

# 页岩储层孔隙对威远区块地质储量的影响

王雪帆<sup>1,2</sup>, 王红岩<sup>3,4,5</sup>, 赵群<sup>3,4,5</sup>

- 1. 中国科学院大学地球科学学院 北京 100049
- 2. 中国科学院渗流流体力学研究所 河北廊坊 065007
- 3. 中国石油勘探开发研究院非常规研究所 北京 100089
- 4. 国家能源页岩气研发(实验)中心 河北廊坊 065007
- 5. 中国石油天然气集团公司非常规油气重点实验室 河北廊坊 065007

通讯作者:Email:wanghongyan69@petrochina.com.cn  
项目支持:国家科技重大专项项目“四川盆地及周缘页岩气形成富集条件、选区评价技术与应用”(2017ZX05035-004)

引用:王雪帆,王红岩,赵群. 页岩储层孔隙对威远区块地质储量的影响[J]. 油气井测试,2020,29(4):8-17.  
Cite: WANG Xuefan, WANG Hongyan, ZHAO Qun. Influence of shale reservoir pores on the geological reserves of Weiyuan block [J]. Well Testing, 2020,29(4): 8-17.

**摘要** 川南地区五峰-龙马溪组海相页岩储层不同建产区页岩气开发效果差异较大,为准确评价页岩微观储层的差异性对评价井产能的影响,以威远区块为研究重点,采用双束扫描电镜、纳米CT和X全岩衍射分析方法,选取W1和W2两口评价井对纵向页岩微观孔隙特征进行研究,分析纳米级孔隙分布对页岩气井“甜点段”的控制作用。研究得到威远龙一<sub>1</sub>亚段4个小层的孔隙度、大孔比例、介孔比例及微孔比例等数据。结果显示,纳米级孔隙发育程度及大孔比例自下而上呈下降趋势,介孔和微孔比例自下而上呈上升趋势。W1、W2井开采目标层位龙一<sub>1</sub>小层厚度分别为6.9 m、7.2 m,W2井高孔隙度、高大孔比例的“双高”储层总厚度高于W1井,评价井试采结果W1井的单井可采储量为 $23.15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,W2井的单井可采储量为 $50.78 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。页岩储层孔隙研究方法对提高气井产能具有重要意义。

**关键词** 威远地区;五峰-龙马溪组;页岩气;孔隙特征;储层特征;地质储量;产能评价;孔隙度

**中图分类号**:TE122      **文献标识码**:A      DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.04.002

## Influence of shale reservoir pores on the geological reserves of Weiyuan block

WANG Xuefan<sup>1,2</sup>, WANG Hongyan<sup>3,4,5</sup>, ZHAO Qun<sup>3,4,5</sup>

- 1. School of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
- 2. Institute of Seepage Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang, Hebei 065007, China
- 3. Unconventional Research Institute, RIPED, Beijing 100089, China
- 4. National Energy Shale Gas Research and Development (Experimental) Center, Langfang, Hebei 065007, China
- 5. Key Laboratory of Unconventional Oil and Gas, CNPC, Langfang, Hebei 065007, China

**Abstract:** The shale gas development effects of marine facies shale reservoir in different production areas of the Wufeng-Longmaxi formation in the southern Sichuan region are quite different. In order to accurately evaluate the impact of the difference of micro-pores of shale reservoir on the productivity of the appraisal well, select the Weiyuan block as the research focus, adopt methods such as dual-beam scanning electron microscope, nano CT and X whole-rock diffraction analysis, select two appraisal wells W1 and W2 to study the characteristics of longitudinal shale micro-pores, and analyze the controlling role of nano pore distribution on sweet spot of shale gas wells. The research has obtained data on the porosity, macropore ratio, mesopore ratio and micropore ratio of the four sublayers in the Weiyuan Long 一<sub>1</sub> sub-member. The results show that the development degree of nano-scale pores and the ratio of macropores show a decreasing trend from bottom to top, while the ratio of mesopores and micropores shows an increasing trend from bottom to top. The thickness of the Long Long 一<sub>1</sub> sublayer in the target layer for wells W1 and W2 is 6.9 m and 7.2 m, respectively. The total thickness of the “double high” reservoir, namely high porosity and high macropore ratio, in Well W2 is bigger than Well W1. Pilot production of appraisal well shows that the single-well EUR of Well W1 is  $23.15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , and the single-well EUR of Well W2 is  $50.78 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ . The pore research methods of shale reservoirs are of great significance for improving the productivity of gas wells.

**Keywords:** Weiyuan area; Wufeng-Longmaxi formation; shale gas; pore characteristics; reservoir characteristics; geological reserves; productivity evaluation

2019年中国页岩气产量  $153 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 在我国天然气产量中占有重要比例<sup>[1]</sup>。四川盆地南部是中国页岩气的重要产区, 储层为五峰组-龙马溪组海相富有机质页岩<sup>[2]</sup>。近年页岩气勘探开发实践表明, 川南地区五峰-龙马溪组海相页岩储层变化超过预期, 不同建产区页岩气开发效果差异较大, 在同等工程技术水平条件下, 部分区块内部不同生产井之间存在较大差异<sup>[3]</sup>。如何评价页岩微观储层的差异性对于评价井产能的影响, 成为当前亟待解决的重要生产问题之一。部分学者开展了大量的页岩储层微观特征研究, 认为纳米级孔隙是页岩气赋存的主要空间<sup>[4]</sup>。研究认为, 页岩纳米级孔隙主要分为有机孔和矿物基质孔。其中有机孔包含有机质孔和生物孔; 矿物基质孔包含粒间孔、粒内溶孔、晶内溶孔和晶间孔。有机质纳米孔是页岩储层孔隙的主体, 通常占比高达50%以上<sup>[4-5]</sup>。

## 1 地质背景

威远区块五峰-龙马溪组页岩储层位于深水陆棚边缘, 受水下古隆起的影响, 富有机质页岩段横向变化较大<sup>[6-8]</sup>。本文以威远区块为例, 选取了开发井生产差异较大的两口评价井 W1 井和 W2 井 (图 1), 从页岩微观尺度分析储层差异性, 阐述页岩储层特征对气井开发效果的影响。

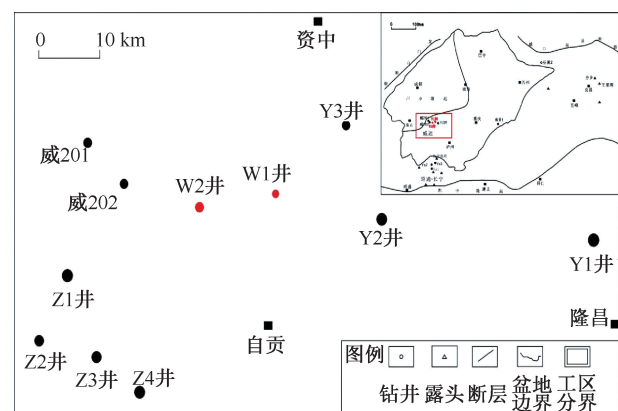


图 1 两口评价井位置图

Fig. 1 Location of the two appraisal wells

在 W1 井中, 龙一<sub>1</sub><sup>1</sup> 小层埋深 3 355.4~3 362.3 m, 厚度为 6.9 m, 总有机碳含量 3.8%~5.9%, 平均含量 4.8%; 龙一<sub>1</sub><sup>2</sup> 小层埋深 3 349.6~3 355.4 m, 厚度为 5.8 m, 总有机碳含量 2.0%~3.1%, 平均含量 2.5%; 龙一<sub>1</sub><sup>3</sup> 小层埋深 3 343.5~3 349.6 m, 厚度为 6.1 m, 总有机碳含量 1.2%~3.0%, 平均含量 2.1%; 龙一<sub>1</sub><sup>4</sup> 小层埋深 3 315.4~3 343.5 m, 厚度为 28.5 m, 总有机碳含量 0.5%~2.5%, 平均含量

1.5%, 压力系数为 1.0。

在 W2 井中, 龙一<sub>1</sub><sup>1</sup> 小层埋深 3 742.9~3 750.1 m, 厚度为 7.2 m, 总有机碳含量 3.8%~6.2%, 平均含量 5.0%; 龙一<sub>1</sub><sup>2</sup> 小层埋深 3 738.6~3 742.9 m, 厚度为 4.3 m, 总有机碳含量 2.0%~4.0%, 平均含量 3.0%; 龙一<sub>1</sub><sup>3</sup> 小层埋深 3 731.2~3 738.6 m, 厚度为 7.4 m, 总有机碳含量 2.8%~4.2%, 平均含量 3.5%; 龙一<sub>1</sub><sup>4</sup> 小层埋深 3 697.2~3 731.2 m, 厚度为 34.0 m, 总有机碳含量 1.4%~3.8%, 平均含量 2.6%, 压力系数为 1.0。

## 2 样品及实验研究

选择威远区块 W1 井和 W2 井共 56 块样品进行实验研究。

### 2.1 取样位置

本文选择威远区块的 W1 井和 W2 井, 其中 W1 井位于区块北部, W2 井位于 W1 井西南 9.5 km 处。两口评价井的目的层均为龙马溪组底部富有机质页岩段, 其测井曲线如图 2 所示。其中 W1 井目的层埋深 3 355.4 m, 总有机碳含量 (TOC) 大于 1% 的页岩段厚度 49.2 m; W2 井目的层埋深 3 742.9 m, 总有机碳含量 (TOC) 大于 1% 的页岩段厚度 52.7 m。取样过程中, 对底部总有机碳含量 (TOC) 大于 3% 的页岩段按照约 1 m 间隔进行取样, 取样 26 块; 总有机碳含量 (TOC) 1%~3% 页岩段按照 2~3 m 间隔进行取样, 取样 16 块; 对总有机碳含量 (TOC) 小于 1% 的页岩段按照约 5 m 间隔进行取样, 取样 14 块, 共取样 56 块。

### 2.2 研究方法

对 W1 井和 W2 井的 56 块样品进行纳米 CT 扫描、FIB-SEM 双束场发射扫描电镜及数据处理。

#### 2.2.1 纳米 CT 扫描

纳米 CT 的精度较高, 可以研究样品的微观结构。对样品进行纳米 CT 扫描和建模, 可以更加直观的观测和分析出样品的孔隙分布和孔隙大小形态, 从而方便对样品进行孔隙网络数据分析及模拟, 进一步进行渗透率的模拟和建模。本次实验的仪器为 Phoenix nanotom m 专业数字岩心 CT 检测系统, 该仪器采用 180 kV/15 W 高性能纳米焦点 X 射线管, 射线源焦点可达到亚微米级别, 扫描完成后就得到了岩心全部的三维 CT 信息, 进而可进行切片数据 3D 可视化、任意方向虚拟剖视等<sup>[9]</sup>。

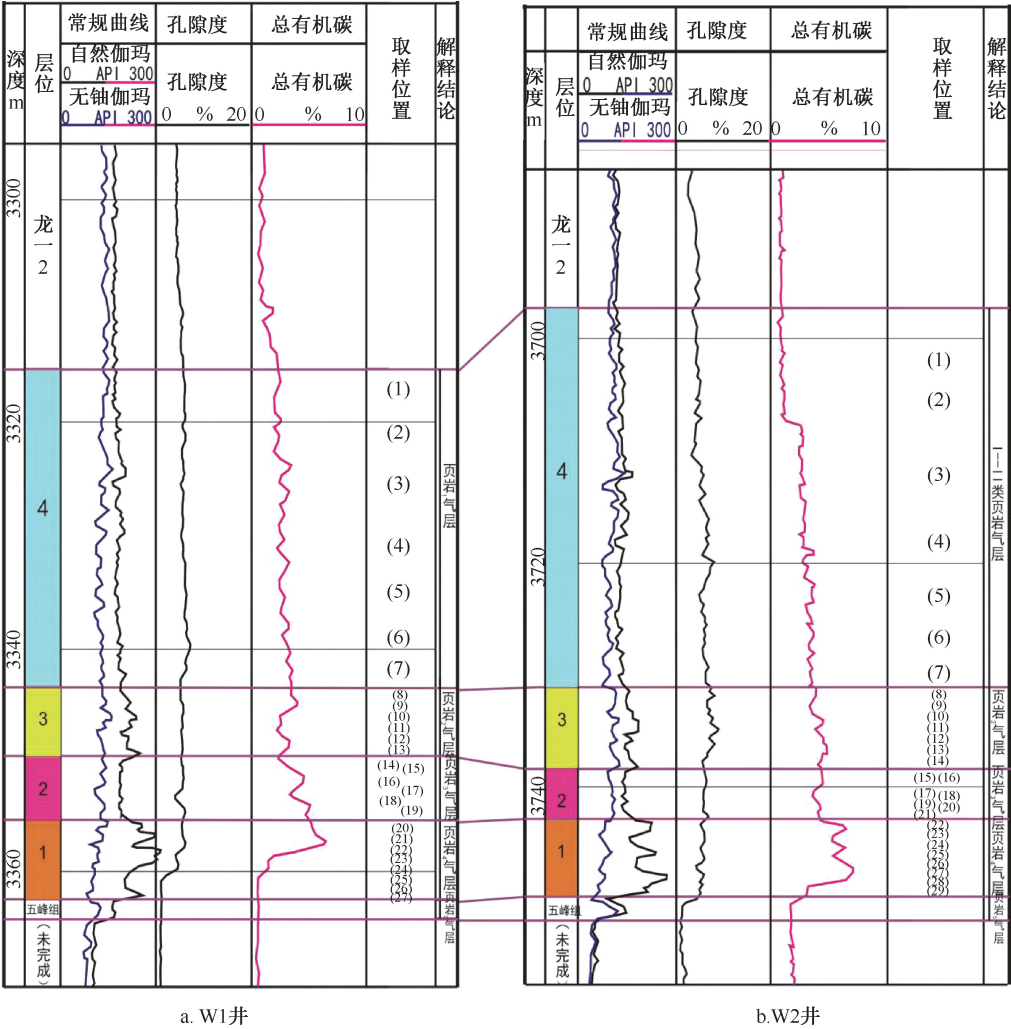


图 2 W1 井和 W2 井测井曲线  
Fig. 2 Logging curves of Well W1 and W2

2.2.2 FIB-SEM 双束场发射扫描电镜

实验中,实验仪器为双束场发射扫描电子显微镜(FIB-SEM)。将样品研磨切割成约 1 cm×1 cm 的薄片,将页岩表面机械磨平,将打磨好的页岩样品薄片放入离子减薄仪器中,用氩离子轰击页岩样品表面,然后将处理好的薄片进行烘干,最后将离子抛光过的样品用导电胶带固定在样品台上,进行抛光面喷涂碳层,将准备好的样品放入双束场发射扫描电子显微镜的样品室内,对页岩样品表面进行观察<sup>[10]</sup>。

2.2.3 数据处理

应用 Phoenix datas | x CT 软件,使用 Phoenix | x-ray CT 系统进行 3D 数据统计和数据处理,实现对孔隙结构三维尺寸及孔隙率等结构参数的定量分析。处理分析后,对岩心样品的 3D 数据进行切割重构,获得“.tiff”文件,经变换字节格式后导入 Avizo,进行三维渲染、孔隙网络结构模拟、孔隙网络

模拟球棍模型和渗透率模拟等计算分析。

3 结果与讨论

针对 W1 井和 W2 井的 56 块样品扫描电镜及数据处理结果,划分出页岩孔隙类型、纳米孔的分层特征,讨论储层差异对于测试产量的影响<sup>[11-12]</sup>。

3.1 页岩孔隙类型

W1 和 W2 井的微观孔隙主要分为有机孔、矿物基质孔和微裂缝。其中,有机孔包括有机质孔和生物孔;矿物基质孔包括粒间孔、粒内孔、晶间孔和溶蚀孔<sup>[13]</sup>。

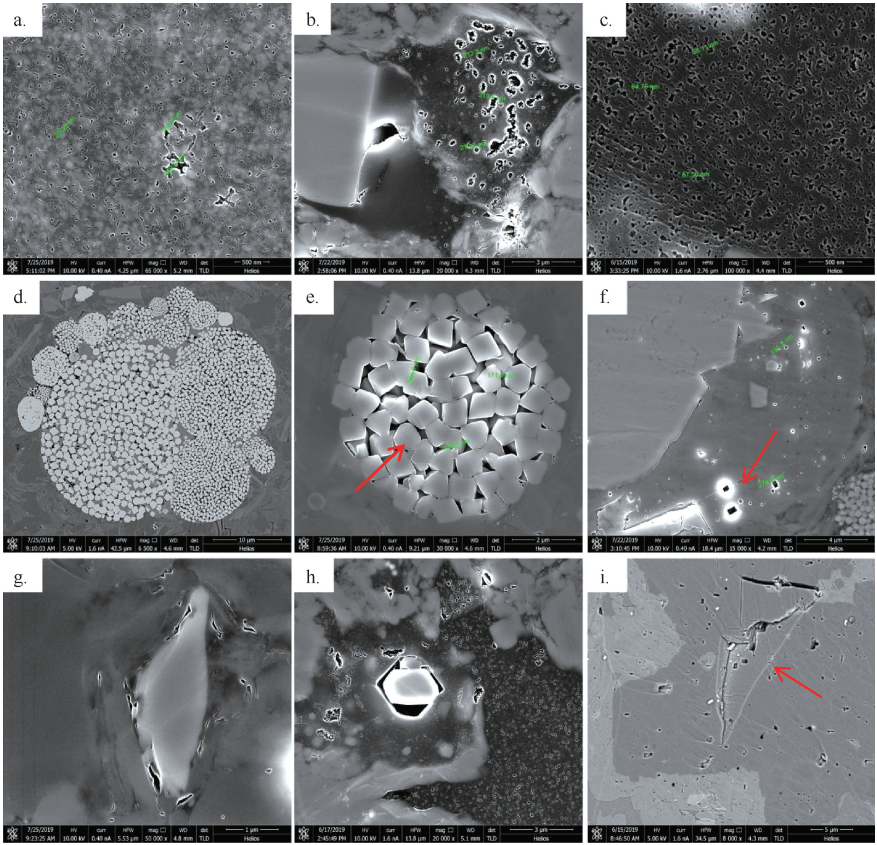
在 W1 井中,龙一<sub>1</sub><sup>1</sup> 小层有机孔约占比例 73%,矿物基质孔约占比例 27%;龙一<sub>1</sub><sup>2</sup> 小层有机孔约占比例 56%,矿物基质孔约占比例 44%;龙一<sub>1</sub><sup>3</sup> 小层有机孔约占比例 32%,矿物基质孔约占比例 68%;龙一<sub>1</sub><sup>4</sup> 小层有机孔约占比例 12%,矿物基质孔约占



比例 88%。

在 W2 井中,龙一<sub>1</sub><sup>1</sup> 小层有机孔约占比例 86%,矿物基质孔约占比例 14%;龙一<sub>1</sub><sup>2</sup> 小层有机孔约占比例 62%,矿物基质孔约占比例 38%;龙一<sub>1</sub><sup>3</sup> 小层有机孔约占比例 37%,矿物基质孔约占比例 63%;龙一<sub>1</sub><sup>4</sup> 小层有机孔约占比例 18%,矿物基质孔约占比例 82%。

有机孔包括:①有机质孔:有机质经过大量生烃后体积缩小及气体排出,呈蜂窝状、线状和串珠状等;②生物孔:生物遗体的空腔或与生物活动有关的产物<sup>[14]</sup>。孔径的大小主要为 10~50 nm 范围内的小孔和 100~1 000 nm 范围内小孔的叠加孔隙。有机质孔隙分布于整个页岩中,多成不规则状<sup>[15]</sup>。连续分布如图 3a、3b 和 3c 所示。



a. b. c. 显示 W1-25、W2-25 和 W2-27 的有机孔,多呈椭圆形、圆形或聚集形态;  
d. e. 显示 W1-14 和 W2-22 的黄铁矿集合体,发育大量晶间孔和粒间孔;f. 显示 W2-18 发育溶蚀孔,多呈不规则形或者圆形;  
g. h. 显示 W1-14 和 W2-28 发育粒间孔,形状不规则;i. 显示 W2-13 发育微裂缝,增加孔隙连通性。

图 3 显微观察下 W1 井和 W2 井孔隙类型  
Fig. 3 Pore types of Well W1 and W2 under microscopic observation

矿物基质孔包括:①粒间孔:沉积时的矿物颗粒支撑形成孔隙,多为不规则状(图 3d);②晶间孔:矿物聚集体之间的孔隙,在龙马溪组页岩中,黄铁矿聚集体较为发育<sup>[16]</sup>(图 3e);③溶蚀孔:不稳定矿物易受到溶蚀作用,形成粒内孔隙,多为圆形或者椭圆形(图 3f);④粒内孔:主要在矿物颗粒内部形成,多为不规则形状(图 3g、图 3h)。矿物基质孔大小的相差较大,孔径分布较广,连通性较好,分布范围从几十纳米到几微米不等。

微裂缝是页岩成藏的重要场所<sup>[17]</sup>,页岩中广泛发育微裂缝,一般是受到构造应力或者地应力的影响,对储层造成一定的破坏而形成的裂缝<sup>[18]</sup>。微裂

缝一般是连通的,可以和孔隙互通,有利于游离气的聚集,是页岩气运移的主要场所<sup>[19]</sup>(图 3i)。

3.2 纳米孔的分层特征

根据国际理论和应用化学协会(IUPAC)标准,将孔径小于 2 nm 的定义为微孔,将孔径属于 2~50 nm 的定义为中孔或介孔;将孔径大于 50 nm 的定义为大孔<sup>[20]</sup>。

3.2.1 龙一<sub>1</sub><sup>1</sup> 小层

W1 井,有机孔约占比例 73%。其中,微孔占 12.26%,介孔占 27.41%,大孔 60.32%;矿物基质孔约占比例 27%,主要包括粒内孔和粒间孔;在选取的样品中,纳米 CT 揭示出,喉道的数量为 37 508 条,



喉道的平均长度为  $5.33\ \mu\text{m}$ , 喉道的总体积为  $1.57 \times 10^5\ \mu\text{m}^3$ 。

W2井, 有机孔约占比86%。其中, 微孔占11.09%, 介孔占20.32%, 大孔68.60%; 矿物基质孔约占比14%, 主要包括粒间孔、溶蚀孔、晶内孔; 在选取的样品中, 纳米CT揭示出, 喉道的数量为40495条, 喉道的平均长度为  $5.71\ \mu\text{m}$ , 喉道的总体积为  $1.97 \times 10^5\ \mu\text{m}^3$ 。

### 3.2.2 龙一<sub>1</sub><sup>2</sup>小层

W1井, 有机孔约占比56%。其中, 微孔占9.25%, 介孔占35.73%, 大孔55.02%; 矿物基质孔约占比44%, 主要包括晶间孔、粒间孔和溶蚀孔; 在选取的样品中, 纳米CT揭示出, 喉道的数量为65329条, 喉道的平均长度为  $5.61\ \mu\text{m}$ , 喉道的总体积为  $2.71 \times 10^5\ \mu\text{m}^3$ 。

W2井, 有机孔约占比62%。其中, 微孔占19.80%, 介孔占35.90%, 大孔44.30%; 矿物基质孔约占比38%, 主要包括晶间孔和粒内孔; 在选取的样品中, 纳米CT揭示出, 喉道的数量为76065, 喉道的平均长度为  $4.96\ \mu\text{m}$ , 喉道的总体积为  $3.1 \times 10^5\ \mu\text{m}^3$ 。

### 3.2.3 龙一<sub>1</sub><sup>3</sup>小层

W1井, 有机孔约占比32%。其中, 微孔占27.06%, 介孔占52.18%, 大孔20.76%; 矿物基质孔约占比68%, 主要包括晶间孔、粒内孔和溶蚀孔; 在选取的样品中, 纳米CT揭示出, 喉道的数量为100935条, 喉道的平均长度为  $6.17\ \mu\text{m}$ , 喉道的总体积为  $4.04 \times 10^5\ \mu\text{m}^3$ 。

W2井, 有机孔约占比37%。其中, 微孔占22.55%, 介孔占42.28%, 大孔35.17%; 矿物基质孔约占比63%, 主要包括粒间孔、溶蚀孔和晶间孔; 在选取的样品中, 纳米CT揭示出, 喉道的数量为106850, 喉道的平均长度为  $6.52\ \mu\text{m}$ , 喉道的总体积为  $4.33 \times 10^5\ \mu\text{m}^3$ 。

### 3.2.4 龙一<sub>1</sub><sup>4</sup>小层

W1井, 有机孔约占比12%。其中, 微孔占15.86%, 介孔占66.73%, 大孔17.41%; 矿物基质孔约占比88%, 主要包括晶间孔、粒间孔和溶蚀孔; 在选取的样品中, 纳米CT揭示出, 喉道的数量为275314条, 喉道的平均长度为  $8.25\ \mu\text{m}$ , 喉道的总体积为  $8.48 \times 10^5\ \mu\text{m}^3$ 。

W2井, 有机孔约占比18%。其中, 微孔占10.05%, 介孔占60.96%, 大孔28.99%; 矿物基质孔

约占比82%, 主要包括粒间孔、粒内孔和晶间孔; 在选取的样品中, 纳米CT揭示出, 喉道的数量为318134条, 喉道的平均长度为  $8.34\ \mu\text{m}$ , 喉道的总体积为  $9.23 \times 10^5\ \mu\text{m}^3$ 。

综上所述, W1井和W2井孔隙分类占比如图4所示, 各小层对比纳米CT孔隙分布如图5所示。

## 3.3 储层差异对于测试产量的影响

(1) 根据页岩气水平井储层测井分类评价标准分析<sup>[21]</sup>, W1井水平井储层分类特征见表1, W2井水平井储层分类特征见表2, 对应的储层分类评价如图6所示。

W1井的含气性6.2%, 总有机碳含量2.7%, 孔隙度4.93%, 该井属于Ⅱ类储层。统计该井五峰组—龙马溪组的储层分类特征, 总深度为46.9m, Ⅰ类储层厚度为32.1m, 实际钻遇比例为68.3%, 该井的测试产量为  $23.15 \times 10^4/\text{d}$ 。

W2井的含气性8.5%, 总有机碳含量3.6%, 孔隙度5.78%, 该井属于Ⅰ类储层。统计该井五峰组—龙马溪组的储层分类特征, 总深度为54.8m, Ⅰ类储层厚度为48.4m, 实际钻遇比例为88.3%, 该井的测试产量为  $50.78 \times 10^4/\text{d}$ 。

准确评价页岩气单井最终可采储量对页岩气勘探开发增产有着十分重要的意义<sup>[22]</sup>。现选取威远区块70口井的测试产量与EUR建立线性关系模型(图7)。已知W1井的测试产量为  $23.15 \times 10^4/\text{d}$ , W2井的测试产量为  $50.78 \times 10^4/\text{d}$ 。根据线性关系模型推算, W1井的单井最终可采储量(EUR)为  $9523 \times 10^8\text{m}^3$ ; W2井的最终可采储量为  $19225 \times 10^8\text{m}^3$ , W2井的EUR远远大于W1井。

根据实验测试与线性模拟结果分析, 两口井的储层差异性较大, W2井的含气性、总有机碳含量、孔隙度, 以及Ⅰ类储层厚度和实际Ⅰ类储层的钻遇比例都明显高于W1井, 且测试产量和EUR都远远大于W1井, 从而导致两口评价井的生产效果有较大的差异(表3)。

(2) W2井靶体龙一<sub>1</sub><sup>1</sup>小层厚度大于W1井, 相差0.3m; 平均孔隙度W2井大于W1井, 相差0.86%; 孔隙在数量上没有明显差异, 在孔隙大小上W1井的微孔和介孔数量大于W2井, W2井大孔数量大于W1井; 喉道差异在数量、平均长度, 喉道总体积上W2井大于W1井, 数量相差2987, 平均长度相差  $0.38\ \mu\text{m}$ , 喉道总体积相差  $0.4 \times 10^5\ \mu\text{m}^3$ ; 总有机碳平均含量W2井大于W1井, 相差0.2%。

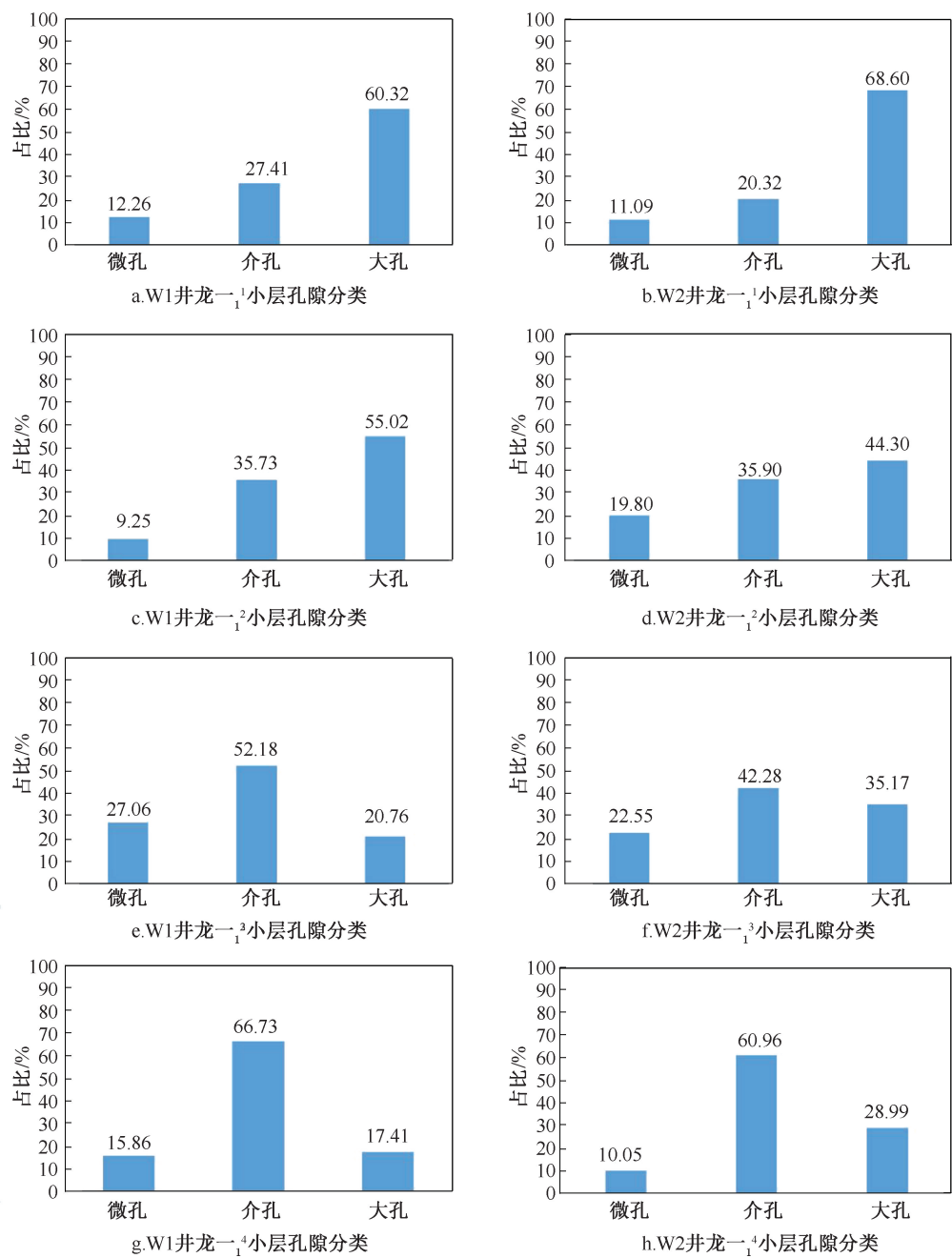


图 4 W1 井和 W2 井孔隙分类占比  
Fig. 4 Pore classification proportions of Well W1 and W2

龙一<sub>1</sub><sup>2</sup> 小层厚度 W1 井大于 W2 井, 相差 1.5 m; 平均孔隙度 W2 井大于 W1 井, 相差 0.2%; 孔隙在数量上 W2 井大于 W1 井, 相差约 87 431 个, 在孔隙大小上 W1 井的微孔数量大于 W2 井, W2 井介孔和大孔数量大于 W1 井; 喉道差异在数量和喉道总体积上 W2 井大于 W1 井, 平均长度上 W1 井大于 W2 井, 数量相差 10 736, 平均长度相差 0.65  $\mu\text{m}$ , 喉道总体积相差  $0.39\times10^5\ \mu\text{m}^3$ ; 总有机碳平均含量 W2 井大于 W1 井, 相差 0.5%。

龙一<sub>1</sub><sup>3</sup> 小层厚度 W2 井大于 W1 井, 相差

1.3 m; 平均孔隙度 W2 井大于 W1 井, 相差 1.59%; 孔隙在数量上 W2 井大于 W1 井, 相差约 488 066 个, 在孔隙大小上 W2 井的微孔、介孔和大孔的数量均大于 W2 井; 喉道差异在数量、平均长度, 喉道总体积上 W2 井大于 W1 井, 数量相差 2 987, 平均长度相差 0.38  $\mu\text{m}$ , 喉道总体积相差  $0.29\times10^5\ \mu\text{m}^3$ ; 总有机碳平均含量 W2 井大于 W1 井, 相差 1.4%;

龙一<sub>1</sub><sup>4</sup> 小层厚度 W2 井大于 W1 井, 相差 6.5 m; 平均孔隙度 W2 井大于 W1 井, 相差 0.9%; 孔隙在数量上没有明显差异。

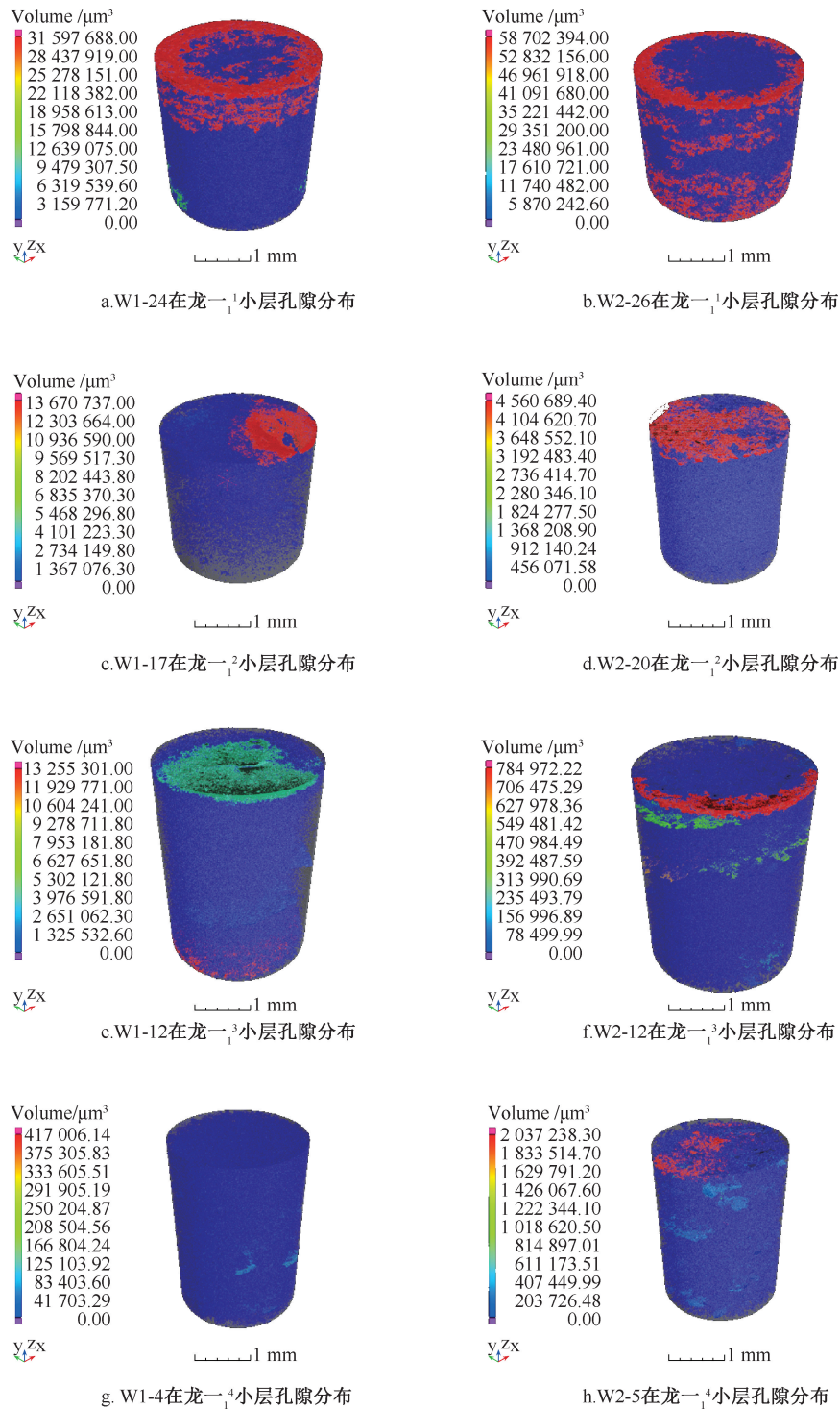


图 5 W1 和 W2 井的纳米 CT 孔隙分布 (各小层对比)  
Fig. 5 Nano-CT pore distribution of Well W1 and W2 (Comparison of each sublayer)

表 1 W1 井水平井储层分类特征

Table 1 Reservoir classification characteristics of horizontal Well W1

储层分类	TOC		孔隙度		含气量		脆性指数		综合评价	
	厚度/m	比例/%	厚度/m	比例/%	厚度/m	比例/%	厚度/m	比例/%	厚度/m	比例/%
I	18.5	39.4	42.2	0.9	44.9	95.3	34.0	72.5	32.1	68.3
II	27.2	58.1	4.7	0.1	3.0	4.7	12.6	26.9	14.8	31.7
III	1.2	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0
总计	46.9	100.0	46.9	100	46.9	100.0	46.9	100.0	46.9	100.0



表 2 W2 井水平井储层分类特征

Table 2 Reservoir classification characteristics of horizontal Well W2

储层分类	TOC		孔隙度		含气量		脆性指数		综合评价	
	厚度/m	比例/%	厚度/m	比例/%	厚度/m	比例/%	厚度/m	比例/%	厚度/m	比例/%
I	21.7	39.6	49.2	89.8	53.2	97.1	47.6	86.9	48.4	88.3
II	31.2	56.9	5.6	10.2	1.4	2.6	7.2	13.1	6.2	11.3
III	1.9	3.5	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
总计	54.8	100	54.8	100	54.8	100.0	54.8	100.0	54.8	100.0

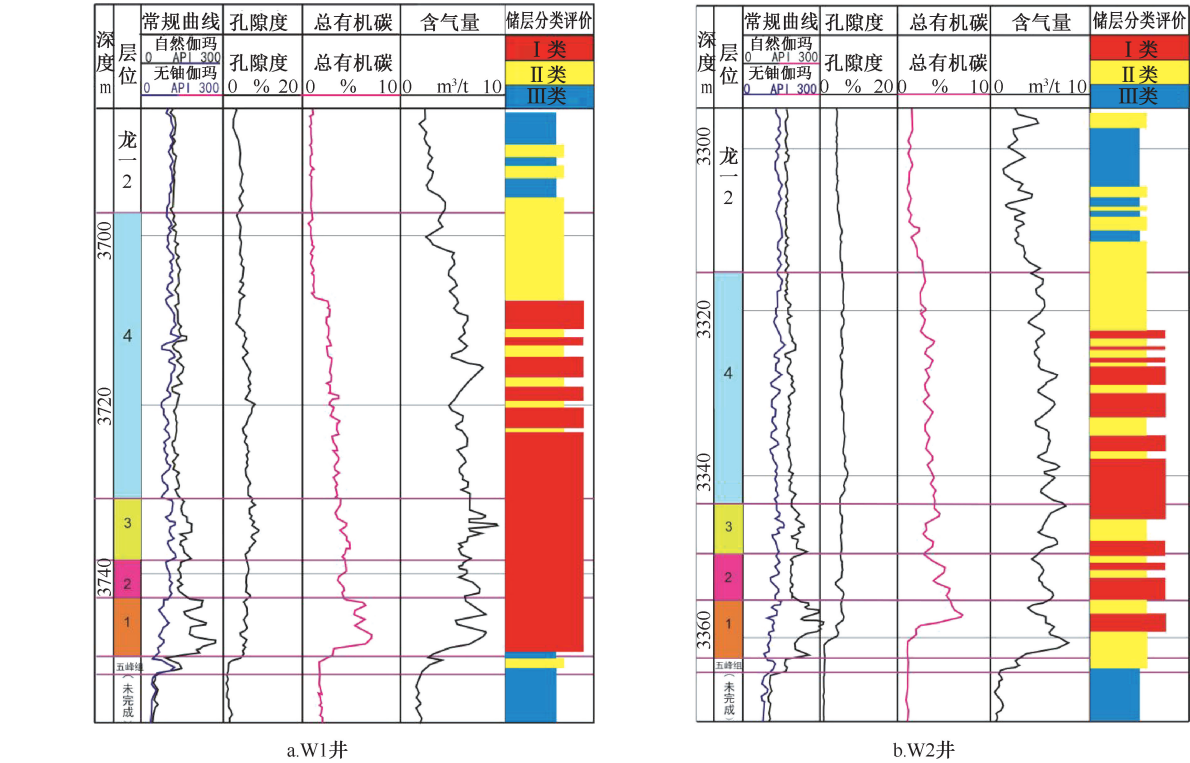


图 6 W1 井和 W2 井储层分类评价

Fig. 6 Reservoir classification evaluation of Well W1 and W2

在孔隙大小上 W1 井的微孔和介孔数量大于 W2 井,W2 井大孔数量大于 W1 井;喉道差异上 W2 井均大于 W1 井,具体数量相差 42 820 个,平均长度相差 0.09  $\mu\text{m}$ ,喉道总体积相差  $0.75\times10^5\text{ }\mu\text{m}^3$ ;总有机碳平均含量 W2 井大于 W1 井,相差 0.9%。

表 3 W1 井和 W2 井孔隙数量、分类与孔隙率对比

Table 3 Pore number, classification and porosity comparison of Well W1 and W2

样品 编号	层位	孔隙数量	孔隙分类			孔隙率/ %
			小于 2 nm	2~50 nm	大于 50 nm	
W1-1	龙一 <sub>1</sub> <sup>1</sup>	1 048 575	128 589	287 465	632 521	5.06
W1-2	龙一 <sub>1</sub> <sup>2</sup>	771 321	86 493	247 487	434 341	5.28
W1-3	龙一 <sub>1</sub> <sup>3</sup>	428 392	115 913	223 545	88 935	4.71
W1-4	龙一 <sub>1</sub> <sup>4</sup>	172 663	27 376	115 226	30 061	4.71
总计	/	2 420 952	361 371	873 723	1 185 858	/
W2-1	龙一 <sub>1</sub> <sup>1</sup>	1 048 575	116 248	213 044	719 283	5.92
W2-2	龙一 <sub>1</sub> <sup>2</sup>	858 752	76 941	298 487	483 324	5.3
W2-3	龙一 <sub>1</sub> <sup>3</sup>	916 458	206 687	387 487	322 284	6.3
W2-4	龙一 <sub>1</sub> <sup>4</sup>	450 555	45 273	274 675	130 607	5.61
总计	/	3 274 340	1 655 498	1 173 693	445 149	/

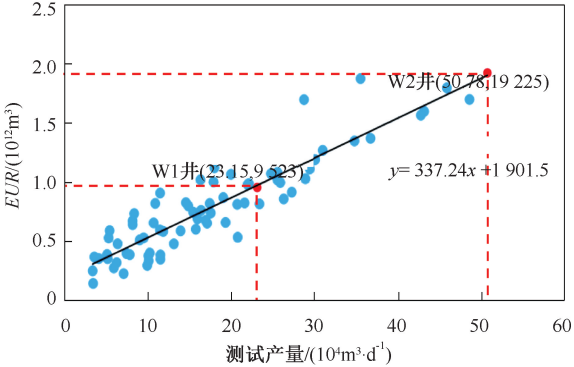


图 7 威远区块测试产量和 EUR 关系

Fig. 7 Relationship between testing production rate and EUR in Weiyuan block

(3) W1 井龙一<sub>1</sub><sup>1</sup> 小层石英含量在 31.4% ~ 60.1%之间,平均含量为 46.8%;龙一<sub>1</sub><sup>2</sup> 小层石英含量在 38.7% ~ 48.2%之间,平均含量为 41.6%;龙一<sub>1</sub><sup>3</sup> 小层石英含量在 20% ~ 45.2%之间,平均含量

为39.5%;龙一<sub>1</sub><sup>4</sup>小层石英含量在21.2%~43.7%之间,平均含量为33.8%。W2井龙一<sub>1</sub><sup>1</sup>小层石英含量在26.4%~88.4%之间,平均含量为72.4%;龙一<sub>1</sub><sup>2</sup>小层石英含量在40.1%~83.7%之间,平均含量为65.1%;龙一<sub>1</sub><sup>3</sup>小层石英含量在34.7%~59.4%之间,平均含量为48.6%;龙一<sub>1</sub><sup>4</sup>小层石英含量在17%~51.8%之间,平均含量为38.5%。

可以看出,W1井和W2井靶体石英含量存在差异,而石英也是页岩气聚集和贮藏的重要场所,因此评价石英含量也对生产有重要意义。

## 4 结论

(1)威远龙一<sub>1</sub>亚段自下而上的4个小层,其中各小层的孔隙度分别为龙一<sub>1</sub><sup>1</sup>小层5.99%、龙一<sub>1</sub><sup>2</sup>小层5.36%、龙一<sub>1</sub><sup>3</sup>小层5.5%和龙一<sub>1</sub><sup>4</sup>小层5.16%。其中龙一<sub>1</sub><sup>1</sup>小层纳米级孔隙最为发育,龙一<sub>1</sub><sup>3</sup>次之,龙一<sub>1</sub><sup>4</sup>小层纳米级孔隙发育程度最低。

(2)威远龙一<sub>1</sub>亚段自下而上的4个小层,大孔比例分别为龙一<sub>1</sub><sup>1</sup>小层64.5%、龙一<sub>1</sub><sup>2</sup>小层45.11%、龙一<sub>1</sub><sup>3</sup>小层32.46%和龙一<sub>1</sub><sup>4</sup>小层23.7%;介孔比例分别为龙一<sub>1</sub><sup>1</sup>小层24.26%、龙一<sub>1</sub><sup>2</sup>小层35.78%、龙一<sub>1</sub><sup>3</sup>小层47.44%和龙一<sub>1</sub><sup>4</sup>小层63.34%;微孔比例分别为龙一<sub>1</sub><sup>1</sup>小层11.14%、龙一<sub>1</sub><sup>2</sup>小层19.11%、龙一<sub>1</sub><sup>3</sup>小层20.1%和龙一<sub>1</sub><sup>4</sup>小层12.96%。其中,龙一<sub>1</sub><sup>1</sup>小层大孔比例最高,龙一<sub>1</sub><sup>2</sup>小层次之,龙一<sub>1</sub><sup>4</sup>大孔比例最低。大孔比例自下而上呈现下降趋势,介孔和微孔比例自下而上呈现上升趋势。

(3)综合孔隙度和大孔比例分析,对比龙一<sub>1</sub>亚段4小层,龙一<sub>1</sub><sup>1</sup>小层孔隙度和大孔比例最高,页岩储集能力最强,是页岩气井开发的主要层位。W1井龙一<sub>1</sub><sup>1</sup>小层厚度为6.9 m,W2井龙一<sub>1</sub><sup>1</sup>小层厚度为7.2 m,W2井比W1井厚0.3 m;W2井高孔隙度、高大孔比例的“双高”储层总厚度高与W1井,评价井试采结果W1井的单井EUR为 $23.15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,W2井的单井EUR为 $50.78 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,表明微观孔隙特征是影响气井产能的原因之一。

(4)采用双束扫描电镜、纳米CT和X全岩衍射分析等多种实验方法,分别对目标井各小层的孔隙度、大孔比例、介孔比例、微孔比例等页岩微观孔隙特征进行了定量描述,详细分析了储层微观孔隙特征对于页岩气井产能的影响,指出加强页岩微观孔

隙特征的研究对页岩气的勘探开发具有较强的指导意义,可以为从事页岩气勘探开发的技术人员提供借鉴,对提高页岩气产能具有重要意义。

**致谢:**感谢中国石油勘探开发研究院非常规所重点实验室刘德勤老师在实验上给予的帮助与支持;感谢四川盆地研究中心提供的相关数据;感谢上海英华实验监测中心的王彦文工程师提供的实验相关资料。

## 参考文献

- [1] 戴金星,秦胜飞,胡国艺,等. 新中国天然气勘探开发70年来的重大进展[J]. 石油勘探与开发,2019,46(6):1037-1046.  
DAI Jinxing, QIN Shengfei, HU Guoyi, et al. Major progress in the natural gas exploration and development in the past seven decades in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019,46(6):1037-1046.
- [2] 邹才能,董大忠,王社教,等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发,2010,37(6):641-653.  
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010,37(6):641-653.
- [3] 蒋裕强,付永红,谢军,等. 海相页岩气储层评价发展趋势与综合评价体系[J]. 天然气工业,2019,39(10):1-9.  
JIANG Yuqiang, FU Yonghong, XIE Jun, et al. Development trend of marine shale gas reservoir evaluation and a suitable comprehensive evaluation system [J]. Natural Gas Industry, 2019,39(10):1-9.
- [4] 邹才能,朱如凯,白斌,等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. 岩石学报,2011,27(6):1857-1864.  
ZOU Caineng, ZHU Rukai, BAI Bin, et al. First discovery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011,27(6):1857-1864.
- [5] 张鸿翔. 页岩气:全球油气资源开发的新亮点——我国页岩气开发的现状与关键问题[J]. 中国科学院院刊,2010,25(4):406-410.  
ZHANG Hongxiang. Shale gas: New bright point of the exploitation of the global oil-gas resources——The present status and key problems of the exploitation of shale gas [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2010,25(4):406-410.
- [6] 熊小林. 四川盆地威远区块龙马溪组地质特征研究[J]. 中国石油和化工标准与质量,2019,39(15):152-153.  
XIONG Xiaolin. Research on geological features of longmaxi formation in Weiyuan block of Sichuan basin [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2019,39(15):152-153.
- [7] 王红岩,郭伟,梁峰,等. 川南自201井区奥陶系-志留系间黑色页岩生物地层[J]. 地层学杂志,2018,42(4):

- 455-460.
- WANG Hongyan, GUO Wei, LIANG Feng, et al. Biostratigraphy of Ordovician-Silurian black shale at Well Zi201, South Sichuan [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2018, 42(4):455-460.
- [8] 马新华. 天然气与能源革命——以川渝地区为例[J]. *天然气工业*, 2017, 37(1):1-8.
- MA Xinhua. Natural gas and energy revolution: A case study of Sichuan-Chongqing gas province [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(1):1-8.
- [9] 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.
- [10] 王秀平, 牟传龙, 葛详英, 等. 川南及邻区龙马溪组黑色岩系矿物组分特征及评价[J]. *石油学报*, 2015, 36(2):150-162.
- WANG Xiuping, MU Chuanlong, GE Xiangying, et al. Mineral component characteristics and evaluation of black rock series of Longmaxi Formation in Southern Sichuan and its periphery [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(2):150-162.
- [11] 刘春枚. 一种评价气井储层物性及边界特征的新方法[J]. *油气井测试*, 2017, 26(6):34-36.
- LIU Chunmei. A new method for evaluating the properties and boundary characteristics of gas [J]. *Well Testing*, 2017, 26(6):34-36.
- [12] 康莉霞, 叶礼友, 刘华勋, 等. 碳酸盐岩气藏的渗流模型和产量递减分析方法[J]. *油气井测试*, 2019, 28(5):8-15.
- KANG Lixia, YE Liyou, LIU Huaxun, et al. Percolation model and production decline analysis method for carbonate gas reservoirs [J]. *Well Testing*, 2019, 28(5):8-15.
- [13] 王社教, 杨涛, 张国生, 等. 页岩气主要富集因素与核心区选择及评价[J]. *中国工程科学*, 2012, 14(6):94-100.
- WANG Shejiao, YANG Tao, ZHANG Guosheng, et al. Shale gas enrichment factors and the selection and evaluation of the core area [J]. *Engineering Sciences*, 2012, 14(6):94-100.
- [14] 聂海宽, 边瑞康, 张培先, 等. 川东南地区下古生界页岩储层微观类型与特征及其对含气量的影响[J]. *地学前缘*, 2014, 21(4):331-343.
- NIE HaiKuan, BIAN RuiKang, ZHANG PeiXian, et al. Micro-types and characteristics of shale reservoir of the lower Paleozoic in Southeast Sichuan basin, and their effects on the gas content [J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(4):331-343.
- [15] 邹才能, 董大忠, 杨桦. 中国页岩气形成条件及勘探实践[J]. *天然气工业*, 2011, 31(12):26-39.
- ZOU Caineng, DONG Dazhong, YANG Hua. Conditions of shale gas accumulation and exploration practices in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(12):26-39.
- [16] 陈生蓉, 帅琴, 高强, 等. 基于扫描电镜-氮气吸脱附和压汞法的页岩孔隙结构研究[J]. *岩矿测试*, 2015, 34(6):636-642.
- CHEN Shengrong, SHUAI Qin, GAO Qiang, et al. Analysis of the pore structure of shale in Ordos basin by SEM with Nitrogen gas adsorption-desorption [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2015, 34(6):636-642.
- [17] LI Yong, TANG Dazhen, WU Peng, et al. Continuous unconventional natural gas accumulations of Carboniferous-Permian coal-bearing strata in the Linxing area, North-eastern Ordos basin, China [J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2016, 36(10):314-327.
- [18] 严强, 张云峰, 付航, 等. 运用高压压汞及扫描电镜多尺度表征致密砂岩储层微纳级孔喉特征——以渤海湾盆地沾化凹陷义176区沙四段致密砂岩储层为例[J]. *石油实验地质*, 2018, 40(2):280-287.
- YAN Qiang, ZHANG Yunfeng, FU Hang, et al. High pressure mercury injection and scanning electron microscopy applied to characterize micro- and nano-scale pore throats in tight sandstone reservoirs: A case study of the fourth member of Shahejie Formation in Yi176 block, Zhanhua sag, Bohai bay basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(2):280-287.
- [19] LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores [J]. *Aapg Bulletin*, 2015, 96(6):1071-1098.
- [20] 丁文龙, 李超, 李春燕, 等. 页岩裂缝发育主控因素及其对含气性的影响[J]. *地学前缘*, 2012, 19(2):212-220.
- DING Wenlong, LI Chao, LI Chunyan, et al. Dominant factor of fracture development in shale and its relationship to gas accumulation [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2):212-220.
- [21] 陈永武, 王少波, 韩征, 等. DZ/T 0254-2014 页岩气资源/储量计算与评价技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014:1-20.
- [22] 王勇, 张林霞, 徐剑良, 等. 页岩气井产量递减分析经验法优化应用研究[J]. *石油化工应用*, 2020, 39(1):8-12.
- WANG Yong, ZHANG Linxia, XU Jianliang, et al. Empirical method for shale gas well production decline analysis optimization applied research [J]. *Petrochemical Industry Application*, 2020, 39(1):8-12.

编辑 刘振庆

第一作者简介:王雪帆,女,1994年11月出生,中国科学院渗流流体力学研究所地质工程专业硕士研究生在读,主要从事非常规油气勘探开发方面的研究工作。电话:010-83596398, 18222005288, Email: wxf1994@petrochina.com.cn。通信地址:河北省廊坊市广阳区万庄镇中石油廊坊分院, 邮政编码:065007。