

一种砂岩油藏高耗水带识别新方法

薛巨丰¹, 廖新维^{2*}, 黄爱先¹, 贾祥军¹, 沈旭东², 陈振荣¹, 尚雄涛²

1. 胜利油田分公司东辛采油厂, 东营 257061

2. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

摘要 准确地识别高耗水带是各种低效水循环治理研究的基础。针对砂岩油藏长期注水开发过程中形成的高耗水带, 建立一注一采油水两相渗流数值模拟模型, 分析注采井间形成高耗水带条件下生产井含水率导数变化特征并确定高耗水带评价指标, 提出基于生产井含水率导数曲线特征识别与评价高耗水带的新方法。研究表明, 注采井间形成高耗水带时生产井的含水率导数曲线具有双峰特征, 且第一峰值大小及出现时间反映了注入水沿高耗水带突进的程 度, 而注采井间未形成高耗水带时生产井的含水率导数曲线为单峰特征, 因此, 依据生产井含水率导数曲线出现双峰特征时的第一峰值, 可以准确地识别评价高耗水带及其级别。实际应用显示, 该方法的识别评价结果与现场测试结果一致。

关键词 砂岩油藏; 高耗水带; 识别方法; 含水率导数

砂岩油藏水驱开发过程中, 由于长期注水, 油藏中油水井之间出现储层渗透率升高的水流通道, 同时由于含水饱和度升高, 水油相对渗透率比值增大, 使得水的渗流能力增强, 油的渗流能力减弱, 从而注入水沿着该区域发生窜流, 形成注入水低效循环带, 即为高耗水带。

长期以来, 石油工作者在优势通道及大孔道的识别与表征方面展开广泛而深入的研究, 取得了较为丰富的成果^[1-14]。在优势通道及大孔道的识别方法上, 目前主要有生产动态资料识别法、试井资料分析法、生产测井资料分析法、取心井资料分析法、数值模拟法和经验公式法等^[4-14]。其中, 生产动态资料识别法又分为灰色关联法、模糊综合评判法、特征曲线法和洛伦兹法等。姜汉桥等^[5,7]从不同的角度对优势通道及大孔道形成机理进行了分析, 借助模糊数学方法及预警理论建立了

优势通道的预警模型和不同发育级别优势通道的动态判别方法, 提出了严重发育、一般发育和不发育三个级别优势通道的分级方法。张磊等^[8]提出一种以油藏的静态地质特征及动态开发特征为基础的识别、评判裂缝型特低渗油藏窜流通道的模型。谷建伟等^[10]借助注入井井口压力数据绘制无因次压降曲线, 提出一种基于试井分析的优势通道识别方法。Li 等^[15]研究优势通道在测井曲线上的反映, 提出相应的识别方法。Chan 等^[16]提出基于生产井油水比及其导数特征的优势通道识别方法, 是一种便捷的分析方法。

上述识别方法均是对优势通道及大孔道进行有效识别与描述, 虽然优势通道、大孔道与高耗水带相比三者的形成机理^[1-4]在表现特征上具有相似性, 但这些方法不能直接应用于高耗水带的识别。如何利用井组现

收稿日期: 2018-08-27; 修回日期: 2019-01-18

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05030002-005)

作者简介: 薛巨丰, 高级工程师, 研究方向为油田开发地质, 电子信箱: xuejufeng.slyt@sinopec.com; 廖新维(通信作者), 教授, 研究方向为油气田开发工程师, 电子信箱: xinwei@cup.edu.cn

引用格式: 薛巨丰, 廖新维, 黄爱先, 等. 一种砂岩油藏高耗水带识别新方法[J]. 科技导报, 2019, 37(5): 99-104; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.05.013

有动态资料进行高耗水带的识别评价是目前亟待解决的问题。为此,本文研究一种能够准确识别评价砂岩油藏高耗水带的新方法。

1 油水两相渗流数值模拟模型

高耗水带的形成,主要受地质流体因素与开发因素两个方面的影响。在具有优势通道的储层中,当含水饱和度高于等渗点的饱和度时,随着含水饱和度升高,水相相对渗透率高于油相相对渗透率的幅度显著增大,使注入水在储层中流动能力更强,而油的流动能力减弱,降低了驱油效率,从而形成低效的高耗水带,如图1所示。因此,储层中的优势通道与高含水饱和度是形成高耗水带的必要条件。

水驱开发过程中,注入水沿着优势通道及高含水饱和度区推进,使得注入水波及体积增加幅度不断减小,直到注入水沿着某一区域发生窜流,形成注入水低效循环。在高耗水带形成过程中,地质因素和流体因素是内因,开发因素是外因。



图1 高耗水带示意

Fig. 1 Schematic diagram of a high water consumption zone

根据上述高耗水带的定义及其形成机理,建立油水两相渗流数值模拟模型,如图2所示,模型中在注采井间添加一条高渗通道以表示高耗水带。油水两相渗流数值模拟模型采用PEBI网格,模型的基础参数为:油藏体积(V)1000×500×5 m³;油藏厚度(h)5 m;储层渗透

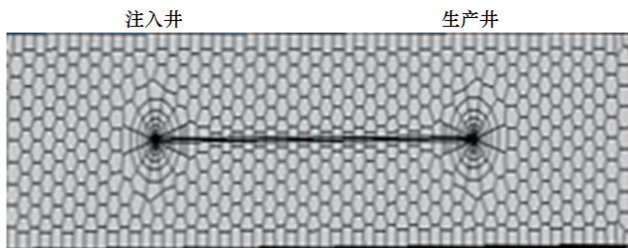


图2 油水两相渗流数值模拟模型

Fig. 2 Two dimensional two phase numerical simulation model

率(K)300×10⁻³ μm²;初始含水饱和度(S_w)23.0%;高耗水带储层渗透率(K₁)300×10⁻³~2700×10⁻³ μm²;高耗水带宽度(w)2~30 m;注采井间距(l)500 m;注水量(q_i)80 m³/d;井底生产压力(P_{wf})15 MPa。

2 含水率导数变化特征及影响因素

2.1 含水率导数变化特征分析

将无因次时间(t_D)定义为

$$t_D = \frac{q_i t}{A \phi h} \tag{1}$$

式中,q_i为注入井的注水量,m³/d;t为生产时间,d;A为油水井间控制面积,m²;φ为储层孔隙度,%;h为储层厚度,m。

生产井的含水率f_w为该井的产水量与产液量的比值,而生产井的含水率导数f'_w的定义为

$$f'_w = \frac{df_w}{dt_D} \tag{2}$$

应用本文建立的油水两相渗流数值模拟模型,进行模拟计算,得到生产井在各时间下的产油量和产水量,进而确定该井的含水率随时间变化关系。由式(2)计算出储层中形成高耗水带与未形成高耗水带条件下生产井的含水率导数,则可绘制以含水率导数f'_w为纵坐标、无因次时间t_D为横坐标的含水率导数随无因次时间变化曲线,如图3所示。

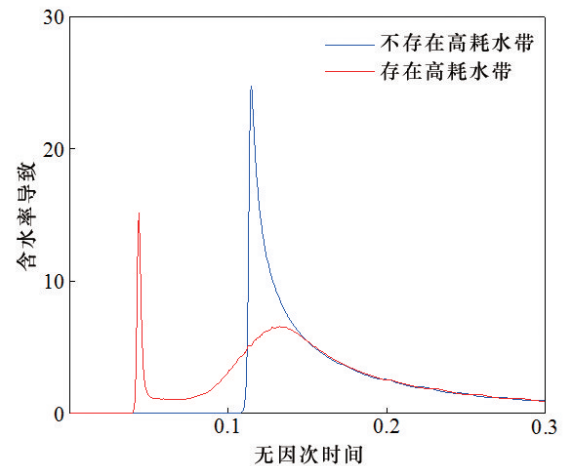


图3 生产井的含水率导数随无因次时间变化曲线

Fig. 3 Variation of water cut derivative of production well with dimensionless time

从图3可以看出,未形成高耗水带的储层(均质储层)生产井含水率导数曲线呈现单峰特征,而形成高耗

水带的储层生产井含水率导数曲线呈现双峰特征。其原因是,形成高耗水带的储层中注入水分别沿高耗水带和其他部位(均质储层)向生产井流动,由于高耗水带的水流能力明显高于其他部位的水流能力,因此注入水首先沿高耗水带到达生产井井底造成含水率快速上升,而其他部位的水流动速度相对较慢,当其到达生产井井底时又使含水率再次上升。相比于高耗水带储层,均质储层内注入水均匀推进到达井底,因此在含水率导数曲线上反映为单峰特征。

2.2 含水率导数变化影响因素分析

由平面二维两相渗流力学相关理论可知,水相在高耗水带中的流动能力主要受高耗水带储层的渗透率、宽度及含水饱和度的影响。为此,将高耗水带储层的渗透率、宽度进行无因次化,分别引入无因次量 α 、 β ,并定义为

$$\alpha = \frac{K_1}{K} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{w}{a} \quad (4)$$

式中, K_1 为高耗水带储层的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K 为均质储层的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; w 为高耗水带储层的宽度,m; a 为储层的总宽度,m。

无因次量 α 表示高耗水带储层渗透率与均质储层渗透率的比值,无因次量 β 表示高耗水带储层宽度与储层总宽度的比值。从前面分析可知,形成高耗水带时,生产井含水率导数曲线中第一个峰反映高耗水带的影响,第二个峰则反映均质储层特征。因此,以第一个峰为研究对象,分析无因次量 α 、 β 及含水饱和度 S_w 三参数对含水率导数曲线的影响。

2.2.1 无因次量 α 的影响

应用油水两相渗流数值模拟模型,保持模型的其他基础参数不变,改变高耗水带储层的渗透率,进行模拟计算,结果如图4所示。从图4可以看出,无因次量 α 越大,含水率导数曲线的第一个峰值越高,出现峰值的时间越早。这是由于无因次量 α 越大注入水突进速度越快,水窜越严重,最终导致第一个峰值高度的增大与出现时间的提前。

2.2.2 无因次量 β 的影响

应用油水两相渗流数值模拟模型,保持模型的其他基础参数不变,改变高耗水带的宽度,进行模拟计算,结果如图5所示。从图5可以看出,无因次量 β 数值越大,含水率导数曲线第一个峰值越大,但第一个峰值

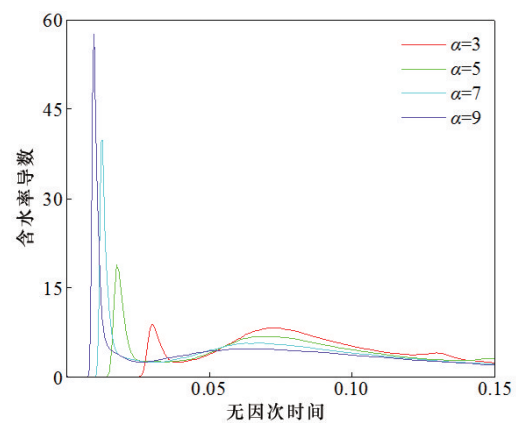


图4 不同渗透率比下含水率导数曲线

Fig. 4 Water cut derivative curve under different permeability ratio

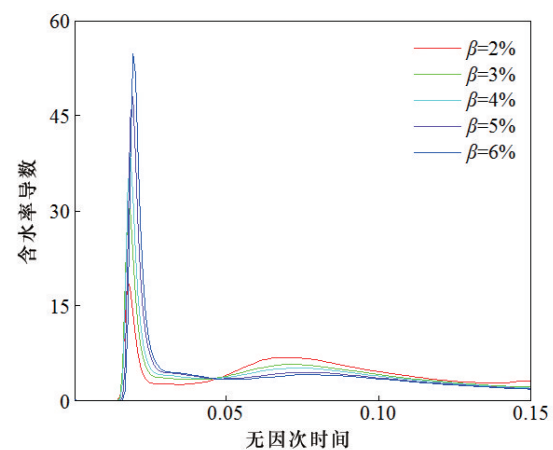


图5 不同宽度比下含水率导数曲线

Fig. 5 Water cut derivative curve under different width ratio

出现的时间基本不随无因次量 β 数值的变化而变化。这是因为当高耗水带储层的渗透率一定时注入水沿高耗水带突进的速度不变,而高耗水带内注入水量随着高耗水带宽度的增加而增大,对生产井含水率上升速度影响不断增大。

2.2.3 含水饱和度 S_w 的影响

应用油水两相渗流数值模拟模型,保持模型的其他基础参数不变,改变储层的含水饱和度,进行模拟计算,结果如图6所示。从图6可以看出,生产井的含水率导数曲线峰值随含水饱和度的升高而减小,峰值出现时间随含水饱和度的升高而提前。这是因为随着含水饱和度的升高水相渗透率增大,流动阻力减小;同时,含水饱和度升高,储层内可流动水增多,注入水到

达生产井时对生产井的含水率影响程度减弱,含水率变化速度减小。

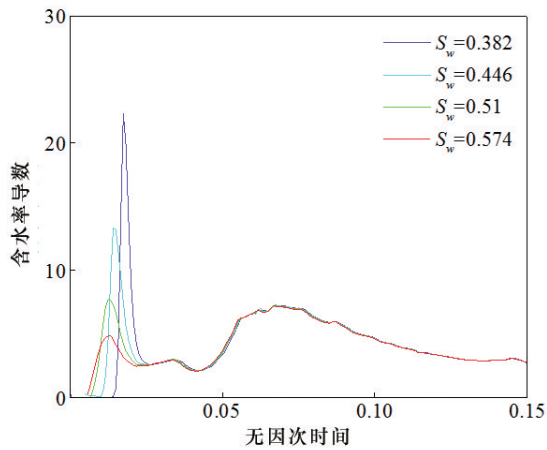


图6 不同含水饱和度下含水率导数曲线

Fig. 6 Water cut derivative curve under different water saturation

3 高耗水带识别方法

3.1 评价指标的确定

从前文针对生产井含水率导数变化特征及其影响因素分析可知,在形成高耗水带的储层中,生产井的含水率导数曲线表现为双峰特征,而均质储层中生产井的含水率导数曲线为单峰特征,因此可以通过生产井的含水率导数曲线来甄别储层是否形成高耗水带。

当储层形成高耗水带时,双峰的含水率导数特征曲线中第一峰值的大小及出现时间受无因次量 α 、 β 以及含水饱和度 S_w 三参数的影响。因此,引入无因次参数 F_{wo} 表示储层中水流动能力与油流动能力的比值,根据平面油水两相渗流理论进行推导,可得

$$F_{wo} = \frac{(Ka - Kw + K_1w)\mu_o K_{rw}(S_w)}{(Ka - Kw)\mu_w K_{ro}(S_w)} \quad (5)$$

即

$$F_{wo} = \frac{(1 - \beta + \alpha\beta)\mu_o K_{rw}(S_w)}{(1 - \beta)\mu_w K_{ro}(S_w)} \quad (6)$$

式中, K_{rw} 、 K_{ro} 分别为水相相对渗透率和油相相对渗透率; μ_w 、 μ_o 分别为水相黏度和油相黏度, mPa·s。

无因次参数 F_{wo} 的数值越大代表储层中水的流动能力越强,大于1时水的流动能力超过油的流动能力,因此将 F_{wo} 作为高耗水带耗水强弱的评价指标。通常情况下 F_{wo} 值小于1.0为弱等级耗水带,1.0~10.0为中等等级耗水带,大于10.0为强等级耗水带。

应用油水两相渗流数值模拟模型,进行 α 、 β 、 S_w 三参数不同组合下的数值模拟,计算出生产井含水率导数双峰曲线中第一峰值 f'_{wmax} ,进而通过回归拟合方法可以构建 f'_{wmax} 与 F_{wo} 的关系式。例如在模型的基础参数下,当 $S_w=0.59$ 时, f'_{wmax} 与 F_{wo} 的关系式为

$$F_{wo} = 1.83 \times 10^{-1} f'_{wmax} + 1.60 \quad (7)$$

由式(7)可知,只要获得实际生产数据中含水率导数曲线的第一峰值,就可以计算得到高耗水带耗水强弱的评价指标 F_{wo} 。

3.2 高耗水带识别的步骤

针对某一注采井组,要识别井间是否形成高耗水带及其强弱程度,可以采取以下步骤完成。

1) 收集研究区的油水相对渗透率数据、储层流体及井网相关特征参数和生产动态资料。

2) 选取单层生产动态资料绘制生产井的含水率及其导数随时间变化关系曲线。

3) 判断生产井的含水率导数曲线是否出现双峰的特征,如果只出现单峰特征,则甄别为储层未形成高耗水带;如果出现双峰特征,则继续以下步骤。

4) 确定生产井的含水率导数双峰特征曲线中第一峰值 f'_{wmax} 。

5) 将有关参数代入式(7)计算得到高耗水带耗水强弱指标 F_{wo} 。

6) 由 F_{wo} 值大小确定注采井间高耗水带的强弱级别。

4 实例应用

胜利油田东辛采油厂莱1区块L1C84井组注采井间水窜比较严重,但高耗水带的来源需要进一步甄别。为此以L1XN73(注入井)-L1C84(生产井)井组和L1XN8(注入井)-L1C84(生产井)井组组成的注采单元进行分析。根据2个注采井组的生产井动态分别绘制含水率导数曲线,如图7和图8所示。

从图7可以看出,L1XN8-L1C84井组的生产井含水率导数曲线呈现单峰特征,表明L1XN8井与L1C84井之间未形成高耗水带。从图8可以看出L1XN73-L1C84井组的生产井含水率导数曲线呈现双峰特征,表明L1XN73井与L1C84井之间已形成高耗水带;进一步评价该高耗水带的级别,可得 $f'_{wmax}=0.068$,代入式(7)得 $F_{wo}=1.612$,表明该高耗水带为中等等级高耗水带。识别评价结果与现场测试结果具有很好的一致性。

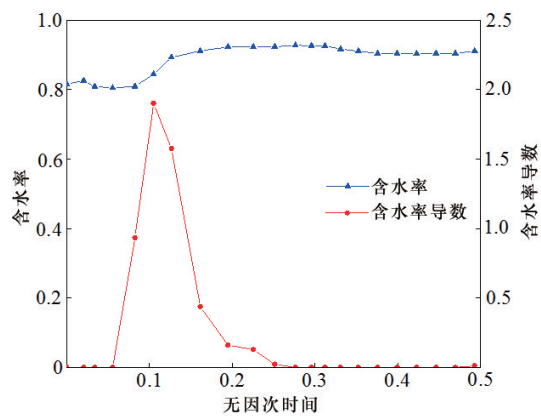


图7 L1XN8-L1C84井组含水率导数曲线

Fig. 7 Water cut derivative curve in well group
L1XN8-L1C84

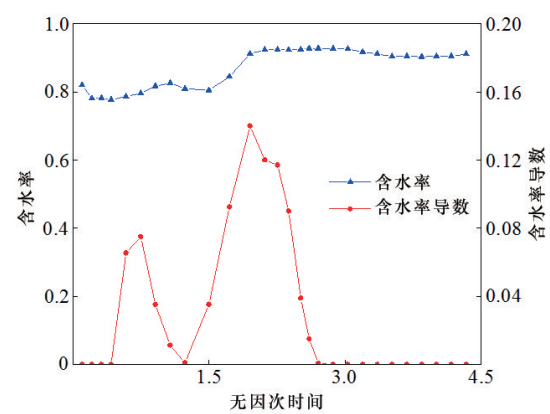


图8 L1XN73-L1C84井组含水率导数曲线

Fig. 8 Water cut derivative curve in well group
L1XN73-L1C84

5 结论

1) 在给出高耗水带的定义及形成机理的基础上,建立油水两相渗流数值模拟模型,分析了注采井间储层形成高耗水带对生产井含水率导数曲线的影响。

2) 分析表明,注采井间储层形成高耗水带时生产井在含水率导数曲线上具有双峰特征,其中第一个峰反映高耗水带特征,第二个峰反映基质特征,而注采井间储层未形成高耗水带时生产井在含水率导数曲线上表现为单峰特征;形成高耗水带时储层渗透率越大,耗水带内含水饱和度越高,则含水率导数曲线中第一个峰值越大,出现时间越早。

3) 通过分析并确定评价指标,提出了基于生产井含水率导数曲线特征识别评价高耗水带的新方法,根据含水率导数曲线第一峰值,可对注采井间形成的高耗水带进行识别与定量表征。实际应用结果表明,该方法识别过程只需要生产动态数据资料,流程简便、结果准确,具有很好的适用性。

参考文献(References)

- [1] 丁帅伟, 姜汉桥, 赵冀, 等. 水驱砂岩油藏优势通道识别综述[J]. 石油地质与工程, 2015, 29(5): 132-136.
Ding Shuaiwei, Jiang Hanqiao, Zhao Ji, et al. General description of preferential migration passage in water-flooding sandstone reservoir[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2015, 29(5): 132-136.
- [2] 孙明, 李治平. 注水开发砂岩油藏优势渗流通道识别与描述技术[J]. 新疆石油天然气, 2009, 5(1): 51-56.
Sun Ming, Li Zhiping. Identification and description of prefer-

ential path for water-flooding sandstone reservoir[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2009, 5(1): 51-56.

- [3] 肖红林. 砂岩油藏水流优势通道识别标准研究[J]. 中国科技信息, 2014, 8(16): 68-69.
Xiao Honglin. Study on identification standard of flow preferential path in sandstone reservoir[J]. China Science and Technology Information, 2014, 8(16): 68-69.
- [4] 毛振强, 谷建伟, 董平志. 疏松砂岩油藏大孔道形成机理与预测[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(1): 77-79.
Mao Zhenqiang, Gu Jianwei, Dong Pingzhi. Study on occurrence mechanism and prediction of big channels in loose cemented sandstone reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(1): 77-79.
- [5] 高慧梅, 姜汉桥, 陈民锋. 疏松砂岩油藏大孔道识别的典型曲线方法[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(1): 108-111.
Gao Huimei, Jiang Hanqiao, Chen Minfeng. Typical curves of identification of high capacity channel in unconsolidated sandstone oil reservoirs[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(1): 108-111.
- [6] 陈晓华. 动态测井资料在大孔道识别上的应用[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2010, 12(2): 35-37.
Chen Xiaohua. Application of dynamic logging data in the identification of high capacity channel[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Sciences Edition), 2010, 12(2): 35-37.
- [7] 姜汉桥. 特高含水期油田的优势渗流通道预警及差异化调整策略[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 114-119.
Jiang Hanqiao. Early-warning and differentiated adjustment methods for channeling in oil reservoirs at ultra-high water cut stage[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2013, 37(5): 114-119.
- [8] 张磊, 陈庆栋, 蒲春生, 等. 裂缝性特低渗油藏窜流通道识别

- 方法研究与应用[J]. 钻采工艺, 2015, 38(6): 29-32.
- Zhang Lei, Chen Qingdong, Pu Chunsheng, et al. Study and application of identification method of channeling-path in the fractured ultra-low permeability reservoir[J]. *Drilling & Production Technology*, 2015, 38(6): 29-32.
- [9] 冯其红, 史树彬, 王森, 等. 利用动态资料计算大孔道参数的方法[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(1): 74-76.
- Feng Qihong, Shi Shubin, Wang Sen, et al. Identification of thief zones based on dynamic data[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2011, 18(1): 74-76.
- [10] 谷建伟, 张秀梅, 郑家朋, 等. 基于无因次压降曲线的注水优势流动通道识别方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(5): 89-93.
- Gu Jianwei, Zhang Xiumei, Zheng Jiapeng, et al. Method of recognizing preferred water flow channels with dimensionless pressure drop curve[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2011, 35(5): 89-93.
- [11] 于春磊, 王硕亮, 张媛, 等. 疏松砂岩储层窜流通道平面分布规律研究[J]. 现代地质, 2016, 30(5): 1134-1140.
- Yu Chunlei, Wang Shuoliang, Zhang Yuan, et al. Study on two dimensional channeling distribution of unconsolidated sandstone reservoir[J]. *Geoscience*, 2016, 30(5): 1134-1140.
- [12] 郑强, 刘慧卿, 李芳, 等. 油藏注水开发后期窜流通道定量识别方法[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(4): 92-95.
- Zheng Qiang, Liu Huiqing, Li Fang, et al. Quantitative identification of breakthrough channel in water flooding reservoirs at later stage[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2012, 40(4): 92-95.
- [13] 宋玉龙. 优势通道综合识别描述方法研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2013.
- Song Yulong. Researches on the comprehensive method for identifying and characterizing the thief zones[D]. Dongying: China University of Petroleum (EastChina), 2013.
- [14] Feng Q, Wang S, Gao G, et al. A new approach to thief zone identification based on interference test[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, 75(1): 13-18.
- [15] Li B, Najeh H, Lantz J, Rampurawala M, et al. Detecting thief zones in carbonate reservoirs by integrating borehole images with dynamic measurements[C/OL]//2008, SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston: Society of Petroleum Engineers, 2008. <https://www.onepetro.org/conferences>
- [16] Chan K S. Water Control Diagnostic Plots[C/OL]//1995, SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston: Society of Petroleum Engineers, 1995. <https://www.onepetro.org/conferences>

New identification method of high water consumption zone in sandstone reservoir

XUE Jufeng¹, LIAO Xinwei^{2*}, HUANG Aixian¹, JIA Xiangjun¹, SHEN Xudong², CHEN Zhenrong¹, SHANG Xiongtao²

1. Dongxin Oil Production Plant, Shengli Oilfield Branch, Dongying 257061, China

2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract Accurate identification of high water consumption zone is the basis to deal with a variety of inefficient water cycle treatments. Aiming at the high water consumption zone formed during the long-term water injection development of sandstone reservoir, a seepage numerical simulation model with one injection well and one production well of oil-water two-phase is established to analyze the variation characteristics of water cut derivative of production well in the high water consumption zone, and the evaluation indicators of high water consumption zone are also established. A new method for identifying and evaluating high water consumption zone based on the water cut derivative curve characteristics of production well is proposed. The results show that the water cut derivative curve of the production well has a double-peak characteristic when there is a high water consumption zone between the injection and production wells while it has a single-peak characteristic when no high water consumption zone is developed, and that the appearance time and magnitude of the peak reflect the extent to which the injected water rushes along the high water consumption zone. According to the first peak of the water cut derivative curve of the production well between the injection and production wells, the high water consumption zone and its level can be accurately identified and evaluated. The practical application results show that the method is simple and has high accuracy and applicability.

Keywords sandstone reservoir; high water consumption zone; identification method; water cut derivative ●



(责任编辑 韩星明)