

高含水油田精细油藏描述研究进展

陈欢庆¹,石成方¹,胡海燕²,吴洪彪²,曹晨²

(1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 中国石油勘探与生产分公司,北京 100007)

摘要:中国中东部主要油区油田均已进入高含水阶段,有大约40%~60%的储量需要在该阶段采出。精细油藏描述是油田有效开发的最基础工作,因此高含水油田精细油藏描述对于油田生产实践和提升规律性认识都具有特别重要的意义。基于详细的中外文文献调研,结合典型油田实践经验总结,系统介绍了目前高含水油田精细油藏描述研究的现状和研究中存在的5个方面主要问题。认为地层精细划分与对比、储层非均质性研究、开发过程中储层变化规律研究、多信息综合剩余油表征技术和高含水油藏三次采油相关研究等属于高含水油田精细油藏描述中的5个关键问题,并明确提出了目前应用效果较好的几种新技术和方法。指出高含水油田精细油藏描述研究发展趋势集中在断裂体系精细解释、储层构型精细表征技术、测井水淹层解释、优势渗流通道研究和多点地质统计学地质建模技术等5个方向。

关键词:储层非均质性;断裂体系;精细油藏描述;剩余油;高含水油田

中图分类号:TE321

文献标识码:A

Advances in fine description of reservoir in high water-cut oilfield

Chen Huanqing¹, Shi Chengfang¹, Hu Haiyan², Wu Hongbiao², Cao Chen²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

2. PetroChina Exploration and Development Company Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Major oilfields in central-eastern China have entered into the high water-cut development stage during which about 40%–60% reserves need to be recovered. Fine description of reservoir is the most essential work for effective oilfield development; at the same time the fine description of high water-cut reservoir is of special significance for boosting production practice in oilfields and deepening understanding of production performance. Based on the detailed study on related documents both in Chinese and in foreign languages, in combination with practical experiences in typical oilfield production, we systematically introduced the status quo of the research on fine description of reservoir in high water-cut oilfield, and summarized the five main problems existing in the present research, including fine division and correlation of stratigraphy, reservoir heterogeneity, patterns of reservoir variation in the process of oilfield development, comprehensive remaining oil characterization with integration of various data, and tertiary oil recovery in high water-cut oilfields. Subsequently, several new techniques and methods with better application results now were pointed out. In addition, the focuses of present research were summarized as follows: ① fine interpretation of fracture system; ② fine characterization of reservoir architecture; ③ logging interpretation for water-flooded layers; ④ identification of preferential seepage channels; ⑤ multipoint geostatistical modeling.

Key words: reservoir heterogeneity, fracture system, fine description of reservoir, remaining oil, high water-cut oilfield

油藏描述是20世纪30年代萌芽,70年代发展起来的用于油气田勘探和开发的一项实用技术^[1-5],在业内已成为认识油藏特征最基本和最重要的手段^[6-10]。目前这项新技术已在生产中广泛应用,获得

了显著经济效益和社会效益^[11-15]。对于高含水油田精细油藏描述,众多研究者均十分关注(表1)^[16-29]。中国许多油田从20世纪80年代进入高含水期,因此对于高含水油田相关的研究也有数十年的历史,取得

收稿日期:2017-09-11;修订日期:2018-08-15。

第一作者简介:陈欢庆(1979—),男,博士、高级工程师,精细油藏描述。E-mail:hqchen2009@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05016-006);中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司项目(2018-40217-000001)。

表 1 按照含水率划分的油田开发阶段分类结果^[16,18,25]

Table 1 Classification of oilfield development phases by water cut^[16,18,25]

类别	含水率/%	油田	
		中国	其他国家
低含水期	0 ~ 20		
中含水期	20 ~ 60	长庆	
高含水期	60 ~ 90	玉门、吐哈、新疆、大港、辽河、吉林、延长、河南、江汉	印度西海岸盆地大孟买油田、罗马什金油田、杜马兹油田、阿尔兰油田、萨莫特洛尔油田、东德克萨斯油田
特高含水期	> 90	大庆、胜利、中原	阿曼 Marmul 油田、加拿大 Rapdan 油田、美国 Yates 油田、德国 Hanks-buetted 油田

了一定的进展。笔者认为目前高含水油田精细油藏描述存在的问题主要包括以下几方面。①构造精细解释和储层预测精度较低;②油水关系复杂;③储层伤害;④储层非均质性强;⑤建立精细油藏描述数据、成果管理和应用平台难度大。本文旨在通过全面梳理目前高含水油田精细油藏描述研究进展,为促进该类油田精细油藏描述技术发展和提高油田开发效果提供参考。

1 高含水油田精细油藏描述关键问题

精细油藏描述是一项系统工程,涉及的研究内容十分广泛,本次将目前高含水油田精细油藏描述的关键问题总结为以下 5 个方面。

1.1 地层精细划分与对比

高含水油田类型众多,从碎屑岩、碳酸盐到其他岩类都有^[30-36],开发中后期地层精细划分难度大,传统的“旋回对比,分级控制”的地层划分对比方法,很难解决这一问题。高分辨率层序地层学理论通过地质成因分析和对于不同等级地层基准面旋回在空间上的对比和划分,一方面在理论上使得地层划分与对比具有地质成因意义,更加符合地下地质实际,另一方面在技术上可以使得地层的划分与对比精细至单层级别^[37],对应单砂体,满足了高含水油田生产实践的要求(图 1)。图中短期基准面旋回对应经典层序地层学中 5 级层序,中期基准面旋回对应 4 级层序。前者对应单层级别的地层划分单元,后者对应小层级别的地层

划分单元。传统的地层划分方法只能将地层划分至中期基准面旋回,而高分辨率层序地层学可以将地层细分至短期基准面旋回,即单层。

1.2 储层非均质性

储层非均质性研究涉及的内容比较丰富,主要包括流场非均质性和流体非均质性两大类^[38-39]。目前在储层非均质性研究中大多集中于流场非均质性研究方面,对于流体非均质性研究甚少。储层流场非均质性研究最多的是利用测井精细解释的渗透率成果计算变异系数、突进系数和级差等参数,通过分析这些参数在空间上的变化规律来定量表征储层流场非均质性特征。虽然测井资料具有定量化和易获取等优点,但受储层物性测井解释精度的限制,上述参数的准确性在一定程度上受到质疑。对于高含水油田而言,工作的重点应该放在不同小层或单层之间或之内的隔层或夹层上。隔夹层的研究应该重点关注两个问题。第一,隔夹层有效性的评价,应该重点刻画在空间上有效封隔油气水等流体的隔夹层,可以通过物理模拟和数值模拟等解决。第二,隔夹层对地下水(汽)等运动规律的影响分析。目前流体非均质性研究还很薄弱,需要加强地球化学方法和动态监测及生产动态数据应用等攻关。

1.3 开发过程中储层变化规律

在油田开发过程中,随着注水或注汽等措施的实施,储层发生一系列的变化,主要包括孔隙结构、粘土矿物性质及其所引起的储层渗透率的变化等。储层流体性质也发生相应的变化。王志章等^[40]以双河油田水驱油藏和克拉玛依油田九区汽驱油藏为例,对开发中后期油藏参数变化规律及变化机理进行详细分析。Dario 等^[41]以挪威海某区实际资料为例,利用地震数据进行贝叶斯转换预测储层性质的静态和动态变化。本次研究利用扫描电镜资料,对辽河盆地西部凹陷某蒸汽驱实验区蒸汽驱前后储层变化规律进行了分析(图 2)。蒸汽驱之前和之后,粘土矿物含量大幅增加,特别是高岭石等更加稳定的粘土矿物(与伊蒙混层粘土矿物相比)含量增加最为明显。由于粘土矿物等的含量大幅度增加,导致其堵塞孔隙和喉道,储层孔隙度和渗透率降低,对比发现,蒸汽驱之后孔隙度和渗透率的减小更甚。对于储层在开发中的变化规律研究,开发中后期密闭取心井与开发初期的取心井物性分析资料对比是行之有效的方法。储层的敏感性分析也可以提供相关的证据。

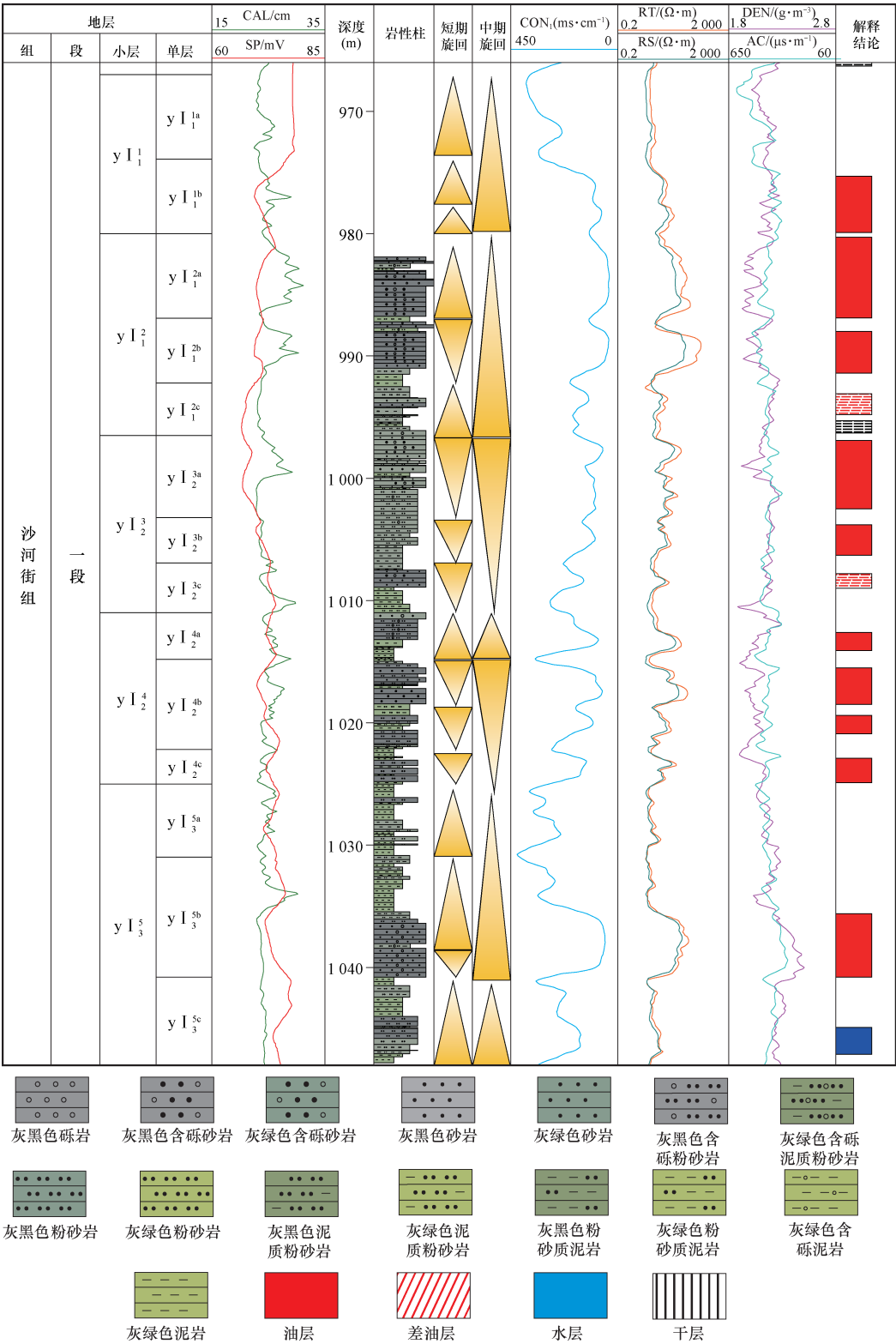


图 1 W3 井单井短期基准面旋回响应模型

Fig. 1 Single-well response model of short-term base level cycles in Well W3

1.4 多信息综合剩余油表征技术

确定高含水油田剩余油分布特征是精细油藏描述研究的核心内容,也是目前研究的热点和难点^[42]。韩

大匡认为,高含水油田剩余油体现“总体高度分散,局部相对富集”的格局^[43]。赵军龙等^[44]对中高含水期剩余油测井评价技术进行了总结(表2,表3)。目前研究剩余油的方法有许多种,包括地质方法,油藏工程、

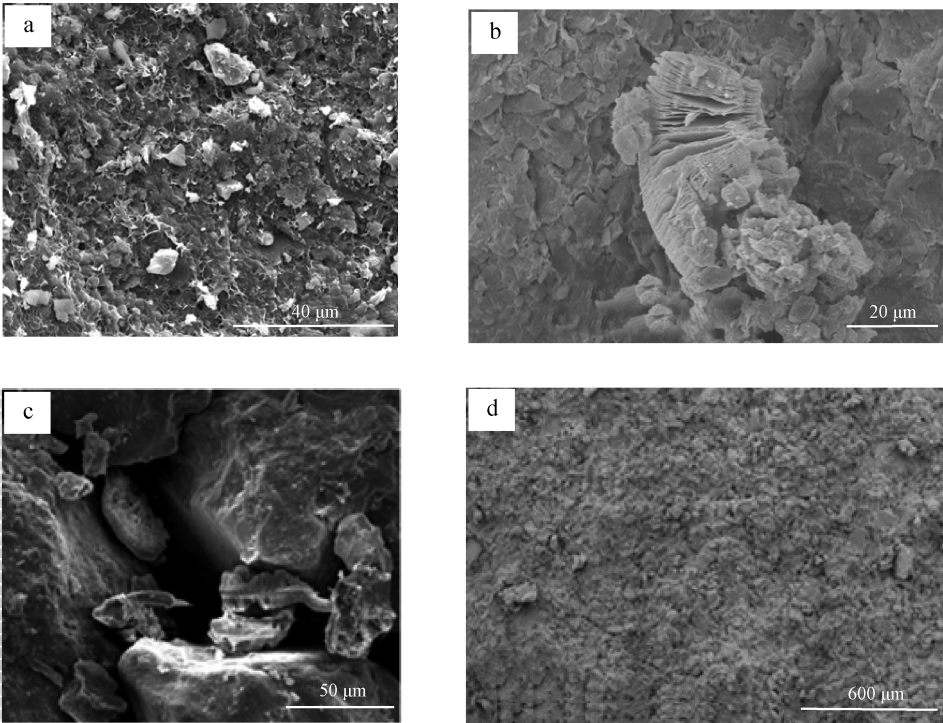


图 2 辽河盆地西部凹陷蒸汽驱试验区于楼油层蒸汽驱前后储层变化规律(扫描电镜)

Fig. 2 Reservoir variation in the process of steam flooding of Yulou reservoir in the steam flooding pilot area in the western sag of Liaohe Basin(SEM)

a. W2 井,蒸汽驱前,砂岩,伊蒙混层粘土,埋深 957.69 m;b. W41 井,蒸汽驱后,砂岩,高岭石粘土,埋深 758.4 m;
c. W2 井,蒸汽驱前,砂岩,孔隙发育,埋深 1 000.76 m;d. W41 井,蒸汽驱后,砂岩,孔隙发育中等,埋深 739.53 m

表 2 裸眼井剩余油饱和度测井方法适用条件及方法特点^[44-53]

Table 2 Application conditions and features of open-hole remaining oil saturation logging^[44-53]

测井方法	适用条件及方法特点	不足	应用实例
电阻率测井	应用广泛,是储层含油性评价的主要手段	受注入水性质和水淹程度的影响	丹佛盆地西罗油田、辽河盆地西部凹陷
介电测井	适用于低矿化度地层水储层,介电常数受地层水矿化度变化影响很小;地层孔隙度大于 8%对油和水就有一定的区分能力,孔隙度越大对油水层的识别精度越高	探测深度较浅	二连盆地吉尔嘎朗图凹陷宝饶构造带、胜利孤岛油田中 11-016 井、大港油田西 2-6-3 井、西 3-7-1 井
激发极化-自然电位组合测井	能够逐点求出地层水矿化度和地层水电阻率,并在求取含水饱和度时消除粘土对饱和度的影响	只适用于淡水泥浆、地层水矿化度低(低于 30 000 mg/L)的砂泥岩剖面。在非均质严重、渗透率变化大及高矿化度条件下应用效果较差	冀东油田、辽河盆地欢喜岭油田齐 40 块
氯能谱测井	在套管井和裸眼井中均适用,且简单、快捷、价格低廉,能克服泥岩含量高的低阻油层以及高渗透地层因泥浆侵入过深(超过了仪器的探测深度)引起的裸眼测井解释结论不可靠的弊端	如果储层含 Ca 元素,测量结果将受影响。同时,该方法适用于 Cl ⁻ 矿化度 > 40 000 mg/L 的高盐油田,地层孔隙度须大于 10%	中原油田卫城油田、江汉油田钟 6-15 井、大庆油田喇嘛甸油田喇 8-B 井
电磁波传播测井	对地层水矿化度不敏感,适用于未知矿化度或矿化度异常的情况下,但其探测范围较小,与电阻率法相结合,效果更佳	探测范围较小	中国南海西部东方区块
核磁共振测井	测量与岩性无关,T2 弛豫时间反映了含油(或水)孔隙大小分布以及不同大小孔隙中的流体含量。通过对 T2 弛豫时间分布分析,可以直观地认识不同孔径孔隙内微观剩余油的分布,对含油量进行精确计算	由于地层氢的核磁性质是由流体本身的性质及其与固相相互作用来决定的,所以研究岩石的核磁共振时,需知道岩石中流体的核磁性质	辽河油田沈 84-安 12 块调整井静 67-541 井、准噶尔盆地 L3-8 井

表 3 套管井剩余油饱和度测井方法适应条件及方法特点^[44,54-58]

Table 3 Application conditions and features of remaining oil saturation logging for casing well^[44,54-58]

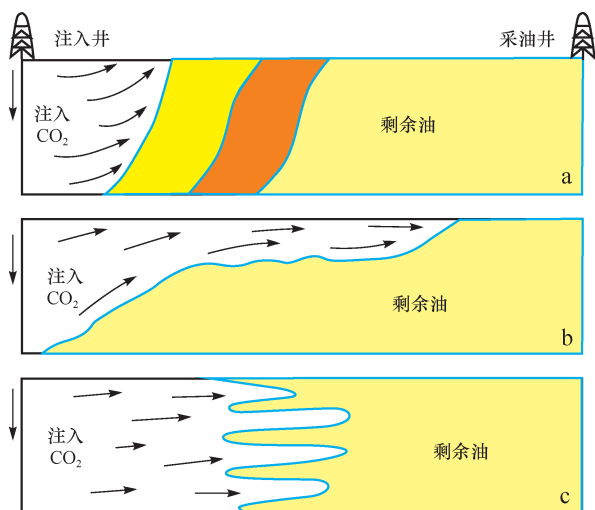
测井方法	适用条件及方法特点	不足	应用实例
中子寿命测井	特别适用于高矿化度地层。中子伽玛测井在这些方面显示出它的优越性,易于推广应用	测井资料解释时需计算 τ 和 Σ 两个参数,使问题复杂化;测井成本高	江汉油田习Ⅱ3-11 井
硼中子寿命测井	满足低矿化度地层;俘获截面大,解释精度高	不足之处在于对压井、洗井作业的要求较高	胜利现河庄油田河 143-斜 52 井、河 68-24 井、河 51-斜 100 井、史 8-斜 110 井、河 146-45 井、河 2-斜 4 井、河 146-55 井
钆中子寿命测井	中子俘获截面大、精确度高;用量少、成本低,施工方便,最大限度地减少了对地层的污染;钆的溶解性比硼好,可进行低温配置	漏失层和强水淹层不易区分、未渗钆层难以识别	克拉玛依油田百口泉油田百 21 井区 9285 井、1427 井
脉冲中子-中子测井	高低孔隙度、低矿化度油藏水的俘获截面(孔隙度大于 5%,矿化度 $5\,000\times 10^{-6}$ 左右)	确定储层含水饱和度时,测井解释结果受地层水矿化度影响较大	青海油田
碳氧比测井	不受地层水矿化度变化的影响,尤其在注入水和地层水矿化度不同的情况下,碳氧比具有其独特的优点;对高孔隙度(>15%)地层能取得良好效果	探测深度浅、受侵入的泥浆滤液、井眼尺寸、井中流体矿化度、俘获本底值、中子脉冲周期及中子管等因素影响	辽河油田 19-123 井、大庆油田喇嘛甸油田
碳氧比能谱测井	经济、有效、快捷、直观,且准确率较高	仅对地层孔隙度大于 20%地层适用;纵向分辨率差,大约在 0.8 m。薄、差层响应较差	胜坨油田 1-2-153 井、大庆油田喇嘛甸油田
脉冲中子衰减测井	受岩性影响较小;适用与孔隙度大于 10%的地层;能区别油和低矿化度的水层;对井筒要求不高,可过油管测量	开发中后期油层受水淹影响,仪器所测的含水饱和度值与裸眼井资料相比偏高。测井仪器成本偏高	孤东 7-36-346 井
RMT 测井	不受地层水矿化度变化影响,具多种测量模式,应用范围广	不适用于低孔(孔隙度小于 8%)的地层	克拉玛依油田陆梁油田 Lu2025 井、准噶尔盆地西北缘检 552 井
过套管电阻率测井	采用推靠方式,不需要进行洗井、刮井作业,节约了大量的占井时间和作业费用;探测深度深;测量时每点可多次测量;测量的动态范围较大,可探测地层电阻率范围是 $0\sim 300\,\Omega\cdot\text{m}$;地层分辨能力较强,围岩的影响相对较小	用直流方式记录信号困难。固井质量对测井质量影响很大。未射孔段可能出现较大段的负差异。咸水泥浆和注入水矿化度变化对解释和评价结论产生较大影响。薄层分辨率低。测井测量井段一般小于 400 m	克拉玛依油田彩南油区 C2285 井、C1103 井

试井以及数值模拟方法、室内实验技术、各种动态监测方法等。对于高含水油田开展剩余油分布规律研究,最关键还是在重视数值模拟的同时,重点利用好密闭取心井资料,加强相关的室内实验研究,注重各种动态监测和生产资料信息的挖掘。同时应该加强储层地质成因模式和微构造、小断层识别等地质研究。近几年,大庆油田在断层附近部署加密调整井,挖潜剩余油,取得了良好的效果。这对于高含水油田精细油藏描述研究中剩余油表征就是一个很好的启示。

1.5 高含水油藏三次采油相关探索

三次采油既能扩大波及体积,又能提高驱油效率,

是开发中后期高含水、特高含水条件下老油田要大幅度提高石油采收率,经济可行的有效途径^[16]。而要开展三次采油,必须正确认识高含水期油田开发地质特征。笔者认为精细油藏描述中需重点关注以下两方面。第一,聚驱、注汽等三采措施与水驱机理差异很大,需要开展聚驱相关的储层孔隙结构和聚驱机理等研究,为三采方式和驱油剂的选择提供依据(图 3)^[59-61]。同时,开展三采对储层伤害等相关的理论分析和室内实验研究。第二,油气水和分布运动规律研究。油田高含水阶段,要合理制定、规划和实施好三采措施,首先必须准确认识地下油气水的分布和运动规律。

图3 CO₂提高采收率机理^[59-61]Fig. 3 Mechanism of CO₂-EOR^[59-61]

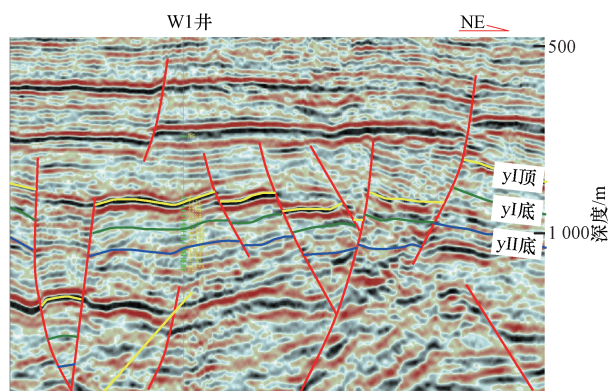
a. 在很低的粘滞力与重力比 R_{vg} 的情况下,体现驱替的特点是气体超覆运动的重力舌进;b. 高一些的粘滞力与重力比 R_{vg} 情况下,驱替的特点仍然是气体的重力舌进,但垂向波及情况已不取决于特定的粘滞力与重力比 R_{vg} ,直到达到极限;c. 驱扫效率随粘滞力与重力比 R_{vg} 的增加而急剧增加,最后达到一个粘滞力与重力比值 R_{vg} ,此时驱替情况完全被横剖面的多个指进所控制,并且横向驱扫效率不取决于特定的粘滞力与重力比值 R_{vg}

2 高含水油田精细油藏描述研究发展趋势

高含水油田精细油藏描述需要解决的问题众多,随着生产实践的深入,新的问题不断出现。本次将高含水油田精细油藏描述研究发展趋势总结为如下5方面。

2.1 断裂体系精细解释

目前断裂体系在中国各大油田广泛存在,从东部的大庆、大港、胜利,到西部的新疆、塔里木等都可以看到。受资料精度和研究者经验等因素影响,目前断裂体系精细解释难度很大。王乃举等指出,影响油藏注水开发的主要是四级断层或更次一级的断层^[17]。因此断裂体系的精细刻画,对于高含水油田剩余油刻画和提高石油采收率具有十分重要的意义。在高含水油田精细油藏描述中,有3个问题需要特别注意。第一,井震资料紧密结合断裂体系剖面精细解释和平面组合(图4)。主要还是利用取心井资料标定高精度的三维地震资料,一般可以实现三级断裂的解释。根据资料的精度和开发生产实践的需求,对于中浅层油藏,应识别出断距5 m以上的五级断层,深层油藏应识别出断距10 m以上的四级断层,超深层应该识别出三级或四

图4 辽河盆地西部凹陷蒸汽驱试验区
断裂体系剖面解释Fig. 4 Seismic interpretation of fracture systems in the steam flooding pilot area in the western sag of Liaohu Basin
y I. 于一油层组;y II 于二油层组;NG. 区域标志层

级断层。李阳等对四级和五级断层的分类特征及识别标志有过详细地介绍^[62]。第二,小断层和微构造的识别和刻画。对于开发中后期油田而言,由于剩余油刻画成为精细油藏描述十分重要的目标之一,而小断层和微构造又对剩余油的分布起着控制作用。因此研究中应该特别重视小断层和微构造的精细刻画。第三,断层封闭性的研究。陈欢庆等^[63]利用典型井水分析数据,对辽河盆地西部凹陷蒸汽驱试验区断裂渗流屏障的封闭性进行了分析。高含水期油水关系复杂,注采井之间的对应关系成为开发生产实践中需要关注的焦点问题之一。而断裂体系的存在又是注采井之间对应关系十分重要的决定因素,因此有必要加大断层封闭性研究的力度。

2.2 储层构型精细表征技术

储层构型也称为储层建筑结构,是指不同级次储层构成单元的形态、规模、方向及其叠置关系^[64]。储层构型精细表征对于精细刻画储层砂体的发育规律和隔夹层的发育规律具有十分重要的作用^[65-67],因此成为高含水油田精细油藏描述中一项重要内容。笔者曾经综合地质、地球物理和开发动态等多种资料,对新疆准噶尔盆地西北缘克下组冲积扇砾岩储层构型进行研究,并建立了针对性的储层构型研究流程(图5)。储层构型研究需要重点关注以下几个问题。一是储层构型研究划分方案和划分级次的确定。受资料的精度限制,目前在储层构型划分中最常用的是4级储层构型和5级储层构型的划分。二是不同构型单元分界面与储层非均质性研究。长时间以来研究者对于储层构型研究关注的焦点主要集中在不同储层构型单元本身,

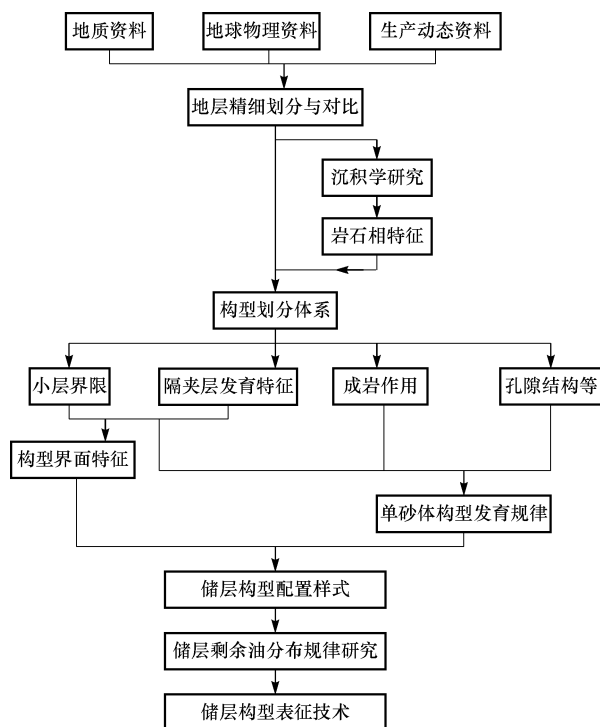


图5 准噶尔盆地西北缘克下组储层构型研究思路和流程

Fig. 5 Ideas and workflow for the study on reservoir architecture of the Kexia Formation in the northwest margin of Jungger Basin

而对于构型之间的分界面重视程度不够,需要加强相关工作。三是不同类型储层构型单元空间发育规模定量特征及空间组合模式。储层构型单元空间发育规模定量特征是储层构型研究最直接的目的,通过这些定量数据的统计分析,可以为高含水油田开发中后期井网井距的加密调整等措施提供地质依据。

2.3 测井水淹层解释

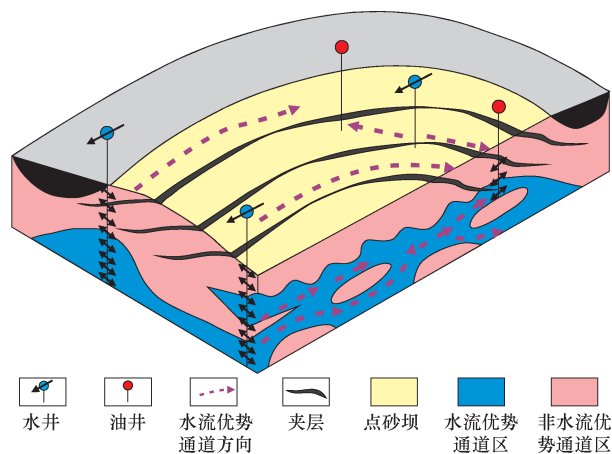
赵培华^[53]指出,无论从采油井见水构成情况,还是从原油产量构成角度来看,中国绝大多数油田已进入高含水阶段。要搞清楚地下油水分布,确定剩余油富集区域,最主要和有效的方法就是进行水淹层测井解释。目前水淹层测井解释研究最大的问题还是解释精度太低,很难满足调整井补孔、压裂酸化改造层位的选择和剩余油表征等要求。在高含水油田水淹层测井解释研究中应该加强油藏条件下水淹层岩石物理性质基础实验研究,深入分析油藏水淹过程中各种测井系列测井响应的变化规律。同时针对不同油藏的地质和开发特征,进一步完善水淹层测井系列,探索水淹层测井新技术和新方法,建立更加精细准确的水淹层测井解释模型,不断提高水淹层测井解释的精度。

2.4 优势渗流通道描述

所谓优势渗流通道是指由于地质及开发因素导致在储集层局部形成的低阻渗流通道,注水开发后期注入水沿此通道形成明显的优势流动而产生注入水大量无效循环^[68-69]。陈程等^[70]以吉林扶余油田 S17-19 区块为例,研究了点砂坝内部水流优势通道分布模式及其对剩余油分布的控制(图6)。图中曲流河点坝层内存在的一段底部型、两段下部型和一段中部型3种水流优势通道类型,在空间上组成了复杂的水流优势通道网络。目前对于水流优势通道的研究主要集中在对其进行识别和描述以及水流优势通道对剩余油分布影响等方面,方法包括地质方法、数值模拟方法、各种数学计算方法等。基于水流优势通道识别基础上的堵水、调剖和调驱等措施的实施,可以防止注入水沿水流优势通道形成无效循环,改善开发效果,提高石油采收率。

2.5 多点地质统计学地质建模技术

油藏描述的最终成果是建立定量的油藏地质模型,作为油藏模拟和油藏工程、采油工艺等研究的工作基础^[11]。对于高含水油田精细油藏描述而言,主要是建立储层预测模型,目前应用最多的是“相控建模”。笔者在进行辽河盆地西部凹陷蒸汽驱试验区地质建模时就使用了这种方法(图7),虽然该方法可以较快捷地建立储层三维地质模型,但对于非均质性强烈的陆相沉积储层而言,井间储层预测的精度并不高。为此需要寻找更具有优势的地质建模方法,多点地质统计学地质建模技术满足了这一要求^[71-72]。目前,众多的研究者对多点地质统计学地质建模方法进行了有益的

图6 点砂坝内部水流优势通道分布模式^[70]Fig. 6 Distribution of preferential flow channels within the point bar reservoir^[70]

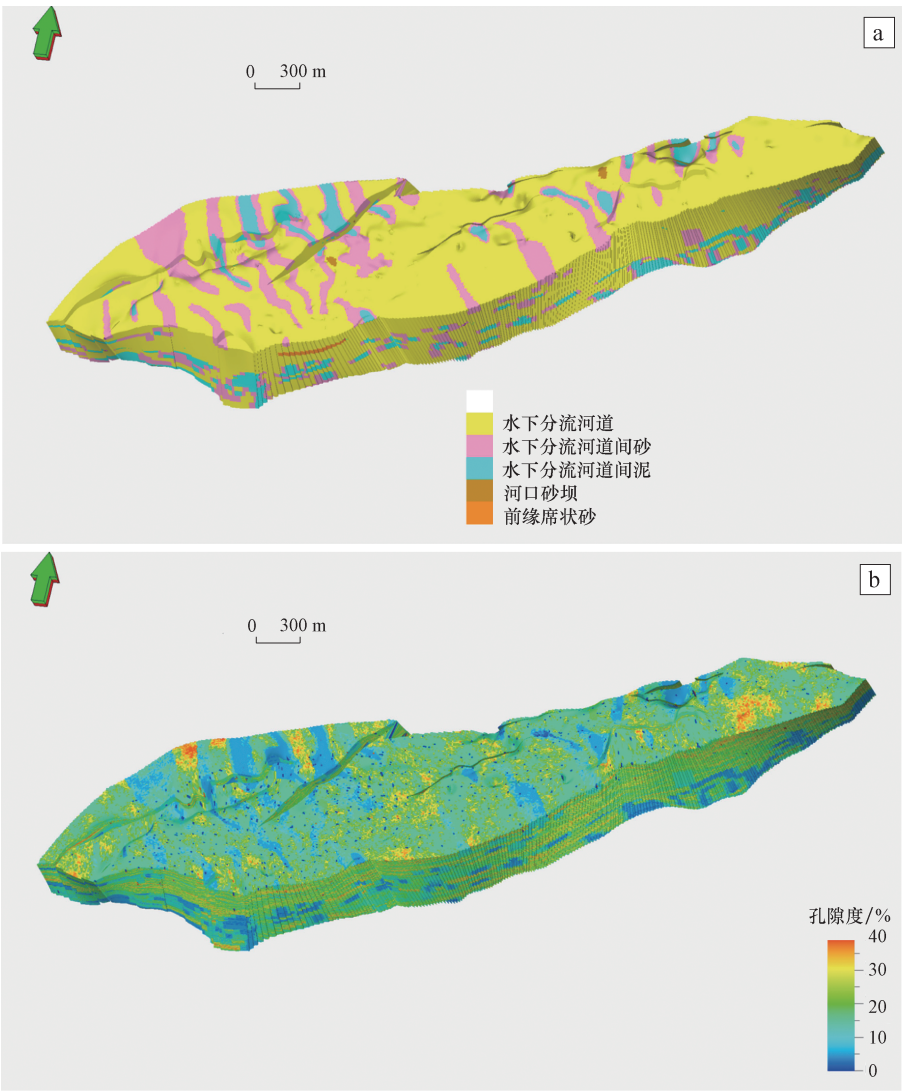


图 7 辽河盆地西部凹陷蒸汽驱试验区地质模型
Fig. 7 Geological model of the steam flooding test area in the western sag of Liaohe Basin
a. 沉积微相模型; b. 孔隙度模型

探索,取得了一定的进步^[73-77],但是还存在诸多未解的难题。比如训练图像平稳性问题、目标体连续性问题、综合地震信息的问题等。

地质建模的软件实现也是多点地质统计学建模需要认真考虑的问题。目前应用最为广泛的大多是国外软件。中国相关企业、高校和科研机构也在从事相关方面软件的研制,但还存在诸多问题。总结主要的问题有以下几个方面。第一,中国相关研究起步较晚,受人员和资金等因素影响和制约,软件在运算方法、成果展示等方面与国外软件相比,还存在较大差距。第二,中国相关软件并没有形成有效的商业运作模式,软件的知名度、推广应用和更新换代方面均存在问题。第三,软件没有形成较完善的培训和售后服务体系,影响了应用推广。储层地质建模研究是高含水油田精细油藏描述关键问题之一,在目前低油价背景下,争取建模

软件国产化,对于各油田企业降本增效具有十分重要的现实意义。

上面提到的只是笔者认为的高含水油田精细油藏描述中几个重点发展方向,在目前各油田生产实践中,还有诸多瓶颈难题需要众多研究者积极探索。比如断块和裂缝型油藏裂缝表征^[78]、井间砂体连通性描述、储层流体非均质性研究等。

3 结论

1) 精细油藏描述研究是一项系统工程,涉及的研究内容众多。高分辨率层序地层学可以有效解决地层精细划分的问题,将分层界限细分至单层。储层非均质性研究中物理模拟和数值模拟实验是隔夹层有效性评价的现实途径,同时应该通过加强地球化学方法应

用和动态资料分析开展流体非均质性研究。地质统计学研究、分析测试资料的对比、不同开发阶段测井物性解释资料的对比分析等是开发过程中储层变化规律研究的有效方法。地质方法、油藏工程、试井以及数值模拟方法、室内试验和动态监测等方法可以实现剩余油表征。三次采油相关机理和开发地质基础研究需要在高含水油田精细油藏描述中加强。

2) 井震资料紧密结合、小断层和微构造的识别刻画、断层封闭性研究等是高含水油田断裂体系精细解释的核心。储层构型划分的级次、构型单元界面的发育规律和构型单元的定量规模特征及空间组合模式等是构型精细表征技术关注的重点。测井水淹层解释可以通过分区分层位、发展测井新技术新方法等不断提高解释精度。优势渗流通道研究方法主要包括地质、数值模拟和各种数学计算方法等。多点地质统计学建模技术需要不断改进算法,同时加强软件国产化。高含水油田精细油藏描述中裂缝表征、单砂体的精细刻画和井间砂体连通性描述以及储层流体非均质性问题也值得关注。目前大港和冀东等油田在地质成因分析基础上,通过井震结合进行构造精细解释和砂体空间预测取得了很好的效果。

参 考 文 献

- [1] Lake L W, Herbert B C Jr. Reservoir characterization[M]. Orlando, Florida: Academic Press, 1986.
- [2] Stoudt E L, Paul M H. Hydrocarbon reservoir characterization-geologic framework and flow unit modeling[M]. Tulsa, Oklahoma: SEPM, 1995.
- [3] Lucia J F. Carbonate reservoir characterization-an integrated approach 2nd edition[M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [4] Rahim K, Reza R, Reza M, et al. Analysis of the reservoir electrofacies in the framework of hydraulic flow units in the Whicher Range Field, Perth Basin, Western Australia[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013, 111: 106 - 120.
- [5] Nikravesh M, Aminzadeh F. Past, present and future intelligent reservoir characterization trends[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2001, 31: 67 - 79.
- [6] Schatzinger R A, Jordan J F. Reservoir characterization-recent advances, AAPG Memoir 71[M]. Tulsa: The American Association of Petroleum Geologists, 1999.
- [7] Patrick D D, Gerilyn S S, John P C. Outcrop-based reservoir characterization: A composite phylloid-algal mound, western Orogrande Basin (New Mexico)[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86 (5): 779 - 795.
- [8] Hisafumi A, Katsuaki K, Toru Y, et al. Magnetotelluric resistivity modeling for 3D characterization of geothermal reservoirs in the Western side of Mt. Aso, SW Japan[J]. Journal of Applied Geophysics, 2006, 58: 296 - 312.
- [9] Chekani M, Kharrat R. An integrated reservoir characterization analysis in a carbonate reservoir: A case study[J]. Petroleum Science and Technology, 2012, 30: 1468 - 1485.
- [10] Julianne F, Per Kent P. Reservoir characterization of a "tight" oil reservoir, the middle Jurassic Upper Shaunavon Member in the Whitemud and Eastbrook pools, SW Saskatchewan[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 44: 41 - 59.
- [11] 裴泽楠, 陈子琪. 油藏描述[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996. Qiu Yanan, Chen Ziqi. Reservoir description[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [12] 张一伟, 熊琦华, 王志章, 等. 陆相油藏描述[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. Zhang Yiwei, Xiong Qihua, Wang Zhizhang, et al. Description of terrestrial oil reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [13] 穆龙新, 裴泽楠. 不同开发阶段的油藏描述[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999. Mu Longxin, Qiu Yanan. Description of reservoirs at different development stages[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [14] 陈欢庆, 朱筱敏. 精细油藏描述中的沉积微相建模进展[J]. 地质科技情报, 2008, 27(2): 73 - 79. Chen Huanqing, Zhu Xiaomin. Microfacies modeling in fine reservoir description[J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 27(2): 73 - 79.
- [15] 贾爱林. 精细油藏描述与地质建模技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010. Jia Ailin. Fine reservoir description and geological modeling[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [16] 宋万超. 高含水期油田开发技术和方法[M]. 北京: 地质出版社, 2003. Song Wanchao. Development technology and methods of high water-cut oilfield[M]. Beijing: Geology Press, 2003.
- [17] 王乃举. 中国油藏开发模式总论[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999. Wang Naiju. An overview of Chinese oil reservoir development model[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [18] 冈秦麟. 高含水油田改善水驱效果新技术(上)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999. Gang Qinlin. New technology for improving water flooding effect in high water cut oilfield (Volume one)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [19] Kris U R, Muhammad H A, Turki F, et al. Scale inhibitor squeeze treatments based on modeling studies[J]. SPE130280, 2010.
- [20] Manichand R, Mogollón J L, Bergwijn S, et al. Preliminary assessment of Tambaredjo heavy oilfield polymer flooding pilot test[J]. SPE138728, 2010.
- [21] Satyajit T, Torsten F, Akhil D. A practical approach for assisted history matching using grid coarsening and streamline-based inversion: experiences in a giant carbonate reservoir[J]. SPE141606, 2011.
- [22] Ghosh A, Singh R K, Nangia V, et al. Multi-dimensional NMR technique for wireline formation tester sampling optimization and perforation strategy determination in a Brown Field, India[J]. SPE153657, 2012.

- [23] 高宝国,滑辉,丁文阁,等.低渗透油田特高含水期开发技术对策[J].油气地质与采收率,2013,20(6):97-99,103.
Gao Baoguo, Hua Hui, Ding Wenge, et al. Development technical countermeasures of low permeable oil fields during high water-cut period[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(6): 97-99, 103.
- [24] 刘宗堡,闫力,高飞,等.油田高含水期断层边部剩余油富集规律及挖潜方法-以松辽盆地杏南油田北断块葡萄花油层为例[J].东北石油大学学报,2014,38(4):52-58.
Liu Zongbao, Yan Li, Gao Fei, et al. Remaining oil enrichment regularity and extract method of oilfield in high water-cut stage fault edge taking Putaohua reservoir of North Fault Block in Xingnan Oilfield in Songliao Basin as an example[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2014, 38(4): 52-58.
- [25] 王玉普,刘义坤,邓庆军,等.中国陆相砂岩油田特高含水期开发现状及对策[J].东北石油大学学报,2014,38(1):1-9.
Wang Yupu, Liu Yikun, Deng Qingjun, et al. Development present situation and the countermeasures of the Chinese continental sandstone oilfield[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2014, 38(1): 1-9.
- [26] 杨超,许晓明,齐梅,等.高含水老油田注采连通判别及注水量优化方法[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(12):4592-4601.
Yang Chao, Xu Xiaoming, Qi Mei, et al. Injector-producer connectivity identification and water injection optimization of mature oil fields in high water cut period[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(12): 4592-4601.
- [27] 朱丽红,杜庆龙,姜雪岩,等.陆相多层砂岩油藏特高含水期三大矛盾特征及对策[J].石油学报,2015,36(2):210-216.
Zhu Lihong, Du Qinglong, Jiang Xueyan, et al. Characteristics and strategies of three major contradictions for continental facies multi-layered sandstone reservoir at ultra-high water cut stage[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(2): 210-216.
- [28] 郑小杰,梁宏刚,娄大娜,等.塔河低幅大底水油藏高含水期剩余油分布[J].科学技术与工程,2015,15(5):86-90.
Zheng Xiaojie, Liang Honggang, Lou Dana, et al. Remaining oil distribution of low amplitude with great bottom water reservoir in high water cut stage in Tahe[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(5): 86-90.
- [29] 张玉.新民油田民3区块高含水期开发对策分析[J].长江大学学报(自科版),2016,13(20):56-61.
Zhang Yu. Development countermeasure analysis of 3 blocks in Xinmin Oilfield at the high water-cut stage[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2016, 13(20): 56-61.
- [30] 邢志贵,蒋学君,许小红.微量元素在变质岩地层对比中的应用[J].特种油气藏,1998,5(1):10-13.
Xing Zhigui, Jiang Xuejun, Xu Xiaohong. Application of trace elements in the metamorphic stratigraphic correlation[J]. Special Oil and Gas Reservoir, 1998, 5(1): 10-13.
- [31] 邓宏文,王洪亮,李小孟.高分辨率层序地层对比在河流相中的应用[J].石油与天然气地质,1997,18(2):90-95,114.
Deng Hongwen, Wang Hongliang, Li Xiaomeng. Application of high-resolution sequence stratigraphic correlation to fluvial facies[J]. Oil & Gas Geology, 1997, 18(2): 90-95, 114.
- [32] 邓宏文,王洪亮,祝永军,等.高分辨率层序地层学-原理及应用[M].北京:地质出版社,2002.
Deng Hongwen, Wang Hongliang, Zhu Yongjun, et al. High-resolution sequence stratigraphic correlation: theory and application[M]. Beijing: Geology Press, 2002.
- [33] 赵汉卿.高分辨率层序地层学对比与我国的小层对比[J].大庆石油地质与开发,2005,24(1):5-9,12.
Zhao Hanqing. High resolution sequence stratigraphy contrast compared with small layers carved up of our country[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2005, 24(1): 5-9, 12.
- [34] 淡卫东,张昌民,尹太举,等.川西白马庙气田上侏罗统蓬莱镇组高分辨率层序地层对比[J].沉积学报,2007,25(5):708-715.
Dan Weidong, Zhang Changmin, Yin Taiju, et al. High resolution sequence stratigraphic correlation of Penglaizhen Formation, Upper Jurassic of Baimamiao gas field, Western Sichuan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(5): 708-715.
- [35] 郑荣才,文华国,李凤杰.高分辨率层序地层学[M].北京:地质出版社,2010.
Zheng Rongcai, Wen Huaguo, Li Fengjie. high resolution sequence stratigraphy[M]. Beijing: Geology Press, 1993.
- [36] 纪友亮,吴胜和,张锐.自旋回和异旋回的识别及其在油藏地层对比中的作用[J].中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(4):1-6.
Ji Youliang, Wu Shenghe, Zhang Rui. Recognition of auto-cycle and allo-cycle and its role in strata correlation of reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36(4): 1-6.
- [37] 陈欢庆,赵应成,高兴军,等.高分辨率层序地层学在地层精细划分与对比中的应用-以辽河西部凹陷某试验区于楼油层为例[J].地层学杂志,2014,38(3):317-323.
Chen Huanqing, Zhao Yingcheng, Gao Xingjun, et al. High-resolution sequence stratigraphy and its application in the fine-scale stratigraphic correlation of the Yulou reservoir in the West Depression of the Liaohe Basin[J]. Journal of Stratigraphy, 2014, 38(3): 317-323.
- [38] 陈永生.油田非均质对策论[M].北京:石油工业出版社,1993.
Chen Yongsheng. Heterogeneity of oil field policy[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993.
- [39] 吴胜和,熊琦华.油气储层地质学[M].北京:石油工业出版社,1998:155-190.
Wu Shenghe, Xiong Qihua. Petroleum reservoir geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 155-190.
- [40] 王志章,蔡毅,杨蕾.开发中后期油藏参数变化规律及变化机理[J].北京:石油工业出版社,1999.
Wang Zhizhang, Cai Yi, Yang Lei. Variation rule and mechanism of reservoir parameters in middle and late period of development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [41] Dario, Tapan M. Bayesian inversion of time-lapse seismic data for the estimation of static reservoir properties and dynamic property changes[J]. Geophysical Prospecting, 2015, 63, 637-655.

- [42] 徐守余.油藏描述方法原理[M].北京:石油工业出版社,2005.
Xu Shouyu. Principle of reservoir description method[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.
- [43] 韩大匡.关于高含水油田二次开发理念、对策和技术路线的探讨[J].石油勘探与开发,2010,37(5):583-591.
Han Dakuang. Discussions on concepts, countermeasures and technical routes for the redevelopment of high water-cut oilfields[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(5): 583-591.
- [44] 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.
- [45] Reed A J.电阻率测井在西罗油田油气勘探开发中的应用[J].国外油气勘探,1992,4(5):76-87.
Reed A J. The application of resistivity logging in oil and gas exploration and development in xiluo oilfield[J]. Offshore Oil and Gas Exploration, 1992, 4(5): 76-87.
- [46] 孙玉红,王建功,高淑梅,等.介电测井在二连地区的应用[J].测井技术,2006,30(2):158-160.
Sun Yuhong, Wang Jiangong, Gao Shumei, et al. The application of dielectric log in Erlian Basin[J]. Well Logging Technology, 2006, 30(2): 158-160.
- [47] 丁娱娇,吴淑琴,李庆合,等.介电测井资料校正方法及油水层的定性识别[J].测井技术,2000,24(2):130-134.
Ding Yujiao, Wu Shuqin, Li Qinghe, et al. Dielectric logging data correction and its qualitative evaluation of oil, water bed[J]. Well Logging Technology, 2000, 24(2): 130-134.
- [48] 翟营莉.稠油水淹层测井解释方法研究[J].国外测井技术,2008,23(4):26-31.
Zhai Yingli. Study on interpretation method of heavy oil flooded layer logging[J]. World Well Logging Technology, 2008, 23(4): 26-31.
- [49] 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):73-77,82.
Zhao Ming, Zhang Haining. Application of two new logging methods for evaluating remaining oil saturation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(5): 73-77, 82.
- [50] 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 application study of the chlorine logging in Weicheng Oil-field[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2005, 27(1): 5-7.
- [51] 王滨涛,高艳芳,樊玉秀,等.喇嘛甸油田剩余油测井评价方法研究[J].石油天然气学报,2014,36(7):84-88.
Wang Bintao, Gao Yanfang, Fan Yuxiu, et al. Remaining oil logging evaluation methods for Lamadian Oilfield[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(7): 84-88.
- [52] 蔡军,张恒荣,曾少军,等.随钻电磁波电阻率测井联合反演方法及其应用[J].石油学报,2016,37(3):371-381.
Cai Jun, Zhang Hengrong, Zeng Shaojun, et al. Joint inversion method of electromagnetic wave resistivity logging while drilling and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(3): 371-381.
- [53] 赵培华.油田开发水淹层测井解释[M].北京:石油工业出版社,2003.
Zhao Peihua. Well logging interpretation of oilfield development flood zone[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [54] 赵伟,王海文,刘延梅,等.硼中子寿命测井技术应用研究[J].新疆石油地质,2007,28(3):372-374.
Zhao Wei, Wang Haiwen, Liu Yanmei, et al. Application of boron-neutron life logging-an example of Xiahezhuan Field[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(3): 372-374.
- [55] 王建江,郭建国.硼(钆)-中子寿命测井技术在油田开发中的应用[J].新疆石油科技,2013,2(23):17-21.
Wang Jianjiang, Guo Jianguo. Application of boron(gadolinium)-neutron lifetime logging technology in oilfield development[J]. Xinjiang Petroleum Technology, 2013, 2(23): 17-21.
- [56] 张锋,王新光.脉冲中子-中子测井影响因素的数值模拟[J].中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(6):46-51.
Zhang Feng, Wang Xinguang. Numerical simulation for influence factor of pulsed neutron-neutron logging[J]. Journal of China University of Petroleum(Science & Technology Edition) 2009, 33(6): 46-51.
- [57] 范小秦,姚振华,徐春华,等.RMT测井在克拉玛依油田中低渗透率砾岩油藏注水开发中的应用[J].测井技术,2008,32(2):180-184.
Fan Xiaoqin, Yao Zhenhua, Xu Chunhua, et al. Application of RMT in water-flooded conglomerate reservoir with low-permeability of Karamay Oilfield[J]. Well Logging Technology, 2008, 32(2): 180-184.
- [58] 徐春华,侯加根,赵喜元,等.过套管电阻率测井在克拉玛依低渗透层的应用[J].西南石油大学学报(自然科学版),2008,30(4):55-59.
Xu Chunhua, Hou Jiagen, Zhao Xiuyan, et al. The application of cased hole formation resistivity logging in Karamay low permeable reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30(4): 55-59.
- [59] 江怀友,沈平平,闫存章,等.世界石油工业CO₂埋存现状与展望[J].国外油田工程,2008,24(7):50-54.
Jiang Huaiyou, Shen Pingping, Yan Cunzhang, et al. Present situation and prospect of CO₂ storage in world oil industry[J]. Foreign Oil Field Engineering, 2008, 24(7): 50-54.
- [60] 沈平平,廖新维.二氧化碳地质埋存与提高石油采收率技术[M].北京:石油工业出版社,2009.
Shen Pingping, Liao Xinwei. Carbon dioxide geological storage and oil recovery technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [61] 陈欢庆,胡永乐,田昌炳.CO₂驱油与埋存研究进展[J].油田化学,2012,29(1):116-121,127.
Chen Huanqing, Hu Yongle, Tian Changbing. Advances in CO₂ displacing oil and CO₂ sequestrated researches[J]. Oilfield Chemistry, 2012, 29(1): 116-121, 127.
- [62] 李阳,刘建民.油藏开发地质学[M].北京:石油工业出版社,2007.

- Li Yang, Liu Jianmin. Reservoir development geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [63] 陈欢庆, 梁淑贤, 荐鹏, 等. 稠油热采储层渗流屏障特征 - 以辽河盆地西部凹陷某试验区于楼油层为例 [J]. 沉积学报, 2015, 33(3): 616 - 624.
- Chen Huanqing, Liang Shuxian, Jian Peng, et al. Flow barrier characteristics of thermal recovery of heavy oil reservoir; taking Yulou oil-bearing sets in some experimental area in the south end of westward slope of West depression in Liaohe Basin as an example [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(3): 616 - 624.
- [64] 吴胜和. 储层表征与建模 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- Wu Shenghe. Reservoir characterization and modeling [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [65] 陈欢庆, 赵应成, 李树庆, 等. 岩性分析对砾岩储层构型研究的意义 - 以准噶尔盆地西北缘六区克下组冲积扇储层为例 [J]. 天然气地球科学, 2014, 25(5): 721 - 731.
- Chen Huanqing, Zhao Yingcheng, Li Shuqing, et al. Significance of lithology analyses on the researches of conglomerate reservoir architecture of alluvial fan sediments; taking alluvial fan reservoir in some area of Northwest Margin of Junggar Basin as an example [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(5): 721 - 731.
- [66] 陈欢庆, 梁淑贤, 舒治睿, 等. 冲积扇砾岩储层构型特征及其对储层开发的控制作用 - 以准噶尔盆地西北缘某区克下组冲积扇储层为例 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2015, 45(1): 13 - 24.
- Chen Huanqing, Liang Shuxian, Shu Zhirui, et al. Characteristics of conglomerate reservoir architecture of alluvial fan and its controlling effects to reservoir development; taking alluvial fan reservoir in some area of Northwest margin of Junggar Basin as an example [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(1): 13 - 24.
- [67] 印森林, 陈恭洋, 戴春明, 等. 河口坝内部储层构型及剩余油分布特征 [J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 630 - 639.
- Yin Senlin, Chen Gongyang, Dai Chunming, et al. Reservoir architecture and remaining oil distribution in mouth bar-A case study on the braided delta of long-axis gentle slope in Zaonan Fault block of Dagang Oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 630 - 639.
- [68] 孙明, 李治平. 注水开发砂岩油藏优势渗流通道识别与描述技术 [J]. 新疆石油天然气, 2009, 5(1): 51 - 56.
- Sun Ming, Li Zhiping. Identification and description techniques of dominated water flooding path of sandstone reservoir of water injection development [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2009, 5(1): 51 - 56.
- [69] 吴忠维, 崔传智, 杨勇, 等. 高含水期大孔道渗流特征及定量描述方法 [J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(4): 839 - 844.
- Wu Zhongwei, Cui Chuanzhi, Yang Yong, et al. Seepage characteristics and quantitative description of large pore pathways at high water cut stage [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(4): 839 - 844.
- [70] 陈程, 宋新民, 李军. 曲流河点砂坝储层水流优势通道及其对剩余油分布的控制 [J]. 石油学报, 2012, 33(2): 257 - 263.
- Chen Cheng, Song Xinmin, Li Jun. Dominant flow channels of point-bar reservoirs and their control on the distribution of remaining oils [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 257 - 263.
- [71] 王家华, 陈涛. 储层沉积相多点地质统计学建模方法研究 [J]. 石油化工应用, 2013, 32(8): 57 - 59.
- Wang Jiahua, Chen Tao. Research on reservoir facies modeling using multiple-point geostatistics [J]. Petrochemical Industry Application, 2013, 32(8): 57 - 59.
- [72] 吴胜和, 李文克. 多点地质统计学 - 理论、应用与展望 [J]. 古地理学报, 2005, 7(1): 137 - 144.
- Wu Shenghe, Li Kewen. Multiple-point geostatistics: theory, application and perspective [J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(1): 137 - 144.
- [73] 张伟, 林承焰, 董春梅. 多点地质统计学在秘鲁 D 油田地质建模中的应用 [J]. 中国石油大学 (自然科学版), 2008, 32(4): 24 - 28.
- Zhang Wei, Lin Chengyan, Dong Chunmei. Application of multiple-point geostatistics in geological modeling of D Oilfield in Peru [J]. Journal of China University of Petroleum, 2008, 32(4): 24 - 28.
- [74] 李少华, 张昌民, 何幼斌, 等. 河道砂体内部物性分布趋势的模拟 [J]. 石油天然气学报, 2009, 31(1): 23 - 25.
- Li Shaohua, Zhang Changmin, He Youbin, et al. Simulation of internal physical distribution trend of channel sand body [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(1): 23 - 25.
- [75] 尹艳树, 张昌民, 李少华, 等. 一种基于沉积模式的多点地质统计学建模方法 [J]. 地质论评, 2014, 60(1): 217 - 221.
- Yin Yanshu, Zhang Changmin, Li Shaohua, et al. A pattern-based multiple point geostatistics method [J]. Geological Review, 2014, 60(1): 217 - 221.
- [76] 耿丽慧, 侯加根, 李宇鹏, 等. 多点地质统计学 DS-MPS 算法在储层沉积相建模中的应用 [J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(1): 24 - 29.
- Geng Lihui, Hou Jiagen, Li Yupeng, et al. Application of DS-MPS algorithm in the modeling of reservoir sedimentary facies [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(1): 24 - 29.
- [77] 刘可可, 侯加根, 刘钰铭, 等. 多点地质统计学在点坝内部构型三维建模中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(4): 577 - 583.
- Liu Keke, Hou Jiagen, Liu Yuming, et al. Application of multiple-point geostatistics in 3D internal architecture modeling of point bar [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4): 577 - 583.
- [78] 张军华. 断块、裂缝型油气藏地震精细描述技术 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2012.
- Zhang Junhua. Seismic fine description technique for fault block and fractured reservoir [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2012.

(编辑 张亚雄)