

引用格式:马林,蒋夏妮,龚劲松.优质页岩气储层测井特征分析[J].油气藏评价与开发,2022,12(3):445-454.

MA Lin, JIANG Xiani, GONG Jinsong. Analysis of logging characteristics of high quality shale gas reservoirs[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(3): 445-454.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.03.006

优质页岩气储层测井特征分析

马林¹,蒋夏妮²,龚劲松¹

(1. 中国石化华东石油工程有限公司测井分公司,江苏扬州 225007;2. 中国石化华东石油技师学院,江苏扬州 225129)

摘要:不同产能页岩气井,其储层测井响应特征存在明显差异。通过对比分析不同产能页岩气井测井曲线响应特征,进而总结高产页岩气储层的测井响应特征。分析不同产能页岩气井在岩性、电性、物性、地应力和孔隙压力等方面的差异,利用电阻率测井、放射性测井和声波扫描等地球物理测井信息,围绕有机质品质和地层压力等反映页岩气产能的关键参数,形成了一套基于测井综合响应特征的优质高产页岩储层识别方法。结果表明,优质高产页岩储层电性特征表现为高伽马、低密度、低中子、高声波时差和中高电阻率等特征,纵、横波时差交会图显示地层呈高压特征,该套分析方法能够准确判别页岩储层勘探开发潜力。通过川东南不同页岩气区块不同类型页岩气层现场试气结果与测井综合分析判定结果对比表明,该套判别方法符合率高,可以为页岩气井后期完井方案决策提供科学依据。

关键词:页岩气;有机碳;含气量;地应力;地层压力;电阻率

中图分类号:TE132

文献标识码:A

Analysis of logging characteristics of high quality shale gas reservoirs

MA Lin¹, JIANG Xiani², GONG Jinsong¹

(1. Sinopec Oilfield Service Corporation, Yangzhou, Jiangsu 225007, China;

2. East China Petroleum Technician Institute, Yangzhou, Jiangsu 225129, China)

Abstract: The logging response characteristics of different productivity shale gas wells are obviously different. By comparing and analyzing the logging response characteristics of shale gas well with different productivity, the logging response characteristics of high production shale gas reservoir are summarized. Then, by the analyses of the differences of lithology, electrical properties, physical properties, in-situ stress and pore pressure in shale gas wells with different productivity, and the geophysics logging information such as resistivity logging, radioactive logging and acoustic scanning, etc., a set of high-quality and high-yield shale reservoir identification methods based on integrated logging response characteristics is developed by considering the key parameters of organic quality and formation pressure to reflect shale gas productivity. The results show that the electrical characteristics of high-quality and high-yield shale reservoirs are high gamma-ray, low density, low neutron, high acoustic time difference and medium-high resistivity. This set of analysis method can accurately identify the exploration and development potential of shale reservoirs. The comparison between the field gas test results of different types of shale gas reservoirs in different shale gas blocks in southeastern Sichuan and the results of comprehensive well logging analysis shows that the method has a high coincidence rate. It can provide scientific basis for later completion plan decision of shale gas well.

Keywords: shale gas; organic carbon; gas content; rock mechanics; formation pressure; resistivity

富有机质页岩测井响应特征与普通泥页岩差异明显,测井可以获取大量岩石物理信息,因而在页岩气储层评价中具有重要作用。石文睿等^[1]利用回归

法确定焦石坝地区页岩岩性、物性和地化等储层地质参数计算方法。刘双莲^[2]针对页岩页理对测井响应及岩石力学参数影响进行了分析研究。颜磊^[3]系

收稿日期:2021-01-07。

第一作者简介:马林(1982—),男,本科,高级工程师,主要从事测井资料处理解释与研究工作。地址:江苏省扬州市老虎山路22号中国石化华东石油工程有限公司测井分公司,邮政编码:225007。E-mail: 95604344@qq.com

基金项目:国家科技重大专项“彭水地区常压页岩气勘探开发示范工程”(2016ZX05061)。

统阐述了川南海相页岩气测井综合评价技术。夏宏泉等^[4]利用测井多参数两向量法识别页岩气地质“甜点”。徐春露等^[5]在考虑孔隙度、有机质含量和有效应力对声波速度影响的基础上,提出了一套基于声波速度模型的页岩气孔隙压力预测方法。王濡岳等^[6]通过选取富有机质页岩响应敏感的测井曲线叠合与交会分析进行优质页岩储层识别。王玉满等^[7]研究了有机质炭化与电阻率响应特征之间的关系。赫志兵^[8]总结了有效烃源岩测井识别与评价方法。陈亚秋等^[9]开展深层页岩气勘探开发指标分析研究。冷玥等^[10]对页岩气储层测井评价技术研究与应用现状进行了总结分析,张庆国等^[11]开展了基于地化参数的页岩储层孔隙度解释模型研究,以上研究均对深层页岩气勘探开发具有借鉴作用。

现有测井评价方法能够进行页岩储层参数定量综合评价,但由于页岩矿物组分复杂以及吸附和游离状态共存的含气性、低孔低渗的储层特征,再加上现有测井仪器测量精度、实验分析技术和现场测试的局限性,造成利用测井进行页岩骨架参数确定和含气性、物性和矿物组分精确评价仍存在一定难度。

以川东南海相页岩气井测井资料为基础,结合实验分析数据以及试气等资料,通过开展页岩储层矿物组分、地化参数、物性参数、含气量和地层压力等关键参数与测井信息的相关性分析,提取最能够反映优质高产页岩的测井元素,围绕以有机质成熟度为核心的地质参数和以地层压力为核心的工程参数,形成一套优质高产页岩测井判别流程。伽马能谱、补偿中子和补偿密度等放射性测井系列可准确识别高有机质丰度、高孔隙度和高脆性矿物层段,电性特征是有机质演化特性最可靠的指示,可以确定储层品质和地质“甜点”。偶极声波和电成像特殊测井可评价页岩储层在演化过程中成岩和构造运动后储层应力状态及裂缝发育特征,是储层保存条件和地层压力的指示,进而反映了页岩工程“甜点”和产能,为页岩气井钻完井方案决策和气藏资源潜力评估提供科学依据。

1 基于放射性测井的优质页岩划分与识别技术

川东南地区页岩实验分析和产气剖面测试结果都显示页岩高产气层段主要分布在有机质含量高、

孔隙度大、脆性矿物含量高以及含气量高的层段,这些层段在测井曲线上表现为高自然伽马、高声波时差、高电阻率、高铀含量以及相对低密度、低中子和低无铀伽马“四高三低”的测井响应特征,利用测井曲线交会图(图1)和曲线重叠方法(图2)能够准确地进行优质页岩气层段测井识别。结果显示龙马溪—五峰组页岩从上至下,中子、密度曲线数值均呈由高渐低的变化,至底部含气性好的优质页岩段低密度、低中子曲线具有明显的幅差。伽马能谱测井显示普通泥岩钍铀比大于3,一般页岩钍铀比为2~3,优质页岩钍铀比小于1。页岩段产气剖面测试结果显示:总有机碳含量(TOC)高、含气量高、脆性矿物含量高和孔渗条件好的优质页岩是主要产气贡献段,是页岩气开发的“甜点”,利用测井技术获取页岩气资源和地质“甜点”分布状况,有利于全面发挥地质导向在页岩气钻井中的技术优势^[12-14]。通过岩心标定测井,将测井计算的脆性矿物含量、孔隙度和TOC进行归一化,将3个有利因素累加,构成页岩“甜点”的定量指标,即“甜点”指数。图2中第9道为“甜点”的定量参数,数值高处即为测量段内的地质甜点位置。

2 基于电性测井的优质页岩识别技术

2.1 基于储层电阻率特征的页岩品质识别

谢小国等^[15]探讨了电阻率与有机质关系,影响页岩导电性的因素包括有机质演化程度、地层束缚水、黄铁矿和页岩层理缝等。有机质是电的不良导体,富含有机质的页岩常表现为高电阻率特征。但当演化程度达到一定阶段时,电阻率反而出现降低的趋势。其原因在于有机质的存在,一方面会增加阳离子交换量及有效表面积,另一方面,还会影响岩样的孔隙结构,进而影响岩样的导电性质;另外受地质综合因素影响,高成熟度有机质炭化,内部结构发生变化,最后变成导电能力强的石墨使得地层电阻率低^[16-17],导致过成熟有机物含量越高,页岩电阻率反而越低,如W1和C1井(图3)。综合说明影响页岩电阻率因素虽多,但有机质的存在是影响电性特征的主要因素,是页岩含气性的综合反映。

结合页岩气井含气性和产气测试资料,利用电性特征可将页岩划分3类:Ⅰ类低阻(小于 $10\ \Omega\cdot\text{m}$),低含气量和产气量,有机质过成熟,含气性和产气性均差;Ⅱ类中高电阻($10\sim 200\ \Omega\cdot\text{m}$),有机质处于生

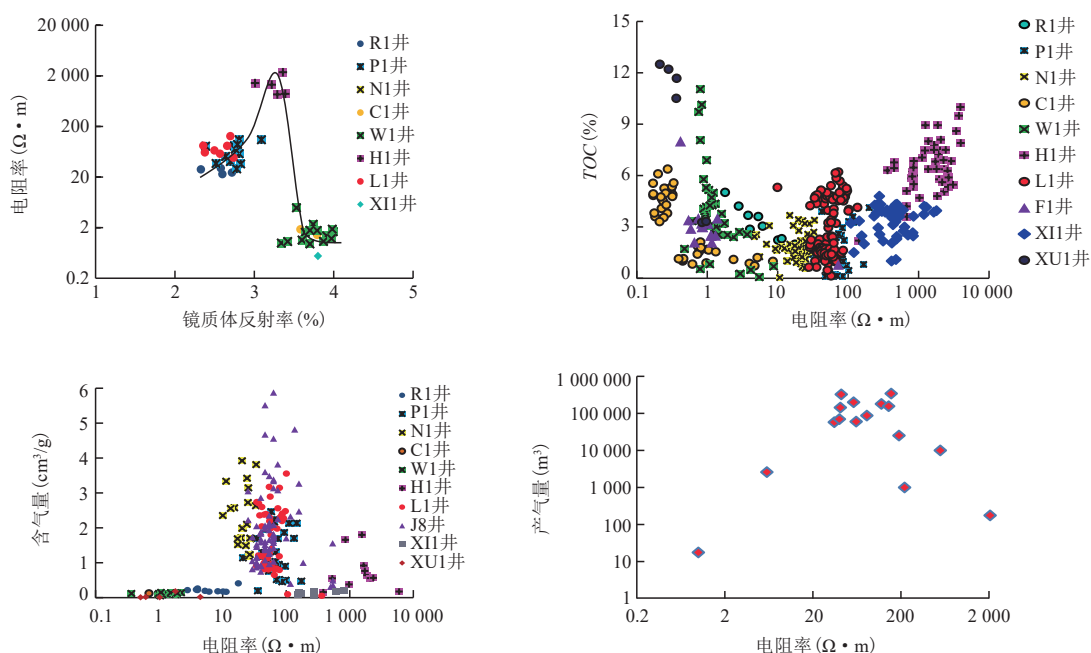


图3 电阻率与镜质体反射率、有机碳、含气量和产气量交会图

Fig. 3 Cross plot of resistivity and vitrinite reflectance, organic carbon, gas content and gas production

气和产气有利阶段,含气性和产气性较好;Ⅲ类高或特高电阻(大于 $200 \Omega \cdot m$),储层偏致密,孔渗性差,不利开采。

2.2 基于电阻率重构法的页岩品质识别

为研究有机质对电阻率的影响,通过上部普通泥岩段电阻率曲线与三孔隙度和伽马曲线相关性分析,重构富有机质页岩段电阻率值(图4),通过实测电阻率与重构电阻率对比,进而间接反映有机质的赋存对页岩导电性的影响。11口井统计结果显示,优质页岩的实测电阻率与重构电阻率比值分布在 $1 \sim 3$,大于3意味着有机质过了最佳生气和产气阶段,如R1、L2和L3井,岩心现场解析含气量和测试产量均相对较差。

2.3 基于页岩与顶板普通泥岩电阻率比值法的页岩品质识别

通过制作同区块富有机质页岩与普通泥岩电阻率比与密度交会图(图5),储层模式可分为两类:第一类是与顶板普通泥岩相比,页岩层电阻率随密度减小变化不大且数值比泥岩略高,这类密度小、TOC高的页岩气储层具有较好的产气性(L1井);第二类

是与顶板普通泥岩相比,页岩层电阻率随密度减小而降低,且低密度、高TOC层段电阻率值明显低于普通泥岩,这类页岩储层自然产气性就相对较差(L2、L3井)。

3 基于声波测井和放射性测井的页岩储层压力预测技术

超压系统有效地支撑了孔隙结构,地层压力系数越高,页岩孔隙越好,超压系统有利于有机孔隙保存^[18],地层压力是影响页岩气产能的主要因素,也是判断页岩保存条件的主要标志。

3.1 基于声波和密度测井交会图法的页岩压力识别技术

有机质生烃作用,特别是烃类裂解生气作用是形成页岩超压的主要原因^[19-21],此类成因的超压,在超压段没有孔隙度异常,测井系列上表现为声波传播速度低。利用声波和密度测井交会图可以区分不同成因的超压^[22],欠压实段的密度和声波速度变化趋势一致,数据点落在正常压实曲线上,而生烃超压由于降低了岩石的有效应力,因此,表现为声波速度

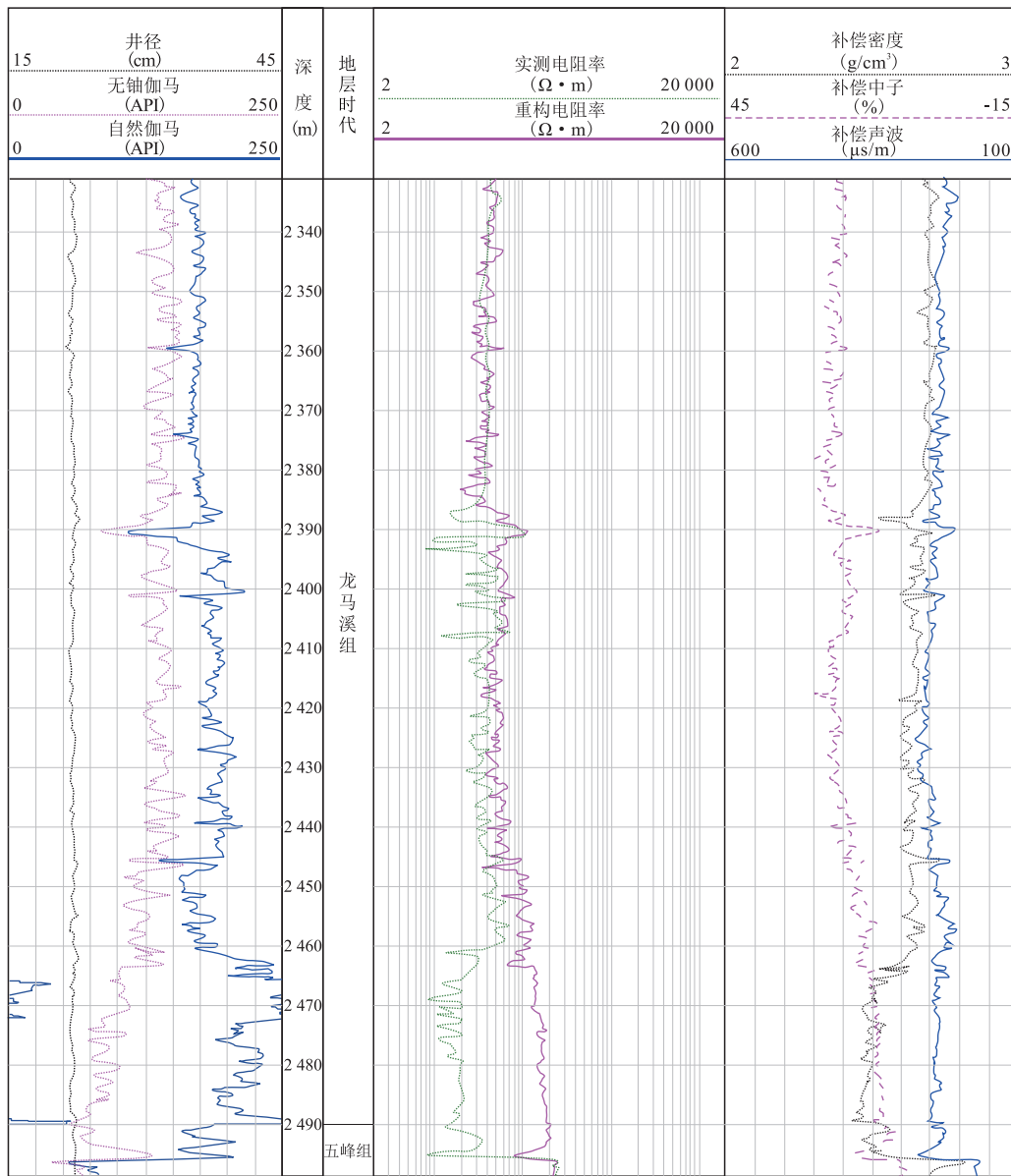


图4 彭水地区L2井实测电阻率与重构电阻率对比

Fig. 4 Comparison of measured resistivity and reconstructed resistivity in Well-L2 of Pengshui area

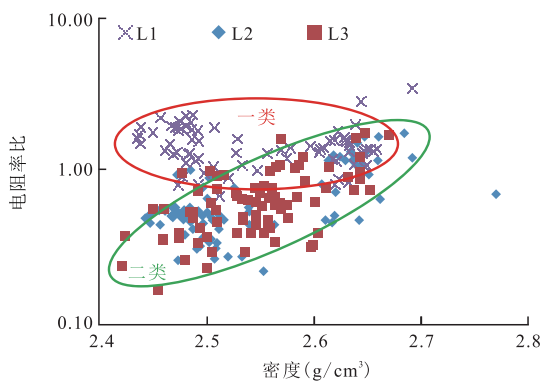


图5 富有机质页岩与泥岩电阻率比与密度交会图

Fig. 5 Cross plot of resistivity ratio and density of shale with rich organic matter

降低,但是岩石密度不会发生明显的变化。

根据岩性、电性、物性和含气性特征,龙马溪组—五峰组底部页岩都可以分为4个亚段,自下而上的岩性分别为高硅高碳页岩段、中硅高碳页岩段、含碳粉砂岩段和中低碳泥页岩段4个岩性段,优质含气层段都集中在底部高硅高碳页岩段。

从J3井和P1井密度-声波速度交会图可见超压地层流体膨胀,超压地层段的密度变化较小,而声波速度明显降低(图6);常压地层的密度和声波速度变化趋势一致,密度和声波速度同时增大(图7)。

3.2 页岩地层压力系数测井评价技术

页岩地层异常孔隙压力成因机理复杂,异常高压成因不再以不平衡压实为主,气体的生成可使得孔隙压力增大。因此,传统的地层声波时差等效深度孔隙压力预测方法针对页岩气储层孔隙压力预测适应性变差。

为避免岩性差异对声波时差的影响,选取龙马溪组上部岩石矿物组成与底部含气页岩相近的普通泥页岩作对比,纵波、横波时差测井数据统计关系显示,在不受气体影响的情况下,纵波时差和横波时差之间呈现出清晰的变化规律,与无气体影响时的规律相比较,含气层段的纵波、横波时差变化趋势偏离

无气体影响时的趋势,纵波时差值明显低于无气体影响时的值,气体对声波的影响主要表现在纵波时差上,而横波时差对流体不敏感,受气体影响相对较小。所以当储层中含有不同压力气体时,纵波时差呈现不同幅度的降低,而横波时差受影响较小,所以纵横波交会趋势线对比可以反映孔隙压力状况。

纵、横波时差交会特征在普通页岩与含气页岩段中具有不同的斜率,统计平桥地区、东胜地区、彭水地区和武隆地区不同纵、横波时差在普通页岩和含气页岩段的斜率发现,普通泥岩段纵、横波时差斜率大,而含气页岩段纵、横波时差斜率小(图8),与含气段纵波衰减明显强于横波衰减相关,二者斜率的比值与地层压力系数具有较好的相关性(表1)。P1和L1井显示为常压页岩气层,水平井日产量(2~5)×10⁴ m³。其余井测井预测地层压力系数大于1.2,水平井日产量大于10×10⁴ m³。

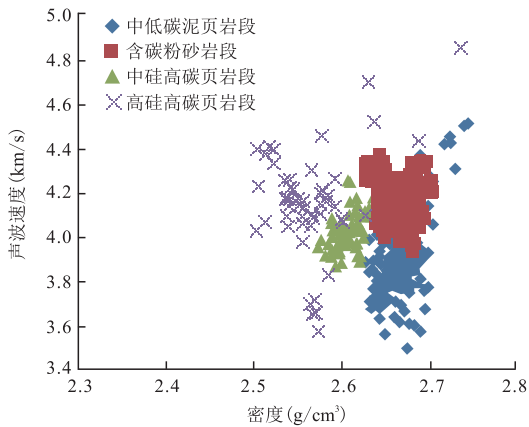


图6 彭水地区J3井超压地层密度-声波速度交会图
Fig. 6 Crossplot of density and acoustic velocity of overpressure formation in Well-J3 of Pengshui area

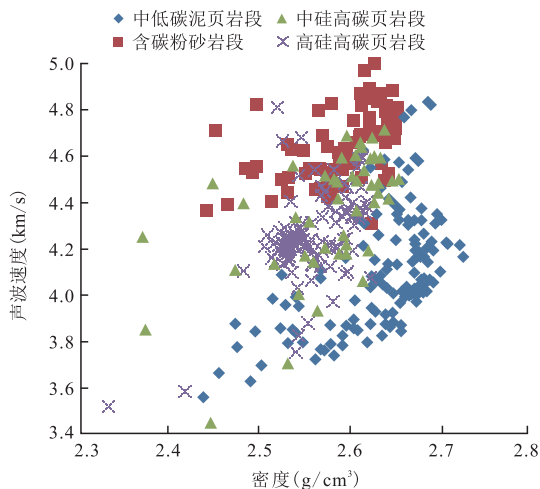


图7 彭水地区P1井常压地层密度-声波速度交会图
Fig. 7 Crossplot of density and acoustic velocity of normal pressure formation in Well-P1 of Pengshui area

4 基于声波扫描测井的优质页岩地应力特征

声波扫描测井解释结果显示页岩地层的水平主应力差越小,压力推进过程中受到的阻力也越小,从而使裂缝的延伸性也更好,且水力压裂形成复杂缝网的可能性也越高,因此,可压性也越好。分析对比偶极声波测井确定的龙马溪—五峰组底部①—③号层最大和最小水平主应力平均值,常压页岩气储层最大与最小地应力差异系数较大,普遍大于20%,有机质生气造成的压力又因裂缝发育被释放掉,压力难以保持。超压页岩气储层最大与最小地应力差异

表1 地层孔隙压力系数测井预测与实测对比
Table 1 Comparison between logging prediction and field measurement of pressure coefficient of formation pore

井名	普通页岩 纵横波时差 交会斜率	含气页岩 纵横波时差 交会斜率	计算地层 压力系数	实测地层 压力系数	相对 误差 (%)
S1	0.036 97	0.027 64	1.34	1.66	19.2
J3	0.036 52	0.025 90	1.41	1.35	4.5
J4	0.037 33	0.030 71	1.22	1.12	8.9
J5	0.034 64	0.028 86	1.20	1.15	4.3
L1	0.042 58	0.038 35	1.11	1.08	2.8
P1	0.037 81	0.036 45	1.04	0.98	6.1

系数相对较小,一般在10%左右(表2),更有利于储层改造后网状缝的形成。

在强挤压应力条件下或强压实条件下,挤压应力增加意味着等效深度或等效负载压力增加,黏土孔隙度急剧降低,黏土束缚水含量降低,因此,在地

层水矿化度和泥岩组分相对稳定情况下,地应力变化是电阻率变化的主要因素^[23],因此,泥岩电阻率能够灵敏地反映地应力集中状态(图9),可以利用这种响应特征对地应力分布状况进行评价,进而对储层品质及含气性进行定性、定量评价。

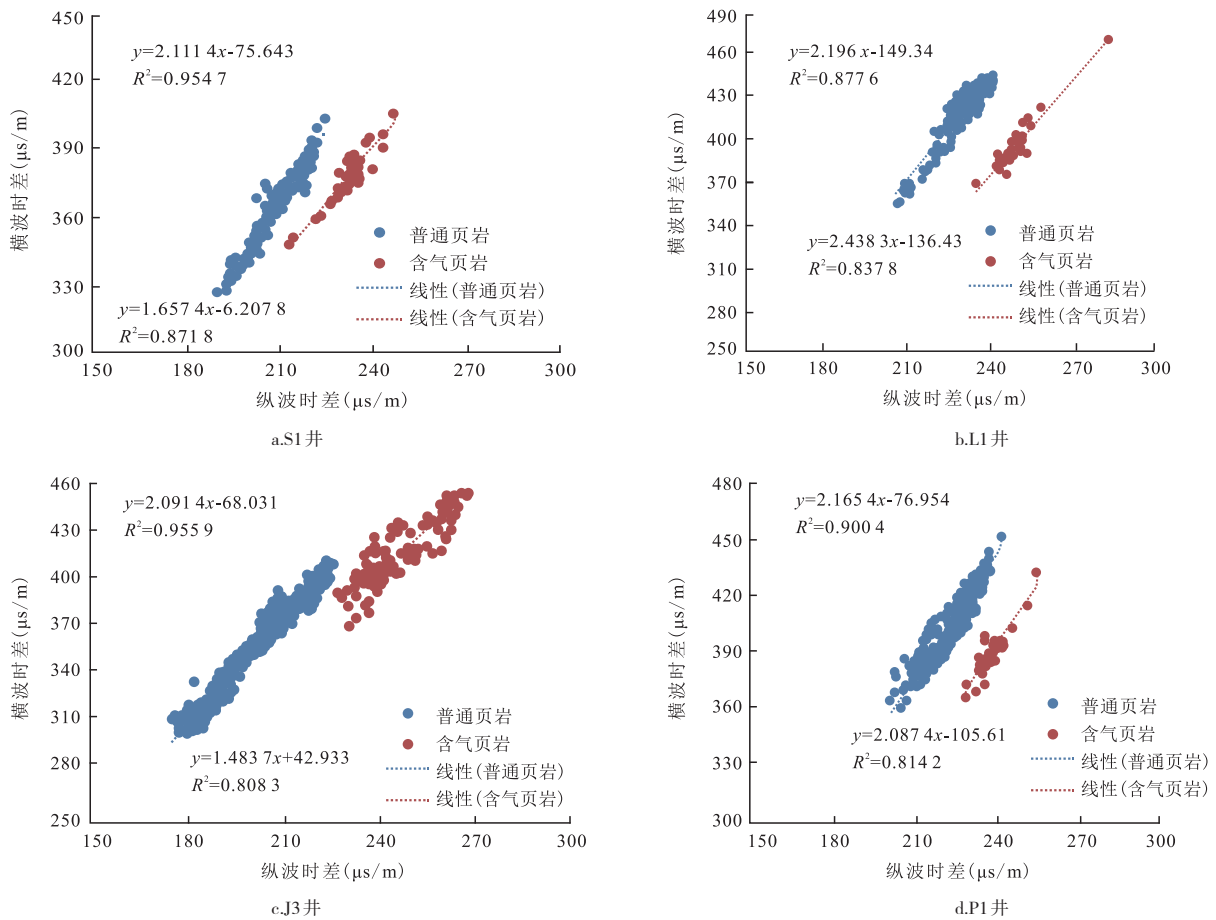


图8 彭水地区S1、L1、J3和P1井纵、横波时差交会图

Fig. 8 Crossplot of longitudinal and shear wave time difference in Well-S1, Well-L1, Well-J3 and Well-P1 of Pengshui area

表2 差异系数统计

Table 2 Statistic of coefficient of difference

井名	最大水平主应力(MPa)	最小水平主应力(MPa)	应力差异系数(%)	压力类型
P1	57	39	46.2	常压
L1	67	51	31.4	常压
L2	61	46	32.6	常压
L3	71	57	24.6	常压
J3	52	45	15.6	超压
J1	84	77	9.1	超压
J4	75	68	10.3	超压
J5	63	54	16.7	超压
S1	81	72	12.5	超压
S2	72	66	9.1	超压

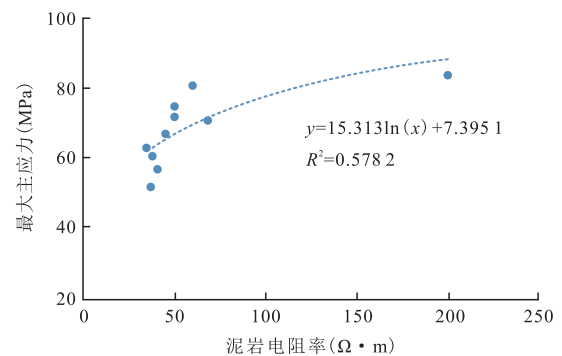


图9 页岩顶板泥岩电阻率与最大主应力关系

Fig. 9 Relation between resistivity and maximum principal stress of shale roof and mudstone

地应力分布与储层品质有着密切的关系,由于构造挤压应力强烈,致使储层致密,孔渗性能差,常常难以形成优质气层。同一构造带优质储层往往发育于构造带局部弱挤压应力区,此处有利于储层保持较高的原生孔渗条件(图10)。

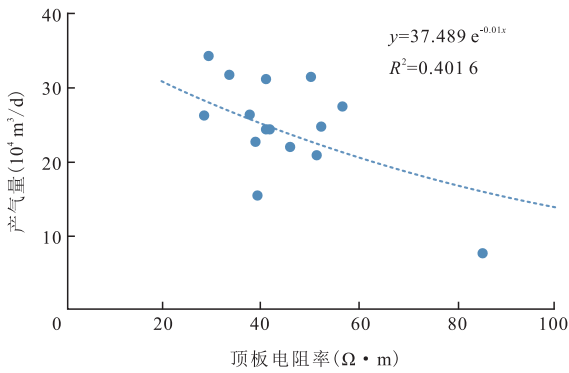


图10 页岩顶板泥岩电阻率与日产气量关系

Fig. 10 Relation between shale resistivity and daily gas production in shale roof

5 基于电阻率成像测井的优质页岩裂缝发育特征

以构造作用为主形成的天然裂缝,对于页岩储层的形成和改造具有重要作用,对页岩气的储渗具有现实意义。如常压页岩气P1井高导缝很发育,且裂缝角度较大,①—⑤小层发育裂缝倾角集中在80°~90°,说明早期构造运动对该井的影响较强,在裂缝被充填之前气体有渗漏。即便裂缝被后期矿物充填,也难以充满整个裂缝网,真正形成有效隔挡和有利于储层压力保存。优质高产页岩储层高导缝不发育,发育低角度小规模高阻缝,利于气体短距离渗流。

6 实例应用分析

研究区位于四川盆地及周缘,沉积环境主要为

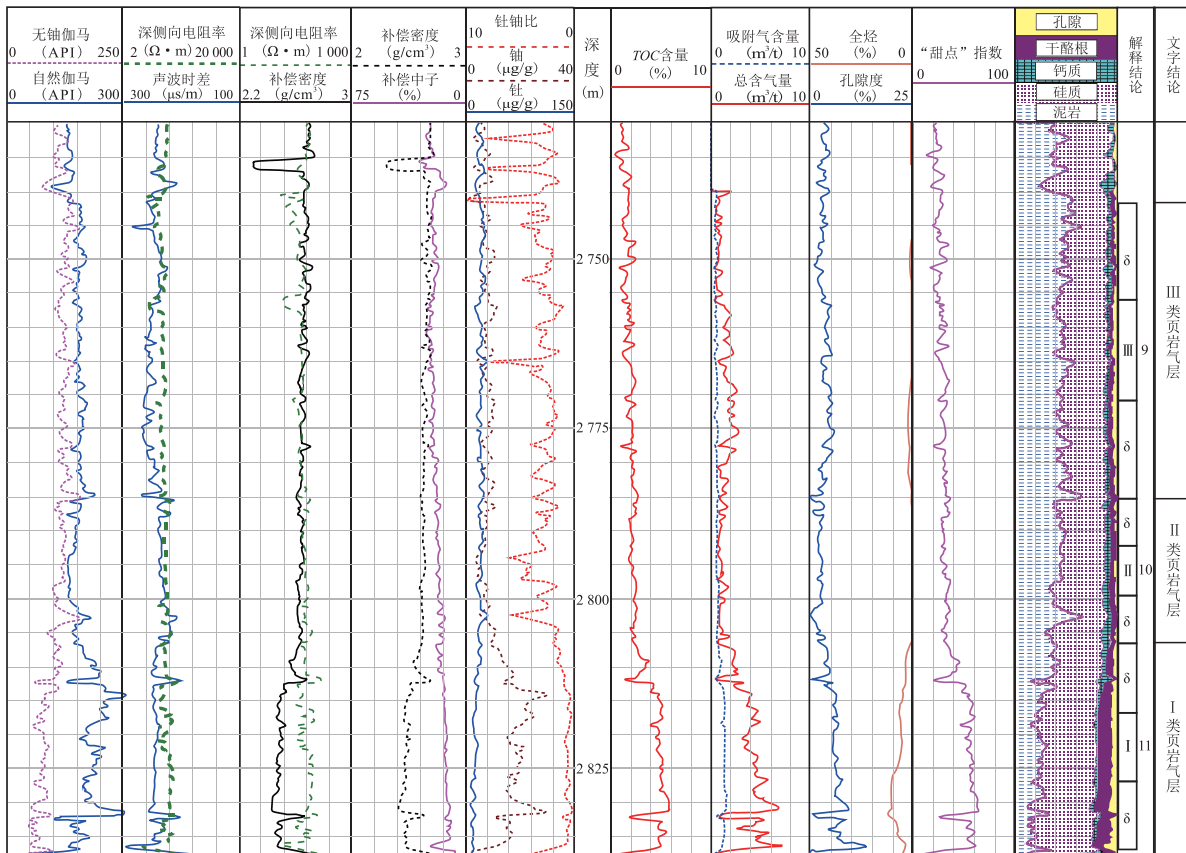


图11 东胜背斜S2井页岩储层测井综合评价成果

Fig. 11 Log comprehensive evaluation result of shale reservoir in Well-S2 of Dongsheng anticline

深水陆棚相,龙马溪—五峰组页岩纵向上从上至下黏土含量逐渐降低,硅质含量、有机质丰度逐渐升高,页岩物性、含气性和页岩品质变好。横向上盆内页岩气藏以超压为主,测试产量较高,盆外气藏以常压为主,测试日产量 $(2\sim 5)\times 10^4\text{ m}^3$ 。S2井(图11)位于盆内,底部伽马呈高值、电阻率呈中高值,中子和密度值相对低,声波时差相对较大,测井曲线重叠面积最大、脆性矿物含量和“甜点”指数都较高,杨氏模量相对较高,泊松比相对较低,综合显示页岩底部为本井优质页岩段,偶极声波测井评价地应力差异系数为10.5%,测井预测地层压力系数为1.39,电成像测井显示优质页岩段发育少量高阻缝,测井综合判断该井属于优质超压页岩气井,后期测试日产气 $32\times 10^4\text{ m}^3$,与测井判定结果一致。

7 结论

1) 优质页岩储层在测井曲线上表现“四高三低”的测井响应特征,伽马能谱、中子和密度等放射性测井系列可以评价页岩岩性、物性和有机质丰度等关键参数,测井曲线交会图和重叠图能有效识别页岩地质“甜点”段。

2) 页岩储层电性特征是判别页岩品质的关键指标,高产优质页岩电阻率主要介于 $10\sim 200\ \Omega\cdot\text{m}$,重构电阻率显示有机质影响因素值分布在 $1\sim 3$;顶板的龙一段底部普通泥岩电阻率值相对较低。

3) 偶极声波和电成像等特殊测井能够评价储层裂缝和应力特征,反映储层保存条件,高产页岩气井普遍具有高孔隙压力特征。不同孔隙压力储层纵、横波速度衰减系数存在差异,高产页岩气井孔隙压力系数普遍高于1.15,最大与最小水平主应力差异系数小于20%,处于构造弱地应力区,储层发育低角度小规模高阻缝。

参考文献

[1] 石文睿,张超谟,张占松,等.涪陵页岩气田焦石坝页岩气储层含气量测井评价[J].测井技术,2015,39(3):357-362.
SHI Wenrui, ZHANG Chaomo, ZHANG Zhansong, et al. Well logging evaluation of Jiaoshiba shale gas reservoir in Fuling District Shale gas field[J]. Logging Techniques, 2015, 39(3): 357-362.

[2] 刘双莲.页岩对测井响应及岩石力学参数影响分析[J].非常规油气,2019,6(4):1-5.
LIU Shuanglian. Effect analysis of shale bedding on well logging response and rock mechanics parameters[J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(4): 1-5.

[3] 颜磊.川南海相页岩气测井综合评价技术及应用研究[D].成都:成都理工大学,2019.
YAN Lei. Comprehensive evaluation technique and application of marine shale gas logging in south Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.

[4] 夏宏泉,王瀚玮,赵昊.测井多参数两向量法识别页岩气地质“甜点”[J].天然气工业,2017,37(11):36-42.
XIA Hongquan, WANG Hanwei, ZHAO Hao. Identification of shale gas geological sweet spot by log multi-parameter two-vector method[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(11): 36-42.

[5] 徐春露,孙建孟,董旭,等.页岩气储层孔隙压力测井预测新方法[J].石油学报,2017,38(6):666-676.
XU Chunlu, SUN Jianmeng, DONG Xu, et al. A new logging prediction method of Pore pressure in shale gas reservoir[J]. Journal of Petroleum Sciences, 2017, 38(6): 666-676.

[6] 王濡岳,冷济高,丁文龙,等.上扬子地区下寒武统牛蹄塘组优质页岩储层测井识别——以贵州岑巩页岩气区块为例[J].天然气地球科学,2015,26(12):2395-2407.
WANG Ruyue, LENG Jigao, DING Wenlong, et al. Logging identification of high quality shale reservoir of lower Cambrian Niutitang formation in upper Yangtze region——Taking Cengong shale gas block as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(12): 2395-2407.

[7] 王玉满,李新景,王皓,等.中上扬子地区下志留统龙马溪组有机质炭化区预测[J].天然气地球科学,2020,31(2):151-162.
WANG Yuman, LI Xinjing, WANG Hao, et al. Carbonation prediction of organic matter in the Lower Silurian Longmaxi formation in the middle and Upper Yangtze region[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(2): 151-162.

[8] 赫志兵.M凹陷泥页岩储层有效烃源岩测井评价及应用[J].长江大学学报(自科版),2016,13(29):18-23.
HE Zhibing. Logging evaluation and application of effective source rock in shale reservoir of M SAG[J]. Journal of Changjiang University(Natural Science), 2016, 13(29): 18-23.

[9] 陆亚秋,梁榜,王超,等.四川盆地涪陵页岩气田江东区块下古生界深层页岩气勘探开发实践与启示[J].石油与天然气地质,2021,42(1):241-250.
LU Yaqiu, LIANG Bang, WANG Chao, et al. Exploration and development of Paleozoic deep shale gas in Jiangdong block, Fuling District shale gas field, Sichuan Basin[J]. Petroleum and Natural Gas Geology, 2021, 42(1): 241-250.

[10] 冷玥,赵迪斐,郭英海,等.页岩气储层测井评价技术研究与应用现状[J].非常规油气,2019,6(6):117-123.
LENG Yue, ZHAO Difei, GUO Yinghai, et al. The application status of shale gas reservoir logging evaluation[J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(6): 117-123.

[11] 张庆国,黄莹双,张容基,等.基于地化参数的页岩:由储层孔隙度解释模型研究[J].非常规油气,2021,8(5):9-17.
ZHANG Qingguo, HUANG Yingshuang, ZHANG Rongji, et al. Study on porosity interpretation model of shale oil reservoir based on geochemical parameters[J]. Unconventional Oil & Gas, 2021, 8(5): 9-17.

[12] 吴奇,梁兴,鲜成钢,等.地质—工程一体化高效开发中国南海相页岩气[J].中国石油勘探,2015,20(4):1-23.

- WU Qi, LIANG Xing, XIAN Chenggang, et al. Geoscience-to-production integration ensures effective and efficient South China marine shale gas development[J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(4): 1-23.
- [13] 刘乃震, 王国勇. 四川盆地威远区块页岩气甜点厘定与精准导向钻井[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(6): 978-985.
LIU Naizhen, WANG Guoyong. Shale gas dessert determination and precision guided drilling in Weiyuan County Block, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(6): 978-985.
- [14] 吴雪平. 页岩气水平井地质导向钻进中的储层“甜点”评价技术[J]. *天然气工业*, 2016, 36(5): 74-80.
WU Xueping. Reservoir “sweet spot” evaluation technique in geo-steering drilling of horizontal shale gas well[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(5): 74-80.
- [15] 谢小国, 罗兵, 尹亮先, 等. 低阻页岩气储层影响因素分析[J]. *四川地质学报*, 2017, 37(3): 433-437.
XIE Xiaoguo, LUO Bing, YIN Liangxian, et al. Analysis of influencing factors of low resistivity shale gas reservoir[J]. *Journal of Sichuan Geology*, 2017, 37(3): 433-437.
- [16] BOB C, MIKE M. Log evaluation of gas shale: A 35-year perspective[R]. Denver: Denver Well Logging Society, 2010.
- [17] 王道富, 王玉满, 董大忠, 等. 川南下寒武统筇竹寺组页岩储集空间定量表征[J]. *天然气工业*, 2013, 33(7): 1-10.
WANG Daofu, WANG Yuman, DONG Dazhong, et al. Quantitative characterization of shale reservoir space of the Lower Cambrian Qiongzhusi formation in southern river[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(7): 1-10.
- [18] 何希鹏, 高玉巧, 唐显春, 等. 渝东南地区常压页岩气富集主控因素分析[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(4): 654-664.
HE Xipeng, GAO Yuqiao, TANG Xianchun, et al. Analysis of main control factors of normal pressure shale gas enrichment in southeast Chongqing[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(4): 654-664.
- [19] TINGAY M, HILLIS R, SWARBRICK R, et al. “Vertically transferred” overpressures in Brunei: Evidence for a new mechanism for the formation of high magnitude overpressures[J]. *Geology*, 2007, 35(11): 1023-1026.
- [20] LAHANN R W, SWARBRICK R E. Overpressures generation by load transfer following shale framework weakening due to smectite diagenesis[J]. *Geofluids*, 2011, 11(4): 362-375.
- [21] HEDBERG H D. Relation of methane generation to undercompacted shales, shale diapirs, and mud volcanoes[J]. *AAPG Bulletin*, 1974, 58(4): 661-673.
- [22] 李双建, 袁玉松, 孙炜, 等. 四川盆地志留系页岩气超压形成与破坏机理及主控因素[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(5): 924-931.
LI Shuangjian, YUAN Yusong, SUN Wei, et al. Formation and failure mechanism of Silurian shale gas overpressure in Sichuan Basin and its main controlling factors[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(5): 924-931.
- [23] 李军, 张超谟, 王贵文, 等. 挤压盆地泥岩对地应力响应特征机理及地质应用[J]. *测井技术*, 2004, 28(2): 141-144.
LI Jun, ZHANG Chaomo, WANG Guiwen, et al. Shale responses to terrestrial-stress, response mechanism and application in the tectonic compressive areas[J]. *Well Logging Technology*, 2004, 28(2): 141-144.

(编辑 李颖洁)

(上接第428页)

- [20] 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——以四川盆地涪陵气田焦石坝区块为例[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.
- [21] 王强, 魏祥峰, 魏富彬, 等. 川东南涪陵地区五峰组—龙马溪组页岩气藏中的超压作用[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(3): 333-340.
WANG Qiang, WEI Xiangfeng, WEI Fubin, et al. Overpressure in shale gas reservoir of Wufeng Longmaxi formation in Fuling area, Southeast Sichuan [J]. *Petroleum experimental geology*, 2019, 41(3): 333-340.
- [22] 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 reservoirs in the Wufeng-Longmaxi Fms in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(6): 31-41.
- [23] 林波, 秦世群, 谢勃勃, 等. 涪陵深层页岩气井压裂工艺难点及对策研究[J]. *石化技术*, 2019, 26(5): 162-168.
LIN Bo, QIN Shiqun, XIE Bobo, et al. Study on difficulties and countermeasures of fracturing technology for Fuling deep shale gas well [J]. *Petrochemical Technology*, 2019, 26(5): 162-168.
- [24] 陶余会. 如何构造模糊层次分析法中模糊一致判断矩阵[J]. *四川师范学院学报(自然科学版)*, 2002, 23(3): 282-285.
TAO Yuhui. How to make fuzzy consistent judgement matrix of the FAHP[J]. *Journal of Sichuan Teachers College (Natural Science)*, 2002, 23(3): 282-285.
- [25] 兰继斌, 徐扬, 霍良安, 等. 模糊层次分析法权重研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2006, 26(9): 107-112.
LAN Jibing, XU Yang, HUO Liang'an, et al. Research on the priorities of fuzzy analytical hierarchy process[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2006, 26(9): 107-112.

(编辑 柳超超)