致密砂岩碎屑颗粒粒度定量表征及对产能的指示意义

姚梦麟[1]，陶云贺[2]，贺洪举[2]，侯克均[3]，刘海军[2]，熊宇[2]，张冲[4*]

1. 川庆钻探工程有限公司对外合作和市场开发处，成都 610051；
2. 中国石油集团测井有限公司西南分公司，重庆 400021；
3. 中石油西南油气田开发事业部，成都 610051；
4. 长江大学地球物理与石油资源学院，武汉 430100

第一作者，E-mail：yaoml_dyy@cnpc.com.cn

* 通信作者，E-mail：yzlogging@163.com

2023-10-20 收稿；2024-02-23 修回；2024-02-26 接受

基金项目：国家自然科学基金项目(41404084)

中图分类号：P618.13　　文章编号：2096-8523(2025)02-0214-10　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230582

摘　要：粒度分析可以判别地层沉积环境和评价储层渗透性，对碎屑岩油气储层评价十分重要。以四川盆地天府气田沙溪庙组致密砂岩储层为研究对象，分析了碎屑岩颗粒大小和形状对储层渗透性的影响，结合粒度中值 *M*、粒度 *C* 值、分选系数等参数，提出了一个综合表征粒度的指示参数 *PI*，对颗粒粒度比较敏感的测井参数自然伽马、光电吸收截面指数和中子进行主成分分析，降维成一个主成分参数，建立了粒度指示参数 *PI* 与主成分参数的指数关系模型，结合测试及测井资料，分析了粒度指示参数 *PI* 与储层产能的相关关系。统计了天府气田沙溪庙组 7 口井 8 个测试气层段，并通过上述方法计算了 7 口井的粒度指示参数 *PI* 值，分析了测试段无阻流量与粒度指示参数 *PI* 的响应关系。结果显示：天府气田沙溪庙组测试段无阻流量与粒度指示参数 *PI* 的累加值 *X* 呈指数关系，其相关系数 R^2 达到 0.85。研究说明：对于岩性以中−细粒砂岩为主，粒级变化大，且储集空间以残余粒间孔为主的储层，粒度指示参数 *PI* 在一定程度上可以指示该种类型储层的产能大小。

关键词：粒度指示参数 *PI*；粒度分析；测井表征；产能；沙溪庙组；四川盆地天府气田；致密砂岩；碎屑颗粒

粒度是指碎屑颗粒的绝对大小，是其最主要的结构特征[1]，研究沉积岩粒度的大小及粒级分布特征的方法统称为粒度分析。粒度分析可以判别地层水动力条件和沉积环境。对于不同沉积环境的沉积岩，由于水动力条件的差异，其颗粒的大小也不同。沉积岩颗粒大小对岩石孔隙结构特征有较强的控制作用，一般认为岩石颗粒越细，其孔隙结构表现越差[1]。因此，粒度分析资料对于碎屑岩油气储层评价十分重要。

沉积岩粒度定量表征的实验分析方法有：筛析法、沉降法、光透法、薄片图像法和激光法等。相较于筛析法、沉降法、光透法等传统方法，基于高倍显微镜的薄片图像法和基于计算机的激光法更为先进，测量精度更高，是目前实验室常用的 2 种分析方法[2-8]。PASSEGA[9] 利用实验确定的粒度中值 *M* 和粒度 *C* 值 2 个参数，绘制了 *C*-*M* 交会图版，并在图中标识出了牵引流、浊流和静水等沉积环境的图式，以此用来判断沉积物的搬运方式，进而鉴别沉积环境[10-15]。依据实验确定的粒度资料，可以分析目标区块粒度对物性的影响，并提取敏感测井参数，从而建立粒度中值定量表征模型及不同粒度中值条件下的渗透率测井精细解释模型[16-18]。

复杂碎屑岩储层纵向上岩石粒度表现为强非均质性，相应的岩石渗透性也表现为较强的非均质特征。赵军等[16] 通过某气田白垩系碎屑岩储层的粒度

著录信息：姚梦麟，陶云贺，贺洪举，等. 致密砂岩碎屑颗粒粒度定量表征及对产能的指示意义[J]. 地质科技通报，2025，44(2)：214-223.
YAO Menglin，TAO Yunhe，HE Hongju，et al. Quantitative characterization of the clastic particle size of tight sandstone and its indicative significance for productivity[J]. Bulletin of Geological Science and Technology，2025，44(2)：214-223.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjqb.cug.edu.cn

分析和物性资料，定性阐述了岩石粒度对渗透率的控制作用。由于储层渗透性在一定程度上影响产能的大小，这给分析粒度特征值与碎屑岩储层产能之间的关系提供了一种新的思路。基于此，笔者在前人研究的基础上，以四川盆地天府气田沙溪庙组致密砂岩储层为研究对象，分析粒度中值 M、粒度 C 值、分选系数 S_o 等粒度参数对储层物性的影响，提出综合表征粒度的特征参数，然后分析粒度特征参数与测井响应之间的关系，提取反映粒度特征参数的敏感测井参数及测井组合参数，建立粒度特征参数的测井表征模型，探讨粒度特征参数与储层产能的关系。

1　碎屑颗粒粒度定量表征

1.1　粒度分析实验

研究区块的粒度分析资料通过激光法获取，仪器为 MAL1025141 激光粒度分析仪。首先通过激光粒度分析仪中多元光电探测器来测量 X 衍射光的空间分布及强度，然后利用计算机反算出碎屑颗粒的大小及粒级分布(图 1)。激光法具有准确、快速和重复性好等特点，相对于薄片图像法，该方法对粒级比较小的颗粒(黏土和细粉砂)分析更为准确[2]。

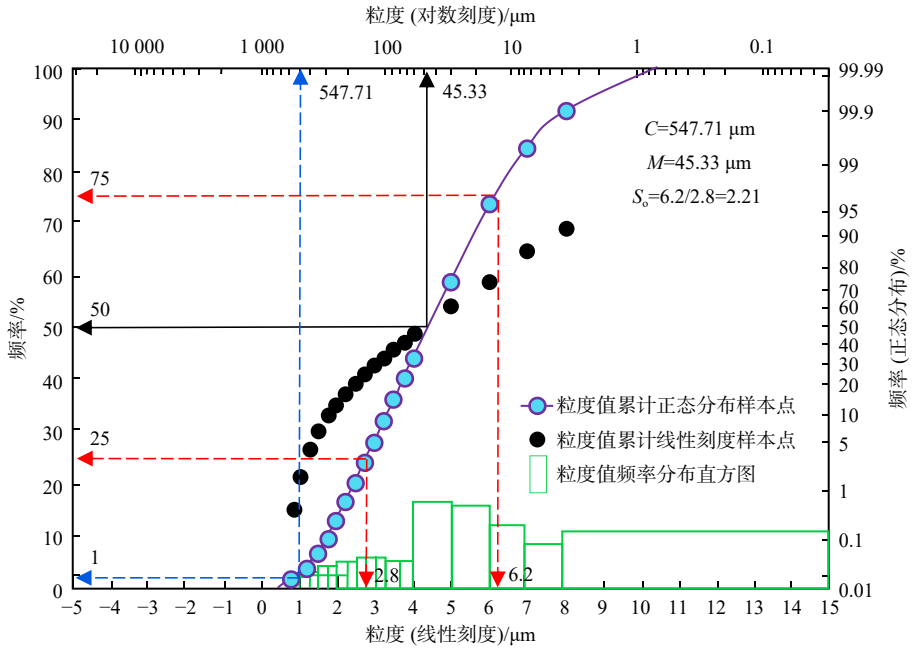
反映颗粒粒度大小及分布特征的参数有：粒度中值 M、粒度 C 值、分选系数 S_o、平均粒径 Mz、偏度 SK、标准偏差 σ、峰度 KG 等。其中，平均粒径、偏度、标准偏差、峰度的计算方法有矩法和图解法 2 种计算方法[19-21]，矩法是将岩心颗粒的峰度、偏度、标准偏差、平均粒径分别定义为粒度分布的四阶矩、三阶矩、二阶矩、一阶矩函数；图解法是依据粒度分布图中累计概率曲线提取的代表性累计概率值对应的粒径计算得来。图解法和矩法计算的峰度和偏度差异比较大，而标准偏差和平均粒径相关性较好，但也存在一定差异。基于此，本研究主要针对粒度中值、粒度 C 值和分选系数来分析其与储层物性的关系，并以此为基础提出一个粒度综合表征参数。

粒度中值 M 定义为一个样品的累计粒度分布百分数达到 50% 时所对应的粒径，M 值代表了水动力的平均能量。粒度 C 值是粒度分析资料累计曲线上颗粒累计粒度分布百分数达到 1% 处对应的粒径，C 值与样品中最粗颗粒的粒径相当，代表了水动力搅动开始搬运的最大能量；分选系数 S_o 是指粒度累计曲线上，75% 和 25% 处所对应的颗粒直径的比值，是表示碎屑沉积物分选性的一种参考。

图 1 为研究区永浅 A 井沙溪庙组沙二段的一块岩样，依据粒度参数的定义，可以通过图 1 中的累计频率曲线依次提取粒度中值、粒度 C 值、分选系数分别为 45.33 μm、547.71 μm、2.21。

1.2　颗粒粒度对储层渗透性影响

影响储层渗透性的因素包括：碎屑颗粒的形状



C. 粒度 C 值；*M*. 粒度中值；S_o. 分选系数

图 1　碎屑颗粒粒度大小及分布特征曲线（永浅 A 井，沙溪庙组沙二段）

Fig. 1　Size and distribution characteristic of debris particles

和大小、层理、胶结作用、破碎作用和溶解作用[22]。在碎屑岩中，破碎作用并不是形成岩石次生渗透率的主要方式。压实和胶结作用一般会降低储层渗透率。片状矿物，如白云母和页岩，会降低岩石的垂向渗透能力，当黏土矿物充填在颗粒接触点时，会遏制岩石水平渗透率，黏土矿物作为影响储层物性的一个重要因素，不仅与黏土含量有关，还与其矿物学特征及其中充填的孔隙流体成分有关。对于岩性纯的砂岩储层，如果胶结物和杂基含量近似一致，则储层物性主要与碎屑颗粒的形状和大小相关，对于碎屑颗粒粒径大、分选好的岩石（图 2a），则无论水平渗透率还是垂向渗透率都较大；对于碎屑颗粒粒径大、分选差的岩石（图 2b），则具有很高的水平渗透率，而垂向渗透率是中等–高；对于碎屑颗粒粒径小、分选差的岩石（图 2c），则岩石渗透率通常很低，特别是垂向渗透率。

1.3　粒度指示参数 *PI*

粒度中值 *M* 和粒度 *C* 值代表碎屑颗粒的粒径大小，粒度中值 *M* 和粒度 *C* 值越大，则颗粒粒径越大；而分选系数 S_o 则代表着碎屑颗粒的形状，分选系数越小，颗粒形状越规则，从 1.2 节颗粒粒度对储层渗透性影响的分析可知，粒度中值 *M* 和粒度 *C* 值分别与岩石渗透率存在正比关系，而颗粒分选系数 S_o 与岩石渗透率存在反比关系。基于以上分析，本研究将粒度中值 *M*、粒度 *C* 值和分选系数组合成一个粒度指示参数 *PI*：

$$PI = \frac{Z_M + Z_C}{Z_{S_o}}, \tag{1}$$

式中：Z_M、Z_C、Z_{S_o} 分别表示归一化后的粒度中值、粒度 *C* 值和分选系数，无因次，归一化公式如下：

$$Z_I = \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}, I = M, C, S_o, \tag{2}$$

式中：I_{max}，I_{min} 分别代表粒度中值、粒度 *C* 值和分选系数在研究区块的最大值和最小值，单位与粒度中值 *M*（μm）、粒度 *C* 值（μm）和分选系数（无因次）一致。

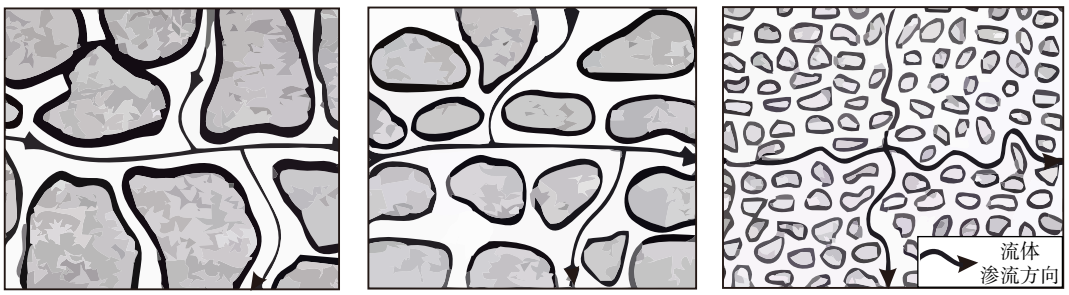
2　粒度指示参数 *PI* 测井评价

2.1　敏感测井参数选取

对颗粒粒度比较敏感的测井参数有自然伽马（*GR*）、光电吸收截面指数（*PE*）和中子（*CNL*）。除了以上参数以外，赵军等[16]也提出 *M-N* 交会图的 *M*、*N*（岩性指示参数）和冲洗带电阻率与孔隙度平方的乘积（$X=R_{xo}\times\phi^2$）等测井组合参数也在一定程度上反映碎屑岩储层颗粒粒度。

选取天府气田沙溪庙组 103 块碎屑岩岩样进行了激光法粒度分析测量，获取粒度中值、粒度 *C* 值和分选系数，并通过式（1）计算出粒度指示参数 *PI*，同时提取岩样对应深度的测井及测井组合响应值，分析粒度指示参数 *PI* 与测井响应值之间的相关性，其相关性结果如图 3。从图 3 中可以看出：粒度指示参数 *PI* 与自然伽马（*GR*）、光电吸收截面指数（*PE*）和中子（*CNL*）相关性最高，相关系数分别达到−0.75，−0.51，−0.51；其次是 *M-N* 交会图中的 *N* 值、冲洗带电阻率与孔隙度平方的乘积（*X*），相关系数分别为 0.38，0.48，其他测井参数相关性较差。

自然伽马测井是在井内测量岩层中自然存在的放射性元素（铀、钍、钾）核衰变过程中放射出来的伽马射线的强度来研究岩层的一种方法，在沉积岩中，泥岩具有较强的放射性，自然伽马值较大，而砂岩放射性弱，自然伽马值较小，即自然伽马在一定程度可以反映岩性颗粒的粗细程度。光电吸收截面指数也是反映地层岩性的有效测井参数之一，跟自然伽马类似，其颗粒粗细程度与 *PE* 值成反比关系。中子测井是以中子源产生的中子与地层间的相互作用为基础来研究地层的一类测井方法，其测量结果与

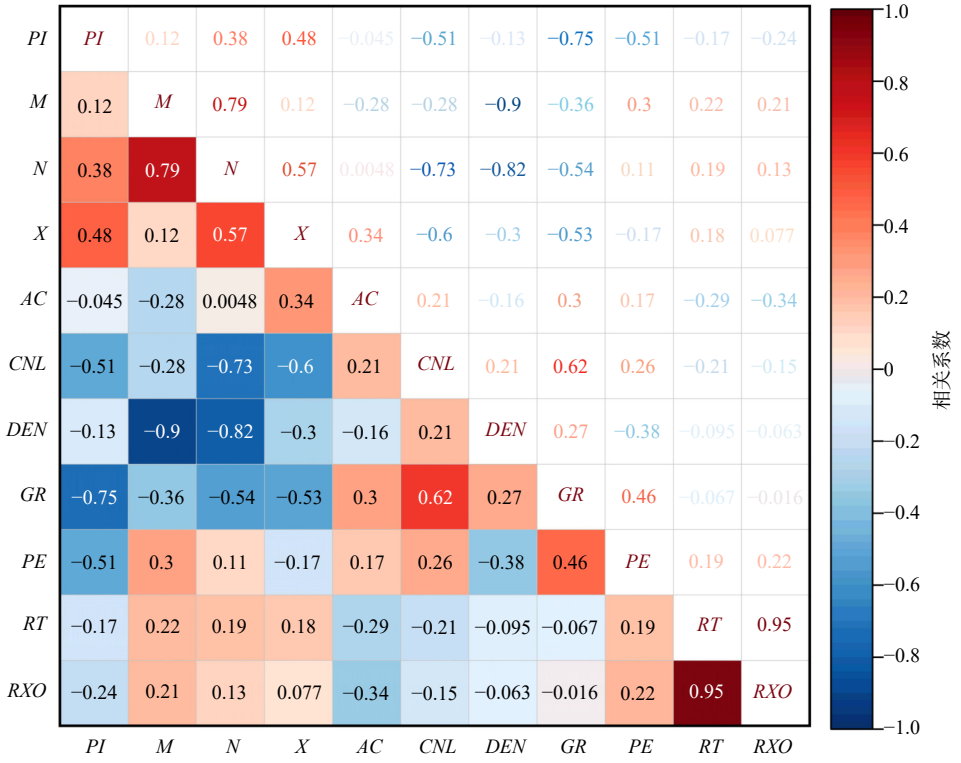


a. 颗粒粒径大、分选好的碎屑岩颗粒 K_{H1}, K_{V1}　b. 颗粒粒径大、分选差的碎屑岩颗粒 K_{H2}, K_{V2}　c. 颗粒粒径小、分选差的碎屑岩颗粒 K_{H3}, K_{V3}

$K_{H1}>K_{H2}>K_{H3}$；$K_{V1}>K_{V2}>K_{V3}$；K_H 为垂向渗透率；K_V 为水平渗透率

图 2　颗粒大小和形状对储层渗透性的影响（改自文献 [22]）

Fig. 2　Influence of particle size and shape on reservoir permeability



PI. 粒度指示参数; *M*. *M-N* 交会图中的 *M*(也叫岩性指示参数); *N*. *M-N* 交会图中的 *N*(也叫岩性指示参数); *X*. 冲洗带电阻率与孔隙度平方的乘积, $X = R_{xo}\phi^2$; *AC*. 声波时差; *CNL*. 补偿中子; *DEN*. 补偿密度; *GR*. 自然伽马; *PE*. 光电吸收截面指数; *RT*. 深侧向电阻率; *RXO*. 浅侧向电阻率; 下同

图 3　天府区块沙溪庙组 *PI* 与测井参数之间的皮尔逊相关图

Fig. 3　Pearson correlation between *PI* and logging parameters of the Shaximiao Formation in the Tianfu Block

地层中含氢指数密切相关, 对于颗粒细的岩石, 一般比表面积大, 吸水能力强, 则中子值大, 因此颗粒粗细程度一般也与中子有一定的反比关系。以上数据分析的结果与理论认识一致, 因此本研究选取自然伽马(*GR*)、光电吸收截面指数(*PE*)和中子(*CNL*)为表征颗粒粒度的敏感测井参数。

2.2　粒度指示参数 *PI* 测井定量表征

首先采用主成分分析法[23-24]将自然伽马(*GR*)、光电吸收截面指数(*PE*)和中子(*CNL*)3 个参数归一化后进行降维处理, 消除共线性的影响。主成分分析是统计学中一种简化数据集的技术, 该技术实际采用一种线性变换, 即把数据变换到一个新的坐标系统中, 使得任何数据投影的第 1 大方差在第 1 个坐标(第 1 主成分)上, 第 2 大方差在第 2 个坐标(第 2 主成分)上, 依次类推。主成分分析通过保留低阶主成分, 忽略高阶主成分来减少数据集的维数, 同时保持数据集对方差贡献最大的特征, 使低阶成分能够保留住数据的最重要方面。

表 1 为 103 块样本主成分分析的结果, 可以看出, 3 个主成分的特征值分别为 2.308、0.497、0.228, 按照特征值大于 1 来提取主成分个数的原则, 确定将 *GR*、*PE*、*CNL* 3 个测井响应参数降维成 1 个主成分, 并给出了第 1 个主成分的矩阵系数, 分别为 0.886, 0.693, 0.828, 主成分 1 的相关系数可以通过主成分矩阵除以特征值的 1/2 次方得到, 例如 Z_{GR} 的相关系数等于 $0.886/(2.308)^{1/2}=0.583$, 即主成分 1 的表达式为:

$$F_1 = 0.583Z_{GR} + 0.456Z_{PE} + 0.545Z_{CNL}。\quad (3)$$

将提取主成分 F_1 与岩心粒度指示参数 *PI* 进行相关性分析, 如图 4, 可以看出: 粒度指示参数 *PI* 与

表 1　主成分分析结果

Table 1　Results of the principal component analysis

主成分	初始特征值			主成分相关系数			主成分矩阵		
	特征值	方差/%	累计方差/%	Z_{GR}	Z_{PE}	Z_{CNL}	Z_{GR}	Z_{PE}	Z_{CNL}
F_1	2.308	83.675	83.675	0.583	0.456	0.545	0.886	0.693	0.828
F_2	0.497	10.676	94.351	—	—	—	—	—	—
F_3	0.228	5.649	100	—	—	—	—	—	—

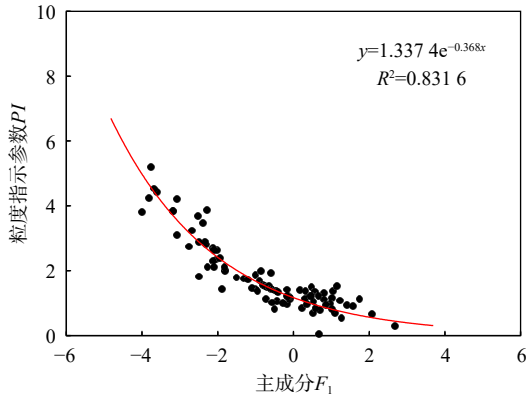


图 4　粒度指示参数 *PI* 与主成分 F_1 的相关关系图

Fig. 4　Correlation plot of the particle size indicator parameter *PI* with the principal component F_1

主成分 F_1 具有较好的指数关系，即可以通过主成分 F_1 对粒度指示参数 *PI* 进行定量表征，其表达式为：

$$PI = 1.337\ 4e^{-0.368F_1}。\tag{4}$$

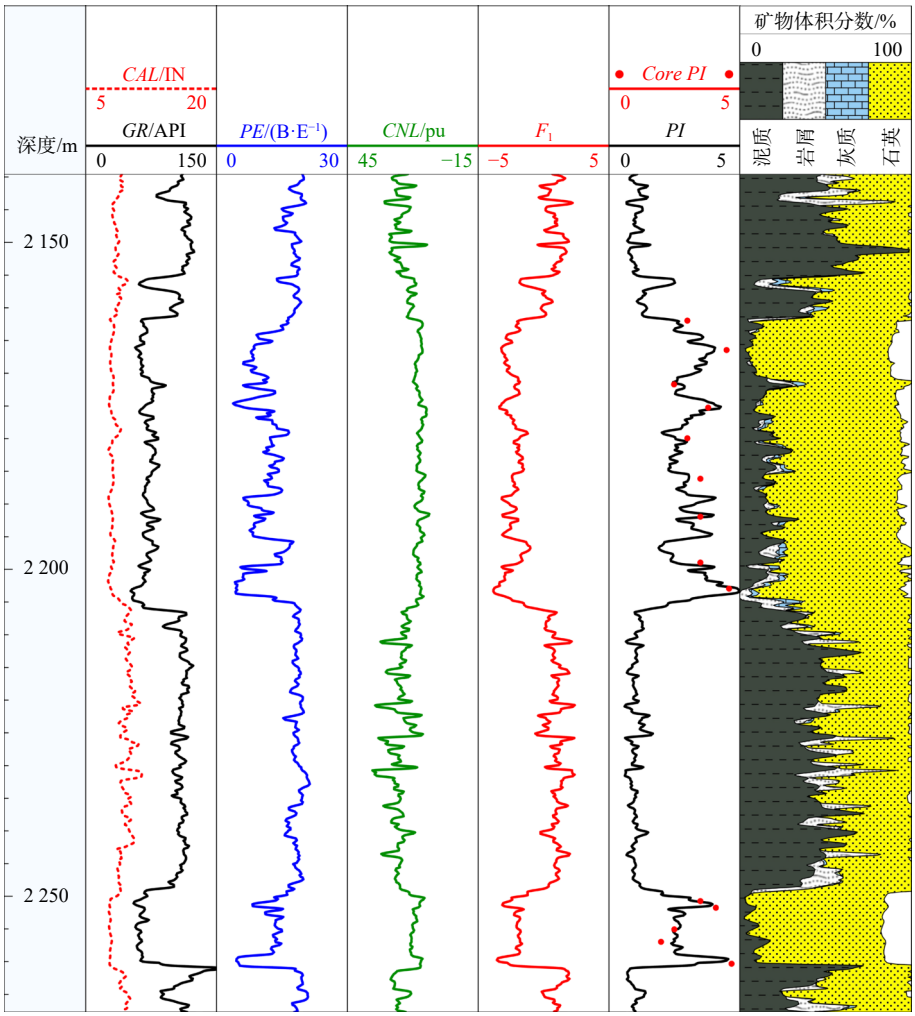
图 5 为天府气田永浅 A 井沙溪庙组（2 140 ~ 2 267 m）粒度指示参数 *PI* 测井评价效果图，可以看出，该段岩性成分以石英砂岩和泥岩为主，其通过主成分分析计算的主成分 F_1 曲线与粒度指示参数 *PI* 具有明显的反比对应关系，且测井计算的 *PI* 与岩心分析的 *PI* 结果吻合较好，说明测井计算的粒度指示参数 *PI* 可以准确表征目标区块的颗粒粒度大小。

3　碎屑颗粒粒度与产能关系

3.1　产能预测基础

渗流力学理论是油气层产能预测的基础，在油气开采过程中，油气井稳定日产量与生产压差符合平面径向流达西定律[25]：

$$Q = \frac{C \times K \times K_{ro} \times H \times \Delta P}{\beta_o \times \mu_o \times \lg\left(\frac{r_e}{r_w} + S\right)},\tag{5}$$



Core PI. 岩心粒度指示参数；1 IN=2.54 cm

图 5　沙溪庙组粒度指示参数 *PI* 测井评价效果图（永浅 A 井）

Fig. 5　Result of *PI* logging evaluation based on particle size indicator parameters in the Shaximiao Formation

式中：Q 为油气井的稳定日产量，m^3/s；K 为有效渗透率，10^{-3} μm²；K_{ro} 为相对渗透率；C 为单位换算系数，一般取 0.54；ΔP 为油气井生产压差，MPa；H 为油气层有效厚度，m；β_o 为油气体积系数，无因次；μ_o 为油气黏度，mPa·s；r_e 为油气井供油半径，m；r_w 为油气井半径，m；S 为表皮系数，无因次。

通常把单位时间、单位油气层厚度和单位生产压差的油气层产量定义为油气层产能指数 J_o：

$$J_o = \frac{Q}{\Delta P \times H} = \frac{C \times K \times K_{ro}}{\beta_o \times \mu_o \times \lg\left(\frac{r_e}{r_w} + S\right)}。\quad (6)$$

在油气田实际开发过程中，受井网限制，不同的油气井供油半径、油气井半径、表皮系数等工程参数差异不大，因此，可以令：

$$a = \frac{C}{\beta_o \times \mu_o \times \lg\left(\frac{r_e}{r_w} + S\right)},\quad (7)$$

将式(7)代入式(6)，则：

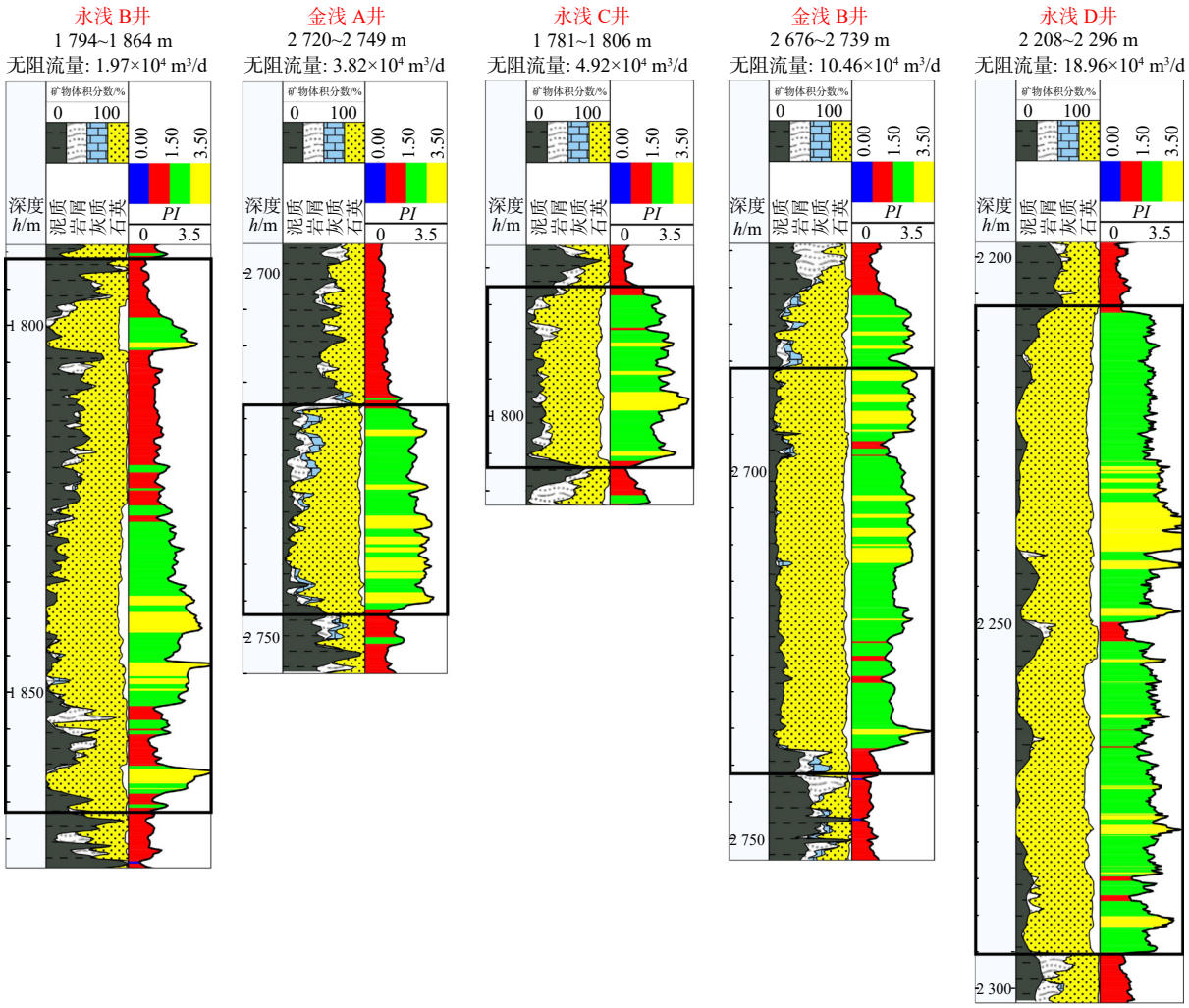
$$J_o = a \times K \times K_{ro}。\quad (8)$$

从式(8)可以看出，决定油气层产能大小的主控因素在于储层的渗透性，由于碎屑岩颗粒的大小、形状与储层渗透性密切相关[26-31]，因此，本研究提出的粒度指示参数 *PI* 理论上可以反映储层产能的大小。

3.2 粒度指示参数 *PI* 与产能的关系

笔者统计了天府区块沙溪庙组 7 口井 8 个测试气层段，并通过以上方法计算出了 7 口井的粒度指示参数 *PI* 值，分析测试段产能与碎屑颗粒粒度的响应关系。

图 6 为部分测试层段粒度指示参数 *PI* 的响应特征。由图 6 可知：随着测试段无阻流量的增加，测试深度范围内的 *PI* 累加值呈现逐渐增大趋势。将这 8 个测试气层段的 *PI* 值进行累加，得到 x，其表达式为：



注：无阻流量为试油测试获取的产液量；黑色加粗框线为统计无阻流量值的深度段；下同

图 6　天府气田部分测试层段粒度指示参数 *PI* 响应特征

Fig. 6　*PI* characteristics response to the particle size indicator parameters in several tested layers of the Tianfu gas field

$$x=\sum_{\text{endep}}^{i=\text{stdep}} PI_i, \tag{9}$$

式中：stdep、endep 分别为测试层段的起始深度和截止深度。建立测试段无阻流量 Q 与 x 的关系，如图 7。由图 7 可知：无阻流量 Q 与 x 呈现明显的指数关系，其关系式如下：

$$Q=2.391\ 6\mathrm{e}^{0.000\ 1x}。 \tag{10}$$

利用式(10)可以指示天府气田沙溪庙组储层的产能大小。通常情况下，产能大小是通过测井计算储层渗透率或孔隙结构测井分类来进行预测[32-35]。而天府气田沙溪庙组储层孔隙度分布在 8%～15%之间，渗透率在 0.1×10^{-3}～10×10^{-3} μm² 之间，储层较为致密，测井很难精确评价该类型储层渗透率[36-42]。

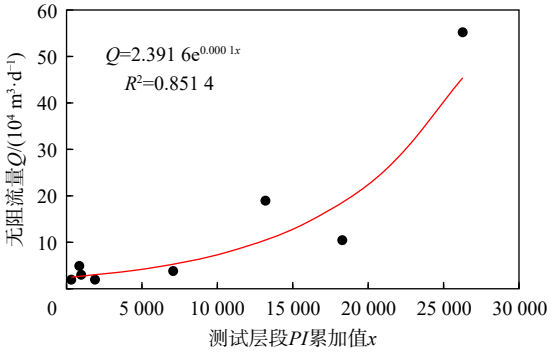


图 7　天府气田测试段无阻流量与粒度指示参数 *PI* 的累加值 *x* 的关系

Fig. 7　Correlation between the unimpeded flow rate and the cumulative *PI* value, *x*, in the test section of the Tianfu gas field

由于目标区块岩性以中–细粒砂岩为主，粒级变化大，且储集空间以残余粒间孔为主，颗粒破碎和溶解作用弱，则储层渗透性主要取决于碎屑颗粒的形状和大小，因此可以用粒度指示参数 *PI* 来指示天府气田沙溪庙组储层产能。

4　结　论

(1)将粒度分析资料中的粒度中值 M、粒度 C 值和分选系数组合，提出了一个反映颗粒粒度形状和大小的粒度指示参数 *PI*，该参数可以反映储层的渗透性，*PI* 值越大，储层渗透性越好。

(2)优选自然伽马、中子和光电吸收截面指数作为反映颗粒粒度的测井敏感参数，利用主成分分析法，建立了粒度指数参数 *PI* 的测井定量表征模型，该模型可以准确表征天府气田沙溪庙组颗粒粒度的大小。

(3)分析了粒度指示参数 *PI* 与储层产能的关系，建立了天府气田沙溪庙组无阻流量 Q 与粒度指示参数 *PI* 的累加值 x 的指数关系模型，该模型可以用来指示目标区块沙溪庙组储层产能大小。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 何幼斌，王文广. 沉积岩与沉积相 [M]. 北京：石油工业出版社，2007.
HE Y B, WANG W G. Sedimentary rocks and sedimentary facies[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.（in Chinese）

[2] 王有鹏，李德文，王锦鹏. 金沙江巧家段冲积物动态图像法粒度特征研究 [J]. 地质论评，2019，65(2)：503-513.
WANG Y P, LI D W, WANG J P. Analysis on grain size of alluvial sediments in the Qiaojia segment, Upper Yangtze River, based on dynamic image method[J]. Geological Review, 2019, 65(2): 503-513.（in Chinese with English abstract）

[3] SHULKIN V M, STRUKOV A Y. Particle-size analysis of modern bottom sediments by the laser diffraction and sieve methods[J]. Russian Journal of Pacific Geology, 2020, 14(4): 378-386.

[4] 尤帆，耿向. 筛分法和激光粒度法联合测定陆源碎屑岩粒度 [J]. 计量学报，2021，42(3)：380-387.
YOU F, GENG X. Granularity of terrigenous clastic rock using sieving method and laser particle size[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(3): 380-387.（in Chinese with English abstract）

[5] 田宇昕. 沉积物粒度分析方法的比较 [J]. 信息系统工程，2019(12)：147-148.
TIAN Y X. Comparison of sediment particle size analysis methods[J]. China CIO News, 2019(12): 147-148.（in Chinese）

[6] PASSEGA R. Texture as characteristic of clastic deposition[J]. AAPG Bulletin, 1957, 41(9): 152-1984.

[7] PASSEGA R. Grain size representation by CM patterns as a geologic tool[J]. Journal of Sedimentary Research, 1964, 34(4): 830-847.

[8] PASSEGA R. Sediment sorting related to basin mobility and environment[J]. AAPG Bulletin, 1972, 56(12): 2440-2450.

[9] PASSEGA R. Significance of CM diagrams of sediments deposited by suspensions[J]. Sedimentology, 1977, 24(5): 723-733.

[10] 葛东升，刘玉明，柳雪青，等. 粒度分析在致密砂岩储层及沉积环境评价中的应用 [J]. 特种油气藏，2018，25(1)：41-45.
GE D S, LIU Y M, LIU X Q, et al. Application of grain size analysis in tight sandstone reservoir and sedimentary environment evaluation[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(1): 41-45.（in Chinese with English abstract）

[11] DAWELBEIT A, JAILLARD E, EISAWI A. Grain size analysis of the Latest Quaternary Kordofan sand of Central Sudan: Depositional environment and mode of transportation[J]. Aeolian Research, 2022, 55: 100785.

[12] WIDED S, JALILA S, KAMEL R. Grain size analysis and charac-

terization of sedimentary environment along the Bizerte Coast, N-E of Tunisia[J]. Journal of African Earth Sciences, 2021, 184: 104353.

[13] 陈欢庆, 舒治睿, 林春燕, 等. 粒度分析在砾岩储层沉积环境研究中的应用: 以准噶尔盆地西北缘某区克下组冲积扇储层为例 [J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2014, 29(6): 6-12.
CHEN H Q, SHU Z R, LIN C Y, et al. Application of grain-size analysis in research of sedimentary environment of conglomerate reservoir: Taking alluvial fan reservoir in the lower member of Kelamayi Formation in some area of the northwestern margin of Zhunger Basin as an example[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2014, 29(6): 6-12. (in Chinese with English abstract)

[14] 刘宏坤, 艾勇, 王贵文, 等. 深层、超深层致密砂岩储层成岩相测井定量评价: 以库车坳陷博孜-大北地区为例 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(1): 299-310.
LIU H K, AI Y, WANG G W, et al. Quantitative well logging evaluation of diagenetic facies of deep and ultra deep tight sandstone reservoirs: A case study of Bozi-Dabei area in Kuqa Depression[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(1): 299-310. (in Chinese with English abstract)

[15] 康积伦, 王家豪, 马强, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组细粒湖底扇沉积及其页岩油储层意义 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 82-93.
KANG J L, WANG J H, MA Q, et al. Fine-grained sublacustrine fan deposits and their significance in shale oil reservoirs in the Lucaogou Formation in the Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 82-93. (in Chinese with English abstract)

[16] 赵军, 代新雲, 古莉, 等. 基于粒度控制的复杂储层渗透性建模方法 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(1): 279-285.
ZHAO J, DAI X Y, GU L, et al. Method of permeability model establishment based on the complex reservoir controlled by particle-size[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(1): 279-285. (in Chinese with English abstract)

[17] 陶文芳, 葛家旺, 雷永昌, 等. 转换斜坡型辫状河三角洲沉积特征: 以珠江口盆地惠州凹陷始新统为例 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 103-114.
TAO W F, GE J W, LEI Y C, et al. Depositional characteristics of a relay ramp controlled braided deltaic system: A case study in the Eocene Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin, China[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 103-114. (in Chinese with English abstract)

[18] 潘保芝, 房春慧, 郭宇航, 等. 基于岩石物理转换模型的苏里格致密砂岩储层测井评价与产能预测 [J]. 地球物理学报, 2018, 61(12): 5115-5124.
PAN B Z, FANG C H, GUO Y H, et al. Logging evaluation and productivity prediction of Sulige tight sandstone reservoirs based on petrophysics transformation models[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(12): 5115-5124. (in Chinese with English abstract)

[19] 谢晓庆, 吴伟, 程亮, 等. 粒度分析在复杂岩性储层渗透率建模中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2022, 19(3): 310-315.
XIE X Q, WU W, CHENG L, et al. Application of granularity analysis in permeability modeling of complex lithologic reservoir[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2022, 19(3): 310-315. (in Chinese with English abstract)

[20] 罗利, 朱心万, 常俊, 等. 苏5、桃7区块不同粒度碎屑岩测井识别方法 [J]. 天然气工业, 2007, 27(12): 36-38.
LUO L, ZHU X W, CHANG J, et al. Logging recognition methods for clastic rocks with different granularities in blocks Su-5 and Tao-7[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(12): 36-38. (in Chinese with English abstract)

[21] 戴建, 张平. 几种沉积物图解法与矩值法粒度参数的对比研究及其意义 [J]. 地质学刊, 2017, 41(2): 239-244.
DAI J, ZHANG P. Comparison and its significance of grain-size parameters of several sediments with graphic method and moment method[J]. Journal of Geology, 2017, 41(2): 239-244. (in Chinese with English abstract)

[22] DJEBBAR T, ERLE C D. 岩石物理学 [M]. 胡法龙, 李潮流, 李霞, 等译.北京: 石油工业出版社, 2016.
DJEBBAR T, ERLE C D. Petrophysics[M]. Translated by HU F L, LI C L, LI X, et al, Beijing: Petroleum Industry Press, 2016. (in Chinese)

[23] 胡松, 张超谟, 胡瑶, 等. 基于主成分分析的砂砾岩储层孔隙度计算方法研究 [J]. 石油天然气学报, 2010, 32(3): 100-104.
HU S, ZHANG C M, HU Y, et al. Method of porosity calculation of glutenite rocks based on principal component analysis[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(3): 100-104. (in Chinese with English abstract)

[24] 申波, 毛志强, 樊海涛, 等. 基于主成分分析技术计算蚀变地层孔隙度的新方法 [J]. 测井技术, 2012, 36(2): 130-134.
SHEN B, MAO Z Q, FAN H T, et al. A new porosity calculation method based on principal component analytical technology for altered formation[J]. Well Logging Technology, 2012, 36(2): 130-134. (in Chinese with English abstract)

[25] 毛志强, 李进福. 油气层产能预测方法及模型 [J]. 石油学报, 2000, 21(5): 58-61.
MAO Z Q, LI J F. Method and models for productivity prediction of hydrocarbon reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(5): 58-61. (in Chinese with English abstract)

[26] 王跃祥, 牟瑜, 谢冰, 等. 川中地区沙溪庙组致密砂岩含气性测井评价技术 [J]. 测井技术, 2023, 47(1): 42-47.
WANG Y X, MU Y, XIE B, et al. Gas-bearing properties log evaluation technique for tight sandstone of shaximiao formation in the central region of Sichuan Basin[J]. Well Logging Technology, 2023, 47(1): 42-47. (in Chinese with English abstract)

[27] 杨雨, 谢继容, 曹正林, 等. 四川盆地天府气田沙溪庙组大型致密砂岩气藏形成条件及勘探开发关键技术 [J]. 石油学报, 2023, 44(6): 917-932.
YANG Y, XIE J R, CAO Z L, et al. Forming conditions and key technologies for exploration and development oflarge tight sandstone gas reservoirs in Shaximiao Formation, Tianfu gas field of Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(6): 917-932. (in Chinese)

[28] 王跃祥, 赵佐安, 唐玉林, 等. 基于知识驱动图版约束的致密砂岩

气储层测井参数智能预测 [J]. 天然气工业, 2024, 44(9): 68-76.
WANG Y X, ZHAO Z A, TANG Y L, et al. Intelligent prediction of logging parameters of tight sandstone gas reservoirs based on knowledge-driven chart constraints[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(9): 68-76. (in Chinese with English abstract)

[29] 王力, 刘岩, 曹茜, 等. 四川盆地中部须家河组致密砂岩储层孔喉结构分类评价 [J]. 东北石油大学学报, 2024, 48(4): 41-53.
WANG L, LIU Y, CAO Q, et al. Classification and evaluation of pore throat structure in tight sandstone reservoirs of the Xujiahe Formation in the central Sichuan Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2024, 48(4): 41-53. (in Chinese with English abstract)

[30] 戴金星, 董大忠, 倪云燕, 等. 致密砂岩气藏与页岩气藏展布模式 [J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 667-678.
DAI J X, DONG D Z, NI Y Y, et al. Distribution patterns of tight sandstone gas and shale gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 667-678. (in Chinese with English abstract)

[31] 夏小勇, 王跃祥, 谢冰, 等. 阵列声波测井在致密砂岩气藏含气性评价中的应用 [J]. 天然气勘探与开发, 2024, 47(3): 77-84.
XIA X Y, WANG Y X, XIE B, et al. Array acoustic logging to evaluate gas-bearing property in tight sandstone gas reservoirs[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2024, 47(3): 77-84. (in Chinese with English abstract)

[32] 汪忠浩, 李森, 汤翟, 等. 基于储层分类的特低渗砂岩储层渗透率模型研究 [J/OL]. 长江大学学报(自然科学版), 2024: 1-12. (2024-03-20). https: //link. cnki. net/doi/10.16772/j. cnki. 1673-1409.20240320. 001.
WANG Z H, LI S, TANG Z, et al. Study on permeability model of ultra-low permeability sandstone reservoir based on reservoir classification[J/OL]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2024: 1-12. (2024-03-20). https: //link.cnki.net/doi/10.16772/j.cnki.1673-1409.20240320.001. (in Chinese with English abstract)

[33] 肖曦, 王志红, 叶云飞, 等. 致密砂岩储层孔隙度预测方法研究 [J]. 地球物理学进展, 2024, 39(4): 1597-1606.
XIAO X, WANG Z H, YE Y F, et al. Novel porosity prediction method for tight sandstone reservoirs: A case study of member of He8, Ordos Basin, Northern China[J]. Progress in Geophysics, 2024, 39(4): 1597-1606. (in Chinese with English abstract)

[34] 陈少云, 杨勇强, 邱隆伟, 等. 致密砂岩孔喉结构分析与渗透率预测方法: 以川中地区侏罗系沙溪庙组为例 [J]. 石油实验地质, 2024, 46(1): 202-214.
CHEN S Y, YANG Y Q, QIU L W, et al. Pore throat structure analysis and permeability prediction method of tight sandstone: A case study of Jurassic Shaximiao Formation in central Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(1): 202-214. (in Chinese with English abstract)

[35] 李朋威, 胡宗全, 刘忠群, 等. 川西新场地区须二段深层致密砂岩储层类型与差异控储作用 [J]. 天然气地球科学, 2024, 35(7): 1136-1149.
LI P W, HU Z Q, LIU Z Q, et al. Types of the deep tight sandstone reservoirs and their different controlling in the second member of Xujiahe Formation in Xinchang area, western Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(7): 1136-1149. (in Chinese with English abstract)

[36] 刘君毅, 冯进, 管耀, 等. 基于改进电成像孔隙度谱的海洋低孔低渗砂岩渗透率评价方法 [J]. 测井技术, 2023, 47(6): 746-752.
LIU J Y, FENG J, GUAN Y, et al. Permeability evaluation method for marine low porosity and permeability sandstone based on improved electrical imaging porosity spectrum[J]. Well Logging Technology, 2023, 47(6): 746-752. (in Chinese with English abstract)

[37] 皮伟, 陈敬轶. 鄂尔多斯盆地北部致密砂岩储层特征及测井识别 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(31): 13265-13272.
PI W, CHEN J Y. Characteristics of tight sandstone reservoirs and logging identification in the northern Ordos Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(31): 13265-13272. (in Chinese with English abstract)

[38] 王道伸, 辛红刚, 蒽克来, 等. 致密砂岩储层孔喉结构特征及其对含油性的控制作用: 以鄂尔多斯盆地志靖—安塞地区延长组 8 段为例 [J]. 天然气地球科学, 2024, 35(4): 623-634.
WANG D S, XIN H G, XI K L, et al. Characteristics of pore throat structure and its control on oiliness in tight sandstone reservoirs: Case study of the 8th member of Yanchang Formation in Zhijing-Ansai area, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(4): 623-634. (in Chinese with English abstract)

[39] 甯波, 任大忠, 王虎, 等. 致密砂岩气藏微观孔隙结构多尺度联合表征 [J]. 断块油气田, 2024, 31(1): 34-41.
NING B, REN D Z, WANG H, et al. Multi-scale combination characterization of micropore structure of tight sandstone gas reservoirs[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2024, 31(1): 34-41. (in Chinese)

[40] 赵振, 刘震, 何发岐, 等. 鄂尔多斯盆地北部盒 1 段致密砂岩储层动态评价 [J]. 天然气地球科学, 2024, 35(3): 449-464.
ZHAO Z, LIU Z, HE F Q, et al. Dynamic evaluation of tight sandstone reservoir in the He_1 member, northern Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(3): 449-464. (in Chinese with English abstract)

[41] 王清辉, 朱明, 冯进, 等. 基于渗透率合成技术的砂岩油藏产能预测方法 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(6): 105-112.
WANG Q H, ZHU M, FENG J, et al. A method for predicting productivity of sandstone reservoirs based on permeability synthesis technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(6): 105-112. (in Chinese with English abstract)

[42] 范宜仁, 宋岩, 张海涛, 等. 低渗透致密砂岩气层产能预测方法研究 [J]. 测井技术, 2016, 40(5): 602-608.
FAN Y R, SONG Y, ZHANG H T, et al. Capacity prediction methods of tight gas sandstone reservoir with low permeability[J]. Well Logging Technology, 2016, 40(5): 602-608. (in Chinese with English abstract)

Summary for “致密砂岩碎屑颗粒粒度定量表征及对产能的指示意义”

Quantitative characterization of the clastic particle size of tight sandstone and its indicative significance for productivity

YAO Menglin[1], TAO Yunhe[2], HE Hongju[2], HOU Kejun[3], LIU Haijun[2], XIONG Yu[2], ZHANG Chong[4*]

1. CCDC External Cooperation & Department, Chengdu 610051, China;
2. Southwest Branch, China National Logging Corporation, Chongqing 400021, China;
3. PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610051, China;
4. Geophysics and Oil Resource Institute, Yangtze University, Wuhan 430100 , China

First author, Email: yaoml_dyy@cnpc.com.cn

* Corresponding author, E-mail: yzlogging@163.com

Abstract: [**Objective**] Particle size analysis is important for the evaluation of clastic petroleum reservoirs because it can identify the stratigraphic depositional environment and assess the permeability of reservoirs. [**Methods**] Using the dense sandstone reservoir of the Shaximiao Formation in the Tianfu Gas Field in the Sichuan Basin as the research object, we first analyzed the influence of the particle size and shape on the permeability of the clastic rock reservoir. Next, we combined the median and *C* values of the particle size and the sorting coefficient to perform a comprehensive characterization of the particle size indicator parameter (*PI*). Additionally, we carried out a principal component analysis on the natural gamma-ray logging value, photoelectric absorption cross-section index, and neutron porosity, which are more sensitive to particle size. An exponential relationship model between the PI and the principal component parameter was established. Finally, the correlation between PI and reservoir production capacity was analyzed by combining the Oil test and logging data. [**Results**] The statistics of 8 test gas sections from 7 wells in the Shaximiao Formation of Tianfu Gas Field were collected, and the *PI* values of 7 wells were calculated using the above method. The response relationship between the unimpeded flow rate and the *PI* was analyzed in the test sections, and the results revealed that the unimpeded flow rate and the cumulative *PI* values in the Shaximiao Formation exhibited an exponential relationship, with a correlation coefficient of 0.85. [**Conclusion**] This study reveals that, for reservoirs whose lithology is dominated by medium- to fine-grained sandstone, with large variations in grain size, and with storage space dominated by residual intergranular pores, the *PI* can, to some extent, serve as an indicator of the production capacity of this type of reservoir.

Key words: particle size parameter; particle size analysis; well log; productivity; Shaximiao Formation; Tianfu gas field in the Sichuan Basin; tight sandstone; clastic particle

Received: 2023-10-20; Revised: 2024-02-23; Accepted: 2024-02-26

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230582