

基于流动单元的储层评价及剩余油预测

尹太举^{①*}, 张昌民^①, 张尚峰^①, 王寿平^②, 毛立华^②

① 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 荆州 434023;

② 中国石油化工股份有限公司中原油田分公司, 濮阳 457001

* Email: yintaij@yangtzeu.edu.cn

收稿日期: 2007-12-05; 接受日期: 2008-04-20

国家自然科学基金项目(批准号: 40602013, 40572078)和国家教育部博士点基金项目(批准号: 20060489002)资助

摘要 采用自然分段结合聚类分析的方法, 在该区识别出 4 类流动单元, 并以短期旋回为单位, 对各类流动单元进行了平面分布预测, 按流动单元的平面结构特征将短期旋回分为 4 类. 采用概念模拟、定性分析和定量模拟的方法对剩余油进行了研究, 表明储层流动单元结构对剩余油的控制明显, 处于一类、二类短期旋回中的大面积连续分布的 E、G 型流动单元大多水淹, 而在以 F 型为主的三类短期旋回中不被控制的小型孤立 G 型流动单元及大面积分布的 F 型流动单元成为剩余油富集部位, 针对此, 开发调整策略应加强小规模 E、G 型流动单元的完善, 加大三类短期旋回的动用力度, 封堵一类短期旋回. 这一策略明显改善油田的开发效果.

关键词

流动单元
分类
储层评价
储层预测
剩余油
开发响应
调整方案

适合于地质研究的储层流动单元研究起源于对厚油层油藏的分层开采及其分析. Testerman^[1]利用渗透率资料, 提出了统计储层分类技术. Cant^[2]提出了把沉积段划分为任意层的分层技术, Cant 后来又提出了层序分析技术, 依据明显的测井模式(如自然伽玛曲线上明显的向上变细层序)在较大的区域内进行追踪对比, Hearn 等^[3], Ebanks 对流动单元又作了进一步阐述, 认为流动单元是垂向上及侧向上连续并影响流体流动的岩石地质、物理性质相似的储集岩体.

进入 20 世纪 90 年代中期, 流动单元研究方法得到了广泛应用, 基本上形成了 4 种类型的流动单元研究方法, 即基于沉积学的精细沉积微相(储层结构分析)的研究方法^[4,5]、基于多参数的储层物性研究方法^[6-8]、以微观孔隙结构特征为核心的基于地质作用过程叠加的岩石物理相^[9,10]研究方法和基于储层带指标(FZI)的研究方法^[11], 主要用于建立储层渗透率解释模型^[12-14]和简化油藏的非均质性表征^[15,16].

近年来, 随着开发的深入, 这一概念在油藏模拟、稠油油藏开发^[17-19]等方面得到了广泛应用, 基于对流动单元的开发特征和生产需要, 结合矿场特征^[20], 还发展了动态(四维)流动单元的概念^[21,22], 并将其应用于剩余油预测^[23,24]中.

基于濮 53 块的特点, 本文将在已有的流动单元垂向划分对比基础^[21]上, 探讨储层流动单元的分类、预测、评价及基于流动单元的剩余油预测和调整策略.

1 地质特征

濮 53 块位于濮城构造沙二上²⁺³油藏中部, 濮城构造核部, 而濮城构造位于东濮凹陷的东缘中北部. 东濮凹陷为中国东部一系列中新代裂陷盆地中的一个, 东侧以兰考-聊城基底断裂与鲁西隆起上的菏泽凸起为界, 西侧为内黄隆起, 南隔兰考凸起与开封凹陷为邻, 北以马陵断层与莘县凹陷相连, 呈北北东

向展布, 北窄南宽(图 1). 凹陷演化从形成到消亡经历了由沉降到抬升两大沉降旋回($E_k-E_{s_2}$ 下)、($E_{s_2}-E_d$)共 6 个发展阶段, 包括初期裂陷($E_k-E_{s_4}$ 下)、强烈裂陷(E_{s_4} 上- E_{s_3})、萎缩(E_{s_2})、稳定下沉(E_{s_1})、收缩(E_d)和消亡-凹陷(N)等.

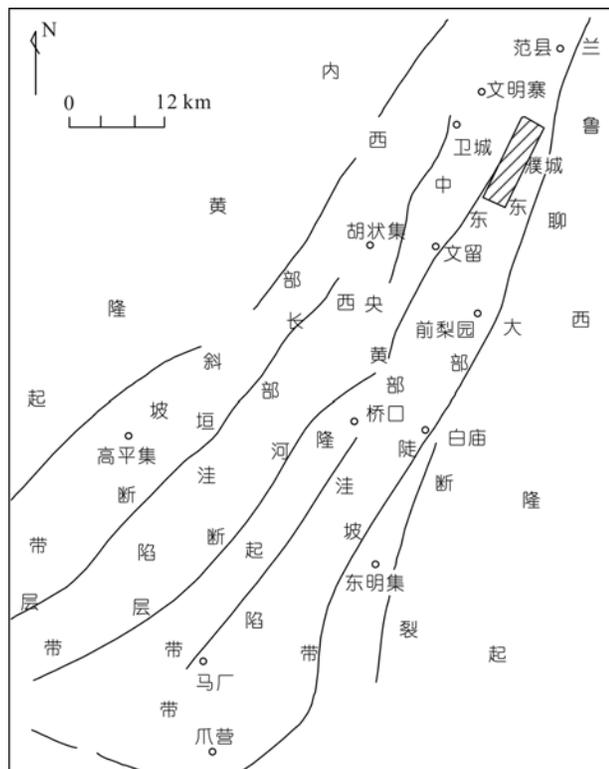


图 1 濮城构造区域构造位置图

本区古近系沉积物源自东部, 可分为两个沉积旋回: 孔店组至沙二下段、沙二上段至东营组. 每一沉积旋回均经历了河流沉积为主至湖泊沉积为主再到以河流沉积为主的发育过程. 沙二期东濮凹陷盆地应力场由原来的拉张变为挤压, 凹陷发生萎缩, 同时气候也变为干旱、半干旱, 从而使得水域缩小变浅, 沉积了一套紫红色、灰绿色砂岩, 泥岩与膏盐岩沉积, 研究层段储层主要为辫状河沉积.

2 资料来源及处理

主要资料包括岩心、分析化验、测井和动态资料.

本区在研究层段有取心井 6 口, 涉及开发初期、

中含水期和高、特高含水期, 累计取心长度 183 m, 取心井段微相有浅湖、滨湖、三角洲前缘等相带, 在取心样品中进行了孔隙度、渗透率、饱和度、碳酸盐含量、泥质含量、黏土矿物、粒度、薄片、压汞、相渗、电镜、润湿性等分析. 由于不同相带、不同开发阶段特征有异, 在进行相应的应用中进行了区别的分析, 并进行了岩心归位校正和岩心中异常数据点的剔除.

本区从 1979 起先后钻井 136 口, 不同时期钻井系列、钻井泥浆、地下水水状况均有不同, 造成测井响应有明显的差异, 因而有必要对测井曲线进行校正. 校正主要有两个方面, 一是井况校正, 将由于井身状况造成的差别进行校正, 这主要通过同一口井内的各曲线相互校验来完成. 另一方面的校正是系统刻度的校正, 即将不同测井条件、不同测井系列的值校正到同一个基准上, 常用的是标准层控制下的趋势面法校正, 本次研究采用该区东营组底部砂岩作为标准层进行了校正.

为了进行无分析化验层段的流动单元类型的确认, 必须求取其相应的参数. 一般地, 可建立测井响应的理论模型或通过统计建立相应参数的解释模型. 该区分析样品较多, 采用了统计方法建立解释模型. 考虑到不同微相、不同岩性的储层其测井响应特征的差异, 在建立模型时采用了多参数神经网络方法进行相应的参数解释, 同时为了提高解释精度, 依照不同的电性模式建立了不同的解释模型.

生产动态资料主要有两类, 一类是生产井的动态监测资料, 包括注水井的吸水剖面和采油井的产液剖面, 主要用于确定合采井中各层段的吸水量和产液量. 研究所涉及的注水和采液剖面 40 余条. 另一类为生产动态资料, 即采油井的产液计量资料和注水井的注水状况.

3 流动单元的分类及其特点

该区流动单元分类研究表明, 基于储层流动层带指标(FZI)的分类方法难于达到较好的分类目的, 而基于储层物性自然分段和聚类分析的方法则可较好地流动单元的分类. 以流动单元为对象进行储层非均质性简化后, 可依据各类流动单元的相对

含量进行分类评价, 基于流动单元的平面组合特征, 指导剩余油分布预测与挖潜. 据此开展濮 53 块储层表征, 取得了很好的效果, 稳定了该区块的生产状况, 明显地提高了该区的油气采收率.

流动单元分类的目的在于简化储层非均质性表征, 即用有限的几种流动单元类型来简化复杂的储层非均质性表征.

据 FZI 法, 在储层质量指标(RQI)与标准化孔隙度(Φ_2)交会图上相同类型的储层流动单元应落在斜率为 1 的斜线上, 而其与右侧坐标的交线值即储层层带指标的大小则表明了其物性的优劣. 以岩性段、自然分布、单样品、短期旋回等为单元的交会图表明各类流动单元差别不明显, 难于据此进行流动单元类型划分. 图 2 为以短期旋回为单元所求取的 RQI 与 Φ_2 的双对数交会图根本无法进行分类. 或如上文所述, 算术平均值并不能真正反映储层的结构特征, 而本研究中求取各指标时采用的恰是此指标.

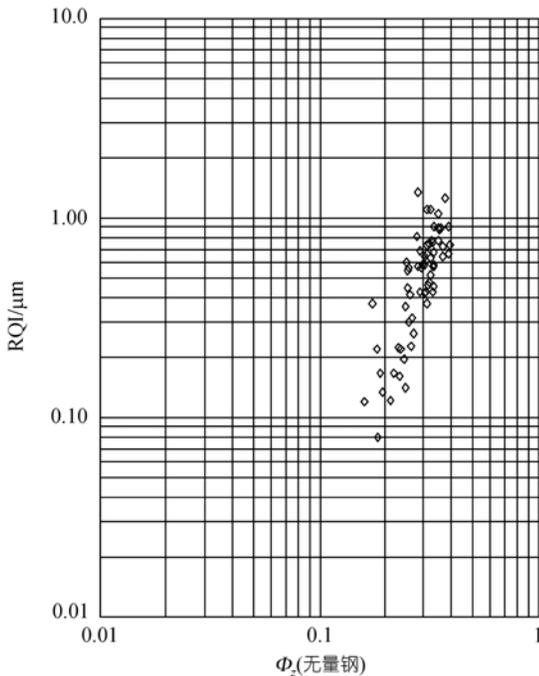


图 2 RQI 与 Φ_2 交会图

本研究采用储层物性自然分段结合聚类分析的方法进行流动单元分类, 即在流动单元分类时首先

以储层物性指标的自然分段进行初步分类, 结合流动单元聚类谱系图, 最终完成流动单元的分类. 这一分类方法第一是充分考虑到储层本身的物性自然分布特征, 而这一特征本身决定于其内部固有的规律性, 对这一规律性的表征符合分段的基本要求. 其次是通过聚类分析选取出最合适或影响分类最大的指标, 有利于对其他未取心井的分类, 能在一定程度上减小分类工作的复杂性和工作量. 而且对各样品点分段的分析, 基本上可以确定各类流动单元的临界值. 在储层参数自然分段研究中不仅采用了直方图法, 而且引入了更能区分次总体的概率曲线法, 基本上能够准确地地区分次总体.

以单样品、电性段、短期旋回、自然分段为单位对储层的孔隙度、渗透率、流动系数、储集系数及 FZI 值用直方图和概率曲线法进行了次总体分布分析, 结果表明其总体特征相似, 但也有差别, 其中层带系数的分布特征与其他特征的分布差异较大. 图 3 为短期旋回渗透率分布概率曲线, 4 个次总体之间的差别比较明显, 易于识别和区分.

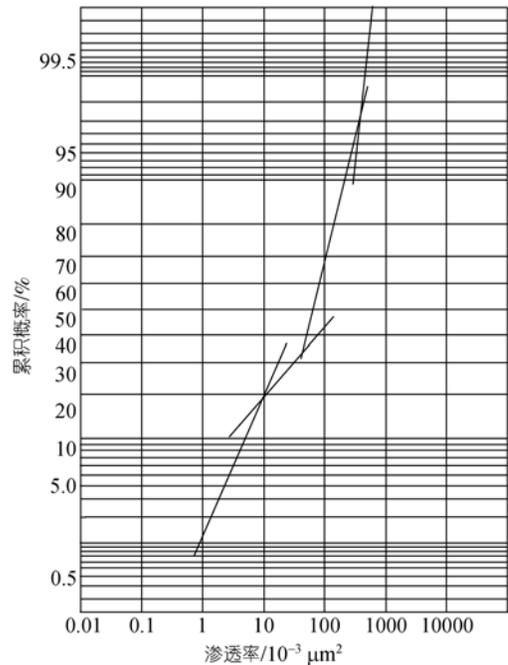


图 3 短期旋回渗透率分布概率曲线

在大致划分的四种类型基础上, 采用判别分析法和聚类法进行了各取心井样品的分类.

据孔隙度、渗透率、厚度、有效厚度、流动层带指标、储层质量指标、流动系数、储集系数、有效流动系数和有效储集系数等指标形成了流动单元的聚类谱系图, 表明可划分为四类流动单元类型, 即 P, F, G, E 型, 其中 E 类的样品数相对较少, 而其他三类的样品数相当. 在各类当中 F, G 类内部的相关性较强, P 型较差, E 型最差. 不同的指标其影响力不同. 经主因子分析后选取流动系数、储集系数、渗透率、储层层带指标来确定流动单元类型. 依据各类流动单元指标分布特征, 确定流动单元分类标准如表 1, 其中在渗透率、流动系数上各类流动单元区别较为明显, 而在孔隙度上具有一定的交叉, 在储层层带指标和储集系数上的交叉较大, 因而区分流动单元应以渗透率和流动系数为主, 同时参考其他指标.

表 1 流动单元分类标准

| 指标类型 | 指标区间 | | | |
|--|-------------|----------|-----------|-----------|
| | P | F | G | E |
| 渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$ | ≤ 25 | 25~100 | 100~250 | >250 |
| 孔隙度 | ≤ 0.22 | 0.2~0.25 | 0.24~0.28 | 0.24~0.27 |
| 储层层带指标/ μm | 0.78~2.0 | 1.1~2.2 | 2.0~2.8 | >2.8 |
| 储集系数/m | ≤ 1.0 | 0.7~1.5 | 0.9~2.0 | >1.3 |
| 流动系数/ $\text{m} \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$ | ≤ 100 | 100~500 | 500~1500 | >1500 |

对成因砂体和流动单元对应关系研究表明, 辫状河道砂主要形成极好型和好型流动单元, 分别占河道砂体的 45.1% 和 37.8%, 说明河道砂体的渗流能力很强. 而河道间砂体主要形成一般型和好型流动单元, 各占有 46.9% 和 31%, 席状砂体物性较差, 多形成差型和一般型流动单元, 其中差型占 34.8%, 一般型占 44%, 显示了较差的物性特征. 对不同流动单元的微相构成统计表明, 构成极好型流动单元和好型流动单元的砂体主要为辫状河道砂体, 表明在开发过程中, 起主要渗流作用的应为该类砂体, 而差型流动单元则主要为席状砂体和河道砂体, 预示着在不均一渗流情况下, 形成低渗带和渗流缓冲带的也将是这类砂体.

4 流动单元预测与评价

流动单元的预测是平面非均质性表征的关键, 是流动单元研究的核心. 可通过储层结构分析法、

门槛值法和三维建模技术来预测. 研究依据流动系数数值进行单井流动单元类型的确定, 通过内插方法预测井间的流动单元类型, 采用五类流动单元类型 P, F, G, E, MUD(表征砂岩不发育的层段)进行井间预测.

在基准面旋回格架内, 流动单元的特征有所不同. 在基准面旋回的高部位, 多发育以差型和一般型流动单元为主的平面模式, 砂体发育较差, MUD, P 型占绝大部分面积, 而在基准面处于较低位置处, 则多发育由 G, E 型流动单元构成的物性较好、砂体厚而连续性的模式, 在两者之间则有相应的过渡类型.

与沉积微相图比较表明, 流动单元平面展布基本上受控于沉积相, 沿水流方向, 或辫状河道发育区是 E, G 型流动单元较为发育的区域, 而在河间或席状砂区多为 P, F 型流动单元发育区, MUD 型则多发育于砂体的边部外缘区.

基于流动单元的短期旋回分类评价主要依据门槛值法完成. 通过对各短期旋回流动单元模型的分析, 依据平面上各类流动单元的相对比例, 对各短期旋回进行评价, 确定了不同的流动单元平面样式. 评价标准如表 2. 各类短期旋回特点如图 4.

表 2 短期旋回评价标准

| 类型 | 一类 | 二类 | 三类 | 四类 |
|----|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|------------------|
| 特征 | 极好型流动单元的比例大于 40%, 好型与极好型的面积和大于 80% | 极好型面积大于 10%, 但小于 40%, 好型与极好型面积和大于 70% | 一般型以上流动单元的比例大于 60%, 而又达到二类的短期旋回 | 差型和非储层的面积和大于 40% |

一类短期旋回: 平面上以好型和极好型流动单元为主, 两者均呈连续分布, 极好型流动单元面积较大, 而一般型、差型流动单元及非储层的面积较小, 且主要位于研究区的边缘部位.

二类短期旋回: 平面上以好型流动单元为主, 其他流动单元面积比例较小, 多呈零散状镶嵌于好型流动单元中间或者边缘部位, 非储层面积很局限地分布于储层的局部边缘部位.

三类短期旋回: 平面上以好型和一般型流动单元为主, 两者基本上可连续分布, 极好型和差型流动单元的面积比例较小, 且多呈零散状镶嵌于好型流

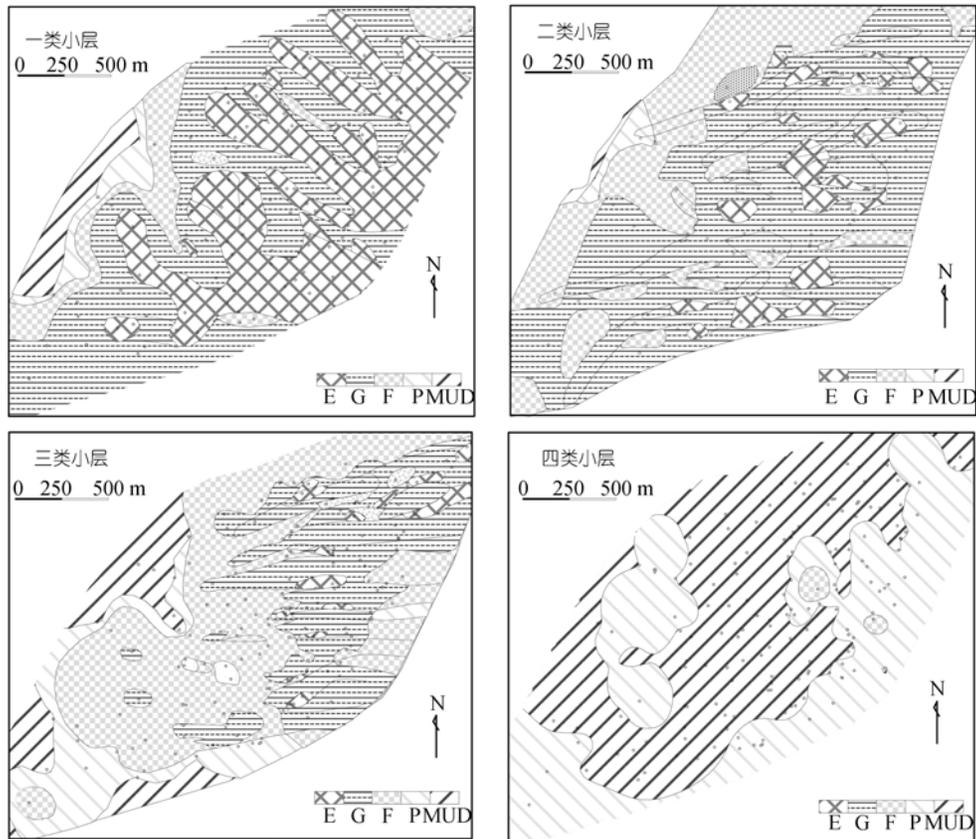


图4 不同类型短期巡回流动单元平面特征

动单元中间或者边缘部位, 非储层的面积较二类短期巡回有所增多。

四类短期巡回: 平面上以差型流动单元为主, 基本上可连续分布, 无极好型流动单元, 基本无好型流动单元, 即使有也只能呈零散状镶嵌于差型流动单元中, 一般型流动单元面积也不大, 多孤立嵌于差型流动单元中。非储层的面积很大, 且连续分布。

各短期巡回评价结果为一类短期巡回 1 个(沙二上 2⁵), 二类短期巡回 5 个(沙二上 2⁷, 2⁸, 2⁹, 3¹, 3⁵), 4 类短期巡回 7 个(沙二上 2⁴, 3³, 3⁴, 3⁶, 3⁷, 3⁸, 3⁹), 四类短期巡回 5 个(沙二上 2¹, 2², 2³, 2⁶, 3¹⁰)。

5 流动单元与剩余油预测

5.1 概念模拟表明流动单元样式对剩余油分布控制明显

根据对沙二上 2⁺³ 厚油层的剖析, 总结出 3 种储层样式。

I 型模式: 以好型、极好型广泛分布为特色, 平面上与一类、二类巡回特征相近, 沉积相上表现为分流河道为主, 剖面上表现为以 E 型的分流河道相互叠加, 局部夹 F, P 型的河间砂体。

II 型模式: 以 G 型流动单元镶嵌于一般型流动单元为特征, 平面上与三类巡回相近, 沉积相上表现为河道孤立分布, 剖面上表现为层状, 河道极少切穿巡回边界。

III 型模式: 以 F, P 型流动单元为主, 平面上与四类巡回特征相近, 沉积相上表现为连续分布的席状砂, 几乎无分流河道沉积, 层状、边界明显。

对各模式建模后, 对注水开发过程进行了模拟, 表明流动单元样式对剩余油分布控制明显。以 I 型模式对模拟结果进行扼要说明:

采用正五点模拟井网, 设计采油井 4 口、注水井 1 口。W₁ 为注水井, 位于模型中心部位 E 型河道砂体上, W₂, W₃, W₄, W₅, 在 W₁ 井周缘。其中 W₂ 位于河道

间 F 型流动单元上, W_3 位于 E 型流动单元上, 与注水井 W_1 井之间有 P 型流动单元隔开, W_4 与注水井 W_1 位于同一 E 型流动单元的同一河道砂体上, 但其间有面积较大的河内洼地 P 型流动单元相隔, W_5 则与 W_1 井位于同一 E 型流动单元的同一河道砂体, 且其间没有差砂体隔开。

模拟结果表明: (1) 注入水沿 E 型流动单元方向优先流动, 推进较快, 处于同一流动单元的采油井 W_5 井高产后快速水淹, 水淹时间远较其他井早, 而 F 型流动单元明显减缓了注入水推进; (2) 经过长期开发后, 位于河间的 W_2 井产量较低, 但见水很晚, 水淹后含水上升较慢, 其含水开采明显可分为两个阶段, 在 F 型流动单元内中含油饱和度明显高于 G 型, 成为剩余油的富集区; (3) 注采井间有 F 型流动单元相隔的 W_3 , W_4 井由于 F 型的缓冲作用, 水淹较直接相连的 W_5 井慢, 水淹后期采油井附近也具有一定的剩余油, 尤其是由较大规模的河内洼地 P 型流动单元相隔的 W_4 井与 W_5 井差别更大一些; (4) W_2 井水淹较慢, 有较多的剩余油; (5) 高含水中后期, 各种类型的砂体基本全部进入到高含水期; (6) 总体上这类储层的动用状况较好, 在中后期由于剩余油主要富集于河道间砂体中, 调整的策略应放在封堵见水的, 尤其是高含水的河道砂体上和加大对河间砂体的动用上; (7) 剖面中剩余油主要受流动单元的井间对应性控制, 由于 E 型流动单元旋回的屏蔽, 在 F, P 型中有大量的剩余油。

5.2 基于流动单元的宏观剩余油半定量分析表明流动单元模式控制了剩余油的分布

以往进行剩余油定性预测时, 由于受监测资料不足的制约, 使得对合采井单井注采量的估计常出现较大的偏差, 进而使得预测与实际之间出现较大的偏差, 基于流动单元进行预测时, 具有以下几个特点: (1) 注入水和产液量劈分以流动单元为依据; (2) 在进行方向注水量劈分时充分考虑到不同流动单元的方向性及其边界的作用, 按流动单元的流动系数进行水量劈分, 而向河道间方向劈分的注水量较少; (3) 在勾绘水淹图时, 依据注水量, 同时考虑各井的流动单元空间分布样式及其接触关系, 确定不同的含水线的位置。

基于此预测了各短期旋回的剩余油分布, 结果表明剩余油的分布与储层流动单元模式密切相关, I 类、II 类小层中剩余油含量较少, 多孤立分布, III 类小层中剩余油较多, 连续分布, IV 类小层动用较差, 但剩余油较少, 难于动用。

5.3 流动单元约束加快了油藏数值模拟的拟合速度

基于流动单元的动态模拟充分考虑了不同流动单元类型的物性、规模、渗流特征, 对模拟过程中的静、动态参数进行优化和修改, 加速模拟的速度, 提高模拟的精度和准确性。与常规方法建立的模型及模拟相比, 本研究基于流动单元的建模型和模拟, 使开发历史拟合速度大大加快, 模型修改程度降低, 节约了模拟成本, 同时模拟成果与地质吻合性大大提高。

5.4 剩余油分布规律

定性分析和定量模拟表明剩余油分布具有以下特点: (1) 平面上剩余油分布主要集中于 F 型流动单元和部分 G 型流动单元中; (2) G, E 型流动单元剩余油以透镜状孤立分布, 而 F 型中连片分布; (3) 垂向上剩余油主要存在于三类短期旋回中; (4) E, G 型流动单元中的剩余油主要由于注采不完善而成; (5) F, P 中的剩余油主要由于储层物性较差屏蔽而形。

6 剩余油挖潜策略

针对剩余油分布特征, 剩余油挖潜策略为:

(1) 细分注水, 垂向上强化 F 型流动单元开采 由于本区已进入特高含水期, 全区除个别部位外, 含水基本上都在 90% 以上, 通过剩余油潜力分析存在高含水层强水淹高能量、低含水层弱水淹低能量的现象, 平面水驱不均匀性和纵向矛盾逐渐加大。这种状况不适应高含水期油田调整挖潜, 针对此充分应用细分流动单元成果, 主要采用大修、恢复等手段分层、分压注采, 在剩余油富集区形成注采井组, 挖潜局部剩余油; 并加大力度调整注采结构, 增强水驱强度, 以便进一步扩大层内、层间水驱状况。

(2) 堵、调结合, 封堵无效注水的 E 型流动单元 尽管油藏整体上都处于较高的含水状况下, 但含水并不均一, 部分层位由于物性相对较好, 注采对应性较好, 注入水长期冲洗, 使得其成为水极易通过的层带, 同时高含水(达到 95% 以上)下, 注入水起不

到应有的作用而成为无效注水. 对这类层, 应实施堵、调结合, 以降低无效注水量和油井的含水, 达到均匀动用的目的.

(3) 加大不完善的 E、G 型流动单元富集区挖潜 对于油藏注采不完善形成的剩余油富集区, 针对不同的情况, 可通过补孔和老井侧钻的方法进行剩余油挖潜. 对于断层遮挡形成的剩余油丰度比较大的区域, 主要根据剩余油储量通过双靶定向井等手段, 挖潜剩余油.

(4) 扩大生产压差, 确保 F、P 型流动单元的产出 为了实现油田高含水期稳产, 通过提高单井排液量使一些压力低、由于层间干扰不产液的短期旋回开始

生产, 增加出油厚度, 提高单井产能.

按以上策略, 通过调整方案的实施, 取得了较好的效果. 依据流动单元研究成果, 设计油井措施井 5 口, 其中提液井 3 口, 回采 1 口, 补孔 1 口; 设计水井措施井 21 口, 期中大修 2 口, 调驱 10 口, 封井 9 口. 从调整结果总看油藏注采结构趋于合理, 区块产量稳中有升, 取得了较好的调整效果. 目前区块日产油增加 32 t, 增产 20%. 自然递减由实施前的 11.9% 下降到目前的 6.7%, 下降了 5.2 个百分点; 综合递减由实施前的 8.7% 下降到目前的 4.0%, 下降了 3.7 个百分点, 含水保持稳定. 增加可采储量 12.1×10^4 t, 提高采收率 1 个百分点.

参考文献

- 1 Testerman J D. A statistical reservoir zonation technique. *J Petrol Technol*, 1962, 14(8): 889—893
- 2 Cant D J. Subsurface facies analysis. In: Walker R G, eds. *Facies Models*. Geological Association of Canada Publications, Business & Economic Service, Toronto, 1984. 27—45
- 3 Hearn C L, Hobson J P, Fowler M L. Reservoir characterization for simulation, Hartog Draw Field, Wyoming. In: Lake L W, Carroll H B, eds. *Reservoir Characterization*. INC. Orlando, Florida: Academic Press, 1986. 341—372
- 4 张昌民, 徐龙, 林克湘. 青海油砂山油田第 68 层分河道砂体解剖学. *沉积学报*, 1996, 14(4): 70—75
- 5 Jackson S R, Tomut Sa L. 应用综合方法建立钟溪油田障壁岛相油藏的定流模型. 见: 刘孟慧, 赵澄林, 纪友亮, 等, 编译. 第二届国际储层表征技术研讨会论文集. 东营: 石油大学出版社, 1990. 14—33
- 6 Ti Guangming, Munly W, Hatz D G, et al. Use of Flow Units as A Tool for Reservoir Description: A Case Study. *SPEFE*, 1995. 122—128
- 7 尹太举, 张昌民, 陈程. 建立储层流动单元模型的新方法. *石油与天然气地质*, 1999, 20(2): 170—175
- 8 彭仕宓, 尹志军, 常学军. 陆相储集层流动单元定量研究新方法. *石油勘探与开发*, 2001, 28(5): 68—70
- 9 熊琦华. 岩石物理相研究方法初探—以辽河冷东——雷家地区为例. *石油学报*. 1994, 15(专刊): 68—75
- 10 Martin A J, Solomon S T. characterization of petrophysical flow units in carbonate reservoir. *AAPG Bull*, 1997, 81(5): 734—759
- 11 冯晓宏, 刘学峰, 岳清山. 厚油层非均质特征描述的新方法——水力(流动)单元分析. *石油学报(增刊)*, 1994, 15: 149—158
- 12 Amaefule J O, Altunbay D, Tiab D, et al. Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells. *Formation Evaluation and Reservoir Geology Proceedings—SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Omega: 1993. 205—220
- 13 Maghsood A, Fujii H, Fujimoto U. Permeability prediction by hydraulic flow units-theory and applications. *SPEFE*, December, 1996. 263—271
- 14 袁新涛, 彭仕宓, 林承焰. 分流动单元精确求取储层渗透率的方法. *石油学报*, 2005, 26(6): 78—81
- 15 赵翰卿. 对储层流动单元研究的认识与建议. *大庆石油地质与开发*, 2001, 20(3): 8—10
- 16 尹太举, 张昌民, 王寿平. 濮 5 块流动单元评价. *石油学报*, 2005, 26(5): 85—89
- 17 Davies D K, Vessell R K, Auman J B. Improved prediction of reservoir behavior through integration of quantitative geological and petrophysical data. *SPE Reservoir Eval Eng*, 1999, 2(2): 149—160
- 18 Davies D K. Reservoir models for meandering and straight fluvial channels, GCAGS(41st). Houston, Texas, USA, 1991. 152—174
- 19 Davies D K, Vessell R K, Bernal G M C. Flow unit modeling in complex reservoirs. *AAPG Annual Convention*. V5, San Diego, CA, USA, 1996. 336
- 20 赵永胜, 董富林, 邵进忠. 储层流动单元的矿场实验. *石油学报*, 1999, 20(6): 43—46
- 21 张继春, 彭仕宓, 穆立华, 等. 流动单元四维动态演化仿真模型研究. *石油学报*, 2005, 26(1): 69—73
- 22 阎长辉, 羊裔常, 董继芬. 动态流动单元研究. *成都理工学院学报*, 1999, 26(3): 273—275
- 23 窦之林. 孤东馆陶组河流相储集层流动单元模型与剩余油分布规律研究. *石油勘探与开发*, 2000, 27(6): 50—52
- 24 李阳. 储层流动单元模式及剩余油分布规律. *石油学报*, 2003, 24(3): 52—55