

Z11 块 E₂d₂ 油藏剩余油分布质量评价

张顺康

(中国石化江苏油田勘探开发研究院, 江苏 扬州 225009)

摘要:针对江苏油田 Z11 块 E₂d₂ 油藏进入高含水阶段面临剩余油挖潜的问题,在划分不同储层类型的基础上,根据油藏数值模拟结果,分析剩余油分布规律。进一步提出利用动用难易指数和剩余储量丰度两个指标建立剩余油分布质量评价方法,根据迭代阈值法计算得到的评价指标分类界限,将剩余油分布质量分成 4 种类型并确定相应的挖潜方向。最后,根据 Z11 块 E₂d₂ 油藏剩余油分布质量评价结果,开展剩余油挖潜的现场应用,取得了较好的调整效果。

关键词:高含水油藏;剩余油;分布质量;评价;挖潜

中图分类号:TE345 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)09-0210-05

江苏油田 Z11 块 E₂d₂ 油藏经过 40 多年的开发,目前已进入开发中后期高含水阶段,地下油水关系趋向复杂,开发难度逐渐加大。为有效挖潜该断块高含水阶段剩余油,急需对剩余油分布质量进行评价。由于 Z11 块 E₂d₂ 油藏是典型的复杂断块油藏,纵向上层系多,各小层在砂体形态、储层物性、能量、储量动用等方面存在比较大的差异,因而准确认识剩余油分布质量存在一定的难度。自进入高含水阶段以来,虽然也曾借鉴其他油田的做法,利用生产动态分析、动态测试、室内实验、数值模拟等多种方法^[1-5]对该油藏开展了剩余油方面的研究,但其指导意义随着开发的不断深入逐渐变弱。

目前,国内外对剩余油的研究主要集中在剩余油成因、剩余油饱和度的检测、剩余油分布规模及挖潜技术等方面。赵艳艳等^[6]通过流线数值模拟对缝洞型油藏进行精细历史拟合,并结合数值模拟结果对剩余油的分布状况和挖潜潜力进行了定量的评价,确定出剩余油挖潜区;余义常等^[7]基于常规物性、扫描电镜、铸体薄片、压汞测试等资料,通过微观刻蚀薄片驱替实验及水驱油过程的核磁共振、CT 扫描研究微观剩余油不同尺度下的分布特征、赋存状态和动用机理;金宝强等^[8]结合新钻井水淹层测井解释成果、密闭取心、生产动态及油藏数值模拟等资料,对渤海特高含水期油田水淹特征和剩余油分布规律进行了研究,并提出相应的调整并挖潜策略;徐静等^[9]利用测井地震资料、动静态资料以及数

值模拟技术,对渤海储层砂体的连通性进行精细描述,同时定量表征了该区域剩余油分布情况。汪涛等^[10]在油田高含水期曲流河储层构型研究的基础上,分析了不同类型的曲流河储层构型下控制的剩余油分布特点。李敏等^[11]以新民油田扶余油层为研究对象,基于单砂体精细刻画工作开展了单砂体层次的剩余油分布研究,进而分析了剩余油分布的控制因素;冯鑫等^[12]利用 X 射线安检机直观了解岩层中流体渗流情况、底水锥进现象以及剩余油分布特征;刘新光等^[13]通过多个方案设计,优化了不同隔夹层隔挡作用下上部剩余油挖潜方式。夏惠芬等^[14]、张翔宇^[15]利用电子计算机断层扫描(CT)及图像分析软件定量分析了岩心中各种类型的微观剩余油及动态变化规律。王欣然等^[16]通过开展不同韵律储层下三维非均质模型水驱油及聚合物驱油实验,分析了渤海油田正、反和复合韵律储层下聚合物驱剩余油分布规律。姜振海^[17]以大庆长垣油田北二区西部为例,应用小井距密闭取心井资料,开展了河道砂体内部薄夹层精细描述,对夹层测井响应特征进行了分类评价,明确了其对剩余油分布的控制作用。宋金鹏等^[18]利用地震、测井、岩心、X 射线荧光光谱分析及物性分析测试数据等资料,分级次对浅水三角洲分流河道砂体进行了定量刻画,为研究区浅水三角洲分流河道砂体精细刻画及老油区特高含水后期剩余油挖潜提供了依据。王友启^[19]针对特高含水期油田油水分布较为

收稿日期:2022-11-03

基金项目:中国石化集团公司科技攻关项目(P20070-5)。

作者简介:张顺康(1979—),男,江苏扬州人,中国石化江苏油田勘探开发研究院,油藏工程主任师,高级工程师,博士,研究方向为油气田开发。

复杂的情况,基于渗流力学理论基础将该类型下的剩余油归纳为 5 种类型,同时认为油藏进入高含水期后剩余油是以难动用油为主要类型存在,具有一定的挖潜潜力。张瑞等^[20]在讨论研究区井间单砂体的注采连通性的基础上,按井间单砂体注采完善状况将研究区宏观剩余油分布模式类型总结为注采不完善未动用剩余油和注采完善已动用剩余油。

总体来看,现有的剩余油评价方法对高含水油藏剩余油流动能力、开采难易程度等方面涉及较少,因而对于高含水油藏剩余油挖潜方向的指导力度有所欠缺。

针对上述问题,本次研究以 Z11 块 E₂d₂ 油藏已有的油藏数值模拟结果为基础,探索了剩余油分布质量的评价指标,建立了相应的评价标准。进一步对剩余油分布质量进行分类,用以指导剩余油挖潜,对于高含水油藏剩余油挖潜具有一定的实用价值。

1 工区概况

Z11 块 E₂d₂ 油藏的位于 ZW 油田北部,是一个三面被断层遮挡的断块油藏。油藏含油面积为 1.72 km²,含油层系为 E₂d₂¹~E₂d₂⁵,地质储量为 328×10⁴ t,渗透率为 0.9~714.7 mD,孔隙度为 7.7%~31.1%,地下原油黏度为 1~3 mPa·s,地层水类型以 NaHCO₃型为主,油藏天然能量不足。该油藏于 1978 年投入注水开发,从投入开发到现在,历经多次井网加密和层系细分调整,目前已经进入开发中后期的高含水阶段。

2 储层类型划分

由于 Z11 块 E₂d₂ 油藏纵向上含油层系较多(含油小层数超过 50 个),各小层在砂体形态、井网形式、剩余油分布规律等方面差异比较大。为了更好地评价剩余油分布质量,将各含油小层划分为不同的类型,部分层系划分结果见表 1。在划分时重点考虑了各小层的储层展布、天然能量、井网形式、剩余油分布特征等因素,具体分为以下 3 种类型:

1)面积展布型。该类型的储层连片分布,含油面积、地质储量较大,采用边内+点状面积注水井网。受历史井网及储层非均质性影响,剩余油富集区主要分布在微构造高点、井间滞留区以及断层夹角处等位置。

2)边水条带型。该类型的储层为小鼻状、单斜构造,含油带宽度小、边水能量不充足。在开发过程中边水舌进,水线推进不均匀,构造高部位靠断层位置剩余油分布相对富集。

3)零散发育型。该类型的储层含油面积小,砂

体纵向叠合性差。地层能量弱,储层物性差,无注采井网,油井弹性开采。由于动用程度较低,剩余油整体富集。

表 1 Z11 块 E₂d₂ 油藏部分储层类型划分结果

小层	储层类型
E ₂ d ₂ ⁻¹	零散发育型
E ₂ d ₂ ⁻²	面积展布型、零散发育型
E ₂ d ₂ ⁻³	面积展布型
E ₂ d ₂ ⁻⁴	面积展布型、零散发育型
E ₂ d ₂ ⁻⁵	零散发育型
E ₂ d ₂ ⁻⁶	面积展布型、零散发育型
E ₂ d ₂ ⁻⁷	面积展布型
E ₂ d ₂ ⁻⁸	边水条带型、零散发育型
E ₂ d ₂ ⁻⁹	零散发育型
E ₂ d ₂ ⁻¹⁰	面积展布型、边水条带型、零散发育型
E ₂ d ₂ ⁻¹¹	面积展布型、边水条带型、零散发育型
E ₂ d ₂ ³⁻²	零散发育型
E ₂ d ₂ ³⁻⁴	面积展布型、边水条带型、零散发育型
E ₂ d ₂ ³⁻⁵	零散发育型
E ₂ d ₂ ³⁻⁶	零散发育型
E ₂ d ₂ ³⁻⁷	面积展布型、边水条带型、零散发育型

3 剩余油分布质量评价

剩余油分布质量是指剩余油用来满足原油开采的能力,在相同的开采条件下,通过对剩余油实施挖潜获得的原油产量(包括初始产量和累积产量)越高,说明剩余油用来满足原油开采的能力越强,剩余油分布质量越好。在评价剩余油分布质量的时候,需要综合考虑剩余油分布的位置、分布状态、流动能力、分布规模等多种因素。这里主要利用 Z11 块 E₂d₂ 油藏已有的油藏数值模拟结果,在分析剩余油分布规律的基础上,开展了剩余油分布质量评价研究。

3.1 剩余油分布规律

3.1.1 剩余油富集位置

油藏数值模拟结果表明:面积展布型储层的剩余油富集区主要受构造、储层物性及历史井网影响,剩余油主要分布在微构造高点、井间滞留区以及断层夹角处等,如图 1(a)所示;边水条带型储层剩余油富集区受边水舌进及断层控制,该类型剩余油富集区主要位于断层附近,如图 1(b)所示;零散发育型储层由于含油面积、地质储量较小,无法建立有效注采关系,无能量补充,长期处于低产低效状态,剩余油整体富集,如图 1(c)所示。

3.1.2 剩余油分布状态

以表 1 中的含油层系为例,在明确不同类型储层剩余油富集位置的基础上,进一步根据油藏数值模拟结果计算出每个小层每一类储层的采出程度和注入孔隙倍数,以层系总采出程度和总注入孔隙

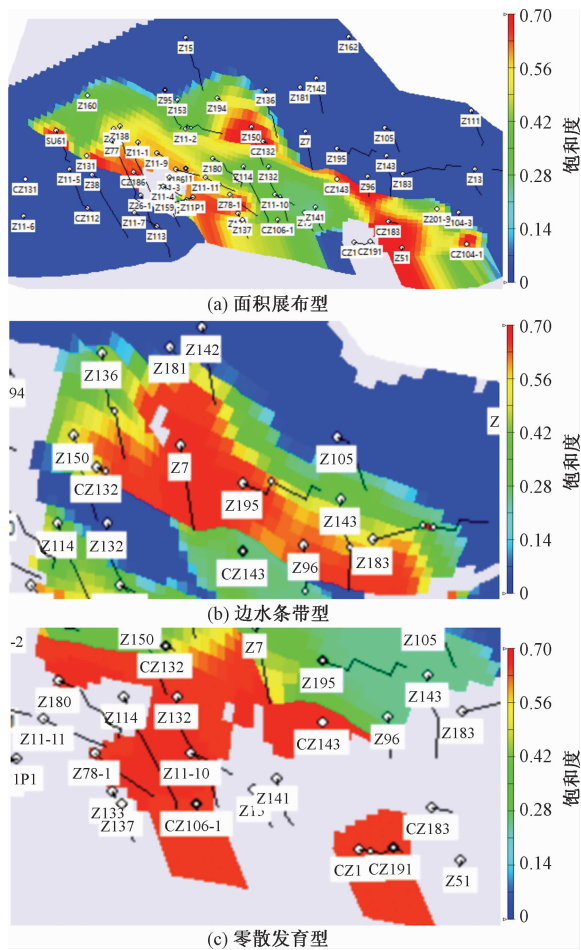


图 1 不同类型储层剩余油饱和度分布

倍数为分类界限,可以将不同类型储层的剩余油分布状态分成 4 种类型(图 2)。第 1 类是“双高”单元(A 区),动用程度较高,剩余油总体较为分散,局部富集;第 2 类是存在无效注水单元(B 区),动用程度较低,剩余油整体富集;第 3 类是能量充足单元(C 区),开发效果较好,动用程度较高剩余油总体较为分散,局部富集;第 4 类是“双低”单元(D 区),由于物性较差或者能量不足,动用程度较低,剩余油以整体富集为主。

从图 2 可以看出,面积展布型储层的剩余油分布状态主要受储层物性,注采井网完善程度的影

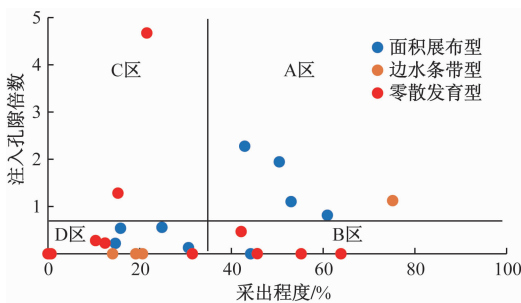


图 2 剩余油分布状态分类

响,剩余油分布状态差异较大;部分小层物性好,注采井网完善,整体动用程度较高,剩余油整体较为分散。与此同时,也有部分砂体因物性较差、储层非均质性强、注采井网不完善等原因存在剩余油在相对富集的现象。边水条带型储层主要依靠天然能量开发,少数实施人工注水+天然能量开发。依靠天然能量开采的剩余油主要呈现整体富集状态,实施人工注水+天然能量开发的剩余油较为分散。零散发育型储层主要受到储层物性及地层能量状况的影响,剩余油分布总体富集,少数区域分散。

3.2 剩余油分布质量评价方法

根据油藏数值模拟得到的静态和动态参数场分布,利用动用难易指数与剩余储量丰度两个指标,建立剩余油分布质量评价模型,对不同类型剩余油所在的网格开展剩余油分布质量评价。其中动用难易指数 Z 为

$$Z = \frac{p - p_b}{\frac{\mu_o \mu_w}{k_o \mu_w + k_w \mu_o}} \tag{1}$$

式中: p 为网格当前压力,MPa; p_b 为油藏饱和压力,MPa; μ_o 为地下原油黏度,mPa·s; μ_w 为地水黏度,mPa·s; k_o 为油相渗透率, μm^2 ; k_w 为水相渗透率, μm^2 。

从式(1)可以看出,动用难易指数 Z 既包含了地下流体性质的信息,又能反映油藏的能量状况,因而能够比较好地体现剩余油的流动能力。其数值越大,表明剩余油越容易动用。式(1)中引入了饱和压力这个参数,主要是考虑到当油藏压力低于饱和压力时,原油的组分及性质会发生比较明显的变化,对剩余油流动能力及油藏最终采收率会产生比较大的影响。

通过对油藏数值模拟网格动用难易指数与剩余储量丰度进行统计,利用迭代阈值法计算相关分类界限,迭代阈值法的实现步骤如下:

1)分别求出油藏所有网格目标属性(动用难易指数和剩余储量丰度)的最大值 $Z_{\max}$ 和最小值 $Z_{\min}$,并设置初始值 $T^k = Z_{\max} + Z_{\min}$ 。

2)根据阈值 $T^k (k = 0, 1, 2, 3, \dots)$ 将目标属性分成两部分(即大于 T^k 的部分和小于 T^k 的部分),再分别求出这两部分目标属性的平均值 Z_1 和最小值 Z_2 ,其中

$$Z_1 = \frac{\sum_{Z(i,j) < T^k} Z(i,j)}{N_1^k} \tag{2}$$

$$Z_2 = \frac{\sum_{Z(i,j) > T^k} Z(i,j)}{N_2^k} \tag{3}$$

式中: $Z(i, j)$ 为网格 (i, j) 的目标属性值; N_1^k 为满足 $Z(i, j) < T^k$ 的网格总数; N_2^k 为满足 $Z(i, j) > T^k$ 的网格总数。

3) 计算新的國值:

$$T^{k+1} = (Z_{\max} + Z_{\min})/2 \quad (4)$$

4) 如果 $T^k = T^{k+1}$, 则迭代结束, 否则 $k = k + 1$, 重复 2)~4)。

以迭代阈值法计算出的动用难易指数与剩余储量丰度为界限,可以将剩余油分布质量分成不同的类型。

3.3 剩余油质量评价结果

以 Z11 块 E₂D₂ 油藏数值模拟结果为基础,利用迭代阈值法计算该油藏动用难易指数和剩余储量丰度的分类界限分别为 663.5 cm²/s、0.609 t/m²。根据计算得到的分类界限,划分不同的剩余油分布质量类型(图 3),进一步可以得到不同类型剩余油平面分布,结果如图 4 所示。

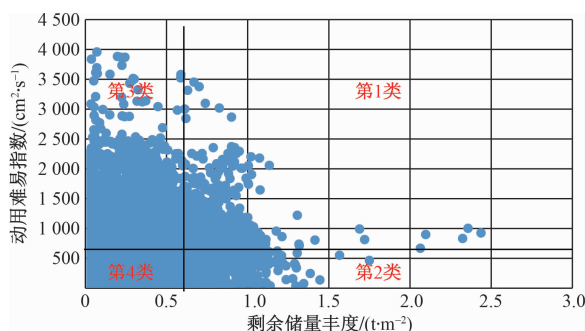


图3 剩余油分布质量类型划分

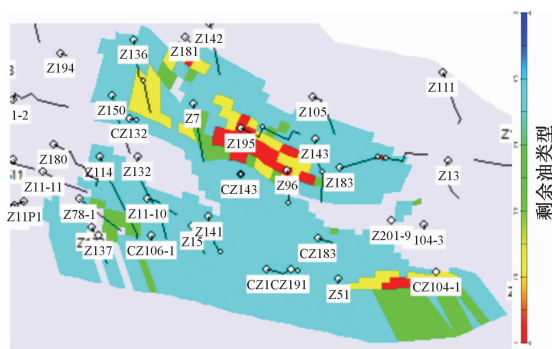


图 4 不同类型剩余油平面分布

图3将剩余油分布质量分成4类:第1类是储量丰度大于 0.609 t/m^2 、剩余油动用难易指数大于 $663.5\text{ cm}^2/\text{s}$ 的剩余油,这类剩余油储量丰度高,调整挖潜也比较容易;第2类是储量丰度大于 0.609 t/m^2 、剩余油动用难易指数小于 $663.5\text{ cm}^2/\text{s}$ 的剩余油,这类剩余油虽然储量丰度高,但调整挖潜比较困难;第3类是储量丰度小于 0.609 t/m^2 、剩

余油动用难易指数大于 $663.5 \text{ cm}^2/\text{s}$ 的剩余油,这类剩余油储量丰度低,但调整挖潜比较容易;第4类是储量丰度小于 0.609 t/m^2 、剩余油动用难易指数小于 $663.5 \text{ cm}^2/\text{s}$ 的剩余油,这一类剩余油储量丰度低,同时调整挖潜比较困难。

在划分不同类型剩余油分布质量的基础上,依据油藏数值模拟结果对 Z11 块 E₂d₂ 油藏不同类型储层剩余油分布质量进行统计,结果见表 2。从表 2 中可以看出,面积展布型储层剩余油质量以第 3、第 4 类为主,局部分布第 1、第 2 类剩余油。结合剩余油分布状态研究结果,该类储层动用程度总体较高,局部区域有一定储量基础。因而动用方式为结合老井侧钻、调补层等措施实施注采完善、井网优化及水动力学调整。边水条带型储层剩余油质量总体以第 4 类为主,该类储层动用程度不高,目前能量不足,储量丰度较低。因而挖潜方向为层系细分重组,同时实施人工注水补充地层能量。零散发育型储层剩余油质量主要为第 3、第 4 类,该类储层储量丰度低,动用能力差,挖潜难度相对较大,因而该类剩余油的动用方式为结合层系细分重组、补充能量等措施实施挖潜。

表 2 Z11 块 E₂d₂ 油藏不同类型储层剩余油分布质量统计结果

储层类型	剩余油分布质量/ 10^4 t		
	面积展布型	边水条带型	零散发育型
第 1 类	4.2	0.9	1.5
第 2 类	6.5	1.5	2.1
第 3 类	49.7	3.7	25.6
第 4 类	71.4	32.3	32.7

4 剩余油挖潜及效果

根据剩余油分布质量评价结果,综合考虑油藏工程、动态测试资料等其他研究方法取得的认识,最终确定优先针对 Z11 块 E₂d₂ 油藏比较容易动用的第 3 类剩余油实施挖潜。考虑到部分层系层间干扰严重,挖潜时对局部层系实施细分重组。2021 年以来,Z11 块 E₂d₂ 油藏共部署实施新井 2 口,老井措施 12 井次。

如 $E_2d_2^{2-6}$ 层系 CZ132 井措施前因低产关停, 剩余油质量研究结果表明该井在 $E_2d_2^{2-6}$ 存在面积展布型第 3 类剩余油, 2021 年下半年调层生产 $E_2d_2^{2-6}$, 调层后最高日产超过 10 t; CZ183 井措施前高含水, 剩余油质量研究结果表明该井在 $E_2d_2^{2-6}$ 存在面积展布型第 3 类剩余油, 2021 年上半年调层生产 $E_2d_2^{2-6}$, 调层后最高日产超过 26 t; E_2d_2 层系在实施局部层系细分重组的同时, 针对零散发育型第 3 类剩余油挖潜, 部署实施

新井 Z11-12 井,实施以后,日产油稳定在 5 t 左右。

Z11 块 E_2d_2 油藏实施剩余油挖潜措施以后,日产油由调整前的 21.7 t 上升到调整后最高的 45.6 t,预测提高采收率 2.1%,取得了较好的调整效果。

5 结论

1)Z11 块 E_2d_2 油藏纵向上含油层系多,各小层在砂体形态、井网形式、剩余油分布规律等方面差异比较大,因而将各小层覆盖的地质储量划分为面积展布型、边水条带型和零散发育型这 3 种类型,从而为开展剩余油分布质量评价提供了基础。

2)在分析剩余油分布规律的基础上,利用动用难易指数与剩余储量丰度两个指标建立了剩余油分布质量评价模型。根据迭代阈值法计算指标的分类界限,进而对 Z11 块 E_2d_2 油藏不同类型的储量开展剩余油分布质量评价,将剩余油分布质量分成了 4 种类型并确定了相应的挖潜方向。

3)根据 Z11 块 E_2d_2 油藏剩余油分布质量评价结果,开展了剩余油挖潜的现场应用,取得了较好的调整效果。

参考文献

[1] 黄哲. 大庆油田聚合物驱后微观剩余油分布规律分析[J]. 当代化工研究, 2016, 16(5): 53-54.

[2] 徐清华. 大庆油田三元复合驱后微观剩余油分布特征[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(4): 110-116.

[3] 刘广为, 周代余, 姜汉桥. 塔里木盆地海相砂岩油藏水平井水淹规律及其模式[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(1): 128-134.

[4] 李俊健, 刘洋, 高亚军, 等. 微观孔喉结构非均质性对剩余油分布形态的影响[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(6): 1043-1052.

[5] 唐海, 何娟, 荣元帅, 等. 塔河断溶体油藏典型断溶体注水驱替规律及剩余油分布特征[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(3): 95-100.

[6] 赵艳艳, 崔书岳, 张允. 基于流线数值模拟精细历史拟合

的缝洞型油藏剩余油潜力评价[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2019, 34(5): 45-51.

[7] 余义常, 徐怀民, 高兴军, 等. 海相碎屑岩储层不同尺度微观剩余油分布及赋存状态: 以哈得逊油田东河砂岩为例[J]. 石油学报, 2018, 39(12): 1397-1409.

[8] 金宝强, 舒晓, 邓猛. 渤海特高含水期油田剩余油分布规律及挖潜策略[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(15): 6033-6040.

[9] 徐静, 霍春亮, 李军, 等. 建模数模一体化方法表征 BN 油田剩余油分布[J]. 石油地质与工程, 2017, 31(5): 61-65.

[10] 汪涛, 任丽华, 张宪国, 等. 基于储层构型的剩余油研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2018, 31(3): 61-67.

[11] 李敏, 张忠民, 张德民, 等. 新民油田高含水期剩余油分布特征及控制因素分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(3): 992-1000.

[12] 冯鑫, 廖浩奇, 李丰辉, 等. 底水油藏高含水期剩余油挖潜可视化驱油实验[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(22): 9315-9321.

[13] 刘新光, 郭晓, 王盘根, 等. 油砂蒸汽辅助重力排水开发隔层界限及上部剩余油挖潜方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(16): 6657-6662.

[14] 夏惠芬, 李文卓, 刘洋, 等. 弱碱三元驱后剩余油定量分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(24): 127-131.

[15] 张翔宇. 高凝油油藏微观剩余油分布影响因素分析: 以大民屯凹陷 S84-A12 块为例[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(20): 8133-8138.

[16] 王欣然, 刘斌, 周凤军, 等. 不同韵律储层下聚合物驱对剩余油分布的影响: 以渤海 G 油田反九点面积注采井网为例[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(5): 112-119.

[17] 姜振海. 河道砂体内部薄夹层识别与剩余油挖潜[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(2): 176-180.

[18] 宋金鹏, 林承焰, 任丽华, 等. 杏树岗油田浅水三角洲储集层构型及剩余油分布特征[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(2): 181-188.

[19] 王友启. 特高含水期油田“四点五类”剩余油分类方法[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(2): 76-80.

[20] 张瑞, 刘宗宾, 廖新武, 等. 三角洲前缘砂体高含水期剩余油分布研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2022, 44(2): 1-16.

Evaluation of Remaining Oil Distribution Quality of E_2d_2 Reservoir in Block Z11

ZHANG Shunkang

(Exploration and Development Research Institute of Jiangsu Oilfield, Sinopec, Yangzhou 225009, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the problem of tapping the remaining oil in E_2d_2 reservoir of Z11 block in Jiangsu Oilfield with high water cut, the distribution law of remaining oil was analyzed based on the classification of different reservoir types according to the results of reservoir numerical simulation. Further the evaluation method of residual oil distribution quality was established by using the two indicators of production difficulty index and residual reserve abundance. According to the classification limits of evaluation indicators calculated by iterative threshold method, the residual oil distribution quality was divided into four types and the corresponding potential tapping direction was determined. Finally, according to the evaluation results of remaining oil distribution quality of E_2d_2 reservoir in block Z11, the field application of tapping the potential of remaining oil was carried out, and a good adjustment effect was achieved.

Keywords: high water cut reservoir; remaining oil; distribution quality; evaluation; tap potential