

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

聂海宽^{1,2,3}, 张柏桥⁴, 刘光祥^{1,2,3}, 颜彩娜⁵, 李东晖^{1,2,3}, 卢志远⁵, 张光荣⁵

[1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083;
3. 中国石油化工集团公司页岩油气勘探开发重点实验室, 北京 100083; 4. 中国石化江汉油田分公司, 湖北潜江 433124;
5. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083]

摘要:涪陵页岩气田开发的巨大成功(JY6-2HF井累产超过 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$)为五峰组-龙马溪组页岩气勘探开发提供了新的启示,这一成功的关键在于①焦石坝地区位于鄂西-渝东五峰组-龙马溪组深水沉积区,WF2—LM4笔石带页岩厚度较大,具有较好的页岩气富集的物质基础;②JY6-2HF井主要穿行在WF2—LM4笔石带页岩层位中,该套优质页岩与中东-北非的“Lower Hot Shale”具有全球可对比性。涪陵、威远和长宁等页岩气田开发井的主要水平段也都在这段笔石带之中,该笔石带页岩具有有机碳含量高($\text{TOC} > 3\%$)、有机质孔最发育(有机质孔隙度 $> 4\%$)和含气量高($6.87 \sim 9.02 \text{ m}^3/\text{t}$)等特点。综合分析认为,在类似的地质和工程条件下,页岩气井水平轨迹在WF2—LM4笔石带页岩中穿行比例决定了页岩气单井产量和最终可采储量(EUR)。研究成果将为四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组页岩气和世界其他地区志留系页岩气勘探开发提供参考。

关键词:JY6-2HF井;五峰组-龙马溪组;页岩气;笔石带;焦石坝;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Geological factors contributing 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

Nie Haikuan^{1,2,3}, Zhang Baiqiao⁴, Liu Guangxiang^{1,2,3}, Yan Caina⁵, Li Donghui^{1,2,3},
Lu Zhiyuan⁵, Zhang Guangrong⁵

[1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China;
2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;
3. Key Laboratory of Shale Oil and Gas Exploration & Production, SINOPEC, Beijing 100083, China;
4. Jiangnan Oilfield Branch Company, SINOPEC, Qianjiang, Hubei 433124, China;
5. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: The great success of shale gas development in Fuling (the cumulative production of Well JY6-2HF has exceeded 300 million cubic meters) provides new enlightenment for the exploration and development of Wufeng-Longmaxi Formations' shale gas reservoir. The keys for the success are: (1) the Wufeng-Longmaxi Formations in Jiaoshiba area were deposited in deep water. The WF2—LM4 graptolitic zone shale is relatively thick, laying a better material basis for shale gas enrichment. (2) The lateral of Well JY6-2HF is mainly emplaced in WF2—LM4 graptolitic zone, which contains high-quality shale comparable to the “Lower Hot Shale” in Middle East-North Africa. Most of the laterals of shale gas wells in Weiyuan and Changning shale gas fields are also emplaced in this graptolitic zone, which is characterized by high total organic carbon content ($\text{TOC} > 3\%$) and high gas content ($6.87 \sim 9.02 \text{ m}^3/\text{t}$), and highly-developed organic pores (organic porosity $> 4\%$). Comprehensive analysis shows that under similar geological and engineering conditions, the wells with longer laterals emplaced in WF2—LM4 graptolitic zone generally have higher test production and estimated

收稿日期:2019-10-16;修订日期:2020-01-28。

第一作者简介:聂海宽(1982—),男,博士、研究员,非常规油气地质。E-mail:niehk.syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41872124,91755211)。

ultimate recovery (EUR). The research results are of referential value to the exploration and development of Wufeng-Longmaxi Formations' shale gas in Sichuan Basin and its periphery, and of the Silurian shale gas in other parts of the world.

Key words: Well JY6-2HF, Wufeng-Longmaxi Formations, shale gas, graptolitic zone, Jiaoshiba, Sichuan Basin

2012年11月, JY1HF井在龙马溪组压裂测试获得日产量 $20.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。2013年中国石化启动了开发先导试验井组,并甩开部署了JY2HF, JY3HF和JY4HF井。2014年7月,国土资源部油气储量评审办公室组织专家经过评审认定,涪陵焦石坝区块JY1HF—JY3HF井区五峰组—龙马溪组新增页岩气探明地质储量 $1\,067.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,标志着涪陵页岩气田的诞生^[1],2019年产量 $63.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,累计产量 $279 \times 10^8 \text{ m}^3$,是目前全球下古生界最大的页岩气田之一。2019年11月8日,涪陵页岩气田JY6-2HF井累计产气量突破 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$,刷新了中国页岩气井单井累计产量最高纪录。

前人在页岩气富集高产控制因素等方面研究取得了大量进展,提出了“二元富集”^[2]、“三元富集”理论^[3]和“源—盖控藏”富集机制^[4-5]等规律和认识,并提出“建造—改造”的评价思路^[6],均认为早期优质页岩的形成提供了页岩气富集的物质基础。当前页岩气勘探开发中最迫切的任务是寻找页岩气最有潜力的层位及其展布范围^[7-8]。对比四川盆地主要页岩气井的生物地层后发现,目前所采用的各种岩相小层划分方案存在严重的穿时问题,其对应的地层无法准确的反映沉积环境变化情况^[4,9],制约了对页岩气井富集、高产主控因素分析^[4]。陈旭等(2015)提出了五峰组—龙马溪组页岩笔石带划分方案^[10],并将JY1井(JY1HF井的导眼井)的主要产气层位对比到五峰组—龙马溪组LM5笔石带页岩层段。聂海宽等(2016)从等时地层的角度,结合页岩气井生产特征分析,认为五峰组—龙马溪组底部页岩(即WF2—LM4笔石带页岩)具有较好的页岩气富集条件和勘探开发潜力^[4]。进一步,聂海宽等(2020)揭示了WF2—LM4笔石带页岩“多藻控烃源、生硅控格架、协同演化控储层”的优质储层成因机制^[11]。WF2—LM4笔石带页岩是焦石坝、长宁—威远、昭通等国家级页岩气示范区的主要开发层段^[12]。在WF2—LM4笔石带页岩厚度减薄或缺少某些笔石带的地区,页岩气钻井效果通常不理想^[5]。陈旭等(2017)^[13]、陈旭等(2018)^[14]发表了扬子区五峰组—龙马溪组含页岩气地层的时空分布模式,同时又提出在宜昌上升范围内,布井勘探龙马溪组页岩气需要格外慎重。当前对页岩气井产量、EUR

(estimated ultimate recovery,单井评估的最终可采储量)与其水平段穿行层位(不同的笔石带)的研究还处在初步探索阶段。

本文以目前产量最高的页岩气井——JY6-2HF井为例,从水平段穿行层位(不同笔石带)、各笔石带页岩特征和生产特征等方面分析该井富集、高产的原因,开展了与其它典型页岩气井水平段穿行层位和产量的对比分析,并讨论了WF2—LM4笔石带页岩对页岩气富集高产的控制、WF2—LM4笔石带页岩与中东—北非Hot shale对比等问题,以期对未来五峰组—龙马溪组页岩气勘探选区和气井水平段穿行提供可推广的理论和技術。

1 区域地质概况

涪陵页岩气田焦石坝地区位于中国西南部重庆市涪陵区,构造上位于四川盆地东部及其边缘,是一个受北东向吊水岩断裂、石门1号断裂及北西走向大耳山断裂、乌江断裂两组边界断裂控制的菱形箱状断背斜^[6],主体为一平缓宽阔的箱状背斜,背斜核部构造形变弱,断裂不发育,地层平缓(倾角小于 5°),两翼构造变形较强,地层变陡(图1,图2)。焦石坝背斜西南部倾末端以及两侧的白涛、吊水岩向斜西部扬起端均表现出北东向构造遭受北西向构造改造的变形特征,推测该区北东向构造形成较早,之后随着乌江断裂带的活动,先存构造遭受北西向改造^[15]。

根据笔石生物地层学的方法,陈旭等(2015)^[10]、陈旭等(2017)^[13]按照地层学的基本原理和方法,建立了一个扬子区五峰组—龙马溪组笔石带序列,并附以代码和国际地层委员会公布的地质年代表上的同位素年龄值(图3),已经成为中国石油和中国石化两大公司对井下该套黑色页岩地层对比的共同语言。这两大公司的广大地质同行已习惯运用各笔石带的代码,如将WF3称为“五三”,即五峰组从下至上第3个笔石带;将LM5称为“龙五”,即龙马溪组从下至上第5个笔石带;以此类推。这一简化方式不但在生产和科研交流上使专家们倍感方便,又不抹杀这些术语的正式名称和科学含义^[10]。根据对JY1井的笔石带鉴定结果,五峰组—龙马溪组底部页岩自下而上包括11个带:

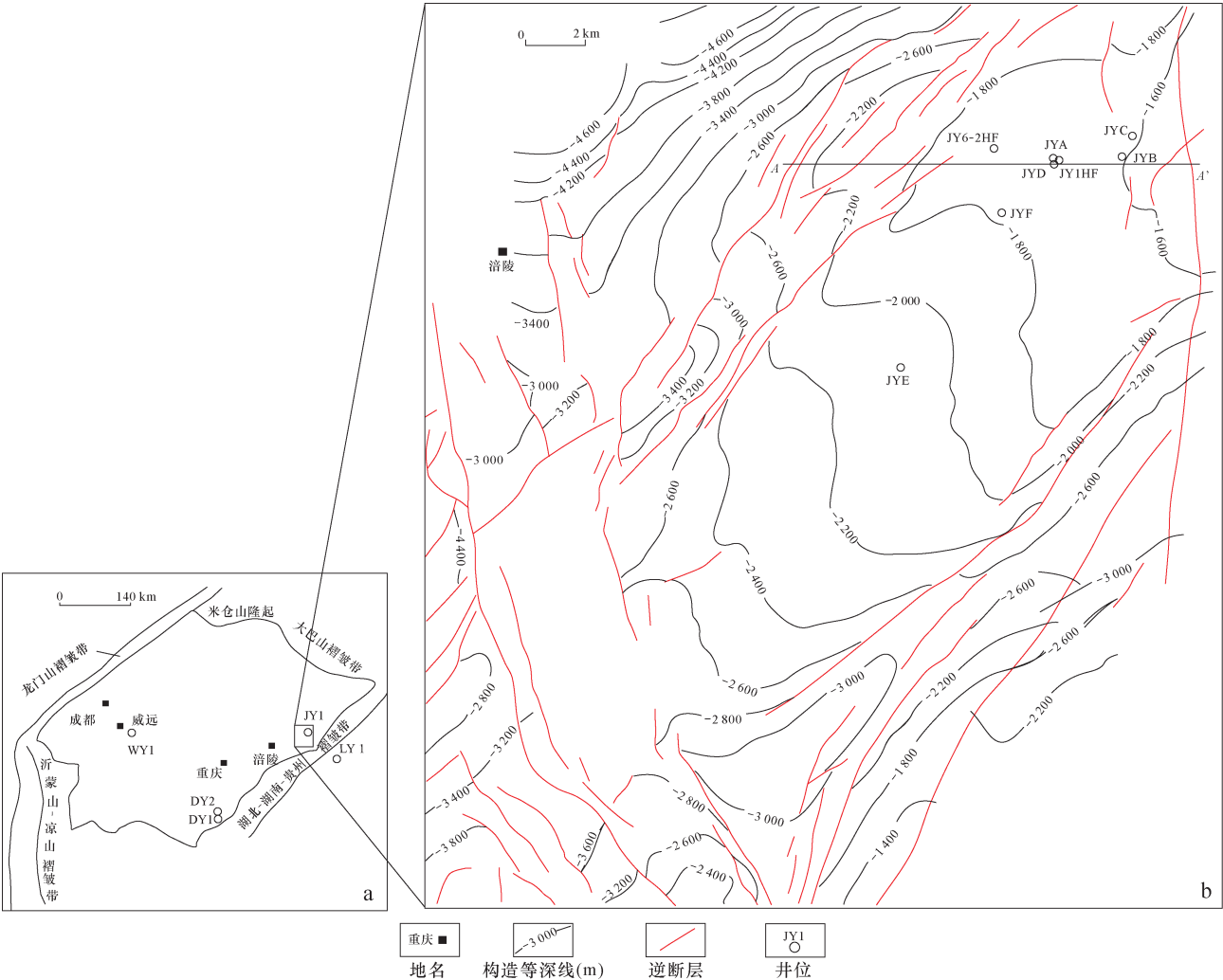


图1 涪陵页岩气田焦石坝地背斜位置(a)和五峰组底部构造图(b)(据文献[15]修改)

Fig.1 The location of the Jiaoshiba anticline in Fuling shale gas field (a), and the bottom structural map of the Wufeng Formation (b) (modified after reference [15])

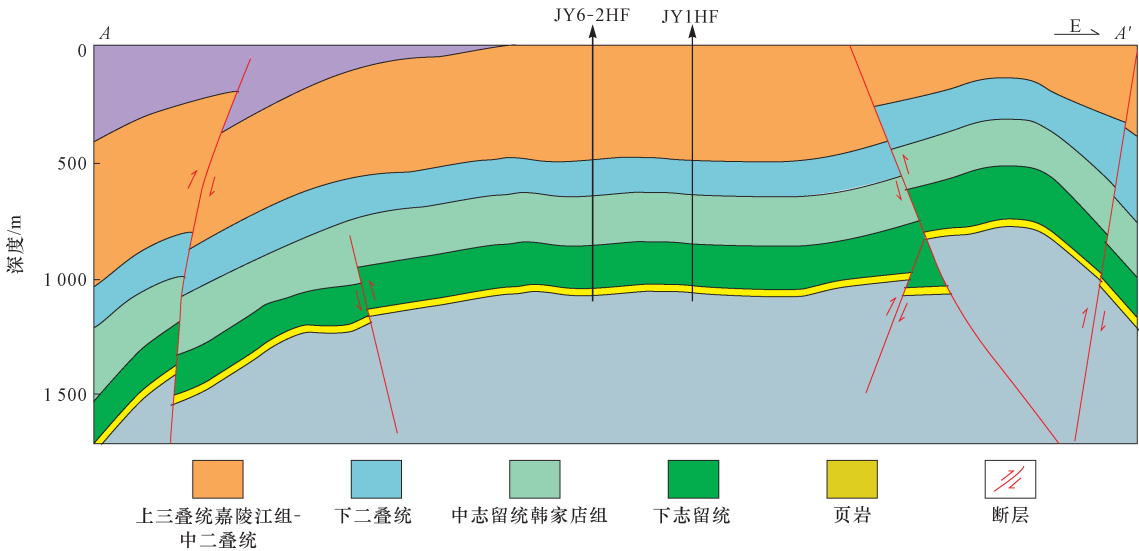


图2 涪陵页岩气田焦石坝背斜过 JY1HF 井和 JY6-2HF 井剖面

Fig.2 The profile of Jiaoshiba anticline through Wells JY1HF and JY6-2HF in Fuling shale gas field (剖面位置见图1中AA',JY6-2HF井为投影位置)

统	阶	生物带	年龄 (Ma)	组
兰多维列统	特里奇阶	N2 <i>Spirograptus turriculatus</i>	438.13	南江组
		LM9/N1 <i>Spirograptus guerichi</i>	438.49	
	埃隆阶	LM8 <i>Stimulograptus sedgwickii</i>	438.76	龙马溪组
		LM7 <i>Lituigraptus convolutus</i>	439.21	
		LM6 <i>Demirastrites triangulatus</i>	440.77	
		LM5 <i>Coronograptus cyphus</i>	441.57	
	鲁丹阶	LM4 <i>Cystograptus vesiculosus</i>	442.47	
		LM3 <i>Parakidograptus acuminatus</i>	443.40	
		LM2 <i>Akidograptus ascensus</i>	443.83	
	赫南特阶	LM1 <i>Metabolograptus? persculptus</i>	444.43	①
		WF4 <i>Metabologr. extraordinarius</i>	445.16	
	上奥陶统 凯迪阶	WF3 <i>Paraorthogr. pacificus</i>	3c <i>Diceragr. mirus</i>	Hirnantia Fauna Manosia
			3b <i>Tangyagraptus typicus</i>	
			3a Lower Subzone	
		WF2 <i>Dicellograptus complexus</i>	447.02	五峰组
		WF1 ③ <i>Foliomena-Nankinolithus</i>	447.62	
				涧草沟组

图3 扬子地区五峰组、龙马溪组和南江组的笔石带划分^[10]
Fig.3 Division of graptolitic zone in the Wufeng, Longmaxi and Nanjiang Formations in Yangtze region^[10]

注:WF1为*Dicellograptus complanatus*带;3a,3b和3c为WF3的3个亚带;①五里坡段;②观音桥段;③*Dicellograptus complanatus*;各带同位素年龄值均代表其底界年龄据文献^[17]。

WF2,WF3,WF4,LM1,LM2,LM3,LM4,LM5,LM6,LM7和LM8^[10,13]。涪陵页岩气田页岩气产层为上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组龙一段一亚段,含气页岩段厚83~100 m,纵向上可划分9个岩相小层^[16],其中①—⑤小层(大致相当于WF2笔石带至LM5笔石带中部)为下部气层,⑦—⑨小层(大致相当于LM6笔石带上部至LM8笔石带页岩)为上部气层,下部气层是目前主要建产层段,上部气层的开发也在积极探索中(图4)。

2 JY6-2HF井地质和生产特征

2.1 JY6-2HF井地质特征

JY6-2HF井位于重庆市涪陵区焦石镇楠木村(图1),构造上位于川东高陡褶皱带焦石坝背斜带构造高部位。焦石坝背斜位于鄂西—渝东五峰组—龙马溪组深水沉积区,WF2—LM4笔石带页岩

厚度较大,具有较好的页岩气富集的物质基础,已发现页岩气田并获得商业开发。JY6-2HF井是针对涪陵页岩气田焦石坝区块部署的一口页岩气评价井,于2013年5月5日开钻,8月10日完井,9月10日放喷测试,试获 $36.33 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流。JY6-2HF井试气长度1 477 m,水平段穿行在WF2—LM4笔石带(大致相当于油田划分的①小层至④小层中部),其中穿越LM1—LM4笔石带页岩(②至③小层)1 148 m,占水平段总长度的78%,穿行在WF2笔石带(①小层)329 m,占水平段总长度的22%(图5)。

2.2 JY6-2HF井生产特征

JY6-2HF井于2013年9月29日正式投入生产,油压29.97 Mpa,配产 $36 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。为探索气井不同生产方式、落实页岩气开发规律、提高单井可采储量,针对JY6-2HF井高压高产特点,江汉油田涪陵页岩气公司对该井采取“初期放大压差生产、后期定压生产”的方式开展试采。该井自投产以来,一直保持着全国页岩气井单井累计产量最高纪录。2014年9月6日,成为全国首口累计产量达 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的高产页岩气井。2016年2月29日,累计产量突破 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2018年9月30日,油压5.33 Mpa,日产气约 $6.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,累计产气 $2.68 \times 10^8 \text{ m}^3$,该井生产压力与输气压力出现持平现象,日产量持续下降,开始实施增压开采措施。2019年11月8日,累计产量突破 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$,日产量仍保持在约 $6.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图6)。

2018年10月,JY6-2HF井在开采后期通过降低井口输压、增压集输措施增产,预测气井日产气量在2028年降至经济极限产量。利用分段曲线预测方法对JY6-2HF井实施增压措施后的产量曲线进行拟合,结果显示双曲递减+指数递减拟合效果较好(图7),该井在增压后剩余可采储量 $1.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ (增压措施产气量已达 $0.32 \times 10^8 \text{ m}^3$),单井最终可采储量为 $3.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3 讨论:WF2—LM4笔石带页岩对页岩气富集高产的控制

JY6-2HF井的持续高产稳产,不仅展示了涪陵页岩气田良好的商业开发前景,也验证了笔石带划分的科学性和WF2—LM4笔石带页岩是页岩气富集高产层段的认识。理论研究表明,五峰组和龙马溪组一段

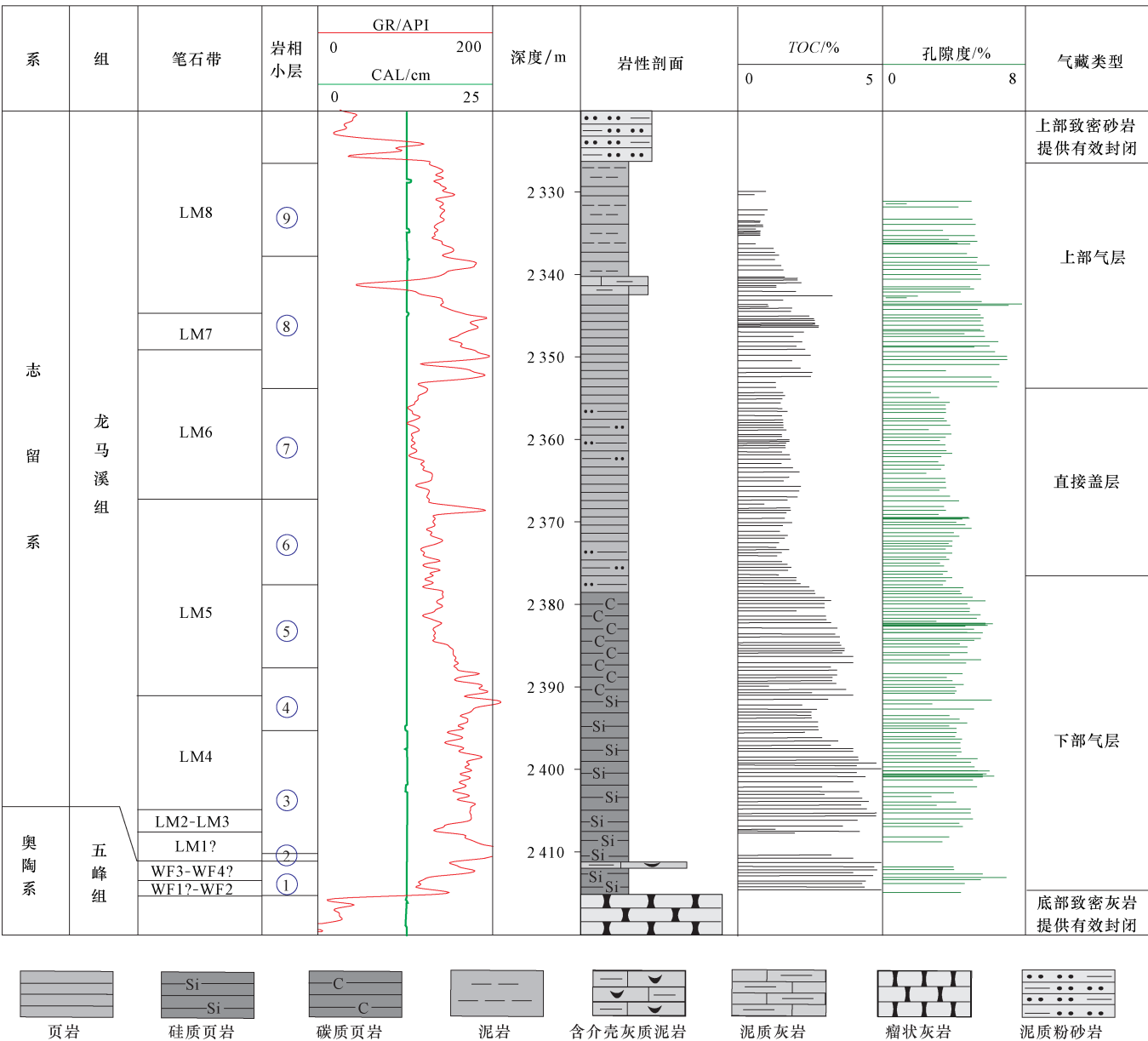


图 4 涪陵页岩气田焦石坝背斜 JY1 井页岩气综合柱状图和勘探开发层段划分(据文献[5]修改)

Fig. 4 The composite column of shale gas, and division of exploration and development target intervals in Well JY1 in Jiaoshiba anticline, Fuling shale gas field(modified after reference[5])

下部页岩的 WF2—LM4 笔石带页岩(图 4)具有沉积速率较慢、有机质类型好(来源于各种浮游藻类)和 TOC 含量较高等特征,在具有良好生烃条件的同时,也具有良好的储集能力(有机质孔发育好且三维连通性好,孔隙度较大且渗透率较低),为天然气提供良好的赋存空间,具备优质的页岩气发育物质基础^[4-5,18]。下部气层的 WF2—LM4 笔石带页岩的纹层较致密和均一,水平渗透率低,气体基本无运移^[4,19],JY1 井 WF2—LM4 笔石带页岩层段具有有机碳含量高($TOC > 3\%$)、有机质孔最发育(有机质孔隙度 $> 4\%$)^[18,20]和含气量高($6.87 \sim 9.02 \text{ m}^3/\text{t}$)等特点^[21]。综合分析认为,

WF2—LM4 笔石带页岩的封闭箱状体系保证了气藏的动态平衡和普遍高含气量。

目前已经发现的涪陵、长宁等页岩气藏均位于深水陆棚沉积区,WF2—LM4 笔石带页岩厚度大于 20 m ^[4,12],涪陵页岩气田焦石坝背斜页岩气钻井分析表明,穿行在五峰组 - 龙马溪组 WF2—LM4 笔石带比例较高的井,压裂效果总体较好,初始产量一般大于 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,EUR 一般大于 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$,个别井可超过 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$;而穿行在龙马溪组 LM4 笔石带以上层位的井,初始产量一般小于 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,EUR 一般小于 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表 1)。对于长宁 - 威远页岩气田五峰

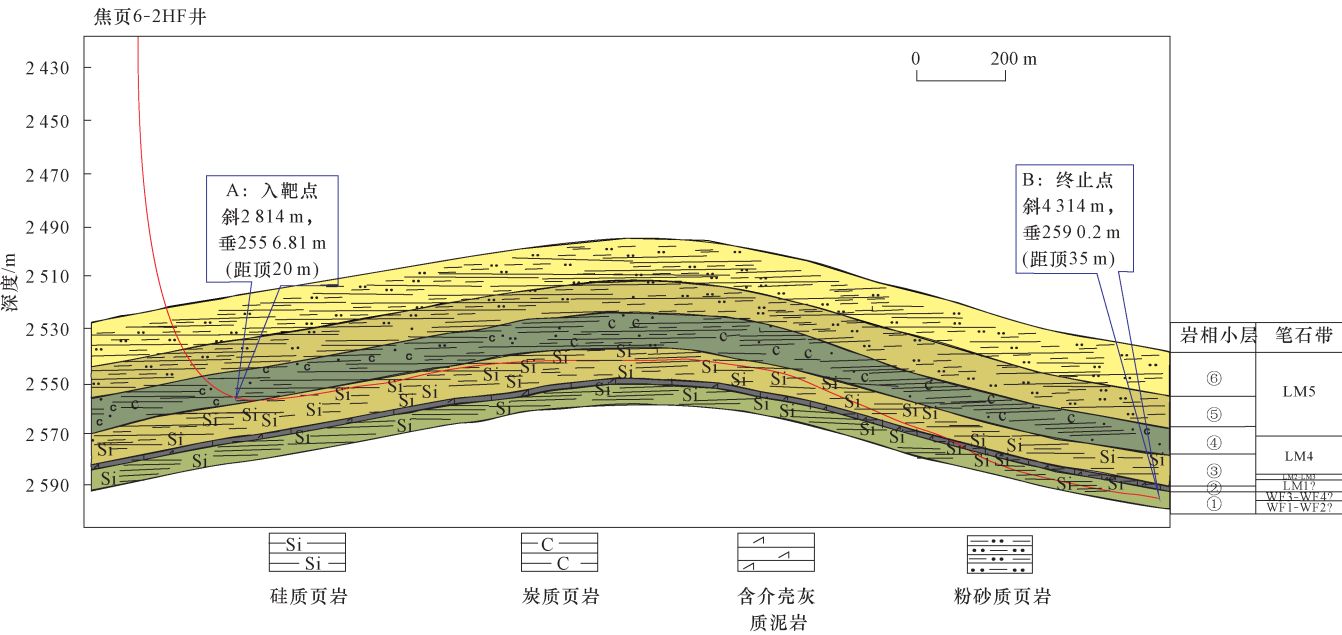


图 5 涪陵页岩气田焦石坝背斜 JY6-2HF 井水平井段穿行轨迹示意图

Fig. 5 A schematic diagram showing the trajectory of lateral in Well JY6-2HF in Jiaoshiba anticline, Fuling shale gas field
A. 页岩气井水平段 A 靶点, B. 页岩气井水平段 B 靶点。(笔石带划分据 JY1 井, 主要穿行在 WF2—LM4 笔石带页岩)

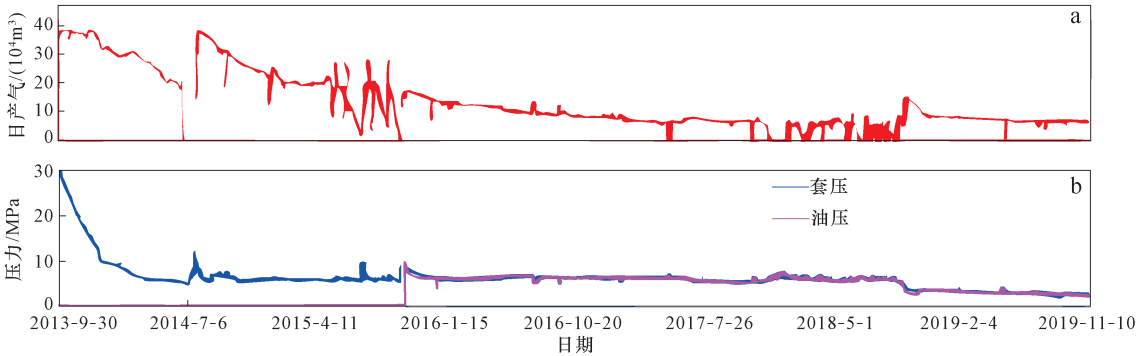


图 6 涪陵页岩气田焦石坝背斜 JY6-2HF 井生产历史

Fig. 6 Production history of Well JY6-2HF in Jiaoshiba anticline, Fuling shale gas field
a 生产曲线; b 套压、油压曲线

组—龙马溪组页岩气藏而言,最优靶体位置分布在①~②小层(即 LM1—LM3 笔石带页岩,笔石带与岩相小层的对应关系见文献[22]的图 3),水平井钻遇长度是决定气井能否高产的主控地质因素^[23-24],并且当靶体中部位置距优质页岩底部 3~8 m,同时①+②小层钻遇长度为 900~1 000 m 时,水平井测试更易获得 20×10⁴ m³/d 以上的高产页岩气流^[23]。从焦石坝、长宁和威远等页岩气的小层划分来看,不同油田企业划分的岩相小层差别较大,不具有对比性,而笔石提供了很好的对比性,页岩气井水平段在各笔石带的穿行层位与产量有较好的对应性。

在靠近古隆起或水上高地的区域,五峰组—龙马溪组优质页岩太薄(厚度小于 20 m)或缺失^[24-26],页岩

气井具有试采产量高、EUR 低的特点。位于四川盆地内部此类地区,由于页岩气藏保存条件较好,气井表现为试采产量很高,但 EUR 均较低,如 DY2HF 井由于受黔北孤岛^[27]、川东南—黔北水下高地的影响,WF2—LM4 笔石页岩带厚度小于 10 m(DY2 井距 DY1 井约 1.5 km,由于海相页岩沉积相变化不大,故各笔石带页岩厚度可以根据 DY1 井类比)(图 1,图 8),试采产量为 20×10⁴ m³/d,但 3 年累计产量为 0.15×10⁸ m³,EUR 为 0.28×10⁸ m³;WY1HF 井位于自流井古隆起之上^[25],缺失 WF2—LM4 笔石页岩带(图 8),试采产量虽高达 20.8×10⁴ m³/d,但 3 年累计产量仅为 0.24×10⁸ m³,EUR 为 0.38×10⁸ m³。DY2HF 井和 WY1HF 井的试采产量与焦石坝背斜的 JY1HF 和 JY6-2HF 等

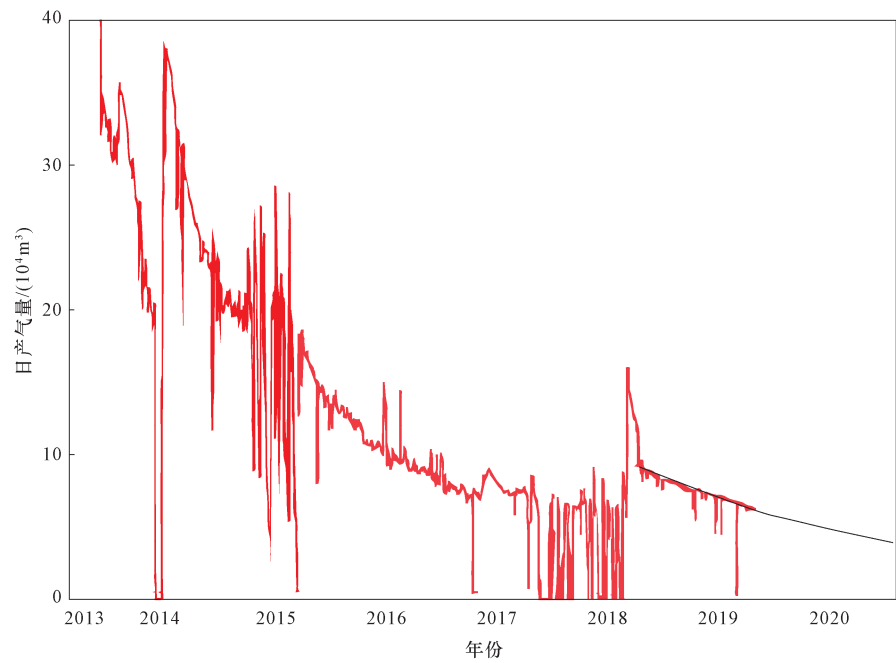


图 7 涪陵页岩气田焦石坝背斜 JY6-2HF 井延伸指数递减拟合曲线

Fig. 7 The extension exponential decline fitting curve of Jiaoshiba anticline in Well JY6-2HF in Jiaoshiba anticline, Fuling shale gas field

页岩气井的差异不大,但前者的累计产量和 EUR 均较低,分析认为 WF2—LM4 笔石带富有机质页岩较薄/缺失是主要原因。总体来说,在 WF2—LM4 笔石带页岩厚度小于 20 m 的页岩气藏中页岩气井的产能较低,在现今经济技术条件下经济效益较差。在 WF2—LM4 笔石页岩带厚度减薄或缺少某些笔石带的地区,能否准确刻画 WF2—LM4 笔石带页岩发育情况以及厘定其厚度成为四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气富集高产目标评价和勘探成功的关键因素。在构造相对复杂的常压页岩气区,如果 WF2—LM4 笔石带页岩厚度较

大,页岩气藏同样具有较好的勘探开发潜力^[28],如武隆向斜 LY1 井的 WF2—LM4 笔石带页岩厚度 20 m,试采产量为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,截至 2019 年底,该井累产为 $0.32 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。需要说明的是,穿行不同笔石带页岩气井的产量和 EUR 差异较大,除了各笔石带页岩本身的差异外,还和压裂产生的裂缝高度、长度和复杂度等因素有关,具体情况尚需根据压裂工艺、微地震监测等资料进一步分析。

在 WF2—LM4 笔石带页岩厚度均超过 20 m 的涪陵页岩气田和长宁页岩气田,页岩气水平井轨迹在 WF2—LM4 笔石带页岩中穿行比例极大程度上决定了单井的 EUR。除前文重点分析的 JY6-2HF 井外,还有一批水平段穿行在 WF2—LM4 笔石带页岩高产页岩气井,如 JY8-2HF 井,穿行 WF2—WF3 笔石带页岩的长度占水平段总长的 90%,穿行 LM1 笔石带页岩的长度占水平段总长的 10%,2019 年 12 月底,已累产 $2.78 \times 10^8 \text{ m}^3$,超过 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 亦指日可待。页岩气井水平段穿行 WF2—LM8 笔石带较多的井,产剖曲线显示主要是 WF2—LM4 笔石带产气贡献较大,如 JY1HF 井试气长度约 1 007.9 m,其中穿越 LM4 笔石带页岩上部层段约 250 m(③小层上部至④小层下部),穿越 LM5 笔石带页岩约 750 m(④小层上部至⑥小层),试采产量 $20.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,已累产 $1.13 \times 10^8 \text{ m}^3$,产剖曲线显示主要是 LM4 笔石带页岩上部层段(即 13 至 15 压裂段)的贡献(表 1;图 9),LM5 笔石带页岩的贡献较少。

表 1 涪陵页岩气田焦石坝背斜主要页岩气井穿行层位与试采产量、EUR

Table 1 Trajectories of laterals, test production and EUR of the main shale gas wells in Jiaoshiba anticline, Fuling shale gas field

井名	主要穿行层位笔石带	试采产量/ (10^4 m^3)	累计产量/ (10^8 m^3)	EUR/ (10^8 m^3)
JY1HF	LM4—LM5	20.28	1.13	1.54
JYA	LM4—LM5	21.18	1.35	1.93
JYB	LM5	15.33	1.12	1.87
JY6—2HF	WF2—LM4	81.92	3.00	3.90
JYC	WF2—WF3	155.83	2.78	3.40
JYD	WF2—LM5	50.70	1.77	2.34
JYE	LM3—LM4	61.91	1.24	1.97
JYF	LM4—LM5	82.63	2.06	2.56

注:累计产量截至 2019 年 11 月底, JY11-2HF 井水平段为 1 000 m,其余井水平段长为 1 400~1 500 m。

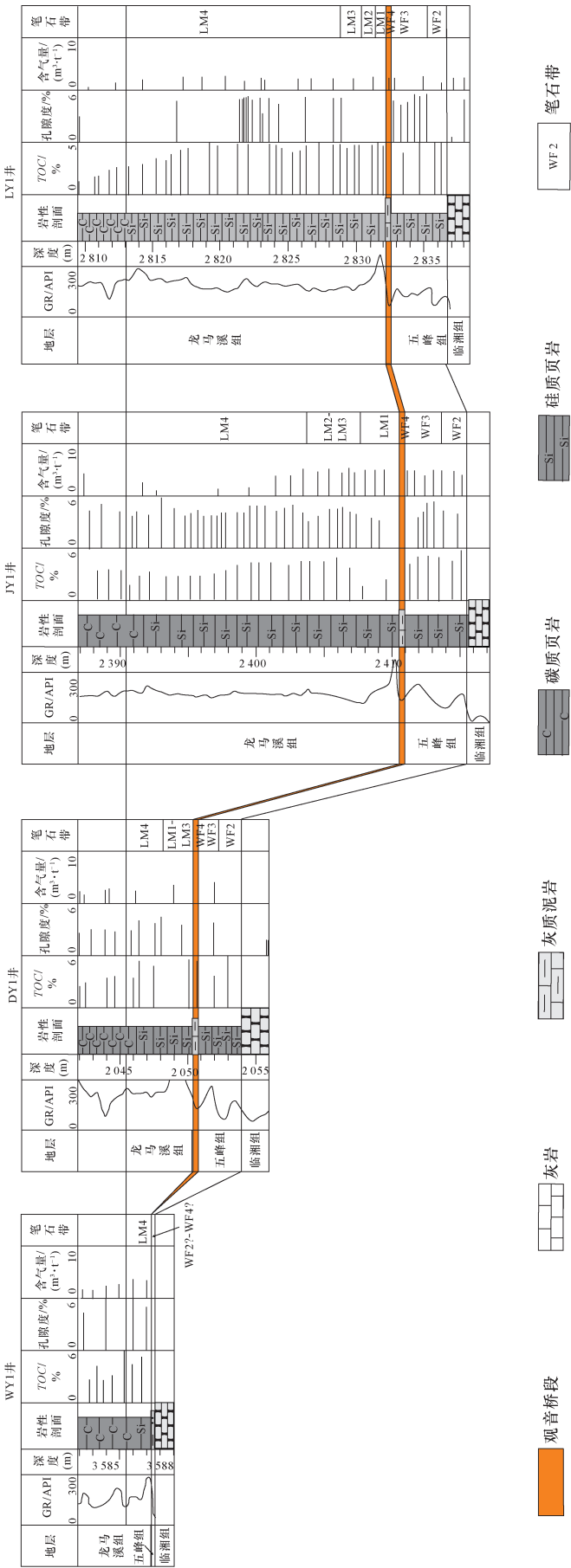


图8 四川盆地WY1, DY1, JY1和LY1井五峰组-龙马溪组底部黑色页岩连井剖面(剖面位置见图1)
Fig.8 Well-tie cross section of the black shale at the Wufeng Formation to the bottom of Longmaxi Formation in Wells WY1,DY1,JY1 and LY1 in the Sichuan Basin
(see Fig.1 for the cross section position)
注: JY1井和DY1井笔石带为陈旭鉴定, WY1井为在陈旭指导下由聂海宽鉴定, LY1井笔石带划分据文献 [29] 方法。

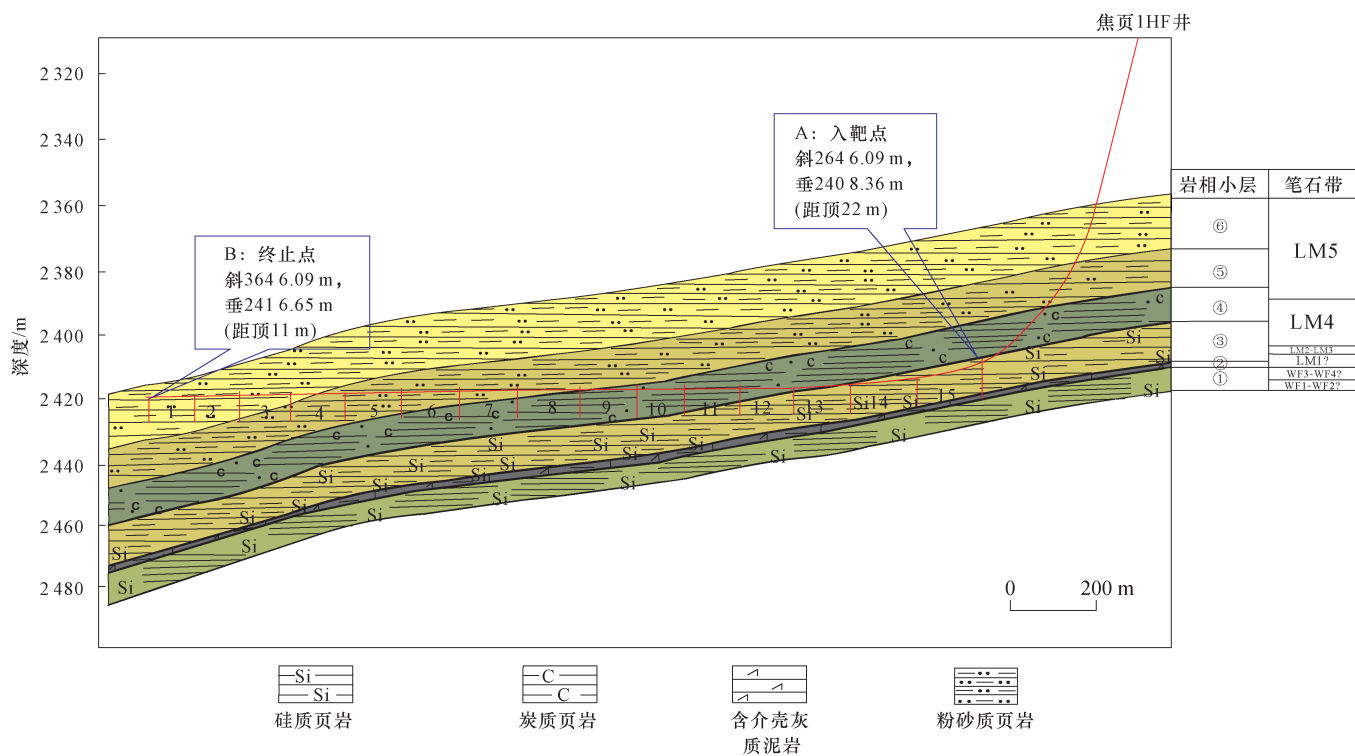


图9 涪陵页岩气田焦石坝背斜 JY1HF 井水平井段穿行轨迹示意图(据文献[30]修改)

Fig.9 A schematic diagram of the trajectory of lateral of Well JY1HF in Jiaoshiba anticline, Fuling shale gas field(modified after reference[30])

A. 页岩气井水平段 A 靶点, B. 页岩气井水平段 B 靶点(主要穿行在 LM4—LM5 笔石带页岩, 数字 1 至 15 为压裂段)

前人研究认为,上奥陶统 - 下志留统是全球性优质烃源岩发育的层段之一^[14,31]。晚奥陶世—早志留世是全球黑色页岩广泛发育的时期^[32],在全球范围内具有可对比性。这套被称为“热页岩”(Hot shale,包括 Lower Hot shale 和 Upper Hot shale)地层的古沉积环境为奥陶纪晚期冰期之后的海平面上升背景下的陆棚、海湾或陆表海,下“热页岩”(Lower Hot shale)主要发育在鲁丹阶早中期。在北非和中东发现了大量以该套页岩为烃源岩的常规油气藏^[32,33]。四川盆地及周缘地区在晚奥陶世—早志留世具有非常特殊的构造沉积环境,提供了优质页岩形成的宏观背景,龙马溪组底部优质页岩与下“热页岩”具有可对比性^[14],下伏发育五峰组黑色页岩。通过全球对比,认为五峰组至龙马溪组底部优质页岩主要发育在凯迪阶上部和鲁丹阶中下部。下“热页岩”(Lower Hot shale)的上界也仅发育至 *vesiculosus biozone*(即本文所指的 LM4 笔石带),特征笔石分子为 *Dimorphograptus confertus* (Nicholson, 1868)^[34],与中国上扬子龙马溪组底部 LM1—LM4 笔石带富有机质页岩具有可比性,也与中国页岩气勘探开发实践验证的 WF2—LM4 笔石带页岩是页岩气富集、高产层段一致。

4 结论和建议

1) JY6 - 2HF 开发实践表明 WF2—LM4 笔石带页岩厚度和水平井轨迹在其穿行比例决定了页岩气井的 EUR。在地质条件相当的情况下,穿行 WF2—LM4 笔石带的页岩气井具有试采产量和 EUR 双高的特点(排除工程差异),进一步,穿行在 WF2—WF3 和/或 LM1—LM3 笔石带的气井产量最高,这一认识为中国页岩气开发提供了可复制、可推广的技术经验。

2) 建议:①精细刻画 WF2—LM4 笔石带页岩的平面展布,进一步明确页岩气富集高产层段;②努力提高新钻井水平段在 WF2—LM4 笔石带页岩的穿行率;③对页岩气井水平段穿行层位较高(LM5—LM6 笔石带页岩)的老井采取定向射孔的工艺(向井筒下方射孔),促使压裂过程中主要裂缝发育在 LM4 及其以下笔石带页岩。

致谢:文中引用了中国石化石油勘探开发研究院、江汉油田分公司、勘探分公司和华东油气分公司等单位的宝贵资料,在此一并表示衷心感谢。

寄语:基础理论研究的精髓在于从无限繁乱的事例和现象中,理性的探究并获得其中最本质的规律,这

是一个简单化的过程。全球层型剖面 and 点位的建立, 涉及全球地球科学研究的根本, 正是这样一个典型的事例。从近于无限的地层学问题中, 抽简出可切实解决人类生存需求资源的标尺, 又是这一类说明本质规律的实践, 当前我与诸君有幸参与页岩气地层的研究过程, 正应如此。(陈旭, 中国科学院南京地质古生物研究所研究员, 中国科学院院士)

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 郭旭升. 南方海相页岩气“二元富集”规律——四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J]. 地质学报, 2014, 88(7): 1209-1218.
Guo Xusheng. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in southern China—Understanding from the Longmaxi Formation shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(7): 1209-1218.
- [3] 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.
- [4] 聂海宽, 金之钧, 边瑞康, 等. 四川盆地及其周缘上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩气“源-盖控藏”富集[J]. 石油学报, 2016, 37(5): 557-571.
Nie Haikuan, Jin Zhijun, Bian Ruikang, et al. The “source-cap hydrocarbon-controlling” enrichment of shale gas in Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation of Sichuan Basin and its periphery [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(5): 557-571.
- [5] Jin Z J, Nie H K, Liu Q Y, et al. Source and seal coupling mechanism for shale gas enrichment in upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its periphery [J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 97: 78-93.
- [6] 何治亮, 胡宗全, 聂海宽, 等. 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩气富集特征与“建造-改造”评价思路[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(5): 724-733.
He Zhiliang, Hu Zongquan, Nie Haikuan, et al. Characterization of shale gas enrichment in the Wufeng-Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and its evaluation of geological construction-transformation evolution sequence [J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(5): 724-733.
- [7] 张金川, 李玉喜, 聂海宽, 等. 渝页1井地质背景及钻探效果[J]. 天然气工业, 2010, 30(12): 114-118, 134.
Zhang Jinchuan, Li Yuxi, Nie Haikuan, et al. Geologic setting and drilling effect of the shale cored well Yuye-1, Panshui County of Chongqing [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(12): 114-118, 134.
- [8] 邹才能, 龚剑明, 王红岩, 等. 笔石生物演化与地层年代标定在页岩气勘探开发中的重大意义[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(1): 1-6.
Zou Caineng, Gong Jianming, Wang Hongyan, et al. Importance of graptolite evolution and biostratigraphic calibration on shale gas exploration [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(1): 1-6.
- [9] 王红岩, 郭伟, 梁峰, 等. 宣汉-巫溪地区五峰组-龙马溪组黑色页岩生物地层特征及分层对比[J]. 天然气工业, 2017, 37(7): 27-33.
Wang Hongyan, Guo Wei, Liang Feng, et al. Black shale biostratigraphic characteristics and stratigraphic correlation in the Wufeng and Longmaxi Formation of the Xuanhan-Wuxi areas [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(7): 27-33.
- [10] 陈旭, 樊隽轩, 张元动, 等. 五峰组及龙马溪组黑色页岩在扬子覆盖区内的划分与圈定[J]. 地层学杂志, 2015, 39(4): 351-358.
Chen Xu, Fan Juanxuan, Zhang Yuandong, et al. Subdivision and delineation of the Wufeng and Longmaxi black shales in the subsurface areas of the Yangtze platform [J]. Journal of Stratigraphy, 2015, 39(4): 351-358.
- [11] 聂海宽, 杜伟, 王濡岳, 等. 四川盆地龙马溪组页岩储层演化特征研究. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院内部报告[R]. 北京, 2020: 1-208.
Nie Haikuan, Du Wei, Wang Ruyue, et al. Study on the evolution characteristics of shale reservoirs in Longmaxi formation of Sichuan Basin [R]. Beijing SINOPEC Exploration and Development Research Institute, 2020: 1-208.
- [12] 聂海宽, 何治亮, 刘光祥, 等. 中国页岩气勘探发现状与优选方向[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(1): 16-38.
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): 16-38.
- [13] 陈旭, 樊隽轩, 王文卉, 等. 黔渝地区志留系龙马溪组黑色笔石页岩的阶段性渐进展布模式[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(6): 720-732.
Chen Xu, Fan Juanxuan, Wang Wenhui, et al. Gradual progressive distribution pattern of black graptolite shale in silurian longmaxi formation in guizhou and chongqing area [J]. Science China Earth Science, 2017, 47(6): 720-732.
- [14] 陈旭, 陈清, 甄勇毅, 等. 志留纪初宜昌上升及其周缘龙马溪组黑色笔石页岩的圈层展布模式[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(9): 1198-1026.
Chen Xu, Chen Qing, Zhen Yongyi, et al. Circumjacent distribution pattern of the Longmaxi graptolitic black shale (early Silurian) on the Yichang Uplift and its peripheral region [J]. Science China Earth Science, 2018, 48(9): 1198-1026.
- [15] 孙健, 罗兵. 四川盆地涪陵页岩气田构造变形特征及对含气性的影响[J]. 石油与天然气地质, 2016, (6): 809-818.
Sun Jian, Luo Bing. Structural deformation and its influences on gas storage in Fuling shale gas play, the Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, (6): 809-818.
- [16] 彭勇民, 龙胜祥, 胡宗全, 等. 四川盆地涪陵地区页岩岩石相标定方法与应用[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(6): 964-970.

- Peng Yongmin, Long Shengxiang, Hu Zongquan, et al. Calibration method of shale petrological facies and its application in Fuling area, the Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(6): 964-970.
- [17] Gradstein F M, Ogg J G, Mark S, et al. The geologic time scale 2012 [J]. Amsterdam: Elsevier, 2012, 1-1176.
- [18] Nie H K, Jin Z J, Sun C X, et al. Organic matter types of the Wufeng and Longmaxi Formations in the Sichuan Basin, south China: Implications for the formation of organic matter pores[J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(9): 8076-8100.
- [19] 李东晖, 刘光祥, 聂海宽, 等. 焦石坝背斜上部气层开发特征及影响因素分析[J]. *地球科学*, 2019, 44(11): 3653-3661.
- Li Donghui, Liu Guangxiang, Nie Haikuan, et al. Development characteristics and influencing factors of upper gas reservoir in Jiaoshiba anticline[J]. *Earth Science*, 2019, 44(11): 3653-3661.
- [20] Nie H K, Jin Z J, Zhang J C. Characteristics of three organic matter pore types in the Wufeng-Longmaxi Shale of the Sichuan Basin, Southwest China[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 7014.
- [21] 李东晖, 聂海宽. 一种考虑气藏特征的页岩含气量计算方法——以四川盆地及其周缘焦页1井和彭页1井为例[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(6): 1324-1332.
- Li Donghui, Nie Haikuan. A new method to calculate shale gas content based on gas reservoir characterization: A case study of Wells JY 1 and PY 1 in Sichuan Basin and its surrounding areas[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(6): 1324-1332.
- [22] 罗超, 王兰生, 石学文, 等. 长宁页岩气田宁211井五峰组-龙马溪组生物地层[J]. *地层学杂志*, 2017, 41(2): 142-152.
- Luo Chao, Wang Lansheng, Shi Xuewen, et al. Biostratigraphy of the wufeng to longmaxi formation at well ning 211 of changning shale gas field[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2017, 41(2): 142-152.
- [23] 谢军, 赵圣贤, 石学文, 等. 四川盆地页岩气水平井高产的地质主控因素[J]. *天然气工业*, 2017, 37(7): 1-12.
- Xie Jun, Zhao Shengxian, Shi Xuewen, et al. Main geological factors controlling high production of horizontal shale gas wells in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(7): 1-12.
- [24] 马新华, 谢军. 川南地区页岩气勘探开发进展及发展前景[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(1): 161-169.
- Ma Xinhua, Xie Jun. The progress and prospects of shale gas exploration and exploitation in southern Sichuan Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(1): 161-169.
- [25] 聂海宽, 金之钧, 马鑫, 等. 四川盆地及邻区上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组底部笔石带及沉积特征[J]. *石油学报*, 2017, 32(2): 160-174.
- Nie Haikuan, Jin Zhijun, Ma Xin, et al. Graptolites zone and sedimentary characteristics of Upper Ordovician Wufeng Formation Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 32(2): 160-174.
- [26] 孙莎莎, 芮昀, 董大忠, 等. 中、上扬子地区晚奥陶世—早志留世古地理演化及页岩沉积模式[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(6): 1087-1106.
- Sun Shasha, Rui Yun, Dong Dazhong, et al. Paleogeographic evolution of the Late Ordovician-Early Silurian in Upper and Middle Yangtze regions and depositional model of shale[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(6): 1087-1106.
- [27] 戎嘉余, 陈旭, 王怿, 等. 奥陶—志留纪之交黔中古陆的变迁: 证据与启示[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(10): 1407-1415.
- Rong Jiayu, Chen Xu, Wang Yi, et al. Northward expansion of Central Guizhou Oldland through the Ordovician and Silurian transition: Evidence and implications[J]. *Science China Earth Science*, 2011, 41(10): 1407-1415.
- [28] 聂海宽, 汪虎, 何治亮, 等. 常压页岩气形成机制、分布规律及勘探前景——以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组为例[J]. *石油学报*, 2019, 40(02): 131-143+164.
- Nie Haikuan, Wang Hu, He Zhiliang, et al. Formation mechanism, distribution and exploration prospect of normal pressure shale gas reservoir: A case study of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its periphery[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(02): 131-143+164.
- [29] 聂海宽, 李东晖, 姜涛, 等. 基于笔石带特征的页岩等时地层测井划分方法及意义——以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组为例[J]. *石油学报*, 2020, in press.
- Nie Haikuan, Li Donghui, Jiang Tao, et al. Logging division method and its significance of shale isochronous strata based on the characteristics of graptolitic zone, take Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its periphery as an example[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, in press.
- [30] 郭旭升. 涪陵页岩气田焦石坝区块富集机理与勘探技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1-346.
- Guo Xusheng. Enrichment region mechanism and exploration technology in Jiaoshiba of Fuling shale gas area[M]. Beijing: Science Press, 2014: 1-346.
- [31] 金之钧. 中国海相碳酸盐岩层系油气形成与富集规律[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(07): 910-926.
- Jin Zhijun. Formation and accumulation of oil and gas in marine carbonate strata in Chinese sedimentary basins[J]. *Science China Earth Science*, 2011, 41(07): 910-926.
- [32] Lüning S, Craig J, Loydell D K, et al. Lower Silurian 'hot shales' in North Africa and Arabia: regional distribution and depositional model[J]. *Earth Science Reviews*, 2000, 49(1-4): 121-200.
- [33] Alkhafaji M W, Aljubouri Z A, Aldobouni I A. Depositional environment of the Lower Silurian Akkas hot shales in the Western Desert of Iraq: Results from an organic geochemical study[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 64: 294-303.
- [34] Lüning S, Shahin Y M, Loydell D, et al. Anatomy of a world-class source rock: Distribution and depositional model of Silurian organic-rich shales in Jordan and implications for hydrocarbon potential[J]. *AAPG Bulletin*, 2005, 89(10): 1397-1427.

(编辑 张玉银)