

页岩气富集高产主控因素分析

——以四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组一段页岩为例

方栋梁, 孟志勇

(中国石化 江汉油田分公司 勘探开发研究院, 武汉 433124)

摘要:以四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组海相页岩为研究对象,综合岩心观察、地化分析、测井和地震资料,分别从页岩气富集和高产两方面开展主控因素系统分析,明确有机碳含量、微—纳米尺度孔隙和保存条件是页岩气富集主控因素。其中有机碳含量不仅是评价页岩原生品质的重要参数,同时影响微—纳米尺度孔隙发育特征,而保存条件是页岩气富集的重要基础保障。页岩气高产受脆性矿物含量、埋深、构造形态和裂缝因素影响,其中脆性矿物含量越高,页岩可压性越好;页岩埋深及构造形态对于地应力影响较大,从而影响页岩储层的压裂改造效果;裂缝的发育导致压裂过程中压力的定向性泄压,无法形成有效复杂缝网。

关键词:页岩气;富集高产;主控因素;五峰组—龙马溪组;涪陵地区;四川盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Main controlling factors of shale gas enrichment and high yield:

a case study of Wufeng-Longmaxi formations in Fuling area, Sichuan Basin

FANG Dongliang, MENG Zhiyong

(Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Jianghan Oilfield, Wuhan, Hubei 433124, China)

Abstract: The controlling factors of shale gas enrichment and yield were discussed based on core observation, geochemical analysis, logging and seismic data of marine shale collected from the Wufeng-Longmaxi formations in the Fuling area of Sichuan Basin. Total organic carbon content, micro- to nano-scale pores and preservation conditions are the main controlling factors for shale gas enrichment. The total organic carbon content is not only an important parameter for evaluating original shale quality, but also affects micro- to nano-scale pore development. The preservation condition is important for shale gas enrichment. The high yield of shale gas is affected by brittle mineral content, burial depth, structural morphology and fractures. The higher the brittle mineral content, the better the compressibility of shale and the better the effect of fracturing. In addition, burial depth and structure features have great effect on crustal stress, and thus have significant influence on fracturing. Natural fracture development leads to directional pressure relief during fracturing, and it is difficult to form an effective and complex permeability mesh.

Key words: shale gas; enrichment and high yield; main controlling factor; Wufeng-Longmaxi formations; Fuling area; Sichuan Basin

涪陵地区位于扬子板块中南部、黔中隆起北缘的北部凹陷,上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组沉积期,涪陵地区所在的中扬子中西部地区整体处于相对安静的深水陆棚沉积环境,发育了一套暗色富硅质、富有机质泥页岩^[1](图1)。近年来勘探证实,该套暗色富有机质泥页岩为一套优质含气页岩储层,有机质类型好(主要为I型干酪根),有机质丰度高(TOC含量在2.54%),热演化程度适中(R_o 为2.5%),储集性能好(孔隙度4.61%),含气丰度

高(5~6 m³/t),使得五峰组—龙马溪组海相页岩成为四川盆地页岩气勘探热点^[2-3]。该套页岩储层含气性平面分布具有较大差异,并在页岩含气性相似的区域,其页岩气单井测试产量也存在较大差异,页岩气富集高产主控因素亟待深入研究。本文系统研究和阐述了页岩气富集和高产的基本地质条件和主控因素,为研究区五峰组—龙马溪组海相页岩气藏的后继研究及开发提供有力的技术支撑。

收稿日期:2019-04-30;修订日期:2019-12-13。

作者简介:方栋梁(1982—),男,工程师,从事非常规油气勘探开发研究工作。E-mail:739981781@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05060)和国家自然科学基金青年基金项目(41702149)联合资助。

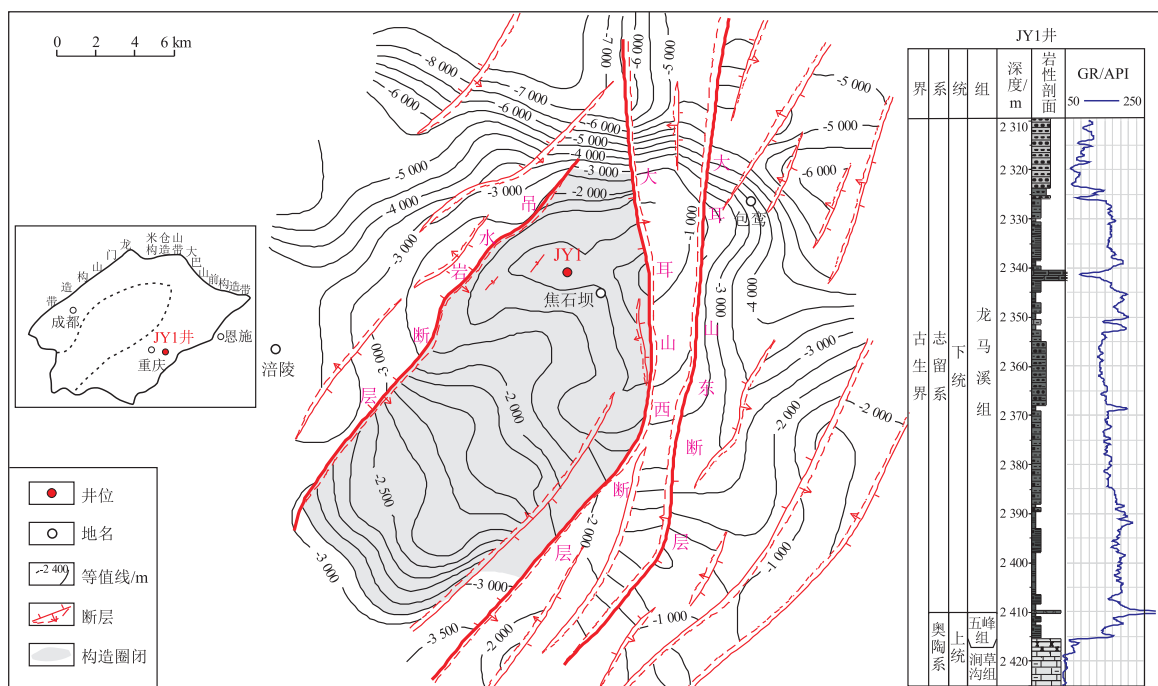


图 1 四川盆地涪陵地区志留系底反射层构造及 JY1 井五峰组—龙马溪组岩性特征

Fig.1 Structure of basal Silurian and lithological characteristics of Wufeng-Longmaxi formations in well JY1, Fuling area, Sichuan Basin

1 页岩气富集主控因素

页岩气富集是页岩气高产的基础,页岩气与常规油气的最大区别在于自生自储,另外页岩气在页岩储层中具备多种赋存状态——溶解态、吸附态和游离态,因此,页岩自身良好的生烃、储气能力是页岩气富集的重要基础条件^[4-5]。页岩气富集受总有机碳含量和微纳米孔隙影响;良好的保存条件是页岩气得以保存的必要条件,也是页岩气井高产的有效保障。

1.1 有机碳含量

页岩气属于典型的自生自储气藏,储层的总有机碳含量是评价页岩储层原生品质的重要基础参数。针对涪陵页岩气田的测试数据表明,有机碳含

量与含气量呈现明显的正相关关系(图 2a)。此外,有机质对页岩储层比表面积具有重要的贡献。液氮吸附实验测定结果表明,页岩储层比表面积与有机碳含量之间呈现了明显的正相关关系(图 2b)。

1.2 微—纳米尺度孔隙

前人研究成果证实:相同孔隙体积前提下,孔隙直径越小,其孔隙内比表面积越大^[6-9]。从分析结果来看,比表面积与微孔和中孔之间呈现明显的正相关关系(图 3a),而与大孔之间相关性较差(图 3b)。压汞—液氮吸附联测结果表明:涪陵页岩气田五峰组—龙马溪组一段页岩以中孔为主,其次为微孔,大孔发育程度最低,其在页岩总孔隙中的占比依次为 80%、8%和 5.5%。由此可知,中、微孔成为页岩气主要赋存空间。此外,镜下观测揭示,页岩内微—纳米孔隙非常发育(图 4)。

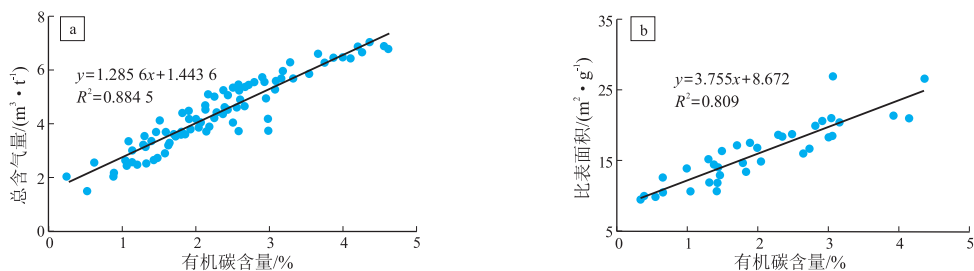


图 2 四川盆地焦石坝地区五峰组—龙马溪组一段含气页岩有机碳含量与总含气量和比表面积关系

Fig.2 Correlation diagram of organic carbon content, total gas content and specific surface area of gas-bearing shale in Wufeng Formation—first member of Longmaxi Formation, Jiaoshiba area, Sichuan Basin

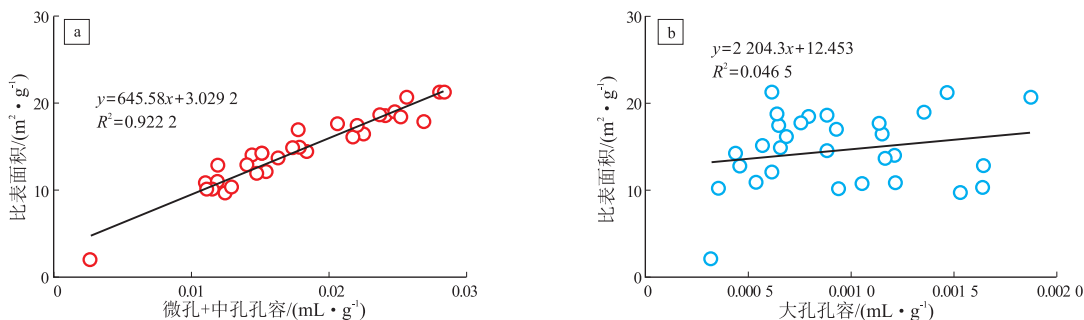


图 3 四川盆地焦石坝地区五峰组—龙马溪组一段含气页岩比表面积主控因素相关性分析

Fig.3 Correlation of main controlling factors of specific surface area of gas-bearing shale in Wufeng Formation—first member of Longmaxi Formation, Jiaoshiba area, Sichuan Basin

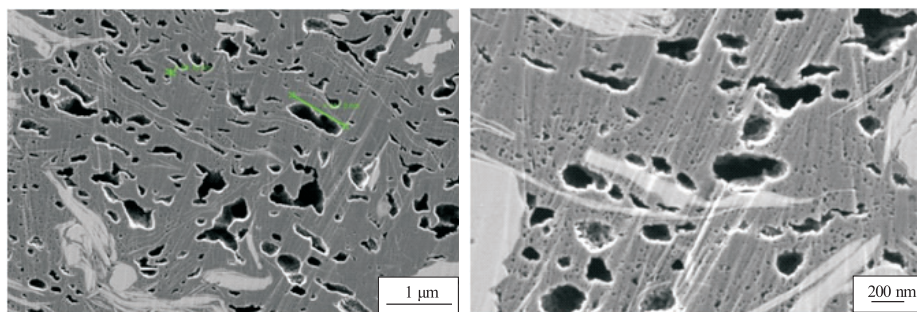


图 4 四川盆地焦石坝地区五峰组—龙马溪组一段含气页岩微—纳米孔隙镜下观察

Fig.4 Observation of micro- to nano-porosity in gas-bearing shale in Wufeng Formation—first member of Longmaxi Formation, Jiaoshiba area, Sichuan Basin

1.3 保存条件

保存条件是页岩气富集的重要基础保障。涪陵页岩气田焦石坝区块开发实践证明:构造保存条件对页岩储层的含气性有着重要的影响,构造复杂区常存在一定程度页岩气逸散现象。以靠近东翼石门 1 号断裂的焦页 B 井为例,该井五峰组—龙马溪组含气页岩段岩心观察结果证实,整个含气页岩段、下伏层洞草沟组灰岩和上覆层龙

二段浊积砂段裂缝均较焦石坝区块主体稳定区发育,在上覆浊积砂段裂缝的充填物中发育了大量的烃类包裹体(图 5),证实该区后期存在一定程度的页岩气的逸散。

从目前开发实践证明,构造变形强度越大,页岩储层含气性相对变差。构造改造强,保存条件变差,气层自身压力下降,受上覆地层压实作用,孔隙尺度变小,进而导致游离气含量减少,并最终影响

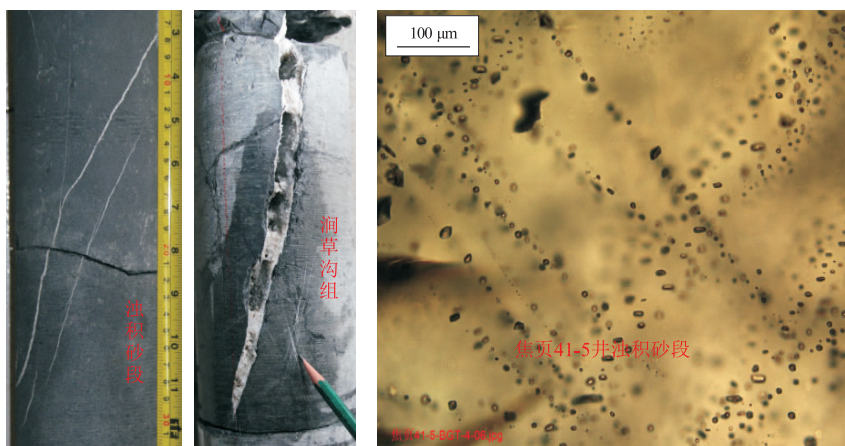


图 5 四川盆地焦页 B 井五峰组—龙马溪组一段含气页岩上下邻层裂缝及流体包裹体照片

Fig.5 Photographs of cracks and fluid inclusions in upper and lower adjacent layers of gas-bearing shale in Wufeng Formation—first member of Longmaxi Formation, well Jiaoye B, Sichuan Basin

页岩气井初期产能。因此,保存条件无论是对页岩气的富集还是页岩气井的高产都是至关重要的。

2 页岩气高产主控因素

页岩气富集是页岩气高产的重要物质基础。页岩储层自身发育大量纳米级孔隙,使其具有特低孔特低渗特征。因此,相较于常规油气藏,其单井高产条件更为苛刻。针对涪陵地区五峰组—龙马溪组一段而言,孔隙度介于 1%~6%,稳态法测试渗透率平均值为 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,使得页岩气开采需经过大规模人工压裂改造,提高储层渗流能力,进而形成一定产能。因此,良好的压裂工程工艺改造效果对页岩气单井产能有着至关重要的影响。结合目前焦石坝区块开发实践,影响压裂改造效果的主要地质因素有页岩脆性矿物含量、埋深、构造形态和裂缝发育特征。

2.1 页岩脆性矿物含量

系统分析揭示:在相同地质条件下,页岩脆性矿物含量与单井产能之间呈现明显的正相关关系(图 6),表明页岩自身脆性矿物含量越高,可压性越好,压裂改造效果越好,单井初期产能越高。

2.2 气层埋深

埋深对压裂改造施工难度的影响,主要表现在以下 3 个方面:(1)形成复杂缝网的难度增大,上覆岩层压力增加导致层间缝剪切难度增加,最小水平主应力、温度增加导致岩石塑性增强,岩石力学参数变化导致诱导应力强度及作用区域减小;(2)导致施工压力提高;(3)由于剪切滑移面由粗糙变得更为光滑,从而导致压裂缝的导流保持能力降低。

在埋深低于 2 800 m 的构造稳定区,埋深不足以对压裂改造效果产生太大的影响^[10],即这个影

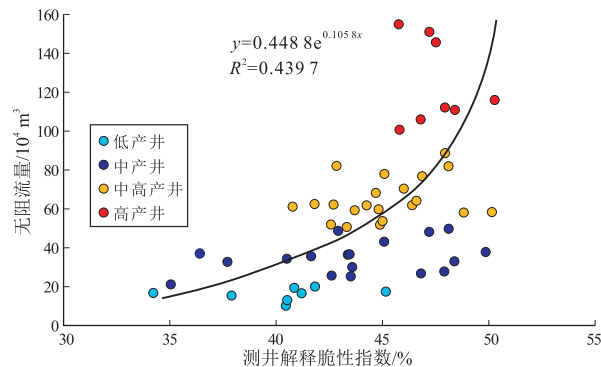


图 6 四川盆地焦石坝区块 1 500 m 水平段无阻流量与测井解释脆性指数拟合

Fig.6 Correlation of unobstructed flow in 1 500 m horizontal section and brittleness index fitting of logging interpretation, Jiaoshiba area Sichuan Basin

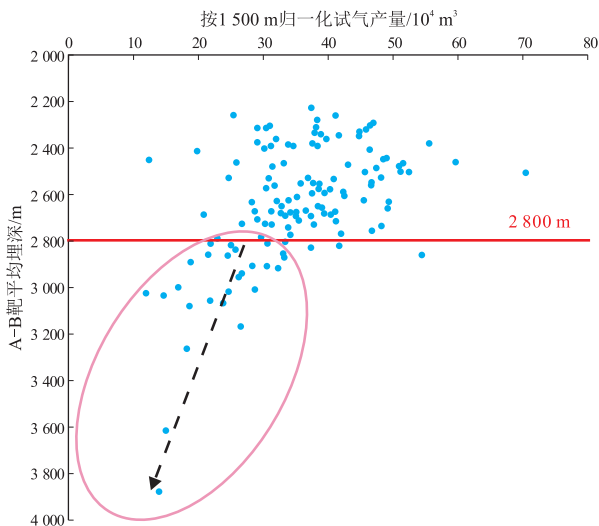


图 7 四川盆地焦石坝地区下部气层已测试井归一化试气产量与埋深关系

Fig.7 Normalized test gas yield and burial depth of test wells in gas reservoir in lower part of Jiaoshiba area, Sichuan Basin

响较其他因素相比并不明显。但埋深超过 2 800 m 后,其单井产能与埋深之间呈现明显的负相关关系(图 7),在相关地质条件相似的前提下,随着埋深的增加,单井产能变低,表明埋深对压裂改造效果起到了负面的影响作用。

2.3 天然裂缝

裂缝发育区常存在应力松弛现象,人工裂缝通过应力松弛区过渡到天然裂缝,使张开的天然裂缝发生膨胀,导致液体效率、缝内净压力降低,影响裂缝延伸及复杂缝网形成。生产实践揭示:焦石坝断背斜压裂施工难度大、压裂效果差的井主要集中在以条带状裂缝为主的区域;裂缝不发育区(以斑点状均质分布的弱曲率区)水平井压裂难度小。以焦页 F 井为例(图 8),其井筒两侧均发育条带状曲率,但西侧条带状曲率明显强于东侧。根据该井微地震检测结果,水平段压裂缝网的平面延展明显受到两侧条带状曲率的限制,在井筒靠近 A 靶的位置,东侧条带状曲率距离井筒较远,裂缝延伸也相对较远。

3 结论

(1)影响页岩气富集的地质主控因素主要包括总有机碳含量、微—纳米尺度孔隙和保存条件。其中,页岩储层比表面积与有机碳含量之间呈现了明显的正相关关系,微—纳米级孔隙是页岩气主要赋存空间。此外,保存条件对页岩气富集意义重大,构造改造强,保存条件变差,页岩气初期产能较低。

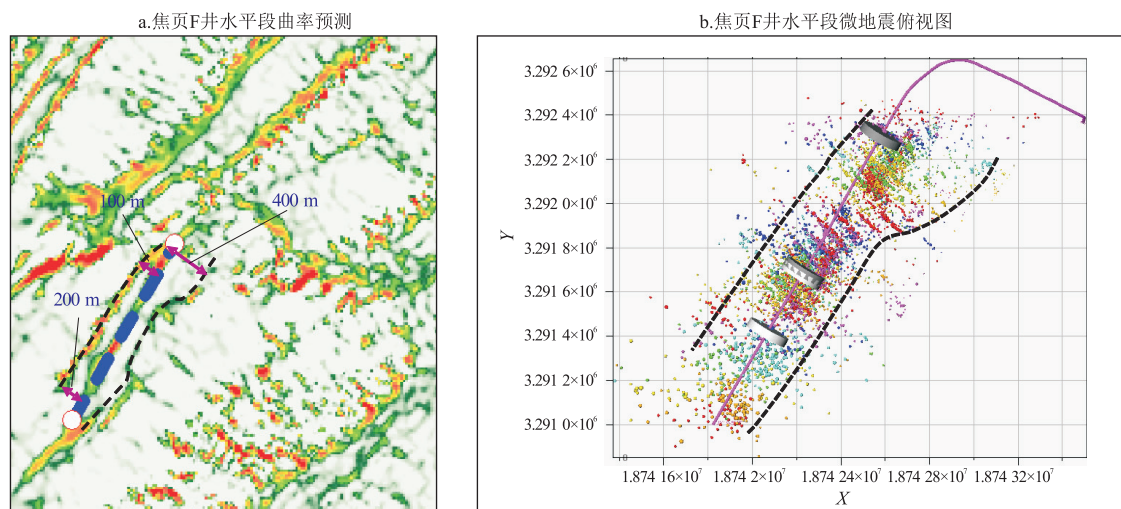


图8 四川盆地焦石坝地区焦页F井水平段曲率预测及微地震检测结果

Fig.8 Curvature prediction and microseismic test results of horizontal section of well JY F in Jiaoshiba area, Sichuan Basin

(2) 良好的压裂改造效果是页岩气井高产的必要条件。影响页岩压裂改造效果的主要地质因素包括页岩脆性矿物含量、埋深、构造形态和裂缝。脆性矿物含量越高,可压性越好,而埋深增大不利于有效压裂。另外,向斜构造形态会派生挤压应力,增大了最小主应力,增加裂缝延伸难度,导致施工难度增加。

参考文献:

- [1] 肖开华,李双建,汪新伟,等.中、上扬子区志留系油气成藏特点与勘探前景[J].石油与天然气地质,2008,29(5):589-596. XIAO Kaihua, LI Shuangjian, WANG Xinwei, et al. Hydrocarbon accumulation features and exploration direction in the Silurian of the Middle-Upper Yangtze Platform [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5): 589-596.
- [2] 张金川,聂海宽,徐波,等.四川盆地页岩气成藏地质条件[J].天然气工业,2008,28(2):151-156. ZHANG Jinchuan, NIE Haikuan, XU Bo, et al. Geological condition of shale gas accumulation in Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 151-156.
- [3] 李金磊,尹成,王明飞,等.四川盆地涪陵焦石坝地区保存条件差异性分析[J].石油实验地质,2019,41(3):341-347. LI Jinlei, YIN Cheng, WANG Mingfei, et al. Preservation condition differences in Jiaoshiba area, Fuling, Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(3): 341-347.
- [4] 王丹,王维旭,朱炬辉,等.四川盆地中浅层龙马溪组页岩储层改造技术[J].断块油气田,2019,26(03):350-354. WANG Dan, WANG Weixu, ZHU Juhui, et al. Stimulation technology of medium-shallow shale gas in Longmaxi Formation of Sichuan Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(03): 350-354.
- [5] 聂海宽,包书景,高波,等.四川盆地及其周缘上奥陶统一下志留统页岩气成藏体系研究[J].石油实验地质,2012,

34(2):115-119.

NIE Haikuan, BAO Shujing, GAO Bo, et al. Accumulation system for shale gas from Upper Ordovician to Lower Silurian in Sichuan Basin and surrounding areas [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(2): 115-119.

- [6] 谢晓永,唐洪明,王春华,等.氮气吸附法和压汞法在测试泥页岩孔径分布中的对比[J].天然气工业,2006,26(12):100-102. XIE Xiaoyong, TANG Hongming, WANG Chunhua, et al. Contrast of nitrogen adsorption method and mercury porosimetry method in analysis of shale's pore size distribution [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(12): 100-102.
- [7] 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.
- [8] 易积正,王超.四川盆地焦石坝地区龙马溪组海相页岩储层非均质性特征[J].石油实验地质,2018,40(1):13-19. YI Jizheng, WANG Chao. Differential pore development characteristics in various shale lithofacies of Longmaxi Formation in Jiaoshiba area, Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(1): 13-19.
- [9] 王超,张柏桥,舒志国,等.四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组海相页岩岩相类型及储层特征[J].石油与天然气地质,2018,39(3):485-497. WANG Chao, ZHANG Boqiao, SHU Zhiguo, et al. Lithofacies types and reservoir characteristics of marine shales of the Wufeng Formation - Longmaxi Formation in Fuling area, the Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3): 485-497.
- [10] 习传学,高东伟,陈新安,等.涪陵页岩气田西南区块压裂改造工艺现场试验[J].特种油气藏,2018,25(1):155-159. XI Chuanxue, GAO Dongwei, CHEN Xinan, et al. Field test of fracturing technology in the southwest section of Fuling Shale Gas Field [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(1): 155-159.