

文章编号: 1004-1338(2018)01-0054-06

## 水平井高精度三维地质建模技术及应用

高浩锋<sup>1</sup>, 成志刚<sup>1</sup>, 万金彬<sup>1</sup>, 罗少成<sup>1</sup>, 程道解<sup>1</sup>, 杨智新<sup>1</sup>, 尤继元<sup>2</sup>

(1. 中国石油集团测井有限公司油气评价中心, 陕西 西安 710077; 2. 榆林学院能源工程学院, 陕西 榆林 719000)

**摘要:** 传统水平井解释方法是利用邻近直井地层对比投影到水平井井眼轨迹主方向上, 拾取地层关键界面点绘制井眼轨迹与地层的关系, 由于地层构造变化使该方法存在一定局限性。基于水平井周围邻近直井的砂体对比, 通过剖面完全约束的方式采用最近邻算法建立高精度三维地质模型。在模型中提取沿水平井井眼轨迹的砂体切片, 结合水平井测井曲线, 采用人机交互的方式实现水平井井眼轨迹与地层关系的可视化表征及精细刻画。该项技术解决了传统地质建模方法的不足, 提升了水平井轨迹钻遇砂体预测的精确度。

**关键词:** 测井解释; 水平井; 三维地质模型; 井轨迹; 剖面完全约束

中图分类号: P631.84

文献标识码: A

Doi: 10.16489/j.issn.1004-1338.2018.01.010

### High Precision Three-dimensional Geological Model and Its Application in the Interpretation of Horizontal Well

GAO Haofeng<sup>1</sup>, CHENG Zhigang<sup>1</sup>, WAN Jinbin<sup>1</sup>, LUO Shaocheng<sup>1</sup>, CHENG Daojie<sup>1</sup>,  
YANG Zhixin<sup>1</sup>, YOU Jiyuan<sup>2</sup>

(1. Reservoir Evaluation Center, China Petroleum Logging CO. LTD., Xi'an, Shaanxi 710077, China;

2. Energy Sources Engineering School, Yulin University, Yulin, Shaanxi 719000, China)

**Abstract:** The traditional interpretation method of horizontal well use adjacent vertical wells stratigraphic correlation projection for the horizontal well trajectory main direction and picks up the key formation interface point trajectory and formation, but because of the formation structure changes, this method has some limitations. Based on the comparison of sand bodies around horizontal wells, the high precision three-dimensional geological model is established by the nearest neighbor algorithm of full section restriction. To find out the relationship between well trajectory and formation space, and improve the accuracy of horizontal well logging interpretation, the sand mass along the horizontal well trajectory is extracted in the model combined with horizontal well logging curves, so the visual representation and fine characterization of the horizontal well trajectory and formation space are realized by human-computer interaction. The method removes the shortcomings of traditional geological modeling and improves the accuracy of sand body prediction in horizontal well trajectory.

**Keywords:** log interpretation; horizontal well; 3D geological model; well trajectory; full section restriction

## 0 引 言

S 气田 H8 段目的层所处区域构造背景稳定,

具北高南低、地势平缓的古地貌特点,二叠纪早期沉积主要受盆地北部物源控制,各种风化作用形成的大量碎屑物被由北向南的河流搬运至盆地中北部地

基金项目: 中国石油集团测井有限公司水平井测井资料处理评价技术研究(CPL2013-D01)

第一作者: 高浩锋,男,1984 年生,硕士,工程师,从事测井精细解释工作。E-mail: gaohf\_cpl@cnpc.com.cn

区形成三角洲平原沉积。受到分流河道和河流三角洲砂体的控制,目的层纵向上气层相互叠置,平面分布连续稳定砂体,且主力产气层段砂体厚度大,试采产水不明显。研究区块有利的地质条件为大规模实施水平井开发奠定了基础。

水平井在油田开发过程中通过增加泄油面积,提高单井的控油半径,能够降低开发成本,提高油气井采收率,是油田高效开发的最重要的技术之一<sup>[1]</sup>。水平井解释主要处理原则是先把水平井测井资料转换为井眼轨迹信息和储层特性参数信息,据此绘制井眼轨迹图和垂深的测井组合成果图,在此基础上,以直井中的解释方法为参考进行地层定量评价。其中井轨迹与地层空间关系的刻画对水平井测井解释影响最明显,通过井眼轨迹与储层空间关系,观察井眼轨迹的在产层内部的变化,即钻头钻遇产层岩性的变化、钻遇产层内部的位置和钻出钻进产层顶底位置、测井曲线响应的影响因素等<sup>[2]</sup>。中国关于水平井轨迹与地层空间关系研究方法主要通过邻近直井地层对比投影至水平井轨迹主方向上进行刻画,由于地质构造存在差异,该方法存在一定局限性,无法精确地表征二者关系。本文通过三维高精度地质建模技术,以多井精细砂体对比成果为基础进行地质建模,将测井成果与地质方法相结合,使用选取关键井、添加约束井以及确定标志层等方法,有效提高了水平井井眼轨迹与地层空间关系刻画的准确度,有针对性地解决了传统表征方法中存在的问题。同时,实现了区域快速建模,提高了解释时效性,为后期精细解释和优化射孔压裂方案及时提供解决手段。

## 1 多井砂体对比剖面约束建模

高精度三维地质模型主要包括构造模型、岩性模型和属性模型。构造模型确定模型整体格架,岩性模型确定目的层砂体分布,在岩性模型基础上对砂体进行属性插值,建立属性模型,进行砂体内部属性变化规律研究并辅助水平井测井精细解释。

### 1.1 构造模型

构造模型采用确定性建模方法,通过矢量化油组砂体顶面构造图,利用分层数据进行井点处约束,通过确定性克里金插值建立各层顶面构造模型<sup>[3]</sup>。构造模型主要反映地层的空间走势规律,包括断层模型和层面模型<sup>[4]</sup>。利用研究区井控资料多的优势,采用以标志层为主和等高程对比划分为辅,结合测井曲线的变化趋势进行地层划分,建立准确的地层格架模型。由于研究区地势平缓,断层不发育,因

此构造建模主要考虑层面建模。

构造建模是三维地质建模过程中的关键步骤之一,也是之后建立岩性模型、属性模型的前置条件,主要用于描述当前选中地层结构空间的平面精度,也就是通过设置软件网格数量决定多少米取1个数据点。为使模型精度更高,网格数量越多越精确,但是网格数量越多,模型的运算速度越慢。经过反复比对,对地层平缓地区一般取10~30 m为宜,对地层坡度较大的地区网格大小应小于10 m,以保证模型能够足够反映地层平面趋势。

### 1.2 多井砂体对比剖面约束下的岩性模型

砂体的三维建模是在三维空间内对砂体几何形态及空间展布作定量或者半定量的描述,主要解决的问题是井间砂体展布的预测。利用直井对砂泥岩的划分结论,在多井砂体对比约束的基础上进行岩性模型的建立,利用岩性模型得到井眼轨迹与地层空间关系。中国水平井井眼轨迹与地层关系的研究方法主要有二维剖面投影方法和三维地质建模方法。

二维剖面投影方法是利用邻近直井测井曲线投影到水平井井眼轨迹主方位上进行精细的小层对比,拾取地层上一系列关键界面点绘制井眼轨迹与地层的相互关系。该方法在一定程度上解决了水平井井眼轨迹与地层的相互关系问题,但也存在自身的局限性:①当井眼轨迹以低角度穿过地层界面时,水平井测井曲线所反映出的地层界面不是一个点,而是延滞为一个区间,难以确定准确的界面点;②邻近直井测井资料投影到水平井井眼轨迹主方位时,如果地层具有一定倾角及渐变甚至相变,投影后的曲线就失去其代表的构造特征。三维地质建模方法是利用水平井邻近直井基于地质等时原理采用数学算法进行外推和内插建立三维属性模型,确定沿水平井轨迹上的属性信息<sup>[5]</sup>。该方法适用于地质构造相对平缓,砂体分布稳定的地层,若地层中存在呈透镜体状的砂体或泥质夹层、地层顶底部有剥蚀等复杂的地质问题,就难以准确描述地层的真实情况,达不到精细刻画井眼轨迹与地层的相互关系。

针对水平井传统解释方法存在的局限性,本文以多井砂体对比剖面为约束条件进行岩性建模,以提升三维地质建模精度,精细刻画井眼轨迹与地层空间关系。

岩性模型是高精度三维地质建模最关键的一步,在前期地层对比的基础上,选取水平井邻近直井,采用地质等时沉积原理开展多井精细砂体对比,形成砂体栅状图。如果有水平井沿着井1和井2穿

行,根据井1和井2砂体分布,水平井完全钻遇砂体,如果砂体内部存在泥质条带则无法反应。图1(a)显示井1、井2邻近直井3在砂体中间有泥质隔夹层,通过井3建立砂体栅状图,在此基础上约束砂体进行岩性建模,则可以进行砂体中间泥质隔夹层

的预测。根据井1和井2砂体分布情况,水平井沿着井1和2钻遇1套完整泥质隔夹层,如果砂体内部存在隔夹层尖灭的情况,模型无法反应。图1(b)显示邻近直井3加入岩性模型的建立以及结合水平井测井曲线变化则可以预测尖灭的发生。

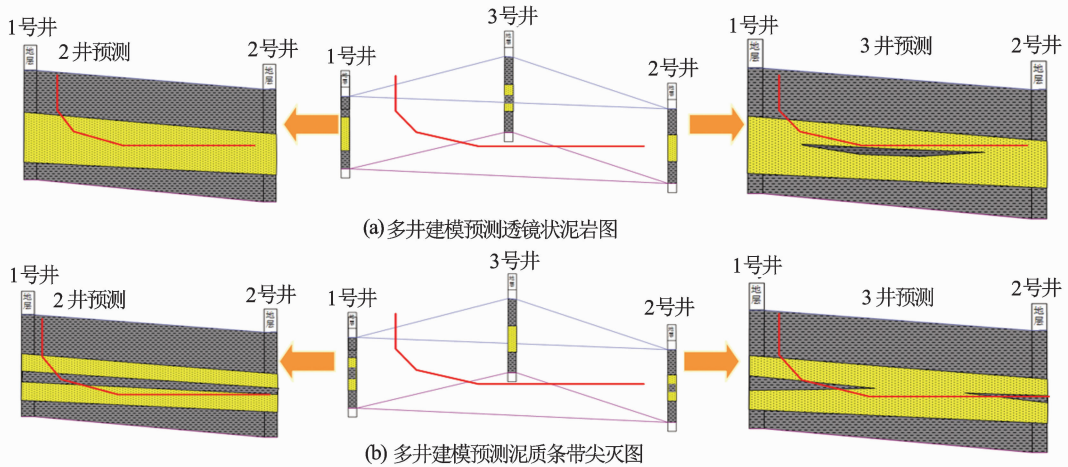


图1 多井建模砂体预测图

在多剖面约束方式下,以砂体栅状图为框架,采用最近邻算法建立高精度三维砂体模型。岩性建模算法主要有3种,即最近邻、指示模拟和序贯模拟方法,不同算法得到的岩性模型效果不同。将最近邻、指示模拟和序贯指示模拟3种算法应用于同一区域,序贯指示法的三维模型结果散乱,不适用于建岩性模型。指示模拟法和最近邻法结果基本相似,但是指示模拟法是一种随机模拟方法,同一数据每次建立的三维模型结果都不一致;由于建模的最终目的是要建立唯一确定的模型,尽量降低随机结果的不确定性<sup>[6]</sup>;而最近邻算法是一种确定方法,因此更适用于岩性模型的建立。

基于岩性模型的建立,利用水平井测井测量的井斜角、方位角和井深,采用最小曲率半径法绘制水平井井眼轨迹,将水平井井眼轨迹等间隔采样,生成空间点列,将空间点列投影到水平面上得到投影点列,投影点列与轨迹点列形成垂直柱子,垂直柱子与三维砂体模型中每层网格求交点,即得到沿井眼轨迹的砂体切片,建立水平井井眼轨迹与地层关系的初始模型。

在岩性初始模型建立的基础上,针对水平井不同的邻近直井情况,采取不同的岩性模型修改方法。

(1) 当水平井有导眼井的情况下,利用导眼井参数与初始岩性模型的建立。沿水平井轨迹进行切片,根据测井响应规律,局部修改井眼轨迹附件砂体

和泥质条带变化情况,使井眼轨迹与地层空间关系基本符合水平井测井曲线响应特征。

(2) 当水平井没有导眼井的情况下,所建立模型沿井轨迹切片后,由于水平井所处位置与最近直井存在构造差,水平井入靶点位置与邻近直井投影过来后的所钻遇砂层会产生误差。因此,通过选取关键井、添加约束井以及确定标志层等方法,准确提高水平井所处地层构造精度,使得水平井入靶点位置能够准确地投影到邻近直井的目的层位置。同时,根据水平井测井曲线响应特征,修改沿井轨迹切片地层和砂体变化规律,使井轨迹与砂体关系更加符合测井曲线响应特征,同步更新岩性模型,提升模型准确度。该方法不仅适用于大区块地质建模,更适用于区域快速建模,可以同时进行多口水平井井眼轨迹与地层关系分析,避免解释每口水平井都要重新进行地质建模,提升水平井测井解释的时效性。

### 1.3 属性模型

在前期目标区多井砂体对比剖面约束采用最近邻算法建立砂体模型的基础上,以相邻直井的测井曲线为主,进行砂体内部插值建立目标区属性模型。属性模型建立工作完成之后可以沿水平井轨迹提取属性切片(如岩性、孔隙度、渗透率和饱和度等),以水平井钻遇储层测井曲线变化特征为主,通过井轨迹在切片上钻遇储层属性变化为辅进行水平井测井精细解释。

## 2 应用实例

### 2.1 具有导眼井的水平井解释方法

利用该项技术对 S 区 H8 段水平井 CH 井进行测井精细解释。首先,弄清楚 CH 水平井在油气藏构造上的位置,分析区域直井的测井、地质、钻井和录井等信息,熟悉 CH 所在区域的地质数据体,并开展测井曲线的标准化,建立 CH 水平井钻遇目的层 H8 段的顶、底构造模型。其次,在地层对比的基础上,选取 A、B、C 和 D 井 4 口井(C 井为水平井 CH 的导眼井,水平井 CH 井眼轨迹沿着 B 井方向钻进),开展精细砂体对比,建立砂体栅状图(见图 2)。从图 2(a)看出,水平井 CH 主要钻遇导眼井 C 测深 3 585.87~3 592.37 m 层段,对应 B 井测深 3 593.5~3 610.87 m 井段,该深度段发育 3 套泥质隔夹层。

利用砂体栅状图基于多剖面完全约束的方式约束三维模型层间砂体走势,采用最近邻算法建立高精度的三维砂体模型[见图 2(b)]。然后利用水平井测井测量的井斜角、方位角和井深,采用最小曲率半径法绘制水平井井眼轨迹,并提取三维砂体模型中沿 CH 水平井井眼轨迹的砂体切片,建立 CH 水平井井眼轨迹与地层关系的初始模型。由于 CH 水平井所在区域受到砂体栅状图的严格约束,CH 沿井轨迹砂体切片中泥质隔夹层走势与井 C 井 B 砂体连通方向泥质条带走势一致,说明砂体剖面约束对水平井 CH 钻遇泥质条带刻画影响明显。同时,在 CH 初次砂体切片上根据水平井 CH 岩性测井曲线变化规律局部修正泥质隔夹层与井轨迹关系,提高刻画精确度[见图 2(c)]。利用修改后的剖面同时更新模型,得到最终岩性模型。在最终岩性模型

建立的基础上,利用水平井邻近直井测井曲线通过砂体内部克里金插值方法,得到研究区孔隙度属性模型[见图 2(d)]。在属性模型中沿水平井轨迹方向进行切片,能够清楚观察到水平井轨迹钻遇储层属性变化规律,辅助测井精细解释(见图 3)。

图 3 为 CH 水平井沿井轨迹孔隙度模型切片,可以看出该段沿井轨迹方向钻遇 3 条泥质条带,储层厚度变薄,物性变差。在测深 4 501.00~4 589.75 m 井段,测井曲线 GR 低值,AC 高值,计算孔隙度平均值 7.9%,气测全烃有显示,孔隙度属性剖面显示轨迹钻遇物性较好储层段,解释为气层;测深 4 661.88~4 704.25 m 井段,测井曲线 GR 低值,AC 值较高,计算孔隙度平均值 5.7%,气测全烃有显示,孔隙度属性剖面显示轨迹钻遇储层段物性变差,解释为差气层;测深 3 947.1~4 021.4 m 井段,测井曲线特征、剖面均显示结合计算含水饱和度 57.5%,解释为气水同层。试气结果表明,日产气 1.823 4 万  $\text{m}^3$ ,日产水 22.33  $\text{m}^3$ ,无阻流量 41.565 1 万  $\text{m}^3$ 。

### 2.2 不包含导眼井的水平井解释方法

水平井 MP8 井所处区域井口附件没有导眼井能参与岩性建模,选择距离最近的几口关键井进行岩性建模。图 4(a)为建立目的层 H8 段地层顶面构造图,沿着 MP8 水平井轨迹方向,建立多井砂体对比剖面,利用该剖面约束建立水平井区域初始岩性模型。沿着水平井轨迹进行初始岩性模型的切片,投影离 MP8 最近的直井 M89 井到岩性切片上。由于 M89 井与 MP8 井存在构造差异,垂直投影到切片上后,MP8 井入靶点距离 M89 的目的油层有一定的高度差(见图 5),不能精确展示水平井的实际入靶点。对此,在水平井井口建立 1 口约束井,该井

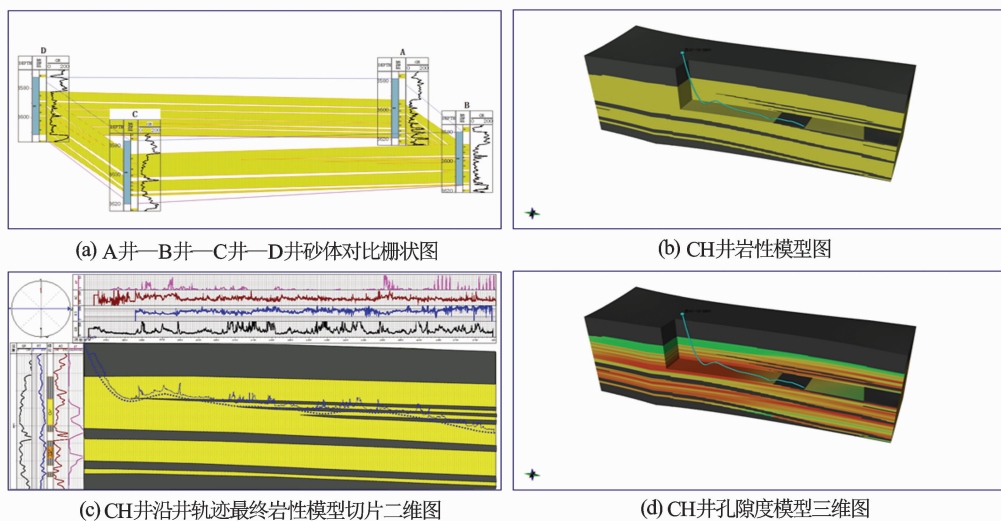


图 2 CH 井三维地质模型建立流程图

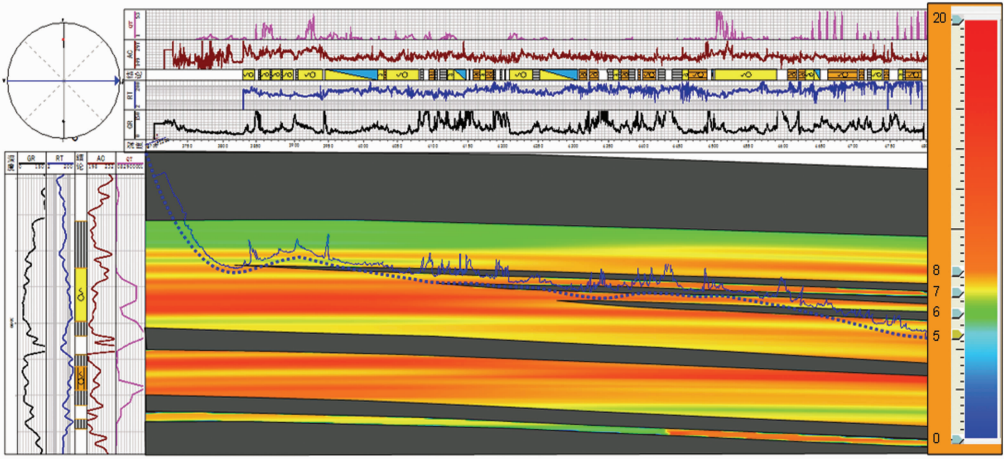
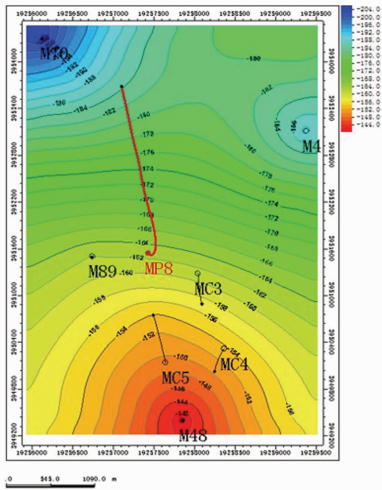
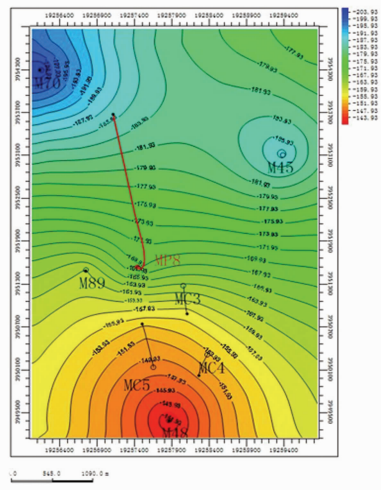


图3 CH水平井沿井轨迹孔隙度模型切片图



(a) MP8井不添加约束井的H8段顶面构造图



(b) MP8井添加约束井后的H8段顶面构造图

图4 MP8井添加约束井前后顶面构造对比图

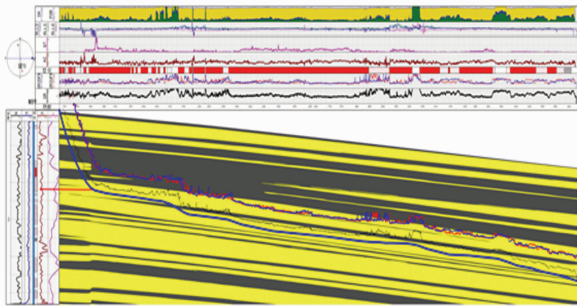


图5 MP8井沿井轨迹初始岩性模型切片图

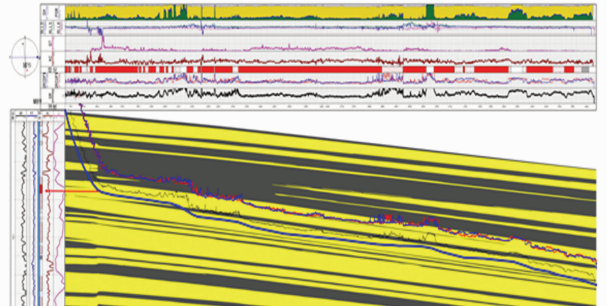


图6 MP8井沿井轨迹初始岩性模型切片图

地层深度与水平井地层校直后的地层深度一致。利用约束井参与建模,图4(b)显示H8段顶面构造图有明显变化。在此基础上再次进行岩性建模,沿井轨迹方向切片上岩性剖面显示水平井入靶点明显对应到M89井油层处(见图6),说明加入约束井进行

岩性建模能够提升岩性模型的精度。在岩性模型切片的基础上,根据水平井测井曲线上GR、下GR的变化规律,对岩性剖面进行局部地层修改(见图7);井段1显示井轨迹入靶点在油层泥质条带下方,沿着北偏西方向下倾穿行。井段2轨迹钻穿泥质条

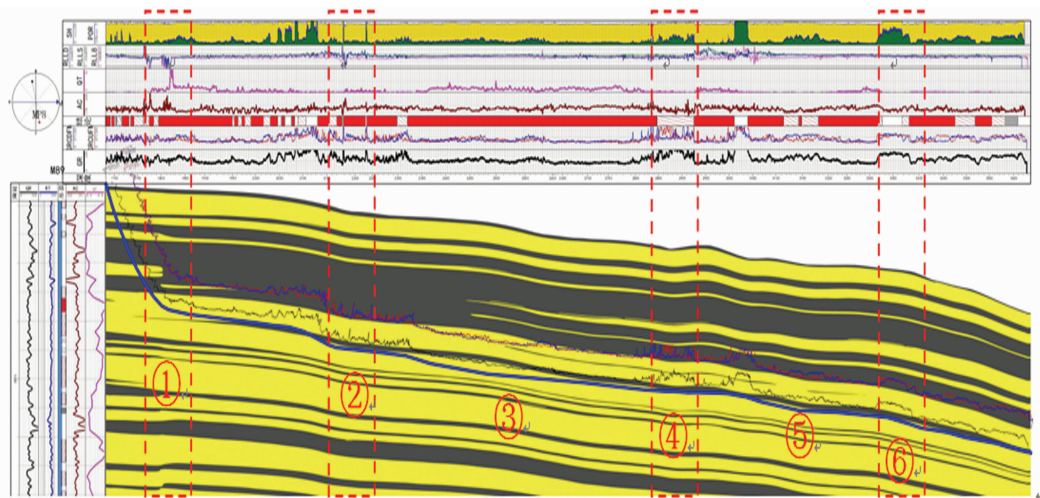


图 7 MP8 井沿井轨迹最终岩性模型切片图

带,在泥质条带顶部穿行。井段 3 开始轨迹在泥质条带下方油层中穿行并保持下倾方向,钻遇上覆泥质条带。井段 4 显示轨迹沿着上覆泥质条带穿行。井段 5 显示轨迹从泥质条带钻出后再砂层中穿行一段距离后又钻进上覆泥质条带。井段 6 显示轨迹同地层倾向一致沿着上覆泥质条带上下穿行。

对 MP8 进行射孔试油,射孔位置定在井段 4 处,日产油 133.65 t,试油结论为工业油层。MP8 井段 4 处 GR 值明显增高,但根据图 7 显示井轨迹处于油层范围内,进行试油产量高,说明精确刻画井轨迹与地层空间关系对后期水平井射孔试油方案的制定具有很重要的意义。

基于最终岩性模型,利用水平井测井曲线以及邻近直井测井曲线通过砂体内部克里金插值方法,得到属性模型,沿水平井轨迹进行属性模型切片,观察井轨迹钻遇目的层属性变化情况,提升水平井测井解释精度(见图 8)。

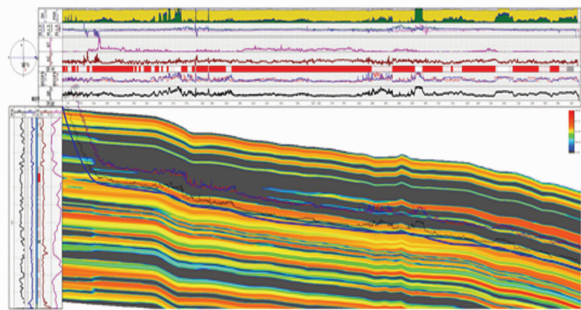


图 8 MP8 井沿井轨迹最终岩性模型切片图

### 3 结束语

(1) 针对地质模型复杂、测井解释耗时长等问题,形成了基于地质研究成果约束的高精度精细砂控三维地质建模方法,实现了井眼轨迹与油藏空间关系的可视化表征及精细刻画,有效提高了水平井测井解释的准确性和时效性。

(2) 通过选取关键井、添加约束井等方法,有效提高了水平井井轨迹与地层空间关系剖面的准确度。同时,区域快速建模与沿井轨迹水平井剖面切片技术的综合应用,提高了水平井测井解释时效。

#### 参考文献:

- [1] 武小何. 水平井测井解释评价技术研究 [J]. 科技信息, 2010(22): 373-374.
- [2] 孙金浩. 水平井地质导向及解释技术研究及应用 [J]. 国外测井技术, 2010(4): 14-19.
- [3] 李莉娟, 闫长辉, 王涛. 水平井开发储层地质建模 [J]. 物探化探计算技术, 2011, 33(6): 612-615.
- [4] 孙焕泉. 水平井开发技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
- [5] 郑春亮, 范伟, 孙金浩. 水平井地质导向与测井资料解释方法研究 [J]. 内蒙古石油化工, 2010(11): 139-142.
- [6] 郝建明, 吴健, 张宏伟. 应用水平井资料开展精细油藏建模及剩余油分布研究 [J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(6): 730-736.

(收稿日期: 2017-08-23 本文编辑 余迎)