

引用格式:张成林,杨学锋,赵圣贤,等.川南自贡区块页岩储层最佳靶体优选[J].油气藏评价与开发,2022,12(3):496-505.

ZHANG Chenglin, YANG Xuefeng, ZHAO Shengxian, et al. Target position optimization for shale reservoirs in Zigong Block of southern Sichuan Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(3): 496-505.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.03.012

川南自贡区块页岩储层最佳靶体优选

张成林¹,杨学锋¹,赵圣贤¹,张鉴^{1,2},邓飞涌³,何沅翰¹,张德良¹,王高翔¹,钟光海¹

(1.中国西南石油天然气田分公司页岩气研究院,四川成都610051;2.页岩气评价与开采四川省重点实验室,四川成都610213;3.中国西南石油天然气田分公司蜀南气矿,四川泸州646000)

摘要:川南自贡区块构造位置位于四川盆地威远斜坡南翼,为北西—南东向单斜坡。该区目的层上奥陶统五峰组一下志留统龙一₁亚段为深水陆棚相富含有机质黑色页岩沉积,储层纵向非均质性较强。水平井页岩“甜点段”钻遇程度的不同造成了测试效果的差异。为明确该区页岩最佳靶体纵向分布、指导水平井钻井轨迹跟踪调整,基于地层小层划分,综合运用钻井、录井、测井及分析化验等资料开展储层精细评价,并利用产气剖面资料评价靶体对页岩气水平井产能的影响。研究结果表明:①受沉积和构造作用的双重影响,目的层中龙一₁小层下部页岩段为最优的“地质—工程”双“甜点”;②生产测井分析表明,龙一₁小层下部具有最高的单位长度产气贡献率,是研究区的最佳靶体;③水平井的龙一₁小层下部页岩有效压裂段长是影响自贡区块气井产能的关键因素。该研究成果将自贡区块最佳靶体纵向分布厚度由2~5 m精确到1~2 m,有效支撑了页岩气产能评价工作,为该区实现页岩气规模效益开发奠定了基础。

关键词:储层精细评价;产气剖面分析;靶体优选;优质页岩储层;五峰组—龙马溪组

中图分类号:TE121

文献标识码:A

Target position optimization for shale reservoirs in Zigong Block of southern Sichuan Basin

ZHANG Chenglin¹, YANG Xuefeng¹, ZHAO Shengxian¹, ZHANG Jian^{1,2}, DENG Feiyong³, HE Yuanhan¹,
ZHANG Deliang¹, WANG Gaoxiang¹, ZHONG Guanghai¹

(1. Shale Gas Institute of PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610051, China;

2. Shale Gas Evaluation and Exploitation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610213, China;

3. Shunan Gas Field of PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Luzhou, Sichuan 646000, China)

Abstract: Zigong Block, which is located in the southern side of Weiyuan Slope in Sichuan Basin, is a monocline in NW-SE direction. O_{3w}-S_{1l}¹⁻¹ is the target layer of that block, which develops black shale with rich organic matters in deep-water continental shelf, while the longitudinal heterogeneity of the reservoir is strong. Different penetration degrees in the sweet spot of horizontal shale well lead to different testing results. In order to determine the longitudinal distribution of the optimal shale target and guide the tracking and adjustment of horizontal well drilling trajectory, based on stratigraphic subdivision, fine evaluation of reservoir is carried out by the comprehensive data of drilling, logging, well testing and laboratory analysis. Meanwhile, the gas production profile data are used to evaluate the impact of the target on shale gas productivity of the horizontal wells. The research results show that: ① Under the influence of both sedimentation and tectonics, the lower part of S_{1l}¹⁻¹ are the optimal “sweet spots”

收稿日期:2021-08-31。

第一作者简介:张成林(1990—),男,硕士,工程师,主要从事页岩气地质综合研究。地址:四川省成都市建设北路一段83号,邮政编码:610051。E-mail:zhangcl01@petrochina.com.cn

通信作者简介:赵圣贤(1987—),男,硕士,高级工程师,主要从事页岩气地质综合研究。地址:四川省成都市建设北路一段83号,邮政编码:610051。E-mail:zhaoshengxian@petrochina.com.cn

基金项目:中国石油天然气集团公司科技攻关项目“深层页岩气有效开采关键技术攻关与试验—深层页岩气开发优化技术现场试验(任务2)”(2019F-31-02)。

for both geology and engineering among target layers; ② The production well logging data indicate that, the lower part of $S_1^{l^{1-1}}$ shows highest gas production contribution of per unit length, which is the optimal target position of the research area; ③ The effective fracking length of shale reservoir in the lower part of $S_1^{l^{1-1}}$ for horizontal well is the key factor for gas well productivity in Zigong Block. Based on the above results, which supports the productivity evaluation of shale gas effectively, and sets the foundation for realizing large-scale and cost-efficient development of shale gas in that block, the longitudinal distribution thickness of the optimal target in Zigong Block is accurate from 2~5 m to 1~2 m.

Keywords: fine evaluation of reservoirs; analysis of gas-production profile; target position optimization; high-quality shale reservoir; Wufeng-Longmaxi Formation

川南地区五峰组—龙马溪组页岩气已在威远、长宁、昭通等区域实现规模效益开发,并逐步向新区拓展^[1-5]。自贡区块作为近期中国石油开展页岩气产能评价的新区,区块内已实施的8口水平井,各井间平面距离小于2 km,工程技术条件相近,测试产量介于 $(7.64 \sim 40.31) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、平均为 $21.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,单井产能差异较大;同时,各井轨迹方位相同、水平段长相近,但水平井穿行层位存在差异。因此,分析目的层段的钻遇情况对单井产能的影响,从而确定最优靶体的纵向分布,是该区提高单井产量的研究重点。

北美页岩地层厚度大、储层品质优,学者们在优选最佳靶体时更加重视储层工程参数的评价^[6]。国内页岩气主要开发层位为四川盆地五峰组—龙马溪组,储层纵向非均质性强,在靶体优选时侧重于地质参数评价^[7-8];在不同区块优质靶体的纵向分布层段与厚度差异大,例如在中国石油的长宁、泸州、威远^[3,5,9]和中国石化的威荣、焦石坝^[7,10]等区块最佳靶体的厚度介于3.5~20 m。总体而言,目前的页岩储层最佳靶体优选普遍存在以下问题:一是优选的靶体纵向跨度大,水平钻井偏差率大、未聚焦到最优势位置;二是页岩储层评价侧重于地质参数评价,往往缺少反映页岩岩石力学性质的工程参数,而岩石力学性质是影响页岩储层压裂改造难易程度的重要因素;三是偏重于储层静态参数的评价,缺乏产气剖面等生产动态资料的佐证。

综合运用钻井、录井、测井及分析化验等资料,在地层小层划分基础上,对自贡区块五峰组—龙一₁亚段页岩开展储层精细描述并分类评价,同时结合产气剖面资料分析,优选最优靶体层段,为优化该区块水平井钻井轨迹参数设计、提高水平井单井产量提供依据。

1 地质概况

1.1 构造特征

川南自贡区块构造位置位于四川盆地威远斜坡南翼,整体为一北西—南东向的单斜坡构造^[11],五峰组—龙马溪组仅发育少量北西—南东向IV级断层(断距20~40 m)^[12];五峰组埋深介于3 200~4 700 m,自北向南逐渐增大(图1)。目的层地层压力系数1.70~1.84,保存条件好。

1.2 地层与岩性特征

针对四川盆地页岩气最有利目的层段^[5],中国石油(五峰组—龙一₁亚段)^[4]与中国石化(①—⑨号层)^[7]在地层小层划分与命名上存在差异,但总体具有良好对应关系(图2)。按中国石油的小层划分方案,根据岩性特征、测井电性特征和古生物发育特征,将五峰组—龙一₁亚段划分为五峰组、龙一₁¹小层(1小层)、龙一₁²小层(2小层)、龙一₁³小层(3小层)和龙一₁⁴小层(4小层)。5个小层整体呈“三分性”,即五峰组厚度为6.5~7.5 m,岩性自下往上由灰质页岩向页岩过渡,具有低伽马、中密度、中声波时差电性特征,发育异性正常笔石(五峰组典型笔石),顶部发育薄层介壳灰岩(观音桥层);龙一₁¹小层—龙一₁³小层累计厚度8.6~11.8 m,岩性为黑色硅质页岩,电性特征呈中—高伽马、中—低密度、中—高声波时差,发育耙笔石、叶笔石、囊笔石、雕刻笔石等标准笔石;龙一₁⁴小层厚度为13.2~19.2 m,岩性自下而上由黏土质页岩向粉砂质页岩过渡,具有低伽马、高密度、低声波时差电性特征,偶见单笔石、耙笔石等标准笔石,笔石个体较小、体型保存不完整^[4,11]。

2 储层精细评价

2.1 储层特征

选取了研究区及邻区3口取心井,井位置见图1,

五峰组—龙一₁亚段岩心分析实验数据描述页岩储层地质参数特征(表1),结果表明储层纵向非均质性
强。其中,龙一₁¹小层脆性矿物含量(即石英、长石和碳酸盐矿物含量之和^[4])平均为81.2%,总有机碳含量(TOC)平均为6.0%,孔隙度平均为6.9%,总含气

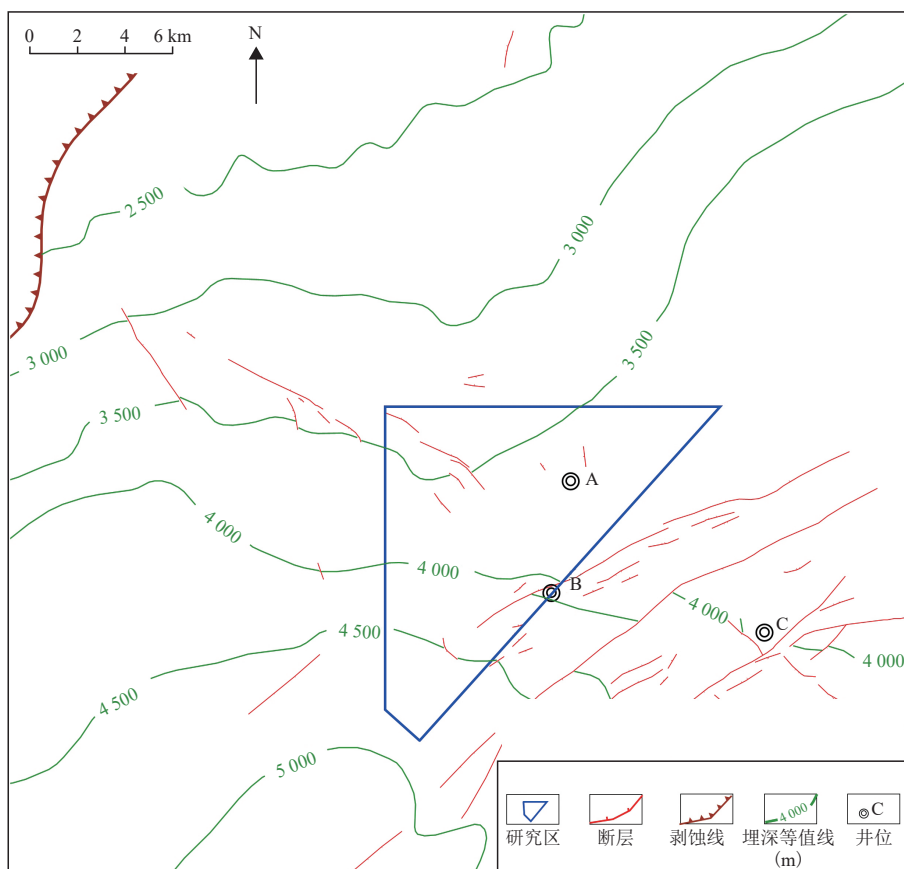


图1 川南自贡区块五峰组底界埋深

Fig. 1 Burying depth for O₃w bottom, Zigong Block of southern Sichuan

表1 川南自贡区块五峰组—龙一₁亚段储层参数实验数据统计

Table 1 Experimental data of reservoirs in O₃w-S₁¹⁻¹, Zigong Block of southern Sichuan

层位	脆性矿物含量		TOC		孔隙度		总含气量		含气饱和度	
	区间(%)	均值(%)	区间(%)	均值(%)	区间(%)	均值(%)	区间(m ³ /t)	均值(m ³ /t)	区间(%)	均值(%)
龙一 ₁ ⁴ 小层	63.4 ~ 69.6 (59)	66.5	2.2 ~ 2.7 (59)	2.5	4.5 ~ 5.1 (59)	4.9	2.6 ~ 4.7(21)	3.6	65.3 ~ 69.2 (59)	67.2
龙一 ₁ ³ 小层	61 ~ 69 (11)	64.2	2.5 ~ 3.7 (11)	3.1	5.0 ~ 6.8 (11)	5.8	3.7 ~ 4.3(4)	3.9	60.6 ~ 67.4 (11)	65.0
龙一 ₁ ² 小层	67 ~ 78.1 (9)	73.5	2.2 ~ 2.9 (9)	2.6	3.7 ~ 6.0 (9)	4.9	3.1 ~ 4.3(4)	3.7	62.8 ~ 74.4 (9)	68.8
龙一 ₁ ¹ 小层	77 ~ 84.3 (11)	81.2	5.2 ~ 7.9 (11)	6.0	6.6 ~ 7.3 (11)	6.9	3.5 ~ 7.8(5)	6.0	78.8 ~ 84.7 (11)	82.4
五峰组	79.5 ~ 87.3 (16)	82.2	2.7 ~ 3.9 (16)	3.2	3.6 ~ 4.3 (16)	4.0	3.5 ~ 6.3(6)	5.3	74.6 ~ 80.6 (16)	78.4

注:括号内为样品数。

量平均为6.0 m³/t,含气饱和度平均为82.4%,单项储层参数整体为各小层最高,是地质最优“甜点”层段。

页岩储层的可压性受本身脆性特征、地应力场等要素的影响^[13]。岩心分析和测井解释表明,自贡区块龙一₁¹小层页岩泊—杨脆性指数48%~62%,泊松比0.18~0.24、杨氏模量介于(3.1~4.4)×10⁴ MPa,最小水平主应力79~88 MPa,岩石破裂压力85~104 MPa(表2);相较于其余各小层,总体呈“高脆性指数、低泊松比、高杨氏模量、低最小水平主应力、低岩石破裂压力”的工程特征,更有利于水力压裂形成复杂缝网^[14]。

2.2 储层分类评价

页岩储层评价目前尚无统一的标准^[4,7,9]。中国石油根据生气潜力、储集物性、可压裂性和含气性4个方面,选取TOC、孔隙度、泊—杨脆性指数、含气量4项静态参数作为页岩储层分类评价标准,将页岩储层划分为I类、II类和III类,其中I类储层需同时满足“TOC大于等于3.0%、孔隙度大于等于5%、泊—杨脆性指数不低于55%、含气量不低于3 m³/t”^[4]。马

新华等^[9]针对临近本次研究区的威远页岩气田100余口水平井,将I类储层中更优的、满足“四高”特点(即TOC不低于4.0%、孔隙度大于等于6%、含气饱和度不低于70%、脆性矿物含量不低于75%)的储层定义为I_a类储层,其余为I_b类储层,结果表明:I_a类储层在靶体设计中有很好的适应性。研究借鉴以上标准,综合地质、工程参数建立本研究区储层精细分类评价标准(表3),并对自贡区块五峰组—龙一₁亚段页岩储层进行了精细分类评价(图2),除龙一₁⁴小层局部和五峰组底部发育III类储层外,I+II类储层主要分布于五峰组中上部—龙一₁⁴小层上部,其中I_b类储层分布于龙一₁¹小层上部和龙一₁⁴小层底部,I_a类储层稳定分布于龙一₁¹小层下部。

2.3 储层发育主控因素

页岩储层发育受沉积和构造作用的双重影响,其中沉积环境是储层形成的基础;构造作用控制了储层的后期改造,主要体现在对天然裂缝发育程度的影响^[15]。

从晚奥陶世开始,四川盆地逐渐由浅水的碳酸

表2 川南自贡区块五峰组—龙一₁亚段储层工程参数统计

Table 2 Engineering parameters of reservoirs in O₃w-S₁¹⁻¹, Zigong Block of southern Sichuan

层位	泊—杨脆性指数(v/v)	泊松比	杨氏模量(10 ⁴ MPa)	最小水平主应力(MPa)	岩石破裂压力(MPa)	
龙一 ₁ ⁴ 小层	41~58	0.19~0.26	2.8~4.5	82~89	92~107	
龙一 ₁ 亚段	龙一 ₁ ³ 小层	45~56	0.21~0.26	2.7~3.2	84~90	97~108
	龙一 ₁ ² 小层	41~56	0.20~0.25	2.9~3.7	85~88	99~107
	龙一 ₁ ¹ 小层	48~62	0.18~0.24	3.1~4.4	79~88	85~104
五峰组	44~61	0.19~0.28	3.2~4.6	80~93	87~117	

表3 川南自贡区块五峰组—龙一₁亚段页岩储层精细分类评价

Table 3 Fine classification and evaluation of shale reservoir in O₃w-S₁¹⁻¹, Zigong Block of southern Sichuan

储层分类	地质参数					工程参数			适用性	
	脆性矿物含量(%)	TOC(%)	孔隙度(%)	含气饱和度(%)	总含气量(m ³ /t)	泊—杨脆性指数(v/v)	最小水平主应力(MPa)	岩石破裂压力(MPa)		
I类	I _a 类	≥75	≥4	≥6	≥70	≥5	≥60	≤85	≤95	靶体精细设计
	I _b 类	70~75	3~4	5~6	65~70	3~5	55~60	85~88	95~100	
II类		60~70	2~3	3~5	60~65	2~3	45~55	88~91	100~105	页岩气开发方案地质储量计算下限
III类		50~60	1~2	2~3	55~60	1~2	30~45	≥91	≥105	页岩气探明储量计算下限

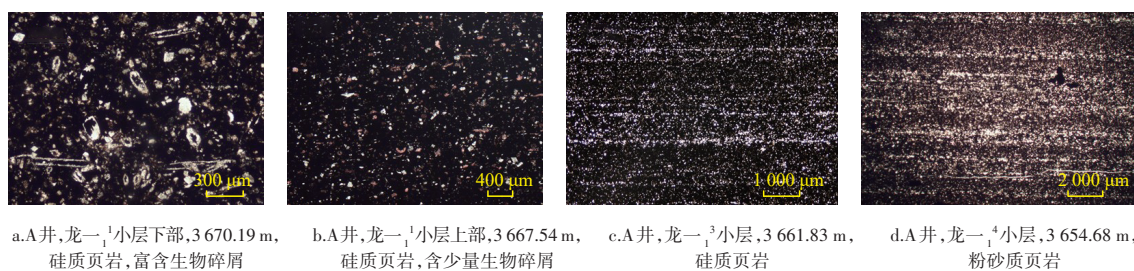


图3 川南自贡区块五峰组—龙一₁亚段典型薄片

Fig. 3 Typical thin sections in $O_3w-S_1l^{-1}$, Zigong Block of southern Sichuan

盐岩台地(临湘组)转变为浅水陆棚(五峰组下部),岩性以灰质页岩为主;而后在五峰组上部页岩沉积时期,水体逐渐变深,页岩中硅质含量逐渐增加;晚奥陶世末期,受气温骤降影响全球海平面迅速降低,沉积了一套薄层的含生物碎屑泥质灰岩(观音桥段)。进入早志留世,随着气温升高海平面快速上升,四川盆地普遍沉积了一套富有机质硅质页岩(图3a—图3c);而后沉积水体逐渐变浅,沉积环境由深水陆棚向浅水陆棚演化,岩性亦由黏土质页岩变为粉砂质页岩(图3d)。微量元素 U/Th 比值(铀/钍)能有效指示古沉积水体氧化还原条件,比值越大,还原性越强^[16]。研究区页岩 TOC 与 U/Th 呈较好正相关关系(图4),表明欠补偿、低能、缺氧的深水陆棚是发育富有机质页岩的最佳沉积环境。从图2可以看出,研究区龙一₁小层下部 U/Th 值介于 5.4~7.1,为沉积环境最优的层段。

此外,自贡区块龙一₁小层下部页岩的生物硅质最富集,因而呈“高 Si、低 Al”的特征(Si 元素含量与 TOC 相关性较高,表明页岩中硅质成因与生物有关;Al 元素的富集与陆源碎屑有关)^[17]。依据研究区典型井的元素俘获测井 ECS 资料(图2),龙一₁小层上部和下部的界限为 Si、Al 元素含量拐点,即龙一₁小层上部呈 Si、Al 含量中等,而龙一₁小层下部主要表现为 Si 含量高、Al 含量低,进一步印证了该区块在龙一₁小层下部形成时期,沉积环境最优,生物发育。

构造作用对页岩储层的影响主要反映在天然裂缝的发育特征^[15]。川南地区经历了多期构造运动,形成了不同规模的断层和天然裂缝。天然裂缝按尺度可分为微裂缝和大尺度裂缝,其中微裂缝能有效增大页岩储集空间和渗流能力,并能与人工裂缝进行沟通并延伸形成复杂缝网,从而对页岩气富集和

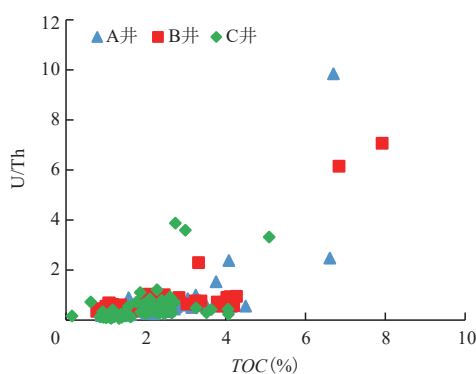


图4 川南自贡区块五峰组—龙一₁亚段 TOC 与 U/Th 的关系

Fig. 4 Correlation of TOC and U/Th in $O_3w-S_1l^{-1}$, Zigong Block of southern Sichuan

产出有重要作用;而大尺度裂缝的发育会造成页岩中气体运移和逸散^[18-19]。岩心裂缝观测表明,研究区各层段中龙一₁小层下部微裂缝最为发育(图5),这与龙一₁小层下部页岩硅质含量最高、脆性最强等特征密切相关。

综上所述认为,受沉积和构造作用的双重控制,自贡区块龙一₁小层下部储层品质最好、微裂缝最发育,为五峰组—龙一₁亚段最优层段。由此,在储层地质、工程品质最优的龙一₁小层中完成了“优中选优”,将最优“甜点”厚度由 2~5 m(研究区龙一₁小层厚度)优化到 1~2 m(研究区龙一₁小层下部厚度)。

3 产气剖面分析

分析水平井钻遇靶体的优劣不仅需要地质、工程静态参数的表征,还需要结合气井生产动态特征

评价。对水平井钻遇的各小层产能贡献的分析主要运用产气剖面资料,如生产测井、示踪剂、分布式光纤监测等技术^[10,20]。以区内钻遇龙一₁小层下部

的A井为例(图6),该井产气剖面测试结果表明:各压裂段产气贡献率不均一;各小层中龙一₁小层下部具有最高的单位长度产气贡献(182.3 m³/m),其余



a.A井,龙一₁小层下部,3 667.03 ~ 3 667.17 m

b.B井,龙一₁小层下部,4 060.30 ~ 4 060.35 m

图5 川南自贡区块页岩心裂缝观测

Fig. 5 Core fracture observation, Zigong Block of southern Sichuan

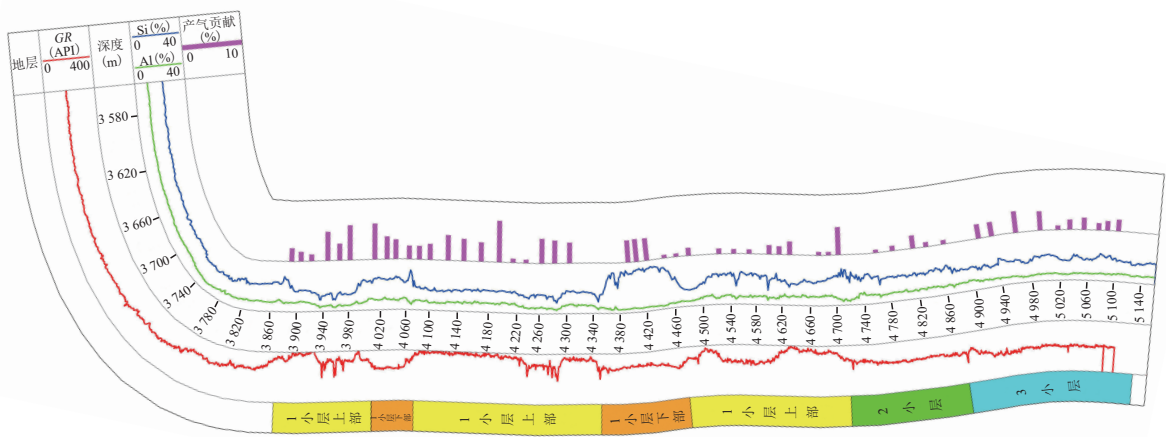
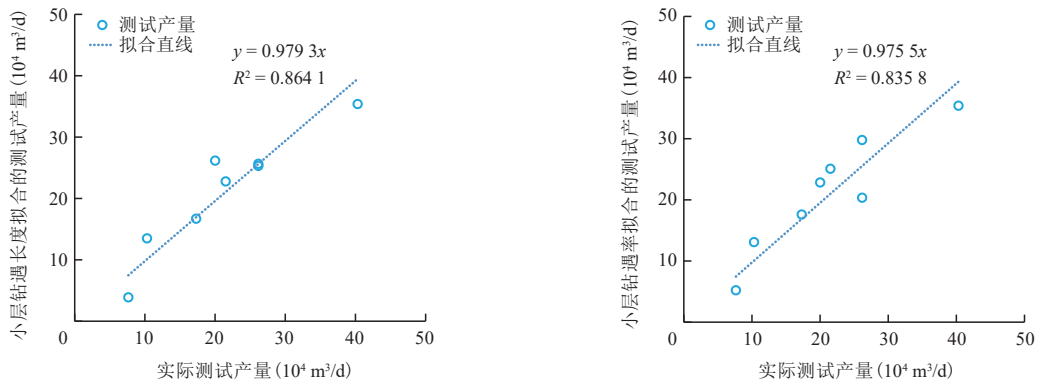


图6 川南自贡区块A井各射孔段产气贡献分布

Fig. 6 Contribution distribution of each perforation section to gas production, Well-A of Zigong Block of southern Sichuan



a. 小层钻遇长度拟合的测试产量—实际测井产量关系

b. 小层钻遇率拟合的测试产量—实际测井产量关系

图7 川南自贡区块8口水平井拟合测试产量与实际测试产量的关系

Fig. 7 Relation between fitted test production and actual test production of eight horizontal wells, Zigong Block of southern Sichuan

依次为龙一₁¹小层上部(120.8 m³/m)、龙一₁³小层(85.3 m³/m)和龙一₁²小层(25.9 m³/m)。

此外,开展了区块内8口气井测试产量与单井各小层钻遇长度、钻遇率的多元线性回归拟合分别为:

$$Y = -0.025\ 268\ 614L_1 + 0.027\ 418\ 867L_2 - 0.005\ 891\ 787L_3 + 0.013\ 358\ 071L_4 + 0.689\ 206\ 836 \quad (1)$$

$$Y = 0.057\ 898R_1 + 0.621\ 602R_2 + 0.199\ 901R_3 + 0.386\ 624R_4 - 23.121\ 6 \quad (2)$$

式中:Y为测试产量,10⁴m³/d;L₁为五峰组钻遇长度,m;L₂为龙一₁¹小层下部钻遇长度,m;L₃为龙一₁¹小层上部钻遇长度,m;L₄为龙一₁²小层钻遇长度,m;R₁为五峰组钻遇率,%;R₂为龙一₁¹小层下部钻遇率,%;R₃为龙一₁¹小层上部钻遇率,%;R₄为龙一₁²小层钻遇率,%。

拟合的测试产量与实际测试产量吻合度高(图7),在测试产量关于小层钻遇长度和钻遇率的拟合公式中,龙一₁¹小层下部的钻遇长度、钻遇率均体现了最大的正向贡献,即一口气井在水平段长一定的情况下,龙一₁¹小层下部钻遇长度越长(即钻遇率越高),其预测测试产量越高。该结果从生产动态特征的角度佐证了龙一₁¹小层下部为自贡区块最佳靶体的观点,表明龙一₁¹小层下部页岩有效压裂段长是区内影响气井产能的关键因素。

4 现场应用效果

优选最佳靶体并提高钻遇长度是页岩气水平井高产、稳产的基础,所以不仅要选择最佳靶体,还要确保钻井能有效地质导向。页岩气水平井钻进中呈现微幅构造发育、纵向靶窗小、靶点精准预测难度大的特点,存在脱靶和出层的风险^[21]。水平井在目的层中呈蛇形钻进,钻遇小层变化频繁、多次重复,单纯依靠随钻测井划分小层易产生多解性^[22]。元素录井在页岩气水平井钻井地质导向、随钻评价、复杂地层分层卡层等方面具有重要作用,尤其其稳定、准确、多样的元素参数(其中Si、Ca、Fe、Al等4种元素的稳定性最好,与页岩组成矿物存在一定相关关系)为小层划分提供了丰富的地层对比参数,与元素测井(目前最常用为元素俘获测井ECS,主要用于直井)参数有良好可对比性^[23-25]。基于前述分析的龙一₁¹小层下部“高Si、低Al”的元素特征,依据沉积地层不可逆原则和钻井旋回的连续性^[22],综合运用元

素录井、随钻测井有效开展了水平井地质导向工作(图8)。

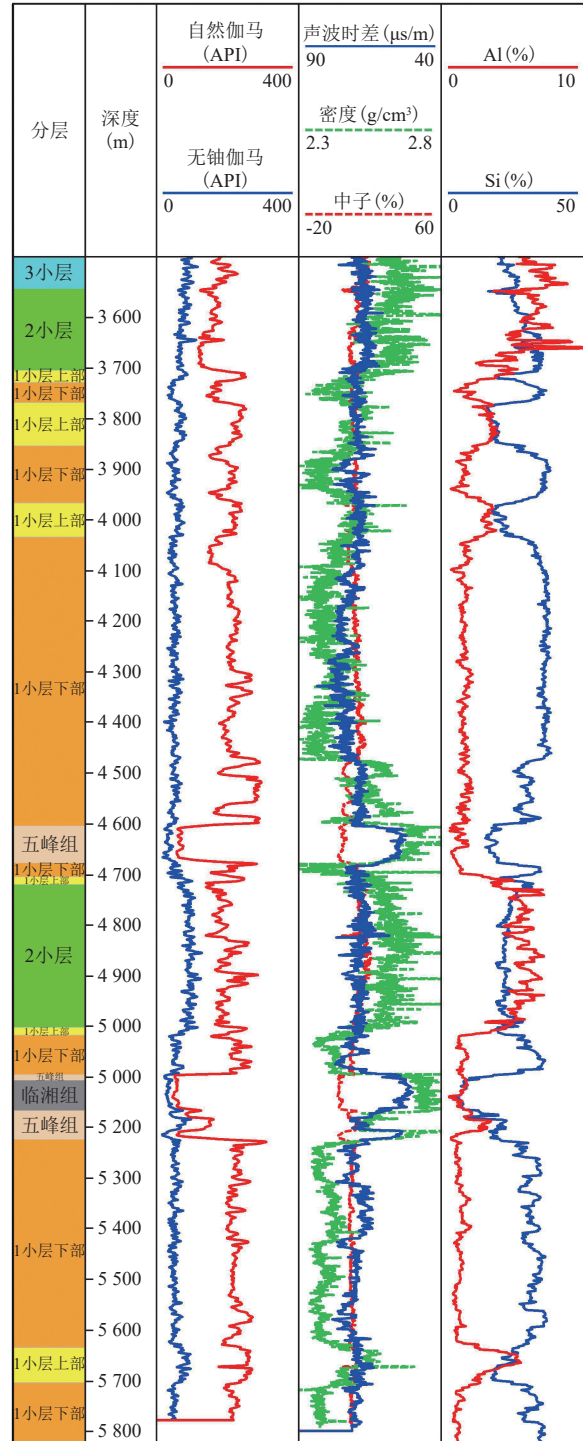


图8 川南自贡区块ZH4-5井小层钻遇情况测井—元素录井综合分析
Fig. 8 Comprehensive analysis of well logging and element logging for drilling degrees of layers in O₃w-S₁l¹⁻¹, Well-ZH4-5 of Zigong Block of southern Sichuan

随着最佳靶体的确定和元素录井地质导向技术的运用,研究区水平井龙一₁小层下部的钻遇率取得了明显提升,由早期的5.2%上升至近期的89.1%,单井测试产量由 $7.64 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提高至 $40.31 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。有效支撑了自贡区块页岩气产能评价工作,为该区块实现页岩气规模效益开发奠定了基础。

5 结论

1) 以地质(脆性矿物含量、TOC、孔隙度、含气饱和度和总含气量)和工程(泊—杨脆性指数、最小水平主应力、岩石破裂压力)关键参数作为储层分类指标,将川南自贡区块五峰组—龙一₁亚段页岩储层划分为I_a类、I_b类、II类和III类4类。受沉积和构造作用的双重影响,龙一₁小层下部为“地质—工程”最优“甜点”,稳定发育I_a类储层;产气剖面资料表明,自贡区块龙一₁小层下部的单位长度产气贡献最高。

2) 运用储层精细评价与产气剖面分析相结合的方法将自贡区块最佳靶体锁定到龙一₁小层下部,厚度精确到1~2 m,龙一₁小层下部的有效压裂段长是影响该区块气井产能的关键因素。

3) 自贡区块龙一₁小层下部页岩呈“高Si、低Al”特征,基于该特征的元素录井分析可有效应用于水平井钻井地质导向、钻遇小层划分等。运用该技术,研究区水平井最佳靶体钻遇率和单井测试产量均显著提高。

参考文献

- [1] 何骁,吴建发,雍锐,等.四川盆地长宁—威远区块海相页岩气田成藏条件及勘探开发关键技术[J].石油学报,2021,42(2):259-272.
HE Xiao, WU Jianfa, YONG Rui, et al. Accumulation conditions and key exploration and development technologies of marine shale gas field in Changning-Weiyuan block, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 259-272.
- [2] 郑爱维,梁榜,舒志国,等.基于大数据PLS法的页岩气产能影响因素分析[J].天然气地球科学,2020,31(4):542-551.
ZHENG Aiwei, LIANG Bang, SHU Zhiguo, et al. Analysis of influencing factors of shale gas productivity based on large data technology: A case of Jiaoshiha block in Fuling Gas Field, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(4): 542-551.
- [3] 杨洪志,赵圣贤,刘勇,等.泸州区块深层页岩气富集高产主控因素[J].天然气工业,2019,39(11):55-63.
YANG Hongzhi, ZHAO Shengxian, LIU Yong, et al. Main controlling factors of enrichment and high-yield of deep shale gas in the Luzhou Block, southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(11): 55-63.
- [4] 赵圣贤,杨跃明,张鉴,等.四川盆地志留统龙马溪组页岩小层划分与储层精细对比[J].天然气地球科学,2016,27(3):470-487.
ZHAO Shengxian, YANG Yueping, ZHANG Jian, et al. Micro-layers division and fine reservoirs contrast of Lower Silurian Longmaxi Formation shale, Sichuan Basin, SW China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(3): 470-487.
- [5] 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.
- [6] 沈骋,赵金洲,谢军,等.海相页岩缝网可压性靶窗空间分布预测——以川南长宁区块为例[J].地质力学学报,2020,26(6):881-891.
SHEN Cheng, ZHAO Jinzhou, XIE Jun, et al. Target window spatial distribution prediction based on network fracability: A case study of shale gas reservoirs in the Changning Block, southern Sichuan Basin[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(6): 881-891.
- [7] 武恒志,熊亮,葛忠伟,等.四川盆地威远地区页岩气优质储层精细刻画与靶窗优选[J].天然气工业,2019,39(3):11-20.
WU Hengzhi, XIONG Liang, GE Zhongwei, et al. Fine characterization and target window optimization of high-quality shale gas reservoirs in the Weiyuan area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(3): 11-20.
- [8] 马新华,谢军,雍锐,等.四川盆地南部龙马溪组页岩气储集层地质特征及高产控制因素[J].石油勘探与开发,2020,47(5):841-855.
MA Xinhua, XIE Jun, YONG Rui, et al. Geological characteristics and high production control factors of shale gas reservoirs in Silurian Longmaxi Formation, southern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 841-855.
- [9] 马新华,李熙喆,梁峰,等.威远页岩气田单井产能主控因素与开发优化技术对策[J].石油勘探与开发,2020,47(3):555-563.
MA Xinhua, LI Xizhe, LIANG Feng, et al. Dominating factors on well productivity and development strategies optimization in Weiyuan shale gas play, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(3): 555-563.
- [10] 李继庆,梁榜,曾勇,等.产气剖面井资料在涪陵焦石坝页岩气田开发的应用[J].长江大学学报(自科版),2017,14(11):75-81.
LI Jiqing, LIANG Bang, ZENG Yong, et al. The application of gas-production profile logging data in the development of Jiaoshiha shale gas field in Fuling area[J]. Journal of Yangtze

- University (Natural Science Edition), 2017, 14(11): 75-81.
- [11] 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 ZI 201, South Sichuan[J]. Journal of Stratigraphy, 2018, 42(4): 455-460.
- [12] 张成林,赵圣贤,张鉴,等.川南地区深层页岩气富集条件差异分析与启示[J].天然气地球科学,2021,32(2):248-261.
ZHANG Chenglin, ZHAO Shengxian, ZHANG Jian, et al. Analysis and enlightenment of the difference of enrichment conditions for deep shale gas in southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(2): 248-261.
- [13] 焦方正.页岩气“体积开发”理论认识、核心技术与实践[J].天然气工业,2019,39(5):1-14.
JIAO Fangzheng. Theoretical insights, core technologies and practices concerning “volume development” of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(5): 1-14.
- [14] 赵金洲,任岚,沈骋,等.页岩气储层缝网压裂理论与技术研究新进展[J].天然气工业,2018,38(3):1-14.
ZHAO Jinzhou, REN Lan, SHEN Cheng, et al. Latest research progresses in network fracturing theories and technologies for shale gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(3): 1-14.
- [15] 何顺,秦启荣,范存辉,等.川东南丁山地区五峰—龙马溪组页岩储层特征及影响因素[J].油气藏评价与开发,2019,9(4):61-67.
HE Shun, QIN Qirong, FAN Cunhui, et al. Shale reservoir characteristics and influencing factors of Wufeng-Longmaxi formation in Dingshan area, Southeast Sichuan[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(4): 61-67.
- [16] 邱振,邹才能,王红岩,等.中国南方五峰组—龙马溪组页岩气差异富集特征与控制因素[J].天然气地球科学,2020,31(2):163-175.
QIU Zhen, ZOU Caineng, WANG Hongyan, et al. Discussion on characteristics and controlling factors of differential enrichment of Wufeng-Longmaxi formations shale gas in South China[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(2): 163-175.
- [17] 王淑芳,邹才能,董大忠,等.四川盆地富有机质页岩硅质生物成因及对页岩气开发的意义[J].北京大学学报(自然科学版),2014,50(3):476-486.
WANG Shufang, ZOU Caineng, DONG Dazhong, et al. Biogenic silica of organic-rich shale in Sichuan Basin and its significance for shale gas[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, 50(3): 476-486.
- [18] 胡明,黄文斌,李加玉.构造特征对页岩气井产能的影响——以涪陵页岩气田焦石坝区块为例[J].天然气工业,2017,37(8):31-39.
HU Ming, HUANG Wenbin, LI Jiayu. Effects of structural characteristics on the productivity of shale gas wells: A case study on the Jiaoshiba Block in the Fuling Shale gasfield, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(8): 31-39.
- [19] 何治亮,聂海宽,张钰莹.四川盆地及其周缘奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩气富集主控因素分析[J].地质前缘,2016,23(2):8-17.
HE Zhiliang, NIE Haikuan, ZHANG Yuying. The main factors of shale gas enrichment of Ordovician Wufeng Formation-Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 8-17.
- [20] 赵政嘉,顾玉洁,才博,等.示踪剂在分段体积压裂水平井产能评价中的应用[J].石油钻采工艺,2015,37(4):92-95.
ZHAO Zhengjia, GU Yujie, CAI Bo, et al. Application of tracer in productivity evaluation for horizontal wells under segmented volume fracturing[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(4): 92-95.
- [21] 刘旭礼.页岩气水平井钻井的随钻地质导向方法[J].天然气工业,2016,36(5):69-73.
LIU Xuli. Geosteering technology in the drilling of shale gas horizontal wells [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(5): 69-73.
- [22] 石强,陈鹏,王秀芹,等.页岩气水平井高产层段判别方法及其应用——以四川盆地威远页岩气示范区下志留统龙马溪组为例[J].天然气工业,2017,37(1):60-65.
SHI Qiang, CHEN Peng, WANG Xiuqin, et al. A method for identifying high-productivity intervals in a horizontal shale gas well and its application: A case study of the Lower Silurian Longmaxi Fm in Weiyuan shale gas demonstration area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 60-65.
- [23] 唐谢,尹平,唐家琼,等.元素录井应用中的问题及对策[J].天然气工业,2020,40(4):51-58.
TANG Xie, YIN Ping, TANG Jiaqiong, et al. Problems in the application of element logging and solutions[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(4): 51-58.
- [24] 葛忠伟,欧阳嘉穗,蔡文轩,等.高陡复杂构造带页岩气水平井方位优选——以永川页岩气区块五峰—龙马溪组为例[J].非常规油气,2021,8(3):111-117.
GE Zhongwei, OUYANG Jiasui, CAI Wenxuan, et al. Orientation optimization of shale gas horizontal wells in high steep complex structural belt—Taking Wufeng—Longmaxi Formation in Yongchuan shale gas block as an example[J]. Unconventional Oil & Gas, 2021, 8(3): 111-117.
- [25] 温真桃,操良涛,简万洪,等.复杂构造区页岩气水平井高钻遇率井轨迹优化技术——以永川南区开发实践为例[J].非常规油气,2022,9(1):112-118.
WEN Zhen tao, CAO Liang tao, JIAN Wan hong, et al. Trajectory optimization technology of shale gas horizontal wells in complicated structure area: A case of the development practice of Yongchuan southern area[J]. Unconventional Oil & Gas, 2022, 9(1): 112-118.