

# 四川盆地平桥地区五峰—龙马溪组

## 页岩微观孔隙特征研究

王运海

(中国石化华东油气分公司, 南京 210011)

**摘要:** 基于氩离子抛光扫描电镜、吸附脱附实验等方法, 对四川盆地平桥地区五峰组—龙马溪组下部页岩微观孔隙进行了研究。结果表明, 富有机质的硅质页岩和碳质页岩微观孔隙以有机孔和微裂缝为主; 孔隙结构相对复杂, 孔隙形态丰富, 孔径范围较大。吸附脱附实验显示, 该页岩既有狭窄的平行板片状孔、少量的锥形平板孔和楔形孔, 孔隙连通性相对差, 又有规则开放圆孔与一端开口的墨水瓶状孔, 孔隙开放性、连通性相对好。氩离子抛光扫描电镜法测量有机孔以细介孔为主且偏向微孔; 吸附法测量比表面积为 9~32.6 m<sup>2</sup>/g, 平均 18.0 m<sup>2</sup>/g, 值偏低, BET 法孔径为 3.23~4.35 nm, BJH 法孔容平均 0.016 5 cm<sup>3</sup>/g, 以细介孔为主, 且偏向微孔界线。综合分析认为, 研究区页岩储层微观孔隙以细介孔为主, 且介孔和微孔贡献了绝大部分的比表面积。

**关键词:** 孔隙类型; 孔隙结构; 页岩; 五峰—龙马溪组; 四川盆地

中图分类号: TE122.23

文献标识码: A

## Micro-pore characteristics of shale from Wufeng-Longmaxi formations in Pingqiao area, Sichuan Basin

WANG Yunhai

(SINOPEC East China Branch Company, Nanjing, Jiangsu 210011)

**Abstract:** The microscopic pore characteristics of shale from the lower Wufeng-Longmaxi formations in the Pingqiao area of the Sichuan Basin were studied using argon ion polished sample scanning electron microscopy and nitrogen adsorption-desorption experiments. Organic-rich siliceous shale and carbonaceous shale micro-pores are dominated by organic pores and micro-cracks. The pore structure is relatively complex, with rich pore morphology and a wide range of pore sizes. Argon ion polishing scanning electron microscopy showed that the organic pores are mainly thin and partly belong to micro-pores. Nitrogen adsorption-desorption experiments showed that the shale has narrow parallel plate-like holes, a small number of conical plate holes and wedge-shaped holes with a poor connectivity, and regular open round holes and ink bottle-shaped holes with open ends. The specific surface area measured by nitrogen adsorption-desorption experiments was 9-32.6 m<sup>2</sup>/g, with an average of 18.0 m<sup>2</sup>/g, which was low. The pore diameters measured by the BET method were 3.23 to 4.35 nm, and the average pore volume by the BJH method was 0.016 5 cm<sup>3</sup>/g. The fine meso-pores were dominant, and they were biased toward the micro-pore boundary. According to the comprehensive analysis, the microscopic pores of shale reservoirs in the study area are mainly mesoporous, and meso-pores and micro-pores contribute most of the specific surface area.

**Key words:** pore type; pore structure; shale; Wufeng-Longmaxi formations; Sichuan Basin

前人针对四川盆地上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩微观孔隙特征进行了研究, 提出了不同的观点与认识, 大至存在三类观点。一是页岩储集空间以纳米级孔隙为主, 是页岩气富集的主要载体<sup>[1-8]</sup>。地质学家通过图像直接法, 如氩离子抛

光扫描电镜、纳米 CT、FIB 实验测量及图像肉眼观察等, 认为有机质孔为优势储集空间, 有机质纳米孔为介孔、微孔。二是主张优质页岩的储集空间以有机质孔、层理缝为主, 页岩孔隙连通性较好<sup>[9-13]</sup>, 但基于孔隙大小、孔隙载体的孔隙分类方法却存在

争议。三是主张微孔、介孔是优势储集空间,是比表面与孔体积方法研究的主要贡献力量<sup>[14-25]</sup>;通过间接法,如氮气吸附法、高压压汞法等,提出微孔和介孔共同发育。

位于四川盆地东侧的平桥地区目前处于页岩气产能建设阶段。该区孔隙度偏低,但试气产量却高;页岩储层描述,尤其是与孔隙度密切相关的孔隙大小、孔隙结构是一个关键问题。本文通过氩离子抛光、氩离子抛光扫描电镜、吸附法等纳米测量技术,开展四川盆地平桥地区页岩储层微观孔隙特征研究,以为该区渗流机理研究和页岩气高效开发提供储层参数。

### 1 地质特征

平桥地区处于四川盆地东南缘高陡褶皱带的东北向长条状背斜,JY8 井位于此背斜高部,PQ10 井位于此背斜向南倾伏端(图 1)。该区北侧为涪陵焦石坝页岩气开发区。平桥地区含气页岩段纵向上分为三段,位于五峰组—龙马溪组龙一段页岩层段厚 110~120 m,又细分为 9 个开发小层:①~③小层发育富有机质的碳质页岩及硅质页岩;④、⑤小层为碳质页岩;⑥~⑨小层随陆源碎屑逐渐增加而发育灰黑色粉砂质页岩。①~⑤小层为页岩气最佳甜点段(图 2)。

平桥地区五峰—龙马溪组龙一段含气页岩段属于深水陆棚沉积,岩心主要为黑色—灰黑色硅质页岩、碳质页岩和粉砂质页岩。薄片鉴定结果表明,

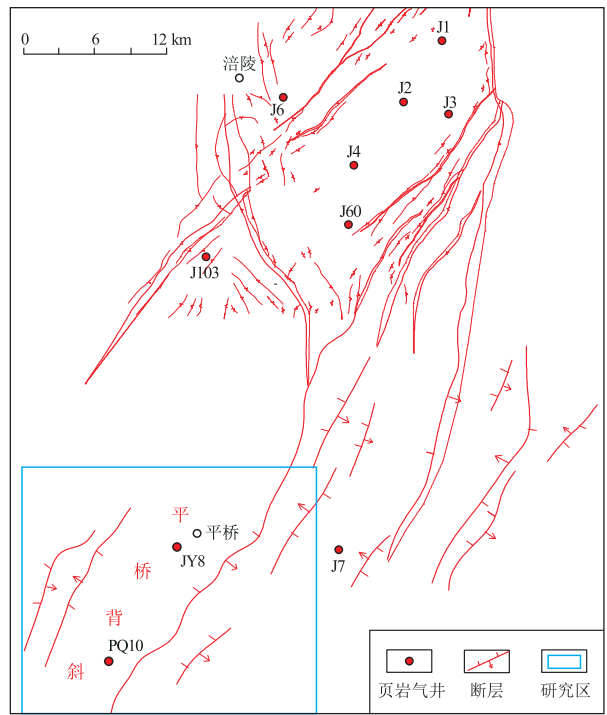


图 1 四川盆地平桥地区构造与研究位置

Fig.1 Structure and sample location of Pingqiao area in Sichuan Basin

自下而上,含气页岩段①~④小层页岩岩石组构相对均匀、块状构造,岩心见较多的笔石化石(图 3a, b);但含气页岩段⑤~⑨小层页岩纹层结构增多,纹层由粉砂、方解石、黄铁矿构成,单个纹层厚度为毫米级,纹层之间间隔达毫米级或厘米级,稀疏不一,无放射虫及硅质海绵,岩心见较少的笔石化石

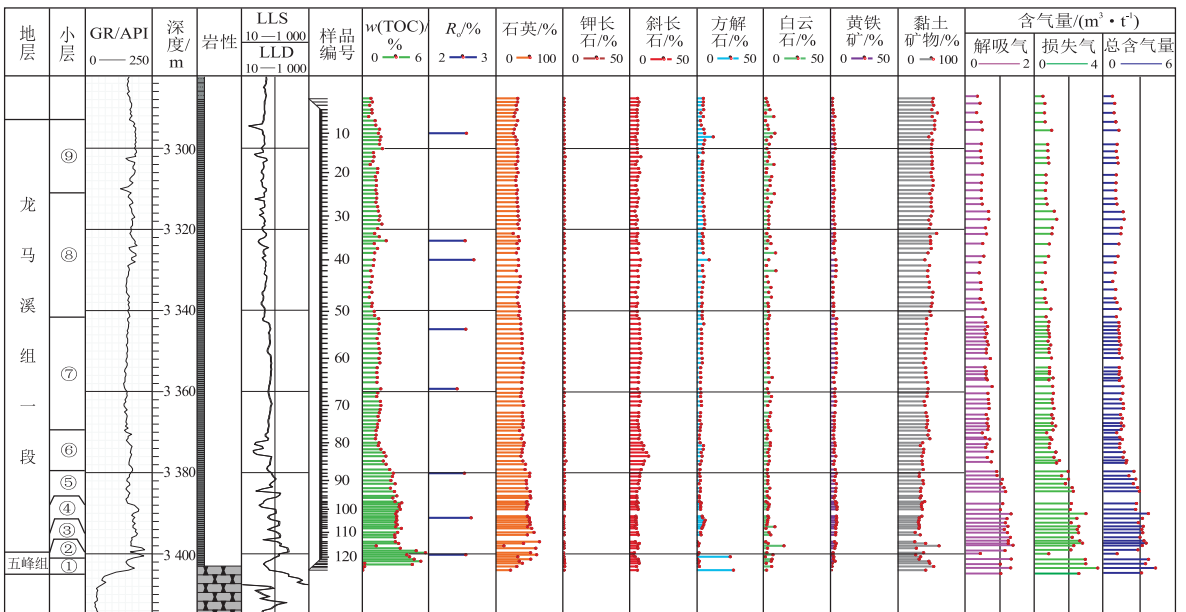


图 2 四川盆地平桥地区 PQ10 井五峰组—龙马溪组龙一段页岩柱状图

Fig.2 Shale histogram from the Wufeng Formation to the first member of Longmaxi Formation in well PQ10, Pingqiao area, Sichuan Basin

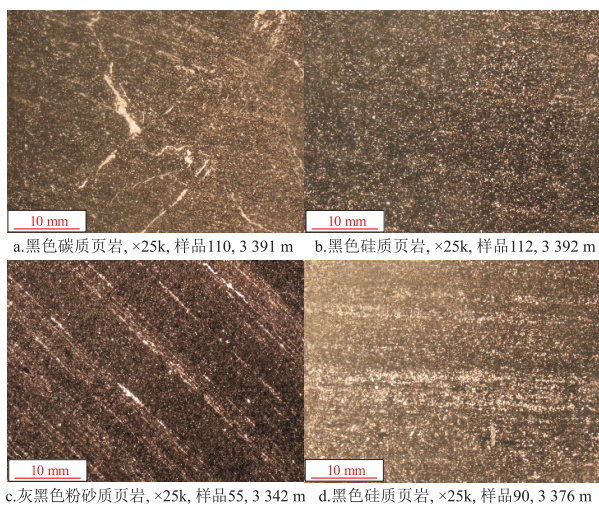


图3 四川盆地平桥地区龙马溪组页岩岩石薄片  
样品编号对应图2。

Fig.3 Photo micro-graphs of rock sections of Longmaxi Formation in Pingqiao area, Sichuan Basin

(图3c,d)。总体看,硅质含量为40%~65%,黏土矿物含量为30%~42%,碳酸盐矿物含量在13%以下;局部见微裂缝(图3a),多被方解石或黄铁矿充填。因为粉砂质纹层的发育,导致岩相变化和TOC降低,形成“下部页岩气富集、上部页岩含气性变差”现象。

全岩X射线衍射分析结果表明,该区页岩中石英、长石等脆性矿物含量较高,其次是黏土矿物,碳酸盐矿物含量相对较低,样品中普遍见少量黄铁矿(1.5%~4.8%,平均3.6%)。其中,石英含量为41.2%~65.1%,平均50.3%,自上而下逐渐增加;上部石英主要为陆源的且与纹层发育相对应,下部石英多为生物作用的硅或有机硅且具有丰富的放射虫、硅质海绵等化石。长石含量为3.2%~8.5%,平均6.3%,自上而下无明显变化;钾长石含量为0.5%~1.3%,平均0.8%;斜长石为2.7%~7.5%,平均5.5%。碳酸盐含量为1.8%~12.7%,平均6.2%,自上而下无明显变化;方解石含量为0.3%~6.3%,平均2.8%;白云石含量1.5%~8.3%,平均3.5%。黏土矿物含量为25.5%~41.7%,平均33.68%,自上而下逐渐减少,与上部陆源供给、下部生物成因作用有关;主要由伊利石、伊/蒙混层及少量绿泥石组成,其中伊利石含量39%~67%,平均53.27%,伊/蒙混层含量22%~55%,平均39.2%,绿泥石含量3.0%~1.03%,平均7.5%。

根据有机显微组分分析,有机质类型主要为I型和II<sub>1</sub>型;龙马溪组有机碳含量(TOC)较高,分布在2.1%~5.69%,平均3.19%,自上而下明显增

加; $R_o$ 普遍较高,为2.42%~3.43%,平均2.86%,已达到高成熟及过成熟产气阶段。该区优质页岩厚度约40 m,生烃条件与涪陵、长宁和威远基本一致,属于最有利的生烃地区。

## 2 样品与分析方法

样品来自五峰组—龙马溪组龙一段,岩性为灰黑色富有机质页岩(图2)。在观察页岩样品的孔隙结构前,依据行业标准《岩石样品扫描电子显微镜分析方法:SY/T 5162-2014》,对页岩样品进行加工处理。用氩离子抛光法对岩样表面进行抛光打磨,然后在页岩样品表面镀上约10 nm厚的一层金膜制成分析样品;制成的样品用德国蔡司SIGMA 500/VP高分辨率场发射扫描电镜放大到100万倍数、二次图像分辨率达到0.8~1.6 nm后,对电镜下观察到的微观孔隙类型及特征进行定量表征;然后利用分析精度达0.000 5 m<sup>2</sup>/g、孔径测量范围为0.35~500 nm、孔体积检测精度达0.000 1 cm<sup>3</sup>/g的ASAP2020M全自动比表面积与孔隙度分析仪,开展氮气吸附和脱附实验,对比表面积等参数进行定量描述,分析其与含气量的关系。

### 2.1 页岩孔隙类型

对处理后的127个样品采用场发射电子显微镜进行了肉眼观测,参考和借鉴前人的划分方法,以基质类型、孔隙成因作为划分依据,将平桥五峰—龙马溪组页岩孔隙划分为无机孔、有机孔及微裂缝三类,其中,无机孔可进一步细分为粒间孔、粒内孔、晶间孔和溶蚀孔。

无机孔中粒间孔形成于沉积或成岩过程,常位于颗粒的接触位置处(图4a),在上覆地层的压实下未被充填,主要为原生残留孔,孔径100 nm左右。粒内孔一般为原始矿物颗粒内部自带,在后期沉积成岩过程中没有被破坏而保留了下来(图4b),孔径2~80 nm;此类孔隙连通性差,一般为死孔隙,其内部储集的气体难以流动。晶间孔主要为矿物晶体之间的细微孔隙(图4c),常见孔径范围5~200 nm;此类孔隙主要分布于自生黄铁矿晶体或黏土矿物晶体间。溶蚀孔形成于成岩期(图4d),在特定成岩环境下不稳定矿物发生溶蚀或溶解形成微孔,孔径范围20~1 000 nm。

根据场发射电子显微镜,本区有机孔密集分布于成熟—过成熟的页岩有机质内(图4e),孔径范围2~30 nm,以细介孔为主且偏向微孔。此类孔隙密集呈海绵状孔状分布,是游离气、吸附气富集的主要赋存空间。

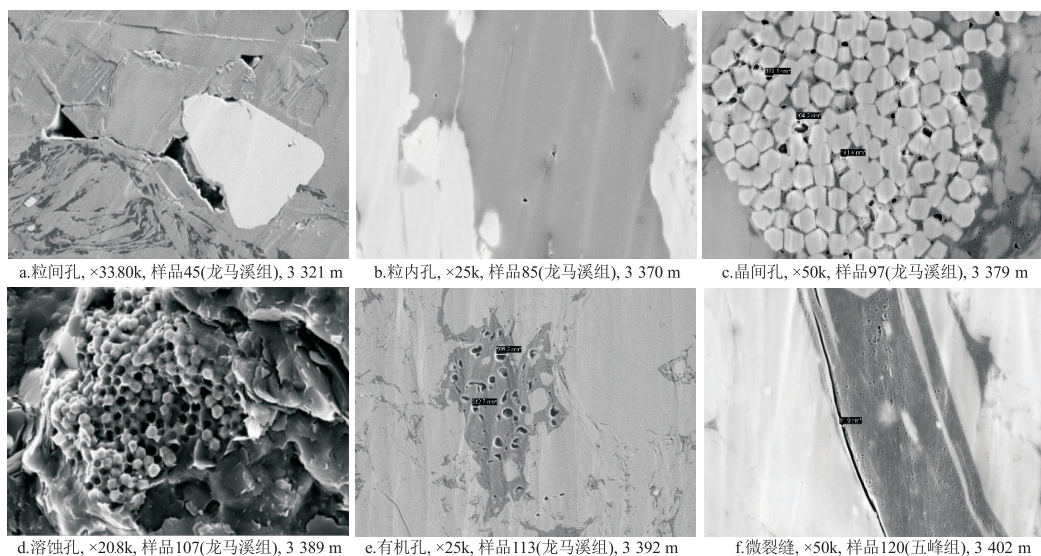


图 4 四川盆地平桥地区五峰—龙马溪组页岩储集空间类型  
样品编号对应图 2。

Fig.4 Reservoir space types of Wufeng-Longmaxi formations in Pingqiao area, Sichuan Basin

微裂缝在本区内主要有两种成因：一种为有机质在成岩演化过程中形成的收缩缝，通常在有机质和无机矿物接触处形成（图 4f）；另一种为构造应力作用下形成的构造缝。微裂缝的发育程度是提高水力压裂效果的重要因素。

### 2.2 孔隙结构特征

吸附实验表明该区页岩样品均有滞回环产生，滞后回线的形成源于开放型孔隙发育，其曲线的细微差异性则反映了页岩孔径的分布特征。依据 DE BORE 及 IUPAC 分类标准<sup>[17-18]</sup>，本区页岩样品回线形态类似于 DE BORE 中的 B 类以及 IUPAC 中

H2、H3 类的叠加（图 5）。具体表现为初期凝聚液蒸发现象主要在开放型大孔中发生，脱附曲线快速下降，随即趋于平缓，表明开放型大孔存在但是所占比例不多；随着相对压力的降低，凝聚蒸发或多分子层脱附现象在过渡孔中发生，孔隙类型以开放型为主（存在一端封闭性孔）；当相对压力处于 5.5 左右时，出现急剧下降的拐点，主要是由于“细颈广体积”或“墨水瓶”型孔隙的存在；当相对压力低于 4.5 左右时，脱附—吸附曲线基本重合，表明孔隙中凝聚和蒸发相对压力相同，此时以微孔中气体脱附为主。

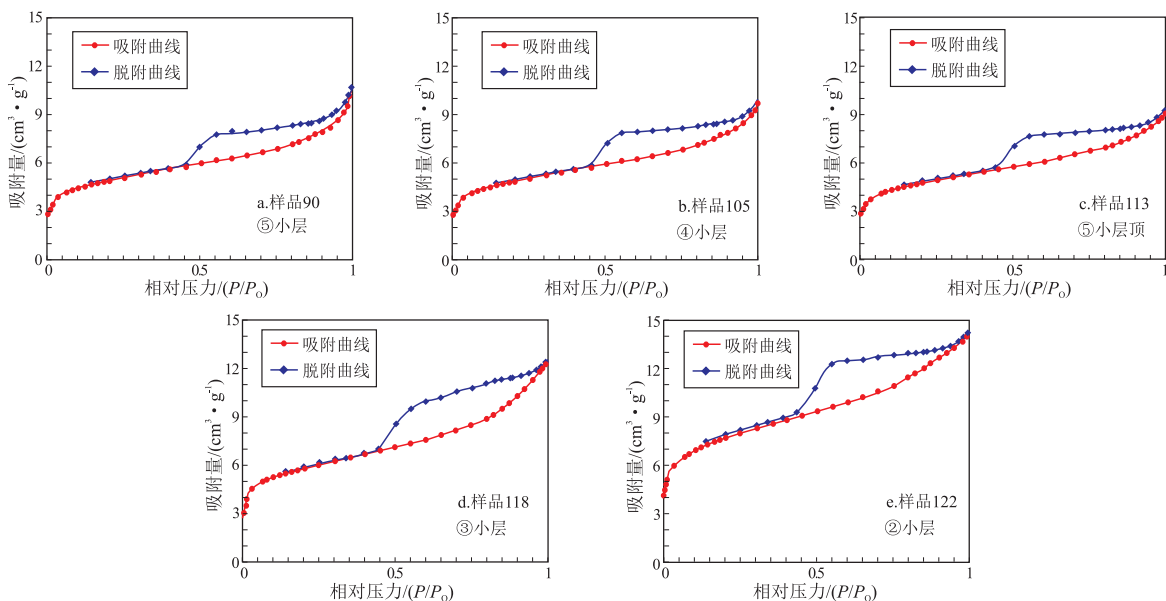


图 5 四川盆地平桥地区五峰—龙马溪组页岩样品氮气吸附解吸等温曲线

Fig.5 N<sub>2</sub> adsorption-desorption isotherms of shale samples from Wufeng-Longmaxi formations in Pingqiao area, Sichuan Basin

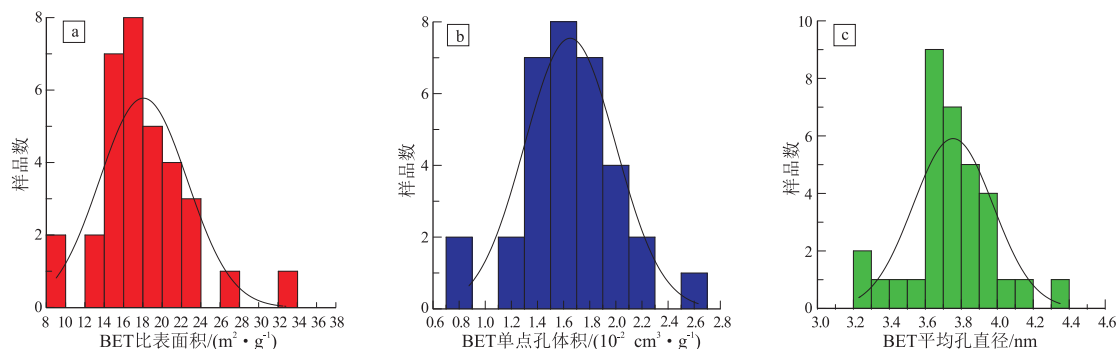


图6 四川盆地平桥地区五峰—龙马溪组页岩比表面积、孔容和孔径分布特征

Fig.6 Distribution of average specific surface area, pore volume and diameter of shale samples from Wufeng-Longmaxi formations in Pingqiao area, Sichuan Basin

本区样品测试曲线差异性可以归纳为两种类型：一类样品曲线整体相对比较平缓，吸附气量也相对较少，脱附回线在拐点处相对圆滑，表明容孔体积相对较少，形成狭长型滞回环，其孔隙形态主要为狭窄的平行板片状孔及微孔，同时含有少量的锥形平板孔和楔形孔（图 5a-c）；第二类样品曲线坡度整体相对较陡，吸附气量相对高，脱附回线在拐点处棱角明显，形成开阔型滞回环，表明其孔隙形态主要为规则开放圆孔，少量的狭窄板状孔及墨水瓶状孔（图 5d,e）。从纵向来看，上部的④、⑤小层多形成狭长型滞回环，孔隙开放性、连通性相对变差；下部②~③小层形成开阔型滞回环，孔隙连通相对变好。

### 2.3 比表面积、孔容与孔径分布特征

纳米级孔隙的比表面积是评价页岩吸附能力的重要参数，本文采用经典的 BET 等温吸附式求取了平桥地区 32 块测试样品的比表面积（图 6a），得出比表面积分布范围为 9~32.6 m<sup>2</sup>/g，峰值区间为 14~20 m<sup>2</sup>/g，平均为 18.0 m<sup>2</sup>/g，值偏低，BET 平均孔直径分布范围为 3.23~4.35 nm。依据 BJH 模型求得岩样平均孔容及孔径分布，其中平均孔容分布范围为 0.008 8~0.026 4 cm<sup>3</sup>/g，峰值区间为 0.014~0.02 cm<sup>3</sup>/g，平均 0.016 5 cm<sup>3</sup>/g（图 6b）；平均分布孔径为 3.32~4.35 nm，峰值区间为 3.6~3.8 nm，均值为 3.75 nm（图 6c）。上述二种方法求得的孔隙均以介孔为主，且偏向微孔界线。

研究区页岩微孔、介孔为比表面积和孔容的主要贡献者，其中，10 nm 以下的微孔、细介孔占比表面积的比例平均达 90% 以上，表明孔径在 10 nm 以下的孔隙为页岩吸附气聚集的主要空间；细介孔所占孔容的比例最大，平均达 45.3%，其次为微孔和中介孔，平均分别为 24.9% 和 19.1%，粗介孔以上孔隙体积约为 10%（图 7）。通过统计对比不同层

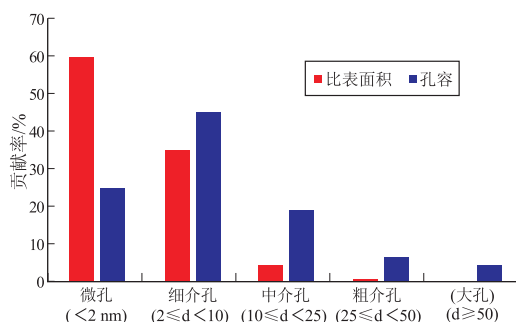


图7 四川盆地平桥地区五峰—龙马溪组页岩不同孔径段对比表面积及孔容的贡献

Fig.7 Contribution of pore diameter to specific surface area and pore volume of shale samples from Wufeng-Longmaxi formations in Pingqiao area, Sichuan Basin

位、相同孔径下的比表面积和孔容变化规律（图 8），结果显示纵向上受高的有机质含量影响，②、③小层的页岩比表面积、孔容即单位质量孔体积要大于④、⑤小层，尤其是小于 10 nm 区间的孔容明显要发育，这说明②、③小层是平桥地区最优质的页岩气储层。

综上所述，尽管不同方法测量的孔径规模不同，分布范围也较广，但总体是以细孔为主，且细介孔和微孔贡献了研究区优质页岩储层绝大部分的比表面积。

### 2.4 微观孔隙影响因素分析

泥页岩储层微观孔隙结构的发育及演化过程，受岩石矿物组分和保存环境等多种因素影响<sup>[19-22]</sup>。有机碳含量、岩石矿物组成、干酪根类型、热演化程度等因素均不同程度地影响孔隙的形态与分布。平桥地区龙马溪组页岩微观孔隙类型虽然众多，但有利于气体富集的孔隙主要为有机孔或有机—无机联合成因孔，此类孔隙的发育演化与以上因素有密切关系。

泥页岩中微观孔隙的发育程度首先与矿物组

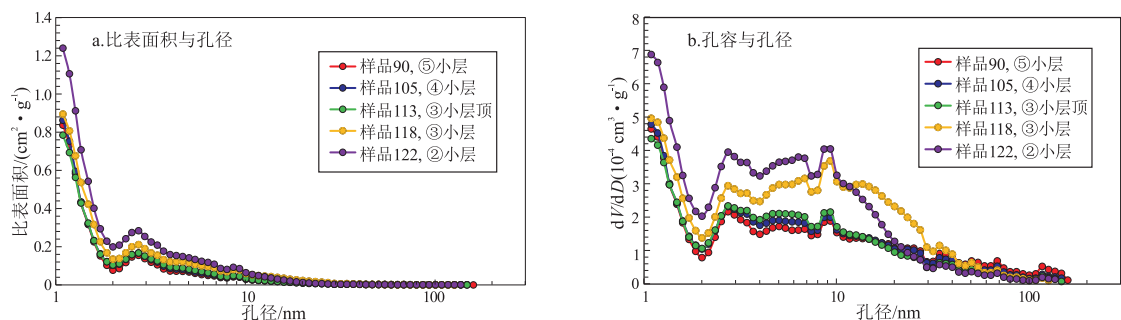


图 8 四川盆地平桥地区五峰—龙马溪组页岩比表面积、孔容与孔径分布曲线  
 Fig.8 Relationship among specific surface area, pore volume and pore diameter of shale samples from Wufeng-Longmaxi formations in Pingqiao area, Sichuan Basin

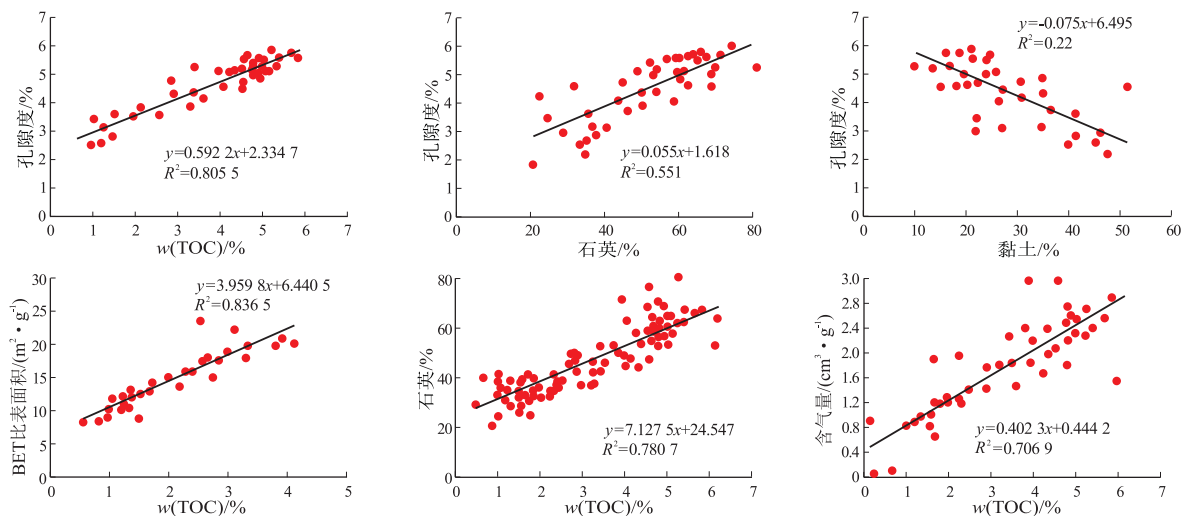


图 9 四川盆地平桥地区五峰—龙马溪组岩石组分、孔隙、比表面积与有机碳含量关系  
 Fig.9 Relationship among rock component, porosity, specific surface area, gas content and TOC content of shale samples from Wufeng-Longmaxi formations in Pingqiao area, Sichuan Basin

成有关,有机碳含量及脆性矿物含量(主要为硅质成分)与孔隙体积呈较好的正相关性,而塑性黏土矿物含量与孔隙度则呈明显的负相关性;同时有机碳含量与对应样品比表面积及含气量有较好的正相关性,即有机碳含量、脆性矿物、比表面积、含气量两两正相关(图 9)。此规律也证实了研究区从上到下储层物性逐渐变好的变化规律。龙马溪组页岩硅质与有机碳含量有明显的正相关性表明,硅质主要来源于生物成因<sup>[23-24]</sup>,因此在其他条件不变的情况下,有机碳含量、脆性矿物(硅质)含量越高其孔隙体积和比表面积越大,越有利于游离气及吸附气的富集成藏。

### 3 讨论及与邻区对比

通过对比焦石坝、威远地区及邻区五峰—龙马溪组的页岩储层孔隙结构的异同,有利于评价平桥地区页岩气开发潜力。

郭旭升等<sup>[2]</sup>对 JY1、JY2、JY4 井研究后认为,

焦石坝地区龙马溪页岩气储层孔隙形态属于开放性的圆筒状孔和平行板状孔,孔径在 2~30 nm 之间,以中(介)孔为主,TOC 与  $R_0$  是控制页岩储层微观孔隙结构的主要因素,黏土矿物含量对其影响相对不明显。张士万等<sup>[24]</sup>认为涪陵地区页岩储层的孔隙直径主要分布在 24 nm 以下,以中孔为主,孔隙组合形态表现为四周开放的平行板状孔隙及细颈广口的墨水瓶形孔隙,页理缝改善了页岩储层的储集能力且又控制着页岩储层的水平渗流能力。杨文新等<sup>[25]</sup>运用氩离子抛光扫描电镜、压汞—吸附联测、核磁共振分析等多种方法,提出焦石坝页岩孔隙主要是微孔和中孔,孔隙直径小于 20 nm 的占总孔隙的 80%以上;平面上,主力层页岩孔隙直径峰值大于 2 nm、孔隙度大于 3%、含水饱和度低于 40%的区块,储层保存条件好。

李卫兵等<sup>[17]</sup>评价了渝东南地区下志留统龙马溪组页岩储层,发现微孔和中孔广泛发育,页岩孔隙在 0.5~1.5 nm 和 4.0~7.0 nm 呈现双峰分布;

苑丹丹等<sup>[21]</sup>提出渝东南地区泥页岩储层所发育的微裂缝、微孔道和絮状物孔隙等相互连通,具有裂缝性孔隙特征,以开放型孔隙为主,纳米级孔隙和微米级孔隙分别提供 0.95% 和 1.60% 的孔隙度;魏国庆等<sup>[23]</sup>以湖北来凤地区 LD1 井分析为基础,认为有机质孔隙和微裂缝是研究区龙马溪组页岩孔隙发育的主要形式,中孔和微孔最为发育;但是,武瑾等<sup>[22]</sup>认为渝东北地区龙马溪组露头剖面的页岩纳米孔隙主要为开放透气性孔,孔径为 2~10 nm 与 30~90 nm 的孔隙提供了大部分总孔体积,有机碳含量与微孔、中孔的孔体积呈正相关性。

邹才能等<sup>[1]</sup>对威远页岩气田威 201 井页岩储层孔隙进行了研究,认为其孔隙以有机质孔、颗粒内孔以及自生矿物间孔隙为主,孔径分布范围为 5~300 nm。熊健等<sup>[3]</sup>研究了四川盆地宜宾长宁地区露头页岩,认为龙马溪组页岩下段富含更多的有机质使其比表面积 (8.1~9.331 m<sup>2</sup>/g) 和总孔隙 (0.021 05~0.023 49 cm<sup>3</sup>/g) 均较高;张烈辉等<sup>[4]</sup>认为四川盆地南部页岩的孔隙结构复杂,孔径分布普遍具有双峰或三峰特征,主要发育孔径介于 0~10 nm 的微孔和中孔,以中孔为主,也有少量大孔和微裂缝发育。王玉满等<sup>[6]</sup>以四川盆地涪陵气田和长宁气区钻井资料为基础,提出五峰组—龙马溪组发育基质孔隙+裂缝型和基质孔隙型,前者主要发育于特殊构造背景区且相对局限,具有裂缝孔隙发育、含气量大、游离气含量高、产层厚、单井产量高等特点;后者分布广泛、占据主导地位,具有基质孔隙度较高、裂缝孔隙不发育、单井产量中高等特征。李笑天等<sup>[5]</sup>利用扫描电镜法测量四川盆地长宁—威远地区 11 口井岩心,认为龙马溪组优质页岩段以中孔为主;薛冰等<sup>[8]</sup>研究了黔西北地区龙马溪组页岩储层微观孔隙特征,认为有利孔径分布范围为 2~64 nm,峰值集中于 2~6 nm。赵佩等<sup>[14]</sup>对川南地区页岩气储层孔隙微观特征、主要影响因素进行了研究,主张龙马溪组页岩孔隙以微孔和介孔为主,孔径为 0.4~1 nm 和 3~20 nm,微孔和介孔占孔隙总体积的 78.17%,占比表面积的 83.92%;魏祥峰等<sup>[16]</sup>指出川南—黔北地区龙马溪组页岩气储层以极为发育的微孔为主。

此外,伍岳等<sup>[13]</sup>对比国内外页岩样品提出了两套孔隙分类方案:粒间孔、粒内孔、有机质孔和微裂缝,以及骨架矿物孔、黏土矿物孔、有机质孔和微裂缝。崔景伟等<sup>[12]</sup>对比国内外页岩样品,通过纳米 CT、FIB 辐射扫描方法和压汞 (MICP)、氮气吸附、二氧化碳吸附法,认为页岩储层以有机质纳米

孔为主,孔隙连通性中等。

对比研究认为,平桥地区龙马溪组页岩储层的微观孔隙以细介孔和微孔为主,其孔隙直径较焦石坝地区略小,较威远地区、川南地区的孔隙直径和比表面积均要大。

## 4 结论

(1) 平桥地区五峰组—龙马溪组页岩以黑色碳质、硅质页岩为主,有机孔、微裂缝是页岩气赋存的主要储集空间。

(2) 研究区页岩储层微观孔隙以细孔为主,且细介孔和微孔贡献了绝大部分的比表面积;下部②、③小层页岩的孔隙连通性、孔隙开放性、孔径大小及比表面积要明显好于上部④、⑤小层。

(3) 页岩有机质含量、硅质含量和热演化程度是控制储层孔隙结构的重要因素。

## 参考文献:

- [1] 邹才能,朱如凯,白斌,等.中国油气储层中纳米孔首次发现及科学价值[J].岩石学报,2011,27(6):1857-1864.  
ZOU Caineng,ZHU Rukai,BAI Bin,et al.First discovery of nanopore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value[J].Acta Petrologica Sinica,2011,27(6):1857-1864.
- [2] 郭旭升,李宇平,刘若冰,等.四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及其控制因素[J].天然气工业,2014,34(6):9-16.  
GUO Xusheng,LI Yuping,LIU Ruobing,et al.Characteristics and controlling factors of micro-pore structures of Longmaxi shale play in the Jiaoshiaba area,Sichuan Basin[J].Natural Gas Industry,2014,34(6):9-16.
- [3] 熊健,刘向君,梁利喜,等.四川盆地长宁地区龙马溪组上、下段页岩储层差异研究[J].西北大学学报(自然科学版),2015,45(4):623-630.  
XIONG Jian,LIU Xiangjun,LIANG Lixi,et al.On the differences of reservoir characteristics of the upper and the lower Longmaxi Formation shale in the Changning region of Sichuan Basin[J].Journal of Northwest University (Natural Science Edition),2015,45(4):623-630.
- [4] 张烈辉,郭晶晶,唐洪明,等.四川盆地南部下志留统龙马溪组页岩孔隙结构特征[J].天然气工业,2015,35(3):22-29.  
ZHANG Liehui,GUO Jingjing,TANG Hongming,et al.Pore structure characteristics of Longmaxi shale in the southern Sichuan Basin[J].Natural Gas Industry,2015,35(3):22-29.
- [5] 李笑天,潘仁芳,鄢杰,等.四川盆地长宁—威远页岩气示范区下志留统龙马溪组泥页岩吸附特征及影响因素分析[J].海相油气地质,2016,21(4):60-66.  
LI Xiaotian,PAN Renfang,YAN Jie,et al.Adsorptivity and influential factors of Lower Silurian Longmaxi gas-bearing shale in Changning-Weiyuan area,Sichuan Basin[J].Marine Origin Petroleum Geology,2016,21(4):60-66.

- [6] 王玉满, 黄金亮, 李新景, 等. 四川盆地志留统龙马溪组页岩裂缝孔隙定量表征[J]. 天然气工业, 2015, 35(9): 8-15.  
WANG Yuman, HUANG Jinliang, LI Xinjing, et al. Quantitative characterization of fractures and pores in shale beds of the Lower Silurian, Longmaxi Formation, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(9): 8-15.
- [7] 于炳松. 页岩气储层孔隙分类与表征[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 211-220.  
YU Bingsong. Classification and characterization of gas shale pore system [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(4): 211-220.
- [8] 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 on shale in Longmaxi Formation, northwest Guizhou [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(2): 138-149.
- [9] SLATT R M, O' BRIEN N R. Pore types in the Barnett and storage and Woodford gas shales: Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2017-2030.
- [10] LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al. Spectrum of pore type and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mud rock pores [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071-1098.
- [11] SING K S W, EVERETT D H, HAUL R A W, et al. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to determination of surface area and porosity [J]. Pure and Applied Chemistry, 1985, 57(4): 603-611.
- [12] 崔景伟, 邹才能, 朱如凯, 等. 页岩孔隙研究新进展[J]. 地球科学进展, 2012, 27(12): 1319-1325.  
CUI Jingwei, ZOU Caineng, ZHU Rukai, et al. New advances in shale porosity research [J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(12): 1319-1325.
- [13] 伍岳, 樊太亮, 蒋恩, 等. 海相页岩储层微观孔隙体系表征技术及分类方案[J]. 地质科技情报, 2014, 33(4): 91-97.  
WU Yue, FAN Tailiang, JIANG Shu, et al. Characterizing techniques and classification methods for microscope pore system in marine shale reservoir [J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(4): 91-97.
- [14] 赵佩, 李贤庆, 田兴旺, 等. 川南地区龙马溪组页岩气储层微孔隙结构特征[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(6): 947-956.  
ZHAO Pei, LI Xianqing, TIAN Xingwang, et al. Study on micro-pore structure characteristics of Longmaxi Formation shale gas reservoirs in the southern Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(6): 947-956.
- [15] GREGG S J, SING K S W. Adsorption surface area and porosity [M]. 2nd ed. London: Academic Press, 1982.
- [16] 魏祥峰, 刘若冰, 张廷山, 等. 页岩气储层微观孔隙结构特征及发育控制因素: 以川南—黔北 XX 地区龙马溪组为例[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(5): 1048-1059.  
WEI Xiangfeng, LIU Ruobing, ZHANG Tingshan, et al. Micro-pores structure characteristics and development control factors of shale gas reservoir; A case of Longmaxi Formation in XX area of southern Sichuan and northern Guizhou [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(5): 1048-1059.
- [17] 李卫兵, 姜振学, 李卓, 等. 渝东南页岩微孔隙结构特征及其控制因素[J]. 特种油气藏, 2016, 23(2): 50-54.  
LI Weibing, JIANG Zhenxue, LI Zhuo, et al. Micro-pore structure characteristics of shale in southeast Chongqing and the controlling factors [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(2): 50-54.
- [18] BROEKHOFF J C P, DE BOER J H. Studies on pore systems in catalysts: Pore distributions from the desorption branch of a nitrogen sorption isotherm in the case of cylindrical pores B. applications [J]. Journal of Catalysis, 1968, 10(4): 377-390.
- [19] 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 evolution [J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(1): 87-125.
- [20] BEHAR F, VANDENBROUCKE M. Chemical modelling of kerogens [J]. Organic Geochemistry, 1987, 11(2): 15-24.
- [21] 苑丹丹, 卢双舫, 陈方文, 等. 渝东南地区彭页 1 井泥页岩微孔隙结构特征[J]. 特种油气藏, 2016, 23(1): 49-53.  
YUAN Dandan, LU Shuangfang, CHEN Fangwen, et al. Shale microscopic pore structure characterization in well Pengye 1 of southeast Chongqing [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(1): 49-53.
- [22] 武瑾, 梁峰, 齐文, 等. 渝东北地区龙马溪组页岩储层微孔隙结构特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(3): 308-319.  
WU Jin, LIANG Feng, LIN Wen, et al. Characteristics of micro-pore structure of Longmaxi Formation shale gas reservoirs in northeast district of Chongqing, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2016, 43(3): 308-319.
- [23] 魏国庆, 李博, 彭传圣, 等. 湖北来凤地区龙马溪组页岩微孔隙结构特征[J]. 资源环境与工程, 2016, 30(2): 188-193.  
WEI Guoqing, LI Bo, PENG Chuansheng, et al. Micro pore structure characteristics of Longmaxi Formation shale in Laifeng area of Hubei Province [J]. Resources Environment & Engineering, 2016, 30(2): 188-193.
- [24] 张士万, 孟志勇, 郭战峰, 等. 涪陵地区龙马溪组页岩储层特征及其发育主控因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 16-24.  
ZHANG Shiwan, MENG Zhiyong, GUO Zhanfeng, et al. Characteristics and major controlling factors of shale reservoirs in the Longmaxi Fm, Fuling area, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(12): 16-24.
- [25] 杨文新, 李继庆, 赵江艳, 等. 四川盆地涪陵地区龙马溪组页岩微孔隙结构定性定量研究[J]. 石油实验地质, 2018, 40(1): 97-102.  
YANG Wenxin, LI Jiqing, ZHAO Jiangyan, et al. Qualitative and quantitative study of micro-pore structures of Longmaxi Formation shale in Fuling area, Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(1): 97-102.