

四川盆地东部复兴地区侏罗系自流井组东岳庙段 陆相页岩凝析气藏地质特征及勘探开发前景

舒志国,周林,李雄,刘皓天,曾勇,谢洪光,姚明君,王艳春

(中国石化江汉油田分公司勘探开发研究院,湖北武汉430070)

摘要:日前,中国石化江汉油田分公司在川东复兴地区部署实施的涪页10HF井测试日产气 $5.58 \times 10^4 \text{ m}^3$,日产油 17.6 m^3 ,取得了该区东岳庙段陆相页岩气勘探的重大突破。为了有效指导该区陆相页岩气的勘探开发,同时为四川盆地和国内外其他地区陆相页岩气的勘探开发提供参考,基于岩心、钻井、测录井和分析化验资料的综合分析,对复兴地区东岳庙段陆相页岩凝析气藏的地质特征进行了研究,结合页岩品质、资源规模、保存条件、地表条件、压裂改造以及试气试采技术等方面分析了复兴地区东岳庙段陆相页岩气的勘探开发前景。综合研究认为:东岳庙段陆相页岩原生品质好,资源规模大,具有形成大型页岩气藏的物质基础;复兴地区为低山和丘陵地貌,东岳庙段埋深适中、地层平缓且断裂不发育,具备开展大规模页岩气开发的有利条件;东岳庙段粘土矿物含量高和可压性较差,“高密布缝体积改造”的压裂工艺技术已基本实现对东岳庙段陆相页岩的有效改造;东岳庙段为高压力系数的页岩凝析气藏,油、气产出规律不清,合理高效的开发方式仍需要持续开展探索。

关键词:开发前景;涪页10HF井;东岳庙段;自流井组;凝析气藏;陆相页岩;侏罗系;复兴地区;四川盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Geological characteristics of gas condensate reservoirs and their exploration and development prospect in the Jurassic continental shale of the Dongyuemiao Member of Ziliujing Formation, Fuxing area, eastern Sichuan Basin

Shu Zhiguo, Zhou Lin, Li Xiong, Liu Haotian, Zeng Yong, Xie Hongguang, Yao Mingjun, Wang Yanchun

(Exploration and Production Research Institute of Jiangnan Oilfield Company, SINOPEC, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: Gas condensate reservoirs were recently discovered by Sinopec Jiangnan Oilfield Company through Well Fuye10HF in the continental shale of the Dongyuemiao Member, Fuxing area, eastern Sichuan Basin. The well was tested with a daily gas rate of 55 800 cubic meters and liquid rate of 17.6 cubic meters, indicating a great breakthrough made in shale gas exploration in the area. An integrated analysis of core, drilling, logging and testing data was then combined with an assessment of rock quality, resource potential, preservation and surface conditions to characterize the reservoirs in terms of geology and development prospect. Applicable fracturing and production technologies to the reservoirs were also reviewed to provide a reference for the exploration and development of other shale reservoirs of similar geological context. The results show that the shale of high quality and extensive distribution in the member is physically sufficient for the generation of large-scale gas reservoirs. The member, conveniently buried in a moderate depth with gentle strata and undeveloped faults in the low-relief Fuxing area, is relatively friendly to a large-scale gas development. Despite a high clay mineral content and poor fracturability, the member responds sensitively to fracturing treatment featuring a “dense-fracture volume stimulation”. The results also suggest that the reservoirs are of high pressure coefficient and produce in a way that requires further studies to formulate a suitable and efficient development scheme.

Key words: Development prospect, Well Fuye 10HF, Dongyuemiao Member, Ziliujing Formation, gas condensate reservoir, continental shale, Jurassic, Fuxing area, Sichuan Basin

收稿日期:2020-07-01;修订日期:2020-12-01。

第一作者简介:舒志国(1966—),男,博士、研究员,石油地质综合。E-mail:trqszz@sina.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05036003-008);中国石油化工股份有限公司技术开发项目(P19017-2)。

自2012年焦页1HF井实现五峰组-龙马溪组页岩气的商业开发以来^[1-3],中国陆续发现了涪陵、长宁、昭通、威远、威荣和永川等海相页岩气田^[4-8]。页岩气的储量和产量的大幅增长,极大地改变了国内能源格局,也有效缓解了中国长期以来面临的油气供应短缺的问题^[9-11]。然而,当下中国页岩气勘探开发的成功仅局限于四川盆地及周缘志留系的海相页岩,随着勘探开发的不断深入,页岩气稳产、增储的压力日趋急迫^[9-13]。这不仅需要我们进一步深化志留系页岩地质工程一体化评价,扩大志留系海相页岩气的勘探开发战果^[14-16],更需要我们解放思想、放开视野,尽快实现志留系向新领域、新层系的拓展^[9,17-19]。

中、新生界以来中国四川盆地侏罗系自流井组、鄂尔多斯盆地三叠系延长组、渤海湾盆地古近系沙河街组和松辽盆地白垩系青山口组等均沉积了大套的陆相暗色泥页岩,具有分布面积广、资源规模大等特点^[9,20-23],是页岩气勘探开发的重要接替领域。早在2011年前后川东北的元坝地区、川东的复兴地区(中国石化涪陵区块及周缘,下文统称复兴地区)和建南地区就在自流井组东岳庙段、大安寨段和千佛崖组(凉高山组)的页岩段见到良好油气显示并测试获得了一定产量的油气流^[24-27],但陆相页岩粘土矿物含量高,纵横向非均质性强,热演化程度差异大,普遍呈现油气同出等特征成为了一直制约四川盆地侏罗系陆相页岩迈出有效开发步伐的关键问题^[28-31]。

2018年3月,中国石化充分借鉴涪陵海相页岩气田的勘探开发经验,组织各下属分公司加大新区新层系页岩气勘探力度^[9],江汉油田积极响应集团公司号召,迅速开展了复兴地区侏罗系的资料复查与潜力评价工作,于2018年9月份部署实施了复兴地区第一口专门针对东岳庙段陆相页岩气的风险探井——涪页10井。2019年初涪页10井完钻,对东岳庙段“穿鞋戴帽”获取了75.6 m的岩心,钻井过程中东岳庙段油气显示活跃,测井解释各类页岩气层50余米。2019年6月,优选东岳庙段东一亚段④小层(厚度6.5 m,有机碳含量 TOC 2.11%,孔隙度6.11%,渗透率 $0.127 \times 10^{-3} \mu m^2$,含气性好)为穿行靶窗开展水平井钻探工作,同年底完成了水平井钻探和1 531 m水平段的压裂。2020年3月底完成涪页10HF井放喷测试,获得了日产气 $5.58 \times 10^4 m^3$,日产油 $17.6 m^3$ 的工业油气流,取得了复兴地区东岳庙段陆相页岩气勘探的重大突破。涪页10HF井的钻探意义不仅仅在于取得了东岳庙段陆相页岩气的勘探突破、极大推进了四川盆地陆相页岩气的勘探开发进程,更为重要的是获取了东岳

庙段典型陆相页岩相关特征参数、揭示了一种特殊油气藏类型——页岩凝析气藏、探索了一套高粘土矿物含量陆相页岩的压裂改造工艺、极大地丰富了中国页岩气勘探的理论和实践。本文旨在通过对复兴地区东岳庙段页岩沉积分布、原生品质、含气性以及流体性质和气藏特征等的分析,以期明确东岳庙段陆相页岩凝析气藏的地质特征,并从地质条件、地表条件、保存特征、可改造性、压裂工艺和排采制度等方面探讨复兴地区陆相页岩气的勘探开发前景,以期为复兴地区、乃至国内外相似地质背景的陆相页岩气的勘探开发提供依据与借鉴。

1 区域地质背景

四川盆地的侏罗系是一套既含油又含气的重要含油气层系,其油气发现始于20世纪50年代末期^[24-25,28-31],至今经历了源外找油、近源找油和进源找油3个阶段^[21]。早中侏罗世,四川盆地主体以滨浅湖-半深湖相沉积为主,纵向上经历了4次湖侵,自下而上形成了自流井组珍珠冲段、东岳庙段、大安寨段和凉高山组凉二段4套富有机质页岩。其中自流井组大安寨段发育介壳灰岩和灰黑色页岩,源储配置关系好,被普遍认为勘探潜力最大,勘探程度也相对最高^[32-34]。东岳庙段时期四川盆地的沉积中心主要位于川东的梁平—广安—涪陵一带,暗色泥页岩有机质丰度较高,分布面积相对较广,但因整体厚度不大,且缺少常规油气藏的储层条件,而较少得到关注。近年来,随着非常规油气勘探的持续火热,江汉油田调整思路、转变方向,从页岩油气勘探角度出发通过近十年来持续不断地在侏罗系陆相页岩油气中的实践探索,最终获得了复兴地区东岳庙段陆相页岩油气的勘探突破。复兴地区位于四川盆地东部,主体处于重庆梁平、垫江和丰都境内,在构造上隶属四川盆地川东高陡断褶带万县复向斜,主要处于被北东向大天池背斜带和方斗山背斜带所夹持的区域内,发育梁平、高安、拔山寺、大堡场和忠县5个向斜和黄泥塘、苟家场和大池干3个背斜,背斜高陡核部主要出露二叠系和三叠系,向斜宽缓主要出露侏罗系(图1,图2)

2 气藏地质特征

2.1 岩性组合特征

东岳庙段沉积时期复兴地区经历了一次较大规模的湖侵,沉积了一套滨浅湖-半深湖相灰黑色泥页岩夹薄层介壳灰岩,区域厚度为60~70 m^[27-28]。结合岩心

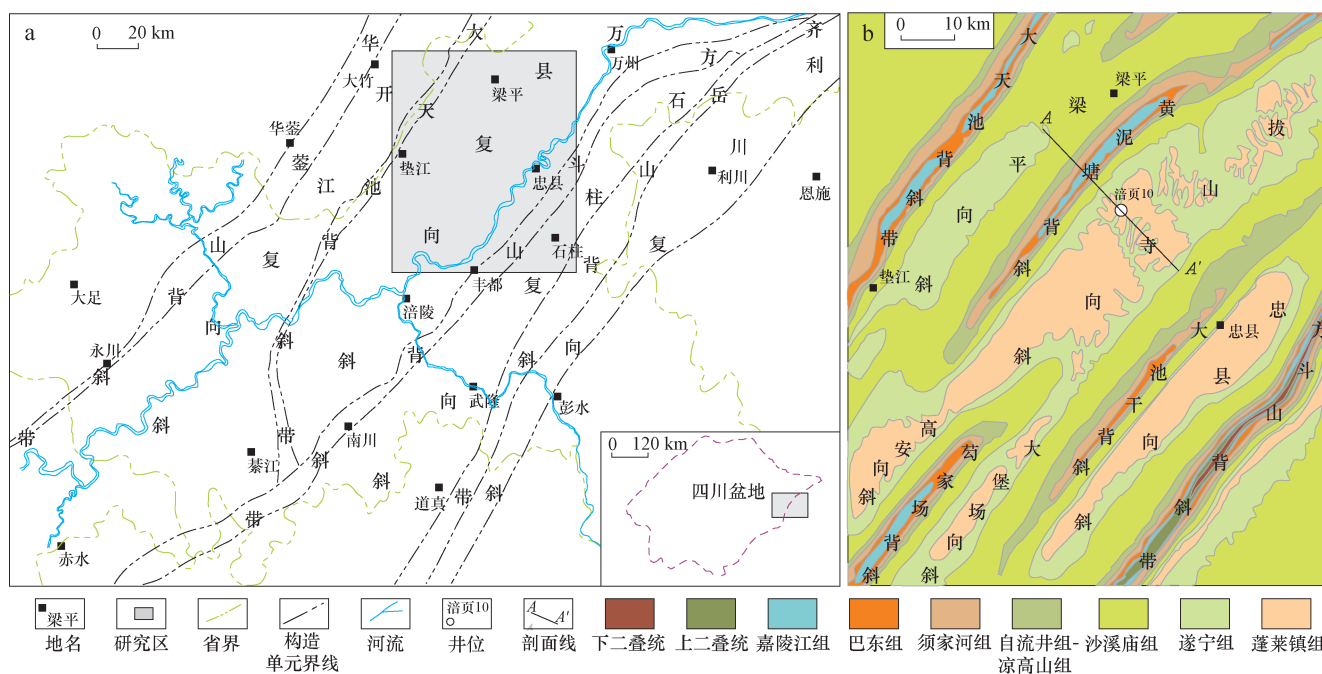


图1 川东复兴地区构造位置(a)和地层出露情况(b)

Fig.1 Structural location (a) and formation exposure (b) of the Fuxing area, eastern Sichuan Basin

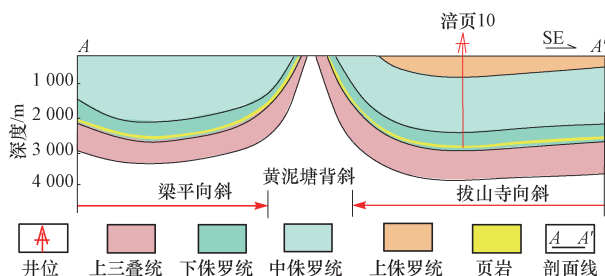


图2 川东复兴地区万县复向斜过涪页10井剖面

Fig.2 Section of the Wanxian synclinorim crossing Well Fuyue10, Fuxing area, eastern Sichuan Basin

观察、测井响应和全岩分析等资料,区内东岳庙段地层可进一步细分为3个亚段7个小层,其中:东一亚段为灰黑色页岩夹薄层的介壳灰岩,厚28 m,包括①,②,③和④4个小层;东二亚段为灰黑色泥质灰岩,厚6.5 m,对应第⑤小层;东三亚段为深灰色和灰黑色的块状泥岩,厚27 m,包括⑥和⑦2个小层(图3)。总体上研究区东岳庙段沉积水体经历了由浅至深再至浅的变化过程,东一亚段自下而上水体环境逐渐变深,介壳灰岩夹层的规模和数量逐渐较少,至④小层水体深度达到最大(图4),随后水体环境迅速变浅,沉积了东二亚段的泥质灰岩和东三亚段的泥岩。平面上东岳庙段半深湖区主要位于复兴地区北部,页岩厚度在25~30 m左右。

2.2 有机地化特征

评价页岩的地化指标主要有3个:有机质类型、有

机质丰度和有机质成熟度。烃源岩的有机质类型是有机质的质量指标,决定了其生油能力^[35]。复兴地区6口井30余块样品的干酪根碳同位素测试分析和显微组分分析资料表明东岳庙段有机质类型以Ⅱ₁型和Ⅱ₂型为主,同时含量少量的Ⅰ和Ⅲ型。32块样品中3.1%的样品碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 小于-28‰,34.4%的样品 $\delta^{13}\text{C}$ 介于-28‰~-26‰,50.0%的样品 $\delta^{13}\text{C}$ 介于-26‰~-24‰,12.5%的样品 $\delta^{13}\text{C}$ 大于-24‰。有机质显微组分整体以镜质体为主,平均含量在62%左右;惰性组次之平均为26%左右;贫氢次生组分含量平均值为12%左右。

有机质碳含量是表征有机质丰度最直接参数,有机碳含量越高,有机质丰度越大,其生烃潜力越大。84块样品的测试结果表明东岳庙段有机碳含量最低为0.16%,最高为4.04%,含量超过2.00%的占比10.60%,1.00%~2.00%的占比53.00%(图5),纵向上,受沉积环境控制,有机碳含量表现出与岩性的明显相关性:东一亚段页岩有机碳含量高,各小层平均有机碳含量均超过1.50%,且自①至④小层随着水体深度的增大有机碳含量增大;东二亚段泥质灰岩有机碳含量明显低于东一亚段页岩,一般为1.00%~1.50%,平均1.23%;东三亚段的泥岩有机碳含量进一步减小,普遍在0.50%左右(图5)。有机质成熟度是描述有机质向油气转化的热力反应程度,达到一定的热演化阶段后有机质才开始降解生烃,且在不同热演化阶

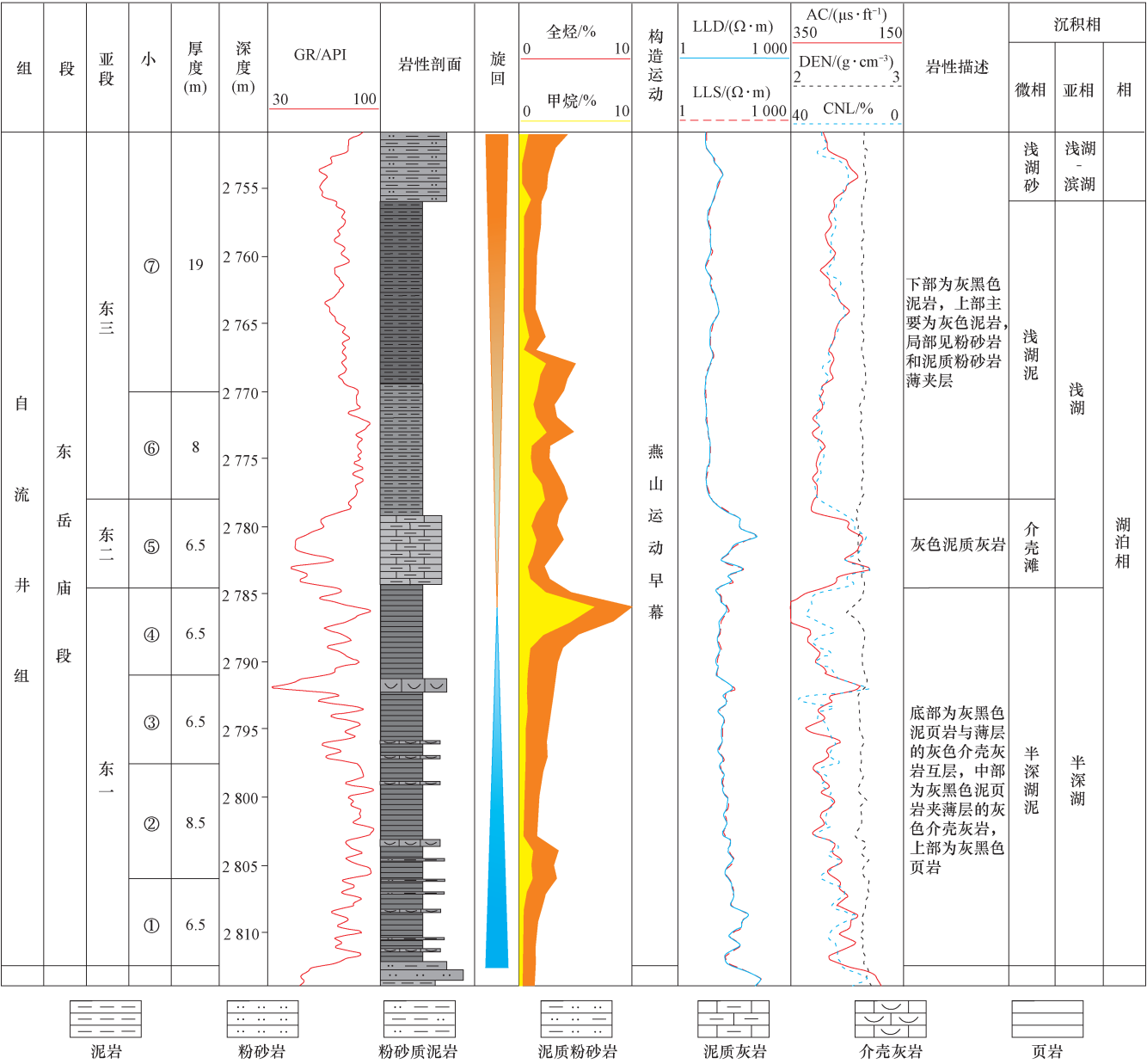


图 3 川东复兴地区自流井组东岳庙段地层综合柱状图

Fig. 3 Stratigraphic column of the Dongyuemiao Member of Ziliujing Formation, Fuxing area, eastern Sichuan Basin

段,其产烃能力和产物有所不同^[36]。东岳庙段泥页岩镜质体反射率介于 1.23%~2.09% 间,整体上有机质演化至高成熟阶段,处于凝析油-湿气的生成阶段。

2.3 岩石矿物学特征

泥页岩的矿物组成不仅对页岩储集物性、油气的赋存状态,还对后期的压裂和排采有着重要影响^[37]。长英质类的脆性矿物含量影响着页岩可改造性和压裂缝网的复杂性^[37-39];粘土矿物含量具有较好的吸附性,是页岩含气性主要控制因素之一^[40-41];长石、碳酸盐类矿物易被有机酸溶蚀形成次生溶蚀孔隙,对储层的储集性能起到关键作用^[40-41]。综合岩心观察描述、

显微镜下观察、全岩及粘土矿物衍射等资料:东一亚段页岩矿物组分以粘土矿物和石英为主,其次为碳酸盐矿物,见少量长石和黄铁矿(表 1);41 个样品的实测粘土矿物含量 46.1%~68.4%,平均为 60.3%,石英含量 16.1%~35.2%,平均为 25.7%,钾长石含量 0~2.2%,平均为 1.0%,斜长石含量 2.1%~4.2%,平均为 3.1%,方解石含量 0~23.8%,平均为 6.5%,白云石含量 0~8.7%,平均为 0.7%,黄铁矿含量 0~5.1%,平均 1.0%。纵向上来看,各小层矿物类型及组分含量差异不大,自下而上从①小层—④小层粘土矿物和长英质矿物含量略有减小,碳酸盐含量和黄铁矿含量略有增加(表 1)。

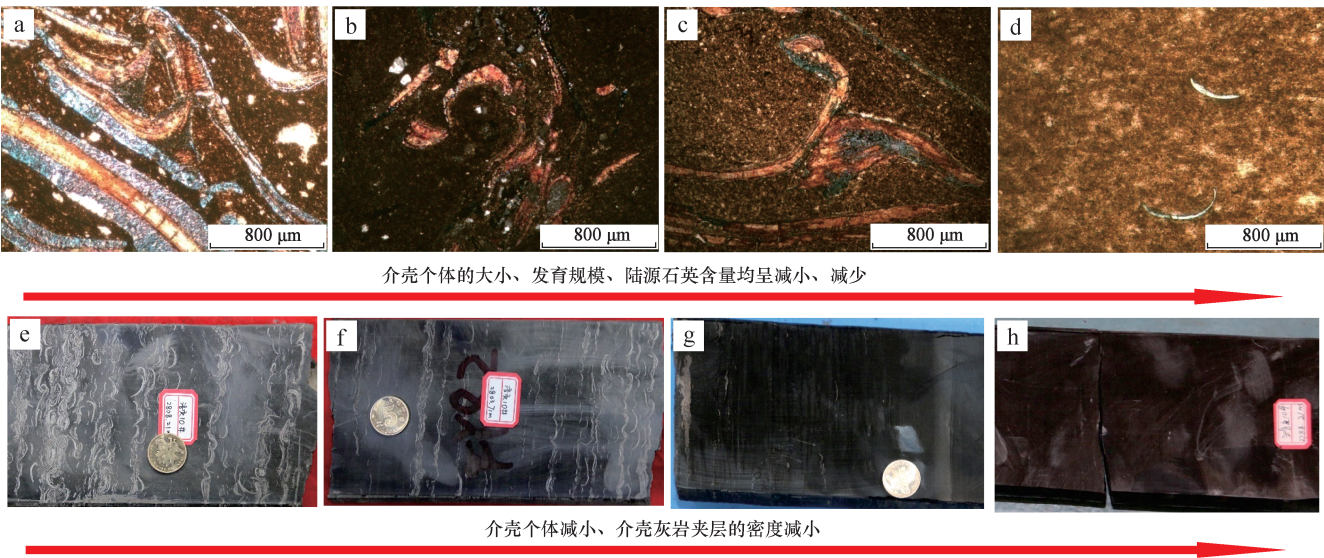


图4 川东复兴地区东一亚段页岩岩心及薄片显微照片

Fig. 4 Photos of cores and thin sections of the first sub-member shale of Dongyuemiao Member, Fuxing area, eastern Sichuan Basin

a. ①小层,埋深2 808.60 m;b. ②小层,埋深2 803.80 m;c. ③小层,埋深2 794.66 m;d. ④小层,埋深2 787.30 m;
e. ①小层,埋深2 808.21 m;f. ②小层,埋深2 803.71 m;g. ③小层,埋深2 795.21 m;h. ④小层,埋深2 788.21 m

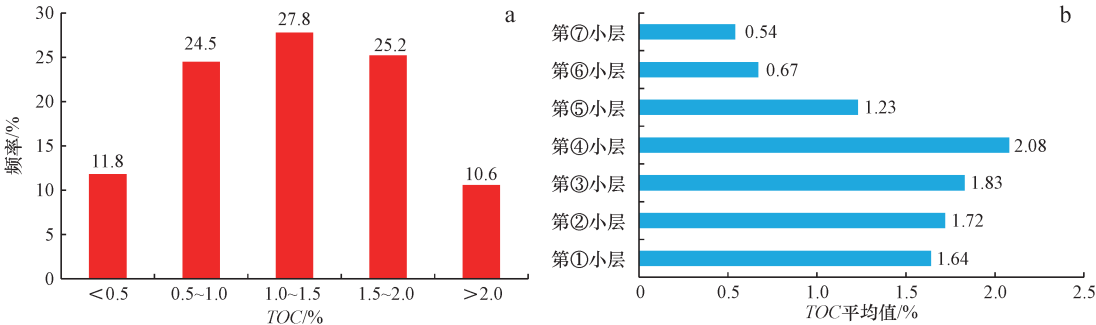


图5 川东复兴地区自流井组东岳庙段有机碳分布(a)和平均值(b)

Fig. 5 Distribution (a) and average content values (b) of organic carbon in the Dongyuemiao Member of Ziliujing Formation, Fuxing area, eastern Sichuan Basin

表1 川东复兴地区东岳庙段矿物成分含量统计

Table 1 Statistics of mineral composition contents of the Dongyuemiao Member, Fuxing area, eastern Sichuan Basin

层位	矿物成分含量/%						
	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	粘土矿物
东三亚段	$\frac{18.0 \sim 34.3}{29.9}$	少见	$\frac{2.0 \sim 4.8}{2.5}$	$\frac{1.2 \sim 27.8}{9.8}$	$\frac{0 \sim 9.9}{2.2}$	无	$\frac{37.9 \sim 67.0}{55.4}$
东二亚段	$\frac{17.8 \sim 26.1}{20.8}$	少见	$\frac{1.3 \sim 2.6}{2.0}$	$\frac{34.0 \sim 59.6}{44.8}$	$\frac{1.9 \sim 5.7}{3.7}$	$\frac{0 \sim 3.3}{1.4}$	$\frac{16.3 \sim 37.3}{26.6}$
东一亚段	$\frac{16.1 \sim 35.2}{25.7}$	$\frac{0 \sim 2.2}{1.0}$	$\frac{2.1 \sim 4.2}{3.1}$	$\frac{0 \sim 23.8}{6.5}$	少见	$\frac{0 \sim 5.1}{1.0}$	$\frac{46.1 \sim 68.4}{60.3}$

注:数据格式为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$ 。

东二亚段岩性以灰黑色泥质灰岩为主,矿物组分以碳酸盐为主,其次为粘土矿物和石英,见少量长石和黄铁矿(表1)。8个样品的实测粘土矿物含量16.3%~37.3%,平均26.6%,石英含量17.8%~

26.1%,平均为20.8%,长石类型主要为斜长石,含量在1.3%~2.6%,平均2.0%,方解石含量34.0%~59.6%,平均为44.8%,白云石含量为1.9%~5.7%,平均3.7%,黄铁矿含量0~3.3%,平均1.4%。

东三亚段岩性为深灰色和灰黑色块状泥岩,矿物组分以粘土矿物和石英为主,其次为碳酸盐岩,长石含量较低,不含黄铁矿(表1),26个样品的实测粘土矿物含量39.5%~67.0%,平均55.4%,石英含量18.0%~34.3%,平均29.9%,长石主要为斜长石,含量2.0%~4.8%,平均为2.5%,方解石含量1.2%~27.8%,平均9.8%,白云石含量0~9.9%,平均2.2%。

2.4 储集特征

储集物性和孔隙类型对页岩油气的赋存和渗流有着重要影响^[42]。50余个样品饱和流体法测定的东岳庙段孔隙度最小值1.64%,最大值7.67%,各小层平均值3.84%~6.98%,渗透率最小值 $0.044 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最大值 $0.376 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,各小层平均值 $(0.083 \sim 0.219) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图6),整体表现出较好的储集性能。30余块样品的氩离子扫描电镜观察发现:东岳庙段泥页岩孔隙类型多样,无机孔、有机孔和裂缝均见发育。有机质孔主要见于无定形固体沥青内部,孔径在数个纳米至数百纳米(图7a—c)。无机孔主要包括粘土矿物间线状孔隙、黄铁矿晶间孔、方解石溶蚀孔和少量长石溶蚀孔,其中,尤以粘土矿物间线状孔隙和方解石溶蚀孔最为典型。粘土矿物层间线状孔隙主要有两种存在形式,一是见于层状、丝缕状粘土矿物与有机质集合体的边缘(图7e,i),二是以粘土矿物层间孔、缝的形式出现(图7h,i),孔径在数个纳米至数个微米之间;方解石溶蚀孔在东一亚段页岩中普遍可见,③和④小层最为发育,主要是因方解石矿物被有机酸部分或全部溶蚀而形成,电镜下菱形方解石的形态清晰可见,孔径一般数百纳米至数微米,大者十几微米(图7d—f)。泥页岩中裂缝对页岩油气富集和运移起着至关重要的作用,复兴地区构造相对稳定,东岳庙段泥页岩中宏观裂缝不发育,仅在镜下见到少量微米级张性

裂缝与纳米级的有机质收缩缝(图7d,e,h)。

从总体储集特征来看,东三亚段泥岩储集物性要略优于东一亚段页岩,但从储集空间类型来看,东三亚段泥岩有机质丰度低,有机孔欠发育,主要是以粘土矿物层间孔和缝为主,而东一亚段页岩中有机质孔普遍发育,且微米级的方解石溶蚀孔(有机质含量高和有机酸溶蚀作用强)普遍可见,更有利于页岩气的赋存和富集。

2.5 含气性特征

含气性评价是评估泥页岩是否具有商业开采价值的最直接参数,包括定性和定量两个方面^[34]。定性评价主要基于钻井过程中使用的钻井液性能、油气显示、井涌和溢流等事件,以及钻井取心时岩心表面气泡溢出情况和浸水实验的情况来定性判断含气性好坏;定量评价主要是针对岩心开展现场解析气的测定和损失气的恢复进而计算含气量^[43]。涪页10HF井水平段钻进时使用的钻井液密度为 $(1.80 \sim 1.94) \text{g}/\text{cm}^3$,1531 m水平段全烃值平均9.26%,甲烷平均6.41%,水平段钻进过程中,多次发生气侵,期间节流循环35次,且均点火成功,火焰高度1~10 m不等,展示出东一亚段页岩具有较好的含气性(图8)。然而借鉴海相页岩解析气的测定和损失气的恢复方法实测的东岳庙段含气量较低,与气测显示涪页10HF测试产量等数据并不匹配,实测含气量最小为 $0.27 \text{m}^3/\text{t}$,最大仅 $1.61 \text{m}^3/\text{t}$,初步分析认为这可能与东岳庙段陆相页岩大孔和介孔占比多,以及渗透性较好有关,岩心出筒过程中损失气量要高于海相页岩所致,适用于陆相页岩含气性定量测试方法可能还需要进一步开展探索。

2.6 流体性质与气藏特征

流体与油气藏的形成和演化密切相关,流体的物理化学性质和动力学特征决定了油气藏性质,是油气藏开发方案和开采策略编制的重要依据^[44]。中国海

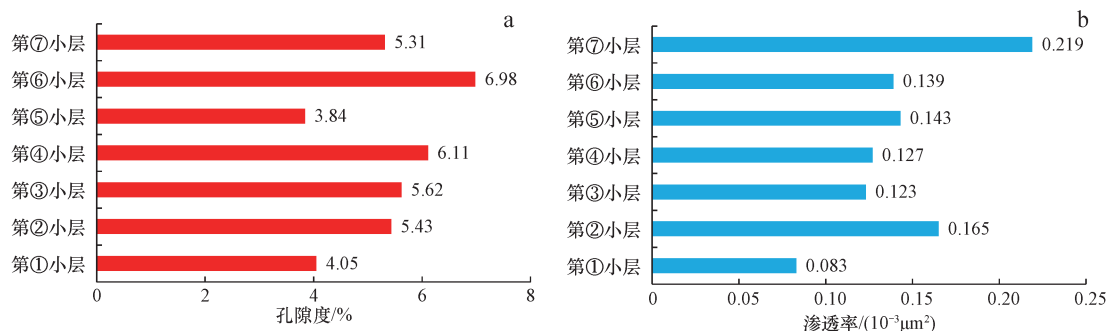


图6 川东复兴地区自流井组东岳庙段孔隙度(a)和渗透率(b)特征

Fig.6 Characteristics of porosity (a) and permeability (b) of the Dongyuemiaomiao Member in Ziliujing Formation, Fuxing area, eastern Sichuan Basin

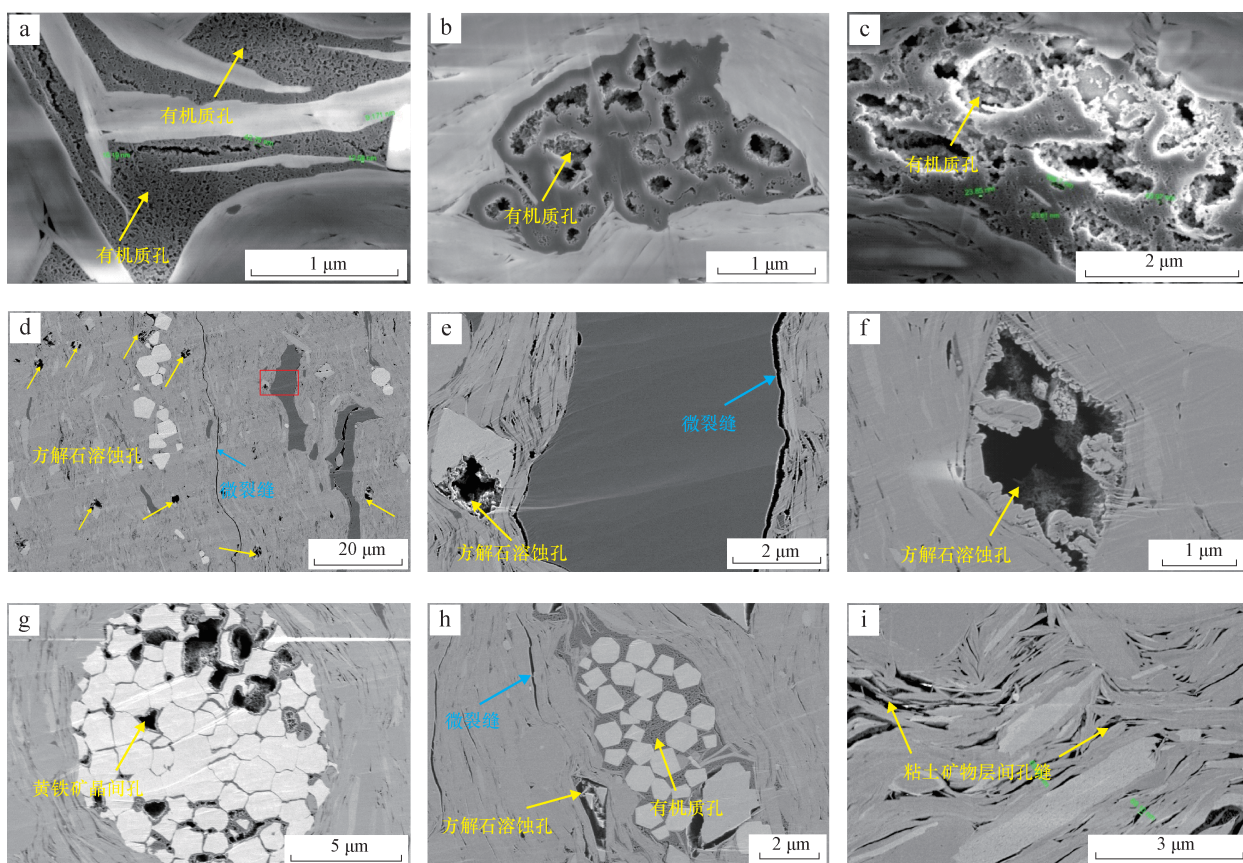


图7 川东复兴地区东一亚段储集空间类型

Fig. 7 Reservoir space types of the first sub-member shale of Dongyuemiao Member, Fuxing area, eastern Sichuan Basin

a. 有机质孔,孔径一般小于10 nm,局部孔连通性较好,③小层,TOC为1.07%,埋深2 797.46 m;b. 有机质孔,孔径大小不一,④小层,TOC为1.68%,埋深2 789.14 m;c. 有机质孔,③小层,TOC为1.23%,埋深2 795.81 m;d. 方解石溶蚀孔和微裂缝,④小层,TOC为4.04%,埋深2 786.36 m;e. 图7d局部放大,菱形方解石局部被溶蚀,有机质孔隙不发育,沿有机质边缘发育微裂缝,④小层,TOC为4.04%,埋深2 786.36 m;f. 菱形方解石几乎被溶蚀成铸模孔,④小层,TOC为1.41%,埋深2 788.31 m;g. 黄铁矿晶体脱落形成黄铁矿晶间孔,④小层,TOC为2.53%,埋深2 785.67 m;h. 有机质孔、方解石溶蚀孔和微裂缝,④小层,TOC为2.46%,埋深2 787.33 m;i. 粘土矿物层间孔,③小层,TOC为1.24%,埋深2 796.06 m

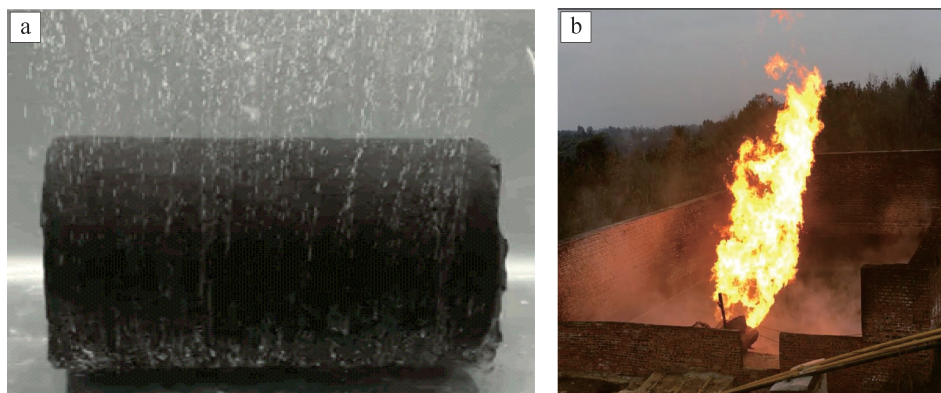


图8 川东复兴地区涪页10HF井浸水实验(a)及放喷点火照片(b)

Fig. 8 Photos showing water immersion test (a) and blowout ignition (b) of Well Fuyel10HF, Fuxing area, eastern Sichuan Basin

相页岩产出层系古老,热演化程度高,均已达到过成熟演化阶段,表现为干气气藏的特征^[3,7,44]。而四川盆地侏罗系陆相页岩热演化程度低,生产过程中大多油气同出,相态复杂,给陆相页岩油气的开采带来较大挑

战^[21,24-25]。复兴地区东岳庙段前期仅在兴隆3侧1井进行了中途试气,相关资料较少,流体性质和气藏特征等不甚明朗。此次在涪页10HF井东岳庙段测试过程中进行了系统的取样分析,对流体性质和气藏类型

等进行了初步研究。涪页 10HF 井井下 6 个保压取样样品的气体组分分析结果表明,东岳庙段天然气组分中 CH_4 含量 81.9%, C_{4+} 含量小于 3.0%, 不含 H_2S ; 20 °C 时,原油密度 0.7752 g/cm^3 , 50.6 °C 时动力粘度为 $1.68 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 原油石蜡指数 4.59, 庚烷 35.26%, 原油全烃色谱分析表明,正构烷烃分布范围 $n\text{C}_2-n\text{C}_{36}$, 呈单峰型分布,无奇偶优势,主峰碳为 $n\text{C}_{11}$, OEP 值为 1, $\sum n\text{C}_{21-}/\sum n\text{C}_{22+}$ 值为 8.12, $\sum n\text{C}_{8-}/\sum n\text{C}_{(2-36)}$ 值为 0.25, 明显具有凝析油的特征。井底取得流体的露点压力为 46.07 MPa, $p-t$ 相图符合常规凝析气藏特征(图 9), 这也与放喷求产时的气油比($1\,243 \sim 3\,142 \text{ m}^3/\text{m}^3$), 以及依据流体特征所判别的气藏类型一致。涪页 10HF 井压裂改造后求得的地层压力系数在 1.93 左右, 推测其原始地层压力系数在 1.70 左右, 为异常高压系统, 综合分析认为复兴地区东岳庙段为中深层、高压及不含硫化氢的页岩凝析气藏。

3 勘探开发前景

3.1 复兴地区东岳庙段具有形成大型油气藏的物质基础

涪页 10 钻揭东岳庙段含气泥页岩厚度为 61.5 m, 其中东一亚段优质页岩为 28.0 m, 平面上复兴地区东一亚段页岩厚度稳定, 一般为 25.0 ~ 30.0 m。有机地化研究表明, 东岳庙段页岩有机质类型主要为 II_1 型和 II_2 型, 以生油为主, 并具有一定的生气潜力^[45], 岩石热解分析测定的生烃潜量均在 2 mg/g 以上, 实测有机质含量基本在 1% 以上, 最大可达 4.04%, 显示出较大的生烃潜力。页岩中无机孔和有机孔均见发育, 且

相对于海相页岩, 具有以方解石溶蚀孔和粘土矿物层为典型特征的无机孔占比相对较高、介孔和大孔占比比较高的特征, 实测孔隙度平均值超过 4%, 渗透率平均值超过 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 具备较好的储集性和渗透性。多口钻井揭示复兴地区东岳庙段整体油气显示活跃, 涪页 10 浸水实验测试岩心表面气泡持续密集溢出, 水平井钻进多次节流循环点火成功, 均指示东岳庙段具有较好的含气性。初步分析表明东岳庙段陆相页岩有机碳含量低, 微孔占比少, 储层中游离气的占比接近 80%, 且主要储集在无机孔中。

综合评价认为, 东岳庙段泥页岩原生品质好, 含气性好, 其中东一亚段为最有利的勘探层段, ④小层有机质丰度最高、物性和含气性最好为最优甜点层。目前初步估算复兴及周缘地区东岳庙段有利勘探开发区面积近 $3\,000 \text{ km}^2$, 资源量 $1.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 同时该区侏罗系大安寨段和凉高山组沉积环境与东岳庙段类似, 发育一定厚度的暗色泥页岩, 具备多层系立体勘探的潜力和形成大型陆相页岩油气藏的物质基础。

3.2 复兴地区具备开展大规模页岩气开发的有利条件

构造方面, 复兴地区主体位于川东隔挡式褶皱带, 呈北东向展布, 包括梁平向斜、拔山寺向斜、大堡场向斜、高安向斜、忠县向斜、黄泥塘背斜、苟家场背斜和大池干背斜 8 个次级构造单元, 总体呈现“背斜窄陡、向斜宽缓”的特征^[26-27], 背斜核部侏罗系出露地表(图 1b), 向斜核部地层平缓, 倾角在 $0^\circ \sim 5^\circ$, 区内整体构造稳定, 仅在拔山寺向斜北部发育一系列北西向小断层, 断距一般小于 50 m, 向上断至侏罗系凉高山组顶部, 向下消失于三叠系雷口坡组。

地表条件方面, 复兴地区为低山、丘陵地貌, 地面海拔 300 ~ 600 m, 区内交通便利、水系发达。埋深方面, 向斜主体区东岳庙段埋深介于 2 200 ~ 2 950 m。总体上, 复兴地区构造稳定保存条件好、地表和埋深条件优越, 具有开展大规模页岩油气开发的有利条件。

4 面临的挑战 and 对策

4.1 东岳庙段粘土矿物含量高, 可压性较差

基于 41 块样品的全岩 X 衍射资料, 东一亚段页岩粘土矿物含量平均在 60% 左右, 远远高于五峰组 - 龙马溪组的 30%, 且从 28 块样品的粘土矿物组分来看, 东一亚段粘土矿物中以敏感性的伊蒙间层和伊利石为主, 两者占粘土矿物的相对含量超过 60%, 占绝对含量的 36% 左右(图 10)。力学实验研究表明东岳庙段

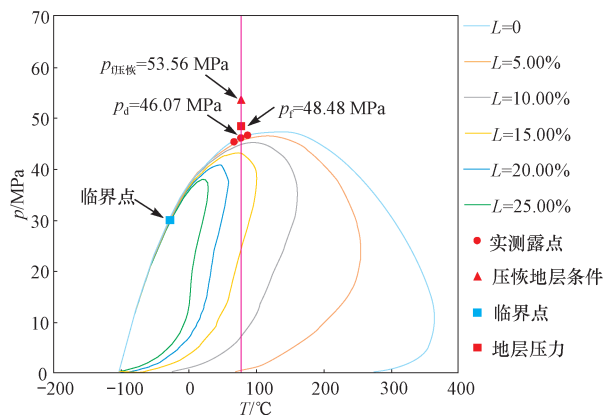


图 9 川东复兴地区东岳庙段页岩凝析气藏 $p-t$ 相

Fig. 9 $p-t$ phase diagram of gas condensate reservoir in the Dongyuemiao Member shale, Fuxing area, eastern Sichuan Basin

$p_{\text{压恢}}$: 压后地层压力; p_d : 露点压力; p_t : 原始地层压力; L : 液相体积等值线

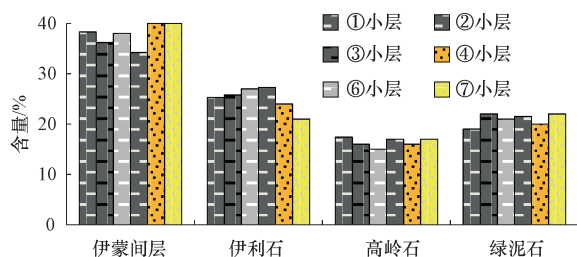


图10 川东复兴地区东岳庙段粘土矿物组成

Fig. 10 Clay mineral composition of Dongyuemiao Member, Fuxing area, eastern Sichuan Basin

陆相页岩岩石破坏强度较弱,破坏形式单一,往往呈单一斜面剪切破坏,未见层理面的开启,而五峰龙马溪组海相页岩多呈现一条主剪切裂缝+若干层理缝的破裂模式,裂缝形态相对较复杂^[46-47]。总的来看,相对于海相页岩,东岳庙段陆相页岩粘土矿物含量高,塑性强,可压性较差,难以形成复杂缝网。针对以上特征,主要采用以“扩体积、增密度、强支撑、抑膨胀”手段,以“缝控储量最大化”为核心的“高密布缝体积改造”的压裂工艺,对涪页10HF井1531 m水平段进行压裂改造(图11),压后评估认为:涪页10HF井压裂施工顺利,各项施工参数符合预期,改造强度高;微地震检测表明水平段改造缝长平均在170 m左右,改造缝宽在50 m左右,改造缝高在60 m左右;从改造效果和最终的试气结果来看,基本到达了预期目标,实现了对东岳庙段陆相页岩的有效改造。

4.2 页岩凝析气藏合理的开发方式需要开展探索

凝析气藏是指在原始高温高压条件下的烃类气体会因压力降低而凝结出液态石油的一种特殊的油气藏类型^[48-49]。中国此类油气藏主要见于雅克拉、大涝坝、白庙、雅哈和春晓等几个常规砂岩储层中^[48-50],未见有页岩层系中的凝析气藏的报道,国外页岩层系中的凝析气藏也仅在伊格福特、都沃内和马塞勒斯等

少数几个层系中有所发现^[51-53]。目前无论是常规储层中的凝析气藏还是页岩中的凝析气藏,采用的开发方式主要有衰竭式开发和保压式开发两种^[48-49,53],衰竭式开发要求原始地层压力要远高于露点压力且凝析油的含量较低,而当凝析油含量较高时一般采取保压的方式开发,其开发早期的投入相对较大^[48-49,53]。从涪页10HF井保压取样分析结果来看,复兴地区东岳庙段原始地层压力和露点压力的差值仅为2.41 MPa,试气过程中压力下降较快,测得凝析油的含量高达538.2 g/m³,可能并不适合采用衰竭式开采。但考虑到涪页10HF井长水平段水平井规模压裂后放喷初期油、气和水三相同出,产量、压力与含水率变化大,受压力和流态等的影响,关于地层流体相态认识的可靠性还有待进一步评估,且目前复兴地区东岳庙段页岩凝析气藏还未正式投入试采,油、气产出规律并不清楚,合理的开发方式和生产制度等还有待持续探索。

5 结论

1) 复兴地区侏罗系自流井组东岳庙段发育滨浅湖—半深湖相暗色泥页岩,其中东一亚段发育25~30 m厚的灰黑色页岩夹薄层的介壳灰岩,基于有机地球化学、岩石矿物学、储集特征和含气性特征分析表明,东一亚段页岩具有有机质类型好、有机质剪度高、储集物性好、介孔和大孔发育、油气显示活跃、粘土矿物含量高和可压性差等特征。东岳庙段热演化程度在1.23%~2.09%,整体处于凝析油—湿气的生成演化阶段,试气过程中油气同出,基于埋深、压力和井下样品的流体性质分析、气油比等资料判断东岳庙段为中深层、高压及不含硫化氢的页岩凝析气藏。

2) 复兴地区东岳庙段陆相页岩原生品质好、资源规模大,具有形成大型油气藏的物质基础;区内为低山和丘陵地貌,东岳庙段埋深适中,地层平缓,断裂不发

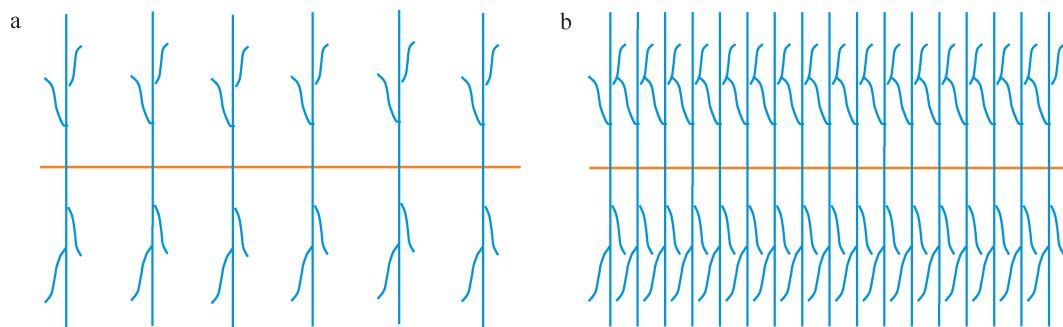


图11 川东复兴地区东岳庙段陆相页岩压裂改造思路

Fig. 11 Continental shale fracturing in the Dongyuemiao Member, Fuxing area, eastern Sichuan Basin

a. 陆相页岩简单缝形态; b. 高密布缝体积改造

育,具备开展大规模页岩气开发的有利条件;东岳庙段粘土矿物含量高,可压性较差,“高密布缝体积改造”的压裂工艺技术已基本实现对东岳庙段陆相页岩的有效改造;东岳庙段为高压系数页岩凝析气藏,油气产出规律不清,合理高效的开发方式需要持续开展探索。

3) 基于对复兴地区东岳庙段页岩地质特征等的研究和分析,建议加强区内陆相页岩气赋存特征和富集主控因素研究,注重页岩凝析气藏原始流体特征与气藏动态特征分析,优化钻井和压裂试气工程工艺实现提速降本增效,加快推进陆相页岩凝析气藏的试采进度探索合理的排采制度。

参 考 文 献

- [1] 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.
Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Wei Zhihong, et al. Discovery and exploration of Fuling shale gas field[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3): 24-37.
- [2] 王志刚. 涪陵页岩气勘探开发重大突破与启示[J]. 石油与天然气地质,2015,36(1):1-6.
Wang Zhigang. Breakthrough of Fuling shale gas exploration and development and its inspiration[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1): 1-6.
- [3] 邹才能,董大忠,王玉满,等. 中国页岩气特征、挑战及前景(二)[J]. 石油勘探与开发,2016,43(2):166-178.
Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Yuman, et al. Shale gas in China: Characteristics, changes and prospects(II)[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 166-178.
- [4] Luo Q Y, Zhong N N, Dai N, et al. Graptolite-derived organic matter in the Wufeng - Longmaxi Formations(Upper Ordovician-Lower Silurian) of southeastern Chongqing, China: Implications for gas shale evaluation[J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 153: 87-98.
- [5] 马新华,谢军,雍锐. 四川盆地南部龙马溪组页岩气地质特征及高产控制因素[J]. 石油勘探与开发,2020,47(5):1-15.
Ma Xinhua, Xie Jun, Yong Rui. Geological characteristics and high production control factors of shale gas in Silurian Longmaxi Formation, southern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 1-15.
- [6] 金之钧,胡宗全,高波,等. 川东南地区五峰组-龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J]. 地学前缘,2016,23(1):1-10.
Jin Zhijun, Hu Zongquan, Gao Bo, et al. Controlling factors on the enrichment and high productivity of shale gas in the Wufeng-Longmaxi Formations, southeastern Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 1-10.
- [7] 庞河清,熊亮,魏力民,等. 川南深层页岩气富集高产主要地质因素分析——以威荣页岩气田为例[J]. 天然气工业,2019,39(S1):78-84.
Pang Heqing, Xiong Liang, Wei Limin, et al. Analysis of the main geological factors for the enrichment and high yield of deep shale gas in South Sichuan: A case study of Weirong shale gas field[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(S1): 78-84.
- [8] 聂海宽,张柏桥,刘光祥,等. 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩气高产地质原因及启示——以涪陵页岩气田 JY6-2HF 为例[J]. 石油与天然气地质,2020,41(1):1-11.
Nie Haikuan, Zhang Boqiao, Liu Guangxiang, et al. Geological factors contribution to high shale gas yield in the Wufeng-Longmaxi Fms of Sichuan Basin: A case study of Well JY6-2HF in Fuling shale gas field[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 1-11.
- [9] 谢军. 长宁-威远国家级页岩气示范区建设实践与成效[J]. 天然气工业,2018,38(2):1-7.
Xie Jun. Practices and achievements of the Changning-Weiyuan shale gas national demonstration project construction[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(2): 1-7.
- [10] 孙焕泉,周德华,蔡勋育,等. 中国石化页岩气发展现状与趋势[J]. 中国石油勘探,2020,25(2):14-26.
Sun Huanquan, Zhou Dehua, Cai Xunyu, et al. Progress and prospect of shale gas development of Sinopec[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 14-26.
- [11] 金之钧,白振瑞,高波,等. 中国迎来页岩油气革命了吗[J]. 石油与天然气地质,2019,40(3):451-458.
Jin Zhijun, Bai Zhengrui, Gao Bo, et al. Has China ushered in the shale oil and gas revolution[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 451-458.
- [12] 赵文智,贾爱林,位云生,等. 中国页岩气勘探开发进展及发展展望[J]. 中国石油勘探,2020,25(1):31-44.
Zhao Wenzhi, Jia Ailin, Wei Yunsheng, et al. Progress in shale gas exploration in China and prospects for future development[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 31-44.
- [13] 潘继平. 非常规天然气资源开发政策困境及对策建议[J]. 石油科技论坛,2019,38(1):1-7.
Pan Jiping. Policy dilemma of unconventional natural gas resources development and suggestions on countermeasures[J]. Oil Forum, 2019, 38(1): 1-7.
- [14] 康玉柱. 中国非常规油气勘探重大进展和资源潜力[J]. 石油科技论坛,2018,37(4):1-7.
Kang Yuzhu. Significant exploration progress and resource potential of unconventional oil and gas in China[J]. Oil Forum, 2018, 37(4): 1-7.
- [15] 焦方正. 非常规油气之“非常规”再认识[J]. 石油勘探与开发,2019,46(5):803-810.
Jiao Fangzheng. Re-recognition of “unconventional” in unconventional oil and gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 803-810.
- [16] 马永生,蔡勋育,赵培荣. 中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J]. 石油勘探与开发,2018,45(4):561-574.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. China's shale gas exploration and development: Understanding and practice[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 561-574.
- [17] 聂海宽,何治亮,刘光祥,等. 中国页岩气勘探开发现状与优选方向[J]. 中国矿业大学学报,2020,49(1):13-35.
Nie Haikuan, He Zhiliang, Liu Guangxiang, et al. Status and direction

- of shale gas exploration and development in China[J]. Journal of China University of mining & technology, 2020, 49(1): 13–35.
- [18] 郭旭升, 胡东风, 李宇平, 等. 海相和湖相页岩气富集机理分析与思考: 以四川盆地龙马溪组 and 自流井组大安寨段为例[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 18–28.
- Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Li Yuping, et al. Analysis and thoughts on accumulation mechanisms of marine and lacustrine shale gas: A case study in shales of Longmaxi Formation and Da'anzhai Section of Ziliujing Formation in Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 18–28.
- [19] 刘光祥, 金之钧, 邓模, 等. 川东地区上二叠统龙潭组页岩气勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 481–487.
- Liu Guangxiang, Jin Zhijun, Deng Mo, et al. Exploration potential for shale gas in the Upper Permian Longtan Formation in eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 481–487.
- [20] 高凤琳, 宋岩, 梁志凯, 等. 陆相页岩有机质孔隙发育特征及成因——以松辽盆地长岭断陷沙河子组页岩为例[J]. 石油学报, 2019, 40(9): 1030–1044.
- Gao Fenglin, Song Yan, Liang Zhikai, et al. Development characteristics of organic pore in the continental shale and its genetic mechanism: A case study of Shahezi Formation shale in the Changling fault depression of Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(9): 1030–1044.
- [21] 朱彤, 包书景, 王烽. 四川盆地陆相页岩气形成条件及勘探开发前景[J]. 天然气工业, 2012, 32(9): 16–21.
- Zhu Tong, Bao Shujing, Wang Feng. Formation conditions and exploration and development prospects of continental shale gas in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(9): 16–21.
- [22] 邹才能, 杨智, 王红岩, 等. “进源找油”: 论四川盆地非常规陆相大型页岩油气田[J]. 地质学报, 2019, 93(7): 1551–1562.
- Zou Caineng, Yang Zhi, Wang Hongyan, et al. “Exploring petroleum inside source kitchen”: Jurassic unconventional continental giant shale oil & gas field in Sichuan basin, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(7): 1551–1562.
- [23] 林腊梅, 张金川, 唐玄, 等. 中国陆相页岩气的形成条件[J]. 天然气工业, 2013, 33(1): 35–40.
- Lin Lamei, Zhang Jinchuan, Tang Xuan, et al. Conditions of continental shale gas accumulation in China[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(1): 35–40.
- [24] 何发岐, 朱彤. 陆相页岩气突破和建产的有利目标——以四川盆地地下侏罗统为例[J]. 石油实验地质, 2012, 34(3): 246–251.
- He Faqi, Zhu Tong. Favorable targets of breakthrough and built-up of shale gas in continental facies in Lower Jurassic, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(3): 246–251.
- [25] 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.
- [26] 王登, 余江浩, 赵雪松, 等. 四川盆地石柱地区自流井组页岩气成藏条件与勘探前景[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(1): 27–35.
- Wang Deng, Yu Jianghao, Zhao Xuesong, et al. Accumulation conditions and exploration potential of shale gas of Ziliujing Formation in Shizhu area, Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(1): 27–35.
- [27] 梁榜, 何生, 陈学辉, 等. 鄂西渝东地区东岳庙段页岩气勘探潜力研究[J]. 断块油气田, 2015, 22(1): 36–41.
- Liang Bang, He Sheng, Chen Xuehui, et al. Exploration potential of Dongyemiao Member shale gas in western Hubei-eastern Chongqing area[J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2015, 22(1): 36–41.
- [28] 刘忠宝, 刘光祥, 胡宗全, 等. 陆相页岩层系岩相类型、组合特征及其油气勘探意义——以四川盆地中下侏罗统为例[J]. 天然气工业, 2019, 39(12): 10–21.
- Liu Zhongbao, Liu Guangxiang, Hu Zongquan, et al. Lithofacies types and assemblage features of continental shale strata and their significance for shale gas exploration: A case study of the Middle and Lower Jurassic Strata in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(12): 10–21.
- [29] 胡宗全, 王濡岳, 刘忠宝, 等. 四川盆地地下侏罗统陆相页岩气源储特征及耦合评价[J]. 地学前缘, 2020, 27(3): 1–13.
- Hu Zongquan, Wang Yuyue, Liu Zhongbao, et al. Source-reservoir characteristics and coupling evaluation of lacustrine shale gas in the Lower Jurassic, Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(3): 1–13.
- [30] 聂海宽, 马鑫, 余川, 等. 川东下侏罗统自流井组页岩储层特征及勘探潜力评价[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(3): 438–447.
- Nie Haikuan, Ma Xin, Yu Chuan, et al. Shale gas reservoir characteristics and its exploration potential-analysis on the Lower Jurassic shale in the eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3): 438–447.
- [31] 杨跃明, 黄东. 四川盆地侏罗系湖相页岩油气地质特征及勘探开发新认识[J]. 天然气工业, 2019, 39(6): 22–33.
- Yang Yueming, Huang Dong. Geological characteristics and new understandings of exploration and development of Jurassic lacustrine shale oil and gas in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(6): 22–33.
- [32] 李延钧, 冯媛媛, 刘欢, 等. 四川盆地湖相页岩气地质特征与资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 423–428.
- Li Yanjun, Feng Yuanyuan, Liu Huan, et al. Geological characteristics and resource potential of lacustrine shale gas in the Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 423–428.
- [33] 周德华, 焦方正, 郭旭升, 等. 川东南涪陵地区下侏罗统页岩油气地质特征[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 450–454.
- Zhou Dehua, Jiao Fangzheng, Guo Xusheng, et al. Geological features of the Lower Jurassic shale gas play in Fuling area, the southeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 450–454.
- [34] 肖继林, 魏祥峰, 李海军. 涪陵海相页岩气和元坝-兴隆场湖相页岩气富集条件差异性分析[J]. 天然气勘探与开发, 2018, 41(4): 8–17.
- Xiao Jilin, Wei Xiangfeng, Li Haijun. Difference of accumulation conditions between Fuling marine shale gas and Yuanba-Xinglongchang lacustrine shale gas[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2018, 41(4): 8–17.
- [35] 卢双舫, 薛海涛, 王民, 等. 页岩油评价中的若干关键问题及研究

- 趋势[J]. 石油学报, 2016, 37(10): 1309–1322.
- Lu Shuangfang, Xue Haitao, Wang Min, et al. Several key issues and research trends in evaluation of shale oil [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(10): 1309–1322.
- [36] 黄籍中. 从有机质成熟度看四川盆地地下古生界油气勘探[J]. 天然气工业, 2007, 27(8): 1–4.
- Huang Jizhong. Oil and gas exploration of Lower Paleozoic in Sichuan Basin from organic matter maturity [J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(8): 1–4.
- [37] 贾爱林. 中国天然气开发技术进展及展望[J]. 天然气工业, 2018, 38(4): 77–86.
- Jia Ailin. Progress and prospects of natural gas development technologies in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(4): 77–86.
- [38] 曾义金. 页岩气开发的地质与工程一体化技术[J]. 石油勘探技术, 2014, 42(1): 1–6.
- Zeng Yijin. Integration technology of geology & engineering for shale gas development [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(1): 1–6.
- [39] 刘乃震, 王国勇, 熊小林. 地质工程一体化技术在威远页岩气高效开发中的实践与展望[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(2): 59–67.
- Liu Naizhen, Wang Guoyong, Xiong Xiaolin. Practice and prospect of geology-engineering integration technology in the efficient development of shale gas in Weiyuan block [J]. *China Petroleum Exploration*, 2018, 23(2): 59–67.
- [40] 聂海宽, 何治亮, 刘光祥, 等. 四川盆地五峰组–龙马溪组页岩气优质储层成因机制[J]. 天然气工业, 2020, 40(6): 31–41.
- Nie Haikuan, He Zhiliang, Liu Guangxiang, et al. Genetic mechanism of high-quality shale gas reservoirs in the Wufeng-Longmaxi Fms in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(6): 31–41.
- [41] 金之钧, 胡宗全, 高波, 等. 川东南地区五峰组–龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 1–10.
- Jin Zhijun, Hu Zongquan, Gao Bo, et al. Controlling factors on the enrichment and high productivity of shale gas in the Wufeng-Longmaxi Formations, southeastern Sichuan Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1): 1–10.
- [42] 高之业, 范毓鹏, 胡钦红, 等. 川南地区龙马溪组页岩有机质孔隙差异化发育特征及其对储集空间的影响[J]. 石油科学通报, 2020, 5(1): 1–16.
- Gao Zhiye, Fan Yupeng, Hu Qinrong, et al. Differential development characteristics of organic matter pores and their impact on reservoir space of Longmaxi Formation shale from the south Sichuan Basin [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2020, 5(1): 1–16.
- [43] 刘莉, 包汉勇, 李凯, 等. 页岩储层含气性评价及影响因素分析——以涪陵页岩气田为例[J]. 石油实验地质, 2018, 40(1): 58–63.
- Liu Li, Bao Hanyong, Li Kai, et al. Evaluation of gas content in shale reservoirs and analysis of influencing factors in Fuling shale gas field [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(1): 58–63.
- [44] 刘光祥, 沃玉进, 潘文蕾, 等. 中上扬子区海相层系流体特征与油气保存条件[J]. 石油实验地质, 2011, 33(1): 17–21.
- Liu Guangxiang, Wo Yujin, Pan Wenlei, et al. Fluid characteristics and hydrocarbon preservation conditions in marine facies strata of middle-upper Yangtze region [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2011, 33(1): 17–21.
- [45] 曾艳涛, 文志刚, 杨立国. 海相烃源岩有机质类型的“双重属性”初探——以安徽南陵–无为地区浅水台地相碳酸盐岩为例[J]. 海相油气地质, 2009, 14(3): 73–78.
- Zeng Yantao, Wen Zhigang, Yang Liguang. Discussion on a case the dual property of organic matter type in marine source rock; Of shallowing platform carbonate rock in Nanling-Wuwei area, Anhui [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2009 14(3): 73–78.
- [46] 袁俊亮, 邓金根, 张定宇, 等. 页岩气储层可压裂性评价技术[J]. 石油学报, 2013, 34(3): 523–527.
- Yuan Junliang, Deng Jinggen, Zhang Dingyu, et al. Fractability evaluation of shale-gas reservoirs [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(3): 523–527.
- [47] 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.
- [48] 袁士义, 叶继根, 孙志道. 凝析气藏高效开发理论与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- Yuan Shiye, Ye Jigen, Sun Zhidao. Theory and practice of efficient development of condensate gas reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [49] 李相方, 程时清, 覃斌, 等. 凝析气藏开采中的几个问题[J]. 石油钻采工艺, 2003, 25(5): 48–50.
- Li Xiangfang, Cheng Shiqing, Tan Bin. Some problems in development and production of gas condensate reservoirs [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2003, 25(5): 48–50.
- [50] 蒋启贵, 黎茂稳, 钱门辉, 等. 不同赋存状态页岩油定量表征技术与应用研究[J]. 石油实验地质, 2016, 38(6): 842–849.
- Jiang Qigui, Li Maowen, Qian Menhui, et al. Quantitative characterization of shale oil in different occurrence state and its application [J]. *Petroleum Geology and Experiments*, 2016, 38(6): 842–849.
- [51] 谌卓恒, 黎茂稳, 姜春庆, 等. 页岩油的资源潜力及流动性评价方法——以西加拿大盆地上泥盆统 Duvernay 页岩为例[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 459–468.
- Chen Zhuoheng, Li Maowen, Jiang Chunqing, et al. Shale oil resource potential and its mobility assessment; A case study of Upper Devonian Duvernay shale in Western Canada Sedimentary Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 459–468.
- [52] Michael G E, Packwood J, Holba A. Determination of in-situ hydrocarbon volumes in liquid rich shale plays [C]. *Unconventional Resources Technology Conference*, Denver, Colorado, USA, 2013: 8.
- [53] Passey Q R, Bohacs K M, Esch W L, et al. From oil-prone source rock to gas-producing shale reservoir-geologic and petrophysical characterization of unconventional shale-gas reservoirs [J]. *SPE*, 2010, 131350.