

引用格式:姜志高,马晓东,丁安徐,等.苏北盆地阜二段页岩油含油性及可动性实验评价:以H井为例[J].油气藏评价与开发,2026,16(2):266-273.  
JIANG Zhigao, MA Xiaodong, DING Anxu, et al. Experimental evaluation of oil content and mobility of shale oil in second member of Funing Formation, Subei Basin: A case study of well H[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2026, 16(2): 266-273.  
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024455

# 苏北盆地阜二段页岩油含油性及可动性实验评价 ——以H井为例

姜志高<sup>1,2,3</sup>, 马晓东<sup>1,2,3</sup>, 丁安徐<sup>1,2,3</sup>, 高和群<sup>1,2,3</sup>, 曾隽<sup>1,2,3</sup>, 王雨梦<sup>1,2,3</sup>, 吴艳艳<sup>1,2,3</sup>

(1. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206; 2. 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 北京 102206; 3. 中国石化华东油气分公司勘探开发研究院, 江苏 扬州 225007)

**摘要:** 鉴于当前实验技术难以准确测定页岩中滞留烃总量, 为实现对页岩油含油性的精确评价, 本研究以苏北盆地H井密闭取心样品为对象, 综合运用冷冻热解、多温阶热解、密闭热释与二维核磁共振(2D-NMR)等多种实验手段, 系统开展了含油性及可动性实验评价。通过不同贮存时间的热解对比实验与密闭热释实验, 确定了阜二段页岩油轻烃恢复系数为1.99; 结合抽提前后热解 $S_2$ 峰面积差值, 建立了重烃校正公式( $0.4526 \times S_2 - 0.3079$ ), 实现了滞留烃总量的准确计算。进一步利用二维核磁共振技术对不同品质原油进行标定, 构建了氢核信号量与油质质量之间的标准曲线, 实现了含油量的无损、快速测定; 并通过洗油前后核磁谱图对比, 明确了可动油与吸附油的 $T_2$ 截止值, 计算出游离油含量及其占比。实验结果表明, 二维核磁共振法测得的含油量与恢复后含油量高度一致, 游离油占比与多温阶热解结果也具有良好相关性。本研究建立的“轻烃恢复—重烃校正—核磁标定—可动油识别”技术体系, 具有操作相对简便、检测范围广、对样品无损等优点, 整体上显著提升了页岩油含油性及可动性评价的准确性与效率, 为页岩油甜点识别、储量计算与开发潜力评估提供了重要的实验依据。

**关键词:** 页岩油; 轻烃恢复; 重烃校正; 含油性; 二维核磁共振(2D-NMR)

中图分类号: TE19

文献标识码: A

## Experimental evaluation of oil content and mobility of shale oil in second member of Funing Formation, Subei Basin: A case study of well H

JIANG Zhigao<sup>1,2,3</sup>, MA Xiaodong<sup>1,2,3</sup>, DING Anxu<sup>1,2,3</sup>, GAO Hequn<sup>1,2,3</sup>, ZENG Jun<sup>1,2,3</sup>, WANG Yumeng<sup>1,2,3</sup>, WU Yanyan<sup>1,2,3</sup>

(1. National Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206, China; 2. Sinopec Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production, Beijing 102206, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Sinopec East China Oil & Gas Company, Yangzhou, Jiangsu 225007, China)

**Abstract:** Given the difficulty in accurately determining the total amount of retained hydrocarbons in shale with current experimental techniques, this study aims to achieve a precise evaluation of shale oil content. Using sealed core samples from well H in the Subei Basin as the subjects, this study employed multiple experimental methods, including freeze pyrolysis, multi-temperature step pyrolysis, sealed thermal release, and two-dimensional nuclear magnetic resonance (2D-NMR) to systematically evaluate the oil content and mobility. Through comparative pyrolysis experiments at different storage times and sealed thermal release experiments, the light hydrocarbon recovery coefficient for shale oil in the second member of the Funing Formation was determined to be 1.99. Combined with the difference in pyrolysis  $S_2$  peak areas before and after extraction, a heavy hydrocarbon correction formula was established ( $0.4526 \times S_2 - 0.3079$ ), enabling accurate calculation of the total retained hydrocarbons. Furthermore, 2D-NMR technology was used to calibrate crude oil of different qualities, and a standard curve between hydrogen nucleus signal intensity and oil mass was established, enabling non-destructive and rapid determination of oil content. By comparing NMR spectra before and after oil washing, the  $T_2$  cutoff values for movable and adsorbed oil were identified, facilitating the calculation of free oil content and its proportion. The experimental results showed that the oil content measured by the 2D-NMR method was highly consistent with the recovered oil content, and the proportion of free oil showed a good correlation with results from multi-temperature step pyrolysis. The technical framework of “light hydrocarbon recovery—heavy hydrocarbon correction—NMR calibration—movable oil identification” established in this study offers advantages such as relative operational simplicity, a broad detection range, and non-destructiveness to samples. Overall, it significantly improves the accuracy and efficiency of shale oil content and mobility evaluation,

收稿日期: 2024-12-25。

第一作者简介: 姜志高(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事非常规实验研究工作。地址: 江苏省扬州市邗江区邗沟路50号, 邮政编码: 225007。

E-mail: 294029854@qq.com

基金项目: 中国石化科研项目“溱潼凹陷低TOC陆相页岩油勘探开发关键技术”(P23190)。

providing crucial experimental support for shale oil sweet spot identification, reserve calculation, and development potential assessment.

**Keywords:** shale oil; light hydrocarbon recovery; heavy hydrocarbon correction; oil content; two-dimensional nuclear magnetic resonance (2D-NMR)

近年来,页岩油作为重要的非常规资源备受关注。松辽盆地<sup>[1]</sup>、渤海湾盆地<sup>[2]</sup>、准噶尔盆地<sup>[3]</sup>、鄂尔多斯盆地<sup>[4-5]</sup>等区块已实现页岩油勘探开发的突破,页岩油成为中国目前的研究重点。苏北盆地SD1井、SD2井、QY1井等相继勘探成功,并取得日产60 t以上的工业油流,标志着苏北盆地页岩油取得突破<sup>[6-8]</sup>。国内外页岩油勘探的成功案例均表明高含油性是页岩油具备商业开采价值的前提,其评价对页岩油“甜点段”筛选具有决定性作用<sup>[9-11]</sup>。因此,准确评价页岩油样品含油性成为亟待攻关的关键方向。然而,现有实验手段难以精准测定岩石中滞留烃总量,主要受限于两方面因素:其一,页岩质地紧密,导致抽提过程难以实现完全提取;其二,页岩油具有自生自储特性,轻烃组分含量高且易挥发散失<sup>[12]</sup>。上述困难使得页岩油储量精确计算面临挑战,迫切需要开发新的评估方法。

针对滞留烃量化难题,学界主要采用轻烃恢复技术与重烃校正方法<sup>[13-15]</sup>。此外,页岩油赋存形式可分为游离态与吸附态<sup>[16]</sup>,其中吸附态页岩油因技术限制难以有效开发,而游离态页岩油成为当前主要开采对象。因此,准确界定页岩油赋存状态(尤其是游离油量)成为另一关键问题。前人研究多采用多温阶热解法与溶剂分步抽提法进行分类与评估<sup>[17-21]</sup>,但上述方法存在实验流程复杂等局限性。

为突破现有技术瓶颈,本研究提出一种创新解决方案:通过密闭热释法与抽提前后热解实验恢复滞留烃,结合二维核磁共振(2D-NMR)技术对不同质量原油进行标定,建立基于2D-NMR的含油量计算方法;同时,通过对比洗油前后核磁谱图,确定可动油与吸附油的 $T_2$ 截止值,进而计算游离油占比及含量。实验结果表明,该方法测定的含油量与恢复后数据高度吻合,验证了其对于页岩油含油性及其可动性评价的准确性与高效性。

## 1 样品

在常规取心过程中,岩石自起钻至实验分析阶段,轻烃损失主要发生于以下环节:起钻时因压力降低导致部分轻烃逸散至井筒;岩心出筒后暴露于地表环境;实验分析阶段的碎样及上机操作。鉴于上述损失机制,页岩油资源评价中,对热解参数 $S_1$ 进行轻烃恢复已成为行业共识<sup>[13-15]</sup>。为规避轻烃在取心、运输及预处理环节的损失,H井采用密闭取心技术:取心筒到达地面后,将岩心连同衬筒切割为100 cm分段,编号后立即用密封帽封堵衬筒两端,并安装卡箍完成密封。密封样品随即置于-60 °C冷冻环境保存24 h,并连同冷冻装置全程冷链运输至实验室。在实验室处理阶段,使用切割机对铝合金衬筒进行环

切并排出密闭液后,将岩心纵向剖切,其中1/3留存备用,2/3部分取中间段作为实验样本,该样本均分为4份,分别用于液氮冷冻碎样后开展常规热解实验、密闭热释实验、2D-NMR实验,以及常温静置24 h后开展冷冻热解实验。

## 2 实验方法

### 2.1 冷冻热解

在热解实验分析前,需对样品进行粉碎处理。常规碎样法因产生高温易导致轻烃损失,为最大限度减少轻质油在粉碎过程中的散失并确保测试准确性,本研究采用冷冻碎样仪进行低温处理:将样品置于密闭环境中,碎样过程中持续注入液氮,使粉碎温度维持在-196 °C的低温环境,且粉碎完成后立即进行上机测试。岩石热解分析严格遵循中华人民共和国国家标准《岩石热解分析》(GB/T 18602-2012),采用程序升温法测定 $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 等热解参数。其中, $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 是评价烃源岩的核心指标,分别对应气态烃(90 °C)、游离烃(90~300 °C)和热解烃(300~600 °C)的生成量。为模拟常规取心起钻及岩心出筒后暴露导致的轻烃损失,将同一块密闭取心岩心样品分割为若干块状样品。冷冻样品送达后立即开展一次冷冻热解实验,其余对比样品置于常温环境中。以此为基础,分别在2、24、48 h 3个时间节点进行热解对比实验,并重点对比其游离烃 $S_1$ 值的变化特征(图1)。

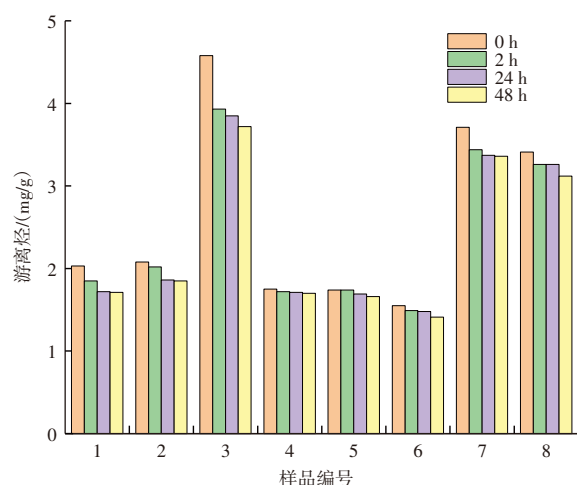


图1 不同放置时间热解对比

Fig. 1 Comparison of pyrolysis at different storage times

### 2.2 多温阶热解

前处理流程与冷冻热解方法保持一致,仅上机升温程序存在差异:首先在200 °C恒温1 min测定 $S_{1-1}$ 值,随后

以 25 °C/min 速率升温至 350 °C 并恒温 1 min 测定  $S_{1-2}$  值,再以相同速率升温至 450 °C 并恒温 1 min 测定  $S_{2-1}$  值<sup>[22-23]</sup>。其中,  $S_{1-1}$  值以轻质油组分为主,  $S_{1-2}$  值以轻-中质油组分为主,  $S_{2-1}$  值以重烃、胶质沥青质组分为主<sup>[24]</sup>。基于上述热解参数特征,游离油占比的计算公式为:

$$S_f = \frac{S_{1-1} + S_{1-2}}{S_{1-1} + S_{1-2} + S_{2-1}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $S_f$  为游离油占比, %;  $S_{1-1}$  为轻质油组分, 单位 mg/g;  $S_{1-2}$  为轻-中质油组分, 单位 mg/g;  $S_{2-1}$  为重烃、胶质沥青质组分, 单位 mg/g。

### 2.3 密闭热释实验

密闭热释实验分析系统主要由样品密封罐、低温粉碎仪、烃类含量检测器及气体发生器等核心部件组成<sup>[25]</sup>。其操作流程如下: 密闭取心样品取出后立即进行采样称重, 并密封于样品罐中; 随后将样品罐冷却至 0~5 °C, 在保持密封状态下通过低温粉碎仪将样品粉碎至 80~100 目粒径; 粉碎完成后, 将样品罐与烃类检测器连接, 测定样品中烃类含量。该分析方法采用程序升温法结合氢火焰离子检测器(FID)进行检测, 具体升温程序为: 先在低温条件下恒温 3 min 测定  $S_g$  值, 再以 50 °C/min 升温速率升至 90 °C 并恒温 5 min 测定  $S_0$  值, 随后以相同速率升至 200 °C 恒温 12 min 测定  $S_{1-1}$  值, 最后以 50 °C/min 升至 300 °C 恒温 12 min 测定  $S_{1-2}$  值。根据热解参数特征, 密闭热释法含油量计算公式为: 密闭热释法含油量 =  $S_g + S_0 + S_{1-1} + S_{1-2}$ , 由于该方法最高升温至 300 °C, 与冷冻热解中  $S_1$  参数的测定温度一致, 因此在方法比对中, 将密闭热释法含油量与冷冻热解的  $S_1$  值进行对比分析。该系统的优势在于实现了样品仓与密封罐的一体化设计, 可有效避免样品转移及处理过程中的烃类损失。

### 2.4 二维核磁共振实验

核磁共振(NMR)信号强度与测试样品的氢含量呈正相关关系。目前中国主流利用 2D-NMR 技术测定含油饱和度, 在分析油相与水相核磁信号时, 对其采用了相同的校准系数, 即相同体积的原油和水在核磁信号量上具有可比性。然而, 不同地区、不同性质的原油存在显著物性差异, 且地层岩石孔隙中除油、水外还赋存一定量的气体组分, 而该气体组分无法被 NMR 技术检测。因此, 直接利用 2D-NMR 技术计算的含油饱和度与真实值存在一定偏差。为提升 2D-NMR 技术对含油性的评价精度, 需对目标层位页岩油进行核磁信号标定。

具体操作流程包括: 首先准确称取 5 组以上不同质量的页岩油样品(质量范围覆盖目标层位原油物性特征), 随后采用 2D-NMR 仪测定各油样的氢核信号量, 最后以氢核信号量( $x$ )为横坐标、油样质量( $y$ )为纵坐标绘制标准曲线(图

2), 经线性回归得到标准曲线方程  $y=10^{-5}x-0.0008$ 。

接下来将冷冻的块状岩心样品解冻后进行称重, 得到其质量  $m_1$ , 然后进行二维核磁共振上机测试, 并且测试参数与原油标定时参数保持一致, 根据 2D-NMR 油水分布图版<sup>[26]</sup>, 得到油的信号量  $A$ 。

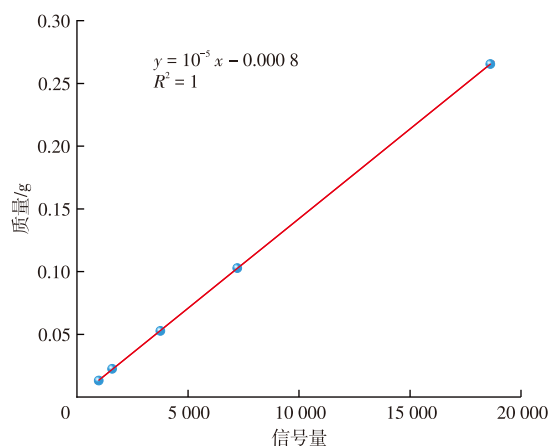


图2 不同页岩油原油质量与NMR信号量标准曲线

Fig. 2 Standard curve of crude oil quality of shale oil and NMR signal intensity

通过上述标准曲线  $y=10^{-5}x-0.0008$ , 将信号量  $A$  代入  $x$ , 可得到油的质量  $y$  值为  $m_2$ 。因此, 可得到二维核磁共振法含油量计算公式:

$$\text{二维核磁法含油量} = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $m_1$  为岩心初始质量, 单位 g;  $m_2$  为公式计算出油的质量, 单位 g。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 实验结果

不同实验方法所得结果如表 1 所示。

### 3.2 轻烃恢复

通过不同放置时间的热解比对实验, 获得各时间点的轻烃恢复系数  $K_1$ 。如表 2 所示, 放置 24 h 与 48 h 的恢复系数平均值差异较小, 且常规取心作业中, 起钻至地面暴露的总时间通常不超过 24 h。因此, 本研究采用 24 h 条件下的恢复系数  $K_1=1.10$  作为常规取心轻烃损失的校正参数。

如表 2 密闭热释结果所示,  $S_g$  与  $S_0$  之和占密闭热释含油量的平均值为 27%, 表明轻烃组分含量较高且不可忽视。然而, 该部分组分无法通过常规热解方法直接测定。为校正样品粉碎及常规热解过程中的烃类损失, 结合图 3 的冷冻热解与密闭热释结果分析发现, 密闭热释含油量与热解  $S_1$  值呈显著相关性。基于相关性分析, 可确定密闭热释含油量与热解  $S_1$  的恢复系数  $K_2$  为 1.81。

表1 苏北盆地H井密闭取心不同实验方法的含油性实验数据比对

Table 1 Comparison of oil content experimental data from different methods for sealed cores of well H, Subei Basin

编号	密闭热释法/(mg/g)				冷冻热解法/(mg/g)		多温阶热解法/(mg/g)			二维核磁共振法/(mg/g)		抽提后热解/(mg/g)
	$S_g$	$S_0$	$S_{1-1}$	$S_{1-2}$	$S_1$	$S_2$	$S_{1-1}$	$S_{1-2}$	$S_{2-1}$	二维核磁含油量	游离油含量	$S'_2$
1	0.20	0.31	0.68	1.03	1.36	6.27	0.65	0.96	1.60	5.84	3.30	3.43
2	0.39	0.45	0.97	1.19	1.61	5.12	1.09	1.35	2.09	4.57	2.72	3.14
3	0.22	0.50	1.19	1.02	1.78	4.49	1.33	1.31	2.52	4.28	2.36	3.03
4	0.35	0.66	1.48	1.56	2.01	4.90	1.66	1.46	2.69	5.71	3.40	3.16
5	0.59	0.73	1.31	1.49	2.24	4.01	1.84	1.58	1.02	5.96	5.07	2.44
6	0.26	0.66	0.98	1.53	2.05	4.99	1.34	1.57	1.23	6.27	4.73	2.92
7	0.22	0.26	0.58	1.01	1.29	5.02	0.66	0.86	1.55	3.91	2.19	3.04
8	0.34	0.49	1.21	1.27	1.53	1.00	0.72	0.86	0.68	3.19	2.40	0.66
9	0.17	0.29	0.49	0.76	1.01	3.85	0.39	0.34	0.88	3.07	1.61	2.57
10	0.34	0.39	0.74	0.74	1.23	3.62	0.88	0.88	1.22	3.00	1.95	2.38

表2 不同放置时间的热解恢复系数

Table 2 Pyrolysis recovery coefficients at different storage times

样品编号	$S_1/(mg/g)$				恢复系数 $K_1$		
	0 h	2 h	24 h	48 h	2 h	24 h	48 h
1	2.03	1.85	1.72	1.71	1.1	1.18	1.19
2	2.08	2.02	1.86	1.85	1.03	1.12	1.12
3	4.58	3.93	3.85	3.72	1.17	1.19	1.23
4	1.75	1.72	1.71	1.70	1.02	1.02	1.03
5	1.74	1.74	1.69	1.66	1.04	1.03	1.05
6	1.55	1.49	1.44	1.41	1.04	1.08	1.10
7	3.71	3.44	3.37	3.36	1.08	1.10	1.10
8	3.41	3.26	3.20	3.12	1.05	1.07	1.09
平均					1.06	1.10	1.11

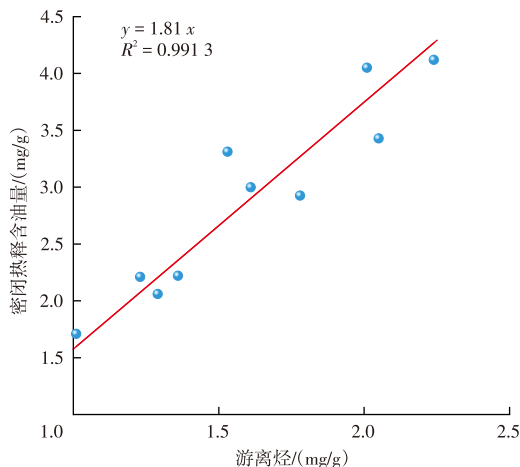


图3 热解游离烃和密闭热释含油量相关性

Fig. 3 Correlation between pyrolysis  $S_1$  and oil content in sealed thermal release

通过模拟起钻过程中及出筒后岩心暴露的恢复系数 $K_1$ 与热解测试过程中轻烃损失的恢复系数 $K_2$ 。得到轻烃总恢复系数 $K = K_1 \times K_2 = 1.10 \times 1.81 = 1.99$ 。因此,轻烃 =  $K \times S_1 = 1.99 \times S_1$

### 3.3 重烃校正

前人通过抽提前后的热解 $S_2$ 差值来进行重烃校正。根据样品抽提前、后岩样热解所得 $S_2$ 差值进行重烃补偿校正<sup>[27-28]</sup>,抽提前 $S_2$ 与抽提后 $S'_2$ 的差值( $\Delta S_2$ )即为页岩油进入 $S_2$ 中的重质组分。通过页岩样品实验数据分析,如图4所示,发现 $\Delta S_2$ 与 $S_2$ 有很好的线性关系。

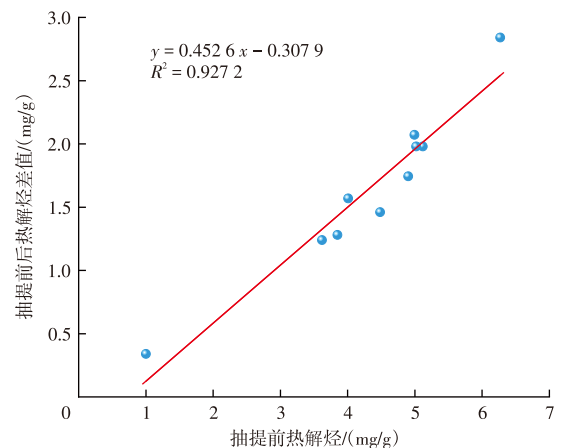


图4 抽提前热解烃和抽提前后热解烃差值相关性

Fig. 4 Correlation between pre-extraction  $S_2$  and  $\Delta S_2$

$$\text{重烃} = \text{抽提前 } S_2 - \text{抽提后 } S'_2 = 0.4526 \times S_2 - 0.3079$$

$$\text{总滞留油量} = \text{轻烃} + \text{重烃} = 1.99 \times S_1 + 0.4526 \times S_2 - 0.3079$$

### 3.4 2D-NMR法测试含油性及其可动性

二维核磁含油量优点:无需升温或洗油,直接通过氢核信号检测,覆盖轻烃至重烃,测试范围广,结果更接近真实含油性。缺点为无法测试岩石样品中的气态烃含量,即密闭热释法中的 $S_g$ 含量,此外,由于核磁共振只能检测氢核信号,对于不同层位、不同地区的原油,由于其组分存在差异,测试结果无法通用,因此,当不同地区

原油组分存在差异时,需重新进行建立标准曲线。对2D-NMR测试出来的含油量与密闭热释法去除 $S_g$ 的含油量与重烃校正后的含油量之和进行比对(图5),发现其具有较强的正相关性,说明了2D-NMR测试出的含油量具有较强的指导意义。

对抽提前后岩心样品进行2D-NMR测试(图6),通过对比油区信号变化特征,可明确抽提后信号完全消失的区域为游离油赋存区,而信号保持稳定的区域为吸附油赋存区。基于此,可确定游离油与吸附油的 $T_2$ 弛豫时间截止值界限,并通过信号强度积分计算各自含量,进而实现页岩油赋存状态的定量评价,具体包括游离油含量及游离油占比的精确计算。

通过2D-NMR与多温阶热解法获得的游离油占比数据进行相关性分析(图7),结果显示二者呈显著正相关。由于多温阶热解法在样品粉碎及上机测试过程中存在轻烃损失,导致其游离油占比计算结果较真实值偏低。

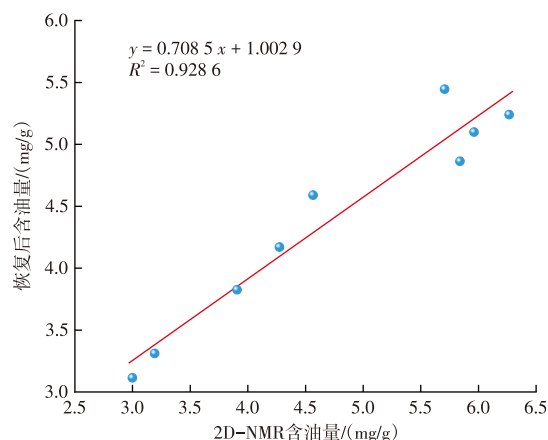


图5 2D-NMR含油量与恢复后的含油量相关性

Fig. 5 Correlation between 2D-NMR-derived oil content and recovered oil content

相较而言,2D-NMR法因无需样品前处理,其游离油占比计算结果更接近真实赋存状态,验证了该技术在页岩油赋存状态定量评价中的优越性。

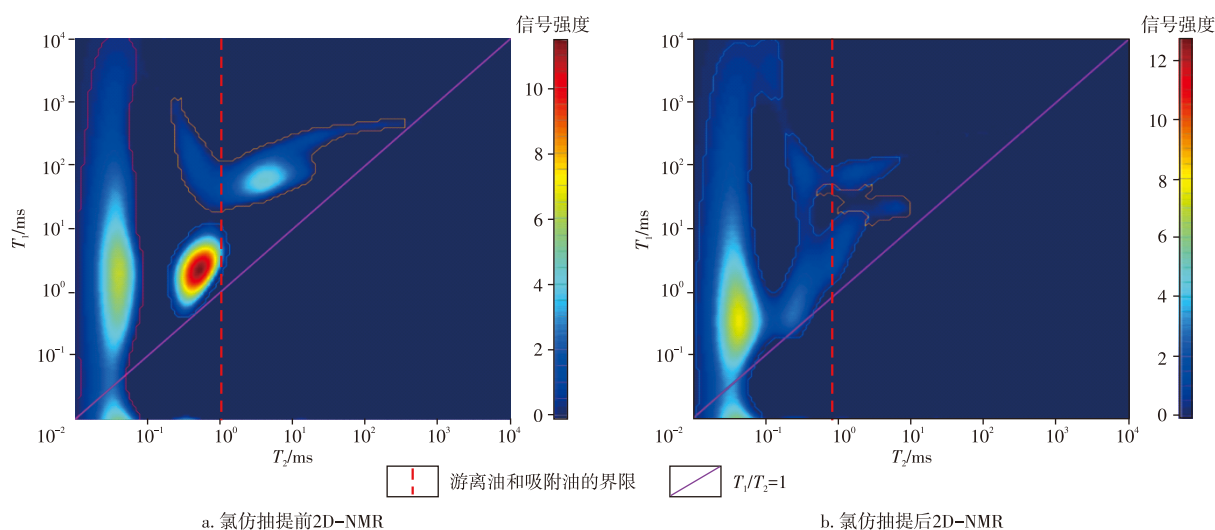


图6 抽提前后2D-NMR比对

Fig. 6 2D-NMR comparison before and after extraction

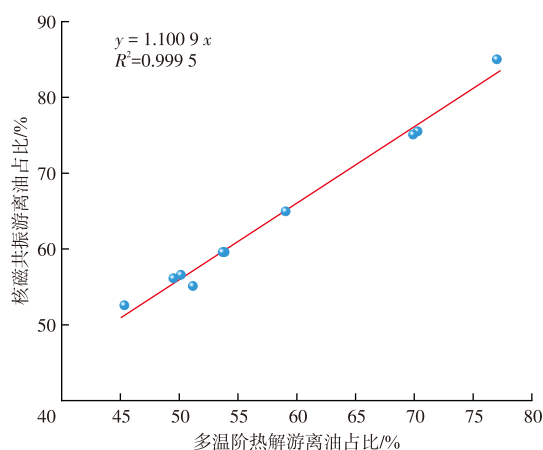


图7 核磁共振与多温阶热解游离油占比比对

Fig. 7 Comparison of free oil proportion from NMR and multi-temperature step pyrolysis

### 3.5 应用效果

基于2D-NMR在含油性及可动性评价中的测试原理,对H井取心井段岩心实施系统性2D-NMR测试,并针对该方法的应用效果展开验证分析。测试结果表明,该方法可有效识别页岩油赋存状态及可动性特征,相关成果已整合形成H井综合柱状图(图8)。

由图8可知,阜宁组II-3小层 $S_1$ 值介于0.76~4.36 mg/g(平均值1.90 mg/g),恢复后含油量介于2.36~12.33 mg/g(平均值6.72 mg/g),二维核磁含油量介于2.11~13.46 mg/g(平均值7.37 mg/g),核磁法游离油占比47.3%~78.7%(平均值55.0%)。II-2小层 $S_1$ 值介于0.44~1.29 mg/g(平均值0.87 mg/g),恢复后含油量介于1.74~14.67 mg/g(平均

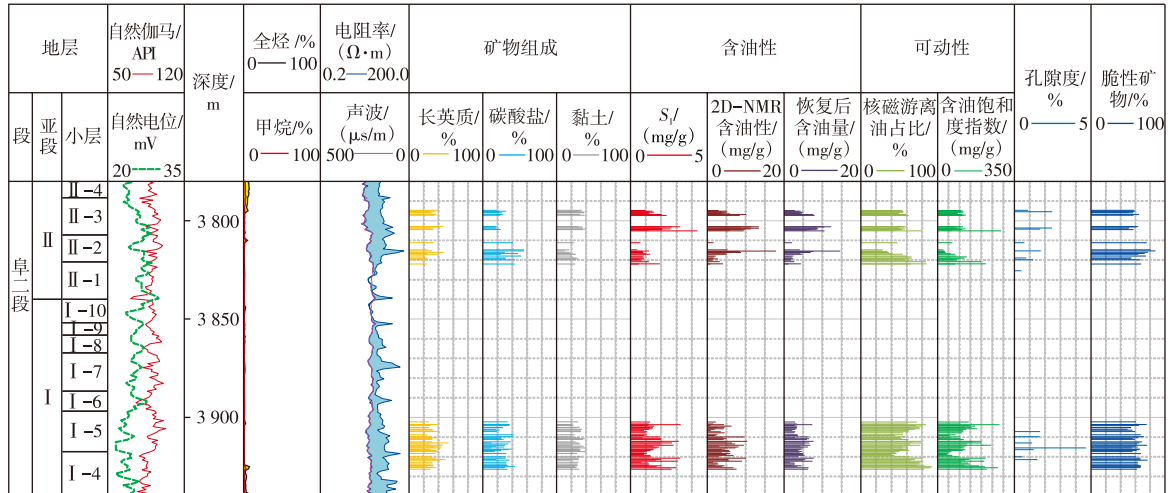


图8 苏北盆地H井综合柱状图

Fig. 8 Comprehensive stratigraphic column of well H, Subei Basin

值4.29 mg/g),二维核磁含油量介于1.12~17.87 mg/g(平均值为4.73 mg/g),核磁法游离油占比28.3%~84.7%(平均值51.8%)。I-5小层 $S_1$ 值介于0.79~3.27 mg/g(平均值1.64 mg/g),恢复后含油量介于2.16~7.68 mg/g(平均值4.46 mg/g),二维核磁含油量介于0.78~9.73 mg/g(平均值4.72 mg/g),核磁法游离油占比44.5%~84.8%(平均值64.9%)。I-4小层 $S_1$ 值介于0.70~3.23 mg/g(平均值1.68 mg/g),恢复后含油量介于1.56~7.73 mg/g(平均值4.66 mg/g),二维核磁含油量介于1.52~10.12 mg/g(平均值5.18 mg/g),核磁法游离油占比45.4%~92.8%(平均值68.9%)。综合分析表明,II-3小层虽游离油占比略低,但其游离油含量的绝对值达到4.05 mg/g,为几个小层中最高,综合含油性最优,可作为H井页岩油开发的优质“甜点段”。

## 4 结论

通过对苏北盆地H井开展密闭取心冷冻热解、多温阶热解、密闭热释及2D-NMR等系列实验研究,系统分析了阜二段页岩滞留烃含量评价方法与页岩油赋存状态特征,得出以下结论:

1)通过不同放置时间比对实验及密闭热释恢复实验,得出苏北盆地页岩油轻烃含量较高, $S_g$ 和 $S_0$ 含量占比平均为27%。热解 $S_1$ 密闭热释含油量具有较强相关性,可对其进行轻烃恢复,阜二段页岩油轻烃恢复系数为1.99。再通过抽提前后比对实验,热解 $S_2$ 和抽提前后的 $S_2$ 差值 $\Delta S_2$ 相关性明显,得出重烃校正公式为重烃=0.452 6× $S_2$ -0.307 9。在此基础上得出总滞留烃量=1.99× $S_1$ +0.452 6× $S_2$ -0.307 9。

2)通过开展不同质量页岩油原油的2D-NMR测试,

得出其氢核信号量,在此基础上,得出原油与氢核信号量之间的标准曲线,实现样品氢核信号量至原油质量的精准转换,获得含油量数据;经与恢复后含油量比对,二者具有很强的相关性,验证了该方法的可靠性;进一步通过抽提前后核磁谱图分析,确定游离油与吸附油界限,计算得到游离油含量及占比,并与多温阶热解结果比对,二者游离油占比相关性显著,有效验证了2D-NMR法对页岩油赋存状态定量评价的准确性。该方法具有快速、无损、精度高的特点,为页岩油含油性及可动性评价提供了高效技术手段。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 周立宏,韩国猛,杨飞,等. 渤海湾盆地歧口凹陷沙河街组三段一亚段地质特征与页岩油勘探实践[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(2): 443-455.  
ZHOU Lihong, HAN Guomeng, YANG Fei, et al. Geological characteristics and shale oil exploration of Es<sub>3</sub>(1) in Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(2): 443-455.
- [3] 魏登峰. 新疆地区页岩油气资源潜力及勘探方向[J]. 石油物探, 2024, 63(6): 1087-1099.  
WEI Dengfeng. Potential resources and exploration direction of shale oil and gas in Xinjiang[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2024, 63(6): 1087-1099.
- [4] 焦方正. 陆相低压页岩油体积开发理论技术及实践:以鄂尔多斯盆地长7段页岩油为例[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(6): 836-844.  
JIAO Fangzheng. Theoretical technologies and practices concerning "volume development" of low pressure continental shale oil: A case

- study of shale oil in Chang 7 member, Ordos Basin, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(6): 836–844.
- [5] 赵海波, 赵磊, 王团, 等. 松辽盆地古龙页岩油粘弹各向异性波场模拟及其响应特征研究[J]. *石油物探*, 2025, 64(4): 716–726.  
ZHAO Haibo, ZHAO Lei, WANG Tuan, et al. Investigation of viscoelastic anisotropy in wavefield simulations and their response characteristics for Gulong shale oil within the Songliao basin[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2025, 64(4): 716–726.
- [6] 高玉巧, 何希鹏, 程熊, 等. 陆相咸化湖盆“低TOC”烃源岩高生烃效率探讨: 以苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段泥页岩为例[J]. *油气藏评价与开发*, 2024, 14(5): 678–687.  
GAO Yuqiao, HE Xipeng, CHENG Xiong, et al. Discussion on high hydrocarbon generation efficiency of saline lacustrine source rocks with low TOC: A case study of the second member of Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2024, 14(5): 678–687.
- [7] 钟志国, 于雯泉, 段宏亮, 等. 苏北盆地中低TOC复杂断块页岩油勘探进展与攻关方向[J]. *油气藏评价与开发*, 2025, 15(1): 11–18.  
ZHONG Zhiguo, YU Wenquan, DUAN Hongliang, et al. Progress and research direction of shale oil exploration in complex fault blocks with low to medium TOC in Subei Basin[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2025, 15(1): 11–18.
- [8] 余文端, 高玉巧, 咎灵, 等. 溱潼凹陷阜宁组二段泥页岩含油性及其富集层段分布[J]. *油气藏评价与开发*, 2024, 14(5): 688–698.  
YU Wenduan, GAO Yuqiao, ZAN Ling, et al. Distribution of oil bearing and shale oil-rich strata in the second member of Funing Formation in Qintong Sag[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2024, 14(5): 688–698.
- [9] 姚红生, 张培先, 何希鹏, 等. 四川盆地及其周缘地区五峰组-龙马溪组页岩气藏类型及勘探实践[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(6): 1807–1822.  
YAO Hongsheng, ZHANG Peixian, HE Xipeng, et al. Classification and exploration practices of shale gas reservoirs in the Wufeng-Longmaxi formations in the Sichuan Basin and its periphery[J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(6): 1807–1822.
- [10] 王勇. 济阳坳陷古近系沙三下—沙四上亚段咸化湖盆证据及页岩油气地质意义[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(3): 27–36.  
WANG Yong. Evidence of Paleogene saline lake basin in the 3rd and 4th members of Shahejie Formation in Jiyang Depression and geological significance of shale oil and gas[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2024, 48(3): 27–36.
- [11] 杨连如, 曹聪, 王桂成, 等. 下寺湾桥镇-雨岔区陆相泥页岩生烃机理与生烃潜力研究[J]. *重庆科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 26(6): 1–12.  
YANG Lianru, CAO Cong, WANG Guicheng, et al. Study on gas generation mechanism and potential of continental shale in Qiaozhen-Yucha of Xiasiwan Town[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 26(6): 1–12.
- [12] 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.
- [13] 孙龙德, 崔宝文, 朱如凯, 等. 古龙页岩油富集因素评价与生产规律研究[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(3): 441–454.  
SUN Longde, CUI Baowen, ZHU Rukai, et al. Shale oil enrichment evaluation and production law in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(3): 441–454.
- [14] 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.
- [15] 林腊梅, 程付启, 刘骏锐, 等. 济阳坳陷渤南洼陷沙一段页岩油资源潜力评价[J]. *中国海上油气*, 2022, 34(4): 85–96.  
LIN Lamei, CHENG Fuqi, LIU Junrui, et al. Evaluation of shale oil resource potential in the first Member in Bonan sag, Jiyang depression[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(4): 85–96.
- [16] 苗禾垚, 张军建, 杨斌, 等. 巨野煤田深部煤层CO<sub>2</sub>地质封存潜力评价及有利区优选[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2025, 44(3): 56–67.  
MIAO Heyao, ZHANG Junjian, YANG Bin, et al. CO<sub>2</sub> geological storage potential evaluation and optimization of favorable areas in deep coal seams of Juye Coal field[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Sciences)*, 2025, 44(3): 56–67.
- [17] 蔡潇, 高玉巧, 何希鹏, 等. 陆相页岩层纹层组合特征及烃类富集机制: 以苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段为例[J]. *石油勘探与开发*, 2025, 52(6): 1315–1327.  
CAI Xiao, GAO Yuqiao, HE Xipeng, et al. Lamina combination characteristics and hydrocarbon enrichment mechanism of continental shale formations: A case study of the second member of the Paleogene Funing Formation in the Qintong Sag, Subei Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2025, 52(6): 1315–1327.
- [18] 范彩伟, 游君君, 周刚. 北部湾盆地涠西南凹陷流沙港组页岩油赋存空间多尺度表征及可动性评价[J]. *地球科学*, 2025, 50(1): 127–143.  
FAN Caiwei, YOU Junjun, ZHOU Gang. Shale oil mobility evaluation and multi-scale characterization of oil occurrence space of Liushagang Formation in Weixinan Sag, Beibuwan Basin[J]. *Earth Science*, 2025, 50(1): 127–143.
- [19] 李家程, 王永宏, 冯胜斌, 等. 鄂尔多斯盆地西南部长7段夹层型页岩油储层物性特征与原油赋存状态分析[J]. *天然气地球科学*, 2024, 35(2): 217–229.  
LI Jiacheng, WANG Yonghong, FENG Shengbin, et al. Analysis of physical characteristics and crude oil occurrence status of interlayered shale oil reservoir in Chang 7 Member in Southwest Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(2): 217–229.
- [20] 朱如凯, 张婧雅, 李梦莹, 等. 陆相页岩油富集基础研究进展与关键问题[J]. *地质学报*, 2023, 97(9): 2874–2895.  
ZHU Rukai, ZHANG Jingya, LI Mengying, et al. Advances and key

- issues in the basic research of non-marine shale oil enrichment[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(9): 2874–2895.
- [21] 高玉巧, 蔡潇, 夏威, 等. 苏北盆地古近系泰州组二段页岩油储层差异成储机理[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(6): 1947–1959.  
GAO Yuqiao, CAI Xiao, XIA Wei, et al. Differential reservoir formation mechanism of shale oil in the second member of Paleogene Taizhou Formation, Subei Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(6): 1947–1959.
- [22] 王民, 马睿, 李进步, 等. 济阳坳陷古近系沙河街组湖相页岩油赋存机理[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(4): 789–802.  
WANG Min, MA Rui, LI Jinbu, et al. Occurrence mechanism of lacustrine shale oil in the Paleogene Shahejie Formation of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(4): 789–802.
- [23] 刘飞, 杜金良, 孙林, 等. 基于核磁共振的页岩油吸附/游离微观分布定量表征: 以鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段为例[J]. *石油实验地质*, 2025, 47(3): 645–658.  
LIU Fei, DU Jinliang, SUN Lin, et al. Quantitative characterization of adsorbed and free shale oil microscopic distribution based on nuclear magnetic resonance: A case study of Chang 7 member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2025, 47(3): 645–658.
- [24] 于利民. 松辽盆地大情字井地区青山口组一段夹层型页岩油甜点综合评价[D]. 大庆: 东北石油大学, 2023.  
YU Limin. Comprehensive evaluation of sweet spots in interlayer shale oil of the first member of Qingshankou formation in daqingzijing area of the Songliao basin[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2023.
- [25] 李超, 罗涛, 黄亚浩, 等. 苏北盆地高邮凹陷花页1井古近系阜宁组裂缝脉体流体演化及其对页岩油充注过程的指示意义[J]. *石油实验地质*, 2024, 46(2): 228–237.  
LI Chao, LUO Tao, HUANG Yahao, et al. Fluid evolution of fracture veins of Paleogene Funing Formation in well HY1 in Subei Basin and implications for shale oil filling[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2024, 46(2): 228–237.
- [26] 张鹏飞. 基于核磁共振技术的页岩油储集、赋存与可流动性研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2019.  
ZHANG Pengfei. Research on Reservoir Occurrence and Mobility of Shale Oil Based on Nuclear Magnetic Resonance Technology[D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2019.
- [27] 薛海涛, 田善思, 王伟明, 等. 页岩油资源评价关键参数: 含油率的校正[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(1): 15–22.  
XUE Haitao, TIAN Shansi, WANG Weiming, et al. Correction of oil content: One key parameter in shale oil resource assessment[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(1): 15–22.
- [28] 卢双舫, 陈国辉, 王民, 等. 辽河坳陷大民屯凹陷沙河街组四段页岩油富集资源潜力评价[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(1): 8–14.  
LU Shuangfang, CHEN Guohui, WANG Min, et al. Potential evaluation of enriched shale oil resource of Member 4 of the Shahejie Formation in the Damintun Sag, Liaohe Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(1): 8–14.

(编辑 徐佩)