

梁玉楠,钟华明,骆玉虎,等.珠江口盆地低阻低渗储层测井渗透率预测方法及应用[J].海洋地质前沿,2019,35(11):28-34.

# 珠江口盆地低阻低渗储层测井渗透率预测方法及应用

梁玉楠,钟华明,骆玉虎,肖大志,吴一雄

(中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东湛江 524057)

**摘要:**为了解决南海西部海域珠江口盆地低阻低渗油藏渗透率评价的难题,详实调研了国内外低阻低渗储层的成因,在此基础上深入分析了珠江口盆地低阻低渗储层渗透率的影响因素。研究表明,孔喉半径是导致渗透率差异大的主要原因。基于岩心资料,采用 FZI 法将研究区储层划分为 6 类流动单元,通过建立每一类流动单元的精细渗透率模型求取低阻低渗储层渗透率参数。结果表明,使用流动单元渗透率模型能够有效提高渗透率计算的精度,目前该方法已在南海西部海域各区域推广应用。

**关键词:**低阻低渗储层;孔喉半径;流动单元;渗透率预测;珠江口盆地

中图分类号:P631.8

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2019.11005

## 0 引言

储层渗透率是反映储层孔隙结构复杂程度的重要参数,也是影响动态预测指标最重要的参数之一,直接影响油气层的测井评价。渗透率的解释精度是油藏描述和剩余油定量描述的关键,所以准确提供储层渗透率参数,对于提高测井解释评价水平以及石油的勘探开发有十分重要的意义。一直以来,渗透率都是国内外石油工作者关注和致力解决的重要研究课题。渗透率指示了储层的渗流能力,直接决定了储层流体的产出能力,是储层综合等级评价的一个关键参数<sup>[1,2]</sup>。储层渗透率大小受孔隙度、岩性、胶结物含量以及成分等各方面因素的影响,特别是在低渗储层中,这些因素都对储层渗透率起作用,使得低渗储层渗透率精确评价异常困难,一般得到的结果精度不高,

很难符合实际地层评价的要求,因此,有必要对渗透率进行精细研究。

## 1 区域背景和低渗储层渗透率的特征

珠江口盆地位于南海北部、海南岛和台湾岛之间,呈 NE 走向,盆地内坳陷相间呈带状分布,自北向南依次为海南隆起、珠三坳陷和神狐隆起(图 1)。

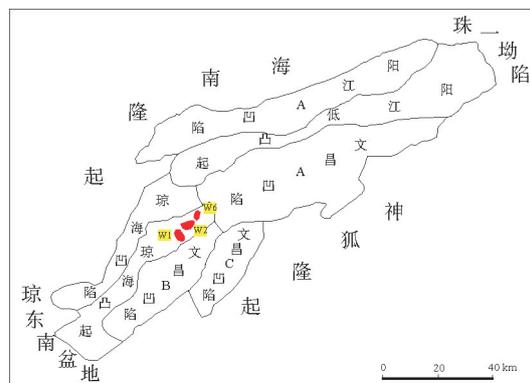


图 1 珠江口盆地构造单元划分及位置

Fig.1 Tectonic and location map of Pearl River Estuary Basin

收稿日期:2018-09-27

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05024-006)

作者简介:梁玉楠(1986—),男,硕士,工程师,主要从事测井解释评价和岩石物理等方面的研究工作.Email:liangyn@cnooc.com.cn

目前,在珠江口盆地珠江组一段上部发现的大量低阻油层,图 2 是珠江口盆地低阻油层测井响应特征图,1 085~1 020 m 为低阻油层,其岩性主要以油斑、油浸粉砂岩、泥质粉砂岩为主,泥质含量平均在 20%以上,物性较差,气测有较明显异常显示,电阻率分布在 1.1~2.0 Ω·m;1 180~1 184 m 为高阻油层,其电阻率 > 2.0 Ω·m;1 184~1 190 m 为典型水层,其电阻率 < 1.1 Ω·m,低阻油层与相邻泥岩和水层电阻率相近。前人使用了大量方法对该地区的低阻油层流体性质进行识别评价<sup>[3-5]</sup>,达到了很好的效果。

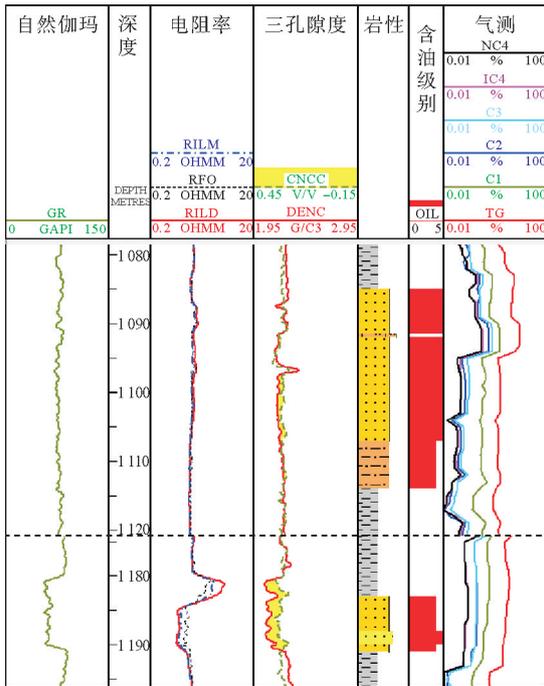


图 2 珠江口盆地低阻油层测井响应特征

Fig.2 Log response of low-resistivity reservoirs in Pearl River Estuary Basin

低阻油层的成因是岩性细、泥质重、黏土矿物以伊蒙混层为主、高束缚水饱和度、高矿化度<sup>[6]</sup>;这些地质因素造成油层低阻的同时,也造成了储层的渗透性差,统计表明,珠江口盆地低阻油层的渗透率主要分布在 5~50 mD 之间,频率主峰在 10 mD(图 3),储层特征表现为低渗、特低渗。

图 4 为珠江口盆地覆压孔隙度与渗透率关系图,蓝色点型数据点为高渗储层岩心数据,黄色圆形数据点为低渗储层岩心数据,渗透率与孔隙度

具有一定的关系,随着孔隙度增大,渗透率增加。但是在同样的孔隙度下,低渗储层的渗透率变化范围较大,当孔隙度为 25%时,渗透率跨度超过了两个数量级,若是采用统一区域公式求取渗透率,由测井资料计算的低渗储层渗透率偏高,误差较大。目前,海上油气田勘探开发费用较为昂贵,地层测试资料较少,开发阶段的配产主要是由测井渗透率计算,渗透率的计算精度对油田开发实施非常重要。

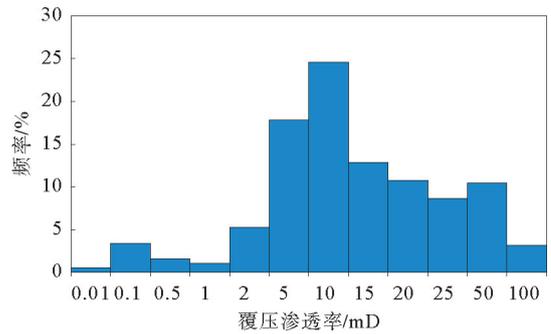


图 3 珠江口盆地低阻油层岩心覆压渗透率频率直方图

Fig.3 Overpressure permeability histogram of low resistivity reservoirs in Pearl River Estuary Basin

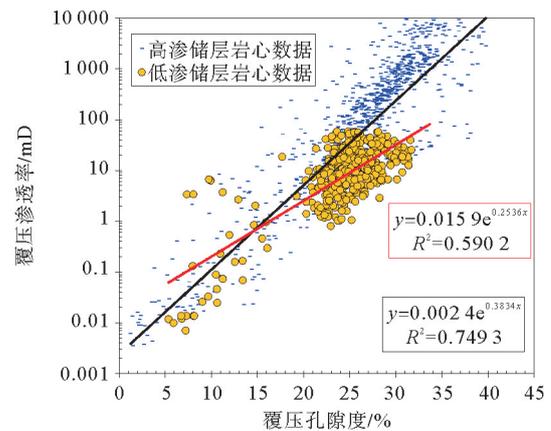


图 4 珠江口盆地覆压孔隙度与覆压渗透率关系

Fig.4 The relationship between overpressure porosity and overpressure permeability

## 2 低阻低渗储层渗透率的主控因素

### 2.1 泥质含量

首先,使用粒度资料研究泥质含量对渗透率的影响。将碎屑粒径 < 0.003 9 mm 作为黏土的

划分标准<sup>[7]</sup>,使用该标准对3口井低阻低渗储层粒度资料进行处理,得到黏土含量与覆压渗透率的关系,如图5所示,低渗储层渗透率随黏土含量增加而减小;但黏土含量与渗透率相关性较差,虽与渗透率有一定关系,但并不是影响渗透率的主要因素。

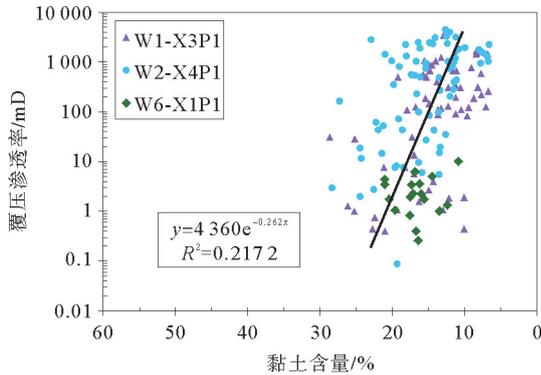


图5 黏土含量与覆压渗透率关系图

Fig.5 The relationship of the clay content and the overpressure permeability

### 2.2 束缚水饱和度

为了研究束缚水饱和度对渗透率的影响因素,选取了毛管压力曲线确定储层的束缚水饱和度。根据文献和工作经验,孔隙半径为0.1 μm为油气能够进入孔隙的最小孔喉半径,通常取此值对应的润相饱和度作为实验室确定束缚水饱和度。使用该标准对3口井低阻低渗储层毛管压力资料进行处理,得到束缚水饱和度与覆压渗透率的关系,如图6所示,低渗储层渗透率随束缚水饱和度

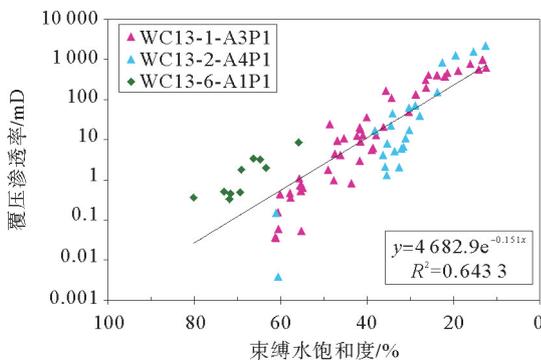


图6 束缚水饱和度与覆压渗透率关系图

Fig.6 The relationship of the irreducible water saturation with the overpressure permeability

度的增加而减小;但束缚水饱和度与渗透率相关性一般,并不是影响渗透率的主要因素。

### 2.3 孔喉半径

为了研究孔喉半径对渗透率的影响因素,选取了相似孔隙度、不同孔喉半径的岩心资料观察渗透率的变化情况。表1中两块岩心的孔隙度为27.8%和27.7%,非常接近,但渗透率分别为23.2 mD和209 mD,差异非常大。这两块岩心孔喉均值分别为1.556 μm和5.862 μm。相同孔隙度而渗透率相差两个数量级,孔喉分布不同是渗透率差异大的原因。

表1 相同孔隙、不同孔喉半径两块岩心物性参数对比

Table 1 Comparison of two cores with the same porosity and different pore throat radius

井名	深度/m	孔隙度/%	渗透率/mD	孔喉均值/μm
X1P1	1 387.32	27.8	23.2	1.556
X3P1	1 490.55	27.7	209	5.862

使用3口井的低渗储层岩心压汞资料做孔喉均值和渗透率交会图(如图7),发现渗透率-孔喉半径相关性要比渗透率-孔隙度、渗透率-泥质含量、渗透率-束缚水饱和度改善很多,证明了孔喉半径是渗透率最重要的影响因素。

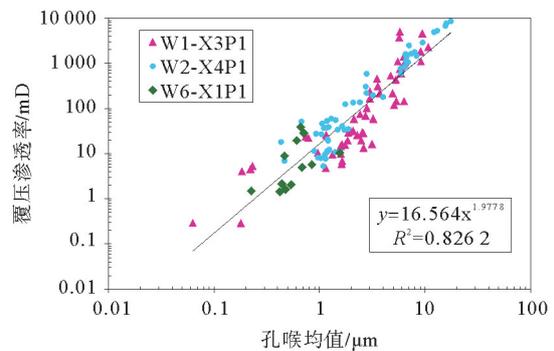


图7 低渗储层孔喉均值和渗透率交会图

Fig.7 Cross plot of pore throat and permeability in low-permeability reservoirs

## 3 流动单元划分的原理

流动单元受储集层矿物成分和结构控制,常

根据孔喉特征把厚层划分为不同流动单元。根据渗流力学原理,利用平均流动单元半径,可以把流动单元和孔隙度、渗透率联系在一起<sup>[8-10]</sup>,它们的关系为:

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

式中:K 为渗透率,mD;

$\varphi_e$  为有效孔隙度,小数;

$F_s$  为形状系数;

$\tau$  为孔隙介质的迂回度;

$S_{gv}$  为单位颗粒体积的表面积。

$F_s \tau^2$  习惯上称为 Kozeny 常数,是一个变常数,在流动单元之间是变化的,但在某个流动单元内部是常数,实际储集层在 5~100 范围取值,定义如下参数表征流动单元的特征。

储层品质因子:

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

标准化孔隙度指数:

$$\varphi_z = \frac{\varphi_e}{1-\varphi_e} \quad (3)$$

流动单元指数:

$$FZI = \frac{1}{\sqrt{F_s \tau S_{gv}}} = \frac{RQI}{\varphi_z} \quad (4)$$

FZI 能综合反映岩石的结构和成分等地质特征,是划分厚层中流动单元的唯一参数,FZI 值相同的样品孔喉特征相同,属于同一流动单元。应用传统的统计技术如聚类分析、频率-直方图等,可以划分不同的流动单元,并得到相应的 FZI 指标值<sup>[11-14]</sup>。

## 4 渗透率模型的建立与应用

### 4.1 渗透率模型的建立

利用 FZI、K 和  $\varphi_e$  3 个参数,通过聚类分析确定岩心井流动单元划分标准。通过研究发现,采取系统聚类分析中完全连接规则下的马氏距离法聚类的效果最好,类间距的计算采用类平均法的效果最好。最终,以 FZI 值分别为 0.4、0.7、1.5、3.4 和 5.08 将珠江口盆地的岩心数据划分为 6 种流动单元(图 8)。

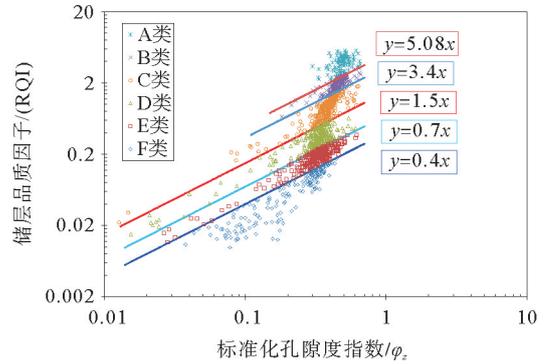


图 8 珠江口盆地岩心数据流动单元划分

Fig.8 Core data defined flow units in Pearl River Estuary Basin

不同流动单元的有效孔隙度与渗透率关系如图 9 所示,该方法将岩心数据细分,渗透率计算的精度更高,误差更小。式(5)-(10)是 A 类至 F 类流动单元的覆压孔渗关系:

$$K = 0.095 * POR^{3.0948} \quad (5)$$

$$K = 0.0016 * POR^{3.9141} \quad (6)$$

$$K = 0.0012 * POR^{3.6599} \quad (7)$$

$$K = 0.0008 * POR^{3.2191} \quad (8)$$

$$K = 0.0001 * POR^{3.4848} \quad (9)$$

$$K = 0.00001 * POR^{3.8755} \quad (10)$$

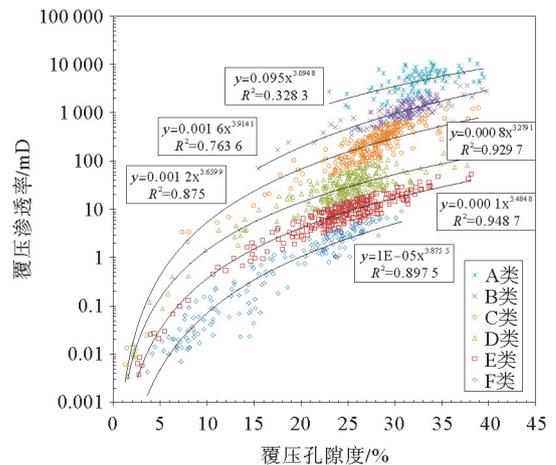


图 9 珠江口盆地不同流动单元有效孔隙度与渗透率分布

Fig.9 Effective porosity and permeability distribution map of different flow unit of in Pearl River Estuary Basin

流动单元划分后,基于聚类分析的思想,使用最能反映岩石岩性和物性的密度、声波和泥质含量曲线,在测井曲线归一化后,使用 Fisher 线性

判别方法建立了常规测井曲线与流动单元指数的关系,可以得到6类不同流动单元的判别模型,判别函数分别为:

$$I_a = 142.02\Delta DEN + 168.14\Delta DT - 0.617\Delta VSH - 87.25 \quad (11)$$

$$I_b = 130.54\Delta DEN + 164.22\Delta DT + 0.541\Delta VSH - 80.54 \quad (12)$$

$$I_c = 126.63\Delta DEN + 160.24\Delta DT + 1.784\Delta VSH - 76.97 \quad (13)$$

$$I_d = 121.87\Delta DEN + 158.12\Delta DT - 1.563\Delta VSH - 71.65 \quad (14)$$

$$I_e = 113.52\Delta DEN + 155.56\Delta DT - 4.882\Delta VSH - 65.85 \quad (15)$$

$$I_f = 105.63\Delta DEN + 153.75\Delta DT - 5.619\Delta VSH - 61.74 \quad (16)$$

使用实际井的测井数据带入式(11)-(16)进

行计算,该深度的流动单元类别为其中计算得到的最大值所代表的类别;然后在根据式(5)-(10)计算不同流动单元的渗透率,由此将渗透率的计算从取心井段推广到非取心井段。

### 4.2 实际应用

利用上述方法对珠江口盆地的低阻油层进行处理评价,结果如图10所示。第七道为渗透率道,蓝色实线(PERM\_FZI)为流动单元模型渗透率,黑色实线(PERM\_QY)为传统模型渗透率,红色圆点为岩心分析渗透率;第八道为流动单元类别道,低阻油层主要以D、E类流动单元为主。从图上可以看到,传统模型计算的渗透率整体上较岩心分析渗透率偏大,而流动单元模型计算的渗透率与岩心分析渗透率吻合较好。由此可见,流动单元模型渗透率可以显著的提高渗透率的计算精度。

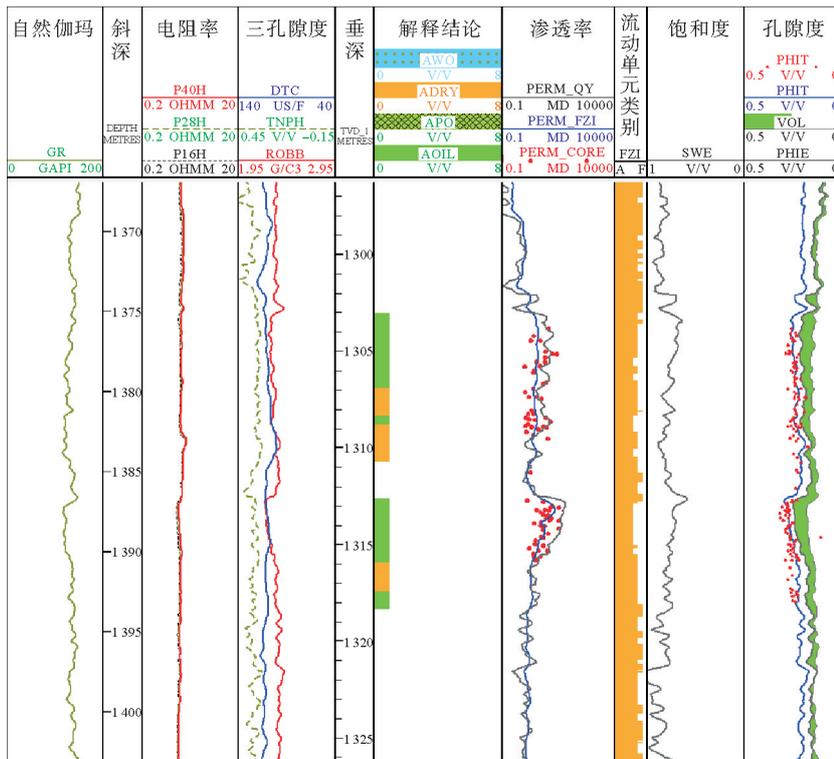


图 10 X1P1 井低渗储层渗透率评价成果

Fig.10 Permeability evaluation of low permeability reservoirs in well X3P1

通过对比低阻低渗储层的流动单元渗透率、传统模型渗透率和岩心渗透率的差异,发现流动单元渗透率与岩心渗透率的相对误差为49%(图11),而传统模型渗透率结果与岩心的相对误差为

98%(图12),该方法显著提高了渗透率的计算精度。从而进一步证实了流动单元渗透率模型具有一定的适用性。

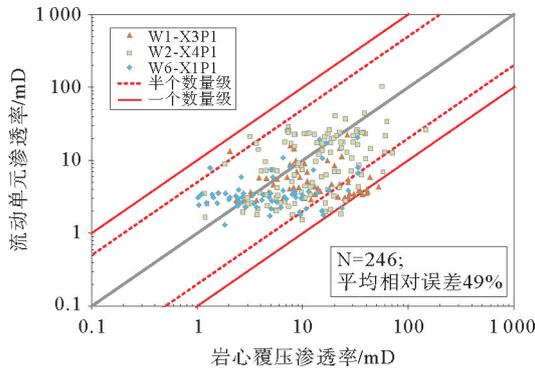


图 11 流动单元模型渗透率误差分析

Fig.11 Error analysis of flow unit permeability

利用建立的渗透率模型,对该 X1P1 所在的 W6 油田已钻 10 口开发井进行了渗透率评价处理。该油田主要目的层 A 油组在平面上可分为南块和北块,在纵向上可分为 3 个小层(A1、A2、A3)。统计了该油田每一口井 3 个小层的渗透率(图13),从图上可以看到,南块的渗透率要好于

北块,北块的渗透率普遍 $< 20$  mD;3 个小层中以第 2 小层的渗透率最好,南块第 2 小层的渗透率最好,分布在 40~50 mD。通过此研究工作,指导后续开发井针对该油田南块 A2 小层进行开发生产。

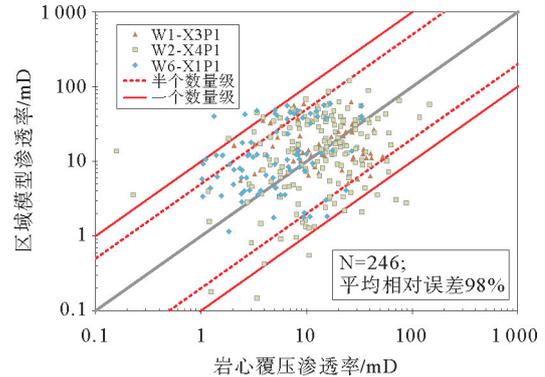


图 12 传统模型渗透率误差分析

Fig.12 Error analysis of regional model permeability

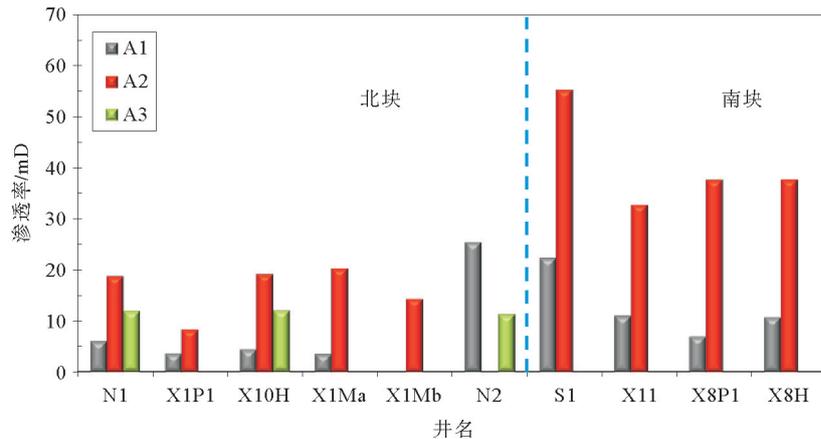


图 13 珠江口盆地 W6 油田 A 油组小层渗透率对比

Fig.13 Permeability correlation for layer A in W6 oilfield

## 5 结论

(1)珠江口盆地低阻低渗储层渗透率偏低与高泥质含量、高束缚水饱和度和孔喉半径较小都有一定的关系,但关键因素是孔喉半径小。

(2)对于低阻低渗储层,同一孔隙度值下的渗透率级差大,已经无法用传统方法建立渗透率模型,或者建立的模型无法满足储层评价的精度要求。以流动单元指数对储层进行分类,再分别建

立渗透率模型,能够有解决这一难题,有效的提高渗透率预测的精度。

### 参考文献:

- [1] 雍世和,张超谟.测井数据处理与综合解释[M].东营:石油大学出版社,1996.
- [2] 欧阳健.石油测井解释与储层描述[M].北京:石油工业出版社,1994.
- [3] 吴健,胡向阳,梁玉楠,等.珠江口盆地低阻油层饱和度评价方法[J].吉林大学学报(地球科学版),2015,45(1):312-319.

- [4] 胡向阳, 吴健, 梁玉楠, 等. 珠江口盆地低阻油层测井综合识别方法研究[J]. 科学通报, 2016, 32(2): 77-81.
- [5] 陈嵘, 李奎, 何胜林, 等. 珠江口盆地文昌地区珠江组一段低阻成因分析与饱和度评价[J]. 岩性油气藏, 2014, 26(5): 97-101.
- [6] 居字龙, 唐辉, 刘伟新, 等. 珠江口盆地高束缚水饱和度成因低阻油层地质控制因素及分布规律差异[J]. 中国海上油气, 2016, 28(1): 60-68.
- [7] 王允诚. 油层物理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- [8] Hearn C L, Ebanks W J, Ranganath V. Geological Factors Influencing Reservoir Performance of the Hartzog Draw Field, Wyoming[J]. Journal of Petroleum Technology, 1984, 36(8): 1335-1344.
- [9] Hamlin H S, Dutton S P, Seggie R J, et al. Depositional controls on reservoir properties in a braid-delta sandstone, Tirrawarra Oil Field, South Australia[J]. Aapg Bulletin American Association of Petroleum Geologists, 1996, 80(2): 139-156.
- [10] 王瑞飞, 宋子齐, 尤小健, 等. 流动单元划分及在地质中的应用[J]. 测井技术, 2003, 27(6): 481-485.
- [11] 杨爱东, 单立群, 刘彦昌, 等. 基于 WT 与 LSSVM 的储层流动单元划分方法[J]. 测井技术, 2017, 41(2): 237-242.
- [12] 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.
- [13] 熊琦华, 吴胜和. 储层地质学[M]. 东营: 石油大学出版社, 1994.
- [14] 窦之林. 储层流动单元研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.

## APPLICATION OF PERMEABILITY PREDICTION METHOD TO LOW-RESISTIVITY AND LOW-PERMEABILITY RESERVOIRS IN PEARL RIVER ESTUARY BASIN

LIANG Yunan, ZHONG Huaming, LUO Yuhu, XIAO Dazhi, WU Yixiong  
(Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang 524057, Guangdong, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of permeability evaluation for low-resistivity and low-permeability reservoirs in the Pearl River Estuary Basin in the western South China Sea, this paper made a detailed investigation on the origin of the low-resistivity and low-permeability reservoirs both at home and abroad, and deeply analyzed the influencing factors on reservoir permeability. The results show that the radius of pore throat is the main reason for the great difference in permeability from reservoir to reservoir. Based on core data, reservoirs are divided into six types by *FZI* method in this case. The permeability of low-resistivity and low-permeability reservoirs is calculated by establishing fine permeability models for each type of flow units. The results prove that the flow unit permeability model can effectively improve the accuracy of permeability calculation, and this method has been widely used in the Western South China Sea.

**Key words:** low-resistivity and low-permeability reservoir; pore throat radius; flow unit; permeability prediction; Pearl River Estuary Basin