

渤海湾盆地济阳坳陷混合页岩成岩演化特征与 优质储层形成机制

——以民丰洼陷沙河街组四段上亚段纯上次亚段页岩为例

刘惠民^{1,2}, 张鹏飞^{1,2}, 李军亮^{1,3,4}, 滕建彬^{1,3,4,5}, 苗卓伟^{1,3,4,5}, 韩箫屿^{1,3,4,5}, 张 顺^{1,3,4,5},
李 博^{1,3,4,5}, 王伟庆^{1,3,4,5}, 赵浩坤^{1,3,4,5}

(1. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 山东 东营 257015; 2. 中国石化胜利油田分公司, 山东 东营 257000; 3. 中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015; 4. 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 山东 东营 257015; 5. 中国石化胜利油田分公司 油气储层微观机理与评价实验室, 山东 东营 257015)

摘要:渤海湾盆地济阳坳陷混合页岩成岩演化对孔隙发育的控制机理尚不明确,成岩作用分异和孔隙响应机制有待揭示。以民丰洼陷混合页岩为研究对象,综合运用岩矿、扫描电镜、核磁共振和低温氮气吸附等多种实验方法,运用岩石矿物分析、扫描电镜、核磁共振和低温氮气吸附等多种实验方法,研究了碳酸盐矿物、长英质矿物和黏土矿物的成岩-成储过程。研究表明:孔隙类型主要为石英粒间孔、方解石晶间孔、白云石晶间孔和黏土矿物片间孔。优质储层形成为骨架结构、自生矿物支撑保孔、溶蚀扩孔和超压流体保孔4个阶段。①早成岩A₁期—A₂期,泥晶方解石弱溶蚀-重结晶,形成毫米纹层骨架,奠定保孔基底。②早成岩A₂期—中成岩A₁期,钾长石溶蚀供K⁺驱动伊/蒙混层向伊利石转化,释放SiO₂,沉淀自生石英,局部形成自生石英刚性支撑架构。③中成岩A₁期—A₂期,有机酸溶蚀方解石与长石,扩大孔径,改善页岩储集性。④中成岩B₁期—B₂期,超压流体支撑孔隙并诱发微裂缝,连通孤立孔喉。这4个阶段逐级递进,从刚性骨架搭建到孔隙支撑强化,再到溶蚀扩孔,叠加超压流体保孔效应,完整揭示了研究区“页岩储层成岩演化—孔隙发育—储集性能提升”的过程和机理。

关键词:成岩演化;混合页岩;页岩油;民丰洼陷;济阳坳陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE121.3 **文献标识码:**A

Diagenetic evolution and formation mechanisms of high-quality shale reservoirs for mixed shales in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin: A case study of shales in the Chunshang interval of the upper sub-member of the 4th member of the Shahejie Formation, Minfeng Sub-sag

LIU Huimin^{1,2}, ZHANG Pengfei^{1,2}, LI Junliang^{1,3,4}, TENG Jianbin^{1,3,4,5}, MIAO Zhuowei^{1,3,4,5}, HAN Xiaoyu^{1,3,4,5},
ZHANG Shun^{1,3,4,5}, LI Bo^{1,3,4,5}, WANG Weiqing^{1,3,4,5}, ZHAO Haokun^{1,3,4,5}

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Efficient Development, Dongying, Shandong 257015, China; 2. Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China; 3. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China; 4. Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production Technology, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China; 5. Laboratory of Microscopic Mechanisms and Evaluation of Hydrocarbon Reservoirs, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: For mixed shales occurring in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, the controlling mechanisms of their diagenetic evolution over pore development remain poorly understood, and their diagenetic differentiation and corresponding pore response mechanisms have yet to be revealed. In this study, we investigate the mixed shales in the

收稿日期:2025-11-02;修回日期:2026-02-02。

第一作者简介:刘惠民(1969—),男,博士、教授级高级工程师,油气勘探研究与管理。E-mail:hmlu@vip.163.com。

通信作者简介:滕建彬(1980—),男,博士、研究员,石油地质与地球化学。E-mail:tengjianbin_slyt@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2024ZD1400105);中国石化科技攻关项目(KLP25024)。

Minfeng Sub-sag, Jiyang Depression. Using multiple experimental methods, including petrographic and mineralogical analysis, scanning electron microscopy (SEM), nuclear magnetic resonance (NMR), and low-temperature nitrogen adsorption, we investigate the diagenetic and reservoir-formation processes of carbonate, felsic, and clay minerals. The results indicate that primary pores in the mixed shales include intergranular pores of quartz, intercrystalline pores of calcites and dolomites, and clay interlayer pores. Four evolutionary stages for the formation of high-quality reservoirs are proposed: framework building, authigenic mineral-supported pore preservation, dissolution-induced porosity enhancement, and overpressure-preserved porosity. Specifically, during the early diagenetic stages A_1 – A_2 , the weak dissolution and recrystallization of micritic calcites contribute to the formation of millimeter-scale lamellar frameworks, providing a structural basis for pore preservation. Subsequently, from the early diagenetic stage A_2 to the middle diagenetic stage A_1 , K^+ released from the dissolution of K-feldspars facilitates the transformation of mixed illite-montmorillonite into illite, leading to the release of SiO_2 and the precipitation of authigenic quartz. Consequently, rigid frameworks supported by authigenic quartz are formed locally. During the middle diagenetic stages A_1 – A_2 , calcites and feldspars are dissolved by organic acids, contributing to increased pore sizes and improved reservoir properties. Afterward, during the middle diagenetic stages B_1 – B_2 , overpressured fluids sustain pores and induce microfractures, thereby connecting isolated pore throats. These four progressive stages, namely rigid framework building, pore support and enhancement, dissolution-induced porosity enhancement, and overpressure-preserved porosity, completely reveal the mechanisms behind the diagenetic evolution of reservoirs, pore development, and reservoir property enhancement for shales in the study area.

Key words: diagenetic evolution, mixed shale, shale oil, Minfeng Sub-sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

引用格式:刘惠民,张鹏飞,李军亮,等.渤海湾盆地济阳坳陷混合页岩成岩演化特征与优质储层形成机制——以民丰洼陷沙河街组四段上亚段纯上次亚段页岩为例[J].石油与天然气地质,2026,47(3):811–826. DOI:10.11743/ogg20260307.

LIU Huimin, ZHANG Pengfei, LI Junliang, et al. Diagenetic evolution and formation mechanisms of high-quality shale reservoirs for mixed shales in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin: A case study of shales in the Chunshang interval of the upper sub-member of the 4th member of the Shahejie Formation, Minfeng Sub-sag[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(3): 811–826. DOI: 10.11743/ogg20260307.

中国非常规油气资源储量丰富,开发潜力巨大。页岩油气作为重要的战略资源,已受到广泛关注^[1–11]。济阳坳陷是中国重要的含油气盆地之一,其页岩油资源具有显著勘探开发价值^[12–15]。近年来,中国页岩油气勘探开发取得系列重要进展:四川盆地等地区的页岩气已实现规模化商业开发^[16–22];松辽盆地古龙页岩和济阳坳陷页岩油亦取得重大勘探突破,展现出总有有机碳含量(TOC)高(2%~10%),干酪根类型以Ⅰ–Ⅱ型为主,脆性矿物含量大于50%,页理缝发育,高异常压力(压力系数1.3~1.7),以及原油以中质–轻质油为主等特征。

其中,古龙页岩发育于白垩系嫩江组,镜质体反射率(R_o)介于0.8%~1.4%,长英质含量高,黏土矿物含量低(<30%),油质轻(相对密度35~45 °API),且连续厚度大(50~200 m)。相比之下,济阳坳陷页岩属于古近系沙河街组,时代较新, R_o 介于0.7%~1.1%,碳酸盐矿物含量高(30%~50%),油质相对略重(相对密度30~38 °API),连续厚度大(30~280 m),且纵向发育多个甜点段。目前,关于陆相湖盆复杂地质特征的页

岩油气地质理论研究仍处于起步阶段,尤其在页岩油富集、赋存机理和影响因素等方面的理论有待进一步完善^[23–34]。因此,深化济阳坳陷页岩油勘探开发研究,不仅有助于优化中国能源结构,也可非常规油气资源高效开发提供理论和技术支持^[35–36]。

济阳坳陷页岩具有沉积厚度大、分布面积广、洼陷多和层位多等特点,展现出良好的页岩油勘探前景^[12]。前人研究表明,页岩储层的成岩作用类型复杂多样,其中压实作用和矿物转化作用对储层的物质组分、结构、孔隙特征、物理性质和含油性均有显著影响^[37–39]。当前研究多聚焦于成岩作用过程中物质组分的演化、孔隙与物性变化,以及结构和力学性质的转变,并对部分影响因素进行了初步探讨^[37–44]。然而,随着研究的不断深入,页岩储层成岩作用在以下3个方面仍需进一步深化:①“岩相分异—成岩递进—储集优化”的级联式演化序列尚未被充分揭示;②岩相分异背景下多矿物体系的“溶蚀—沉淀—转化”过程及其孔隙发育响应机制尚不明晰;③岩相—成岩相组合制约下的差异成储过程机理与理尚不明确。

为此,本文以济阳坳陷混合页岩为研究对象,综合运用X射线衍射全岩矿物分析、氩离子抛光-场发射扫描电镜、能谱分析、岩石薄片显微观察、低温氮气吸附、核磁共振和高压压汞等多种实验技术,系统开展成岩作用研究,揭示其成岩演化特征,并探讨优质储层的形成机制。通过深入研究成岩作用,深化对页岩储层发育规律的理解,从而为页岩油高效开发提供科学依据。

1 区域地质背景

民丰洼陷位于渤海湾盆地东营凹陷北部陡坡带东段,北邻陈家庄凸起,南接中央隆起带,整体呈现“两梁、两洼、两坡”的东西向构造格局^[12,23]。页岩油勘探开发的目的是层为沙(沙河街组)四段上亚段纯下次亚段和纯上次亚段页岩,埋深介于2 250~4 350 m, R_o 介于0.5%~1.1%。受陆源输入影响,民丰洼陷页岩岩相在纵向上呈继承性发育特征,平面上自北向南依次为长英页岩(局部夹砂岩条带)、混合页岩(可进一步分为碳酸盐质混合页岩、长英质混合页岩和黏土质混合页岩)和碳酸盐页岩(图1)。

2 混合页岩的岩石学特征

2.1 岩石结构与构造

碳酸盐质混合页岩和长英质混合页岩具有不同的岩石结构和构造特征,其中最常见的沉积构造类型为水平层理和透镜状层理,不同岩相之间的差异主要体现在为沉积组构的不同。

在民丰洼陷的混合页岩中,水平层理主要形成于水动力较弱的静稳环境,单层厚度多为微米至毫米级。透镜状层理反映轻微的水动力扰动。在混合页岩中,该类层理常表现为层面上的波状起伏痕迹,指示沉积环境具有一定的水动力条件,但尚不足以形成明显的交错层理。具体而言,碳酸盐质混合页岩主要发育水平层理和透镜状层理;长英质混合页岩受较强水动力影响,其长英质矿物多呈“悬浮状”分散分布于泥质纹层中(图2)。

2.2 单井岩相占比

X射线衍射(XRD)结果表明,民丰洼陷页岩以黏土矿物、石英、方解石和白云石为主,长石含量相对较低,另伴生少量黄铁矿(表1)。岩相统计显示,碳酸盐质混合页岩在多数井中占比最高。

X射线衍射全岩矿物分析结果表明,MFY1HF井页岩中的碳酸盐矿物含量介于8.0%~60.0%(平均值为38.8%),黏土矿物含量介于17.0%~42.0%(平均值为28.7%),长英质矿物含量介于19.0%~44.0%(平均值为29.4%)(表1)。MFY1-1HF井导眼段页岩中的碳酸盐矿物含量介于10.0%~83.0%(平均值为35.8%),黏土矿物含量介于11.0%~49.0%(平均值为30.5%),长英质矿物含量介于5.0%~54.0%(平均值为30.3%)(表1)。

在碳酸盐页岩(如MF112井)中,碳酸盐矿物平均含量超过50%,占绝对优势;在长英页岩(夹砂岩条带,如MFS1井)中,长英质矿物平均含量为45%,占主导地位;在混合页岩中,3类矿物的比例相对平衡,灰质平均含量为35%。

结合岩石薄片显微观察,研究层段主要发育混合页岩和碳酸盐页岩,少量发育长英页岩(图3)。混合页岩中又以碳酸盐质混合页岩和长英质混合页岩为主。进一步分析表明,碳酸盐质混合页岩中碳酸盐矿物、长英质矿物和黏土矿物的含量比值约为4:3:3,而黏土质混合页岩中三者的比值约为3:3:4。

在混合页岩中,碳酸盐质混合页岩占比最大。例如,MFSX102井、MFY1HF井和MFX143井的混合页岩中碳酸盐质混合页岩占比分别为50.00%,66.00%和70.37%(图4)。MFY101HF井的混合页岩中碳酸盐质混合页岩占比虽仅为27.14%,但其碳酸盐页岩占比达50.00%,整体上碳酸盐矿物含量相对更高。

3 混合页岩的孔-缝体系与物性特征

3.1 微裂缝特征

岩心观察和岩石薄片分析结果显示,混合页岩中普遍发育网状缝,其中以高角度缝为主,并与水平层理缝明显交错。部分微裂缝切穿不同纹层,宽度多集中于微米级,长度主要为厘米至分米级(图5)。纹层内常见由生烃增压作用形成的超压流体微裂缝,形态呈不规则或蛇曲状,宽度介于1~5 μm ,延伸长度介于5~100 μm 。此类微裂缝多沿较大矿物颗粒和有机质边缘发育,缝内常充填胶质沥青原油,且缝面未见明显纹层错断现象(图6)。

3.2 孔隙类型与特征

混合页岩的主要孔隙类型受纹层产状、矿物类型和接触关系等因素的综合影响。泥质纹层主要发育长

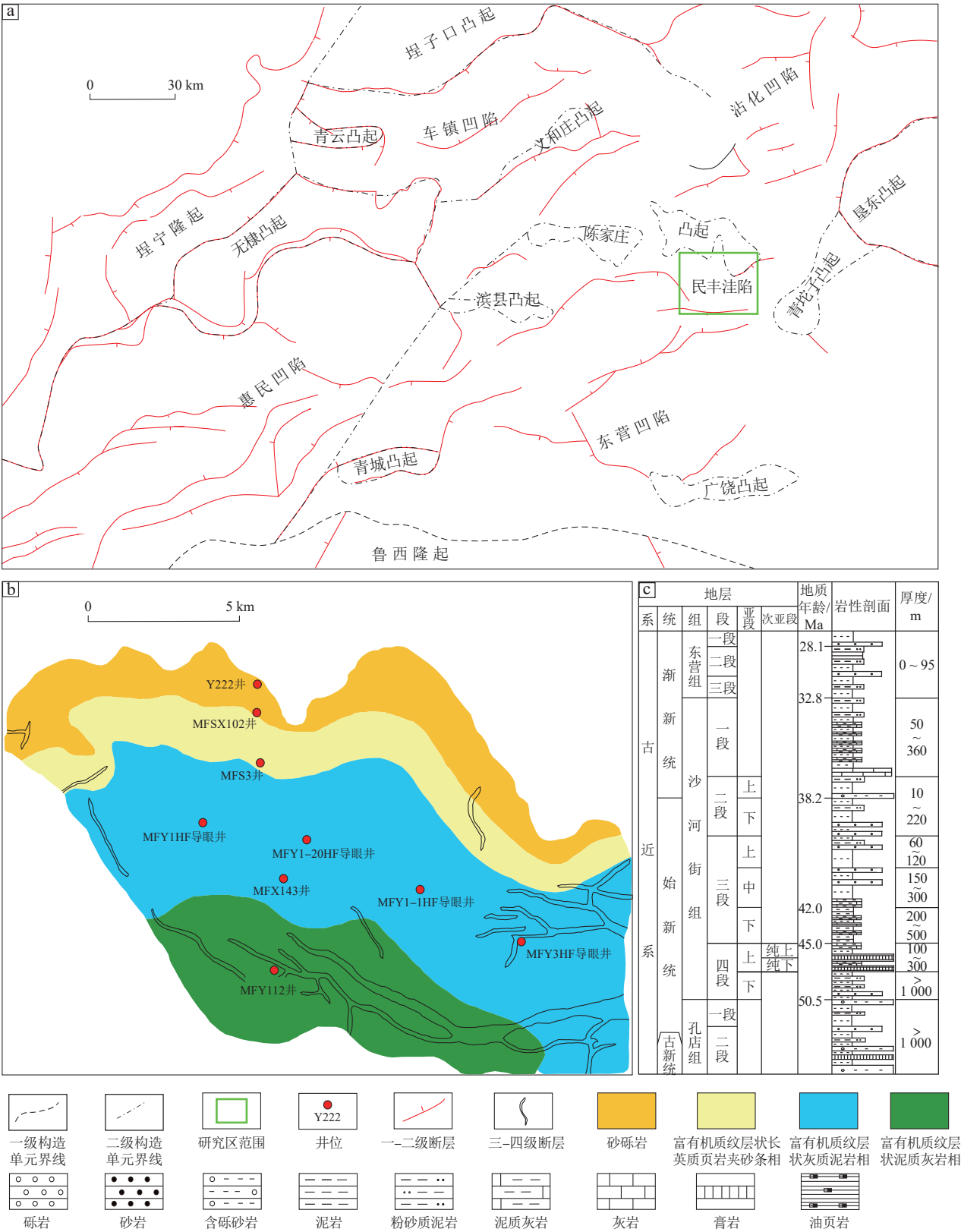


图1 渤海湾盆地济阳凹陷民丰洼陷构造单元及页岩岩相分布特征

Fig. 1 Tectonic units and shale lithofacies distribution characteristics of Minfeng Subsag in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. 济阳凹陷构造与研究区位置; b. 民丰洼陷页岩岩相平面分布; c. 民丰洼陷地层综合柱状图

英质碎屑粒间孔和粒间残余孔,多为复合型孔隙。其中,粒间残余孔常充填有黏土矿物、黄铁矿、自生石英

和有机质等,属于复合型孔隙。整体而言,无机孔隙在总孔隙中占比超过90%,以石英粒间孔、方解石晶间孔

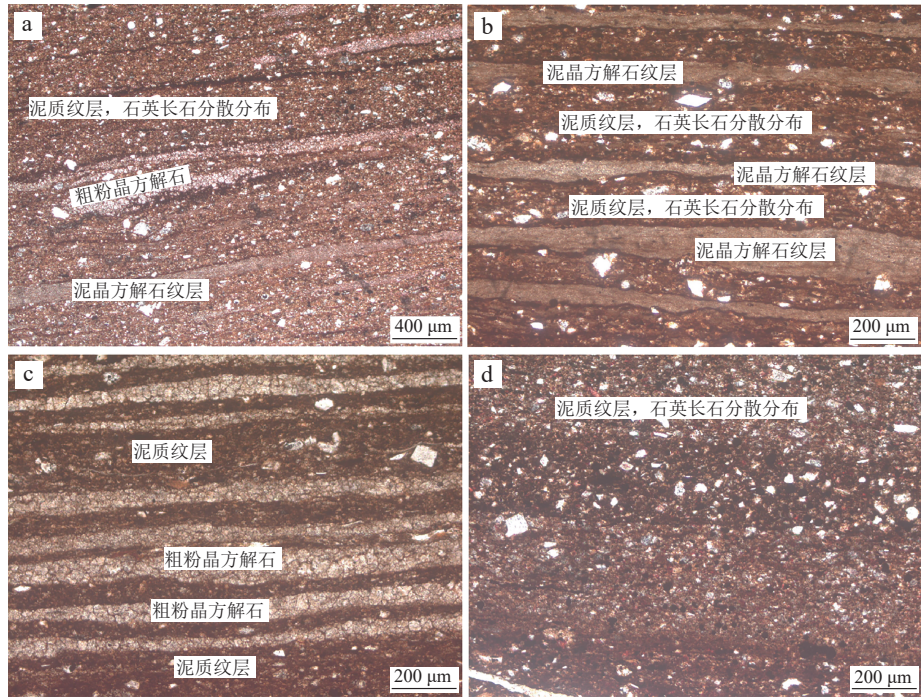


图2 渤海湾盆地济阳坳陷民丰洼陷MFY1HF井沙四上亚段纯上次亚段页岩沉积构造特征显微照片(普通薄片,单偏光)

Fig. 2 Microphotographs (thin section, plane-polarized light) of sedimentary structure characteristics of shale in the upper $E_2s_4^{(CS)}$ Member of Wells MFY1HF in Minfeng sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. 碳酸盐质混合页岩,粉-细晶方解石纹层被泥质纹层夹持,MFY1HF井,埋深3 579.20 m;b. 碳酸盐质混合页岩,泥晶方解石和泥质互层,MFY1HF井,埋深3 622.83 m;c. 碳酸盐页岩,泥质纹层与层状粗粉晶方解石纹层互层,MFY1HF井,埋深3 593.51 m;d. 长英页岩,有机质、泥质和泥晶方解石混杂,显微水平层理,MFY1HF井,埋深3 784.20 m

表1 渤海湾盆地济阳坳陷民丰洼陷MFY1HF井和MFY1-1HF井沙四上亚段纯上次亚段3层组页岩岩相类型与矿物含量分布
Table 1 Mineral compositions of shales in the 3rd bed of the Chunshang interval of the upper sub-member of the Sha 4 Member in wells MFY1HF and MFY1-1HF, Minfeng Sub-sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

井号	矿物组分含量/%					伊/蒙间层比/%
	碳酸盐矿物	长英质矿物	黏土矿物	伊利石	伊/蒙混层	
MFY1HF	8.0 ~ 60.0/38.8	19.0 ~ 44.0/29.4	17.0 ~ 42.0/28.7	89.0 ~ 100.0/97.5	0 ~ 8.0/1.9	20.0
MFY1-1HF	10.0 ~ 83.0/35.8	5.0 ~ 54.0/30.3	11.0 ~ 49.0/30.5	74.0 ~ 100.0/96.8	0 ~ 26.0/3.2	20.0

注:表中数据格式为“最小值~最大值/平均值”。

(图7a)、白云石晶间孔(图7b)、解理缝(图7c)、黏土矿物片间孔(图7d)和方解石晶内溶蚀孔最为常见。

3.3 孔径与物性特征

本次实验选取两块典型样品,分别为碳酸盐质混合页岩和黏土质混合页岩。样品岩心直径为25 mm、长度为50 mm,岩性完整,纹层清晰,无明显裂隙和风化损伤。岩心观察与薄片镜下鉴定显示,样品中碳酸盐矿物纹层(以方解石为主)与泥质纹层呈互层状,单层厚度介于0.2~1.5 mm。

在样品预处理阶段,采用高精度岩心切割仪沿纹层界面进行剥离,剥离过程中以显微镜实时观察,确保分离后的纹层纯度不低于95%。将剥离后的纹层样品

加工为直径10 mm、长度20 mm的标准圆柱样,置于60℃真空干燥箱中烘干48 h,以消除孔隙水干扰,随后进行抽真空饱和水处理(饱和时间为24 h),确保孔隙完全被水填充。

核磁共振实验采用MacroMR12-150H-I纽迈PQ001型低场核磁共振成像分析仪。该仪器磁场强度为0.35 T,质子共振频率为121 MHz,适配页岩微孔隙分析需求。实验采用Carr-Purcell-Meiboom-Gill(CPMG)序列采集弛豫时间(T_2)信号,设置回波时间为0.2 ms和15.0 ms以精准捕捉微小孔隙信号,回波个数为120 000,扫描次数为8次,确保信号信/噪比覆盖长弛豫时间范围。根据核磁共振原理, T_2 与孔隙半径正相关。结合岩样孔隙流体(水)的表面弛豫特性,提

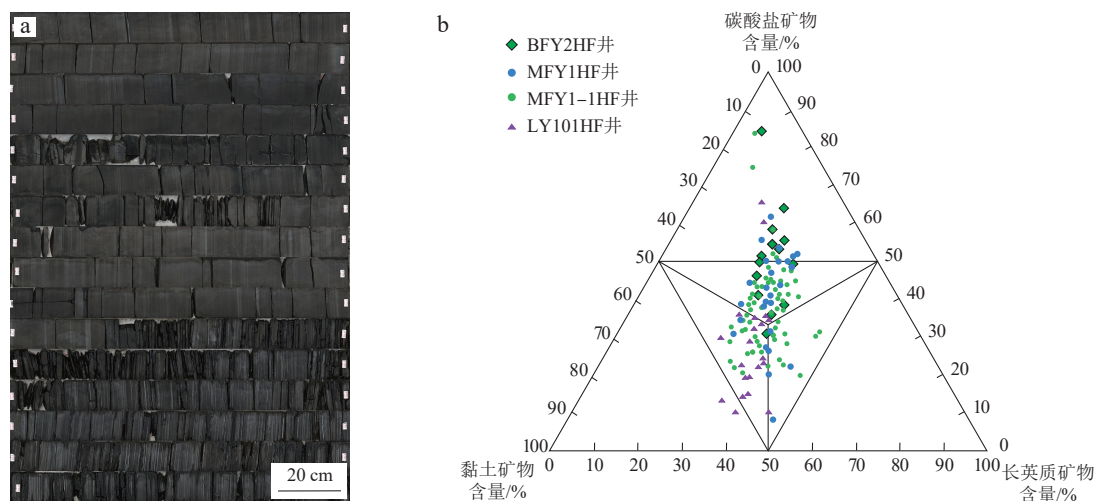


图3 渤海湾盆地济阳坳陷民丰洼陷MFY1HF井(埋深3 784 ~ 3 800 m)纹层状碳酸盐质混合页岩心照片(a)与岩相组成三角端元图(b)

Fig. 3 Core photo (a) and ternary diagram of lithofacies (b) for lamellar carbonate mixed shales (burial depth 3 784 ~ 3 800 m) in well MFY1HF, Minfeng Sub-sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

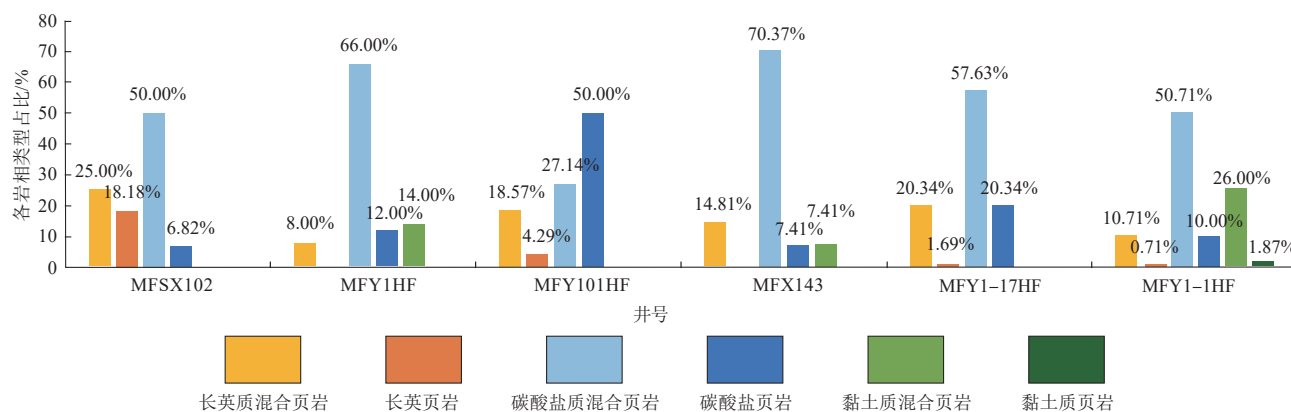


图4 渤海湾盆地济阳坳陷民丰洼陷MFY1HF等井沙四上亚段纯上次亚段3层组页岩不同岩相类型占比柱状图

Fig. 4 Bar chart showing the proportions of various lithofacies of shales in the 3rd bed of the Chunshang interval of the upper sub-member of the Sha 4 Member in well MFY1HF, Minfeng Sub-sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

出下列具体计算公式。

$$r = \frac{1}{2} \rho_2 T_2 \quad (1)$$

式中: r 为孔隙直径, μm ; ρ_2 为岩石表面弛豫率, $\mu\text{m/s}$; T_2 为横向弛豫时间, s 。孔径 $\approx 20 \text{ nm}$ (对应 $T_2 \approx 1 \text{ ms}$)。

页岩样品经 60°C 真空脱气 12 h 预处理后, 在 77K 液氮环境开展低温氮气吸附实验。通过逐级调控相对压力 (p/p_0 , p 为吸附平衡压力, p_0 为饱和蒸气压力) 获取吸附-脱附等温线, 采用比表面积多点法 (BET) 和孔径分布模型 (BJH) 分别计算孔隙比表面积和分析孔径介于 $2.0 \sim 50.0 \text{ nm}$ 的介孔分布, 以表征孔径介于 $0.4 \sim 200.0 \text{ nm}$ 的微孔-介孔的孔容与结构参数。

低温氮气吸附实验结果显示, 不同类型混合页岩的

孔径分布特征存在显著差异。在孔径介于 $1 \sim 30 \text{ nm}$ 和 $30 \sim 300 \text{ nm}$ 两个区间内, 碳酸盐质混合页岩中孔隙体积分布较为均衡, 其占比分别为 49% 和 51% ; 相比之下, 黏土质混合页岩的孔径主要介于 $1 \sim 30 \text{ nm}$, 孔隙体积占比达到 62% , 而孔径 $30 \sim 300 \text{ nm}$ 的孔隙体积仅占 38% 。由此可见, 碳酸盐质混合页岩在大孔径发育方面更具优势, 而黏土质混合页岩则在小孔径孔隙方面占优。

选取碳酸盐质混合页岩和黏土质混合页岩两类样品, 基于汞对页岩的非润湿特性, 采用高压压汞法 (压力 $> 200 \text{ MPa}$) 将汞压入样品孔隙, 依据 Washburn 方程建立压力-进汞量关系, 定量计算孔喉半径、孔隙体积和孔喉分布等参数, 以表征页岩孔隙结构。实验结果证实, 碳酸盐质混合页岩中孔径大于 50 nm 的大孔和微

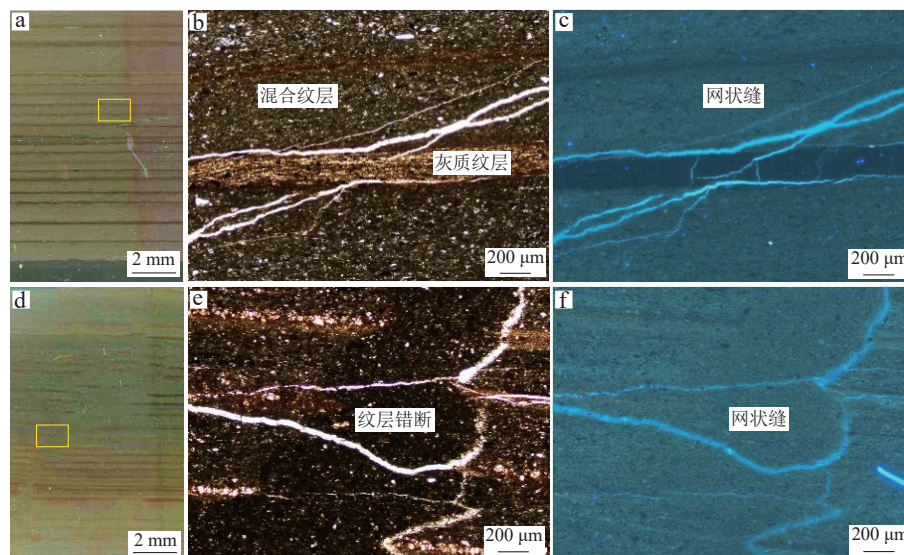


图5 渤海湾盆地济阳坳陷民丰洼MFY1-1HF井沙四上亚段纯上次亚段网状缝发育特征显微照片(普通薄片)

Fig. 5 Microphotographs (thin section) of reticular fracture development in $E_2s^{4(CS)}$ Member of Well MFY1-1HF in Minfeng sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a—c. 长英质混合页岩,埋深3 674.55 m, b图为单偏光, c图为荧光; d—f. 碳酸盐质混合页岩,埋深3 667.15 m, d图为单偏光, f图为荧光 (b图和c图为a图中黄框部分放大, e图和f图为b图中黄框部分放大。)

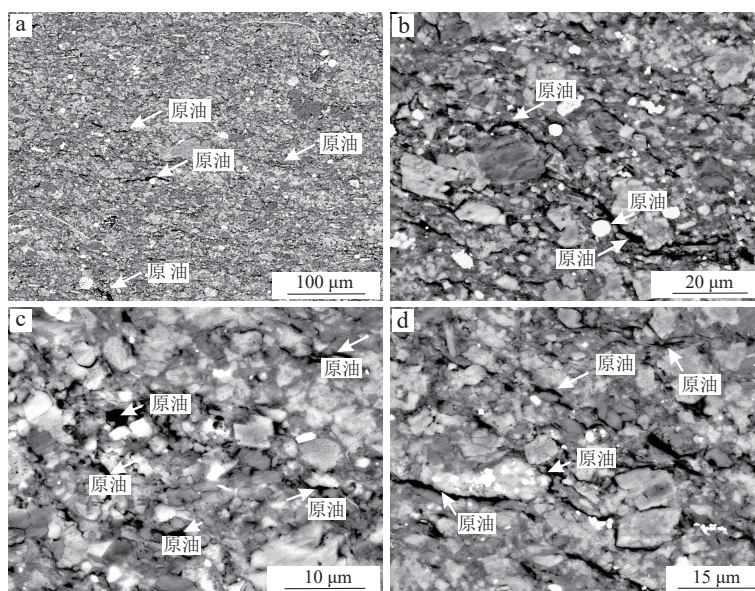


图6 渤海湾盆地济阳坳陷民丰洼MFY1-1HF井沙四上亚段纯上次亚段超压流体微裂缝扫描电镜照片(埋深3 643.80 m)

Fig. 6 SEM images of overpressure fluid induced microfractures in $E_2s^{4(CS)}$ Member of Well MFY1-1HF in Minfeng sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin (burial depth: 3 643.80 m)

a. 碳酸盐质混合页岩, 概貌, 发育微米级超压流体裂缝, 含原油; b—d. 碳酸盐质混合页岩, 微裂缝呈不规则状或蛇曲状, 缝内充填胶质沥青原油, 缝面未见明显错断现象

裂缝的发育程度显著高于黏土质混合页岩(图8c,d)。

4 混合页岩的成岩演化特征

压实作用贯穿湖相页岩的整个成岩过程,尤其在成岩作用早期和中-浅埋藏阶段,是造成页岩孔隙降

低的最主要因素。当埋深大于3 000 m时,其影响减弱,矿物成分与压实作用对基质支撑型页岩的减孔效应不再显著。此时,碳酸盐矿物、长英质矿物和黏土矿物3大类组分的成岩作用与支撑能力和超压流体开始主导孔隙演化。由于碳酸盐矿物、长英质矿物和黏土矿物含量差异明显,各类混合页岩表现出不同的成

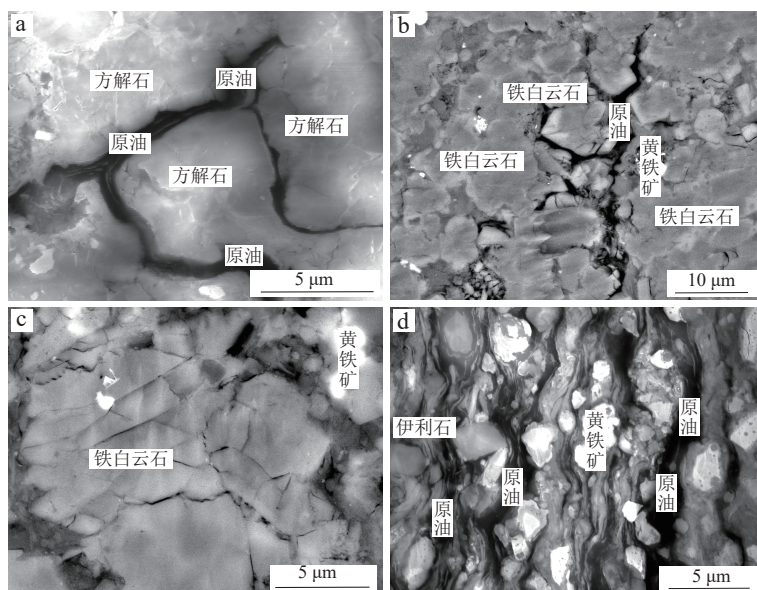


图7 渤海湾盆地济阳坳陷民丰洼陷MFY1-1HF井混合页岩主要孔隙类型扫描电镜照片

Fig. 7 SEM images of primary pore types in mixed shales in well MFY1-1HF, Minfeng Sub-sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

- a. 埋深3 671.85 m, 方解石晶间孔和晶间溶蚀孔; b. 埋深3 671.85 m, 铁白云石晶间孔和晶间溶蚀孔; c. 埋深3 669.95 m, 铁白云石晶间孔和晶间缝; d. 埋深3 674.55 m, 泥质纹层内的复合型孔隙与原油

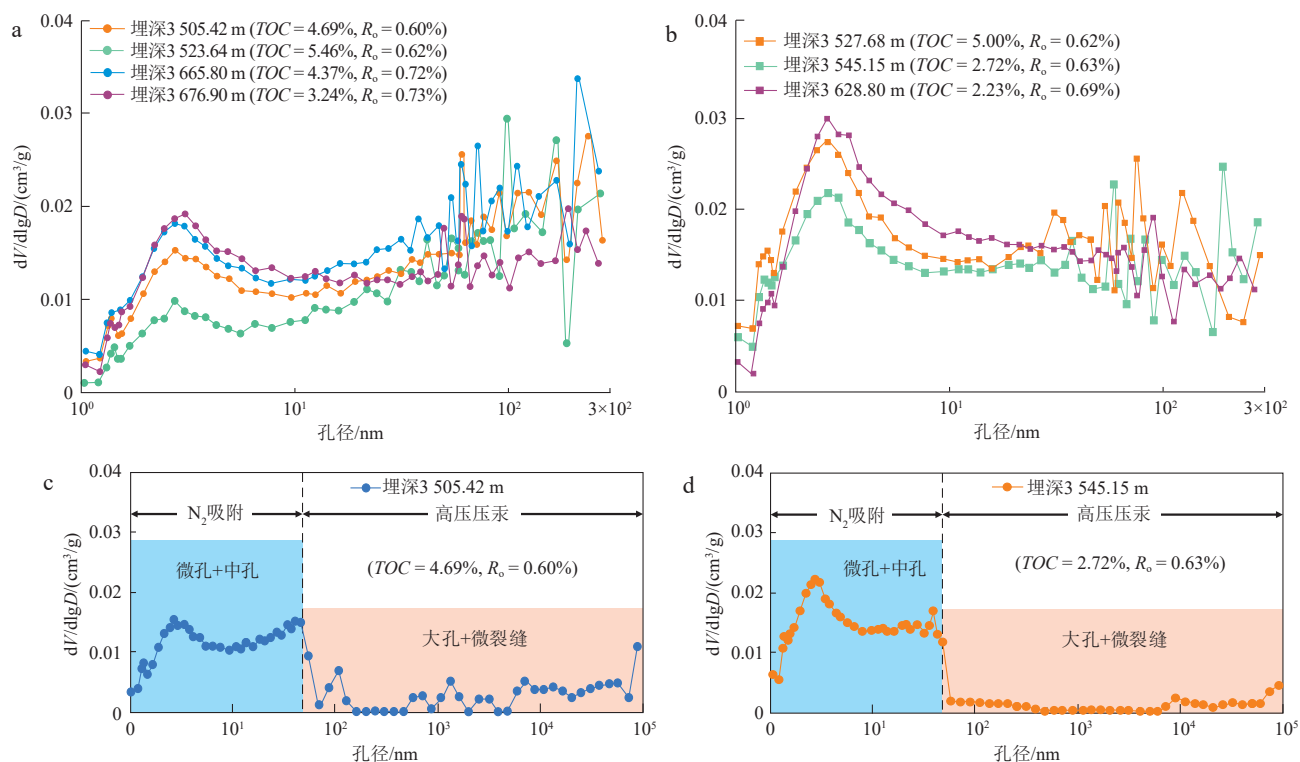


图8 渤海湾盆地济阳坳陷民丰洼陷MFY1-1HF井页岩孔隙孔径分布

Fig. 8 Pore size distributions of shales in well MFY1-1HF, Minfeng Sub-sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

- a. 碳酸盐质混合页岩, 低温 N_2 吸附实验; b. 黏土质混合页岩, 低温 N_2 吸附实验; c. 碳酸盐质混合页岩, N_2 吸附和高压压汞实验; d. 黏土质混合页岩, N_2 吸附和高压压汞实验

$dV/dlgD$. 孔隙体积变化率; TOC . 总有机碳含量; R_o . 镜质体反射率

岩路径。

整体上, 3类混合页岩的矿物组成差异导致其成

岩作用类型明显分异: 碳酸盐质混合页岩以碳酸盐矿物溶蚀-重结晶为主, 长英质混合页岩以长英质溶蚀-

胶结为主,黏土质混合页岩则以黏土矿物转化-石英自生作用为主导。此外,矿物颗粒粒径的显著差异决定了成岩作用的孔隙贡献尺度:泥晶碳酸盐矿物相关成岩作用主要提供微米级宏孔,而黏土矿物相关成岩作用主要提供纳米级微孔。下面介绍各类成岩作用的详细特征。

4.1 碳酸盐矿物的成岩作用

民丰洼陷沙四上亚段混合页岩中普遍发育泥晶方解石,主要以两种形式产出:①泥晶方解石纹层和透镜体;②泥晶方解石与石英、长石和黏土矿物混杂产出。众多研究表明,藻类勃发是浅水蒸发环境下泥晶方解石形成的主要原因^[35];而在半深水-深水环境中,泥晶方解石的成因则主要来源于化学沉淀,少量与微生物席发育环境下的生物-化学作用相关^[39, 45]。

泥晶方解石的稳定碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)与有机质含量呈明显负相关关系,表明其主要形成于沉积-同沉积期的水体环境中^[39]。在埋藏成岩过程中,泥晶方解石经历晶体间熟化融合、弱重结晶、溶蚀和强重结晶等一系列作用。在压力和地层水作用下,晶体接触点不断愈合,导致局部孔隙减小,但岩石致密性增强。

首先,物理和化学作用促使泥晶方解石晶体之间的界面逐渐融合。在压力作用下,晶体的接触点发生微小变形和挤压,使得晶体之间的接触更紧密。同时,在地质流体(如含有钙和镁等离子的地下水)的作用下,方解石晶体表面可能会发生溶解-再沉淀的过程。部分溶解的方解石组分在晶体接触处重新结晶,从而起到胶结和融合相邻晶体的作用。从微观结构上看,晶体之间的边界逐渐变得模糊,晶体之间的结合更加牢固,形成相对致密的方解石胶结结构。该过程虽然降低了岩石内部的孔隙度,但增强了岩石的强度和硬度。

随着埋深的增加,当温度达到50~60℃时,泥晶方解石会发生明显的重结晶。页岩内部流体流动可不断带入新离子并带走溶解物质,促进泥晶方解石的溶解和重结晶。民丰洼陷页岩中的泥晶方解石主要结晶形成粉晶结构(图9a, b),反映页岩内部流体流动较弱,水岩作用的反应物质不足,晶体生长缓慢。

页岩中的有机质对泥晶方解石的重结晶亦有影响。有机质热演化生烃过程中伴生的有机酸对方解石产生溶蚀作用,改变了晶体的表面形态和结构,进而影响重结晶过程。在有机酸等流体环境中,泥晶方解石的晶格能相对较低,更易与水分子相互作用而发生溶解。低晶格能使矿物与水分子之间形成更大电位差,这是泥晶方解石易于被溶蚀的主要原因。有机

酸可对晶体边缘、裂缝和孔壁进行选择性的溶蚀,使孔隙扩大或产生新的溶蚀孔。当与白云石共存时,方解石更易被优先溶蚀,体现出明显的成分与结构选择性。

4.2 石英与长石的成岩作用

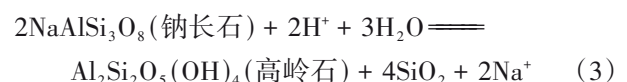
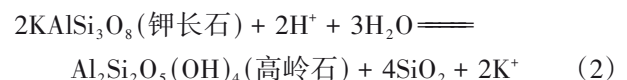
4.2.1 陆源石英的压溶与胶结作用

上覆岩层的压实作用及页岩基质支撑结构制约了孔隙发育,但陆源石英、长石、白云石和方解石等刚性矿物因粒径大、强度高,可在压实过程中保持形态;而黏土矿物和有机质在压实作用下多沿颗粒呈“环绕贴附”状产出。这一产出特征对成岩作用产生3方面影响:①刚性-塑性差异促成粒缘缝发育;②脆性矿物(如石英和长石等)可抵抗压实并保护原生粒间孔,黏土矿物片间孔亦相对发育;③颗粒界面间的水膜作用促进了石英-黏土矿物的水化溶解反应。

在埋藏压实成岩过程中,石英颗粒于酸-碱交替的成岩流体中发生溶蚀,形成少量微小孔隙,但其溶蚀程度通常弱于长石。尤其在腐殖酸和生烃有机酸的参与下,短暂的酸性、中性和碱性流体环境有助于石英溶蚀和微距离运移后的再结晶沉淀^[46]。石英颗粒边缘可形成港湾状溶蚀坑(图9c, d),并在腐殖酸与生烃有机酸作用下发生局部溶解-再沉淀现象。石英溶解动力学明显受酸碱度(pH值)控制:①酸性环境促进石英表面Si—O键断裂,加速溶蚀,石英溶解速率增加;②中性和酸性条件下,反应速率受 $\text{Q1}(\text{Si})\text{—O}_{\text{br}}$ (单聚体硅氧四面体—桥氧原子)键断裂控制;③碱性条件下,由水分子靠近 $\text{Q1}(\text{Si})$ 的速率控制,且随pH值升高,溶解速率显著加快。

4.2.2 长石的溶解作用

通过氩离子抛光-扫描电子显微镜观察和能谱元素分析可见,钾长石和斜长石普遍发生边缘不规则溶蚀并形成溶蚀孔,在微裂缝和孔隙网络发育的微区尤为显著(图9e, f)。在民丰洼陷混合页岩中,有机质热演化产生的有机酸和 CO_2 等酸性流体^[37],为长石矿物溶蚀提供了必要条件。长石在酸性成岩流体(如有机酸和 CO_2)作用下易发生溶解,典型反应包括:



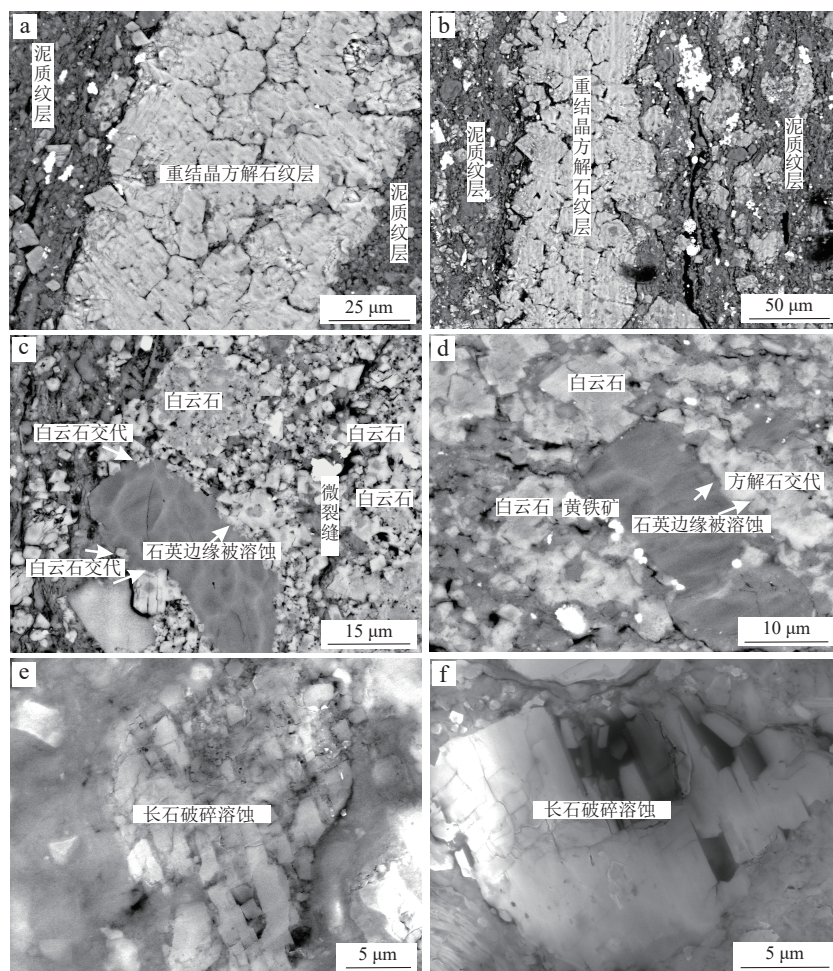


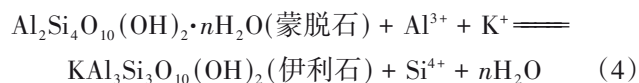
图9 渤海湾盆地济阳拗陷民丰洼陷MFY1HF井页岩方解石重结晶现象扫描电镜照片

Fig. 9 SEM images showing calcite recrystallization in shales in well MFY1HF, Minfeng Sub-sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin
a. 埋深3 661.85 m,重结晶方解石纹层与泥质纹层;b. 埋深3 665.25 m,重结晶方解石与泥质纹层;c. 埋深3 647.40 m,石英溶蚀与被白云石交代现象;d. 埋深3 643.80 m,石英溶蚀与被白云石交代现象;e. 埋深3 674.55 m,钠长石发生破碎溶蚀;f. 埋深3 639.10 m,长石破碎溶蚀形成的孔隙

这些反应过程释放 K^+ 、 Al^{3+} 和 Na^+ 等离子,促进高岭石和伊利石等黏土矿物的形成,同时释放的硅质组分易在邻近区域沉淀为自生石英。其溶蚀常表现为港湾状孔,强烈溶蚀可形成铸模孔,溶孔面孔率可达5%~12%。

4.3 黏土矿物转化与自生石英

黏土矿物转化是影响湖相页岩孔隙演化的重要因素。随着埋深增加,以及温度和压力的上升,高岭石与伊/蒙混层逐渐向伊利石和绿泥石转化,可显著促进无机孔隙发育^[29]。蒙脱石在50~100℃条件下发生伊利石化:



蒙脱石溶解使孔隙水中硅浓度超过石英饱和度,从而在黏土矿物周围形成微米级的石英晶体。钾长石的溶解可为黏土矿物转化提供所需的 K^+ ,并释放 Fe^{2+} ,

Mg^{2+} 和 Ca^{2+} ,供绿泥石和方解石等矿物利用。

扫描电镜观察发现,MFY1HF井和MFY1-1HF井页岩岩心样品中的泥质纹层中大量发育粒径介于2~7 μm、晶形较好的短柱状自生石英,其粒间孔孔径大,且富含有机质(图10)。扫描电镜结果显示,MFY1HF井自生石英含量与面孔率之间存在良好的正相关关系。因此,页岩纹层内部刚性颗粒支撑下孔隙发育是重要成储机制,而泥质纹层成岩矿物转化过程中释放的 SiO_2 (自生石英),是埋藏压实阶段细粒沉积物孔隙得以保存的重要支撑颗粒。

5 优质储层的形成机制

优质页岩储层的高孔-高渗体系并非单一成岩事件产物,而是由“矿物溶蚀—矿物转化—晶体重构”3级耦合机制逐级递进式构建的复杂成岩系统。该机

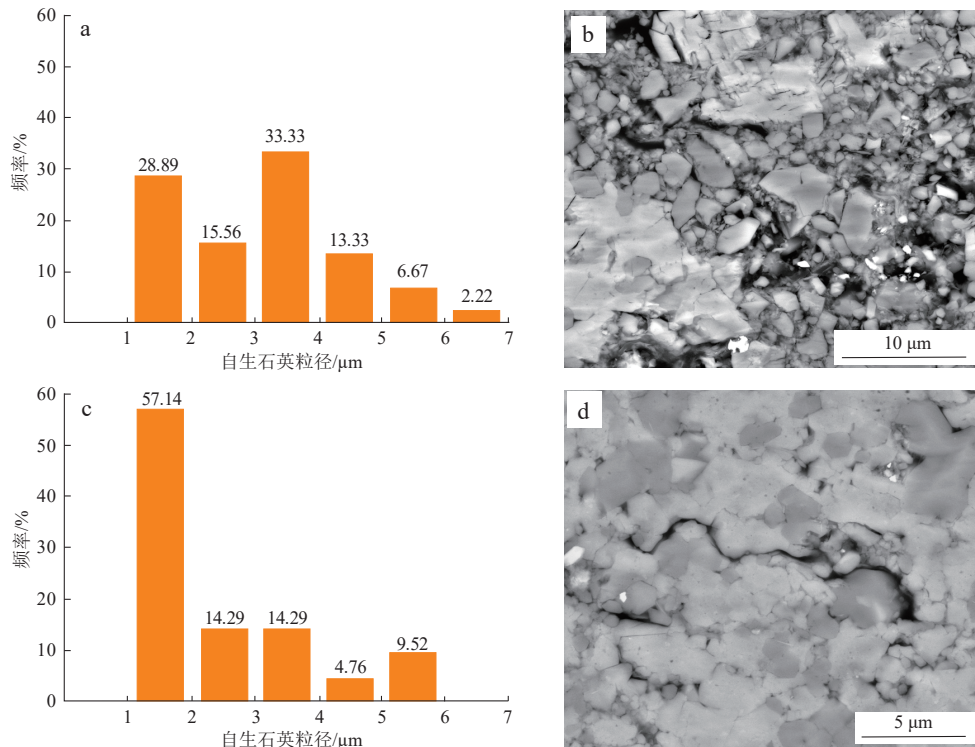


图10 渤海湾盆地济阳坳陷民丰洼陷MFY1HF井混合页岩中的自生石英与晶体粒径

Fig. 10 Authigenic quartz and crystalline grain size in mixed shales in well MFY1HF, Minfeng Sub-sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. 黏土矿物-有机质纹层中自生石英粒径频率分布直方图,埋深3 597.60 m; b. 黏土矿物-有机质纹层中的自生石英晶粒扫描电镜照片,埋深3 597.60 m; c. 方解石纹层中自生石英粒径频率分布直方图,埋深3 605.22 m; d. 方解石纹层中的自生石英晶粒扫描电镜照片,埋深3 605.22 m

制以方解石溶解-重结晶、长石溶蚀和黏土矿物转化为核心,历经“骨架建立—溶蚀迁移—晶体重构—再溶增孔”递进演化,逐级释放孔隙并再分配空间,最终构筑高脆性、大孔径、强连通的优质储集体系。研究区页岩的成岩阶段及孔隙纵向发育规律如图11所示,大致可分为3个阶段。

5.1 骨架构筑阶段

此阶段发生于早成岩 A_1 期— A_2 期(图12)。泥晶方解石首先响应腐殖酸($\text{pH} = 4 \sim 5$)弱溶蚀,晶格 Ca^{2+} 选择性出溶,形成纳米级溶蚀坑。随即因局部 CaCO_3 过饱和触发弱重结晶,此阶段主要由泥晶(方解石晶间孔孔径介于 $1 \sim 3 \mu\text{m}$)转化为粉晶(方解石晶间孔孔径介于 $5 \sim 15 \mu\text{m}$),晶间缝合线初步生成,泥晶方解石集合体成透镜状或纹层状,奠定刚性基底。同期,石英和长石尚未发生显著溶蚀-沉淀,仅作为力学骨架被动承载上覆应力。此阶段溶蚀-重结晶强度受控于腐殖酸浓度与超压流体滞留时间,富 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 孔隙水促使纤状方解石沿纹层界面和早期微裂缝垂直生长,形成毫米级刚性骨架。骨架的建立不仅为后续流体运移

提供渗流通道,还通过侧向支撑抑制了压实作用,使部分原生孔隙得以保存(此阶段页岩通常孔隙度 $\geq 8\%$)。

5.2 自生矿物支撑保孔阶段

此阶段主要发生于早成岩 A_2 期—中成岩 A_1 期^[47],钾长石溶蚀产生钾离子,促进黏土矿物(伊/蒙混层和蒙脱石)发生伊利石化。主要包括3类反应(图11):①Bu等认为,蒙脱石等黏土矿物具有固体酸性,其层间的酸性位点在有机质热解过程中起到催化作用^[48], Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的存在可能增强这种固体酸性,促进有机质的热解,进而释放出有机酸,有机酸诱导钾长石酸性溶蚀释放 K^+ ;② K^+ 促进蒙脱石的伊利石化释放 Si^{4+} 促进自生石英沉淀。该阶段页岩中黏土矿物的转化程度高,X射线衍射黏土矿物分析表明,其主要类型为伊利石,含量普遍大于90%,部分可达100%。页岩中的自生石英绝对含量介于2%~21%(平均值为11%)。民丰洼陷沙四上亚段页岩中的黏土矿物转化率普遍大于90%,③伊利石化作用释放 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} ,促进白云石进一步发生铁白云石化作用与重结晶。上覆岩层的压实作用促使黏土矿物集合体的结构调整和有序化。同

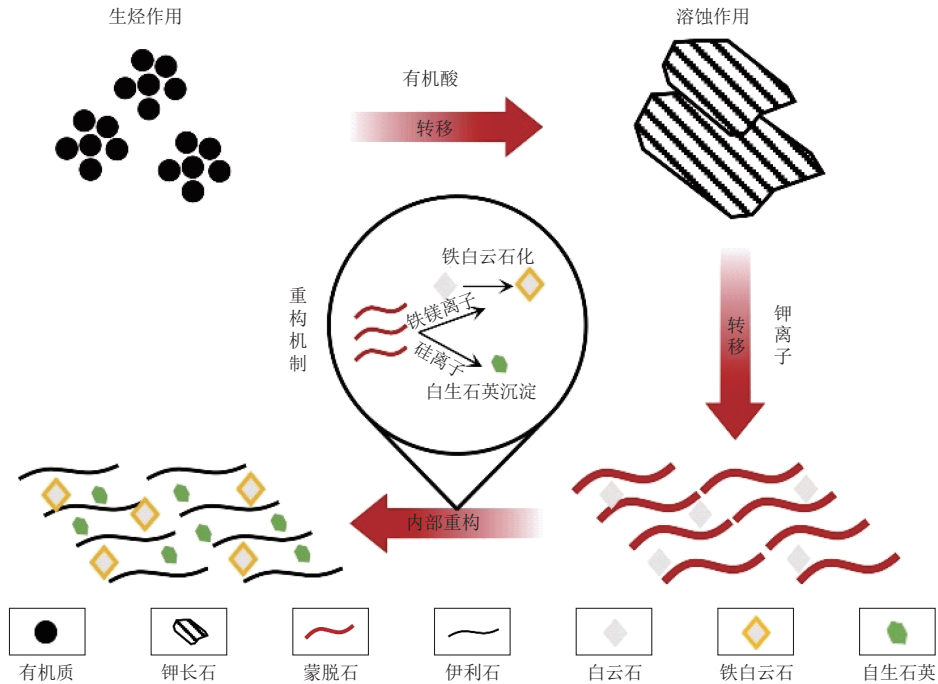


图 11 烃类生成过程中元素迁移和晶体重构机制示意图

Fig. 11 Schematic diagram of element migration and crystal reconstruction mechanisms during hydrocarbon generation

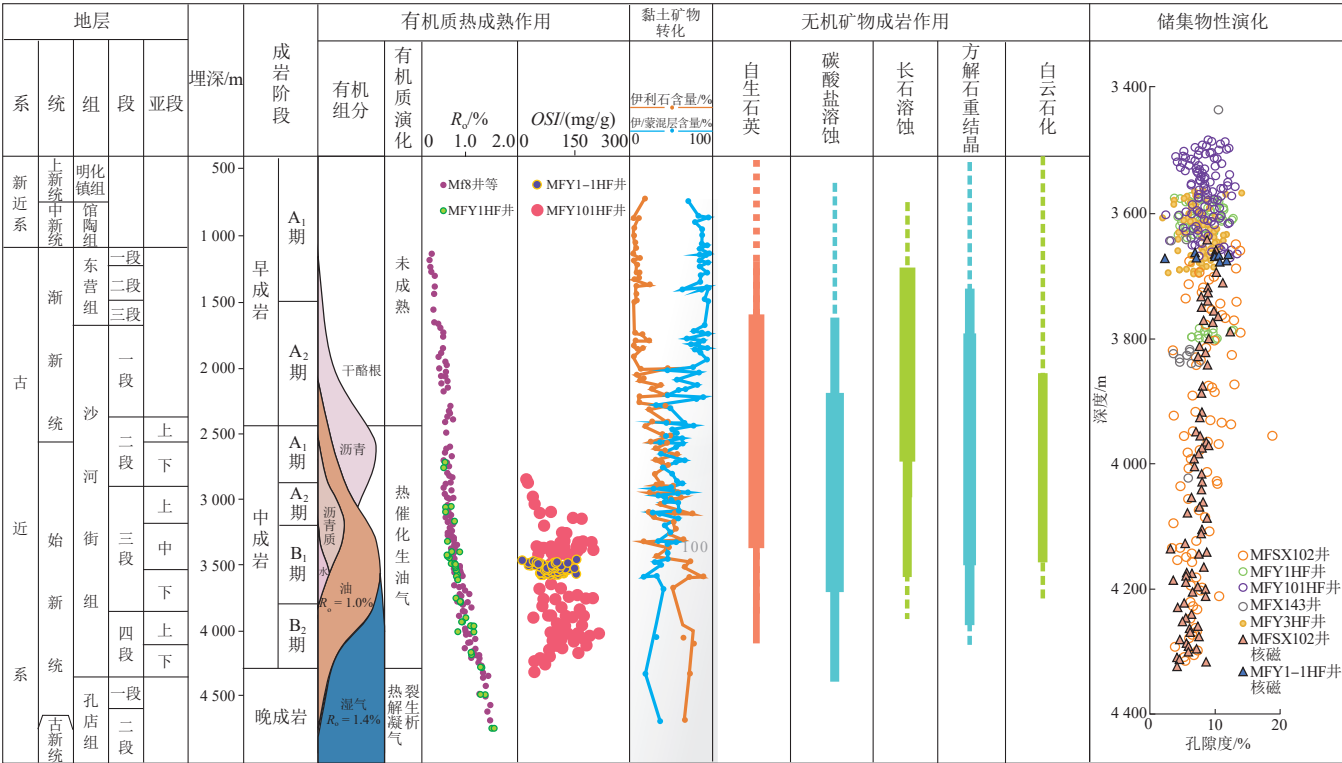


图 12 渤海湾盆地济阳坳陷混合页岩成岩与优质储层演化特征

Fig. 12 Diagenetic evolution and characteristics of high-quality reservoirs in hybrid shale, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

R_o 镜质体反射率; OSI 含油饱和度指数

时,地层水中富含黏土矿物转化形成的硅质,在生烃增压的驱动下,这些硅质易于在石英、长石、方解石和白云石等大颗粒的边缘发生富集并沉淀,形成晶簇状自

生石英微区。

自生石英含量与页岩的储集能力密切相关:①自生石英的微区富集有利于粒间孔支撑和大孔隙孔隙

(孔径区间)的发育;②自生石英之间形成的粒间孔孔径一般为黏土矿物片间孔的5~300倍,具有绝对的储集优势,使页岩具有较高的孔隙,粒间孔内极易汇集泥质纹层中有机质热演化生成的页岩油。

5.3 溶蚀扩孔阶段

此阶段主要对应中成岩 A₁期—中成岩 A₂期。中成岩 A₁期有机质热演化完全进入生油窗,生烃过程中释放有机酸,生烃增压作用产生微裂缝,有机酸(pH=4.5~5.5)沿骨架边缘和晶间微裂隙扩散,诱发差异性溶蚀:①方解石晶体边缘被溶蚀,孔径扩大至50~100 μm;②有机酸沿着斜长石界面和解理发生溶蚀,释放 Ca²⁺, Na⁺, Si⁴⁺和 Al³⁺等离子,形成斜长石溶蚀孔隙(溶蚀孔孔径介于2~15 μm)。中成岩 A₂期有机质逐渐进入成熟阶段,热解和缩聚反应产生大量有机酸,方解石的溶蚀作用进一步增强。该阶段溶蚀作用总孔隙度增加2%~4%,并显著降低喉道迂曲度。有机质热演化、有机质生烃增压和有机酸溶蚀矿物是改善页岩孔隙和裂缝的关键因素,三者相互影响、相互关联^[37,40-43]。

5.4 超压流体保孔阶段

此阶段对应中成岩 B₁期—B₂期。该期处于有机质生烃高峰阶段,民丰洼陷沙四上亚段的地层压力系数介于1.4~1.8,属于强超压体系,超压流体在页岩储层演化中发挥关键的保孔作用:①超压流体可支撑粒间孔、有机质孔等原生孔隙的孔壁结构,抑制压实作用引发的孔隙快速闭合,有效保留储集空间;②超压流体突破岩石破裂阈值时,会在页岩内部诱发大量网状微裂缝,连通原本孤立的孔喉系统,促使页岩油从纳米级孔隙向大孔隙重新分配,并与构造应力裂缝共同构建高效渗流网络,从而降低排烃压力阈值,提升储层连通性。

6 结论

1) 研究区混合页岩储集空间“缝-孔”组合:①高角度-水平层理缝交织成微米—厘米级网格,部分切穿纹层;②超压流体缝沿颗粒-有机质缘发育,缝宽介于1~5 μm,充填沥青。无机孔孔隙占比大于90%,以石英粒间孔、方解石晶间孔、白云石晶间孔和黏土矿物片间孔等为主。

2) 混合页岩成岩演化受“矿物溶蚀—转化—重构”3级控制。①早成岩 A₁期—A₂期,泥晶方解石弱溶蚀—重结晶成毫米纹层骨架,孔隙度≥8%;②早成岩 A₂

期—中成岩 A₁期,钾长石溶蚀提供 K⁺促使伊/蒙混层向伊利石转化,自生石英含量介于2%~21%,粒间孔孔径为黏土矿物片间孔的5~300倍,奠定了储集优势;③中成岩 A₁期—A₂期,有机酸差异性溶蚀方解石与长石,溶蚀孔孔隙度增加2%~4%;④中成岩 B₁期—B₂期,为生烃高峰期,地层压力系数介于1.4~1.8,强超压支撑孔壁、诱发网状微裂缝,连通孤立孔喉,构建高孔—高渗体系。

3) 混合页岩经历骨架构筑、自生矿物支撑保孔、溶蚀扩孔和超压流体保孔4个阶段。骨架构筑阶段通过方解石溶蚀重结晶构建刚性基底,实现原生孔隙保存。自生矿物支撑保孔阶段依托黏土矿物伊利石化与自生石英沉淀增强孔隙支撑能力。溶蚀扩孔和超压流体保孔阶段借助有机酸差异性溶蚀扩孔与超压流体保孔造缝,最终形成高脆性、大孔径及强连通性的优质储集空间。

参 考 文 献

- [1] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.
JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [2] 郭旭升, 申宝剑, 李志明, 等. 论我国页岩油气的统一性[J]. 石油实验地质, 2024, 46(5): 889-905.
GUO Xusheng, SHEN Baojian, LI Zhiming, et al. Discussion on the uniformity of shale oil and gas in China [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2024, 46(5): 889-905.
- [3] 郭旭升, 赵培荣, 张宇, 等. 中国陆相页岩油分类分级评价的现状、挑战与发展趋势[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(6): 1745-1761.
GUO Xusheng, ZHAO Peirong, ZHANG Yu, et al. Current status, challenges, and future trends of the classification and grading evaluation of lacustrine shale oil in China [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(6): 1745-1761.
- [4] 游祖辉, 赵建华, 蒲秀刚, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷歧北次凹古近系沙河街组三段—亚段页岩含油性控制因素与页岩油富集模式[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(2): 443-461.
YOU Zuhui, ZHAO Jianhua, PU Xiugang, et al. Controlling factors in oil-bearing properties and shale oil enrichment patterns of the 1st sub-member of the 3rd member of the Paleogene Shahejie Formation, Qibei sub-sag, Huanghua Depression, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(2): 443-461.
- [5] 施振生, 周天琪, 汪鹏飞. 细粒沉积中内源组分的类型、分布及页岩油气甜点意义[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(3): 759-776.
SHI Zhensheng, ZHOU Tianqi, WANG Pengfei. Types and

- distributions of endogenetic components in fine-grained sediments and their implications for the evaluation of shale oil and gas sweet spots[J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(3): 759–776.
- [6] 黎茂稳, 马晓潇, 金之钧, 等. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 1–25.
- LI Maowen, MA Xiaoxiao, JIN Zhijun, et al. Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 1–25.
- [7] 郭彤楼. 中国页岩气发展的回顾与思考——从志留系到寒武系[J]. *油气藏评价与开发*, 2025, 15(3): 339–348.
- GUO Tonglou. Review and reflection on shale gas development in China: From Silurian to Cambrian [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2025, 15(3): 339–348.
- [8] 包书景, 葛明娜, 赵培荣, 等. 中国页岩气勘探开发现状、潜力与发展建议[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(2): 348–364.
- BAO Shujing, GE Mingna, ZHAO Peirong, et al. Status-quo, potential, and recommendations on shale gas exploration and exploitation in China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(2): 348–364.
- [9] 孙龙德, 刘合, 何文渊, 等. 大庆古龙页岩油重大科学问题与研究路径探析[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(3): 453–463.
- SUN Longde, LIU He, HE Wenyuan, et al. An analysis of major scientific problems and research paths of Gulong shale oil in Daqing Oilfield, NE China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 453–463.
- [10] LI Jijun, YOU Hang, ZHANG Xinwen, et al. Influence of shale reservoir properties on shale oil mobility and its mechanism [J]. *Energy Geoscience*, 2024, 5(4): 100329.
- [11] MA Lichi, SONG Mingshui, WANG Yongshi, et al. Exploration progress of the Paleogene in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Energy Geoscience*, 2023, 4(1): 42–50.
- [12] 刘惠民, 高阳, 秦峰, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. *石油学报*, 2023, 44(12): 2141–2159.
- LIU Huimin, GAO Yang, QIN Feng, et al. New fields, new types and resource potentials of hydrocarbon exploration in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(12): 2141–2159.
- [13] 刘惠民, 李军亮, 刘鑫金, 等. 渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段-沙三下亚段页岩裂缝发育特征及成因机制[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(6): 1960–1979.
- LIU Huimin, LI Junliang, LIU Xinjin, et al. Characteristics and genetic mechanism of natural fractures in shales from the upper sub-member of the Sha 4 Member to the lower sub-member of the Sha 3 Member in the Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(6): 1960–1979.
- [14] 宋明水, 刘惠民, 王勇, 等. 济阳坳陷古近系页岩油富集规律认识与勘探实践[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(2): 225–235.
- SONG Mingshui, LIU Huimin, WANG Yong, et al. Enrichment rules and exploration practices of Paleogene shale oil in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(2): 225–235.
- [15] 王永诗, 李政, 王民, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷陆相页岩油吸附控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(3): 489–498.
- WANG Yongshi, LI Zheng, WANG Min, et al. Factors controlling lacustrine shale oil adsorption in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 489–498.
- [16] 姚红生, 张培先, 何希鹏, 等. 四川盆地及其周缘地区五峰组-龙马溪组页岩气藏类型及勘探实践[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(6): 1807–1822.
- YAO Hongsheng, ZHANG Peixian, HE Xipeng, et al. Classification and exploration practices of shale gas reservoirs in the Wufeng-Longmaxi formations in the Sichuan Basin and its periphery [J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(6): 1807–1822.
- [17] 施振生, 赵圣贤, 周天琪, 等. 海相含气页岩水平层理类型、成因及其页岩气意义——以川南地区古生界五峰组-龙马溪组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1499–1514.
- SHI Zhensheng, ZHAO Shengxian, ZHOU Tianqi, et al. Types and genesis of horizontal bedding of marine gas-bearing shale and its significance for shale gas: A case study of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1499–1514.
- [18] 陈强路, 席斌斌, 尤东华, 等. 四川盆地东南部二叠系长兴组成藏过程与天然气有效聚集[J]. *石油实验地质*, 2025, 47(5): 963–973.
- CHEN Qianglu, XI Binbin, YOU Donghua, et al. Hydrocarbon accumulation process, and effective natural gas accumulation in Permian Changxing Formation, southeastern Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2025, 47(5): 963–973.
- [19] 李帅智, 刘成林, 刘文平, 等. 川南龙马溪组页岩储层微观孔隙结构及其对吸附能力的影响[J]. *特种油气藏*, 2025, 32(2): 22–32.
- LI Shuaizhi, LIU Chenglin, LIU Wenping, et al. Microporous structure of the Longmaxi Formation shale reservoirs in southern Sichuan Basin and its effect on adsorption capacity [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2025, 32(2): 22–32.
- [20] 张金旭, 王有智, 陈绪强, 等. 川东北地区侏罗系凉高山组页岩储层地质特征及页岩油气勘探潜力[J]. *大庆石油地质与开发*, 2025, 44(2): 38–49.
- ZHANG Jinxu, WANG Youzhi, CHEN Xuqiang, et al. Geological characteristics of shale reservoirs and exploration potential of shale oil and gas in Jurassic Lianggaoshan Formation of northeastern Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2025, 44(2): 38–49.
- [21] 张熠, 刘萍, 周翔. 松辽盆地王府地区泉四段常规、非常规油气有序分布及成藏主控因素[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2025, 55(1): 46–56.
- ZHANG Yi, LIU Ping, ZHOU Xiang. Main controlling factors and distribution of conventional and unconventional oil within the 4th member of Quantou Formation in Wangfu area, Songliao Basin

- [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2025, 55(1): 46–56.
- [22] 周红飞, 洪海涛, 秦春雨, 等. 川东地区东岳庙段湖相页岩油气源储特征与富集层段优选[J]. *断块油气田*, 2025, 32(1): 10–19.
- ZHOU Hongfei, HONG Haitao, QIN Chunyu, et al. Source-reservoir characteristics and optimization of enrichment layers of shale oil and gas of Dongyuemiao member in eastern Sichuan Basin [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2025, 32(1): 10–19.
- [23] 刘惠民, 李军亮, 刘鹏, 等. 济阳坳陷古近系页岩油富集条件与勘探战略方向[J]. *石油学报*, 2022, 43(12): 1717–1729.
- LIU Huimin, LI Junliang, LIU Peng, et al. Enrichment conditions and strategic exploration direction of Paleogene shale oil in Jiyang Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(12): 1717–1729.
- [24] 刘惠民. 济阳坳陷古近系页岩油地质特殊性及其勘探实践——以沙河街组四段上亚段—沙河街组三段下亚段为例[J]. *石油学报*, 2022, 43(5): 581–594.
- LIU Huimin. Geological particularity and exploration practice of Paleogene shale oil in Jiyang Depression: A case study of the upper submember of member 4 to the lower submember of Member 3 of Shahejie Formation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(5): 581–594.
- [25] 吴伟涛, 李天宇, 闫新智, 等. 鄂尔多斯盆地定边—富县地区延长组长8油层组致密油富集因素与富集模式[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(5): 1392–1409.
- WU Weitao, LI Tianyu, YAN Xinzhi, et al. Enrichment factors and patterns of tight oil in the 8th oil group of the Yanchang Formation, Dingbian–Fuxian area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(5): 1392–1409.
- [26] 刘惠民, 王勇, 李军亮, 等. 济阳坳陷始新统页岩岩相发育主控因素及分布特征[J]. *古地理学报*, 2023, 25(4): 752–767.
- LIU Huimin, WANG Yong, LI Junliang, et al. Main controlling factors and distribution characteristics of shale lithofacies in the Eocene of Jiyang Depression [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2023, 25(4): 752–767.
- [27] 刘惠民, 张顺, 包友书, 等. 东营凹陷页岩油储集地质特征与有效性[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(3): 512–523.
- LIU Huimin, ZHANG Shun, BAO Youshu, et al. Geological characteristics and effectiveness of the shale oil reservoir in Dongying Sag[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 512–523.
- [28] 张安达, 王继平, 王永超, 等. 松辽盆地古龙页岩储集空间类型及油赋存状态[J]. *大庆石油地质与开发*, 2021, 40(5): 68–77.
- ZHANG Anda, WANG Jiping, WANG Yongchao, et al. Reservoir space types and oil occurrence of Gulong shale in Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(5): 68–77.
- [29] 邵红梅, 高波, 潘会芳, 等. 松辽盆地古龙页岩成岩—孔隙演化[J]. *大庆石油地质与开发*, 2021, 40(5): 56–67.
- SHAO Hongmei, GAO Bo, PAN Huifang, et al. Diagenesis-pore evolution for Gulong shale in Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(5): 56–67.
- [30] 徐亮, 杨威, 姜振学, 等. 四川盆地川西坳陷三叠系须家河组页岩有机孔演化及成因[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(2): 325–340.
- XU Liang, YANG Wei, JIANG Zhenxue, et al. Evolution and genesis of organic pores in Triassic Xujiahe Formation shale, western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2): 325–340.
- [31] 霍秋立, 曾花森, 张晓畅, 等. 松辽盆地古龙页岩有机质特征与页岩油形成演化[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(3): 86–96.
- HUO Qiuli, ZENG Huasen, ZHANG Xiaochang, et al. Organic matter characteristics and shale oil formation of Gulong shale in Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(3): 86–96.
- [32] 白玉彬, 李梦瑶, 朱涛, 等. 玛湖凹陷二叠系风城组烃源岩地球化学特征及页岩油“甜点”评价[J]. *岩性油气藏*, 2024, 36(6): 110–121.
- BAI Yubin, LI Mengyao, ZHU Tao, et al. Geochemical characteristics of source rocks and evaluation of shale oil “sweet spot” of Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2024, 36(6): 110–121.
- [33] 姚玉来, 肖飞, 李士超, 等. 松辽盆地齐家凹陷南部青山口组一段古环境及其对有机质富集的控制作用[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2025, 49(1): 59–71.
- YAO Yulai, XIAO Fei, LI Shichao, et al. Paleoenvironment of the first member of Qingshankou Formation in southern Qijia Sag, Songliao Basin and its control on enrichment of organic matter [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2025, 49(1): 59–71.
- [34] 杨旺旺, 王振林, 苏静, 等. 玛湖凹陷风城组页岩油赋存空间特征及可动性影响因素[J]. *新疆石油地质*, 2025, 46(2): 192–200.
- YANG Wangwang, WANG Zhenlin, SU Jing, et al. Occurrence space and mobility of shale oil in Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2025, 46(2): 192–200.
- [35] 刘惠民. 济阳坳陷页岩油勘探实践与前景展望[J]. *中国石油勘探*, 2022, 27(1): 73–87.
- LIU Huimin. Exploration practice and prospect of shale oil in Jiyang Depression [J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(1): 73–87.
- [36] 杨勇, 张世明, 吕琦, 等. 中国东部陆相断陷盆地页岩油开发理论认识与技术实践——以济阳页岩油为例[J]. *油气地质与采收率*, 2024, 31(5): 1–15.
- YANG Yong, ZHANG Shiming, LYU Qi, et al. Theoretical understanding and technical practice of shale oil development in continental faulted basins in eastern China: A case study of Jiyang shale oil [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2024, 31(5): 1–15.
- [37] 刘惠民, 包友书, 张守春, 等. 陆相富碳酸盐页岩结构特征与

- 页岩油可动性——以济阳坳陷古近系沙河街组页岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(6): 1150–1161.
- LIU Huimin, BAO Youshu, ZHANG Shouchun, et al. Structural characteristics of continental carbonate-rich shale and shale oil movability: A case study of the Paleogene Shahejie Formation shale in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(6): 1150–1161.
- [38] 滕建彬, 邱隆伟, 张守鹏, 等. 济阳坳陷古近系沙河街组湖相富含有机质页岩白云石成因及成岩演化[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(6): 1080–1093.
- TENG Jianbin, QIU Longwei, ZHANG Shoupeng, et al. Origin and diagenetic evolution of dolomites in Paleogene Shahejie Formation lacustrine organic shale of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, East China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(6): 1080–1093.
- [39] MIAO Zhuowei, ZHANG Kuihua, ZHANG Pengfei, et al. The staged growth of bedding-parallel fibrous calcite veins, from synsedimentary period to oil-generative window [J]. Marine and Petroleum Geology, 2024, 160: 106660.
- [40] 包友书. 陆相泥页岩在水平地应力作用下裂缝的多样性——以济阳坳陷古近系泥页岩为例[J]. 石油学报, 2019, 40(7): 777–785.
- BAO Youshu. Fracture diversity of continental shale under horizontal geostress: A case study of the Paleogene shale in Jiyang Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(7): 777–785.
- [41] LIU Huimin, ZHANG Shun, SONG Guoqi, et al. A discussion on the origin of shale reservoir inter-laminar fractures in the Shahejie Formation of Paleogene, Dongying depression [J]. Journal of Earth Science, 2017, 28(6): 1064–1077.
- [42] 滕建彬. 沉积和成岩作用交互约束页岩油生储品质机理分析——以东营凹陷牛庄洼陷古近系沙河街组页岩为例[J]. 油气地质与采收率, 2024, 31(6): 18–32.
- TENG Jianbin. Mechanism of interaction influence between sedimentation and diagenesis on quality of shale oil generation and storage: A case study of Paleogene shale of Shahejie Formation in Niuzhuang subsag of Dongying Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(6): 18–32.
- [43] 滕建彬, 刘惠民, 邱隆伟, 等. 济阳坳陷页岩油储层物质组分对含油性的控制规律[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 80–87.
- TENG Jianbin, LIU Huimin, QIU Longwei, et al. Control law of material components of shale oil reservoir on oil-bearing characteristics in Jiyang Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 80–87.
- [44] 滕建彬. 东营凹陷利页1井泥页岩中白云石成因及层序界面意义[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(2): 1–7.
- TENG Jianbin. Genesis of dolomite in shale drilled by Well Liye1 in Dongying Sag and its significance on sequence boundary indication [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(2): 1–7.
- [45] BAI Chenyang, YU Bingsong, LIU Huimin, et al. The genesis and evolution of carbonate minerals in shale oil formations from Dongying depression, Bohai Bay Basin, China [J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 189: 8–26.
- [46] ZHANG Pengfei, ZHANG Kuihua, MIAO Zhuowei, et al. Early diagenetic origin of authigenic quartz in lacustrine calcareous shale of the Shahejie Formation, Eastern China: Implications for shale reservoirs [J]. Carbonates and Evaporites, 2024, 39(4): 107.
- [47] LI Yaohua, YANG Wei, WANG Qianyou, et al. Influence of the actively migrated diagenetic elements on the hydrocarbon generation potential in tuffaceous shale [J]. Fuel, 2019, 256: 115795.
- [48] BU Hongling, YUAN Peng, LIU Hongmei, et al. Effects of complexation between organic matter (OM) and clay mineral on OM pyrolysis [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2017, 212: 1–15.

(编辑 王 迪)