

引用格式: 邹毅, 刘成川, 邓美洲, 等. 川中资阳—东峰场区块须家河五段储层“四性”关系及应用[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(3): 484-491.

ZOU Yi, LIU Chengchuan, DENG Meizhou, et al. “Four-properties” relationship and application in the fifth member of Xujiahe Formation in Ziyang–Dongfengchang Block of central Sichuan[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(3): 484-491.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024.03.018

川中资阳—东峰场区块须家河五段 储层“四性”关系及应用

邹毅, 刘成川, 邓美洲, 牛娜, 韩智英

(1. 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 川中资阳—东峰场区块须家河五段(以下简称须五段)储层具有低孔、低渗且非均质性强的特点, 为了建立可靠的测井解释模型以及确定有效储层下限, 应用砂岩测井、录井、岩心及试气等资料, 以岩心归位及测井曲线标准化为依据, 开展储层“四性”关系研究, 结果表明: 岩性、物性、电性、含气性相关性较好, 自然伽马随粒度减小而增大; 电阻率曲线可以识别含钙砂岩; 声波时差与孔隙度相关性好; 含气性与物性呈正相关。在“四性”关系研究的基础上建立了孔隙度、渗透率及含水饱和度解释模型, 并确定了储层判别标准。以上研究成果在生产中取得良好的应用效果, 储层测井、试气和实验结果符合“四性”关系图版。通过测井解释模型计算的物性参数与岩心实验测试结果吻合; 产气剖面测试结果与储层判别标准匹配。“四性”关系研究为测试方案设计提供了有效的技术支撑。

关键词: 东峰场; 须五段; “四性”关系; 测井解释; 储层判别标准

中图分类号: TE122

文献标识码: A

“Four-properties” relationship and application in the fifth member of Xujiahe Formation in Ziyang–Dongfengchang Block of central Sichuan

ZOU Yi, LIU Chengchuan, DENG Meizhou, NIU Na, HAN Zhiying

(Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Southwest China Oil & Gas Company, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: The fifth member of Xujiahe Formation (Xu-5 member) in Ziyang–Dongfengchang Block of central Sichuan is characterized by low porosity, low permeability, and strong heterogeneity. This study aims to develop a reliable logging interpretation model and to establish the lower limits of effective reservoirs using well logging, core, and gas testing data. The research focuses on the correlation among four key properties: lithology, physical properties, electrical properties, and gas content following core homing and log normalization. A significant correlation exists between the lithology, physical properties, electrical properties, and gas content. Gamma ray readings increase as particle size decreases, aiding in sediment characterization. Resistivity curves effectively identify calcium-bearing sandstones. A strong positive correlation exists between sonic differential time and porosity. Gas content is positively correlated with physical properties, indicating richer gas zones correlate with specific log signatures. Based on these relationships, a comprehensive interpretation model for porosity, permeability, and water saturation was established, alongside criteria for reservoir identification. The application of these findings in production scenarios demonstrates consistency between reservoir logging, gas testing, and experimental results with the established four-properties relationship diagram. The calculated physical property parameters from the logging interpretation model align well with core test outcomes, and gas production profile testing corroborates the reservoir identification criteria. This study provides critical technical support for designing testing schemes and optimizing resource extraction.

Keywords: Dongfengchang; the fifth member of Xujiahe Formation (Xu-5 member); “four-properties” relationship; logging interpretation; discriminant criteria of reservoirs

收稿日期: 2023-05-15.

第一作者简介: 邹毅(1990—), 女, 硕士, 工程师, 从事致密砂岩储层评价方面的研究工作。地址: 四川省成都市高新区吉泰路688号, 邮政编码: 610041。E-mail: 243213873@qq.com

基金项目: 中国石化油田事业部开发导向项目“资阳—东峰场须五气藏潜力评价及部署优化”(YTBXD-XN2022-2)。

储层“四性”特征是指岩性、物性、电性和含油气性,各项特征及其相互之间的关系是低孔、低渗储层研究的重要内容^[1]。“四性”关系的研究成果被广泛应用于辽河盆地、准噶尔盆地以及鄂尔多斯盆地等不同区域的油气藏储层,前人通常根据“四性”关系来建立测井解释模型和确立储层评价标准,从而为储层改造和储量计算等提供参考^[2-11]。不同地区的“四性”关系有相似之处,但又各有差异,因此,得到的定量指标无法跨地区通用,不同区域、不同层位的致密砂岩气藏需分别开展“四性”关系的定性和定量研究。目前,东峰场须五段储层对“四性”关系研究较少,急需开展相关研究。基于东峰场须五段多井录井、测井、岩心、测试等资料,系统剖析储层“四性”之间的内在联系,在物性与电性关系基础上建立孔隙度模型,进而建立渗透率、饱和度解释模型;通过大量数据分析和“四性”关系图版,确定储层判别标准。“四性”关系研究成果在单井上应用效果较好,为储层改造施工提供有效技术支持。

1 概况

川中资阳—东峰场地区位于四川盆地中部的川中隆起构造带威远构造北斜坡上,构造平缓^[12-16]。经过多年勘探发现,该区三叠系上统须家河组五段为有利油气富集区。研究区为继承性单斜构造,南西高、北东低,断层欠发育,整体以三角洲前缘沉积为主,有利沉积微相主要为水下分流河道和河口坝沉积。储层具有低孔、低渗且非均质性强的特点,孔隙度介于0.16%~11.6%(平均值为5.16%),渗透率介于 $(0.01\sim 31.50)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ (平均值为 $0.13\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$),含气砂体厚度介于26~38 m,储层厚度介于13.0~26.2 m。目前,针对东峰场须五段储层测井研究较少,因此,深入开展该地区储层“四性”关系研究,建立可靠的测井解释模型,明确储层物性、电性及含气性判别标准,对水平段靶点优选、测试井段选取以及储层分类改造具有重要意义。

2 储层“四性”关系

研究区常规测井解释曲线主要有^[17]:自然伽马(GR)、声波时差(AC)、补偿中子(CNL)、密度(DEN)、自然电位(SP)、深侧向电阻率(LLD)、浅侧向

电阻率(LLS)、井径(CAL)等。受地应力和钻井液等影响,井眼扩径较为严重,多形成复杂的椭圆井眼,而密度测井受井眼影响较大,导致部分资料失真^[18];自然电位在致密储层中反应不明显,仅作为辅助曲线。因此,选取自然伽马、声波时差、补偿中子、深侧向电阻率、浅侧向电阻率等测井资料,结合录井、测试等资料,进行储层“四性”关系研究。

2.1 岩心归位和标准化

由于录井与测井测量深度的方法和仪器不同,需开展岩心归位,使之满足“四性”关系研究需求。岩心、岩屑和薄片资料显示:须五段岩性整体以岩屑砂岩为主,发育少量岩屑石英砂岩,局部存在含钙砂岩,砂体顶部和底部发育泥页岩。根据含钙砂岩储层高电阻^[19-20]以及泥岩高自然伽马的特点^[21],以含钙砂岩和泥页岩为标志层,进行岩心归位,使岩心和测井曲线深度匹配。为了减少因仪器类型、操作方式不当等造成的系统误差^[22],采用频率直方图法^[23]进行测井曲线标准化,使不同井之间测井参数具有可对比性,满足多井储层测井评价需求。“四性”关系分析图版数据来源于研究区须五段测井曲线标准化处理后的数据。

2.2 岩性与电性的关系

储层的电性主要指的是各种测井所获得的反映地下地质情况的信息,即测井信息,泛指全部测井类型所包含的岩石物理属性。测井曲线中自然伽马曲线可以较好反应储层岩性,结合声波时差、电阻率等测井曲线可得到须五段不同岩性电性特征。东峰场须五段不同岩性的自然伽马与声波时差、自然伽马与深侧向电阻率交会图(图1)显示:自然伽马对区分砂岩粒度、砂泥岩有较好的响应,随着砂岩粒度变细(中砂岩—细砂岩—粉砂岩),自然伽马值增大,页岩自然伽马值明显大于砂岩,中砂岩和细砂岩自然伽马一般小于100 API;不同粒度砂岩、砂泥岩之间声波时差值差异不明显,含钙砂岩声波时差值较相同粒度不含钙砂岩整体偏低;深侧向电阻率能较好地识别含钙砂岩,含钙砂岩电阻率整体较高,且变化范围大。

为了进一步明确含钙层的电性特征,分别拟合A1井深侧向电阻率、声波时差、补偿中子与岩心钙元素含量关系曲线,随着岩心钙元素含量增大,声波时

差和补偿中子减小,深侧向电阻率增大。深侧向电阻率与岩心钙元素拟合度最高,受含钙量影响也最大,因此选取深侧向电阻率来划分含钙砂岩。深侧向电阻率半幅点深度对应钙元素含量约为8%,则含钙砂岩电性标准为:深侧向电阻率 $\geq 100 \Omega \cdot m$,声波时差 $\leq 60 \mu s/ft$,补偿中子 $\leq 3.5\%$ 。

2.3 岩性与物性关系

根据5口井岩心物性实验结果分析:须五段中砂岩孔隙度介于5.4%~6.6%,渗透率介于 $(0.12 \sim 0.26) \times 10^{-3} \mu m^2$;细砂岩孔隙度介于2.7%~5.3%,渗透率介于 $(0.04 \sim 0.06) \times 10^{-3} \mu m^2$;粉砂岩孔隙度介于2.0%~2.6%,渗透率介于 $(0.03 \sim 0.08) \times 10^{-3} \mu m^2$;含钙中砂岩孔隙度介于2.4%~4.9%,渗透率介于 $(0.03 \sim 0.15) \times 10^{-3} \mu m^2$;含钙细砂岩孔隙度介于1.0%~2.7%,渗透率介于 $(0.02 \sim 0.03) \times 10^{-3} \mu m^2$ 。岩性和物性的关系表现为:随着砂岩粒度变大,孔隙度和渗透

率增大;含钙会导致砂岩孔隙度和渗透率降低;随着钙元素含量升高,岩心孔隙度和渗透率减小,钙元素含量大于8%时,孔隙度小于4%,渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu m^2$ 。研究区有效储层为物性较好的中砂岩,其次为细砂岩,粉砂岩和含钙量超过8%的砂岩物性较差,为非储层。

2.4 物性与电性关系

常规测井曲线中,三孔隙度(声波、密度、中子)曲线能较好反应储层物性^[24]。密度值受井眼扩径影响失真,无法反映储层的物性好坏,重点研究孔隙度与声波时差、补偿中子的关系。拟合岩心孔隙度与声波时差、补偿中子关系可知,岩心孔隙度与声波时差、补偿中子均呈正相关, R^2 分别为0.797 6、0.327 1(图2)。综合认为:研究区储层岩心孔隙度与密度相关性较弱,与声波时差、补偿中子呈正相关,三孔隙度曲线中声波时差最能体现储层孔隙度的变化规律。

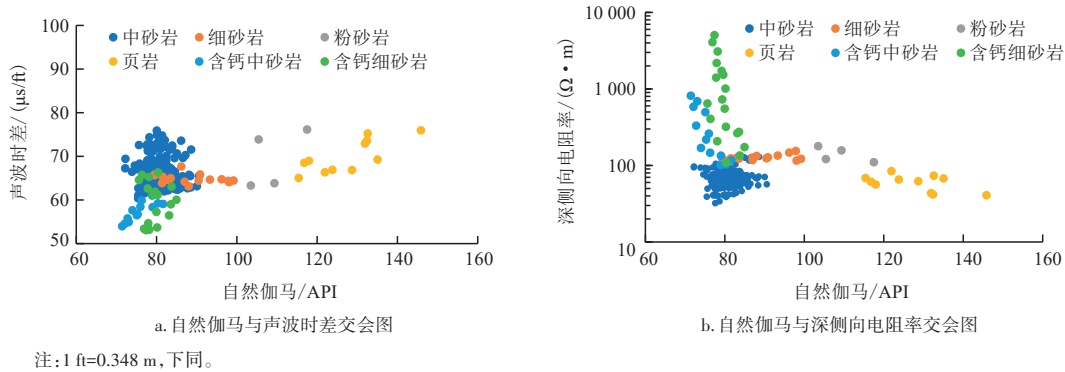


图1 川中资阳—东峰场须五段不同岩性测井参数交会图

Fig. 1 Crossplot of logging parameters of different lithologies of Xu-5 member in Ziyang–Dongfengchang Block of central Sichuan

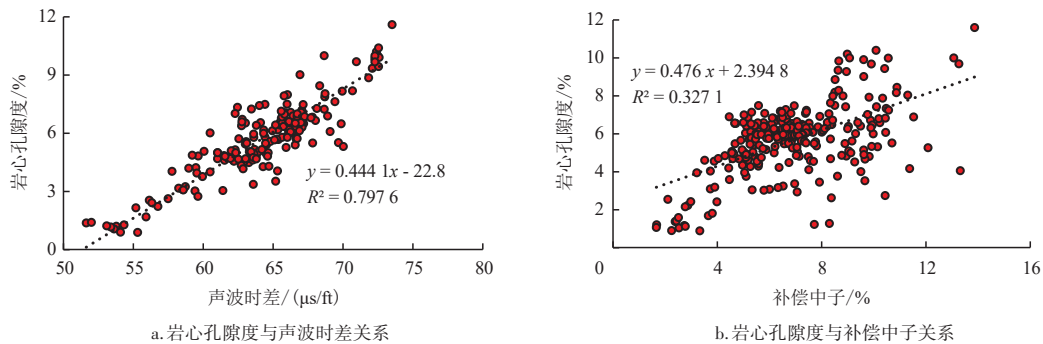


图2 川中资阳—东峰场须五段岩心孔隙度与测井参数关系

Fig. 2 Relationship between core porosity and log parameter of Xu-5 member in Ziyang–Dongfengchang Block of central Sichuan

2.5 含气性与物性关系

气测录井全烃值能够直观反映储层含气性,一般钻井液密度相差不大的情况下,全烃显示越好,测试产量越高。将5口取心井按照物性差异分为若干井段,分别统计各井段岩心孔隙度、渗透率和气测全烃平均值,根据全烃含量与岩心孔隙度、渗透率关系可知,全烃值与岩心孔隙度、渗透率均呈正相关, R^2 分别为0.249 0、0.695 6,由此可以看出储层物性对含气性有较大影响。

2.6 含气性与电性关系

研究区为致密砂岩储层,孔隙结构也相对较复杂,而电阻率、声波时差、补偿中子等电性特征是岩石骨架和孔隙中流体的综合反映,单一电性参数则无法准确判断储层含气性。应用多种电性参数交会图,可以得到含气性与储层电性的相关特点。如利用声波时差与补偿中子交会图可以看出:气层与差气层的声波时差为中高值(一般大于63 $\mu\text{s}/\text{ft}$),补偿中子则由于气层挖掘效应,其值低于典型水层,一般介于4%~10%,而含气层则表现为声波时差值低于气层和差气层(图3)。由已测试或投产层的测井解释含气饱和度与深侧向电阻率交会图(图4)可以看出:含气饱和度基本与深侧向电阻率呈正相关,含气饱和度大于60%的为好气层,电阻率介于50~100 $\Omega\cdot\text{m}$ 。受岩性影响,电阻率并非越高越好,大于100 $\Omega\cdot\text{m}$ 的储层,其岩性以含钙细砂岩或含钙中砂岩为主,含气性较差。电阻率相近情况下,中砂岩含气饱和度高于细砂岩。

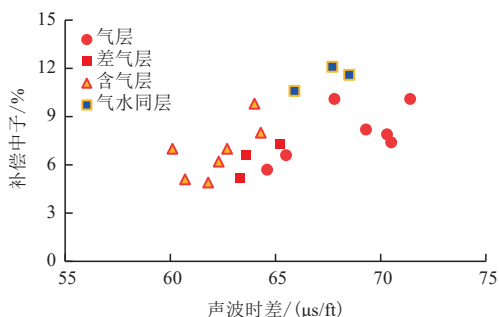


图3 川中资阳—东峰场须五段不同含气储层声波时差与补偿中子交会图

Fig. 3 Crossplot of sonic differential time and neutron of different gas-bearing reservoirs of Xu-5 member in Ziyang-Dongfengchang Block of central Sichuan

研究区A2井须五段储层“四性”关系(图5)可以明显反映出含气性与电性、岩性之间的关系。图中气层电阻率为中低值(但深侧向电阻率通常仍大于50 $\Omega\cdot\text{m}$),中子有明显挖掘效应;差气层声波时差比气层略小(一般大于63 $\mu\text{s}/\text{ft}$),电阻率为中低值(深侧向电阻率一般仍大于45 $\Omega\cdot\text{m}$),中子有一定挖掘效应;含气层声波时差比差气层略小,电阻率为中低值(深侧向电阻率一般仍大于40 $\Omega\cdot\text{m}$),中子挖掘效应不明显;一般当深侧向电阻率小于40 $\Omega\cdot\text{m}$ 或补偿中子大于10%时含水风险较大。

3 综合应用和效果评价

3.1 测井解释模型建立

1) 孔隙度模型

根据物性与电性关系,三孔隙度曲线中,声波时差与岩心孔隙度相关性较好,且水平井一般缺少补偿中子和密度测井曲线,综合考虑精确性和实用性,优选声波时差拟合经验公式进行孔隙度计算,东峰场须五段孔隙度计算公式为:

$$\varphi = 0.444 1 I_{AC} - 22.8 \quad (1)$$

式中: φ 为孔隙度,%; I_{AC} 为声波时差,单位 $\mu\text{s}/\text{ft}$ 。

孔隙度计算结果与实验分析结果相差较小,经计算平均相对误差为5.6%,使用式(1)计算的孔隙度满足测井解释精度要求。

2) 渗透率模型

东峰场须五段储层裂缝欠发育,为基质孔隙储层,储层孔隙度和渗透率总体呈正相关关系,渗透率解释依据岩心孔渗相关关系取得:

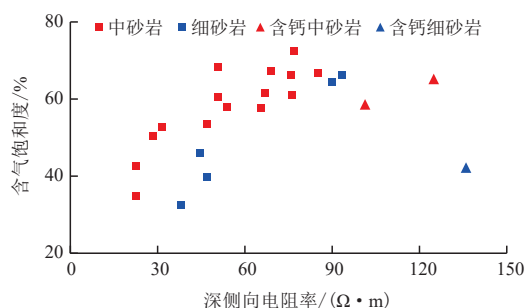


图4 川中资阳—东峰场须五段含气饱和度与深侧向电阻率交会图

Fig. 4 Crossplot of gas saturation and resistivity of Xu-5 member in Ziyang-Dongfengchang Block of central Sichuan

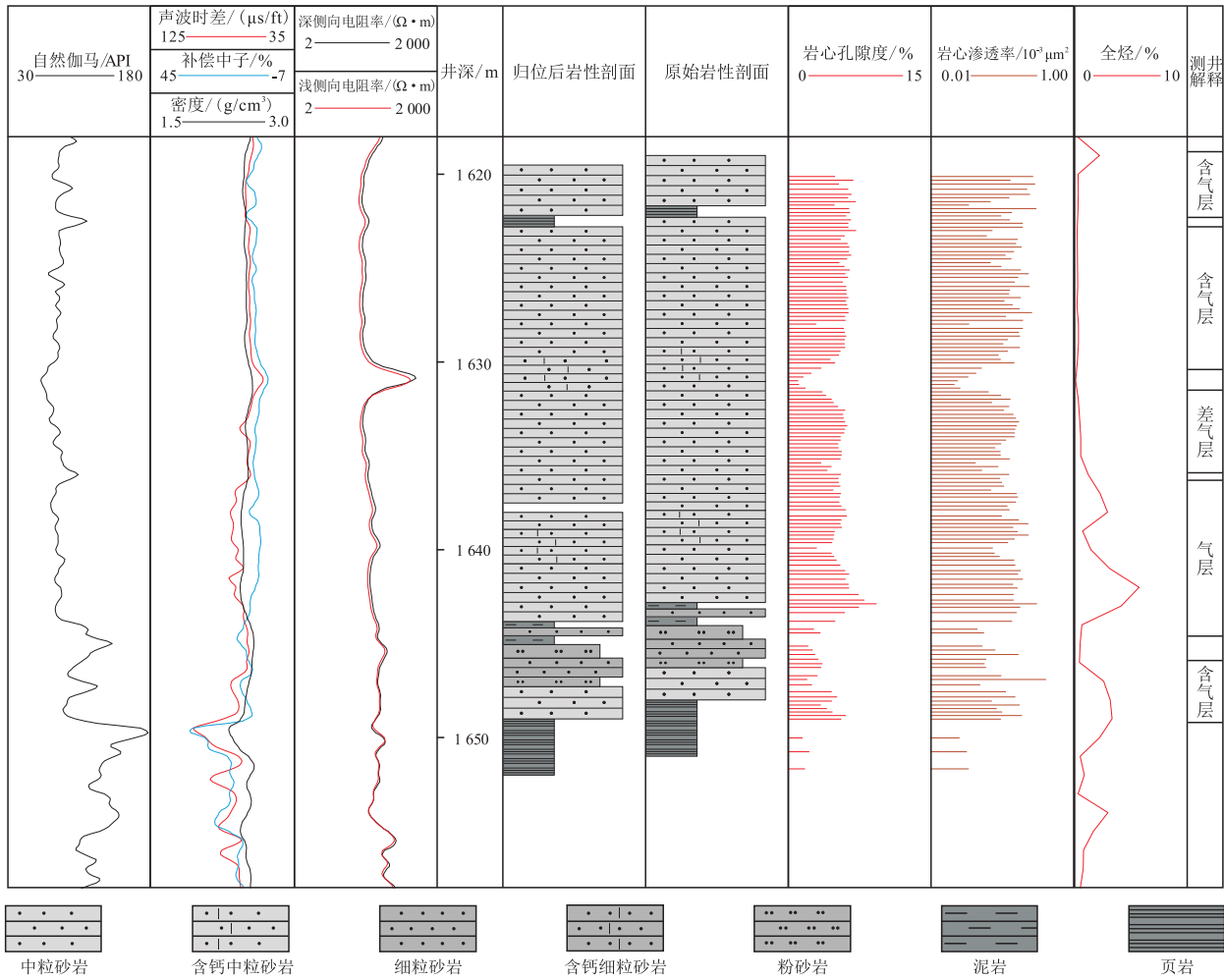


图5 川中资阳—东峰场须五段A2井储层“四性”关系

Fig. 5 “Four-properties” relationship of Xu-5 member of Well-A2 in Ziyang-Dongfengchang Block of central Sichuan

$$k = 0.0146 e^{0.41\varphi} \quad (2)$$

式中: k 为渗透率,单位 $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3) 饱和度模型

东峰场须五段为砂岩储层,其含气饱和度采用阿尔奇公式^[25-26]进行计算。利用岩心样品的岩石电阻率测试分析实验结果确定了阿尔奇公式岩电参数,建立了饱和度测井解释模型(图6):

$$S_w^n = abR_w / (\varphi^m R_{LLD}) \quad (3)$$

式中: S_w 为含水饱和度,%; R_{LLD} 为深侧向电阻率,单位 $\Omega\cdot\text{m}$; R_w 为地层水电阻率,单位 $\Omega\cdot\text{m}$; a 、 b 为岩性系数; m 为孔隙度指数; n 为饱和度指数,%。由岩电实验确定饱和度模型的参数值: $a = 1.0216$, $m = 1.496$; $b = 1.0262$, $n = 1.573$ 。

3.2 储层判别标准确定

基于“四性”关系研究,绘制了孔隙度和电阻率交会图(图7),根据测试、生产资料与储层的电性参数,结合储层测井响应特征,可以得到不同含气级别储层判别标准(表1)。研究区有效储层含气级别下限为差气层,岩性下限为细砂岩,孔隙度下限为4%,渗透率下限为 $0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,深侧向电阻率下限为 $45 \Omega\cdot\text{m}$,声波时差下限为 $63 \mu\text{s}/\text{ft}$,含气饱和度下限为55%。

3.3 应用实例

A3井(图8)为研究区以须五段为目的层的直井,钻遇37 m厚砂岩,岩性以中粒岩屑砂岩为主,发育3套含钙砂岩,砂体中部钻取8 m岩心,并在岩心

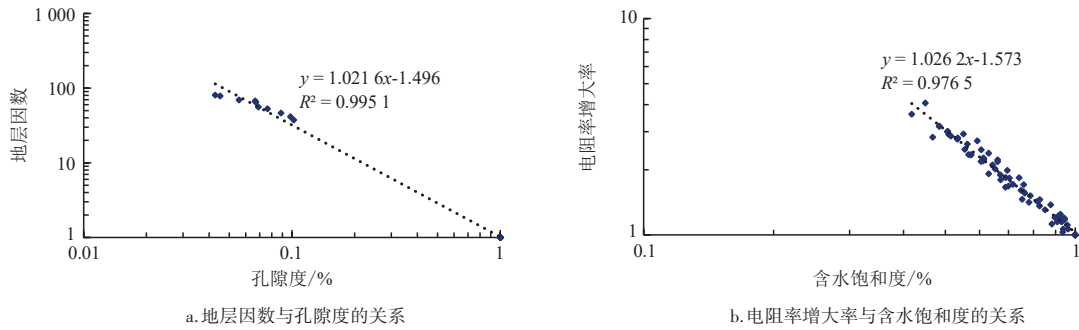


图6 川中资阳—东峰场须五段岩电实验结果

Fig. 6 Experimental results of rock electricity of Xu-5 member in Ziyang-Dongfengchang Block of central Sichuan

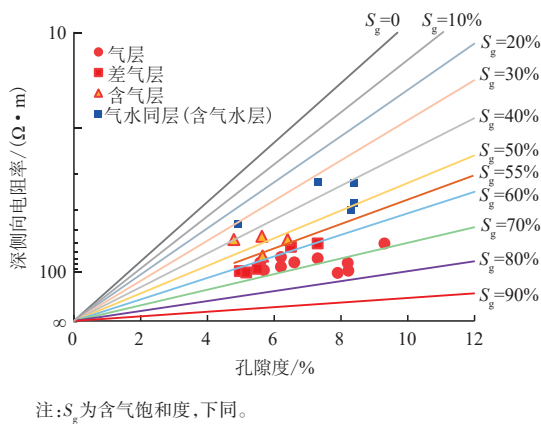


图7 川中资阳—东峰场须五段储层孔隙度和深侧向电阻率交会图

Fig. 7 Crossplot of reservoir porosity and resistivity of Xu-5 member in Ziyang-Dongfengchang Block of central Sichuan

不同深度取小岩柱样进行物性测试。基于测井曲线,通过公式(1)、(2)、(3)分别计算出A3井须五段孔隙度、渗透率、饱和度,按照储层判别标准,划分气层1层、差气层1层、含气层2层,分别针对气层和差气层2个试气段开展储层改造,进行产气剖面测试。

对比物性参数计算结果和岩心实验测试结果,孔隙度、渗透率计算结果与实验结果趋势大体一致,除了个别样品渗透率测试值较高,整体孔隙度、渗透率计算误差较小。2个试气段长度均为5 m,第一段岩性以中粒岩屑砂岩为主,其次为细粒岩屑砂岩,GR平均值为60 API,AC平均值为63.2 $\mu\text{s}/\text{ft}$,LLD平均值为73.4 $\Omega \cdot \text{m}$,孔隙度平均值为4.9%,渗透率平均值为 $0.14 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,含气饱和度平均值为68.3%,测井解释为差气层;第二段岩性为中粒岩屑砂岩,GR平均值为63 API,AC平均值为71.7 $\mu\text{s}/\text{ft}$,LLD平均值为56.5 $\Omega \cdot \text{m}$,孔隙度平均值为8.7%,渗透率平均值为 $0.59 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,含气饱和度平均值为76.6%,测井解释为气层。根据产气剖面测试结果显示:该井天然气日产量为 $2.156 \times 10^4 \text{m}^3$,第二段为主要产气段,产气量占79%,第一段产气仅占21%。

东峰场须五段“四性”关系在A3井整体应用效果较好,储层测井、试气、实验结果符合“四性”关系图版,建立的测井解释模型计算精度满足生产需求,试气结果与储层判别标准匹配,“四性”关系的研究成果为压裂方案施工提供有效技术支撑。

表1 川中资阳—东峰场须五段储层判别标准

Table 1 Reservoir discriminant standard of Xu-5 member in Ziyang-Dongfengchang Block of central Sichuan

含气级别	岩性	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	深侧向电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$	声波时差/ $(\mu\text{s}/\text{ft})$	S_g /%
气层	中砂岩、细砂岩	≥ 5.0	≥ 0.13	≥ 50	≥ 65	≥ 60
差气层	中砂岩、细砂岩	≥ 4.0	≥ 0.08	≥ 45	≥ 63	≥ 55
含气层	中砂岩、细砂岩	≥ 4.0	≥ 0.08	≥ 40	≥ 60	< 60
气水同层	中砂岩、细砂岩	≥ 4.5	≥ 0.10	< 40	≥ 65	< 50

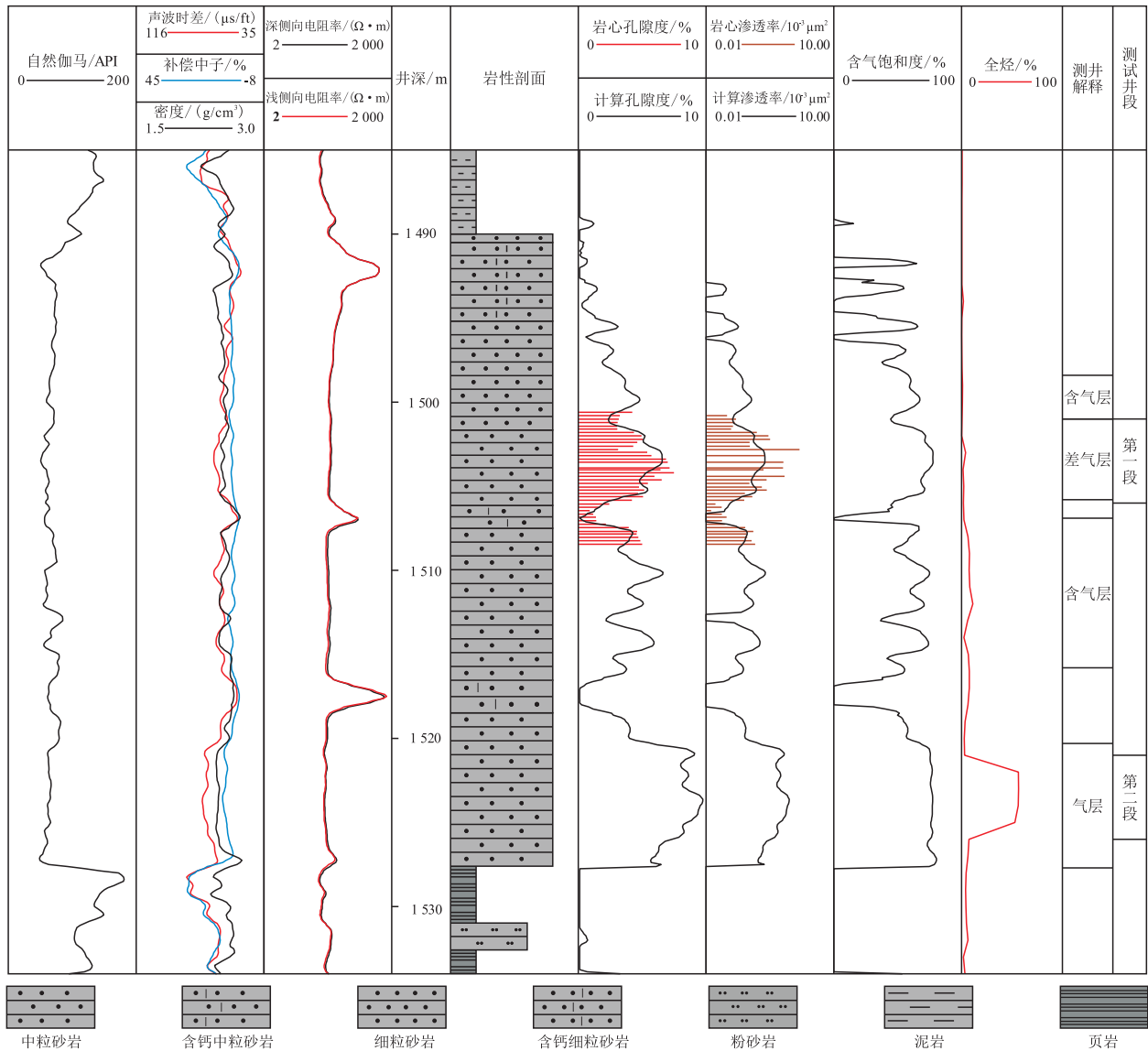


图8 川中资阳—东峰场须五段A3井测井解释成果

Fig. 8 Log interpretation results of Xu-5 member of Well-A3 in Ziyang-Dongfengchang Block of central Sichuan

4 结论

1) “四性”关系研究表明:东峰场须五段储层岩性、电性、物性、含气性相关性好,岩性控制物性、含气性好坏;电性反应岩性、物性、含气性特征。在“四性”关系研究基础上建立了精度高、适用性强的测井解释模型,确定了不同含气级别储层判别标准:中砂岩和细砂岩物性较好,含钙砂岩(含钙量大于8%)、粉砂岩和部分细砂岩物性较差;中砂岩和细砂岩自

然伽马一般小于100 API,电阻率一般小于100 Ω·m。三孔隙度中声波时差与岩心孔隙度相关性最好,由此确立了孔隙度解释模型,在孔渗关系基础上进一步建立渗透率解释模型,并结合岩电实验建立含水饱和度模型。储层含气性与物性有密切关系,声波时差一定程度上代表物性好坏,低电阻率(小于40 Ω·m)和高中子(大于10%)是储层含水表现。有效储层含气级别下限为差气层,岩性下限为细砂岩,孔隙度下限为4%,渗透率下限为0.08×10⁻³ μm²,电阻率下限为45 Ω·m,声波时差下限为63 μs/ft,含气饱

和度下限为55%。

2) 研究成果在单井上的应用效果较好,A3井各项参数符合“四性”关系图版,通过测井解释模型计算的物性参数与岩心实验测试结果吻合,该井产气剖面测试结果与储层判别标准匹配,“四性”关系研究为压裂方案施工提供了有效技术支撑。

参考文献

[1] 冯弋秦,赵俊兴,王冰,等.定北地区盒一段致密砂岩储层“四性”关系及有效下限[J].成都理工大学学报(自然科学版),2020,47(2):141-149.
FENG Yiqin, ZHAO Junxing, WANG Bing, et al. The “four-property” relation and effective lower limit of tight sandstone reservoirs of the first Member of Lower Shihezi Formation in Dingbei Block, Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2020, 47(2): 141-149.

[2] 叶超,刘宏义,李传浩,等.致密砂岩储层“四性”特征及有效厚度下限值的确定——以鄂尔多斯盆地陇东地区山1段为例[J].天然气技术与经济,2020,14(2):6-12.
YE Chao, LIU Hongyi, LI Chuanhao, et al. Four-property characteristics of tight sandstone reservoirs and determining their minimum effective thickness: An example from Shan 1 Member, Longdong area, Ordos Basin[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2020, 14(2): 6-12.

[3] 俞保财,任小锋,于焕朝,等.鄂尔多斯盆地X地区上古生界本溪组储层“四性”关系[J].石油地质与工程,2022,36(3):56-60.
YU Bao cai, REN Xiaofeng, YU Huanchao, et al. Four-property relations in the upper Paleozoic Benxi formation of X area in Ordos basin[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2022, 36(3): 56-60.

[4] 石芳惠.鄂尔多斯盆地沿河湾区延长组储层“四性关系”研究[J].非常规油气,2019,6(5):32-37.
SHI Fanghui. Four-properties relationship of Yanchang reservoir in Yanhewan, Ordos Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(5): 32-37.

[5] 任婷,漆万珍,曹红霞,等.鄂尔多斯盆地延长东区上古生界储层“四性”关系研究[J].非常规油气,2015,2(6):22-30.
REN Ting, QI Wanzhen, CAO Hongxia, et al. Four-properties relationship of upper paleozoic reservoir in Yanchang East, Ordos Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2015, 2(6): 22-30.

[6] 向英杰,王泽华,吕振虎,等.四性关系研究在储层解释及描述中的应用——以KBM油田西区白垩系储层为例[J].新疆地质,2017,35(3):336-340.
XIANG Yingjie, WANG Zehua, LYU Zhenhu, et al. The application of the research on the four property relationship in the reservoir interpretation and description: A case study from west cretaceous in KBM Oilfield[J]. Xinjiang Geology, 2017, 35(3): 336-340.

[7] 赵明珠,杨威,王耀华,等.陆相页岩储层连通孔隙系统分布与形成机制——以川西坳陷上三叠统须家河组为例[J].石油实验地质,2022,44(1):170-179.

ZHAO Mingzhu, YANG Wei, WANG Yaohua, et al. Distribution and genetic mechanisms of connected pore systems in continental shale reservoirs: A case study of Xujiahe Formation of Upper Triassic, Western Sichuan Depression[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(1): 170-179.

[8] 李晓涛.四性关系研究在黄金带油田的应用[J].辽宁化工,2020,49(8):1015-1016.
LI Xiaotao. Application of four-property relationship research in Huangjindai oilfield[J]. Liaoning Chemical Industry, 2020, 49(8): 1015-1016.

[9] 张伟,赵莉莉,龚鑫,等.准噶尔盆地石树沟凹陷平地泉组烃源岩地球化学特征[J].石油地质与工程,2022,36(3):27-32.
ZHANG Wei, ZHAO Lili, GONG Xin, et al. Geochemical characteristics of source rocks of Pingdiqian formation in Shishugou sag of Junggar basin[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2022, 36(3): 27-32.

[10] 段正鑫,刘一锋,楼章华,等.川西坳陷三叠系须家河组油气富集与地层压力关系[J].石油实验地质,2023,45(1):72-79.
DUAN Zhengxin, LIU Yifeng, LOU Zhanghua, et al. Correlation between formation pressure and hydrocarbon enrichment in Triassic Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(1): 72-79.

[11] 彭建,陶玉平,张居增,等.华庆油田山137区长6油藏有效厚度下限研究[J].辽宁化工,2021,50(2):271-273.
PENG Jian, TAO Yuping, ZHANG Juzeng, et al. Research on effective thickness lower limit of Chang6 oil reservoir in Shan137 area, Huaqing Oilfield[J]. Liaoning Chemical Industry, 2021, 50(2): 271-273.

[12] 顾战宇.川南东峰场地区须二、须六段成岩演化差异对储层的影响[J].成都理工大学学报(自然科学版),2017,44(2):139-148.
GU Zhanyu. Influences of diagenesis evolution difference on the Xu-2 and Xu-6 reservoir in the Dongfengchang area, southern Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2017, 44(2): 139-148.

[13] 任杰,姜淑霞,罗周亮,等.通南巴气田须家河组致密砂岩储层特征及分类评价[J].断块油气田,2023,30(6):914-924.
REN Jie, JIANG Shuxia, LUO Zhouliang, et al. Characteristics and classification evaluation of tight sandstone reservoir in Xujiahe Formation of Tongnanba Gas Field[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2023, 30(6): 914-924.

[14] 曹烈,王信,黎青.川中资阳地区须家河组含油气系统及勘探前景分析[J].天然气勘探与开发,2012,35(4):1-5.
CAO Lie, WANG Xin, LI Qing. Petroleum system and exploration prospect of Xujiahe Formation in Ziyang area, central Sichuan Basin[J]. Natural gas exploration and development, 2012, 35(4): 1-5.

[15] 张鹏伟,张洪安,王学军,等.四川盆地普光和通南巴地区须家河组气藏气源探讨[J].断块油气田,2022,29(2):145-151.
ZHANG Pengwei, ZHANG Hong'an, WANG Xuejun, et al.

- 云岩地球化学特征及形成过程——以ST18井为例[J]. 石油实验地质, 2022, 44(4): 647-654.
- WANG Lichao, ZHOU Yang, HU Linhui, et al. Geochemical characteristics and formation process of zebra dolomites in Lower Permian Qixia Formation, northwestern Sichuan Basin: A case study of well ST 18[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(4): 647-654.
- [26] 郭涛. 贵州省织金区块岩脚向斜煤层气富集高产规律研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 62-69.
- GUO Tao. The enrichment and high yield law of CBM in Yanjiao syncline in Zhijin Block, Guizhou Province[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(2): 62-69.
- [27] 高玉巧, 李鑫, 何希鹏, 等. 延川南深部煤层气高产主控地质因素研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 21-27.
- GAO Yuqiao, LI Xin, HE Xipeng, et al. Study on the main controlling geological factors of high yield deep CBM in Southern Yanchuan Block[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(2): 21-27.
- (编辑 柳超超)

(上接第491页)

- Origin of natural gas in the Xujiahe Formation in Puguang and Tongnanba area, Sichuan Basin, China[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29(2): 145-151.
- [16] 乔林, 袁剑, 袁玥. 川中地区东峰场须五气藏试采特征分析[J]. 石化技术, 2022, 29(6): 136-138.
- QIAO Lin, YUAN Jian, YUAN Yue. Analysis of test production characteristics of Xuwu gas reservoir in Dongfengchang in the central Sichuan Basin[J]. Petrochemical Industry Technology, 2022, 29(6): 136-138.
- [17] 石油工业标准化技术委员会石油测井专业标准化委员会. 测井数据处理符号: SY/T 5254—2016[S]. 北京: 石油工业出版社, 2016.
- Petroleum Industry Standardization Technical Committee Petroleum Logging Professional Standardization Committee. Logging data processing symbol: SY/T 5254-2016[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.
- [18] 张建良. 复杂岩性地层扩径井段失真密度曲线校正方法研究[J]. 国外测井技术, 2022(4): 60-66.
- ZHANG Jianliang. Study on correction method of distortion density curve of expanded well section in complex lithologic formation[J]. World Well Logging Technology, 2022(4): 60-66.
- [19] 唐晓敏, 宋延杰, 付健, 等. 含泥含钙致密砂岩导电规律与导电模型[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(4): 1660-1669.
- TANG Xiaomin, SONG Yanjie, FU Jian, et al. Conductance mechanism and conduction model for tight shale-rich and calcite-rich sands[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(4): 1660-1669.
- [20] 南泽宇, 谭茂金, 张延华, 等. 元坝须三段致密含钙砂砾岩地层测井响应特征及岩性识别方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(3): 969-978.
- NAN Zeyu, TAN Maojin, ZHANG Yanhua, et al. Well logging characteristics and lithology identification methods of tight calcarenaceous sandy conglomerate reservoirs of the 3rd Member of Xujiahe Formation in Yuanba Area[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(3): 969-978.
- [21] 叶超, 黎玲, 邓攀, 等. 苏里格气田西区盒8段储层“四性”关系研究——以苏54区块为例[J]. 石油化工应用, 2015, 34(1): 26-49.
- YE Chao, LI Ling, DENG Pan, et al. Study of Sulige gas field west of He 8 reservoir “four” relationship: Taking Su 54 block as an example[J]. Petrochemical Industry Application, 2015, 34(1): 26-49.
- [22] 高春云, 周立发, 路萍. 测井曲线标准化研究进展综述[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(5): 1777-1783.
- GAO Chunyun, ZHOU Lifa, LU Ping. Review of the development of well log normalization[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(5): 1777-1783.
- [23] 殷树军, 殷秋丽. 针对复杂泥浆体系的油水层识别方法[J]. 国外测井技术, 2018, 39(5): 12-14.
- YIN Shujun, YIN Qiuli. Oil-water layer identification method for complex mud system[J]. World Well Logging Technology, 2018, 39(5): 12-14.
- [24] 李阳. 定北地区盒1段致密砂岩气层测井识别与评价研究[J]. 石油地质与工程, 2018, 32(1): 98-102.
- LI Yang. Research on well logging identification and evaluation of tight sandstone gas reservoir in He 1 member of Dingbei area[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2018, 32(1): 98-102.
- [25] 李应许, 赵俊兴, 魏千盛, 等. 杭锦旗中部盒一段储层“四性”关系及有效储层下限[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(6): 675-682.
- LI Yingxu, ZHAO Junxing, WEI Qiansheng, et al. The reservoir “four properties” relation and the lower limit of effective reservoir in He 1 Member of Xiashihezi Formation in central area of Hangjinqi, Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 2021, 48(6): 675-682.
- [26] 李克智. 鄂尔多斯盆地大牛地气田致密砂岩气藏水平井压裂“甜点”识别方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(6): 124-132.
- LI Kezhi. Horizontal well fracturing “sweet spots” identification method for tight sandstone gas reservoir in Daniudi Gas Field in Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(6): 124-132.
- (编辑 郭群)