

渤海湾盆地东濮凹陷沙三段泥页岩储层孔隙微观特征及其对油气滞留的意义

邵新荷^{1,2}, 庞雄奇^{1,2}, 胡涛^{1,2}, 徐田武³, 徐源^{1,2}, 唐令^{1,4}, 李慧^{1,2}, 李龙龙^{1,2}

[1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 3. 中国石化中原油田分公司, 河南濮阳 457001; 4. 中国石油大学(北京)非常规天然气研究院, 北京 102249]

摘要:结合基础地化特征,对渤海湾盆地沙三段泥页岩进行XRD全岩矿物测试、镜下薄片鉴定和扫描电镜观察、低温氮气吸附实验,分析泥页岩储层孔隙空间的微观结构特征,并在此基础上研究沙三段泥页岩储集空间发育的影响因素,阐述孔隙发育对泥页岩油气富集的意义。结果表明:东濮凹陷沙三段泥页岩可划分为粉砂质泥页岩、灰质泥页岩和膏质泥页岩,其地化特征非均质性很强,显示出油气在沙三段泥页岩中的富集特征十分复杂。沙三段泥页岩中发育有粒间孔隙、粒内孔隙、有机孔及裂缝,不同岩性中的主要孔隙类型及孔隙分布存在差异。低压氮气吸附实验显示出沙三段泥页岩孔径分布体系可分为微孔主导、大孔主导和多孔径共控3种孔隙结构。沉积作用及成岩作用对沙三段泥页岩孔隙网络的发育均有影响,沉积环境为不同类型孔隙在各个岩性中的发育奠定基础,成岩作用在泥页岩埋藏过程中对孔隙网络起改造作用,大孔隙和微裂缝为液态烃及游离气的主要富集场所,微孔及介孔能够为吸附气提供吸附位,溶解气对于页岩油的开发具有重要意义。

关键词:微观孔隙特征; 油气富集; 泥页岩; 沙三段; 东濮凹陷; 渤海湾盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Microscopic characteristics of pores in Es³ shales and its significances for hydrocarbon retention in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

Shao Xinhe^{1,2}, Pang Xiongqi^{1,2}, Hu Tao^{1,2}, Xu Tianwu³, Xu Yuan^{1,2}, Tang Ling^{1,4}, Li Hui^{1,2}, Li Longlong^{1,2}

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China; 3. Zhongyuan Oilfield Company Ltd., SINOPEC, Puyang, Henan 457001, China; 4. Unconventional Natural Gas Institute, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China]

Abstract: The Es³ shales in Dongpu Sag were studied with XRD analysis, thin section and SEM observation, and low-temperature nitrogen adsorption experiment based on their basic geochemical characteristics. Microscopic characteristics of shale pores were analyzed, and thus controlling factors of shale pore development and its significance for hydrocarbon retention in shales have been identified. Results show: the Es³ shales in Dongpu Sag can be classified into silty shales, calcareous shales and gypsum shales according to their mineral compositions; the strong heterogeneity in shales' geochemical characteristics reflects a complex hydrocarbon retention pattern in Es³ shales; several pore types including interparticle, intraparticle and organic-matter pores and fractures, are identified in Es³ shales with different lithologies dominated by different pore types; the pore systems in Es³ shales can be dominated by micropores, macropores, or pores of multiple diameters based on low-pressure nitrogen adsorption experiment; pore development in Es³ shales is affected by both deposition and diagenesis, with deposition environment laying the foundation for pore development in various lithologies and diagenesis modifying pore structures during shale burial, respectively; oil and free gas mainly accumulate in large pores and mi-

收稿日期:2017-12-21; 修订日期:2018-10-10。

第一作者简介:邵新荷(1993—),博士研究生,非常规油气成藏机理。E-mail:sophiashao0212@yahoo.com。

通讯作者简介:庞雄奇(1961—),教授,盆地分析、油气资源评价、油气成藏机理。E-mail:pangxq@cup.edu.cn。

基金项目:中国石化中原油田分公司科技项目(P15022)。

crofractures, and micro- and meso-pores provide sites for adsorbed gas, while solution gas is of great significance to develop shale oil/gas resources.

Key words: shale, microscopic characteristic of pores, Es^3 , hydrocarbon enrichment, Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

随着人们对含油气系统认识的逐步深入以及能源需求的不断增长,世界油气资源勘探开发重点逐渐转向非常规油气,特别是页岩油气领域的发展极为迅速^[1-4]。国内一些开发较为成熟的盆地中已经发现了巨大的页岩油气资源,在过去几十年的勘探历程当中,东濮凹陷沙河街组三段泥页岩中多次见到油气显示,特别是柳屯洼陷的PS18-1井在沙三上亚段当中获取了 $100\text{ m}^3/\text{d}$ 的高产稠油^[5],展现出东濮凹陷沙三段泥页岩中拥有可观的页岩油气资源潜力。页岩油气聚集具有源储一体的特征,泥页岩既作为烃源岩,又作为储集体^[6-9],泥页岩孔隙空间的发育特征对于页岩油气资源的勘探开发至关重要。陆相湖盆沉积非均质性、空间上相变快、岩性组合多样^[10],因此对于陆相泥页岩储层的研究具有相当的难度。本文以渤海湾盆地东濮凹陷沙河街组三段(沙三段)泥页岩为对象,针对其储集空间的微观结构特征展开研究,一方面可以明确泥页岩孔隙发育的主控因素,对刻画沙三段泥页岩储层的分布发育提供依据,另一方面能够分析储集空间微观特征对页岩油气滞留的意义,对东濮凹陷沙三段泥页岩油气资源的勘探开发具有一定的理论应用价值。

1 地质背景与样品采集

东濮凹陷位于渤海湾盆地西南端,面积约 $5\,300\text{ km}^2$,在3条北北东向的大断裂(兰聊断裂带、黄河-文西-观城断裂带、长垣-石家集-宋庙断裂)的控制下,东濮凹陷形成了“两洼一隆一陡一斜坡”的构造格局^[11-12](图1);同时,东濮凹陷的沉积及构造演化特征在海通集-桥口-白庙一线南北两侧也具有很大差异,盐湖沉积在北部较为发育而在南部不发育,整体呈现出“东西分带、南北分块”的特征^[13]。研究区内地层由第四系平原组、新近系明化镇组及馆陶组、古近系东营组、沙河街组及孔店组组成。沙河街组是一套重要的油气勘探层系,自上而下分为沙一段、沙二段、沙三段及沙四段(图1),其中沙三段是研究区内泥页岩发育的主要层系,也是本文的研究对象,岩性组成十分复杂。岩心描述结果显示其发育有灰-深灰色泥岩、粉砂岩、盐岩、膏岩等^[14],该区沙三段主要为湖相背景下的三角洲和半深湖-深湖沉积。本次研究在东濮凹陷北部典型勘探井中选取24块泥页岩样品,并对样品进

行了XRD全岩矿物分析、薄片鉴定及扫描电镜观察、低压氮气吸附等实验,并收集了300余个样品点的有机地化分析数据,在此基础上开展对沙三段泥页岩储层孔隙微观特征的研究。

2 矿物组成特征

对24块样品进行镜下薄片鉴定及XRD全岩矿物分析结果表明(图2),东濮凹陷沙三段泥页岩储层矿物组成包括石英、长石、碳酸盐矿物、粘土矿物和石膏等,不同样品矿物相对含量变化较大。石英+长石矿物含量介于 $11.8\%\sim 54.6\%$,平均为 33.2% ;碳酸盐矿物以方解石为主($0.8\%\sim 54.6\%$,平均为 20.2%),同时含有白云石,其含量普遍小于 15% ;粘土矿物含量介于 $11.2\%\sim 67.0\%$,平均为 34.8% ;石膏含量在 $0.3\%\sim 17.2\%$,平均为 8.4% ;其他矿物包括石盐、黄铁矿和菱铁矿等,总含量普遍小于 17.3% ,平均为 3.64% 。

根据矿物的相对含量可将东濮凹陷沙三段泥页岩划分为粘土矿物、石英、长石矿物含量较高的粉砂质泥岩、碳酸盐矿物含量高的灰质泥页岩及石膏或石盐含量高的膏质泥岩或蒸发岩。总体而言,沙三段泥页岩矿物组成十分复杂,反映了该套泥页岩在沉积时期水体盐度和水动力条件不断变化。深湖-半深湖相主要沉积灰质泥页岩及膏质泥岩,前三角洲泥和水下分流间湾主要沉积粉砂质泥岩,高含量的石盐则能够反映水体盐度的上升^[10,15]。

3 地球化学特征

东濮凹陷沙三段泥页岩有机质丰度非均质性很强,研究区南北部差异明显(表1)。整体而言, TOC (有机碳含量)介于 $0.13\%\sim 8.51\%$ 范围内,平均为 0.90% ;热解 S_1+S_2 (生烃潜量)介于 $0.03\sim 68.45\text{ mg/g}$ 范围内, $T_{\max}$ (热解峰温)主要集中在 $359\sim 537\text{ }^\circ\text{C}$ 。该套泥页岩有机质类型以 II_1 型、I型为主,腐泥组和壳质组是干酪根显微组分的主要组成,少数样品干酪根显微组分以镜质组为主,说明水生生物和陆生植物对沙三段泥页岩中有机质均有贡献,但以水生生物为主。不同岩性有机质丰度与类型都存在差异,例如灰质泥

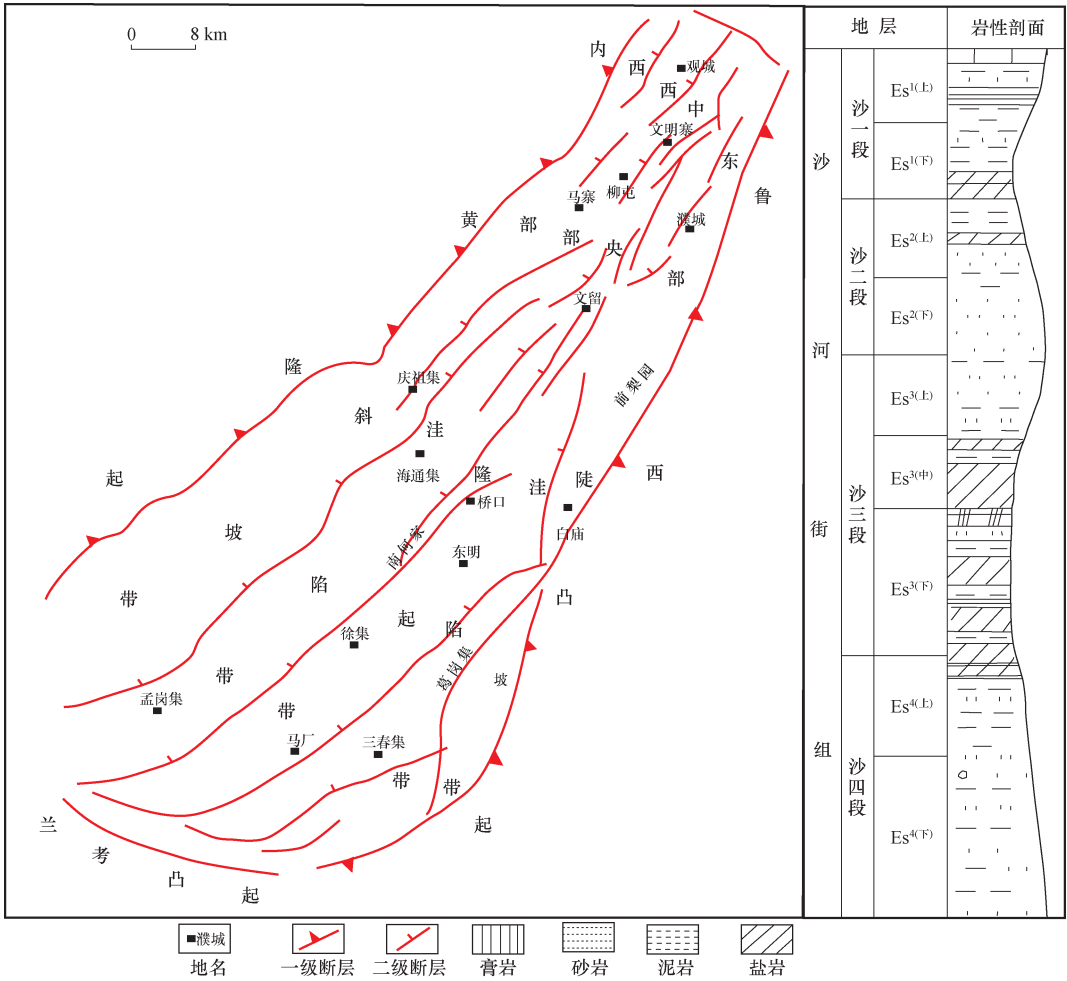


图 1 东濮凹陷构造分区及地层综合柱状图

Fig. 1 Tectonic division and stratigraphic column of Dongpu Sag

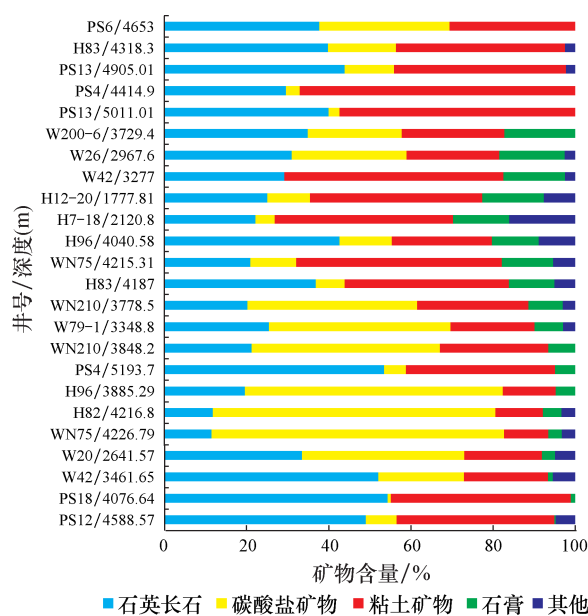


图 2 东濮凹陷沙三段泥页岩矿物组成

Fig. 2 Mineral composition of Es³ shales in Dongpu Sag

表 1 东濮凹陷沙三段泥页岩地球化学特征

Table 1 Geochemical characteristics of Es³ shales in Dongpu Sag

地球化学参数	膏盐岩发育地区	膏盐岩不发育地区
TOC/%	0.15 ~ 8.51	0.13 ~ 2.66
	1.11	0.56
(S ₁ + S ₂)/(mg · g ⁻¹)	0.04 ~ 68.45	0.03 ~ 14.49
	4.16	1.23
T _{max} /℃	412 ~ 537	359 ~ 491
	439	447

注:表中数据为 $\frac{\text{最大值} - \text{最小值}}{\text{平均值}}$ 。

岩与膏盐岩有机质丰度高,生烃潜力较大,有机质类型以 I 型、II₁ 型为主,而粉砂质泥岩中有 TOC 丰度与生烃潜力较低,有机质类型主要为 II 型,含有少量 III 型有机质。

沙三段泥页岩成熟度变化较大,R_o(镜质体反射率)分布在 0.30% ~ 2.25% 范围内,主要分布在 0.5% ~ 1.5%,说明研究区内大部分烃源岩已经开始生烃,一

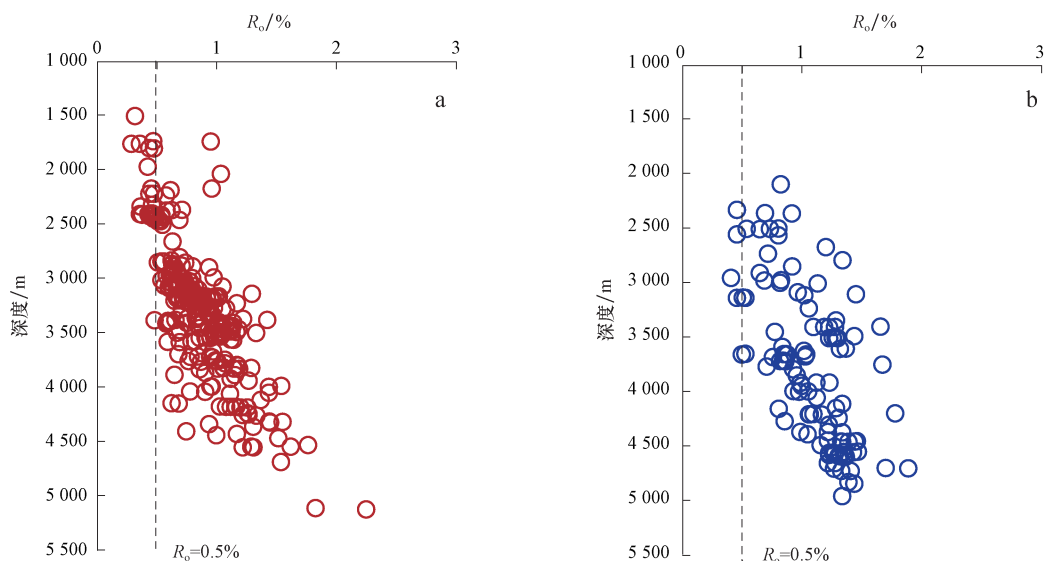


图3 东濮凹陷沙三段泥页岩镜质体反射率(R_o)与深度关系

Fig. 3 Vitrinite reflectance(R_o) vs. burial depth of Es³ shales in Dongpu Sag

a. 膏盐岩发育地区; b. 膏盐岩不发育地区

些埋藏较深的泥页岩已经进入生气阶段。前人研究表明,东濮凹陷中膏盐岩的广泛发育对于泥页岩的热演化过程具有重要影响(图3)。膏盐岩对地温传导能力较强,含膏盐地层中泥页岩与膏盐岩空间配置关系不同,导致泥页岩的热演化程度与同深度下无盐地层中的烃源岩有明显差异^[16]。总体而言,东濮凹陷沙三段泥页岩热演化特征在空间上变化十分复杂。

4 孔隙类型

东濮凹陷沙三段泥页岩储层非均质性极强,孔隙类型、大小和形态等特征在空间上变化很大。本文结合镜下薄片鉴定及扫描电镜观察结果,根据 Loucks 等在 2012 年的分类^[17],将沙三段泥页岩中的孔隙类型划分为:矿物基质孔(粒间孔隙、粒内孔隙)、有机孔和裂缝,并对各类型的孔隙特征进行分析刻画(图4)。

4.1 粒间孔隙

根据扫描电镜观察结果,沙三段泥页岩整体致密,粒间孔隙发育较少,通常以残余粒间孔的形式存在于骨架矿物颗粒之间,如石英、长石和方解石等。形状多呈不规则多边形,孔径大小差异明显,通常为微米级(图4a—c)。特别是在石盐矿物含量高的泥页岩中,能够在石盐晶体之间形成粒间孔,该类孔隙通常为圆形或椭圆形,在溶蚀作用下孔隙能够生长连片,发育连通的孔隙网络(图4d)。此外,粘土矿物粒间孔隙也较为发育,孔隙多为片状生长于粘土矿物集合体内

(图4a),孔径较小,分布不均一。

4.2 粒内孔隙

沙三段泥页岩中粒内孔隙主要为黄铁矿集合体内部的孔隙,方解石或白云石晶体内部形成的次生孔隙,石膏脱水形成的解理状孔隙及少数生物化石成因孔隙。黄铁矿在沙三段泥页岩中十分发育,其中以莓球状黄铁矿集合体发育最为普遍。莓球状黄铁矿集合体的形成通常伴生着有机质及自生粘土矿物在黄铁矿颗粒之间充填,未被充填的部分即形成孔隙,该类孔隙形状较规则,呈团簇状分布,孔径普遍较小,且与黄铁矿颗粒大小相关(图4e)。泥页岩在生烃过程中能够产生大量的有机酸,对方解石或白云石矿物产生溶蚀,从而形成次生孔隙^[18]。该类孔隙分布较为集中,主要发育在方解石或白云石晶体的内部或边缘,呈圆形或椭圆形,孔径变化范围较大,最大可达 3 μm 。孔隙连通性与泥页岩生烃作用强弱或有机酸析出量有关,生成的有机酸越多,溶蚀作用越强烈,特别是在碳酸盐矿物含量高的泥页岩中,能够形成连通性极好的孔隙网络。此外,沙三段泥页岩中生物化石比较发育,沉积埋藏过程中生物体腔内逐渐充填自生粘土矿物或黄铁矿等,并形成网状孔隙结构,单体孔隙形状不规则,呈多边形或狭缝状,孔隙直径变化较大。

4.3 有机孔

本文所阐述的有机孔包括与有机质相关的孔隙及裂缝。沙三段属于陆相湖盆沉积的泥页岩,其热演化

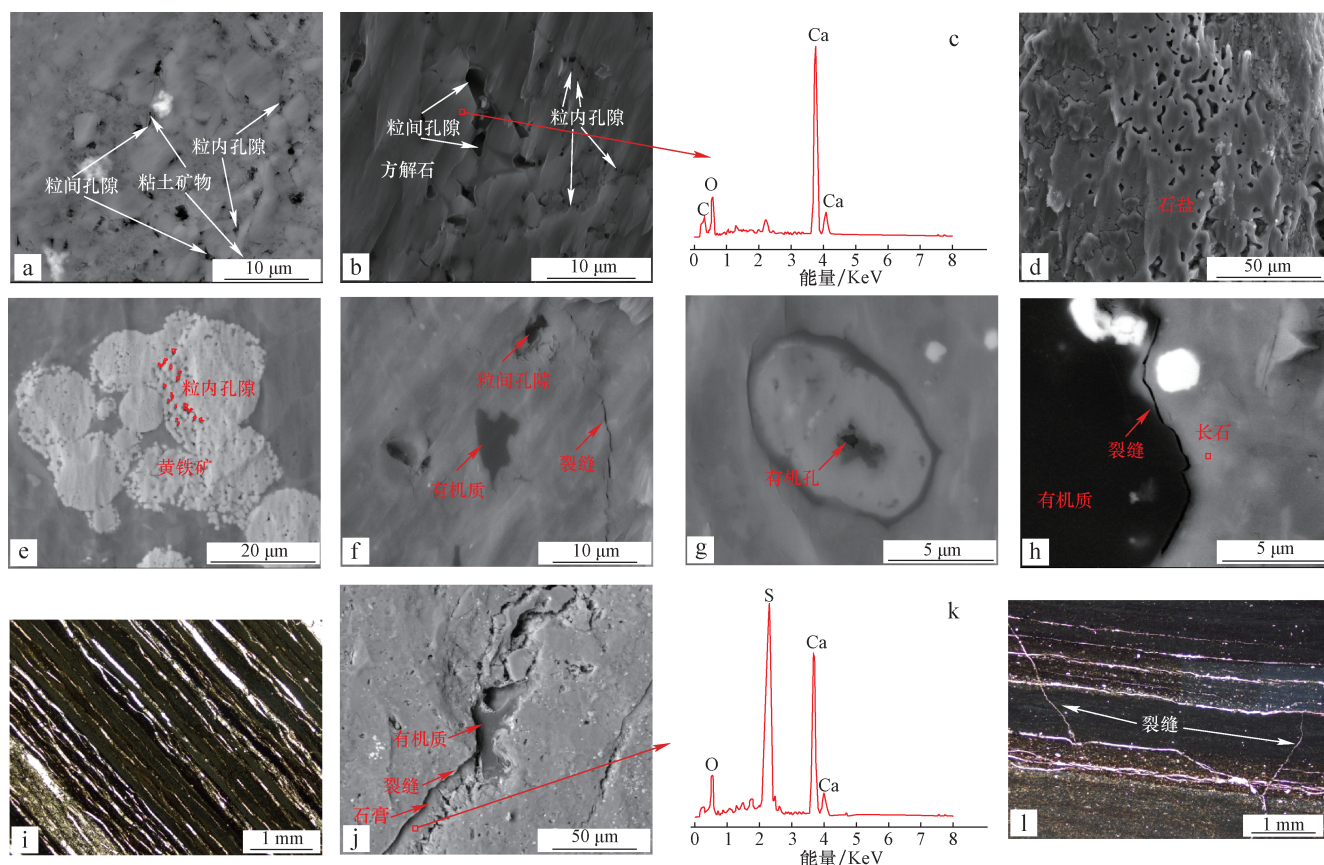


图4 东濮凹陷沙三段泥页岩储层孔隙类型及微观特征

Fig. 4 Types and microscopic characteristics of pores in Es³ shales in Dongpu Sag

a. 粒间孔隙及粒内孔隙, WN75 井, 埋深 4 226.79 m; b. 粒间孔隙及碳酸盐矿物粒内溶蚀孔隙, WN26 井, 埋深 2 967.60 m; d. 石盐晶体粒间孔隙, WN26 井, 埋深 2 967.60 m; e. 黄铁矿集合体发育粒内孔隙, PS13 井, 埋深 4 905.01 m; f. 粒间孔隙、微裂缝及孔隙不发育的有机质, PS4 井, 埋深 4 414.90 m; g. 有机孔, PS13 井, 埋深 4 905.01 m; h. 有机质边缘发育微裂缝, PS12 井, 埋深 4 588.57 m; i. 层理缝, H7-18 井, 埋深 2 120.80 m; j. 石膏充填微裂缝, WN26 井, 埋深 2 967.60 m; l. 构造缝, WN75 井, 埋深 4 226.79 m; c, k. WN26 井, 矿物能谱分析结果

程度远低于四川盆地龙马溪组等进入过成熟度的泥页岩, 因此它的有机质孔隙系统特征也与过成熟海相页岩在形貌、孔隙发育密度等方面有明显差异。根据前人研究, 海相过成熟泥页岩的有机质能够形成海绵状孔隙网络, 单体孔隙形态通常为圆形或椭圆形^[19]。沙三段泥页岩有机质孔隙发育程度较低(图 4f), 多数与有机质相关的孔隙空间为发育在有机质与周围矿物颗粒之间的收缩缝(图 4h), 部分有机质内部发育原生有机孔隙, 且形状多为不规则多边形, 孔隙直径通常小于 1 μm (图 4g)。有机孔的发育与有机质在高成熟阶段大量生气有关, 沙三段泥页岩大部分处于生油阶段, 仅有少部分开始进入生气阶段, 因此有机孔的形成有限。有机质边缘形成的收缩缝目前被认为是在样品制备过程中形成的, 不能反映有机质在地下的状态。

4.4 裂缝

裂缝是沙三段泥页岩储层的一种重要的孔隙空

间。根据镜下薄片鉴定及扫描电镜观察结果, 沙三段泥页岩储层中裂缝十分发育, 包括顺层理缝及构造缝。顺层理缝在灰质泥页岩中十分发育, 裂缝多位于两套纹层之间(图 4i), 通常充填方解石或石膏(图 4j, k), 镜下观察的缝宽最大可达 100 μm , 但岩心由地下取到地面过程中, 由于压力卸载作用的存在, 裂缝在地下的宽度可能远小于地面条件下所观测到的层间缝宽度^[18]。构造缝通常穿切层理缝发育, 其宽度较小(图 4l), 部分构造缝中充填有方解石或石膏。微裂缝的形成与泥页岩自身的各向异性及生排烃作用有关, 烃源岩进入生排烃过程后在其内部产生异常高压, 易沿页岩沉积的力学薄弱面产生裂缝。沉积纹层之间矿物成分及力学性质的差异性, 导致层理缝的大量形成。

5 孔隙结构

低压氮气吸附实验是一种表征泥页岩储层孔隙结

构的有效手段。本研究对24块东濮凹陷沙三段泥页岩样品进行了低压氮气吸附实验,在测定其比表面积及孔隙体积的基础上,对其孔径分析及孔隙结构进行表征。

5.1 氮气吸附-解吸等温线形态

根据国际理论与应用化学联合会(IUPAC)的分类,可根据形态将24块沙三段泥页岩样品氮气吸附-解吸等温线划分为两类。第一类等温线形态对应IUPAC分类下的IV型等温线,H2型回滞环(图5a)。在吸附的初始阶段,吸附曲线呈现出轻微上凸的形状,反映页岩微孔内部的单分子吸附或填充。随着相对压力($p/p_0 < 0.8$)的增加,页岩吸附曲线首先呈近似线性上升,反映页岩孔隙中开始发生多分子层吸附,相对压力趋近于1时,吸附量增加速度变大,表现为氮气在页岩表面的毛细管凝聚^[20],没有吸附饱和现象出现,说明存在有一定量的大孔。解吸曲线在相对压力达到0.4时与吸附曲线不重合,在相对压力趋近于1时两条曲线再次闭合,形成较宽的H2型回滞环,反映孔隙类型主要为大孔细喉的墨水瓶状孔隙,且介孔及微孔发育程度较高。第二类等温线形态对应IUPAC分类下的III型等温线,H3型或H4型回滞环(图5b)。吸附曲线在相对压力较低($p/p_0 < 0.8$)的区域变化趋势十分平缓,吸附量不大,在平衡压力接近饱和蒸汽压,相对压力趋近于1的区域吸附量骤然增加,没有吸附饱和现象出现,反映出泥页岩中大孔较为发育。解吸曲线与吸附曲线形态近乎重合,仅在相对压力较高区域形成较窄的回滞环,反映出四周开放的平行板状孔隙较为发育,且孔径范围分布较广。

5.2 孔隙结构参数特征

通过BJH方法计算的孔径分布可将东濮凹陷沙三段泥页岩孔径分布分为3类(图6):微孔主导孔隙结构、大孔主导孔隙结构和多孔径共控孔隙结构。微

孔主导体系孔径分布曲线呈单峰形态,峰值对应的孔径通常小于10 nm,泥页岩储层孔隙体积主要由微孔及介孔贡献,大孔含量很少,该类孔隙对应的氮气吸附等温线形态通常为第一类;大孔主导孔隙结构的孔径分布曲线也为单峰形态或上升形态,其中单峰态峰值对应的孔径通常大于10 nm,微孔及介孔对于泥页岩储层孔隙体积的贡献很少,而大孔主导着储层孔隙结构的发育特征,该类泥页岩储层所对应的氮气吸附等温线形态通常为第二类;具有多孔径共控孔隙结构的泥页岩储层通常对应第一类氮气吸附等温线,其孔径分布曲线呈现双峰态或孔径分布不均匀的多峰形态,不同孔径的孔隙对于泥页岩储层孔隙体积均有贡献。

表2反映了沙三段泥页岩储层不同类型孔隙结构的BET比表面积、孔隙体积、平均孔径参数:微孔主导孔隙结构BET比表面积介于 $8.56 \sim 15.71 \text{ m}^2/\text{g}$,平均为 $11.80 \text{ m}^2/\text{g}$,孔隙体积 $0.008 \sim 0.021 \text{ m}^3/\text{g}$,平均为 $0.013 \text{ m}^3/\text{g}$,平均孔径分布在 $4.16 \sim 5.17 \text{ nm}$ 范围;大孔主导孔隙结构BET比表面积介于 $0.29 \sim 7.70 \text{ m}^2/\text{g}$,平均为 $2.94 \text{ m}^2/\text{g}$,孔隙体积 $0.0018 \sim 0.027 \text{ m}^3/\text{g}$,平均为 $0.012 \text{ m}^3/\text{g}$,平均孔径分布在 $11.98 \sim 25.19 \text{ nm}$ 范围;多孔径共控孔隙结构各参数变化范围较大,BET比表面积介于 $3.57 \sim 22.41 \text{ m}^2/\text{g}$,平均为 $8.92 \text{ m}^2/\text{g}$,孔隙体积为 $0.003 \sim 0.037 \text{ m}^3/\text{g}$,平均为 $0.016 \text{ m}^3/\text{g}$,平均孔径分布通常为 $4.09 \sim 10.95 \text{ nm}$ 。因此,微孔主导孔隙结构通常具有较小的平均孔径及较大的比表面积,大孔主导孔隙结构具有较大的平均孔径及较小的比表面积,但3种孔隙结构的总孔体积差异不大。

6 泥页岩储层孔隙发育特征的影响因素

6.1 沉积环境

东濮凹陷沙三段泥页岩的沉积环境较为复杂,可

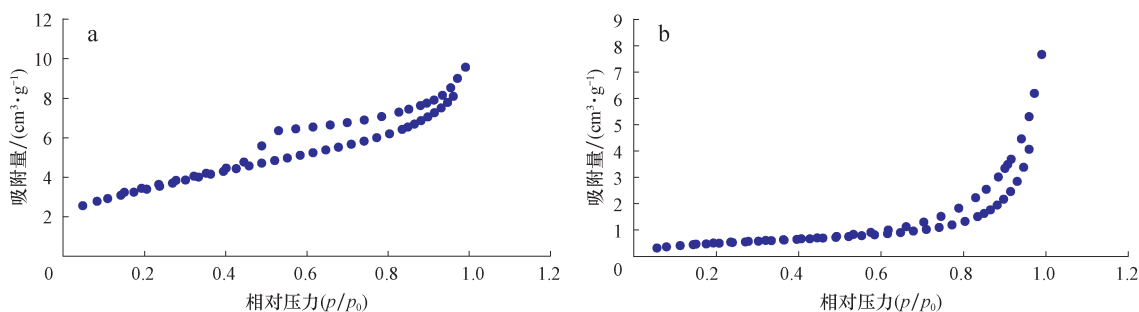


图5 东濮凹陷沙三段泥页岩低压氮气吸附曲线形态分类

Fig. 5 Nitrogen adsorption-desorption isotherms of Es³ shales in Dongpu Sag

a. 第一类吸附-解吸线, PS4井, 埋深5 193.70 m; b. 第二类吸附-解吸线, H12-20井, 埋深1 777.81 m

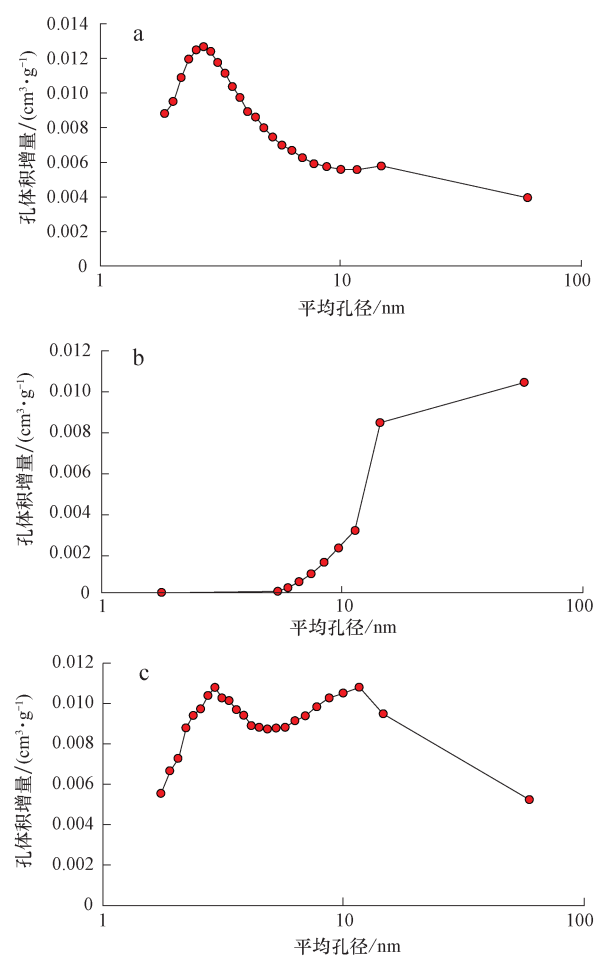


图 6 东濮凹陷沙三段泥页岩储层孔径分布特征

Fig. 6 Pore size distribution of Es³ shales in Dongpu Sag

- a. 微孔主导孔隙结构, PS4 井, 埋深 5 193.70 m;
- b. 大孔主导孔隙结构, H12~20 井, 埋深 1 777.81 m;
- c. 多孔径共控孔隙结构, H83 井, 埋深 4 187 m

以划分为块状粉砂质泥岩相、纹层状灰质泥岩相及纹层状膏质泥岩相^[10],具有不同的岩矿组成和有机质丰度。总体而言,块状粉砂质泥岩相和纹层状膏质泥岩相的孔隙网络比表面积较纹层状灰质页岩相更大,纹层状灰质泥岩相和纹层状膏质泥岩相的孔隙平均孔径大于硅质泥岩相(图 7)。粘土矿物和碳酸盐矿物含量的差异性对沙三段泥页岩孔隙网络的复杂性有很大影响:BET 比表面积与碳酸盐矿物含量呈负相关,与粘土矿物含量呈正相关,平均孔径与碳酸盐矿物含量呈正相关,与粘土矿物含量之间存在明显的负相关关系(图 7)。

根据镜下薄片鉴定结果,碳酸盐矿物或石膏含量高的深湖-半深湖相泥页岩通常纹层发育程度远高于水下分流河道相沉积的粘土矿物含量高的泥页岩,特别是水体盐度较高时,易产生水体分层,在细粒沉积物

表 2 东濮凹陷沙三段泥页岩低压氮气吸附实验参数

Table 2 Pore structure parameters of Es³ shales in Dongpu Sag from low-pressure nitrogen adsorption experiment

孔隙分布类型/样品个数	BET 比表面积/ (m ² · g ⁻¹)	孔隙体积/ (m ³ · g ⁻¹)	平均孔径/nm
微孔主导 孔隙结构/4	8.56 ~ 15.71 11.80	0.008 0 ~ 0.021 0.013	4.16 ~ 5.17 4.66
大孔主导 孔隙结构/13	0.29 ~ 7.70 2.94	0.001 8 ~ 0.027 0.012	11.98 ~ 25.19 18.06
多孔径共控 孔隙结构/7	3.57 ~ 22.41 8.92	0.003 0 ~ 0.037 0.016	4.09 ~ 10.95 6.82

注:表中数据为最大值~最小值
平均值

组构上体现为强韵律性及非均质性^[10],并能够形成大量的纹层间裂缝,在未充填情况下表现为低压氮气吸附所识别的四周开放的平行板状孔。此外,深湖-半深湖的沉积环境有利于有机质的富集,大量原生有机孔有条件发育,也为有机质生烃过程中大量有机酸的生成提供物质基础,有利于矿物中次生孔隙的大规模发育(图 4a,b)。相比之下,粘土矿物及石英长石矿物含量高的泥页岩尽管存在矿物定向发育的特征,但层间缝发育程度很差,扫描电镜结果显示其孔隙网络主要由岩石骨架颗粒间孔、粘土矿物粒间孔等以个体或连通形式构成,即对应氮气吸附实验中所识别出的墨水瓶状孔隙。

BET 比表面积、平均孔径分别与总有机碳含量呈负相关和正相关(图 8),这与在四川盆地龙马溪组等页岩中获取的规律不一致。主要因为:龙马溪组页岩属于过成熟页岩已经大量生气,在有机质中形成大量的次生的小孔径有机孔,能够增加储层孔隙结构的比表面积并降低平均孔径^[19],而东濮凹陷沙三段泥页岩主要处于生油阶段或生气早期,次生有机孔发育程度有限(图 4f),而主要发育孔径较大的原生有机孔(图 4g)。此外,深湖-半深湖沉积的灰质泥页岩及膏质泥岩中纹层多为富含有机质的条带,这些有机质中发育有代表生物原本结构的原生有机孔^[17],这类孔隙通常具有较大的孔径及较小的比表面积。

6.2 成岩作用

泥页岩埋藏过程中除了在压实作用下粒间孔隙和粒内孔隙体积大量损失之外^[17],成岩作用诸如胶结和溶蚀作用也使泥页岩孔隙结构发生明显变化。钾长石溶蚀通常伴随着大量自生高岭石的形成,自生高岭石

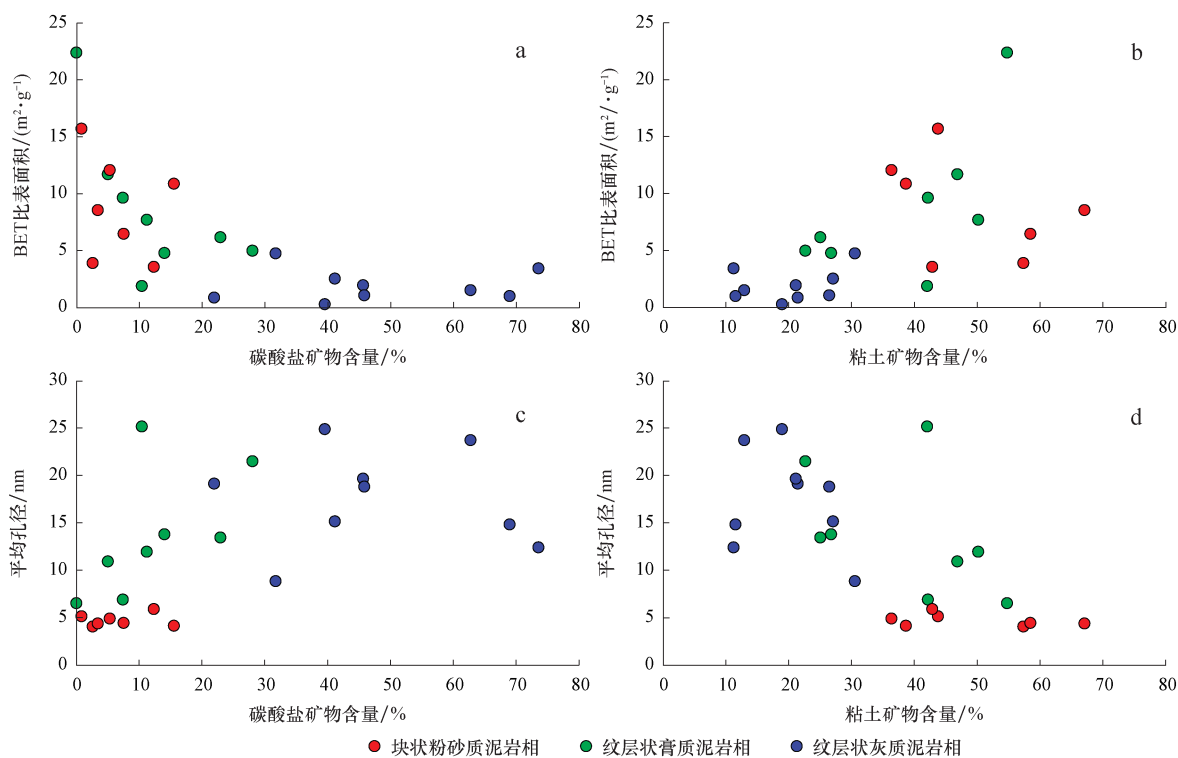


图7 东濮凹陷沙三段泥页岩孔隙结构参数与矿物含量相关性

Fig. 7 Relationship between pore structure parameters and mineral content of Es³ shales in Dongpu Sag

- a. BET 比表面积 - 碳酸盐矿物含量关系; b. BET 比表面积 - 粘土矿物含量关系; c. 平均孔径 - 碳酸盐矿物含量关系; d. 平均孔径 - 粘土矿物含量关系

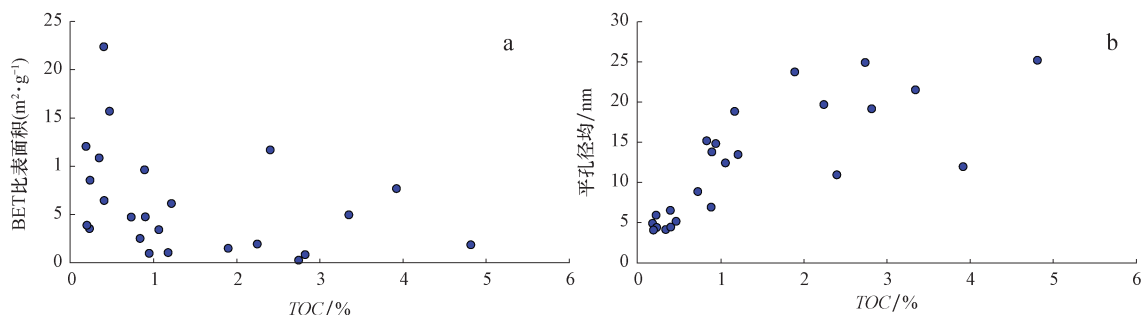
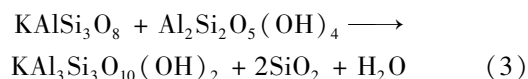
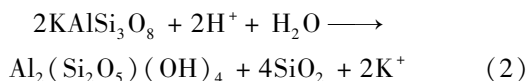
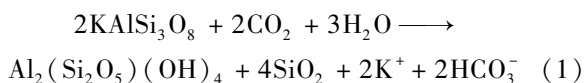


图8 东濮凹陷沙三段泥页岩孔隙结构参数与有机碳丰度相关性

Fig. 8 Relationship between pore structure parameters and TOC of Es³ shales in Dongpu Sag

- a. BET 比表面积 - TOC 关系; b. 平均孔径 - TOC 关系

又可进一步转化为伊利石^[21-22]:



自生粘土矿物在泥页岩骨架矿物粒间孔隙当中生长,使大孔隙被切割成多个小孔隙(图7d),且降低孔隙之间的连通性,增加孔隙网络迂曲程度。此外,碳酸盐矿物和石膏的胶结作用分别在灰质泥页岩和膏质泥页岩

中十分常见,通常充填粒间孔隙或呈条带状充填裂缝(图4j),不利于孔隙空间的发育,但碳酸盐矿物的脆性较大,在水力压裂条件下易于形成裂缝,对于页岩油气的勘探开发有重要意义^[23]。溶蚀作用与泥页岩自身有机质热演化生烃过程有紧密联系,随着埋藏深度增大,温度升高,有机质生烃开始伴随成岩作用发生,产生有机酸,在调节地层流体PH值的同时对碳酸盐、石膏等矿物进行溶蚀,形成大量次生溶蚀孔隙^[24]。尽管东濮凹陷沙三段泥页岩孔隙比表面积和平均孔径随碳酸盐矿物含量的增加整体分别呈现增加和降低的趋势,但对于碳酸盐矿物占主导的泥页岩样品(>50%),

孔隙比表面积和平均孔径随碳酸盐矿物含量增加而分别呈现略微增加和下降的趋势(图7),说明碳酸盐矿物溶蚀对于东濮凹陷沙三段泥页岩中、小孔隙的发育具有重要意义。然而,不少学者认为有机酸溶蚀不稳定矿物对泥页岩储层的改造程度有限^[18,25],泥页岩通常被认为是一个相对封闭的成岩体系,流体交换程度比砂岩储层中弱得多,水-岩反应的产物无法及时排除,抑制成岩作用的进行,烃类从有机质生成后进入泥页岩储层中,对于排烃作用较差的泥页岩,油气在孔隙中大量聚集,逐渐将无机孔隙的水润湿性改变为油润湿性,减少矿物与地层流体之间的接触,从而阻止溶蚀作用的进一步发生^[26]。

7 页岩储层孔隙发育对油气滞留的意义

泥页岩储层孔隙发育对于页岩油气的富集至关重要。根据热解 S_1 与储层 BET 比表面积和平均孔径的关系, S_1 与 BET 比表面积呈负相关,而与平均孔径呈正相关(图9),表明大孔隙对于烃类在泥页岩中的滞留较小孔隙贡献更大。荧光薄片鉴定结果显示,泥页

岩层理缝或构造缝中发淡绿色荧光,发光强度中等,基质不发荧光或暗褐色荧光(图10a,b);此外,沙三段泥页岩中含有大量生物骨架内形成的孔隙呈现黄绿色荧光,发光强度中等(图10c)。不同孔隙类型或介质当中烃类荧光特征的变化显示出烃类从有机质生成后经粘土基质进入裂缝及较大孔隙的过程。高分子量稠环芳烃含量高的烃类通常呈现褐色或和黑色荧光,而芳环数量少的低分子量烃类通常显示黄绿色至蓝绿色荧光^[27]。结合荧光颜色及荧光强度可以判断,东濮凹陷沙三段泥页岩储层中的裂缝和宏孔为轻质游离液态烃提供富集空间,而基质内小孔隙网络中游离烃含量较少,主要残留可动性较差的大分子烃类,连通性较差的孔隙网络则不利于原油的赋存。

东濮凹陷沙三段泥页岩特征复杂,成熟度分布范围广(图3),页岩气勘探领域潜力巨大。气体在泥页岩储层孔隙中的赋存除了游离态之外,吸附态也是一种重要的赋存状态。Ambrose 等通过分子模拟手段认识到在页岩孔隙,特别是有机孔隙中,气体能够在孔隙表面形成一层密度较大的吸附层^[28]。页岩中能够为气体提供吸附位的孔隙主要为粘土矿物集合体中大量

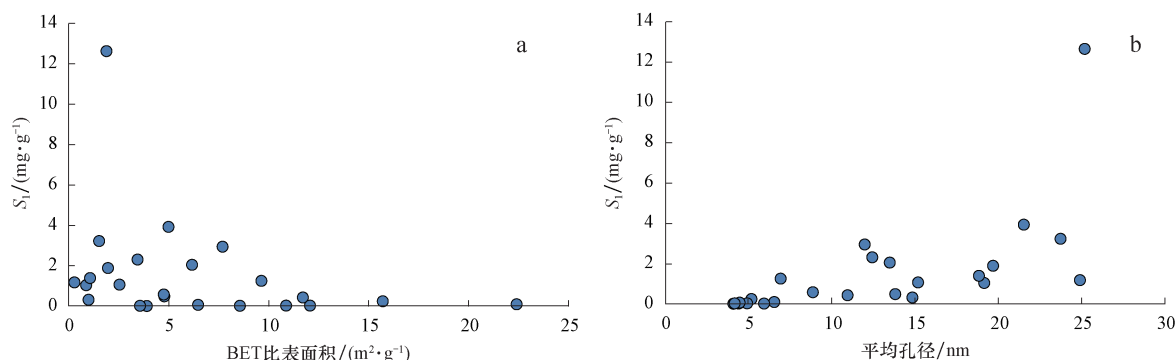


图9 东濮凹陷沙三段泥页岩滞留烃量与孔隙结构参数相关性

Fig. 9 Relationships between retained hydrocarbon and pore structure parameters of Es³ shales in Dongpu Sag

a. S_1 与 BET 比表面积相关性; b. S_1 与平均孔径相关性

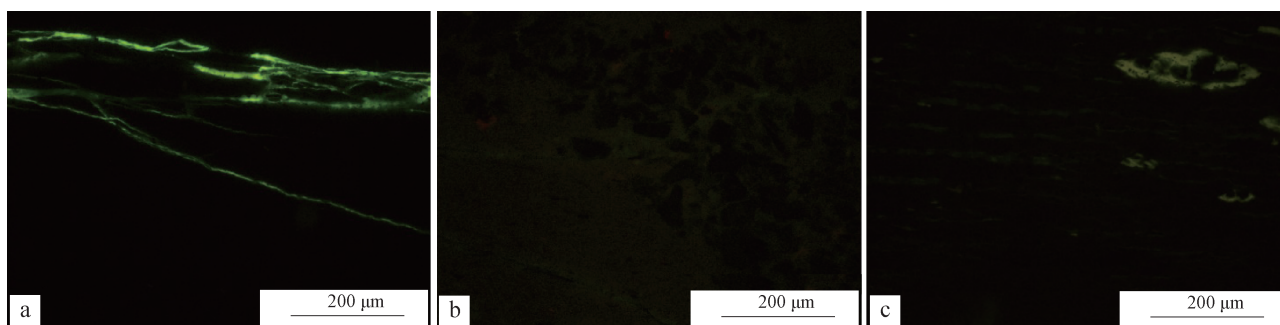


图10 东濮凹陷沙三段泥页岩荧光薄片鉴定结果

Fig. 10 Fluorescence thin section images of Es³ shales in Dongpu Sag

a. PS4 井,埋深4 414.90 m; b. PS18 井,埋深4 076.64 m; c. PS18 井,埋深3 348.80 m

发育的微孔及处于高热演化阶段的有机质大量生气过程中形成的微孔。同时,对于刚刚进入生气阶段的泥页岩而言,气态烃能够大量溶解于原油中,对于页岩油的开发也具有重要意义。气态烃溶解在液态烃中,改变了烃类流体的组成和相态,整体分子量降低,导致原油粘度大幅度下降,可动性增加^[27]。此外,随着溶解气含量的增加使烃类流体气油比增加,导致原油饱和压力增加。原油饱和压力是影响页岩油的产出驱动类型的重要因素,高饱和压力能够形成较大的驱动能量,提高烃类流体的产出量^[29]。因此,处于生油窗末期和生气窗早期的泥页岩时东濮凹陷沙三段页岩油气勘探开发中值得关注的领域。

8 结论

1) 东濮凹陷沙三段泥页岩可以划分为粉砂质泥页岩、灰质泥页岩、膏质泥页岩,其地球化学特征非均质性较强,反映出含油气特征的复杂性。东濮凹陷沙三段泥页岩储层孔隙类型包括粒间孔隙、粒内孔隙、有机孔及裂缝,且不同岩性泥页岩中孔隙类型、分布及发育程度差异很大。低压氮气吸附实验结果表明,不同的岩石类型由不同孔径的孔隙主导,总体而言,沙三段泥页岩孔径分布体系可分为3类:微孔主导孔隙结构、大孔主导孔隙结构和多孔径共控孔隙结构。

2) 沙三段泥页岩储层孔隙空间的形成由沉积作用及成岩作用共同控制,深湖-半深湖相沉积的泥页岩中发育纹层且富含有机质,为裂缝及原生有机孔的发育提供条件,由于沙三段泥页岩主要处于生油或生气早期,次生有机孔发育十分有限。压实作用和胶结作用使泥页岩在埋藏过程中损失大量孔隙;成岩过程伴生的矿物转化导致自生粘土矿物在泥页岩骨架矿物粒间孔隙当中生长,降低孔隙之间的连通性,增加孔隙网络迂曲程度;生烃过程中产生的有机酸能够对不稳定矿物进行溶蚀,形成大量次生孔隙。沙三段泥页岩储层中液态烃主要赋存在微裂缝或大孔隙当中,气态烃可以呈游离态、吸附态及溶解态存在于页岩孔隙网络当中。早期生气阶段气态烃在泥页岩储层中的赋存对于提高液态烃在储层中的流动性,有利于页岩油的开发。

参 考 文 献

- [1] 贾承造,郑民,张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.
- Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and devel-

- opment[J]. Petroleum exploration & development,2012,39(2):2-0.
- [2] 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 Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China [J]. Petroleum exploration & development, 2013, 40(1):14-26.
- [3] 姜福杰,庞雄奇,欧阳学成,等. 世界页岩气研究概况及中国页岩气资源潜力分析[J]. 地学前缘,2012,19(2):198-211.
- Jiang Fujie, Pang Xiongqi, Ouyang Xuecheng, et al. The main progress and problems of shale gas study and the potential prediction of shale gas exploration [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2):198-211.
- [4] Ross D J K, Bustin R M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation [J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(1):87-125.
- [5] 骆杨,赵彦超,吕新华. 东濮凹陷柳屯洼陷沙河街组三段上亚段盐间泥页岩储层特征[J]. 石油学报,2013,34(2):293-300.
- Luo Yang, Zhao Yanchang, Lv Xinhua. Characterization of the upper Es₃ inter-salt shale reservoir in Liutun sag, Dongpu Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2):293-300.
- [6] 邹才能,董大忠,王社教,等. 中国页岩气形成机理,地质特征与资源前景[J]. 石油勘探与开发,2010,37(6):641-653.
- Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, et al. Geological characteristics and resource potential of shale gas in China [J]. Petroleum Exploration & Development, 2010, 37(6):641-653.
- [7] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4):475-499.
- [8] Slatt R M, O'Brien N R. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales: Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12):2017-2030.
- [9] 姜福杰,庞雄奇,姜振学,等. 烃源岩滞留油气作用及其对泥页岩含油气率的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(6):2439-2448.
- Jiang Fujie, Pang Xiongqi, Jiang Zhenxue, et al. Residual oil and gas in source rocks and its influence on oil and gas rate in shale [J]. Journal of Central South University, 2013, 44(6):2439-2448.
- [10] 张鹏,张金川,黄宇琪. 东濮凹陷北部沙三段泥页岩岩相特征[J]. 科学技术与工程,2015(21):1-6.
- Zhang Peng, Zhang Jingchuan, Huang Yuqi. The lithofacies characteristics of Es₃ in the northern Dongpu Depression [J]. Science Technology & Engineering, 2015(21):1-6.
- [11] 周进松,于兴河,杜海峰,等. 东濮凹陷北部古近系沙三段沉积体系特征及充填模式[J]. 沉积与特提斯地质,2010,30(3):90-95.

- Zhou Jinsong, Yu Xinghe, Du Haifeng, et al. Sedimentary systems and filling models for the middle part of the third member of the Shahejie Formation in northern Dongpu depression[J]. *Sedimentary Geology & Tethyan Geology*, 2010, 30(3): 90–95.
- [12] 杜海峰, 于兴河, 陈发亮. 河南省东濮凹陷古近系沙河街组沙三段盐岩沉积特征及其石油地质意义[J]. *古地理学报*, 2008, 10(1): 53–62.
- Du Haifeng, Yu Xinghe, Chen Faliang. Sedimentary characteristics of saltrocks and their petroleum geologic significance of the Member 3 of Shahejie Formation of Paleogene in Dongpu Sag, Henan Province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(1): 53–62.
- [13] 黄宇琪, 张金川, 张鹏, 等. 东濮凹陷北部沙三段泥页岩微观储集空间特征及其主控因素[J]. *山东科技大学学报: 自然科学版*, 2016, 35(3): 8–16.
- Huang Yuqi, Zhang Jinchuan, Zhang Peng, et al. Microscopic characteristics and main controlling factors of shale reservoir space of Es³ Formation, northern Dongpu Depression[J]. *Journal of Shandong University of Science & Technology*, 2016, 35(3): 8–16.
- [14] 唐令, 庞雄奇, 徐田武, 等. 东濮凹陷古近系沙河街组烃源岩生烃底限及其差异探讨[J]. *天然气工业*, 2017, 37(2): 26–37.
- Tang Ling, Pang Xiongqi, Xu Tianwu, et al. Hydrocarbon generation thresholds of Paleogene Shahejie Fm source rocks and their north-south differences in the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2017.
- [15] 张晶, 鹿坤, 蒋飞虎, 等. 东濮凹陷页岩油气富集条件[J]. *断块油气田*, 2015, 22(2): 184–188.
- Zhang Jing, Lu Kun, Jiang Feihu, et al. Enrichment condition of shale oil and gas in Dongpu Depression[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2015, 22(2): 184–188.
- [16] 刘景东, 蒋有录, 谈玉明, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷膏盐岩与油气关系[J]. *沉积学报*, 2014, 32(1): 126–137.
- Liu Jingdong, Jiang Youlu, Tan Yuming, et al. Relationship between gypsum-salt rock and oil-gas in Dongpu Depression of Bohai Gulf Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(1): 126–137.
- [17] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. 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.
- [18] 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(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(12): 1495–1507.
- [19] Shao X, Pang X, Li Q, et al. Pore structure and fractal characteristics of organic-rich shales: A case study of the lower Silurian Longmaxi shales in the Sichuan Basin, SW China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 80: 192–202.
- [20] 杨峰, 宁正福, 张世栋, 等. 基于氮气吸附实验的页岩孔隙结构表征[J]. *天然气工业*, 2013, 33(4): 135–140.
- Yang Feng, Ning Zhengfu, Zhang Shidong, et al. Characterization of pore structures in shales through nitrogen adsorption experiment[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(4): 135–140.
- [21] Higgs K E, Zwingmann H, Reyes A G, et al. Diagenesis, porosity evolution, and petroleum emplacement in tight gas reservoirs, Taranaki basin, New Zealand[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77, 1003–1025.
- [22] Ma B, Cao Y, Jia Y. Feldspar dissolution with implications for reservoir quality in tight gas sandstones: Evidence from the Eocene Es₄ interval, Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 150: 74–84.
- [23] 李钲源. 东营凹陷泥页岩矿物组成及脆度分析[J]. *沉积学报*, 2013, 31(4): 616–620.
- Li Juyuan. Analysis on mineral components and frangibility of shales in Dongying Depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(4): 616–620.
- [24] 孔令明, 万茂霞, 严玉霞, 等. 四川盆地志留系龙马溪组页岩储层成岩作用[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(8): 1547–1555.
- Kong Lingming, Wan Maoxia, Yan Yuxia, et al. Reservoir diagenesis research of Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Natural Gas Geoscience*, 2016, 1(3): 203–211.
- [25] 郭秋麟, 陈晓明, 宋焕琪, 等. 泥页岩埋藏过程孔隙度演化与预测模型探讨[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(3): 439–449.
- Guo Qiulin, Chen Xiaoming, Song Huanqi, et al. Evolution and models of shale porosity during burial process[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(3): 439–449.
- [26] 王森, 陈勇, 徐兴友, 等. 泥质岩中纤维状结构脉体成因机制及其与油气活动关系研究进展[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(10): 1107–1118.
- Wang Miao, Chen Yong, Xu Xingyou, et al. Progress on formation mechanism of the fibrous veins in mudstone and its implications to hydrocarbon migration[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(10): 1107–1118.
- [27] 包友书, 张林晔, 张金功, 等. 渤海湾盆地东营凹陷古近系页岩油可动性影响因素[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(3): 408–414.
- Bao Youshu, Zhang Linye, Zhang Jingong, et al. Factors influencing mobility of Paleogene shale oil in Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(3): 408–414.
- [28] Ambrose R J, Hartman R C, Campos M D, et al. New pore-scale considerations for shale gas in place calculations[C]. *Society of Petroleum Engineers*, 2010: 219–229.
- [29] 张林晔, 包友书, 李钲源, 等. 湖相页岩油可动性——以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷为例[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(6): 641–649.
- Zhang Linye, Bao Youshu, Li Juyuan, et al. Movability of lacustrine shale oil: A case study of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2014, 41(6): 641–649.