

引用格式:刘雨林,范凌霄,房大志,等.源—储分类新方法在川东地区页岩气井产量分析中的应用[J].油气藏评价与开发,2022,12(3):429-436.

LIU Yulin, FAN Lingxiao, FANG Dazhi, et al. Application of a new source-reservoir classification method in production analysis of shale gas wells in Eastern Sichuan[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(3): 429-436.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.03.004

源—储分类新方法在川东地区页岩气井 产量分析中的应用

刘雨林^{1,2}, 范凌霄^{1,3}, 房大志⁴, 彭勇民^{1,3}, 曾联波², 冯动军^{1,3}

(1. 中国石化石油勘探开发研究院有限公司, 北京 102206; 2. 中国石油大学(北京), 北京 102249;
3. 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 北京 102206; 4. 中国石化重庆页岩气有限公司, 重庆 408400)

摘要:利用总有机碳含量(*TOC*)、孔隙度等实验分析和水平井钻井试气等相关资料,开展了南川区块海相页岩储层源—储耦合关系与典型高低产井原因分析。研究表明,页岩有机质与储集空间紧密相连,互相依存,二者之间形成复杂的源—储耦合关系,*TOC*(源)和孔隙度(储)是表征源—储配置类型的关键参数,可划分为富碳高孔、中碳中孔、低碳低孔等12种类型,对页岩源—储相配置系进行半定量评价;同时,通过引入源—储分类新方法,建立了研究区五峰组—龙马溪组I、II、III类页岩储层源—储配置评价标准,结合研究区开采工艺相似的8口水平井源—储配置评价与试气产量分析表明,I类源—储配置层段在水平井段中占比越大,压裂试气产量越高。源—储分类新方法是页岩气井地质评价与压后产能分析的实用工具,具有推广意义。

关键词:总有机碳含量;孔隙度;源—储耦合系数;五峰组—龙马溪组;川东地区

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Application of a new source-reservoir classification method in production analysis of shale gas wells in Eastern Sichuan

LIU Yulin^{1,2}, FAN Lingxiao^{1,3}, FANG Dazhi⁴, PENG Yongmin^{1,3}, ZENG Lianbo², FENG Dongjun^{1,3}

(1. Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 102206, China; 2. China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Sinopec Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production Technology, Beijing 102206, China; 4. Sinopec Chongqing Shale Gas Co., Ltd., Chongqing 408400, China)

Abstract: By using the experimental test data such as the total organic carbon content (*TOC*) and porosity and the drilling and testing data of horizontal wells, the researches on the source-reservoir coupling relationship of marine shale reservoirs in Nanchuan district and the reasons for typical high and low field wells have been carried out. The researches show that the shale organic matter and storage space are closely connected and interdependent, forming a complex source-reservoir coupling relationship between each other. The *TOC* (the source) and the porosity (the reservoir) are the key parameters to characterize the source-reservoir configuration types. There are 12 categories, including high-carbon with high-porosity, medium-carbon with medium-porosity, and low-carbon with low-porosity, for the semi-quantitative evaluation. By introducing this new method of source-reservoir classification, the evaluation criteria of source-reservoir configuration for I, II and III shale reservoirs of Wufeng-Longmaxi Formation in the study area are established. Combining the source-reservoir configuration evaluation and gas test production analysis of 8 horizontal wells with similar mining technology in the study area, it is shown that the larger the proportion of class I source reservoir configuration in horizontal wells, the higher the fracturing gas test production. The new source-reservoir classification method is a practical tool for geological evaluation and post-compression productivity analysis of shale gas wells, and has the popularization significance.

Keywords: total organic carbon (*TOC*); porosity; source-reservoir coupling coefficient; Wufeng-Longmaxi Formation; Eastern Sichuan

收稿日期:2020-11-16。

第一作者简介:刘雨林(1994—),男,在读硕士研究生,从事地质工程研究。地址:北京市昌平区南环东路15号,邮政编码:102249。
E-mail:liurainforest@163.com

基金项目:国家重点研发计划“煤层气、页岩气及现代煤化工关键技术标准研究”(2018YFF02133802)。

页岩具有一套独立的生储系统,其“源”“储”兼备的特点^[1-2]使其在埋藏热演化过程中即可作为源岩,同时又可以作为储层。

页岩作为源岩,其有机质类型、总有机碳含量(*TOC*)、热演化程度(R_o)决定着页岩的生烃潜力^[3],也是资源评价的重要指标^[4-6],其中浮游藻类(I类有机质)和底栖藻类(II类有机质)在高成熟—过成熟阶段生气能力最强^[7]。页岩同时作为储集体,其矿物组分、孔隙度、孔隙类型、孔径分布、比表面积等微观特征是影响储集性能的重要参数^[8-10]。页岩中的各类有机质、矿物颗粒以及各类孔隙在成岩演化过程中,通过不同的排列方式、空间配置,形成了不同的储集空间类型,也导致了微观结构在纵、横向上的非均质性^[11-12],同时使得水平井靶窗以及井轨迹的设计更加严苛^[13-14]。总体而言,*TOC*(源)与孔隙度(储)分别决定了页岩的生烃潜力和储集性能,是页岩气富集的物质基础^[15],同时也影响着水平井产量高低。

上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组是中国南方海相页岩气勘探开发的重点层系^[16],其中南川区块处于复杂构造带,单井产量差异明显,页岩气井高低产的原因有待探讨。采用源—储分类评价新方法,在川东海相页岩水平井中开展源—储分类评价,从而解剖单井的高低产原因。

1 地质背景与勘探开发现状

川东地区构造上属于川东高陡构造带,东西紧靠华蓥山、齐岳山,北接大巴山,其内发育北东向隔档式平行背斜。研究区南川区块位于川东高陡构造带万县复向斜,是川东南—湘鄂西“槽—挡”过渡区,构造上主要包括平桥背斜、东胜背斜以及阳春沟向斜(图1)。受印支期、燕山—喜山期等构造运动影响,研究区主要发育龙济桥断层、袁家沟断层、平桥西断层、平桥东断层等北东向断层^[17],西部断层断面平缓,以逆冲滑脱为主,东面断层断面较陡,以冲断为主。

从沉积环境来看,晚奥陶世—早志留世时期,四川盆地及其周缘“东南西三面环山”,南川区块远离陆架坡折带,处于深水陆棚沉积。具体表现为五峰组下部为海侵体系域,主要沉积一套5~10 m的炭质页岩和硅质页岩,上部逐渐转变为高位体系域^[18],沉积一套几十厘米的浅水陆棚浅灰色介壳灰岩;到早志留世时期,冰川消融导致海平面持续上升,研究区

再次进入海侵体系域阶段,龙马溪组底部沉积一套深水陆棚炭质页岩,向上水体变浅,岩性以浅灰色泥页岩为主,发育粉砂质条带。

南川区块以五峰组—龙马溪组底部为主要开发层系,使平桥—东胜南斜坡JY10井、SY1井相继突破,其中平桥南背斜完成了 $6.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 产能建设。五峰组—龙马溪组底部岩性以硅质页岩、炭质页岩为主,具有石英与黏土含量高、*TOC*与热演化程度高^[19]、含气量好等特点。平桥南背斜JY10—10井1—3小层石英含量平均49.3%,黏土矿物含量平均30.7%,*TOC*平均2.83%, R_o 值平均3.04%,孔隙度平均3.6%,含气量平均 $5.21 \text{ cm}^3/\text{g}$,日产气量约为 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$;JY194—3井1—3小层石英含量平均56.2%,黏土矿物含量平均26.4%,*TOC*平均达4.09%,孔隙度平均3.8%,含气量平均 $4.60 \text{ cm}^3/\text{g}$,日产气量约 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

2 页岩源—储分类方法

2.1 源—储耦合机理与方法定义

页岩的“源”“储”并非孤立存在,一方面,有机质的结构、成熟度,矿物组分的不同影响孔隙的发育以及结构特征^[19, 20];另一方面,颗粒骨架间的各类孔隙是有机质保存的有效场所,有机质产生的天然气以吸附或游离态的形式赋存在纳米孔内^[21-22]。有机质孔比表面积大,有机质越发育的地方有机质孔往往越发育,孔隙越连通,越有利于页岩气的富集,是相互作用最强的一类源—储体系;无机质孔主要包括晶间孔以及粒内溶蚀孔隙,与有机质(源)直接或间接接触,例如草莓状黄铁矿,其微晶之间的孔隙可被有机质充填而发育有机质孔,未被充填的粒间孔也是页岩气赋存的重要场所;黏土矿物塑性强,在刚性矿物或内部超压环境的支撑下形成狭缝状的黏土矿物间孔,内部充填有机质,可为吸附气或游离气提供赋存场所^[23];微裂缝在页岩中有较大的储集空间,常常被有机质充填。微裂缝是页岩中的优势渗滤通道^[24],同时也沟通孤立孔隙并形成孔—缝网络,在源—储体系起到疏通页岩气的作用。综上,页岩有机质与储集空间紧密相连,互相依存,使二者之间形成复杂的源—储耦合关系。

将有机质含量(*TOC*)与孔隙度分别作为生烃能力和储集性能的核心指标,并依照国内对页岩储层

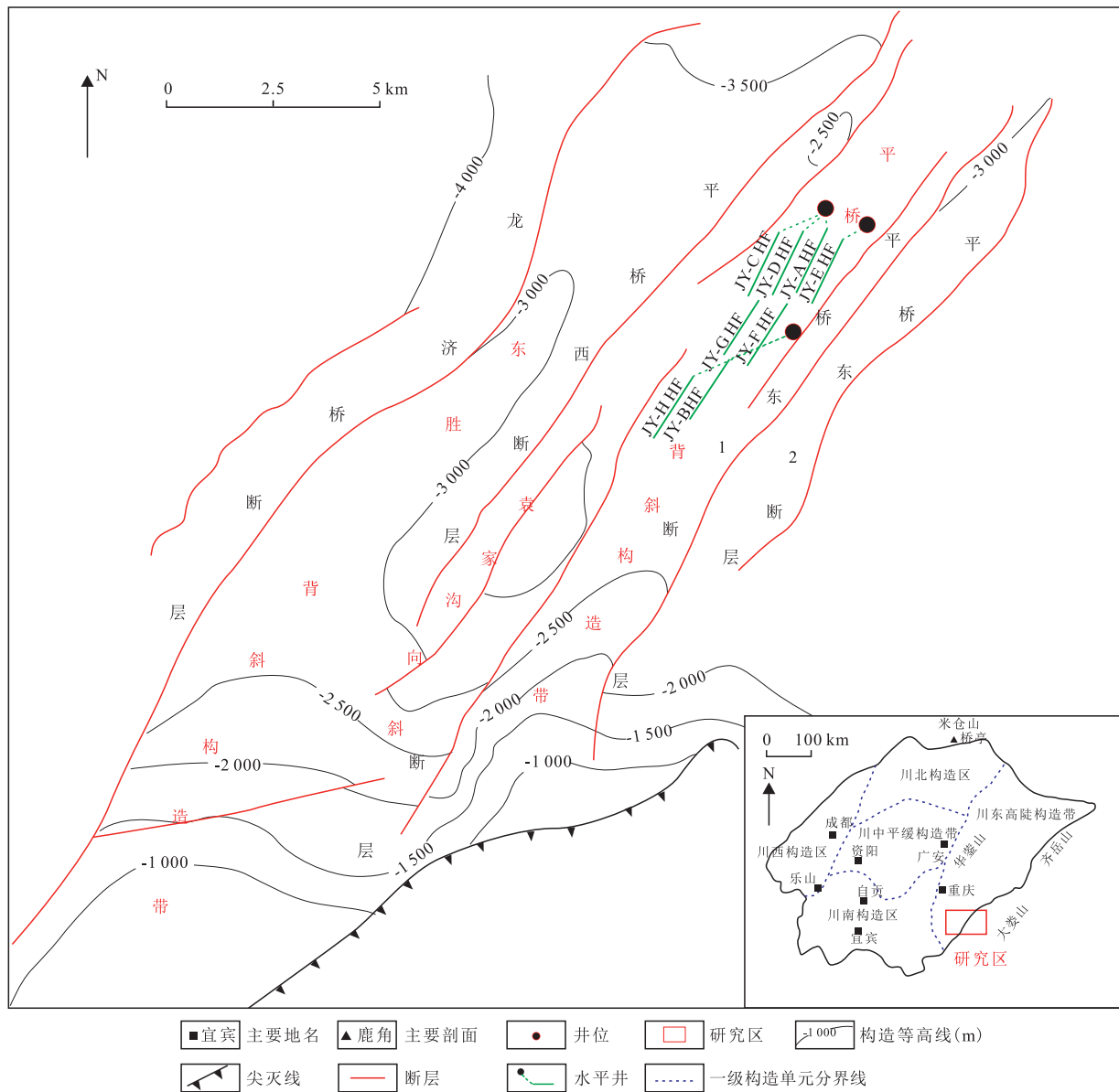


图1 南川地区地质构造
Fig. 1 Geological structure of Nanchuan Block

以及页岩气资源的评价指标,将源—储配置类别分为富碳高孔、中碳中孔、低碳低孔等12类(表1),对页岩储层源—储相互关系进行半定量评价。

将源—储耦合系数定义为页岩储层中有机质与孔隙度相互影响的大小^[25],公式定义为:

$$K = \omega_{\text{TOC}} \varphi \quad (1)$$

式中: K 为源—储耦合系数; ω_{TOC} 为有机质含量,%; φ 为孔隙度,%。

页岩储层中有机质与储集空间的耦合关系多变,在纵向和横向相非均质都非常强,较好的有机质丰度并不代表有较高的孔隙度来赋存页岩气,“源”

和“储”两者缺一不可。源—储分类评价方法正是利用这一点,定量的表征源和储之间相互耦合的强弱,突显出页岩气富集条件较优的有利层段。

2.2 源—储分类评价标准制定

研究区南川区块处于四川盆地边缘,地质构造较为复杂、地层压力系数较低、源—储耦合机制复杂。目的层位为五峰组—龙马溪组下段(1—3号小层)有机质丰富, TOC 介于0.4%~7.7%,平均3.9%,孔隙度介于2.17%~5.65%,平均3.47%,整体属于高碳中孔的源—储配置类别。

表1 页岩源—储配置类型
Table 1 Source-reservoir configuration types of shale

储配置类别	源—储配置类型				
	TOC(源) $\geq 4\%$	TOC(源): $2\% \sim 4\%$	TOC(源): $1\% \sim 2\%$	TOC(源) $< 1\%$	
孔隙度(储) (%)	≥ 4	富碳高孔源—储	高碳高孔源—储	中碳高孔源—储	低碳高孔源—储
	$2 \sim 4$	富碳中孔源—储	高碳中孔源—储	中碳中孔源—储	低碳中孔源—储
	< 2	富碳低孔源—储	高碳低孔源—储	中碳低孔源—储	低碳低孔源—储

页岩总含气量可作为页岩气富集程度的重要标准^[26]。源—储耦合系数与总含气量之间有着密切的相关性,耦合系数越大,页岩气富集条件优。因此,可以利用耦合系数和总含气量之间的相关性制定储层分类评价标准。以研究区不同井位的总含气量数据、TOC以及孔隙度数据制作散点图(图2),根据主力产层、次要产层与非产层的优势分布区来确定I、II和III类储层的分界线。根据图2可以看出,南川区块主力产层(1—3号小层)散点优势分布区大致以总含气量 $4 \text{ m}^3/\text{t}$ 为界,次要产层与非产层的散点优势分布区以总含气量 $2 \text{ m}^3/\text{t}$ 为界,其分别所对应的源—储耦合系数分级界线为15.0、7.5。也就是说耦合系数大于15.0的页岩储层,其含气量是最高的,页岩气富集条件是最优良的。综上所述,以源—储耦合系数(≥ 15.0 、 $15.0 \sim 7.5$ 、 < 7.5)为界,划分出研究区I、II和III类储层。

3 典型井实例分析

3.1 高产井JY-AHF源储配置分析

南川区块JY-AHF井五峰组—龙马溪组I段1—5号小层TOC介于 $0.82\% \sim 6.67\%$,平均 2.98% ,孔隙度介于 $3.31\% \sim 4.55\%$,平均 3.75% 。其中1号

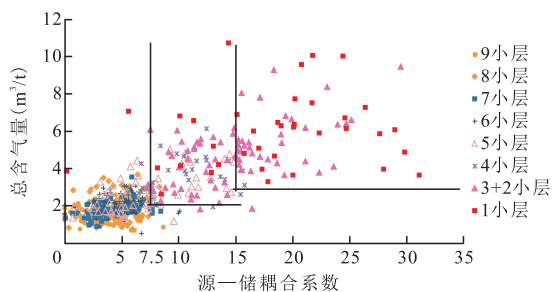


图2 南川区块源储耦合系数与总含气量关系
Fig. 2 Relation between source-reservoir coupling coefficient and total gas content in Nanchuan Block

和3号小层分为富碳高孔、高碳高孔源—储类型,4号小层次之,属于中碳中孔源—储类型(图3)。由源—储耦合公式计算表明,JY-AHF井直井段五峰组—龙马溪组底部的源储耦合系数明显高于上部,也就是说下部页岩层段,特别是 $2697.8 \sim 2685.9 \text{ m}$ 层段是源储耦合最为有利的层位。按照研究区源—储分类的判别标准,1—3号小层主要为I、II类源储配置层段,2号小层附近夹有厚度几十厘米的III类源—储层段,4—5号小层源—储指标逐渐变差,主要以III类源储配置层为主。

JY-AHF井水平段长 1538 m ,于2017年1月12日进行压裂返排,加液量 36904.05 m^3 ,加砂量 1348.6 m^3 , 12 mm 油嘴试气产量为 $32 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,返排率 2.36% 。该井靶窗位于1—3号小层内,AB靶间水平段穿行在1—3号小层内部(图4),测井TOC平均 3.9% ,源—储耦合较好。根据源—储耦合系数的计算,AB段的源—储耦合系数介于 $0.04 \sim 40.2$,平均值23,I类源—储配置层占到 96.7% ,仅在 3308 m 有长度为 20.6 m 的III类源储配置层段。综合而言,JY-AHF井1—3号小层属于高碳中孔源储耦合类型,靶窗位于I—II类源储配置层段,整个水平井段主要穿行于I类源储配置层段中,页岩气富集条件较好,这也是压裂试气产量较高的原因。

3.2 中产井JY-BHF井源储配置分析

JY-BHF井水平段长 1500 m ,水平段在1—3号中穿行,钻遇率为 100% (图5)。1—3号小层高钻遇率和测试产量并不匹配, 12 mm 油嘴测试产量 $16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右,加液量 41156.4 m^3 ,加砂量 1430.4 m^3 ,返排率 2.34% 。偏低的测试产量一方面反映了储层中页岩气富集的复杂性,另一方面也说明并不能简单的依据主力产层钻遇率来解释页岩气高低产的原因。研究区五峰组—龙马溪组一段平均孔隙度 3.32% ,平均渗透率 $0.0478 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度高、渗

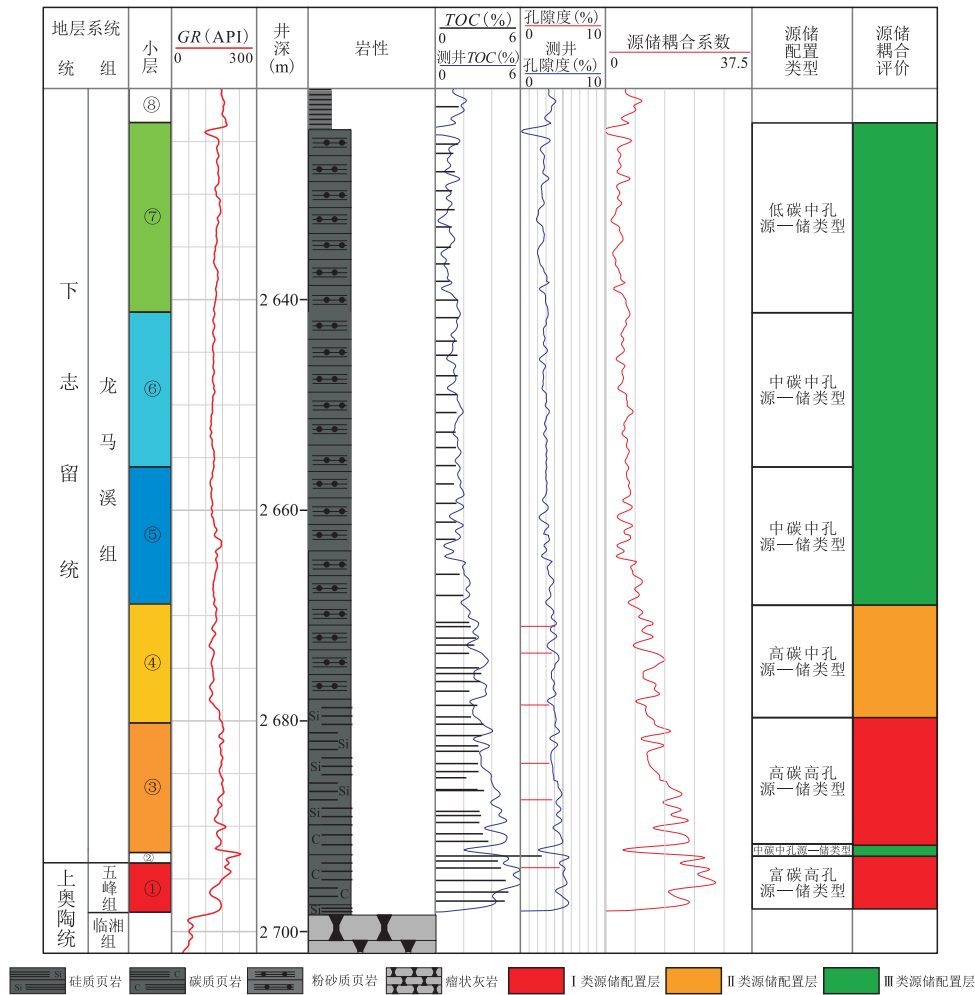


图3 南川区块JY-AHF直井段源储耦合评价

Fig. 3 Evaluation of source-reservoir coupling of vertical section in Well-JY-AHF in Nanchuan Block

透率较低,使得页岩气就地保存而没有经过较长的运移。考虑到页岩储层源—储耦合的复杂性,采用“源—储分类”方法表征储层 TOC和孔隙度之间的耦合强度,突出显示页岩气富集条件最优的层段。根据表2以及图6可以发现,JY-BHF井主力产层钻遇率高,源—储配置评价 I类储层占79.1%, II类占比4.4%, III类占比16.5%, III类源—储配置层段以夹层的形式频繁出现在水平段中,相较于JY-AHF井而言,源—储耦合关系相对较弱,压裂试气产量受到了 III类源—储层段的影响而降低。综上所述,虽然五峰组—龙马溪组底部(1—3号小层)深水陆棚炭质页岩有机质碳含量整体较高,但从源—储配置评价来看, I类源—储层的占比小, III类源—储夹层过多是试气产量偏低的原因。

3.3 源—储耦合系数与试气产量相关性

页岩气试气产量影响因素较多,涵盖地质因素和工程因素,选取区内开采工艺类似的水平井,从源—储耦合地质角度分析试气产量波动较大的原因。选井的水平井距介于390~450 m、水平段长1400~1538 m、压裂18~20段、加砂量1072.7~1485.1 m³、加液量34155.5~42099.9 m³、返排率介于2.34%~7.38%。根据源—储分类评价来看,研究区开采工艺相似的8口水平井钻遇 I类储层占比介于79.10%~96.96%(表2),其12 mm油嘴压裂试气产量为(15~32)×10⁴ m³/d。总体来看,研究区钻遇 I类储层的占比越大,压裂试气产量越高,两者之间呈明显的正相关性(图6a);而1—3号小层钻遇率基

本保持在90%以上,1—3号小层钻遇率与压裂试气产量之间无明显相关性。

研究区南川区块五峰组顶部埋深介于2 700~4 000 m,优质储层(1—3号小层)钻遇率普遍大于

90%,从研究区开采工艺相似的水平井1—3号小层钻遇率和压裂试气散点图来看,优质储层钻遇率即使达到100%,其压裂试气产量也会在(14~31)×10⁴ m³/d波动(图6b),表明钻遇率与压裂试气产量并不成匹

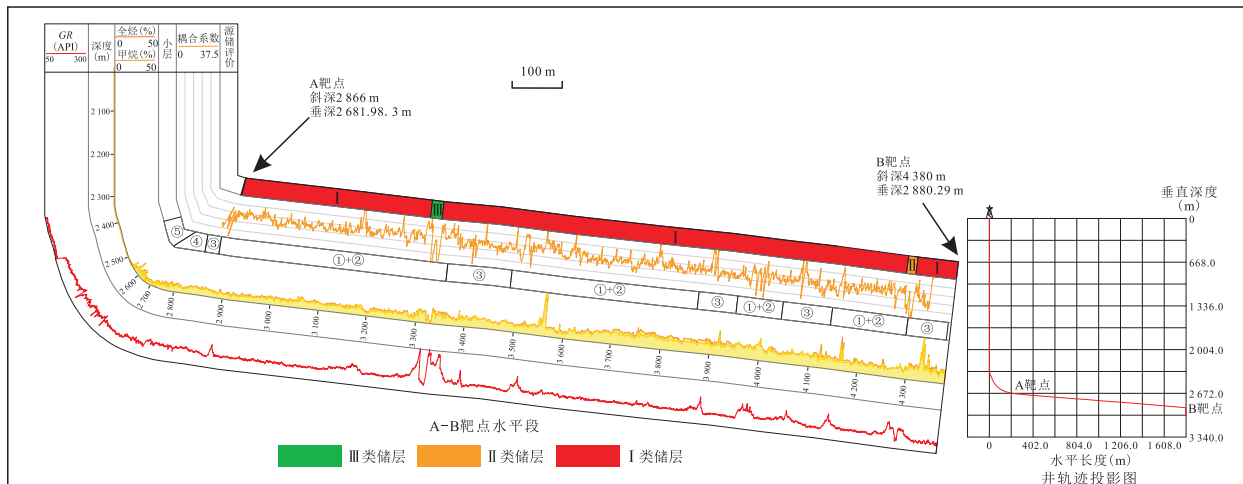


图4 南川区块JY-AHF水平井段源储耦合评价

Fig. 4 Evaluation of source-reservoir coupling of horizontal section in Well-JY-AHF in Nanchuan Block

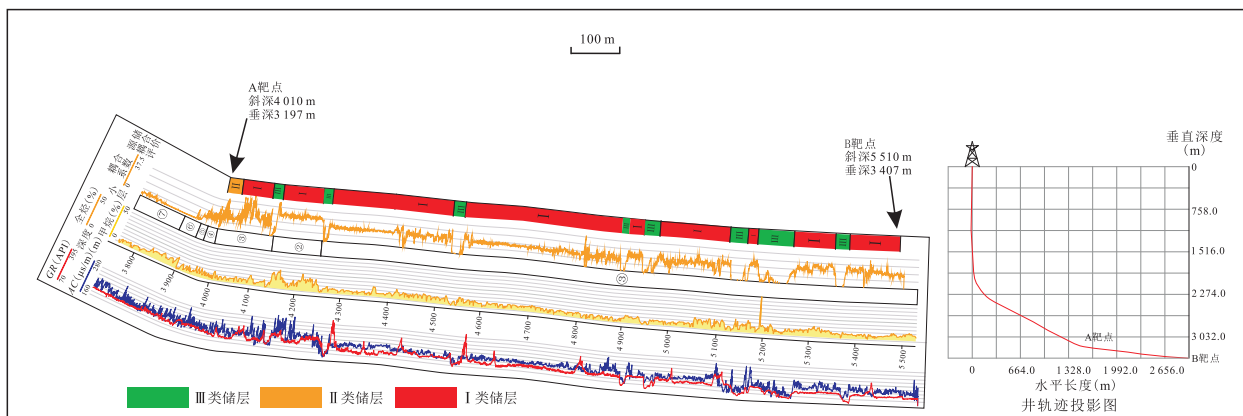


图5 南川区块JY-BHF水平井源储耦合评价

Fig. 5 Evaluation of source-reservoir coupling of horizontal section in Well-JY-BHF in Nanchuan Block

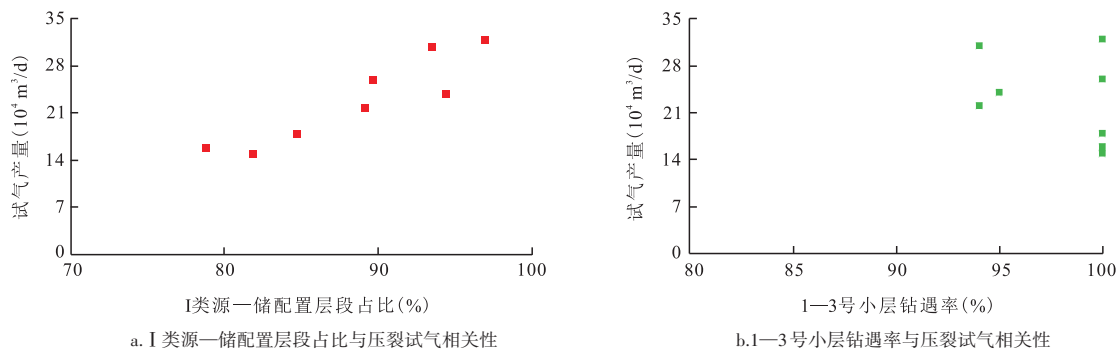


图6 I类储层占比、1—3小层钻遇率与压裂试气产量相关性

Fig. 6 Correlation between the proportion of type I reservoir, layer 1 to layer 3 drilling encounter rate and fracturing gas production

表2 南川区块源储配置评价 I 及 II 类占比
Table 2 Proportion of type I and type II source and reserve allocation evaluation in Nanchuan Block

井名	1-3号小层 钻遇率(%)	返排率 (%)	I类占比 (%)	II类占比 (%)	12 mm油嘴试气 产量(10 ⁴ m ³ /d)	水平段长 (m)	压裂段数 (段)	加液量 (m ³)	加砂量 (m ³)
JY-AHF井	100	2.36	96.96	1.38	32	1 538	20	36 904.05	1 348.60
JY-BHF井	100	2.34	79.10	4.87	16	1 400	20	41 156.40	1 430.40
JY-CHF井	95	3.90	94.43	3.38	24	1 459	20	42 099.89	1 215.39
JY-DHF井	100	3.88	89.66	0	26	1 512	19	40 486.00	1 223.10
JY-EHF井	94	7.38	89.17	9.02	22	1 529	18	34 155.45	1 106.29
JY-FHF井	94	2.98	93.51	2.43	31	1 440	18	34 375.40	1 072.70
JY-GHF井	100	5.09	84.70	8.93	18	1 423	19	36 480.70	1 485.10
JY-HHF井	100	3.57	81.88	18.13	15	1 422	20	41 222.60	1 355.10

配关系。利用源—储分类方法评价出的 I 类储层占比越高,其压裂试气产量越高,综合而言,在压裂试气产量的分析上,双变量的源—储分类方法优于优质储层钻遇率法。

4 结论

1) 页岩储层中“源”“储”互相耦合,共同制约着页岩气的富集。川东地区南川区块五峰组—龙马溪组底部源—储配置最优。以 JY-AHF 直井段为例,1—3号小层源—储配置分别为富碳高孔、高碳高孔源—储配置类型,4号小层次之,属于高碳中孔源—储配置类型。

2) JY-AHF 井、JY-BHF 井水平段 I 类源—储配置层段分别占比 96.96%、79.10%,前者试气产量高、后者试气产量相对偏低,I 类源—储配置层段占比与各自的压裂试气产量相匹配。再根据研究区开采工艺类似的 8 口水平井源—储分类评价,证实此方法在解释分析压裂试气产量的实用性。

3) 通过对研究区部分水平井五峰组—龙马溪组页岩源—储耦合系数计算发现:I 类储层的占比越大,页岩源—储耦合越佳,压裂试气产量越高。综合表明双变量的“源—储分类”法在评价页岩气井的高、低产方面要优于优质页岩钻遇率法。

参考文献

- [1] 胡宗全,杜伟,彭勇民,等.页岩微观孔隙特征及源—储关系——以川东南地区五峰组—龙马溪组为例[J].石油与天然气地质,2015,36(6):1001-1008.
HU Zongquan, DU Wei, PENG Yongmin, et al. Microscopic pore characteristics and the source-reservoir relationship of shale —A case study from the Wufeng and Longmaxi Formations in Southeast Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6): 1001-1008.
- [2] 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,2021,28(1):261-272.
HU Zongquan, WANG Ruyue, LIU Zhongbao, et al. Source-reservoir characteristics and coupling evaluation of lacustrine shale gas in the Lower Jurassic, Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(1): 261-272.
- [3] 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.
- [4] 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.
DONG Dazhong, WANG Yuman, HUANG Xu'nan, et al. Discussion about geological characteristics, resource evaluation methods and its key parameters of shale gas in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(9): 1583-1601.
- [5] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. Aapg Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [6] 腾格尔,高长林,胡凯,等.上扬子东南缘下组合优质烃源岩发育及生烃潜力[J].石油实验地质,2006,28(4):359-365.
TENGER, GAO Changlin, HU Kai, et al. High-quality source rocks in the Lower Combination in Southeast Upper-Yangtze area and their hydrocarbon generating potential[J]. Petroleum Geology And Experiment, 2006, 28(4): 359-365.
- [7] 秦建中,申宝剑,陶国亮,等.优质烃源岩成烃生物与生烃能力动态评价[J].石油实验地质,2014,36(4):465-472.
QIN Jianzhong, SHEN Baojian, TAO Guoliang, et al. Hydrocarbon-forming organisms and dynamic evaluation of hydrocarbon generation capacity in excellent source rocks[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2014, 36(4): 465-472.

- [8] BUSTIN RM, BUSTIN AM, CUI A, et al. Impact of shale properties on pore structure and storage characteristics[C]// Paper SPE-119892-MS presented at the SPE Shale Gas Production Conference, Fort Worth, Texas, USA, November 2008.
- [9] 王濡岳,胡宗全,杨滔,等.黔东南岑巩地区下寒武统黑色页岩孔隙结构特征[J].石油实验地质,2019,41(2):207-214.
WANG Ruyue, HU Zongquan, YANG Tao, et al. Pore structure characteristics of the Lower Cambrian black shale in the Cengong block, southeastern Guizhou area[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2019, 41(2): 207-214.
- [10] 王濡岳,胡宗全,董立,等.页岩气储层表征评价技术进展与思考[J].石油与天然气地质,2021,42(1):54-65.
WANG Ruyue, HU Zongquan, DONG Li, et al. Advancement and trends of shale gas reservoir characterization and evaluation [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1): 54-65.
- [11] 李玉喜,何建华,尹帅,等.页岩油气储层纵向多重非均质性及其对开发的影响[J].地学前缘,2016,23(2):118-125.
LI Yuxi, HE Jianhua, YIN Shuai, et al. The multi-anisotropy of shale oil and gas reservoirs in vertical and its influence on oil-gas development[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 118-125.
- [12] 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.
- [13] 葛忠伟,樊莉,钟文俊,等.威远龙马溪组黑色页岩非均质性及其对开发的影响[J].非常规油气,2019,6(4):33-39.
GE Zhongwei, FAN Li, ZHONG Wenjun, et al. Heterogeneity of black shale of Longmaxi Formation in Weiyuan and its impact on development[J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(4): 33-39.
- [14] 高全芳.武隆向斜五峰组—龙马溪组优质页岩特征及水平井靶窗优选[J].非常规油气,2019,6(3):99-105.
GAO Quanfang. The high-quality shale characteristics of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Wulong syncline and the best target of horizontal well[J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(3): 99-105.
- [15] 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.
- [16] 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, challenges and prospects (II) [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 166-178.
- [17] 金晓波.南川区块断层精细解释研究[J].油气藏评价与开发,2018,8(4):6-10.
JIN Xiaobo. Study on the fine fault interpretation in Nanchuan district[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2018, 8(4): 6-10.
- [18] 郭旭升.上扬子地区五峰组—龙马溪组页岩层序地层及演化模式[J].地球科学,2017,42(7):1069-1082.
GUO Xusheng. Sequence stratigraphy and evolution model of the Wufeng-Longmaxi shale in the upper yangtze area[J]. Earth Science, 2017, 42(7): 1069-1082.
- [19] 何贵松,何希鹏,高玉巧,等.中国南方3套海相页岩气成藏条件分析[J].岩性油气藏,2019,31(1):57-68.
HE Guisong, HE Xipeng, GAO Yuqiao, et al. Analysis of accumulation conditions of three sets of marine shale gas in southern China[J]. Lithologic Reservoirs, 2019, 31(1): 57-68.
- [20] HU H, HAO F, LIN J, et al. Organic matter-hosted pore system in the Wufeng-Longmaxi (O_3w-S_1l) shale, Jiaoshiba area, Eastern Sichuan Basin, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2017, 173: 40-50.
- [21] ARINGHIERI R. Nanoporosity characteristics of some natural clay minerals and soils[J]. Clays and Clay Minerals, 2004, 52(6): 700-704.
- [22] 张金川,聂海宽,徐波,等.四川盆地页岩气成藏地质条件[J].天然气工业,2008(2):151-156.
ZHANG Jinchuan, NIE Haikuan, XU Bo, et al. Geological condition of shale gas accumulation in sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 2008(2): 151-156.
- [23] 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. Analyses 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.
- [24] 刘伟新,鲍芳,俞俊杰,等.川东南志留系龙马溪组页岩储层微孔隙结构及连通性研究[J].石油实验地质,2016,38(4):453-459.
LIU Weixin, BAO Fang, YU Lingjie, et al. Micro-pore structure and connectivity of the Silurian Longmaxi shales, southeastern Sichuan area[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(4): 453-459.
- [25] 彭勇民.基于页岩源储相互关系的分类评价方法及装置:中国,ZL201610373919.4[P].2020-09-04.
PENG Yongmin. Classification evaluation method and device based on the relationship between shale source and reservoir: China, ZL201610373919.4[P]. 2020-09-04.
- [26] 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.

(编辑 徐佩)