

测井新技术在陆相致密油“七性”评价中的应用

——以松辽盆地北部高台子油层为例

尹成芳^{1,2}, 柯式镇^{1,2*}, 姜明^{1,2}, 康正明^{1,2}, 王伟东^{1,2}, 孙旭^{1,2}, 郑树桐^{1,2}

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院, 北京 102249

* 通信作者, wksz@cup.edu.cn

收稿日期: 2016-09-05

摘要 中国陆相致密油储层具有岩性复杂、孔隙结构复杂、非均质性强等特点, 常规测井难以准确评价岩性、物性、电性、含油性、烃源岩特性、脆性和水平地应力各向异性, 本文综合应用“无源三组合”测井(岩性扫描测井、致密储层核磁共振测井和介电扫描测井)、声波扫描测井、微电阻率成像测井等测井新技术, 结合传统“三组合”测井技术, 总结出了陆相致密油测井评价思路, 目的是解决烃源岩品质、储层品质和工程品质“三类品质”评价问题。运用该思路, 对松辽盆地北部Q地区高台子油层测井新技术资料相对齐全的J2井和Q1井, 进行精细测井评价, 同时, 结合常规测井资料, 建立了相应的“七性”评价模型, 并将模型用于研究工区内20口老井资料的解释, 取得了良好效果。最终, 在测井精细评价基础上初步建立储层分类标准, 形成了一套陆相致密油评价体系。相比常规测井, 测井新技术将以其独特优势支持我国陆相致密油勘探开发的深入进行。

关键词 测井新技术; 陆相致密油; 七性评价; 三类品质; 测井评价

0 引言

致密油继页岩气突破后, 已成为全球非常规石油勘探开发的又一亮点领域, 被石油工业界誉为“黑金”^[1]。对中国而言, 致密油是目前最为现实的待开发的非常规油气资源之一^[2]。国内关于致密油的研究和勘探已初见成效^[3], 但目前针对中国陆相致密油的测井评价技术主要采用常规储层的评价方法和思路, 其中, 烃源岩品质评价主要指烃源岩生油能力评价, 以评价有机质丰度为主, 评价参数为总有机碳(TOC)含量, 同时兼顾判断干酪根类型, 采用的方法如: 基于密度测井、声波测井和电阻率测井的Schmoker法^[4-5]和 $\Delta\log R$ 法^[6-10], 均属于间接评价方法, 且需要

有足够多的岩心分析资料进行刻度, 否则不确定性较大。储层品质评价主要指“岩性”、“物性”、“电性”和“含油性”评价, 主要基于传统“三组合”测井, 但由于致密油储层岩性复杂、非均质性强, 常规测井曲线对岩性的响应和识别的灵敏度受孔隙度小、孔隙结构复杂的影响, 同时有机质的存在降低了常规曲线对孔隙度的灵敏度, 常规曲线对含油性的响应则受到高束缚水饱和度、有机质和黄铁矿等因素的影响, 进而削弱了常规测井响应与地层组分和孔隙流体之间的线性关系。采用传统测井技术基本不能有效识别储层, 定量评价储层的岩石物理参数更是难上加难。工程品质评价主要指“脆性”和“地应力和各向异性”的评价, 之所以是致密油气评价的重点内容之一, 首先基

引用格式: 尹成芳, 柯式镇, 姜明, 康正明, 王伟东, 孙旭, 郑树桐. 测井新技术在陆相致密油“七性”评价中的应用——以松辽盆地北部高台子油层为例. 石油科学通报, 2017, 01: 32-43

YIN Chengfang, KE Shizhen, JIANG Ming, KANG Zhengming, WANG Weidong, SUN Xu, ZHENG Shutong. Application of new well logging technology in the evaluation of “seven properties” of continental tight oil: A case study on the Gaotaizi oil layer in the Northern Songliao Basin. Petroleum Science Bulletin, 2017, 01: 32-43. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.01.004

于致密油储层的开发方式,必须采用水平井和大型体积压裂,另外,脆性指数大小、地应力方位、大小及各向异性等参数也是水平井井眼轨迹优化和压裂方案设计中的重要参数,但目前主要依赖于常规声波测井和密度测井资料,对于地应力方位和各向异性等参数则必须依赖声波成像资料。因此,针对松辽盆地北部青山口组青二、三段烃源岩与储层相互共存、储层独立、与烃源岩相邻的特点,本文借助“无源三组合”测井(岩性扫描测井、致密储层核磁共振测井和介电扫描测井)、声波扫描测井、微电阻率成像测井等测井新技术,结合传统“三组合”测井技术,总结出了陆相致密油测井评价思路(图1)。利用该评价思路,首先,通过对J2井新技术测井资料的处理解释和Q1井测井资料岩心刻度,建立相应的岩性、物性、电性和含油性的解释参数的模型,并应用于研究工区内20口老井资料,同时,综合应用微电阻率成像测井的高分辨率信息对J2和Q1井进行精细薄层分析和储层内部结构剖析,并建立定量评价致密油地层的薄互层砂地比和薄层识别的方法和模型。再者,结合岩心数据精细评价Q1井的烃源岩品质(*TOC*、成熟度和生烃能力),并建立相应的解释参数和模型,处理评价工区内20口井的资料。最后,综合各种资料,在储层参数精细评价基础上初步建立储层分类标准。

1 工区地质概况

研究区块位于松辽盆地北部中央坳陷区,主体部分位于齐家—古龙凹陷,勘探面积约1 000 km²。Q地

区中新生界自下而上沉积了白垩系、古近系、新近系和第四系,纵向上以中、下部含油气组合为主要目的层,包括萨尔图、葡萄花、高台子、扶余和杨大城子5个含油层系^[11]。主力油层主要分布在高台子油层高三、高四油层组,位于青山口组优质源岩上部,区域沉积环境为三角洲前缘亚相和前三角洲亚相,沉积砂体分别为河口坝、远砂坝、席状砂为主,砂岩层数多,单砂体薄,平面上呈席状和透镜状大面积错迭连片分布^[12-13]。整体岩性较细,主要为细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩,部分储层砂岩中含有碳酸盐矿物与泥质胶结物成分,储层物性较差,根据样品分析,高四组油层的含油样品分析孔隙度主要分布在8.0%~15.0%,平均孔隙度为12.2%,空气渗透率主要分布在0.1~10.0 mD,平均渗透率为0.5 mD,属于典型的致密油层。按照体积算法计算,高三、高四油层组致密油资源量为3.0亿 t^[11],资源潜力较大,是未来提交储量的重要接替区。

2 “七性”评价

2.1 薄层识别

大套的连续钻井取心资料表明,高三、高四组的薄层平均厚度在0.5 m以下,对于这种薄互层储层,常规测井曲线受限于垂向分辨率的大小,很难满足储层准确识别的要求。微电阻率成像测井空间分辨率为0.51 cm,当目标体尺寸大于0.51 cm时,图像的尺寸接近其实际大小^[14],因此本次研究以其高分辨

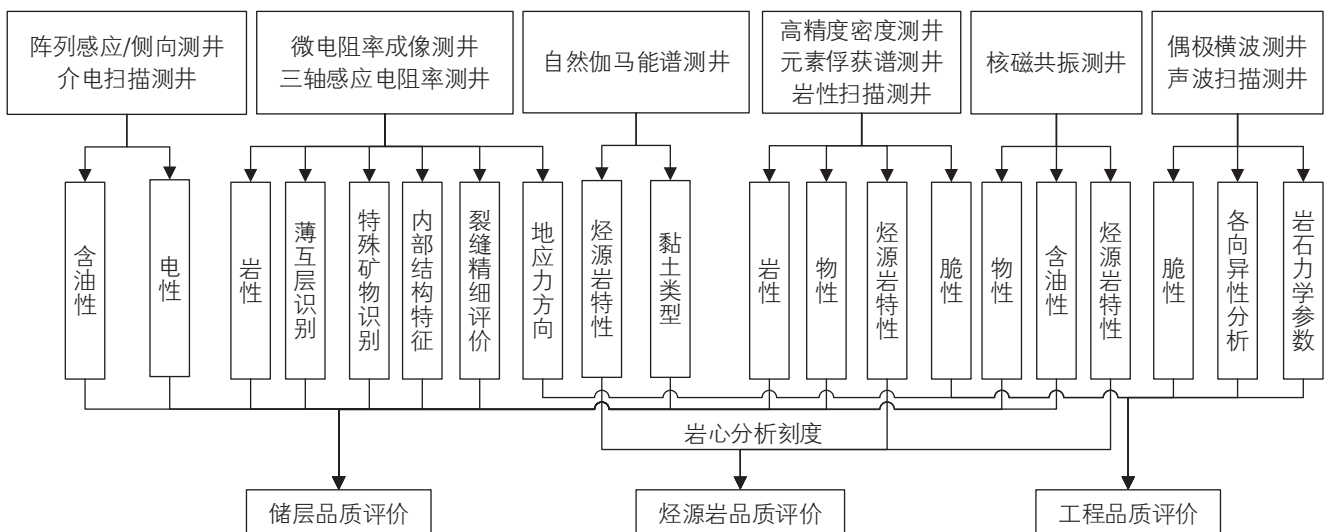


图1 测井新技术评价陆相致密油思路

Fig. 1 The flow diagram of continental tight oil evaluation with new well logging technology

率电阻率曲线分析为基础,综合利用其提供的岩石构造信息,岩性扫描测井提供的岩石矿物组分信息及取心提供的岩石矿物和结构特征,建立成像测井与岩心观察和描述之间的解释模板,进行薄层识别和岩性分类,如图2所示,图中第一道蓝实线为自然伽马,刻度范围0~150 gAPI,第五道红绿实线分别为深浅电阻率曲线,刻度范围0.1~1 000 Ω·m,不同阴影代表气测值的高低。上段为泥质粉砂岩,其中碳酸盐矿物含量较低,小于10%,泥质含量偏高,30%左右,石英和长石含量较高,50%左右;中段为含泥粉砂岩,其

中泥质含量略微降低到20%左右,碳酸盐矿物含量与上段相当,石英和长石含量较高为60%左右;下段介形虫层,碳酸盐矿物含量较高70%左右,泥质含量较低20%,石英和长石含量较低仅10%左右。在岩性准确识别的基础上,可以计算出每米井段含泥粉砂岩、泥质粉砂岩和介形虫层3种类型的岩石的厚度,即研究区有利的3类薄层所占地层的比例,称之为砂地比(NTG),从而实现对薄层的定量评价。此外,三轴感应电阻率测井和声波扫描测井,利用水平方向和垂直方向上的电阻率和横波时差差异,也具有识别薄层的

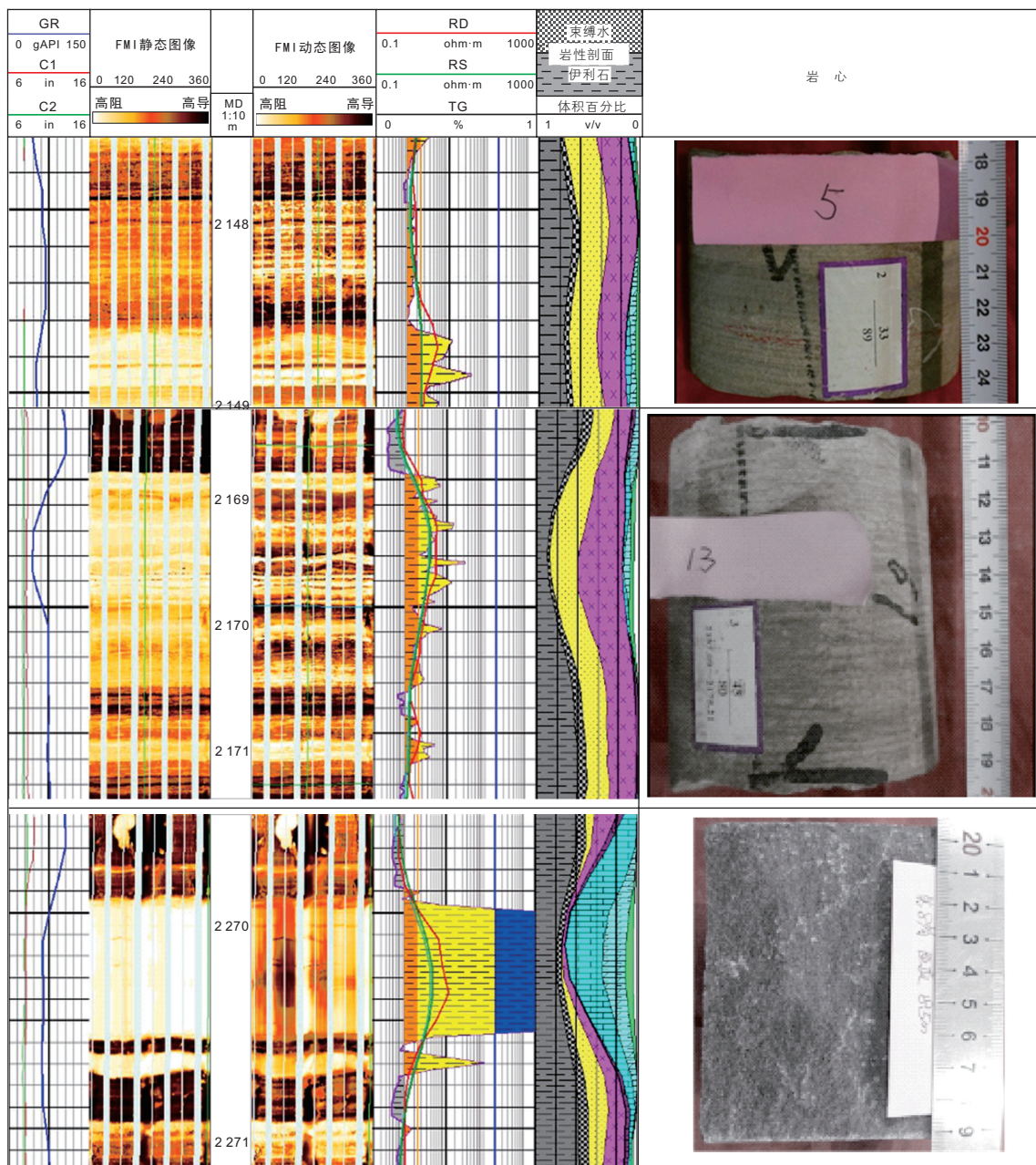


图2 J2井微电阻率成像测井薄层识别与岩性分类
 Fig. 2 The thin bed and lithology classification from FMI and LS of well J2

能力。

2.2 岩性成分评价

研究区块在平面上,由北至南岩性逐渐变化,北部泥质含量低,南部含量高,趋势是逐渐递增;在纵向上,高三组砂岩含量高,高四组砂岩含量低;碳酸盐矿物含量随机性较大,在纵向和横向上分布不规则,从岩心观察碳酸盐岩包括介形虫和钙质碳酸盐胶结。因此有必要通过元素俘获谱测井、岩性扫描测井方法和岩心分析评价储层岩性。

元素俘获谱测井和岩性扫描测井均是通过谱采集、剥谱、氧闭合、解释4步完成从采集到矿物含量、骨架性质及总有机碳含量的计算^[15]。与元素俘获谱测井相比,岩性扫描测井除了确定Si、Ca、Fe、S、Ti、Gd等元素的含量,同时还可定量测定Al、Ba、Cl、H、K、Mg、Mn、Na、Cu和Ni等元素的含量。该仪器主要使用非弹性散射数据来定量测定C和Mg元素的含量,对Mg元素的精确测量使得区分方解石和白云石更加明晰,C元素的精确测量则对确定总有机碳含量水平至关重要。Al元素的直接测量,使得黏土含量的计算更加精确,从而避免了因高伽马值而遗漏评价储层^[16]。图3所示为研究地区J2井的岩性扫描测井成果图,由图揭示了该地区矿物成分复杂,既有黏土、石英、钠长石、钾长石,还有方解石、重矿物黄铁矿、

含锰的铁白云石和有机碳。此种复杂岩性条件下,常规测井曲线基本上不能有效识别特殊矿物、划分储层和识别甜点。因此,需要通过特殊测井方法与常规测井联系起来,由于南北差异大,建立不同区块的岩性模型,依据现有资料的客观性,把现有的多种矿物简化为3种矿物:多种黏土简化为黏土;石英、钠长石和钾长石简化为砂岩;方解石和白云石简化为碳酸盐岩;由于黄铁矿含量很低,可以省略掉。这样通过声波、中子、密度和电阻率等曲线回归出矿物模型,从而进行参数计算、多井对比及地震反演等。

北部模型(依据J2井):

$$V_{\text{clay}} = 0.151\rho_b + 1.436\Phi_N - 0.002\Delta t - 0.207 \log R_t - 0.642t \quad (1)$$

$$V_{\text{calc}} = 0.248 \log R_t + 0.0008\rho_b + 0.0012\Delta t - 0.321 \quad (2)$$

南部模型(依据Q1井):

$$V_{\text{clay}} = 0.0303\rho_b + 0.0033\Delta t - 0.121 \log R_t + 0.00057GR + 0.0368 \quad (3)$$

$$V_{\text{calc}} = -0.0095\rho_b - 0.00097\Delta t + 0.116 \log R_t - 0.00127GR + 0.25 \quad (4)$$

砂岩体积含量:

$$V_{\text{qtz}} = 1 - V_{\text{clay}} - V_{\text{calc}} \quad (5)$$

式中, V_{clay} 、 V_{calc} 、 V_{qtz} 分别为黏土含量(v/v)、碳酸盐岩含量(v/v)和砂岩含量(v/v); ρ_b 、 Φ_N 、 Δt 、 R_t 、 GR 分别为密度测井值(g/cm^3)、中子值(v/v)、纵波时差

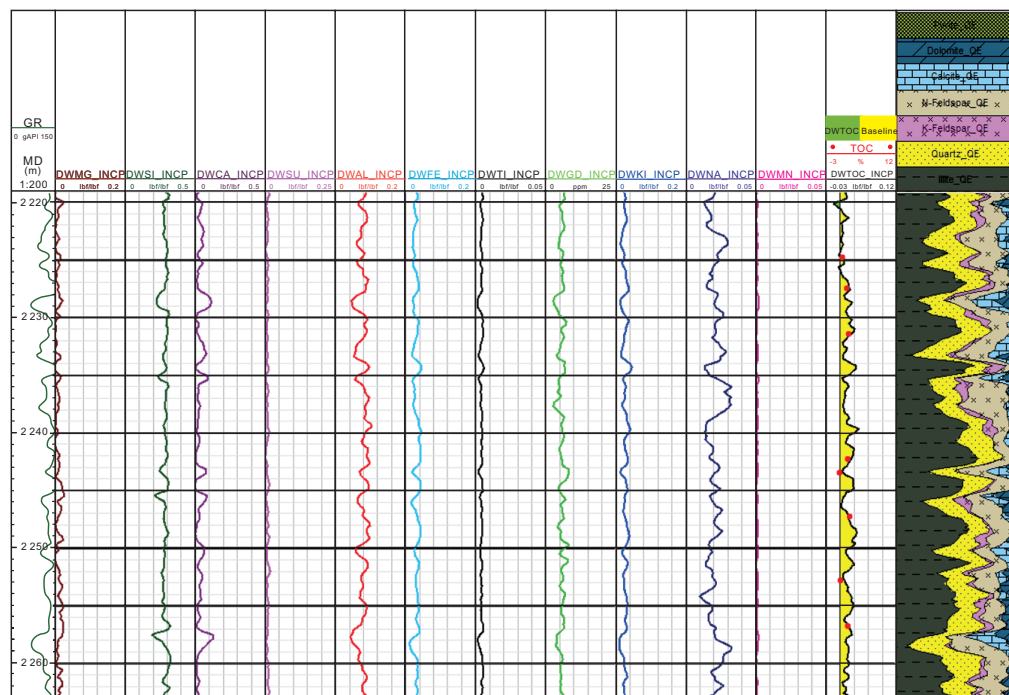


图3 J2井的岩性扫描测井成果图

Fig. 3 The Litho Scanner spectroscopy result of well J2

值($\mu\text{s}/\text{ft}$)、深探测电阻率值($\Omega \cdot \text{m}$)和自然伽马值(gAPI)。

2.3 物性分析

核磁共振测井计算的孔隙度与岩性无关且精度高,是确定致密油储层孔隙度和渗透率的一种十分有效的方法。但由于致密油储层孔隙空间小,孔隙结构以小孔细喉为主,通常,核磁共振测井仪的信噪比较低。因此,为了提高致密储层核磁共振测井的信噪比,应采用高精度测井仪,采用适当的测量模式和合理的采集参数。致密储层核磁共振测井测量采用了改进的增强精度模式(EPM),长等待模式相同,但短等待模式做了调整,即等待时间(WT)由0.08 s改为0.02 s,回波个数由原来的100个改为30个,目的使更小的孔喉

都能测到^[17]。当然,核磁共振测井采集时,钻井液中应不含顺磁的含铁物质^[18]。孔隙结构控制着储层物性特征,不同类型孔隙结构的储层具有不同的物性特征。研究表明,研究地区致密油储层储集空间主要以粒间孔、粒间溶孔、微裂缝等为主,孔隙范围5~100 μm 。孔隙结构以小孔细喉为主,喉道细小,孔喉半径普遍小于0.1 μm ^[11]。由于常规测井评价储层孔隙结构的能力较弱、取心分析成本过高^[19]、储层孔隙结构评价不能连续量化等问题,利用核磁共振测井 T_2 谱转换成毛管压力曲线,进而提取出孔喉半径、孔喉分选系数等反映储层孔隙结构的参数,进而实现致密砂岩储集层孔隙结构的连续定量评价。当然,应用的前提是准确确定储层岩石的横向表面弛豫率^[20]。如图4,反映

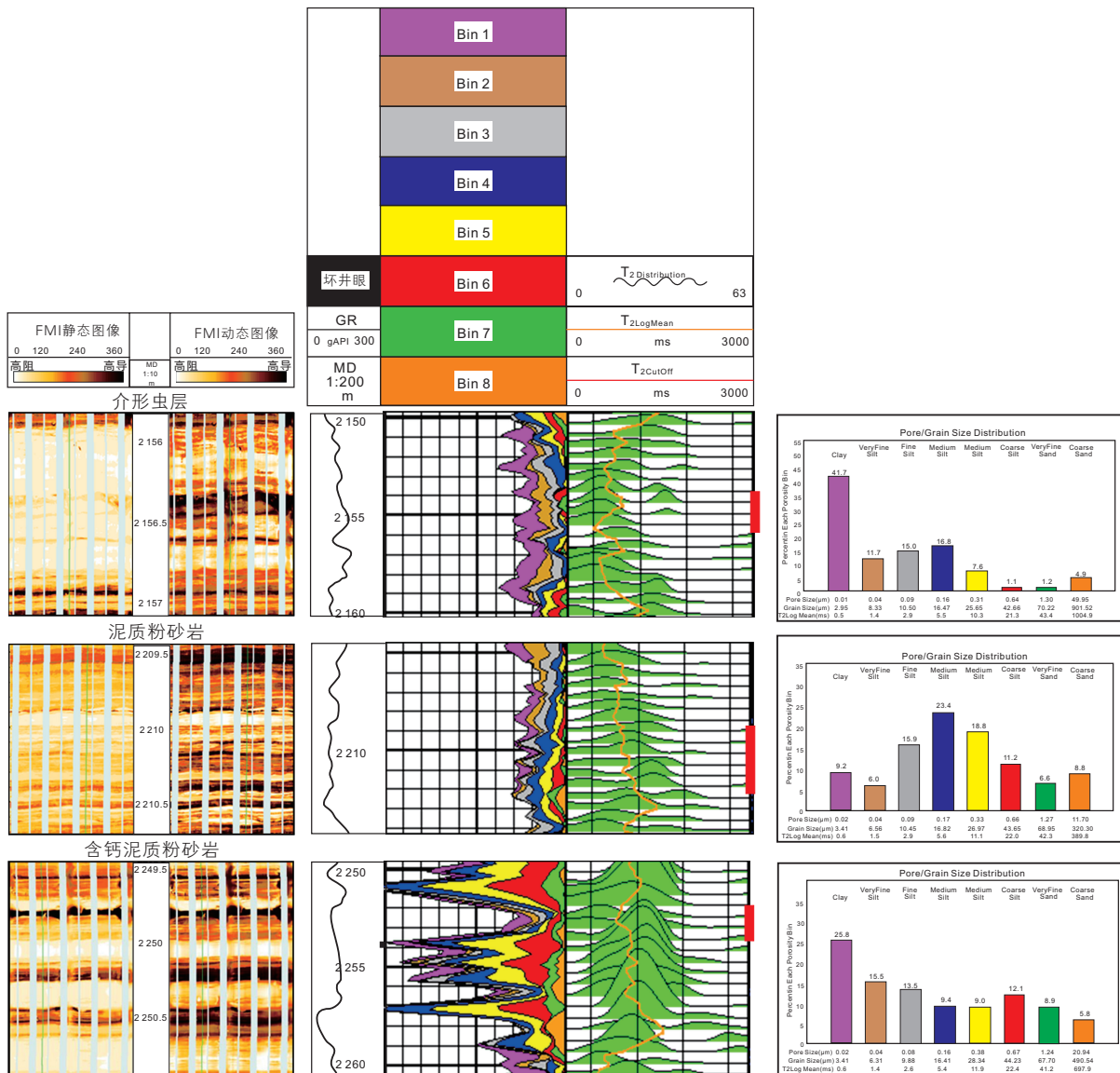


图4 J2井典型储层的岩石粒度和孔喉大小分布图

Fig. 4 The pore structure characteristics and porosity from CMR of well J2

了储层的岩石颗粒大小和孔喉大小的分布,右边为颗粒与喉道分布的直方图,中间核磁反映了不同时间域的孔隙大小,其中黑色实线为自然伽马曲线,刻度范围 0~300 gAPI,孔隙度刻度范围 0.4~0 m³/m³。对于含钙泥质粉砂岩储层,岩石颗粒和孔隙非常小, T₂ 主要小于 10 ms,微电阻率成像图像上为亮色条带;对于介形虫储层,孔隙大小和岩石颗粒分布不均匀, J2 井的 2 151~2 156 m 储层物性相对较差;粉砂岩储层是相对最好的储层,颗粒和孔隙分布均匀,以相对“较大”的孔隙和颗粒为主。

利用核磁共振测井孔隙度和岩心孔隙度双重验证,不考虑骨架参数,直接利用测井曲线回归北部和南部井区孔隙度。经多次拟合试验,利用密度、声波和泥质含量回归模型计算精度最高,孔隙度模型见式(6)、式(7):

$$\phi = -0.26\rho_b + 0.0015\Delta t - 0.049VCL + 0.64 \quad (6)$$

$$\phi = -0.65\rho_b - 0.0019\Delta t + 0.24VCL + 1.81 \quad (7)$$

式中, ϕ 为孔隙度, ρ_b 、 Δt 、 VCL 分别为密度, 声波时差, 泥质含量。

2.4 含油性评价

致密油储层储集空间小, 油气对电阻率值的贡献小, 测井所能探测到的油气信息相应较弱。另外, 黄铁矿、有机质成熟度等因素也会影响电阻率值。针对研究地区, 阵列感应/阵列侧向测井电阻率值还具有以下特点: 电阻率值的变化与钙质含量密切相关、电阻

率各向异性与泥质含量和钙质含量相关、低含钙粉砂岩电阻率值与烃源岩电阻率值对比度低、电阻率响应与泥质含量相关性不强等。因此, 往往适合于常规储层的基于电阻率模型的各种饱和度方法不能用于致密储层的饱和度计算。

介电扫描测井通过在 4 个不连续频率下进行每个测量周期内包括 72 个振幅测量和 72 个相位测量, 反演得到介电常数和电导率, 利用岩石骨架和水的介电常数差别大, 而油和岩石骨架的介电常数相近, 结合高精度密度测井等孔隙度测井技术, 可确定出致密油储层的含水孔隙度^[21]。对于致密油储层, 由于侵入较浅或基本未发生, 冲洗带特征可认为与原状地层特征相同。因此, 含水孔隙度与总孔隙度比值即为含水饱和度。介电扫描测井评价准则是: 如果计算含水孔隙度小于总孔隙度值, 则为含油气段; 如果两者基本相等, 则为水层或干层。

岩性扫描测井得到的 TOC, 另一个重要应用就是用来评价致密油的含油性^[22], 见式(8):

$$S_{hc} = \frac{TOC \cdot \rho_{ma} \cdot (1 - \phi_t)}{\rho_{hc} \cdot X_{hc} \cdot \phi_t} \quad (8)$$

式中, TOC 为岩性扫描测井得到的总有机碳含量; ρ_{hc} 为致密油密度, 根据研究地区致密油密度取值 0.80~0.85 g/cm³; X_{hc} 为指定参数, 0.85。如图 5, 整体上, TOC 计算含水饱和度 S_w 与常规方法计算含水饱和度 SUWI 相吻合, 其中 J2 井两种方法计算结果对应

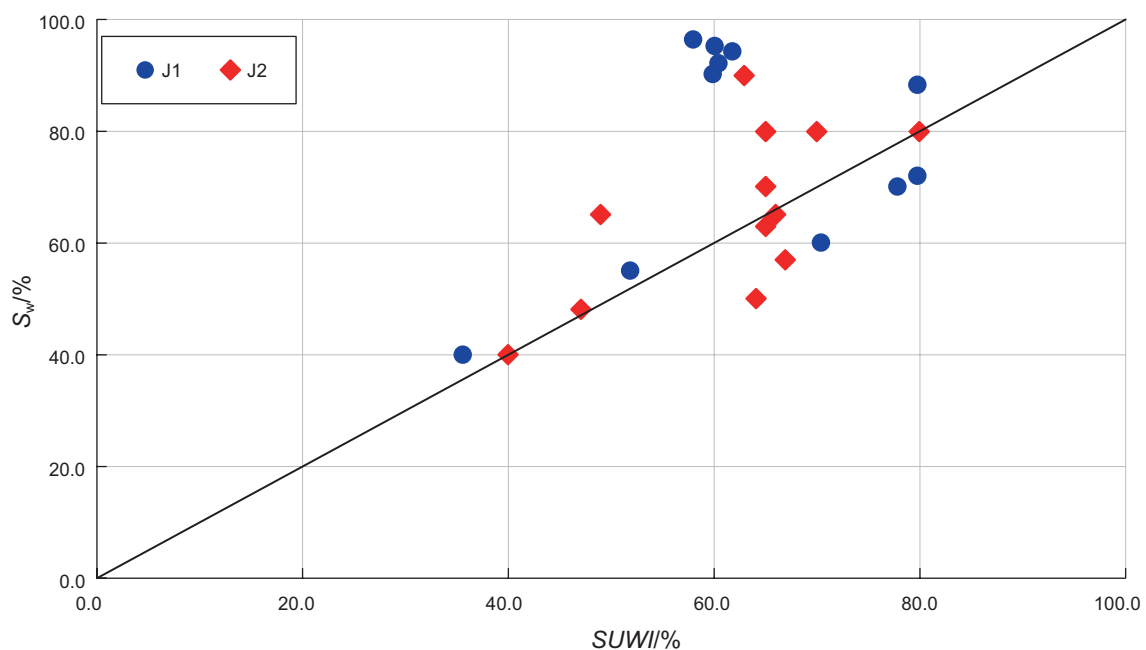


图 5 利用 TOC 计算 S_w 与常规方法计算 SUWI 对比

Fig. 5 The comparison of S_w calculated from TOC and SUWI from conventional logging

性较好, J1 井部分 S_w 值相对较高, 分析认为可能由于 TOC 较低, 碳酸盐胶结导致的高阻储层。

2.5 烃源岩特性评价

致密油的形成与烃源岩密切相关, 成熟、优质、具有一定厚度和分布范围的烃源岩是致密油形成的物质基础。烃源岩特性评价即烃源岩生油能力评价, 以评价有机质丰度为主, 评价参数为 TOC, 同时兼顾判断干酪根类型。由于烃源岩(有机质)的存在对致密油气储层岩石物理参数和岩石机械特性参数计算至关重要, 因此综合特殊测井和常规测井数据进行烃源岩识别和 TOC 计算是致密油气储层评价的重要任务。本研究目的层段是高四组和高三组的含油储层, 油气来源主要是青一段的烃源岩地层, 虽然青一段地层不是研究内容, 但致密油的评价离不开烃源岩的研究, 因此有必要对青一段烃源岩的参数进行分析。

岩性扫描测井计算出的总碳含量包括矿物含有的无机碳和有机碳两部分。通过对碳酸盐岩等含碳矿物进行校正, 剩余的碳可认为是自然有机物, 相当于有机碳, 包括: 孔隙中的干酪根、沥青和其他固态烃、油以及天然气等烃类中含有的碳。相比各种间接测量技术, 利用岩性扫描直接得到的 TOC 精度高, 无需岩心数据刻度^[23]。如图 3 所示 J2 井的岩性扫描测井成果图, 第 13 道为岩性扫描测井计算得到的 TOC, 均高于 2%, 与岩心分析结果一致性较好。

对于无岩性扫描的井, 采用电阻率和声波曲线直接与测量的 TOC 建立关系式, 因为电阻率和声波是必测项目, 并且与 TOC 的相关性较好, 另外这两条曲线受环境影响较小, 不必做校正, 能谱测量的轴曲线与 TOC 也有一定的相关性, 但由于统计起伏现象需要做环境校正, 并且有些井不测量该曲线。因此, 通过对 J2 井的电阻率和声波曲线进行线性回归, 见式(9):

$$TOC = 0.000\ 895\ 641\ 3\Delta t + 0.011\ 107\ 21\log R_t - 0.074\ 937\ 03 \quad (9)$$

目前, 利用测井资料研究干酪根类型的方法并不多^[18]。地球化学研究表明, 不同类型的干酪根中, O/C 比和 H/C 比存在差异, 而且这种差异与干酪根的成熟度有关^[24]。元素俘获测井/岩性扫描测井能够准确地测量地层中 H、O 和 C 等元素的含量, 据此可判断烃源岩和储层中干酪根的类型, 进而丰富测井技术在烃源岩特性评价中的应用。

2.6 脆性评价

岩石脆性是指其中破裂前未觉察到的塑性变形的

性质^[25], 亦即岩石受到的外力(如压裂)达到一定极限时发生破裂的性质。致密油评价中, 以脆性指数刻画岩石的脆性特征。脆性指数越高, 越有利于致密油储层压裂和后期开采。目前计算脆性指数常用方法主要是岩石矿物组分计算法和岩石弹性参数计算法。

致密储层岩石中脆性矿物(如: 石英、方解石、白云石等)的含量决定了后期压裂改造的效果, 并直接影响油气产量。石英含量和碳酸盐矿物含量越高、泥质含量越低, 岩石的脆性越高, 因此, 采用岩石的矿物组分进行研究地区储层脆性评价, 计算公式见式(10)^[13]:

$$BI = \frac{V_{qtz} + V_{calc} + V_{dolo}}{V_{qtz} + V_{calc} + V_{dolo} + V_{clay}} \times 100 \quad (10)$$

式中, BI 为脆性指数, 无量纲; V_{qtz} 、 V_{calc} 、 V_{dolo} 、 V_{clay} 分别为元素俘获测井/岩性扫描测井提供的石英、方解石、白云石和黏土矿物的含量, v/v。

尽管弹性参数杨氏模量和泊松比并非是直接反映岩石脆性的参数, 但在岩石力学范畴内, 杨氏模量越大, 泊松比越小, 岩石脆性越好^[26], 故而也可基于杨氏模量和泊松比进行岩石脆性评价, 计算公式见式(11)-式(13)^[27]:

$$BI_E = \frac{E - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} \times 100 \quad (11)$$

$$BI_\mu = \frac{\mu - \mu_{min}}{\mu_{max} - \mu_{min}} \times 100 \quad (12)$$

$$BI = \frac{BI_E + BI_\mu}{2} \quad (13)$$

式中, E 、 E_{max} 、 E_{min} 分别为岩石的杨氏模量、目的层杨氏模量最大值和最小值, GPa; μ 、 μ_{max} 、 μ_{min} 分别为岩石的泊松比、目的层泊松比最大值和最小值, 无量纲。利用弹性参数评价脆性指数, 关键是利用高精度密度测井以及偶极横波测井/声波扫描测井获取高精度杨氏模量和泊松比等岩石弹性参数。同时, 注意动静弹性参数转换。

2.7 水平地应力和各向异性评价

水平地应力和各向异性评价之所以是致密油气评价的重点内容之一, 首先基于致密油储层的开发方式, 必须采用水平井和大型体积压裂, 另外, 水平地应力方位、大小及各向异性等参数也是水平井井眼轨迹优化和压裂方案设计中的重要参数。通过微电阻率成像测井图像上拾取的钻井诱导缝和井壁崩落参数, 确定出最大水平主应力 σ_H 和最小水平主应力 σ_h 的大小和

方位^[28]。在应力诱发的声波各向异性地层中，快慢横波频散曲线交叉^[29]，此时，利用声波扫描测井得到的快横波的传播方向与 σ_H 方向一致，但需要指出的是，当存在多种引起声学各向异性机理存在时，快横波传播方向将不能作为判断 σ_H 方向的充分依据。

利用仅有的两口井的声波扫描测井资料，基于岩石力学岩心实验结果确定的相关关系确定静态杨氏模量、单轴抗压强度等参数，采用考虑各向异性的孔隙弹性公式计算最小水平主应力及最大水平主应力^[30]，见式(14)、式(15)：

$$\sigma_H = \frac{\mu}{1-\mu}(\sigma_V - \alpha P_p) + \frac{E}{1-\mu^2}(\beta_x + \mu\beta_y) + \alpha P_p \quad (14)$$

$$\sigma_h = \frac{\mu}{1-\mu}(\sigma_V - \alpha P_p) + \frac{E}{1-\mu^2}(\beta_y + \mu\beta_x) + \alpha P_p \quad (15)$$

式中， E 为岩石的杨氏模量，GPa； μ 为岩石的泊松比，无量纲； σ_V 为上覆岩层压力，GPa； P_p 为孔隙压力，GPa； α 为比奥弹性系数； β_x 和 β_y 分别为最小水平主应力及最大水平主应力方向上的应变，主要用来刻画由于构造应力产生的额外的水平地应力。与基于一维岩石力学模型所预测的井壁崩落和井径曲线确定的最大水平主应力对比，验证了岩石力学模型的准确性。

研究表明，J1井和J2井的岩石刚度明显高于Q1井，表明研究区域北部和南部有明显不同的力学特征；声波扫描测井结果表明，地层在青一段有明显各向异性，但在储层段的各向异性并不明显；J1井和J2井

σ_H 明显高于 σ_V ，有明显走滑断层应力区的特征，而Q1井表现为正断层应力特征，见表1。因此，在水力压裂设计施工中采用不同的工艺：Q1井 σ_H 和 σ_h 差别小，杨氏模量低，有天然裂缝发育，考虑加大支撑剂粒径、浓度，并加大滑溜水用量，提供复杂缝网的形成规模；J1和J2井 σ_H 和 σ_h 差较大，杨氏模量较高，加之裂缝不发育，不容易形成复杂缝网，但脆性较高，裂缝延伸相对容易，需要考虑采用更高强度及粒径稍小的支撑剂，压裂则以交联液为主，提高携砂能力及近井裂缝宽度。

3 综合实例分析

对于高台子致密油含油性评价，首先识别储层，然后计算和分析储层品质参数和烃源岩参数，结合岩心、试油和测井综合解释，划分储层级别：I、II、III类致密油储层，见表2。致密油的评价还要把储层类别与TOC在纵向上的分布关系联系起来，分析表明：储层越是与高TOC值相邻或内嵌于高TOC地层中，储层含油性越好，这也体现致密油特征之一。应用南北两个解释模型，精细处理解释研究区域内20口井。总体上，从北至南，见图6，储层变薄，黏土含量增加，非均质性增强，储层变差。纵向上发育两套高有机碳含量地层，分别位于高三、高四组底部。高三组地层，南部地层有机碳含量明显高于北部，北部为区域内有利储层，高四组地层有机碳含量变化较小，主要是在

表1 岩石力学参数对比

Table 1 The comparison of geomechanical parameters

井名	杨氏模量/GPa	泊松比	TIV各向异性/%	原场应力	脆性/%	最小水平应力方向/°
Q1	15	0.30	10*	正断层	20	170
J1	35	0.25	5	走滑	50	0
J2	30	0.30	不明显	走滑	45	0

*由于无声波扫描测井资料，仅依据岩心实验结果

表2 储层分类标准

Table 2 The classification of tight oil reservoirs

致密油分类	产能/(m ³ /m)	孔隙度/%	电阻率/(Ω·m)	泥质含量/%	岩性	岩心
I类	0.5	>9	>20	<10	粉砂岩	油浸
II类	0.1~0.5	7~9	>15	10~20	含泥粉砂	油斑油浸
III类	<0.1	4~7	>15	<30	泥质粉砂	油迹油斑
水层或含油水			<15			

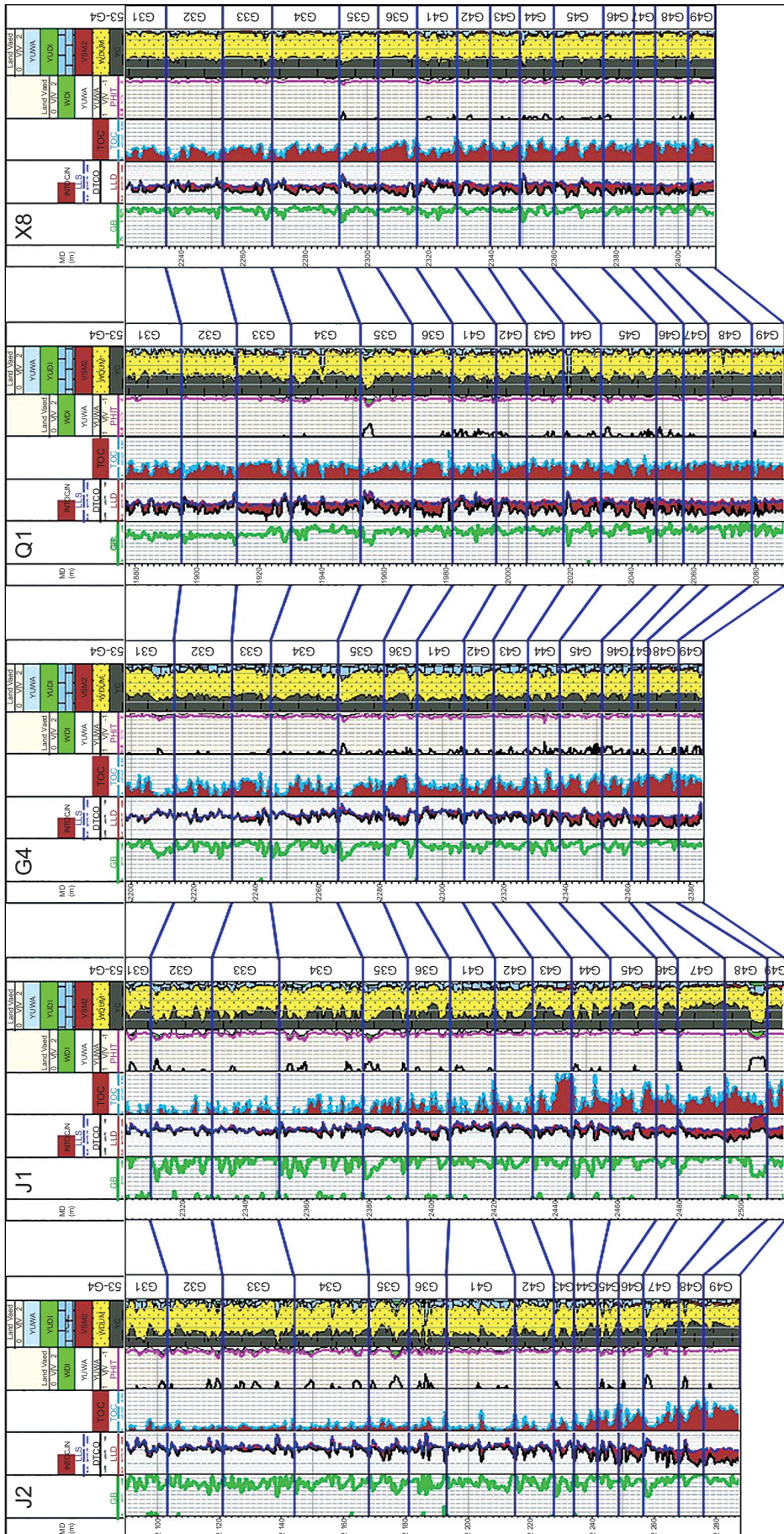


图 6 从北至南 5 口井致密油储层综合评价成果图
Fig. 6 The comprehensive evaluation result charts of the tight oil reservoir of five wells from north to south area

底部寻找砂岩发育带。

4 结论

在岩心分析、试油等资料基础上,借助“无源三组合”测井、声波扫描测井、微电阻率成像测井等特殊测井项目,结合传统“三组合”测井技术,总结了陆相致密油测井评价思路。

综合应用微电阻率成像测井高空间分辨率特点,进行精细的薄层分析,并建立了薄互层识别的方法和模型,解决了常规测井薄层分辨率低的难题。

岩性扫描测井为复杂致密油地层提供了精确矿物成分、骨架参数,还直接提供有机碳含量,避免了常规测井计算的不确定性。同时,精确的矿物组分为脆性评价参数奠定了基础。

声波扫描测井不仅用以计算水平主应力大小,还可提供水平主应力方位和各向异性信息,为评价储层可压裂性提供了有利依据。

综合各种资料,对20口关键井进行了储层精细测井评价,建立了储层分类标准。分析认为,较好的烃源岩发育在青一段、高四组和高三组底部,有效的致密油储层位于高四组和高三组底部。

参考文献

- [1] BRUCE J. Bakken black gold[N]. Leader-Poster, 2007-12-10(6).
- [2] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136. [JIA C Z, ZHENG M, ZHANG Y F. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.]
- [3] 邹才能, 杨智, 朱如凯, 等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. 地质学报, 2015, 89(6): 979-1007. [ZOU C N, YANG Z, ZHU R K, et al. Progress in China's unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(6): 979-1007.]
- [4] SCHMOKER J W. Organic content of Devonian shale in western Appalachian Basin[J]. AAPG Bulletin, 1980, 64(12): 2156-2165.
- [5] SCHMOKER J W. Determination of organic-matter content of Appalachian Devonian shales from gamma-ray logs[J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(7): 1285-1298.
- [6] FLOWER J G. Use of sonic-shear-wave/resistivity overlay as a quick-look method for identifying potential pay zones in the Ohio(Devonian) Shale[J]. Journal of Petroleum Technology, 1983, 35(3): 638-642.
- [7] MEYER B L, NEDERLOF M H. Identification of source rock on wireline logs by density/resistivity and sonic transit time/resistivity crossplot[J]. AAPG Bulletin, 1984, 68(2): 121-129.
- [8] PASSEY Q R, CREANEY S, KULLA J B, et al. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(12): 1777-1794.
- [9] 王贵文, 朱振宇, 朱广宇. 烃源岩测井识别与评价方法研究[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(4): 50-52. [WANG G W, ZHU Z Y, ZHU G Y. Logging identification and evaluation of Cambrian-Ordovician source rocks in syncline of Tarim basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(4): 50-52.]
- [10] 焦翠华, 王清辉, 徐怀民, 等. 准东地区北部二叠系致密油藏烃源岩测井评价[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(5): 524-527. [JIAO C H, WANG Q H, XU H M, et al. The logging evaluation of source rocks in Permian tight oil reservoir in Northern East Junggar basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(5): 524-527.]
- [11] 施立志, 王卓卓, 张革, 等. 松辽盆地齐家地区致密油形成条件与分布规律[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 44-50. [SHI L Z, WANG Z Z, ZHANG G, et al. Distribution and formation of tight oil in Qijia area, Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 44-50.]
- [12] 施立志, 王卓卓, 张永生. 松辽盆地齐家地区高台子油层致密油分布及地质特征[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(12): 1943-1950. [SHI L Z, WANG Z Z, ZHANG Y S. Distribution and geological characteristics of tight oil in Gaotaizi oil layer of Qijia area, Songliao Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(12): 1943-1950.]
- [13] 刘传平, 钟淑敏, 谢鹏, 等. 大庆油田高台子致密油测井评价方法研究[J]. 断块油气田, 2016, 23(1): 46-51. [LIU C P, ZHONG S M, XIE P, et al. Logging evaluation method for tight oil sandstone reservoir in Gaotaizi Formation[J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2016, 23(1): 46-51.]
- [14] 陶婕, 柯式镇, 尹成芳. 新视界: 斯伦贝谢高清微电阻率成像仪FMI-HD[J]. 国外测井技术, 2013(6): 67-68. [TAO J, KE S Z, YIN C F. New viewer: Schlumberger FMI-HD High-Definition Formation MicroImager[J]. World Well Logging Technology, 2013(6): 67-68.]
- [15] 尹成芳, 柯式镇. 斯伦贝谢新型高清晰度能谱测井仪-Litho Scanner的崛起[J]. 国外测井技术, 2012(6): 73-74. [YIN C F, KE S Z. Schlumberger new high definition spectrum well logging toolrise of LithoScanner[J]. World Well Logging Technology, 2012(6): 73-74.]

- [16] RADTKE R J, LORENTE M, ADOLPH B, et al. A new capture and inelastic spectroscopy tool takes geochemical logging to the next level[C]. SPWLA 53rd Annual Logging Symposium, Cartagena, Colombia, 2012.
- [17] HOOK P, FAIRHURST D, RYLANDER E, et al. Improved precision magnetic resonance acquisition: application to shale evaluation[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, USA, 2011.
- [18] 赵政璋, 杜金虎, 邹才能, 等. 致密油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012. [ZHAO Z Z, DU J H, ZOU C N, et al. Tight oil and gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.]
- [19] 尤源, 牛小兵, 冯胜斌, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 致密油储层微观孔隙特征研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38(6): 18–23. [YOU Y, NIU X B, FENG S B, et al. Study of pore features in Chang7 tight oil reservoir, Yanchang layer, Ordos Basin[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2014, 38(6): 18–23.]
- [20] 李潮流, 李长喜, 候雨庭, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 段致密储集层测井评价[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 608–614. [LI C L, LI C X, HOU Y T, et al. Well logging evaluation of Triassic Chang 7 Member tight reservoirs, Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 608–614.]
- [21] MEHDI H, HENRI B, BENOIT D, et al. Dielectric dispersion: a new wireline petrophysical Measurement[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, USA, 2008.
- [22] CRADDOCK P, HERRON S L, BADRY R, et al. Hydrocarbon saturation from total organic carbon logs derived from inelastic and capture nuclear spectroscopy[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2013, SPE 166297.
- [23] 袁超, 周灿灿, 胡松, 等. 地层有机碳含量测井评价方法综述[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(6): 2831–2837. [YUAN C, ZHOU C C, HU S, et al. Summary on well logging evaluation method of total organic carbon content in formation[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(6): 2831–2837.]
- [24] TUCKER M E. Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks(third edition)[M]. Oxford: Blackwell Science, 2001.
- [25] 穆永利, 陈建, 张丽华, 等. 致密油储层测井评价及研究[J]. 长江大学学报(自科版), 2015, 12(32): 21–26. [MU Y L, CHEN J, ZHANG L H, et al. Well logging evaluation and study of tight oil reservoirs[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2015, 12(32): 21–26.]
- [26] 李华阳, 周灿灿, 李长喜, 等. 致密砂岩脆性指数测井评价方法—以鄂尔多斯盆地陇东地区长 7 段致密砂岩储集层为例[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(5): 593–597. [LI H Y, ZHOU C C, LI C X, et al. Logging evaluation and application of brittleness index in tight sandstone reservoir[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(5): 593–597.]
- [27] 杨雪冰, 李庆峰, 李文志, 等. 声波测井技术在非常规致密油藏储层评价中的应用[J]. 应用声学, 2014, 33(1): 16–22. [YANG X B, LI Q F, LI W Z, et al. The application of acoustic logging technologies in the unconventional dense reservoir[J]. Journal of Applied Acoustics, 2014, 33(1): 16–22.]
- [28] 刘之的, 夏宏泉, 汤小燕, 等. 成像测井资料在地应力计算中的应用[J]. 西南石油学院学报, 2005, 27(4): 9–12. [LIU Z D, XIA H Q, TANG X Y, et al. The application of the formation stress calculation using image well logging data[J]. Journal of Southwest petroleum institute, 2005, 27(4): 9–12.]
- [29] ARROYO FRANCO J L, MERCADO ORTIZ M A, GOPA S D, et al. Sonic investigations in and around the borehole[J]. Oilfield Review, 2006, 21(1):14–33.
- [30] 王冬梅, 吴广民. 地层压力计算模型及其现场应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(4): 84–87. [WANG D M, WU G M. Formation pressure calculation model and its field application[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(4): 84–87.]

Application of new well logging technology in the evaluation of “seven properties” of continental tight oil: A case study on the Gaotaizi oil layer in the Northern Songliao Basin

YIN Chengfang^{1,2}, KE Shizhen^{1,2}, JIANG Ming^{1,2}, KANG Zhengming^{1,2}, WANG Weidong^{1,2}, SUN Xu^{1,2}, ZHENG Shutong^{1,2}

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China
2 College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract The continental tight oil reservoirs in China have complex lithology, complicated pore structure and strong hetero-

geneity, etc. It is difficult to evaluate the “seven properties” i.e. lithology, reservoir quality, electrical properties, petroliferous properties, source rock properties, brittleness and in-situ stress anisotropy with conventional well logs. An evaluation idea takes the advantages of new well logging technology combined with the conventional well logs so that the evaluation of “three qualities”, i.e. the quality of the hydrocarbon source rocks, the quality of the reservoir and the quality of the engineering can be carried out. Based on the above-mentioned idea, well J2 and Q1 of Q region in Songliao Basin are evaluated with relatively complete new well logging data. The models of “seven properties” evaluation are built in order to evaluate the wells with the conventional well data. The data of 20 old wells are processed with the models in the same work area, achieving desirable results. In the end, the reservoir classification standard is preliminary established on the basis of fine logging evaluation and a continental tight oil evaluation system is formed accordingly. Comparing with the conventional well logs, new logging technology will provide great support for the further work of continental tight oil exploration and development.

Keywords new well logging technology; continental tight oil; seven properties evaluation; three qualities; logging evaluation

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.01.004

(编辑 付娟娟)