

# 陆相页岩气形成条件及勘探开发潜力

## ——以川东涪陵北地区侏罗系东岳庙段为例

刘皓天<sup>1</sup>, 李雄<sup>1</sup>, 万云强<sup>2</sup>, 刘忠宝<sup>3</sup>, 周林<sup>1</sup>, 车世琦<sup>1</sup>

1 中国石化江汉油田分公司勘探开发研究院; 2 中国石化江汉油田分公司; 3 中国石化勘探开发研究院

**摘要** 陆相泥页岩是页岩气勘探开发的重要接替领域。利用四川盆地涪陵北地区最新钻井(FY10井)资料及大量样品的分析测试结果,从页岩矿物组成、有机地球化学特征、储集特征、含气性等方面研究了侏罗系自流井组东岳庙段页岩气形成条件与勘探潜力。研究表明:研究区东岳庙段一亚段优质页岩厚度大于20 m,有机质含量较高(TOC为1.31%~4.04%,平均值大于1.5%),有机质类型以Ⅱ型为主,有机质已进入高成熟演化阶段;页岩中无机矿物孔与有机质孔均较发育,平均孔隙度大于4%,储集性能好;岩心浸水实验显示气泡密集、持续性好,页岩气形成与富集条件好;东岳庙段整体埋藏深度适中,页岩中发育大量灰质介壳纹层,有利于增强压裂改造效果,因此具备良好的页岩气勘探开发潜力。

**关键词** 陆相泥页岩;页岩气;勘探潜力;东岳庙段;侏罗系;四川盆地

**中图分类号**: TE132.2 **文献标识码**: A

## 0 前言

近年来,我国在涪陵、长宁、昭通及威远等多个地区奥陶系五峰组一志留系龙马溪组已获得海相页岩气勘探开发的成功<sup>[1-4]</sup>,但随着勘探开发的不断深入,未来页岩气增储上产仍面临巨大压力,急需拓展新领域、新层系。我国陆相盆地分布范围广,中生界、新生界等多个层系均发育陆相泥页岩,是页岩气勘探开发的重要接替领域之一。尽管在鄂尔多斯盆地三叠系<sup>[5]</sup>和四川盆地侏罗系的多口钻井已获得了陆相页岩气的工业发现,但与海相泥页岩相比,产气量明显偏低,迄今为止尚未实现规模商业开发。在四川盆地侏罗系的3个地区(元坝、涪陵北、建南)、3个层段(自流井组东岳庙段、大安寨段、千佛崖组)压裂测试均获页岩气流,如元坝地区YB21井在大安寨段最高日产 $50.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,涪陵北地区FYHF-1井在大安寨段最高日产 $1.73 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,建南地区JYHF-1井在东岳庙段最高日产 $1.23 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,这展现了盆地侏罗系陆相页岩气勘探开发的良好前

景。由于不同地区、不同层段的页岩地质特征差异较大<sup>[6-12]</sup>,钻井取心又少,因此对于侏罗系陆相页岩气形成条件的研究还缺乏系统性,认识也不够深入。

近期,在川东涪陵北地区部署了FY10井,该井在东岳庙段全取心,这为陆相页岩气研究提供了有利条件。笔者在对FY10井岩心观察描述的基础上,采用全岩矿物X射线衍射、薄片鉴定、高压压汞-氮气吸附联合测定、氩离子抛光-扫描电镜分析及孔隙度、有机碳含量、热解、干酪根碳同位素、镜质组反射率测试等多种实验技术方法,深入开展了研究区东岳庙段页岩气形成条件研究,认为东岳庙段一亚段页岩气地质条件好:优质页岩厚度大,有机质含量较高,有机质类型以Ⅱ型为主,有机质已进入高成熟演化阶段;页岩中无机矿物孔与有机质孔均较发育,储集性能好;东岳庙段整体埋藏深度适中,页岩中发育大量灰质介壳纹层,有利于增强压裂改造效果,具备良好的页岩气勘探开发潜力。该项研究可为四川盆地侏罗系页岩气勘探开发提供依据与指导。

收稿日期: 2019-07-22; 改回日期: 2019-11-14

本文受国家科技重大专项下属专题“中扬子页岩气潜力分析与目标评价”(编号: 2017ZX05036-003-008)资助

**第一作者**: 刘皓天, 副研究员, 现从事石油天然气地质勘探研究工作。通信地址: 430223 湖北省武汉市洪山区大学园路18号;  
E-mail: liuht.jhyt@sinopec.com

1 研究区概况

涪陵北地区构造上位于四川盆地川东高陡构造带,属于万县复向斜中的拔山寺向斜,向斜总体呈北东向延伸(图1)。区内侏罗系发育完整,自下而上依次为下侏罗统自流井组、中侏罗统千佛崖组(凉高山组)和沙溪庙组、上侏罗统遂宁组和蓬莱镇组,其中,自流井组自下而上又可以进一步划分为4个岩性段,即珍珠冲段、东岳庙段、马鞍山段及大安寨段。依据FY10井岩性及常规测井响应特征,本次研究目的层东岳庙段自下而上进一步划分为3个亚段7个小层(图2)。

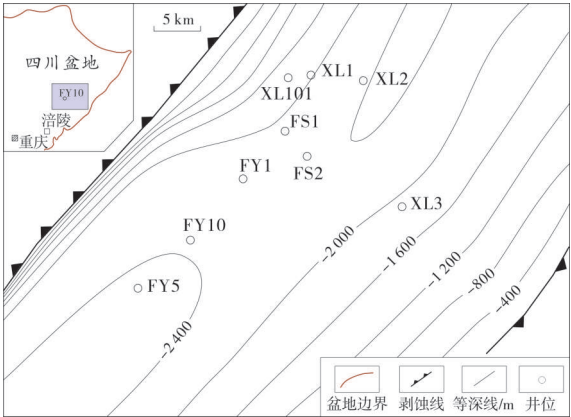


图1 涪陵北地区东岳庙段底界海拔深度图  
Fig. 1 Burial depth of the bottom of Dongyuemiao Member in north Fuling area

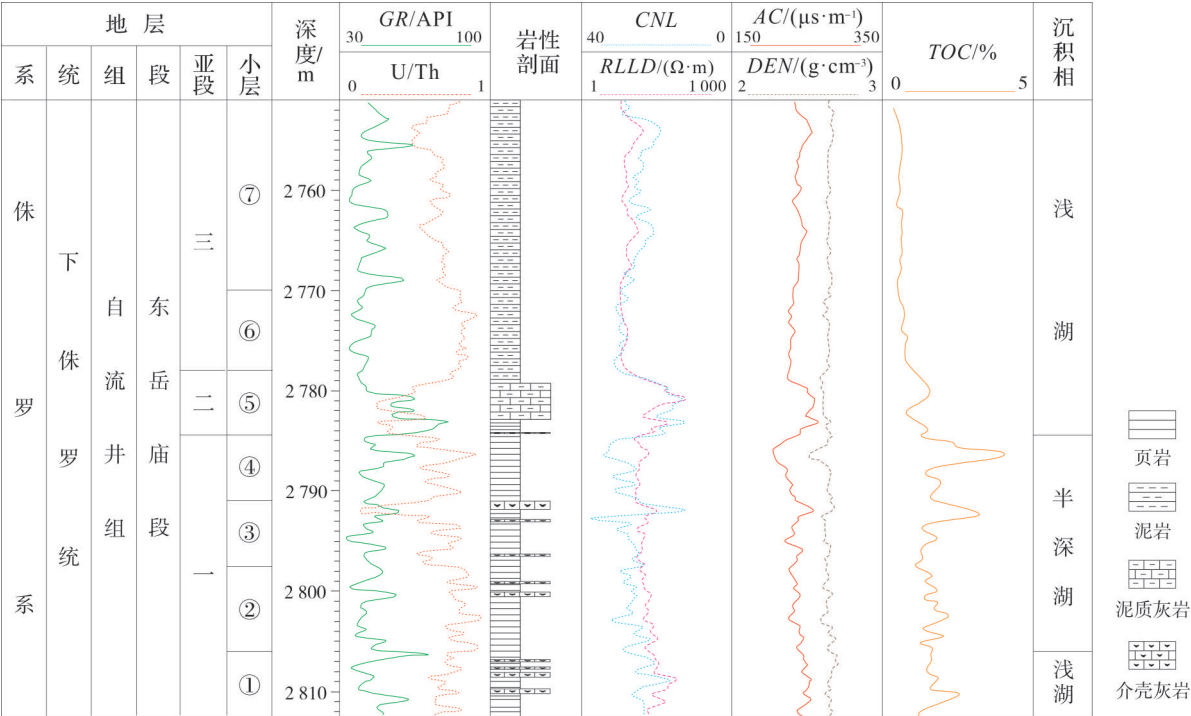


图2 涪陵北地区东岳庙段地层综合柱状图(FY10井)

Fig. 2 Comprehensive strata column of Dongyuemiao Member of Well FY 10 in north Fuling area

2 东岳庙段页岩气形成条件

2.1 页岩全岩矿物组成及岩性特征

FY10井东岳庙段63个页岩样品的全岩X衍射测试分析结果表明,页岩矿物组成整体以黏土矿物、石英为主(图3a),其次为方解石,但含量分布不均:黏土矿物为26.5%~71.8%,平均为56.2%;石英为14.4%~52.7%,平均为26.8%;碳酸盐矿物为

0~45.3%,平均为11.5%。从东岳庙段3个亚段各主要矿物平均含量的对比分析结果(图3b)来看,3个亚段长英质矿物的平均含量大致相当,东岳庙段一亚段(简称东一亚段)与东三亚段以黏土矿物含量高为特点,而东二亚段以碳酸盐矿物含量高为特点。据岩心观察,东一亚段岩性主要为灰黑色页岩夹灰质介壳纹层一薄层,东二亚段主要为灰黑色泥质灰岩、灰质泥岩,而东三亚段主要为深灰色一灰色泥岩。

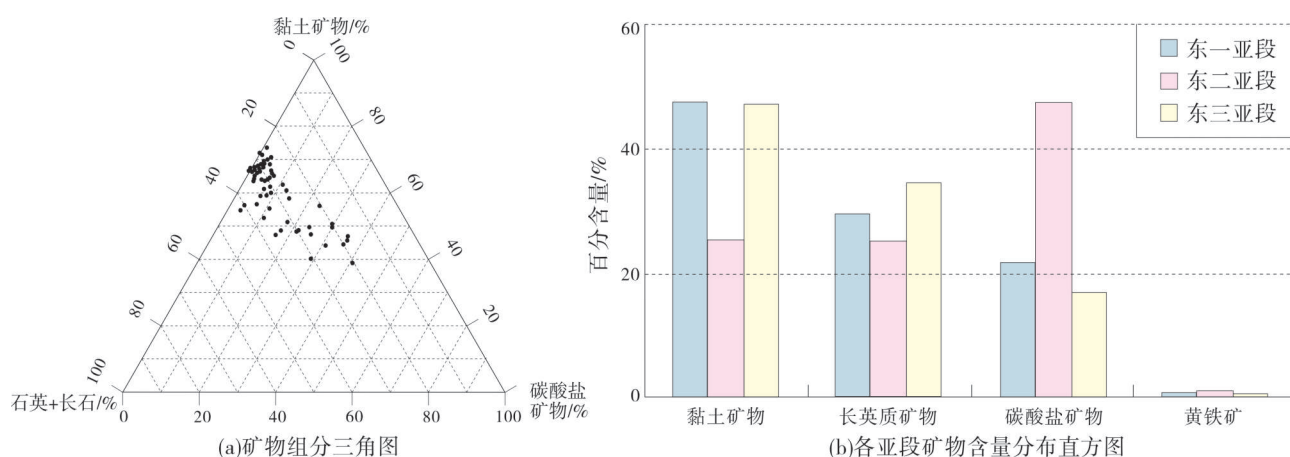


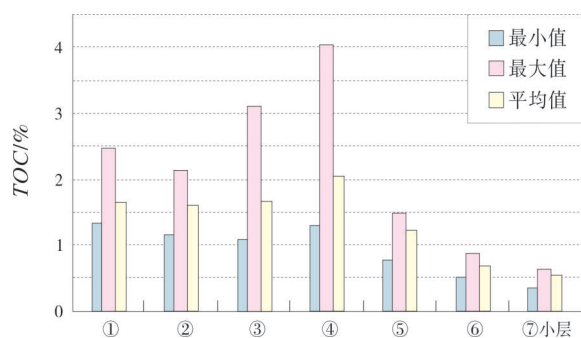
图3 涪陵北地区东岳庙段页岩矿物组成特征(FY10井)

Fig. 3 Shale mineral composition of Dongyuemiao Member of Well FY10 in north Fuling area

## 2.2 页岩有机地球化学特征

### 2.2.1 有机碳含量及热演化程度

从FY10井东岳庙段84个页岩岩心样品实测有机碳含量( $TOC$ )结果来看(图4),  $TOC$ 平均值由大到小依次为东一亚段(①—④小层)、东二亚段(⑤小层)、东三亚段(⑥、⑦小层), 东一亚段各小层页岩  $TOC$  均大于1.5%, 且自下而上逐渐增大, 东二、东三亚段以小于1.0%为主。其中, ④小层  $TOC$  最高, 最大值为4.04%, 平均值为2.04%; 其次为③小层,  $TOC$  最大值为3.13%, 平均值为1.67%。

图4 涪陵北地区东岳庙段  $TOC$  分布特征(FY10井)Fig. 4  $TOC$  histogram of Dongyuemiao Member of Well FY10 in north Fuling area

笔者在FY10井东岳庙段共选取6个页岩样品进行干酪根镜质组反射率( $R_o$ )测定, 数据结果详见表1。6个样品  $R_o$  的平均值在1.52%~1.58%之间, 反映有机质已进入高成熟演化阶段, 以生气为主。平面上,  $R_o$  整体大于1.4%, 且自东北往西南方向呈增大趋势。

表1 涪陵北地区东岳庙段镜质组反射率( $R_o$ )特征(FY10井)

Table 1 Vitrinite reflectance of Dongyuemiao Member of Well FY10 in north Fuling area

亚段	深度/m	$R_o$ /%			测点数
		最小值	最大值	平均值	
东三亚段	2758.51	1.35	1.69	1.52	40
	2771.03	1.33	1.82	1.54	49
东二亚段	2783.81	1.32	1.75	1.58	33
	2793.51	1.34	1.73	1.55	27
东一亚段	2802.37	1.33	1.76	1.57	21
	2810.31	1.54	1.64	1.58	12

### 2.2.2 有机质类型

笔者选取FY10井  $TOC$  较高的东一亚段20个样品进行干酪根碳同位素测试, 按照三类四分法的有机质类型划分标准, 东一亚段有机质类型以  $II_2$ 、 $II_1$  型为主, 局部发育  $I$ 、 $III$  型。从有机质显微组分来看, 东一亚段页岩整体以镜质组为主, 含量为5.0%~100%, 平均值为62.7%; 惰质组次之, 含量为0~52.5%, 平均值为26.2%; 贫氢次生组分含量为0~60.0%, 平均值为11.5%。显微镜下观察鉴定结果表明, 页岩有机质显微组分主要包括镜质体、丝质体、固体沥青及微粒体; 镜质体与丝质体在各层段普遍发育, 镜质体(图5a, 5b)多呈块状、条带状, 表面均一, 呈灰色—灰白色; 丝质体(图5c)呈亮白色, 有凸起; 固体沥青以③、④小层最为发育, 主要沿岩石裂缝充填, 形态取决于裂隙或孔隙的形状(图5d); 微粒体弥散分布于矿物、黏土中, 仍以③、④小层相对含量最高。



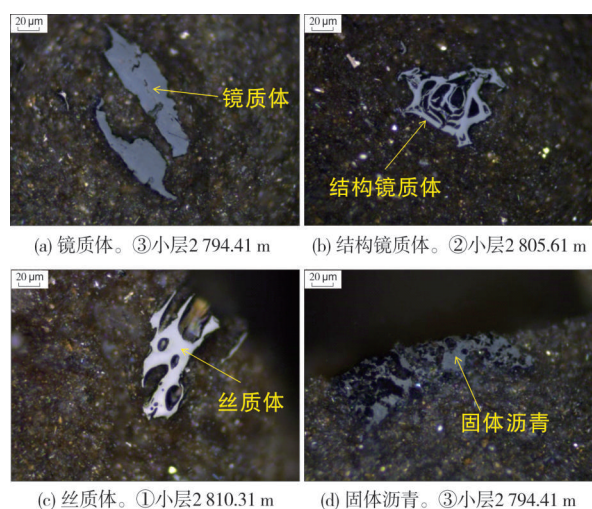


图5 涪陵北地区东岳庙段有机显微组分特征(FY10井)

Fig. 5 Organic maceral photos of Dongyuemiao Member of Well FY10 in north Fuling area

## 2.3 页岩储层特征

### 2.3.1 物性特征

FY10井页岩岩心物性统计结果表明:整体上,东一亚段富有机质页岩孔隙度为1.64%~7.67%,平均值为5.30%;按小层统计,各小层平均孔隙度均大于4%,且自下而上由①小层至④小层逐渐增大(图6),④小层平均孔隙度可达6.11%;东一亚段水平渗透率为 $(0.04\sim1.07)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,平均值为 $0.28\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,渗透率相对较高。结合岩心观察,认为东一亚段页岩的良好发育对渗透性的提高贡献明显。从孔渗分析结果来看,东岳庙段页岩储集性能较好。与焦石坝地区JY1井志留系龙马溪组海相页岩(孔隙度为2.78%~7.08%,平均值为4.81%)相比,涪陵北地区东岳庙段陆相页岩并不逊色。

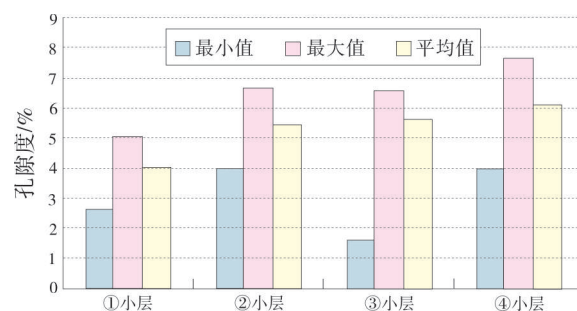


图6 涪陵北地区东岳庙段一亚段页岩孔隙度特征(FY10井)

Fig. 6 Shale porosity histogram of Dongyuemiao Submember 1 of Well FY10 in north Fuling area

### 2.3.2 孔隙结构特征

页岩孔隙结构表征是页岩储集性能评价的重要依据。目前定量测定页岩孔隙大小的手段主要是流体注入法,包括低温氮气吸附法、二氧化碳吸附法、高压压汞法,这些方法均有各自的局限性,因此综合各种技术手段进行页岩孔隙分析是准确揭示页岩全孔径分布范围的有效途径<sup>[13]</sup>。本次研究采用高压压汞-吸附联合测定法对FY10井东岳庙段页岩开展了全孔隙结构的定量表征。结果表明:侏罗系东岳庙段陆相页岩孔径分布特征表现为双峰,2~10 nm的微孔占比相对较小,大孔(孔径>50 nm)占比相对较大(图7a)。这与志留系龙马溪组海相页岩孔径分布(图7b,同一仪器分析)存在较大差异。

### 2.3.3 页岩储集空间类型及特征

前期针对陆相页岩储集空间类型的研究多集中在鄂尔多斯盆地延长组<sup>[14-17]</sup>,对于四川盆地东岳庙段页岩储层孔隙的研究相对较少。笔者通过系统的氩

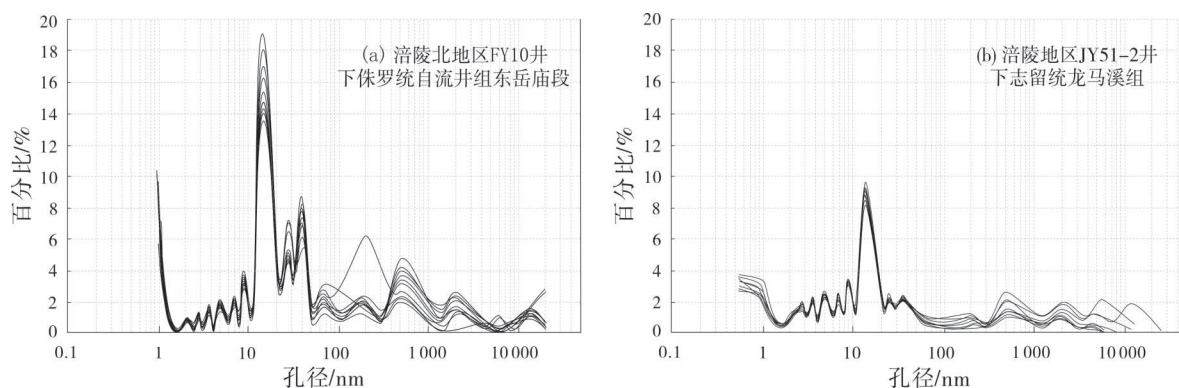


图7 四川盆地侏罗系陆相页岩与志留系海相页岩孔径分布特征对比图

Fig. 7 Comparison of pore size distribution between Jurassic continental shale and Silurian marine shale

离子抛光-扫描电镜图像观察发现:东岳庙段富有机质页岩储层中无机矿物孔、有机质孔均有发育(图8),其中,无机矿物孔包括黏土矿物层间孔、粒间孔、方解石粒内孔,以黏土矿物层间孔为主,其次为粒间孔。黏土矿物层间孔主要呈狭缝形、线形,宽几十到几百纳米不等(图8a),主要为黏土矿物片层间压实作用后的残余孔隙,镜下可见少量孔隙被暗色有机质全充填或部分充填。粒间孔主要是由片状黏土矿物和少量长石、石英及方解石颗粒杂乱排列所形成,

颗粒之间相互支撑形成较为稳定的结构,孔隙形态多呈三角形、多边形及不规则形等。页岩中有机质孔主要发育于无固定形态的固体沥青内部,孔径大小分布不均,几十到几百纳米不等,孔隙形态多以斑点形、不规则形为主(图8b),少量为椭圆形。此外,局部样品中见少量莓状黄铁矿集合体,黄铁矿单晶被暗色有机质充填,其内部发育有机质孔(图8c)。整体而言,东岳庙段富有机质页岩中各类无机矿物孔与有机质孔发育,因而具备良好的储集性能。

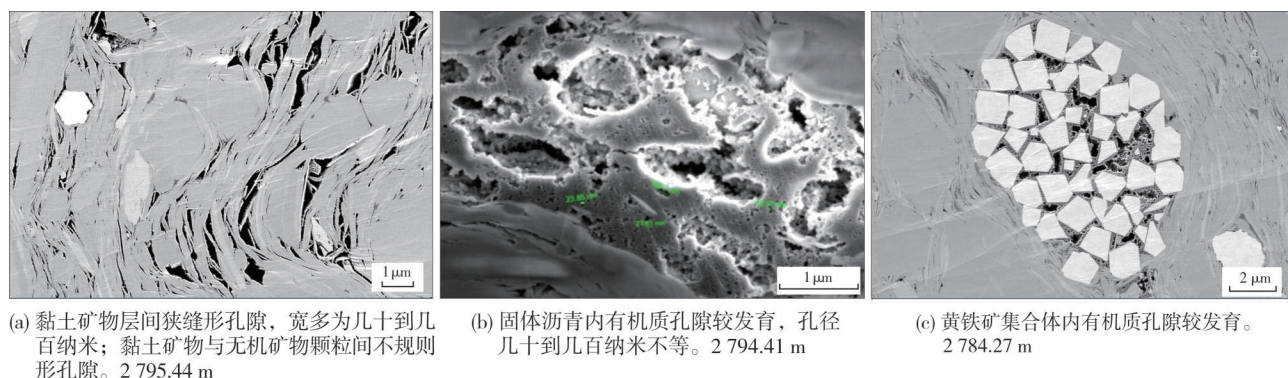


图8 涪陵北地区东岳庙段页岩储层孔隙特征(FY10井,扫描电镜)

Fig. 8 Different types of pore in the shale of Dongyuemiao Member of Well FY10 in north Fuling area(SEM)

## 2.4 页岩含气性特征

FY10井尽管泥浆密度较大( $1.78\sim 1.82\text{ kg/m}^3$ ),加之全井段取心,均会不同程度地对气测显示产生影响,但仍获得了较好的气测显示:上部④小层(厚6.5 m)全烃值为2.75%~13.54%,平均值为5.98%。

东岳庙段①至④小层岩心出筒时泥浆表面均有不同程度的气泡显示(图9a),尤其是②小层上部至④小层气泡数量明显增多。全井段系统的浸水实验测试结果也显示:自下而上由①至④小层气泡显示效果逐渐变好(图9b—d),尤其是③、④小层气泡密集、能量较强,持续性好,表明其含气量较高。

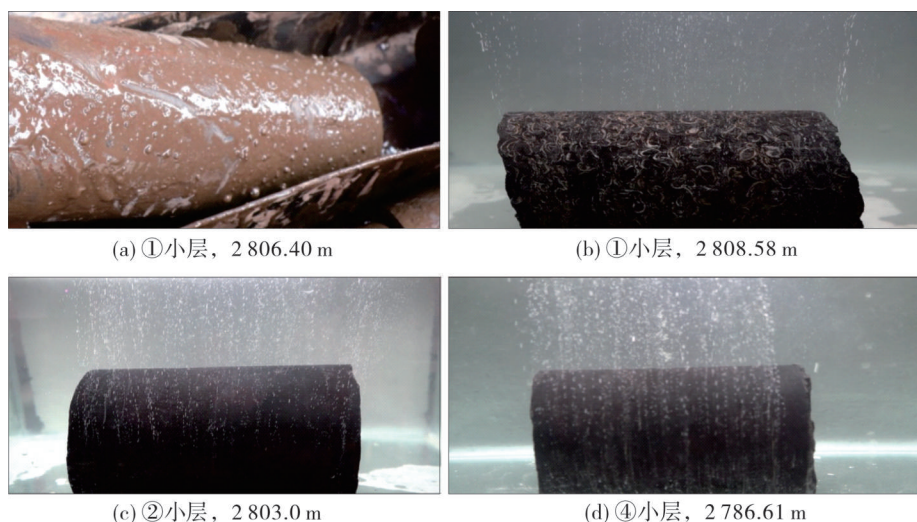


图9 涪陵北地区东岳庙段岩心出筒与浸水实验图(FY10井)

Fig. 9 Photos of core out of barrel and water immersion test of Dongyuemiao Member of Well FY10 in north Fuling area



### 3 东岳庙段页岩气勘探开发潜力

#### 3.1 页岩气形成地质条件好

研究区内FY10井等钻井揭示东岳庙段优质页岩厚度多大于20 m,  $TOC$  平均值大于1.5%, 局部少量层段可达4%以上; 有机质类型以 $II_2$ 、 $II_1$ 型为主, 生烃潜力好; 有机质成熟度 $R_o$ 多大于1.4%, 已进入高成熟演化阶段, 以生气为主。页岩中无机矿物孔(黏土矿物层间孔、粒间孔)、有机质孔均较发育, 孔隙度均大于4%, 优质层段平均孔隙度最高可达6.11%。岩心构造裂缝基本不发育, 压力系数高, 保存条件好, 现场出筒岩心泥浆表面及浸水实验测试显示气泡密集、持续性好, 反映其含气性好。综合分析认为: 东一亚段上部③、④小层页岩气富集条件最好, 为有利页岩气勘探开发层段。

#### 3.2 页岩气开发条件好

页岩气富集层段埋藏深度越大, 对于页岩气水平井工程压裂改造的技术要求越高, 同时也会提高钻井及工程施工的经济成本。目前我国在四川盆地以五峰组—龙马溪组为目的层的3 000 m以浅的

钻探及压裂改造技术已较为成熟, 但对于深层, 尤其是深度大于4 000 m的钻井工程压裂改造技术仍处于探索阶段。研究区东岳庙段底界埋深多小于3 000 m, 其中拔山寺向斜主体在2 750~2 950 m之间, 埋深适中。

陆相页岩黏土矿物含量高, 目前认为这会影响水平井压裂改造效果, 但有研究认为陆相富有机质页岩夹薄层条带灰岩或砂岩的岩性组合可以提高脆性指数和杨氏模量, 并降低泊松比, 使其更接近纯灰岩的值, 有利于后期的压裂改造<sup>[18]</sup>。对FY10井东岳庙段系统的岩心观察描述结果显示: 东一亚段①至④小层页岩中发育大量的灰质介壳纹层(图10), 累计可达476条, 各小层的密度为7~21条/米。这对于提高页岩层段脆性指数, 形成更多的人工裂缝, 在一定程度上增强压裂改造效果将起到积极的作用。加之目前我国已在陆相页岩储层压裂缝网形成机理<sup>[19]</sup>、分段多簇压裂技术<sup>[20]</sup>等方面的技术方法上有一些探索和进步, 因此, 研究区有望实现页岩气高产, 获得良好的勘探开发效果。

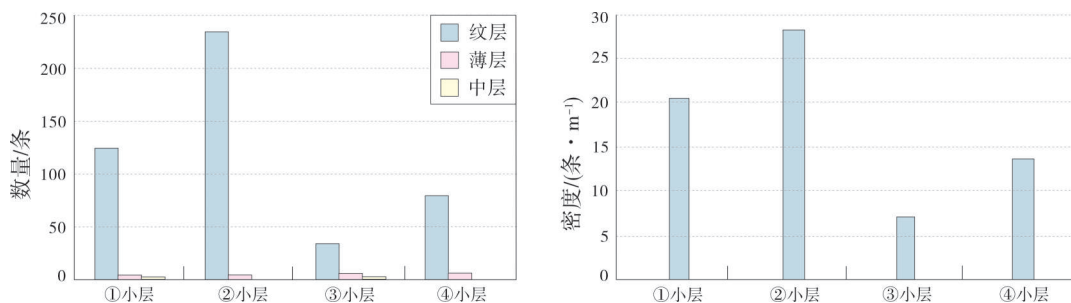


图10 涪陵北地区东岳庙段一亚段各小层介壳纹层统计对比(FY10井)

Fig. 10 Statistical histogram of shell laminae in each sublayer of the Dongyuemiao Submember 1 of Well FY10 in north Fuling area

## 4 结 论

(1) 四川盆地涪陵北地区侏罗系自流井组东岳庙段一亚段优质页岩厚度大于20 m, 有机质丰度较高( $TOC$ 为1.31%~4.04%, 平均值大于1.5%); 有机显微组分以镜质体、丝质体、固体沥青为主, 有机质类型以 $II_2$ 、 $II_1$ 型为主; 镜质组反射率平均值在1.52%~1.58%之间, 反映已进入高成熟演化阶段。页岩中无机矿物孔与有机质孔均较发育, 其中无机矿物孔以黏土矿物层间孔为主, 其次为粒间孔, 平均孔隙度大于4%, 储集性能好。岩心浸水实验显示气泡密

集、持续性好, 反映页岩气形成与富集条件好。

(2) 研究区东岳庙段整体埋藏深度适中, 页岩中发育大量灰质介壳纹层, 有利于增强压裂改造效果, 因而具备良好的页岩气勘探开发潜力, 有望实现规模性商业开发。

#### 参考文献

- [1] 郭旭升, 胡东风, 李宇平, 等. 涪陵页岩气田富集高产主控地质因素[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 481~491.
- [2] 郭旭升, 胡东风, 魏志红, 等. 涪陵页岩气田的发现与勘探认识[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(3): 24~37.

- [3] 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.
- [4] 舒志国,关红梅,喻璐,等.四川盆地焦石坝地区页岩气储层孔隙参数测井评价方法[J].石油实验地质,2018,40(1):38-43.
- [5] 王香增,高胜利,高潮.鄂尔多斯盆地南部中生界陆相页岩气地质特征[J].石油勘探与开发,2014,41(3):294-304.
- [6] 高健,林良彪,任天龙,等.川北地区下侏罗统东岳庙段页岩气富集主控因素研究[J].岩性油气藏,2016,28(5):67-75.
- [7] 邓翔.川东地区下侏罗统大安寨段页岩气富集规律研究[D].成都:成都理工大学,2016.
- [8] 顾忠安,郑荣才,王亮,等.渝东涪陵地区大安寨段页岩储层特征研究[J].岩性油气藏,2014,26(2):67-73.
- [9] 黄江庆,梁榜,车世琦,等.鄂西渝东地区东岳庙段陆相页岩气富集主控因素分析[J].石油天然气学报,2014,36(4):30-33,35.
- [10] 黄棋琴.川北地区下侏罗统东岳庙段页岩气富集规律研究[D].成都:成都理工大学,2015.
- [11] 黄东,李育聪,韦腾强,等.四川盆地侏罗系大安寨段湖相页岩地质特征及勘探开发潜力[C]//中国石油学会天然气专业委员会,四川省石油学会.2016年全国天然气学术年会论文集.银川,2016:254-263.
- [12] 朱彤,俞俊杰,王峰.四川盆地海相、湖相页岩气形成条件对比及开发策略[J].天然气地球科学,2017,28(4):633-641.
- [13] 刘忠宝,高波,冯动军,等.上扬子地区下寒武统黑色页岩矿物组成特征及其油气勘探意义[J].天然气工业,2017,37(4):21-26.
- [14] 黄海,陈军斌,邓彦玲,等.鄂尔多斯盆地南部长7陆相页岩基质孔隙发育类型及影响因素[J].西安石油大学学报(自然科学版),2017,32(5):42-48.
- [15] 曹茜,周文,陈文玲,等.鄂尔多斯盆地南部延长组长7段陆相页岩气地层孔隙类型、尺度及成因分析[J].矿物岩石,2015,35(2):90-97.
- [16] 耳闯,赵靖舟,王芮,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组富有机质页岩孔隙特征及发育机制[J].天然气地球科学,2016,27(7):1202-1214.
- [17] 冯小龙,敖卫华,唐玄.陆相页岩气储层孔隙发育特征及其主控因素分析:以鄂尔多斯盆地长7段为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2018,48(3):678-692.
- [18] 魏祥峰,黄静,李宇平,等.元坝地区大安寨段陆相页岩气富集高产主控因素[J].中国地质,2014,41(3):970-981.
- [19] 张博.延长陆相页岩气储层体积压裂缝网形成机理研究[D].西安:西安石油大学,2014.
- [20] 相智文.延长陆相页岩气储层分段多簇压裂缝网模拟研究[D].西安:西安石油大学,2015.

编辑:董庸

## Formation conditions and exploration and development potential of continental shale gas: a case of Dongyuemiao Member of the Jurassic in north Fuling area, eastern Sichuan Basin

LIU Haotian, LI Xiong, WAN Yunqiang, LIU Zhongbao, ZHOU Lin, CHE Shiqi

**Abstract:** Continental shale is an important succeeding field of shale gas exploration and development. The formation conditions and exploration potential of shale gas in Dongyuemiao Member of the Lower Jurassic Ziliujing Formation are analyzed on the aspects of mineral composition, organic geochemistry, reservoir characteristic and gas content from the latest drilling data (Well FY10). The results show that the Dongyuemiao Submember 1 in the study area has higher organic matter content (TOC at range of 1.31%~4.04% with average value more than 1.50%) with thickness more than 20 m of high-quality shale, and the organic matter type is mainly type II with high thermal maturity. Both of the inorganic and organic pores are developed in the shale, and the average porosity is more than 4%, which indicates good reservoir properties of the shale. The water immersion test of core shows that the shale gas bubbles are dense and persistent, which indicates good formation and enrichment conditions of shale gas. The burial depth of the Dongyuemiao Member in the study area is moderate, and the shale contains a large amount of calcareous shell laminae to improve the fracturing effect, which reveals good potential for shale gas exploration and development.

**Key words:** continental shale; shale gas; formation conditions; Dongyuemiao Member; Jurassic; Sichuan Basin

**LIU Haotian**, First author: MSc, Associate Research Fellow, engaged in petroleum geology and exploration. Add: No. 18 Daxueyuan Rd., Hongshan District, Wuhan, Hubei 430223, China