

鄂尔多斯盆地悦乐地区长 6 段储层特征及 主控因素分析

张慧芳^{1,2}, 魏钦廉^{1,2}, 陈曦³, 毕岭^{1,2}, 魏雪珂^{1,2}

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. 延长油田股份有限公司定边采油厂, 陕西 定边 717111

[摘要] 为明确鄂尔多斯盆地悦乐地区三叠系延长组长 6 段储层发育特征及控制因素, 以悦乐地区长 6 段砂岩储层为研究对象, 结合岩心资料、薄片鉴定、扫描电镜、高压压汞与地球物理测井解释等技术方法, 从岩石学特征、物性特征及孔隙结构特征多个方面, 探讨了沉积作用和成岩作用在储层储集性能方面的重要意义。结果表明: 悦乐地区长 6 段岩性以岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩为主, 孔隙类型主要以粒间孔和长石溶孔为主。悦乐地区长 6 段孔隙度均值为 9.27%; 渗透率均值为 $0.142 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 以特低孔-超低渗储层为主; 根据储层分类评价标准, 长 6 段储层由好到差依次分为 I, II, III 类。沉积环境为研究区长 6 储层提供物质基础, 成岩作用是研究区目的层形成致密储层的关键因素。胶结作用一定程度上充填孔隙、堵塞孔喉, 降低储层物性, 而溶蚀作用对于改善储层物性具有积极的作用。该研究成果为研究区进一步勘探开发提供借鉴。

[关键词] 鄂尔多斯盆地; 悦乐地区; 长 6 段; 储层特征; 沉积作用; 成岩作用

[分类号] P618.13

[文献标志码] A

Analysis of reservoir characteristics and main controlling factors of Chang 6 member in Yuele area, Ordos Basin

ZHANG Huifang^{1,2}, WEI Qinlian^{1,2}, CHEN Xi³, BI Ling^{1,2}, WEI Xueke^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Oil and Gas Accumulation Geology in Shaanxi Province, Xi'an 710065, China;

3. Dingbian Oil Production Plant, Yanchang Oilfield Co., Ltd., Dingbian 717111, China

Abstract: This study seeks to clarify the characteristics and factors controlling the reservoirs of the Chang 6 member of the Triassic Yanchang Formation in the Yuele area of the Ordos Basin. We combined data on the core, thin-slice identification, scanning electron microscopy, high-pressure

[收稿日期] 2023-06-02。

[基金项目] 国家科技重大专项(2016ZX05056); 西安石油大学研究生创新与实践能力的培养计划(YCS22213069)。

[第一作者] 张慧芳(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 沉积学与储层地质学, E-mail: 1710558163@qq.com。

[通信作者] 魏钦廉(1976—), 男, 教授, 研究方向: 沉积学与储层地质学, E-mail: wql@xssyu.edu.cn。

[引用格式] 张慧芳, 魏钦廉, 陈曦, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地悦乐地区长 6 段储层特征及主控因素分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(4): 531-542+560.

Zhang H F, Wei Q L, Chen X, et al., 2024. Analysis of reservoir characteristics and main controlling factors of Chang 6 member in Yuele area, Ordos Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(4): 531-542+560.

mercury injection, and geophysical logging-based explanations to examine the importance of sedimentation and diagenesis for the storage of the reservoir of the Chang 6 member in terms of its petrological and physical characteristics as well as its pore structure. The results showed that the lithology of the Chang 6 member in the Yuele area was dominated by lithic feldspar sandstone, and mainly contained intergranular and feldspathic pores. The average porosity of the Chang 6 member in the Yuele area was 9.27% and its average permeability was $0.142 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. It thus had ultra-low-porosity and permeability. We used standards of categorization of reservoirs to divide reservoirs of the Chang 6 member into categories I, II and III in order from best to worst. The depositional environment provided the material basis for the Chang 6 member. Diagenesis was a vital process in the formation of the dense reservoir in the study area. Cementation can be used to fill the pore space and block the throat of the pores to alter the physical properties of the reservoir, while dissolution can enhance its properties. The research here provides guidance for further exploration and development in the area.

Key words: Ordos Basin; Yuele area; Chang 6 member; reservoir characteristics; sedimentation; diagenesis

随着常规油气藏勘探开发的枯竭,非常规油气勘探与开发已成为增加油气储量和产量的主要发展方向,特别是致密油已成为研究领域的一大亮点(孙龙德等,2019;李国欣等,2022;邹才能等,2022)。鄂尔多斯盆地三叠系延长组油气资源十分丰富,其中延长组长6油层组具有较好的发展前景。随着悦乐地区进入勘探开发中期,亟待进行下一步的有利区预选工作。储层特征是油气勘探有利区优选的先行工作,开展该地区的储层特征研究,有助于优选有利储集区块,为勘探开发部署提供依据。肖玲等(2017)认为水云母胶结是造成南梁地区长6储层致密化的重要原因。曹斌风和孙卫(2011)通过对吴旗地区薛岔区块长6储层成岩作用的研究,发现目前主要处于晚成岩阶段的A期—B期,压实作用和铁方解石胶结是造成孔隙减少的主要原因。尽管现有一些研究者已对长6储层的沉积特征、储层微观孔隙结构特征进行了分析,但并未对该研究区主控因素进行系统深入的分析。鉴于以上考量,本文选取悦乐地区延长组长6段为研究对象,在前人研究的基础上(任大忠等,2016;王朋等,2020;陈怡婷等,2020),综合岩心观察、扫描电镜、物性、高压压汞等数据,对长6段储集层的岩石组分特征、物性特征、孔隙类型以及储集层微观孔隙特征进行综合分析,并对主控因素进行分析,为研究区的油气勘探开发提供依据。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地形成于古生代时期,在华北稳

定克拉通盆地基础上演化而来的,面积共 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$,是中国第二大内陆沉积盆地(李德生,2004;郑荣才,2006)。内部富含丰富的石油、天然气、煤等矿产资源,目前已成为国内研究热点。鄂尔多斯盆地三叠系延长组从下向上可划分为长10—长1段。其中,长6段沉积期为湖盆萎缩阶段,湖盆中心仍处于三角洲—湖泊沉积环境。悦乐地区位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡的西南部,地处甘肃省华池县与庆城县境内,勘探面积大约为 2650 km^2 (图1)。区域上呈现出平缓西倾大单斜的构造特征,研究区内长6油层组地层厚度发育较为稳定,厚度大约为 $94.2 \sim 164.2 \text{ m}$,平均厚度为 117.7 m 。

2 储集层特征

2.1 储层岩石学特征

根据对研究区长6储层薄片鉴定资料表明,悦乐地区延长组长6段主要岩石类型为岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩,长石砂岩占比较少(图2)。在碎屑成分组成中,石英的质量分数为 $13.8\% \sim 61.2\%$,平均值为 40.54% ;长石的质量分数为 $9.4\% \sim 58.5\%$,平均值为 32.22% ;岩屑的质量分数为 $6.2\% \sim 41\%$,平均值为 27.24% 。岩屑多为变质岩岩屑,其次是沉积岩岩屑,岩浆岩岩屑占比最少(图3)。填隙物以胶结物为主,其质量分数为 $4.5\% \sim 44\%$,平均值为 16.24% ,杂基的占比较低。胶结物以伊利石、绿泥石、铁方解石和硅质胶结为主(图4)。

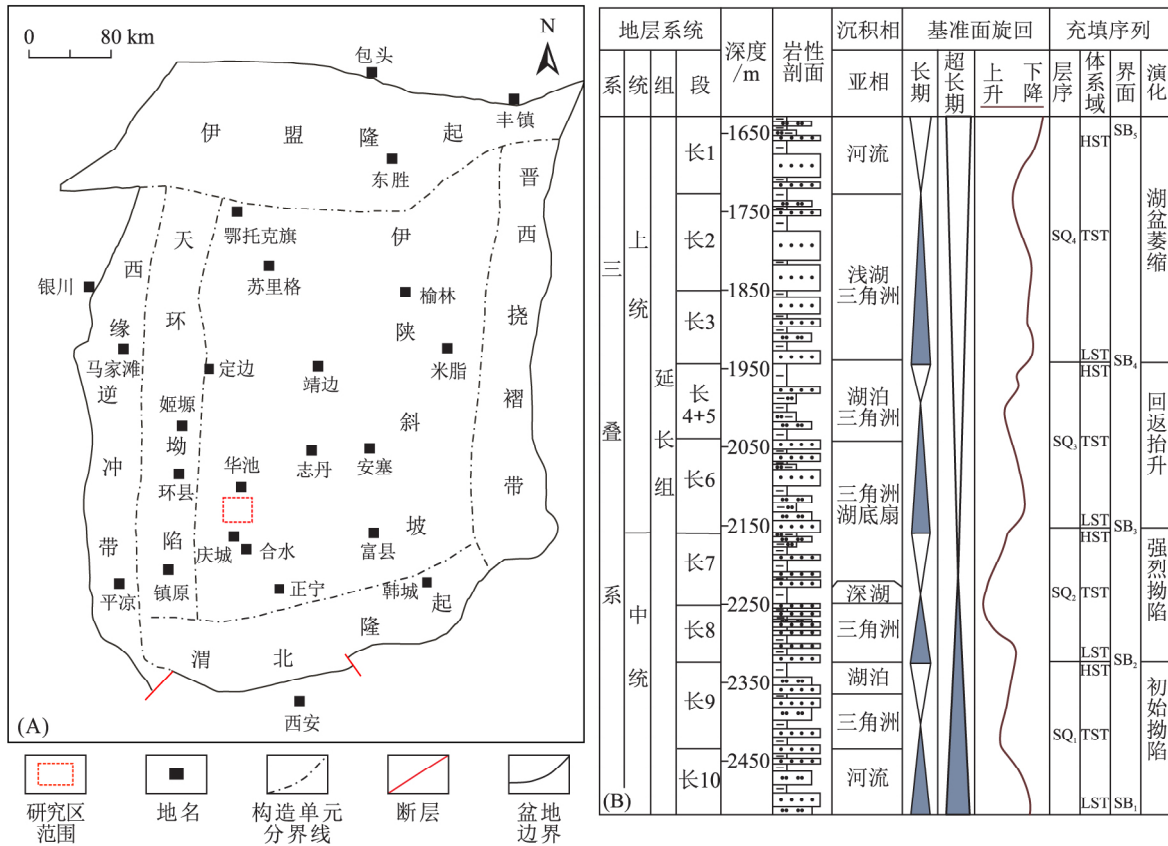


图 1 鄂尔多斯盆地悦乐地区位置及延长组地层柱状图
 Fig. 1 Location of the Yuele area and stratigraphic column of the Yanchang Formation in the Ordos Basin
 (A) 悦乐地区位置图; (B) 延长组地层柱状图

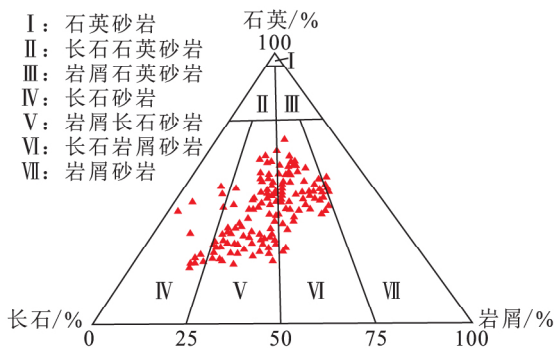


图 2 鄂尔多斯盆地悦乐地区长 6 段砂岩类型三角图
 Fig. 2 Triangulation of types of sandstone in the Chang 6 member in the Yuele area of the Ordos Basin

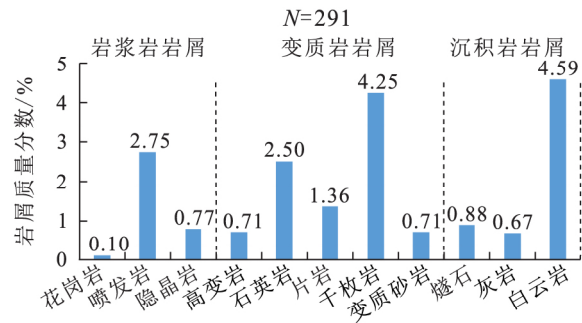


图 3 鄂尔多斯盆地悦乐地区长 6 段岩屑组成直方图
 Fig. 3 Histogram of rock chip content of the Chang 6 member in the Yuele area of the Ordos Basin

2.2 储层物性特征

储层物性可以反映储层质量的好坏,孔隙度是对储层储集性能的表现,而渗透率是对储层渗流能力大小的良好反映。通过对研究区长 6 段储集层物性测试数据统计分析,结果显示(图 5-A~B):长 6 段孔隙度值集中在 6%~14% 之间,均值为 9.27%;渗透率值主要以 $<0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为

主,平均值为 $0.142 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。根据现有的储层分类评价标准(赵靖舟等,2012),长 6 段属于典型的致密砂岩储层,整体表现为特低孔-超低渗储层。根据长 6 段储层孔渗相关性可知(图 5-C),长 6 储层孔隙度与渗透率呈现出较好的正相关关系,表明储层的储渗能力主要依赖于储层基质孔隙。

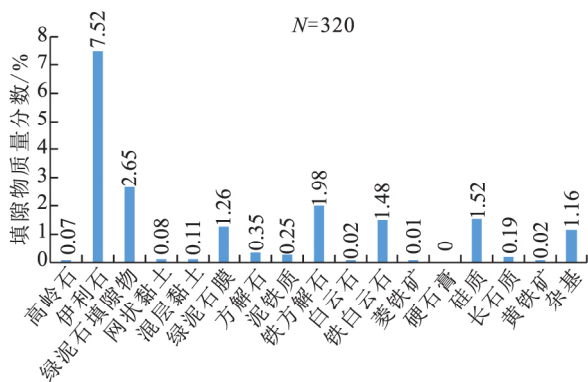


图 4 鄂尔多斯盆地悦乐地区长 6 段填隙物组成直方图
Fig. 4 Histogram of filler contents in the Chang 6 member in the Yuele area of the Ordos Basin

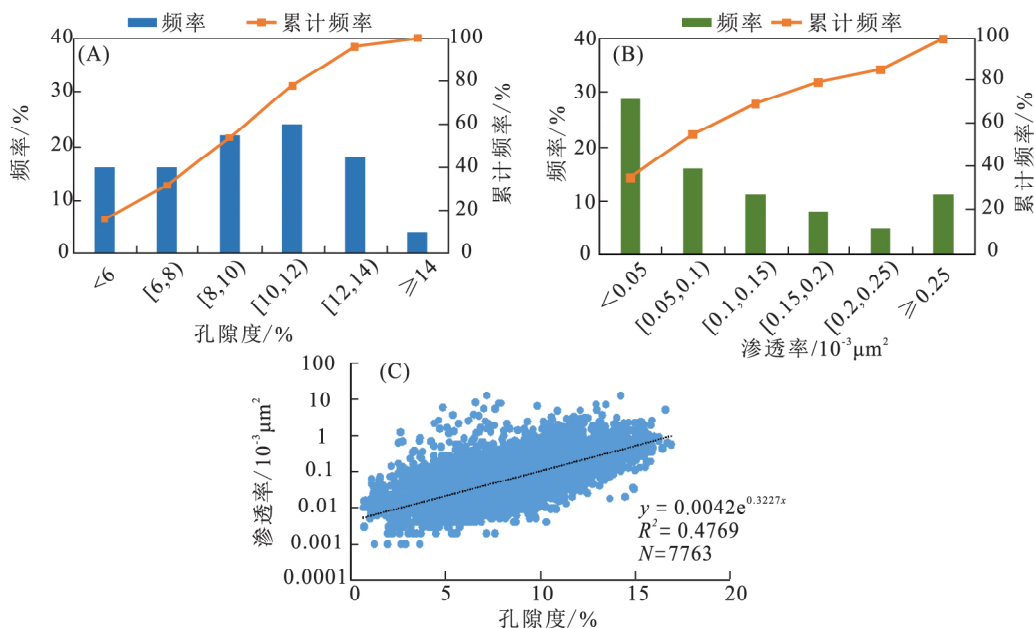


图 5 鄂尔多斯盆地悦乐地区长 6 段孔渗分布直方图
Fig. 5 Histogram of the distribution of seepage from pores in the Chang 6 member in the Yuele area of the Ordos Basin
(A) 孔隙度分布直方图; (B) 渗透率分布直方图; (C) 孔渗相关性图

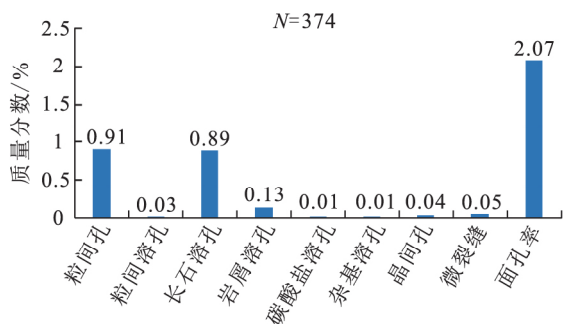


图 6 鄂尔多斯盆地悦乐地区长 6 段储集空间类型
Fig. 6 Types of storage spaces in the Chang 6 member in the Yuele area of the Ordos Basin

2.3 储层孔隙类型

通过对研究区岩石铸体薄片和扫描电镜的观察与分析,可知悦乐地区长 6 段储层的面孔率平均值为 2.07%,相对较低。孔隙类型主要包括粒间孔和溶蚀孔隙,晶间孔与微裂缝发育较少(图 6)。溶蚀孔隙以长石溶孔(0.89%)最为发育。粒间孔属于原生孔隙,为悦乐地区占比最高的孔隙类型(图 7-A~B)。溶蚀孔主要表现为储层中长石和杂基等不稳定组分的溶解,产生的大量次生孔隙使储集空间增大,储层物性提高(图 7-C~D);晶间孔主要赋存于高岭石矿物之间(图 7-E)。受地应力影响,储层岩石发生破裂并

形成微裂缝(图 7-F),微裂缝在岩石总孔隙度中所占的比例很小,但其对于改善储层具有重要的作用。喉道作为连通 2 个孔隙的狭窄通道对于储层的渗流能力起着决定性的影响(刘桂珍等, 2022)。悦乐地区长 6 储层主要喉道类型有受压实成因形成的片状喉道和受黏土矿物胶结成因的管束型喉道(图 7-A)。

2.4 储层微观孔隙结构特征

通过对研究区长 6 段压汞样品统计数据可以看出(表 1):排驱压力平均为 3.564 MPa;中值半径平均为 0.128 μm,主要为细孔喉;分选系数平

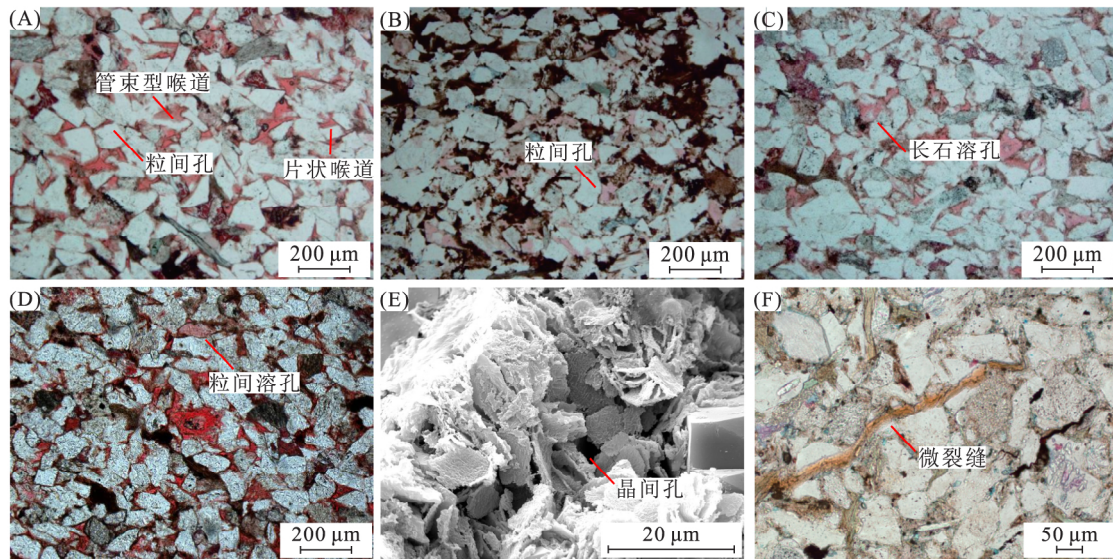


图 7 鄂尔多斯盆地悦乐地区长 6 段孔隙类型图

Fig. 7 Map of types of pores in the Chang 6 member in Yuele area of the Ordos Basin

(A) 粒间孔及片状、管束型喉道, B280, 1 892.44 m, 铸体薄片; (B) 粒间孔, B269, 1 900.6 m, 铸体薄片; (C) 长石粒内溶孔, B280, 1 851.23 m, 铸体薄片; (D) 粒间溶孔, B280, 1 851.23 m, 铸体薄片; (E) 高岭石晶间孔隙发育, Y436, 1 971.24 m, 扫描电镜; (F) 微裂缝, B143, 1 927.5 m, 铸体薄片

表 1 鄂尔多斯盆地悦乐地区长 6 段高压压汞参数统计表

Table 1 Parameters of high-pressure mercury injection in the Chang 6 member in the Yuele area of the Ordos Basin

层位	孔隙度/ %	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	排驱压力/ MPa	中值压力/ MPa	中值半径/ μm	分选 系数	变异 系数	歪度	最大 SHg/%	退汞 效率/%
最小值	5.30	0.007	0.060	1.13	0.020	0.573	0.041	-1.56	47.70	9.90
长 6 最大值	15.50	1.568	16.034	36.35	0.653	2.546	0.229	1.73	96.17	37.30
平均值	10.84	0.196	3.564	11.19	0.128	1.399	0.115	0.02	77.49	25.05

均为 1.399, 反映孔喉分布不均匀, 分选性差; 歪度为 0.02, 为粗歪度; 最大进汞饱和度 47.7%~96.17%, 平均为 77.493%, 退汞效率平均为 25.049%, 反映出长 6 段储层属于致密砂岩储层, 非均质性较强。根据储层孔隙结构分类评价标准(赵靖舟等, 2007), 可将研究区长 6 段储层的孔隙结构由好到差分为 I, II, III 三种类型: I 类孔隙结构压汞曲线呈现出明显的平台状特征, 孔隙度大于 10.7%, 渗透率一般大于 $0.156 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 孔喉分选性好, 分布均匀, 排驱压力较低(小于 1.2 MPa), 中值半径通常大于 $0.1 \mu\text{m}$, 退汞效率高于 22.2%(图 8-A)。而 II 类孔隙结构压汞曲线平台角度较 I 类孔隙结构大, 以细孔喉为主, 孔隙度一般在 8.7%~11.2% 之间, 渗透率介于 $(0.09 \sim 0.4) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间, 物性较 I 类孔隙结构差, 排驱压力在 1.5~3 MPa 之间, 中值半径大于 $0.07 \mu\text{m}$, 退汞效率高于 20.4%(图 8-B)。III 类孔隙结构压汞曲线平台角度更大, 孔喉连通

性差, 孔隙度处于 5%~12% 之间, 渗透率处于 $(0.02 \sim 0.3) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间, 中等—偏高排驱压力(2~12.85 MPa), 中值半径为 $0.03 \sim 0.3 \mu\text{m}$ (图 8-C)。总体上来看, 研究区储层以 II 类孔隙结构为主。

3 储层质量影响因素分析

低渗透储层的岩性是决定物性的关键因素, 而物性又是控制含油性的重要因素。其中储层岩性受沉积环境、成岩作用等多种因素共同影响(邓秀芹等, 2011; 时保宏等, 2019)。沉积作用对储层原生孔隙起着重要控制作用, 经过后期成岩作用改造, 储层碎屑矿物组成和孔隙结构发生了显著变化, 从而影响研究区长 6 油层组储层质量。

3.1 沉积环境

沉积环境决定了沉积类型, 沉积类型又影响储层孔隙的形成和演化。综合分析研究区内的薄片粒度统计、岩心描述、测井资料, 发现研究区长

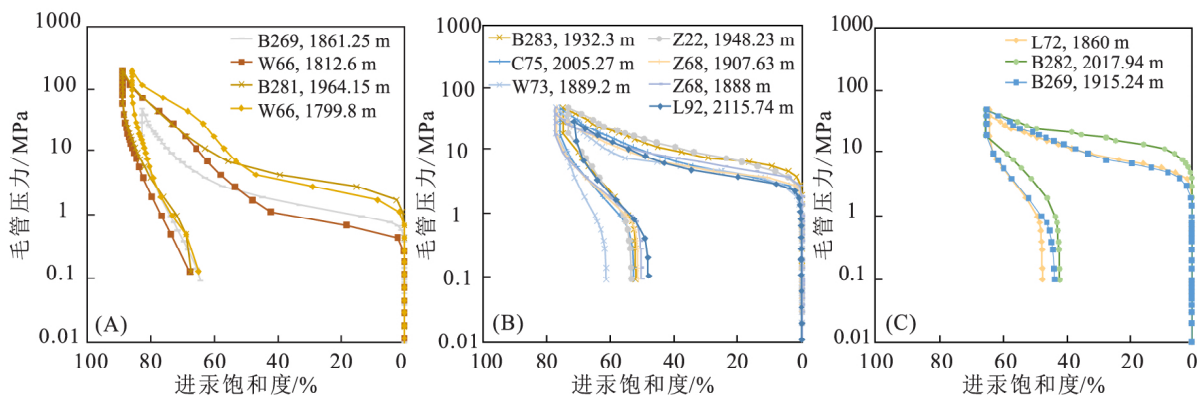


图 8 鄂尔多斯盆地悦乐地区长 6 储层压汞曲线

Fig. 8 Curve of mercury compression in the Chang 6 reservoir in the Yuele area of the Ordos Basin

(A) I 类孔隙结构; (B) II 类孔隙结构; (C) III 类孔隙结构

6 段储集层的粒径主要在 0.05~0.3 mm 之间, 颗粒分选中等, 磨圆较差, 表现为次棱角状, 颗粒之间主要通过点-线状接触和凹凸缝合线接触进行连接。根据岩心观察和测井曲线分析, 可见长 6 油层组主要发育灰黑色细砂岩(图 9-A), 块状砂岩(图 9-B), 滑塌变形构造、沟模和重荷模等同生变形构造(图 9-C~F), 这些特征反映了长 6 段形成于半深湖-深湖相沉积环境, 砂体受重力流沉积影响, 主要是由三角洲前缘砂质沉积物在斜坡上受重力等外界作用影响发生滑动而形成。研究区主要以砂质碎屑流、油流成因砂体为主(杨若

愚, 2020)。通过悦乐地区长 6 储层沉积-岩性-物性分析可知(图 10), 砂质碎屑流颗粒粒度较粗, 砂体厚度较大, 岩性主要为细砂岩, 自然伽马呈钟形或箱形, 物性相对较好, 孔隙度平均值为 9.34%, 渗透率平均值为 $0.27 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 是油气聚集的有利储集层; 油流沉积常以砂泥岩薄互层的形式出现, 砂体厚度较小, 主要为粉砂岩、泥质粉砂岩, 自然伽马曲线多呈锯齿状, 物性较差, 孔隙度和渗透率平均值分别为 7.9% 和 $0.14 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 11)。综上可知, 沉积作用奠定了悦乐地区长 6 段储层质量的基础。

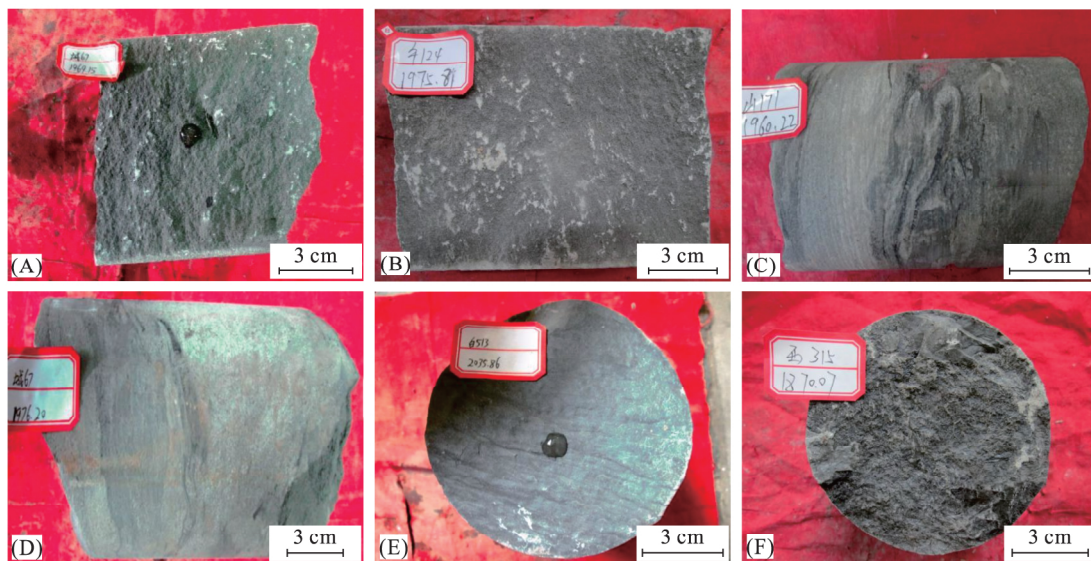


图 9 鄂尔多斯盆地悦乐地区长 6 段典型沉积构造

Fig. 9 Typical sedimentary structure of the Chang 6 member in the Yuele area of the Ordos Basin

(A) 灰黑色细砂岩, C67, 1 969.15 m; (B) 块状砂岩, W124, 1 975.81 m; (C) 滑塌变形构造, S171, 1 960.22 m; (D) 滑塌变形构造, C67, 1 962.05 m; (E) 沟模, B513, 2 035.86 m; (F) 重荷模, X315, 1 870.07 m

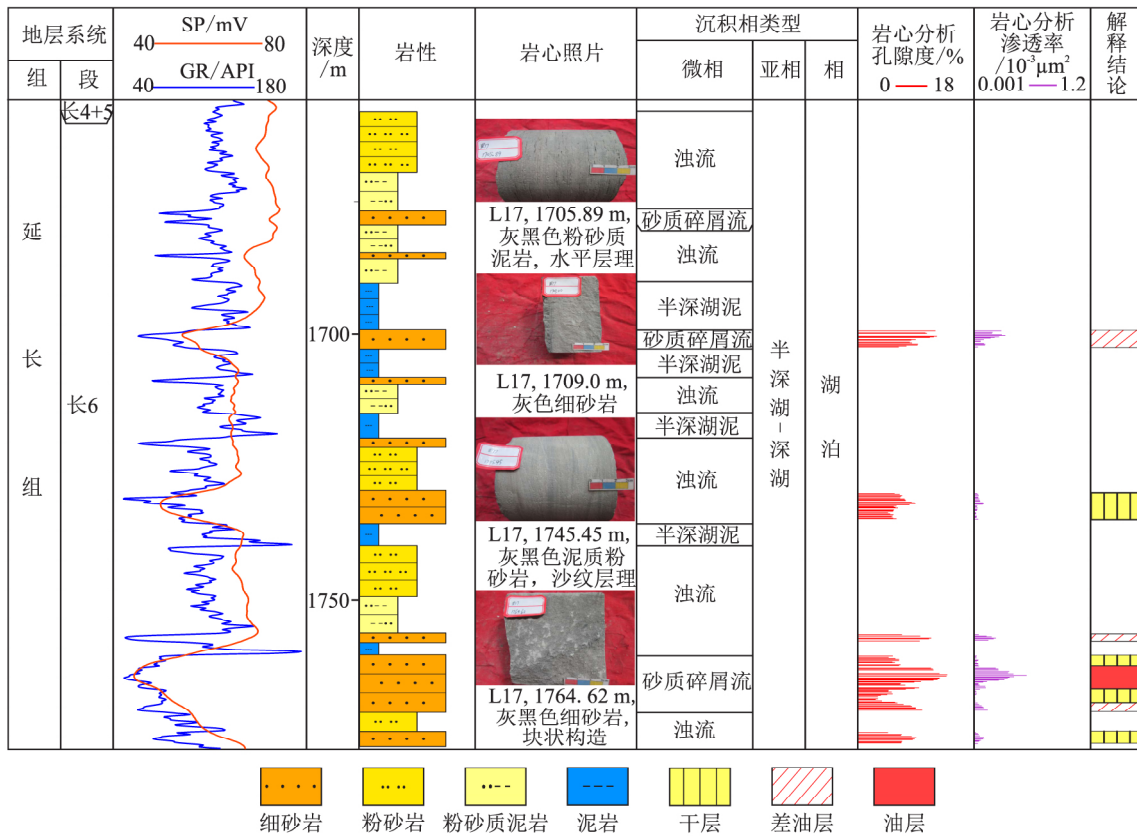


图 10 鄂尔多斯盆地悦乐地区 L17 井长 6 段沉积-岩性-物性关系

Fig. 10 Sedimentary-lithological-physical relationships in the Chang 6 member of well L17 in the Yuele area of the Ordos Basin

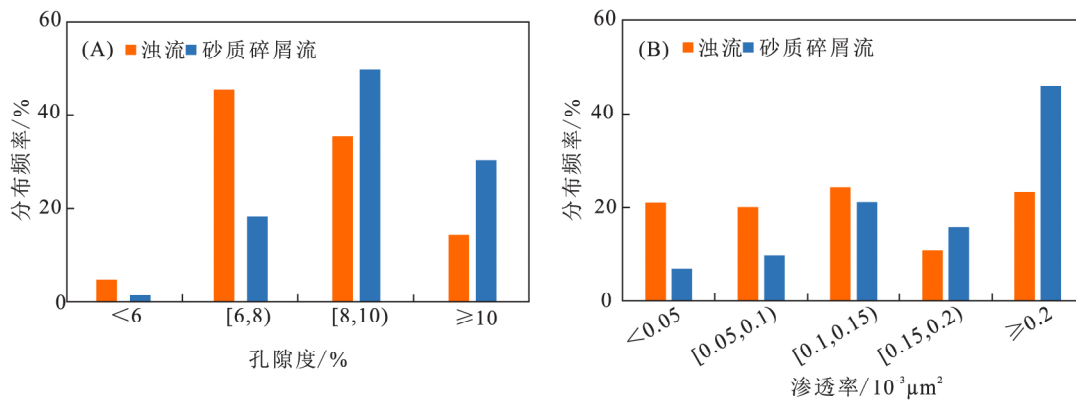


图 11 鄂尔多斯盆地悦乐地区长 6 段不同沉积成因储层孔渗分布直方图

Fig. 11 Histogram of distribution of pore permeability of reservoirs with different sedimentary geneses in the Chang 6 member of the Yuele area in the Ordos Basin

3.2 成岩作用

成岩作用是指岩石在其形成过程中经历一系列改变,包括改变原有矿物组成和岩石孔隙,进而影响岩石的物理性质和化学性质。这些变化可以导致储层的储集性能和孔喉结构的改变,从而对储层产生影响(陈刚等,2019;魏钦廉等,2021)。

成岩作用既可以促进储层的形成和发育,也可以破坏储层的储集性能。形成致密储层的重要因素之一是破坏性的作用,如压实和胶结作用,使储层原有孔隙度变小、渗透率大幅降低、连通性变差。建设性作用,例如溶蚀作用,可以有效提高储层的孔隙度和渗透率(白蕾等,2021)。

根据 Beard 所建立的经验公式 (Beard and Weyl, 1973):

$$\phi_0 = 20.91 + 22.90/S_0 \quad (1)$$

式中: ϕ_0 为原始孔隙度; S_0 为粒度分析中的分选系数, $S_0 = \sqrt{Q_2/Q_1}$, Q_1 表示概率累计曲线上

75%处颗粒直径; Q_2 表示概率累计曲线上 25%处颗粒直径。

通过计算得出长 6 段储集层的原始孔隙度为 46.60%, 并绘制悦乐地区长 6 段储集层的孔隙演化史分析 (图 12)。

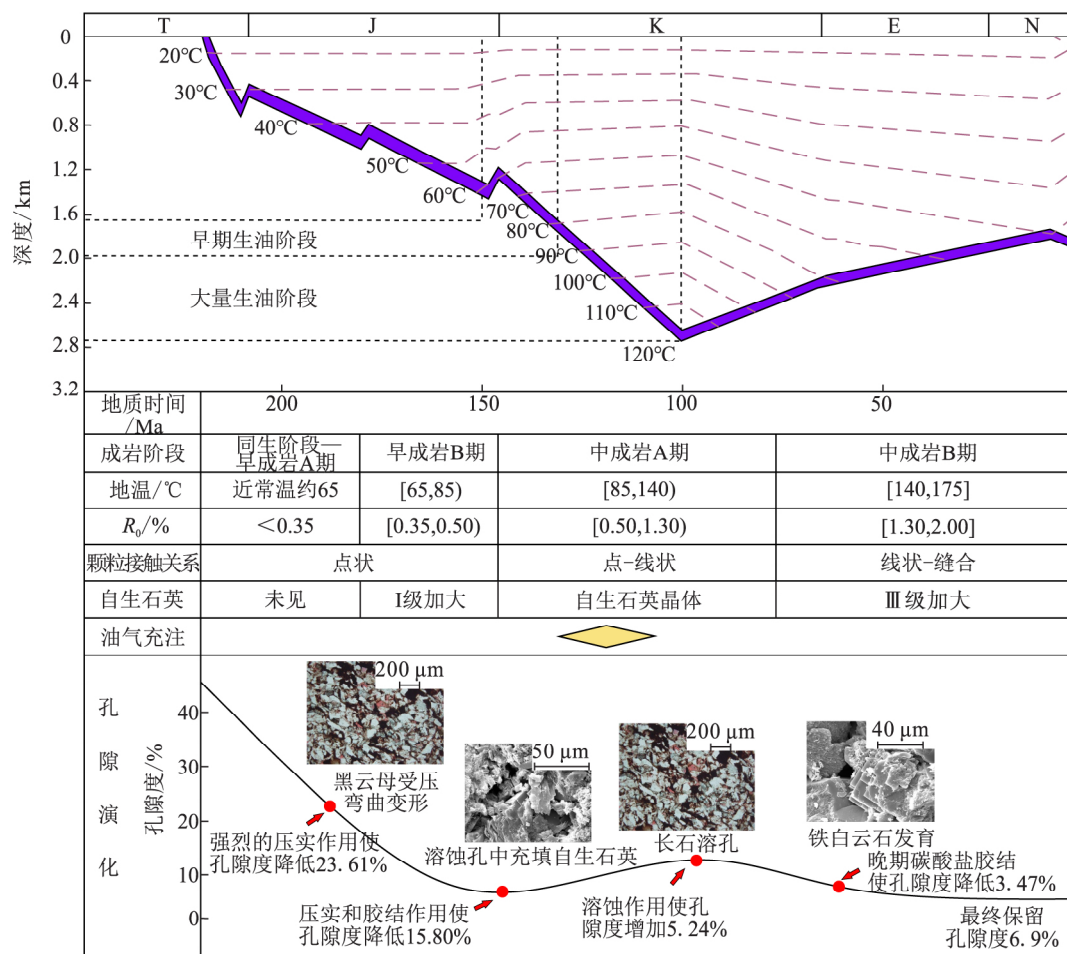


图 12 鄂尔多斯盆地悦乐地区长 6 段孔隙演化史

Fig. 12 Evolutionary history of pore spaces in the Chang 6 member of the Yuele area in the Ordos Basin

3.2.1 压实作用

压实作用主要发生在成岩早期。参考肖玲等 (2017)对压实作用损失孔隙度的计算公式:

$$\text{压实后剩余孔隙度} = \frac{\text{胶结物} + [\text{胶结物溶孔} + \text{粒间孔}]}{(\text{面孔率} \times \text{岩心分析孔隙度})} \quad (2)$$

$$\text{压实作用损失孔隙度} = \text{原始孔隙度} - \text{压实后剩余孔隙度}$$

由公式(2)计算得知:早期成岩阶段快速压实使长 6 段孔隙度损失 23.61% (图 12), 是导致长 6 储层砂岩原生孔隙减少的主要原因。压实作用主要表现为:石英、燧石和其他刚性颗粒在压实作

用下破裂并产生压溶现象,颗粒间呈线性或缝合接触 (图 13-A~B)。强烈的压实作用使储层孔隙度大幅度下降,破坏储层的储集性能。

3.2.2 胶结作用

胶结作用是将分散的碎屑颗粒或矿物固结为岩石,是导致储层致密化的另一重要因素 (Xiao et al., 2023)。胶结率是反映胶结作用强度的一项参数,通常胶结率定量表征胶结作用对砂岩孔隙的影响 (石良等, 2015)。依据前人 (袁艺, 2021)对胶结减孔量的计算公式:

$$\begin{aligned} \text{胶结率} &= \text{胶结物含量} / \text{原始孔隙度} \\ \text{胶结减孔量} &= \text{原始孔隙度} \times \text{胶结率} \end{aligned} \quad (3)$$

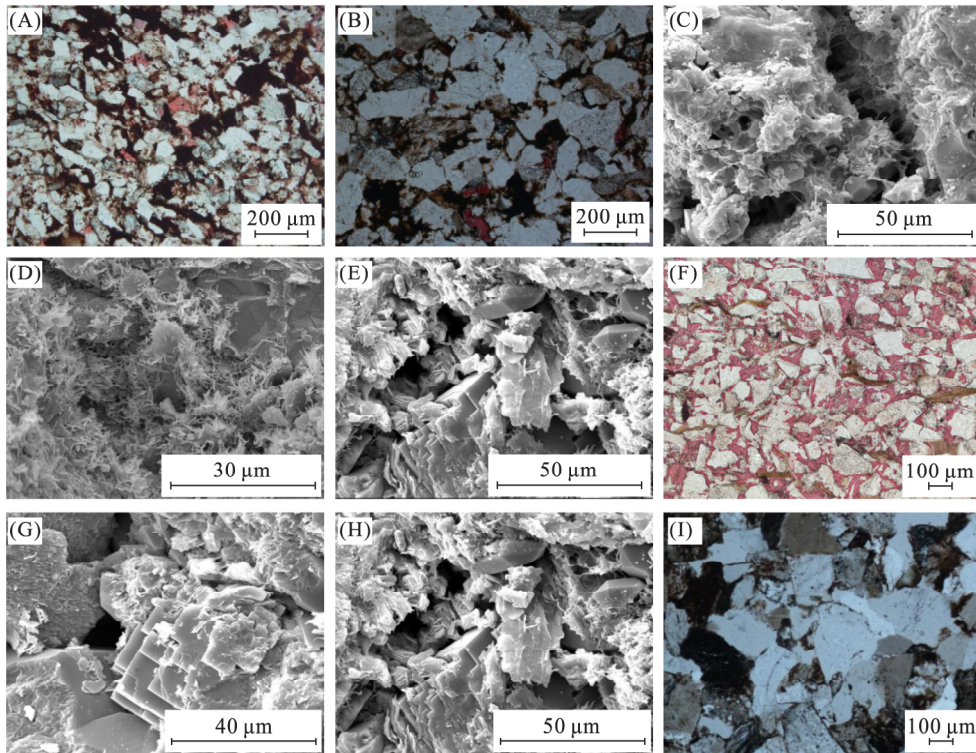


图 13 鄂尔多斯盆地悦乐地区长 6 段致密储集层填充物及成岩作用

Fig. 13 HiEffects of filler and diagenesis on the Chang 6 member of the dense reservoir in the Yuele area of the Ordos Basin

- (A) 黑云母受压弯曲变形, B281, 1 979. 2 m, 单偏光;
- (B) 颗粒间以线接触为主, L181, 1 948. 96 m, 单偏光;
- (C) 粒间孔隙间填充毛发状伊利石, S159, 2 100. 15 m, 扫描电镜;
- (D) 伊利石填充孔喉, Z74, 1 599. 93 m, 扫描电镜;
- (E) 叶片状绿泥石, S159, 2 100. 15 m, 扫描电镜;
- (F) 碳酸盐胶结, B143, 1 916. 47 m, 单偏光;
- (G) 铁白云石发育, Y436, 1 971. 24 m, 扫描电镜;
- (H) 溶蚀孔中充填自生石英, B159, 2 100. 15 m, 扫描电镜;
- (I) 石英次生加大边, B159 井, 2 100. 15 m, 单偏光

对悦乐地区长 6 储层的胶结率计算(图 14), 得知长 6 段储集层的胶结率平均值为 29. 9%, 长 6 储集层胶结减孔量为 13. 94%, 压实和胶结作用的复合作用, 使孔隙度降低至 7. 19%(图 12)。研究区胶结物类型丰富, 主要包括硅质、黏土矿物和碳酸盐岩胶结物 3 种。

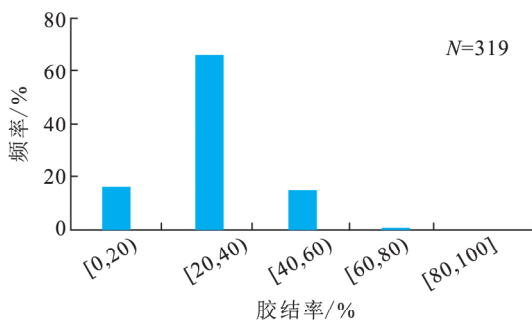


图 14 鄂尔多斯盆地悦乐地区长 6 段胶结率分布直方图
Fig. 14 Histogram of rate of distribution of cementation in the Chang 6 member of Yuele area in the Ordos Basin

(1) 黏土矿物胶结

研究表明, 研究区内黏土矿物以伊利石和绿泥石为主(图 13-C~D)。扫描电镜观察发现, 发现长 6 段储层中, 伊利石多呈毛发状的特征, 这类伊利石在颗粒表面呈平行附着状态或在孔喉中被高速流体冲刷破碎, 导致孔喉被堵塞, 降低储层的渗透率, 最终形成一套致密储层(Li et al., 2017)。根据统计数据, 长 6 段储层伊利石相对平均质量分数为 7. 52%, 并且伊利石的质量分数与储层面孔率呈负相关(图 15), 说明伊利石是造成长 6 储层致密化的主要胶结物。

研究区绿泥石胶结物通过扫描电镜观察发现, 绿泥石多以叶片状存在(图 13-E)。多项研究表明, 当颗粒表面有自生绿泥石膜存在, 可以有效地防止硅质胶结物和碳酸盐胶结物的生成, 提高储层的抗压实能力, 保护原生孔隙(赵俊兴等, 2009;程新虎等, 2012;田建锋等, 2014)。当绿泥

石的含量过多时会占据一定的孔隙空间,破坏颗粒间的原生孔隙,导致储层物性变差(图 15)。绿泥石的形成与岩浆岩岩屑的蚀变作用有关(姚泾利等,2011;魏钦廉等,2022),长 6 段岩浆岩岩屑平均质量分数为 3.62%,一定程度上有利于储层中绿泥石的形成,对改善储层物性具有一定积极作用。

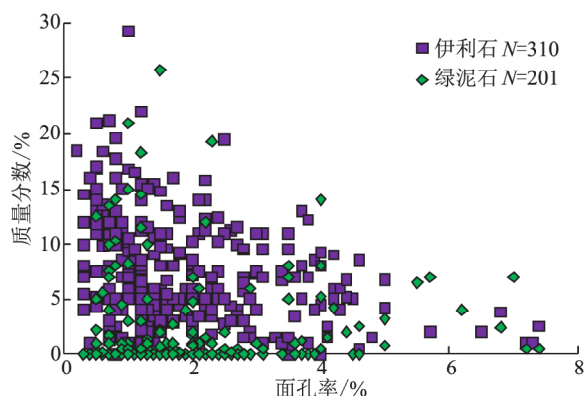


图 15 鄂尔多斯盆地悦乐地区长 6 段储集层面孔率与伊利石和绿泥石质量分数相关性

Fig. 15 Correlation between porosity of the face, and mass fractions of illite and chlorite in the reservoir of the Chang 6 member in Yuele area of the Ordos Basin

(2) 碳酸盐胶结

在长 6 段储层中,孔隙结构还受到碳酸盐胶结物的影响。悦乐地区碳酸盐胶结物主要类型包括方解石、铁白云石和铁方解石等。碳酸盐岩胶结物可以分为成岩阶段早晚两期,早期方解石胶结物充填于碎屑颗粒之间,堵塞原生孔隙,降低储层的物性(图 13-F)。中成岩期发生铁方解石和铁白云石胶结,使得孔隙进一步降低,储层更加致密化(图 13-G)。研究区长 6 段碳酸盐胶结物平均质量分数为 3.47%,碳酸盐胶结对悦乐地区长 6 储层孔隙的消极影响仅次于伊利石。

(3) 硅质胶结

硅质胶结物的形成,堵塞孔喉,减低储层物性,也是研究区砂岩储层致密化的另一主要原因(图 13-H~I)。硅质胶结物存在 2 种主要形式:一种是碎屑石英颗粒的次生加大边,次生加大边的形成使得石英颗粒呈凹凸缝合线状接触,进而堵塞喉道,降低储层的物性;另一种是指充填于孔隙中的自生石英,该种硅质胶结物通常分布于孔隙的边缘和粒内溶孔中,紧贴着颗粒成长。通过镜下观察,发现研究区长 6 储层中,石英次生加大

较为发育。

3.2.3 溶蚀作用

储层内孔隙水溶液可以溶解储层内不稳定的碎屑颗粒和胶结物,从而影响次生孔隙的发育,对于改善低孔低渗储层的物性具有重要的作用(尹鹤等,2022)。酸性流体通过孔隙、裂缝进入砂岩,对长石和岩屑等不稳定组分进行溶解(冯旭等,2016),形成了各种次生孔隙,包括粒内溶孔和粒间孔。

$$\text{溶蚀作用增加的孔隙度} = \text{岩心孔隙度} \times (\text{溶蚀孔隙度} / \text{面孔率}) \quad (4)$$

由公式(4),计算得出长 6 段溶蚀作用使孔隙度增加 5.24%,这种作用可有效改善储层孔隙结构。砂岩中的岩屑颗粒主要来源于岩浆岩和变质岩,根据对研究区长 6 段的岩石碎屑颗粒组分统计,长 6 段的变质岩岩屑和岩浆岩岩屑的平均质量分数为 6.97%和 2.53%。因此,长 6 段储层中的不稳定组分较易溶解,能够有效地改善储层的物性。

通过对研究区长 6 段孔隙演化分析(图 16),可以看出压实作用是导致长 6 储层致密,孔隙减少的主控因素;胶结作用是储层致密的关键,溶蚀作用一定程度上改善了储层孔隙结构。

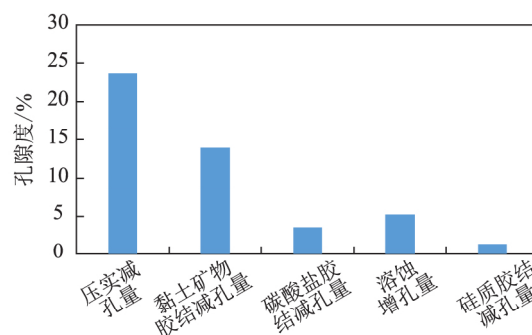


图 16 不同成岩作用对孔隙演化的影响

Fig. 16 Effects of different forms of diagenesis on pore evolution

4 结论

a. 鄂尔多斯盆地悦乐地区长 6 储层岩石类型以岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩为主。孔隙度平均值为 9.27%,渗透率平均值为 $0.142 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于特低孔-超低渗储层。

b. 悦乐地区长 6 储层孔隙类型以粒间孔和长石溶孔最为发育。孔隙结构主要为细孔喉,孔喉

分布不均匀,分选性差。依据储层孔隙结构分类评价标准,将研究区长6段储层孔隙结构由好到差依次分为Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ类,不同类型孔隙结构表现出一定差异性,研究区储层以Ⅱ类孔隙结构为主。

c. 沉积作用和成岩作用共同影响着储层的质量与分布。沉积作用是影响长6储层特征的主要因素,研究区以砂质碎屑流及浊流砂体为主,砂质碎屑流砂体物性较好,浊流砂体物性相对较差。成岩作用是造成长6段储层致密化重要因素。一方面破坏性的成岩作用为压实作用和胶结作用,其中,绿泥石胶结一定程度上可以改善储层的物性;另一方面建设性的成岩作用主要为溶蚀作用,对于改善研究区储层质量具有一定的积极作用。

[参 考 文 献]

- 白蓊,吴春燕,杜炜,等,2021.致密砂岩储层特征及控制因素——以鄂尔多斯盆地陕北地区长7和长10储层为例[J].西北大学学报(自然科学版),51(1):95-108.
- Bai R, Wu C Y, Du W, *et al.*, 2021. Characteristics and controlling factors of tight sandstone reservoirs: A case study of the Triassic Chang 7 and Chang 10 reservoirs in the Shanbei area, Ordos Basin[J]. Journal of Northwestern University (Natural Science Edition), 51(1):95-108. (in Chinese)
- 曹斌风,孙卫,2011.吴旗地区薛岔区块延长组长6砂岩储层成岩作用研究[J].天然气地球科学,22(6):951-960.
- Cao B F, Sun W, 2011. Diagenesis of Chang 6 Reservoirs in Xuecha Block of Wuqi area[J]. Natural Gas Geoscience, 22(6):951-960. (in Chinese)
- 陈刚,阚洪阁,陈登祺,等,2019.延113-延133井区山1、山2³储层特征及差异性研究[J].石油地质与工程,33(6):1-4.
- Chen G, Kan H G, Chen D Q, *et al.*, 2019. Reservoir characteristics and differential study of Shan 1 and Shan 2³ reservoirs in Yan113-Yan133 well blocks[J]. Petroleum Geology and Engineering, 33(6):1-4. (in Chinese)
- 陈怡婷,刘洛夫,王梦尧,等,2020.鄂尔多斯盆地西南部长6、长7储集层特征及控制因素[J].岩性油气藏,32(1):51-65.
- Chen Y T, Liu L F, Wang M Y, *et al.*, 2020. Characteristics and controlling factors of Chang 6 and Chang 7 reservoirs in the southwestern Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 32(1):51-65. (in Chinese)
- 程新虎,柳益群,陈巍巍,等,2012.鄂尔多斯盆地张家山区长8储集层成岩作用及有利相带[J].新疆石油地质,33(3):316-320.
- Cheng X H, Liu Y Q, Chen W W, *et al.*, 2012. Diagenesis and favorable facies of Chang-8 reservoir in Zhangjia-shan area in Ordos Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(3):316-320. (in Chinese)
- 邓秀芹,付金华,姚泾利,等,2011.鄂尔多斯盆地中及上三叠统延长组沉积相与油气勘探的突破[J].古地理学报,13(4):443-455.
- Deng X Q, Fu J H, Yao J L, *et al.*, 2011. Sedimentary facies of the Middle-Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin breakthrough in petroleum exploration [J]. Journal of Palaeogeography, 13(4):443-455. (in Chinese)
- 冯旭,刘洛夫,窦文超,等,2016.鄂尔多斯盆地西南部长7和长6₃致密砂岩成岩作用与成岩相[J].成都理工大学学报(自然科学版),43(4):476-486.
- Feng X, Liu L F, Dou W C, *et al.*, 2016. Diagenesis and diagenetic facies of the Chang 7 and Chang 6₃ tight sandstone in southwestern Ordos Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 43(4):476-486. (in Chinese)
- 李德生,2004.重新认识鄂尔多斯盆地油气地质学[J].石油勘探与开发,31(6):1-7.
- Li D S, 2004. Reconceptualizing oil and gas geology in the Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 31(6):1-7. (in Chinese)
- 李国欣,雷征东,董伟宏,等,2022.中国石油非常规油气开发进展、挑战与展望[J].中国石油勘探,27(1):1-11.
- Li G X, Lei Z D, Dong W H, *et al.*, 2022. Progress, challenges and prospects of unconventional oil and gas development of CNPC [J]. China Petroleum Exploration, 27(1):1-11. (in Chinese)
- 刘桂珍,王蓉,宿墨瀚,等,2022.湖盆深水砂岩成岩相及微观孔隙结构研究——以鄂尔多斯盆地黄陵地区延长组长6段为例[J].河北地质大学学报,45(5):23-31.
- Liu G Z, Wang R, Su M H, *et al.*, 2022. Diagenetic facies types and microscopic pore structure of deepwater sandstone—From Chang 6 member in Huangling area, Ordos Basin, NW China [J]. Journal of Hebei GEO University, 45(5):23-31. (in Chinese)
- 任大忠,孙卫,黄海,等,2016.鄂尔多斯盆地姬塬油田长6致密砂岩储层成因机理[J].地球科学,41(10):1735-1744.
- Ren D Z, Sun W, Huang H, *et al.*, 2016. Formation mechanism of Chang 6 tight sandstone reservoir in Jiyuan oilfield, Ordos Basin [J]. Earth Science, 41(10):1735-1744. (in Chinese)
- 时保宏,李荣堃,田雯,等,2019.鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组长9₁段储层差异性特征及成因[J].中国石油大学学报(自然科学版),43(4):1-10.
- Shi B H, Li R K, Tian W, *et al.*, 2019. Difference of char-

- acteristics and genetic of reservoirs in the Chang 9₁ of Yanchang Formation in Ji Yuan area, Ordos Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 43(4):1-10. (in Chinese)
- 石良, 金振奎, 闫伟, 等, 2015. 异常高压对储集层压实和胶结作用的影响——以渤海湾盆地渤中凹陷西北次凹为例[J]. 石油勘探与开发, 42(3):310-318.
- Shi L, Jin Z K, Yan W, *et al.*, 2015. Influence of overpressure on reservoir compaction and cementation: A case from northwestern subsag, Bozhong sag, Bohai Bay Basin, East China [J]. Petroleum Exploration and Development, 42(3):310-318. (in Chinese)
- 孙龙德, 邹才能, 贾爱林, 等, 2019. 中国致密油气发展特征与方向[J]. 石油勘探与开发, 46(6):1015-1026.
- Sun L D, Zou C N, Jia A L, *et al.*, 2019. Development characteristics and orientation of tight oil and gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 46(6):1015-1026. (in Chinese)
- 田建锋, 喻建, 张庆洲, 等, 2014. 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), 44(3):741-748.
- Tian J F, Yu J, Zhang Q Z, *et al.*, 2014. The pore-lining chlorite formation mechanism and its contribution to reservoir quality[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 44(3):741-748. (in Chinese)
- 王朋, 孙灵辉, 王核, 等, 2020. 鄂尔多斯盆地吴起地区延长组长 6 储层特征及其控制因素[J]. 岩性油气藏, 32(5):63-72.
- Wang P, Sun L H, Wang H, *et al.*, 2020. Reservoir characteristics and controlling factors of Chang 6 of Yanchang Formation in Wuqi area, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 32(5):63-72. (in Chinese)
- 魏钦廉, 崔改霞, 刘美荣, 等, 2021. 鄂尔多斯盆地西南部二叠系盒 8 下段储层特征及控制因素[J]. 岩性油气藏, 33(2):17-25.
- Wei Q L, Cui G X, Liu M R, *et al.*, 2021. Reservoir characteristics and controlling factors of the Permian lower He 8 member in southwestern Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 33(2):17-25. (in Chinese)
- 魏钦廉, 王翀, 刘军峰, 等, 2022. 鄂尔多斯盆地樊家川地区三叠系长 6₃ 储层特征及主控因素[J]. 岩性油气藏, 34(2):31-44.
- Wei Q L, Wang C H, Liu J F, *et al.*, 2022. Characteristics and main controlling factors of the Triassic Chang 6₃ reservoir in Fanjiachuan area, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 34(2):31-44. (in Chinese)
- 肖玲, 魏钦廉, 吕玉娟, 2017. 鄂尔多斯盆地南梁地区长 6 油层组储层致密化及优质储层主控因素研究[J]. 延安大学学报(自然科学版), 36(4):12-16.
- Xiao L, Wei Q L, Lv Y J, 2017. The reservoir densification and main controlling factors of high quality reservoirs of Chang 6 reservoir in Nanliang area, Ordos Basin [J]. Journal of Yan'an University (Natural Science Edition), 36(4):12-16. (in Chinese)
- 杨若愚, 2020. 鄂尔多斯盆地 YL 地区长 6 沉积微相及储层评价研究[D]. 西安: 西安石油大学档案馆.
- Yang R Y, 2020. A Study on Chang 6 Sedimentary Characteristics and Reservoir in the YL area, Ordos Basin [D]. Xi'an: The Archive of Xi'an Shiyou University. (in Chinese)
- 姚泾利, 王琪, 张瑞, 等, 2011. 鄂尔多斯盆地华庆地区延长组长 6 砂岩绿泥石膜的形成机理及其环境指示意义[J]. 沉积学报, 29(1):72-79.
- Yao J L, Wang Q, Zhang R, *et al.*, 2011. Forming mechanism and their environmental implications of chlorite-coatings in Chang 6 sandstone (Upper Triassic) of Hua-Qing area, Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 29(1):72-79. (in Chinese)
- 尹鹤, 苏静, 牛伟, 等, 2022. 玛西斜坡区百口泉组二段储层特征及物性控制因素[J]. 科学技术与工程, 22(23):10012-10021.
- Yin H, Su J, Niu W, *et al.*, 2022. Reservoir characteristics and controlling factors of physical property in second member of Baikouquan Formation in western slope of Mahu Sag [J]. Science Technology and Engineering, 22(23):10012-10021. (in Chinese)
- 袁艺, 2021. 东营凹陷博兴洼陷沙河街组滩坝砂岩成岩作用及孔隙演化研究[D]. 北京: 中国地质大学档案馆.
- Yuan Y, 2021. Study on the Diagenesis and Pore Evolution of Beach and Bar Sandstones of the Shahejie Formation in the Boxing Sag, Dongying Depression [D]. Beijing: The Archive of China University of Geosciences. (in Chinese)
- 赵靖舟, 白玉彬, 曹青, 等, 2012. 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, 33(6):811-827.
- Zhao J Z, Bai Y B, Cao Q, *et al.*, 2012. Quasi-continuous hydrocarbon accumulation: A new pattern for large tight sand oilfields in the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 33(6):811-827. (in Chinese)
- 赵靖舟, 吴少波, 武富礼, 2007. 论低渗透储层的分类与评价标准——以鄂尔多斯盆地为例[J]. 岩性油气藏, 19(3):28-31+53.
- Zhao J Z, Wu S B, Wu F L, 2007. The classification and evaluation criterion of low permeability reservoirs: An example from Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 19(3):28-31+53. (in Chinese)
- 赵俊兴, 黄德才, 罗媛, 等, 2009. 鄂尔多斯盆地南部长 6 段储层成岩作用特征[J]. 天然气工业, 29(3):34-37+133-134.

(下转第 560 页)

- systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society of London Special Publications, 42(1): 313–345.
- Tang L M, Chen H L, Dong C W, *et al.*, 2013. Middle Triassic post-orogenic extension on Hainan Island: Chronology and geochemistry constraints of bimodal intrusive rocks [J]. Science China Earth Sciences, 56(5): 783–793.
- Turner S J, Langmuir C H, 2022. Sediment and ocean crust both melt at subduction zones[J]. Earth and Planetary Science Letters, 584: 117424.
- Wang Y J, Qian X, Cawood P A, *et al.*, 2018. Closure of the East Paleotethyan Ocean and amalgamation of the Eastern Cimmerian and Southeast Asia continental fragments[J]. Earth-Science Reviews, 186: 195–230.
- White, William M, 2010. Oceanic island basalts and mantle plumes: The geochemical perspective[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 38(1): 133–160.
- Winchester J A, Floyd P A, 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 20(4): 325–343.
- Xiong F H, Liu Q, Hou M C, *et al.*, 2023. Petrogenesis of Neoproterozoic mafic dykes in western Yangtze Block, South China: Implications for the assembly and break-up of Rodinia [J]. International Geology Review, 65(14): 2191–2211.
- Zhang W, Hu Z C, 2020. Estimation of isotopic reference values for pure materials and geological reference materials[J]. Atomic Spectroscopy, 41(3): 93–102.
- Zhao J H, Zhou M F, Wu Y B, *et al.*, 2019. Coupled evolution of Neoproterozoic arc mafic magmatism and mantle wedge in the western margin of the South China Craton[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 174(4): 1–16.
- Zhu W G, Zhong H, Li X H, *et al.*, 2008. SHRIMP zircon U-Pb geochronology, elemental, and Nd isotopic geochemistry of the Neoproterozoic mafic dykes in the Yanbian area, SW China[J]. Precambrian Research, 164(1–2): 66–85.

(责任编辑:甘娟娟)



(上接第 542 页)

- Zhao J X, Huang D C, Luo Y, *et al.*, 2009. Diagenetic features of reservoirs in the Chang-6 member, south Ordos basin [J]. Natural Gas Industry, 29(3): 34–37+133–134. (in Chinese)
- 郑荣才, 文华国, 韩永林, 等, 2006. 鄂尔多斯盆地白豹地区长 6 油层组湖底滑塌浊积扇沉积特征及其研究意义 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 33(6): 566–575.
- Zheng R C, Wen H G, Han Y L, *et al.*, 2006. Discovery and significance of sublacustrine slump turbidite fans in Chang 6 oil-bearing formation of Baibao region in Ordos Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 33(6): 566–575. (in Chinese)
- 邹才能, 杨智, 董大忠, 等, 2022. 非常规源岩层系油气形成分布与前景展望[J]. 地球科学, 47(5): 1517–1533.
- Zou C N, Yang Z, Dong D Z, *et al.*, 2022. Formation, distribution and prospects of unconventional hydrocarbons in source rock strata in China[J]. Earth Science, 47(5): 1517–1533. (in Chinese)
- Beard D C, Weyl P K, 1973. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 57(2): 349–369.
- Li P, Zheng M, Bi H, *et al.*, 2017. Pore throat structure and fractal characteristics of tight oil sandstone: A case study in the Ordos Basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 149: 665–674.
- Xiao L, Bi L, Yi T, *et al.*, 2023. Pore structure characteristics and influencing factors of tight reservoirs controlled by different provenance systems: A case study of the Chang 7 members in Heshui and Xin'anbian of the Ordos Basin[J]. Energies, 16(8): 3410.

(责任编辑:黄维婷)