

# 基于流动单元分类的致密砂岩储层渗透率预测

鲁健康<sup>1,2</sup>, 郝彬<sup>3</sup>, 李程善<sup>4</sup>, 王维斌<sup>4</sup>, 王乾右<sup>5</sup>, 杨威<sup>1,2\*</sup>

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 北京 102249

3 中国石油勘探开发研究院西北分院, 兰州 730020

4 中国石油长庆油田分公司勘探事业部, 西安 710018

5 利物浦大学地球海洋与生态科学系, 英国利物浦 L69 3GP

\* 通信作者, yangw@cup.edu.cn

收稿日期: 2021-04-14

中国石油大学(北京)优秀青年学者科研启动基金项目(2462020QNXZ004)、国家科技重大专项“中生界陆相不同盆地类型页岩气赋存方式与富集规律研究”(2016ZX05034001-005)和国家科技重大专项“页岩气成藏要素匹配及综合评价”(2017ZX05035002-007)、中石油战略合作科技专项(ZLZX2020-01-06-02)联合资助

**摘要** 渗透率是衡量岩石允许流体通过的畅通程度的参数, 是反映储层渗流特性进行储层评价的关键参数之一。鄂尔多斯盆地中南部地区长6致密砂岩储层由于受沉积环境、成岩作用和构造因素的综合影响, 孔隙结构复杂、非均质性强。岩心孔渗实验数据中, 相同孔隙度数值的岩心渗透率数值相差1至2个数量级, 利用常规解释方法进行渗透率解释精度较低, 不能满足储层评价要求。本论文运用FZI累积频率划分方法将研究区储层划分为4类, 分类后的四类储层孔隙度、渗透性差异明显, 且每一类储层孔隙结构、渗透性等特征基本一致, 说明利用FZI值划分储层类型的合理性。在此基础上建立了各类储层的渗透率精细解释模型, 利用多元线性回归建模方法建立孔隙度、FZI的测井响应多参数拟合方程, 实现了FZI的连续定量评价, 实现了研究区致密储层流动单元类型的连续划分及其渗透率的测井评价; 并将其应用于研究区典型单井的渗透率计算中, 应用结果表明: 新方法计算渗透率与岩心分析数据吻合较好, 该方法有效地提高了渗透率测井评价的准确度。该研究对于精确预测该研究区长6致密砂岩储层渗透率的空间分布和陆相致密砂岩储层渗透率的详细评价提供理论依据。

**关键词** 渗透率; 孔隙度; 流动单元; 测井曲线; 延长组; 致密储层; 鄂尔多斯盆地

## Permeability prediction of tight sandstone reservoirs based on flow unit classification

LU Jiankang<sup>1,2</sup>, HAO Bin<sup>3</sup>, LI Chenshan<sup>4</sup>, WANG Weibin<sup>4</sup>, WANG Qianyou<sup>5</sup>, YANG Wei<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2 Institute of Unconventional Natural Gas Research, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3 Research Institute of Exploration and Development-Northwest, PetroChina, Lanzhou 730020, China

4 Exploration Department, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

5 Department of Earth, Ocean and Ecological Sciences, University of Liverpool, Liverpool L69 3GP, UK

**Abstract** Permeability is a measure of the ability of a porous rock to allow fluids to pass through it. It is one of the key

引用格式: 鲁健康, 郝彬, 李程善, 王维斌, 王乾右, 杨威. 基于流动单元分类的致密砂岩储层渗透率预测. 石油科学通报, 2021, 03: 369-379

LU Jiankang, HAO Bin, LI Chenshan, WANG Weibin, WANG Qianyou, YANG Wei. Permeability prediction of tight sandstone reservoirs based on flow unit classification. Petroleum Science Bulletin, 2021, 03: 369-379. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.03.030

parameters for reservoir evaluation to reflect the characteristics of reservoir seepage. Due to the comprehensive influence of sedimentary environment, diagenesis and tectonic factors, the tight sandstone reservoirs of the Upper Triassic Chang 6 member in the central-southern Ordos Basin have a complex pore structure and strong heterogeneity. In the core porosity and permeability test data, the core permeability values of the same porosity value differ by one to two orders of magnitude. Permeability prediction with methods used for conventional reservoirs cannot meet the requirements of unconventional reservoir evaluation. Hence, this study divided the Chang 6 reservoir into four types of flow units using the Flow Zone Indicator (*FZI*) cumulative frequency division method. The porosity and permeability of the four types of reservoirs after classification are obviously different, and the characteristics of the pore structure and permeability of each type of reservoir are basically the same. On this basis, a fine interpretation model for permeability of various reservoirs was established, and a multi-parameter fitting equation for porosity and *FZI* logging response was established by using multiple linear regression modeling methods to achieve continuous quantitative evaluation of *FZI* and to realize the continuous division of flow unit types in tight reservoirs in the area and the logging evaluation of permeability; and we applied it to the permeability calculation of typical single wells in the study area. The application results show that the new method calculates permeability which is in good agreement with the core analysis data. This method effectively improves the accuracy of permeability logging evaluation. This research is of great significance for accurately predicting the spatial distribution of permeability of Chang 6 tight sandstone reservoirs in the study area, and will provide a theoretical basis for the detailed evaluation of the permeability of continental tight sandstone reservoirs.

**Keywords** permeability; porosity; flow unit; log interpretation; Yanchang Formation tight reservoir; Ordos Basin

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.03.030

## 0 引言

渗透率是衡量岩石允许流体通过的畅通程度的参数,是储层评价以及开发的关键参数之一<sup>[1,2]</sup>,在较均质的常规砂岩储层中,孔隙度与渗透率具有良好的相关性,利用岩心实测数据可建立孔隙度与渗透率的回归模型<sup>[3]</sup>。为提高渗透率的解释精度,国内外学者提出了不同的模型及计算方法<sup>[4-5]</sup>:如Jennings和Lucia等<sup>[6]</sup>基于岩石构系数提出了广义渗透率模型,Bryant等<sup>[7]</sup>通过建立高精度的地质模型对渗透率进行预测,Mathisen等<sup>[8]</sup>借助于测井应用数学统计方法计算渗透率,廖东良等<sup>[9]</sup>提出分流动单元计算渗透率的方法。近几年,随着人工智能技术在石油工业中的应用,越来越多的学者开始利用机器学习、大数据分析、BP神经网络等方法综合预测储集层参数<sup>[10-11]</sup>:如王依诚等<sup>[12]</sup>基于机器学习方法构建数字岩心的渗透率快速预测方法,黄雨阳<sup>[13]</sup>等联合NMR与MICP参数建立了储层渗透率的智能预测方法,王猛等<sup>[14]</sup>采用区域测井大数据分析进行渗透率建模,张言辉<sup>[15]</sup>建立了渗透率预测的BP神经网络模型提高渗透率的计算精度。

鄂尔多斯盆地中南部地区长6储层为一套致密砂岩储层,由于受后期成岩作用影响导致储层的孔隙结构和物性发生变化,储层非均质性较强,在同一孔隙度下储层的渗透率相差一到两个数量级。通过对研究区储层的岩心实测孔隙度、渗透率进行相关性分析发

现数据点离散,相关性较差,运用单一回归分析方法建立渗透率解释模型,拟合度差、精度低不能满足储层评价以及后期开发的要求<sup>[16-18]</sup>。因此,为了准确求取渗透率满足储层评级及储层开发的需求,建立一套高精度的渗透率计算方法非常必要。

本文基于流动单元理论对储层进行分类,并利用测井参数计算致密砂岩储层渗透率的方法,该套方法计算精度高,应用效果好,可以很好的利用测井资料预测致密砂岩储层渗透率的空间分布,为以长6储层为代表的陆相致密砂岩储层的后期开发提供有价值的参考。

## 1 研究区概况

研究区位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡中南部,内部构造简单,为平缓西倾大单斜,倾角小于 $1^\circ$ ,多发育小型低幅鼻状隆起。长6油层组以实际地层的岩性、电性组合特征为出发点,按旋回分出长6<sub>1</sub>、长6<sub>2</sub>、长6<sub>3</sub>和长6<sub>4</sub>四个亚油层组<sup>[17]</sup>,沉积相为三角洲前缘亚相沉积,储集砂体为分流河道、水下间湾、河口坝、席状砂沉积,岩性以粉砂岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩为主,局部发育暗色泥岩,及其与灰白色细砂岩、粉砂岩互层<sup>[18]</sup>,主要发育微裂缝、残余粒间孔、杂基孔和粒内溶孔等多种孔隙类型<sup>[19]</sup>,长6砂组整体孔渗分布不均匀,储层非均质性较强。

## 2 样品及数据分析

本次选用研究区 6 口取心井 3 个亚油层组的共 103 块样品的孔渗实测数据进行相关研究。孔隙度与渗透率测试由长庆油田公司勘探开发研究院分析实验中心测试。目的层孔隙度分布在 0.3%~16.2% 范围内, 平均为 8%, 渗透率分布在  $(0.036\sim 23.691) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 平均为  $0.83 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 孔隙度和渗透率数据的分布区间及个数进行统计发现孔隙度小于 12% 的样品占 85.44%, 渗透率小于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的占 84.74%(图 1)。

对实测孔隙度和实测渗透率进行回归来求取研究区实测渗透率与孔隙度之间的定量关系(图 2), 二者的总体趋势呈正相关, 渗透率随着孔隙度的增大而增

大。直接利用孔渗拟合得到的渗透率计算模型其  $R^2$  值大小为 0.4316, 用该方法计算得到的渗透率, 不能满足储层评价及开发中渗透率精细解释的精度要求。

储集层分类评价是解决非均质的有效途径<sup>[5]</sup>, 为探究在垂向上渗透率的分布情况, 按油层组对目的层的实测孔渗数据进行孔渗相关性分析(图 3), 长 6<sub>1</sub>、长 6<sub>2</sub>、长 6<sub>3</sub> 三个油层组的  $R^2$  分别为 0.4208、0.1528、0.5532, 各亚油层组内部的孔渗的相关性较差, 说明对于非均质较强的致密砂岩储层按照亚油层组来研究储层的孔渗关系效果较差。

## 3 流动单元

流动单元的概念最早是由 Hearn C L 于 1984 年提

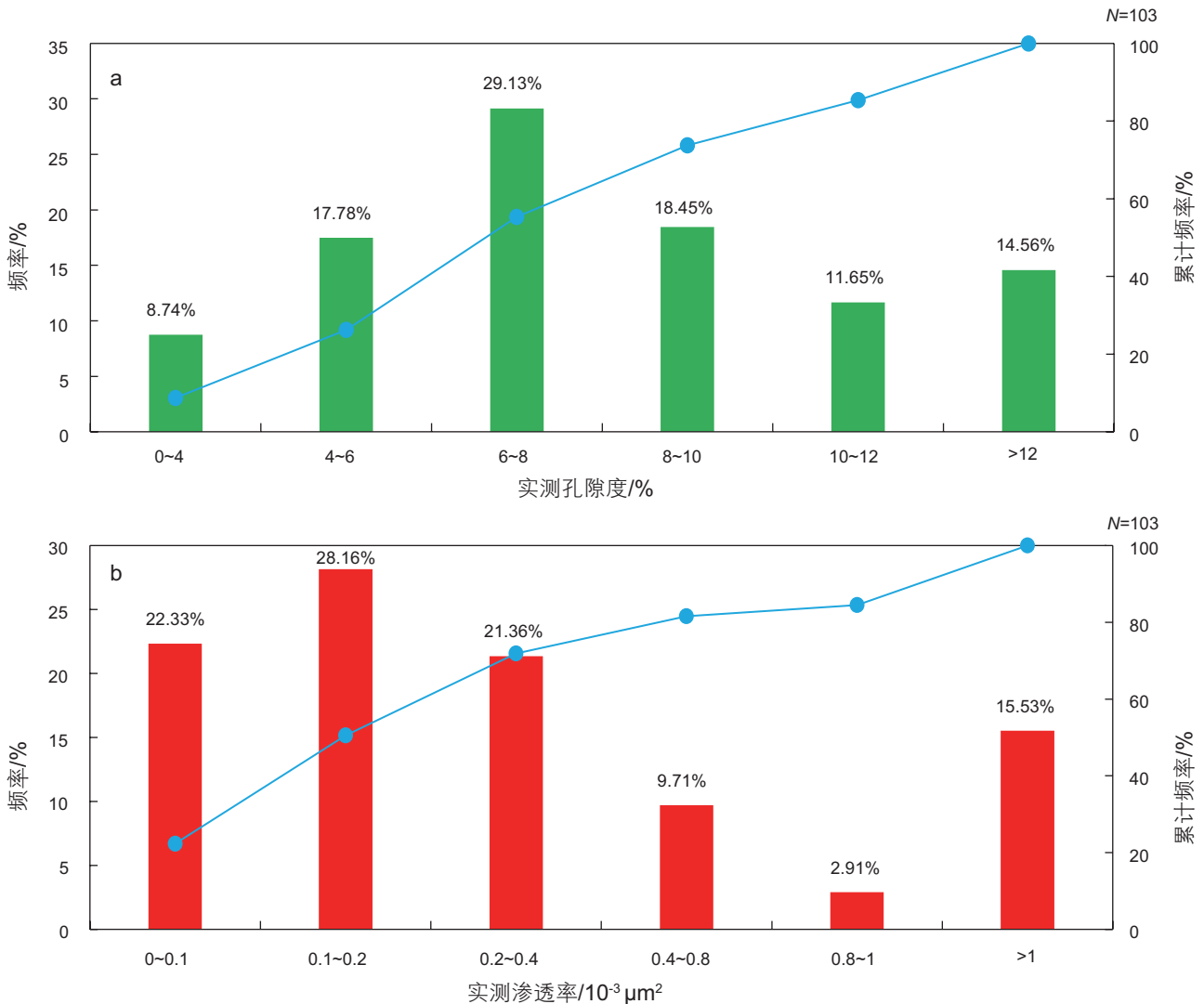


图 1 鄂尔多斯盆地延长组长 6 油层组致密砂岩储层孔隙度、渗透率样品个数及频率分布图

Fig. 1 The number and frequency distribution of tight sandstone reservoirs in the Chang 6 oil-bearing formation of Yanchang Formation in the Ordos Basin

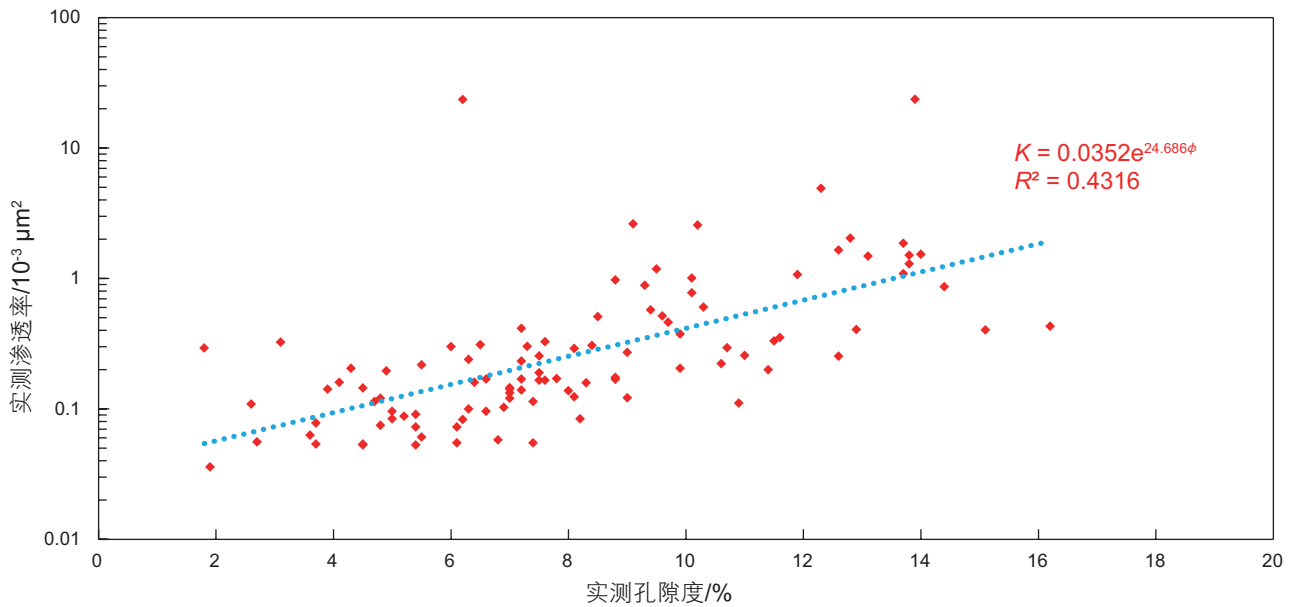


图2 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长6油层组致密砂岩储层孔隙度渗透率交会图

Figure 2 Intersection diagram of porosity and permeability of tight sandstone reservoirs in the Chang 6 oil-bearing group of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin

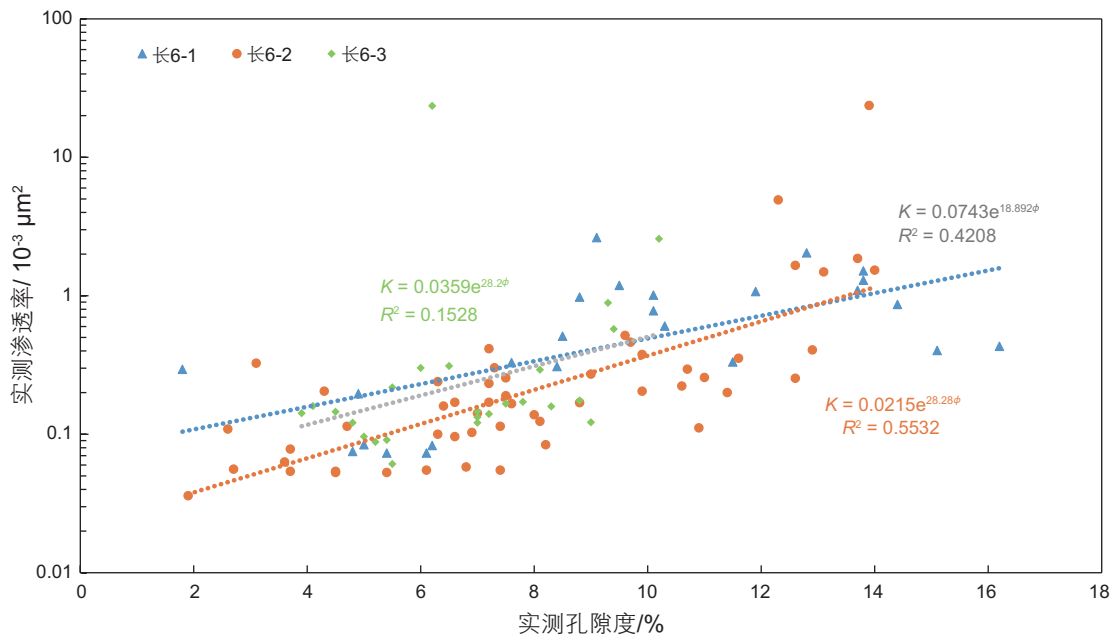


图3 鄂尔多斯盆地延长组长6<sub>1</sub>、长6<sub>2</sub>、长6<sub>3</sub>亚油层组孔渗交会图

Fig. 3 Porosity and permeability intersection diagram of the Chang 6<sub>1</sub>, Chang 6<sub>2</sub>, and Chang 6<sub>3</sub> sub-oil layers of the Yanchang Formation in the Ordos Basin

出的<sup>[20]</sup>,他认为流动单元是:垂向及侧向上连续、具有相似渗透率、孔隙度和层面特征的储集带。流动单元的发育特征和空间分布状况受沉积作用、构造作用、成岩作用等不同程度控制<sup>[9,21-22]</sup>,因此可以用流动单元来综合反映储层的岩石物性特征。而储层由于在沉积

过程中受到多种沉积、成岩以及后生作用的影响,因此一个储层可以划分为多个岩石物理性质各异的流动单元,而在同一个流动单元内部,岩石的物理性质和渗流特征具有相似性,所以通过对储层划分不同的流动单元进行储层孔渗关系的研究是可行且合理的。

目前关于流动单元的划分方法经历了从定性划分、半定量划分到定量划分的过程<sup>[23-24]</sup>；其中定性划分方法包括露头沉积界面分析法，岩心定性分析法，沉积岩相分析法，沉积、成岩、构造作用综合法；定量划分方法有流动分层指数划分法，非均质综合指数法、孔喉几何形状法、多参数分析法，层次分析法，动态流动单元研究法，生产动态资料法等<sup>[25-27,33]</sup>。目前，以流动分层指数法和多参数定量分析法应用最为广泛，取得较好效果。但是多参数分析法存在参数的选取上不统一，不同学者研究的侧重点不同，其参数选取存在差异，导致其应用效果存在较大差异。流动带指数法是把岩石矿物特征、储层孔喉特征及结构特征等综合起来表征孔隙几何特征的参数，所以利用流动分层指数法进行储层流动单元的划分，可较准确地描述储层非均质特征<sup>[28]</sup>。

### 3.1 流动单元的基本原理

Kozeny 和 Caman 根据哈根—泊稷叶和达西定律推导出岩石储层孔隙度和渗透率之间的关系式 Kozeny-Caman 方程式：

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

式中， $K$ 为渗透率， $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ； $\phi_e$ 为有效孔隙度，%； $F_s$ 为形状系数； $\tau$ 为孔隙介质的迂曲度； $F_s \tau^2$ 为 Kozeny 常数，其为一个变常数，其值在不同的岩石物理相是不同的，在同一个岩石物理相内部其值是一个常数，在实际储层中取值范围为 5~100； $S_{gv}$ 为单位体积颗粒的表面积， $\mu\text{m}^2$ 。

推导得出流动分层指数  $FZI$ ：

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

流动分层指数  $FZI$  是岩石微观孔隙结构特征的反映，其是将岩石结构和矿物地质特征、孔喉特征等综合起来的一个综合判定参数，因此，可以用其较准确地描述油藏的非均质特征<sup>[29]</sup>。

### 3.2 流动单元的划分

根据统计学原理，在相同条件下对同一事物重复多次测量或试验观测的结果应该服从正态分布的规律，对于同种流动单元内样品的测量相当于对该流动单元内单一样品的多次测量的结果，如果某一物理量在线性坐标下的形态为正态分布曲线，那么在正态概率坐标上的形态就近似为一条直线<sup>[30-32]</sup>。由于随机误差的存在，同一流动单元的  $FZI$  围绕其真实均值呈正态分

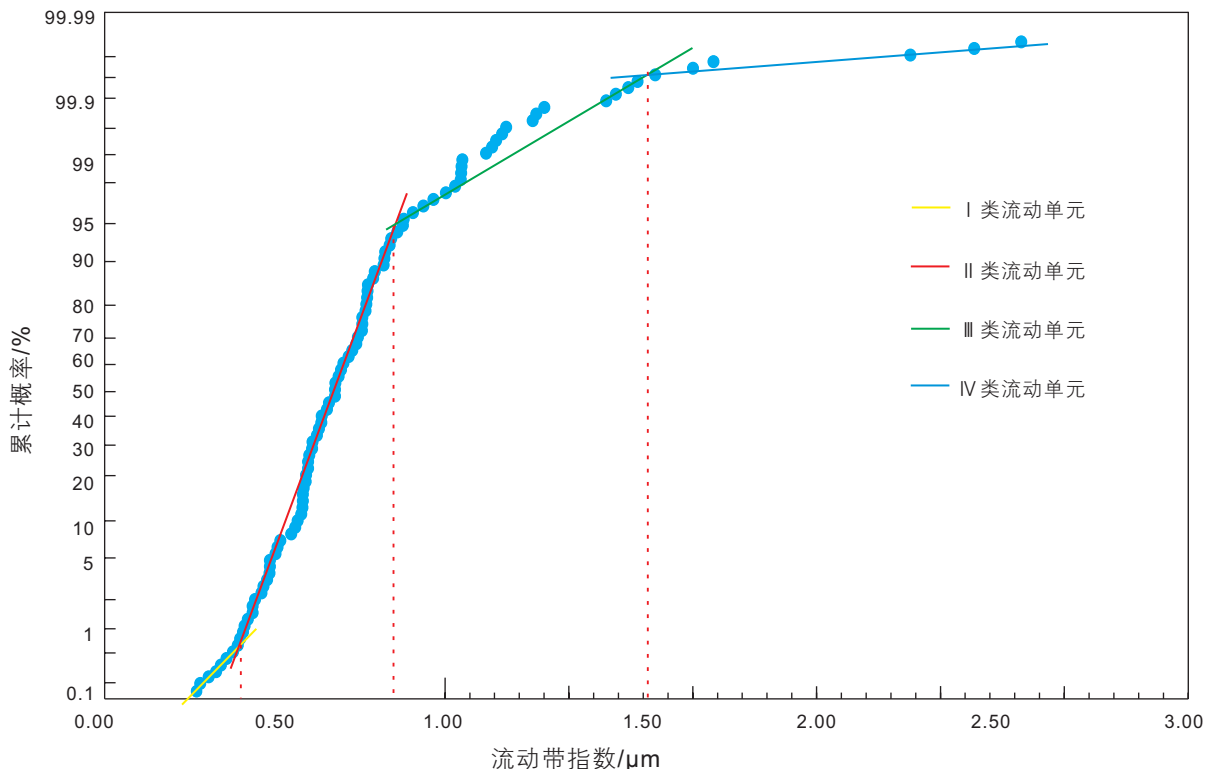


图 4 鄂尔多斯盆地延长组长 6 油层组流动分层指数累计概率分布图

Fig. 4 Cumulative probability distribution map of flow unit index of Chang 6 reservoir of Yanchang Formation in Ordos Basin

布不同流动单元具有不同的孔喉特征和不同的正态分布函数,所以当存在多个非均质流动单元时, $FZI$ 整体分布是若干正态分布的叠加,因此在正态概率坐标上表现为具有不同斜率的直线段<sup>[33]</sup>。

选用研究区长6口取心井的长 $6_1$ 、长 $6_2$ 、长 $6_3$ 三个亚油层组的103块岩心分析数据计算流动分层指数并做出研究区流动分层指数的累计概率分布图(图4)。可以看出图中明显存在多条不同斜率分布的曲线,将不同斜率曲线的交点作为流动单元划分的界限值,将研究区长 $6_1$ 、长 $6_2$ 、长 $6_3$ 划分为4个流动单元。

4类流动单元的具体参数如(表1)所示,第I类储层流动分层指数小于0.4,平均孔隙度为11%,平均渗透率为 $0.217 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,属于“高孔低渗”储层;第II类储层流动分层指数0.4~0.8,平均孔隙度为8.5%,平均渗透率为0.387;第三类储层流动感单元指数0.8~1.5,平均孔隙度为6.8%,平均渗透率为 $0.711 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,这两类储层物性相对较好;第IV类储层流动分层指数大于1.5,平均孔隙度为4.6%,平均渗透率为 $5.095 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,属于“低孔高渗”储层,该类储层微裂缝发育。

根据流动单元可以将研究区长6储层划分为4种流动单元,在用流动单元划分的基础之上对研究区的实测孔渗参数进行拟合,可以清楚的看到在分流动单元之后各类储层孔隙度、渗透率计算模型的 $R^2$ 平均达到了0.8892,大幅提高了预测准确率(图5)。

## 4 孔隙度和流动分层指数的测井计算

为了将利用岩心分析数据进行流动单元划分进行渗透率计算的方法在未取心的地区进行推广,所以考虑用测井曲线进行流动分层指数的计算,对未取心井的地区进行流动单元划分。同时通过测井曲线与孔隙

度之间的相关性拟合进行孔隙度的计算。

### 4.1 孔隙度的测井计算

对数据中的异常数据值进行剔除,选取其中典型样品的数据进行孔隙度和测井参数以及经过测井参数进行换算得到的参数进行相关性分析,其分析结果见表2。

根据分析结果显示 $SH$ (通过 $SP$ 曲线计算得到的泥质含量曲线)、 $SP$ 曲线与孔隙度相关性最好,且与孔隙度值呈负相关,也符合泥质含量越高孔隙度值越小的地质规律。通过 $SPSS$ 软件对孔隙度和测井参数进行多元回归,采用逐步回归的方法,该方法会对不符合统计标准的变量进行剔除,以得到最优的模型。最终孔隙度的计算模型:

$$\phi_c = -0.227SH + 0.135SP + 7.170 \quad (3)$$

式中, $SH$ 为泥质含量,%; $SP$ 为自然电位,mV。

利用该模型计算出得到的孔隙度拟合度较高,其 $R^2$ 值为0.879,满足精度要求。

### 4.2 流动分层指数的测井计算

由于取心成本的限制,只对研究区少数的关键井进行了取心,研究区内的大部分井都没有进行取心。在有取心的井段可以直接利用岩心法分析数据结合Kozeny-Caman方程来计算流动分层指数进行储集层分类。而未取心的井段,就不能进行流动分层指数的计算。前人研究发现测井曲线和流动分层指数之间有相关性,可以通过测井参数建立流动分层指数与测井响应之间的定量关系进行未取心井段的流动分层指数的计算,然后再进行储集层分类<sup>[27-28]</sup>。

建立储层流动分层指数与测井响应的函数关系。首先分析测井参数和流动单元之间的相关性,选取对流动分层指数敏感性较强的测井参数进行回归分析,建立流动单元与测井曲线之间的函数模型,进

表1 长6油层组基于流动分层指数的分类标准及渗透率计算模型

Table 1 Classification criteria and permeability calculation model of Chang 6 reservoir group based on flow unit index

类别	流动分层指数/ $\mu\text{m}$	有效孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	渗透率计算模型	相关系数
I	<0.4	6.8~16.2(11)	0.055~0.43(0.217)	$K = 0.0129e^{23.605\phi_c}$	0.8585
II	0.4~0.8	4.59~14.4(8.5)	0.053~1.86(0.387)	$K = 0.0123e^{34.34\phi_c}$	0.8752
III	0.8~1.5	3.6~12.8(6.8)	0.054~4.92(0.711)	$K = 0.0183e^{42.316\phi_c}$	0.9268
IV	>1.5	0.3~13.9(4.6)	0.036~29.6(5.095)	$K = 0.0371e^{46.246\phi_c}$	0.8964

注: 6.8~16.2(11)最大值~最小值(平均值)

行流动单元的测井计算。通过对研究区测井参数与流动分层指数(FZI)进行相关性分析,分析结果如表2所示。

利用SPSS进行多元回归得到利用测井参数计算流动分层指数的计算模型如下所示:

$$FZI = 0.023\Delta t - 0.018\phi_c - 0.002SP - 3.913 \quad (4)$$

式中,  $\Delta t$  为声波时差, 单位  $\mu\text{s}/\text{m}$ 。

通过该方法拟合得到的流动单元计算模型精度较高, 其  $R^2$  值为 0.812, 拟合度高。

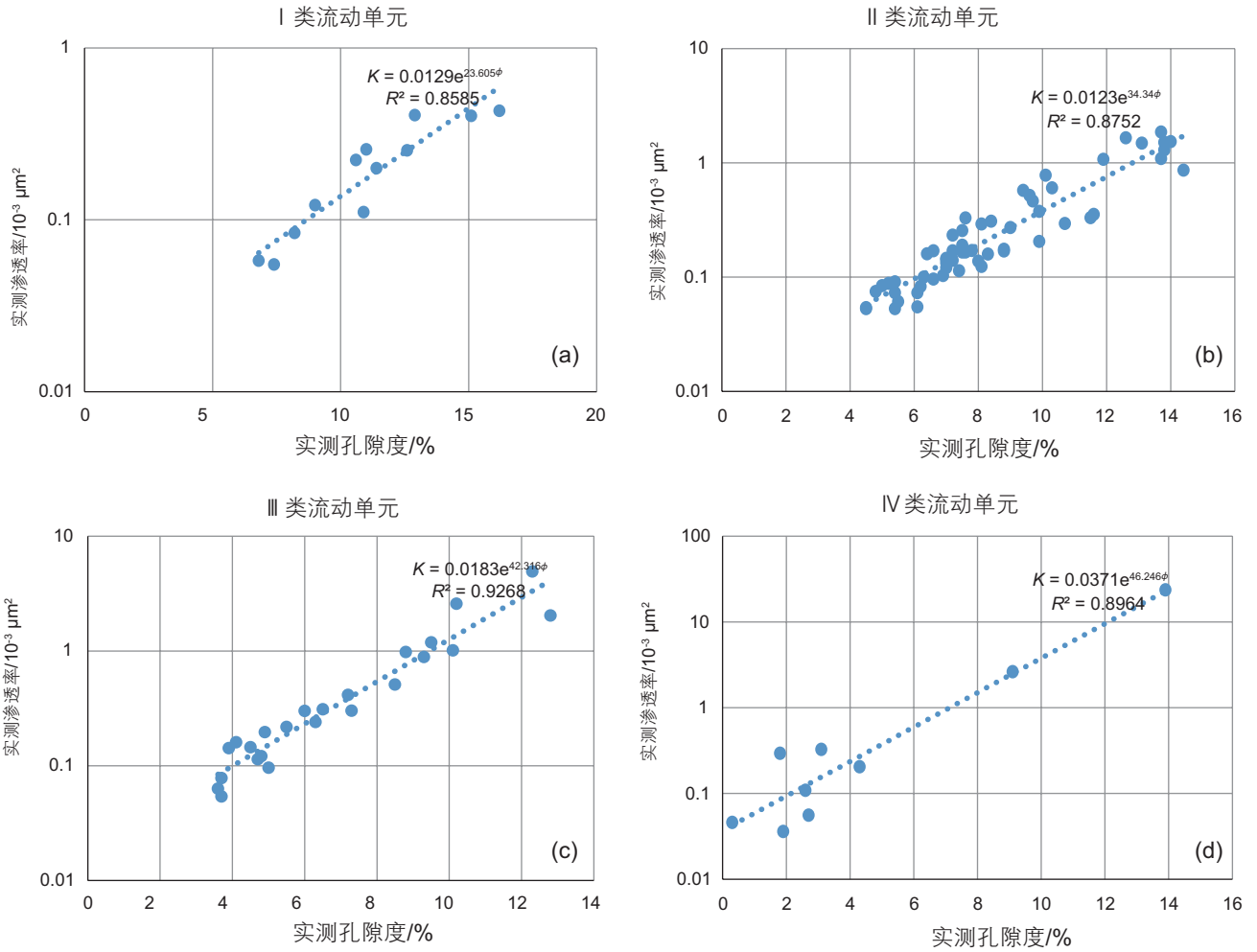


图5 划分流动单元之后实测孔隙度渗透率交会图

Fig. 5 Intersection diagram of measured porosity and permeability after dividing flow units

表2 流动分层指数、孔隙度、测井曲线相关性分析

Table 2 Correlation analysis of flow unit index, porosity and logging curve

	$FZI/\mu\text{m}$	$\phi_c / \%$	$AC/(\mu\text{s}/\text{ft})$	$SP/\text{mV}$	$GR/\text{API}$	$SH/\%$
$FZI$	1	0.291	0.898	-0.293	0.394	-0.291
$\phi_c$		1	0.391	-0.917	0.665	-1.000
$AC$			1	-0.375	0.546	-0.391
$SP$				1	-0.489	0.917
$GR$					1	-0.504
$SH$						1

### 4.3 实例应用

将本次研究推导出的渗透率计算模型在研究区典型单上进行应用，具体流程如下：首先根据式(3)计算出地层的有效孔隙度 $\phi_e$ ，然后利用式(4)计算流动分层指数 $FZI$ ，再根据前面的流动单元划分标准将流动单元划分为4类，最后利用每种流动单元的渗

透率计算模型计算每一类流动单元的渗透率。其应用效果如图6、图7所示，利用 $FZI$ 方法分类后计算的渗透率曲线，与岩心实测渗透率对比，绝对误差 $0.26 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，相对误差19.14%；利用测井计算得到的 $FZI$ 与利用岩心实测计算得到的 $FZI$ 拟合程度较好。用本次研究的模型计算出的渗透率整体上和岩心实测渗透率拟合度较高，满足储层精细评价的要求，计算

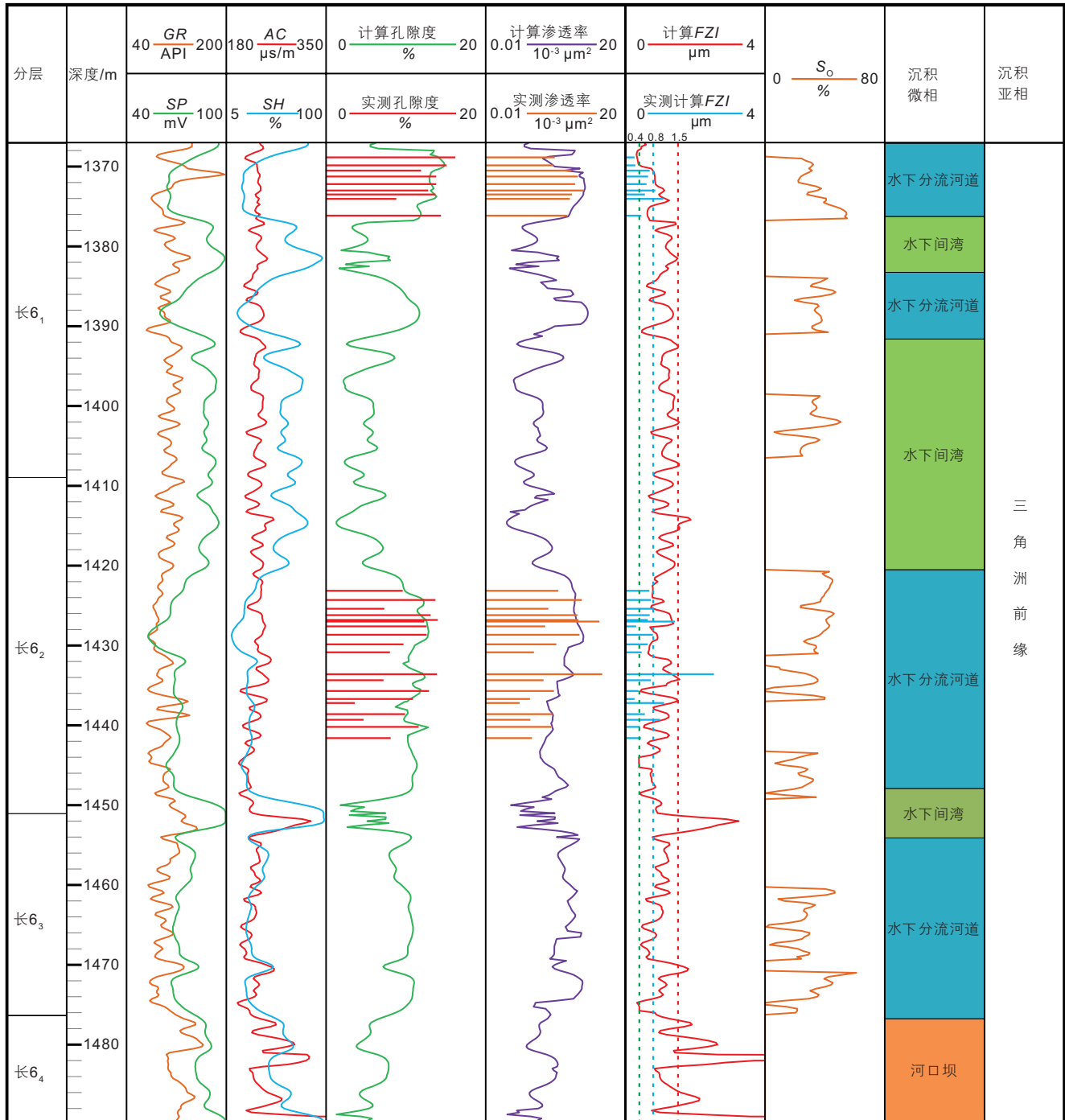


图6 S-001 计算渗透率与岩心分析渗透率对比图

Fig. 6 Comparison of S-001 calculated permeability and core analysis permeability



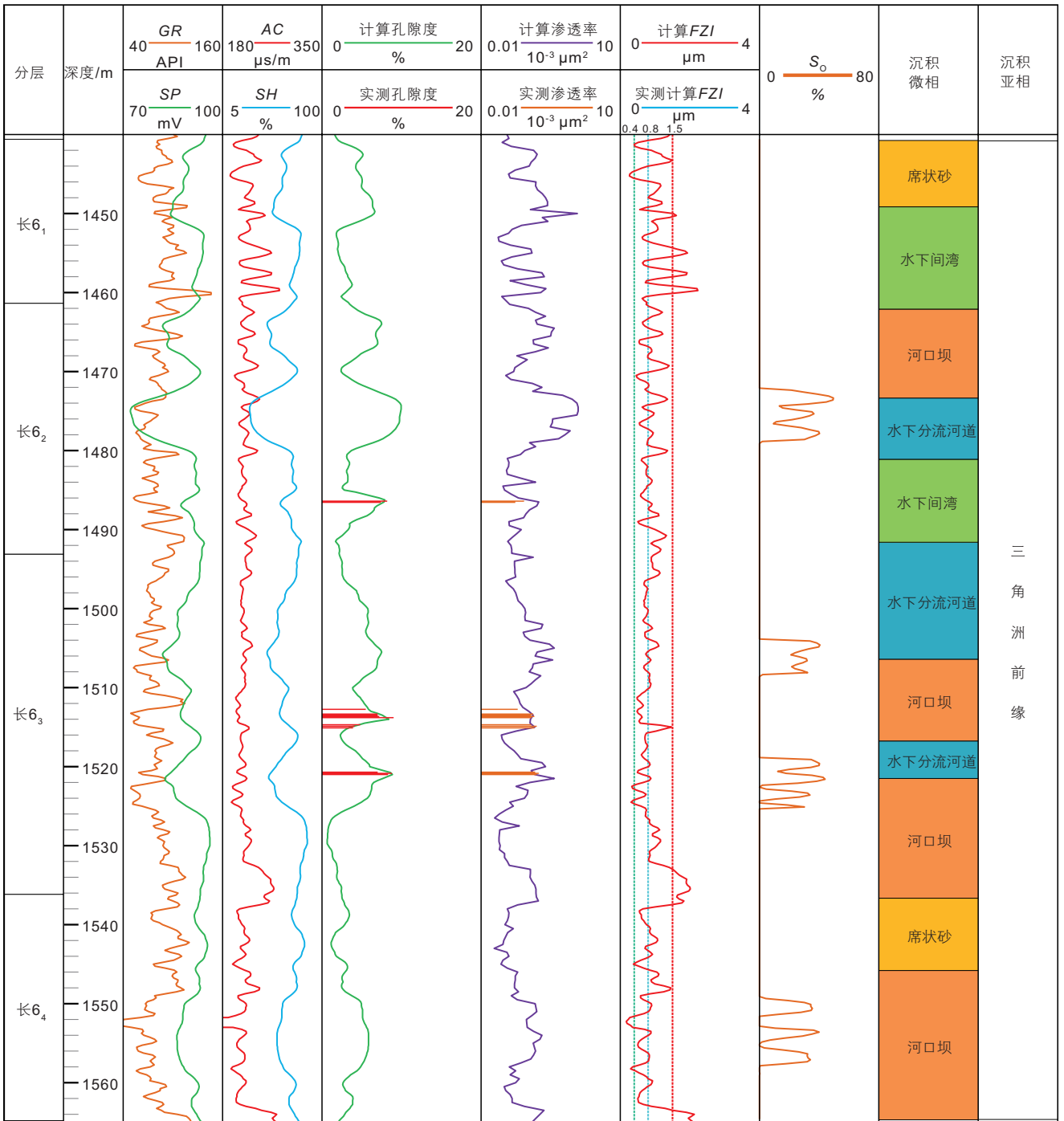


图 7 S-002 计算渗透率与岩心分析渗透率对比图

Fig. 7 Comparison of S-002 calculated permeability and core analysis permeability

精度较高。本次研究为该地区没有取心井的地区渗透率的精确计算提供了很好的依据。

### 5 结论

(1) 利用流动单元对储层进行分类可以很好的提高

渗透率的解释精度，使得渗透率计算模型的拟合度由 0.4316 提高到平均 0.8892，大幅提高了预测准确度。

(2) 建立了流动分层指数、有效孔隙度的测井计算模型，模型的拟合度均达到 0.8 以上。形成了一套利用分流动单元结合测井资料求取鄂尔多斯盆地中南部地区长 6 致密砂岩储层渗透率的计算方法。

(3)应用该套方法对典型单井渗透率进行计算,计算精度高、实际应用效果好,计算得到渗透率的绝对误差为  $0.26 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 相对误差 19.14%, 实现了渗透率的连续评价, 为致密砂岩储层渗透率的精细评价提供了参考。

## 参考文献

- [1] 荆万学. 常规测井资料计算砂岩储层渗透率的理论思考[J]. 测井技术, 2002, 26(1): 46-48, 89.[JING W X. A Theoretical method for calculation of sandstone reservoir with conventional logging data[J]. Logging Technology, 2002, 26(1): 46-48, 89.]
- [2] 赵培强, 李长文, 沙峰, 等. 滨里海盆地东缘中区块碳酸盐岩储层渗透率预测研究[J]. 石油科学通报, 2020, 5(01): 39-48.[ZHAO P Q, LI C W, SHA F, et al. Study of permeability prediction of carbonate reservoirs in the middle block of the eastern margin of the Caspian Basin [J]. Petroleum Science Bulletin, 2020, 5(01): 39-48.]
- [3] 陈志强, 吴思源, 白蓉, 等. 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.[CHEN Z Q, WU S Y, BAI R, et al. Logging evaluation for permeability of tight sandstone gas reservoirs based on flow unit classification: a case from Xujiahe Formation in Guang'an area, central Sichuan Basin[J]. lithologic reservoirs, 2017, 29(6): 76-83.]
- [4] 刘利. 一种提高凝灰质储层渗透率解释精度的方法——以南贝尔油田为例[J]. 浙江大学学报(理学版), 2019, 46(6): 762-768.[LIU L. A method for improving interpretation accuracy of permeability of tuffaceous reservoir-taking Nanbeier Oilfield as an example[J] Journal of Zhejiang University (Science Edition). 2019, 46(6): 762-768.]
- [5] 宋宁, 刘振, 张剑凤, 等. 基于流动单元分类的非均质砂岩储集层渗透率预测[J]. 科技导报, 2013, 31(2): 68-71.[SONG N, LIU Z, ZHANG J F, et al. Permeability prediction of heterogeneous sand reservoir based on flow units classification[J]. Science and technology bulletin, 2013, 31(2): 68-71.]
- [6] JENNINGS J W, LUCIA F J. Predicting permeability from well logs in carbonates with a link to geology for inter well permeability mapping[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2001, 6(04): 215-225.
- [7] BRYANT S, CADE C, MELLOR D. Permeability prediction from geologic models[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(8): 1338-1350.
- [8] MATHISEN T, SANG H L, DATTA-GUPTA A. Improved permeability estimates in carbonate reservoirs using electro facies characterization: A case study of the North Robertson Unit, West Texas[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2003, 6(3): 176-184.
- [9] 廖东良, 吴海燕. 基于流动单元改进的渗透率解释模型[J]. 测井技术, 2015, 39(6): 802-806.[LIAO D L, WU H Y. Flow unit and its application to reservoir classification[J]. Well Logging Technology, 2015, 39(6): 802-806.]
- [10] 匡立春, 刘合, 任义丽, 等. 人工智能在石油勘探开发领域的应用现状与发展趋势[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(01): 1-11.[KUANG L C, LIU H, REN Y L, et al. Application and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(01): 1-11.]
- [11] 林伯韬, 郭建成. 人工智能在石油工业中的应用现状探讨[J]. 石油科学通报, 2019, 4(04): 403-413.[LIN B T, GUO J C. Discussion on current application of artificial intelligence in petroleum industry [J]. Petroleum Science Bulletin, 2019, 4(04): 403-413.]
- [12] 王依诚, 姜汉桥, 于馥玮, 等. 基于机器学习的数字岩心孔渗预测方法研究[J]. 石油科学通报, 2019, 4(04): 354-363.[WANG Y C, JIANG H Q, YU F W, et al. Researches on the pore permeability prediction method of 3D digital cores based on machine learning[J]. Petroleum Science Bulletin, 2019, 4(04): 354-363.]
- [13] 黄雨阳, 冯进, 宋伟, 等. 结合NMR横向弛豫时间谱与压汞资料的砂岩储层改进渗透率智能预测方法[J]. 物探化探计算技术, 2020, 42(03): 338-344.[HUANG Y Y, FENG J, SONG W, et al. Improved intelligent prediction method of sandstone reservoir permeability based on NMR transverse relaxation time spectrum and mercury intrusion data [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 42(03): 338-344.]
- [14] 王猛, 刘志杰, 杨玉卿, 等. 基于区域测井大数据和实验资料的储层流动单元渗透率建模方法[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(01): 274-280.[WANG M, LIU Z J, YANG Y Q, et al. Permeability calculation in reservoir flow unit based on regional logging big data and experimental data[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2021, 36(01): 274-280.]
- [15] 张言辉. 基于物性预测相对渗透率的改进神经网络方法[J]. 天然气与石油, 2020, 38(03): 44-49.[ZHANG Y H. Improved neural network method for predicting relative permeability based on physical properties[J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38(03): 44-49.]
- [16] 张亮, 党海龙, 王振华, 等. 定边油区长7储层测井渗透率解释模型优化[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2018, 33(4): 22-26, 35.[ZHANG L, DANG H L, WANG Z H, et al. Optimization of logging permeability interpretation model for Chang 7 reservoir in Dingbian oil region[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition). 2018, 33(4): 22-26, 35.]
- [17] 杨生强. 志丹永152井区三叠系延长组长6储层特征及控油性研究[D]. 西安石油大学, 2011.[YANG S Q. Analysis on controlling factors and characteristics of Chang 6 reservoir of Yanchang formation in Triassic of Yong 152 well block of Zhidan[D] Xi'an Shiyou

- University, 2011.]
- [18] 王乾右. 鄂尔多斯盆地延长组致密储层沉积相控储集空间特征差异[D]. 中国石油大学(北京), 2019. [WANG Q Y. Depositional facies controls on the characteristic differences of tight reservoir space in the Yanchang formation, Ordos Basin[D] China University of Petroleum (Beijing), 2019.]
- [19] 郑忠文, 王乾右, 葛云锦, 等. 鄂尔多斯盆地西部延长组长 8~长 6 段致密储层微观孔隙特征差异[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(15): 69-80.[ZHENG Z W, WANG Q Y, GE Y J, et al. Differences of microscopic pore characteristics among the Yanchang formation Chang 8 ~ Chang 6 tight reservoirs in the Western Ordos Basin[J]. Science, Technology and Engineering, 2016, 18(15): 69-80.]
- [20] HEARN C L, EHANKS W J, TYE R S. Geological factors influencing reservoir performance of the Hartzog Draw Field, Wyoming[J]. Petrol. Tech., 1984, 36: 1335-1344.
- [21] 张龙海, 刘忠华, 周灿灿, 等. 低孔低渗储集层岩石物理分类方法的讨论[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6): 763-768.[ZHANG L H, LIU Z H, ZHOU C C, et al. A method for petrophysical classification of low porosity and low permeability reservoirs[J]. Petroleum exploration and development, 2008, 35(6): 763-768.]
- [22] 喇全亮, 任建伟. 流动单元的影响因素[J]. 石化技术, 2017, 24(2): 19. [LA Q L, REN J W. Influencing factors of flow unit[J]. Petrochemical Technology, 2017, 24(2): 19.]
- [23] 孙明. 元城油田精细油藏描述与剩余油分布研究[D]. 中国地质大学(北京), 2009.[SUN M. The fine description of reservoir and the distributing of remaining oil of yuancheng oilfield [D]. China University of Geosciences (Beijing), 2009.]
- [24] 李园园. 川口油田川 33 井区长 6 油层组储层精细描述[D]. 长安大学, 2007.[LI Y Y. The fine description of chang6 reservoir group of chuan33area in chuankou oilfield[D]. Chang'an University, 2007.]
- [25] 宋俊朋. 印尼K区块中下侏罗统储层及成藏特征研究[D]. 中国石油大学(华东), 2016.[SONG J P. The study of reservoir and hydrocarbon accumulation characteristics of the middle-lower Jurassic in K block of Indonesia[D]. China University of Petroleum (East China), 2016.]
- [26] 王志松, 欧成华, 侯庆杰, 等. H油田延 6 段储层流动单元划分与剩余油分布研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2014, 16(04): 13-16+25.[WANG Z S, OU C H, HOU Q J, et al. Research on flow unit classification and remaining oil distribution to yan 6 of oilfield H [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 16(04): 13.]
- [27] 魏晓敏. 姬源油田长 8 油藏流动单元研究[D]. 西安石油大学, 2010.[WEI X M. The flow units research of Chang 8 reservoir in Jiyuan Oilfield[D]. Xi'an Shiyou University, 2010.]
- [28] 钟金银, 颜其彬, 杨辉廷, 等. 基于流动单元划分的储层测井二次解释[J]. 大庆石油学院学报, 2012, 36(03): 63-66+9.[ZHONG J Y, YAN Q B, YANG H T, et al. Reservoir logging secondary interpretation based on flow unit division[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2012, 36(03): 63-66+9.]
- [29] 闫羽, 闫斐, 桂传松, 等. 流动单元及其在储层分类中的应用[J]. 天然气勘探与开发, 2015, 38(4): 8-9, 14-16, 22.[YAN Y, YAN F, GUI C S, et al. Flow unit and its application to reservoir classification[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2015, 38(4): 8-9, 14-16, 22.]
- [30] 马宏宇. 特高含水期水淹层渗透率计算方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2013, 32(1): 170-174.[MA H Y. Calculation method of water-flooded layer permeability in ultra-high water cut stage [J]. Daqing petroleum geology and development, 2013, 32(1): 170-174.]
- [31] 程梦薇. 基于储层分类的渗透率测井计算方法[J]. 长江大学学报(自科版), 2016, 13(35): 5, 42-46, 52.[CHENG M W. Permeability logging calculation method based on reservoir classification [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2016, 13(35): 5, 42-46, 52.]
- [32] 范宜仁, 葛新民, 汪海龙, 等. 非均质性砂砾岩储层渗透率预测方法研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, 32(3): 6-10, 185-186.[FAN Y R, GE X M, WANG H L, et al. Study on the method predicting permeability in the heterogeneous glutenite reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 2010, 32(3): 6-10, 185-186.]
- [33] 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, 88.[LU M Z, LIN C Y, ZHANG X G, et al. Evaluation and optimization of flow unit division methods[J]. Lithologic reservoirs, 2015, 27(1): 74-80, 88.]