

陆相断陷湖盆页岩典型成岩作用对储集性能的控制 ——以济阳坳陷东营凹陷沙四上亚段为例

张鹏飞^{1,2}, 张 顺^{2,3}, 魏晓亮², 李军亮^{2,3}, 滕建彬^{2,3}, 王 鑫^{2,3}, 苗卓伟^{2,3},
刘鑫金³, 陈 涛^{2,3}, 王 勇^{2,3}

(1. 中国石化胜利油田分公司 西部油气勘探项目部, 山东 东营 257000; 2. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206; 3. 中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015)

摘 要:以济阳坳陷东营凹陷沙河街组四段上亚段(沙四上亚段)典型页岩为研究对象,采用岩心观察、薄片观察、X线衍射全岩矿物分析、扫描电镜观察、有机地球化学测试、低温氮气吸附实验和核磁共振实验等方法,分析页岩沉积环境、岩相及其组合特征,研究页岩成岩作用,探讨典型成岩作用对页岩储集性能的影响。结果表明:东营凹陷沙四上亚段典型页岩类型为纹层状碳酸盐页岩和混合类页岩,东营凹陷缓斜坡洼陷带主要发育富碳酸盐页岩岩相组合,陡斜坡深陷带发育混合类页岩岩相组合,湖盆边缘带发育富长英类和富黏土类页岩岩相组合;成岩作用类型多样,有机质演化与碳酸盐等矿物近源溶蚀,黏土矿物转化与自生石英沉淀代表页岩不同矿物相互作用的典型特点,有机质生烃与碳酸盐矿物—自生石英—黏土矿物成岩协同演化特征明显;生烃排酸背景下的方解石溶蚀和重结晶作用对储集性能有良好的改善作用;自生石英沉淀、长石溶蚀是陡坡混合类页岩典型的成岩、成储作用类型,自生石英集合体保留大量晶间孔,扩孔作用显著,长英质矿物质量分数与页岩孔隙度、纳米级孔隙体积呈近似正相关关系。该结果为东营凹陷页岩有利储集区优选和井位部署提供指导。

关键词:页岩油;混合页岩;成岩作用;储集性能;沙四上亚段;东营凹陷;济阳坳陷

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-4107(2025)06-0001-15

0 引言

页岩油是重要的石油接替资源。中国东部油田老区逐渐进入中高油气勘探程度阶段,勘探对象逐渐转向非常规新领域。济阳坳陷作为中国东部陆相断陷湖盆的典型代表,富有机质页岩层系多,分布范围广,富碳酸盐类和混合类页岩油商业产能获得战略性突破,20口井初期日产油超百吨,14口井累积产油过万吨,展示良好的勘探开发前景^[1-4]。页岩出油井在各凹陷层系分布^[1-2],平面上以东营凹陷最多,主要集中在沙河街组四段上亚段(沙四上亚段(E_{s_4s}))和沙河街组三段下亚段(沙三下亚段(E_{s_3x})),东营凹陷沙四上亚段页岩是最早取得页岩油突破的主力层系。对富有机质页岩成岩作用及其演化过程研究较少,影响成储机制和储层评价等方面研究及页岩油勘探突破。

陆相断陷咸化湖盆页岩沉积和成岩等地质条件具有特殊性^[3-6],受气候和水体等环境影响明显,岩相类型多、相变快,有机质参与,成岩环境相对封闭,陆相页岩成岩矿物类型及演化过程复杂,造成页岩储集空间多样,基质孔隙与多尺度裂缝表现强烈的非均质性^[1,3]。关于陆相富有机质页岩成岩研究,主要集中于成岩现象识别和成岩作用特征分析。东营凹陷是陆相断陷咸化湖盆的典型代表,细粒沉积物在埋藏过程中经历复杂的有机—无机协同成岩作用改造,对页岩储层的物质组成、孔隙微观结构、岩石物性和力学性质具有重要的影响,是控制页岩储层发育与演化的重要因素^[6-12]。人们认为页岩中方解石和白云石等不稳定矿物溶蚀、方解石重结晶、黏土矿物转化^[4-7],以及有机质生烃排酸等是陆相页岩典型的成岩作用类型^[7-10],探讨有机—无机成岩作用,建立富碳酸盐页岩成岩演化序列^[1,3,11]。储集特征的研究主要集中于采用多方法、多尺度表征陆相页岩储集空间和微观孔缝结构等特征,明确富碳酸盐类页岩的储集性能,关

收稿日期:2024-09-04;编辑:刘丽丽

基金项目:国家科技重大专项(2024ZD1400100);国家自然科学基金企业联合基金项目(U24B6002)

作者简介:张鹏飞(1981—),男,博士,研究员,主要从事石油地质基础和油气勘探部署方面的研究。

通信作者:张 顺,E-mail: satisfacotryshun@163.com

于成岩作用对储集特征的控制研究较少。

以东营凹陷古近系沙四上亚段页岩为研究对象,笔者分析洼陷区典型取心井资料,采用岩心观察、薄片观察、X线衍射全岩矿物分析、扫描电镜观察、有机地球化学测试、低温氮气吸附实验和核磁共振实验等方法,研究页岩典型成岩作用,探讨典型成岩作用对页岩储层储集空间及储集性能的控制,为东营凹陷页岩有利储集区优选和井位部署提供指导。

1 区域地质概况

东营凹陷位于济阳拗陷东南部,是典型的开阔中、新生代箕状凹陷和济阳拗陷最大的次级负向构造单元,北为滨县、陈家庄凸起,南为鲁西隆起,东西长度为 90 km,南北宽度为 65 km,面积约为 5 700 km²^[13-14]。东营凹陷边界断层主要发育于盆地北部,以坡坪式边界断层为代表,发育中央隆起带,盆地结构为北断南超的复杂单断型,可以划分为陡坡带、深陷带、中央隆起带、洼陷带和缓坡带 5 个构造带。洼陷区由利津、博兴、牛庄和民丰 4 个次级洼陷构成(见图 1)。

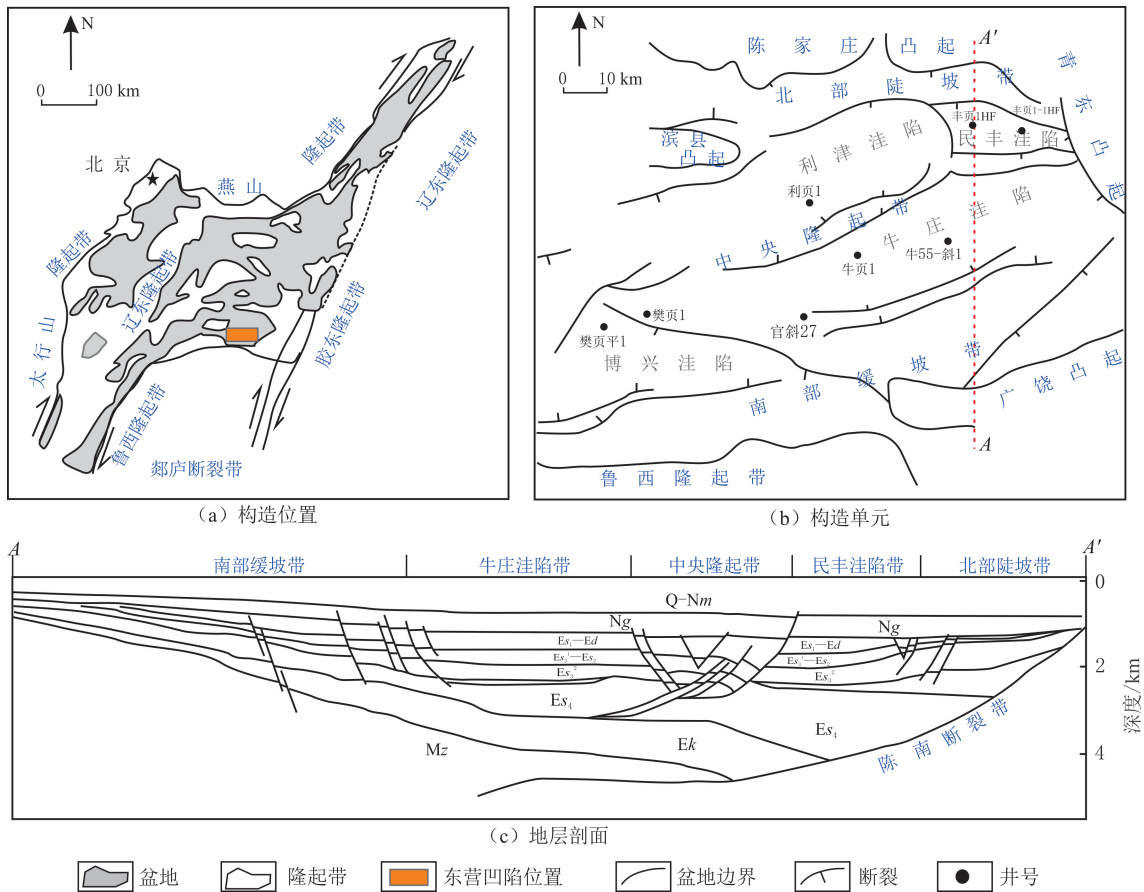


图 1 东营凹陷构造位置、构造单元及地层剖面(据文献[3]修改)

Fig. 1 The structural position, structural units and stratigraphic section of the Dongying Sag(modified by reference[3])

总体上,东营凹陷新生代构造演化特征:古近系为断陷特征,新近系为拗陷特征。受喜马拉雅运动的幕式活动控制,东营凹陷发育与演化具有明显的阶段性,构造演化经历裂陷期、断陷期和拗陷期 3 个阶段^[13-15]。初始裂陷期,由于气候总体处于干旱、半干旱状态,发育以冲积扇、膏盐为代表的沉积充填类型。东营凹陷古近系体现陆相断陷盆地从初始,到发展、鼎盛,再到萎缩的构造沉积演化过程,叠加古气候、物源供给和地层充填等条件,形成丰富多样的沉积体系及有效的油气聚集。深陷扩张期,气候潮湿,湖盆范围广大,水体达到最深,在半深湖—深湖背景下,斜坡区(陡、缓坡带)发育各种三角洲,洼陷区充填大套富有机质页岩等细粒沉积。沙四段沉积晚期—沙三段沉积早期是东营凹陷的主要断陷活动期,湖盆水体深

度增加,存在多个湖侵和湖退旋回,形成一系列包括从咸水至淡水的多种湖相泥页岩沉积,暗色泥岩总厚度超过 1 km。

东营凹陷沙四上亚段沉积时期,断陷活动逐渐加强,气候转向湿润,降水量增加,逐渐逼近并略大于蒸发量,湖平面逐步上升(见图 2),迅速淹没凹陷宽缓的南斜坡和较陡的北斜坡。沙四上亚段沉积时期,湖泊水体较浅、较咸,属于咸水环境^[3]。沙四上亚段沉积早期至晚期,水体咸化程度逐渐减弱,陆源碎屑输入能力增强。在构造和气候控制下,沉积环境及湖水介质演化决定页岩的沉积物质来源、成岩流体性质的多样性。沙四上亚段从下至上的古气候由半湿润演变为湿润,碎屑物源由少物源演变为多物源,水体由浅水演变为深水,由盐水演变为半咸水,沉积环境由强还原演变为还原^[1,3]。

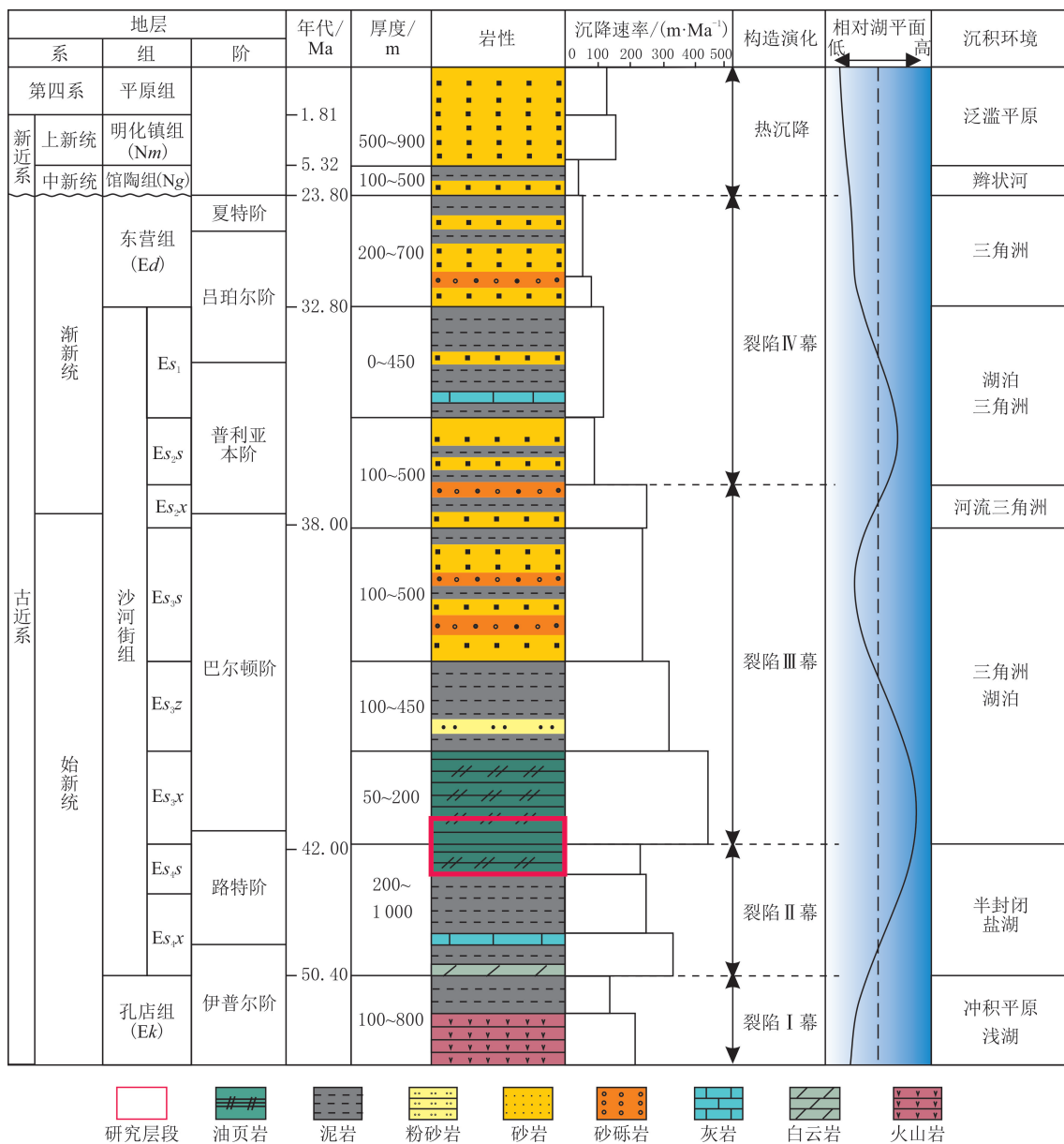


图 2 东营凹陷湖盆演化及岩性剖面
Fig. 2 Evolution diagram of lake basin and lithological section in Dongying Sag

2 样品选取与实验方法

实验样品采自东营凹陷 4 个主要洼陷(利津、博兴、牛庄和民丰)的 6 口钻井,进行基于 X 线衍射(XRD)测试的矿物组分分析、基于薄片图像和扫描电镜图像的微观结构分析、基于扫描电镜—阴极发光

(SEM-CL)的成岩矿物特征分析,以及基于扫描电镜—能谱(SEM-EDS)的微观矿物识别分析。

XRD 测试样品 300 块,使用粉碎机用水将样品研磨至小于 5 mm,在 110 °C 温度下烘干去除水分。使用 Bruker D8 DISCOVER X 线衍射仪,以 2°/min 的速率从 3°提升到 70°扫描样品。使用 Leica 光学显微镜对 215 块样品进行薄片观察,获取页岩纹层分布及矿物特征信息。使用 ZEISS 及 FEI 扫描电镜对 80 块样品进行 SEM 图像拍摄,拍摄前分别使用不同目数砂纸和 Leica EM TIC 3X 离子研磨仪对样品进行抛光。对其中 25 块样品进行 SEM-CL 和 SEM-EDS 分析,使用 CL 探头为 MonoCL4,波长为 185~850 nm,EDS 探头为牛津仪器 EDS。镜质体反射率按照 SY/T 5124—2012《沉积岩中镜质体反射率测定方法》测定,使用 MPV-SP 显微光度计在油浸下测定。

3 实验结果

3.1 矿物岩石学特征

矿物成分控制页岩的沉积成岩、储集物性及脆性等特征。根据样品 X 线衍射分析结果,东营凹陷沙四上亚段页岩主要矿物包括黏土矿物、石英、钾长石、斜长石、方解石、白云石、硬石膏、菱铁矿和黄铁矿等。黏土矿物质量分数为 2.00%~53.00%,靠近北部陡坡带的利津和民丰洼陷黏土矿物平均质量分数为 37.70%;石英质量分数为 2.00%~43.00%,平均为 23.00%;长石质量分数普遍小于 10.00%,其中钾长石质量分数<斜长石质量分数;碳酸盐矿物质量分数普遍较高,其中,方解石质量分数为 25.00%~50.00%,白云石质量分数为 6.00%~10.00%,靠近南部缓坡带的博兴和牛庄洼陷碳酸盐矿物质量分数高于近北部陡坡带的民丰和利津洼陷的(见表 1)。

表 1 东营凹陷不同洼陷沙四上亚段页岩样品全岩矿物质量分数

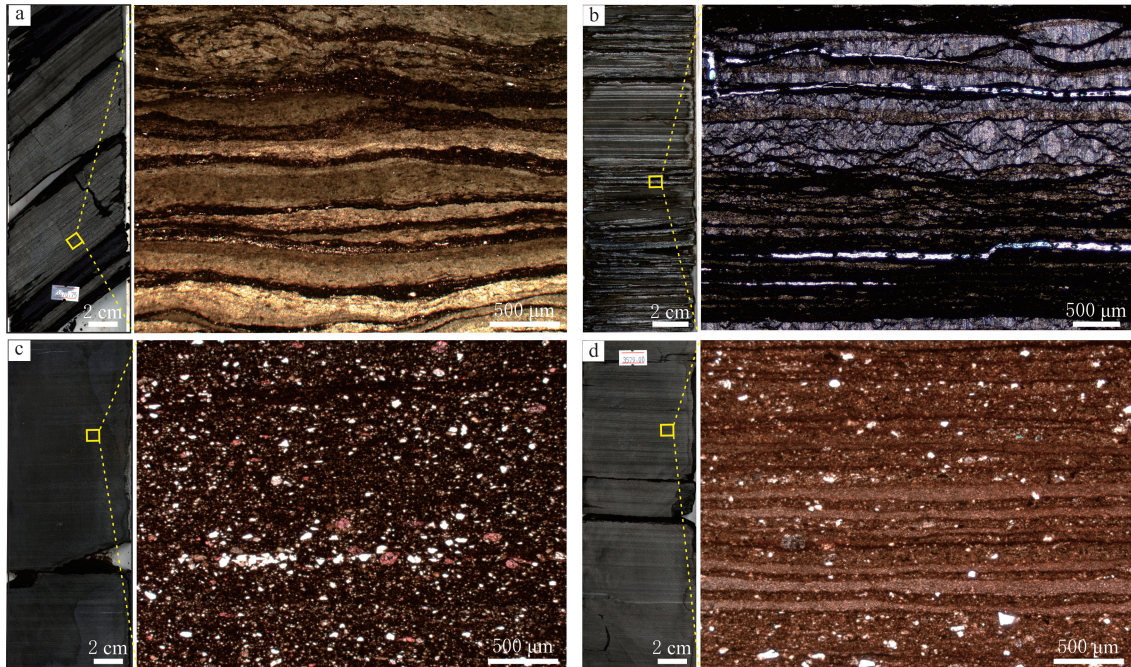
洼陷	井号 (样品数)	w(黏土矿物)	w(石英)	w(钾长石)	w(斜长石)	w(方解石)	w(白云石)	w(黄铁矿)	w(硬石膏)	w(菱铁矿)	%
博兴	樊页平 1 (55)	3.00~32.00 13.40	5.00~30.00 17.24	1.00~8.00 4.00	1.00~32.00 4.80	13.00~85.00 49.56	3.00~62.00 12.43	1.00~11.00 3.73	1.00~1.00 1.00	1.00~1.00 1.00	
	樊页 1 (60)	2.00~50.00 15.80	2.00~43.00 22.38	—	1.00~35.00 5.64	2.00~80.00 38.12	1.00~95.00 16.57	1.00~24.00 2.57	—	—	
牛庄	牛页 1 (70)	5.00~41.00 18.92	10.00~43.00 25.07	—	1.00~6.00 1.97	2.00~72.00 45.89	1.00~63.00 6.18	1.00~15.00 2.30	—	1.00~3.00 1.12	
	牛 55—斜 1 (30)	2.00~46.00 20.44	5.00~38.00 19.38	1.00~6.00 3.43	1.00~16.00 6.28	4.00~88.00 39.90	1.00~56.00 9.55	—	—	1.00~6.00 1.46	
民丰	丰页 1HF (50)	11.00~53.00 32.91	5.00~39.00 21.24	1.00~4.00 2.33	1.00~7.00 3.48	1.00~55.00 27.28	2.00~80.00 10.22	1.00~5.00 2.29	1.00~3.00 1.34	1.00~5.00 2.29	
利津	利页 1 (35)	13.00~47.00 32.37	11.00~42.00 26.79	—	2.00~12.00 5.26	1.00~48.00 24.78	2.00~60.00 9.28	—	1.00~4.00 1.31	—	

注: $\frac{\text{最小} \sim \text{最大}}{\text{平均}}$ 。

在岩石薄片观察和 X 线衍射全岩矿物分析的基础上,明确页岩的主要矿物组成和岩石组成。根据主要矿物组成,将东营凹陷沙四上亚段页岩划分为富碳酸盐类页岩、富长英类页岩、富黏土类页岩和混合类页岩(碳酸盐矿物、长英质矿物和黏土矿物质量分数小于 50.00%)4 类。

3.2 岩相及其组合发育特征

根据“三端元四要素”岩相划分方案^[16-17],以及页岩沉积构造(纹层状、层状、块状)和有机质质量分数、碳酸盐矿物晶体形貌,对页岩岩相类型进行细分。东营凹陷沙四上亚段页岩主要发育富有机质纹层状碳酸盐页岩、富有机质层状碳酸盐页岩、富有机质纹层状灰质混合类页岩、富有机质纹层状黏土页岩、含有机质层状长英页岩等岩相类型。其中,混合类页岩岩相三端元矿物质量分数小于 50.00%,若碳酸盐矿物质量分数大于黏土矿物和长英质矿物的,则为碳酸盐质混合类页岩相;若黏土矿物质量分数最大,则为黏土质混合类页岩相;若长英质矿物质量分数最大,则为长英质混合类页岩相。纹层状碳酸盐页岩和灰质混合类页岩相最为常见(见图 3-4),是持续获得页岩油产能突破的代表性岩相类型。



(a) 纹层状碳酸盐页岩, 樊页平1井, 3 470.50 m, 泥微晶方解石纹层与富有机质黏土矿物层垂向频繁叠置, 碳酸盐矿物质量分数为60.00%, 黏土矿物质量分数为14.00%, 长英质矿物质量分数为22.00%; (b) 纹层状粗晶碳酸盐页岩, 牛55-斜1井, 3 347.07 m, 方解石有不同程度的重结晶现象, 粗晶方解石纹层与微晶方解石纹层、富有机质黏土层互层, 碳酸盐矿物质量分数为68.00%; (c) 层状灰质混合类页岩, 丰页1-1HF井, 3 579.50 m, 方解石与长英质、黏土矿物及白云石混合, 整体呈定向结构, 碳酸盐矿物质量分数为43.00%; (d) 纹层状混合类页岩, 丰页1HF井, 3 786.80 m, 方解石纹层与混合纹层互层, 局部有机质纹层、细粉砂顺纹层分布, 黏土矿物质量分数为39.00%, 长英质矿物质量分数为40.00%

图 3 东营凹陷沙四上亚段典型页岩岩相类型岩心与岩石薄片
Fig. 3 Core and thin section of typical shale lithofacies in Es₄s of Dongying Sag

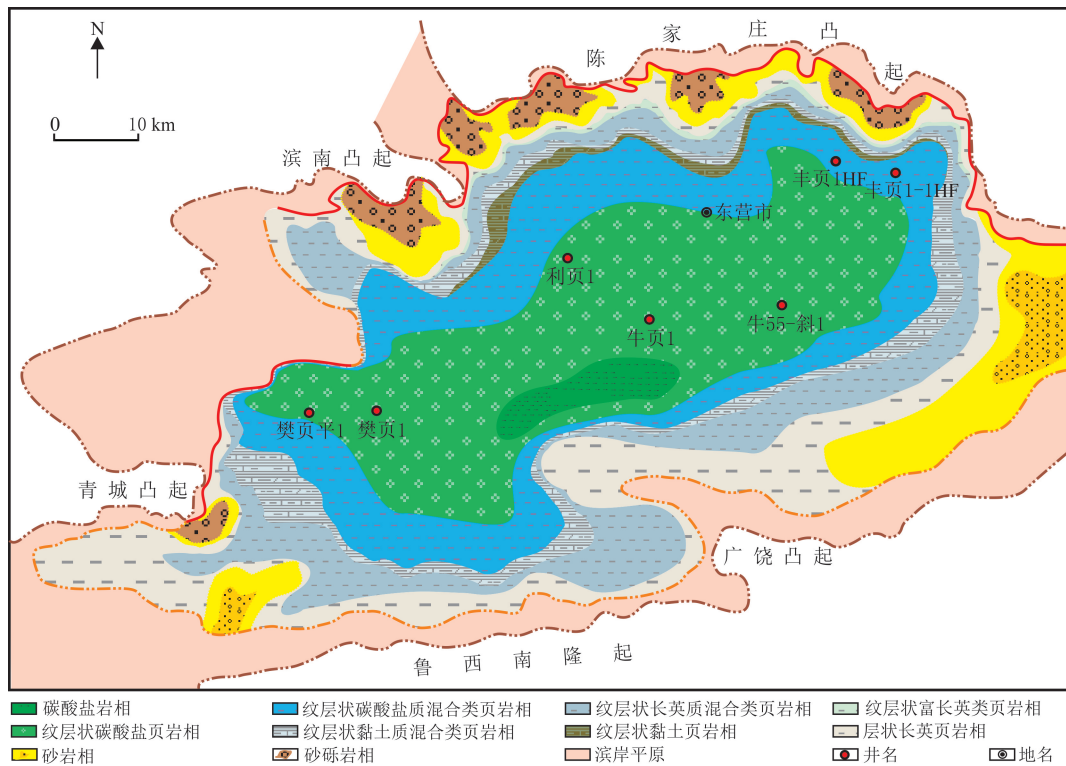


图 4 东营凹陷沙四上亚段页岩岩相及组合发育分布
Fig. 4 Distribution characteristics of shale lithofacies and its assemblage in Es₄s of Dongying Sag

不同沉积环境和沉积构造位置的页岩类型存在差异^[18-22],且不同页岩岩相往往以组合形式产出。平面分布受陆源碎屑物质供给、古气候、水介质和古湖盆底形控制显著(见图4),凹陷缓斜坡洼陷主体页岩层系底部主要是纹层状碳酸盐页岩夹灰质混合类页岩,向浅部逐渐过渡为层状碳酸盐页岩与混合页岩互层组合。陡斜坡深陷带发育混合类页岩岩相组合,沿陡坡带向盆地中心方向由长英质混合类页岩向纹层状黏土质混合类页岩过渡,黏土页岩分布局限;湖盆边缘带发育富长英和黏土页岩岩相组合,在毗邻物源供给区和重力流区域,普遍发育厘米级到分米级厚度的砂岩夹层^[13-15]。总体上,富有机质纹层状碳酸盐页岩及混合类页岩是东营凹陷沙四上亚段沉积时期最为发育的页岩岩相类型。

3.3 典型成岩现象及成岩作用

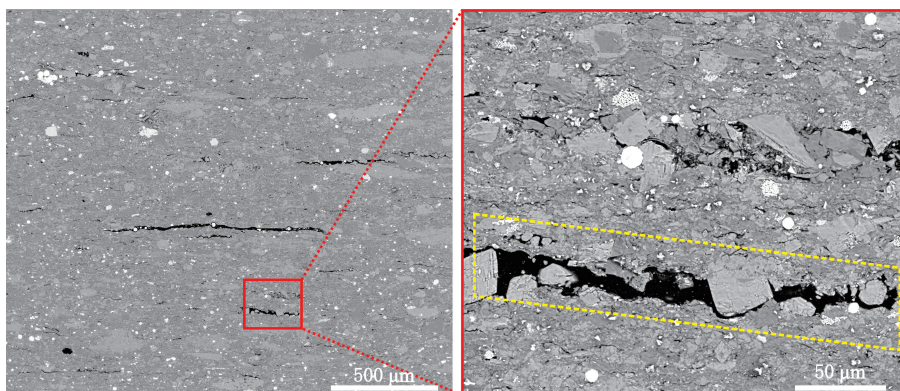
陆相断陷盆地页岩矿物成分和组构类型多样。东营凹陷沙四上亚段页岩是由碳酸盐矿物、长英质矿物、黏土矿物及有机质等构成的复杂集合体^[6,23-25]。不同的沉积环境产生特定的矿物组合。在埋藏演化过程中,干酪根热解与无机矿物成岩相互耦合,控制页岩成岩作用类型和成岩演化特点^[7]。根据岩心观察、岩石薄片观察、扫描电镜及元素分析等,识别东营凹陷沙四上亚段页岩主要发育压实、胶结、交代、有机质生烃演化和溶蚀等成岩作用类型^[24-26]。

3.3.1 有机质演化与近源溶蚀

有机质演化是页岩成岩作用中最典型的成岩作用。东营凹陷沙四上亚段页岩是一套典型的富有机质中等热演化程度的页岩, R_o 介于0.60%~0.82%,总有机碳质量分数($w(\text{TOC})$)主体在1.00%~6.00%之间,最高为12.00%。较好的有机质类型是有机质孔发育的必要条件,但相对较低的热演化程度在一定程度上制约有机质孔的演化^[9-10]。对于以无机孔缝为主要储集空间的陆相页岩,有机质演化除形成一部分有机质孔外,更重要的作用是对临近无机矿物的溶蚀、溶解作用。低成熟阶段有机质产生的 CO_2 与微量有机酸驱动碳酸盐胶结的显著溶蚀,形成以微米级晶间孔为主的孔隙网络^[27-28]。东营凹陷沙四段未成熟I型干酪根产酸潜力介于6.71~35.59 mg/g^[7],在干酪根生烃过程中存在较长的产酸周期,控制水溶液的pH,持续生烃能力强。酸性流体的溶蚀作用对易溶矿物的最终成岩面貌至关重要。

东营凹陷沙四上亚段页岩溶蚀现象普遍存在,如方解石、(铁)白云石、长石、石英和黄铁矿等,其中方解石等碳酸盐矿物的溶蚀最为常见^[7-10]。对于纹层状富碳酸盐页岩,最常见的是对毗邻有机质的(铁)方解石和(铁)白云石的溶蚀,扫描电镜下可见碳酸盐矿物内部及颗粒边缘溶蚀现象(见图5),在有一定重结晶作用下的方解石纹层内部及纹层界线处,溶蚀作用形成的连通孔隙及孔缝网络效应更加明显(见图5(d));对于成分混积明显的混合页岩,除方解石等碳酸盐矿物近源溶蚀现象外,有机酸对长石的溶解普遍存在。长石溶蚀溶解导致向黏土矿物转化,同时伴随二氧化硅析出。

在中深层封闭体系中,长石和方解石等碳酸盐矿物溶蚀顺序为有机质热演化释放的酸性产物优先溶蚀长石矿物。相较于方解石,长石溶蚀的较高化学反应平衡常数决定埋藏条件下长石溶蚀作用缓慢但长期持续^[29],长石和方解石存在接力溶蚀现象^[29-30],在溶蚀作用较强的区域破坏颗粒的完整性。



(a) 层状混合类页岩中近水平方向微裂缝,有机质分布,丰页1HF井,3665.25 m

(b) 图(a)中线框部分,临近有机质,白云石边缘及方解石溶蚀现象,丰页1HF井,3665.25 m

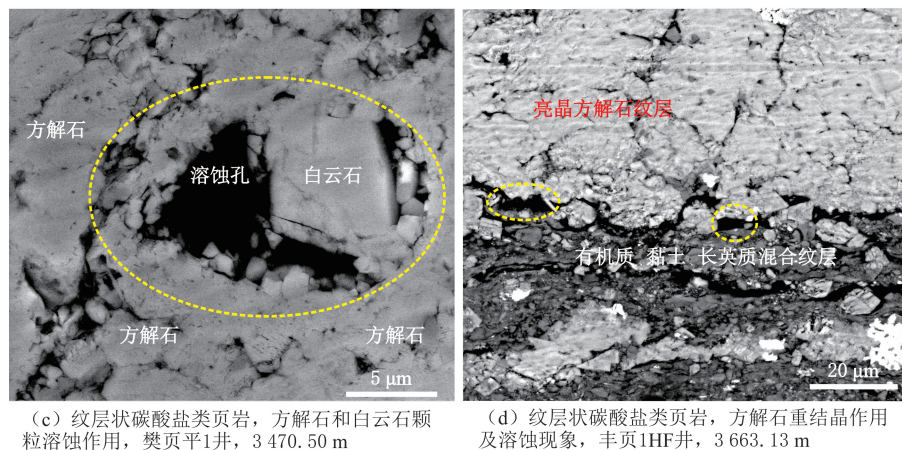


图5 东营凹陷沙四上亚段页岩碳酸盐矿物溶蚀现象

Fig. 5 The dissolution phenomenon of shale carbonate minerals in Es_{4s} of Dongying Sag

3.3.2 黏土矿物转化与自生石英沉淀

黏土矿物转化是页岩层系最为重要的成岩成储作用之一,为相对封闭的页岩成岩体系提供重要的成矿物质来源。蒙脱石伊利石化是沉积岩最重要的一种矿物转化类型。随埋深增加、温度升高,蒙脱石向伊利石转化首先形成伊/蒙混层矿物,随转化程度增加,伊/蒙混层矿物的结构由无序趋于有序。东营凹陷页岩层系中石英主要是陆源碎屑石英^[26-31],呈分散状或层状发育于页岩基质。根据石英矿物形态、产状及伴生组分关系,自生石英在东营凹陷沙四上亚段页岩层系中较为常见,尤其是在凹陷北部陡斜坡洼陷页岩中。

在蒙脱石向伊利石转化过程中,蒙脱石质量的17%~23%转化成SiO₂,形成自生石英^[7]。自生石英颗粒较小,在阴极发光图像上表现为核部发光,发光强度为弱—不发光^[32-33],边缘发光强度较强,指示在形成过程中成岩流体环境发生变化。自生石英主要以微晶石英集合体和顺纹层局部呈分散状产出,与陆源石英呈棱角状、阴极发光强的特征显著不同(见图6)。晶形较好的自生石英颗粒多呈六方形,石英颗粒大小不一,粒径介于1~5 μm(见图6-7),常与陆源石英、方解石、(铁)白云石和黏土矿物等构成混合纹层。

自生石英成因主要来源于黏土矿物转化脱硅作用。北部陡斜坡毗邻东营凹陷北部物源供给区,其中民丰地区源区母岩主要是花岗片麻岩,抗风化能力较强^[31],母岩提供大量K⁺,富含大量K⁺的偏咸水流体有助于高岭石和蒙脱石向伊利石转化;北部陡坡带尤其是民丰洼陷混合类页岩中伊利石质量分数达到99%(主要集中在96%~98%之间),黏土矿物转化比较充分,转化过程中释放大量的SiO₂,形成自生石英,K⁺质量分数越高,形成的伊利石矿物越细,形成大量的伊利石等黏土矿物晶间孔。相同埋深条件下,东营凹陷博兴洼陷页岩层系伊/蒙混层比为0.5~0.6,自生石英占比低于靠近物源供给区的民丰洼陷的。

不同类型页岩成岩作用存在差异。南部富碳酸盐类页岩主要由不同结晶程度的方解石纹层和泥质纹层构成,以博兴洼陷富有机质纹层状微、细晶碳酸盐页岩为例,泥质纹层内部主要是黏土矿物转化和有机质生烃演化,方解石纹层典型的成岩作用类型是方解石重结晶和溶蚀^[10];纹层状混合类页岩中自生石英占比较富碳酸盐类页岩及层状灰质混合类页岩的增加,除黏土矿物转化外,自生石英沉淀是最典型的成岩作用类型,在矿物混合均匀的纹层或层内部,长石颗粒的溶蚀较为常见。

3.3.3 成岩演化序列

在成岩作用和成岩现象观察基础上,根据电子探针元素扫描及碳、氧同位素测试数据^[10-11],厘定东营凹陷沙四上亚段页岩主要是中成岩阶段产物,其中博兴洼陷沙四上亚段页岩成熟度稍高。以最典型的富有机质纹层状碳酸盐页岩和碳酸盐质混合类页岩为例,建立东营凹陷页岩成岩演化序列(见图8)。

东营凹陷沙四上亚段页岩有机—无机协同演化作用明显。有机质生烃形成酸性成岩流体环境,溶蚀碳酸盐和长石等矿物。随埋深增加,有机酸质量分数经历从低到高再到低的过程,峰值对应的埋深在3 000 m左右,游离态的有机酸形成演化过程,与油气生成过程及大孔径次生孔隙演化过程具有较强的一

致性^[2,10]。碳酸盐矿物重结晶作用与有机质演化作用关系密切,有机质生烃促进亮晶方解石发育,油气生成和有机酸溶蚀作用同步,方解石等碳酸盐矿物溶蚀后伴随富 Ca^{2+} 流体的沉淀作用,重结晶作用更明显,氧同位素多数具有高负值特征^[10],说明方解石重结晶作用普遍发生在中成岩阶段后期,少量发生在早成岩阶段,在粗晶方解石之间或有机质纹层与亮晶纹层之间,接受酸性流体改造而形成通畅的流体环境,起增孔扩容作用。

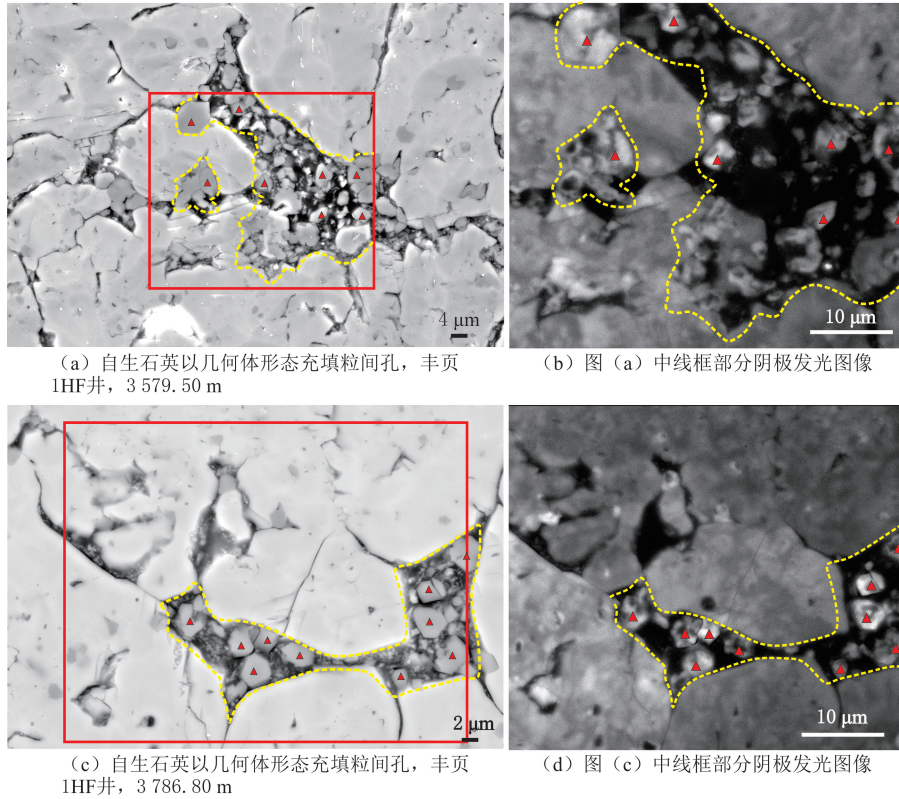


图 6 东营凹陷民丰洼陷页岩扫描电镜—阴极发光特征
Fig. 6 SEM-CL characteristics of shales in Minfeng Subsag of Dongying Sag

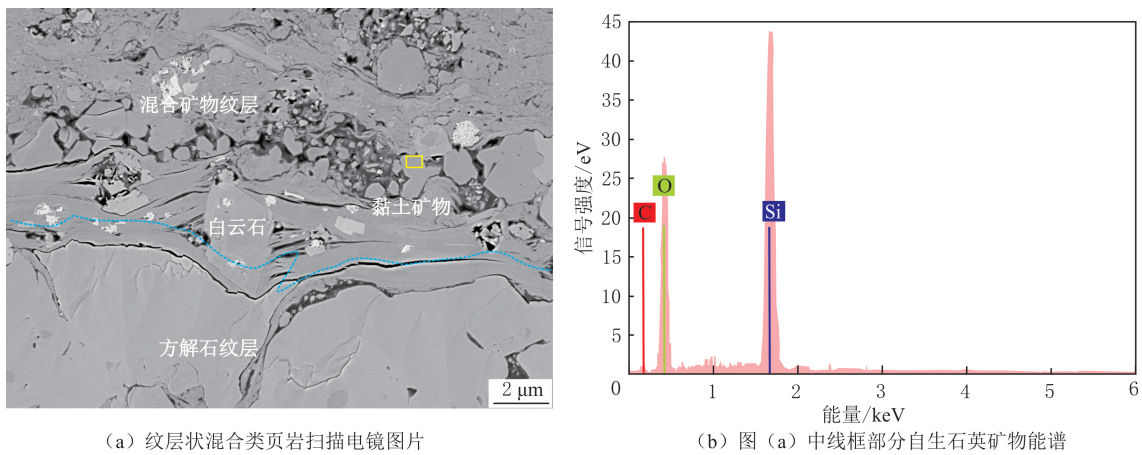


图 7 自生石英在纹层状混合类页岩中赋存状态
Fig. 7 Occurrence state of authigenic quartz in shale in Dongying Sag

总体上,有机质生烃、排酸和方解石溶蚀沉淀、重结晶、再溶蚀,控制富碳酸盐页岩储集空间和储集性能的演化。自生石英既有早期成岩作用成因,也有中晚期成岩作用成因,多期生烃与多旋回碳酸盐矿物—自生石英—黏土矿物成岩协同演化特征明显。

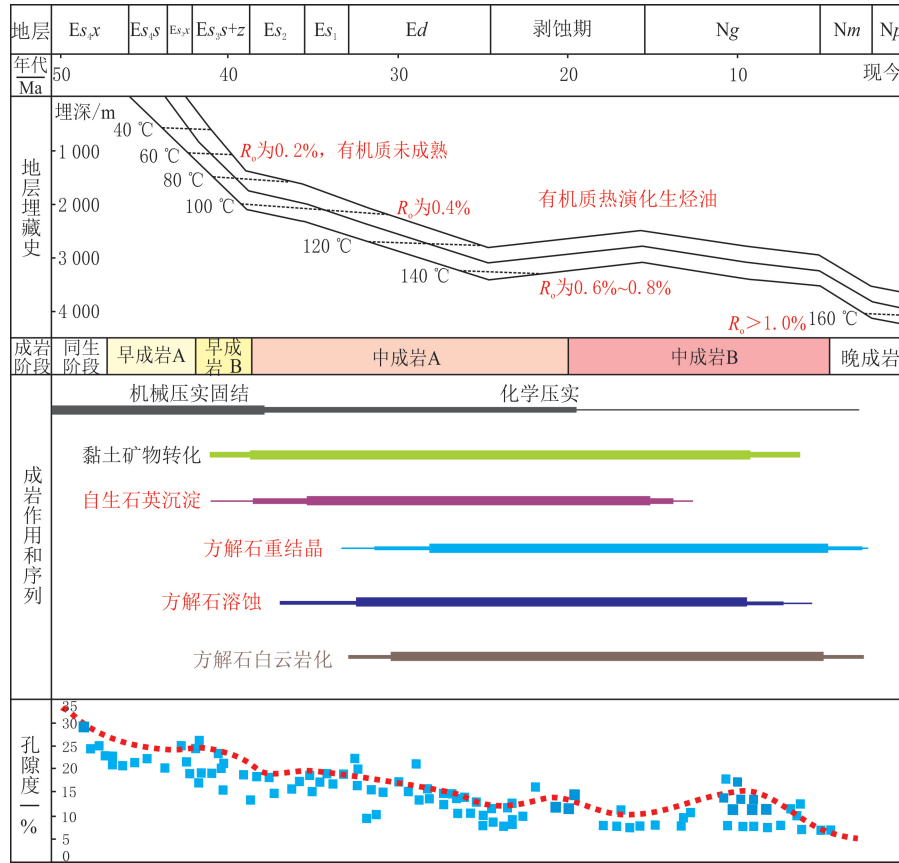


图 8 东营凹陷沙四上亚段页岩成岩演化序列(据文献[1,10]修改)

Fig. 8 Diagenetic evolution sequence of Es_4s shale in Dongying Sag(modified by references[1,10])

4 讨论

相较于常规粗碎屑沉积,富有机质页岩具有粒度细小、矿物组分多样和岩石类型丰富的特征,尤其是在陆相断陷成化盆地,细粒沉积受气候及物源的影响更为敏感。在成岩演化过程中,封闭成岩体系中不同矿物之间、矿物和流体之间相互作用特征更显著,在地层温度、压强条件下,细粒物质对成岩环境的响应更直接快速,直接控制储集空间及其组合类型的发育、改造和演化。

矿物组成是页岩油储集空间发育演化的物质基础,不同岩相类型的矿物组成、组构不同(见图 4),决定不同类型页岩的成岩、成储作用存在差异。以东营凹陷南部缓斜坡洼陷富碳酸盐页岩及北部陡斜坡混合页岩为例,探讨典型成岩作用对页岩储集性能的控制。

4.1 纹层状碳酸盐页岩

纹层状碳酸盐页岩主要的成岩作用类型有碳酸盐矿物溶蚀、黏土矿物转化,细晶、粗晶碳酸盐页岩经历方解石重结晶作用。有机质生烃排酸溶蚀方解石在方解石、(铁)白云石单矿物及方解石(重结晶)富集纹层中普遍发育。储集性能控制作用方面,富有机质纹层状碳酸盐页岩中的溶蚀多见于方解石和白云石等碳酸盐矿物晶体边缘及内部,呈阶状、洞状、港湾状和缝状^[6-8,23],孔隙具有局部连通性。随温度升高和压强增大,黏土矿物转化明显,总体趋势呈片状到丝片状再到絮状的特征,代表伊/蒙混层向伊利石转化,转化过程中的黏土矿物脱水收缩,增加黏土矿物晶间孔和成岩收缩缝的发育丰度^[34-38]。黏土矿物转化过程中形成的伊利石或伊/蒙混层晶间孔缝、有机质收缩孔缝与局部连通性较好的碳酸盐矿物晶间(溶蚀)孔缝沟通,形成储集空间组合,显著增加储集有效性。

碳酸盐矿物晶形及大小通常和储集空间发育程度密切相关。一般情况下,矿物结晶度越高,晶体大小

越趋于均一有序,越容易出现晶间孔,但对储集性能的影响取决于成岩流体环境和页岩结构。生烃排酸溶蚀背景下的方解石重结晶作用对储集层物性具有良好的改善能力,方解石重结晶形成的主要储集空间类型为方解石重结晶晶间孔、方解石解理缝、溶蚀孔、黏土矿物晶间收缩孔(缝)和有机质孔,一方面形成孔隙和裂隙沟通;另一方面碳酸盐矿物质量分数高,富集成层,脆性大,在超压作用下,碳酸盐在流体介质中的溶解度增大,促进层裂缝等裂缝开启。未发生重结晶方解石溶蚀的页岩较相同岩相发生溶蚀的页岩样品孔隙度低 2%~4%。当成岩流体环境为碱性时,盐类、石膏和重晶石等矿物沉淀充填在一定程度上减少孔隙数量^[39]。当纹层内部有机质质量分数较低时,不同期次方解石不断由纹层顶底两侧趋于中间方向生长,原有的晶间孔缝体积逐渐减小,酸性流体改造作用弱,重结晶方解石纹层内部有效孔隙较少,纹层界面成为上下临近富有机质黏土层剥离或线状溶蚀的突破面,产生类似层理缝的晶间孔隙的连通。

4.2 纹层状碳酸盐质混合类页岩

纹层状碳酸盐质混合类页岩在南部缓斜坡页岩层系厚度累计占比普遍小于 30%,在北部陡斜坡带注陷中心大规模发育,集中在以民丰注陷为代表的混合类页岩层系,厚度累计占比大于 60%。长英质矿物质量分数在北部陡坡深陷带页岩中更高(见图 9)。

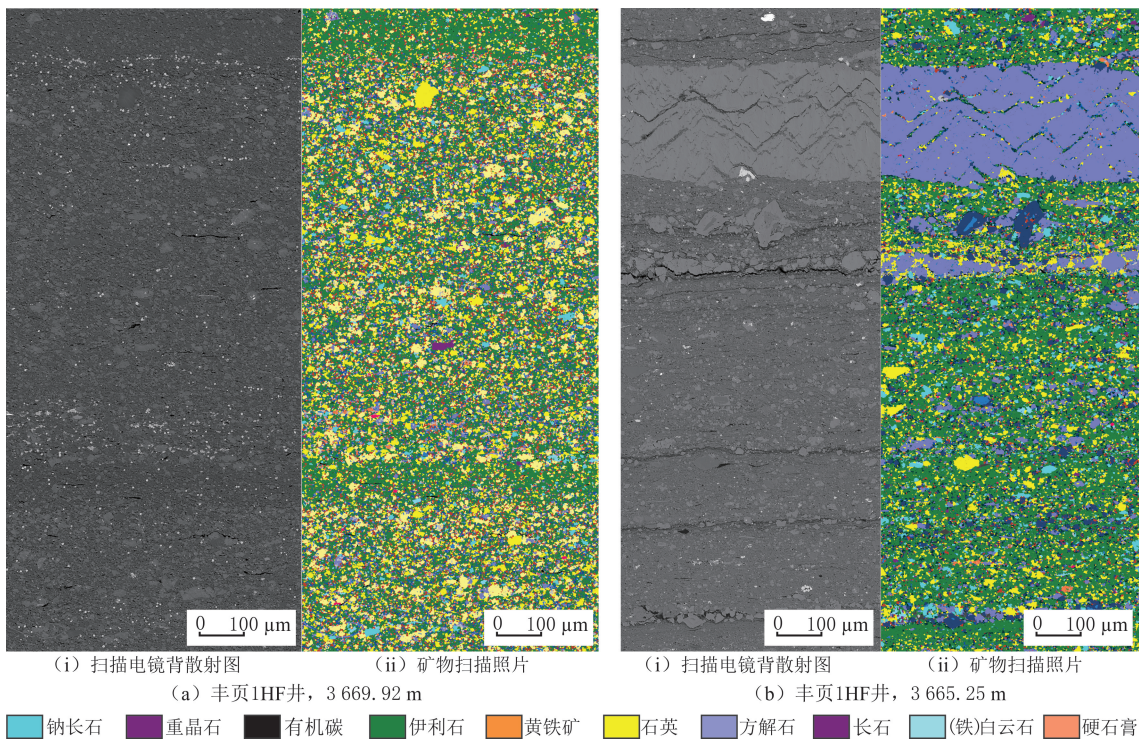


图 9 混合类页岩扫描电镜与矿物扫描照片

Fig. 9 Scanning electron microscope and mineral scanning photos of mixed shales

以长英质质量分数较高的民丰注陷混合类页岩为例,分析典型成岩相对储集性能的控制。根据岩石薄片观察、氩离子抛光样品扫描电镜分析,矿物类型及其混合方式多样,不同类型成岩矿物成岩作用存在差异。方解石白云岩化、黄铁矿胶结和压实、碳酸盐矿物溶蚀等在纹层状碳酸盐页岩中常见的成岩现象,在混合页岩中较为普遍,但自生石英沉淀是东营凹陷北部陡坡带沙四上亚段页岩最典型的成岩作用类型,碳酸盐矿物总体呈纹层状产出,(铁)白云石、方解石、黏土矿物、石英、长石等主要矿物类型在局部混合较均匀,可见矿物成分结构差异形成的近水平方向微裂缝(见图 9(b)),石英矿物赋存发育位置不同,对页岩储集性能控制作用存在差异。石英赋存状态观察及能谱分析显示,纹层状碳酸盐质混合类页岩自生石英主要发育于富有机质黏土纹层、泥质混合纹层及碳酸盐矿物纹层(或亮晶方解石晶间孔隙和裂隙)。

在富有机质黏土纹层内部,自生石英沉淀主要呈矿物集合体形态,少量呈分散状顺纹层分布。在压实作用下,伊利石或伊/蒙混层等成层性较好的黏土矿物在局部出现小尺度变形,在微米级自生石英矿物颗

粒之间保留大量粒间孔,在自生石英颗粒与陆源石英、白云石、方解石等刚性骨架矿物颗粒之间发育颗粒和晶体之间的孔隙(见图 7(a))。在页岩基质中,固体沥青等烃类充填于黏土矿物晶间微裂隙、矿物颗粒孔隙,有机质演化过程中,部分烃类赋存位置形成有机质孔,在富有机质黏土层和混合纹层内部较为普遍(见图 7、图 9)。孔隙发育的固体沥青具有一定的抵抗外界应力的能力,有助于储层中微裂隙与矿物之间储集空间的保存^[31-32]。

在方解石纹层内部,自生石英主要沉淀于一定结晶程度的方解石晶体架构的储集空间(见图 9),颗粒排列产状与方解石架构矿物形成的储集空间结构有关(在方解石颗粒顺层排列空隙或界面上),自生石英主要呈单矿物分散状分布(见图 9(b-ii)),孔隙基本被黏土矿物和固态沥青充填;在方解石(重结晶)颗粒未接触的空隙内,自生石英和固态有机质充填空隙,总体以矿物集合体产出,颗粒主要呈线接触,少量呈点接触(见图 10(a-b));在有机质收缩部位颗粒之间,空隙的特征明显,孔径可达 $2\ \mu\text{m}$ (见图 10(b-d)),反映自生石英集合体内保留大量粒间孔,为后期热解生烃阶段油气的充注提供有效空间。总体上,在一定结晶程度的方解石纹层内部,由自生石英沉淀产生的粒间孔和其他孔隙数量少于富有机质黏土层内部的自生石英粒间孔(见图 10(b)),对储集性能的建设作用主要是增加储层脆性,自身或与方解石形成的刚性矿物集合体在一定程度上抑制后期的压实作用,对次生孔隙提供有效的保护作用,增加页岩整体的脆性矿物质量分数,提高页岩储层的可压性。

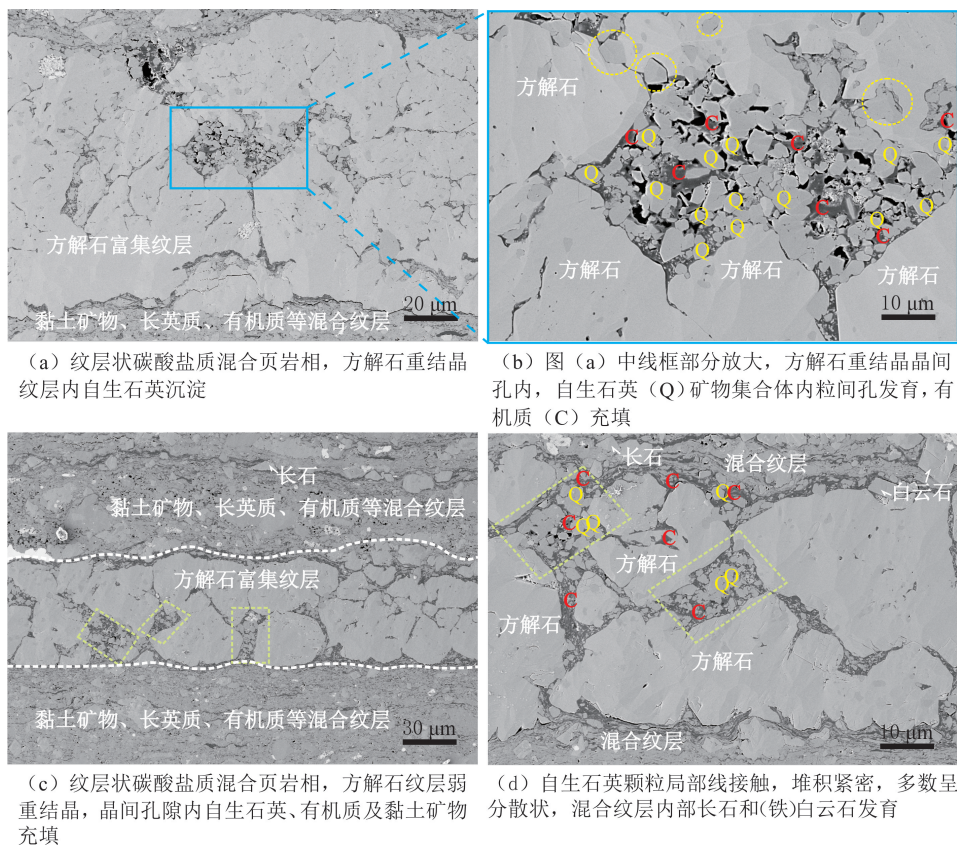


图 10 混合页岩方解石富集纹层中自生石英与其他矿物主要孔隙类型

Fig. 10 Main pore types of autogenic quartz and other minerals in calcite enriched laminates of mixed shales

混合纹层内部自生石英矿物与方解石、白云石等架构矿物,形成粒间孔和碳酸盐晶间孔微米级孔隙组合。富有机质黏土层内部或靠近碳酸盐矿物纹层部分自生石英呈总体分散、局部矿物集合体形态,一方面,抵抗压实变形、保留大量粒间孔;另一方面,烃类赋存体积收缩后形成有机质孔缝,提高不同类型孔隙与微裂缝之间的连通性。

除自生石英沉淀外,在矿物混合均匀的纹层或层内部,长石颗粒的溶蚀较为常见,在(铁)白云石、方解

石、长石和石英等刚性矿物颗粒架构内部,可见矿物边缘和内部溶蚀现象,扫描电镜下可见长石晶面溶蚀、解理溶蚀及矿物边缘港湾状溶蚀,反映有机酸溶蚀作用较强^[21,30]。分散的微晶石英与长石颗粒形成刚性接触骨架,一方面支撑较大微米级粒间孔,另一方面在机械压实过程中防止黏土矿物顺层定向排列,保留与黏土矿物相关的微米级和纳米级的粒间孔和粒内孔^[33,39-41]。分析民丰洼陷重点取心井混合页岩发育层段样品的储集物性,孔隙度普遍较高,平均大于 8%。低温氮气吸附实验结果表明,长英质矿物与孔隙体积呈较好的正相关关系(见图 11),是民丰洼陷富有机质混合类页岩层系页岩油富集高产的主要原因。有机质演化收缩形成的有机质孔及与矿物颗粒边缘形成的微裂隙,形成局部连通性较高的孔隙—裂隙组合,在一定程度上提高混合页岩的储集性能。纹层状和层状富碳酸盐页岩长石和石英矿物质量分数普遍小于 30%,储层中自生沉淀微晶石英矿物转化作用微弱,长石溶蚀现象不普遍,自生石英沉淀和长石溶蚀带来的储集空间和储集性能增大效果不明显。总体上,混合类页岩的自生石英沉淀、长石和碳酸盐矿物溶蚀增加孔隙数量,增强孔隙网络的渗透性能,从而提升混合类页岩的储集性能^[41-42]。

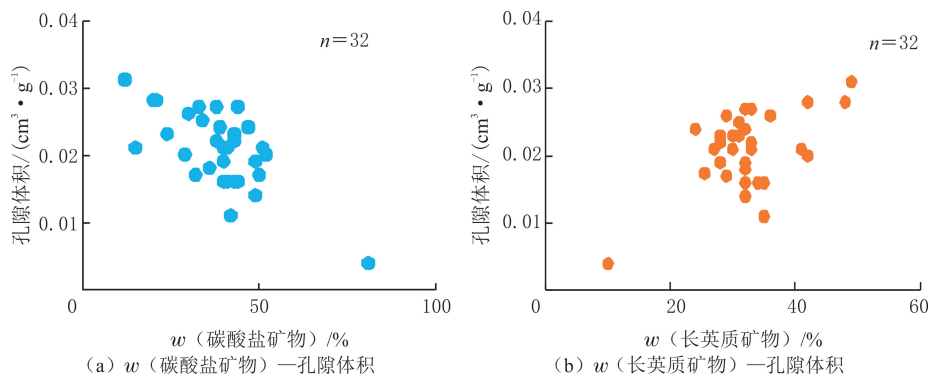


图 11 研究区丰页 1HF 井纹层状混合类页岩碳酸盐矿物、长英质矿物质量分数与孔隙体积关系

Fig. 11 The relationship between the mass fraction of laminated mixed shale-like carbonate minerals and feldspar minerals and the pore volume in the well FY 1HF of study area

5 结论

(1) 济阳坳陷东营凹陷沙四上亚段典型页岩类型为纹层状碳酸盐页岩相和碳酸盐质混合类页岩相,经历压实、胶结、交代、有机质生烃演化和溶蚀等成岩作用;有机质演化与近源溶蚀、黏土矿物转化与自生石英沉淀反映研究区页岩不同矿物相互作用的特点,多期生烃与多旋回碳酸盐矿物—自生石英—黏土矿物成岩协同演化特征明显。

(2) 研究区有机质生烃排酸溶蚀在碳酸盐类页岩尤其是碳酸盐矿物富集纹层中最普遍,黏土矿物转化过程中形成的伊利石或伊/蒙混层晶间孔缝、有机质收缩孔缝与局部连通性较好的碳酸盐矿物晶间(溶蚀)孔缝沟通,形成储集空间组合,显著增加储集有效性。生烃增压条件下,自生石英沉淀、长石溶蚀是混合类页岩典型的成岩增孔方式,大量粒间孔和晶间孔为后期热解生烃阶段油气的充注提供有效空间,一定程度上增加可压性。

(3) 研究区南部纹层状碳酸盐页岩储层勘探评价的关键参数是埋深、碳酸盐矿物质量分数及晶体形貌;民丰洼陷混合类页岩储集性整体较好,勘探评价的关键参数是黏土矿物中伊利石矿物质量分数和长英质矿物质量分数。

参考文献(References):

[1] 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.

- [2] 宋明水. 济阳坳陷页岩油勘探实践与现状[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 1-12.
SONG Mingshui. Practice and current status of shale oil exploration in Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 1-12.
- [3] 张顺, 刘惠民, 张鹏飞, 等. 东营凹陷中低成熟度富碳酸盐页岩地质特征: 以牛庄洼陷沙四段上亚段为例[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(6): 1138-1151.
ZHANG Shun, LIU Huimin, ZHANG Pengfei, et al. Geological characteristics of shale oil enrichment in Niuzhuang Sag, Dongying Depression[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(6): 1138-1151.
- [4] 姜在兴, 张文昭, 梁超, 等. 页岩油储层基本特征及评价要素[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 184-196.
JIANG Zaixing, ZHANG Wenzhao, LIANG Chao, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 184-196.
- [5] 张建国, 姜在兴, 刘鹏, 等. 陆相超细粒页岩油储层沉积机制与地质评价[J]. 石油学报, 2022, 43(2): 234-249.
ZHANG Jianguo, JIANG Zaixing, LIU Peng, et al. Deposition mechanism and geological assessment of continental ultrafine-grained shale oil reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(2): 234-249.
- [6] 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.
- [7] 栾国强, 董春梅, 马存飞, 等. 基于热模拟实验的富有机质泥页岩成岩作用及演化特征[J]. 沉积学报, 2016, 34(6): 1208-1216.
LUAN Guoqiang, DONG Chunmei, MA Cunfei, et al. Pyrolysis simulation experiment study on diagenesis and evolution of organic-rich shale[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(6): 1208-1216.
- [8] 余志云, 陈世悦, 张顺, 等. 成岩作用对泥页岩储集性能的影响: 以东营凹陷古近系沙四上亚段为例[J]. 古地理学报, 2022, 24(4): 771-784.
YU Zhiyun, CHEN Shiyue, ZHANG Shun, et al. Influence of diagenesis on reservoir performance of shale: a case study of the upper sub-member of member 4 of Paleogene Shahejie Formation in Dongying Sag[J]. Journal of Palaeogeography, 2022, 24(4): 771-784.
- [9] 赵建华, 金之钧. 泥岩成岩作用研究进展与展望[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 58-72.
ZHAO Jianhua, JIN Zhijun. Mudstone diagenesis: research advances and prospects[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 58-72.
- [10] 张顺. 东营凹陷页岩储层成岩作用及增孔和减孔机制[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(3): 562-578.
ZHANG Shun. Diagenesis and mechanism of shale reservoir pore increase and reduction in Dongying Sag[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(3): 562-578.
- [11] 张顺, 刘惠民, 宋国奇, 等. 东营凹陷页岩油储集空间成因及控制因素[J]. 石油学报, 2016, 37(12): 1495-1507.
ZHANG Shun, LIU Huimin, SONG Guoqi, et al. Genesis and control factors of shale oil reserving space in Dongying Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(12): 1495-1507.
- [12] 刘金, 王剑, 马啸, 等. 陆相咸化湖盆页岩油甜点孔隙特征与成因: 以准噶尔盆地芦草沟组为例[J]. 地质学报, 2023, 97(3): 864-878.
LIU Jin, WANG Jian, MA Xiao, et al. Pore characteristics and genesis of shale oil sweet spots in saline lacustrine basins: a case study from the Lucaogou Formation in the Junggar Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(3): 864-878.
- [13] 王居峰. 济阳坳陷东营凹陷古近系沙河街组沉积相[J]. 古地理学报, 2005, 7(1): 45-58.
WANG Jufeng. Sedimentary facies of the Shahejie Formation of Paleogene in Dongying Sag Jiyang Depression[J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(1): 45-58.
- [14] 于兴河, 姜辉, 李胜利, 等. 中国东部中、新生代陆相断陷盆地沉积充填模式及其控制因素: 以济阳坳陷东营凹陷为例[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(1): 39-45.
YU Xinghe, JIANG Hui, LI Shengli, et al. Depositional filling models and controlling factors on Mesozoic and Cenozoic fault basins of terrestrial facies in Eastern China: a case study of Dongying Sag of Jiyang Depression[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(1): 39-45.
- [15] 刘建平, 鲜本忠, 张莉, 等. 渤海湾盆地东营凹陷碎屑流主控型深水体系沉积过程及模式[J]. 中国地质, 2022, 49(6): 1951-1969.
LIU Jianping, XIAN Benzong, ZHANG Li, et al. Depositional process and model of debrite dominated deep-water system in the Dongying Depression, Bohai Bay Basin[J]. Geology in China, 2022, 49(6): 1951-1969.
- [16] 王勇, 刘惠民, 宋国奇, 等. 济阳坳陷泥页岩细粒沉积体系研究[J]. 石油学报, 2019, 40(4): 395-410.
WANG Yong, LIU Huimin, SONG Guoqi, et al. Study on the mud shale fine-grained sedimentary system in the Jiyang Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(4): 395-410.
- [17] 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 Zaixing, LIANG Chao, WU Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1031-1039.
- [18] 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 Shun, CHEN Shiyue, YAN Jihua, 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.
- [19] 王勇,宋国奇,刘惠民,等. 济阳拗陷细粒沉积岩形成环境及沉积构造[J]. *东北石油大学学报*, 2015,39(3):7-14.
- WANG Yong, SONG Guoqi, LIU Huimin, et al. Formation environment and sedimentary structures of fine-grained sedimentary rock in Jiyang Depression[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2015,39(3):7-14.
- [20] 王学军,宁方兴,郝雪峰,等. 古近系页岩油赋存特征:以济阳拗陷为例[J]. *科学技术与工程*, 2017,17(29):39-48.
- WANG Xuejun, NING Fangxing, HAO Xuefeng, et al. Paleogene shale oil occurrence features: a case of Jiyang Depression[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017,17(29):39-48.
- [21] 刘雅利,张顺,刘惠民,等. 断陷盆地陡坡带富有机质页岩基本特征及勘探前景:以济阳拗陷为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2021,50(6):1108-1118.
- LIU Yali, ZHANG Shun, LIU Huimin, et al. Basic characteristics and exploration prospect of shale in steep slope belt of continental faultedbasin: a case study of Jiyang Depression[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021,50(6):1108-1118.
- [22] 宁方兴,王学军,郝雪峰,等. 济阳拗陷不同岩相页岩油赋存机理[J]. *石油学报*, 2017,38(2):185-195.
- NING Fangxing, WANG Xuejun, HAO Xuefeng, et al. Occurrence mechanism of shale oil with different lithofacies in Jiyang Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017,38(2):185-195.
- [23] 徐效平. 渤海湾盆地东营凹陷古近系富碳酸盐矿物页岩储集特征及其控制因素[J]. *石油实验地质*, 2023,45(3):413-421.
- XU Xiaoping. Reservoir characteristics and controlling factors of Paleogene carbonate-rich shale in Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023,45(3):413-421.
- [24] 滕建彬,邱隆伟,张守鹏,等. 济阳拗陷古近系沙河街组湖相富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.
- [25] 王永诗,李政,王民,等. 渤海湾盆地济阳拗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.
- [26] 张顺,刘惠民,王永诗,等. 东营凹陷古近系页岩成岩事件及其对页岩储集空间发育特征的影响[J]. *油气地质与采收率*, 2019,26(1):109-118.
- ZHANG Shun, LIU Huimin, WANG Yongshi, et al. Diagenetic event of Paleogene shale and its influence on development characteristics of shale pore space in Dongying Sag[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019,26(1):109-118.
- [27] HOUSEKNECHT D W, SCHENK C J, SSHMOKER J W, et al. Organic acid-driven carbonate dissolution in Lower Paleozoic shales of the United States[J]. *AAPG Bulletin*, 2016,100(5):717-738.
- [28] 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.
- [29] 操应长,远光辉,王艳忠,等. 典型含油气盆地深层富长石碎屑岩储集层长石溶蚀接力成孔认识及其油气地质意义[J]. *中国科学:地球科学*, 2022,52(9):1694-1725.
- CAO Yingchang, YUAN Guanghui, WANG Yanzhong, et al. Successive formation of secondary pores via feldspar dissolution in deeply buried feldspar-rich clastic reservoirs in typical petroliferous basins and its petroleum geological significance[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022,52(9):1694-1725.
- [30] 宋来弟,李美蓉,于海鹏,等. 不同 pH 条件下长石和方解石矿物选择性溶蚀过程[J]. *东北石油大学学报*, 2022,46(3):74-83.
- SONG Laidi, LI Meirong, YU Haipeng, et al. Selective dissolution process of feldspar and calcite minerals under different pH conditions[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2022,46(3):74-83.
- [31] 李桥. 东营凹陷北带古近纪“源—汇”系统及砂体分布[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2018:15-60.
- LI Qiao. The Paleogene source-to-sink system and sand-bodies distribution in the northern steep slope zone, Dongying Sag[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2018:15-60.
- [32] 肖冬生,付强. 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗区块下石盒子组自生石英形成机制[J]. *岩石矿物学杂志*, 2011,30(1):8.
- XIAO Dongsheng, FU Qiang. The genetic mechanism of authigenic quartz in Lower Shihezi Formation of Haggin Banner Northern Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2011,30(1):8.
- [33] 刘国恒,黄志龙,郭小波,等. 新疆三塘湖盆地马朗凹陷中二叠统芦苇沟组泥页岩层系 SiO₂ 赋存状态与成因[J]. *地质学报*, 2016,90(6):1220-1235.

- LIU Guoheng, HUANG Zhilong, GUO Xiaobo, et al. The SiO_2 occurrence and origin in the shale system of Middle Permian series Lucaogou Formation in Malang Sag, Santanghu Basin, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016,90(6):1220-1235.
- [34] 陈彦华,刘莺.成岩相—储集体预测的新途径[J].*石油实验地质*,1994,16(3):274-281.
CHEN Yanhua, LIU Ying. Diagenetic facies: a new approach to the prediction of reservoir rocks[J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1994,16(3):274-281.
- [35] 邹才能,陶士振,薛叔浩.“相控论”的内涵及其勘探意义[J].*石油勘探与开发*,2005,32(6):7-12.
ZOU Caineng, TAO Shizhen, XUE Shuhao. Connotation of “Facies Control Theory” and its significance for exploration[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005,32(6):7-12.
- [36] 赖锦,王贵文,王书南,等.碎屑岩储层成岩相研究现状及进展[J].*地球科学进展*,2013,28(1):39-50.
LAI Jin, WANG Guiwen, WANG Shunan, et al. Research status and advances in the diagenetic facies of clastic reservoirs[J]. *Advances in Earth Science*, 2013,28(1):39-50.
- [37] 卢龙飞,刘伟新,魏志红,等.四川盆地志留系页岩成岩特征及其对孔隙发育与保存的控制[J].*沉积学报*,2022,40(1):73-87.
LU Longfei, LIU Weixin, WEI Zhihong, et al. Diagenesis of the Silurian shale, Sichuan Basin: focus on pore development and preservation[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022,40(1):73-87.
- [38] 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.
- [39] 王剑,周路,刘金,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组酸碱交替成岩作用特征及对页岩储集层的影响[J].*石油勘探与开发*,2020,47(5):898-912.
WANG Jian, ZHOU Lu, LIU Jin, et al. Acid-base alternation diagenesis and its influence on shale reservoirs in the Permian Lucaogou Formation, Jimusar Sag, Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020,47(5):898-912.
- [40] 窦伟,孙丕臣,欧阳哲远,等.纹层发育程度对页岩储层的影响:以渤海湾盆地东营凹陷沙四上一沙三下亚段页岩为例[J].*东北石油大学学报*,2023,47(4):14-28.
DOU Wei, SUN Pichen, OUYANG Zheyuan, et al. Influence of lamination development on shale reservoirs: a case study of shales from the upper Es_4 and lower submember Es_3 in the Dongying Sag of the Bohai Bay Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2023,47(4):14-28.
- [41] WANG Y, LIU L, ZHANG Y. Controls on silica cementation and porosity evolution in shale reservoirs[J]. *Sedimentary Geology*, 2021,416:105847.
- [42] PLUMMER L N, BUSENBERG E. The solubilities of amorphous silica and quartz in water at elevated temperatures[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982,46(9):1963-1974.