渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段页岩储层特征及主控因素

高波[1,2*]，郝芳[1]，张志垚[3]

1. 中国石油大学（华东）地球科学与技术学院，山东 青岛，266580；
2. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司滨南采油厂，山东 滨州，256600；
3. 山东石油化工学院，山东 东营，257061

* 通信作者，E-mail：gaobo.slyt@sinopec.com

2024-11-18 收稿；2025-01-05 修回；2025-01-11 接受

中图分类号：P618.13　　文章编号：2096-8523(2025)03-0070-12　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240707

摘　要：中国陆相页岩油资源十分丰富，是常规油气的重要战略接替领域，其中页岩储层发育影响因素是页岩油富集机理研究的重点和难点之一。以渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段页岩为研究对象，通过 X 射线衍射(XRD)、气体吸附、高压压汞、场发射扫描电镜(FE-SEM)和聚焦离子束扫描电镜(FIB-SEM)等技术手段，明确了沙河街组页岩岩相类型，精细表征了页岩储集空间类型与结构，揭示了页岩孔隙发育影响因素。结果表明：①研究区沙四上亚段页岩主要发育 5 种岩相类型(富有机质纹层状钙质页岩、富有机质纹层状混合质页岩、富有机质层状混合质页岩、富有机质块状钙质页岩和含有机质纹层状钙质页岩)；②页岩储集空间类型以粒间孔、粒内溶孔、晶间孔和微裂缝为主，有机孔基本不发育，不同类型页岩孔隙结构存在明显差异，其中富有机质纹层状页岩孔体积较大；③有机质丰度和沉积构造(纹层)对页岩储层具有明显的控制作用，有机酸溶蚀作用形成大量溶蚀孔，增加页岩储集性能，而过高的有机质丰度使页岩塑性增强，不利于孔隙的保存。纹层结构有利于页岩的储集性，不同纹层储集性存在显著差异，长英质纹层储集性较好，黏土质纹层次之，粗晶方解石纹层相对较差。研究结果揭示了东营凹陷沙四上亚段页岩储层特征以及有机质丰度和纹层结构对储层发育的控制作用，对渤海湾盆地陆相页岩油勘探开发有一定的参考意义。

关键词：页岩油；储集性；纹层结构；沙河街组；东营凹陷；渤海湾盆地

与常规油气储层相比，页岩储层粒度更细，具有低孔低渗的特征。陆相页岩对高频气候变化更加敏感，页岩储层岩石组分更为复杂，孔隙类型多样，具有极强的非均质性[1-4]。孔隙和裂缝是页岩的重要储集空间，对页岩油的储集、渗流和富集具有重要影响[2, 5-7]。前人[2, 8-11]对页岩孔隙发育影响因素进行了大量的研究，包括沉积环境、成岩作用和热演化程度等。沉积环境决定了页岩中总有机碳、脆性矿物和黏土矿物的含量，进而控制了页岩的岩相类型以及相应的微观储集空间类型[12-13]。在沉积过程中，沉积环境受物源供给、季节和气候变化等因素影响，使得沉积岩在结构、成分上表现出较大的差异[10-11]。纹层作为陆相页岩储层的基本沉积构造单元，对页岩储层储集性有显著影响[11]。纹层中发育的中-微孔和大孔能够提供更大的孔体积，有利于油气的运移与储集[14]。同时，不同沉积环境下形成的纹层类型在孔隙结构和储集性能方面也存在明显的差异，进而影响油气的赋存[15-18]。成岩作用是影响页岩孔隙结构特征的重要因素。碳酸盐矿物在成岩演化过程中的溶蚀、胶结和重结晶等控制着储集空间及其

著录信息：高波，郝芳，张志垚. 渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段页岩储层特征及主控因素 [J]. 地质科技通报，2025，44(3)：70-81.
GAO Bo, HAO Fang, ZHANG Zhiyao. Characteristics and controlling factors of shale reservoirs in the Upper Fourth Member of the Shahejie Formation in Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(3): 70-81.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

组合样式[19-20]。黏土矿物在成岩过程中会发生相应的转化，对页岩储层孔隙结构产生重要影响。例如，黏土矿物从蒙脱石逐渐转化为伊蒙混层和伊利石，大量层间水排出，形成大量黏土矿物层间孔和收缩缝[21]。热演化程度影响页岩孔隙发育演化，随着热演化程度升高，有机孔隙发育程度增大[22]，而当热演化程度过高时，有机质会出现明显的碳化现象，有机孔收缩或塌陷，有效孔隙度大幅度降低[23]。

东营凹陷沙河街组页岩油具有巨大的勘探潜力，以东营凹陷沙四上亚段页岩为研究对象，选取东营凹陷 5 口典型钻井，基于总有机碳含量（total organic carbon，简称 TOC）、X 射线衍射（X-ray diffraction，简称 XRD）、低温 N_2 吸附、高压压汞、场发射扫描电镜（field emission scanning electron microscope，简称 FE-SEM）和聚焦离子束扫描电镜（focused ion beam-scanning electron microscope，简称 FIB-SEM）等测试分析，明确了东营凹陷沙四上亚段页岩物质组成及岩相类型，阐明了不同类型页岩储集空间及孔隙结构差异性，揭示了页岩储层发育主控因素。

1 区域地质概况

东营凹陷位于中国东部渤海湾盆地的东南部，属于济阳坳陷的次级构造单元。凹陷东西向延伸 90 km，南北向宽达 65 km，总面积接近 5 800 km^2。东营凹陷北邻坨−胜−永断层、陈家庄凸起，东邻青坨子凸起，南接鲁西隆起和广饶凸起，西靠林樊家构造带和青城凸起，由牛庄洼陷、博兴洼陷、利津洼陷、中央隆起带、南部缓坡带和北部陡坡带等次级构造单元组成，是中国东部陆相断陷盆地富油凹陷的典型代表（图 1a）。凹陷由一系列基底断块构成，总体上呈“北断南超、北陡南缓”的箕状构造特征。从中生代后期到古近纪，东营凹陷北部的断裂活动强烈、落差大，而南部活动较弱、落差小，导致凹陷呈现北陡南缓的箕状断陷湖盆。南北方向上，主要受 NE−NEE 向的张性与张扭性大断裂所控制。东西方向上，一系列的 NW 向和近 SN 向断裂使东营凹陷的构造特征变得尤为复杂。东营凹陷古近系沙四上亚段富有机质泥岩发育相对广泛，厚度可达数百米（图 1b）[25]。岩性以灰色砂岩、深灰色灰质泥岩、油页岩、泥灰岩为主，夹有少量碳酸盐岩和粉砂岩，沉积构造多样，是东营凹陷的主力烃源岩之一[26-27]。

2 页岩岩相划分

2.1 岩石学与矿物学特征

XRD 结果表明，东营凹陷沙四上亚段页岩主要由方解石和黏土矿物组成，其次为石英、长石和铁白云石，含有少量黄铁矿、菱铁矿。其中，方解石体积分数最高，分布在 11.35%～71.09%，平均为 46.86%；其次为黏土矿物，体积分数介于 6.12%～48.42%，平均为 23.45%；石英体积分数在 5.11%～24.91%，平均为 16.07%；铁白云石（体积分数平均为 7.12%）、斜长石（体积分数平均为 5.05%）和黄铁矿（体积分数平

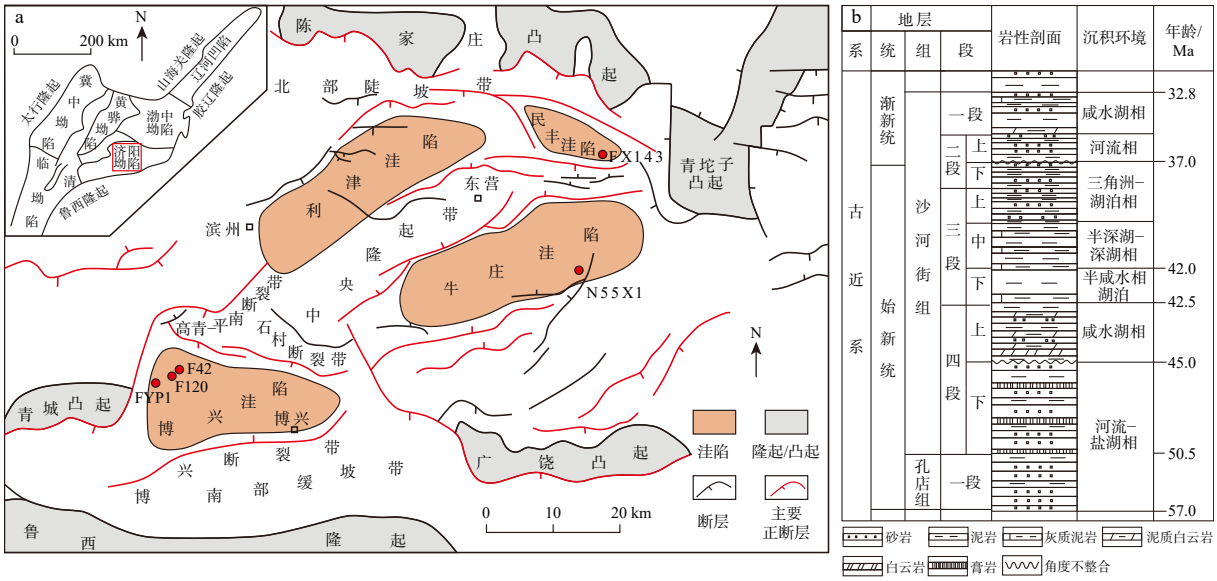


图 1 东营凹陷构造位置图 (a) 与区域地层柱状图 (b)（据文献 [24] 修改）

Fig. 1 Tectonic location (a) and regional stratigraphic column (b) of Dongying Sag

均为 2.12%)含量相对较少。

2.2　沉积构造特征

东营凹陷沙四上亚段页岩中沉积构造多样，基于纹层厚度可将沉积构造分为纹层状、层状以及块状(图 2)。研究区页岩中沉积构造以纹层状为主，兼有部分层状和块状。纹层状页岩中纹层厚度介于 200 ~ 600 μm。层状页岩中纹层厚度介于 1 ~ 10 mm。块状页岩成分较为均匀，表现为长英质矿物、黏土矿物和碳酸盐矿物等多种矿物混杂，层理不发育。

2.3　有机地球化学特征

东营凹陷沙四上亚段页岩有机碳质量分数(w(TOC))主要分布在 0.78% ~ 11.2%，平均值为 3.93%；游离烃质量占比(S_1)为 0.16 ~ 8.45 mg/g，平均值为 3.25 mg/g；热解烃质量占比(S_2)为 0.42 ~ 65.2 mg/g，平均值为 23.51 mg/g；生烃潜量(S_1+S_2)为 0.58 ~ 72.93 mg/g，平均值为 26.77 mg/g。干酪根类型主要为Ⅰ型兼有少量Ⅱ$_1$型，页岩具有良好的生油潜力。

2.4　岩相划分

本研究岩相划分综合考虑有机质丰度、沉积构造特征以及矿物组成 3 个因素[28]。首先，使用黏土矿物、碳酸盐矿物和长英质矿物作为三端元对矿物组分进行分类，以矿物体积分数 50% 为界线，将页岩岩相划分为钙质页岩、混合质页岩、黏土质页岩、长英质页岩 4 种。沉积构造则基于岩心与薄片观察结果分为纹层状、层状和块状 3 种类型。w(TOC)以 2% 为界，w(TOC)大于 2% 的定义为富有机质，w(TOC)小于 2% 为含有机质(图 3)。

基于上述划分方案，对东营凹陷沙四上亚段页岩进行了岩相划分。结果显示，研究区主要发育 5 种岩相：富有机质纹层状钙质页岩、富有机质纹层状混合质页岩、富有机质层状混合质页岩、富有机质块状钙质页岩和含有机质纹层状钙质页岩。

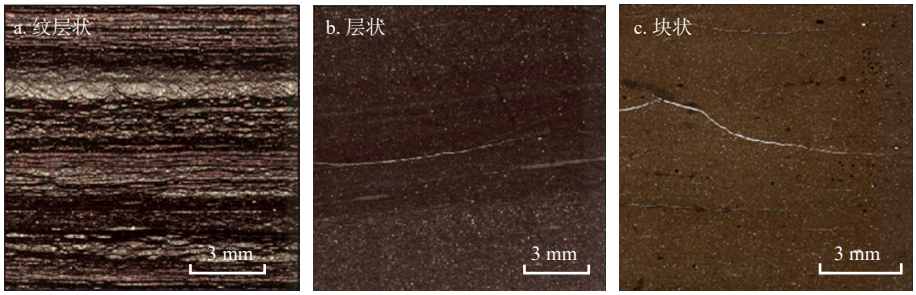


图 2　东营凹陷沙四上亚段页岩沉积构造特征

Fig. 2　Sedimentation characteristics of shale in the Upper Fourth Member of the Shahejie Formation in Dongying Sag

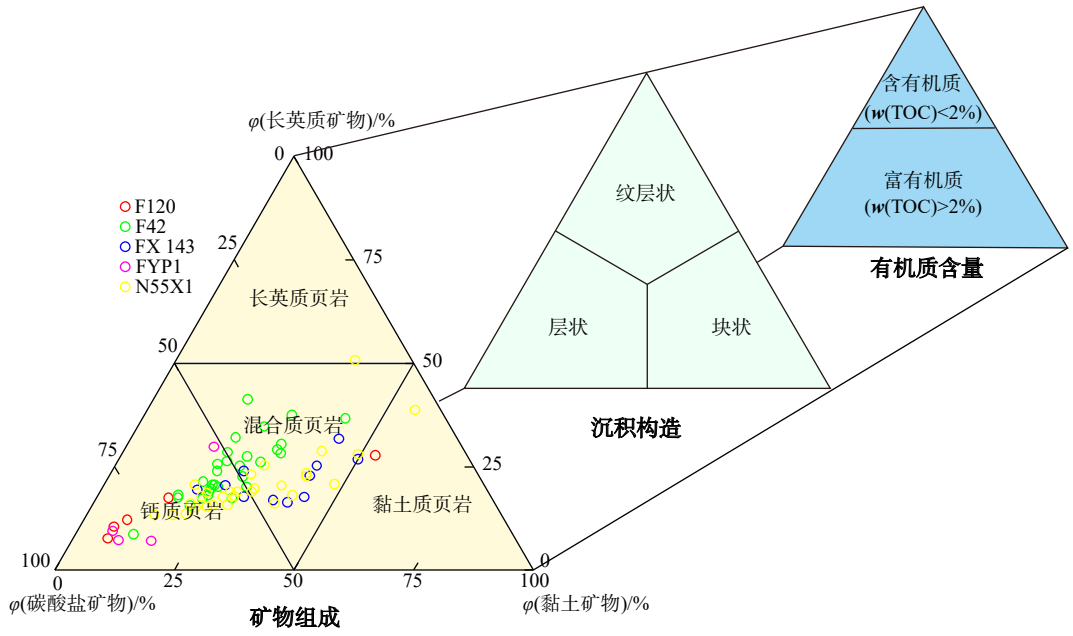


图 3　东营凹陷沙四上亚段页岩岩相划分方案（据文献 [28] 修改）

Fig. 3　Lithofacies classification of shale in the Upper Fourth Member of the Shahejie Formation in Dongying Sag

3 储集空间发育特征

3.1 储集空间类型

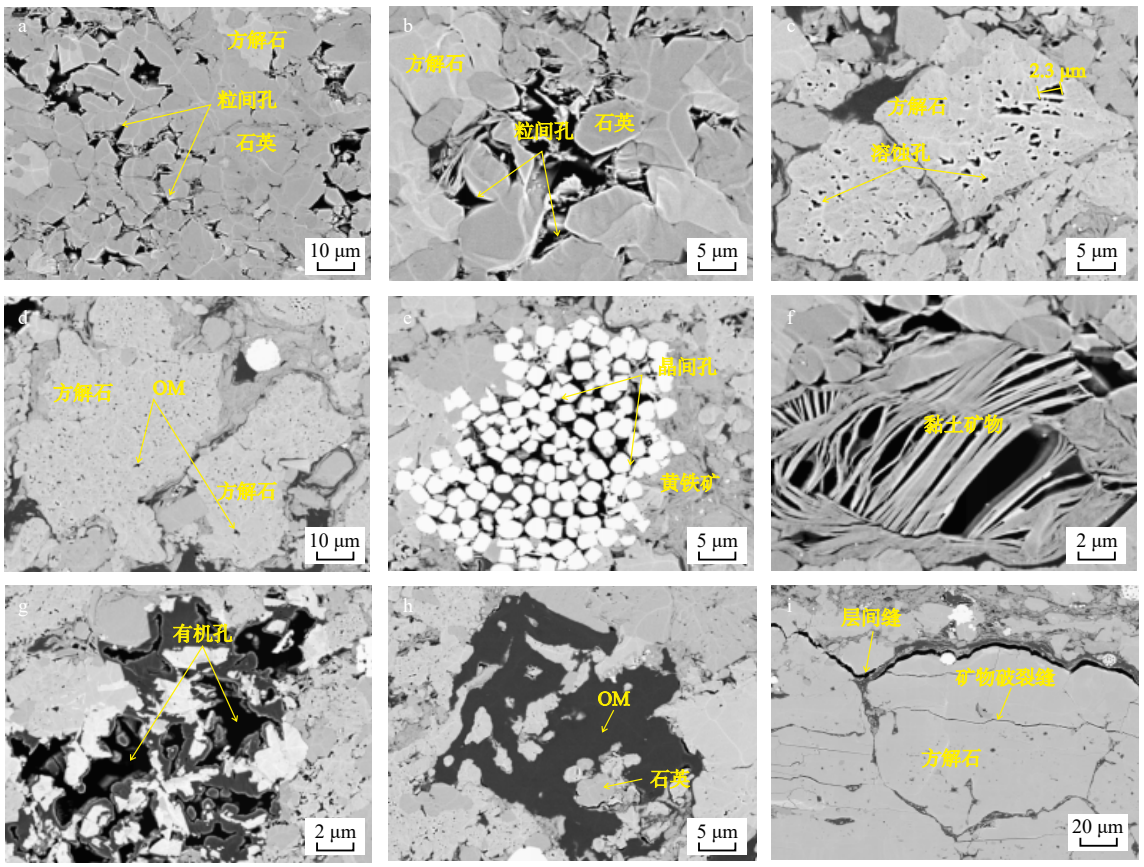
场发射扫描电镜试验(FE-SEM)观察结果显示，研究区沙四上亚段页岩发育多种孔隙类型，主要为无机孔，其次为有机孔和微裂缝。无机孔包括粒间孔、粒内溶孔、晶间孔等类型。其中，粒间孔主要发育于刚性矿物颗粒间(图 4a, b)，孔隙形态包括三角形、多角形和不规则形态，通常与刚性矿物颗粒分布密切相关。粒内孔主要发育于矿物颗粒内部，研究区页岩粒内孔主要为粒内溶孔(图 4c, d)，孔隙形态多样，包括楔形、三角形、四边形和椭圆形等多种类型。晶间孔是指在矿物晶体在生长过程中相互堆积所形成的孔隙，研究区页岩中晶间孔主要为黄铁矿晶间孔(图 4e)和黏土矿物晶间孔(图 4f)，部分晶间孔中还可见有机质充填。

有机孔是页岩中有机质在生烃演化过程中形成的孔隙，主要发育在有机质团块内部[29-30]。研究区页岩绝大部分有机质中并未发育有机孔，仅在少量有机质中可以观察到(图 4g, h)，这是因为陆相页岩有机质热演化程度较低导致的。

研究区页岩中微裂缝较为发育，主要为层间微裂缝(图 4i)，多发育在岩性互层的层理面上(图 4i)，裂缝规模在几十纳米到几十微米之间，是有效的油气运移通道。此外，一些矿物颗粒内部也发育有微裂缝，可能与构造作用或有机质生烃演化和黏土矿物转化脱水导致的岩石局部异常超压有关，矿物颗粒在压力或应力作用下发生破裂，从而形成微裂缝(图 4i)。

3.2 孔隙结构

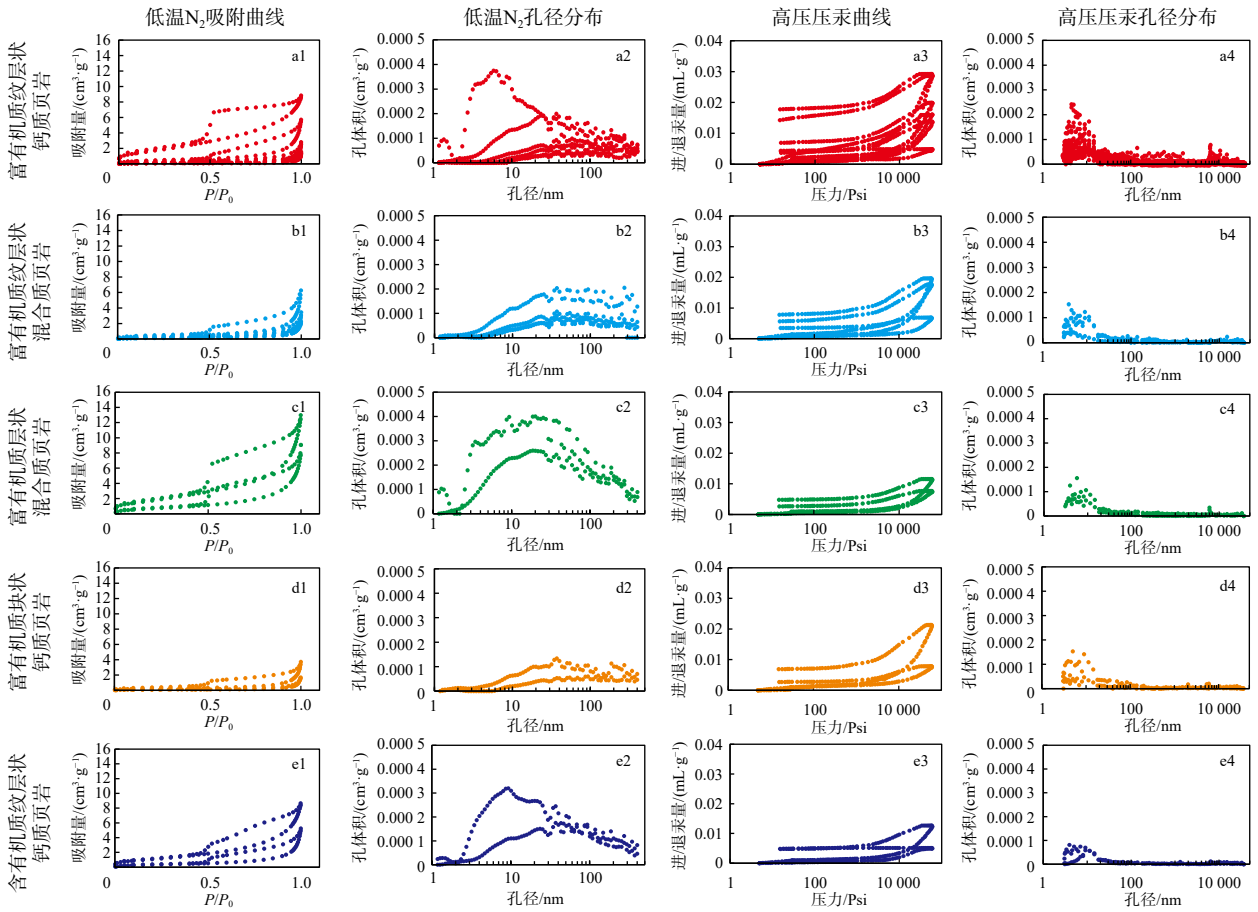
采用低温 N_2 吸附和高压压汞的方法，对研究区页岩的孔隙结构进行表征。低温 N_2 吸附结果表明，东营凹陷沙四上亚段页岩的孔隙形态整体表现出 H2 型(墨水瓶状孔)和 H3 型(平行板状孔)的混合特征(图 5)。其中，富有机质纹层状钙质页岩和富有机质层状混合质页岩的吸附曲线特征相似(图 5a1, c1)，迟滞环形态宽大，最大氮气吸附量平均值分别为 8.82, 12.99 cm^3/g，其次为含有机质纹层状钙质页(图 5e1)，迟滞环形态较为宽大，最大氮气吸附量为 8.65 cm^3/g，富有机质纹层状混合质页岩和富有机质



a, b. 粒间孔; c, d. 粒内溶孔; e. 黄铁矿晶间孔; f. 黏土矿物晶间孔; g. 有机孔; h. 有机质团块; i. 层间微裂缝与超压微裂缝

图 4 东营凹陷沙四上亚段页岩典型储集空间类型扫描电镜图像

Fig. 4 FE-SEM images of typical reservoir space of shale in the Upper Fourth Member of the Shahejie Formation in Dongying Sag



P/P_0. 相对压力, 代表实际压力与 N_2 在液氮温度下饱和蒸气压的比值; 1 psi=6.895 kPa

图 5　东营凹陷沙四上亚段页岩不同岩相低温 N_2 吸附和高压压汞实验结果

Fig. 5　Results of low-temperature N_2 adsorption and high-pressure mercury injection of different lithofacies of shale in the Upper Fourth Member of the Shahejie Formation in Dongying Sag

块状钙质页岩的迟滞环都呈狭小形态(图 5b1, d1), 最大氮气吸附量分别为 6.25, 3.74 cm^3/g。此外, 基于 DFT 理论模型[31-32], 计算了页岩 N_2 孔体积和孔径分布。结果表明, 研究区页岩孔体积介于 0.00239 ~ 0.02041 cm^3/g 之间, 平均为 0.00672 cm^3/g, 不同岩相孔径分布曲线均为单峰型, 但孔体积和峰值孔径区间存在一定差异(图 5a2, b2, c2, d2 和 e2)。高压压汞结果表明, 研究区不同岩相的压汞曲线形态差异不明显, 最大进汞量和退汞效率存在较大差异。其中, 富有机质纹层状钙质页岩的最大进汞量平均为 0.018 mL/g(图 5a3), 退汞效率为 52.28%。富有机质纹层状混合质页岩、富有机质层状混合质页岩和富有机质块状钙质页岩这 3 种岩相在曲线形态、最大进汞量以及退汞效率等方面未见明显差异(图 5b3, c3 和 d3), 最大进汞量分别为 0.009, 0.014, 0.015 mL/g, 退汞效率分别为 61.8%, 59.4%, 66.4%。含有机质纹层状钙质页岩的平均最大进汞量最低, 为 0.009 mL/g, 退汞效率整体较低, 平均 33.6%(图 5e3)。不同岩相高压压汞孔体积存在差异, 富有机质纹层状钙质页岩孔体积最大, 富有机质块状钙质页岩和含有机质纹层状钙质页岩孔体积较小。同时, 研究区高压压汞孔径分布主要为单峰型, 部分岩相出现双峰型的特征(图 5a4, b4, c4, d4 和 e4), 这可能与页岩中发育的微米级大孔和微裂缝有关。

受控于页岩孔隙表征方法本身的局限性和页岩孔隙结构的复杂性, 单一孔隙结构表征实验不能完全表征清楚页岩储层孔隙结构特征。低温 N_2 吸附主要针对孔径小于 100 nm 的微孔(<25 nm)和小孔(25 ~ 100 nm), 高压压汞则能较好地反映孔径大于 100 nm 的中孔(100 ~ 1000 nm)和大孔(>1000 nm)[33-34]。为了精准全面地表征页岩储层的孔隙结构特征, 以 100 nm 为拼接点将低温 N_2 吸附和高压压汞测试结果进行拼接, 对东营凹陷沙四上亚段储层孔隙特征进行全尺度联合表征(图 6)。

结果表明, 富有机质纹层状钙质页岩的平均孔体积为 0.0066 cm^3/g, 微孔体积平均占 22.09%, 小孔平

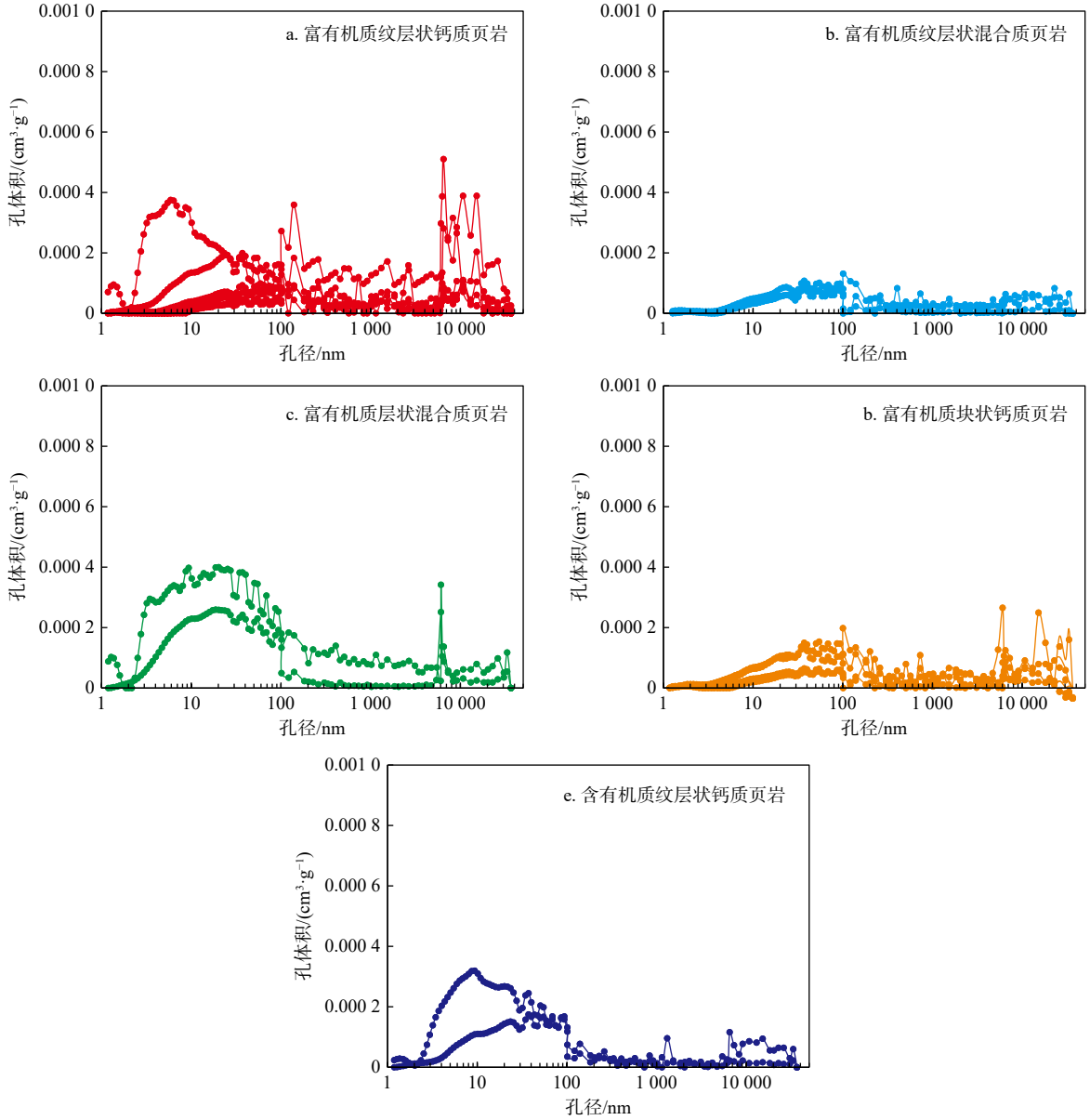


图 6　东营凹陷沙四上亚段页岩不同岩相低温 N_2 吸附和高压压汞联合表征结果

Fig. 6　Combined characterization results of low-temperature N_2 adsorption and high-pressure mercury injection of different lithofacies of shale in the Upper Fourth Member of the Shahejie Formation in Dongying Sag

均占 30.01%, 中孔平均占 19.13%, 大孔平均占 28.83%(图 6a); 富有机质纹层状混合质页岩的平均孔体积为 0.005 0 cm³/g, 微孔体积平均占 20.50%, 小孔平均占 38.27%, 中孔平均占 12.92%, 大孔平均占 28.31%(图 6b); 富有机质层状混合质页岩的平均孔体积为 0.005 7 cm³/g, 微孔体积平均占 51.00%, 小孔平均占 29.91%, 中孔平均占 6.75%, 大孔平均占 12.33%(图 6c); 富有机质块状钙质页岩的平均孔体积为 0.005 1 cm³/g, 微孔体积平均占 16.59%, 小孔平均占 31.10%, 中孔平均占 13.11%, 大孔平均占 39.20%(图 6d); 含有机质纹层状钙质页岩的平均孔体积为 0.006 2 cm³/g, 微孔体积平均占 38.27%, 小孔平均占 35.29%, 中孔平均占 8.36%, 大孔平均占 18.07%(图 6e)。综合来看, 富有机质纹层状钙质页岩的孔体积较大, 孔隙主要由微、小孔和大孔(缝)组成, 其次为富有机质层状混合质页岩和含有机质纹层状钙质页岩, 孔隙主要为微孔和小孔, 而富有机质块状钙质页岩孔体积较小。

4　储层发育影响因素

4.1　页岩物质组成

研究区页岩总孔体积与有机碳质量分数(w(TOC))总体呈负相关(图 7a1), 这是由于页岩

有机质孔隙发育程度低，有机孔对页岩孔体积的贡献不显著，这与扫描电镜观察结果一致（图 4g，h）。中孔体积与 w(TOC)呈正相关（图 7a4），这可能与有机质在热演化过程中产生的有机酸溶蚀不稳定矿物所形成的溶蚀孔隙有关。此外，过高的有机质含量可能会导致页岩支撑能力变弱，孔隙在压实作用影响下闭合，最终表现为微孔、小孔和大孔体积与 w(TOC)呈现先正相关后负相关的关系（图 7a2，a3，a5）。

研究区页岩总孔体积与长英质矿物体积分数呈现出弱正相关关系（图 7b1），说明研究区长英质矿物颗粒粒间孔对孔体积的贡献度相对较小。中孔体积与长英质矿物体积分数呈现弱正相关性（图 7b4），这可能与长石溶蚀有关。长英质矿物还可以形成稳定的刚性格架，使部分孔径较大的粒间孔或微裂缝不受压实作用或构造作用破坏，因此大孔体积与长英质矿物体积分数呈明显正相关（图 7b5）。

研究区页岩总孔体积与黏土矿物体积分数相关性不明显（图 7c1），但小孔体积与黏土矿物体积分数具有正相关关系，这可能与黏土矿物集合体中发育的小孔径狭缝状或楔状孔隙有关，与扫描电镜观察结果一致（图 4f、图 7c3）。

研究区页岩总孔体积与碳酸盐矿物体积分数具有正相关性，这可能与方解石的溶蚀作用有关，方解石在有机酸作用下容易发生溶蚀，形成大量溶蚀孔隙，改善了页岩储集性能[7, 28]。与此同时，碳酸盐矿物重结晶作用也会使页岩储集能力降低[35]（图 7d1）。

4.2　热成熟度

本研究使用最高热解峰温（T_{max}）来评价研究区页岩有机质热演化程度。小孔体积与有机质热演化程度指标 T_{max} 呈一定的负相关关系（图 7e3），而中孔体积与 T_{max} 则呈弱正相关关系（图 7e4），这表明随着有机质热演化，有机质生烃过程中释放的有机酸对不稳定矿物（方解石、长石等）进行溶蚀，形成孔径较大的溶蚀孔。值得注意的是，研究区页岩总孔体积与 T_{max} 并未呈现明显相关性（图 7e1），表明研究区页岩的孔隙结构以及控制因素复杂多样，热演化程度不是页岩孔隙结构特征的主要控制因素。

4.3　纹层结构

受沉积过程中的物源供给、季节交替以及气候变化等因素影响，页岩通常会显现出不同类型的纹层结构[10, 36-37]。这些纹层结构对于页岩储集性质和可压裂性至关重要，也会影响页岩储层流体的可动性[38]。济阳坳陷勘探实践表明，纹层对陆相页岩储集性与含油性均具有明显的控制作用，富有机质纹层状页岩出油井段数占总出油井段数的 70%，其次为富有机质层状页岩（约占 27%）[27]。

通过岩石薄片、高分辨率扫描电镜以及大视域拼接等方式，可识别出研究区纹层状、层状以及块状等不同沉积构造特征的页岩。通过比较富有机质纹层状钙质页岩、富有机质层状混合质页岩和富有机质块状钙质页岩的孔隙结构特征不难看出，不同沉积构造页岩的孔隙结构存在着明显差异（图 5，6）。富有机质纹层状页岩的孔体体积最大，发育较多的大孔和微裂缝，孔隙间具有较好的连通性（图 5，6）；而富有机质层状混合质页岩和富有机质块状钙质页岩的孔体积小于富有机质纹层状钙质页岩，其孔隙类型以微小孔为主，仅有少量样品发育大孔和微裂缝（图 5，6）。

为探究不同类型纹层对页岩储层的影响，进一步对比了不同类型纹层孔隙结构差异。研究区页岩发育多种类型纹层，包括长英质纹层、黏土质纹层、粗晶方解石纹层等。基于聚焦离子束扫描电镜（FIB-SEM），对不同类型纹层孔隙结构及连通性进行评价[39-40]。其中，长英质纹层厚度介于 200 ~ 600 μm，发育粒间孔、粒内溶孔等孔隙类型（图 8），孔隙度较高（4.58%），总孔隙占比大（6.24%），孔隙连通性较好（连通孔隙占比 5.31%）。黏土质纹层厚度介于 30 ~ 400 μm，微裂缝较为发育（图 8），孔隙度中等（1.18%），总孔隙占比为 1.24%，孔隙连通性中等（连通孔隙占比 0.71%）。粗晶方解石纹层厚度介于 100 ~ 150 μm，发育晶间孔、粒间孔等孔隙类型，孔隙内多被有机质充填（图 8），孔隙度约为 0.084%，总孔隙占 0.96%，孔隙连通性较差（连通孔隙占比 0.18%）。综上所述，长英质纹层是研究区储集性最好的纹层类型，黏土质纹层次之，粗晶方解石纹层相对较差。

5　结　论

（1）东营凹陷沙四上亚段发育多种类型页岩，综合矿物组成、有机质丰度和沉积构造，识别出 5 种主要的岩相类型，包括富有机质纹层状钙质页岩、富有机质纹层状混合质页岩、富有机质层状混合质页岩、富有机质块状钙质页岩和含有机质纹层状钙质页岩。

（2）研究区页岩孔隙类型主要为无机孔和微裂缝，有机孔基本不发育。无机孔包括粒间孔、晶间孔和粒内溶孔等，微裂缝主要是层间微裂缝和超压微裂缝。不同岩相页岩孔隙结构差异较大，富有机质纹层状钙质页岩孔体积较大，其次为富有机质层状

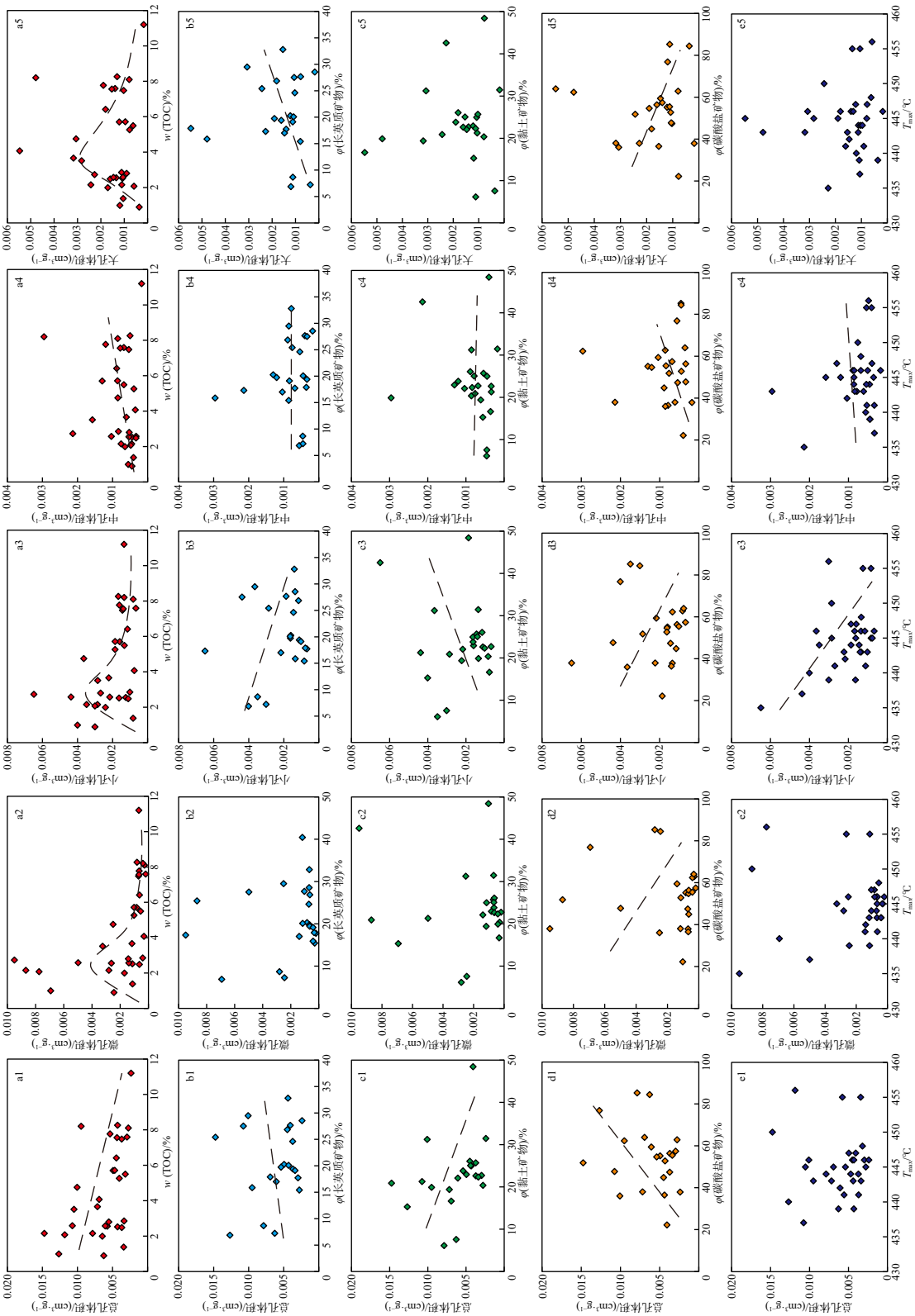


图 7　东营凹陷沙四上亚段页岩储层发育影响因素分析（T_{max} 为最高热解峰温）

Fig. 7　Analysis of factors influencing the development of shale reservoirs in the Upper Fourth Member of the Shahejie Formation in Dongying Sag

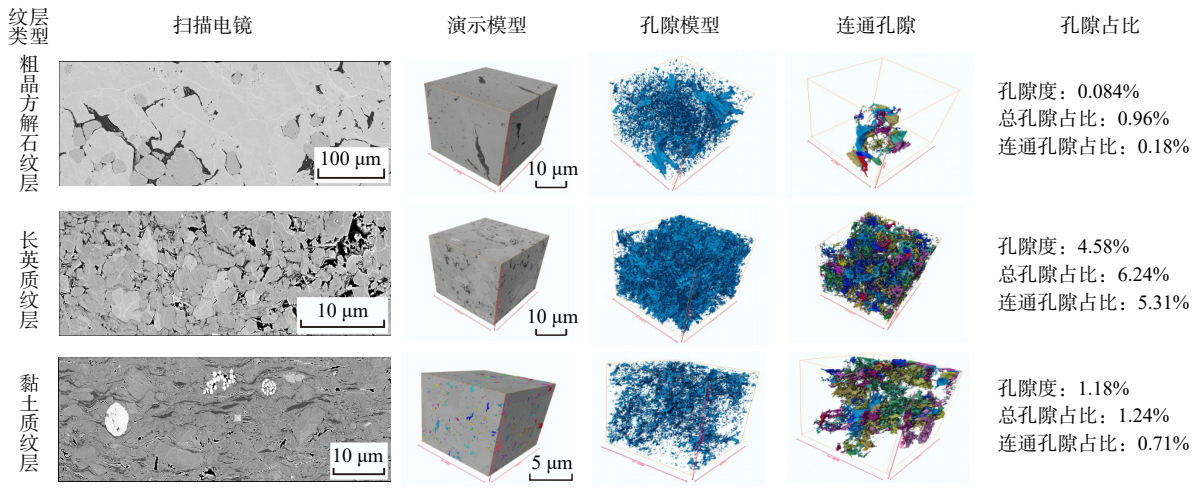


图 8　不同类型纹层基于三维 FIB-SEM 图像的孔隙定量表征结果

Fig. 8　Quantitative characterization results of pores based on three-dimensional FIB-SEM images for different types of laminations

混合质页岩和含有机质纹层状钙质页岩，富有机质块状钙质页岩孔体积较小。

（3）有机质丰度和纹层结构是研究区页岩储集性的主控因素。有机质生烃演化过程中产生的有机酸可促进溶蚀孔的形成，改善页岩储集性，但过高的有机质丰度也会导致页岩塑性增强，不利于孔隙保存。纹层结构有利于页岩孔缝的形成，不同类型纹层储集性存在差异，长英质纹层储集性较好，黏土质纹层次之，粗晶方解石纹层相对较差。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 邹才能, 马锋, 潘松圻, 等. 全球页岩油形成分布潜力及中国陆相页岩油理论技术进展 [J]. 地学前缘, 2023, 30(1): 128-142.
ZOU C N, MA F, PAN S Q, et al. Formation and distribution potential of global shale oil and the developments of continental shale oil theory and technology in China[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(1): 128-142. (in Chinese with English abstract)

[2] GOU Q Y, XU S, HAO F, et al. Full-scale pores and micro-fractures characterization using FE-SEM, gas adsorption, nano-CT and micro-CT: A case study of the Silurian Longmaxi Formation shale in the Fuling area, Sichuan Basin, China[J]. Fuel, 2019, 253: 167-179.

[3] 朱如凯, 张婧雅, 李梦莹, 等. 陆相页岩油富集基础研究进展与关键问题 [J]. 地质学报, 2023, 97(9): 2874-2895.
ZHU R K, ZHANG J Y, LI M Y, et al. Key issues in the basic research of non-marine shale oil enrichment[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(9): 2874-2895. (in Chinese with English abstract)

[4] 高凤琳, 宋岩, 梁志凯, 等. 陆相页岩有机质孔隙发育特征及其成因: 以松辽盆地长岭断陷沙河子组页岩为例 [J]. 石油学报, 2019, 40(9): 1030-1044.
GAO F L, SONG Y, LIANG Z K, et al. Development characteristics of organic pore in the continental shale and its genetic mechanism: A case study of Shahezi Formation shale in the Changling Fault Depression of Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(9): 1030-1044. (in Chinese with English abstract)

[5] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策 [J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14-26.
ZOU C N, YANG Z, CUI J W, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14-26. (in Chinese with English abstract)

[6] ZHAO R X, XUE H T, LU S F, et al. Multi-scale pore structure characterization of lacustrine shale and its coupling relationship with material composition: An integrated study of multiple experiments[J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 140: 105648.

[7] 匡立春, 侯连华, 杨智, 等. 陆相页岩油储层评价关键参数及方法 [J]. 石油学报, 2021, 42(1): 1-14.
KUANG L C, HOU L H, YANG Z, et al. Key parameters and methods of lacustrine shale oil reservoir characterization[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(1): 1-14. (in Chinese with English abstract)

[8] ROSS D J K, BUSTIN R M. Investigating the use of sedimentary geochemical proxies for paleoenvironment interpretation of thermally mature organic-rich strata: Examples from the Devonian-Mississippian shales, Western Canadian Sedimentary Basin[J]. Chemical Geology, 2009, 260(1/2): 1-19.

[9] CHALMERS G R, BUSTIN R M, POWER I M. Characterization of gas shale pore systems by porosimetry, pycnometry, surface area, and field emission scanning electron microscopy/transmission electron microscopy image analyses: Examples from the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus, and Doig units[J]. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 2012, 96(6): 1099-1119.

[10] 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题 [J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1031-1039.
JIANG Z X, LIANG C, WU J, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary

rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1031-1039. (in Chinese with English abstract)

[11] 张顺, 陈世悦, 鄢继华, 等. 东营凹陷西部沙三下亚段–沙四上亚段泥页岩岩相及储层特征 [J]. 天然气地球科学, 2015, 26(2): 320-332.
ZHANG S, CHEN S Y, YAN J H, et al. Characteristics of shale lithofacies and reservoir space in the 3rd and 4th members of Shahejie Formation, the west of Dongying Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(2): 320-332. (in Chinese with English abstract)

[12] 葛岩, 万欢, 黄志龙, 等. 页岩气储层微观孔隙结构影响因素及“三元”耦合控制作用 [J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(5): 17-23.
GE Y, WAN H, HUANG Z L, et al. Influencing factors and three-element coupled control on microscopic pore structure in shale gas reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(5): 17-23. (in Chinese with English abstract)

[13] XU S, HAO F, SHU Z G, et al. Pore structures of different types of shales and shale gas exploration of the Ordovician Wufeng and Silurian Longmaxi successions in the eastern Sichuan Basin, South China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2020, 193: 104271.

[14] 杨潇, 姜呈馥, 孙兵华, 等. 砂质纹层的发育特征及对页岩储层物性的影响: 以鄂尔多斯盆地南部中生界延长组为例 [J]. 延安大学学报(自然科学版), 2015, 34(2): 18-23.
YANG X, JIANG C F, SUN B H, et al. The sandy laminar characteristics and its effect on reservoir property of shale: A case study from the Upper Triassic Yanchang Fm in southern Ordos Basin[J]. Journal of Yanan University (Natural Science Edition), 2015, 34(2): 18-23. (in Chinese with English abstract)

[15] 万佳林, 于志超, 黄文辉. 陆相纹层型页岩油储集空间特征及其控制因素: 以松辽盆地长岭凹陷青山口组页岩为例 [J]. 天然气地球科学, 2024, 35(9): 1671-1687.
WAN J L, YU Z C, HUANG W H. Reservoir space and controlling factors of lacustrine laminated shale oil reservoir: A case study of Cretaceous Qingshankou Formation in the Changling Sag, southern Songliao Basin, NE China[J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(9): 1671-1687. (in Chinese with English abstract)

[16] 俞雨溪, 罗晓容, 雷裕红, 等. 陆相页岩孔隙结构特征研究: 以鄂尔多斯盆地延长组页岩为例 [J]. 天然气地球科学, 2016, 27(4): 716-726.
YU Y X, LUO X R, LEI Y H, et al. Characterization of lacustrine shale pore structure: An example from the Upper-Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(4): 716-726. (in Chinese with English abstract)

[17] 文杰, 徐尚, 苟启洋, 等. 页岩油微运移研究进展及意义 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(4): 1-14.
WEN J, XU S, GOU Q Y, et al. Research status and significance of shale oil micromigration[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(4): 1-14. (in Chinese with English abstract)

[18] 周立宏, 陈长伟, 甘华军, 等. 歧口凹陷沙一下亚段页岩形成环境及页岩油潜力综合评价 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(5): 19-30.
ZHOU L H, CHEN C W, GAN H J, et al. Shale formation environment and comprehensive evaluation of shale oil potential of the Lower First Member of Shahejie Formation in Qikou Sag[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(5): 19-30. (in Chinese with English abstract)

[19] 徐良伟, 杨克基, 鲁文婷, 等. 富有机质泥页岩微纳米孔隙系统演化特征及模式研究新进展 [J]. 沉积学报, 2022, 40(1): 1-21.
XU L W, YANG K J, LU W T, et al. New research progress on organic-rich shale micro- and nanoscale pore system evolution characteristics and models[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(1): 1-21. (in Chinese with English abstract)

[20] 胡素云, 白斌, 陶士振, 等. 中国陆相中高成熟度页岩油非均质地质条件与差异富集特征 [J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(2): 224-237.
HU S Y, BAI B, TAO S Z, et al. Heterogeneous geological conditions and differential enrichment of medium and high maturity continental shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(2): 224-237. (in Chinese with English abstract)

[21] APLIN A C, MACQUAKER J H S. Mudstone diversity: Origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2031-2059.

[22] 吴松涛, 朱如凯, 李勋, 等. 致密储层孔隙结构表征技术有效性评价与应用 [J]. 地学前缘, 2018, 25(2): 191-203.
WU S T, ZHU R K, LI X, et al. Evaluation and application of porous structure characterization technologies in unconventional tight reservoirs[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(2): 191-203. (in Chinese with English abstract)

[23] 王玉满, 李新景, 陈波, 等. 海相页岩有机质炭化的热成熟度下限及勘探风险 [J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(3): 385-395.
WANG Y M, LI X J, CHEN B, et al. Lower limit of thermal maturity for the carbonization of organic matter in marine shale and its exploration risk[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 385-395. (in Chinese with English abstract)

[24] 王伟庆, 王学军, 李政, 等. 东营凹陷低成熟页岩储集空间与分形特征: 以民丰洼陷沙四段上亚段页岩为例 [J/OL]. 油气地质与采收率: 1-11[2025-04-07]. https: //doi. org/10.13673/j. pgre. 202310005.
WANG W Q, WANG X J, LI Z, et al. Reservoir space and fractal characteristics of low-maturity shale in Dongying Sag: A case study of upper submember of the Fourth Member in Shaheiie Formation in the Minfeng area[J/OL]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency : 1-11[2025-04-07]. https://doi.org/10.13673/j.pgre.202310005. (in Chinese with English abstract)

[25] LIANG C, CAO Y C, LIU K Y, et al. Diagenetic variation at the lamina scale in lacustrine organic-rich shales: Implications for hydrocarbon migration and accumulation[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2018, 229: 112-128.

[26] 刘惠民. 济阳坳陷古近系页岩油地质特殊性及勘探实践: 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 H M. 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. (in Chinese with English abstract)

[27] 杨勇. 济阳陆相断陷盆地页岩油富集高产规律 [J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(1): 1-20.

YANG Y. Enrichment and high production regularities of shale oil reservoirs in continental rift basin: A case study of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(1): 1-20. (in Chinese with English abstract)

[28] 王冠民. 济阳坳陷古近系页岩的纹层组合及成因分类 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(3): 666-671.
WANG G M. Laminae combination and genetic classification of Eogene shale in Jiyang Depression[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(3): 666-671. (in Chinese with English abstract)

[29] CURTIS M E, CARDOTT B J, SONDERGELD C H, et al. Development of organic porosity in the Woodford Shale with increasing thermal maturity[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 103: 26-31.

[30] CLARKSON C R, SOLANO N, BUSTIN R M, et al. Pore structure characterization of North American shale gas reservoirs using USANS/SANS, gas adsorption, and mercury intrusion[J]. Fuel, 2013, 103: 606-616.

[31] BERTIER P, SCHWEINAR K, STANJEK H, et al. On the use and abuse of N_2 physisorption for the characterization of the pore structure of shales[J]. The Clay Minerals Society Workshop Lectures, 2016, 12: 151-161.

[32] GUAN Q Z, DONG D Z, WANG S F, et al. Preliminary study on shale gas microreservoir characteristics of the Lower Silurian Longmaxi Formation in the southern Sichuan Basin, China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 31: 382-395.

[33] 卢双舫, 李俊乾, 张鹏飞, 等. 页岩油储集层微观孔喉分类与分级评价 [J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(3): 436-444.
LU S F, LI J Q, ZHANG P F, et al. Classification of microscopic pore-throats and the grading evaluation on shale oil reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 436-444. (in Chinese with English abstract)

[34] 曾宏斌, 王芙蓉, 罗京, 等. 基于低温氮气吸附和高压压汞表征潜江凹陷盐间页岩油储层孔隙结构特征 [J]. 地质科技通报, 2021, 40(5): 242-252.
ZENG H B, WANG F R, LUO J, et al. Characteristics of pore structure of intersalt shale oil reservoir by low temperature nitrogen adsorption and high pressure mercury pressure methods in Qianjiang Sag[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(5): 242-252. (in Chinese with English abstract)

[35] 白辰阳. 济阳坳陷纹层碳酸盐岩成因及其对页岩油富集的指示意义 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
BAI C Y. Genesis of laminar carbonate rocks in Jiyang Depression and its indicative significance for shale oil enrichment[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2019. (in Chinese with English abstract)

[36] HU T, PANG X Q, JIANG F J, et al. Movable oil content evaluation of lacustrine organic-rich shales: Methods and a novel quantitative evaluation model[J]. Earth-Science Reviews, 2021, 214: 103545.

[37] LI T W, JIANG Z X, SU P B, et al. Effect of laminae development on pore structure in the Lower Third Member of the Shahejie shale, Zhanhua Sag, Eastern China[J]. Interpretation, 2020, 8(1): 103-114.

[38] 姜振学, 李廷微, 宫厚健, 等. 沾化凹陷低熟页岩储层特征及其对页岩油可动性的影响 [J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1587-1600.
JIANG Z X, LI T W, GONG H J, et al. Characteristics of low-mature shale reservoirs in Zhanhua Sag and their influence on the mobility of shale oil[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(12): 1587-1600. (in Chinese with English abstract)

[39] 孙亮, 王晓琦, 金旭, 等. 微纳米孔隙空间三维表征与连通性定量分析 [J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 490-498.
SUN L, WANG X Q, JIN X, et al. Three dimensional characterization and quantitative connectivity analysis of micro/nano pore space[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 490-498. (in Chinese with English abstract)

[40] 秦洋. 致密储层微观孔隙结构与连通性研究 [D]. 南京: 南京大学, 2021.
QIN Y. A study on micro pore structure and pore-throat connectivity in tight sandstone reservoir[D]. Nanjing: Nanjing University, 2021. (in Chinese with English abstract)

Summary for “渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段页岩储层特征及主控因素”

Characteristics and controlling factors of shale reservoirs in the Upper Fourth Member of the Shahejie Formation in Dongying Sag, Bohai Bay Basin

GAO Bo[1,2*]，HAO Fang[1]，ZHANG Zhiyao[3]

1. School of Earth Science and Technology, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong, 266580；
2. Binnan Oil Production Plant of Shengli Oil field Company, SINOPEC, Binzhou Shandong, 256600, China；
3. Shandong Institute of Petroleum and Chemical Technology, Dongying Shandong, 257061

* Corresponding author， E-mail：gaobo.slyt@sinopec.com

Abstract：[**Objective and Methods**] China has abundant continental shale oil resources, which serve as an important strategic substitute for conventional petroleum. The factors that influence shale reservoir development are crucial to understanding the enrichment mechanism of shale oil. This study focuses on the Upper Fourth Member of the Shahejie Formation, utilizing XRD, gas adsorption, high-pressure mercury injection, FE-SEM, and FIB-SEM to identify lithofacies types, characterize shale storage space and structures, and explore the factors influencing pore development in the shale. [**Results**] The results show that: ①Five primary lithofacies types are developed in the study area: Organic-rich laminated calcareous shale, organic-rich laminated mixed shale, organic-rich layered mixed shale, organic-rich massive calcareous shale, and organic laminated calcareous shale. ②The main types of reservoir spaces include intergranular pores, dissolution pores, intergranular pores, and microfractures, with organic pores being minimally developed. Significant differences in pore structure are observed across different shale types, with organic-rich laminated shale showing larger pore volumes. ③The abundance of organic matter and sedimentary structures (such as laminations) play a significant role in controlling shale reservoir properties. Organic acid dissolution leads to the formation of dissolution pores, enhancing reservoir performance. However, excessive organic matter abundance increases shale plasticity, hindering pore preservation. Laminated structures enhance reservoir properties, with felsic laminations showing the best reservoir properties, followed by clay laminations, and coarse calcite laminations having the poorest reservoir properties. [**Conclusions**] The research reveals the characteristics and controlling factors (organic matter abundance and laminations) of shale reservoirs in the Upper Fourth Member of the Shahejie Formation, providing valuable insights for the development of continental shale oil in the Bohai Bay Basin.

Key words: shale oil；reservoir property；lamination structure；Shahejie Formation；Dongying Sag；Bohai Bay Basin

Received：2024-11-18；Revised：2025-01-05；Accepted：2025-01-11

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240707