

# 海上低流度储层启动压力梯度测试新方法

姜洪丰

中海石油(中国)有限公司湛江分公司勘探开发部 广东湛江 524057

通讯作者: Email: jianghf3@cnoc.com.cn

项目支持: 中国海洋石油有限公司“十四五”重大科技项目“海上深层/超深层储层经济产能获取技术研究”(KJGG2022-0406)

引用: 姜洪丰. 海上低流度储层启动压力梯度测试新方法[J]. 油气井测试, 2024, 33(5): 51-55.

Cite: JIANG Hongfeng. A new method for testing threshold pressure gradient in offshore low-mobility reservoirs [J]. Well Testing, 2024, 33(5): 51-55.

**摘要** 目前业内主要用数值计算方法和岩心实验法获取启动压力梯度,但在勘探阶段岩心资料较少,且缺少利用现有测试资料确定启动压力梯度的方法。基于地层测试资料,利用渗流力学理论和试井分析方法刻画了低渗储层中流体流动过程,建立了一种基于测试资料的启动压力梯度计算新方法,并针对性完善了现场测试工艺制度,形成了一套低流度储层测试及评价方法。该方法在南海西部 WSX-1 井中进行了实践,顺利完成了地层测试及储层评价,计算得到了储层启动压力梯度 1.55 MPa/100 m,说明了该技术方法的可行性。研究结果对海上低流度储层勘探开发具有一定借鉴意义。

**关键词** 南海油田;低流度储层;探井;地层测试;启动压力梯度;测试工艺;计算方法

中图分类号: TE345 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.05.008

## A new method for testing threshold pressure gradient in offshore low-mobility reservoirs

JIANG Hongfeng

Department of Exploration and Development of Zhanjiang Company, CNOOC (China) Co., Ltd., Zhanjiang, Guangdong 524057, China

**Abstract:** Currently, the industry primarily relies on numerical calculation methods and core experiments to determine the threshold pressure gradient. However, core data is scarce during the exploration stage, and there is a lack of methods to determine the threshold pressure gradient using existing test data. Based on formation test data and applying flow mechanics theory and well test analysis, the fluid flow in low-permeability reservoirs was characterized, and a new method for calculating the threshold pressure gradient using test data was established. Additionally, the field testing procedures were optimized, forming a comprehensive method for testing and evaluating low-mobility reservoirs. This method was successfully applied in well WSX-1 in the western South China Sea, where formation testing and reservoir evaluation were completed, yielding a calculated threshold pressure gradient of 1.55 MPa/100 m. The results demonstrate the feasibility of this technique and offer valuable insights for the exploration and development of offshore low-mobility reservoirs.

**Keywords:** South China Sea oilfield; low-mobility reservoir; exploration well; formation testing; threshold pressure gradient; testing procedures; calculation method

随着常规油气藏勘探程度加深和开发难度加大,海上勘探开发逐渐向低孔渗、稠油领域进发<sup>[1]</sup>,该类储层具有流动性差的共同点,生产流动过程中存在明显启动压力梯度特征,只有当驱动剪切力超过某一初始剪切力时,原油才开始流动<sup>[2-5]</sup>。这使得油藏驱替难度大,采收率低,部分稠油、低渗油田技术可采储量仅有 3%,绝大多数稠油资源长眠于地下<sup>[6]</sup>。不同油田对其规律有不同的研究结果,总体来看启动压力梯度是与流度成反相关的,在稠油

和低渗储层中其特征表现得更加明显<sup>[7-8]</sup>。

启动压力梯度对油田开发有重要影响,主要体现在以下三方面:第一,启动压力梯度对合理井网井间影响明显,在存在启动压力梯度的储层中应注意启动压力梯度对井网井距影响<sup>[9]</sup>;第二,明确启动压力梯度可提高油藏产能评价准确度,对开采周期和采收率评价保持客观认识,避免出现稠油油藏开发效果差于预期的情况<sup>[10]</sup>;第三,针对启动压力梯度的大小,可以提出改善开发效果的措施,如蒸

汽吞吐,人工举升等等<sup>[11]</sup>。总之,启动压力梯度对开发意义深远,在勘探开发一体化进程中需要在勘探阶段对其评价落实,有效指导后续开发部署。目前,业内确定启动压力梯度方法主要可分为两类:一是数值计算方法,其特点是方便快捷,但是计算模型选择需要生产或实验数据支撑<sup>[12]</sup>。二是物理模拟实验,其结果具有较高的代表性,但前提是有大量的岩心和代表性流体样品,且实验过程复杂,条件苛刻,耗时较长<sup>[13]</sup>。针对上述两种方法在地质资料缺少的勘探区块不具备评价条件,本文提出了通过测试技术分析启动压力梯度的新方法,其优点是基于动态数据进行分析获取启动压力梯度,结果代表性高,可直接指导开发。但该技术对测试技术和作业经验要求较高,在深入挖掘测试理论、工艺和方法的基础上,提出了探井启动压力梯度测试新技术。

## 1 地层中流体流动模型构建及求解

在低流量油藏中,储层一般具有低孔低渗的特征,由于储层孔隙度细小导致流体流动过程中流体与孔道避免相互作用力较大,存在一定的附加阻力效应,流体流动过程中只要驱替压力梯度大于该附加阻力效应时才能流动。根据渗流力学理论,该类储层中流体的流动速度可以表示为

$$\begin{cases} v = 0 & \left| \frac{\partial p}{\partial r} \right| \leq \lambda \\ v = -\frac{k}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial r} - \lambda \right) & \left| \frac{\partial p}{\partial r} \right| > \lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中: $v$ 为流动速度,m/s; $k$ 为地层渗透率,mD; $\mu$ 为流体黏度,mPa·s; $p$ 为地层压力,MPa; $r$ 为半径,m; $\lambda$ 为启动压力梯度,MPa/m。

在海上探井测试过程中,由于作业环境限制及地层物性影响,在测试时间内一般很难探测到地层边界,因此可以把地层看作是无限大。假设地层等厚、不考虑重力及流动过程中流体物理化学变化,地层内流体流动的连续性方程可以写为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{k}{\mu} r \left( \frac{\partial p}{\partial r} - \lambda \right) \right] = \frac{\phi C_i}{3.6} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2)$$

式中: $\phi$ 为孔隙度; $C_i$ 为综合压缩系数,MPa<sup>-1</sup>;  $t$ 为时间,s。

在探井测试中,地层压力处于原始压力状态,因此初始条件可以写为:

$$p(r, 0) = p_i \quad (3)$$

假设测试过程中,井以定产量生产,井筒处的

内边界条件可以写为:

$$\frac{172.8\pi}{\mu} \left( rhk \left( \frac{\partial p}{\partial r} - \lambda \right) \right)_{r=r_w} - 24C \frac{dp_w}{dt} = qB \quad (4)$$

$$p_w = \left[ p - Sr \left( \frac{\partial p}{\partial r} - \lambda \right) \right]_{r=r_w} \quad (5)$$

由于地层无限大,可以补充外边界条件:

$$p(\infty, t) = p_i \quad (6)$$

方程(2)至方程(6)构成了低流量油藏非达西流体流动模型。由于模型具有较强的非线性,无法直接求解,这里通过隐式有限差分方法对模型进行离散得到模型的求解矩阵,然后利用高斯消元法对矩阵进行求解,得到了井底压力及地层压力的分布。根据地层压力分布,得到了地层中压力梯度场的分布,进而确定了地层中流动区域的大小。最后结合探井测试的作业特点,给出了基于测试资料求取油藏启动压力梯度的相关方法。

在求解过程中考虑压力场分布的差异,采用等对数步长块中心网格对油藏进行离散,网格步长可表示为:

$$\Delta x = \frac{1}{N} \ln r_e \quad (7)$$

于是可以得到离散后的流动连续性方程为:

$$\frac{1}{e^{2(i-0.5)\Delta x} \Delta x^2} p_i^{n+1} - \left( \frac{2}{e^{2(i-0.5)\Delta x} \Delta x^2} + \frac{\phi C_i \mu \Delta t}{3.6k} \right) p_i^{n+1} + \frac{1}{e^{2(i-0.5)\Delta x} \Delta x^2} p_{i+1}^{n+1} = \frac{1}{e^{(i-0.5)\Delta x} \Delta x} \lambda - \frac{\phi C_i \mu \Delta t}{3.6k} p_i^n \quad (8)$$

内边界处,

$$\frac{172.8\pi hkr_w}{\mu} \left[ \frac{p_i^{n+1} - p_w^{n+1}}{(e^{0.5\Delta x} - r_w) \Delta x} - \lambda \right] - 24C \frac{p_w^{n+1} - p_w^n}{\Delta t} = qB \quad (9)$$

外边界处,

$$p(r_e, t) = p_i \quad (10)$$

由方程(8)至方程(10)联立形成方程组,其系数矩阵为大型矩阵,利用高斯消元法进行求解,可以得到任意时刻地层网格中的压力分布。基于压力分布可以得到地层中压力梯度的分布,地层中压力梯度表达式可以写为:

$$\frac{\partial p(r_i, t)}{\partial r} = \frac{p_{i+1} - 2p_i + p_{i-1}}{2e^{(i+0.5)\Delta x} - 2e^{(i-0.5)\Delta x}} \quad (11)$$

根据非达西流体在低渗储层中的流动特征,只有当压力梯度大于启动压力梯度后流体才开始流动,根据得到的地层中启动压力梯度分布图可以得

到探测半径的大小。在探井测试过程中,通常会采用多个测试制度进行测试,由于测试过程中地层参数及井参数没有发生变化,所以可以根据不同测试制度下测试时间及井底压力的大小通过试算确定地层启动压力梯度大小。

## 2 特征参数对测试结果影响评价

某油藏厚度 18.8 m,孔隙度 17.5%,含水饱和度为 27.9%,原始地层压力为 35.36 MPa,地层温度为 125 °C,井筒半径为 7.854 cm,地层渗透率为 7.9 mD,原油黏度为 9.65 mPa·s。为分析测试过程中,相关地层参数对测试结果的影响,这里对相关参数的影响进行了敏感性分析。

### (1) 启动压力梯度对井底压力曲线的影响

地层中存在启动压力梯度时,流体流动时需要克服启动压力梯度,只有地层压力梯度大于启动压力梯度时地层流体才发生流动。当测试井以定产量生产时,启动压力梯度越大,生产压差越大。图 1 为测试井不同启动压力梯度下的井底压力和压力导数曲线,在早期启动压力梯度对压力和压力导数形态影响不大,后期导致压力和压力导数曲线出现上翘,表现出与油藏存在边界或物性变差时相同的试井响应特征,在测试过程中应结合流体物性和地质成果准确识别特征曲线形成原因,对测试资料进行合理解释和评价。

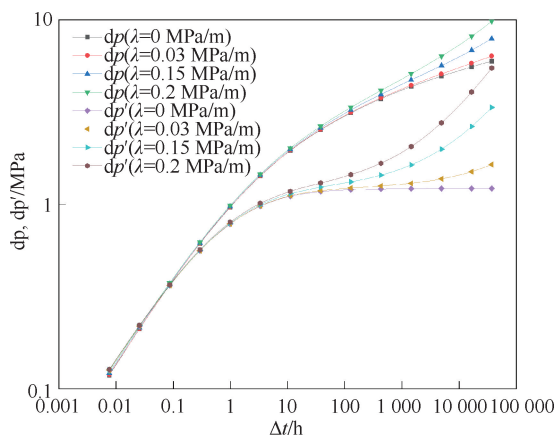


图 1 不同启动压力梯度下测试井压力和压力导数曲线图

Fig. 1 Curves of pressure and pressure derivative for different threshold pressure gradients

### (2) 启动压力梯度对生产压差的影响

启动压力梯度在储层中一般是由于流体与流动孔隙壁面的相互作用产生的。存在启动压力梯度的地层中进行试井测试时,原油从地层流动井筒的过程中,需同时克服启动压力梯度和流体流动时

的渗流阻力,因此相比常规储层,相同条件下存在启动压力梯度的储层生产压差更大。图 2 为不同时刻 3 种不同启动压力梯度地层中的生产压差柱状图,存在启动压力梯度的储层中生产压差明显高于无启动压力梯度的地层,且启动压力梯度越大,生产压差差异约明显。

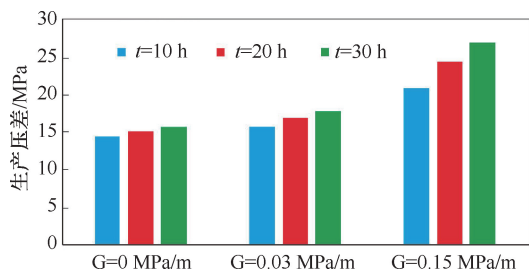


图 2 不同时间下 3 种不同启动压力梯度地层中的生产压差柱状图

Fig. 2 The production pressure difference histogram in the formation with three different starting pressure gradients at different time

### (3) 启动压力梯度对测试产能的影响

启动压力梯度的存在导致油井生产压差增大,进而降低了测试井的生产能力。图 3 为不同启动压力梯度下油井产油指数柱状图。由图可知,随着启动压力梯度增加,相同测试条件下油井产油指数明显降低,且测试时间越长,产能指数差异越明显。建议在低流量储层测试过程中,合理确定测试制度以准确获取油井的产能信息。

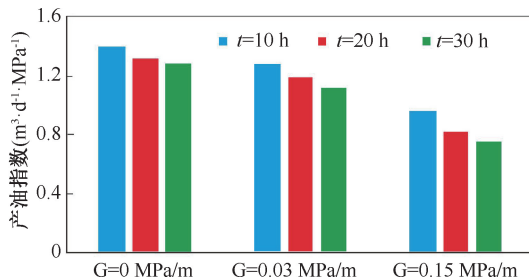


图 3 不同启动压力梯度下油井产油指数柱状图

Fig. 3 Histogram of oil production index of well under different starting pressure gradients

## 3 储层测试工艺与资料应用

南海西部 WSX-1 井是北部湾乌石区块一口低渗、稠油探井,该井区目的层位原油比重高、气油比低,加之物性一般,流动阻力比较大,存在明显的启动压力梯度现象,为在勘探阶段落实清楚启动压力梯度资料,为开发建产和井网部署提供基础,在 WSX-1 井测试作业中应用启动压力梯度测试技术。WSX-1 井测试作业测试层位是流沙岗组二段,测试

井段为:3 236.5~3 244.4 m,3 253.9~3 255.7 m,3 269.4~3 280.3 m,3 315.4 m~3 324.8 m,采用 TCP+RTTS 封隔器+DST 工具+139.7 mm 钻杆的射孔测试联作管柱,使用使用外径 127 mm,相位角 60°,孔密 16 孔 / m 的射孔枪,超深穿透高温 SD-PR45HMX39-1 射孔弹进行在负压 6.877 MPa 的条件下射开储层。由于在海上低流量储层测试中,储层原始压力、流动压力、表皮系数、流量、渗透率是需要测试精确落实。其中储层原始压力主要通过霍纳法得到,要求设置初开、初关井,且缩短开井时间、延长关井时间,这样霍纳外推得到的压力更具代表性;渗透率的获取主要是为了计算试井波及半径,也就是油藏压力漏斗的半径,作为启动压力梯度驱动距离,因此需要测试设置二关井,用试井解释精准求取,同时也可落实表皮系数;获取稳定流压,同流量建立产能回归方程。考虑到两点成线、三点验证思路,因此测试需设置三级求产,并拉开压差,以保证回归方程的准确性。综上所述,利用测试资料求取启动压力梯度需要初开、初关落实地层原始压力,需要二开二关落实多个油嘴的产能资料和关井压恢试井资料,且每个油嘴产量需尽量拉开,保证资料的准确性。因此在 WSX-1 井测试中采用了三开二关测试制度,测试过程顺利,取得准确的全套测试资料,见表 1 所示。

表 1 WSX-1 井 DST 测试各油嘴稳定求产资料表  
Table 1 Steady production data table of each oil nozzle in DST of WSX-1 well

测试制度	油井产量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	井底流压/ MPa	流动压差/ MPa	采油指数/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ·MPa <sup>-1</sup> )
制度 1	10.6	25.927	5.866	1.81
制度 2	41.3	17.604	14.189	2.91
制度 3	51.8	15.766	16.027	3.23

各项资料录取完毕后按照启动压力梯度试井方法计算得到表皮压力损失和流动压差,结合产量数据建立流动压差与油流量回归关系图(如图 4),可以看到三点的回归性较高,回归线为一条不过原点的直线,截距(启动压力)为 2.896 MPa,启动压力特征明显。

根据试井结果,建立波及距离随开关井时间的变化曲线,发现在开井时间实际为 54 h 23 min 时,波及距离为 186.4 m(图 5),结合启动压差 2.896 MPa,最终得到启动压力梯度为 0.015 5 MPa/m,即 1.55 MPa/100 m,验证了探井利用测试作业分析启动压力梯度技术的可行性。

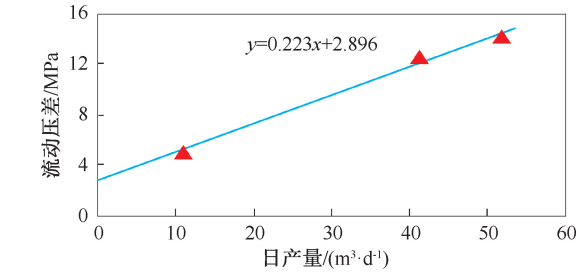


图 4 WSX-1 井流压—油流量回归关系曲线图  
Fig. 4 WSX-1 well flow pressure-oil flow regression curve

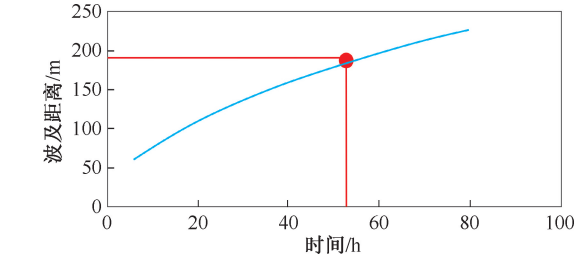


图 5 WSX-1 井压力波及距离随开井时间变化曲线  
Fig. 5 WS-X-1 well pressure sweep distance curve with opening time

针对海上低孔渗或者稠油等低流量储层,地层流动阻力大,井口压力低,难以实现多级稳定自喷求产,须辅以人工举升工艺。海上常用的人工举升工艺有氮气气举、电潜泵、电潜螺杆泵、地面杆驱螺杆泵等,各种工艺特点不同,进行适配性分析。氮气气举优势在于举升深度深、压差大,适合气井和低黏度油层的举升,对于稠油井,举升过程中的氮气膨胀降温会导致原油黏度急剧增大,导致稠油更加难以流动。电潜泵无法加热降低原油黏度,且不适配目前海上探井的一体化测试管柱。电潜螺杆泵无法井下加热降低原油黏度,提升流动性幅度有限。地面杆驱螺杆泵具备电缆加热、螺杆泵抽、变频变压等功能,能够从提高压差、降低原油黏度等多方面提高储层产能,且与海上探井射孔测试一体化管柱适配性好,应用可行性最高。通过地面杆驱螺杆泵可以拉大生产压差和产能梯度,为启动压力梯度的测试求取提供最佳的工艺手段。

4 结论

(1)基于渗流力学理论和试井分析方法能实现对低渗储层中流体流动过程的表征,建立的基于测试资料的启动压力梯度计算新方法能够实现低流量储层启动压力梯度的计算。

(2)基于 WSX-1 井测试资料计算的地层启动压力梯度为 1.55 MPa/100 m,验证了探井利用测试作业分析启动压力梯度技术的可行性。

(3)利用测试资料求取启动压力梯度建议初开、初关落地层原始压力,二开二关落实多个油嘴的产能资料和关井压恢试井资料,且每个油嘴产量需尽量拉开,保证资料的准确性。

**致谢:**感谢中海石油(中国)有限公司湛江分公司提供的技术应用场景和技术指导。

## 参考文献

- [1] 徐长贵,赖维成,张新涛,等.中国海油油气勘探新进展与未来勘探思考[J].中国海上油气,2023,35(2):1-12.  
XU Changgui, LAI Weicheng, ZHANG Xintao, et al. New progress and future exploration thinking of CNOOC oil and gas exploration[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(2):1-12.
- [2] 唐伏平,唐海,余贝贝,等.存在启动压力梯度时的合理注采井距确定[J].西南石油大学学报,2007,29(4):89-91.  
TANG Fuping, TANG Hai, YU Beibei, et al. The determination of the injection-production well spacing with the consideration of the start-up pressure gradient[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(4):89-91.
- [3] 许家峰,程林松,李春兰,等.普通稠油油藏启动压力梯度求解方法与应用[J].特种油气藏,2006,13(4):53-57.  
XU Jiafeng, CHENG Linsong, LI Chunlan, et al. Starting pressure gradient calculation and its application in conventional heavy oil reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2006, 13(4):53-57.
- [4] 李道品.低渗透砂岩油田开发[M].北京:石油工业出版社,1997:24-38.
- [5] 孙建芳.胜利油区稠油非达西渗流启动压力梯度研究[J].油气地质与采收率,2010,17(6):74-77.  
SUN Jianfang. Threshold pressure gradient study on non-Newtonian flow of heavy oil reservoirs in Shengli oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(6):74-77.
- [6] 郭太现,苏彦春.渤海油田稠油油藏开发现状和技术发展方向[J].中国海上油气,2013,25(4):26-30.  
GUO Taixian, SU Yanchun. Current status and technical development direction in heavy oil reservoir development in Bohai oilfields[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(4):26-30.
- [7] 张戈,邢振华,张伟,等.低流量稠油油藏启动机制及主控因素实验研究[J].西安石油大学学报(自然科学版),2023,38(2):77-83.  
ZHANG Ge, XING Zhenhua, ZHANG Wei, et al. Experimental study on start-up mechanism and main controlling

- factors of low-mobility heavy oil reservoir[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2023, 38(2):77-83.
- [8] 郑洁,代玲,薛永超.海上低渗透油藏启动压力梯度实验研究[J].新疆石油天然气,2015,11(4):31-35.  
ZHENG Jie, DAI Ling, XUE Yongchao. An experimental study on starting pressure gradient of low permeability reservoirs on offshore field[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2015, 11(4):31-35.
- [9] 王熙华.利用启动压力梯度计算低渗油藏最大注采井距[J].断块油气田,2003,10(6):75-76.  
WANG Xihua. Using start-up pressure gradient to calculate low-permeability reservoir's biggest producer-injector spacing[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2003, 10(6):75-76.
- [10] 祝明谦,王怒涛,张辉.启动压力梯度和应力敏感效应对油藏产能的影响[J].大庆石油地质与开发,2018,37(3):59-63.  
ZHU Mingqian, WANG Nutao, ZHANG Hui. Influences of the start-up pressure gradient and stress sensitive effect on the productivity of the oil reservoir[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(3):59-63.
- [11] 苗志国.有效驱动系数对低和特低渗透储层开发效果的影响[J].大庆石油地质与开发,2016,35(2):43-47.  
MIAO Zhiguo. Influence of the effective driving coefficient on the development effects of low and ultra-low-permeability reservoirs[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(2):43-47.
- [12] 胡心玲,曹晨光,梁文川.基于分形理论的多孔介质稠油启动压力梯度计算与分析[J].断块油气田,2022,29(4):514-519.  
HU Xinling, CAO Chenguang, LIANG Wenchuan. Calculation and analysis of threshold pressure gradient of heavy oil in porous media based on fractal theory[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29(4):514-519.
- [13] 黄亮,石军太,杨柳,等.低渗气藏启动压力梯度实验研究及分析[J].断块油气田,2016,23(5):610-614.  
HUANG Liang, SHI Juntai, YANG Liu, et al. Experimental research and analysis on threshold pressure gradient in low-permeability gas reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(5):610-614.

编辑 吴志力

**第一作者简介:**姜洪丰,男,1990年出生,高级工程师,学士学位,2013年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业,现从事海上地层测试研究和管理工作。电话:0759-3911150, Email:jianghf3@cnooc.com.cn。通信地址:广东省湛江市坡头区南调路22号信箱,邮政编码:524057。