

引用格式:孙伟. 溱潼凹陷西斜坡阜三段储层测井解释方法及应用初探[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(3): 121-125.

SUN W. Log interpretation method and application for 3rd member of Funing Formation in west slope of Qintong sag[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(3): 121-125.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.03.019

# 溱潼凹陷西斜坡阜三段储层测井解释方法及应用初探

孙伟

(中国石化华东油气分公司勘探开发研究院, 江苏 南京 210011)

**摘要:** 为了提高测井解释精度,提升解释模型区带适用性,以苏北盆地溱潼凹陷西斜坡阜三段储层为对象,开展了区带孔隙度、饱和度评价模型研究。对实验分析孔隙度和测井资料进行统计分析发现,经泥质校正后的声波时差曲线与实验分析孔隙度较好地满足声波地层因素关系,确定本区岩石骨架声波时差为  $189.39 \mu\text{s/m}$ ,骨架岩性系数  $x$  为 1.472,建立了区带孔隙度解释模型;分析了地层因素  $F$  与孔隙度的关系,明确了胶结指数  $m$  随岩心孔隙度的变化规律,即中孔储层随着孔隙度增大,  $m$  值较为稳定,高-特高孔储层随着孔隙度增大,  $m$  值有增大趋势;实现了由测井资料计算可变胶结指数  $m$ ,进而可准确计算储层含油饱和度。应用结果表明,利用建立的孔隙度和饱和度模型在本区的解释成果与实验分析吻合性好。

**关键词:** 溱潼凹陷;测井解释;孔隙度;饱和度;复杂砂岩;声波地层因素关系

中图分类号: P631.84

文献标识码: A

## Log interpretation method and application for 3rd member of Funing Formation in west slope of Qintong sag

SUN Wei

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Sinopec East China Oil and Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210011, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of log interpretation and the applicability of interpretation model for zones, the suitable porosity and saturation models are established for analysis of the 3rd member of Funing Formation in the west slope of Qintong sag, North Jiangsu basin. After the statistics and analysis of the experimental porosity and well logs, it is found that interval transit time after shale correction and the porosity of the experimental analysis can satisfy the relation among acoustic formation factors. The interval transit time for the rock matrix in this area is determined to be  $189.39 \mu\text{s/m}$ , the matrix lithology coefficient ( $x$ ) is 1.472, and the interpretation model for the porosity in the zone is established. And then, the relation between formation factor ( $F$ ) and porosity is analyzed. Meanwhile, the variation rule of cementation index ( $m$ ) with core porosity is determined, that is, with the increase of porosity in mesoporous reservoirs,  $m$  is relatively stable, while with the increase of porosity in high-extra-high pore reservoirs,  $m$  tends to increase. Therefore, the variable cementation index ( $m$ ) can be calculated from well logs, and then the oil saturation of reservoir can be calculated accurately. The interpretation results of the established porosity and saturation models in this area agree well with the experimental analysis.

**Key words:** Qintong sag, logging interpretation, porosity, saturation, complex sandstone, relation among acoustic formation factors

孔隙度和饱和度是储量计算中的关键参数,也是测井解释的重要内容。溱潼凹陷西斜坡阜三段储层受相带和埋深等影响,具有岩性细、胶结性差等特点。孔隙度实验和岩电实验等成功率普遍较低,采用以往分区块建立孔隙度、饱和度模型的方法,存在

几个问题:1)各区块资料点往往较为集中,规律性不强;2)各区块间模型参数不一、推广性差;3)无法对区带总体变化规律进行把控。为了提高测井解释精度,提升解释模型区带适用性,开展区带孔隙度、岩电参数与测井信息相关性研究,建立区带适用的孔

收稿日期:2020-02-19。

作者简介:孙伟(1985—),男,硕士,工程师,主要从事测井和储量相关研究。通讯地址:江苏省南京市鼓楼区热河南路37号,邮政编码:210011。E-mail:sunwei4790@126.com

孔隙度、饱和度评价模型尤为必要。

针对复杂砂岩储层的孔隙度和饱和度评价前人开展过很多研究<sup>[1-14]</sup>。利用声波时差计算孔隙度方面,1956年WYLLIE最先提出时间平均公式,该公式仅适用于压实和胶结良好的纯砂岩,对于未胶结、未压实的地层,需要采用压实校正系数进行校正。1980年RAYMER等人提出用非线性经验公式表征孔隙度和声波时差的关系。1986年MARTIN等在RAYMER工作基础上提出了声波地层因素公式,解决了纯石英砂岩地层的孔隙度计算问题。饱和度方面,1942年ARCHIE最先建立了纯砂岩饱和度评价模型;后人在此基础上逐步改进,到目前已提出泥质砂岩饱和度评价模型几十种,但Archie公式最具有综合性。它的关键在如何准确确定与岩性有关的常数 $a$ 、 $b$ ,胶结指数 $m$ ,饱和度指数 $n$ 等解释参数,许多学者通过岩电实验统计或数值模拟等方法开展了大量工作。

针对溱潼凹陷西斜坡阜三段复杂储层,理论模型和其它地区经验解释模型均无法准确获取孔隙度、饱和度参数,在综合实验和测井资料的基础上,以声波地层因素和Archie公式为依据,经过分析统计和泥质校正确定了溱潼凹陷西斜坡统一的孔隙度和饱和度模型,并首次进行了应用,有效解决了泥质砂岩储层孔隙度和饱和度解释问题。

## 1 研究区概况

溱潼凹陷是苏北盆地的一个三级构造单元,整体为南断北超、中间开阔、东西收敛的箕状断陷,由南往北可划分为断阶带、深凹带、斜坡带3个构造单元,其中斜坡带在帅垛以东为东斜坡带,帅垛及其西部为西斜坡带。阜宁组三段是溱潼凹陷主力含油层位之一,主要为大型湖泊三角洲沉积。溱潼西斜坡带处于三角洲前缘亚相<sup>[15-21]</sup>。阜三段夹持于阜二段、阜四段两套主力烃源岩之间,是油气运聚的主要层系。西斜坡带紧邻生油主凹,构造位置有利,该区带砂体上倾尖灭,高部位受物性或反向正断层控制,易形成上倾尖灭型的构造-岩性油藏和断层控制的构造油藏。近年来溱潼凹陷西斜坡阜三段逐渐成为主力的勘探和产建区,已形成千万吨级的储量规模。

阜三段岩性主要有细砂岩、粉砂岩,陆源碎屑成分主要为石英、长石,胶结物以黏土矿物为主,砂岩以颗粒支撑为主,分选好-中等,次棱角-次圆

状。储集类型主要为中-高孔、中-高渗型,油藏埋深为1 420~2 300 m。

## 2 解释模型的建立

### 2.1 孔隙度模型

溱潼西斜坡各区块阜三段砂岩存在一定差异,表现在:埋深较浅的砂岩存在欠压实、胶结较差的现象,随着深度增加压实和胶结趋于正常;孔隙度分布范围较大,最低值为6.3%,最高值为37.7%。以往各区块取不同的压实校正系数,采用Wyllie公式计算孔隙度,各区块间计算公式差异较大。为了建立溱潼西斜坡统一的孔隙度模型,本次采用J. P. Martin声波地层因素模型,该模型适用于孔隙度小于50%的地层,它的主要特点是不需做声波压实校正,也不需要流体声波时差,避免了这2个参数引起的误差。公式为:

$$\varphi = 1 - \left( \frac{\Delta t_{ma}}{\Delta t} \right)^{1/x} \quad (1)$$

也可改写为:

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_{ma}} = \frac{1}{(1-\varphi)^x} = F_s \quad (2)$$

式中: $\varphi$ 为孔隙度; $f$ ;  $\Delta t_{ma}$ 为岩石骨架声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$ ;  $\Delta t$ 为声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$ ;  $x$ 为骨架岩性系数;  $F_s$ 为声波地层因素。

图1为利用南华、仓吉、顾庄、陈家舍等区块11口取心井151块阜三段样品绘制的岩心分析孔隙度与声波时差的关系,图中绿色圆形数据点为实测数据点,灰色三角形数据点是根据声波地层因素公式计算的石英砂岩理论数据点。交会图显示该区声波时差与实验分析孔隙度在低-中孔隙度时符合石英

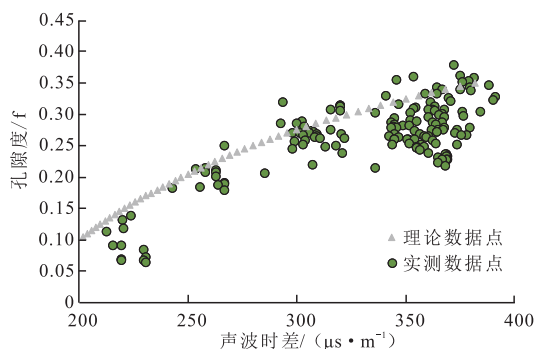


图1 声波时差与实验分析孔隙度关系

Fig. 1 Relation between interval transit time and experimental analysis porosity

砂岩地层因素非线性关系,在高-特高孔隙度时数据点分布较为分散。以GR值为第三坐标分析了泥质含量对声波时差的影响,数据显示离散点主要为泥质含量较高的数据点(图2)。

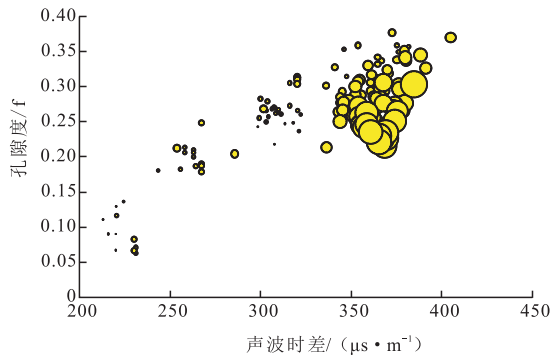


图2 以GR为第三坐标的声波时差与实验分析孔隙度关系  
Fig. 2 Relation between interval transit time and experimental analysis porosity with GR as 3rd coordinate

对声波时差进行泥质校正后,实验分析孔隙度与声波时差关系显著改善(图3),即随着声波时差的增大,孔隙度不再呈现线性增加,孔隙度增大趋势逐渐变缓。通过拟合(图4)得到本区孔隙度计算公式为:

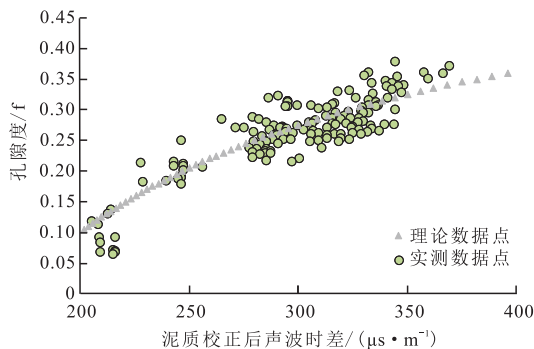


图3 泥质校正后声波时差与孔隙度关系

Fig. 3 Relation between interval transit time and porosity after shale correction

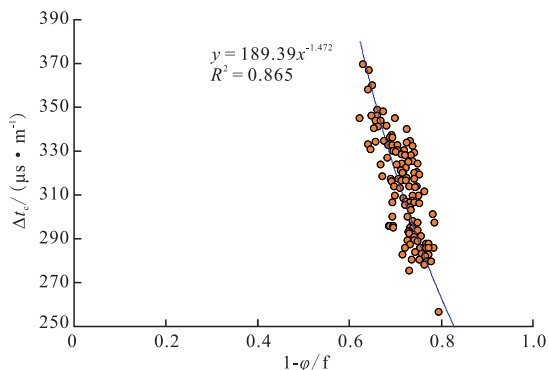


图4 声波地层因素

Fig. 4 Acoustic formation factors

$$\varphi = 1 - (189.39 / \Delta t_c)^{1/1.472} \quad (3)$$

式中:  $\Delta t_c$  为泥质校正后的声波时差,  $\mu\text{s}/\text{m}$ 。

实验分析资料拟合的本区岩石骨架声波时差为  $189.39 \mu\text{s}/\text{m}$ , 骨架岩性系数  $x$  为  $1.472$ 。骨架的声波时差大于石英, 骨架岩性系数小于石英, 符合长石质石英砂岩声学特征。

## 2.2 饱和度模型

仓吉、南华、顾庄等区块共有7口井48个样品进行了岩电实验。实验结果分析表明,本区电阻增大系数  $I$  与含水饱和度在双对数坐标下基本呈现直线关系,孔隙度与地层因素  $F$  在双对数坐标下不再呈现直线关系,反映本区孔隙结构较为复杂(图5、图6)。由此确定本区  $b$  值为  $1.035$ ,  $n$  值为  $1.766$ ,  $m$  值为非固定值。这与前人的研究成果一致,即  $b$  基本不受储层孔隙结构的影响,  $n$  受储层孔隙结构的影响相对较小,  $m$  受储层孔隙结构的影响较大<sup>[5-6]</sup>。

将岩电实验得到的地层因素  $F$  和孔隙度绘制在对数坐标上,便能得到岩性指数  $a$  和胶结指数  $m$ ,  $a$  与  $m$  相互制约,实际计算中常取  $a$  为  $1$ ,由此计算岩石胶

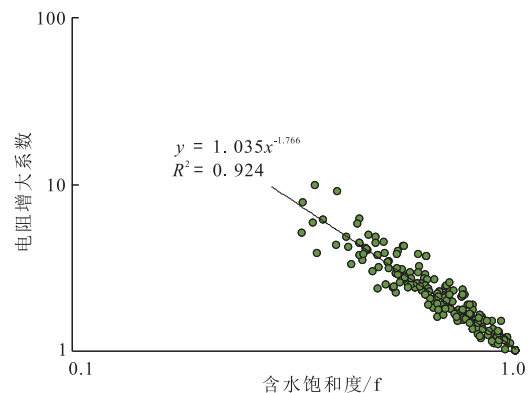


图5 电阻增大系数与含水饱和度关系

Fig. 5 Relation between resistance increase coefficient and water saturation

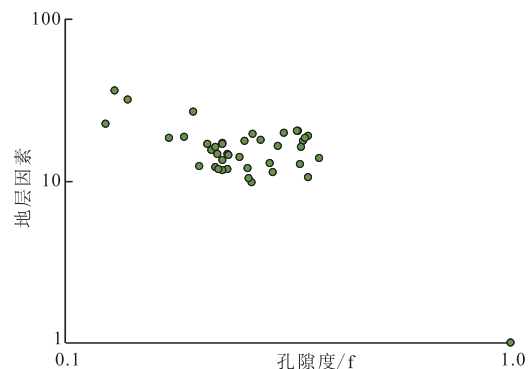


图6 地层因素与孔隙度关系

Fig. 6 Relation between formation factors and porosity

结指数 $m$ 。统计规律表明, $m$ 值与孔隙度呈现较好的二次多项式关系(图7):

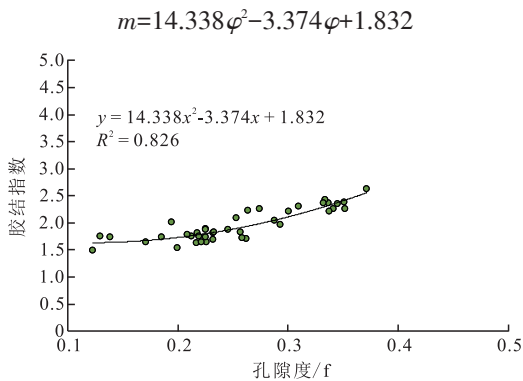


图7 胶结指数与孔隙度关系

Fig. 7 Relation between cementation index and porosity

对于中孔储层,随着孔隙度增加, $m$ 值较为稳定;对于高-特高孔储层,随着孔隙度增加, $m$ 值有增大趋势。分析认为,本区中孔储层主要为三角洲前缘沉积,岩性较纯, $m$ 值较为稳定;高-特高孔储层为更浅层的浅湖滩相,岩性较细,泥质含量平均为16%,主要以分散形式存在于孔隙及喉道中,使孔隙喉道迂回曲折,从而使岩石的 $m$ 值增大。这种现象在其他地区也较为普遍<sup>[3-6]</sup>。

明确了本区胶结指数与孔隙度的相关性后,可根据孔隙度计算可变胶结指数,进而根据 Archie 公式进行饱和度的计算。需要强调的是,本区岩电实验数据点泥质含量一般低于20%,在实际应用中,有必要对泥质含量大于20%的储层先进行电阻率的泥质校正,以提高解释精度。

### 3 应用实例

利用建立的孔隙度和饱和度模型对研究区6口老井和1口新井进行了处理解释。与实验结果对比,孔隙度相对误差在6%以内,饱和度绝对误差在±5%以内,证实该模型在本区具有较好的适用性。

图8是勘探新区CX区块应用实例。解释CX3井2号层平均孔隙度为26.5%,平均含油饱和度为40.6%;4号层平均孔隙度为24.5%,平均含油饱和度为48.8%。后期物性分析显示,2号层平均孔隙度为27.2%,4号层平均孔隙度为25.1%,测井解释孔隙度平均相对误差为2.5%;根据压汞资料利用油柱高度法计算2号层平均含油饱和度为41.4%,4号层平均含油饱和度为49.4%,测井解释饱和度平均绝对误差为-0.7%。

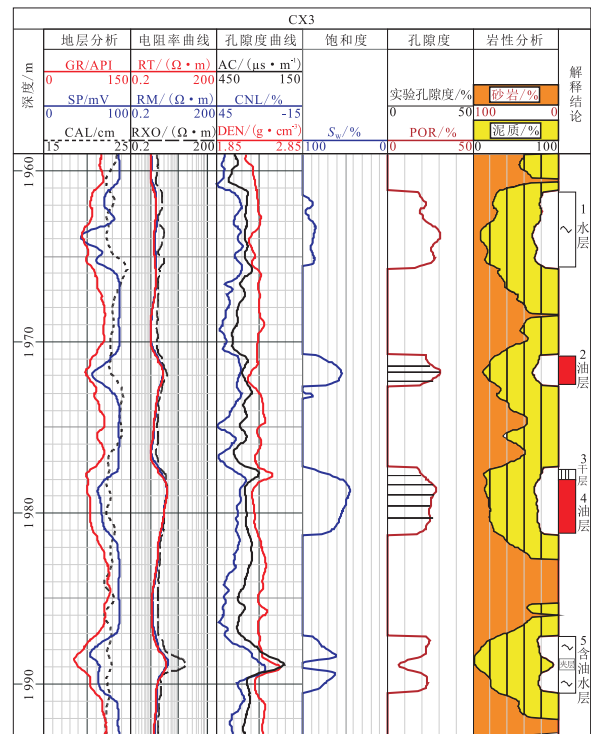


图8 CX3井阜三段测井解释成果

Fig. 8 Log interpretation results of the third member of the Funing Formation of well-CX3

### 4 结论

1) 本区经泥质校正后的声波时差值与实验分析孔隙度符合非线性声波地层因素关系,即随着声波时差的增大,孔隙度不再呈现线性增加,孔隙度增大趋势逐渐变缓。

2) 通过实际资料拟合,确定了本区岩石骨架声波时差为189.39 μs/m,骨架岩性系数 $\alpha$ 为1.472,符合长石质石英砂岩特征。

3) 本区电阻增大系数与含水饱和度在双对数坐标下基本呈现直线关系;地层因素 $F$ 与孔隙度在双对数坐标下不再呈现直线关系。对于中孔储层,随着孔隙度增大, $m$ 值较为稳定;对于高-特高孔储层,随着孔隙度增大, $m$ 值有增大趋势。

4) 建立的孔隙度模型解释成果与实验分析吻合度高,对于提高复杂砂岩孔隙度和含油饱和度的计算精度有一定意义。

#### 参考文献

- [1] 周灿灿,李潮流,王昌学,等.复杂碎屑岩测井岩石物理与处理评价[M].北京:石油工业出版社,2013.  
ZHOU C C, LI C L, WANG C X, et al. Petrophysics and treatment evaluation of logging complex clastic rocks[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.

- [2] 李雄炎,秦瑞宝,毛志强,等.高精度胶结指数模型的建立与应用[J].石油学报,2014,35(1):76-84.  
LI X Y, QIN R B, MAO Z Q, et al. Establishment and application of a high-precision cementation exponent model[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 76-84.
- [3] 王建功,蔡文渊,罗安银,等.二连地区复杂砂岩胶结指数m和系数a的研究[J].测井技术,2010,34(5):449-452.  
WANG J G, CAI W Y, LUO A Y, et al. On sandstone cementation exponent m and factor a in erlian area[J]. Well Logging Technology, 2010, 34(5): 449-452.
- [4] 韩双,潘保芝.孔隙储层胶结指数m的确定方法及影响因素[J].油气地球物理,2010,8(1):43-47.  
HAN S, PAN B Z. Determination method of cementation index m of pore reservoir and influencing factors[J]. Petroleum Geophysics, 2010, 8(1): 43-47.
- [5] 傅爱兵.济阳拗陷碎屑岩储层胶结指数变化规律分析[J].特种油气藏,2011,18(3):39-42.  
FU A B. Analysis of cementation exponent of the clastic rock reservoirs in the Jiyang Depression[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18(3): 39-42.
- [6] 王志文,葛祥,朱爱民.洛带碎屑岩储层胶结指数计算及变化规律研究[J].西部探矿工程,2010,22(3):83-84.  
WANG Z W, GE X, ZHU A M. Study on consolidation index calculation and variation law of detrital rock reservoir[J]. West-China Exploration Engineering, 2010, 22(3): 83-84.
- [7] 金力钻,孙玉红,周文革,等.低电阻率砂岩油气层的测井饱和度计算新模型[J].测井技术,2020,44(1):55-60.  
JIN L Z, SUN Y H, ZHOU W G, et al. New model for the log-based saturation calculation of low-resistivity sandstone reservoirs[J]. Well Logging Technology, 2020, 44(1): 55-60.
- [8] 吴丰,丛林林,姚聪,等.不规则条带状泥质对砂岩电阻率影响的数值模拟[J].测井技术,2019,43(4):355-360.  
WU F, CONG L L, YAO C, et al. Numerical simulation to the influence of irregularly banded argillaceous composition on sandstone resistivity[J]. Well Logging Technology, 2019, 43(4): 355-360.
- [9] 胡胜福,周灿灿,李霞,等.测井饱和度解释模型的演化历程分析与思考[J].地球物理学进展,2017,32(5):1992-1998.  
HU S F, ZHOU C C, LI X, et al. Analysis and prospect of logging saturation model evolutionary history[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(5): 1992-1998.
- [10] 刘双莲,李浩,魏修平,等.含岩屑砂岩储层“甜点”测井评价技术难点与对策[J].石油物探,2020,59(1):141-149.  
LIU S L, LI H, WEI X P, et al. Difficulties and strategy of logging evaluation on “sweet spots” of lithic sandstone reservoirs[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(1): 141-149.
- [11] 陈继华,陈政,毛志强.莫西庄地区低阻油层成因分析与饱和度评价[J].石油物探,2011,50(3):247-251.  
CHEN J H, CHEN Z, MAO Z Q. Analysis on the forming of low-resistivity oil layer and evaluation of the water saturation in Moxizhuang area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(3): 247-251.
- [12] 未睨,王尚旭,赵建国,等.致密砂岩纵、横波速度影响因素的实验研究[J].石油物探,2015,54(1):9-16.  
WEI X, WANG S X, ZHAO J G, et al. Laboratory investigation of influence factors on  $v_p$  and  $v_s$  in tight sandstone[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015, 54(1): 9-16.
- [13] 韩学辉,郭俊鑫,毛新军,等.泥质砂岩黏土附加导电强度评价指数定义及应用方法[J].地球物理学报,2019,62(11):4462-4471.  
HAN X H, GUO J X, MAO X J, et al. Definition of clay additional conductivity intensity index for argillaceous sandstone and its application[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(11): 4462-4471.
- [14] 刘成川,陈俊,黎华继,等.中江气田沙溪庙组气藏致密砂岩储层测井评价[J].石油物探,2020,59(1):131-140.  
LIU C C, CHEN J, LI H J, et al. Logging evaluation of the tight sandstone reservoir in the gas reservoir of the Shaximiao formation within Zhongjiang gas field, China[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(1): 131-140.
- [15] 吴群,余文端,骆卫峰,等.苏北盆地溱潼凹陷岩性油藏勘探成果及启示[J].中国石油勘探,2016,21(3):99-107.  
WU Q, YU W D, LUO W F, et al. Achievements and recognitions of exploration in lithologic reservoirs in Qintong sag, North Jiangsu Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3): 99-107.
- [16] 臧素华.苏北盆地溱潼凹陷西斜坡阜三段沉积相研究[J].石油地质与工程,2014,28(6):22-24.  
ZANG S H. Sedimentary facies study of 3rd member Funing formation in western slope of Qintong depression, northern Jiangsu basin[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2014, 28(6): 22-24.
- [17] 卞梅.溱潼凹陷西南斜坡阜三段滩坝沉积特征及模式[J].非常规油气,2018,5(3):25-30.  
BIAN M. The beach bar sedimentary characteristics and models of the third member of Funing Formation in the southwest slope of Qintong Sag[J]. Unconventional Oil & Gas, 2018, 5(3): 25-30.
- [18] 张航国,咎灵.苏北盆地溱潼凹陷西斜坡阜宁组三段油气富集规律[J].长江大学学报,2016,13(35):13-17.  
ZHANG H G, ZAN L. The rules of hydrocarbon enrichment in the 3<sup>rd</sup> member of Funing Formation on the west steep slope of Qintong Depression of North Jiangsu Basin[J]. Journal of Yangtze University, 2016, 13(35): 13-17.
- [19] 张松扬.大牛地气田致密砂岩储层测井评价[J].石油物探,2010,49(4):415-420.  
ZHANG S Y. Logging evaluation technique for tight sandstone reservoir in Daniudi Gasfield[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2010, 49(4): 415-420.
- [20] 王旭影,姜在兴.苏北盆地海安凹陷古近系阜三段滩坝沉积特征[J].油气地质与采收率,2018,25(5):57-64.  
WANG X Y, JIANG Z X. Sedimentary characteristics of beach-bar in the 3rd member of Paleogene Funing Formation in Hai'an Sag, North Jiangsu Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(5): 57-64.
- [21] 敬晓波.溱潼西斜坡阜三段储层特征及主控因素研究[J].石油地质与工程,2019,33(1):6-9.  
JING X B. Reservoir characteristics and main controlling factors of Fu 3 member of Qintong west slope[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2019, 33(1): 6-9.

(编辑 王隽)