

考虑压力敏感及流体黏度的致密油藏动用半径

姜永,吴浩君,高振南,杨晨旭

中海石油(中国)有限公司天津分公司 天津 300459

通讯作者:Email:jiangyong198786858@163.com

项目支持:中海石油(中国)有限公司重大专项“渤海中深层复杂油气藏高效开发技术”(CNOOC-KJ135 ZDXM36TJ03TJ)

引用:姜永,吴浩君,高振南,等. 考虑压力敏感及流体黏度的致密油藏动用半径[J]. 油气井测试,2024,33(3):8-12.

Cite: JIANG Yong, WU Haojun, GAO Zhennan, et al. Drainage radius of tight oil reservoirs considering pressure sensitivity and fluid viscosity[J]. Well Testing, 2024, 33(3): 8-12.

摘要 常用的低渗透致密油藏动用半径计算方法未考虑地层渗透率及流体黏度的变化,影响了结果的准确性。建立考虑启动压力梯度、渗透率及原油黏度随地层压力变化的致密油藏动用半径计算模型,并采用数值分析的迭代法对模型进行了求解,分析启动压力梯度、压力敏感系数、黏度变形系数、生产压差等关键参数对油井动用半径的影响。结果表明,启动压力梯度越大,流体的非线性流动越强,油井动用半径越小;随着生产压差的增大动用半径增大,同时,压力敏感系数对动用半径的影响也越来越大;黏度变形系数越大,导致渗流阻力增加,油井动用半径越小。研究成果应用于BZ油田开发方案制定,确定合理生产压差为8~10 MPa,合理注采井距约为200~250 m。该方法对于低渗透致密油藏开发方案制定具有一定指导意义。

关键词 致密油藏;动用半径;启动压力梯度;压力敏感效应;黏度变形系数;生产压差;低渗透;非达西渗流

中图分类号:TE312

文献标识码:A

DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.03.002

Drainage radius of tight oil reservoirs considering pressure sensitivity and fluid viscosity

JIANG Yong, WU Haojun, GAO Zhennan, YANG Chenxu

Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China

Abstract: To address the issues in calculating the dynamic drainage radius of low-permeability tight oil reservoirs, a model considering the startup pressure gradient, permeability, and variations in crude oil viscosity with reservoir pressure was established. The model was solved using numerical analysis iterative method, and the effects of key parameters such as startup pressure gradient, pressure sensitivity coefficient, viscosity deformation coefficient, and production pressure difference on the drainage radius of oil wells were analyzed. The results indicate that the larger the startup pressure gradient, the stronger the non-linear fluid flow and the smaller the drainage radius of oil wells. As the production pressure difference increases, the drainage radius also increases. As the production pressure difference increases, the drainage radius increases. When the production pressure difference is small, the influence of the pressure sensitivity coefficient on the drainage radius is relatively small, but as the production pressure difference increases, the impact of the pressure sensitivity coefficient becomes more significant. The higher the viscosity deformation coefficient, the larger the flow resistance and the smaller the drainage radius of oil wells. The research findings were applied to designing development plan for the BZ Oilfield, where a reasonable production pressure difference of 8~10 MPa and an injection-production well spacing of approximately 200~250 meters were recommended. The design of injection-production well spacing and reasonable working system for oil wells achieved favorable results, which provides a guidance for the design of development plans for tight oil reservoirs.

Keywords: tight oil reservoir; drainage radius; startup pressure gradient; pressure sensitivity effect; viscosity deformation coefficient; production pressure difference; low permeability; non-Darcy flow

随着勘探开发力度的不断加大,国内许多致密油藏陆续投入开发。致密油藏具有低孔、低渗的特点。细小的孔道导致渗流阻力增强,特别是在孔道小于1 μm 时,只有克服启动压力梯度后,地层流体才能流动^[1-3]。对于致密油藏的开发,油井有效动

用半径是开发井网设计的重要参数^[4-5]。油井的储量动用程度、储层动用半径会受到启动压力梯度的影响,从而影响油井的采油能力。对于低渗油藏的开发,有许多学者针对低渗非达西渗流特征、调查半径计算、动用半径计算方法、产能变化规律等方

面开展了大量研究工作,刘英宪等^[6]基于椭圆流理论,建立了考虑启动压力梯度的低渗油藏压裂井的产能及动用半径计算方法。陈民锋等^[7]建立了考虑启动压力梯度影响下的油藏动用半径计算模型,分析了致密油藏中地层压力梯度分布、油井动用半径变化规律。朱维耀等^[8]建立了低、特低渗油藏考虑非达西渗流油井未压裂情况下动用半径计算公式。罗宪波等^[9]针对稠油油藏存在非达西渗流情况,建立了存在启动压力梯度时稠油油藏油井有效动用半径的数学模型。前人对低渗油藏动用半径的研究,主要是分析启动压力梯度的影响,而没有综合考虑油田开发过程中地层渗透率和流体黏度的变化,但实际对于致密油藏,渗透率和黏度的细微变化对渗流机理有很大的影响^[10]。本文基于低渗油藏渗流理论,同时考虑了启动压力梯度、压力敏感效应和流体黏度变化,建立了致密油藏油井动用半径计算模型,分析了启动压力梯度、压力敏感系数、黏度变形系数、生产压差等关键参数对油井动用半径的影响。

1 储层压力敏感及黏度变化特征

在油藏开发过程中,随着地下流体的不断采出,储层有效应力随着地层压力下降而增加。而当有效应力增大时,储层的孔隙空间受到压缩,导致油藏孔隙和喉道的体积减小。对于低渗致密油藏而言,这些变化使储层的渗透率产生明显下降,从而影响储层的渗流能力^[11-13],进而影响油井的产能、油田采收率等开发指标。另外,对于低渗致密油藏,原油黏度的变化对渗流机理也会产生较大的影响。特别是当油田地层压力低于饱和压力时,由于原油脱气导致黏度增加,从而导致渗流阻力增加。因此,储层渗透率的压力敏感现象及流体性质变化对致密油藏开发方案的设计就显得尤为重要。

2 动用半径计算公式推导

假设均质、水平、等厚圆形油藏中有一口生产井定产量生产,地层流体为单相渗流,微可压缩。考虑黏度变化和地层应力敏感的影响,忽略重力和毛管力的影响。

不考虑启动压力梯度时,稳定渗流的数学模型为

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[r \frac{k(p)}{\mu(p)} \frac{dp}{dr} \right] = 0 \quad (1)$$

$$p(r_w) = p_w \quad (2)$$

$$p(r_e) = p_i \quad (3)$$

式中: k 为渗透率, μm^2 , μ 为原油黏度 $\text{mPa} \cdot \text{s}$; r_e 为油藏半径, m ; r_w 为井半径, m ; p_w 为井底压力, MPa ; p_i 为原始地层压力, MPa 。

假设渗透率随压力呈指数变化,同时假设流体黏度也随压力呈指数变化^[10]。

$$k(p) = k_0 e^{-c_k(p_i-p)} \quad (4)$$

$$\mu(p) = \mu_0 e^{-c_\mu(p_i-p)} \quad (5)$$

式中: c_k 为渗透率变形系数, MPa^{-1} ; c_μ 为黏度变形系数, MPa^{-1} 。

对(1)式积分得

$$r \frac{k(p)}{\mu(p)} \frac{dp}{dr} = C_1 \quad (6)$$

分离变量得

$$\frac{k(p)}{\mu(p)} dp = \frac{C_1}{r} dr \quad (7)$$

将式(4)、式(5)代入式(7)得

$$\frac{k_0 e^{-c_k(p_i-p)}}{\mu_0 e^{c_\mu(p_i-p)}} dp = \frac{C_1}{r} dr \quad (8)$$

对式(8)积分得

$$\frac{k_0}{\mu_0} \frac{1}{c_k - c_\mu} e^{(-c_\mu - c_k)(p_i-p)} = C_1 \ln(r) + C_2 \quad (9)$$

将边界条件式(2)、式(3)代入式(9),求得 C_1 、 C_2 ,即

$$C_1 = \frac{k_0}{\mu_0} \frac{1}{(c_k + c_\mu) \ln(r_e/r_w)} [1 - e^{(-c_\mu - c_k)(p_i-p_w)}] \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{k_0}{\mu_0} \frac{1}{(c_k + c_\mu)} \left[1 - \frac{\ln r_e}{\ln(r_e/r_w)} (1 - e^{(-c_\mu - c_k)(p_i-p_w)}) \right] \quad (11)$$

将式(10)、式(11)代入式(9),则地层压力分布满足关系式

$$e^{(-c_\mu - c_k)(p_i-p)} = \frac{1}{\ln(r_e/r_w)} [1 - e^{(-c_\mu - c_k)(p_i-p_w)}] \ln(r) + \left[1 - \frac{\ln r_e}{\ln(r_e/r_w)} (1 - e^{(-c_\mu - c_k)(p_i-p_w)}) \right] \quad (12)$$

对于低渗致密油藏,细小的孔道导致渗流阻力增强,流体流动时,由于存在启动压力梯度的影响,只有当驱动压力梯度大于孔道的启动压力梯度时,流体才开始流动。假设油藏启动压力梯度为 G ,则

当 $\frac{dp}{dr} \geq G$ 时的区域为油藏实际供液区, $\frac{dp}{dr} = G$ 时对应

$$\begin{cases} e^{(-c_\mu - c_k)(p_i - p)} = \frac{1}{\ln(r_e/r_w)} [1 - e^{(-c_\mu - c_k)(p_i - p)}] \ln(r_m) + \left[1 - \frac{\ln r_e}{\ln(r_e/r_w)} (1 - e^{(-c_\mu - c_k)(p_i - p_w)}) \right] \\ \left. \frac{dp}{dr} \right|_{r=r_m} = G \end{cases} \quad (13)$$

式(13)为综合考虑了启动压力梯度、压力敏感效应和流体黏度变化的致密油藏油井动用半径计算模型方程组,可以看出,油井的有效动用半径不仅与生产压差有关,与渗透率变形系数、黏度变形系数及启动压力梯度也密切相关。由于该方程是关于 r_m 的非线性方程,采用数值分析的迭代法求解。

3 动用半径影响因素分析

基于以上建立的致密油藏油井动用半径计算模型及求解,分析了启动压力梯度、生产压差、压力敏感系数、黏度变形系数对动用半径的影响,为指导致密油藏开发方案的设计提供理论依据。

3.1 启动压力梯度对动用半径影响

通过对上述模型进行求解,可以获得不同启动压力梯度下油井的动用半径(见图1)。

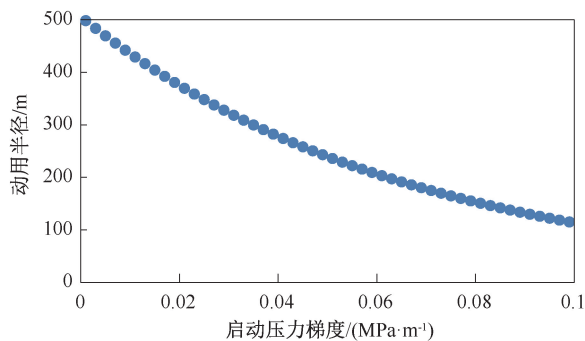


图1 启动压力梯度对动用半径的影响

Fig. 1 Influence of starting pressure gradient on application radius

计算参数为: $r_e = 500$ m、 $r_w = 0.11$ m、 $p_w = 20$ MPa、 $p_i = 30$ MPa、 $c_k = 0.001$ MPa⁻¹、 $c_\mu = 0.06$ MPa⁻¹。可以看出,低渗致密油藏的动用半径受启动压力梯度影响非常明显。启动压力梯度的存在会增加流体渗流阻力,从而降低流体在孔道中的流动能力,使得油井有效动用半径明显减小。当其他开发条件一定时,启动压力梯度越大,流体的非线性流动越强,油井动用半径越小,特别是当启动压力梯度达到 0.06~0.1 MPa/m 时,油井的动用半径明显降低。

应的半径为油藏的有效动用半径。假设油藏动用半径为 r_m ,则 r_m 可由下面方程组解出。

3.2 生产压差对动用半径影响

动用半径随着生产压差变化的关系(见图2),计算参数为: $r_e = 500$ m、 $r_w = 0.11$ m、 $c_k = 0.001$ MPa⁻¹、 $c_\mu = 0.06$ MPa⁻¹。结果表明,当启动压力梯度一定时,生产压差越大,油井的动用半径相应增大。但对于低渗存在压力敏感效应的油藏,若生产压差过大,地层压力逐渐下降,导致岩石的有效应力不断增加,储层渗透率和孔隙度随之减小,因而导致当生产压差增大到一定程度时,有效动用半径增加的幅度会逐渐减小。

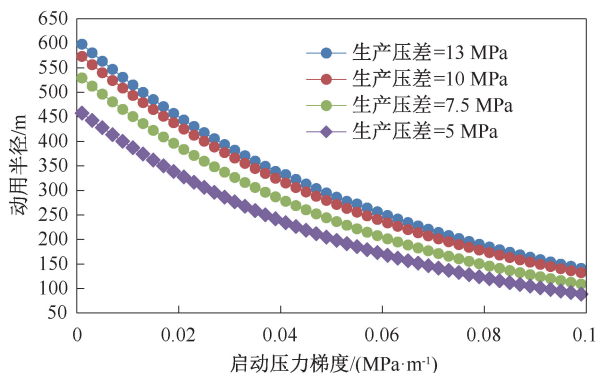


图2 生产压差对动用半径的影响

Fig. 2 Influence of production pressure difference on application radius

3.3 压力敏感系数对动用半径影响

对于低渗透致密油藏,渗透率的微小变化造成渗流机理的较大改变,不同压力敏感系数下动用半径随着生产压差变化的关系(见图3)。

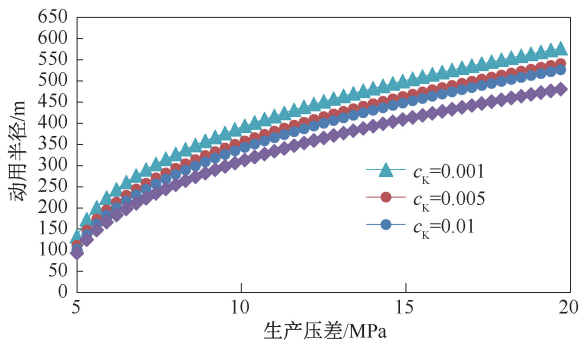


图3 压力敏感系数对动用半径的影响

Fig. 3 Influence of pressure sensitivity coefficient on application radius

计算参数为: $r_e = 500\text{ m}$ 、 $r_w = 0.11\text{ m}$ 、 $p_w = 20\text{ MPa}$ 、 $p_i = 30\text{ MPa}$ 、 $G = 0.02$ 、 $c_\mu = 0.06\text{ MPa}^{-1}$ 。可以看出,当生产压差一定时,压力敏感系数越大,油井动用半径越小。生产压差较小时,压力敏感系数对动用半径的影响差异相对较小,之后随着生产压差的增大,压力敏感系数对动用半径的影响也越来越大。

3.4 黏度变形系数对动用半径影响

对于低渗致密油藏,原油黏度的变化对渗流机理也会产生较大的影响。随着地层压力下降,流体黏度增加,导致渗流阻力增加,从而影响油井的生产能力。不同黏度变形系数下动用半径随着生产压差变化的关系(见图 4),计算参数为: $r_e = 500\text{ m}$ 、 $r_w = 0.11\text{ m}$ 、 $p_w = 20\text{ MPa}$ 、 $p_i = 30\text{ MPa}$ 、 $c_k = 0.003\text{ MPa}^{-1}$ 、 $G = 0.02$ 。结果表明,黏度变形系数越大,油井动用半径越小,并且当黏度变形系数大于 0.05 时,对动用半径的影响明显提高。因此,对于低渗致密油藏的开发,要保证油田的稳产,须采用注水、注气等手段保持地层压力,防止因地层压力下降导致原油脱气黏度升高。

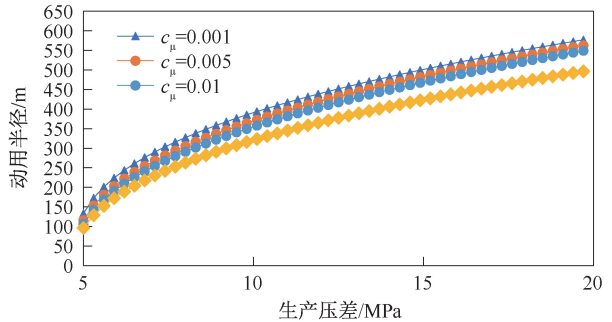


图 4 黏度变形系数对动用半径的影响
Fig. 4 Influence of viscosity deformation coefficient on application radius

4 实例应用

以 BZ 低渗油田为例,生产井半径为 0.11 m,原始地层压力 32 MPa,渗透率为 1~10 mD,渗透率变形系数为 0.03 MPa⁻¹,启动压力梯度为 0.04 MPa/m。根据油藏实际资料和本文所建立的动用半径计算方法进行分析,动用半径随生产压差的关系见图 5,可以看出,随着生产压差的增大,油井的动用半径不断增大,当生产压差为 10 MPa 时,动用半径约 250 m,生产压差达到 20 MPa 时,动用半径可达到 450 m 左右。同时,结合油田的产能认识,由于受启动压力梯度和压力敏感效应的双重影响,油井采油指数随着生产压差的增大并不是单调递增

的,当生产压差小于 8~10 MPa 时,采油指数随着生产压差的增大而增大,油井采油指数最高为 0.53 m³/(d·MPa),之后随着生产压差的增大采油指数反而减小(见图 6),结合油井的动用半径及采油指数变化规律综合分析,建议油田合理的生产压差控制在 8~10 MPa 之间,油田的开发方案设计注采井距约为 200~250 m。

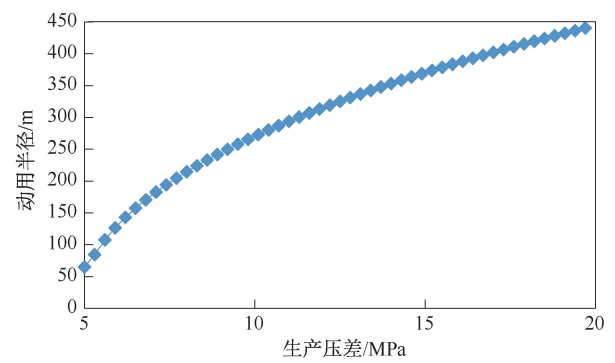


图 5 动用半径随生产压差变化关系
Fig. 5 Relationship between application radius and production pressure difference

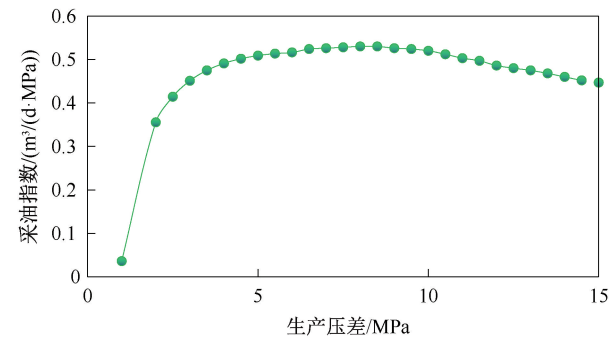


图 6 油井采油指数随生产压差变化关系
Fig. 6 Relation of oil recovery index with production pressure difference

5 结论

- (1)在综合考虑启动压力梯度影响及渗透率随压力变化的基础上,建立了低渗压敏油藏油井动用半径计算方法,并对模型进行了数值求解,通过实例计算表明所建模型适用于低渗压敏油藏动用半径分析。
- (2)当生产压差一定时,随着启动压力梯度、压力敏感系数及黏度变形系数的增大,油井动用半径越小。
- (3)随着生产压差的增大,油井动用半径越大,当生产压差增大到一定程度时,油井动用半径增加趋势会逐渐减弱,油井合理生产压差确定要综合考虑油井动用半径、采油能力变化等对开发的影响。

(4)对于低渗压敏油藏的开发,油田开发方式的选择、注采井距等参数的设计应综合考虑启动压力梯度、应力力敏感性、原油黏度变化等关键参数的影响。

致谢:感谢中海石油(中国)有限公司天津分公司相关技术人员在论文编写期间给予的指导和帮助。

参考文献

- [1] 阮敏,何秋轩.低渗透非达西渗流综合判据初探[J].西安石油学院学报(自然科学版),1999(4):53-55.
RUAN Min, HE Qiuxuan. Preliminary study on comprehensive criterion of low permeability non-Darcy seepage flow [J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition), 1999(4): 53-55.
- [2] 谭雷军,贾永禄,冯曦.低速非达西流启动压力梯度的确定[J].油气井测试,2000,9(4):5-7.
TAN Leijun, JIA Yonglu, FENG Xi. Determination of starting pressure gradient for low speed non darcy flow [J]. Well Testing, 2000, 9(4): 5-7.
- [3] 秦积舜,张新红.变应力条件下低渗透储层近井地带渗流模型[J].石油钻采工艺,2001,23(5):41-44.
QIN Jishun, ZHANG Xinhong. Seepage model of low permeability reservoirs near wellbore under variable stress conditions [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2001, 23(5): 41-44.
- [4] 刘建军,刘先贵.低渗透岩石非线性渗流规律研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(3):556-561.
LIU Jianjun, LIU Xiangui. Research on nonlinear seepage law of low permeability rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(3): 556-561.
- [5] 陈明强,任龙,李明,等.鄂尔多斯盆地长7低渗透油藏渗流规律研究[J].断块油气田,2013,20(2):191-195.
CHEN Mingqiang, REN Long, LI Ming, et al. Study on the percolation law of chang 7 low permeability oil reservoirs in the Ordos basin [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(2): 191-195.
- [6] 刘英宪,高红立,张俊,等.非均质低渗油藏压裂井产能及动用半径研究[J].复杂油气藏,2012,5(3):53-55.
LIU Yingxian, GAO Hongli, ZHANG Jun, et al. Study on the productivity and production radius of fractured wells in heterogeneous low permeability reservoirs [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2012, 5(3): 53-55.
- [7] 陈民锋,李晓风,赵梦盼,等.启动压力影响下确定油藏有效动用半径[J].断块油气田,2013,20(4):462-465.
CHEN Minfeng, LI Xiaofeng, ZHAO Mengpan, et al. Determining the effective production radius of oil reservoirs

- under the influence of start-up pressure [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(4): 462-465.
- [8] 朱维耀,刘今子,宋洪庆,等.低/特低渗透油藏非达西渗流有效动用计算方法[J].石油学报,2010,31(3):452-457.
ZHU Weiyao, LIU Jinzi, SONG Hongqing, et al. Calculation method for effective utilization of non Darcy flow in low/ultra-low permeability reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 452-457.
- [9] 罗宪波,李波,刘英,等.存在启动压力梯度时储层动用半径的确定[J].中国海上油气,2009,21(4):248-250.
LUO Xianbo, LI Bo, LIU Ying, et al. Determination of reservoir development radius in the presence of start-up pressure gradient [J]. China Offshore Oil and Gas, 2009, 21(4): 248-250.
- [10] 张快乐,廖新维,赵晓亮,等.考虑渗透率和流体黏度的致密油藏探测半径[J].断块油气田,2017,24(4):518-521.
ZHANG Kuaile, LIAO Xinwei, ZHAO Xiaoliang, et al. Detection radius of tight oil reservoirs considering permeability and fluid viscosity [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2017, 24(4): 518-521.
- [11] 吕成远,王建.低渗透砂岩油藏渗流启动压力梯度实验研究[J].石油勘探与开发,2002,29(2):86-88.
LYU Chengyuan, WANG Jian. Experimental study on the starting pressure gradient of low permeability sandstone reservoir percolation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(2): 86-88.
- [12] 宋付权.变形介质低渗透油藏的产能分析[J].特种油气藏,2002,9(4):33-35.
SONG Fuquan. Productivity analysis of low permeability reservoirs with deformable media [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2002, 9(4): 33-35.
- [13] 计秉玉,赵宇,宋考平,等.低渗透油藏渗流物理特征的几点新认识[J].石油实验地质,2015,37(2):129-133.
JI Bingyu, ZHAO Yu, SONG Kaoping, et al. New understandings on the physical characteristics of low permeability oil reservoir seepage [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 129-133.

编辑 穆立婷

第一作者简介:姜永,1985年出生,男,高级工程师,硕士,2012年毕业于长江大学矿产普查与勘探专业,目前主要从事油藏工程方面的研究工作。电话:022-66500859。Email:jiangyong198786858@163.com。通信地址:天津市滨海新区海川路渤海石油管理局大厦B座渤海石油研究院,邮政编码:300459。