

# 基于核磁共振测井的致密砂岩储层 孔喉空间有效性定量评价

罗少成<sup>1</sup>,成志刚<sup>1</sup>,林伟川<sup>1</sup>,张海涛<sup>2</sup>,杨小明<sup>2</sup>,肖飞<sup>1</sup>,唐冰娥<sup>3</sup>

(1.中国石油测井有限公司 油气评价中心,陕西 西安 710077; 2.中国石油长庆油田分公司 勘探开发研究院,陕西 西安 710018; 3.中国石油测井有限公司 长庆事业部,陕西 西安 710201)

**摘要:**油气储层孔隙可分为毫米级孔隙、微米级孔隙和纳米级孔隙3种类型,常规储层的孔喉直径一般大于1  $\mu\text{m}$ ,致密含气砂岩储层的孔喉直径为0.03~1  $\mu\text{m}$ ,纳米级孔隙是致密砂岩储层连通储集空间的主体,因此对其储层有效性评价的难度较大。核磁共振 $T_2$ 谱与压汞曲线均能很好地反映储层的孔隙结构,利用核磁共振 $T_2$ 谱与压汞实验的相关性,将核磁共振 $T_2$ 谱转化为孔喉分布图谱。在此基础上对岩心核磁共振 $T_2$ 谱和压汞实验数据进行深入处理分析,并结合前人研究成果,确定SLG油田致密砂岩储层孔喉空间的有效性划分标准为:孔喉半径小于0.04  $\mu\text{m}$ 孔喉体系为粘土束缚水体积,孔喉半径为0.04~0.1  $\mu\text{m}$ 孔喉体系为非泥质微孔隙地层水体积,孔喉半径为0.1~0.2  $\mu\text{m}$ 的孔喉体系为毛细管束缚水体积,孔喉半径大于0.2  $\mu\text{m}$ 的孔喉体系为可采出流体体积。实践证明,该方法可以对孔喉空间进行快速地定量计算,明确孔隙中的含水特征与赋存状态,实现了对致密砂岩储层孔喉空间的有效性定量评价。

**关键词:**致密砂岩 核磁共振 $T_2$ 谱 压汞 孔喉空间 有效性

中图分类号:P631.823

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)03-0016-06

## Quantitative evaluation of the effectiveness of pore-throat space in tight sandstone reservoirs based on nuclear magnetic resonance log

Luo Shaocheng<sup>1</sup>, Cheng Zhigang<sup>1</sup>, Lin Weichuan<sup>1</sup>, Zhang Haitao<sup>2</sup>, Yang Xiaoming<sup>2</sup>, Xiao Fei<sup>1</sup>, Tang Bing'e<sup>3</sup>

(1. *Reservoirs Evaluation Center, China Petroleum Logging Co., Ltd., Xi'an City, Shannxi Province, 710077, China*; 2. *Exploration and Development Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an City, Shannxi Province, 710018, China*; 3. *Changqing Division, China Petroleum Logging Co., Ltd., Xi'an City, Shannxi Province, 710201, China*)

**Abstract:** The pores in reservoirs bearing hydrocarbon have been divided into three types: millimeterpore, micropore and nanopore. The diameter of pore throat in conventional reservoir is generally larger than 1  $\mu\text{m}$ . The diameter of pore-throat in tight gas reservoirs ranges from 0.03 to 1  $\mu\text{m}$ . The nanopore is the main body of the connected reservoir space in tight sand, so it is difficult to evaluate the effectiveness of tight reservoirs. Both NMR  $T_2$  spectrum and capillary pressure curves can well reflect the pore throat structure of rocks. The NMR  $T_2$  spectrum was translated into pore throat distributions using the correlation between NMR  $T_2$  experiment and mercury injection. On the basis of previous research results, the core NMR  $T_2$  spectrum and capillary pressure data were processed and analyzed deeply to determine effectiveness criteria of the tight sand pore throat in SLG oilfield: the pore-throat system with pore radius less than 0.04  $\mu\text{m}$  is associated with clay bound water volume; the pore-throat system with a pore radius between 0.04 and 0.1  $\mu\text{m}$  is associated with non-shale micro-po-

收稿日期:2015-03-05。

作者简介:罗少成(1983—),男,湖北监利人,工程师,硕士,从事测井方法研究与解释评价工作。联系电话:18706718519, E-mail: lsc0222@126.com。

基金项目:国家科技重大专项“复杂储层油气测井解释理论与处理技术”(2011ZX05020-008),中国石油科技攻关项目“致密气藏测井采集处理与评价技术研究”(2010E-2304)。

rosity formation water volume; the pore-throat system with pore radius between 0.1 and 0.2  $\mu\text{m}$  is associated with capillary bound water volume; the pore-throat system with pore radius more than 0.2  $\mu\text{m}$  is associated with the volume in which the fluid can be taken out. The practice proves that the method can be used to quickly calculate pore-throat space quantitatively and to determine the pore water features and its occurrence, which can evaluate the space effectiveness of tight sand reservoirs effectively.

**Key words:** tight sandstone; NMR  $T_2$  spectrum; mercury injection; pore-throat space; effectiveness

随着世界油气需求的持续增长与常规油气资源的不断减少,具有较大资源潜力的非常规油气逐渐成为新的研究领域,受到各国和石油公司的高度重视<sup>[1-2]</sup>。中国致密气资源分布广泛,具有现实的和潜在的经济价值,是现阶段应着力发展的非常规天然气资源<sup>[3-4]</sup>;在非常规天然气中,未来中国致密气开采更具现实意义,应当成为“当红主角”<sup>[5-6]</sup>。然而,致密砂岩气藏赋存的地质条件复杂<sup>[7]</sup>,滞留在岩石孔隙中的水赋存形式多样,如何经济有效地开发这些难采储量,已成为当前气田开发的难点<sup>[8]</sup>。众所周知,岩石中含有自由水和束缚水,束缚水包含了粘土束缚水、非泥质微孔隙地层水和毛细管束缚水<sup>[9-10]</sup>。在气藏开发过程中,当驱替压力梯度较小时,赋存在储层中较大孔喉或孔隙中的自由水先排出,随着驱替压力梯度的增大,粘土束缚水不可动,赋存在微细孔喉中的束缚水可以运移并部分产出,从而对气井产能产生较大影响<sup>[11]</sup>。如何进行储层孔喉空间的有效性划分,明确水在孔隙中的分布特征以及水的可动性等问题对于致密含水砂岩气藏的开发具有重要意义<sup>[12-13]</sup>。

核磁共振  $T_2$  谱和压汞曲线均可在一定程度上反映岩石的孔隙结构特征,且两者之间存在一定的转换关系<sup>[14]</sup>。通过对 SLG 油田致密砂岩岩心核磁共振  $T_2$  谱和压汞实验数据的深入处理分析,构建了核磁共振  $T_2$  谱转伪毛管压力曲线的转换模型,并与理论相结合,建立致密砂岩储层孔喉空间的划分标准。在实际测井资料处理过程中,利用转换模型将核磁共振  $T_2$  谱连续深度转换伪毛管压力曲线,结合孔喉空间划分标准,实现了对粘土束缚水、非泥质微孔隙地层水、毛细管束缚水和可采出流体孔喉体积的定量计算,从而可以有效评价孔隙中的含水特征和赋存状态,为研究区储层有效性评价及储层改造层位的选择和优化提供依据。

## 1 致密砂岩储层特征

SLG 油田致密砂岩储层的岩性以石英砂岩、岩屑石英砂岩和岩屑砂岩为主,碎屑组分主要为石英

类,其次为岩屑组分,仅局部偶见少量长石颗粒,填隙物主要为粘土矿物(水云母、高岭石和绿泥石)、硅质和碳酸盐胶结物,部分层段含较多的凝灰质杂基。孔隙类型主要发育原生粒间孔隙、次生溶孔(粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔)、填隙物内溶孔和高岭石晶间微孔共4类孔隙;其中,以次生溶孔和高岭石晶间微孔为主,原生粒间孔隙居次,含少量收缩孔和微裂隙。孔隙度主要为3%~12%,空气渗透率主要为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,排驱压力高,喉道半径小,分选较差,孔隙结构复杂。将压汞法计算得到的最大孔喉直径、主流孔喉直径<sup>[15]</sup>、中值孔喉直径和平均孔喉直径投点于 Nelson 连续谱<sup>[16]</sup>(图1),最大孔喉直径横跨致密砂岩和常规砂岩,主流孔喉直径、中值孔喉直径和平均孔喉直径绝大部分分布于 Nelson 连续谱的致密砂岩范围内,纳米级孔隙是研究区储层连通性储集空间的主体。

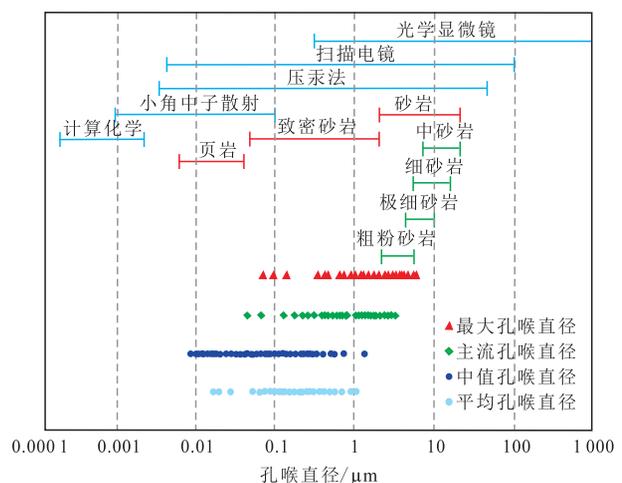


图1 SLG 油田致密砂岩储层在 Nelson 连续谱中的分布

Fig.1 Pore throat distribution of the tight sandstone reservoir in SLG oilfield in Nelson's continuous spectrum

## 2 核磁共振 $T_2$ 谱与毛管压力转换关系建立

毛管压力与孔喉半径的关系<sup>[17]</sup>可以表示为

$$p_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (1)$$

式中:  $p_c$  为毛管压力, MPa;  $\sigma$  为液体界面张

力, mN/m;  $\theta$  为润湿角, ( $^\circ$ );  $r$  为孔喉半径,  $\mu\text{m}$ 。

由核磁共振弛豫机制可知<sup>[18]</sup>, 在均匀磁场中观测到的横向弛豫时间可以表示为

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2B}} + \rho_2 \left( \frac{S}{V} \right) + \frac{D(\gamma G T_E)^2}{12} \quad (2)$$

式中:  $T_2$  为横向弛豫时间, ms;  $T_{2B}$  为流体的体积弛豫时间, ms;  $\rho_2$  为岩石横向表面弛豫强度,  $\mu\text{m}/\text{ms}$ ;  $S$  为孔隙表面积,  $\text{cm}^2$ ;  $V$  为孔隙体积,  $\text{cm}^3$ ;  $D$  为流体扩散系数,  $\mu\text{m}^2/\text{ms}$ ;  $\gamma$  为旋磁比,  $\text{rad}/(\text{s} \cdot \text{T})$ ;  $G$  为磁场梯度强度,  $\text{Gs}/\text{cm}$ ;  $T_E$  为回波间隔, ms。

由于实验室经常使用岩心饱和地层水来进行实验,  $T_{2B}$  的数值通常超过 3 000 ms, 远大于  $T_2$ , 因此体积弛豫可以忽略。当磁场很均匀, 对应的  $G$  很小且  $T_E$  也足够小时, 扩散弛豫也可以忽略不计, 因此式(2)可以简化为

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \left( \frac{S}{V} \right) \quad (3)$$

联立式(1)和式(3)可得

$$p_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho_2 r} \times \frac{V}{S} \times \frac{1}{T_2} \quad (4)$$

令

$$C = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho_2 r} \times \frac{V}{S} \quad (5)$$

式中:  $C$  为核磁共振  $T_2$  谱转换伪毛管压力曲线的横向转换系数。

横向转换系数的求取一般是通过岩心刻度采用相似对比法获得<sup>[19]</sup>。在获取横向转换系数之后, 为得到不同毛管压力条件下的进汞饱和度增量, 须将经过横向转换系数刻度后的伪毛管压力曲线幅度增量经过纵向刻度转换为进汞饱和度增量, 纵向刻度转换采用分段等面积法确定小孔径转换系数( $D1$ )和大孔径转换系数( $D2$ )<sup>[20]</sup>。为实现在无压汞测量资料情况下有效利用核磁共振  $T_2$  谱定量计算毛管压力, 提出了一种与压汞测量资料不相关的横、纵向转换系数的计算方法。经过多次统计分析, 建立  $C$ ,  $D1$  和  $D2$  的统计关系模型为

$$C = -166.36 \ln T_{2gm} + 452.97 \quad R=0.787 \quad (6)$$

$$D1 = -15.03 \ln \phi + 43.029 \quad R=0.803 \quad (7)$$

$$D2 = -13.996 \ln \phi + 37.334 \quad R=0.858 \quad (8)$$

式中:  $D1$  为小孔径转换系数;  $D2$  为大孔径转换系数;  $T_{2gm}$  为  $T_2$  的几何平均值, ms;  $\phi$  为孔隙度, %。

### 3 储层孔喉空间有效性划分

由核磁共振  $T_2$  谱中  $T_2$  截止值的物理含义可

知,  $T_2$  时间值所对应的孔喉半径可以表征储层中流体的流动情况。大于  $T_2$  截止值时储层孔隙中的流体可动, 小于  $T_2$  截止值时储层孔隙中的流体不可动<sup>[21-22]</sup>, 从而可以将  $T_2$  截止值转换为储层流动孔喉半径下限值。具体方法为给定初始孔喉半径, 利用数理插值方法求取对应的进汞饱和度, 核磁共振  $T_2$  谱利用  $T_2$  截止值确定可动流体饱和度, 构建目标函数的表达式为

$$Y = \sum_{i=1}^n [S_{wm}(i) - S_{hg}(i)]^2 \quad (9)$$

式中:  $Y$  为目标函数;  $i$  为研究区既具有核磁共振  $T_2$  谱又具有压汞实验数据的岩心数;  $n$  为研究区既具有核磁共振  $T_2$  谱又具有压汞实验数据的总岩心数;  $S_{wm}$  为可动流体饱和度, %;  $S_{hg}$  为孔喉半径对应的进汞饱和度, %。

当  $Y$  值达到最小时的孔喉半径即为储层流动孔喉半径下限值。对研究区 118 块既具有核磁共振  $T_2$  谱又具有压汞实验数据的岩心进行分析, 确定其储层流动孔喉半径下限值为  $0.1 \mu\text{m}$ 。

统计分析研究区致密砂岩储层的压汞曲线发现, 其压汞孔喉分布以双峰和单峰 2 种形态为主, 较少见多峰岩心的存在。将具有双峰形态特征的孔喉分布曲线叠置, 依据岩心的孔喉分布特征, 可以将岩心的孔喉划分为小孔喉、中孔喉和大孔喉 3 部分。其中, 双峰形态特征的孔喉分布曲线的主峰峰值小于  $0.04 \mu\text{m}$ , 次峰峰值大于  $0.2 \mu\text{m}$ , 因此将孔喉半径小于  $0.04 \mu\text{m}$  的划分为小孔喉, 大于  $0.2 \mu\text{m}$  的划分为大孔喉, 两者之间的部分划归为中孔喉。从 SLG 油田具有双峰形态特征孔喉分布曲线岩心的平均孔喉分布(图 2)可以看出, 具有双峰形态特征孔喉分布曲线的岩心位于小孔喉的主峰峰值比位于大孔喉的次峰峰值高约 1.5%, 说明研究区双峰形态

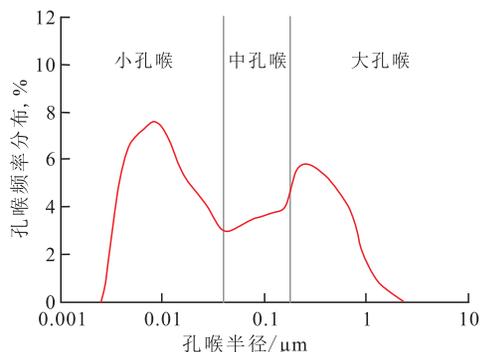


图2 SLG 油田具有双峰形态特征孔喉分布曲线岩心的平均孔喉分布

Fig.2 Average pore throat distribution of core samples in SLG oilfield having pore throat distribution curve that exhibits bimodal pattern

特征孔喉分布曲线的岩心是以小孔喉占主导地位。

研究区具有单峰形态特征孔喉分布曲线岩心的孔喉分布主峰可以明显的分为2类(图3)。一类岩心的孔喉分布主峰主要位于小孔喉,其孔喉分布主峰峰值主要为 $0.006 \sim 0.04 \mu\text{m}$ ,平均孔喉分布主峰峰值小于 $0.04 \mu\text{m}$ ,共有26块岩心,占具有单峰形态特征孔喉分布曲线岩心的62%。另一类岩心的孔喉分布主峰主要位于大孔喉,其孔喉分布主峰峰值主要为 $0.2 \sim 1.0 \mu\text{m}$ ,平均孔喉分布主峰峰值大于 $0.2 \mu\text{m}$ ,共有16块岩心,占具有单峰形态特征孔喉分布曲线岩心的38%。

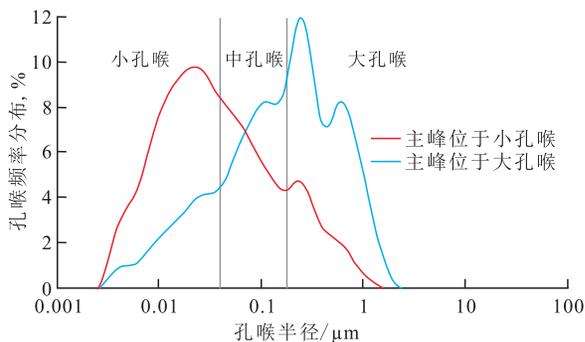


图3 SLG油田具有单峰形态特征孔喉分布曲线岩心的平均孔喉分布

Fig.3 Average pore throat distribution of core samples in SLG oilfield having pore throat distribution curve that exhibits unimodal pattern

确定致密砂岩储层的流动孔喉半径下限值需要2个关键参数,分别为甲烷分子被稳定吸附的喉道半径临界值(或甲烷可以自由脱附的喉道半径临界值)和束缚水膜厚度。邹才能等<sup>[23]</sup>认为,甲烷分子被稳定吸附的喉道半径临界值约为 $0.02 \mu\text{m}$ ,束缚水膜厚度的平均值约为 $0.02 \mu\text{m}$ ,据此含气致密储层的临界孔喉半径约为 $0.04 \mu\text{m}$ 。李晓晖等<sup>[24]</sup>认为,孔喉半径小于 $0.1 \mu\text{m}$ 孔隙中的水与大于 $0.1 \mu\text{m}$ 孔隙中的水的物理化学特性存在差异,可以将孔喉半径为 $0.1 \mu\text{m}$ 作为微毛细管孔隙与自由孔隙的划分界限。而在实际生产过程中,油气运移可以近似简化为平面径向渗流,基于渗流方程计算出孔隙中水能够流出所对应的孔喉半径要大于 $0.188 \mu\text{m}$ 。在岩心核磁共振 $T_2$ 谱确定束缚水饱和度过程中,国际上通用的做法是当岩石离心速度使得岩石所受的毛管压力达到 $3.75 \text{ MPa}$ 时,岩石中剩下的水即为束缚水<sup>[25]</sup>,由式(1)即可确定毛管压力为 $3.75 \text{ MPa}$ 时对应的孔喉半径为 $0.2 \mu\text{m}$ 。

通过实际岩心测试资料与理论分析,将研究区储层孔喉空间以 $0.04, 0.1$ 和 $0.2 \mu\text{m}$ 为界进行划分;每一区间代表互相连通、孔喉大小相近的同一孔喉

体系的体积,确定为研究区致密砂岩储层孔喉空间的有效性划分标准。

## 4 测井解释模型建立及实例应用

核磁共振测井的原理表明,横向弛豫时间与孔喉空间具有对应关系,核磁共振 $T_2$ 谱分布实际代表岩石孔喉半径的分布,不同的孔喉半径对应不同的核磁共振 $T_2$ 值。通过岩心压汞曲线与核磁共振 $T_2$ 谱的相互转换,根据孔喉半径分别为 $0.04, 0.1$ 和 $0.2 \mu\text{m}$ 将一个完整的核磁共振 $T_2$ 谱分布划分为粘土束缚水、非泥质微孔隙地层水、毛细管束缚水和可采出流体4个部分(图4)。其中,孔喉半径小于 $0.04 \mu\text{m}$ 孔喉体系中的水为粘土束缚水,孔喉半径为 $0.04 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 孔喉体系中的水为非泥质微孔隙地层水,孔喉半径为 $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 孔喉体系中的水为毛细管束缚水,孔喉半径大于 $0.2 \mu\text{m}$ 孔喉体系中的水为可采出流体。

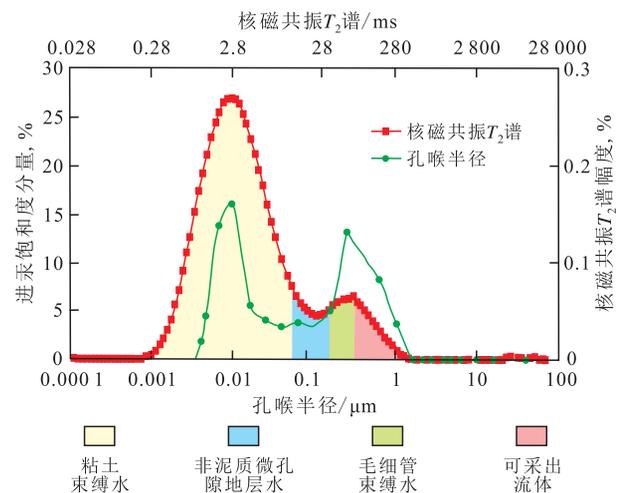


图4 测井解释模型

Fig.4 Logging interpretation model

基于核磁共振测井的致密砂岩储层孔喉空间有效性评价方法、标准及建立的测井解释模型,编制程序对实际资料进行处理。由SLG油田A井核磁共振测井评价储层孔喉空间有效性的应用成果(图5)可以看出,根据该井毛管压力曲线形态、孔喉半径、综合储层分类指数以及储层孔喉空间流体类型的综合分析,认为7,9,11和12号层的储集性能较好,孔喉空间流体类型以可采出流体为主,测井解释为气层。对该井3859~3874和3901~3915m井段试气,产气量为 $39000 \text{ m}^3/\text{d}$ ,产油量为 $6.3 \text{ t/d}$ ,产水量为 $6.3 \text{ m}^3/\text{d}$ ,与测井解释结论一致,表明利用核磁共振测井是可以快速进行致密砂岩储层孔喉空间有效性定量评价的。

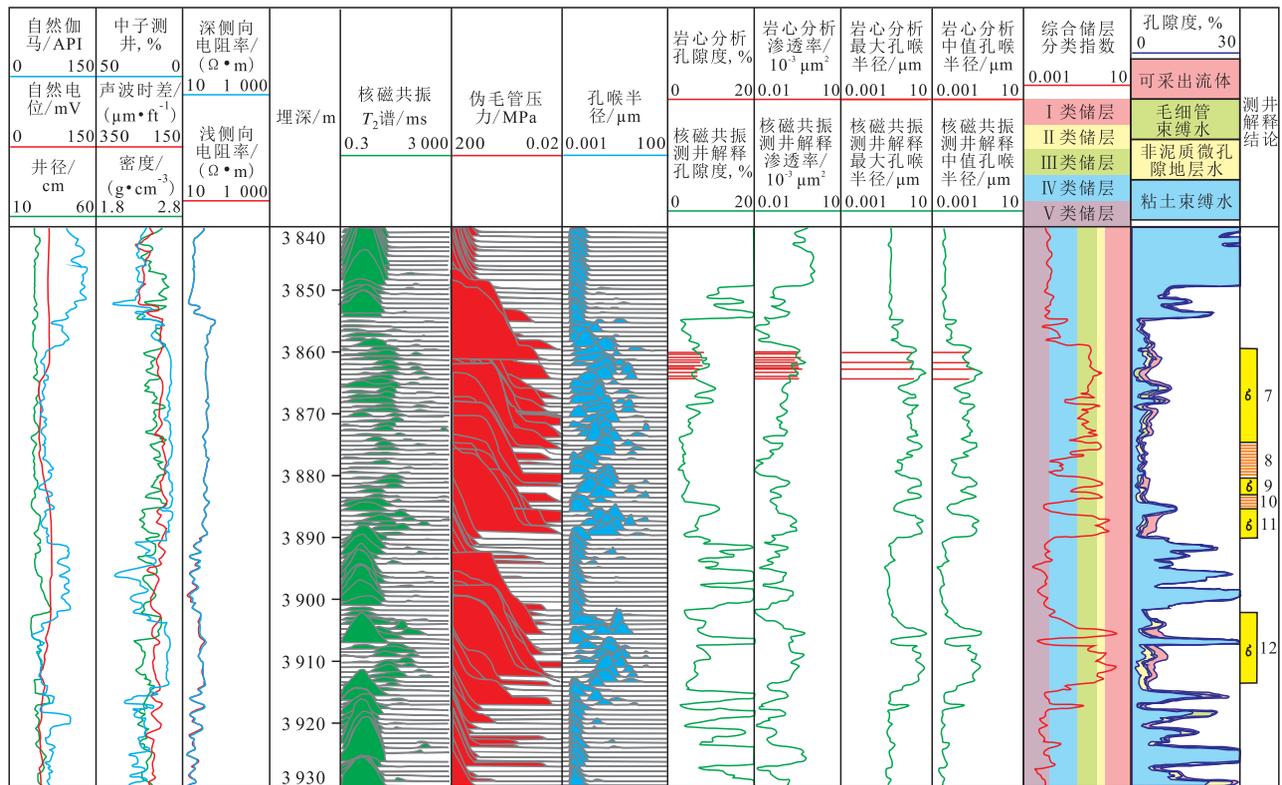


图5 SLG油田A井核磁共振测井评价储层孔喉空间有效性应用成果

Fig.5 Example of using NMR logging data to evaluate effectiveness of pore-throat space in Well A from SLG oilfield

### 5 结论

致密砂岩气藏的储层具有岩性致密、物性差、微细孔隙发育和毛管压力高等特征,且滞留在岩石孔隙中的水的赋存形式多样,可产生较为严重的影响。利用压汞曲线和核磁共振  $T_2$  谱的一致性,采用数理方法对压汞曲线进行处理,建立SLG油田致密砂岩储层孔喉空间的有效性划分标准,进而利用岩心压汞和核磁共振  $T_2$  谱建立的转换模型实现核磁共振测井连续计算粘土束缚水、非泥质微孔隙地层水、毛细管束缚水和可采出流体4个部分的孔喉体积。通过分析孔隙中水的赋存状态,可以为研究区的储层有效性评价及储层改造层位的选择和优化提供依据。

建议今后应重视并加强核磁共振  $T_2$  谱和压汞实验,使转换模型满足各地区的规律性,提高伪毛管压力的转换精度。随着科学技术的发展,储层孔喉空间划分标准是可以浮动的,如射孔工艺、压裂工艺等外界条件发生变化,有的非工业性油气层即可以转化为工业性油气层。建议从多角度验证致密砂岩储层孔喉空间有效性定量评价标准的准确性,以合理、准确地评价孔隙中的含水特征与赋存状态。

### 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] 任闯燕,姜汉桥,李爱山,等.非常规天然气增产改造技术研究进展及其发展方向[J].油气地质与采收率,2013,20(2):103-107.  
Ren Minyan, Jiang Hanqiao, Li Aishan, et al.Review on study progress of unconventional gas stimulation technology [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(2): 103-107.
- [3] 王伟明,赵旭,孙计文,等.致密砂岩气资源潜力关键参数确定方法——以吐哈盆地为例[J].石油与天然气地质,2014,35(2):258-265.  
Wang Weiming, Zhao Xu, Sun Jiwen, et al.Key parameter selection for tight gas resource potential: a case from Turfan-Hami Basin[J].Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 258-265.
- [4] 赵靖舟,李军,曹青,等.论致密大油气田成藏模式[J].石油与天然气地质,2013,34(5):573-583.  
Zhao Jingzhou, Li Jun, Cao Qing, et al.Hydrocarbon accumulation patterns of large tight oil and gas fields [J].Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 573-583.
- [5] 邱振,邹才能,李建忠,等.非常规油气资源评价进展与未来展望[J].天然气地球科学,2013,24(2):238-246.

- Qiu Zhen, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Unconventional petroleum resources assessment: Progress and future prospects [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(2): 238-246.
- [6] 康毅力, 罗平亚. 中国致密砂岩气藏勘探开发关键技术现状与展望 [J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(2): 239-245.  
Kang Yili, Luo Pingya. Current status and prospect of key techniques for exploration and production of tight sandstone gas reservoirs in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(2): 239-245.
- [7] 赵政璋, 杜金虎. 非常规油气资源现实的勘探开发领域: 致密油气 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.  
Zhao Zhengzhang, Du Jinhui. Reality of unconventional oil and gas exploration and development: tight oil and gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [8] 郭平, 黄伟岗, 姜贻伟, 等. 致密气藏束缚与可动水研究 [J]. *天然气工业*, 2006, 26(10): 99-101.  
Guo Ping, Huang Weigang, Jiang Yiwei, et al. Research on the irreducible and movable water of tight sandstone gas reservoir [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(10): 99-101.
- [9] 孙赞东, 贾承造, 李相方, 等. 非常规油气勘探与开发 (上册) [M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 442-458.  
Sun Zandong, Jia Chengzao, Li Xiangfang, et al. Unconventional oil and gas exploration and development ( I ) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 442-458.
- [10] 彭盛强. 复杂砂泥岩储层薄膜束缚水饱和度研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.  
Peng Shengqiang. Study on the clay bound water saturation in the complex shale reservoir [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [11] 叶礼友. 川中须家河组低渗砂岩气藏渗流机理及储层评价研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院 (渗流流体力学研究所), 2011.  
Ye Liyou. Study on percolation mechanism and reservoir evaluation of Xujiahe low permeability sandstone gas reservoirs in central Sichuan basin [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Science (Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics), 2011.
- [12] 任晓娟, 阎庆来, 何秋轩, 等. 低渗气层气体的渗流特征实验研究 [J]. *西安石油学院学报: 自然科学版*, 1997, 12(3): 21-24.  
Ren Xiaojuan, Yan Qinglai, He Qiuxuan, et al. The experimental study of characteristics of gas flow in tight formation [J]. *Journal of Xi'an Petroleum Institute: Natural Science Edition*, 1997, 12(3): 21-24.
- [13] 李喜平, 梁生, 李君. 边水气藏开发过程中的气水关系分析 [J]. *天然气工业*, 2000, 20(增刊): 99-101.  
Li Xiping, Liang Sheng, Li Jun. Analysis of gas-water relation in the process of developing gas reservoir with edge water [J]. *Natural Gas Industry*, 2000, 20(supplement): 99-101.
- [14] 吴健, 胡向阳, 何胜林, 等. 南海西部油区低阻油层识别与定量评价 [J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(1): 66-69, 73.  
Wu Jian, Hu Xiangyang, He Shenglin, et al. Comprehensive identification and quantitative evaluation on low resistivity reservoir in the western south China sea [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(1): 66-69, 73.
- [15] 罗蛰潭, 王允诚. 油气储集层的孔隙结构 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.  
Luo Zhetan, Wang Yuncheng. The pore structure of reservoir [M]. Beijing: Science Press, 1986.
- [16] Nelson P H. Pore-throat sizes in sandstones, tight sandstones, and shales [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(3): 329-340.
- [17] 罗厚义, 汤达祯, 汤永梅. 利用毛管压力预测碳酸盐岩油藏油水界面 [J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(2): 71-73.  
Luo Houyi, Tang Dazhen, Tang Yongmei. Study on prediction of oil water contact in carbonate reservoir with capillary pressure data [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(2): 71-73.
- [18] 吴丰, 司马立强, 令狐松, 等. 昆北地区储层核磁共振孔隙度偏低分析及校正 [J]. *特种油气藏*, 2014, 21(2): 75-79.  
Wu Feng, Sima Liqiang, Linghu Song, et al. Analysis and correction of low reservoir porosity derived from NMR log in the Kunbei area [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2014, 21(2): 75-79.
- [19] 刘堂宴, 王绍民, 傅容珊, 等. 核磁共振谱的岩石孔喉结构分析 [J]. *石油地球物理勘探*, 2003, 38(3): 328-333.  
Liu Tangyan, Wang Shaomin, Fu Rongshan. Analysis of rock pore throat structure with NMR data [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2003, 38(3): 328-333.
- [20] 邵维志, 丁娱娇, 刘亚, 等. 核磁共振测井在储层孔隙结构评价中的应用 [J]. *测井技术*, 2009, 33(1): 52-56.  
Shao Weizhi, Ding Yujiao, Liu Ya, et al. The application of NMR log data in evaluation of reservoir pore structure [J]. *Well Logging Technology*, 2009, 33(1): 52-56.
- [21] 刘桂玲, 孙军昌, 熊生春, 等. 高邮凹陷南断阶特低渗透油藏储层微观孔隙结构特征及分类评价 [J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(4): 37-41.  
Liu Guiling, Sun Junchang, Xiong Shengchun, et al. Study of the petrophysical properties and reservoir evaluation of south-fault ultra-low-permeability reservoir of Gaoyou depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(4): 37-41.
- [22] 田素月, 孙灵芬. 核磁共振测井在东濮凹陷深层气评价中的应用 [J]. *油气地质与采收率*, 2003, 10(3): 34-35.  
Tian Suyue, Sun Lingfen. Application of nuclear magnetic resonance logging to deep gas evaluation in Dongpu sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2003, 10(3): 34-35.
- [23] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(6): 1 857-1 864.  
Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. First discovery of nanopore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(6): 1 857-1 864.
- [24] 李晓辉. 复杂泥质砂岩储层束缚水饱和度计算方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2006.  
Li Xiaohui. Study on shaly sand irreducible water saturation calculation method [D]. Changchun: Jilin University, 2006.
- [25] 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 (NMR) imaging logging and nuclear magnetic resonance (NMR) and its applications [M]. Beijing: Science Press, 1998.