

济阳坳陷页岩油测井评价

蒋云箭¹,刘惠民²,柴春艳³,王敏⁴,杨东根¹,吴春文⁴,陈潇⁵

(1.中国石化胜利油田分公司油气勘探管理中心,山东东营257001; 2.中国石化胜利油田分公司,山东东营257001;
3.中国石化胜利石油工程有限公司难动用项目管理中心,山东东营257000; 4.中国石化胜利油田分公司
勘探开发研究院,山东东营257015; 5.中国石油天然气股份有限公司规划总院,北京100083)

摘要:目前,普遍利用岩心和气测录井研究页岩油地质特性,测井资料在页岩油评价中的作用并未得到充分发挥。基于岩心分析和元素俘获能谱测井刻度标定,采用测井曲线重叠法,建立了页岩油地质特性测井评价方法和表征手段。结果表明,改进后的 $\Delta\log R$ 法计算的总有机碳含量与岩心分析数据更吻合,测井曲线重叠及其组合特征与气测异常存在较好的对应关系,能够定性反映页岩油可动性。利用渤页平5井二维核磁测井数据,首次从测井角度揭示了页岩油地层流体赋存特征和含油特点,确定了页岩油地层含油性定量评价方法,求取了页岩油地层核磁测井可动孔隙度 T_2 截止值,达到了定量评价页岩油地层含油性的目的。应用实例表明测井评价结果与岩心分析结果基本一致。测井曲线重叠法和核磁测井资料更加全面准确地反映了页岩油地层含油性,测井资料在页岩油评价中的作用得到了充分体现。

关键词:页岩油;二维核磁测井; $\Delta\log R$ 法;测井评价;济阳坳陷

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Logging evaluation of shale oil in Jiyang Depression

JIANG Yunjian¹, LIU Huimin², CHAI Chunyan³, WANG Min⁴, YANG Donggen¹, WU Chunwen⁴, CHEN Xiao⁵

(1.Oil and Gas Exploration and Management Center, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257001, China; 2.Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257001, China;
3.Management Center of Difficult Producing Project, Shengli Petroleum Engineering Corporation, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China; 4.Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China;
5.PetroChina Planning and Engineering Institute, Beijing City, 100083, China)

Abstract: The core analysis and gas logging are universally applied to research the mobility of shale oil, but the role of the logging in evaluating shale oil is not played fully. On the basis of the core analysis and elemental capture spectroscopy (ECS) logging calibration, the logging evaluation method and characterization means of shale oil geological characteristics are established by the logging curve overlap method. The results show that the total organic carbon (TOC) calculated by the improved $\Delta\log R$ method is more consistent with core analysis data. There is a good corresponding relationship of logging curve overlap and its combination characteristics with gas logging abnormality, which can qualitatively reflect the mobility of shale oil. With the 2D NMR data of Well BYP5, the fluid occurrence characteristics and oil-bearing properties of shale oil formation are revealed for the first time from the perspective of logging. The quantitative oil-bearing property evaluation method of shale oil formation is determined, and the NMR T_2 cut-off value of shale oil movable porosity is obtained to quantitatively evaluate oil-bearing properties. Applications indicate that the logging evaluation results are basically consistent with the core analysis results. The logging curve overlap method and the NMR data can more comprehensively and accurately reflect the oil-bearing properties of shale oil formation. Thus, the role of logging data in shale oil evaluation is fully dis-

played.

Key words: shale oil; 2D NMR logging; $\Delta\log R$; logging evaluation; Jiyang Depression

页岩油地层具有黏土含量高、岩石矿物复杂、储集空间多样、低孔超低渗透、普遍需要压裂改造以及地层压力较高、钻井过程中油气显示活跃等多重特征,上述特点决定了页岩油地质研究的复杂性。随着页岩油研究工作的深入和地质工程一体化的不断推进,页岩油地质研究成果日益丰富,济阳坳陷古近系页岩油产能建设不断取得突破。

页岩油地质研究工作主要包括“地质甜点”和“工程甜点”2个方面,其中“地质甜点”是页岩油富集高产的物质基础,也是地质研究的核心。目前,针对页岩油地层多采用岩心实验方法开展“地质甜点”分析^[1-13],为页岩油测井评价提供一些思路和目标。张晋言等依据胜利油田页岩油地层岩相地质分类,开展“五性”指标研究,即矿物组分、地化参数、储层物性、含油气量和可压性等属性的多元回归分析,并综合气测录井和槽面显示,划分页岩油地层有利岩相,确定含油性^[14]。蒋云箭等分析了页岩油地层气测异常段泥浆侵入剖面特征,采用径向电阻率差异法,研究地层油气可动性^[15]。王敏指出页岩油勘探的核心问题是地层游离烃(S_1)含量的评价,利用岩心分析数据,建立了游离烃测井多元回归模型^[16]。上述研究多注重于测井特征与某一地质属性的相关性分析,对页岩油地层多属性特征之间的关系分析不够,无法从测井角度取得页岩油测井评价的统一认识,页岩油地层含油性测井评价方法存在较大的局限性。为此,笔者以页岩油地质认识为指导,从有机质测井响应特征出发,系统开展页岩油地层烃源岩品质、脆性矿物含量和页岩油可动性与测井响应特征的关系研究,深入挖掘页岩油地层含油性测井响应信息和表征方法,从而达到准确评价含油性的目的。

1 有机质测井响应特征新认识

济阳坳陷东营凹陷和沾化凹陷沙四段上亚段纯上次亚段与沙三段下亚段发育大量有机质丰度高、生烃潜力大的烃源岩,有机质在生烃演化过程中通过腐泥化及腐殖化作用形成干酪根,其中部分干酪根最终转化为油气。干酪根具有特殊的物理性质,即自然伽马高、电阻率高、补偿密度低、声波时差高和含氢指数高,表现为“四高一低”的典型测

井特征。同时,干酪根富集段发育纹层状-层状层理,测井曲线具有明显的锯齿状分布形态。

东营凹陷牛页1井沙四段上亚段纯上次亚段与沙三段下亚段有机质富集,地层埋深大于页岩油生烃门限。其中沙三段下亚段3层组3 295~3 303 m井段为富有机质纹层状-层状泥质灰岩,岩心分析总有机碳含量(TOC)为4.0%~8.0%,平均为7.4%。测井曲线具有“四高一低”的特征,锯齿状形态明显,为干酪根相对富集层段(图1)。当地层微裂缝即“泥岩裂缝”发育时,钻井过程中通常气测异常活跃,槽面见油气显示,地层测试获工业油气流。

图1采用深层砂泥岩地层测井图头刻度。在低岩心分析TOC值层段,补偿中子曲线一般位于声波时差曲线的左方,即基于图头刻度的声波时差孔隙度小于补偿中子孔隙度,特别是在没有生烃能力的泥岩段(如3 462 m以下地层),声波时差孔隙度远小于补偿中子孔隙度;而在岩心分析TOC值相对较高的沙四段上亚段纯上次亚段2层组和沙三段下亚段3层组,补偿中子曲线一般位于声波时差曲线的右方,即基于图头刻度的声波时差孔隙度普遍大于补偿中子孔隙度。由此可见,声波时差与补偿中子曲线之间的相对位置关系可以定性反映地层TOC值的变化。分析认为,干酪根特殊的物理性质决定了声波时差与补偿中子曲线反映的孔隙度差异。当干酪根含氢指数为67%时,对应的补偿中子孔隙度为67%,干酪根骨架声波时差为173 $\mu\text{s}/\text{ft}$,计算的声波时差孔隙度为92.9%。由此可见,干酪根声波时差孔隙度远大于补偿中子孔隙度。地层干酪根含量越高,声波时差孔隙度与补偿中子孔隙度差别越大,两者在测井图中的位置差异也越明显。这一特征在页岩油地层普遍存在,也是干酪根富集的新的重要证据。

2 TOC测井计算

目前,利用测井资料计算TOC值的方法主要有体积模型法、最小二乘法、多元线性回归法和由EXXON/ESSO石油公司推出的 $\Delta\log R$ 法等,也可以采用元素俘获能谱(ECS)测井升级版岩性扫描(Litho Scanner)测井直接测量,其中 $\Delta\log R$ 法是目前应用最为广泛的一种方法^[17]。

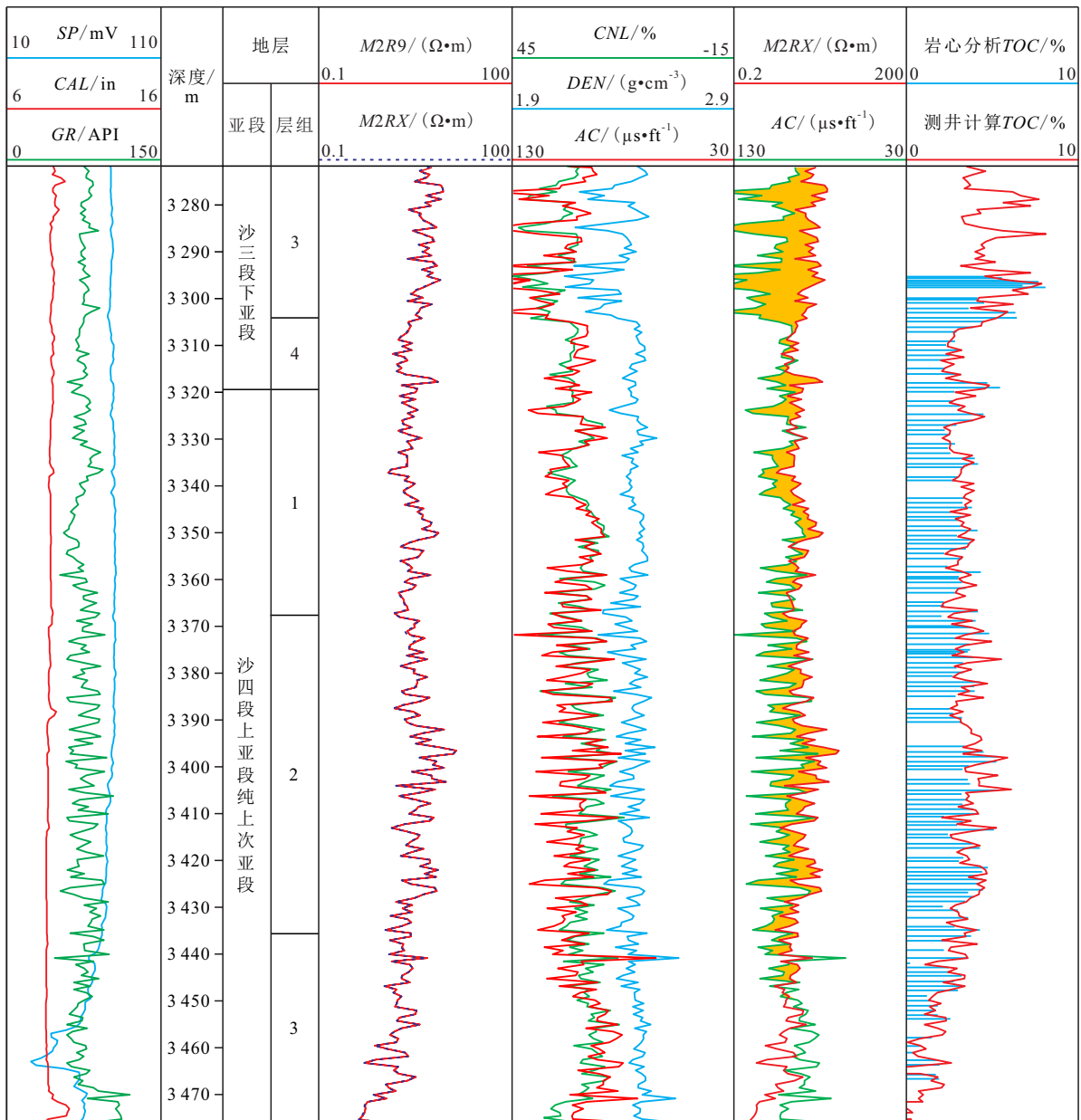


图1 牛页1井页岩油地层测井响应特征

Fig.1 Logging response characteristics for shale oil reservoir in Well NY 1

2.1 ΔlogR 法的改进

ΔlogR 法采用曲线重叠法, 即在地层某一深度段(非烃源岩段)将对数坐标电阻率曲线和线性坐标声波时差曲线进行重合处理, 依据电阻率和声波时差曲线在对数坐标上的间距计算 ΔlogR 值, 其表达式为:

$$\Delta \log R = \log \frac{R_t}{R_{\text{基线}}} + K(\Delta t - \Delta t_{\text{基线}}) \quad (1)$$

ΔlogR 法具有直观和操作性强等优点, 但非烃源岩段的确定、重合段基线值的读取和 K 的确定均存在人为因素, 影响计算结果的准确性。

胡慧婷等对 ΔlogR 法进行了适当改进^[18], 其表

达式为:

$$\Delta \log R = \log R + \frac{\log \frac{R_{\text{max}}}{R_{\text{min}}}}{(\Delta t_{\text{max}} - \Delta t_{\text{min}}) \times (\Delta t - \Delta t_{\text{max}})} - \log R_{\text{min}} \quad (2)$$

假定在非烃源岩段, 同一测井道中对数坐标电阻率曲线和线性坐标声波时差曲线基本重合的条件下, (2) 式中 ΔlogR 的计算仅与电阻率和声波时差测量值以及电阻率和声波时差曲线图头设定的刻度范围即最大值和最小值有关, 从而较好地避开了基线值的读取和叠合系数的确定, 减少了主观因素的影响。虽然如此, (2) 式依然需对非烃源岩段进

行确定。由于非烃源岩地层测井响应特征不明显,在缺少岩心分析数据的情况下,往往难以准确识别非烃源岩段。

近年来,以页岩油为研究目的的钻井取心与岩心分析数据日益丰富,为进一步优化 $\Delta\log R$ 法提供了条件。虽然无法有效确定非烃源岩段,但可以岩心分析 TOC 值为约束,通过调整电阻率和声波时差曲线图头刻度范围,使得基于(2)式计算的 TOC 值与岩心分析 TOC 值误差最小,从而合理避开了对非烃源岩段的确定,也确保了计算 TOC 值的准确性。

2.2 应用效果分析

以牛页1井为例,采用胜利油田 $\Delta\log R$ 与 TOC 经验关系式计算 TOC 值(简称测井计算 TOC 值),其表达式为:

$$TOC = \Delta\log R \times 10^{-0.944R_0 + 1.5374} + \Delta TOC \quad (3)$$

其中, $\Delta\log R$ 根据(2)式计算, ΔTOC 取值为0, R_0 值由胜利油田东营凹陷经验公式确定^[19],其表达式为:

$$R_0 = 0.1658e^{0.0004H} \quad (4)$$

通过调整电阻率和声波时差曲线图头刻度范围,使得测井计算 TOC 值与岩心分析 TOC 值误差最小,最终确定电阻率和声波时差的最大刻度值和最小刻度值,即当电阻率对数刻度值分别为0.2和200 $\Omega \cdot m$,声波时差线性刻度值分别为130和30 $\mu s/ft$ 时,测井计算 TOC 值与岩心分析 TOC 值基本一致,误差最小(图1)。

对比牛页1井不同亚段测井计算 TOC 值分布特征可知,在沙三段下亚段3层组干酪根富集段,高声波时差-高电阻率特征段测井计算 TOC 值平均为5.0%,地层生烃能力强;沙四段上亚段纯上次亚段2层组为高声波时差和低电阻率的测井响应特征,与干酪根高电阻率差别较大,一般认为没有生烃能力,但本段测井计算 TOC 值为2.0%~4.0%,平均为2.5%,岩心分析 TOC 平均值为2.7%,指示地层同样具有生烃能力。需要指出的是,与传统认识不同,高声波时差和低电阻率的测井响应特征往往也具有一定的生烃能力,由此也进一步丰富了生烃地层测井响应特征认识。

采用改进的 $\Delta\log R$ 法计算 TOC 值有3个优点:①最大限度减少了人为因素的影响,消除了井眼、地层水和不同电阻率测井系列等诸多客观因素对声波时差和电阻率的影响,可以保证计算结果的准确性。②由于电阻率曲线和声波时差曲线重叠产生的间距大小(图1中黄色充填部分)与 TOC 值正相

关,可以利用两者的重叠幅度直观反映地层 TOC 值纵向分布特征。③由于页岩油地层沉积环境相对稳定,采用岩心约束建立的电阻率和声波时差刻度值可以作为同一区块同名曲线重叠的刻度依据,更好地发挥测井资料(尤其是老井测井资料)计算地层 TOC 值的作用。

3 脆性矿物含量测井表征

高脆性矿物含量的页岩油地层有利于油气流动,也有利于大规模的压裂改造。当地层黏土矿物含量增加,脆性矿物含量降低时,地层可压性变差,压裂后黏土矿物易形成“泥糊糊”堵塞渗流通道,从而不利于油气的移动和聚集,降低了压裂改造效果。脆性矿物研究对地层油气可动性分析、可压性评价以及压裂工艺的优化非常重要,其分析多采用矿物体积模型、测井曲线多元拟合和ECS测井等方法,其中ECS测井直接测量地层元素并给出主要岩性矿物含量,可信度更高^[19]。

牛页1井3270~3475 m井段采用ECS测井,岩性矿物组分主要为黏土矿物、长英质矿物、碳酸盐矿物及少量黄铁矿(图2)。其中黏土矿物平均含量为33.6%,长英质矿物平均含量为27.8%,碳酸盐矿物平均含量为35.9%,黄铁矿平均含量为2.7%。黏土矿物、长英质矿物和碳酸盐矿物平均含量均小于50.0%,为混积型页岩相类型。

基于ECS测井岩性矿物数据,分析自然伽马与ECS黏土矿物含量、声波时差与ECS脆性矿物含量(长英质矿物与碳酸盐矿物含量之和)之间的相关性。在同一测井道,采用曲线重叠法使得自然伽马与ECS黏土矿物含量曲线、声波时差与ECS脆性矿物含量曲线基本重合,此时自然伽马和声波时差能有效反映地层黏土矿物和脆性矿物含量。为更好地突出地层脆性矿物纵向分布特征,采用重叠后的图头刻度对自然伽马和声波时差曲线进行重叠,两者之间的重叠间距(图2中绿色填充部分)与ECS脆性矿物剖面基本一致,从而可以定性分析地层脆性。尽管如此,依然不能有效突出相对高脆性矿物含量段,尤其是高碳酸盐矿物含量分布的地层。沙四段上亚段纯上次亚段2层组为高碳酸盐矿物含量地层,自然伽马和声波时差曲线重叠间距较小,与ECS脆性矿物剖面不吻合。

济阳坳陷生烃地层碳酸盐矿物含量相对较高,高碳酸盐矿物含量地层容易产生天然裂缝,有利于

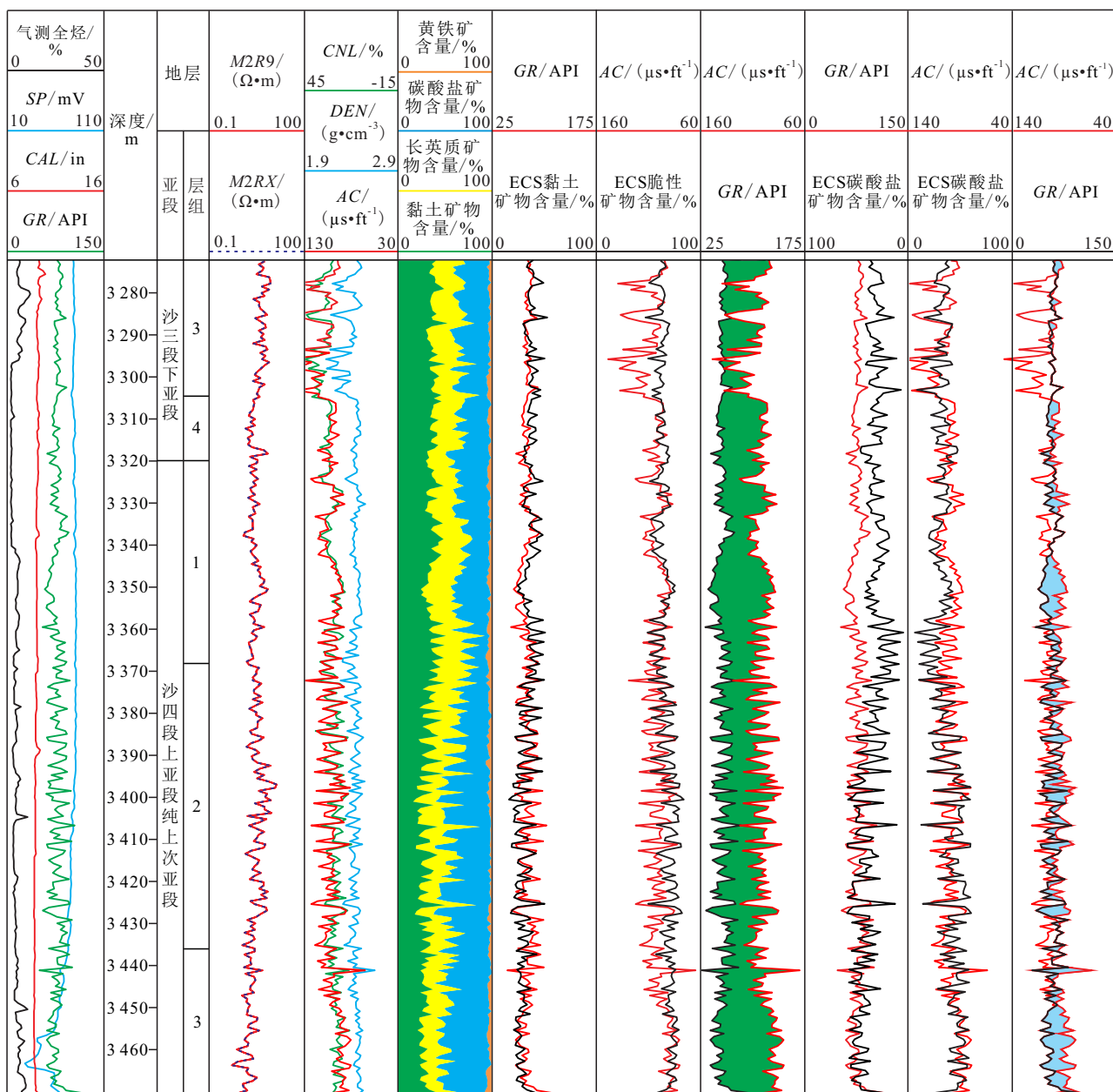


图2 牛页1井脆性矿物含量测井响应特征

Fig.2 Logging response characteristics for brittle mineral content in Well NY1

地层压裂改造,也有利于油气可动性分析^[20-22]。为更好地反映高碳酸盐矿物含量分布特征,采用ECS碳酸盐矿物含量标定自然伽马和声波时差曲线,确定自然伽马曲线图头刻度范围为0~150 API,声波时差曲线图头刻度范围为40~140 μs/ft。依据标定后的图头刻度对自然伽马和声波时差曲线进行重叠,重叠产生的间距(图2中蓝色填充部分)较好地指示了高碳酸盐矿物含量地层。对于碳酸盐矿物含量大于40.0%的地层,自然伽马和声波时差曲线有重叠间距,同时采用ECS碳酸盐矿物含量标定后的自然伽马和声波时差曲线图头刻度对同一区块

其他未采集ECS测井资料并提供参考,更好地发挥常规测井资料分析地层碳酸盐矿物含量的作用。

总体而言,自然伽马和声波时差曲线重叠能够有效地反映地层脆性矿物和碳酸盐矿物含量的分布特征。但沙三段下亚段3层组由于干酪根高自然伽马和高声波时差特性的影响,自然伽马和声波时差曲线重叠反映的脆性矿物含量明显小于ECS脆性矿物含量,这会对后续开展的地层油气可动性分析产生一定影响,也会对基于声波时差计算的岩石力学脆性参数和可压性分析带来误差,需要引起足够的重视。对于地区性页岩油探井,建议采集岩性

扫描测井以获得准确的地层脆性矿物含量。

4 页岩油可动性测井响应分析

页岩油成藏过程中,部分油气以游离烃形式赋存于矿物基质孔隙和裂缝中,一般采用岩心实验数据评价游离烃含量^[23-24]。钻井过程中,地层游离烃流入井筒,气测录井仪监测到气测异常变化,尤其是当地层压力大、油质较好、气油比高、微裂缝和薄夹层发育时,气测异常值可达100%。游离烃和气测异常代表了油气不同方面的可动特征,前者为原地滞留的近源富集,油气运移距离短,表现为微观可动特征,是地层可动油气的真实反映;后者反映油气活跃程度,表现为宏观可动特征,是地层可动油气的间接反映。游离烃和气测异常从不同角度反映了页岩油地层油气可动性,是页岩油地层含油性评价的重要依据。

目前,普遍利用岩心和气测录井研究页岩油地层油气可动性。由于无法深刻认识页岩油可动性测井响应特征,测井资料在页岩油地层油气可动性评价中的作用没有得到充分体现。

页岩油地层总有机碳含量与游离烃含量相关性较强,高脆性矿物含量地层尤其是高碳酸盐矿物含量地层气测异常值较高,这初步表明总有机碳含量、碳酸盐矿物含量与油气可动性之间存在联系,为利用测井资料分析页岩油可动性,明确页岩油可动性的测井表征提供了可能。以樊201和樊页1井为例进行分析。

4.1 樊201井

樊201井位于济阳坳陷东营凹陷博兴洼陷,沙四段上亚段纯上次亚段和沙三段下亚段为页岩油集中发育段。钻井液泥浆密度为 1.40 g/cm^3 ,钻井过程中见到不同程度的气测异常显示,部分井段气测异常值达100%。对沙四段上亚段纯上次亚段和沙三段下亚段分段压裂投产后,平均单段日产油量为 $7.2\text{ m}^3/\text{d}$,说明地层具有较好的油气可动性。

采用上述研究方法,确定樊201井页岩油地层电阻率、自然伽马和声波时差曲线经标定后的图头刻度,并对电阻率和声波时差曲线、自然伽马和声波时差曲线分别进行重叠处理(图3)。在不同亚段以及同一亚段不同层组内,电阻率和声波时差曲线重叠特征、自然伽马和声波时差曲线重叠特征以及气测异常特征差异明显。依据测井曲线重叠特征和气测异常特征之间的关系,将3201~3610m井段自下而上划分为4段。

第一段 位于沙四段上亚段纯上次亚段1层组和2层组(3437~3610m),气测曲线形态饱满,气测异常值达100%,油气可动性好。此段电阻率和声波时差曲线重叠间距中等,自然伽马和声波时差曲线重叠间距大,表现为中等TOC值和高碳酸盐矿物含量(>40%)的测井组合特征。该组合特征表明地层具有一定含油性,且有利于油气流入井筒,并与高气测异常值相对应。该段气测异常可以通过测井组合特征得到较好诠释,初步表明页岩油宏观可动性在测井曲线上存在较好的响应特征。

第二段 位于沙三段下亚段4层组(3293~3437m),气测异常值较低,平均为23.2%,电阻率和声波时差曲线重叠间距较小,自然伽马和声波时差曲线重叠间距较大(碳酸盐矿物含量>40%),为较低TOC值和较高碳酸盐矿物含量的测井组合特征。该组合特征表明地层虽然具有较好的油气可动条件,但地层含油性较差,与低气测异常值一致,测井组合特征与气测异常相吻合,再次表明测井组合特征能够有效反映页岩油宏观可动性。

第三段 位于沙三段下亚段3层组(3243~3293m),气测曲线为锯齿状形态,部分井段气测异常值达100%。电阻率和声波时差曲线重叠间距大,为高TOC值和低碳酸盐矿物含量的测井组合特征。该段地层碳酸盐矿物含量低,与高气测异常值矛盾。分析认为原因有2点:一是地层自身脆性矿物含量较低,油气可动性差,造成部分井段气测异常低值。二是干酪根的影响造成声波时差增大、自然伽马增高,使得测井曲线重叠后表现的低碳酸盐矿物含量特征不能有效反映地层油气可动性。尽管如此,电阻率和声波时差曲线重叠间距大小与气测异常值相吻合,初步表明电阻率和声波时差曲线重叠特征也可以反映页岩油宏观可动性。同时,高气测异常值反映了地层较高脆性矿物含量的客观存在,可以弥补测井曲线重叠分析脆性矿物含量的不足。

第四段 位于沙三段下亚段3层组(3201~3243m),气测异常值低,为高TOC值和低碳酸盐矿物含量的测井组合特征。该段地层测井组合特征与第三段基本一致,但气测异常值低,这是受地层低脆性矿物含量的影响,还是地层本身油气可动性差,需要进一步分析。

4.2 樊页1井

樊页1井沙三段下亚段采集了ECS和电阻率成像测井,可以准确了解地层脆性矿物含量和微裂缝发育情况。该井沙三段下亚段3层组(3164~

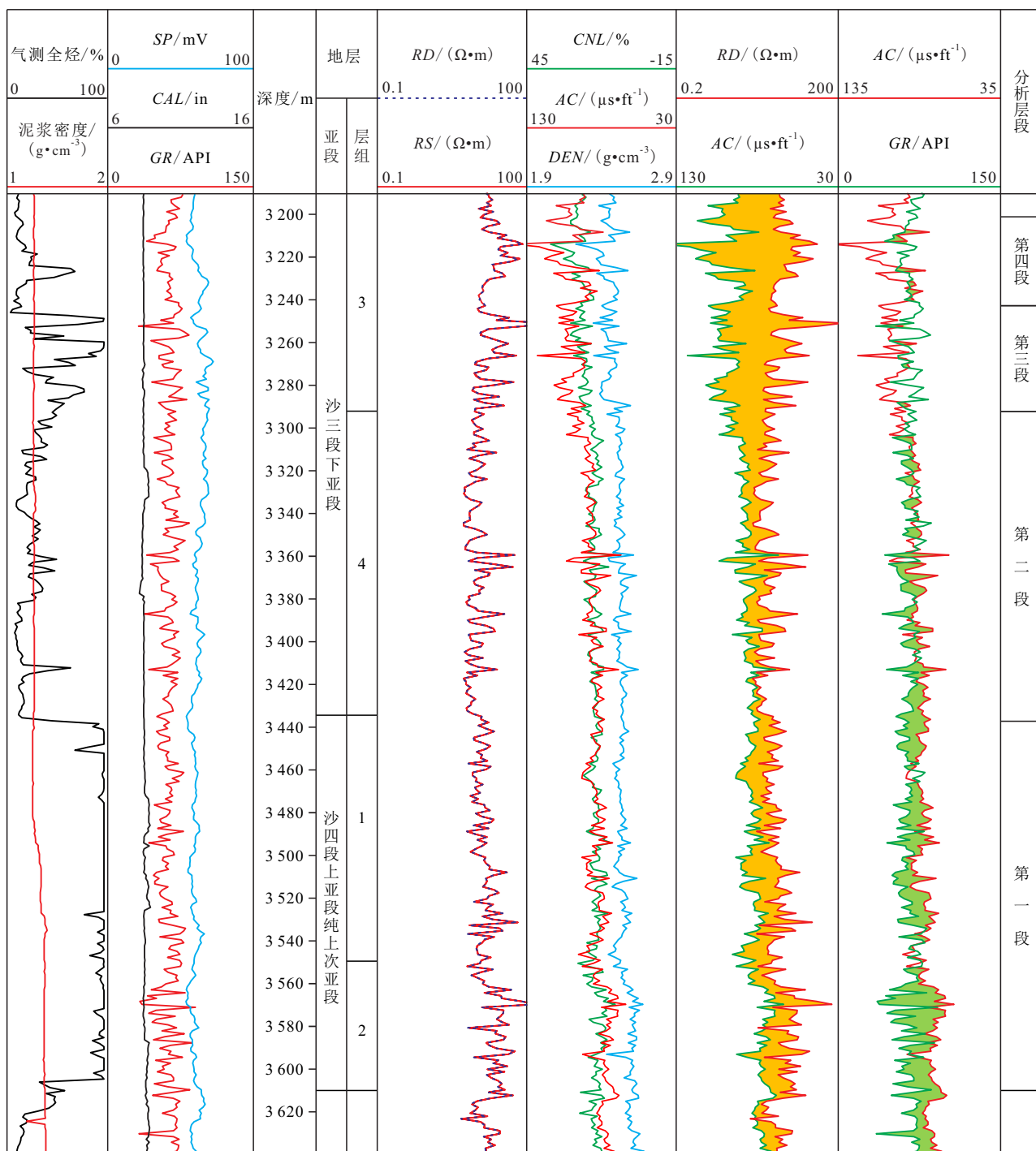


图3 樊201井页岩油可动性测井响应特征

Fig.3 Logging response characteristics for shale oil mobility in Well F201

3 206.3 m)为干酪根集中发育段,测井计算 *TOC* 值平均为 4.27%,ECS 碳酸盐矿物平均含量为 34.8%,总体上为高 *TOC* 值和低碳酸盐矿物含量(<40%)的测井组合特征,但在层组内部有机质含量、碳酸盐矿物含量、裂缝密度和气测异常显示差异较大(图 4)。为了解低碳酸盐矿物含量地层页岩油可动性测井特征,对碳酸盐矿物含量相对低的 3 个层段进行对比分析。

第一段(3 199.6~3 206.3 m)气测异常值高,最高达 84%。测井计算 *TOC* 值平均大于 6.0%,ECS 黏土矿物平均含量为 45.0%,ECS 碳酸盐矿物平均含量为 37.0%,成像拾取高导裂缝条数为 7 条。虽然该层碳酸盐矿物含量较低,但地层微裂缝较发育,有利于油气流动。对第一段进行测试,折算日产油量为 2.4 m³/d,不含水,指示地层具有较好的油气可动性。

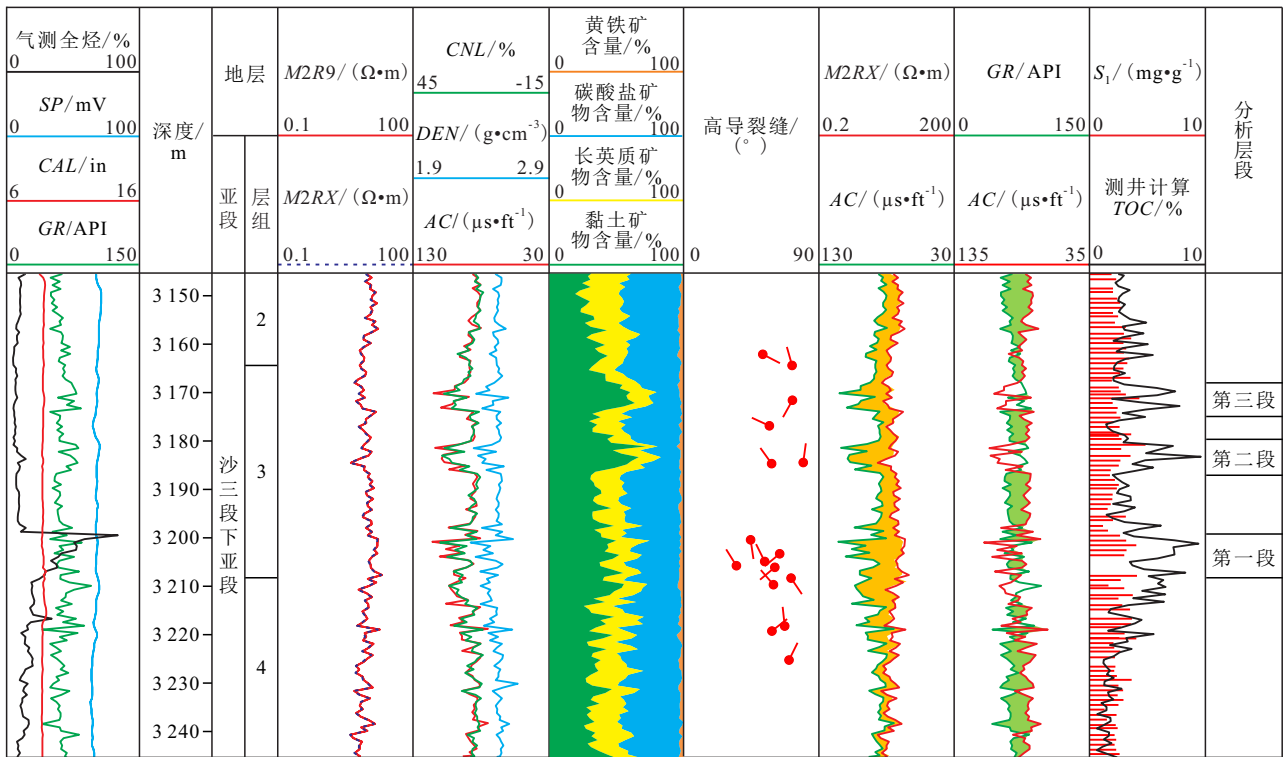


图4 樊页1井页岩油可动性测井响应特征

Fig.4 Logging response characteristics for shale oil mobility in Well FY1

第二段(3 180.1~3 186.2 m)和第三段(3 168.4~3 173.3 m)气测异常值较低,平均仅为8.9%,但测井计算 TOC 值较高,平均为5.8%。第二段和第三段 ECS 黏土矿物平均含量为53.0%,ECS 碳酸盐矿物平均含量为30.0%,成像拾取高导裂缝2条,与第一段对比,第二段和第三段黏土矿物含量更高,碳酸盐矿物含量更低,微裂缝也不发育,地层油气更难流入井筒。但第二段和第三段岩心分析 S_1 值与第一段基本一致,说明第二段和第三段自身具有较好的微观油气可动性,由于碳酸盐矿物含量低、微裂缝不发育,不利于地层油气流入井筒,从而表现为低气测异常值的特征。第二段和第三段测井计算 TOC 值较高,地层油气可动性可通过其进行有效表征。

综上所述,在高碳酸盐矿物含量地层,电阻率和声波时差曲线重叠以及自然伽马和声波时差曲线重叠的组合特征与气测异常特征相对应,可以有效表征页岩油宏观可动特征。在低碳酸盐矿物含量地层,电阻率和声波时差曲线重叠间距大小与岩心分析 S_1 正相关,能有效表征页岩油微观可动性。据此,页岩油宏观可动性和微观可动性在测井曲线上具有明显的表征特征,完全可以通过测井曲线重叠法和测井曲线组合特征定性反映页岩油地层含油性。

需要指出的是,钻井过程中,气测异常值不仅受碳酸盐矿物含量和裂缝发育程度的影响,钻井液泥浆密度和钻井取心施工也会影响气测异常值。首先,钻井液泥浆密度的提高会对地层油气流产生不同程度的压制作用;其次,在钻井取心过程中,由于钻头破岩体积小,部分地层游离烃滞留于岩心中,一般表现为低气测异常值。因此,气测异常值难以准确反映地层游离烃含量,仅是地层油气可动性的间接反映,页岩油测井评价应立足于测井资料的认识和分析,不应过多依赖于气测曲线。

5 页岩油地层含油性定量评价

虽然可以利用测井曲线计算地层总有机碳含量,但总有机碳含量通常为地层干酪根、沥青和孔隙中油气含量的总和,无法准确反映地层含油性。尽管测井曲线组合特征与气测异常、岩心分析 S_1 具有较好的相关性,但也仅仅是地层油气可动性的定性反映,无法满足页岩油定量评价需要^[25-27]。从定量评价的角度,需要确定页岩油地层含油饱和度和孔隙度2个关键参数。

5.1 含油饱和度测井分析

随着页岩油地质研究不断深入,对页岩油地层

含油特征形成了相对统一的认识。页岩油地层具有自生自储、生烃地层 TOC 值普遍较高、压裂后均能见到不同程度的油气产量、整体含油的成藏特点^[28-29]。有机质生烃和排烃过程中的耗水作用使地层水大量减少^[30],使得页岩油油藏具有低含水饱和度和高含油饱和度的特征,与常规油藏差别较大^[31-32]。

与页岩气藏以吸附方式赋存于孔隙中对孔径要求不高不同,页岩油主要以游离烃形式赋存于脆性矿物基质和微裂缝中。页岩油地层孔径越大,油气可动能力越强,游离烃富集量就越大,越有利于油气采出^[5,33-34]。上述页岩油地层含油特征和油气赋存形式可以通过二维核磁(斯伦贝谢 CMR-NG)测井资料深入分析得到进一步验证。

二维核磁测井在提供准确的孔隙结构信息的同时,还能确定储层流体类型和含量,为分析不同孔隙结构内流体分布特点提供了手段。依据二维核磁解释成果,将地层孔隙结构划分为黏土孔隙结构、毛管孔隙结构和可动孔隙结构3类,并将孔隙结构内流体划分为沥青质、黏土水、束缚烃、毛管水、可动烃和可动水6种类型^[35](图5)。

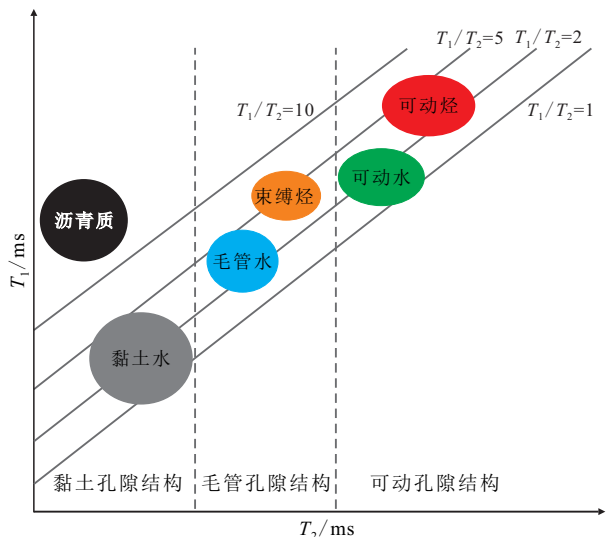


图5 二维核磁孔隙结构及赋存流体类型关系
Fig.5 Relationship between pore structure and fluid types by 2D NMR

渤页平5井以探索渤南洼陷东次洼沙三段下亚段高演化程度区页岩含油气情况为勘探目的,水平段靶窗位置为沙三段下亚段13上层组2段(4 192~4 307 m),首次采用二维核磁测井,为分析页岩油地层孔隙结构、赋存流体特征及含油分布特征提供了条件。

孔隙结构特征 渤页平5井采用5和10 ms T_2 截止值划分黏土孔隙度、毛管孔隙度和可动孔隙度

(图6)。沙三段下亚段13上层组2段总孔隙度平均为5.3%,其中黏土孔隙度平均为1.1%,毛管孔隙度平均为1.9%,可动孔隙度平均为2.3%,毛管孔隙度与可动孔隙度之和平均为4.2%,渗透率平均为0.002 9 mD,为低孔超低渗透储层特征。

含水特征 由图6可以看出,沙三段下亚段13上层组2段黏土水孔隙度平均为0.88%,毛管水孔隙度平均为0.68%,可动水孔隙度平均为0.28%。因此,黏土水体积约占总含水体积的48%,毛管水体积约占总含水体积的37%,可动水体积约占总含水体积的15%,地层水主要富集于黏土孔隙内,可动孔隙含水体积较低。

含油特征 按照图5油气分类,不同孔隙结构内页岩油包括沥青质、束缚烃和可动烃3种类型。统计沙三段下亚段13上层组2段3类油气孔隙度,其中沥青质孔隙度平均为0.7%,束缚烃孔隙度平均为0.8%,可动烃孔隙度平均为1.9%,3类油气总孔隙度平均为3.4%,占地层总孔隙度的64.2%,即地层含油饱和度达64.2%,为高含油饱和度特征油藏。

不同孔隙结构内含油分布特征 在黏土孔隙内,沥青质孔隙度平均为0.7%,占黏土孔隙度的63.6%,即黏土孔隙含油饱和度为63.6%;在毛管孔隙内,束缚烃孔隙度平均为0.8%,占毛管孔隙度的42.2%,即毛管孔隙含油饱和度为42.2%;在可动孔隙内,可动烃孔隙度平均为1.9%,占可动孔隙度的82.6%,即可动孔隙含油饱和度为82.6%。由此,沙三段下亚段13上层组2段属于低含水饱和度和高含油饱和度油藏,与地质认识完全一致^[36]。尤其在可动孔隙内,地层含油饱和度达82.6%,可动孔隙内基本不含水。该条件下含油饱和度近似为1,地层含油孔隙度的计算可以由含油饱和度与可动孔隙度的求取简化为对可动孔隙度的求取,其表达式为:

$$\phi_o = S_o \phi_f \approx \phi_f \tag{5}$$

5.2 可动孔隙度测井分析

页岩油具有自生自储的成藏特点,对孔隙连通性要求较低,沥青质、束缚烃和油气比较高的可动烃分别赋存在不同的孔隙结构中。实验分析和勘探实践表明沥青质分子体积大、黏度高且赋存在小孔隙内,无法被有效开采。束缚烃黏度中等,赋存在毛管孔隙中,通过储层改造可以被有效动用和采出,与可动烃具有同等商业价值^[36]。因此,从采出程度分析,束缚烃也具有可动性,页岩油地层可动孔隙应包含毛管孔隙内束缚烃孔隙和可动孔隙2部分。而(5)式中地层可动孔隙度并未包含束缚烃孔

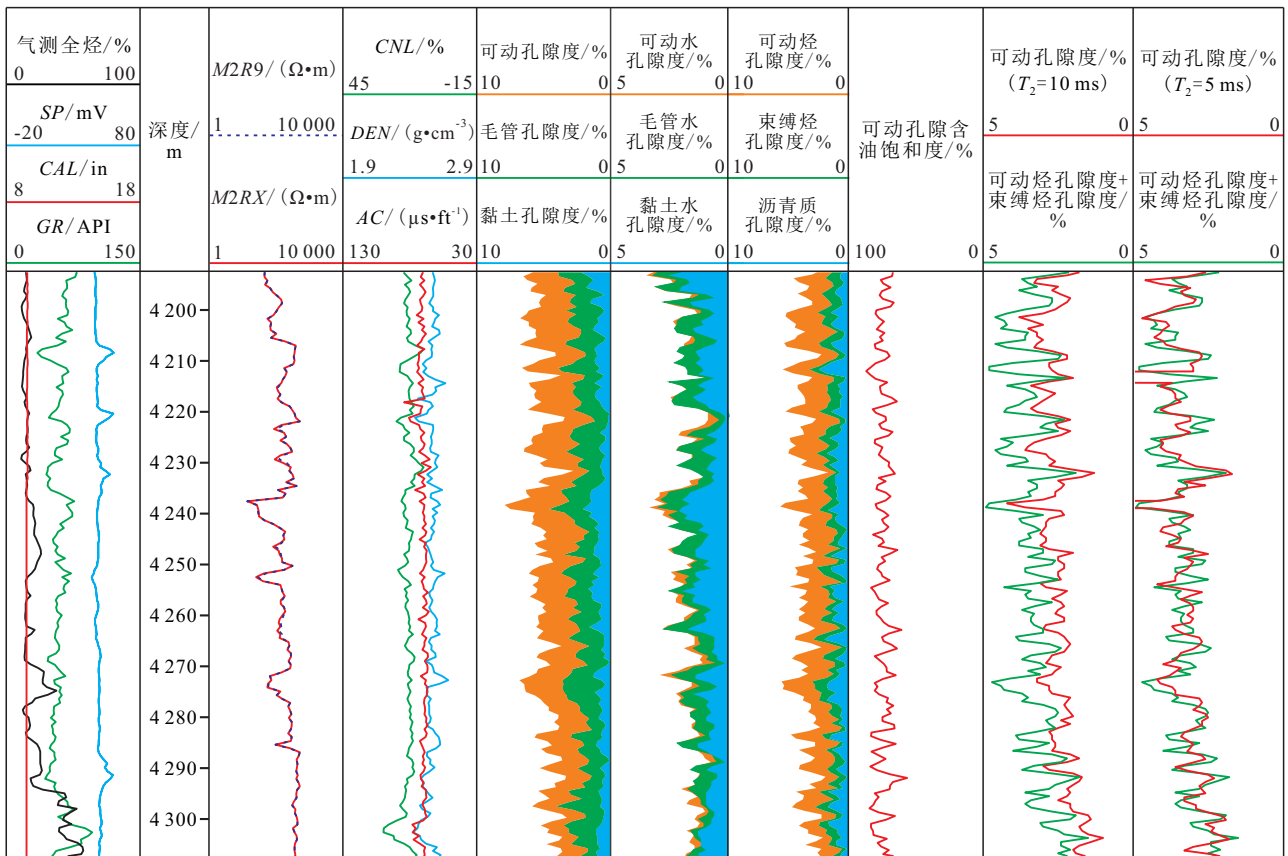


图6 渤页平5井二维核磁测井流体特征分析

Fig.6 2D NMR logging response characteristics for fluids in Well BYP5

孔隙度,会导致地层含油孔隙度计算值明显偏小。依据 10 ms T₂截止值计算的地层可动孔隙度明显小于地层可动烃孔隙度与束缚烃孔隙度之和(图6),有待做进一步改进。

渤页平5井4190~4310 m井段毛管孔隙度平均为1.9%,束缚烃孔隙度平均为0.8%,毛管孔隙含水饱和度为57.8%,含油饱和度为42.2%,毛管孔隙内含水饱和度较高而含油饱和度较低,与可动孔隙内高含油饱和度特点存在较大差别。尽管毛管孔隙中含油饱和度低,但这部分油气可动性好,对油气产量有贡献,应将束缚烃孔隙从毛管孔隙中剥离出来,并划归至可动孔隙。

相关研究表明^[36],页岩油地层流体类型与孔隙结构大小具有较好的相关性,即小孔隙内以地层水为主,大孔隙内以地层油气为主,即使在毛管孔隙内,小孔隙内主要富集毛管水,大孔隙内以束缚烃为主,渤页平5井不同孔隙结构内流体特征分析也验证了这一点。因此,理论上存在一个T₂截止值,依据该T₂截止值可以区分毛管水孔隙与束缚烃孔隙。但页岩油地层流体类型的分布除与孔隙结构密切相关外,还与矿物组分、润湿性、含油品质以及

地层温度和压力有关^[37],需要通过岩心分析给出相对合理的T₂截止值以满足地层含油性评价的需要^[5,38]。

由于二维核磁测井定量确定了可动烃孔隙度和束缚烃孔隙度,可以采用该数据确定一个新的T₂截止值,使得利用新的T₂截止值划分的可动孔隙度与可动烃孔隙度和束缚烃孔隙度之和基本一致。依据上述认识,分别采用4,5,6,7,8和9 ms等T₂截止值计算可动孔隙度。结果表明,当T₂截止值为5 ms时,重新计算的地层可动孔隙度与原计算的可动烃孔隙度与束缚烃孔隙度之和基本一致(图6),表明采用5 ms T₂截止值确定的可动孔隙度更加准确地反映了地层可动烃孔隙度。

6 应用实例

利页1井为一口页岩油重点探井,全井进行了长井段钻井取心,积累了丰富的岩心分析数据。但受实验条件和测井评价方法的限制,无法准确评价利页1井页岩油地层含油性以及不同亚段和层组含油性差异,对于哪一个层组含油性更好一直存在不

同的认识。

利页1井完井后采用了ECS和一维核磁(CMR)测井,经岩心分析TOC值和ECS碳酸盐矿物含量标定后,确定了电阻率、声波时差和自然伽马曲线的图头刻度范围,依据刻度范围对电阻率和声波时差曲线、自然伽马和声波时差曲线进行了重叠处理(图7),开展地层总有机碳含量、脆性矿物含量和油气可动性定性分析。

利页1井3580~3800 m井段电阻率和声波时差曲线表现出不同幅度的重叠间距,测井计算TOC

值与岩心分析TOC值基本一致,测井计算TOC值平均为3.2%,为整体含油特征。自然伽马和声波时差曲线重叠间距小,甚至无重叠特征,反映地层碳酸盐矿物含量低,与ECS矿物剖面基本一致。由于地层碳酸盐矿物含量较低不利于地层油气流出井筒,以及受钻井取心施工与钻井液泥浆密度提高的影响,气测异常值普遍较低,无法有效反映页岩油宏观可动性,但电阻率和声波时差曲线重叠间距定性表明地层含油性较好,但不同亚段及层组内含油性差别较大。

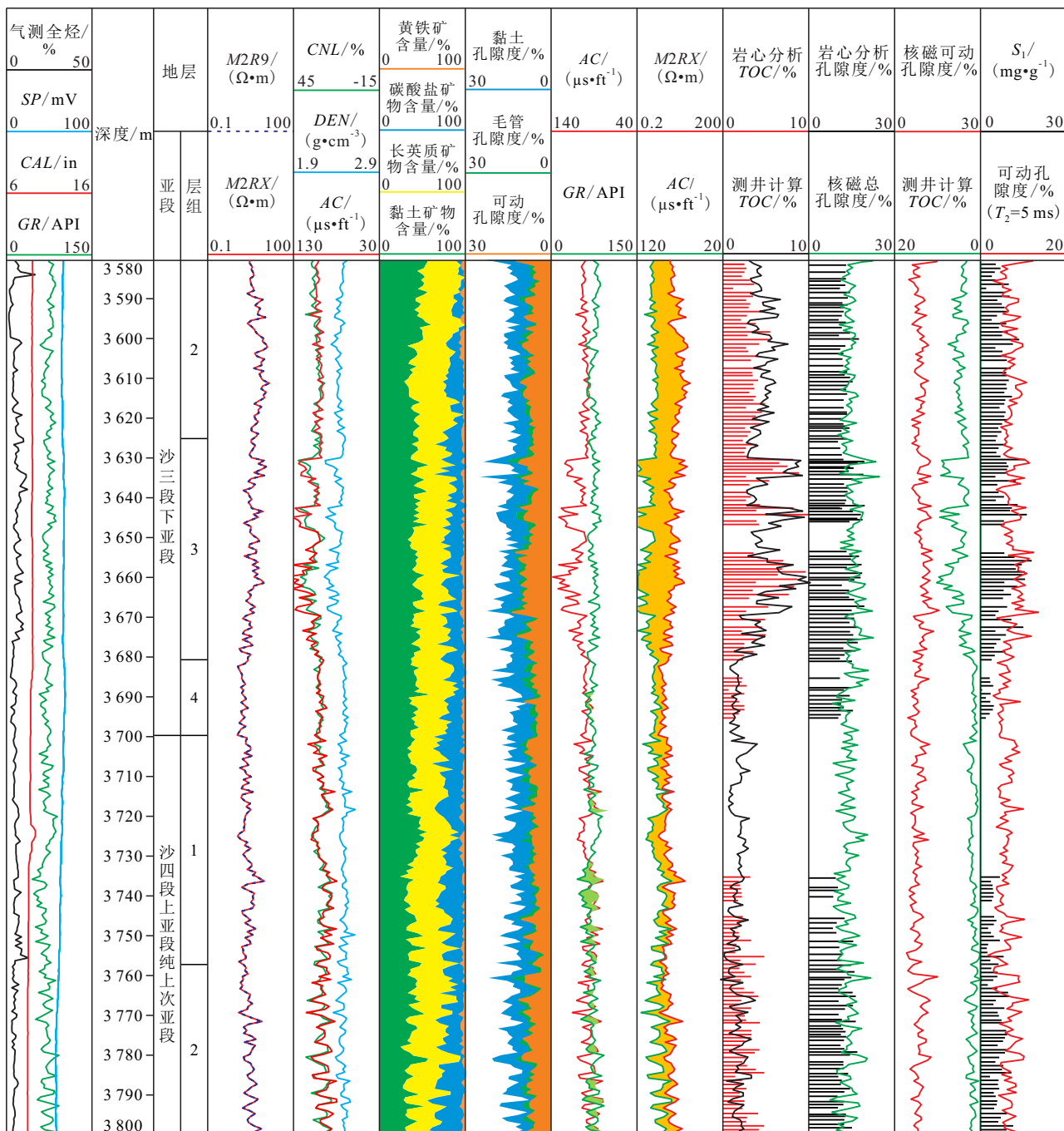


图7 利页1井页岩油测井综合评价

Fig.7 Comprehensive logging evaluation for shale oil in Well LY1

对利页1井一维核磁测井数据进行二次处理,并采用渤页平5井确定的5 ms T_2 截止值分析地层可动孔隙度,取得以下几点认识:①对比核磁总孔隙度与岩心分析孔隙度(未做覆压校正),两者具有较好的一致性,指示核磁测井不受地层岩性和干酪根的影响,可以准确反映地层总孔隙度。②对比核磁可动孔隙度与测井计算 TOC 值,两者变化趋势基本一致,测井计算 TOC 值越高,核磁可动孔隙度越大,反映了页岩油地层有机质对储层孔隙具有良好的改造作用。③对比核磁可动孔隙度与 S_1 值,两者对应关系较好,表明核磁可动孔隙度是定量评价地层可动油气体积的有效手段。④对比不同亚段含油性测井评价,沙三段下亚段3层组测井计算 TOC 值平均为5.4%,核磁可动孔隙度平均为6.4%,沙四段上亚段纯上次亚段2层组测井计算 TOC 值平均为1.9%,核磁可动孔隙度平均为5.5%。

相比沙四段上亚段纯上次亚段2层组,沙三段下亚段3层组 TOC 值与核磁可动孔隙度均较高。因此,沙三段下亚段3层组含油性更好,应是未来页岩油地层勘探开发的首选目标。

7 结论

以页岩油地质认识为指导,采用测井手段开展页岩油地质特性分析与表征,建立了页岩油地层含油性定性与定量评价方法,为页岩油测井评价提供了新的思路,测井资料在页岩油评价中的作用得到了充分体现。由于干酪根对常规测井曲线的影响以及页岩油地层孔隙结构、流体类型和赋存方式的复杂性,基于常规测井曲线开展的页岩油测井评价存在一定的局限性,对于地区性页岩油探井,应采用岩性扫描和二维核磁测井,更好地满足页岩油定量评价的需要。

符号解释

H ——井深, m;
 K ——叠合系数, 小数;
 R ——电阻率, $\Omega \cdot m$;
 R_{max} ——电阻率曲线图头最大刻度值, $\Omega \cdot m$;
 R_{min} ——电阻率曲线图头最小刻度值, $\Omega \cdot m$;
 R_0 ——镜质组反射率, %;
 R_1 ——地层电阻率, $\Omega \cdot m$;
 $R_{基线}$ ——非烃源岩段电阻率, $\Omega \cdot m$;
 S_0 ——含油饱和度, %;
 T_1 ——纵向弛豫时间, ms;

T_2 ——横向弛豫时间, ms;
 T_1/T_2 ——纵横向弛豫时间比;
 TOC ——总有机碳含量, %;
 Δt ——声波时差, $\mu s/ft$;
 Δt_{max} ——声波时差曲线图头最大刻度值, $\mu s/ft$;
 Δt_{min} ——声波时差曲线图头最小刻度值, $\mu s/ft$;
 $\Delta t_{基线}$ ——非烃源岩段声波时差, $\mu s/ft$;
 ΔTOC ——总有机碳含量背景值, %;
 ϕ_f ——可动孔隙度, 小数;
 ϕ_o ——含油孔隙度, %。

参考文献

- [1] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14-26.
ZOU Caineng, YANG Zhi, CUI Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of non-marine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14-26.
- [2] 卢双舫, 黄文彪, 陈方文, 等. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 249-256.
LU Shuangfang, HUANG Wenbiao, CHEN Fangwen, et al. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: Discussion and application[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 249-256.
- [3] 姜在兴, 张文昭, 梁超, 等. 页岩油储层基本特征及评价要素[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 184-196.
JIANG Zaixing, ZHANG Wenzhao, LIANG Chao, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir[J]. Acta Petroli Sinica, 2014, 35(1): 184-196.
- [4] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 陆相湖盆页岩层系基本地质特征与页岩油勘探突破——以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组二段一亚段为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(3): 361-372.
ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Geological characteristics of shale rock system and shale oil exploration breakthrough in a lacustrine basin: A case study from the Paleogene 1st sub-member of Kong 2 Member in Cangdong sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 361-372.
- [5] 刘惠民, 张顺, 包友书, 等. 东营凹陷页岩油储集地质特征与有效性[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 512-523.
LIU Huimin, ZHANG Shun, BAO Youshu, et al. Geological characteristics and effectiveness of the shale oil reservoir in Dongying sag[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 512-523.
- [6] 刘雅利, 刘鹏. 陆相富有机质泥页岩中夹层特征及其作用——以济阳凹陷为例[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(5): 1-9.
LIU Yali, LIU Peng. Interlayer characteristics and their effect on continental facies organic-rich shale: A case study of Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(5): 1-9.
- [7] 宋国奇, 徐兴友, 李政, 等. 济阳凹陷古近系陆相页岩油产量的影响因素[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 463-471.

- SONG Guoqi, XU Xingyou, LI Zheng, et al. Factors controlling oil production from Paleogene shale in Jiyang depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(3):463-471.
- [8] 王勇, 王学军, 宋国奇, 等. 渤海湾盆地济阳拗陷泥页岩相与页岩油富集关系[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(5):696-704.
WANG Yong, WANG Xuejun, SONG Guoqi, et al. Genetic connection between mud shale lithofacies and shale oil enrichment in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(5):696-704.
- [9] 孙焕泉. 济阳拗陷页岩油勘探实践与认识[J]. *中国石油勘探*, 2017, 22(4):1-14.
SUN Huanquan. Exploration practice and cognitions of shale oil in Jiyang depression [J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(4):1-14.
- [10] 宋明水, 刘惠民, 王勇, 等. 济阳拗陷古近系页岩油富集规律认识与勘探实践[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(2):225-235.
SONG Mingshui, LIU Huimin, WANG Yong, et al. Enrichment rules and exploration practices of Paleogene shale oil in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(2):225-235.
- [11] 王永诗, 李政, 王民, 等. 渤海湾盆地济阳拗陷陆相页岩油吸附控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(3):489-498.
WANG Yongshi, LI Zheng, WANG Min, et al. Factors controlling lacustrine shale oil adsorption in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3):489-498.
- [12] 陈扬, 胡钦红, 赵建华, 等. 渤海湾盆地东营凹陷湖相富有机质页岩纹层特征和储集性能[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(2):307-324.
CHEN Yang, HU Qinrong, ZHAO Jianhua, et al. Lamina characteristics and their influence on reservoir property of lacustrine organic-rich shale in the Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2):307-324.
- [13] 朱毅秀, 吕品, 金科, 等. 四川元坝地区大安寨段陆相细粒沉积岩储层物性特征及有利储集层研究[J]. *特种油气藏*, 2021, 28(4):39-47.
ZHU Yixiu, LÜ Pin, JIN Ke, et al. Study on physical properties and favorable reservoirs of terrestrial pulverite reservoirs in Da'anzhai Member, Yuanba area, Sichuan [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(4):39-47.
- [14] 张晋言, 孙建孟. 利用测井资料评价泥页岩油气“五性”指标[J]. *测井技术*, 2012, 36(2):146-153.
ZHANG Jinyan, SUN Jianmeng. Log evaluation on shale hydrocarbon reservoir [J]. *Well Logging Technology*, 2012, 36(2):146-153.
- [15] 蒋云箭, 刘惠民, 柴春艳, 等. 页岩油油气可动性测井响应特征分析及应用[J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(5):44-52.
JIANG Yunjian, LIU Huimin, CHAI Chunyan, et al. Analysis of hydrocarbon movability logging response features of shale oil and its applications [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(5):44-52.
- [16] 王敏. 页岩油评价的关键参数及求取方法研究[J]. *沉积学报*, 2014, 32(1):174-181.
WANG Min. Key parameter and calculation in shale oil reservoir evaluation [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(1):174-181.
- [17] 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 Guiwen, ZHU Zhenyu, ZHU Guangyu. Logging identification and evaluation of Cambrian-Ordovician source rocks in syncline of Tarim basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(4):50-52.
- [18] 胡慧婷, 卢双舫, 刘超, 等. 测井资料计算源岩有机碳含量模型对比及分析[J]. *沉积学报*, 2011, 29(6):199-205.
HU Huiting, LU Shuangfang, LIU Chao, et al. Models for calculating organic carbon content from logging information: Comparison and analysis [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(6):199-205.
- [19] 廖东良. 页岩地层ECS测井资料解释新方法及其应用[J]. *石油钻探技术*, 2015, 43(4):102-107.
LIAO Dongliang. Interpretation and application of ECS logging data in shale formations [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(4):102-107.
- [20] 蒋裕强, 董大忠, 漆麟, 等. 页岩气储层的基本特征及其评价[J]. *天然气工业*, 2010, 30(10):7-12.
JIANG Yuqiang, DONG Dazhong, QI Lin, et al. Basic features and evaluation of shale gas reservoirs [J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(10):7-12.
- [21] 白辰阳. 济阳拗陷纹层碳酸盐岩成因及其对页岩油富集的指示意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
BAI Chenyang. The genesis of laminar carbonates from Jiyang Sub-basin and their implicate for shale oil accumulation [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [22] 杨智, 侯连华, 陶士振, 等. 致密油与页岩油形成条件与“甜点区”评价[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(5):555-565.
YANG Zhi, HOU Lianhua, TAO Shizhen, et al. Formation conditions and “sweet spot” evaluation of tight oil and shale oil [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(5):555-565.
- [23] 宁方兴, 王学军, 郝雪峰, 等. 济阳拗陷页岩油甜点评价方法研究[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(35):11-16.
NING Fangxing, WANG Xuejun, HAO Xuefeng, et al. Evaluation method of shale oil sweetspots in Jiyang Depression [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(35):11-16.
- [24] 金旭, 李国欣, 孟思炜, 等. 陆相页岩油可动性微观综合评价[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(1):222-232.
JIN Xu, LI Guoxin, MENG Siwei, et al. Microscale comprehensive evaluation of continental shale oil recoverability [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(1):222-232.
- [25] 彭君, 周勇水, 李红磊, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷盐间细粒沉积岩相与含油性特征[J]. *断块油气田*, 2021, 28(2):212-218.
PENG Jun, ZHOU Yongshui, LI Honglei, et al. Lithofacies and oil-bearing characteristics of fine-grained sedimentary rocks of salt-layers in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2021, 28(2):212-218.
- [26] 李志明, 徐二社, 秦建中, 等. 烃源岩评价中的若干问题[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2010, 25(6):8-12, 27.
LI Zhiming, XU Ershe, QIN Jianzhong, et al. Some problems on

- the evaluation of source rock[J].*Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2010, 25(6): 8-12, 27.
- [27] 蒋启贵, 黎茂稳, 钱门辉, 等. 不同赋存状态页岩油定量表征技术与应用研究[J]. *石油实验地质*, 2016, 38(6): 842-849.
JIANG Qigui, LI Maowen, QIAN Menhui, et al. Quantitative characterization of shale oil in different occurrence states and its application [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(6): 842-849.
- [28] 支东明, 唐勇, 何文军, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组常规-非常规油气有序共生与全油气系统成藏模式[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(1): 38-51.
ZHI Dongming, TANG Yong, HE Wenjun, et al. Orderly coexistence and accumulation models of conventional and unconventional hydrocarbons in Lower Permian Fengcheng Formation, Mahu sag, Junggar Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(1): 38-51.
- [29] 孙龙德, 刘合, 何文渊, 等. 大庆古龙页岩油重大科学问题与研究路径探析[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(3): 453-463.
SUN Longde, LIU He, HE Wenyuan, et al. An analysis of major scientific problems and research paths of Gulong shale oil in Daqing Oilfield, NE China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 453-463.
- [30] 张善文. 再论“压吸充注”油气成藏模式[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(1): 37-44.
ZHANG Shanwen. Re-discussion on the reservoir formation by pressure-suck filling [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(1): 37-44.
- [31] 薛冰, 张金川, 唐玄, 等. 黔西北龙马溪组页岩微观孔隙结构及储气特征[J]. *石油学报*, 2015, 36(2): 138-149, 173.
XUE Bing, ZHANG Jinchuan, TANG Xuan, et al. Characteristics of microscopic pore and gas accumulation on shale in Longmaxi Formation, northwest Guizhou [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(2): 138-149, 173.
- [32] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 致密油与页岩油内涵、特征、潜力及挑战[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(1): 3-17.
ZOU Caineng, ZHU Rukai, BAI Bin, et al. Significance, geologic characteristics, resource potential and future challenges of tight oil and shale oil [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(1): 3-17.
- [33] 许琳, 常秋生, 杨成克, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油储层特征及含油性[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(3): 535-549.
XU Lin, CHANG Qiusheng, YANG Chengke, et al. Characteristics and oil-bearing capability of shale oil reservoir in the Permian Lucaogou Formation, Jimusaer sag [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 535-549.
- [34] 李吉君, 史颖琳, 黄振凯, 等. 松辽盆地北部陆相泥页岩孔隙特征及其对页岩油赋存的影响[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2015, 39(4): 27-34.
LI Jijun, SHI Yinglin, HUANG Zhenkai, et al. Pore characteristics of continental shale and its impact on storage of shale oil in northern Songliao Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Sciences*, 2015, 39(4): 27-34.
- [35] KAUSIK Ravinath, FELLAH Kamilla, RYLANDER Erik, et al. NMR relaxometry in shale and implications for logging [J]. *Petrophysics*, 2016, 57(4): 339-350.
- [36] ZOU Caineng, JIN Xu, ZHU Rukai, et al. Do shale pore throats have a threshold diameter for oil storage? [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 13619.
- [37] 卢双舫, 薛海涛, 王民, 等. 页岩油评价中的若干关键问题及研究趋势[J]. *石油学报*, 2016, 37(10): 1 309-1 322.
LU Shuangfang, XUE Haitao, WANG Min, et al. Several key issues and research trends in evaluation of shale oil [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(10): 1 309-1 322.
- [38] 刘雅慧, 王才志, 刘忠华, 等. 一种评价页岩油含油性的测井方法——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷为例[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(7): 1 084-1 091.
LIU Yahui, WANG Caizhi, LIU Zhonghua, et al. A logging method for evaluating oil-bearing property of Jimusar shale oil: Case study of Jimusar Sag in Junggar Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(7): 1 084-1 091.

编辑 何青芳