

# 高含水油藏剩余油再分布规律研究

## ——以江苏油田S区块为例

徐伟<sup>1</sup>, 王智林<sup>1</sup>, 张建宁<sup>2</sup>, 黄耀<sup>2</sup>

(1. 中国石化江苏油田分公司勘探开发研究院, 江苏 扬州 225009; 2. 中国石化江苏油田分公司采油一厂, 江苏 扬州 225265)

**摘要:** 油田经过长期注水开发进入高含水阶段, 产量下降较快以至停采, 对停采的高含水油藏开展剩余油分布规律的再认识可以有效提高老油田采收率。为此开展了平板物理模拟实验, 利用含油饱和度场分布对剩余油二次富集机理进行研究; 同时结合数值模拟研究, 验证了高部位区域剩余油分布规律, 并对其主控影响因素进行分析。结果表明, 剩余油受到残余阻力压差以及渗吸的作用, 二次富集主要分布在注采连线的周边以及渗透率较低的高部位地区。确定了影响剩余油二次聚集的影响因素及技术界限值, 即油藏满足停采时间超过36个月, 地层倾角大于20°, 平面渗透率级差大于2, 渗透率大于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 等条件可开展油田高含水停采油藏二次挖潜。

**关键词:** 剩余油分布; 二次聚集; 平板模型; 影响因素

**中图分类号:** TE327 **文献标志码:** A

## Study on redistribution law of remaining oil in high water-cut reservoir: A case of Block S in Jiangsu Oilfield

XU Wei<sup>1</sup>, WANG Zhilin<sup>1</sup>, ZHANG Jianning<sup>2</sup>, HUANG Yao<sup>2</sup>

(1. Exploration and development Research Institute of Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Yangzhou 225009, China;

2. No.1 oil Plant of Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Yangzhou 225265, China)

**Abstract:** After a long period of water injection and development, the oilfield enters the high water-cut stage, and the production decreases rapidly and even stops. Re-understanding the distribution law of remaining oil in the stopped production reservoirs with the high water-cut can effectively improve the recovery efficiency of old oilfields. For this reason, a plate physical simulation experiment was carried out to study the mechanism of secondary enrichment of residual oil by using the distribution of the oil saturation field. At the same time, combined with a numerical simulation study, the distribution law of remaining oil in the high position area was verified, and the main controlling factors were analyzed. The results show that the residual oil is affected by the residual resistance pressure difference and imbibition, and the secondary enrichment is mainly distributed in the peripheral areas of the injection-production line and the high areas with low permeability. The influencing factors and technical limits affecting the secondary accumulation of remaining oil are determined, i.e., the secondary exploitation can be carried out in a stopped production reservoir with the high water cut if the reservoir meets the conditions such as the stoppage time exceeds 36 months, the formation dip angle is more than 20°, the plane permeability difference is greater than 2, and the permeability is more than  $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ .

**Key words:** residual oil distribution; secondary aggregation; plate model; influencing factor

**引用格式:** 徐伟, 王智林, 张建宁, 等. 高含水油藏剩余油再分布规律研究——以江苏油田S区块为例[J]. 复杂油气藏, 2024, 17(1): 86-91.

XU Wei, WANG Zhilin, ZHANG Jianning, et al. Study on redistribution law of remaining oil in high water-cut reservoir: A case of Block S in Jiangsu Oilfield[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2024, 17(1): 86-91.

油田多数区块在经过长期注水开发后已进入中高含水阶段, 开发进入瓶颈期从而被迫停采。关井停采之后, 注采井间流线发生变化, 地层流体在压降梯度作用下继续流动, 剩余油分布随关井时间的延长而可能发生变化, 准确描述和预测高含水停采油藏中的剩余油分布规律, 能有效提高该油藏开

收稿日期: 2023-06-05; 改回日期: 2023-09-14。

第一作者简介: 徐伟(1995—), 硕士, 主要从事油藏工程相关研究。E-mail: m15190413669@163.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“百万吨CO<sub>2</sub>驱油封存示范应用技术研究”(P22180-2); 中国石化江苏油田科技攻关项目“中高含水油藏CO<sub>2</sub>驱提高采收率关键技术政策研究”(JS22010)。

发潜力。开发实践表明,原来已经强水淹或特强水淹而停采的油层,由于地下动态条件的变化,经过一段时间后,剩余油会在一定区域再次聚集<sup>[1-2]</sup>,重新开采效果明显,因此,对于停采后油藏剩余油再次富集规律研究,能有效提高老油田二次开发阶段采出程度。

近年来,李向平等<sup>[3]</sup>通过Fetkovich公式和数值水体对长庆油田区块进行剩余油分布规律研究,总结了不同类型剩余油富集模式;乐平等<sup>[4]</sup>结合现场生产数据,利用正交模拟实验,研究了构造、物性、注入体系等因素对采收率的影响;刘斌等<sup>[5]</sup>结合实际区块,建立了一维数值机理模型总结气顶边水油藏剩余油分布规律。由于目前针对高含水停采油藏的剩余油再分布规律研究较少,因此本文通过物理实验模拟对老区剩余油再富集机理进行研究,结合区块实际地质资料,通过数值模拟对S区块剩余油分布规律进行研究,有效挖潜剩余油。

## 1 区块概况

S区块储层渗透率平均为 $234 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙度平均为26.1%。地面原油性质较好,地面原油密度 $0.8312 \text{ g/cm}^3$ ,地面原油黏度 $16.54 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。开发初期,由于油藏边底水能量强,主要依靠天然能量,采用井间接替、逐层开发的模式开发。开发过程中,油井因高含水陆续关井停产。

停产一段时间后,几口井先后恢复生产,取得较好效果,挖潜成功油井主要集中在构造的中高部位,说明实际生产过程中存在剩余油再富集的现象,并且S区块仍然具有进一步挖掘潜力。因此,结合物理模拟及数值模拟方法,进一步研究该类油藏剩余油再富集规律,明确高含水油藏剩余油再分布的影响因素,对老区挖潜具有重要意义。

## 2 平板物理模拟实验

结合研究区块地质参数,建立大型平板物理模型,模拟原油在地下真实流动情况,分析在非均质条带下,五点井网的波及状态以及水驱后剩余油二次聚集的分布特征。

### 2.1 实验材料

实验材料主要包括:①三维大尺度平板填砂模型(见图1),长×宽×高为 $45 \text{ cm} \times 45 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ ,3个条带渗透率分别为 $800 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $1\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $1\,200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,通过预埋布置五点井网,井口布置

防砂筛网模拟防砂情况;②实验用油使用目标油田提供的原油配置模拟油,黏度 $10 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ;③实验用水采用模拟地层矿化度用水。整个实验过程中模拟原始地层压力以及油藏温度。

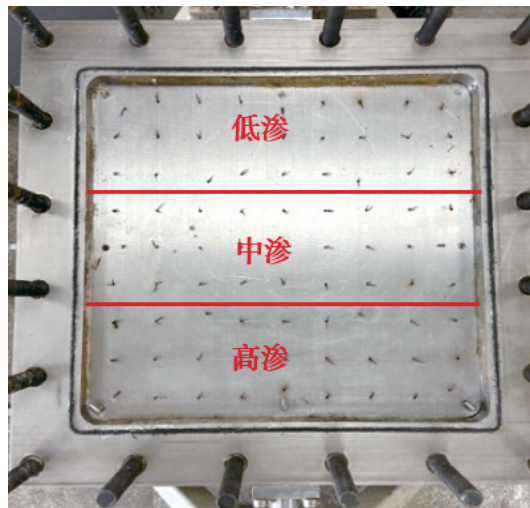


图1 三维大尺度平板填砂模型

### 2.2 实验装置及步骤

#### 2.2.1 实验装置

主要由平板填砂模型:工作压力 $<5 \text{ MPa}$ 、恒速平流泵: $0.01 \sim 9.99 \text{ mL/min}$ 、气瓶:工作压力 $<12 \text{ MPa}$ 、活塞容器:可耐腐蚀,工作压力 $<50 \text{ MPa}$ 、六通阀:工作压力 $<50 \text{ MPa}$ 、含油饱和度检测系统、恒温箱、以及电阻率采集系统、饱和度采集系统、油水采集系统组成。

#### 2.2.2 实验步骤

(1)固定模型与地面呈 $20^\circ$ 倾角,填入不同砂径的砂粒,筛选分为高、中、低3个渗透率条带并刮平压实,用半封挡的橡胶在高、中、低渗条带中间模拟夹层,从而模拟出非均质地层,然后进行抽真空,并且开始饱和地层水,最后对该模拟地层进行水测渗透率。

(2)恒温箱内饱和模拟油,并老化一段时间。

(3)工作制度:在平板仪器出口处放置量筒,实时监测含水率以及压力数据,当水驱至瞬时含水率98%停,之后关井将模型静置一个月,过程中通过仪器实时监测剩余油的流动分布。

### 2.3 饱和度场测试及再富集特征

含油饱和度测量原理:准备采用两极法,当水驱前缘到达某一电极点时,该电阻率阻值会产生明显下降,并且实验还采用监测仪器实时监测驱替过程中的电阻率变化,并通过输入的阿尔齐公式给出监测点的含油饱和度,从而去判断驱替后的剩余含

油饱和度分布状况。正式实验开始之前是对公式中的固定参数进行标定,阿尔齐公式描述如下:

$$F = \frac{R_o}{R_w} = \frac{a}{\varphi^m} \quad (1)$$

$$I = \frac{R_l}{R_o} = \frac{b}{S_w^m} \quad (2)$$

式中, $F$ 为地层因子; $I$ 为电阻率指数; $R_o$ 为100%饱和地层水的岩石电阻率, $\Omega \cdot m$ ;  $R_w$ 为岩石孔隙中地层水的电阻率, $\Omega \cdot m$ ;  $R_l$ 为含油气岩石的电阻

率, $\Omega \cdot m$ ;  $a$ 、 $b$ 、 $m$ 为与岩石性质有关的岩性常数; $S_w$ 为含水饱和度,%; $\varphi$ 为孔隙度,%。

实验基于S区块井网分布特征,模拟五点井网驱油模式,通过平板内部81个微电极监测点换算出含油饱和度,并通过等高线绘图软件绘制饱和度场图,从而分析水驱过程中原油整体流动,以及最终的剩余油分布,这里以含油饱和度为指标对高中低的剩余油比例作了计算,高渗区剩余油占总剩余油15%,中渗区占28%,低渗区占57%(见图2)。

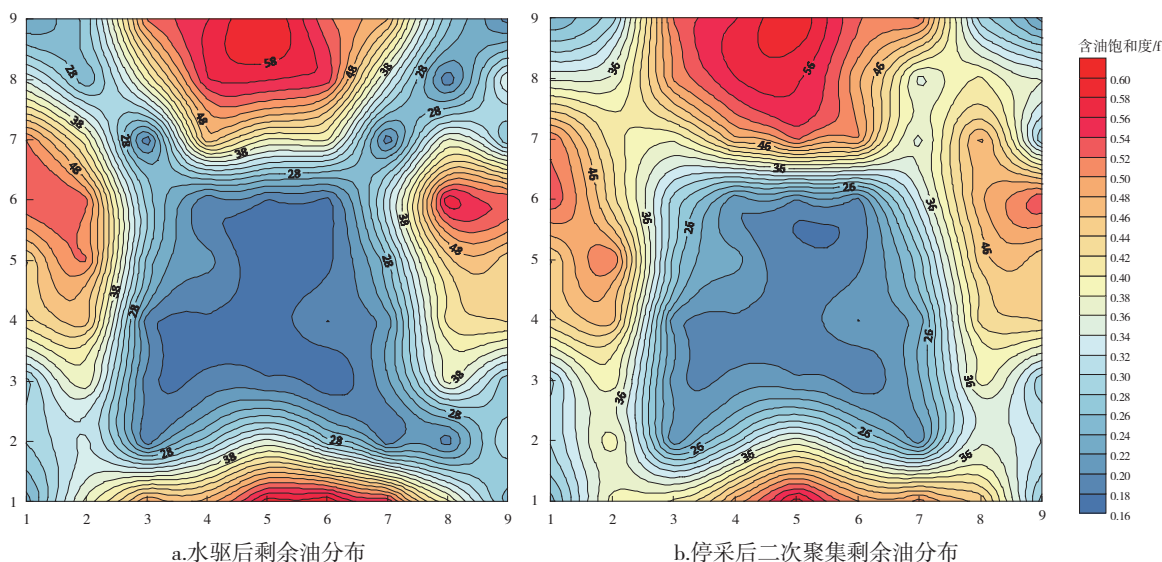


图2 五点井网水驱剩余油分布

对图中的含油饱和度场进行定量分析得出,水驱结束后波及系数为0.29,剩余油在经过关井一段时间后波及系数为0.32。此外注水油田剩余油潜力区的控制因素主要受到水动力、毛管力、摩擦力以及地层条件等影响,结合含油饱和度最终分布,关井后,分析剩余油首先主要集中在中低渗带,以及水驱流线无法波及的区域。

剩余油二次富集首先受注水形成的残余驱替压差造成的影响,其主要渗流通道主要分布于注采连线的周边,当油井关井后,生产井周边压差开始恢复,从而在注采连线中间出现低势区,形成新的富集区域,该部分剩余油相对来说可以二次采集,剩余油重新分布后可通过注采耦合的方式调整流线,提高该部分剩余油动用程度。

其次是在动用程度较低的低渗透带,受到渗吸作用以及压力传递因素的影响,富集在中间的剩余油往四周逐步渗吸,剩余油饱和度变化越剧烈,剩余油富集程度越高;剩余油再富集越集中,连续性

越强,动用潜力越大,尤其在油层构造高部位因强水淹停采区域,周围或连续或零散的剩余油重新聚集而成为潜力区<sup>[6-7]</sup>,当含水超过90%,特高含水阶段窜流通道形成,各类剩余油赋存于孔隙中。

### 3 剩余油二次聚集饱和度分布特征

#### 3.1 平面饱和度平衡机理

通过实验岩心测得S区块压汞毛管力曲线(见图3),进行J函数转换(见图4),计算得到不同渗透率下毛管力与含水饱和度、含水率关系,可以得出平面饱和度具有以下特点:相同含水饱和度下,渗透率越高,毛管力越低,阻力越小;毛管力相同,渗透率越高,含水饱和度越低。表明在相同饱和度时,高渗部位阻力小,低渗中的可动剩余油通过渗吸作用流向高渗部位,导致高渗部位的油饱和度增大、低渗部位的油饱和度降低的趋势。在不同饱和度时,由于扩散作用,可动剩余油会向低含油饱和度方向运移聚集<sup>[8-9]</sup>。



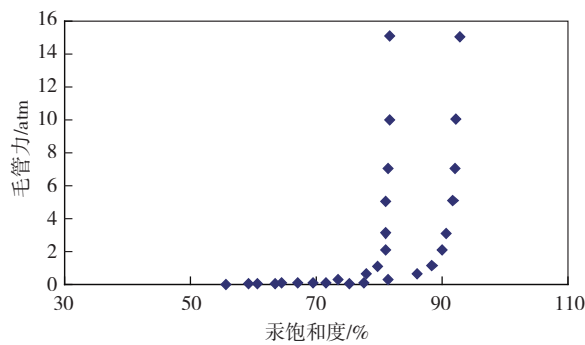


图3 S区块压汞毛管力曲线

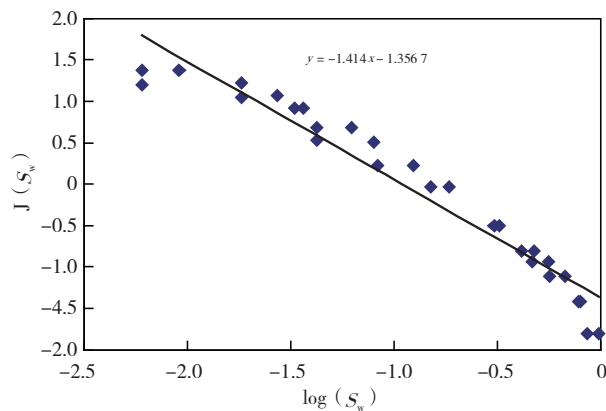


图4 S区块油田J函数拟合结果

油藏停采初期,受到残余阻力压差影响,油水在高、低渗透层之间继续窜流,随着弹性能量的释放,毛管力作用使得油水由同向流动改为逆向窜

流,并且高、低渗透层间的含水饱和度差和渗透率差所产生的毛管压力梯度会引起渗吸现象,含水饱和度场重新分布,原油逐步流向高含水饱和度区,从而使得整个油藏油水饱和度分布趋于均匀。

### 3.2 剩余油分布特征

为研究高含水油藏在开发阶段剩余油分布规律,基于实际区块的地质模型建立数值模拟模型,S区块平均孔隙度22%,平均渗透率 $200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,纵向上划分为2个砂层组,4个含油砂体,生产井主要集中在油藏构造的中低部位。

采用单井定油量进行模拟计算,并结合不同时期剩余油饱和度分布图(见图5a),分析该含油砂体停采后剩余油运移过程。

根据S区块油藏数值模拟成果及剩余油再聚集过程分析,认为高含水停采油藏剩余油形成模式主要有两种。

第一种模式为油藏静态因素主控的剩余油形成模式<sup>[10]</sup>。其剩余油二次富集规律主要表现为:开启断块油藏剩余油主要富集在构造高部位、井间滞留区等,在经过关井停采之后,高饱和度区剩余油经过长期的运移,向低饱和度区聚集,其中扇形开启油藏断层夹角剩余油富集,并且低部位区会逐步向高部位区运移扩散(见图5b)。

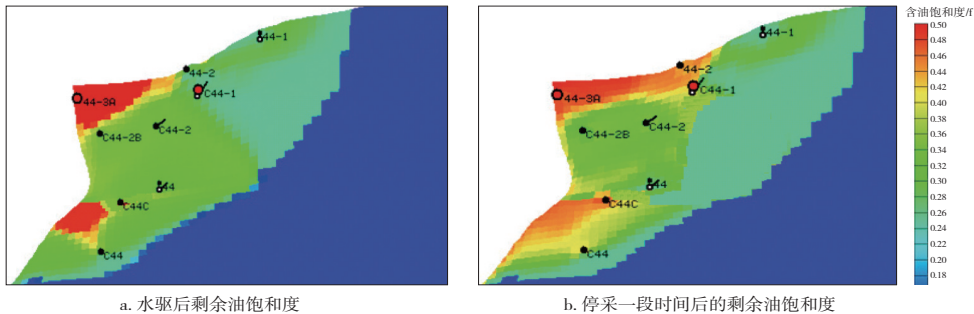


图5  $K_2 t_1^{-2-1}$ 砂体水驱后剩余油饱和度变化对比

第二种模式为动态富集再生藏模式。根据油藏实际生产特征进行历史拟合,剩余油会在停井一段时间后重新富集,受残余驱替压差作用影响,将建立新的流体势格局。因此原本零散分布在高势区的剩余油将进行动态的运移并再次富集于低势闭合区中,形成含油饱和度较高且有一定经济规模的剩余油潜力区。

S区块停采时间为33个月,在渗吸以及驱替压差作用下,分析认为可动用剩余油会向构造高部位以及注采井间的低势区运移再富集。为此,在该区块剩余油富集区先后实施了3口油井,均取得较好

效果。其中,A井布置在C44-3A井以及C44C井之间的低势区,开采初期日产液13.6 t,日产油13.5 t,含水0.9%,目前累计产油8 000 t;B井布置在44井西部,该区域由于长期水驱形成了水淹,初期日产液16.5 t,日产油5.7 t,含水65.6%,目前累计产油1 100 t。

### 4 剩余油二次聚集主控因素

剩余油饱和度变化越剧烈,剩余油富集程度越高;剩余油再富集越集中,连续性越强,越易被动用,动用潜力越大<sup>[11-12]</sup>。通过对各个目的层进行数值模拟,将各砂体停采时间、停采期限、停采后投产

开发效果与现场实际采出效果进行对比分析研究。统计了S区块各砂体储层地质参数,分析影响剩余油动用的主要控制因素。

#### 4.1 渗透率

分析结果表明,渗透率与油水初次运移速度以及二次富集速度成正比。随着渗透率的增加,构造顶部以及腰部含水均开始下降(见图6),油藏顶部的含水下降幅度要大于腰部。从下降幅度看,渗透率大于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 含水下降幅度明显加快,当渗透率超过 $1\,500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 含水趋于稳定,因此在后期二次开采过程中,应继续加大油藏高部位动用力度。

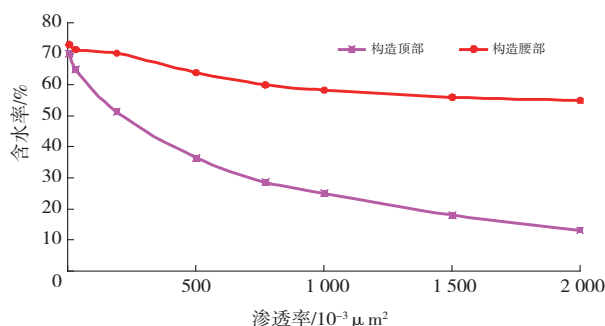


图6 渗透率大小与含水率关系

#### 4.2 地层倾角

随着构造倾角的增加,纵向上顶部砂体剩余油饱和度明显高于下部;平面上,高部位剩余油饱和度高于油藏中部(见图7),底部剩余油饱和度略低于中部;从含水率变化来看,高部位含水率随着停采时间增加,含水率降低,而油藏中部随着停采时间的增加,含水率开始上升,从构造倾角影响程度来看,当构造幅度小于 $20^\circ$ 时,含水变化不明显,大于 $20^\circ$ 时,开始明显变化。

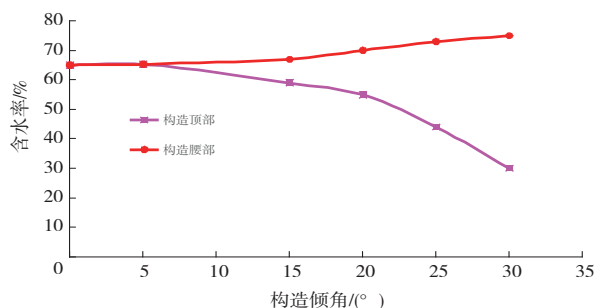


图7 构造倾角与含水率关系

#### 4.3 平面非均质性

平面上剩余油的二次聚集总是向着渗透率高的位置运移,低渗带剩余油逐步向中渗带渗吸,最终当含油饱和度平衡后,高渗带高于低渗带含油饱和度;随着平面渗透率级差的增加(见图8),含水率呈降低的趋势,在级差超过10之后,渗吸作用失效。

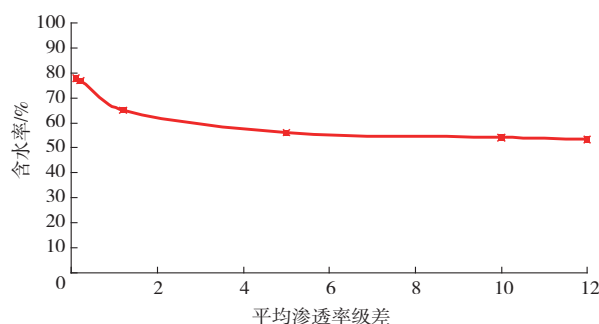


图8 平均渗透率级差与含水率关系曲线

#### 4.4 停采时间

受重力作用影响,砂体在停采后出现分异现象。当毛管力作用小于油水密度差引起的重力作用,油藏下部剩余油开始向上运移,从而在高部位形成新的潜力区;从含水率变化可以看出(见图9)随着停采时间的增加,含水率逐渐下降,当时间达到36个月时,含水下降速度明显降低,到78个月时趋于稳定。

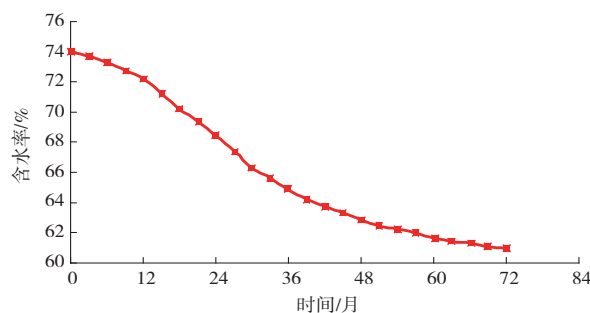


图9 停采时间与含水率关系曲线

## 5 结论

(1)平板物理模拟和实际油藏的数值模拟研究均验证了停产油藏二次富集现象,剩余油二次富集主要受残余驱替压差以及渗吸作用影响,二次富集区域首先分布在注采连线周边形成的低势区;其次在构造高部位因强水淹停采区域,周围或连续或零散的剩余油重新聚集而成为潜力区。

(2)通过平面饱和度平衡机理分析,认为相同含水饱和度下,渗透率与毛管力呈负相关;相同毛管力下,渗透率与含水饱和度呈负相关。高、低渗透层间的含水饱和度差和渗透率差所产生的毛管压力梯度会引起渗吸现象,含水饱和度场重新分布,剩余油逐步流向高含水饱和度区。研究成果在现场实施中取得了较好的增油效果。

(3)剩余油再富集特征受停采时间、地层倾角、非均质性及渗透率等因素控制。理论上单因素政策界限为:停采时间超过36个月,地层倾角大于

20°, 平面渗透率级差大于2, 渗透率大于  $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 该技术界限可用于油田高含水停采油藏挖潜的筛选。

#### 参考文献:

- [1] 王吉涛, 李俊键, 张博文, 等. 高含水老油田剩余油再富集质量评价及影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(1):153-160.  
WANG Jitao, LI Junjian, ZHANG Bowen, et al. Quality evaluation of remaining oil re-enrichment in high water-cut mature oil reservoirs and its influencing factors [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(1):153-160.
- [2] 李本轲. 双河油田剩余油再富集区分布规律研究[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(5):296-298.  
LI Benke. Study on distribution law of remaining oil re-enrichment area in Shuanghe Oilfield [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(5):296-298.
- [3] 李向平, 段鹏辉, 汪澜, 等. 低渗透底水油藏剩余油分布规律及挖潜措施研究——以长庆油田Y19井区为例[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2022, 37(4):69-75, 126.  
LI Xiangping, DUAN Penghui, WANG Lan, et al. Study on remaining oil distribution and stimulation measures of low permeability bottom water reservoir: Taking wellblock Y19 in Changqing Oilfield as an example [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2022, 37(4):69-75, 126.
- [4] 乐平, 屈思敏, 李丰辉, 等. 高孔高渗高含水稠油油藏剩余油分布特征及动用主控因素[J]. 非常规油气, 2023, 10(2):33-42.  
YUE Ping, QU Simin, LI Fenghui, et al. Remaining oil distribution characteristics and main controlling factors for use in high porosity, high permeability and high water cut heavy oil reservoirs [J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(2):33-42.
- [5] 刘斌, 岳宝林, 张伟, 等. 渤海X油田气顶区油气移动规律及韵律性对剩余油分布影响研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2022, 24(1):52-57.  
LIU Bin, YUE Baolin, ZHANG Wei, et al. Study on the law of oil and gas movement and the influence of rhythm on the distribution of remaining oil in the gas cap area of Bohai X Oilfield [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 24(1):52-57.
- [6] 公言杰, 柳少波, 姜林, 等. 油气二次运移可视化物理模拟实验技术研究进展[J]. 断块油气田, 2014, 21(4):458-462.  
GONG Yanjie, LIU Shaobo, JIANG Lin, et al. Research progress in visual physical simulation experiment technology of secondary hydrocarbon migration [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(4):458-462.
- [7] 李宜强, 张津, 潘登, 等. 高含水期微观剩余油赋存规律——以大港油田小集区块和港西区块为例[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(4):444-449.  
LI Yiqiang, ZHANG Jin, PAN Deng, et al. Occurrence laws of microscopic remaining oil in high water-cut reservoirs: A case study on blocks Xiaoji and Gangxi in Dagang Oilfield [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(4):444-449.
- [8] 张天涯. 高含水率油藏人工强边水驱技术研究[J]. 石油化工应用, 2022, 41(10):13-18.  
ZHANG Tianya. Research on artificial strong edge water flooding technology in high water cut reservoir [J]. Petrochemical Industry Application, 2022, 41(10):13-18.
- [9] 金宝强, 舒晓, 邓猛. 渤海特高含水期油田剩余油分布规律及挖潜策略[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(15):6033-6040.  
JIN Baoqiang, SHU Xiao, DENG Meng. Distribution and potential exploitation strategy of remaining oil in high water-cut stage, Bohai Sea [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(15):6033-6040.
- [10] 李丹, 景佳骏, 李明林, 等. 天然水驱高含水油藏见水规律及剩余油分布研究[J]. 中国矿业, 2018, 27(z1):377-381.  
LI Dan, JING Jiajun, LI Minglin, et al. Study on the water breakthrough rule and the remaining oil distribution of naturally water drive oil reservoirs during high water cut period [J]. China Mining Magazine, 2018, 27(z1):377-381.
- [11] 丁帅伟, 姜汉桥, 周代余, 等. 中高含水期油藏剩余油潜力量化评价新方法及其应用[J]. 复杂油气藏, 2016, 9(1):41-45.  
DING Shuaiwei, JIANG Hanqiao, ZHOU Daiyu, et al. A new method for quantitatively evaluating the remaining oil potential of reservoir at medium-high water-cut stage and its application [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2016, 9(1):41-45.
- [12] 郑松青, 杨敏, 康志江, 等. 塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏水驱后剩余油分布主控因素与提高采收率途径[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(4):746-754.  
ZHENG Songqing, YANG Min, KANG Zhijiang, et al. Controlling factors of remaining oil distribution after water flooding and enhanced oil recovery methods for fracture-cavity carbonate reservoirs in Tahe Oilfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(4):746-754.

(编辑 卞 炜)