

国内外剩余油研究进展综述

李昊昕

中国石油大学(北京)地球物理学院, 北京

收稿日期: 2024年5月8日; 录用日期: 2024年6月9日; 发布日期: 2024年7月15日

摘要

本研究通过全面调研, 系统梳理了国内外剩余油研究技术现状, 从宏观角度剖析剩余油成因类型, 详细阐述饱和度测井、剩余油井间监测等主流识别技术; 从微观层面探讨剩余油研究手段、形成机理、赋存状态及其对提升采收率的意义。

关键词

剩余油, 饱和度测井, 井间动态监测, 微观剩余油

A Comprehensive Review of Progress in Domestic and International Studies on Residual Oil

Haixin Li

College of Geophysics, China University of Petroleum (Beijing), Beijing

Received: May 8th, 2024; accepted: Jun. 9th, 2024; published: Jul. 15th, 2024

Abstract

This study conducts a comprehensive investigation and systematically sorts out the current status of remaining oil research technologies both domestically and abroad. It analyzes the macroscopic causes of remaining oil from a broad perspective, elaborating on mainstream identification techniques such as saturation logging and inter-well monitoring for remaining oil. On a micro level, it explores research methods of remaining oil, its formation mechanisms, existence states, and the significance of these factors in enhancing recovery rates.

Keywords

Remaining Oil, Saturation Logging, Inter-Well Dynamic Monitoring, Micro-Scale Remaining Oil

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

剩余油是在油田开发过程中未能被完全采出的石油，其分布受到地质、工程等多重因素的影响，呈现出高度的复杂性和难以聚集的特点。这种复杂性不仅增加了开采的难度，也对油田的可持续发展构成了挑战。

为了深入了解剩余油研究的现状和发展趋势，有必要对国内外剩余油研究进行全面的梳理和分析。本研究综合分析了国内外关于剩余油研究的文献资料，包括 40 余篇期刊或会议论文、22 项发明专利及 7 份石油公司内部报告。深入剖析国内剩余油研究的现状和挑战，总结我国在剩余油识别、评价和开采方面的主要成果，揭示存在的问题和面临的挑战。

2. 国外剩余油研究现状

2.1. 饱和度测井

饱和度测井技术作为油田开发过程中的关键技术之一，在识别和评价油气藏，尤其是剩余油藏的分布和性质方面发挥着至关重要的作用。国外常用的饱和度测井包括中子寿命、介电常数、碳氧比能谱测井等方法。

当前，脉冲中子测井作为一种创新方法，被公认为属于评估套管井内储层含油饱和度的极佳手段，得到了极其广泛的应用。该技术适用于多种地层，包括砂泥岩地层、碳酸盐地层和火成岩地层等。但它对地层的物理性质非常敏感，因此在高矿化度或含有特殊元素的地层中可能需要特别校正或采用特定的方法[1]-[3]。Jeri Mufarrej 等在 WJO 油田的某油井中进行了脉冲中子 - 中子测井组合测量，确定产出剖面、产水源和当前含水饱和度[4]。结果表明，所有产出来自两个射孔段，且这两个流体入口的含水率均为 100%。在一些非贡献和未射孔层段中存在高油饱和度。

C/O 能谱测井技术是基于元素成分差异的原理来推断储层油气水的饱和度的一项技术[5]-[7]，自 20 世纪 60 年代起在国外开发使用。Dennis Denney 研究指出，C/O 测井解释成功的关键因素之一是测井设计。在开展工作之前，地层水矿化度、井眼条件、井眼流体的二次侵入、电阻率对比、孔隙度、剥蚀/酸化和套管情况、水泥情况以及全部的限制因素都必须考虑到[8]。

介电常数测井是通过测量地层的介电常数来判断油气水的饱和度。由于不同流体的介电常数不同，因此可以通过介电常数测井来区分油、气和水，进而推断剩余油的分布。上世纪六十年代，塔叶夫开创性地提出了介电测井技术的概念与方法。七十年代 Schlumberger 公司研制出 EPT-D 型介电测井仪。

Richard A 等进行了实验室岩心测量、建立了理论井筒系统计算机模型、设计了仪器，并提供了一个详细的现场示例。介电常数测井作为一种独立估算地层水体积的方法的重要性和实用性，特别是在盐度未知或变化的情况下。这种方法的成功应用可以为石油勘探和开发提供更准确、更可靠的地层水饱和度测量，从而优化油气藏的评估和管理[9]。

2.2. 剩余油井间监测

井间监测技术作为确定剩余油分布和动态变化的关键手段，正受到越来越多的关注和研究。当前，科研与工业界正积极研发并推广运用多种先进的井间监测技术，包括地震监测、电磁波探测以及同位素示踪等方法。

在针对剩余油分布问题的研究中，地震技术扮演着重要角色，其中应用最广泛的主要有井中地震技术、VSP 垂直地震剖面技术等。井间地震技术在解决剩余油分布难题上展现出独特且关键的优势，其核心价值主要体现在两个维度：首先，该技术巧妙借力于现役油田的成熟井网体系，对油藏进行深度细致的地质解析。通过这一过程，能够揭示储层微观到宏观的非均质性特征，深入剖析其对流体流动行为的复杂影响，从而对既有的储层模型进行全面的校准与提升。这些由井间地震技术获取的高质量地质资料，对于构建科学合理的加密钻井方案，实现剩余油资源的精准定位与高效开采，提供了不可或缺的理论基石。其次，作为一项动态监测技术，井间地震法在油田生产阶段同样发挥着不可替代的角色。它能够在增产措施执行的全过程中持续追踪其实际效能，精准量化改造措施对油藏的影响范围与渗透效率，为适时调整和优化实施方案提供了实时、准确的数据反馈。这一能力使得决策者能够在第一时间掌握增产措施的实际效果，确保其始终指向提升剩余油采收率的核心目标，最大限度地挖掘油藏潜力。

Nakata, R.等应用井间地震技术进行了一系列重复的监测，研究了日本那霸碳捕获和储存站点的 CO₂ 注入过程，通过时间推移弹性全波形反演来估计与注入相关的速度变化。通过严谨的波形模拟实验，成功验证了介质的各向异性特性，并在此基础上构建了一个完备的各向异性模型[10]。弹性全波形反演速度模型显示了比先前基于旅行时间的模型更详细的结构，并且不包含声学全波形反演结果中明显的伪影。

井间电磁波剩余油监测技术，系在电磁测井技术的理论框架与实践经验基础上逐步孕育而生。其工作原理在于：向目标地层定向发射特定频段的电磁波能量，随后于临近井眼中接收经地层介质传播并发生交互作用后的电磁信号。通过对所接收到的复杂数据进行深度反演运算与解析，可提炼出富含地质信息的井间电阻率分布。可直观且精确地映射井间范围内地层的流体空间分布状态，为剩余油监测与评价提供了有力的技术支撑。

Marsala, A.等利用跨井电磁感应技术对两个相距较远的水平井进行勘测，通过三维反演，绘制出油藏中的油水饱和度分布图。三维反演得到的电阻率分布与裂缝区域内大范围的波及油藏相一致，揭示了井间存在大量未波及剩余油[11]。Khosravi 等人采用时间序列重力法，对伊朗南部一个大型多相气藏进行了敏感性分析。研究者进行了正演模拟和敏感性分析，以明确在何种条件下，4D 重力法能检测到该油气藏的饱和度变化。研究发现，随着储层深度的减小、生产井数量的增加以及生产时间的延长，现代海洋重力计能更轻易地捕获到产生的重力信号。证明了时间序列重力法在监测大型多相气藏饱和度变化方面的有效性。

2.3. 微观剩余油研究

探讨储层在不同开发阶段的含油性潜力与提升采收率策略时，微观剩余油的形成机制、蕴藏量及其空间格局构成了关键研究议题。由于这类剩余油尺度极其微小且受多种复杂因素共同影响，对其开展细致的剖析通常需要运用一系列独特而精密的研究技术。此类研究大体可归纳为物理实验与数值模拟两大路径。

物理实验手段囊括了一系列先进技术，如经典光学观测技术、扫描电子显微镜技术、激光共聚焦显微技术、计算机断层成像技术以及核磁共振成像技术。其中后两项技术在国际微观剩余油研究领域已赢得显著关注，它们在揭示复杂多孔介质内部油水分布细节方面的应用尤为突出。

Middleton (2006)在一项研究中模拟了高压条件下水驱油的过程, 首先对岩心样品充分饱和原油, 继而在驱替过程中采用重水作为驱替剂。用了 CT 设备对整个过程开展高分辨率扫描, 详尽揭示了各开发阶段流体的变化规律。八十年代, Chatiaie 在微观剩余油赋存模式研究中, 采用仿真岩心对进行了实验分析。结果显示, 微观剩余油的形态主要包括: 一是孤立液滴形态, 赋存于单一孔隙内; 二是双液滴形态, 填充两个相邻孔隙; 三是网络状液滴形态, 同时赋存于三个或三个以上孔隙当中, 形成复杂的连通网络。

Mitchell 等(2013)详细介绍了核磁共振成像技术在岩石内部流体识别领域的应用, 并认为随着核磁共振仪器硬件水平的发展, 高分辨率监测提高采收率过程中微观剩余油三维空间分布变化将有巨大的潜力。

伴随着对渗流现象内在机制理解的不断深化与计算机运算效能的显著跃升, 针对微观剩余油行为的模拟技术呈现出多样化的发展态势。模拟方法大致可归纳为三大主流类别: 有网格模拟、无网格模拟以及孔网模拟。Shabro (2010)运用三维数字岩心技术开展水驱油过程的有网格模拟, 成功获得了微观剩余油的空间赋存状态及相渗特征, 其结果显示, 该网格化模拟策略对于非润湿相捕获现象的再现与实验观察数据高度吻合[12]。Huang 等人(2011)通过自由能模型改进, 模拟了多孔介质两相流流动。经改良后的模型不仅实现了伽利略不变性的严格满足, 还展现出对较高黏度比情形下两相流精确建模的能力。在对比分析了该方法与颜色模型、SC 模型之后, Huang 指出其在多维度两相流模拟任务中展现出独特的优越性[13]。

3. 国内剩余油研究现状

在国内, 研究者们已经形成了一套完整且多元化的研究体系, 主要包括油藏数值模拟法、动态分析方法、沉积相分析法、检查井研究方法、物质平衡法、水驱特征曲线法和测井解释法等。这些方法各具特色, 相互补充, 共同构成了我国剩余油宏观分布研究的坚实基础。

3.1. 油藏数值模拟法

自上世纪八十年代起, 国内开始引入并应用油藏数值模拟技术。这一技术的核心功能不仅局限于量化描绘整个油藏饱和度的时空演变历程, 更延伸至对未来饱和度变化趋势的前瞻性预测。现阶段, 业界普遍采用数值模拟来刻画开发过程中地下实际剩余油分布状况, 以此作为指导开发调整的直接依据。此外, 油藏数值模拟亦被广泛应用于探究不同油藏条件与开发机制作用下, 剩余油形成机理与分布模式的研究[14]-[21]。

3.2. 检查井研究方法

检查井研究剩余油的前提是避免钻井液对地层含油性的破坏, 因此需要油基泥浆密闭取心或保压取心, 通过岩心含油性来研究取心层位剩余油的分布特性。该方法在以下几个方面展现出了显著的应用价值: 首先, 它为水淹层饱和度测井解释提供了扎实的参考素材, 有助于提升解释精度; 其次, 通过对注水后油层参数变化的量化记录, 为相关动态研究提供了宝贵的数据支持; 最后, 所获取的实物样本为从微观角度探究残余油性质与分布规律提供了直接的实验素材[22]-[25]。

3.3. 物质平衡法

应用物质平衡法能得出水驱结束时的剩余油饱和度。物质平衡法, 这一植根于质量守恒定律的经典工具, 在剩余油研究领域扮演着举足轻重的角色。它运用数学建模与定量分析手段, 剖析油气藏开采过程中产出流体、注入流体与地下储层储量之间的动态交互关系, 旨在量化油气藏的剩余油资源[26], 从而为制定科学的开发策略、提升采收率提供坚实的理论基础。尽管如此, 物质平衡法在揭示剩余油的平面与剖面空间分布特征方面仍存在局限性, 未能直接提供预测性的见解。

$$ROS = (N - NP)(1 - SWI) \times \frac{BO}{N \times BOI} \quad (1)$$

其中： N ——原始石油地质储量； NP ——累计产油量； BO ——地层体积系数； BOI ——原始地层体积系数； SWI ——原始含水饱和度。

3.4. 水驱特征曲线法

剩余油研究的水驱特征曲线法是一种基于水驱油田开发过程中油水动态关系的分析技术[27]。通过绘制和分析特定类型的水驱特征曲线，可以揭示油藏开采过程中水驱油效率的变化趋势与潜在剩余油的分布特征。

首先根据现场实际生产资料中的累积产油量和产水量，结合油藏地质储量数据，计算出油藏的采出程度(R)，公式为：

$$R = \frac{\text{累计产油量}}{\text{地质储量}} \times 100\% \quad (2)$$

接下来，估算区块平均含油饱和度，公式为：

$$S_{or} = S_{oi}(1 - R) \quad (3)$$

式中： S_{or} 为当前含油饱和度， S_{oi} 为原始含油饱和度。

综合上述两步，研究人员能够估算油田各区块的剩余油状况。

3.5. 测井解释技术

剩余油测井解释技术在中国已得到广泛应用，其涵盖了从经典测井组合解析到前沿特殊测井技术的多样化手段。

常规测井组合解释方法通过整合电阻率、声波、密度、中子等多种常规测井资料，运用多相流体在微观孔隙介质中的渗流理论模型，结合油水两相共渗现象及其分流量平衡方程，能够计算出目标储层的剩余油饱和度以及对应的含水率，并据此科学划分出不同级别的水淹状况[28]-[30]。

针对特定开发需求，特殊测井剩余油研究技术展现出显著优势。其中，时间推移测井技术作为一种动态监测手段，通过在同一井眼中进行多次测井以捕捉随时间变化的储层特性，成为揭示剩余油分布动态演变的重要工具。该技术细分为电阻率、碳氧比以及中子寿命时间推移测井等多个分支[31]。此外，井间同位素示踪法近年来在国内得到了积极尝试与成功应用。例如，大港油田通过监测示踪剂在井间迁移轨迹及浓度变化，实现了对剩余油分布的立体定位[32]。

4. 国内外研究对比分析

4.1. 共同点

技术融合与多学科交叉应用：全球范围内的研究均倾向于将地质、地球物理、计算机科学等多学科知识与技术融合，以期达到对剩余油分布与动态变化的精细化认知。

技术创新与应用：持续追求技术创新，如脉冲中子测井、介电常数测井、数字岩心模拟等技术，均在全球范围内被广泛采纳以提升剩余油识别的准确度和效率。

4.2. 差异对比

国外剩余油研究起步较早，更侧重于理论深度探索和技术精细化发展，如在数字岩心模拟和微观渗流理论方面建立了坚实的基础。而国内研究则针对陆相油藏特点，形成了更为全面和实用的综合研究

与应用体系，尤其是在本土化监测技术和综合评估方法上有所突破。

国外剩余油研究的突出特点在于：一是数字岩心与微观渗流理论的前沿探索：在数字岩心技术和微观渗流理论领域，国外研究保持着显著的领先地位，通过高精度的数字岩心模型与微观渗流分析，深入揭示孔隙介质中流体动态行为，显著提升了剩余油分布预测的精确度。二是创新监测技术的深度应用：在传统测井技术之外，国外积极研发并应用诸如时间序列重力法等监测技术，以及 C/O 能谱测井等微观尺度技术，这些前沿技术的深度应用彰显了对剩余油研究的不断探索与突破。

国内研究剩余油研究的突出特点在于：一是本土化综合应用体系构建与创新：针对复杂陆相沉积环境，国内研究构建了综合应用体系，包括油藏数值模拟、沉积相分析及检查井技术等，此体系针对性强，有效促进了实际生产效率的提升。二是实践紧密结合与实物数据支撑：国内研究强调与生产实践紧密结合，以检查井为例，通过油基泥浆取心技术直接获取岩心样本，为剩余油分布提供了实证数据，加深了理论与实践的融合。三是经济高效的技术策略导向：国内研究侧重技术的经济性和实用性，油藏数值模拟不仅作为理论研究工具，更直接指导油田开发策略，展示了研究与生产实践的高效对接与协同。

5. 剩余油研究的挑战与方向

5.1. 面临的挑战

一是剩余油井间预测不足：当前剩余油研究虽积累了丰富的井点数据，但在井间层面的预测上存在显著不足。由于缺乏充分的井间资料，对剩余油分布的宏观理解不够全面，限制了井间剩余油的精准预测与优化开发策略的制定。二是动静态综合系统研究耗时长：现有的剩余油预测手段常常侧重于静态地质研究或油藏动态分析单独考虑，忽视了油藏开发中两者交互作用的复杂性。而同时考虑动静态多因素的油藏模拟虽然理论上更全面，但计算量大，效率低下，导致研究周期长，难以及时指导生产实践。三是跨尺度研究技术的缺失：宏观与微观尺度研究之间互相割裂，缺乏有效的连接。宏观尺度研究无法深入微观机理，微观尺度又难以直接指导宏观开发实践，导致剩余油研究与提升采收率策略制定上的脱节。

5.2. 发展方向与前景

针对上述挑战，未来剩余油研究应朝以下方向推进：一是描述对象向井间拓展，发展井间剩余油预测新技术：借助飞速发展的分布式光纤技术，依托监测数据反演结果，持续捕获微观层面的温度、压力变化及流体动态信息，结合四维地震等大尺度地球物理数据的井震联合反演，构建出详尽的油藏动态模型，实时追踪油藏变化，识别剩余油富集区域，探索解决井间预测难题的有效途径。二是描述规模向多尺度联合转变，发展微观 - 介观 - 宏观一体化协同研究技术：发展数字岩心技术，推动微观孔隙尺度、介观层理尺度、宏观油藏尺度的精细表征，实现多尺度一体化研究，通过构建跨尺度模型，同步考虑微观流体结构与宏观流动特征，解决老油田控油地质体逐步减小给剩余油识别带来的困难，指导精准挖潜与采收率提升策略的制定。三是描述手段向大数据智能迈进，发展动静结合智能化快速预测技术：集成检查井、水淹层解释、动态监测等多元数据，借助人工智能与大数据分析技术、深度学习算法，分析剩余油分布的综合影响因素，构建高效、实时的预测模型，缩短研究周期，提高剩余油分布预测的即时性和准确性，为调整挖潜提供快速决策依据。

这些发展方向旨在克服当前挑战，推动剩余油研究向更高精度、更高效、实时性与综合分析的方向发展，为石油资源的高效开采和可持续性提供强大的技术支持。

6. 结论

1) 剩余油识别与评价技术显著提升：饱和度测井(如中子寿命、C/O 能谱、介电测井)已成为关键工

具, 新型脉冲中子测井增强了饱和度精确评估。井间监测技术(地震法、电磁波法、同位素示踪法)实现实时监控, 助力油藏管理与增产措施优化。

2) 微观研究对揭示剩余油机理与提高采收率至关重要: 物理实验与数值模拟深入探究微观尺度分布规律与驱替过程, 为优化开采策略与提升采收率提供科学依据。

3) 面临的挑战与未来方向: 当前剩余油研究面临井间预测不足、动静态综合研究耗时长、跨尺度研究技术缺失等挑战。未来的研究应聚焦于发展井间剩余油预测技术、建立多尺度一体化研究体系、以及利用大数据与智能技术加速动静态预测, 以提高研究效率和精准度, 适应复杂油田条件, 推动油田开发的高质量发展。

综上所述, 国内外剩余油研究在理论探索、技术革新和实践应用等方面取得了显著成果, 但仍面临诸多挑战。亟需在井间描述、多尺度表征、智能化快速预测方面加速创新攻关, 为我国石油工业的稳产增产和资源高效利用做出重要贡献。

参考文献

- [1] Morris, F., Morris, C. and Quinlan, T. (2005) Applications of Pulsed Neutron Capture Logs in Reservoir Management. *SPE Western Regional Meeting*, Irvine, 30 March-1 April 2005, SPE-93889-MS. <https://doi.org/10.2118/93889-ms>
- [2] Tao, B., Zhou, J., Wu, K. and Zhang, Z. (2020). Pulsed-neutron Log Design for Uncertain Water Salinity Reservoirs in an Oil Producer Offshore. *Offshore Technology Conference Asia*, Kuala Lumpur, 2-6 November 2020, OTC-30346-MS. <https://doi.org/10.4043/30346-ms>
- [3] Al-Nasser, M.N., *et al.* (2020) Quantifying Gas Saturation with Pulsed Neutron Logging-An Innovative Approach. *SPE Reservoir Characterization and Simulation Conference and Exhibition*, Abu Dhabi, 16-18 September 2013, SPE-166025-MS.
- [4] Mufarrej, J., *et al.* (2024) Unlocking the Reservoir Flow Evaluation and Water Saturation in a Low Formation Water Salinity Using Production Logging and Pulsed Neutron Logging While Lifting the Well by Flow Jet Pump in an Oil Well of Wafra Joint Operations. *Offshore Technology Conference Asia*, Kuala Lumpur, 27 February-1 March 2024, OTC-34757-MS.
- [5] Ma, S.M., Guergueb, N., Guo, W. and Eid, M. (2021) Intrinsic Carbon-Oxygen Logging for Enhanced Consistency of Reservoir Saturation Monitoring. *SPWLA 62nd Annual Online Symposium Transactions*, 15-20 May 2021, 1-9. <https://doi.org/10.30632/spwla-2021-0021>
- [6] Van Steene, M., Ma, S. and Ghadiry, S. (2023) Rigless Mineralogy Logging—A Reality for Improved Evaluation of Complex Formations. *Middle East Oil, Gas and Geosciences Show*, Manama, 19-21 February 2023, SPE-213525-MS. <https://doi.org/10.2118/213525-ms>
- [7] Kelder, O. and Hajari, A.S. (2004) C/O Logging Methodologies: Comparing Saturation Determination Techniques. SPE 90339.
- [8] Denney, D. (2005) Atlantis, the Quest for Stray Shallow-Water-Flow Sands. *Journal of Petroleum Technology*, **57**, 50-52. <https://doi.org/10.2118/1005-0050-jpt>
- [9] Meador, R.A. (1975) Dielectric Constant Logging, a Salinity Independent Estimation of Formation Water Volume. *Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME*, 28 September-1 October 1975, Dallas, SPE-5504-MS.
- [10] Nakata, R., Nakata, N., Girard, A., Ichikawa, M., Kato, A., Lumley, D., *et al.* (2022). Time-Lapse Crosswell Seismic Monitoring of CO₂ Injection at the Nagaoka CCS Site Using Elastic Full-Waveform Inversion. In: Abubakar, A. and Hakami, A., Eds., *Second International Meeting for Applied Geoscience & Energy*, Society of Exploration Geophysicists, 802-806. <https://doi.org/10.1190/image2022-3744414.1>
- [11] Marsala, A.F., Lyngra, S., Safdar, M., Zhang, P. and Wilt, M. (2015). Crosswell Electromagnetic Induction between Two Widely Spaced Horizontal Wells: Coiled-Tubing Conveyed Data Collection and 3D Inversion from a Carbonate Reservoir in Saudi Arabia. In: Schneider, R.V., Ed., *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015*, Society of Exploration Geophysicists, 2848-2852. <https://doi.org/10.1190/segam2015-5891203.1>
- [12] Shabro, V., Prodanovic, M., Arns, C.H., *et al.* (2010) Pore Scale Modeling of Two-Phase Flow. *18th International Conference on Computational Methods in Water Resources*, Barcelona, 21-24 June 2010, 1-8.
- [13] Huang, H., Wang, L. and Lu, X. (2011) Evaluation of Three Lattice Boltzmann Models for Multiphase Flows in Porous Media. *Computers & Mathematics with Applications*, **61**, 3606-3617. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2010.06.034>

-
- [14] 张光明, 许昌杰, 周晓俊, 赵英. 高 30 断块油藏剩余油分布研究[J]. 江汉石油学院学报, 2003, 25(4): 102-108.
- [15] 孙明. 元城油田精细油藏描述与剩余油分布研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2009.
- [16] 高永利, 江苗, 陈明强. 马岭油田南一区直 32 油藏剩余油研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2006(3): 52-54.
- [17] 闫坤, 等. 聚驱后优势渗流通道流线数值模拟识别方法的建立及应用[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(2): 33-37.
- [18] 刘薇薇, 等. 水驱砂岩油藏优势渗流通道识别[J]. 复杂油气藏, 2020, 13(1): 42-47.
- [19] 胡丹丹, 等. 厚油层层内夹层对剩余油的影响研究[J]. 特种油气藏, 2009, 16(3): 49-52.
- [20] 温静. “双高期”油藏剩余油分布规律及挖潜对策[J]. 特种油气藏, 2004, 11(4): 50-53.
- [21] 赵永胜. 剩余油分布研究中的几个问题[J]. 大庆石油地质与开发, 1996(4): 72-74, 86.
- [22] 兰丽凤, 等. 基于小井距检查井的夹层分布特征及对剩余油分布的控制作用——以萨尔图油田北二西区为例[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(4): 83-87.
- [23] 周超, 等. 杏树岗油田检查井水洗规律研究-以 X6-12-JE24 井为例[J]. 长江大学学报(自科版)(中旬), 2013, 10(3): 73-76.
- [24] 高兴军, 等. 高含水油田密闭取心检查井水淹状况及主控因素研究: 以扶余油田泉四段油层为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 162-170.
- [25] 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.
- [26] 陈元千. 油气藏的物质平衡方程式及其应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1979.
- [27] 杨世刚, 励学思. 油井生产动态分析[M]. 东营: 石油大学出版社, 1996.
- [28] 孙友国, 等. 储层测井综合评价在剩余油分布中的应用[J]. 国外测井技术, 2003(2): 63-71.
- [29] 刘春艳. 老井测井储层评价与剩余油挖潜研究[J]. 国外测井技术, 2008, 23(5): 32-36.
- [30] 李安琪. 水淹层测井解释及剩余油分布研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南石油学院, 2004.
- [31] 李淑霞, 陈月明, 冯其红, 张庆珍. 利用井间示踪剂确定剩余油饱和度的方法[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(2): 73-75.
- [32] 李科星, 等. 疏松砂岩油藏大孔道识别综述[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(5): 42-44.