

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

张 顺^{1,2},王永诗¹,刘惠民¹,陈世悦³,谭明友⁴,张云银⁴,郝雪峰¹,谢忠怀¹

[1. 中国石化 胜利油田分公司 勘探开发研究院,山东 东营 257022; 2. 中国石化 胜利油田分公司 博士后流动工作站,山东 东营 257022;
3. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院,山东 青岛 266580; 4. 中国石化 胜利油田分公司 物探研究院,山东 东营 257022]

摘要:以渤海湾盆地东营凹陷古近系沙河街组三段下亚段泥页岩为研究对象,通过厘米级岩心观察描述、岩石薄片鉴定、X-射线衍射分析等,分析泥页岩基本沉积特征,划分岩相及微相类型,分析半深湖-深湖沉积微相平面和垂向分布特征。综合扫描电镜观察、激光共聚焦显微镜观察以及低温氮气吸附实验等,对储层的孔隙和裂缝成因、类型、形貌、孔径及孔隙分布等特征进行综合表征。结果表明,东营凹陷泥页岩矿物类型多样,以往作为优质烃源岩的细粒沉积岩,其实大部分属于碳酸盐岩范畴;储层孔隙、裂缝类型多样,孔隙存在多尺度性、孔隙结构复杂。不同微相的泥页岩储层微观结构特征存在差异,沉积微相对储层微观结构的控制作用主要表现在对储层矿物组成和组构、有机质的沉积和保存条件的控制,进而影响了孔隙类型及孔隙结构。平阔半深湖微相发育的泥页岩储层有机质含量较高,脆性矿物以方解石为主,孔隙和裂缝类型多样,孔隙连通性中等且孔隙的开放性较好,可视为页岩油勘探开发有利相带区。

关键词:孔隙;储层微观结构;沉积微相;泥页岩;东营凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Controlling effect of fine-grained sedimentary microfacies upon the microstructure of shale oil reservoirs in the Dongying Sag, Bohai Bay Basin

Zhang Shun^{1,2}, Wang Yongshi¹, Liu Huimin¹, Chen Shiyue³, Tan Mingyou⁴, Zhang Yunyin⁴, Hao Xuefeng¹, Xie Zhonghuai¹

(1. Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257022, China;

2. Working Station for Postdoctors, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257022, China;

3. College of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China;

4. Geophysical Research Institute, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257022, China)

Abstract: Shale samples from the lower third member of the Shahejie Formation of the Palaeogene in Dongying Sag were taken for a sedimentation characterization, a classification of lithologic facies and microfacies and an analysis of planar and vertical distributions of the shales of semi-deep and deep lacustrine facies through a centimeter-scale core description, thin section identification and X-ray diffraction analyses of the samples. Such means as observations of SEM images and laser confocal microscope and experiments of low-temperature nitrogen adsorption were also resorted to study the genesis, types, morphology, size and distribution of pores and fissures in the samples. The results show various types of minerals and the fine-grained sediments being regarded previously as high-quality source rocks are largely carbonates. It also indicates that there are various pore and fissure types and the pores are of multi-scales and have complicated structures. The shale reservoirs with different types of microfacies differ in micro-structures. The controlling effect of sedimentary microfacies upon the micro-structure of reservoirs is mainly displayed in compositions and fabric of minerals, and deposition and preservation of organic matters, which further affect the types and structures of pores. The shale reservoirs developed in flat and semi-deep lacustrine facies are found to contain high content of organic matters, various types of rocks and brittle minerals dominated by calcite. They also harbor pores and fissures of various types. With fairly connected open pores, the reservoirs are considered to be potential exploration targets in the sag.

Key words: pore, reservoir microscopic structure, microfacies, shale, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

收稿日期:2016-07-12;修订日期:2016-08-09。

第一作者简介:张顺(1985—),男,博士后,沉积学与储层地质学。E-mail:satisfactoryshun@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41372107);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB239102)。

细粒沉积的概念最早由 Krumbein 在 1932 年研究岩石粒度分析中提出。80 多年过去了,对于细粒沉积的研究经历了较漫长的过程,数量巨大的细粒物质愈发引起人们的重视。传统粗碎屑储层的研究在储集空间及成因机理等方面已经较为成熟^[1],泥页岩储层的研究起步较晚,成为近几年非常规油气研究中的一个热点^[2-3]。作为源储一体,细粒沉积具有特殊性。大量研究人员已在细粒沉积岩的矿物岩石学^[1]、页岩油形成机制^[2-6]、岩石相分类^[3,7-16]、沉积环境^[16-17]及储层基本特征^[18-22]等方面做了积极有益的探讨。对储层的研究又集中在储层孔隙类型分类^[19-22]及微观结构^[23-25]等方面。张林晔等^[26]认为东营凹陷泥页岩储层碳酸盐矿物含量及有机质含量较高,有利于裂缝的形成;久凯^[21]、张顺^[25]等认为湖相深水泥页岩储层储集空间类型多样,微观结构较为复杂。在孔隙微观结构研究的方法技术上,目前常用的主要有压汞法、氩离子抛光技术、扫描电镜观察技术及低温氮气吸附等^[2,4,25-27]。相比传统压汞法,气体吸附法在表征孔隙结构时更能得到微观结构的统计信息和总体特征,但在陆相页岩油气储层的研究中应用还不够充分。总体上看,关于陆相泥页岩的沉积微环境研究还处于探讨阶段^[16]。针对泥页岩储层的研究多集中于海相页岩气储层,研究内容也多以储层基本特征的多手段表征为主,沉积环境对储层微观孔隙结构控制作用不够明确。

沉积(微)环境和储层特征研究是页岩油勘探的

重要基础,而沉积微相是沉积微环境的物质表现,是形成有效储层的前提和基础^[1]。只有将两者相结合,寻找微相与储层基本特征的对应关系,分析微相对泥页岩储层物性、孔隙(裂缝)类型和孔隙结构等的控制作用,才能有效地指导湖盆沉积中心的页岩油气勘探。渤海湾盆地东营凹陷作为断陷湖盆的典型代表,古近系经历了由孔店—沙四期(沙河街组四段沉积期)咸水湖相到沙三沉积期微咸水—淡水湖相,再到沙二段沉积期河流—三角洲相对完整的沉积旋回。沙四段中、晚期—沙三段时期是东营凹陷强烈断陷期,该沉积期湖盆水域宽深,形成了典型的半深湖—深湖沉积。本文在前人^[22,25]研究基础上,从东营凹陷古近系沙河街组三段下亚段(沙三下亚段)泥页岩沉积和储层基本特征入手,系统研究沉积时期半深湖—深湖沉积微相对泥页岩储层微观结构特征的控制作用,这对目前寻找东营凹陷页岩油气勘探开发有利区带工作有一定的指导意义。

1 泥页岩岩石学特征

1.1 泥页岩矿物组成特征

东营凹陷古近系沙四中、晚期—沙三早期广泛发育泥页岩等细粒沉积,沙三下亚段沉积时,大部分地区处于深湖—半深湖环境,发育了深湖相油页岩、深灰色泥岩、钙质泥岩和深水浊积扇沉积^[16-17]。本次研究的样品取自东营凹陷西部专探页岩油系统取心

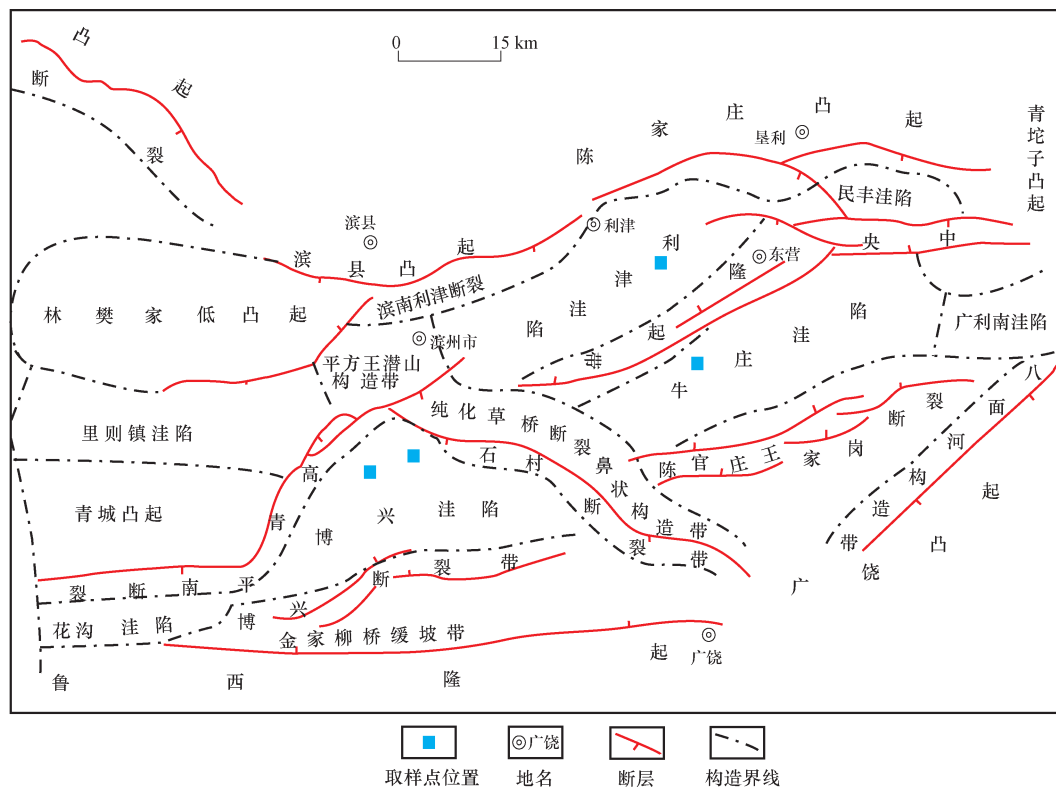


图1 东营凹陷构造单元划分

Fig. 1 Structure units of the Dongying Sag

表 1 东营凹陷古近系泥页岩全岩矿物组成

Table 1 Bulk mineral compositions of the fine-grained Paleogene shale in the Dongying Sag

东营凹陷西部 构造单元	矿物含量/%							
	粘土	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	菱铁矿
博兴洼陷	$\frac{6 \sim 54}{27.00}$	$\frac{1 \sim 34}{21.27}$	0	$\frac{2 \sim 18}{7.93}$	$\frac{5 \sim 72}{30.80}$	$\frac{1 \sim 31}{9.80}$	$\frac{0 \sim 16}{4.00}$	$\frac{0 \sim 1}{0.20}$
利津洼陷	$\frac{11 \sim 57}{34.00}$	$\frac{10 \sim 42}{26.07}$	0	$\frac{2 \sim 21}{7.60}$	$\frac{0 \sim 67}{15.00}$	$\frac{2 \sim 71}{13.47}$	$\frac{0 \sim 8}{3.13}$	$\frac{0 \sim 2}{0.73}$

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

井利页 1、樊页 1 及老井复查的樊 119 井沙三下亚段的泥页岩。泥页岩矿物成分主要为碳酸盐、粘土矿物和长英质陆源碎屑矿物,碳酸盐矿物以方解石为主,此外还含少量黄铁矿、菱铁矿等,几乎不含钾长石,整体呈现出“矿物类型复杂、脆性矿物含量高”等特征(表 1)。

镜下观察,东营凹陷泥页岩以定向组构和杂乱组构为主,纹层特征较显著,主要是(富有机质)粘土层、方解石层以及很少量的白云石纹层构成。最常见的纹层叠置方式是方解石纹层与粘土矿物或以粘土矿物为主的纹层在垂向上的叠置,韵律性或旋回性很强(表 2)。方解石重结晶形成的纹层或夹层,与其互层的粘土层往往色深、质纯,有机质含量也较高。细粉砂一般以分散状、透镜状或局部富集状产出,难以成层,以定向结构为主。原生黄铁矿一般呈星散状分布于不同矿物纹层间。

总体上看,断陷盆地深水细粒沉积岩在物质组成和组构等方面具有以下特征:矿物类型多样,以往作为优质烃源岩的细粒沉积岩,其实大部分属于碳酸盐岩范畴;微观非均质性很强,一个视域常兼有多种沉积构造类型;半深湖-深湖环境并不十分稳定,夹杂的不稳定沉积部分代表了事件沉积对细粒沉积物沉积微环境的影响。

1.2 岩相类型划分

半深湖-深湖泥页岩岩石类型复杂,包括录井显示的泥岩、页岩、灰质泥岩、泥质灰岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、粉砂岩以及灰岩和白云岩等。东营凹陷古近系湖相深水泥页岩以深灰色和灰黑色为主,随着方解石及长英质矿物的混入,颜色由深逐渐变浅,主要发育纹层状构造、页状构造和块状构造。随着方解石重结晶作用的增强,方解石颜色变为纯白色(表 2)。

“岩相”即一定沉积环境中形成的岩石类型及其组合,包含岩石类型、颜色、结构、沉积构造等信息,是沉积相的主要组成部分。综合泥页岩矿物岩石学特征和有机地化特征对泥页岩进行岩相类型划分。东营凹陷沙三下沉积期半深湖-深湖泥页岩主要发育纹层状灰岩相、具方解石脉的灰岩相、纹层状细粉砂岩相、纹层状粉砂质细粒混合沉积岩相、纹层状灰

质细粒混合沉积岩相、块状细粒混合沉积岩相、页状粘土岩相,可以按照有机质含量(以 TOC 含量的 2%和 4%为界,划分为含有机质、中有机质及富有机质)对岩相类型进行细分。不同岩相类型的详细特征见表 2。

2 泥页岩微观结构特征

储层微观结构(储集空间类型、大小、形貌和孔隙结构)是影响页岩油气产能的重要因素。通过岩心精细观察、岩石薄片鉴定及扫描电镜、激光共聚焦显微镜观察分析,对泥页岩储集空间(裂缝和孔隙)类型及形貌进行研究,利用低温氮气吸附法对孔隙比表面积、孔体积及孔隙结构特征进行分析。

2.1 孔隙(裂缝)类型

2.1.1 裂缝

1) 层间缝

东营凹陷细粒沉积发育多套钙质纹层与泥质纹层互层的沉积层偶,使得不同纹层间层理面成为潜在的裂缝发育区,在较小的作用力下即可形成微裂缝(图 2a)。通过岩石荧光薄片观察,裂缝水平延伸较长,开度往往大于几个微米(图 2b)。岩心出筒由于卸载作用导致大量人工诱导水平缝发育,造成岩心上层间缝大量发育且开度较大。

2) 异常压力缝

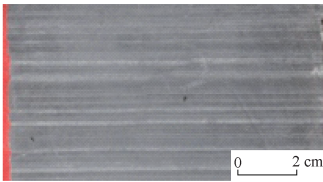
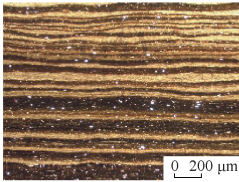
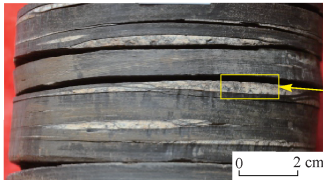
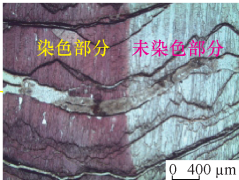
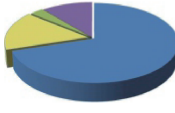
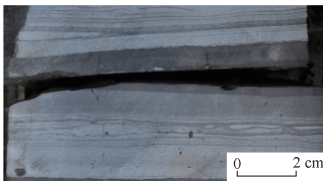
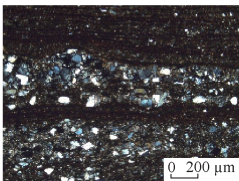
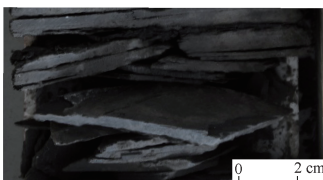
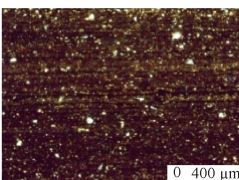
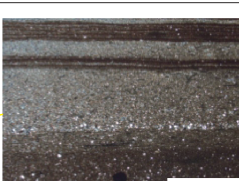
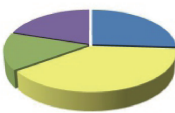
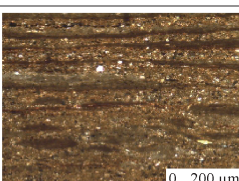
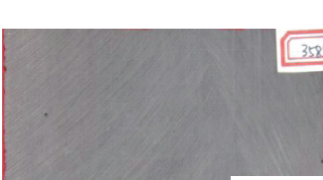
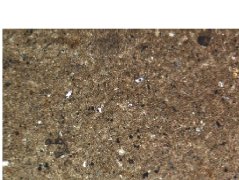
按照异常高压成因又可分为欠压实超压裂缝和生烃超压裂缝。裂缝形态以高角度缝或近垂直缝为主,超压缝的缝面不平直,多呈微锯齿状以及弯曲短线状分布(图 2c)。长度多集中在 0.2~5 cm,一般不成组系出现,开度小于 2 mm,部分被沥青质充填。与构造缝相比,裂缝错断纹层现象不明显(图 2c,d)。在同一热演化条件下,有机质丰度高的样品生烃增压作用明显,异常压力缝相对发育。

3) 微裂缝

扫描电镜下可见基质中大量的微小孔缝,一般为毫米级或微米级(图 2h,i)。这些微裂缝是连接宏观

表 2 东营凹陷沙三下亚段泥页岩宏观和微观特征

Table 2 Macroscopic and microscopic features of shale samples from the lower third member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag

岩相类型	岩心照片	镜下照片	矿物组成	基本特征
碳酸盐岩相	纹层状灰岩相 			宏观岩心以深灰色为主;镜下浅色泥晶方解石层,与富有有机质粘土层互层,层间可见细小石英颗粒;发育构造缝、异常高压缝、粘土矿物晶间孔、溶蚀孔及有机质孔
	具方解石脉的灰岩相 			白色方解石部分呈夹层状或脉状产出,方解石层与粘土层界限清晰;方解石重结晶现象明显;发育层间缝、方解石重结晶晶间孔、粘土矿物晶间孔和有机质孔
细粉砂岩相				灰、深灰色,波状、断续状砂质纹层清晰可辨;长英质矿物呈断续纹层状,与灰-泥混合层互层产出;发育构造缝(中-低角度)、粒间孔及方解石晶间孔
页状粘土岩相				黑-灰黑色,页理发育,呈薄片状、易剥离;镜下以泥晶、微晶方解石为主,次为少量粘土发育粘土矿物收缩缝、粘土矿物晶间孔及溶蚀孔、有机质孔
细粒混合沉积岩相	纹层状粉砂质 			深灰、灰色,局部层理特征显著;镜下长英质矿物呈定向结构,纹层状泥-灰混合层与渐变粉砂层互层,可见黄铁矿呈散状分布发育少量层间缝、矿物收缩缝;长英质粒间孔及少量溶蚀孔
细粒混合沉积岩相	纹层状灰质 			深灰、灰褐色,纹层特征较显著;方解石(或白云石)呈纹层状或透镜体集合状产出,长英质矿物零星分布,局部富集成团块状;发育层间缝、高角度构造缝以及少量异常高压缝、方解石晶间孔
	块状细粒混合沉积岩相 			深灰色,较均匀块状,可见少量断续纹层纹层;粉砂与粘土及泥晶方解石、白云石较均匀混合;发育方解石晶间孔及少量长英质粒间孔,还可见少量构造缝

裂缝与微观孔隙的桥梁,随机分布的微裂缝和微孔隙,在外力作用下扩展、合并、沟通可形成宏观裂缝。

2.1.2 无机成因孔

1) 粒间孔

主要指石英和长石颗粒之间的孔隙,沉积作用和后期成岩改造作用等均可形成,孔隙形态多样,与矿物组

成关系密切,以多角形、三角形和线形居多(图 2e,f)。

2) 矿物晶间孔

包括粘土矿物晶间孔以及黄铁矿晶间孔。粘土矿物晶间孔主要是在伊蒙混层中发育,多呈线形分布于絮状粘土矿物集合体中,孔径多位于几纳米到几百纳米(图 2j)。水体分层缺氧环境下的同生黄铁矿粒度一般小于 0.1 mm,呈星点状或密集球状分布^[34],而成岩期

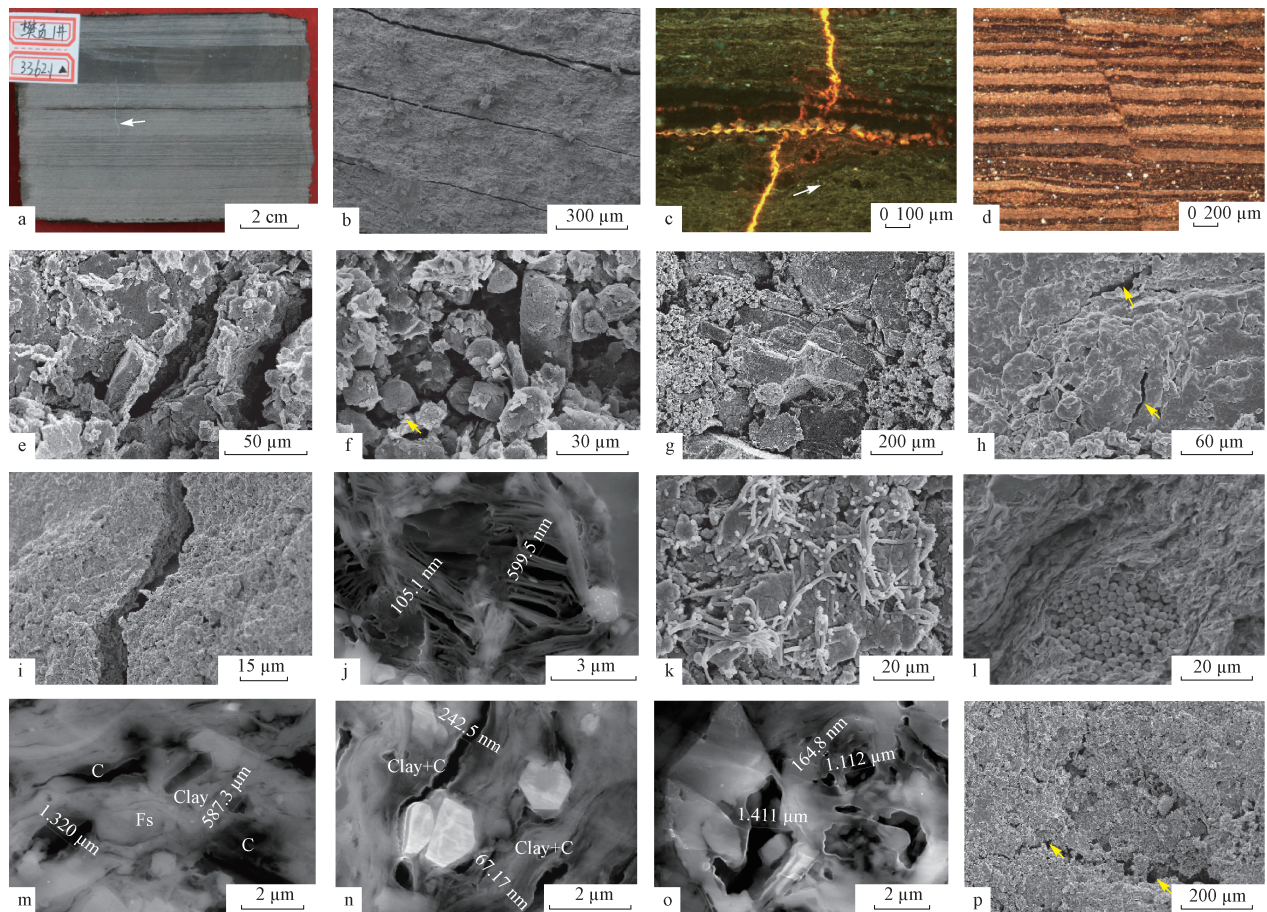


图2 东营凹陷古近系泥页岩储层孔隙、裂缝类型及形貌

Fig. 2 Types and morphology of pores and fissures in the Palaeogene shale reservoirs, the Dongying Sag

a. 纹层状灰岩发育层间缝和异常高压缝, 樊页1井, 埋深3 362.10 m; b. 扫描电镜下观察层间缝, 牛页1井, 埋深3 466.35 m; c. 荧光薄片照片, 异常高压缝, 樊页1井, 埋深3 435.64 m; d. 剪性构造缝将纹层错断, 利页1井, 埋深3 594.60 m; e. 不同矿物集合体之间孔缝, 樊119井, 埋深3 294.50 m; f. 粒间孔, 樊页1井, 埋深3 217.68 m; g. 方解石重结晶晶间孔缝, 利页1井, 埋深3 599.67 m; h, i. 成岩收缩缝, 樊页1井, 埋深3 217.68 m; j. 氩离子抛光样品扫描电镜下观察, 粘土矿物晶间孔, 埋深3 656.85 m; k. 丝发状伊利石, 樊页1井, 埋深3 179.11 m; l. 黄铁矿晶间孔, 樊页1井, 埋深3 139.32 m; m, n. 氩离子抛光样品扫描电镜下观察, 有机质生烃残留孔, 利页1井, 埋深3 644.04 m, 3 644.55 m; o. 氩离子抛光样品扫描电镜下观察, 溶蚀孔隙, 利页1井, 埋深3 617.58 m; p. 溶蚀孔隙局部连通, 利页1井, 埋深3 599.67 m

形成的黄铁矿表面一般均匀、光亮, 黄铁矿晶间孔主要指密集成团块状黄铁矿晶体之间的微孔隙(图2l)。

3) 重结晶晶间孔

重结晶作用是东营凹陷泥页岩中常见的成岩作用类型, 重结晶晶间孔是方解石或白云石在重结晶过程中形成的孔隙。东营凹陷沙三下泥页岩重结晶晶间孔以方解石重结晶晶间孔为主, 这类孔隙是伴随着方解石晶体结构变粗, 晶间孔逐渐增大形成, 主要发育于东营凹陷夹层状灰岩中, 孔隙大小从10~200 μm不等(图2g)。

2.1.3 有机成因孔

1) 有机质孔

有机质孔的界定范围还存在争议, 对于生物化石少、成熟度较低且以富集液态烃类为主的泥页岩而言, 有机质孔主要是有机质演化过程中形成的近长椭圆状的孔隙(图2m, n), 因此称之为有机质生烃残留孔更

为确切, 在有机质富集层(或富有机质粘土层、混合层)中集中发育。从发育丰度角度, 东营凹陷泥页岩中有机质孔隙并不占优。

2) 溶蚀孔

溶蚀孔是生烃和有机酸溶蚀共同作用的结果, 与有机质演化及粘土矿物转化关系密切。在扫描电镜下极易辨认, 多呈蜂窝状或星散状分布于矿物表面以及粘土矿物内部(图2o), 孔径多集中在1~2.5 μm, 最大可达5 μm。相较于其他孔隙类型, 溶蚀孔的分布较为孤立, 连通性较差, 当微裂缝大量发育时, 孔隙之间局部连通(图2p)。

2.2 孔隙微观结构

2.2.1 孔隙的孔径、比表面积和孔体积

低温液氮吸附实验主要是测量页岩油储集空间中微-介孔的比表面积及孔体积, 这些小于50 nm的孔隙大小与氮气的吸附机理具有对应性^[27-30](表3)。

表 3 东营凹陷沙三下泥页岩液氮吸附实验结果
Table 3 Results of liquid nitrogen adsorption experiments upon shale samples from the lower third member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag

样品号	孔体积/ (mL · g ⁻¹)	各孔径段体积比			比表面积/ (m ² · g ⁻¹)	各孔径段比表面积比			平均孔径/ nm
		> 100 nm	10 ~ 100 nm	< 10 nm		> 100 nm	1 ~ 100 nm	< 10 nm	
1	0.030	0.11	0.43	0.46	23.41	0.00	0.02	0.98	4.00
2	0.008	0.11	0.41	0.49	4.96	0.00	0.01	0.99	3.98
3	0.013	0.10	0.37	0.53	9.19	0.00	0.01	0.99	3.98
4	0.006	0.14	0.48	0.38	1.718	0.00	0.04	0.96	3.99
5	0.006	0.10	0.38	0.52	4.34	0.00	0.01	0.99	3.98
6	0.010	0.09	0.37	0.54	7.78	0.00	0.00	1.00	3.98

根据 BET 等温吸附方程测定,研究区泥页岩储层的比表面积在 1.718 ~ 23.41 m²/g,主要集中在 4 ~ 9 m²/g。小于 10 nm 的微孔和介孔对比表面积贡献最大。孔隙体积为 0.008 ~ 0.03 mL/g,平均为 0.012 7 mL/g,微孔体积百分比比较大,介于 38% ~ 54%。其次是介孔。根据 7 个样品点各自的总孔体积与比表面积数据绘制散点图,拟合线性关系为 0.896,说明微-介孔范围内的孔隙的比表面积和孔体积二者具有较好的正相关关系,微-介孔范围内的孔隙体积随比表面积的增大而增大。

2.2.2 孔隙形状特征及连通性

页岩油储层中微米级孔隙的形貌及连通性可通过薄片及扫描电镜观察进行研究,而对于纳米级别的孔隙(主要集中在 2 ~ 50 nm)还需要对氮气吸附及二氧化碳吸附等温线的形状进行分析^[28-29]。考虑到页岩油分子直径较大以及流动的特殊性^[30],应主要采用低温液氮吸附实验分析大于 2 nm 孔隙的形状及连通性。

如图 3 所示,研究区泥页岩样品的液氮吸附-脱

附曲线总体上具有以下特点。①样品的吸附等温线总体上呈不明显的反“S”型,不同沉积微环境的岩相样品曲线形态存在差异,部分样品未出现吸附饱和状态,表明样品中存在较大的孔隙;②吸附脱附曲线都随相对压力增高而缓慢上升,在相对压力接近 1 时,吸附脱附曲线上升速度加快;③在较高的相对压力处(0.4 ~ 1.0),泥页岩样品的吸附曲线和解吸曲线不重合,产生吸附滞后回线;④在相对压力接近 0.5 时,脱附曲线出现明显拐点,使脱附曲线几乎陡直下降。

结合扫描电镜观察,通过脱附回线(滞后回线及滞后环的形状)分析可进行泥页岩孔隙形态及联通性分析。总体上看,东营凹陷古近系细粒沉积储层的孔隙多尺度性特征显著。孔缝形态复杂,多为圆柱形孔、四端开口的平行板状孔及墨水瓶状孔,少量一端封闭的平行板状孔或尖劈形孔。多数孔隙呈开放状态,这与氩离子抛光的介质孔中直径较大的孔隙开放程度较高(图 2e,f)相一致,孔隙之间具有一定的连通性(图 2e—g,k)。具体到孔隙类型,纳米级溶蚀孔多发育于易溶矿物(主要是方解石)表面,仅在少量孔隙图像具有一定景深,表明孔隙连通性很差。干酪根收缩等形成的有机质孔多成孤立分布,连通性差。方解石重结晶成因的晶间孔连通性中等到好,多与成岩成因的微裂缝或者生烃成因的异常高压缝形成网络状的储集空间组合,大大改善了储集空间的连通性能。

3 沉积微相类型及其对储层微观结构的控制作用

3.1 沉积微相类型及特征

从岩心观察描述入手,在骨架砂体沉积相控制下,将细粒沉积岩(即广义的泥页岩)蕴含的岩石类型、沉积构造特征、古生物化石等作为相标志和重要基础,综合控制细粒沉积岩发育的水动力条件、古湖盆底形及事件沉积^[16,31-37]等因素,对半深湖、深湖相进行微相的划分和厘定,将东营凹陷西部沙三下半深湖、深湖沉

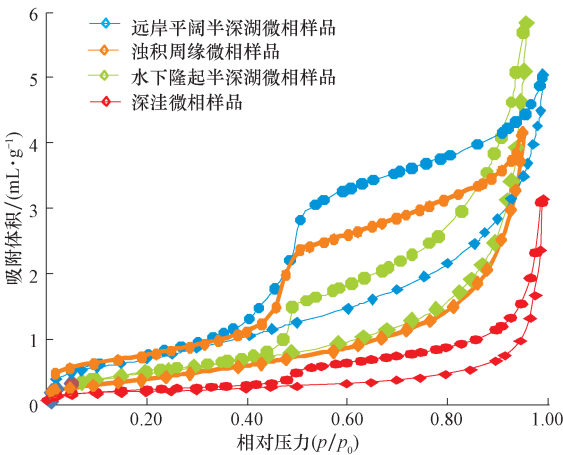


图 3 东营凹陷沙三下亚段不同沉积微相泥页岩样品氮气吸附-脱附曲线

Fig. 3 Adsorption and desorption curves of samples from shales of different sedimentary microfacies in the lower third member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag

积相划分为平阔半深湖微相、水下隆起半深湖微相、深湖微相、浊积周缘微相、近岸水下扇前缘微相等(图4)。

深湖相区是湖泊(也是盆地)的沉积中心,岩性横向分布稳定、沉积厚度大、有机质含量高,是陆相盆地中最有力的生油相带,半深湖与深湖难于严格区分,可将其作为整体,水体最深处命名为深湖微相。浊积周缘微相和近岸水下扇微相分别为毗邻浊积岩周缘、近岸水下扇前缘区域的细粒沉积,是物源区与深水区的过渡,依据所毗邻的骨架砂体类型进行区分,在细粒物质的类型及粒径大小方面都存在明显差异。水下隆起半深湖微相和平阔半深湖微相是半深湖-深湖中面积最大的细粒沉积相区,主要是通过古湖盆底形进行区别。各微相类型的平面展布情况如图4所示,本文重点分析细粒沉积发育的平阔半深湖、水下隆起半深湖、深湖、浊积周缘等4个微相,各微相基本特征如表4所示。

不同微环境形成的泥页岩,由于受物源、湖盆底部起伏形态、水体深度及性质、水动力条件等因素影响,细粒物质的原始混合堆积方式及成岩作用等存在差异,正是这些因素(或相标志)的差异造成了泥页岩储

层在垂向和平面的非均质性。受沉积微相控制的主要矿物含量及有机碳分布会直接影响孔隙的成因类型(原生沉积型和成岩后生改造型)及发育程度。从上述影响因素的角度,系统分析半深湖-深湖沉积微环境对储层微观结构特征的控制作用,尝试建立微相与储层微观特征之间的联系。

3.2 沉积微相对储层微观结构的控制作用

3.2.1 深湖(洼)微相

一般来说,只有当水流速度逐渐降低时,水中所携带的各种有机、无机颗粒才能由粗到细逐步沉积。以颗粒形式存在的有机质,由于密度较低,易于搬运而难以沉积,仅当水流速度相当低时,有机碎屑才能与细小的粘土矿物一起沉积。矿物颗粒的吸附作用可能是沉积有机质聚集的主要原因,总体上有有机质与碎屑粒径、水动力强度、水流速度成反比。深湖微相细粒沉积物质免受水动力的影响。因此,泥页岩有机质含量高,有机质层和粘土层往往混合产出、难区分,加之位于洼陷

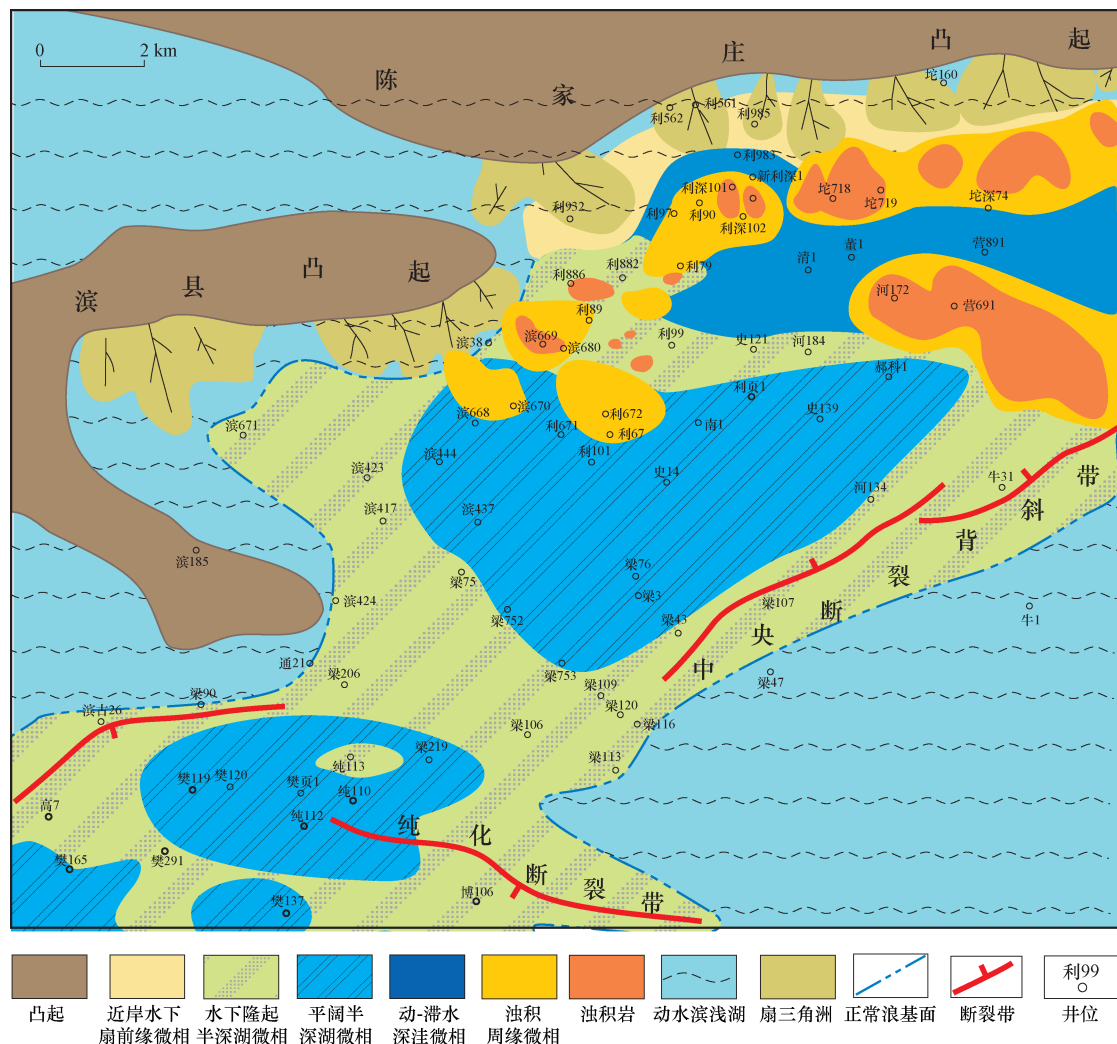


图4 东营凹陷西部沙三下细粒沉积岩沉积微相

Fig.4 Sedimentary microfacies of the fine grained sedimentary rocks in the lower third member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag

表 4 东营凹陷半深湖—深湖泥页岩沉积微相基本特征

Table 4 Characteristics of sedimentary microfacies in semi-deep and deep lacustrine shale in the Dongying Sag

基本特征	平阔半深湖微相	水下隆起半深湖微相	深湖微相	浊积边缘微相
水动力条件	弱—较弱	较弱—中	弱—近静水	较强—中等,多变
古地貌	较深、平坦、广阔	带状、丘状水下局部微隆起	水体最深处	浊积岩周围的水下斜坡
岩石类型	灰质泥岩、泥岩和泥灰岩	泥质粉砂、粉砂、灰质泥岩、泥灰岩	灰黑色泥岩、泥灰岩、砂质泥岩	泥质砂岩、砂质泥岩
岩相类型	纹层状灰岩、夹层状灰岩及少量页状粘土岩	粉砂岩、纹层状灰质细粒混合沉积岩	灰黑色页状粘土岩、夹层状灰岩	块状细粒混合沉积岩、纹层状灰岩
有机质丰度	总体较高(2.1%~7.08%,集中在2.23~4.2%)	中—低(集中在1.21%~3.54%)	高(2.0%~6.0%,最高8.67%)	低—中(集中在0.4%~2.2%)
细粒物质的混合方式	纹层叠置、灰—泥均—混合	纹层叠置、灰、泥、砂均—混合	纹层叠置混合	递变层理混合、不均匀团块状混合、纹层叠置混合
成岩作用类型	压实、胶结作用、粘土矿物收缩作用、溶蚀作用、方解石的重结晶作用	压实作用、胶结作用、溶蚀作用和少量的交代作用	压实作用、溶蚀作用	压实、胶结和溶蚀作用
储集空间类型	层间微缝、异常高压缝及构造缝;粘土矿物晶间孔、方解石重结晶晶间孔及溶蚀孔	少量异常高压缝和构造缝;粒间孔及溶蚀孔	层间页理缝;粘土矿物晶间孔	构造缝、层间缝;方解石重结晶晶间孔及溶蚀孔

中心(图 4),对应异常高压空间分布的高值区,有利于孔隙(特别是有机质孔)的保存。

深湖微相粘土矿物中较高的伊利石及伊蒙混层矿物含量本身就是层间微孔缝、溶蚀孔极大比表面积的重要贡献者,粘土层中发育粘土矿物晶间孔及溶蚀孔,孔隙形态多为一端封闭的圆筒状孔。孔隙的连通性中等,粘土矿物晶间孔隙常为弯曲、断续状,与纹层界面近于平行,连通性一般,尺寸一般小于 1.3 μm。孔隙度平均为 8.9%。成岩形成的夹层状灰岩相在纵向上往往与灰黑色页状粘土岩相伴生^[14],因此从沉积环境角度,这种脉状的方解石是深湖微相的产物,层间页理缝较发育(多数可能是岩心出筒后应力卸载导致),主体水平,角度多集中在 0~2°,开度多介于 0.01~0.30 mm。方解石重结晶晶间孔十分发育,孔径最大可达 100 μm,与层间缝及少量异常高压缝连通性较好。对夹层状灰岩脱附曲线与吸附曲线进行分析(图 3),在接近饱和蒸汽压时才发生明显的氮气聚集,吸附曲线上陡直,上升速率大,反映了孔隙结构为四周开放的平行板状狭缝型孔隙,孔隙大小从微孔到大孔均较发育,连通性较好,孔隙度平均为 8%。

3.2.2 平阔半深湖微相

平阔半深湖微相水动力稍强于深湖微相,湖盆流体以底流最为显著(也可见少量浊流标志),湖盆深处的底流作用往往受斜坡区的底流或滑塌作用影响,因而才形成了(细)粉砂质夹层,且往往具有周期性,这在樊页 1 井岩心观察中常见。陆源有机质对平阔半深湖微相有机质的贡献有限,总体上有机质以产烃能力较强的水体生物的贡献为主,湖水钙质来源丰富,钙质生物特别是在藻类大量发育的条件下可形成富有机质

泥页岩(如美国绿河组页岩),微环境较有利于有机质的保存。有机质丰度方面,盆地北部和南部仍然存在差异,凹陷北部利津洼陷平阔半深湖区有机质含量高于南部博兴洼陷,主要集中在 2.23%~4.2%。

平阔半深湖微相发育的岩石类型多样,以泥质灰岩为主(表 4),富有机质纹层状灰岩相为平阔半深湖微相发育的典型岩相类型^[16],纹层极为发育,不同矿物成分的纹层以层偶形式产出。单个纹层灰质或粘土越纯,纹层间越容易形成层间微缝,从而实现孔缝沟通,因此层间缝最为发育,主体近水平,角度多集中在 0~5°,开度多介于 0.01~0.5 mm,线密度为 10~35 条/m;次为异常高压缝及中、低角度的构造缝,以樊页 1 井沙三下亚段中部样品为例,异常高压缝角度为 25°~85°,开度最小为 0.001 mm,最大可达 2 mm,线密度集中在 2~5 条/m;在粘土纹层和方解石纹层内部,孔隙类型以粘土矿物晶间孔、溶蚀孔为主,且溶蚀孔多发于在方解石(或白云石)晶体边缘及内部,孔径较大,为 2.5~5 μm;扫描电镜下可观察团块状、层状黄铁矿内部的晶间孔,孔隙大小为 1~2 μm。此外,絮状粘土矿物中的开放孔隙,与纹层界面近于平行。如图 4 所示,纹层状灰岩样品吸脱附曲线的滞回环宽大,吸附曲线变化缓慢,脱附曲线明显,在中等相对压力处表现为陡直下降且脱附曲线比吸附曲线陡峭,反映了“广体细径”的墨水瓶形等无定形孔隙;微孔较发育曲线分离段的坡度接近平行,表明介质孔中直径较大的孔隙开放程度相对较高。总体上平阔半深湖微相发育的泥页岩储层有机质含量较高,岩石类型多样,脆性矿物以方解石为主。孔隙、裂缝类型多样,孔隙连通性中等,开放性较好。对樊页 1 井沙三下纹层发育的泥质灰岩样品进行统计,孔隙度集中在 6.7%~11.5%。

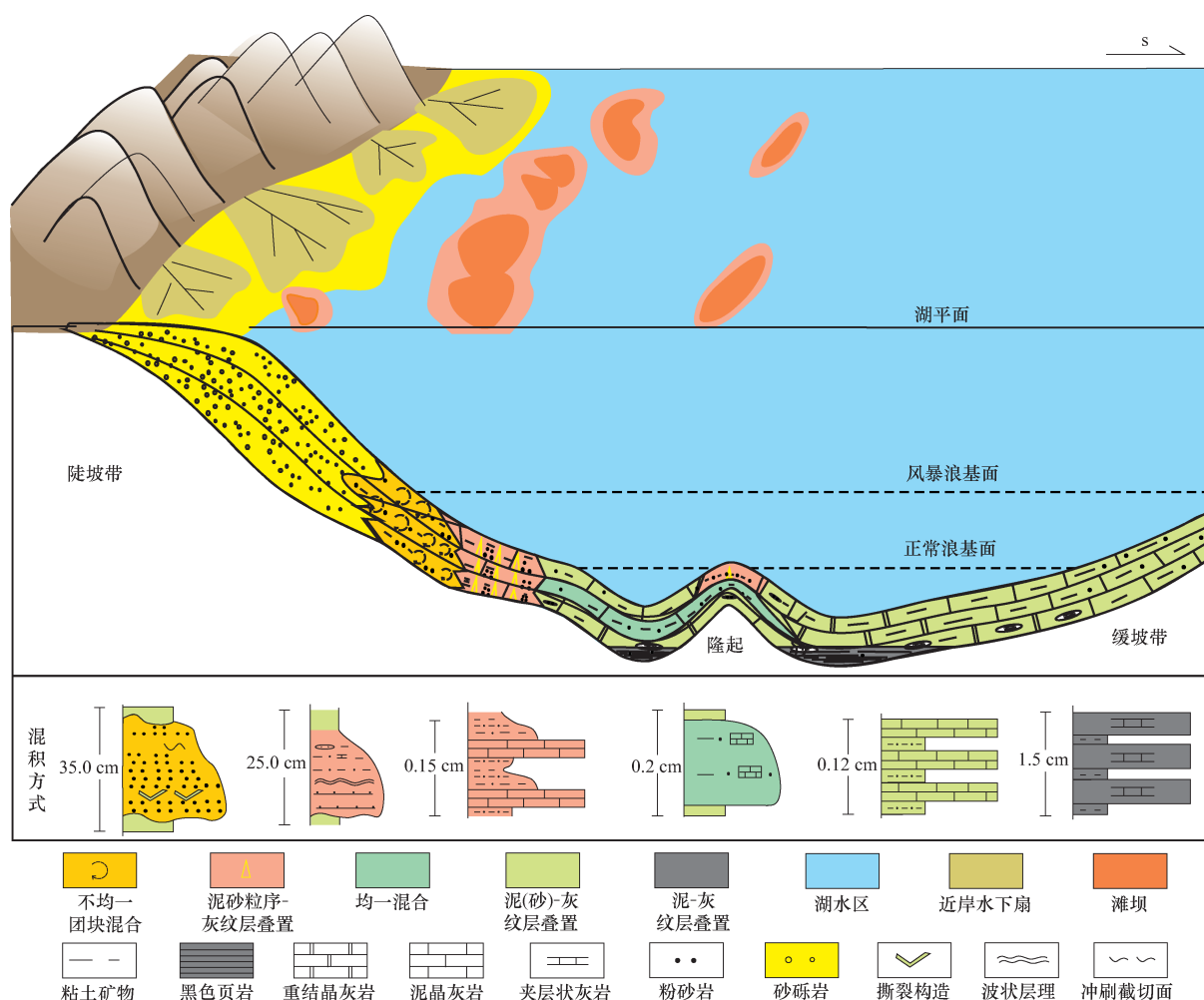


图5 东营凹陷泥页岩沉积模式

Fig. 5 Depositional mode of the shale in the Dongying Sag

3.2.3 水下隆起半深湖微相

相较于深湖微相和平阔半深湖微相,水下隆起半深湖微相发育的范围有限,水体相对较浅,水动力相对较强,湖盆流体类型较为多样,因此长英质矿物含量相对较高且兼有分散状和顺层分布的特点。块状的细粒混合岩中可见破碎的植物茎和不完整叶片化石,而由于有机质的保存条件欠佳,TOC含量低到中等。该微相发育的细粒沉积岩垂向上不同矿物层的叠置规律并不明显,纹层界限不清晰,在裂缝的发育类型和规模上均不如平阔半深湖微相中发育的纹层状灰岩。

纹层状细粒混合沉积岩相是水下隆起半深湖微相发育的典型岩相类型,矿物总体显定向结构,层间微缝虽然局部发育但数量有限,裂缝线密度小于3条/m,宽度多为微米级,多数仅在扫描电镜下可观测,且由于微米级灰泥透镜体的断续排列,不同矿物集合体之间(尤其是灰泥透镜体与其他矿物集合体)的微裂缝通常延伸较短,异常高压缝总体上欠发育。构造缝线密度1.2条/m,裂缝开度可达数毫米,缝内部分充填方解石。作为半深湖与深湖的边缘相沉积,湖盆流体具

有交互性和多样性,长英质矿物含量相对较高且兼有分散状和顺层分布的特点,极少富集成层或砂质团块,因此顺纹层发育石英颗粒间微米级的粒间孔,但孔径较小,连通性一般。粘土矿物多与长英质矿物、炭屑及星散状黄铁矿较均匀混合,略显定向结构,分布于灰泥透镜体之间,扫描电镜下可见溶蚀孔(缝)。有机质成层性差,丰度较低,集中在1.21%~3.54%,几乎不见有机质演化孔。此外,可见介形虫内容蚀孔隙,少量孔隙被油充填。尽管有大孔径的孔隙存在,但并不占优势,孔隙多尺度性特征不明显。介孔开放性较好,大孔开放性则较差,孔隙(缝)连通性一般。

3.2.4 浊积周缘微相

东营凹陷靠近北部陡坡带,扇三角洲前缘滑塌等作用形成的浊积体在半深湖-深湖区呈串珠状分布,由于毗邻浊积骨架砂体,浊积周缘微相水动力条件较强,浊流是控制细粒物质混合沉积的最主要流体类型。浊流对细粒物质的搬运、沉积、改造有着十分重要的作用^[31-33]。浊流通过悬浮作用搬运细粒砂质和泥质,上部表现为渐变接触;分选较差,通常富含泥质沉积,孔

隙度和渗透率都较低。粉砂级石英颗粒的大量存在,较好的保存了粒间孔隙。泥级石英和长石的存在,增强了细粒沉积岩的脆性,有利于裂缝的发育。总体上,毗邻骨架砂体的细粒沉积岩发育段,粉砂常呈条带状、团块状或厚层状产出,极容易储集油气,牛876井及牛872井岩心观察中可见油浸粉砂岩夹于暗色泥岩中。

由于水体深度较小,加之风暴等事件沉积影响^[37],有机质含量普遍较低,泥、微晶方解石含量较高,往往还发育块状细粒混合沉积岩。由于水体分层作用不明显,多数细粒沉积物快速悬浮沉降,混合方式以较均一的混合为主,成层性特征不显著,因此几乎不存在较纯净的碳酸盐层或陆源碎屑层,层间缝不发育。埋深总体小于3 200 m,异常高压缝欠发育。总体致密,储集空间类型以基质孔隙为主,以泥晶方解石晶间微孔、粘土矿物晶间孔、黄铁矿晶间孔(图2f)以及长英质矿物颗粒的粒间孔最为常见,长英质矿物粒间孔径约30 μm ,除粒间孔外,孔隙(微裂缝)连通性较差。孔隙度变化范围较大,集中在3.5%~9.4%,细粒物质混合充分的块状样品孔隙度普遍较小,粉砂含量较高的泥页岩孔隙度可达12%。

综上,矿物组成、组构及有机质丰度反映了细粒沉积岩的沉积微环境,是沉积微相对储层微观结构控制作用的最直接表现。沉积微环境不仅控制了泥页岩中主要矿物颗粒的类型、分布和含量,而且影响了有机质丰度、分布及后生成岩改造等,进而控制了泥页岩储层的微观结构特征。结合储集空间类型、丰度、孔隙结构及有机质丰度等,平阔半深湖微相可视为有利相带区。

4 结论

1) 东营凹陷古近系半深湖-深湖泥页岩矿物组成复杂、岩石类型多样,储层非均质性很强。泥页岩中碳酸盐矿物以方解石为主,以往作为优质烃源岩的细粒沉积岩,其实大部分属于碳酸盐岩范畴。除了古地貌、水动力条件外,湖盆流体、黄铁矿以及古生物化石等不仅可以作为微相划分的标志,还控制了泥页岩储层的发育。

2) 储集空间类型主要有层间缝、异常压力缝、构造缝、成岩收缩缝、粒间孔、溶蚀孔、粘土矿物晶间孔、方解石重结晶晶间孔以及少量有机质演化孔等类型;微裂缝的存在沟通了孔隙,增大了储层的孔渗性能。孔隙结构复杂,储集层内孔径具有多尺度性,孔隙的比表面积和孔体积二者具有较好的正相关关系;孔隙形态多为两端开口的圆筒状孔、平行板状孔及墨水瓶状孔,少量一端封闭的平行板状孔或尖劈形孔;开放孔较小,但所占比例较大。不同微相发育的泥页岩储层在

微观结构特征上存在差异。

3) 受湖盆流体、距离物源远近、水动力强弱和水深等因素影响,不同微相在矿物的组成上存在差异,这些矿物以不同方式及不同比例混合形成不同的岩石及岩相类型,控制了细粒沉积岩不同成因类型(尤其是原生沉积型孔隙)及不同大小孔隙的发育;不同微相类型有机质富集程度不同,对储层储集能力及碳酸盐结晶形态均有影响,与细粒沉积岩中较大孔隙的发育程度具有良好的相关性,并进一步造成孔隙结构特征等方面的差异;平阔半深湖微相可视为可能的有利相带。

参考文献

- [1] 潘荣,朱筱敏,王星星,等. 深层有效碎屑岩储层形成机理研究进展[J]. 岩性油气藏,2014,26(4):73-80.
Pan Rong, Zhu Xiaomin, Wang Xingxing, et al. Advancement on formation mechanism of deep effective clastic reservoir[J]. Lithologic Reservoirs, 2014, 26(4):73-80.
- [2] 孙龙德,方朝亮,李峰,等. 油气勘探开发中的沉积学创新与挑战[J]. 石油勘探与开发,2015,42(2):129-136.
Sun Longde, Fang Chaoliang, Li Feng, et al. Innovations and challenges of sedimentology in oil and gas exploration and development[J]. Petroleum Exploration And Development, 2015, 42(2):129-136.
- [3] 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,2014,34(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, 2014, 34(6):1031-1039.
- [4] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报,2012,33(2):173-187.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2):173-187.
- [5] 卢双舫,黄文彪,陈方文,等. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发,2012,39(2):249-256.
Lu Shuangfang, Huang Wenbiao, Chen Fangwen. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: Discussion and application[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2):249-256.
- [6] 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. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1):14-26.
- [7] 郝运轻,谢忠怀,周自立,等. 非常规油气勘探领域泥页岩综合分类命名方案探讨[J]. 油气地质与采收率,2012,19(6):16-19.
Hao Yunqing, Xie Zhonghuai, Zhou Zili, et al. Discussion on multi-factors identification of mudstone and shale[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(6):16-19.
- [8] 李钜源. 东营凹陷泥页岩矿物组成及脆度分析[J]. 沉积学报,2013,04:616-620.

- Li Juyuan. Analysis on Mineral Components and Frangibility of Shales in Dongying Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31 (4): 616 – 620.
- [9] Mohamed O. Abouelresh and Roger M. Slatt. Lithofacies and sequences stratigraphy of the Barnett Shale in east-central Fort Worth Basin, Texas [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96 (1): 1 – 22.
- [10] Zhu G, Gu L, Su J, et al. Sedimentary association of alternated mudstones and tight sandstones in China's oil and gas bearing basin sand its natural gas accumulation [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012.
- [11] Slatt RM, O'Brien NR. 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.
- [12] 付金华, 邓秀芹, 楚美娟, 等. 鄂尔多斯盆地延长组深水岩相发育特征及其石油地质意义 [J]. *沉积学报*, 2013, 05: 928 – 938.
- Fu Jinhua, Deng Xiuqin, Chu Meijuan, et al. Features of Deepwater Lithofacies, Yanchang Formation in Ordos Basin and Its Petroleum Significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 05: 928 – 938.
- [13] 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).
- Wang Guanmin. Laminae combination and genetic classification of Eocene shale in Jiyang Depression [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42 (3).
- [14] 王冠民, 任拥军, 钟建华, 等. 济阳坳陷古近系黑色页岩中纹层状方解石脉的成因探讨 [J]. *地质学报*, 2006, 79 (6): 834 – 838.
- Wang Guanmin, Ren Yongjun, Zhong Jianhua. Genetic analysis on lamellar calcite veins in Paleogene black shale of the Jiyang Depression [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 79 (6): 834 – 838.
- [15] 刘群, 袁选俊, 林森虎, 等. 鄂尔多斯盆地延长组湖相黏土岩分类和沉积环境探讨 [J]. *沉积学报*, 2014, 32: 1016 – 1025.
- Liu Qun, Yuan Xuanjun, Lin Senhu, et al. The classification of lacustrine mudrock and research on its depositional environment [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32: 1016 – 1025.
- [16] 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. Characterization of sedimentary microfacies of shale in the lower third sub-member of Shahejie Formation, western Dongying sag [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35 (4): 633 – 645.
- [17] 朱光有, 金强, 张水昌, 等. 东营凹陷湖相烃源岩 TOC 与 Sr 的正相关性及其原因 [J]. *地学前缘*, 2006, 12 (4): 551 – 560.
- Zhu Guangyou, Jin Qiang, Zhang Shuichang, et al. Positive correlation between contents of TOC and Sr in source rocks of the Palaeogene Shahejie Formation in Dongying Sag, eastern China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12 (4): 551 – 560.
- [18] 姜在兴, 张文昭, 梁超, 等. 页岩油气储层基本特征及评价要素 [J]. *石油学报*, 2014, 35 (1): 184 – 196.
- Jiang Zai xing, Zhang Wenzhao, Liang Chao, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir [J]. *Acta petrolei sinica*, 2014, 35 (1): 184 – 196.
- [19] 何建华, 丁文龙, 付景龙, 等. 页岩微观孔隙成因类型研究 [J]. *岩性油气藏*, 2014, 26 (5): 30 – 35.
- He Jianhua, Ding Wenlong, Fu Jinglong, et al. Study on genetic type of micropore in shale reservoir [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2014, 26 (5): 30 – 35.
- [20] 慈兴华, 冀登武, 陈汉林, 等. 济阳坳陷四扣洼陷泥质岩裂缝储层预测研究 [J]. *高校地质学报*, 2002, 8 (1): 96 – 105.
- Ci Xinghua, Ji Dengwu, Chen Hanlin, et al. Study on prediction of muddy fractural reservoirs in Sikou Sag, Jiyang Depression [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2002, 8 (1): 96 – 105.
- [21] 久凯, 丁文龙, 黄文辉, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷沙三段页岩气地质条件分析 [J]. *大庆石油学院学报*, 2012, 36 (2): 65 – 70.
- Jiu Kai, Ding Wenlong, Huang Wenhui, et al. Analysis of geological condition of the formation of Shahejie shale gas in Jiyang Depression in Bohai Bay Basin [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2012, 36 (2): 65 – 70.
- [22] 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]. *Nature Gas Geoscience*, 2015, 26 (2): 320 – 332.
- [23] 杨超, 张金川, 李婉君, 等. 辽河坳陷沙三、沙四段泥页岩微观孔隙特征及其成藏意义 [J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35 (2): 287 – 293.
- Yang Chao, Zhang Jinchuan, Li Wanjuan, et al. Microscopic pore characteristics of Sha-3 and Sha-4 shale and their accumulation significance in Liaohe Depression [J]. *Oil and Gas Geology*, 2014, 35 (2): 287 – 293.
- [24] 杨峰, 宁正福, 胡昌蓬, 等. 页岩储层微观孔隙结构特征 [J]. *石油学报*, 2013, 34 (2): 301 – 311.
- Yang Feng, Ning Zhengfu, Hu Changpeng, et al. Characterization of microscopic pore structures in shale reservoirs [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34 (2): 301 – 311.
- [25] 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*, 2015, 42 (2): 129 – 136.
- Chen Shiyue, Zhang Shun, Wang Yongshi, et al. Lithofacies types and reservoirs of Paleogene fine-grained sedimentary rocks Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Exploration And Development*, 2015, 42 (2): 129 – 136.
- [26] 张林峰, 李政, 朱日房, 等. 济阳坳陷古近系存在页岩气资源的可能性 [J]. *天然气工业*, 2008, 28 (12).
- Zhang Linfe, Li Zheng, Zhu Rifang, et al. Resource potential of shale gas in paleogene in Jiyang Depression [J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28 (12).
- [27] 田华, 张水昌, 柳少波, 等. 压汞法和气体吸附法研究富有机质页岩孔隙特征 [J]. *石油学报*, 2012, 33 (3): 419 – 427.
- Tian Hua, Zhang Shuichang, Liu Shaobo, et al. Determination of organic-rich shale pore features by mercury injection and gas adsorption methods [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33 (3): 419 – 427.
- [28] 刘圣鑫, 钟建华, 马寅生. 柴东石炭系页岩微观孔隙结构与页岩气等温吸附研究 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 1: 005.
- Liu Shenxin, Zhong Jianhua, Ma Yinshen. Study of microscopic pore structure and adsorption isothermal of carboniferous shale, Eastern Qaidam Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2015, 1: 005.

- [29] 薛冰, 张金川, 唐玄, 等. 黔西北龙马溪组页岩微观孔隙结构及储气特征[J]. 石油学报, 2015, 36(2): 138–149, 173.
Xue Bin, Zhang Jinchuan, Tang Xuan. Characteristics of microscopic pore and gas accumulation on shale in Longmaxi Formation, northwest Guizhou[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 36(2): 138–149, 173.
- [30] 林緬, 江文滨, 李勇, 等. 页岩油(气)微尺度流动中的若干问题[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(1): 18–28.
Lin Mian, Jiang Wenbin, Li Yong, et al. Several questions in the micro-scale flow of shale oil/gas[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(1): 18–28.
- [31] 赵宁, 黄江琴, 李栋明, 等. 远源缓坡型薄层细粒浊积岩沉积规律——以松南西斜坡大布苏地区青一段地层为例[J]. 沉积学报, 2013, 02: 291–301.
Zhao Ning, Huang Jiangqin, Li Dongming, et al. Sedimentary Laws of Thin-layer, Fine-grain Turbidites of Distant-gentle[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 02: 291–301.
- [32] 姜涛, 解习农. 细粒浊积体研究现状与展望[J]. 地球学报, 2003, 03: 289–292.
Jiang Tao, Xie Xinong. Present condition and prospects of researches on fine-grained turbidite systems[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 03: 289–292.
- [33] 吴嘉鹏, 王英民, 王海荣, 等. 深水重力流与底流交互作用研究进展[J]. 地质评论, 2012, 06: 1110–1112.
Wu Jiapeng, Wang Yingmin, Wang Hairong, et al. The interaction between deep-water turbidity and bottom currents[J]. Geological Review, 2012, 06: 1110–1112.
- [34] 吴朝东, 陈其英, 雷家锦. 湘西震旦—寒武纪黑色岩系的有机岩石学特征及其形成条件[J]. 岩石学报, 1999, 15(1): 453–462.
Wu Chaodong, Chen Qiyang, Lei Jiajin. The genesis factors and organic petrology of black shale series from the upper Sinian to the lower Cambrian, southwest of China[J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(1): 453–462.
- [35] 陈中红, 查明. 铀曲线在沉积盆地古环境反演中的应用[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 06: 11–15.
Chen Zhonghong, Zha Ming. Application of uranium curve to paleoenvironment inversion in sedimentary basin[J]. Journal of the University of Petroleum, 2004, 06: 11–15.
- [36] 郑宁, 姜在兴, 李廷栋, 等. 渤海湾盆地孤南洼陷沙三中亚段风暴沉积基本特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2010, 04: 1191–1198.
Zheng Ning, Jiang Zaixing, Li Tingdong, et al. Basic characteristics of tempestite sediments of Middle Sha 3 Formation in Gunan Subbasin of Bohai Bay Basin and their geological significance[J]. Geology in China, 2010, 04: 1191–1198.
- [37] 魏小洁, 姜在兴, 李一凡, 等. 渤海湾盆地东营凹陷利津洼陷古近系沙河街组湖相风暴沉积特征及控制因素[J]. 古地理学报, 2014, 03: 377–384.
Wei Xiaojie, Jiang Zaixing, Li Yifan, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of lacustrine storm deposits of the Paleogene Shahejie Formation in Lijin sag, Dongying Depression, Bohai Bay Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 03: 377–384.

(编辑 张玉银)

欢迎订阅 2017 年《石油实验地质》期刊

《石油实验地质》是一份报道我国油气普查、勘探及开发成果,反映我国石油地质研究水平的学术性、技术性刊物。本刊紧密结合我国石油工业的发展战略,以石油工业上游所涉及的油气勘探的热点、难点问题为重点进行报道和分析,同时重点报道国内外油气实验测试的最新技术和方法。本刊为中文核心期刊,2016 年版中国科技期刊引证报告(扩刊版)统计的影响因子达 2.419,已被美国“化学文摘(CA)”、“石油文摘(PA)”、俄罗斯“文摘杂志(AJ)”和“中国石油文摘”、“中国地质文摘”、“中国学术期刊文摘”等收录,是“中国科学引文数据库”、“中国学术期刊综合评价数据库”、“中国科技论文统计源”来源期刊,并全文收录于“中国期刊网”、“中国知网”、“万方数据”及“维普中文科技期刊数据库”中。

《石油实验地质》为双月刊,逢单月 28 日出版。每本定价 20 元,全年 120 元。在校学生半价优惠。

通信地址:江苏无锡市蠡湖大道 2060 号《石油实验地质》编辑部

邮 编:214126

电 话:(0510)68787203

电子邮箱:sysydz_syky@sinopec.com

网 址:http://www.sysydz.net

开 户 行:中国建设银行股份有限公司无锡分行营业部

帐 号:32001618636052516631

户 名:中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所

银行代码(12 位):105302000443