

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2021.02.010

基于岩石物理相的复杂砂岩储层分类评价 ——以珠江口盆地惠州凹陷为例

刘君毅 王清辉 冯进 管耀 杨清

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司)

摘要: 珠江口盆地惠州凹陷珠江组 and 珠海组沉积时期, 由于母岩类型和沉积环境等因素的影响, 目的层发育多种类型中低渗砂岩储层, 不同类型砂岩储层的孔隙结构、渗流性能和岩电规律差异显著, 传统分区分层位建模的方法存在模型选择针对性不强、解释精度偏低等生产难题。为提高储层参数解释精度, 文章从岩石物理相分类入手, 基于岩心资料优选粒度均值、矿物含量、孔隙度、渗透率和孔隙结构特征参数表征储层的岩石物理特征, 将储层分为长石石英中—细砂岩相、含黏土长石石英细砂岩相、含黏土长石石英粉砂岩相及钙质石英中—细砂岩相4类岩石物理相。进一步根据不同岩石物理相的测井响应特征提取敏感曲线, 用判别分析方法建立不同类型岩石物理相的测井识别标准。在此基础上, 利用实验数据刻度建立每一类岩石物理相的储层参数精细解释模型。实际应用效果表明, 基于岩石物理相分类的方法, 孔隙度、渗透率及含水饱和度的计算精度较传统方法得到明显提高, 满足储量计算的要求, 新井的测井解释结论与DST测试结果吻合良好。

关键词: 岩石物理相; 储层参数; 解释模型; 惠州凹陷; 珠江组; 珠海组

中图分类号: P631.84 **文献标识码:** A

Complex sandstone reservoirs evaluation based on petrophysical facies classification: a case study of Huizhou Sag in the Pearl River Mouth Basin

Liu Junyi, Wang Qinghui, Feng Jin, Guan Yao, Yang Qing

(Shenzhen Branch of CNOOC (China) Co., Ltd.)

Abstract: During the deposition period of Zhujiang and Zhuhai Formations in Huizhou Sag of the Pearl River Mouth Basin, several types of low and medium permeability sandstone reservoirs were developed in the target layer due to the influence of mother rock types and sedimentary environment. The pore structure, flow capacity and rock electricity law are significantly different of different types of reservoir. The traditional zoning and layered method has application problems such as poor pertinence of selected model and low interpretation accuracy. In order to improve the interpretation accuracy of reservoir parameters, this paper starts with the reservoir classification by petrophysical facies. Based on the core data, parameters of the average grain size, mineral content, porosity, permeability and pore structure are optimally selected to characterize the reservoir petrophysical properties. The reservoir is accordingly divided into four petrophysical facies: feldspar quartz medium-fine sandstone facies, clayey feldspar quartz fine sandstone facies, clayey feldspar quartz siltstone facies and calcareous quartz medium-fine sandstone facies. Furthermore, sensitive log curves are extracted according to the logging response characteristics of different petrophysical facies, and the logging identification criteria for different types of petrophysical facies are established using discriminant analysis method. On this basis, the fine interpretation model of reservoir parameters for each type of petrophysical facies is established and calibrated by experimental data. The practical application results show that the calculation accuracy of porosity, permeability and water saturation based on the method of petrophysical facies classification is significantly improved compared with the traditional method, which meets the requirements of reserves calculation, and the logging interpretation conclusion is in good agreement with the DST test result for new wells.

Key words: petrophysical facies, reservoir parameter, interpretation model, Huizhou Sag, Zhujiang Formation, Zhuhai Formation

基金项目: 国家科技重大专项“南海东部海域勘探新领域及关键技术”(2016ZX05024-004)。

第一作者简介: 刘君毅(1991-), 男, 安徽桐城人, 硕士, 2015年毕业于中国石油大学(北京), 工程师, 现主要从事珠江口盆地东部地区测井储层评价方面的研究工作。地址: 广东省深圳市南山区后海滨路(深圳湾段)3168号中海油大厦A座, 邮政编码: 518000。E-mail: liujy76@cnooc.com.cn

收稿日期: 2020-06-30; 修改日期: 2021-01-28

引用：刘君毅，王清辉，冯进，等．基于岩石物理相的复杂砂岩储层分类评价——以珠江口盆地惠州凹陷为例[J]．中国石油勘探，2021,26(2):92-102.

Liu Junyi, Wang Qinghui, Feng Jin, *et al.* Complex sandstone reservoir evaluation based on petrophysical facies classification: a case study of Huizhou Sag in the Pearl River Mouth Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(2):92-102.

0 引言

随着油气勘探的不断深入，珠江口盆地东部已经发现越来越多的粉细砂岩和钙质砂岩油藏^[1]，这类油藏通常表现为岩性复杂、薄互层的特征，储层的孔隙结构和导电性质存在明显的差异性，在宏观上表现为孔渗关系复杂、物性变化范围广、测井响应特征复杂、非均质性特征较强。测井解释建模的传统做法是分区分层建立模型^[2]，其前提是假设同一区块、同一层段的储层是相对均质的，这就忽略了储层内部孔隙结构和渗流特性的差异。如果采用这种方法来评价珠江口盆地惠州凹陷复杂砂岩储层，通常会导致其孔隙度、渗透率和饱和度出现较大误差，而这些参数是落实油藏有效性的基础。目前通过针对特定区域开展复杂储层岩石物理相研究，基于储层岩石物理相分类建立测井解释模型，能够快速有效地获得准确的储层参数，并应用于开展油藏精细描述^[3-5]。本文以珠

江口盆地惠州凹陷 22 口取心井珠江组和珠海组复杂砂岩储层的岩心资料、测井资料和分析化验资料为基础，分析不同类型岩石物理相对储层岩性、物性和电性的控制作用，确定基于岩石物理相的储层分类方法，采用 Fisher 判别分析方法确定岩石物理相的识别标准；在此基础上，利用岩心资料刻度测井信息，建立不同类型储层对应的孔隙度、渗透率和岩电参数模型。

1 区域地质概况

珠江口盆地惠州凹陷位于珠一坳陷中部，面积约为 10000km²，是珠江口盆地一个重要的富烃凹陷，其沉积地层自下而上依次为始新统文昌组和恩平组，渐新统珠海组，中新统珠江组、韩江组和粤海组，上新统万山组（图 1）及第四系。惠州凹陷产层主要分布在珠江组和珠海组，其中珠江组为大套海相三角洲

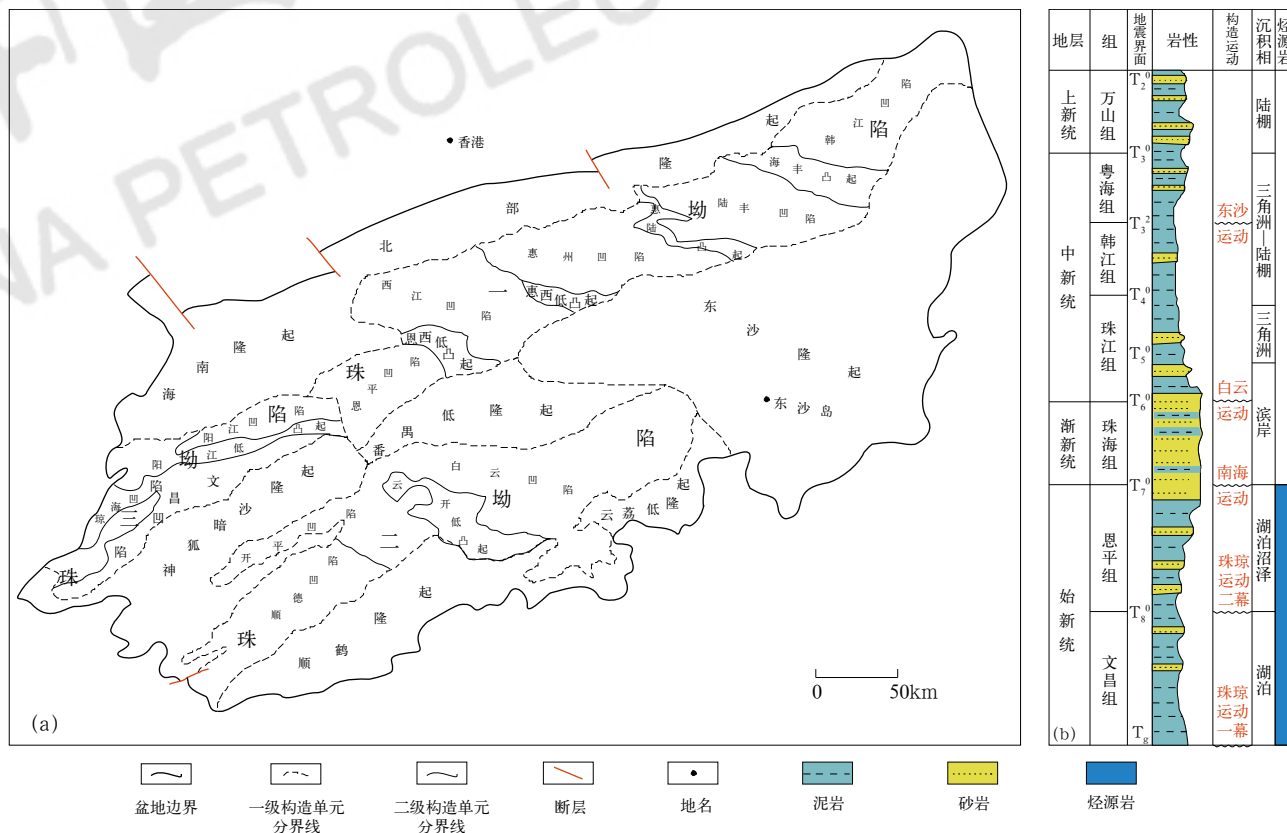


图1 珠江口盆地惠州凹陷构造位置 (a) 及纵向地层格架 (b)

Fig.1 Structural location (a) and stratigraphic framework (b) of Huizhou Sag in the Pearl River Mouth Basin

沉积, 珠海组为典型的海陆过渡相沉积, 主要发育三角洲平原、三角洲前缘及滨岸相^[6]。根据前人研究^[7], 研究区目的层主要分布在1800~3500m范围内, 相当于早成岩阶段B期到中成岩阶段A期, 总体上经历的成岩改造程度较弱。储层岩性以中—细、极细长石石英砂岩和中—细含灰质砂岩为主, 颗粒间主要为线接触, 孔隙类型以原生粒间孔为主, 次生溶孔包括粒间溶孔和粒内容孔。储层孔隙度主要为8%~28%, 渗透率为0.1~1000mD, 但受颗粒粗细、泥质含量和灰质胶结物的影响, 目的层孔隙结构多样、孔渗关系复杂, 不同类型储层的物性与饱和度计算模型和参数差异较大, 给解释评价带来很大挑战。

2 岩石物理相分类与测井识别方法

2.1 基于岩心资料的岩石物理相分类方法

研究区储层岩性较为复杂, 物性分布范围广泛, 从特低孔、特低渗到高孔、高渗均有涵盖, 如图2所示。从图中可以看出, 尽管孔渗之间拟合的相关系数较高, 但同一孔隙度对应的渗透率相差可达两个数量级, 这说明岩石的渗流特性虽然与孔隙度密切相关, 但无法用单一的孔渗关系来表征。岩心压汞曲线形态多样, 孔隙结构参数分布范围广泛: 岩心样品的排驱压力为0.01~1.37MPa, 最大连通孔喉半径为0.54~61.87 μm , 平均孔喉半径为0.12~18.97 μm , 孔喉半径中值为0.01~16.61 μm , 孔喉分选系数为0.11~5.35 μm , 反映了储层类型的多样性和孔隙结构的复杂性。为了精确描述储层特征, 为后续勘探开发提供可靠的基础数据, 需开展储层分类研究。

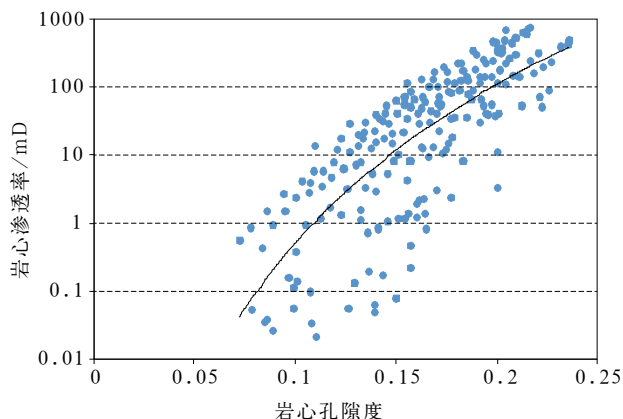


图2 惠州凹陷珠江组、珠海组岩心分析孔隙度与渗透率关系图
Fig.2 Relationship between porosity and permeability by core analysis of Zhujiang & Zhuhai Formations in Huizhou Sag

国外学者 Spain D R 于1992年提出在单井剖面上划分岩石物理类型^[8], 国内学者代金友等指出岩石物理相是具有一定岩石物理特性的储层成因单元, 是沉积作用、成岩作用及后期构造作用的综合效应, 最终表现为现今的孔隙几何学特征^[9]。从岩石物理相的角度对储层进行分类评价, 可以取得良好的应用效果^[10-12]。前期关于岩石物理相的划分主要是基于流动单元^[13]和模糊聚类^[14]的方法, 但这些方法多基于某个单一参数或划分的岩石物理相不具有明确的地质意义; 后期在成岩相、沉积相和裂缝相研究的基础上, 采用综合分析和命名的方法开展岩石物理相分类研究^[15-17]。本次研究依据研究区实际资料, 采用岩石粒度和矿物成分表征沉积微相, 采用孔隙度、渗透率和孔隙结构参数表征岩石物理相, 珠江组和珠海组砂岩储层的裂缝基本不发育, 所以不考虑裂缝相的影响。

根据研究区储层地质特征, 选取能够表征岩石粒度、矿物成分和物性的6项参数开展岩石物理相综合分类, 具体包括粒度均值、钾长石含量、方解石含量、孔隙度、渗透率和孔隙结构特征参数R35(进汞饱和度为35%时对应的孔喉半径值)。在对22口取心井的316块岩心样品实验结果进行综合分析的基础上, 将储层划分为如下4类岩石物理相。

I类: 长石石英中—细砂岩相, 岩性以中砂岩、细砂岩为主, 中砂岩、细砂岩分别占该类岩石物理相的69.57%和23.91%。矿物成分以石英和钾长石为主, 石英和钾长石的平均含量分别为76.9%和14.1%, 方解石和白云石含量较少。该类储层颗粒粒度偏粗、分选好、抗压实作用强、胶结程度弱; 储层主要发育粒间孔, 连通性好, 压汞曲线为宽平台型, R35平均为22.4 μm ; 孔隙度一般大于12%, 主值区间孔隙度平均为16.9%, 渗透率一般大于10mD, 主值区间渗透率平均为72.6mD, 属于中孔中渗储层, 是该区最优质的储层。该类储层对应测井响应特征为“三低一高”, 即低自然伽马、低密度、低光电吸收截面指数和高中子孔隙度。

II类: 含黏土长石石英细砂岩相, 岩性以细砂岩为主, 细砂岩占该类岩石物理相的80.95%。矿物成分以石英和钾长石为主, 平均含量分别为67.9%和11.3%; 黏土矿物含量较高, 平均为16.2%; 方解石和白云石含量较低。相对于I类岩石物理相而言, 粒度较细。储层孔隙发育中等、连通性较好, 压汞曲线为缓坡型, R35平均为2.59 μm ; 孔隙度一般大于

10%，主值区间孔隙度平均为 16.3%，渗透率一般大于 1mD，主值区间渗透率平均为 21.6mD，储层以中孔低渗为主。该类储层对应测井响应特征为“三中一高”，即中自然伽马、中密度、中光电吸收截面指数、高中子孔隙度。

Ⅲ类：含黏土长石石英粉砂岩相，以粉砂岩、细砂岩为主，其中粉砂岩占 75%。矿物成分以石英、斜长石和钾长石为主，平均含量分别为 65.6%、7.1% 和 8.9%；黏土矿物含量为 17.9%，方解石和白云石含量较低。相较于Ⅱ类岩相而言，粒度更细、泥质含量更高，储层更容易受到压实和胶结作用的改造，孔隙连通性较差，压汞曲线为斜坡型，R35 平均为 1.47 μm ，主值区间孔隙度平均为 15.4%，主值区间渗透率平均为 1.95mD，属于中孔特低渗储层。该类储层对应测井响应特征为“二高二中”，即高自然伽马、高中子孔隙度、中密度和中光电吸收截面指数。

Ⅳ类：钙质石英中—细砂岩相，以钙质中砂岩、钙质细砂岩为主。矿物成分以石英和方解石为主，平均含量分别为 52.9% 和 23.2%；含有少量的长石和白云石。该类储层分选差，碳酸盐胶结程度较为严重，孔隙连通性很差；压汞曲线为斜坡型，R35 平均为 0.57 μm ；主值区间孔隙度平均为 14.2%，主值区间渗透率平均为 1.07mD，属于低孔特低渗储层，是研究区品质最差的储层。该类储层对应测井响应特征为“两低两高”，即低自然伽马、低中子孔隙度、高密度、高光电吸收截面指数。

2.2 岩石物理相测井识别方法

从上述岩石物理相分类的描述可以看出，岩心资料揭示研究区储层品质主要受控于粒度、钾长石含量和方解石含量。在矿物成分分布相近的前提下，颗粒越粗，抗压实作用越强，孔喉连通性越好；钾长石在一定程度上能改善储层内部的渗流特性，其含量越高，储层渗透性越好；而作为胶结物形式出现的方解石，其含量越高，胶结程度越强，储层的渗透性和导电性也越差。

由于岩心获取难度大、分布不连续、分析化验成本高等因素，如何从测井资料实现对该区储层的岩石物理相准确分类就成为亟待解决的问题。考虑到目的层的测井系列，选取对粒度、钾长石含量和方解石含量较为敏感的自然伽马、密度、中子孔隙度与光电吸收截面指数 4 条测井曲线，以岩心分析数据作为标定，研究建立基于测井曲线的岩石物理相分类方法。

研究区测井系列主要采用 ECLIPS-5700 系统，大部分井主要为 21 世纪初期完成资料采集，不同井之间的测井曲线系统误差不大，因此不用考虑资料标准化。但是，不同测井曲线的量纲、数值分布区间及受孔隙流体的影响差异必须考虑，研究采用规则化资料预处理方法，提取主要反映储层骨架特征的参数^[18]，包括正则化自然伽马 (NGR)、密度孔隙度与中子孔隙度差值 ($\Delta\phi$) 及骨架岩性指数 (P) 3 个参数。利用岩心标定后的 4 类岩石物理相对应的 3 个测井参数响应图版见图 3，具体数值范围见表 1，其中：

$$NGR = GR_{\min} / GR \quad (1)$$

表 1 惠州凹陷珠江组、珠海组储层 4 类岩石物理相测井响应特征参数统计表

Table 1 Statistical table of logging response characteristic parameters of the four types of petrophysical facies of Zhujiang & Zhuhai Formations in Huizhou Sag

岩石物理相类型	分布	GR/API	$DEN/(g \cdot cm^{-3})$	ϕ_N	$P_e/(bar \cdot e^{-1})$	NGR	$\Delta\phi$	$P/(bar \cdot g^{-1})$
Ⅰ类	范围	45.0~85.6	2.18~2.42	0.06~0.30	2.0~2.9	0.45~0.89	-0.33~0.57	0.70~1.18
	平均值	66.2	2.28	0.21	2.4	0.62	0.26	0.87
Ⅱ类	范围	80.8~119.9	2.22~2.47	0.14~0.27	2.0~3.6	0.33~0.50	-0.58~0.28	0.69~1.21
	平均值	102.2	2.36	0.22	2.8	0.40	-0.11	0.92
Ⅲ类	范围	107.0~165.9	2.28~2.51	0.17~0.34	2.5~3.5	0.24~0.37	-1.07~-0.03	0.87~1.19
	平均值	132.3	2.39	0.26	3.1	0.31	-0.52	1.05
Ⅳ类	范围	47.0~94.6	2.36~2.58	0.15~0.24	2.9~4.7	0.42~0.85	-0.52~-0.04	1.01~1.56
	平均值	64.9	2.46	0.17	3.8	0.63	-0.24	1.28

$$\Delta \phi = \phi_D - \phi_N \tag{2}$$

$$P = (U - U_f) / (DEN - DEN_f) \tag{3}$$

式中 GR ——自然伽马, API;
 GR_{\min} ——自然伽马最小值, API;
 ϕ_D ——石灰岩刻度的视密度孔隙度;
 ϕ_N ——中子孔隙度;
 U ——岩石体积光电吸收截面指数, bar/cm^3 ;
 U_f ——流体体积光电吸收截面指数, 取 $0.36\text{bar}/\text{cm}^3$;
 DEN ——测井密度, g/cm^3 ;
 DEN_f ——流体密度, 取 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 。

进一步利用 Fisher 判别分析方法构建不同岩石物理相类型识别函数, 其中第 1、第 2 和第 3 典型判别函数分别为 F_1 、 F_2 和 F_3 , 表达式如下:

$$F_1 = 3.236NGR + 5.345\Delta\phi - 1.378P - 2.2 \tag{4}$$

$$F_2 = 10.537NGR - 1.078\Delta\phi + 7.20P - 12.5 \tag{5}$$

$$F_3 = -8.305NGR + 5.240\Delta\phi + 7.139P - 2.52 \tag{6}$$

典型函数的特征值和贡献率如表 2, 其中第 1 和第 2 典型函数的贡献率分别为 63.6% 和 36.1%, 累计达到 99.7%, 基本包含绝大部分的测井信息, 故选择第 1 和第 2 典型函数作为岩石物理相类型判别的特征变量。将第 1 和第 2 典型函数做交会图 (图 4), 4 类岩石物理相之间的界限明显, 判别精度较高。

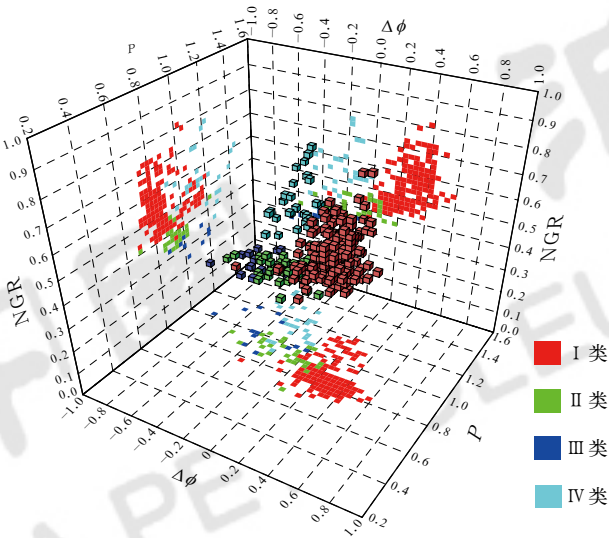


图 3 惠州凹陷珠江组、珠海组储层 4 类岩石物理相测井响应特征参数图版

Fig.3 Plate of logging response characteristic parameters of the four types of petrophysical facies of Zhujiang & Zhuhai Formations in Huizhou Sag

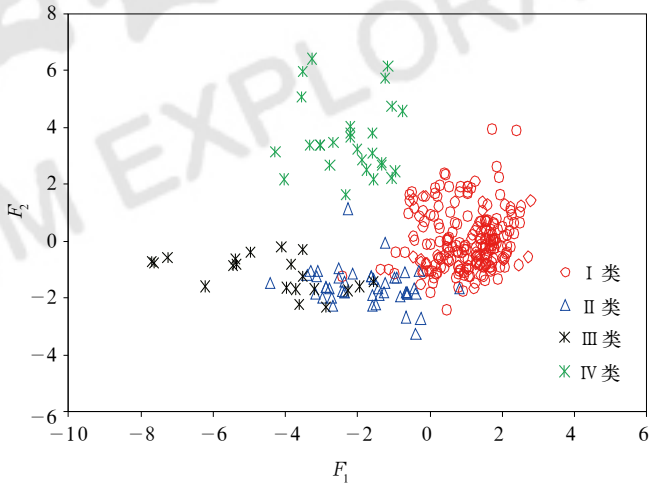


图 4 惠州凹陷珠江组、珠海组储层岩石物理相 Fisher 判别结果图

Fig.4 Fisher discrimination graph of petrophysical facies of Zhujiang & Zhuhai Formations in Huizhou Sag

表 2 惠州凹陷珠江组、珠海组储层典型岩石物理相 Fisher 函数判别特征值和贡献率分布特征

Table 2 Fisher function eigenvalue and distribution characteristics of the contribution ratio of typical petrophysical facies of the Zhujiang & Zhuhai Formations in Huizhou Sag

典型函数	特征值	贡献率 / %	累计贡献率 / %	相关性
F_1	2.886	63.6	63.6	0.862
F_2	1.636	36.1	99.7	0.788
F_3	0.016	0.3	100.0	0.125

通过上述 Fisher 降维法得到的典型函数 $F(X)$, 根据最小平方误差准则函数的梯度下降算法^[19], 经转化可得到 4 类储层的判别函数 f :

I 类长石石英中—细砂岩相:

$$f_1 = 117.931NGR + 11.376\Delta\phi + 104.608P - 84.79 \tag{7}$$

Ⅱ类含黏土长石石英细砂岩相：

$$f_2=90.573NGR-0.396\Delta\phi+99.01P-65 \quad (8)$$

Ⅲ类含黏土长石石英粉砂岩相：

$$f_3=90.986NGR-18.147\Delta\phi+101.791P-73.46 \quad (9)$$

Ⅳ类钙质石英中—细砂岩相：

$$f_4=144.891NGR-9.318\Delta\phi+136.106P-135.30 \quad (10)$$

对于未知储层，把其对应的测井参数代入到公式

(7) ~ (10) 分别计算其 f 值，判别函数最大值所属的类别即为该储层的岩石物理相类型。

利用上述判别函数对 22 口取心井的 157 个小层进行岩石物理相类型判别，符合率为 92.4% (表 3)。统计结果表明不同岩石物理相时空分布大致具有如下规律：Ⅰ类和Ⅱ类岩石物理相主要分布在珠江组下段和珠海组上段，平均厚度分别为 196m、348.6m。Ⅲ类岩石物理相主要分布在珠江组上段，平均厚度为 161.2m。Ⅳ类相主要分布在珠江组下段，平均厚度为 48.8m。

表 3 惠州凹陷珠江组、珠海组储层岩石物理相类型 Fisher 判别结果统计表
Table 3 Statistical table of Fisher discrimination results of petrophysical facies types of Zhujiang & Zhuhai Formations in Huizhou Sag

岩石物理相类型	Fisher 判别分析识别结果		符合率 /%
	符合	不符合	
Ⅰ类	73	3	96.1
Ⅱ类	29	5	85.3
Ⅲ类	22	4	84.6
Ⅳ类	21	0	100.0
合计	145	12	92.4

3 不同类型储层参数建模

如前所述，研究区不同类型储层岩石物理特征差异较大，在准确分类的基础上，可以充分利用岩心实验数据针对不同岩石物理相建立对应的储层参数精细解释模型。

首先考虑孔隙度建模。由于岩心分析孔隙度与测井孔隙度曲线的纵向分辨率不同，直接利用岩心孔隙度数据与测井曲线值建立相关关系会带来误差。为提

高测井解释模型的精度，需要对岩心分析数据和测井数据进行纵向匹配，本文采用划分样本层的方法来实现两者分辨率的匹配。

将研究区 22 口取心井的 2204 个岩心孔隙度样本点划分为 453 个样本小层，通过分析各样本小层岩心孔隙度与密度孔隙度、中子孔隙度和自然伽马等测井参数的相关性，采用多参数回归的方法，分别建立 4 类岩石物理相对应的孔隙度解释模型 (表 4)。

表 4 惠州凹陷珠江组、珠海组储层不同岩石物理相测井解释参数模型及参数表
Table 4 Statistical table of log interpretation models and parameters for different petrophysical facies of Zhujiang & Zhuhai Formations in Huizhou Sag

岩石物理相类型	孔隙度计算模型	覆压孔渗关系	岩电参数			
			a	b	m	n
Ⅰ类	$\phi=0.4397\phi_D+0.3717\phi_N-0.0933\Delta GR+0.9392$	$K=0.025e^{47.96\phi}$	1	1	1.704	1.867
Ⅱ类	$\phi=1.0362\phi_D-0.0617\phi_N-0.0178$	$K=10^8\phi^{8.509}$	1	1	1.704	1.867
Ⅲ类	$\phi=0.5823\phi_D+0.4321\phi_N-0.044\Delta GR-0.03276$	$K=0.00006e^{63.62\phi}$	1	1	1.515	2.013
Ⅳ类	$\phi=0.4496\phi_D+0.4428\phi_N-0.0105$		1	1	1.828	1.940

注： ϕ —岩石孔隙度； K —岩石渗透率，mD； ΔGR —自然伽马相对值； $\Delta GR=(GR-GR_{min})/(GR_{max}-GR_{min})$ ； GR_{min} —自然伽马最小值，API； GR_{max} —自然伽马最大值，API； a —岩性系数； b —系数； m —胶结指数； n —饱和度指数。

研究区的孔渗关系难以用统一的模型进行表述, 岩石物理相的划分则为测井渗透率建模提供了框架模型^[20]。对图 2 所示的孔渗数据进行岩石物理相分类, 发现 4 类岩石物理相表现出较为明显的 3 种孔渗关系 (图 5)。从图 5 可以看出, III 类、IV 类岩石

物理相受泥质和钙质胶结的影响, 孔隙结构明显变差, 在相同的孔隙度条件下, 其渗透率明显小于 I 类、II 类岩石物理相。采用统计回归分析的方法分别建立 4 类岩石物理相对应的 3 种渗透率模型, 如表 4 所示。

同样, 储层岩电参数主要受控于岩性、孔隙结构、黏土矿物类型和分布形式^[21-24]。对于孔隙结构差异大的储层, 如果采用相同的岩电参数, 往往会造成含水饱和度的计算误差较大, 影响流体类型判别和储量计算^[25-28]。通过分析研究区 14 口井 137 块岩心岩电实验数据, 发现 4 类岩石物理相的地层因素与孔隙度、电阻率增大指数与含水饱和度在双对数坐标系中表现出 3 种关系 (图 6)。从图 6 可以看出, III 类岩石物理相受到黏土矿物含量较高和颗粒较细的影响, m 值明显变小; IV 类岩石物理相受钙质胶结的影响, 岩石的导电路径更加复杂, m 值明显变大。采用回归方法确定其岩电参数, 如表 4 所示。

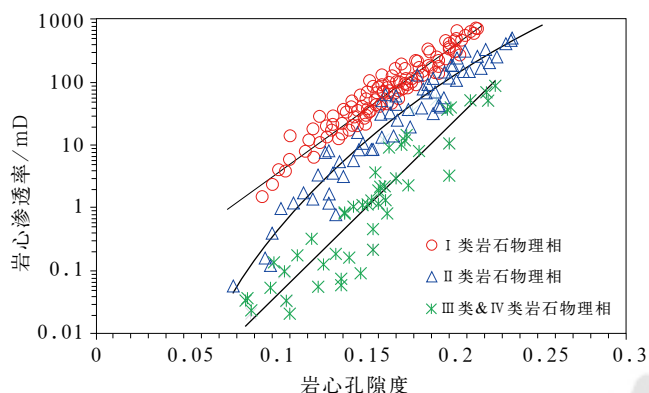


图 5 惠州凹陷不同类型岩石物理相渗透率模型

Fig.5 Permeability interpretation models for different types of petrophysical facies in Huizhou Sag

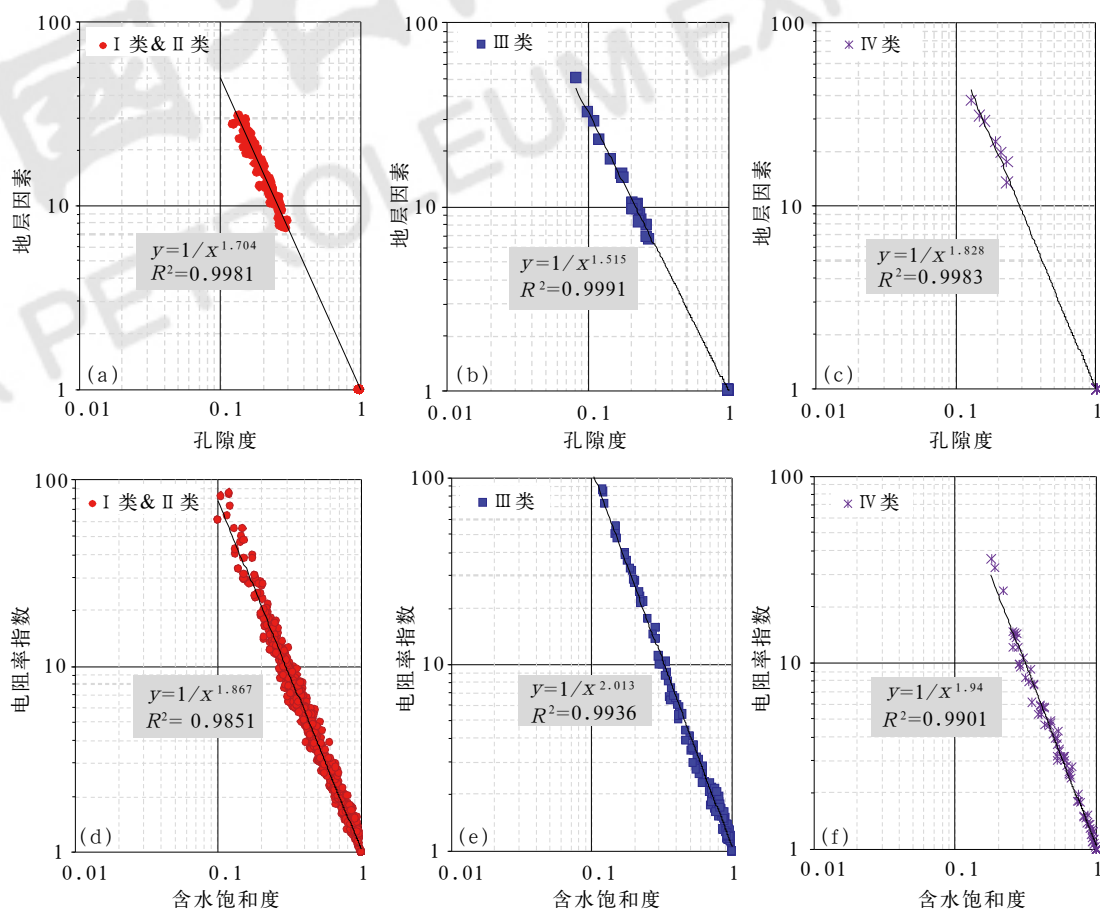


图 6 惠州凹陷珠江组、珠海组储层不同岩石物理相岩电参数图版

Fig.6 Plate of rock electric parameters of different petrophysical facies of Zhujiang & Zhuhai Formations in Huizhou Sag

(a)—(c) 依次为 I 类 & II 类、III 类和 IV 类储层的地层因素与孔隙度关系图; (d)—(f) 依次为 I 类 & II 类、III 类和 IV 类储层的电阻率指数与含水饱和度关系图

4 应用实例分析

图 7 为惠州凹陷 A 井 ZJ1-05 和 ZJ1-06 层评价成果图。图中第 11 道为利用本文的方法进行岩石物理相分类的结果；第 6、7、8 道中的红色曲线分别为分类型计算的渗透率、含水饱和度和孔隙度曲线，蓝色曲线为原始单一模型的计算成果，离散点为密闭取心分析孔隙度、渗透率和含水饱和度数据。薄片分析数据表明该井 ZJ1-05 层 1927~1932m 井段以含泥中—细粒长石石英砂岩为主，孔隙空间主要为原生粒间孔，储层物性较好，以Ⅱ类岩石物理相为主；ZJ1-06 层岩性以含泥极细粒长石石英砂岩为主，局部为含钙细粒石英砂岩，物性较差，以Ⅲ类岩石物理

相为主，局部为Ⅳ类岩石物理相，与测井识别的岩石物理相类型一致。

由图 7 可知，采用岩石物理相分类计算储层参数的方法明显提高了孔隙度、渗透率、饱和度的计算精度。与岩心数据对比，分类建模后计算孔隙度的相对误差由单一模型的 22.85% 降低至 5.58%，含水饱和度和绝对误差由 11.24% 降低至 4.29%，渗透率的相对误差减小至半个数量级以内。分类解释后将 ZJ1-06 层由单一模型解释的底水油藏调整为边水油藏，油水界面下移 5.7m，DST 测试获得日产纯油 96m³，且稳定生产 16 个月，含水率保持在 5% 以下，与分类解释结论一致。

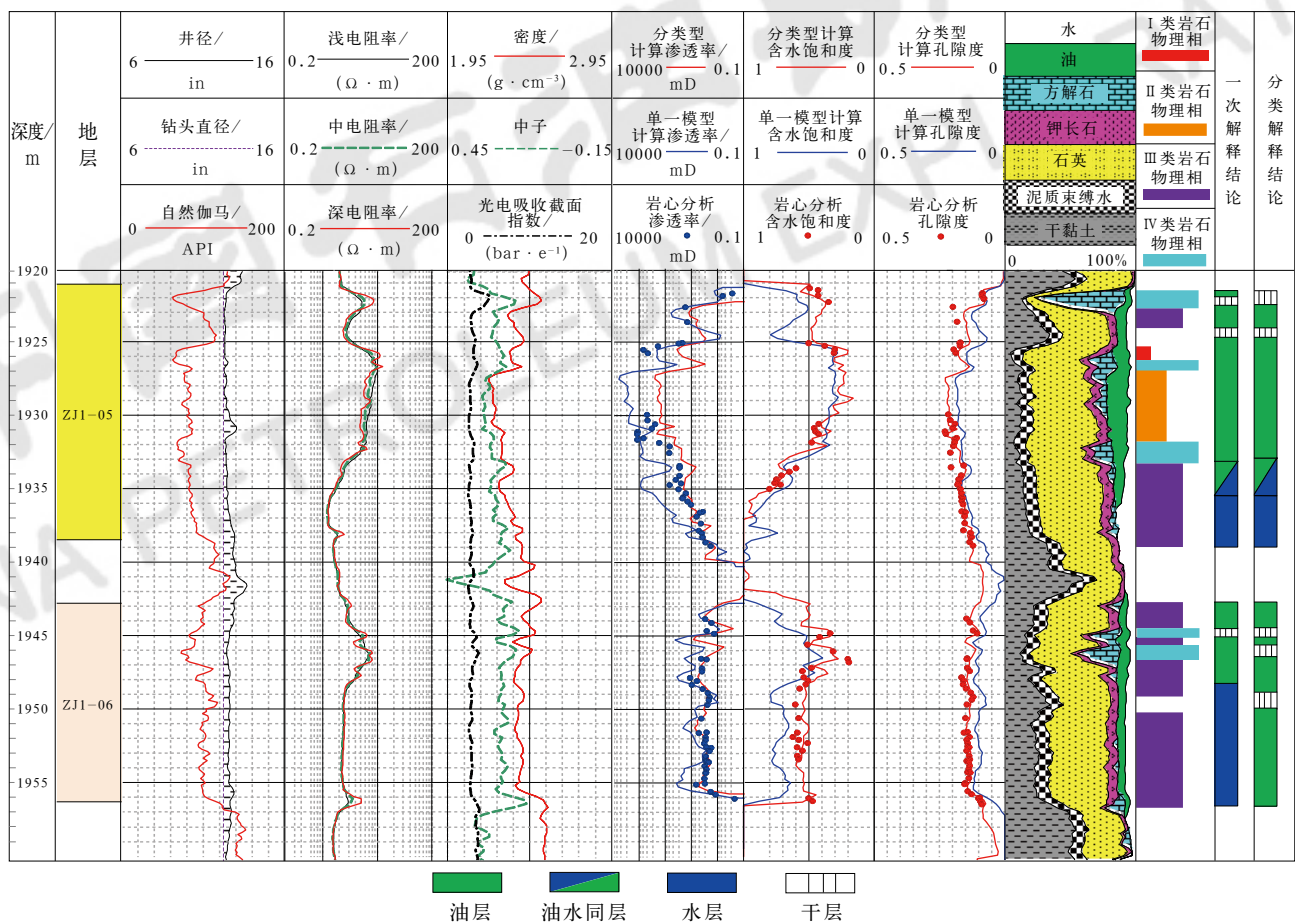


图 7 惠州油区 A 井珠江组 ZJ1-05 层与 ZJ1-06 层储层分类评价成果图

Fig.7 Reservoir classification and evaluation results graph of ZJ1-05 and ZJ1-06 layers of Well A

图 8 为 B 井 ZJ2-03 层评价成果图，在 2356.8~2357.9m 井段，岩心分析渗透率小于 0.5mD，按照区域标准该段应为干层。若采用单一的渗透率模型和岩电参数进行计算，其渗透率和换算后的含油饱和度被明显高估，从而解释为油层。从岩石物理相分类结

果可以看出，该深度段为Ⅳ类钙质砂岩相。通过岩石物理相分类处理，有效消除了储层含钙对渗透性及导电性的影响，各项参数的计算精度明显提高。扣除非渗透性钙质夹层，ZJ2-03 层的有效厚度减少了 1.9m。

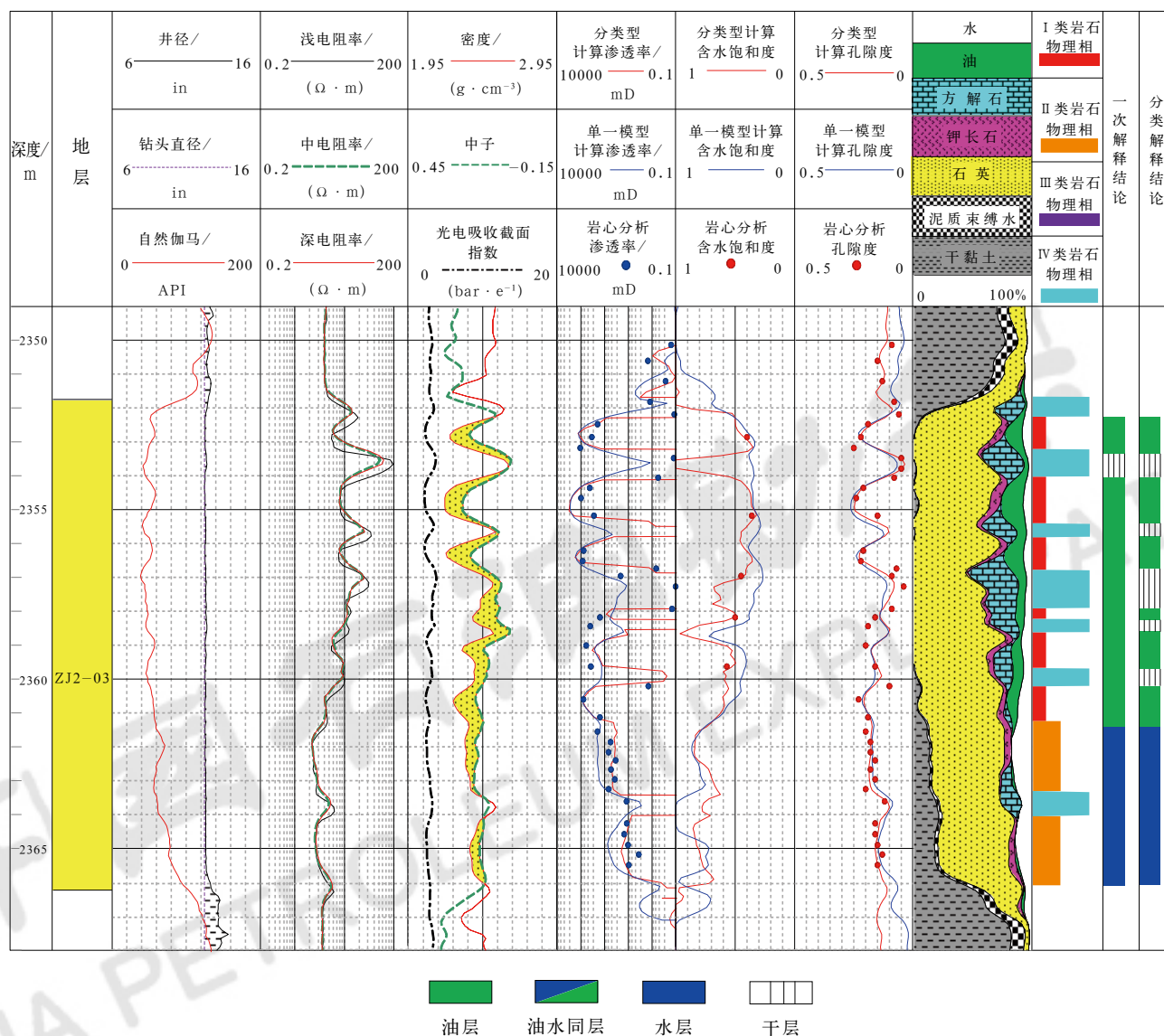


图8 惠州油区B井珠江组ZJ2-03层储层分类评价成果图

Fig.8 Reservoir classification and evaluation results graph of ZJ2-03 layer of Well B

依据上述成果对研究区65口老井进行重新处理,在其中20口井中新解释油层73层,累计有效厚度为187.5m,为老油田挖潜及开发评价提供了有效指导,生产实效显著。

5 结论

(1) 珠江口盆地惠州凹陷珠江组、珠海组砂岩储层特征差异主要受沉积和成岩作用影响,根据岩心资料,可将储层划分为4类岩石物理相,分类结果显示粒度均值和矿物成分是影响该区储层岩石物理响应的关键因素,通过构建正则化自然伽马、密度孔隙度与中子孔隙度差值及骨架岩性指数3项测井衍生参数可

有效识别4种不同岩石物理相。

(2) 不同的岩石物理相对储层物性及导电性有明显的控制作用,利用实验资料标定,针对不同岩石物理相分别构建孔隙度、渗透率、饱和度计算模型,相较于以往常用的单一解释模型,储层参数计算精度得到显著提高,从而为老油田挖潜及开发评价提供有效指导。

(3) 本文采用的岩石物理相分类方法具有明确的地质意义,有效建立起地质特征与测井属性之间的“桥梁”,克服了常规分类方法地质意义模糊或与测井参数关联度低的不足,可推广应用于其他复杂碎屑岩储层测井评价。

参考文献

- [1] 冯进, 潘卫国, 管耀, 等. 非均质性油藏测井评价新技术及其在南海东部的应用[J]. 中国海上油气, 2015, 27(3): 38–45.
Feng Jin, Pan Weiguo, Guan Yao, *et al.* A new logging evaluation technique for heterogeneous reservoirs and its application in the eastern South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(3): 38–45.
- [2] 石玉江, 张海涛, 侯雨庭, 等. 基于岩石物理相分类的测井储层参数精细解释建模[J]. 测井技术, 2005, 29(4): 329–332.
Shi Yujiang, Zhang Haitao, Hou Yuting, *et al.* Fine interpretation modeling of logging reservoir parameters based on petrophysical facies classification[J]. Well Logging Technology, 2005, 29(4): 329–332.
- [3] 宋子齐, 杨红刚, 孙颖, 等. 利用岩石物理相分类研究特低渗储层参数建模[J]. 断块油气田, 2010, 17(6): 672–677.
Song Ziqi, Yang Honggang, Sun Ying, *et al.* Study on parameter modeling of ultra-low permeability reservoir by petrophysical facies classification[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010, 17(6): 672–677.
- [4] 柴毓, 王贵文. 致密砂岩储层岩石物理相分类与优质储层预测: 以川中安岳地区须二段储层为例[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(3): 74–85.
Chai Yu, Wang Guiwen. Petrophysical facies classification and high quality reservoir prediction of tight sandstone reservoirs: a case study of the second member of Xujiahe Formation in Anyue area, central Sichuan Basin[J]. Lithologies Reservoirs, 2016, 28(3): 74–85.
- [5] 赖锦, 王贵文, 罗官幸, 等. 基于岩石物理相约束的致密砂岩气储层渗透率解释建模[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(3): 1173–1182.
Lai Jin, Wang Guiwen, Luo Guanxing, *et al.* Permeability interpretation modeling of tight sandstone gas reservoir based on lithophysical facies constraint[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(3): 1173–1182.
- [6] 陈长民, 施和生, 许仕策. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 147–160.
Chen Changmin, Shi Hesheng, Xu Shice. The conditions of hydrocarbon accumulation of the Tertiary petroleum system in the Pearl River Mouth Basin[M]. Beijing: Science Press, 2003: 147–160.
- [7] 龙更生, 施和生, 郑荣才, 等. 珠江口盆地惠州凹陷深部储层成岩作用与孔隙演化[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(4): 671–672.
Long Gengsheng, Shi Hesheng, Zheng Rongcai, *et al.* Diagenesis and pore evolution of deep reservoirs in Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2011, 30(4): 671–672.
- [8] Spain D R. Petrophysical evaluation of a slope fan / basin-floor fan complex: Cherry Canyon Formation, Ward County, Texas[J]. AAPG Bulletin, 1992, 76(6): 805–827.
- [9] 代金友, 张一伟, 熊琦华, 等. 用模糊聚类方法划分岩石物理相[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(2): 12–16.
Dai Jinyou, Zhang Yiwei, Xiong Qihua, *et al.* Division of petrophysical facies by fuzzy clustering method[J]. Journal of Petroleum University (Natural Science Edition), 2004, 28(2): 12–16.
- [10] 赖锦, 王贵文, 陈敏, 等. 基于岩石物理相的储层孔隙结构分类评价: 以鄂尔多斯盆地姬塬地区长8油层组为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(5): 566–573.
Lai Jin, Wang Guiwen, Chen Min, *et al.* Classification and evaluation of reservoir pore structure based on petrophysical facies: a case study of Chang 8 oil-bearing formation in Jiuyan area, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5): 566–573.
- [11] Nabway B S, Kassab M A. Porosity-reducing and porosity-enhancing diagenetic factors for some carbonate microfacies: a guide for petrophysical facies discrimination[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7(11): 4523–4539.
- [12] 单祥, 陈能贵, 郭华军, 等. 基于岩石物理相的砂砾岩储层分类评价: 以准噶尔盆地玛131井区块百二段为例[J]. 沉积学报, 2016, 34(1): 149–157.
Shan Xiang, Chen Nenggui, Guo Huajun, *et al.* Reservoir evaluation of Sand-conglomerate Lomerate reservoir based on petrophysical facies: a case study of the Bai2 member of well Ma131 region in Junggar Basin[J]. Journal of Sedimentology, 2016, 34(1): 149–157.
- [13] 姚光庆, 赵彦超, 张森龙. 新民油田低渗细粒储集砂岩岩石物理相研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1995, 20(3): 355–360.
Yao Guangqing, Zhao Yanchao, Zhang Senlong. Petrophysical facies of low-permeability fine-grained reservoir sandstone in Xinmin oilfield[J]. Earth Science, 1995, 20(3): 355–360.
- [14] 吕晓光, 闫伟林. 储层岩石物理相划分方法及应用[J]. 大庆石油地质与开发, 1997, 16(3): 18–21.
Lü Xiaoguang, Yan Weilin. Petrophysical facies division method and its application[J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 1997, 16(3): 18–21.
- [15] 邹才能, 陶士振, 周慧, 等. 成岩相的形成、分类与定量评价方法[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(5): 526–540.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Zhou Hui, *et al.* Formation, classification and quantitative evaluation of diagenetic facies[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(5): 526–540.
- [16] 杨宁, 王贵文. 岩石物理相的控制因素及其定量表征方法研究[J]. 地质评论, 2013, 59(3): 563–574.
Yang Ning, Wang Guiwen. Controlling factors of petrophysical facies and their quantitative characterization methods[J]. Geological Review, 2013, 59(3): 563–574.
- [17] 张海龙, 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 Hailong, Liu Zhonghua, Zhou Cancan, *et al.* Discussion on petrophysical classification method of low porosity and low permeability reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(6): 763–768.
- [18] 石玉江, 肖亮, 毛志强, 等. 低渗透砂岩储层成岩相测井识别方法及其地质意义: 以鄂尔多斯盆地姬塬地区长8段储层为例[J]. 石油学报, 2016, 39(1): 1–10.

- 2011,32(5):820-827.
- Shi Yujiang, Xiao Liang, Mao Zhiqiang, *et al.* Diagenetic facies identification method of low permeability sandstone reservoir and its geological significance: a case study of Chang 8 member reservoir in Jiyuan area, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011,32(5):820-827.
- [19] 王向公, 张超谟. 应用地球物理常用数学方法[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1995:64-87.
- Wang Xianggong, Zhang Chaomo. Common mathematical methods of applied geophysics[M]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University Press, 1995:64-87.
- [20] 曾少军, 何胜林, 王利娟, 等. 基于流动单元的测井储层参数精细建模技术: 以崖城 13-1 气田陵三段为例[J]. *天然气工业*, 2011,31(8): 12-15.
- Zeng Shaojun, He Shenglin, Wang Lijuan, *et al.* Fine modeling technology of logging reservoir parameters based on flow unit: a case study of 3rd member of Lingshui Formation in the Yacheng 13-1 Gasfield[J]. *Natural Gas Industry*, 2011,31(8):12-15.
- [21] 张春林, 李剑, 刘锐娥. 鄂尔多斯盆地盒 8 段致密砂岩气储层微观特征及其形成机理[J]. *中国石油勘探*, 2019,24(4):476-484.
- Zhang Chunlin, Li Jian, Liu Ruie. Microscopic characteristics and forming mechanisms of He 8th member tight sandstone gas reservoirs in Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019,24(4):476-484.
- [22] 韩国猛, 吴雪松, 崔宇, 等. 渤海湾盆地黄骅凹陷二叠系致密砂岩储层特征、主控因素及发育模式[J]. *中国石油勘探*, 2019,24(4): 509-519.
- Han Guomeng, Wu Xuesong, Cui Yu, *et al.* Characteristics, control factors and development models of Permian tight sandstone reservoirs in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019,24(4): 509-519.
- [23] 许琳, 常秋生, 冯玲丽, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组页岩油储层特征及控制因素[J]. *中国石油勘探*, 2019,24(5):649-660.
- Xu Lin, Chang Qiusheng, Feng Lingli, *et al.* The reservoir characteristics and control factors of shale oil in Permian Fengcheng Formation of Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019,24(5):649-660.
- [24] 时战楠, 蒲秀刚, 韩文中, 等. 黄骅拗陷孔南地区中下侏罗统储层特征及成藏组合模式[J]. *中国石油勘探*, 2019,24(6):758-770.
- Shi Zhannan, Pu Xiugang, Han Wenzhong, *et al.* Characteristics and accumulation models of Middle and Lower Jurassic reservoirs in Kongnan area, Huanghua Depression[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019,24(6): 758-770.
- [25] 张明禄, 石玉江. 复杂孔隙结构砂岩储层岩电参数研究[J]. *测井技术*, 2005,29(5):446-448.
- Zhang Minglu, Shi Yujiang. Study on electrical parameters of sandstone reservoir with complex pore structure[J]. *Well Logging Technology*, 2005,29(5):446-448.
- [26] 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.
- Chen Rong, Li Kui, He Shenglin, *et al.* Low resistivity genetic analysis and saturation evaluation of the first member of Zhujiang Formation in Wenchang area of Pearl River Mouth Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2014,26(5): 97-101.
- [27] 石玉江, 李高仁, 周金昱. 泥质型低渗透储层岩电性质研究及饱和度模型建立[J]. *测井技术*, 2008,32(3):203-206.
- Shi Yujiang, Li Gaoren, Zhou Jinyu. Study on petroelectric properties and establishment of saturation model of argillaceous low permeability reservoir[J]. *Well Logging Technology*, 2008,32(3):203-206.
- [28] 闫建平, 温丹妮, 李尊芝. 低渗透砂岩孔隙结构对岩电参数的影响及应用[J]. *天然气地球科学*, 2015,26(12):2227-2233.
- Yan Jianping, Wen Danni, Li Zunzhi. Influence of pore structure of low permeability sandstone on rock electrical parameters and its application[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015,26(12):2227-2233.