



# Dynamic Extraction and Method Optimization of T<sub>2</sub> Cutoff Values in Super-Deep Reservoirs

Shixuan Lin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Earth Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Shiyu University Shaanxi Province Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shaanxi

Email: Tee0711@163.com

**How to cite this paper:** Lin, S.X. (2025) Dynamic Extraction and Method Optimization of T<sub>2</sub> Cutoff Values in Super-Deep Reservoirs. *Open Access Library Journal*, **12**: e14293. <https://doi.org/10.4236/oalib.1114293>

**Received:** September 16, 2025

**Accepted:** October 20, 2025

**Published:** October 23, 2025

Copyright © 2025 by author(s) and Open Access Library Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

The accuracy of the T<sub>2</sub> cutoff value directly impacts the precision of calculating bound fluid saturation, mobile fluid porosity, and permeability in nuclear magnetic resonance (NMR) measurements. The porous structure of deep tight sandstone reservoirs is complex, characterized by low porosity, low permeability, and strong heterogeneity. As a result, fixed T<sub>2</sub> cutoff values are not suitable for these reservoirs. In order to improve the calculation precision of T<sub>2</sub> cutoff values in deep tight sandstone reservoirs, this study relies on NMR experimental measurements of deep tight sandstone samples to establish dynamic extraction methods based on classification Gaussian distribution, multi-fractal analysis, and petrogenesis classification. These methods were used to extract the T<sub>2</sub> cutoff values in the deep tight sandstone reservoirs located in Baodao Island offshore area. Research results indicate that when there are a sufficient number of diverse test points available for analysis based on multi-fractal theory parameters and their relationship with nuclear magnetic resonance T<sub>2</sub> cutoff values, high precision can be achieved. Additionally, high matching degrees between calculated and experimentally determined T<sub>2</sub> cutoff values were observed using classification Gaussian distribution method. Furthermore, the dynamic extraction method based on petrogenesis classification was able to provide targeted block-by-block extraction within the reservoir section. This research provides robust support for dynamic calculation methods related to T<sub>2</sub> cut off values and fully meets the requirements for evaluating pore structures within deep tight sandstone reservoirs using nuclear magnetic resonance logging.

## Subject Areas

Geology

## Keywords

Nuclear Magnetic Resonance Logging,  $T_2$  Cutoff Value, Multi-Fractal Analysis, High Bound Water Saturation, Gaussian Function, Multi-Parameter Fitting, Petrofacies Classification

## 1. 引言

核磁共振测井技术在复杂储层孔隙结构评价中发挥着关键作用[1]。与常规测井方法相比,核磁共振测井提供了更加丰富的多尺度孔隙信息,能够通过处理分析  $T_2$  分布谱获取孔径、孔隙度、渗透率、束缚水饱和度、可动流体饱和度等诸多参数[2] [3]。精准计算上述参数的关键是确定  $T_2$  截止值。 $T_2$  截止值是核磁共振测井处理解释的一个关键参数,直接影响孔隙束缚流体和可动流体分界线的划分。据此,国内外相关领域的专家学者相继开展过诸多研究,在各自的研究区取得了良好的应用效果。Parra 等(2001)利用 FZI 方法分析过佛罗里达洞穴型碳酸盐岩的  $T_2$  截止值,发现其随储层类型而变[4];吴丰等(2014)研究发现储层岩性对  $T_2$  截止值的影响较大[5];高楚桥等(2004)建立了  $T_2$  截止值与油柱高度间的关系模型,为确定  $T_2$  截止值开辟了新途径[6];邵维志等(2009)从核磁共振  $T_2$  谱形态入手,探讨了单峰、双峰及多峰的  $T_2$  截止值确定方法[7];Haldia 等(2013)建立了融合核磁共振与模块式地层动态测试器(MDT)的  $T_2$  截止值计算方法[8];Ge 等(2015)利用多重分形理论计算过动态  $T_2$  截止值[9];Xiao 等(2018)系统剖析了不同形态的  $T_2$  谱,并采用正态分布函数法计算过  $T_2$  截止值[10]。

归纳梳理现有  $T_2$  截止值确定方法可分为两类,其一为固定  $T_2$  截止值确定法;其二为动态  $T_2$  截止值确定法。固定  $T_2$  截止值通过对特定区块特定层位选取一定数量的岩心,测试核磁共振得到每块岩心  $T_2$  截止值,对其平均得到该区块的  $T_2$  截止值[10]。业界常用墨西哥湾 Wilcox 地区和加拿大西部油田钻探的岩样核磁共振实验数据,取砂岩地层  $T_2$  截止值为 33.0 ms,取碳酸盐岩地层  $T_2$  截止值为 92.0 ms [11] [12]。该法适用于均质性好的地层,对非均质性较强的深层致密砂岩储层,容易高估束缚流体体积,普适性较差。鉴于此,该领域的专家学者将视角转至动态  $T_2$  截止值确定方法上。为提高研究区核磁共振测井评价孔隙结构的精度,本研究基于测试分析的深层致密砂岩岩样核磁共振实验,分别采用分类高斯分布法、多重分形法、成岩相分类法提取动态  $T_2$  截止值,旨在为致密砂岩储层核磁共振孔隙结构评价提供技术支撑。

## 2. 岩心核磁共振实验

LS 区块位于莺歌海盆地凹陷斜坡带,深层致密砂岩储层岩性、孔隙结构复杂,呈低孔低渗/特低渗特征。钻取该区中新统( $N_1$ )黄流组二段 19 块致密砂岩标准岩样,分别开展饱和水和离心束缚态的核磁共振实验,获取岩心孔隙度、

渗透率、 $T_2$  截止值、束缚水饱和度等参数。本实验使用的等待时间 TW 为 6.0 s，回波间隔 TE 为 0.2 ms，扫描次数为 128 次。表 1 为目标岩样核磁共振实验测量结果。相应的饱和水及离心束缚态核磁共振  $T_2$  谱如图 1 所示。目标岩样的孔隙度介于 7.4%~13.4%，渗透率介于 0.044~0.818 mD。根据核磁共振  $T_2$  谱可知，本研究所取岩样饱和水状态下核磁共振  $T_2$  谱信号主要分布于 0.1~100 ms，以短  $T_2$  弛豫组分为主，孔隙结构以小孔隙为主；离心束缚水状态下核磁共振  $T_2$  谱主要分布在 0.1~10 ms，实验岩石样品孔隙结构差，属于典型的致密砂岩储层岩石。

**表 1.** LS71 区块 19 块深层致密砂岩岩样核磁共振实验测量结果

岩心 编号	孔隙度 (%)	渗透率 (mD)	RQI	束缚水饱和度 (%)	$T_2$ 峰值 (ms)	$T_2$ 几何均值 (ms)	实验 $T_2$ 截止值 (ms)
1	8.0	0.044	0.074	51.29	41.596	11.96	19.90
2	9.8	0.385	0.198	48.24	41.595	7.04	20.72
3	9.1	0.053	0.072	45.08	33.405	9.40	11.34
4	9.5	0.277	0.171	53.31	51.795	15.37	31.84
5	8.9	0.266	0.173	50.78	33.405	9.59	21.71
6	9.1	0.128	0.119	48.09	21.544	9.71	15.50
7	12.1	0.392	0.180	38.14	33.405	12.3	11.56
8	8.5	0.65	0.277	53.63	41.994	14.31	35.55
9	11.8	0.18	0.124	35.85	21.544	9.17	10.34
10	12.8	0.15	0.108	39.94	26.827	11.84	10.00
11	13.4	0.083	0.079	34.85	26.827	10.88	8.03
12	11.5	0.382	0.182	38.57	21.544	9.82	9.76
13	11.7	0.517	0.210	36.11	41.595	16.64	18.31
14	12.1	0.818	0.260	32.62	41.596	18.05	10.14
15	9.3	0.18	0.139	55.53	64.495	13.13	29.26
16	7.4	0.15	0.142	64.34	80.309	17.23	35.32
17	11.1	0.287	0.161	37.71	51.795	19.96	16.27
18	9.8	0.083	0.092	57.45	41.596	12.68	24.71
19	12.4	0.532	0.207	27.24	51.795	15.63	6.36

通过对单岩样饱和态和离心态核磁共振  $T_2$  谱数据进行累积计算便可获得实验  $T_2$  截止值。如图 1(a)所示，离心态  $T_2$  谱数据计算离心后样品的累积孔隙度，在饱和态  $T_2$  谱上寻找一点，使其右侧累积孔隙度与离心样品总累积孔隙度相等，该点对应  $T_2$  值即为  $T_2$  截止值(图 1(b)中红色圆点)。核磁共振测井实际应用中，一般只能得到饱和态  $T_2$  谱，离心态  $T_2$  谱多采用高斯函数进行拟合求取。

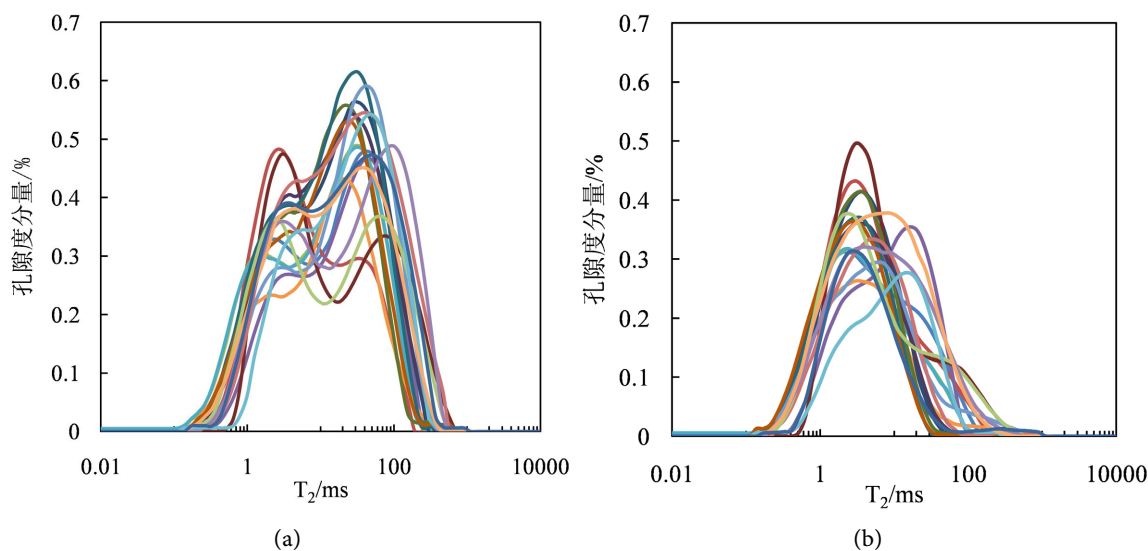


图 1.19 块岩样饱和水状态(a)和离心束缚水状态(b)核磁共振  $T_2$  谱

### 3. $T_2$ 截止值动态计算方法研究

#### 3.1. 多重分形法

##### (1) 方法过程

多重分形(Multifractal)是一种分为多个区域的复杂分形结构。为了更细致地刻画分形的复杂性和不均匀性,需要引入其概率分布函数及其各阶矩的计算,从而构成分形维数的一个连续谱,这就是多重分形或多标度分形。在多重分形中,系统的复杂性通过一系列的分形维数来描述,这些维数通常构成一个连续的谱,即奇异谱(singularity spectrum)或质量指数谱(mass exponent spectrum)。奇异谱反映了系统中不同奇异程度(即不同分形维数)的区域或子集的分形分布情况。常涉及以下参数:

奇异指数( $\alpha$ ): 在多重分形中,  $\alpha$  是一个标度指数,称为奇异指数。它反映了分形体内各个小区间的奇异程度,其数值与所在位置有关。

奇异谱( $f(\alpha)$ ): 将分形上具有相同  $\alpha$  值的小区间数记为  $f(\alpha)$ , 它被称为奇异谱,因为它将奇异值  $\alpha$  的密度用一个连续函数来表示(见图 2)。

质量指数( $\tau(q)$ ): 将分布函数进行加权求和,得到的结果常称为质量指数(见图 3)。

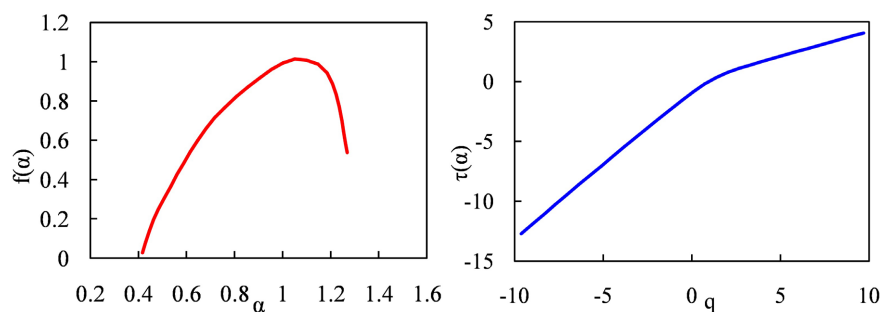


图 2. 多重分形奇异谱  $\alpha$ - $f(\alpha)$ 关系图(左)与质量函数  $q$ - $\tau(q)$ 关系图(右)

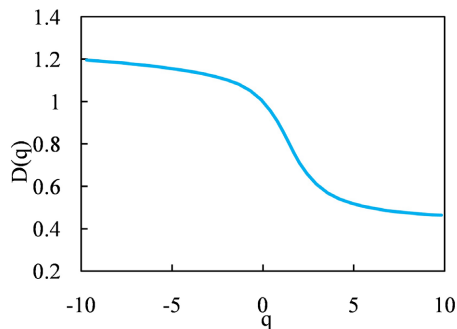


图 3. 广义分形维谱  $q$ - $D(q)$ 关系图

广义分形维数( $D_q$ ): 定义加权后的广义分形维数  $D_q$ , 当  $q = 0$  时,  $D_0$  就是普通的分形维数; 而  $D_{-1}$  称为信息维数,  $D_{-2}$  称为关联维数。

这一系列公式给出了多重分形理论的基本核心。

从核磁共振  $T_2$  谱计算奇异谱、广义分形维数谱和质量函数等分形参数, 分析分形参数与核磁共振  $T_2$  截止值的关系, 在不同储层/区块建立核磁  $T_2$  截止值动态提取方法。该方法依赖于核磁  $T_2$  谱实验数据, 当测试点数量充足且多样时,  $T_2$  截止值计算精度高。效果如下图 4 所示:

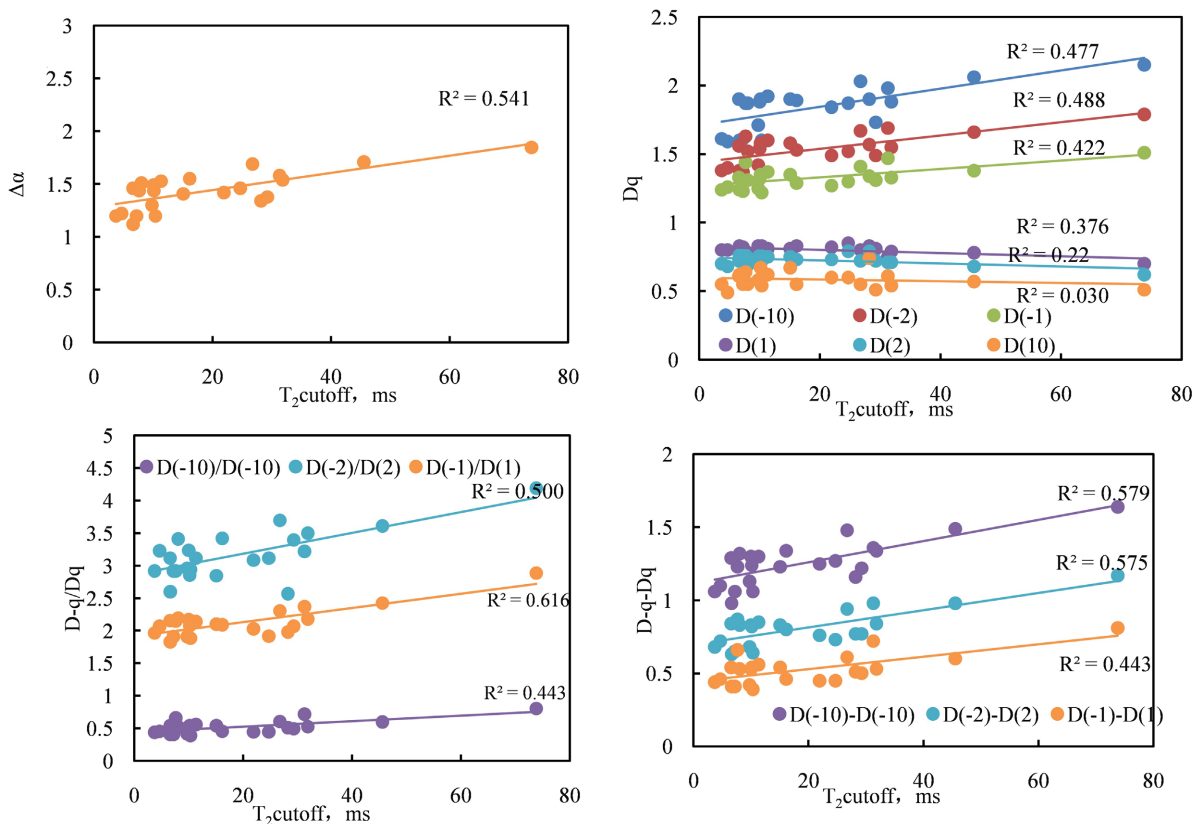


图 4. 多重分形参数与  $T_2$  截止值关系分析

### (2) 效果分析

选定如下多重分形参数公式进行计算:

$$T_{2\text{Cutoff}} = ABS(1.11*(183.66(D_{-10} - D_{10}) + 28.76(D_{-2}/D_2) - 121.91(\Delta\alpha) - 97.18) + 0.62) \quad (1)$$

对 LS 区块 LS71-18 井试样进行多重分形法分析应用, 效果如下图 5 所示:

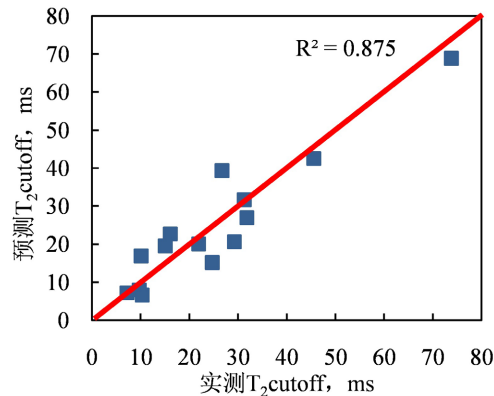


图 5. LS71 区块基于多重分形参数的  $T_2$  截止值预测效果(平均相对误差 12.6%)

基于多重分形理论, 建立  $T_2$  截止值动态提取方法。LS71 区块, 核磁共振实验样品数量多、形态丰富, 得到的  $T_2$  截止值动态评价方法, 精度高。

### 3.2. 分类高斯分布法

#### (1) 方法过程

在非储层段, 核磁  $T_2$  谱的形态和峰值位置, 用高斯分布函数拟合束缚水峰和可动峰, 计算得到  $T_2$  截止值。在储层段, 根据核磁共振孔隙度和核磁  $T_2$  谱形态参数, 采用多元回归法计算  $T_2$  截止值, 提高计算精度。

系统分析研究区致密砂岩岩样的毛管压力、孔隙度、渗透率及核磁共振测试结果, 结合储层地质研究成果, 将研究区目的层储层类型划分为 3 类(表 2)。I 类储层孔隙度介于 11.1%~13.4%, 渗透率介于 0.287 mD~0.818 mD, 束缚水饱和度小于 41%; II 类储层孔隙度介于 8.5%~9.8%, 渗透率介于 0.266 mD~0.65 mD, 束缚水饱和度大于 41%; III 类储层孔隙度介于 7.4%~9.8%, 渗透率介于 0.044 mD~0.18 mD, 束缚水饱和度大于 55%。

研究得知, I 类储层使用高斯分布计算的  $T_2$  截止值与实际  $T_2$  截止值相接近, II、III 类储层使用高斯分布计算  $T_2$  截止值效果欠佳。据此, 本研究拟针对 II、III 类储层采用分类高斯函数拟合模型进行  $T_2$  截止值计算。

表 2. 储层分类标准

储层类型	孔隙度(%)	渗透率(mD)	束缚水饱和度(%)	排驱压力(Mpa)	平均孔喉半径( $\mu\text{m}$ )	最大进汞饱和度(%)	分选系数
I 类	11.1~13.4	0.287~0.818	$\leq 41$	$< 1.0$	0.1~0.8	60~83	1.8~3.0
II 类	8.5~9.8	0.266~0.65	$> 41$	1.5~2.0	0.05~0.1	46~72	1.1~1.8
III 类	7.4~9.8	0.044~0.18	$> 55$	$> 2.5$	0.01~0.05	35~65	0.5~1.1

利用 II、III 类储层的岩心核磁共振实验数据, 分析各参数与实验  $T_2$  截止值

间的相关性。研究得知，饱和水  $T_2$  几何均值、束缚水饱和度、 $T_2$  半幅值、物性综合指数、 $T_2$  峰值相关性较好，敏感性依次降低，渗透率与实验  $T_2$  截止值相关性较差。

其中， $RQI$  为物性综合指数，计算公式为：

$$RQI = \sqrt{\frac{K}{\phi}} \quad (2)$$

式中： $RQI$  为物性综合指数，无因次；

$\phi$  为孔隙度，%；

$K$  为渗透率，mD。

利用上述优选物性综合指数  $RQI$ 、束缚水饱和度  $Swi$ 、 $T_2$  峰值、 $T_2$  半幅值和饱和态  $T_2$  几何均值等  $T_2$  截止值敏感参数，采用加权最小二乘法拟合  $T_2$  截止值计算模型。加权最小二乘法是一种统计学方法，其基本思想是在最小二乘法的基础上，给每个样本点赋予不同的权重，来解决样本点的误差差异问题；权重是观测值相关的标量值，可以用来衡量观测值的置信度或相对重要性。权重越大，观测值对结果的影响就越大。本研究通过 SPSS 数据分析工具，对优选的五个敏感参数进行权重估算，进而根据估算出的权重来确定拟合系数。式(3)为该法计算  $T_2$  截止值的示意模型。

$$T_{2c} = a + \sum_{i=1}^5 w_i x_i \quad (3)$$

式中： $a$  为常数；

$X_i$  为各拟合参数；

$w_i$  为各拟合参数的系数。

分别对 II、III 类储层使用加权最小二乘法计算后，得出研究区 II 类、III 类储层  $T_2$  截止值计算模型中的系数(表 3)。由此，可得出式(4)、式(5)所示的 II、III 类储层  $T_2$  截止值多参数计算模型。

$$T_{2c} = -9.994 + 41.567 \times RQI + 0.429 \times Swi + 0.101 \times T_{2f} + 0.548 \times T_{2g} - 0.049 \times T_{2f\_50} \quad (4)$$

$$T_{2c} = -6.900 + 38.449 \times RQI + 0.380 \times Swi + 0.107 \times T_{2f} + 0.544 \times T_{2g} - 0.051 \times T_{2f\_50} \quad (5)$$

式中： $Swi$  为束缚水饱和度，%；

$T_{2f}$  为  $T_2$  峰值，ms；

$T_{2g}$  为饱和水  $T_2$  几何均值，ms；

$T_{2f\_50}$  为  $T_2$  半幅值，ms。

**表 3.** 研究区 II 类、II 类储层  $T_2$  截止值计算模型中的系数

储层类型	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$	$R^2$
II 类	-9.994	41.567	0.429	0.101	0.548	-0.049	0.981
III 类	-6.900	38.449	0.380	0.107	0.544	-0.051	0.985

## (2) 效果分析

利用上述模型对研究区 II、III 类储层的岩心  $T_2$  截止值进行计算，计算结果如表 4 所示。根据表中数据可知，利用分类高斯分布法计算的 II、III 类储层的  $T_2$  截止值与实验值偏差小，绝对误差介于 0.061~2.071 ms，平均相对误差小于 4%。由此表明，分类高斯分布法的 II、III 类储层的  $T_2$  截止值的精度较高。

**表 4.** 研究区 II、II 类储层多参数拟合模型计算  $T_2$  截止值

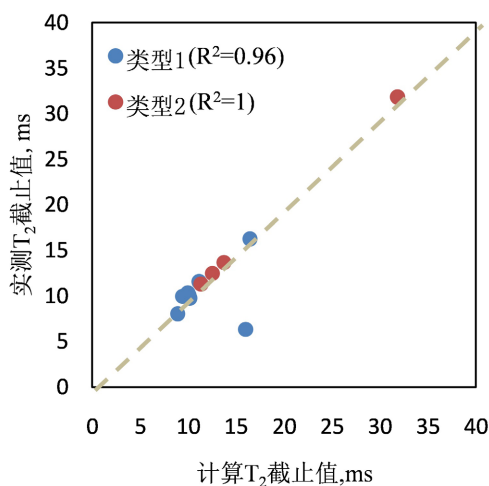
岩心编号	实验 $T_2$ 截止值(ms)	分类高斯分布法计算 $T_2$ 截止值(ms)	绝对误差值(ms)
1	19.90	18.771	1.129
2	20.72	20.546	0.174
3	11.34	13.357	2.017
4	31.84	27.079	1.761
5	21.71	21.187	0.523
6	15.50	16.272	0.772
8	35.55	32.079	0.529
15	29.26	29.199	0.061
16	41.32	36.227	0.907
18	24.71	24.371	0.339

两类储层分别以该计算模型进行预测，

$$T_{2cutoff1} = 22.057 - 1.319 * \phi + 0.289 * T_{2f} - 0.299 * T_{2gm} \quad (6)$$

$$T_{2cutoff2} = 0.710 - 1.598 * \phi + 0.119 * T_{2f} + 2.612 * T_{2gm} \quad (7)$$

在 LS71 区块基于分类高斯分布的  $T_2$  截止值模型预测计算所得结果如下图 6 所示：



**图 6.** LS71 区块基于分类高斯分布的  $T_2$  截止值预测效果(平均相对误差 15%)

### 3.3. 成岩相分类法

#### (1) 方法过程

针对储层段，根据岩心实验得到的孔隙度、渗透率关系和岩石薄片资料，

进行成岩相分类, 在不同区块、层位建立针对性的核磁  $T_2$  截止值动态评价方法。

总结 LS 不同成岩相类型及特征, 考虑测井曲线的分辨率, 将胶结、溶蚀效果相似的归纳为一大类, 因此将 9 种成岩相归纳为了 3 类(见表 5)。

表 5. 不同成岩相归纳

成岩岩相类型 (大类)	成岩岩相类型 (亚类)	成岩作用强度系数			主要 矿物成分	孔隙类型	孔隙度/%	渗透率/mD
		视压实率 $\alpha/\%$	视胶结率 $\beta/\%$	视溶蚀率 $\gamma/\%$				
中压实 - 弱胶结 - 溶蚀相(I) [溶蚀成岩相]	中压实 - 钙质 弱胶结 - 强溶蚀相	38.09~65.68	0.11~29.62	39.02~90.90	石英、 长石、 方解石	粒间孔、 粒间溶孔、 长石溶孔、 铸模孔、 海绿石溶孔	10.16~17.68	0.16~17.88
	中压实 - 菱铁矿 弱胶结 - 强溶蚀相				石英、 长石、 菱铁矿			
	中压实 - 硅质 弱胶结 - 强溶蚀相				石英、 长石			
	中压实 - 黏土矿物 弱胶结 - 强溶蚀相				石英、 长石、 白云石			
	中压实 - 海绿石 弱胶结 - 强溶蚀相				石英、 长石、 海绿石			
中强压实 - 中强 胶结 - 溶蚀相(II) [弱溶蚀成岩相]	中强压实 - 钙质中 强胶结 - 溶蚀相	41.35~75.19	30.43~67.53	11.76~81.59	石英、 长石、 方解石	粒间孔、 粒间溶孔、 长石溶孔、 铸模孔	5.82~14.10	0.07~8.61
	中强压实 - 菱铁矿中 强胶结 - 溶蚀相				石英、 长石、 菱铁矿			
中强压实 - 强胶结 - 弱溶蚀相(III) [碳酸岩胶结成岩相]	钙质强胶结 - 弱溶蚀相	50.37~86.54	71.51~99.70	0.00~66.67	石英、 长石、 方解石	粒间孔、 长石溶孔、 铸模孔	3.17~9.75	<3.5
	菱铁矿强胶结 - 弱溶蚀相				石英、 长石、 菱铁矿			

## (2) 效果分析

考虑到渗透率评价难度大, 故选取孔隙度( $\phi$ )、 $T_2$  峰值( $T_{2p}$ )、 $T_2$  峰值\_50% ( $T_{2p(50\%)}$ )、 $T_2$  峰值\_75% ( $T_{2p(75\%)}$ )和  $T_2$  几何均值( $T_{2gm}$ )作为输入项, 构建多元拟合线性模型进行计算(见图 7)。

$$T_{2c\text{胶结成岩相}} = -6.74 + 1.28 * \phi + 1.54 * T_{2f} - 0.41 * T_{2f(50\%)} \quad (8)$$

$$T_{2c\text{弱溶蚀成岩相}} = 3.73 - 0.07 * \phi + 0.35 * T_{2f} - 0.014 * T_{2f(50\%)} - 0.07 * T_{2f(75\%)} + 1.15 * T_{2gm} \quad (9)$$

$$T_{2c\text{碳酸盐胶结成岩相}} = 118.99 - 29.68 * \phi + 66.60 * T_{2f} + 2.89 * T_{2gm} \quad (10)$$

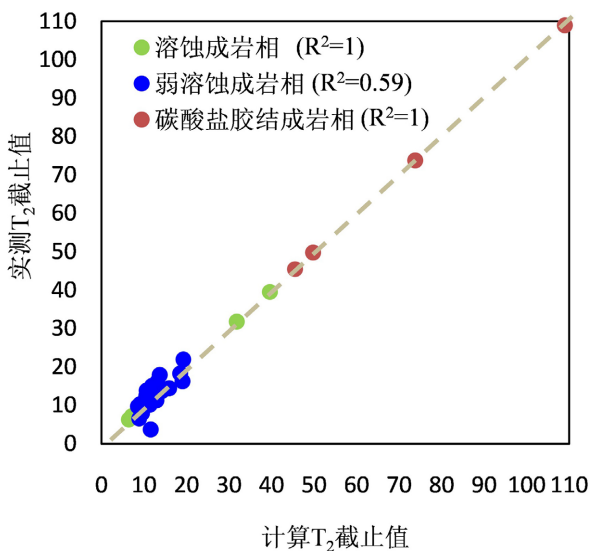


图 7. LS71 区块基于成岩相分类的 T<sub>2</sub>截止值预测效果(平均相对误差 16.7%)

#### 4. T<sub>2</sub>截止值动态计算方法效果对比

对分类高斯分布、多重分形、成岩相分类三种方法确定 T<sub>2</sub> 截止值结果在 LS71 区块进行三方法值与实际值对比分析, 结果见表 6。并由图 8 可直观看出, 成岩相法确定 T<sub>2</sub> 截止值与实验对比吻合度最好; 多重分形法, 次之; 分类高斯分布法计算出的 T<sub>2</sub> 截止值与实验值误差较大。

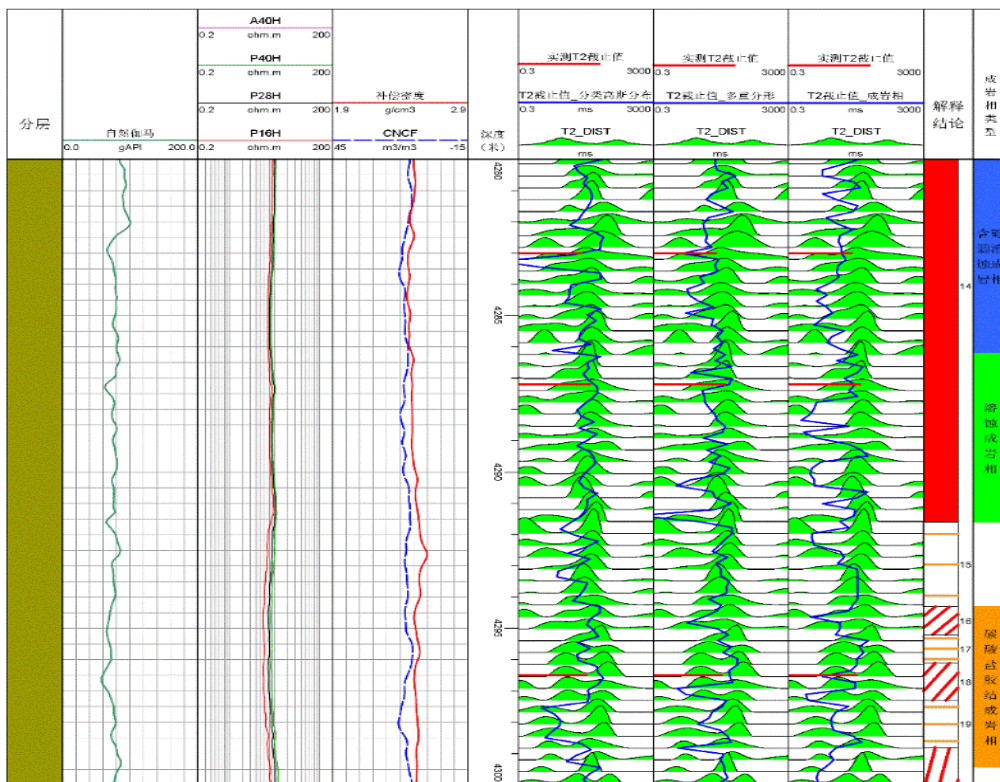


图 8. LS71-18 井 T<sub>2</sub>截止值处理结果对比(4280~4300 m)

**表 6.** LS71 区块不同方法计算  $T_2$  截止值(单位: ms)

	实验值	分类高斯分布	多重分形	成岩相分类
溶蚀成岩相	17.73	37.20	32.90	12.30
弱溶蚀成岩相	12.49	37.36	28.69	12.81
碳酸盐胶结成岩相	17.84	36.91	25.73	13.43

## 5. 结论

LS71 区块研究区属于深层/超深层储层, 区块分布广、地层跨度大、岩性及矿物多变, 核磁共振  $T_2$  谱响应复杂, 不能简单用固定  $T_2$  截止值和形态法, 进行孔隙结构评价、流体识别。

本研究采用多重分形、分类高斯分布和成岩相分类三种  $T_2$  截止值动态评价方法, 经过实验分析, 都有不错的适用性, 可见表 7。

**表 7.** LS71 区块应用方法效果总结

区块/ 方法	多重分形 $T_2$ 截止值提取		分类高斯分布 $T_2$ 截止值提取		成岩相分类 $T_2$ 截止值提取	
	相关系数 $R^2$	相对误差, %	相关系数 $R^2$	相对误差, %	相关系数 $R^2$	相对误差, %
LS	0.8756	28.6	0.98	15	0.917	13.8
方法 特点	需一定数量的核磁 实验进行标定和建模。		依赖核磁 $T_2$ 谱形态 参数进行建模。		需岩心孔隙度、渗透率分析 数据, 或者储层分类数据。	

其中, 针对超深层储层特性进行改进的分类高斯分布和成岩相分类的  $T_2$  截止值提取方法, 效果显著。能够支持深层致密砂岩储层核磁共振测井评价孔隙结构的需求。

## Conflicts of Interest

The author declares no conflicts of interest.

## References

- [1] Xiao, L.Z., Xie, R.H. and Liao, G.Z. (2012) Theory and Method of NMR Logging for Complicated Oil and Gas Reservoirs in China. Science Press.
- [2] Liu, W., Xiao, Z.X., Yang, S.Y., *et al.* (2009) Comparative Studies on Methods of Evaluation of Reservoir Pore Structure by Using NMR (Nuclear Magnetic Resonance) Well Logging Data. *Oil Geophysical Prospecting*, **44**, 773-778.
- [3] Zhang, C. (2018) A New Method for Calculating Permeability of Tight Sandstone Reservoir by Using NMR Spectrum. *Well Logging Technology*, **42**, 550-556.
- [4] Parra, J.O., Hackert, C.L., Collier, H.A., *et al.* (2001) NMR and Acoustic Signatures in Vuggy Carbonate Aquifers. *42nd Annual SPWLA Logging Symposium Transactions*, Houston, 17-20 June 2001, 1-11.
- [5] Wu, F., Sima, L.Q., Yang, H.M., *et al.* (2014) Research on NMR  $T_2$  Cutoff of Complex Lithology in the West Qaidam Basin. *Well Logging Technology*, **38**, 144-149.
- [6] Gao, C.Q., He, Z.B., Wu, H.S., *et al.* (2004) Relationship between NMR  $T_2$  Cutoff and Capillary Pressure. *Oil Geophysical Prospecting*, **39**, 117-120.

- [7] Shao, W.Z., Ding, Y.J., Xiao, F., *et al.* (2009) On the Method of Determining  $T_2$  Cutoff Value with the  $T_2$  Spectrum Characteristics. *Well Logging Technology*, **33**, 430-435.
- [8] Haldia, B.S., Singh, S. and Bhanja, A.K. (2013) A New Approach to Determine  $T_2$  Cutoff Value with Integration of NMR, MDT Pressure Data in TSV Sand of Charali Field. *The 10th Biennial International Conference & Exposition*, Mumbai, 4-6 October 2018, P013.
- [9] Ge, X., Fan, Y., Zhu, X., Chen, Y. and Li, R. (2015) Determination of Nuclear Magnetic Resonance  $T_2$  Cutoff Value Based on Multifractal Theory—An Application in Sandstone with Complex Pore Structure. *Geophysics*, **80**, D11-D21. <https://doi.org/10.1190/geo2014-0140.1>
- [10] Xiao, L., Li, J., Mao, Z., Lu, J., Yu, H., Guo, H., *et al.* (2018) A Method to Determine Nuclear Magnetic Resonance (NMR)  $T_2$  cutoff Based on Normal Distribution Simulation in Tight Sandstone Reservoirs. *Fuel*, **225**, 472-482. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.178>
- [11] Staley, C. (1987) Magnetic Resonance Digital Image Analysis and Permeability of Porous Media. *Applied Physics Letters*, **51**, 1146-1148. <https://doi.org/10.1063/1.98766>
- [12] Morriss, C.E., Maclinis, J., Freedman, R., *et al.* (1993) Field Test of an Experimental Pulsed Nuclear Magnetism Tool. *34th Annual SPWLA Logging Symposium Transactions*, Calgary, 13-16 June 1993, 1-23.

## Appendix (Abstract and Keywords in Chinese)

### 超深层储层 $T_2$ 截止值的多方法动态提取及方法优选

**摘要:**  $T_2$  截止值精确与否直接影响到核磁共振计算束缚流体饱和度、可动流体孔隙度、渗透率的精度。深层致密砂岩储层孔隙结构复杂，呈低孔低渗、强非均质性特征，固定  $T_2$  截止值适用性差。为提高深层致密砂岩储层  $T_2$  截止值的计算精度，本研究依托深层致密砂岩岩样的核磁共振实验测量，分别建立了分类高斯分布、多重分形、成岩相分类的核磁共振  $T_2$  截止值动态提取方法，实现对海上 LS 区深层致密砂岩储层  $T_2$  截止值的提取。研究表明，基于多重分形理论分析分形参数与核磁共振  $T_2$  截止值的关系，当测试点数量充足且多样时， $T_2$  截止值计算精度高；基于分类高斯分布计算与岩样实验确定的  $T_2$  截止值吻合度较高；基于成岩相分类的核磁  $T_2$  截止值动态提取方法在储层段可针对性分区块分层位进行提取。为  $T_2$  截止值的动态计算方法提供有力支撑，完全能够满足深层致密砂岩储层核磁共振测井评价孔隙结构的需求。

**关键词:** 核磁共振测井， $T_2$  截止值，多重分形，高束缚水饱和度，高斯函数，多参数拟合，成岩相分类