

doi:10.3799/dqkx.2017.506

核磁共振技术在非常规油气藏的应用基础

杨正明¹, 张亚蒲¹, 李海波¹, 郑兴范², 雷启鸿³

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2. 中国石油勘探与生产分公司, 北京 100007

3. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西西安 710018

摘要: 核磁共振技术在非常规油气藏应用解释中有较多争议, 结合渗流流体的概念, 提出了针对核磁共振图谱解释流体动用性质的新方法, 并应用于非常规油气藏, 研究表明: 致密油和致密砂岩气藏岩心的核磁共振图谱左峰和右峰是连续而不是截然分开的, 说明难动用流体与易动用流体的性质是连续渐变的, 不是独立分开的; 而页岩和煤层气藏岩心核磁共振图谱则反之。在非常规油气藏岩心中, 难动用流体占主导地位, 致密油和致密砂岩气藏岩心的易动用流体多于页岩和煤层气藏岩心。致密油和致密砂岩气藏的采出程度提高取决于易动用流体的采出; 而页岩和煤层气藏的采出程度提高则取决于难动用流体的采出。

关键词: 非常规油气藏; 核磁共振; 流体; 采出程度; 石油地质。

中图分类号: P631

文章编号: 1000-2383(2017)08-1333-07

收稿日期: 2016-12-20

Application Basis of Nuclear Magnetic Resonance Technology in the Unconventional Reservoirs

Yang Zhengming¹, Zhang Yapu¹, Li Haibo¹, Zheng Xingfan², Lei Qihong³

1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

2. PetroChina Exploration and Production Company, Beijing 100007, China

3. Exploration & Development Research Institute, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, China

Abstract: The application interpretation of nuclear magnetic resonance (NMR) technology in unconventional reservoirs has been very controversial. A new interpretation method of NMR spectrum is proposed and applied to the unconventional reservoirs combining with the concept of seepage fluid. The results show that the left peak and right peak of nuclear magnetic resonance spectrum in tight oil and gas sandstone cores are continuous rather than entirely separated, which indicates that the properties of the differences between the easy-to-produce fluid and the difficult-to-produce fluid is not completely separated. But the nuclear magnetic resonance spectrum of shale and coal bed methane (CBM) reservoir cores is opposite to the above mentioned results. In cores of unconventional reservoirs, the difficult-to-produce fluid dominates, and the easy-to-produce fluid in tight oil and gas sandstone cores is more than that of shale and CBM reservoir cores. The recovery degree of tight oil and gas sandstone reservoirs mainly increases in the easy-to-produce fluid extraction, but the recovery degree of shale and CBM reservoirs mainly increases in the difficult-to-produce fluid extraction.

Key words: unconventional reservoirs; nuclear magnetic resonance; fluid; recovery degree; petroleum geology.

“十二五”以来, 非常规油气资源在中国能源工业中的地位愈发重要(王生维等, 1995; 孙赞东等, 2011; 赵政璋等, 2012; 邹才能等, 2013, 2015; 吴松涛等,

2015; 郭迎春等, 2016)。经初步评价, 中国非常规石油资源量为 $2.23 \times 10^{10} \sim 2.63 \times 10^{10}$ t, 非常规天然气资源量为 $8.90 \times 10^{14} \sim 1.26 \times 10^{15}$ m³; 其中, 致密油可采

基金项目: 国家科技重大专项(No.2017ZX05013-001); 中国石油天然气集团公司重大基础科技攻关课题(No.2014B-1203)。

作者简介: 杨正明(1969-), 男, 高级工程师, 主要从事低渗/致密油气田物理模拟、渗流理论和三次采油方面的研究工作。

ORCID: 0000-0001-8855-2720. E-mail: yzhm69@petrochina.com.cn

引用格式: 杨正明, 张亚蒲, 李海波, 等, 2017. 核磁共振技术在非常规油气藏的应用基础. 地球科学, 42(8): 1333-1339.

资源量为 $2.0 \times 10^9 \sim 2.5 \times 10^9$ t, 致密砂岩气藏、埋深 1 500 m 以上的煤层气藏和页岩气藏可采资源量分别为 $9.0 \times 10^{12} \sim 1.3 \times 10^{13}$ m³、 1.09×10^{13} m³ 左右和 $1.0 \times 10^{13} \sim 2.5 \times 10^{13}$ m³. 致密油气、煤层气和页岩气等已成为勘探开发的重点领域, 非常规资源开发初见成效. 截止到 2014 年底, 中国致密气产量为 3.6×10^{10} m³, 占天然气总产量的 27% 左右; 煤层气产量为 3.6×10^9 m³, 页岩气产量为 1.3×10^9 m³, 长庆油田也已建成了具有 10^6 t 的致密油产能规模.

核磁共振技术作为一个快速无损检测技术越来越受到人们的重视, 在非常规油气藏领域得到了广泛的应用. 利用核磁共振技术可快速得到岩石孔隙度、渗透率、油水饱和度等多项关键物性参数 (Wang *et al.*, 1996; 王为民等, 2001; Mai and Kantzas, 2002; 肖立志等, 2012; 孙军昌, 2013), 其在定量研究孔隙介质的表面性质 (如润湿性) 等方面也有独特的优势 (周波等, 2004; 孙军昌, 2013), 可动流体百分数是目前核磁共振技术测试应用较广泛的一项重要参数, 在评价低渗透油气田开发潜力方面起到了重要作用 (王为民等, 2001; 杨正明等, 2007, 2008, 2009, 2012; 张亚蒲等, 2010; 张仲宏等, 2012). 可动流体量通常利用束缚水双峰模型计算获得, 该模型假定束缚水占据小孔隙 (对应 T_2 谱左峰), 可动流体占据大孔隙 (对应 T_2 谱右峰), 设想有一个确切 T_2 截止值, 小于该值的 T_2 图谱对应束缚流体, 大于该值的 T_2 图谱对应可动流体. 大量实验表明, 小于 T_2 截止值的 T_2 谱对应的流体也不完全不可动. 笔者在应用时, 对以前的核磁共振基本原理进行了梳理, 并结合渗流流体的概念, 提出了新的核磁共振图谱解释方法.

1 岩心核磁共振图谱解释新方法

核磁共振 (nuclear magnetic resonance, 简称 NMR) 是某些具有自旋磁矩的原子核在外加磁场作用下, 吸收特定频率的电磁波, 从而改变能量状态的现象. 核磁共振技术在石油勘探开发中应用时, 通过对岩样进行核磁共振测试, 快速获得储层渗透率、孔隙度、含油饱和度、可动流体百分数和可动水饱和度等物性和流体参数, 为有效储层的划分、评价与油水层识别等提供了有效的方法和手段.

图 1 为长庆典型致密油岩样 (空气渗透率为 0.21 mD) 饱和水及不同离心力的核磁共振谱. 当在饱和水状态时, 岩心中测试的核磁共振图谱为双峰结构, 这种结构在低渗/致密油气藏的岩心中较为

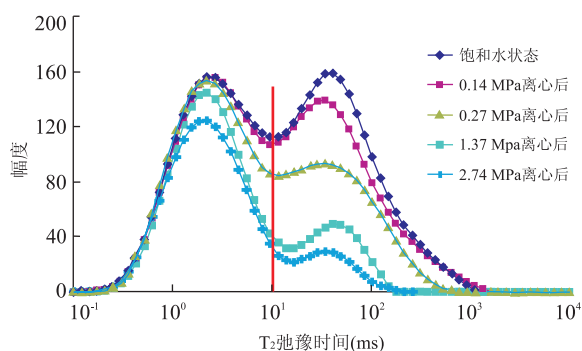


图 1 饱和水及不同离心力条件下典型致密油岩样核磁共振谱
Fig.1 NMR spectrum of water saturated and after different centrifugal force in typical tight oil sample
图中红线的左边为难动用流体; 红线的右边为易动用流体

表 1 不同离心力下所采出易动用流体和难动用流体占总流体的百分数

Table 1 The percentage of body fluid and boundary fluid of total fluid produced by different centrifugal force

离心力 (MPa)	采出流体占总流体的百分数 (%)	
	易动用流体	难动用流体
0.14	5.74	0.94
0.27	19.42	2.39
1.37	39.10	9.81
2.74	44.15	13.66

普遍. 很多学者将其中的 T_2 弛豫时间转化为孔喉半径大小, 将核磁共振图谱转化为孔喉半径分布图, 从而认为在图中的右峰部分是大孔喉所占据的空间特征, 左峰为小孔喉所占据的空间特征. 但这种解释无法回答在左峰和右峰之间为什么会出明显的凹陷, 高压压汞测试的孔喉分布特征曲线结果也不支持以上的解释 (孟智强, 2014).

黄延章 (1998) 提出了渗流流体概念, 他将多孔介质流体分为边界流体和体相流体. 边界流体为流体性质受界面影响的流体, 分布在孔道壁上, 形成边界层; 体相流体是流体性质不受界面影响的流体, 分布在多孔介质孔道的中轴部位. 因此, 边界流体和体相流体的性质是不同的. 实验表明: 在 25 °C 条件下的试管中, 水表现为体相流体, 其 T_2 弛豫时间为 3 500 ms; 而在淤泥的微孔隙中, 水表现为边界流体, 其 T_2 弛豫时间小于 0.3 ms. 而在致密岩心中核磁共振的图谱基本上是小于是 1 000 ms, 因此, 在致密岩心中的流体性质介于体相流体和边界流体, 用 T_2 弛豫时间图谱来将流体划分为相对易动用流体 (简称易动用流体) 和相对难动用流体 (简称难动用流体). 在图 1 和表 1 中还可以看出, 在不同的离心力下所采出的易动用流体和难动用流体是不同的; 随

表 2 5 块实验样品的物性数据和测试结果

Table 2 The physical properties and test data of 5 experimental samples

序号	长度(cm)	直径(cm)	孔隙度(%)	渗透率(mD)	易动用流体所占流体比例(%)	难动用流体所占流体比例(%)
1	3.240	2.52	1.62	0.000 49	0.31	99.69
2	2.520	2.46	7.79	0.012 00	23.38	76.62
3	2.523	2.49	6.42	0.070 00	42.56	57.44
4	2.520	2.48	6.54	0.167 00	51.15	48.85
5	2.522	2.38	10.57	0.212 00	51.61	48.39

随着离心力的增大,所采出的易动用流体和难动用流体越来越多.在 0.14 MPa 离心力下,采出的大多数是易动用流体,采出的易动用流体占总流体体积的 5.74%,而采出的难动用流体占总流体体积的 0.94%;在 2.74 MPa 离心力下,采出的易动用流体占总流体体积的 44.15%,而采出的难动用流体占总流体体积的 13.66%.因此,在一定的压差下,可以采出易动用流体,也可以采出难动用流体,这些结论与前人的研究一致(徐绍良和岳湘安,2007).从图 1 中也可以看出:随着离心力的增大,致密油中采出的易动用流体要多于难动用流体.因此,对于致密砂岩油气藏来说,提高其采出程度,重要的是提高易动用流体的采出程度.

因此,笔者将图 1 图谱右峰部分定义为易动用流体,左峰部分定义为难动用流体的提法,与过去将右峰部分定义为可动流体,左峰部分定义为不可动流体的提法相比更科学.

2 岩心核磁共振研究

2.1 致密油岩心核磁共振研究

选取中石油某一典型致密油藏 5 块实验样品进行核磁共振测试,核磁共振实验利用 Reccore-04 型岩心核磁共振分析仪完成(测试参数:等待时间为 3 000 ms;回波间隔为 600 μs;回波个数为 1 024;扫描次数为 64;增益为 40 db),常规气测孔渗利用 KSL-II 型孔渗联测仪完成,岩心饱和水的装置为低渗致密岩样专用的抽真空加压饱和装置,保证岩样饱和和水后岩石孔隙内被水充满(下文中涉及的核磁及常规实验所用设备、测试条件与此相同).岩石基本物性数据和测试结果如表 2 和图 2 所示.

从图 2 和表 2 中可以看出:(1)随着渗透率的降低,岩心核磁共振的右峰逐渐降低,易动用流体所占流体比例急剧降低,难动用流体所占流体比例急剧上升.当致密岩心渗透率为 0.000 49 mD 时, T_2 谱没有右峰,只有一个左峰,易动用流体所占流体比例仅

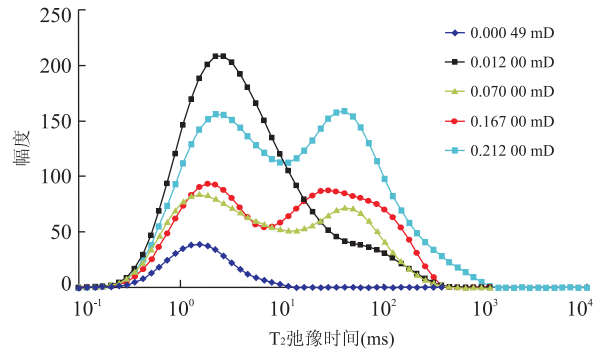


图 2 不同渗透率致密油岩样的核磁共振图谱

Fig.2 NMR spectrum in different permeability cores from tight oil reservoir

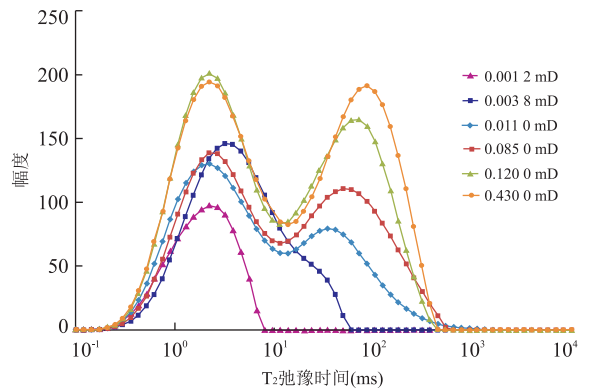


图 3 不同渗透率致密砂岩气藏岩样的核磁共振图谱

Fig.3 NMR spectrum in different permeability cores from tight sandstone gas reservoir

为 0.31%,难动用流体所占流体比例为 99.69%;当致密岩心为 0.212 00 mD 时,易动用流体所占流体比例为 51.61%,难动用流体所占流体比例为 48.39%.(2)在致密油藏岩心中,核磁共振图谱的左峰和右峰不是截然分开的,是紧密相联的,说明难动用流体与易动用流体的性质有差异,但不大.

2.2 致密砂岩气岩心核磁共振研究

6 块实验样品取自中石油典型致密砂岩气藏,其岩石物性数据和测试结果如图 3 和表 3 所示.从图 3 中可以看出:(1)随着岩心越致密,即渗透率越低,核磁共振图谱右峰逐渐降低,说明在岩心中易动

表 3 6 块实验样品的物性数据和测试结果

Table 3 The physical properties and test data of 6 experimental samples

序号	长度(cm)	直径(cm)	孔隙度(%)	渗透率(mD)	易动用流体所占流体比例(%)	难动用流体所占流体比例(%)
1	3.240	2.52	1.62	0.001 2	0	100
2	2.520	2.46	7.79	0.003 8	16.87	83.13
3	2.523	2.49	6.42	0.011 0	35.50	64.50
4	2.520	2.48	6.54	0.085 0	43.95	56.05
5	2.522	2.38	10.57	0.120 0	45.26	54.74
6	2.523	2.41	12.46	0.430 0	49.33	50.67

表 4 5 块实验样品的物性数据和测试数据

Table 4 The physical properties and test data of 4 experimental samples

序号	长度(cm)	直径(cm)	渗透率(mD)	易动用流体所占流体比例(%)	难动用流体所占流体比例(%)
1	3.38	2.51	0.000 854	0	100
2	3.25	2.52	0.002 968	1.97	98.03
3	3.32	2.51	0.022 447	2.96	97.04
4	3.33	2.51	0.121 304	3.52	96.48
5	3.35	2.51	0.589 073	12.62	87.38

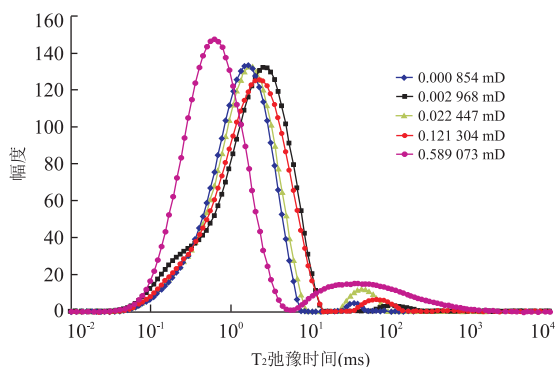


图 4 5 块页岩气藏岩心核磁共振图谱

Fig.4 NMR spectrum of 5 shale gas reservoir cores

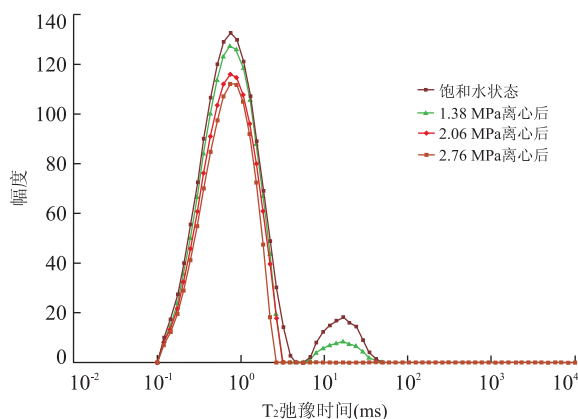


图 5 典型致密页岩岩样饱和水及不同离心力的核磁共振图谱

Fig.5 NMR spectrum of water saturated and after different centrifugal force in typical shale samples

用流体所占比例越来越少,难动用流体所占比例越来越多.当渗透率为 0.430 0 mD 时,易动用流体所占比例为 49.33%,难动用流体所占比例为 50.67%;当渗透率为 0.085 0 mD 时,易动用流体所占比例为 43.95%,难动用流体所占比例为 56.05%;当渗透率为 0.001 2 mD 时,易动用流体所占比例为 0%,难动用流体所占比例为 100%。(2)致密气藏岩心中的核磁共振图谱的左峰和右峰形态分布规律同致密油岩心类似,说明二者难动用流体与易动用流体的性质也类似。

2.3 页岩气岩心核磁共振研究

5 块实验样品取自中石油典型页岩气藏,其岩石物性数据和测试的核磁共振图像如表 4 和图 4 所示:(1)不同渗透率的页岩岩心饱和水后测试其核磁共振图谱呈现 2 种类型.第一种类型页岩岩心核磁 T_2 呈左单峰态分布,表明此类页岩样品只含有一定量的难动用流体,基本不含易动用流体,如渗透率为

表 5 不同离心力下所采出易动用流体和难动用流体占总流体的百分数

Table 5 The percentage of body fluid and boundary fluid of total fluid produced by different centrifugal force

离心力 (MPa)	采出流体占总流体的百分数(%)	
	易动用流体	难动用流体
1.38	4.15	6.43
2.06	7.73	14.23
2.76	7.73	21.74

0.000 854 mD 的岩心;第二种类型页岩岩心核磁 T_2 谱除了有一个基本对称的左峰外,还有一个孤立的右峰,且峰值很小,表明此类样品中易动用流体和难动用流体性质在页岩中差异较大,难动用流体很难变成易动用流体;随着渗透率的变大,右峰逐渐变

表 6 实验样品的物性数据及测试数据

Table 6 The physical properties and test data in different experimental samples

岩心	井号	孔隙度(%)	渗透率(mD)	易动用流体所占流体比例(%)	难动用流体所占流体比例(%)
1	晋试 8 井	1.36	0.088	4.61	95.39
2	晋试 9 井	2.95	0.182	5.45	94.55
3	晋试 11 井	4.70	0.781	7.42	92.58
4	晋试 12 井	4.80	1.124	8.77	91.23
5	晋试 7 井	2.23	1.824	21.17	78.83

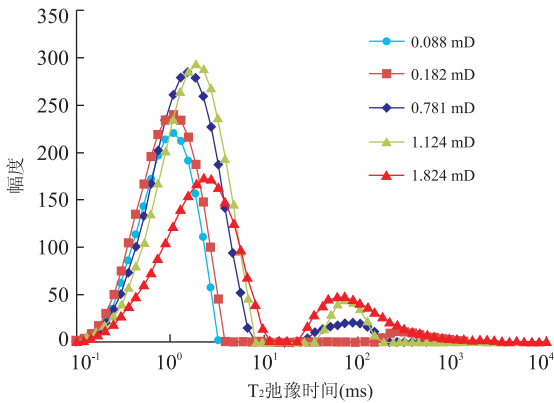


图 6 5 块煤层气藏岩心核磁共振图谱

Fig.6 NMR spectrum of 5 CBM reservoir cores

大。(2)随着岩心越致密,岩心中易动用流体所占比例越来越少,难动用流体所占比例越来越多。

以一块页岩岩心为例,测试饱和水及不同离心力下的核磁共振图谱,测试结果如图 5 和表 5 所示:(1)在不同的离心力下所采出的易动用流体和难动用流体是不同的,随着离心力的增大,所采出的易动用流体和难动用流体越来越多。在 1.38 MPa 离心力下,采出的易动用流体占总流体体积的 4.15%,而采出的难动用流体占总流体体积的 6.43%;在 2.06 MPa 离心力下,采出的易动用流体占总流体体积的 7.73%,而采出的难动用流体占总流体体积的 14.23%。(2)随着离心力的增大,采出的易动用流体保持不变,主要来自于难动用流体。如当离心力从 2.06 MPa 增加到 2.76 MPa 时,采出的易动用流体占比保持不变,而采出的难动用流体则增加了 7.51 个百分点。因此,提高页岩油藏的采出程度在于提高难动用流体的采出程度。

2.4 煤层气岩心核磁共振研究

5 块实验样品取自中石油典型煤层气藏,其岩石物性数据和测试结果如表 6 和图 6 所示:(1)不同渗透率的煤层气藏岩心饱和水后测试其核磁共振图谱呈现两个峰,且不连通。表明此类样品中易动用流体和难动用流体性质差异较大,难动用流体很难变成易动用流体;随着渗透率的变大,右峰逐渐变大。

表 7 不同类型油气藏核磁共振特征对比

Table 7 Comparison of NMR characteristics in different type reservoirs

油气藏类型	T ₂ 谱特征	易动用流体比例	难动用流体比例
致密油	连续的双峰或单峰	低或相对较高	高或相对较低
致密砂岩气	连续的双峰或单峰	低或相对较高	高或相对较低
页岩	单峰或不连续的双峰	很低或较低	很高或较高
煤层气	单峰或不连续的双峰	很低或较低	很高或较高

(2)随着岩心越致密,岩心中易动用流体所占比例越来越少,难动用流体所占比例越来越多。

表 7 给出不同油气藏核磁共振特征对比。从表 7 可看出:致密油和致密砂岩气藏岩心 T₂ 谱呈连续的双峰或单峰结构,易动用流体比例低或相对较高,难动用流体比例高或相对较低;而页岩和煤层气藏岩心 T₂ 谱呈单峰或不连续的双峰结构,易动用流体比例很低或较低,难动用流体比例很高或较高。

3 结论

(1)结合渗流流体概念,笔者提出了针对核磁共振图谱解释流体动用性质的新方法,即将核磁共振图谱的右峰部分定义为易动用流体,左峰部分定义为难动用流体,这种提法与过去将右峰部分定义为可动流体,左峰部分定义为不可动流体的提法相比更科学。

(2)致密油和致密砂岩气藏岩心的核磁共振图谱,其左峰和右峰不是截然分开的,说明难动用流体与易动用流体性质不是完全分开的;而页岩和煤层气藏岩心核磁共振图谱,其左峰和右峰是截然分开的,表明此类样品中易动用流体和难动用流体性质差异较大,难动用流体很难变成易动用流体。

(3)在非常规油气藏岩心中,难动用流体占主导地位,易动用流体较少;致密油和致密砂岩气藏岩心的易动用流体要多于页岩和煤层气藏岩心,而难动用流体分布规律则相反。

(4)不同离心力的核磁共振图谱表明:致密油和

致密砂岩气藏的采出程度提高在于易动用流体的采出;而页岩和煤层气藏的采出程度提高在于难动用流体的采出。

References

- Guo, Y. C., Song, Y., Pang, X. Q., et al., 2016. Characteristics and Genetic Mechanism of Near-Source Accumulated Accumulation for Continuous-Type Tight Sand Gas. *Earth Science*, 41(3): 433–440 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Y. Z., 1998. Percolating Flow Mechanism of Low Permeability Reservoir. Petroleum Industry Press, Beijing, 12 (in Chinese).
- Mai, A., Kantzas, A., 2002. An Evaluation of the Application of Low Field NMR in the Characterization of Carbonate Reservoirs. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio. doi:10.2118/77401-MS
- Meng, Z. Q., 2014. Research on Pore Structure Characteristics of Tight Oil Reservoirs—Illustrated by the Case of Ordos Basin and Sichuan Basin (Dissertation). University of Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Sun, J. C., 2013. Study on Physical Simulation Method and Its Application of Ultra-Low Permeability Petroleum Reservoir (Dissertation). University of Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z. D., Jia, C. Z., Li, X. F., et al., 2011. Unconventional Oil & Gas Exploration and Development: Volume 1. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, S. W., Chen, Z. H., Zhang, M., 1995. Pore and Microfracture of Coal Matrix Block and Their Effects on the Recovery of Methane from Coal. *Earth Science*, 20(5): 557–560 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W. M., Lang, D. J., Liu, W., 1996. The Application of NMR Imaging to the Studies of Enhanced Oil Recovery in China. *Magnetic Resonance Imaging*, 14(7): 951–953. doi:10.1016/S0730-725X(96)00192-0
- Wang, W. M., Guo, H. K., Ye, C. H., 2001. The Evaluation of Development Potential in Low Permeability Oilfield by the Aid of NMR Movable Fluid Detecting Technology. *Acta Petrolei Sinica*, 22(6): 40–44 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S. T., Zou, C. N., Zhu, R. K., et al., 2015. Reservoir Quality Characterization of Upper Triassic Chang 7 Shale in Ordos Basin. *Earth Science*, 40(11): 1810–1823 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, L. Z., Xie, R. H., Liao, G. Z., 2012. Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Logging Theory and Method in Chinese Complex Reservoirs. Science Press, Beijing, 30–31 (in Chinese).
- Xu, S. L., Yue, X. A., 2007. Experimental Research on Nonlinear Flow Characteristics at Low Velocity. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 31(5): 60–63 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. M., Guo, H. K., Jiang, H. Q., et al., 2009. Experimental Study on Different Lithologic Rock of Volcanic Gas Reservoir Using Nuclear Magnetic Resonance Technique. *Acta Petrolei Sinica*, 30(3): 400–403 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. M., Guo, H. K., Liu, X. W., et al., 2012. Characteristic Experimental Technology of an Extra-Ultra Low Permeability Reservoir. Petroleum Industry Press, Beijing, 135–155 (in Chinese).
- Yang, Z. M., Jiang, H. Q., Zhu, G. Y., et al., 2008. Research on Reservoir Evaluation Index for Low-Permeability Water-Bearing Gas Reservoir. *Acta Petrolei Sinica*, 29(2): 252–255 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. M., Miao, S., Liu, X. G., et al., 2007. Percentage Parameter of the Movable Fluid in Ultra-Low Permeability Reservoir and Its Application. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 22(2): 96–99 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. P., He, Y. F., Yang, Z. M., et al., 2010. The Application of Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Technology in Coalbed Methane Reservoir Evaluation. *Journal of Oil and Gas Technology*, 32(2): 277–279 (in Chinese).
- Zhang, Z. H., Yang, Z. M., Liu, X. G., et al., 2012. A Grading Evaluation Method for Low-Permeability Reservoirs and Its Application. *Acta Petrolei Sinica*, 33(3): 437–441 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. Z., Du, J. H., Zou, C. N., et al., 2012. Tight Oil & Gas. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Zhou, B., Wang, W. M., Guo, H. K., et al., 2004. Measurement on Scale of Wettability of Porous Media with NMR Methods. *Earth Science*, 29(4): 495–499 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Zhang, G. S., Yang, Z., et al., 2013. Geological Concepts, Characteristics, Resource Potential and Key Techniques of Unconventional Hydrocarbon: On Unconventional Petroleum Geology. *Petroleum Exploration and Development*, 40(4): 385–399, 454 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Zhu, R. K., Bai, B., et al., 2015. Significance, Geologic Characteristics, Resource Potential and Future Challenges of Tight Oil and Shale Oil. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(1): 3–17 (in

Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 郭迎春,宋岩,庞雄奇,等,2016.连续型致密砂岩气近源累计聚集的特征及成因机制.地球科学,41(3): 433-440.
- 黄延章,1998.低渗透油层渗流机理.北京:石油工业出版社,12.
- 孟智强,2014.致密油储层孔隙结构特征研究——以鄂尔多斯盆地、四川盆地为例(硕士学位论文).北京:中国科学院大学.
- 孙军昌,2013.特低渗储层物性参数测试方法及应用研究(博士学位论文).北京:中国科学院大学.
- 孙赞东,贾承造,李相方,等,2011.非常规油气勘探与开发:上册.北京:石油工业出版社.
- 王生维,陈钟惠,张明,1995.煤基岩块孔裂隙特征及其在煤层气产出中的意义.地球科学,20(5): 557-560.
- 王为民,郭和坤,叶朝辉,2001.利用核磁共振可动流体评价低渗透油田开发潜力.石油学报,22(6): 40-44.
- 吴松涛,邹才能,朱如凯,等,2015.鄂尔多斯盆地上三叠统长7段泥页岩储集性能.地球科学,40(11): 1810-1823.
- 肖立志,谢然红,廖广志,2012.中国复杂油气藏核磁共振测井理论和方法.北京:科学出版社,30-31.
- 徐绍良,岳湘安,2007.低速非线性流动特性的实验研究.中国石油大学学报(自然科学版),31(5): 60-63.
- 杨正明,郭和坤,姜汉桥,等,2009.火山岩气藏不同岩性核磁共振实验研究.石油学报,30(3): 400-403.
- 杨正明,郭和坤,刘学伟,等,2012.特低-超低渗透油气藏特色实验技术.北京:石油工业出版社,135-155.
- 杨正明,姜汉桥,朱光亚,等,2008.低渗透含水气藏储层评价参数研究.石油学报,29(2): 252-255.
- 杨正明,苗盛,刘先贵,等,2007.特低渗透油藏可动流体百分数参数及其应用.西安石油大学学报(自然科学版),22(2): 96-99.
- 张亚蒲,何应付,杨正明,等,2010.核磁共振技术在煤层气储层评价中的应用.石油天然气学报,32(2): 277-279.
- 张仲宏,杨正明,刘先贵,等,2012.低渗透油藏储层分级评价方法及应用.石油学报,33(3): 437-441.
- 赵政璋,杜金虎,邹才能,等,2012.致密油气.北京:石油工业出版社.
- 周波,王为民,郭和坤,等,2004.孔隙介质润湿性的核磁共振刻度特征的测量.地球科学,29(4): 495-499.
- 邹才能,张国生,杨智,等,2013.非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学.石油勘探与开发,40(4): 385-399, 454.
- 邹才能,朱如凯,白斌,等,2015.致密油与页岩油内涵、特征、潜力及挑战.矿物岩石地球化学通报,34(1): 3-17.