孔(缝),近方形孔孔径约400 nm,颗粒间缝宽约40 nm,碎屑颗粒间以点-线接触为主,碎屑颗粒与有机质颗粒间凹凸接触,碎屑颗粒与有机质颗粒间的裂隙可能是样品处理过程中形成的,有机质颗粒内可见离散的孔隙,孔径多在50 nm以下;c. Y7井,埋深1150.1 m,长7,碎屑颗粒间孔,碎屑颗粒间呈点-线接触,碎屑颗粒间孔呈近方形(孔径约2 μm)和近三角形(孔径800~1000 nm),碎屑颗粒与粘土矿物间、粘土矿物之间还发育很多微米以下孔隙;d. X79井,埋深873.35 m,长7,粘土矿物片体间孔,图片上方近三角形孔隙,短轴孔径约180 nm,图片下方长条形孔隙,短轴孔径约71 nm,中间偏右区域近圆形孔隙,孔径约81 nm;e. X79井,埋深873.35 m,长7,粘土矿物片体间孔,孔隙呈近三角形、长条形和近圆形,近三角形孔孔径约170 nm,长条形和近圆形孔径约80 nm;f. X79井,埋深873.35 m,长7,碎屑颗粒间(溶蚀)孔,长石颗粒被溶蚀,上方孔隙的长石颗粒被溶蚀较彻底,形成铸模孔,孔径约600 nm,左下角可见溶蚀残余,孔径约700 nm;g. X79井,埋深873.35 m,长7,长石颗粒内溶蚀孔,孔隙边缘不规则的溶蚀状,孔径100~2000 nm;h. X79井,埋深873.35 m,长7,粘土矿物内孔,孔隙图像有一定的景深,说明孔隙有一定的连通性;i. Y4井,埋深1171.11 m,长7,粘土矿物内孔,孔隙呈近圆形、多边形和长条形孔隙;j. M20井,埋深980.89 m,长7,黄铁矿晶间孔,孔径约285 nm

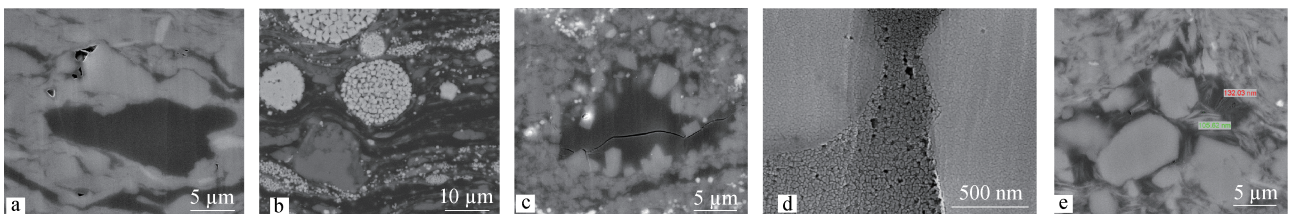


图2 鄂尔多斯盆地延长组长7富有机质泥页岩中的有机质和有机质孔

Fig. 2 Organic matter and organic pores in organic-rich shale of the Chang-7 member, Yanchang Formation, Ordos Basin

a. X96井,埋深2080.77 m,长7,有机质颗粒与矿物碎屑颗粒间呈凹凸接触,有机质发生变形,有机质内无明显孔隙,可见少量碎屑颗粒间孔,孔径在1 μm以下;b. X96井,埋深2063.27 m,长7,层状有机质,有机质与无机矿物互层,黄铁矿(白色)呈单体、球状集合体和条带状集合体,黄铁矿集合体内发育黄铁矿晶间孔,黄铁矿集合体、碎屑颗粒和有机质间呈凹凸接触;c. X96井,埋深2035 m,长7,图中间有机质无明显孔隙,有机质内存在一条微裂缝,矿物颗粒嵌入有机质内部;d. Y4井,埋深1171.11 m,长7,黄铁矿颗粒间为有机质,可见有机质内分散的孔隙,孔隙直径50 nm以下;有机质颗粒范围内,有机质孔的面积率约5.5%;e. Y7井,埋深1150.1 m,长7,有机质被包围在碎屑颗粒和粘土矿物间,碎屑颗粒间呈点-线接触,有机质内无明显孔隙,可见少量孤立的孔隙,孔径在100 nm左右;有机质颗粒范围内,有机质孔的面积率约0.5%

(注:图中暗色区域为有机质,浅色区域为矿物。)

1.3 孔隙孔径分布特征

受场发射扫描电镜分辨率的制约,镜下观察到的孔隙更多地反映孔隙类型和孔隙形态^[24],并不能完全代表孔径分布区间。前期研究揭示,微孔孔径主要集中在0.4~1 nm,中孔孔径主要集中在3~5 nm^[7]。综合低温CO₂吸附、低温N₂吸附和压汞实验,系统揭示了富有机质页岩中不同孔径区间内孔隙的分布特征(图3)。微孔(<2 nm)区间内,孔径范围在0.5~1 nm的孔隙构成了微孔的主体。中孔(2~50 nm)区间内,孔径范围在3~5 nm的孔隙构成了中孔的主体。宏孔(50~1 μm)区间内,基本不发育孔隙。综合3种实验结果,页岩储层以50 nm以下的孔隙为主。

1.4 微裂缝

微裂缝主要表现为纹层缝或页理缝(图4a,b),在层状有机质与粘土矿物、粘土矿物和砂质纹层之间或层状粘土矿物之间均可形成微裂缝(图4a,c,d)。在富有机质页岩中,常发育层状有机质、条带状粘土矿物或矿物碎屑、条带状分布的黄铁矿颗粒互层的现象(图4b,c)。在有机质条带、黄铁矿颗粒和条带状矿物之间也普遍发育微裂缝(图4d—f),顺层缝和斜交缝形成微裂缝网络系统。上述微裂缝网络与矿物基质孔和有机质孔配合,即可形成孔隙-微裂缝网络系统。

1.5 裂缝

长7泥岩和页岩的裂缝包括水平缝、低角度缝、高角度缝和近直立缝。水平缝和低角度缝主要沿砂质纹层、页理和凝灰质纹层发育(图5a—c)。水平缝和低角度缝可能不是天然缝,而是岩心在取至地面后沿纹层面或层理面形成,但纹层为后期储层改造过程中沟通孔隙和人工裂缝提供了有利条件。高角度缝和近直立缝可在泥岩和页岩段内发育。前期研究证实,长7

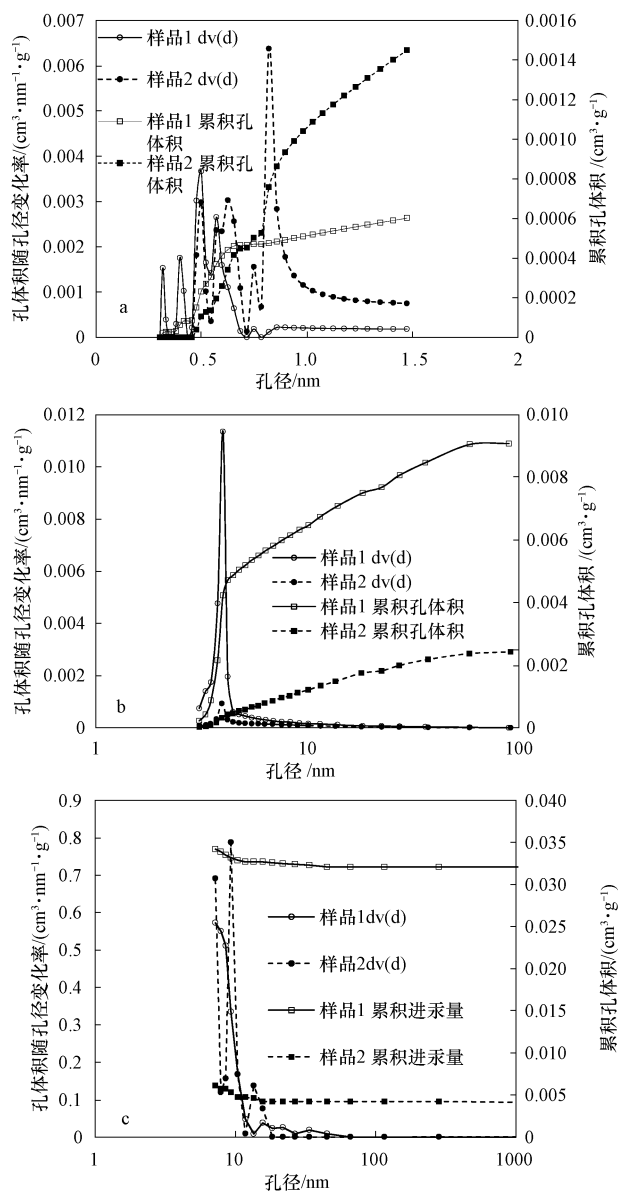


图3 鄂尔多斯盆地延长组长7富有机质页岩孔隙孔径分布特征

Fig. 3 Size distribution of pores in organic-rich shale of the Chang-7 member, Yanchang Formation, Ordos Basin

a. CO₂ 吸附实验; b. N₂ 吸附实验; c. 压汞实验

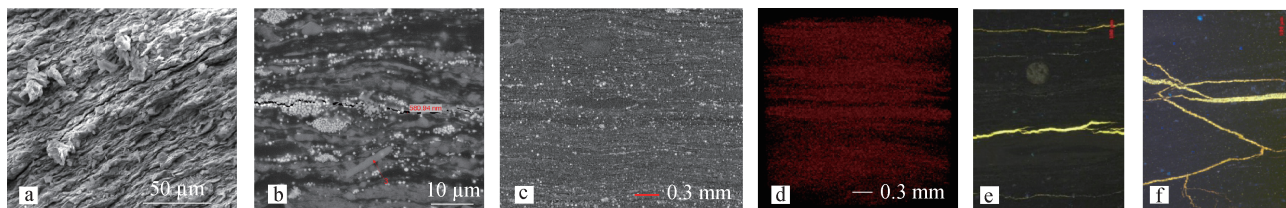


图4 鄂尔多斯盆地延长组长7富有机质泥页岩中微裂缝特征

Fig. 4 Micro-fractures in organic-rich shale of the Chang-7 member, Yanchang Formation, Ordos Basin

a. Y860井,埋深1 849.91 m,长7,微裂缝顺泥质纹层发育; b. X96井,埋深2 062.66 m,长7,层状有机质,有机质与无机矿物互层,黄铁矿呈离散的单体和球状集合体分布,离散状集合体发育在碎屑颗粒和层状有机质之间,三者之间发育微裂缝,缝宽约580 nm; c. X96井,埋深2 063.95 m,长7,CT扫描图像,富有机质纹层、砂质纹层和黄铁矿互层; d. X96井,埋深2 063.95 m,长7,CT扫描图像,孔隙三维空间分布特征,红色区域为纹层缝; e. X96井,埋深2 068.94 m,长7,黑色页岩,激光共聚焦显微镜下裂缝二维形态,裂缝(黄色区域)顺纹层分布或与纹层斜交; f. X96井,埋深2 062.66 m,长7,黑色页岩,激光共聚焦显微镜下裂缝二维形态,裂缝(黄色区域)顺纹层分布或与纹层斜交

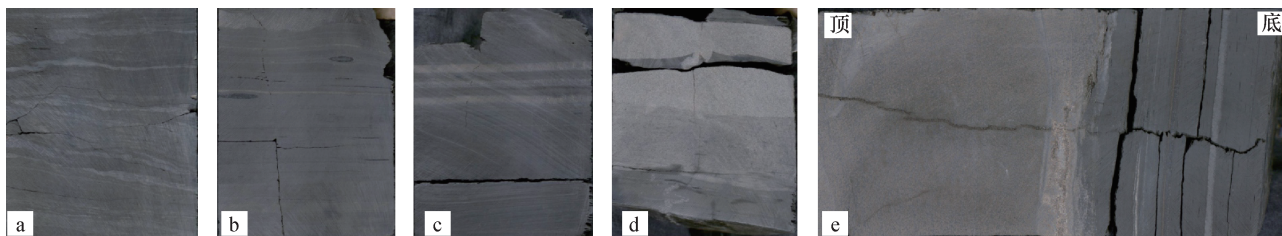


图5 鄂尔多斯盆地 X96 井延长组长7 富有机质泥页岩中的裂缝

Fig. 5 Fractures in organic-rich shale of the Chang-7 member, Yanchang Formation, Ordos Basin

- a. 埋深 2 044.07 m, 水平缝和低角度缝顺砂质纹层发育, 水平缝与低角度缝相交; b. 埋深 2 054.75 m, 水平缝沿页理发育, 高角度缝与水平缝相交; c. 埋深 2 055.56 m, 黑色泥岩与凝灰质条带互层, 高角度缝与层面相交; d. 埋深 2 047.04 m, 近直立缝贯穿泥岩、泥质细砂岩和细砂岩段; e. 埋深 2 061.12 m, 高角度缝贯穿黑色页岩和细砂岩, 高角度缝与黑色页岩内的页理、纹层面和低角度缝相交, 细砂岩内有较好含油显示

富有机质页岩中构造裂缝以高角度缝为主, 很多情况下被方解石所充填^[25]。高角度缝既可与水平缝和低角度缝以及纹层界面构成裂缝网络(图 5a—c), 也可从页岩和泥岩段贯穿至砂岩段(图 5d, e), 在与黑色页岩段紧邻的砂岩段由于裂缝的沟通作用, 在砂岩段具有良好的含油显示(图 5e)。

2 长7 致密砂岩孔隙和裂缝特征

2.1 物性特征

长7 致密砂岩孔隙度范围为 0.5% ~ 12.3%, 平均值为 7.14%, 主体分布范围为 6% ~ 12%; 渗透率范围为 $(0.02 \sim 7.83) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均值为 $0.17 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 主体分布范围 $(0.05 \sim 0.2) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 长7 段属于典型的致密储层^[26-27]。渗透率在 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下的样品孔隙度和渗透率具有明显的正相关性(图 6)。

2.2 孔隙类型

长7 致密砂岩储层孔隙类型划分强调孔隙成因, 同时兼顾孔隙大小和几何形状, 以此为原则, 首先将孔隙类型划分为原生孔隙和次生孔隙两大类, 然后再进一步细分。

2.2.1 原生孔隙

目前保留下来的原生孔隙基本都经历了压实作用和胶结作用的改造, 因此, 主要为剩余原生粒间孔, 其次为晶间孔。薄片下可以发现, 颗粒之间多以线接触为主, 可见凹凸接触, 原生粒间孔在压实作用下缩小(图 7a, b)。同时, 在原生粒间孔内多被微晶石英、碳酸盐胶结物和伊利石等自生矿物充填(图 7c)。晶间孔隙为自生矿物的晶间孔隙, 长7 致密砂岩内主要为伊利石晶间孔, 呈拉长孔、近三角形孔和圆形孔等(图 7d, e)。

2.2.2 次生孔隙

次生孔隙主要是长石和岩屑以及早期碳酸盐胶结

物被有机酸溶蚀后形成的各类孔隙, 孔隙边缘不规则。按孔隙产状, 可划分为粒间溶孔和粒内溶孔两类。粒间溶孔主要为长石、岩屑等易溶颗粒的边缘被溶蚀(图 7d), 粒内溶孔主要为易溶颗粒内部被溶蚀, 溶蚀彻底

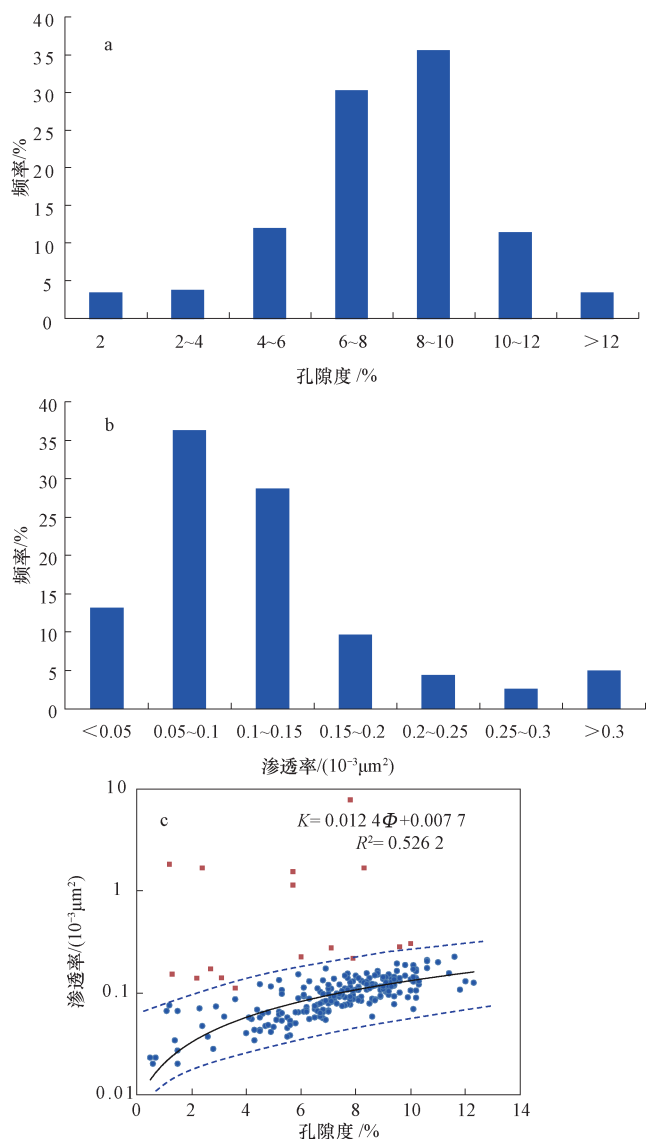


图6 鄂尔多斯盆地延长组长7 致密砂岩物性特征

Fig. 6 Physical properties of tight sandstone of the Chang-7 member, Yanchang Formation, Ordos Basin

a. 孔隙度直方图; b. 渗透率直方图; c. 孔隙度-渗透率关系直方图

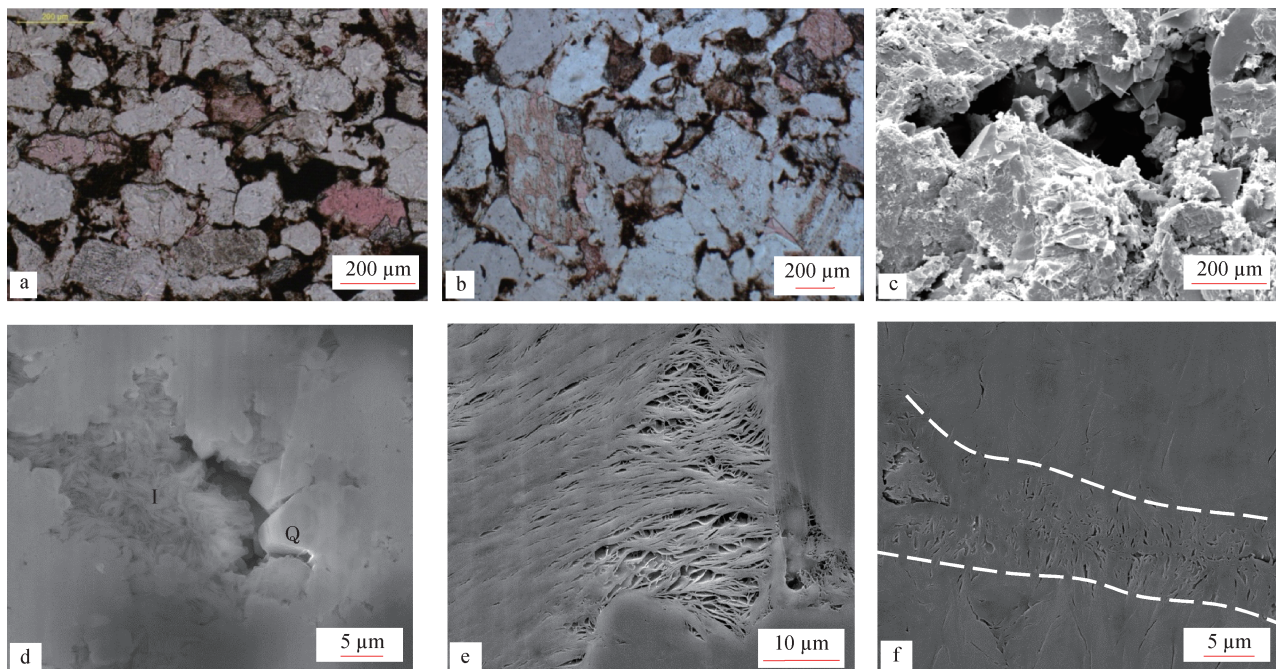


图 7 鄂尔多斯盆地延长组长 7 致密砂岩储层孔隙类型

Fig. 7 Pore types in tight sandstone of the Chang-7 member, Yanchang Formation, Ordos Basin

a. X96 井,埋深 2 028.99 m,长⁷₂,铸模孔;b. X96 井,埋深 2 003.87 m,长⁷₂,粒内溶孔和粒间溶孔;c. X96 井,埋深 2 028.99 m,长⁷₂,剩余原生粒间孔;d. B522 井,埋深 1 948.09 m,长⁷₃,剩余粒间孔孔径 2 μm 以上;e. X96 井,埋深 2 016.18 m,长⁷₂,伊利石晶间孔;f. X96 井,埋深 2 078.69 m,长⁷₃,伊利石晶间孔,白色线区域内。

I. 伊利石;Q. 石英

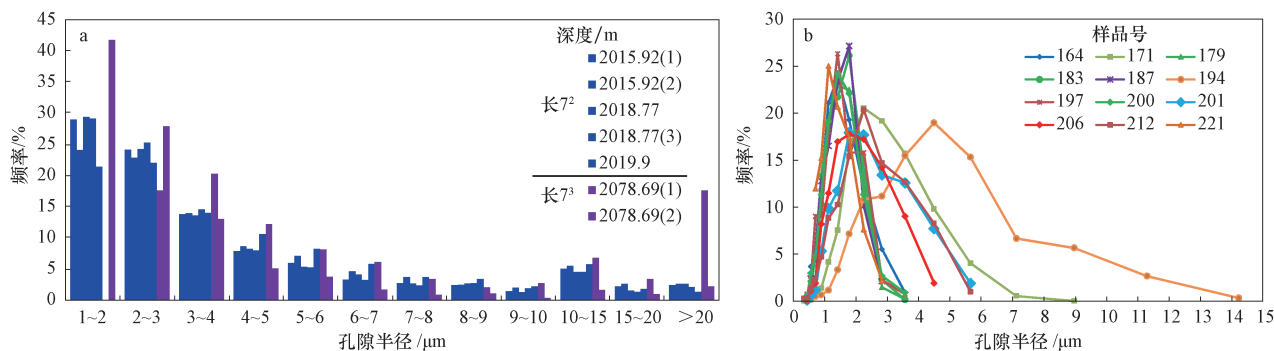


图 8 鄂尔多斯盆地延长组长 7 致密砂岩储层孔隙孔径分布特征

Fig. 8 Pore size distribution in tight sandstone of the Chang-7 member, Yanchang Formation, Ordos Basin

a. 激光共聚焦显微镜分析结果;b. 工业 CT 分析结果

的情况下,可以出现铸模孔(图 7a,b)。与剩余粒间孔类似,粒间溶孔多被微晶石英、晚期碳酸盐胶结物和伊利石等自生矿物充填(图 7d)。

2.3 孔径特征

通过铸体薄片和普通扫描电镜观察的孔隙孔径多在数十微米以上(图 7a—c)。利用场发射扫描电镜观察经过氩离子抛光处理的样品,可以发现很多孔径 10 μm 以下的孔隙。在 10 μm 以下的孔隙中,剩余粒间(溶)孔孔径在 2 μm 以上(图 7d),伊利石晶间孔孔径多在 1 μm 以下(图 7e)。

利用激光共聚焦显微镜观察铸体薄片,本次研究

中选用的激光共聚焦显微镜分辨率为 1 μm。半径 2 μm 以上的孔隙占总孔隙的 70 以上%,半径 2~6 μm 的孔隙占总孔隙的 50%以上(图 8a)。利用工业 CT(分辨率为 900 nm)观察孔隙孔径分布,孔隙半径主要分布在 1~5 μm(图 8b)。综合激光共聚焦显微镜和工业 CT 结果,长 7 致密砂岩以 2 μm 以上孔隙为主。

根据 T₂ 谱曲线形态分析,长 7 致密砂岩 T₂ 谱存在 4 种类型:①单峰,小孔为主,T₂ 谱能量在 1 ms 附近最强,反映以小孔隙为主(图 9a);②双峰,小孔为主,出现两个峰值区,1 ms 附近最强,其次为 100 ms 附近,小孔所占体积较多(图 9b);③双峰,大孔为主,出现两个峰值区,100 ms 附近最强,其次为 1 ms 附近,大孔所

占体积较多(图9c);④双峰,小孔和大孔等量型,出现两个峰值区,1 ms 和 100 ms 处峰值近似相等,小孔和大孔所占体积近似相等(图9d)。小孔和大孔只是对孔隙大小的相对称谓,没有规定其具体孔径界线值。根据牛小兵^[15]和冯胜斌^[16]的资料,小孔区可能反映的孔隙半径范围在10~1 000 nm 的孔隙信息,大孔区可能反映的孔隙半径范围在1~100 μm 的孔隙信息。4种 T_2 谱曲线类型均具有一个共同特征,即孔隙信号和200 psi 离心压力下, T_2 谱在1 ms 附近无明显分离

或分离间隔较小,在10~100 ms 区间,两种状态下的 T_2 谱间隔明显,说明大孔区内的孔隙连通性较好^[28]。总体而言,直径2 μm 以上的孔隙占有较大比重,且连通性较好。

2.4 孔喉特征

各类毛管压力曲线对应的孔喉分布均表现出双峰或多峰特征,大部分样品的孔喉半径都位于735 nm 以下,且主峰位于73.5 nm 以下(图10)。双峰或多峰形

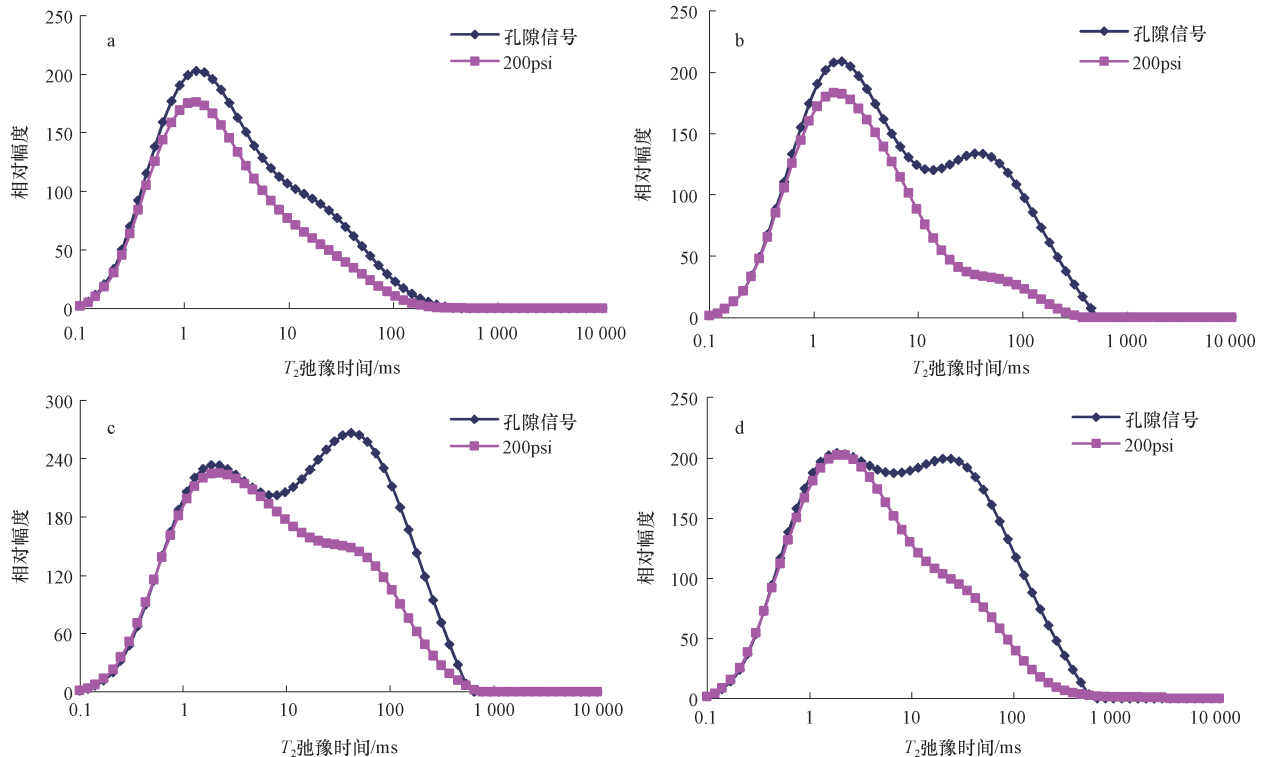


图9 鄂尔多斯盆地延长组长7 致密砂岩储层 T_2 谱特征

Fig. 9 T_2 spectrum of tight sandstone of the Chang-7 member, Yanchang Formation, Ordos Basin

a. 单峰型,小孔为主;b. 双峰型,小孔为主;c. 双峰型,大孔为主;d. 双峰型,小孔和大孔等量型

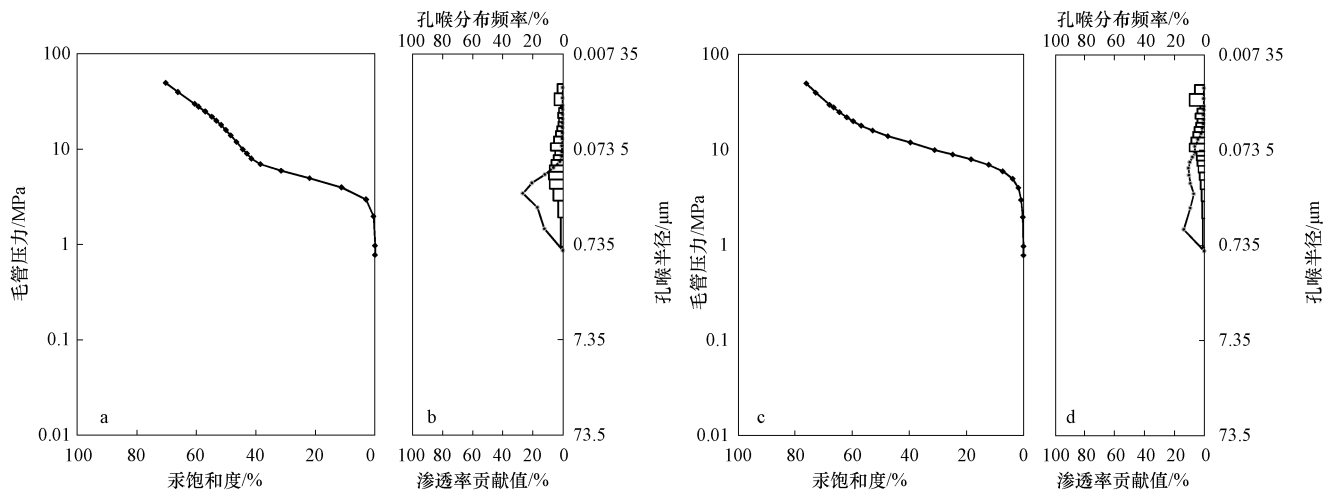


图10 鄂尔多斯盆地延长组长7 致密砂岩储层毛管曲线特征与孔喉分布特征

Fig. 10 Capillary pressure curve and pore-throat distribution of tight sandstone of the Chang-7 member, Yanchang Formation, Ordos Basin

a, c. X96 井, 长7², 埋深2 029.39 m; d. X96 井, 长7², 2 037.95 m

态特征说明致密砂岩的孔喉有多个孔径区间,孔喉总体分选较差。各类型的孔喉对渗透率的贡献作用均表现出一致的特征,即大的孔喉对渗透率贡献作用大,对渗透率起贡献作用的孔喉半径分布在 73.5 ~ 735 nm。长 7 致密砂岩以纳米级孔喉为主。

2.5 裂缝特征

致密砂岩段内常见到高角度缝和近直立缝(图 5d,e),裂缝周围的含油显示较好,裂缝对改善储层渗透性有较大的作用;同时,砂岩内也发育微裂缝^[4,13]。微裂缝和裂缝可以沟通致密砂岩的孔隙和喉道,改善致密储层渗透性,是石油运移的重要通道。综合上述分析,长 7 致密砂岩储层发育纳米级喉道-微米级孔隙-(微)裂缝网络。

3 页岩-致密砂岩系统内孔隙-裂缝综合特征

3.1 页岩-致密砂岩成藏联系

长 7 油层组沉积时期经历了晚三叠世最大的一次湖泛事件,形成了以“张家滩页岩”为代表的优质烃源岩^[1-3]。长 7 油层组总体对应了长期基准面上升中晚期-长期基准面下降的过程,从长 7³ 到长 7¹,泥质含量和有机质含量降低,砂质含量增加。长 7³ 以黑色页岩和泥岩为主,夹含粉砂泥岩、粉砂质泥岩和重力流成因的薄层粉砂岩、细砂岩和含泥细砂岩等。长 7² 和长 7¹ 以厚层块状细砂岩为主,夹薄层黑色泥岩^[29]。在此沉积背景下,形成了长 7 富有机质页岩-致密砂岩的连续岩性序列,构成了 3 类含油层段类型:①富有机质页岩层段内自生自储的页岩油气(长 7³);②富有机质页岩层段内薄层致密砂岩的致密油(长 7³);③富有机质页岩层段之上的致密油(长 7² 和长 7¹)。

页岩油气既可吸附在有机质和矿物表面,也可以储存在页岩层系内各种类型的孔隙内^[5]。以细粒沉积物为主的富有机质页岩具有很大的比表面积,为油气提供了吸附的场所。页岩储层内的粒间孔、粒内孔和有机质孔为游离态的页岩油气提供了赋存空间。长 7³ 富有机质页岩层段内,总有机碳含量(TOC)、比表面积和孔体积与热解参数游离烃含量(S_1)之间均具有正相关性(图 11),证实了富有机质页岩即可作为烃源岩又可作为储层的二重性。

对于烃源岩层而言,只有生成的油气满足自身吸附和储存后才会向外排烃^[5]。有机质类型、有机质丰度和有机质成熟度是决定页岩油气潜力的重要基础。对于致密油而言,除了上述因素之外,影响因素还包括排烃效率、成藏动力和运移通道等。研究表明,华池地区长 7 烃源岩生烃增压介于 13 ~ 22 MPa,生烃强度大于 $300 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 范围内致密油可以富集成藏。致密油成藏孔隙度下限约为 4%,渗透率下限约为 $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔喉直径下限约为 50 nm^[30]。由于长 7 致密砂岩中,对渗透率起贡献作用的孔喉半径分布在 73.5 ~ 735 nm,因而长 7 致密砂岩储层完全可以满足致密油成藏。

3.2 页岩-致密砂岩孔隙发育机制异同点

长 7 富有机质页岩和致密砂岩沉积后,经历了大致相同的地质埋藏过程和同步的构造演化过程,具有相似的温压体制,因此在富有机质页岩-致密砂岩系统内,压实作用、胶结作用和溶蚀作用等都影响了孔隙类型和孔隙发育程度。由于沉积演化的阶段性和沉积成因的差异性,富有机质页岩和致密砂岩在粒度和矿物组成方面的具有较大的不同,因此,各类成岩作用在页岩和致密砂岩孔隙演化过程中发挥的作用可能不同。同时,由于矿物组成和有机质含量的差异,页岩内

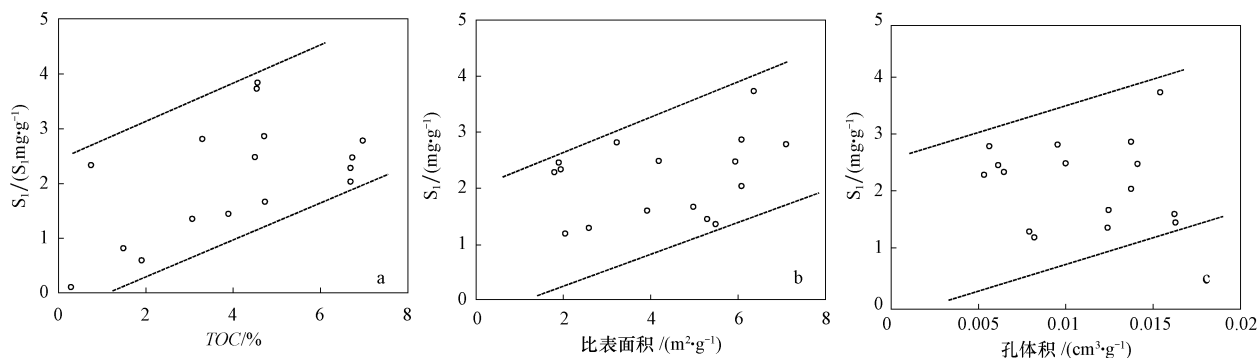


图 11 鄂尔多斯盆地延长组长 7 富有机质页岩总有机碳、比表面积、孔体积与游离烃量相关性

Fig. 11 Correlation of total organic carbon, specific surface area and and pore volume with free hydrocarbon content in Ordos Basin

a. TOC 与 S_1 关系; b. 比表面积与 S_1 关系; c. 孔体积与 S_1 关系

(注: TOC 为有机碳含量; S_1 为游离烃含量。)

发育有机质孔也是页岩储层和致密砂岩储层的重要区别。由于篇幅原因,本文对两类孔隙发育机制的异同点做简要分析。

3.2.1 富有机质页岩孔隙发育影响因素

长7 富有机质页岩形成于半深湖-深湖沉积环境,并伴有重力流成因的薄层砂质纹层,有利于形成碎屑颗粒间孔、碎屑颗粒内孔和顺层微裂缝。早期成岩作用阶段形成的黄铁矿,有利于形成黄铁矿晶间孔,但黄铁矿也是压实作用的主要参与者(图 2a,b)。压实作用造成粒间孔和粒内孔的孔径变小和孔体积降低,碎屑颗粒和黄铁矿与有机质颗粒间呈凹凸接触(图 2a,b),有机质孔在压实作用下闭合导致有机质孔不发育。溶蚀作用促进长石粒间溶孔和长石粒内溶孔的形成(图 1f,b),一定程度改善储层质量。在成熟度达到一定阶段后,开始出现有机质孔。有机质孔发育程度差,一方面受成熟度的影响,另一方面可能是压实作用造成的。

在早成岩期,有机质未成熟,沉积作用影响明显,主要发育了粒内孔和粒间孔。随着埋深增大,温度和压力增加,进入中成岩期,压实作用和胶结作用增强,粒间孔和粒内孔逐渐降低。有机质热演化程度逐渐升

高,随着粘土矿物脱水与结构转化、有机质热解排酸、生烃和排烃的进行,形成了一定的溶蚀孔和有机质孔,增加了部分孔隙空间(图 12)。

3.2.2 致密砂岩孔隙发育影响因素

与富有机质页岩相似,沉积作用是影响致密砂岩储层孔隙发育的先决条件。长7 致密砂岩的成因类型主要为重力流砂体和三角洲前缘砂体。以重力流砂体为例,砂质碎屑流成因砂体物性好于滑塌成因砂体和浊积岩。砂体厚度是沉积作用的直接产物,不同砂体厚度在砂层抗压实能力、砂层顶底面和砂体内部胶结程度和溶蚀程度的差异,都会造成储层物性的不同。沉积条件决定了沉积物粒度特征,粒度对孔隙结构造成重要影响,最终影响了储层孔隙度特别是渗透率的大小。

长7 致密砂岩碎屑颗粒间以线接触为主,较少出现凹凸接触(图 7a,b),表明储层目前尚未达到最大压实阶段,在埋藏过程中,储层持续受到压实作用的破坏。

胶结物类型包括自生伊利石、石英次生加大,微晶石英和碳酸盐胶结物。伊利石等粘土矿物抗压实能力弱,容易堵塞孔隙和喉道,造成孔隙度降低,渗透率减小。胶结物既可以充填在原生粒间孔内,也可充填在

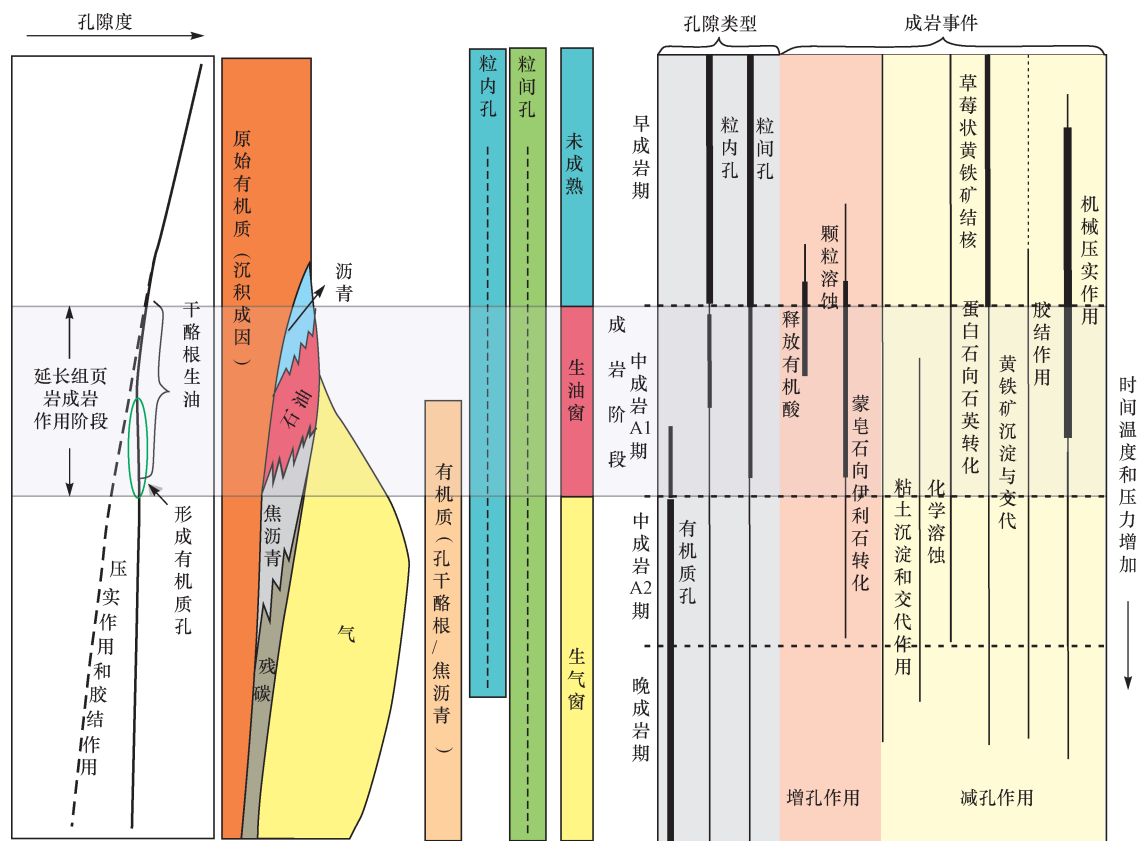


图 12 鄂尔多斯盆地延长组泥页岩储层有机质演化、孔隙类型与成岩作用综合模式(据文献[21]和[31],修改)

Fig. 12 Cartoon of comprehensive model of organic matter evolution, pore types and diagenesis of shale reservoirs, Ordos Basin (modified from reference[21] and [31])

溶蚀孔内(图7c,e)。压实作用和胶结作用造成孔隙度的损失率在80%以上,溶蚀作用对改善储层物性起到一定积极作用。

在有机质热演化排出有机酸形成溶蚀孔隙前,受压实作用和早期胶结作用影响,储层已达到低孔低渗阶段(孔隙度<15%),形成相对封闭的成岩环境,流体运移不畅。有机质成熟早期,剩余压力低,酸性流体就近溶蚀,由于流体运移不畅,硅质胶结物和碳酸盐胶结物等就近沉淀。在压实作用和胶结作用的双重影响下,二者对储层的破坏作用抵消了溶蚀作用对储层的改善作用。晚期碳酸盐胶结物和伊利石持续充填剩余粒间孔及溶蚀孔,造成孔隙度进一步降低(图13)。

3.2.3 页岩-致密砂岩系统成岩作用联系

虽然各类成岩作用对富有机质页岩储层和致密砂岩储层的影响存在差异,但二者的孔隙演化不是孤立的。二者都受控于统一的地质演化过程,富有机质页岩作为烃源岩,具有更大的压缩性和生烃增压特征。在统一的地温场背景下,构成页岩和致密砂岩的各种矿物处于相似的温度条件下,但流体环境存在一定程度的差异。页岩比致密砂岩在压实过程中具有更大的脱水能力,促使页岩层系内的各种矿物组分或离子进

入与其相邻的砂岩内,从而促进了砂岩内的胶结作用、交代作用及重结晶作用。页岩内有机质热演化过程中,排酸作用促进了页岩和砂岩内易溶矿物的溶解,形成次生孔隙,并且极有可能将页岩内的溶蚀产物带入砂岩中,从而促进砂岩内的胶结作用,进而加速砂岩致密化进程。有机质成熟排烃有利于形成有机质孔,延缓页岩储层孔隙度降低趋势。在排烃作用下,石油进入紧邻的砂岩储层促进致密油成藏。成岩流体和烃类流体的运移和充注效应将富有机质页岩和致密砂岩联系成统一的整体。

3.3 页岩-致密砂岩系统内孔隙-裂缝网络

长7富有机质页岩和致密砂岩内部均发育大小及数量不同的孔隙,它们与粗细及数量不同的喉道相互连通形成错综复杂的孔隙网络系统。非均质性是各类储层普遍存在的现象,因此在页岩和致密砂岩中实际上均存在无数的孔隙网络,这些孔隙网络之间或彼此孤立,或相互连通。连通的孔隙网络由开放的孔隙、喉道和微裂缝及裂缝构成。

碎屑颗粒、粘土矿物、有机质和黄铁矿等构成了页岩的主要“骨架”,各类矿物和有机质之间彼此接触,也为各类矿物基质孔和有机质孔提供了载体。富有机质页岩在生烃过程中,生烃增压作用为微裂缝的形成

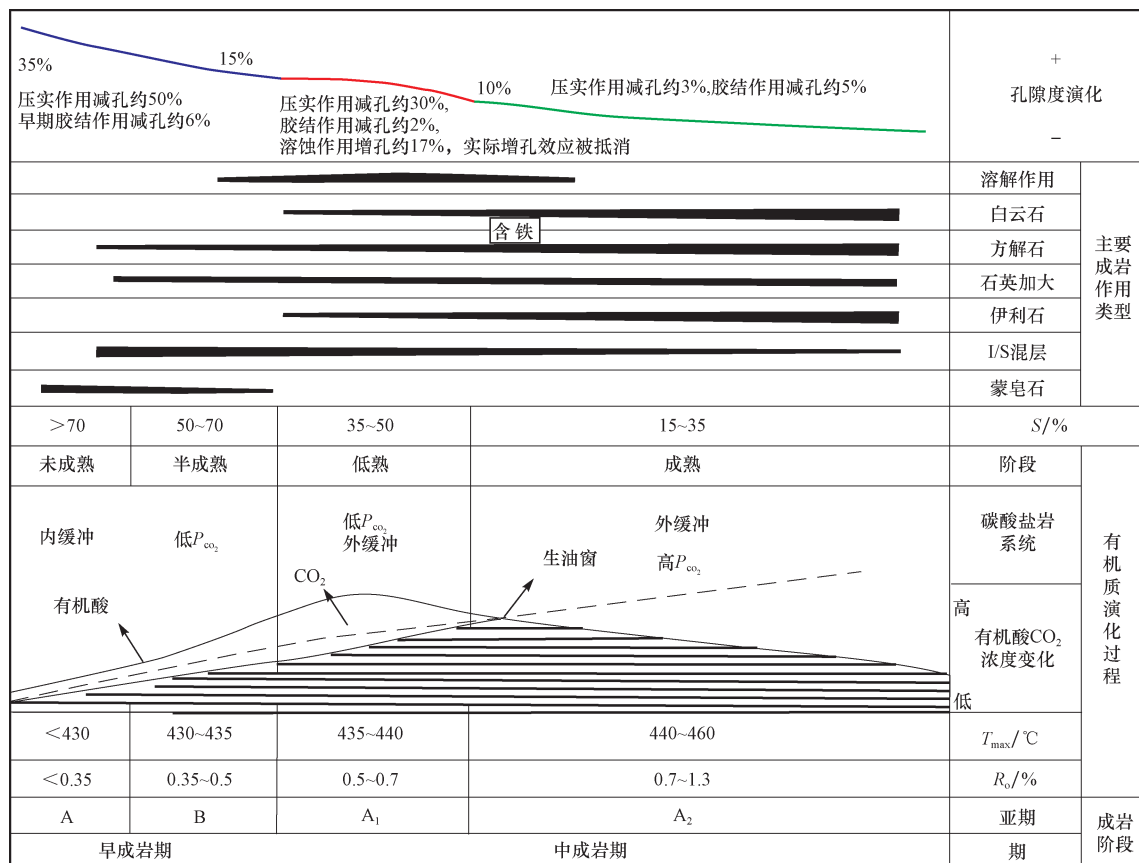


图13 鄂尔多斯盆地长7油层组致密砂岩储层孔隙演化史

Fig. 13 Pore evolution history of tight sandstone in Chang-7 Member, Ordos Basin

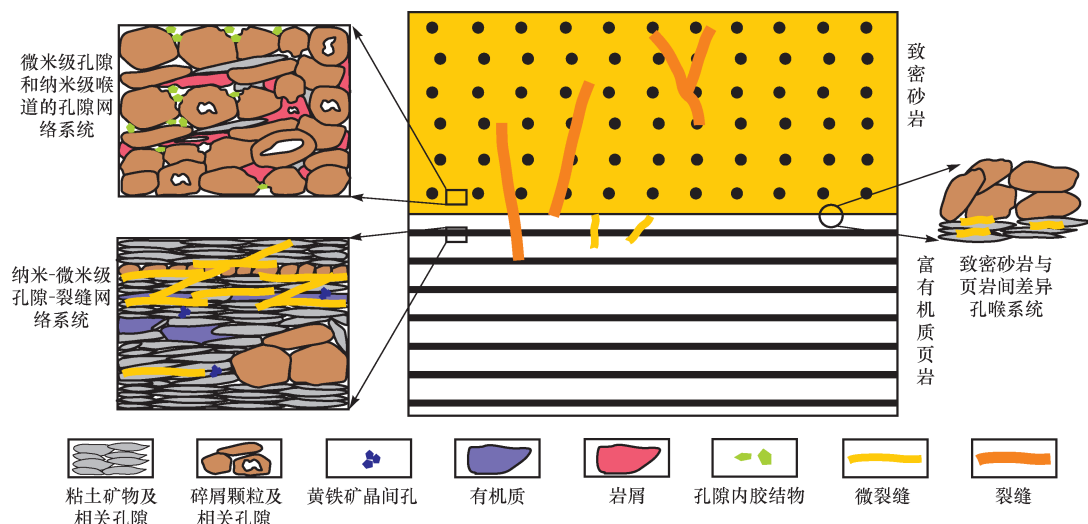


图 14 鄂尔多斯盆地延长组长7油层组页岩和致密砂岩孔隙-裂缝网络系统

Fig. 14 Model of pore-fracture networks for shale-tight sandstone system in the Chang-7 member, Yanchang Formation, Ordos Basin

提供了有利条件^[4,32-33]。燕山期构造运动促进了页岩内高角度构造裂缝的形成^[25],从而为石油初次运移提供了通道。

致密砂岩中发育大小和形态各异的剩余原生粒间孔、次生孔隙和晶间孔隙,各类孔隙通过粗细和形态各异的喉道彼此连通或孔隙间互不连通。受成岩作用和构造作用的影响,砂岩中同样存在微裂缝和高角度构造缝^[34-35],并沟通了孔隙网络,进而为石油提供了高效运移通道^[36-40]。

延长组长7油层组页岩-致密砂岩系统中存在下述孔缝网络系统和石油运移路径:①页岩内纳米-微米级孔隙-裂缝网络系统,形成页岩油的存储空间和石油源内运移的路径;②致密砂岩内微米级孔隙和纳米级喉道的孔隙网络系统,形成致密油的存储空间;③页岩和致密砂岩间差异孔喉结构-微裂缝-裂缝孔喉网络系统,页岩内孔隙多在50 nm以下,致密砂岩孔隙在2 μm以上,有效孔喉半径区间主要为73.5~735 nm,页岩和致密砂岩间存在孔隙差。在生烃增压作用下,页岩和致密砂岩间差异孔喉结构-微裂缝-裂缝网络系统构成源内石油向外运移的路径(图14)。

4 结论

1) 长7富有机质页岩内孔隙类型包括粒间孔、粒内孔、晶间孔和有机质孔,粒间孔和粒内孔是主要孔隙类型。页岩内孔隙以孔径50 nm以下的孔隙为主。致密砂岩内发育剩余原生粒间孔、晶间孔和各类次生孔隙,以直径2 μm以上的孔隙和纳米级喉道为主。

2) 富有机质页岩和致密砂岩内均存在裂缝和微裂缝,沟通了各类孔隙,成为油气运移的通道。富有机质页岩-致密砂岩系统内孔隙的形成和演化均受到沉

积作用和成岩作用的影响,成岩流体和烃类流体的运移和充注效应应富有机质页岩和致密砂岩联系成统一的整体。

3) 页岩内发育纳米-微米级孔隙-裂缝网络系统。致密砂岩内发育微米级孔隙和纳米级喉道的孔隙网络系统,形成致密油的存储空间。页岩和致密砂岩间差异孔喉结构-微裂缝-裂缝网络系统,构成源内石油向源外运移的通道。

参 考 文 献

- [1] 杨华,傅强,付金华. 鄂尔多斯晚三叠世盆地沉积层序与油气成藏[M]. 北京:地质出版社,2007:21-43.
Yang Hua, Fu Qiang, Fu Jinhua. Late Triassic sedimentary sequence and petroleum accumulation of Ordo Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 21-43.
- [2] 杨华,张文正. 论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用:地质地球化学特征[J]. 地球化学, 2005, 34(2): 147-154.
Yang Hua, Zhang Wenzheng. Leading effect of the Seventh Member high-quality source rock of Yanchang Formation in Ordos Basin during the enrichment of low-penetrating oil-gas accumulation: Geology and geochemistry[J]. Geochimica, 2005, 34(2): 147-154.
- [3] 张文正,杨华,李剑锋,等. 论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用——强生排烃特征及机理分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 289-293.
Zhang Wenzheng, Yang Hua, Li Jianfeng, et al. Leading effect of high-class source rock of Chang7 in Ordos Basin on enrichment of low permeability oil gas accumulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 289-293.
- [4] 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 Hua, Li Shixiang, Liu Xianyang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 1-11.
- [5] 邹才能,杨智,崔景伟,等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对

- 策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14–26.
- Zou Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(1): 14–26.
- [6] 高岗, 刘显阳, 王银会, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长7段页岩油特征与资源潜力[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 140–146.
- Gao Gang, Liu Xianyang, Wang Yinhui, et al. Characteristics and resource potential of the oil shale of Chang 7 Layer in Longdong Area, Ordos Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(2): 140–146.
- [7] 耳闻, 赵靖舟, 白玉彬, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组富有机质泥页岩储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 708–715.
- Er Chuang, Zhao Jingzhou, Bai Yubin, et al. Initial discussion on characteristics of organic-rich shale of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(5): 708–715.
- [8] 王香增. 陆相页岩气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2014, 73–106.
- Wang Xiangzeng. *Lacustrine shale gas* [M]. Beijing: Petroleum Industrial Press, 2014, 73–106.
- [9] 杨超, 张金川, 唐玄, 等. 鄂尔多斯盆地陆相页岩微观孔隙类型及对页岩气储渗的影响[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 240–250.
- Yang Chao, Zhang Jinchuan, Tang Xuan. Microscopic pore types and its impact on the storage and permeability of continental shale gas, Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 2013 204 240–250.
- [10] 曾维特, 张金川, 丁文龙, 等. 延长组页岩储层纳米级孔隙特征及影响因素——以鄂尔多斯盆地柳坪171井为例[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 1118–1126.
- Zeng Weite, Zhang Jinchuan, Ding Wenlong, et al. Characteristics and influence factors of nanopores in Yanchang Shale reservoir: a case study of Liuping-171 Well in Ordos Basin [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(6): 1118–1126.
- [11] 杨巍, 陈国俊, 吕成福, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组长7段富有机质页岩孔隙特征[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(3): 418–426, 591.
- Yang Wei, Chen Guojun, Lv Chengfu, et al. Micropore characteristics of the organic-rich shale in the 7th Member of the Yanchang Formation in the Southeast of Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(3): 418–426, 591.
- [12] 曹茜, 周文, 陈文玲, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组长7段陆相页岩气地层孔隙类型、尺度及成因分析[J]. 矿物岩石, 2015, 35(2): 90–97.
- Cao Qian, Zhou Wen, Chen Wenling, et al. Analysis of pore types sizes and genesis in continental shale gas reservoir of Chang 7 of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2015, 35(2): 90–97.
- [13] 姚泾利, 邓秀芹, 赵彦德, 等. 鄂尔多斯盆地延长组致密油特征[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(2): 150–158.
- Yao Jingli, Deng Xiuqin, Zhao Yande, et al. Characteristics of tight oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(2): 150–158.
- [14] 赵继勇, 刘振旺, 谢启超, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬油田长7致密油储层微观孔喉结构分类特征[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(5): 73–79.
- Zhao Jiyong, Liu Zhenwang, Xie Qichao, et al. Micro pore throat structural classification of Chang 7 tight oil reservoir of Jiyuan Oilfield in Ordos Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(5): 73–79.
- [15] 牛小兵, 冯胜斌, 刘飞, 等. 低渗透致密砂岩储层中石油微观赋存状态与油源关系——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组为例[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 288–233.
- Niu Xiaobing, Feng Shengbing, Liu Fei, et al. Microscopic occurrence of oil in tight sandstones and its relation with oil sources—a case study from the upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(3): 288–233.
- [16] 冯胜斌, 牛小兵, 刘飞, 等. 鄂尔多斯盆地长7致密油储层储集空间特征及其意义[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(11): 4574–4580.
- Feng Shengbing, Niu Xiaobing, Liu Fei, et al. Characteristics of Chang7 tight oil reservoir space in Ordos basin and its significance [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 34(3): 288–233.
- [17] 付金华, 邓秀芹, 楚美娟, 等. 鄂尔多斯盆地延长组深水岩相发育特征及其石油地质意义[J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 928–938.
- Fu Jinhua, Deng Xiuqin, Chu Meijuan, et al. Features of deepwater lithofacies, Yanchang Formation in Ordos Basin and its petroleum significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(5): 928–938.
- [18] 付金华, 邓秀芹, 张晓磊, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组深水砂岩与致密油的关系[J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 624–634.
- Fu Jinhua, Deng Xiuqin, Zhang Xiaolei, et al. Relationship between deepwater sandstone and tight oil of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. *Journal of Paleogeography*, 2013, 15(5): 624–634.
- [19] 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: 848–861.
- [20] 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 Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, 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.
- [21] 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.
- [22] Chalmers G R, Bustin R M, Power I M. Characterization of gas shale pore systems by porosimetry, pycnometry, surface area, and field emission scanning electron microscopy/transmission electron microscopy image analyses: Examples from the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus, and Doig units [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(6): 1099–1119.
- [23] Curtis M E, Sondergeld C H, Ambrose R J, et al. Microstructural investigation of gas shales in two and three dimensions using nanometer-scale resolution imaging [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(4): 665–677.
- [24] 朱如凯, 白斌, 崔景伟, 等. 非常规油气致密储集层微观结构研究进展[J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 615–623.
- Zhu Rukai, Bai Bin, Cui Jingwei, et al. Research advances of micro-

- structure in unconventional tight oil and gas reservoir[J]. Journal of Paleogeography, 2013, 15(5): 615-623.
- [25] 王芮,赵靖舟,耳闯,等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段富有机质页岩裂缝特征及形成机制[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2014, 29(5): 43-48.
- Wang Rui, Zhao Jingzhou, Er Chuang, et al. Characteristics and forming mechanics of fractures in organic-rich shale of Chang-7 Member, the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Journal of Xian Shiyou University (Natural Science Edition), 2014, 29(5): 43-48.
- [26] 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.
- [27] 赵靖舟,白玉彬,曹青,等. 鄂尔多斯盆地准连续型低渗透-致密砂岩大油田成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 811-817.
- Zhao Jingzhou, Bai Yubin, Cao Qing, et al. Quasi-continuous hydrocarbon accumulation: a new pattern for large tight sand oilfields in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 811-817.
- [28] 郭和坤,刘强,李海波,等. 四川盆地侏罗系致密储层孔隙结构特征[J]. 深圳大学学报(理工版), 2013, 30(3): 306-312.
- Guo Hekun, Liu Qiang, Li Haibo, et al. Microstructural characteristics of the Jurassic tight oil reservoirs in Sichuan Basin[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2013, 30(3): 306-312.
- [29] 耳闯,罗安湘,赵靖舟,等. 鄂尔多斯盆地华池地区三叠系延长组长7富有机质页岩岩相特征[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 108-117.
- Er Chuang, Luo Anxiang, Zhao Jingzhou, et al. Lithofacies features of organic-rich shale of the Triassic Yanchang Formation in Huachi Area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 108-117.
- [30] 赵靖舟,耳闯,吴伟涛,等. 城壕地区延长组长7致密油成藏地质条件综合研究[D]. 陕西 西安: 西安石油大学, 2014: 119-118.
- Zhao Jingzhou, Er Chuang, Wu Weitao, et al. Comprehensive research on geological conditions for tight oil accumulation in Chang-7 Member, Yanchang Formation, Chenghao Area [D]. Xi'an, Shaanxi: Xi'an Shiyou University, 2014: 119-118.
- [31] Bohacs K M, Passey Q R, Rudnicki M, et al. The spectrum of fine-grained reservoirs from 'shale gas' to 'shale oil'/tight liquids: Essential attributes, key controls, practical characterization[C]//IPTC-16676, paper presented at the International Petroleum Technology Conference, 26-28 March 2013, Beijing, China; IPTC, 2013.
- [32] Berg R R and Gangi A F. Primary migration by oil-generation microfracturing in low-permeability source rocks; application to the Austin Chalk, Texas[J]. AAPG Bulletin, 83(5), 1999: 727-755.
- [33] 郭秋麟,陈宁生,宋焕琪,等. 致密油聚集模型与数值模拟探讨——以鄂尔多斯盆地延长组长7致密油为例[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(1): 4-10.
- Guo Qiulin, Chen Ningsheng, Song Huanqi, et al. Accumulation models and numerical models of tight oil: A case study Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoir, 2013, 25(1): 4-10.
- [34] 牛小兵,侯贵廷,张居增,等. 鄂尔多斯盆地长6-长7段致密砂岩岩心裂缝评价标准及应用[J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(3): 571-579.
- Niu Xiaobing, Hou Tinggui, Zhang Juzeng, et al. Assessment criteria for Member 6 and 7 tight sand in Ordos Basin and its applications[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2014, 38(3): 571-579.
- [35] 赵向原,曾联波,王晓东,等. 鄂尔多斯盆地宁县-合水地区长6、长7、长8储层裂缝差异性及其开发意义[J]. 地质科学, 2015, 50(1): 274-285.
- Zhao Xiangyuan, Zeng Lianbo, Wang Xiaodong, et al. Differences of natural fracture characteristics and their development significance in Chang 6, Chang 7 and Chang 8 reservoir, Ningxian-Heshui area, Ordos Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2015, 50(1): 274-285.
- [36] 郭凯,曾渊辉,李元昊,等. 陇东地区延长组构造裂缝方解石脉特征及其与烃类流体活动的关系[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(2): 36-42.
- Guo Kai, Zeng Jianhui, Li Yuanhao, et al. Geochemical characteristics of tectonic fracture-filling calcite in Yanchang formation of Longdong area and its relationship with hydrocarbon fluid flow[J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(2): 36-42.
- [37] 李荣西,刘海情,朱瑞静,等. 异常高压驱动石油运移成藏——鄂尔多斯盆地延长组长7多相态烃类沸腾包裹体证据[J]. 地质科学, 2013, 48(4): 1219-1233.
- Li Rongxi, Liu Haiqing, Zhu Ruijing, et al. Anomalous pressure driving oil migration: Evidence from multiphase boiling hydrocarbon fluid inclusions in Yanchang Reservoir, Ordos Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2013, 48(4): 1219-1233.
- [38] 王香增,张丽霞,李宗田,等. 鄂尔多斯盆地延长组长7致密储层孔隙类型划分方案及其油气地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 1-7.
- Wang Xiangzeng, Zhang Lixia, Li Zongtian, et al. Pore type classification scheme for continental Yanchang shale in Ordos Basin and its geological significance[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 1-7.
- [39] 时保宏,郑飞,张艳,等. 鄂尔多斯盆地延长组长7油层组石油成藏条件分析[J]. 石油实验地质, 2014, 36(3): 285-290.
- Shi Baohong, Zheng Fei, Zhang Yan, et al. Hydrocarbon accumulation conditions of Chang7 section, Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(3): 285-290.
- [40] 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.

(编辑 董立)