

鄂尔多斯盆地三叠系延长组富有机质泥页岩储层特征

耳 闯^{1,2}, 赵靖舟^{1,2}, 白玉彬^{1,2}, 樊 豪¹, 沈武显^{1,2}

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安石油大学 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要:富有机质泥页岩储层特征研究对认识页岩油气勘探潜力具有重要意义。为确定延长组富有机质泥页岩储层特征,开展了岩石薄片、扫描电镜、X-射线衍射、物性、比表面积孔径分析和有机碳含量等分析测试工作,揭示了泥页岩岩相、矿物含量、成岩作用、孔隙类型、物性和孔隙结构等特征。延长组泥页岩可划分为泥岩岩相、含粉砂泥岩岩相和粉砂质泥岩岩相3种岩相类型。泥岩岩相的有机碳含量最高,粘土矿物含量高(>50%),成岩作用较弱;粒间孔和粒内孔是中生界泥页岩储层主要的孔隙类型;微孔主要集中在0.4~1 nm,中孔主要集中在3~5 nm,中孔对孔隙体积和比表面积的贡献好于微孔。根据现有资料认为,延长组富有机质泥页岩塑性矿物含量高,成岩作用弱,对储层后期改造提出了严峻挑战。

关键词:岩相;孔隙类型;孔隙结构;储层特征;富有机质泥页岩;延长组;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Reservoir characteristics of the organic-rich shales of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin

Er Chuang^{1,2}, Zhao Jingzhou^{1,2}, Bai Yubin^{1,2}, Fan Hao¹, Shen Wuxian^{1,2}

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. Shaanxi Key Lab of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: Reservoir characteristics study is very important to understand the hydrocarbon potential of organic-rich shales. A series of analyses and tests, including thin sections, SEM, XRD, physical property, total organic carbon (TOC), specific surface area and pore size distribution, were made to reveal the reservoir characteristics of the organic-rich shales of the Triassic Yanchang Formation (Fm) in Ordos Basin. This paper also defined the lithofacies, mineral types, diagenesis, pore types and physical properties. Three types of lithofacies are identified in the organic-rich shales, including muddy shale, silt-bearing shale and silty shale. The muddy shale has the highest TOC content, clay content of more than 50% and relatively weak diagenesis. The dominant pore types of the organic-rich shales in the Yanchang Fm are intragranular and intergranular pores. The pore sizes of micropores are mainly within 0.4 to 1 nm and those of mesopores are mainly within 3 to 5 nm. The contribution of the mesopores to pore volume and specific surface area is larger than that of the micropores. The high content of ductile minerals and weak diagenesis of the organic shales in the the Yanchang Fm make the reservoir stimulation more challenging.

Key words: lithofacies, pore type, pore structure, reservoir characteristics, organic-rich shale, Yanchang Formation, Ordos Basin

页岩气是一种自生自储的连续型气藏,储层研究是页岩气基础地质研究的重要组成部分。页岩储层研究重点包括矿物类型与含量、孔隙度和渗透率、孔隙类型和孔隙结构等方面。矿物类型和含量是决定了页岩

储层脆性特征,寻找脆性矿物含量高、易压裂的地层对页岩气压裂开发具有重要影响^[1-3]。页岩储层孔隙(纳米级)系统对烃类的储集能力和流体向裂缝网络传导具有重要的控制作用^[4]。页岩储层孔隙的类型、

收稿日期:2013-03-31;修订日期:2013-08-15。

第一作者简介:耳闯(1982—),男,讲师,沉积与储层、非常规油气地质。E-mail:erchuang2008@yahoo.com.cn。

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2013JQ503);国家科技重大专项(2011ZX05018001-004);西安石油大学博士科研启动基金项目(YS29031219)。

大小和孔隙的组合影响了烃类储集空间和原地滞留资源量的计算^[5-6]。

目前,国内外针对富有机质页岩储层特征的研究主要集中在海相地层^[7-8],陆相富有机质页岩储层特征研究相对薄弱。鄂尔多斯盆地中生界三叠系延长组长7段和长9段是重要的烃源岩层^[9-10]。近年来,延长组页岩油气逐渐受到国内勘探界和学术界的重视。徐士林等^[11]认为鄂尔多斯盆地三叠系延长组具备页岩气形成条件。赵靖舟^[12]认为与三叠系延长组相比,上古生界页岩气形成条件更为优越。王社教等^[13]认为,上三叠统延长组长7段页岩处于大量生油阶段,页岩气主要为热成因的伴生气,成藏条件较致密油要差。目前针对鄂尔多斯盆地延长组富有机质泥页岩的研究重点在页岩油气形成条件分析和勘探潜力上,而缺少对页岩储层的研究,本文试图通过现有资料,对中生界页岩储层特征做初步介绍。

1 泥页岩岩相特征

1.1 划分方法

岩心颜色一般为灰色、黑色和深黑色。岩性包括页岩、泥岩、粉砂质泥岩等,发育的沉积构造包括块状层理、水平层理和波状层理等。

根据镜下薄片观察结果,综合沉积构造和粒度两方面特征,将中生界泥页岩划分为3种岩相和8种亚岩相。首先根据粒度特征,以粉砂含量 $<10\%$ 、 $10\% \leq$ 粉砂含量 $<25\%$ 和 $25\% \leq$ 粉砂含量 $<50\%$ 为界,将泥岩分为3种岩相,即泥岩(M)、含粉砂泥岩(SBM)和粉砂质泥岩(SM)。其次根据显微沉积构造,再细分为8种亚类。

1.2 泥岩岩相(M)

包括块状和纹层状两种沉积构造,泥质含量大于90%,黄铁矿和炭屑呈零星状分布,含量均在2%以下,个别样品中可见白云石微晶,含量较低。X-射线衍射分析结果表明,粘土矿物含量分布范围为60.1%~71.2%,硅质含量为20.5%~36.1%,碳酸盐为2.5%~10.1%,有机碳含量为3.34%~7.84%。

① 块状泥岩(M1):碎屑颗粒含量低并呈零星点状“漂浮”于沉积基质内(图1a)。

② 纹层状泥岩(M2):碎屑颗粒含量低,呈线状分布并与泥质交互出现而形成显微纹层(图1b)。

1.3 含粉砂泥岩岩相(SBM)

包括块状和条带状两种类型,泥质含量介于75%~84%,黄铁矿和炭屑零星状分布,黄铁矿含量

1%~3%,炭屑含量1%~5%,个别样品中可见碳酸盐胶结物,含量较低。X-射线衍射分析结果表明,粘土矿物含量分布范围为51.2%~68.5%,硅质含量为29.1%~47.4%,碳酸盐为3.2%~6.6%,有机碳含量总体分布在1.89%~5.29%,其中有一个样品达11.67%。

① 块状含粉砂泥岩(SBM1):碎屑颗粒分布或集中或分散。集中式分布,颗粒之间呈线接触-凹凸接触;分散式分布,颗粒之间呈点-线接触。泥质多被有机质浸染,富有机质部分和贫有机质部分渐变接触(图1c)。

② 条带状含粉砂泥岩(SBM2):目前只发现一个样品为该种岩相,碎屑颗粒条带状集中出现,颗粒之间点-凹凸接触(图1d)。

1.4 粉砂质泥岩岩相(SM)

包括递变状、块状、炭质纹层和复合层理4种类型,泥质含量介于52%~71%,黄铁矿零星分布,含量小于2%;炭屑零星或线状分布,含量2%~4%;碳酸盐含量低。X-射线衍射分析结果表明,粘土矿物含量分布范围为51.1%~71.0%,硅质含量为28.2%~46.3%,碳酸盐含量低,有机碳含量总体分布在0.30%~5.45%。

① 递变状粉砂质泥岩(SM1):碎屑颗粒含量具有由多到少或由少到多分布的特征,呈递变状。随着碎屑颗粒含量由低到高,颗粒之间也由点接触向线接触和凹凸接触过渡(图1e)。

② 块状粉砂质泥岩(SM2):碎屑颗粒集中分布,粒径比前述几种颗粒的粒径大,以石英为主,颗粒间点接触-线接触。炭质碎屑为团块状或长条状分布于泥质或碎屑颗粒之间(图1f)。

③ 炭质纹层状粉砂质泥岩(SM3):总体以泥质为主,碎屑颗粒在局部范围集中发育,造成整体粉砂质含量较高,炭质呈长条状顺纹层分布,个别炭屑粒径大,分布于颗粒和泥质之间(图1g)。

④ 复合层理粉砂质泥岩(SM4):具块状、炭质纹层状和条带砂多种沉积构造,块状和条带状部分碎屑含量高,炭质纹层状部分碎屑含量低。块状部分由于碎屑颗粒含量高,粒度大,与其相邻的炭质纹层部分具有差异压实特征(图1h)。

1.5 各岩相有机碳含量对比

对在安塞、志丹等地区采集的23块岩心样品进行配套的薄片鉴定、X-射线衍射分析和有机碳含量(TOC)测试,统计相关分析测试结果,泥质含量和粘土矿物含量均与对应样品的有机碳含量具有一定的正相

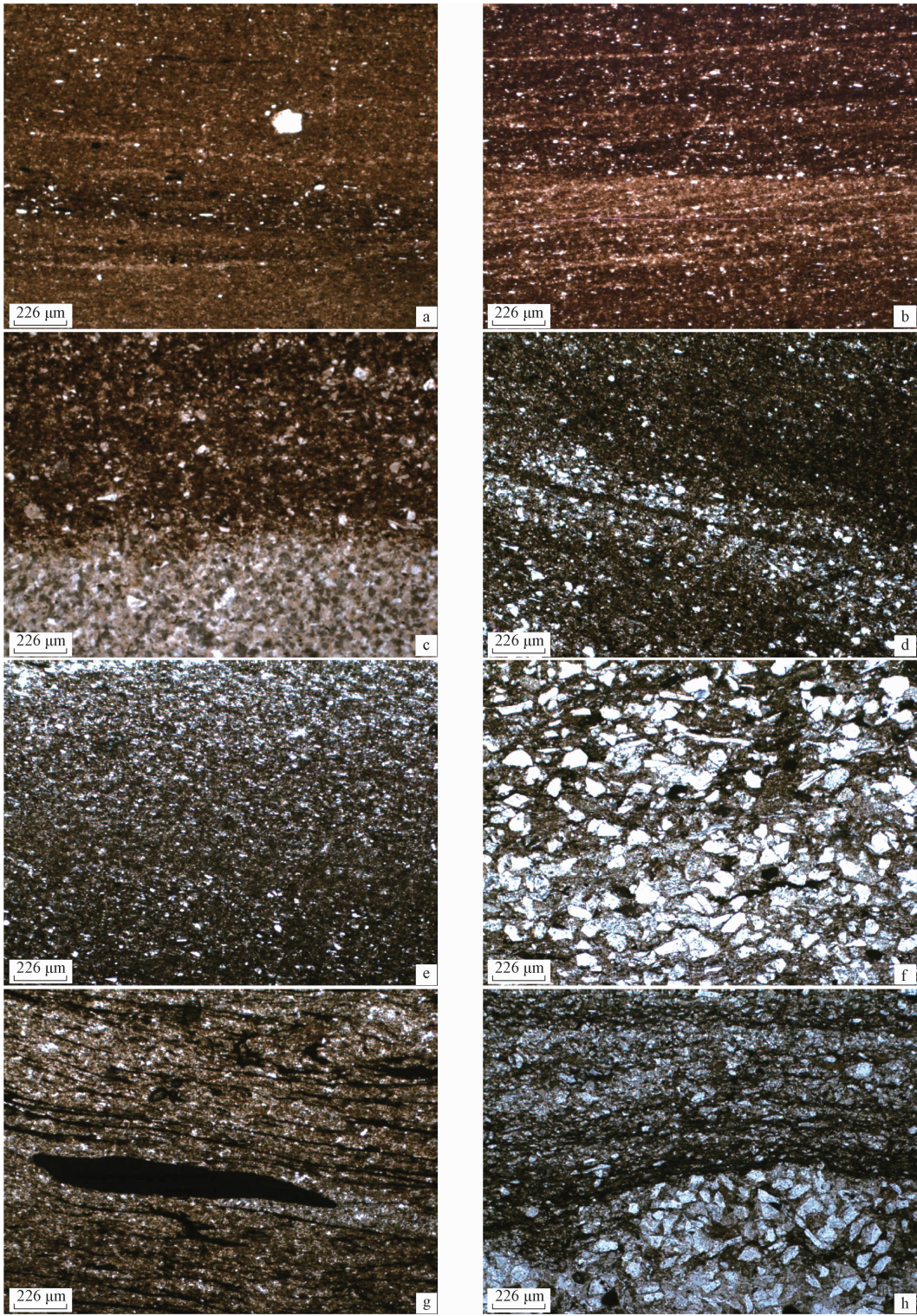


图 1 鄂尔多斯盆地延长组富有机质泥页岩岩相类型

Fig. 1 Lithofacies of organic-rich shales in the Yanchang Formation of Ordos Basin

a. 永 860 井,1 845.52 m,长 7 段,块状泥岩,白云石零星分布,单偏光;b. 永 860 井,1 850.26 m,长 7 段,纹层状泥岩,见微裂缝,单偏光;c. 永 860 井,1 848.97 m,长 7 段,块状含粉砂泥岩,泥质被有机质浸染,贫有机质段和富有机质段渐变接触,单偏光;d. 杏 6139 井,1 127.16 m,长 7 段,条带状含粉砂泥岩,砂质条带集中发育,单偏光;e. 杏 6139 井,1 127.36 m,长 7 段,渐变状粉砂质泥岩,砂质含量由中部至上部呈递变式,单偏光;f. 杏 6159 井,1 566.66 m,长 9 段,块状粉砂质泥岩,颗粒间点接触-线接触,单偏光;g. 杏 6138 井,1 079.56 m,长 7 段,炭质纹层状粉砂质泥岩,炭质纹层线状分布,单偏光;h. 杏 2008 井,1 542.00 m,长 9 段,复合层理粉砂质泥岩,具块状、炭质纹层状和条带状多种沉积构造,单偏光

关性(图 2,图 3)。3 种岩相类型中,总体以泥岩岩相的有机碳含量最高,含粉砂泥岩相和粉砂质泥岩相有机碳含量次之。页岩岩相的发育特征与沉积环境具有

重要的相关性,暗色泥岩中泥质含量高可以反映水体深度大或水动力条件弱;相反,泥质含量低则可能与水体深度浅或水动力条件强有关。有机碳含量与沉积环

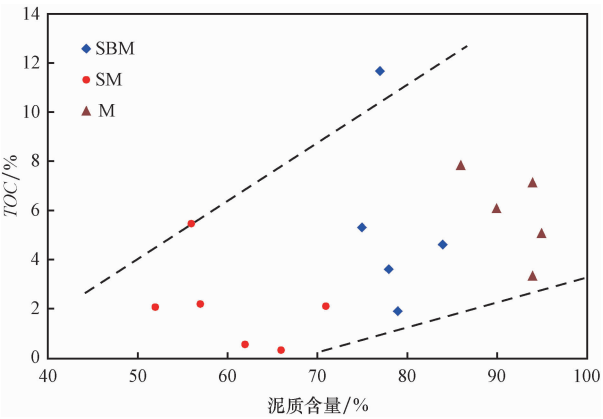


图2 鄂尔多斯盆地泥质含量与 TOC 相关性

Fig.2 Scatter diagram of shale content vs. TOC in Ordos Basin

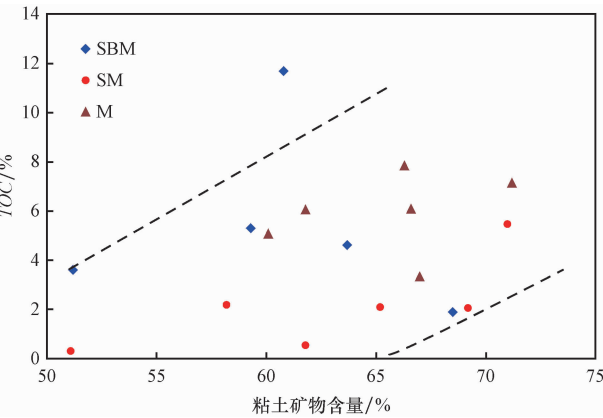


图3 鄂尔多斯盆地粘土矿物含量与 TOC 相关性

Fig.3 Scatter diagram of clay mineral content vs. TOC in Ordos Basin

境也有一定的相关性,深水或静水条件下,有机质处于闭塞缺氧或弱还原环境下,有利于有机质的保存,有机碳含量高。

2 矿物组成特征

脆性矿物含量是评价页岩气勘探潜力的重要指标。同时,粘土矿物含量对富有机质页岩储层的孔隙类型、孔喉结构和含气性均有影响^[14-18]。根据 X-射线衍射全岩鉴定分析数据表明,延长组泥页岩粘土矿物含量高,总体分布范围为 50%~75%,平均值 54.2%。石英、长石和碳酸盐胶结物等矿物含量低。石英总体含量分布在 15%~30%,平均值 20.7%。长石和碳酸盐胶结物含量更低。

粘土矿物中以伊利石居多,含量集中在 30%~70%,以 30%~45% 为主,平均值 40.3%,其次为伊/蒙混层和绿泥石,高岭石不常见。伊/蒙混层集中在 25%~45%,平均值 31.19%,伊/蒙混层间层比分布范围为 15%~20%;绿泥石集中在 11%~42%,平均值为 21.54%。

3 成岩作用和成岩阶段

延长组富有机质泥页岩发育的成岩作用类型主要包括压实作用、胶结作用和溶蚀作用。由于泥质含量高,抗压实能力弱,富有机质泥页岩的压实程度高,个别样品中可以见到缝合线。泥质定向分布,成层性好,碎屑颗粒含量高的部分抗压实能力较强,碎屑颗粒与泥质之间呈凹凸接触(图 4a,b)。

胶结作用的产物主要包括硅质胶结、碳酸盐胶结和黄铁矿。硅质胶结表现为微晶石英和石英次生加大(图 4c),扫描电镜下可见菱面立方体状白云石(图 4d)。黄铁矿多为二八面体单晶,球状集合体少见(图 4e)。

溶蚀作用以长石溶蚀为主,形成粒内溶孔。粒内溶孔具有不规则的孔隙边缘或沿长石解理缝发育(图 4f)。

伊/蒙混层间层比为 15%或 20%,镜质体反射率(R_o)介于 0.50%~1.14%,综合有机质成熟度和伊/蒙混层间层比,根据中华人民共和国石油天然气行业标准《SY/T 5477-2003 碎屑岩成岩阶段划分》,长 7 段泥页岩成岩演化阶段为中成岩 A 期。

成岩阶段与储层的脆性有密切联系,页岩处于成岩晚期或变质阶段,岩石矿物向脆而稳定的矿物转化^[3]。而延长组目前处于中成岩作用阶段,对储层的可改造性无疑将是一项重要的挑战。

4 物性特征

根据中生界延长组泥页岩样品物性统计结果,孔隙度分布在 0.4%~6.99%,平均为 3.05%;基质渗透率分布在 $0.002 \times 10^{-3} \sim 0.219 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.031 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。其中 1 块样品裂缝渗透率可达 $2.990 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。孔隙度数据以 4% 以下居多,2% 以下的孔隙度占样品总数的 40% 以上(图 5)。渗透率以 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下居多,其中 $0.001 \times 10^{-3} \sim 0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 样品数量占 57.89%, $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上样品数量少(图 5)。总体上,延长组泥页岩表现为极低的孔隙度和渗透率。

按岩相统计,孔隙度平均值以粉砂质泥岩岩相(SM)最大,其次为含粉砂泥岩(SBM)岩相,最小的为泥岩(M)岩相(表 1)。图 6 和图 7 中各点的离散程度高,相关性不明显。泥质含量大于 50%,数据点位于图的右侧,泥质含量与孔隙度有一定负相关趋势;砂质含量小于 50%,数据点位于图的左侧,砂质含量与孔隙度有一定正相关趋势(图 6),说明砂质含量高的情

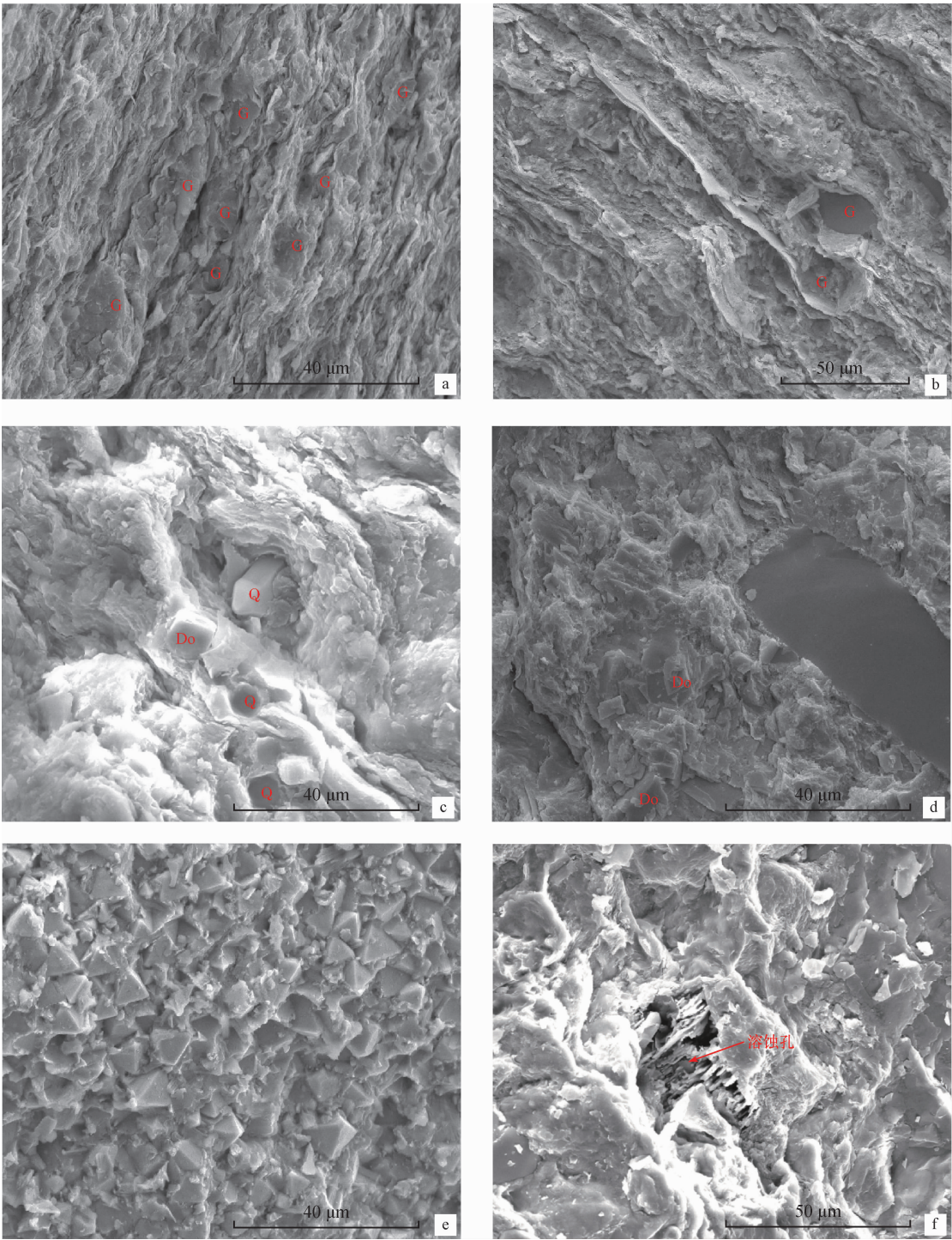


图 4 鄂尔多斯盆地延长组富有机质泥页岩成岩作用类型

Fig. 4 Diagenesis of organic-rich shale in the Yanchang Formation of Ordos Basin

a. 永 860 井,1 846.82 m,长 7 段,纹层状泥岩,碎屑颗粒与泥质凹凸接触,SEM;b. 杏 2008 井,1 542.00 m,长 9 段,片状伊利石,SEM;c. 杏 2008 井,1 521.80 m,长 9 段,微晶石英,分布于泥质之中,SEM;d. 永 860 井,1 848.97 m,左下角白云石胶结物,SEM;e. 杏 6138 井,1 074.76 m,长 7 段,黄铁矿二八面体单晶,SEM;f. 杏 3023 井,1 644.17 m,长 9 段,长石颗粒遭溶蚀,SEM;
G. 颗粒;Q. 自生石英;Do. 白云石

况下,抗压实能力可能较强,有利于孔隙的保存。粘土矿物含量与孔隙度总体表现为正相关,硅质含量与孔隙度相关性不明显(图 7)。

从上述统计分析的结果可以看出:1)粉砂质泥岩和含粉砂泥岩中,碎屑颗粒含量相对较高,抗压实能力强,有利于孔隙的保存(图 8b)。2)粘土矿物与孔隙度

总体为正相关,与粘土矿物有关的孔隙对总孔隙的可能贡献较大。

5 孔隙类型

页岩气储集空间包括孔隙和裂缝两部分。富有机

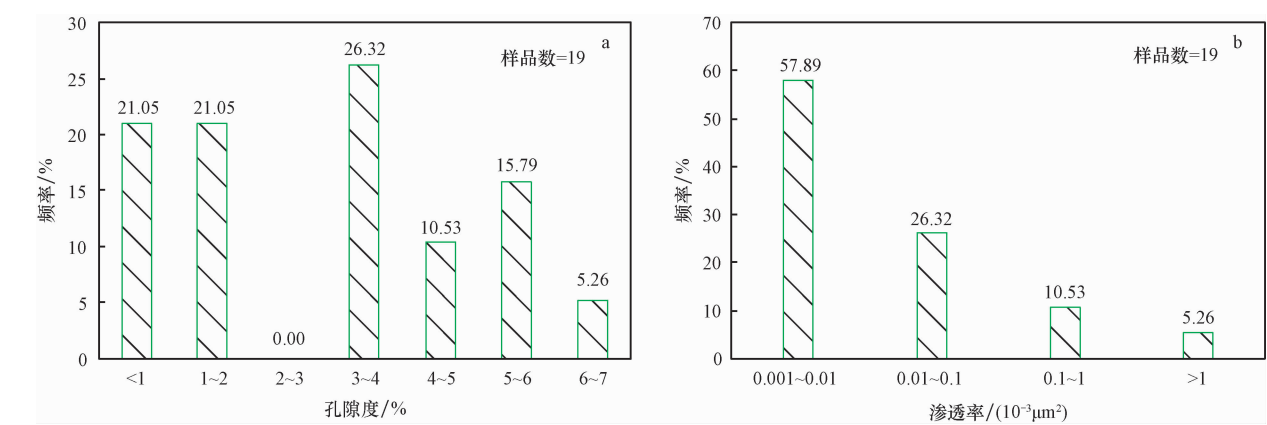


图5 鄂尔多斯盆地延长组泥页岩孔隙度和渗透率分布直方图
Fig. 5 Histogram of porosity and permeability of the shale in the Yanchang Formation of Ordos Basin
a. 孔隙度分布直方图;b. 渗透率分布直方图

表1 各泥页岩岩相泥质含量、砂质含量和孔隙度对比

Table 1 Comparison of shale content,sand content and porosity among three lithofacies

岩相	泥质含量/%			砂质含量/%			孔隙度/%			样品数/ 个
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	
SBM	84	75	78.60	20	12	15.00	5.11	3.44	4.36	5
SM	71	52	60.67	41	26	35.33	6.99	3.94	5.08	6
M	95	86	91.50	9.5	3	5.42	5.63	3.21	4.24	6

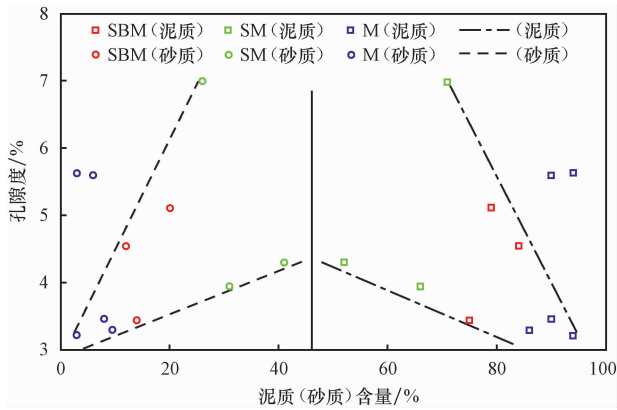


图6 鄂尔多斯盆地泥质含量和砂质含量与孔隙度交会图
Fig. 6 Scatter diagram of shale content and sandy content vs. porosity in Ordos Basin

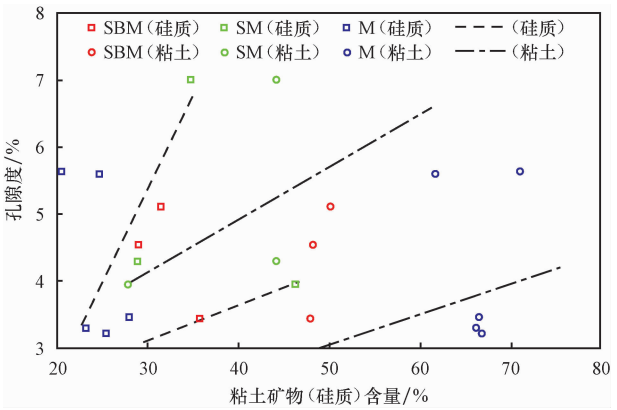


图7 硅质含量和粘土矿物含量与孔隙度交会图
Fig. 7 Scatter diagram of siliceous content and clay mineral content vs. porosity in Ordos Basin

质页岩中的孔隙包括有机质孔和与矿物基质有关的孔隙(粒间孔和粒内孔),粒间孔和有机质孔的连通性好于粒内孔^[6]。通过扫描电镜观察并结合其他研究者资料^[19],目前在延长组富有机质泥页岩中能够识别的孔隙类型包括粒间孔、粒内孔、有机质孔和裂缝。

粒间孔以原生孔隙为主,受压实作用影响,粒间孔存在于定向排列的泥质层之间,形态更像层间缝,缝宽在1 μm 以下(图 8a)。在碎屑颗粒发育的情况下,粒间孔更发育,直径最大可达 17.8 μm(图 8b)。

粒内孔包括溶蚀孔和晶间孔,以溶蚀孔隙为主,多

为长石溶孔(图 4f),孔径一般在 25 μm 左右;晶间孔包括伊利石晶间孔、绿泥石晶间孔、黄铁矿晶间孔等类型,晶间孔孔径小,一般在 300 nm 左右(图 10c)。

有机质孔多为狭长缝状,发育于有机质与矿物基质边界,孔隙宽 50 ~ 200 nm^[19](图 8d)。

裂缝主要发育在泥质层界面处(图 8e),孔宽 200 ~ 1 000 nm,沿显微水平层理方向延伸或与水平层理小角度斜交,裂缝多被硅质或碳酸盐胶结物充填(图 8f)。

延长组泥页岩储层中纳米级孔隙主要有粘土矿物

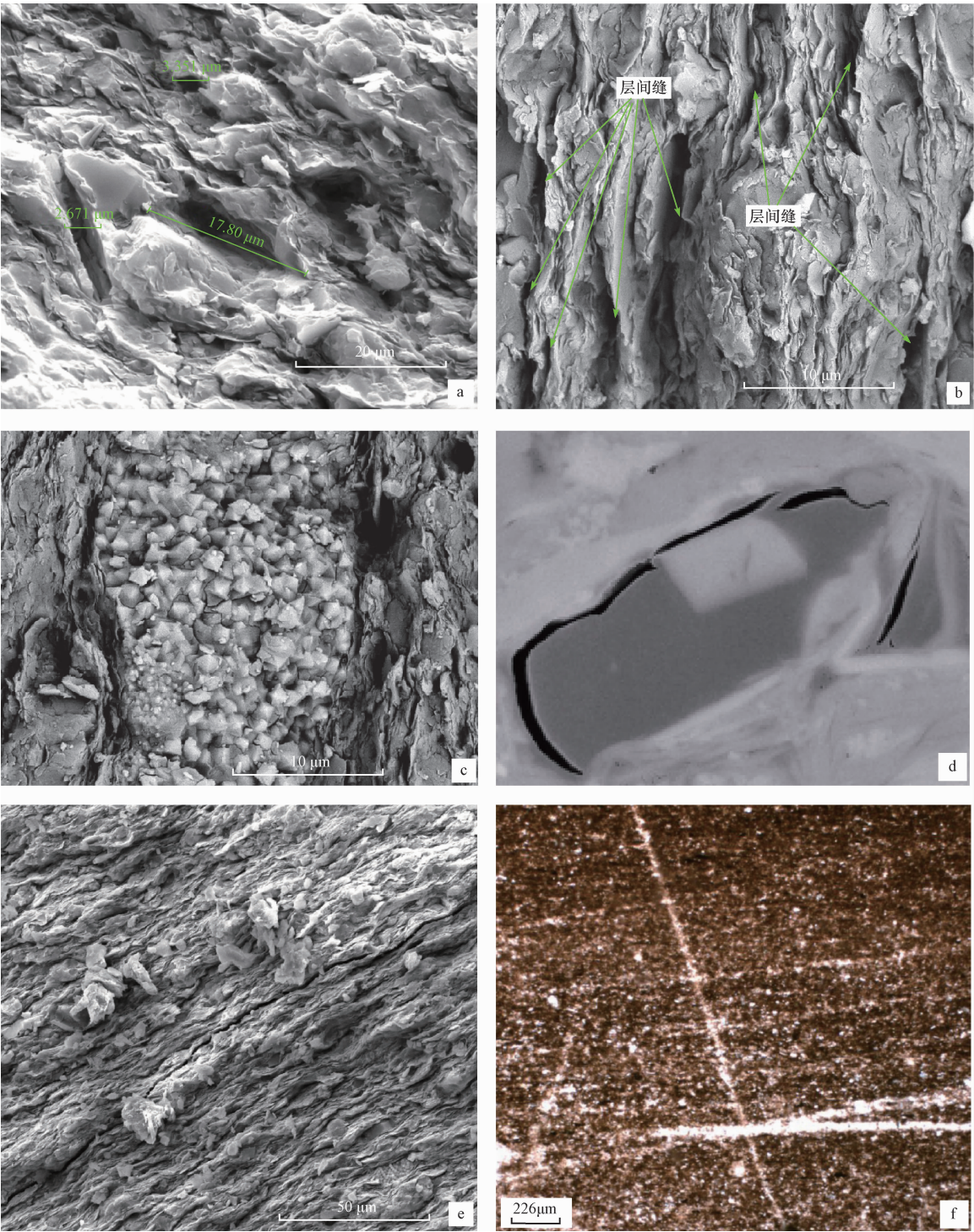


图 8 鄂尔多斯盆地延长组富有机质泥页岩孔隙类型

Fig. 8 Pore types of organic-rich shale in the Yanchang Formation of Ordos Basin

- a. 杏 6138 井,1079.56 m,长 7 段,粒间孔,SEM;b. 靖探 913 井,1 936.56 m,长 7 段,粒间孔,BSE(背散射扫描电镜);
c. 美泉 20 井,980.83 m,长 7 段,黄铁矿晶间孔,BSE;d. 白 406 井,1 975.30 m,长 7 段,有机质孔^[19];
e. 永 860 井,1 849.91 m,长 7 段,裂缝顺泥质纹层发育,SEM;f. 永 860 井,1 850.26 m,长 7 段,微裂缝被硅质充填,单偏光

的晶间孔、黄铁矿晶间孔及有机质孔。

延长组泥页岩目前处于中成岩 A 期,有机质演化形成的酸性流体促进了长石和碳酸盐胶结物等不稳定矿物的溶解,有利于形成溶蚀孔隙。

延长组干酪根类型以 I - II₁ 型为主,R₀ 主要分布在 0.50% ~ 1.14%,仍处于生油窗,热演化程度较

低,总体不利于有机质孔的形成。根据目前中生界现有分析数据表明,孔隙度与有机碳含量相关性不明显,略呈负相关(图 9),延长组泥页岩以粒内孔和粒间孔为主,有机质孔不是主要的孔隙类型。这一结论与 Jarvie^[20] 对 Montney 页岩和 Harris 等.^[21] 对 Muskwa 页岩的研究结果相似。

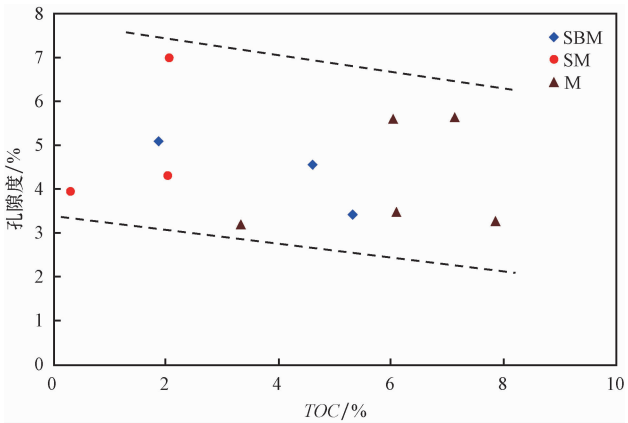


图9 鄂尔多斯盆地延长组泥页岩 TOC 与孔隙度交会图
Fig.9 Scatter diagram of TOC vs. porosity in Ordos Basin

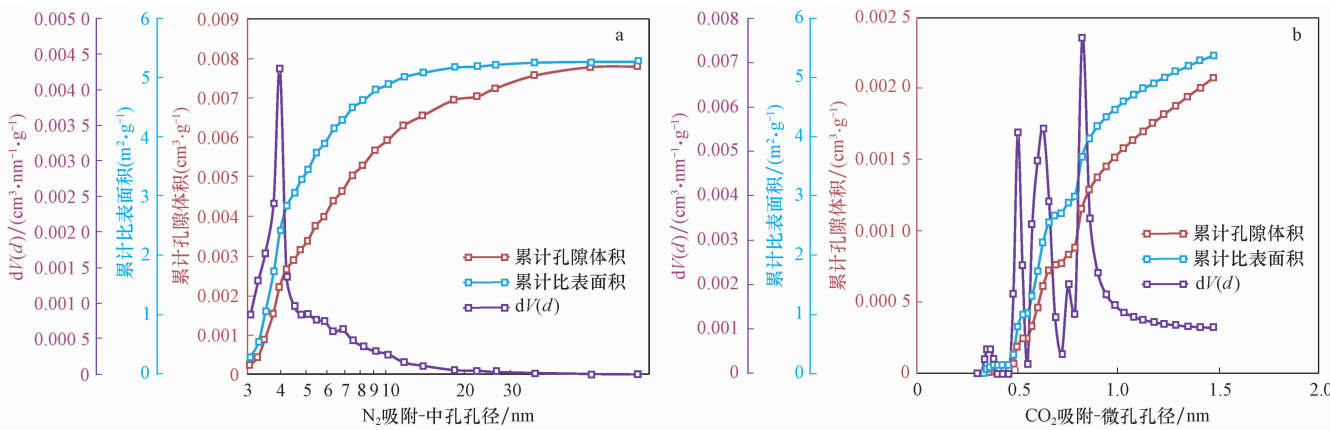


图10 鄂尔多斯盆地延长组泥页岩储层孔隙结构特征
Fig.10 Features of pore structures of shale reservoirs in the Yanchang Formation of Ordos Basin

和 N₂ 吸附实验测试结果开展纳米孔的微孔 (<2 nm) 和中孔 (2~50 nm) 的特征研究。

孔径分布、孔容和比表面积是分析页岩储层孔隙特征的有效手段。根据低温 CO₂ 和 N₂ 吸附实验结果编制了孔径分布特征图(图 10)。以累计孔隙体积、累计比表面积和孔隙体积随孔径的变化率[$dV(d)$]作纵坐标,以孔径作横坐标。微孔孔径主要集中在 0.4~1 nm,中孔孔径主要集中在 3~8 nm。总体上中孔对总体积的贡献大于微孔的贡献,而两者具有相近的比表面积(图 10)。

高孔隙度的样品中孔和宏孔的贡献较大,而比表面积较小;随着孔隙度降低,微孔的贡献逐渐增高,比表面积增大^[4,14],而微孔主要发育在有机质孔中。延长组以矿物基质孔为主,有机质孔不占主要地位,与有机质孔有关的微孔对总孔隙体积和比表面的贡献较少。

7 结论

1) 根据砂质含量,将延长组富有机质泥页岩分为泥岩、含粉砂泥岩和粉砂质泥岩。再结合显微构造,将上述 3 种岩相进一步分为 8 种类型,泥岩岩相的有机

6 孔隙特征

Nelson 的研究成果表明,页岩储层的孔喉直径在 0.1~0.005 μm^[22]。绝大多数页岩储层的孔隙直径小于 1 μm^[6]。Chalmers 等建议使用 IUPCU(国际纯化学与应用化学联合会)的分级标准,将孔隙类型分为宏孔(>50 nm)、中(介)孔(2~50 nm)和微孔(<2 nm)^[24]。邹才能等根据孔喉半径大小,将孔隙类型分为毫米级(>1 mm)、微米级(1 μm~1 mm)和纳米级(<1 μm)3 种孔隙类型^[23]。本次研究过程中,将孔径在 1 μm 以下的孔隙称为纳米孔,根据低温 CO₂

碳含量最高。

2) 延长组富有机质泥页岩粘土矿物含量高,以伊利石和伊蒙混层居多。成岩作用类型主要包括压实作用、胶结作用和溶蚀作用。塑性矿物含量高,成岩作用较弱,可能不利于储层的改造。

4) 孔隙类型包括粒间孔、粒内孔、有机质孔和裂缝,前两种孔隙类型是延长组泥页岩主要的孔隙类型。纳米级孔隙的主要孔隙类型有粘土矿物的晶间孔、黄铁矿晶间孔及有机质孔。

5) 碎屑颗粒含量高,有利于孔隙的保存;粘土矿物与孔隙度呈正相关,可能与粘土矿物中发育较多的微米级和纳米级孔隙有关。

6) 纳米级孔隙中,中孔对总体积的贡献大于微孔的贡献,而两者具有相近的比表面积,中孔对页岩气赋存的贡献作用更大。

参 考 文 献

[1] Bowker K A. Barnett shale gas production, Fort Worth Basin: issues and discussion[J]. AAPG Bulletin,2007,91(4):523-533.
[2] 蒋裕强,董大忠,漆麟,等. 页岩气储层的基本特征及其评价[J]. 天然气工业,30(10):7-12.

- Jiang Yuqiang, Dong Dazhong, Qi Lin, et al. Basic features and evaluation of shale gas reservoirs [J]. *Natural Gas Industry*, 30 (10): 7–12.
- [3] 王社教, 杨涛, 张国生, 等. 页岩气主要富集因素与核心区选择及评价[J]. *中国工程科学*, 14 (6): 94–100.
- Wang Shejiao, Yang Tao, Zhang Guosheng, et al. Shale gas enrichment factors and the selection and evaluation of the core area [J]. *Engineering Sciences*, 14 (6): 94–100.
- [4] Chalmers G R, Bustin R M, Power I M. Characterization of gas shale pore systems by porosimetry, pycnometry, surface area, and field emission scanning electron microscopy/transmission electron microscopy image analyses: examples from the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus, and Doig units [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96 (6): 1099–1119.
- [5] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the mississippian Barnett Shale [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79: 848–861.
- [6] 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.
- [7] 李娟, 于炳松, 张金川, 等. 黔北地区下寒武统黑色页岩储层特征及其影响因素[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33 (3): 364–374.
- Li Juan, Yu Bingsong, Zhang Jinchuan, et al. Reservoir characteristics and their influence factors of the Lower Cambrian dark shale in northern Guizhou [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33 (3): 364–374.
- [8] 谢忱, 张金川, 李玉喜, 等. 渝东南渝科1井下寒武统富有机质页岩发育特征与含气量[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34 (1): 11–15.
- Xie Chen, Zhang Jinchuan, Li Yuxi, et al. Characteristics and gas content of the Lower Cambrian dark shale in Well Yuke 1, Southeast Chongqing [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34 (1): 11–15.
- [9] 杨华, 张文正. 论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用: 地质地球化学特征[J]. *地球化学*, 2005, 34 (2): 147–154.
- Yang Hua, Zhang Wenzheng. Leading effect of the Seventh Member high-quality source rock of Yanchang Formation in Ordos Basin during the enrichment of low-penetrating oil-gas accumulation: geology and geochemistry [J]. *Geochimica*, 2005, 34 (2): 147–154.
- [10] 张文正, 杨华, 李善鹏. 鄂尔多斯盆地长₇湖相优质烃源岩成藏意义[J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35 (5): 557–568.
- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Li Shanpeng. Hydrocarbon accumulation significance of Chang₇ high-quality lacustrine source rocks of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35 (5): 557–568.
- [11] 徐士林, 包书景. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组页岩气形成条件及有利发育区预测[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20 (3): 460–465.
- Xu Shilin, Bao Shujing. Preliminary analysis of shale gas resource potential and favorable areas in Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20 (3): 460–465.
- [12] 赵靖舟. 鄂尔多斯盆地页岩气藏形成的基本地质条件——六大有利因素呼吁加快鄂尔多斯盆地页岩气资源勘查[Z]. 页岩气国际研讨会, 2011.
- Zhao Jingzhou. Geological conditions of shale gas in the Ordos Basin: accelerating the speed of shale gas prospecting is needed because of 6 advantages [Z]. *International Symposium on Shale Gas*, 2011.
- [13] 王社教, 李登华, 李建忠, 等. 鄂尔多斯盆地页岩气勘探潜力分析[J]. *天然气工业*, 2011, 31 (12): 40–46.
- Wang Shejiao, Li Denghua, Li Jianzhong, et al. Exploration potential of shale gas in the Ordos Basin [J]. *Nature Gas Industry*, 2011, 31 (12): 40–46.
- [14] Chalmers G R L, Bustin R M. On the effects of petrographic composition on coalbed methane sorption [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 69 (4): 288–304.
- [15] Ross D J K, Bustin R M. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26 (6): 916–927.
- [16] Strapoć D, Mastalerz M, Schimmelmann A, et al. Geochemical constraints on the origin and volume of gas in the New Albany Shale (Devonian-Mississippian), eastern Illinois Basin [J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94 (11): 1713–1740.
- [17] 吉利明, 邱军利, 夏燕青, 等. 常见黏土矿物电镜扫描微孔隙特征与甲烷吸附性[J]. *石油学报*, 2012, 33 (2): 249–256.
- Ji Liming, Qiu Junli, Xia Yanqing, et al. Micro-pore characteristics and methane adsorption properties of common clay minerals by electron microscope scanning [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33 (2): 249–256.
- [18] 吉利明, 邱军利, 张同伟, 等. 泥页岩主要黏土矿物组分甲烷吸附实验[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2012, 37 (5): 1043–1050.
- Ji Liming, Qiu Junli, Zhang Tongwei, et al. Experiments on methane adsorption of common clay minerals in shale [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2012, 37 (5): 1043–1050.
- [19] 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 and Development*, 2013, 40 (1): 14–26.
- [20] Jarvie D. Shale resource systems for oil and gas: part 1—shale gas resource systems [C] // Breyer J A. *Shale reservoirs—giant resources for the 21st century*. AAPG Memoir, 1997: 69–87.
- [21] Harris N B, Dong T. Porosity and pore sizes in the Horn River Shale [EB]. <http://www.empr.gov.bc.ca/OG/oilandgas/petroleumgeology/UnconventionalGas/Documents/N%20Harris.pdf>, 2012.
- [22] Nelson P H. Pore-throat sizes in sandstones, tight sandstones, and shales [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93 (3): 329–340.
- [23] Chalmers G R, Bustin R M, Power I M. A pore by any other name would be as small: the importance of meso- and microporosity in shale gas capacity [Z]. *AAPG Search and Discovery Article*, 2009.
- [24] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. *岩石学报*, 2011, 27 (6): 1857–1864.
- Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. First discovery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27 (6): 1857–1864.