

引用格式:蔡潇,靳雅夕,叶建国,等.一种页岩有机孔与无机孔定量表征的方法[J].油气藏评价与开发,2020,10(1):30-36.

CAI X, JIN Y X, YE J G, et al. A quantitative characterization method for organic and inorganic pores in shale[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(1): 30-36.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.01.005

# 一种页岩有机孔与无机孔定量表征的方法

蔡潇,靳雅夕,叶建国,彭柳,孙婧榕,朱一川

(中国石化华东油气分公司勘探开发研究院,江苏扬州 225007)

**摘要:**扫描电镜图像处理后得到的面孔率结果能够有效反映页岩有机质孔隙的发育程度,在统计样本足够大的前提下能够相对准确地定量表征有机质孔隙的规模大小。由于受扫描电镜绝对分辨率的限制,面孔率结果在小于2 nm的孔径范围内低估了有机孔含量,需要通过吸附法得到的孔径分布结果进行校正,再结合TOC和有效孔隙度来计算页岩有机质孔隙度,从而间接得到有机孔和无机孔比例。渝东南地区4口页岩气井的数据表明武隆和东胜地区以有机孔为主,底部①至②小层的有机孔比例高,最高可达85.89%;彭水地区受有机碳控制,有机孔比例不高于20%;平桥地区有机孔比例在20%~30%,层理缝及纹层构造相对发育,尤其是纹层构造中碎屑颗粒与泥质互层间可能存在的裂隙或粒缘缝对无机孔的贡献较大。有机孔比例主要受有机质丰度与有机质孔隙发育程度的影响,有机孔比例与TOC含量在纵向上的变化规律高度一致。

**关键词:**页岩;孔隙;有机孔;无机孔;定量

中图分类号:TE135

文献标识码:A

## A quantitative characterization method for organic and inorganic pores in shale

CAI Xiao, JIN Yaxi, YE Jianguo, PENG Liu, SUN Jingrong, ZHU Yichuan

(Exploration and Development Research Institute, Sinopec East China Oil and Gas Company, Yangzhou, Jiangsu 225007, China)

**Abstract:** The results of surface porosity obtained by scanning electron microscopy image processing can effectively reflect the development degree of shale organic matter pore. On the premise that the statistical sample is large enough, the pore size of organic matter can be quantitatively characterized relatively accurately. Due to the limitation of absolute resolution of scanning electron microscopy, the organic pore content was underestimated in the pore size range of less than 2 nm. The results of pore size distribution obtained by adsorption method need to be corrected. Combined with TOC and effective porosity, the porosity of shale organic matter can be calculated, and the proportion of organic and inorganic pore can be obtained indirectly. The data of 4 shale gas wells in southeastern Chongqing show that organic pore is the main type in Wulong and Dongsheng area, and the proportion of organic pore in bottom layer(① to ②) is high, up to 85.89%. Pengshui area is controlled by organic carbon, and the proportion of organic pore is not more than 20%. The organic pore proportion in Pingqiao area ranges from 20% to 30%, and the bedding fissures and laminar structures are relatively developed, especially the possible fissures or grain margin fissures between clastic particles and muddy interbeds in laminar structures contribute greatly to the inorganic pore. The proportion of organic pore is mainly affected by the abundance of organic matter and the degree of pore development of organic matter. The ratio of organic pore is highly consistent with the variation of TOC content in the vertical direction.

**Key words:** shale, pore, organic pore, inorganic pore, quantify

收稿日期:2019-07-24。

第一作者简介:蔡潇(1988—),男,本科,工程师,主要从事石油地质实验方面的研究工作。通讯地址:江苏省扬州市邗沟路50号,邮政编码:225100。E-mail: caixiao2370@sina.com

基金项目:“十三五”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);中国石化科技部项目“渝东南盆缘转换带页岩气富集主控因素研究”(P18057-2)。

页岩气是“生—储—聚”三位一体的非常规天然气藏,其孔隙结构是衡量页岩是否具有储气能力和开采价值的关键指标之一<sup>[1-3]</sup>。页岩孔隙特征及发育程度决定了页岩气的赋存状态<sup>[4-5]</sup>,间接影响了页岩气的开发效果<sup>[6-8]</sup>。而页岩孔隙结构复杂,微、纳米级孔隙网络发育,孔隙类型多样,是典型的特低孔特低渗介质<sup>[9-13]</sup>。JARVIE等<sup>[14]</sup>研究认为,页岩孔隙主要以有机质生烃形成的孔隙为主。LOUCKS等<sup>[15]</sup>研究发现页岩中还存在大量的矿物晶间孔、矿物粒间孔及黏土矿物粒内孔隙。微裂缝的存在也不容忽视,其尺度从纳米级至毫米级,是页岩气重要的储集空间和渗流通道<sup>[16-19]</sup>。按照前人的研究成果,可将页岩储集空间主要分为有机孔、无机孔和微裂缝3个大类。

不同页岩微观孔隙的类型、大小、发育程度和连通性存在很大的差异,如何在定性研究的基础上对有机孔与无机孔进行定量表征是进一步确定页岩储集空间类型的发展趋势。目前,计算有机孔与无机孔比例的方法还较少,仍处于探索和研究阶段。卢双舫等<sup>[20]</sup>基于孔隙润湿性的差异对有机孔与无机孔比例进行了估算,研究认为有机孔表现为混合润湿相,而无机孔则表现为亲水相,通过核磁共振实验将亲水相与亲油相区分开来,进而计算得到有机孔与无机孔的比例。该方法的理论基础是建立在有机孔与无机孔润湿相的差异之上,但由于页岩组分复杂,有机质类型、黏土矿物类型及温压条件的差异都会对润湿相造成影响,因此,以润湿相作为有机孔与无机孔判断标志存在一定的局限性。基于大量的扫描电镜(SEM)分析结果,对不同探井SEM图像中同一类型有机孔图像进行处理并统计面孔率,结合实验室实测的TOC以及孔径分布结果,计算得到的有机质孔隙度能够直接反映有机孔的大小,再结合孔隙度能够间接地计算有机孔与无机孔的比例。采用的方法相对于润湿相的差异,在判断标示上更加准确,在统计样本数量足够大的前提下,更能够直观地反映有机孔比例的大小。

## 1 样品和实验

### 1.1 样品

渝东南盆缘转换带是目前国内最具商业开发价值的区块,区内广泛分布的五峰—龙马溪组页岩具有高TOC、高孔隙度及高含气量的特点。该地区页

岩有机质内部发育有大量的纳米级孔隙,溶蚀孔、黄铁矿晶间孔和黏土矿物晶间孔等无机孔也普遍存在,同时局部地区和层位可见大量的微裂缝<sup>[21-26]</sup>。因此,该区五峰—龙马溪组是研究页岩有机孔与无机孔比例计算的理想样品。实验样品均选自中国石化华东油气分公司渝东南地区彭水—武隆—平桥—东胜区块的探井岩心,由东向西主要包括彭水地区A井、武隆地区B井、平桥地区C井和东胜地区D井(图1)等4口页岩气井,层位为龙马溪组底部和五峰组上部的优质页岩段,取样密度为每0.5 m选取1个样品。

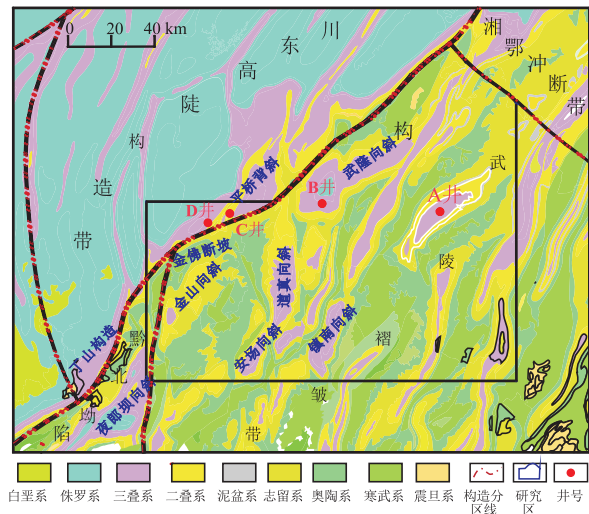


图1 彭水—武隆—南川区块4口页岩气探井分布  
Fig. 1 Distribution of four shale gas exploration wells in Pengshui-Wulong-Nanchuan Block

### 1.2 实验

所有的实验分析工作均在中国石化华东油气分公司非常规油气资源实验中心完成,核心参数中有机碳含量(TOC)测试采用美国力可CS-230型碳硫测定仪;孔隙度测试采用美国岩心实验室Poropdp覆压孔隙度渗透率测试仪;孔径分布特征采用了美国麦克ASAP2020全自动比表面积及微孔物理吸附分析仪;有机孔发育特征采用德国蔡司SIGMA热场发射扫描电子显微镜进行观察分析;其他基础参数如现场含气量测试采用无压阻微压损型“页岩解吸气连续组分自动测试仪”;岩石矿物组成测试采用日本理学Ultima IV组合型多功能水平X-射线衍射仪。

## 2 结果

为了便于对比研究,按照统一的地层划分标准

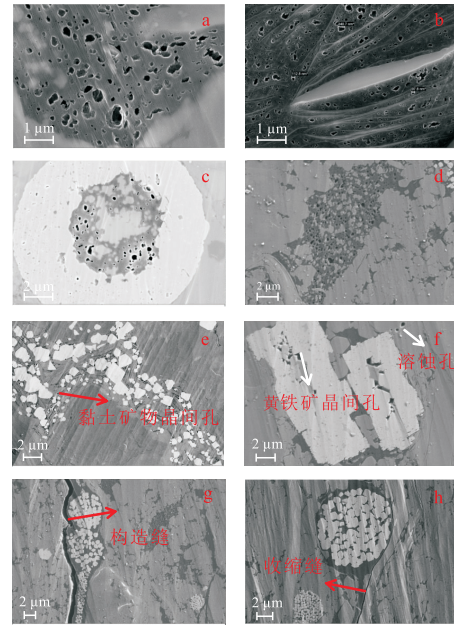
将样品所在的优质页岩段自下而上划分为①至⑤小层,研究中均以小层为单位进行对比分析。研究区4口页岩气井优质页岩段的厚度为30~35 m,岩心岩性均为黑色页岩,含气量和孔隙度的样品按每1 m取1个样品,TOC和全岩矿物分析按照每0.5 m取1个样品,镜质体反射率按照每3 m取1个样品。

实验分析的统计结果如下表1所示:含气量为1.82~3.00 cm<sup>3</sup>/g,孔隙度为2.51%~4.88%,TOC为2.74%~4.11%,镜质体反射率为2.57%~3.01%,矿物成分主要为石英、黏土矿物、长石、碳酸盐矿物和黄铁矿等,其中石英含量为45.5%~54.0%,黏土矿物含量为25.3%~32.7%。

扫描电镜分析的结果表明,4口井有机质形态多样,多呈棱角状填充于矿物颗粒之间,亦可见数十微米大小的块状有机质(图2)。4口井镜质体反射率的范围介于2.57%~3.01%,均处于过成熟阶段,绝大多数有机质内部均可见纳米级孔隙,孔隙大小在几纳米至数百纳米不等(图2a~2d)。无机孔主要以溶蚀孔、黏土矿物晶间孔和黄铁矿晶间孔为主(图2e、2f)。局部可见微裂缝,主要包括构造缝和收缩缝,其中构造缝为由应力挤压导致岩心破裂而形成的裂缝(图2g),收缩缝则多为矿物或有机质脱水导致体积变小而形成的裂缝(图2h)。

### 3 分析与讨论

页岩是典型的多孔介质,相对于常规砂岩储层,页岩的储集空间更小且储集空间类型更加复杂。从扫描电镜观察结果可以看出,有机质孔隙、溶蚀孔、晶间孔、应力缝或收缩缝都能够作为页岩气的储集空间。根据成因可将页岩储集空间分为3大类,即有机孔、无机孔和微裂缝。为了对页岩这3大类储集空间进行准确的定量分析,基于大量扫描电镜图像,对同一类型有机质进行图像处理,从而获得有机质面孔率,并在此基础上结合实验室测试的孔径分布、



a.B井2 833.22 m,块状有机质孔隙发育,孔径从数十至数百微米不等;b.A井2 683.5 m,有机质包裹黏土矿物,孔隙发育;c.D井3 465.2 m,黄铁矿交代生物骨架,内部包裹有机质,孔隙发育;d.B井2 831.95 m,有机质包裹硅质颗粒,孔隙发育;e.A井2 157.88 m,黏土矿物和黄铁矿局部富集,黏土矿物晶间孔发育;f.B井2 831.95 m,白铁矿晶间孔和溶蚀孔;g.B井2 825.56 m,构造缝缝宽可达数百纳米;h.B井2 832.54 m,有机质与矿物颗粒间可见收缩缝

图2 4口井页岩主要发育的孔隙类型

Fig. 2 Main types of pores developed in shale of four wells

TOC和有效孔隙度数据计算得到了有机质孔隙度和有机孔占比。该方法在计算有机孔比例的前提下,间接得到无机孔占比,因此,将局部存在的微裂缝空间纳入了无机孔的范畴,无机孔包含溶蚀孔、晶间孔、应力缝和收缩缝等所有非有机成因的储集空间。

#### 3.1 视面孔率

由于每口井每个层位主要发育的有机孔类型略有不同,为了直观真实地反映有机孔发育程度,选取的图片样本为每口井每个层位中有机质发育最广泛

表1 4口页岩气井页岩的储层基本参数

Table 1 Basic parameters of shale reservoirs in four shale gas wells

井号	含气量/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	孔隙度/%	TOC/%	镜质体反射率/%	石英/%	黏土矿物/%	长石/%	碳酸盐矿/%	黄铁矿等/%	压力系数
A井	1.82	2.51	2.74	2.64	45.5	28.5	11.7	9.8	4.5	0.96
B井	2.16	4.88	4.11	2.57	54.0	25.3	10.2	6.5	4.4	1.08
C井	3.00	3.68	3.40	3.01	50.4	32.7	6.6	6.2	4.5	1.30
D井	2.94	4.47	3.00	2.71	49.2	30.0	6.5	7.0	3.8	1.20

的有机孔类型。如A井上部发育固体沥青孔为主,下部可见生物化石孔,因此,③至⑤小层选取固体沥青孔,而①至②小层为生物化石孔(图3);B井整体上多发育固体沥青孔和无定形干酪根孔,因此,5个小层均选用无定形干酪根孔(图3);C井则上部主要发育固体沥青孔,下部多无定形干酪根孔,且上部多见孔径为数百纳米的大孔,因此,③至⑤小层选取固体沥青孔,而①至②小层选取了无定形干酪根孔(图3)。为了排除不同视域内有机质孔隙发育程度的差异,保证有机质面孔率能代表本小层有机孔发育情况,根据小层的厚度,每层选取的样品数量为2~4个,每个样品中选取了5~8张SEM图像进行有机孔提取,每口井处理的图像数量均超过80张。

面孔率的计算只限制在有机质范围内,面孔率为孔隙面积占有有机质面积的百分比,不包括周缘的无机矿物,因此,该面孔率可理解为有机质中孔隙的

占比。在有机孔图像提取的过程中,通过图像上灰度的差异来区分有机质和孔隙,采用分水岭算法进行阈值分割。实际上,在扫描电镜图像采集过程中,为了图片整体的效果,对比度和亮度并没有完全统一,使有机孔图像处理困难。无论使用哪种阈值分割方法都需要在软件自动识别的基础上进行人工干预来对自动识别不准确的地方进行修改,同时受限于ZEISS SIGMA 场发射扫描电镜绝对分辨率,小于2 nm 的孔隙在SEM图像中并不能很好地显示。若仅使用SEM图像处理的面孔率结果,会严重低估了页岩实际的有机孔数量,因此,将SEM图像处理的面孔率称为视面孔率。表2为研究区视面孔率统计结果。

### 3.2 真面孔率

受实验所用扫描电镜与图像处理分辨率的影响,仅使用图像处理的结果是低估有机质孔隙的含

表2 研究区视面孔率统计结果

Table 2 Statistical result of visual face rate in research area

层号	井号				%
	A井	B井	C井	D井	
⑤小层	3.30	13.73	8.88	28.42	
④小层	5.88	16.71	8.44	14.70	
③小层	7.26	15.50	9.64	13.31	
②小层	7.63	13.64	4.16	22.91	
①小层	5.90	13.00	5.95	20.69	

表3 研究区真面孔率统计结果

Table 3 Statistical result of visual ture rate in research area

层号	井号				%
	A井	B井	C井	D井	
⑤小层	4.08	19.53	13.62	38.88	
④小层	6.74	23.70	11.93	19.81	
③小层	8.04	24.66	14.11	17.58	
②小层	8.34	22.74	5.94	24.12	
①小层	6.45	18.89	8.22	26.77	

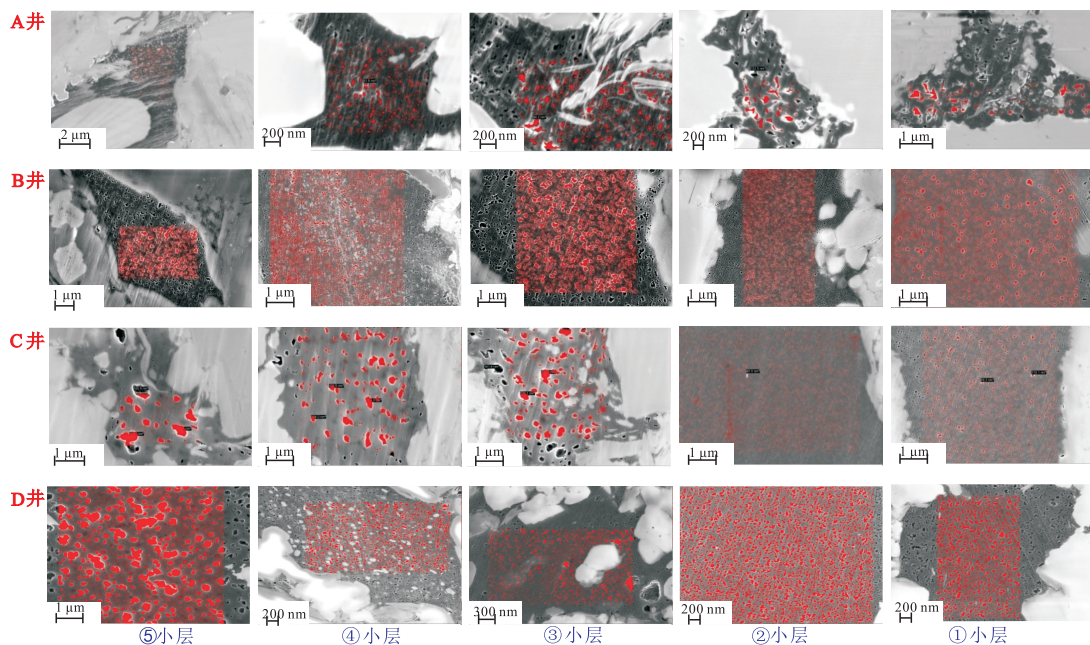


图3 4口井页岩有机孔发育特征

Fig. 3 Development characteristics of organic pore in shale of four wells

量。为了计算得到准确的页岩有机孔数量,需要孔径分布中小于2 nm的孔隙比例。目前表征页岩小于2 nm孔径分布特征的实验方法主要为吸附法,因此,结合液氮吸附实验的结果对小于2 nm的孔隙进行了恢复。在这个过程中,使用扫描电镜图像提取的方式是包含了有机质中不连通的孔隙,而液氮吸附实验的结果则是连通的孔隙,但受实验条件的限制而未考虑连通性的影响。将扫描电镜中提取的有机质孔隙均按照连通孔隙参与计算,可能高估了连通的有机质孔隙含量。按照上述计算原则对面孔率进行换算,换算的结果称为真面孔率(表3)。

$$S_{\text{真}} = \frac{S_{\text{视}}}{100 - D_2} \times 100 \quad (1)$$

式中: $S_{\text{真}}$ 为真面孔率,%; $S_{\text{视}}$ 为视面孔率,%; $D_2$ 为孔径小于2 nm的孔隙比例,%。

### 3.3 有机质孔隙度

实验室通过TOC测试可以得到有机质的质量百分数,根据有机质密度和岩石密度可计算得到有机质体积百分数。选取的样品主要为渝东南地区志留系龙马溪组的黑色页岩,实验室实测的岩石密度范围在2.58~2.70 g/cm<sup>3</sup>,有机质类型主要以I型为主,原始密度为1.3 g/cm<sup>3</sup>,随热演化程度略有升高。统计结果表明有机质体积百分数与质量百分数之比约为2:1,通过TOC即可换算得到有机质经验体积百分数。通过上述有机质面孔率数据,可由式(2)计算得到有机质孔隙度(表4)。

$$\phi_o = \frac{2 \times \text{TOC}}{100 - S_{\text{真}}} \times S_{\text{真}} \quad (2)$$

式中: $\phi_o$ 为有机质孔隙度,%; $\text{TOC}$ 为有机碳含量,%。

表4 研究区有机质孔隙度结果

Table 4 Porosity of organic matter in study area

层号	井号			
	A井	B井	C井	D井
⑤小层	0.13	1.14	0.81	2.42
④小层	0.38	2.92	0.82	1.43
③小层	0.58	3.19	1.01	1.19
②小层	0.60	3.64	0.84	4.45
①小层	0.47	2.22	0.81	3.00

### 3.4 有机孔与无机孔比例

根据上述计算得到的有机质孔隙度结果,与实验室实测的有效孔隙度计算结果进行计算,即可得

到有机孔与无机孔比例。

$$C_o = \frac{\phi_o}{\phi_{\text{有}}} \times 100 \quad (3)$$

$$C_i = 100 - C_o \quad (4)$$

式中: $\phi_{\text{有}}$ 为实验室实测有效孔隙度,%; $C_o$ 为有机孔比例,%; $C_i$ 为无机孔比例,%。

### 3.5 实例分析

B井除含气量外,各项静态指标均处于4口井的较大值(表1)。从有机孔与无机孔的比例来看,B井孔隙发育特征受TOC控制明显,有机孔比例的变化趋势与TOC变化趋势一致,说明B井储集空间中有机孔的贡献更大(图4,图5)。D井与B井极为相似,除⑤小层外,有机孔比例的变化趋势与TOC变化趋势一致,有机孔比例受TOC控制同样明显。其中③至④小层由于TOC含量偏低,有机孔比例较低,而①至②小层TOC含量明显升高,因此,有机孔比例急剧升高。

A井实测的TOC、孔隙度及石英含量均属于几口井的最低值,有机孔主要以固体沥青孔和生物化石孔为主,虽然孔径分布中大孔的比例高,但整体的孔隙度偏低。纵向上有机孔比例随深度的增加有增大的趋势,与其TOC的变化趋势一致(图5,图6)。但有机孔比例偏低的原因与有机质含量及有机孔发育程

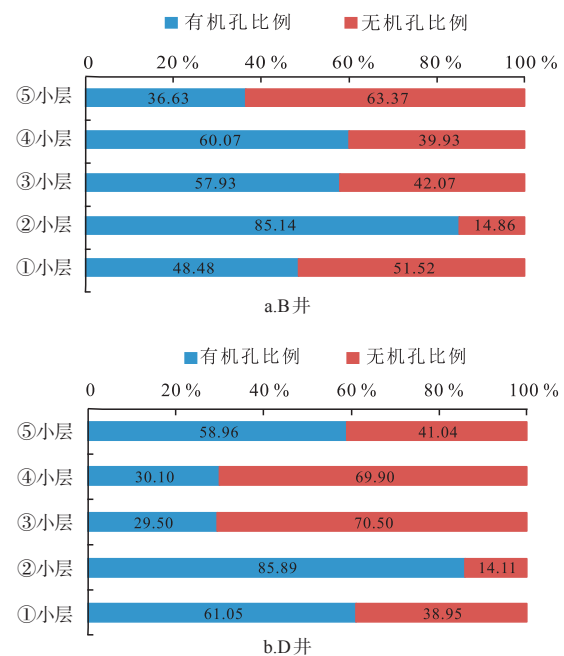


图4 B井与D井有机孔与无机孔比例  
Fig. 4 Ratio of organic and inorganic pore in well-B and well-D

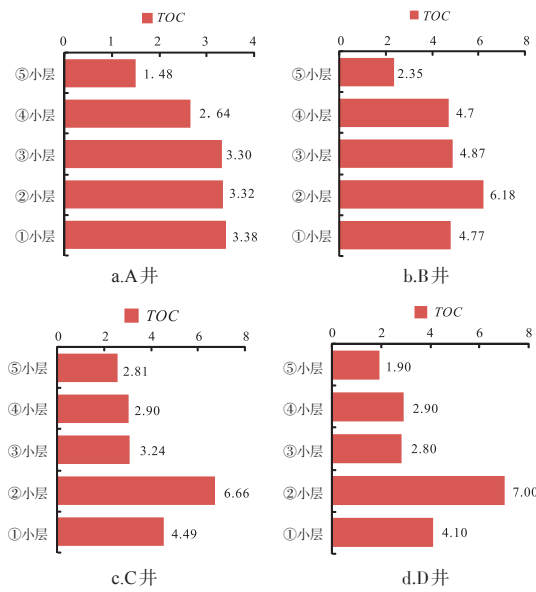


图5 研究区4口页岩气井 TOC统计

Fig. 5 TOC statistics of four shale gas wells in study area

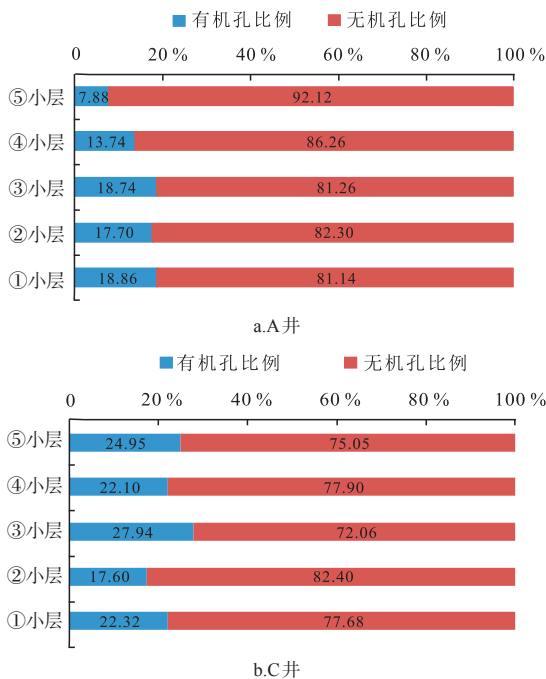


图6 A井和C井有机孔与无机孔比例

Fig. 6 Ratio of organic and inorganic pore in well-A and well-C

度相关,表3中真面孔率能够直观地反映出有机孔发育程度明显低于其他各井。

C井整体的静态指标均处于5口井的较大值,有机质孔隙发育,有机孔比例与TOC的变化趋势一致。不同于B井和D井,在TOC含量基本相当的情况下,C井无机孔占比明显高于其他各井(图5,图6)。这与C井发育的纹层及页理缝密切相关。在研究区

4口页岩气井中,C井的页理缝密度最高,沿层理方向可见大量微裂缝,其中局部填充有少量黄铁矿或方解石,这为页岩气提供了大量的储集空间(图7),同时也成为页岩气扩散的主要通道,能够极大地提高页岩的渗流能力,这也是该井在后期的开发过程中取得高产的主要原因。

从纹层发育情况来看,C井也明显区别于其他几口页岩气井样品,尤其在第③小层中,C井的纹层数量明显高于其他各井(图8),纹层主要是由较大粒径的碎屑颗粒(长英质)与泥质呈互层分布,碎屑颗粒与泥质互层间可能存在裂隙或粒缘缝,这对于页岩气储集空间也有着积极作用。

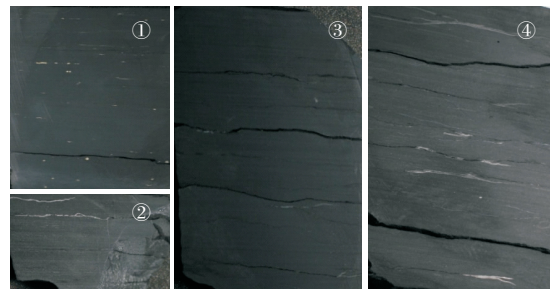


图7 C井页岩微裂缝发育情况

Fig. 7 Development of shale microfractures in well-C

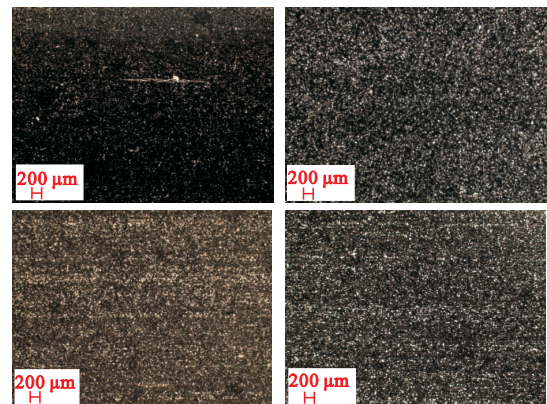


图8 研究区4口页岩气井纹层发育情况

Fig. 8 Laminae development of four shale gas wells in study area

## 4 结论

1) 通过对扫描电镜图像进行处理后能够有效地表征页岩有机质孔隙的发育程度,结合孔径分布、TOC及有效孔隙度能够计算页岩的有机质孔隙度和有机孔比例,间接计算出无机孔比例。

2) 渝东南地区五峰—龙马溪组页岩有机孔比

例主要受有机质丰度与有机质孔隙发育程度的影响,有机孔比例与TOC含量在纵向上的变化规律高度一致。

3) 层理缝及纹层构造对页岩无机孔的贡献较大,能够有效增加页岩的储集空间和渗流能力,是页岩气高产的重要影响因素。

#### 参考文献

- [1] 张勇. 彭水区块页岩脆性与含气性定性预测[J]. 油气藏评价与开发, 2017, 7(1): 78-82.  
ZHANG Y. Shale brittleness and gas bearing property prediction of Pengshui block[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(1): 78-82.
- [2] 蔡进. 四川盆地焦石坝地区五峰组—龙马溪组页岩储层成岩作用研究[J]. 矿物岩石, 2017, 37(4): 103-109.  
CAI J. Study of shale reservoir diagenesis of the Wufeng-Longmaxi Formations in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2017, 37(4): 103-109.
- [3] 李佳欣. 观音桥段地质特征及其对页岩气产量的影响——以南川地区为例[J]. 油气藏评价与开发, 2018, 8(4): 68-72.  
LI J X. Geological features of Guanyinqiao member and its influence on the shale gas production: A case study of Nanchuan district[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2018, 8(4): 68-72.
- [4] 田巍, 邓瑞健, 朱维耀, 等. 页岩压裂缝网储层应力敏感性及对产能的影响[J]. 油气藏评价与开发, 2017, 7(6): 71-77.  
TIAN W, DENG R J, ZHU W Y, et al. Stress sensitivity of shale reservoir fracture network and its effect on productivity[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(6): 71-77.
- [5] 陈红宇, 卢飞龙, 刘伟新, 等. 蛋白石硅质页岩成岩过程中的孔隙结构变化特征[J]. 石油实验地质, 2017, 39(3): 341-347.  
CHEN H Y, LU L F, LIU W X, et al. Pore network changes in opaline siliceous shale during diagenesis[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(3): 341-347.
- [6] 陈居凯, 朱炎铭, 崔兆帮, 等. 川南龙马溪组页岩孔隙结构综合表征及其分形特征[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(1): 55-62.  
CHEN J K, ZHU Y M, CUI Z B, et al. Pore structure and fractal characteristics of Longmaxi shale in southern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(1): 55-62.
- [7] 曹涛涛, 宋之光, 王思波, 等. 上扬子区古生界页岩的微观孔隙结构特征及其勘探启示[J]. 海相油气地质, 2015, 20(1): 71-78.  
CAO T T, SONG Z G, WANG S B, et al. Characteristics of microscopic pore structure in Paleozoic shales in Upper Yangtze Region and its enlightenment for shale gas exploration[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2015, 20(1): 71-78.
- [8] 段瑶瑶. 松辽盆地上白垩统嫩江组泥页岩孔隙特征及其与成岩作用关系——以松科1井、2井为例[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.  
DUAN Y Y. The pore characteristics of shale of the Upper Cretaceous Nenjiang Formation in Songliao Basin and its relation to diagenesis: Taking Songke 1 and 2 wells as an example[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.
- [9] 甘玉青, 王超, 方栋梁, 等. 四川盆地焦石坝地区五峰—龙马溪组页岩元素地球化学特征及对页岩气开发的意义[J]. 石油实验地质, 2018, 40(1): 78-89.  
GAN Y Q, WANG C, FANG D L, et al. Element geochemical characteristics of the Wufeng-Longmaxi shale in Jiaoshiba area, Sichuan Basin and their significance to shale gas development[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(1): 78-89.
- [10] 刘玉霞, 王亮, 程秀梅, 等. 高成熟度页岩有机孔隙结构与压力系数关系初探——以川东南志留统龙马溪组为例[J]. 油气藏评价与开发, 2017, 7(4): 77-82.  
LIU Y X, WANG L, CHENG X M, et al. Research on relationship between organic pore structure and pressure coefficients in shale with high maturity: A case from Longmaxi formation, southeastern Sichuan[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(4): 77-82.
- [11] 刘国恒, 黄志龙, 姜振学, 等. 鄂尔多斯盆地延长组湖相页岩纹层发育特征及储集意义[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(3): 408-417.  
LIU G H, HUANG Z L, JIANG Z X, et al. The characteristic and reservoir significance of lamina in shale from Yanchang Formation of Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(3): 408-417.
- [12] 梁兴, 张廷山, 杨洋, 等. 滇黔北地区筇竹寺组高演化页岩气储层微观孔隙特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(2): 18-26.  
LIANG X, ZHANG T S, YANG Y, et al. Microscopic pore structure and its controlling factors of overmature shale in the Lower Cambrian Qiongzhusi Fm, northern Yunnan and Guizhou provinces of China[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(2): 18-26.
- [13] 许文俊, 李勇明, 赵金洲, 等. 页岩气水平井分段压裂复杂缝网形成机制[J]. 油气藏评价与开发, 2017, 7(5): 64-73.  
XU W J, LI Y M, ZHAO J Z, et al. Formation mechanism of complex fracture network under horizontal well staged fracturing in shale gas reservoir[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(5): 64-73.
- [14] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale gas system: The Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [15] LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and descriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071-1098.
- [16] 李留仁, 赵艳艳, 李忠兴, 等. 多孔介质微观孔隙结构分形特征及分形系数的意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(3): 105-107.  
LI L R, ZHAO Y Y, LI Z X, et al. Fractal characteristics of micropore structure of porous media and the meaning of fractal coefficient[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2004, 28(3): 105-107.
- [17] 李子文, 林柏泉, 郝志勇, 等. 煤体多孔介质孔隙度的分形特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 437-442.

(下转第63页)