

【环境与能源 / Environment and Energy】

D油田二类油层聚驱上返时机计算方法

陈宝玉^{1,2}, 董雅婷¹, 冯诗淼³, 秦旗⁴, 杨其浩¹

1) 东北石油大学石油工程学院, 黑龙江大庆163318; 2) 大庆油田有限责任公司, 黑龙江大庆163453; 3) 大庆油田有限责任公司第三采油厂, 黑龙江大庆163113; 4) 大庆油田有限责任公司第二采油厂, 黑龙江大庆163414

摘要: 为合理确定不同经济条件下的经济极限含水率, 充分考虑油田效益最大化, 评估油田生产是否具有经济效益, 针对二类油层聚驱潜力层系接替投产时机问题, 基于盈亏平衡原理与产量递减规律提出一种明确上返开发时机的新方法. 打破选取98%(水的体积分数)作极限含水率行业标准的限制, 基于油价、油田实际产出、成本和税金等经济参数, 运用投入产出平衡理论, 推导出聚合物驱油田单井经济极限含水率计算模型. 利用产量递减规律预测处于后续水驱阶段的油层未来含水变化趋势, 结合经济极限含水率, 明确达到盈亏平衡点的时机, 即层系接替投产时机. 以D油田二类油层为例, 计算不同油价和产液规模下的经济极限含水率, 评价油井生产是否具有经济效益, 并预测油田含水率变化, 明确了开发投产时机. 结果表明, 经济极限含水率与油价和日产液量均呈正相关, 对于具有较高采油速度的化学驱油层而言, 高油价下的极限含水率可达99.02%, 远超行业标准. 根据建立的经济极限含水率模型预测的开发投产时机, 延长了油井高含水期效益生产的寿命, 大幅度提高了经济效益, 对油田化学驱开发具有重要的指导意义.

关键词: 油田开发; 二类油层; 聚合物驱; 产量递减; 经济极限含水率; 开发时机

中图分类号: TE327 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3724/SP.J.1249.2024.06653

Calculation of the timing for polymer flooding upward return in the second-class oil layers of D oilfield

CHEN Baoyu^{1,2}, DONG Yating¹, FENG Shimiao³, QIN Qi⁴, and YANG Qihao¹

1) School of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang Province, P. R. China

2) Daqing Oil Field Co. Ltd., Daqing 163453, Heilongjiang Province, P. R. China

3) The Third Oil Production Plant of Daqing Oil Field Co. Ltd., Daqing 163113, Heilongjiang Province, P. R. China

4) The Second Oil Production Plant of Daqing Oil Field Co. Ltd., Daqing 163414, Heilongjiang Province, P. R. China

Abstract: In order to reasonably determine the economic limit of water cut under different economic conditions, and fully consider the maximization of oilfield benefits and evaluate economic benefits of oilfield production, we propose a new method based on the principle of profit and loss balance and the law of production decline to clarify the timing of upward development, in response to the issue of the replacement and production timing of polymer flooding potential layers in the second-class oil layers. Breaking the industry standard of selecting the value of 98% as the limit of water cut, based on oil prices using the input-output balance theory, a calculation model for the economic

Received: 2023-06-20; **Accepted:** 2023-10-29; **Online (CNKI):** 2023-12-12

Foundation: National Science and Technology Major Special Project of China (ZX05009-004-006)

Corresponding author: Senior engineer CHEN Baoyu (chenbaoyu1@petrochina.com.cn)

Citation: CHEN Baoyu, DONG Yating, FENG Shimiao, et al. Calculation of the timing for polymer flooding upward return in the second-class oil layers of D oilfield [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2024, 41(6): 653-658. (in Chinese)



limit water cut of individual wells undergoing polymer flooding is derived based on economic parameters such as oil prices, actual oilfield output, costs, and taxes. The production decline law is used to predict the future trends in water cut changes in oil layers during the subsequent water flooding stage. Combined with the economic limit of water cut, we determine the break timing for reaching the even point, i. e., the timing of replacing the layer system for production. Taking the second-class oil layer of D oilfield as an example, the economic limit water cuts under different oil prices and liquid production scales are calculated, evaluating whether oil well production is economically viable and predicting changes in water cut, thereby clarifying the development and production timing. The results indicate that the economic limit water cut is positively correlated with oil prices and daily liquid production. For chemical flooding reservoirs with a high oil recovery rate, the limit water cut can reach 99.02% at high oil prices, significantly exceeding the industry standard. The predicted development and production timing based on the established economic limit water cut model extends the lifespan of economically productive periods during high water cut phases, greatly enhancing economic efficiency and providing important guidance for the chemical flooding development of oilfields.

Key words: oilfield development; the second-class oil layers; polymer flooding; production decline; economic limit of water cut; oilfield development timing

目前, 大庆油田二类油层已全面进入后续水驱阶段, 与一类油层相比, 二类油层河道砂发育规模明显变小、层数增多、厚度变薄、渗透率变低, 综合含水率高, 低效无效循环严重, 亟需进入到聚驱上返阶段。为实现二类油层上返聚驱优化提效, 需选取最佳时机进行潜力层系返层开发, 以达到提高储量动用程度的目的, 避免开发时机不当造成的经济损失等问题。含水率作为油田开发的关键因素, 在二类油层含水率(水的体积分数)高于90%的条件下^[1-3], 细微的含水率上升会引起水油比的大幅增长, 从而导致吨液处理费用上升, 进而降低全区的经济效益。常见的特高含水期极限含水率确定方法通常由理论推导与模型建立^[4-7]组成, 而按照行业规定的区块定液量生产时, 含水率达到98%时转层停产^[8-12], 往往会造成不必要的经济亏损或剩余可采储量较大等问题。本研究综合具体区块的经济参数确定其特定经济极限含水率, 利用递减规律中含水率与时间的关系, 反算聚驱上返的开发时机, 能够更精确地保证油田利益最大化。

1 经济极限含水率模型

经济极限含水率模型的建立基于盈亏平衡原理, 当油田投资成本与收益达到平衡时, 继续生产会导致收支不平衡, 投入资本高于盈利收入, 造成经济亏损。利用经济极限含水率模型求得含水界限, 即保证油田在不亏损的情况下达到最高含水率, 二类油层在达到经济极限含水率的时机上返投

产, 可保障目前开发的层系达到最优经济效益, 最小程度减少经济损失^[13-16]。以D油田二类油层为例, 基于其具体的实际成本等经济参数, 建立经济极限含水模型, 以此为标准评价区块是否达到含水界限从而需要停产转层, 上返开发时机研究流程如图1。

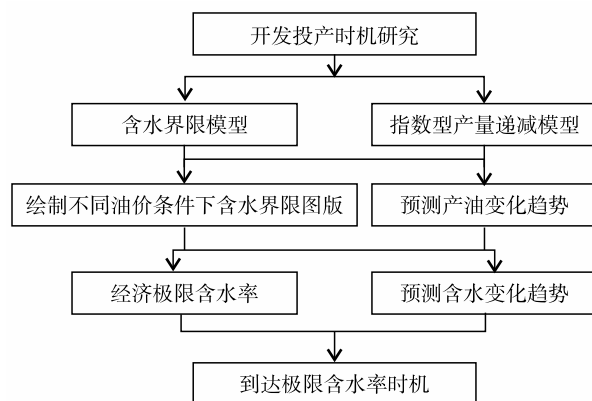


图1 上返开发时机研究流程

Fig. 1 Flow chart of the reaching time on the timing of back to development.

基于收支平衡原理, 建立不同油价和液量规模条件下的经济极限模型。

$$Q(1 - f_w^\infty) [\gamma_o P_o (1 - \alpha) - C_{fg} - C_{vg}] = 0 \quad (1)$$

其中, Q 为年产液量, 单位: t; f_w^∞ 为经济极限含水率, 单位: %; γ_o 为原油商品率, 单位: %; P_o 为油价, 单位: 元/t; α 为综合产品含税率, 单位: %; C_{fg} 为单位原油年固定投资, 单位: 元/t; C_{vg} 为单位原油年变动投资, 单位: 元/t。

1.1 单位原油固定投资

聚驱开采条件下, 对于全区而言现阶段油井和水井的数量不变, 固定投资包含采出作业费、井下作业费、测井试井费、维护及修理费、其他辅助作业费、运输费以及管理费等不随产液含水率变化的经济投入^[17].

设全区单井年固定支出为 C_d (单位: 元), 则单位原油固定支出表达式为

$$C_{fg} = \frac{C_d}{Q_t} \quad (2)$$

其中, Q_t 为第 t 年的单井年产油量, 单位: t.

$$Q_t = 365 \times R \times Q_{rd} \quad (3)$$

其中, Q_{rd} 为第 t 年单井日产油量, 单位: t; R 为生产时率.

综上, 全区单位原油固定支出可表示为

$$C_{fg} = \frac{C_d}{Q_t} = \frac{C_d}{365RQ_{rd}} \quad (4)$$

1.2 单位原油变动投资

原油变动投资主要指与产油产液以及含水率密切相关的投资费用, 包括投入的成本影响产液量或含水率的变化或者因产油、产液及含水率而变化的成本费用.

第 t 年的变动投资为

$$C_{vt} = \frac{(C_o + C_s)Q_t}{1 - f_{wt}} + C_j v \left(\frac{\beta}{\rho} + \frac{Q_{Lt} - Q_t}{Q_t} \right) \quad (5)$$

其中, C_{vt} 为单井第 t 年变动成本, 单位: 元; C_o 为产液处理费, 单位: 元/t; C_s 为产液的增产措施费, 单位: 元/t; f_{wt} 为油井第 t 年的含水率, 单位: %; C_j 为单位注水费用, 单位: 元; v 为注采比; β 为原油体积系数; ρ 为原油相对密度; Q_{Lt} 为第 t 年的单井年产液量, 单位: t.

1.3 经济极限含水率模型建立

通过对各类成本的推导研究, 结合盈亏平衡理论建立的经济界限模型, 针对D油田二类油层, 其原油商品率为0.99, 目前原油综合含税率为0.22. 求解经济极限含水率计算公式, 其推导过程为

$$1 - f_w^\infty = \frac{(C_{fg} + C_{vg})Q}{0.9948 \times (1 - 0.22)QP_o} \quad (6)$$

$$f_w^\infty = 1 - \frac{C_{fg} + C_{vg}}{0.776P_o} = 1 - \frac{1.29 \left(\frac{C_d}{365RQ_{rd}} + \frac{C_j}{Q_t} \right)}{P_o} \quad (7)$$

D油田二类油层具体参数带入, 即可算出该区块的经济极限含水率, 以便后续明确达到含水界限的时机, 即转层上返的最佳开发时机.

2 基于产量递减模型的含水率预测

基于产能效益双目标约束建产原则, 考虑最大限度地利用资源, 建立不同油价、液量规模条件下的含水界限模型. 根据盈亏平衡原理, 在给定液量条件下, 可以预测出区块到达含水界限的极限含水率. 结合指数型产量递减模型, 利用含水率与产油量之间的关系, 推导出含水率与时间的关系.

2.1 指数型产量递减

根据三次采油开发指标变化规律的研究结果, 处于后续水驱阶段的区块产量符合Arps递减规律. 通常用递减率 D_i 表示产量的下降速度(单位: a^{-1}), 即单位时间内单位产量的变化量,

$$Q_t = Q_i \exp(-D_i t) \quad (8)$$

其中, Q_i 为递减初年的年产油量, 单位: t.

2.2 递减规律预测开动态

收集区块历史动态数据(t, Q_t), 利用指数型产量递减模型, 绘制 $\lg Q_t - t$ 关系曲线, 见图2. 由图2确定斜率为 m_1 , 求出 D_i ; 确定截距为 m_2 , 进而求出 Q_i ; $m_2 = \lg Q_i$, 进行开动态预测.

$$\lg Q_t = \lg Q_i - (D_i \lg e)t \quad (9)$$

$$m_1 = \frac{\lg Q_{t_2} - \lg Q_{t_1}}{t_2 - t_1} = -D_i \lg e \quad (10)$$

$$m_2 = \lg Q_i \quad (11)$$

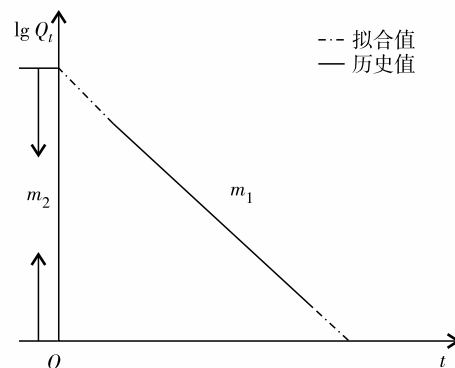


图2 $\lg Q_t - t$ 关系曲线

Fig. 2 $\lg Q_t - t$ relationship curve.

利用含水率与时间的关系反算达到经济极限含水率的时间, 将区块到达含水界限的时间作为该区块现阶段开发结束时间, 即接替开发调整方式的投产时机.

3 实例应用

3.1 经济模型参数

利用上述模型思路研究 D 油田二类油层上返时机, 其经济参数数据如表 1. 目前该区块开发层系为 SII10+11-SIII10, 二次上返目的层系为 SII1-9.

表 1 D 油田二类油层固定成本和变动成本费用
Table 1 Fixed and variable cost expenses of D oilfield

成本费用	类别	价格
变动成本	驱油物注入费	2.78×10^{-4} 万元/ m^3
变动成本	油气处理费	3.01×10^{-4} 万元/t
固定成本	单井采出作业费	7.92 万元
固定成本	单井井下作业费	2.64 万元
固定成本	单井测井试井费	1.01 万元
固定成本	单井维护及修理费	1.66 万元
固定成本	运输费	1.09 万元/t
固定成本	单井其他辅助作业费	2.95 万元
固定成本	单井厂矿管理费	2.66 万元

3.2 经济极限含水率计算

基于 D 油田二类油层上返工业区生产动态数据, 计算分析得 D 油田二类油层平均单井年产液量, 作为经济极限含水率模型定液量生产条件.

通过含水界限模型及表 1 可得不同油价和单井年产液量下的单井经济极限含水率. 以 D 油田二类油层单井年产液量 2×10^4 t 为例, 当油价分别为 0.28、0.32、0.35、0.40 和 0.50 万元/t 时, 对应的含水界限分别为 98.35%、98.56%、98.68%、98.85% 和 99.08%. 以此得出随油价上涨, 含水界限呈现小幅度上升趋势. D 油田二类油层单井年产液量及对应含水界限数据见表 2.

表 2 不同油价和单井年产液量下单井经济极限含水率

Table 2 Economic limit water content of a single well under different oil prices and different annual liquid production of a single well %

$10^{-4} \times Q_L$	不同油价下经济极限含水率				
	0.28 万元/t	0.32 万元/t	0.35 万元/t	0.40 万元/t	0.50 万元/t
0.5	97.98	98.22	98.32	98.10	98.48
1.0	98.06	98.31	98.45	98.64	98.92
1.5	98.12	98.35	98.50	98.68	98.95
2.0	98.35	98.56	98.68	98.85	99.08
2.5	98.51	98.95	99.02	99.16	99.41

3.3 经济极限开发投产时机

1) 预测含水率变化趋势

针对 D 油田二类油层上返开发调整时机问题, 利用实际生产动态数据绘制 $\lg Q_t - t$ 关系曲线如图 3 所示. 根据 $\lg Q_t - t$ 关系曲线采用 2.2 节数学方法求出 $D_i = 0.14 \text{ a}^{-1}$, $Q_i = 27.84 \times 10^4 \text{ t}$.

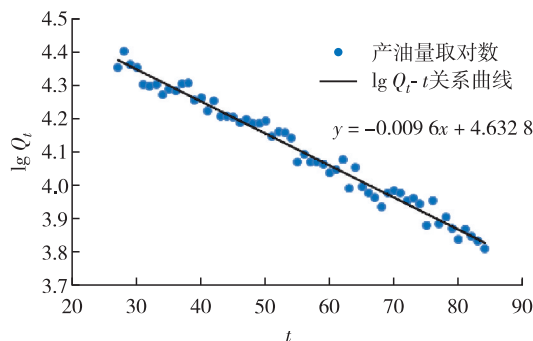


图 3 D 油田二类油层 $\lg Q_t - t$ 关系曲线

Fig. 3 $\lg Q_t - t$ relationship curve of the second class oil layers of D oilfield. Blue dots indicate taking the logarithm of oil production, and the black line is $\lg Q_t - t$ relationship curve.

分析二类油层未实施区块 $\lg Q_t - t$ 关系曲线, 拟合出各区块递减数学公式, 求得 D_i 和 Q_i , 利用指数型递减规律公式预测产油量变化曲线, 结果如图 4.

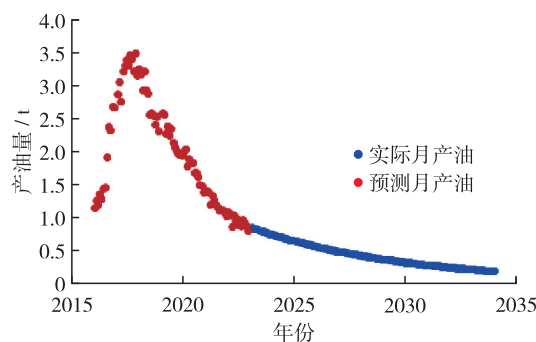


图 4 D 油田二类油层产油量变化曲线

Fig. 4 Oil production variation curve of the second class oil layers of D oilfield. Red dots indicate predicting monthly oil production, and blue dots indicate actual monthly oil production.

在定液量生产的条件下预测二类油层上返各未实施区块不同年月的含水率变化, 绘制含水率变化曲线, 如图 5.

2) 开发投产时机计算结果

根据预测的 D 油田二类油层含水率变化曲线, 预测未来 10 a 各月的含水率, 结果如表 3.

综合上述开发时机计算结果, 在当前油价浮动情况下, 取油价为 0.40 万元/t 作为经济极限开发时机的参数, 则 D 油田二类油层经济极限含水率为

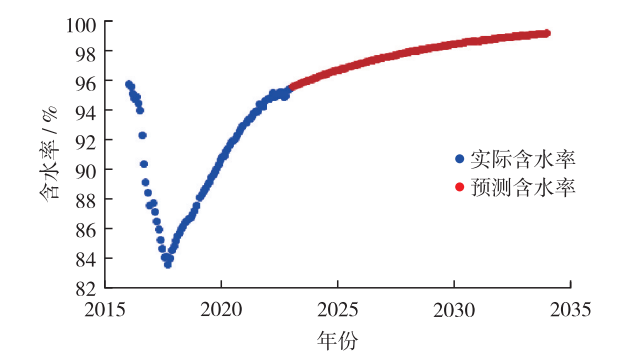


图5 D油田二类油层含水率变化曲线

Fig. 5 Water content variation curve of the second class oil layers of D oilfield. Blue dots indicate actual water content, and red dots indicate predicting water content.

表3 预测含水率变化			
Table 3 Predicting changes in water content %			
预测时间	含水率	预测时间	含水率
2024年11月	96.52	2032年3月	98.85
2024年12月	96.56	2032年4月	98.86
2025年1月	96.60	2032年5月	98.87
2025年2月	96.64	2032年6月	98.88
2025年3月	96.68	2032年7月	98.89
2025年4月	96.72	2032年8月	98.90
2025年5月	96.76	2032年9月	98.91
2025年6月	96.80	2032年10月	98.92
2025年7月	96.84	2032年11月	98.93
2025年8月	96.88	2032年12月	98.94
2025年9月	96.92	2033年1月	98.95
2025年10月	96.96	2033年2月	98.96
2025年11月	97.00	2033年3月	98.97
2025年12月	97.04	2033年4月	98.98
2026年1月	97.08	2033年5月	98.99
2026年2月	97.12	2033年6月	99.00
2026年3月	97.16	2033年7月	99.00
2026年4月	97.20	2033年8月	99.01
2026年5月	97.22	2033年9月	99.02
2026年6月	97.24	2033年10月	99.03
2026年7月	97.26	2033年11月	99.04
2026年8月	97.28	2033年12月	99.04
2026年9月	97.30	2034年1月	99.05
2026年10月	97.32	2034年2月	99.06
2026年11月	97.34	2034年3月	99.07
2026年12月	97.36	2034年4月	99.08
2027年1月	97.38	2034年5月	99.08
2027年2月	97.40	2034年6月	99.09
2027年3月	97.42	2034年7月	99.10
2027年4月	97.44	2034年8月	99.11
2027年5月	97.46	2034年9月	99.12
2027年6月	97.48	2034年10月	99.12
2027年7月	97.50	2034年11月	99.13

98.85%, 结合预测的含水率变化, 得到D油田二类油层达到经济极限含水率时机为2032年3月, 即开发时机为2032年4月。

目前, D油田二类油层含水率小于经济极限含水率。由此可见, 目前该区块的井依然具有一定的经济效益, 应维持生产, 全区依然具有较高的经济效益, 消除了“单井含水率达到98%应关井”的疑虑, 对D油田、全油田乃至类似油田具有很好的指导和借鉴意义。

4 结 论

1) 油价和日产油量是影响单井经济极限含水率的2个重要因素, 单井经济极限含水率与油价和日产油量均呈正相关关系。

2) 采用近3 a产液量平均值作为定液量生产条件, 经济极限含水率随油价与产液量的升高而增大。当油价从0.28万元/t到0.40万元/t时, 经济极限含水率从97.98%提升至98.85%。

3) 对于该油田的开发状况, 考虑最大限度地利用资源, 将首套层系开采到达盈亏平衡点后返层。根据不同油价下的含水界限, 结合后续水驱阶段的开发规律, 可以确定接替层系的投产时机。

研究成果可为油田开发时机决策提供一定的决策支持。模型中的经济参数设置主要参考了相关学者的研究成果, 对各类油田都具有参考意义。

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目(ZX05009-004-006)
作者简介: 陈宝玉(chenbaoyu1@petrochina.com.cn), 东北石油大学博士研究生, 大庆油田有限责任公司高级工程师。研究方向: 油田开发调整和剩余油挖潜。
引文: 陈宝玉, 董雅婷, 冯诗森, 等. D油田二类油层聚驱上返时机计算方法[J]. 深圳大学学报理工版, 2024, 41(6): 653-658.

参考文献 / References:

[1] 张继成, 范佳乐, 匡力, 等. 一种预测特高含水期开发指标的联解法[J]. 深圳大学学报理工版, 2018, 35(6): 558-565.
ZHANG Jicheng, FAN Jiale, KUANG Li, et al. An integrated method for predicting the development index of extra-high water cut period [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2018, 35(6): 558-565. (in Chinese)
[2] 李明, 王文涛, 聂桂萍, 等. 经济极限含水率的一种确定方法[J]. 化学工程与装备, 2019(5): 275-

- 276, 218.
LI Ming, WANG Wentao, NIE Guiping, et al. A method for determining the economic limit water content [J]. Chemical Engineering and Equipment, 2019 (5): 275-276, 218. (in Chinese)
- [3] 王玲, 张金锁, 邹绍辉. 序列投资下的石油勘探投资最优时机选择[J]. 中国管理科学, 2020, 28(10): 54-64.
WANG Ling, ZHANG Jinsuo, ZOU Shaohui. The optimal investment timing of petroleum resources exploration based on sequential investment theory [J]. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(10): 54-64. (in Chinese)
- [4] 刘会友, 范海军. 用多元时序分析法预测油水井动态[J]. 石油大学学报自然科学版, 2001, 25(2): 70-72.
LIU Huiyou, FAN Haijun. Prediction of production performances of oil and injection wells with multivariate time series method [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2001, 25(2): 70-72. (in Chinese)
- [5] 张倍铭, 马文国, 李淑娟. 大庆油田二类油层注聚后期合理转后续水驱注入时机研究[J]. 当代化工, 2017, 46(5): 859-863, 872.
ZHANG Beiming, MA Wenguo, LI Shujuan. Study on the timing of subsequent waterflooding at the late stage of polymer injection in class II reservoir in Daqing oilfield [J]. Contemporary Chemical Industry, 2017, 46(5): 859-863, 872. (in Chinese)
- [6] 孙常伟. 一种计算水驱油藏高含水期驱油效率的新方法[J]. 中外能源, 2022, 27(11): 58-62.
SUN Changwei. A new method for calculating the oil displacement efficiency of water drive reservoirs during high water cut periods [J]. Zhongwai Energy, 2022, 27(11): 58-62. (in Chinese)
- [7] KAMAL B, ABBASI Z, HASSANZADEH H. Water-cut measurement techniques in oil production and processing [J]. Energies, 2023, 16: 6410.
- [8] TATAR A, BARATI-HAROONI A, NAJAFI-MARGHMALEKI A. et al. Prediction of moisture content of natural gases using a GA-RBF model [J]. Journal of Molecular Liquids, 2016, 223, 994-999.
- [9] ZHANG Fan, ZHANG Qun, ZHOU Zhaohui, et al. Study on the effect of different viscosity reducers on viscosity reduction and emulsification with daqing crude oil [J]. Molecules, 2023, 28(3): 1399.
- [10] BAI Yajie, HOU Jian, LIU Yongge, et al. Energy-consumption calculation and optimization method of integrated system of injection-reservoir-production in high water-cut reservoir [J]. Energy, 2022, 239: 121961.
- [11] DONG Yukun, ZHANG Yu, LIU Fubin, et al. Research on an optimization method for injection-production parameters based on an improved particle swarm optimization algorithm [J]. Energies, 2022, 15(8): 2889.
- [12] GAO Shusheng, YANG Yi, LIAO Guangzhi, et al. Experimental research on inter-fracture asynchronous injection-production cycle for a horizontal well in a tight oil reservoir [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208: 109647.
- [13] 赵林, 冯连勇. 未开发油田价值评估和投资时机选择模型的构建及应用[J]. 中国石油大学学报自然科学版, 2009, 33(6): 161-166.
- [14] ZHAO Lin, FENG Lianying. Establishment and application of evaluation and investment timing model for undeveloped oilfield [J]. Journal of China University of Petroleum Edition of Natural Science, 2009, 33(6): 161-166. (in Chinese)
- [15] 朱琦. A 区二类油层聚驱停注聚时机及界限优化[J]. 化学工程与装备, 2023(8): 51-55.
ZHU Qi. Optimization of timing and boundary for polymer flooding shutdown in class II oil reservoirs in zone A [J]. Chemical Engineering and Equipment, 2023(8): 51-55. (in Chinese)
- [16] 赵洪涛, 李金泽, 杨毅, 等. 基于长短期记忆神经网络的油井产液量和含水率预测方法[J]. 石油地质与工程, 2022, 36(5): 75-80.
ZHAO Hongtao, LI Jinze, YANG Yi, et al. Method for predicting oil well liquid production and water content based on short-term and short-term memory neural networks [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2022, 36(5): 75-80. (in Chinese)
- [17] 李明, 王文涛, 聂桂萍, 等. 经济极限含水率的一种确定方法[J]. 化学工程与装备, 2019(5): 275-276, 218.
LI Ming, WANG Wentao, NIE Guiping, et al. A method for determining the economic limit water content [J]. Chemical Engineering and Equipment, 2019(5): 275-276, 218. (in Chinese)

【中文责编: 晨兮; 英文责编: 天澜】