

页岩气田储层含气性测井评价

——以四川盆地涪陵页岩气田 J 区块为例

柳筠, 张梦吟

(中国石化 江汉油田分公司 勘探开发研究院, 武汉 430023)

摘要:页岩储层岩性较复杂、储集空间类型多样, 现有的含气性测井综合评价方法体系还不够完善。为深化四川盆地涪陵页岩气田 J 区块页岩储层含气性评价认识, 应用密度—中子叠合法、自然伽马—去铀伽马叠合法、铀—钍比值法开展含气储层定性识别, 并对吸附气、游离气、孔隙度、含气饱和度等含气性参数进行了测井定量预测研究。在多参数对比研究的基础上, 优选了有机碳含量、孔隙度、含气饱和度、硅质含量、埋深为影响含气性测井评价参数, 采用灰色关联分析法构建出储层含气性测井评价指数 GQ , 建立了含气性评价标准, 即 I 类含气储层 $GQ \geq 0.57$, II 类含气储层 $0.37 < GQ < 0.57$, III 类含气储层 $GQ \leq 0.37$ 。该方法应用于 J 区块表明, 含气性参数定量预测模型精度较高, 且含气性评价标准可以对储层含气性进行有效的评价和分类, 具有很好的推广前景。

关键词:含气性; 灰色关联; 测井评价; 五峰组—龙马溪组; 涪陵页岩气田; 四川盆地

中图分类号: TE122.23

文献标识码: A

Gas-bearing property evaluation

by petrophysical logging in shale gas reservoirs:

a case study in J area of Fuling shale gas field, Sichuan Basin

LIU Yun, ZHANG Mengyin

(Research Institute of Exploration and Development, SINOPEC Jiangnan Oilfield Company, Wuhan, Hubei 430023, China)

Abstract: The lithology of shale reservoirs is complex and the types of storage porosity are diverse. The existing gas-bearing property evaluation system by petrophysical logging is not perfect. In order to deepen the understanding of the gas-bearing capacity evaluation of shale reservoirs in J area of the Fuling shale gas field in the Sichuan Basin, the density-neutron curve superposition method, natural gamma-de-uranium gamma curve superposition method, and uranium-thorium ratio method are applied in qualitative recognition. Quantitative logging research was carried out on gas-bearing parameters such as adsorbed gas, free gas, porosity, and gas saturation. Based on the multi-parameter comparative study, organic carbon content, porosity, gas saturation, siliceous content, and burial depth are selected as the logging evaluation parameters that affect gas-bearing properties. A logging evaluation index (GQ) for gas-bearing capacity is constructed using fuzzy correlation analysis. The gas-bearing evaluation criterion is established, that is, $GQ \geq 0.57$ for type I gas-bearing reservoirs, $0.37 < GQ < 0.57$ for type II gas-bearing reservoirs, and $GQ \leq 0.37$ for type III gas-bearing reservoirs. The application of this method in J area shows that the accuracy of the quantitative prediction model for gas-bearing parameters is high, and the gas-bearing evaluation criteria can effectively evaluate and classify the gas-bearing properties of the reservoir.

Key words: gas-bearing property; fuzzy correlation; well logging evaluation; Wufeng-Longmaxi formations; Fuling shale gas field; Sichuan Basin

非常规页岩气藏是自生自储型气藏, 含气性是页岩气藏地质评价工作的重点指标之一, 对评估页岩气区块的工业开采价值具有重要作用。四川盆地涪陵页岩气田上奥陶统五峰组—下志留统龙马

溪组发育富有机质页岩储层, 其形成时间老, 热演化程度高, 开发潜力良好。

页岩储层含气性影响因素复杂, 国内外学者用于评价页岩含气性的指标繁多, 且多从储层地质特

征或测试参数等方面进行研究^[1-6],目前尚未有一套完善的、并基于测井信息的含气性综合评价体系^[7-8]。涪陵页岩气田开发井主要是水平钻井,但以现有实验仪器及分析手段无法在水平井中进行页岩含气性分析化验等相关工作。如何在大段的穿行目的层中基于测井信息对页岩气储层含气性进行较为准确的评价,并提供可压裂的页岩气优质储层段,还需要进行深入的探讨和研究。

本文以涪陵页岩气田 J 区块页岩储层为例,结合该区储层地质、测井、岩心分析资料,开展含气储层定性识别以及含气性参数测井定量预测研究;分析并遴选储层含气性测井影响参数,进而运用灰色关联法计算不同影响因素的权重,进行储层测井含气性综合评价研究,同时参考前人的研究成果,建立了工区内测井含气性分类标准,以期为该页岩气的开发提供有效的技术支撑。

1 研究区概况

1.1 页岩储层特征

涪陵页岩气田 J 区块隶属于川东褶皱带万县复向斜东南部,地表属于低山、丘陵、河流地貌,整体上构造由北向南逐渐复杂。工区内各时代地层发育齐全,其中五峰组—龙马溪组一段为涪陵页岩气田页岩气勘探的主要目的层段,发育有大套的富碳、富

硅、富页理、富笔石、富黄铁矿的黑色页岩^[9-10]。

对 J 区块页岩气层段五峰组—龙马溪组一段进行了岩心分析实验(图 1),其中,岩石组分具有脆性矿物含量高、黏土含量低、分布较稳定等特点。页岩储层段脆性矿物总平均含量为 61.1%,以硅质矿物为主,黏土矿物总平均含量约为 36.6%,主要成分为伊蒙混层和伊利石;有机碳含量为 0.4%~6.62%,平均 2.43%,经换算后的等效镜质体反射率平均为 2.55%,表明目的层段页岩储层烃源岩品质较好。岩心孔隙度较好,纵向上呈“高一低—高”特征,其值为 1.50%~8.38%,平均 3.54%。综合显示 J 区块具备良好的储层品质。

1.2 储层测井响应特征

由 J 区块现场测录井、地质及全岩资料可知,五峰组—龙马溪组龙一段为目的层段,龙一段又可细分为 3 个亚段。五峰组—龙一段一亚段为主力含气页岩段,其岩性为富碳高硅页岩,硅质以自生为主;龙一段二亚段发育含碳质粉砂质页岩,硅质成分以粉砂质为主;龙一段三亚段岩性主要为碳质页岩。常规测井曲线显示,五峰组—龙一段一亚段声波时差及自然伽马曲线呈高值特征;深侧向电阻率为中到高值,电阻率曲线整体形态呈平滑的漏斗形或箱形,而局部由于地层中含有黄铁矿使得电阻率曲线有楔形下降形态;中子孔隙度值有

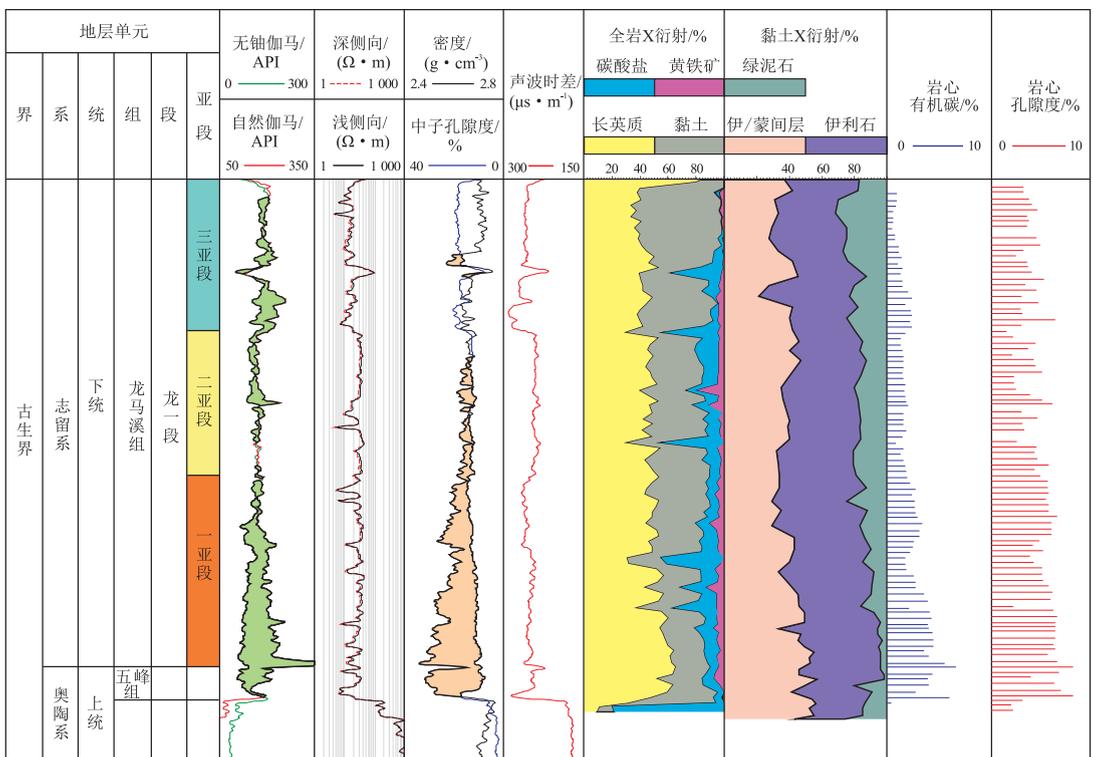


图 1 四川盆地涪陵页岩气田 J 区块焦页 A 井目的层段综合特征

Fig.1 Comprehensive features of interest intervals in well A, J area, Fuling shale gas field, Sichuan Basin

所降低,同时密度曲线呈现低值特征(普遍低于 2.58 g/cm^3),说明储层具备明显的气层特征,是聚集页岩气的优质层段。

2 页岩储层测井含气性评价

2.1 含气页岩储层定性识别方法

涪陵页岩气田J区块含气页岩段测井曲线具备明显的响应特征,因此通过不同测井曲线的组合可以识别页岩储集段和优质含气页岩段。

2.1.1 密度—中子叠合法

在含气储层中天然气的密度远低于油、水的密度,气体部分会造成含氢指数降低,储层因此往往存在“挖掘效应”。基于这种岩石物理基础,在测井曲线上(图1)将中子孔隙度和密度孔隙度测井曲线进行相反方向的刻度,即从左至右中子减小、密度增大,当应用于气层时,测井曲线间充填图形表现为密度向右包络中子的图形。

2.1.2 自然伽马—去铀伽马叠合法

涪陵页岩气田页岩储集层中有机质含量高,有机质能吸附高放射性元素铀,自然伽马曲线测井值整体呈现出高一极值。除局部段外,自然伽马主要集中在 $100 \sim 200 \text{ API}$,无铀伽马值主要集中在 $60 \sim 140 \text{ API}$ 。因此采用自然伽马能谱测井的去铀自然伽马和自然伽马曲线对比,根据两者之间的差值能快速识别出页岩储层,2条曲线间的包络面积越大,反映有机质含量(高含铀)越高,指示相对较好的储层(图1)。

2.1.3 钍—铀比值法

利用钍—铀比值法可以识别沉积环境及富集带。通常在强水动力(高能)环境下,钍含量相对较高,铀、钾含量相对较低;在弱水动力(低能)环

境下则反之。此外,氧化还原环境也影响铀含量值,比如在还原条件下,有机质及铀的含量高;而钾含量与黏土含量紧密相关^[11]。从图2可知,在目的层上部,钍/铀比值分布在 $2 \sim 7$,为海相氧化还原过渡带,是页岩气较富集带;在目的层下部,钍/铀比值整体小于2,为海相还原环境,同时自然电位响应特征出现较明显异常,为页岩气富集带。

2.2 含气性参数定量表征模型

孔隙和裂缝是页岩气的主要储集空间,通常情况下页岩气有3种方式赋存于页岩储层,其中吸附气赋存于岩石颗粒及有机质表面,游离气以游离状态赋存于孔隙及裂缝之中^[12],此外由于泥页岩中溶解气量所占比例极低,故计算页岩气总含气量时可不考虑溶解气含量。含气性的定量表征应重点计算4个参数:吸附气含量、游离气含量、含气(水)饱和度和孔隙度^[13]。

2.2.1 吸附气含量

页岩的吸附能力对页岩的总含气量、页岩气采收率以及开采价值的评价有着重要影响。通常情况下,可以通过兰格缪耳等温吸附实验获得地层最大的吸附气含量^[14]。目前,涪陵页岩气田J区块系统开展等温吸附实验的温度为 $85 \text{ }^\circ\text{C}$,该温度接近页岩气藏的平均温度。因此,可以建立该实验温度下测定的吸附气含量与岩心总有机碳的关系式。但在实验室条件下,岩石黏土表面对气体存在一定的吸附能力,且实际的页岩气藏黏土表面被束缚水占据,降低了储层对气体的吸附能力,因此要开展烘干样品与平衡水样品的吸附气校正研究。建立校正关系式如下。

$$G_w = 1.01 G_{\text{dry}} - 0.32$$

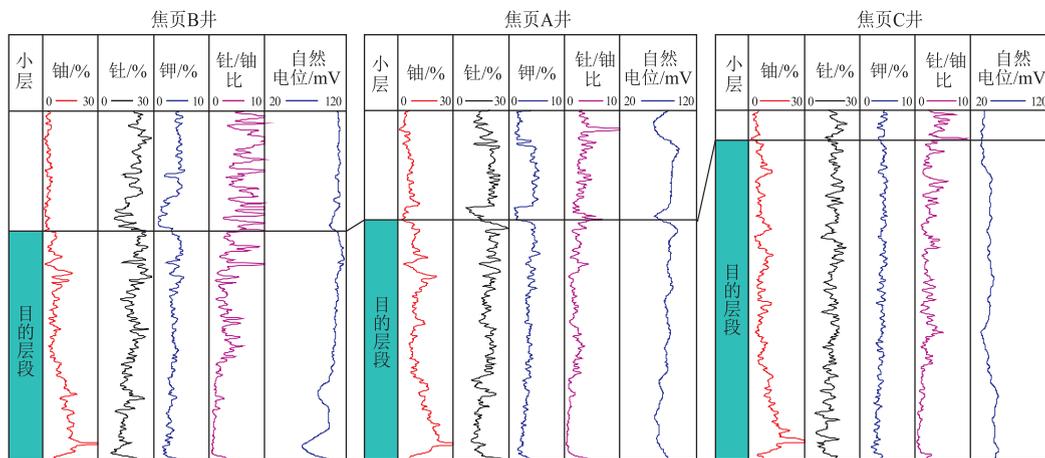


图2 四川盆地涪陵页岩气田J区块直井连井图

Fig.2 Multi-well comparison of J area, Fuling shale gas field, Sichuan Basin

式中: G_w 、 G_{dry} 分别为页岩平衡水样品和烘干样品吸附气含量, m^3/t 。

基于校正后的吸附气含量,可建立其与有机碳的关系式:

$$G_{ad} = 0.77w(\text{TOC}) + 0.08$$

式中: G_{ad} 为页岩吸附气含量, m^3/t ; $w(\text{TOC})$ 为总有机碳含量,%。

2.2.2 游离气含量

游离气含量除了容易受到储层的地层压力、温度影响外,含水(气)饱和度以及孔隙度也会影响游离气的计算。采用 LEWIS 等提出的页岩游离气含量经验公式^[15-16],即在得到页岩储层含水饱和度及孔隙度后,再将地层条件下的含气量换算到地表,即可得到J区块页岩游离气含气量。计算后的吸附气和游离气含量之和即可近似等于总含气量。具体换算公式如下:

$$G_{free} = \frac{1}{B_g} \varphi (1 - S_w) \frac{1}{\rho_b}$$

$$G_T = G_{ad} + G_{free}$$

式中: G_{free} 为计算的游离气含量, m^3/t ; B_g 为气体体积系数,常数无量纲,具体取值以J工区实际测算值为准; φ 为计算页岩储层孔隙度,%; S_w 为计算页岩地层含水饱和度,%; ρ_b 为地层岩石密度, g/cm^3 ; G_T 为计算的总含气量, m^3/t 。

要提高含气量解释可靠性,关键是要计算相对准确的含水饱和度和孔隙度。

2.2.3 含水饱和度

涪陵页岩气田储层具有较强的非均质性,且发育有微裂缝及黄铁矿。现场在钻井过程中,地层受到钻井液侵入影响,电阻率曲线会出现明显的低阻现象^[17-18]。在页岩储层中,页岩饱和度指数难以测量,地层水电阻率亦难以求准,因此传统阿尔奇公式不适用于非常规页岩储层。通过将测井曲线信息与岩心实测分析资料进行相关性分析得知,基于密度、中子曲线可以与实测含水饱和度建立相应的解释模型,公式如下:

$$S_w = 112.015\rho_b + 0.035NPHI - 249.418$$

$$S_g = 100 - S_w$$

式中: $NPHI$ 为中子测井值,%; S_g 为计算含气饱和度值,%。

2.2.4 孔隙度

涪陵页岩气田J区块页岩地层矿物成分复杂,

孔隙度模型已经不能像砂岩、碳酸盐岩等地层,直接采用体积模型进行孔隙度计算。根据岩石物理特征和测井响应特征分析,认为在该区块孔隙度与声波时差、中子等测井曲线具有一定的相关性。建立模型如下:

$$\varphi = 0.156AC + 0.093NPHI + 1.906$$

式中: AC 为声波时差测井值, $\mu s/ft$ 。

测井定量计算的含气性参数结果与岩心分析实测值吻合度较高,平均误差较小,说明计算模型适用于该区块。

3 页岩储层含气性测井综合评价

在常规油气藏储层含气性评价研究中,通常建立以储层孔隙度、渗透率等物性参数为依据的分类标准,而页岩气储层致密、发育有微裂缝,储层产能通常与储层原生品质和压裂缝网的沟通程度有关,故需要针对页岩气的特点建立相应的含气性测井综合评价方法^[19]。

3.1 含气性测井影响参数优选

基于J区块70口水平井测井综合解释成果,确定归一化无阻流量为反映页岩含气性的比较参数序列,结合现场工程、试气等资料,进行多参数对比,建立多种交会图版并分析各相关系数,以此优选影响含气性测井评价的参数^[20]。

涪陵页岩气田页岩气开发为分层系开发,J区块已试气井穿行层位主要以下部气层为主。因此,为了尽量消除不同小层地质条件差异的影响,本次研究选取地质条件相近、主要穿行主力含气层的开发井数据来开展研究。

通过各参数交会图(图3)分析可知,各参数与归一化无阻流量均有一定的相关性。以无阻流量作为母序列,其他参数作为子序列,通过分析各参数与无阻流量相关性的高低,以该区域经验系数值0.55为门限值,从中选取相关性相对较高的5个参数,即有机碳含量、含气饱和度、孔隙度、埋深、硅质含量作为影响含气性评价的参数,其相关系数分别为0.74,0.62,0.61,0.61,0.60;而相关性较弱的电阻率、全烃、压力系数为次要参数,相关系数分别为0.44,0.40,0.16。其中,优选的影响参数中,正相关指标为有机碳含量、孔隙度、含气饱和度、硅质含量,负相关指标为埋深。

3.2 构建含气性测井评价指数

研究发现,采用单一因素来评价含气性常常会出现不同的结果。如采用有机碳含量来评价有效

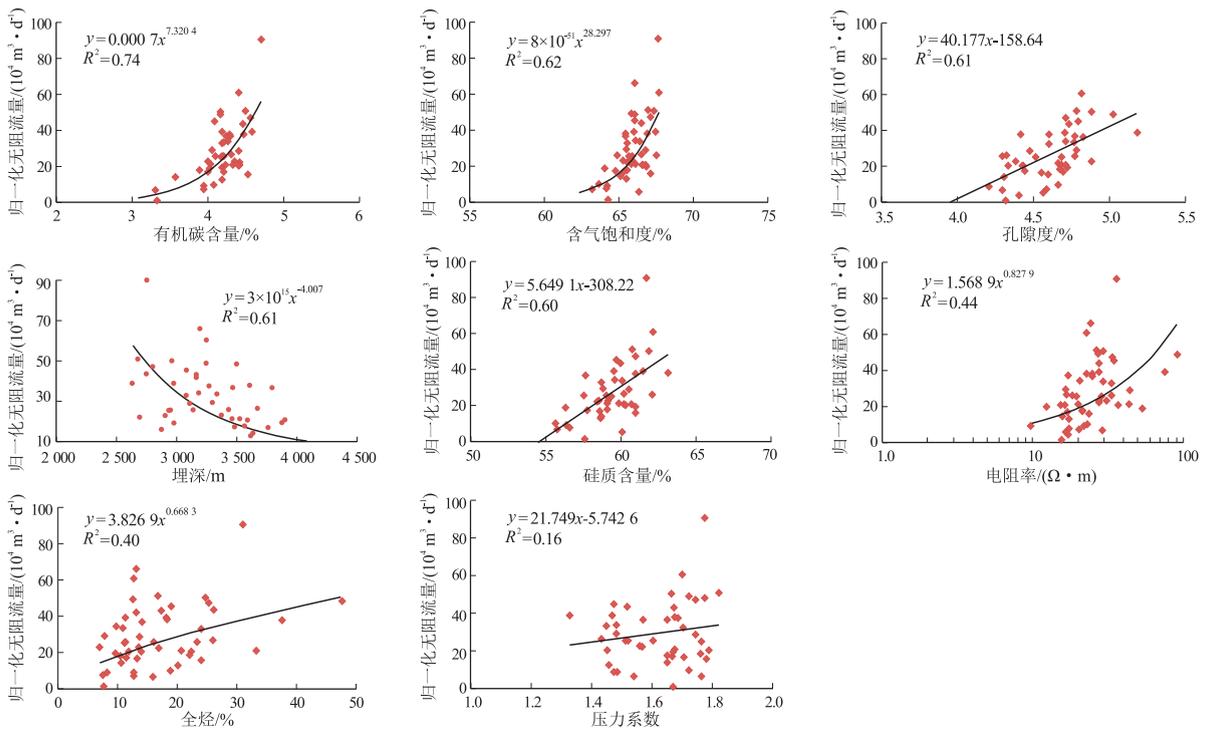


图 3 四川盆地涪陵页岩气田 J 区块各参数与无阻流量交会图

Fig.3 Cross-plots of multiple parameters and open-flow capacity of J area, Fuling shale gas field, Sichuan Basin

储层,评价结果为 I 类,而换用孔隙度来评价该储层的结果可能仅为 II 类。在 J 地区,为避免因采用单因素评价含气性过程中造成评价结果不唯一、多种结果交叉影响的情况,建立了基于多个参数的含气性测井评价指数 (Gas-bearing Quality),公式如下:

$$GQ = \sum_{i=1}^n W_i R_i$$

式中: GQ 为储层含气性测井评价指数; R_i 为归一化含气性评价参数; W_i 为归一化权重系数。

权重系数是针对各个具体评价因素而言、在计算权重时的一个相对概念,它反映出各评价因素在总体系统评价中所占的比例系数。确定权重系数的方法较多,在 J 区块储层含气性测井综合评价研究过程中,利用灰色关联分析法^[21]来求取各评价参数的权重系数。前人已在常规砂岩、煤层气储层评价中采用灰色关联法,深入挖掘各参数的影响程度,并由此进行综合评价,取得了很好的应用效果。

首先,由于不同参数的数值差异大,单位也不一样,因此需要对各参数进行数据归一标准化,使得各项参数具有可比性。以归一化无阻流量作为母序列,含气性敏感参数为子序列,对子序列参数采用极值法,使每项评价参数在 0~1 之间。其中,

对正向指标有机碳含量、孔隙度、含气饱和度、硅质含量采取极小值法进行归一化,对负向指标埋深采用极大值法进行归一化。换算公式如下:

$$R_{ij} = \frac{A - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}}$$

$$R_{ik} = \frac{B_{\max} - B}{B_{\max} - B_{\min}}$$

式中: R_{ij} 、 R_{ik} 分别为经极小值、极大值法归一化后的各子参数序列,无量纲; A 、 B 为原始子参数序列,无量纲; A_{\min} 、 B_{\min} 和 A_{\max} 、 B_{\max} 分别为原始子参数序列的最小值和最大值,无量纲。

其次,利用灰色关联分析法的经典公式,求取数值归一化后的各子序列与母序列间的关联系数、关联度,计算公式如下:

$$\delta_{oi} = \frac{\Delta_{\min} + \sigma \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(x) + \sigma \Delta_{\max}}$$

$$r_i = \frac{1}{N} \sum_{x=1}^N \delta_i(x)$$

式中: δ_{oi} 为归一化后的各子序列与母序列间的关联系数,无量纲; σ 为分辨系数,常数,通常取值 0.5; Δ_{\min} 、 Δ_{\max} 分别为两级最小差值和两级最大差值,无量纲; $\Delta_{oi}(x)$ 为归一化后的同一点上各子序

列与对应母序列之间的绝对差值,无量纲; r_i 为各子序列参数的关联度,无量纲; $\delta_i(x)$ 为子序列上各点对应的关联系数,无量纲; N 为子序列上参与比较的点的个数。其中,子序列与母序列之间的关联度越接近 1,表明该子因素对母因素的影响越大^[22]。

将计算出的关联系数、关联度代入下式:

$$W_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^N r_i}$$

式中: W_i 为归一化权重系数; r_i 为各子序列参数的关联度,在本式中,共选取了 5 个子参数序列,因此 $N=5$,即可得到权重系数 W_i (表 1)。

最后,将计算出的各参数权重系数代入 GQ 的计算公式,即可得到含气性测井评价指数 GQ 的具体计算公式,即: $GQ=0.22 \times$ 归一化后有机碳含量 $+0.18 \times$ 归一化后孔隙度 $+0.22 \times$ 归一化后含气饱和度 $+0.19 \times$ 归一化后硅质含量 $+0.19 \times$ 归一化后埋深,由此可以计算出 J 区块 70 口水平井的 GQ 值。

根据页岩含气性综合评价指标 GQ 以及各数值的分布区间,可做出涪陵页岩气田 J 区块页岩储层含气性测井综合评价指数值的概率累计分布曲线(图 4)。从图 4 可以看出,曲线存在拐点即表明最大变化点,说明不同水平井的含气性存在差异。由此可以根据曲线区域分界值(0.37 和 0.57),对含气性的等级分类进行划分,即 I 类含气储层 $GQ \geq 0.57$, II 类含气储层 $0.37 < GQ < 0.57$, III 类含气储层 $GQ \leq 0.37$ 。

基于该分类阈值,将 J 区块 51 口已进行产能

表 1 各项参数权重系数

Table 1 Weight coefficient of every parameter

参数	有机碳含量	孔隙度	含气饱和度	硅质含量	埋深
关联度 r_i	0.69	0.57	0.70	0.59	0.59
权重系数 W_i	0.22	0.18	0.22	0.19	0.19

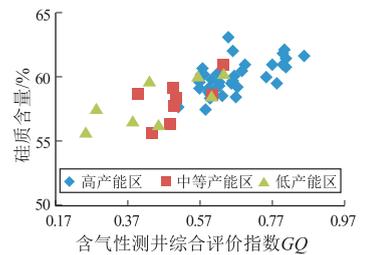
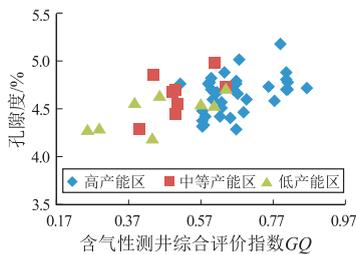
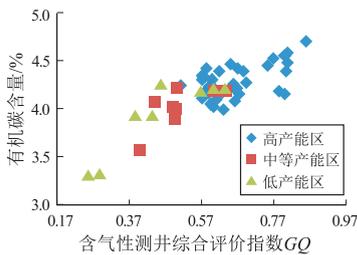


图 6 四川盆地涪陵页岩气田 J 区块测井参数与含气性测井综合评价指数交会图

Fig.6 Cross-plots of logging parameters and comprehensive evaluation index of gas-bearing property of J area, Fuling shale gas field, Sichuan Basin

测试井的最高测试产量值投在交会图版上(图 5),分析可知共有 47 口井最高测试产量投射在 3 种分类阈值区间里,符合率达到 92.2%,说明用基于测井资料建立的 GQ 指数来评价储层含气性是可靠、有效的。

3.3 建立含气性测井综合评价标准

将 J 区块 51 口已测试的井按产量高低分为 3 类,即高产能区、中等产能区和低产能区^[23-24],并绘制不同产能分类下的各测井参数与含气性测井综合评价指数 GQ 的交会图版(图 6)。基于含气性测井综合评价指数 GQ ,结合该区实际地质情况,

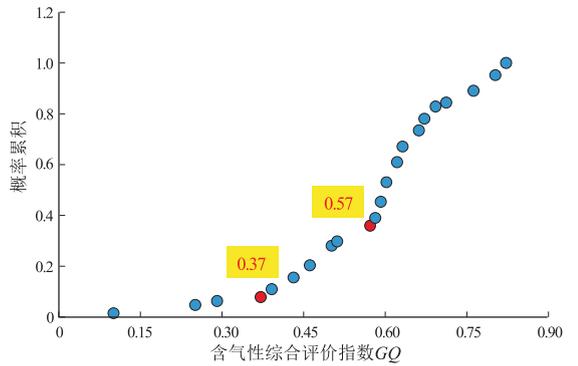


图 4 含气性综合评价指数概率累积曲线

Fig.4 Cumulative probability curve of comprehensive evaluation index of gas-bearing property

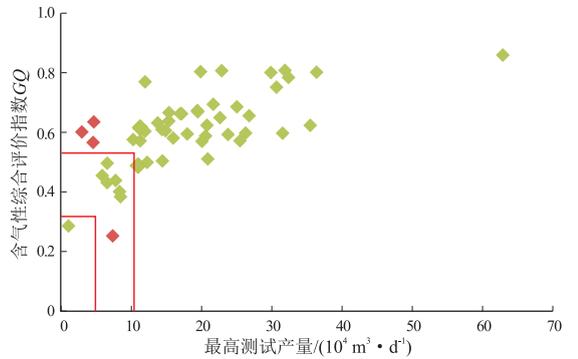


图 5 含气性综合评价指数与最高测试产量交会图

Fig.5 Cross-plots of comprehensive evaluation index of gas-bearing property and max-test production

表 2 四川盆地涪陵页岩气田 J 区块
含气性测井综合评价标准

Table 2 Comprehensive logging evaluation
criteria of gas-bearing property of J area,
Fuling shale gas field, Sichuan Basin

评价等级	GQ	有机碳含量/%	孔隙度/%	硅质含量/%
I	≥ 0.57	≥ 4	≥ 4.5	≥ 60
II	0.37~0.57	3.5~4	4~4.5	55~60
III	≤ 0.37	≤ 3.5	≤ 4	≤ 55

建立区域内以 GQ 、有机碳含量、孔隙度、硅质含量为主的储层含气性测井评价分类标准(表 2)。

3.4 应用分析

(1)以 J 区块北部焦页 X-5HF 井为例。该井气层中深为 2 753.2 m,水平段各参数测井解释平均值如下:孔隙度为 4.72%,有机碳含量为 4.7%,硅质含量为 61.67%,含气饱和度为 67.62%。将上述评价参数归一化无量纲化处理后得到:埋深 0.93,孔隙度 0.64,有机碳 0.99,硅质 0.83,含气饱和度 0.99。利用含气性综合评价指数计算, $GQ = 0.19 \times 0.93 + 0.18 \times 0.64 + 0.22 \times 0.99 + 0.19 \times 0.83 + 0.22 \times 0.99 = 0.88$,含气性综合评价为 I 类。该井试气后最高测试产量为 $62.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,归一化无阻流量为 $90.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,评价为高产能井,证实含气性评价结果与实际试气结果吻合。

(2)以 J 区块南部焦页 Y-1HF 井为例。该井气层中深为 3 484 m,水平段各参数测井解释平均值如下:孔隙度为 4.45%,有机碳含量为 3.9%,硅质含量为 57.75%,含气饱和度为 64.79%,将上述评价参数归一化无量纲化处理后得到:埋深 0.5,孔隙度 0.59,有机碳 0.57,硅质 0.38,含气饱和度 0.46。利用含气性综合评价指标计算, $GQ = 0.19 \times 0.5 + 0.18 \times 0.59 + 0.22 \times 0.57 + 0.19 \times 0.38 + 0.22 \times 0.46 = 0.5$,含气性综合评价为 II 类。该井试气后最高测试产量为 $12.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,归一化无阻流量为 $17.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,评价为中等产能井,证实含气性评价结果与实际试气结果吻合。

4 结论

(1)形成了一套基于测井资料的含气性综合评价方法。基于岩心资料建立的含气性参数定量解释模型计算的孔隙度、含水饱和度、含气量结果与实测参数值吻合度高。

(2)优选了有机碳含量、孔隙度、含气饱和度、硅质含量、埋深为影响 J 区块含气性测井评价的敏

感参数,其权重系数分别为 0.22,0.18,0.22,0.19,0.19,其中,有机碳含量、孔隙度、含气饱和度、硅质含量为正相关指标参数,埋深为负相关指标参数。

(3)利用灰色关联分析法构建 J 区块含气性测井评价指数 GQ ,建立了含气性测井评价标准。I 类储层 $GQ \geq 0.57$,II 类储层 $0.37 < GQ < 0.57$,III 类储层 $GQ \leq 0.37$ 。该评价标准在 J 区块进行了应用,北部焦页 X-5HF 井 GQ 指数评价为 I 类,且最高测试产量、归一化无阻流量高,为高产能井;南部焦页 Y-1HF 井 GQ 评价为 II 类,且最高测试产量、归一化无阻流量中等,为中等产能井。分类结果与实际生产结果互相印证,证实了该评价指数的有效性。

参考文献:

- [1] 罗胜元,刘安,李海,等.中扬子宜昌地区寒武系水井沱组页岩含气性及影响因素[J].石油实验地质,2019,41(1):56-67.
LUO Shengyuan, LIU An, LI Hai, et al. Gas-bearing characteristics and controls of the Cambrian Shuijingtu Formation in Yichang area, Middle Yangtze region[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(1): 56-67.
- [2] 张洪洁,王凤琴,刘航,等.鄂尔多斯盆地东南部长 7 段页岩气含气量及影响因素[J].新疆石油地质,2019,40(6):666-672.
ZHANG Hongjie, WANG Fengqin, LIU Hang, et al. Shale gas content and its influencing factors in Chang 7 member of South-eastern Ordos basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(6): 666-672.
- [3] 严伟,王建波,刘帅,等.四川盆地焦石坝地区龙马溪组泥页岩储层测井识别[J].天然气工业,2014,34(6):30-36.
YAN Wei, WANG Jianbo, LIU Shuai, et al. Logging identification for the Longmaxi mud shale reservoir in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 30-36.
- [4] 彭超,唐军,冯爱国,等.涪陵页岩气储层含气性测井评价[J].科学技术与工程,2017,17(2):190-196.
PENG Chao, TANG Jun, FENG Aiguo, et al. Gas content ability evaluation by logging technology in Fuling shale gas reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(2): 190-196.
- [5] 刘洪林,王红岩,方朝合,等.中国南方古老海相页岩气超压富集特征及勘探开发意义[J].非常规油气,2014,1(1):11-16.
LIU Honglin, WANG Hongyan, FANG Chaohu, et al. The characteristics of over-pressure reservoir for older South China marine shale and its significance for exploration[J]. Unconventional Oil & Gas, 2014, 1(1): 11-16.
- [6] 许露露,张焱林,陈程,等.鄂西地区黄陵背斜周缘五峰组—龙马溪组页岩气储层及含气性特征[J].特种油气藏,2019,26(5):26-32.
XU Lulu, ZHANG Yanlin, CHEN Cheng, et al. Shale gas reservoir and gas-bearing properties of Wufeng-Longmaxi formations in the periphery of Huangling anticline of western Hubei province [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(5): 26-32.
- [7] 杨克兵,王连君,刘懿,等.阵列声波测井评价致密砂岩气层

- 含气性[J].断块油气田,2019,26(4):486-490.
- YANG Keping, WANG Lianjun, LIU Yi, et al. Gas-bearing properties evaluation of tight sandstone gas reservoir by array acoustic logging[J]. Fault - Block Oil and Gas Field, 2019, 26(4): 486-490.
- [8] 夏宏泉, 刘畅, 王瀚玮, 等. 页岩含气量的测井评价方法研究[J]. 特种油气藏, 2019, 26(3): 1-6.
- XIA Hongquan, LIU Chang, WANG Hanwei, et al. Logging evaluation of shale gas content[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(3): 1-6.
- [9] 方栋梁, 孟志勇. 页岩气富集高产主控因素分析: 以四川盆地涪陵地区五峰组-龙马溪组一段页岩为例[J]. 石油实验地质, 2020, 42(1): 37-41.
- FANG Dongliang, MENG Zhiyong. Main controlling factors of shale gas enrichment and high yield: a case study of Wufeng-Longmaxi formations in Fuling area, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(1): 37-41.
- [10] 魏力民, 王岩, 张天操, 等. 页岩气富集与高产主控因素: 以川南地区五峰组-龙马溪组为例[J]. 断块油气田, 2020, 27(6): 700-704.
- WEI Limin, WANG Yan, ZHANG Tiancao, et al. Main control factors of enrichment and high production of shale gas: a case study of Wufeng-Longmaxi Formation in Southern Sichuan[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(6): 700-704.
- [11] 梁学堂, 张伟然, 张海强. 鄂西地区页岩储层伽玛能谱特征与沉积环境及综合评价[J]. 资源环境与工程, 2018, 32(4): 576-583.
- LIANG Xuetao, ZHANG Yiran, ZHANG Haiqiang. Characteristics of gamma-ray spectroscopy, sedimentary environment and comprehensive evaluation of shale gas reservoir in western Hubei province[J]. Resources Environment & Engineering, 2018, 32(4): 576-583.
- [12] 张作清, 孙建孟. 页岩气测井评价进展[J]. 石油天然气学报, 2013, 35(3): 90-95.
- ZHANG Zuoqing, SUN Jianmeng. Progress of logging evaluation on shale gas reservoirs[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(3): 90-95.
- [13] 陈康, 张金川, 唐玄. 湘鄂西下志留统龙马溪组页岩含气性测井评价[J]. 特种油气藏, 2016, 23(1): 16-20.
- CHEN Kang, ZHANG Jinchuan, TANG Xuan. Gas content logging evaluation of Lower Silurian Longmaxi Shale in western Hunan - Hubei[J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2016, 23(1): 16-20.
- [14] 郭怀志, 潘保芝, 张丽华, 等. 页岩吸附模型及吸附气含气量计算方法进展[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(3): 1080-1087.
- GUO Huaizhi, PAN Baozhi, ZHANG Lihua, et al. Progress in adsorption model and calculation method of absorbed gas content of shale[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(3): 1080-1087.
- [15] 石文睿, 张占松, 张建平, 等. 建南东岳庙段页岩气常规测井解释模型研究: 以JYHF-1井为例[J]. 天然气勘探与开发, 2014, 37(2): 29-34.
- SHI Wenrui, ZHANG Zhansong, ZHANG Jianping, et al. Conventional well-logging interpretation model for shale gas in Dongyuemiao Member of Jiannan area: an example from JYHF-1 well[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2014, 37(2): 29-34.
- [16] LEWIS R, INGRAHAM D, PEARCY M, et al. New evaluation Techniques for gas shale reservoirs[C]//Reservoir Symposium 2004. Schlumberger: [s.n.], 2004.
- [17] 张晓明, 石万忠, 舒志国, 等. 涪陵地区页岩含气量计算模型及应用[J]. 地球科学, 2017, 42(7): 1157-1168.
- ZHANG Xiaoming, SHI Wanzhong, SHU Zhiguo, et al. Calculation model of shale gas content and its application in Fuling area[J]. Earth Science, 2017, 42(7): 1157-1168.
- [18] 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. Log evaluation of gas content from Jiaoshiiba shale gas reservoir in Fuling gas field[J]. Well Logging Technology, 2015, 39(3): 357-362.
- [19] 李霞, 程相志, 周灿灿, 等. 页岩油气储层测井评价技术及应用[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(5): 904-914.
- LI Xia, CHENG Xiangzhi, ZHOU Cancan, et al. Technology and application of well logging evaluation of shale oil and gas reservoirs[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(5): 904-914.
- [20] 李武广, 钟兵, 杨洪志, 等. 页岩储层含气性评价及影响因素分析: 以长宁-威远国家级试验区为例[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(10): 1653-1660.
- LI Wuguang, ZHONG Bing, YANG Hongzhi, et al. Evaluation of gas-bearing property for shale reservoir and its influence factors analysis: taking Changning-Weiyuan national experimental zone as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(10): 1653-1660.
- [21] 许宏龙, 刘建, 乔诚, 等. 灰色关联分析法在双河油田储层评价中的应用[J]. 油气藏评价与开发, 2015, 5(5): 17-21.
- XU Honglong, LIU Jian, QIAO Cheng, et al. Application of gray correlative analysis method to reservoir evaluation of Shuanghe oilfield[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2015, 5(5): 17-21.
- [22] 王衍, 马俯波, 张海英, 等. 灰色关联分析法在页岩储层评价中的应用: 以湖南保靖页岩气区块为例[J]. 非常规油气, 2017, 4(6): 8-12.
- WANG Yan, MA Fubo, ZHANG Haiying, et al. Application of grey relational analysis in shale gas reservoir evaluation: taking shale gas block in Baojing Hunan as an example[J]. Unconventional Oil & Gas, 2017, 4(6): 8-12.
- [23] 王忠东, 王业博, 董红, 等. 页岩气水平井产量主控因素分析及产能预测[J]. 测井技术, 2017, 41(5): 577-582.
- WANG Zhongdong, WANG Yebo, DONG Hong, et al. Production main control factors analysis and productivity prediction for shale gas of horizontal well[J]. Well Logging Technology, 2017, 41(5): 577-582.
- [24] 郭彤楼, 张汉荣. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 28-36.
- GUO Tonglou, ZHANG Hanrong. Formation and enrichment mode of Jiaoshiiba shale gas field, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 28-36.