

# 基于流动单元和阵列声波测井的储层渗透率计算

范玲<sup>1</sup>, 习研平<sup>2</sup>, 代槿<sup>3</sup>, 罗莹莹<sup>3</sup>, 温梦晗<sup>4</sup>, 梁芸<sup>3</sup>, 吴丰<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国石油西南油气田分公司, 川中油气矿, 四川 遂宁

<sup>2</sup>中国石油川庆钻探工程公司, 地质勘探开发研究院, 四川 成都

<sup>3</sup>西南石油大学, 地球科学与技术学院, 四川 成都

<sup>4</sup>中国石油西南油气田分公司, 技术咨询中心, 四川 成都

收稿日期: 2021年11月1日; 录用日期: 2021年11月19日; 发布日期: 2021年11月29日

## 摘要

对于孔隙结构复杂的储层, 现有的基于常规测井的渗透率模型计算精度低, 无法满足生产需要。基于孔隙结构对储层进行分类, 并根据测井资料的丰富程度提出两类渗透率计算模型: 对于常规测井曲线齐全的井, 利用测井曲线计算储层流动单元指数FZI, 并进行储层分类识别, 每一类储层单独建立渗透率模型; 对于有阵列声波测井曲线的井, 通过交会图筛选渗透率敏感参数, 并建立基于阵列声波的渗透率模型。研究表明: 声波时差(AC)、补偿密度(DEN)、补偿中子(CNL)测井曲线可准确计算流动单元指数FZI并识别I类、II类、III类储层, 常规测井和阵列声波测井获得的密度曲线、泥质含量、斯通利波时差和泊松比等参数与渗透率相关性较高, 基于这些参数建立的三因子指数模型对I类储层和II类储层适用性较好, 双因子幂乘模型对III类储层适用性较好。基于流动单元和基于阵列声波的渗透率模型提高了复杂孔隙结构储层的渗透率计算精度, 有效地支撑了气藏的高效勘探与开发。

## 关键词

流动单元, 阵列声波, 渗透率, 斯通利波

# Flow Unit and Array Acoustic Wave Logging-Based Reservoir Permeability Calculation

Ling Fan<sup>1</sup>, Yanping Xi<sup>2</sup>, Jin Dai<sup>3</sup>, Yingying Luo<sup>3</sup>, Menghan Wen<sup>4</sup>, Yun Liang<sup>3</sup>, Feng Wu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Middle Sichuan Oil and Gas Field, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Suining Sichuan

<sup>2</sup>Institute of Geological Exploration and Development, Petrochina Chuanqing Drilling Engineering Company, Chengdu Sichuan

文章引用: 范玲, 习研平, 代槿, 罗莹莹, 温梦晗, 梁芸, 吴丰. 基于流动单元和阵列声波测井的储层渗透率计算[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(11): 1530-1541. DOI: 10.12677/ag.2021.1111147

<sup>3</sup>School of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

<sup>4</sup>Technical Consulting Center, Petrochina Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu Sichuan

Received: Nov. 1<sup>st</sup>, 2021; accepted: Nov. 19<sup>th</sup>, 2021; published: Nov. 29<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

For reservoir with complex pore structure, the calculation accuracy of existing permeability model based on conventional logging is low and cannot meet production needs. The reservoir is classified based on pore structure, and two permeability calculation models are proposed according to the abundance of logging data. For Wells with complete conventional logging curves, the reservoir flow unit index FZI is calculated by logging curves, and the reservoir is classified and identified. For Wells with array acoustic logging curves, permeability sensitive parameters are screened by cross plot and permeability model based on array acoustic logging is established. The results show that: Acoustic time difference (AC), compensated density (DEN), and compensated neutron (CNL) logs can accurately calculate flow unit index FZI and identify class I, II, and III reservoirs. Density curves, shale content, Stoneley wave time difference, poisson's ratio and other parameters obtained from conventional and array acoustic logs are highly correlated with permeability. The three-factor exponential model based on these parameters is suitable for class I reservoir and class II reservoir, and the two-factor power model is suitable for class III reservoir. The permeability model based on flow unit and array acoustic wave improves the calculation accuracy of permeability of complex pore structure reservoir and supports efficient exploration and development of gas reservoir effectively.

## Keywords

Flow Unit, Array Acoustic, Permeability, Stoneley Wave

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers 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

## 1. 引言

渗透率是评价储层好坏的重要参数之一，现有的地层渗透率计算模型主要是基于微观参数和常规测井曲线建立的。为了提高储层渗透率评价的精度，大量学者尝试了新的方法或运用了大量新的测井数据。流动单元法是近年来用在渗透率评价上较多的一种方法，并且取得了一定的成果[1] [2] [3]。流动单元是指一个垂向上及横向上连续的储集体，在该储集单元内部具有相似的渗流特征[4] [5] [6] [7] [8]。但现有基于流动单元的方法严重依赖于大量岩心分析数据，只有先通过岩心数据确定岩石的流动单元类型，才能准确计算岩石渗透率。但若岩心分析数据较少，在没有取心的层段又该如何应用该方法呢？

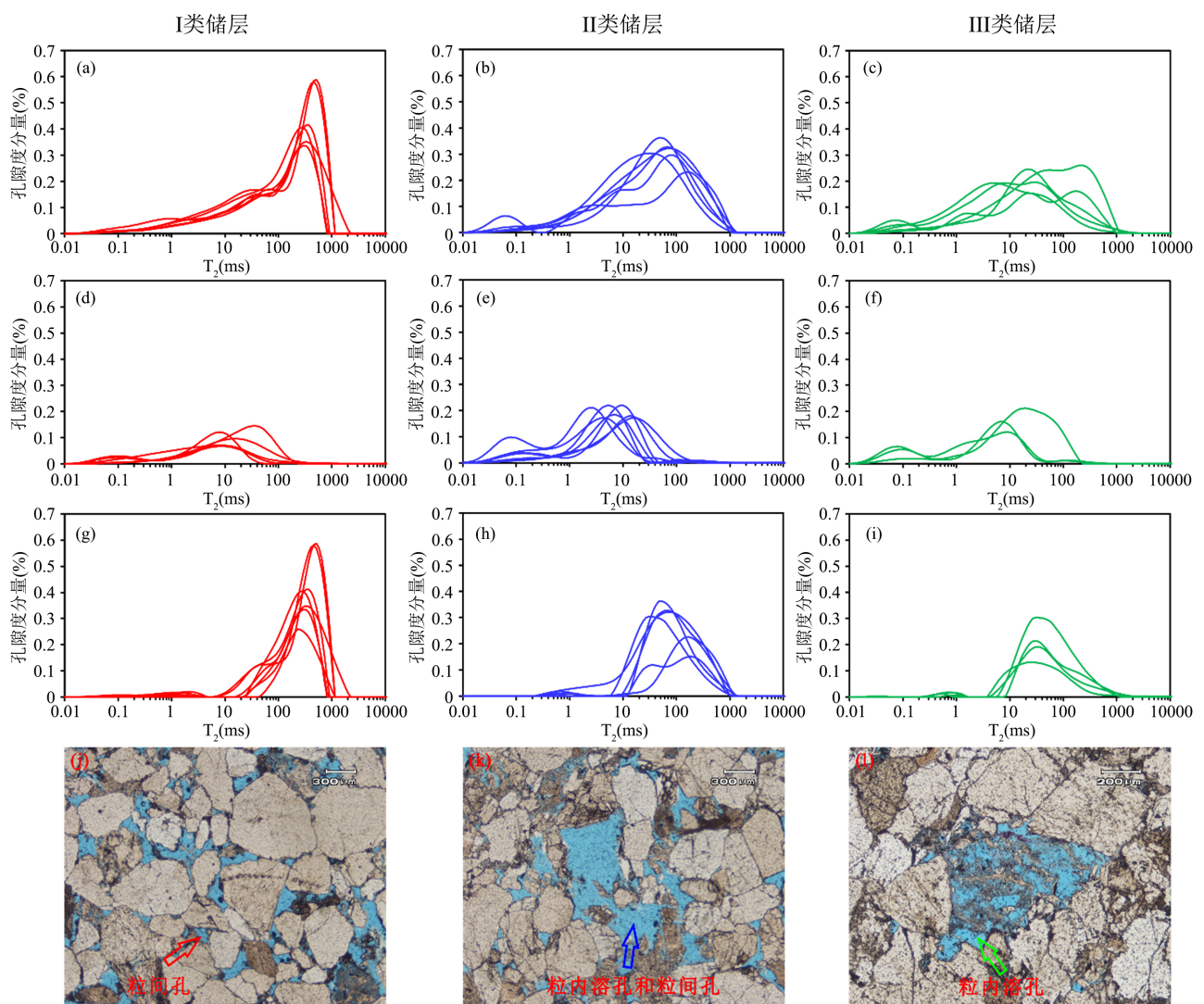
另外，阵列声波测井资料可以获得井壁地层更多的信息，通过对接收到的波列处理，可获得纵波、横波、斯通利波时差及泊松比，并用于评价储层的岩石力学特性、含气性和渗透性。前人研究表明在岩心渗透率标定的基础上，可根据斯通利波来进行地层渗透的简单估算，但在储层孔隙结构复杂的地层中，仅依靠斯通利波进行渗透率计算精度较低[9] [10] [11]。目前少有基于阵列声波测井的渗透率高精度计算方法，仅利用横波时差或者纵波时差计算孔隙度，然后计算地层渗透率，但其精度远不足以对地层渗透

率进行准确定量描述。

针对研究区地层孔隙结构复杂导致的孔渗关系精度低、现有流动单元法无法实现连续渗透率计算、阵列声波测井资料利用程度低这三大问题，本文拟先通过核磁资料对研究区储层进行分类，再利用测井曲线计算 FZI (流动单元指数)进行储层的测井分类，并利用流动单元理论和阵列声波测井资料，分别建立渗透率评价模型，为研究区后续的作业决策、储量计算和开发方案提供依据。

## 2. 基于孔隙结构的储层分类

研究区发育三角洲平原~三角洲前缘沉积，沉积物粒度相对较粗，岩性包括中砂岩、粗砂岩和含砾砂岩等。储层孔隙度主要在 6%~20%之间，渗透率主要在 0.01~1000 mD 之间。由于储层孔隙度和渗透率的范围非常大，导致储层渗透率的准确计算非常困难。



**Figure 1.** Pore structure characteristics of type I, II and III reservoirs. (a), (b) and (c) show the  $T_2$  distribution of water saturated rocks; (d), (e), and (f) show the  $T_2$  distribution of bound water staterocks. (g), (h) and (i) show the  $T_2$  distribution of movable water staterocks. (j), (k), and (l) are photos of cast thin sections

**图 1.** I 类、II 类、III 类储层孔隙结构特征。(a)、(b)、(c)为岩石饱和水状态  $T_2$  分布；(d)、(e)、(f)为岩石束缚水状态  $T_2$  分布；(g)、(h)、(i)为岩石可动水状态  $T_2$  分布；(j)、(k)、(l)为铸体薄片照片

采用全直径核磁共振岩心分析仪 AniMR-Hole Core 对岩心样品开展核磁共振测量, 得到岩心饱和水状态、岩心束缚水状态的核磁  $T_2$  分布。结合岩心核磁资料和铸体薄片资料, 将研究区储层划分为三类储层: I 类储层(中高渗储层)、II 类储层(中低渗储层)、III 类储层(低渗储层) (图 1)。I 类储层孔隙类型主要为粒间孔, 孔径主要区间 0.45~0.8 mm,  $T_2$  谱主峰值约 600 ms, 孔隙度 > 13%, 渗透率 > 10 mD; II 类储层孔隙类型主要为粒内溶孔和粒间孔, 孔径主要区间 0.25~0.45 mm, 核磁共振的  $T_2$  谱主峰值约 70 ms, 孔隙度为 10%~13%, 渗透率为 1~10 mD; III 类储层孔隙类型主要为粒内溶孔, 孔径主要区间 0.01~0.25 mm, 核磁共振的  $T_2$  谱主峰值约 20 ms, 孔隙度 < 10%, 渗透率 < 1 mD。

### 3. 基于流动单元的渗透率计算

#### 3.1. 流动单元基础理论

根据平均水单元动力概念, Amaefule 等人通过将孔隙空间看成很多个毛细管, 应用了 Darcy 定律以及 Poisscuille 定律, 进而得到了可以表征不同流动单元间渗透率与孔隙度关系的方程[12]:

$$K = \frac{\phi_e^3}{(1-\phi_e)^2} \frac{1}{F_s \tau^2 S_{gv}^2} \quad (1)$$

式中,  $K$  为渗透率, mD;  $\phi_e$  为有效孔隙度, 小数;  $F_s$  为孔隙的几何形状指数, 对于圆柱形, 其值为 2;  $S_{gv}$  是矿物颗粒比表面积, 小数;  $\tau$  为流动路径的弯曲度, 小数。

在 Kozeny-Carman 方程中, 一般将  $F_s \tau^2$  称为 Kozeny 常数。在确定的流动单元内它是一个常数, 但若在不同的流动单元之间, 该值也会发生相应的改变。流动单元指数  $FZI$  的定义如下:

$$FZI = \frac{1}{\tau S_{gv} \sqrt{F_s}} = 0.0314 \frac{1-\phi_e}{\phi_e} \sqrt{\frac{K}{\phi_e}} \quad (2)$$

式中,  $FZI$  为流动单元指数。

通过研究流动单元指数和通过实验分析的矿物颗粒表面、束缚水饱和度和矿物颗粒比重间的关系, 对于比较粗的, 分选性比较好的砂岩, 它的流动单元指数相对较高, 而对于具有高弯曲度的砂岩, 它的分选性一般来说比较差, 流动单元指数也比较低, 基于流动单元指数能够更好地计算岩石的渗透率。

#### 3.2. 流动单元的测井分类

将公式 2 中的部分表达式提取出来, 分别定义为储层品质因子  $RQI$  和孔隙度指标  $\phi_z$  (公式 3、公式 4), 则流动单元指数  $FZI$  可表示为储层品质因子  $RQI$  和孔隙度指标  $\phi_z$  的形式[5] [13] [14] (公式 5)。

$$RQI = \sqrt{\frac{K}{\phi_e}} \quad (3)$$

式中,  $RQI$  为储层品质因子。

$$\phi_z = \frac{\phi_e}{1-\phi_e} \quad (4)$$

式中,  $\phi_z$  为孔隙度指标。

$$FZI = 0.0314 \frac{RQI}{\phi_z} \quad (5)$$

对公式 5 等号两边分别取对数, 可得:

$$\lg RQI = a \lg \phi_z + \lg FZI \quad (6)$$

式中,  $a$  为系数。

以岩心物性分析资料进行标定, 通过声波时差( $AC$ )、补偿密度( $DEN$ )、补偿中子( $CNL$ )测井曲线建立流动单元指数  $FZI$  的测井计算模型(公式 7)。基于  $FZI$  值划分 I 类、II 类、III 类储层的  $FZI$  界限: I 类储层(中高渗储层),  $FZI \geq 2.5$ ; II 类储层(中渗储层),  $2.5 > FZI \geq 1$ ; III 类储层(低渗储层),  $FZI < 1$  (图 2)。根据公式 6 绘制以  $\lg(RQI)$  为横坐标、 $\lg(\phi_z)$  为纵坐标的交会图(图 3(a)), 数据点呈现明显的分带特征, 研究区三类储层的数据点可拟合得到三条斜率相近但截距不同的平行线, 由此实现了流动单元的测井分类与预测。

$$FZI = 0.182AC - 14.578DEN - 0.389CNL + 30.07 \quad (7)$$

式中,  $AC$  为补偿声波测井值,  $DEN$  为补偿密度测井值,  $CNL$  为补偿中子测井值。

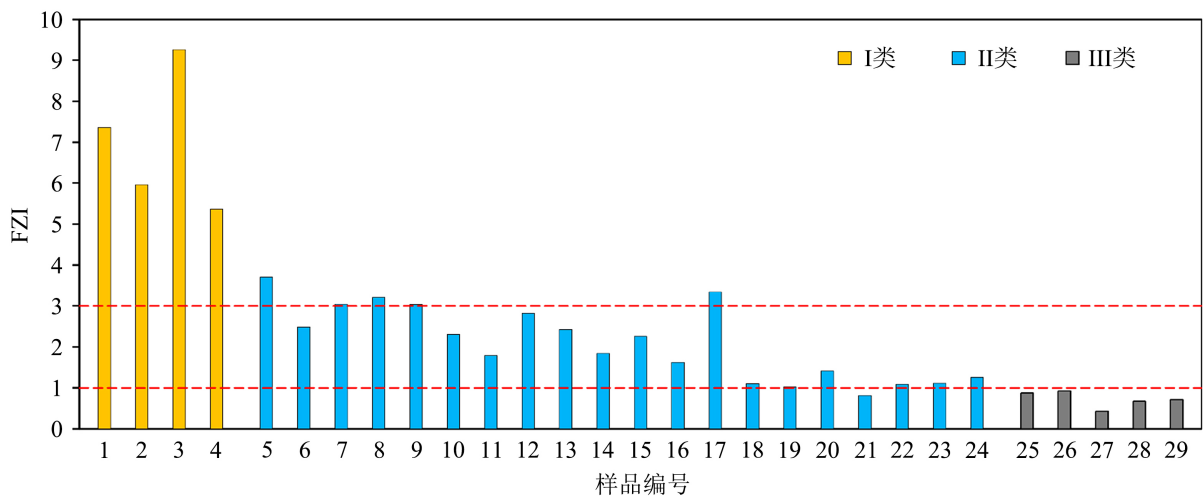


Figure 2. Classification results of reservoir flow units based on  $FZI$   
图 2. 基于  $FZI$  的储层流动单元划分结果

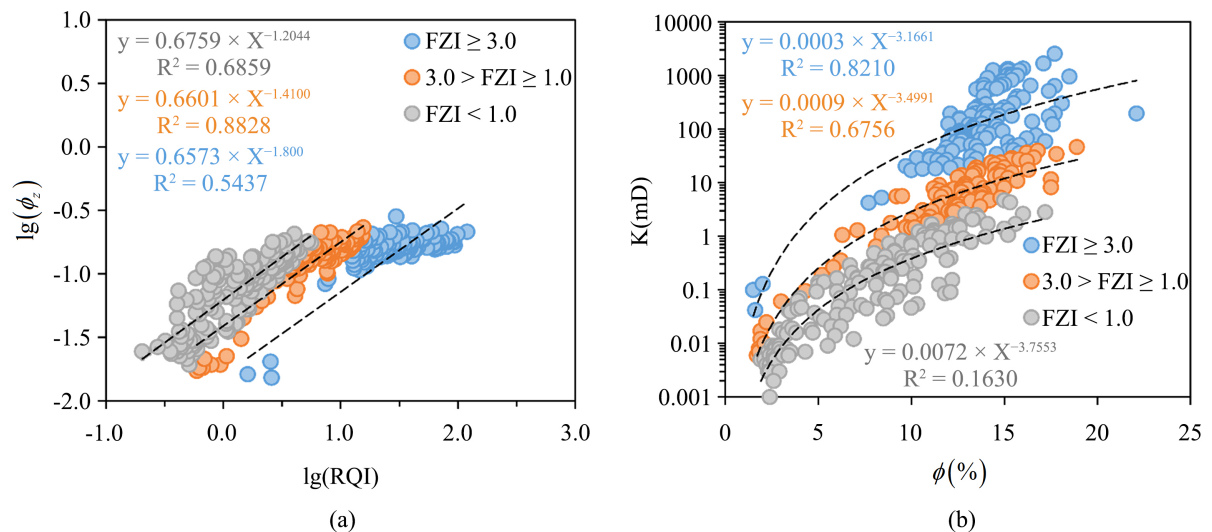


Figure 3.  $FZI$  classification and pore-permeability relationship. (a)  $FZI$  classification; (b) Pore-permeability relationship based on  $FZI$  classification

图 3.  $FZI$  分类与孔渗关系。(a)  $FZI$  分类; (b) 基于  $FZI$  分类的孔渗关系

### 3.3. 基于流动单元的渗透率模型

在测井计算  $FZI$  值并进行 I 类、II 类、III 类储层划分的基础上, 对这三类储层的数据点进行孔隙度~渗透率拟合, 分别得到 I 类、II 类、III 类储层的孔隙度~渗透率拟合关系(图 3(b))。在相同孔隙度条件下, I 类储层的渗透率最高, II 类储层的渗透率其次, III 类储层的渗透率最低。基于流动单元  $FZI$  分类的 I 类、II 类、III 类储层渗透率模型如表 1 所示。

**Table 1.** Permeability model based on  $FZI$  classification of flow units  
**表 1.** 基于流动单元  $FZI$  分类的渗透率模型

储层类型	$FZI$ 分类标准	渗透率模型
I 类储层	$FZI \geq 3$	$K = 0.0072 \times \Phi^{3.7553}$
II 类储层	$3 > FZI \geq 1$	$K = 0.0009 \times \Phi^{3.4991}$
III 类储层	$FZI < 1$	$K = 0.0003 \times \Phi^{3.1661}$

## 4. 基于阵列声波测井的渗透率计算

### 4.1. 渗透率影响因素筛选

目前基于测井曲线建立的渗透率模型广泛运用了核磁共振、电阻率和自然伽马测井等[12] [15] [16] [17] [18] [19]测井资料(表 2), 但极少见运用阵列声波测井信息的渗透率模型。已有研究表明, 阵列声波测井资料中斯通利波可以判断井眼情况、地层中孔隙空间的连通性, 与地层渗透率有关; 而纵横波速度比、泊松比、体积模量等都可以通过阵列声波资料提取计算, 这些参数除了与岩石强度、地层含气性有关外, 还在一定程度上反映渗透性。常规测井、储层参数和阵列声波测井中, 到底哪些参数对渗透率最为敏感? 本文通过交会图分析不同影响因素与渗透率的相关性, 来筛选敏感参数(图 4)。结果表明, 常规测井中密度曲线与渗透率相关性较高, 储层参数中泥质含量与渗透率相关较高, 阵列声波曲线中斯通利波、泊松比与渗透率的相关性较高(表 3)。

### 4.2. 渗透率模型形式选择

对比分析现有的经典渗透率模型计算公式, 大多采用指数乘积形式, 也有采用指数和、幂乘积[12] [15] [16] [17] [18] [19]的形式(表 4)。本文在参考已有渗透率模型的基础上, 主要采用 3 种形式: 指数乘积形式(公式 7)、幂乘积形式(公式 8)和线性形式(公式 9)。

$$K = mT_1^{t_1}T_2^{t_2}\cdots T_n^{t_n} \quad (7)$$

$$K = 10^{t_1T_1+t_2T_2+\cdots+t_nT_n+m} \quad (8)$$

$$K = t_1T_1 + t_2T_2 + \cdots + t_nT_n + m \quad (9)$$

式中,  $K$  为渗透率;  $m$  为系数;  $T_n$  为影响因素, 影响因素包括孔隙度、泥质含量等;  $T_i$  为第  $i$  个影响因素,  $t_n$  为影响因素系数;  $t_i$  是第  $i$  个影响因素  $T_i$  的系数;  $t_i$  为常数,  $i$  为整数,  $n$  为整数,  $0 < i < n$ 。

**Table 2.** Comparison of existing permeability models based on logging curves  
**表 2.** 已有基于测井曲线的渗透率模型对比

测井	研究人员	渗透率模型	影响因素
核磁共振	Swanson (1981)	$k = 4.6\phi^4 T_{2lm}^2$	孔隙度、 $T_2$ 对数平均值
	Coates (1991)	$k = \left[ (\phi/C)^2 (FFI/BVI) \right]$	孔隙度、自由流体指数
	Quintero <i>et al.</i> (1999)	$k = Cpf 4.6\phi^4 T_{2lm}^2$	孔隙度、 $T_2$ 对数平均值
	Sen <i>et al.</i> (1990)	$k = 10^{-0.1} (\phi^m T_2)^{2.15}$	孔隙度、 $T_2$ 值
电阻率	Tixier (1949)	$k = C \left[ \frac{2.3}{R_o (\rho_w - \rho_o)} \frac{\Delta R}{\Delta D} \right]^2$	电阻率、地层水密度、地层油密度
	Coates and Dummannoir (1974)	$k = C \left[ \frac{C\phi^{2w}}{w^4 (R_w/R_t)} \right]^2$	电阻率、孔隙度、胶结和弯曲度因素
	Yao and Holditch (1993)	$k = \frac{\phi^{e1} (1 - I_{GR})^2 R_{id}^{e3}}{(R_{id}/R_{sf})^{e4}}$	自然伽马、深浅侧向电阻率、孔隙度
自然伽马	Saner <i>et al.</i> (1997)	$\log(K) = 7.04 - 4.19(F)$	地层因素(与电阻率有关)
	Mohaghegh <i>et al.</i> (1997)	$k = 126.5 + 0.0011GR - 50.3DEN + 0.625RD$	自然伽马、密度、电阻率
	Xue <i>et al.</i> (1997)	$\log(K) = 0.151\Delta t - 0.019\phi_d - 0.0392GR + 0.0222RD - 7.7$	自然伽马、孔隙度、声波、电阻率

**Table 3.** Relationship between permeability and different influencing factor types  
**表 3.** 不同影响因素类型与渗透率的关系

类型	影响因素	单相关关系	相关系数 $R^2$
常规测井曲线	声波时差曲线/ $AC$	$K = 5E - AC^{40.311}$	0.6310
	密度曲线/ $DEN$	$K = 2E + 43e^{-40.16 * DEN}$	0.8163
	自然伽马曲线/ $GR$	$K = 5E + 24 * GR^{-12.59}$	0.6629
	深侧向电阻率/ $RD$	$K = 4E - 06 * RD^{4.6512}$	0.4722
储层参数	孔隙度/ $POR$	$K = 0.0002 * e^{0.9669 * POR}$	0.8359
	泥质含量/ $V_{SH}$	$K = 1E + 07 * V_{SH}^{-4.91}$	0.6361
阵列声波曲线	斯通利波时差/ $DTST$	$K = 4E - 99 * e^{1.0805 * DTST}$	0.7233
	横波时差/ $DTD$	$K = 10.656 * DTD - 1013.4$	0.0180
	泊松比/ $POSI$	$K = 53803 * e^{-55.16 * POSI}$	0.7812

**Table 4.** Comparison of existing classical permeability models  
**表 4.** 已有经典渗透率模型对比

形式	研究人员	渗透率模型	影响因素
	Krumbein and Monk (1943)	$k = 760D_g^2 e^{-1.3\sigma_D}$	晶粒直径
	Berg (1970)	$k = 80.8\phi^{5.1} D^2 e^{-1.385p}$	孔隙度、中值粒径
	Timur (1968)	$k = 0.136\phi^{4.4} / S_{wir}^2$	孔隙度、束缚水饱和度
	Coates and Denoo (1981)	$k = [100\phi_e^2 (1 - S_{wi})^2 / S_{wi}]^2$	孔隙度、束缚水饱和度
	Sen <i>et al.</i> (1990)	$k = 10^{6.59} (\phi^m V_p / S)^{2.08}$	孔隙度、体积、表面比
	Sen <i>et al.</i> (1990)	$k = 10^{2.65} (\phi^m / Q_v)^{2.11}$	孔隙度、阳离子交换量
指数乘积	Amaefule <i>et al.</i> (1993)	$k = 1014(FZI)^2 [\phi_e^3 / (1 - \phi_e)^2]$	孔隙度、流动带指标
	Katz and Thomson (1986)	$k = 226^{-1} l_c^2 (\sigma / \sigma_o)$	孔隙直径、电导率
	Martys <i>et al.</i> (1994)	$k = (2\phi_2^* / S^2) (\phi_1 - \phi_i)^f$	孔隙度、比表面积
	Van Baaren (1979)	$k = 10D_d^2 \phi^{3.64+m} C^{-3.64}$	孔隙度、颗粒尺寸
	Hansen and Skieltorp (1988)	$k = c'\phi (l_1 / l_n)^{2[(E_s - D_s) + (D_s - E_s)]}$	孔隙度、长度、欧氏维数、分型维数
	Mavko and Nur (1997)	$k \propto c(\phi - \phi_c)^3 d^2$	孔隙度、颗粒大小
指数和	Pape <i>et al.</i> (1999)	$k = A\phi + B\phi^{\exp 1} + C(10\phi)^{\exp 2}$	孔隙度
幂乘积	Garrison <i>et al.</i> (1993)	$k = 10^{-1.7-0.6D_{s(control)} + 113S_{a(control)}}$	视表面分形维数、面积形状因子

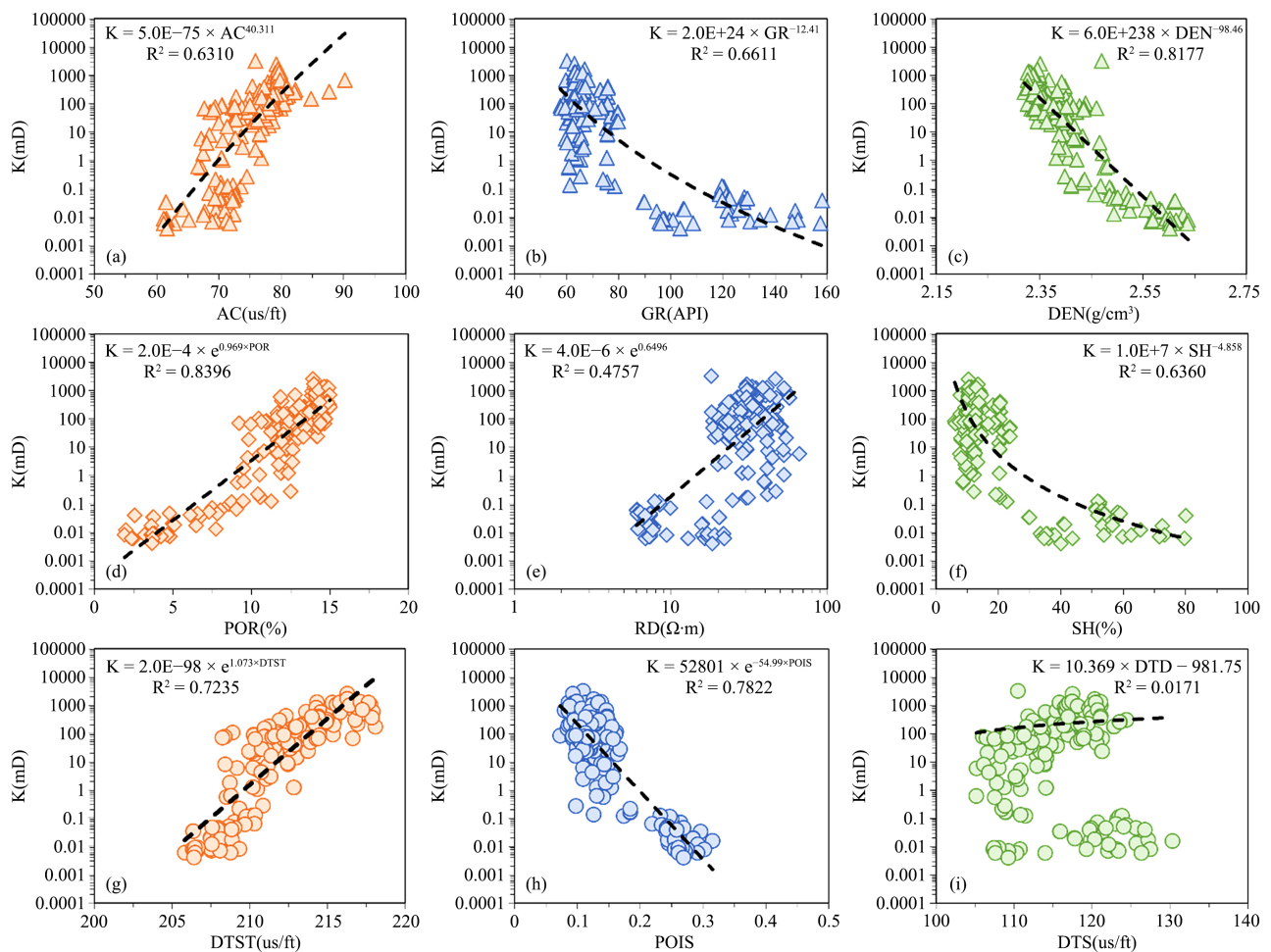
### 4.3. 基于阵列声波测井的渗透率模型

综合渗透率影响因素筛选和渗透率模型形式选择结果，分两组参数建立渗透率模型：1) 选取孔隙度(POR)、斯通利波时差(DTST)两个参数，分别采用指数乘积形式、幂乘积形式和线性形式建立渗透率模型；2) 选取孔隙度(POR)、泥质含量( $V_{SH}$ )、斯通利波时差(DTST)三个参数，分别采用指数乘积形式、幂乘积形式和线性形式建立渗透率模型(表 5)。



**Table 5.** Permeability models based on array acoustic wavelogging  
**表 5.** 基于阵列声波测井的渗透率模型

选取参数	公式形式	渗透率模型	相关系数 R <sup>2</sup>	公式编号
孔隙度(POR)	幂	$K = 0.0009 * e^{0.84 * \Phi}$	0.9163	POR-K
孔隙度(POR) 斯通利声波时差(DTST)	指数	$K = 10^{-235.566 * \Phi^{4.4364} * DTST^{-99.7999}}$	0.9142	K-1-1
	幂	$K = 10^{0.3239 * \Phi + 0.1173 * DTST - 27.4206}$	0.9264	K-1-2
	线性	$K = -39.8632 * \Phi + 114.4274 * DTST - 23594.13$	0.5662	K-1-3
孔隙度(POR) 斯通利声波时差(DTST) 泥质含量(V <sub>SH</sub> )	指数	$K = 10^{-285.594 * \Phi^{1.99146} * DTST^{123.506} * V_{SH}^{-2.1313}}$	0.9434	K-2-1
	幂	$K = 10^{0.1773 * \Phi + 0.1950 * DTST - 0.0277 * V_{SH} - 41.6369}$	0.9428	K-2-2
	线性	$K = -58.4742 * \Phi + 121.2763 * DTST - 3.6354 * V_{SH} - 24757.2$	0.6915	K-2-3



**Figure 4.** Correlation between permeability and different influencing factors  
**图 4.** 不同影响因素与渗透率的相关性

### 5. 实际应用效果

根据表 5 建立的渗透率模型,对研究区 X 井进行渗透率计算(图 5)。从图 5 可以看出双因子及三因子的渗透率模型较单因子孔隙度建立的渗透率模型有更高的预测精度。结合前述储层分类结果,对于 I 类储层和 II 类储层,三因子指数模型的效果较好;对于 III 类储层,双因子幂乘模型的效果较好。采用流动单元拟合法计算的渗透率比采用原始回归模型进行渗透率预测的效果更好。采用流动单元分类拟合法适用于常规测井曲线齐全的井,基于阵列声波的渗透率模型适用于测量了阵列声波测井曲线的井,这两类模型比不分类的孔隙度~渗透率拟合模型,计算渗透率的精度更高(图 6)。

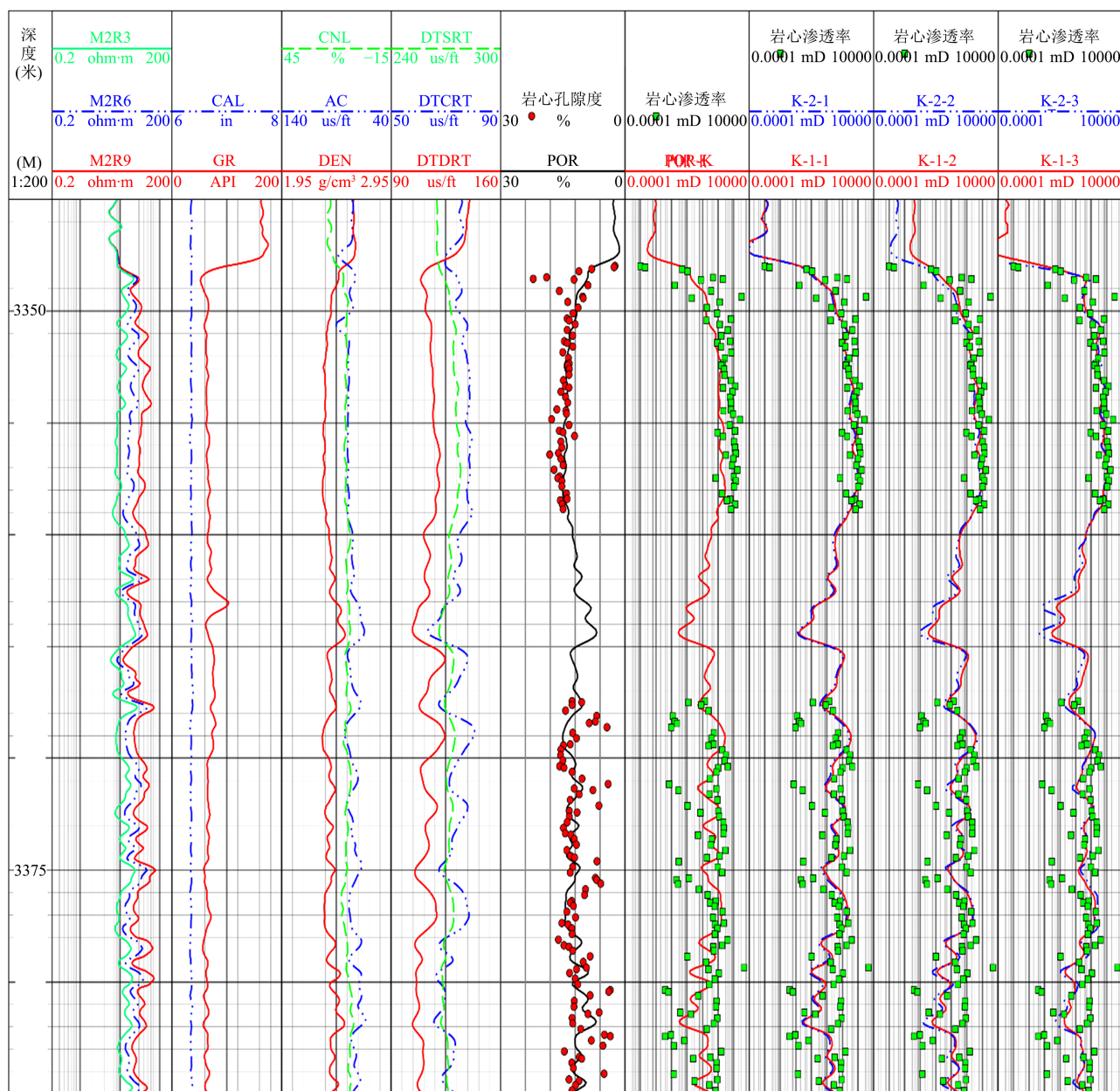


Figure 5. Comparison of calculation results of different permeability models

图 5. 不同渗透率模型计算结果对比

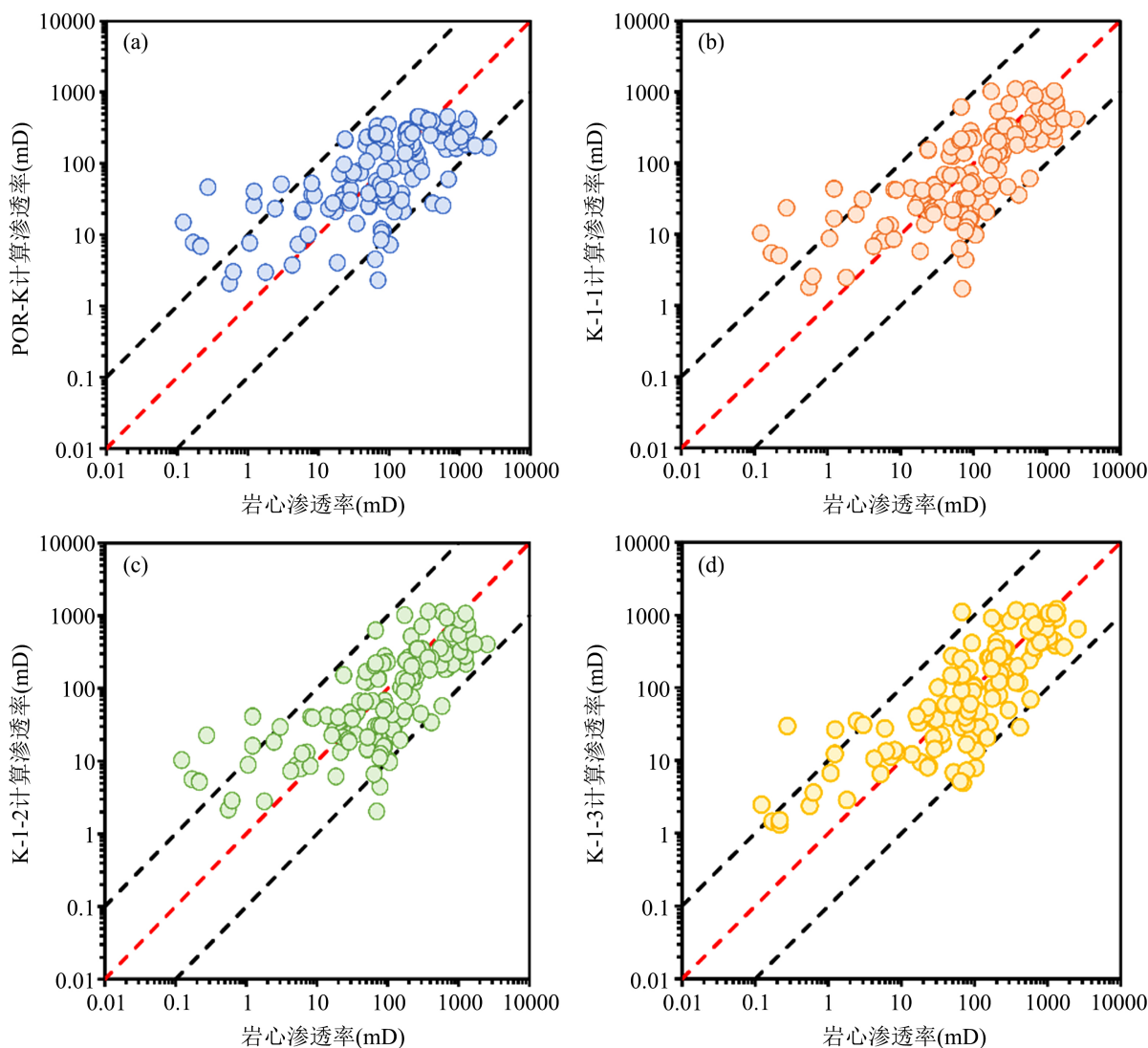


Figure 6. Comparison of calculation accuracy of different permeability models

图 6. 不同渗透率模型计算精度对比

## 6. 结论

1) 研究区储层可分为三类: I 类储层孔隙类型主要为粒间孔,  $T_2$  谱主峰值约 600 ms, 孔隙度 > 13%, 渗透率 > 10 mD; II 类储层孔隙类型主要为粒内溶孔和粒间孔,  $T_2$  谱主峰值约 70 ms, 孔隙度为 10%~13%, 渗透率为 1~10 mD; III 类储层孔隙类型主要为粒内溶孔, 核磁共振的  $T_2$  谱主峰值约 20 ms, 孔隙度 < 10%, 渗透率 < 1 mD。

2) 基于流动单元的渗透率模型适用于常规测井曲线齐全的井, 基于测井曲线建立流动单元指数  $FZI$  计算公式, 可将在全井段实现 I 类储层、II 类储层和 III 类储层的流动单元分类, 最后通过流动单元分类的渗透率模型可提高渗透率计算精度。

3) 常规测井和阵列声波测井获得的密度曲线、泥质含量、斯通利波时差和泊松比等参数与渗透率相关性较高, 基于这些参数建立的三因子指数模型更适合 I 类储层和 II 类储层、双因子幂乘模型更适合 III 类储层。

## 基金项目

四川省重点研发计划(重大科技专项) (编号: 2020YFSY0039); 西南石油大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室开放基金(编号: PLN201719)。

## 参考文献

- [1] 汪中浩, 章成广. 低渗砂岩储层测井评价方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [2] 高楚桥. 复杂储层测井评价方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [3] Hearn, C.L., Ebanks, W.J., Ranganathan, V., *et al.* (1984) Geological Factors Influencing Reservoir Performance of the Hartzog Draw Field, Wyoming. *Journal of Petroleum Technology*, **36**, 1335-1344. <https://doi.org/10.2118/12016-PA>
- [4] 张恒荣, 何胜林, 吴进波, 吴一雄, 梁玉楠. 一种基于 Kozeny-Carmen 方程改进的渗透率预测新方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(3): 899-906.
- [5] 陈志强, 吴思源, 白蓉, 雷刚. 基于流动单元的致密砂岩气储层渗透率测井评价——以川中广安地区须家河组为例[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(6): 76-83.
- [6] 郑香伟, 吴健, 何胜林, 胡向阳, 梁玉楠. 基于流动单元的砂砾岩储层渗透率测井精细评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(1): 286-294.
- [7] 张添锦, 张海, 李鹏程. 基于 FZI 的致密砂岩渗流特征分析[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(3): 370-376.
- [8] 吕明针, 林承焰, 张宪国, 等. 储层流动单元划分方法评价及优选[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(1): 74-80.
- [9] 陈刚, 潘保芝. 利用斯通利波反演地层渗透率[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2010, 40(增刊): 77-81.
- [10] 许孝凯, 陈雪莲, 范宜仁, 等. 斯通利波影响因素分析及渗透率反演[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2012, 36(2): 97-104.
- [11] 高坤, 陶果, 王兵. 利用斯通利波计算地层渗透率的方法及应用[J]. 测井技术, 2005, 29(6): 507-510.
- [12] Amaefule, J.O., Altunbay, M., Tiab, D., *et al.* (1993) Enhanced Reservoir Description: Using Core and Log Data to Identify Hydraulic (Flow) Units and Predict Permeability in Uncored Interval/Wells. *The 68th Annual SPE Conference and Exhibition*, Houston, 2-5 October 1993, 205-220. <https://doi.org/10.2118/26436-MS>
- [13] 靳彦欣, 林承焰, 赵丽, 等. 关于用 FZI 划分流动单元的探讨[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 130-131.
- [14] 欧家强, 罗明高, 王小蓉. 低渗透油藏中储层流动单元划分[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2008, 23(5): 24-28.
- [15] Amabeoku, M.O., Funk, J.J., Al-Dossary, S.M., *et al.* (2001) Calibration of Permeability Derived from NMR Logs in Carbonate Reservoirs. *The SPE Middle East Oil Show*, Manama, 17-20 March 2001, SPE 68085. <https://doi.org/10.2118/68085-MS>
- [16] Hassall, J., Ferraris, P., Al-Raisi, M., *et al.* (2004) Comparison of Permeability Predictors from NMR, Formation Image and Other Logs in a Carbonate Reservoir. *The Abu Dhabi International Conference and Exhibition*, Abu Dhabi, 10-13 October 2004, SPE 88683. <https://doi.org/10.2118/88683-MS>
- [17] Sigal, R. (2002) Coates and SDR Permeability: Two Variations on the Same Theme. *Petrophysics*, **43**, 38-46.
- [18] Lala, A.M.S. and El-Sayed, N.A.E. (2015) Calculating Absolute Permeability Using Nuclear Magnetic Resonance Models. *Arabian Journal of Geosciences*, **8**, 7955-7960. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-1841-4>
- [19] Babadagli, T. and Al-Salmi, S. (2004) A Review of Permeability-Prediction Methods for Carbonate Reservoirs Using Well-Log Data. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, **7**, 75-88. <https://doi.org/10.2118/87824-PA>