

引用格式:张杰,曾诚,李彦泽,等.复杂断块油藏水驱储量控制程度评价新方法[J].油气藏评价与开发,2023,13(2):200-205.

ZHANG Jie, ZENG Cheng, LI Yanze, et al. New evaluation method of water flooding reserve control degree in complex fault block reservoirs[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(2): 200-205.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.02.008

复杂断块油藏水驱储量控制程度评价新方法

张杰,曾诚,李彦泽,李明林,骆洪梅,李晶华

(中国石油冀东油田分公司,河北唐山 063000)

摘要:复杂断块油藏纵向上油层多,平面上油砂体发育面积小,平面非均质性强,难以构建规则井网均匀驱替,同时受储层各种封闭边界影响,水驱过程中易形成死油区,为了更加精准计算水驱储量控制程度,更好地评价油藏的井网合理性与完整性,找出井网调整和加密潜力,针对常规方法的不足,提出了更加适用的新方法,即网格储量法。通过提高平面上井网内储量控制面积的划分精度,结合储层地质条件及储层非均质差异,以注采井组为基本单元,逐层网格化井网控制地质储量,对网格化的地质储量进行分类统计,找出复杂边界造成的死油区,进而计算区块注采井网控制程度、水驱储量控制程度,最终得到井网调整加密潜力。将该方法应用在南堡101断块井网适应性评价中,找到了复杂边界造成的井网未控制未动用区域,通过加密调整取得较好的挖潜效果,证明该方法在复杂断块油藏水驱储量控制程度评价有较好的适应性,可以推广至其他复杂断块油藏。

关键词:复杂断块油藏;注采井网控制程度;水驱控制程度;井组网格化;水驱潜力;边界效应

中图分类号:TE357

文献标识码:A

New evaluation method of water flooding reserve control degree in complex fault block reservoirs

ZHANG Jie, ZENG Cheng, LI Yanze, LI Minglin, LUO Hongmei, LI Jinghua

(PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan, Hebei 063000, China)

Abstract: There are many oil layers in the vertical direction of complex fault block reservoirs. The development area of oil sand bodies on the plane is small, and the plane heterogeneity is strong. It is difficult to construct a regular well pattern for uniform displacement. At the same time, due to the influence of various closed boundaries of reservoirs, bypassed oil area is easy to form in the process of water flooding. In order to calculate the control degree of water drive reserves more accurately, evaluate the rationality and integrity of reservoir well pattern better, and find the way to adjust the well pattern, a more suitable new method, namely grid reserve method, is proposed for the shortcomings of traditional methods. By improving the division accuracy of the reserve control area in the well pattern on the plane, combining the geological conditions and the heterogeneity difference of the reservoir, and taking the injection-production well group as the basic unit, the geological reserves are controlled by the well pattern gridded layer by layer. The grid geological reserves are classified and counted, and those bypassed oil areas are found out, and then the control degree of the injection-production well pattern and the control degree of the water drive reserves are calculated. Finally, the potential of well pattern adjustment and encryption is obtained. This method is applied to the adaptability evaluation of the well pattern in Nanpu-101 fault block, and the uncontrolled and unused area of well pattern caused by complex boundary is found. After well pattern infilling, better potential tapping effect is show in this area. It is proved that this method has good adaptability in the evaluation of water drive reserves control degree in complex fault block reservoirs, and can be extended to other complex fault block reservoirs.

Keywords: complex fault block reservoir; control degree of injection-production well pattern; water drive control degree; gridding of well pattern; water drive potential; boundary effect

收稿日期:2023-02-09。

第一作者简介:张杰(1982—),男,本科,高级工程师,现从事油田油藏开发研究工作。地址:河北省唐山市曹妃甸区汇丰路47号,邮政编码:063000。E-mail: zhangjiejd@petrochina.com.cn

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金“考虑杂质混入、水盾阻隔及孔隙尺寸效应的CO₂近混相驱油典型特征研究”(51704303)。

水驱储量控制程度是油田开发井网完善程度的一项重要指标,直观地指示、评价了油藏的井网合理性与完善性。水驱储量控制程度往往受地质这一先天条件限制,但在同一地质条件下,布井方式、开发井网的差异,也是导致水驱储量控制程度差异的直接原因。正确的注水方式、合理的井网密度及注采强度等,能够有效提高水驱控制程度。因此,储层地质条件及储层非均质差异,人为控制的开发方式,均是影响水驱控制程度大小的重要因素^[1]。通常计算水驱储量控制程度有3种方法^[1-3],即有效厚度法、井网密度法、分油砂体法,各方法在计算不同类型油田水驱储量控制程度时,都存在一定不足,特别是应用到复杂断块油藏,有较强的不适应性。

1 常规方法对复杂断块油藏的不适应性

1.1 有效厚度法

有效厚度法是指现有井网条件下,开发单元内与注水井连通的采油井射开有效厚度与总有效厚度之比^[4-6],是各油田最为广泛采纳的计算方法。该方法基于油水井射开层的静态连通关系,用注水井与采油井相互连通的有效厚度评价水驱储量控制程度,认为只要注水井与采油井相互连通的有效厚度被射开,则该部分储量就被控制住,对于注水井与采油井不连通的有效厚度不属于水驱储量控制范围内,其实质是用水驱储量控制厚度来代替水驱储量,优点是便于计算,只需完成油水井间静态连通关系研究便可知水驱储量控制程度。但对比水驱控制程度定义,有效厚度法存在明显缺陷:该方法只考虑了油水井间纵向射开层的注采连通状况,未考虑平面上注采井网的适应性,未描述注采井网平面上未控制的储量。

1.2 井网密度法

通过对37个开发单元进行数据统计分析,回归出5类油藏类型下水驱储量控制程度与井网密度关系曲线,表征流体性质、储层物性及井网密度对水驱储量控制程度的影响,该方法未考虑油藏复杂边界的影响,仅适用于砂体范围较大、储层连通性较好且井网较规则的均质油藏。

1.3 分油砂体法

通过经验公式统计计算水驱储量控制程度,一般适用于规则井网,复杂断块油藏的井网常常不规则不完善,影响计算结果。

2 适用于复杂断块油藏的新计算方法研究

复杂断块油藏的复杂性主要表现在十分破碎的砂体形态上,因而形成的储层砂体多为面积小且封闭边界复杂,同时在油水井附近,还往往发育非渗透隔夹层、低渗条带等形成不渗透界面,这些界面对渗流场中的等势线分布、流线分布以及井的产量都会产生影响,即“边界效应”^[6-7]。因此,提高平面上井网内储量控制面积的划分精度,是计算复杂断块水驱储量控制程度的关键,而纵向基本与前面提到的3种统计方法相同。

2.1 平面网格划分小层储量

由于复杂断块油藏纵向砂体叠置复杂。因此,在划分平面面积时,采用小层单砂体平面图作为调查的基础图件,在纵向采用单砂体精细对比作为研究砂体连通关系、划分注采控制面积和对应关系的基础研究资料。以水井为中心,将注采井组网格化。先将井组内一线油井连线,再取油井连线中点与中心水井连线,将井组注采对应面积网格化,以三角形反七点井网为例(图1)。

平面上油砂体的封闭边界一般分为断层边界和砂体尖灭两种,不同几何形态边界组合就形成了复

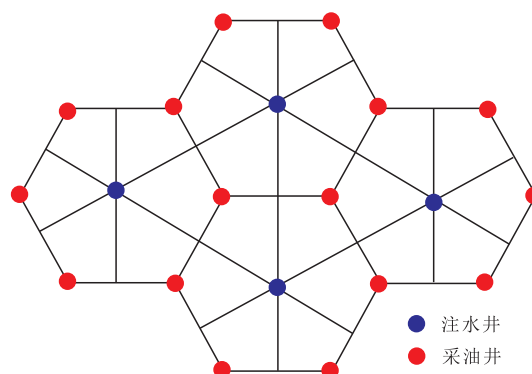


图1 三角形反七点井网网格化

Fig. 1 Gridding of triangle inverse seven-point well pattern

杂边界。对于主要由直井构成的注采系统,可以用渗流力学中“镜像反映法”理论来解决复杂边界问题^[5-7]。对边界镜像反映后,由于流场的对称性,在坐标原点的流速为零,称为平衡点^[8-10],在平衡点附近将形成死油区,死油区内的油在现有井网条件下难以采出(图2)。

在实际网格划分中,采用简化方法勾画边界油水井控制面积。对于砂体尖灭的注采井网控制边界,若水井在边部,则沿油水井连线向水井方向延长1/3井距,若与边界距离小于1/3井距则网格边界与不渗透边界重合,再与油水井连线中点的垂直线连接;若油井在边部,则向外延长1/2井距作为边界,若与边界距离小于1/2井距则网格边界与不渗透边界重合^[11-14](图3)。

2.2 计算网格地质储量并分类

依据上述划分原则,对油藏内所有井网控制的地质储量进行网格化划分,之后计算所有网格面积及地质储量,同时判定每个网格所属储量控制类别,判定方法如下:只要受井控制的储量就称为井网控制储量;井网控制储量当中,有油水井对应的可被现有注采井网水驱控制的储量叫作注采井网控制储

量;注采井网控制储量中,油水井射孔形成了注采对应关系的储量称为水驱控制储量。值得注意的是,这3类储量不是并列关系,而是包含关系,判定时层层递进,在井网控制储量中通过注水井判定出注采井网控制储量,进而根据注采射孔对应判定出水驱控制储量。

网格储量计算方法:

$$N_i = S_i \bar{H}_i \omega_0 \quad (1)$$

式中: ω_0 为单储系数, $10^4 \text{ t/km}^2 \cdot \text{m}$; N_i 为单个网格地质储量, 10^4 t ; \bar{H}_i 为网格内油砂体平均厚度, m ; S_i 为油砂体网格面积, km^2 。

2.3 计算水驱储量控制程度

储量网格化之后我们得到了每个网格的储量,同时给每个储量赋予了对应的储量控制类别,即井网控制、注采井网控制、水驱控制,在此基础上就可以计算出井网控制储量、注采井网控制储量、水驱控制储量以及相应的控制程度。

$$\text{计算井网控制程度: } N_w = \sum_{i=1}^n N_{wi} \quad (2)$$

$$E_w = \frac{N_w}{N} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{计算注采井网控制程度: } N_j = \sum_{i=1}^m N_{ji} \quad (4)$$

$$E_j = \frac{N_j}{N} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{计算水驱储量控制程度: } N_k = \sum_{i=1}^l N_{ki} \quad (6)$$

$$E_k = \frac{N_k}{N} \times 100\% \quad (7)$$

式(2)一式(7)中: N 为动用地质储量, 10^4 t ; N_w 为井网控制地质储量, 10^4 t ; N_{wi} 为单个网格井网控制地质储量, 10^4 t ; N_j 为注采井网控制地质储量, 10^4 t ; N_{ji} 为单个网格注采井网控制地质储量, 10^4 t ; N_k 为水驱控制地质储量, 10^4 t ; N_{ki} 为单个网格水驱控制地质储量, 10^4 t ; E_w 为井网控制程度,%; E_j 为注采井网控制程度,%; E_k 为水驱储量控制程度,%; n 、 m 、 l 分别为井网控制、注采井网控制、水驱控制网格数。

从控制程度的公式可以看出,将整体储量进行网格化划分,将每个网格内的控制储量进行叠加,能够有效地定位有效厚度法忽略的井网未控制区域,从而更好地把控由于复杂断块面积小,井网不规则,断层岩性边界靠近井网造成的死油区,进一步明确调整加密潜力区。

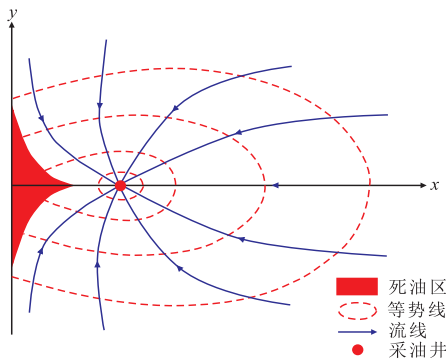


图2 “死油区”形成原理

Fig. 2 Formation principle of “bypassed oil area”

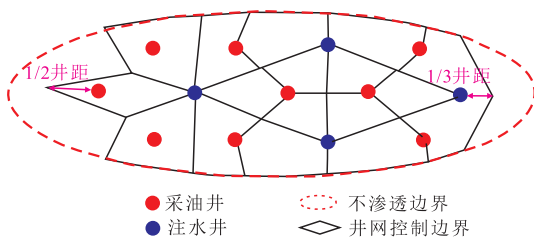


图3 网格边界勾画示意图

Fig. 3 Sketch diagram of grid boundary

3 油田实际应用

以冀东油田南堡101断块为例,进行应用效果评价。该断块纵向含油小层25层,动用地质储量 533.45×10^4 t,水驱储量控制程度统计步骤如下:

1) 以小层平面图作为基础图件,以含油面积为边界,以水井为中心,将注采井组网格化。

2) 依据储量控制类别判定方法,设定标准色板,依次判定各网格是否属于井网控制、注采井网控制、水驱控制,若网格内有生产井存在则为井网控制;若包含油井和水井,则为注采井网控制;若油水井对应射孔生产,则为水驱控制,确定属性后填充相应颜色,3个判定图层叠置得到图4。

3) 根据式(1)一式(7)手动计算并统计所有网格地质储量,分类汇总后得到井网控制地质储量 509.3×10^4 t,注采井网控制地质储量 413.3×10^4 t,水驱控制地质储量 374.0×10^4 t,进而得到断块井网控制程度95.5%、注采井网控制程度77.5%、水驱储量控制程度70.1%。

通过运用网格化水驱储量计算方法,揭示出该

断块注采井网控制程度相对偏低,具有注采井网调整潜力,通过分析计算结果及网格化后的小层平面图,对注采井网未控制网格图层(仅井网控制+井网未控制)纵向叠合后,可直观显示出注采井网未控制区域,进而在此区域考虑注采井网完善。通过进一步的井网部署论证后^[15-23],实施加密井15口(图5),加密后注采井网控制程度达到93.5%,新增水驱控制储量 85.4×10^4 t,增加可采储量 17.1×10^4 t。实际开发效果表明,加密井平均单井产能8 t,体现出较好的挖潜效果,取得了较好的经济效益,同时也落实了断块水驱控制程度提高的潜能。

若采用常规厚度法进行计算,注采井网控制地质储量 479.2×10^4 t,水驱控制地质储量 446.4×10^4 t,得到的注采井网控制程度89.9%、水驱储量控制程度83.6%,表明该井网注采已高度完善,可调控潜力不大,该计算方法由于精度不够,完全忽视了油藏的加密潜力。

4 结论

1) 常规水驱储量控制程度计算方法不适用于

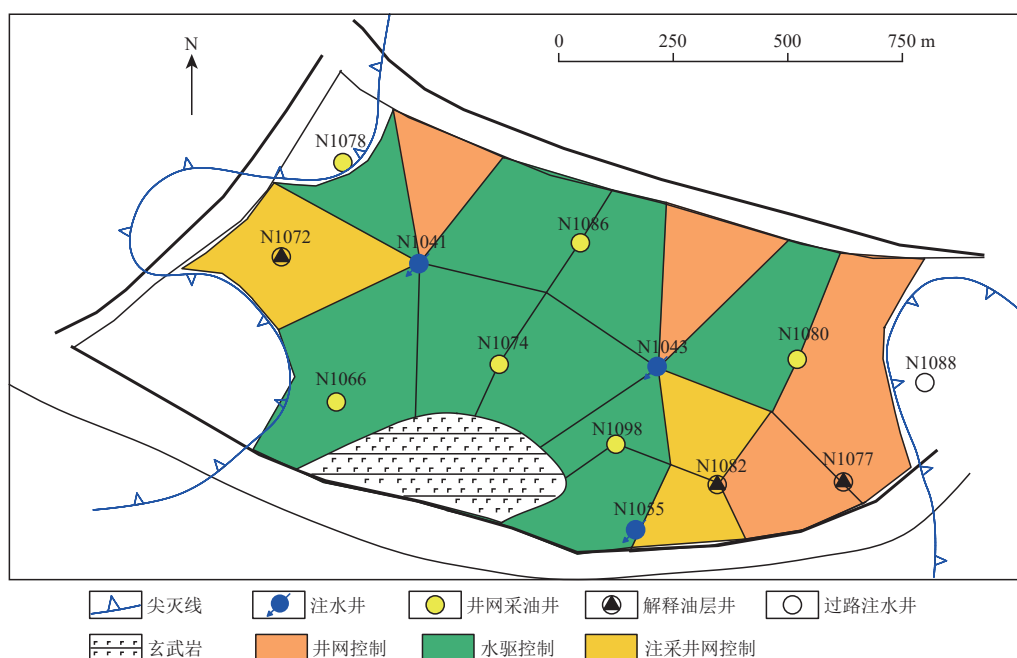


图4 冀东油田南堡101断块含油面积网格化

Fig. 4 Gridded oil area of Nanpu-101 fault block in Jidong oilfield

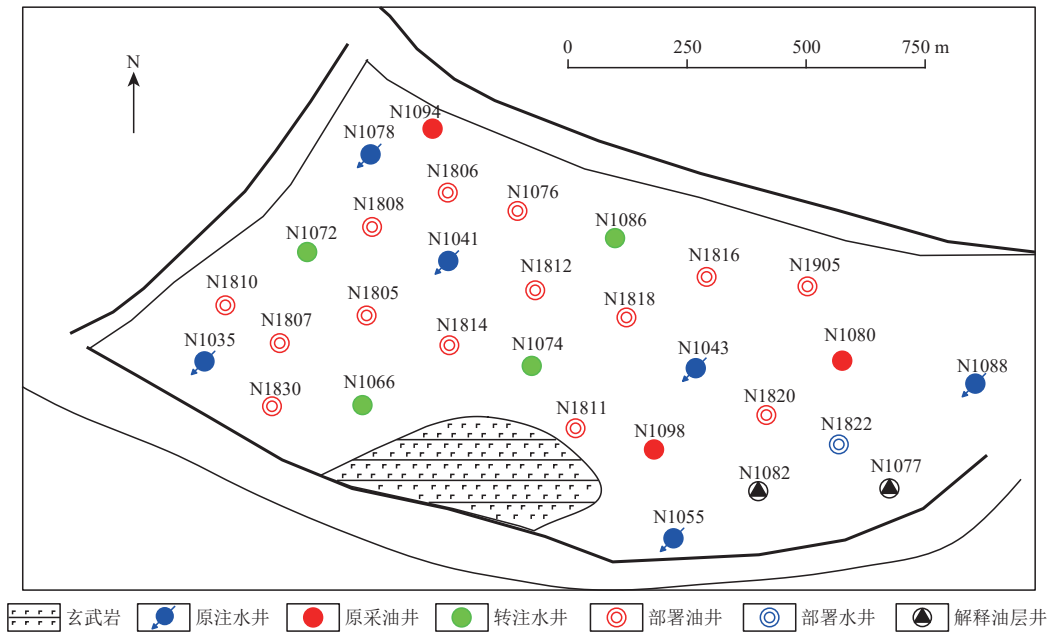


图5 冀东油田南堡101断块加密后井位部署

Fig. 5 Well location deployment of Nanpu-101 fault block in Jidong oilfield after infilling

复杂断块油藏,复杂断块油藏受平面非均质性、封闭边界等影响,需要在平面上细分、分类评价,以提高准确度。

2) 针对复杂断块油藏平面砂体相变快、边界复杂的特点,提出了一种评价水驱储量控制程度的新方法,即网格储量法。该方法以单砂体(小层)为基本单元,网格化井网控制储量,进而对储量进行分类判定,统计计算出井网控制程度、注采井网控制程度、水驱控制程度,最终得到井网调整加密潜力。

3) 该方法通过实际应用证明其对复杂断块油藏具有更好的适用性,适合所有复杂的井网,简单易懂操作性强,可用于开展复杂断块油藏的快速评价,有利于油藏工程人员更好地掌握分析油藏调整、挖潜潜力,对油藏未来治理对策的制定具有重要的指导意义。

参考文献

- [1] 缪飞飞. 水驱储量控制程度计算方法综述及新方法研究[J]. 石油地质与工程, 2017, 31(4): 50-53.
LIAO Feifei. Review and new method research on calculation method of water drive reserve control degree[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2017, 31(4): 50-53.
- [2] 周英芳,刘志军,茆春锦,等. 多层油藏水驱驱替效率计算新方法[J]. 特种油气藏, 2008, 15(3): 72-75.
ZHOU Yingfang, LIU Zhijun, MAO Chunjin, et al. A new calculation method of water displacement efficiency for layered reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2008, 15(3): 72-75.
- [3] 尹晓喆,王佳旭,吴琼,等. 多层砂岩油田水驱控制程度综合评价方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(5): 64-67.
YIN Xiaozhe, WANG Jiaxu, WU Qiong, et al. Comprehensive evaluating method of the water-flooding controlled degree for the multilayered sandstone oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(5): 64-67.
- [4] 闫正和,石军太,秦峰,等. 水驱气藏动态储量和水侵量计算新方法[J]. 中国海上油气, 2021, 33(1): 93-103.
YAN Zhenghe, SHI Juntai, QIN Feng, et al. A new method for calculating dynamic reserves and water influx of water drive gas reservoirs[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(1): 93-103.
- [5] 孙洪志,刘吉余. 储层综合定量评价方法研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(6): 8-11.
SUN Hongzhi, LIU Jiyu. Research on comprehensive and quantitative reservoir evaluation[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 23(6): 8-11.
- [6] 杨昱杰,曲艳玲,刘蕊. 水驱砂岩油田小层注采关系分析方法和应用效果[J]. 科技导报, 2008, 26(7): 30-33.
YANG Yujie, QU Yanling, LIU Rui. Relationship between production and injection in sub-divided oil layer of water driving sandstone oilfield[J]. Science & Technology Review, 2008, 26(7): 30-33.

- [7] 韩大框, 万仁溥. 多层砂岩油藏开发模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
HAN Dakuang, WAN Renpu. Development mode of multilayer sandstone reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [8] 方凌云, 万新德. 砂岩油藏注水开发动态分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
FANG Lingyun, WAN Xinde. Dynamic analysis of water injection development in sandstone reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [9] 黄炳光, 刘蜀知. 实用油藏工程与动态分析方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
HUANG Bingguang, LIU Shuzhi. Practical reservoir engineering and dynamic analysis method[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [10] 于德水. 基于相变的井网水驱控制程度分析—以萨尔图中区西部二、三类油层为例[J]. 断块油气田, 2014, 21(1): 74-78.
YU Deshui. Analysis on water flooding control degree based on phase transition: Taking type II and type III oil layers on the west section of central Saertu Oilfield as an example[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2014, 21(1): 74-78.
- [11] 裴占松. 对不同井网密度下砂体控制程度的研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2010, 29(1): 47-50.
PEI Zhansong. Study on the controlled degree of sandbodies at different well-spacing densities[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2010, 29(1): 47-50.
- [12] SY/T6219—1996, 油田开发水平分级[S]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
SY/T 6219—1996, Oilfield development level classification[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [13] 郭军辉. 水驱多层砂岩油田注采关系定量评价方法研究[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(7): 132-135.
GUO Junhui. Study on quantitative evaluation method of injection-production relationship in water flooding multi-layer sandstone oilfield[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(7): 132-135.
- [14] 汪立君, 陈新军. 储层非均质性对剩余油分布的影响[J]. 地质科技情报, 2003, 22(2): 71-73.
WANG Lijun, CHEN Xinjun. Influence of reservoir heterogeneity on the distribution of remaining oil[J]. Geological Science and Technology Information, 2003, 22(2): 71-73.
- [15] 尹楠鑫, 李存贵, 张吉, 等. 鄂尔多斯盆地五里湾油藏长6段储层非均质性对剩余油分布的影响[J]. 复杂油气藏, 2015, 8(3): 44-49.
YIN Nanxin, LI Cungui, ZHANG Ji, et al. Influence of reservoir heterogeneity on the distribution of remaining oil of Chang 6 layer in Wuliwan reservoir, Ordos Basin[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2015, 8(3): 44-49.
- [16] 封从军, 单启铜, 时维成, 等. 扶余油田泉四段储层非均质性对剩余油分布的控制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(1): 1-7.
FENG Congjun, SHAN Qitong, SHI Weicheng, et al. Reservoirs heterogeneity and its control on remaining oil distribution of K₁q⁴, Fuyu Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(1): 1-7.
- [17] 安玉华, 康楠, 胡治华, 等. 基于注采模式的水驱油藏剩余油分布特征[J]. 石油地质与工程, 2022, 36(3): 74-77.
AN Yuhua, KANG Nan, HU Zhihua, et al. Distribution characteristics of remaining oil in water drive reservoir based on injection-production model[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2022, 36(3): 74-77.
- [18] 鲍敬伟, 李丽, 叶继根, 等. 高含水复杂断块油田加密井井位智能优选方法及其应用[J]. 石油学报, 2017, 38(4): 444-452.
BAO Jingwei, LI Li, YE Jigen, et al. Well location intelligent optimization method and its application for infill wells in high water cut complex fault-block oilfields[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(4): 444-452.
- [19] 王群一, 毕永斌, 修德艳, 等. 复杂断块特高含水油田储层及渗流规律研究[J]. 特种油气藏, 2013, 20(4): 70-73.
WANG Qunyi, BI Yongbin, XIU Deyan, et al. Study on reservoir and seepage law of complex fault block ultra-high water cut oilfield[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(4): 70-73.
- [20] 李军辉, 柳成志, 卢双舫, 等. 复杂断块储层非均质性研究——以辽河油田沈84—安12块Es₃³段为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(5): 757-764.
LI Junhui, LIU Chengzhi, LU Shuangfang, et al. Study of reservoir heterogeneity of intricate fault-block: A case study of Es₃³ formation of Shen84-An12 Block in Liaohe Oilfield[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38(5): 757-764.
- [21] 张晓诚, 王晓鹏, 李进, 等. 渤海油田疏松砂岩压裂充填技术研究与应用[J]. 石油机械, 2021, 49(9): 66-72.
ZHANG Xiaocheng, WANG Xiaopeng, LI Jin, et al. Research and application of fracturing filling technology for loose sandstone in Bohai Oilfield[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(9): 66-72.
- [22] 赵润琦, 陈振良, 史怀忠, 等. 斧形PDC齿破碎致密硬质砂岩特性数值模拟研究[J]. 石油机械, 2021, 49(10): 8-16.
ZHAO Runqi, CHEN Zhenliang, SHI Huaizhong, et al. Numerical simulation study on characteristics of tight hard sand broken by axe-shaped PDC cutter[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(10): 8-16.
- [23] 刘成林, 任杨, 孙林, 等. 海上特低渗砂岩储层酸化增效技术研究与应用[J]. 石油机械, 2022, 50(9): 117-124.
LIU Chenglin, REN Yang, SUN Lin, et al. Research and application of acidizing technology in offshore ultra-low permeability sandstone reservoir[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(9): 117-124.