

# 海相高成熟页岩气储层孔隙连通关系

——以彭水地区龙马溪组为例

肖佃师<sup>1</sup>, 卢双舫<sup>1</sup>, 房大志<sup>2</sup>, 孔星星<sup>1</sup>, 陈方文<sup>1</sup>, 李吉君<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)深层油气重点实验室, 山东 青岛 266580; 2. 中国石化华东油气分公司南川页岩气项目部, 重庆 408400)

**摘要:** 孔隙连通关系影响着页岩气的渗流及产出程度, 但对页岩连通关系的研究还相对薄弱。以彭水地区五峰—龙马溪组页岩气层为例, 通过多种实验手段刻画页岩的连通孔隙组合类型, 分析孔喉连通关系。研究发现, 页岩储层发育有机孔相互连通、有机孔—微裂缝连通、有机孔—黏土孔连通和黏土孔—晶间孔连通4类组合关系。以有机孔相互连通组合为主的富有机质页岩, 符合短导管状孔喉组合模式, 孔喉比最小; 而以有机孔—黏土孔相互连通组合为主的中、贫有机质页岩, 为短导管和树形孔隙复合模式, 孔喉比较大。当TOC(有机碳含量)/黏土矿物含量比值减小时, 树形孔隙比例增多, 孔喉比也会变小。小孔喉比和高含量的有机孔相互连通孔隙组合, 有利于减弱压裂液滞留产生的水锁伤害。

**关键词:** 页岩储层; 孔隙组合; 孔喉连通性; 孔喉结构; 彭水地区

中图分类号: TE37

文献标识码: A

## Pore connectivity of marine high-maturity shale gas reservoirs: A case study in Longmaxi formation, Pengshui area

XIAO Dianshi<sup>1</sup>, LU Shuangfang<sup>1</sup>, FANG Dazhi<sup>2</sup>, KONG Xingxing<sup>1</sup>, CHEN Fangwen<sup>1</sup>, LI Jijun<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;

2. Nanchuan Shale Gas Project Department, Sinopec East China Oil and Gas Company, Chongqing 408400, China)

**Abstracts:** Micro-pore connectivity affects the seepage and production of shale gas, but there are less research on shale connectivity currently. Taking the Wufeng-Longmaxi formation shale gas reservoir in Pengshui area as an example, the connected pore assemblages of shale gas reservoirs were classified, and then the pore-throat connections of different types of shales were discussed based on a variety of experimental methods. Four types of connected pore assemblages were classified in shale, that is, organic pore interconnection, organic pore-micro-fracture interconnection, organic pore-clay pore interconnection, and clay pore-intergranular pore interconnection. Organic-rich shale, mainly composed of interconnected organic pore assemblages, conforms to the short-conduit pore-throat assemblage model with the minimum pore-throat ratio. While medium-low organic shale, mainly composed of interconnected organic pore-clay pore assemblages, is a composite model of short-conduit and tree-shaped pore with the relatively large pore-throat ratio. When the ratio of TOC/clay mineral content decreases, the tree-shaped pore-throat ratio increases and the pore-throat ratio decreases. The combination of small pore throat ratio and high content organic pore interconnection is conducive to reducing water lock damage caused by fracturing fluid retention.

**Key words:** shale reservoirs, pore assemblages, pore-throat connectivity, pore-throat structure, Pengshui area

近年来,页岩气资源在我国能源结构中的战略地位逐步提高<sup>[1]</sup>。页岩气藏为“人工改造”气藏<sup>[2]</sup>,依靠水平钻井技术和大型水力压裂有效提高页岩气藏的渗

流能力和改造体积。然而,赋存在页岩储层中的甲烷,还需要通过基质孔隙和裂缝网络运移至人工裂缝中<sup>[3-5]</sup>,才能被有效采出,因此,页岩孔隙结构也影

收稿日期:2019-06-25。

第一作者简介:肖佃师(1981—),男,博士,副教授,非常规油气地质评价。通讯地址:山东省青岛市黄岛区长江西路66号,邮政编码:266580。  
E-mail: xiaods@upc.edu.cn

基金项目:国家科技重大专项“彭水地区常压页岩气勘探开发示范工程”(2016ZX05061);中央高校自主创新项目“海相页岩气储层有机非均质性成因及其对孔隙结构的影响”(18CX02069A)。

响着页岩气的渗流及产量,其中页岩含气量及游离气占比受孔隙类型、比表面积及孔隙大小的控制<sup>[6-7]</sup>,基质渗流能力、压裂液渗吸过程及滞留的伤害程度(水锁伤害)则主要受页岩孔隙连通关系的影响<sup>[8]</sup>。

与孔隙类型及大小分布的刻画相比<sup>[9]</sup>,页岩气储层孔隙连通关系的研究相对薄弱。这一方面由于页岩孔隙窄小、类型多样、连通关系复杂,其连通性明显不同于常规碎屑岩储层<sup>[6,9]</sup>,另外也缺乏有效表征手段。纳米CT技术能实现孔隙三维显示,揭示空间连通关系,但其分辨率仍无法实现页岩多尺度孔隙分布的全面刻画<sup>[9]</sup>;自吸实验是润湿相驱替非润湿相过程,自吸曲线形态及自吸斜率也常被用于反映页岩连通性,但这些参数受不同类型孔隙表面润湿性差异的影响<sup>[10-11]</sup>,五峰—龙马溪组页岩具有强烈的亲油性和中等程度亲水性,呈现混合润湿性特征<sup>[12]</sup>。另外,注入Wood材料和示踪剂也常用于直观揭示页岩孔隙连通性<sup>[13-14]</sup>,但所需实验需要在国外完成。在分析页岩主要孔隙类型及分布特征基础上,提出页岩的连通孔隙组合类型,结合低温氮气吸附、压汞等实验结果,探讨不同类型页岩的孔喉连通关系。

## 1 样品特征及实验方法

彭水地区位于四川盆地东南缘<sup>[3]</sup>,区内上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组下段富有机质页岩层厚度达25~35 m,具有较好的页岩气勘探开发潜力<sup>[15]</sup>。本次所选五峰—龙马溪组样品来自彭水地区的PY1井(桑柘坪向斜)和LY1井(武隆向斜)。样品TOC与矿物组成、孔体积均具有明显相关性,TOC越高,气测孔体积越大、石英含量越多(表1)。在页岩气甜点评价时,通常将含气量作为重要指标,在国家标准《页岩气地质评价方法》中,含气量 $>2\text{ m}^3/\text{t}$ 作为海相页岩气有利层段的标准<sup>[16]</sup>,在该区含气量为 $1\text{ m}^3/\text{t}$ 、 $2\text{ m}^3/\text{t}$ 对应TOC的值为1.5%和2.5%(图1)。根据这两个界线,将该区页岩样品细分为富有机质页岩( $\text{TOC}>2.5\%$ )、中有机质页岩(1.5%~2.5%)和贫有机质页岩( $\text{TOC}<1.5\%$ )3类,其中富有机质页岩的石英含量大于50%,黏土矿物含量普遍低于25%,中有机质页岩的石英含量低于50%,黏土矿物含量偏高,而贫有机质页岩的石英含量低于35%,黏土矿物含量均值大于35%。

对页岩样品开展压汞、低温氮气吸附和场发射

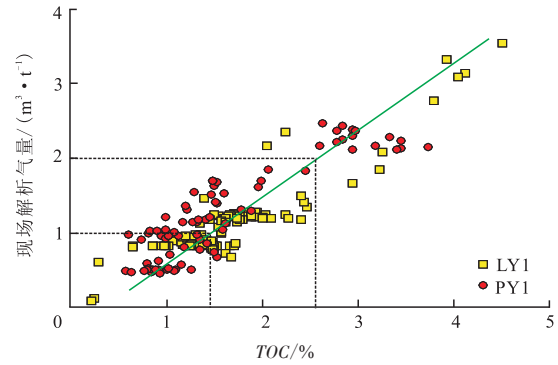


图1 彭水地区龙马溪组页岩含气量与TOC间关系  
Fig. 1 Relation between shale gas content and TOC of Longmaxi formation in Pengshui area

扫描电镜(SEM)等实验测试。压汞测试采用中国石油大学(华东)Autopore 9505孔隙分析仪。通过调整进汞压力,得到进汞和退汞曲线,根据Washburn理论<sup>[17]</sup>可由进汞曲线计算孔喉大小分布;本次实验最大进汞压力为200 MPa,表征的最小孔喉半径为3.6 nm。利用ASAP2460比表面积分析仪进行低温氮气吸附测试。通过调整相对压力( $PP_0$ ),分别得到吸附和脱附2条曲线,利用DFT模型<sup>[18]</sup>将吸附曲线转化为孔隙大小分布,并计算总孔体积(表1)。

## 2 页岩样品孔隙组合类型

### 2.1 不同类型孔隙分布特征

前人研究表明<sup>[9]</sup>,页岩气储层发育有机孔和无机孔2大类孔隙,无机孔又可进一步细分为黏土矿物有关孔、晶间孔和颗粒溶蚀孔等。不同类型孔隙在大小分布、内在连通性等方面存在差异,对页岩孔隙网络连通性贡献不同。

有机孔伴随着干酪根的生烃过程而产生,单个有机孔多呈椭圆或近似圆形,空间上常呈簇状密集分布,表现出蜂窝状、蜘蛛网状等形态(图2a、2b、2c),具有“孔中套孔”的特征,揭示了有机质颗粒内有机孔较好的内在连通性。有机孔的相互连通可用短导管状孔隙网络近似<sup>[19]</sup>,即将有机孔等效为不同半径的导管。黏土矿物有关孔(图2d)是自生黏土矿物晶体间或黏土矿物聚合物间形成的多尺度孔隙组合(图2e),聚合物之间多形成狭长的层间缝(图2d),长度可达数十微米,黏土矿物晶体间可形成大量几纳米级别的晶间孔,再到单个硅铝层尺度,发育大

表1 页岩样品基本特征及不同类型孔隙含量计算结果  
Table 1 Basic characteristics of shale gas samples and calculated content of different pore types

编号	深度/ m	是否参 与建模	TOC/ %	石英/ %	黏土/ %	孔体积/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	计算孔体积/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	不同类型孔隙占比/%		
								有机孔	黏土矿物 有关孔	脆性矿物 晶间孔
PY1-2	2 156.98	是	3.52	63.0	29.0	0.011 1	0.010 6	70.6	10.4	19.0
PY1-6	2 151.20	是	3.63	55.6	23.3	0.010 5	0.010 8	71.6	8.2	20.2
PY1-13	2 134.77	是	1.88	41.0	32.0	0.004 6	0.007 0	44.4	29.4	26.2
PY1-22	2 106.35	是	0.90	34.0	34.0	0.005 9	0.005 5	27.2	40.1	32.7
LY1-6	2 828.68	是	4.87	55.8	23.0	0.014 8	0.013 5	77.2	6.6	16.3
LY1-12	2 820.24	是	4.50	53.0	22.0	0.012 1	0.012 7	75.8	6.6	17.6
LY1-18	2 805.50	是	1.70	41.0	30.0	0.006 2	0.006 7	42.3	29.1	28.5
LY1-19	2 794.40	是	1.38	33.8	41.0	0.006 5	0.006 5	35.0	40.5	24.5
LY1-9	2 824.42	否	5.04	58.6	21.8	0.015 4	0.013 8	60.4	10.2	29.4
LY1-17	2 807.46	否	2.40	37.0	38.0	0.008 9	0.008 3	47.7	29.4	22.9
PY1-1	2 157.78	否	2.22	40.3	42.7	0.008 3	0.008 0	45.9	34.5	19.6
PY1-23	2 097.51	否	0.61	33.0	26.0	0.004 6	0.004 4	23.0	38.1	38.9

量 $<2 \text{ nm}$ 的晶内孔,其中晶间孔及晶内孔需要更高分辨率SEM才能识别。多尺度孔隙组合使得黏土矿物有关孔呈现出树形孔隙网络特征<sup>[20-21]</sup>,层间缝为树干,晶间孔为次级树干,晶内孔为树叶,该类孔隙也具有较好的内在连通性。另外,黏土矿物及有机质通常呈长条形或连片展布(图2a、2d),有效增加了孔隙网络连通的长度。石英、碳酸盐等脆性矿物也能形成晶间孔或溶蚀孔,但孔隙多呈孤立状分布(图2f),对页岩连通性的贡献有限。

### 2.2 连通孔隙组合类型

孔隙组合是指在成因上具有联系、空间上相邻出现的2类或多类孔隙,比如砂岩储层中的残留粒间孔和粒间溶蚀孔组合<sup>[21]</sup>、晶间孔和微裂缝组合等,不同孔隙组合通常具有差异明显的孔喉连通关系。连通孔隙组合则更加突出连通性,孔隙间相互组合、沟通,能够明显增加页岩储层的孔隙连通性及连通路径长度。通过大量SEM观察,发现页岩样品中主要

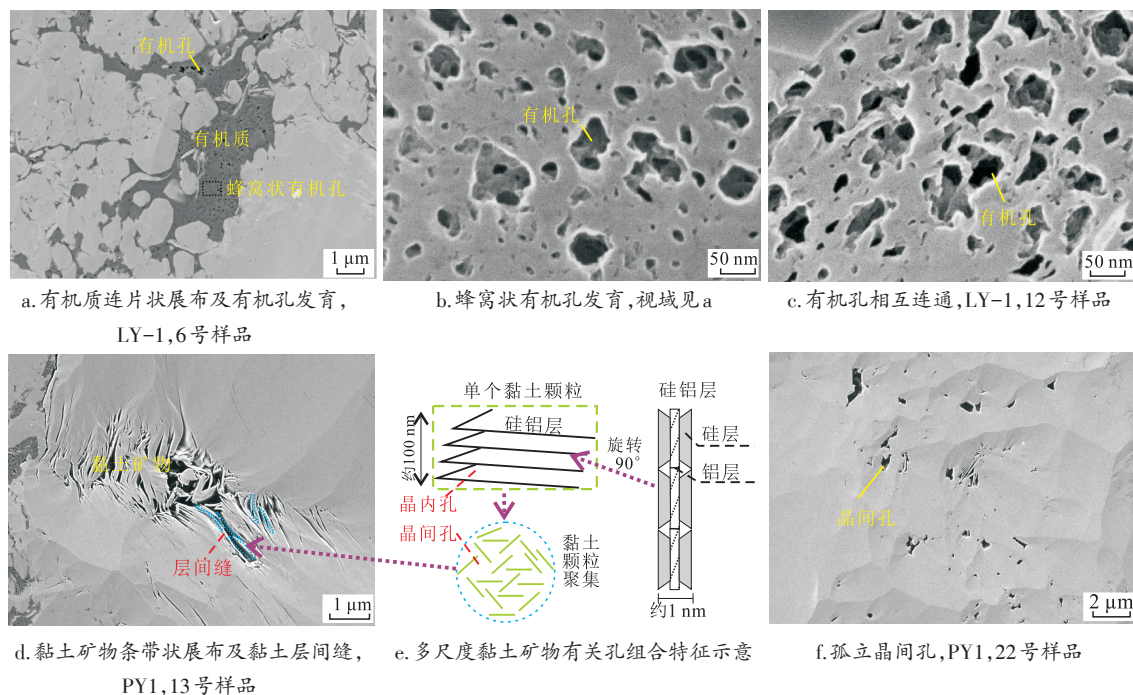


图2 彭水地区龙马溪组页岩样品主要孔隙类型镜下特征

Fig. 2 Microscopic characteristic of main pore types of shale samples of Longmaxi formation in Pengshui area of Sichuan Basin

发育4类连通孔隙组合:

1) 有机孔相互连通组合。即单个有机质内有有机孔相互沟通,多个相邻有机质颗粒组合形成大面积连片展布的连通孔隙网络。有机质在页岩中具有2类分布形式:一是原地有机质<sup>[22-23]</sup>,沿页岩纹层定向富集分布,该类有机质分布范围大,通常具有较为规则的外形;二是迁移有机质(或称为运移固态有机质)<sup>[22-23]</sup>,赋存在黏土矿物或脆性矿物晶体之间,分布较分散、外形不规则,主要与成岩过程中沥青或液态烃的运移有关<sup>[23]</sup>。在石英、碳酸盐微晶发育区域,晶间孔或粒间孔发育、且连通性好,后期赋存大量的运移固态有机质,进入高一过成熟阶段后,可形成大量有机孔,且石英、碳酸盐等脆性矿物能有效保存这类孔隙<sup>[23]</sup>;同时石英、碳酸盐微晶通常与原地有机质相连,形成大面积连通的有机孔隙网络。该类组合在富含有机质硅质页岩中最为发育,因其发育大量的生物成因石英微晶(图3a)。

2) 有机孔—微裂缝连通组合。有机孔隙网络被长距离延伸的微裂缝沟通,进一步拓宽有机孔连通路程长度。根据微裂缝形成时间,可分为2类:一类是微裂缝形成较晚,由于有机质和脆性颗粒间接触处为受力软弱面,构造作用形成的微裂缝倾向于沿着软弱面延伸,使得距离较远的有机质通过微裂

缝沟通(图3b);另一类是微裂缝形成时间较早,成岩过程中沥青或游离烃会沿微裂缝运移,进而形成沿裂缝分布的运移固态有机质(图3c)。

3) 有机孔—黏土矿物有关孔连通组合。有机孔隙网络被黏土矿物有关孔沟通形成较长连续路径,其中有机质颗粒充填在黏土层间缝或黏土矿物与相邻脆性矿物之间的晶间孔内,单个有机质颗粒被黏土矿物聚合物隔开,相邻有机质颗粒内的孔隙网络需要依靠黏土矿物有关孔沟通(图3d、3e)。该组合的成因过程为:自生黏土矿物首先形成,运移固态有机质会赋存在较大的颗粒晶间孔或黏土层间缝中,但难以赋存在较小的黏土矿物晶间孔或晶内孔,这利于黏土孔隙网络的保存。同时,在成岩过程中,黏土矿物容易弯曲变形、甚至折断(图3e),会缩小或堵塞渗流通道,使得运移固态有机质基本不沟通,必须依靠黏土有关孔来连接。同时,黏土矿物偏塑性,在黏土与脆性矿物接触处或黏土矿物内部为微裂缝发育部位(图3d),微裂缝极大提高了该类孔隙组合的连通性。

4) 局部可见黏土矿物有关孔—脆性矿物晶间孔连通组合。黏土矿物有关孔沟通脆性矿物晶间孔。在该类组合中,通常赋存少量的运移固态有机质,说明该类孔隙组合孔喉较小,且连通路程较短。

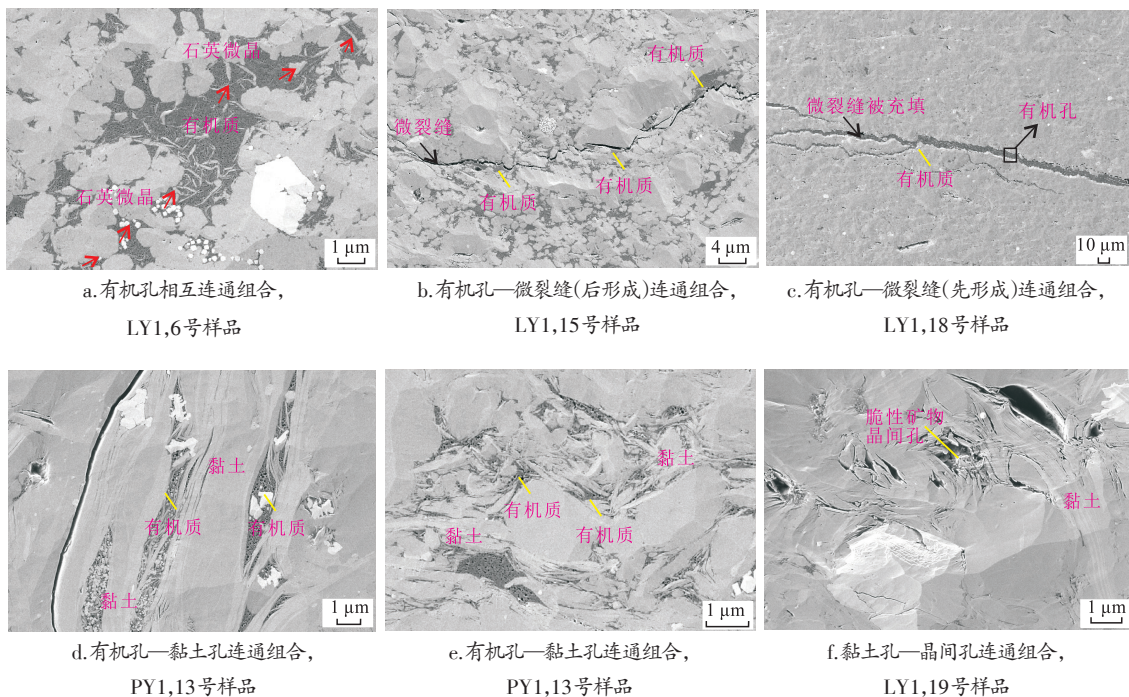


图3 彭水地区龙马溪组页岩样品中连通孔隙组合类型

Fig. 3 Types of connected pore assemblages of shale samples of Longmaxi formation in Pengshui area in Sichuan Basin

## 2.3 不同岩性页岩连通孔隙组合分布特征

页岩中连通孔隙组合的发育程度受不同类型孔隙发育比例,以及有机质、黏土矿物和微裂缝等发育特征等影响。对于具有相似沉积环境的页岩,单位质量某组分所含孔隙体积应该为定值,即某种类型孔隙体积应该与相应组分的含量密切相关。有机孔、黏土矿物有关孔和脆性矿物晶间孔是页岩主要的孔隙类型,因此,页岩总孔体积可近似为3类孔隙体积之和,根据上面假设,联物质平衡方程及边界条件,可建立如下方程组:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N (V_{OM} W_{OMi} + V_{clay} W_{clayi} + V_s W_{si}) = V_i \\ W_{OMi} + W_{clayi} + W_{si} = 1 \\ V_{OM} > 0, V_{clay} > 0, V_s > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $W_{OMi}$ 、 $W_{clayi}$ 、 $W_{si}$  为第  $i$  块样品的有机质、黏土矿物或脆性矿物的质量分数,%;  $V_{OM}$ 、 $V_{clay}$ 、 $V_s$ 、 $V_i$  为单位质量有机质、黏土矿物、脆性矿物和第  $i$  块样品的孔隙体积,  $\text{cm}^3/\text{g}$ 。

将所有样品的物质组分和孔体积带入上述公式,可优化求解出  $V$ ,进而计算页岩中每类孔隙体积及其相对比例。选取8块页岩样品参与建模,另外4块样品作为验证(表1),参与建模样品计算总孔体积与实测值间相关系数达87%,验证样品计算孔体积的相对误差平均值为6.45%,说明模型的计算精度较高,适用于孔隙类型含量计算。单位质量  $TOC$ 、黏土矿物和脆性矿物所含孔隙的体积为  $0.1656 \text{ cm}^3/\text{g}$ 、 $0.00646 \text{ cm}^3/\text{g}$  和  $0.00271 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。对于富有机质页岩,有机孔、黏土孔和脆性矿物晶间孔的比例为74:8:18,说明有机孔占主导,黏土孔比例最少;对于中有机质页岩,3类孔隙发育比例为43:29:27,有机孔仍最发育,但比例明显降低,黏土孔和脆性矿物晶间孔比例相当;而贫有机质页岩,发育比例为31:41:28,黏土孔明显占优,有机孔和脆性矿物晶间孔的比例较为接近。

在孔隙类型发育特征刻画基础上,结合SEM图像,分析不同页岩中连通孔隙组合类型的发育特征。富有机质页岩通常具有较高的石英微晶和有机孔含量,有机孔相互连通组合和有机孔—微裂缝组合最发育,有机孔—黏土矿物有关孔连通组合类型局部发育,且黏土矿物多分布在有机质内部(图2a),对有机孔连通网络的破坏程度有限;对于中有机质页岩,有机孔和石英微晶含量降低、黏土矿物有关孔

增多,有机孔相互连通组合逐渐被有机孔—黏土矿物有关孔连通组合取代(图3d),黏土孔—脆性矿物晶间孔和有机孔—微裂缝连通组合局部发育;对于贫有机质页岩,黏土有关孔含量最多,有机孔—黏土矿物有关孔连通组合和黏土矿物有关孔—脆性矿物晶间孔最发育(图3f),有机孔相互连通组合局部发育,且连通路径的长度有限。

## 3 页岩孔喉连通关系

### 3.1 孔喉组合类型及大小分布

孔喉连通关系就是研究孔喉大小、组合类型、配位数和孔喉比等内容,连通性影响着致密储层内流体的运移方式及动用程度,孔喉越粗、配位数越多、孔喉比越小,储层流体可动程度越高、越不容易发生水锁伤害等<sup>[23]</sup>。孔隙配位数是指某一孔隙与相连孔隙间相互连通的喉道数,通常需要借助纳米CT或FIB-SEM手段进行定量刻画,而本文主要利用流体法刻画页岩孔隙连通性,并没考虑配位数这个参数。目前常用的孔喉组合包括“大孔—细喉型”(即球棍型)<sup>[21]</sup>、树形孔隙<sup>[20]</sup>和短导管状孔隙网络<sup>[19]</sup>3类,其中“大孔—细喉”型主要发育在砂岩这类粒间孔相对发育的储层中,树形孔隙网络主要描述黏土矿物孔隙这类具有多尺度孔隙组合特征的储集空间,而短导管状主要刻画粒内溶蚀孔这类蜂窝状形态的储集空间。页岩粒度细,压实作用导致颗粒或矿物晶体间片状、弯片状喉道基本消失或被黏土矿物、有机质等充填,缺少形成“大孔—细喉”的“喉道”基础;同时有机孔和黏土矿物有关孔是页岩气储层主要孔隙类型,两者均属于次生孔隙,前者形成于生排烃过程,在高成熟度阶段页岩有机孔通常呈蜂窝状,符合短导管状组合;而后者形成于自生黏土胶结作用,多尺度孔隙合理组合能保证次级孔隙被上级别的孔隙沟通,符合树形孔隙网络。若将喉道定义为连接2个较宽孔隙空间之间的狭窄部分,则在有机孔、黏土矿物有关孔隙网络中喉道和孔隙的区分已经不明显。

压汞法是刻画储层孔喉组合和大小常用实验手段。页岩样品的压汞曲线呈现较好相似性(图4a),均表现出“高排驱压力、高退汞效率和上凸形态”的特征。页岩排驱压力点均  $> 13.7 \text{ MPa}$ ,说明主要孔喉半径  $< 53 \text{ nm}$ ,孔喉以纳米级别为主;进汞曲线呈上凸形,随压力增加,进汞量缓慢增加,不存在“在较窄

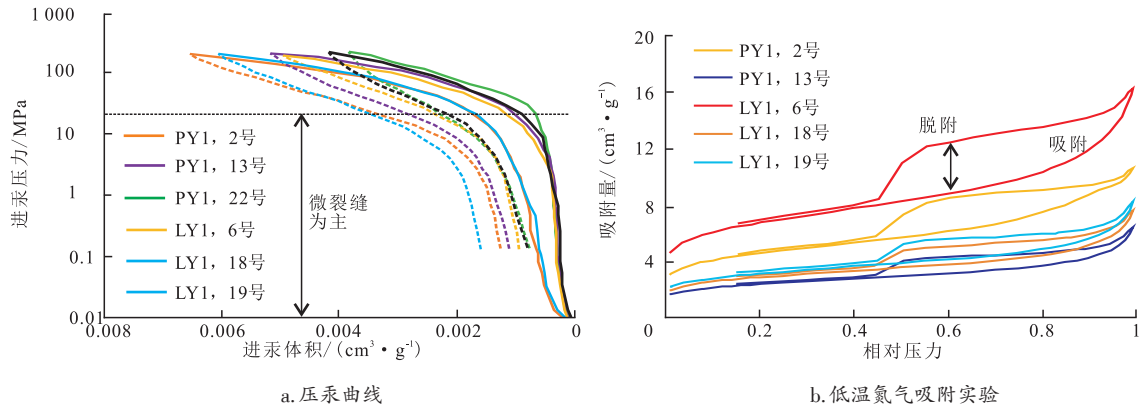


图4 典型龙马溪组页岩样品高压压汞和低温氮气吸附实验结果对比

Fig. 4 Experimental results of high pressure mercury injection and low temperature nitrogen adsorption for typical shale samples of Longmaxi formation

压力范围内进汞量突增”,说明页岩储层中基本不发育“大孔—细喉型”孔喉组合,同时较高的退汞效率(均值 $>77\%$ )也说明页岩储层发育树形及短导管状孔隙这类孔喉区分较小的组合类型。低温氮气吸附实验结果见图4b,页岩样品的氮气吸附曲线均呈现“S”型,当相对压力 $PIP_0 > 0.45$ 时,吸附曲线和脱附曲线间存在明显滞后环,可反映孔隙形态。随TOC增大,滞后环形态由H3型逐渐过渡为H2型为主,说明由贫有机质到富有机质页岩,“平行板状孔”比例逐渐降低,而“墨水瓶型”孔比例增多,这与SEM观察和公式计算结果一致。

### 3.2 不同孔隙组合页岩的孔喉连通特征

对于页岩这类纳米级孔喉主导的储层,压汞法在刻画孔喉连通关系方面存在明显不足。实验过程中采用较高压力才能将汞注入到页岩孔隙中,但高压会改变原有孔喉连通关系,如产生裂缝或破坏黏土矿物形态等,这也可能是导致退汞效率高的一个原因。而低温氮气吸附是在较低压力下测量连通孔隙,除需要粉碎样品外,基本不破坏原有孔隙结构。将两种实验结合能有效弥补上述缺陷,深化页岩孔喉组合关系研究。

两种实验在测量原理上具有明显区别,压汞法测量孔喉体积,即与喉道相连的孔隙体积,且随进汞压力增加,汞充填顺序是从粗孔喉到细孔喉,早期充注的汞不会遮挡后期汞的充注;而低温氮气吸附开始时,氮气首先在孔隙表面发生单层或多层吸附,随相对压力( $PIP_0$ )增加,氮气在微孔和介孔中发生毛细管凝聚<sup>[18]</sup>,顺序为由小孔隙到大孔隙,根据毛细管凝

聚现象,氮气吸附实验能刻画储集空间大小,但是氮气的凝聚会堵塞孔隙空间,影响氮气的继续充注。3类孔喉组合下高压压汞和低温氮气吸附测试过程见图5、图6。对于大孔—细喉型,压汞法测量孔喉分布与氮气吸附测量的储集空间分布明显不同,如当进汞压力为 $P_1$ (对应孔喉半径 $r$ )时,进汞量为喉道体积 $A_2$ 和与之相连的孔隙体积 $B_2$ ,当相对压力为 $P_1/P_0$ (对应半径也为 $r$ )时,氮气仅在喉道 $A_2$ 中凝聚,且 $B_2$ 被 $A_2$ 中凝聚的氮气遮挡难以继续充注,由此可见当储层中发育大孔—细喉型这类孔喉比相对较大的组合类型时,压汞孔喉分布会明显高于低温氮气吸附得到的孔隙分布。而对于树形孔隙或短导管状组合,孔喉无明显区分,次级孔隙通常被上一级孔隙直接沟通,早期发生毛细管凝聚的孔隙基本不影响较大孔隙中氮气的充填,两种实验揭示的孔喉或储集空间基本相同,测量结果相差较小。

不同页岩样品两种实验结果对比见图7。对于富有机质页岩(LY1-6、PY1-2),压汞法测得孔喉分布与低温氮气吸附实验结果(DFT模型)基本重合(图7b)或稍低(图7a),说明该类页岩整体孔喉比较小;对于中有机质页岩(LY1-18、PY1-13),压汞法孔喉分布明显高于氮气吸附实验(图7c、7e),说明孔喉比最大;而贫有机质页岩(LY1-19、PY1-22),压汞法孔喉分布稍高于低温氮气吸附实验,说明孔喉比中等。富有机质页岩以有机孔相互连通组合和有机孔—微裂缝组合为主,表现为短导管状孔隙网络,说明这种孔隙网络的孔隙和喉道区分不明显或孔喉比较小;对于中有机质页岩,黏土孔—有机孔组合类型较为发育,说明这类组合具有较大的孔喉比,有机孔隙

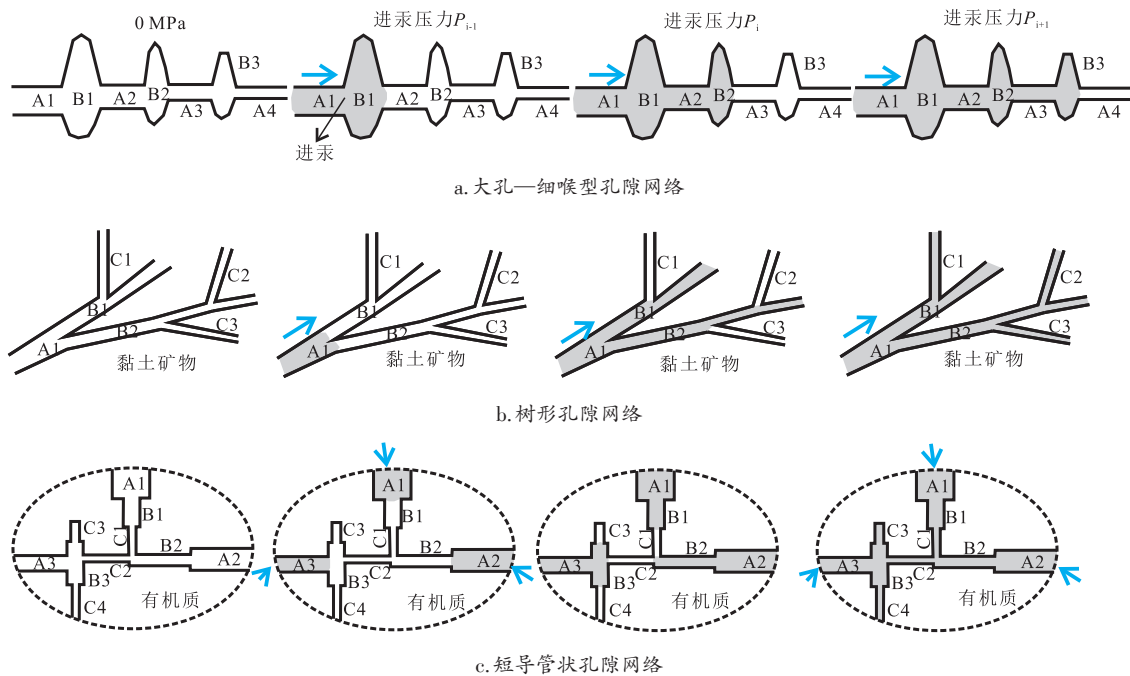


图5 汞在三类孔喉网络中的充填过程

Fig. 5 Intrusion process of mercury in three types of pore-throat networks

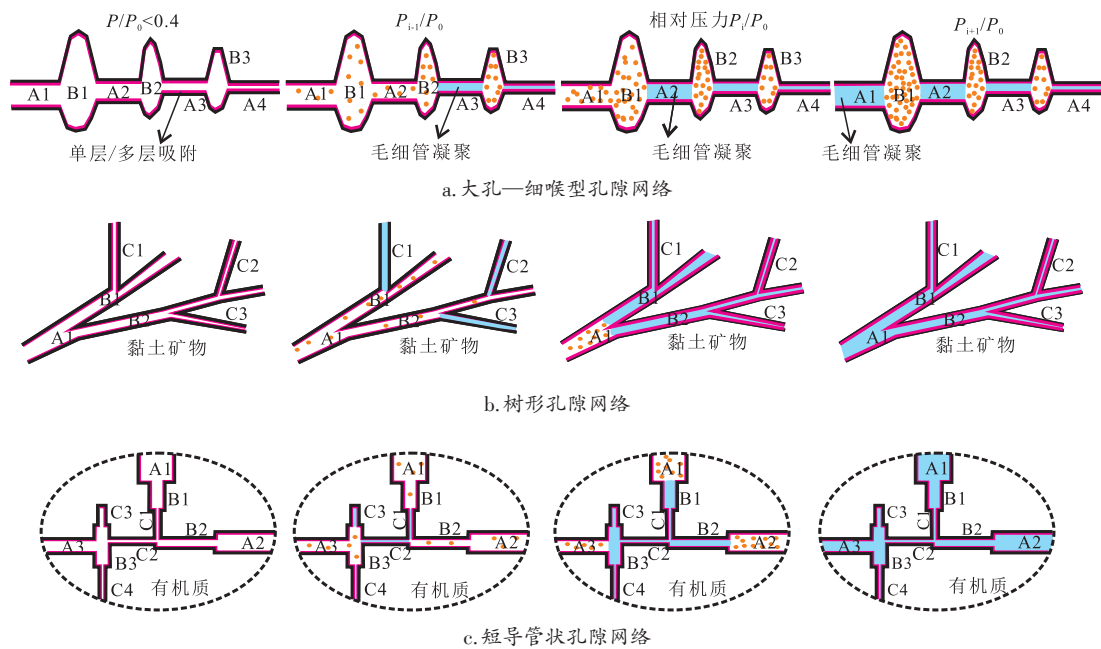


图6 临界温度下氮气在三类孔喉网络中的吸附、凝聚过程

Fig. 6 Adsorption and condensation of nitrogen in three types of pore-throat networks at critical temperature

网络被黏土矿物聚合体遮挡或被黏土矿物有关孔沟通,形成短导管状—树形孔隙复合网络,在两种不同类型孔隙网络之间呈现出较大的孔喉比;而贫有机质页岩的TOC/黏土矿物含量偏低,除发育有机孔—黏土孔连通组合外,黏土孔—脆性矿物晶间孔组合

比例也较高(树形孔隙,孔喉比较小),导致该类页岩的孔喉比整体小于中有机质页岩。

在富有机质页岩样品中,通常可见压汞孔喉分布低于氮气吸附孔隙分布的情况,这可能由于氮气吸附实验采用粉碎样品(60~80目),而压汞实验时

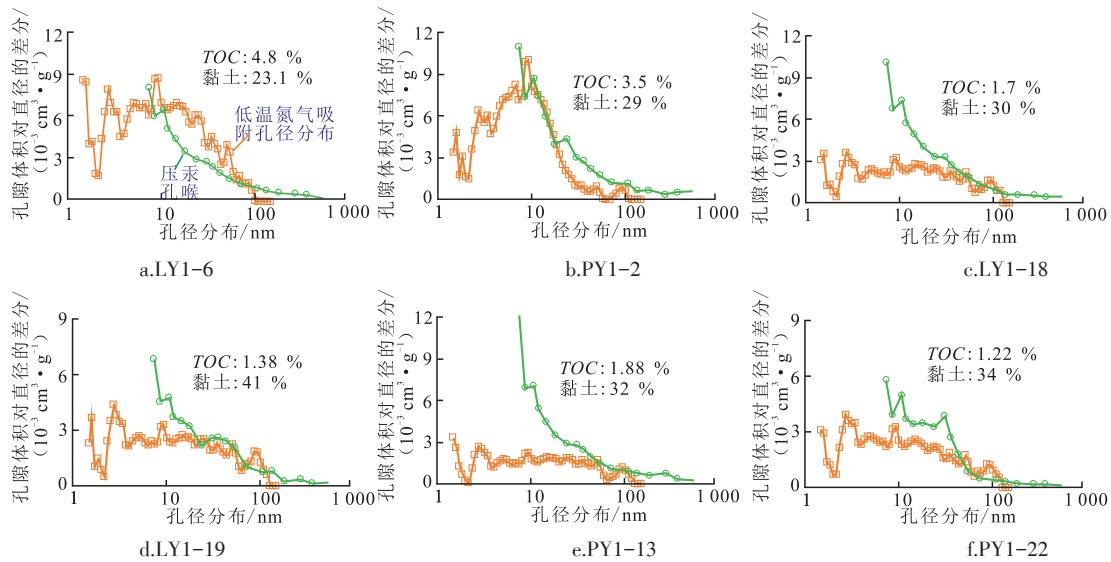


图7 压汞孔喉分布与低温氮气吸附孔径分布对比

Fig. 7 Comparison of pore-throat distributions derived from mercury intrusion and low temperature nitrogen adsorption

采用柱样,适当粉碎样品可提高内部孔隙与样品外表面接触的概率,减小毛细管凝聚堵塞孔隙的影响。对比2块页岩样品在不同粉碎目数下孔径分布(图8)可知,对于贫有机质页岩,当目数>120时(图8b),较大孔(30~100 nm)含量明显增高,说明页岩样品中很多较大孔隙受毛细管凝聚遮挡的影响,无法被低温氮气吸附测量,同时也指示该类样品较大的孔喉比,而富有机质页岩的孔径变化不大(图8a),也验证了该类样品中孔喉比较小或无区分,基本不受毛细管凝聚遮挡影响。

#### 4 页岩孔喉连通关系对页岩气开发的启示

在压裂过程中,大量压裂液直接与原状页岩气

层接触,并快速渗吸到页岩储层中,后续很难返排。页岩气井通常表现出压裂液返排率越低、产能越高的现象<sup>[24]</sup>,但压裂液滞留对页岩气产出的影响机理还不明确<sup>[25]</sup>。滞留压裂液一方面会置换部分页岩气,同时也会对页岩气的渗流产生明显伤害。对于有机孔相互连通组合,滞留压裂液通常位于有机孔表面(当干酪根含氮氧官能团时表现亲水性)或较小的有机孔内,尽管会降低页岩气的渗流能力,但较小的孔喉比和好的内在连通性,压裂液基本不会引起水锁伤害。而对于有机孔—黏土孔连通组合,通常具有相对大的孔喉比,黏土矿物晶间孔为窄喉道,控制着有机孔隙网络中流体渗流,且黏土亲水性明显强于干酪根,水会优先吸附在黏土矿物晶间孔和晶内孔表面,进一步缩小“喉道”,造成严重的水锁伤害,导致有机孔中赋存的页岩气很难流动,当黏土遇水膨胀

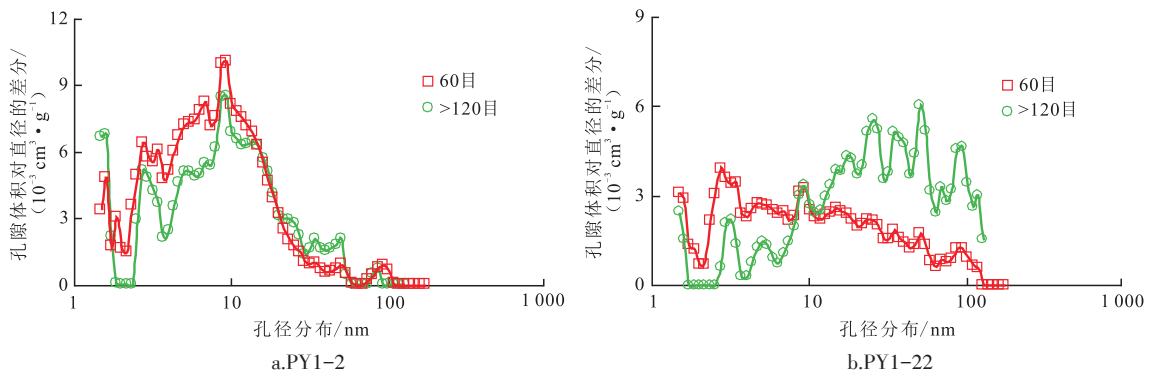


图8 不同目数页岩样品低温氮气吸附孔径表征结果对比

Fig. 8 Comparison of pore distribution derived from nitrogen adsorption of shale samples with different mesh numbers

产生微裂缝时,该现象会有所减弱。因此,压裂液对不同连通孔隙组合页岩储层的伤害程度差异很大。对于富有机质硅质页岩,压裂液滞留的伤害并不明显,而对于有机孔—黏土孔连通组合发育的页岩(如中有机质页岩),尽量避免水基压裂液的滞留,减少对页岩气产出的影响。

## 5 结论

1) 页岩气储层发育有机孔相互连通、有机孔—微裂缝连通、有机孔—黏土孔连通、黏土孔—脆性矿物晶间孔连通4类孔隙组合类型。富有机质页岩以有机孔相互连通、有机孔—微裂缝组合类型为主,随TOC降低,有机孔—黏土孔连通组合比例增大。

2) 页岩样品以几至几十纳米级别孔喉为主,大孔—细喉型不发育,整体表现出较小孔喉比。有机孔相互连通组合发育的样品,对应短导管状组合模式,孔喉比最小,而有机孔—黏土孔连通组合发育的样品,发育树形孔隙—短导管状复合网络模式,孔喉比较大。

3) 孔喉组合类型及孔喉比影响压裂液滞留对页岩气储层伤害程度。以有机孔相互连通组合为主的富有机质页岩的孔喉比小,水锁伤害较弱,而以有机孔—黏土孔连通组合为主的中、贫有机质页岩,孔喉比较大,黏土亲水性强,水锁伤害较为严重。

### 参考文献

[1] 邱振,邹才能,李建忠,等.非常规油气资源评价进展与未来展望[J].天然气地球科学,2013,24(2):238-246.

[2] 邹才能,丁云宏,卢拥军,等.“人工油气藏”理论、技术及实践[J].石油勘探与开发,2017,44(1):144-154.

[3] 金之均,胡宗全,高波,等.川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J].地学前缘,2016,23(1):1-10.

[4] 邹才能,董大忠,王玉满,等.中国页岩气特征、挑战及前景(一)[J].石油勘探与开发,2015,42(6):689-701.

[5] 贾爱林,位云生,金亦秋.中国海相页岩气开发评价关键技术进展[J].石油勘探与开发,2016,43(6):949-955.

[6] 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.

[7] TANG X, JIANG Z, SHU J, et al. Characteristics and origin of in-situ gas desorption of the Cambrian Shuijingtuo Formation shale gas reservoir in the Sichuan Basin, China[J]. Fuel, 2017, 187: 285-295.

[8] 康毅力,张晓怡,游利军,等.页岩气藏自然返排缓解水相圈闭损害实验研究[J].天然气地球科学,2017,28(6):819-827.

[9] 张琴,刘畅,梅啸寒,等.页岩气储层微观储集空间研究现状

及展望[J].石油与天然气地质,2015,36(4):666-674.

[10] SUN M, YU B, HU Q, et al. Pore connectivity and tracer migration of typical shales in south China[J]. Fuel, 2017, 203: 32-46.

[11] YANG R, HAO F, HE S, et al. Experimental investigations on the geometry and connectivity of pore space in organic-rich Wufeng and Longmaxi shales[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 84: 225-242.

[12] YANG R, HE S, YI J Z, et al. Nano-scale pore structure and fractal dimension of organic-rich Wufeng-Longmaxi shale from Jiaoshiba area, Sichuan Basin: Investigations using FE-SEM, gas adsorption and helium pycnometry[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 70(1): 27-45.

[13] KLAVER J, HEMES S, HOUBEN M, et al. The connectivity of pore space in mudstones: insights from high-pressure Wood's metal injection, BIB-SEM imaging, and mercury intrusion porosimetry[J]. Geofluids, 2015, 15(4): 577-591.

[14] HU Q, LIU X, GAO Z, et al. Pore structure and tracer migration behavior of typical American and Chinese shales[J]. Petroleum Science, 2015, 12(4): 651-663.

[15] 何希鹏,高玉巧,唐显春,等.渝东南地区常压页岩气富集主控因素分析[J].天然气地球科学,2017,28(4):654-664.

[16] GB/T 31483-2015.页岩气地质评价方法[S].北京:中国标准出版社,2015.

[17] WASHBURN E W. The dynamic of capillary flow[J]. Physical Review, 1921, 17(3): 273-283.

[18] THOMMES M. Physical adsorption characterization of nanoporous materials[J]. Chemie Ingenieur Technik, 2010, 82(7): 1059-1073.

[19] JIANG C B, BRYANT S, DAIGLE H. A bundle of short conduits model of the pore structure of gas shale[C]// paper URTEC-2169349-MS presented at the Unconventional Resources Technology Conference, 20-22 July 2015, San Antonio, Texas, USA.

[20] SAKHAEI-POUR A, BRYANT S L. Effect of pore structure on the producibility of tight-gas sandstones[J]. AAPG Bulletin, 2014, 98(4): 663-694.

[21] XIAO D S, JIANG S, THUL D, et al. Combining rate-controlled porosimetry and NMR to probe full-range pore throat structures and their evolution features in tight sands: A case study in the Songliao Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 83: 111-123.

[22] 胡宗全,杜伟,彭勇民,等.页岩微观孔隙特征及源—储关系——以川东南地区五峰组—龙马溪组为例[J].石油与天然气地质,2015,36(6):1001-1008.

[23] 王香增,张丽霞,雷裕红,等.低熟湖相页岩内运移固体有机质和有机质孔特征——以鄂尔多斯盆地东南部延长组长7油层组页岩为例[J].石油学报,2018,39(2):141-151.

[24] 刘乃震,柳明,张士诚.页岩气井压后返排规律[J].天然气工业,2015,35(3):50-54.

[25] 张涛,李相方,王永辉,等.页岩储层特殊性质对压裂液返排率和产能的影响[J].天然气地球科学,2017,28(6):828-838.

(编辑 尹淑容)