

海相砂岩油藏定量描述技术及开发策略

——以文昌 Z 油田为例

金中述, 周海韵, 代云娇, 岳绍飞

(中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057)

摘要: 文昌 Z 油田经过二十年的开发, 层内层间物性差异大, 大部分生产井采用多井合采方式导致剩余油分布较为复杂, 定量描述剩余油难度大。以 Z 油田 ZJ1-4U 油组为例, 利用地质精细描述、剩余油定量描述及时变数值模拟, 对剩余油分布进行精细研究, 形成一套海相砂岩油藏剩余油定量描述的研究技术。通过油藏剩余油定量描述研究技术, 挖掘油田内部潜力, 提出加密调整方案, 投产后取得良好效果, 表明海相砂岩油藏定量描述技术可实施性较高, 为类似油藏下步挖潜提供新方法新思路。

关键词: 海相砂岩; 地质精细描述; 时变数值; 剩余油定量描述

中图分类号: TE37 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)02-0288-09

文昌 Z 油田是我国南海海域典型的海相砂岩油藏, 主要含油层系为珠江组。该油组原油性质具有密度、黏度、胶质和沥青含量低的特点, 原油品质好, 属于轻质原油。油田投入开发近 21 年, 已进入高含水高采出程度阶段, 层间层内矛盾突出, 产量逐渐下降, 因此, 在油藏定量描述剩余油基础上对油田进行调整挖潜是有必要的。

目前国内大部分陆地油田剩余油挖潜研究思路主要依靠大量取芯及动静态资料。与其相比, 海上油田在资料收集上存在一定短板, 主要是海上油田开发成本高, 开发井数相对较少, 因此各项取芯资料、动态检测资料有限。且 Z 油田由于层内层间物性差异大, 导致多层合采条件下油组内部及油组间含水差异大, 使得剩余油分析难度增大。

本文针对 Z 油田地质及开发特征, 综合利用地质精细描述、剩余油定量描述及精细数值模拟, 对 Z 油田复杂地质条件下剩余油分布进行定量描述, 并通过实施调整井验证描述准确性, 形成一套海相砂岩油藏剩余油定量描述技术, 为类似油藏剩余油分布研究提供新方法。

1 剩余油定量描述技术

1.1 地质精细描述技术

在单井高分辨率层序界面识别的基础上, 首先

挑选标准井, 建立覆盖全区的骨干剖面, 其次在垂直物源方向和平行于西南物源方向选取两个剖面进行连井层序分析, 建立覆盖全油田的 ZJ1-4U 油组高分辨率等时地层格架。最后结合单井相、测井相及地震相进行连井相和平面相研究, 确定小层沉积环境及沉积微相空间展布^[1-2]。

采用地质综合研究方法对隔夹层进行精细研究, 再利用地质统计学反演对钙质夹层进行精细刻画, 搞清隔夹层的类型、特征、成因及分布规律, 最终指导油田剩余油分布研究。

中期基准面旋回等时地层格架建立是在长期基准面旋回框架约束下, 主要依靠井资料, 即测井曲线形态的变化、沉积旋回、地层厚度等信息, 在关键井上对中期基准面旋回界面进行识别, 进而细分地层, 并通过骨架剖面网, 推广至全油田, 同时通过井震结合, 对井上识别的中期旋回转换面进行层位标定及追踪, 从而建立全油田的中期旋回等时地层格架。选取 2 井为关键井, 目的层 ZJ1-4U 油组位于两个不同的长期基准面旋回 LSC2 和 LSC1 内, 两个长期旋回分界面为地震反射 T41 界面, 界面之上发育一套厚约 12 m 的泥岩(图 1)。

目的层 ZJ1-4U 油组位于 MSC4 内部, 在 2 井

收稿日期: 2023-10-30

作者简介: 金中述(1990—), 女, 山东青岛人, 工程师, 研究方向为开发油藏; 周海韵(1995—), 女, 黑龙江林口人, 工程师, 研究方向为油藏开发; 代云娇(1986—), 女, 吉林长春人, 工程师, 研究方向为开发地质; 岳绍飞(1988—), 男, 河南辉县人, 工程师, 研究方向为开发地质。

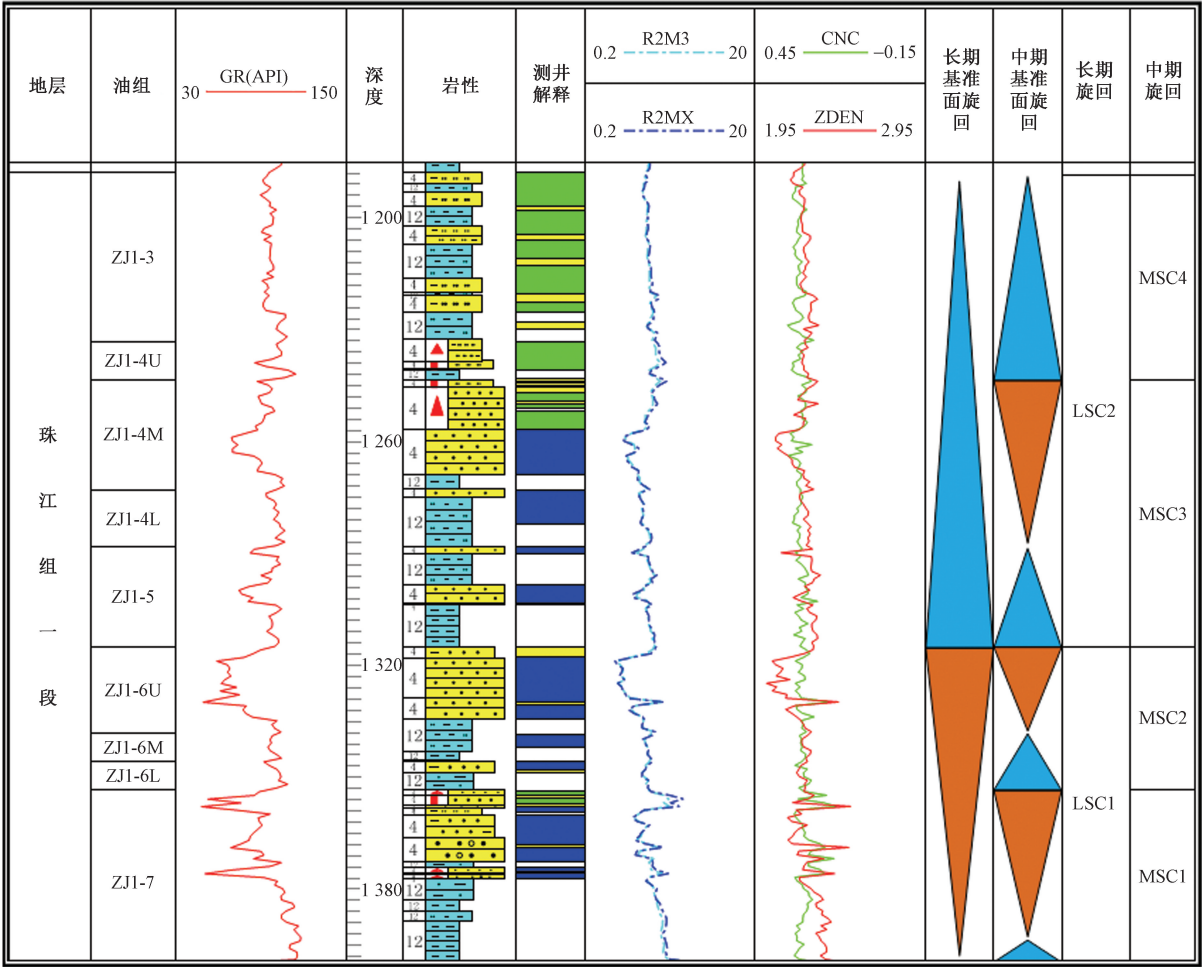


图1 关键井 WC13-1-2 井基准面旋回划分

MSC4 内部,根据测井曲线特征,可识别出较为明显的 2 个台阶,代表了 3 次阶段性的海侵海退沉积旋回,从地层叠加样式看,4 套砂岩叠加样式为退积或加积,由于自然伽马曲线值最高处代表的泥质含量最高,结合沉积环境,认为自然伽马曲线值由最低转为最高处代表阶段性的初始海泛面,根据旋回界面划分原则,将该界面识别为旋回转换面,在 MSC4 内部可识别出 2 个短期基准面旋回转换面,将 MSC1 分为 3 个短期基准面旋回,分别为 SSC5、SSC6、SSC7(图 2)。

由两个方向的骨架剖面:可见,ZJ1-4U 油组在各井上的旋回特征较为相似,与标准井的基准面旋回特征基本一致,MSC4 总体上为一个基准面上升半旋回,其内部可划分为 3 个短期基准面旋回,分别为 SSC5、SSC6、SSC7。短期旋回 SSC5 与 SSC6 分别对应 ZJ1-4U-2 小层和 ZJ1-4U-1 小层。

1 小层临滨滩为主,泥质粉砂岩,砂体展布范围广;2 小层发育两个呈北西向展布的临滨砂坝主体,各个砂坝主体内部砂体连续性较好,近顺物源

方向砂体连续性差。1 小层平均厚度 2.0 m,渗透率 1.7~17.8 mD,属低阻低渗层;2 小层平均厚度 1.8 m,渗透率 5.4~1021.8 mD,属中高渗储层(图 3~图 4)。

1.2 剩余油定量描述技术

为提高剩余油分布准确性,采用油藏工程方法及动静态研究成果,结合生产井投产后生产资料及测试情况,半定量绘制小层含水等值线图^[3]。

以 Z 油田 ZJ1-4U 油组为例。首先收集油田动静态资料,以生产数据为基础,对生产阶段进行划分。针对不同阶段的生产数据,结合油藏工程方法与产液剖面测试,对单井产量进行分小层劈分,最终得到较为准确的小层产量情况,从而得到小层含水变化情况。结合精细地质研究成果,对见水方向进行理论验证,对含水数据进行修正(图 5)。

结合生产动态,将 ZJ1-4U 油组生产阶段划分为四个阶段。第一阶段:2002 年 7 月—2012 年 3 月,该阶段为未动用阶段。结合 RPM 结果,可以

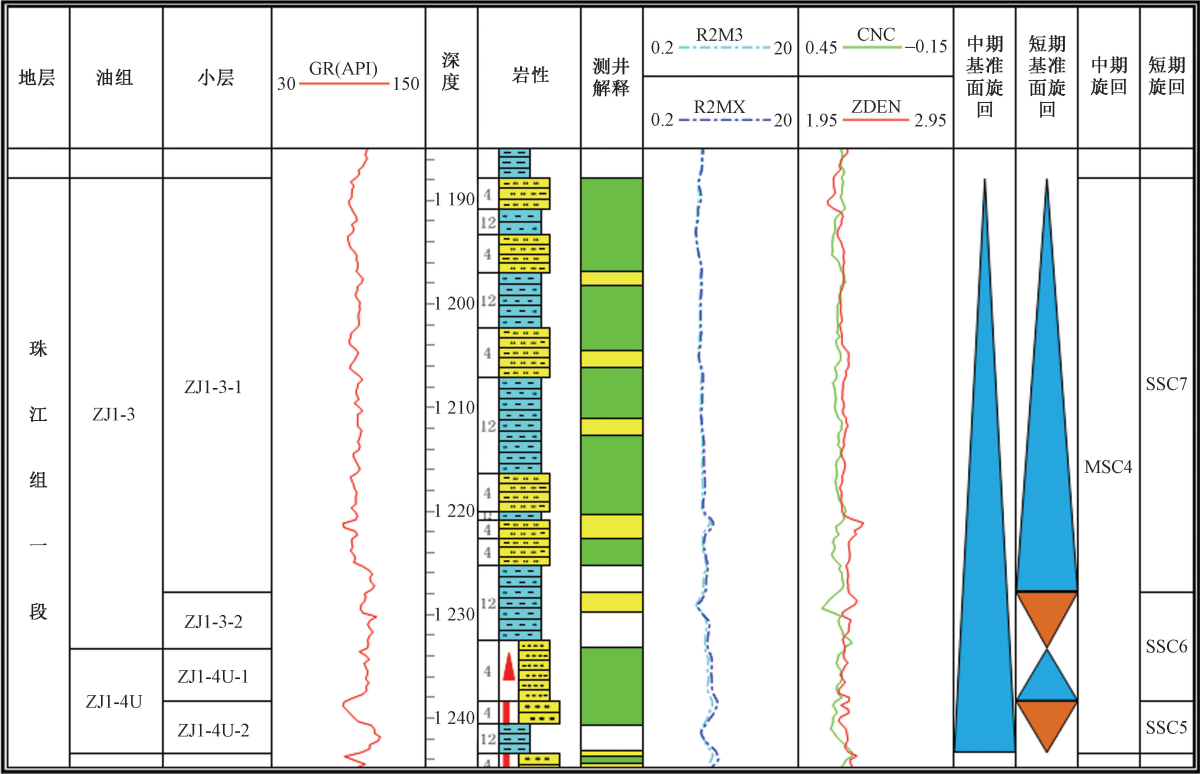


图 2 ZJ1-4U 油组短期基准面旋回划分

看出 ZJ1-4U 油组基本未动用,该阶段探井密闭取芯成果印证这一结论。渗透率级差是指多层合采的储层中,小层中渗透率的最大值与最小值的比值。级差越大,低渗层动用越差;各层平均渗透率越大,低渗层动用越好;生产压差越大,低渗层动用越好。分析认为渗透率极差超过 10,则相对低渗油组未动用。与 ZJ1-4M、ZJ2-1 油组对比,计算渗透率极差均超过 10,导致 ZJ1-4U 动用程度低。第二阶段:2012 年 3 月—2013 年 5 月,该阶段主要生产井为 A9 井,该阶段水驱模式为弹性能+边水驱动,其中 1 小层基本未动用;2 小层 A9 井点处动用,且由于距离 2 小层含油内边界较近,A9 井主要见水方向为北侧。第三阶段:2013 年 5 月—2019 年 2 月,该阶段主要生产井为 A3H1 井、A9 井,历年 RPM 监测资料显示 A2 井在 ZJ1-4U-2 小层动用程度低。见水方向为南侧及北侧。第四阶段:2019 年 2 月至今,为加密调整阶段,实施调整井 A2H1、A7H1 井,其生产层位均为 ZJ1-4U-2 小层(图 6)。

利用该方法,最终绘制出不同阶段 ZJ1-4U 油组小层含水等值线图(图 7),图 7 结合油藏多年动态认识,参考地质影响因素,使得含水分布更贴近地下情况,剩余油富集区一目了然。

1.3 时变数值模拟方法

水驱过程中大量冲刷后,岩石矿物表面优先吸附的黏土矿物被水冲走,优先吸附的油膜被剥落、改造,形成了新的水膜,故岩石润湿性随注水冲刷由初期的亲油向亲水方向转化,继而导致油水相渗形态变化,驱油效率提高。

为了更好地分析非均质性较强油藏剩余油分布规律,地质建模时考虑相控建模技术,结合阶段不同,考虑到水驱油藏开发过程中储层物性、流体参数以及相渗曲线的动态变化。采用综合考虑储层渗流参数(渗透率、相渗曲线)动态连续变化的时变数值模拟技术^[4-7],使数值模型最大程度接近地下情况,保证拟合可靠性。

将一个长期开发的油藏的开发历史时期,按照以下原则划分成几个模拟阶段,再分阶段分别建立地质初始模型和动态模拟模型。划分的方法可以根据重大开发方案调整的时期(如加密井网、调整注采系统)划分;也可根据开发阶段(如产量上升阶段、稳产阶段、产量下降阶段)划分。这样,每个模拟段的模拟时间就会缩短。此次阶段划分参考定量描述中划分成果。

第一阶段初始模型建立的地质模型是从油藏精细描述的结果中抽取,先建立起第一阶段初始模

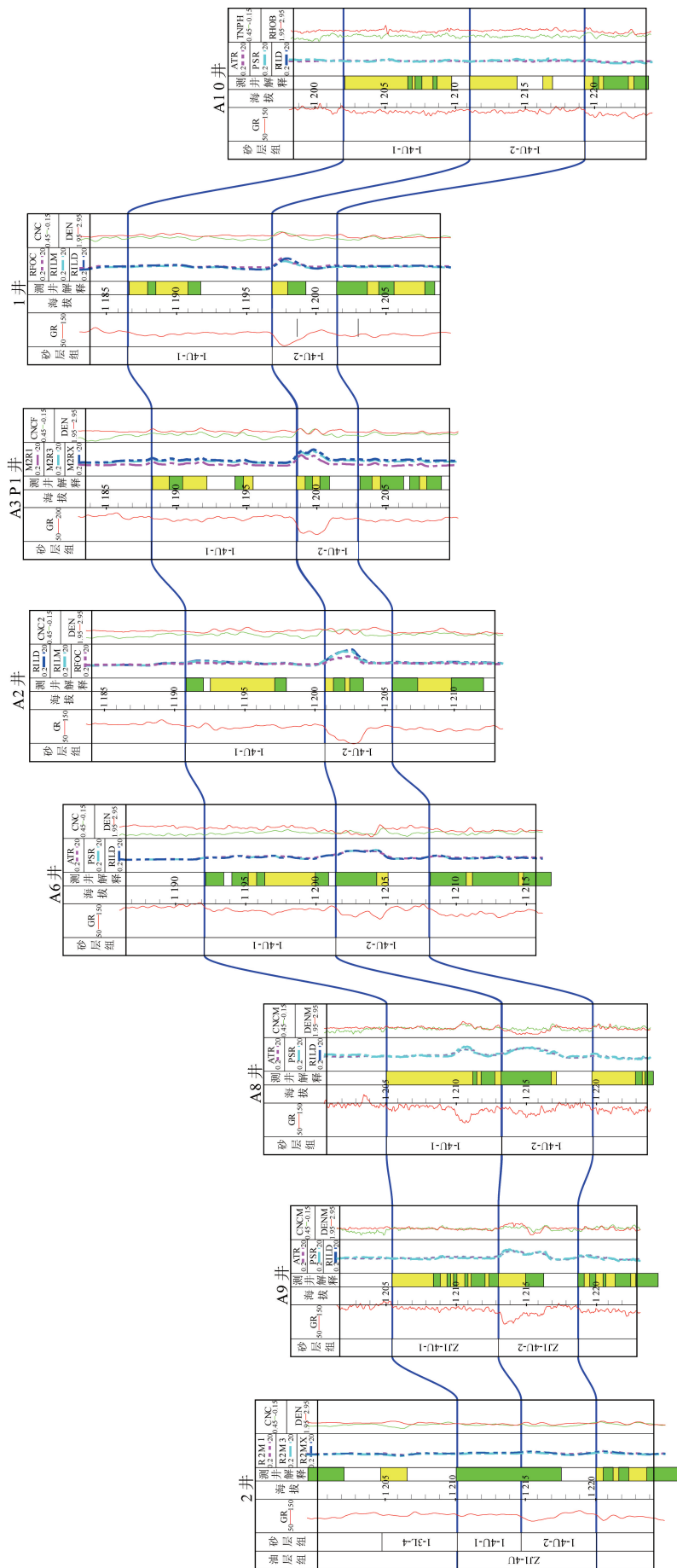


图 3 小层划分与对比

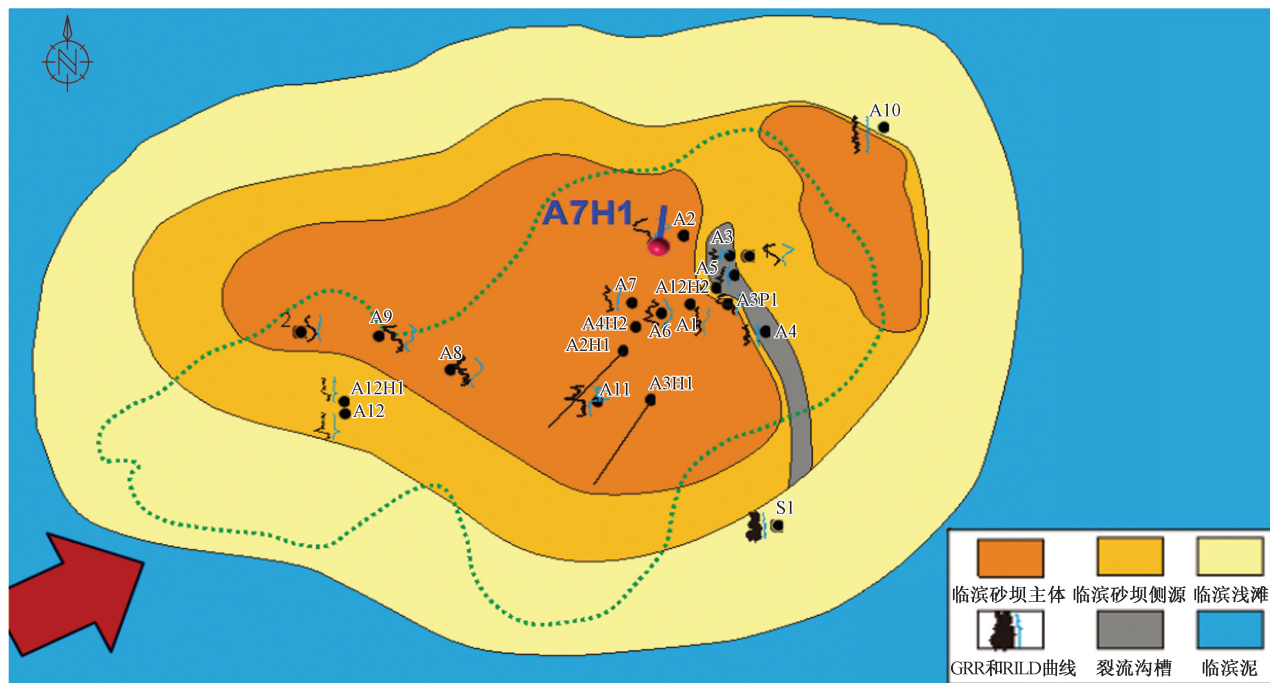


图4 ZJ1-4U-2小层沉积相平面分布

型和动态模拟模型;第二阶段动态模拟模型的建立将第一模拟阶段的结果作为第二阶段建立模型的初始数据。从第一阶段的结果中抽取参数,建立第二阶段初始模拟模型。

在长期注水冲刷下,孔隙结构特征会由于黏土矿物的脱落及矿物颗粒的冲刷迁移而改变,进而导致孔隙度及渗透率的改变。故认为影响动态驱油效率的最直接参数为水驱强度,这里采用面通量(累积通过的流体体积与横截面积之比)表征水驱强度的强弱。实验结果证实,面通量由 $3\text{ m}^3/\text{m}^2$ 增加至 $100\text{ m}^3/\text{m}^2$,以行业标准(30 PV,对应 $1.6\sim 3\text{ m}$ 面通量)时的驱油效率作为参考点,高倍水驱后的岩心驱油效率中渗岩心增加7%,高渗岩心增加17%。由此可以看出面通量增大,驱油效率增加,且物性越好增幅越大。首先运用实验数据整理得到面通量与相渗端点值时变关系,统计某时刻数模网格累计过水面通量,即可通过面通量与相渗端点值时变关系,计算得到新的相渗端点值。最终形成可考虑随水相冲刷动态变化的数值模拟技术。

使用考虑渗流时变的数值模型进行模拟,可以更好地反映疏松砂岩水驱油藏的冲刷机理和生产动态,对生产预测具有重要作用。

通过对使用时变数值模拟前后剩余油饱和度图进行对比发现,使用时变数值模拟结果剩余油分布更为准确,且单井历史拟合精度更高。

2 油田剩余油分布

结合地质精细描述技术、剩余油定量描述技术与精细数值模拟研究成果,对于剩余油潜力开展了重新评价,总体来讲剩余油主控因素包括两大方面,一是由于井网不完善造成;二是由于储层的非均质性导致。井网不完善区域可进一步细分为未动用及井控不足区。

2.1 未动用区

油田未动用区块主要分为两类,一类是储层物性较差,由于技术原因无法有效开采;一类是储层物性较好,由于存在隔夹层导致目前未动用区域。两类储层由于未能有效动用,其水淹程度均较低,储量丰度较高,含油饱和度接近原始含油饱和度。ZJ1-4U-1小层由于物性差及油组内部隔夹层展布相对较广,水前缘推进距离较短,导致小层动用程度相对较低,构造主体区剩余油比较富集,具有调整挖潜潜力(图8)。

2.2 井控不足区

井控不足区域主要是指平面上目前井网未能有效动用的部分,动用程度低,剩余油富集。井控不足区域主要分布在井网边部或外部,中度水淹,存在一定剩余油,储量规模相对较小。比如ZJ1-4U-2小层厚度较薄,平均厚度仅2 m左右,驱动类型为边水油藏,见水方向主要来自油藏的北侧及南侧,剩余油集中在ZJ1-4U-2小层A4、A5井东侧无井控区域。



图 5 A2井历年RPM测试结果

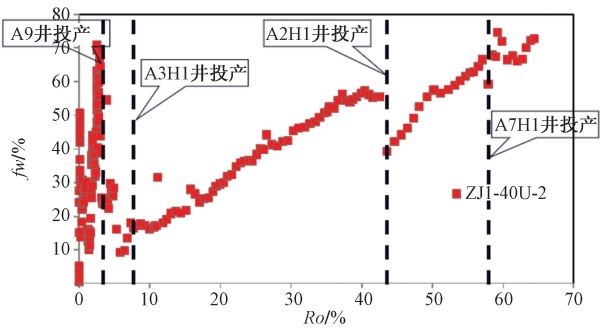
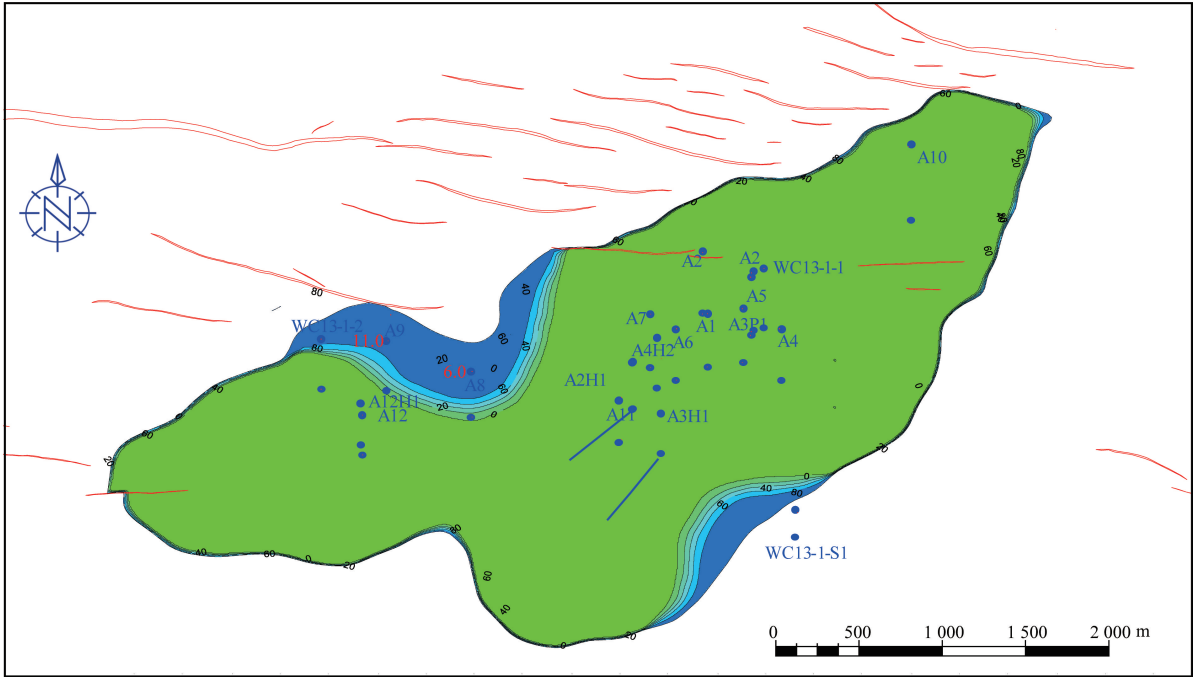


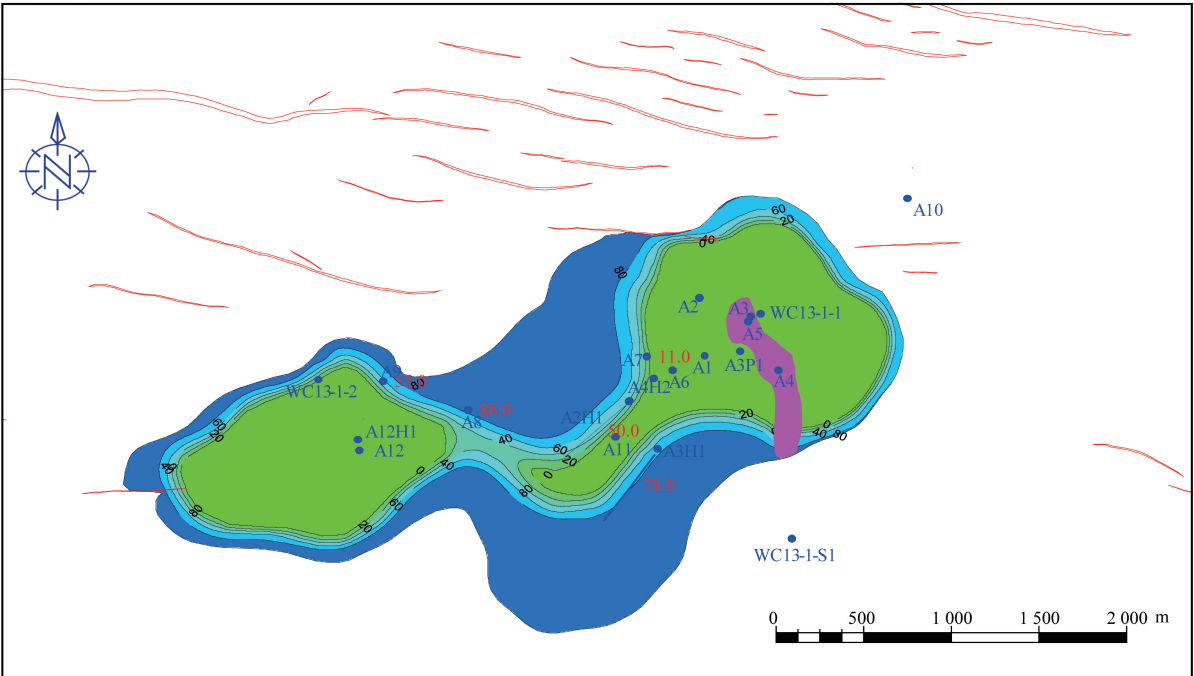
图 6 ZJ1-4U-2 小层生产曲线

2.3 层间干扰剩余油富集区

由于层内存在非均质性,在同一生产压差下,低渗透层难以有效动用,从而形成剩余油富集区。比如 ZJ1-4U-2 小层 A1、A2 井间剩余油,是由于 A1、A2 井同时生产 ZJ1-4U、ZJ1-4M 及 ZJ2-1U 油组,其中 ZJ1-4M-3 小层及 ZJ2-1U 均为特高渗储层,渗透率均超 2 000 mD,多层合采导致 ZJ1-4U 油组受物性干扰导致产出比例降低,结果分析认为当渗透率极差超过 10 以后,渗透率相对较低的油组基本无产



(a) ZJ1-4U-1 小层目前含水等值线



(b) ZJ1-4U-2 小层目前含水等值线

图 7 ZJ1-4U-1 小层、ZJ1-4U-2 小层目前含水等值线

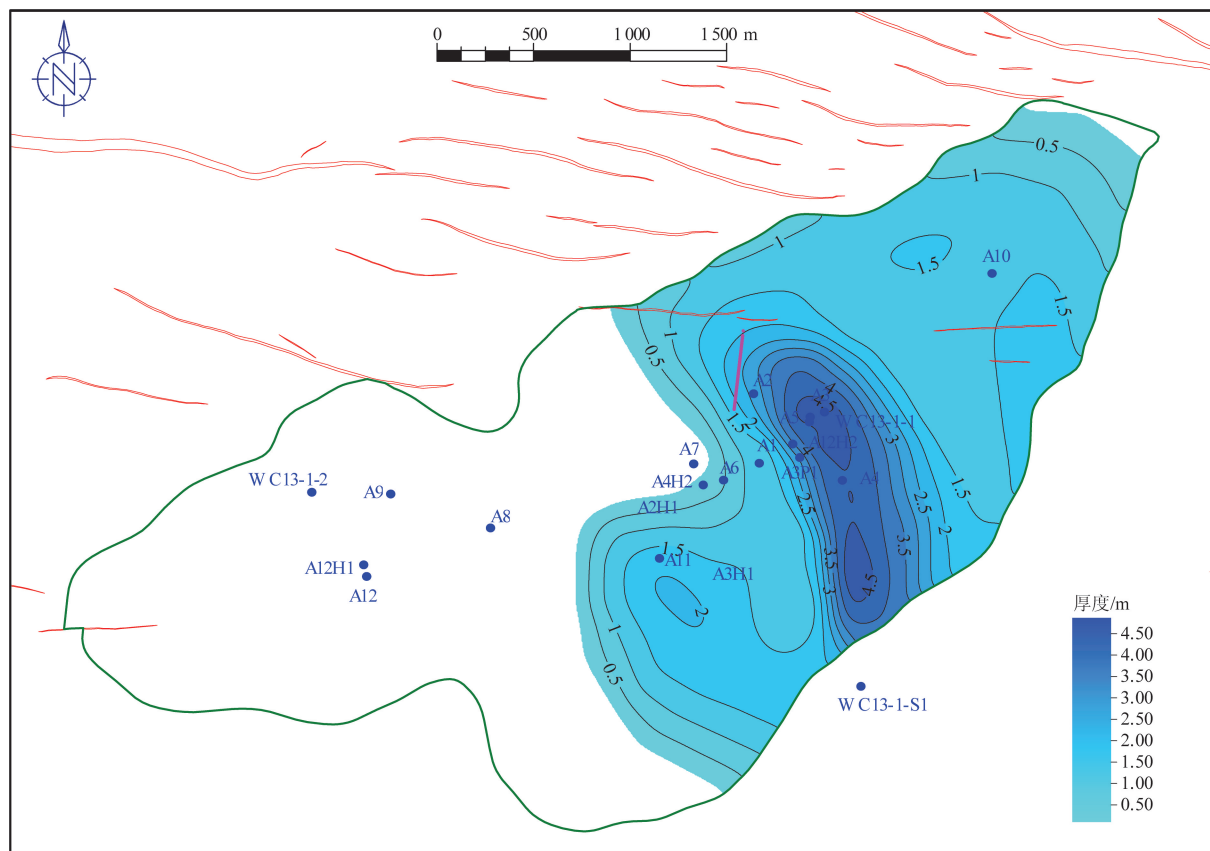


图8 ZJ1-4U小层间隔夹层展布

出,虽然 ZJ1-4U 油组的 2 小层渗透率可达 200 mD,但由于合采使得油组开采程度低,因此存在一定剩余油。

3 应用效果

通过对油藏定量描述研究,确定油田剩余油富集区,依据剩余油研究成果,进行调整井方案研究,在 2020—2023 年期间实施两口加密调整井。其中 A7H1 井于 2020 年实施,开发 ZJ1-4U-2 小层,该井初期不含水,投产后含水上升规律与作业前基本一致,预计该井累计增油量 12 万 m^3 ; A4M3 井于 2022 年实施,开发 ZJ1-4M-1 小层,初期含水 25%,投产后含水上升规律与作业前基本一致,预计该井累计增油量 5 万 m^3 ,表明研究成果准确性相对较高。针对目前油田内部潜力区,预计下步将实施 4 口加密调整井,油田可采储量可增加 12 万 m^3 ,油田采收率提高 0.5%。

4 结论

(1)针对文昌 Z 油田地质油藏特征,结合动态开发情况,综合利用地质精细描述技术、剩余油定量描述技术与精细数值模拟等方法对该油田的剩余油分布进行定量描述,形成了一套剩余油定量描述的技术方法,为该油田下步挖潜调整奠定了坚实的基础。

(2)剩余油定量描述结果表明,文昌 Z 油田剩余油主要分为未动用区、井控不足区及层间干扰剩余油富集区三大类。基于该油田剩余油分布规律所实施的油田加密调整开发已取得良好效果,表明本文提出的剩余油定量描述技术具有较高精度。

参考文献

- [1] 金中述,周海韵,晏庆辉,等.海上双高油田开发特征及增产措施研究[J].石化技术,2022,29(10):93-95.
- [2] 商建霞,张乔良,李华,等.基于储层构型的渗流单元刻画方法及应用——以珠江口盆地文昌 C 油田为例[J].沉积学报,2021,39(7):1020-1030.
- [3] 苏彦春.海上大井距多层合采稠油油田剩余油定量描述技术及其应用[J].中国海上油气,2012,24(1):82-85.
- [4] 沈泽阳.海上 B 油田储层时变数值模拟及调控策略研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2020.
- [5] 孙焕泉,孙国,吴素英,等.储集层参数动态地质模型的建立——以胜坨油田二区沙二段 12 层为例[J].石油勘探与开发,2004,31(S):89-91.
- [6] 邓玉珍,徐守余.三角洲储层参数动态模型研究——以胜坨油田二区下第三系沙二段 83 小层为例[J].石油学报,2003,24(2):61-64.
- [7] 杜玉洪,张继春,侯翠芬.储层宏观物性参数随注水开发动态演化模式研究[J].特种油气藏,2004,11(5):52-55.

The Quantitative Description Technology and Development Strategy of Submarine Sandstone Reservoir Oilfield: Taking Wenchang Z Oilfield as an Example

JIN Zhongshu, ZHOU Haiyun, DAI Yunjiao, YUE Shaofei

(CNOOC China Ltd. , Zhanjiang 524057, Guangdong, China)

Abstract: Wenchang Z oilfield, after 20 years of development, has large differences in reservoir properties between layers. Most production wells adopt joint production methods, resulting in complex distributions of remaining oil. Quantitatively describing the remaining oil is difficult. Taking the ZJ1-4U oil group in the Wenchang Z oilfield as an example, through details geological description, quantitative description of remaining oil, and time-variable numerical simulation, the distribution of remaining oil was studied in detail, forming a research technique for quantitative description of marine sandstone reservoirs. Through quantitative description, the potential within the oilfield was explored. A scheme for density adjustment is proposed. After production, good results have been achieved, indicating that the quantitative description technique for marine sandstone reservoirs is highly feasible, providing new methods and ideas for similar reservoirs in future exploitation.

Keywords: marine sandstone reservoirs; details geological description; time-variable numerical simulation; quantitative description technique