

渤海湾盆地东营凹陷湖相富有机质页岩纹层特征和储集性能

陈 扬^{1,2,3}, 胡钦红⁴, 赵建华^{1,2}, 蒙冕模^{1,2}, 尹 娜^{1,2}, 张晓贝^{1,2}, 许格非^{1,2}, 刘惠民⁵

[1. 山东省深层油气重点实验室, 山东 青岛 266580; 2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 山东 青岛 266071; 4. 得克萨斯大学阿灵顿分校, 得克萨斯州 阿灵顿 76019; 5. 中国石化胜利油田分公司, 山东 东营 257000]

摘要:以渤海湾盆地东营凹陷沙河街组四段上亚段(沙四上亚段)页岩为研究对象,通过有机质分析、薄片观察、扫描电镜、高压压汞和低压氮气吸附等技术,明确页岩纹层特征及其对储层物性的影响,为页岩油勘探开发提供理论依据。沙四上亚段页岩按照成分可划分出4种在孔隙发育特征上具有差异性的纹层单元,总结出7种纹层组合类型。粒状方解石纹层+混合纹层+有机质纹层组合是沙四上亚段储集能力最好的纹层组合类型,同时发育较多的纳米孔和微米孔,纳米孔主要由混合纹层的粘土矿物晶间孔和粒状方解石纹层中的有机质收缩缝构成,微米孔主要由混合纹层内微裂缝和粒状方解石纹层边界处的微裂缝提供。泥晶方解石纹层+有机质纹层组合储集能力次之,纳米孔主要由泥晶方解石纹层中的脆性矿物粒间孔构成,微米孔主要由纹层间薄弱面形成的微裂缝提供。页岩的储层物性受到埋藏压实作用、粘土矿物转化作用、方解石重结晶作用和有机酸溶蚀作用等多重因素影响,不同纹层组合的页岩储层物性影响因素有所不同。

关键词:纹层组合类型;纹层单元;有机质;储层物性;湖相页岩;渤海湾盆地

中图分类号: TE122.2 **文献标识码:** A

Lamina characteristics and their influence on reservoir property of lacustrine organic-rich shale in the Dongying Sag, Bohai Bay Basin

Chen Yang^{1,2,3}, Hu Qinrong⁴, Zhao Jianhua^{1,2}, Meng Mianmo^{1,2}, Yin Na^{1,2},
Zhang Xiaobei^{1,2}, Xu Gefei^{1,2}, Liu Huimin⁵

[1. Shandong Provincial Key Laboratory of Deep Oil and Gas, Qingdao, Shandong 266580, China; 2. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 3. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao, Shandong 266071, China; 4. University of Texas at Arlington, Arlington, Texas 76019, USA; 5. Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China]

Abstract: The shale of the upper 4th member of Shahejie Formation in the Dongying Sag, Bohai Bay Basin (Es^{4u}) is studied to clarify the characteristics of shale laminae and their influence on reservoir properties through organic matter analysis, thin section observation, scanning electron microscopy (SEM) observation, high pressure mercury intrusion experiment and low-temperature nitrogen adsorption (LTNA). The results will be of a theoretical basis to shale oil exploration and development. This shale interval (Es^{4u}) can be divided into four lamina units different in composition and pore feature, and consequently seven types of lamina assemblages are concluded. The assemblage of granular calcite lamina, mixed lamina and organic lamina is of the best reservoir capacity in this interval with well-developed nano- and micro- pores. Its nano-pores are mainly composed of clay-mineral intergranular pores in the mixed lamina and constricted fissures of organic matters in the granular calcite lamina; while the micro-pores are mainly composed of micro-cracks in the mixed lamina and at the boundary of the granular calcite lamina. The assemblage of micrite calcite lamina and organic lamina ranks second in terms of reservoir property. Its nano-pores are dominated by rigid mineral

收稿日期:2020-09-15;修订日期:2022-01-22。

第一作者简介:陈扬(1997—),女,硕士研究生,地质资源与地质工程。E-mail:3192024487@qq.com。

通讯作者简介:胡钦红(1965—),男,博士、教授,裂隙、基岩相互作用、页岩油气的赋存和运移行为。E-mail:water19049@gmail.com。

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41830431)。

intergranular pores in the micrite calcite lamina, and the micro-pores by the micro-cracks formed on inter-lamina weak surfaces. Under the effect of burial compaction, clay mineral transformation, calcite recrystallization and organic acid dissolution, the lamina assemblages are different in reservoir properties.

Key words: lamina assemblage type, lamina unit, organic matter, reservoir property, lacustrine shale, Bohai Bay Basin

引用格式:陈扬,胡钦红,赵建华,等.渤海湾盆地东营凹陷湖相富有机质页岩纹层特征和储集性能[J].石油与天然气地质,2022,43(2):307-324. DOI:10.11743/ogg20220206.

Chen Yang, Hu Qinrong, Zhao Jianhua, et al. Lamina characteristics and their influence on reservoir property of lacustrine organic-rich shale in the Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 307-324. DOI: 10.11743/ogg20220206.

国际上对页岩的研究工作主要集中于海相沉积中,如美国 Western Gulf 盆地的 Eagle Ford 页岩和 Fort Worth 盆地中的 Barnett 页岩^[1-3]。而近些年在陆相盆地中也发现了大量具有页岩油勘探开发潜力的页岩层段,如印度尼西亚 Sumatra 盆地的 Brown 页岩和美国 Uinta 盆地的 Green River 组页岩^[4-6]。中国的陆相页岩油勘探也陆续在渤海湾盆地、南襄盆地和三塘湖盆地等地区中取得了重要进展^[7-10]。

中国东部渤海湾盆地古近系发育的湖相页岩具有分布范围广、地层厚度大、埋藏较浅、有机质丰度高、普遍处于生油高峰阶段的特点,是中国页岩勘探和开发的主阵地^[11-15]。渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷古近系沙河街组三段下亚段-沙河街组四段上亚段发育了一套典型的湖相深水页岩,具有岩石类型复杂、组合类型多样、受多种因素控制等特征^[14,16-17]。

在页岩中,纹层是十分常见的沉积特征,通常包含许多不同成分,如粘土矿物、石英和长石等碎屑矿物、碳酸盐矿物和有机质。对纹层的研究通常根据矿物成分将其分类,由不同成分构成的纹层在垂向上形成层偶^[18]。Thomas 等^[19]将湖泊 Meerfelder Maar 和 Quebrada de Cafayate 的沉积物分为粉砂碎屑纹层和纯硅藻土纹层。Zalmai 等^[20]综合 Eagle Ford, Bakken, New Albany, Mowry 和 Chattanooga 等多个地区页岩的纹层发育特征,根据形态总结出低角度波状纹层、下超纹层、交错纹层和平行纹层,根据成分划分粉砂质纹层和富粘土纹层,并模拟纹层形成过程。Leticia 等^[21]对西班牙北部 Ebro 盆地的叠层石纹层按晶体尺寸划分出深色致密微晶纹层、浅色多孔的/凝结的微晶-微亮晶纹层、浅色致密微晶纹层和纤维状纹层。施振生等^[22]将四川盆地龙马溪组一段含气页岩划分为泥纹层和粉砂纹层,总结了二者在物质组成、孔隙类型和孔径分布上的差异,并发现泥纹层与粉砂纹层含量比值造成了水平与垂直渗透率比值的差异。杨博伟^[23]也对龙马溪组一段页岩纹层发育特征进行了详细研究,根据形态和成分对其进行划分,并对纹层互层类型发育频率

进行了统计。蕙克来等^[24]将鄂尔多斯盆地延长组 7³ 亚段富有机质页岩划分出 4 种纹层类型和 2 类主要的纹层组合类型,总结了不同纹层组合的储集空间特征和页岩油富集过程。目前国内外对纹层划分的标准众多,但缺乏对纹层成分和孔隙特征的微观尺度表征,以及对纹层组合类型储集性能的评价^[24]。许多地质学家认为,分层的水体是纹层形成的主要沉积环境,最适合纹层的发育,水体分层具体包括由湖水盐度、温度、湖盆大小、水深和底流等不同因素引起的分层^[25-28]。湖泊及其纹层状沉积物的变化承载着古气候和古环境等重要环境信息,被广泛应用于它们的恢复^[29]。随着对纹层研究的逐渐深入,人们开始意识到湖盆中这种垂向上具有层偶特征的纹层状页岩有着更好的页岩油潜力^[27,30-31],而纹层的分布和岩石物理特征,影响着页岩油勘探开发^[32]。

学者们在对东营凹陷页岩的研究中提出了多种页岩岩相划分方案,划分依据包括矿物组成、沉积构造、有机质含量和颜色等,明确了富有机质纹层状泥质灰岩是主要的岩相类型^[32-34],不同页岩岩相类型发育的储集空间组合及孔隙结构存在差异^[35]。页岩油主力储层段(沙河街组三段和四段)中发育大量纹层状碳酸盐岩,矿物成分主要是方解石^[33-39],并且页岩中的碳酸盐岩夹层与油气分布关系密切^[18]。

本文以渤海湾盆地东营凹陷沙河街组四段上亚段(沙四上亚段)页岩为研究对象,通过薄片观察,以矿物成分为依据划分出纹层单元,建立纹层组合类型的分类方案,利用扫描电镜观察不同纹层单元的成分和孔隙特征,结合高压压汞和低压氮气吸附实验获得孔隙结构性质,明确优势纹层组合类型,分析不同纹层组合类型的储集空间特征及影响因素,为页岩油的高效勘探开发提供了依据。

1 地质背景

渤海湾盆地是华北地台经历了多期构造运动之

后,最后形成的由一系列古近纪箕状凹陷组成的断陷盆地^[40-45],是中国东部重要的油气产区,面积约为 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。济阳凹陷位于渤海湾盆地南部,面积约为 $2.65 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[43,45-46],包括沾化、车阵、惠民和东营4个凹陷^[43-47]。东营凹陷位于济阳凹陷东南部,东起青坨子凸起,西邻惠民凹陷,北以陈家庄-滨县凸起为界,南抵鲁西隆起和广饶凸起(图1),是中国陆相箕状凹陷的典型代表,具有“北断南超、北深南浅”的特点^[48]。

济阳凹陷的地层从古生界至新生界均有发育,其中,新生界古近系和新近系最厚,是凹陷的主要沉积,古近系由老到新依次为孔店组(*E_k*)、沙河街组(*E_s*)和东营组(*E_d*)^[43](图1)。沙河街组在东营凹陷内分布最为广泛,可进一步细分为4段,主要由砂岩、泥岩、油页岩和蒸发岩组成^[31,49](图1)。古近系为典型的湖泊沉

积体系,经历了湖泊扩张和萎缩的过程^[40]。湖盆扩张鼎盛时期,在深湖-半深湖环境中沉积的沙三下亚段-沙四上亚段是页岩油的主力储集层位^[40,50]。

2 纹层单元和纹层组合

东营凹陷沙四上亚段页岩中纹层成分具有显著差异,且形态各异、组合类型多样。通过对NY1井共106块岩心样品的薄片观察,按照成分可划分出4种纹层单元:方解石纹层(泥晶、粒状、纤维状)、白云石纹层、混合纹层和有机质纹层。

光学显微镜下,方解石纹层按照粒度和形态分为3种类型。①泥晶方解石纹层晶粒细小,直径小于 $4 \mu\text{m}$,单偏光下纹层形态具有弯曲状、透镜状和平直

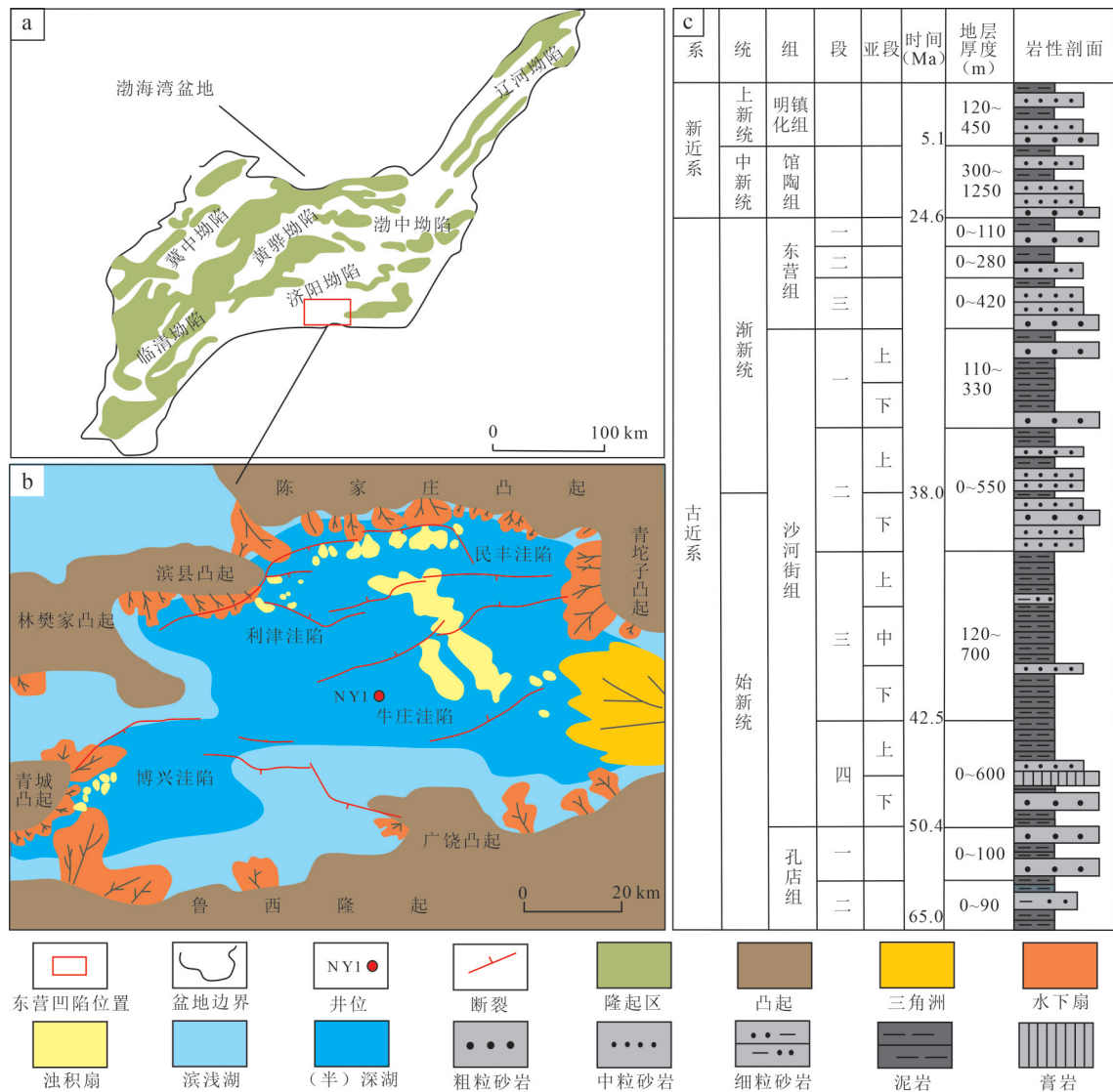


图1 渤海湾盆地东营凹陷沙河街组沉积相及地层综合柱状图^[14,51-52]

Fig. 1 Composite stratigraphic column and sedimentary facies of the Shahejie Formation in the Dongying Sag, Bohai Bay Basin^[14,51-52]

a. 东营凹陷位置; b. 沙河街组沉积相; c. 古近系和新近系地层综合柱状图

状,连续性包括连续状和不连续状,大部分纹层是连续状(图2a—d)。^②粒状方解石纹层平直连续,方解石晶粒较大,直径介于20~50 μm,自形程度高,重结晶

作用明显。重结晶程度高、晶粒较大的方解石晶粒之间可见黑色有机质,单偏光下部分方解石晶粒具有边缘比中心更明亮的特征(图2g)。^③纤维状方解石脉

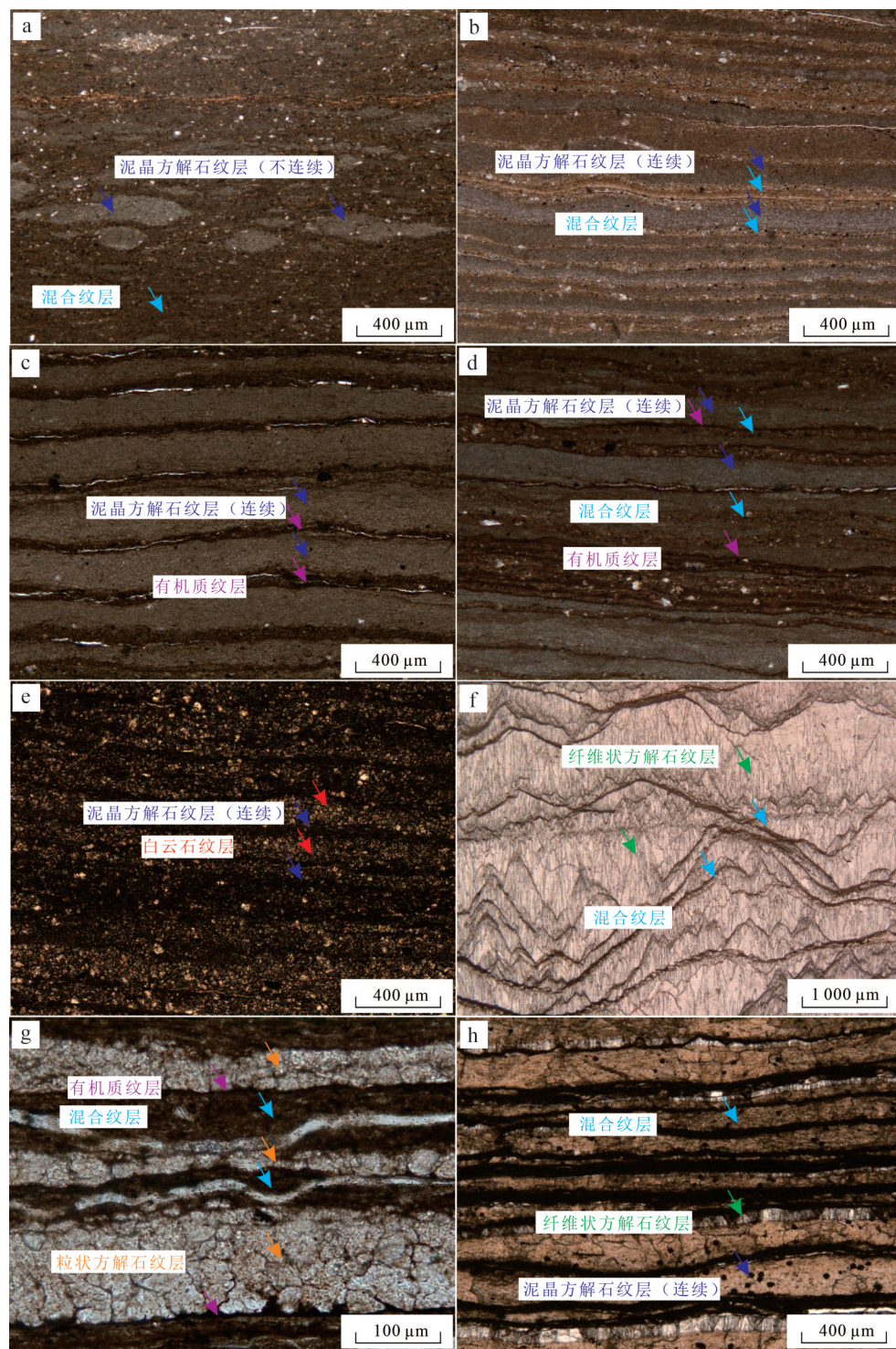


图2 东营凹陷NY1井沙四上亚段页岩纹层组合类型

Fig. 2 Lamina assemblages of the Es^{4U} shale in Well NY1, Dongying Sag

a. 泥晶方解石纹层(不连续)+混合纹层,埋深3 344.46 m,单偏光; b. 泥晶方解石纹层(连续)+混合纹层,埋深3 383.2 m,单偏光; c. 泥晶方解石纹层+有机质纹层,埋深3 440.13 m,单偏光; d. 泥晶方解石纹层+混合纹层+有机质纹层,埋深3 366.60 m,单偏光; e. 泥晶方解石纹层+白云石纹层,埋深3 375.50 m,单偏光; f. 纤维状方解石纹层+混合纹层,埋深3 437.03 m,单偏光; g. 粒状方解石纹层+混合纹层+有机质纹层,埋深3 459.50 m,单偏光; h. 纤维状方解石纹层+泥晶方解石纹层+混合纹层,埋深3 437.53 m,单偏光

体通常具有两种形态:一种是平行于水平纹层的纤维状矿物,单偏光下可以看到其中的纤维互相平行,几乎垂直于脉体边缘(图2h),这种构造在页岩中十分常见,早在19世纪20—30年代就被学者们观察到^[53-54]。这种互相平行排列的细小纤维与动物肌肉纤维形态相似,常被学者们称为“牛肉”构造(‘beef’ structure)^[31]。另一种形态的脉体具有“锥中锥”或叠锥状结构(cone-in-cone structure),是指单独个体具有厘米级透镜状形态,并且可以形成聚集体的圆锥结构^[55]。单偏光下观察到纤维状方解石脉体中都具有一条暗色的中线,中线基本上平行于两侧的围岩,发育位置更靠近于脉体的一侧,反映了中线两侧纤维状方解石生长速率的差异^[31](图2f)。白云石纹层平直连续,白云石晶粒粗大,直径在10~30 μm,自形程度高(图2e)。混合纹层的成分复杂,普通光学显微镜下在单偏光下可识别出较多磨圆程度低的石英和长石等矿物碎片,另外还可见零星分布的、具有完整晶型的方解石和白云石晶粒(图2d)。有机质纹层常发育在方解石纹层的边缘,以黑色的连续条带状分布(图2d)。

纹层单元具有复杂的组合形式,可总结归纳为7种纹层组合类型:①泥晶方解石纹层+混合纹层,分布在沙四上亚段上部和中部,中部居多;②泥晶方解石纹层+有机质纹层,主要分布在沙四上亚段中部;③泥晶方解石纹层+混合纹层+有机质纹层,广泛分布在沙四上亚段;④泥晶方解石纹层+白云石纹层,主要分布在沙四上亚段中部;⑤纤维状方解石纹层+混合纹层,分布在沙四上亚段中部和下部;⑥粒状方解石纹层+混合纹层+有机质纹层,只在沙四下亚段下部存在;⑦纤维状方解石纹层+泥晶方解石纹层+混合纹层(图2),仅分布在沙四下亚段中部。总体上,以第①和第③类为主。

通过对东营凹陷NY1井沙四上亚段106件页岩样品有机碳(TOC)含量进行测试,实验结果表明,页岩样品普遍具有较高的TOC含量(图3),介于0.25%~7.77%,平均为2.61%,并且不同纹层组合类型的页岩TOC含量具有一定差异。泥晶方解石纹层+混合纹层组合的页岩TOC含量平均为2.33%(1.41%~3.14%),泥晶方解石纹层+有机质纹层组合的页岩TOC含量平均为3.52%(1.90%~6.35%),泥晶方解石纹层+混合纹层+有机质纹层组合的页岩TOC含量平均为2.81%(1.50%~6.45%),泥晶方解石纹层+白云石纹层组合的页岩TOC含量平均为3.24%(2.19%~5.90%),纤维状方解石纹层+混合纹层组合的页岩TOC含量平均为1.72%(1.41%~2.30%),粒状方解石纹层+混合纹层+有机质纹层组合的页岩

TOC含量平均为2.63%,纤维状方解石纹层+泥晶方解石纹层+混合纹层组合的页岩TOC含量平均为3.11%(2.32%~3.84%)。

3 纹层单元微观成分和孔隙特征

研究区页岩不同纹层单元结构的显著差异,使页岩储层表现出极强的非均质性,从而导致了断陷湖盆页岩储层储集空间类型复杂多样^[14,56]。国内外有多种关于页岩储集空间的分类方案,本文以Loucks等^[57]提出的页岩储层基质孔隙三端元分类方案(粒间孔、粒内孔、有机质相关孔隙)为依据,通过扫描电镜观察,总结微观尺度下不同纹层单元的成分和孔隙特征。

3.1 方解石纹层

3.1.1 泥晶方解石纹层

泥晶方解石纹层在研究区中广泛发育,具有弱结晶化特征^[31],矿物以方解石为主,方解石晶粒直径大部分小于5 μm,边缘形态不规则、界限模糊,晶粒间充填着石英、钠长石和粘土矿物,粘土矿物以伊/蒙混层为主,黄铁矿也十分常见(图4a)。泥晶方解石纹层底部方解石晶粒较大,长英质等矿物含量较少,向上方解石晶粒变小,长英质等矿物含量增加(图4b)。泥晶方解石纹层中的孔隙类型主要为方解石、石英和长石等脆性颗粒之间的粒间孔和粘土矿物晶间孔,还有少量的黄铁矿晶间孔(图5a—c),部分方解石晶粒内发育粒内溶孔,似圆形或椭圆形。粒间孔孔径一般小于1 μm,局部孔径较大,达到5 μm;粘土矿物晶间孔和黄铁矿晶间孔孔径较小,一般小于500 nm,局部达到1~2 μm;粒内溶孔孔径大部分小于100 nm,较大溶孔达到1 μm。

3.1.2 纤维状方解石纹层

纤维状方解石纹层成分单一,几乎全部由致密的方解石构成,少量的菱锆矿常分布在方解石边缘,具有沿纤维方向生长的形态,纹层内几乎没有石英和长石等矿物(图4c,d)。而纤维状方解石的中线以石英、钠长石和有机质为主。纤维状方解石纹层中常见方解石破裂产生的裂缝网络,宽度在500 nm以下,裂缝空间中可充填有机质和粘土矿物,方解石与相邻混合纹层间也常见沿纹层薄弱面产生的微裂缝^[58](图5d)。

3.1.3 粒状方解石纹层

粒状方解石纹层中矿物以边缘光滑、界限清晰的

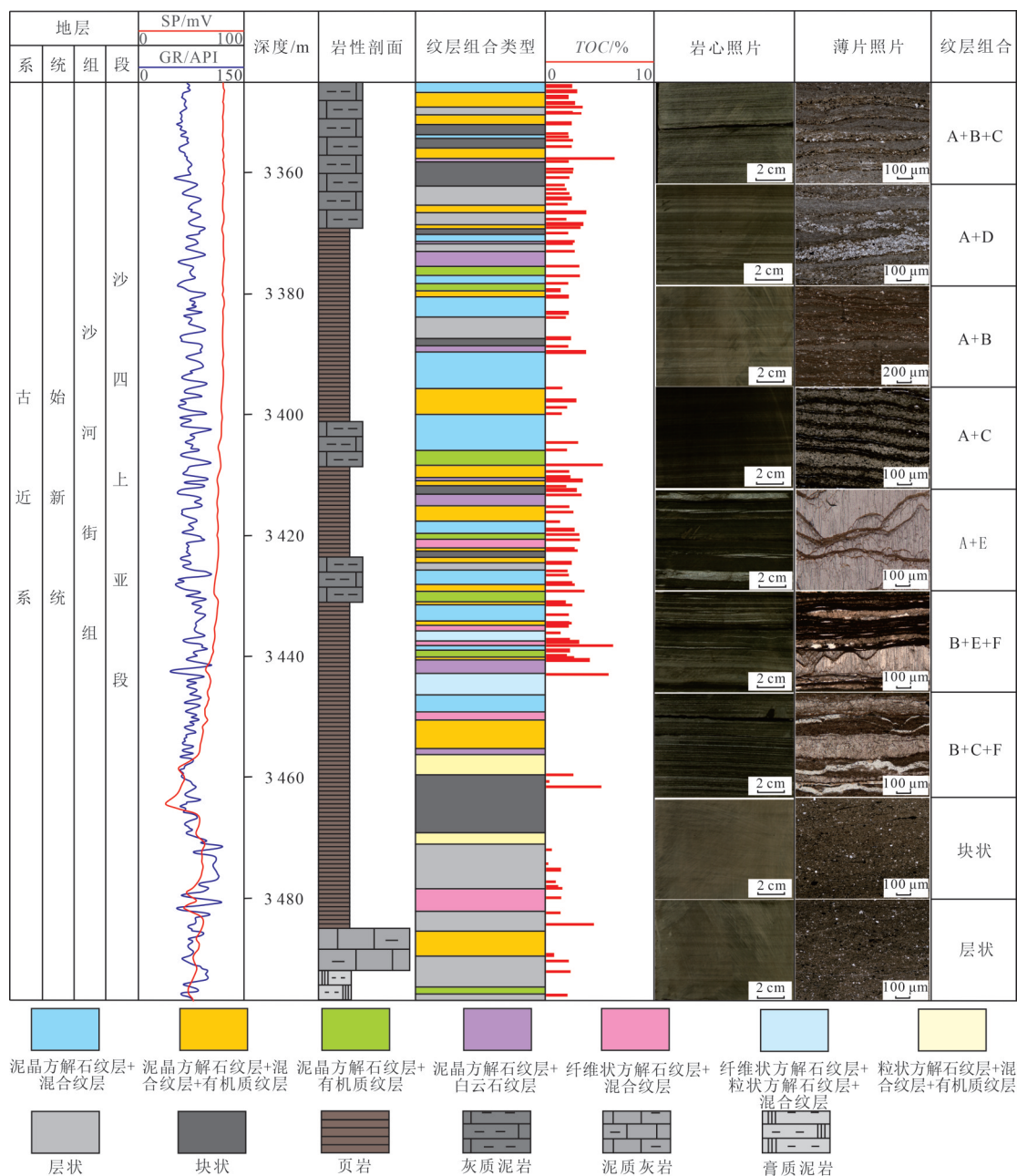


图3 东营凹陷NY1井沙四上亚段页岩纹层组合类型纵向分布

Fig. 3 Vertical distribution of lamina assemblages in the Es^{4U} shale in Well NY1, Dongying Sag

(A. 泥晶方解石纹层; B. 混合纹层; C. 有机质纹层; D. 白云石纹层; E. 纤维状方解石纹层; F. 粒状方解石纹层。)

方解石为主,其次为分布在粒状方解石颗粒周围和内部的石英和钠长石。与泥晶方解石纹层相比,其粘土矿物含量较低,这与重结晶作用有关^[59-60]。黄铁矿也是方解石颗粒间常见的矿物,此外纹层内还有一定量的菱锑矿和少量重晶石(图4e—g)。粒状方解石纹层以方解石和长英质等脆性矿物颗粒间的粒间孔为主,长英质矿物含量越高的部分,粒间孔隙越多,大部分孔隙充填有机质,常见有机质收缩缝(图5e,f)。粒间孔孔径较大,介于1~10 μm,其中的有机质收缩缝大部分宽度小于1 μm,局部可达2~3 μm。粒状方解石内

发育粒内溶孔,似圆形或椭圆形为主,孔径大部分小于1 μm,最大可以达到5 μm,同样充填有机质,可见有机质收缩缝。粒状方解石纹层与相邻混合纹层间常见微裂缝,微裂缝宽度可达10 μm。

3.2 白云石纹层

白云石纹层矿物组成以白云石为主,其次为石英、钠长石、粘土矿物、黄铁矿和少量菱锑矿(图4h),其中粘土矿物主要为伊/蒙混层。纹层底部白云石颗粒较大,向上白云石颗粒直径减小(图4i)。白云石纹层中

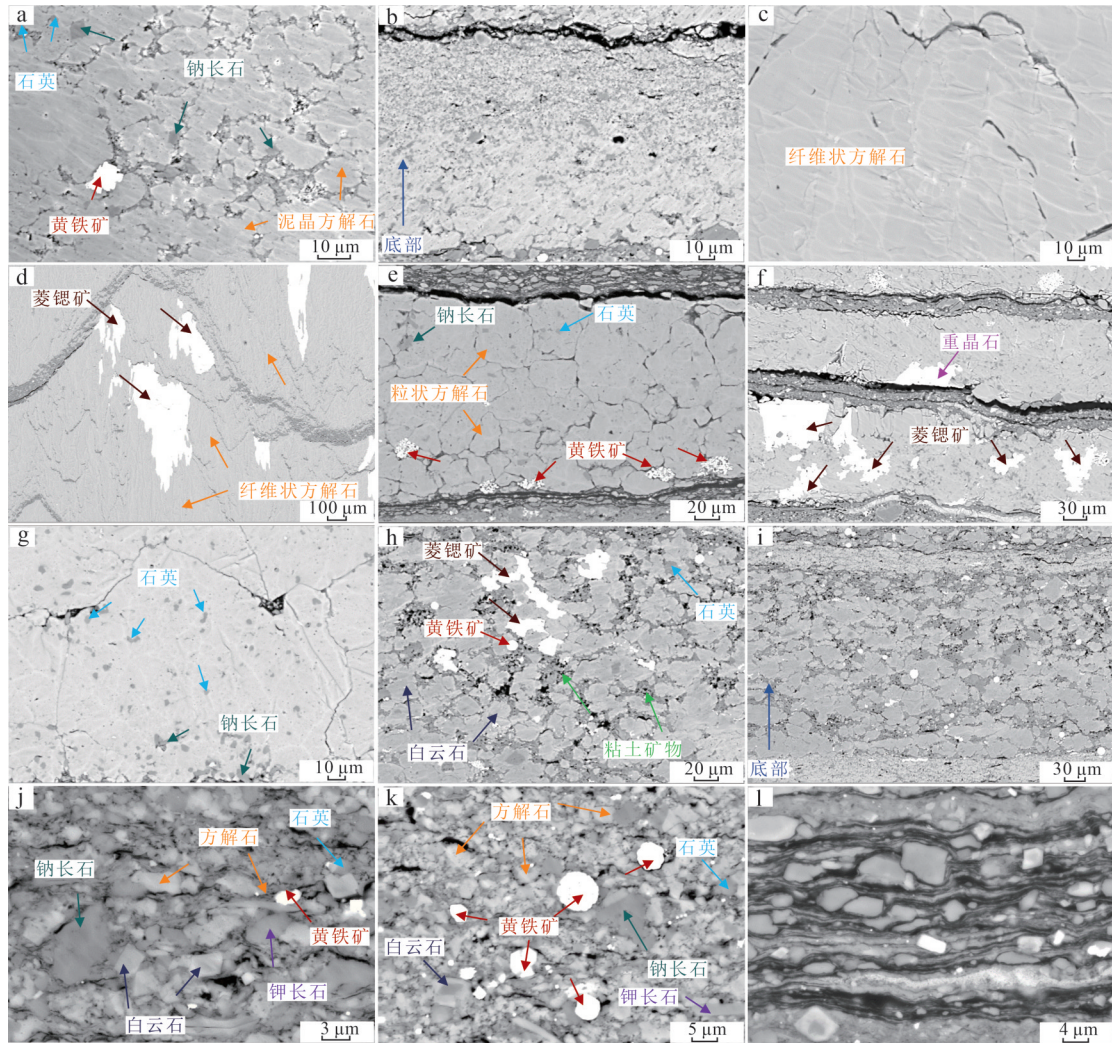


图4 东营凹陷NY1井沙四上亚段页岩纹层单元微观成分特征

Fig. 4 Microscopic composition characteristics of lamina units in the Es^{4U} shale in Well NY1, Dongying Sag

a. 泥晶方解石纹层矿物分布,埋深3 389.70 m,SEM; b. 泥晶方解石纹层纵向上粒度变化,埋深3 389.70 m,SEM; c. 纤维状方解石纹层,埋深3 389.70 m,SEM; d. 纤维状方解石纹层矿物分布,埋深3 389.70 m,SEM; e, f. 粒状方解石纹层矿物分布,埋深3 437.53 m,SEM; g. 粒状方解石内部和边缘矿物分布,埋深3 437.53 m,SEM; h. 白云石纹层矿物分布,埋深3 389.70 m,SEM; i. 白云石纹层纵向上粒度变化,埋深3 389.70 m,SEM; j. 混合纹层矿物分布,埋深3 366.60 m,SEM; k. 混合纹层矿物分布,埋深3 389.70 m,SEM; l. 有机质纹层,埋深3 437.43 m,SEM

的孔隙类型主要为粘土矿物晶间孔,孔径分布在500 nm ~ 2 μm,局部孔径达到3 ~ 4 μm,其次发育粒间孔,孔径小于2 μm,另外还有黄铁矿晶间孔,孔径小于1 μm(图5g—i),白云石颗粒内溶蚀孔不发育。

3.3 混合纹层

混合纹层中矿物成分复杂,包括方解石、白云石、石英、钠长石、粘土矿物、黄铁矿和少量的钾长石(图4j, k),粘土矿物主要为伊/蒙混层。混合纹层中的孔隙类型多样,包括脆性颗粒粒间孔、粒内溶蚀孔、粘土矿物晶间孔、黄铁矿晶间孔、有机质收缩缝和微裂缝(图5j—m)。粒内溶蚀孔常见于白云石和钾长石中。在不同纹层组合类型中,混合纹层表现出不同的孔隙

特征。在纤维状方解石纹层+泥晶方解石纹层+混合纹层组合中,混合纹层中孔隙不发育,孔隙类型以有机质收缩缝为主,宽度小于500 nm。混合纹层中还常见宽度分布在1 ~ 10 μm范围的微裂缝。在其他纹层组合中,混合纹层以粘土矿物晶间孔为主,孔径小于1 μm。

3.4 有机质纹层

有机质纹层常见于方解石纹层边缘,呈现连续弯曲、纵向叠加的有机质条带(图4l)。纹层中常见矿物颗粒边缘的有机质收缩缝,宽度小于0.5 μm(图5o),在有机质纹层与方解石纹层接触处也常见有机质收缩缝,宽度可达5 μm。

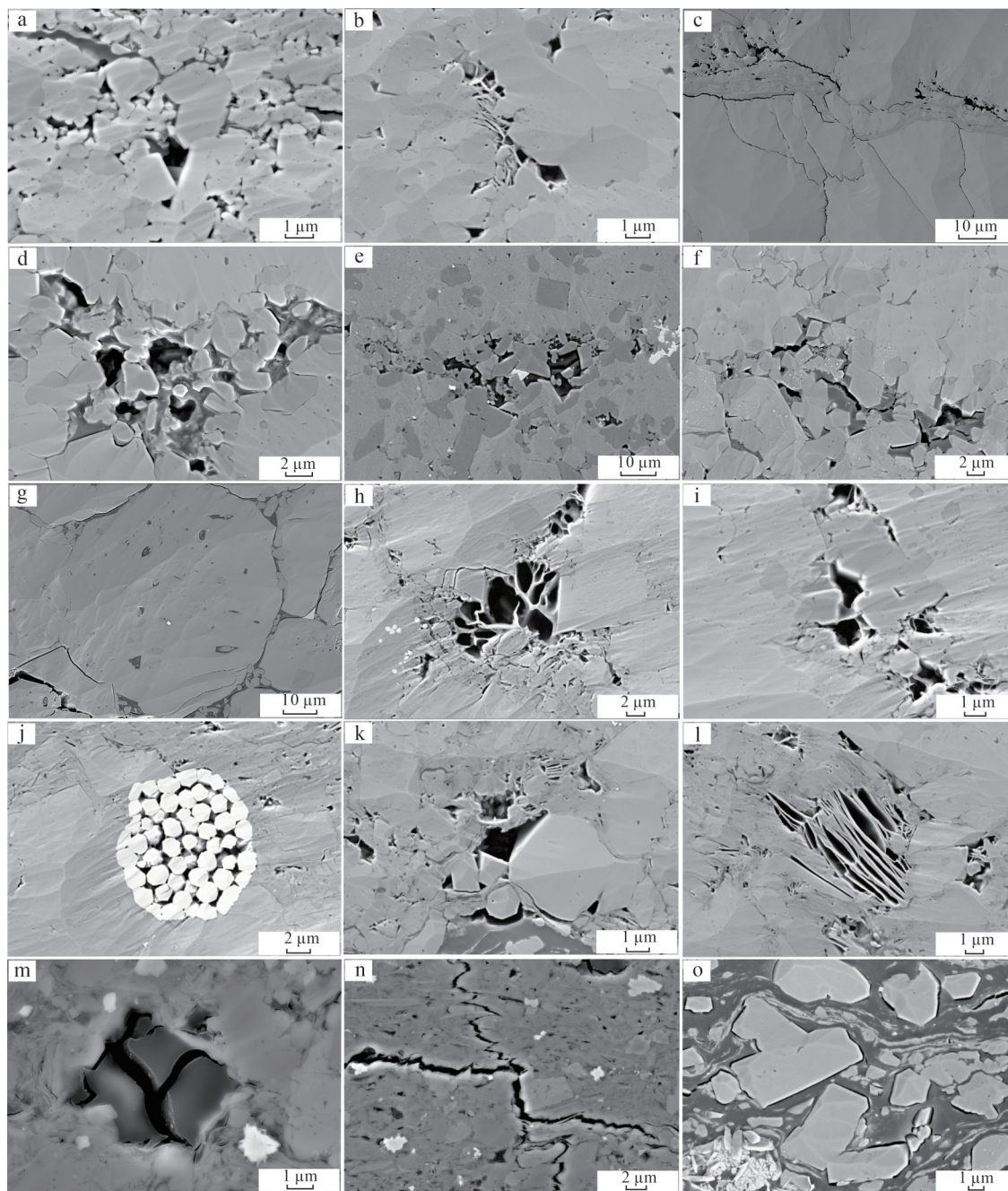


图5 东营凹陷NY1井沙四上亚段页岩纹层单元微观孔隙特征

Fig. 5 Microscopic pore characteristics of lamina units in the Es^{4U} shale in Well NY1, Dongying Sag

a. 泥晶方解石纹层粒间孔,埋深3 389.70 m,SEM;b. 泥晶方解石纹层粘土矿物晶间孔,埋深3 389.70 m,SEM;c. 纤维状方解石纹层裂缝网络,埋深3 437.03 m,SEM;d—f. 粒状方解石纹层粒间孔内充填有机质,有机质发育收缩缝,埋深3 459.50 m,SEM;g. 粒状方解石纹层粒内溶蚀孔,埋深3 459.50 m,SEM;h. 白云石纹层粘土矿物晶间孔,埋深3 389.70 m,SEM;i. 白云石纹层粒间孔,埋深3 389.70 m,SEM;j. 白云石纹层黄铁矿晶间孔,埋深3 389.70 m,SEM;k. 混合纹层粒间孔,埋深3 389.70 m,SEM;l. 混合纹层粘土矿物晶间孔,埋深3 389.70 m,SEM;m. 混合纹层有机质收缩缝,埋深3 437.43 m,SEM;n. 混合纹层微裂缝,埋深3 366.60 m,SEM;o. 有机质纹层中矿物颗粒边缘收缩缝,埋深3 431.03 m,SEM

4 储层物性特征及影响因素

4.1 储层物性特征

高压压汞实验能够表征页岩样品的宏孔(>50 nm)

分布特征,所能探测的孔喉范围在3 nm ~ 50 μm^[61-62]。

本次高压压汞的实验样品共22块,设置起始压力为5 psi(34.47 kPa),对应页岩孔喉直径约50 μm,样品均为表面平整的立方块(1 cm³),避免低压阶段进汞过程可能引起“麻皮效应”对实验结果产生影响^[63]。为降

低制样过程中人为造成的层间裂缝对实验结果的影响,压汞实验制样采用线切割方法。低压氮气吸附实验表征的是页岩样品的中孔(2~50 nm)分布特征,能探测2~200 nm范围内的孔隙。本次低压氮气实验样品共13块,采用DFT模型得出孔径分布。

高压压汞实验结果显示,沙四上亚段页岩储层孔隙度介于2.44%~16.00%(平均为5.60%),总孔隙体积介于0.009 7~0.075 6 mL/g(平均为0.023 4 mL/g),平均孔喉直径介于6.67~42.60 nm(平均为12.70 nm),比表面积介于3.30~15.10 m²/g(平均为7.86 m²/g)。

粒状方解石纹层+混合纹层+有机质纹层组合是沙四上亚段页岩储集能力最好的纹层组合类型,泥晶方解石纹层+有机质纹层组合次之,其他纹层组合的孔隙度较低(表1)。粒状方解石纹层+混合纹层+有机质纹层组合样品的孔隙度最高,平均值为16.0%;4块泥晶方解石纹层+有机质纹层组合样品的孔隙度分别为8.93%,7.87%,6.23%,6.71%,平均为7.43%;5块泥晶方解石纹层+白云石纹层组合样品的孔隙度分

别为2.85%,4.29%,11.6%,3.83%,5.14%,平均为5.55%;2块纤维状方解石纹层+泥晶方解石纹层+混合纹层组合的孔隙度分别为3.13%,8.32%,平均为5.73%;纤维状方解石纹层+混合纹层组合样品的孔隙度为4.34%;4块泥晶方解石纹层+混合纹层组合样品的孔隙度分别为2.44%,2.65%,5.43%,6.29%,平均为4.20%;5块泥晶方解石纹层+混合纹层+有机质纹层组合样品的孔隙度分别为2.64%,3.01%,5.12%,5.38%,4.69%,平均为4.17%。

高压压汞实验的进、退汞曲线形态能反映孔隙喉道的分布特征和孔隙连通性的好坏^[61-62]。进汞曲线中,当进汞压力增加时,一定量的汞进入页岩中的微米级连通孔隙中,显示微米孔的发育情况;压力超过10 000 psi(68.95 MPa)后,进汞量随进汞压力增加而快速增大,反映页岩中存在大量纳米孔;当进汞压力达到最大值时,如果进汞曲线中累计进汞量仍有继续增加的趋势,说明页岩中可能存在小于3 nm的孔隙^[62](图6)。退汞曲线中观察到沙四上亚段页岩退汞效率

表1 东营凹陷NY1井沙四上亚段页岩高压压汞实验结果

Table 1 Experimental results of high pressure mercury intrusion experiment in the Es^{4u} shale in Well NY1, Dongying Sag

深度/m	纹层组合类型	$\rho_{\text{体}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho_{\text{骨架}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\Phi/\%$	$V_{\text{孔隙}}/(\text{mL}\cdot\text{g}^{-1})$	$D_{\text{平均}}/\text{nm}$	$S_{\text{面积}}/(\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1})$
3 344.60	泥晶方解石纹层+混合纹层	2.51	2.58	2.44	0.009 7	6.97	5.57
3 383.20		2.49	2.56	2.65	0.010 6	8.30	5.13
3 404.60		2.37	2.51	5.43	0.022 9	7.40	12.40
3 431.83		2.49	2.65	6.28	0.025 3	6.67	15.20
3 377.10	泥晶方解石纹层+有机质纹层	2.40	2.63	8.93	0.037 3	9.88	15.10
3 420.63		3.44	2.65	7.86	0.032 2	15.30	8.39
3 434.83		2.46	2.63	6.23	0.025 3	15.10	6.71
3 440.13		2.45	2.62	6.71	0.027 4	15.10	7.27
3 366.60	泥晶方解石纹层+混合纹层+有机质纹层	2.45	2.52	2.64	0.010 7	6.87	6.26
3 348.56		2.48	2.55	3.01	0.012 1	7.06	6.88
3 409.40		2.45	2.58	5.12	0.020 9	13.80	6.05
3 410.40		2.44	2.58	5.38	0.022 1	10.70	8.27
3 431.43		2.44	2.56	4.69	0.019 2	7.29	10.60
3 371.71	泥晶方解石纹层+白云石纹层	2.52	2.60	2.85	0.011 3	10.10	4.47
3 375.50		2.53	2.64	4.29	0.017 0	6.80	9.97
3 410.80		2.22	2.51	11.60	0.052 3	15.90	13.20
3 415.14		2.57	2.67	3.83	0.014 9	13.60	4.41
3 442.85		2.43	2.56	5.14	0.021 2	11.70	7.22
3 437.03	纤维状方解石纹层+混合纹层	2.49	2.60	4.34	0.017 4	13.90	5.04
3 459.50	粒状方解石纹层+混合纹层+有机质纹层	2.12	2.52	16.0	0.075 6	27.30	11.10
3 437.43	纤维状方解石纹层+泥晶方解石纹层+	2.66	2.75	3.13	0.011 7	14.20	3.31
3 437.53	混合纹层	2.36	2.58	8.32	0.035 2	42.60	3.30

注: $\rho_{\text{体}}$ 为体密度; $\rho_{\text{骨架}}$ 为骨架密度; Φ 为压汞测定的孔隙度; $V_{\text{孔隙}}$ 为压汞测定孔隙体积; $D_{\text{平均}}$ 为平均孔喉直径,通过 $D_{\text{平均}}=4V/A$ (V 为总孔隙体积, mL/g; A 为总孔面积, m²)计算得到; $S_{\text{面积}}$ 为压汞测定的孔隙比表面积。

普遍低于50%,可能与页岩中发育的细颈瓶孔隙(类似墨水瓶孔隙)有关,这类孔隙的喉道细、连通性差、退汞效率低^[61-62](图6)。吸附-脱附曲线形成的滞后环可以反映页岩中的孔隙形态,根据国际理论和应用化学联合会(IUPAC)对滞后环形态的划分方案,东营凹陷沙四上亚段页岩的孔隙形态表现出H2型(墨水瓶型孔)和H3型(平行板状孔)的混合特征(图7)。低压氮气吸附实验的吸附增量与孔隙直径关系图反映沙四上亚段页岩中存在直径在2~3 nm范围的孔隙(图8)。

吸附增量图和进汞增量图反映了页岩中孔隙直径的分布情况^[63](图8,图9)。大多数纹层组合发育5~100 nm范围内的纳米孔,粒状方解石纹层+混合纹层+有机质纹层组合的纳米孔分布范围更广,孔隙直径在3~200 nm范围内,并且3~10 nm范围内的气体吸附量远高于其他纹层组合,与扫描电镜下观察到的粒状方解石粒间孔内大量存在的有机质收缩缝有关(图9)。7种纹层组合中,粒状方解石纹层+混合纹层+有机质纹层组合是沙四上亚段页岩储集能力最好的纹层组合类型,同时发育较多的纳米孔和微米孔。纳米孔直径主要分布在3~200 nm范围内,由混合纹层的粘土矿物晶间孔和粒状方解石纹层中的有机质收缩缝构成;微米孔主要由混合纹层内微裂缝和粒状方解石纹层边界处的微裂缝构成。泥晶方解石纹层+有机质纹层组合储集能力次之,纳米孔主要分布在5~100 nm范围内,主要由泥晶方解石纹层中的脆性矿物粒间孔构成;微米孔主要由纹层间薄弱面形成的微裂缝构成。

4.2 储层物性影响因素

4.2.1 方解石重结晶作用和有机酸溶蚀作用

粒状方解石纹层+混合纹层+有机质纹层组合中,孔隙的发育主要与重结晶作用和有机酸溶蚀作用有关。在3 000~3 600 m这一埋藏深度区间中,东营凹陷页岩处于排酸高峰,有机质持续生烃能力强,使成岩流体环境偏酸性^[64]。方解石重结晶作用之所以能够形成较多的储集空间,主要是源于方解石晶体相邻纹层顶、底界限生长时,在重结晶的方解石晶体间发育孔隙,重结晶部分所占比例越大,接受有机酸流体改造的可能性就越大,这些连通孔隙就形成很好的供烃类流体流通和富集的通道^[14]。由此,方解石晶体未长满的晶体间隙以及后期有机酸流体的溶蚀改造部分共同构成了方解石重结晶晶间孔,当与方解石内部受有机酸溶蚀作用产生的溶蚀孔隙和

相邻混合纹层中的生烃高压缝、收缩微缝以及方解石纹层和混合纹层间的微裂缝连通时,可以形成非常有效的储集空间网络^[14]。根据扫描电镜下对粒状方解石纹层的观察,方解石重结晶晶间孔和粒内溶蚀孔被有机质充填(图5e,f),因此粒状方解石纹层+混合纹层+有机质纹层组合储集空间中的纳米孔主要由有机质收缩缝构成,微米孔则由连通的裂缝网络构成。

纤维状方解石纹层+混合纹层组合和纤维状方解石纹层+泥晶方解石纹层+混合纹层组合孔隙度低,这与纹层组合中致密的纤维状方解石有关。纤维状方解石的生长是由于页岩沿页理面裂开形成微裂缝,后期流体沿着这些页理破裂面灌入后重结晶形成^[60]。微裂缝被重结晶方解石充填,减少了储集空间,而纤维状方解石纹层内几乎不发育储集空间,因此测得孔隙度值低。

4.2.2 压实作用

相对于其他纹层组合来说,泥晶方解石纹层+有机质纹层组合中无混合纹层,泥晶方解石的含量更高,这与其发育较多的纳米孔隙是有关的。根据扫描电镜下对泥晶方解石纹层+有机质纹层组合中孔隙类型的观察,泥晶方解石纹层的孔隙类型以脆性矿物颗粒间孔和粘土矿物晶间孔为主(图5a,b),其他纹层组合中的混合纹层孔隙类型主要是粘土矿物晶间孔,而地层深埋过程中的压实作用在粘土矿物含量高的混合纹层中更显著,泥晶方解石纹层中的孔隙受影响较小,因此泥晶方解石纹层可以提供的纳米孔隙多于混合纹层。另外,根据光学显微镜下的观察发现,泥晶方解石纹层+有机质纹层组合中泥晶方解石晶粒越大,纳米孔隙含量越高,也表明一定程度的方解石重结晶作用和有机酸溶蚀作用可以提高泥晶方解石纹层+有机质纹层组合中纳米孔隙的含量^[65]。

4.2.3 粘土矿物转化作用

泥晶方解石纹层+混合纹层、泥晶方解石纹层+混合纹层+有机质纹层、泥晶方解石纹层+白云石纹层中可以发现埋藏深度大的页岩纳米孔更多,这与粘土矿物的转化作用有关。粘土矿物的絮凝作用在不同的沉积环境中具有差异性,高岭石和伊利石在盐度为9%~13%时絮凝物最多,而蒙皂石在盐度为20%~24%时才形成大量絮凝物^[66]。东营凹陷半深湖-深湖环境受外来水体影响小,盐度较大,造成此环境下蒙皂石沉积占优势,这种现象已在现代沉积中得到证实^[66-67]。

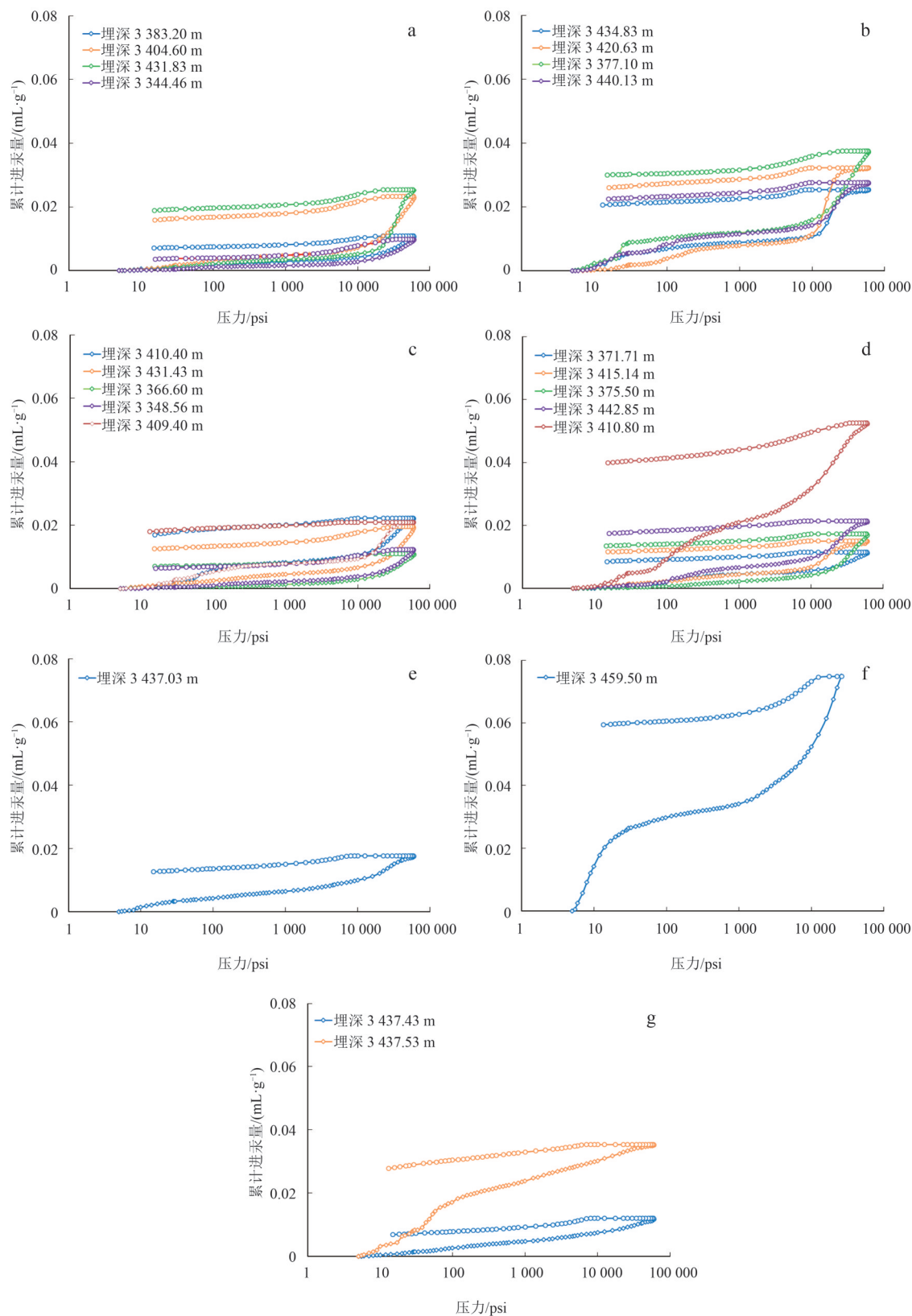


图6 东营凹陷NY1井沙四上亚段页岩进汞-退汞曲线

Fig. 6 Mercury injection and withdrawal curves of the Es^{4U} shale in Well NY1, Dongying Sag

- a. 泥晶方解石纹层+混合纹层; b. 泥晶方解石纹层+有机质纹层; c. 泥晶方解石纹层+混合纹层+有机质纹层; d. 泥晶方解石纹层+白云石纹层;
e. 纤维状方解石纹层+混合纹层; f. 粒状方解石纹层+混合纹层+有机质纹层; g. 纤维状方解石纹层+泥晶方解石纹层+混合纹层

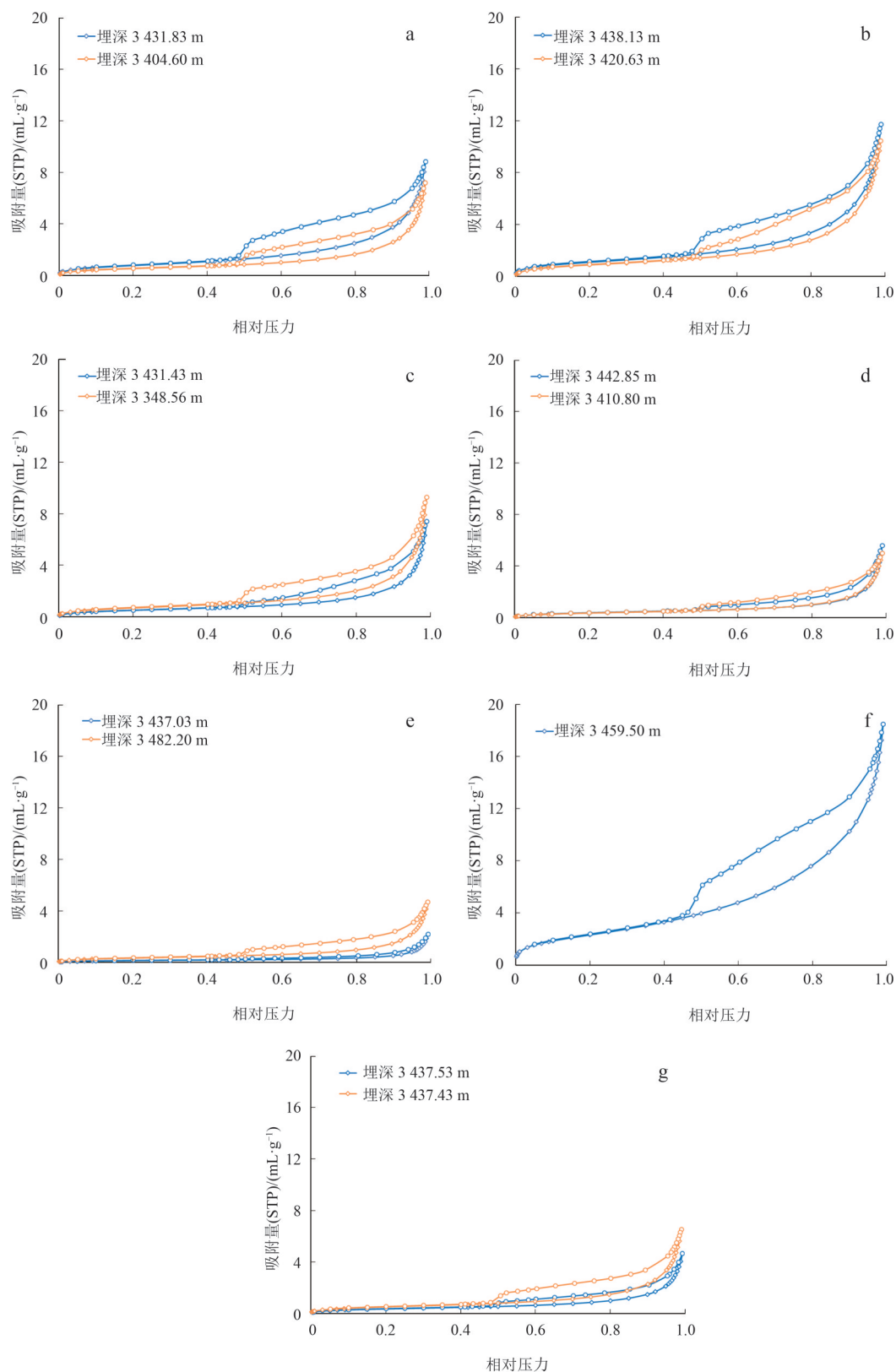


图7 东营凹陷NY1井沙四上亚段页岩低温氮气吸附-脱附曲线

Fig. 7 Low-temperature nitrogen adsorption-desorption curves of the Es^{4U} shale in Well NY1, Dongying Sag

a. 泥晶方解石纹层+混合纹层; b. 泥晶方解石纹层+有机质纹层; c. 泥晶方解石纹层+混合纹层+有机质纹层; d. 泥晶方解石纹层+白云石纹层; e. 纤维状方解石纹层+混合纹层; f. 粒状方解石纹层+混合纹层+有机质纹层; g. 纤维状方解石纹层+泥晶方解石纹层+混合纹层

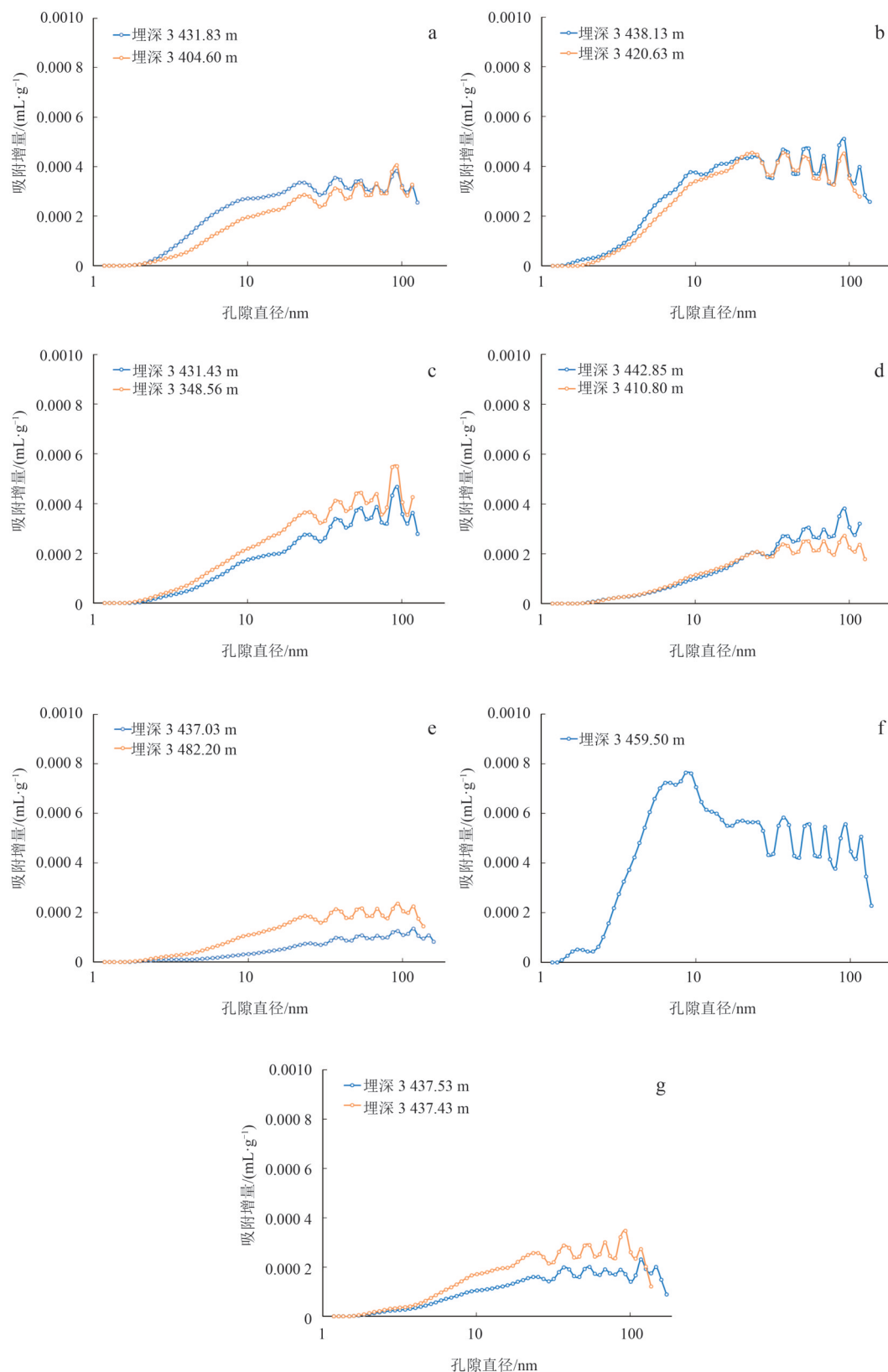


图8 东营凹陷NY1井沙四上亚段页岩低温氮气吸附增量曲线

Fig. 8 Low-temperature nitrogen adsorption increment curves of the Es^{4U} shale in Well NY1, Dongying Sag

- a. 泥晶方解石纹层+混合纹层; b. 泥晶方解石纹层+有机质纹层; c. 泥晶方解石纹层+混合纹层+有机质纹层; d. 泥晶方解石纹层+白云石纹层;
e. 纤维状方解石纹层+混合纹层; f. 粒状方解石纹层+混合纹层+有机质纹层; g. 纤维状方解石纹层+泥晶方解石纹层+混合纹层

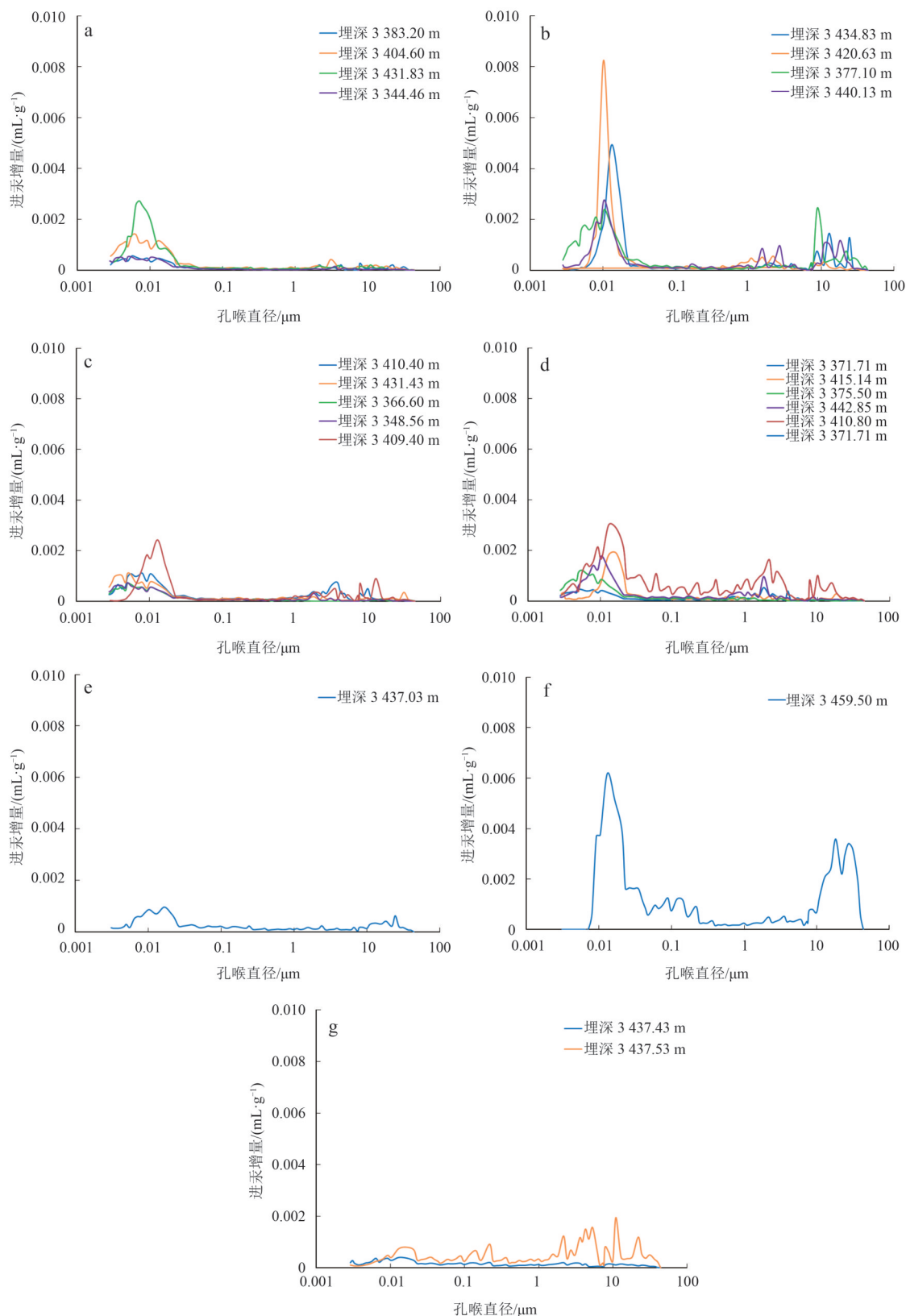


图9 东营凹陷NY1井沙四上亚段页岩进汞增量曲线

Fig. 9 Mercury injection increment curves of the Es^{4u} shale in Well NY1, Dongying Sag

a. 泥晶方解石纹层+混合纹层;b. 泥晶方解石纹层+有机质纹层;c. 泥晶方解石纹层+混合纹层+有机质纹层;d. 泥晶方解石纹层+白云石纹层;e. 纤维状方解石纹层+混合纹层;f. 粒状方解石纹层+混合纹层+有机质纹层;g. 纤维状方解石纹层+泥晶方解石纹层+混合纹层

对 NY1 井样品进行扫描电镜观察,发现粘土矿物以伊/蒙混层为主,样品中含有较多的微晶石英和斜长石,但钾长石很少见,说明了蒙皂石向伊利石的转化,转化过程中混合纹层的粘土矿物晶间孔大量发育,形成大量的纳米孔^[14]。在蒙皂石向伊利石转化的过程中会析出硅质并消耗大量的 K^+ ,样品中自生石英的出现和含钾矿物的消耗也从侧面反映出粘土矿物的转化作用^[66]。

5 结论

1) 东营凹陷沙四上亚段页岩按照成分可划分出4种纹层单元:方解石纹层(泥晶、粒状、纤维状)、白云石纹层、混合纹层、有机质纹层。这些纹层单元可总结归纳为7种纹层组合类型:①泥晶方解石纹层+混合纹层;②泥晶方解石纹层+有机质纹层;③泥晶方解石纹层+混合纹层+有机质纹层;④泥晶方解石纹层+白云石纹层;⑤纤维状方解石纹层+混合纹层;⑥粒状方解石纹层+混合纹层+有机质纹层;⑦纤维状方解石纹层+泥晶方解石纹层+混合纹层。

2) 粒状方解石纹层+混合纹层+有机质纹层组合是沙四下亚段储集能力最好的纹层组合类型,同时发育较多的纳米孔和微米孔。纳米孔直径主要分布在3~200 nm 范围内,主要由混合纹层的粘土矿物晶间孔和粒状方解石纹层中的有机质收缩缝构成;微米孔主要由混合纹层内微裂缝和粒状方解石纹层边界处的微裂缝构成,当方解石粒间孔和溶蚀孔内的有机质收缩缝与相邻混合纹层中的生烃高压缝、收缩微缝以及方解石纹层与混合纹层间的微裂缝连通时,可以形成非常有效的储集空间网络。泥晶方解石纹层+有机质纹层组合储集能力次之,纳米孔主要分布在5~100 nm 范围内,主要由泥晶方解石纹层中的脆性矿物粒间孔构成;微米孔主要由纹层间薄弱面形成的微裂缝构成,当粒间孔与微裂缝连通时,同样形成有效的储集空间网络。

3) 粒状方解石纹层+混合纹层+有机质纹层组合的高孔隙度主要受方解石重结晶作用和有机酸溶蚀作用影响;泥晶方解石纹层+有机质纹层组合中的泥晶方解石含量比其他纹层组合中的高,储层储集空间受地层压实作用影响较小,因此其纳米孔隙含量更高,泥晶方解石纹层也受到重结晶作用和有机酸溶蚀作用影响,泥晶方解石晶粒越大,纳米孔隙含量越高;泥晶方解石纹层+混合纹层、泥晶方解石纹层+混合纹层+有机质纹层、泥晶方解石纹层+白云石纹层组合中储集

空间受粘土矿物转化影响,埋藏更深的页岩具有更多的纳米孔;纤维状方解石纹层+混合纹层组合和纤维状方解石纹层+泥晶方解石纹层+混合纹层组合中储集空间受重结晶后的、致密的、不发育孔隙的纤维状方解石影响,孔隙度低。

参 考 文 献

- [1] Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett mudstone: Lithofacies and depositional setting of a deep water mudstone succession in the Fort Worth basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 579-601.
- [2] 周立宏, 韩国猛, 杨飞, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷沙河街组三段一亚段地质特征与页岩油勘探实践[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(2): 443-455.
Zhou Lihong, Han Guomeng, Yang Fei, et al. Geological characteristics and shale oil exploration of Es³⁽¹⁾ in Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(2): 443-455.
- [3] Monzon O, Yang Y, Kim J, et al. Microbial fuel cell fed by Barnett Shale produced water: Power production by hypersaline autochthonous bacteria and coupling to a desalination unit[J]. Biochemical Engineering Journal, 2016, 117(2): 87-91.
- [4] Burton D, Woolf K, Sullivan B. Lacustrine depositional environments in the Green River Formation, Uinta Basin: Expression in outcrop and wireline logs[J]. AAPG Bulletin, 2014, 98(9): 1699-1715.
- [5] Schenk C J, Charpentier R R, Klett T R, et al. Assessment of shale-oil resources of the Central Sumatra Basin, Indonesia[J/OL]. U. S. Geological Survey, 2015. <https://doi.org/10.3133/fs20153072>.
- [6] Birdwell J E, Berg M D V, Johnson R C, et al. Geological, geochemical and reservoir characterization of the Uteland Butte member of the Green River Formation, Uinta Basin, Utah[M]. Hydrocarbon Source Rocks in Unconventional Plays, Rocky Mountain Region, 2016: 352-377.
- [7] 宋国奇, 张林晔, 卢双舫, 等. 页岩油资源评价技术方法及其应用[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 221-228.
Song Guoqi, Zhang Linye, Lu Shuangfang, et al. Shale oil resource evaluation technology and its application[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(4): 221-228.
- [8] 盛湘, 陈祥, 章新文, 等. 中国陆相页岩油开发前景与挑战[J]. 石油实验地质, 2015, 37(3): 267-271.
Sheng Xiang, Chen Xiang, Zhang Xinwen, et al. Development prospects and challenges of continental shale oil in China[J]. Petroleum Geology Experiment, 2015, 37(3): 267-271.
- [9] 邹才能, 杨智, 朱如凯, 等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. 地质学报, 2015, 89(6): 979-1007.
Zou Caineng, Yang Zhi, Zhu Rukai, et al. Progress of unconventional oil and gas exploration and development and theoretical technology in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(6): 979-1007.
- [10] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 断陷湖盆湖相页岩油形成有利条件及富集特征——以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段为例[J]. 石油学报, 2019, 40(9): 1013-1029.
Zhao Xianzheng, Zhou Lihong, Pu Xiugang, et al. Favorable formation conditions and enrichment characteristics of lacustrine shale

- oil in faulted lacustrine basins: A case study of the second member of Kongdian Formation in Cangdong sag, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(9): 1013–1029.
- [11] 周立宏, 赵贤正, 柴公权, 等. 陆相页岩油效益勘探开发关键技术与工程实践——以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段为例[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(5): 1–8.
- Zhou Lihong, Zhao Xianzheng, Chai Gongquan, et al. Key technologies and engineering practice of benefit exploration and development of continental shale oil: A case study of Kong2 member in Cangdong sag, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 1–8.
- [12] 王永诗, 李政, 巩建强, 等. 济阳凹陷页岩油气评价方法: 以沾化凹陷罗家地区为例[J]. *石油学报*, 2013, 34(1): 83–91.
- Wang Yongshi, Li Zheng, Gong Jianqiang, et al. Shale oil and gas evaluation method in Jiyang depression: A case study of Luoia area in Zhanhua Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(1): 83–91.
- [13] 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. Basic characteristics and evaluation factors of shale oil reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(1): 184–196.
- [14] 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, 1527.
- Zhang Shun, Liu Huimin, Song Guoqi, et al. Genesis and controlling factors of shale oil reservoir space in Dongying sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(12): 1495–1507, 1527.
- [15] 马义权, 刘惠民, 张守鹏, 等. 济阳凹陷细粒混积岩类型与湖盆演化的耦合关系[J]. *地球科学*, 2020, 40(10): 1–14.
- Ma Yiquan, Liu Huimin, Zhang Shoupeng, et al. Coupling relationship between fine-grained migmatite types and lake basin evolution in Jiyang depression[J]. *Journal of Earth Science*, 2020, 40(10): 1–14.
- [16] 刘惠民, 张守鹏, 王朴, 等. 沾化凹陷罗家地区沙三段下亚段页岩岩石学特征[J]. *油气地质与采收率*, 2012, 19(6): 11–15.
- Liu Huimin, Zhang Shoupeng, Wang Pu, et al. Petrological characteristics of shales in the lower third member of Shahejie Formation in Luoia area, Zhanhua sag[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(6): 11–15.
- [17] 刘惠民, 王勇, 杨永红, 等. 东营凹陷细粒混积岩发育环境及其岩相组合——以沙四上亚段泥页岩细粒沉积为例[J]. *地球科学*, 2020, 40(10): 1–16.
- Liu Huimin, Wang Yong, Yang Yonghong, et al. Development environment and lithofacies Association of fine-grained migmatite in Dongying depression: A case study of fine-grained shale deposition in the upper Es4 member[J]. *Journal of Earth Science*, 2020, 40(10): 1–16.
- [18] 张建国. 济阳凹陷始新统沙三下亚段湖相细粒沉积岩成因机制研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- Zhang Jianguo. Study on the genetic mechanism of lacustrine fine-grained sedimentary rocks in the lower third member of Eocene Shahejie Formation in Jiyang depression[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [19] Thomas E, Martin H T. Semi-automated detection of annual laminae (varves) in lake sediments using a fuzzy logic algorithm[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 435(5): 272–282.
- [20] Zalmay Y, Juergen S. On the origin of silt laminae in laminated shales[J]. *Sedimentary Geology*, 2017, 360(9): 22–34.
- [21] Leticia M, Concha A, Julian E, et al. Lacustrine stromatolites as multi-scale recorders of climate change: Insights from the Miocene Ebro Basin[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2019, 530: 312–329.
- [22] 施振生, 董大忠, 王红岩, 等. 含气页岩不同纹层及组合储集层特征差异性及其成因——以四川盆地志留统龙马溪组一段典型井为例[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(4): 829–840.
- Shi Zhensheng, Dong Dazhong, Wang Hongyan, et al. Differences in the characteristics of gas shale reservoirs in different lamellae and combinations and their genesis: Taking a typical well in the first member of the Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin as an example[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(4): 829–840.
- [23] 杨博伟, 熊敏, 陈雷, 等. 川东南龙马溪组海相页岩纹层发育特征[J]. *地球科学前沿*, 2020, 10(7): 555–562.
- Yang Bowei, Xiong Min, Chen Lei, et al. Development characteristics of marine shale laminae in the Longmaxi Formation in south-eastern Sichuan[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 10(7): 555–562.
- [24] 蕙克来, 李克, 操应长, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7³亚段富有机质页岩纹层组合与页岩油富集模式[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(6): 1–12.
- Jia Kelai, Li Ke, Cao Yingchang, et al. Organic-rich shale laminar assemblage and shale oil enrichment model of the Chang 7³ sub-member of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(6): 1–12.
- [25] Hay B J, Honjo S. Interannual variability in particulate flux in the southwestern Black Sea[J]. *Deep-Sea Research*, 1990, 37(6): 911–928.
- [26] Larson C P S, Macdonald G M. Lake morphometry, sediment mixing and the selection of sites for time resolution paleoecological studies[J]. *Quaternary Science Review*, 1993, 12(9): 781–792.
- [27] Bai C Y, Yu B S, Liu H M, 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(4): 8–26.
- [28] Ma Yiquan, Fan Majie, Lu Yongchao, et al. Climate-driven paleolimnological change controls lacustrine mudstone depositional process and organic matter accumulation: Constraints from lithofacies and geochemical studies in the Zhanhua Depression, eastern China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 167(6): 103–118.
- [29] Elrick M, Hinnov L A. Millennial-scale paleoclimate cycles recorded in widespread Palaeozoic deeper water rhythmites of North America[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 243(3): 348–372.
- [30] Wang M, Chen Y, Song G Q, et al. Formation of bedding-parallel, fibrous calcite veins in laminated source rocks of the Eocene Dongying Depression: A growth model based on petrographic observations[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 200(5): 18–35.
- [31] 赵珂. 渤海湾盆地东营凹陷沙四上一沙三下亚段碳酸盐纹层特征及成因分析[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2019.
- Zhao Ke. Characteristics and genesis of carbonate laminae in the

- upper Es⁴-Es³ lower member of Dongying sag, Bohai Bay Basin [D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2019.
- [32] Aplin A C, J S H macquaker. Mudstone diversity: Origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12):2031-2059.
- [33] 张金亮, 司学强. 断陷湖盆碳酸盐与陆源碎屑混合沉积——以东营凹陷金家地区古近系沙河街组第四段上亚段为例[J]. 地质论评, 2007, 53(4):448.
- Zhang Jinliang, Si Xueqiang. Mixed deposition of carbonate and terrigenous clasts in fault depression lake basin: a case study of the upper member of the fourth member of Shahejie formation of Paleogene in Jinjia area, Dongying depression[J]. Geological Review, 2007, 53(4):448.
- [34] 张善文, 袁静, 隋凤贵, 等. 东营凹陷北部沙河街组四段深部储层多重成岩环境及演化模式[J]. 地质科学, 2008, 43(3): 576-587.
- Zhang Shanwen, Yuan Jing, Sui Fenggui, et al. Multiple diagenetic environment and evolution model of deep reservoir in the fourth member of Shahejie Formation in northern Dongying sag[J]. Journal of Earth Science, 2008, 43(3):576-587.
- [35] 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 porosity enhancement and reduction mechanisms of shale reservoirs in Dongying Sag [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(3):562-578.
- [36] 张顺, 陈世悦, 谭明友, 等. 东营凹陷西部沙河街组三段下亚段泥页岩沉积微相[J]. 石油学报, 2014, 35(4):633-645.
- Zhang Shun, Chen Shiyue, Tan Mingyou, et al. Sedimentary microfacies of shale in the lower third member of Shahejie Formation in Western Dongying sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 633-645.
- [37] 王勇, 宋国奇, 刘惠民, 等. 济阳坳陷页岩油富集主控因素[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(4):20-25.
- Wang Yong, Song Guoqi, Liu Huimin, et al. Main controlling factors of shale oil enrichment in Jiyang depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(4):20-25.
- [38] 孙超, 姚素平, 李晋宁, 等. 东营凹陷页岩油储层特征[J]. 地质论评, 2016, 62(6):1497-1510.
- Sun Chao, Yao Suping, Li Jinning, et al. Characteristics of shale oil reservoir in Dongying sag [J]. Geological Review, 2016, 62(6): 1497-1510.
- [39] Hao Y, Chen F, Zhu J, et al. Reservoir space of the Es₃³-Es₄¹ shale in Dongying sag [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(4):425-431.
- [40] Ma B B, Cao Y C, Eriksson K A, et al. Burial evolution of evaporites with implications for sublacustrine fan reservoir quality: A case study from the Eocene Es₄ interval, Dongying depression, Bohai Bay Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 76(3):98-114.
- [41] 张顺, 陈世悦, 蒲秀刚, 等. 断陷湖盆细粒沉积岩岩相类型及储层特征——以东营凹陷沙河街组和沧东凹陷孔店组为例[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(3):568-581.
- Zhang Shun, Chen Shiyue, Pu Xiugang, et al. Lithofacies types and reservoir characteristics of fine-grained sedimentary rocks in faulted lake basin: A case study of Shahejie Formation in Dongying sag and Kongdian Formation in Cangdong sag[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2016, 45(3):568-581.
- [42] 陈世悦, 张顺, 王永诗, 等. 渤海湾盆地东营凹陷古近系细粒沉积岩岩相类型及储集层特征[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(2):198-208.
- Chen Shiyue, Zhang Shun, Wang Yongshi, et al. Lithofacies types and reservoir characteristics of Paleogene fine-grained sedimentary rocks in Dongying sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2):198-208.
- [43] 刘惠民, 于炳松, 谢忠怀, 等. 陆相湖盆富有机质页岩微相特征及对页岩油富集的指示意义——以渤海湾盆地济阳坳陷为例[J]. 石油学报, 2018, 39(12):1328-1343.
- Liu Huimin, Yu Bingsong, Xie Zhonghui, et al. Microfacies of organic rich shale in continental lake basin and its significance for shale oil enrichment: A case study of Jiyang depression in Bohai Bay Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(12):1328-1343.
- [44] 朱光有, 金强, 周建林, 等. 渤海湾盆地东营断陷湖盆充填模式研究[J]. 石油实验地质, 2003, 25(2):143-148.
- Zhu Guangyou, Jin Qiang, Zhou Jianlin, et al. Study on the filling model of Dongying fault depression lake basin in Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology Experiment, 2003, 25(2):143-148.
- [45] Guo Xiaowen, Liu Keyu, He Sheng, et al. Petroleum generation and charge history of the northern Dongying depression, Bohai Bay Basin, China: insight from integrated fluid inclusion analysis and basin modelling[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 32(1): 21-35.
- [46] Feng Youliang, Li Sitian, Lu Yongchao. Sequence stratigraphy and architectural variability in Late Eocene lacustrine strata of the Dongying depression, Bohai Bay Basin, Eastern China [J]. Sedimentary Geology, 2013, 295(8):1-26.
- [47] 宋国奇, 徐兴友, 李政, 等. 济阳坳陷古近系陆相页岩油产量的影响因素[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3):463-471.
- Song Guoqi, Xu Xingyou, Li Zheng, et al. Influencing factors of Paleogene continental shale oil production in Jiyang depression [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3):463-471.
- [48] 逢淑伊, 操应长, 梁超, 等. 渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段—沙三下亚段岩相特征及沉积环境——以樊页1井为例[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4):799-809.
- Fu Shuyi, Cao Yingchang, Liang Chao, et al. Lithofacies characteristics and sedimentary environment of the upper es₄-es₃ lower submember of Dongying sag, Bohai Bay Basin: a case study of well Fanye 1 [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(4):799-809.
- [49] Yang T, Cao Y C, Henrik F, et al. Diagenetic evolution and chemical changes of deep-water mudstones of Shahejie Formation in the Dongying Sag, Jiyang Depression, Eastern China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 93(5), 14-32.
- [50] 张顺, 王永诗, 刘惠民, 等. 渤海湾盆地东营凹陷细粒沉积微相对页岩油储层微观结构的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(6):923-934.
- Zhang Shun, Wang Yongshi, Liu Huimin, et al. Control of fine-grained sedimentary microfacies on shale oil reservoir microstructure in Dongying sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(6):923-934.
- [51] 杨棵, 董艳蕾, 朱筱敏, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷埕岛东坡古近系东营组二段下部源-汇系统[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6):1280-1292.
- Yang Ke, Dong yanlei, Zhu Xiaomin, et al. Source sink system in

- the lower part of the second member of the Paleogene Dongying Formation in the eastern slope of Chengdao, Bozhong sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(6): 1280-1292.
- [52] Zhang Jianguo, Jiang Zaixing, Liang Chao, et al. Lacustrine massive mudrock in the Eocene Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China: Nature, origin and significance[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 77(3): 1042-1055.
- [53] Webster T. Observations on the Purbeck and Portland Beds[J]. *Transactions of the Geological Society*, 1826, 2(2): 37-44.
- [54] Buckland W, De la Beche HT. On the geology of the neighbourhood of Weymouth and the adjacent parts of the coast of Dorset[J]. *Transactions of the Geological Society*, London, 1835, S2-4(1): 1-46.
- [55] Cobbold P R, Zanella A, Rodrigues N, et al. Bedding-parallel fibrous veins (beef and cone-in-cone): worldwide occurrence and possible significance in terms of fluid overpressure, hydrocarbon generation and mineralization[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 43(3): 1-20.
- [56] 沈骋, 任岚, 赵金洲, 等. 页岩岩相组合划分标准及其对缝网形成的影响——以四川盆地志留系龙马溪组页岩为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 98-106.
- Shen Cheng, Ren Lan, Zhao Jinzhou, et al. Division of shale lithofacies associations and their impact on fracture network formation in the Silurian Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 98-106.
- [57] Robert G, Loucks. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(6): 1071-1098.
- [58] 王勇, 刘惠民, 宋国奇, 等. 湖相泥页岩中碳酸盐成因及页岩油气地质意义——以东营凹陷沙河街组四段上亚段—沙河街组三段下亚段烃源岩为例[J]. *石油学报*, 2017, 38(12): 1390-1400.
- Wang Yong, Liu Huimin, Song Guoqi, et al. Origin of carbonate in lacustrine shale and its geological significance of shale oil and gas: A case study of source rocks from upper sub member of 4th member of Shahejie formation to lower sub member of 3rd member of Shahejie Formation in Dongying depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(12): 1390-1400.
- [59] 滕建彬. 东营凹陷页岩油储层中方解石的成因及证据[J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(12): 18-25.
- Teng Jianbin. Genesis and evidence of calcite in shale oil reservoirs in Dongying sag[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(12): 18-25.
- [60] 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]. 武汉: 中国地质大学(北京), 2019.
- Bai Chenyang. Genesis of laminar carbonate rocks in Jiyang depression and its indicative significance for shale oil enrichment [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [61] 杨锐. 鄂西渝东地区五峰组—龙马溪组页岩孔隙结构与连通孔隙流体示踪[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2018.
- Yang Rui. Pore structure and connected pore fluid tracing of Wufeng Formation Longmaxi formation shale in Western Hubei and Eastern Chongqing[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2018.
- [62] 胡钦红, 张宇翔, 孟祥豪, 等. 渤海湾盆地东营凹陷古近系沙河街组页岩油储集层微米—纳米孔体系表征[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(5): 681-690.
- Hu Qinhong, Zhang Yuxiang, Meng Xianghao, et al. Characterization of micro nano scale pore system of Paleogene Shahejie Formation shale oil reservoir in Dongying sag, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(5): 681-690.
- [63] 胡钦红, 刘惠民, 黎茂稳, 等. 东营凹陷沙河街组页岩油储集层润湿性、孔隙连通性和流体—示踪剂运移[J]. *石油学报*, 2018, 39(3): 278-289.
- Hu Qinhong, Liu Huimin, Li Maowen, et al. Wettability, pore connectivity and fluid tracer migration of shale oil reservoir of Shahejie Formation in Dongying depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(3): 278-289.
- [64] 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 events of Paleogene shale in Dongying sag and its influence on shale reservoir spatial development characteristics [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(1): 109-118.
- [65] 陈前, 闫相宾, 刘超英, 等. 压实对页岩有机质孔隙发育控制作用——以四川盆地东南地区及周缘下古生界为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 76-85.
- Chen Qian, Yan Xiangbin, Liu Chaoying, et al. Controlling effect of compaction upon organic matter pore development in shale: A case study on the Lower Paleozoic in southeastern Sichuan Basin and its periphery[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 76-85.
- [66] 侯中帅, 陈世悦. 东营凹陷沙四段上亚段—沙三段下亚段泥页岩成岩演化及其对储层发育的影响[J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(1): 119-128.
- Hou Zhongshuai, Chen Shiyue. Diagenetic evolution of shale and its influence on reservoir development in the upper and lower sub members of Es⁴ and Es³ in Dongying depression[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(1): 119-128.
- [67] Thomas A R, Murray H H. Clay mineral segregation by flocculation in the Porters Creek Formation[J]. *Clays&Clay Minerals*, 1989, 37(2): 179-184.

(编辑 张玉银)