

引用格式:钱诗友,杨志强,徐晨.苏北盆地低有机质断块型页岩油测井评价方法及应用[J].油气藏评价与开发,2025,15(1):19-27.

QIAN Shiyu, YANG Zhiqiang, XU Chen. Logging evaluation methods of low-organic matter fault-block shale oil in the Subei Basin and their application[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(1): 19-27.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.01.003

苏北盆地低有机质断块型页岩油测井评价方法及应用

钱诗友¹,杨志强²,徐晨²

(1.中国石化江苏油田分公司,江苏扬州225009;2.中国石化经纬有限公司华东测控分公司,江苏扬州225002)

摘要:苏北盆地构造复杂、断层发育,阜宁组二段泥页岩的有机质丰度较低,总有机碳含量基本小于1.5%。该套泥页岩具有岩相类型多样、孔隙结构复杂、储层非均质性强、压力系数横向变化大等特点。以苏北盆地H区块阜宁组二段页岩油储层为例,基于岩石物理实验分析结果,对区域测井响应关系特征进行分析,将常规测井与特殊测井相结合,建立页岩油储层岩性、储集性、含油性、可动性、可压性评价的测井解释模型,模型计算结果与岩心分析结果吻合较好。在此基础上,优选敏感参数,建立了区块页岩油储层评价分类标准,对储层进行“甜点”综合评价。经多口井的勘探实践验证,该测井评价技术具有较好的地区适应性,有效划分页岩油储层类别,有利于页岩油储层“甜点”优选,为苏北盆地页岩油勘探开发提供可靠的技术支持。

关键词:苏北盆地;阜二段;页岩油;测井;储层参数;“甜点”评价

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Logging evaluation methods of low-organic matter fault-block shale oil in the Subei Basin and their application

QIAN Shiyu¹, YANG Zhiqiang², XU Chen²

(1.Sinopec Jiangsu Oilfield Company, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;

2. Huadong Geosteering & Logging Company of Sinopec Matrix Corporation, Yangzhou, Jiangsu 225002, China)

Abstract: The Subei Basin is characterized by a complex structure and well-developed faults. The shale in the second member of the Funing Formation has relatively low organic matter abundance, with a total organic carbon (TOC) generally below 1.5%. This shale exhibits diverse lithofacies types, complex pore structures, strong reservoir heterogeneity, and significant lateral variations in pressure coefficients. Using the shale oil reservoir in Block H of the second member of the Funing Formation in the Subei Basin as an example, this paper analyzed the characteristics of regional logging responses based on the results of rock physics experiments. By integrating conventional and specialized logging methods, a logging interpretation model was developed to evaluate the lithology, reservoir properties, oil content, mobility, and fracability of the shale oil reservoir. The model's calculations aligned well with core analysis results. Building on this, sensitive parameters were optimized to establish evaluation and classification standards for the shale oil reservoirs in the block, and a comprehensive “sweet spot” evaluation of the reservoir was conducted. Exploration practices involving multiple wells have verified that this logging evaluation technology is regionally adaptable. It effectively classifies shale oil reservoir types, supports the optimal selection of “sweet spots”, and provides reliable technical support for the exploration and development of shale oil in the Subei Basin.

Keywords: Subei Basin; the second member of Funing Formation; shale oil; well logging; reservoir parameters; “sweet spot” evaluation

中国的页岩油发展起步较晚,但近年来发展迅速^[1-2]。现如今松辽盆地、鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地等地区的陆相页岩油均相继取得了工业突破,展现了中国

东部陆相页岩油的广阔勘探前景^[3-6]。近年来,苏北盆地相关研究人员开展了大量基础工作^[7-9],不断强化地区页岩油的机理研究。2020年以来,苏北盆地多个区块页岩

收稿日期:2024-05-10。

第一作者简介:钱诗友(1983—),男,硕士,副研究员,主要从事石油地质综合研究及勘探管理工作。地址:江苏省扬州市邗江区维扬路188号中国石化江苏油田勘探管理部,邮政编码:225009。E-mail:qiansy.jsyt@sinopec.com

通信作者简介:徐晨(1985—),女,硕士,高级工程师,主要从事非常规储层测井解释评价工作。地址:江苏省扬州市邗江区老虎山路22号,邮政编码:225002。E-mail:xuch2010.osjw@sinopec.com

基金项目:中国石化科研项目“内陆断陷湖盆断块型页岩油勘探开发关键技术”(P23189)。

油试获高产工业油流,证实了苏北盆地低有机质断块型页岩油具备巨大的勘探潜力^[10-12]。苏北盆地作为中国东部小型陆相盆地,地层构造复杂、断层十分发育。页岩油主要有直斜井和水平井开发模式,特别是过断层水平井,与稳定构造相比,评价更注重小层对比刻画以及非均质性的变化。与中国其他陆相页岩相比,目的层阜宁组二段页岩具有岩相类型多样、低有机碳、低液态烃含量、低孔渗、非均质性强、含油气性隐蔽的特点,页岩油富集规律和“甜点”主控因素不明确,高产与低产页岩段测井响应特征变化不明显,给测井定量评价和页岩储层分类带来较大的困难。

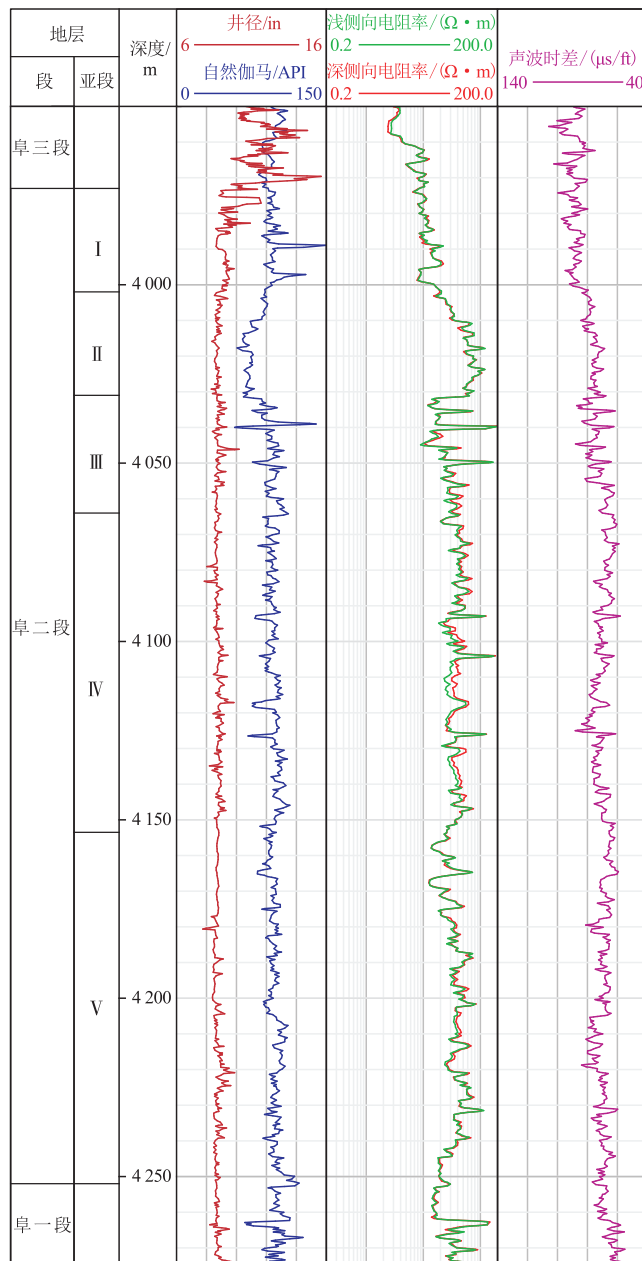
结合区域特点,围绕岩性、储集性、含油性、可动性、可压性等特性及其匹配关系,从岩心实验刻度出发,建立多参数页岩油测井解释模型,对储层参数进行计算,进而对储层进行分类,形成一套适用于苏北盆地低有机质复杂断块型页岩油的双“甜点”测井综合评价方法。该技术有效支撑了苏北页岩油“甜点”评价、靶窗选层以及压裂设计,目前累计完成20余口井的测井评价,在多个凹陷、构造、层系获得重大突破,纵向上发现多套“甜点”段。

1 区域地质概况

苏北盆地是下扬子准地台东部一个白垩纪—近古纪的大型断拗叠置盆地,面积 $3.28 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[13-14]。盆地内自下而上发育多套湖相泥页岩,包括上白垩统泰州组二段、古近系阜宁组二段(以下简称阜二段)和阜宁组四段等。

阜二段整体为较好的烃源岩,以半深湖—深湖沉积为主,厚度介于200~450 m,埋藏深度介于2 800~4 700 m,地层压力系数介于1.2~1.5。阜二段泥页岩的有机质丰度低,样品的有机质丰度总体上小于1.5%,大多处于低成熟—成熟阶段^[15-17]。

阜二段可分为5个亚段(图1),其顶部I亚段为一套黑色泥岩层夹少量粉砂质泥岩,俗称“泥脖子段”,厚度一般大于40 m,整体显示出高声波时差、高中子、低电阻率等高含泥的测井响应特征,页岩品质差;阜宁组II亚段为厚层块状灰质泥岩,钙质含量明显增加,因其电阻率与上部泥岩段相比呈隆起状,故俗称“龟背段”,但其物性较差,加之层理和裂缝不发育,含油性受物性影响大;阜宁组III亚段为黑色泥岩与灰黑色油页岩、泥灰岩互层,厚度介于25~40 m,常有7个单层泥灰岩,电阻率有明显的尖峰状凸起,故称“七尖峰段”,页岩品质发生明显变化,常见油气显示;阜宁组IV亚段岩性由黑色泥岩夹泥灰岩组成,厚度普遍在50 m以上,俗称“四尖峰段”,电阻率基值明显抬高,整体含油性变好;阜宁组V亚段岩性为黑色泥



注:1 in=0.025 m;1 ft=0.304 8 m

图1 苏北盆地高邮凹陷花庄地区HY7井阜宁组二段测井响应特征

Fig. 1 Logging response characteristics of well HY7 in the second member of Funing Formation in Huazhuang area of Gaoyou Sag, Subei Basin

岩夹多层灰黑色泥灰岩,厚度在90 m以上,俗称“山字形段”,与IV亚段相比测井响应特征变化不大。

2 页岩油储层参数测井评价方法

2.1 岩性评价

苏北盆地阜二段页岩矿物种类多样,主要由黏土(平均体积分数为22.1%)、石英(平均体积分数为25.5%)、方解石(平均体积分数为14.5%)、白云石(平均体积分数为

13.4%)、斜长石(平均体积分数为18.2%)、钾长石(平均体积分数为2.4%)以及少量黄铁矿等组成。虽然岩性扫描测井可以通过测量地层元素的体积分数直接得到骨架矿物体积分数,但相对成本较高,因此基于常规测井进行岩性评价仍是研究重点。

建立阜二段页岩体积评价模型,将页岩体积分为骨架和孔隙流体两部分,骨架为泥质骨架、硅质骨架、灰质骨架。研究发现:无轴伽马、声波时差、补偿中子、补偿密度、电阻率对于不同岩性有不同的值域区间,可较好地地区分岩性,作为敏感曲线计算矿物组分。

基于阜二段507个岩心(岩屑)样品的全岩矿物分析结果,与测井曲线进行多元回归统计,得到泥质体积分数的地区拟合公式为:

$$V_{SH} = V_{SH1} \times A_{KTH} + V_{SH2} \times B_{AC} + V_{SH3} \times D_{CNL} - V_{SH4} \times E_{DEN} - V_{SH5} \times \log(F_{RD}) + V_{SH6} \quad (1)$$

式中: V_{SH} 为泥质含量,%; V_{SH1} 、 V_{SH2} 、 V_{SH3} 、 V_{SH4} 、 V_{SH5} 、 V_{SH6} 分别为泥质含量的系数; A_{KTH} 为无轴伽马,单位API; B_{AC} 为声波时差,单位 $\mu\text{s}/\text{m}$; D_{CNL} 为补偿中子,%; E_{DEN} 为补偿密度,单位 g/cm^3 ; F_{RD} 为深侧向电阻率,单位 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

用同样的方法计算硅质体积分数、灰质体积分数。将多元回归法计算得到的泥质体积分数、硅质体积分数、灰质体积分数与岩心分析结果进行比较,HY7井一致性较好,相对误差分别为10%、11.9%、14.8%(图2)。

2.2 储集性评价

阜二段泥页岩的储集空间主要为黏土矿物层(片)间

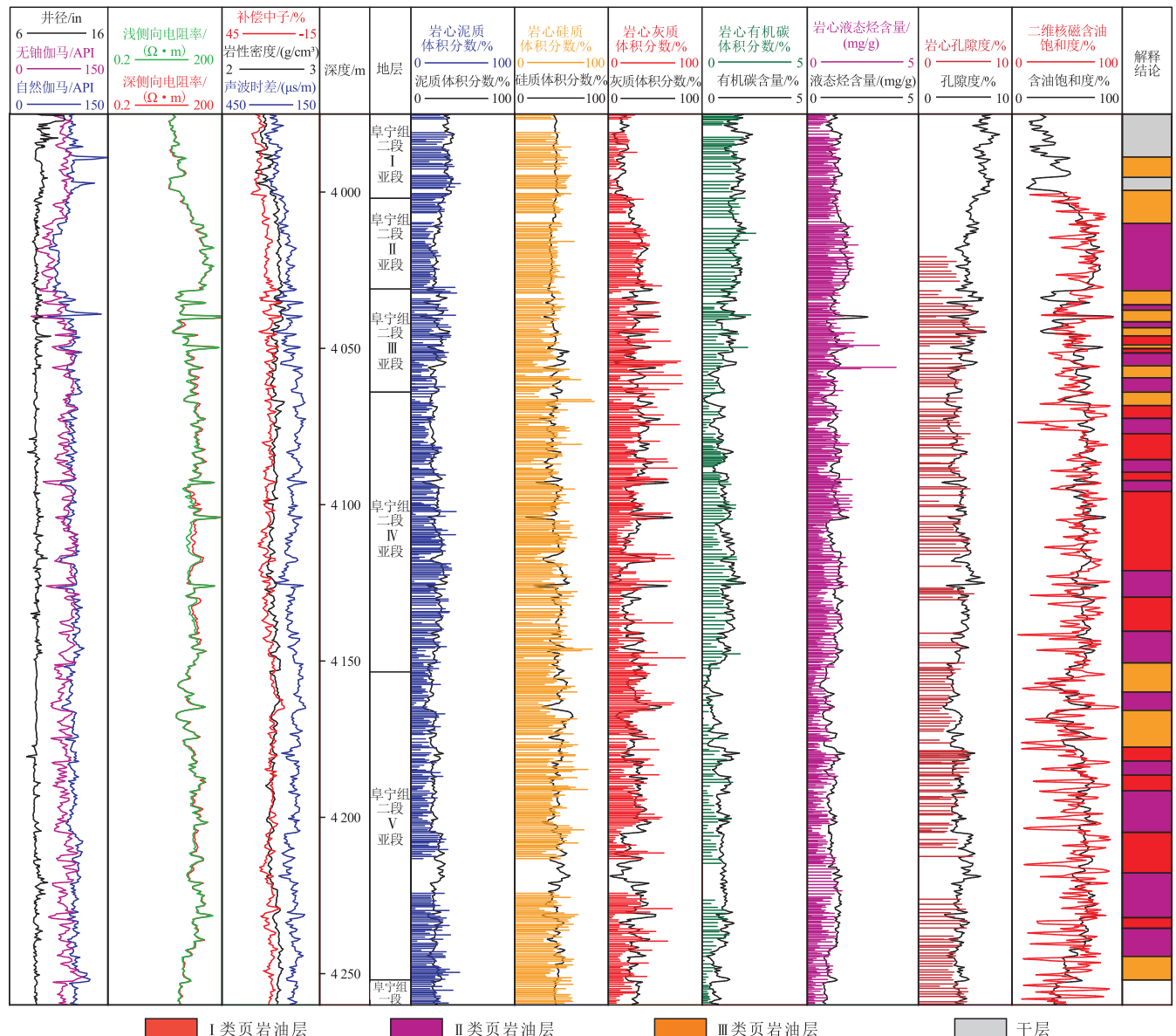


图2 苏北盆地高邮凹陷花庄地区HY7井测井处理结果与岩心实验结果对比情况

Fig. 2 Comparison between logging processing results and core experiment results of well HY7 in Huazhuang area of Gaoyou Sag, Subei Basin

孔、晶(粒)间孔、层理缝、构造微裂缝,发育少量的有机质孔和溶孔(图3)。裂缝局部发育,为高角度缝,可见网状缝,部分被灰质充填。

2.2.1 孔隙度

对于低孔、特低渗的泥页岩储层来说,矿物组成复杂多样,综合骨架值难以确定,因此常规孔隙度模型不能满足页岩油储层孔隙度定量计算的精度需要。

依据研究区的岩心实验分析等数据,利用测井曲线建立孔隙度计算模型。在进行孔隙度计算之前,首先对各测井曲线与岩心分析孔隙度结果做相关分析,寻找出对泥页岩孔隙度较为敏感、相关性最好的测井曲线,与岩心分析孔隙度进行多元回归拟合,建立孔隙度多元回归模型^[18]。阜二段优质页岩油层段主要表现为相对高的声波时差值、较高的中子值和较低的密度值特征。经过分析,三孔隙曲线、无轴伽马曲线与岩心分析孔隙度有较好的相关性,拟合公式为:

$$G_{\text{POR}} = p_1 \times B_{\text{AC}} + p_2 \times D_{\text{CNL}} + p_3 \times E_{\text{DEN}} + p_4 \times A_{\text{KTH}} + p_5 \quad (2)$$

式中: G_{POR} 为孔隙度,%; p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 、 p_5 分别为多元回归方程的系数。

将多元回归法计算得到的孔隙度与岩心分析孔隙度进行比较,相对误差为14.7%(图2)。此外,核磁孔隙度不受骨架岩性影响,利用核磁测井计算孔隙度精度更高。

2.2.2 裂缝发育程度

层理缝和构造缝作为储集空间和渗流通道,是页岩油高产的重要因素^[19]。根据产液情况分析,一般优质页岩

岩段裂缝发育,以高角度部分张开缝为主,其次为高角度闭合缝,对产能贡献相对较小的储层裂缝欠发育。

电成像测井可以很好地反映储层的层理、裂缝发育情况。图4为HY7井4 170~4 175 m电成像处理成果,该段岩性为灰黑色油斑泥岩,岩心可见裂缝较发育,多条高角度裂缝和水平裂缝交错,出筒破碎。成像图上显示层理发育,张开缝较发育,与岩心对应一致性较好。

2.3 含油性评价

2.3.1 地化特性

页岩的含油性评价包括总有机碳(TOC)含量、液态烃含量(S_1)、含油饱和度等参数的计算。分析各常规测井曲线与岩心分析TOC、 S_1 的关系,发现声波时差、电阻率与TOC、 S_1 在数值上具有较强的关联性,因此优选以上参数进行多元回归建模,定量计算TOC、 S_1 ,得到拟合公式如下:

$$\omega(\text{TOC}) = t_1 \times \text{Log}(H_{\text{RT}}) + t_2 \times B_{\text{AC}} + t_3 \quad (3)$$

$$S_1 = a \times \text{Log}(H_{\text{RT}}) + b \times B_{\text{AC}} + c \quad (4)$$

式中: $\omega(\text{TOC})$ 为总有机碳含量,%; t_1 、 t_2 、 t_3 分别为多元回归方程的系数; H_{RT} 为深电阻率,单位 $\Omega \cdot \text{m}$; B_{AC} 为声波时差,单位 $\mu\text{s}/\text{m}$; S_1 为液态烃含量,单位 mg/g ; a 、 b 、 c 分别为多元回归方程的系数。

将多元回归法计算得到的总有机碳含量、液态烃含量与岩心分析结果进行比较,一致性较好,相对误差分别为13.8%和9.38%(图3)。

从图3处理结果看,苏北盆地阜二段I、II、III亚段TOC含量相对较高,但实际高产层位主要位于阜二段IV、

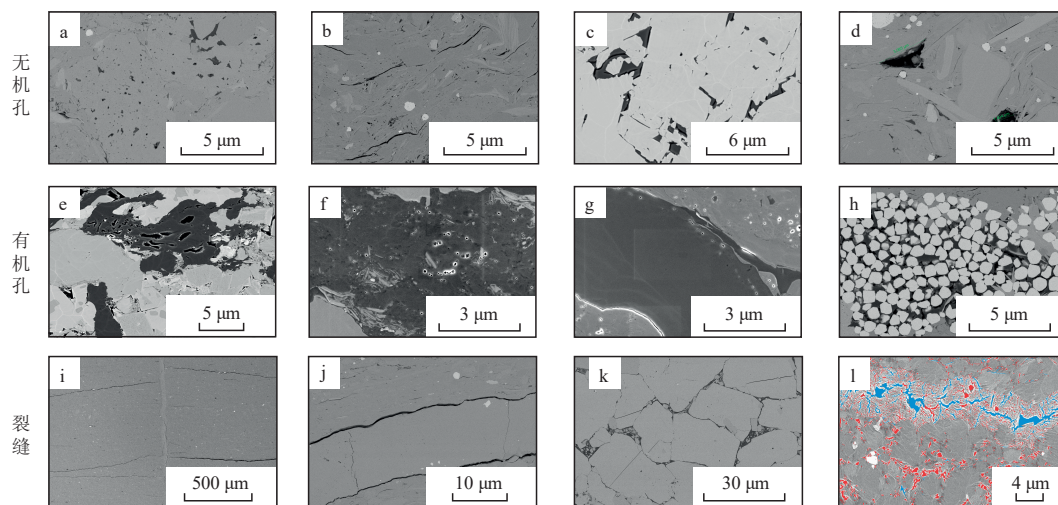


图3 苏北盆地高邮凹陷花庄地区HY7井页岩孔隙结构特征

Fig. 3 Characteristics of the shale pore structure of well HY7 in Huazhuang area of Gaoyou Sag, Subei Basin

V亚段,TOC数值平均仅为1.1%左右,普遍存在TOC含量较高,与含油较好的层段相背离的现象。总有机碳含量是表征烃源岩生烃能力的重要参数,与沉积环境和演化程度相关。但生烃中心不一定是产油中心,高TOC区不一定高产,低TOC区也不一定低产。因次,针对低有机碳页岩油,游离烃含量和含油饱和度是评价含油性的主要指标。

2.3.2 含油饱和度

页岩油储层作为自生自储的地层,矿物组分较为复杂,还含有一定的有机质。页岩的导电机理变得复杂,有机质、泥质含量、岩石骨架对电阻率的影响甚至可能超过流体的影响。不同岩性的地层可能电阻率差异很大,使得阿尔奇公式在页岩储层中计算含油饱和度适用性较差。西门杜公式在阿尔奇公式的基础上,考虑了泥质含量对导电性的影响,最大程度接近页岩储层的导电机理。方程如下:

$$S_w = \sqrt{\frac{aR_w}{R_1\phi^m} + \left(\frac{aR_w V_{sh}}{2R_{sh}\phi^m}\right)^2} - \frac{aR_w V_{sh}}{2R_{sh}\phi^m} \quad (5)$$

式中: S_w 为含水饱和度,%; a 、 m 为岩电实验参数; R_w 、 R_{sh} 、 R_1 分别为地层水电阻率、泥质电阻率、地层真电阻率,单位 $\Omega\cdot m$; ϕ 为孔隙度,%; V_{sh} 为泥质含量,%。

该方法可以在一定程度上解决含油饱和度计算的问题,但该公式中的岩电参数需要通过大量岩电实验获得。

二维核磁共振测井目前在致密油识别和评价中已经

被广泛地应用,可以进行连续的 T_1 、 T_2 谱测量,通过对 T_1 - T_2 谱进行聚类分析,能够确定复杂储层的流体性质和体积:包括可动和不可动油、自由、毛管束缚和黏土束缚水。从而通过可动油的孔隙体积,准确求取含油饱和度。

HY7井利用常规测井、二维核磁测井资料分别进行饱和度计算后,进行了对比(图3),可以看出两种方法计算结果整体趋势上较为一致。

2.4 可动性评价

烃类在储层条件下可以发生自由流动才将其列入可动烃类资源,页岩油可动性受多种因素控制,包括储层岩相、可动油含量、物性、流体性质等^[20]。在测井解释中,含油饱和指数、可动油孔隙度、裂缝发育程度是页岩油可动性评价的重要参数。

2.4.1 含油饱和指数(OSI)

目前对于烃源岩中可动油的表征缺乏比较明确的指标,北美海相页岩油常采用OSI作为可动性评价参数即地化热解液态烃含量与总有机碳含量的比值。高OSI意味着页岩油储集在满足固体有机质“吸附需求”后,依然有大量游离烃存在。

根据H2CHF井示踪剂的统计结果,产油贡献率大于5%,含水率小于40%的层段 S_1 大于1.5 mg/g,含油饱和指数大于100 mg/g,纹层发育、白云石条带发育;产油贡献率小于4%,含水率大于50%的层段 S_1 小于1.5 mg/g,含油饱和指数小于100 mg/g,粉砂岩条带发育(图5)。

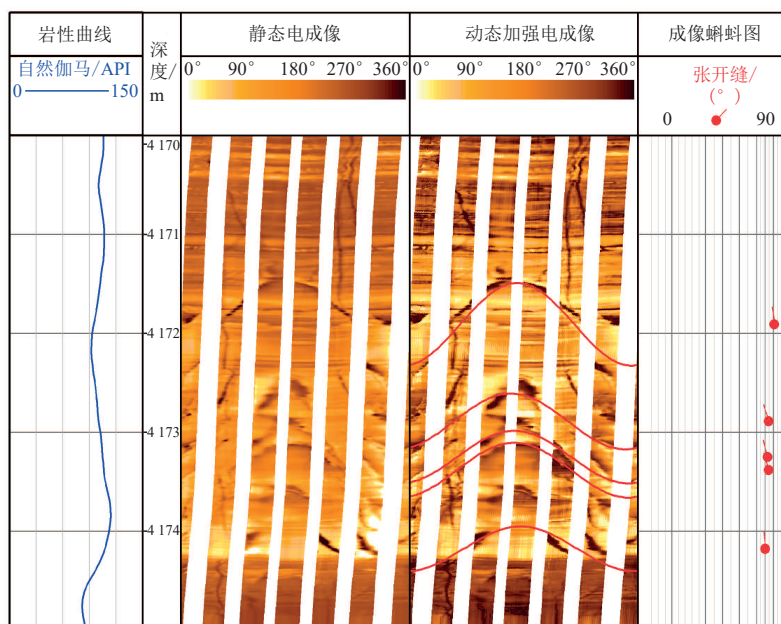


图4 苏北盆地高邮凹陷花庄地区HY7井页岩电成像测井图像特征

Fig. 4 Electrical imaging logging characteristics of the shale reservoir of well HY7 in Huazhuang area of Gaoyou Sag, Subei Basin

2.4.2 可动油孔隙度

二维核磁测井能够确定流体性质和体积:包括可动和不可动油、自由、毛管束缚和黏土束缚水。以HY7井为例,该井4 094~4 106 m核磁有效孔隙度介于2.1%~4.4%,可动油体积介于0.3%~2.2%,有效含油饱和度介

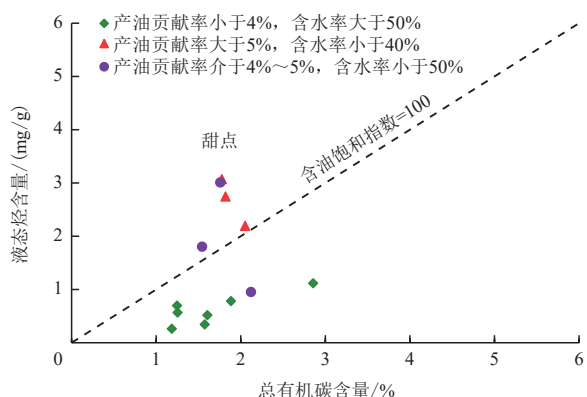


图5 苏北盆地H2CHF井单段产油贡献率与液态烃含量、总有机碳含量的关系

Fig. 5 Relationships of the contribution rate of single section oil production with liquid hydrocarbon content and TOC in well H2CHF, Subei Basin

于58.2%~74.9%。该段整体物性、含油性较好,可以看出I类层明显具有长 T_2 、 T_1 谱、可动油含量高、毛管水含量相对少的特征(图6)。

2.5 可压性评价

页岩油必须采用大型工程压裂手段使其渗流通道达到活跃状态,实现油气开采的目的。偶极声波测井可计算泊松比、弹性模量等岩石力学参数,并通过分地区、分岩性实验标定,实现从动态到静态参数的转换,进而准确计算岩石破裂压力、最大水平主应力、最小水平主应力等参数。

H101井地应力参数分析结果显示,测井计算结果与岩心实测结果较为吻合(图7)。通过井壁稳定性分析地应力模型进行验证,模拟井壁情况与实际井眼情况较为一致,说明该应力计算模型基本可靠,为后续水平井精细靶窗选取和压裂设计提供重要依据。

页岩脆性是影响页岩油储层压裂的关键因素,也是判别页岩油储层工程“甜点”区的重要指标之一。页岩油储层的脆性指数越高,越有利于地层裂缝发育,越容易通过人工改造形成网状裂缝。

在仅有常规测井资料的情况下,我们可以利用岩石

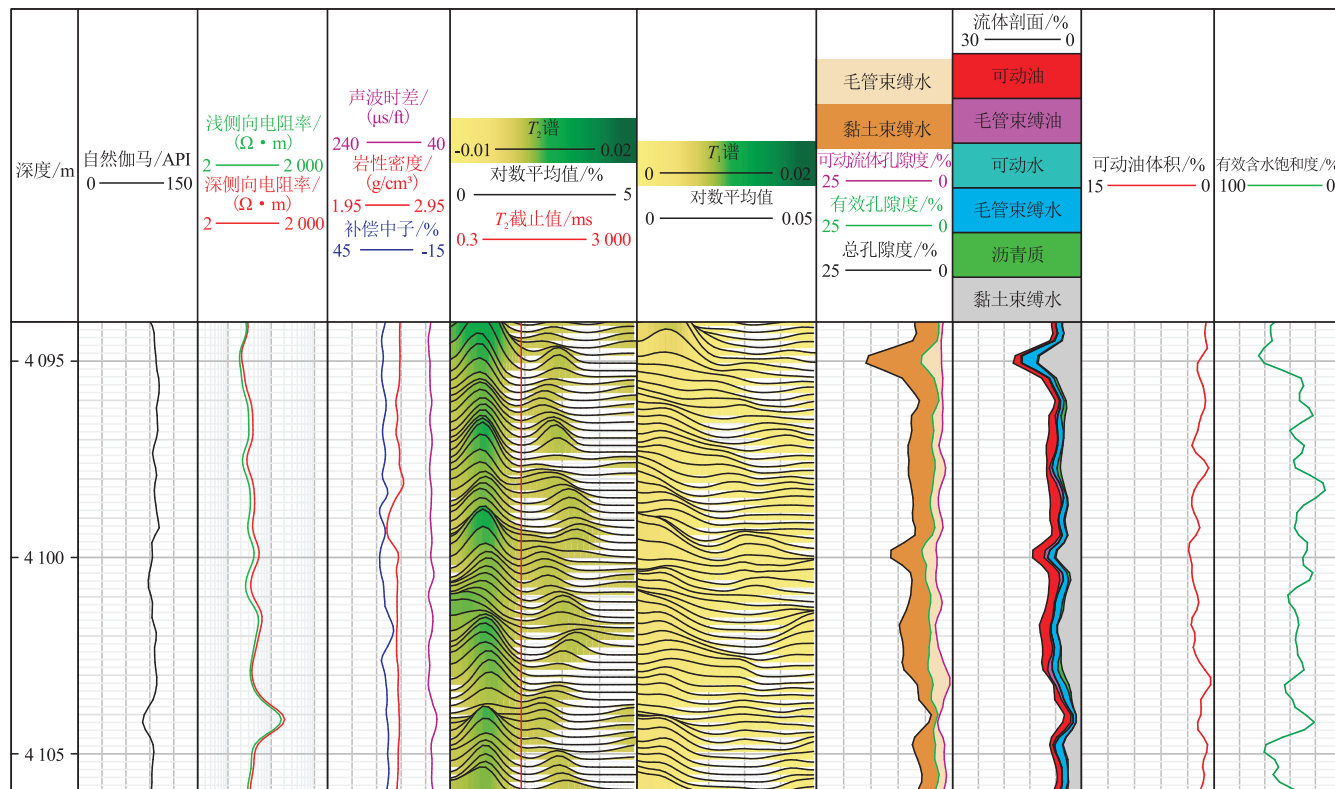


图6 苏北盆地高邮凹陷花庄地区HY7井二维核磁可动性分析成果图

Fig. 6 Results of NMR mobility analysis of well HY7 in Huazhuang area of Gaoyou Sag, Subei Basin

矿物组分含量计算脆性指数。阜二段页岩脆性矿物主要为长英质、灰云质,采用脆性矿物与总矿物的比值来表征页岩的脆性。脆性矿物含量越高,则代表储层脆性越好。

$$B_{YB} = \frac{V_{\text{硅质}} + V_{\text{灰质}}}{1 - G_{\text{POR}}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: B_{YB} 为脆性指数,%; $V_{\text{硅质}}$ 为硅质含量,%; $V_{\text{灰质}}$ 为灰质含量,%。

在有偶极声波测井资料的情况下,可以利用岩石力学参数如泊松比、杨氏模量计算脆性指数,公式如下^[20]:

$$B_{YB} = \frac{I_V + I_E}{2} \quad (7)$$

式中: $I_V = 100 \frac{V - V_{\text{max}}}{V_{\text{min}} - V_{\text{max}}}$, $I_E = 100 \frac{E - E_{\text{max}}}{E_{\text{min}} - E_{\text{max}}}$ 。 V 为泊松比; E 为杨氏模量,单位MPa; E_{max} 、 E_{min} 分别为杨氏模量计算段相对最大值和最小值,单位MPa; V_{max} 、 V_{min} 分别为泊松比计算段相对最大值和最小值。

3 页岩油“甜点”综合评价及应用

3.1 页岩油“甜点”综合评价

页岩油综合评价包括地质“甜点”评价和工程“甜点”评价^[21-23]。地质“甜点”评价主要是关注烃源岩品质、储集性能、含油性、可动性、纹层和裂缝发育情况等综合评价,工程“甜点”评价主要是优选矿物组分合适、脆性指数高、可压性好、应力差较小、各向异性弱、有利于压裂造缝的层段^[24-25]。

通过岩心实验分析资料标定,建立合理的测井解释模型,并根据试油结果进行反馈,总结规律,优选指标,制定适用于各区块的页岩油储层综合评价标准(表1)。

在实际储层评价时,对于同一储层,如果评价I、II、III类油层出现评价要素交叉矛盾时,若相差1个级别,原

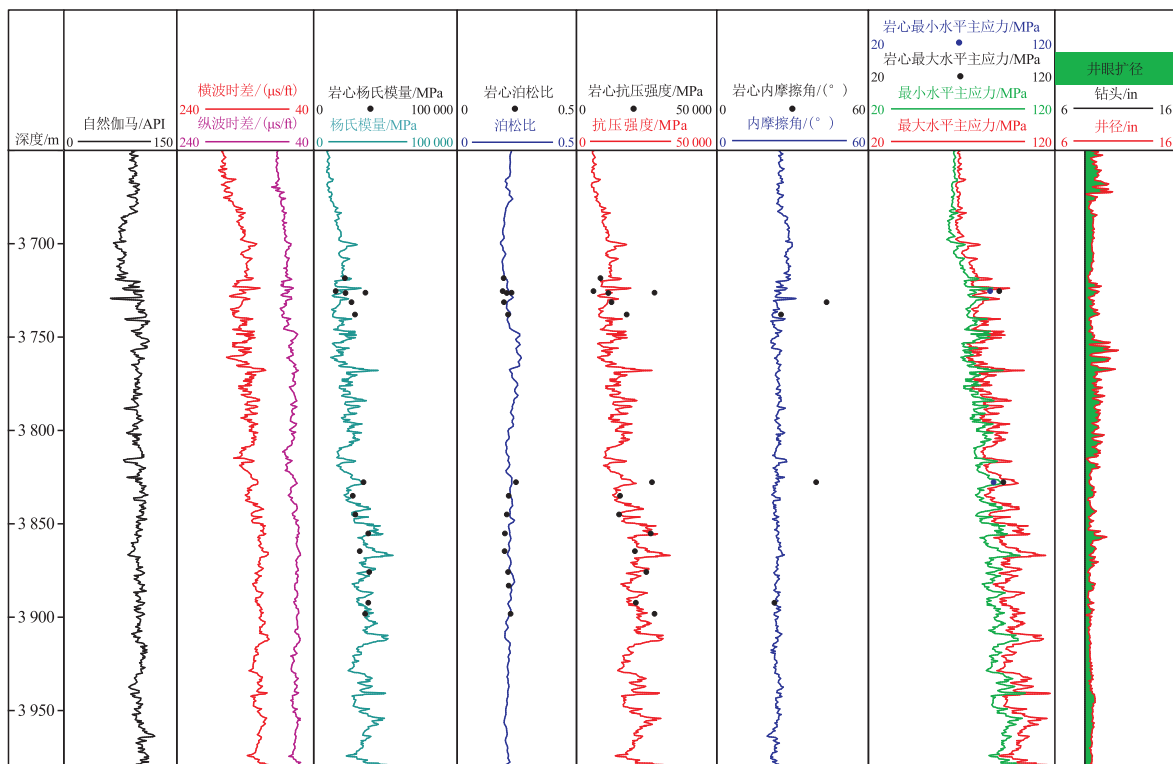


图7 苏北盆地高邮凹陷花庄地区H101井地应力分析结果

Fig. 7 Results of in-situ stress analysis of well H101 in Huazhuang area of Gaoyou Sag, Subei Basin

表1 苏北盆地高邮凹陷花庄地区阜二段页岩油储层综合评价标准

Table 1 Comprehensive evaluation criteria for shale oil reservoirs in the second member of Funing Formation in Huazhuang area of Gaoyou Sag, Subei Basin

储层类型	黏土含量/%	孔隙度/%	总有机碳含量/%	液态烃含量/(mg/g)	含油饱和度/%	脆性矿物指数/%	裂缝发育情况
I类页岩油层	<30	>5	>1.5	>1.5	>50	>60	发育
II类页岩油层	30~40	3~5	1.0~1.5	1.0~1.5	40~50	50~60	较发育
III类页岩油层	>40	<3	<1.0	<1.0	<40	<50	不发育

则上以孔隙度、含油饱和度、 S_1 为主控因素;若相差2个级别时,可降低1个级别解释。

对苏北盆地HY7井进行参数计算,划分储层类型。该井4 094.0~4 116.0 m计算的黏土含量、孔隙度、液态烃含量、含油饱和度、脆性矿物指数均达到I类页岩油层的解释标准,为最优“甜点”段(图3)。以该段为靶窗部署水平井,投产半年多油气当量突破 1×10^4 t。

3.2 水平井应用实例

针对苏北盆地断块型页岩油藏,准确判断水平井靶窗钻遇情况及断层位置,对于后期压裂方案设计尤为重要。阜二段泥页岩测井响应特征区分度不显著,井眼在目的层中穿行很长,各小层伽马曲线特征差异不明显,曲线形态难以直接和导眼井去对比。如果水平段井轨迹多次上下调整,或者地层产状发生变化,会使得利用常规曲线进行地层分析比直井困难很多。

成像测井资料能更为直观精细地反映地层岩性与构造变化情况,对于地层对比和断层识别起到重要作用。通过成像资料,不仅可以有效识别出断层,还可以分析出井轨迹相对于地层的钻进方向。钻井轨迹相对于地层向下出层时,在成像上为“哭脸”的特征;反之,为“笑脸”的特征。

HY1HF井在成像测井成果图上识别出两条断层。

在4 018、4 454、4 888、5 318 m成像上存在4个明显的钻进方向反切点,反切点上下曲线形态对称,图像对称,视倾角对称。结合以上信息,将常规测井曲线与导眼井进行精细对比,绘制井眼轨迹,得到较为可靠的地层分析结果(图8)。

经过处理分析,HY1HF井阜二段页岩测井解释划分20层,累计视厚1 939.0 m。其中I类页岩3层厚度为303.7 m;II类页岩8层厚度为669.2 m;III类页岩8层厚度为955.6 m;干层10.5 m。该井压裂后放喷排采,最高日产油量为29.7 t,实现了地区页岩油的重大勘探突破。

4 结论

1) 在岩心实验的基础上,充分利用自然伽马能谱、电阻率、三孔隙度等常规测井曲线,通过多种方法,建立计算页岩油储层矿物组分含量、孔隙度、液态烃含量、总有机碳含量、含油饱和度等关键地质参数的解释模型,计算结果与实验数据误差较小。

2) 电成像、偶极声波、二维核磁等特殊测井方法能有效解决页岩地层的岩相识别、裂缝分析、断层识别、可动性分析、可压性分析等问题,在苏北复杂断块型页岩油的测井评价中发挥了重要的作用。

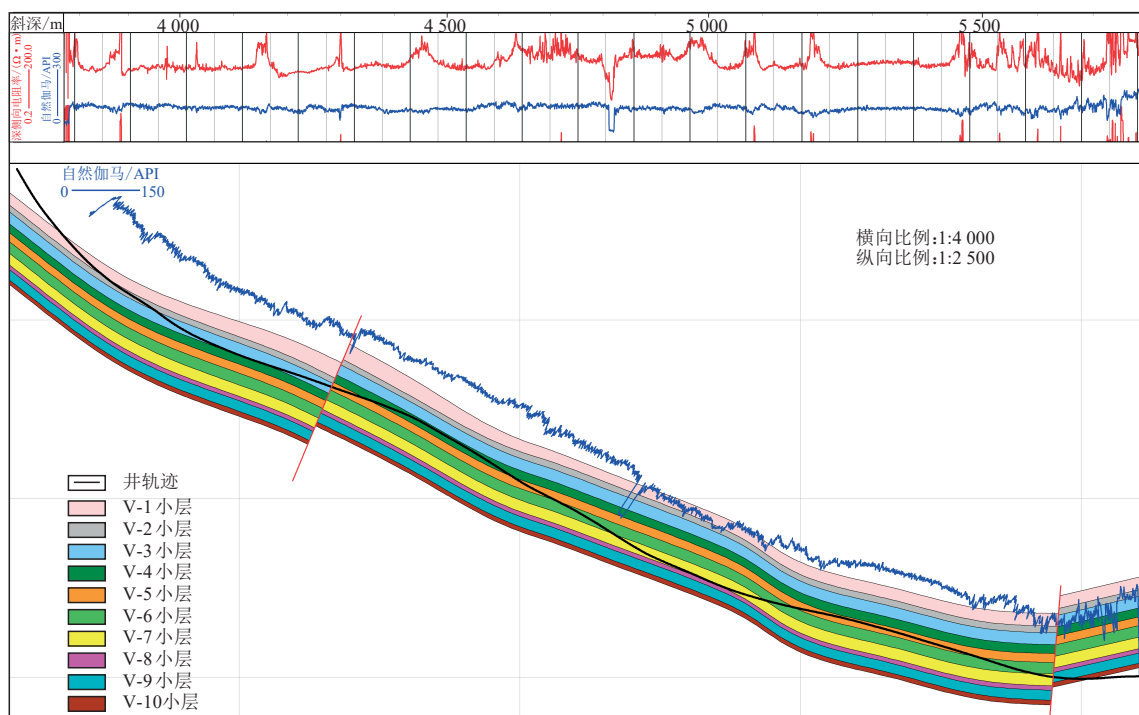


图8 苏北盆地高邮凹陷花庄地区HY1HF井井眼轨迹

Fig. 8 Wellbore trajectory analysis of well HY1HF in Huazhuang area of Gaoyou Sag, Subei Basin

3) 通过优选地质“甜点”(岩性、含油性、可动性、物性)和工程“甜点”(脆性指数、岩石力学参数、应力差异、各向异性),构建页岩油“甜点”段综合评价方法,最终指示页岩油勘探开发有利靶窗。生产实践证明,优选的“甜点”段试油效果较好,该技术在苏北盆地具有良好的适用性。

参考文献

- [1] 金之钧,王冠平,刘光祥,等.中国陆相页岩油研究进展与关键科学问题[J].石油学报,2021,42(7):821-835.
JIN Zhijun, WANG Guanping, LIU Guangxiang, et al. Research progress and key scientific issues of continental shale oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(7): 821-835.
- [2] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等.中国陆相页岩油地质特征与勘探实践[J].地质学报,2022,96(1):155-171.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong, et al. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(1): 155-171.
- [3] 何文渊,蒙启安,冯子辉,等.松辽盆地古龙页岩油原位成藏理论认识及勘探开发实践[J].石油学报,2022,43(1):1-14.
HE Wenyuan, MENG Qi'an, FENG Zihui, et al. In-situ accumulation theory and exploration & development practice of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(1): 1-14.
- [4] 刘惠民.济阳坳陷页岩油勘探实践与前景展望[J].中国石油勘探,2022,27(1):73-87.
LIU Huimin. Exploration practice and prospect of shale oil in Jiyang Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 73-87.
- [5] 赵贤正,蒲秀刚,周立宏,等.深盆湖相区页岩油富集理论、勘探技术及前景:以渤海湾盆地黄骅坳陷古近系为例[J].石油学报,2021,42(2):143-162.
ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, ZHOU Lihong, et al. Enrichment theory, exploration technology and prospects of shale oil in lacustrine facies zone of deep basin: a case study of the Paleogene in Huanghua depression, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 143-162.
- [6] 何文渊.松辽盆地古龙凹陷页岩油储层中的纳孔纳缝及其原位成藏理论初探[J].地学前缘,2023,30(1):156-173.
HE Wenyuan. Preliminary study on nanopores, nanofissures, and in situ accumulation of Gulong shale oil[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(1): 156-173.
- [7] 方志雄,肖秋生,张殿伟,等.苏北盆地陆相“断块型”页岩油地质特征及勘探实践[J].石油与天然气地质,2023,44(6):1468-1478.
FANG Zhixiong, XIAO Qiusheng, ZHANG Dianwei, et al. Geological characteristics and exploration of continental fault-block shale oil reservoirs in the Subei Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1468-1478.
- [8] 芮晓庆,周圆圆,李志明,等.苏北盆地阜宁组源储特征及页岩油勘探方向探讨[J].海洋地质与第四纪地质,2020,40(6):133-145.
RUI Xiaoqing, ZHOU Yuanyuan, LI Zhiming, et al. Characteristics of source rocks and reservoirs of the Funing Formation in the Subei Basin and their bearing on future shale oil exploration[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2020, 40(6): 133-145.
- [9] 荆晓明.苏北盆地溱潼凹陷古近系阜二段页岩油甜点评价[J].非常规油气,2023,10(3):31-38.
JING Xiaoming. Evaluation of shale oil sweet spots in the second member of Paleogene Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin [J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(3): 31-38.
- [10] 高玉巧,蔡潇,夏威,等.苏北盆地古近系阜宁组二段页岩油储集空间特征及甜点段评价:以溱潼凹陷QY1井为例[J].石油实验地质,2024,46(5):916-926.
GAO Yuqiao, CAI Xiao, XIA Wei, et al. Characteristics of reservoir space and sweet spot evaluation of shale oil in the second member of Paleogene Funing Formation in Subei Basin: A case study of well QY1 in Qintong Sag[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(5): 916-926.
- [11] 云露,何希鹏,花彩霞,等.苏北盆地溱潼凹陷古近系陆相页岩油成藏地质特征及资源潜力[J].石油学报,2023,44(1):176-187.
YUN Lu, HE Xipeng, HUA Caixia, et al. Accumulation characteristics and resource potential of Paleogene continental shale oil in Qintong sag of Subei Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 176-187.
- [12] 朱相羽,段宏亮,孙雅雄.苏北盆地高邮凹陷古近系陆相页岩油勘探突破及意义[J].石油学报,2023,44(8):1206-1221.
ZHU Xiangyu, DUAN Hongliang, SUN Yaxiong. Breakthrough and significance of Paleogene continental shale oil exploration in Gaoyou sag, Subei Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(8): 1206-1221.
- [13] 舒良树,王博,王良书,等.苏北盆地晚白垩世—新近纪原型盆地分析[J].高校地质学报,2005(4):534-543.
SHU Liangshu, WANG Bo, WANG Liangshu, et al. Analysis of northern Jiangsu prototype basin from Late Cretaceous to Neogene[J]. Geological Journal of China Universities, 2005(4): 534-543.
- [14] 邱旭明,刘玉瑞,傅强.苏北盆地上白垩统一第三系层序地层与沉积演化[M].北京:地质出版社,2006.
QIU Xuming, LIU Yurui, FU Qiang. Stratigraphic sequence and sedimentary evolution of Tertiary and Upper Cretaceous in Subei Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- [15] 咎灵,骆卫峰,马晓东.苏北盆地溱潼凹陷阜二段烃源岩生烃潜力及形成环境[J].非常规油气,2016,6(3):1-8.
ZAN Ling, LUO Weifeng, MA Xiaodong. Hydrocarbon generation potential and genetic environments of second member of Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2016, 6(3): 1-8.
- [16] 段宏亮,孙雅雄,杨保良.苏北盆地高邮凹陷古近系阜宁组二段页岩油富集主控因素[J].石油实验地质,2024,46(3):441-450.
DUAN Hongliang, SUN Yaxiong, YANG Baoliang. Main controlling factors of shale oil enrichment in second member of Paleogene Funing Formation in Gaoyou Sag of Subei Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(3): 441-450.
- [17] 咎灵,白鸾羲,印燕铃,等.苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段页岩油基本特征及成因分析[J].石油实验地质,2023,45(2):356-365.
ZAN Ling, BAI Luanxi, YIN Yanling, et al. Basic characteristics and genesis analysis of shale oil in the second member of Paleogene Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(2): 356-365.
- [18] 匡立春,侯连华,杨智,等.陆相页岩油储层评价关键参数及方法[J].石油学报,2021,1(1):1-14.
KUANG Lichun, HOU Lianhua, YANG Zhi, et al. Key parameters and methods of lacustrine shale oil reservoir characterization[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 1(1): 1-14.

- [37] 杨勇,张世明,吕琦,等.中国东部陆相断陷盆地页岩油开发理论认识与技术实践:以济阳页岩油为例[J].油气地质与采收率,2024,31(5):1-15.
YANG Yong, ZHANG Shiming, LYU Qi, et al. Theoretical understanding and technical practice of shale oil development in continental faulted basins in eastern China: A case study of Jiyang shale oil[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(5): 1-15.
- [38] BERGER A, LOUTRE M F, LASKAR J. Stability of the astronomical frequencies over the earth's history for paleoclimate studies[J]. Science, 1992, 255(5044): 560-566.
- [39] LI M S, HINNOV L, KUMP L. Acycle: Time-series analysis software for paleoclimate research and education[J]. Computers & Geosciences, 2019, 127: 12-22.
- [40] 石巨业,金之钧,刘全有,等.天文旋回在页岩油勘探及富有机质页岩地层等时对比中的应用[J].地学前缘,2023,30(4):152-159.
SHI Juye, JIN Zhijun, LIU Quanyou, et al. Application of astronomical cycles in shale oil exploration and the high-precision stratigraphic isochronous comparison of organic-rich fine-grain sedimentary rocks[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 152-159.
- [41] MEYERS S R, SAGEMAN B B. Quantification of deep-time orbital forcing by average spectral misfit[J]. American Journal of Science, 2007, 307(5): 773-792.
- [42] 石巨业,金之钧,刘全有,等.基于米兰科维奇理论的湖相细粒沉积岩高频层序定量划分[J].石油与天然气地质,2019,40(6):1205-1214.
SHI Juye, JIN Zhijun, LIU Quanyou, et al. Quantitative classification of high-frequency sequences in fine-grained lacustrine sedimentary rocks based on Milankovitch theory[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1205-1214.
- [43] 宋翠玉,吕大炜.米兰科维奇旋回时间序列分析法研究进展[J].沉积学报,2022,40(2):380-395.
SONG Cuiyu, LYU Dawei. Advances in Time Series Analysis Methods for Milankovitch Cycles[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(2): 380-395.
- [44] LAI J, WANG G W, FAN Q X, et al. Geophysical well-log evaluation in the era of unconventional hydrocarbon resources: A review on current status and prospects[J]. Surveys in Geophysics, 2022, 43: 913-957.
- [45] LI M S, KPUMP L R, HINNOV L A, et al. Tracking variable sedimentation rates and astronomical forcing in Phanerozoic paleoclimate proxy series with evolutionary correlation coefficients and hypothesis testing[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 501: 165-179.

(编辑 李青)

(上接第27页)

- [19] 李国欣,刘国强,侯雨庭,等.陆相页岩油有利岩相优选与压裂参数优化方法[J].石油学报,2021,42(11):1405-1416.
LI Guoxin, LIU Guoqiang, HOU Yuting, et al. Optimization method of favorable lithofacies and fracturing parameter for continental shale oil[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(11): 1405-1416.
- [20] 马林.页岩储层关键参数测井评价方法研究[J].油气藏评价与开发,2013,3(6):66-71.
MA Lin. Study on key parameters logging evaluation methods of shale reservoir[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2013, 3(6): 66-71.
- [21] 夏宏泉,赖俊,李高仁,等.基于测井资料的页岩油储层甜点预测[J].西南石油大学学报(自然科学版),2021,43(4):199-207.
XIA Hongquan, LAI Jun, LI Gaoren, et al. Sweet spot prediction of shale oil reservoir based on logging data[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2021, 43(4): 199-207.
- [22] 杨智,唐振兴,李国会,等.陆相页岩层系石油富集区带优选、甜点区段评价与关键技术应用[J].地质学报,2021,95(8):2257-2272.
YANG Zhi, TANG Zhenxing, LI Guohui, et al. Optimization of enrichment plays, evaluation of sweet area and application of key technologies for the continental shale strata oil in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(8): 2257-2272.
- [23] 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):1084-1091.
LIU Yahui, WANG Caizhi, LIU Zhonghua, et al. A logging method for evaluating oil-bearing property of Jimsar shale oil: Case study of Sag in Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(7): 1084-1091.
- [24] 李志明,刘雅慧,何晋译,等.陆相页岩油“甜点”段评价关键参数界限探讨[J].石油与天然气地质,2023,44(6):1453-1467.
LI Zhiming, LIU Yahui, HE Jinyi, et al. Limits of critical parameters for sweet-spot interval evaluation of lacustrine shale oil[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1453-1467.
- [25] 白斌,戴朝成,侯秀林,等.松辽盆地白垩系青山口组页岩层系非均质地质特征与页岩油甜点评价[J].石油与天然气地质,2023,44(4):846-856.
BAI Bin, DAI Chaocheng, HOU Xiulin, et al. Geological heterogeneity of shale sequence and evaluation of shale oil sweet spots in the Qingshankou Formation, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 846-856.

(编辑 徐佩)