

文章编号: 1671-1505(2024)06-1435-17 DOI: 10.7605/gdxb.2024.05.088

古老深层致密砂岩储集层孔隙形成与保存机制： 以鄂尔多斯盆地长城系为例*

刘恒宇^{1,2} 刘明洁^{1,2} 郝志磊³ 任茵⁴ 吴恩郁^{1,2} 许晗^{1,2}
钟寿康^{1,2} 谭秀成^{1,2} 曾伟^{1,2} 连承波^{1,2} 戴鸿鸣^{1,2}

1 西南石油大学天然气地质四川省重点实验室, 四川成都 610500

2 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500

3 中国石油长庆油田分公司勘探事业部, 陕西西安 710018

4 中国石油集团长城钻探工程有限公司地质研究院, 辽宁盘锦 124010

摘要 为探讨古老深层致密砂岩储集层孔隙的形成与保存机制, 综合运用岩心、薄片、扫描电镜、X衍射及流体包裹体等多种分析测试手段, 系统分析了鄂尔多斯盆地中东部长城系深层砂岩储集层的沉积环境、岩石学、储集空间等特征, 进而阐明孔隙形成与保存机制。研究发现长城系主要发育潮道沉积环境的石英砂岩和岩屑石英砂岩, 具有中等结构成熟度和高成分成熟度特征, 储集空间以剩余粒间孔和岩屑粒内溶孔为主, 平均孔隙度为6.6%; 长城系砂岩压实作用普遍较强, 胶结作用主要以石英和伊利石胶结为主, 溶蚀作用以岩屑颗粒的酸性溶蚀最为发育, 其次为石英的碱性溶蚀。研究表明: 强水动力条件下形成的长城系潮道砂岩粒度粗、分选较好、杂基含量少且成分成熟度高, 是其原生孔隙发育的主要原因; 早期大气淡水的淋滤溶蚀、中期有机酸的溶蚀以及晚期的硅质碱性溶蚀为长城系次生孔隙的形成提供有利条件。长城系砂岩储集层刚性石英颗粒含量较高, 粒度较粗和分选较好, 早期黏土包膜抑制石英次生加大边的形成, 早期长时间浅埋、后期快速深埋的埋藏过程等因素有利于孔隙的保存。

关键词 古老深层 致密砂岩 孔隙形成与保存 长城系 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 刘恒宇, 男, 1996年生, 硕士研究生, 主要从事储层地质学研究。E-mail: 202121000111@stu.swpu.edu.cn。

通讯作者简介 刘明洁, 男, 1985年生, 副教授, 主要从事油气储层地质学研究。E-mail: mjliu@swpu.edu.cn。

中图分类号: TE122.2⁺1 文献标志码: A

Pore formation and preservation mechanisms of ancient deep tight sandstone reservoirs: a case study of the Mesoproterozoic Changcheng System in Ordos Basin

LIU Hengyu^{1,2} LIU Mingjie^{1,2} HAO Zhilei³ REN Yin⁴ WU Enyu^{1,2} XU Han^{1,2}
ZHONG Shoukang^{1,2} TAN Xiucheng^{1,2} ZENG Wei^{1,2} LIAN Chengbo^{1,2} DAI Hongming^{1,2}

* 国家自然科学基金项目(编号: 41872154)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41872154)]

收稿日期: 2023-08-16 改回日期: 2023-11-27

1 *Sichuan Natural Gas Geology Key Laboratory, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China*

2 *School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China*

3 *Exploration Department, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China*

4 *Geology Research Institute, Greatwall Drilling of CNPC, Liaoning Panjin 124010, China*

Abstract To investigate the pore formation and preservation mechanisms of ancient deep tight sandstone reservoirs, a combination of core, thin section, scanning electron microscopy, X-ray diffraction and fluid inclusion analysis techniques was used to systematically analyze the sedimentary environment, petrology, reservoir space, porosity and diagenesis of the deep sandstone reservoirs of the Changcheng System in the central and eastern Ordos Basin. On this basis, the mechanisms of pore formation and preservation was clarified. The results show that the Changcheng System mainly develops quartz sandstone and lithic quartz sandstone in tidal channel sedimentary environment, with medium textural maturity and high compositional maturity. The reservoir space is dominated by residual intergranular pores and intragranular dissolution pores of rock fragments, with an average porosity of 6.6%. The compaction of the Changcheng System sandstone is generally strong, and it is mainly composed of quartz and illite cementation. The acidic dissolution of rock fragment is the most developed, followed by alkaline dissolution of quartz. The results indicate that the coarse grain size, good sorting and low matrix content are the main reasons for the primary pore development in the Changcheng System tidal channel sandstones, which formed under strong hydrodynamic conditions. The Changcheng System sandstone reservoirs have experienced leaching dissolution of meteoric fresh water during the early stage, organic acids dissolution during the middle stage and alkaline dissolution of quartz during the late stage, which provides favorable conditions to the formation of secondary pores. The pore preservation of the Changcheng System sandstone reservoirs is mainly attributed to the rich in rigid compressive quartz grains, coarse grain size and good sorting, the quartz cementation inhibited by early authigenic clay coating and the burial process of early long-term shallow burial and rapid deep burial in the later stage.

Key words ancient deep strata, tight sandstone, formation and preservation of pores, Changcheng System, Ordos Basin

About the first author LIU Hengyu, born in 1996, master degree candidate, is mainly engaged in oil and gas reservoir geology. E-mail: 202121000111@stu.swpu.edu.cn.

About the corresponding author LIU Mingjie, born in 1985, associate professor, is mainly engaged in oil and gas reservoir geology. E-mail: mjliu@swpu.edu.cn.

近年来,伴随着国内油气勘探程度的不断加大,古老深层油气藏已成为油气勘探开发和研究的新热点(王铁冠和韩克猷,2011;赵文智等,2018)。特别是近年来国内大型克拉通盆地与断陷盆地在中新元古界—古生界不断取得油气勘探的突破,如四川盆地新元古界—寒武系安岳大气田、威远大气田和冀中坳陷的中新元古界“新生古储”大型油气藏等获得重大发现(邹才能等,2014)。国内学者开始关注同为大型克拉通盆地的鄂尔多斯盆地在中新元古界是否同样具有较好的油气勘探开发潜力,并在盆地内开展了一些基础研究工作,主

要集中在沉积特征和岩相古地理(欧阳征健等,2020)、烃源岩发育特征(冯娟萍等,2015)、成藏组合与模式及勘探方向和潜力(郝松立等,2016;管树巍等,2017)等方面,并取得了一些成果,如在北部伊盟隆起锦13井、锦142井中元古界长城系见明显气测异常,中途测试分别获 $23\ 970\ \text{m}^3/\text{d}$ 、 $5000\ \text{m}^3/\text{d}$ 天然气流等(杜金虎等,2019)。这些勘探开发实践也证实鄂尔多斯盆地深层中元古界长城系具有良好油气成藏条件和大规模聚集能力。

目前针对于鄂尔多斯盆地中元古界长城系砂

岩储集层方面的研究主要集中在储集层岩石学特征和储集空间类型表征两方面，明确长城系岩石类型主要为石英砂岩和岩屑石英砂岩，储集空间主要为岩屑粒内溶孔、剩余粒间孔和微裂缝（白海峰等，2020；张威等，2023）。但对长城系砂岩储集层成岩演化特征以及孔隙形成与保存机制尚不明确，从而严重制约了后续油气勘探的进程。本研究选取鄂尔多斯盆地中东部地区 4 口取心井 38 件样品在西南石油大学天然气地质四川省重点实验室进行铸体薄片鉴定（Leica DM4P 偏光显微镜）、扫描电镜观察（FEI Quanta 650 FEG 场发射扫描电镜，30 kV 下优于 1.0 nm）、X 射线衍射分析（Rigaku DMAX-3C X 射线衍射仪，45 kV，35 mA）、孔隙度测试（Temco CMS-300 孔渗分析仪）以及流体包裹体测试（Linkam THMSG600 地质冷热台）。基于实验结果，系统分析研究区长城系砂岩成岩演化特征，进而探讨砂岩储集层孔隙形成和保存机制。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通西部，盆地西北侧与阿拉善地块相邻，西侧南段与走廊过渡带、祁连褶皱带相接，南侧隔渭河盆地与秦岭褶皱带相望，南侧东段与豫皖地块的小秦岭地区相邻，东邻山西地块的吕梁山隆起，总面积约 $37 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，是中国第二大沉积盆地（付金华等，2023）。鄂尔多斯盆地根据现今构造发育特征可划分为伊盟隆起、渭北隆起、天环坳陷、伊陕斜坡、西缘褶皱冲断带和晋西挠褶带等 6 个一级构造单元（图 1-A）；经历了迁西、阜平、五台、吕梁、晋宁、加里东、海西、印支、燕山及喜马拉雅等多期次构造运动旋回演化（杨俊杰，2002）。文中研究区位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部（图 1-A），研究层位为中元古界长城系。中元古界蓟县系和新元古界在研究区内缺失，下古生界寒武系在研究区部分地区缺失，长城系与寒武系或奥陶系呈不整合接触，且在研究区东部无沉积，岩性以灰白色或紫红色石英砂岩为主（图 1-B），主要发育三角洲、滨浅海、浅海等沉积相（欧阳征健等，2020）（图 1-C）。

2 储集层基本特征

2.1 沉积学特征

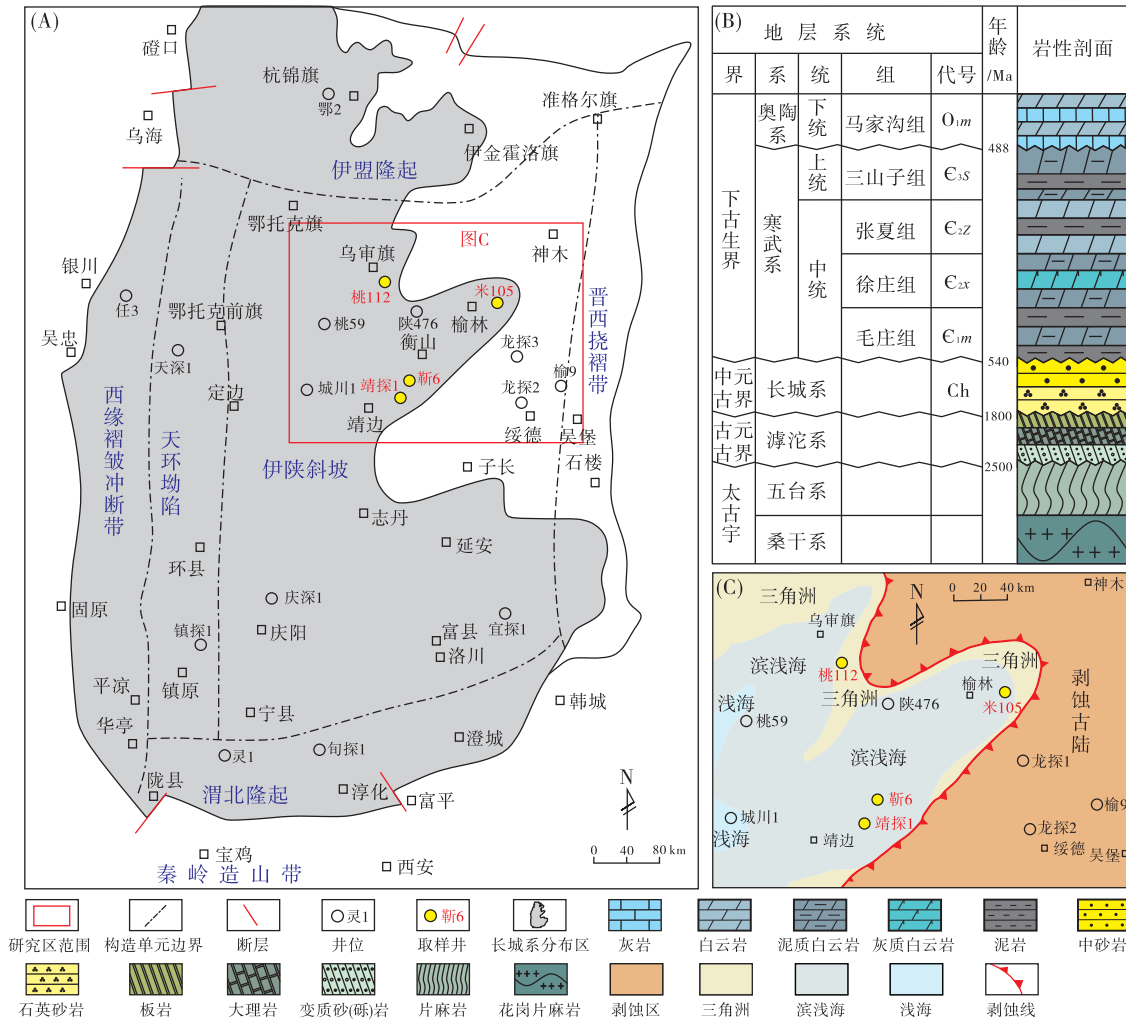
基于岩心精细观察与描述发现，长城系砂岩储集层主要呈紫红色和灰白色，粒度以中—细砂岩为主，分选中等—好，整体上表现出下粗上细的正旋回特征（图 2；图 3）。旋回底部可见冲刷面，且冲刷面之上为砾石沉积段，砾径多小于 5 mm（图 2-A），砾石段向上砾石含量逐渐减小、砾径变小，整体粒度变细，呈正粒序层理（图 2-B），同时粒度概率曲线主要表现为三段式，以跳跃组分为主，见少量滚动和悬浮组分（图 3），整体上旋回底部表现为下蚀充填的特征；旋回中部主要发育平行层理和交错层理（图 2-C，2-D），反映较强水动力的沉积环境；旋回上部多发育韵律层理、波状层理和脉状层理（图 2-E，2-F，2-G），粒度概率曲线呈两段式，主要发育跳跃组分和悬浮组分（图 3），反映为潮汐沉积背景下相对较弱的水动力沉积环境。此外前人研究发现，鄂尔多斯盆地中东部长城系为三角洲—滨浅海沉积环境（欧阳征健等，2020），且山西省东南缘黎城地区为障壁型海岸潮坪沉积环境（王玺童等，2021）。综合以上分析并结合前人研究成果，推测研究区长城系砂岩储集层主要为潮控滨岸潮道沉积（图 3）。

2.2 岩石学特征

鄂尔多斯盆地中东部长城系岩性主要为石英砂岩和岩屑石英砂岩（图 4-A），石英含量为 88.4%~95.5%（平均为 92.8%），长石含量为 0%~1.3%（平均为 0.1%），岩屑含量为 4.5%~10.6%（平均为 7.1%），粒度以细—中粒为主，细粒、中粒次之（图 4-B），分选性中等—好，磨圆度为次圆状—圆状，呈颗粒支撑结构，且颗粒之间主要为线接触关系，整体上砂岩的结构成熟度中等、成分成熟度较高。填隙物主要以硅质胶结物、自生黏土矿物和杂基为主（图 4-C），其中硅质胶结物平均含量为 6.2%，黏土矿物（主要为伊利石）平均含量为 5.4%，杂基平均含量为 3.3%（图 4-C）。

2.3 储集空间特征

通过铸体薄片镜下观察发现，研究区长城系砂岩储集层储集空间类型主要为剩余粒间孔，其次为次生孔隙，局部发育裂缝，其中次生孔隙主要为粒



A—鄂尔多斯盆地构造单元、中元古界长城系分布与研究区位置；B—鄂尔多斯盆地中东部地层发育特征；C—研究区长城系沉积相平面图
图 1 鄂尔多斯盆地中东部地区位置 (A)、地层发育特征 (B) 及沉积相平面分布 (C)
(据田刚和宋立军, 2017; 欧阳征健等, 2020; 有修改)

Fig. 1 Location (A), stratigraphy (B) and sedimentary facies distribution (C) of central and eastern Ordos Basin (modified from Tian and Song, 2017; Ouyang *et al.*, 2020)

内溶孔和晶间孔。

1) 剩余粒间孔。剩余粒间孔为砂岩储集层经历压实作用和胶结作用后残余的原生粒间孔隙。研究区剩余粒间孔普遍发育, 为长城系最主要的储集空间类型, 剩余粒间孔多呈近三角形, 边缘表现出平直且规则的特征(图 5-A)。

2) 粒内溶孔。长城系砂岩储集层中粒内溶孔是除剩余粒间孔之外最为重要的储集空间, 主要包括岩屑粒内溶孔和石英粒内溶孔。其中岩屑粒内溶孔相对更为发育, 表现为颗粒内部不规则溶蚀和残余部分岩屑(图 5-B), 而当岩屑溶蚀程度较大时多形成具原始颗粒轮廓与形态的铸模孔(图 5-C),

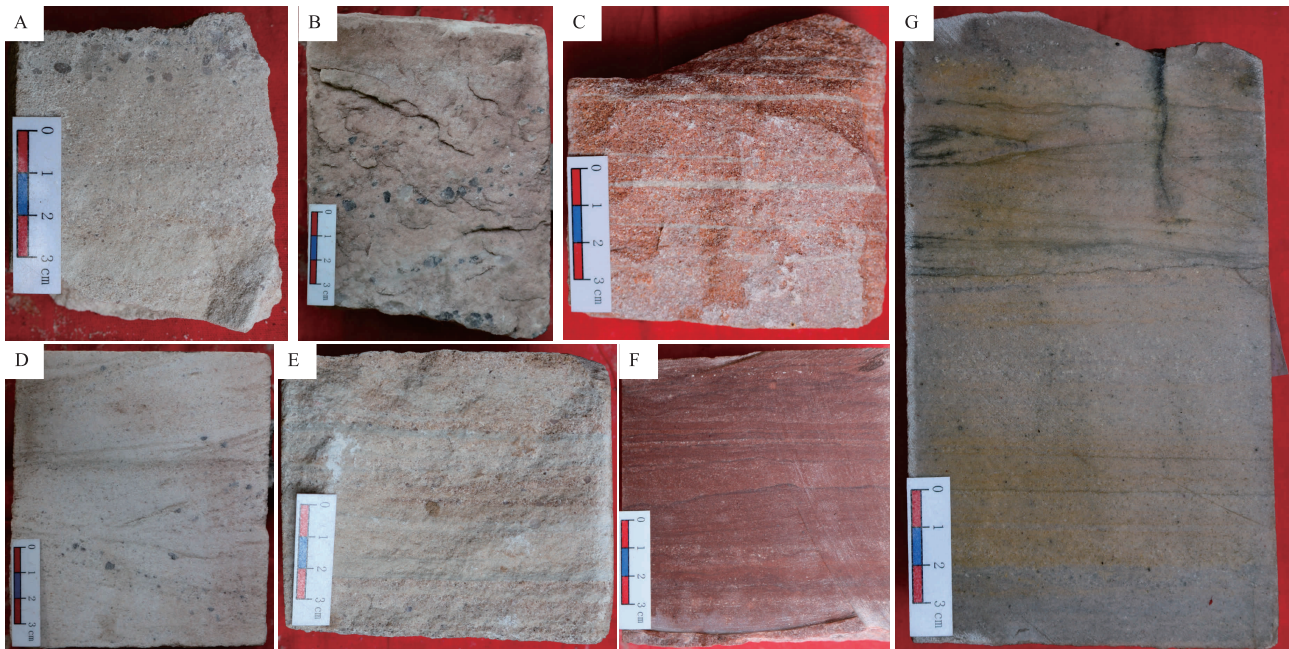
石英粒内溶孔表现为颗粒内部不规则状、孤立状溶蚀(图 5-D)。

3) 晶间孔。长城系砂岩储集层粒间孔和粒内溶孔内普遍发育自生伊利石重结晶形成的云母, 可见呈条带状的云母晶间孔(图 5-E)。

4) 裂缝。长城系砂岩储集层裂缝局部发育, 且多为构造成因裂缝, 镜下裂缝多表现为刚性颗粒内部的穿粒缝及粒缘缝, 多数表现为开启、未被胶结物充填(图 5-D, 5-F), 这一特征反映裂缝形成时间相对较晚。

2.4 孔隙度分布特征

研究区长城系砂岩孔隙度分布范围较大, 主要



A—冲刷面，靖探 1 井，4172.05 m；B—粒序层理，米 105 井，3691.51 m；C—平行层理，靖探 1 井，4179.58 m；D—交错层理，米 105 井，3690.79 m；E—韵律层理，靖探 1 井，4172.59 m；F—波状层理，米 105 井，4095.21 m；G—脉状层理，桃 112 井，3856.43 m

图 2 鄂尔多斯盆地中东部长城系砂岩储集层沉积特征

Fig. 2 Sedimentary characteristics of the Changcheng System sandstone reservoirs in central and eastern Ordos Basin

分布在 0.92%~15.64%，平均孔隙度为 6.6%，其中孔隙度小于 4% 样品占样品总数 42.1%，孔隙度 4%~8% 的样品占样品总数 26.3%，孔隙度 8%~12% 的样品占样品总数 10.5%，孔隙度 12%~16% 分布范围样品占样品总数 21.1% (图 6)，为典型的致密砂岩储集层。

3 成岩作用特征

3.1 压实作用

研究区长城系致密砂岩储集层由于埋藏深度较大，主体埋深大于 3600 m，因而整体上看压实作用普遍较强，以机械压实为主，局部可见化学压实作用，镜下主要表现为石英颗粒呈线接触 (图 7-A)，局部可见石英压溶现象导致的颗粒呈线—凹凸接触 (图 7-B)，以及因石英次生加大近基底式胶结导致的颗粒呈点—线接触 (图 7-C)。

3.2 胶结作用

3.2.1 硅质胶结

硅质胶结物是研究区长城系碎屑岩中最发育的胶结物类型，主要表现为石英次生加大边和自生石

英晶体。石英次生加大边主要围绕石英颗粒共轴生长，并与石英颗粒的光学和结晶学具有连续性，与石英颗粒之间可见清晰的“尘线”，且加大边整体相对较厚 (图 7-C)。自生石英晶体主要生长在石英颗粒表面并充填粒内溶孔和剩余粒间孔，结合扫描电镜可以观察到 2 种不同形态的自生石英晶体：一种是围绕石英颗粒边缘生长的石英微晶，其晶形较小，在普通偏光显微镜下难以观察到其自生晶体结构，只有在扫描电镜下才能观察到 (图 7-D)；另一种则是晶形较大的自生石英晶体，主要呈典型的六方锥状沿颗粒边缘生长于剩余粒间孔中 (图 7-D, 7-E)。

依据硅质胶结物镜下生长形态和硅质胶结物中盐水包裹体均一温度测定发现，研究区存在早期、中期和晚期 3 期硅质胶结。其中早期硅质为扫描电镜下观察到的覆盖在石英颗粒表面的石英微晶 (图 7-D)，中期硅质胶结主要为石英次生加大边和自生石英晶体。早期和中期石英胶结物包裹体均一温度分布范围为 83~129℃ (图 8-A, 8-B, 8-C)，表明早期与中期硅质胶结为近连续的沉淀过程，且属于同生成岩阶段—中成岩 A 期产物。晚期硅质胶结同样也包括石英次生加大边和自生石英晶体，

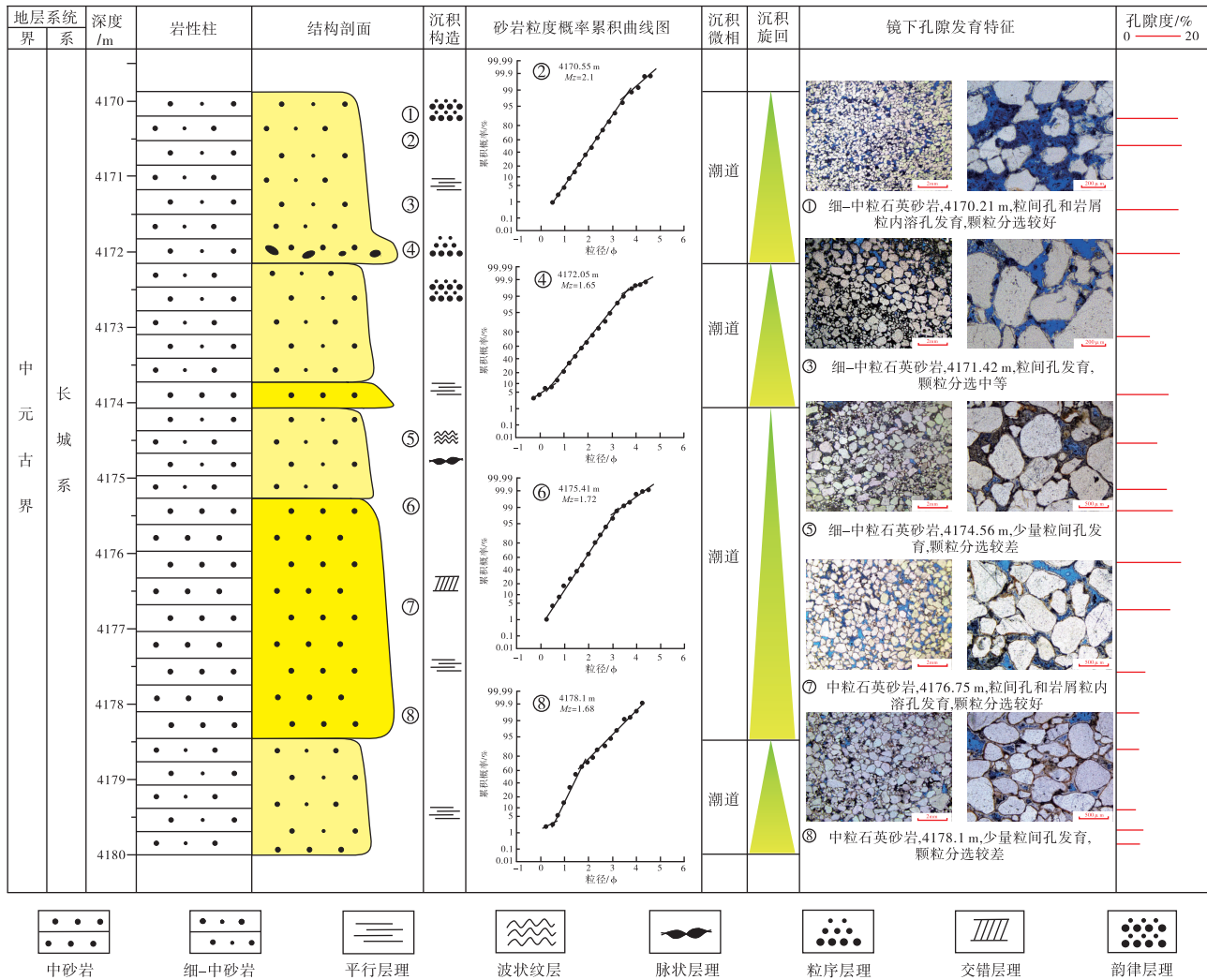


图 3 鄂尔多斯盆地中东部靖探 1 井长城系砂岩储集层典型旋回沉积相及孔隙发育特征

Fig. 3 Typical cycle sedimentary facies and pore development characteristics of the Changcheng System sandstone reservoirs of Well Jingtang-1 in central and eastern Ordos Basin

且该期自生石英晶体晶形较大，充填于粒间孔和粒内溶孔中，其均一温度较高，分布范围为 156~172℃(图 8-B, 8-C)，属中成岩 B 期—晚成岩期产物。

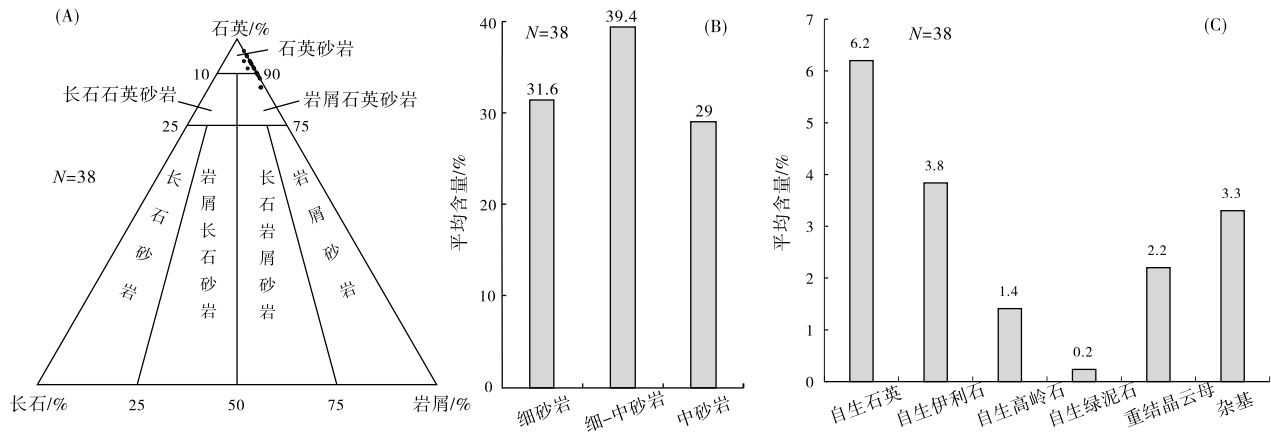
3.2.2 黏土矿物胶结

根据镜下薄片、扫描电镜观察以及黏土矿物的 X 射线衍射分析结果，研究区长城系砂岩储集层中黏土矿物胶结物主要为伊利石，仅在 X 衍射结果中发现有少量高岭石和绿泥石(图 4-C)。伊利石显微赋存状态包括 2 类：一类是早期围绕石英颗粒表面生长的弯曲鳞片状伊利石包膜(图 7-E, 7-F)，形成于岩石强烈压实之前，可由早期的渗滤黏土薄膜在有 K⁺ 供给且温度达到 50~90℃ 的条件

下向伊利石转化而成(孟万斌等, 2011)；另一类伊利石以弯曲片状并在片状末端常见毛刺状、蜂窝状或网状集合体充填于粒间孔和岩屑粒内溶孔中(图 7-G, 7-H)，这类伊利石通常于富 K⁺ 环境条件下直接结晶形成(田建锋等, 2013)，或由早期形成的高岭石随温度的升高转化而成(黄思静等, 2009)。

3.2.3 硬石膏胶结

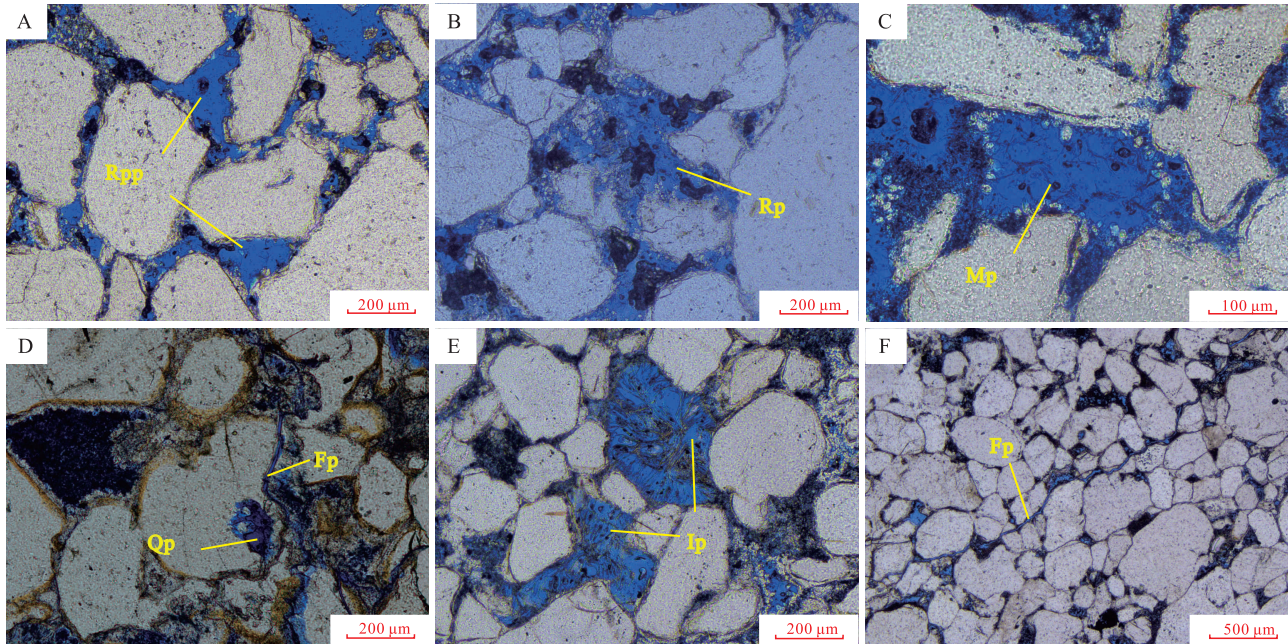
研究区长城系砂岩储集层可见硬石膏胶结，主要呈长条状集合体发育于潮道底部滞留砾石段，正交光下干涉色可达三级绿(图 7-I)。整体上，研究区长城系砂岩储集层硬石膏胶结物仅在桃 112 井局部沉积旋回底部发育，且主要分布在砾石间，同时



A—岩石类型三角图；B—岩石粒度类型分布直方图；C—孔隙物分布直方图

图 4 鄂尔多斯盆地中东部长城系砂岩储集层岩石学特征

Fig. 4 Petrologic characteristics of the Changcheng System sandstone reservoirs in central and eastern Ordos Basin



A—剩余粒间孔，靖探 1 井，4171.42 m，单偏光；B—岩屑粒内溶孔，靖探 1 井，4171.42 m，单偏光；C—岩屑溶蚀形成铸模孔，靖探 1 井，4170.21 m，单偏光；D—石英粒内溶孔，靖探 1 井，4179.8 m，单偏光；E—云母晶间孔，靖探 1 井，4172.05 m，单偏光；F—裂缝，米 105 井，3691.83 m，单偏光。Rpp 为剩余粒间孔；Qp 为石英粒内溶孔；Rp 为岩屑粒内溶孔；Ip 为晶间孔；Mp 为铸模孔；Fp 为裂缝

图 5 鄂尔多斯盆地中东部长城系砂岩储集层储集空间类型

Fig. 5 Reservoir space types of the Changcheng System sandstone reservoirs in central and eastern Ordos Basin

可见砾石内部石英颗粒普遍发育石英次生加大边（图 7-1）。推测其为成岩相对较晚的时期，在较为干旱条件下，因海水不断蒸发浓缩、孔隙流体盐度逐渐增大，从而在再沉积的砾石颗粒间直接沉淀析出形成。

3.3 溶蚀作用

溶蚀作用是研究区长城系储集层孔隙发育的主

要原因之一，通过铸体薄片镜下观察可以识别出 2 类溶蚀作用，分别为早期的酸性溶蚀和晚期的碱性溶蚀。其中酸性溶蚀可进一步划分出早成岩阶段 A 期长时间的大气淡水淋滤溶蚀和早成岩阶段 B 期—中成岩阶段 A 期的有机酸溶蚀，主要表现为岩屑粒内溶蚀形成粒内溶孔（图 5-B）和铸模孔（图 5-C）。碱性溶蚀主要表现为石英粒内与边缘溶蚀（图 5-D；图 7-L），以及黏土矿物交代溶蚀石英颗

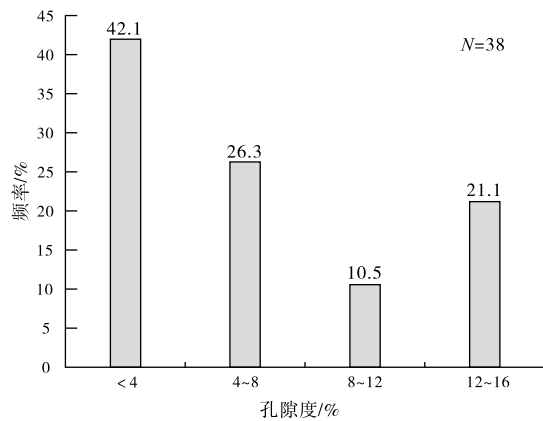


图 6 鄂尔多斯盆地中东部长城系砂岩储集层孔隙度分布直方图

Fig. 6 Porosity distribution of the Changcheng System sandstone reservoirs in central and eastern Ordos Basin

粒边缘(图 7-G)和石英次生加大边(图 7-K)。

3.4 重结晶作用

研究区可见岩屑粒内溶孔和粒间孔中充填白云母矿物,常呈弯曲片状集合体(图 5-E),其成因主要是孔隙中呈分散状的自生伊利石随埋藏深度的增加发生胶体沉淀的再结晶作用而形成(常丽华等,2006)。

3.5 成岩序列

基于长城系 38 块样品 X 衍射黏土矿物成分分析、自生成岩矿物共生关系以及胶结物包裹体均一温度分析可知,长城系储集层自生黏土矿物主要为伊利石(图 4-C),石英次生加大较发育,颗粒间石英自形晶体相互连接,同时测得部分硅质胶结物盐水包裹体均一温度较高,分布范围为 156~172℃,且现今研究区长城系烃源岩 R_0 最大为 3.20% (田刚和宋立军,2017),因此依据中国石油天然气行业标准(SY/T5477-2003)成岩阶段划分方案及主要标志,长城系储集层整体上处于晚成岩阶段。

综合上述自生矿物成岩现象,建立长城系砂岩储集层成岩演化序列(图 9):早成岩 A 期在大气淡水的淋滤溶蚀作用下,易溶的岩屑颗粒等组分发生部分溶蚀,黏土薄膜和石英微晶形成;早成岩 B 期一中成岩 A 期,压实作用普遍发育,有机质成熟产生大量有机酸进一步溶蚀岩屑等颗粒,粒间或粒内发生硅质、高岭石和伊利石沉淀,同时因局部成

岩流体盐度过大,硬石膏直接沉淀析出;中成岩 B 期,有机酸基本消耗殆尽,同时前期形成的硅质胶结物和自生黏土矿物堵塞孔隙喉道,成岩环境逐渐由酸性向碱性转变,发生高岭石的伊利石化、自生伊利石和石盐的沉淀析出以及石英的碱性溶蚀;晚成岩阶段,伊利石对石英的交代溶蚀产生较多的硅质,在封闭的成岩环境中形成晚期硅质胶结,同时岩屑粒内溶孔中自生伊利石发生重结晶形成白云母。

4 储集层孔隙形成及保存机制

4.1 孔隙纵向分布特征

由前所述可知,基于岩心精细观察与描述,长城系储集层砂体主要表现为由多个粒度下粗上细的正旋回砂体叠合而成。以靖探 1 井 4169.8~4180 m 取心段为例,该段砂体自下而上可划分为 4 个正旋回,分别对应 4 期潮道沉积砂体(图 3)。

旋回一和旋回三由于沉积厚度较小(<2 m)且样品数据点少(不超过 3 个),本次研究主要针对旋回二和旋回四进行分析。

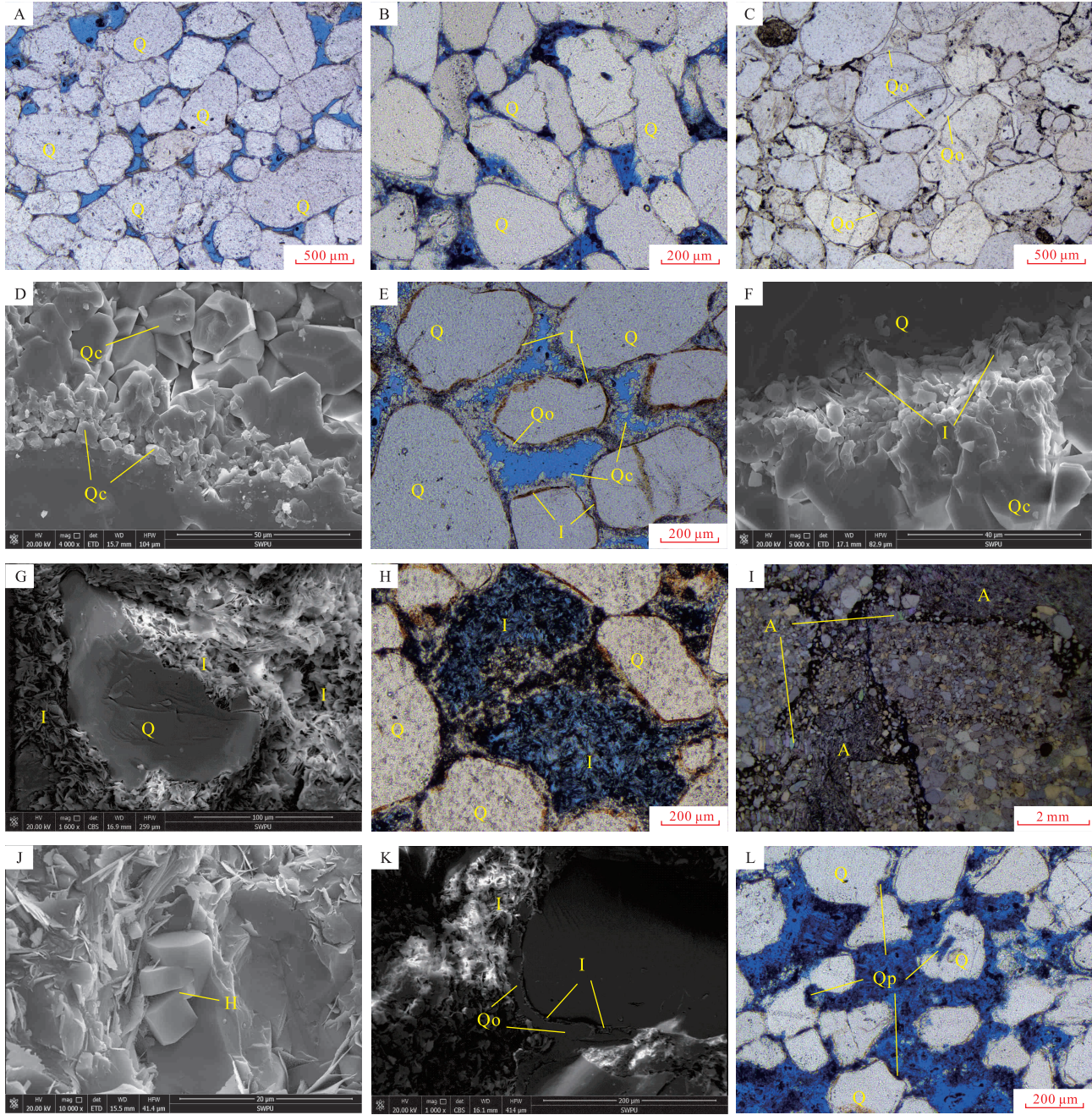
旋回二(4174.08~4178.44 m)下部为中砂岩,上部为细一中砂岩,且以下部中砂岩为主。结合镜下特征及孔隙度测试发现,该旋回顶部和底部分选较差,主要发育剩余粒间孔,孔隙度分布范围为 5.32%~9.67%;旋回中部分选好,除发育剩余粒间孔之外,还可见岩屑粒内溶孔,孔隙度分布范围为 11.9%~15.3%(图 3)。因此,旋回二相对高孔的储集层段主要发育在旋回中部。

旋回四(4169.8~4172.05 m)整体均为细一中砂岩,底部见砾石段。结合镜下特征及孔隙度测试发现,该旋回除底部砾石段外,整体分选较好,普遍发育剩余粒间孔,同时岩屑粒内溶孔较为发育,孔隙度分布范围为 15.1%~15.6%(图 3)。尽管旋回四因上部无连续取心、厚度相对较薄、数据相对较少,但基于现有长城系砂岩储集层孔隙度值数据来推测,旋回四相对高孔的储集层段发育在旋回下部。

4.2 孔隙形成机制

4.2.1 原生粒间孔

研究区长城系砂岩储集层原生粒间孔的发育主要受沉积条件控制。长城系砂岩储集层主要形成于

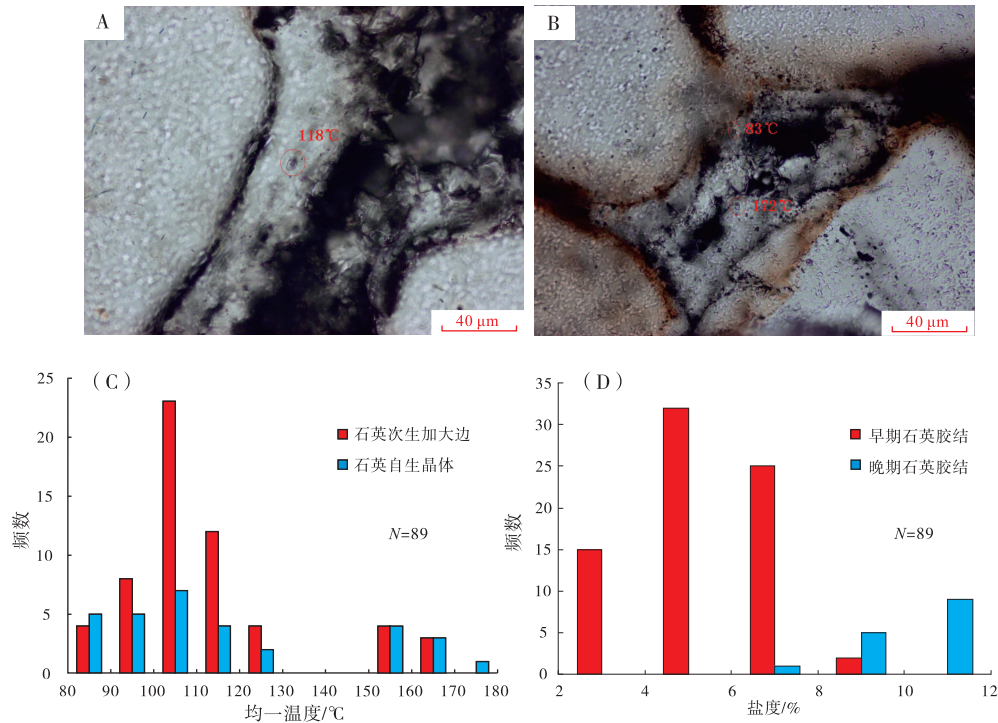


A—颗粒呈线接触，米 105 井，3694.85 m，单偏光；B—颗粒呈线一凹凸接触，靖探 1 井，4170.55 m，单偏光；C—石英次生加大充填粒间，桃 112 井，3857.1 m，单偏光；D—二期自生石英晶体充填粒间，靖探 1 井，4179.36 m，扫描电镜；E—黏土矿物包膜、早期石英次生加大和晚期自生石英晶体充填粒间，靖探 1 井，4173.86 m，单偏光；F—伊利石薄膜，靖探 1 井，4179.58 m，扫描电镜；G—伊利石交代溶蚀石英颗粒和粒间充填伊利石，靖探 1 井，4170.21 m，扫描电镜；H—伊利石充填岩屑粒内溶孔，靖探 1 井，4176.75 m，单偏光；I—硬石膏充填砾石间，桃 112 井，3855.04 m，正交偏光；J—石英颗粒被溶且溶孔内见少量石英晶体和黏土矿物充填，靖探 1 井，4170.21 m，单偏光；K—石英颗粒被溶且溶孔内见少量石英晶体和黏土矿物充填，靖探 1 井，4170.21 m，单偏光；L—石英颗粒被溶且溶孔内见少量石英晶体和黏土矿物充填，靖探 1 井，4170.21 m，单偏光。

Q 为石英颗粒；Qo 为石英次生加大边；Qc 为自生石英晶体；A 为硬石膏；H 为石英盐晶体；I 为伊利石；Qp 为石英粒内溶孔

图 7 鄂尔多斯盆地中东部长城系砂岩储集层成岩作用特征

Fig. 7 Diagenesis characteristics of the Changcheng System sandstone reservoirs in central and eastern Ordos Basin



A—中期石英胶结物包裹体, 靖探 1 井, 4172.05 m; B—早期和晚期石英胶结物包裹体, 靖探 1 井, 4179.58 m;

C—石英胶结物盐水包裹体均一温度分布直方图; D—石英胶结物盐水包裹体盐度分布直方图

图 8 鄂尔多斯盆地中东部长城系砂岩储集层石英胶结物盐水流体包裹体特征

Fig. 8 Saline fluid inclusions characteristics of quartz cement of the Changcheng System sandstone reservoirs in central and eastern Ordos Basin

水动力整体较强的潮控滨岸潮道沉积(图 3), 砂岩杂基含量少、粒度普遍相对较粗、分选较好, 具有成分成熟度较高和结构成熟度中等的特点(图 4; 图 5; 图 7), 是长城系原生粒间孔发育主要原因。

4.2.2 酸性溶蚀孔

由镜下薄片观察可知, 长城系砂岩储集层普遍可见岩屑颗粒溶蚀残留, 并广泛发育粒内溶孔和铸模孔(图 5-B, 5-C, 5-E; 图 7-H), 同时储集层孔隙度与岩屑含量呈正比(图 10), 表明长城系砂岩储集层存在酸性溶蚀。前人研究发现, 长城系在下古生界寒武系沉积前曾经历了约 9~10 亿年的抬升暴露过程, 甚至有直接与奥陶系马家沟组呈不整合接触现象(白海峰等, 2020; 魏柳斌等, 2021), 表明长城系沉积后长期处于直接暴露于地表或浅埋藏状态, 不可避免地接受长期的大气淡水淋滤溶蚀作用(白海峰等, 2020)。在早成岩阶段 A 期的浅埋和开放性成岩体系中, 大气淡水充分吸收 CO_2 并形成含碳酸的流体, 在长时间酸性条件下长城系砂岩储集层中的岩屑等易溶组分发生持续

溶蚀, 且持续性流动的水体能极大地提高大气淡水的溶蚀能力, 并使溶蚀产物能够被及时迁移出储集层, 形成一定数量的岩屑粒内溶孔(黄思静等, 2003; 丁晓琪等, 2014)。此时, 作为溶蚀产物的早期石英胶结物中可见均一温度小于 90°C 且盐度小于 4% 的盐水包裹体(图 8-C, 8-D), 表明存在浅埋藏低温条件下的淡水溶蚀。随着储集层的逐渐深埋, 在早成岩 B 期—中成岩 A 期, 长城系泥质烃源岩逐渐成熟, 干酪根在该热演化阶段可产生大量含有有机酸和 CO_2 等酸性流体(操应长等, 2022a)。由于早成岩阶段 B 期早期长城系埋藏较浅, 储集层尚未发生大规模胶结作用, 粒间孔较发育且存在大气淡水溶蚀形成的岩屑粒内溶孔, 此时有机酸等溶蚀流体运移通畅, 可继续对砂岩中的岩屑等颗粒进行接力溶蚀(操应长等, 2022b), 形成岩屑粒内溶孔和铸模孔(图 5-B, 5-C, 5-E; 图 7-H)。此时, 作为溶蚀产物的早期石英胶结物中相对较晚形成的自生石英, 其盐水包裹体呈均一温度相对较高 ($90\sim 130^\circ\text{C}$) 且盐度较高的特征

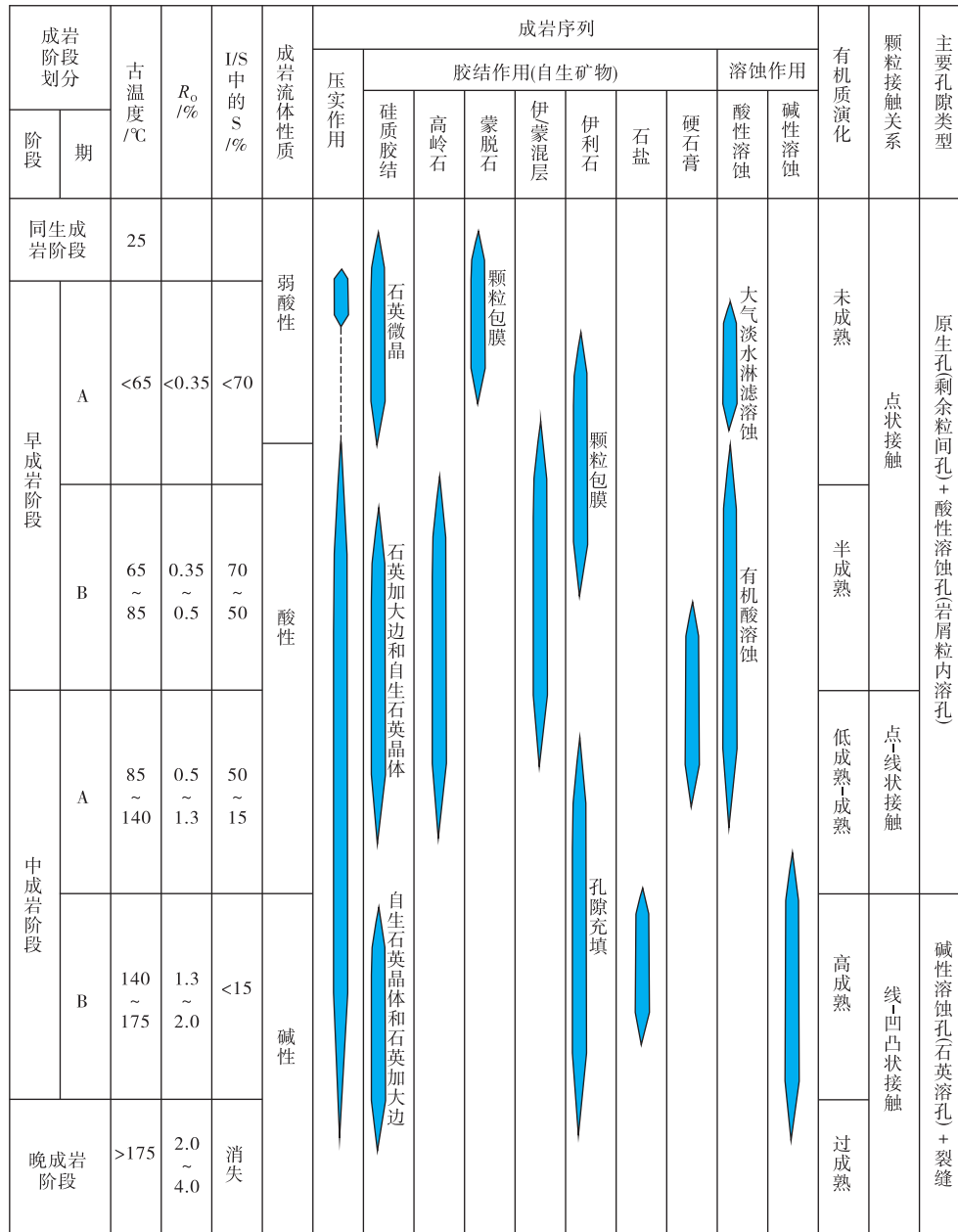


图 9 鄂尔多斯盆地中东部长城系砂岩储集层成岩演化序列

Fig. 9 Diagenetic sequence of the Changcheng System sandstone reservoirs in central and eastern Ordos Basin

(4%~8%) (图 8-C, 8-D), 表明为埋藏相对较深、地温相对较高、地层水相对偏咸条件下的有机酸溶蚀。

4.2.3 碱性溶蚀孔

前人研究表明石英颗粒在碱性条件下可发生溶蚀(邱隆伟等, 2002; 曹天宇等, 2020; 宇振昆等, 2021), 发现 SiO₂ 溶解速率会随着温度和 pH 值的升高而增大, 当温度大于 25 °C 且 pH 值大于 9.8 时, 石英将发生溶解(钟大康等, 2007; 万友

利等, 2014)。此外, 当成岩流体中存在 Na⁺、K⁺、Ca²⁺ 等离子时可以降低石英溶解反应的活化能, 进而可以提高石英的溶解速率(Dove, 1994)。长城系储集层进入中成岩 B 期后, 有机质开始进入高成熟演化阶段, 岩屑中的长石等铝硅酸盐类矿物的溶解反应大量消耗 H⁺(如 KAlSi₃O₈(钾长石)+H⁺+0.5H₂O=K⁺+0.5Al₂Si₂O₅(OH)₄(高岭石)+2SiO₂(石英)), 致使有机酸浓度降低, 碱金属离子开始大量富集等综合效应使得成岩环境开始转变为碱性

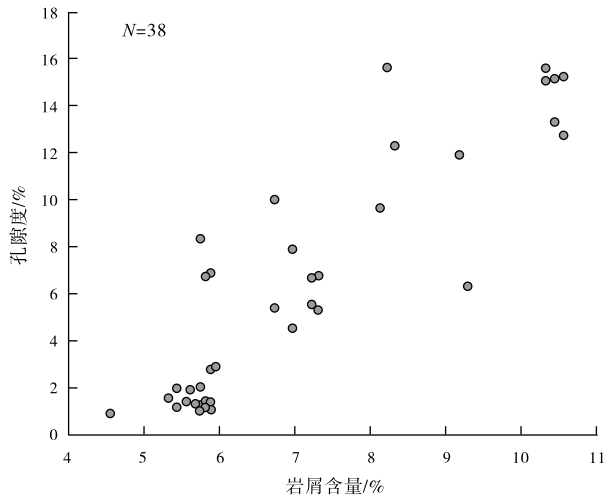


图 10 鄂尔多斯盆地中东部长城系砂岩储集层岩屑颗粒含量与孔隙度关系散点图

Fig. 10 Relationship between content of rock fragment grains and porosity of the Changcheng System sandstone reservoirs in central and eastern Ordos Basin

环境 (刘金库等, 2015)。研究区长城系砂岩储集层在扫描电镜下发现少量石盐晶体存在 (图 7-J), 这种石盐矿物主要经孔隙水沉淀形成, 表明孔隙水中含有 NaCl 电解质。同时, 长城系硅质胶结物包裹体分析显示, 晚期孔隙水温度达到 150℃ (图 8-C), 在这种环境下储集层高温碱性水介质可对石英颗粒及其加大边进行直接溶蚀, 因而可观察到石英粒内溶孔和石英颗粒边缘溶孔 (图 5-D; 图 7-L)。

4.3 孔隙保存机制

4.3.1 沉积条件

研究表明原始沉积条件是储集层孔隙形成的前提和基础, 无论是浅层还是深层优质储集层, 其孔隙形成和保存机理都与其岩石原始组分和结构有密切关系 (金凤鸣等, 2018; 张鹏辉等, 2019; 路媛媛, 2021)。研究区长城系砂岩储集层中的石英刚性颗粒普遍含量较高, 平均含量为 92.8%, 可有效提高储集层抗压实性, 从而达到较好的原生孔隙保存效果 (图 5-A; 图 7-A, 7-B, 7-E)。通过镜下观察发现, 长城系砂岩储集层孔隙发育与碎屑颗粒的分选程度密切相关, 分选较好的样品原生孔隙保存较好 (图 11-A), 而分选较差的样品原生孔隙相对不发育且溶蚀孔

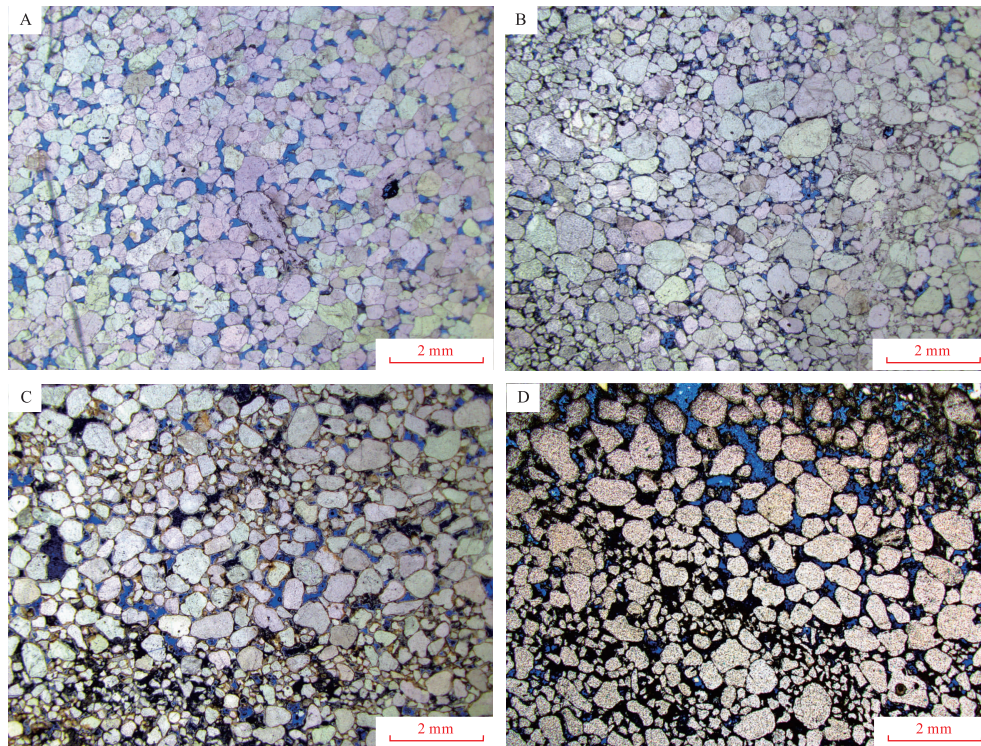
隙较少 (图 11-B)。此外, 对于分选较差的同一样品, 镜下可观察到孔隙主要集中在分选相对较好的区域, 而分选相对较差的区域仅偶见少量孔隙 (图 11-C, 11-D)。同时通过分析砂岩储集层样品孔隙度与粒度关系发现, 砂岩储集层孔隙度与粒度呈正相关, 随砂岩粒度增大, 孔隙度呈增加趋势 (图 12)。由于砂岩粒级越小、分选越差, 碎屑颗粒接触表面积越大, 颗粒间更易于滑动和重新排列, 支撑力小, 进而促进了压实进程, 导致孔隙多被破坏 (图 3; 图 11)。而相对粒级大且分选好的砂岩, 碎屑颗粒接触表面积较小, 颗粒间支撑力大, 孔喉早期连通性好的同时后期抗压实能力强, 使得原生孔隙得到有效的保存 (高志勇等, 2013; 王汇智等, 2022) (图 3; 图 11)。

4.3.2 颗粒包膜

颗粒包膜是埋藏后从骨架颗粒表面向外生长而形成的成岩自生产物 (远光辉等, 2015)。颗粒包膜主要包括黏土矿物包膜和微晶石英包膜, 其中黏土矿物包膜主要为绿泥石包膜和伊利石包膜等。大量学者研究表明深层砂岩储集层中无论是黏土矿物包膜还是石英微晶包膜的发育, 大多对储集层孔隙的保存有积极的作用 (胡作维等, 2012; 李云和胡作维, 2014; 于春勇, 2021; 田兵等, 2022)。黏土矿物包膜的发育通过隔离石英加大边在石英颗粒表面生长的潜在成核质点, 进而可抑制或减缓硅质胶结物的发育造成储集层孔隙度的降低, 使得储集层深埋情况下孔隙能够被有效保存 (远光辉等, 2015)。黏土矿物包膜能对孔隙起到保存作用通常需要满足 3 个条件 (张鹏辉等, 2019): (1) 颗粒包膜的含量不能太少且具有一定的厚度, (2) 较高的颗粒表面覆盖率, (3) 形成于硅质胶结发育之前。研究区长城系砂岩储集层中伊利石包膜普遍存在, 而且多覆盖整个颗粒表面, 且形成于颗粒强烈压实和硅质胶结之前, 具体表现为伊利石包膜发育的石英颗粒次生加大不发育, 仅在颗粒边缘形成少量自生石英晶体 (图 5-A, 5-D; 图 7-A, 7-E), 有利于原生孔隙的保存, 而伊利石包膜不发育的石英颗粒, 可见石英次生加大普遍发育, 粒间孔隙几乎完全被石英胶结物充填 (图 7-C)。

4.3.3 埋藏方式

埋藏方式对深层碎屑岩储集层的形成具有重要



A—分选较好，原生孔隙相对发育，米 105 井，3692.8 m，单偏光；B—分选较差，原生孔隙相对不发育，米 105 井，3690.05 m，单偏光；C—分选差异导致原生孔隙发育差异，靖探 1 井，4179.58 m，单偏光；D—分选差异导致原生孔隙发育差异，靖探 1 井，4171.42 m

图 11 鄂尔多斯盆地中东部长城系砂岩储集层颗粒分选与孔隙发育关系

Fig. 11 Relationship between grain sorting and pore development of the Changcheng System sandstone reservoirs in central and eastern Ordos Basin

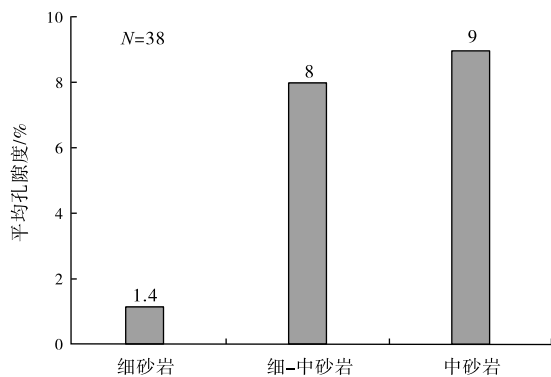


图 12 鄂尔多斯盆地中东部长城系砂岩储集层粒度与孔隙度关系

Fig. 12 Relationship between grain size and porosity of the Changcheng System sandstone reservoir in central and eastern Ordos Basin

影响，早期长期浅埋、晚期短期快速深埋是形成深层优质储集层的重要原因（钟大康等，2008；高崇龙等，2017；操应长等，2022a）。根据长城系埋藏史可知，在下古生界寒武系沉积前，长城系经历

了 9~10 亿年的抬升暴露过程，寒武系和奥陶系沉积后又经历了 150 Ma 的稳定浅埋藏，随后在 200 Ma 内埋深从 1.5 km 快速深埋至 5 km 左右，此后经历 100 Ma 的缓慢抬升至现今 4 km 左右（田刚和宋立军，2017）（图 13）。早期长时间稳定浅埋藏过程中，长城系岩石颗粒在早期成岩阶段排列方式和接触方式基本定型，且早成岩阶段形成的黏土薄膜和硅质胶结物充填粒间，使得岩石形成抗压骨架，提高了岩石的抗压实性，在后期短时间快速深埋的过程中，压实作用对颗粒的排列方式和接触方式的影响减弱，有利于剩余粒间孔隙的保存（杨香华等，1998；雷德文等，2008）。

4.4 孔隙形成与演化保存模式

在针对长城系孔隙形成与保存机制分析的基础上，结合研究区长城系埋藏史，并以靖探 1 井参数为基准，建立了鄂尔多斯盆地中东部长城系砂岩储集层孔隙形成、演化与保存模式（图 13）。长城系砂岩在同生成岩阶段成岩作用较弱，颗粒主要为漂

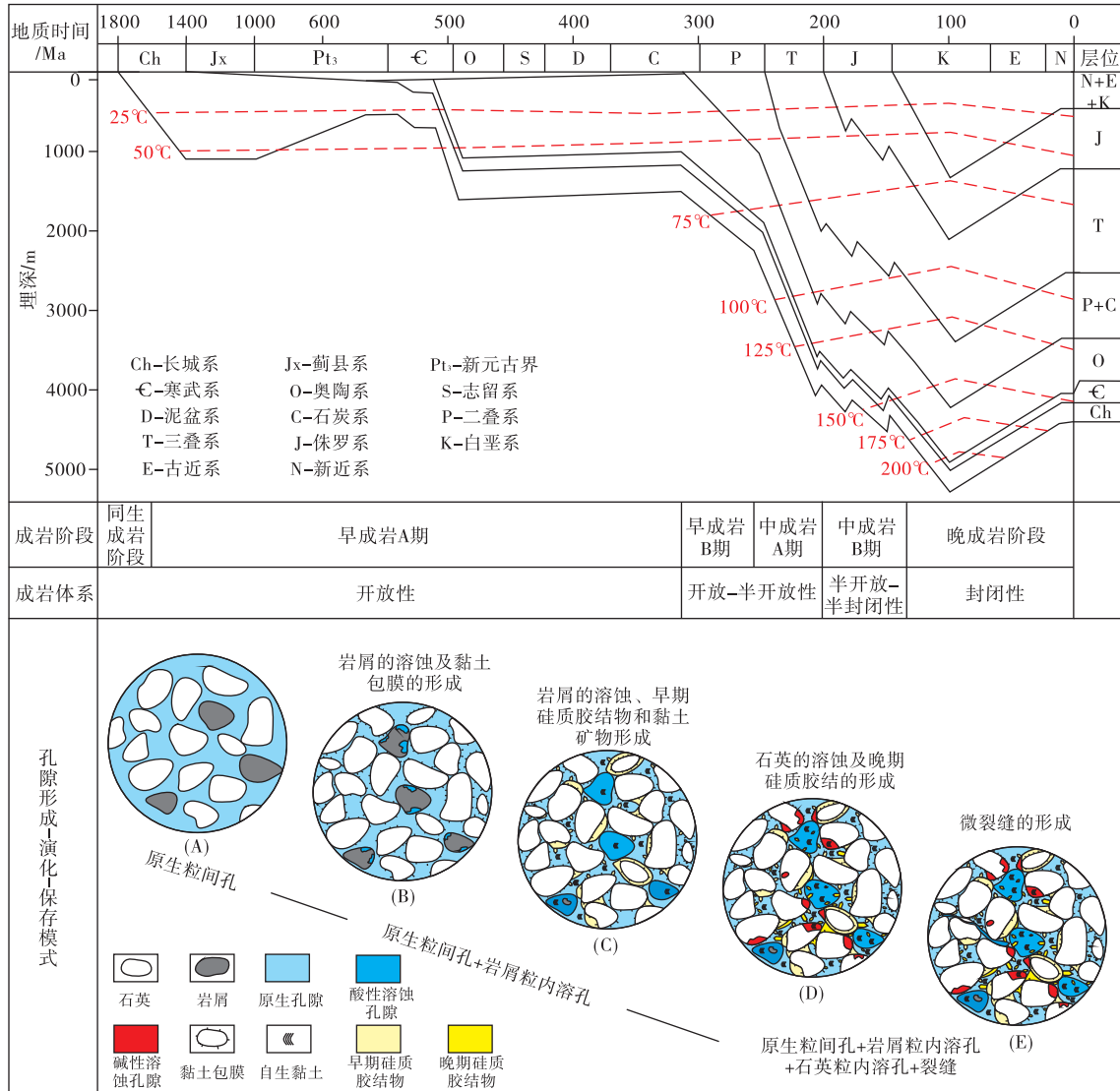


图 13 鄂尔多斯盆地中东部长城系砂岩储集层孔隙形成、演化与保存模式

Fig. 13 Pore formation, evolution and preservation model of the Changcheng System sandstone reservoirs in central and eastern Ordos Basin

浮一点接触，粒间孔隙发育(图 13-A)；早成岩阶段 A 期为近地表的开放性成岩体系，此过程作用时间长、埋藏浅、压实强度弱，砂岩除内部粒间孔隙普遍发育外还存在大气淡水溶蚀形成的岩屑粒内溶孔和渗滤黏土矿物包膜(图 13-B)；早成岩阶段 B 期—中成岩阶段 A 期，随着压实作用和胶结作用的增强，粒间孔隙条件相对变差，长城系砂岩表现为开放—半开放性成岩体系，此时有机质成熟脱羧形成有机酸，进而对岩屑颗粒接力溶蚀形成大量岩屑粒内溶孔，此时溶蚀产物（如自生硅质和黏土矿物）可随成岩流体向储集层外部迁移，在此过程中部分溶蚀产物逐渐沉淀析出，充填粒间孔和

粒内溶孔(图 13-C)；中成岩阶段 B 期，因持续的压实作用及胶结作用，粒间孔隙条件进一步变差，成岩体系转变为半开放—半封闭性，同时成岩环境也逐渐向碱性环境转变。此时，发生黏土矿物的转化和石英颗粒的碱性溶蚀，并形成少量石英粒内溶孔，但由于粒间孔隙条件的限制，该期溶蚀产物无法向储集层外部有效迁移，只能在储集层内部再次沉淀析出(图 13-D)；晚成岩阶段，由于砂岩储集层孔隙多被伊利石和自生石英晶体充填，以及随埋深的增加压实强度增大，致使储集层表现为封闭性成岩体系，同时由于储集层偶见少量未被开启的裂缝，此时外部流体很难进入储集层内部进行进一步

的改造, 使得长城系砂岩储集层前期形成和保存的孔隙得以继续保存至今(图 13-E)。

5 结论

鄂尔多斯盆地中东部地区中元古界长城系古老深层致密砂岩形成于潮控滨岸潮道沉积环境, 水动力较强、杂基含量少、砂岩储集层普遍粒度相对较粗、分选好且成分成熟度高, 为原生孔隙的发育提供有利条件; 成岩演化过程中经历早期大气淡水、中期有机酸和晚期硅质碱性溶蚀, 有利于次生溶孔的形成。长城系砂岩储集层孔隙的保存主要受初始沉积条件、黏土包膜发育和埋藏过程等因素的综合影响, 砂岩储集层粒度粗、分选好、富含抗压的刚性石英颗粒, 早成岩阶段颗粒发育黏土包膜抑制石英次生加大, 早期长时间浅埋、晚期快速深埋的埋藏方式为孔隙的保存提供了有利条件。

参考文献 (References)

- 白海峰, 包洪平, 李泽敏, 郝松立, 武春英, 井向辉. 2020. 鄂尔多斯盆地元古界长城系沉积特征及天然气成藏潜力. 地质科学, 55(3): 672-691. [Bai H F, Bao H P, Li Z M, Hao S L, Wu C Y, Jing X H. 2020. Sedimentary characteristics and gas accumulation potential of Changcheng System in Ordos Basin in Proterozoic. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 55(3): 672-691]
- 曹天宇, 钟光康, 牛胜利, 孙海涛, 曹轩, 王菲. 2020. 惠州凹陷东部珠海组储层碱性成岩作用及孔隙演化. 沉积学报, 38(6): 1327-1337. [Cao T Y, Zhong D K, Niu S L, Sun H T, Cao X, Wang F. 2020. Alkaline diagenesis and porosity evolution of Zhuhai formation reservoirs in eastern Huizhou sag. Acta Sedimentologica Sinica, 38(6): 1327-1337]
- 操应长, 远光辉, 杨海军, 王艳忠, 刘可禹, 管念民, 扈克来, 王健. 2022a. 含油气盆地深层—超深层碎屑岩油气勘探现状与优质储层成因研究进展. 石油学报, 43(1): 112-140. [Cao Y C, Yuan G H, Yang H J, Wang Y Z, Liu K Y, Zan N M, Xi K L, Wang J. 2022a. Current situation of oil and gas exploration and research progress of the origin of high-quality reservoirs in deep-ultra-deep clastic reservoirs of petroliferous basins. Acta Petrolei Sinica, 43(1): 112-140]
- 操应长, 远光辉, 王艳忠, 管念民, 靳子濠, 刘可禹, 扈克来, 魏亦哈, 孙沛沛. 2022b. 典型含油气盆地深层富长石碎屑岩储层长石溶蚀接力成孔认识及其油气地质意义. 中国科学: 地球科学, 52(9): 1694-1725. [Cao Y C, Yuan G H, Wang Y Z, Zan N M, Jin Z H, Liu K Y, Xi K L, Wei Y H, Sun P P. 2022b. Understanding of relay pore-forming of feldspar dissolution in deep feldspar-rich clastic reservoirs in typical oil-gas-bearing basins and its petroleum geological significance. Scientia Sinica (Terrae), 52(9): 1694-1725]
- 常丽华, 陈曼云, 金巍, 李世超, 于介江. 2006. 透明矿物薄片鉴定手册. 北京: 地质出版社, 111-112. [Chang L H, Chen M Y, Jin W, Li S C, Yu J J. 2006. Handbook of Transparent Mineral Flake Identification. Beijing: Geological Publishing House, 111-112]
- 丁晓琪, 韩玫梅, 张哨楠, 伏美燕, 万友利. 2014. 大气淡水在碎屑岩次生孔隙中的作用. 地质论评, 60(1): 145-158. [Ding X Q, Han M M, Zhang S N, Fu M Y, Wan Y L. 2014. Roles of meteoric water on secondary porosity of siliciclastic reservoirs. Geological Review, 60(1): 145-158]
- 杜金虎, 李相博, 包洪平, 徐旺林, 王雅婷, 黄军平, 王宏波, 完颜容, 王菁. 2019. 鄂尔多斯盆地中新元古界—下古生界天然气成藏地质条件及勘探新领域. 石油勘探与开发, 46(5): 820-835. [Du J H, Li X B, Bao H P, Xu W L, Wang Y T, Huang J P, Wang H B, Wanyan R, Wang J. 2019. Geological conditions of natural gas accumulation and new exploration areas in the Mesoproterozoic to Lower Paleozoic of Ordos Basin, NW China. Petroleum Exploration and Development, 46(5): 820-835]
- 冯娟萍, 丁雪峰, 欧阳征健. 2015. 鄂尔多斯盆地南缘中元古界长城系烃源岩地球化学特征. 西安科技大学学报, 35(6): 749-754. [Feng J P, Ding X F, Ouyang Z J. 2015. Geochemical characteristics of Mesoproterozoic Erathem Changchengian system source rocks in the south margins of Ordos Basin. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 35(6): 749-754]
- 付金华, 赵会涛, 董国栋, 韩天佑, 任军峰, 黄正良, 卢子兴, 朱保定, 朱静, 殷亮亮, 李士祥. 2023. 鄂尔多斯盆地新领域油气勘探发现与前景展望. 天然气地球科学, 34(8): 1289-1304. [Fu J H, Zhao H T, Dong G D, Han T Y, Ren J F, Huang Z L, Lu Z X, Zhu B D, Zhu J, Yin L L, Li S X. 2023. Discovery and prospect of oil and gas exploration in new areas of Ordos Basin. Natural Gas Geoscience, 34(8): 1289-1304]
- 高志勇, 崔京钢, 冯佳睿, 罗忠, 黄贤营, 李小陪, 赵雪松, 郭美丽. 2013. 埋藏压实作用对前陆盆地深部储层的作用过程与改造机制. 石油学报, 34(5): 867-876. [Gao Z Y, Cui J G, Feng J R, Luo Z, Huang X Y, Li X P, Zhao X S, Guo M L. 2013. An effect of burial compaction on deep reservoirs of foreland basins and its reworking mechanism. Acta Petrolei Sinica, 34(5): 867-876]
- 高崇龙, 纪友亮, 高志勇, 王剑, 任影, 刘大卫, 段小兵, 桓芝俊, 程同冉. 2017. 准噶尔盆地腹部深层储层物性保存过程多因素耦合分析. 沉积学报, 35(3): 577-591. [Gao C L, Ji Y L, Gao Z Y, Wang J, Ren Y, Liu D W, Duan X B, Huan Z J, Cheng T R. 2017. Multi-factor coupling analysis on property preservation process of deep buried favorable reservoir in hinterland of Junggar Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 35(3): 577-591]
- 管树巍, 吴林, 任荣, 朱光有, 彭朝全, 赵文韬, 李杰. 2017. 中国主要克拉通前寒武纪裂谷分布与油气勘探前景. 石油学报, 38(1): 9-22. [Guan S W, Wu L, Ren R, Zhu G Y, Peng Z Q, Zhao W T, Li J. 2017. Distribution and petroleum prospect of Precambrian rifts in the main cratons, China. Acta Petrolei Sinica, 38(1): 9-22]

- 郝松立,孙六一,包洪平,刘刚,章贵松. 2016. 鄂尔多斯盆地中—新元古界勘探方向及潜力. 天然气地球科学, 27(12): 2127–2135. [Hao S L, Sun L Y, Bao H P, Liu G, Zhang G S. 2016. Exploration direction and potential of the Middle–Upper Proterozoic in Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 27(12): 2127–2135]
- 黄思静,武文慧,刘洁,沈立成,黄成刚. 2003. 大气水在碎屑岩次生孔隙形成中的作用: 以鄂尔多斯盆地三叠系延长组为例. 地球科学, 28(4): 419–424. [Huang S J, Wu W H, Liu J, Shen L C, Huang C G. 2003. Generation of secondary porosity by meteoric water during time of subaerial exposure: an example from Yanchang formation sandstone of Triassic of Ordos Basin. *Earth Science*, 28(4): 419–424]
- 黄思静,黄可可,冯文立,佟宏鹏,刘丽红,张雪花. 2009. 成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间的物质交换与次生孔隙的形成: 来自鄂尔多斯盆地上古生界和川西凹陷三叠系须家河组的研究. 地球化学, 38(5): 498–506. [Huang S J, Huang K K, Feng W L, Tong H P, Liu L H, Zhang X H. 2009. Mass exchanges among feldspar, kaolinite and illite and their influences on secondary porosity formation in clastic diagenesis: a case study on the Upper Paleozoic, Ordos Basin and Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression. *Geochimica*, 38(5): 498–506]
- 胡作维,李云,黄思静,成欣怡,黄阳. 2012. 颗粒包膜在深埋藏砂岩储层原生孔隙保存中的意义. 矿物岩石地球化学通报, 31(6): 640–648. [Hu Z W, Li Y, Huang S J, Cheng X Y, Huang Y. 2012. The significance of the grain coating in preserving the primary porosity in deeply buried sandstone reservoirs. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31(6): 640–648]
- 金凤鸣,张凯逊,王权,牛新杰,于作刚,白国平,赵璇. 2018. 断陷盆地深层优质碎屑岩储集层发育机理: 以渤海湾盆地饶阳凹陷为例. 石油勘探与开发, 45(2): 247–256. [Jin F M, Zhang K X, Wang Q, Niu X J, Yu Z G, Bai G P, Zhao X. 2018. Formation mechanisms of good-quality clastic reservoirs in deep formations in rifted basins: a case study of Raoyang sag in Bohai Bay Basin, East China. *Petroleum Exploration and Development*, 45(2): 247–256]
- 雷德文,唐勇,常秋生. 2008. 准噶尔盆地南缘深部优质储集层及有利勘探领域. 新疆石油地质, 29(4): 435–438. [Lei D W, Tang Y, Chang Q S. 2008. The deep and relatively high-quality clastic reservoir bodies and favorable exploration areas in southern margin of Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 29(4): 435–438]
- 李云,胡作维. 2014. 深层砂岩储层中微晶石英包膜的形成及其对原生粒间孔隙的保存意义. 地质科技情报, 33(3): 87–92. [Li Y, Hu Z W. 2014. Formation of the microcrystalline quartz coatings and its protection of the primary intergranular porosity in the deeply buried sandstone reservoirs. *Geological Science and Technology Information*, 33(3): 87–92]
- 刘金库,彭军,石岩,鲍作帆,孙永亮,刘学敏,张泽. 2015. 致密砂岩储层石英溶蚀成因及对孔隙发育的影响: 以川中—川南过渡带须家河组为例. 石油学报, 36(9): 1090–1097. [Liu J K, Peng J, Shi Y, Bao Z F, Sun Y L, Liu X M, Zhang Z. 2015. The genesis of quartz dissolution in tight sand reservoirs and its impact on pore development: a case study of Xujiahe Formation in the transitional zone of Central–Southern Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 36(9): 1090–1097]
- 路媛媛. 2021. 临兴气田上古生界致密砂岩储层发育特征及主控因素. 非常规油气, 8(1): 43–50. [Lu Y Y. 2021. Characteristics and main controlling factors of tight sandstone reservoir of upper Paleozoic in Linxing gas field. *Unconventional Oil & Gas*, 8(1): 43–50]
- 孟万斌,吕正祥,冯明石,张世华,李敏,麦发海. 2011. 致密砂岩自生伊利石的成因及其对相对优质储层发育的影响: 以川西地区须四段储层为例. 石油学报, 32(5): 783–790. [Meng W B, Lü Z X, Feng M S, Zhang S H, Li M, Mai F H. 2011. The origin of authigenic illite in tight sandstones and its effect on the formation of relatively high-quality reservoirs: a case study on sandstones in the 4th member of Xujiahe Formation, western Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 32(5): 783–790]
- 欧阳征健,冯娟萍,马海勇,李文厚. 2020. 鄂尔多斯地区中元古界长城系沉积特征研究. 西北大学学报(自然科学版), 50(1): 105–112. [Ouyang Z J, Feng J P, Ma H Y, Li W H. 2020. The sedimentary characteristics of the Middle Proterozoic Changchengian system in Ordos area. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 50(1): 105–112]
- 邱隆伟,姜在兴,陈文学,李晓红,熊志东. 2002. 一种新的储层孔隙成因类型: 石英溶解型次生孔隙. 沉积学报, 20(4): 621–627. [Qiu L W, Jiang Z X, Chen W X, Li X H, Xiong Z D. 2002. A new type of secondary porosity: quartz dissolution porosity. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(4): 621–627]
- 田建锋,高永利,张蓬勃,王秀娟,杨友运. 2013. 鄂尔多斯盆地合水地区长7致密油储层伊利石成因. 石油与天然气地质, 34(5): 700–707. [Tian J F, Gao Y L, Zhang P B, Wang X J, Yang Y Y. 2013. Genesis of illite in Chang 7 tight oil reservoir in Heshui area, Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 34(5): 700–707]
- 田刚,宋立军. 2017. 鄂尔多斯盆地中元古界烃源岩热演化史模拟. 石油实验地质, 39(4): 520–526. [Tian G, Song L J. 2017. Thermal evolution modeling of Mesoproterozoic source rocks in the Ordos Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 39(4): 520–526]
- 田兵,郑有伟,赵俊梅,朱雪峰,何滔,罗晓峰. 2022. 深层碎屑岩储层异常高孔研究进展. 科学技术与工程, 22(22): 9456–9465. [Tian B, Zheng Y W, Zhao J M, Zhu X F, He T, Luo X F. 2022. Research development in anomalously high porosity of deep clastic reservoirs. *Science Technology and Engineering*, 22(22): 9456–9465]
- 万友利,丁晓琪,白晓亮,黄方方,朱志良. 2014. 塔中地区志留系海相碎屑岩储层石英溶蚀成因及影响因素分析. 沉积学报, 32(1): 138–147. [Wan Y L, Ding X Q, Bai X L, Huang F F, Zhu Z L. 2014. Quartz dissolution causes and influencing factors in the Silurian marine clastic reservoir rocks in central Tarim Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(1): 138–147]
- 王汇智,赵卫卫,杨水胜,王如意. 2022. 鄂尔多斯盆地地下寺湾地区延长组储层特征研究. 非常规油气, 9(1): 48–56. [Wang H Z,

- Zhao W W, Yang S S, Wang R Y. 2022. Research of reservoir characteristics of Yanchang Formation in Xiasiwan Area, Ordos Basin. *Unconventional Oil & Gas*, 9(1): 48-56]
- 王铁冠, 韩克猷. 2011. 论中—新元古界的原生气资源. *石油学报*, 32(1): 1-7. [Wang T G, Han K Y. 2011. On Meso-Neoproterozoic primary petroleum resources. *Acta Petrolei Sinica*, 32(1): 1-7]
- 王玺童, 王怀厂, 官玉龙, 刘文香, 罗顺社, 吕奇奇, 张严. 2021. 山西黎城元古界长城系常州沟组岩石学特征和沉积环境. *海相油气地质*, 26(1): 71-80. [Wang X T, Wang H C, Guan Y L, Liu W X, Luo S S, Lü Q Q, Zhang Y. 2021. Petrological characteristics and sedimentary environment of Changzhougou Formation of the Mesoproterozoic Changcheng System in Licheng, Shanxi. *Marine Origin Petroleum Geology*, 26(1): 71-80]
- 魏柳斌, 赵俊兴, 苏中堂, 魏新善, 任军峰, 黄正良, 武春英. 2021. 鄂尔多斯盆地奥陶系中组合微生物碳酸盐岩分布规律及沉积模式. *石油勘探与开发*, 48(6): 1162-1174. [Wei L B, Zhao J X, Su Z T, Wei X S, Ren J F, Huang Z L, Wu C Y. 2021. Distribution and depositional model of microbial carbonates in the Ordovician middle assemblage, Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(6): 1162-1174]
- 杨俊杰. 2002. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律. 北京: 石油工业出版社, 50-56. [Yang J J. 2002. *Tectonic Evolution and Oil-Gas Reservoirs Distribution in Ordos Basin*. Beijing: Petroleum Industry Press, 50-56]
- 杨香华, 叶加仁, 孙永传, 周士科, 武文来. 1998. 歧南断阶带深层沙二段砂岩成岩演化特征与孔隙保存. *中国海上油气地质*, 10(4): 242-249. [Yang X H, Ye J R, Sun Y C, Zhou S K, Wu W L. 1998. Diagenesis evolution and preservation of porosity in the member 2, Shahejie Formation, Qinan fault-step zone. *China Offshore Oil and Gas*, 10(4): 242-249]
- 于春勇. 2021. 富县地区长 8 致密砂岩储层孔隙结构特征及形成机理. *非常规油气*, 8(1): 15-24. [Yu C Y. 2021. Pore structure characteristics and formation mechanism of Chang 8 member tight sandstone reservoir in Fuxian area. *Unconventional Oil & Gas*, 8(1): 15-24]
- 宇振昆, 丁金岗, 冯振伟, 姜柳青, 李汉林, 常小斌, 宗浩, 梁积伟. 2021. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组碱性成岩作用浅析. *非常规油气*, 8(2): 24-32. [Yu Z K, Ding J G, Feng Z W, Jiang L Q, Li H L, Chang X B, Zong H, Liang J W. 2021. Analysis on alkaline diagenesis of the Permian Fengcheng formation in Mahu sag, Junggar Basin. *Unconventional Oil & Gas*, 8(2): 24-32]
- 远光辉, 操应长, 贾珍臻, 王艳忠, 杨田. 2015. 含油气盆地中深层碎屑岩储层异常高孔带研究进展. *天然气地球科学*, 26(1): 28-42. [Yuan G H, Cao Y C, Jia Z Z, Wang Y Z, Yang T. 2015. Research progress on anomalously high porosity zones in deeply buried clastic reservoirs in petroliferous basin. *Natural Gas Geoscience*, 26(1): 28-42]
- 钟大康, 朱筱敏, 周新源, 王招明. 2007. 初论塔里木盆地砂岩储层中 SiO₂ 的溶蚀类型及其机理. *地质科学*, 42(2): 403-414. [Zhong D K, Zhu X M, Zhou X Y, Wang Z M. 2007. An approach to categories and mechanisms of SiO₂ dissolution in sandstone reservoirs in the Tarim Basin. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 42(2): 403-414]
- 钟大康, 朱筱敏, 王红军. 2008. 中国深层优质碎屑岩储层特征与形成机理分析. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 38(S1): 11-18. [Zhong D K, Zhu X M, Wang H J. 2008. Characteristics and formation mechanism of deep high-quality clastic reservoir in China. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 38(S1): 11-18]
- 张鹏辉, Lee Yong Il, 张金亮, 梁杰, 武英利, 袁勇, 王晋晨, 刘璐晨, 王正云, 付俊杰. 2019. 砂岩储集层粒间孔隙保存机制. *天然气工业*, 39(7): 31-40. [Zhang P H, Il L, Zhang J L, Liang J, Wu Y L, Yuan Y, Wang J C, Liu L C, Wang Z Y, Fu J J. 2019. Preservation mechanisms of intergranular pores in sandstone reservoirs. *Natural Gas Industry*, 39(7): 31-40]
- 张威, 闫相宾, 刘超英, 陆永潮, 安川, 范玲玲, 归平军. 2023. 鄂尔多斯盆地北部中元古界潜山圈闭特征与成藏模式. *地质学报*, 97(1): 168-178. [Zhang W, Yan X B, Liu C Y, Lu Y C, An C, Fan L L, Gui P J. 2023. Characteristics and reservoir forming model of Mesoproterozoic buried hill traps in the northern Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 97(1): 168-178]
- 赵文智, 胡素云, 汪泽成, 张水昌, 王铜山. 2018. 中国元古界—寒武系油气地质条件与勘探地位. *石油勘探与开发*, 45(1): 1-13. [Zhao W Z, Hu S Y, Wang Z C, Zhang S C, Wang T S. 2018. Petroleum geological conditions and exploration importance of Proterozoic to Cambrian in China. *Petroleum Exploration and Development*, 45(1): 1-13]
- 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 汪泽成, 张宝民, 魏国齐, 王铜山, 姚根顺, 邓胜徽, 刘静江, 周慧, 徐安娜, 杨智, 姜华, 谷志东. 2014. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现. *石油勘探与开发*, 41(3): 278-293. [Zou C N, Du J H, Xu C C, Wang Z C, Zhang B M, Wei G Q, Wang T S, Yao G S, Deng S H, Liu J J, Zhou H, Xu A N, Yang Z, Jiang H, Gu Z D. 2014. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 41(3): 278-293]
- Dove P M. 1994. The dissolution kinetics of quartz in sodium chloride solutions at 25 degrees to 300 degrees C. *American Journal of Science*, 294: 665-712.

(责任编辑 李新坡; 英文审校 李攀)