

四川盆地涪陵地区五峰—龙马溪组页岩气层孔隙特征及对开发的启示

刘尧文¹, 王进², 张梦吟², 蔡进², 卢文涛², 沈童²

(1. 中国石化江汉油田分公司, 湖北潜江 433124; 2. 中国石化江汉油田分公司勘探开发研究院, 武汉 430223)

摘要:页岩孔隙特征是影响页岩含气性的重要因素。综合运用氩离子抛光扫描电镜、高压压汞、液氮吸附等技术,对涪陵地区五峰组—龙马溪组龙一段上部气层孔隙特征进行研究,对比上下部页岩孔隙发育特征的差异性。研究发现,下部气层有机碳含量高,孔隙类型以有机质孔为主,孔体积基本大于0.02 mL/g, BET比表面积基本大于20 m²/g;上部气层有机碳含量低,孔隙类型主要为微裂隙、黏土矿物孔,孔体积主要分布在0.016~0.02 mL/g,比表面积主要为12~20 m²/g。结合单井含气量测试结果,发现有机碳含量与含气量相关性最好,比表面积和孔隙度次之。以此为基础,开展上部气层含气性评价,认为⑧小层为上部气层含气性最佳层段,⑥和⑦小层次之,⑨小层最差。

关键词:孔隙特征;页岩;页岩气;五峰—龙马溪组;涪陵地区;四川盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Pore features of shale gas layer in Wufeng-Longmaxi formations in Fuling area of Sichuan Basin and the application to development

LIU Yaowen¹, WANG Jin², ZHANG Mengyin², CAI Jin², LU Wentao², SHEN Tong²

(1. SINOPEC Jiangnan Oilfield Company, Qianjiang, Hubei 433124, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, SINOPEC Jiangnan Oilfield Company, Wuhan, Hubei 430223, China)

Abstract: Shale porosity is an important factor affecting the gas-bearing capacity of shale. The pore characteristics of the upper gas layer from the Wufeng Formation to the first member of Longmaxi Formation were studied and compared with the lower gas layer by using argon plasma scanning electron microscopy (SEM), high pressure mercury intrusion and liquid nitrogen adsorption. Results show that the organic carbon content of the lower gas layer is high, the pores in the organic matter are dominant, the pore volume is mainly >0.02 mL/g, and the BET specific surface area is mainly >20 m²/g. The organic carbon content of the upper gas layer is low, the pores are mainly micro-fissures and clay mineral pores, the pore volume is mainly distributed from 0.016-0.02 mL/g, and the specific surface area is mainly 12-20 m²/g. Combined with a single well gas content test results, we found that organic carbon content has the best correlation with gas content, followed by specific surface area and porosity. An evaluation of the gas-bearing properties of the upper gas layer was carried out. Sub-layer ⑧ was considered as the best gas layer in the upper interval, while sub-layers ⑥ and ⑦ were the next best, and sub-layer ⑨ the worst.

Key words: pore characteristics; shale; shale gas; Wufeng-Longmaxi formations; Fuling area; Sichuan Basin

目前中国的页岩气勘探开发方兴未艾,作为国内首个实现商业开发的大型页岩气田,四川盆地东部的涪陵页岩气田受到了普遍关注。众多专家学者针对涪陵焦石坝地区页岩储层开展了大量研究工作,主要集中在储层矿物成分、储集空间类型、微观孔隙结构和页岩含气量等方面^[1-5]。经过近几

年的深入研究,逐渐认识到页岩含气性和可压性是影响页岩气井产能最重要的2个方面。其中储层特征特别是储层孔隙特征是影响页岩含气性的重要因素,储层脆性矿物含量等是影响页岩可压性的主要因素。

涪陵地区页岩气勘探层位为五峰组—龙马溪

收稿日期: 2017-10-13; 修订日期: 2017-12-04。

作者简介: 刘尧文(1967—),男,高级工程师,从事油气勘探开发与管理工作。E-mail: 276176723@qq.com。

通信作者: 王进(1986—),男,硕士,工程师,从事页岩气地质研究工作。E-mail: yyqdz2017@sina.com。

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05060)和中国石化科技项目(P17014-3)资助。

组龙一段,综合利用钻井、测录井、岩心观察等资料,结合电性特征,可进一步细分为9个小层,其中①~⑤小层厚约40 m,又称下部气层;⑥~⑨小层厚约50 m,称为上部气层。

涪陵地区探井分析化验结果证实,五峰组—龙马溪组龙一段上下部气层脆性矿物含量差异不大,上部气层为51.84%~59.60%,下部气层为57.8%~69.68%(按照能源行业标准“NB/T 14001-2015 页岩气藏描述技术规范”同属于I类),表明上、下部页岩自身可压裂性相当。那么针对页岩含气性影响因素的研究就显得尤为重要,目前的研究主要集中在五峰组—龙马溪组龙一段下部气层,对龙一段上部页岩层段的研究相对较少,缺乏针对上部气层孔隙特征的研究。

本次选取涪陵地区页岩岩心样品,通过开展氩离子抛光扫描电镜、高压压汞分析和氮气吸附等分析,系统获取整个五峰组—龙马溪组龙一段页岩的孔隙分布特征,对比上、下部页岩孔隙发育特征的差异性,明确涪陵地区页岩段纵向孔隙发育的非均质性;结合现场含气量测试结果,初步明确孔隙特征对含气量的影响,分析上部气层含气性有利层位,为下步页岩气的开发提供指导。

1 研究区概况

涪陵地区地理位置位于重庆市涪陵区,构造位置属川东高陡褶皱带万县复向斜。川东高陡褶皱带西以华蓥山断裂为界,东以齐岳山断裂为界,北与秦岭褶皱带相接,整体表现为“侏罗山式”褶皱,涪陵地区总体表现为“隔档式”褶皱样式,背斜狭窄紧闭,向斜平缓宽阔^[6-8]。

涪陵地区页岩气勘探的目的层段是五峰组—龙马溪组龙一段,其中五峰组厚度较薄,一般为4~6 m,岩性主要为灰黑色含黏土硅质页岩;龙马溪组龙一段厚度为80~100 m,岩性以灰黑色、黏土质硅质页岩、含黏土硅质页岩和黏土质粉砂质页岩为主,页理缝发育,笔石化石丰富,见较多硅质放射虫及少量硅质海绵骨针等化石,含气页岩段普遍见黄铁矿条带及分散状黄铁矿晶粒,总体反映缺氧、滞留的深水陆棚环境沉积^[9]。

上、下部气层在岩性、有机质丰度、孔隙度和含气性等方面差异明显:涪陵地区上部气层岩性主要为黏土页岩,有机碳含量中—低($w(\text{TOC})=1.0\% \sim 2.0\%$)、中高孔(孔隙度在2.0%~4.0%)、含气量相对较低($3 \sim 5 \text{ m}^3/\text{t}$);下部气层岩性主要为硅质页岩,有机碳含量高($w(\text{TOC})=3\% \sim 4\%$)、高孔为主

(孔隙度3.0%~5.0%)、含气量高($4 \sim 7 \text{ m}^3/\text{t}$)。

2 孔隙特征

2.1 孔隙类型

从岩心观察和氩离子抛光扫描电镜观察结果来看,涪陵地区五峰—龙马溪组页岩孔隙主要为纳米级的孔隙,包括少量微米级的孔隙,根据孔隙成因可将孔隙进一步划分为有机质孔隙和无机孔隙(黏土孔隙和碎屑孔隙)。

从氩离子抛光扫描电镜观察结果来看,下部孔隙发育,孔隙类型以有机质孔为主,平面上呈圆形、椭圆形及不规则形状;有机质孔隙的孔径跨度较大,从纳米级到微米级均有发育,以150~450 nm为主,按国际理论与应用化学联合会(以下简称IUPAC)分类,属于中孔和大孔级别,有机质表面有机质孔隙发育程度高,多呈蜂窝状(图1a)。

上部气层孔隙发育程度较下部气层低,孔隙类型主要为层间残余的微裂隙、粉砂颗粒边缘残余的微裂隙和黏土矿物片层间发育的纳米级微孔隙;其次为有机质碎屑内部发育的孔隙,有机质孔多小于100 nm,属于中孔和大孔级别。

2.2 孔隙构成

研究表明,涪陵地区五峰—龙马溪组含气页岩段总孔隙体积由黏土矿物束缚水孔隙体积和含气孔隙体积组成,含气孔隙体积又可以细分为有机孔隙体积和碎屑孔、缝体积。页岩总孔隙度与密度、声波、中子等测井曲线具有较好的相关性;束缚水孔隙度与黏土矿物含量呈正相关。利用五峰—龙马溪组180块样品物性分析测试结果,分别建立了总孔隙度与密度、声波、中子的多元线性回归方程(式(1)),以及束缚水孔隙度与黏土矿物含量的相关关系(式(2)),有机孔隙度与TOC的关系(式(3))等:

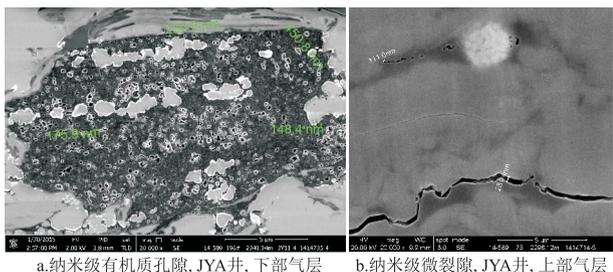


图1 四川盆地涪陵地区焦页A井五峰组—龙马溪组一段上、下部气层孔隙类型

Fig.1 Pore types of upper and lower shale gas reservoirs from Wufeng Formation to first member of Longmaxi Formation of well Jiaoye A in Fuling area, Sichuan Basin

$$POR_{总} = 0.156AC + 0.093CNL - 4.12DEN + 1.906 \quad (1)$$

$$POR_{束缚} = 0.097V_{黏土} - 3.128 \quad (2)$$

$$POR_{有机} = 1.359 4w(TOC) - 0.104 1 \quad (3)$$

$$POR_{碎屑} = POR_{总} - POR_{有机} - POR_{束缚} \quad (4)$$

$$POR_{总} = POR_{有机} + POR_{碎屑} + POR_{束缚} \quad (5)$$

式中： $POR_{总}$ 为总孔隙度； $POR_{有机}$ 为有机孔隙度； $POR_{碎屑}$ 为碎屑孔隙度； $POR_{束缚}$ 为黏土束缚水孔隙度； DEN 为密度测井值； AC 为声波测井值； CNL 为中子测井值； $V_{黏土}$ 为黏土矿物含量。

平面上选取涪陵地区不同位置的 6 口探井开展测井解释。结果表明：自上而下有机质孔隙所占孔隙体积百分比逐渐增加；平面上下部页岩段以有机质孔隙为主，普遍占到总孔隙体积的 50% 以上，上部气层段有机质孔隙占比较低，平均为 30.4% ~ 35.4%，以无机孔隙为主（表 1）。

2.3 孔隙结构特征

2.3.1 高压压汞法

高压压汞曲线形态可以反映页岩孔隙的发育特征^[9-10]。高压压汞法测试的孔隙直径范围为大于 3.6 nm，主要对中孔和大孔进行表征。通过对研究区焦页 B 井岩心样品测试结果统计，涪陵地区五峰组—龙马溪组龙一段压汞曲线主要存在 2 种类型：

(1) I 型岩石毛管压力曲线（图 2a）。该类样品孔隙度低，平均为 3.3%；排驱压力大，主要分布在 18.14 ~ 51.71 MPa，平均 31.65 MPa；分选系数小，平均为 0.002；岩石毛管压力曲线呈现“单峰”特征；孔喉直径以 8 ~ 32 nm 为主，平均孔喉直径为 13.2 nm，属中孔级别，8 ~ 32 nm 孔隙对渗透率的贡献占到 67.92% ~ 100%，平均为 88.77%（表 2）。

(2) II 型岩石毛管压力曲线（图 2b）。该类样品孔隙度低，平均为 1.9%，与 I 型相比，该类型曲线上为较低压力下开始进汞，进汞曲线为上升直线；排驱压力小，主要分布在 0.12 ~ 3.14 MPa，平均仅 0.78 MPa；分选系数大，平均为 0.371；岩石毛管压力曲线呈现不明显的“双峰”特征；II 型岩石孔隙直径包括中孔、大孔和微裂隙，中孔孔隙直径以 8 ~ 32 nm 为主，大孔和微裂隙孔径较大，达 0.6 ~ 8 μm，且大孔和微裂隙对渗透率的贡献大，孔径为 2 ~ 8 μm 的大孔以及微裂隙对渗透率的贡献占到 85.83% ~ 98.36%，平均为 94.33%（表 2）。

统计发现，涪陵地区五峰组—龙马溪组龙一段以 I 型为主，上、下部气层均有发育；II 型较少，且主要发育在上部气层，下部气层少见。反映总体上五峰组—龙马溪组龙一段基质孔隙较均质，局部发育大孔和微裂隙，有利于页岩气的流动和采出。

2.3.2 液氮吸附法

(1) 液氮吸附—脱附曲线。涪陵地区五峰—龙马溪组页岩段上、下部气层液氮吸附—脱附曲线特征类似，在相对压力 0.2 ~ 0.8 的区域吸附量随相对压力的增高而增加，吸附曲线相对平坦，在该阶段发生多分子层吸附；在相对压力大于 0.8 后液氮吸附量急剧增加，发生毛细凝聚现象。液氮吸附—脱附曲线存在明显的吸附回线，兼有 IUPAC 分类体系中 H2 型和 H3 型吸附回线类型的特征，分析认为孔隙属于细颈广口的墨水瓶型孔隙。

(2) 孔隙体积。以焦页 B 井为例，41 块样品分析测试结果：五峰组—龙马溪组龙一段页岩的孔体积为 0.016 ~ 0.027 mL/g，平均为 0.02 mL/g，上、下部气层孔隙体积差异较大（图 3a）。下部气层孔体积略大，基本大于 0.02 mL/g；上部气层主要分布在

表 1 四川盆地涪陵地区 6 口探井有机质孔隙体积百分比分层统计
Table 1 Stratification statistics of pore volume percentage of organic matter in six wells of Fuling area, Sichuan Basin

气层	小层	有机质孔隙体积百分比/%					
		焦页 A	焦页 B	焦页 C	焦页 D	焦页 E	焦页 F
上部气层	⑨	22.80	17.19	15.00	18.38	15.79	14.54
	⑧	37.50	26.51	28.81	32.54	28.13	29.95
	⑦	40.30	37.97	38.41	44.36	38.75	38.15
	⑥	41.18	41.22	39.50	46.14	40.00	40.05
下部气层	⑤	37.60	44.17	41.30	47.16	43.90	40.99
	④	43.38	51.06	48.27	51.49	45.06	46.49
	③	59.36	65.43	68.53	69.26	55.26	61.29
	②	71.73	68.79	68.22	66.78	53.72	75.60
	①	64.25	63.74	65.52	66.18	50.25	60.50

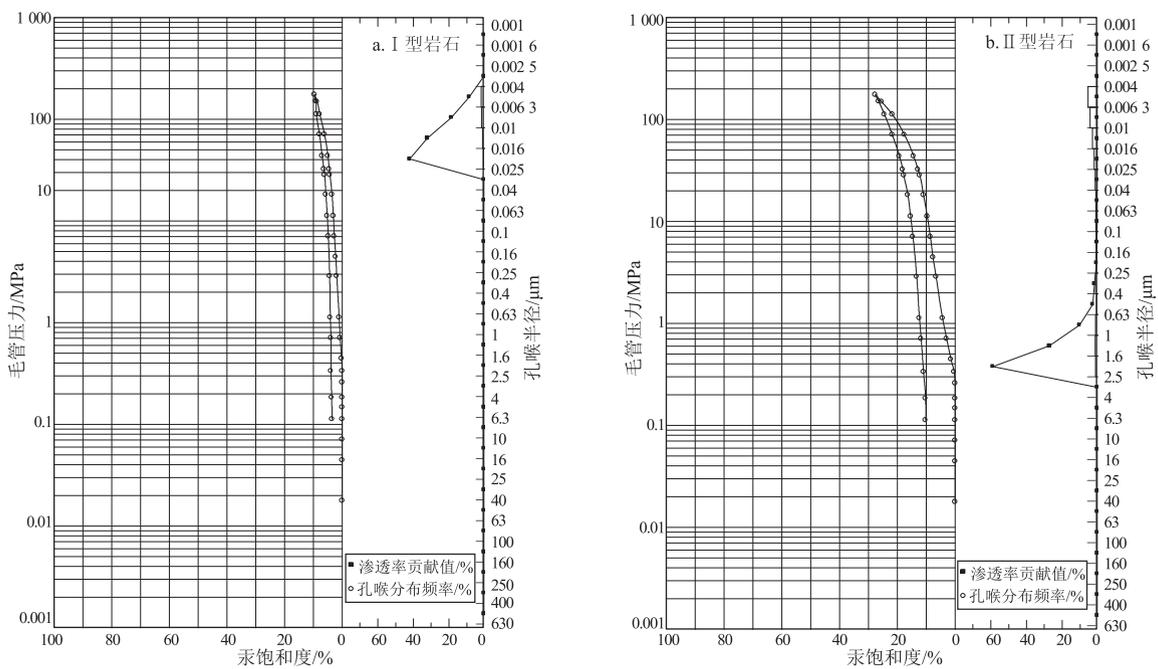


图 2 四川盆地涪陵地区 2 种不同类型岩石毛管压力曲线

Fig.2 Capillary pressure curves of two different rock types in Fuling area, Sichuan Basin

表 2 四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组龙一段不同类型毛管压力曲线特征

Table 2 Characteristics of different types of capillary pressure curves from Wufeng Formation to first member of Longmaxi Formation in Fuling area, Sichuan Basin

主要参数	I 型毛管压力曲线	II 型毛管压力曲线
孔隙度/%	1.1~4.8/3.3	1.4~2.5/1.9
排驱压力/MPa	18.14~51.71/31.65	0.12~3.14/0.78
分选系数	0.001~0.003/0.002	0.018~0.749/0.371
孔喉直径/nm	8.0~32.0/13.2	58.8~1 477.4/717.04
对渗透率主要贡献孔隙直径范围/nm	8~50	2 000~8 000

注:表中分式的意义为:最小值~最大值/平均值

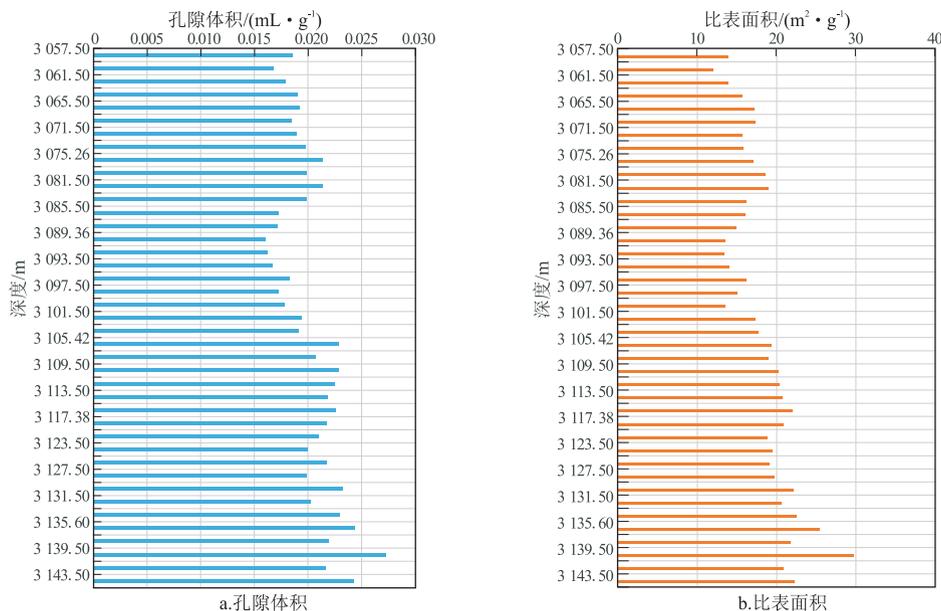


图 3 四川盆地涪陵地区焦页 B 井页岩孔隙体积和比表面积纵向分布

Fig.3 Vertical distribution of shale pore volume and specific surface area of well Jiaoye B in Fuling area, Sichuan Basin

0.016~0.02 mL/g。不同孔径所占的比例不同,其中中孔所占比例最大,平均为 47.86%,其次为微孔,约占 33.44%,大孔所占比例最小,约占 18.70%,反映中孔、微孔对孔体积贡献较大。

(3)比表面积。焦页 B 井五峰组—龙马溪组龙一段页岩的 BET 比表面积为 11.96~29.71 m²/g,平均为 18.22 m²/g。总体上自下而上比表面积逐渐降低,与孔隙体积变化规律一致(图 3b)。下部气层孔 BET 比表面积基本大于 20 m²/g,上部气层主要分布在 12~20 m²/g。研究发现,孔体积和比表面积的相关关系良好(图 4),反映了微孔是页岩比表面积的主要贡献者,构成了气体吸附的主要空间。

3 上部气层含气性评价

3.1 孔隙特征对含气性的影响分析

众多学者研究认为,孔隙类型、孔隙度、孔隙比表面积和孔隙体积对页岩含气性影响较大^[11-18]。有机质中普遍发育有机质孔,页岩有机碳含量高在很大程度上决定了有机质孔面孔率的大小,从而会对页岩含气量产生影响;页岩孔隙度对吸附气和游离气均有影响,页岩孔隙度越大,页岩总含气量越高;页岩孔隙比表面积和孔隙体积主要影响吸附气

量,在很大程度上会影响页岩的吸附气储集能力。

涪陵地区五峰组—龙马溪组龙一段页岩上、下部气层孔隙特征差异较大,表明其纵向非均质性较强。以焦页 B 井为例,下部气层有机碳含量高,平均为 3.39%,孔隙类型以有机质孔为主,孔隙度主要分布在 3.13%~4.45%,孔体积大于 0.02 mL/g, BET 比表面积基本大于 20 m²/g,含气量平均为 5.65 m³/t;上部气层有机碳含量低,平均为 1.5%,孔隙类型主要为微裂隙、黏土矿物孔,其次为有机质碎屑内部发育的孔隙,孔隙度主要分布在 1.68%~2.1%,孔体积主要分布在 0.018~0.02 mL/g,比表面积主要为 12~20 m²/g,实测含气量平均为 3.71 m³/t(图 3,表 3)。分别统计有机碳含量、孔隙度、孔隙体积、孔隙比表面积和含气量的关系,发现有机碳含量与含气量相关关系最好,其次为孔隙度和 BET 比表面积;孔隙体积和含气量相关性略差,可能与页岩以纳米孔为主,孔隙体积差异较小所致(图 5)。

3.2 上部气层含气性优选

目前,涪陵页岩气田下部气层的开发进展顺利,为进一步扩大示范区建设阵地,夯实产建区资源基础,上部气层的含气性优选工作就显得尤为重要。

前述研究初步优选出有机碳含量、孔隙度和 BET 比表面积是影响含气性的主要因素。以此为基础,分小层统计上部⑥~⑨小层的有机碳含量、孔隙度、孔隙比表面积。结果表明,⑧小层有机碳含量高、比表面积大、孔隙度高,为上部气层含气性最好层段;⑥和⑦小层有机碳含量较高,比表面积、孔隙度较大,为上部气层含气性较好层段;⑨小层含气性最差(图 6)。

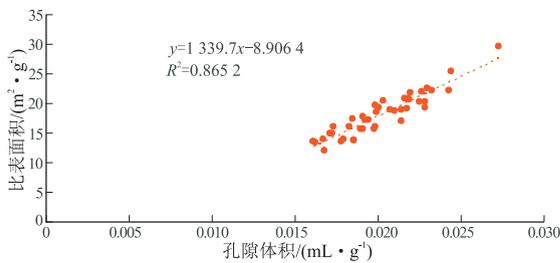


图 4 四川盆地涪陵地区焦页 B 井页岩比表面积与孔隙体积相关关系

Fig.4 Shale specific surface area vs. pore volume of well Jiaoye B in Fuling area, Sichuan Basin

4 结论

(1)涪陵地区五峰组—龙马溪组龙一段可进

表 3 四川盆地涪陵地区焦页 B 井五峰—龙马溪组龙一段页岩孔隙特征参数统计

Table 3 Shale pore characteristic parameters from Wufeng Formation to first member of Longmaxi Formation of well Jiaoye B in Fuling area, Sichuan Basin

气层	层号	有机碳含量/%	孔隙度(氦气法)/%	BET 比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	孔隙体积/(mL·g ⁻¹)	总含气量/(m ³ ·t ⁻¹)
上部气层	⑨	1.32	2.08	14.49	0.018	3.72
	⑧	1.54	2.10	17.20	0.020	3.85
	⑦	1.58	1.68	15.12	0.018	3.76
	⑥	1.56	1.80	15.28	0.018	3.52
	⑤	2.53	3.70	19.89	0.022	4.96
下部气层	④	2.57	3.13	19.95	0.021	4.80
	③	3.64	3.49	22.06	0.022	5.92
	②	4.73	4.10	21.77	0.022	7.08
	①	3.46	4.45	24.22	0.024	5.51

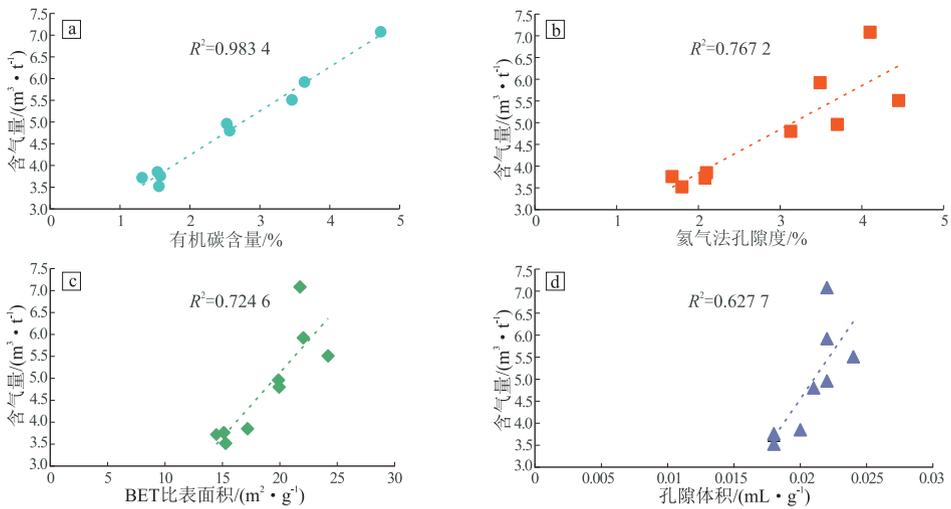


图 5 四川盆地涪陵地区焦页 B 井上部气层页岩有机碳含量、氦气法孔隙度、BET 比表面积、孔隙体积和含气量相关关系
Fig.5 Shale organic carbon content, helium porosity, BET specific surface area, pore volume and gas content correlation of upper shale gas reservoir of well Jiaoye B, in Fuling area, Sichuan Basin

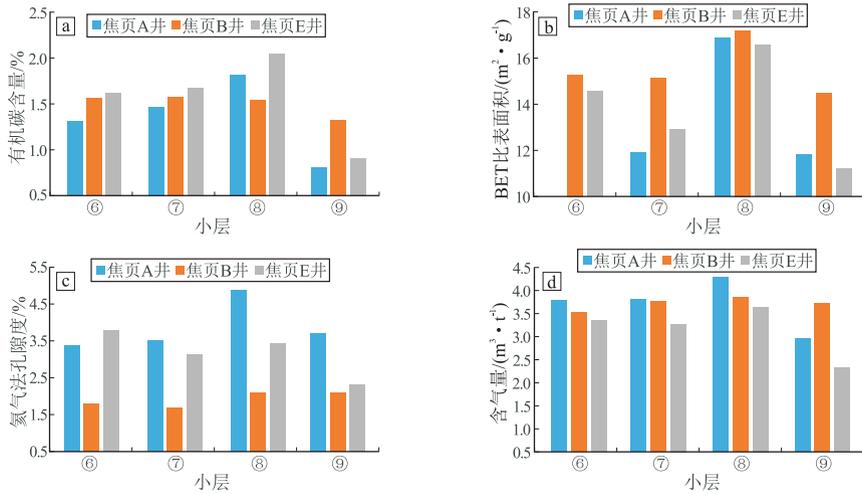


图 6 四川盆地涪陵地区焦页 A、B、E 井上部气层页岩有机碳含量、氦气法孔隙度、BET 比表面积对比
Fig.6 Shale organic carbon content, helium porosity, BET specific surface area contrast diagram of upper shale gas reservoir among wells Jiaoye A, B and E in Fuling area, Sichuan Basin

一步细分为上、下部气层,上、下部气层在孔隙类型、有机质丰度、孔隙度、孔径、孔隙比表面积等方面差异明显。下部气层有机碳含量高,孔隙类型以有机质孔为主,孔体积基本大于 0.02 mL/g, BET 比表面积基本大于 20 m^2/g ;上部气层有机碳含量低,孔隙类型主要为微裂隙、黏土矿物孔,其次为有机质碎屑内部发育的孔隙,孔体积主要分布在 0.016~0.02 mL/g,比表面积主要为 12~20 m^2/g 。

(2) 统计发现,涪陵地区五峰组—龙马溪组龙一段页岩有机碳含量与含气量相关关系最好,其次为 BET 比表面积和孔隙度;孔隙体积和含气量相关性略差,可能与页岩以纳米孔为主,孔隙体积差异较小有关。

(3) 涪陵地区上部气层具备较好的开发潜力,

其中⑧小层有机碳含量高、比表面积大、孔隙度高,为上部气层含气性最好层段;⑥和⑦小层有机碳含量较高,比表面积、孔隙度较大,为上部气层含气性较好层段;⑨小层含气性最差。

参考文献:

[1] 耿一凯,金振奎,赵建华,等.页岩储层孔隙类型控制因素研究:以川东焦石坝地区龙马溪组为例[J].石油实验地质,2017,39(1):71-78.
GENG Yikai, JIN Zhenkui, ZHAO Jianhua, et al. Controlling factors of pore types in shale reservoirs: A case study from the Longmaxi Formation in Jiaoshiba area, eastern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(1): 71-78.

[2] 申宝剑,仰云峰,腾格尔,等.四川盆地焦石坝构造区页岩有机质特征及其成烃能力探讨:以焦页 1 井五峰—龙马溪组

- 为例[J].石油实验地质,2016,38(4):480-488.
- SHEN Baojian, YANG Yunfeng, TENGGER, et al. Characteristics and hydrocarbon significance of organic matter in shale from the Jiaoshiba structure, Sichuan Basin: A case study of the Wufeng-Longmaxi formations in well Jiaoye 1[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(4):480-488.
- [3] 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 Jiaoshiba area, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6):9-16.
- [4] 王燕, 冯明刚, 魏祥峰, 等. 焦石坝页岩气储层黏土组分特征及其体积分数计算[J]. 断块油气田, 2015, 22(3):301-304.
- WANG Yan, FENG Minggang, WEI Xiangfeng, et al. Clay mineral component characteristics and volume fraction calculation for Jiaoshiba shale gas reservoir [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015, 22(3):301-304.
- [5] 刘超, 陆亚秋, 梁榜, 等. 涪陵焦石坝地区五峰组—龙马溪组含气页岩相划分: 以 JY11-4 井为例[J]. 江汉石油职工大学学报, 2015, 28(5):1-5.
- LIU Chao, LU Yaqiu, LIANG Bang, et al. Lithofacies classification of gas bearing shale in Wufeng-Longmaxi Formation: A case study of JY11-4 well [J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2015, 28(5):1-5.
- [6] 郭旭升, 胡东风, 文治东, 等. 四川盆地及周缘下古生界海相页岩气富集高产主控因素: 以焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例[J]. 中国地质, 2014, 41(3):893-901.
- GUO Xusheng, HU Dongfeng, WEN Zhidong, et al. Major factors controlling the accumulation and high productivity in marine shale gas in the Lower Paleozoic of Sichuan Basin and its periphery: A case study of the Wufeng-Longmaxi Formation of Jiaoshiba area [J]. Geology in China, 2014, 41(3):893-901.
- [7] 魏祥峰, 郭彤楼, 刘若冰. 涪陵页岩气田焦石坝地区页岩气地球化学特征及成因[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(3):539-548.
- WEI Xiangfeng, GUO Tonglou, LIU Ruobing. Geochemical features of shale gas and their genesis in Jiaoshiba block of Fuling shale gasfield, Chongqing [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(3):539-548.
- [8] 郭彤楼, 刘若冰. 复杂构造区高演化程度海相页岩气勘探突破的启示: 以四川盆地东部益缘 JY1 井为例[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(4):643-651.
- GUO Tonglou, LIU Ruobing. Implications from marine shale gas exploration breakthrough in complicated structural area at high thermal stage: Taking Longmaxi Formation in well JY1 as an example [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(4):643-651.
- [9] 杨峰, 宁正福, 孔德涛, 等. 高压压汞法和氮气吸附法分析页岩孔隙结构[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(3):450-455.
- YANG Feng, NING Zhengfu, KONG Detao, et al. Pore structure of shales from high pressure mercury injection and nitrogen adsorption method [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(3):450-455.
- [10] 田华, 张水昌, 柳少波, 等. 压汞法和气体吸附法研究富有机质页岩孔隙特征[J]. 石油学报, 2012, 33(3):419-427.
- TIAN Hua, ZHANG Shuichang, LIU Shaobo, et al. Determination of organic-rich shale pore features by mercury injection and gas adsorption methods [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3):419-427.
- [11] 姜振学, 唐相路, 李卓, 等. 川东南地区龙马溪组页岩孔隙结构全孔径表征及其对含气性的控制[J]. 地学前缘, 2016, 23(2):126-134.
- JIANG Zhenxue, TANG Xianglu, LI Zhuo, et al. The whole-aperture pore structure characteristics and its effect on gas content of the Longmaxi Formation shale in the southeastern Sichuan Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2):126-134.
- [12] 林潼, 段文哲, 任怀建, 等. 页岩孔隙空间的形成与演化及孔隙对含气性的影响[J]. 地质科学, 2017, 52(1):141-155.
- LIN Tong, DUAN Wenzhe, REN Huaijian, et al. The formation and evolution of shale pore space and pore effects to gas bearing capacity [J]. Chinese Journal of Geology, 2017, 52(1):141-155.
- [13] 郭少斌, 黄磊. 页岩气储层含气性影响因素及储层评价: 以上扬子古生界页岩气储层为例[J]. 石油实验地质, 2013, 35(6):601-606.
- GUO Shaobin, HUANG Lei. Gas-bearing influential factors and evaluation of shale gas reservoir: A case study of Paleozoic shale gas reservoir in Upper Yangtze region [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(6):601-606.
- [14] 夏嘉, 王思波, 曹涛涛, 等. 黔北地区下寒武统页岩孔隙结构特征及其含气性能[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(9):1744-1754.
- XIA Jia, WANG Sibo, CAO Taotao, et al. The characteristics of pore structure and its gas storage capability of the Lower Cambrian shales from northern Guizhou Province [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(9):1744-1754.
- [15] 龙胜祥, 彭勇民, 刘华, 等. 四川盆地东南部下志留统龙马溪组一段页岩微—纳米观地质特征[J]. 天然气工业, 2017, 37(9):23-30.
- LONG Shengxiang, PENG Yongmin, LIU Hua, et al. Micro- and nano-scale geological characteristics of the shale in the first member of Lower Silurian Longmaxi Fm in SE Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(9):23-30.
- [16] 孙亮, 王晓琦, 金旭, 等. 微纳米孔隙空间三维表征与连通性定量分析[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3):490-498.
- SUN Liang, WANG Xiaoqi, JIN Xu, et al. Three dimensional characterization and quantitative connectivity analysis of micro/nano pore space [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3):490-498.
- [17] 纪文明, 宋岩, 姜振学, 等. 四川盆地东南部龙马溪组页岩微—纳米孔隙结构特征及控制因素[J]. 石油学报, 2016, 37(2):182-195.
- Ji Wenming, SONG Yan, JIANG Zhenxue, et al. Micro-nano pore structure characteristics and its control factors of shale in Longmaxi Formation, southeastern Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(2):182-195.
- [18] 陈磊, 姜振学, 温暖, 等. 页岩纳米孔隙分形特征及其对甲烷吸附性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(2):31-39.
- CHEN Lei, JIANG Zhenxue, WEN Nuan, et al. Fractal characteristics of nanopores and their effect on methane adsorption capacity in shales [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(2):31-39.