

引用格式:唐建信,钱坤,唐人选.苏北盆地帅垛复杂断块油田地质工程一体化高效开发实践[J].油气藏评价与开发,2021,11(3):377-383.
TANG Jianxin, QIAN Kun, TANG Renxuan. Practice of geology-engineering integration development of Shuaiduo Oilfield with complex fault in Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3):377-383.
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.03.012

苏北盆地帅垛复杂断块油田地质工程一体化 高效开发实践

唐建信,钱坤,唐人选

(中国石化华东油气分公司泰州采油厂,江苏泰州 225300)

摘要:苏北盆地帅垛油田戴南组一段油藏为中高渗复杂断块油藏,油藏驱动方式既有天然水驱也有人工水驱。投产后半井初产高,含水上升速度快,注入水单向突进,层间吸水差异大,平面上部分注采井组无响应,层间和平面开发矛盾突出。针对不同断块和油层开发矛盾,引入地质工程一体化理念,加强基础地质研究,重新认识和落实主体构造,制定和实施加密调整方案,对高含水断块加强微构造和剩余油分布研究,完善注采井网;同时开展适合帅垛油藏的卡堵水和分层注水等一系列配套工艺技术研究应用。经过近几年的开发调整,实现了油田增产稳产,连续8年产量超过 6×10^4 t,平均年产量 8.8×10^4 t,采油速度2.2%,平均含水上升率2.33%,水驱控制储量达 366.2×10^4 t,水驱控制程度86.7%,水驱动用储量 363×10^4 t,水驱动用程度86%。地质工程一体化理念在帅垛油田剩余油挖潜中的实践经验,对其他同类型油藏效益开发具有借鉴意义。

关键词:复杂断块;地质工程一体化;剩余油;深部调剖;帅垛油田;苏北盆地

中图分类号:TE313

文献标识码:A

Practice of geology-engineering integration development of Shuaiduo Oilfield with complex fault in Subei Basin

TANG Jianxin, QIAN Kun, TANG Renxuan

(Taizhou Oil Production Plant, Sinopec East China Oil and Gas Company, Taizhou, Jiangsu 225300, China)

Abstract: The reservoir of the Ed¹ in Shuaiduo Oilfield in Subei Basin is a complex fault block reservoir with medium and high permeability. Both natural water and artificial water are used in the water flooding here. After put into production, some wells have high initial production, and rapid rise in water cut. The injected water bursts in one direction, and the difference in water absorption between layers is large. Some injection and production well groups on the plane have no response. The contradictions between the layers and the plane development are prominent. In view of the development contradictions of different fault blocks and oil layers, the concept of geology-engineering integration has been introduced to strengthen the basic geological research, re-understand and implement the main structure, and then, formulate and implement intensification adjustment plans. The study of micro structure and remaining oil distribution is strengthened, and the injection-production well pattern is improved for the high water-cut fault blocks. At the same time, the research and application of a series of supporting technology such as water blocking and layered water injection suitable for Shuaiduo reservoir are also carried out. Due to the development and adjustment in recent years, the production of the oilfield keeps increasing and is stable. The annual output is above 6×10^4 t for eight consecutive years, the average annual output is 8.8×10^4 t, the oil recovery rate is 2.2%, the average water cut rise rate is 2.33%, the reserve controlled by water flooding reaches 366.2×10^4 t, the degree of water drive control is 86.7%, the reserve for water drive is 363×10^4 t, and the degree of water drive is 86%. The practical experience of the concept of geology-engineering integration in tapping the potential of remaining oil in the Shuaiduo Oilfield has a good reference significance for other similar oil reservoirs.

Key words: complex fault, geology-engineering integration, residual oil, in-depth profile modification and flooding, Shuaiduo Oilfield, Subei Basin

收稿日期:2021-01-11。

第一作者简介:唐建信(1970—),男,硕士,教授级高级工程师,本刊第二届编委会委员,主要从事提高采收率和非常规油气藏勘探开发方面的研究。地址:江苏省泰州市南通路99号,邮编225300。E-mail:tangjx.hdsj@sinopec.com

基金项目:中国石化科技项目“溱潼凹陷阜三段岩性油藏成藏规律与目标评价”(P19027-4)。

复杂断块油藏在我国各种类型油藏中占据很大比例,其投入开发的地质储量和年产油量约占总量的 $1/3^{[1-3]}$ 。目前,我国东部复杂断块油藏多数已进入高含水期和高采出程度开发阶段,剩余油分布特征受多种因素控制,导致高度分散且表征难度大 $^{[4-5]}$ 。因此,基于高含水期剩余油富集区域精准预测,形成以均衡流场、完善井网为核心的综合治理技术及配套工艺,成为复杂断块油藏效益开发的迫切需求。

从复杂断块油藏精细描述技术、剩余油分布规律综合评价及挖潜对策方面、驱替相流场强度表征方法以及断块油藏注采参数优化方面做了大量的探索研究,在断块油藏开发调整方面取得了一定的进展 $^{[6-9]}$;但研究多聚焦开发工程或者工艺技术的单一方法,对复杂断块油藏深度开发阶段油藏描述、油藏工程关键技术及与其配套的工艺技术整体集成鲜见公开报道。地质工程一体化为搭建地质研究与现场工艺技术应用之间的桥梁,能够最大限度实现油藏低成本高效益开发。美国最先提出地质工程一体化理念,实现了页岩油气的效益开发,并实现能源独立。中国也在持续加强地质工程一体化发展,胜利油田分公司盐222区块通过地质工程一体化攻关,通过深化地质认识和优化缝网压裂技术,提高“缝控储量”,建成产能 $10\times 10^4\text{t/a}^{[10]}$ 。塔里木油田在YM32油藏开发过程中,针对不同剩余油分布模式,不断调整和完善工程技术方案,建成年产能 $10\times 10^4\text{t}$ 并连续稳产4年 $^{[11]}$ 。大庆油田扶杨油藏结合裂缝监测结果,构建平行于最大地应力方向的裂缝驱替体系,日产油连续6年保持在 1.5t 左右 $^{[12]}$ 。目前地质工程一体化方法已经在国内低孔低渗油藏、页岩气藏、缝洞型油藏都取得较为成功的应用效果 $^{[13]}$,同时苏北复杂断块油藏也应用该理念获得较好的开发效果。

帅垛油田戴南组位于苏北盆地溱潼凹陷的内斜坡带的中部,为典型的断块破碎、储层强非均质的“双复杂”岩性—构造复合型油藏,面临断块破碎、油水关系复杂、储量规模小等诸多困难。本文围绕油田进入中高含水期后暴露出的问题和矛盾,以流程调控、改善水驱开发效果为综合治理目标,阐明了井震联合复杂断块油藏构造精细描述技术、基于物性时变数值模拟方法的剩余油预测技术、复杂断块油藏整体深部调剖技术和改善开发效果的配套工艺技术综合应用方法,探索了一条适用于复杂断块油田深度开发的地质工程一体化技术实施路线,并取得

了良好的增油降水的矿场实施效果,为同类油田深度开发阶段的综合调整、改善水驱开发效果提供借鉴。

1 开发矛盾

帅垛油田2011年投入开发,2012年采用不规则三角形井网注水开发,但含水上升速度快,注入水单向突进严重,纵向上层间吸水差异大,平面上注采井对应程度低,同时受低序级断层、微构造、沉积微相、储层非均质性等多方面因素影响,油藏流场更加复杂,严重影响了开发效果。

1.1 油水关系复杂

帅垛油田构造极为复杂、油水关系认识不清,主要体现在3个方面:①同一断块,物性相同,产液量相同,但动液面相差较大;②储采严重不匹配,例如帅1断块Ⅲ油组开发6年采油速度平均为 7.33% ,含水从 26.8% 上升到 28.5% ,含水仅上升 1.6% ,但该断块储量仅 $24\times 10^4\text{t}$,而相邻帅3断块储量 $57.3\times 10^4\text{t}$,采油速度 2% ,相同时间含水从 38% 上升到 60% ,含水上升了 22% ;③同一断块注采无响应,例如注水井帅1-3B并于2012年4月投注,日注 60m^3 ,对应 300m 井距处的邻井帅1井动液面产量均无明显响应,而井距达 700m 的帅1-平1井响应明显。

1.2 储层平面层间矛盾突出

帅垛区块含油层段具有明显的上细下粗的正旋回沉积特征,岩心物性实验表明,研究区戴南组I、II、III油组储层非均质变异系数分别为 0.82 、 0.72 、 0.69 ,突进系数分别为 5.0 、 4.2 、 3.6 ,储层纵向非均质性强。主力油藏分布在8个断块,均为天然水驱,其中帅1-8、帅3等III油组油藏为刚性水驱,边底水能量充足,初期部分井自喷生产,产量 $14\sim 32\text{t/d}$,由于采油速度快,边底水推进快,位于油水边界附近的油井很快水淹。帅1-4等II油组油藏砂体厚度、平面物性及含油性差异较大,具有一定的弱边水天然能量,驱动方式主要为人工水驱,储层非均质性强导致注入水单向突进明显,如帅1-4等4口井注入水单向指进,而帅1-6等3口老井转注后,周边采油井未见明显动态响应,部分断块尚未建立起有效驱替系统,平面波及系数低,水驱动用程度低。

2 稳产增产技术

通过近几年的不断探索,在构造精细研究、剩余油的认识和储层非均质描述方面都取得了突破性进展,总结出了一套适合帅垛油田的稳产开发技术和做法。受内部夹层遮挡、储层非均质性强等影响,开发中后期零星剩余油区普遍发育,如何做好精细油藏描述,进一步提高剩余油预测精度,对下一步极限挖潜、延缓油田递减尤为重要。

2.1 井震联合复杂断块油藏构造精细描述技术

针对帅垛油田复杂小断块的构造特点,增补近年新钻井分层数据,依据“旋回对比,分级控制”陆相地层对比方法,结合三维地震地质解释,构建了帅垛油田戴南组小层级别等时地层格架。从苏北盆地区域构造背景和古地应力条件出发,建立了帅垛油田戴南组断裂发育模式。以井身断点识别为基础,以地震资料断层强化处理数据体和高分辨率处理数据体等“双体”解释结果为井间地层和断层规模的约束,在地质模式的指导下进行了帅垛油田复杂断块断层解释和空间组合的精细构造研究,重新落实了帅垛戴南组油藏断裂系统和微型构造。研究表明,随着井控程度增加和地震资料重新处理以及利用“双体”进行解释,研究区戴南组新构造格局发生了明显的变化,其中主力断块构造变化较大,3个主要断块帅1、帅3、帅1-8等基本合并成大断块,形成了一个相对简单、构造完整的整装油藏,新老构造对比见图1。新构造图解决了Ⅲ油组开发中存在储采不匹配、动液面不一致、注采无响应等诸多问题。如老构造图中,注水井帅1-3B与采油井帅1井处于同一断块,但注采无响应;调整后的新构造,两井之间有断层;而帅1平1、帅5-8水淹严重,与帅1-3B均处于断层外。重新认识后的井位构造,部分区块井距较大,储量控制程度低,有加密调整潜力。

2.2 基于物性时变数值模拟方法的剩余油预测技术

剩余油分布规律及富集区域的精准预测是油田深度开发阶段油藏精细描述的关键任务^[14-16]。中高渗油田在开发中后期经注入水的长期冲刷逐渐形成优势通道,导致储层物性参数及相对渗透率曲线将会发生变化,而常规数值模拟方法并未考虑储层物

性时变和相对渗透率曲线端点值的变化,导致模拟结果与实际情况不完全符合,从而影响数值模拟预测结果与实际情况不相符^[17-20]。岩心敏感性实验表明,戴一段储层具有强速敏、中等水敏、弱酸敏、弱碱敏的特征(表1)。因此,帅垛油田深度开发阶段剩余油预测及方案优化须考虑储层物性时变效应的影响,模拟预测结果更可靠。

表1 苏北盆地帅垛油田戴南组油藏敏感性试验
Table 1 Reservoir sensitivity test of Dainan Formation in Shuaiduo Oilfield of Subei Basin

地层	实验项目	断块	实验参数	实验结果
Ed'	速敏	帅1	临界流速 1.062 m/d	强速敏
	水敏	帅1	水敏伤害指数 46 %	中等偏弱水敏
	酸敏	帅1	酸敏伤害指数 22 %	弱酸敏
	碱敏	帅1	碱敏伤害指数 16 %	弱碱敏

根据帅垛戴南组物性数据及岩心驱替实验,建立了一维岩心数值实验模型(图2)。以该模型某一网格节点为研究对象,统计不同模拟时间下此网格的含水饱和度以及流经此网格节点的总注水体积和前缘孔隙存水量,其中,水驱前缘网格节点的注水冲刷量为总注水体积与前缘孔隙存水量之差。以水驱前缘的含水饱和度变化和通过网格节点的注水冲刷量为描述对象,建立前缘含水饱和度变化量与注水冲刷倍数的关系。基于岩心数值实验结果,采用多元回归方法,推导出渗透率变化倍数与网格节点含水饱和度的变化关系,以等效实现注水开发过程中储集层渗透率的时变数值模拟。

帅8-6断块为帅垛油田主力断块之一。基于精细构造解释结果和新钻井动静态数据,重新构建了帅8-6断块Ⅱ油组三维精细地质模型。平面上孔隙度与渗透率在中部较高,在断层附近较低。应用考虑物性时变的油藏数值模拟方法在帅垛油田戴南组油藏地质储量和开发历史拟合基础上,建立了目前开发阶段剩余油预测模型。模拟结果表明,断块中部注采井网完善区注水波及系数较高,剩余油饱和度整体较低,但亦存在由于非主流线波及区造成的剩余油,如帅8-6井。而由于S1断层的遮挡作用,帅8-6断块剩余油主要集中在断层附近区域(图3),成为下一步挖潜的重要方向,加密井部署见图4。

2.3 基于整体深部调剖断块油藏水驱储量动用技术

帅垛油田戴一段油藏非均质普遍严重,平面上

油藏渗透性、油藏厚度、含油级别存在较大差异。由于长期注水开发和开发方式频繁转换,帅垛油田戴南组部分井进入特高含水期开发阶段后动态非均质变强,渗透率增大,孔喉半径增大,层间、层内矛盾加剧,无效和低效水循环导致水驱开发效果变差。各断块之间水驱动用程度和储量控制程度差异巨大,严重制约了帅垛油田整体开发效益。因此,亟须形

成复杂断块油田深度开发阶段改善水驱开发效果、提高水驱储量动用程度的技术方法。

室内实验及矿场实践表明,注入调堵剂可改善油水井的产吸剖面,使油藏深部液流转向,扩大注水波及体积,降低自然递减速度,从而进一步提高油田水驱储量动用程度和最终采收率。堵水调剖技术是油田深度开发阶段改善注水开发效果、实现油藏稳

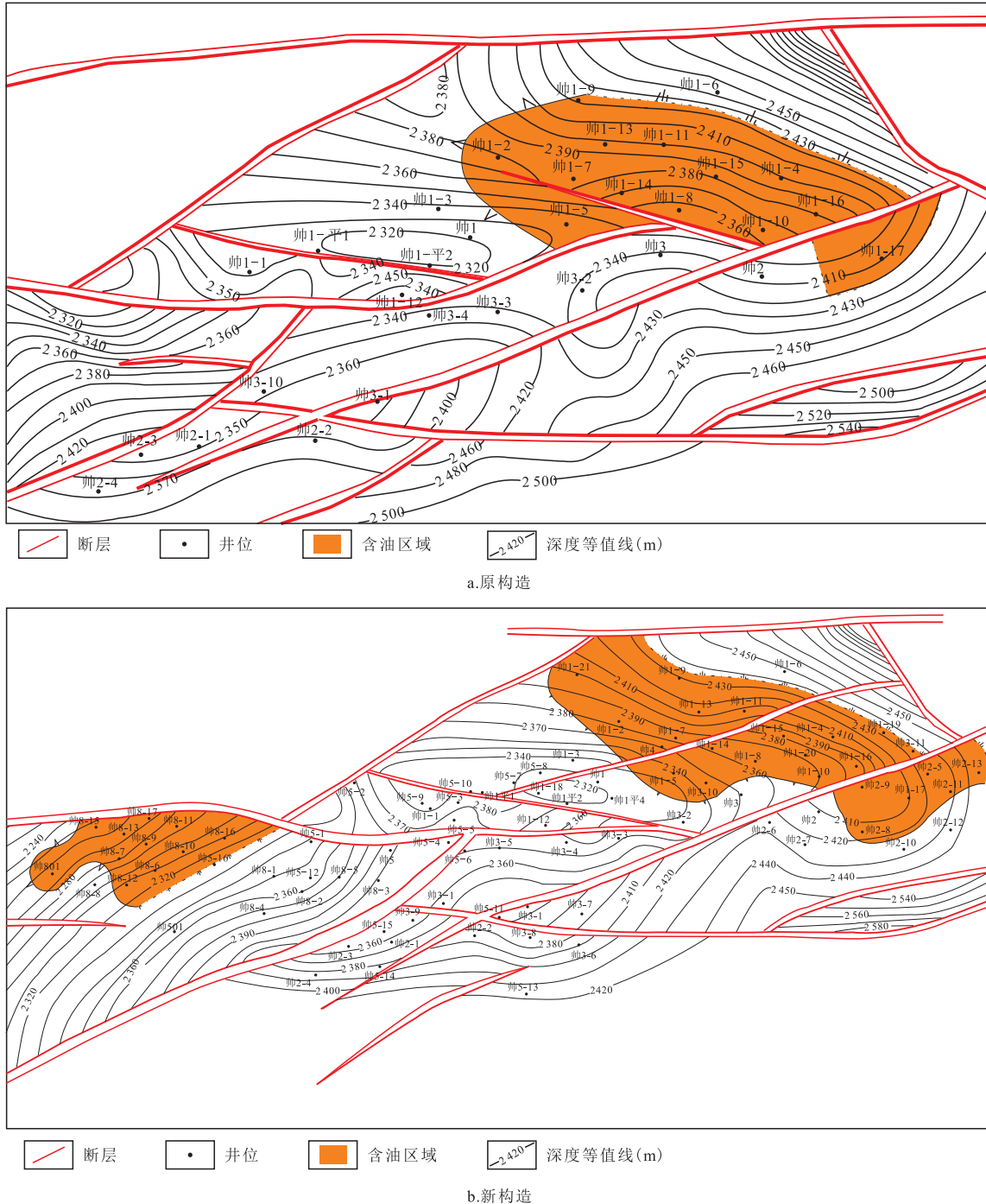


图1 苏北盆地帅垛油田戴南组油藏Ⅱ油组更新前后顶面构造

Fig. 1 Comparison of top structure of Dainan II Oil Formation of Shuaiduo Oilfield in Subei Basin before and after update

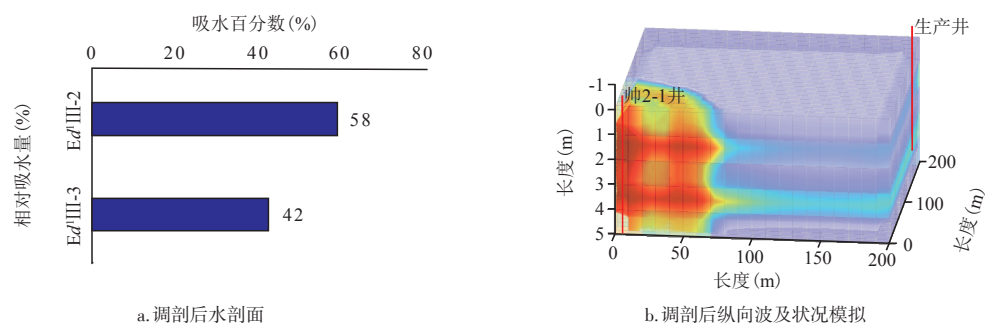


图5 苏北盆地帅垛油田帅2-1井调剖后吸水剖面及纵向波及状况

Fig. 5 Water absorption profile and longitudinal spread after profile control of Well-Shuai-2-1 in Shuaiduo Oilfield of Subei Basin

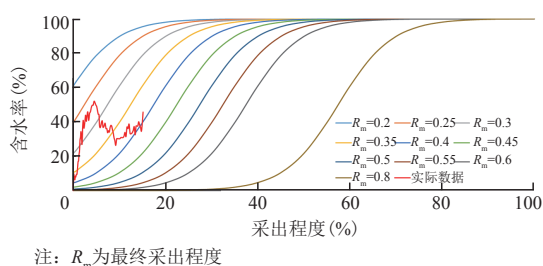
注: R_m 为最终采出程度

图6 苏北盆地帅垛戴南组油藏含水率与采出程度变化曲线

Fig. 6 Variation curve of water content and recovery degree of reservoirs in Dainan Formation of Shuaiduo Oilfield in Subei Basin

分类治理工艺等研究,为深度开发阶段稳产增产打下基础。

通过部署调整井16口,投转注水18口,调剖堵水14口,实现控(水)提(液)并举,调(驱、剖)堵(水)结合,水驱控制程度由初期的74.4%提高至86.7%。油田连续8年年产量超过 6×10^4 t,平均采油速度2.22%,平均含水上升率2.33%;连续6年自然递减率小于10%,平均自然递减率6.34%,综合递减率3.4%,实现了帅垛油田增产稳产,预测水驱采收率约40%(图6)。几年来,区块盈亏平衡点持续降低,最低降至29.4美元/桶,超过苏北盆地复杂断块油藏平均水平。

4 结论

1) 有效利用新钻井资料及生产动态数据,动静结合,井震联合,提高油藏构造描述精度、深化油藏地质认识。

2) 建立精细化、高分辨的油藏地质模型是复杂

断块油藏开发中后期剩余油预测、综合治理方案编制的键。

3) 建立以“均衡流场、扩大波及”为目标,以时变数值模拟方法和整体深部调剖为手段的复杂断块油藏精细注水技术,完善了注采系统,提高了水驱储量控制程度和动用程度。

参考文献

- [1] KOVSCEK A R, CASTANIER L M, GERRITSEN M G. Improved predictability of in-situ-combustion enhanced oil recovery[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2013, 16(2): 172-182.
- [2] 蒋永平. 复杂断块油藏高含水期化学剂强化 CO_2 复合驱提高采收率技术[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(5): 654-658.
JIANG Yongping. Enhanced oil recovery technology of chemicals & carbon-dioxide combined flooding in high water cut stage of complex fault block reservoir[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(5): 654-658.
- [3] LIU J S, DING W L, DAI J S, et al. Quantitative prediction of lower order faults based on the finite element method: A case study of the M35 fault block in the western Hanliu fault zone in the Gaoyou sag, East China[J]. Tectonics, 2018, 37(10): 3479-3499.
- [4] 王伟. 喇嘛甸油田水驱二次开发方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(2): 69-73.
WANG Wei. Secondary developing methods for the waterflooding of Lamadian Oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(2): 69-73.
- [5] 张胜利, 黄咏梅, 牛明超, 等. 埕岛油田跟踪优化注水开发及效果[J]. 西南石油学院学报, 2003, 25(5): 46-48.
ZHANG Shengli, HUANG Yongmei, NIU Mingchao, et al. Tracking optimum development by water injection and achieve effect in Chengdao Oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2003, 25(5): 46-48.
- [6] 陈祖华, 吴公益, 钱卫明, 等. 苏北盆地复杂小断块油藏注 CO_2 提高采收率技术及应用[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(1): 152-162.
CHEN Zuhua, WU Gongyi, QIAN Weiming, et al. EOR technology and application of CO_2 injection for small complex fault block reservoirs in Subei Basin[J]. Petroleum Geology and

- Recovery Efficiency, 2020, 27(1): 152-162.
- [7] 李留仁,袁士义,胡永乐.合理注采井数比与合理压力保持水平的确定[J].西安石油大学学报(自然科学版),2011,26(3):59-61.
LI Liuren, YUAN Shiyi, HU Yongle. Determination of reasonable ratio of injectors to producers and reasonable pressure maintenance level[J]. Journal of Xi'an Shiyu University(Natural Science), 2011, 26(3): 59-61.
- [8] 唐人选,谈士海,郎春艳.多油层合采的油井产液及含水特征分析[J].中国海上油气(地质),2003,17(2):118-122.
TANG Renxuan, TAN Shihai, LANG Chunyan. An analysis of liquid production and water cut in commingled multiplezone producing wells[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2003, 17(2): 118-122.
- [9] 耿娜,缪飞飞,刘小鸿,等.水驱储量动用程度计算方法研究[J].断块油气田,2014,21(4):472-475.
GENG Na, MIAO Feifei, LIU Xiaohong, et al. Calculation method of reserves producing degree of water flooding[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2014, 21(4): 472-475.
- [10] 万绪新,谢广龙,丁余刚.胜利油田难动用石油储量地质工程一体化探索[J].中国石油勘探,2020,25(2):43-50.
WAN Xuxin, XIE Guanglong, DING Yugang. Exploration on geology-engineering integration of hard-to-recover reserves in Shengli Oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 43-50.
- [11] 常少英,朱永峰,曹鹏,等.地质工程一体化在剩余油高效挖潜中的实践及效果——以塔里木盆地YM32白云岩油藏为例[J].中国石油勘探,2017,22(1):46-52.
CHANG Shaoying, ZHU Yongfeng, CAO Peng, et al. Application of geology-engineering integration in high-efficiency remaining oil potential tapping and its results: a case study on YM32 dolomite oil reservoirs in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1): 46-52.
- [12] 殷代印,项俊辉,王东琪.大庆油田长垣外围特低渗透扶杨油层综合分类[J].岩性油气藏,2018,30(1):150-154.
YIN Daiyin, XIANG Junhui, WANG Dongqi. Classification of Fuyang oil reservoir with ultra-low permeability around placanticline of Daqing Oilfield[J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(1):150-154.
- [13] 胡文瑞.地质工程一体化是实现复杂油气藏效益勘探开发的必由之路[J].中国石油勘探,2017,22(1):1-5.
HU Wenrui. Geology-engineering integration—a necessary way to realize profitable exploration and development of complex reservoirs[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1): 1-5.
- [14] 吴君达,李治平,孙妍,等.基于神经网络的剩余油分布预测及注采参数优化[J].油气地质与采收率,2020,27(4):85-93.
WU Junda, LI Zhiping, SUN Yan, et al. Neural network-based prediction of remaining oil distribution and optimization of injection-production parameters[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(4): 85-93.
- [15] 袁春晖,万玉金,刘晓华,等.龙王庙组气藏X井区储层非均质性精细描述[J].特种油气藏,2019,26(2):121-126.
YUAN Chunhui, WAN Yujin, LIU Xiaohua, et al. Fine characterization of reservoir heterogeneity in the wellblock X of Longwangmiao Formation[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(2): 121-126.
- [16] 文华,孙娜.一种定量描述气藏储层非均质性的新方法[J].特种油气藏,2011,18(1):51-53.
WEN Hua, SUN Na. A new quantitative description method of gas reservoir heterogeneity[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18(1): 51-53.
- [17] AHAMADI M A. Connectionist approach estimates gas-oil relative permeability in petroleum reservoirs: Application to reservoir simulation[J]. Fuel, 2015, 140: 429-439.
- [18] XIAO B Q, FAN J T, DING F. Prediction of relative permeability of unsaturated porous media based on fractal theory and Monte Carlo simulation[J]. Energy & Fuels, 2012, 26(11): 6971-6978.
- [19] NASVI M C M, RANJITH P G, SANJAYAN J, et al. Sub- and super-critical carbon dioxide permeability of wellbore materials under geological sequestration conditions: An experimental study[J]. Energy, 2013, 54(2): 231-239.
- [20] ABDELAZIM R. An integrated approach for relative permeability estimation of fractured porous media: Laboratory and numerical simulation studies[J]. Journal of Petroleum Exploration & Production Technology, 2016: 1-18.

(编辑 黄颖)