

南海西部底水油藏水平井含水上升规律分析及定量表征

张芟强,雷 昊,于成超,张连枝,唐慧敏

(中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东 湛江 524057)

摘要:水平井开发底水油藏过程中,随着原油的采出,井筒附近形成压降漏斗,底水突破油水界面向井底产生锥进,使油井见水时间、产量等发生变化,影响油藏开发效果。为详细刻画水平井生产变化,对其含水上升规律的研究是关键。基于底水油藏水平井渗流机理分析,利用南海西部油田实际油藏资料,优选了适合南海西部底水油藏的水驱特征曲线,并通过建立的底水油藏数值模型,求得俞氏水驱常数与影响油藏含水上升规律各因素的关系。在此基础上,以俞氏水驱常数为研究对象,结合正交试验设计方法,分析得到影响底水油藏水平井含水上升规律的主控因素。最后使用多元线性回归得到反映含水上升的定量关系式并通过实例验证。该研究思路可为类似底水油藏水平井含水上升规律影响因素的定性及定量研究提供一定的借鉴。

关键词:底水油藏;含水上升规律;主控因素;正交设计;定量评价

中图分类号:TE341 **文献标志码:**A

Analysis and quantitative characterization of water-cut rising law of horizontal wells in bottom water reservoir in western South China Sea

ZHANG Jiqiang, LEI Hao, YU Chengchao, ZHANG Lianzhi, TANG Huimin

(Zhanjiang Branch of CNOOC(China)Co. Ltd., Zhanjiang 524057, China)

Abstract: During horizontal well development of bottom water reservoirs, as crude oil is produced, a pressure drop funnel will be formed near the wellbore, and the bottom water will break through the oil-water interface to produce a coning at the bottom of the well, which will change the water breakthrough time and production of the oil well, thereby affecting the reservoir development effect. In order to describe the production changes of horizontal wells in detail, study on the law of water cut rise is a key. Based on the analysis of the seepage mechanism of horizontal wells in bottom water reservoirs, using actual reservoir data in the western oilfields of South China Sea, a waterflooding characteristic curve is optimized, which is suitable for bottom water reservoirs, and the bottom water reservoir numerical model is established to find the relationship between the Yu's waterflooding constant and the factors affecting the law of water-cut rising. On this basis, regarding the Yu's waterflooding constant as the research object, and combined with the orthogonal array design method, the main controlling factors affecting the law of water-cut rising in the horizontal well are analyzed. Finally, the quantitative relationship reflecting the rise in water cut is obtained by multiple linear regression method and verified by an example. This research idea can provide a certain reference for the qualitative and quantitative research on the influencing factors of water-cut rising in horizontal wells in similar bottom water reservoirs.

Key words: bottom water reservoirs; water cut law; main controlling factor; orthogonal design; quantitative evaluation

底水油藏广泛分布于国内外各大油田且储量丰富,在我国海上油田,底水油藏探明数量及储量也相当可观。对于底水油藏,开发过程中侵入水平井的底水会导致油井过早水淹,给油田生产带来较大的负面影响。通过对海上各底水油藏开发实例及数模研究表明,底水油藏初期含水上升快,但进入高含水期后,含水上升缓慢,大部分产量都在此阶段产出。可见准确认识底水油藏的含水上升规律是

评价和提高其开发效果的关键。目前,对于含水上

收稿日期:2020-06-05;改回日期:2020-07-08。

第一作者简介:张芟强(1990—),硕士,工程师,主要从事油藏工程及油气田开发研究。E-mail:tiyou0201@sina.cn。

基金项目:“南海西部油田上产 2000 万方关键技术研究”——课题《南海西部在生产油气田提高采收率技术研究》(编号:CNOOC-KJ 135 ZDXM 38 ZJ 01 ZJ)。

升规律的研究主要在实验模拟、理论计算和数值模拟三方面。实验模拟研究的代表有Stephens^[1-5]等,虽然实验模拟可较直观地反映油井的水淹动态和模式,但实验装置的组建和实验过程较为复杂,因此此类实验开展并不多。理论计算以马克西莫夫^[6-11]等为代表,提出包括甲型、乙型、俞启泰等水驱特征曲线,为油藏的含水预测提供一定理论依据,但在模型的适用条件方面需要慎重。数值模拟方面以Yang^[12-18]等为代表,通过建立较为精细的地质模型,可对油藏含水上升的变化规律进行研究,其中地质模型的精准程度是影响模拟结果的关键。以上研究大多是对含水上升规律影响因素的定性研究,但结合实际油藏数据对水平井含水上升规律进行定量评价的研究较少。本文结合理论方法、数值模拟研究及数理计算方法,分析了影响油藏水平井含水上升规律的主控因素,并建立了多因素与水驱常数的定量关系式。该研究方法和思路对油藏的生产动态预测、采收率的估算及改善油藏的开发效果均有重要意义。

1 渗流机理分析

底水油藏生产过程中,一般有托进和脊进两种驱油方式。托进主要发生在底水油藏开发的早期阶段,油水界面较均匀地向上缓慢移动,是一种理想的底水驱动方式;脊进是由于井筒附近产生压力漏斗降,油水接触界面在井筒附近上升速度明显大于远端上升速度,从而形成以井筒为轴心的“倒锥状”油水界面形态(见图1)。水脊一旦突破后,油井迅速见水,产水量从无开始增加,产油量降低,生产水油比增大,含水率上升,开发效果变差。因此研究底水油藏含水上升机理,分析油井见水时间,可得到油井含水上升的影响因素。

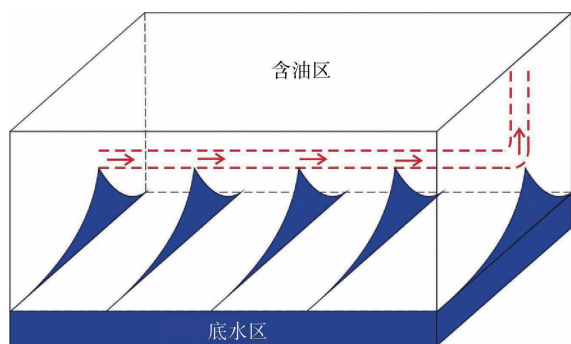


图1 水平井底水脊进示意

目前描述底水油藏水平井见水规律的模型主要有Permadi模型^[19]、Pual Papatzacos模型^[20]、程林松模型^[21]和李立峰模型^[22]。以Permadi模型和Pual Papatzacos模型为例,其对应的水平井水脊突破时间预测模型分别为:

$$t_{BT} = \frac{849.247}{(\Delta p - \Delta \gamma_{ow} h_{wc})} \frac{8(\mu_w + \mu_o) \varphi (1 - S_{or}) h^2}{h_{wc}} \quad (1)$$

$$t_{BT} = \frac{3.249 h^2 L \varphi}{B_o q_o} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}} \quad (2)$$

式(1)~(2)中, μ_o 为原油黏度,mPa·s; μ_w 为地层水黏度,mPa·s; φ 为孔隙度,小数; S_{or} 为残余油饱和度,小数; h_{wc} 为避水高度,m; Δp 为产量 q_o 条件下的生产压差,Pa; $\Delta \gamma_{ow}$ 为油水重度差,Pa/m; L 为水平段长度,m; q_o 为油井产量,m³/d; B_o 为原油体积系数,小数; k_h 为水平渗透率, μm^2 ; k_v 为垂直渗透率, μm^2 。

从公式(1)~(2)可以看出,垂直水平渗透率比、油水黏度、避水高度、采油速度、水平段长度等是影响水平井见水时间的因素,从而影响水平井含水上升规律。除此之外,通过生产动态表明,水体能量、动用储量的大小等也会对见水特征产生影响。因此可将垂直水平渗透率比等8个因素作为主控因素分析的基础。

2 水驱特征曲线优选

为较好地对底水油藏水平井含水上升规律进行评价,通过引入水驱特征曲线来表征油井的水驱规律,以建立起各影响因素与油井含水上升规律的关系。南海西部X油田和Y油田都是天然能量充足的底水油藏,中高孔中高渗,原油黏度低,油井产能高。这里以它们为例,分别用甲型、乙型、丙型、丁型及俞启泰水驱特征曲线与其实际含水上升曲线进行对比分析(见图2、图3)。

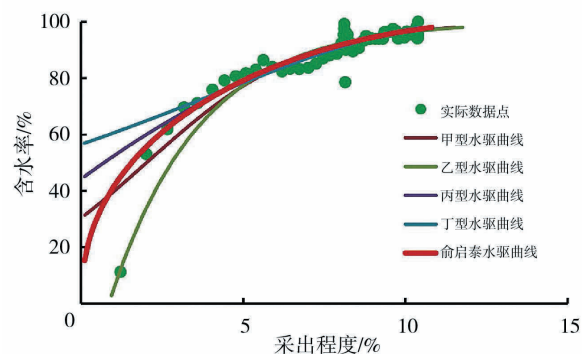


图2 南海西部X油田含水上升曲线

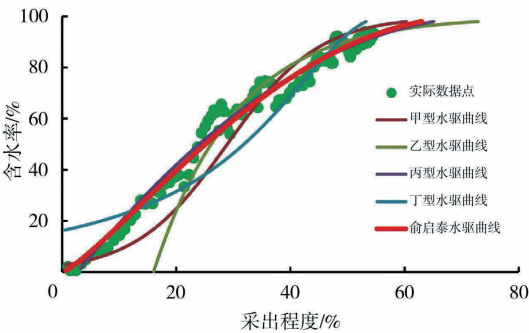


图3 南海西部Y油田含水上升曲线

从图2、图3可以看出,X油田和Y油田的水驱特征与俞启泰水驱特征曲线拟合关系更好,因此这里优选俞启泰水驱特征曲线来表征油藏的水驱特征。

俞启泰水驱特征曲线^[8]的关系式为:

$$\lg N_p=a-b\lg \frac{L_p}{W_p}$$

(3)

由式(3)可推导 N_p 与 f_w 的关系为:

$$N_p=10^a\left\{\frac{2bf_w}{1-f_w+b(1+f_w)+\sqrt{[1-f_w+b(1+f_w)]^2-4b^2f_w}}\right\}^b$$

(4)

取 f_w 为0.98时的 N_p 为 N_R ,并令

$$A=\frac{2\times 0.98b}{1-0.98+b(1+0.98)+\sqrt{[1-0.98+b(1+0.98)]^2-4\times 0.98b^2}}$$

(5)

$$R^*=\frac{N_p}{N_R}$$

(6)

可得

$$f_w=\frac{(1+b)AR^{*1/b}-b(AR^{*1/b})^2}{b+(1-b)AR^{*1/b}}$$

(7)

式(3)~(7)中: a,b 为常数; N_p 为累积产油量, 10^4 m^3 ; L_p 为累积产液量, 10^4 m^3 ; W_p 为累积产水量, 10^4 m^3 ; f_w 为含水率,小数; R^* 为可采储量采出程度,小数。

根据式(7)可作出含水率 f_w 和可采储量采出程度 R^* 的关系图(见图4),可以看出 b 值由0到 ∞ 变化时, f_w 与 R^* 关系曲线由凹形逐渐变为凸形,可反映出不同的(甚至是极端的)含水上升情况,可见 b 值可作为反映油田含水率变化特征值,为了方便使用,将 b 值称为俞氏水驱常数。

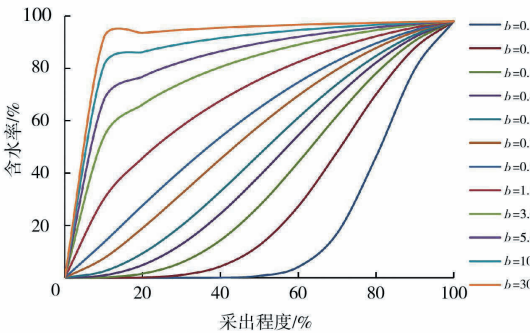


图4 俞启泰水驱特征曲线图版

3 数值模型及正交试验设计

3.1 数值模型的建立

在第2节分析了底水油藏水平井含水上升规律的影响因素及表征含水上升的俞氏水驱常数(b 值),在此基础上,利用Petrel-RE软件建立网格数为 $51\times 51\times 10$,网格大小 $20\text{ m}\times 20\text{ m}\times 2\text{ m}$ 的单井机理模型(见图5),运用正交试验设计和主控因素分析方法进一步分析各因素对水平井含水上升的影响。

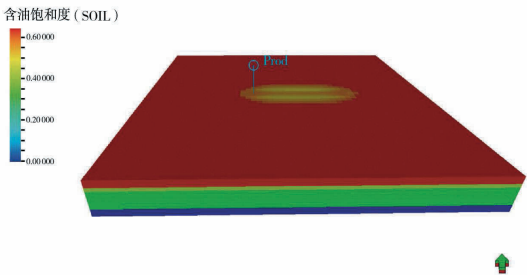


图5 底水油藏水平井机理模型示意

3.2 正交优化试验设计

正交优化试验设计是利用正交表、运用统计学原理研究多因素多水平的一种设计方法。它所选取试验方案具有典型性、代表性和完整性,可实现以最少的试验次数达到全面试验等效的结果。根据第1节筛选出的影响含水上升规律的因素,设计了8因素5水平的正交试验表,共有50个试验点,其中8个影响因素为自变量,俞氏水驱常数 b 为响应值,试验因素及取值水平如表1所示。

表 1 正交设计参数水平取值

因素	垂直水平 渗透率比	水平段长度/ m	水体倍比	避水高度/ m	动用储量/ 10^4 m^3	采油速度/ %	油水 黏度比	油水过渡带 厚度/m
水平 1	0.05	340	100	4	100	4	2	0
水平 2	0.10	400	200	6	150	5	5	1
水平 3	0.20	500	400	8	200	6	10	2
水平 4	0.50	600	600	10	250	7	30	3
水平 5	1.00	700	800	12	300	8	50	4

基于Visual Studio开发工具,运用C#语言编制了相关程序,通过直接导入Petrel-RE计算的产液、产油和产水量,对俞氏水驱常数 b 进行拟合回归,部分拟合结果如表2所示。

表 2 正交试验计算结果

因素	垂直水平 渗透率比	水平段长度/ m	水体 倍比	避水高度/ m	动用储量/ 10^4 m^3	采油速度/ %	油水 黏度比	油水过渡带 厚度/m	俞氏水驱 常数
试验 1	0.05	340	100	4	100	4	2	0	2.090
试验 2	0.10	340	200	8	250	8	2	1	1.972
试验 3	0.20	500	800	6	250	4	2	2	2.270
试验 4	0.50	500	100	6	100	6	30	1	21.310
试验 5	1.00	700	600	8	150	4	10	1	4.510

3.3 主控因素分析

主控因素决定油田开发的主要矛盾,它可规避对油田开发的不利因素以改善其开发效果,因此引入变异系数法、方差分析法、灰色关联分析法三种方法^[23]对正交试验结果进行联合分析,可计算得到各影响因素的权重,如表3所示。

表 3 各因素权重分析

影响因素	变异系数法		方差分析法		灰色关联法		平均权重与次序	
	权重	排序	权重	排序	权重	排序	权重	排序
垂直水平渗透率比	0.161	3	0.180	3	0.150	2	0.166	3
水平段长度	0.049	6	0.031	6	0.082	6	0.054	6
水体倍比	0.040	7	0.027	7	0.074	7	0.047	7
避水高度	0.181	2	0.220	2	0.153	3	0.185	2
动用储量	0.156	4	0.150	4	0.148	4	0.151	4
采油速度	0.151	5	0.078	5	0.147	5	0.125	5
油水黏度比	0.230	1	0.301	1	0.172	1	0.234	1
油水过渡带厚度	0.032	8	0.013	8	0.068	8	0.038	8

从表3可知:

(1)各影响因素权重排序为:油水黏度比、避水高度、垂直水平渗透率比、动储量、采油速度、水平段长度、水体倍比和油水过渡带厚度。

(2)影响因素中油水黏度比、避水高度、垂直水平渗透率比、动储量和采油速度的权重和为0.861。

通过以上分析可认为底水油藏水平井含水上升规律的主控因素为油水黏度比、避水高度、垂直水平渗透率比、动储量和采油速度。

4 定量分析

结合第3节分析结论,以油水黏度比等5个参数为基础,对含水上升规律进行定量分析。通常采用多元回归分析来研究多个因素之间的关系,其中按

模型的类型可划分为线性回归和非线性回归,一般来说,线性回归模型的准确率相对更高,适用性也更广。基于第3节主控因素分析结果,首先分析单因素与俞氏水驱常数 b 的关系,其次将单因素与 b 的关系形式作为独立个体,运用多元线性回归方法建立多因素反映含水上升的关系式。

4.1 单因素分析

以动储量为例,分析单因素与俞氏水驱常数 b 的关系形式。对比南海西部各底水油藏实际数据与数值模拟结果,可以看到动储量与俞氏水驱常数 b 为线性关系,两者分析结果一致(见图6、图7)。以此类推,可分析得到垂直水平渗透率比和油水黏度比与俞氏水驱常数呈对数关系,避水高度、动储量和采油速度与俞氏水驱常数呈线性关系。

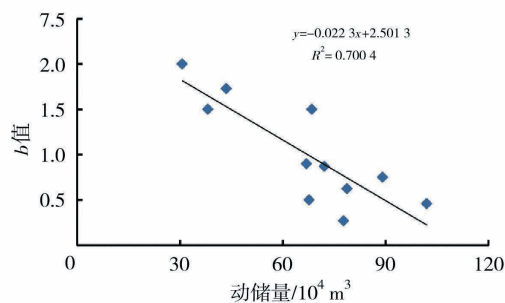


图6 动储量与俞氏水驱常数的关系(实际数据)

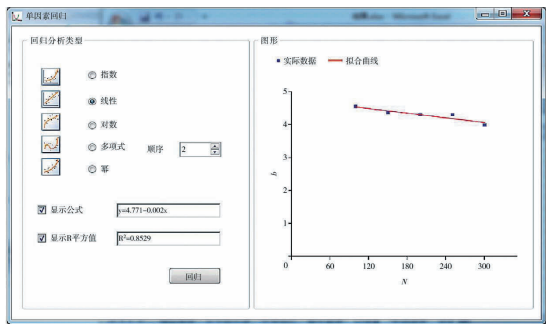


图7 动储量与俞氏水驱常数的关系(数值模拟)

4.2 多元回归

由4.1节各因素与俞氏水驱常数的关系,可建立一个多元线性回归模型,其表达式如下:

b=β₀+β₁ln(μ_o/μ_w)+β₂h_o+β₃ln(K_v/K_h)+β₄N+β₅v_o (8)

式中:β₀~β₄为表达式系数,无因次;μ_o/μ_w为油水黏度比,无因次;h_o为避水高度,m;K_v/K_h为垂向水平渗透率比,无因次;N为动储量,10⁴ m³;v_o为采油速度,%。

基于实际样本数据,运用matlab编程求解得到南海西部底水油藏俞氏水驱常数定量表达关系式为:

b=-1.392 6+0.518 9ln(μ_o/μ_w)+0.055 6h_o+0.196 8ln(K_v/K_h)-0.017 5N+0.578 6v_o
R²=0.81 (9)

运用定量关系式(9)计算俞氏水驱常数值,得到定量关系式的拟合值。作拟合值与实际值的散点关系图,如图8所示,从拟合值与实际值之间关系趋势可知,散点比较均匀地分布在线性趋势线两侧,表明定量关系式所计算的拟合值与实际值差异不大,呈现较好的线性函数关系。

为进一步验证式(9)的准确性,这里选取南海西部Y1井进行实例验证。该井相关参数如下:垂向水平渗透率比0.1,动用储量81.27×10⁴ m³,油水黏度

比2,避水高度11 m,采油速度4.2%。将参数带入式(9),得到俞氏水驱常数值为0.105,作实际和计算的含水上升曲线,如图9所示,计算曲线和实际数据点拟合情况较好,能反映Y1井在各阶段的含水上升情况,说明定量关系式具有较强的适用性。

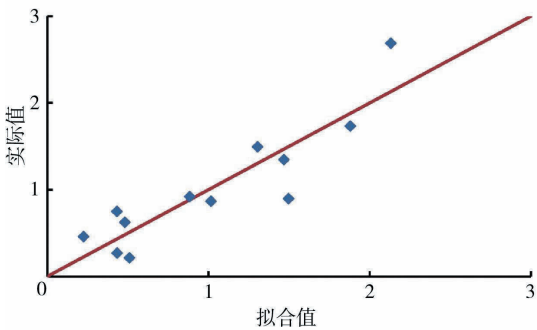


图8 拟合结果与实际值散点关系

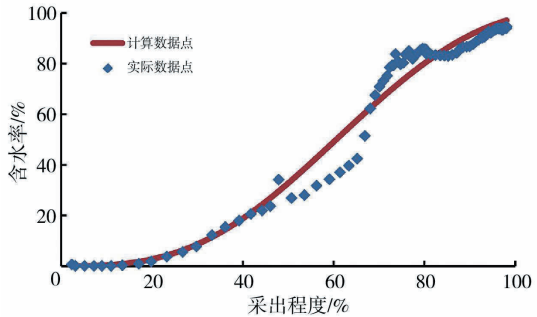


图9 Y1井含水上升曲线对比

5 结论

(1)在分析底水油藏渗流机理的基础上,利用南海西部实际油藏资料,优选了适合南海西部底水油藏的水驱特征曲线。

(2)结合数值模拟研究,通过C#编制程序求得水驱常数与影响油藏含水上升规律各因素的关系。在此基础上,结合正交优化试验设计方法,分析得到影响底水油藏含水上升规律的主控因素。

(3)通过多元线性回归方法得到了反映含水上升的定量关系式,并结合实例研究,验证了该定量关系式的可靠性。该研究思路可为类似底水油藏含水上升规律影响因素的定性及定量研究提供一定的借鉴思路。

参考文献:

[1] STEPHENS A C,MOORE T F,CAUDLE B H.Some model studies of Bottom water driven reservoirs [C].University of Oklahoma -SPE Production Research Symposium in Norman,Oklahoma,29-30 April,1963.
[2] JIANG Q,BULLER R M.Experimental study and numeri-

- cal modelling of the bottom water coning flow to a horizontal well [C]. Technical Meeting/Petroleum Conference of the South Saskatchewan Section, Regina, 16–18 October, 1995.
- [3] PERMADI P, LEE R L, KARTOATMODJO R T. Behavior of water cresting under horizontal wells [C]. SPE Annual Technical Conference & Exhibition held in Dallas, U.S.A., 22–25 October, 1995.
- [4] 王加禄, 刘玉章, 江如意, 等. 水平井开采底水油藏水脊脊进规律的物理模拟 [J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(5): 590–593.
- [5] 李立峰, 岳湘安, 李良川, 等. 底水油藏水平井开发水脊规律研究 [J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(1): 89–91, 95.
- [6] WRIGH F F A. Field results indicate significant advances in after-flooding [J]. JPT, 1958(10): 12.
- [7] PARTS M, MATTHEWS C S, JEWETT R L, et al. Prediction of injection rate and production history for multi-fluid five-spot floods [J]. Transactions of the AIME, 1959, 216(1): 98–105.
- [8] 俞启泰. 预测水驱砂岩油藏含水上升规律的新方法 [J]. 新疆石油地质, 2002, 23(4): 314–316.
- [9] 洪楚侨, 杨志兴, 苏崇华, 等. Logistic 曲线在涠洲油田群含水规律研究中的应用 [J]. 海洋石油, 2011, 31(1): 68–72.
- [10] 张辉, 彭小东, 刘鑫, 等. 底水油藏含水上升规律研究—以 Y2 油藏西北区为例 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12(35): 9470–9474, 9479.
- [11] 田选华, 郭迎春, 刘全稳, 等. 水平井产量递减、含水上升规律经验公式研究 [J]. 石油化工应用, 2015, 34(5): 24–26.
- [12] KUO M C T. A simplified method for water coning predictions [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Francisco, 5–8 October, 1983.
- [13] YANG W, WATTENBERGER R A. Water coning calculations for vertical and horizontal wells [C]. APE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, 1991.
- [14] 于蓬勃. 底水稠油油藏水平井见水特征及影响因素 [J]. 天然气与石油, 2015, 33(5): 36–40.
- [15] 章威, 龙明, 李军, 等. 生产动态确定底水油藏油井水淹范围的新方法 [J]. 天然气与石油, 2017, 35(4): 68–72.
- [16] 喻高明, 凌建军, 蒋建军, 等. 砂岩底水油藏开采机理及开发策略 [J]. 石油学报, 1997, 18(2): 64–68.
- [17] 凌宗发, 王丽娟, 李保柱, 等. 水平井含水率上升影响因素 [J]. 现代地质, 2008, 22(1): 86–90.
- [18] 杜殿发, 王玉靖, 侯加根, 等. 薄层边底水油藏水淹模式—以陆梁油田陆9井区呼二三油藏为例 [J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(5): 91–93.
- [19] PERMADI P. Effect of drainage area and producing rate on horizontal-well oil recovery in bottom water drive reservoirs [C]. SPE India Oil and Gas Conference and Exhibition, New Delhi, India, 17–19 February, 1998.
- [20] PAPATZACOS P, HERRING T R, MARTINSEN R. Cone breakthrough time for horizontal wells [J]. SPE Reservoir Engineering, 1991, 6(3): 311–318.
- [21] 程林松, 郎兆新, 张丽华. 底水驱油藏水平井锥进的油藏工程研究 [J]. 石油大学学报(自然科学版), 1994, 18(2): 43–47.
- [22] 李立峰, 岳湘安, 张立娟. 考虑井筒压降的底水油藏水平井见水时间研究 [J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2012, 27(4): 46–49.
- [23] 蒋勇, 李建良. 数值分析与计算方法 [M]. 科学出版社, 2012.

(编辑 谢 葵)