

基于动静态资料的多期叠置储层水驱效果评价

刘永福¹, 李宁², 李洪¹, 周静萍², 黄时祯¹, 鲁明宇²

1. 中国石油塔里木油田分公司轮南采油气管理区 新疆库尔勒 841000

2. 中国石油集团测井有限公司地质研究院 陕西西安 710075

通讯作者:Email: lin010sccj@cnpc.com.cn

项目支持:中国石油塔里木油田分公司科学研究与技术开发项目“台盆区碎屑岩油藏百万吨稳产技术研究”(T202312)

引用:刘永福, 李宁, 李洪, 等. 基于动静态资料的多期叠置储层水驱效果评价[J]. 油气井测试, 2023, 32(6): 72-77.

Cite: LIU Yongfu, LI Ning, LI Hong, et al. Evaluation of water flooding effect of multi-stage superimposed reservoir based on dynamic and static data [J]. Well Testing, 2023, 32(6): 72-77.

摘要 多期沉积储层会形成曲流河、辫状河、三角洲等不同砂体构型模式,不同砂体叠置关系及内部构型特征使水淹规律、水驱开发效果多解性强。精细立体开展水驱效果评价成为制约老油田剩余油有效挖潜的主要因素。在充分利用井间示踪剂资料、油水井生产数据分析注采对应关系的基础上,结合区域井间砂体连通关系明确水驱优势方向,分析水驱连通层位,从见效时间、平面、纵向三个维度深入剖析水驱规律,基于多资料开展水平井砂体构型刻画,明确剩余油富集层位,采取挖潜措施,使停产老井 X10-H2 井日产液 9 t,日产油 2.32 t。研究证明动静结合多维度综合评价薄互储层水驱效果措施有效率提升了 10%。该方法为老油田“压舱石工程”提供了可靠的技术支撑和示范模板。

关键词 多期叠置储层;井间示踪剂;水驱效果评价;注采分析;挖潜措施;砂体构型;剩余油挖潜;地质综合研究

中图分类号:TE353

文献标识码:B

DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.06.012

Evaluation of water flooding effect of multi-stage superimposed reservoir based on dynamic and static data

LIU Yongfu¹, LI Ning², LI Hong¹, ZHOU Jingping², HUANG Shizhen¹, LU Mingyu²

1. Lunnan Oil and Gas Production Management Area, Tarim Oilfield, Petrochina, Korla, Xinjiang 841000, China

2. Geological Research Institute of China Petroleum Logging Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710075, China

Abstract: It is difficult to evaluate the water flooding effect of multi-stage superimposed reservoir, and the law of water flooding is not well understood, which become the main reasons restricting the effective exploitation of remaining oil in old oilfield. In this paper, on the basis of making full use of interwell tracer data and oil-well production data to analyze the corresponding relationship between injection and production, the dominant direction of water drive is defined according to the connectivity relationship between wells and sand bodies, and the connected horizon of water drive is analyzed. The law of water drive is analyzed from three dimensions: response time, plane and vertical. Based on multiple data, the sand body configuration of horizontal wells was described, the remaining oil enrichment horizon was defined, and suggestions on potential exploitation measures were put forward successively to help X10-H2 well produce 9 tons of fluid per day and 2.32 tons of oil per day, so that the discontinued old well could gain “new life”. It is proved that the method of multi-dimensional comprehensive evaluation of thin interreservoir water flooding effect combined with dynamic and dynamic can make the results more accurate, reasonable and reliable, and the measure efficiency can be increased by 10%. This method provides a reliable technical support and demonstration template for “ballast stone engineering” in old oil fields.

Keywords: multi-stage superimposed reservoir; cross-well tracer; evaluation of water flooding effect; injection and production analysis; suggestions on potential exploitation measures; sand body configuration; tap the potential of remaining oil; comprehensive study of geology

注水开发已经成为油田普遍采用的一种方式^[1-2]。精细水驱开发可以提高油藏波及体积及水驱动用程度,提高最终采收率,已经成为油田高

效开发的核心技术。多期叠置储层砂体内部构型和砂体间的叠置结构直接控制水驱开发效果,复杂的砂体叠置关系使得精细水驱效果评价变的困

难,多解性增强^[3-6]。国内外学者对砂体构型研究主要集中在储层沉积特征、储层静态精细描述等方面,有关砂体叠置结构及构型特征与水驱效果之间关系的研究较少,在高含水油田开发中后期,明确砂体构型对水驱规律研究以及开发调整技术对策制定具有重要现实意义^[7-10]。同时长期注水开发使得储层物性发生改变,非均质性增强,水驱规律认识更加复杂^[11-12]。现阶段我国许多油田已经步入特高含水期,单井日产油水平急剧下降,注入水地下存水率越来越低,特高含水期水油比急剧增大,阶段水驱开发效果变差^[13-15]。精细水驱效果评价是解决低效无效水循环、提高水驱动用程度的重要手段,是一项综合性研究,要求在提高单项技术精度的同时,必须采取地质、测井、油藏工程多学科联合攻关,利用一切可利用的动、静态信息,保证水驱效果评价的准确性。为复杂构造老油田持续稳产、剩余油精细挖潜提供详实依据及参考。

1 区块地质及开发概况

本文以塔里木盆地轮南油田 X10 井区为研究靶区,在多期叠置储层地质认识基础上,通过井间示踪剂、油水井动态数据对水驱见效时间、油藏平面水驱规律进行分析研究,通过井间砂体连通关系、射孔注采对应情况研究纵向水驱规律,然后从水驱见效时间、平面、纵向多维度综合评价水驱开发效果及剩余油富集主控因素,提出针对性的剩余油挖潜措施建议(见图 1)。

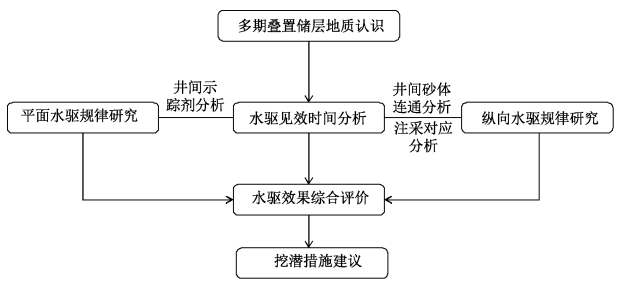


图 1 多期叠置储层水驱效果评价技术流程
Fig. 1 Evaluation technical process of water flooding effect in multi-stage superimposed reservoir

1.1 区块地质特征

轮南油田钻遇的地层自上而下依次为第四系、第三系、白垩系、侏罗系、三叠系、石炭系和奥陶系,缺失二叠系、泥盆系和志留系。轮南油田纵向上含油层系多:E、K、J、T 均发育有含油砂层;平面上含油区块多:从西向东依次为 X1 井区、X26 井区、X2

井区、X3 井区、X10 井区,均为中孔、中渗储层,储层非均质性严重,主要油藏类型为层状边底水构造油藏。X10 井区为典型的多期叠置砂岩储层,通过 X10 井测井综合解释得出三叠系 T₁ 油组是研究区的主力油层,自下而上分别发育辫状河、水下分流河道、曲流河沉积。T₁³ 下部为辫状河沉积,经岩心观察以砂砾岩和含砾粗砂岩为主,下粗上细正旋回特征明显,底部常见冲刷面构造,常见钙质夹层;T₁³ 上部以粉砂岩、细砂岩为主,灰黑色粉砂质泥岩中发育水平层理,小型波状层理,沉积水动力明显减弱,为水下分流河道沉积;T₁² 岩性以细、中砂岩为主,底部见薄层底砾岩或泥砾,向上岩性逐渐变细,正旋回特征明显,为曲流河沉积。

1.2 区块开发特征

X10 井区是塔里木盆地轮南油田最早投入开发区域之一,井区 T₁ 油组自 1990 年投入开发以来,探明原油 260×10⁴ t,累产 85×10⁴ t,采出程度 32%,总井数 13 口,先后经历了稀井高产、天然能量开发稳产、低速低产、综合治理等阶段。2021 年年产油 0.21×10⁴ t,目前 2 口油井生产,日产油 6 t,含水率 94%,1 口注水井,日注水 38 m³。目前处于“高含水、高采出程度、低采油速度”开发阶段,通过动静态资料开展精细水驱效果评价对于提高油藏开发水平、最终采收率至关重要。

2 水驱效果评价研究

水驱效果评价是油藏动态分析的主要内容,通过动静态资料的综合应用分析,利用的动态资料主要包括生产测井资料、油水井生产数据等,静态资料包括测井解释成果、砂体连通图等地质图件。深入认识水驱规律,提高油藏水驱开发效果。

2.1 平面水驱规律研究

生产测井资料丰富贴近于油田开发现状,各监测项目从不同角度反映油水井注采状况,是油藏动态评价不可或缺的资料,为提高水驱开发水平提供了重要支撑^[16-18]。注产剖面是以明确注水井(采油井)各小层纵向注入量(采出量)的动态监测方法。井间示踪剂是通过注水井注入微量物质示踪剂对采油井进行取样监测,来实现井组范围内注采连通信息判别。生产测井资料是研究平面水驱规律、判断储层非均质性、井间连通性、查明注入水推进方向与水驱速度到评价各种措施效果的重要资料^[19-20]。

为深入研究 X10 井区范围内注水驱替条件下油水井连通情况,2016 年分别对 X10-1、X10-H3、X10-8H 注水井进行井间示踪剂监测(见表 1)。通过 X10 井区 T_1 油藏参数及井组地层物性分析,

分别选用微量物质 CF-BA01、CF-BA03、CF-BA05 作为注入示踪剂,用量均为 9.8 kg。经取样分析,3 口注水井均在 X10-H2 井见剂(如图 2 黑色虚线箭头所示)。

表 1 X10-H2 井示踪剂监测统计表
Table 1 X10-h2 well tracer monitoring statistics

测试年份	注水井号	见剂井号	示踪剂种类	井距/ m	平均渗透率/ mD	峰值浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	见剂时间/ d	水驱前缘推进 速度/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)
2016	X10-1		CF-BA01	1 242	4 645	9.67	249	4.99
	X10-H3	X10-H2	CF-BA03	350	2 645	42.00	210	1.67
	X10-8H		CF-BA05	674	2 895	7.46	180	3.74

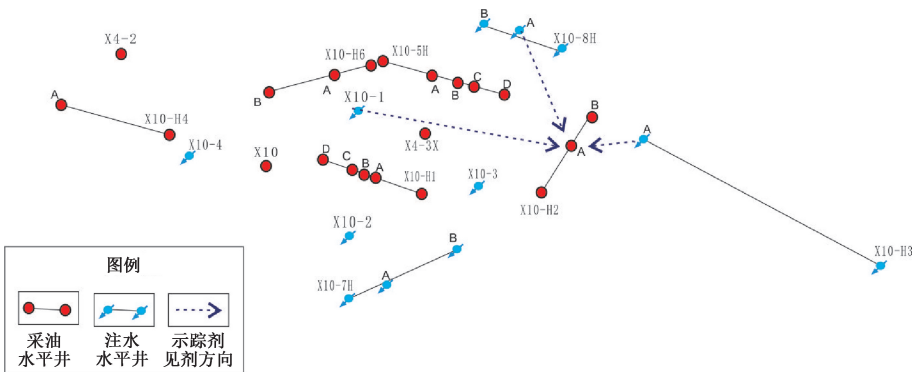


图 2 X10-H2 井示踪剂见剂示意图
Fig. 2 X10-H2 well tracer see agent schematic diagram

通常依据储集层渗透率、孔喉半径等参数将轮南油田 T_1 油组水淹层分为高渗透水淹层、大孔道水淹层和特大孔道水淹层 3 类。经过现场实践统计:渗透率 50~8 000.00 mD,孔喉半径小于 30.00 μm 的水淹层属高渗透水淹层;渗透率为 8 000.00~94 000.00 mD,孔喉半径为 30.00~100.00 μm 的水淹层为大孔道水淹层;渗透率大于 94 000.00 mD,孔喉半径大于 100.00 μm 的水淹层为特大孔道水淹层。依据以上标准判定该井组井间连通通道所在层位均为高渗透水淹层。平面上,X10-H2 井受西、东、北三个方向注水影响,其中 X10-1 井水驱前缘速度达到 4.99 m/d,计算渗透率为 4645 mD 均为最高,三口注水井中该井注水驱替贡献最大。

2.2 纵向水驱规律研究

单砂体分析基于地质资料、测井资料等开展,通过解剖多期次河道形成的复合砂体,识别出单一河道,明确单期次河道单砂体的空间展布及井间连通情况,为注采调整提供依据支撑。结合过 X10-1 井-X10-H2 导眼井-X10-H3 导眼井砂体连井剖面图(见图 3)分析, T_1^3 水动力强,微相类型以河道主体和

水下分流河道为主,存在厚度较大、横向连续好的大套砂体如 T_1^{3-4} 、 T_1^{3-3} 、 T_1^{3-1} 。到 T_1^2 沉积时,水动力明显减弱,砂体规模变小,主要沉积水下分流河道、河道侧翼和

水下分流河道间沉积, T_1^{2-1} 、 T_1^{2-2} 砂体间存在泥质夹层。在 T_1^2 、 T_1^3 层间存在厚度稳定的泥岩隔层。具体油水井连通分析,X10-1 井注水层段在 T_1^{3-4} 、 T_1^{3-3} 、 T_1^{2-2} 、 T_1^{2-1} ;X10-H3 井注水层段在 T_1^{3-1} 、 T_1^{2-2} 、 T_1^{2-1} ;X10-8H 井注水层段在 T_1^{3-1} 、 T_1^{2-1} 。X10-H2 井采油层段在 T_1^{3-2} 、 T_1^{3-1} 、 T_1^{2-2} 、 T_1^{2-1} 。结合区域动态监测资料,在区域内存在明显的层间吸水差异, T_1^3 层受储层物性及砂体连通影响吸水明显好于 T_1^2 层。综合判断, T_1^3 层水驱状况好于 T_1^2 层,具体到单砂体上 T_1^{3-3} 、 T_1^{3-1} 水驱动用程度最高, T_1^{3-2} 、 T_1^{2-2} 、 T_1^{2-1} 依次变差。

2.3 水驱效果综合评价

2.3.1 水平井构型分析

水平井作为多期叠置储层剩余油挖潜的主要生产形式。相比定向井而言,水平井可以在平面上体现储集层更多横向变化信息。但水平井井轨迹受围岩影响,测井解释容易出现偏差,因此水平井构型不能单纯依靠测井解释结果来划分单砂体期次,必须在沉积模式约束下,以直井

的单砂体构型为基础,综合考虑隔夹层、构造、测井解释、储层物性、地层垂厚、钻录井资料和生产动态信息,多维衡量,判定砂体钻穿河道期次以

及井间砂体连通关系,平面砂体展布规律。依此进行产量劈分,预测剩余油分布,制定挖潜措施建议更具针对性。

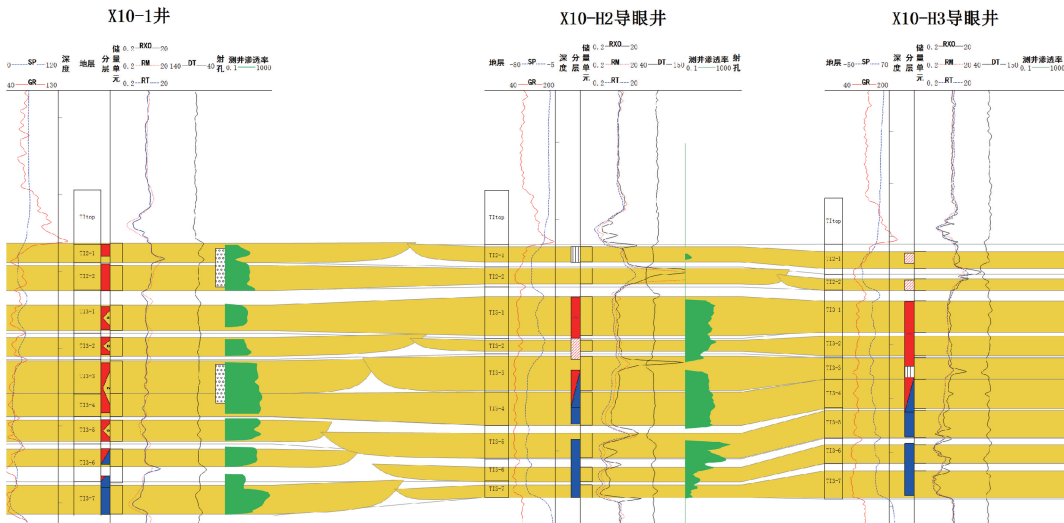


图 3 X10-1 井、X10-H2 导眼井、X10-H3 导眼井砂体连井剖面图
Fig. 3 X10-1 well X10-H2 pilot well X10-H3 pilot well sand body connecting well profile

X10-H2 水平井(见图 4) T_1^{2-1} 层顶靶点海拔 (-3 800. 69 m) 高于导眼井(-3 802. 69 m) 2 m, 而 T_1^{3-1} 顶泥岩海拔相同, 均为 -3 807. 5 m, 表明向靶点方向, T_1^2 厚度增加, 说明改层为点坝沉积具有一定挖潜潜力。其中 4 812. 5~4 824 m (T_1^{2-1}) 段为点坝边部沉积(垂厚约 3. 4 m), 向两侧均逐渐歼灭为废弃河道沉积; 4 834. 7~4 848. 1 m (T_1^{2-2}) 段为点坝沉积(垂厚 2 m), 向两侧点坝均逐渐歼灭为废弃河道底部沉积。4 851~4 871 m 钻遇 T_1^{3-1} 顶泥岩(垂厚约 2 m)。4 871~4 902 m 灰色粉砂质泥

岩,测井解释差油层,表明为河道边部(T_1^{3-1}), 4 900~4 975 m (垂厚约 0. 5 m) 钻遇浅灰色荧光细砂岩,测井解释为油层,测井曲线特征与前段有明显变化,表明进入另一条河道(T_1^{3-2})。依次构型结果利用 KH 法进行累产油产量劈分, T_1^3 层累产油 $12. 70 \times 10^4$ t, T_1^2 层 $2. 92 \times 10^4$ t, 说明 X10-H2 井主产层段主要在 T_1^{3-2} 、 T_1^{3-1} 段, 结合直井井间连通关系研究, T_1^3 层水驱状况好于 T_1^2 层, T_1^{2-1} 、 T_1^{2-2} 段具有明显的点坝沉积特征, 作为次产层应具有进一步挖潜潜力。

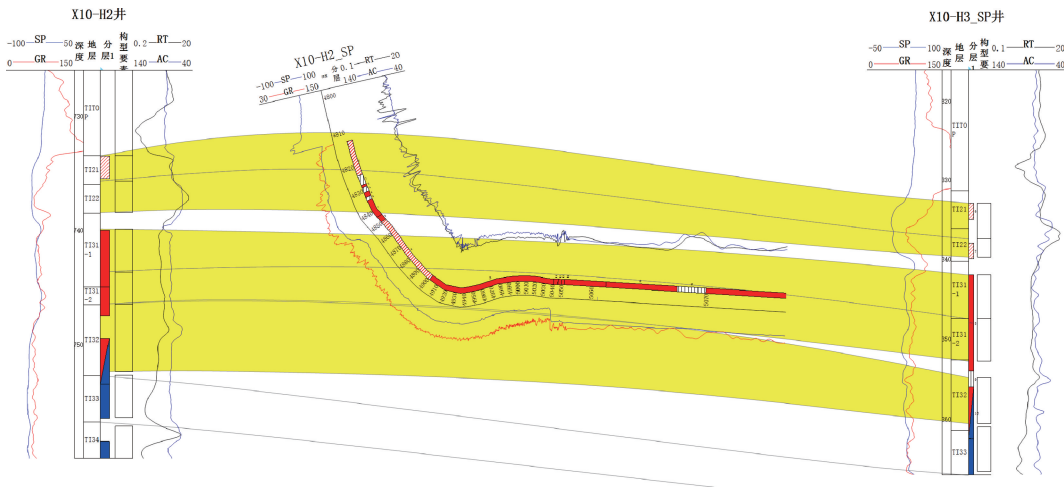


图 4 X10-H2 水平井砂体构型剖面图
Fig. 4 Profile of sand body configuration in X10-H2 horizontal well

2. 3. 2 剩余油挖潜措施建议及效果分析

依据水平井构型分析及产量劈分结果,建议针

对 X10-H2 井封堵泥岩(4 860 m)以下层段,单采 T_1^2 段(4 812~4 850 m)。2023 年 5 月对该井挤水泥封



堵 4 860 m 以下射孔井段,重新补孔 T_1^{2-1} 、 T_1^{2-2} : 4 812~4 860 m。X10-H2 井 2019 年因高含水关井,2023 年堵水措施后,日产液 9 t,日产油 2.32 t,含水 74.2%,该措施对 T_1^2 层剩余油进行了有效挖潜,助力高含水老油藏最终采收率提高。

3 结论

(1)多期叠置砂岩储层沉积体系复杂,通过测井、岩心资料综合分析确定各层段沉积体系是水驱效果评价的基础。X10 井区 T_1^3 下部为辫状河沉积, T_1^3 上部为水下分流河道沉积, T_1^2 为曲流河沉积。

(2)动态监测资料作为油藏开发监测一手资料,井间示踪剂可以在平面上明确水驱范围及主要方向,辅助砂体井间连通判别,通过动静态资料综合分析使评价结果更加立体、精细。平面上,X10-H2 井受西、东、北三个方向注水影响,X10-1 影响最大;纵向上, T_1^3 层水驱状况好于 T_1^2 层,剩余油主要富集于 T_1^2 层。

(3)通过多资料结合、多方法联动开展水平井砂体构型技术研究可以最大限度克服单一资料的多解性,提高剩余油预测的准确性。为老油田措施挖潜提供了详实依据和支撑,为国内高效开发同类油藏、“压舱石工程”成功实施提供借鉴。

致谢:感谢李震和尹元华在技术研究、论文修改、测井解释方面做出的帮助与贡献。

参考文献

- [1] 李宁,吴迪,陈彦竹,等. 动静态测井测试资料在井组水驱效果评价中的应用[J]. 测井技术,2021,45(2): 207-212.
LI Ning, WU Di, CHEN Yanzhu, et al. Application of dynamic and static logging and testing data in evaluation of waterflood effect of well group[J]. Well Logging Technology, 2021,45(2): 207-212.
- [2] 秦民君,李宁,郑小敏,等. 生产测井资料在低渗透裂缝性油藏精细数值模拟中的应用[J]. 测井技术,2018,42(6): 684-688.
QIN Minjun, LI Ning, ZHENG Xiaomin, et al. Application of production logging data in the fine numerical simulation of low-permeability fractured reservoir [J]. Well Logging Technology, 2018,42(6): 684-688.
- [3] 李宁,杨林,郑小敏,等. 基于示踪剂监测和数值模拟的低渗透油藏注采连通性评价[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(6): 735-740.
LI Ning, YANG Lin, ZHENG Xiaomin, et al. Evaluation

- on injection-production connectivity of low-permeability reservoirs based on tracer monitoring and numerical simulation [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(6): 735-740.
- [4] 李宁,吴新伟,万磊,等. 同位素吸水剖面测井资料采集影响因素分析[J]. 油气井测试,2019,28(3): 49-54.
LI Ning, WU Xinwei, WAN Lei, et al. Analysis of influencing factors on logging data acquisition of isotope water injection profile[J]. Well Testing, 2019,28(3): 49-54.
- [5] 张丽莎,朱苗苗,许阳,等. 通过产气剖面测试分析气井生产参数变化规律[J]. 油气井测试, 2023, 32(4): 62-67.
ZHANG Lisha, ZHU Miaomiao, XU Yang, et al. Study the variation law of gas well production parameters through gas production profile test[J]. Well Testing, 2023,32(4): 62-67.
- [6] 张文全,郝晓波,李雪彬,等. 试油全周期动态评价方法—以准噶尔盆地玛中区块玛 X 井为例[J]. 油气井测试,2023,32(3): 69-73.
ZHANG Wenquan, HAO Xiaobo, LI Xuebin, et al. Dynamic evaluation method for full cycle of oil testing: a case study of Well Ma X in Mazhong block, Junggar Basin [J]. Well Testing, 2023,32(3): 69-73.
- [7] 李超. 低渗透油藏压前不稳定试井数据与压裂效果的关系分析[J]. 油气井测试,2023,32(1): 74-78.
LI Chao. Relationship between unstable well test data before fracturing and fracturing effect in low permeability reservoir[J]. Well Testing, 2023,32(1): 74-78.
- [8] 王孝超. 基于大数据的定量措施选层技术[J]. 油气井测试,2022,31(5): 58-63.
WANG Xiaochao. Quantitative stimulation layer selection technology based on big data[J]. Well Testing, 2022, 31(5): 58-63.
- [9] 秦鹏,刘世界,朱建英,等. 中高含水期新型水驱特征曲线关系式[J]. 油气井测试,2022,31(1): 69-73.
QIN Peng, LIU Shijie, ZHU Jianying, et al. A new relational expression of water drive characteristic curve at medium and high water cut stages [J]. Well Testing, 2022, 31(1): 69-73.
- [10] 隋金巍. 利用测试资料评价采油井封堵层位的封堵效果[J]. 油气井测试,2023,32(2): 53-57.
SUI Jinwei. Application of test data in sealing evaluation of production wells [J]. Well Testing, 2023, 32(2): 53-57.
- [11] 李亚辉,冯伊涵,王伟,等. 一种改进的非均质底水气藏水平井产出动态预测方法[J]. 油气井测试,2021, 30(5): 1-8.
LI Yahui, FENG Yihan, WANG Wei, et al. An improved production performance prediction method for horizontal wells in heterogeneous bottom water gas reservoirs [J]. Well Testing, 2021,30(5): 1-8.
- [12] 朱苗苗,王安立,张丽莎,等. W433 区块分层压力测试



- 技术[J]. 油气井测试, 2021, 30(5): 73-78.
- ZHU Miaomiao, WANG Anli, ZHANG Lisha, et al. Layered pressure testing technology in block W433 [J]. Well Testing, 2021, 30(5): 73-78.
- [13] 徐海霞, 陈小凯, 吕孝明, 等. 动态监测技术在超深油藏调剖调驱中的应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(6): 37-40.
- XU Haixia, CHEN Xiaokai, LYU Xiaoming, et al. Application of dynamic monitoring technology in the deep profile control process of extra-deep heavy oil reservoir [J]. Well Testing, 2017, 26(6): 37-40.
- [14] 缪立南, 邸士莹. 利用测试资料评价压裂措施效果[J]. 油气井测试, 2017, 26(4): 33-35.
- MIAO Linan, DI Shiyang. Using the data of test to evaluate fracturing effect measures [J]. Well Testing, 2017, 26(4): 33-35.
- [15] 侯连华, 王京红, 信荃麟, 等. 吸水剖面测井资料在油田开发中的应用[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1997, 21(2): 18-24.
- HOU Lianhua, WANG Jinghong, XIN Quanlin, et al. Application of water injection profile data to oilfield development [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 1997, 21(2): 18-24.
- [16] 张芳, 王新海. 低渗透油藏水驱开发效果综合评价方法[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2012, 14(5): 34-36.
- ZHANG Fang, WANG Xinhai. Comprehensive estimate method of water flooding effect in low-permeability reservoir [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 14(5): 34-36.
- [17] 张利军, 郑伟, 王帅, 等. 厚层强非均质油藏部分射开试井曲线特征及影响因素[J]. 油气井测试, 2018, 27(4): 1-6.
- ZHANG Lijun, ZHENG Wei, WANG Shuai, et al. Characteristics of well testing curves and influencing factors for thick and strong heterogeneous reservoirs with partial perforation [J]. Well Testing, 2018, 27(4): 1-6.
- [18] 陈彬, 王艺景, 赵伟新, 等. 注水剖面资料确定吸水层动态残余油饱和度[J]. 测井技术, 2003, 27(2): 159-161.
- CHEN Bin, WANG Yijing, ZHAO Weixin, et al. Using water injection profile data to determine changeable residual oil saturation of water accepting layers [J]. Well Logging Technology, 2003, 27(2): 159-161.
- [19] 夏竹君, 赵军霞, 张丽萍, 等. 注水井吸水剖面测井技术在长庆油田的应用[J]. 国外测井技术, 2005, 20(1): 28-31.
- XIA Zhujun, ZHAO Junxia, ZHANG Liping, et al. Application of water injection profile logging technology in Changqing oilfield [J]. World Well Logging Technology, 2005, 20(1): 28-31.
- [20] 戴家才, 郭海敏, 彭燕明, 等. 注水剖面测井确定分层吸水指数方法研究[J]. 测井技术, 2006, 30(4): 354-356.
- DAI Jiakai, GUO Haimin, PENG Yanming, et al. On method for determining injectivity index of each zone by water injection profile logging [J]. Well Logging Technology, 2006, 30(4): 354-356.

编辑 方志慧

第一作者简介:刘永福,男,1979年出生,硕士研究生,高级工程师,2005年毕业于中国矿业大学(北京)地质学专业,长期从事沉积储层与石油地质研究工作。电话:0996-2178002,13565099809;Email:liuyongf-tlm@petrochina.com.cn。通信地址:新疆巴州库尔勒市石化大道,邮政编码:841000。