

# 稠油油藏边水突进影响因素分析

罗波 娄小娟

中国石油大港油田公司勘探开发研究院, 天津 300280

**摘要:**稠油油藏的开发投资大、风险高,尤其在目前国际油价低迷的情况下小型边水稠油油藏的开发更是面临经济与技术双重困难。为在低投入的情况下完成小型边水稠油油藏的产量任务,实现海外项目的正现金流,开展稠油油藏边水突进影响因素研究。以海外R油田为例,充分利用油藏的天然能量,实现海外油藏开发低投入、高收益的目标;以油藏实际生产数据为基础,动静结合,摸清油藏的边水推进特征;通过研究认为优化单井日产液量,能有效控制边水推进形态,降低油井水淹程度,实现稠油边水油藏的高效开发,是国际油价低迷的情况下,海外稠油油藏保持稳产的有效措施。

**关键词:**稠油油藏;储层非均质性;边水突进;水驱波及面积

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2019.06.011

## Analysis on Influencing Factors of Edge Water Inrush in Heavy Oil Reservoir

Luo Bo, Lou Xiaojuan

PetroChina Dagang Oilfield Exploration and Development Institute, Tianjin, 300280, China

**Abstract:** Heavy oil reservoir development investment is large, with high risks, especially under the current situation of low international oil price. The development of small edge water heavy oil reservoir is facing economic and technical difficulties. In order to complete the production task of small edge water heavy oil reservoirs with low input, realize the positive cash flow of overseas projects, and carry out the research on the influencing factors of edge water inrush in heavy oil reservoirs, we take overseas oilfield R as an example to make full use of the natural energy of the reservoir and realize the goal of low investment and high profit in overseas reservoir development. Based on the actual production data of the reservoir, the characteristics of edge water propulsion in the reservoir are understood by combining the dynamic and static processes. Through the study, it is considered that optimizing the daily production of a single well can effectively control the edge water advance form, reduce the water flooded degree of oil wells, and realize the efficient development of heavy oil edge water reservoir. It is an effective measure to maintain stable production of overseas heavy oil reservoir under the condition of low international oil price.

**Keywords:** Heavy oil reservoir; Reservoir heterogeneity; Edge water inrush; Water drive sweep area

收稿日期:2019-06-11

基金项目:中国石油股份有限公司重大专项“大港油田效益增储建产关键技术研究与应用”(2017 E-11)

作者简介:罗波(1977-),男,四川宣汉人,高级工程师,硕士,主要从事油田开发规划及提高采收率研究。

## 0 前言

国内外稠油油藏的开发主要采用蒸汽驱、SAGD、火驱等技术<sup>[1-2]</sup>,开发过程具有高投资、高风险的特点<sup>[3]</sup>。R 油田是海外小型稠油边水油藏,在国际油价低迷的形势下,大型增产措施无法实施<sup>[4-5]</sup>,油井水淹速度快,产量形势严峻,油藏开发面临着经济、技术双重困难<sup>[6]</sup>。为实现海外油藏低投入、高收益的目标,开展油藏边水推进特征研究<sup>[7]</sup>,充分利用天然能量,实现稠油边水油藏的经济、高效开发<sup>[8]</sup>,提高海外市场竞争实力。

## 1 概况及存在问题

R 油田位于乍得 X 盆地西南部,受两条大断层控制,形成南高北低的一个断鼻构造。油藏埋深为 950 ~ 1 100 m,主要含油目的层为白垩系。发育浅湖-半深湖、扇三角洲沉积为主。储层物性较好,平均孔隙度 18.7%,平均渗透率 0.237  $\mu\text{m}^2$ ,属于中孔中高渗储层。具有统一的油水界面,含油面积 5.1  $\text{km}^2$ ,水体面积为含油面积的 35 倍,边水能量充足。地层原油黏度 67  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ,原油密度 0.93  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,是一个受构造控制的小型边水稠油油藏。2009 年投产共钻遇油井 19 口,投产至今累计产油  $28.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,采出程度 4.1%,综合含水率 35.7%,采油速度 0.35%。

R 油田属于稠油边水油藏,油水黏度比高,边水极易突进<sup>[9]</sup>。随着开发的进行构造低部位油井水淹严重,85% 以上的油井进入高含水阶段,产量递减速度快。部分构造高部位油井也受到影响,单井产量下降<sup>[10]</sup>。油藏开发面临着“水驱波及面积小,有油采不出”的困境。因此控制边水推进形态,减缓边水突进速度,防止油井水淹,成为影响油藏产量的关键点<sup>[11]</sup>。

## 2 边水突进特征

对工区各部位油井的生产动态数据进行分析研究<sup>[12]</sup>,认为 R 油藏边水突进具有以下两个特征:

1) 单井无水采油期的长短与边水距离有关。对 R 油藏 19 口油井的无水采油期与边水距离进行统计分析,结果显示单井无水采油期的长短与边水距离相关。构造中高部位油井距边水距离较远,平均无水采油期 305 d。构造低部位油井距边水较近,平均无水采油期较短,仅 51.4 d,见表 1。线性回归过程中,二者表现出较高的相关性,见图 1,符合层状边水油藏的开发特征。

2) 边水突进受储层非均质性影响。单井综合含水率总体上呈现构造低部位油井综合含水率高于构造中高部位油井综合含水率的特征,但受储层非均质性影响,部分油井综合含水率异常。如图 2 所示位于构造中

部位的油井 R13 井,无水采油期仅 45 d,综合含水率 74% 进入高含水阶段,综合含水率异常。经分析发现该井位于储层高渗透带,边水突进引发单井水淹。

因此,储层非均质性及单井与边水的距离,是影响边水突进的主要因素。

表 1 无水采油期统计表

井名	无水采油期时间 /d	平均无水采油期 /d	构造位置
R 1-18	0	51.4	低部位
R 1-19	13		
R 2	18		
R 1-12	20		
R 1-2	44		
R 1-4	55		
R 1-20	90		
R 1-8	103		
R 1-5	120		
R 1-13	45	305	中高部位
R 1-6	105		
R 1-15	120		
R 1	402		
R 1-14	430		
R 1-10	480		
R 1-11	550		

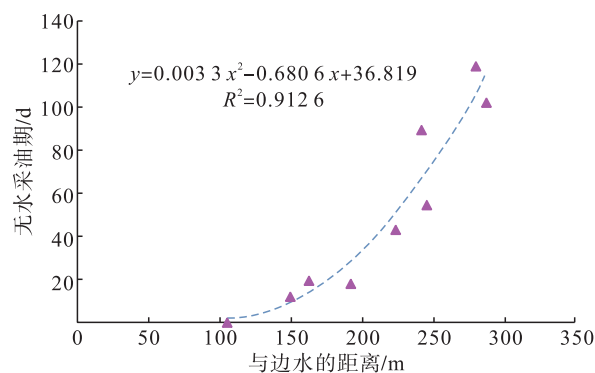


图 1 无水采油期与边水距离图

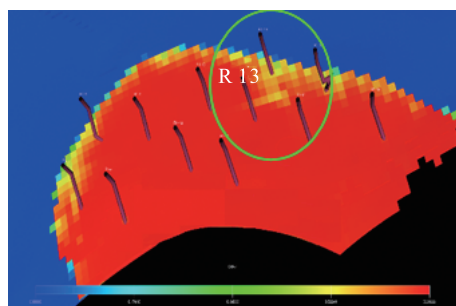


图 2 部分区域边水突进图

### 3 优化单井日产液量

常规的单井配产对油藏开发效果的影响不明显,主要考虑油层有效厚度的差异<sup>[13]</sup>,采用经验公式或者无因次采油采液指数进行计算即可<sup>[14]</sup>。稠油边水油藏油水黏度比大,单井日产液量不合理极易引发边水突进,造成油井水淹单井产量急速下降<sup>[15]</sup>,因此常规油藏的单井配产方法无法满足稠油边水油藏的开发需求;为提高单井配产精度,开展精细油藏数值模拟研究,高精度还原油藏开发历程及现状,量化储层非均质性及边水距离对边水突进的影响,优化单井日产液量<sup>[16]</sup>。

通过数值模拟分别计算不同渗透率、不同边水距离下,油井的合理日产液量,通过多元回归,量化该油藏单井日产液量与边水距离和储层非均质性的相关性<sup>[17]</sup>。如渗透率为 $0.1 \mu\text{m}^2$ 时,分别计算边水距离为158.0、230.1、266、315.5和409.5 m时的单井累计产油量,见图3。由此计算出当前条件下,合理单井日产液量与边水距离的关系,见图4。其次开展同一位置不同渗透率下合理单井日产液量研究,计算出合理单井日产液量与边水距离及渗透率的关系<sup>[18]</sup>,见表2。通过多元回归,得到R油藏单位厚度下,合理单井日产液量与边水距离、渗透率的计算式(1)。

$$P_L = 0.0063 \times L + 1.76 \times \log(k) - 2.46 \quad (1)$$

$$R^2 = 0.93$$

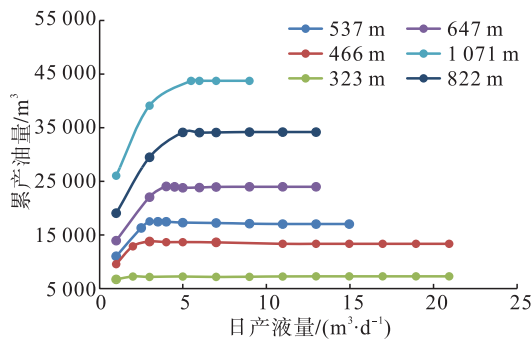


图3 累产油量与日产液量关系曲线图

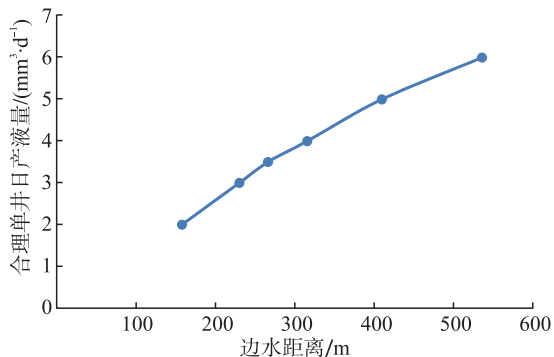


图4 合理单井日产液量与边水距离曲线图

表2 不同边水距离及渗透率下合理单井日产液量表

渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	不同边水距离下的单井合理日产液量 / ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )					
	158 m	230.1 m	266 m	315.5 m	409.5 m	537 m
20	0.83	1.28	1.51	1.82	2.41	3.21
75	1.84	2.29	2.52	2.83	3.42	4.22
100	2.06	2.51	2.74	3.05	3.64	4.44
250	2.76	3.21	3.44	3.75	4.34	5.14
350	3.01	3.47	3.69	4.01	4.6	5.4
400	3.12	3.57	3.8	4.11	4.7	5.5

### 4 实施效果

R油田的主力含油层系为KI-4,占总地质储量的75%,投产油井8口;砂体整体发育稳定、连片,平均油藏厚度5 m,计划日产液 $149.1 \text{ m}^3/\text{d}$ ;对主力层系单井分别采用无因次采油采液指数法及公式法优化方法进行配产,见表3;投产10 a后,单井日产液量优化后方案累计产油 $8.37 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,采出程度19.7%,与优化前相比累计增油 $1.36 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,采收率提高3.2个百分点,最高含水相差15个百分点。因此,在稠油边水油藏的开发过程中,优化单井日产液量能有效调整边水推进形态<sup>[19]</sup>,延缓边水突进速度,提高油藏的采出程度,是R油田这类小型边水稠油油藏在低油价下可实施的有效增产措施之一<sup>[20]</sup>。

表3 主力层系合理单井日产液量表

井名	距边水距离 / m	渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	公式法计算 日产液量 / ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	无因次法计算 日产液量 / ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )
R 1-18	105	153	10.2	18.6
R 1-19	150	174	12.1	18.6
R 1	281	348	18.9	18.6
R 1-15	298	286	18.7	18.6
R 1-14	299	245	18.1	18.6
R 1-13	348	317	20.7	18.6
R 1-10	480	208	23.2	18.6
R 1-11	550	317	27	18.6
合计			149.1	149.1

### 5 结论与认识

1) 小型边水稠油油藏的开发呈高含水、低采出程度的特征,开发过程中面临着经济、技术双重困难。优化单井日产液量能有效控制边水形态,充分利用天然能量减缓产量压力,是低油价环境下小型稠油油藏稳产增效的新思路。

2) 单井生产动态数据能有效表征边水突进特征, 小型稠油边水油藏边水突进, 受储层非均质性 & 单井与边水的距离影响。

3) 常规的单井配产方式无法满足小型边水稠油油藏的开发需求。考虑单井与边水的距离及储层非均质性优化单井配产, 可有效调控边水推进形态, 减缓边水突进速度。

#### 参考文献:

- [1] 郑腊年, 李晓平, 张小龙, 等. 幂律流体稠油油藏水平井产能影响因素分析[J]. 天然气与石油, 2013, 31(2): 65-68.  
Zheng Lanian, Li Xiaoping, Zhang Xiaolong, et al. Analysis on Influence Factors of Horizontal Well Productivity in Heavy Oil Reservoir with Power Law Fluid [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(2): 65-68.
- [2] 叶 翠, 江厚顺, 幸明刚. 稠油热采技术研究[J]. 长江大学学报(自然科学版)理工, 2012, 9(7): 99-101.  
Ye Cui, Jiang Houshun, Xing Minggang. Technical Study on Heavy Oil Thermal Recovery [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition) Science & Engineering, 2012, 9(7): 99-101.
- [3] 龚秋红, 王洪松, 孙 祥, 等. 八面河油田稠油掺水降黏集输技术[J]. 天然气与石油, 2011, 29(5): 15-17.  
Gong Qiuhong, Wang Hongsong, Sun Xiang, et al. Viscosity Reduction of Heavy Oil Mixed with Sewage in Bamianhe Oilfield [J]. Natural Gas and Oil, 2011, 29(5): 15-17.
- [4] 万海乔. 深层稠油天然气吞吐增产技术实施效果评价[J]. 天然气与石油, 2013, 31(6): 63-65.  
Wan Haiqiao. Evaluation on Implementation Effect of Deep Heavy Oil and Gas Stimulation Technology [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(6): 63-65.
- [5] 孟科全, 唐晓东, 邹雯炆, 等. 稠油降黏技术研究进展[J]. 天然气与石油, 2009, 27(3): 30-34.  
Meng Kequan, Tang Xiaodong, Zou Wenwen, et al. Progress in Research on Heavy Oil Viscosity Reduction Technology [J]. Natural Gas and Oil, 2009, 27(3): 30-34.
- [6] 张 峰, 张世杰, 郭宇光. 辽河油田超稠原油延迟焦化的研究[J]. 天然气与石油, 2004, 22(2): 50-52.  
Zhang Feng, Zhang Shijie, Guo Yuguang. Study on Delayed Coking of Over Viscous Crude Oil in Liaohe Oil Field [J]. Natural Gas and Oil, 2004, 22(2): 50-52.
- [7] 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.  
Yu Pengbo. Water Breakthrough Characteristics and Influence Factors of Horizontal Well in Heavy Oil Reservoir with Bottom Water [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33(5): 36-40.
- [8] 张伦友, 孙家征. 提高气藏采收率的方法和途径[J]. 天然气工业, 1992, 12(5): 32-36.  
Zhang Lunyou, Sun Jiazheng. Method and Approach for Raising Recovery of Gas Reservoir [J]. Natural Gas Industry, 1992, 12(5): 32-36.
- [9] 张连枝, 程时清, 付随艺. 多分支水平井注采井网波及系数研究[J]. 天然气与石油, 2013, 31(2): 55-58.  
Zhang Lianzhi, Cheng Shiqing, Fu Suiyi. Study on Sweep Efficiency of Well Pattern with Vertical Injector and Multilateral Horizontal Producer [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(2): 55-58.
- [10] 李 欣, 王长宁, 谭 平, 等. 安塞低渗透油田水平多分支井钻井技术[J]. 石油钻采工艺, 2007, 29(3): 15-18.  
Li Xin, Wang Changning, Tan Ping, et al. Technology for Drilling Multilateral Horizontal Wells of Ansai Low Permeability Oilfields [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007, 29(3): 15-18.
- [11] 张小龙, 李晓平, 谢维扬, 等. 不同泄油体模式下水平井产能方程分析[J]. 天然气与石油, 2012, 30(2): 45-48.  
Zhang Xiaolong, Li Xiaoping, Xie Weiyang, et al. Analysis on Deliverability Equation for Horizontal Well in Different Oil Drainage Body Models [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(2): 45-48.
- [12] 刘文超, 同登科, 张世明. 低渗透稠油油藏水平井产能计算新方法[J]. 石油学报, 2010, 31(3): 458-462.  
Liu Wenchao, Tong Dengke, Zhang Shiming. A New Method for Calculating Productivity of Horizontal Well in Low-Permeability Heavy Oil Reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 458-462.
- [13] 庞兴河, 何勇明, 刘 辉. 一种新的稠油油藏水平井产能预测方法[J]. 石油钻探技术, 2004, 32(1): 51-53.  
Pang Xinghe, He Yongming, Liu Hui. A Novel Method of Predicting Heavy Oil Productivity in Horizontal Wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004, 32(1): 51-53.
- [14] 俞启泰, 赵 明, 林志芳. 水驱砂岩油田驱油效率和波及系数研究(一)[J]. 石油勘探与开发, 1989(2): 48-52.  
Yu Qitai, Zhao Ming, Lin Zhifang. Research on Oil Displacement Efficiency and Sweep Efficiency in Water Drive Sandstone Oilfield (I) [J]. Petroleum Exploration and Development, 1989(2): 48-52.
- [15] 李士伦, 郭 平, 孙 雷, 等. 拓展新思路、提高气田开发水平和效益[J]. 天然气工业, 2006, 26(5): 1-5.  
Li Shilun, Guo Ping, Sun Lei, et al. Expanding New Ideas and Improving Level and Benefits of Gas Field Development [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(5): 1-5.
- [16] 胡 锦, 陈宇波, 曾 文. 引射器在气田上的应用[J]. 天然

(5): 127 - 133.

- [13] 牟丹,王祝文,黄玉龙,等.基于最小二乘支持向量机测井识别火山岩类型:以辽河盆地中基性火山岩为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2015,45(2):639-648.  
Mou Dan, Wang Zhuwen, Huang Yulong, et al. Application of Least Squares Support Vector Machine to Lithology Identification: Taking Intermediate Basaltic Rocks of Liaohe Basin as an Example [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45 (2): 639 - 648.
- [14] 周金昱,郭浩鹏,张少华,等.松辽盆地火山岩岩性测井识别方法研究[J].石油天然气学报,2014,36(3):72-76.  
Zhou Jinyu, Guo Haopeng, Zhang Shaohua, et al. Research on Lithology Identification for Volcanic Rock Based on Logging in Songliao Basin [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36 (3): 72 - 76.
- [15] 范存辉,梁则亮,秦启荣,等.基于测井参数的遗传BP神经网络识别火山岩岩性——以准噶尔盆地西北缘中拐凸起石炭系火山岩为例[J].石油天然气学报,2012,34(1):68-71.  
Fan Cunhui, Liang Zeliang, Qin Qirong, et al. Identification of Volcanic Rock Lithology by Using Genetic BP Neural Network Based on Logging Parameters——By Taking Carboniferous Volcanic Rocks in Zhongguai Uplift of Northwestern Margin of Junggar Basin for Instance [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34 (1): 68 - 71.
- [16] 王团.量子神经网络在雷家地区岩性识别中的应用[J].长春大学学报,2015,25(4):68-71.  
Wang Tuan. Application of Quantum Neural Networks in Lithology Identification in Leijia Area [J]. Journal of Changchun University, 2015, 25 (4): 68 - 71.
- [17] 江凯,王守东,胡永静,等.基于 Boosting Tree 算法的测井岩性识别模型[J].测井技术,2018,42(4):395-400.  
Jiang Kai, Wang Shoudong, Hu Yongjing, et al. Lithology Identification Model by Well Logging Based on Boosting Tree Algorithm [J]. Well Logging Technology, 2018, 42 (4): 395 - 400.
- [18] 李学贵,许少华,赵恩涛,等.基于LVQ过程神经网络的储层岩性识别[J].吉林大学学报(信息科学版),2017,35(4):398-403.  
Li Xuegui, Xu Shaohua, Zhao Entao, et al. Reservoir Lithology Discrimination Based on LVQ Process Neural Network [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2017, 35 (4): 398 - 403.
- [19] 牟丹,王祝文,黄玉龙,等.基于SVM测井数据的火山岩岩性识别——以辽河盆地东部拗陷为例[J].地球物理学报,2015,58(5):1785-1793.  
Mou Dan, Wang Zhuwen, Huang Yulong, et al. Lithological Identification of Volcanic Rocks from SVM Well Logging Data: Case Study in the Eastern Depression of Liaohe Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58 (5): 1785 - 1793.
- [20] 宋延杰,王团,付健,等.雷64区块砂砾岩储层岩性识别方法研究[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2015,31(1):73-79.  
Song Yanjie, Wang Tuan, Fu Jian, et al. Research on Technology of Lithology Identification of Sand-Conglomerate Rock in Lei 64 [J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), 2015, 31 (1): 73 - 79.

(上接第69页)

- 气与石油,2008,26(3):59-62.  
Hu Jin, Chen Yubo, Zeng Wen, et al. Application of Injector in Natural Gas Field [J]. Natural Gas and Oil, 2008, 26 (3): 59 - 62.
- [17] 马超群,刘德华,黄磊,等.高含水期油藏开发方式选择及最优方案设计[J].天然气与石油,2012,30(3):60-63.  
Ma Chaoqun, Liu Dehua, Huang Lei, et al. Selection of High Watery Period Oil Reservoir Development Options and Optimal Option Design [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30 (3): 60 - 63.
- [18] 欧阳传湘,左晨晓,张智军,等.水平井气润湿反转堵水实验研究[J].岩性油气藏,2011,23(3):106-109.  
Ouyang Chuanxiang, Zuo Chenxiao, Zhang Zhijun, et al. Experimental Study on Wetting Transition Water Shutoff of Horizontal Well [J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23 (3): 106 - 109.
- [19] 王杰祥,任文龙,王腾飞,等.稠油热采井氮气泡沫抑制边水技术研究[J].特种油气藏,2013,20(2):105-107.  
Wang Jiexiang, Ren Wenlong, Wang Tengfei, et al. Study on Controlling Edge Water Techniques by Nitrogen Foam in Heavy Oil Thermal Recovery [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20 (2): 105 - 107.
- [20] 王福林.底水油藏底水锥进及人工隔层稳油控水机理研究[D].大庆:大庆石油学院,2010.  
Wang Fulin. Research on Water Coning and Artificial Interlayer Control Coning to Enhance Oil Recovery Mechanism of Bottom Water Reservoirs [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2010.