

陆相页岩油储层可动油含量测井评价方法

——以苏北盆地古近系阜宁组二段页岩油为例

李军, 邹友龙, 路菁

(中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100026)

摘要:近年来中国东部陆相盆地页岩油勘探开发取得重大进展,但制约页岩油产能评价的关键因素是油可动性。研究苏北盆地页岩油提出了二维核磁共振法和常规测井法2种测井评价页岩可动油含量的方法。建立了二维核磁共振测量纵向弛豫时间(T_1)-横向弛豫时间(T_2)可动油识别图版,评价吸附油及束缚水等流体类型,通过游离烃含量(S_1)与沉积环境、沉积构造的关系及测井响应的关联性,分析常规测井电阻率及声波时差对游离烃含量、有机质含量响应灵敏度,建立了游离烃含量测井定量评价模型。提出了测井资料评价游离烃含量的方法,计算可动油饱和度及含油量。咸化环境和纹层状构造有利于有机质成烃和运移,游离烃含量高。

关键词:含油性;可动性;可动油含量;测井评价;页岩油;苏北盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Well-log-based assessment of movable oil content in lacustrine shale oil reservoirs: A case study of the 2nd member of the Paleogene Funing Formation, Subei Basin

LI Jun, ZOU Youlong, LU Jing

(Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100026, China)

Abstract: Recent years have witnessed significant progress in the exploration and exploitation of shale oil in continental basins in East China. However, the assessment of shale oil productivity is largely hindered by the evaluation of oil mobility. By investigating the shale oil in the Subei Basin, we propose two well-log-based methods for assessing the movable oil content in shales: the two-dimensional nuclear magnetic resonance (2D NMR) method and the conventional logging. An identification plot for movable oil is thereby established using the 2D NMR-derived longitudinal and transverse relaxation time (T_1 and T_2 , respectively), acting to assess fluid types like adsorbed oil and irreducible water. By exploring the relationships of free hydrocarbon content (S_1) with sedimentary environments and structures, along with the correlation between S_1 and logging responses, we analyze the response sensitivities of conventional well-log-derived resistivity and sonic interval transit time to S_1 and organic matter content, and establish a well-log-based quantitative assessment model for S_1 . Furthermore, a method for assessing S_1 using log data is developed to calculate both movable oil saturation and oil content. The results reveal that saline environments and lamellar structures promote hydrocarbon generation and migration from organic matter, resulting in high S_1 .

Key words: oil-bearing property, mobility, movable oil content, well-log-based assessment, shale oil, Subei Basin

引用格式:李军, 邹友龙, 路菁. 陆相页岩油储层可动油含量测井评价方法——以苏北盆地古近系阜宁组二段页岩油为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(3): 816-826. DOI: 10.11743/ogg20240317.

LI Jun, ZOU Youlong, LU Jing. Well-log-based assessment of movable oil content in lacustrine shale oil reservoirs: A case study of the 2nd member of the Paleogene Funing Formation, Subei Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(3): 816-826. DOI: 10.11743/ogg20240317.

收稿日期: 2024-01-30; 修回日期: 2024-05-30。

第一作者简介: 李军(1967—), 男, 教授, 测井资料解释与评价。E-mail: lijun67.syky@sinopec.com。

通信作者简介: 邹友龙(1988—), 男, 博士、副研究员, 岩石物理与测井数据处理及解释方法。E-mail: zouyl.syky@sinopec.com。

页岩油指赋存于富有机质、纳米级孔隙为主的页岩地层中的石油聚集,页岩既是烃源岩又是储集岩,为自生自储型石油聚集,一般需要压裂改造才具有工业产能^[1-7]。页岩油相态复杂,通常以游离态、吸附态和互溶态形式共存,在目前技术条件下游离油是工业产能的主要贡献者^[8-9]。因此,确定游离油含量是页岩油评价的关键^[10]。

地质上通常采用热解法和驱替实验法定量评价可动油含量,而在区域评价和甜点选层评价中则采用综合分析方法定性评价页岩油可动性。分步热解法确定可动油含量是产业界主流方法,已广泛应用于页岩油评价中。赋存于页岩大孔隙和微裂缝内的游离油相对于矿物、干酪根表面及微孔隙壁的吸附油,分子量较小,容易热释出来。通过设置不同温阶分步热解,区分不同吸附油、游离油等不同赋存状态石油,进而定量评价可动油含量^[11-15]。蒋启贵等认为 200 °C 以下热释烃为轻质油组分,为现实的可动油含量(S_{1-1}); 200 ~ 350 °C 热释烃为轻-中质油组分,为最大可能可动油含量(S_{1-2}); 350 ~ 450 °C 热释烃为重烃、沥青和胶质等,为吸附油; 450 ~ 600 °C 热释烃为干酪根再生烃,为剩余生烃潜力。 S_{1-1} 与 S_{1-2} 之和为可动油含量 S_1 (单位质量页岩中的轻质油含量,mg/g)^[11]。生产中采用含油饱和度指数表征页岩油可动性^[9]。实验室内采用离心驱替实验或者离心-核磁共振实验确定页岩孔隙中游离油比例和可动油流动最小孔径^[16]。

影响页岩油可动性的地质因素主要包括孔隙结构、页岩组分和流体本身性质(流体组分、密度、黏度等)。在地质选区选层评价中,将这些因素归结为沉积相、烃源岩性质和成熟度等宏观地质要素,综合这些宏观地质要素对可动油进行定性分类评价^[16]。

目前,利用常规测井资料评价可动油含量尚无成熟的技术。基于总饱和度和束缚饱和度的传统砂岩储层流体可动饱和度测井评价并不适用于页岩可动油评价。在岩性和烃源岩识别基础上,将录井、测试等信息与测井信息关联,利用测井曲线重叠和径向差异定性判断页岩油可动性。如蒋云箭^[17]利用双侧向测井径向差异定性济阳坳陷页岩油可动性,并进行分级评价,与测试结果对比,符合度高,取得良好效果;也有学者依据常规测井评价成熟度和地层压力等参数,借此间接评价页岩油可动性^[18]。目前尚无定量评价页岩油含量的模型和方法。

岩石核磁共振测量是一种无损测量技术,可以反复对岩石进行多方式扫描测量而不破坏样品,而且既

可以在地面测量也可以在井下测量。核磁共振测定岩石孔隙中氢核磁弛豫特征,通过标定和反演计算确定页岩总孔隙度、有效孔隙度和可动及束缚孔隙度。一般利用一维核磁共振技术确定页岩孔隙度和孔隙结构,利用二维核磁共振确定孔隙中各种流体性质及其含量,如束缚油含量、可动油及束缚水含量^[19-23]。从技术上讲,目前只有核磁共振技术能够实现可动油的直接测量和评价,是页岩油评价的有力手段,并且正在行业界初步推广应用。但是页岩油类型多、非均质性强、孔隙结构复杂等客观地质条件,以及人们对页岩油认识差异和实验手段限制,目前利用二维核磁定量评价页岩油模型、确定流体界限值和计算方法等尚无统一标准,各种方法还在不断完善中。

针对东部苏北盆地古近系阜宁组二段(阜二段)页岩油,基于行业内通用温阶分步热解技术,确定可动油和吸附油含量,利用常规测井和二维核磁共振测井定量评价可动油方法,在实践中应用,助力页岩油资源评价和高效勘探开发。

1 二维核磁可动油定量评价

1.1 二维核磁页岩油识别模板

页岩储层岩性矿物组分、孔隙结构和流体组分复杂,导致常规测井流体识别难,而核磁测量孔隙中流体的氢核信号,几乎不受岩石骨架影响,在流体评价方面具有特殊优势。二维核磁同时测量孔隙中流体的横向弛豫时间(T_2)和纵向弛豫时间(T_1)性质获得二维 T_1 - T_2 谱。由于不同流体的 T_1 和 T_2 性质具有一定差异,因此根据流体在二维谱上的分布位置可以相对有效地对页岩储层流体进行识别和定量评价。各流体组分含量的计算可采用截止值方法,利用 T_1 、 T_2 和 T_1/T_2 截止值,将二维 T_1 - T_2 谱划分为若干区域分别对应不同的流体,对每个区域内的核磁孔隙度累加即为该流体组分对应的孔隙度。目前,大多数学者只给定了页岩储层中各流体组分在二维核磁 T_1 - T_2 谱上的相对位置分布,如图1所示^[19]。实际应用中,针对不同研究区,需采用不同的截止值参数。

采用岩心实验刻度截止值参数可提高各流体组分定量评价的精度。与常规储层不同,页岩油储层的流体组分更为复杂,可将孔隙中的流体分为6种类型:干酪根沥青质等、黏土束缚水、毛管束缚水、可动水、束缚油与可动油^[19]。针对页岩油储层,设计实施了岩心核

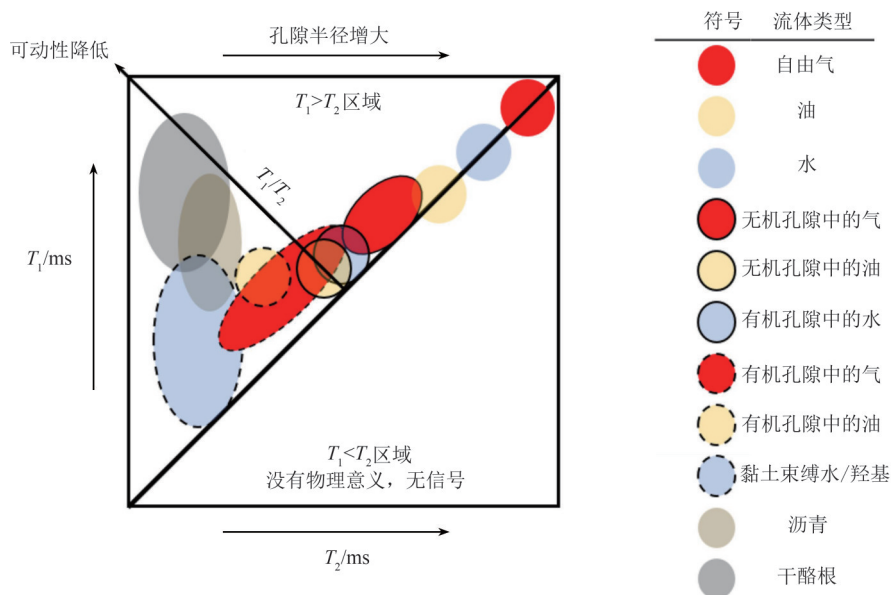


图1 不同条件下页岩储层中各流体组分的二维核磁 T_1 - T_2 谱(根据文献[19]修改)

Fig. 1 2D NMR T_1 - T_2 spectrum involving different fluid types and conditions (modified after reference [19])

磁共振与多温热解并行实验(实验方案如图2所示), 确定各流体组分在二维 T_1 - T_2 谱上的响应特征及其截止值参数。多温热解实验采用蒋启贵等实验方案^[11-12], 改进现有 Rock-Eval 6 热解和热解色谱方法, 结合样品溶剂抽提前、后热解对比实验和不同类型样品的综合分析, 建立不同赋存状态页岩油热释法: 在 200 °C 恒温 1 min 测试 S_{1-1} , 然后以 25 °C/min 升温至

350 °C, 并恒温 1 min 测试 S_{1-2} , 再以 25 °C/min 升温至 450 °C, 并恒温 1 min 测试 S_{2-1} , 最后再以 25 °C/min 升温至 600 °C, 测试 S_{2-2} 。结合色谱-质谱分析等分子化学分析手段, 实现不同赋存状态页岩油定量表征。基于该方案, 本文利用热解确定不同赋存状态烃组分时, 采用的温阶分别为 200, 350, 450 和 600 °C。

实验过程同步测量升温热解过程中岩心不同赋存

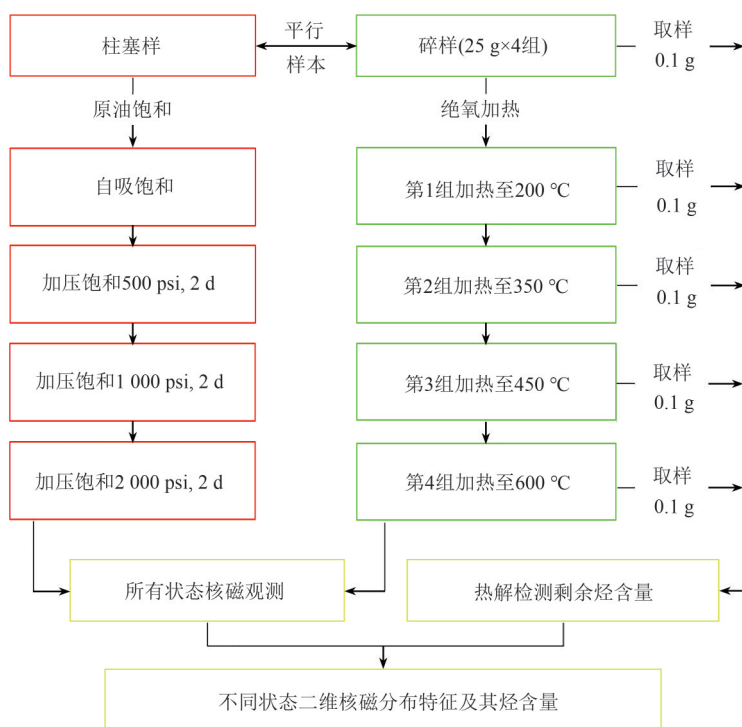


图2 岩心样品核磁共振与多温热解并行实验方案

Fig. 2 A parallel experiment scheme for the NMR measurement and programmed pyrolysis of cores

状态烃组分的二维核磁 T_1 - T_2 谱的谱峰分布位置与幅度变化,测量结果如图3所示,干酪根(S_{2-2})主要位于 $T_2 < 0.6$ ms, $T_1/T_2 > 10$ 区域;黏土束缚水主要位于 $T_2 < 0.6$ ms, $T_1/T_2 \leq 10$ 区域;毛管束缚水主要位于 0.6 ms $\leq T_2 < 2.5$ ms, $T_1/T_2 < 5$ 区域;可动水主要位于 $T_2 \geq 2.5$ ms, $T_1/T_2 < 2$ 区域;束缚油(S_{2-1})主要位于 0.6 ms $\leq T_2 < 2.5$ ms, $T_1/T_2 \geq 5$ 区域;可动油($S_{1-1}+S_{1-2}$)主要位于 $T_2 \geq 2.5$ ms, $T_1/T_2 \geq 2$ 区域。

针对阜二段页岩油储层,通过岩心不同升温热解过程中的二维核磁测量结果与现场实践,最终确定如图4所示的二维核磁流体识别与定量评价图版。

1.2 评价模型

根据图4所示定量评价图版,先采用采用截止值方法计算各流体组分体积及可动油饱和度,具体公式如下:

$$CBW = \int_{T_{2,\min}}^{T_{2,\text{cutoff1}}} f(T_2) dT_2 \quad \left(\frac{T_1}{T_2} \leq 10 \right) \quad (1)$$

$$BVI = \int_{T_{2,\text{cutoff1}}}^{T_{2,\text{cutoff2}}} f(T_2) dT_2 \quad \left(\frac{T_1}{T_2} < 5 \right) \quad (2)$$

$$VFW = \int_{T_{2,\text{cutoff2}}}^{T_{2,\max}} f(T_2) dT_2 \quad \left(\frac{T_1}{T_2} < 2 \right) \quad (3)$$

$$VBK = \int_{T_{2,\min}}^{T_{2,\text{cutoff1}}} f(T_2) dT_2 \quad \left(\frac{T_1}{T_2} > 10 \right) \quad (4)$$

$$VBO = \int_{T_{2,\text{cutoff1}}}^{T_{2,\text{cutoff2}}} f(T_2) dT_2 \quad \left(\frac{T_1}{T_2} \geq 5 \right) \quad (5)$$

$$VFO = \int_{T_{2,\text{cutoff2}}}^{T_{2,\max}} f(T_2) dT_2 \quad \left(\frac{T_1}{T_2} \geq 2 \right) \quad (6)$$

$$PHIT = \int_{T_{2,\min}}^{T_{2,\max}} f(T_2) dT_2 \quad (7)$$

$$PHIE = PHIT - CBW \quad (8)$$

$$SMO = 100VFO/PHIE \quad (9)$$

式中: CBW 为黏土束缚水孔隙度,%; BVI 为毛管束缚水孔隙度,%; VFW 为可动水孔隙度,%; VBK 为干酪根体积,%; VBO 为束缚油孔隙度,%; VFO 为可动油孔隙度,%; $PHIT$ 为总孔隙度,%; SMO 为可动油饱和度,%; $T_{2,\min}$ 为 T_2 最小值,ms; $T_{2,\max}$ 为 T_2 最大值,ms; $T_{2,\text{cutoff1}}$ 为黏土束缚水 T_2 截止值,取 0.6 ms; $T_{2,\text{cutoff2}}$ 为毛管束缚水 T_2 截止值,取 2.5 ms。

最后,根据可动油饱和度计算可动油含量公式如下:

$$S_1 = \frac{10VFO\rho_o B_o}{\rho_r} \quad (10)$$

式中: S_1 为可动油含量,mg/g; ρ_o 为原油密度, g/cm³; ρ_r 为页岩油储层密度, g/cm³; B_o 为原油地层体积系数,无量纲。

2 常规测井可动油定量评价

结合沉积环境和沉积构造分析可动油含量的主要地质影响因素,并与测井数据关联,依据岩心冷冻热解实验得到的 S_1 、总有机碳含量(TOC),作 S_1 与 TOC 交会图,建立可动油含量定量评价方法。

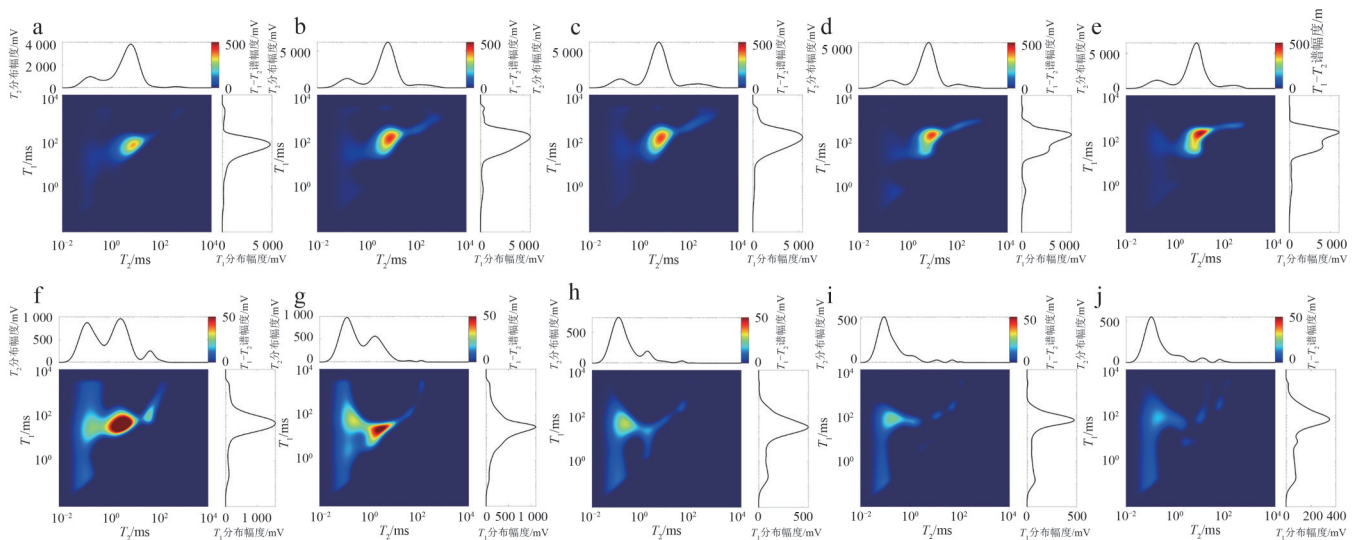


图3 岩心样品升温热解过程中不同阶段的二维核磁测量结果

Fig. 3 2D NMR measurements of cores at different stages during pyrolysis processes at rising temperatures

a. 柱塞样原始状态; b. 自吸饱和油; c. 500 psi 加压饱和油; d. 1 000 psi 加压饱和油; e. 2 000 psi 加压饱和油; f. 碎样原始状态; g. 碎样加热至 200 °C; h. 碎样加热至 350 °C; i. 碎样加热至 450 °C; j. 碎样加热至 600 °C

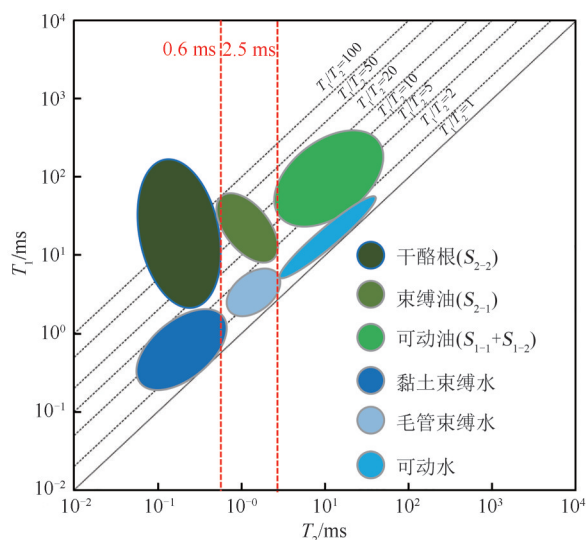


图4 苏北盆地阜二段二维核磁 T_1 - T_2 谱页岩油和孔隙流体识别与定量评价图版

Fig. 4 2D NMR T_1 - T_2 spectrum-based identification and quantitative assessment chart board for pore fluids in shale oil reservoirs in the 2nd member of the Funing Formation (Fu 2 Member) in the Subei Basin, East China

2.1 沉积环境影响

苏北盆地阜二段(可细分为一亚段—四亚段)经历了从咸水湖盆到淡水湖盆沉积演化过程。从下往上分为4个阶段:一亚段和二亚段为咸水湖盆沉积阶段;三亚段为咸水-淡水过渡沉积阶段;四亚段为微咸水湖盆沉积阶段;五亚段淡水湖盆沉积阶段^[24]。不同演化阶段湖水性质不同,造成纵向上 S_1 - TOC 演化关系不同。一亚段和二亚段为咸水湖盆沉积环境, S_1 与 TOC 呈现高斜率、强相关线性关系,斜率达到 2.14, 相关系数达到 0.85 以上,表明在相同有机质含量和演化程度条件下,

咸化环境可生成更多油气,页岩油可动性好(图5)。

随着湖盆向淡水沉积演化,斜率不断降低,到阜二段四亚段微咸水湖盆沉积阶段,斜率为 1.00 左右;五亚段淡水湖盆沉积阶段,斜率为 0.66, 远小于 1.00。表明在相同有机含量和演化程度条件下,可动油含量降低,页岩油可动性变差。特别是三亚段正好处在咸水-淡水过渡沉积阶段,由此造成点群分布在咸水、淡水区带,既覆盖一亚段和二亚段咸水区带,也覆盖四亚段和五亚段微咸水和淡水区带(图5)。因此沉积环境的变化(尤其是盐度的变化)导致 S_1 - TOC 关系复杂化。

2.2 沉积构造影响

相同沉积环境和演化程度条件下,沉积构造对可动油含量也有较大影响。苏北盆地阜二段灰云质、云灰质页岩及泥岩沉积构造宏观上可分为3类:纹层状(纹层厚度 < 1 cm)、层状(单层厚度 1 ~ 10 cm)和块状(单层厚度 > 10 cm)。通过岩心刻度成像测井,在成像测井上分为强层状、弱层状和块状3种类型,分别对应纹层状、层状和块状沉积构造。

阜二段二亚段以纹层状、弱层状和块状含灰云质页岩为主体,图6展示二亚段 S_1 - TOC 点群分布与沉积构造关系。在块状、弱层状发育段,点群偏离高斜率的线性相关规律,斜率向变小方向偏转,表明在相同沉积环境和演化程度条件下,块状、弱层状构造造成可动烃含量减少,可动性变差。图7为三亚段 S_1 - TOC 交会图,同样地对于块状泥岩段, S_1 - TOC 交会点群向斜率变小方向偏转。

2.3 可动油定量评价模型

S_1 与 TOC 呈现高线性相关性,但受沉积环境、沉积

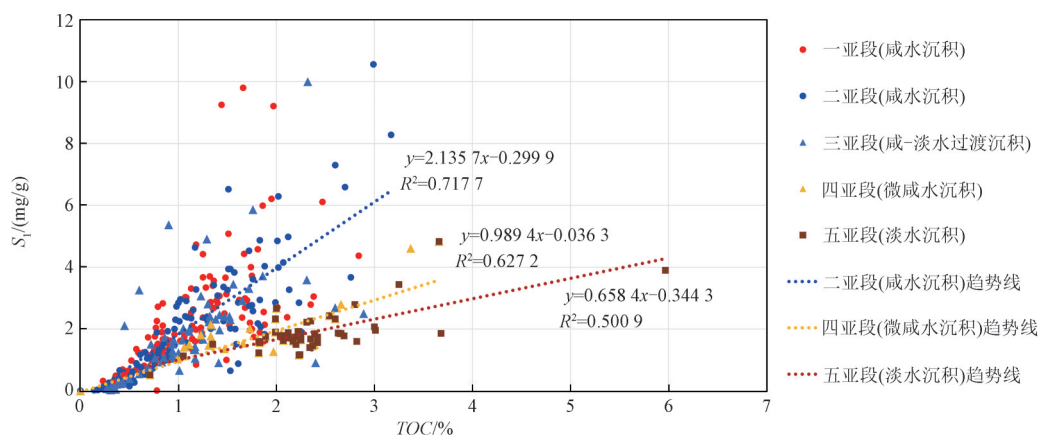


图5 苏北盆地阜二段咸水-淡水湖盆沉积页岩 S_1 - TOC 关系

Fig. 5 S_1 vs. TOC for shales deposited in saline to freshwater lacustrine of the Fu 2 Member in the Subei Basin, East China

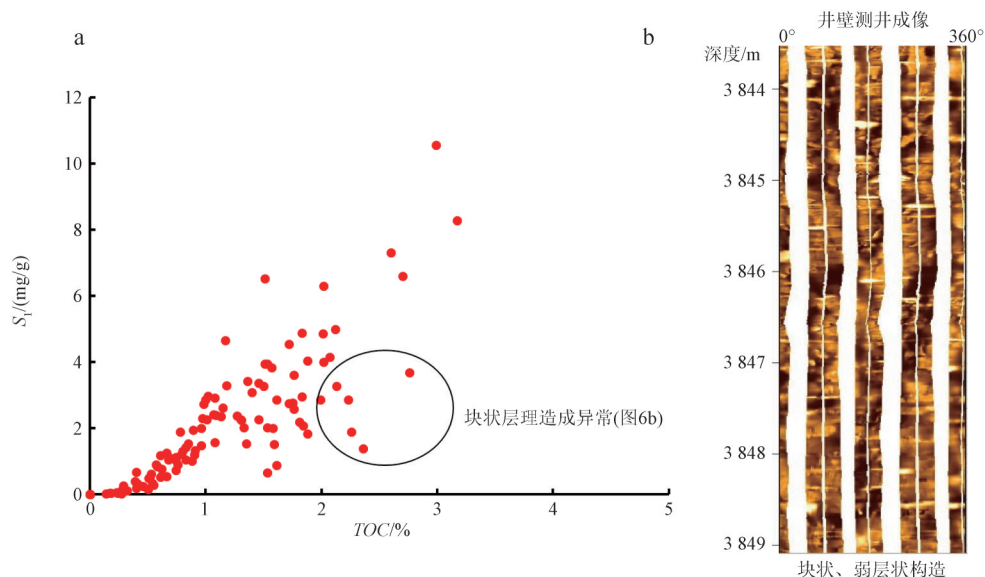
图6 苏北盆地阜二段二亚段页岩 S_1 - TOC 分布(a)与沉积构造关系(b)

Fig. 6 S_1 vs. TOC (a) and its relationship with sedimentary structures (b) for the 2nd submember of the Fu 2 Member in the Subei Basin

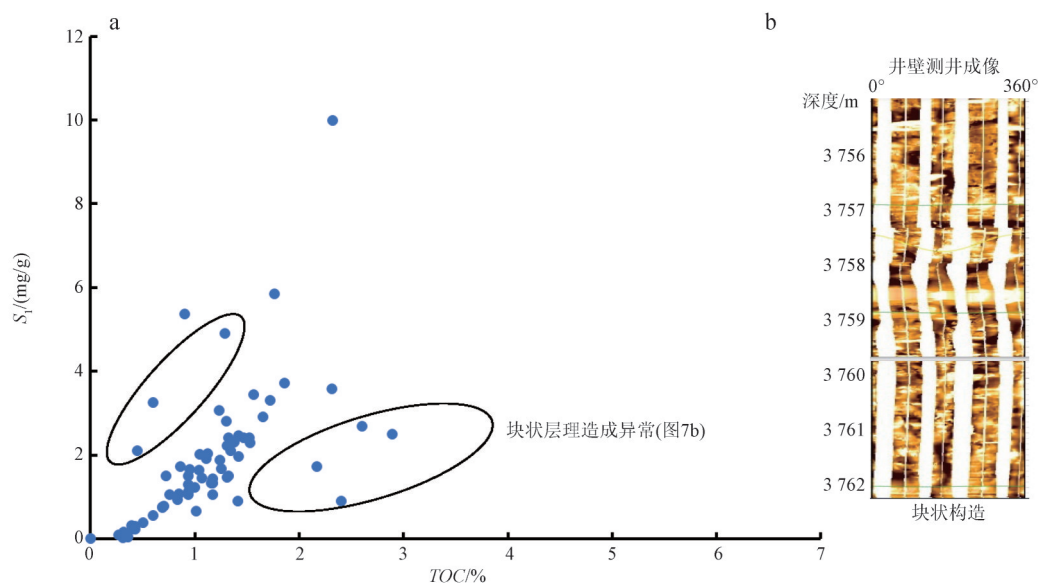
图7 苏北盆地阜二段三亚段页岩 S_1 - TOC 分布(a)与沉积构造关系(b)

Fig. 7 S_1 vs. TOC (a) and its relationship with sedimentary structures (b) for the 3rd submember of the Fu 2 Member in the Subei Basin

构造和成熟度等地质因素影响,相关系数和斜率发生变化。电阻率与声波时差是评价 TOC 的敏感信息,电阻率相对变化幅度是影响 S_1 - TOC 斜率的敏感信息。将这些敏感测井信息关联,并通过特设系数调整沉积环境、沉积构造对 S_1 - TOC 斜率的影响。推导可动油定量评价模型如下:

$$\Delta \lg R = \lg \frac{R}{R_{base}} + K(\Delta t - \Delta t_{base}) \quad (11)$$

$$TOC = \alpha_1 \times \Delta \lg R \quad (12)$$

$$S_1 = \frac{R}{R_{base}} \times \sqrt{\Delta \lg R} \times \alpha_2 \quad (13)$$

$$OSI = \frac{S_1}{TOC} \times 100 \quad (14)$$

式中: $\Delta \lg R$ 为电阻率-声波时差差异距离,无量纲; R 为计算点的测井深侧向电阻率, $\Omega \cdot m$; R_{base} 为普通泥岩段的电阻率平均值, $\Omega \cdot m$; K 为声波时差与电阻率曲线在泥岩段重合时的刻度系数,无量纲; Δt 为计算点的测井声波时差, $\mu s/m$; Δt_{base} 为普通泥岩段的声波时差, $\mu s/m$; TOC 为总有机碳含量,%; α_1 为有机碳含量调整系数,取值1.4~1.5,无量纲; α_2 为 S_1 调整系数,取值0.5~1.0,无量纲; OSI 为含油饱和度指数, mg/g 。

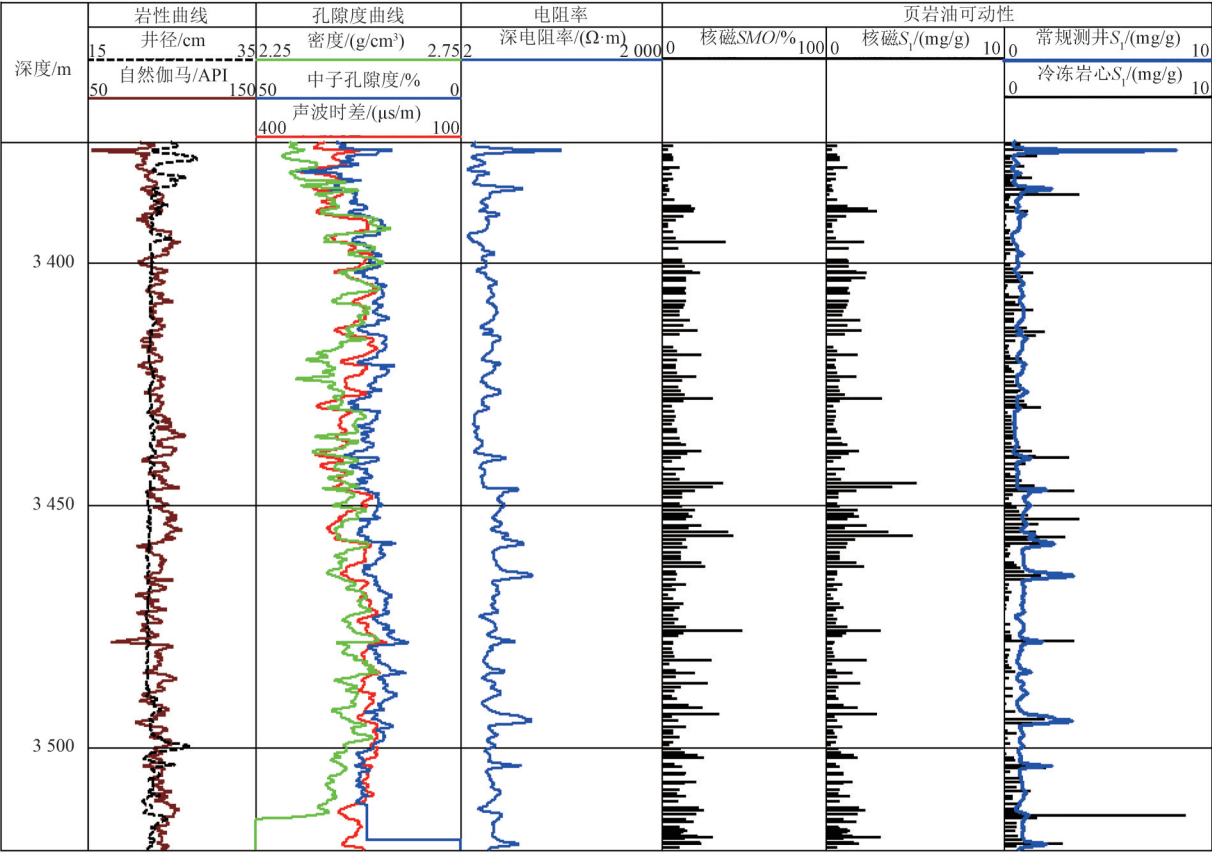


图8 苏北盆地阜二段页岩二维核磁、常规测井计算可动油含量与冷冻岩心测试结果对比

Fig. 8 Comparison of movable oil content calculated based on 2D NMR and conventional logs with that measured via pyrolysis of frozen cores for shales in the Fu 2 Member in the Subei Basin

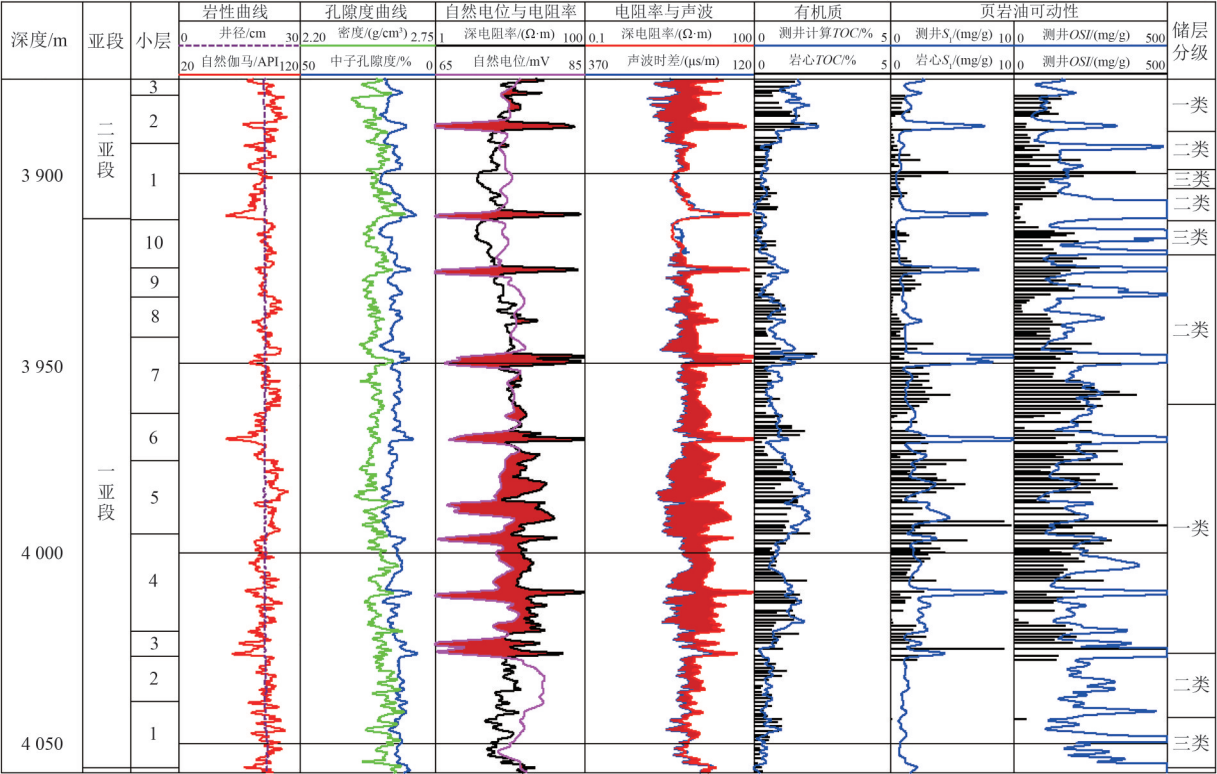


图9 苏北盆地阜二段陆相页岩可动油含量测井定量评价成果

Fig. 9 Well-log-based quantitative assessment results for movable oil content in lacustrine shales of the Fu 2 Member in the Subei Basin

3 评价效果及应用

3.1 评价效果

利用上述方法对苏北盆地阜二段页岩可动油含量进行定量评价。图 8 展示了某井分别采用二维核磁共振和常规测井评价得出的可动油含量,以及与冷冻岩心热解可动油含量的对比,可以看出核磁共振可动油含量、常规测井评价的可动油含量与冷冻岩心分析结果基本吻合,变化趋势是一致的,表明应用上述方法定量评价可动油是可行的。

苏北盆地阜二段范围内大多数井只有常规测井资料,没有二维核磁共振测井资料,可借助电阻率、声波时差等测井资料,计算可动烃含量(S_1)及含油饱和度指数(OSI),实现区域范围内页岩可动油定量评价,在此基础上进行分级评价(图 9)。

3.2 选层评价中的应用

A 井位于苏北盆地海安凹陷,是一口页岩油风险探井,目的层段为阜二段,常规取心长度为 217.3 m。在井场直接对全直径岩心实施快速、高精度的二维核磁共振测量,并对测量结果实时解释。图 10 所示为该井井场全直径岩心高精度核磁测量解释成果图。取

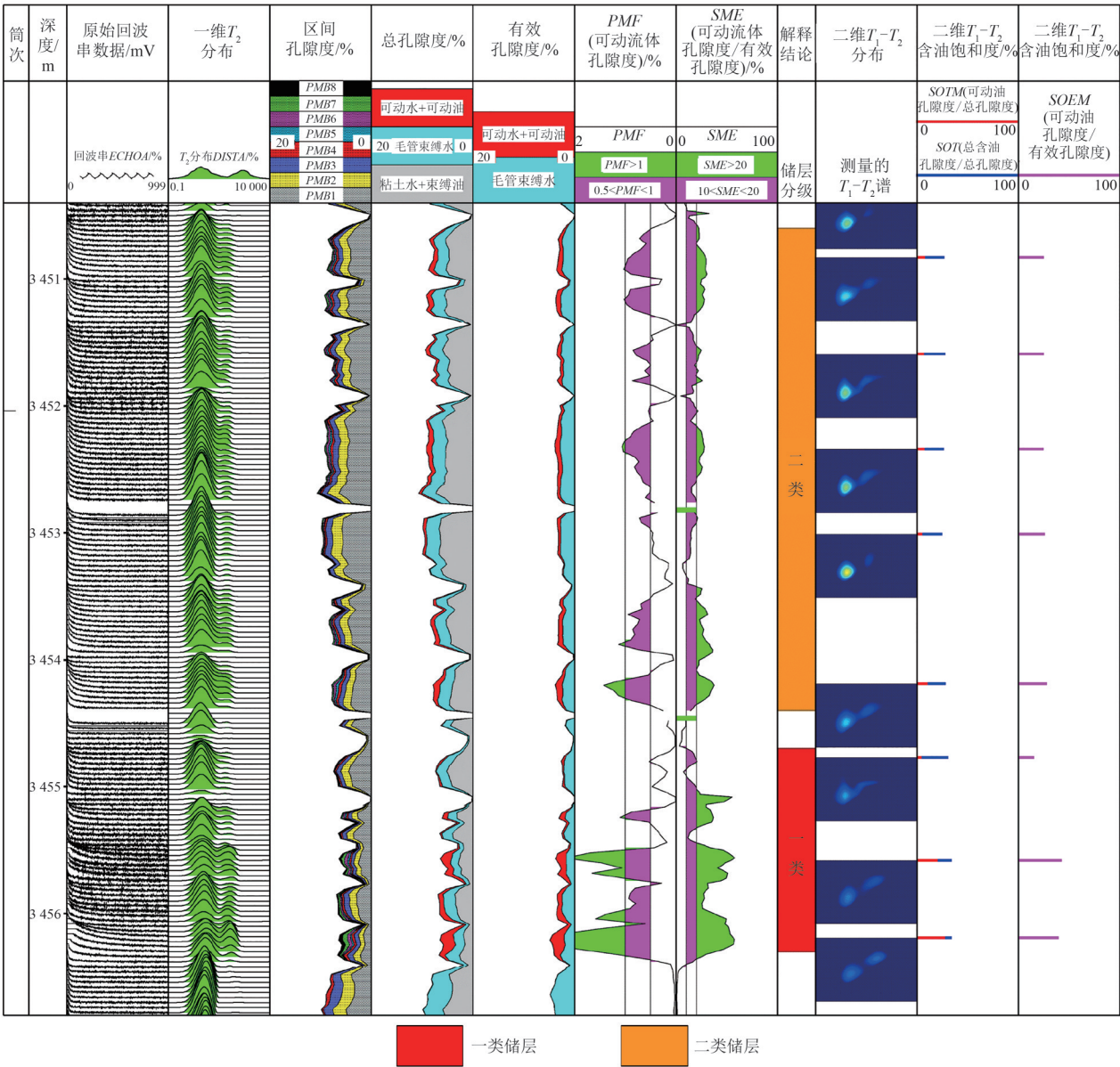


图 10 A 井全直径岩心高精度核磁测量解释成果

Fig. 10 Interpretation of high-precision NMR measurements of full-diameter cores from well A

心井段总体有效孔隙度及含油性较差,以束缚油为主,局部段发育较好页岩油。根据测井定性分析和定量评价结果,建立海安凹陷阜二段页岩油分类评价标准(表1),对储层进行分级评价,主要分为3类。一类:可动孔隙度大于1.0%,且可动孔隙度/有效孔隙度比大于20.0%;二类:可动孔隙度大于0.5%、小于1.0%且可动孔隙度/有效孔隙度比大于10.0%,或可动孔隙度大于1.0%且可动孔隙度/有效孔隙度比大于10.0%、小于20.0%;三类:可动孔隙度小于0.5%,或可动孔隙度/有效孔隙度比小于10.0%。根据评价结果,阜二段二亚段2,3,4,5小层为最优甜点区,以此作为水平井靶窗和压裂甜点区(图11),进行水平井钻井和压裂,获高产工业油流。可动性评价结

果助力勘探取得重大突破。

4 结论

1) 页岩油可动性评价是页岩油测井评价的核心内容,但目前尚无统一适用的评价方法和模型。页岩油为低孔、超低渗透率储集层,孔隙中无自由水,二维核磁共振技术对于页岩油评价有天然优势,是评价页岩油物性、含油性及可动性的有效手段。二维核磁共振技术既可以地面测量,也可以井下测量,可以获得页岩中总孔隙度、有效孔隙度、游离油、吸附油和束缚水含量。便携式井场地面二维核磁测量可以有效消除流体散失对测量结果的影响。

表1 苏北盆地海安凹陷阜二段页岩油储层分类评价标准

Table 1 Classification and assessment criteria for shale oil in the Fu 2 Member in the Hai'an Sag, Subei Basin

储层类别	岩相		定性分析		定量分析			
	岩性	沉积构造	$RT/(\Omega \cdot m)$	AC & RT重叠法	VFO/%	SMO/%	$S_f/(mg/g)$	$OSII/(mg/g)$
一类	含灰云质页岩、灰云质页岩、灰质页岩	纹层状	>10.0	差异幅度中等-大	>1.0	>20	>2	>200
二类	含灰云质页岩、灰云质页岩	纹层状、层状	6.5 ~ 10.0	差异幅度中等-小	>0.5	>10	1 ~ 2	100 ~ 200
三类	块状泥岩、云质泥岩、灰云质页岩	块状、层状	<6.5	无差异或差异大(异常低电阻率)	<0.5	<10	<1	<100

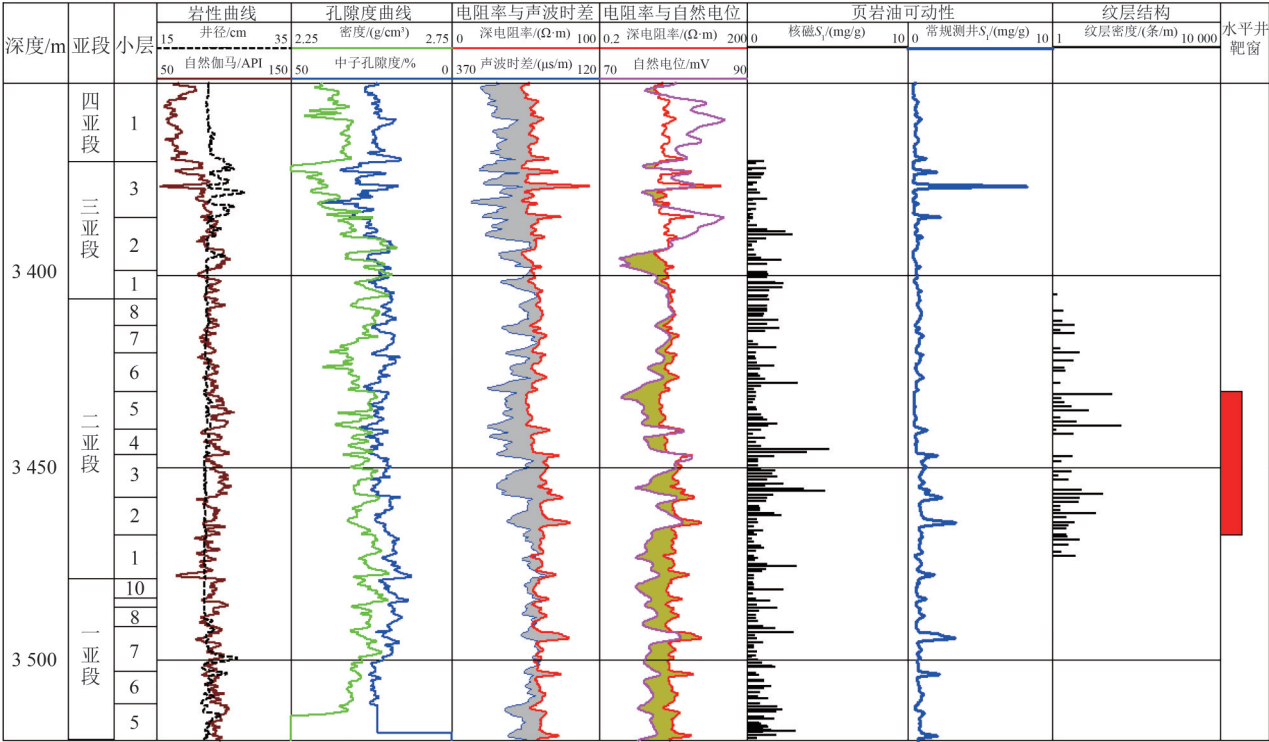


图11 二维核磁共振可动油饱和度评价结果及水平井靶窗选择

Fig. 11 2D NMR-based assessment results of movable oil saturation and selected landing zones for horizontal wells

2) 在明确影响游离烃含量地质因素的基础上,借助敏感测井信息构建游离烃含量测井评价模型,实现基于常规测井资料的页岩油可动性定量评价。

3) 在研究区范围内,可利用自然电位、电阻率和声波时差等曲线重叠交会从而定性分析页岩含油性,再依据可动油定量评价结果进行分级评价,为压裂选层和高效开发方案设计提供依据。

参 考 文 献

- [1] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187.
- ZOU Caineng, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: Taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [2] 金之钧,张谦,朱如凯,等. 中国陆相页岩油分类及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 801-819.
- JIN Zhijun, ZHANG Qian, ZHU Rukai, et al. Classification of lacustrine shale oil reservoirs in China and its significance[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 801-819.
- [3] 郭旭升,马晓潇,黎茂稳,等. 陆相页岩油富集机理探讨[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1333-1349.
- GUO Xusheng, MA Xiaoxiao, LI Maowen, et al. Mechanisms for lacustrine shale oil enrichment in Chinese sedimentary basins[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1333-1349.
- [4] 孙龙德,王小军,冯子辉,等. 松辽盆地古龙页岩纳米孔缝形成机制与页岩油富集特征[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1350-1365.
- SUN Longde, WANG Xiaojun, FENG Zihui, et al. Formation mechanisms of nano-scale pores/fissures and shale oil enrichment characteristics for Gulong shale, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1350-1365.
- [5] 李明,王民,张金友,等. 中国典型盆地陆相页岩油组分评价及意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1479-1498.
- LI Ming, WANG Min, ZHANG Jinyou, et al. Evaluation of the compositions of lacustrine shale oil in China's typical basins and its implications[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1479-1498.
- [6] 刘惠民,李政,包友书,等. 渤海湾盆地济阳坳陷高产页岩油井BYP5页岩地质特征[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1405-1417.
- LIU Huimin, LI Zheng, BAO Youshu, et al. Geology of shales in prolific shale-oil well BYP5 in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1405-1417.
- [7] 胡宗全,王濡岳,路菁,等. 陆相页岩及其夹层储集特征对比与差异演化模式[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1393-1404.
- HU Zongquan, WANG Ruyue, LU Jing, et al. Storage characteristic comparison of pores between lacustrine shales and their interbeds and differential evolutionary patterns[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1393-1404.
- [8] 李阳,赵清民,吕琦,等. 中国陆相页岩油开发评价技术与实践[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(5): 955-964.
- LI Yang, ZHAO Qingmin, LYU Qi, et al. Evaluation technology and practice of continental shale oil development in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(5): 955-964.
- [9] 赵文智,朱如凯,刘伟,等. 中国陆相页岩油勘探理论与技术进展[J]. 石油科学通报, 2023, 8(4): 373-390.
- ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, LIU Wei, et al. Advances in theory and technology of non-marine shale oil exploration in China[J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(4): 373-390.
- [10] 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.
- [11] 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 and Experiment, 2016, 38(6): 842-849.
- [12] 蒋启贵,黎茂稳,马媛媛,等. 页岩油可动性分子地球化学评价方法——以济阳坳陷页岩油为例[J]. 石油实验地质, 2018, 40(6): 849-854.
- JIANG Qigui, LI Maowen, MA Yuanyuan, et al. Molecular geochemical evaluation of shale oil mobility: A case study of shale oil in Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2018, 40(6): 849-854.
- [13] 蒋启贵,黎茂稳,钱门辉,等. 页岩油探井现场地质评价实验流程与技术进展[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 571-582.
- JIANG Qigui, LI Maowen, QIAN Menhui, et al. Experimental procedures of well-site geological evaluation for shale oil and related technological progress[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 571-582.
- [14] 刘天,刘小平,刘启东,等. 陆相页岩游离油定量表征及其影响因素——以苏北盆地高邮凹陷古近系阜宁组二段为例[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 910-922.
- LIU Tian, LIU Xiaoping, LIU Qidong, et al. Quantitative

- characterization and influencing factors of free oil content in lacustrine shale: A case study of Funing Formation in the Gaoyou Sag, Subei Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44 (4): 910-922.
- [15] 王民, 余昌琦, 费俊胜, 等. 页岩油在干酪根中吸附行为的分子动力学模拟与启示[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1442-1452.
- WANG Min, YU Changqi, FEI Junsheng, et al. Molecular dynamics simulation of shale oil adsorption in kerogen and its implications[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1442-1452.
- [16] 李进步. 页岩油赋存机理及可动性研究——以济阳坳陷沙河街组为例[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020: 189-228.
- LI Jinbu. Study on occurrence mechanism and mobility of shale oil: A case study of Shahejie Formation in Jiyang Depression[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020: 189-228.
- [17] 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.
- [18] 李宁, 闫伟林, 武宏亮, 等. 松辽盆地古龙页岩油测井评价技术现状、问题及对策[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(3): 117-128.
- LI Ning, YAN Weilin, WU Hongliang, et al. Current situation, problems and countermeasures of the well-logging evaluation technology for Gulong shale oil[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(3): 117-128.
- [19] ELSAYED M, ISAH A, HIBA M, et al. A review on the applications of nuclear magnetic resonance (NMR) in the oil and gas industry: Laboratory and field-scale measurements [J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2022, 12(10): 2747-2784.
- [20] LU Jing, LIU Mi, LIU Kun, et al. A novel method for quantitative evaluation of oil content and mobility in shale oil reservoirs by NMR logging: A case study of the inter-salt shale oil in the Jiangnan Basin [J]. *Unconventional Resources*, 2024, 4: 100067.
- [21] SHOEIBI A, AL-HASHASH M, AL-AJMI S, et al. Identification of bitumen with pyrolysis analysis on core/cuttings and NMR relationship in Middle Marrat reservoir rock [C]//SPWLA 64th Annual Logging Symposium, Lake Conroe, 2023. Houston: Society of Petrophysicists and Well Log Analysts, 2023: SPWLA-2023-0049.
- [22] CHOHAN M A, HAND R, NICOU D B. Integration of NMR log and core data to determine a generalized petrophysical model applicable in the Austin Chalk [C]//SPWLA 64th Annual Logging Symposium, Lake Conroe, 2023. Houston: Society of Petrophysicists and Well Log Analysts, 2023, 2023: SPWLA-2023-0050.
- [23] CHRISTENSEN S A, THERN H, PETERSEN J T, et al. NMR fluid substitution-pursuing the fundamental controlling parameters of a low-mobility reservoir [C]//SPWLA 64th Annual Logging Symposium, Lake Conroe, 2023. Houston: Society of Petrophysicists and Well Log Analysts, 2023, 2023: SPWLA-2023-0052.
- [24] 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.

(编辑 董奕含)