

深水重力流复合下切水道体系精细地质表征与建模

——以西非尼日尔三角洲盆地 OML130 区块为例

卜范青, 张旭

(中海油研究总院)

摘要 尼日尔三角洲盆地新近系深水重力流沉积是西非深水区重要的勘探开发目标, OML130 区块 AKPO 油田 A 油组主要发育复合水道体系, 不同期水道垂向相互叠置, 局部下切连通, 开展水道储层的精细地质建模对后期开发至关重要。采用“宏观格架、砂组嵌入”两步走的框架搭建思路, 再现了 A 油组七期水道垂向加积和侧向摆动迁移的特征。借助时移地震动态监测信息, 拾取水驱区域, 准确识别和表征出不同期水道间的下切连通区, 形成了一套连通区定量识别的建模方法; 通过对深水重力流沉积微相的多条件约束模拟, 建立了可靠的沉积微相模型, 为后期属性模拟奠定了坚实基础。后期生产动态的验证效果较好, 证明这套建模方法具有较高的实用价值。

关键词 尼日尔三角洲盆地; 深水沉积; 重力流; 复合下切水道; 时移地震; 地质建模

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

储层地质模型是油藏描述追求的核心^[1], 而地质建模的一个重要应用则是进行剩余油预测^[2-5]。目前国际上大型石油公司如道达尔、壳牌等较为认同的剩余油预测方法是应用地质建模成果进行数值模拟, 而预测准确的前提是务必保证地质建模的精度。目前国内地质建模的方法, 重点是对陆相沉积开展的^[2-5], 受实际地质资料的限制, 针对深水浊积水道储层的精细分类和非均质性表征尚未形成系统认识, 对于深水复合叠置浊积水道的研究也较少。河流相的垂向连通现象较少, 而深水重力流水道体系中的储层不仅横向变化快, 而且还存在下切连通现象^[6-7], 如何在三维地质模型中对此进行定量表征仍是个难题。对于浊积水道砂体横向摆动剧烈、垂向相互切叠的特征^[7], 常规一般是采用随机建模进行模拟实现, 根据模拟对象的不同分为基于象元和基于目标的模拟方法^[8-12]。笔者之前主要采用基于目标的方法来模拟深水浊积水道的空间展布, 通过定义目标的空间展布形态, 以反映储层形态^[7], 其优势为在井少、砂体描述结果不理想的情况下较容易再现目标体的空间几何形态; 其缺点有以下3个:

一是空间结构参数取值难以准确; 二是模拟实现的砂体空间展布与实际可能不吻合; 三是不同期水道的连通性无法在模拟中客观实现。因此, 如何获取定量化的地质信息来约束模拟结果, 尽可能提高空间格架和相模拟的合理性, 则是利用该方法进行模拟的关键所在。

本次研究笔者将以西非 OML130 区块内 AKPO 油田为例, 采用“宏观格架控制、砂组精细嵌入、连通区定量标定、储层多级模拟”思路来构建模型, 建立复合地质模式及生产动态的模拟实现, 以此为油田剩余油预测及井的加密提供可靠的地质依据。

1 研究区概况

尼日尔三角洲盆地位于非洲大陆西部, 这里是世界著名的含油气盆地和油气勘探开发的热点之一。尼日尔三角洲盆地是在非洲板块与大西洋板块边缘三联点上发育的裂谷盆地^[13]。研究区 OML130 区块位于西非尼日利亚海域(图1), 尼日利亚海域从北到南发育三个区域构造带^[14]: 北侧为拉张构造带, 以铲状断层和滚动背斜为主要特征; 南侧为挤压构造

收稿日期: 2016-11-11; 改回日期: 2017-12-06

本文受国家科技重大专项“西非、亚太及南美典型油气田开发关键技术研究”(编号: 2011ZX05030-005)资助

卜范青: 1981年生, 硕士, 工程师, 2010年毕业于中国石油大学(华东), 现主要从事开发地质及地质建模等工作。通讯地址: 100028 北京朝阳区太阳宫南街6号楼海油大厦B座; E-mail: bufq@cnooc.com.cn

带,叠瓦状逆冲断层较为发育;中部为构造转换带。AKPO 油田是区块内唯一在产油田,北距陆上哈科特港 200 km,水深为 1 300~1 450 m,位于区域构造转换带上。研究区整体构造为一受断层切割、向四周倾伏的断背斜,构造东西向延伸较长,南北向延伸相对较短,具有西翼、南翼陡,东翼、北翼缓的总体构造形态特征(倾角为 5° ~ 6° 左右)。

研究区三维地震数据处理面元 $12.5\text{ m}\times 12.5\text{ m}$,记录长度 7.5 s,采样间隔 3 ms,目的层频带宽度 5~60 Hz,主频 32 Hz,处理后,其速度拾取精度、信噪比和保幅程度等方面都有很大改善,地震反演与各井的吻合程度很高,储层空间描述具有较高的可靠性。

研究区位于尼日尔三角洲沉积体系中,发育了巨厚的中白垩统一新近系,其中目标层位于新近系,从下到上主要由三套进积型地层单元组成,分别为阿卡特组(Akata Fm.)、阿格巴达组(Agbada Fm.)和贝宁组(Benin Fm.),下部阿卡特组为主要生油层系,阿格巴达组为本区主要含油层系。阿格巴达组主要发育深水重力流沉积,自上而下可划分为 A、B、C、D、E、F、G、H 等八个油组,其中 A 油组为典型的复合深水重力流水道沉积,共发育七期深水浊积水道(图 2),自下而上分别为 AL(下)亚油组的三期(AL1、AL2、AL3)、AU(上)亚油组的四期(A(中)、AU1、AU2、AU3),依据地震剖面和平面对应特征,可以看出这七期深水重力流水道—朵叶砂体的平面总体展布形态和侧向迁移的叠置关系(图 2,图 3)。A 油组的岩性为细—粗砂岩,成分以石英和长石为主,储层物性较好,储集空间以粒间孔为主,具有中孔、中高渗特征^[15]。

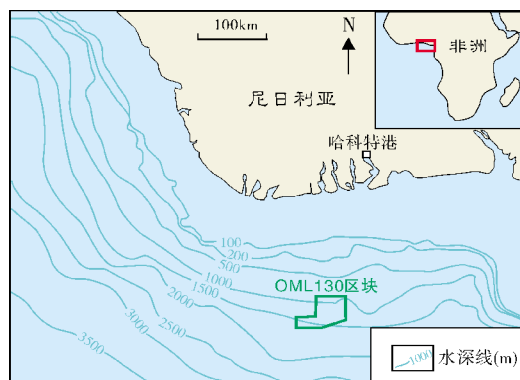


图 1 西非 OML130 区块地理位置

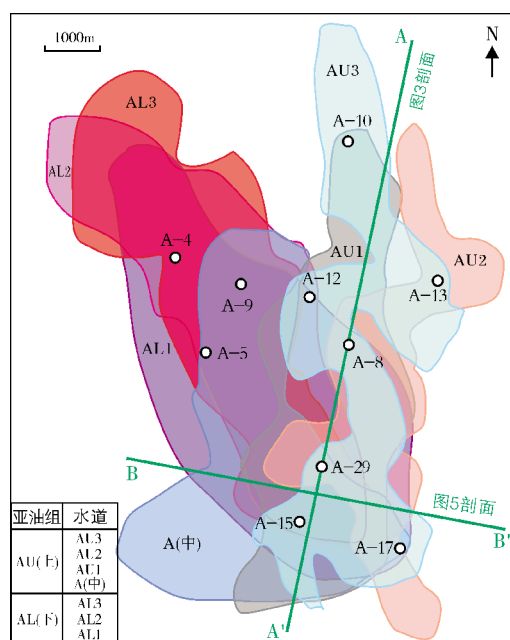


图 2 尼日尔三角洲盆地 AKPO 油田 A 油组七期水道的平面分布

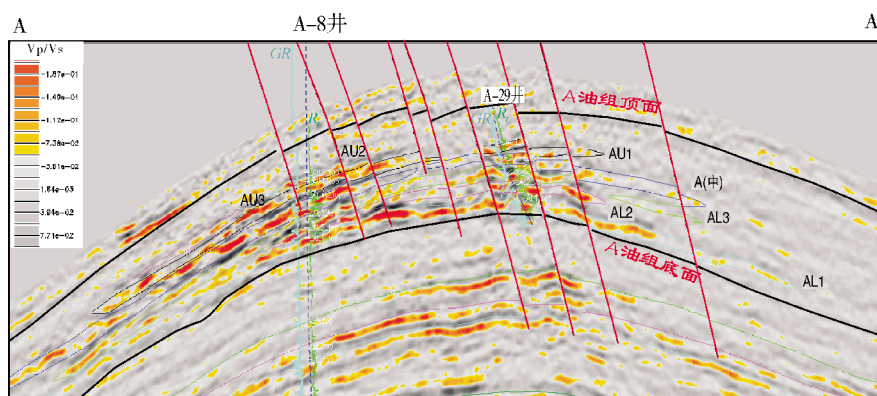


图 3 尼日尔三角洲盆地 AKPO 油田近南北方向断层系统及七期水道沉积模式(Vp/Vs 属性)

A—A'剖面位置见图 2

AKPO油田2009年投产,开发井已全部完钻,生产动态资料非常丰富,目前见水井越来越多,油田已进入产量递减期,其中A油组生产矛盾尤为凸显,因此需要重点开展深水重力流水道储层的精细表征和建模,以此为剩余油预测及加密井实施提供可靠依据。

2 三维表征难点及解决方法

2.1 三维表征存在的技术难点

研究区构造上为被动大陆边缘受底部泥岩拱张作用所形成的底辟花状构造,沉积上为典型的复合深水重力流水道沉积。这种情况下的地质建模过程中存在如下问题:(1)目标油田的断层非常发育,地层接触关系复杂,构造建模过程中断层建模方法和参数的设置对网格质量有较大影响,因此如何优化建模参数和方法、提高网格运算速度是一个难点;(2)由于多期叠置水道下切且搭接连通的特殊性,而采用常规建模方法,一般均未对水道间连通区做单独处理,这将造成模型中砂体连通性和连通区域不准确;(3)深水重力流水道体系内部仍存在较强的非均质性,如果采用常规的砂泥岩相的模拟,将无法满足油田方案优化

的研究精度,因而需进一步细分沉积微相。

针对以上难点,笔者重点从断层模型构建、复合下切水道体系的空间格架建立、沉积储层的精细表征等三个方面进行了研究,并基于高分辨率三维地震数据体,获得了高质量的构造解释成果和复合水道体系内部的空间展布,基于丰富的测井及分析化验数据,对重力流储层进行了精细分类,构建了三维地质模型,这为后期寻找剩余油提供了较可靠的地质依据。

2.2 复杂构造网格质量控制

网格质量的优劣对后期数值模拟的收敛性及运算速度影响较大。为确保网格不发生畸变,笔者采用了以下两种方式:(1)生成网格时,尽量采用与主构造垂直的趋势线去控制网格方向;(2)网格类型选取Zig-Zag的方式以减少断层处的畸形网格的产生。选取A油组顶面构造图(图4a)进行网格化,如图4b所示生成的网格皆为正交网格而无畸形网格。针对有无畸形网格对数值模拟运算的影响进行了测试,设计两个方案来对比采用以上网格质量控制方法的数值模拟的运算时间(表1),可以看出方案2的运算时间提高了近15%。

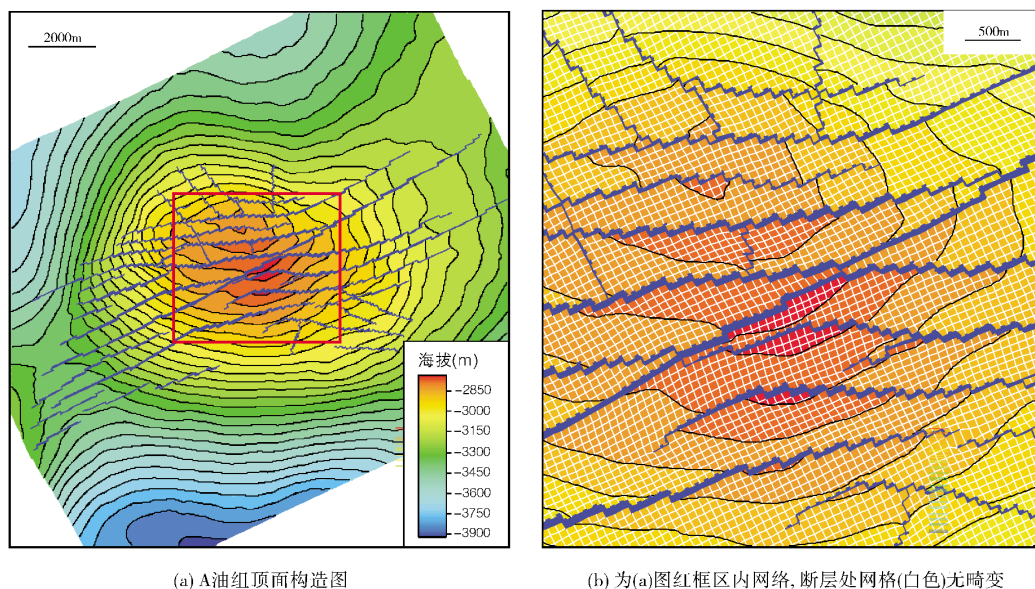


图4 尼日尔三角洲盆地AKPO油田A油组顶面构造图及其网格化

表1 不同断层处理方案数值模拟运行速度对比

方案	实施对策	数值模拟运算时间(min)
方案1	复杂断层不作趋势控制,网格类型未采用Zig-Zag	195
方案2	复杂断层作趋势控制,断层网格类型选择Zig-Zag(如图4b)	166

2.3 复合下切水道体系精细构建

2.3.1 复合水道内部格架的重构

研究区地震资料的品质较高,储层空间描述具有较高的可靠性。根据深水重力流的砂体叠置和迁移特征,融合层拉平和切片属性分析等地震解释技术,实现了水道储层期次的划分和追踪解释。依据平面展布形态和侧向迁移叠置关系(图2),A油组整体物源供应为自南向北,七期水道由西向东侧向迁移,垂向上相互加积,相邻的两期水道间可能存在

连通性。

针对多期叠置的复合水道空间格架难以准确刻画的难题,本文中采取了“宏观格架、砂组嵌入”的两级控制的建模思路。首先利用大尺度的A油组构造顶面、底面搭建宏观地层格架,然后把利用地震砂体描述刻画的七期水道顶面、底面嵌入到油组的宏观格架中,采用两步走的框架搭建模式来完成复合多期水道的框架模型。在可靠的砂体描述的成果基础上,再现了七期水道的垂向加积特征(图5),客观展示了其侧向的摆动迁移(图2)。

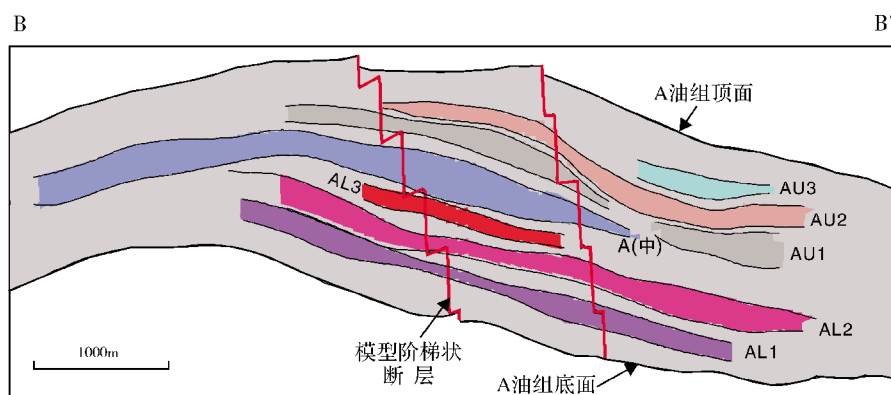


图5 地质建模的宏观框架控制(用A油组顶面、底面控制)

B—B'剖面位置见图2

2.3.2 时移地震指示的水道间连通区的定量标定

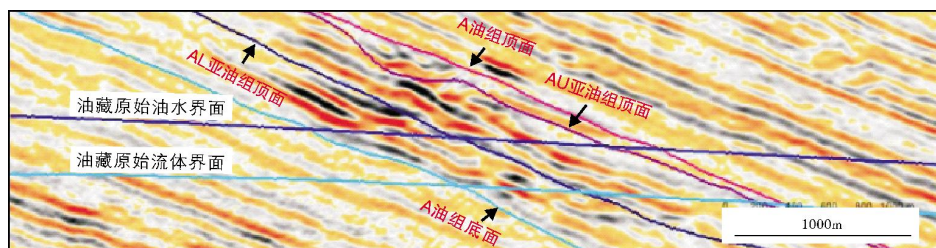
由于复合浊积水道体系中存在侵蚀下切现象^[16],相邻期次水道间可形成连通区,从而导致不同期水道间相互连通。若未刻画连通区域,流体仅在单期水道内流动,并不能客观反映流体渗流特征,这将直接影响后期的模拟结果。因此只有客观描述水道间的连通情况,才能更有效地指导井网部署^[8]。为了准确识别和表征复合下切水道间的连通区,笔者探索了一套深水水道间连通区定量识别的建模方法。主要有以下两种方法:

分级标定 综合地质概念模型,充分利用测井和地震资料,在标定水道“叠合区域”的基础上,依次标定出“确定连通区域”和“可能连通区域”,最终实现连通区域的三维空间表征。笔者对此已在之前做了深入研究^[7],在此不做赘述。

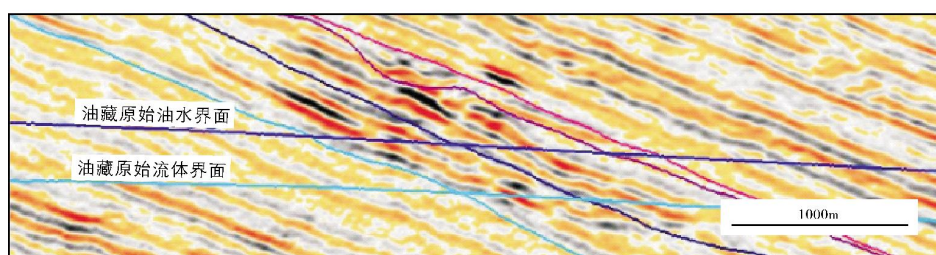
四维地震 时移地震是利用重复三维地震资料来监测油藏变化,即油藏开发所引起的变化可由两次地震响应差异来表征,它是利用不同时间观测

的三维地震有效信息的差异来进行储层监测,以完善油藏管理方案和提高油气采收率的技术。研究区在开发前采集了5个分角度的叠加数据体,开发3年后又采集了相同的5个分角度的叠加数据。如图6所示,开发前采集的数据如图6a(Baseline),开发后采集的数据如图6b(Monitor),两次地震的差异量 Δ 如图6c(为Monitor与Baseline的差),图6c中,A油组邻近原始油水界面附近,发生明显的阻抗变化,这可以表征水驱范围及水驱高度。基于此,本次研究开展了时移地震匹配反演,即将时移地震的振幅差异信息演绎为流体变化的信息,亦即将振幅差异转换为水驱特征信息^[17]。

将时移地震的反演数据体重新采集至Petrel建模软件中,定量拾取水驱范围,若水驱范围位于不同水道间,则该区域为下切水道的连通区域,图7为AU亚油组水道体系叠合时移地震监测水驱效果图,红色区域为水驱范围,浅蓝色背景区域未发生水驱,图8为基于反演数据体所提取的水驱范围,两者有较好的相似性。



(a) 开发前采集的数据(Baseline)



(b) 开发后采集的数据(Monitor)

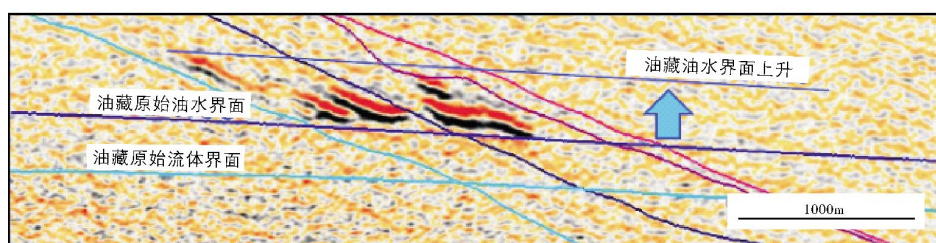
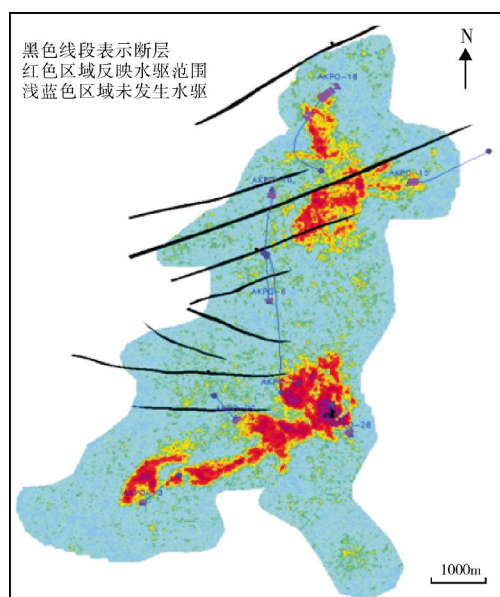
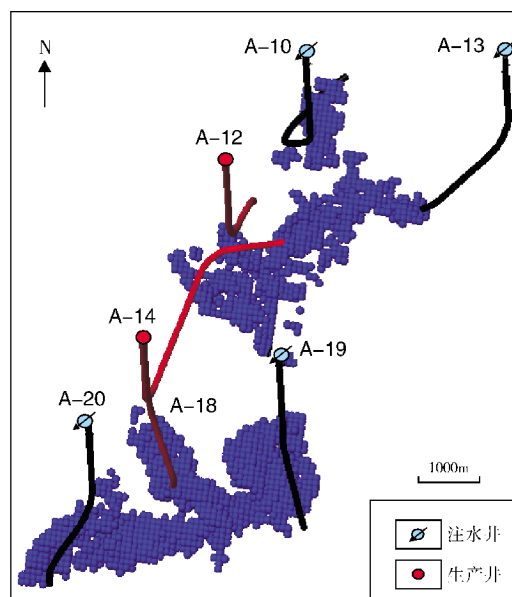
(c) 差异量($\Delta = \text{Monitor} - \text{Baseline}$)

图6 尼日尔三角洲盆地AKPO油田时移地震响应特征

图7 尼日尔三角洲盆地AKPO油田AU亚油组
时移地震监测水驱效果图8 尼日尔三角洲盆地AKPO油田AU亚油组
水驱区域的定量拾取(基于反演数据体)

2.4 浊积水道内部沉积微相三维表征

针对西非深水重力流沉积水道体系内部的沉积特征,笔者进行了大量的前期研究,将深水重力流水道划分为主水道(main channel)、砂质天然堤(sandy levee)、泥质天然堤(shale levee)、底部滞留沉积(basal lag)等四类沉积微相^[15]。为实现水道内部非均质性的客观刻画,本次研究基于以上分类结果,利用多级控制的建模方法^[18],首先建立确定性沉积相模型,然后采用多条件约束,建立了沉积相控的沉积微相模型。

首先从井点出发,优选最小负振幅属性,进行沉积相平面划分,以AU3水道为例,平面上划分为水道主体及水道侧缘两种相类型(图9)。研究还表明,研究区的纵横波速度比这一地震属性能反映岩性信息^[7],它与泥质含量的相关性较好。然后以单井相和平面沉积相为基础数据,以纵横波速度比为空间协同约束条件,统计A油组15口生产井的纵横波反演数据体与单井相的相关关系,图10为统计得到的各微相的空间分配比例(由于底部滞留沉积发育很少,在纵横波速度比中无法得到),以此为约束变量,就可模拟得到沉积微相模型。

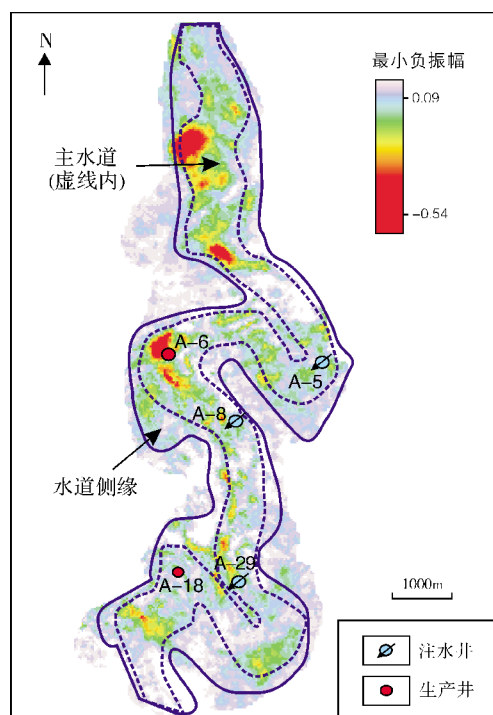


图9 尼日尔三角洲盆地AKPO油田AU3水道平面沉积相

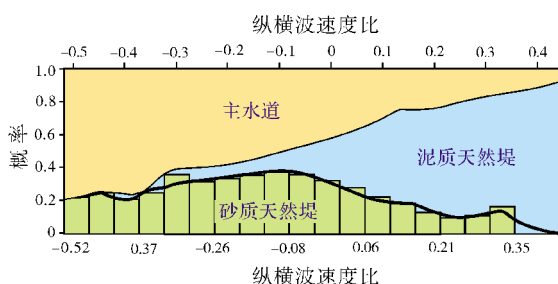


图10 尼日尔三角洲盆地AKPO油田AU3水道沉积微相与纵横波速度比的分配比例关系

3 下切水道三维表征效果评价

上述精细地质建模技术,使得对AKPO油田A油组下切型复合深水重力流水道体系的模拟结果更符合地质认识。

图11中,A-17井为注水井,对应采油井A-15井,从图中可以看出,A-17井注水层段和A-15井生产层段分属于不同水道砂体,若没有表征出连通区域,则注水不可能受效。从实际生产资料来看,A-15井投产初期压力下降较快,当A-17井投注后,A-15井压力下降幅度变缓,后期压力保持基本稳定,这证实了两口井注采受效。这也说明通过上述方法建立的模型,表征出了该区水道间的连通区,且与实际生产动态特征较吻合。

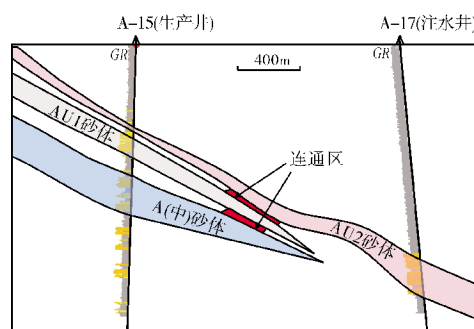


图11 尼日尔三角洲盆地AKPO油田AU2亚油组地质模型剖面

本次研究的成果已实际应用于油田加密调整方案之中。根据模拟结果,明确了油田剩余油潜力区,并成功实施了一口加密调整井。AL1小层在北区动用程度不高,从净油柱高度图(图12)可看出,在生产井A-4井和A-5井中间靠近北侧的区域(图12中红圈所示)有大量剩余油存在,于是在该区域低部位设计了一口注水井A-9,该井于2016年3月下旬投注,初期注入量为3900m³/d,之后维持在3500m³/d左右,注入量保持稳定,周围油井的产量皆有一定幅度的提升,效果较好。

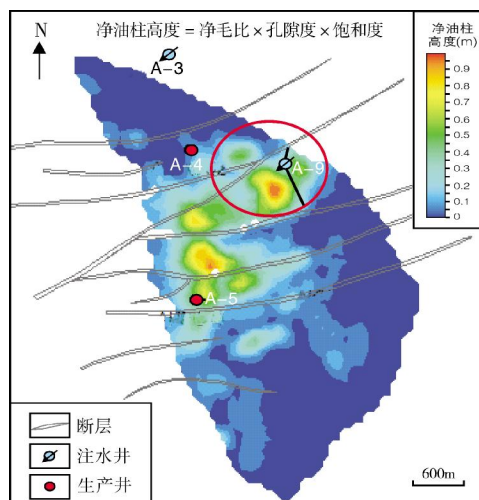


图12 尼日尔三角洲盆地AKPO油田AL亚油组
AL1小层净油柱高度分布

4 结束语

针对尼日尔三角洲盆地OML130区块AKPO油田新近系A油组深水重力流复合水道体系,探索了一套精细地质表征与建模的方法。通过优化网格质量,提高了数值模拟的速度;通过“宏观格架、砂组嵌入”思路重构了复杂多变的下切型水道体系框架;借助时移地震动态监测信息,准确表征出不同期水道间的下切连通区;通过多级控制,建立了复合水道体系的沉积微相模型。后期生产动态的验证效果较好。

参考文献

- [1] 裴泽楠. 储层地质模型[J]. 石油学报, 1991, 12(4): 55-62.
- [2] 兰丽凤, 白振强, 于德水, 等. 曲流河砂体三维构型地质建模及应用[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2010, 32(4): 20-25.
- [3] 岳大力, 吴胜和, 谭河清, 等. 曲流河古河道储层构型精细解

- 剖——以孤东油田七区西馆陶组为例[J]. 地学前缘, 2008, 15(1): 101-108.
- [4] 李少华, 卢文涛. 基于沉积过程的储集层随机建模方法——以河流相储集层为例[J]. 古地理学报, 2011, 13(3): 325-333.
- [5] 白振强, 王清华, 杜庆龙, 等. 曲流河砂体三维构型地质建模及数值模拟研究[J]. 石油学报, 2009, 30(6): 898-902.
- [6] Saller A, Werner K, Sugiaman F, et al. Characteristics of Pleistocene deep-water fan lobes and their application to an upper Miocene reservoir model, offshore East Kalimantan, Indonesia[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(7): 919-949.
- [7] 卜范青, 张宇焜, 杨宝泉, 等. 深水复合浊积水道砂体连通性精细表征技术及应用[J]. 断块油气田, 2015, 22(3): 309-313, 337.
- [8] 于兴河. 油气储层表征与随机建模的发展历程及展望[J]. 地学前缘, 2008, 15(1): 1-15.
- [9] 吴胜和, 李宇鹏. 储层地质建模的现状与展望[J]. 海相油气地质, 2007, 12(3): 53-60.
- [10] 尹艳树, 吴胜和, 张昌民, 等. 用多种随机建模方法综合预测储层微相[J]. 石油学报, 2006, 27(2): 68-71.
- [11] 陈玉琨, 李少华, 吴胜和, 等. 多地质条件约束下利用基于目标的方法模拟水下分流河道[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(11): 51-55.
- [12] 张宇焜, 高博禹, 卜范青. 深水浊积复合水道砂体内部建筑结构随机模拟——基于多点地质统计学与软概率属性协同约束方法[J]. 中国海上油气, 2012, 24(4): 37-40.
- [13] 孙立春, 汪洪强, 何娟, 等. 尼日利亚海上区块近海底深水水道体系地震响应特征与沉积模式[J]. 沉积学报, 2014, 32(6): 1140-1152.
- [14] 王颖, 吕明. 深水沉积储层特征——以尼日利亚OML130区块为例[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(2): 228-236.
- [15] 卜范青, 张旭, 陈国宁. 尼日尔三角洲盆地重力流沉积模式及储层特征——以AKPO油田为例[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2017, 32(1): 64-70.
- [16] 冉怀江, 林畅松, 朱筱敏, 等. 南海北部新近系深水低位沉积特征及控制因素[J]. 特种油气藏, 2015, 22(4): 46-50.
- [17] 张会来, 范廷恩, 胡光义, 等. 水驱油藏时移地震叠前匹配反演——西非深水扇A油田时移地震研究实例[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(3): 530-535, 564.
- [18] 于兴河, 陈建阳, 张志杰, 等. 油气储层相控随机建模技术的约束方法[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 237-244.

编辑:董庸

Geological Modeling of Combined Incised-Channel System in Deep-water Sediment Gravity Flow Deposits: A Case of Block OML130 in Niger Delta Basin, West Africa

Bu Fanqing, Zhang Xu

Abstract: The deep-water sediment gravity flow deposits in Niger Delta Basin is an important exploration and development target in West Africa. The reservoir group A of AKPO oilfield in Block OML130 is mainly composed of combined incised-channel system. The channels in different periods overlap each other vertically, and they are partially cut and connected, which is very important for oil field development. In view of the above geological characteristics, a modeling framework is adopted to reconstruct the vertical aggradation and lateral swaying. With the help of the information of time-lapse seismic monitoring, the water-flooding area is detected and the connected areas of incised channels are picked out, by which a quantitative identification method is formed for incised area between different channels. Under many restrictive conditions, a reliable model of sedimentary microfacies is established. And the post-production dynamic verification is effective, which proves that the modeling method has a high practical value.

Key words: Deep-water deposition; Gravity flow; Combined incised-channel; Time-lapse seismic; Geological model; Niger Delta Basin

Bu Fanqing: MSc, Geology Engineer. Add: CNOOC Research Institute, 6 Taiyanggong South Str., Beijing 100028, China