

文章编号: 0253- 9985(2004) 01- 0026- 05

流动单元研究在北大港油田中的应用

窦松江^{1,2}, 于兴河¹, 李才雄^{1,2}

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国石油大港油田公司, 天津 300280)

摘要: 以北大港油田港东地区下第三系河流相沉积储层为例, 通过精细储层对比、储层结构及渗流屏障的研究, 港东地区垂向上细分为 118 个时间地层单元, 平面上划分出 2 681 个含油连通体, 并根据各含油连通体储层的空间物性展布及动态分析资料, 采用因子分析的方法, 细分为 9 000 个流动单元类型; 在此基础上, 利用数值模拟及常规油藏工程方法, 逐步量化不同流动单元剩余油的资源潜力, 并进一步划分了 6 类剩余油资源潜力类型。其中, 注采井网不完善、垂向上不同流动单元级别动用程度的差异和受渗流屏障遮挡及微构造影响所形成的剩余油资源潜力区, 剩余油资源潜力相对集中, 是油田今后开发的重点。

关键词: 河流相; 流动单元; 岩石物理相; 渗流屏障; 渗流差异; 剩余油

中图分类号: TE112. 1 文献标识码: A

Flow unit study at middle and late development stages in Northern Dagang oilfield

Dou Songjiang^{1,2} Yu Xinghe¹ Li Caixiong^{1,2}

(1. China University of Geosciences, Beijing; 2. Dagang Oilfield Company of PetroChina, Dagang, Tianjin)

Abstract: Taking the Paleogene fluvial reservoirs in Gangdong area in Northern Dagang oilfield as an example, the reservoirs in Gangdong area can be divided into 118 time-stratigraphic units vertically and 2681 oil-bearing sandbodies laterally based on fine reservoir correlation and study of reservoir structure and flow barriers. Totally 9000 flow units are defined by using factorial analysis method according to the spatial distribution of physical properties of each sand body and the dynamic analysis data. Numerical modeling and conventional reservoir engineering methods have further been used to progressively determine the quantities of the remaining oil potential in each flow unit and define 6 types of remaining oil potentials. Areas with remaining oil potentials that have been formed due to imperfect flood pattern, the difference of producing status between various vertical flow units, and the impacts of flow barriers and microstructures are the main targets of development in the future.

Key words: fluvial reservoir; flow unit; petrophysical facies; flow barrier; seepage flow difference; remaining oil

储层流动单元研究是国外 20 世纪 80 年代中后期开始兴起的一种储层研究方法^[1], 20 世纪 90 年代在国内开始进行探索性研究。目前, 储层流动单元尚没有统一的定义, 但对其共同的理解是: 流动单元是在侧向上和垂向上连续的, 内部具有相同或相似的影响流体流动的岩性和岩石物理性质的储层单元。针对陆相储层地质特征, 探索储层流动单元的研究思路和方法, 并应用于油田开发中后期的老油田, 对于提高老油田的采收率具

有很大的现实意义^[2]。

1 思路

前人对流动单元研究的方法很多, 不同的学者根据自己的理解提出了不同的研究方法, 总体上可归纳为 3 大类^[3,4]。

(1) 根据岩相及宏观岩石物理参数进行流动单元研究。通过沉积学研究在垂向上划分为若干个成因单元, 并研究各成因单元内岩性与孔、渗等

参数特征; 然后进一步细分, 划分出岩性和孔、渗性质均相似的储集单元, 即流动单元。

(2) 应用孔隙几何学进行流动单元研究。根据孔隙类型及岩石类型划分流动单元: 将具有同一孔隙组合类型的岩类归属于同一类流动单元; 根据流动分层指标(*FZI*) 划分水力流动单元, *FZI* 实际上反映了岩石孔隙结构特征, 相似的 *FZI* 值的岩石认为具有相似的水力半径。

(3) 应用传导系数、储存系数等参数进行流动单元的划分。通过岩心描述, 将沉积层段分成若干层, 并根据岩石特征和物性特征将这些层进一步分为若干个亚层, 然后通过传导系数、储存系数等参数计算, 将这些亚层进一步划分若干个流动单元。

以上的研究方法, 大多是从静态分析的角度研究流动单元, 而忽视了大量动态资料的综合分析。

本次流动单元的划分除考虑成因单元内部在垂向上的渗流差异外, 充分结合平面上渗流分布规律与单元间渗流屏障的研究, 以确定储层的连通状况, 划分连通体。在此基础上, 进一步根据储层的空间物性展布及动态分析资料, 划分流动单元类型, 量化流动单元内的剩余油资源潜力, 为制定油田开发调整方案提供依据。

流动单元研究分为3个层次: 首先, 开展精细储层对比及其结构研究, 确定连通砂体与渗流屏障的分布; 其次, 开展储层参数评价研究, 确定连通体内部导致渗流差异的储层质量差异, 划分流动单元类型; 第三, 开展油藏工程分析, 确定不同流动单元内的剩余油资源潜力。

2 实例

2.1 地质概况

北大港油田港东开发区位于北大港构造带东段, 为复杂断块油藏, 属于河流相沉积储层, 油层主要集中于明化镇组下段和馆陶组, 含油井段长达1 000 m, 油藏埋深在1 300~2 300 m, 储层物性以中孔-高渗为主。截至1999年, 油井综合含水90%, 采出程度已达42.3%。由于地下情况异常复杂, 随着不断开采, 含水率逐渐上升, 在开发中也渐渐暴露出油层射开程度高, 但动用程度较差, 以及注水单层突进等矛盾, 表现出明显的渗流差异。针对开发后期生产中出现的难题, 迫切需要

以流动单元为基础建立精细的流动单元模型, 并搞清由于流动单元内渗流差异所控制的剩余油的分布状况。

2.2 流动单元划分

2.2.1 储层精细对比^[5]

港东开发区在以往的研究过程中, 主要是以小层为基础进行储层研究^[1]和地质模型的建立, 没有充分考虑到单砂层的成因特征和等时性。本次研究的具体研究步骤是: 通过对岩心观察和岩电关系研究, 选择明显反映储层特征的测井响应曲线, 寻找各级对比标志层(反映等时界面), 建立标准对比剖面; 利用沉积旋回和各种对比标志层由大到小、由粗到细逐级进行划分对比; 结合吸水剖面、产液剖面、压力测试(FMT)、示踪剂测试等资料, 对单砂体的对比连通关系进行验证和修改。综合应用岩心、测井和三维地震等信息, 采用“旋回对比、分级控制、动态验证、调整完善”的对比思路。将工区内明化镇组II油组—馆陶组III油组划分为47个小层, 最终将47个小层从垂向上细分为118个时间地层单元。研究过程中充分考虑了河道的迁移及河道的叠置, 并对河道叠置形成的厚砂层进行劈分, 以确保其等时性。

2.2.2 储层结构^[6]

在等时地层格架研究基础上, 即可进行储层结构分析^[3]。

该区明化镇组下段属于曲流河沉积环境, 从微相分析, 可划分为点坝、废弃河道、溢岸相(天然堤、决口扇)和泛滥平原等几种微相, 其中点坝为体系内砂体建造的主体, 在河流的侧向加积作用控制下(图1), 点坝由若干个在时间和空间上依次叠置的侧积体组成“半连通体”, 单砂体整体连通性较差, 变化较大, 主要为透镜状和条带状。据统计, 单砂体钻遇率为10%~40%, 最低仅4%; 因此, 曲流河沉积环境下, 点坝砂体结构简单, 界面相对较少^[6], 在垂向上一般呈迷宫状结构。

馆陶组为辫状河沉积环境, 由主河道、心滩和河漫滩等几种沉积微相构成。主河道底部滞留沉积和心滩砂常构成辫状河储层的主体。由于辫状河水动力能量较强, 河流下切作用和河道变迁频繁, 时常造成砂体相互切割与叠置, 砂体之间接触关系也较复杂, 界面相对明显, 砂体相对发育、分布稳定, 且连通性好, 砂体呈拼块状结构。单砂体钻遇率为30%~70%, 个别达90%以上。

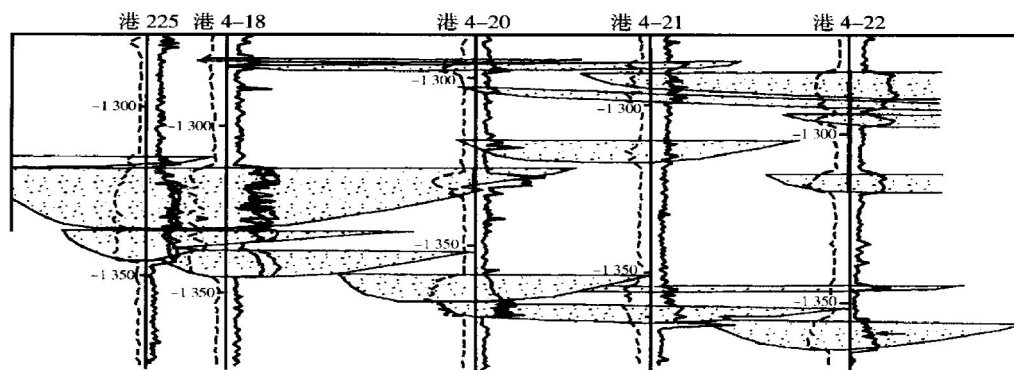


图 1 港 225 井—4-22 井砂体结构剖面图

Fig. 1 Sand body profile between G225 well and 4-22 well

2.2.3 渗流屏障^[1]

渗流屏障的存在, 往往使一个时间地层单元的砂体划分成不同的连通体。本区渗流屏障大体可分为泥岩屏障、钙质胶结屏障和封闭性断层屏障等 3 种类型^[2]。

(1) 泥岩屏障: 包括垂向泥岩屏障和侧向泥岩屏障两种。垂向泥岩屏障在垂向上将两个连通体隔开, 其主要是通过垂向相分析及高精度地层对比而加以确定; 侧向泥岩屏障主要是指河道间或坝间泥岩, 主要通过时间地层单元内沉积微相分析来确定。本区泥岩夹层厚度一般在 0.2~1.5 m 左右。

(2) 钙质胶结屏障: 本区钙质胶结带或钙质泥砾岩多出现于正韵律砂层的底部, 形成钙质胶结界面, 由于砂体拼合结构不同, 常形成不同的界面特征, 进而形成不同的渗流特征。其厚度 1~3 m, 物性较差, 对流体渗流起一定的屏障作用。钙质胶结条带在测井曲线上表现出“两高一低”的特点, 即电阻率出现“高钙尖”; 微电极底部出现高异常, 渗流性差; 声波时差则明显偏低; 自然电位曲线上反映不明显。

(3) 封闭性断层屏障: 在注水开发过程中, 断层的作用表现在两个方面, 开启性断层起渗流通道作用, 而封闭性断层则构成渗流屏障。一般通过静态法(断层两侧岩性的变化)、动态测试法(压力、含水、原油性质等变化)、物质平衡方程法(注采量的计算)来判定断层的封闭性。

2.2.4 连通体的划分^[3]

在时间地层单元对比的基础上, 依据砂/泥界面, 确定砂体的分布及砂体的拼合结构, 结合渗流屏障研究成果及开发动态测试资料, 确定砂体垂

向上与侧向上的连通状况, 最后进行连通体的划分。港东开发区垂向上细分为 118 个时间地层单元, 平面上共划分出 2 681 个含油连通体。

2.2.5 流动单元的划分

不同类型的流动单元具有不同的渗流能力和岩石物性特征, 通过前面渗流屏障和连通体的划分, 针对连通体内部孔隙度(Φ)、渗透率(K)、渗透率与厚度的乘积($K \times H$)、变异系数 V_k 等 4 个具有代表意义的变量, 采用因子分析的方法, 对流动单元进行分类评价。主因子的表达式可表示为

$$F_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_{ij}$$

式中 F_i 第 i 个主因子的因子得分; a_{ij} 为第 i 主因子与第 j 个变量的权系数; x_{ij} 为第 i 个样品第 j 个变量的值。

对本区 1 500 个样品, 计算各个样品的因子得分, 依据因子得分的集中程度, 以及相应的吸水、产液能力的差异, 将流动单元划分出 4 种类型(表 1)。

表 1 流动单元分类标准

Table 1 Classification of flow units

类型	F_i 评价因子	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	变异系数	吸水强度 / $[\text{m}^3(\text{d} \cdot \text{m})^{-1}]$
I	> 1.8	> 30	> 1000	< 0.6	> 15
II	$> 1.2 \sim 1.8$	$> 26 \sim 30$	$> 400 \sim 1000$	$0.6 \sim < 0.8$	$> 8 \sim 15$
III	$0.8 \sim 1.2$	$22 \sim 26$	$> 100 \sim 400$	$0.8 \sim < 0.9$	$5 \sim 8$
IV	< 0.8	< 22	$10 \sim 100$	$0.9 \sim 1.0$	< 5

本区垂向上基本以 118 个时间单元进行研究, 平面上共划分出 2 681 个含油连通体, 依据流动单元分类标准, 平面上累计划分出近 9 000 个不同级别的流动单元(图 2)。

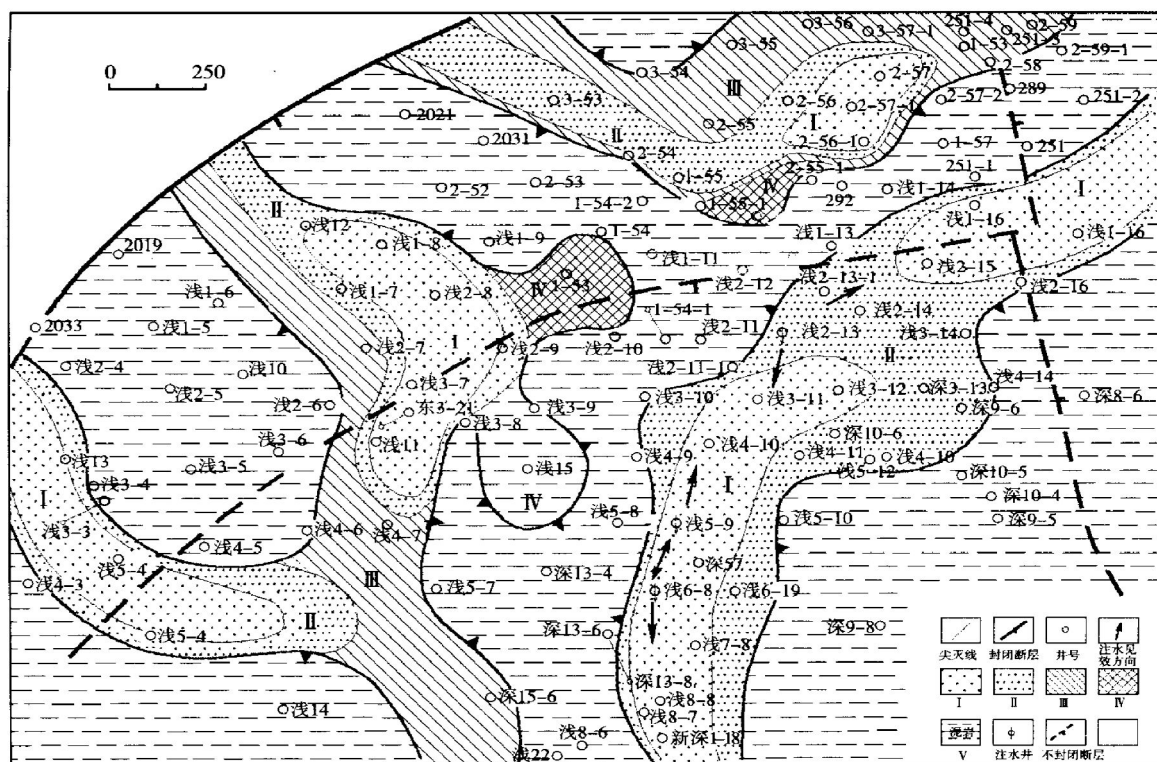


图 2 平面流动单元分布图

Fig. 2 Areal distribution of flow units

2.3 岩石物理相与流动单元的关系

岩石物理相是储层在沉积作用和成岩作用控制下,岩性和岩石物性的统一体,同时也是储层孔隙网络特征的高度概括,因此它与岩石相、沉积微相、物性和孔隙结构等宏观和微观特征有密切的联系。目前在岩石物理相与流动单元划分上存在有混淆的现象。

笔者认为,对于成岩作用较强的地区,应该在对岩石物理相研究的基础上,开展流动单元研究,一种类型的岩石物理相,可包含几个不同的流动单元类型;每种类型的流动单元,一般不包含不同的岩石物理相类型(开发过程中的高压注水、压裂等人为因素除外)。

2.4 流动单元的剩余资源潜力

2.4.1 判断剩余油分布

(1) 依据流动单元类型可直接、定性地判别剩余油分布。不同类型的流动单元具有不同的储层质量特征,也表现出不同的开发效果。I, II类流动单元水淹扩大区多沿物性好、流动能力强的流动单元方向流动,特别是长期注水会沿该方向形成一高渗流通道,从而使通道附近水淹程度高,而在远离通道方向水淹程度相对较低,从而形成剩

余油富集区。因此,平面上剩余油富集区多分布于 I, II 类流动单元的边缘及 III, IV 类流动单元中。

(2) 利用数值模拟及常规油藏工程方法计算剩余油储量。不同类型的流动单元剩余油储量的计算, 主要采用数值模拟及常规油藏工程的方法计算剩余油储量, 采用数值模拟手段能较为准确、快速地得出每个研究单元的剩余资源潜力, 同时也可以利用流动系数与动态测试这种常规油藏工程方法计算剩余油储量。港东开发区剩余油可采储量大于 5×10^4 t 的流动单元, 只占总数的 8%, 60% 的剩余可采储量小于 2×10^4 t, 说明开发后期的老油田剩余资源相当分散。

2.4.2 剩余油资源潜力类型^[7]

根据精细地质研究成果,如何量化剩余资源潜力类型,并提出相应的挖潜对策,是高含水、高采出油田进一步提高开发效益的重要前提。港东开发区流动单元共划分 6 种剩余油资源潜力类型,并利用数值模拟研究,把潜力类型按数值模拟成果(单位面积剩余可采储量)进行量化。(1)注采井网不完善形成的剩余资源潜力区(包括井网控制不住的流动单元)。(2)垂向上不同级别流动

单元动用程度差异形成的剩余资源潜力区。(3) 平面上储层较薄的流动单元(IV类流动单元或表外储层)储层质量差异形成的潜力区。(4) 同一流动单元内部由于沉积韵律、小的侧积层及夹层影响控制形成的剩余油潜力区。该潜力区又按韵律特征细分为正韵律型、复合韵律型、相对均质韵律型等3种类型,前两者测试成果反映出中上部韵律段油层驱油效率低,剩余油相对富集,而下部韵律水驱油效率较高,剩余油资源相对较少。(5) 受渗流屏障遮挡及微构造影响形成的剩余油资源潜力区(断层边角,甚至隔夹层控制形成的未动用区)。(6) 由于套变报废井影响形成的未动用剩余油资源潜力区。

上述6类潜力区,其中:1类控制的剩余可采储量占总剩余可采储量27.9%,2类占20.8%,3类占8%,4类占11%,5类占24.3%,6类占8%,剩余油潜力在1类2类5类潜力区相对集中。

2.4.3 采取的措施

针对注采井网不完善与级别低的III、IV类流动单元形成的潜力区,采取钻新井、完善及调整注采井网,并对规模较大的流动单元适时开展三次采油工作;对层间矛盾形成的剩余资源潜力区,依据资源潜力大小采取调剖、细分注及层系重组;对套变报废井影响形成的剩余资源潜力,采取钻新井、侧钻井及大修等措施;对流动单元内部由于沉积韵律、小的侧积层及夹层影响控制形成的剩余油,采取间歇注水、改变注水方向、软地层压裂、混相驱等措施;对受渗流屏障遮挡形成的剩余资源潜力区(断层边角,甚至隔夹层控制形成的未动用区),采取钻高效聪明井、补层措施。

在港东开发区通过流动单元研究量化潜力后,编制了整体调整方案,实施后,矿场实施效果显著,该区年产油量从调整前 42×10^4 t上升到实施后的 45×10^4 t,综合含水下降0.5个百分点,采油速度从0.82%上升到0.87%,水驱采收率增加了2.2个百分点,自然递减从1997年的27%下降到2000年的18%,现已累计增油 26×10^4 t。同时也

为该油田的下一步挖潜、调整及提高采收率工作奠定了基础。

3 结论

(1) 流动单元研究应分为3个层次,尽管不同层次研究的重点不同,但三者之间是一个有机的整体,不可分割。也可以说第一个层次主要是确定流动单元的主体骨架,以反映其连通与渗流状况;二是确定各流动单元的参数场特征;最后一个层次则是评价其内部剩余油的资源潜力。

(2) 陆相储层相变快,流动单元的分布亦很复杂,不同类型的流动单元具有不同的渗流能力,其控制形成的剩余油富集程度不同。剩余油分布不仅与流动单元类型有关,而且与注采井网的完善程度、油层动用程度及水驱油效率等有着密切关系。

(3) 本文提出了一套较为实用的流动单元的研究方法,港东开发区的应用实践证明,它是行之有效的;同时该项工作也为今后老油田开展类似工作提供了借鉴。

致谢:中国石油石油勘探开发研究院裘亦楠教授审阅了全文并提出了修改意见。

参 考 文 献

- 1 裘亦楠. 油藏描述[M]. 北京:石油工业出版社,1996. 66~215
- 2 吴胜和. 陆相储层流动单元研究的新思路[J]. 沉积学报,1999, 17(2): 252~257
- 3 Hearn C J, Ebanks W J Jr, Tye R S, et al. Geological factors influencing reservoir performance of the Hartzog Draw Field, Wyoming[J]. J Petrol Tech, 1984, 36: 1335~1344
- 4 Ebanks W J Jr. Flow unit concept-integrated approach to reservoir description for engineering projects[J]. AAPG Bull, 1987, 71(5): 551~552
- 5 于兴河,李剑峰. 碎屑岩系储层地质建模及计算机模拟[M]. 北京:地质出版社,1996
- 6 张昌民. 储层研究中的层次分析法[J]. 石油与天然气地质, 1992, 13(3): 344~350
- 7 李胜利,于兴河,高兴军,等. 剩余油分布研究新方法——灰色关联法[J]. 石油与天然气地质,2003, 24(2): 175~179