

环江油田长6储层基于多元回归分析的产能评价

章雨^{1,2}, 李少华², 李俊仪², 陈彤伟², 杨定贵², 陈威²

1. 北京大学地球与空间科学学院 北京 100871

2. 长江大学地球科学学院 湖北武汉 430100

通讯作者: Email: jpishli@sina.com

项目支持: 湖北省自然科学基金创新群体项目“储层精细表征与建模”(2016CFA024)、大学生创新项目“产能评价方法研究——以环江油田为例”(2015011)

引用: 章雨, 李少华, 李俊仪, 等. 环江油田长6储层基于多元回归分析的产能评价[J]. 油气井测试, 2019, 28(2): 68-72.

Cite: ZHANG Yu, LI Shaohua, LI Junyi, et al. Productivity evaluation of Chang 6 formation in Huanjiang Oilfield based on multivariate regression analysis [J]. Well Testing, 2019, 28(2): 68-72.

摘要 环江油田长6储层具有低孔隙度、特低-超低渗透率的特征, 非均质性强, 产能预测难度大。利用研究区内11口井的测井资料, 对有效层段的测井解释孔隙度、渗透率及含油饱和度进行多种方法的平均化处理, 筛选出最大值, 分析单井日产量与各测井参数的相关关系, 引入表征储层非均质性的定量评价参数进行回归分析, 建立了多元线性回归的产能预测模型。结果表明, 利用孔隙度、渗透率、含油饱和度的最大值, 以及有效厚度、突进系数、变异系数、级差, 多参数组合与单井日产量进行回归分析得到的相关性最好, 复相关系数0.970。建立的回归公式对新井的产能具有很好的预测效果, 为油田产能评价提供依据。

关键词 环江油田; 产能预测; 多元回归分析; 低孔低渗油藏; 储层非均质性; 相关系数; 定量评价

中图分类号: TE353 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.02.012

Productivity evaluation of Chang 6 formation in Huanjiang Oilfield based on multivariate regression analysis

ZHANG Yu^{1,2}, LI Shaohua², LI Junyi², CHEN Tongwei², YANG Dinggui², CHEN Wei²

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan Hubei 430100, China

Abstract: The reservoirs in Chang 6 Formation of Huanjiang Oilfield have the characteristics of low porosity, extra and ultra-low permeability, and strong heterogeneity, which lead to the difficult prediction of production capacity. The well logging data of 11 wells in the study area were used to average the porosity, permeability and oil saturation of the effective interval, and the maximum value of them were selected. In addition, the correlation between daily production of single well and various logging parameters was analyzed, and quantitative evaluation parameters for reservoir heterogeneity were introduced for regression analysis. Based on these works, a productivity prediction model for multiple linear regression was established. The results showed that the combination of porosity, permeability, maximum oil saturation, effective thickness, penetration coefficient, coefficient of variation, and gradation has the best correlation with the daily production of single well, and the multiple correlation coefficient factor reached to 0.970. The established regression formula has a good prediction effect on the productivity of new wells and provides a basis for the productivity evaluation of oilfields.

Keywords: Huanjiang Oilfield; productivity prediction; multiple regression analysis; low porosity and permeability reservoir; heterogeneity of reservoir; correlation coefficient; quantitative evaluation

油气储层产能评价与预测是油气勘探和开发领域的一项基本任务, 开展储层产能评价与预测工作, 不仅可以检验油气勘探成果, 而且可以为油气田开发规划部署、开发方案设计及开发动态分析提供重要依据。目前, 有关产能评价与预测的方法很

多^[1-4], 归纳起来可分为两大类: 一类是以测井信息为主的静态参数评价方法^[5]; 另一类是以试井资料为主的动态参数评价方法^[6]。利用地球物理测井手段获取的储层参数, 主要反映的是储层的静态特征, 无法直接反映出储层的动态特征。试井产能评

价,其测试的产能为测试供液半径内(通常是测试井周围几百米范围内)储层产能的平均值,对于层间有薄夹层分隔的多层合采的储层,由于其无法用封隔器准确封隔每一单一储层,因此无法得到单一储层的生产能力^[7]。

利用油气井系统测试资料,包括地层压力、井底流动压力和测试产量等进行计算,得出的仅是一口井或一个产层段的产能。而利用测井资料,解释反映岩性、物性、储层非均质性和含油性等地质参数的测井参数,可建立油田区块内已测试井的测井参数与产能关系式,进而直接估算出新井产能,节约测试成本和测试时间。其中,多元线性回归方法能综合考虑静态和动态的多种产能影响因素,是一种有效的预测方法^[8-11]。本文以环江油田长6储层为例,分析单井日产油量与测井参数(测井解释孔隙度、渗透率及含油饱和度等)的关系,其中,各参数的数据处理应用了平均化(算术、几何和调和)、筛选最大值等方法,同时,长6作为低孔低渗储层,其孔隙类型多样、孔隙结构复杂、非均质性强,故又引入表征储层渗透率变化的非均质性参数,即变异系数、突进系数和级差,并在此基础上建立多元线性回归的产能预测模型,筛选有利建产目标区,为油田高效开发提供科学依据。

1 多元回归分析原理

原油的单井日产量不只受单一因素的影响,除了渗透率、孔隙度和含油饱和度外,还与油层有效厚度、储层的非均质性等因素有关。因此,产能预测可以看成是一个变量与多个变量之间的相关关系。为此,可利用多元线性回归的方法进行模拟预测。

多元回归的基本思想:如果 y 是通过 x_1, x_2, \dots, x_m 来预测的随机变量,又估计它们之间存在某种线性关系,则可建立 m 元线性回归模型:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m + \varepsilon$$

式中: $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ 为待估参数; ε 为随机误差,且 $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ 。

结合测井及试油、试采等资料,假设原油单井日产量为 y ,影响单井日产油量的因素为 x_1, x_2, \dots, x_m ,利用 y 与 x_1, x_2, \dots, x_m 的 n 组($n \gg m$)观察值求出待估参数 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$,从而得到回归方程。

2 储层产能的影响因素

储层产能的影响因素众多,包括了储层自身条

件、油气性能以及外部环境条件等。而在实际生产过程中,油气性能和外部环境条件等都是相对固定不变的,故储层的自身性质将对储层的产能起决定性作用^[12]。对于环江油田长6储层,在进行产能评价研究时,选取的主控因素为:孔隙度、渗透率、含油饱和度、有效厚度及储层非均质性参数。

(1)孔隙度。孔隙度是储层产能评价的重要参数之一,其数值大小能影响和决定储层所含流体的多少。储层孔隙度越大,所含流体越多,其渗透能力也越强,利于原油的开采。

(2)渗透率。渗透率是指在一定压力差条件下,岩石本身允许流体通过的能力。它是反映储层产能的重要参数,其大小代表着孔隙中流体在储层中的流动能力,值越大,代表流动能力强,孔隙结构好,连通能力好,开发产油能力强。

(3)含油饱和度。含油饱和度是直接反映储层流体性质和含油量的参数,是评价储层产能的重要指标。当储层孔隙度和渗透率一定时,含油饱和度越高,油层含油越多,更有利于原油的开采。

(4)有效厚度。利用储层孔隙度、渗透率、含油饱和度等资料进行有效层的筛选,以此为单井的有效厚度。有效厚度能直接代表开发油层的厚度,一般情况下,油层有效厚度越大,单井日产油量越多。

(5)储层非均质性。储层非均质性是指储层在形成过程中,受沉积环境、成岩作用和构造作用影响,其空间分布及内部各种属性上存在的不均衡变化。对环江油田长6储层,重点研究了层内非均质性,包括层内粒度的韵律性和层理构造的发育情况,一般粒度粗、物性好、层理构造密度较小的层段含油性较好^[13-15]。同时,引入了表征渗透率变化的非均质性参数,即变异系数、突进系数和级差^[16-17]。

3 多元回归法在产能评价中的应用

环江油田位于鄂尔多斯盆地西部的天环坳陷区,区内发育上三叠系延长组长3、长4+5、长6及长8等多套含油层系,存在大面积的低孔超低渗砂岩油藏,近年来,石油预探在长6取得重大突破。通过分析处理环江油田长6实测测井资料,发现各储层参数对油井产量的制约关系,将数理统计中的多元回归法应用到数值模型的建立上,可以取得很好的产能评价效果。

3.1 测井资料的分析及处理

分析环江油田11口井的测井资料,根据测井

解释孔隙度 Φ 、渗透率 K 和含油饱和度 S_o 。筛选有效层,挑选出各井有效层样品点中孔隙度、渗透率、含油饱和度的最大值,并计算出油层有效厚度 H ,以及各有效层孔隙度、渗透率、含油饱和度的均值,其中渗透率均值采用了算术、几何、调和三种平均化算法,并计算渗透率变异系数 V_K 、突进系数

T_K 和级差 J_K ,结果见表 1。总体来说,油层有效厚度、孔隙度、渗透率和含油饱和度的值对油井产量均有一定程度影响,并以渗透率影响最为突出,与油井产量呈明显正相关,表征储层非均质性的渗透率变异系数、突进系数和极差也与油井产量呈相关性。

表 1 环江油田长 6 单井储层参数表
Table 1 Reservoir parameters of single well in Chang6 Formation, Huanjiang Oilfield

井号	$H/$ m	$\Phi/$ %	$K/$ μm^2	$K'/$ μm^2	$K''/$ μm^2	$S_o/$ %	$\Phi_{\text{max}}/$ %	$K_{\text{max}}/$ μm^2	$S_{o\text{max}}/$ %	V_K	J_K	T_K	$q/$ ($\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$)
白 39	5.880	9.27	0.072	0.071	0.069	66.02	9.99	0.910	69.21	0.173	2.460	12.639	0.31
耿 245	13.270	7.98	0.046	0.045	0.044	64.67	10.99	0.128	74.17	0.233	3.200	2.783	0.93
虎 2	26.250	8.23	0.050	0.050	0.049	67.35	9.31	0.071	77.59	0.148	2.029	1.420	2.08
环 307	7.750	8.25	0.050	0.049	0.049	55.63	8.92	0.062	68.61	0.119	1.771	1.240	2.00
环 316	5.375	8.04	0.047	0.046	0.045	48.41	9.00	0.064	64.87	0.172	1.829	1.362	0.71
环 317	5.000	8.14	0.036	0.029	0.019	51.25	9.71	0.076	66.78	0.502	19.000	2.093	0.42
罗 151	16.000	7.66	0.041	0.040	0.040	52.59	8.53	0.054	66.14	0.139	1.588	1.326	1.45
罗 200	24.625	7.77	0.042	0.042	0.042	34.66	8.57	0.055	52.78	0.124	1.618	1.304	0.20
罗 23	10.500	11.02	0.110	0.095	0.085	48.47	12.52	0.268	58.06	0.578	0.217	2.436	2.14
罗 238	13.750	8.63	0.057	0.056	0.056	56.68	9.41	0.074	76.93	0.289	0.023	1.298	2.34
罗 51	2.500	7.89	0.044	0.038	0.038	48.42	8.51	0.054	54.01	0.103	0.016	1.227	0.34

注: Φ 、 K 、 S_o 均取算术平均值; K' 取几何均值; K'' 取调和均值; q 为日均产量。

3.2 数学模型的建立

首先,作单一参数的一元线性回归分析,即分别将测井解释孔隙度、渗透率、含油饱和度均值与单井日均产量在 SPSS 软件中进行相关性分析(数据见表 1,其中渗透率采用算术均值),得到回归方程并进行产量预测。如图 1 所示,展示了孔隙度、渗透率和含油饱和度这三种主要参数各自对储层产量的预测效果。其中,横轴为每口井的实际日产油量,纵轴为各自相应的预测日产油量。根据拟合的回归公式可知各相关系数 R 值均在 0.3 至 0.4 之间,中度相关。说明在产能评价过程中,三个参数都有一定的相关性,相对而言,渗透率的相关性最好,但是都不高。因此,单一因素不能较好的对油气产能进行预测。

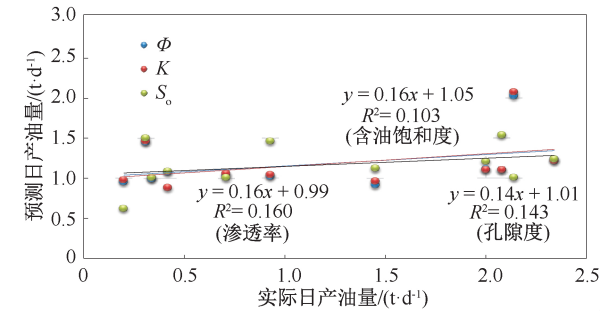


图 1 环江区 11 口井单因素法预测和实际日产油量的相关分析图
Fig.1 Correlation analysis between single factor method prediction and actual daily oil production of 11 wells in Huanjiang area

单一因素做产能预测效果不理想,考虑采用多种参数综合预测。利用 SPSS 软件作多元线性回归分析,即把单井日均产量作为因变量(y),选取多种参数作为自变量($x_i, i = 1, 2, \dots, n$),参数的选择采用多种组合方式。首先,使用常规的算术平均化方法,即选取孔隙度、渗透率和含油饱和度作为自变量,其中,孔、渗、饱的取值均为各有效储层段的算术平均值,得到回归公式的复相关系数 R 为 0.502;其次,考虑到渗透率作为储层产液的主控因素,其不同平均值算法可能会对结果产生一定影响,故在算术均值的基础上,引入了几何均值和调和均值(如图 2 所示,其中横轴为单井实际日产油量、纵轴为预测日产油量)。

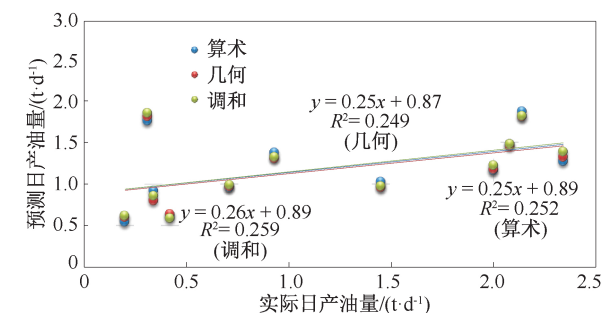


图 2 环江区 11 口井渗透率均值法预测和实际日产油量的相关分析图
Fig.2 Correlation analysis chart of permeability mean method prediction and actual daily oil production of 11 wells in Huanjiang block

从图 2 可以看出,对渗透率采用不同的平均化方法得到的结果几乎没有什么差异,说明对于特低渗储层而言,可以采用简单的算术平均方法。三种平均化方法得到回归曲线的复相关系数都在 0.5 左右,比只考虑单一因素效果要好,但是相关性还是不够显著,难以满足实际生产的需要;由于储层产能常取决于物性、含油性最好的层段,故又引入了各有效层段孔隙度、渗透率和含油饱和度的最大值作为自变量的取值(图 3)。从图 3 中可以看出,采用最大值的方式较大幅度提高了回归公式的相关性,复相关系数从 0.5 提高到 0.68 左右,鉴于数据点相对较少,相关性依然不够显著。

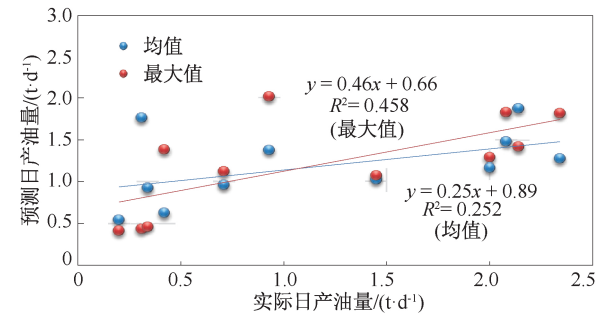


图 3 环江区 11 口井最大值法预测和实际日产油量的相关分析图
Fig.3 Correlation analysis between maximum value method prediction and actual daily oil production of 11 wells in Huanjiang block

针对上述问题,结合研究区储层强非均质性的特点,引入了表征渗透率变化的非均质性参数,包括变异系数、突进系数和级差。同时,综合对前几种方法的分析,经过反复计算与检验,得到了相关性(复相关系数 R 为 0.970)最好的参数组合,并建立了多元回归方程模型:

$$y = -0.062x_1 + 18.072x_2 + 0.082x_3 - 0.912x_4 + 0.016x_5 - 1.459x_6 + 0.001x_7 - 2.641$$

其中,自变量分别为 $\Phi_{\max}(x_1)$ 、 $K_{\max}(x_2)$ 、 $S_{\text{omax}}(x_3)$ 、 $V_{\text{k}}(x_4)$ 、 $J_{\text{k}}(x_5)$ 、 $T_{\text{k}}(x_6)$ 、 $H(x_7)$,因变量为单井日均产量(y)。

将研究区 11 口井相应的测井解释数据引入到建立的回归方程中,预测了相应测试层的日产油量。

从图 4 中可看出,预测日产油量同实际日产油量相关性强,两者在数值上接近、吻合率高。因此,在充分利用测井和试油试采资料的基础上,通过引入储层非均质性参数,使用多元线性回归分析法建立的产能预测模型,具有很好的预测效果,从而为油田产能评价提供依据。

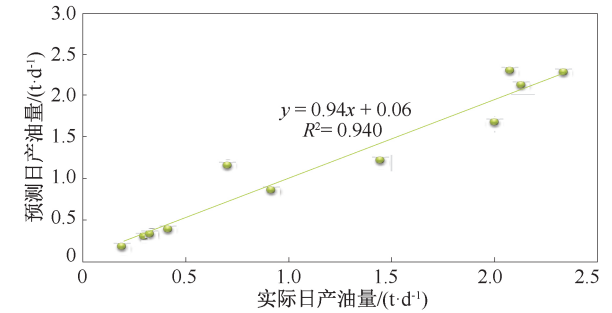


图 4 环江区 11 口井预测和实际日产油量的相关分析图
Fig.4 Correlation analysis between the prediction and the actual daily oil production of 11 wells in Huanjiang block

4 结论

(1)从以上的实例分析可看出,多元回归分析作为一种数理统计方法,可应用到油田产能评价中,并可综合考虑多重影响因素,包括孔隙度、渗透率、含油饱和度及有效厚度等,具有较好的预测效果。

(2)储层非均质性作为低孔低渗油藏产能的重要影响因素,其渗透率突进系数、变异系数、级差,可引入到产能预测公式中,能够提高预测精度。

(3)本文得到的产能预测模型,多参数组合与单井日产量进行回归分析得到的相关性最好,建立的回归公式能够对新井的产能进行有效的预测,适用于环江地区的勘探开发。对于其他地区,应结合具体的地质背景,选取特定的产能影响因素,从而建立相应的回归方程。

致谢:感谢长庆油田分公司对论文研究工作所提供的支持。

参考文献

[1] 黄力,何顺利,张小霞,等.超低渗透储层产能主要影响因素确定方法研究[J].科学技术与工程,2010,10(30): 7408-7413.
HUANG Li, HE Shunli, ZHANG Xiaoxia, et al. Research on determination of the main factors influencing the oil well productivity of ultra low permeability reservoir [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(30): 7408-7413.
[2] 郑爱维,李继庆,卢文涛,等.涪陵页岩气田分段压裂水平井非稳态产能评价方法[J].油气井测试,2018, 27(1): 22-30.
ZHENG Aiwei, LI Jiqing, LU Wentao, et al. Unsteady productivity evaluation method of multi-stage fractured horizontal well for shale gas in Fuling shale gas field [J]. Well Testing, 2018, 27(1): 22-30.
[3] 李陈,夏朝辉,汪萍,等.致密砂岩气藏分段压裂水平井产能预测方法研究与应用[J].油气井测试,2016, 25(2): 25-27.

- LI Chen, XIA Zhaohui, WANG Ping, et al. Study and application of production capacity forecast with multistage fracturing to horizontal well in tight sand gas reservoir [J]. Well Testing, 2016, 25(2): 25-27.
- [4] 李勇明, 周文武, 赵金洲, 等. 低渗透油藏水平井分段压裂半解析产能计算与影响因素研究[J]. 油气藏评价与开发, 2018, 8(2): 52-57.
- LI Yongming, ZHOU Wenwu, ZHAO Jinzhou, et al. Semi-analytical productivity calculation and sensitive factors for the multi-stage fractured horizontal well in low permeability reservoirs [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2018, 8(2): 52-57.
- [5] 黎小伟, 谭成仟, 龙慧. A 油田测井产能预测评价方法研究[J]. 国外测井技术, 2012(1): 26-28.
- LI Xiaowei, TAN Chengqian, LONG Hui. Study on the evaluation method of well logging productivity prediction in A Oilfield [J]. World Well Logging Technology, 2012(1): 26-28.
- [6] 赵楠, 梁玉凯, 蒋利平, 等. 未测试储层产能预测方法及应用——以 WS1-5 油田为例[J]. 油气井测试, 2015, 24(2): 38-40.
- ZHAO Nan, LIANG Yukai, JIANG Liping, et al. A productivity prediction method and its application for no well testing formation——Taking WS1-5 Oilfield as an example [J]. Well Testing, 2015, 24(2): 38-40.
- [7] 许立全, 李秀生. 不同产能评价方法的对比分析[J]. 油气井测试, 2005, 14(6): 15-17.
- XU Liquan, LI Xiusheng. Comparative analysis of different deliverability evaluation methods [J]. Well Testing, 2005, 14(6): 15-17.
- [8] 严丽, 王燕, 范树平. 多元回归分析方法预测川东北礁滩相储层产能[J]. 新疆石油天然气, 2011, 7(4): 37-40.
- YAN Li, WANG Yan, FAN Shuping. Output prediction of reef-bank facies in northeastern Sichuan Basin using multiple regression analysis [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2011, 7(4): 37-40.
- [9] 尹鹏, 魏俊, 张志军, 等. 考虑多因素的低渗透气藏压裂井产能公式分析[J]. 油气藏评价与开发, 2018, 8(1): 34-37, 43.
- YIN Peng, WEI Jun, ZHANG Zhijun, et al. Analysis of low permeability gas reservoir fracturing well productivity equation considering multi-factors [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2018, 8(1): 34-37, 43.
- [10] 徐会林, 王新海, 魏少波. 利用多参数组合产能系数预测安 83 井区长 7 储层的产能方法研究[J]. 油气井测试, 2016, 25(1): 9-12.
- XU Huilin, WANG Xinhai, WEI Shaobo. A Research method to predict the capacity based on the combination of multi-parameter productivity index in the Chang7 Formation of An 83 Block [J]. Well Testing, 2016, 25(1): 9-12.
- [11] 汤述安, 郑泽忠, 朱学波. 多元回归分析在油气产能预测中的应用[J]. 科技创新导报, 2008(21): 169-171.
- TANG Shu'an, ZHENG Zezhong, ZHU Xuebo. Application of multiple regression analysis in oil and gas productivity prediction [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2008(21): 169-171.
- [12] 胡高贤, 龚福华. 多元回归分析在低渗透油藏产能预测中的应用[J]. 油气田地面工程, 2010, 29(12): 23-25.
- HU Gaoxian, GONG Fuhua. Application of multiple regression analysis in productivity prediction of low permeability reservoir [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2010, 29(12): 23-25.
- [13] 龙慧, 吴晓明, 胡海涛, 等. 环江油田长 4+5 油层组特征及测井产能评价[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(11): 93-99.
- LONG Hui, WU Xiaoming, HU Haitao, et al. The reservoir features and logging capacity evaluation of Chang 4+5 reservoir in Huanjiang Oilfield [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(11): 93-99.
- [14] 张艺荣, 龙慧. 环江油田长 6 储层特征及其影响因素分析[J]. 石油化工应用, 2012, 31(10): 66-71.
- ZHANG Yirong, LONG Hui. Reservoir characteristics and influencing factors of Chang6 reservoir in Huanjiang Oilfield [J]. Petrochemical Industry Application, 2012, 31(10): 66-71.
- [15] 高伟, 孙佳才, 张同伍, 等. 鄂尔多斯盆地环江地区长 8 储层沉积微相特征及油气富集规律研究[J]. 天然气勘探与开发, 2014, 37(2): 15-20.
- GAO Wei, SUN Jiakai, ZHANG Tongwu, et al. Sedimentary microfacies characteristics and hydrocarbon accumulation regularity of Chang 8 sandstone in Huanjiang Area, Ordos Basin [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2014, 37(2): 15-20.
- [16] 关利群, 屈红军, 胡春花, 等. 安塞油田 H 区长 6 油层组储层非均质性与含油性关系研究[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(3): 26-37.
- GUAN Liqun, QU Hongjun, HU Chunhua, et al. The relationship of heterogeneity and oil-bearing property of Chang 6 reservoir at H area in Ansai Oilfield [J]. Lithologic Reservoirs, 2010, 22(3): 26-37.
- [17] 武文玉. 渗透率级差对渤海非均质储层空气泡沫驱油效果影响[J]. 精细石油化工进展, 2018, 19(1): 18-20, 24.
- WU Wenyu. Effect of permeability differential on oil flooding of air foam in homogeneous reservoir in Bohai Oilfield [J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2018, 19(1): 18-20, 24.

编辑: 王 军

第一作者简介: 章雨, 男, 1995 年出生, 北京大学地质系在读硕士研究生, 研究方向为含油气盆地分析。电话: 18062441948; Email: 2892122872@qq.com。通信地址: 北京市海淀区颐和园路 5 号北京大学, 邮政编码: 100871。