

引用格式:王吉涛,李俊键.高含水油田剩余油研究方法、分布特征与发展趋势[J].油气地质与采收率,2024,31(2):58-69.
WANG Jitao, LI Junjian. Research methods, distribution characteristics, and development trend of remaining oil in high water cut oilfields[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(2): 58-69.

高含水油田剩余油研究方法、分布特征与发展趋势

王吉涛^{1,2}, 李俊键^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249)

摘要: 为了提高高含水油田剩余油研究与评价效果, 基于大量文献调研, 梳理了剩余油的概念、影响因素, 从剩余油微观分布、宏观分布和饱和度定量分析3个方面总结了剩余油研究方法及其适用条件, 概括了水驱油藏、稠油油藏和化学驱油藏的剩余油分布特征, 进一步提出了目前剩余油研究的难点和发展趋势。结果表明: 剩余油的影响因素主要包括地质构造、沉积微相、储层非均质性和井网密度、井网模式、注采系统的完善程度、生产动态等; 剩余油研究方法包括实验分析方法、数值模拟方法和矿场测试方法等, 各种方法的研究目的和适用条件不同, 测试结果反映不同位置、不同尺度下的剩余油饱和度分布; 高含水油田剩余油分布总体呈现高度分散和相对富集的特征, 剩余油微观分布呈现连续相和非连续相多种形式; 剩余油研究发展趋势包括但不限于以下5方面: 超大物理模型的构建、多尺度高分辨率成像系统集成、考虑不同驱替介质及物性时变与非连续相非线性渗流的数值模拟改进方法、多学科多方法矿场测试的综合应用及大数据人工智能的广泛应用。

关键词: 高含水油田; 剩余油; 分布特征; 非线性渗流; 研究方法; 适用条件; 发展趋势

文章编号: 1009-9603(2024)02-0058-12

DOI: 10.13673/j.pgre.202401033

中图分类号: TE341

文献标识码: A

Research methods, distribution characteristics, and development trend of remaining oil in high water cut oilfields

WANG Jitao^{1,2}, LI Junjian^{1,2}

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China; 2. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China)

Abstract: To improve the research and evaluation effect of remaining oil in high water cut oilfields, this paper sorted out the concept and influencing factors of remaining oil, summarized the research methods and applicable conditions of remaining oil from three aspects of microscopic distribution, macroscopic distribution, and quantitative analysis of saturation of remaining oil, and discussed the distribution characteristics of remaining oil in water flooding reservoirs, heavy oil reservoirs, and chemical flooding reservoirs based on literature research. The difficulties and development trends of remaining oil research were further put forward. The results show that the influencing factors of remaining oil mainly include geological structure, sedimentary microfacies, reservoir heterogeneity, well pattern density, well pattern, perfection of injection-production system, and production performance. The remaining oil research methods include experimental analysis, numerical simulation, field testing, etc. The research purposes and applicable conditions of each method are different, and the test results reflect the distribution of remaining oil saturation at different locations and scales. The distribution of remaining oil in high water cut oilfields is highly dispersed and relatively enriched, and the microscopic distribution of remaining oil is in various forms of continuous and discontinuous phases. The development trend of remaining oil research includes but is not limited to five aspects: the construction of super-large physical models, the integration of multi-scale high-resolution imaging systems, the improvement of numerical simulation methods considering the time-varying and discontinuous nonlinear seepage of different displacement media and physical properties, the comprehensive application of multidis-

收稿日期: 2024-01-18。

作者简介: 王吉涛(1994—), 男, 江苏如皋人, 在读博士研究生, 从事油气田开发与提高采收率研究。E-mail: 351725442@qq.com。

disciplinary and multi-method field testing, and the wide application of big data artificial intelligence.

Key words: high water cut oilfields; remaining oil; distribution characteristics; nonlinear flow; research methods; applicable conditions; development trend

我国东部主力油田已进入中、高、特高含水开发阶段,部分油田还经历了化学驱开发,原油的稳产主要依靠基于流场调控的控水稳油、综合治理等挖潜措施。经过一次、二次采油后,仍有60%~70%的剩余油残留在地下,部分老油田历经了三次采油,但采收率也难以超过50%,这些剩余油对于增加可采储量和提高采收率是一个巨大的潜力^[1-3]。剩余油的分布受地质条件和驱油进程等多方面因素的影响^[4],其分布规律极其复杂。我国对于剩余油的研究最早始于“六五”期间,到了20世纪70年代以后,油田工作者开始初步研究地下油水在油田开发中的运动规律,发现油气采收率低是由于有相当数量的剩余油残留在物性差的区域,油水流通困难,难以开采。经过几十年的研究,我国对剩余油形成和分布的认识已经趋于成熟^[5-8]。针对剩余油的研究方法可归纳为一维纵向、二维平面和三维空间3个大类^[9]。通过与不同规模的油层相对应,将剩余油研究的对象分为宏规模、大规模、小规模以及微规模,这些不同规模的剩余油研究相互联系,依靠的主要方法各不相同^[10-11]。

目前针对剩余油的研究方法众多,主要包括开发地质学方法、岩心观察描述和分析测试方法、测井解释方法、四维地震方法、油藏数值模拟方法、动态监测分析方法和油藏工程方法等。不同方法各有特点,又各有自身的局限性。如何针对具体油藏条件,合理选取剩余油研究方法,有效提高高含水油田的剩余油评价效果一直是油田开发关注的重点问题。为此,笔者针对剩余油研究方法与认识开展系统梳理,归纳提出了剩余油研究的几点发展趋势,旨在为相关研究提供参考。

1 剩余油的概念及影响因素

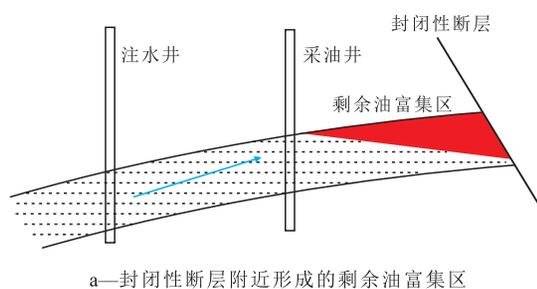
1.1 剩余油的概念

针对剩余油的探索始于20世纪30年代。1956年,美国地质学家 HUBBERT 首次提出了“剩余油”的概念,指的是在石油资源开采后所剩余的未开采石油储量^[12]。20世纪60—70年代,石油价格上涨和供应需求的变化引发了人们对剩余油资源的重视。1975年,美国成立了剩余油饱和度委员会,对剩余油进行专门的研究。20世纪80—90年代,剩余油的

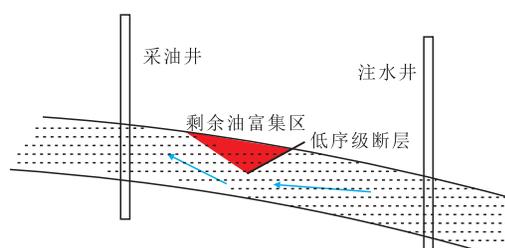
分布和提高采收率技术引起了国内外学者的普遍关注。剩余油的概念逐渐演变为“未开采油藏”,即尚未被开采利用的石油资源。进入21世纪,随着新技术的发展,剩余油研究随之完善。从开采的角度,剩余油是指通过加深对地质体的认识和改善开采工艺水平等措施可以采出的原油^[13]。从剩余资源的角度,剩余油是指经一定程度开采后,滞留在油层内的原油^[14]。目前,科技人员研究中普遍采用后者的概念。

1.2 剩余油形成的影响因素

剩余油的形成受地质条件和开发条件的综合影响。其中,地质条件包括地质构造、沉积微相和储层非均质性。地质构造对剩余油形成的影响分为2类:一是大型封闭性断层,这类断层通常就是油藏的边界,受注入水波及程度的影响,剩余油往往富集在断层下伏油层的构造高部位和角落处;二是低序级断层,注采井间未被发现的低序级断层会在局部阻挡流体流动,影响驱油效果,造成低序级断层附近剩余油富集(图1)。沉积微相是平面上油水运动的主要影响因素,其对剩余油的控制主要体现在砂体的外部几何形态、不同微相间的物性差异及砂体的延伸方向和展布规律上。储层垂向上的非均质性控制着单砂层内的波及体积和层间矛盾的



a—封闭性断层附近形成的剩余油富集区



b—断层遮挡注入水形成的剩余油富集区

图1 地质构造对剩余油形成的影响
Fig.1 Influence of geological structure on formation of remaining oil

程度,导致剩余油往往存在于非均质性较强、物性较差的层段。储层平面上的非均质性影响窜流通道的形成,导致剩余油平面上分布不均匀,富集在同一相带的边角或物性较差的部位^[14-15]。

影响剩余油分布的开发条件包括井网密度、井网模式、注采系统的完善程度、生产动态等。其中,最重要的是注采系统的完善程度及其与地质因素的相互关系^[16-18]。井网密度越大,水驱波及系数越高,剩余油的富集部位越少。线性井网受注入井方向储层非均质性的影响,剩余油可能富集在2口注入井之间。四点面积井网的剩余油可能富集在注入井之间的压力平衡区。七点法和五点法井网的水驱波及系数优于反九点法井网。不稳定的砂体分布或井网控制程度低都可能导致注采系统不完善,造成剩余油的分布特征更加复杂。高含水油藏驱替过程中,高驱替速度和高油水黏度比会诱发指进程度增大,造成剩余油富集^[19]。总的来说,影响剩余油形成的地质条件和开发条件二者相互作用,相互影响,加大了对剩余油认识的难度。

2 剩余油研究方法

剩余油研究的基本内容主要包括剩余油的分布特征和剩余油饱和度定量分析^[3]。从剩余油微观分布、宏观分布和饱和度定量分析3方面梳理不同研究内容所对应的主要研究方法。

2.1 剩余油微观分布研究方法

剩余油微观分布研究是针对驱替过程结束后,孔隙尺度下剩余油的分布特征。目前主要研究方法包括传统光学方法、物理模拟方法、高分辨率成像技术及核磁共振成像技术等。

2.1.1 传统光学方法

传统光学方法是最早研究剩余油微观分布的实验技术,研究对象主要包括含油薄片、真实岩心模型和微观仿真模型。基于不同的研究对象,梳理了传统光学方法的主要技术特点和适用条件(表1)。

传统光学方法的优点在于实验模型制作方便、成本相对较低,该技术目前依然是剩余油微观分布研究的主要手段。缺点是无法全面反映剩余油分布的三维空间特征。未来的发展趋势包括高分辨率成像技术、新型光学传感器的引入及多种分析手段的结合。

2.1.2 物理模拟方法

物理模拟方法是基于油藏特征,利用相似原则将研究对象缩小至室内实验级别,用以模拟驱替过程、预测产能、评估增产措施效果等的方法。周凤军等根据相似原则设计物理模拟参数,研究了不同韵律地层对早期聚合物驱剩余油分布规律以及生产动态的影响^[24]。徐冰基于电阻率法定量分析了非均质模型中的剩余油分布^[25]。

物理模拟方法的优点在于可以通过调节实验参数和条件在实验室中模拟真实油藏结构和条件下的剩余油行为,具有较强的可控性,得到的数据和结果可以直观地反映剩余油流动情况。缺点在于物理模拟方法成本相对较高、时间周期长。由于实验条件的限制,对于某些特殊油藏情况的模拟存在局限性。物理模拟方法的发展趋势主要包括不同尺度模拟技术的提高、高温高压条件下模拟技术的发展、现场实验与模拟集成以及数据处理和机器学习技术的应用。

2.1.3 高分辨率成像技术

高分辨率成像技术是指利用扫描电镜、激光共聚焦技术及CT扫描技术等获得高分辨率岩心图像,从而直观表征微观孔隙中原油组分的变化规律、剩余油的分布特征及剩余油分布与黏土矿物之间的关系等^[26]。结合驱替设备,能够提供不同驱替时刻下岩心模型中的油水空间分布信息,定量分析剩余油饱和度^[27-28]。

由于微观剩余油尺寸较小,影响因素复杂,高分辨率成像技术是未来剩余油微观分布研究的主要手段。其技术优点在于针对孔隙结构相对单一的岩心中的微观剩余油形成机理、赋存量以及空间

表1 传统光学方法总结(自文献[20-23]整理)
Table1 Conventional optical methods (Modified by Reference [20-23])

研究对象	技术特点及适用条件
含油薄片	将不受污染的含油岩心进行切割、制作而成,基本保持了剩余油的原始分布状况。可以评价取心井所在区域的含油性和水淹程度,但只能近似代替实际赋存量,难以进行微观剩余油形成机理研究
真实岩心模型	以具有代表性的岩心为研究对象进行驱替实验,应用薄片技术分析,直接描述剩余油的形成机理、赋存量以及空间分布。可以研究微观剩余油形成机理、聚合物驱油效率,但不能反映流体渗流的动态特征
微观仿真模型	根据显微镜下储层孔隙结构特征,在玻璃上刻画出相似孔隙网络模型。由于其良好的可视性及驱替实验的可重复性,该技术已经成为目前实验室动态研究微观剩余油的主要手段

分布规律研究效果显著。对于大尺度非均质储层微观剩余油特性的研究是该技术未来发展需要考虑的问题。

2.1.4 核磁共振成像技术

核磁共振成像技术原理是基于核磁共振现象测定岩石中的核磁信号,并据此推断地下储层中的油水含量。刘凡等应用核磁共振成像技术研究聚合物驱前后剩余油在岩心孔隙中的微观分布规律。结果表明:驱替结束后,剩余油主要分布在中低渗透层未波及到的区域,以及低渗透层中、小孔隙中^[29]。张顺康等基于核磁共振二维谱开展水驱油实验研究,对比分析了不同驱替阶段的油水变化规律。结果表明:随着水驱进程的发展,连片状剩余油比例不断降低,但与网络状、孤岛状剩余油相比,其体积绝对量在水驱后期相当,仍具较大的开发潜力^[30]。

核磁共振成像技术对流体运动的敏感性和大尺寸样品的适用性,使其对驱替过程的剩余油微观分布研究具有无可比拟的优势^[31-33],缺点在于由于信噪比的限制,核磁共振成像技术的空间分辨率目前低于CT扫描技术。未来该技术在剩余油微观分布特征研究的发展方向在于提高分辨率及复杂油藏条件下的成像分析。

2.2 剩余油宏观分布研究方法

2.2.1 数值模拟方法

数值模拟方法是目前在油藏尺度研究、预测剩余油饱和度的最广泛的方法^[34-36],常用的数值模拟软件包括CMG, ECLIPSE, Tnavigator, VIP, SURE, GrandTM等^[37-45]。权勃等基于小尺度地质体等效表征的方法,即通过设置单元间网格传导率,达到在油藏数值模拟中精细表征薄夹层对渗流效果及剩余油分布的影响。结果表明:该方法能有效提高单井历史拟合精度及井间剩余油分布预测精度^[46]。针对水驱开发油田进入中高含水期后,储层渗透率以及油水相渗曲线会发生较大变化的问题,魏峰开发了一套能完整考虑多种渗流参数实时变化的时变模拟框架,并将此新模拟技术应用于某海上高渗透疏松砂岩油藏,根据此区块已有的渗流时变规律,研究了在考虑时变情况下的剩余油分布、最终采收率预测及挖潜措施^[47]。

油藏注水开发后期,剩余油的分散程度越来越高,逐步由连续相转变为多孔状、滴状、膜状等非连续相,其动用及运移难度也逐渐增加,此时再用达西定律来描述其运移规律已不合适,应考虑其非连

续相渗流特征。基于大量的室内物理模拟实验结果,建立了高含水期考虑非连续相的非线性渗流特征数学模型。该模型主要包括2个方面:一是由于流动速度导致的非线性特征,可以用拟合非线性压差与理论线性压差比值(M_{nl})进行表示;二是由于油相非连续导致的油相启动压力梯度,其代表对于特高含水期剩余油可以运移所需要达到的最低压力梯度门限值。

M_{nl} 根据实际流动速度进行判别:

$$M_{nl} = \begin{cases} 1 & (N_{cao}, N_{caw}) \in R_L \\ 0.2157 \ln N_{ca} + 3.8028 & (N_{cao}, N_{caw}) \in R_{NL} \end{cases} \quad (1)$$

非连续油相启动压力梯度和剩余油饱和度二者的关系可以拟合为:

$$\frac{dp_{\lambda o}}{dx} = aS_o + b \quad (2)$$

基于matlab进行数值模拟计算,建立一注一采典型数值模拟模型,渗透率为200 mD,原油黏度为2 mPa·s,采用定液量20 m³/d生产2 400 d。对比油相饱和度模拟结果(图2,图3)可以发现,考虑非线性渗流后,随着剩余油饱和度的降低,油相启动压力增大,剩余油越来越难以驱出,已波及区域内剩余油饱和度要大于不考虑非线性渗流的模拟结果。从波及范围来看,考虑非线性渗流模型的波及更差,对主流线两侧剩余油驱替效果更低,在模型主流线两侧还有剩余油富集,含油饱和度可达到0.7以上。同时,对比生产动态曲线(图4,图5)发现,非线性渗流模型模拟结果的含水率上升更快,比常规模型早约100 d到达90%以上,采出程度比常规模型低近4个百分点。模拟结果更加符合油藏实际,有效提高了高含水油藏的数值模拟精度。

数值模拟方法的优点在于针对油气渗流规律的模拟全面直观,能够在不同的驱替阶段和空间分布上定量分析、预测剩余油饱和度的变化。缺点在于数值模拟结果的准确性极大依赖于基础资料、软件平台和研究者的经验及水平。数值模拟方法的发展趋势在于对数值模拟方法进行改进,更快、更准确地预测剩余油;发展新的数值模拟技术,例如分子模拟、人工智能等。

2.2.2 四维地震技术

四维地震技术是利用反射波和地震波的变化来监测油藏内部岩石和流体性质变化。该技术主要用于油藏压力、流体移动和岩石物性变化的监测,并可识别死油区、开展加密井部署、校正油藏地质模型等,为优化采油方案提供重要数据和指导意

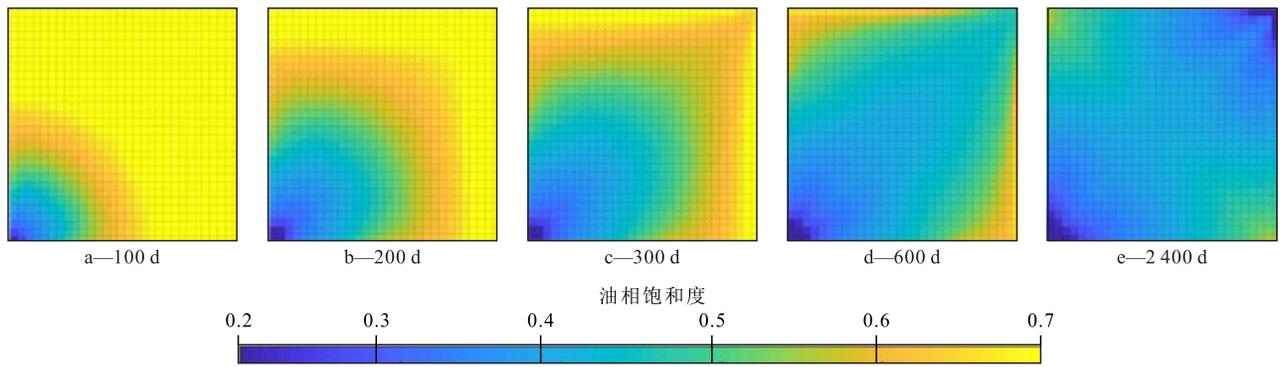


图2 不考虑非线性渗流油饱和度模拟结果

Fig.2 Simulation results of oil saturation without considering nonlinear flow

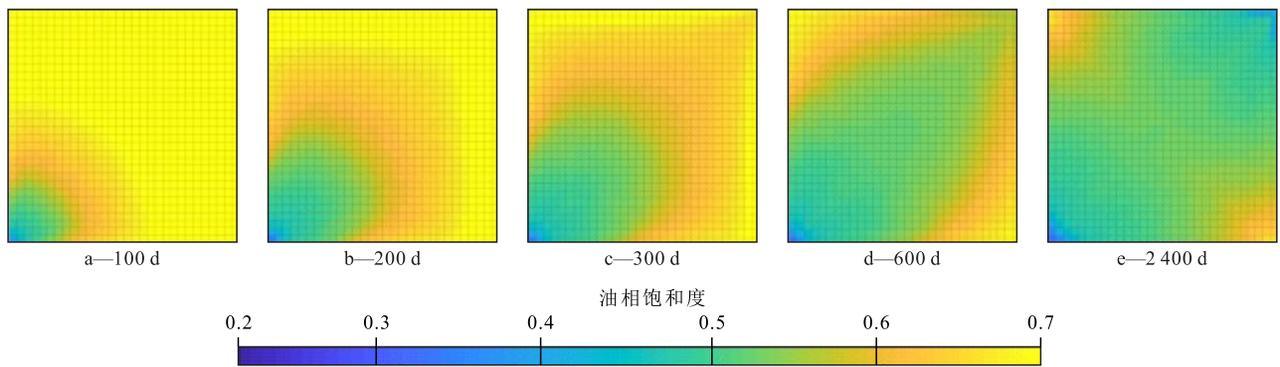


图3 考虑非线性渗流油饱和度模拟结果

Fig.3 Simulation results of oil saturation considering nonlinear flow

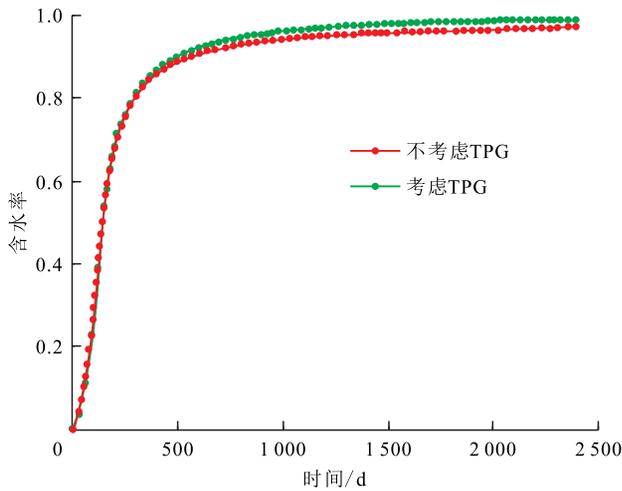


图4 考虑非线性渗流含水率对比曲线

Fig.4 Comparison curve of water content considering nonlinear flow

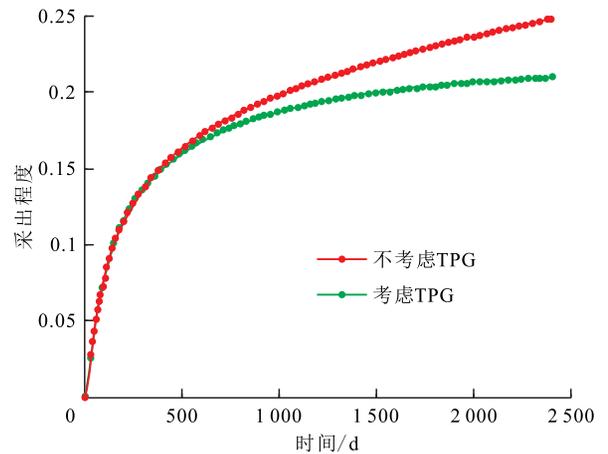


图5 考虑非线性渗流采收程度对比曲线

Fig.5 Comparison curve of recovery degree considering nonlinear flow

见,提高采油效率^[48-51]。

四维地震技术在剩余油研究上的优点在于可以通过长时间的监测,提供地下储层随时间变化的高分辨率图像,量化储层中剩余油的分布和流动状态。缺点在于四维地震技术需要长时间的监测和大量的数据处理工作,成本较高。对地下储层的地质条件要求较高,在非均质性强的陆相沉积储层难以实施。该技术未来的发展趋势主要包括数据处

理和解释技术的提升,与地质学、地球物理学、计算机科学等领域进行多学科交叉应用及新型监测技术的发展。

2.3 剩余油饱和度定量分析研究方法

2.3.1 测井技术

测井技术是直接探测剩余油的有效手段^[52],根据井况条件,测井技术可分为裸眼井测井和套管井测井。如表2所示,对不同测井技术的主要技术特点和适用条件进行了归纳和总结。在充分认识现

有测井方法的技术特点和适用条件的基础上,应遵循地质约束测井、岩心及动态生产刻度测井、测井服务于地质及开发的原则,开展剩余油测井方法的选择及技术工作部署^[53]。

测井技术的优点在于采集信息多、覆盖面广、采样密度大、能实时反映地层条件下的各项参数。缺点在于针对岩性复杂、长期注水的地层条件,单一测井方法难以适用于各类储层。测井技术的发展趋势主要体现在研发新的测井技术、裸眼井测井与套管井测井协同工作以及将现代数学方法引入到剩余油测井解释建模中。

2.3.2 示踪剂技术

20世纪80年代初,我国在大港油田和胜利油田开始研发应用示踪剂技术,截至目前,已发展了化学示踪剂、放射性同位素示踪剂、稳定性同位素示踪剂和微量物质示踪剂4代技术^[67]。示踪剂技术的原理是从注入井注入的示踪剂跟随流体运动进入油藏内部后,在监测井进行取样分析,结合地质模型和数值模拟等方法进行示踪剂解释,从而获得区块流线、分层、非均质性特征、剩余油饱和度等重要信息,为油田开发调整提供数据依据^[68-70]。

示踪剂技术的优点在于相较于分布式光纤和连续油管电缆等机械式检测装备,其成本较低、操作简单。缺点在于对地下水 and 环境可能会造成一定程度的影响。未来示踪剂技术的发展趋势在于通过提高示踪剂技术的精准确度、效率、环境友好度和智能化,拓展其在油田开发中的应用范围。

3 剩余油分布特征

我国注水开发油藏,由于储层非均质性等因素影响,注水开发过程中平面上和纵向上水推进不均匀,油水关系复杂,在空间上形成彼此交错的状态,剩余油的分布既高度零散又相对富集^[14,16]。根据我国高含水油藏自身的地质特征、油藏特点及开发方式的不同,剩余油分布形式也各有其自身特点^[18]。下面以胜利油田为例论述。

3.1 水驱油藏

胜利油田整装油藏分布在胜坨、孤岛、孤东、埕东4个油田,目前综合含水率为95.7%,整体处于特高含水后期开发阶段。从“九五”到“十一五”期间,宏观剩余油的认识经历了从“水淹严重、高度分散”到“总体分散、局部集中”,再到“普遍分布、差异赋存”的转变。取心井表明整装油藏平均剩余油饱和度下降,主流线高耗水,剩余油饱和度降至残余油附近,弱驱段与强驱段剩余油饱和度级差逐渐增大。从微观剩余油赋存状态上看,水驱主要驱替孔隙内的连片型剩余油,且随含水率上升,剩余油的分散性增强。从微观剩余油赋存空间看,在高注入倍数条件下,剩余油主要分布在小孔隙中。断块油藏动用地质储量为 16.1×10^8 t,主要分布在东辛、临盘、现河等油田,综合含水率为93.2%。进入特高含水期后,剩余油富集规模越来越小。受断层渗流屏障遮挡作用,越靠近断层驱替压力梯度越小,距断

表2 不同测井技术及适用条件(自文献[53-66]整理)

Table2 Applicable condition of different well logging methods (Modified by Reference [53-66])

测井方法		适用条件
裸眼井测井	电阻率测井	最常用的含油气性评价手段
	介电测井	适用于低矿化度地层水储层,孔隙度越大,识别精度越高
	电磁波传播测井	适用于矿化度异常的地层,与电阻率法结合可取得较好效果
	核磁共振测井	可以直观认识不同孔径孔隙内微观剩余油的分布
激发极化-自然电位组合测井		仅适用于地层水矿化度小于30 000 mg/L的砂泥岩层
套管井测井	过套管电阻率测井	可探测电阻率为0~300 $\Omega \cdot m$ 的地层,受围岩影响较小
	碳氧比测井	对孔隙度大于15%的地层应用效果好
	中子寿命测井	特别适用于高矿化度地层
	脉冲中子-中子测井	适用于孔隙度高于5%、矿化度低于5 000 mg/L地层
	碳氧比能谱测井	仅适用于孔隙度大于20%的地层,对有效厚度大于0.8 m的油层具有较好的响应
	脉冲中子衰减测井	适用于孔隙度大于10%的地层
	RMT测井	不受地层水矿化度变化影响,应用范围较为广泛
	氯能谱测井	在油田开发后期的高矿化度油层中应用效果较好

层50 m以内(油井距断层100 m)原油难以流动,剩余油近断层富集。在水动力、浮力作用下,特高含水期高倾角断块油藏分散,剩余油沿油层上倾方向发生重新运移、分异聚集,在构造高部位有利圈闭区域形成剩余油二次富集区。

总的来说,随着开发不断深入,水驱老油田油藏动态连通关系复杂、空间流线分布复杂,剩余油饱和度普遍较低。不同流线位置剩余油统计结果显示:剩余油分布受井网影响明显,非主流线、油井排剩余油相对富集^[19];层间非主力层部位动用程度相对较低,剩余油饱和度高;厚层层内动用不均衡,正韵律顶部剩余油相对富集。

3.2 化学驱油藏

胜利油田化学驱油藏具有地层温度高、地层水矿化度高、原油黏度高、储层非均质性强的特点,主要分布在孤岛、孤东、胜坨等油田,覆盖地质储量 5.8×10^8 t,累积产油量为 $7\ 226 \times 10^4$ t。聚合物驱后油藏采出程度高,剩余油更加分散,储层非均质性更加严重。

聚合物驱后油藏特高含水后期密闭取心显示,剩余油呈现“普遍分布、局部富集”的特征。从平面上看,油井排间、非主流线和断层边部位置剩余油饱和度相对较高。从纵向上看,层内受沉积韵律影响,韵律层顶部水淹程度相对较低,剩余油富集。聚合物驱后剩余油微观定量分析结果显示:微观剩余油分为连片型、多孔型、柱状、盲端、膜状、斑状等。聚合物驱后,连片型、多孔型剩余油饱和度下降明显,分别下降28%和3.5%^[19]。

3.3 稠油油藏

胜利油田稠油油藏探明地质储量为 6.99×10^8 t,主要分布在东部单家寺、乐安和西部春风等油田,2022年动用地质储量 7×10^8 t。胜利油田东部深层稠油油藏开发方式以蒸汽吞吐为主,目前已进入高轮次吞吐阶段。由于胜利油田稠油厚度薄、井距大、非均质性强,常规蒸汽驱面临蒸汽带窄、热水带宽、驱替不均衡等难题。剩余油呈现“整体富集、条带水淹”的分布规律。

2011年以来稠油油藏密闭取心井研究分析表明:吞吐中后期剩余油饱和度较高,平面上,距吞吐井距离越远,剩余油饱和度越高^[19]。纵向上,层间下部小层剩余油相对富集。受蒸汽超覆作用的影响,各小层吸汽不均衡,层间动用差异较大,上部小层吸汽强度高,开发效果好,下部小层动用差,剩余油富集。层内受韵律性影响,正韵律储层上部剩余

油富集。

4 剩余油研究的难点及发展趋势

剩余油研究作为精细油藏描述的最重要内容之一,涉及面十分广泛。以胜利油田为例,总结剩余油研究的难点并提出关于剩余油研究发展趋势的几点想法。

4.1 剩余油研究的难点

从胜利油田的开发实践来看,整装油藏特高含水后期高耗水层带发育、低效水循环严重;断块油藏剩余油分布差异大、有效动用难度大;深层、薄层超稠油油藏注汽难、热损失大。聚合物驱后油藏动态非均质性更强,剩余油更加分散。

从目前剩余油研究方法来看,一方面剩余油研究方法众多,各个方法均具优缺点,如何根据研究目标和掌握的基础数据,选取适合的方法表征剩余油,难度很大;另一方面,目前的剩余油研究方法难以充分适用于日渐复杂的油藏开发条件。以室内物理模拟为例,一是直接获取的岩心资料无法反映整个油藏;二是间接获取的资料存在诸多不确定性,因此常规室内实验模拟尺度难以认识剩余油及流场演变。因此,如何提高剩余油的描述精度,充分发挥各研究方法的优点,难度很大。

4.2 剩余油研究的发展趋势

基于文献调研和胜利油田的开发实践,笔者认为,随着技术的进步,未来剩余油研究的发展趋势包括但不限于以下5方面:

(1)超大规模物理模型的构建。针对储层剩余油的研究,大型物理模拟方法在考虑油藏的井网、井距等影响因素方面有其它方法无可比拟的优势。通过把地下储层“搬到地面”,构建超大规模物理模型,重现油田开发过程,直接获取物性、饱和度及压力等信息,认清剩余油空间分布特征及可动潜力,对特高含水油田持续高效开发具有重要意义。

(2)多尺度高分辨率成像系统集成。扫描电镜、激光共聚焦技术及CT扫描等高分辨率成像技术在数字岩心构建及剩余油微观研究方面已取得了大量的成果。但由于分辨率和观察视野的矛盾性,依靠单一手段能够获得同一尺度的剩余油分布特征,但微米、毫米、厘米等连续尺度剩余油的特征认识不清。通过数据融合技术实现同一块岩心连续尺度剩余油分析,有望实现剩余油微观认识的多尺度升级跨越。

(3)考虑不同驱替介质及驱动方式的数值模拟改进方法。随着对地下储层结构和流体认识的不断深入,常规的数值模拟技术难以准确描述复杂储层的动态变化。因此,多尺度、多相流模拟成为一种发展趋势。随着大数据和人工智能技术的发展,数据驱动模拟方法将逐渐应用于剩余油研究中。通过对大量观测数据的分析和建模,能够更好地理解储层中剩余油的分布和运移规律。

(4)多学科多方法矿场测试的综合应用。随着高含水油藏开发的进行,常规油藏复杂化,单一的测井技术已经难以满足油藏开发的需求。需要将裸眼井测井技术与套管井测井技术相结合、将测井认识与井间地震等技术相结合,实现“点”信息向“体”信息的转化。同样,未来示踪剂技术的发展也需要与核磁共振、人工智能等技术结合,提高油藏解释的效率和精确性。

(5)大数据人工智能的广泛应用。由于开发多年的油藏具有井数多、基础数据量大、信息分析工作量大的特征,传统的剩余油分布研究方法在数据量、计算能力和分析方法上存在局限性。人工智能和大数据的出现,为剩余油研究提供了新的解决方案。已积累的各类数据为机器学习技术深度判别、预测以及应用奠定了坚实的基础,大数据及人工智能技术的应用将是剩余油研究的新趋势,也使得地质数据的深层次分析成为可能^[71-77]。

5 结论

(1)剩余油的形成受地质条件和开发条件的共同影响。地质构造、沉积微相、储层非均质性等地质条件是储层剩余油形成的内因,井网密度、井网模式、注采系统的完善程度、生产动态等开发条件是剩余油形成的外因。二者相互作用,加大了对剩余油认识的难度。

(2)针对剩余油分布特征和饱和度定量分析的研究方法包括传统光学方法、物理模拟方法、高分辨率成像技术、核磁共振成像技术、数值模拟方法、四维地震技术、测井技术和示踪剂技术等。不同方法反映不同位置、不同尺度的剩余油特征。取心分析和测井技术反映的是井眼附近剩余油的饱和度特征。示踪剂技术反映的是油藏渗透带的平均剩余油饱和度特征。数值模拟技术提供不同开发阶段、不同油藏部位的剩余油宏观分布特征。

(3)高含水油田剩余油分布总体呈现高度分散

和相对富集的特征,剩余油微观分布呈现连续相和非连续相多种形式。水驱油藏剩余油平面上非主流线、油井排剩余油相对富集;层间非主力层剩余油饱和度高;层内正韵律顶部剩余油相对富集。化学驱油藏平面上非主流线、油井排剩余油相对富集;纵向上正韵律顶部剩余油相对富集。稠油油藏平面上距吞吐井越远,剩余油饱和度越高;层间下部小层剩余油相对富集;层内正韵律上部剩余油相对富集。

(4)剩余油评价技术的发展趋势主要体现在:针对剩余油研究的超大规模物理模拟技术将持续发展。微观尺度的剩余油分析需要借助CT技术、核磁共振成像技术和孔隙网络方法等手段,未来发展趋向多尺度、高精度测试手段的集成。多种测井方法协同工作,是解决高含水油田油藏种类繁多、岩性复杂、剩余油评价困难的发展方向。大数据及人工智能技术的应用将是剩余油研究的新趋势,机器学习与改进的数值模拟技术相结合能有效提高剩余油模拟精度和效率,是今后发展的主要方向。

符号解释

- a, b —— 与储层物性条件相关的系数,可以由实验得到;
- $\frac{dp_{\lambda 0}}{dx}$ —— 油相启动压力梯度;
- M_{nl} —— 拟合非线性压差与理论线性压差比值;
- N_{ca} —— 毛管数;
- N_{cao} —— 油相毛管数;
- N_{caw} —— 水相毛管数;
- R_L, R_{NL} —— 达西线性流动区域和非线性渗流区域,根据实验进行计算;
- S_o —— 剩余油饱和度。

参考文献

- [1] 陆大卫,王春利.剩余油饱和度测井评价新技术[M].北京:石油工业出版社,2003:12-123.
LU Dawei, WANG Chunli. New technique of residual oil saturation logging evaluation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 12-123.
- [2] 谢俊,张金亮.剩余油描述与预测[M].北京:石油工业出版社,2003:1-13.
XIE Jun, ZHANG Jinliang. Residual oil description and prediction [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 1-13.
- [3] 俞启泰.关于剩余油研究的探讨[J].石油勘探与开发,1997,24(2):46-50.
YU Qitai. A study on remaining oil [J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(2): 46-50.

- [4] 乐平,屈思敏,李丰辉,等.高孔高渗高含水稠油油藏剩余油分布特征及动用的主控因素[J].非常规油气,2023,10(2):33-42.
YUE Ping, QU Simin, LI Fenghui, et al. Remaining oil distribution characteristics and main controlling factors for use in high porosity, high permeability and high water cut heavy oil reservoirs [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2023, 10(2): 33-42.
- [5] 赵培华.油田开发水淹层测井技术[M].北京:石油工业出版社,2003:1-2.
ZHAO Peihua. Water flooded zone evaluation logging technique for the oilfield development [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 1-2.
- [6] 杨冰,傅强,官敬涛,等.特高含水油藏不同井网流场调整模拟与驱油效率[J].油气藏评价与开发,2023,13(4):519-524.
YANG Bing, FU Qiang, GUAN Jingtao, et al. Oil displacement efficiency based on different well pattern adjustment simulation in high water cut reservoirs [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13(4): 519-524.
- [7] 刘宝珺,谢俊,张金亮.我国剩余油技术研究现状与进展[J].西北地质,2004,37(4):1-6.
LIU Baojun, XIE Jun, ZHANG Jinliang. Present situation and advance of remaining oil research technology in China [J]. *Northwest Geology*, 2004, 37(4): 1-6.
- [8] 王瑞,张红,王建,等.不同注采方式下层间非均质储层微观剩余油动用状况[J].大庆石油地质与开发,2023,42(5):82-89.
WANG Rui, ZHANG Hong, WANG Jian, et al. Analysis of producing status of microscopic remaining oil in interlayer heterogeneous reservoirs by different injection-production methods [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2023, 42(5): 82-89.
- [9] 张昌民,徐龙,林克湘,等.青海油砂山油田第68层分流河道砂体解剖学[J].沉积学报,1996,14(4):70-76.
ZHANG Changmin, XU Long, LIN Kexiang, et al. Anatomy of distributary channel sand, the No. 68 sandbody of Youshashan, western Qinghai [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1996, 14(4): 70-76.
- [10] 张健.海上高含水油田非连续化学驱模式研究[J].中国海上油气,2023,35(1):70-77.
ZHANG Jian. Study on discontinuous chemical flooding model of offshore high water cut oilfield [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2023, 35(1): 70-77.
- [11] CHIERICI G L. Economically improving oil recovery by advanced reservoir management [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1992, 8(3): 205-219.
- [12] HUBBERT M K. Nuclear energy and the fossil fuels [M]. Houston, TX: Shell Development Company, Exploration and Production Research Division, 1956.
- [13] 郭平,冉新权,徐艳梅,等.剩余油分布研究方法[M].北京:石油工业出版社,2007:1-2.
GUO Ping, RAN Xinquan, XU Yanmei, et al. The method for studying remaining oil distribution [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007: 1-2.
- [14] 李阳,刘建明.油藏开发地质学[M].北京:石油工业出版社,2007:203-212.
LI Yang, LIU Jianming. The geology of reservoir development [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007: 203-212.
- [15] 李阳,王端平,刘建民.陆相水驱油藏剩余油富集区研究[J].石油勘探与开发,2005,32(3):91-96.
LI Yang, WANG Duanping, LIU Jianmin. Remaining oil enrichment areas in continental waterflooding reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(3): 91-96.
- [16] 董冬,陈洁,邱明文.河流相储集层中剩余油类型和分布规律[J].油气采收率技术,1999,6(3):39-46.
DONG Dong, CHEN Jie, QIU Mingwen. The type and distribution of remaining oil in the fluvial reservoir [J]. *Oil and Gas Recovery Technology*, 1999, 6(3): 39-46.
- [17] 晁宏洲,王赤字,刘峰,等.注水开发油藏剩余油饱和度测量与监测技术及应用[J].钻采工艺,2007,30(4):84-87.
CHAO Hongzhou, WANG Chiyu, LIU Feng, et al. Measure and monitoring techniques of remaining oil saturation in water flood development reservoir and its application [J]. *Drilling & Production Technology*, 2007, 30(4): 84-87.
- [18] 徐艳梅,郭平,黄伟岗,等.剩余油分布的影响因素[J].西南石油学院学报,2005,27(6):29-32.
XU Yanmei, GUO Ping, HUANG Weigang, et al. Factors that influenced remind oil distribution [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2005, 27(6): 29-32.
- [19] 孙焕泉,杨勇,王海涛,等.特高含水油藏剩余油分布特征与提高采收率新技术[J].中国石油大学学报:自然科学版,2023,47(5):90-102.
SUN Huanquan, YANG Yong, WANG Haitao, et al. Distribution characteristics of remaining oil in extra-high water cut reservoirs and new technologies for enhancing oil recovery [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2023, 47(5): 90-102.
- [20] 宋考平,李世军,方伟,等.用荧光分析方法研究聚合物驱后微观剩余油变化[J].石油学报,2005,26(2):92-95.
SONG Kaoping, LI Shijun, FANG Wei, et al. Fluorescence analysis on changeable rules of microscopic remaining oil after polymer flooding [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(2): 92-95.
- [21] 公言杰,柳少波,朱如凯,等.松辽盆地南部白垩系致密油微观赋存特征[J].石油勘探与开发,2015,42(3):294-299.
GONG Yanjie, LIU Shaobo, ZHU Rukai, et al. Micro-occurrence of Cretaceous tight oil in southern Songliao Basin, NE China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(3): 294-299.
- [22] 马炳杰.注水停止对剩余油分布状态影响的实验研究[J].科学技术与工程,2016,16(12):254-259.
MA Bingjie. The Impact of water stoped on residual oil distribution in experimental study [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(12): 254-259.
- [23] 王国栋,唐洪,罗宪波,等.直井水平井联合井网与剩余油分布的实验研究[J].重庆科技学院学报:自然科学版,2021,23(1):19-25.
WANG Guodong, TANG Hong, LUO Xianbo, et al. Experi-

- mental study on residual oil distribution of combined vertical well and horizontal well pattern [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2021, 23(1): 19-25.
- [24] 周凤军,李金宜,瞿朝朝,等.海上厚层油藏早期聚合物驱剩余油分布特征实验研究[J].油气地质与采收率,2017,24(6): 92-96.
ZHOU Fengjun, LI Jinyi, QU Zhaozhao, et al. Laboratory core experiments of remaining oil distribution at the early polymer flooding in offshore thick reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(6): 92-96.
- [25] 徐冰.纵向非均质储层凝胶调剖剩余油分布特征实验研究[J].油气地质与采收率,2020,27(6):71-80.
XU Bing. Experimental study on distribution characteristics of remaining oil in vertical heterogeneous reservoirs by gel profile control [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(6): 71-80.
- [26] 白振强,吴胜和,付志国.大庆油田聚合物驱后微观剩余油分布规律[J].石油学报,2013,34(5):924-931.
BAI Zhenqiang, WU Shenghe, FU Zhiguo. The distribution of microcosmic remaining oils after polymer flooding in Daqing oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(5): 924-931.
- [27] 侯建,邱茂鑫,陆努,等.采用CT技术研究岩心剩余油微观赋存状态[J].石油学报,2014,35(2):319-325.
HOU Jian, QIU Maoxin, LU Nu, et al. Characterization of residual oil microdistribution at pore scale using computerized tomography [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(2): 319-325.
- [28] 曹永娜.CT扫描技术在微观驱替实验及剩余油分析中的应用[J].CT理论与应用研究,2015,24(1):47-56.
CAO Yongna. Application CT scanning technology analysis micro-flooding experiments and the residual oil [J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2015, 24(1): 47-56.
- [29] 刘凡,周文胜,谢晓庆.聚合物驱结合井网调整技术剩余油实验研究[J].石油化工高等学校学报,2020,33(4):28-33.
LIU Fan, ZHOU Wensheng, XIE Xiaoqing. Experimental study on residual oil of polymer flooding composite well network adjustment [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2020, 33(4): 28-33.
- [30] 张顺康,刘炳官,尤启东,等.江苏低渗透油藏核磁共振剩余油微观实验研究[J].复杂油气藏,2023,16(2):199-203.
ZHANG Shunkang, LIU Bingguan, YOU Qidong, et al. Experimental study of NMR residual oil microscopy in low permeability reservoirs of Jiangsu Oilfield [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(2): 199-203.
- [31] 闫伟超,孙建孟.微观剩余油研究现状分析[J].地球物理学进展,2016,31(5):2198-2211.
YAN Weichao, SUN Jianmeng. Analysis of research present situation of microscopic remaining oil [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(5): 2198-2211.
- [32] LIU Zheyu, CHENG Hongjie, XU Changfu, et al. Effect of lithology on pore-scale residual oil displacement in chemical flooding using nuclear magnetic resonance experiments [C]. SPE-190450-MS, 2018.
- [33] 刘成,王栋,柳雪青,等.基于核磁共振技术的大庆油田X6东区剩余油分布特征研究[J].非常规油气,2022,9(3):96-102.
LIU Cheng, WANG Dong, LIU Xueqing, et al. Study on distribution characteristics of residual oil in eastern X6 block of Daqing Oilfield based on nuclear magnetic resonance [J]. Unconventional Oil & Gas, 2022, 9(3): 96-102.
- [34] 刘晨.考虑储层参数时变的相对渗透率曲线计算方法[J].西南石油大学学报:自然科学版,2019,41(2):137-142.
LIU Chen. Method for calculating the relative permeability curve of an oil reservoir considering the time-varying effect of relevant reservoir parameters [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2019, 41(2): 137-142.
- [35] 刘斌,瞿朝朝,岳宝林,等.优势渗流通道对动态特征及剩余油影响研究[J].石油化工应用,2020,39(11):38-43.
LIU Bin, QU Zhaozhao, YUE Baolin, et al. Influence of dominant seepage channels on dynamic characteristics and remaining oil [J]. Petrochemical Industry Application, 2020, 39(11): 38-43.
- [36] 赵辉,郭文娟,岳文成,等.数值模拟技术在侏罗系T3油藏开发中的应用[J].石油化工应用,2020,39(4):63-65.
ZHAO Hui, GUO Wenjuan, YUE Wencheng, et al. Application of numerical simulation technology in the development of Jurassic T3 reservoir [J]. Petrochemical Industry Application, 2020, 39(4): 63-65.
- [37] 孙鹏霄,闫志明.LD10-1油田不同韵律性厚层剩余油富集规律[J].中外能源,2020,25(9):41-48.
SUN Pengxiao, YAN Zhiming. Enrichment law of remaining oil in different rhythmic thick oil reservoirs in LD10-1 Oilfield [J]. Sino-Global Energy, 2020, 25(9): 41-48.
- [38] 刘财广,刘欢欢,王辰伟.注采井组内井间示踪约束下的克里金剩余油饱和度分布预测模型[J].中国锰业,2018,36(6):127-133.
LIU Caiguang, LIU Huanhuan, WANG Chenwei. A Kriging model of predicting the distribution of residual oil saturation under the interwell tracer constrained in injection and production well Groups [J]. China's Manganese Industry, 2018, 36(6): 127-133.
- [39] 匡铁.超大规模油藏数值模拟技术[J].大庆石油地质与开发,2018,37(4):62-64.
KUANG Tie. Numerical simulation for super large-scale oil reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(4): 62-64.
- [40] 汪洋,黄延明,同鑫,等.剩余油研究方法综述[J].特种油气藏,2023,30(1):14-21.
WANG Yang, HUANG Yanming, TONG Xin, et al. Review of remaining oil research methods [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023, 30(1): 14-21.
- [41] 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.
- [42] 魏峰. 考虑渗流参数时变效应的高渗透油藏数值模拟技术[J]. *大庆石油地质与开发*, 2021, 40(3): 66-70.
- WEI Feng. Numerical simulation of the high-permeability oil reservoirs considering the time-varying effect of the seepage parameters [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(3): 66-70.
- [43] MUHAMMAD Tahir, RAFAEL E Hincapie. Potential benefits of fluid optimization for combined smart-water and polymer flooding: Impact on remaining oil saturation [C]. SPE-196763-MS, 2019.
- [44] GUILTINAN Eric, SANTOS Javier E, KANG Q. Residual saturation during multiphase displacement in heterogeneous fractures with novel deep learning prediction [C]. Unconventional Resources Technology Conference, Austin, Texas, USA, 20-22 July 2020.
- [45] RIZK Ahmed Samir, TEMBELY Moussa. Residual oil saturation estimation from carbonate rock images based on direct simulation and machine learning [C]. IPTC-22096-MS, 2022.
- [46] 权勃, 侯亚伟, 张东, 等. 小尺度等效表征技术在油藏数值模拟研究中的应用——以渤海C油田馆陶组辫状河储层为例[J]. *长江大学学报: 自科版*, 2018, (15): 53-58.
- QUAN Bo, HOU Yawei, ZHANG Dong, et al. The application of small scale equivalent characterization technique in reservoir simulation—By taking braided river reservoir of Guantao formation in Caofeidian 11-1 oilfield for example [J]. *Journal of Yangtze University: Natural Science Edition*, 2018, (15): 53-58.
- [47] 魏峰. 高渗储层渗流参数时变效应的数值模拟技术研究与应用[C]. 西安: 油气田勘探与开发国际会议, 2019.
- WEI Feng. Development and application of numerical simulation technique with time-dependent effect of flow parameter in high permeability reservoirs [C]. Xi'an: International Field Exploration and Development Conference, 2019.
- [48] 荣宁, 吴迪, 韩易龙, 等. 微地震监测水驱前缘技术在哈得双台阶水平井的应用效果评价[J]. *大庆石油地质与开发*, 2006, 25(2): 94-96.
- RONG Ning, WU Di, HAN Yilong, et al. Application evaluation of microearthquake monitoring waterflood front technique used to double step horizontal wells in Hade Oilfield [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2006, 25(2): 94-96.
- [49] 饶良玉, 吴向红, 韩冬, 等. 高含水油田剩余油分布研究现状与展望[J]. *大庆石油地质与开发*, 2012, 31(2): 67-71.
- RAO Liangyu, WU Xianghong, HAN Dong, et al. Current studies and prospects of the remained oil distribution in high-water-cut oilfield [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2012, 31(2): 67-71.
- [50] 云美厚, 丁伟, 王新红. 陆相薄互层油藏四维地震监测存在的问题与建议[J]. *石油地球物理勘探*, 2005, 40(4): 444-450.
- YUN Meihou, DING Wei, WANG Xinhong. Problems existed in 4-D seismic monitoring of continental thin and interbedded reservoir and suggestions [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2005, 40(4): 444-450.
- [51] 霍进, 张新国, 吴平, 等. 四维地震技术在稠油开采中的应用[J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(3): 80-82.
- HUO Jin, ZHANG Xinguo, WU Ping, et al. The application of four-dimensional seismic technology to heavy oil production. *Petroleum Exploration and Development* [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(3): 80-82.
- [52] 赵晨云, 窦松江, 窦煜, 等. 高含水期油藏剩余油聚集度表征方法[J]. *新疆石油地质*, 2023, 44(6): 690-695.
- ZHAO Chenyun, DOU Songjiang, DOU Yu, et al. A new method for characterizing remaining oil in high water-cut reservoirs [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2023, 44(6): 690-695.
- [53] 赵军龙, 曹军涛, 李传浩, 等. 中高含水期剩余油测井评价技术综述与展望[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(2): 838-845.
- ZHAO Junlong, CAO Juntao, LI Chuanhao, et al. A review and perspective of logging evaluation technology of oil remaining in middle and high water cut stage [J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(2): 838-845.
- [54] 高瑞琴, 剡慧君, 朱爱民, 等. 二连油田中低孔隙度地层介电测井解释方法研究[J]. *测井技术*, 2009, 33(5): 457-460.
- GAO Ruiqin, YAN Huijun, ZHU Aimin, et al. Dielectric log interpretation method of middle-low porosity reservoir in Er Lian Oilfield [J]. *Well Logging Technology*, 2009, 33(5): 457-460.
- [55] 康俊佐, 邢光龙, 杨善德. 电磁传播电阻率测井的二维全参数反演方法研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(1): 275-283.
- KANG Junzuo, XING Guanglong, YANG Shande. A study on the two-dimensional full-parameter inversion method of the electromagnetic propagation resistivity logging [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(1): 275-283.
- [56] 王东, 张海澜, 王秀明. 部分饱和和孔隙岩石中声波传播数值研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(2): 524-532.
- WANG Dong, ZHANG Hailan, WANG Xiuming. A numerical study of acoustic wave propagation in partially saturated poroelastic rock [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(2): 524-532.
- [57] 黄隆基. 核测井原理[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2008: 164-165.
- HUANG Longji. Principle of nuclear logging [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2008: 164-165.
- [58] 贾丽华. 用核磁共振技术研究特高含水期剩余油分布[J]. *油气田地面工程*, 2011, 30(1): 40-41.
- JIA Lihua. Research of remaining oil distribution during high water by using nuclear magnetic resonance technology [J]. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, 2011, 30(1): 40-41.
- [59] 许长福, 刘红现, 钱根宝, 等. 克拉玛依砾岩储集层微观水驱油机理[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(6): 725-732.
- XU Changfu, LIU Hongxian, QIAN Genbao, et al. Microcosmic mechanisms of water-oil displacement in conglomerate reservoirs in Karamay Oilfield, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(6): 725-732.
- [60] 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 wa-

- ter cut reservoir based on matching relationship [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2022, 29(5): 692-697.
- [61] 宁从前, 谭廷栋, 李宁. 核磁共振测井在天然气勘探中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2001, 16(2): 42-49.
- NING Congqian, TAN Tingdong, LI Ning. Application of nuclear magnetic resonance logging in natural gas detection [J]. *Progress in Geophysics*, 2001, 16(2): 42-49.
- [62] 陈四平, 李木元, 仲艳华. 剩余油饱和度测井技术进展[J]. *测井技术*, 2004, 28(1): 7-10.
- CHEN Siping, LI Muyuan, ZHONG Yanhua. Advances of well logging technology in residual oil saturation [J]. *Well Logging Technology*, 2004, 28(1): 7-10.
- [63] 王金彬, 何彪, 王黎, 等. 氯能谱测井仪的改进及其应用[J]. *测井技术*, 2006, 30(3): 360-362.
- WAN Jinbin, HE Biao, WANG Li, et al. Improvement of chlorine spectra logging tool and its application [J]. *Well Logging Technology*, 2006, 30(3): 360-362.
- [64] 赵明, 章海宁. 两种评价剩余油饱和度的测井方法应用研究[J]. *石油学报*, 2002, 23(5): 73-77.
- ZHAO Ming, ZHANG Haining. Application of two new logging methods for evaluation remaining oil saturation [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2002, 23(5): 73-77.
- [65] 何琰, 张引来, 吴念胜. 氯能谱测井方法在卫城油田的应用研究[J]. *西南石油学院学报*, 2005, 27(1): 5-7.
- HE Yan, ZHANG Yinlai, WU Niansheng. The applying study of the chlorine logging in Weicheng Oilfield [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2005, 27(1): 5-7.
- [66] 刘四新, 佟文琪. 电磁波测井的现状和发展趋势[J]. *地球物理学进展*, 2004, 19(4): 235-237.
- LIU Sixin, TONG Wenqi. The situation and progress of electromagnetic well logging [J]. *Progress in Geophysics*, 2004, 19(4): 235-237.
- [67] 宋吉水, 王岩楼, 廖广志, 等. 井间示踪技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- SONG Jishui, WANG Yanlou, LIAO Guangzhi, et al. *Interwell tracer technique* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [68] BRIGHAM W E, SMITH D H. Prediction of tracer behavior in five-spot flow [R]. SPE 1130, 1965.
- [69] 张永飞, 李育, 张敏, 等. 非放射性微量金属物质示踪剂研制及应用[J]. *特种油气藏*, 2023, 30(2): 153-160.
- ZHANG Yongfei, LI Yu, ZHANG Min, et al. Preparation and application of non-radioactive trace metal tracer [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(2): 153-160.
- [70] 孙涛, 窦宏恩, 邹存友, 等. 井间动态连通性评价新方法研究[J]. *特种油气藏*, 2017, 24(2): 110-114.
- SUN Tao, DOU Hongen, ZOU Cunyou, et al. A new method for inter-well dynamic communication evaluation [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2017, 24(2): 110-114.
- [71] 胡伟, 杨胜来, 李斯鸣, 等. 基于多层次模糊综合评价的剩余油分布研究方法[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2015, 37(4): 22-28.
- HU Wei, YANG Shenglai, LI Siming, et al. Application of multi level fuzzy comprehensive evaluation method in the research of remaining oil distribution in Xing 6 District [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2015, 37(4): 22-28.
- [72] 宋志军, 潘志, 胡海峰, 等. 神经网络数据挖掘工具用于剩余油分布研究[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 2003, 27(1): 105-106.
- SONG Zhijun, PAN Zhi, HU Haifeng, et al. Application of neural network data mining tool to researching remaining oil distribution [J]. *Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science*, 2003, 27(1): 105-106.
- [73] 谷建伟, 任燕龙, 王依科, 等. 基于机器学习的平面剩余油分布预测方法[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2020, 44(4): 39-46.
- GU Jianwei, REN Yanlong, WANG Yike, et al. Prediction methods of remaining oil plane distribution based on machine learning [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2020, 44(4): 39-46.
- [74] 卜亚辉. 基于机器学习的高含水油田剩余油预测方法[J]. *油气地质与采收率*, 2022, 29(4): 135-142.
- BU Yahui. Prediction of remaining oil in high water cut oilfield based on machine learning [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(4): 135-142.
- [75] 王文东, 石梦翻, 庄新宇, 等. 基于机器学习的井位及注采参数联合优化方法[J]. *深圳大学学报: 理工版*, 2022, 39(2): 126-133.
- WANG Wendong, SHI Menghe, ZHUANG Xinyu, et al. Joint optimization method of well location and injection-production parameters based on machine learning [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2022, 39(2): 126-133.
- [76] REN Hongjia, WANG Xianchang, GUO Qiulin, et al. Spatial prediction of oil and gas distribution using Tree Augmented Bayesian network [J]. *Computers & Geosciences*, 2020, 142: 104518.
- [77] 刘丽杰, 张先敏, 魏祥祥, 等. 特高含水期剩余油分类评价方法[J]. *油气地质与采收率*, 2022, 29(5): 83-90.
- LIU Lijie, ZHANG Xianmin, WEI Xiangxiang, et al. Classification and evaluation method of remaining oil in ultra-high water cut stage [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(5): 83-90.