

引用格式:吴宽宽,冯其红,张先敏,等.多层水驱油藏均衡驱替注采参数协同优化方法[J].油气地质与采收率,2023,30(5):67-75.

WU Kuankuan, FENG Qihong, ZHANG Xianmin, et al. Collaborative optimization method of injection and production parameters for multi-layer reservoirs based on balanced water flooding[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(5): 67-75.

多层水驱油藏均衡驱替注采参数协同优化方法

吴宽宽¹,冯其红¹,张先敏¹,孙红霞²,于金彪²,易红霞²

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015)

摘要:由于储层非均质性 & 开发措施的影响,易造成水驱过程驱替不均衡。基于统计学方法,提出了采用克里斯琴森均匀系数定量评价多层水驱油藏开发过程中均衡驱替程度,以最大化均衡驱替为目标建立了分层注采参数优化数学模型,采用协方差矩阵自适应智能进化算法进行求解,形成了多层水驱油藏注采参数协同优化方法,并通过实例验证了方法的可靠性。将建立的新方法应用于胜利油区胜坨油田坨142油藏典型井组,通过对比智能协同分层注采参数优化前后结果,相比于原始方案克里斯琴森均匀系数提高了3.49%,累积产油量增加 $1.024 \times 10^4 \text{ m}^3$,同时含水率降低1.34%。表明该方法可以精准地控制各层间的配产和配注,有效地改善水驱油藏层间和井间的均衡驱替状况,实现注采参数和剩余油分布的精准匹配。

关键词:均衡水驱;克里斯琴森均匀系数;分层注采参数优化;智能优化;提高采收率

文章编号:1009-9603(2023)05-0067-09

DOI:10.13673/j.pgre.202304024

中图分类号:TE319

文献标识码:A

Collaborative optimization method of injection and production parameters for multi-layer reservoirs based on balanced water flooding

WU Kuankuan¹, FENG Qihong¹, ZHANG Xianmin¹, SUN Hongxia², YU Jinbiao², YI Hongxia²

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China),

Qingdao City, Shandong Province, 266580, China; 2. Exploration and Development Research

Institute, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: Unbalanced water flooding can easily occur due to the influence of reservoir heterogeneity and development measures. Based on the statistical method, the Christiansen uniformity coefficient is used to quantitatively evaluate the balanced water flooding degree during the development of multi-layer reservoirs. A mathematical model for optimizing multi-layer injection and production parameters is established to maximize balanced water flooding, and the covariance matrix adaptive intelligent evolution algorithm is used to solve the problem. A collaborative optimization method of injection and production parameters for multi-layer reservoirs based on water flooding is developed, and its reliability is verified by an example. The new method is applied to the typical well group of Shengtuo T142 reservoir in Shengli Oilfield. By comparing the results before and after the optimization of intelligent collaborative stratified injection and production parameter, it is found that the Christiansen uniformity coefficient by the original scheme is improved by 3.49%. The cumulative oil production is increased by $1.024 \times 10^4 \text{ m}^3$, and the water cut is decreased by 1.34%. The results show that this method can accurately control the production and injection allocation between layers, effectively

收稿日期:2023-04-24。

作者简介:吴宽宽(1994—),男,河南周口人,在读博士研究生,从事油气田开发及数值模拟研究。E-mail: wukuankuanupc@126.com。

通信作者:冯其红(1969—),男,四川西充人,教授,博士。E-mail: fengqihong@126.com。

基金项目:国家科技重大专项“特高含水后期整装油田延长经济寿命期开发技术”(2016ZX05011-001)。

improve the balanced water flooding between layers and wells, and realize the accurate matching between injection and production parameters and remaining oil distribution.

Key words: balanced water flooding; Christiansen uniformity coefficient; stratified injection and production parameter optimization; intelligent optimization; enhanced oil recovery

受储层的非均质性、井网不完善以及注采制度不合理等因素的影响,长期的多层合采导致层间剩余油动用不均衡,从而造成注入水的无效循环,但采用分层注水方式可有效改善水驱均衡程度,因此如何构建水驱油藏目前均衡驱替状况的评价指标,并开展基于均衡驱替的多层水驱油藏注采参数协同优化方法研究,是目前研究的难点^[1-3]。传统均衡驱替定义为注入井的驱替液在各个方向的驱替程度相同,并在相同时间内能到达最近的采油井^[4]。SUN等根据 Buckley-Leverett 方程和水驱油理论,推导了含水率、产液量和注水速率之间的定量关系,定义了均衡驱替的评价系数,用来指导水驱油藏平面均衡注采方案优化^[1]。王军等以见水时间相同作为判断是否均衡驱替的标准,并以此标准进行井网和注采措施调整^[5-6]。冯其红等基于油藏工程方法和经济性角度对均衡驱替理论进行了推导,当水驱油藏各注采方向上的累积注水量等于注入孔隙体积倍数,即油藏达到了均衡驱替,并以最大化均衡驱替开展了单层油藏注采参数优化研究^[4,7-8]。刘海成等基于油藏工程理论推导了非均质油藏在定液量和定压差2种不同生产方式下的注采参数设计公式,以减小不均衡驱替为目的,形成了非均质油藏均衡注采优化的方法^[9]。马奎前等推导采出程度和注水量与注入孔隙体积倍数的关系,以实现油田均衡驱替的目标,形成一种基于均衡驱替的单层油藏配产配注优化方法^[10-11]。陈存良等开展了基于最大净现值的多层水驱油藏配注方法研究^[12-13]。崔传智等以层间吸水指数级差作为注水层系分段指标,以均衡驱替为目标,利用 Buckley-Leverett 非活塞式水驱油理论计算各段配注量^[14]。孙召勃等分析多层合采油藏长期注水开发特点,提出采用驱替通量定量表征各层驱替程度差异的方法,建立了基于驱替通量均衡化思想的注水井纵向各层配注量确定方法^[15]。卜亚辉根据渗流力学原理分析了流场参数间的相互影响关系,建立了适配系数与累积产油量之间的相关性,并提出了一种基于适配系数的流场调控优化方法,从而使流场分布更加均衡^[16]。梁文福根据油藏工程基本原理,建立了分类井网产液量分配比例优化数学模型,该方法可以有效减少油层动用不均衡等开发矛盾,取得较好的增油降水效果^[17]。

近年来,诸多学者开展了基于均衡驱替理念作为评价和指导开发方案设计的研究,但多是基于单井组或单层油藏建立均衡驱替的指标,结合油藏工程方法或者经验公式进行配产配注方案设计,未考虑注水井和生产井之间的协同开发效果影响;其次是基于智能算法对油藏进行笼统注采参数优化,无法实现注采参数和各层剩余油分布的精准匹配。为此,笔者结合统计学理论和智能优化算法,提出基于克里斯琴森均匀系数的水驱油藏均衡驱替定量评价方法,以最大化均衡驱替为目标,建立了多层水驱油藏分层注采参数协同优化数学模型,并结合智能优化算法对注采井的工作制度进行分层智能优化,从而实现储层非均质性和剩余油分布与注采参数的精准匹配。

1 基于克里斯琴森均匀系数的水驱油藏均衡驱替评价方法

1.1 均衡驱替评价指标

已有的研究表明,利用饱和度标准差来反映水驱油藏的均衡驱替程度是一种直观有效的方法^[4,7]。目前现场应用中,多是采用含水饱和度标准差或者方差指标来评价水驱油藏的均衡驱替程度,但该方法只能是针对单层水驱油藏,无法对多层水驱油藏的均衡驱替程度进行评价。计算公式为:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

从(1)式中可以看出,饱和度标准差虽然能够反映出饱和度数据与平均饱和度数值的离散情况,但并不能体现含油饱和度数值的高低,就会导致更高或更低的平均含油饱和度其饱和度标准差的结果可能相同,因此对于多层的水驱油藏,无法定量准确地表征不同层位饱和度离散状况。引入统计学中克里斯琴森均匀系数(CU)来表征多层水驱油藏的均衡驱替程度,克里斯琴森均匀系数^[17]也称为克里斯琴森一致性系数,是一种常用的统计学方法,通常被视为评估、测量数据内部一致性和可靠性的有效指标,克里斯琴森均匀系数是基于平均偏差的统计量,能够直观反映试验中被测参数与平均

值的偏离程度,其计算公式为:

$$CU = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{\sum_{i=1}^n x_i} \right) \times 100\% \quad (2)$$

1.2 均衡驱替评价指标检验

采用经典的egg模型对多层水驱油藏注采参数优化方法的适用性进行评价,egg模型采用注水开发,作为计算实例被广泛应用于历史拟合和井网注采优化等算法的检验^[18-19]。模型^[20]总网格数为60×60×7,每个网格尺寸为8m×8m×4m。截取部分egg标准算例模型来验证所提出的均衡驱替评价指标,设置一注四采5口井,多层egg模型分别截取第1,3,5和7层,其余层设置为隔层,截取模型渗透率场和井位分布如图1所示。

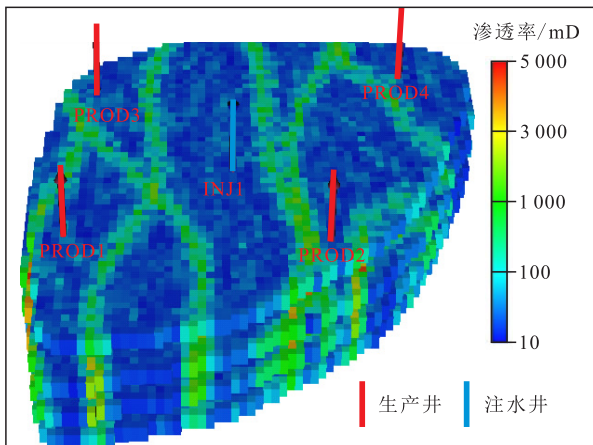
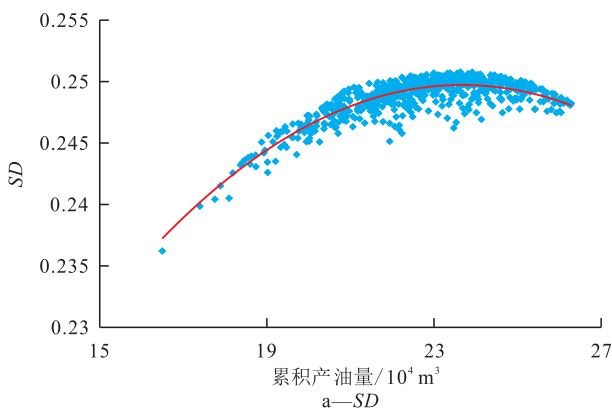


图1 多层egg模型渗透率场及井位分布

Fig.1 Permeability field and well location distribution of multi-layer egg model

首先进行多层egg模型均衡驱替指标论证,设置注水井的日注液量为140m³/d,4口生产井的日产量变化范围为0~140m³/d,保持注采平衡,对生产



井日产量以10m³/d为步长单位进行遍历组合,共有680种液量分配方案,运行数值模拟计算不同方案下第10a和第15a的SD和CU与其相对应的累积产油量(图2,图3)。从图2和图3中可以看出,SD和累积产油量不再具有线性关系,证明此时SD已无法再用来定量表征油藏的均衡驱替程度。而CU在不同的时间节点和累积产油量相关程度仍然在99%以上,由此表明,CU可以定量评价多层水驱油藏均衡驱替的程度。

2 多层水驱油藏注采参数协同优化数学模型构建与求解

2.1 优化数学模型构建

根据克里斯琴森均匀系数的意义,即克里斯琴森均匀系数越大,油藏驱替程度越均匀,因此为实现油藏均衡驱替程度的最大化,选择克里斯琴森均匀系数作为目标函数,各层的注水井日产量和生产井日产量作为优化变量,同时对油藏总产量、总注入量和各注采井进行单井液量约束。基于上述考虑,构建注采参数优化数学模型为:

$$\begin{aligned} \max CU(x) &= \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{\sum_{i=1}^n x_i} \right) \times 100\% \\ \text{s.t.} \quad & I_{vwi,k}^{\min} \leq I_{vwi,k} \leq I_{vwi,k}^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, z \\ & P_{vj}^{\min} \leq P_{vj} \leq P_{vj}^{\max} \quad j = 1, 2, \dots, m \\ & \sum_{i=1}^n I_{vwi} = \sum_{j=1}^m P_{vj} \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 优化数学模型求解

注采参数优化问题具有多峰值、多约束、高维

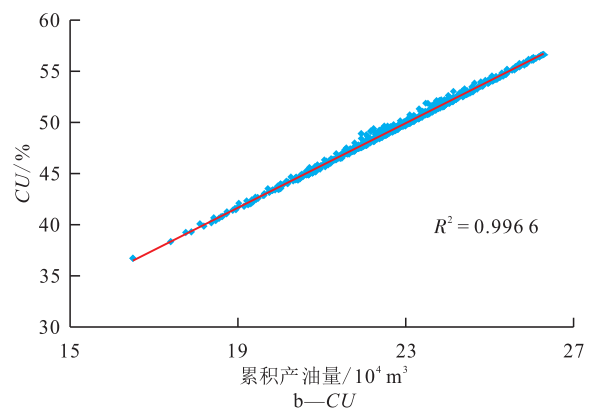


图2 10a后不同注采液量下的累积产油量与均衡驱替评价指标相关性

Fig.2 Correlation between cumulative oil production and balanced water flooding evaluation index with different injection and production fluid volumes after 10 years

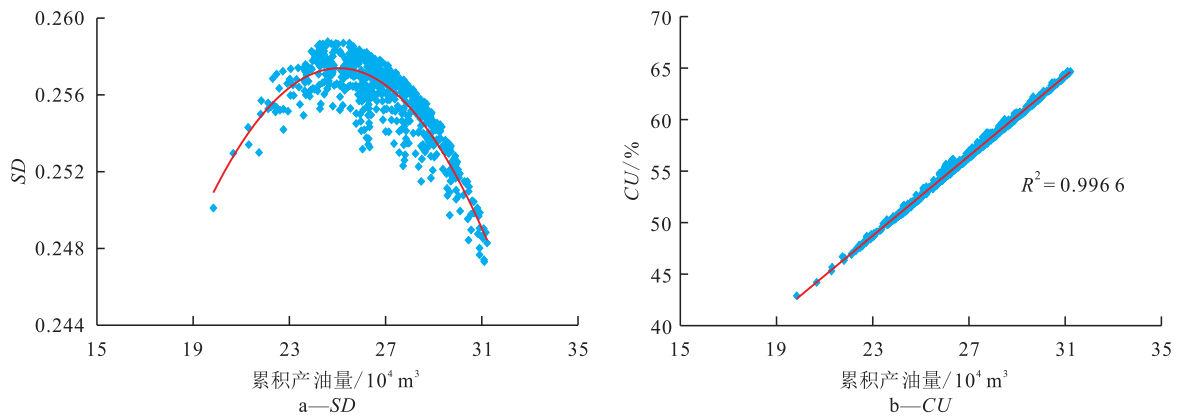


图3 15 a后不同注采液量下的累积产油量与均衡驱替评价指标相关性

Fig.3 Correlation between cumulative oil production and balanced water flooding evaluation index with different injection and production fluid volumes after 15 years

度和非线性等特点,在采用优化算法求解优化数学模型时较难,不同类型的优化算法在求解不同特点优化问题时效率不同,因此对于优化算法的选取十分重要。采用协方差矩阵自适应智能进化算法(CMA-ES)^[21]进行求解优化数学模型,CMA-ES属于一种随机性、全局性优化算法,是一个应用广泛、性能较好的自适应算法,常用于非线性、非凸函数的优化问题,在中等规模变量的复杂优化问题上具备较好的优化效果,CMA-ES在优化过程不需要对目标函数进行求导,属于随机性搜索算法。

基于均衡驱替的水驱油藏分层注采参数优化方法主要表现为:针对目前油藏的开发状况,利用克里斯琴森均匀系数定量评价油藏的均衡驱替程度,以最大化均衡驱替为目标,在此基础上,构建注采参数分层优化数学模型,结合相应的约束条件,采用CMA-ES对注采参数优化数学模型进行求解,以实现注采参数和剩余油分布的精准匹配,从而改善油藏的水驱开发效果(图4)。

2.3 方法验证

将建立的基于均衡驱替的分层注采参数优化方法应用于egg模型,分别开展分层注采参数优化和笼统注采参数优化。在分层注采优化时,每层注入液量同样作为优化变量,设置注水井在每层的日注液量优化范围均为0~80 m³/d,日总注液量约束为160 m³/d;每口生产井日产液量优化范围为0~80 m³/d,然后对生产井日产液量和各层日注液量进行优化;在笼统注采参数优化时,日总注液量为160 m³/d保持不变,只优化每口生产井日产液量。

为了对比笼统注采优化和分层注采优化的效果,优化中保持注采平衡,评价时间为10 a,优化算法设置相同的初始化参数,由于数值模拟需要耗费大量的时间,设置CMA-ES最大迭代次数为1 000,

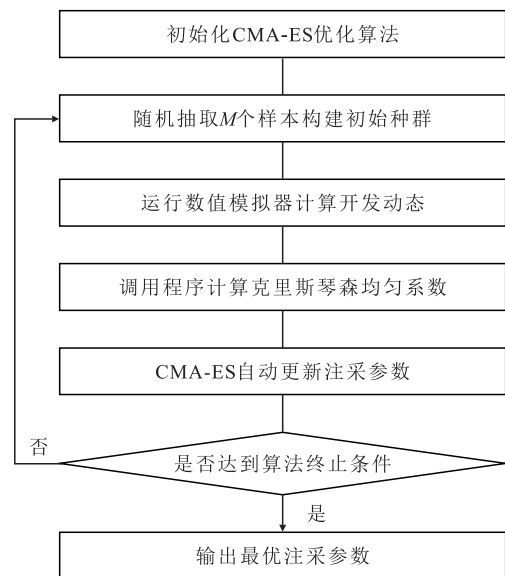


图4 基于均衡驱替注采参数优化流程

Fig.4 Flow chart for optimization of injection and production parameters based on balanced water flooding

种群数为50,各优化10次,取平均优化结果进行对比。不同优化方式的寻优过程如图5所示,在相同的迭代次数下,分层注采优化可以提高克里斯琴森均匀系数为2.5%,表明分层注采优化后可使水驱程度更加均衡。通过对比不同优化方式的最优生产动态(图6,表1)可知,在相同的注入液量下,相比于笼统注采优化,分层注采优化后油藏采出程度提高1.45%,同时含水率下降了2.75%,由此表明,分层注采优化可有效改善油藏的开发效果,对注入水实现更充分的利用,验证其方法的有效性。

3 实例应用

胜利油区胜坨油田坨142油藏位于东营凹陷

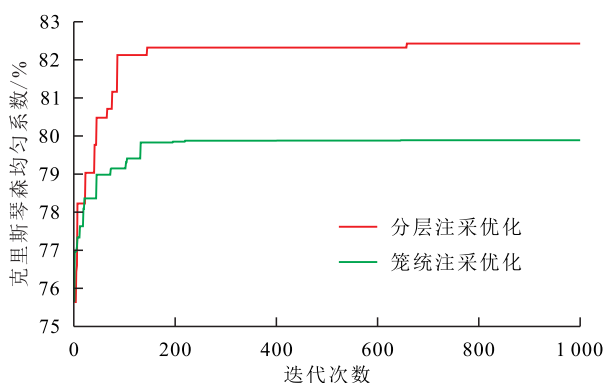


图5 不同优化方式寻优过程

Fig.5 Optimization of different optimization methods

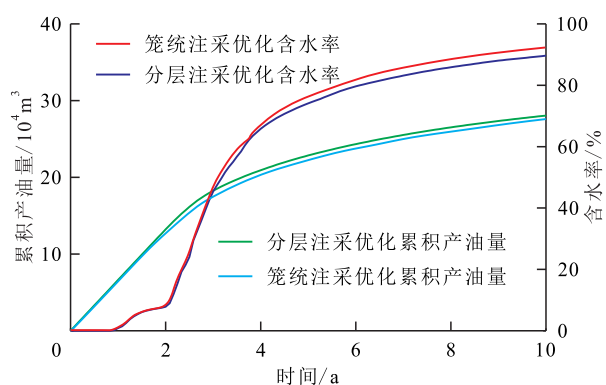


图6 不同优化方式生产动态对比

Fig.6 Comparison of production dynamics of different optimization methods

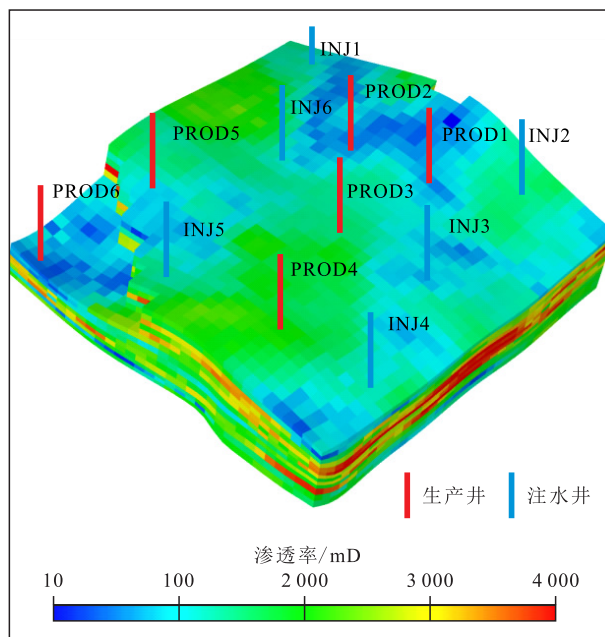
表1 不同优化方式优化结果

Table1 Comparison of results of different optimization methods m^3/d

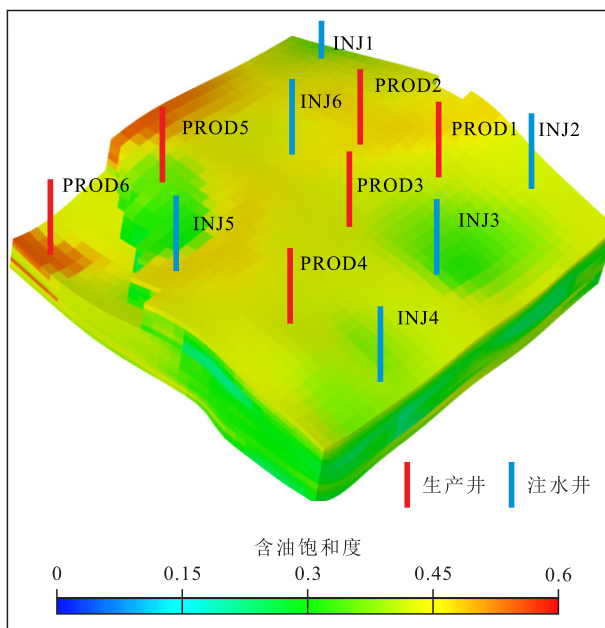
优化方法	注水井INJ1				生产井			
	第1小层	第2小层	第3小层	第4小层	PROD1	PROD2	PROD3	PROD4
分层注采	56	19	45	40	53	26	57	25
笼统注采	160				23	33	35	69

坨-胜-永断裂构造带胜利村构造东翼,是一个倾向东南的单斜构造,地层较陡,地层倾角约为 $5^{\circ} \sim 8^{\circ}$,油层埋深为2 450~2 880 m,构造高差为430 m,地层原油密度为 $0.834 5 \text{ g/cm}^3$,油层温度为 99.8°C ,原始地层压力为27.0 MPa。坨142油藏是三角洲前缘亚相反韵律沉积,纵向上主要划分为6个开发层系,沙二段是坨142油藏的主力层,共细分为4个小层(15^{2-1} , 15^{2-2} , 15^{2-3} 和 15^{2-4}),截取沙二段典型井组进行应用分析,典型井组主要位于 15^{2-1} , 15^{2-2} 和 15^{2-3} 这3个小层,渗透率、剩余油和井位分布如图7所示,属于高渗透油藏,水驱开发后期剩余油高度分散,生产井和注水井各6口,目前井组日配注量为 $360 \text{ m}^3/d$,设置注采比为1:1,根据现场实际单井最大配产配

注能力设置约束范围,注水井的日注液量为 $0 \leq I_{\text{vwi},k} \leq$



a—渗透率分布



b—剩余油分布

图7 坨142油藏典型井组属性分布

Fig.7 Typical well group attribute distribution in T142 reservoir

$300 \text{ m}^3/d$,生产井的日产液量为 $0 \leq P_{\text{vj}} \leq 300 \text{ m}^3/d$,在保持原始总配注的情况下对注采参数开展优化,考虑到实际油藏模拟耗时问题,设置CMA-ES最大迭代次数为500,种群数为25,以5 a后克里斯琴森均匀系数为评价目标函数开展优化。

从沙二段典型井组优化前后的生产动态对比(图8)和优化结果(表2)可以看出,当优化结束时,分层注采优化的克里斯琴森均匀系数相比原始方案提高了3.49%,同时累积产油量增加 1.024×10^4

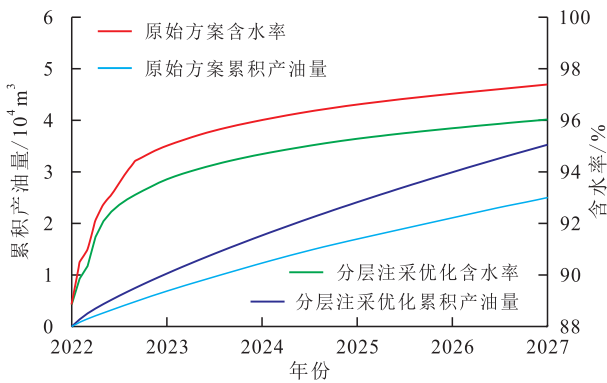


图8 优化前后生产动态对比

Fig.8 Comparison of production dynamics before and after optimization

表2 优化前后结果对比

Table2 Comparison of results before and after optimization

方案对比	克里斯琴森均匀系数/%	累积产油量/10 ⁴ m ³	含水率/%
分层注采优化	92.11	3.527	96.03
原始方案	88.62	2.503	97.37
变化量	3.49	1.024	-1.34

m³,含水率降低1.34%,说明在相同生产时间及注采液量条件下,通过分层注采优化后,油藏驱替更加均衡,可以有效地改善油藏开发效果。

从优化前后注采液量对比(图9)、优化后各层

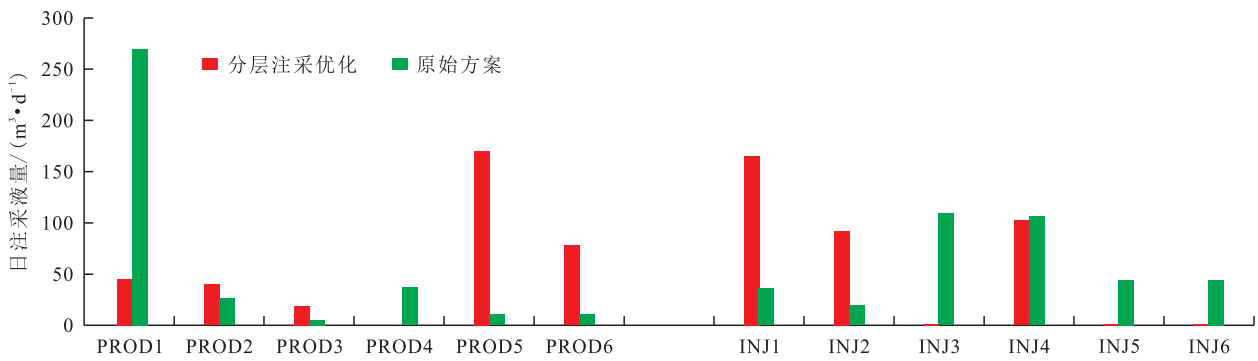


图9 优化前后日注采液量对比

Fig.9 Comparison of injection and production fluid volumes before and after optimization

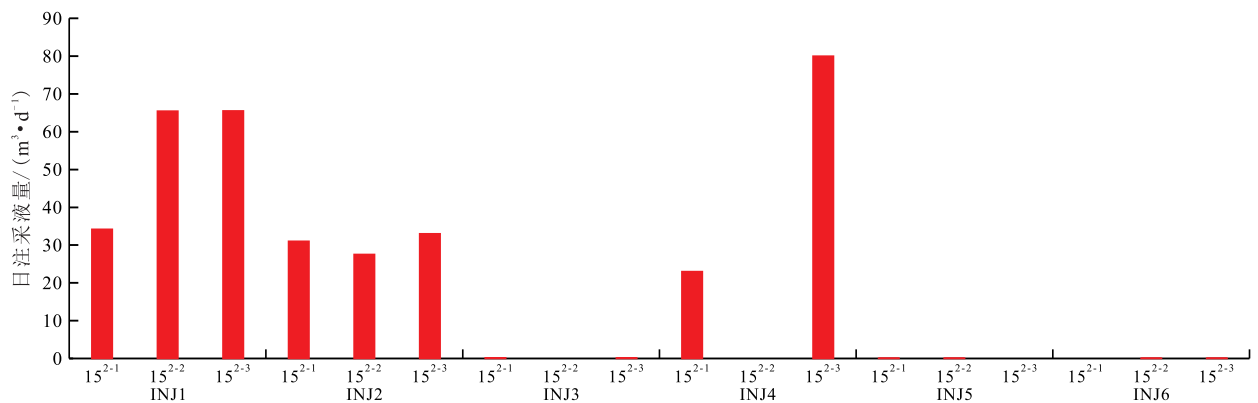


图10 分层注采优化后各层液量分布

Fig.10 Distribution of liquid volume in each layer after injection and production optimization

液量分布(图10)和优化前后剩余油分布(图11,图12)可以看出,通过注采参数智能协同分层优化,在沙二段的15²⁻¹小层对INJ1,INJ2和INJ4等3口注水井进行精准调配,同时对INJ3,INJ5和INJ6等3口注水井进行降注,可以减少高含水区域注入水的无效循环;对应的生产井PROD5进行提液,有利于采出油藏边部高度富集的剩余油,对生产井PROD2和PROD3进行稍微提液,有利于采出井间局部剩余油;通过对INJ1,INJ2和INJ4等3口注水井在沙二段的15²⁻³小层进行精准增注,同时关闭注水井INJ6,可以使得注水井INJ1更多的水流向角落生产井,以及对生产井PROD5和PROD6的合理提液,可以有效地采出PROD3,PROD5和PROD6等3口生产井之间的连片剩余油。通过矿场实际应用表明,对注采井液量的精准分配,可以有效地实现注采参数和剩余油分布的精准匹配,提高各层间注水利用率,最终实现井间和平面的均衡驱替。

4 结论

提出了基于克里斯琴森均匀系数的水驱油藏

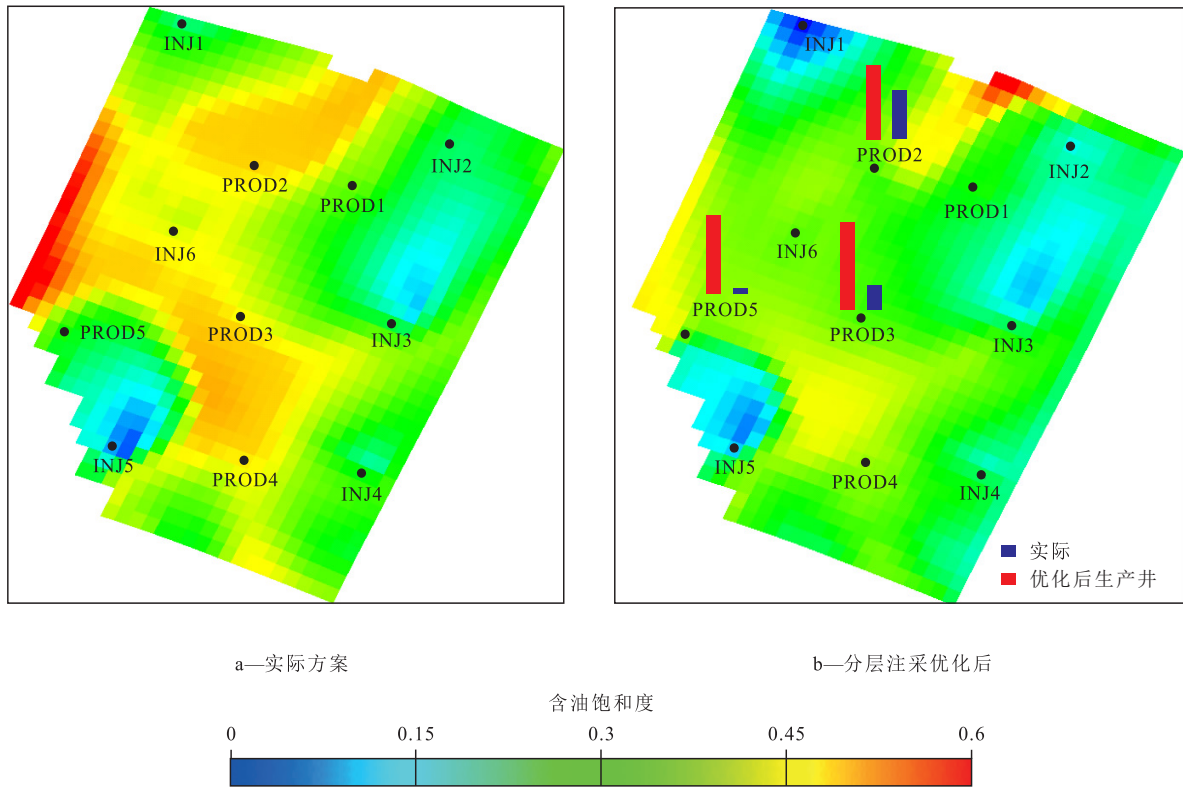


图 11 沙二段 15²⁻¹小层优化前后剩余油分布对比

Fig.11 Comparison of remaining oil distribution before and after optimization of $E_{s_2}15^{2-1}$

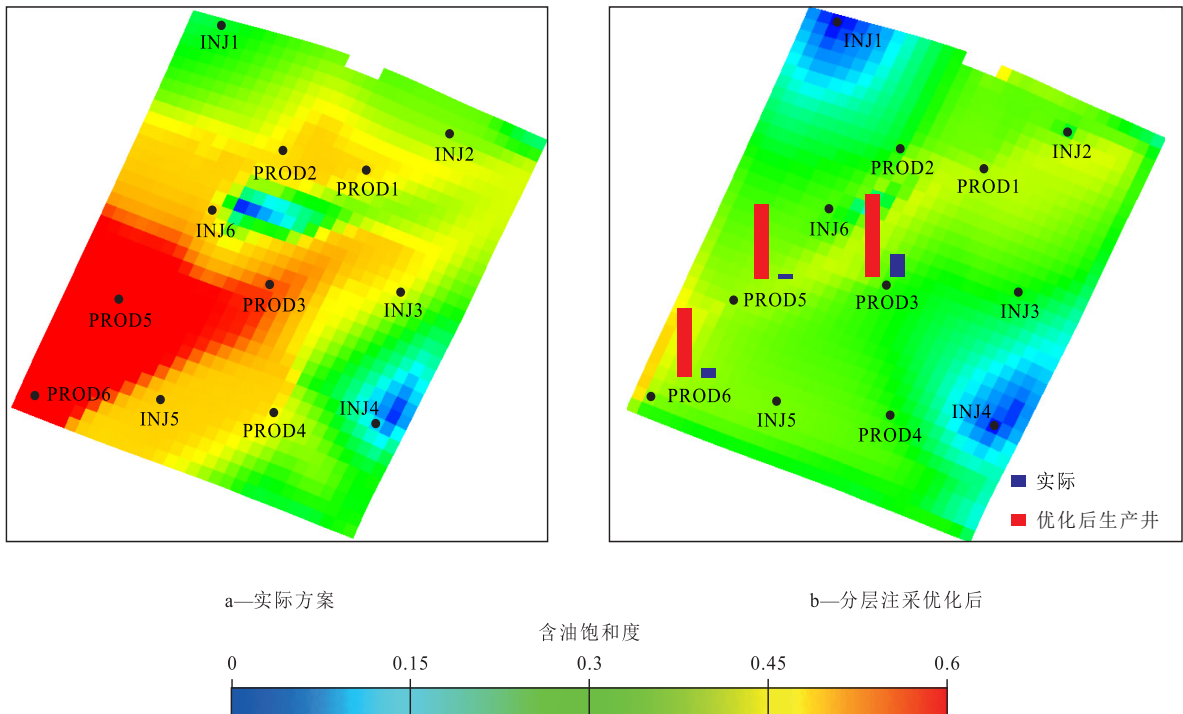


图 12 沙二段 15²⁻³小层优化前后剩余油分布对比

Fig.12 Comparison of remaining oil distribution before and after optimization of $E_{s_2}15^{2-3}$

均衡驱替的评价指标,该指标可以定量评价单层和多层水驱油藏的均衡驱替程度,相比于传统的含水饱和度标准差具有更广泛的适用意义。基于克里斯琴森均匀系数,构建了以油藏最大化均衡驱替为

目标的分层注采参数优化数学模型,并采用协方差矩阵自适应智能进化算法进行求解,形成多层水驱油藏注采参数协同优化方法。将新建立的方法应用于胜利油区胜坨油田坨 142 油藏,通过分层注采

优化后克里斯琴森均匀系数相比原始方案提高了3.49%，累积产油量增加了 $1.024 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，同时含水率降低了1.34%。实例应用表明该方法可以精准地控制各层间的配产和配注，有效地改善水驱油藏层间和井间的均衡驱替状况，实现增油降水的开发目标，可以为现场的开发调整提供技术支撑。

符号解释

- CU ——克里斯琴森均匀系数，%；
 $CU(x)$ ——优化目标函数；
 i ——优化的第 i 口注水井；
 I_{vwi} ——第 i 口注水井的注水速度， m^3/d ；
 $I_{vwi,k}$ ——第 i 口注水井在第 k 层的注水速度， m^3/d ；
 j ——优化的第 j 口生产井；
 k ——第 k 层；
 m ——生产井总井数，口；
 M ——随机生成的样本个数；
 n ——数值模型网格总数；
 P_{vj} ——第 j 口生产井的产液速度， m^3/d ；
 SD ——含水饱和度标准差；
 \bar{x} ——含水饱和度的平均值，小数；
 x_i ——每个网格的含水饱和度，小数；
 z ——注水井总井数，口。

参考文献

- [1] SUN Guangyi, LIU Yingxian, CHANG Huijiang, et al. A new method for plane equilibrium injection-production adjustment of water flooding reservoir [J]. Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2020, 1549(4): 42-47.
- [2] ZHI Zhong, ALEXANDER Y Sun, BO Ren, et al. A deep-learning-based approach for reservoir production forecast under uncertainty [J]. SPE Journal, 2021, 26(3): 1 314-1 340.
- [3] 冯其红, 王波, 王相, 等. 多层非均质油藏开发指标预测方法[J]. 特种油气藏, 2014, 21(4): 85-88.
 FENG Qihong, WANG Bo, WANG Xiang, et al. A method for predicting development indicators of multi-layered non-homogeneous reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(4): 85-88.
- [4] 冯其红, 王相, 王端平, 等. 水驱油藏均衡驱替开发效果论证[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(3): 83-88.
 FENG Qihong, WANG Xiang, WANG Duanping, et al. Demonstration of balanced replacement development effect in water flooding reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery, 2016, 23(3): 83-88.
- [5] 王军. 注采井网均衡驱替的产量设计[J]. 特种油气藏, 2005, 12(6): 37-39.
 WANG Jun. Production design for balanced replacement of injection and extraction well networks [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2005, 12(6): 37-39.
- [6] 严科, 张俊, 王本哲, 等. 平面非均质油藏均衡水驱调整方法研究[J]. 特种油气藏, 2015, 22(5): 86-89.
 YAN Ke, ZHANG Jun, WANG Benzhe, et al. Study of balanced water drive adjustment method for planar inhomogeneous reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(5): 86-89.
- [7] 冯其红, 王相, 王波, 等. 非均质水驱油藏开发指标预测方法[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(1): 36-39.
 FENG Qihong, WANG Xiang, WANG Bo, et al. Methodology for predicting the development index of non-homogeneous water-driven reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery, 2014, 21(1): 36-39.
- [8] 王端平, 冯其红, 张以根, 等. 基于均衡水驱理念的油藏井网及注采方案优化设计方法: CN107829718A[P]. 2018-03-23.
 WANG Duanping, FENG Qihong, ZHANG Yigen, et al. Optimization design method of reservoir well network and injection and extraction scheme based on balanced water drive concept: CN107829718A[P]. 2018-03-23.
- [9] 刘海成, 王相. 基于均衡驱替理念的水驱油藏注采设计方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35): 14 988-14 993.
 LIU Haicheng, WANG Xiang. A design method for water-driven reservoir injection and recovery based on the concept of balanced replacement [J]. Science and Technology and Engineering, 2021, 21(35): 14 988-14 993.
- [10] 马奎前, 陈存良, 刘英宪. 基于层间均衡驱替的注水井分层配注方法[J]. 特种油气藏, 2019, 26(4): 109-112.
 MA Kuiqian, CHEN Cunliang, LIU Yingxian. A layered injection method for water injection wells based on balanced replacement between layers [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(4): 109-112.
- [11] 常会江, 孙广义, 陈晓明, 等. 基于均衡驱替的平面注采优化研究与应用[J]. 特种油气藏, 2019, 26(4): 120-124.
 CHANG Huijiang, SUN Guangyi, CHEN Xiaoming, et al. Research and application of planar injection and extraction optimization based on balanced replacement [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(4): 120-124.
- [12] 陈存良, 马奎前, 王相, 等. 基于最大注水效率的平面均衡驱替方法[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(3): 124-128.
 CHEN Cunliang, MA Kuiqian, WANG Xiang, et al. A planar balanced replacement method based on maximum water injection efficiency [J]. Petroleum Drilling Technology, 2021, 49(3): 124-128.
- [13] 陈存良, 王相, 刘学, 等. 基于最大净现值的水驱多层油藏均衡驱替方法[J]. 特种油气藏, 2019, 26(1): 122-125.
 CHEN Cunliang, WANG Xiang, LIU Xue, et al. A balanced replacement method for water-driven multilayer reservoirs based on maximum net present value [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(1): 122-125.
- [14] 崔传智, 刘力军, 丰雅, 等. 基于均衡驱替的分段注水层段划分及合理配注方法[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(4): 67-71.
 CUI Chuazhi, LIU Lijun, FENG Ya, et al. Segmentation of

- water injection and reasonable injection method based on balanced replacement [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2017, 24(4): 67-71.
- [15] 孙召勃,李云鹏,贾晓飞,等.基于驱替定量表征的高含水油田注水井分层配注量确定方法[J]. *石油钻探技术*, 2018, 46(2): 87-91.
- SUN Zhaobo, LI Yunpeng, JIA Xiaofei, et al. A method for determining the stratified injection volume of water injection wells in high water-bearing oil fields based on quantitative characterization of repulsion [J]. *Petroleum Drilling Technology*, 2018, 46(2): 87-91.
- [16] 卜亚辉.基于适配关系的高含水油藏流场调控优化方法[J]. *断块油气田*, 2022, 29(5): 692-697.
- BU Yahui. Optimization method of flow field control in high water cut reservoir based on matching relationship [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2022, 29(5): 692-697.
- [17] 梁文福.大庆萨南油田特高含水期水驱注采结构优化调整方法[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(4): 53-58.
- LIANG Wenfu. Optimization and adjustment method of water drive injection-production structure in ultra-high water cut period of Sanan Oilfield, Daqing [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(4): 53-58.
- [18] 李徐佳,王华山,李楠.一维流场均匀性评价指标的修正系数及其应用[J]. *辽宁工程技术大学学报:自然科学版*, 2016, 35(10): 168-173.
- LI Xujia, WANG Huashan, LI Nan. Correction coefficient of one-dimensional flow field uniformity evaluation index and its application [J]. *Journal of Liaoning University of Engineering and Technology: Natural Science Edition*, 2016, 35(10): 168-173.
- [19] CHEN Hongwei, FENG Qihong, ZHANG Xianmin, et al. Well placement optimization using an analytical formula-based objective function and cat swarm optimization algorithm [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 157: 1067-1083.
- [20] KIM J, YANG H, CHOE J. Robust optimization of the locations and types of multiple wells using CNN based proxy models [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 193: 107424.
- [21] JANSEN J D, FONSECA R M, KAHROBAEI S, et al. The egg model—a geological ensemble for reservoir simulation [J]. *Geoscience Data Journal*, 2014, 1(2): 192-195.
- [22] RIOS L M, SAHINIDIS N V. Derivative-free optimization: a review of algorithms and comparison of software implementations [J]. *Journal of Global Optimization*, 2013, 56: 1247-1293.

编辑 王星