



基于曲流河演化模拟的海上大井距油田点坝 内部构型建模方法

舒晓,金宝强,缪飞飞,邓猛,胡勇

(中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院,天津 300459)

摘要:点坝是渤海湾盆地的重要储油单元,随着油田开发进入高含水阶段,点坝内部构型对油水运动和剩余油分布的影响愈加显著,挖潜难度逐步提高。海上油田由于井距大,井间对比难以实现侧积层刻画。为解决这一问题,提高地质模型精度,提出了基于曲流河演化模拟、井数据拟合的点坝内部构型建模新方法。该方法通过曲流河演化模拟获取具有真实形态特征的点坝三维构型初始模型,并通过搜索域与逻辑筛选的方式实现与井数据的拟合,从而实现点坝内部构型的三维建模。这一方法应用于渤海湾盆地 A 油田曲流河相储层点坝内部构型建模,结果显示,该方法不仅能够构建具有真实形态的构型模型,同时能够忠实于井数据,为点坝内部构型精细研究提供了一套新的思路与方法。

关键词:构型 点坝 侧积层 储层建模 河流相

中图分类号:TE319 文献标志码:A

Internal architecture modeling of point bar in offshore oilfields with large well - spacing based on evolution simulation of meandering river

SHU Xiao, JIN Baoqiang, MIAO Feifei, DENG Meng, HU Yong

(CNOOC Bohai Petroleum Research Institute, Tianjin 300459, China)

Abstract: Point bar is one of important oil units in Bohai Bay Basin. As the oilfield development entered the high water stage, the internal architecture of point bar has more and more significant effects on oil - water movement and oil remaining distribution, and the difficulty in tapping the potential is gradually increased. However, due to limited to large well - spacing in offshore oilfields, the lateral accretion layers are hardly depicted by the well - to - well correlation. To solve this problem and improve the precision of geologic model, it was proposed a new modeling method for the internal architecture of point bar based on evolution simulation of meandering river and well data fitting. Based on the evolution simulation of meandering river, it is obtained real morphological characteristics of initial model of 3D point bar architecture. And then the well data fitting is realized by the means of searching domain and logical judgment. So it is obtained the 3D modeling of internal architecture of point bar. This method was applied for modeling the internal architecture of point bar of meandering river facies reservoirs in A Oilfield of Bohai Bay Basin. The application results showed that the method can be used to not only model the real morphology of architecture , but also agree with actual well data, providing a set of new idea and method for studying on fine depiction of the internal architecture of point bar.

Key words: architecture; point bar; lateral accretion layer; reservoir modeling; fluvial facies

河流相储层是重要的油气勘探和开发目标。大量河流相储层的发现促使了河流相建模技术的飞速发展,其均是为了获得一个形态、分布更为真实准确的相模型^[1-2]。随着勘探开发的不断深入,油田进入高含水至特高含水阶段,传统建模算法如序贯指示模拟构建的模型由于存在缺乏形态真实性无法用

于构型建模。现阶段点坝内部构型建模主要是在构

收稿日期:2018-07-24;改回日期:2018-09-24。

第一作者简介:舒晓(1989—),硕士,工程师,主要从事油藏精细描述与储层建模方面的工作。E-mail: shuxiao@cnoc.com.cn。

型元素分析的基础上通过手工方法实现^[3-16]。手工构建方法当前主要有两种:①通过三维建模软件如 direct 等对临井夹层进行对比^[1];②在经验公式、概率分布、定性模式指导下手工嵌入一组弯曲曲面去拟合已知井数据来代表三维侧积层模型^[1,13]。这些方法一定程度上解决了侧积层的建模问题,但对于海上大井距油田,井距超过 200 m,井间对比侧积层并不现实。针对这一问题,提出了一套成因规律指导、条件数据约束、自动模式拟合的储层构型建模新方法。该方法引入了河流动力学领域的河道迁移方程,能够根据已知河道形态计算未来河道形态,从而模拟河道的时空演化^[17-29]。但由于地下储层中一般仅能确定末期河道的位置,无法准确得知河道演化初始时期的中线。因此提出了一种井数据约束下的历史河道中线恢复方法。在得到各时期的河道中线后,考虑到侧积层是细粒物质披覆在河道凸岸形成的,结合 Deutsch 提出的河道形态定量表征方法^[4],就可以确定河道中线各个位置处的侧积层的形态和倾角,从而实现侧积层三维分布模式的定量表征。最后以各个时期的河道中线为侧积层平面走向线,构建虚拟侧积层模型,在井数据的约束下剔除不忠实条件数据的虚拟侧积层,保留忠实于条件数据的虚拟侧积层,则实现了侧积层的自动模式预测和拟合。这一方法在渤海湾盆地 N 油田曲流河相储层进行了实际应用,实现了侧积层的定量模式预测和拟合,构建了点坝内部三维构型模型,提高了建模效率和准确性。

1 曲流河演化模拟基本原理

曲流河作为一种复杂的动力系统,其相似而有规律的平面形态以及摆动、迁移和迂回等运动特征都是由其内在动力机制决定的^[24-25]。对于曲流河相储层而言,其成因模拟可分为 3 个方面:首先是河道形态演变模拟,其次是沉积模拟,最后是三维构型元素复杂几何形态定量表征。下面将分别对这 3 方面进行阐述。

1.1 曲流河迁移演化模拟方法

曲流河相储层是河流侧向迁移与向下游整体移动过程中沉积形成的,其从初始顺直形态逐渐迁移发育成具有高弯曲度的河道,当弯曲达到一定程度时,河流发生截弯取直或者决口改道,从而降低了河道的整体曲率,使得河道保持稳定。

针对上述河道形态演变过程,Ikeda 等发现河道中线各位置处的迁移速率与该处水流近岸速度增量

呈正比关系,即河道迁移公式^[17-19],其可记为:

$$dist(s,t) = Eu(s,t) \quad (1)$$

其中 $dist(s,t)$ 表示 t 时刻河道弧长 s 位置处的河道迁移距离, m; E 表示侵蚀系数,但在实际模拟计算中主要作为时间步长因子使用,其值越大,时间步长越大,每一次模拟计算的河道迁移距离 $dist(s,t)$ 就越大; $u(s,t)$ 表示 t 时刻河道弧长 s 处的近岸速度增量, m/s, 该值越大表示水流对河岸的冲刷作用越强烈,迁移也越迅速。可通过以下方程计算:

$$u(s,t) = -b \sqrt{\frac{gIh_0}{f}} C(s,t) + \\ bf \sqrt{\frac{gIh_0}{f}} \left[\frac{I}{fh_0} + \frac{(A+2)}{h_0} \right] \int_0^s e^{(-2f(S-s)/h_0)C(s,t)} ds \quad (2)$$

式中, h_0 是河道平均深度, m, 可通过压实校正后的点坝砂体厚度确定; b 为河道宽度的一半, 可通过地震切片或与河道深度有关的经验公式获得, m; g 为重力加速度, m/s²; A 为冲刷因子, 无量纲常数; f 是摩擦系数, 无量纲常数; I 是河道比降, 无量纲常数。该参数反映了河流沉积时期的古地貌坡降, 对于曲流河发育的下游平原而言, 该值一般较小, 但对于地下储层难以确定, 因此可结合现代地貌考察给一个大致的数值范围, 以反映参数认识的不确定性; $C(s,t)$ 表示 t 时刻时河道弧长 s 位置处的曲率; S 表示河道总弧长。

从式(2)右侧第一项可以看出, 局部近岸速度增量主要受河道曲率、宽度影响, 曲率越大, 迁移速度越大, 这实质上反映了局部河道形态对其迁移演化的控制作用; 宽度越大, 河道内水流流量也越大, 水动力越强, 迁移也越迅速, 这反映了水动力强弱对河道演化的控制作用。而积分项则表明河道任一弧长 s 位置处的近岸速度增量还受到上、下游河道曲率的影响, 这说明河道是在水动力机制控制下整体连动的, 而并非简单的随机摆动或游走。

下面对迁移模拟具体实现方法进行说明。图 1 中黑线是演化初始河道中线, 在迁移演化一段时间后演化为蓝线, 最后演化为绿线所示形态。在计算中, 根据式(1)、(2)计算组成河道中线的各个控制点的迁移距离, 向迁移方向(曲率半径方向)迁移, 最后使用样条曲线连接迁移后的控制点, 便可以得到迁移后的绿色河道中线, 完成一次迁移模拟。重复上述过程, 便可以实现长时间尺度的模拟。根据这一方法, 可以根据初始河道形态预测未来任一时

刻河道的形态。

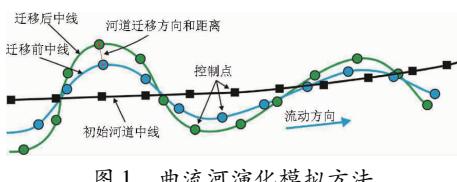


图 1 曲流河演化模拟方法

1.2 河道三维几何形态定量描述

构型建模的要求之一就是表征构型元素的空间几何形态。对于河道剖面形态的表征,传统建模软件常使用对称半圆形描述。但由于河道弯曲处螺旋流侵蚀凹岸,加积凸岸,河道剖面形态虽演化进行其不对称性逐渐加大^[21~22,27],半圆形无法有效地描绘准确的河道剖面形态。

Deutsch 等人发现河道曲率越大,河道剖面不对称性越大,河床最深位置处偏向凹岸一侧,二者具有明确的对应关系,由此其给出了与河道曲率相关的河道剖面形态定量表征公式^[4~6]。因此,只要能够确定河道平面形态,就可以计算出河道各个位置的曲率,再通过 Deutsch 河道剖面形态公式就能确定河道中线不同位置处的河道剖面,从而恢复河道三维几何形态。

对于侧积层,其本身是洪水泛滥后水流能量减弱细粒沉积物质披覆在点坝表面上形成的,因此其形态与点坝表面形态或者当前河道凸岸一侧中上部的形态一致^[1]。此外,周银邦等人通过研究现代河流、露头发现,河床剖面形态决定了侧积层倾角^[28]。因此,通过 Deutsch 河道剖面形态表征公式描绘河道剖面凸岸一侧的轮廓,一方面能够表征侧积层的几何形态,另一方面能够用来计算侧积层倾角的大小。

Deutsch 提出的河道剖面形态定量表征公式如下^[4]:

$$h = 4h_0 \left(\frac{w}{2b} \right)^{-\ln 2 / \ln(w_0)} \left[1 - \left(\frac{w}{2b} \right)^{-\ln 2 / \ln(w_0)} \right] \quad (3)$$

如图 2 所示, h 为河道底面深度, w 为河道深度相对宽度位置, b 为河道宽度的 $1/2$, h_0 为河道最大深度, w_0 为河道最大深度相对宽度位置, 其与河道中线曲率相关, w_0 的计算公式如下:

$$w_0 = \begin{cases} 0.5 \times (1 + \frac{C(P_i)}{C_{\max}}), & C(P_i) \neq 0 \\ 0.5, & C(P_i) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, C_{\max} 表示河道中线最大曲率的绝对值, 而 $C(P_i)$ 则表示河道中线上某一控制点 P_i 处的曲率。从式(4)可以看出, 当河道曲率为 0 时, 即河道为顺

直河段时, 最大深度位置在河道中央, 河道剖面形态对称; 当曲率不等于 0 时, 最大深度在凹岸一侧, 这与实际认识一致。

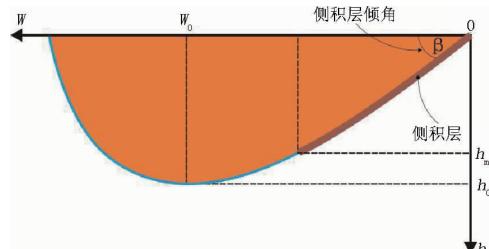


图 2 河道、侧积层形态定量表征方法

为了表征侧积层垂向延伸长度, 引入了侧积层垂向延伸比例参数 a , 其值等于 h_m/h_0 。

最后通过式(3)、(4), 根据河道深度 h_0 、宽度 $2b$ 、河道曲率、侧积层垂向延伸比例 a 几项参数便可以实现河道、侧积层三维几何形态的表征。

1.3 三维网格模型构建方法

如图 3 所示, 首先以河道顶、底界面建立层位格架模型, 然后根据侧积层面的大小、数模计算能力决定层位模型内部的网格尺寸。一般而言, 网格尺寸过少则无法表示侧积层的形态和厚度, 过多则使网格数急剧膨胀。在精细模型构建过程中, 网格维数可以小一些以精细表征侧积层的形态, 后期再根据需要进行粗化。

确定网格尺寸后, 便可对层位模型内部进行网格化。网格化后, 先将点坝范围内的网格值赋予点坝相, 然后将侧积层面经过的网格值修改为侧积层, 废弃河道矢量模型占据的网格值修改为废弃河道, 最后完成构型单元网格模型的建立(见图 3)。

2 模式预测和拟合基本原理

自动模式拟合的核心是定量模式预测。空间预测的基本前提是预知对象的分布规律或模式^[1]。本文中, 定量模式预测和拟合是在井控下以河流动力学中的河道迁移公式为基础结合虚拟侧积层方法实现的。下面将对这一方法进行详细阐述。

2.1 初始河道中线

给定一组合理的初始河道中线是使模拟结果容易忠实于已知条件数据的关键, 本文采取 Ferguson 提出的曲流河周期扰动模型快速生成初始河道中线^[29]。其表达函数如下:

$$\theta + \frac{2h}{k} \frac{d\theta(s)}{ds} + \frac{1}{k^2} \frac{d^2\theta(s)}{ds^2} = \partial(s) \quad (5)$$

式中, s 表示河道弧长, $\theta(s)$ 表示对应河道弧长

s 处的切线方位角, h 表示阻尼系数, 其值越大, 河道波动性越大, 反之越小; k 表示尺度系数, 其值越大, 生成的初始河道的波长越小, 反之亦然。 $\theta(s)$ 则表示一个沿弧长变化的正态分布随机数, 由于这一随

机数的存在, 使得生成的河道中线具有一定的随机性, 可以满足获得不同河道形态的需求。通过调节周期扰动模型的参数, 能够迅速生成一组满足统计关系的初始河道中线。

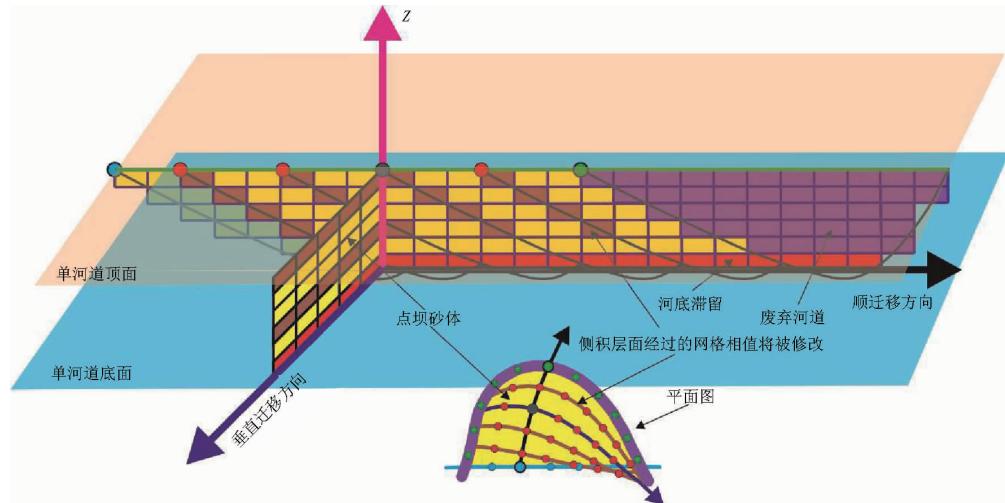


图 3 三维模型网格化方法

2.2 点坝模拟方法

由于点坝(曲流环)形成时, 其古地貌、水动力条件、物质来源具有统计平稳性, 实际建模时针对单一曲流环逐个进行, 以下是具体方法。

(1) 基于多维互动、层次分析方法完成沉积微

相分析, 识别出单个点坝砂体分布范围的基础上, 将根据测井曲线、岩心识别出的废弃河道、点坝作为点、线数据输入, 用来约束和检验模拟实现。如图 4 所示, 图中灰色圆点表示测井识别的废弃河道, 橙色圆点表示测井识别的点坝。

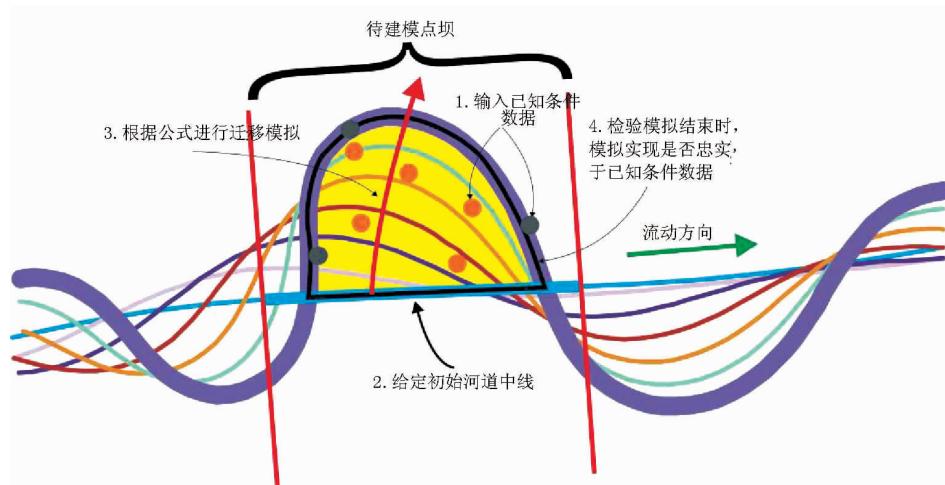


图 4 点坝模拟方法

(2) 根据曲流河周期扰动模型或手动方式给出一组初始河道中线进行模拟, 基于算法本身稳定性考虑, 这条初始河道中线本身长度可以很大, 但是实际建模中只考虑局部河段形成的单一河弯与井数据的匹配, 即逐个点坝进行模拟。

(3) 给定公式(1)、(2)所需的模拟参数, 由于一些模拟参数的取值无法准确给定, 因此可以给出一个范围值, 让程序针对不同值生成不同的模拟结

果, 如此可以反映不同古地貌、水动力条件的差异, 反映了定量表征过程中认识的不确定性。

(4) 进行迁移模拟计算, 给定较小的侵蚀系数 E 值, 以使得模拟的时间步长较小, 在模拟中保存每一次迁移模拟计算后的河道中线。

(5) 在每一次迁移模拟计算结束后, 以当前模拟得到的河道中线为搜索框中线, 以河道半宽 b 为半径建立搜索框。当所有解释为废弃河道的井均位

于该搜索框内时,模拟结束。当缺少废弃河道测井解释时,只需当前模拟的河道中线与初始河道中线形成的封闭轮廓能够包含所有测井解释的点坝时模拟结束。

(6) 将所有满足上述条件的模拟实现挑选出来,即完成了点坝模型的构建。

通过上述方法,可以得到多个满足已知条件数据的点坝砂体模型。因此,该方法实质上是一种随机模拟方法,可以有效地反映认识的不确定性。

2.3 侧积层模拟方法

在完成点坝建模后,下一步就是构建点坝内部的侧积层模型,侧积层自动模式拟合方法如图 5 所示。首先将构建的各虚拟侧积层分别与测井解释进行对比,即检查虚拟侧积层在三维空间中与井轨迹的交点,查看该交点处测井解释相值。当解释相值属于侧积夹层段时,说明模拟的虚拟侧积层与井数据吻合,如图中棕色侧积层,其将被保留为实侧积层。否则,即自动将该虚拟侧积层移除,即图中绿线。若出现了模拟的多个虚拟侧积层与同一井上侧积夹层匹配的情况,则随机选择一个虚拟侧积层为实侧积层,移除其余虚拟侧积层。没有井控位置生成的虚拟侧积层则计算其与其余实侧积层的距离,当距离过小时,删除该虚拟侧积层。最后成对地计算虚拟侧积层之间的距离,当距离小于某一指定的阈值时,随机删除其中一条。这类侧积层虽然没有井数据直接约束,但却是通过模拟预测的。通过上述方法,能够得到忠实于已知条件数据和符合成因规律的点坝内部侧积层模型。

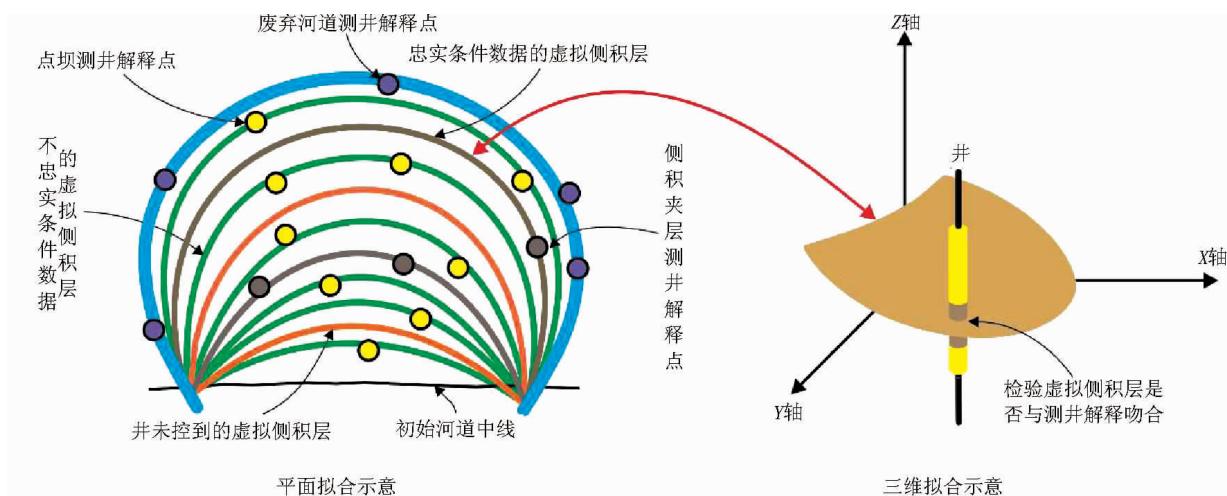


图 5 侧积层自动模式拟合方法

3 曲流河相储层三维构型建模实例

为检验这一模拟方法能否实现点坝及其内部构型元素的定量表征,我们以渤海湾盆地 N 油田明下段曲流河相储层为例进行了实际建模。

N 油田明下段沉积时期地形坡降小,地势平缓,以高弯曲度的曲流河相沉积为主。通过测井曲线分析,统计了该区点坝砂体厚度,并利用经验公式计算了河道宽度和河曲振幅(见表 1)。

表 1 储层参数统计

点坝厚度/m	河道宽度/m		河曲振幅/m
	Leeder 公式	Lorenz 公式	
4.0 ~ 7.0	57.5 ~ 136.1	445.5 ~ 1063.6	

基于上述研究,对该区 M1 单砂层点坝 O1 开展构型元素建模工作。图 6 显示了 M1 单砂层内部点

的交点,查看该交点处测井解释相值。当解释相值属于侧积夹层段时,说明模拟的虚拟侧积层与井数据吻合,如图中棕色侧积层,其将被保留为实侧积层。否则,即自动将该虚拟侧积层移除,即图中绿线。若出现了模拟的多个虚拟侧积层与同一井上侧积夹层匹配的情况,则随机选择一个虚拟侧积层为实侧积层,移除其余虚拟侧积层。没有井控位置生成的虚拟侧积层则计算其与其余实侧积层的距离,当距离过小时,删除该虚拟侧积层。最后成对地计算虚拟侧积层之间的距离,当距离小于某一指定的阈值时,随机删除其中一条。这类侧积层虽然没有井数据直接约束,但却是通过模拟预测的。通过上述方法,能够得到忠实于已知条件数据和符合成因规律的点坝内部侧积层模型。

坝 O1 范围内测井构型元素解释栅状图。

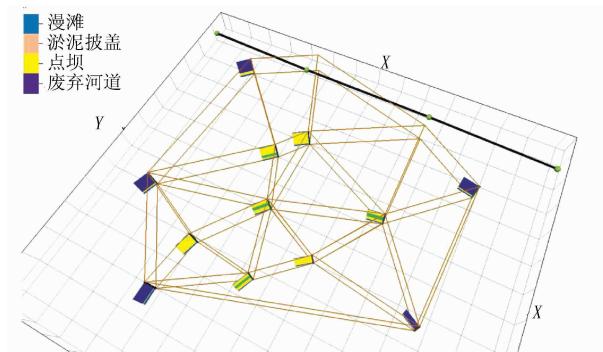


图 6 构型元素测井解释连井栅状图

根据表 1 的统计参数和井上指示的废弃河道发育位置,首先给定一组初始河道中线输入软件中,图 6 中绿色控制点连成的黑线显示了其中一条初始河道中线,再给出计算公式(1)、(2)所需的参数(见表 2)后便可进行模拟。

表2 模拟输入参数

河道宽度($2b$)/m	河道深度 h /m	摩擦系数(f)	侵蚀系数(E)	冲刷因子(A)	侧积层垂向延伸比例(a)	河道比降(I)
55~65	4~5	0.0024~0.0036	0.15	6~7	2/3~3/4	0.001~0.003

首先进行点坝模拟,模拟结束条件是当前模拟的河道中线建立的搜索框内包含所有解释为废弃河道相的井。随后进行侧积层的模拟,进行虚拟侧积层与井数据的自动拟合,最终模拟结果如图7所示。构建的侧积层模型不仅忠实于井数据,同时各期次侧积层的形态和展布具有明确的结构关系。

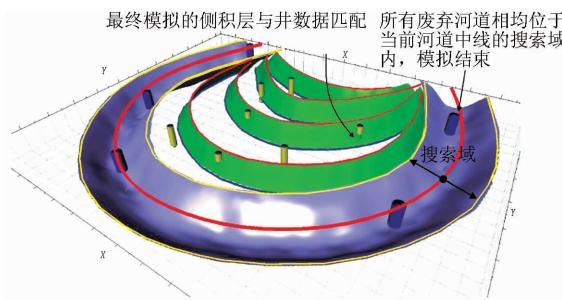


图7 点坝内部构型空间矢量模型

4 结论

(1) 提出了演化模拟、井数据约束的曲流河点坝内部构型建模新方法。这一方法充分考虑构型元素的三维复杂形态特征和结构关系,通过定量模拟预测和自动拟合建立三维构型模型。一定程度上解决了构型元素几何形态、空间结构的定量表征以及侧积层模型不忠实条件数据的问题。

(2) 提出了点坝内部构型元素定量模式表征、预测和拟合新方法。利用河流动力学的河道迁移公式在井数据约束下恢复各个时期的河道中线来表征构型元素的空间分布和展布规律。通过提取河道中线为骨架构建虚拟侧积层,基于逻辑判断剔除不忠实于井数据的虚拟侧积层,实现与井数据的自动拟合。

(3) 将该方法应用于实际曲流河相储层点坝内部构型建模工作中,建立的模型中构型元素几何形态真实,结构关系明确,地质含义清晰,相接触关系准确,是一种有效的储层构型建模新方法。

参考文献:

- [1] 吴胜和. 储层表征与建模[M]. 北京:石油工业出版社,2010: 1~448.
- [2] 李少华,张昌民,尹艳树. 河流相储层随机建模的几种方法[J]. 西安石油学院学报(自然科学版),2003,18(5): 10~15.
- [3] PYRCZ M J, DEUTSCH C V. Geostatistical reservoir modeling [M]. Oxford University, 2014: 27~116.
- [4] DEUTSCH C V, WANG L. Hierarchical object-based stochastic modeling of fluvial reservoirs[J]. Mathematical Geology, 1996, 28(7): 857~880.
- [5] HOLDEN L. Modeling of fluvial reservoirs with object models[J]. Mathematical Geology, 1998, 30(5): 473~496.
- [6] DEUTSEH C V, TRAN T T. Fluvsim: A program for object-based stochastic modeling of fluvial depositional system[J]. Computers & Geosciences, 2002: 525~535.
- [7] 吴胜和,岳大力,刘建民. 地下古河道储层构型的层次建模研究[J]. 中国科学D辑:地球科学, 2008, 38(增1): 111~121.
- [8] 邹拓,吴淑艳,陈晓智,等. 曲流河点坝内部超精细建模研究—以港东油田一区一断块为例[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(6): 1168.
- [9] 范峥,吴胜和,岳大力,等. 曲流河点坝内部构型的嵌入式建模方法研究[J]. 中国石油大学学报, 2012, 36(3): 1~6.
- [10] 李宇鹏,吴胜和,耿丽慧,等. 基于空间矢量的点坝砂体储层构型建模[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 133~139.
- [11] 黄继新,穆龙新,陈和平,等. 基于沉积界面的储集层建模方法初探[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(5): 591~594.
- [12] 李宇鹏,吴胜和. 储集层构型分级套合模拟方法[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(5): 630~634.
- [13] 尹艳树,张昌民,李少华,等. 一种新的曲流河点坝侧积层建模方法[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 315~318.
- [14] 周银邦,吴胜和,计秉玉,等. 曲流河储层构型表征研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 695~702.
- [15] 岳大力,吴胜和,刘建民. 曲流河点坝地下储层构型精细解剖方法[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 99~103.
- [16] MIALL A D. Architectural element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits[J]. Earth Science Reviews, 1985, 22(2): 261~308.
- [17] IKEDA S, PARKER G, SAWAI K. Bend theory of river meanders. Part 1. Linear development[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1981, 112: 363~377.
- [18] JOHANNESSON H, PARKER G. Inertial effects on secondary and primary flow in curved channels[J]. External Mem., 208, St. Anthony Falls Hydraul. Lab., Univ. of Minn., Minneapolis, 1988.
- [19] JOHANNESSON H, PARKER G. Linear theory of river meanders [C]// River Meandering. Water Resources Monograph 12. Washington: American Geophysical Union, 1989: 181~214.
- [20] HOWARD A D. Floodplain Processes[M]. John Wiley & Sons, 1996: 15~62.
- [21] HOWARD A D, HEMBERGER A T. Multivariate characterization of meandering[J]. Geomorphology, 1991, 14(4): 161~186.

(下转至第 56 页)

表 3 水平井设计与实钻对比

井名	设计情况				实钻情况			备注
	水平段长度/ m	布井下限/ m	避水高度/ m	实钻长度/ m	油层钻遇 率/%	初期含水 率/%	3 年累产油/ 10^4 m^3	
A 井	179	11	13	179	100	78	5.5	
W 井	235	9	11	231	98.5	75	6.2	砂体叠切处, 物性差
N 井	350	7	8	350	100	77	6.9	
H 井	270	10	12	256	95	79	6.5	砂体叠切处, 物性差

4 结论

(1) 利用高分辨率地震资料及倾角导向滤波技术, 有效提高地震资料信噪比。利用优选的边缘检测算法, 实现对小尺度河道平面展布特征精细刻画, 结合实钻曲线, 证实小尺度河道的宽度、厚度及岩性特征均可靠。通过河砂一体化属性在三维空间中展示河砂与构造的关系, 为直观寻找剩余油提供有力依据。

(2) 利用野外露头分析水平井着陆过程, 并分析避开小尺度河道着陆对低油柱油藏的重要性。本文研究方法精确刻画小尺度河道展布, 能有效指导调整井设计过程中避开小尺度河道, 为低油柱油田争取最大的油柱高度, 在油田实际生产中, 取得很好的应用效果。

参考文献:

- [1] 马佳国, 侯东梅, 王建立, 等. 高精度河砂同期展示的关键技术与应用效果[J]. 断块油气田, 2017, 24(5): 623–627.
- [2] 刘爱群, 赫建伟, 陈殿远, 等. 近海复杂断块区地震成像及储层精细描述关键技术研究—以南海西部北部湾盆地涠 12-1 油田为例[J]. 岩性油气藏, 2014, 26(1): 100–104.
- [3] 陈可洋, 吴沛熹, 杨微. 扩散滤波方法在地震资料处理中的应用研究[J]. 岩性油气藏, 2014, 26(1): 117–122.
- [4] 张明学, 雷江平, 刘伟伟, 等. 90 度相位转换与波形分类技术
-
- (上接第 43 页)
- [22] HOWARD A D, DOLAN R. Geomorphology of the Colorado River in the Grand Canyon [J]. Journal of Geology, 1981, (89): 269–298.
- [23] HOWARD A D, KNUTSON T R. Sufficient conditions for river meandering: a simulation approach [J]. Water Resources Research, 1984, (20): 1659–1667.
- [24] 许栋, 白玉川. 蜿蜒河流横向摆动及河谷地形沉积过程数值模拟[J]. 泥沙研究, 2010, (4): 68–72.
- [25] 许栋, 白玉川, 谭艳. 蜿蜒河流演变动力过程及其研究进展 [J]. 泥沙研究, 2011, (4): 73–78.
- [26] MEAKIN P, SUN T. A simulation model for meandering rivers and

在贝西北地区储层预测中的应用[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(18): 4376–4380.

- [5] 王大伟, 刘震, 陈小宏, 等. 地震相干技术的进展及其在油气勘探中的应用[J]. 地质科技情报, 2005, 24(2): 71–76.
- [6] 王鹏, 高伟, 张红斌, 等. 地震切片演化技术在乍得 A 区块的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(1): 115–118.
- [7] 陆宗骐, 梁诚. 用 Sobel 算子细化边缘[J]. 中国图形学报, 2000, 5(6): 516–520.
- [8] 马佳国, 侯东梅, 史浩等. 基于地震属性的小尺度末期河道识别[J]. 复杂油气藏, 2016, 9(4): 22–24.
- [9] LEEDER M R. Fluvial fining-upwards cycles and the magnitude of paleochannels [J]. Geology Magazine, 1973, 110(3): 265–276.
- [10] 李宇鹏, 吴胜和, 岳大力. 现代曲流河道宽度与点坝长度的定量关系[J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(6): 19–22.
- [11] 隋新光, 赵敏娇, 渠永宏. 水平井挖潜技术在大庆油田高含水后期厚油层剩余油开发中的应用[J]. 大庆石油学院学报, 2006, 30(1): 112–119.
- [12] 刘文岭, 韩大匡, 胡水清, 等. 高含水油田发展油藏地球物理技术的思考与实践[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 550–559.
- [13] 韩大匡. 关于高含水油田二次开发理念、对策和技术路线的探讨[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(5): 563–583.
- [14] 孟鹏, 苏彦春, 冯鑫等. 曲流河废弃河道识别及其对低油柱油藏水平井着陆的影响[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(4): 475–479.

(编辑 谢葵)

their associated sedimentary environments [J]. Physica A, 1996, 233(2): 606–618.

- [27] PYRCZ M J, BOISVERT J B, Deutsch C V. Alluvsim: a program for event-based stochastic modelling of fluvial depositional systems [J]. computers & geosciences, 2009, (35): 1671–1685.
- [28] 舒晓, 赵永军, 王兵杰. 一种新的曲流河点坝砂体内部构型模拟方法[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(增1): 151–155.
- [29] 李少华, 刘显太, 王军, 等. 基于沉积过程建模算法 Alluvsim 的改进[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 140–143.

(编辑 谢葵)