

doi: 10.12029/gc20160616

郝兆栋, 田忠斌, 唐书恒. 鄂尔多斯盆地东缘海陆过渡相页岩气储层孔隙特征及影响因素[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 2059–2069.

Xi Zhaodong Tian Zhongbin Tang Shuheng. Characteristics and main controlling factors of shale gas reservoirs in transitional facies on the eastern margin of Ordos Basin[J]. Geology in China, 2016, 43(6): 2059–2069(in Chinese with English abstract).

鄂尔多斯盆地东缘海陆过渡相页岩气储层孔隙特征 及影响因素

郝兆栋^{1,2} 田忠斌³ 唐书恒^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京)海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京)页岩气资源勘查与战略评价国土资源部重点实验室, 北京 100083;

3. 山西省煤炭地质物探测绘院, 山西 晋中 030600)

摘要: 为了研究鄂尔多斯盆地石炭—二叠系海陆过渡相页岩气储层孔隙特征, 选取页 4 井、页 1 井和 DT803 井海陆过渡相页岩样品进行了扫描电镜、低温液氮吸附实验以及相关的地球化学实验, 分析了海陆过渡相页岩气储层的孔隙类型、特征及其影响因素。实验结果表明: 研究区页岩孔隙以粒间孔和有机质孔最为发育; 页岩孔形态以狭窄的平行板状为主, 孔隙微观孔径分布范围为 1~60 nm, 主孔径分布介于 1~6 nm 和 40~60 nm, 介孔为孔体积和比表面积的主要贡献者, 但微孔对比表面积的贡献不容忽视; 有机碳和黏土矿物含量是海陆过渡相页岩孔隙发育的主要影响因素, 脆性矿物对孔隙发育影响不明显。

关 键 字: 华北海陆过渡相页岩; 孔隙类型; 孔隙特征; 影响因素

中图分类号: TE122.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2016)06-2059-11

Characteristics and main controlling factors of shale gas reservoirs in transitional facies on the eastern margin of Ordos Basin

XI Zhao-dong^{1,2}, TIAN Zhong-bin³, TANG Shu-heng^{1,2}

(1. MOE Key Lab of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Enrichment Mechanism, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. MOLR Key Lab of Shale Gas Resources Survey and Strategic Evaluation, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Shanxi Coal Geological Geophysical Surveying and Mapping Institute, Jinzhong 030600, Shanxi, China)

Abstract: In order to study the pore characteristics of shale gas reservoirs on the eastern margin of Ordos Basin, the authors selected the shale in Ye-1, Ye-4 and DT803 wells for experiments including scanning electron microscope, nitrogen sorption-desorption experiments and related geochemical experiments. Meanwhile, the transitional facies shale pore types, characteristics and influencing factors of gas reservoir were analyzed. The results show that inter-granular pore and organic pores are most developed

收稿日期: 2015-11-25; 改回日期: 2016-02-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272176)资助。

作者简介: 郝兆栋, 男, 1991 年生, 硕士生, 非常规天然气地质专业; E-mail: 505271801@qq.com。

in the shale, the pore morphology of the shale is mainly in the narrow parallel-plate, the pore size distribution range is 1–60nm, and the main pore size distribution is between 1–6nm and 40–60nm. The mesopores make a major contribution to pores specific surface area and pore volume, the contribution of the micro-pores to the surface area cannot be ignored; the values of organic carbon and clay minerals are the main controlling factors of the pore development, and the influence of brittle minerals on the development of pores is not obvious.

Key words: the shale in transitional facies; pore type; pore characteristics; influence factors

About the first author: XI Zhao-dong, male, born in 1991, master candidate, majors in unconventional natural gas geology; E-mail: 505271801@qq.com.

Fund Support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41272176).

中国富有机质页岩按形成环境分为海相页岩、海陆过渡相页岩和陆相页岩3大类。泥页岩储层的主要研究内容包括孔隙类型、孔隙结构、发育特征及其影响因素。许多学者通过扫描电镜、氩离子抛光和低温液氮吸附等实验手段对中国南方的下寒武统、下志留统海相页岩孔隙进行了深入的研究^[1-3]。近年来,国内学者也针对海陆过渡相页岩的孔隙类型和微观特征进行了分析探讨,其中对页岩孔隙类型的划分多是基于孔隙成因;而对于影响页岩孔隙发育因素的认识也不尽相同^[4-6],一些研究认为TOC含量是主要影响因素,黏土矿物和无机矿物对页岩孔隙发育作用不显著;一些研究认为TOC含量、黏土矿物和无机矿物通过不同的方式共同控制着页岩孔隙的发育。在2012年完成的《全国页岩气资源潜力调查评价及有利区优选报告》中认为,我国上古生界海陆过渡相页岩气的资源量可达8.97万亿方,其中鄂尔多斯盆地及其周缘页岩气资源量达到2.7万亿方。因此在海陆过渡相页岩气的勘探开发上取得突破性的进展十分重要。

鄂尔多斯盆地是一个古生代地台及台缘拗陷与中生代台内拗陷叠合的大型多旋回克拉通盆地,其东缘北部为阴山古陆,南部为古中条山隆起。北部的阴山古陆为最主要的物源区,而南部的古中条山隆起仅在本溪组和太原组下部地层发育期为区内局部的物源供应区。受构造运动的影响,研究区的沉积演化受华北海的控制。晚古生代石炭纪—二叠纪地层是在奥陶系剥蚀面上发育的一套填平补齐的碎屑沉积,缺失下石炭统。研究区本溪组主要为泻湖、潮坪沉积,不同区域之间地层厚度差异较大。晚石炭世后期海侵范围扩大,形成一套障壁海岸与碳酸盐台地沉积体系,沉积物下部主

要由粉砂岩、细砂岩与灰色泥岩互层组成,往上渐变为黑色泥岩和煤层互层。早二叠世,受西伯利亚板块向南俯冲的影响,海水开始逐渐退出,山西组发育一套河流—三角洲的含煤岩系,厚度为30~60m。海陆过渡相页岩的沉积环境迥异,垂向上经历了多期海侵海退的沉积演化历程,其沉积环境与成岩演化与海相页岩相比具有自身的特点(图1)。本文以鄂尔多斯东缘石炭—二叠系海陆过渡相泥页岩为研究对象,通过扫描电镜观测划分页岩孔隙类型,利用低温液氮吸附实验分析页岩的孔径分布、比表面积和孔体积,结合页岩的物质组成和地化参数,综合揭示影响页岩孔隙发育的控制因素。

1 样品采集及实验测试

研究主要以石炭—二叠系海陆过渡相泥页岩为对象,选取页4井、DT803井和页1井的岩心进行扫描电镜观测、低温液氮吸附、有机碳含量、镜质体反射率和XRD全岩矿物分析实验(表1)。

扫描电镜实验是在捷克公司生产的TESCAN VEGA 3 LM扫描电子显微镜上进行的;页岩比表面积及孔径分布测定是在MK-ASAP 2020N型全自动比表面积及孔隙度分析仪上完成的,基于BET多分子层吸附理论计算页岩的比表面积,基于BJH模型计算页岩的孔径分布^[7-8]。根据国际理论和应用化学协会(IUPAC)的孔隙分类^[9],将页岩孔隙大小划分为微孔(粒径<2 nm)、介孔(粒径2~50 nm)和宏孔(粒径>50 nm)。

从表1可见,海陆过渡相页岩黏土矿物含量较高,均在50%以上,而石英含量偏低,平均32.6%,TOC含量介于1.62%~6.39%, R_o 介于1.24%~2.04%,实验样品均达到高成熟阶段, R_o 大致相近的

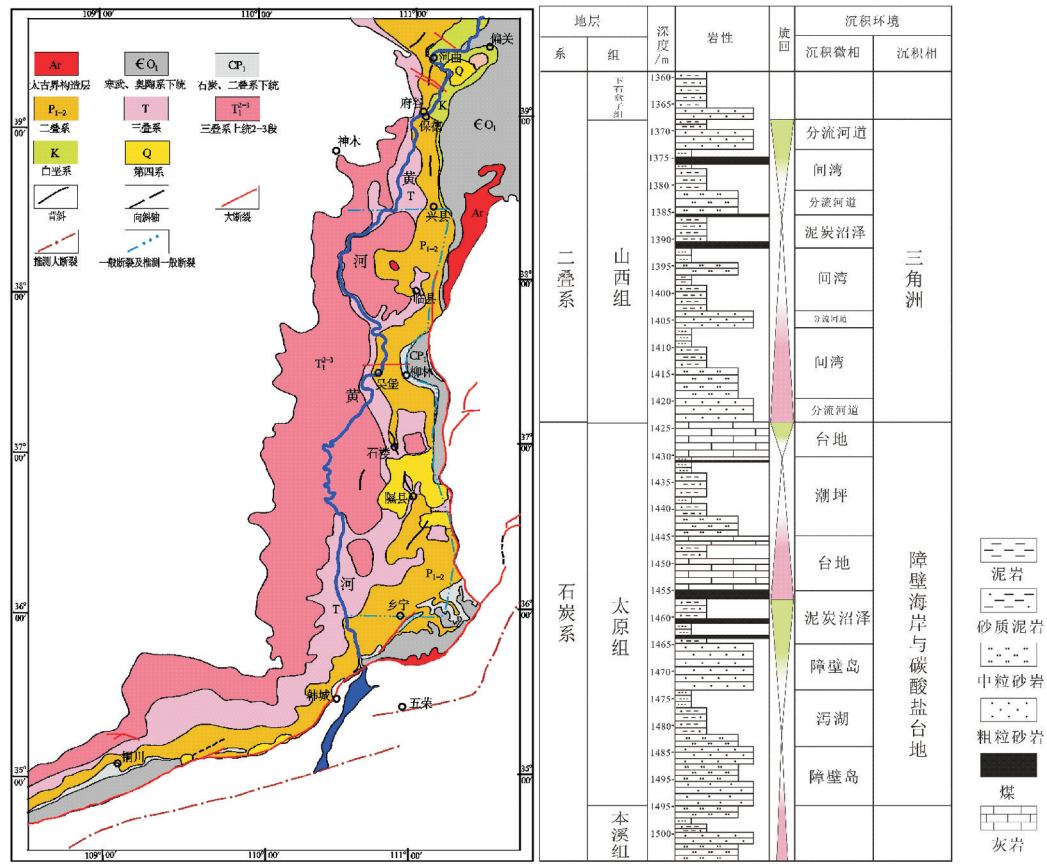


图1 鄂尔多斯盆地东缘区域地质及海陆过渡相地层综合柱状图

Fig.1 The location and tectonic units of the eastern margin of Ordos Basin and comprehensive columnar section of marine–continental transitional formation

表1 石炭—二叠纪海陆过渡相泥页岩样品信息
Table 1 The experimental sample information

井位	样品编号	层位	Ro/%	TOC/%	石英/%	黏土/%
DT803 井	WS2-1	山西组	1.24	2.17	39.7	53.5
	WS2-3	太原组	1.26	2.76	30.9	52.8
	WS3-2	太原组	1.41	1.62	39	55.5
	WS4-2	太原组	1.32	2.18	28.5	47.9
页 4 井	LL2-2	山西组	2.04	6.39	30.4	59.3
	LL2-3	山西组	1.98	4.18	20.3	72.6
	LL4-2	太原组	2.15	3.82	35.3	56.4
页 1 井	XX306	山西组	1.48	2.38	37.9	50.5
	XX309	太原组	1.39	4.66	35.7	53
	XX338	太原组	1.97	2.15	45.2	41.1

样品但 TOC 含量和矿物组成差异较大。

2 页岩孔隙形态特征及分类

学术界对页岩储层孔隙分类的争议较大,原因主要在于孔隙分类的原则和依据与适用性、简约性之间的矛盾,北美海相页岩的孔隙分类以 LOUCKS 的三分法最为经典,即粒间孔、粒内孔及有机孔。本文针对扫描电镜下的孔隙发育特征,根据孔隙发育位置以及孔隙成因将其划分为有机孔、无机孔和微裂缝,无机孔又划分为粒间孔、粒内孔和晶间孔(表2)。

2.1 无机孔

2.1.1 粒间孔

粒间孔通常发育于矿物颗粒接触处,其中主要

表2 过渡相页岩孔隙分类特征

Table 2 Characteristics of pore types of shale gas reservoirs in transitional facies

孔隙类型	孔径分布	特征
无机孔	粒间孔	纳米—微米级
	粒内孔	纳米级
	晶间孔	纳米级
有机孔	有机质孔	纳米级
微裂缝	微米—毫米级	

颗粒之间的孔隙，多发育于黏土矿物间
沉积原生孔隙或受溶蚀作用等改造
主要指黄铁矿晶体生长不紧密或后期成岩收缩作用而形成的孔隙
有机质生烃形成于有机质内部的孔隙
黏土矿物、有机质受成岩、构造等应力作用形成的孔裂隙

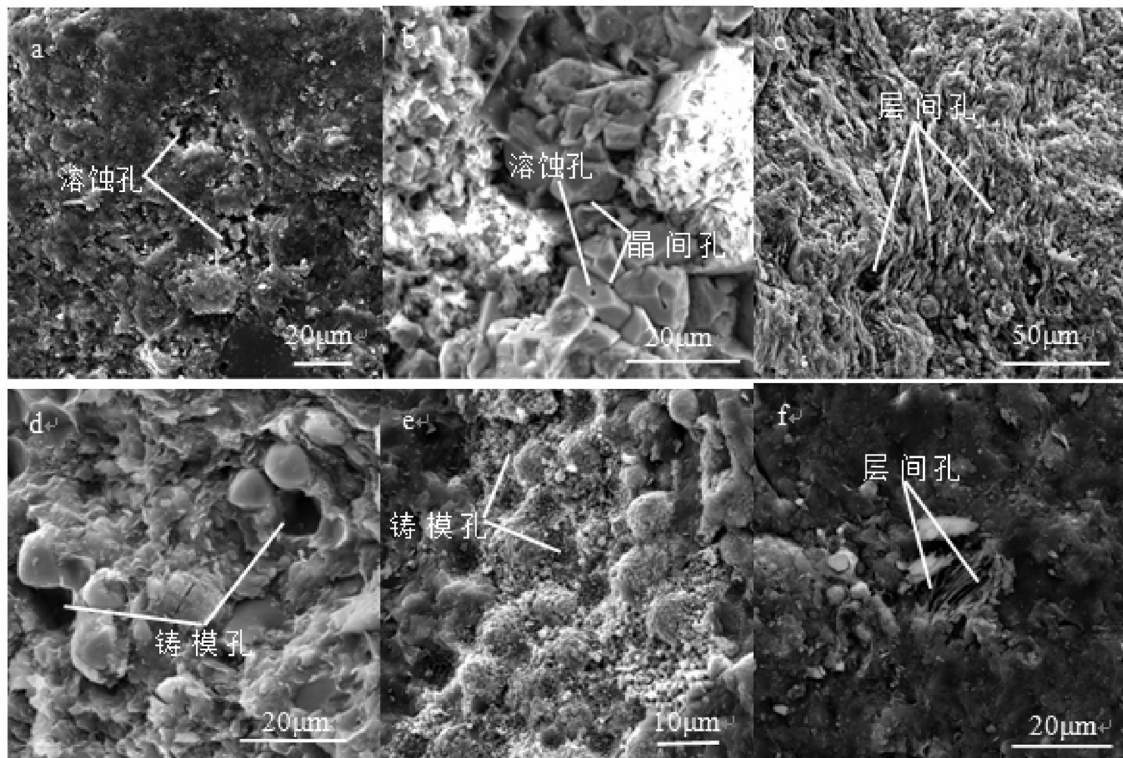


图2 页岩无机矿物孔赋存形态与特征

a—黏土矿物溶蚀孔,样品 LL2-2;b—石英颗粒晶间孔、溶蚀孔和石英黏土矿物粒间孔,样品 LL4-2;c—黏土矿物层间缝,样品 LL2-3; d—矿物铸模孔,WS2-1;e—黄铁矿晶间孔,样品 WS2-1;f—高岭石粒间孔,样品 WS2-3

Fig.2 Occurrence status and characteristics of nonorganic pores of the shale

a—Corrosion pores, LL2-2;b—Corrosion pores and pores between quartz and clay minerals, LL4-2;c—The channel between clay minerals, LL2-3; d—Mould pore,WS2-1; e—Intercrystalline solution pores,WS2-1;f—The pores between kaolinite,WS2-3

以片粒状黏土矿物为主(图2-c),其特点是发育集中,胶结复杂,分选差,孔形态多样,以多边形和拉长的长条形状为主,其中叠层状的高岭石粒间孔形态呈线性(图2-f)。石英与黏土矿物接触处形成的纳米级的粒间孔相对较少(图2-b),主要是由于脆性矿物含量少造成的。

2.1.2 粒内孔

粒内孔发育于颗粒内部,黏土矿物层中的粒内孔最为发育,其中以伊蒙混层为主,这可能是由于

蒙脱石或其他不稳定的矿物在沉积埋藏过程中转化而形成。其他矿物形成的粒内孔相对较少,其中在镜下见到的有黄铁矿铸模孔和石英、黏土矿物溶蚀孔(图2-a、b、d)。粒内孔可以为气体提供较大的赋存空间,同时也可与粒间孔一起组成孔隙网络,极大地提高页岩的渗流能力。

2.1.3 晶间孔

晶间孔是在环境稳定和介质条件适当情况下,矿物结晶形成的晶间微孔隙。页岩样品中以黄铁

矿晶间孔最为发育,黄铁矿多呈莓粒状晶簇出现(图2-e),形态为规则的立方体或五角十二面体,直径为200~400 nm。它们部分与有机质共生(图2-c),这些黄铁矿晶粒的形态和分布,对草莓体黄铁矿中纳米级的晶间孔隙起着决定性作用,它为页岩气提供了一定的储集空间。

2.2 有机质孔隙

有机质孔隙普遍存在,孔隙大小从几纳米到几百纳米不等,孔隙之间的连通性极好,具有这种纳米级孔隙的页岩通常具有极高的比表面积,能为气体吸附提供大量的吸附点位。有机质孔隙大多数为圆形、椭圆形,呈蜂窝状分布(图3-a),其中部分有机质孔隙被黏土矿物充填(图3-b)。在一些样品中有一块直径为几个微米的有机质颗粒可含有许多个纳米孔,但有的有机质却不发育孔隙,原因可能与不同有机质类型或成熟度有关。相较于无机孔中的溶蚀孔来说,发育于有机质孔隙中的溶蚀孔较多(图3-a、c)。

2.3 微裂缝

微裂缝在页岩气体的渗流中具有重要作用,是

连接微观孔隙与宏观裂缝的桥梁,其一般为微米级^[10]。实验中发现有机质颗粒和黏土矿物都可发育微裂缝,发育于有机质内部的微裂缝一般比较平直,裂隙较小,延伸不长,部分有机质微裂隙会被矿物充填(图3-f);矿物间微裂缝形态较多样(图3-d、e),其中图3-e中微裂缝可能是由于矿物基质脱水收缩而形成,密集发育,多成钝三角形状,孔径较大,连通性好。这些微裂缝与其他孔隙相连,组成裂缝网络-孔隙系统,为滞留在页岩中的部分油气提供了有效的储存空间。

3 低温液氮吸附实验对页岩孔隙的表征

过渡相页岩孔隙类型多样,结构复杂,以有机质孔和粒间孔最为发育。扫描电镜实验提供了大量的孔隙类型和孔隙大小的信息,但观察范围和结果具有一定的局限性,而低温液氮实验可以很好地对页岩中微观孔隙进行表征,定量的获取页岩的孔隙参数。

3.1 孔隙形态特征

根据实验测试得到典型样品的吸脱附曲线见

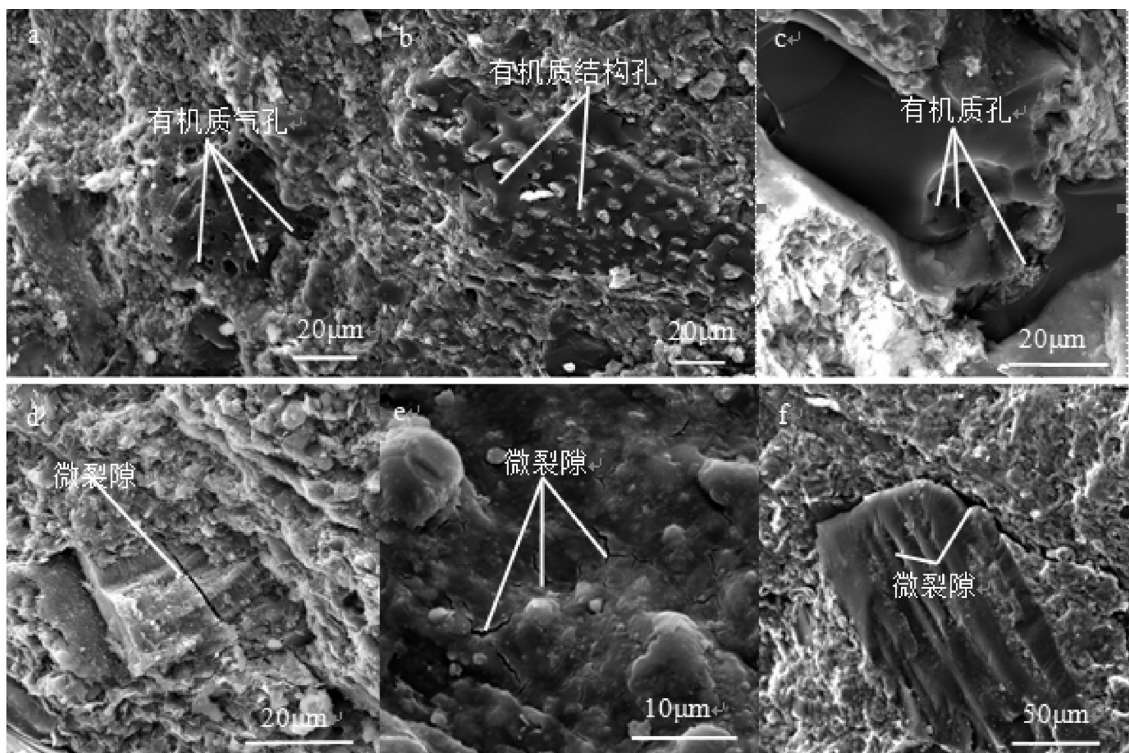


图3 页岩有机孔及微裂缝赋存形态与特征

Fig. 3 Occurrence status and characteristics of organic pores and micro-crack of the shale

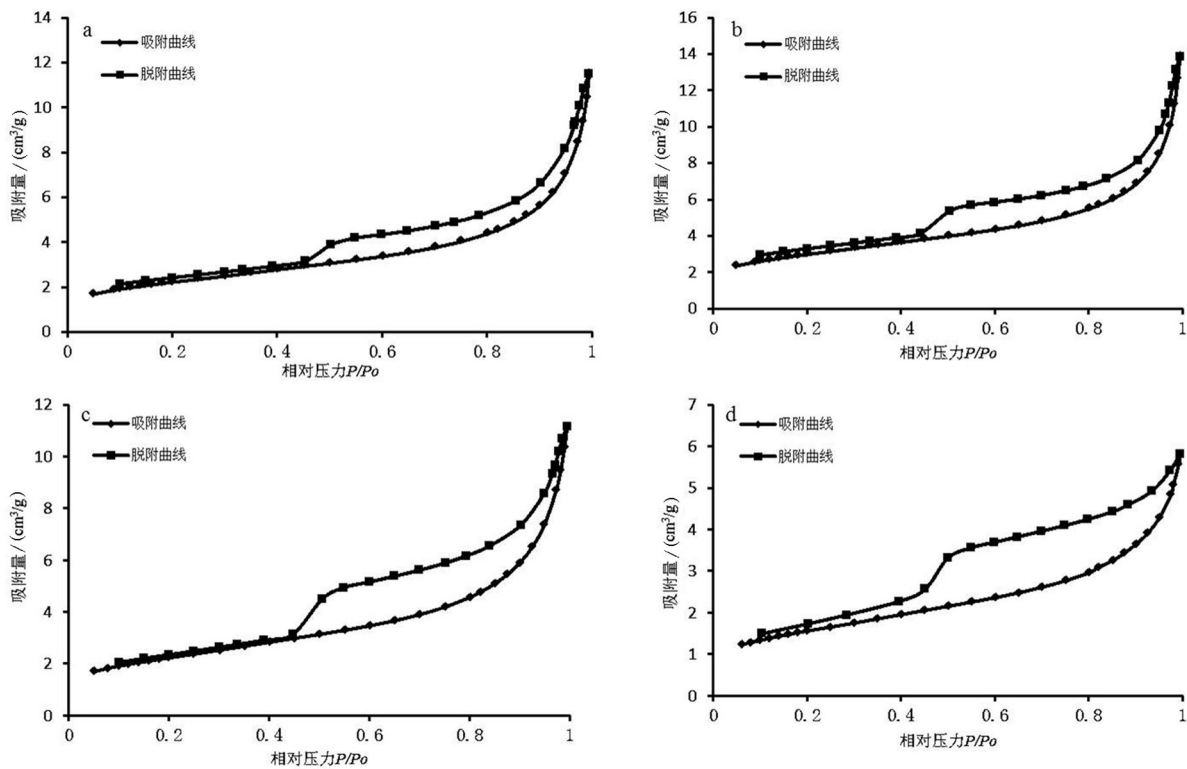


图4 典型页岩样品氮气吸 / 脱附曲线

Fig. 4 Adsorption and desorption curve of shale samples

图4,其中曲线整体呈反S型,属于典型的IV型等温线,进一步分析不同样品曲线形态上的差别^[11],可以将其大致分成两种类型。

图4-a、b吸附曲线在相对压力小于0.8时平缓上升,在接近于1.0时急剧上升,但未呈现出饱和吸附的现象,表明样品在吸附氮气的过程中出现了毛细凝聚的现象。脱附曲线在相对压力为0.5左右时出现拐点,但拐点不明显,形成的滞后环与H3型相当,相对压力小于0.5时,曲线近乎重合,反映出此类页岩样品孔隙以狭窄的平行板孔为主,也发育一端封闭的不透气孔。

图4-c、d吸附曲线与上述样品类似,脱附曲线在相对压力为0.5左右时出现拐点,拐点明显且吸脱附曲线分离较大,在相对压力小于0.4时,吸脱附曲线也并未完全重合,此类页岩样品以开放孔隙为主,主要为两端开口的锥形孔和狭窄的平行板孔,还包括一定的墨水瓶孔。

通过样品的吸脱附曲线的分析,表明华北过渡相页岩孔隙多以开放型孔隙为主,形态主要为狭窄

的平行板孔,此外一端封闭的孔隙和墨水瓶孔也有分布。进一步分析吸脱附曲线并结合页岩矿物组成可见,狭窄的平行板孔主要与有机质微裂缝、黏土矿物粒间孔有关,墨水瓶型孔以溶蚀孔居多,开放型孔隙与黄铁矿的晶间孔存在一定的相关性。

3.2 孔径分布特征

低温液氮吸附实验对50 nm以下的孔隙孔径具有极好的表征作用^[12],典型样品的孔径分布曲线见图5。纵坐标为 $dV/d\log D$,表示总孔容对孔径对数的微分, $dV/d\log D$ 不仅能很好地描述微孔和介孔,而且可以很好地表征宏孔的特点^[13]。从图5看出样品的孔径分布可分为2种类型。

类型一的页岩吸附量较大,孔隙发育较好。孔径分布曲线存在2处峰值,主要孔径范围分布于3~6 nm和40~60 nm,其余孔径孔隙也都有发育;类型二的样品吸附量较小,存在多峰值现象,主要以微孔和介孔为主,宏孔含量比类型一少得多。主要孔径分布范围为1~6 nm和10 nm左右。

孔径分布特征对于页岩气的储集和渗流方式

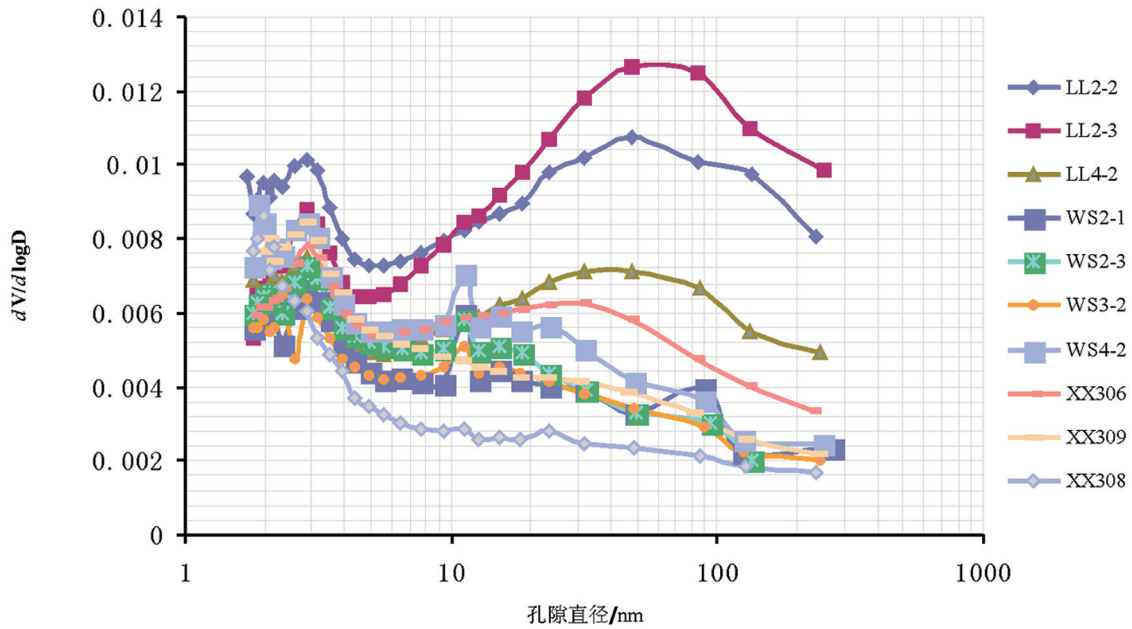


图5 孔径分布曲线

Fig.5 Distribution curve of pore size

有重要的影响,Ross & Bustin^[14]在研究密西西比泥盆系页岩时发现,甲烷吸附气量与微孔含量存在很好的正相关关系。本文测试的过渡相页岩样品都呈现出多孔径分布的特征,其中样品LL2-2和LL2-3的甲烷吸附气量可能高于其他样品,因为它们的微孔含量相对更高。进一步的分析,复杂的孔径分布特征可能会使得气体以多种方式运移,在纳米级孔隙中可能以Knudsen扩散和滑移流为主,在微米级孔隙中可能以达西流运移。

3.3 孔隙比表面积和体积

实验样品的BET比表面积介于5.05~10.47 m²/g,平均为7.13 m²/g,BJH总孔体积为0.00703~0.023

cm³/g,平均为0.0127 cm³/g。相比于南方海相页岩^[15],华北海陆过渡相页岩样品的比表面积偏低,依据实验测试结果分别得到不同孔径对应的孔体积与比表面积比例图(图6)。观察可知,介孔对比表面积和孔隙体积的贡献率都达到了60%以上;微孔体积平均仅占3.72%,但提供了14.21%的比表面积;大孔体积平均为24.61%,却只提供了4.73%的比表面积,这表明介孔贡献了主要的孔体积及比表面积,微孔所提供的比表面积不容忽视。

低温液氮吸附实验测试孔径范围为0.35~300 nm,但对于直径0.35 nm左右的微孔测试结果不准确(相比于CO₂吸附实验),这一部分微孔数据的缺失会

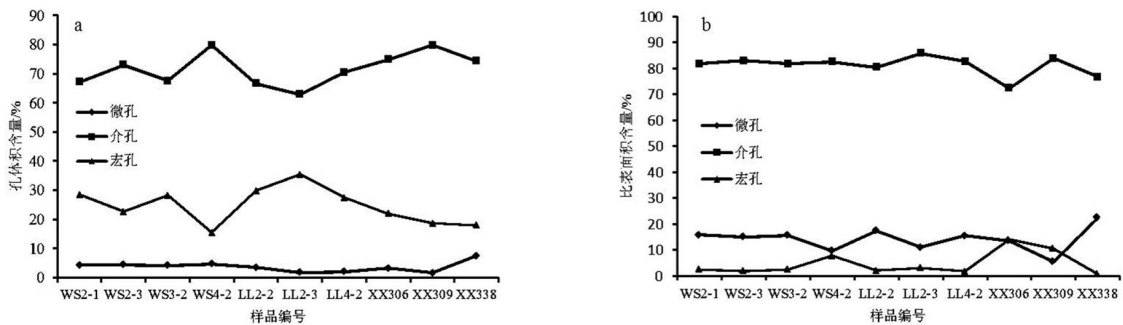


图6 页岩样品不同孔径比表面积、孔体积的百分含量分布

Fig. 6 Percentage distribution of total pore volume and BET surface area of the shale sample

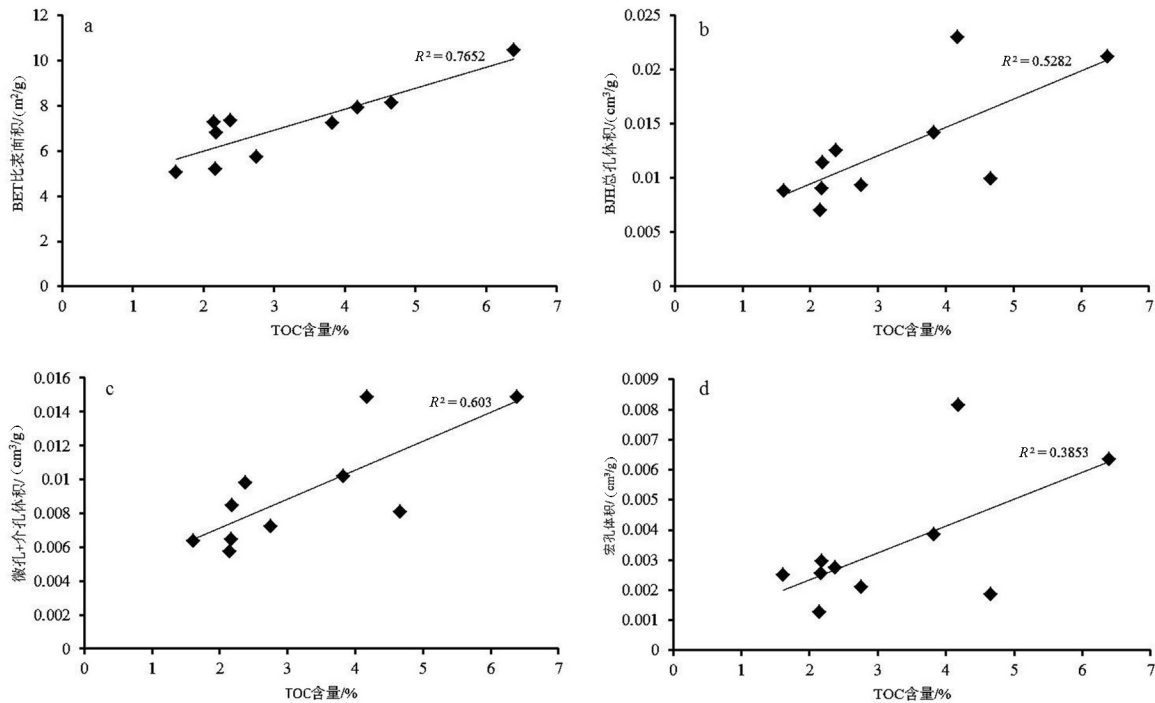


图7 页岩孔隙与TOC含量关系
Fig. 7 Relationship between shale pore and TOC content

导致微孔的比表面积和体积偏小,突出介孔和宏孔的比例,但是由于甲烷分子的动力学直径为0.38 nm,页岩中小于0.38 nm的微孔对页岩孔隙系统意义不大,因此这一部分孔隙对本次研究影响较小。

4 孔隙发育影响因素

4.1 有机质含量

泥页岩有机碳含量是衡量烃源岩生烃潜力的重要参数,也是有机孔发育的重要控制因素^[16]。通过图7可见,TOC含量与页岩BET比表面积和总孔隙体积都有很好的正相关性,TOC含量越高,页岩孔体积和比表面积越大,表明了有机质含量是控制页岩孔隙发育的主要因素之一。图7-c、d反映出页岩微孔和介孔含量与TOC含量呈很好的正相关性,虽然TOC含量和宏孔体积也呈现一定的相关关系,但其相关性($R^2=0.38$)明显弱于TOC含量与介孔和微孔体积的关系($R^2=0.6$),这表明TOC主要通过微孔、介孔来影响页岩的孔隙发育。

实验样品成熟度均达到高-过成熟阶段,有机质碎屑发生脱氢、生气反应,会引起有机质孔隙含量的升高。有机质孔隙具有复杂的内部结构,孔隙

表面粗糙,内部形态多样,这种结构大大增加了页岩的比表面积。此外,在扫描电镜下发现许多与有机质有着紧密联系的大孔隙和微裂缝(图3-a,b,f),有机碳含量高的页岩脆性较强,抗张强度降低,容易在外力作用下形成天然裂缝和诱导裂缝。因此,有机碳含量越高,微裂缝和宏孔含量越高,页岩孔体积就越大。

4.2 有机质成熟度 R_o

本次研究所测试样品的成熟度集中于成熟-高成熟阶段,个别样品达到过成熟阶段,平均为1.6%,相较于南方海相页岩成熟度偏低。观察图8可以看出, R_o 与页岩BET比表面积和总孔隙体积存在一定的相关性,随着有机质成熟度的增加,过渡相页岩的比表面积和总孔体积都增大,表明成熟度越高的页岩,孔隙越发育。 R_o 与微孔和介孔含量存在正相关关系,与宏孔体积没有明显的相关性,这说明,成熟度越高,微孔和介孔越发育。前人对 R_o 与孔隙结构的关系进行了大量深入的研究, R_o 对孔隙发育的影响十分复杂,一般不是简单的线性关系。本文得到的 R_o 与孔隙结构参数的线性相关性相对较显著,其原因可能是,所测试10个样品的成熟度变化范围

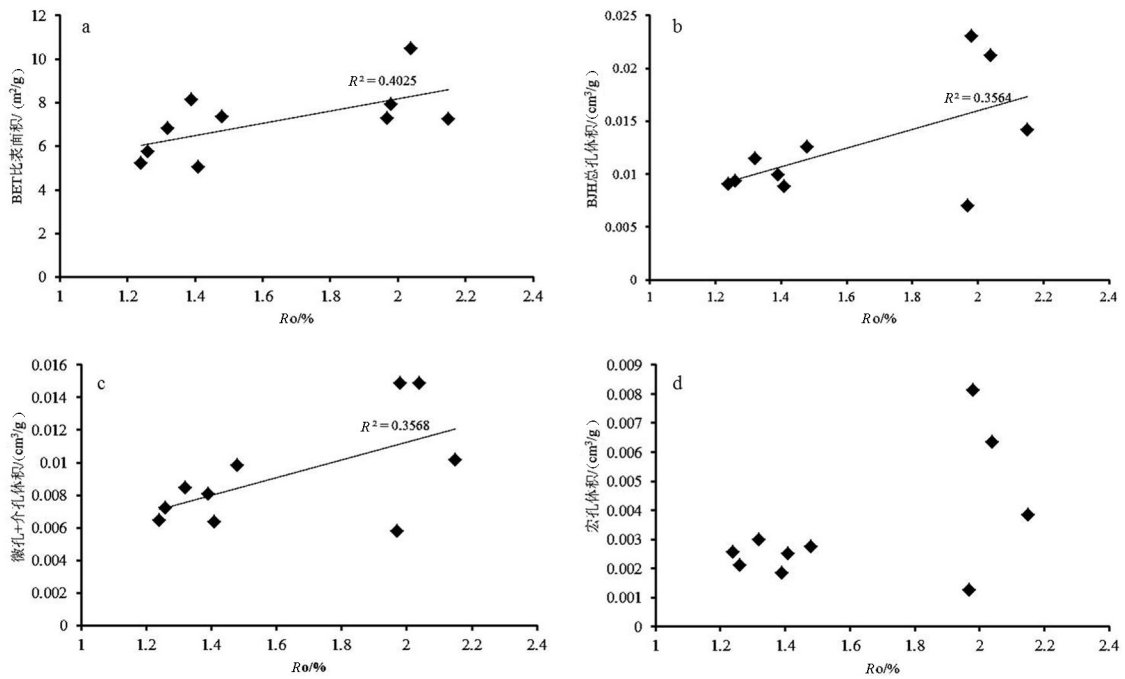


图8 页岩孔隙与 R_o 关系
Fig. 8 Relationship between shale pore and R_o

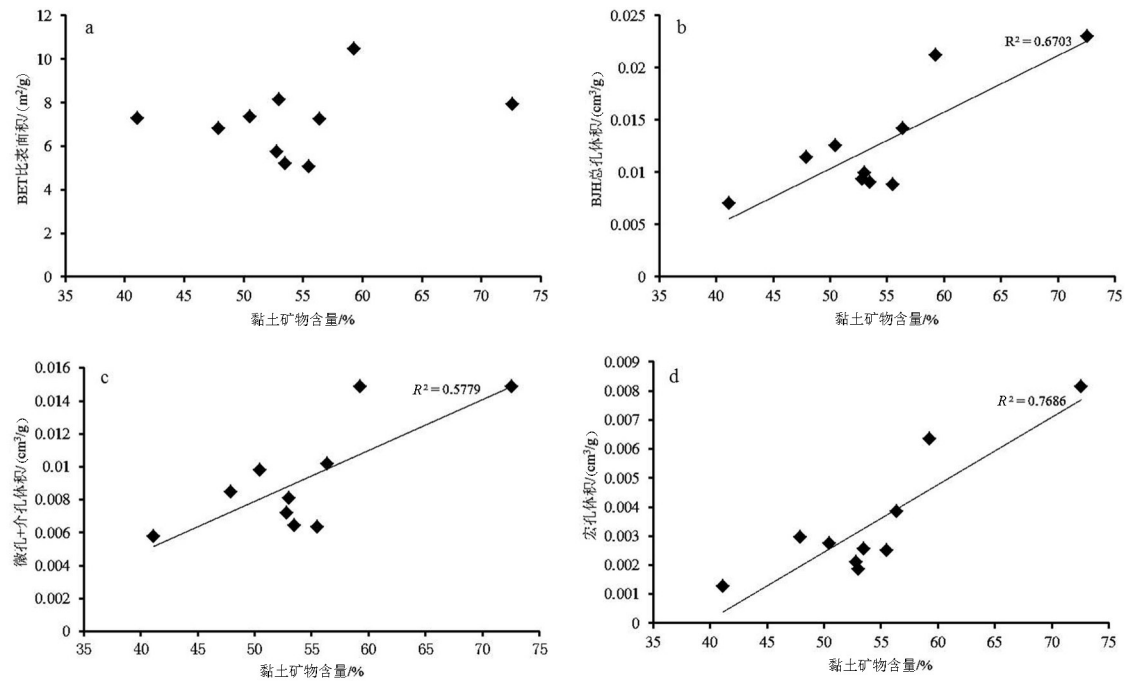


图9 页岩孔隙与黏土矿物含量关系
Fig. 9 Relationship between shale pore and clay mineral content

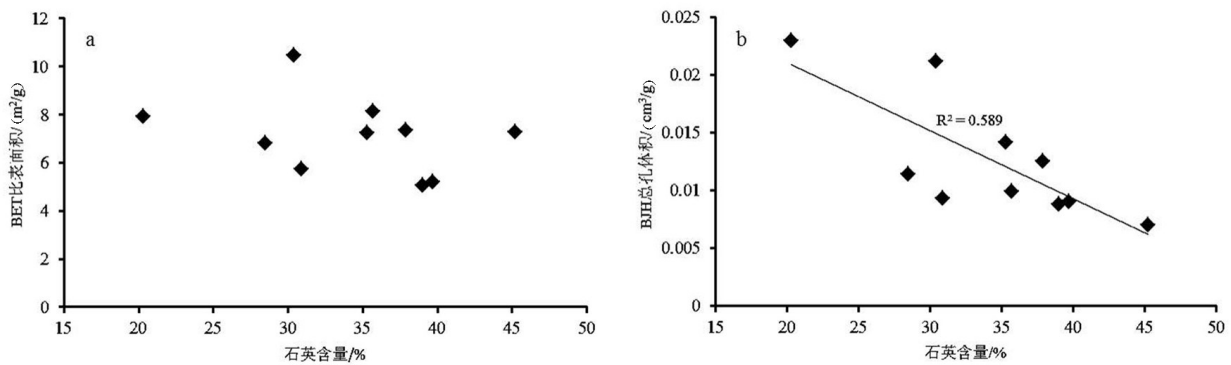


图10 页岩孔隙与石英含量关系

Fig. 10 Relationship between shale pore and quartz content

小(1.24%~2.15%),缺少低成熟阶段和过成熟阶段的样品,因此在一定成熟度范围内得到了此结论。

4.3 矿物含量

观察图9可知,黏土矿物含量与页岩比表面积相关性不明显,与孔隙体积有较好的正相关关系。虽然黏土矿物粒度细,具有较大的比表面积,但不同黏土矿物晶层及孔隙结构不同,孔比表面积也存在很大的差别,蒙脱石具有的孔比表面积为800 cm²/g,伊利石30 cm²/g、高岭石15 cm²/g^[17]。实验样品中黏土矿物类型主要为伊蒙混层和高岭石,因此所提供的比表面积很有限。黏土矿物对孔体积贡献较大的原因在于其晶形大多呈片状、层状,发育较多的粒间孔,而粒间孔相较于粒内孔、有机质孔隙孔径较大,因此黏土矿物对宏孔含量影响较大。图9-c和9-d也反映出黏土矿物含量与宏孔体积的相关性要好于微孔和介孔体积,虽然黏土晶粒间发育纳米级孔隙,增加微-介孔的含量,但细粒的黏土矿物也会充填部分微小孔隙,堵塞孔喉,减少部分微孔含量。此外,在扫描电镜下观察到大量的黏土矿物粒间孔,孔径为纳米到微米级,而微孔主要源自于有机质孔隙。

过渡相页岩富集黏土矿物而贫脆性矿物,脆性矿物对于页岩孔隙发育影响不显著,通过图10可知石英含量与孔比表面积无明显相关性,与孔体积呈负相关性。实验样品中脆性矿物以石英为主,平均为32.6%,长石和碳酸盐类矿物含量很低,因此溶蚀孔和溶蚀裂缝发育较少;此外石英自身比表面积仅为20 cm²/g,对孔比表面积贡献也较少。虽然理论上石英属于刚性矿物,石英颗粒可构成一个相对刚

性格架,增强页岩的抗压实能力,有利于页岩中大孔和裂缝的保存,但实验测试主要为300 nm以内孔隙,且镜下见到的微裂缝主要发育于有机质和黏土矿物中,石英晶间孔和溶蚀孔几乎不发育。

5 结 论

(1)通过扫描电镜观察将鄂尔多斯东缘海陆过渡相页岩孔隙划分为粒间孔、粒内孔和晶间孔等无机孔,以及有机质孔和微裂缝,过渡相页岩以黏土矿物粒间孔和有机质孔隙最为发育。

(2)低温液氮吸附实验表明鄂尔多斯东缘海陆过渡相页岩孔隙结构复杂,形态多样,以开放型孔隙为主,包括狭窄的平行板孔和锥形孔,也部分发育墨水瓶孔和一端封闭的不透气孔。华北海陆过渡相页岩孔径分布范围为1~60 nm,主孔径分布介于1~6 nm和40~60 nm。介孔对孔体积和孔比表面积贡献最大,微孔以3.72%的孔体积含量贡献了14.21%的比表面积,微孔对比表面积的贡献不容忽视。

(3)鄂尔多斯东缘海陆过渡相泥页岩中有机质是微孔发育的物质基础,TOC含量越高,页岩比表面积和孔体积随之增大,其中对孔比表面积的贡献尤为显著;在一定成熟度范围内,Ro越高,页岩比表面积和总孔体积越大;黏土矿物通过影响宏孔和介孔的含量控制页岩孔体积,起主要的控制作用,脆性矿物含量对孔隙发育的影响不明显。

参考文献(References):

- [1] Wang Y, Zhu Y, Chen S, et al. Characteristics of the nanoscale pore structure in northwestern Hunan shale gas reservoirs using field

- emission scanning electron microscopy, high-pressure mercury intrusion, and gas adsorption[J]. *Energy & Fuels*, 2014, 28(2): 945–955.
- [2] Huang J, Zou C, Dong D, et al. Geochemical and reservoir characteristics of the Upper Triassic continental shale in the Sichuan Basin, China[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2015, 33(3): 375–395.
- [3] 伍坤宇, 张廷山, 杨洋, 等. 昭通示范区黄金坝气田五峰—龙马溪组页岩气储层地质特征[J]. *中国地质*, 2016, 43(1): 275–287.
Wu Kunyu, Zhang Tingshan, Yang Yang, et al. Geological characteristics of Wufeng–Longmaxi shale–gas reservoir in the Huangjinba gas field, Zhaotong National Shale Gas Demonstration Area[J]. *Geology in China*, 2016, 43(1): 275–287(in Chinese with English abstract).
- [4] 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.
Xue Bing, Zhang Jinchuan, Tang Xuan, et al. Characteristics of microscopic pore and gas accumulation shale in Longmaxi Formation, northwest Guizhou[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(2): 138–149(in Chinese with English abstract).
- [5] 顾志翔, 彭勇民, 何幼斌, 等. 湘中坳陷二叠系海陆过渡相页岩气地质条件[J]. *中国地质*, 2015, 42(1): 288–299.
Gu Zhixiang, Peng Yongmin, He Youbin, et al. Geological conditions of Permian sea–land transitional facies shale gas in the Xiangzhong depression[J]. *Geology in China*, 2015, 42(1): 288–299(in Chinese with English abstract).
- [6] 唐玄, 张金川, 丁文龙, 等. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界海陆过渡相页岩储集性与含气性[J]. *地学前缘*, 2016, 23(2): 147–157.
Tang Xuan, Zhang Jinchuan, Ding Wenlong, et al. The reservoir property of the Upper Paleozoic marine–continental transitional shale and its gas–bearing capacity in the Southeastern Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(2): 147–157(in Chinese with English abstract).
- [7] 严继民, 张启元. 吸附与凝聚: 固体的表面与孔[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
Yan Jimin, Zhang Qiyuan. Adsorption and Condensation: the Surface and Pore of Solid[M]. Beijing: Science Press, 1979 (in Chinese with English abstract).
- [8] Brunauer S, Emmett P H, Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1938, 60(2): 309–319.
- [9] Rouquerol J, Avnir D, Fairbridge C W, et al. Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report) [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1994, 66(8): 1739–1758.
- [10] 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 pores structures in shales through nitrogen adsorption experiment[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(4): 135–140(in Chinese with English abstract).
- [11] Pan L, Xiao X, Tian H, et al. A preliminary study on the characterization and controlling factors of porosity and pore structure of the Permian shales in Lower Yangtze region, Eastern China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 146: 68–78.
- [12] 刘圣鑫, 钟建华, 马寅生, 等. 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, 39(1): 33–42.
Liu Shengxin, Zhong Jianhua, Ma Yinsheng, et al. Study of microscopic pore structure and adsorption isothermal of carboniferous shale, Eastern Qaidam Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2015, 39(1): 33–42(in Chinese with English abstract).
- [13] 赵迪斐, 郭英海, 解德录, 等. 基于低温氮吸附实验的页岩储层孔隙分形特征[J]. *东北石油大学学报*, 2014, (6): 100–108, 11–12.
Zhao Difei, Guo Yinghai, Xie Delu, et al. Fractal characteristics of shale reservoir pores based on nitrogen adsorption[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2014, (6): 100–108, 11–12(in Chinese with English abstract).
- [14] 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.
- [15] 罗超, 刘树根, 孙玮, 等. 鄂西—渝东地区下寒武统牛蹄塘组黑色页岩孔隙结构特征[J]. *东北石油大学学报*, 2014, 38(2): 8–17.
Luo Chao, Liu Shugen, Sun Wei, et al. Pore structure characterization of black shale in the lower Cambrian Niutitang formation in western Hubei and eastern Chongqing area[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2014, 02: 8–17, 79, 5–6 (in Chinese with English abstract).
- [16] Loehr S C, Baruch E T, Hall P A, et al. Is organic pore development in gas shales influenced by the primary porosity and structure of thermally immature organic matter?[J]. *Organic Geochemistry*, 2015, 87: 119–132.
- [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(in Chinese with English abstract).