

页岩油储层核磁有效孔隙度起算时间的确定

——以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油储层为例

王伟¹,赵延伟²,毛锐¹,孙中春¹,牟立伟¹

(1. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院,新疆克拉玛依 834000;

2. 中国石油新疆油田分公司采油一厂,新疆克拉玛依 834000)

摘要:准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油储层岩性细,孔喉结构复杂,常规测井评价方法难以准确计算有效孔隙度。为此,选取5种粘土类型共30块砂岩样品,分别测量了氦气孔隙度、不同状态下的核磁 T_2 谱、粘土类型以及含量。通过对配套实验数据的分析,明确了粘土类型对储层核磁 T_2 信号短横向弛豫分量的影响机制。在此基础上,结合实验测量结果以及不同类型粘土束缚水的核磁共振弛豫时间,利用迭代法实现了研究区页岩油储层有效孔隙度的准确计算,并确定起算核磁时间为1.7 ms。该方法的计算结果得到了岩心分析数据以及实际测井资料的验证,应用效果较好,为页岩油储层有效孔隙度评价提供了一种新的技术思路和解决办法。

关键词:核磁共振测井;粘土矿物;有效孔隙度;页岩油;芦草沟组;二叠系;吉木萨尔凹陷;准噶尔盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Determination of the starting time for measurement of NMR effective porosity in shale oil reservoir: A case study of the Permian Lucaogou shale oil reservoir, Jimusaer sag

Wang Wei¹, Zhao Yanwei², Mao Rui¹, Sun Zhongchun¹, Mu Liwei¹

(1. Exploration and Development Research Institute of Xinjiang Oilfield Branch Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China;

2. No. 1 Oil Production Plant, Xinjiang Oilfield Branch Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: Due to the fine-grained lithology and complex pore throat structure of the Lucaogou shale oil reservoir in Jimusaer sag, Junggar Basin, it is difficult to accurately calculate the effective porosity by conventional logging interpretation methods. To solve this difficulty, 30 sandstone samples of five clay types were selected for measurements such as porosity under helium expansion, nuclear magnetic resonance (NMR) T_2 spectrum under different conditions, type and content of clay. The mechanism of clay type effect on short lateral relaxation component of reservoir NMR T_2 signal was revealed through the analysis of matching experimental data. Subsequently, combined with the experimental results and the NMR relaxation time of bound water in various clay types, the effective porosity of shale oil reservoirs in the study area was calculated accurately by iteration method. The initial NMR time was determined to be 1.7 ms, which have been verified well by core analysis and actual logging. The study serves as a new technical solution for effective porosity evaluation of shale oil reservoir.

Key words: NMR logging, clay mineral, effective porosity, shale oil, Lucaogou Formation, Permian, Jimusaer sag, Junggar Basin

对于现今越来越重要的致密油储层以及页岩油储层,有效孔隙度已经成为一个非常重要的物性参数。然而,利用测井资料计算页岩油储层有效孔隙度却存在很大的困难。首先,作为骨架存在的干酪根会直接

导致声波、密度测井计算的孔隙度偏高,使得利用常规测井计算孔隙度的方法基本失效。其次,复杂的岩性以及矿物类型造成岩石骨架测井参数难以确定^[1-2]。针对此问题,目前主要有两种解决办法:一是有机质校

收稿日期:2019-02-12;修订日期:2019-03-26。

第一作者简介:王伟(1986—),女,工程师,储层测井评价。E-mail: wangw_xj@petrochina.com.cn。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB239002)。

正的密度孔隙度法^[3-5];二是利用元素俘获测井估算岩石骨架的测井响应,再利用常规测井进行孔隙度计算^[6-7]。此外,核磁共振测井计算的孔隙度因基本不受干酪根的影响,已广泛应用于页岩油、致密油等非常规储层物性评价中^[8-11]。

本文以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油储层为研究对象,通过实际资料处理与分析,上述方法在研究区的应用效果均不够理想。主要因为无机矿物变化大、需要大量的岩心数据进行标定以及核磁共振有效孔隙度的起算时间不够准确。为了解决页岩油储层有效孔隙度问题,对研究区含不同粘土矿物类型的岩心进行了X-射线衍射和核磁共振联测实验。通过分析实验数据,明确了不同类型的粘土矿物对核磁 T_2 弛豫时间的影响机制,在此基础上,采取“岩心刻度测井”方法,利用迭代法实现了页岩油储层有效孔隙度的准确计算,并确定起算核磁时间为1.7 ms,为准噶尔盆地页岩油储层有效孔隙度评价提供了一种新的技术思路 and 解决办法。

1 地质概况

吉木萨尔凹陷位于准噶尔盆地东部,其北界为吉木萨尔断裂,南界为三台断裂,西界为老庄湾断裂和西地断裂,向东逐渐过渡为古西凸起上。二叠系芦草沟组整体为咸化的湖相沉积环境,厚度大、分布广,纵向上以暗色泥岩的烃源岩与云质岩的储层呈互层分布,属源储相邻、近源成藏的页岩油气藏。芦草沟组页岩油储层属于低孔特低渗储层:覆压孔渗样品平均孔隙度为9.5%,渗透率为 $0.001 \times 10^{-3} \sim 0.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;储层以微孔为主,大尺寸的纳米孔和微米孔为油气的主要储集空间^[12]。

2 理论基础

核磁共振测井可以准确地反映地层孔隙度^[13],图1是岩石中不同类型孔隙流体的核磁孔隙度模型^[14]。从图中可知,核磁有效孔隙度的计算公式为:

$$\phi_E = \phi_T - \phi_{CBW} \quad (1)$$

式中: ϕ_E 为有效孔隙度,%; ϕ_T 为总孔隙度,%; ϕ_{CBW} 为粘土束缚水孔隙度,%。

利用上式计算有效孔隙度的核心是确定粘土束缚水孔隙度的大小。岩石 T_2 分布中短弛豫组分通常是粘土束缚水的弛豫特性,通常将 T_2 时间小于3 ms的组分归为粘土束缚水。常规的砂岩储层常用3 ms作

为粘土束缚水截止值,最早是由Straley等提出的^[15]。Straley等通过对45块不同油田的砂岩岩样进行实验,将薄膜电位测量的阳离子交换当量计算的粘土束缚水饱和度与2 MHz频率下的核磁共振测量结果进行对比,确定粘土束缚水的 T_2 截止值为3 ms。Freedman等(1997)和Martin等(2004)采用与Straley相同的方法,对不同地区的砂岩岩样实验,得出的有效孔隙度起算时间分别为1 ms和2.8 ms^[16-17]。前人研究表明粘土束缚水截止值并不是固定不变的,而是随着地区的不同而发生变化。

芦草沟组页岩油储层岩性细、孔隙度小^[18-21],核磁共振 T_2 分布短弛豫分量比例大,粘土束缚水截止值的改变对储层有效孔隙度的计算结果影响非常显著^[22-23]。因此研究合适的粘土束缚水截止值及认识其岩石物理依据是准确评价研究区页岩油储层有效孔隙度的关键。

3 粘土矿物类型对粘土束缚水 T_2 截止值的影响

Prammer等(1996)通过对不同类型的粘土矿物进行 T_2 弛豫时间测量,结果表明(表1):高岭石的 T_2 谱峰分布为8~16 ms,绿泥石的 T_2 谱峰分布为5 ms左右,伊利石的 T_2 谱峰分布为1~2 ms,而蒙脱石的 T_2 谱峰分布为0.3~1 ms。可见,不同粘土矿物的 T_2 弛豫时间不同,蒙脱石、伊利石的 T_2 弛豫时间小于3 ms,而绿泥石和高岭石则大于3 ms^[24]。

Prammer的实验结果揭示了单种粘土矿物的 T_2 谱横向弛豫范围。然而实际地层中岩石的粘土矿物往往是不同类型粘土组合而成,粘土束缚水 T_2 弛豫时间就是多种粘土矿物的综合响应。本文对准噶尔盆地三个地区(阜东地区、陆梁地区及莫北地区)的30块砂岩岩样进行了核磁共振及配套实验测量。所有样品核

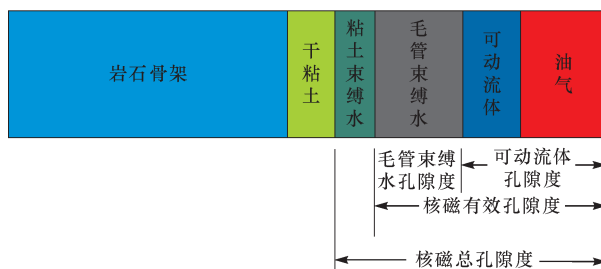


图1 核磁共振 T_2 分布与不同类型孔隙流体对应关系概念模型^[14]

Fig.1 Conceptual model showing the correlation between NMR T_2 spectrum and various pore fluids^[14]

表1 不同类型粘土矿物的 T_2 时间
Table 1 T_2 time of different clay minerals

粘土类型	含水率/%	粘土束缚 T_2 ($T_e = 0.5$)/ms
蒙脱石	7.0	—
	18.9	0.3
	31.1	0.5
	54.4	1.0
伊利石	8.8	1.0
	15.8	2.0
高岭石	11.7	8.0
	17.4	12.0
	20.0	16.0
绿泥石	7.5	5.0

注: T_e 回波间隔, ms。

磁共振实验均采用 NaCl 溶液饱和, 岩心核磁共振测量使用的是英国核磁共振仪器公司开发的 MARAN - 2 型核磁共振岩心分析仪。主要工作参数为: 测试温度 30 ℃, 工作频率 2 MHz, 回波间隔 0.2 ms、等待时间 6 s, 回波数 4 096、扫描次数 128。使用 LD5 - 10B 型离心机, 在 100 psi 压力下对岩样进行离心处理, 使其达到束缚水状态, 然后进行核磁共振测量, 主要采集参数与饱和水状态相同。

表2为3个地区4个层位的X - 衍射分析结果, 图2为这3个地区核磁共振实验结果, 其中红色的为饱和水 T_2 谱, 蓝色虚线为离心 T_2 谱。阜东地区头屯河组砂岩粘土矿物类型以伊/蒙混层为主, 平均相对含量为 78.71%, 其他粘土矿物相对含量较少, 伊利石、高岭石和绿泥石的平均相对含量分别为 6.21%, 9.43% 和 5.64%, 该区样品的粘土束缚水峰值介于 1 ~ 3 ms (图2a)。莫北地区三工河组砂岩粘土矿物类

表2 准噶尔盆地不同地区不同层位砂岩样品粘土矿物类型及相对含量

Table 2 Mineral types and relative contents of clay in the sandstone samples from different horizons of various regions in Junggar Basin

地区	粘土矿物含量/%				
	蒙脱石	伊/蒙混层	伊利石	高岭石	绿泥石
阜东地区 头屯河组		78.71	6.21	9.43	5.64
莫北地区 三工河组		17.00	16.00	38.38	28.78
陆梁地区 白垩系	42.14	27.63	7.77	6.54	15.91
陆梁地区 侏罗系		17.24	23.07	44.93	14.76

型以高岭石和绿泥石为主, 平均相对含量分别为 38.38% 和 28.78%, 伊利石和伊/蒙混层平均相对含量均较低, 分别为 16% 和 17%, 该区样品的粘土束缚水峰值介于 15 ~ 30 ms (图2b)。陆梁地区白垩系砂岩粘土矿物类型以蒙脱石和伊/蒙混层为主, 平均相对含量分别为 42.14% 和 27.63%, 绿泥石、伊利石和高岭石平均相对含量较低, 分别为 15.91%, 7.77% 和 6.54%, 该区样品的粘土束缚水峰值介于 3 ~ 4 ms (图2c)。陆梁地区侏罗系砂岩粘土类型以高岭石为主, 平均相对含量 44.93%, 伊利石、伊/蒙混层和绿泥石平均相对含量分别为 23.07%, 17.24% 和 14.76%, 该区样品的粘土束缚水峰值大于 20 ms (图2d)。

上述实验结果可以看出, 以伊/蒙混层为主的阜东头屯河组岩样和以蒙脱石、伊/蒙混层为主陆梁白垩系岩样的 T_2 谱中粘土束缚水峰靠前, 在 3 ms 左右; 以高岭石和绿泥石为主的莫北三工河组岩样和以高岭石为主的陆梁侏罗系岩样, T_2 谱中粘土束缚水峰靠后, 大于 15 ms。实验结果表明粘土矿物类型确实对储层核磁共振 T_2 短弛豫分量的分布有控制作用, 含蒙脱石或伊/蒙混层矿物的砂岩比含伊利石或高岭石矿物的砂岩核磁共振 T_2 短弛豫分布更小更靠前。

4 核磁有效孔隙度起算时间的确定

上述实验分析结果表明, 利用核磁共振测井评价储层有效孔隙度的关键是在明确储层粘土矿物主要类型的基础上, 选择合理的核磁有效孔隙度起算时间。

芦草沟组岩样 X - 衍射实验结果表明 (图3), 芦草沟组页岩油储层不含高岭石, 绿泥石的平均相对含量不到 5%, 伊/蒙混层和蒙脱石相对含量均在 30% ~ 40%, 绿/蒙混层相对含量为 25% 左右, 说明此地区粘土矿物类型以伊利石和蒙脱石为主。通过分析芦草沟组页岩油储层 25 块离心样品的核磁共振实验和粘土矿物 X - 衍射数据, 其中 19 块样品粘土矿物以蒙脱石和伊/蒙混层为主, 离心 T_2 谱峰小于或等于 3 ms, 4 块样品的离心 T_2 谱峰在 3 ~ 5 ms, 其绿/蒙含量较高, 仅两块样品的离心 T_2 谱峰大于 10 ms, 其绿泥石和绿/蒙混层相对含量较高 (表3)。以 C 井 01357 号的岩样核磁共振 T_2 谱图为例 (图4), 蓝色为饱和水 T_2 谱, 红色为离心后 T_2 谱, 可以看到粘土束缚峰小于 3 ms。根据配套的核磁共振和 X - 衍射实验数据分析认为, 本地区的粘土束缚水 T_2 截止值应小于 3 ms。

确定有效孔隙度起算时间最为直接的方法是岩心有效孔隙度和核磁共振联测实验^[25]。然而, 这种方法

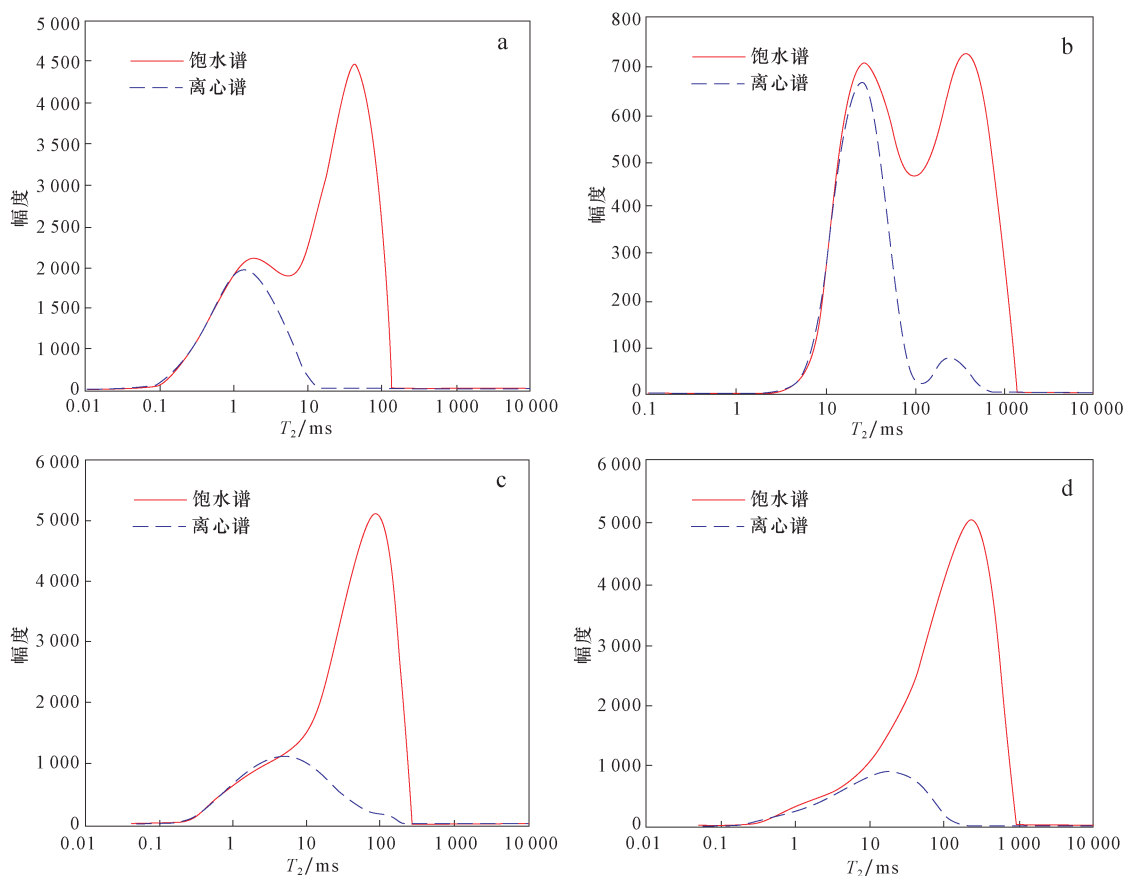


图2 准噶尔盆地不同地区不同层位砂岩岩样核磁共振实验测量结果

Fig. 2 NMR measurements of sandstone samples from various sections in different areas of the Junggar Basin

a. 阜东地区头屯河组; b. 莫北地区三工河组; c. 陆梁地区白垩系; d. 陆梁地区侏罗系

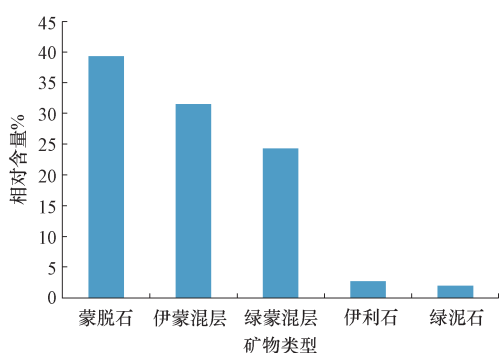


图3 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组岩样

X-衍射数据分析结果

Fig. 3 Analysis of X-ray diffraction data of rock samples from the Permian Lucaogou Formation, Jimusaer sag

需要大量的实验样品,同时由于岩心实验的环境与井下仪器的采集环境和仪器参数具有较大的差异,会造成实验结果与井下实测资料的一致性差,实验结果通常无法直接应用于孔隙度计算^[26]。对此,研究提出应用系统取心岩心有效孔隙度分析数据和核磁共振测井不同 T_2 起算时间计算的孔隙度进行对比分析,采用迭代法确定核磁有效孔隙度起算时间。

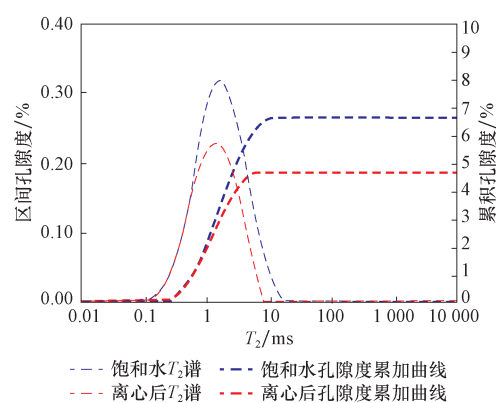


图4 吉木萨尔凹陷C井01357号岩样核磁共振测量结果

Fig. 4 NMR measurements of rock samples from Well C in Jimusaer sag

对岩心分析的孔隙度进行厘米级岩心归位后,基于实际地层的核磁共振测井 T_2 谱,从 0.3 ms 至 3 ms,并以 0.1 ms 的时间间隔逐渐增加,计算得到不同起始时间的有效孔隙度。计算公式为:

$$\phi_e = \sum_{T_{2,\text{cutoff}}}^{T_{2,\text{max}}} \phi_k \quad (2)$$

式中: ϕ_e 为计算的有效孔隙度,%; $T_{2,\text{max}}$ 为横向弛豫时

表 3 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组岩样离心 T_2 谱峰值与粘土矿物含量

Table 3 The peak of centrifugal T_2 spectrum and clay mineral content of rock samples in the Permian Lucaogou Formation, Jimusaer sag

井号	样品编号	离心 T_2 谱峰值/ms	粘土矿物含量/%				
			蒙脱石	伊蒙混层	伊利石	绿蒙混层	绿泥石
A	01109	1.85	85	6	0	0	9
	0110	3.00	34	25	0	25	16
	0111	1.00	95	0	0	5	0
	0112	5.00	30	0	15	23	32
	0113	3.00	43	25	12	20	0
	0114	1.80	55	35	10	0	0
B	01221	2.00	0	83	9	0	8
	01222	4.00	0	69	0	31	0
	01223	1.90	89	0	0	0	11
	01224	1.30	100	0	0	0	0
	01225	3.00	0	54	0	46	0
C	01351	4.00	0	55	0	45	0
	01352	2.00	0	95	5	0	0
	01353	2.00	0	61	30	0	9
	01354	3.00	70	0	0	30	0
	01355	2.50	67	0	0	33	0
	01356	3.00	0	81	7	0	12
	01357	1.70	0	100	0	0	0
	01358	1.00	100	0	0	0	0
	01359	1.20	0	95	5	0	0
	01360	5.00	37	0	0	63	0
	01361	3.20	0	78	15	0	0
	01362	3.00	62	0	9	29	0
	01363	15.00	0	0	8	77	15
	01364	11.00	0	0	9	68	23

间最大值,斯伦贝谢公司 CMR 仪器最大 T_2 时间为 3 000 ms; $T_{2,cutoff}$ 为粘土束缚水 T_2 截止值; ϕ_k 为第 k 个 T_2 时间对应的孔隙度分量, %。

当每得到一个 T_2 截止值计算的有效孔隙度后,将取心处储层的计算值与其岩心分析的有效孔隙度进行均方根误差分析,其表达式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\phi_{ei} - \varphi_{ci})^2}{n}}$$

(3)

式中: $RMSE$ 为某一截止值计算的有效孔隙度与岩心分析孔隙度的均方根误差; n 为样品总数; ϕ_{ei} 为核磁共振计算的第 i 个样点的有效孔隙度, %; φ_{ci} 为第 i 个样品的岩心分析孔隙度, %。

均方根误差最小所对应的 T_2 时间,认定为储层有效孔隙度的 T_2 截止值。表 3 为利用上述方法从 0.3 ms 至 3 ms 起始时间计算的有效孔隙度与岩心分析孔隙

度的均方根误差。从此表可知,以 1.7 ms 起始时间计算的有效孔隙度与岩心分析有效孔隙度的均方根误差为 3.87,小于其他起始时间计算的孔隙度与岩心分析孔隙度的误差。综合考虑,最终确定以 1.7 ms 为粘土束缚水截止值计算的核磁有效孔隙度为芦草沟组页岩油储层有效孔隙度。

5 应用

将 1.7 ms 作为有效孔隙度起算时间的方法应用到实际井资料中,取得了较理想的结果。图 5 为 C 井核磁共振测井孔隙度处理成果图,从图中可以看出核磁 0.3 ms 孔隙度(第一道)和核磁 3 ms 孔隙度(第三道)的变化趋势均与分析孔隙度有较好的相关性,但绝对误差较大。3 146~3 150 m 井段,核磁 0.3 ms 起算孔隙度与分析孔隙度的吻合度高于核磁 3 ms 起算孔

隙度与分析孔隙度的吻合度;而 3 155 ~3 161 m 井段处恰好相反。而 1.7 ms 起算时间计算的有效孔隙度(第二道)与分析的孔隙度在全井段吻合性均较好,能够较真实地反映地层的孔隙度。

为进一步验证该方法的可靠性,使用该方法对 B 井进行了核磁共振孔隙度处理,如图 6 所示。图中第一、三、四道是常规测井曲线道,第五道为分析孔隙度与核磁共振测井处理孔隙度,包括核磁 3 ms 孔隙度和核磁 1.7 ms 孔隙度。

可以看出核磁 1.7 ms 孔隙度与分析孔隙度吻合

度高,相对误差为 2.86%,而常用的核磁 3 ms 孔隙度与分析孔隙度吻合度较差,相对误差可达 20%以上。这也说明了在研究区芦草沟组页岩油储层以 1.7 ms 作为有效孔隙度起算时间具有明显的技术优势。

6 结论

1) 通过对比准噶尔盆地不同地区、不同层系岩心核磁共振 T_2 谱和 X - 衍射实验结果,明确了核磁共振有效孔隙度起算时间受粘土矿物类型的控制。

表 3 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组不同起算时间值与岩心分析值的均方根误差

Table 3 RMS error analysis for different starting time values and core analysis values in the Permian Lucaogou Formation, Jimusaer sag

起始时间/ms	均方差/%	起始时间/ms	均方差/%	起始时间/ms	均方差/%	起始时间/ms	均方差/%
0.3	3.94	1.0	4.08	1.7	3.87	2.4	4.59
0.4	3.92	1.1	4.12	1.8	3.90	2.5	4.59
0.5	3.93	1.2	4.17	1.9	4.39	2.6	4.61
0.6	3.95	1.3	4.21	2.0	4.41	2.7	4.62
0.7	3.99	1.4	3.91	2.1	4.44	2.8	4.63
0.8	4.01	1.5	3.89	2.2	4.46	2.9	4.65
0.9	4.05	1.6	3.88	2.3	4.53	3.0	4.67

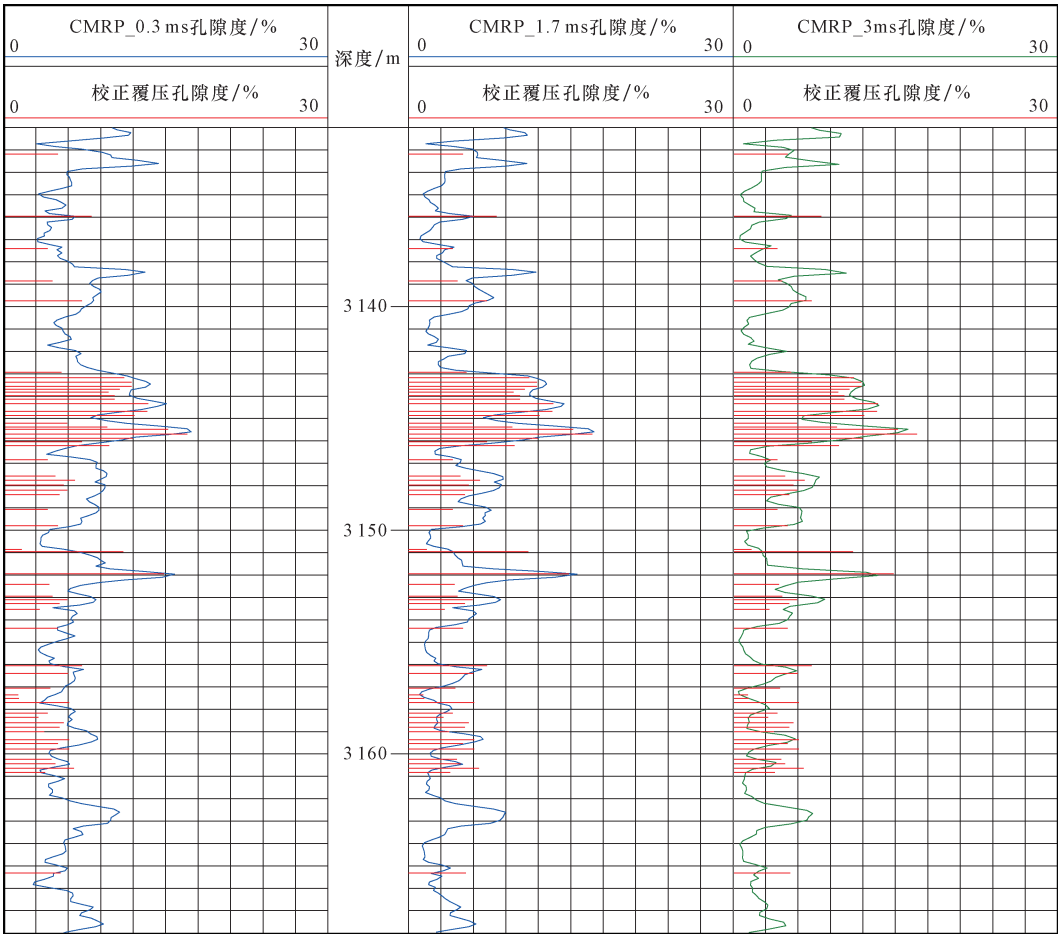


图 5 吉木萨尔凹陷 C 井核磁共振有效孔隙度处理成果

Fig. 5 A profile showing the effective porosity through processing NMR data from Well C in Jimusaer sag

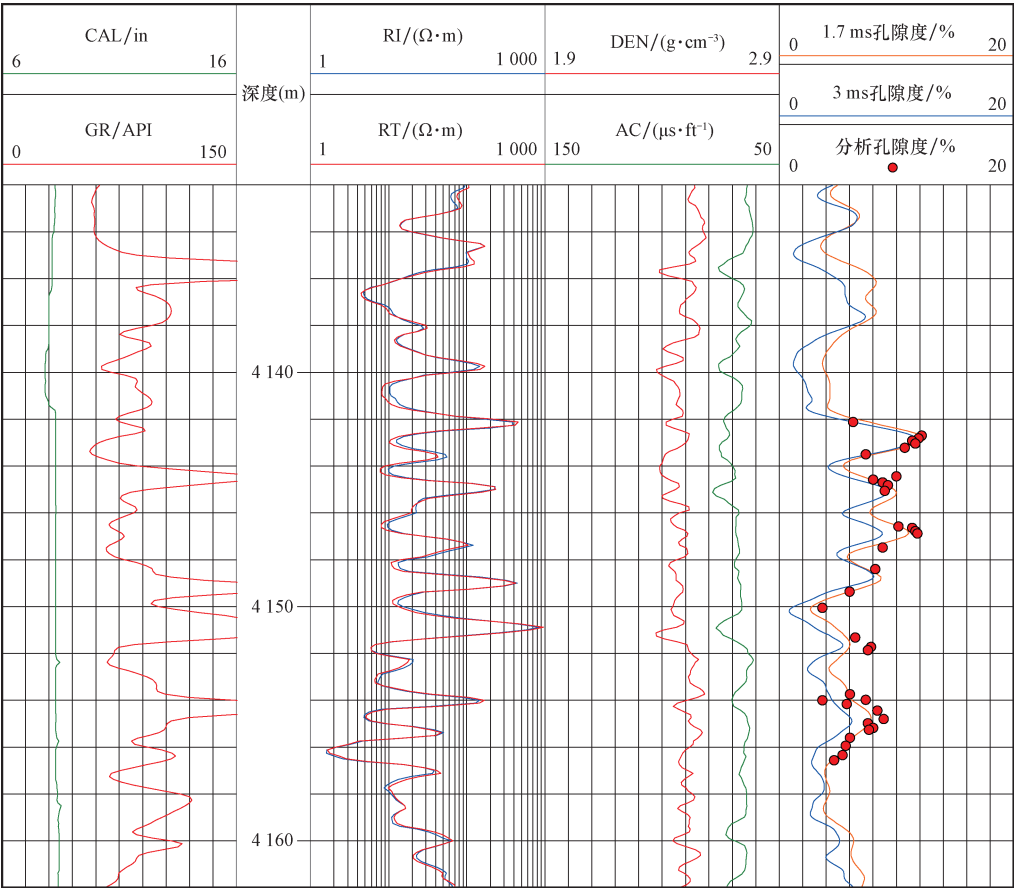


图 6 吉木萨尔凹陷 B 井不同起算时间下孔隙度计算精度对比

Fig. 6 Comparison of porosity calculation accuracy in Well B at different starting time, Jimusaer sag

2) 若储层的主要粘土矿物类型以伊利石、蒙脱石或伊/蒙混层为主,则有效孔隙度的起算时间在 0.3 ms 至 3 ms 的范围内确定。若储层的主要粘土矿物类型以高岭石、绿泥石为主,则有效孔隙度的起算时间在大于 3 ms 的范围内确定。研究区页岩油储层粘土矿物以蒙脱石和伊利石为主,其有效孔隙度起算时间应小于 3 ms。

3) 以系统取心岩心有效孔隙度分析数据为基础,与现场核磁共振测井不同粘土束缚水截止值计算的孔隙度进行对比,利用迭代法最终确定 1.7 ms 为研究区核磁共振有效孔隙度起算时间,为储层物性评价提供了可靠参数。

参 考 文 献

[1] 丁娱娇,邵维志,常静春,等. 过渡岩类致密储层特征及测井评价[J]. 测井技术,2016,40(3):331-338.
Ding Yujiao, Shao Weizhi, Chang Jingchun, et al. Transitional rock tight reservoir characteristics and log evaluation[J]. Well logging technology, 2016, 40(3): 331-338.

[2] 张琦斌,郭智奇,刘财,等. 针对有机质微观特性的页岩储层岩石物理建模及应用[J]. 地球物理学进展,2018,33(5):2083-2091.
Zhang Qinbin, Guo Zhiqi, Liu Cai, et al. Rock physics model and its applications in the Longmaxi shale based on the quantification of

microstructural properties of organic matter[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(5): 2083-2091.

[3] 李超,张立宽,罗晓容,等. 泥岩压实研究中有机质导致声波时差异常的定量校正方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(3): 77-87.
Li Chao, Zhang Likuang, Luo Xiaorong, et al. A quantitative method for revising abnormally high sonic data in rich-organic rock during compaction study[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(3): 77-87.

[4] 张冲,郭聪,朱林奇,等. 考虑有机质校正的页岩气储层总孔隙度测井评价方法[J]. 煤炭学报, 2017(6): 1527-1534.
Zhang Chong, Guo Cong, Zhu Linqi, et al. A logging interpretation method for total porosity considering organic matter correction of shale gas reservoirs[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(6): 1527-1534.

[5] 高衍武,赵延静,李国利,等. 基于核磁和密度测井评价准噶尔盆地致密油烃源岩有机碳含量[J]. 油气藏评价与开发, 2014(2): 5-8.
Gao Yanwu, Zhao Yanjing, Li Guoli, et al. Total organic carbon evaluation of tight oil source rocks in Junggar basin based on nuclear magnetic logging and density logging[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2014(2): 5-8.

[6] 吴勇,侯雨庭,李会庚,等. 高精度地层元素测井在页岩油储层评价中的应用——以鄂尔多斯盆地长7段为例[J]. 非常规油气, 2016, 3(2): 1-10.

- Wu Yong, Hou Yuting, Li Huigeng, et al. Application of high-precision formation elements logging to shale oil reservoir evaluation—A case study of Seventh Member of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2016, 3(2): 1–10.
- [7] 蔡德洋, 章成广, 信毅, 等. 利用元素俘获测井评价致密砂岩岩性及有效性[J]. *工程地球物理学报*, 2012, 09(4): 440–444.
- Cai Deyang, Zhang Chengguang, Xin Yi, et al. Using Elemental Capture Spectroscopy (ECS) logging to evaluate tight sandstone lithology and its effectiveness [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2012, 09(4): 440–444.
- [8] 张晋言. 页岩油测井评价方法及其应用[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(3): 1154–1162.
- Zhang Jinyan. Well logging evaluation method of shale oil reservoirs and its applications [J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(3): 1154–1162.
- [9] 张笑, 王殿生, 安祥, 等. 致密油岩心孔隙度核磁共振实验测量的杂质信号处理方法[J]. *核电子学与探测技术*, 2015(4): 411–416.
- Zhang Xiao, Wang Diansheng, An Xiang, et al. Methods of processing impurity signals on measuring porosity of cores from tight oil reservoir by NMR [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2015(4): 411–416.
- [10] Martin P, Dacy J. Effective Q_v by NMR tests [C]//SPWLA 45th Annual Logging Symposium, 2004.
- [11] 成志刚, 吴有彬, 李戈理, 等. 核磁共振测井技术在致密油储层评价中的应用研究[J]. *测井技术*, 2016, 40(6): 719–725.
- Cheng Zhigang, Wu Youbin, Li Geli, et al. Application of NMR logging to the evaluation of Tight Oil Reservoirs [J]. *Well Logging Technology*, 2016, 40(6): 719–725.
- [12] 宋永, 周路, 郭旭光, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组湖相云质致密油储层特征与分布规律[J]. *岩石学报*, 2017, 33(4): 1159–1170.
- Song Yong, Zhou Lu, Guo Xuguang, et al. Characteristics and occurrence of lacustrine dolomitic tight-oil reservoir in the Middle Permian Lucaogou Formation, Jimusaer sag, southeastern Junggar Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(4): 1159–1170.
- [13] Coates G R, Xiao L Z, Prammer M G. NMR logging principles and applications [M]. Texas: Gulf Publishing Company, 1999: 20–60.
- [14] 匡立春, 孙中春, 毛志强, 等. 核磁共振测井技术在准噶尔盆地油气勘探开发中的应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2015: 51–59.
- Kuang Lichun, Sun Zhongchun, Mao Zhiqiang, et al. Application of NMR logging technology in oil and gas exploration and development in Junggar Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015: 51–59.
- [15] Straley C, Rossini D, Vinegar H, et al. Core analysis by low field NMR [C]//SCA Conference Paper, 1994: 9404.
- [16] Freedman R, Boyd A, Gubelin G, et al. Measurement Of Total Nmr Porosity Adds New Value To Nmr Logging [C]//SPWLA 38th Annual Logging Symposium, 1997.
- [17] Martin P, Dacy J. Effective Q_v by NMR tests [C]//SPWLA 45th Annual Logging Symposium, 2004.
- [18] 匡立春, 胡文瑄, 王绪龙, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层初步研究: 岩性与孔隙特征分析 [J]. *高校地质学报*, 2013(3): 529–535.
- Kuang Lichun, Hu Wenxuan, Wang Xulong, et al. Research of the tight oil reservoir in the Lucaogou Formation in Jimusaer Sag: Analysis of lithology and porosity characteristics [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2013(3): 529–535.
- [19] 匡立春, 孙中春, 欧阳敏, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组复杂岩性致密油储层测井岩性识别 [J]. *测井技术*, 2013, 37(6): 638–642.
- Kuang Lichun, Sun Zhongchun, Ouyang Min, et al. Complication lithology logging identification of the Lucaogou tight oil reservoir in Jimusaer Depression [J]. *Well Logging Technology*, 2013, 37(6): 638–642.
- [20] 穆永利, 陈建, 张丽华, 等. 致密油储层测井评价及研究一以吉木萨尔凹陷芦草沟组为例 [J]. *长江大学学报(自科版)*, 2015, 12(32): 21–26.
- Mu Yongli, Chen Jian, Zhang Lihua, et al. Well logging evaluation and study of tight oil reservoirs—By taking Lucaogou Formation in Jimusaer Depression for example [J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2015, 12(32): 21–26.
- [21] 惠克来, 操应长, 朱如凯, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层岩石类型及特征 [J]. *石油学报*, 2015, 36(12): 1495–1507.
- Xi Kelai, Cao Yingchang, Zhu Rukai, et al. Rock types and characteristics of tight oil reservoir in Permian Lucaogou Formation, Jimusaer sag [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 36(12): 1495–1507.
- [22] 王振林, 毛志强, 孙中春, 等. 致密油储层孔隙结构核磁共振测井评价方法 [J]. *断块油气田*, 2017, 24(6): 53–57.
- Wang Zhenlin, Mao Zhiqiang, Sun Zhongchun, et al. Evaluation of pore structure using NMR logs for tight oil reservoirs [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2017, 24(6): 53–57.
- [23] 赵培强, 孙中春, 罗兴平, 等. 致密油储层核磁共振测井响应机理研究 [J]. *地球物理学报*, 2016, 59(5): 1927–1937.
- Zhao Peiqiang, Sun Zhongchun, Luo Xingping, et al. Study on the response mechanisms of nuclear magnetic resonance (NMR) log in tight oil reservoirs [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(5): 1927–1937.
- [24] Prammer M G, Drack E D, Bouton J C, et al. Measurements of clay-bound water and total porosity by magnetic resonance Logging [J]. *Log Analyst*, 1996, 37(6): 61–97.
- [25] 毛志强, 张冲, 肖亮. 一种基于核磁共振测井计算低孔低渗气层孔隙度的新方法 [J]. *石油地球物理勘探*, 2010, 45(1): 105–109.
- Mao Zhiqiang, Zhang Chong, Xiao Liang. A NMR-based porosity calculation method for low porosity and low permeability gas reservoir [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2010, 45(1): 105–109.
- [26] 谢红, 肖立志, 邓克俊. 核磁共振测井孔隙度观测模式与处理方法研究 [J]. *地球物理学报*, 2006, 49(5): 1567–1572.
- Xie Ranhong, Xiao Lizhi, Deng Kejun. NMR logging porosity activation and data processing method [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(5): 1567–1572.