

页岩气储层孔隙特征差异及其对含气量影响

吴艳艳, 曹海虹, 丁安徐, 王亮, 陈云燕

(中国石化华东分公司石油勘探开发研究院实验中心, 江苏扬州 225000)

摘要:运用氩离子抛光+扫描电镜和氮气吸附法对渝东南地区龙马溪组的 24 个页岩样品和川东南地区须家河组 10 个页岩样品孔隙进行测试, 探讨页岩的孔隙特征差异及其对含气量的影响。研究发现, 其孔隙类型主要包括有机质孔、矿物粒间孔、溶蚀孔、晶间孔、矿物层间解理缝和微裂缝等; 孔隙形态多为不规则, 多呈开放状态; 孔隙结构较复杂, 纳米级有机质孔丰富, 主孔位于 2~10 nm。须家河组页岩样品以无机中大孔和微裂隙为主。有机质孔发育差异原因可能是由页岩的有机质类型本身化学分子性质差异造成, 也可能是具有催化生气作用的无机矿物或元素与有机质赋存关系差异造成。数理统计结果显示, 孔隙类型并不是含气量大小的主控因素, TOC 是页岩气藏最本质因素。须家河组页岩中孔隙结构主要受无机矿物影响; 龙马溪组页岩样品的 TOC 是比表面积和孔径为 2~10 nm 孔发育的本质因素, 提供页岩气主要的储存空间。伊利石是孔径为 2~10 nm 孔发育的重要影响因素, 也是提供页岩气存储空间的重要物质。

关键词:孔隙特征; 有机质孔; 含气量; 页岩气; 川东南地区; 渝东南地区

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

Pore characteristics of a shale gas reservoir and its effect on gas content

Wu Yanyan, Cao Haihong, Ding Anxu, Wang Liang, Cheng Yunyan

(Experiment Center, Petroleum Exploration and Development Institute,
SINOPEC East China Company, Yangzhou, Jiangsu 225000, China)

Abstract: The porosity tests of 24 Longmaxi Formation shale samples from the southeastern Chongqing area and 10 Xujiahe Formation shale samples from the southeastern Sichuan area were carried out with argon ion milling+scanning electron microscopy (SEM) and nitrogen adsorption methods. The effect of porosity difference on gas content was discussed. Shale pores are usually organic pores, mineral inter-particle pores, dissolution pores, inter-granular pores and inter-laminar cleavage cracks, and most of the pore shape was irregular and open. The pore structure of the samples was complex. Nano-scale organic pores were common in the Longmaxi Formation shale samples, and the pore diameter was 2-10 nm. Inorganic middle-large pores and micro-cracks were dominant in the Xujiahe Formation shale samples. The pore characteristics might result from different chemical molecular properties of organic matter in the shale, or a catalytic relationship between inorganic mineral or element and organic matter. Statistical results showed that the pore types were not the main controlling factors of gas content; TOC was the most essential factor for shale gas reservoir. The pore structure of the Xujiahe Formation shale samples was mainly affected by inorganic minerals. TOC was the dominant factor of specific surface area and 2-10 nm pores in the Longmaxi Formation shale samples, and provided the main storage space for shale gas. Illite was an important factor for 2-10 nm pores, which provided the main storage space for the Xujiahe shale gas.

Key words: pore characteristics; organic pores; gas content; shale gas; southeastern Sichuan area; southeastern Chongqing area

页岩是一种非均质多孔介质, 它的孔隙类型与孔隙结构直接与页岩气的吸附性和流动性密切相关, 是影响气藏储集能力和页岩气开采的重要因素^[1-5]。Schettler 等^[6]通过对美国泥盆系页岩气井的大量测井曲线分析发现, 岩石孔隙是页岩气主要

存储场所, 约一半的气量存储在孔隙中。纳米孔中存储的气体可能就有复杂的热力学状态, 因而研究页岩气储层纳米孔隙结构对页岩气资源评价和成藏机理研究, 乃至页岩气勘探开发有重要意义^[7]。不少学者对页岩孔隙微观特征、发育影响因素、地

质评价等方面进行研究,提出了一些新思路和新观点^[8-23],但孔隙发育差异原因及对含气量影响相关研究甚少。本文选取不同地区、不同层位页岩气储层样品,研究不同页岩孔隙特征差异,探讨孔隙发育的影响因素及不同孔隙特征对含气量的影响,以期为下一步勘探开发提供参考。

1 样品及测试

选取渝东南地区下志留系龙马溪组不同深度的 24 个页岩样品和川东南地区三叠系须家河组 10 个页岩样品。扫描电镜、比表面积和孔径分布是在中国石化华东分公司研究院实验中心完成。比表面积及孔径分布测定采用美国麦克仪器公司生产的 ASAP2020 型号的比表面及孔径测定仪。样品经过 150 °C 真空脱气 240 min 后放入液氮瓶中进行等温吸附脱附测定,仪器测试的孔径范围为 0.35~500 nm,吸附-脱附相对压力 (P/P_0) 范围为

0.001~0.995。比表面积选择 BET 模型计算结果,孔径分布选择 DFT 模型计算结果。氩离子抛光设备为 HITACHI 生产的 IM4000 离子抛光装置;扫描电镜为 ZEISS 生产的 SIGMA 场发射扫描电子显微镜。含气量通过 LH-2 现场含气量测定仪测定。

2 结果

2.1 孔隙类型

扫描电镜镜下观察结果显示,龙马溪组页岩样品中微孔裂隙类型丰富,主要由有机质孔隙和无机孔隙组成。无机孔主要包括矿物粒间孔、晶间孔、层间解理缝等;常见有机质孔发育于黄铁矿晶体间(图 1a,b,d,f),云母层间解理缝中见有机质微孔发育(图 1c),矿物粒间发育有机质微孔(图 1e),层状黏土矿物中有机质发育大量孔隙(图 1f)。须家河组样品孔隙类型明显区别于龙马溪组样品,主要为无机孔隙和微裂隙,有机质孔隙极少(图 1g-l)。

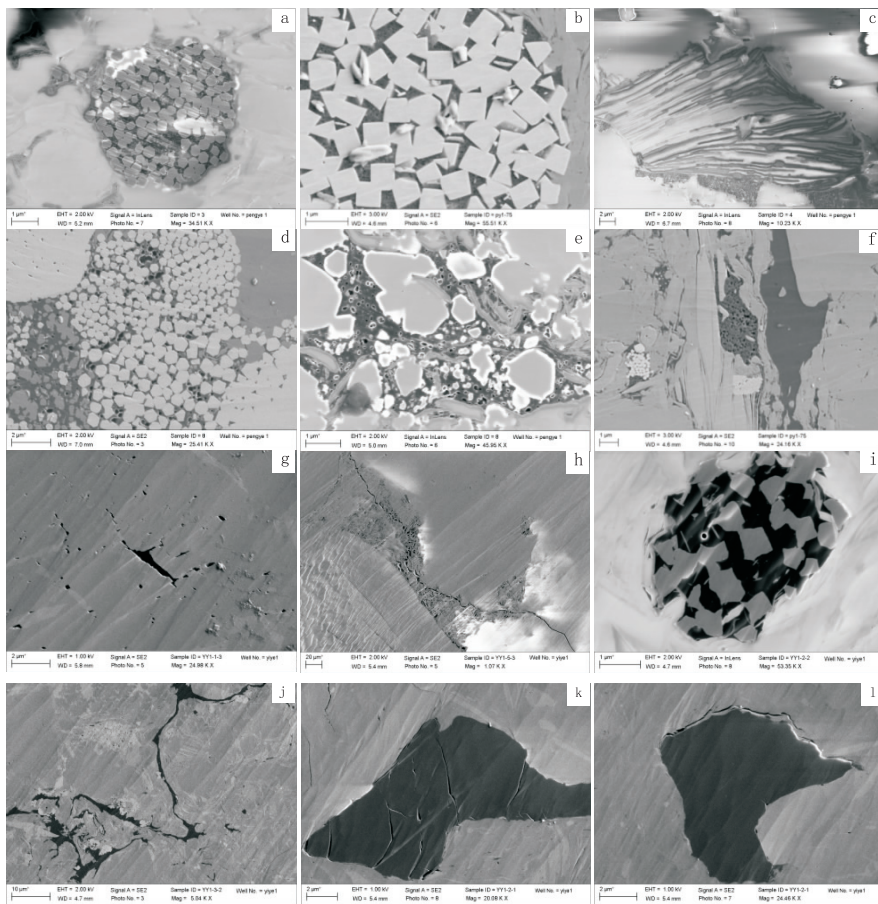


图 1 渝东南地区龙马溪组(a-f)和川东南地区须家河组(g-l)页岩样品扫描电镜

a.草莓状黄铁矿,晶间发育大量有机质微孔;b.黄铁矿晶间发育有机质微孔;c.云母层间解理缝发育有机质微孔 d.草莓状黄铁矿晶间发育有机质微孔;e.粒间分布有机质微孔;f.有机质微孔;g.粒间孔,部分颗粒边缘弱溶蚀;h.大量黏土矿物沿微裂缝方向分布,孔隙极发育;i.黄铁矿集合体内部有机质微孔不发育,伴生微量纤维状黏土矿物;j.粒间有机质呈纤维状;k.有机质内部裂缝;l.块状有机质,内部孔隙不发育,边缘可见微裂缝

Fig.1 SEM photographs of shale samples from Longmaxi Formation in southeastern Chongqing area (a-f) and Xujiahe Formation in southeastern Sichuan area (g-l)

2.2 比表面积与孔径分布特征

龙马溪组样品的比表面积为 5.42~22.00 m²/g, 平均为 13.46 m²/g。孔径分布范围为 3.4~6.13 nm, 平均值为 4.27 nm。微孔、中孔、大孔分别占孔隙总体积的 7%, 86%, 7%。以 6 种孔径范围 (<2, 2~10, 10~20, 20~50, 50~100, >100 nm) 分别统计了孔容和孔比表面积, 无论是孔容还是比表面积, 各样品差别主要在于 2~10 nm 的中孔(以国际纯化学与应用化学联合会(IUPAC)通用划分方案, 即孔径小于 2 nm 为微孔, 大于 2 nm 且小于 50 nm 为中孔, 大于 50 nm 为大孔)。

须家河组样品的比表面积为 1.27~6.06 m²/g, 平均为 3.10 m²/g; 平均孔径为 6.97~13.8 nm, 平均值为 9.82 nm, 10~50 nm 的孔占总孔容比例最高。2 组样品均以中孔为主, 但须家河组样品大孔的比例较高, 微孔、中孔、大孔分别占孔隙总体积的 10%, 60%, 30%。

2.3 等温吸附线

根据吸附和脱附曲线类型可以判别样品的孔隙特点。所有样品均具有吸附回线, 封闭性孔(包括一端封闭的圆筒形孔、平行板孔和圆锥形孔)不能产生吸附回线, 表明页岩储层孔隙形态呈开放状态。开放状纳米孔可提高页岩气解吸效率和储层渗透率, 开发过程中, 页岩气容易从大量纳米微孔中逐渐解吸, 流至钻井孔, 提高页岩气的产量^[7]。大部分样品在吸附回线上有一类明显的标志, 即解吸分支有一个急剧下降的拐点(图 2)。这种现象是由一种特殊形态孔——细颈瓶孔, 也叫“墨水瓶孔”引起^[24], 墨水瓶孔虽一端封闭, 却能产生吸附回线。

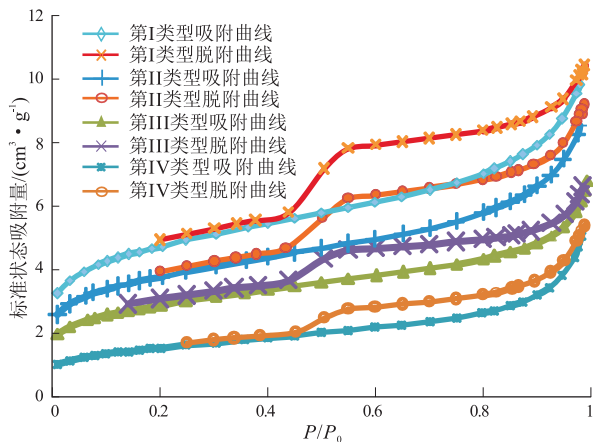


图 2 渝东南地区龙马溪组和川东南地区须家河组页岩样品的吸附等温线

Fig.2 Adsorption isotherms of samples from Longmaxi Formation in southeastern Chongqing area and Xujiahe Formation in southeastern Sichuan area

在低压段, 曲线前半段 ($P/P_0 < 0.45$) 上升缓慢, 并呈向上微凸的形状, 此阶段为吸附单分子层向多分子层过渡; 曲线中间段 ($0.45 < P/P_0 < 0.80$) 随压力的增大吸附量缓慢增加, 此阶段为多分子层吸附过程; 曲线后半段 ($0.80 < P/P_0 < 1$) 吸附线急剧上升, 直到接近饱和蒸气压也未呈现出吸附饱和现象, 表明样品中含有一定量的中孔和大孔, 由于毛细凝聚而发生大孔容积的充填^[7]。因孔隙形态复杂, 几乎不可能用某一种吸附回线代表的孔隙类型描述实际孔隙特征, 实际吸附回线大致与某种类型相似, 即可近似描述孔隙特征。

页岩样品吸附回线存在明显差异(图 2), 总体上, 龙马溪组样品吸附回线分为 4 种类型: 第 I 类型接近 IUPAC 提出的 H2 型^[7], 第 II 和第 III 类型介于 H2 和 H3 型之间, 第 IV 类型接近 H3 型。须家河组样品都为第 I 和 II 类型。表明各样品孔的具体形状存在差异, 孔隙形态复杂无规则。

3 讨论

3.1 有机质对孔隙结构的影响

不同干酪根类型具有不同的分子结构, 在相同演化程度下, 具有不同的孔隙结构和比表面积, 它们会影响天然气的吸附率和扩散率, 一般情况下, I 和 II 型干酪根具有更强的吸附能力^[25]。龙马溪组页岩样品主要为 II 型干酪根, 须家河组页岩样品主要为 III 型干酪根。双变量相关分析结果显示: 龙马溪组样品孔径为 2~10 nm 之间的中孔提供主要的比表面积(表 1, 2~10 nm 孔容/比表面积, $r \geq 0.9$), 2~10 nm 的孔又主要和 TOC 有关(表 1, 2~10 nm 孔容/TOC, $r \geq 0.9$)。结合扫描电镜结果, 认为龙马溪组样品中气体储集空间以有机质孔为主, 其有机质类型决定了其孔隙结构和比表面积的形成更有利于气体的吸附。须家河组页岩中虽然有大量的孔隙, 但是页岩有机微孔极少, 页岩比表面积相对龙马溪组样品较低, 这样吸附态的页岩气就较少, 即甲烷在页岩中赋存时主要为游离状。本研究中因为样品的成熟度范围较窄, 孔隙结构特征与有机质成熟度关系不明显。此外, 认为有机质的赋存状态差异对有机质孔发育具有一定的影响, 即与有机质共生的某些矿物或元素对有机质孔的发育可能具有一定的促进作用。

3.2 无机矿物对孔隙发育的影响

图 1f 中所示, 龙马溪组页岩样品中距离相近的有机质赋存形态存在明显差异, 左边有机质发育丰富的孔隙, 而右边的有机质孔却并不发育。可能

表 1 渝东南地区龙马溪组和川东南地区须家河组页岩样品实验参数之间的相关系数
Table 1 Correlation coefficient of experimental parameters of shale samples from Longmaxi Formation in southeastern Chongqing area and Xujiahe Formation in southeastern Sichuan area

页岩样品	置信水平/%	相关系数 r			
		$r \geq 0.9$	$0.8 \leq r < 0.9$	$0.7 \leq r < 0.8$	
须家河组	99	小于 2 nm 孔容/比表面积 小于 2 nm 孔容/钾长石* 黏土/脆性矿物	含气量/TOC	黏土/平均孔径*	黏土矿物/比表面积
			平均孔径/脆性矿物	石英/比表面积*	
			2~10 nm 孔容/比表面积	10~51 nm 孔容/高岭石	
			51~101 nm 孔容/比表面积*	大于 101 nm 孔容/比表面积*	
龙马溪组	99	含气量/TOC 含气量/比表面积 含气量/2~10 nm 孔容 TOC/比表面积 TOC/2~10 nm 孔容 2~10 nm 孔容/比表面积	51~101 nm 孔容/平均孔径	含气量/伊利石	
			含气量/2~10 nm 孔容比	含气量/平均孔径*	
			含气量/大于 100 nm 孔容比*	含气量/10~50 nm 孔容	
			TOC/2~10 nm 孔容比	含气量/50~100 nm 孔容比*	
			TOC/平均孔径	TOC/伊利石	
			TOC/大于 100 nm 孔容比*	TOC/10~50 nm 孔容比*	

* 表示相关关系为负相关。

为有机质类型差异造成孔隙发育差异。有研究表明,红藻等在成岩演化过程中更易于生成孔隙。在有机质类型和成熟度一致的情况下,有机质孔隙的发育受到与其共生的无机质的影响。在龙马溪组页岩样品中有机质孔极为发育的有机质周围或为莓球状黄铁矿,或与层状黏土矿物紧密共生。具有层状的黏土矿物和黄铁矿已被前人的研究证明是对烃源岩成烃演化具有一定的催化作用^[26-28],同时,在成岩演化作用过程中,黄铁矿的存在对有机孔隙形态的保存可以起到一定的保护作用。无机质的催化成烃作用可以使页岩中部分有机质提前进入生烃演化阶段,同时产生更多的有机质孔。图 1f 中有机质孔隙不发育的有机质周围无机矿物种类和形态明显不同,主要为石英和非层状黏土矿物。进一步分析发现,黄铁矿含量与孔隙度呈一定的正相关关系(图 3)。综上所述,认为页岩本身的物质不均一性导致有机质孔隙发育差异现象的发生,具有催化生气作用的无机矿物或元素及有机质赋存关系差异是导致有机质孔隙发育差异的重要原因。

3.3 孔隙类型对含气量影响

虽然 2 组样品中孔隙类型具有明显区别,但数理统计结果显示(表 1),2 组样品的含气量主控因素均为 TOC。孔隙类型并不是含气量大小的主控因素。体现 TOC 为页岩气藏最本质因素。须家河组样品的含气量仅与 TOC 有关,比表面积与孔径分布结果与高岭石、石英等无机矿物具有显著相关关系,暗示孔隙结构主要受无机矿物的影响。龙马溪组样品的含气量还与比表面、2~10 nm 中孔的孔

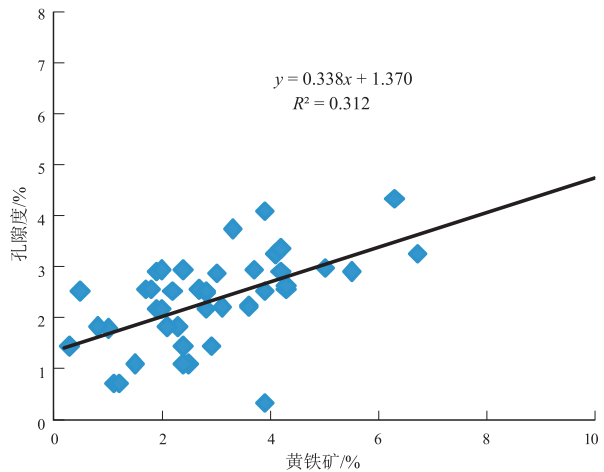


图 3 渝东南地区龙马溪组页岩孔隙度和黄铁矿含量相关关系

Fig.3 Correlation between porosity and pyrite content in shale samples from Longmaxi Formation in southeastern Chongqing area

容及孔容比、伊利石、和 10~50 nm 中孔孔容之间具有显著的正相关性。这些参数之间的相关关系暗示,页岩样品的孔容和比表面积主要是孔径为 2~10 nm 的有机质中孔提供,页岩气主要赋存于有机质孔隙中。同时,伊利石是孔径为 2~10 nm 孔发育的重要影响因素,亦是提供页岩气存储空间的重要物质。

4 结论

(1) 须家河组页岩样品的孔隙类型主要为无机矿物中、大孔;孔隙具有不规则形态,多呈开放状,孔隙结构较复杂。龙马溪组页岩样品中主要为 2~10 nm 的有机质孔。

(2)有机质孔发育差异原因可能是由页岩的有机质类型本身化学分子性质差异造成,也可能是具有催化生气作用的无机矿物或元素与有机质赋存关系差异造成。在成岩演化作用过程中,黄铁矿的存在对有机孔隙形态的保存可以起到一定的保护作用。原生黄铁矿和具有层状结构的黏土矿物是有机质孔发育的重要影响物质。

(3)孔隙类型并不是页岩含气量大小的主控因素,TOC为页岩气藏最本质因素。须家河组中孔隙结构主要受无机矿物影响。龙马溪组页岩样品中有机质孔是页岩气主要的储集空间。伊利石是孔径为2~10 nm孔发育的重要影响因素,亦是提供页岩气存储空间的重要物质。

参考文献:

- [1] Ambrose R J, Hartman R C, Campos MD, et al. New pore-scale considerations for shale gas in place calculations [C]//SPE Unconventional Gas Conference. Pittsburgh, Pennsylvania, USA: SPE, 2010: 1-17.
- [2] 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.
- [3] 武瑾, 王红岩, 拜文华, 等. 渝东南龙马溪组页岩储层特征及吸附影响因素分析[J]. 断块油气田, 2013, 20(6): 713-718.
Wu Jin, Wang Hongyan, Bai Wenhua, et al. Analysis on characteristics of Longmaxi Formation shale reservoir in southeast district of Chongqing and adsorption influence factor [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(6): 713-718.
- [4] 葛忠伟, 樊莉. 页岩气研究中应注意的问题[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(6): 19-22.
Ge Zhongwei, Fan Li. Some notable problems about shale gas in the scientific research [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(6): 19-22.
- [5] 冯子齐, 于炳松, 曾秋楠, 等. 鄂尔多斯东南部页岩气储层特征及其主控因素[J]. 特种油气藏, 2013, 20(6): 40-43.
Feng ZiQi, Yu Bingsong, Ceng Qianan, et al. Southeastern ordos shale gas reservoir characteristics and its main controlling factors [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(6): 40-43.
- [6] 马明福, 李薇, 刘亚村. 苏丹 Melut 盆地北部油田储集层孔隙结构特征分析[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 121-124.
Ma Mingfu, Li Wei, Liu Yacun. Pore structure characteristics analysis of the oilfield in north Melut Basin, Sudan [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 121-124.
- [7] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 川南龙马溪组页岩气储层纳米孔隙结构特征及其成藏意义[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 438-444.
Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, et al. Structure-characteristics and accumulation significance of nanopores in Longmaxi shale gas reservoir in the southern Sichuan Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 438-444.
- [8] 冯爱国, 张建平, 石元会, 等. 中扬子地区涪陵区块海相页岩气层特征[J]. 特种油气藏, 2013, 20(6): 15-19.
Feng Aiguo, Zhang Jianping, Shi Yuanhui, et al. Characteristics of marine shale gas play in fuling block in the Middle Yangtze Area [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(6): 15-19.
- [9] 邹才能, 杨智, 陶士振, 等. 纳米油气与源储共生型油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 13-26.
Zou Caineng, Yang Zhi, Tao Shizhen, et al. Nano-hydrocarbon and the accumulation in coexisting source and reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 13-26.
- [10] 黄金亮, 邹才能, 李建忠, 等. 川南志留系龙马溪组页岩气形成条件与有利区分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 782-787.
Huang Jinliang, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Shale gas accumulation conditions and favorable zones of Silurian Longmaxi Formation in south Sichuan Basin, China [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 782-787.
- [11] 龙鹏宇, 张金川, 姜文利, 等. 渝页1井储层孔隙发育特征及其影响因素分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(10): 3954-3964.
Long Pengyu, Zhang Jinchuan, Jiang Wenli, et al. Analysis on pores forming features and its influence factors of reservoir well Yuye-1 [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(10): 3954-3964.
- [12] 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.
- [13] 杨峰, 宁正福, 胡昌蓬, 等. 页岩储层微观孔隙结构特征[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 301-311.
Yang Feng, Ning Zhengfu, Hu Changpeng, et al. Characterization of microscopic pore structures in shale reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 301-311.
- [14] 陈尚斌, 夏筱红, 秦勇, 等. 川南富集区龙马溪组页岩气储层孔隙结构分类[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 760-765.
Chen Shangbin, Xia Xiaohong, Qin Yong, et al. Classification of pore structures in shale gas reservoir at the Longmaxi Formation in the south of Sichuan Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5): 760-765.
- [15] 侯宇光, 何生, 易积正, 等. 页岩孔隙结构对甲烷吸附能力的影响[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(2): 248-256.
Hou Yuguang, He Sheng, Yi Jizheng, et al. Effect of pore structure on methane sorption capacity of shales [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2): 248-256.
- [16] 辜敏, 鲜学福, 杜云贵, 等. 威远地区页岩岩心的无机组成、结构及其吸附性能[J]. 天然气工业, 2012, 32(6): 99-102.
Gu Min, Xian Xuefu, Du Yungui, et al. Mineral composition, structure and adsorption properties of Weiyuan shale cores [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(6): 99-102.
- [17] 潘磊, 陈桂华, 徐强, 等. 下扬子地区二叠系富有机质泥页岩孔隙结构特征[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 787-793.

Pan Lei, Chen Guihua, Xu Qiang, et al. Pore structure characteristics of Permian organic-rich shale in Lower Yangtze area [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5): 787-793.

[18] 黄振凯, 陈建平, 薛海涛, 等. 松辽盆地白垩系青山口组泥页岩孔隙结构特征[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 58-65. Huang Zhenkai, Chen Jianping, Xue Haitao, et al. Microstructural characteristics of the Cretaceous Qingshankou Formation shale, Songliao Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 58-65.

[19] 胡海燕. 富有机质 Woodford 页岩孔隙演化的热模拟实验[J]. 石油学报, 2013, 34(5): 820-825. Hu Haiyan. Porosity evolution of the organic-rich shale with thermal maturity increasing[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(5): 820-825.

[20] 梁兴, 张延山, 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 Xing, Zhang Yanshan, Yang Yang, 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.

[21] 王庆波, 刘若冰, 魏祥峰, 等. 陆相页岩气成藏地质条件及富集高产主控因素分析: 以元坝地区为例[J]. 断块油气田, 2013, 20(6): 698-703. Wang Qingbo, Liu Ruobing, Wei Xiangfeng, et al. Geologic condition of shale gas accumulation in continental facies and main controlling factors of enrichment and high production: Taking Yuanba District as an example[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(6): 698-703.

[22] 曾秋楠, 于炳松, 李昱霏. 鄂尔多斯盆地东南部延长组页岩储层特征及控制因素[J]. 特种油气藏, 2013, 20(1): 23-26. Zeng Qiunan, Yu Bingsong, Li Yufei. Reservoir characteristics and control factors in the shale bed of Yanchang Formation of Southeast in Ordos Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(1): 23-26.

[23] 周德华, 焦方正, 郭旭升, 等. 川东北元坝区块中下侏罗统页岩油气地质分析[J]. 石油实验地质, 2013, 35(6): 596-600. Zhou Dehua, Jiao Fangzheng, Guo Xusheng, et al. Geologic analysis of Middle-Lower Jurassic shale reservoirs in Yuanba area, northeastern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(6): 596-600.

[24] 琚宜文, 姜波, 王贵梁, 等. 构造煤结构及储层物性[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005. Ju Yiwen, Jiang Bo, Wang Guiliang, et al. Tectonic coal structure and reservoir property [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2005.

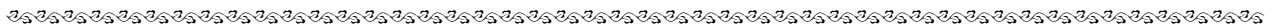
[25] 孙赞东, 贾承造, 李相方, 等. 非常规油气勘探与开发(下册)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011. Sun Zandong, Jia Chengzao, Li Xiangfang, et al. Unconventional oil and gas exploration and development (part II) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.

[26] 卢红选, 孟自芳, 李斌, 等. 微量元素对褐煤有机质热解成烃的影响[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(2): 64-66. Lu Hongxuan, Meng Zifang, Li Bin, et al. Effect of trace element on pyrogenic hydrocarbon generation of lignite [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(2): 64-66.

[27] 吴艳艳, 秦勇. 煤中矿物/金属元素在生气过程中的催化作用[J]. 地球科学进展, 2009, 24(8): 882-890. Wu Yanyan, Qin Yong. Catalysis of mineral/metal elements during coal bed gas generation [J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(8): 882-890.

[28] 吴艳艳, 秦勇, 刘金钟, 等. 矿物/金属元素在煤成烃过程中的作用: 以黔西滇东上二叠统大河边煤矿煤样为例[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(1): 141-152. Wu Yanyan, Qin Yong, Liu Jinzhong, et al. Catalysis action of mineral/metal elements during coal-derived hydrocarbons process: An example of the late Permian coal from Dahebian coal mine in eastern Yunnan and western Guizhou [J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(1): 141-152.

(编辑 徐文明)



(上接第 230 页)

[32] 李荣西, 周生斌. 矿物中单个有机包裹体测试与 TOF-SIMS 技术的应用[J]. 矿物学报, 2000, 20(2): 172-176. Li Rongxi, Zhou Shengbin. Analytical techniques for individual organic inclusions and application of TOF-SIMS [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2000, 20(2): 172-176.

[33] Pironon J, Thiéry R, Teinturier S, et al. Water in petroleum inclusions: Evidence from Raman and FT-IR measurements, PVT consequences [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2000, 69-70: 663-668.

[34] 曹剑, 姚素平, 胡文瑄, 等. 油气包裹体中水的检出及其意义[J]. 科学通报, 2006, 51(13): 1583-1588. Cao Jian, Yao Suping, Hu Wenxuan, et al. Detection of water in petroleum inclusions and its implications [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(13): 1583-1588.

[35] Hagemann H W, Hollerbach A. The fluorescence behavior of crude oils with respect to their thermal maturation and degradation [J]. Organic Geochemistry, 1986, 10(1/3): 473-480.

(编辑 韩 彧)