

引用: 石玉江, 蔡文渊, 刘国强, 等. 页岩油储层孔隙流体的全直径岩心二维核磁共振图谱特征及评价方法 [J]. 中国石油勘探, 2023, 28(3): 132-144.  
Shi Yujiang, Cai Wenyuan, Liu Guoqiang, et al. Full diameter core 2D NMR spectrum characteristics of pore fluid in shale oil reservoir and evaluation method [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(3): 132-144.

# 页岩油储层孔隙流体的全直径岩心二维核磁共振图谱特征及评价方法

石玉江<sup>1</sup> 蔡文渊<sup>1</sup> 刘国强<sup>2</sup> 袁超<sup>3</sup> 张伟<sup>1</sup> 祇淑华<sup>1</sup> 李思<sup>1</sup> 王少卿<sup>1</sup>

(1 中国石油集团测井有限公司; 2 昆仑数智科技有限责任公司; 3 中国石油油气和新能源分公司)

**摘要:** 如何客观评价页岩油层中的孔隙流体, 准确测量和定量表征页岩油及致密油储层含油饱和度与可动油含量等参数, 已经成为当前急需解决的重要技术难题。通过率先在国内引入车载移动式全直径岩心核磁共振测量仪, 开展了页岩油岩心现场测试分析和评价研究工作, 实现了现场对钻井取心进行连续、高精度、无损的快速核磁共振扫描, 弥补了核磁共振测井和室内岩心实验的不足, 填补了国内页岩油全直径岩心现场测量技术空白。结合现场岩心描述、其他配套实验数据及试油验证, 系统总结出不同流体组分的二维核磁共振  $T_1$ - $T_2$  图谱特征, 明确了不同孔径中油、水信号的  $T_1/T_2$  比值变化规律, 建立了基于全直径岩心二维核磁共振图谱特征的孔隙流体组分分析方法及识别标准, 实现页岩油、致密油及复杂碎屑岩等储层孔隙流体组分准确识别与流体饱和度定量解释。车载移动式全直径岩心二维核磁共振测量技术在松辽盆地古龙页岩油、鄂尔多斯盆地长7<sub>3</sub>页岩油、河套盆地勘探评价中发挥了重要作用, 在大庆、长庆、西南、华北、新疆等致密油气田已规模应用, 取得良好效果。

**关键词:** 全直径岩心; 二维核磁共振; 流体组分; 可动油饱和度

**中图分类号:** P631.823 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2023.03.011

## Full diameter core 2D NMR spectrum characteristics of pore fluid in shale oil reservoir and evaluation method

Shi Yujiang<sup>1</sup>, Cai Wenyuan<sup>1</sup>, Liu Guoqiang<sup>2</sup>, Yuan Chao<sup>3</sup>, Zhang Wei<sup>1</sup>, Zhi Shuhua<sup>1</sup>, Li Si<sup>1</sup>, Wang Shaoqing<sup>1</sup>

(1 CNPC Logging Co., Ltd.; 2 Kunlun Digital Technology Co., Ltd.; 3 PetroChina Oil, Gas & New Energies Company)

**Abstract:** How to objectively evaluate the pore fluid in shale oil reservoir and accurately measure and quantitatively characterize parameters such as oil saturation and mobile oil content in shale oil and tight oil reservoirs are key technical problems that need to be solved urgently. The vehicle-mounted mobile full diameter core NMR measurement instrument is firstly introduced in domestic to conduct on-site core testing analysis and shale oil evaluation, which supports to realize the continuous, high-precision, non-destructive and rapid NMR scanning of drilled core on well site, make up for the shortcomings of NMR logging and indoor core experiments, and fill the blank of on-site measurement technology of full diameter shale oil core in China. Based on field core description, other supporting experimental data and well testing verification, the characteristics of 2D NMR  $T_1$ - $T_2$  spectrum of various fluid components are systematically summarized, the change rule of  $T_1/T_2$  ratio of oil and water fluid signals in pores with different diameters is identified, and the pore fluid component analysis method and identification standard are established by using 2D NMR spectrum characteristics of full diameter core, which support to realize the accurate

第一作者简介: 石玉江 (1971-), 男, 甘肃平凉人, 博士, 2012年毕业于西北大学, 教授级高级工程师, 主要从事测井技术应用、地质综合研究与管理。地址: 陕西省西安市高新技术开发区锦业二路丈八五路50号, 邮政编码: 710000。E-mail: syj\_cq@petrochina.com.cn

通信作者简介: 张伟 (1990-), 男, 湖北荆州人, 硕士, 2015年毕业于长江大学, 工程师, 主要从事测井解释评价应用工作。地址: 河北省任丘市渤海东路002号, 邮政编码: 062550。E-mail: hbzhangw@cnpc.com.cn

收稿日期: 2022-12-30; 修改日期: 2023-04-07

identification of pore fluid components and quantitative interpretation of fluid saturation of shale oil, tight oil and complex clastic rock reservoirs. The technology of vehicle-mounted mobile full diameter core NMR measurement has played an important role in the exploration and evaluation of Gulong shale oil in Songliao Basin, Chang 7<sub>3</sub> shale oil in Ordos Basin, as well as in Hetao Basin, and has widely been applied in tight oil and gas oilfields in Daqing, Changqing, Xinan, Huabei, and Xinjiang oilfields, in which good results have been achieved.

**Key words:** full diameter core, 2D NMR, fluid component, mobile oil saturation

## 0 引言

储集物性、含油性是页岩油、致密油等非常规储层甜点评价中的两项关键参数<sup>[1-9]</sup>,随着页岩油勘探的不断深入,储集空间中流体可流动性也成为一项重要评价指标。然而,页岩油、致密油等非常规储层微观孔隙结构复杂,储集空间主要为纳米级和微纳(亚微)米级孔隙,流体赋存状态十分复杂<sup>[10-14]</sup>,现有的岩石物理实验方法和测井方法在表征孔隙流体特征中均面临较大挑战,如何准确测量和定量表征页岩油及致密油储层含油饱和度与可动油含量等参数,并客观评价其含油性与可流动性,已经成为当前急需解决的重要技术难题。

近年来,二维核磁共振技术已应用于页岩油、致密油储层柱塞岩样的岩石物理实验测量和流体识别中,国内外学者主要基于高频核磁共振分析仪对来自页岩油储层钻井取心的柱塞样来样和干样,进行了较多的二维核磁共振实验室测量和二维核磁共振 $T_1-T_2$ 图谱流体组分分析,研究表明二维核磁共振 $T_1-T_2$ 技术能较好地识别出孔隙空间中不同赋存状态的流体组分和固体有机质<sup>[15-18]</sup>。另外,研究学者还对页岩油储层粉碎样进行逐级地球化学热解和二维核磁共振实验室联测分析研究,证实了基于二维核磁共振 $T_1-T_2$ 图谱可有效区分吸附烃和游离烃信号,并可用于评价流体的可流动性<sup>[19-20]</sup>。虽然二维核磁共振技术在页岩油研究方面取得较大进展,但在页岩油、致密油甜点评价与优选的现场应用方面仍面临诸多困难,一是在纹层发育的泥页岩岩心上取柱塞样困难,获取完整岩样受限,对于纵向非均质性强的页岩油储层而言,柱塞岩样代表性存在局限;二是在制备新鲜岩样过程中,无法避免柱塞样中流体的散逸,导致在实验室对新鲜来样进行二维核磁共振测量分析时所获取的流体组分并不完全,主要是缺失易散失的可动流体组分,因此会低估储层品质;三是二维核磁共振 $T_1-T_2$ 图谱流体分布研究还有待深入,存在不同尺度孔隙空间中流体信号界限不清的问题,虽然国内

外学者根据各自实验研究总结概括了诸多二维核磁共振 $T_1-T_2$ 图谱流体分布图版,但这些图版中的流体组分界限存在巨大差异<sup>[21-24]</sup>,当前还缺乏广泛适用的流体识别图版,二维核磁共振分析技术亟待深化。此外,二维核磁共振测井技术在页岩油、致密油储层开始初步应用,在含油性评价方面发挥了重要作用,但受到井筒客观条件和采集模式与原始回波信号信噪比较低等问题的制约,与实验室岩样测量相比,其观测范围、测量精度受限,纳米级孔隙流体观测不完整,二维核磁共振 $T_1-T_2$ 图谱分辨率较低,对 $T_2$ 小于10ms区间的流体组分信号区分度低,急需相应的二维核磁共振岩石物理实验的标定,明确不同孔隙流体组分界限,提高解释精度。

车载移动式全直径岩心二维核磁共振测量技术的出现有效解决了上述问题,该技术能直接对现场刚出筒的钻井取心进行连续、无损、快速的核磁共振测量,在钻井阶段及时获取岩心连续深度、高信噪比的一维 $T_2$ 和二维 $T_1-T_2$ 核磁共振数据,兼顾了核磁共振测井连续测量与室内高精度测量的优势,更加真实反映了致密储层流体组分分布特征。该项技术首先在俄罗斯推出,主要应用于常规储层和稠油储层全直径岩心现场测量<sup>[25]</sup>,2019年首次引入国内开展现场试验,至2021年先后在多个油田致密油、页岩油钻井取心现场进行应用。2022年5月,国产的车载移动式全直径岩心核磁共振测量仪在现场试验成功,填补了国内全直径岩心现场核磁共振测量技术空白。

本文在阐述车载移动式全直径岩心二维核磁共振测量技术方法及优势的基础上,结合现场岩心描述、其他配套实验数据及试油验证,建立了基于全直径岩心二维核磁共振 $T_1-T_2$ 图谱的孔隙流体组分分析方法及流体识别标准。截至2022年9月,这项技术在国内各大油田已展开规模应用,提供了基于二维核磁共振 $T_1-T_2$ 图谱解释的含油饱和度、可动油饱和度等重要参数,为页岩油、致密油勘探储层甜点评价、油层识别和资源评估奠定了基础。

## 1 全直径岩心二维核磁共振测量技术及优势

### 1.1 测量技术

通过全直径岩心二维核磁共振移动式车载装置,实现了在井场对钻井取心进行核磁共振测量。图1为全直径岩心二维核磁共振测量系统,在井场钻井取心出筒后,第一时间将其放置在岩心槽中,通过岩心步进系统将岩心匀速地推送至磁场中进行核磁共振扫描

测量,测距仪连续记录测量深度。

采用CPMG脉冲序列进行一维核磁共振 $T_2$ 测量,通过连续深度采样的方式进行扫描,按深度逐点对采集的单回波串反演处理,获取沿着岩心、连续深度的一维标准 $T_2$ 谱;采用多组等待时间的饱和恢复脉冲序列进行二维核磁共振 $T_1-T_2$ 测量,通过连续点测的方式进行扫描,按深度逐点对采集的多组回波串反演处理,获取沿着岩心、连续深度的二维核磁共振 $T_1-T_2$ 图谱。通过获取的一维 $T_2$ 和二维 $T_1-T_2$ 核磁共振图谱,进行储层物性、流体组分与饱和度评价。

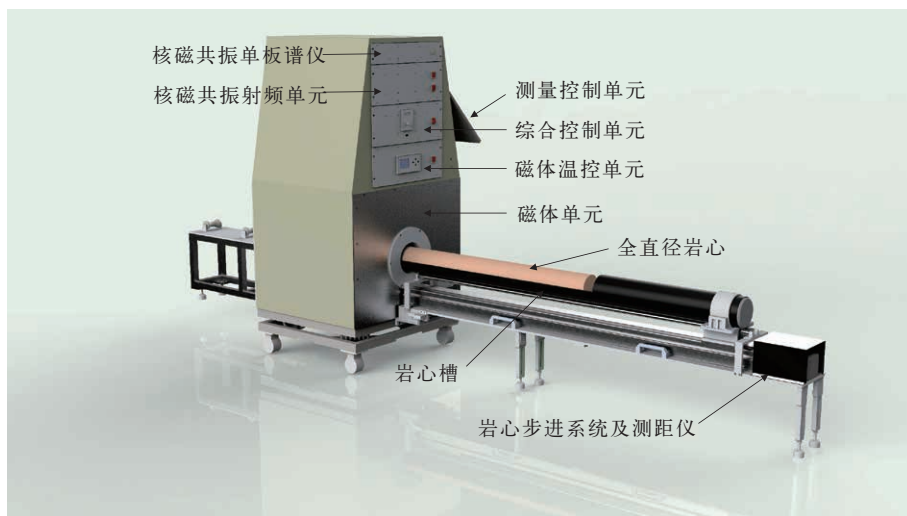


图1 全直径岩心二维核磁共振测量系统

Fig.1 Full diameter core 2D NMR measurement system

### 1.2 技术优势

与室内柱塞岩样核磁共振实验技术相比,全直径岩心二维核磁共振测量具有以下独特优势:(1)能直接对钻井取心进行无损测量。在不破坏钻井取心的同时,也避免了制备新鲜柱塞岩样过程中的流体散逸。

(2)在钻井现场即可获得第一手的原始地层信息,能快速且准确提供储层孔隙度、孔隙结构和流体组分、含油饱和度等关键参数。(3)与室内实验室对柱塞岩样进行单点测量不同,全直径岩心测量采用沿着岩心进行连续扫描的方式,可获取连续深度采样的一维 $T_2$ 、二维 $T_1-T_2$ 核磁共振图谱。测量的纵向深度分辨率高达1cm,即可精确测量到长度为1cm的岩心圆柱体中的流体信息,能充分满足非均质性较强的页岩油储层、致密油储层高精度评价需求。(4)测量的对象为钻井全直径岩心,所测量的岩心体积比柱塞岩样更大,能更完整地反映地层中的孔隙和

流体信息。可直接测量直径为12cm(及以内)的钻井取心,测量的岩心体积是柱塞岩样(常用直径为1.5cm、2.5cm等)的70~180倍。与二维核磁共振测井相比,全直径岩心二维核磁共振测量采用了更高的发射频率、更小的回波间隔及恢复等待时间,极大提高了信噪比。

此外,通过表1可以看出,与国外全直径岩心二维核磁共振测量技术相比<sup>[25]</sup>,自主研发的国产化技术在测量的关键指标上具有后发优势,其一维核磁共振 $T_2$ 、二维核磁共振 $T_1-T_2$ 测量的最小回波间隔可达到0.15ms,二维核磁共振 $T_1-T_2$ 测量最小等待时间可达到0.058ms,能对纳米级孔隙流体信号进行更为有效的观测和精细化表征。同时,国产测量仪高信噪比测量只需要更少的叠加次数,从而进一步提高了现场测量时效:一维核磁共振 $T_2$ 测量采用2次叠加,测速达到16min/m;二维核磁共振 $T_1-T_2$ 测量采用4次叠加,测速为3min/深度点,满足现场测量时效和信噪比要求。



表 1 俄罗斯与国产全直径岩心二维核磁共振测量仪器  
主要性能指标对比表

Table 1 Comparison of main performance indexes of full  
diameter core 2D NMR measurement instruments made in  
Russia and China

仪器参数	国产仪器	俄罗斯仪器
工作频率 /MHz	6	6.8
最小回波间隔 /ms	0.15	0.3
最小等待时间 /ms	0.058	1
最小纵向分辨率 /cm	1	1
步进系统控制精度 /mm	1	1
测试岩心长度上限 /m	1	1
测试岩心直径上限 /mm	120	116
一维核磁共振 $T_2$ 图谱 测量模式	连续测量	连续测量
二维核磁共振 $T_1$ — $T_2$ 图谱 测量模式	连续测量、点测	点测

2 基于全直径岩心二维核磁共振  $T_1$ — $T_2$  图谱的储层流体组分识别

越来越多的学者将二维核磁共振技术应用于储层流体性质识别，大都是利用柱塞岩样二维核磁共振实验数据进行流体性质分析<sup>[26-30]</sup>，但是柱塞岩样对整个储层代表的局限性、制备柱塞样过程中的流体散逸等问题严重制约了储层流体识别现场应用。另外，二维核磁共振测井由于信噪比较低，现阶段还无法完整观测到页岩油储层、致密油储层纳米级孔隙流体信号，且分辨能力低。

本文通过对大量页岩油储层、致密油储层及常规储层全直径岩心二维核磁共振现场实测数据的分析，并同步开展了室内柱塞岩样的二维核磁共振  $T_1$ — $T_2$  测量及对比分析，同时结合现场岩心描述及试油验证，系统总结了不同流体组分在二维核磁共振  $T_1$ — $T_2$  图谱上的分布特征，建立形成基于全直径岩心二维核磁共振的储层流体组分分析及流体性质识别图版。为避免由于不同的核磁共振测量仪主频差异大导致的测量结果差异大，室内柱塞样核磁共振测量仪采用 5.0MHz 主频，与全直径岩心二维核磁共振测量仪 6.0MHz 接近，且室内与现场岩心核磁共振测量所采用的采集参数完全一致。

2.1 不同流体组分的二维核磁共振  $T_1$ — $T_2$  图谱分布特征

储层中不同的流体组分在二维核磁共振  $T_1$ — $T_2$  图谱上表现为不同的信号集合，通过前人研究<sup>[21-24,26-30]</sup>和全直径岩心二维核磁共振实测数据发现，不同流体组分的  $T_2$ 、 $T_1/T_2$  值特征不同，通常油具有更高的  $T_1/T_2$  值，而水的  $T_1/T_2$  值则更低。值得注意的是，页岩油储层、致密油储层及部分砂岩储层中的孔隙结构多种多样，不同孔径中的流体赋存状态较为复杂，为流体识别带来困难。为此，本文在不同尺度孔隙区间划分的基础上，利用二维核磁共振  $T_1$ — $T_2$  图谱中流体信号的峰值点位置及主要分布范围的  $T_2$ 、 $T_1/T_2$  值特征来进行流体组分分析与识别。

本文根据大量的全直径岩心二维核磁共振实测数据分析认为，传统的核磁共振测井“三组分”孔隙模型（黏土束缚水、毛细管束缚水、可动流体）已经不能满足页岩油等非常规储层孔隙流体划分与描述的需求，其中最主要问题是  $T_2$  在 1.6ms 之前的黏土束缚水孔隙区间其实包括了黏土孔隙束缚水和纳米孔隙束缚油等信号。统计分析大量的全直径岩心二维核磁共振现场实测资料，发现大多数的页岩油、致密油等储层中不同的流体组分在二维图谱的  $T_2$  维度上具有界限区分，基本上可以划分出 5 个区间。基于全直径岩心二维核磁共振  $T_1$ — $T_2$  图谱分布特征研究及有关  $T_2$  孔径转换关系研究成果<sup>[31-35]</sup>，本文首次提出了在  $T_2$  维度上的“五组分”孔隙区间划分模型，涵盖了总孔隙空间中全尺度孔径分布范围，分别是：微孔、微小孔、小孔、中孔、大孔（表 2），满足了页岩油等非常规储层孔隙流体划分与表征的要求。

表 2 “五组分”孔隙区间划分标准表  
Table 2 “Five-component” classification standard for  
pore interval

孔隙区间	$T_2$ /ms	包含的流体组分
微孔	<1.6	黏土束缚水、 吸附油、 重组分残余油
微小孔	1.6~6	毛细管束缚水、 可动油
小孔	6~20	可动水、 可动油
中孔	20~60	
大孔	>60	

### 2.1.1 微孔区间 ( $T_2=0.2\sim 1.6\text{ms}$ ) 流体组分

微孔区间主要包含黏土束缚水、吸附油及重组分残余油 3 种流体组分。如图 2a 所示, 为纯泥岩柱塞岩样的室内二维核磁共振实验结果, 流体信号集中在微孔区间中的黏土束缚水, 信号峰值点位置分布在  $T_1/T_2$  比值的 5 倍线以下, 信号主要范围分布在  $T_1/T_2$  比值的 10 倍线以下。图 2b 为河套盆地临河组纯泥岩全直径岩心二维核磁共振测量结果, 其黏

土束缚水信号与室内纯泥岩柱塞岩样的流体信号分布特征基本一致 (图 2a)。与黏土束缚水信号的二维核磁共振  $T_1-T_2$  图谱分布特征不同, 微孔区间中的吸附油信号具有更高的  $T_1/T_2$  比值, 如图 2c 为河套盆地临河组富含有机质泥岩的全直径岩心二维核磁共振测量结果, 微孔区间中流体信号峰值点分布在  $T_1/T_2$  比值的 20~30 倍线之间, 信号主要范围分布在  $T_1/T_2$  比值的 10~100 倍之间, 流体组分为吸附油 (与黏

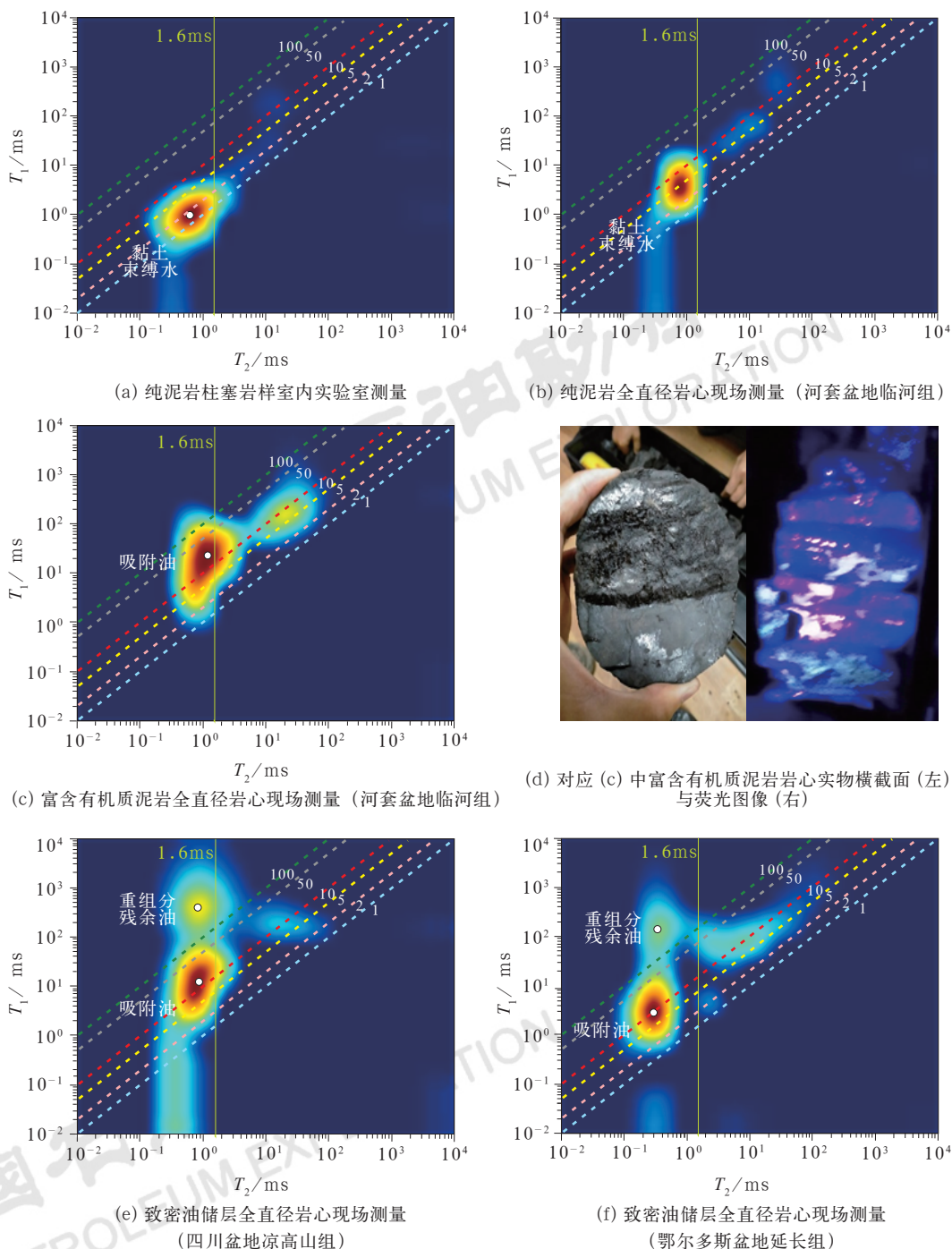


图 2 微孔区间流体组分分布特征图

Fig.2 Distribution characteristics of fluid components in micro pores

图中虚线上数值为  $T_1/T_2$  比值, 下同

土束缚水信号能显著区分开), 岩心描述该泥岩样品中含油特征显著, 岩心实物在荧光下显示为富含有机质的泥岩(图2d)。另外, 比吸附油具有更高  $T_1/T_2$  比值特征的流体信号一般为重组分残余油流体, 通常其峰值点位置及信号主要范围分布在  $T_1/T_2$  比值的100倍线以上。图2e、图2f分别为四川盆地凉山组和高山组及鄂尔多斯盆地延长组的致密油储层全直径岩心二维核磁共振  $T_1$ — $T_2$  图谱特征, 微孔区间除了包括吸附油流体组分以外, 均含有重组分残余油流体, 这部分的流体组分特征需进一步研究。

### 2.1.2 微小孔区间 ( $T_2=1.6\sim6\text{ms}$ ) 流体组分

微小孔区间主要包含毛细管束缚水、可动油两种流体组分。图3a、图3b为两块不同柱塞岩样在

洗油洗盐、饱和水后的室内二维核磁共振测量结果, 两块样品的流体信号主要包括两部分: 微孔区间中的黏土束缚水、微小孔区间中的毛细管束缚水。毛细管束缚水信号峰值点位置分布在  $T_1/T_2$  比值的2倍线左右, 信号主要范围则分布在  $T_1/T_2$  比值的5倍线以下。图3c、图3d为松辽盆地古龙凹陷页岩油储层全直径岩心二维核磁共振现场测量结果, 该段页岩油储层孔隙以微孔、微小孔为主, 微小孔中的流体信号峰值点位置分布均在  $T_1/T_2$  比值的10倍线以上, 信号主要范围分布在  $T_1/T_2$  比值的5~7倍线以上, 与毛细管束缚水的分布特征能完全区分开。值得指出的是, 针对同一孔隙区间中的油, 其信号的  $T_1/T_2$  比值越高, 则油的流动性一般会越差。

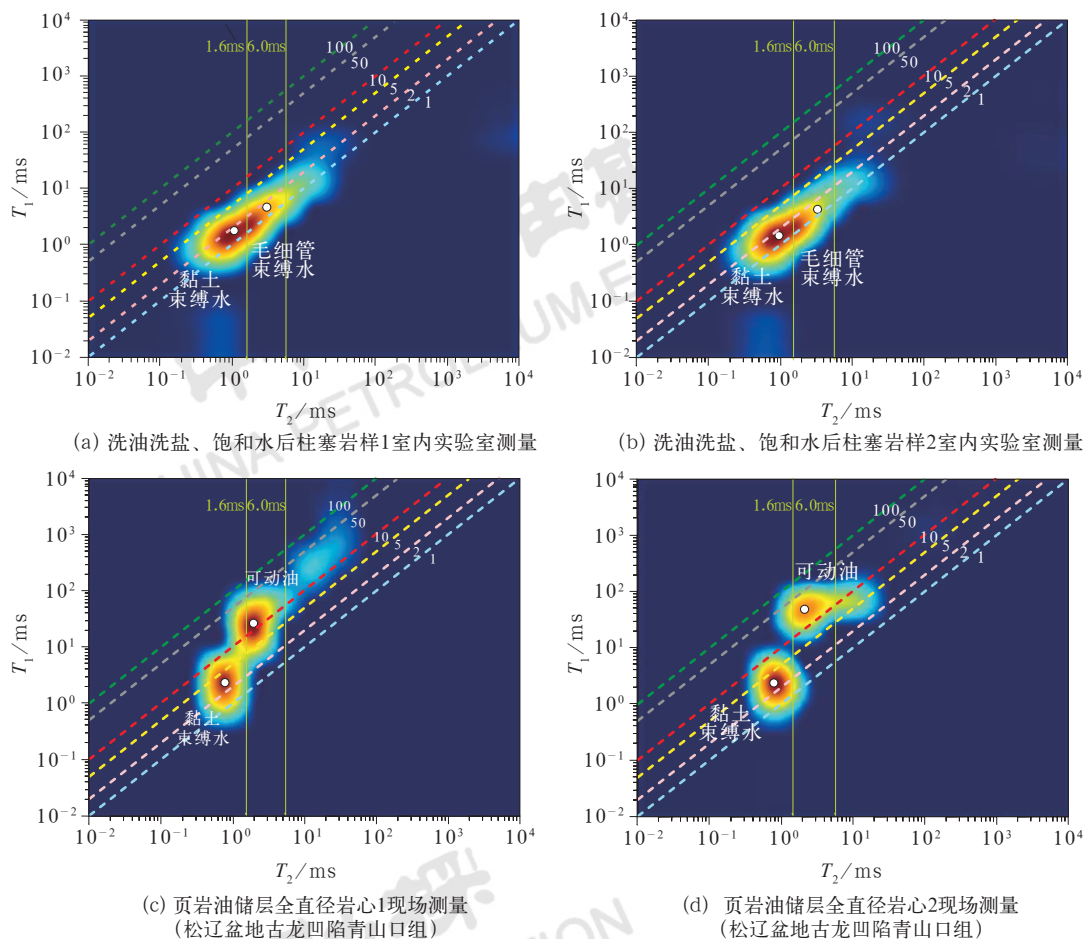


图3 微小孔区间流体组分分布特征图

Fig.3 Distribution characteristics of fluid components in minute pores

### 2.1.3 小孔区间 ( $T_2=6\sim20\text{ms}$ ) 流体组分

小孔区间主要包含可动水、可动油流体组分。图4a为柱塞岩样在洗油洗盐、饱和水后的室内二维核磁共振测量结果, 流体信号主要为小孔区间中的可动水, 小孔可动水与毛细管束缚水的信号特征类似, 峰值点位置分布在  $T_1/T_2$  比值的2倍线附近, 信号主要范围

则分布在  $T_1/T_2$  比值的5倍线以下。图4b、图4c、图4d分别为鄂尔多斯盆地延长组致密油储层、松辽盆地古龙凹陷青山口组页岩油储层、四川盆地凉山组页岩油储层全直径岩心二维核磁共振图谱特征, 岩心实物描述均为饱含油。通过全直径岩心二维核磁共振现场测量, 重点分析了3个地区页岩油储层、



致密油储层在小孔区间中的流体信号,其峰值点位置分布均在  $T_1/T_2$  比值的 10 倍线附近,信号主要范

围分布在  $T_1/T_2$  比值的 5 倍线以上,为可动油流体,与该区间的可动水信号能明显区分。

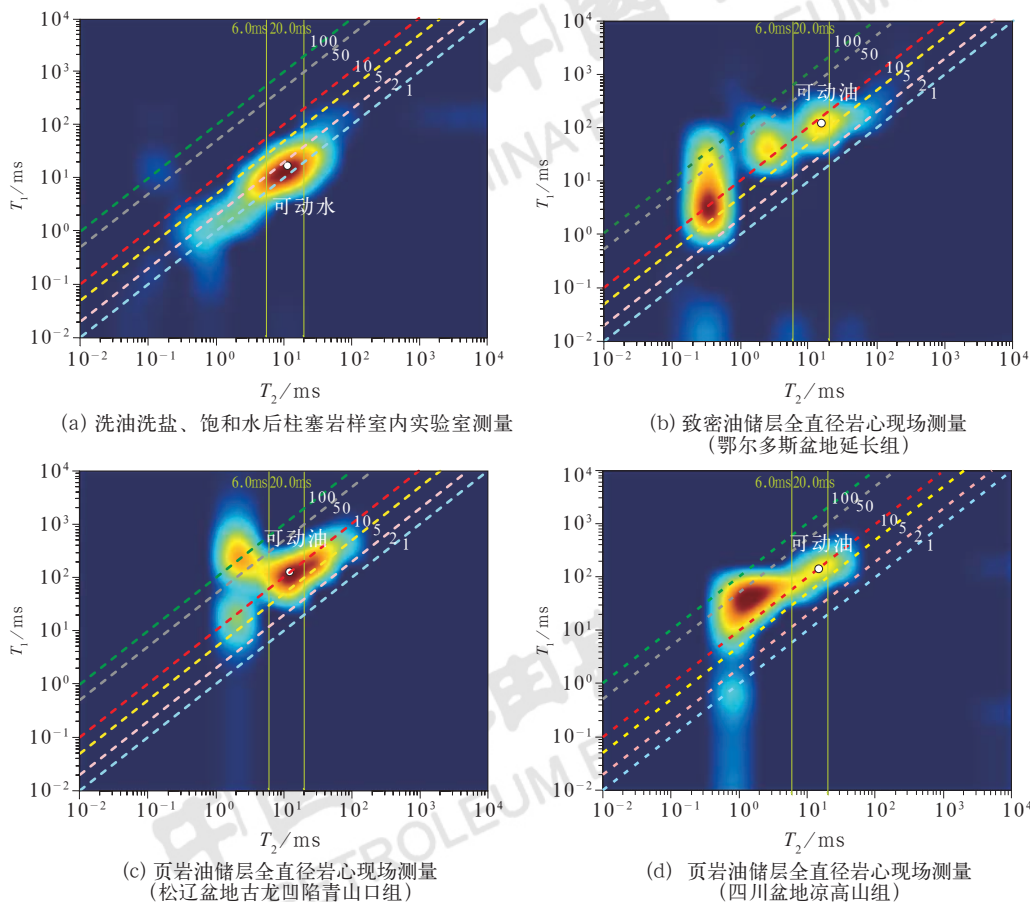


图 4 小孔区间流体组分分布特征图

Fig.4 Distribution characteristics of fluid components in small pores

### 2.1.4 中孔、大孔区间 ( $T_2 > 20\text{ms}$ ) 流体组分

中孔、大孔区间主要对应常规砂岩储层,所包含的流体组分主要为可动水、可动油。图 5a 为柱塞岩样在洗油洗盐、饱和水后的室内二维核磁共振测量结果,中孔、大孔区间主要为可动水流体,其信号峰值点分布在  $T_1/T_2$  比值的 1~2 倍线左右,信号主要范围则分布在  $T_1/T_2$  比值的 3 倍线以下。图 5b 为河套盆地临河组常规砂岩储层全直径岩心二维核磁共振测量结果,录井显示为油斑细砂岩,试油证实为油层,可动油信号峰值点分布在  $T_1/T_2$  比值的 3 倍线左右,信号主要范围则分布在  $T_1/T_2$  比值的 2 倍以上,与微孔—小孔区间的油、水信号的  $T_1/T_2$  比值相比,中孔、大孔区间中油、水信号的  $T_1/T_2$  比值更低。

### 2.2 流体组分解释标准及饱和度定量计算

二维核磁共振  $T_1-T_2$  图谱资料分析表明,不同

孔径中包含不同赋存状态的流体组分,且不同孔径中油、水信号的  $T_1/T_2$  比值特征不同:微孔—小孔区间油、水信号的  $T_1/T_2$  比值差异较大,两者容易区分;中孔、大孔区间油、水信号的  $T_1/T_2$  比值差异较小,两者的区分度比微孔—小孔区间中油、水的区分度低。

通过大量全直径岩心二维核磁共振测量与结果分析,结合现场岩心描述、配套柱塞岩样实验数据及试油验证,建立了不同孔径区间的全直径岩心二维核磁共振  $T_1-T_2$  图谱流体组分识别标准及图版,并发现重要规律:随着孔径增大 ( $T_2$  增大),孔隙中油、水信号的  $T_1/T_2$  比值逐渐减小,如表 3 和图 6 所示(图 6 中红色实线为标注的油与水的界限)。值得注意的是,不同工作频率的核磁共振仪器及不同采集参数(主要为回波间隔)会对全直径岩心测量结果产生较大影响,表 3 与图 6 中不同流体组分  $T_1/T_2$  判识标准适用于工作频率为 6MHz 的核磁共振仪器,回波间隔为 0.2ms。

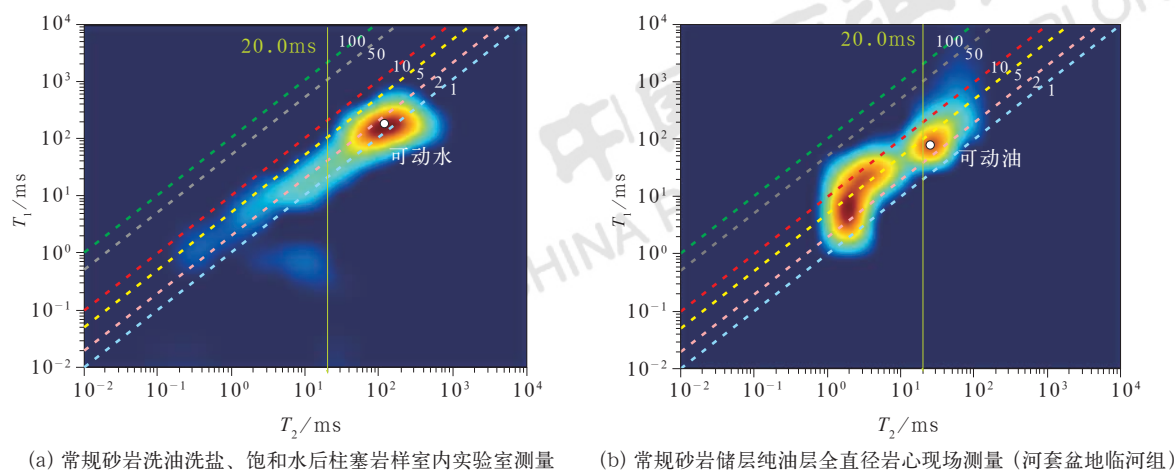


图 5 中孔、大孔区间流体组分分布特征图  
Fig.5 Distribution characteristics of fluid components in meso-macro pores

表 3 全直径岩心二维核磁共振  $T_1$ — $T_2$  图谱流体组分识别标准表  
Table 3 Identification standard for fluid components by full diameter core 2D NMR  $T_1$ — $T_2$  spectrum

孔隙区间	$T_2/\text{ms}$	流体组分	$T_1/\text{ms}$	$T_1/T_2$ 比值
微孔	<1.6	黏土束缚水	0.5~8	2~5
		吸附油	3~50	$\geq 10$
		重组分残余油	50~2000	$\geq 50$
微小孔	1.6~6	毛细管束缚水	2~30	<5
		可动油	10~100	$\geq 10$
小孔	6~20	可动水	10~200	<5
		可动油		$\geq 5$
中孔、大孔	>20	可动水	20~400	$\geq 2$
		可动油	30~500	<2

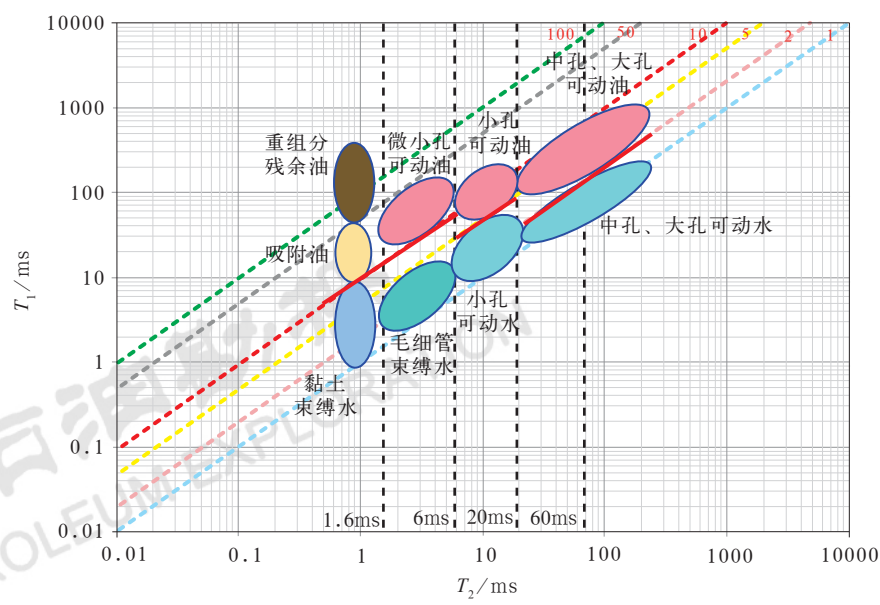


图 6 全直径岩心二维核磁共振  $T_1$ — $T_2$  图谱流体组分识别图版  
Fig.6 Identification plate for fluid components by full diameter core 2D NMR  $T_1$ — $T_2$  spectrum



不同流体组分信号在二维核磁共振  $T_1$ — $T_2$  图谱上分布的区域不同,信号的分布区域越大、信号强度越高,则流体组分在孔隙中的占比越高,对应的饱和度越高。在二维核磁共振  $T_1$ — $T_2$  图谱流体组分定性识别的基础上,通过对流体组分分布区域内的信号强度进行累加,再与图谱信号总强度进行比值,得到流体组分的饱和度。图7所示为鄂尔多斯盆地长7<sub>3</sub>致密油储层的二维核磁共振  $T_1$ — $T_2$  图谱特征,灰色虚线框为总的油信号(包括吸附油和可动油)分布区域、绿色虚线框为可动油信号的分布区域。

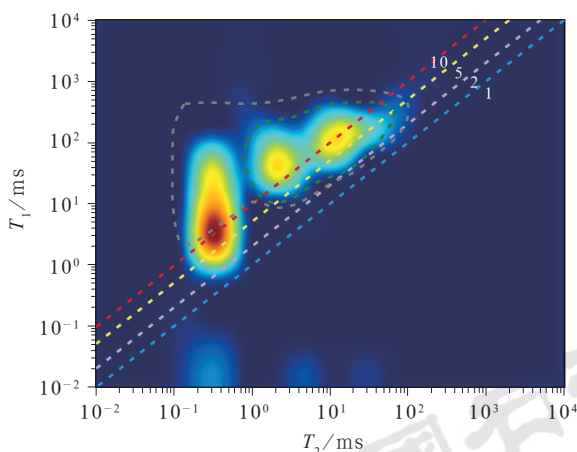


图7 二维核磁共振  $T_1$ — $T_2$  图谱流体组分饱和度计算  
Fig.7 Calculation of fluid component saturation by 2D NMR  $T_1$ — $T_2$  spectrum

公式(1)至公式(3)所示,为建立的二维核磁共振  $T_1$ — $T_2$  图谱流体组分饱和度计算模型。通过对图7中二维核磁共振  $T_1$ — $T_2$  图谱灰色虚线区域、绿色虚线区域信号强度累加,然后与图谱总信号强度进行比值,分别得到总含油饱和度(72.64%)、可动油饱和度(38.58%),实现二维核磁共振  $T_1$ — $T_2$  的

流体组分饱和度定量评价。

$$Y_k = \sum_{\substack{m \leq i \leq n \\ p \leq j \leq q}} P(i,j) \quad (1)$$

$$Y = \sum_{\substack{-\infty \leq i \leq +\infty \\ -\infty \leq j \leq +\infty}} P(i,j) \quad (2)$$

$$S_k = (Y_k/Y) \times 100 \quad (3)$$

式中  $Y_k$ ——第  $k$  种流体组分对应的信号强度;  
 $P(i,j)$ ——二维核磁共振  $T_1$ — $T_2$  图谱中  $T_2$  为  $i$ 、 $T_1$  为  $j$  坐标点的信号强度;  
 $Y$ ——二维核磁共振  $T_1$ — $T_2$  图谱总的信号强度;  
 $S_k$ ——第  $k$  种流体组分的饱和度, %。

### 3 应用实例

2020—2022年,全直径岩心二维核磁共振技术规模应用于大庆、长庆、西南、新疆、青海、华北、福山等油田,在松辽盆地古龙页岩油、鄂尔多斯盆地长7<sub>3</sub>致密油、河套盆地低电阻率油层等勘探评价方面发挥了重要作用(表4)。现场应用实践表明:全直径岩心二维核磁共振技术已经成为页岩油及致密油勘探甜点评价、复杂碎屑岩油层识别和资源评估的一项新的重要技术。

#### 3.1 古龙页岩油甜点评价与储量参数计算

图8为松辽盆地古龙凹陷GYA井青一段全直径岩心核磁共振解释成果图。通过现场对钻井取心进行连续一维  $T_2$ 、二维  $T_1$ — $T_2$  核磁共振测量及资料处理分析,确

表4 全直径岩心二维核磁共振技术应用地区及解决的主要问题统计表

Table 4 Application areas and the main problems solved by full diameter core 2D NMR technology

地区		目的层组	主要岩性	主要解决问题
松辽盆地	古龙、三肇	青山口组一段、二段	纹层状页岩	流体组分表征、可动油饱和度评价、甜点识别、储量参数计算
四川盆地	川中	凉高山组	细砂岩、页岩	孔隙结构表征、流体组分识别、甜点识别、含油性评价
柴达木盆地	柴西	下干柴沟组	泥质白云岩、灰质泥岩	孔隙度确定、孔隙结构表征
鄂尔多斯盆地	庆城	延长组	页岩、泥质粉砂岩	甜点识别、可动油饱和度评价
二连盆地	乌里雅斯太	阿尔善组	页岩	流体组分识别、含油饱和度评价

续表

地区		目的层组	主要岩性	主要解决问题
河套盆地	兴隆	临河组	疏松砂岩	低电阻率油层识别评价、储量参数计算
冀中坳陷	饶阳	沙河街组	细砂岩、粉砂岩	孔隙结构表征
福山凹陷	永安	流沙港组二段	泥质粉砂岩、含砾砂岩	孔隙度确定、含油性评价

定储层品质最好的甜点层，其总孔隙度为 11%~14%，有效孔隙度为 3.7%~5.8%，总含油饱和度为 36%~55%，可动油饱和度为 30%~47%，可动油占比高且未见明显的可动水。根据古龙页岩油纵向上的甜点评价成果进行

水平井钻探，试油证实为纯油层。该技术成果指导了古龙页岩油甜点识别与优选、可动油饱和度定量表征，为松辽盆地古龙页岩油勘探发现与储量上交提供了有力支撑。

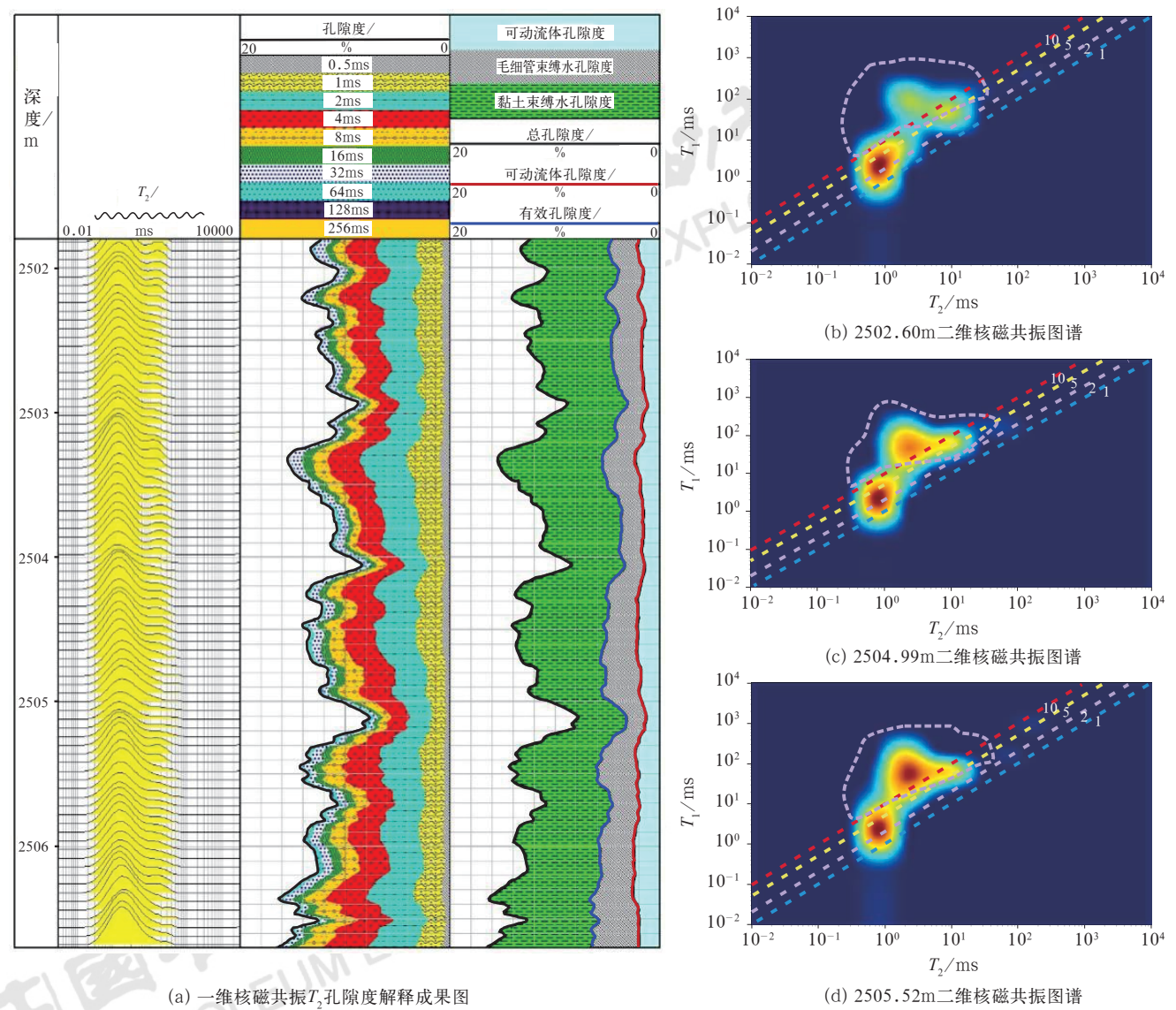


图 8 松辽盆地古龙凹陷 GYA 井全直径岩心二维核磁共振解释成果图

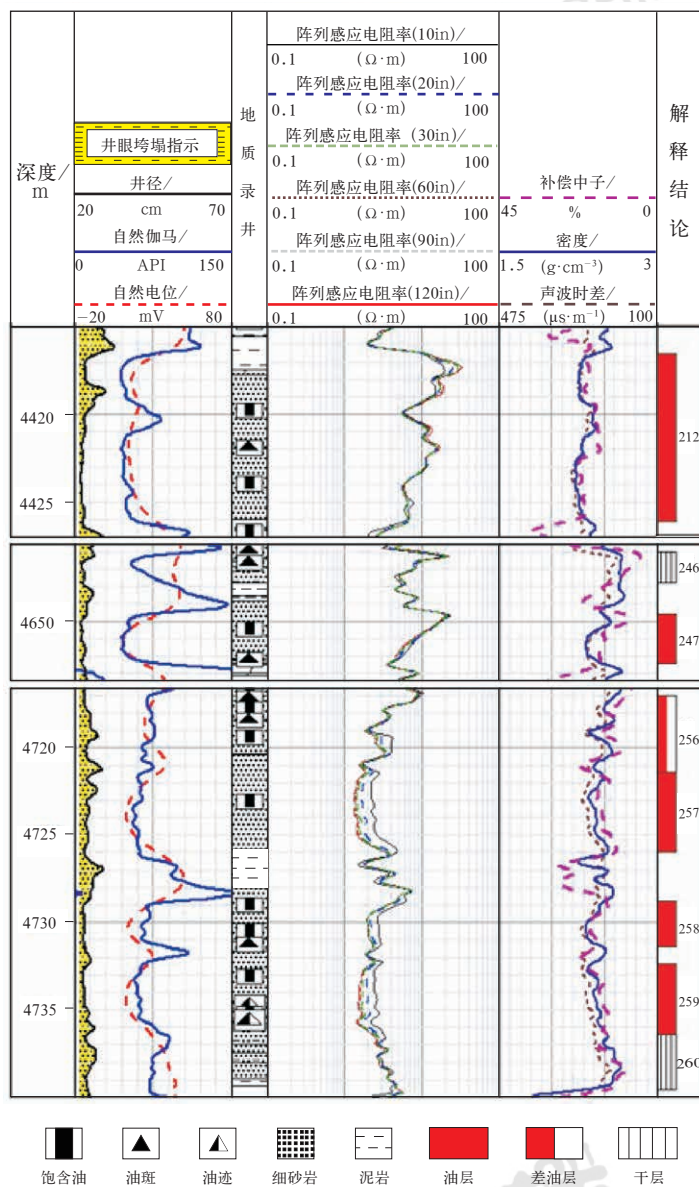
Fig.8 Full diameter core 2D NMR interpretation results in Well GYA in Gulong Sag in Songliao Basin



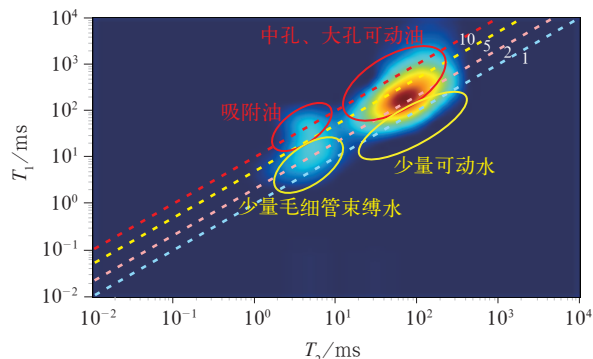
### 3.2 河套盆地临河组低电阻率油层识别与评价

河套盆地临河组埋藏较深, 含油储层平均达到5000~6000m, 属于咸化湖盆砂岩沉积地层, 地层水总矿化度高达130000~180000mg/L。在高矿化度地层水背景下, 复杂岩性与孔隙结构相互作用,

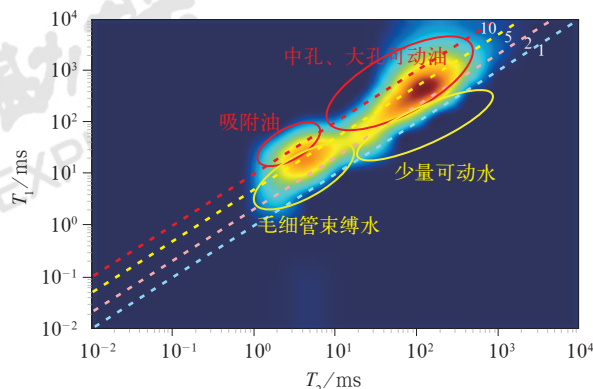
导致油层电阻率值变化非常大: 既存在高电阻率、低侵特征显著的典型油层, 也存在低电阻率、高侵特征的非典型油层。低电阻率油层的识别与饱和度定量评价非常困难。图9为XHA井临河组不同类型油层的全直径岩心二维核磁共振与常规测井解释综合成果。



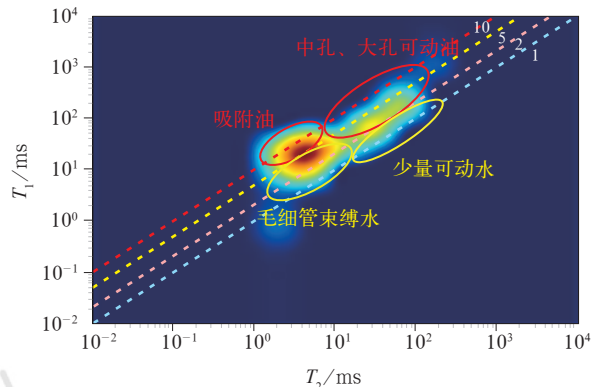
(a) 常规测井特征



(b) 高电阻率油层二维核磁共振图谱特征



(c) 中等电阻率油层二维核磁共振图谱特征



(d) 低电阻率油层二维核磁共振图谱特征

图9 河套盆地XHA井临河组不同类型油层常规测井与二维核磁共振综合解释成果

Fig.9 Comprehensive interpretation results of conventional logging and 2D NMR for different types of oil layers in Linhe Formation in Well XHA in Hetao Basin

通过全直径岩心二维核磁共振  $T_1$ — $T_2$  图谱, 明确了临河组高矿化度条件下的毛细管束缚水是低电阻率油层电阻率特征的主控因素。图9b为212号层, 二维核磁共振  $T_1$ — $T_2$  图谱为典型高电阻率油层特征, 流体组分以中孔、大孔可动油为主, 电阻率一般大于

$10\Omega\cdot m$ , 含油饱和度为67%~78%; 图9c为247号层中等电阻率油层特征, 流体组分以中孔、大孔可动油和毛细管束缚水为主, 电阻率在4~ $10\Omega\cdot m$ 之间, 含油饱和度为56%~70%; 图9d为257—259号层低电阻率油层特征, 毛细管束缚水信号较强, 中



孔、大孔可动油信号较弱,该类油层电阻率一般低于  $2\Omega\cdot\text{m}$ , 含油饱和度为 48%~55%。目前,已试油验证该类低电阻率油层的电阻率下限达到  $0.9\Omega\cdot\text{m}$ 。技术成果指导了河套盆地临河组咸化湖盆沉积下低电阻率油层识别,实现含油饱和度定量评价,为兴华 1 区块上交亿吨探明储量提供了有力支撑。

## 4 结论

全直径岩心二维核磁共振技术实现了在现场对岩心进行快速、连续、无损、高精度的一维  $T_2$ 、二维  $T_1$ — $T_2$  核磁共振测量,弥补了核磁共振测井和室内岩心实验的不足,确定了页岩油储层、致密油储层全直径岩心一维  $T_2$  和二维  $T_1$ — $T_2$  核磁共振图谱特征,实现储层物性与含油性定量评价。

通过建立全直径岩心  $T_1$ — $T_2$  二维核磁共振孔隙流体解释方法和流体组分识别标准,较好解决了页岩油不同赋存特征的孔隙流体识别评价问题。实践证明,全直径岩心  $T_1$ — $T_2$  二维核磁共振分析技术已经成为页岩油、致密油等非常规油气及复杂碎屑岩油气勘探开发中一项新的重要技术手段,在高精度物性、含油饱和度定量评价方面起到不可替代的作用。

## 参考文献

- [1] 刘国强.非常规油气时代的测井采集技术挑战与对策[J].中国石油勘探,2021,26(5):24-37.  
Liu Guoqiang. Challenges and countermeasures of well logging data acquisition technology in unconventional petroleum exploration and development[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(5):24-37.
- [2] 付金华,刘显阳,李士祥,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组 7 段页岩油勘探发现与资源潜力[J].中国石油勘探,2021,26(5):1-11.  
Fu Jinhua, Liu Xianyang, Li Shixiang, et al. Discovery and resource potential of shale oil of Chang 7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(5):1-11.
- [3] 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.
- [4] 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,2021,42(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, 2021,42(1):1-14.
- [5] 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.
- [6] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.页岩油地质评价方法:GB/T 38718—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.  
State Administration of Market Supervision, Administration and State Committee for Standardization Administration. Evaluation method of shale oil geology: GB/T 38718—2020[S]. Beijing: China Standard Press, 2020.
- [7] 郭秋麟,白雪峰,何文军,等.页岩油资源评价方法、参数标准及典型评价实例[J].中国石油勘探,2022,27(5):27-41.  
Guo Qiulin, Bai Xuefeng, He Wenjun, et al. Shale oil resource assessment methods, parameter standards and typical case studies[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(5):27-41.
- [8] 肖立志.核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用[M].北京:科学出版社,1998.  
Xiao Lizhi. Nuclear magnetic resonance logging and core magnetic resonance imaging and its application[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [9] 毛锐,申子明,常秋生,等.准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系下乌尔禾组核磁共振测井含油性评价方法[J].中国石油勘探,2021,26(4):162-172.  
Mao Rui, Shen Ziming, Chang Qiusheng, et al. Evaluation method of reservoir oil-bearing property by NMR logging of Permian Lower Wuerhe Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(4):162-172.
- [10] Li Junqian, Lu Shuangfang, Xie Liujuan, et al. Modeling of hydrocarbon adsorption on continental oil shale: a case study on *n*-alkane[J]. Fuel, 2017,206:603-613.
- [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 state and its application[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016,38(6):842-849.
- [12] 张安达,王继平,王永超,等.松辽盆地古龙页岩储集空间类型及油赋存状态[J].大庆石油地质与开发,2021,40(5):68-76.  
Zhang Anda, Wang Jiping, Wang Yongchao, et al. Reservoir space types and oil occurrence of Gulong shale in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021,40(5):68-76.
- [13] 胡钦红,张宇翔,孟祥豪,等.渤海湾盆地东营凹陷古近系沙河街组页岩油储集层微米—纳米级孔隙体系表征[J].石油勘探与开发,2017,44(5):681-690.  
Hu Qinhong, Zhang Yuxiang, Meng Xianghao, et al. Characterization of micro-nano pore networks in shale oil reservoirs of Paleogene Shahejie Formation in Dongying Sag of Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017,44(5):681-690.
- [14] 张盼盼,刘小平,关铭,等.沧东凹陷孔二段低熟页岩纳米孔隙特征及主控因素[J].特种油气藏,2021,28(2):20-26.  
Zhang Panpan, Liu Xiaoping, Guan Ming, et al. Study on characteristics and main controlling factors of nano-pores in low-maturity shale reservoirs in member 2 of Kongdian Formation in Cangdong Sag[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021,28(2):20-26.
- [15] Fleury M, Romero-Sarmiento M. Characterization of shales using  $T_1$ — $T_2$  NMR maps[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016,137:56-62.

- [16] Coates G R, Xiao Lizhi, Prammer M G, *et al.* NMR logging principles and applications[M]. Houston: Halliburton Energy Services, 1999.
- [17] 谢然红, 肖立志, 陆大卫. 识别储层流体的( $T_2, T_1$ )二维核磁共振方法[J]. 测井技术, 2009, 33(1): 26–31.  
Xie Ranhong, Xiao Lizhi, Lu Dawei. ( $T_2, T_1$ ) Two-dimensional NMR method for fluid typing[J]. Well Logging Technology, 2009, 33(1): 26–31.
- [18] Kathryn E W, Justin E B. Updated methodology for nuclear magnetic resonance characterization of shales[J]. Journal of Magnetic Resonance, 2013, 233: 17–28.
- [19] Zhang Pengfei, Lu Shuangfang, Li Junqian, *et al.* 1D and 2D nuclear magnetic resonance (NMR) relaxation behaviors of protons in clay, kerogen and oil-bearing shale rocks[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 114: 1–13.
- [20] Seyedalireza K, Mehdi O, Xie Z H, *et al.* NMR relaxometry a new approach to detect geochemical properties of organic matter in tight shales[J]. Fuel, 2019, 235: 167–177.
- [21] Li Jinbu, Jiang Chunqing, Wang Min, *et al.* Adsorbed and free hydrocarbons in unconventional shale reservoir: a new insight from NMR  $T_1$ – $T_2$  maps[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 116: 1–14.
- [22] 宁从前, 周明顺, 成捷, 等. 二维核磁共振测井在砂砾岩储层流体识别中的应用[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(1): 267–274.  
Ning Congqian, Zhou Mingshun, Cheng Jie, *et al.* Application of 2D NMR logging in fluid identification of glutenite reservoir[J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(1): 267–274.
- [23] 张世懋, 葛祥, 王辛, 等. 川西气田白云岩储层二维核磁共振测井气水识别方法[J]. 波谱学杂志, 2020, 37(3): 360–369.  
Zhang Shimao, Ge Xiang, Wang Xin, *et al.* A two-dimensional NMR logging method for gas–water identification in dolomite reservoir of the western Sichuan Gasfield[J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2020, 37(3): 360–369.
- [24] 白龙辉, 柳波, 迟亚奥, 等. 二维核磁共振技术表征页岩所含流体特征的应用[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1389–1400.  
Bai Longhui, Liu Bo, Chi Yaao, *et al.* 2D NMR studies of fluids in organic-rich shale from the Qingshankou Formation, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1389–1400.
- [25] 吉尔吉佐夫, 侯学理, 穆尔扎卡耶夫. 移动式全直径岩心核磁共振测量仪在俄罗斯超稠油地层评价中的应用[J]. 测井技术, 2017, 41(5): 506–511.  
Kirgizov D I, Hou Xueli, Murzakaev V M. Application of complex nuclear magnetic resonance measurements to super-viscous oil deposits in Russian Republic of Tatarstan[J]. Well Logging Technology, 2017, 41(5): 506–511.
- [26] Li Jinbu, Huang Wenbiao, Lu Shuangfang, *et al.* Nuclear magnetic resonance  $T_1$ – $T_2$  map division method for hydrogen-bearing components in continental shale[J]. Energy Fuels, 2018, 32: 9043–9054.
- [27] 覃莹瑶, 张宫, 张嘉伟, 等. 磁场强度对  $T_1$ – $T_2$  二维核磁共振实验的影响研究[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(5): 2082–2089.  
Qin Yingyao, Zhang Gong, Zhang Jiawei, *et al.* Study on the influence of magnetic field intensity on  $T_1$ – $T_2$  two-dimensional nuclear magnetic resonance experiment[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(5): 2082–2089.
- [28] 顾兆斌, 刘卫, 孙佃庆, 等. 基于核磁共振二维谱技术识别储层流体类型[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, 32(5): 83–86.  
Gu Zhaobin, Liu Wei, Sun Dianqing, *et al.* Identify reservoir fluid types with two dimensional NMR techniques[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2010, 32(5): 83–86.
- [29] 韩闯, 李纲, 别康, 等. 二维核磁共振  $T_1$ – $T_2$  谱在风西复杂碳酸盐岩储层流体识别中的应用[J]. 测井技术, 2021, 45(1): 56–61.  
Han Chuang, Li Gang, Bie Kang, *et al.* Application of innovative  $T_1$ – $T_2$  fluid typing method in complex carbonate reservoir of Fengxi block[J]. Well Logging Technology, 2021, 45(1): 56–61.
- [30] Fleury M, Romero-Sarmiento M. Characterization of shales using  $T_1$ – $T_2$  NMR maps[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 137: 56–62.
- [31] Zou C, Jin X, Zhu R, *et al.* Do shale pore throats have a threshold diameter for oil storage[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 13619.
- [32] 李国欣, 朱如凯, 张永庶, 等. 柴达木盆地英雄岭页岩油地质特征、评价标准及发现意义[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 1–13.  
Li Guoxin, Zhu Rukai, Zhang Yongshu, *et al.* Geological characteristics, evaluation criteria and discovery significance of Paleogene Yingxiongling shale oil in Qaidam Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 1–13.
- [33] Green D P, Veselinovic D. Analysis of unconventional reservoirs using new and existing NMR methods[C]. GeoCanada 2010, Working with the Earth, 2010: 1–4.
- [34] 何雨丹, 毛志强, 肖立志, 等. 核磁共振  $T_2$  分布评价岩石孔径分布的改进方法[J]. 地球物理学报, 2005, 48(2): 373–378.  
He Yudan, Mao Zhiqiang, Xiao Lizhi, *et al.* An improved method of using NMR  $T_2$  distribution to evaluate pore size distribution[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(2): 373–378.
- [35] 李军, 金武军, 王亮, 等. 利用核磁共振技术确定有机孔与无机孔孔径分布: 以四川盆地涪陵地区志留系龙马溪组页岩气储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 129–134.  
Li Jun, Jin Wujun, Wang Liang, *et al.* Quantitative evaluation of organic and inorganic pore size distribution by NMR: a case from the Silurian Longmaxi Formation gas shale in Fuling area, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 129–134.