

文章编号: 1000-0747(2018)02-0223-12 DOI: 10.11698/PED.2018.02.05

## 致密砂岩储集层微观结构特征及成因分析 ——以鄂尔多斯盆地陇东地区长6段和长8段为例

刘翰林<sup>1,2</sup>, 杨友运<sup>1,2</sup>, 王凤琴<sup>1,2</sup>, 邓秀芹<sup>3</sup>, 刘烨<sup>4</sup>,  
南珺祥<sup>3</sup>, 王津<sup>1</sup>, 张洪洁<sup>1</sup>

(1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 西安 710065; 2. 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 西安 710065;  
3. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 西安 710004; 4. 西安石油大学计算机学院, 西安 710065)

基金项目: 国家科技重大专项“中生界低渗透储层非均质性评价技术”(2016ZX05050006); 国家科技重大专项“中生界  
延长组低渗透储层微观评价技术”(2011ZX05044); 国家自然科学基金“鄂尔多斯盆地延长组连续型岩性  
油藏成藏机理与地质特征”(41102083); 西安石油大学研究生创新基金(YCS17111014)

**摘要:** 通过铸体薄片、扫描电镜、X射线衍射、恒速压汞等方法, 对比了鄂尔多斯盆地陇东地区上三叠统长6段、长8段致密储集层微观结构的差异, 建立了相应的孔隙演化模式, 探讨了主要成岩作用对不同储集层致密化的控制。研究表明, 喉道是控制长6段、长8段储集层物性的主要因素; 储集层渗透率越低, 喉道半径越小、分布越集中、占有有效储集空间比例越大。明确长6段和长8段储集层差异: ①随渗透率增大, 长8段较6段储集层中相对大喉道对渗透率的影响作用明显增大; ②长6段储集层中纳米级喉道与孔隙半径比的相关性更强。沉积作用决定储集层原生孔隙结构, 成岩作用是储集层致密的主控因素。受长6段、长8段储集层岩石结构和绿泥石含量差异的影响, 压实作用使埋深和地温更大的长8<sub>1</sub>亚段储集层减孔量(15%)小于长6<sub>3</sub>亚段储集层(17%); 而硅质、钙质及黏土矿物胶结充填孔隙、堵塞孔喉是造成长6段、长8段储集层渗透率差异较大的关键。图15表1参34

**关键词:** 鄂尔多斯盆地; 三叠系; 延长组; 致密砂岩储集层; 恒速压汞; 微观孔喉结构

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

### Micro pore and throat characteristics and origin of tight sandstone reservoirs: A case study of the Triassic Chang 6 and Chang 8 members in Longdong area, Ordos Basin, NW China

LIU Hanlin<sup>1,2</sup>, YANG Youyun<sup>1,2</sup>, WANG Fengqin<sup>1,2</sup>, DENG Xiuqin<sup>3</sup>, LIU Ye<sup>4</sup>,  
NAN Junxiang<sup>3</sup>, WANG Jin<sup>1</sup>, ZHANG Hongjie<sup>1</sup>

(1. College of Geosciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. Shaanxi Key Lab of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710004, China; 4. College of Computer Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The microstructure differences of the Triassic Chang 6 and Chang 8 members tight reservoirs in the Longdong area of Ordos Basin were compared by means of cast thin sections, scanning electron microscope, X-ray diffraction, and constant rate mercury injection. Their pore evolution models were established, and the effects of main diagenesis on densification were examined. The throat is the main factor controlling the physical properties of the Chang 6 and Chang 8 members reservoirs: The lower the permeability, the smaller and the more concentrated the throat radius and the larger the proportion of the throats in the effective storage space. There are several obvious differences between Chang 6 and Chang 8 members: (1) with the increase of permeability, the contribution of the relative large throats to the permeability in the Chang 8 member reservoir is more than that in the Chang 6 member reservoir; (2) the control effect on pore-throat ratio of the nano-throats in the Chang 6 member reservoir is more significant. The sedimentary action determines the primary pore structure of the Chang 6 and Chang 8 members sand bodies, and the diagenesis is the main factor controlling the densification of the reservoirs. Because of the difference in rock fabrics and the chlorite content of Chang 6 and Chang 8, the strong compaction resulted in less porosity reduction (17%) of the Chang 8<sub>1</sub> reservoir with larger buried depth and larger ground temperature than the Chang 6<sub>3</sub> reservoir (19%). The siliceous, calcareous and clay minerals cement filling the pores and blocking the pore throat, which is the key factor causing the big differences between the reservoir permeability of Chang 6 and Chang 8 members.

**Key words:** Ordos Basin; Triassic; Yanchang Formation; tight sandstone reservoir; constant-speed mercury intrusion; micro pore and throat structure

引用: 刘翰林, 杨友运, 王凤琴, 等. 致密砂岩储集层微观结构特征及成因分析: 以鄂尔多斯盆地陇东地区长 6 段和长 8 段为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(2): 223-234.

LIU Hanlin, YANG Youyun, WANG Fengqin, et al. Micro pore and throat characteristics and origin of tight sandstone reservoirs: A case study of the Triassic Chang 6 and Chang 8 members in Longdong area, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(2): 223-234.

## 1 地质概况

陇东地区位于鄂尔多斯盆地西南部, 跨越西峰、环县、庆阳、合水、宁县、镇原及华池等 7 个区县(见图 1)<sup>[1]</sup>, 该地区上三叠统延长组是在盆地持续拗陷和稳定沉降过程中形成的一套冲积扇与扇三角洲—河流—湖泊相陆源碎屑岩沉积体系, 自下而上发育 10 个油层组<sup>[2]</sup>, 延长组中部长 6 段—长 8 段沉积期, 对应湖盆扩张、强烈拗陷和稳定收缩等 3 个阶段, 发育了优质的烃源岩和类型丰富的砂体。随着西峰、华庆、环江、镇北及合水多个亿吨级油气富集区的发现<sup>[3]</sup>, 证明了陇东地区延长组仍有巨大的勘探潜力, 更说明长 6 段、长

8 段作为主力产层, 对保障长庆油田  $5\,000 \times 10^4$  t 稳产具有重要意义。

研究区长 6 段—长 8 段储集层属于典型的致密砂岩储集层, 具有孔喉细小、结构复杂、非均质性强等特征, 一般渗透率小于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。深入认识其微观结构和致密化机理对指导研究区油气勘探开发具有重要意义。近年来, 中国有关学者针对研究区储集层微观结构方面开展了相关的研究工作, 邹才能等<sup>[4]</sup>认为纳米级孔隙是致密砂岩油气储集层的主要储集空间; 杨智峰等<sup>[5]</sup>研究发现鄂尔多斯盆地西南部长 6 段—长 8 段致密砂岩储集层纳米尺度下孔隙的半径大多小于  $0.5 \mu\text{m}$ , 其中球状孔隙发育, 连通性较差; 徐黎明等<sup>[6]</sup>通过研究致密油储集层的微观孔喉结构特征, 得出华庆地区长 6 段储集层渗透率为  $(0.01 \sim 1.00) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  以微米级孔隙为主; 任晓霞等<sup>[7]</sup>对长 8 段致密砂岩储集层的微观孔隙结构进行了定量表征, 结果表明亚微米孔喉对渗透率的贡献起主导作用。还有部分学者讨论了研究区储集层致密化的原因, 宋平等<sup>[8]</sup>认为压实作用是长 7 段储集层致密化的关键成岩因素; 钟大康<sup>[9]</sup>研究表明鄂尔多斯盆地长 6 段—长 7 段碳酸盐胶结物等对石英的交代作用减少了大量粒间孔体积, 使储集层更加致密; 周勇等<sup>[10]</sup>分析了长  $8_2$  亚段致密储集层中早期绿泥石环边的胶结作用, 认为其是相对高渗储集层原生孔隙保存的关键。上述学者的研究大多围绕单一层位展开, 未对不同层位致密砂岩储集层微观结构特征及成因机理进行对比, 未解释差异性成岩演化对孔隙结构的影响。本文选取陇东地区延长组 2 个代表性目的层段, 即华庆油田长  $6_3$  亚段和马岭油田长  $8_1$  亚段作为研究对象, 利用铸体薄片、扫描电镜、岩心物性、恒速压汞等资料, 深入剖析长 6 段、长 8 段致密储集层不同尺度微观孔喉结构的差异以及各主要成岩作用对长 6 段、长 8 段储集层致密化的差异控制, 进一步深化储集层致密化机理, 促进研究区致密油勘探开发进程。

## 2 储集层特征

### 2.1 岩石组分特征

陇东地区延长组中部以长石岩屑砂岩和岩屑长石

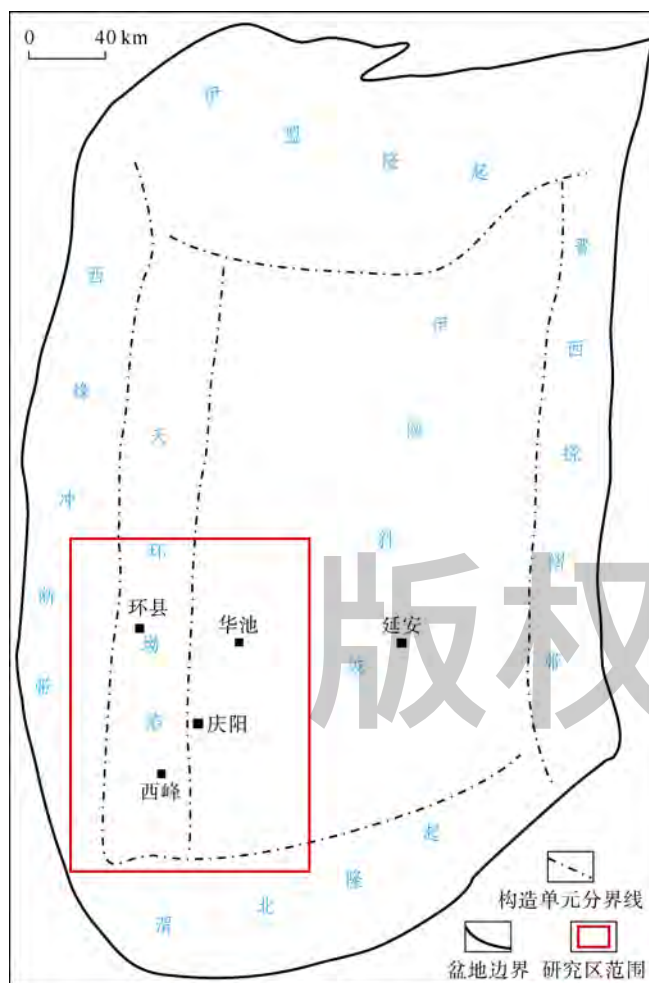


图 1 鄂尔多斯盆地陇东地区构造位置图

砂岩为主，长石砂岩和岩屑砂岩次之（见图2）。其中，长8段储集层中石英、长石、岩屑的平均含量分别为35.08%、33.12%、31.08%，比例接近1:1:1，岩屑成分以火成岩岩屑为主，尤其富含喷发岩岩屑<sup>[11-12]</sup>，云母含量平均值为3.41%；而长6段储集层中石英、长石、岩屑的平均含量分别为33.26%、43.48%、23.26%，具有“低石英、高长石”的特点，这是因为长6段沉积期华庆地区主要受北东方向阴山物源的控制，所提供的碎屑物质具有高斜长石的特征<sup>[13]</sup>。长6段的岩屑成分主要以千枚岩、变质粉砂岩等低级变质岩为主，云母类矿物含量丰富，平均为7.26%。长8段沉积末期

构造事件对陇东地区沉积物物源的改变，是长8段与长6段岩石组分具有较大差异的主要原因<sup>[14]</sup>。

### 2.2 储集层孔喉类型

根据铸体薄片与场发射扫描电镜结果，将研究区长6段、长8段致密储集层孔隙分为4类：①粒间孔，主要由残余粒间孔组成，孔隙规则性好且与颗粒边界呈平整接触，喉道以弯片状和片状为主，绿泥石以包膜状沿骨架颗粒表面垂直生长，孔喉半径平均为35~50 μm（见图3a、图3b）；②粒间溶孔-粒内溶孔，主要由粒间扩大溶孔和粒内溶孔组成，孔隙形状分布不均匀，多呈条带状、弯曲状，喉道以弯片状为主。

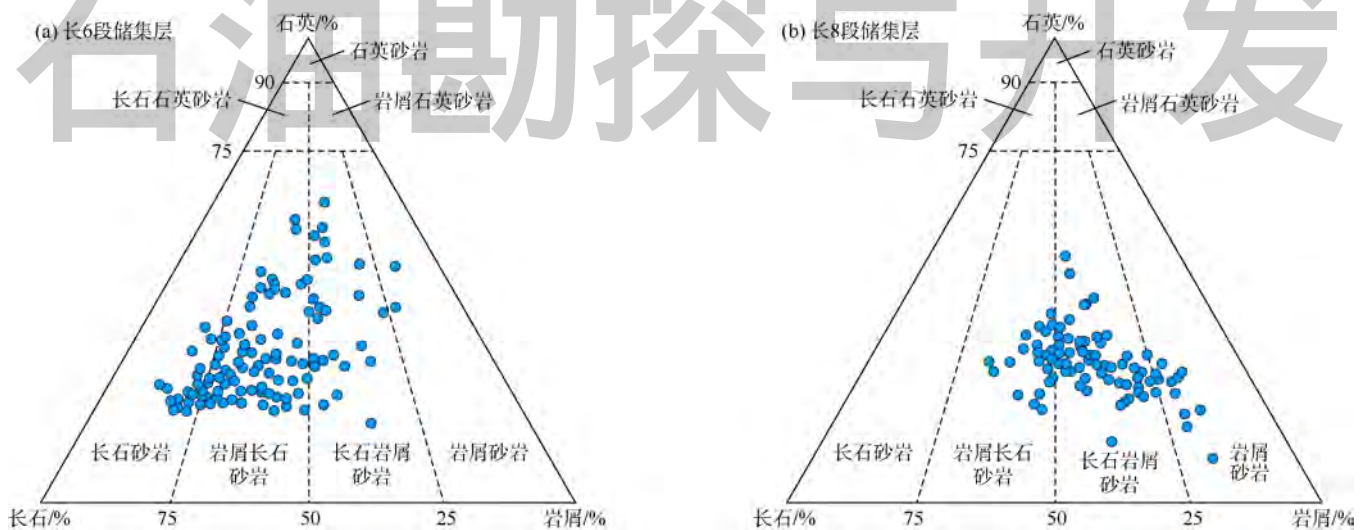
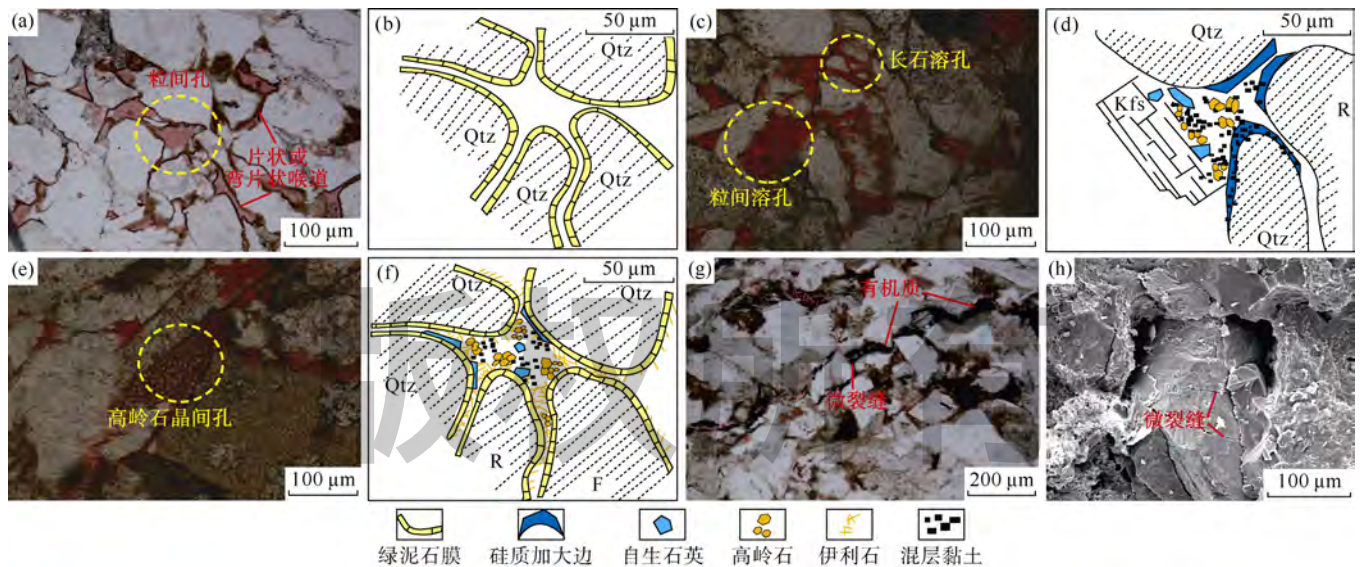


图2 陇东地区长6段、长8段储集层砂岩分类



(a) X127井，长8段，1836.5 m，粒间孔及片状、弯片状喉道，铸体薄片；(b) Z12井，长8<sub>1</sub>亚段，2117.83 m，粒间孔，孔喉结构素描图；(c) W25井，长6<sub>3</sub>亚段，1919.90 m，粒间溶孔及长石溶孔，铸体薄片；(d) B282井，长6<sub>3</sub>亚段，1979.2 m，粒间溶孔-粒内溶孔，孔喉结构素描图；(e) X181井，长8段，2063.00 m，高岭石晶间孔；(f) L79井，长8<sub>1</sub>亚段，2173.84 m，黏土矿物晶间微孔，孔喉结构素描图；(g) Z134井，长8段，1961.50 m，微裂缝中充填有机质，铸体薄片；(h) Y284井，长6<sub>3</sub>亚段，2176.32 m，微裂缝，扫描电镜

图3 陇东地区长6段、长8段致密储集层孔喉类型（Qtz—石英；F—长石；Kfs—钾长石；R—岩屑）

孔隙和喉道壁上石英加大边较发育,自生石英(多呈牙状、马蹄状)不均匀充填孔喉,并含少量混层黏土矿物,孔喉半径平均为 $15\sim 30\ \mu\text{m}$ (见图3c、图3d);③黏土矿物晶间微孔,成岩晚期,喉道内部被大量自生黏土矿物充填,如叶片状绿泥石、丝缕状伊利石和书页状高岭石等,在这些黏土矿物间发育晶间微孔,孔径平均为 $4\sim 25\ \mu\text{m}$ ,以微纳米孔隙为主(见图3e、图3f);④微裂缝,孔隙之间主要以微裂缝连通,其宽度为 $200\ \text{nm}\sim 20\ \mu\text{m}$ (见图3g、图3h)。

### 2.3 储集层微观孔喉特征

#### 2.3.1 实验样品及条件

恒速压汞技术能够直观、定量地分析孔隙、喉道、孔喉半径比的大小及分布特征等<sup>[15]</sup>。本文实验采用ASPE-730型恒速压汞实验装置,实验温度为 $25\sim 30\ ^\circ\text{C}$ ,接触角为 $140\ ^\circ\text{C}$ ,汞表面张力为 $485\ \text{mN/m}$ 。本文分别选取华庆地区长 $6_3$ 亚段具有代表性的8块岩心样品和马岭地区长 $8_1$ 亚段具有代表性的10块样品。前者样品孔隙度为 $5.84\%\sim 13.56\%$ (平均值为 $8.64\%$ ),渗透率为 $(0.073\sim 0.403)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ (平均值为 $0.292\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ );后者样品孔隙度为 $5.1\%\sim 13.0\%$ (平均值为 $9.89\%$ ),渗透率为 $(0.0318\sim 2.6140)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ (平均值为 $0.759\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ )。样品均属于典型的低孔低渗致密砂岩,但整体上长6段、长8段孔隙度差异小,长8段储集层渗透率大于长6段。根据渗透率的大小对18个样品进行分类,对比分析不同层位、不同渗透率样品的孔隙半径分布特征、喉道半径分布特征以及孔喉半径比分布特征的差异。

#### 2.3.2 孔、喉半径分布特征

长6段、长8段储集层不同渗透率样品的孔隙半径分布曲线具有相似的形态、集中区间和峰值(见图4a),说明孔隙大小不是控制长6段、长8段储集层物性差异的主要因素。长6段、长8段储集层不同级别渗透率样品的喉道半径分布差异大,但两个地区均表现出:渗透率越高,喉道半径分布范围越宽且分布频率越低,同时大喉道占比越大(见图4b)。比较长6段、长8段喉道半径累计分布曲线(见图4c):当渗透率级别较低(以华庆4号和马岭59号样品为例)累计分布频率达95%时,喉道半径均接近 $0.60\ \mu\text{m}$ ,说明长6段、长8段低渗样品主要受渗流通道中半径小于 $0.6\ \mu\text{m}$ 的喉道所控制;但随着渗透率的增大(以华庆1号和马岭18号样品为例),长6段、长8段储集层喉道特征差异明显:长 $6_3$ 亚段储集层喉道半径主要

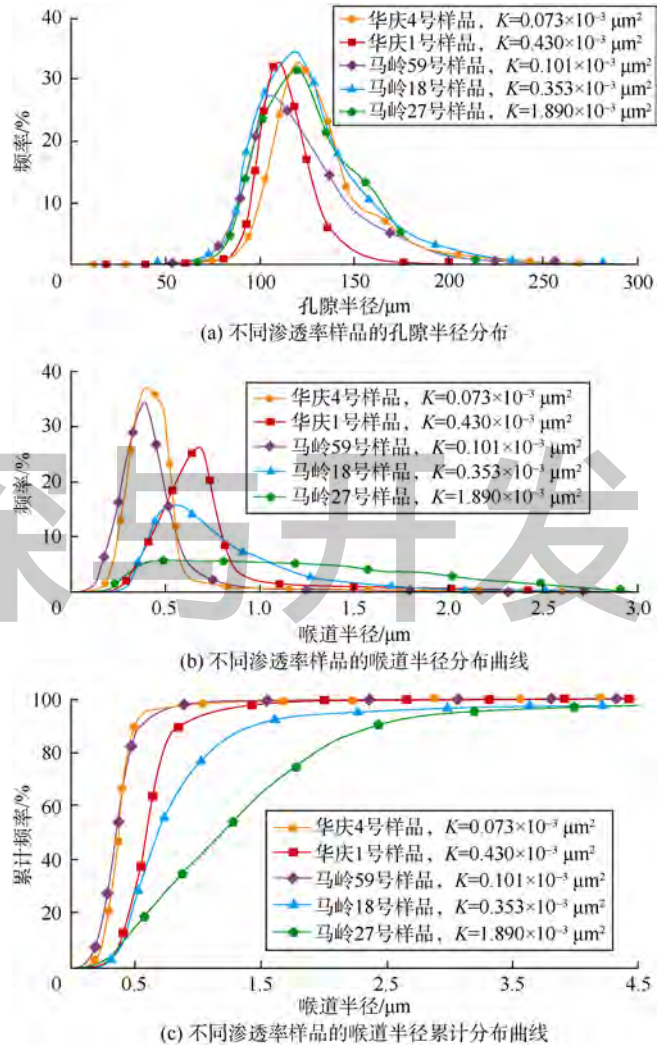


图4 陇东地区长6段、长8段致密储集层不同渗透率样品的孔、喉半径分布特征( $K$ —渗透率)

分布范围较集中,为 $0.25\sim 1.50\ \mu\text{m}$ ,样品主要受渗流通道半径小于 $1.5\ \mu\text{m}$ 的喉道所控制,不存在相对大喉道来贡献渗透率;而长 $8_1$ 亚段储集层喉道半径分布( $0.20\sim 2.27\ \mu\text{m}$ )较分散,大于 $1.5\ \mu\text{m}$ 的喉道约占15%,说明此时相对大喉道对渗透率的贡献较低渗时有所增加。

#### 2.3.3 孔喉半径比特征

从统计结果来看(见图5a、图5b),研究区样品的孔隙半径与孔喉半径比具有正相关关系,但相关性比较差,相关系数仅为 $0.2427$ ;而平均喉道半径和孔喉半径比具有较强的负相关关系(相关系数为 $0.6434$ )。长 $6_3$ 亚段储集层的平均喉道半径越小,与孔喉半径比的散点分布越集中,且长 $6_3$ 亚段储集层的孔喉半径比与平均喉道半径小于 $1.0\ \mu\text{m}$ 、孔喉半径比大于235的纳米级喉道相关性更强;而长 $8_1$ 亚段储集层平均喉道半径与孔

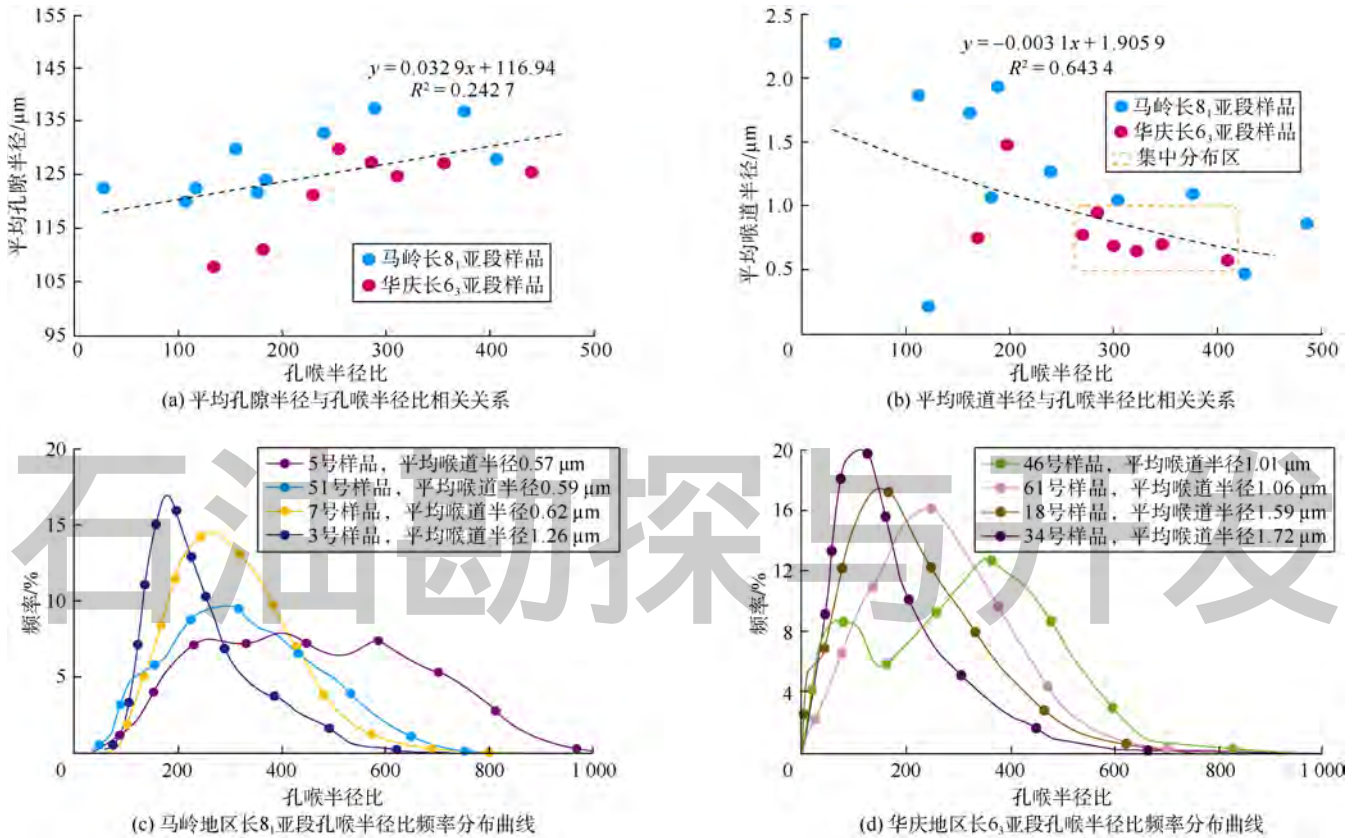


图5 陇东地区长6段、长8段致密储集层不同渗透率样品的孔喉比特征

喉半径比的散点分布较均匀，无明显集中分布区。

长6段、长8段储集层不同喉道半径条件下的孔喉半径比频率分布曲线变化趋势相似(见图5c、图5d)，以长8<sub>1</sub>亚段储集层为例，5、51、7、3号样品的平均喉道半径分别为0.57、0.59、0.62、1.26 μm，孔喉半径比的分布范围分别为60~960、50~730、90~670、70~610 μm，峰值频率分别为7.42%、9.72%、14.23%、17.35%，平均孔喉半径比分别为440.74、311.01、287.19、230.99。这表明不同物性致密砂岩储集层的平均喉道半径越小，孔喉半径比的峰值所对应的频率越低，但平均孔喉半径比越大且分布范围越宽；孔喉半径比越大反映孔隙、喉道之间的差异越大，油气通过窄小喉道时需要克服更大的毛细管阻力，致使大孔隙内的油气难以在细小喉道中发生渗流，并引起油气开采难度的相对增大<sup>[16]</sup>。

### 2.3.4 毛管压力曲线变化特征

恒速压汞技术不仅提供了总的毛管压力曲线，同时能够给出孔隙、喉道的进汞压力曲线，可以直观、定量表征储集层样品的有效喉道体积及其所控制的有效孔隙体积的分布特征<sup>[17]</sup>。根据不同进汞曲线的变化特征，将进汞过程大致分为3个阶段：第I阶段，毛管压力达到排驱压力后，汞首先进入相对大喉道所连通的孔隙，此时总毛管压力曲线和孔隙毛管压力曲线

重合，而喉道的影响并不明显；第II阶段，随着进汞压力的增加，孔隙毛管压力曲线开始上翘，虽然反映进汞压力急剧增大，但孔隙中进汞量却增加缓慢，说明喉道开始起主要控制作用，此时总毛管压力曲线和孔隙毛管压力曲线趋于分离；第III阶段，当连通孔隙被汞充满后，继续增加进汞压力，汞只是进入更细小的喉道，此时总毛管压力曲线完全受喉道毛管压力曲线的控制。通过研究区不同渗透率样品毛管压力曲线的对比(见图6)，可以看出：渗透率越高的储集层(3号、46号样品)，孔隙毛管压力曲线与总毛管压力曲线

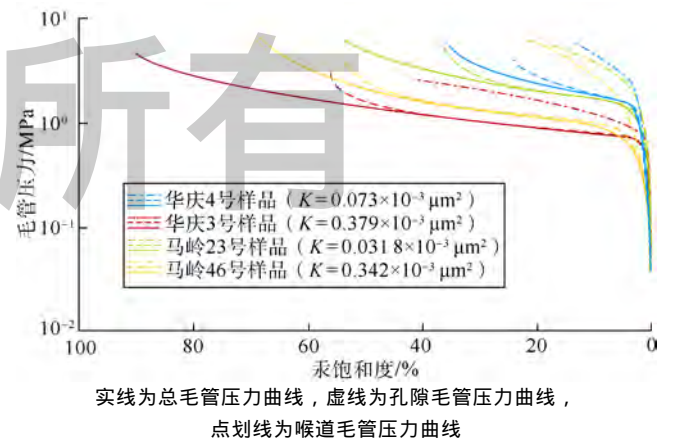


图6 不同渗透率样品的恒速压汞实验毛管压力曲线

的重合段越长,即孔隙毛管压力曲线对总毛管压力曲线影响和控制作用越大,反映孔隙所占有效储集空间比例大;渗透率越低的储集层(4号、23号样品),喉道毛管压力曲线对总毛管压力曲线的影响越大,反映喉道所占有效储集空间的比例越大。

根据汞注入孔喉的时间先后,进汞 I、II、III 阶段分别对应相对大喉道、相对小喉道和微细喉道。通过对比不同喉道半径的 3 号和 7 号样品毛管压力曲线

表 1 陇东地区长 6 段、长 8 段致密储集层代表样品恒速压汞孔隙结构参数

样品号	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	平均喉道 半径/ $\mu\text{m}$	微观均质 系数	微观分选 系数	排驱压力/ MPa	进汞饱和度/%	
							喉道	孔隙
3	5.84	0.379	1.26	0.02	0.92	5.50	38.92	46.45
7	13.56	0.348	0.60	0.03	1.09	8.08	30.54	21.24

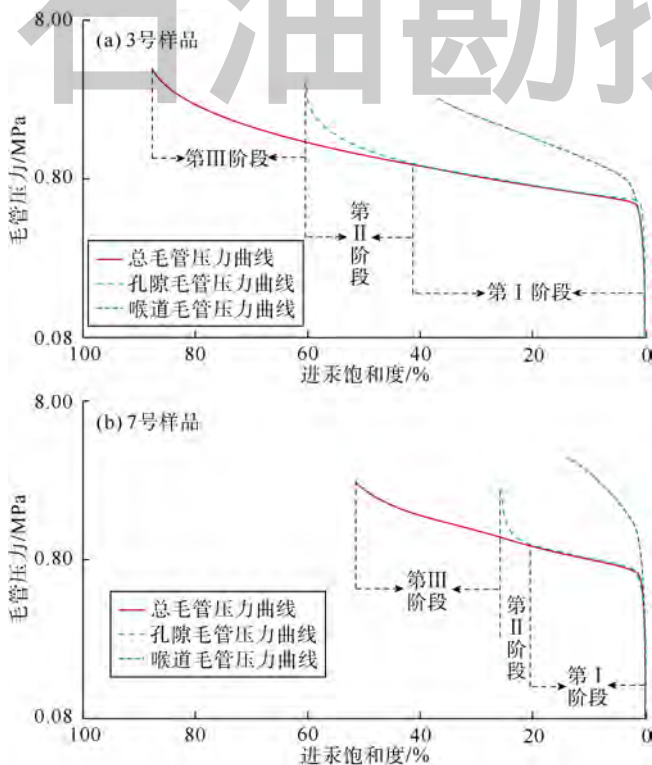


图 7 不同喉道半径样品的毛管压力曲线对比

综上所述,马岭地区长 8<sub>1</sub> 亚段储集层和华庆地区长 6<sub>3</sub> 亚段储集层的平均孔隙度基本相同,前者较后者高渗的主要原因在于发育少量半径较大的孔喉,这些相对大孔喉对储集层渗透率起到主要贡献;华庆地区虽大量发育半径较小的孔喉,但其对渗透率贡献较小;并且随着物性变差,喉道半径越细、分布范围越小、小孔喉所占比例越大,但喉道占有有效储集空间的比例也越高,使得储集层总体孔喉连通性和微观孔隙结构较差并增大了储集层的渗流阻力,相应地增大了开采难度。

### 3 储集层致密化成因及差异性分析

致密砂岩储集层微观结构是在沉积环境改造的基

础上,通过漫长的地质历史时期,经历复杂的成岩作用形成的<sup>[18]</sup>。沉积作用奠定了致密储集层形成的基础,成岩作用控制了致密储集层的演化进程<sup>[19-20]</sup>,最终形成了差异化的孔喉结构。因此,致密储集层的形成受沉积作用和成岩作用 2 种因素共同影响。

#### 3.1 沉积作用对储集层物性的影响

陇东地区长 6 段、长 8 段储集层沉积时主要发育强牵引流成因的分流河道中细砂岩、快速递变悬浮沉积成因的浊流粉细砂岩以及砂质碎屑流细砂岩 3 种类型<sup>[2,11,14,21]</sup>。研究区复杂且多元的沉积环境造成了长 6 段、长 8 段致密砂岩储集层岩石组构的差异。

长 8 段储集层沉积期沉积物供应稳定,物源主要来自西南和东北 2 个方向,以西南方向物源为主<sup>[22]</sup>,在近物源缓坡搬运作用下,发育了 1 套浅水辫状河三角洲沉积体系<sup>[21]</sup>(见图 8),并以强牵引流分流河道中细砂岩为代表。受间歇性水流环境的影响,整体粒度较粗(平均粒径为 0.24 mm),分选性差—中等,碎屑颗粒以次棱角状为主,杂基含量较少,一般低于 5%,原生粒间孔隙发育,孔隙度一般小于 12%,渗透率范围在  $(0.05 \sim 5.00) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。而长 6 段储集层沉积期水体较深,从湖盆边缘到湖盆中央发育三角洲—重力流沉积。三角洲砂体分选较差,杂基含量相对较高,原生粒间孔隙发育差,孔隙度一般小于 8%,渗透率范围为  $(0.05 \sim 0.20) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;而砂质碎屑流整体的粒度变化小,物性较差,一般孔隙度小于 10%,渗透率为  $(0.08 \sim 0.30) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

#### 3.2 成岩作用对储集层微观结构的控制

根据镜下观察,研究区主要的破坏性成岩作用为压实和胶结作用,它们使孔隙变小、喉道变窄、微观结构复杂化、连通性变差,是导致储集层致密化的重要原因;而主要的建设性成岩作用是溶蚀作用,它所产生的次生孔隙对储集层物性的改善起积极影响<sup>[23]</sup>。根

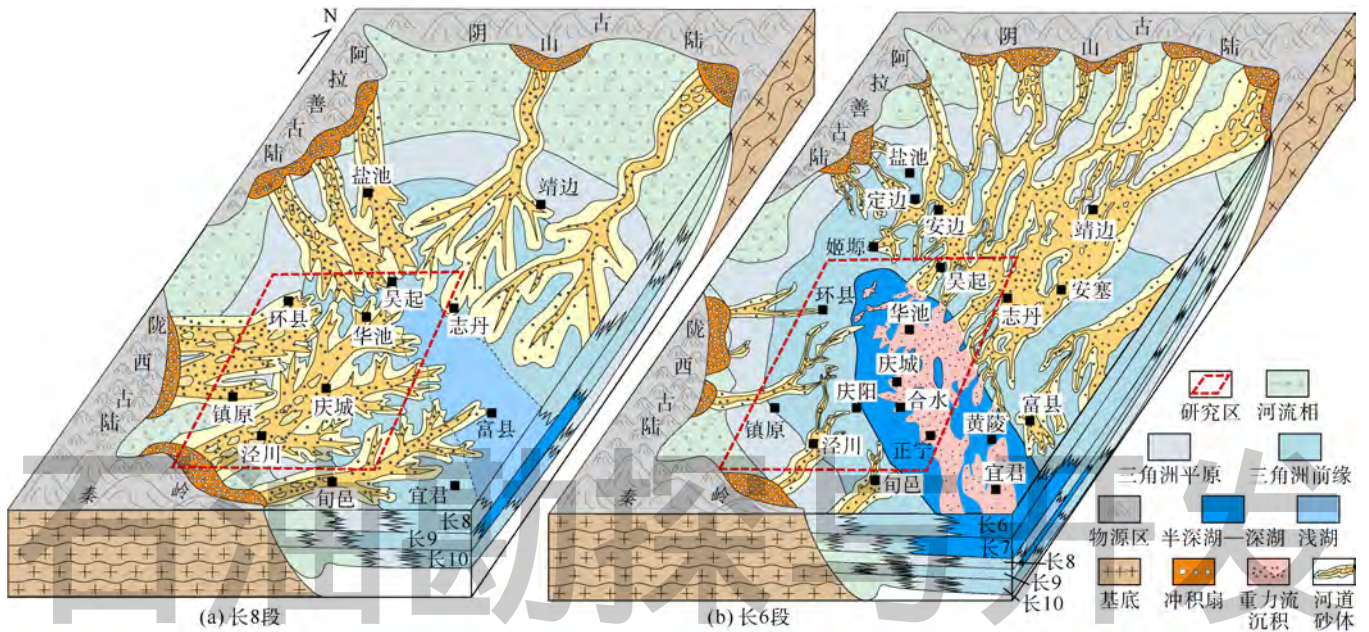


图8 鄂尔多斯盆地长6段、长8段沉积模式示意图

据 Beard 和 Weyl 所建立的原始孔隙度与分选系数之间的线性关系<sup>[24]</sup>, 计算得到长 8<sub>1</sub> 亚段储集层和长 6<sub>3</sub> 亚段储集层的初始孔隙度分别为 38.50% 和 40.00%。通过孔隙演化轨迹对比 (见图 9), 定量比较了不同成岩作

用对长 6 段、长 8 段致密储集层微观结构的差异控制。  
3.2.1 压实作用

压实作用大量缩减储集层原生孔隙, 是导致研究区储集层物性变差的主要因素。成岩早期, 砂岩颗粒

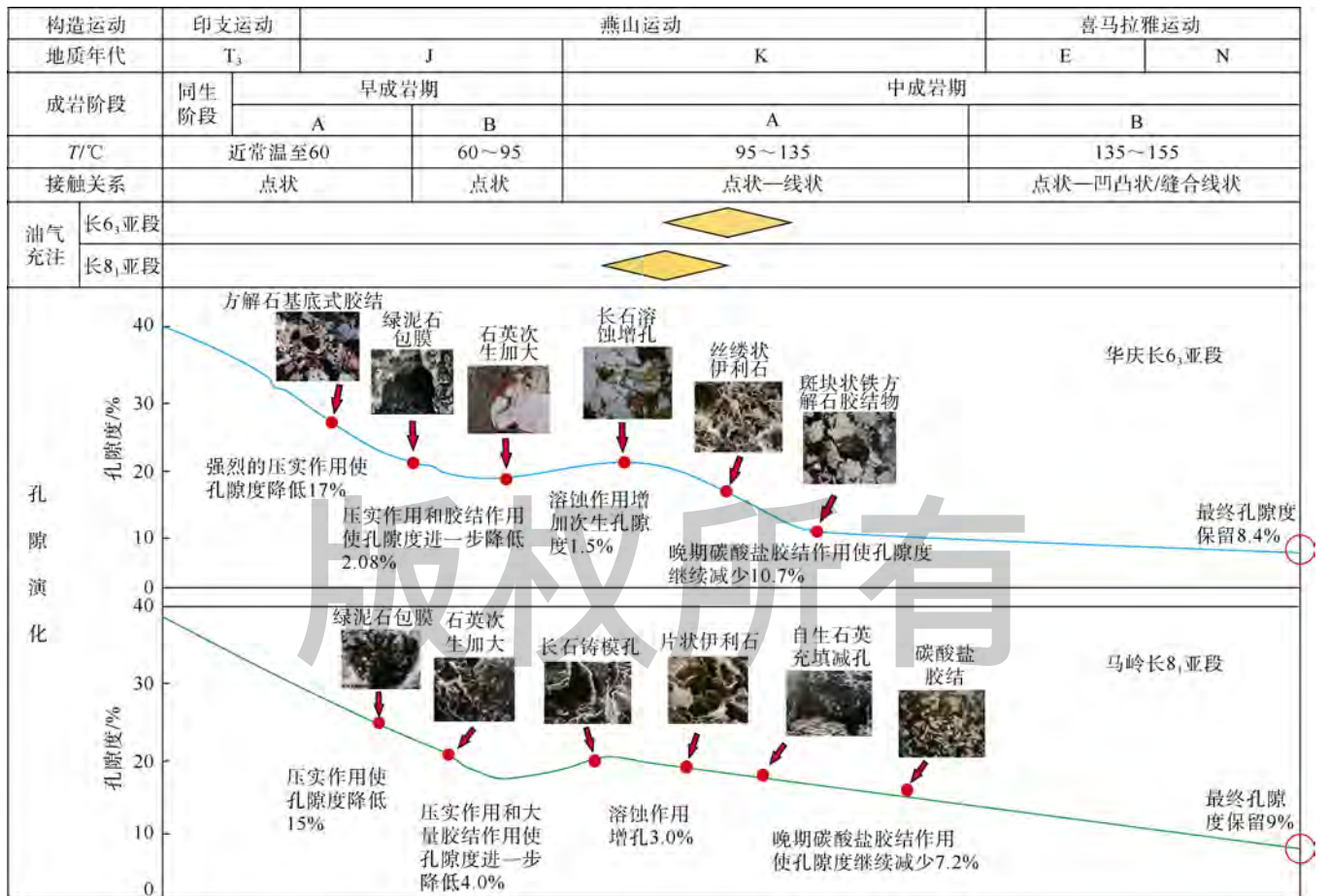


图9 陇东地区长6段、长8段致密储集层孔隙演化史对比

在上覆水体和沉积物负荷压力下紧密排列、位移、再分配,随着岩层上覆压力的不断增大和成岩压实作用的继续增强,千枚岩、泥岩岩屑及云母等塑性组分易发生挤压变形(见图10)。

根据长6段、长8段孔隙演化史对比可以看出(见图9),埋藏深度和地层温度更大的长8<sub>1</sub>亚段储集层压实减孔量(15%)小于长6<sub>3</sub>亚段(17%)。长6<sub>3</sub>亚段储集层平均粒径较长8<sub>1</sub>亚段更细,越细的颗粒比表面积越大,在承受相同压力的情况下越不易发生变形、滑动,负荷的压力大都用来挤压孔隙<sup>[25]</sup>;

长6<sub>3</sub>亚段储集层分选较差,较细的颗粒更易充填在较粗的颗粒间,由颗粒重新排列所产生的减孔效应更强;长6<sub>3</sub>亚段储集层塑性组分含量突出,塑性组分抗压能力弱,受压变形并易挤入粒间孔隙中形成假杂基而堵塞喉道,导致原生粒间孔大量丧失;长8<sub>1</sub>亚段储集层火山岩岩屑含量较高,尤其富含喷发岩岩屑<sup>[11-12]</sup>,在成岩过程中易蚀变形成绿泥石膜,这种碎屑颗粒包膜方式产出的绿泥石沉淀抑制了石英的次生加大,同时也大大提高了岩石的机械强度和抗压实能力。

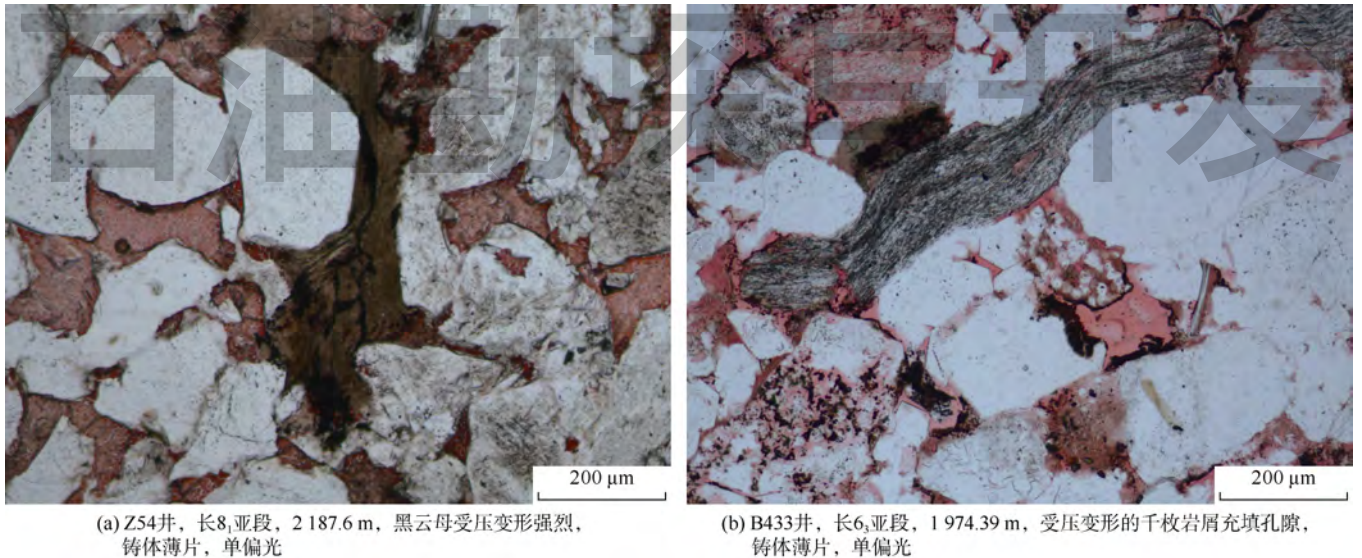


图10 陇东地区长6段、长8段致密储集层压实作用特征

### 3.2.2 胶结作用

胶结作用是研究区储集层致密化的主要机制,主要有黏土矿物胶结、碳酸盐胶结和硅质胶结。其中,黏土胶结矿物以伊利石和绿泥石为主,碳酸盐类以方解石和铁方解石为主,硅质胶结以石英加大为主(见图11)。

#### 3.2.2.1 硅质胶结

研究区的硅质胶结主要表现为石英次生加大型和

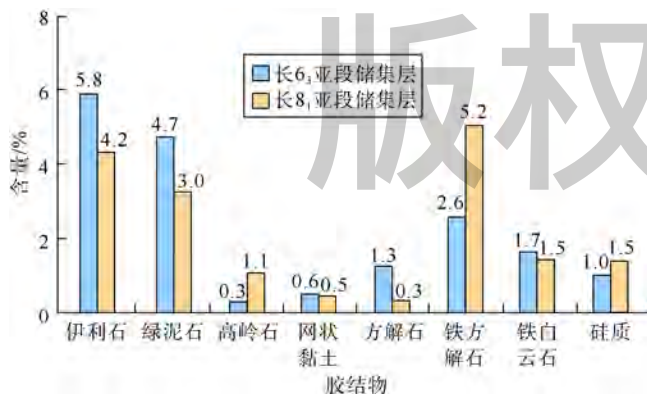


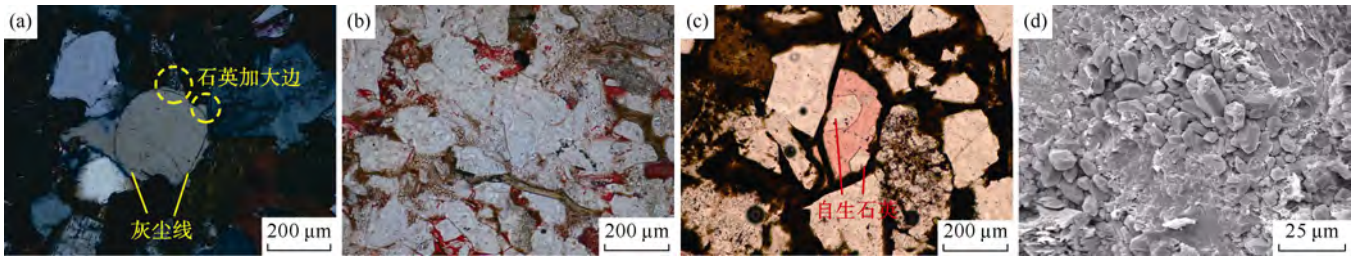
图11 陇东地区长6段、长8段致密储集层主要填隙物含量差异

自生石英型2种,其赋存特征差异显著。前者均围绕碎屑石英颗粒边缘生长,石英颗粒与加大边之间常常可见由黏土矿物组成的灰线(见图12a),加大边多为II级<sup>[26]</sup>,加大后的石英呈贴面结合或镶嵌紧密呈凹凸接触状(见图12b),主要出现在骨架颗粒中刚性石英富集区,在长6<sub>3</sub>亚段储集层和长8<sub>1</sub>亚段储集层均发育。而自生石英颗粒多充填于长8<sub>1</sub>亚段储集层的残余粒间孔、溶蚀粒间孔和粒内溶孔中(见图12c),主要由长石等硅铝酸盐与酸性流体发生反应形成,晶粒大小不一,自形程度高,为六方双锥状(见图12d)。一定量硅质胶结物的形成,可以增强砂岩的抗压实能力,减缓压实作用对原生粒间孔的破坏;而大量的硅质胶结物则会堵塞、分隔孔喉,降低了孔隙连通性,增加了孔喉结构的复杂性,这也是研究区砂岩储集层致密化的重要原因之一。

#### 3.2.2.2 碳酸盐胶结

在长8<sub>1</sub>亚段储集层和长6<sub>3</sub>亚段储集层中,碳酸盐胶结物的总含量差异高于其他填隙物,其主要类型有



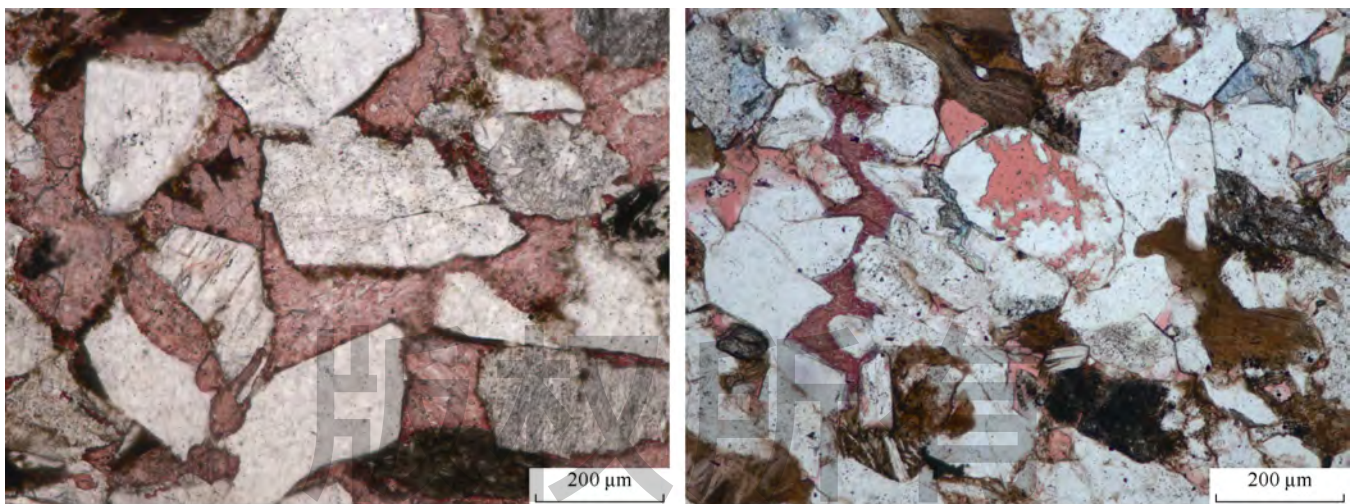


(a) L238井,长 $6_3$ 亚段,1899.22 m,石英次生加大边狭窄且不连续,铸体薄片,正交偏光;(b) B408井,长 $8_1$ 亚段,2243.7 m,加大后的石英镶嵌紧密呈凹凸状接触,铸体薄片,单偏光;(c) X33井,长 $8_1$ 亚段,2012.5 m,自生石英颗粒充填溶孔,铸体薄片,单偏光;(d) M42井,长 $8_1$ 亚段,2660.9 m,大量自生石英颗粒充填粒间孔,扫描电镜

图12 陇东地区长6段、长8段致密储集层硅质胶结物发育特征

方解石、铁白云石、铁方解石(见图11)。通过分析碳酸盐胶结物的赋存状态、成分和结构等特征,可以判断长 $6_3$ 亚段储集层存在2期碳酸盐胶结。长 $6_3$ 亚段储集层方解石/铁方解石胶结物碳、氧同位素组成分析表明:方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 相对较重( $-4.4\text{‰}\sim-0.9\text{‰}$ )、 $\delta^{18}\text{O}$ 较轻( $-20.5\text{‰}\sim-17.3\text{‰}$ ),总体显示出无机碳源同位素组成特征<sup>[27]</sup>,成因主要与沉积水介质中的碳酸钙过饱和及碱性沉积环境有关<sup>[28]</sup>,形成时间主要在成岩早期,以基底式胶结的钙质层为主(见图13a),常与少量自生石英一起产出,相对减少机械压实作用的影响,使一部分原始孔隙得以保存,同时为后期溶蚀作用提供部分物质基础;铁方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ ( $-8.1\text{‰}\sim-2.2\text{‰}$ )和 $\delta^{18}\text{O}$ ( $-20.5\text{‰}\sim-17.3\text{‰}$ )均较轻,反映有机碳源同位素组成特征<sup>[26]</sup>,成因主要与有机质演化过程中脱羟基作用有关,形成时间大致在中成岩阶段A

期,主要以斑块状或连晶状充填于粒间孔、溶蚀孔隙内,引起孔隙堵塞,最终导致孔隙度和渗透率的进一步降低。总体上随碳酸盐胶结物含量的增加,致密储集层面孔率逐渐降低,部分样品投点表明碳酸盐胶结物含量在28%以上时,储集层孔隙基本不发育。本文研究在长 $8_1$ 亚段储集层未见明显的方解石胶结,多见斑块状分布的自生铁方解石不均匀地充填于各类孔隙空间(见图13b),其碳、氧同位素组成( $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-9.5\text{‰}\sim-3.9\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-22.0\text{‰}\sim-16.6\text{‰}$ )与长 $6_3$ 亚段储集层中铁方解石的碳、氧同位素组成相比,前者具有更低的碳同位素组成,说明位于延长组主要烃源岩长7段之下的长8段储集层受有机流体的直接影响大<sup>[29]</sup>,这些有机流体的组成依赖烃源岩中的有机质在热演化过程中释放的有机酸和碳酸等酸性物质<sup>[30]</sup>。



(a) Y293井,长 $6_3$ 亚段,2170.47 m,方解石呈基底式胶结,铸体薄片(茜素红S和铁氧化钾混合染色薄片中方解石胶结物呈红色),单偏光

(b) X127井,长 $8_1$ 亚段,2129.20 m,斑块状分布的铁方解石充填孔隙,铸体薄片(茜素红S和铁氧化钾混合染色薄片中铁方解石胶结物呈紫红色),单偏光

图13 陇东地区长6段、长8段致密储集层碳酸盐类胶结物发育特征

### 3.2.2.3 黏土矿物胶结

研究区黏土矿物中伊利石和绿泥石胶结物含量最为突出,它们对储集层微观结构复杂化起到了重要作

用。伊利石主要分布在原生孔隙边缘或残余粒间孔隙中,与自生石英、铁白云石等共生,产状和结构多样。通过铸体薄片和扫描电镜观察,长 $8_1$ 亚段储集层伊利

石结晶相对较差,多呈残片状或卷曲片状,这种平行贴附于颗粒表面的片状伊利石,易增加岩石孔隙的弯曲度,间接降低储集层的渗透率。而长 $6_3$ 亚段储集层伊利石结晶较好,多呈丝缕状、毛发状,部分保留少量高岭石或绿蒙混层基体,这种丝缕状的伊利石易被孔喉中高速流体冲刷折断,运移后堵塞孔喉,直接使储集层渗透率降低,同时缩减了储集层的有效孔喉个数和有效孔喉半径<sup>[31]</sup>。

统计表明,长 $6_3$ 亚段储集层伊利石绝对含量平均值(5.8%)远高于长 $8_1$ 亚段储集层(4.2%),其含量与砂岩孔隙度和渗透率均呈负相关(见图14),且渗透率降低幅度更大。因此,不同结构和产状的伊利石胶结物不仅造成了储集层孔喉微观结构的复杂化,而且是长 $8_1$ 亚段和长 $6_3$ 亚段储集层渗透率差异较大的关键。

研究区绿泥石胶结物主要以孔隙衬里绿泥石为主。它作为绿泥石黏土膜双层结构的外层,通常呈叶

状或针状垂直于内层包膜向孔隙方向生长(见图15a),厚度一般为 $10\sim 15\ \mu\text{m}$ ,且向孔隙中心方向自形程度逐渐变好,叶片增大并变得稀疏。这种孔隙衬里绿泥石既缩小孔隙又堵塞喉道,从而导致砂岩储集层物性变差。除了自生绿泥石外,长 $6_3$ 亚段储集层多见富铁镁铝硅酸盐矿物绿泥石化形成的蚀变绿泥石(见图15b),单偏光下具深绿—淡黄色多色性。

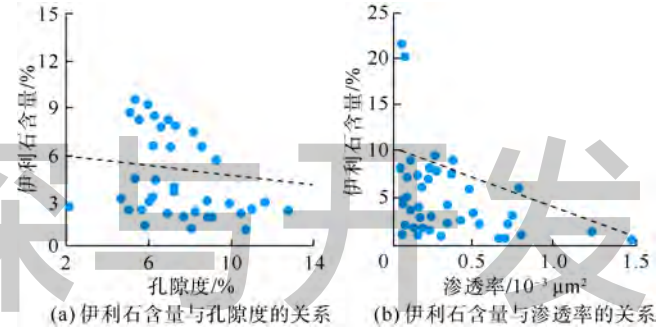


图14 研究区长 $6_3$ 亚段储集层伊利石含量与物性的相关关系

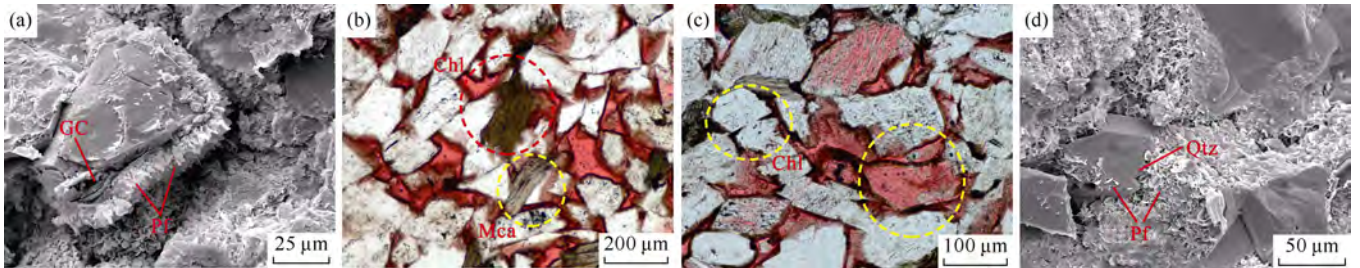


图15 陇东地区长6段、长8段致密储集层绿泥石发育特征(Chl—绿泥石;Gc—颗粒包膜绿泥石;Pf—孔隙衬里绿泥石;Mca—云母;Qtz—石英)

图15 陇东地区长6段、长8段致密储集层绿泥石发育特征(Chl—绿泥石;Gc—颗粒包膜绿泥石;Pf—孔隙衬里绿泥石;Mca—云母;Qtz—石英)

部分薄片中可以观察到绿泥石黏土包壳保留完整并形成类似于铸模孔的溶蚀孔,有学者<sup>[32]</sup>据此认为绿泥石黏土膜具有一定的支撑作用,能提高岩石的机械强度和抗压实能力。笔者研究认为,绿泥石在地下高温高压条件下相对于其他颗粒是塑性的,支撑作用并不强。虽然薄片观察到局部绿泥石膜保存完整,但还可观察到部分颗粒呈点—线接触的位置有少量的绿泥石黏土膜存在(见图15c)。结合绿泥石硬度和密度较低的特点<sup>[33]</sup>,说明绿泥石黏土膜在提高岩石的机械强度和抗压实能力方面的作用有限。前人研究<sup>[34]</sup>认为绿泥石环边通过分隔孔隙水与石英颗粒的表面来阻止自生石英胶结物在碎屑石英的表面成核,从而导致在绿泥石胶结作用发生的地方,很少有自生石英生长的现象。但研究区多见被绿泥石环边包裹的长石颗粒发生粒内溶蚀,以及绿泥石黏土膜与碳酸盐胶结物相伴生的现象,均说明绿泥石黏土膜能够分隔孔隙水来抑制胶结

物形成的机理缺乏说服力。同时,在研究区绿泥石黏土膜发育的地方,可以见到大量的石英雏晶,并且少量片状绿泥石嵌入石英雏晶中(见图15d)。

## 4 结论

陇东地区长6段和长8段致密储集层以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主,长石砂岩和岩屑砂岩次之。长6段、长8段致密砂岩储集层孔隙类型可分为粒间孔型、粒间溶孔-粒内溶孔型、黏土矿物晶间微孔型和微裂缝型4类。

长6段、长8段致密储集层孔隙半径特征无明显差异,但喉道半径差异显著。渗透率越低,喉道半径分布范围越窄、小喉道占比越高,对渗透率产生的作用就越多;越细小的平均喉道半径,对应的孔喉半径比越大,反映隙、喉之间的差异越大,微细喉道及其所连通的孔隙越发育,对应的总孔喉连通性越差。

沉积作用决定了长6段、长8段致密储集层砂体的原生孔隙结构，主要体现在岩石组构方面。长6段储集层在油流和砂质碎屑流的影响下杂基含量相对较高，分选较差，原生粒间孔隙发育较差；长8段储集层砂体受强牵引流的影响，粒度较粗，分选、磨圆较好，杂基含量较少，原生粒间孔隙发育较好。

成岩作用是导致长6段、长8段储集层致密的重要原因。硅质、钙质及黏土矿物胶结充填孔隙、堵塞孔隙是造成长6段、长8段储集层渗透率差异较大的关键，尤其体现在不同产状的伊利石胶结物对长6<sub>3</sub>亚段、长8<sub>1</sub>亚段储集层微观孔隙结构的影响上。

#### 参考文献：

- [1] 杨华, 钟大康, 姚涇利, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组砂岩储层孔隙成因类型及其控制因素[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 69-76.  
YANG Hua, ZHONG Dakang, YAO Jingli, et al. Pore genetic types and their controlling factors in sandstone reservoir of Yanchang Formation in Longdong Area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 69-76.
- [2] 罗静兰, 李忠兴, 史成恩, 等. 鄂尔多斯盆地西南部上三叠统延长组长8、长6油层组的沉积体系与物源方向[J]. 地质通报, 2008, 27(1): 101-111.  
LUO Jinglan, LI Zhongxing, SHI Cheng'en, et al. Depositional systems and provenance directions for the Chang 6 and Chang 8 reservoir groups of the Upper Triassic Yanchang Formation in the southwestern Ordos Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(1): 101-111.
- [3] 胡延旭. 鄂尔多斯盆地西南部庆阳地区长8油层组储层描述与评价[D]. 西安: 西北大学, 2014.  
HU Yanxu. Reservoir description and evaluation of Chang-8 oil-bearing layer in Qingyang Area, southwest Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2014.
- [4] 邹才能, 杨智, 陶士振, 等. 纳米油气与源储共生型油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 13-26.  
ZOU Caineng, YANG Zhi, TAO Shizhen, et al. Nano-hydrocarbon and the accumulation in coexisting source and reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 13-26.
- [5] 杨智峰, 曾减辉, 韩菲, 等. 鄂尔多斯盆地西南部长6—长8段致密砂岩储层微观孔隙特征[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(6): 909-919.  
YANG Zhifeng, ZENG Jianhui, HAN Fei, et al. Characterization of microscopic pore texture of Chang 6-Chang 8 members tight sandstone reservoirs in the southwestern part of Ordos Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(6): 909-919.
- [6] 徐黎明, 牛小兵, 梁晓伟, 等. 华庆地区长6致密油储层微观孔隙结构特征[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2017, 39(4): 36-46.  
XU Liming, NIU Xiaobing, LIANG Xiaowei, et al. Microscopic characteristics of pore-throat structures of the Chang 6 member tight oil layer in the Huaqing region[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2017, 39(4): 36-46.
- [7] 任晓霞, 李爱芬, 王永政, 等. 致密砂岩储层孔隙结构及其对渗流的影响: 以鄂尔多斯盆地马岭油田长8储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(5): 774-779.  
REN Xiaoxia, LI Aifen, WANG Yongzheng, et al. Pore structure of tight sandstone reservoir and its influence on percolation: Taking the Chang 8 reservoir in Maling oilfield in Ordos Basin as an example[J]. Oil and Gas Geology, 2015, 36(5): 774-779.
- [8] 宋平, 李文厚, 卢进才, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬—陇东地区三叠系延长组长7段致密储层成岩作用[J]. 地质通报, 2016, 35(2/3): 415-423.  
SONG Ping, LI Wenhou, LU Jincai, et al. A study of tight reservoir diagenesis in the Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation, Jiyuan-Longdong area, Ordos Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(2/3): 415-423.
- [9] 钟大康. 致密油储层微观特征及其形成机理: 以鄂尔多斯盆地长6—长7段为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1): 49-61.  
ZHONG Dakang. Micro-petrology, pore throat characteristics and genetic mechanism of tight oil reservoirs: A case from the 6th and 7th members of Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2017, 38(1): 49-61.
- [10] 周勇, 徐黎明, 纪友亮, 等. 致密砂岩相对高渗储层特征及分布控制因素研究: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长8<sub>2</sub>为例[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(1): 106-120.  
ZHOU Yong, XU Liming, JI Youliang, et al. Characteristics and distributing controlling factors of relatively high permeability reservoir: A case study from Chang 8<sub>2</sub> sandstones of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(1): 106-120.
- [11] 杨华, 付金华, 何海清, 等. 鄂尔多斯华庆地区低渗透岩性大油区形成与分布[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 641-648.  
YANG Hua, FU Jinhua, HE Haiqing, et al. Formation and distribution of large low-permeability lithologic oil regions in Huaqing, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 641-648.
- [12] 付金华, 邓秀芹, 王琪, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长8储集层致密与成藏耦合关系: 来自地球化学和流体包裹体的证据[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 48-57.  
FU Jinhua, DENG Xiuqin, WANG Qi, et al. Compaction and hydrocarbon accumulation of Triassic Yanchang Formation Chang 8 member, Ordos Basin, NW China: Evidences from geochemistry and fluid inclusions[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 48-57.
- [13] 廖建波, 李智勇, 龙礼文, 等. 物源交汇作用对油气富集的影响: 以鄂尔多斯盆地中部华庆地区长6段沉积期为例[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(1): 20-23.  
LIAO Jianbo, LI Zhiyong, LONG Liwen, et al. The effect of provenance intersection on the petroleum enrichment: An example from Chang-6 member in Huaqing area of central Ordos Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(1): 20-23.
- [14] 付晶, 吴胜和, 罗安湘, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组纵向储层质量差异及主控因素分析[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 98-107.  
FU Jing, WU Shenghe, LUO Anxiang, et al. Reservoir quality and its controlling factors of Chang 8 and Chang 6 members in Longdong Area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 98-107.
- [15] 王瑞飞, 沈平平, 宋子齐, 等. 特低渗透砂岩油藏储层微观孔隙特征[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 560-563, 569.  
WANG Ruifei, SHEN Pingping, SONG Ziqi, et al. Characteristics of micro-pore throat in ultra-low permeability sandstone reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4): 560-563, 569.
- [16] 任颖惠. 华庆地区长6<sub>3</sub>储层构型表征及孔隙特征分析[D]. 西安:

- 西安石油大学, 2015.
- REN Yinghui. The reservoir architecture characterization and pore throat characteristics analysis of Chang 6<sub>3</sub> reservoir in Huaqing Area[D]. Xi'an: Xi'an Shiyu University, 2015.
- [17] 何涛, 王芳, 汪伶俐. 致密砂岩储层微孔隙结构特征: 以鄂尔多斯盆地延长组长 7 储层为例[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(4): 23-26.
- HE Tao, WANG Fang, WANG Lingli. Characteristics of micro-pore structure of tight sandstone reservoir: A case study from Chang 7 reservoir of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(4): 23-26.
- [18] 赖锦, 王贵文, 罗官幸, 等. 基于岩石物理相约束的致密砂岩气储层渗透率解释建模[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(3): 1173-1182.
- LAI Jin, WANG Guiwen, LUO Guanxing, et al. A fine logging interpretation model of permeability confined by petrophysical facies of tight gas sandstone reservoirs[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(3): 1173-1182.
- [19] 王军杰, 杨仁超, 樊爱萍, 等. 鄂尔多斯盆地靖边气田砂岩储层成岩作用[J]. 科技导报, 2010, 28(21): 37-42.
- WANG Junjie, YANG Renchao, FAN Aiping, et al. Diagenesis of sandstone reservoirs in Jingbian gas field, Ordos Basin[J]. Science and Technology Review, 2010, 28(21): 37-42.
- [20] 盛贤才, 郭战峰, 刘新民. 秦岭—大别造山带南侧兴山地区中上寒武统白云岩储层特征[J]. 石油实验地质, 2009, 31(2): 172-176.
- SHENG Xiancai, GUO Zhanfeng, LIU Xinmin. Characteristics of middle-upper Cambrian dolomite reservoir in the Xingshan area of the southern margin of Qinling and Dabie Orogenic Belt[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2009, 31(2): 172-176.
- [21] 雷启鸿, 高琼瑶, 成良丙, 等. 鄂尔多斯盆地马岭地区长 8 油层组物源及沉积展布特征[J]. 岩性油气藏, 2015, 21(2): 70-76, 91.
- LEI Qihong, GAO Qiongyao, CHENG Liangbing, et al. Provenance and sedimentary facies evolution of Chang 8 oil reservoir set in Mailing area, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 21(2): 70-76, 91.
- [22] 王纹婷, 郑荣才, 王成玉, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长 8 油层组物源分析[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(4): 41-46.
- WANG Wenting, ZHENG Rongcai, WANG Chengyu, et al. Provenance analysis of the 8<sup>th</sup> oil-bearing member of Yanchang Formation, Upper Triassic, Jiyuan area, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(4): 41-46.
- [23] 戴朝成, 郑荣才, 朱如凯, 等. 四川类前陆盆地中西部须家河组储层特征[J]. 天然气地球科学, 2011, 27(1): 47-55.
- DAI Chaocheng, ZHENG Rongcai, ZHU Rukai, et al. Reservoir characteristics of the Xujiahe Formation in central-west Sichuan analogous foreland basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 27(1): 47-55.
- [24] BEARD D C, WEYL P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand[J]. AAPG Bulletin, 1973, 57(2): 349-369.
- [25] 操应长, 惠克来, 王健, 等. 砂岩机械压实与物性演化成岩模拟实验初探[J]. 现代地质, 2011, 25(6): 1152-1158.
- CAO Yingchang, XI Kelai, WANG Jian, et al. Preliminary discussion of simulation experiments on the mechanical compaction and physical property evolution of sandstones[J]. Geoscience, 2011, 25(6): 1152-1158.
- [26] 邢顺全. 砂岩中自生石英和长石的演变特征及其地质意义[J]. 大庆石油地质与开发, 1983, 2(3): 171-177, 241-242.
- XING Shunquan. Evolutional characteristic of authigenic quartz and feldspar in sandstones and their geological significance[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1983, 2(3): 171-177, 241-242.
- [27] HUDSON J D. Stable isotopes and limestone lithification[J]. Journal of the Geological Society, 1977, 133(4): 637-660.
- [28] 张艳, 李建明, 徐论勋. 鄂尔多斯盆地华庆地区三叠系长 6 层碳酸盐胶结物及形成机理[J]. 石油地质与工程, 2010, 24(1): 20-22, 26.
- ZHANG Yan, LI Jianming, XU Lunxun. Carbonate cements and their formation mechanism of Chang 6 Formation in Huaqing area, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2010, 24(1): 20-22, 26.
- [29] 孙致学, 孙治雷, 鲁洪江, 等. 砂岩储集层中碳酸盐胶结物特征: 以鄂尔多斯盆地中南部延长组为例[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(5): 543-551.
- SUN Zhixue, SUN Zhilei, LU Hongjiang, et al. Characteristics of carbonate cements in sandstone reservoirs: A case from Yanchang Formation, middle and southern Ordos Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(5): 543-551.
- [30] 姚泾利, 王琪, 张瑞, 等. 鄂尔多斯盆地中部延长组砂岩中碳酸盐胶结物成因与分布规律研究[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(6): 943-950.
- YAO Jingli, WANG Qi, ZHANG Rui, et al. Origin and spatial distribution of carbonates in Yanchang Fm. (Triassic) sandstones within the lacustrine center of Ordos Basin, NW China[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(6): 943-950.
- [31] 赵振铎, 闫百泉. 松辽盆地 F 油层高岭石、伊利石对储层物性、敏感性影响的实验研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(5): 947-954.
- ZHAO Zhenduo, YAN Baiquan. Effects of kaolinite and illite on physical property and sensitivity damage in the F reservoir of the Songliao Basin[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2014, 33(5): 947-954.
- [32] 黄思静, 谢连文, 张萌, 等. 中国三叠系陆相砂岩中自生绿泥石的形成机制及其与储层孔隙保存的关系[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, 31(3): 273-281.
- HUANG Sijing, XIE Lianwen, ZHANG Meng, et al. Formation mechanism of authigenic chlorite and relation to preservation of porosity in nonmarine Triassic reservoir sandstones, Ordos Basin and Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2004, 31(3): 273-281.
- [33] 田建锋, 喻建, 张庆洲. 孔隙衬里绿泥石的成因及对储层性能的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(3): 741-748.
- TIAN Jianfeng, YU Jian, ZHANG Qingzhou. The pore-lining chlorite formation mechanism and its contribution to reservoir quality[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(3): 741-748.
- [34] BILLAULT V, BEAUFORT D, BARONNET A, et al. A nano-petrographic and textural study of grain-coating chlorites in sandstone reservoirs[J]. Clay Minerals, 2003, 38(3): 315-328.
- 第一作者简介: 刘翰林 (1992-), 男, 山东聊城人, 西安石油大学地球科学与工程学院在读硕士研究生, 主要从事储集层地质学方面的研究。地址: 陕西省西安市雁塔区电子二路 18 号, 西安石油大学地球科学与工程学院, 邮政编码: 710065. E-mail: LHLMC@163.com
- 联系作者简介: 王凤琴 (1964-), 女, 陕西彬县人, 博士, 西安石油大学地球科学与工程学院教授, 主要从事致密砂岩油气地质和页岩气方面的研究工作。地址: 陕西省西安市雁塔区电子二路 18 号, 西安石油大学地球科学与工程学院, 邮政编码: 710065. E-mail: fqwang@xysu.edu.cn
- 收稿日期: 2017-12-01 修回日期: 2018-03-02

(编辑 张朝军)