

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2021.03.013

引用格式: 陈洁. 贵州凤冈地区早寒武世牛蹄塘组页岩孔隙结构特征[J]. 华东地质, 2021, 42(3): 359-366.

# 贵州凤冈地区早寒武世牛蹄塘组页岩孔隙结构特征

陈洁

(江苏长江地质勘查院, 江苏 南京 210046)

**摘要:** 利用扫描电子显微镜观测、低温液氮实验、CO<sub>2</sub> 吸附实验及高压压汞实验等分析手段, 对贵州凤冈地区早寒武世牛蹄塘组页岩钻孔岩心最优孔隙段进行了综合分析。牛蹄塘组页岩各种孔隙发育较齐全, 连通性好, 是良好的页岩气储集层。微孔及纳米级孔隙发育, 孔隙形态为墨水瓶孔、圆锥状等无定型态孔隙, 为吸附气提供了较大的比表面积; 有机质孔、粒内孔、晶间孔、粒间孔较发育, 连通性好, 孔径多数为 100 nm~5 μm; 大孔(>1 000 nm) 连通性好, 有利于气体解吸、扩散及渗透, 具有较大的孔隙体积和比表面积, 为气体提供了较好的吸附空间。

**关键词:** 牛蹄塘组页岩; 实验测试; 孔隙结构; 孔隙度; 贵州凤冈

**中图分类号:** P618.13

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-1871(2021)03-359-08

页岩气是产自极低孔渗、富有机质暗色泥页岩地层中的天然气, 具有资源潜力大、开采周期长等优点<sup>[1-3]</sup>。页岩是低孔低渗储集层, 页岩孔裂隙结构不仅影响孔隙中气体的赋存状态, 而且影响孔隙与气、液分子之间的相互作用, 正确划分页岩孔隙结构, 是研究页岩储层孔隙、空间结构、渗流特征、赋存特征和页岩气可采性的基础<sup>[4-5]</sup>。全国页岩气资源潜力评价结果<sup>[6]</sup>表明, 贵州省页岩气地质资源量约 10.48 万亿 m<sup>3</sup>, 页岩气资源丰富, 是我国重要的页岩气远景区。贵州凤冈地区构造复杂, 地层岩石破碎, 对页岩孔隙结构特征的系统研究较少, 页岩气勘查处于起步阶段<sup>[7-9]</sup>。

针对上述问题, 本文通过对钻探岩心进行实验测试分析, 提取目的层页岩孔隙结构参数, 运用扫描电子显微镜观测、低温液氮和 CO<sub>2</sub> 吸附实验、高压压汞实验等分析手段, 对贵州凤冈地区早寒武世牛蹄塘组岩心样品孔径进行定量分析, 对孔隙类型进行定性分析, 为黔北牛蹄塘组页岩气的进一步开发提供参考。

## 1 地质概况

研究区位于黔北—黔中分区黔北台隆遵义断拱凤冈 NNE 向构造变形区。区内震旦纪之后的沉积盖层发育变形构造, 主要由晚侏罗世—早白垩世燕山运动形成, 具有多期次叠加改造的特征。区内牛蹄塘组底界面总体为 NNE 向复向斜, 深度为—250~—5 500 m, 落差>50 m 的断层有 15 条, 牛蹄塘组较大规模的断层有 9 条, 断层多数为逆断层(图 1)。

根据研究区 QZ02 井资料, 牛蹄塘组主要为黑色碳质页岩, 上部为灰黑色、黑色含砂质页岩, 中下部为黑色碳质页岩, 底部为黑色碳泥质硅质岩、含磷硅质岩, 夹石煤。下部含磷硅质岩及碳泥质硅质岩为缺氧环境, 为局限台地靠近陆缘的沉积环境; 向上砂质含量增加, 碳质含量减少, 为深水陆棚沉积, 逐渐由强还原环境转化为弱氧化环境。测井曲线特征显示自然电位曲线平直光滑, 局部小幅波动; 视电阻率曲线平直光滑, 底部

\* 收稿日期: 2020-01-09 修订日期: 2020-06-29 责任编辑: 谭桂丽

**基金项目:** 国家基础研究发展计划(973)“页岩微孔缝结构与页岩气赋存富集研究(编号: 2012CB214702)”及贵州永泰能源页岩气开发有限公司“贵州凤冈二区块页岩气地质调查”项目联合资助。

**第一作者简介:** 陈洁, 1986 年生, 女, 高级工程师, 主要从事非常规油气地质勘查工作。Email: 706771489@qq.com。

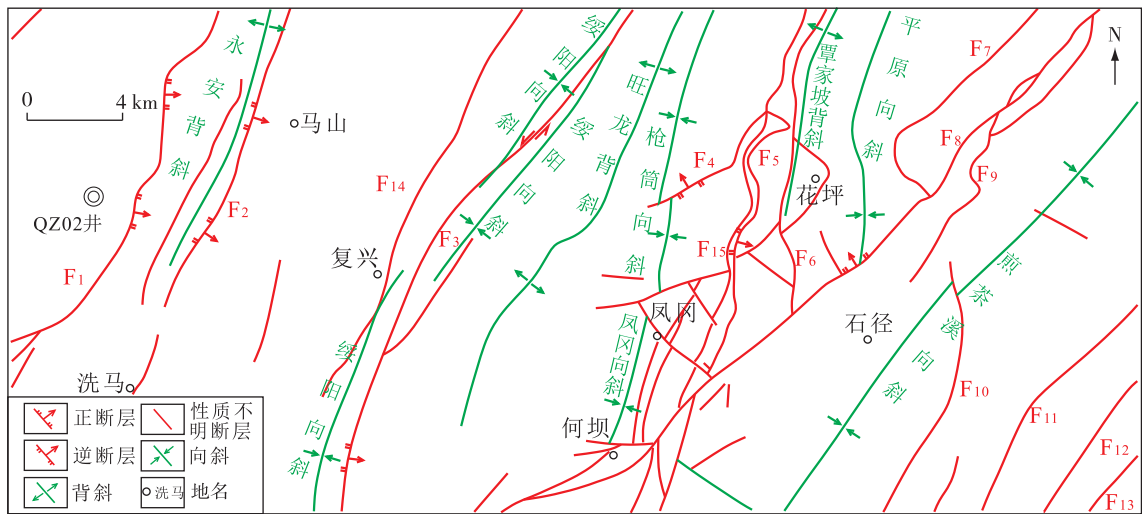


图 1 研究区构造地质简图<sup>[12]</sup>  
Fig. 1 Structural geological map of the study area <sup>[12]</sup>

有较小的波动；自然伽马曲线呈小锯齿状，仅在底部有较大幅波动(图 2)。研究区牛蹄塘组形成在较稳定、水体滞留的沉积环境，有利于有机质的保存<sup>[10-11]</sup>。

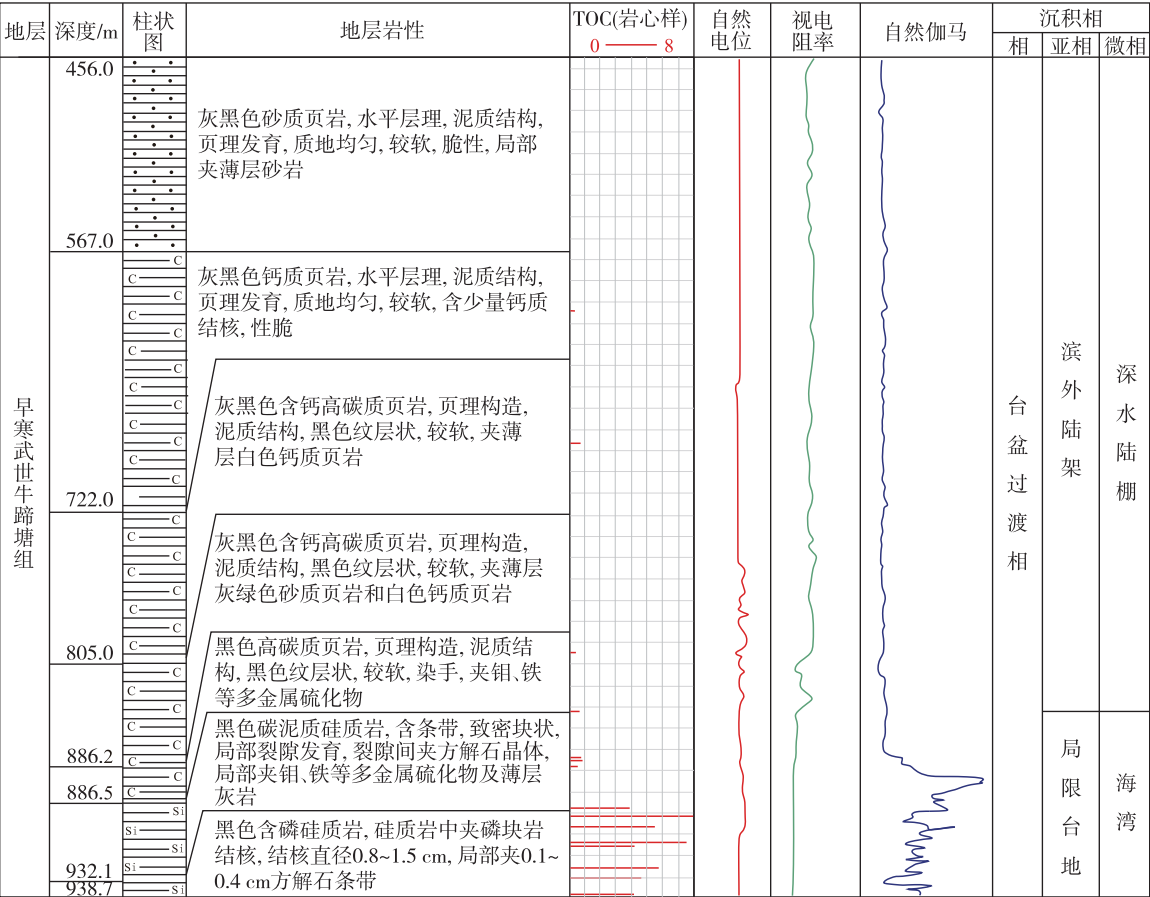


图 2 早寒武世牛蹄塘组页岩 QZ02 井 TOC 柱状图  
Fig. 2 TOC column graph of shale in Early Cambrian Niutitang Formation from well QZ02

## 2 样品特征

本次实验测试样品取自 QZ02 井(图 1),井深 943.2 m,终孔层位为早寒武世牛蹄塘组底部。研究区牛蹄塘组 TOC 实验测试样 18 个,埋深 601.0~938.7 m,TOC 平均值为 3.25%,自 865 m 以深牛蹄塘组下段 TOC 值 $>3.0\%$ ,平均镜质体反射率为 3.20%,演化程度为高成熟( $R_o \geq 2.0\%$ ),页岩层较高的有机质丰度和热演化程度为页岩微孔隙的发育奠定了基础。

QZ02 井牛蹄塘组页岩 XRD 矿物成分分析结果见表 1。中上段(603~830 m)黏土矿物含量为 30.9%~48.1%,平均值为 42.4%;石英含量为 33.2%~38.7%,平均值为 35.7%。中下段(851~920 m)黏土矿物含量为 8.4%~24.1%,平均值为 16.1%;石英含量为 30.7%~55.3%,平均值为 43.6%,且垂向分布较均匀。斜长石和方解石含量平均值分别为 15.7%和 3.0%,白云石和钾长石含量平均值分别为 6.8%和 3.2%,石膏、黄铁矿和菱铁矿平均含量 $<3\%$ 。

表 1 QZ02 井牛蹄塘组页岩 XRD 矿物成分及相关参数

Table 1 XRD mineral compositions and related parameters of shale in Niutitang Formation from well QZ02

样品编号	埋深/ m	TOC/ %	R <sub>o</sub> / %	黏土矿物/ %	石英/ %	钾长石/ %	斜长石/ %	方解石/ %	白云石/ %	菱铁矿/ %	石盐/ %	黄铁矿/ %	硬石膏/ %
FJ-7	603	0.28	3.18	43.1	38.7	0.2	12.0	2.3	—	1.0	0.7	0.6	—
FJ-9	680	0.64	3.25	46.8	33.2	0.2	11.7	3.8	—	0.7	0.8	0.1	2.7
FJ-12	798	0.29	3.27	48.1	35.4	0.3	11.2	1.0	0.3	—	—	—	3.0
FJ-29	809	1.07	—	30.9	35.9	0.1	16.2	10.2	1.4	—	0.5	—	3.4
FJ-15	830	0.51	3.35	43.1	35.5	0.3	9.4	0.5	3.2	0.3	—	1.9	2.5
FJ-32	851	3.20	3.21	24.4	30.7	—	14.2	5.8	10.7	—	—	11.4	2.8
FJ-18	860	4.56	3.23	15.5	44.7	3.1	17.5	0.1	3.6	1.2	—	10.3	4.0
FJ-24	920	5.92	3.23	8.4	55.3	3.2	15.3	3.2	6.0	0.6	—	7.6	0.4

黏土矿物可吸附页岩中的有机质及气体,在有机质向烃转化的过程中具有催化作用,对烃源岩中有机质富集及页岩气成藏具有重要作用。研究区黏土矿物主要为伊蒙混层和伊利石,伊利石形成过程中使泥页岩产生裂缝<sup>[13-15]</sup>,可增加气体运移的储集空间,石英、斜长石等脆性矿物有利于页岩气储层的压裂改造。

## 3 实验方法及仪器简介

页岩中的孔隙结构较复杂,孔径分布范围广。采用孔径四分方法,即微孔(孔径 $<10$  nm)、过渡孔( $10\text{ nm}<\text{孔径}<100\text{ nm}$ )、中孔(孔径 $100\sim1\,000\text{ nm}$ )、大孔(孔径 $>1\,000\text{ nm}$ )<sup>[16-17]</sup>,分别选取相应的测试方法对最优孔隙段进行测试,即微孔采用扫描电子显微镜观测,过渡孔采用低温液氮和 $\text{CO}_2$ 吸附实验测试,中一大孔采用高压压汞实验进行分析。

选取 QZ02 孔早寒武世牛蹄塘组暗色页岩段进

行扫描电镜观察、高压压汞实验、氮气吸附实验和 $\text{CO}_2$ 吸附实验,仪器为 JSM6610LV 扫描电子显微镜及 Energy+波普能谱仪、AutoPoreIV 9500 全自动压汞仪、ASAP2020M 比表面积及微孔分析仪。

## 4 实验结果

### 4.1 扫描电子显微镜观测的微孔(纳米孔)特征

孔隙是页岩气的主要储存空间<sup>[18-20]</sup>,孔隙微观发育特征决定了储层的储集性能,利用扫描电镜及氩离子抛光观察页岩孔隙发育特征及其连通性。研究区早寒武世牛蹄塘组暗色页岩主要发育有机质孔(图 3(a))、粒内孔(脆性矿物粒内孔(图 3(b)) 和黏土矿物粒内孔、晶间孔(黄铁矿晶间孔(图 3(c)) 和脆性矿物晶间孔(图 3(d)))、矿物粒间孔(图 3(e))及裂隙(图 3(f)),孔径变化较大,一般为 $100\text{ nm}\sim5\text{ }\mu\text{m}$ ,多为椭圆形或不规则凹坑形及少量月牙形。此外,测试样品裂缝较发育,缝宽一般 $0.4\sim10\text{ }\mu\text{m}$ ,少数可达 $20\text{ }\mu\text{m}$ 左右,连通性好。

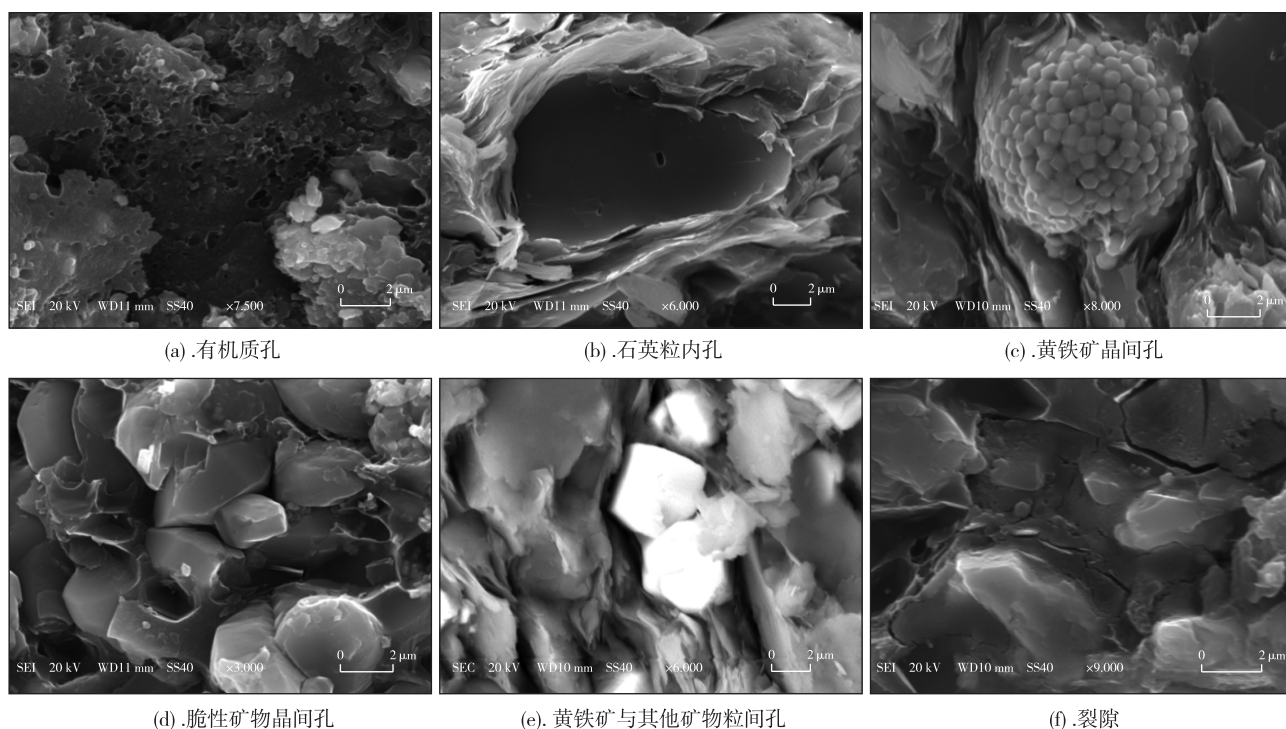


图3 QZ02井牛蹄塘组页岩岩心 SEM 观测照片

Fig. 3 SEM observation photos of shale core in Niutitang Formation from well QZ02

## 4.2 低温液氮和 CO<sub>2</sub> 吸附实验表征的过渡孔特征

### 4.2.1 低温液氮实验

液氮吸附实验可测试孔径范围更小的微孔,精度可以达 0.35 nm。

(1)孔隙特征。吸附等温线采用 BET 模型计算单层吸附量<sup>[21-22]</sup>。液氮吸附实验统计结果如表 2 所示。测试样品孔隙总体积为 0.001~0.009 mL/g,孔径分布范围为 3.646~6.787 nm,平均孔径为 4.927 nm;比表面积为 2.463~14.884 m<sup>2</sup>/g,平均值为 8.852 m<sup>2</sup>/g,具有良好的气体吸附能力。

表 2 牛蹄塘组页岩液氮实验结果

Table 2 Liquid nitrogen result of shale in Niutitang Formation

样品编号	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	总孔体积/ (mL·g <sup>-1</sup> )	平均孔径/ nm
FJ-7	4.038	0.003	5.612
FJ-20	11.589	0.008	4.210
FJ-24	11.790	0.004	4.172
FJ-26	2.463	0.001	5.067
FJ-34	4.615	0.002	6.787
FJ-36	14.884	0.006	3.646
FJ-38	12.589	0.009	4.998

(2)吸附-脱附曲线及其孔隙特征。根据吸附和脱附曲线可以判别样品的孔隙特点。样品的吸附曲线在形态上略有差别,但整体呈反 S 形,根据 IUPAC 定义的吸附等温线分类<sup>[6,22-24]</sup>,曲线与 II 型吸附等温线接近,吸附曲线前段上升缓慢,略向上微凸,后段急剧上升,一直持续到相对压力接近 1.0 时也未呈现吸附饱和现象,表明样品在吸附氮气的过程中发生了毛细孔凝聚现象;较低相对压力时( $p/p_0$  为 0~0.3),吸附曲线前半部分上升缓慢,呈向上微凸状,该阶段为吸附单分子层向多分子层过渡;曲线中间部分( $p/p_0$  为 0.3~0.8),在中-高相对压力下吸附量缓慢增加,该阶段为多分子层吸附过程;曲线后半段( $p/p_0$  为 0.8~1.0),吸附量增加较快,至接近饱和蒸气压时未呈现吸附饱和,说明样品中含有较大比例的大孔,脱附等温线位于吸附等温线上方,形成滞后环,说明页岩样品中孔所占比例也较高(图 4)。

滞后回线的形状反映了样品的孔隙结构<sup>[25]</sup>,本次分析样品属于 H2 型,其特征为吸附曲线平稳上升,脱附曲线在中间压力处比吸附曲线陡,形成的滞后回线宽大,说明孔隙为墨水瓶孔、圆锥状等无定型态孔隙,可能与页岩中黏土矿物颗粒片状叠层

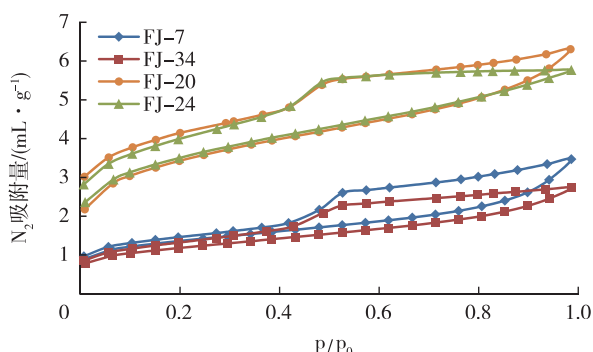


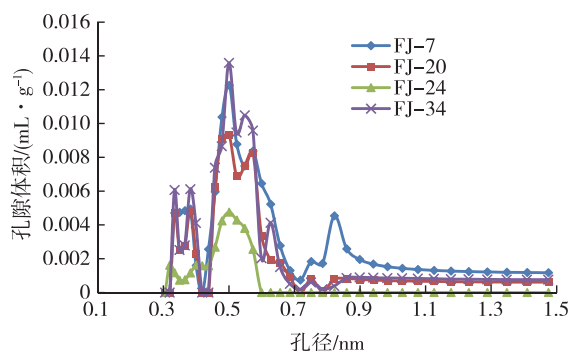
图 4 牛蹄塘组页岩液氮吸附-脱附等温线图

Fig. 4 Liquid Nitrogen isothermal adsorption-desorption curves of shale in Niutitang Formation

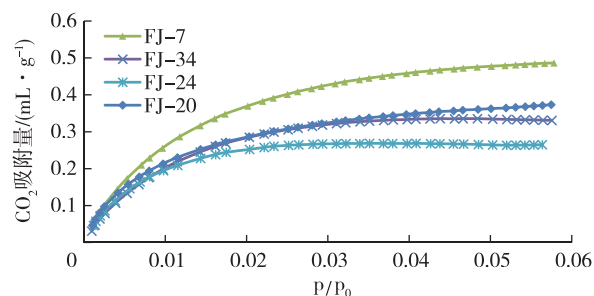
结构有关<sup>[6]</sup>,且孔隙联通,微孔发育,有利于页岩气的吸附、聚集及运移。

#### 4.2.2 CO<sub>2</sub> 吸附实验

对 4 个样品进行 CO<sub>2</sub> 吸附实验测试,样品比表面积为 2.013~15.60 m<sup>2</sup>/g,平均值为 7.02 m<sup>2</sup>/g,总孔体积为 0.000 8~0.013 8 mL/g。实验记录的孔径分布范围为 0.305 3~1.504 8 nm,孔径平均值为 0.582 2 nm(图 5)。

图 5 牛蹄塘组页岩 CO<sub>2</sub> 吸附实验孔径分布图Fig. 5 Pore diameter distribution of CO<sub>2</sub> adsorption experiment of shale in Niutitang Formation

CO<sub>2</sub> 吸附等温线也表现为微孔吸附特征。整体吸附量增加较少,饱和蒸气压处吸附量接近饱和,与 IUPAC 定义的 I 类吸附曲线相似<sup>[6,22-24]</sup>,吸附饱和值为微孔的体积(图 6)。以上分析表明,页岩微孔较发育,增加了页岩的比表面积,为吸附气提供了附着空间。

图 6 牛蹄塘组页岩 CO<sub>2</sub> 吸附-脱附等温线Fig. 6 CO<sub>2</sub> adsorption-desorption isotherm of shale in Niutitang Formation

#### 4.3 高压压汞实验表征的孔隙特征

本次高压压汞实验测试孔径下限值为 3.75 nm。实验结果基本可反映孔径 > 3.75 nm 的孔隙孔隙度、孔径结构、孔隙类型与分布特征,但无法实现对孔径 < 3.75 nm 孔隙的测试。

(1) 孔隙度。泥页岩是泥质沉积物经过长期的成岩作用和后期变化改造的综合产物,是页岩气储存的重要空间<sup>[21,26-27]</sup>。研究表明,美国页岩的总孔隙度一般在 10% 以下,有效含气孔隙度仅为 1%~5%<sup>[28]</sup>。对暗色泥页岩段进行高压压汞孔隙度测试,发现研究区泥页岩段的孔隙度为 0.95%~2.66%,平均值为 1.70%,其中孔隙度为 0.5%~1.0% 的泥页岩段约占 8.3%,孔隙度为 1.0%~1.5% 的泥页岩段约占 16.7%,孔隙度为 1.5%~2.0% 的泥页岩段约占 66.7%,孔隙度为 > 2.0% 的泥页岩段占 8.3%,大部分样品孔隙度约为 2.0%。牛蹄塘组下段泥页岩孔隙度分布较稳定,孔隙度一般为 1.59%~2.00%。

(2) 孔径。页岩中的孔隙分为有效孔隙和孤立孔隙,气体、液体能到达有效孔隙中,但不能进入全封闭性的孤立孔隙,孔隙系统研究是页岩储层评价的重要内容。高压压汞实验结果显示,大孔(> 1 000 nm)所占比例为 62.43%~82.78%,中孔(100~1 000 nm)所占比例为 5.11%~14.03%,过渡孔(10~100 nm)所占比例为 3.83%~10.67%,微孔(< 10 nm)所占比例为 6.1%。高压压汞试验测试的牛蹄塘组泥页岩孔径主要为大孔,为游离气提供了较大的赋存空间,一定量的中孔和过渡孔为吸附气提供了较大的吸附表面积<sup>[29-30]</sup>(表 3)。



表3 牛蹄塘组页岩高压压汞实验结果

Table 3 Result of high pressure mercury injection experiment of shale in Niutitang Formation

样品编号	平均孔径/ nm	总孔比表面积/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	孔隙度/%
FJ-7	9 192.0	0.051	0.76
FJ-9	6 159.6	0.911	0.97
FJ-12	8 007.2	2.038	1.30
FJ-15	7 893.2	2.006	1.61
FJ-18	7 068.6	1.515	1.41
FJ-22	6 668.6	2.378	1.88
FJ-24	7 507.4	1.327	1.19
FJ-26	7 031.2	2.343	1.40
FJ-31	8 310.6	1.959	1.66
FJ-34	7 439.4	1.433	4.30
FJ-36	7 709.8	1.560	1.33
FJ-38	6 213.4	2.885	1.52

毛管压力曲线形态有3种孔隙类型(图7),相应的储集空间特征如下。

(1)类型一。代表样品为FJ-4、FJ-31(图7(a)),毛管压力曲线中间段较长且平缓,喉道大小分布集中;毛管压力曲线略靠近左下方,歪度较粗,具有较好的储渗能力。储层有利于气体保存及渗流。

(2)类型二。代表样品为FJ-9、FJ-22、FJ-24(图7(b)),毛管压力曲线中间段较长但略陡,喉道分布区间较分散;毛管压力曲线略靠近右侧,孔、喉大小分布多为细孔喉,储渗能力相对较差。储层有利于气体保存,但不利于气体渗流。

(3)类型三。代表样品为FJ-34(图7(c)),毛管压力曲线中间段较长但略陡,喉道分布区间较分散;毛管压力曲线略靠近左下方,孔、喉大小分布多为粗孔喉,具有较好的储渗能力。储层有利于气体保存及渗流。

综合分析认为,牛蹄塘组下部暗色泥页岩段储层自由孔多,孔隙连通性好,有利于气体解吸、扩散及渗透,是较好的页岩气储层。

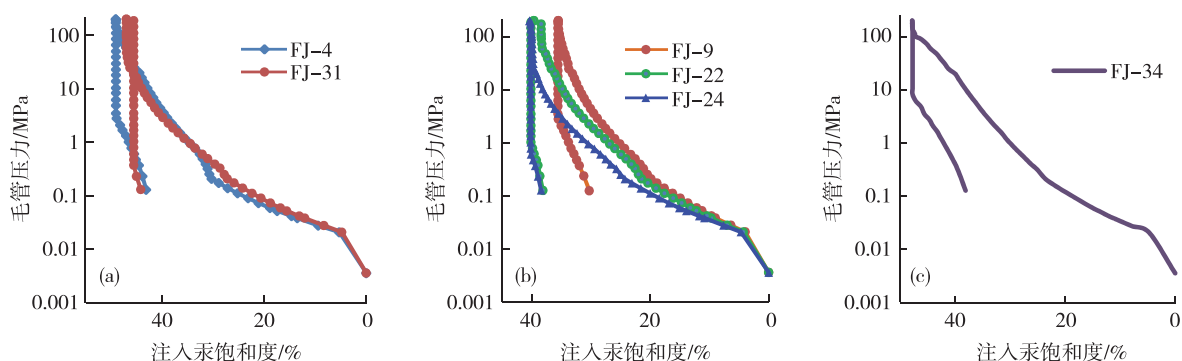


图7 牛蹄塘组暗色泥页岩毛管压力曲线图

Fig. 7 Capillary pressure curves of dark mud shale in Niutitang Formation

## 5 结论

(1)贵州凤冈地区早寒武世牛蹄塘组页岩中各种孔隙发育较齐全,且连通性好,是良好的页岩气储集层。

(2)牛蹄塘组石英及黏土矿物含量较高,对后期压裂改造和气体吸附具有促进作用。扫描电子显微镜下观察的牛蹄塘组黑色页岩主要以有机质孔、粒内孔、矿物粒间孔及裂隙等类型,孔径多数为100 nm~5  $\mu\text{m}$ ,裂缝较发育,连通性好。

(3)高压压汞实验表明牛蹄塘组页岩过渡孔、

中孔较发育。牛蹄塘组下部黑色泥页岩段储层自由孔多,孔隙连通性好,有利于气体解吸、扩散及渗透,具有较大的孔隙体积和比表面积,为气体提供了较好的吸附空间。

(4)低温液氮和 $\text{CO}_2$ 吸附实验反牛蹄塘组页岩微孔及纳米级孔隙发育,为吸附气提供了较大的比表面积,孔隙多为墨水瓶孔、圆锥状等无定型态孔隙,联通性好,有利于页岩气的吸附、聚集及运移。

## 参考文献

[1] 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.
- [2] 董大忠,程克明,王玉满,等.中国上扬子地区下古生界页岩气形成条件及特征[J].石油与天然气地质,2010,31(3):288-299.
- [3] 董大忠,邹才能,李建忠,等.页岩气资源潜力与勘探开发前景[J].地质通报,2011,30(2/3):324-336.
- [4] 贾承造,郑民,张永峰.非常规油气地质学重要理论问题[J].石油学报,2014,35(1):1-10.
- [5] 康玉柱.中国非常规泥页岩油气藏特征及勘探前景展望[J].天然气工业,2012,32(4):1-5.
- [6] 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.
- [7] 徐波,李敬含,李晓革,等.辽河油田东部凹陷页岩气成藏条件及含气性评价[J].石油学报,2011,32(3):450-458.
- [8] 董大忠,王玉满,黄旭楠,等.中国页岩气地质特征、资源评价方法及关键参数[J].天然气地球科学,2016,27(9):1583-1601.
- [9] CURTIS J B. Fractured shale-gas systems [J]. AAPG Bulletin,2002,86(11):1921-1938.
- [10] 李俊良,谢瑞永,游君君,等.贵州黔北地区页岩气成藏条件与勘探前景[J].中国矿业,2012,21(2):55-59.
- [11] 李娟,于炳松,郭峰.黔北地区下寒武统底部黑色页岩沉积环境条件与源区构造背景分析[J].沉积学报,2013,31(1):20-31.
- [12] 闫高原,朱炎铭,王阳,等.贵州凤冈区牛蹄塘组页岩气成藏条件分析[J].特种油气藏,2014,21(6):75-78.
- [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.
- [14] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等.常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J].石油学报,2012,33(2):173-187.
- [15] 聂海宽,张金川,李玉喜.四川盆地及其周缘下寒武统页岩气聚集条件[J].石油学报,2011,32(6):959-967.
- [16] 马超,宁宁,王红岩,等.湘西—黔东地区下寒武统牛蹄塘组页岩气勘探前景[J].特种油气藏,2014,21(1):38-41.
- [17] 梁兴,叶熙,张介辉,等.滇黔北坳陷威信凹陷页岩气成藏条件分析与有利区优选[J].石油勘探与开发,2011,38(6):693-699.
- [18] 胡明毅,邱小松,胡忠贵,等.页岩气储层研究现状及存在问题探讨[J].特种油气藏,2015,22(2):1-7.
- [19] 王濡岳,丁文龙,龚大建,等.黔北地区海相页岩气保存条件——以贵州岑巩区块下寒武统牛蹄塘组为例[J].石油与天然气地质,2016,37(1):45-55.
- [20] 杨瑞东,程伟,周汝贤,等.贵州页岩气源岩特征及页岩气勘探远景分析[J].天然气地球科学,2012,23(2):340-347.
- [21] 据宜文,姜波,侯泉林,等.煤岩结构纳米级变形与变质变形环境的关系[J].科学通报,2005,50(17):1884-1892.
- [22] ROUQUEROL J, AVNIR N, FAIRBRIDGE C W, et al. Physical chemistry division commission on colloid and surface chemistry, subcommittee on characterization of porous solids: Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report) [J]. Pure and Applied Chemistry, 1994, 66(8):1739-1758.
- [23] 钟玲文,张慧,员峥嵘,等.煤的比表面积、孔体积及其对煤吸附能力的影响[J].煤田地质与勘探,2002,30(3):26-28.
- [24] 辛勤,罗孟飞.现代化研究方法[M].北京:科学出版社,2009:10-43.
- [25] 刘辉,吴少华,姜秀民,等.快速热解褐煤焦的低温氮吸附等温线形态分析[J].煤炭学报,2005,30(4):507-510.
- [26] 陈尚斌.页岩储层微观结构及其吸附非均质性研究评述[J].煤炭科学技术,2016,44(6):23-32.
- [27] 赵佩,李贤庆,田兴旺,等.川南地区龙马溪组页岩气储层微孔隙结构特征[J].天然气地球科学,2014,25(6):947-956.
- [28] ROSS D J K, BUSTIN R M. Characterizing the shale gas resource potential of devonian-mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation [J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(1): 87-125.
- [29] 肖佃师,赵仁文,杨潇,等.海相页岩气储层孔隙表征、分类及贡献[J].石油与天然气地质,2019,40(6):1215-1225.
- [30] 郑和荣,彭勇民,唐建信,等.中、上扬子地区常压页岩气勘探前景——以湘中坳陷下寒武统为例[J].石油与天然气地质,2019,40(6):1155-1167.

## Pore structure characteristics of shale in Early Cambrian Niutitang Formation in Fenggang area, Guizhou Province

CHEN Jie

(Jiangsu Changjiang Geological Exploration Institute, Nanjing 210046, Jiangsu, China)

**Abstract:** By using the analytical methods such as scanning electron microscope observation, low temperature liquid Nitrogen and CO<sub>2</sub> adsorption experiment and high pressure mercury injection experiment, this study conduct a comprehensively analysis on optimal pore segment of shale in Early Cambrian Niutitang Formation. The result shows that the Niutitang Formation is a good shale gas reservoir with well-developed pores and good connectivity. Micro-pores and nano-scale pores are developed well, and the pore forms are ink-bottle pores, conical pores and other amorphous pores, which provide large specific surface area for gas absorption. Organic matter pores, intergranular pores and intergranular pores are also developed with good connectivity, and most of the pore sizes are 100 nm~5 μm. Besides, macropores (> 1 000 nm) has good connectivity, which is beneficial to gas desorption, diffusion and permeation. It has a higher pore volume and a larger specific surface area, providing a larger adsorption space for the gas.

**Key words:** Niutitang Formation shale; experimental test; pore structure; porosity; Fenggang area, Guizhou