

文章编号:1000-0747(2009)06-0730-07

# 应用水平井资料开展精细油藏建模 及剩余油分布研究

郝建明<sup>1,2,3</sup>, 吴健<sup>4</sup>, 张宏伟<sup>3</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所; 2. 中国科学院研究生院; 3. 中国石油冀东油田公司; 4. 中国石油勘探开发研究院)

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司“低渗透水平井改造”重大专项研究《水平井控水技术研究与现场应用》(2008F-1506)

**摘要:** 以高尚堡油田高104-5区块馆陶组8#小层水平井开发油藏为例,分析水平井钻井资料、地震资料等各种基础信息的地质意义并加以综合利用,在单砂体内部开展沉积旋回精细划分对比的基础上,采用目前流行的相控随机建模技术建立了水平井目的层单一目标砂体高精度地质模型。在此基础上,开展精细油藏数值模拟研究,建立油藏动态模型,进而通过历史拟合以及动态方法对静态模型进行验证,经验证,所建立的地质模型具有较高的精确度,能够满足进一步开展研究工作的需要,并以此为基础对水平井开发状况、含水特征、见水规律以及剩余油分布特征等问题进行研究和评价。图11参10

**关键词:** 水平井; 相控; 地震属性; 随机建模; 数值模拟; 剩余油

中图分类号:TE319; TE327

文献标识码:A

## Study on fine reservoir modeling and distribution of remaining oil with data of horizontal wells

Hao Jianming<sup>1,2,3</sup>, Wu Jian<sup>4</sup>, Zhang Hongwei<sup>3</sup>

(1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Jidong Oilfield Company, PetroChina, Tangshan 063004, China; 4. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The horizontal well-produced oil reservoir was taken as an example in No.8 substratum of the Guantao Formation, block Gao 104-5, Gaoshangpu Oilfield. Horizontal well drilling data, seismic data and other fundamental information, combined with the fine internal division and correlation of sedimentary cycles in a single sandbody, were used to establish a single-sandbody high-precision geological model for the target zone of horizontal well, with the currently popular phased stochastic modeling technology. On this basis, we carried out detailed reservoir numerical simulation and established a dynamic reservoir model, then verified the static model with history matching and dynamic method. The geological model has high accuracy, and meets the demand of further research. With the modified model, we researched and evaluated the development status of the horizontal wells, the characteristics and trend of water cut and the distribution characteristics of remaining oil.

**Key words:** horizontal well; phase control; seismic attribute; stochastic modeling; numerical simulation; remaining oil

## 0 引言

近年来,冀东油田在大力加强油藏精细描述的基础上,积极推广应用水平井开发新技术<sup>[1]</sup>,使水平井开发技术在冀东油田各种类型的油藏开发实践中得到广泛应用<sup>[2]</sup>,油藏开发效果得到显著改善,开发效益稳步提高。但随着油藏开发程度的不断提高,油井含水上升等开发矛盾也逐渐暴露出来。特别是对于浅层高孔高渗边底水油藏,准确预测油层中剩余油分布尤其是

其富集部位是高含水油藏调整挖潜、提高水驱采收率、改善开发效果的基础和关键<sup>[3]</sup>。

## 1 油藏概况

高尚堡油田高104-5区块是冀东油田主要开发区块之一,区域构造位于南堡凹陷高柳构造带高柳断层面上盘一侧。主要含油层段为新近系馆陶组6#—13#小层。其中8#小层构造总体比较完整,其南侧为东西走向的高柳断层,西部含油井区地层向北偏东方向

倾斜,倾角 $3^{\circ}$ 左右,高点埋深 $-1\ 746\text{ m}$ (见图1)。储集层为一套辫状河沉积砂体,岩性粗,高孔高渗,砂层厚度为 $8.3\sim 22.7\text{ m}$ ,分布稳定。

高104-5区块馆陶组油藏原油具有密度高、黏度高、胶质含量高、沥青质含量高和凝固点低的特点,属于未饱和的常规稠油油藏。8#小层含油面积 $1.2$

$\text{km}^2$ ,地质储量 $205\times 10^4\text{ t}$ 。

油藏自2004年开始整体利用水平井投入开发,先后部署实施了14口水平井。至2006年6月,水平井已累计生产原油 $17.3\times 10^4\text{ t}$ ,产水 $34.2\times 10^4\text{ m}^3$ 。尽管油藏投入开发的时间不长,但含水上升速度较快,已有8口井含水率大于 $60\%$ ,总体表现处于中高含水期。

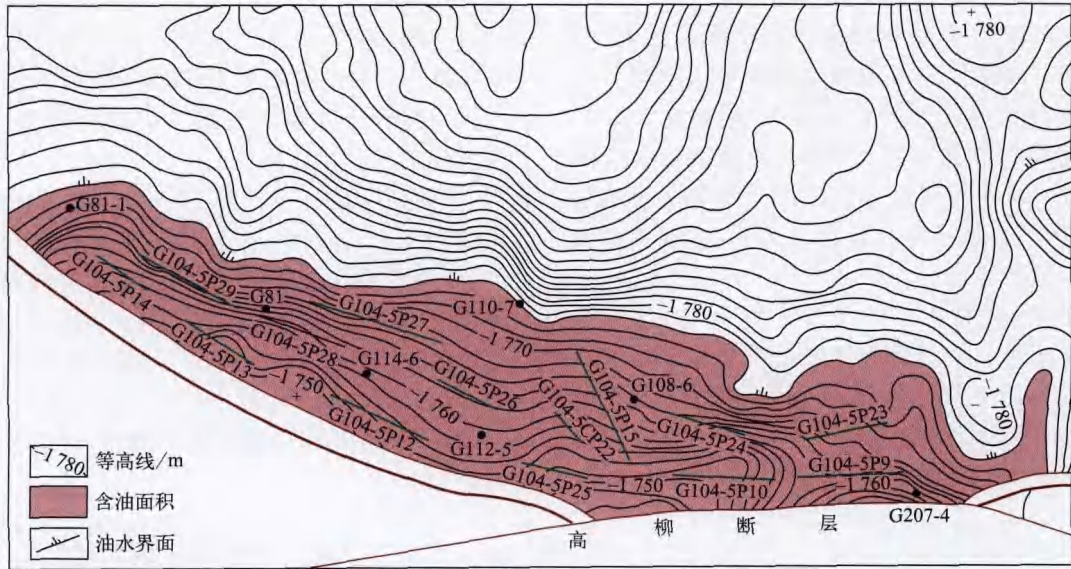


图1 高104-5区块馆陶组8#小层顶面构造图

为有效控制含水上升速度,实现油藏的高效开发,油田开始着手开展精细油藏描述工作,而三维地质建模是目前油藏描述工作的主要内容之一。

## 2 水平井资料在储集层建模中的作用

储集层建模技术是近年来快速发展的一项高新技术,它综合利用各种地质、地震、测井和生产动态数据,并用地质统计学的方法对各种储集层参数进行井间预测,建立定量精确的三维可视化储集层模型,是目前油藏描述工作的一项重要组成部分。储集层建模技术能够定量表征和刻画储集层非均质性,从而研究油气勘探和开发中的不确定性和投资风险<sup>[4]</sup>。

由于水平井目的层为单一砂层,以往储集层建模目标多为一组或多组砂层,限于模型的精度,很难对单砂层内部岩性、物性变化规律进行描述。因此,针对水平井目标砂体开展精细油藏地质建模工作,建立逼近地下实际的高精度三维地质模型,进而开展精细油藏数值模拟研究,可以对水平井生产特点及见水情况进行准确描述,同时通过精细油藏剩余油分布研究,可为水平井控水增油和油藏剩余油挖潜提供依据,进一步完善水平井开发技术。

目前通常采用地震资料及露头信息对地层特征的

横向变化进行研究、描述,但在矿场应用上都有较严重的缺陷。实际上,水平井资料是油田现场最为直接的揭示储集层横向变化的地质信息。

由于水平井与地层在空间上具有独特的配置关系,因此,与传统的直井或常规定向井相比,水平井资料在描述储集层横向变化特征上具有无可比拟的优势。

首先,水平井资料对储集层面微构造的控制作用十分明显。传统的直井或常规定向井与储集层面只有一个交点,因此,在平面上对层面的控制只有一个点。而水平井除了同样具有一个与层面的交点外,其全部水平井段均可实现对地层层面进行精确或半精确控制。

其次,水平井资料描述了储集层物性参数在平面上的连续变化特征。储集层岩石相的模拟与预测是储集层建模工作的主要内容之一,常规定向井资料能够准确反映储集层岩性纵向上的变化特征,但对于常规定向井开发的油藏,由于井距普遍大于储集层建筑结构的尺度,因此用其岩性资料无法准确建立储集层沉积模式,而水平井资料恰好能够弥补这一地质信息上的缺陷。对于一套河流相储集层,水平井资料相当于为模型的输入提供了一组连续的井点数据,结合常规定向井

资料综合分析研究,就可以较为准确地了解河道的规模及沉积特征,进而建立符合地质实际的岩相模型。

本次研究工作的目标区高 104-5 区块馆陶组 8# 小层主要以水平井方式开发,具有丰富的水平井钻井资料,为建立精细油藏地质模型奠定了扎实的资料基础。

### 3 储集层精细三维地质模型的建立

油藏描述技术就是充分利用各种动静态资料,研究油藏范围内井间储集层参数和油藏参数的空间分布规律。精细油藏描述研究的特点就是“精细化”,“精”就是要定量化和提高精确度;“细”就是描述的内容和尺度愈来愈细<sup>[5]</sup>。本次研究工作以高分辨率层序地层学理论为指导,从精细地层对比划分入手,建立高精度的三维储集层地质模型。

#### 3.1 精细地层划分与对比

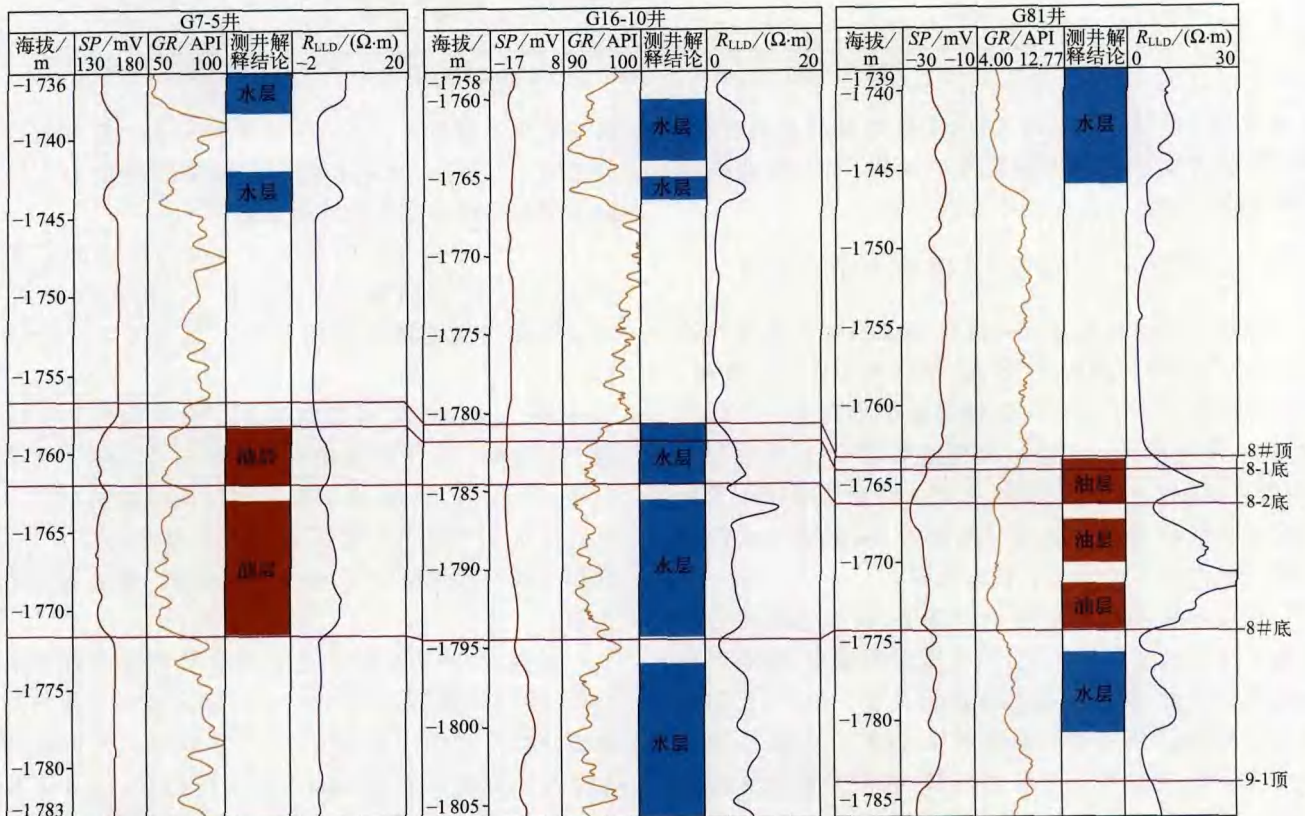
精细三维地质建模的最终目标是准确描述出储集层的三维特征和内部变化规律,沉积单元划分是影响储集层描述可靠性的重要因素。

三维地质建模利用测井数据进行井间插值计算,

为了使沉积砂体的分布以及砂体内部的泥质夹层得到合理的反映,插值计算应该是沿着等地质时间的沉积界面进行。因此构造模型中的地层界面必须是等时面,而不是砂体的顶底面。同时还应该在砂体内部尽可能多地寻找出等时的沉积韵律界面,以进一步保证插值的等时性。这就需要从沉积旋回的角度对目标砂体的界面以及内部的韵律层界线进行重新对比和落实。

在地层对比过程中,除了常规的自然电位和电阻率曲线以外,还使用了自然伽马曲线作为对比依据。由于自然伽马曲线对砂泥岩剖面更为敏感,可以用于细分层系的对比工作。

研究目的层 8# 小层为一套厚约 15 m 的辫状河块状砂岩沉积,纵向上,砂体的中下部为比较均质的块状砂岩,只有很少的薄夹层发育,对砂岩的储集性和其中流体的运动基本没有影响。往上泥质夹层逐渐增加,呈砂泥岩互层式沉积,与中下部砂岩间发育一个比较稳定的泥质隔层(见图 2),可以在多数井上进行对比。至砂体顶部,随着沉积活动的减弱,该旋回砂岩沉积逐渐结束。



SP—自然电位;GR—自然伽马; $R_{LLD}$ —深侧向电阻率

图 2 地层划分对比结果

根据这一旋回特点,将目标砂体划分为 3 个次级的沉积韵律层:中下部为一套相对较为均质的厚层砂

岩;上部泥岩夹层增多,变为砂泥互层式沉积,与下伏地层之间以一个比较稳定的泥质夹层分隔;顶部韵律

层表现为沉积活动接近尾声,但不同构造部位结束的方式不同,地层横向变化较大。

在精细砂体对比的基础上,建立精细构造模型。

### 3.2 建立构造模型

建立三维构造模型是全部储集层建模工作的前提,只有建立准确的构造模型,在此基础上建立的储集层模型才有意义。

首先应用全部钻井、测井资料开展目标砂层高精度小层对比,精确落实每口井目标砂层顶、底界限及断点位置。然后针对有声波曲线的井制作合成记录,将所有分层点转换到时间域进行层位标定,在高分辨率地震资料上进行目标砂层顶面微构造及微断层的追踪与解释,通过建立目标区速度模型,将解释的层面与断层转换到深度域,应用水平井实际钻井资料对层面和断层进行检验,最终建立精确的构造模型(见图3)。这样建立的三维构造模型一方面与钻井分层数完全吻合,另一方面保留了地震反射波反映出的微构造变化,是进行构造分析的良好平台。



图3 精细构造模型

从构造模型可以看出,高104-5构造为一个近东西走向的断鼻构造,构造相对比较简单,幅度比较宽缓,高点位于构造的南部,向北地层逐渐加深。在断鼻构造内部发育一些走向近南北的微构造,这些微构造代表了原生沉积面的起伏。油藏内部共发育了两条次级小断层。一条为南掉,断距最大为30 m,位于G109-5井附近。另一条为北掉,最大断距15 m左右,位于G104-P15井附近。由于G109-5井附近的南掉断层断距较大,使其南侧的地层低于油水界面的深度。G104-P15井附近的北掉小断层只在G104-4井附近将砂层断开,在其他部位断层两侧砂层都是相通的,尤其是G104-P15井以西,断距仅为5 m左右,对储集层的连通性基本没有影响。

为实现对储集层进行精细描述,以达到后期对水平井生产状况进行精确模拟的目的,本模型建立了高

精度的网格系统,网格纵向间距小于0.5 m。

### 3.3 构建岩相模型

相控建模方法是既考虑物性参数同时亦考虑沉积微相的一种建模方法<sup>[6]</sup>。对于岩性变化大、沉积环境复杂的陆相地层,相控建模方法能使所建模型更加逼近客观实际,因此,近年来被广泛应用于各种地质建模工作中。

通常,建立岩相模型主要是利用测井数据进行插值计算,但是由于陆相沉积储集层非均质性严重,分布特征复杂多变,计算出的模型往往存在多解性和不确定性。而建模的最终结果是要建立唯一确定的模型,因此在模拟计算过程中就应当尽量降低随机结果的不确定性,最好的方法是将尽可能多的地质信息(如地震资料)作为约束条件整合到模型的计算中,以获得可信度较高的油藏地质模型。

在陆相沉积层序砂泥岩结构中,作为储集层的砂岩(砾岩)与作为封盖层的泥岩在纵向上具有较强的韵律性,基于地震资料纵向波阻抗差异的地震反演技术能够较好地对比储集层岩性进行预测<sup>[7]</sup>。

采用目标区高分辨率地震资料,通过对地震属性与地层特征关系的分析,提取了相对波阻抗(道积分方法)、瞬时频率、瞬时带宽3个能够较好反映地质特征的地震属性。将三者分别与钻井数据进行回归分析。经过对比认为,目标层的砂体厚度与地震振幅之间具有一定的相关性,平均孔隙度与相对波阻抗之间具有较好的相关性,二者可以作为相应储集层模型计算的约束条件参与储集层参数的计算。

对于单一目标砂层,全区岩性变化不大,因此,将研究区地层分为砂、泥两种岩相进行岩相模型的模拟计算完全能够满足研究及生产的需要。模型计算方法采用序贯指示随机模拟,经统计得到目标砂体的变差函数,同时应用地震振幅属性平面图对模拟计算进行了协克里金条件约束,建立储集层岩相模型(见图4)。

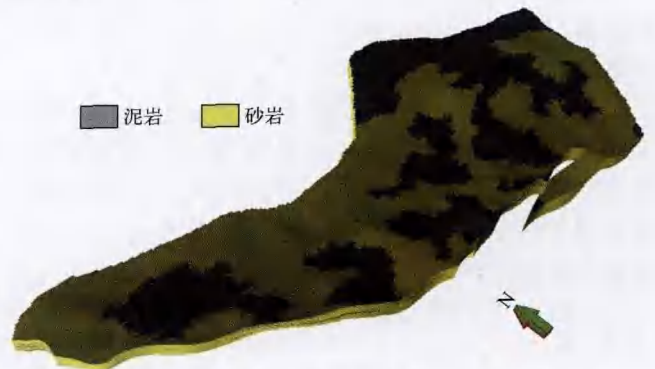


图4 岩相模型

### 3.4 物性参数模型计算

储集层物性参数模型的计算采用相控随机模拟方法。首先用序贯高斯随机模拟算法并加入地震相对波阻抗数据进行协克里金条件约束计算得到孔隙度模型(见图5)。

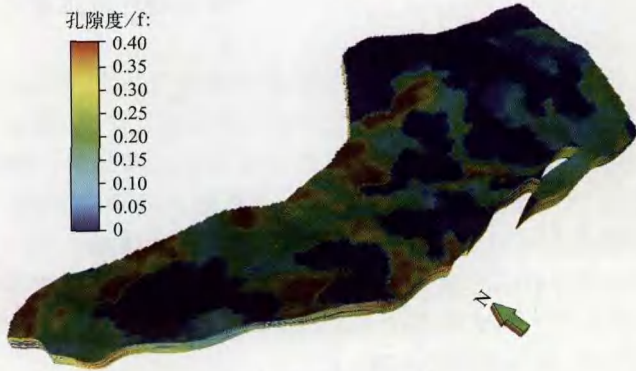


图5 孔隙度模型

通常在测井解释中,渗透率是孔隙度的函数,两者有直接的密切关系。因此,在计算渗透率模型时直接利用孔隙度模型对计算进行了协克里金条件约束,以保证渗透率模型与孔隙度模型之间保持较好的相似性,建立渗透率模型(见图6)。

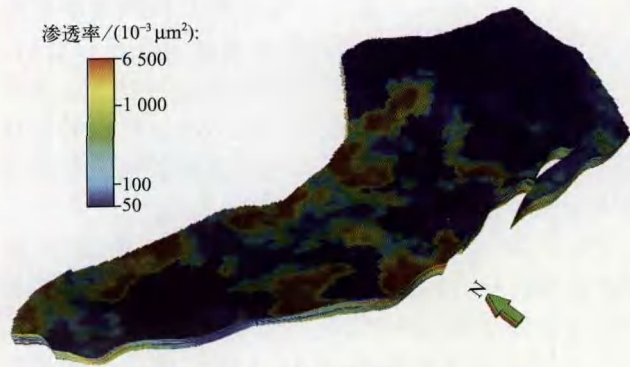


图6 渗透率模型

### 4 模型验证

建立三维地质模型的最终目标是对油藏进行准确的描述,为剩余油的挖潜提供基础,因此,验证模型的可靠性非常必要。

模型的检验有很多方法,例如通过统计多个实现上每个网格点目标出现的概率来获取最优的模拟结果;通过抽稀井检验评价模拟结果;通过与实际储集层展布模型对比评价模拟结果等等<sup>[8]</sup>,笔者认为,检验模型最有效的手段是进行生产动态验证,本次研究采用生产数值模拟结果与储集层结构分析对模型进行检验,取得了很好的效果。

本次工作以此精细三维地质模型为基础,经模型

粗化后得到数模网格,在油藏数值模拟器中对现有生产井进行生产动态历史拟合,以检验模型的准确性。

通过对21口生产井的生产动态进行历史拟合,单井油产量能够完全拟合;含水率拟合有19口井拟合结果较好,拟合度为91%。G104-5P9井在没有做任何调整的情况下达到了比较好的吻合程度(见图7),G104-5P11井和G108-6井在只调整了垂向渗透率的情况下也达到了比较好的拟合结果。

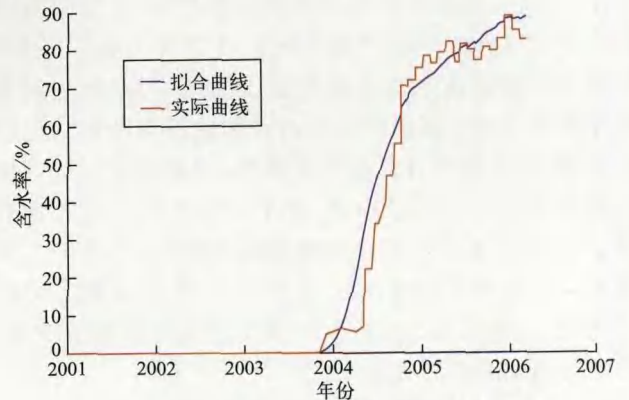


图7 G104-5P9井含水率拟合曲线

另外,开发井的生产状况与储集层的结构密切相关。因此,通过三维地质模型与开发井生产曲线的对比,可以对储集层特征与生产状况的关系进行定性的分析。在此仅举一例:分析认为G104-5P9井轨迹距油水界面很近,然而该井投产后含水上升较慢,产液量和含水率比较稳定(见图8)。在此模型的过井剖面上显示,该井射孔井段为比较均质的储集层,下面隔层比较发育,油水界面位于隔层的下方。模型显示的储集层分布特点较好地解释了该井的生产特点,证明此模型具有相当的可靠性(见图9)。

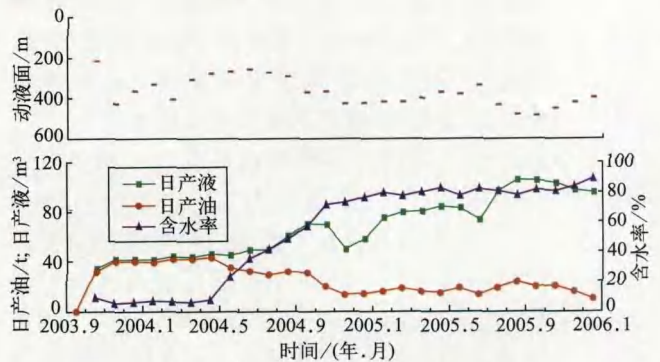


图8 G104-5P9井生产曲线

### 5 剩余油分布研究

剩余油分布是一个相对的概念,目前的剩余油饱和度高,说明油层动用程度低;剩余油饱和度低,说明

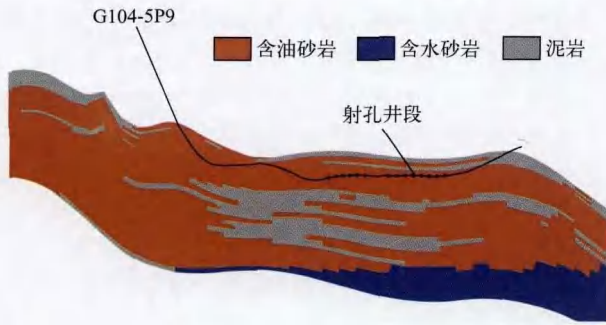


图9 过G104-5P9井轨迹剖面

油层动用程度高。剩余油的多少与单砂体本身的特征及开发对策存在密切的关系<sup>[9]</sup>。

首先,砂体所属的沉积类型、储集层物性以及夹层分布对剩余油的分布有着重要影响。

其次,断层也是影响油层动用情况的一个重要因素,一般来说,靠近断层的位置,特别是封闭断层边缘,能量难以得到有效补充,因而难以动用。

再者,储集层非均质性对剩余油分布起着重要作用。储集层的非均质特征主要体现在渗透率在平面、

层内、层间的分布。平面上,边底水沿着渗透率较高的方向推进,渗透率较低的部分则很难得到有效驱替,形成死油区;层内渗透率较低的部分也难以被水洗;层间非均质强,则可能形成边底水的单层突进,即边底水最先沿着渗透率较高的地层驱替,一旦油井见水后,其他低渗的油层就更难以得到有效驱替,因此低渗的油层剩余油饱和度比较高。

最后,油藏的开发方式也是影响剩余油分布的一个重要因素。如井网形式,沿着主流线容易水洗,非主流线则是剩余油饱和度较高的地区;井控程度低、超出单井控制范围以外的地区也是剩余油饱和度较高的地区;另外,射孔不完善往往也会导致油层未动用。

水驱油藏三维数值模拟是研究剩余油饱和度分布的重要方法,本次研究工作将建立的油藏三维静态地质模型输入数值模拟器,同时输入油气高压物性、油水相对渗透率等基本地质参数,开展油藏历史拟合。

通过生产历史拟合,得到油藏目前剩余油饱和度分布模型(见图10、图11)。通过在三维空间对模型进行观察,本区剩余油分布具有如下特征:

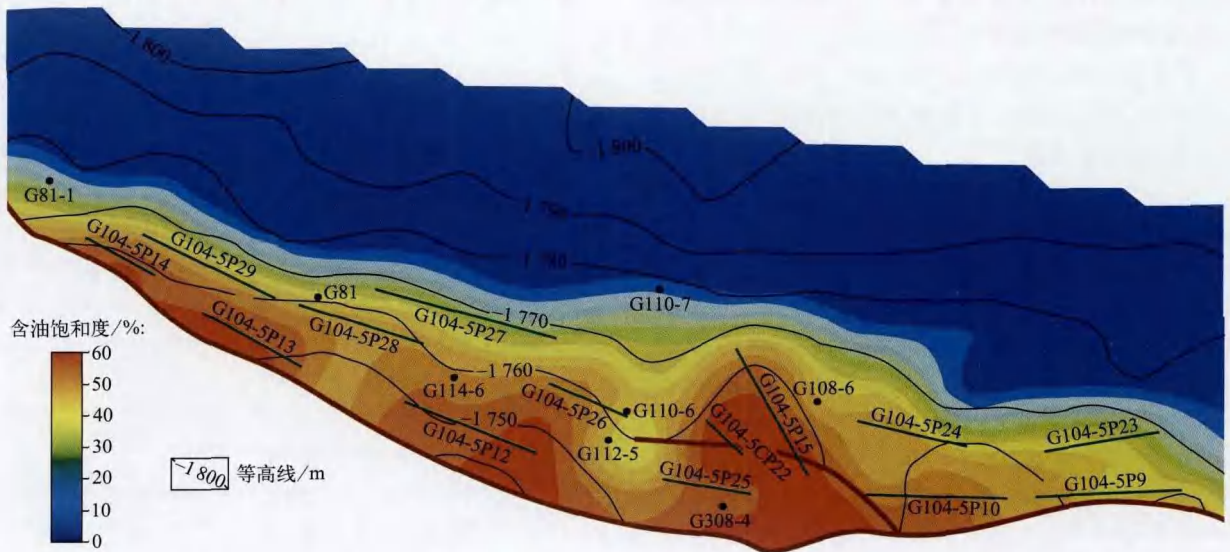


图10 平面剩余油饱和度分布

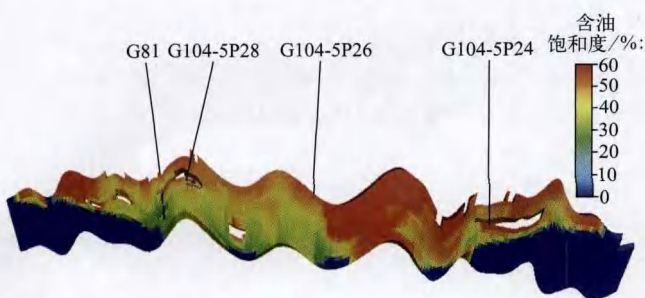


图11 过井剖面剩余油饱和度分布

①井网完善的部位,剩余油饱和度低。如中部的G104-5P25井区尽管处于构造高部位,且有小断层遮挡,但由于井位比较集中,油层动用程度比较高,含油饱和度明显低于其北部更靠近油水边界的区域。

②距离油水边界近,剩余油饱和度低。

③位于高渗透带上的井区,水驱程度高,剩余油饱和度低。

④夹层下部未射孔的部位剩余油饱和度高。G104-5P24井射孔段下部有夹层,其下的模拟层因未

射孔,含油饱和度较高。

## 6 结论

通常对地质情况的认识是通过各种资料综合分析得到的,采用的资料越多,认识就越准确,因此,为了建立接近实际的高精度地质模型,应当尽可能收集更多的资料,深度挖掘其所包含的地质信息,并在建模过程中合理地加以综合利用。

水平井资料在油藏精细建模过程中具有非常重要的作用,对油藏构造、储集层横向变化的描述具有独特的、其他地质资料无法比拟的优势,随着水平井技术不断完善,水平井资料将越来越丰富,开展地质建模必须充分利用每一口水平井的地质资料。

由于水平井轨迹独特的空间形态以及与地层之间特殊的接触关系,理论上其测井响应特征应不同于常规定向井,但目前水平井测井仍多采用常规定向井测井方法及测井解释公式<sup>[10]</sup>,必然会产生误差,因此,应用水平井资料开展储集层建模研究要充分考虑这一影响。

相控建模是目前主流的储集层建模方法,其前提是建立准确的储集层相模型,随着随机建模技术的发展,不少学者提出改进的算法进行相的模拟,但笔者认为效果都不很理想,因此,目前在建立相模型时还应加入更多的地质约束条件。

### 参考文献:

- [1] 周海民,常学军,郝建明,等.冀东油田复杂断块油藏水平井开发技术与实践[J].石油勘探与开发,2006,33(5):622-629.  
Zhou Haimin, Chang Xuejun, Hao Jianming, et al. Horizontal well development technique and its practice for complex fault-block reservoirs in Jidong Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(5): 622-629.
- [2] 常学军,郝建明,廖保方,等.冀东油田复杂断块油藏精细描述与水平井开发实践[R].唐山:中国石油冀东油田公司,2004.  
Chang Xuejun, Hao Jianming, Liao Baofang, et al. Fine description and Horizontal well development technique and its practice for complex fault-block reservoirs in Jidong Oilfield[R]. Tangshan: Jidong Oilfield Company, 2004.
- [3] 王学忠,曾流芳.孤东油田挖潜剩余油实用技术应用效果评价[J].石油勘探与开发,2008,35(4):467-475.  
Wang Xuezhong, Zeng Liufang. Effect of practical techniques in producing remaining oil in Gudong Oilfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(4): 467-475.

- [4] 杨辉廷,颜其彬,李敏.油藏描述中的储层建模技术[J].天然气勘探与开发,2004,27(3):45-49.  
Yang Huiting, Yan Qibin, Li Min. Reservoir modeling technique in pool description[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2004, 27(3): 45-49.
- [5] 贾爱林,郭建林,何东博.精细油藏描述技术与发展方向[J].石油勘探与开发,2007,34(6):691-695.  
Jia Ailin, Guo Jianlin, He Dongbo. Perspective of development in detailed reservoir description [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(6): 691-695.
- [6] 张淑娟,邵龙义,宋杰,等.相控建模技术在阿南油田阿11断块中的应用[J].石油勘探与开发,2008,35(3):355-361.  
Zhang Shujuan, Shao Longyi, Song jie, et al. Application of facies-controlled modeling technology to the fault-block A11 in A'nan Oilfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(3): 355-361.
- [7] 任殿星,李凡华,李保柱.多条件约束油藏地质建模技术[J].石油勘探与开发,2008,35(2):205-214.  
Ren Dianxing, Li Fanhua, Li Baozhu. Geomodeling technology under multifactor control [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(2): 205-214.
- [8] 尹艳树,吴胜和.储层随机建模研究进展[J].天然气地球科学,2006,17(2):210-216.  
Yin Yanshu, Wu Shenghe. The progress of reservoir stochastic modeling[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(2): 210-216.
- [9] 彭仕宓,周恒涛,李海燕,等.分阶段流动单元模型的建立及剩余油预测——以别古庄油田京11断块为例[J].石油勘探与开发,2007,34(2):216-221,251.  
Peng Shimi, Zhou Hengtao, Li Haiyan, et al. Phased flow unit model establishment and remaining oil prediction: An example from Jing 11 block in Bieguzhuang Oilfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2): 216-221, 251.
- [10] 汪中浩,易觉非,赵乾富,等.水平井测井资料地质解释应用[J].江汉石油学院学报,2004,26(3):70-72.  
Wang Zhonghao, Yi Juefei, Zhao Qianfu, et al. Application of geologic interpretation of horizontal well logging data[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2004, 26(3): 70-72.

第一作者简介:郝建明(1967-),男,内蒙古集宁人,中国石油冀东油田公司高级工程师,现为中国科学院地球化学研究所在读博士研究生,主要从事油田勘探开发地质研究工作。地址:河北省唐山市,中国石油冀东油田公司科技信息处,邮政编码:063004。E-mail: haojm@petrochina.com.cn

收稿日期:2007-04-10 修回日期:2009-08-25

(编辑 郭海莉 绘图 李秀贤)