

页岩气“双甜点”参数测井评价方法

刘双莲^{1,2}

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘要:页岩气储层的地质与工程“双甜点”评价常困于3点:①含气饱和度计算精度低,定量评价方法还不成熟;②可压裂性评价方法虽多,但操作困难,局限性大;③地质与工程评价弱关联,一体化融合不充分。针对上述难点,开展了3方面探索:①根据含气原理,基于测井曲线与含气敏感关系的次序重构,建立了表征地质“甜点”的含气丰度曲线;②根据脆性指数、岩石力学参数及地应力差异系数与压裂的相关性,提出表征工程“甜点”的综合可压指数;③根据生产数据,基于测试层产能分级,建立了表征地质-工程一体化的评价图版。本研究提高了页岩气层的定性判别和可压性评价精度,地质-工程一体化评价图版能准确区分高、中、低产气层及干层,并被生产测试及产出剖面所验证。实践表明,该技术在四川盆地及其周缘深、浅层具有良好通用性和可靠性,推广应用前景广阔。

关键词:含气丰度;可压指数;甜点;地质-工程一体化;页岩气;储层评价;四川盆地

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

Logging evaluation of “double sweet spot” in shale gas reservoirs

Liu Shuanglian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100101, China;

2. Research Institute of Petroleum Engineering, SINOPEC, Beijing 100101, China)

Abstract: Evaluation of “double sweet spot” in shale gas reservoirs, i. e. shale gas sweet spot that are both geologically and engineeringly feasible, is challenging due to insufficient accuracy of gas saturation calculation, limitations of fracability assessment methods (though quite a few), and inadequate integration between the geological and engineering assessments. In view of these, a gas abundance curve representing the geological “sweet spot” is established to tackle the accuracy problem through a sequential reconstruction of the sensitivity relationship between logging curves and gas bearing property based on gas bearing principles. A comprehensive fracability index representing the engineering “sweet spot” is developed to enhance the usability of the fracability assessment methods based on the correlation of rock brittleness index, mechanic parameters and in-situ stress difference coefficients to fracturing. And a geology-engineering evaluation chart is also proposed to better integrate the two aspects based on the production data and productivity classification of layers tested. This study improves the accuracy of qualitative identification and fracability assessment of shale gas sweet spots. The chart has been proven to be effective in recognizing high- medium- and low-potential gas pay zones as well as dry layers. Practices show that the technology is applicable and reliable in assessing shallow/deep layers in the Sichuan Basin and its periphery.

Key words: gas abundance, compressibility index, sweet spot, geology-engineering integration, shale gas, reservoir assessment, Sichuan Basin

引用格式:刘双莲. 页岩气“双甜点”参数测井评价方法[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 1005-1012. DOI: 10.11743/ogg20220420.

Liu Shuanglian. Logging evaluation of “double sweet spot” in shale gas reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 1005-1012. DOI: 10.11743/ogg20220420.

收稿日期: 2022-01-05; 修订日期: 2022-05-01。

作者简介: 刘双莲(1970—), 女, 博士、高级工程师, 非常规储层评价与测井解释。E-mail: liusl.sripe@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技部项目(PE19012-2)。

页岩气储层具有低孔、特低渗特征,需采用水平井技术和大型压裂技术才有可能有效开发^[1-3]。要想实现工业开采,需弄清两个关键问题:①怎样准确判断页岩气储层是否具有足够的含气量(即游离气+吸附气饱和度或含气丰度)?含气量是页岩的地质“甜点”指标^[4-5],事实证明,含气量越高,工业开采的能力就越强。②怎样准确判断页岩气储层的可压性好坏(即寻找页岩的工程“甜点”)^[6-8]?页岩储层即使含气量很高,但如果可压性很差,也不能工业开采。可见,测井技术在页岩气评价中扮演着重要角色,如何利用测井技术准确评价页岩储层的含气量与可压性,对于指导压裂层段的选取、改善压裂效果及提高页岩储层的产能,具有重要意义。

目前页岩气“双甜点”评价面临三大难点。①含气饱和度计算精度低。由于页岩气具有游离与吸附两种赋存方式,其饱和度评价需分别计算游离气与吸附气含量。目前,业内主要应用阿尔奇公式计算游离气饱和度^[9-10],但公式参数 a 、 b 、 m 和 n 非固定值,其变化规律还难以用实验准确描述,这使计算结果的不确定性很大。吸附气计算多采用Langmuir等温吸附实验方法^[7],该计算结果受实验条件、储层压力、样品质量及温度等多种因素影响,计算结果的不确定性也很大。因此,有必要探索适合现阶段页岩气储层含气丰度的有效判别方法。②可压性评价存在较大局限性。研究表明,页岩地层可压性取决于脆性矿物含量、脆性指数、力学特性、地应力特征、破裂压力和裂缝系统等多种因素^[11-15]。目前可压性评价方法虽多,但实际操作还是多倚重单因素指数,如依据脆性指数指导压裂等(脆性指数仅能反映地层的弹性变形这一方面),对于其他因素如地层应力等对压裂的影响即使考虑到了,操作难度也较大。因此,有必要探索能兼顾多种因素、操作方便的高精度综合可压指数评价方法。③地质-工程一体化融合研究很不充分。前文分析表明,页岩气的含气量计算和可压性评价方法还很不成熟,加之地质-工程一体化的融合能力不足等因素,目前的页岩气地质与工程甜点评价,更多是相互独立的两个单元。这经常引发一些矛盾现象,如有些储层评价的地质甜点甚佳,压裂后却几乎不产气,有些页岩气层完全压开了,产气量却很少,导致含气评价与工程评价进退失据。因此,怎样探寻简洁、实用的页岩气地质-工程一体化应用技术,是页岩气评价的现实问题。

上述3个难点限制了测井技术的应用。以四川盆地为例,目前各地区的页岩气测井评价通常以个案研

究居多,各地区局限性明显,研究之间难以互相借鉴。这种情况反映了含气性评价不成熟的现状,严重影响了页岩气测井评价技术的权威性。有些页岩气产区甚至大量减少了测井工作量,测井曲线信息的大幅减少,也为页岩气产区后期的调整与挖潜埋下隐患。

本文以四川盆地及其周边的多个页岩气评价区为研究对象,针对上述3个难点开展探索。其中,针对含气饱和度定量计算方法尚不成熟的问题,建立了基于含气测井敏感参数的含气丰度曲线,解决了单一方法在大范围内的通用性问题,提高了页岩气层的定性判别精度;针对可压指数的单因素评价问题,创建了考虑多种指标综合作用的可压指数评价模型,该模型便捷、实用,提升了页岩储层的可压性系统评价能力;针对地质-工程一体化融合研究不充分问题,创建了基于页岩气含气丰度和综合可压指数的“双甜点”解释图版,实际应用表明,该图版能够科学、合理地分析和预测测试产能与地质、工程的内在关系。

1 页岩储层含气丰度评价方法

众多研究表明,页岩储层的地质“甜点”评价参数主要与页岩的总有机碳含量、孔隙度、含气饱和度、厚度及含气量等参数有关^[16-17]。现场应用表明,这些参数的求取受多种因素干扰:①页岩生成环境(海相或湖相)提供的煤或钙质等测井信号,对总有机碳含量计算精度影响非常大,在实际应用中,即使尝试了各种计算公式也难以满足计算精度;②页岩储层中有很多种矿物,每种矿物的岩石骨架不同,对孔隙度计算精度影响较大;③前文中已介绍含气量评价受到诸多因素影响,其准确性有待商榷;④有机碳含量更多的是反映储层中有机质丰度,但具体评价还需结合氯仿沥青“A”、总烃及热解生烃潜量综合评价^[18-19]。

本文认为,从含气测井实验或原理出发,只要页岩储层含气,总会找到与含气相关的敏感测井曲线,根据测井曲线与含气敏感关系的密切程度,可以重构出页岩储层的含气丰度曲线,依据该含气丰度曲线,可确定页岩储层的流体性质判断标准,该标准也完全可以通过测试或试采关系得到检验和验证。按照这个思路提高页岩气层的定性判别精度,避免僵硬套用尚不成熟的页岩气储层定量评价方法。

1.1 敏感曲线分析

直接寻找测井曲线与含气丰度的精确关系,是现今测井行业很少涉及的领域。由于测井曲线与含气丰

度的关系复杂,因而需要优先寻找含气丰度与测井曲线之间的敏感关系。

测井的气层识别原理表明,当储层含有一定丰度天然气时,会出现中子曲线的“挖掘效应”与密度曲线的降低。同理,这两条曲线也应该是含气敏感曲线,并普适于各地区页岩气储层。本文以这两条曲线为切入点,开展了测井与页岩气储层的敏感关系研究。

具体研究方法如下:①根据页岩气岩心分析总含气量,确定含气量大小的级别。图中将含气量的数据区间划分为4个,即含气量小于 $1 \text{ m}^3/\text{t}$ 、含气量 $1 \sim 2 \text{ m}^3/\text{t}$ 、含气量 $2 \sim 3 \text{ m}^3/\text{t}$ 与含气量大于 $3 \text{ m}^3/\text{t}$,为获得含气量大小与测井曲线间的敏感关系提供参考。②含气量与测井曲线的敏感关系研究。根据气层的测井曲线判别机理,分别制作各测井曲线与总含气量的关系图版(图1—图3)。③页岩储层含气敏感测井曲线的确定。根据图版中测井曲线与页岩储层含气的敏感程度,确定敏感测井曲线的次序,为含气丰度曲线的创建提供计算依据。

图1—图3分别是中子-密度、密度-声波时差、自然伽马-电阻率交会图版。由这些图版可看出,①密度曲线与含气量的敏感度最高,中子曲线次之,这是创建含气丰度曲线的基础。②当含气量大于 $3 \text{ m}^3/\text{t}$ 时,密度与中子曲线能较清晰将其区分(图1)。这表明含气丰度越高,密度和中子测井曲线综合判别含气量的能力越强,这是利用测井曲线较高精度定性判别页岩

气储层流体性质的图版依据。③当含气量分别在 $1 \sim 2 \text{ m}^3/\text{t}$ 与 $2 \sim 3 \text{ m}^3/\text{t}$ 时,密度与中子曲线较难将其区分。因此将其合并,作为该类页岩气储层的综合判别依据(图2,图3)。上述工作为含气丰度曲线的创建提供了科学依据。

1.2 含气丰度曲线创建

依据上述研究,获得了对含气丰度敏感的测井曲线,采用优化重组的方法,创建出含气丰度曲线。

$$GS = \frac{1}{A \times DEN \times B \times CNL} \quad (1)$$

式中:GS为含气丰度,无量纲;DEN为补偿密度值, g/cm^3 ;CNL为补偿中子测井值,%;A,B为地区经验系数,无量纲。

将新创建的含气丰度曲线统一应用到焦石坝地区(焦页1井,焦页6井,焦页7井,焦页8井)及其周围的彭水地区(彭页1井)、黄坪地区(黄页1井)。研究表明,计算的含气丰度与总含气量总体成正相关关系(图4)。其中,焦页1井总含气量最高,基本都大于 $1 \text{ m}^3/\text{t}$,近半数以上的总含气量大于 $3 \text{ m}^3/\text{t}$,含气丰度大于26,测试产量为 $15.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,为工业气层;焦页6井,焦页7井,焦页8井次之,总含气量与测井分析的含气丰度分化较大,半数以上的含气量在 $1 \sim 3 \text{ m}^3/\text{t}$,一部分含气量大于 $3 \text{ m}^3/\text{t}$,约1/4的含气丰度大于26,测试产量分别为 2.8×10^4 、 6.22×10^4 和 $23 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,测试

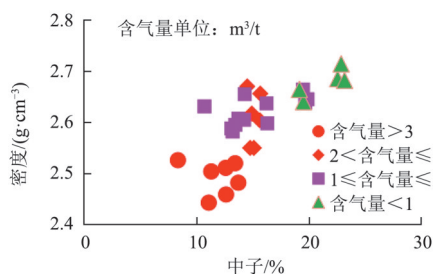


图1 中子-密度交会图

Fig. 1 Density-neutron crossplot

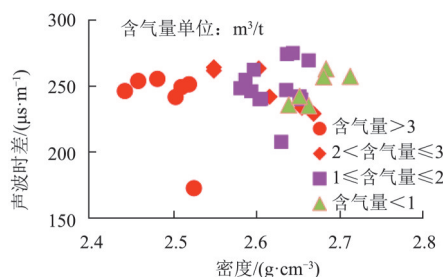


图2 密度-声波时差交会图

Fig. 2 Density vs. interval transit time

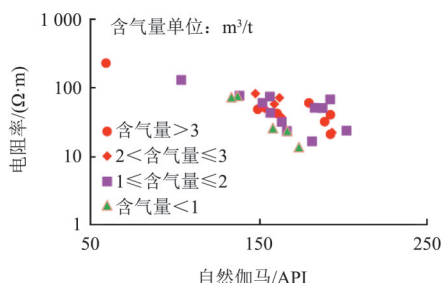


图3 自然伽马-电阻率交会图

Fig. 3 Gamma ray-resistivity crossplot

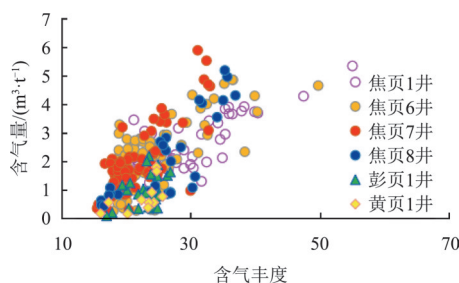


图4 含气丰度与总含气量关系

Fig. 4 Relationship between gas abundance and total gas content

结果介于工业气层与低产气层之间;彭页1井含气量基本都小于 $2\text{ m}^3/\text{t}$,测试产量为 $2.5 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,含气丰度小于26,为低产气层;黄页1井含气量小于 $1\text{ m}^3/\text{t}$,含气丰度小于26,测试产量为 $0.0417 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,仅仅是含气储层。

以上分析表明,高含气丰度总体对应着高总含气量。这6口井分属于3个地区,以前多数研究都采用3种不同的气层判别方法,且评价效果各异。采用新提出的含气丰度曲线技术,实现了一种方法在不同地区的通用,并且精度较高,但由于缺乏岩石可压性依据,仅凭该图版还不足以准确预测出工业气层。

2 页岩气储层工程“甜点”评价方法

工程“甜点”通常指的是可压性好的地层,为避免单纯应用脆性指数高低来表征可压性好差,本文提出采用综合指数判断岩石可压性的方法。

2.1 可压性影响因素

研究表明,影响页岩可压性的参数通常包括页岩的脆性指数、脆性矿物含量、岩石力学以及地应力大小等。当页岩储层受构造因素影响较小时,页岩的脆性指数受页岩脆性矿物含量的影响最大,通常脆性矿物含量越高,则脆性指数越大;当页岩储层遭受构造或地应力影响时,上述因素会发生很大改变。局部裂缝对储层的可压性影响可能会大于脆性指数,从力学角度看来,地层的破裂是地层受力作用的结果,除了流体压力的作用外,也和地层中存在的地应力大小有很大的关系^[20-22]。

根据上述分析,本文选取脆性指数、力学特性与地应力差异系数参数进行可压性评价。选择依据是:脆性指数是表征压裂能量的一个参数,力学特性反映物体弹性变形程度,应力差异系数反映裂缝形成模式。

2.2 综合可压指数评价模型

根据上述分析,选择脆性指数、杨氏模量与地应力差异系数参与可压指数建模。

页岩地层可压性指数计算模型具体为:

$$FI = \alpha E_{BI} + \beta E_{YMOD} + \gamma \Delta\sigma \quad (2)$$

$$E_{BI} = \frac{BI - BI_{\min}}{BI_{\max} - BI_{\min}} \quad (3)$$

$$E_{YMOD} = \frac{YMOD - YMOD_{\min}}{YMOD_{\max} - YMOD_{\min}} \quad (4)$$

式中: FI 为可压指数,无量纲; E_{BI} 为标准化后的脆性指数,无量纲; α, β, γ 为经验系数,无量纲; $\Delta\sigma$ 为应力差异系数,无量纲; BI 为脆性指数,%; $BI_{\min}$ 为脆性指数最小值,%; $BI_{\max}$ 为脆性指数最大值,%; E_{YMOD} 为标准化后的杨氏模量,无量纲; $YMOD$ 为杨氏模量,MPa; $YMOD_{\min}$ 为杨氏模量最小值,MPa; $YMOD_{\max}$ 为杨氏模量最大值,MPa。

2.3 综合可压指数应用效果

图5分别显示了黄页1井、彭页1井与焦页1井的可压指数曲线(图中 FI 曲线)与含气丰度曲线(图中 GS 曲线)。可以看出,彭页1井的可压指数高于焦页1井,黄页1井的可压指数最低。其中,黄页1井天然气测试产量为 $0.0417 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,基本为干井,这与其含气丰度与可压指数均较低一致;彭页1井可压指数较高,但其测试产量较低,只有 $2.5 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,这与其含气丰度较低有关;焦页1井的可压指数与含气丰度均较高,因而其测试产量较高,该井初产 $15.5 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,经过1年开采,日产量仍在 $6 \times 10^4\text{ m}^3$ 左右。

该案例表明,仅凭可压指数无法准确预测页岩气储层产能。只有将含气丰度与可压指数有机结合,才有可能对页岩气储层做到科学分析和准确预测。因此,有必要开展页岩气地质-工程一体化研究。

3 页岩气地质-工程一体化应用

3.1 地质-工程一体化图版的创建

上述分析表明,页岩气地质-工程一体化研究是页岩气测井评价的核心技术。本文在页岩储层含气丰度与可压指数评价的基础上,按照焦石坝页岩储层地质-工程参数特征与初期产能特点,统计了五峰组与龙马溪组5个优质小层的参数,按产能区间对其进行划分,采用含气丰度表征页岩地质“甜点”、可压指数表征工程“甜点”的方法,应用交会图分析技术,建立地质-工程一体化评价方法。再结合生产测试数据与产出剖面成果,对建立的一体化评价技术进行检验与反复论证,最终形成页岩地质-工程一体化评价技术。

按照初始产能高低,划分了4个产能级别(无阻流量 $<20 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, $20 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d} \leq$ 无阻流量 $<40 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, $40 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d} \leq$ 无阻流量 $<80 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 与无阻流量 $\geq 80 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$),建立了可压指数与地层含气丰度

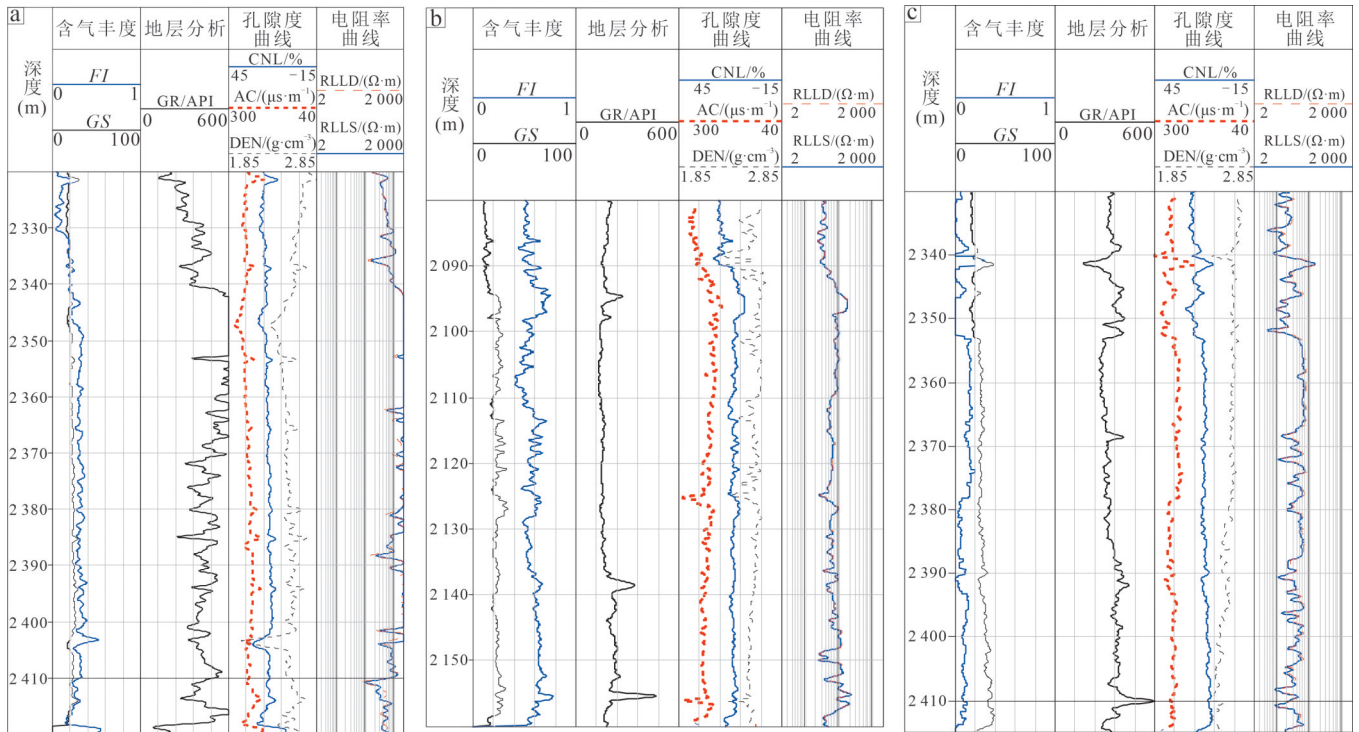


图5 贵州黄页1井(a)、四川盆地彭页1井(b)和焦页1井(c)可压指数曲线计算结果对比

Fig. 5 Comparison of calculated fracability index curves for Well Huangye 1 in Guizhou Province and Wells Pengye 1 and Jiaoye 1 in the Sichuan Basin

之间的关系(图6),从交会图可明显看到产能分化为4个明显的分布区域。

I类区域是含气丰度高、可压指数高的区域,该区绝大多数井的测试产量大于 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,经济价值显著;II类区域为含气丰度高、可压指数低的区域,该区绝大多数井的测试产量介于 $(20 \sim 40) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,具有一定经济价值;III类区域为含气丰度低、可压指数高的区域,该区绝大多数井的测试产量小于 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,

经济价值相对较低;IV类区域为含气丰度和可压指数均低,该区域基本为低产或干层区。

可见,较之单独应用含气量或可压指数图版进行产能预测,利用地质-工程一体化图版预测产能可得到更准确的结果,为页岩气科学开采提供了有力武器。从图版中也可以看出,对于各区域边界上的产能预测还存在不稳定性,一方面说明,该技术还有待进一步完善,另一方面表明,页岩气储层的复杂性导致各区域边界处储层测井技术描述精度无法满足要求。

3.2 地质-工程一体化图版的应用

为进一步检验地质与工程一体化研究成果的通用性和可靠性,开展了两方面的应用分析:①对分布在焦石坝区域外的丁页2井开展了应用分析;②对结合产出剖面测试结果的井,对该成果进行检验。

隆胜2井是丁页2井的先导井,井位于贵州省习水县寨坝镇,目的层位是上奥陶统五峰组至下志留统龙马溪组,井深4 409 m,是焦石坝区域外围的深层井。图7为隆盛2井可压性综合评价成果图,图8为含气丰度与可压指数关系图。从图中可以看出隆胜2井的含气丰度与可压指数分布在第III类区域,对应侧钻水平井丁页2井试气产能为 $10.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,与图版预测规律完全吻合。

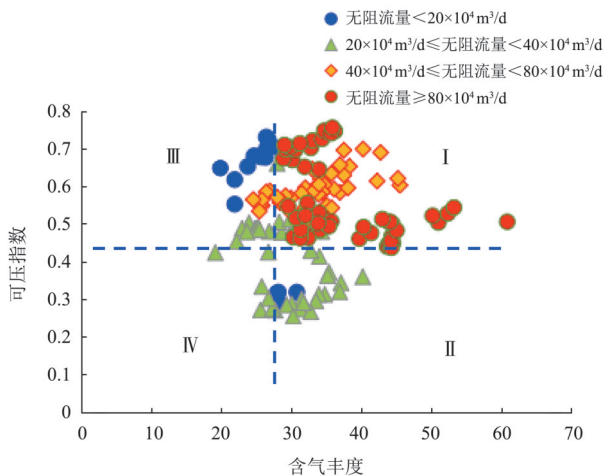


图6 可压指数与含气丰度关系

Fig. 6 Fracability index vs. gas abundance

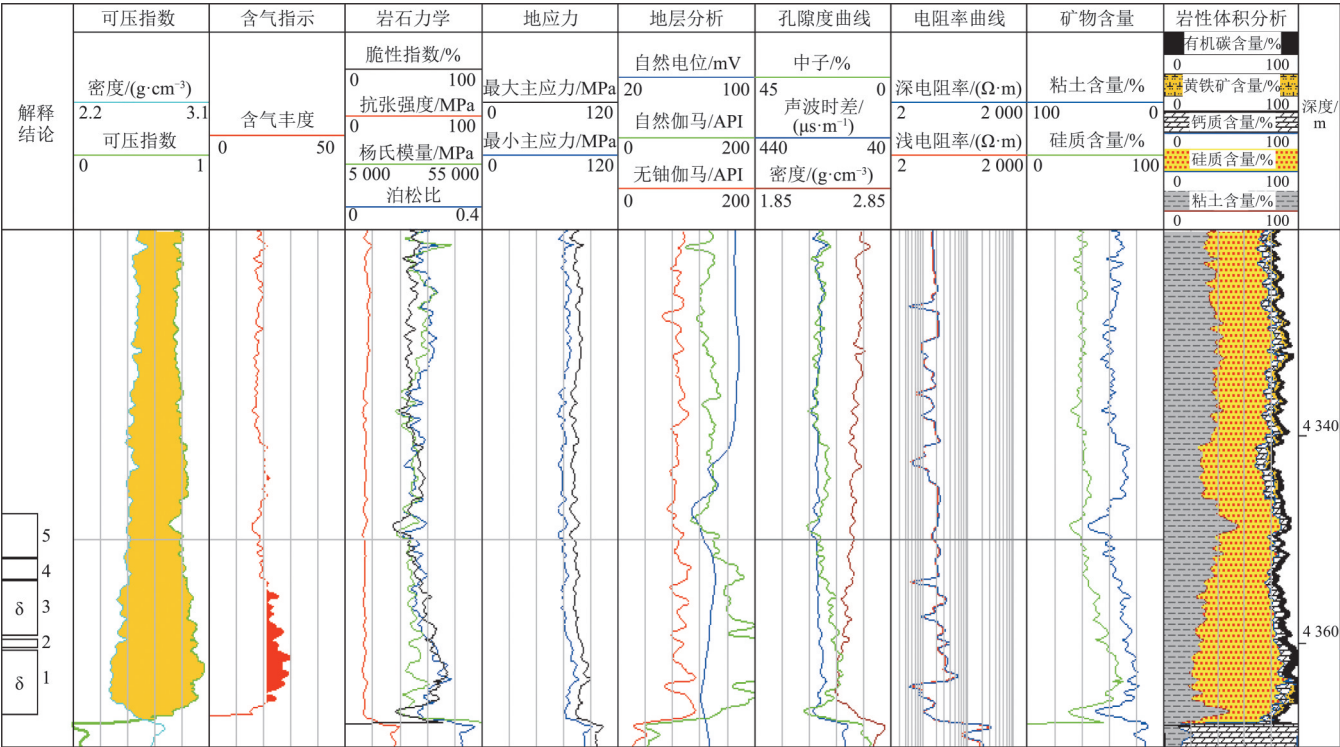


图7 贵州省隆盛2井可压性评价成果

Fig. 7 Assessment results of fracability of Well Longsheng 2 in Guizhou Province

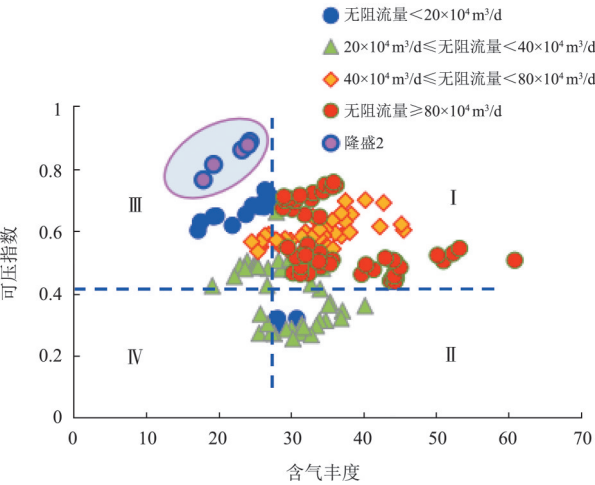


图8 贵州省隆盛2井可压指数与含气丰度关系

Fig. 8 Fracability index vs. gas abundance, Well Longsheng 2 in Guizhou Province

图9为焦页6-2井产出剖面测试与测井解释结果,从该图中可以看出,上部2 900~3 500 m深度段为龙马溪组3小层、4小层,该段产能占全井产能的40%;下段3 500~4 300 m深度段为五峰组1小层与龙马溪组3小层,该段产能占全井产能的60%。

利用上述一体化评价方法研究发现,该井上部地层可压指数与含气丰度均低于下段地层,因而下段地层测试产能好于上段地层,与研究结果一致。

4 结论

1) 基于含气测井实验或原理建立大区域页岩气含气性通用评价方法可行且有效。本文通过测井曲线与含气敏感关系的密切程度研究,重构出页岩储层的含气丰度曲线,该曲线可指示页岩储层地质“甜点”,已被生产测试结果所验证。

2) 实践表明,综合可压指数便捷、实用,能综合表征脆性指数、杨氏模量与地应力差异系数对储层可压性的指示性,可以有效描述页岩储层的工程“甜点”。

3) 实践表明,含气丰度与综合可压指数能够分别指示页岩储层的地质“甜点”与工程“甜点”。但仅凭含气丰度或可压指数还难以准确预测页岩气储层产能,地质-工程一体化研究才是准确预测页岩气储层产能的必由之路。

4) “双甜点”解释图版不仅能够科学、合理地分析测试产能与地质、工程的内在关系,而且多个应用实例均证明,它在四川盆地及周缘深、浅层页岩地层中具有通用性,解决了以往一个地区摸索一套测井评价方法的局限性问题。该方法有助于快速确定储层有利部位,指导压裂选层,提高页岩储层开发效率,具有较好的推广应用前景。

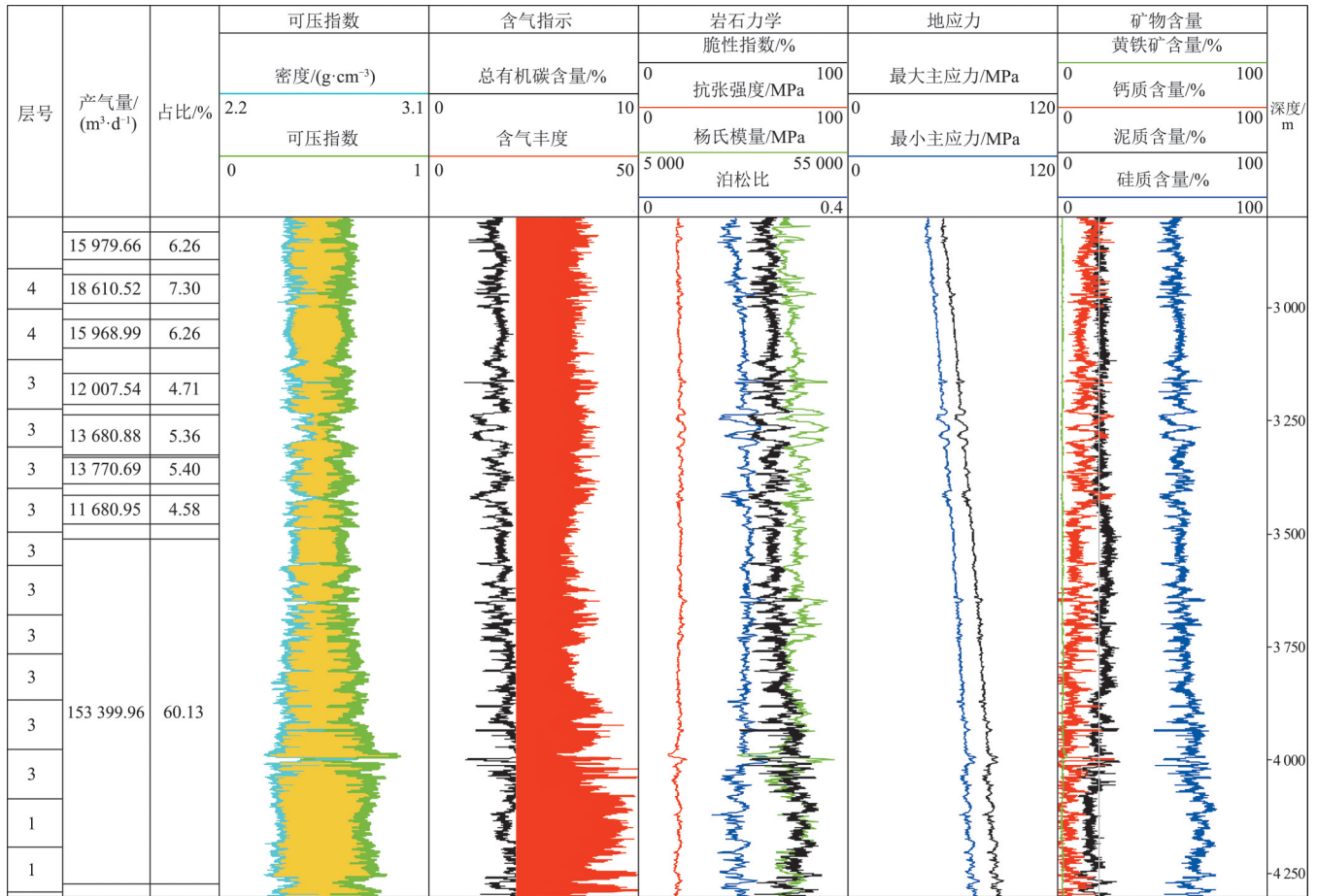


图9 四川盆地焦页6-2HF井综合评价

Fig. 9 A comprehensive assessment of Well Jiaoye 6-2HF, Sichuan Basin

参 考 文 献

- [1] 薛承瑾. 页岩气压裂技术现状及发展建议[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(3): 24-29.
Xue Chengjin. Technical advance and development proposals of shale gas fracturing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(3): 24-29.
- [2] 曾雨辰, 杨保军. 页岩气水平井大型压裂设备配套及应用[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(6): 78-82.
Zeng Yuchen, Yang Baojun. Equipment outfitting and application for large-scale fracturing in shale gas horizontal wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(6): 78-82.
- [3] 史进, 吴晓东, 孟尚志. 页岩气开发现状及开采技术分析[C]// 2011年煤层气学术研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 2011.
Shi Jing, Wu Xiaodong, Meng Shangzhi. Analysis on current development situation and exploitation technology of shale gas[C]// Proceedings of 2011 Coalbed Methane Symposium. Beijing: Beijing: Geological Publishing House, 2011, 462-469.
- [4] 陈桂华, 白玉湖, 陈晓智, 等. 页岩油气纵向综合甜点识别新方法及其定量评价[J]. 石油学报, 2016, 37(11): 1337-1342, 1360.
Chen Guihua, Bai Yuhu, Chen Xiaozhi, et al. A new identification method for the longitudinal integrated shale oil/gas sweet spot and its quantitative evaluation[J]. Acta Petroli Sinica, 2016, 37(11): 1337-1342, 1360.
- [5] 祝彦贺, 陈桂华, 梁建设, 等. 页岩油气甜点识别的综合评价方法[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(2): 301-309.
Zhu Yanhe, Chen Guihua, Liang Jianshe, et al. Comprehensive evaluation methods of shale oil and shale gas sweet spot identification[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(2): 301-309.
- [6] 廖东良, 路保平. 页岩气工程甜点评价方法: 以四川盆地焦石坝页岩气田为例[J]. 天然气工业, 2018, 38(2): 43-50.
Liao Dongliang, Lu Baoping. An evaluation method of engineering sweet spots of shale gas reservoir development: A case study from the Jiaoshiba Gas Field, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(2): 43-50.
- [7] 葛勋, 郭彤楼, 马永生, 等. 四川盆地东南缘林滩场地区上奥陶统五峰组-龙马溪组页岩气储层甜点预测[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 633-647.
Ge Xun, Guo Tonglou, Ma Yongsheng, et al. Prediction of shale reservoir sweet spots of the Upper Ordovician Wufeng-Longmaxi Formations in Lintanchang area, southeastern margin of Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 633-647.
- [8] 吴诗倩, 郭建华, 李智宇, 等. 中国南方海相地层牛蹄塘组页岩

- 气“甜点段”识别和优选[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 1048-1059.
- Wu Shiqing, Guo Jianhua, Li Zhiyu, et al. Identification and optimization of shale gas “sweet spots” in marine Niutitang Formation, South China[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 1048-1059.
- [9] 董谦, 刘小平, 李武广, 等. 关于页岩含气量确定方法的探讨[J]. 天然气与石油, 2012, 30(5): 34-37.
- Dong qian, Liu Xiaoping, Li Wuguang, et al. Determination of gas content in shale[J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(5): 34-37.
- [10] 许露露, 刘早学, 温雅茹, 等. 中扬子鄂西地区牛蹄塘组页岩储层特征及含气性研究[J]. 特种油气藏, 2020, 27(4): 1-9.
- Xu Lulu, Liu Zaoxie, Wen Yaru, et al. Shale gas reservoir and gas-bearing properties of Middle Yangtze Niutitang Formation in Western Hubei[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(4): 1-9.
- [11] 何畅, 万玉金, 耿晓燕, 等. 页岩气水平井高产主控因素定量评价及应用[J]. 特种油气藏, 2021, 28(1): 113-119.
- He Chang, Wan Yujin, Geng Xiaoyan, et al. Quantitative evaluation and application of main control factors for high production of horizontal shale gas wells[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(1): 113-119.
- [12] 沈骋, 郭兴午, 陈马林, 等. 深层页岩气水平井储层压裂改造技术[J]. 天然气工业, 2019, 39(10): 68-75.
- Shen Cheng, Guo Xingwu, Chen Malin, et al. Horizontal well fracturing stimulation technology for deep shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(10): 68-75.
- [13] 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 Jingzhou, 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.
- [14] 蒋廷学, 卞晓冰, 苏璠, 等. 页岩可压性指数评价新方法及应用[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(5): 16-20.
- Jiang Tingxue, Bian Xiaobin, Su Yuan, et al. A new method for evaluating shale fracability index and its application[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(5): 16-20.
- [15] 陈志明, 陈昊枢, 廖新维, 等. 致密油藏压裂水平井缝网系统评价方法-以准噶尔盆地吉木萨尔地区为例[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(6): 1288-1298.
- Chen Zhiming, Chen Haoshu, Liao Xinwei, et al. Evaluation of fracture networks along fractured horizontal wells in tight oil reservoirs: A case study of Jimusar oilfield in the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(6): 1288-1298.
- [16] 李曙光, 徐天吉, 吕其彪, 等. 深层页岩气双“甜点”参数地震预测技术[J]. 天然气工业, 2019, 39(S1): 113-117.
- [17] 董岩, 徐东升, 钱根葆, 等. 吉木萨尔页岩油“甜点”预测方法[J]. 特种油气藏, 2020, 27(3): 54-59.
- Dong Yan, Xu Dongsheng, Qian Genbao. Shale oil “sweet-spot” prediction in Jimusar Sag[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(3): 54-59.
- [18] 太万雪, 刘成林, 田继先, 等. 柴达木盆地西部古近系咸化湖盆烃源岩总有机碳含量预测[J]. 特种油气藏, 2021, 28(1): 74-80.
- Tai Wanxue, Liu Chenglin, Tian Jixian, et al. Prediction of total organic carbon content of source rocks in Paleogene salinized lake basin in western Qaidam Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(1): 74-80.
- [19] 郭秋麟, 王建, 陈晓明, 等. 页岩油原地量和可动油量评价方法与应用[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1451-1463.
- Guo Qiulin, Wang Jian, Chen Xiaoming, et al. Discussion on evaluation method of total oil and movable oil in-place[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1451-1463.
- [20] 马妮, 林正良, 胡华锋, 等. 页岩地层的破裂压力地震预测方法[J]. 石油物探, 2019, 58(6): 926-934.
- Ma Ni, Lin Zhengliang, Hu Huadeng, et al. A seismic-based prediction method for fracture pressure in a shale formation[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(6): 926-934.
- [21] 龙章亮, 温真桃, 李辉, 曾贤薇. 一种基于灰色关联分析的页岩储层可压性评价方法[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(1): 37-42.
- Long Zhangliang, Wen Zhentao, Li Hui, Zeng Xianwei. An evaluation method of shale reservoir crushability based on grey correlation analysis[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(1): 37-42.
- [22] Herong Zheng, Jincai Zhang, Yuanchang Qi. Geology and geomechanics of hydraulic fracturing in the Marcellus shale gas play and their potential applications to the Fuling shale gas development[J]. Energy Geoscience, 2020, 1(1-2): 36-46.

(编辑 张亚雄)