

# 井震约束下的浅水三角洲构型解剖及界面等效表征 ——以B油田1167砂体为例

张立安,张 岚,吴穹颢,常会江,叶小明

(中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459)

**摘要:**渤海B油田明化镇组下段发育典型的浅水三角洲储层,浅水三角洲复合砂体为多期次单砂体切割叠置形成,内部非均质性强,同时海上油田稀井网大井距,也给深入分析储层内部结构带来了困难。为进一步提高砂体动用程度及开发效果,在储层地质学理论指导下,应用海上高分辨率地震资料、丰富的动静态数据,基于砂体的井震响应特征,对主力砂体开展精细解剖。总结了砂体成因类型及叠置关系,形成了井震约束下的单砂体构型解剖思路,明确了砂体构型边界及接触关系,提出了不同类型砂体构型解剖方法。在单砂体构型解剖的基础上,融合地震地质信息,建立三维构型模型。研究表明,井震约束下的砂体构型解剖及界面等效表征在渤海B油田的地质建模及油藏数值模拟中取得了较好的应用效果。

**关键词:**河流相;叠置关系;井震约束;构型解剖;三维建模

**中图分类号:**TE321 **文献标志码:**A

## Architecture analysis and interface equivalent characterization of shallow water delta under the constraint of well seismic: a case of B Oilfield in Bohai Basin

ZHANG Li'an, ZHANG Lan, WU Qiongyuan, CHANG Huijiang, YE Xiaoming

(Bohai Petroleum Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China)

**Abstract:** Typical shallow-water delta reservoirs are developed in the lower part of the Minghuazhen Formation of B Oilfield in the Bohai Sea. The shallow-water delta composite sand-body is formed by multiple stages of single sandbody cutting and superimposition, and the internal heterogeneity is strong. At the same time, due to the sparse well pattern and large well spacing in offshore oilfields, it is also difficult to in-depth analyze the internal structure of the reservoir. In order to further improve the production degree and development effect of main sand bodies, under the guidance of the reservoir geology theory, by applying the offshore high-resolution seismic data and abundant dynamic and static data, based on the seismic response characteristics of sandbody, it was carried out fine anatomy of the main sandbody. And then it was summarized the genetic types and superimposed relationships of sandbodies, and it was formed a single sandbody configuration anatomy under the constraint of well seismic. The configuration boundaries and contact relationships of sandbodies were clarified, and different types of sandbody configuration anatomy methods were proposed. Based on the configuration anatomy of a single sandbody, a three-dimensional configuration model was established by integrating seismic and geological information. The study shows that the structural anatomy of sandbodies and the equivalent characterization of interfaces under the constraints of well earthquakes have achieved good application effects in the geological modeling and reservoir numerical simulation of Bohai B Oilfield.

**Key words:** fluvial facies; superimposing relation; well seismic constraint; architecture analysis; 3D modeling

随着渤海油田开发程度的不断加深,浅水三角洲类型的油田逐步进入开发中后期,复合砂体的非均质性严重制约了其高效开发,开发生产矛盾日益凸显,传统砂体描述技术已难以满足油藏精细开发的需求,迫切需要提高储层研究解剖精度。陆上油田密井网条件下的河流相储层构型技术难以在海上油田借鉴,而海上油田稀井网大井距的限制条件

收稿日期:2021-02-19;改回日期:2021-04-16。

第一作者简介:张立安(1987—),硕士,工程师,现主要从事油气田开发和储层地质建模工作。E-mail:cnooc\_zla@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项“渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范”(2016ZX05058001);中海石油(中国)有限公司综合科研项目“渤海双高油田挖潜关键技术研究”(YXKY-2018-TJ-04)。

制约了储层构型的应用与发展,因此,开展储层构型精细解剖方法研究,分析砂体构型单元之间的接触关系和叠置样式,构建砂体构型界面的空间分布形态,对于开发中后期老油田的调整挖潜和提高采收率具有重要意义。

目前利用密井网、野外露头等手段对河流相沉积地质体刻画及表征趋于成熟<sup>[1-2]</sup>,开始转向沉积体形成机理及形成过程的研究。近几年提出了基于砂体内部构型边界解剖及精细刻画新方法,并在此基础上构建砂体界面等效表征,指导油田调整挖潜及稳油控水。当今技术下储层的构型研究理论日趋完善,在实际应用的油田也取得了一定的成果,但仅仅停留在地质层面的构型研究依然未能较好地在三维地质建模中实现储层精细三维表征应用<sup>[3-5]</sup>。本文以渤海B油田为例,应用高分辨率三维地震资料和丰富的动静态数据,对主力砂体开展精细解剖,总结了不同砂体结构类型的井震响应特征,形成了井震过程约束下的单砂体构型解剖思路,以构型约束为导向,融合地震地质多信息,构建了砂体内部构型单元界面等效表征方法,并通过油藏数值模拟验证了方法的有效性。

### 1 研究区地质概况

B油田位于渤海南部海域黄河口凹陷中央隆起带北端,主要含油层段为新近系明化镇组,油藏埋深930~1 719 m,油藏类型受岩性控制,为岩性-构造油气藏。本文以新近系明化镇组1167砂体为例,1167位于新近系明下段II油组,储集岩性为浅水三角洲沉积背景下的中—细粒砂岩,为一套复合砂体沉积,平面分布范围较广,地震上易于追踪解释,砂岩平均厚度9.7 m,平均孔隙度30.2%,平均渗透

率 $1\ 538.3\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ ,储层物性为特高孔特高渗。1167砂体为浅水三角洲水下分流河道沉积,砂体相互切叠,呈连片状分布。

### 2 砂体解剖及构型研究

1167砂体属于分流砂坝型浅水三角洲储层,沉积以类心滩坝复合体的样式前积或侧向迁移,这些复合体进一步在平面上叠置,形成连片分布的砂体,而不同的类心滩之间则以湖泛泥岩或沉积物路过面为边界<sup>[6]</sup>。在复合类心滩坝内部则是不同的小的单一类心滩,类心滩之间以较薄的泥质沉积或沉积路过面为边界,类心滩内部由多期增生体组合而成。解剖将从大到小逐级进行,解剖时先确定复合砂体的平面展布,然后利用井震特征进一步识别单一河道的砂体边界,在此基础上,结合高精度地震资料和地震正演模拟,划分不同期次单一砂体,刻画砂体的几何形态,对不同砂体间的接触关系进行分析,预测砂体间泥岩保存程度,借以对复合砂体内部的连通性进行刻画,并用动态资料进行验证,确定砂体解剖的正确性。最终提取主要储层构型单元类心滩的几何形态参数,并进一步明确类心滩内部结构特征,建立结构模式。

#### 2.1 复合河道识别

五级构型界面在地震上表现为横向上连续稳定分布的同相轴,为厚度稳定的纯泥岩段,自然伽马曲线靠近泥岩基线,电阻率曲线无幅度差,在研究区内稳定分布。

应用连井地震反演剖面与测井资料结合(见图1),对全区进行五级构型界面识别。随后利用高精度地震资料对五级构型单元复合砂体进行追踪识别,确定1167砂体的边界。

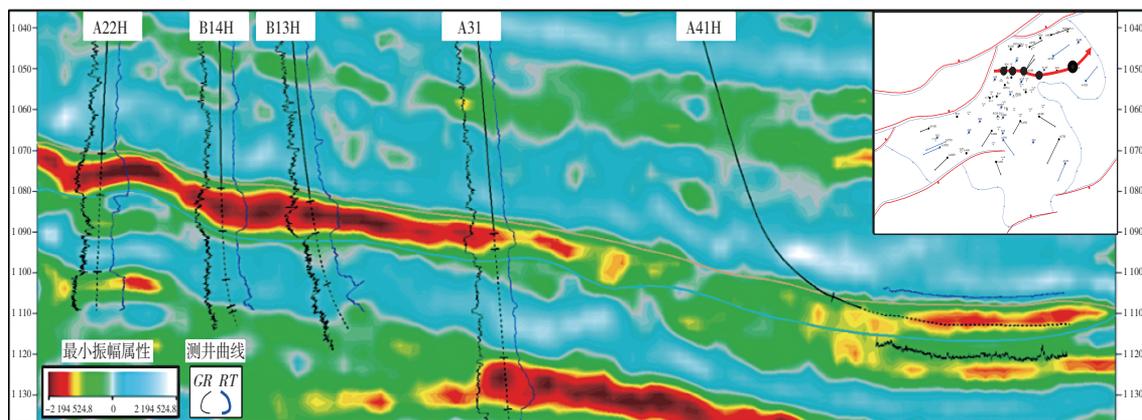


图1 五级构型界面地震及测井响应剖面

### 2.2 单一河道识别

不同单一河道砂体的岩性、电性及其在平、剖面上显示的几何形态等均有所差异,可利用研究区井资料以及地震属性资料,结合地震属性平面图、地震反演资料、各井点的测井曲线形态、连井剖面及空间组合样式,综合识别与划分出单一河道<sup>[7-9]</sup>。

在已知复合河道分布的基础上,首先是识别出单一河道的构型边界,确定了能反映不同砂体叠置关系的4种单河道边界识别标志(见图2)。

4种单河道边界识别标志,代表不同的地质意

义:“分离式”边界代表不同非均质性单一河道侧向分离,河道之间发育泥岩,地震剖面多表现为同相轴错断;“河间砂连接”边界代表不同非均质性单一河道侧向以薄层砂拼接,地震剖面多表现为不同河道间薄层砂处同相轴连续性差,振幅较弱;“上下叠置”边界代表不同期次非均质性单一河道垂向叠置,地震剖面多表现为河道叠置处同相轴叠置,且具有一定高程差异;“相邻切割”边界代表同一期次非均质性单一河道侧向切割,地震剖面多表现为河道叠置处同相轴拼接,振幅略微变弱。

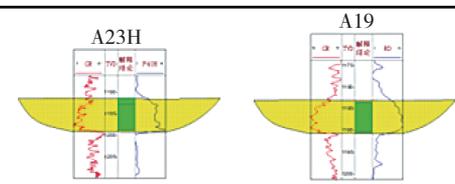
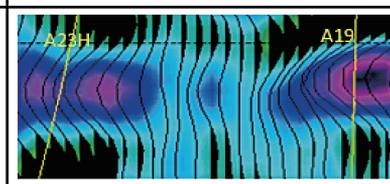
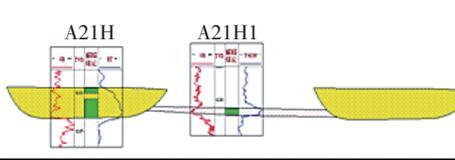
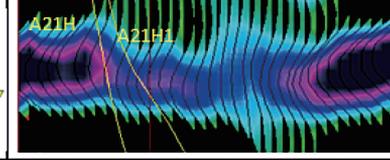
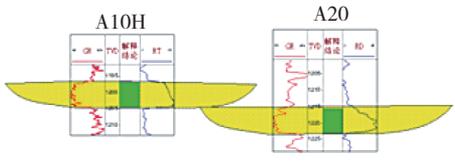
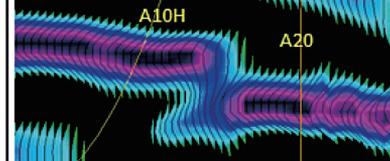
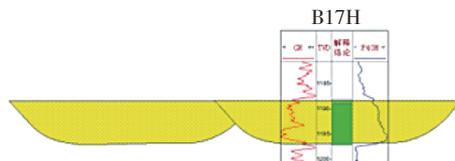
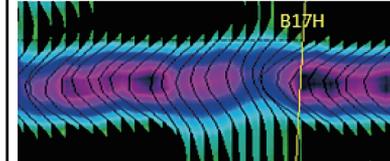
边界识别标志	连井剖面	地震剖面
分离式		
河间砂连接		
上下叠置		
相邻切割		

图2 单一河道识别标志

在总结不同单河道边界识别标志的基础上,对1167砂体开展单一河道的识别。以A37W井区为例,该井区发育4条单一河道,东西两侧两条河道规模较大,并和中部两条单一河道呈现出“薄层砂连接”和“上下式”叠置接触关系,而中部两条河道规模较小,侧向切割(见图3)。最终,根据不同地震响应,确定单河道的横向边界,完成了1167砂体单河道的精细解剖(见图4)。

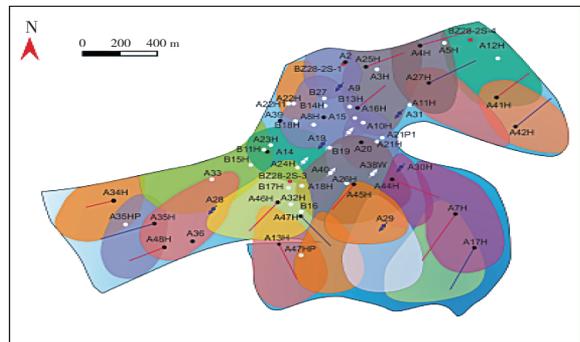


图3 1167砂体单一河道平面分布

### 2.3 河道内部构型

在浅水三角洲沉积类型中,单一河道内部构成单元主要为类心滩及分流河道沉积,浅水三角洲储层骨架砂体为类心滩沉积,砂体厚度大,稳定且连续性良好,为优势储层。

分流河道由于是过水环境,底部发育滞留沉积,后期泥质充填,砂体沉积厚度小。应用连井地震反演剖面与测井资料结合,综合考虑测井曲线纵向分辨率与砂体特征间的关系确定相类型,以测井曲线形态与连井砂体地震相特征间的对应关系来确定相分布范围,依据连井地震波阻抗剖面相变点

确定砂体边界及接触关系(见图4),由此统计出类心滩构型单元的几何形态:类心滩长度310~860 m,宽度156~616 m,厚度2.7~9.8 m。

### 2.4 类心滩内部构成

单一类心滩内部是由多期增生体纵向叠加而成,顺物源方向,砂体不断向湖推进过程中主要以前积的方式形成。

随着类心滩的增长逐步向前推进,测井曲线响应特征表现出局部的回返,表明泥质含量增大并测得前积角度约为7°~12°;垂直物源方向,则是以顺流加积的方式为主(见图5)。

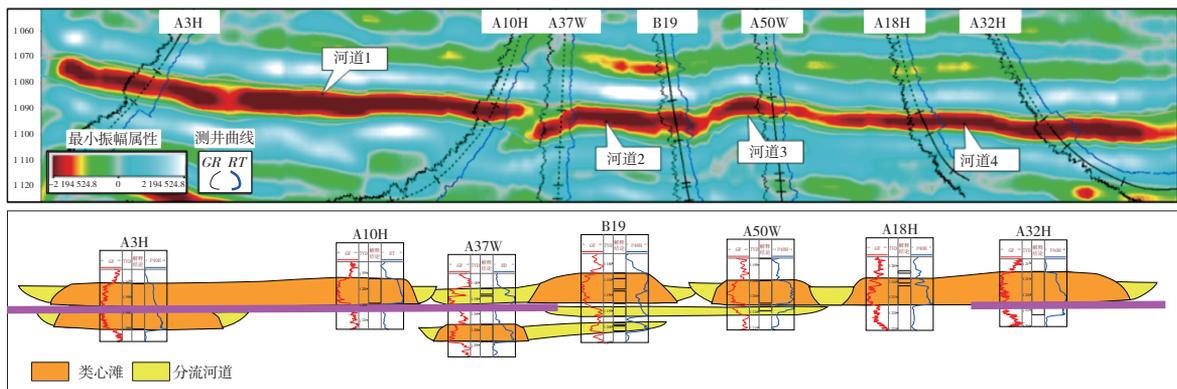


图4 四级构型单元剖面分布

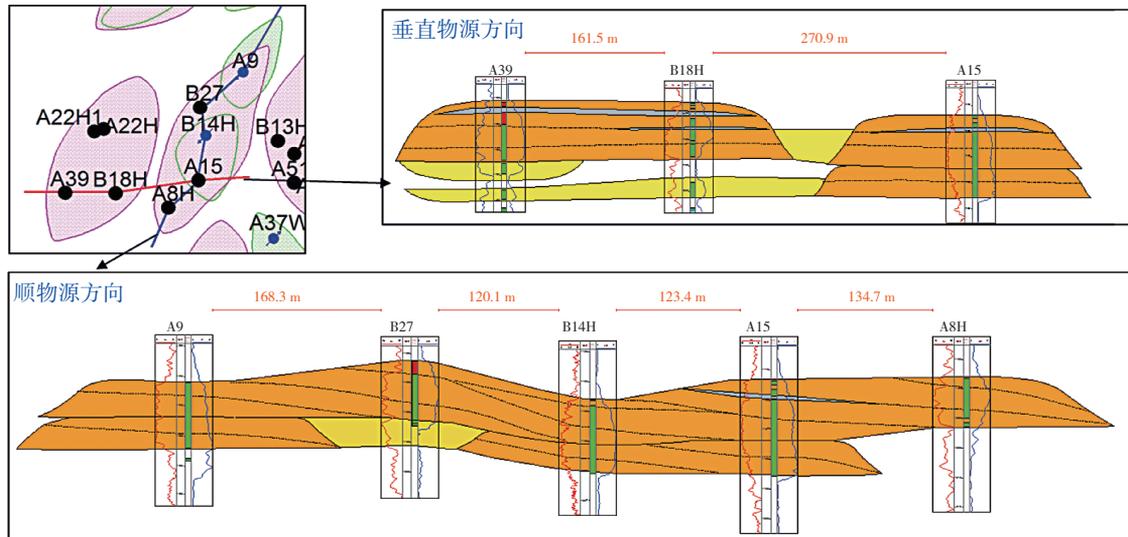


图5 三级构型单元模式

### 2.5 内部构型单元界面等效表征

构型界面是指构型单元之间或内部的渗透性或非渗透性界面,实际上主要是指构型单元之间或内部的薄夹层,由于这类夹层规模小且厚度薄,其分布的稳定性直接影响到开发效果。本文所指的

构型界面相当于Maill所指的三级和四级界面,也就是本次研究的类心滩内部构型界面,这类夹层(界面)在现有的技术下,或者在商业软件无法实现,或者即使在商业软件中可以实现但由于尺度非常小,数值模拟使用的过程中容易被粗化掉,因此本次研

究主要思路是:把这类规模、厚度非常小的、具有一定渗透性或非渗透性的夹层表征为物理的虚面,即本文所指的构型界面,然后通过赋予这个界面一定的传导率值来等效表征该界面的渗透性,这类类似于数值模拟过程中对断层封堵性的处理。本次研究主要是通过等值线平移的方法来刻画构型界面,然后把这些界面转化成数模所需的断层格式,以此来实现在数值模拟过程中构型界面所引起的不同构型单元间的渗透性强弱(或是否具隔挡作用)变化。构型界面刻画的具体方法如下:

通过1167砂体顶界面沿侧积方向方位角120°,以夹层倾角和目的层厚度为约束,通过等值线平移(可视为将仿射空间中同一个向量加到目标对象的每个点上,或将坐标系统的中心移动的结果)对公式(1)、(2)、(3)进行平移,以线控面,最终完成构型建模界面。期间的每一次平移都严格按照前文构型成果进行,最终组合控制侧积夹层的类心滩内部构型界面形态(见图6)。

等值线空间平移公式为:

$$x_{i+1} = x_i + A \sin(\theta) \quad (1)$$

$$y_{i+1} = y_i + A \sin(\theta) \quad (2)$$

$$z_{i+1} = z_i + A \sin(\varphi) \quad (3)$$

式中, $x_i, y_i, z_i, x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}$ 分别为前积夹层线第*i*、*i+1*次平移后的坐标,*i*为平移的次数;*A*为每次平移的平面距离,*m*,即两条等值线的平面距离,可以直接测量; $\theta$ 为前积方向与正东方向的夹角,(°); $\varphi$ 为前积倾角,(°)。通过此方法分别刻画出1167砂体所有类心滩内部的构型界面(见图7)。

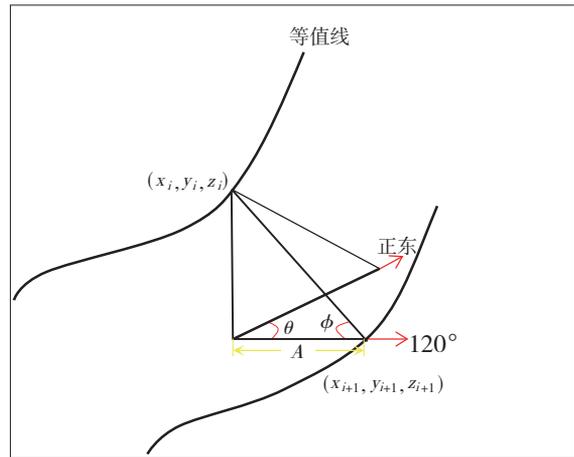


图6 等值线空间平移示意

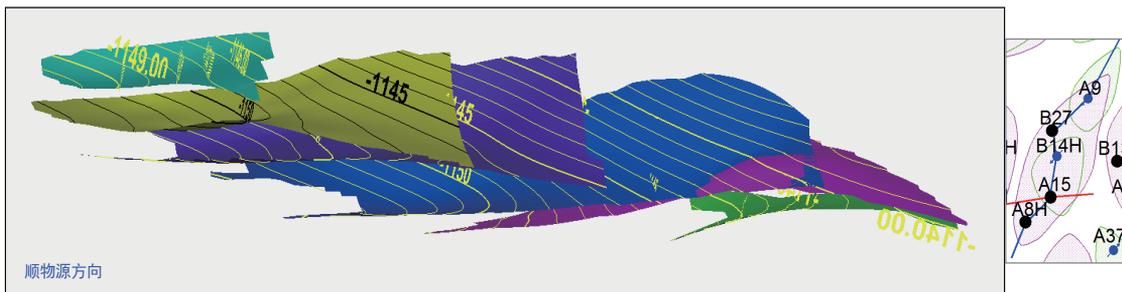


图7 1167砂体类心滩内部构型界面示意

### 3 构型约束下的储层表征

此次研究提出的重要技术手段是将各构型要素(主要是构型界面)定量在三维建模中实现的方法,应用此法将构型解剖<sup>[10-13]</sup>所得的夹层倾向、夹层倾角、夹层间距及平面分布等要素精确定量地在建模中实现。

#### 3.1 沉积微相建模

油田开发中、晚期井网密度较大,因此地质研究及认识较细,本次研究已到四级构型级别,首先将前期地质精细研究的单井相转化为建模过程中的沉积微相代码,按分类加载到建模软件中<sup>[14-15]</sup>,然后根据井点资料求取变差函数,定义不同规模的搜索锥、搜索步长、步长容差和角度容差,计算空间

点对间的变差,拟合出变差函数<sup>[16]</sup>。在此基础上将地质认识的沉积微相作为建模过程中的概率趋势,应用序贯指示算法来实现沉积微相模拟(见图8)。

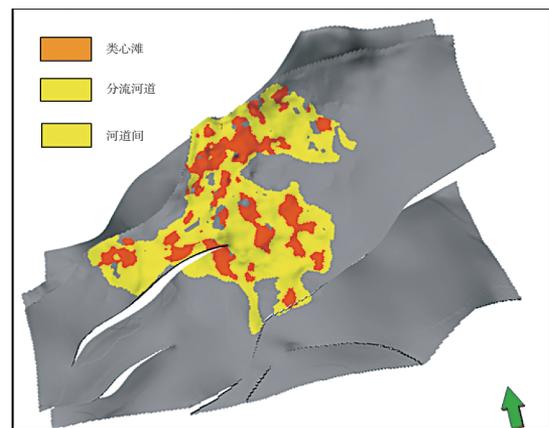


图8 1167砂体沉积微相模型

### 3.2 相控属性建模

属性建模的最终成果是建立反映储层特征的孔隙度、渗透率、饱和度等物性参数模型。根据相控建模原则,通过求取变差函数,利用海上高分辨率地震资料,采用地震波阻抗反演作为第二变量,协同约束建立各模拟单元中每个沉积微相的孔隙度、渗透率等参数模型(见图9),降低了井间属性预测的不确定性和随机性,提升了属性参数模拟精度。

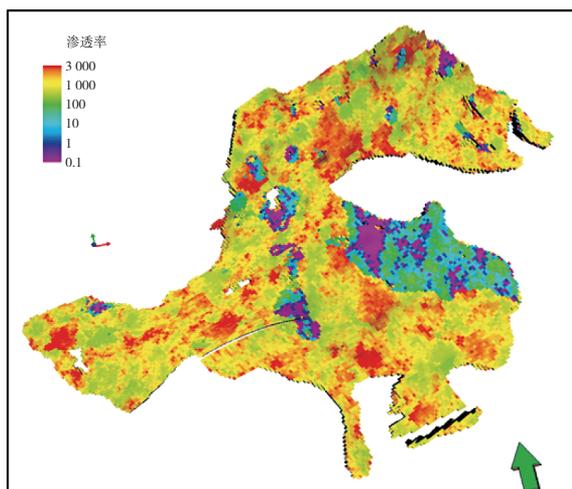


图9 1167砂体渗透率模型

### 3.3 类心滩坝构型界面等效表征

前面构型研究得到了三维空间中构型界面的分布,但如何将其定量刻画到三维地质模型,并应用到油藏数值模拟中,是当前小尺度构型建模的难点。本次研究采用一种等效表征的思路来开展构型界面的模型表征<sup>[16]</sup>。该方法主要是利用网格界面传导率乘数这个参数将构型界面对流体渗流的影响表征到油藏数模中<sup>[16]</sup>。研究中首先将类心滩内部多个构型界面分别与网格模型求交,通过交切关系计算得到各构型界面在网格模型中的位置,最后以网格界面传导率乘数数据卡的格式输出,供数模调用。传导率乘数数据卡中第2列为传导率乘数值,初始值默认为0,即表示该构型界面对流体起到完全遮挡的作用,其最终数值须在下一步油藏数模中结合油藏动态响应进行调整。

## 4 实例应用

应用本次构型研究成果建立了1167砂体精细地质模型,结合油藏数值模拟及实际需求对网格及属性进行粗化。输出构型界面并定义构型界面两侧的网格传导率,开展油藏生产动态历史拟合及数

值模拟研究。其中,传导率利用网格间的渗透率和网格尺寸来定义,根据油田实际注采井组的生产动态分析来确定,并通过历史拟合不断调整,最终根据历史拟合的符合程度确定传导率数值。图10为B油田1167砂体数值模拟历史拟合图,本次研究主要对56口油水井通过调整构型界面两侧的传导率来拟合,新模型单井含水率历史拟合平均误差小于10%的有51口井,符合率达91%,较老模型提高了11%。通过开展构型解剖及界面等效表征,在油藏模型中加入构型界面(即隔夹层),数值模拟结果更加符合实际生产特征,提高了单井历史拟合精度与可信度(见图10)。

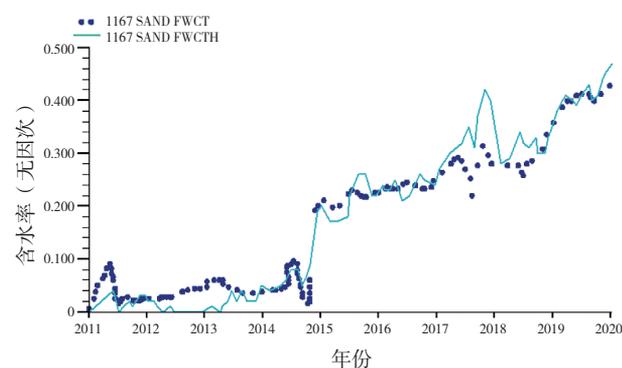


图10 1167砂体2、3井区含水率拟合对比

## 5 结论

(1)本次研究对BZ油田1167砂体逐级解剖,由复合河道到单一河道,由单一河道到类心滩,再由类心滩到内部前积界面,明确了1167砂体是由四条单一河道及其内部的类心滩等微相构成,类心滩内部存在前积特征,前积角 $7^{\circ} \sim 11^{\circ}$ 。

(2)利用网格界面传导率乘数参数能够实现类心滩构型界面的精细表征,充分表达小尺度构型界面对油藏渗流能力的影响,提高历史拟合精度。

(3)高分辨地震资料对砂体横向分布情况具有良好响应,利用高分辨地震资料并震结合可以实现复合砂体内部结构的精细解剖。采用等效表征能够精细表征小尺度构型界面对渗流的影响,大幅提高模型表征精度和拟合精度,为后续剩余油的研究奠定地质基础。

### 参考文献:

- [1] 何伟,马世忠,闫树,等.萨中地区特高密井下点坝构型建模与应用[J].地球物理学进展,2016,31(3): 1117-1122.

(下转第73页)

## 参考文献:

- [1] 张运来,廖新武,胡勇,等.海上稠油油田高含水期开发模式研究[J].岩性油气藏,2018,30(4):120-126.
- [2] 李廷礼,刘彦成,于登飞,等.海上大型河流相稠油油田高含水期开发模式研究与实践[J].地质科技情报,2019,38(3):141-146.
- [3] 金宝强,舒晓,邓猛.渤海特高含水期油田剩余油分布规律及挖潜策略[J].科学技术与工程,2020,20(15):6033-6040.
- [4] 苏彦春,李廷礼.海上砂岩油田高含水期开发调整实践[J].中国海上油气,2016,28(3):83-90.
- [5] 申春生,胡治华,李林,等.中高含水期河流相砂体剩余油定量预测新方法[J].地质科技情报,2018,37(5):49-53.
- [6] 汪巍,郭敬民,李博,等.馆陶组砾岩夹层研究及水平井分层系开发实践[J].油气藏评价与开发,2016,6(1):5-8.
- [7] 邓景夫,李云鹏,贾晓飞,等.海上高含水期油田细分层系技术界限研究[J].特种油气藏,2018,25(2):116-119.
- [8] 姜伟.中国海上油田开发中的钻完井技术现状和展望[J].中国工程科学,2011,13(5):58-65.
- [9] 范白涛.渤海油田钻完井技术及发展现状[J].中国海上油气,2017,29(4):109-117.
- [10] 李振鹏,马存飞,刘春艳,等.地层视垂厚度分析在油田小层对比中的应用[J].断块油气田,2018,25(5):626-630,634.
- [11] 苗春欣.小断块油藏有效厚度校正方法研究[J].石油工业计算机应用,2015(3):35-37.
- [12] 甘丽琴,谢岳,胡勇,等.储层深度预测误差分析及规避方法[J].科学技术与工程,2018,18(6):87-92.
- [13] 刘传奇.储层真厚度求取新方法[J].海洋石油,2012,32(4):33-37.
- [14] 陈平.钻井与完井工程[M].北京:石油工业出版社,2011:196-201.
- [15] 戴俊生.构造地质学及大地构造[M].北京:石油工业出版社,2006:4-11.

(编辑 谢 葵)

## (上接第64页)

- [2] 马世忠,吕桂友,闫百泉,等.河道单砂体“建筑结构控三维非均质模式”研究[J].地学前缘,2008,15(1):57-64.
- [3] 吴胜和,翟瑞,李宇鹏.地下储层构型表征:现状与展望[J].地学前缘,2012,19(2):15-23.
- [4] 张昌民,尹太举,喻辰,等.基于过程的分流平原高弯河道砂体储层内部建筑结构分析——以大庆油田萨北地区为例[J].沉积学报,2013,31(4):653-662.
- [5] 白玉华.对浅水三角洲的一点认识[J].油气藏评价与开发,2014,4(5):11-17,23.
- [6] 刘金连,张建宁.济阳探区单一河道砂体边界地质建模及其地震正演响应特征分析[J].石油物探,2010,49(4):344-350.
- [7] 张显文,胡光义,范廷恩,等.河流相储层结构地震响应分析与预测[J].中国海上油气,2018,30(1):110-117.
- [8] 赵翰卿,付志国,吕晓光,等.大型河流—三角洲沉积储层精细描述方法[J].石油学报,2000,21(4):109-113.
- [9] 陈飞,胡光义,范廷恩,等.渤海海域W油田新近系明化镇组河流相砂体结构特征[J].地学前缘,2015,22(2):207-213.
- [10] 范廷恩,王海峰,胡光义,等.海上油田复合砂体构型解剖方法及其应用[J].中国海上油气,2018,30(4):102-112.
- [11] 肖大坤,胡光义,范廷恩,等.现代曲流河沉积原型建模及构型级次特征探讨——以海拉尔河、潮白河为例[J].中国海上油气,2018,30(1):118-126.
- [12] 汪巍,侯东梅,马佳国,等.海上油田高弯度曲流河储层构型表征——以渤海曹妃甸11-1油田主力砂体Lm943为例[J].中国海上油气,2016,28(4):55-62.
- [13] 吴胜和,岳大力,刘建民,等.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(S1):111-121.
- [14] 张岚,黄凯,张建民,等.BZ油田浅水三角洲储层地质建模研究[J].海洋石油,2012,32(3):33-38.
- [15] 张存才,付志国,黄述旺,曲流河点坝砂体内部建筑结构三维地质建模[J].海洋石油,2007,27(4):19-24.
- [16] 霍春亮,叶小明,高振南,等.储层内部小尺度构型单元界面等效表征方法[J].中国海上油气,2016,28(1):54-59.

(编辑 谢 葵)