

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2022014

引用格式: 岳宝林, 王双龙, 祝晓林, 等. 气驱-水驱联合特征曲线在气顶边水油藏中的应用 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(2): 99-104.

YUE Baolin, WANG Shuanglong, ZHU Xiaolin, et al. Application of a gas and water drive combined characteristic curve in reservoirs with gas cap and edge water [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(2): 99-104.

气驱-水驱联合特征曲线在气顶边水油藏中的应用

岳宝林, 王双龙, 祝晓林, 刘 斌, 陈存良

(中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459)

摘 要: 气顶边水油藏进入开发中晚期后, 面临着气窜与水侵的双重难题, 需要评价开发效果, 并基于评价结果调整开发策略, 但无法直接应用气驱特征曲线或水驱特征曲线评价该类油藏的开发效果。因此, 基于稳定渗流理论, 推导了气驱特征曲线关系式, 并与水驱特征曲线关系式联立, 建立了计算不同阶段气驱产油量占总产油量比例的方法; 利用该方法可计算出气顶边水油藏气驱与水驱的采出程度, 并根据计算结果调整开发策略。以锦州 X 油田 3 井区为例进行了应用分析, 计算出该井区所开发气顶边水油组上部当前气驱采出程度为 24.3%, 下部当前水驱采出程度为 48.4%, 发现该油组上部气驱采出程度低, 指出应实施屏障注水, 提高油组的采收率。研究结果表明, 采用气驱-水驱联合特征曲线可以评价气顶边水油藏的开发效果。

关键词: 气顶边水油藏; 气驱曲线; 水驱曲线; 屏障注水

中图分类号: TE349

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2022)02-0099-06

Application of a Gas and Water Drive Combined Characteristic Curve in Reservoirs with Gas Cap and Edge Water

YUE Baolin, WANG Shuanglong, ZHU Xiaolin, LIU Bin, CHEN Cunliang

(Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin, 300459, China)

Abstract: When reservoirs with gas cap and edge water enter the middle and late stages of development, challenges of gas channeling and water cut emerge, and relevant evaluations and development strategy adjustments are needed depending on evaluation results. However, the development effect of such reservoir cannot be directly evaluated by the characteristic curve of gas drive or water drive. In light of this, this paper presents a method for calculating the proportion of oil production by gas drive at different stages by combining the relations for characteristic curves of water drive and gas drive. Specifically, the relation for characteristic curve of gas drive was derived based on the steady seepage theory. The degrees of reserve recovery by gas drive and water drive in reservoirs with gas cap and edge water can be calculated using this method, and the calculation results can provide a basis for adjusting the development strategy. The calculated degree of reserve recovery by gas drive was 24.3% for the upper part of an oil group with gas cap and edge water in Well Block 3 of JZ-X Oilfield, and that by water drive was 48.4% for the lower part. Considering that the degree of reserve recovery by gas drive in the upper part was low, barrier water injection was intended to be conducted for enhancing the oil recovery of the oil group. The research indicates that the development effect of reservoirs with gas cap and edge water can be evaluated by the gas and water drive combined characteristic curve.

Key words: gas cap and edge water oil reservoir; gas drive curve; water drive curve; barrier water injection

气顶边水油藏是特殊类型的油藏, 其基本特征是在一个油层内同时存在着没有隔离的油藏和气藏, 气藏在上, 油藏在中, 下部一般还有边水或底水存在。该类油藏中的油气水在漫长的成藏过程中,

已经形成了水动力学平衡、热力学平衡及多组分相态平衡的状态^[1-5]。油气层一旦钻开投入开发, 这种平衡状态就被打破, 油气层内出现物质和能量的交换, 如流体流动、压力传递、界面移动和相态转化

收稿日期: 2021-05-04; 改回日期: 2022-01-04。

作者简介: 岳宝林 (1986—), 男, 山东济宁人, 2009 年毕业于中国石油大学 (华东) 石油工程专业, 2012 年获中国石油大学 (华东) 油气田开发专业硕士学位, 工程师, 主要从事油气田开发方面的研究工作。E-mail: 282565118@qq.com。

基金项目: 国家科技重大专项“渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范” (编号: 2016ZX05058001) 资助。

等,给开发生产带来困难。海上油田对于该类油藏,部署平行于油气水界面的水平井进行开发,并取得了较好的开发效果^[6-8]。但随着油藏进入开发中后期,不可避免会出现气窜与水侵,油藏面临着地层压力下降快、产液量逐渐降低和气驱效率低等难题^[9-15]。因此,需要评价该类油藏的开发效果,并根据评价结果挖掘油藏开发潜力。

目前,普遍采用童氏水驱曲线评价水驱油藏的开发效果;而对于气驱油藏,人们借鉴水驱曲线的思路,采用气驱特征曲线评价气驱油藏的开发效果,形成了评价水驱油藏和气驱油藏开发效果的方法^[16-23]。气顶边水油藏受气驱与水驱的双重影响,无法直接应用气驱特征曲线或水驱特征曲线评价开发效果。因此,笔者基于稳定渗流理论,推导了气驱特征曲线关系式,并将其与水驱特征曲线关系式联立,建立了计算气驱产油量占总产油量比例的方法,实现了气顶边水油藏水驱与气驱综合影响下开发效果的评价、油藏潜力的量化,并以锦州X油田3井区为例进行了应用分析,提出了挖掘气顶边水油藏开发潜力的措施。

1 气驱-水驱联合特征曲线的建立

1.1 气驱特征曲线

水驱特征曲线以油水相对渗透率曲线为基础推导而来,基本假设是,在油-水两相稳定渗流条件下,中含水阶段 $K_{rw}/K_{ro}-S_w$ 呈半对数直线关系。该思想同样适用于气驱油的情况,二者的区别主要是黏度比的差异。对于油-气两相稳定渗流,认为 $K_{rg}/K_{ro}-S_g$ 也满足指数函数关系:

$$\frac{K_{rg}}{K_{ro}} = m e^{n S_g} \quad (1)$$

式中: K_{rg} 为气相相对渗透率; K_{ro} 为油相相对渗透率; S_g 为含气饱和度; m 和 n 为回归系数。

忽略毛细管力的影响,对于气驱稳定渗流,根据平面径向流公式,可以得出产油量、产气量与油气黏度、体积系数及相对渗透率的关系:

$$\frac{Q_g - Q_o R_{si}}{Q_o} = \frac{\mu_o B_o K_{rg}}{\mu_g B_g K_{ro}} \quad (2)$$

式中: Q_g 为地面条件下的产气量, m^3/d ; Q_o 为地面条件下的产油量, m^3/d ; R_{si} 为气油比, m^3/m^3 ; μ_o 为地层原油黏度, $mPa \cdot s$; μ_g 为地层天然气黏度, $mPa \cdot s$; B_o 为原油体积系数, m^3/m^3 ; B_g 为天然气体积系数, m^3/m^3 。

在气驱油条件下,水相仅以束缚水形式存在于地层中,气驱油藏任意时刻的含油饱和度为油藏中剩余油体积与油藏孔隙体积之比。根据物质平衡方程,气驱油过程中油藏的含气饱和度为:

$$S_g = \frac{N_p}{N} (1 - S_{wi}) \quad (3)$$

式中: N_p 为累计产油量, $10^4 m^3$; N 为地质储量, $10^4 m^3$; S_{wi} 为束缚水饱和度。

油藏的累计产气量可表示为:

$$G_p = \int_0^t Q_g dt \quad (4)$$

式中: G_p 为累计产气量, $10^4 m^3$ 。

由式(1)~式(4)可得:

$$G_p = \int_0^t Q_o \left[\frac{m \mu_o B_o}{\mu_g B_g} e^{\frac{n N_p}{N} (1 - S_{wi})} + R_{si} \right] dt \quad (5)$$

由瞬时产油量与累计产油量的关系可得:

$$Q_o = \frac{dN_p}{dt} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),进行积分、求对数,可得:

$$\lg(G_p - R_{si} N_p + C) = A + B N_p \quad (7)$$

其中

$$B = \frac{3n(1 - S_{wi})}{4.606N} \quad (8)$$

与水驱特征曲线相比,累计产气量与累计产油量的关系受溶解气油比的影响。随着大气顶油藏持续开发,气顶气因膨胀向油区扩张,并依靠气体前缘的推进而驱油,由于油气黏度差异大,进入油区的气体容易在油井井底泄压区形成“指进”,发生气窜,生产气油比不断增大,溶解气油比与常数项的影响越来越小。生产气油比与溶解气油比的比值达到10、累计产气量达到 $1\,000 \times 10^4 m^3$ 时,式(7)左侧忽略溶解气油比时的计算结果与考虑溶解气油比时的计算结果相差很小。因此,大气顶油藏开发中后期,可以认为累计产气量与累计产油量在半对数坐标上呈直线关系,即:

$$\lg G_p = A + B N_p \quad (9)$$

1.2 气驱-水驱联合特征曲线

采用水平井开发气顶边水油藏时,可以认为上部储量气驱动用,下部储量水驱动用。气顶边水油藏下部水驱与甲型水驱曲线相符,即:

$$\lg W_p = A_1 + B_1 N_{p1} \quad (10)$$

$$B_1 = \frac{3n_1(1 - S_{wi})}{4.606N_1} \quad (11)$$

式中: W_p 为累计产水量, 10^4 m^3 ; N_{p1} 为水驱累计产油量, 10^4 m^3 ; n_1 为水相指数; N_1 为水驱动用储量, 10^4 m^3 。

上部气驱特征曲线的关系式为:

$$\lg G_p = A_2 + B_2 N_{p2} \quad (12)$$

$$B_2 = \frac{3n_2(1-S_{wi})}{4.606N_2} \quad (13)$$

式中: N_{p2} 为气驱累计产油量, 10^4 m^3 ; n_2 为气相指数; N_2 为气驱动用储量, 10^4 m^3 。

利用式(10)和式(12), 可求得各阶段间水驱产油量与气驱产油量的比:

$$\frac{\Delta N_{p1}}{\Delta N_{p2}} = \frac{B_2 \Delta \lg W_p}{B_1 \Delta \lg G_p} \quad (14)$$

利用式(14), 根据各阶段累计产气量与累计产水量, 可计算得到上部气驱累计产油量与下部水驱累计产油量的比, 从而得到各阶段气驱产油量与总产油量的比, 以评价不同阶段的开发效果及指导下步开发策略的调整。

2 应用分析

以锦州 X 油田 3 井区为例进行应用分析。锦州 X 油田古近系沙河街组发育了一系列受构造控制的短轴半背斜气顶油藏, 该油田 3 井区开发的 I 油组是以大气顶、强边水和窄油环为特征的砂岩油藏(见图 1), 气顶指数为 2.03, 水体倍数为 50~80, 油环平面宽度小于 600.00 m。目前已进入开发后期, 采出程度 35.1%, 气油比 1 832 m^3/m^3 , 含水率 85.4%, 出现了含水率和气油比高的问题, 需要评价油藏开发潜力, 以指导开发策略的调整。

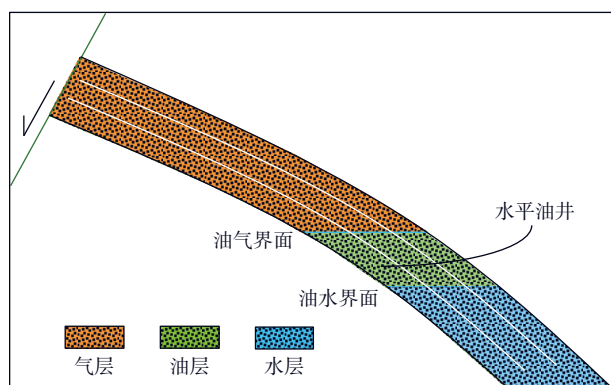


图 1 锦州 X 油田 3 井区 I 油组油气水界面示意

Fig.1 Oil-gas-water interface of Oil Group I in Well Block 3 of JZ-X Oilfield

3 井区采用水平井开发, 水平井部署于油柱高度的下 1/3—1/2 处(见图 1), 受气、水两相驱替, 在上下部分原油不发生大幅度窜流的情况下, 可以认为水平井上部为气驱, 下部为水驱。甲型、乙型、丙型和丁型等 4 种水驱曲线含水率上升的规律不相同。将锦州 X 油田水驱曲线含水率的上升规律与 4 种水驱曲线含水率的上升规律进行对比, 发现该油田含水率的上升规律与甲型水驱曲线相符。

结合地质储量计算方法, 计算出 3 井区水驱和气驱动用储量比为 0.45:0.55。

针对水驱动用储量与水驱特征曲线的关系, 童宪章院士根据国内外 25 个油田的生产资料提出的“7.5B”公式, 已经成为水驱油田计算水驱动用储量的主要方法^[19]。但由于海上油田考虑经济效益问题, 普遍选用少井高产的开发策略, 如采用陆地油田回归参数计算海上油田的水驱动用储量, 计算结果较高, 因此选用渤海油田典型水驱区块的生产数据对式(11)进行回归修正, 得到:

$$B_1 = \frac{6.1}{N_1} \quad (15)$$

借鉴计算海上油田水驱动用储量的思路, 选用渤海油田典型气驱区块的生产数据对式(13)进行回归, 可得:

$$B_2 = \frac{5.2}{N_2} \quad (16)$$

将式(15)和式(16)代入式(14), 消去 B_1 和 B_2 , 得到应用动态生产数据计算水驱产油量与气驱产油量的公式:

$$\frac{\Delta N_{p1}}{\Delta N_{p2}} = \frac{B_2 \Delta \lg W_p}{B_1 \Delta \lg G_p} = 0.85 \frac{N_1 \Delta \lg W_p}{N_2 \Delta \lg G_p} = 0.695 \frac{\Delta \lg W_p}{\Delta \lg G_p} \quad (17)$$

锦州 X 油田 3 井区水驱和气驱特征曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出, 随着气驱和水驱的进行, 累计产气量、累计产水量与累计产油量在各阶段均呈半对数直线关系。基础井网发生气窜后, 气油比上升速度越来越快, 反映到气驱曲线上, 斜率不断增大; 综合调整后, 气油比上升速度有所放缓, 气驱曲线的斜率有所减小; 伴随着油田整体进入开发后期, 气窜矛盾不断激化, 当前油田气驱曲线斜率也不断增大。利用式(17), 计算出各阶段气驱产油量占比, 就能评价当前气驱的采出程度。

3 井区投产初期, 井距 600.00 m, 单井井控储量 $66 \times 10^4 \text{ t}$, 上部气驱与下部水驱较为均衡, 气驱产油量占比 52.6%, 气驱与水驱的产油量基本相同。随着

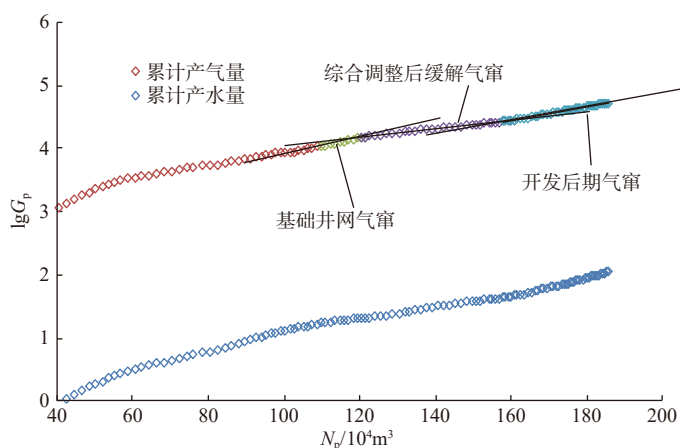


图2 锦州X油田3井区气驱特征曲线和水驱特征曲线

Fig.2 Characteristic curves of gas drive and water drive in Well Block 3 of JZ-X Oilfield

油藏进入开发中期,该井区地层压力降低,一方面气顶膨胀,油气界面移动速度快于油水界面,气窜快于水窜;另一方面气窜后气体在近井地带膨胀,占据流体流动空间。当气油比升至 $706 \text{ m}^3/\text{m}^3$

时,气驱产油量占比降至 41.9%。该井区以挖潜井间剩余油为目的调整开发方案后,井的数量增加 1 倍,井距缩至 300.00 m,单井井控储量 $33 \times 10^4 \text{ t}$,气窜有所缓解,气驱产油量占比增至 42.8%(见图 3)。

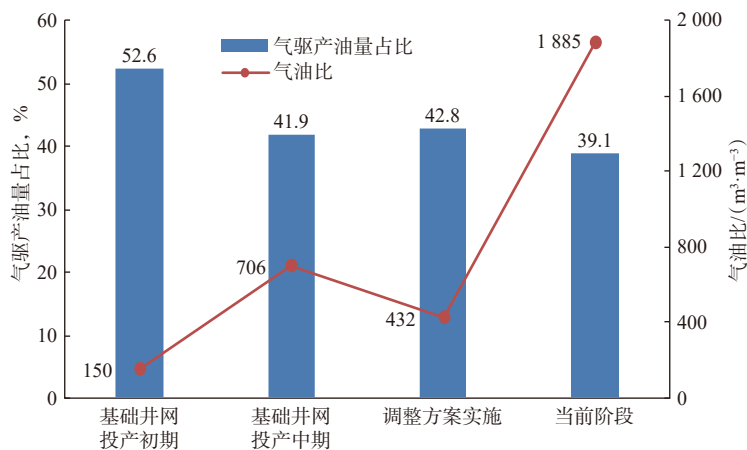


图3 锦州X油田3井区各阶段气驱产油量占比

Fig.3 Proportion of oil production by gas drive in each stage in Well Block 3 of JZ-X Oilfield

结合动用储量劈分结果和气驱、水驱产油量占比,计算上部储量当前气驱采出程度为 24.3%,预测以天然能量开发的采收率为 25.9%;下部储量当前水驱采出程度为 48.4%,预测采收率为 51.7%。

与水驱相比,由于气油黏度比小,气驱易发生气窜,波及程度与气驱效率都较低,造成储层上部采出程度低,若以当前的开发方式继续开发,上部气驱的采收率要远低于下部水驱的采收率,因此,需改变开发方式挖掘油藏的潜力。采用数值模拟方法,模拟不同注水井型、水平井不同布井方向、水平井不同布井位置的开发效果,发现在原始油气界面上实施水平井平行立体注采井网的开发效果最好。

注入水一方面起屏障功能,将大气顶油藏分割为气藏+小气顶油藏 2 个独立的开发单元;另一方面下驱油藏,水和气混合驱替油环,具有较好的驱替效果,可以提高驱油效率(见图 4)。

气顶边水窄油环油藏具有特殊性,而锦州 X 油田尚无该类油藏转屏障注水的经验。因此,以水驱程度高、气窜严重、纵向驱替不均衡、剩余油多和增产效果显著为原则,选择在 D4H 井、D15HS 井组补钻水平注水井。D4H 井、D15HS 井组控制地质储量 $98 \times 10^4 \text{ t}$,当前采出程度 27.6%,气油比 $2570 \text{ m}^3/\text{m}^3$,含水率 85%。受气窜影响,单井平均产液量由初期的 $100 \text{ m}^3/\text{d}$ 降至当前的 $20 \text{ m}^3/\text{d}$,开发效果较差。水

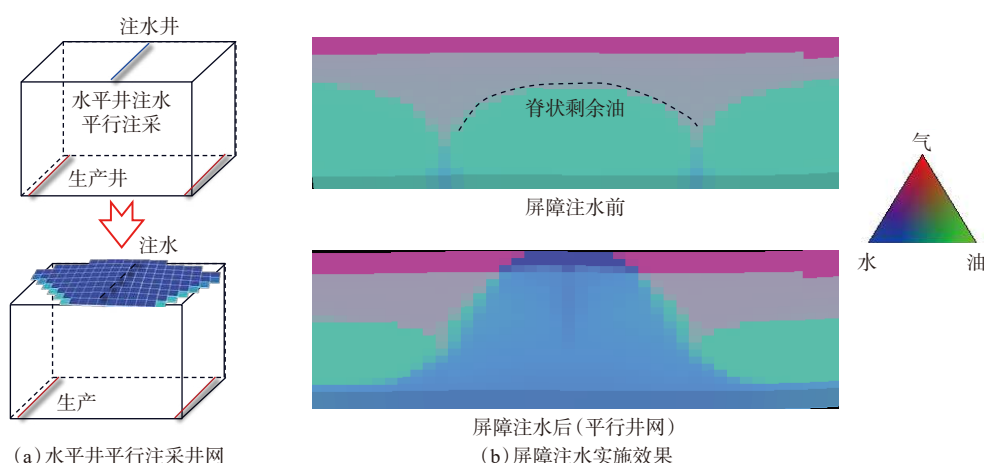


图 4 屏障注水示意

Fig.4 Barrier water injection

平注水井开始注水后, 初期注采比为 1.0, 后期跟踪油井产液量变化灵活调整, 预测 4 个月左右水障基本形成, 适时对油井采取提液措施, 放大生产压差, 在油藏中将注入水引向油井, 一方面防止注入水大量进入气顶, 造成气顶水侵; 另一方面实现水障驱油效果。因为 1 口注水井无法实现油田的水障连片, 对气窜只能实现部分屏障, 对开发效果的改善主要以气驱转水驱的增油效果为主, 预测实施注水后可累计增产油量 5.4×10^4 t, 井组采收率提高 5.5 百分点。

3 结 论

1) 基于稳定渗流理论, 推导了气驱特征曲线关系式, 即累计产气量与累计产油量的关系式。该关系式表明, 在大气顶油藏开发中后期, 累计产气量与累计产油量在半对数坐标上呈直线关系。

2) 将水驱和气驱特征曲线关系式联立, 建立了气驱产油量占比的计算方法, 从而实现气顶边水油藏水驱与气驱综合影响下开发效果的评价。以锦州 X 油田 3 井区为例, 分析了所建方法在气顶边水油藏中的应用问题。

3) 气顶边水油藏上部气驱采出程度低, 要提高采出程度, 需改变开发方式, 可在油气边界附近实施屏障注水, 一方面通过注入水分割气顶, 另一方面利用注入水驱油, 实现水和气混合驱替油环。

参 考 文 献

References

[1] 岳宝林, 祝晓林, 刘斌, 等. 气顶边水油藏天然能量开发界面运移

规律研究 [J]. 天然气与石油, 2021, 39(5): 74–79.

YUE Baolin, ZHU Xiaolin, LIU Bin, et al. Research on migration law of natural energy development interface in gascap edge water narrow oil ring reservoir[J]. Natural Gas and Oil, 2021, 39(5): 74–79.

[2] 葛丽珍, 李傲, 孟智强, 等. 气顶边水窄油环水平井生产压差调控实验研究 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(1): 90–95.

GE Lizhen, LI Ao, MENG Zhiqiang, et al. Experimental study on the draw-down pressure control of horizontal wells with gas-cap/edge water narrow oil rims[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(1): 90–95.

[3] 朱志强, 李云鹏, 葛丽珍, 等. 气顶底水油藏水平井垂向位置确定模型及应用 [J]. 石油钻探技术, 2016, 44(5): 104–108.

ZHU Zhiqiang, LI Yunpeng, GE Lizhen, et al. The model and application in determining the vertical position of horizontal well in gas cap and bottom water reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(5): 104–108.

[4] 杨晨旭, 冯沙沙, 张伟, 等. 小气顶底水薄层油藏开发规律及技术政策 [J]. 断块油田, 2020, 27(1): 85–89.

YANG Chenxu, FENG Shasha, ZHANG Wei, et al. Development rules and technical policies of thin-layer reservoir with small gas cap and bottom water[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2020, 27(1): 85–89.

[5] 房娜, 刘宗宾, 祝晓林, 等. 气顶边水油藏水平井垂向位置优化研究 [J]. 特种油气藏, 2019, 26(4): 91–96.

FANG Na, LIU Zongbin, ZHU Xiaolin, et al. Longitudinal position optimization of horizontal-wells in the gas-cap oil reservoir with edge-aquifer[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(4): 91–96.

[6] 葛丽珍, 孟智强, 朱志强, 等. 气顶边水油藏初期合理采油速度三维物理模拟实验 [J]. 中国海上油气, 2019, 31(6): 99–105.

GE Lizhen, MENG Zhiqiang, ZHU Zhiqiang, et al. Three-dimensional physical simulation experiment of reasonable initial oil recovery rate for the gas cap/edge water reservoirs[J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(6): 99–105.

[7] 张安刚, 范子菲, 宋珩, 等. 计算凝析气顶油藏油气界面移动距离的新方法 [J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(1): 102–105.

ZHANG Angang, FAN Zifei, SONG Heng, et al. A new computing method of moving range of the oil-gas contact in oil reservoir with condensate gas cap[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,

- 2015, 22(1): 102–105.
- [8] 张安刚, 范子菲, 宋珩, 等. 凝析气顶油藏气顶油环协同开发方式下水侵量计算模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(8): 3040–3046.
- ZHANG Angang, FAN Zifei, SONG Heng, et al. Water influx calculation of oil-rim reservoir with condensate gas cap under concurrent development of gas cap and oil rim[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2015, 46(8): 3040–3046.
- [9] 窦松江, 冯小宁, 李炼民. 尼日尔 G 油田气顶油气藏开发策略研究[J]. 非常规油气, 2015, 2(5): 34–37.
- DOU Songjiang, FENG Xiaoning, LI Lianmin. Development strategy for gas cap reservoirs in Niger G Oilfield[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2015, 2(5): 34–37.
- [10] 刘佳, 程林松, 范子菲, 等. 气顶油环协同开发下油气界面运移规律研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, 37(5): 99–105.
- LIU Jia, CHENG Linsong, FAN Zifei, et al. Experimental studies on oil and gas coordinated development mechanism of oil rim reservoirs[J]. *Journal of Southwest Petroleum university(Science & Technology Edition)*, 2015, 37(5): 99–105.
- [11] 张迎春, 童凯军, 郑浩, 等. 气顶边水油藏水平井开发效果影响因素分析[J]. 中国海上油气, 2012, 24(增刊1): 57–61.
- ZHANG Yingchun, TONG Kaijun, ZHENG Hao, et al. An analysis of the factors to influence development of oil reservoirs with gas cap and edge water by horizontal wells[J]. *China offshore Oil and Gas*, 2012, 24(supplement1): 57–61.
- [12] 伍友佳. 辽河双台子油气藏气顶驱开采特征及气窜模式[J]. 天然气工业, 2000, 20(6): 76–79.
- WU Youjia. Characteristics of gas-cap drive production and gas breakthrough pattern of Shuangtaizi oil and gas reservoir in Liaohel[J]. *Natural Gas Industry*, 2000, 20(6): 76–79.
- [13] 王彬, 朱玉凤. 气顶油气田气顶气窜研究[J]. 天然气工业, 2000, 20(3): 79–82.
- WANG Bin, ZHU Yufeng. A research on gas channelings in gas-cap oil reservoir[J]. *Natural Gas Industry*, 2000, 20(3): 79–82.
- [14] 蒋明, 赫恩杰, 肖伟. 气顶边水油藏开发策略研究与实践[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(5): 68–70.
- JIANG Ming, HE Enjie, XIAO Wei. Study and practice of developing strategy on reservoirs with gas cap and edge water[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2011, 33(5): 68–70.
- [15] 余忠, 赵会杰, 李卫京, 等. 正确选择气顶油藏高效开发模式[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(2): 70–72.
- YU Zhong, ZHAO Huijie, LI Weijing, et al. Optimization of development scheme for gas-cap reservoir[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(2): 70–72.
- [16] 童凯军, 张迎春, 戴卫华, 等. 天然气驱油藏开发动态评价及可采储量预测新方法[J]. 石油学报, 2015, 36(6): 740–747.
- TONG Kaijun, ZHANG Yingchun, DAI Weihua, et al. A new method for evaluation of development performance and recoverable reserves estimation in natural gas flooding reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(6): 740–747.
- [17] 顾乔元, 唐兆青, 鲜波, 等. 气驱特征曲线在凝析气藏开发中的应用[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(6): 724–727.
- GU Qiaoyuan, TANG Zhaoqing, XIAN Bo, et al. Application of gas-drive characteristic curve in condensate gas reservoir by dry gas injection development process[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2014, 35(6): 724–727.
- [18] 苑志旺, 杨宝泉, 杨莉, 等. 注气驱油藏新型气驱特征曲线推导及应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2018, 40(2): 135–141.
- YUAN Zhiwang, YANG Baoquan, YANG Li, et al. Derivation and practice of the new gas flooding characteristic curve of reservoir with gas injection flooding[J]. *Journal of Southwest Petroleum university(Science & Technology Edition)*, 2018, 40(2): 135–141.
- [19] 马奎前, 孙召勃, 贾晓飞, 等. 对水驱曲线中童氏“7.5B”公式再认识和改进[J]. 特种油气藏, 2018, 25(2): 107–110.
- MA Kuiqian, SUN Zhaobo, JIA Xiaofei, et al. Recognition and improvement of Tong's “7.5B” in waterflooding curve[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2018, 25(2): 107–110.
- [20] 谷建伟, 任燕龙, 张以根, 等. 一种改进的乙型水驱特征曲线研究及应用[J]. 特种油气藏, 2020, 27(1): 102–107.
- GU Jianwei, REN Yanlong, ZHANG Yigen, et al. Research and application of an improved type-B water-flooding characteristic curve[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(1): 102–107.
- [21] 高文君, 王少霞, 刘文锐, 等. 水驱驱替特征系列修正及油水渗流特征方程确定[J]. 断块油气田, 2021, 28(3): 374–377.
- GAO Wenjun, WANG Shaoxia, LIU Wenrui, et al. Series modification of water drive displacement characteristics and oil-water seepage characteristics equation determination[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2021, 28(3): 374–377.
- [22] 王柏力, 冯乔, 江海英, 等. 水驱特征曲线在低渗透油藏开发中的应用[J]. 特种油气藏, 2019, 26(6): 82–87.
- WANG Baili, FENG Qiao, JIANG Haiying, et al. Application of waterflooding characteristic curve in the development of low-permeability oil reservoir[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(6): 82–87.
- [23] 高文君, 刘致远, 薛龙龙. 利用反向推理方法确定水驱特征曲线渗流方程[J]. 断块油气田, 2020, 27(4): 478–483.
- GAO Wenjun, LIU Zhiyuan, XUE Longlong. Determination of seepage equation of water drive characteristic curve by reverse derivation method[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2020, 27(4): 478–483.

[编辑 刘文臣]