

# 地震构型分析方法在胜坨油田辫状河储层表征中的应用

崔文富<sup>1</sup>, 黄旭日<sup>2,3</sup>, 唐静<sup>2,3</sup>, 张栋<sup>2,3</sup>, 陈永红<sup>2,3</sup>

(1. 中国石化胜利油田分公司胜利采油厂, 东营 257051;

2. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500;

3. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500)

**摘要:** 辫状河沉积砂体储层内部的复杂结构是控制砂体连通性的根本原因, 它制约了碎屑沉积储层的剩余油开发。以往依靠井数据的砂体构型表征精度取决于井控程度, 井间预测由于缺乏数据支持而存在不确定性。因此, 砂体构型精细表征的关键在于使用地震数据进行井间预测。研究表明, 通过划分复合心滩坝砂体的单井构型相, 结合地震正演分析确定地震可辨识构型模式, 利用地震构型分析方法预测地震构型相和构型边界的平面分布特征, 能够为井间预测提供客观数据支持。

**关键词:** 储层构型; 复合心滩坝; 单井构型相; 地震构型相; 构型边界

**中图分类号:** P631.4

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.06.09

## 0 引言

胜坨油田在沙二段1~3砂层组沉积时期, 主要发生辫状河流及泛滥平原沉积, 所发育的辫状河砂体具有极强的储层非均质性。当前, 油田的含水率已到达90%, 迫切需要针对辫状河砂体储层进一步开展精细化的储层表征, 以促进剩余油开发, 这是新形势下提高油气采收率的研究重点。

前人以野外露头、现代沉积及陆上密井网等资料为基础的储层构型理论研究, 其研究精细程度已达到了三级界面限定的增生体级次<sup>[1-6]</sup>。然而, 在地下实际中, 沉积砂体的理论结构往往难以完整保存。河流的频繁摆动导致沉积砂体相互侵蚀叠置、循环嵌套, 通常以残存体彼此叠置成为复合砂体, 使实际的储层结构更为复杂<sup>[7-9]</sup>。另外, 井网井距与砂体展布规模互为矛盾, 井控程度决定了表征尺度。

相对的大井距无法满足储层构型的精细解剖, 井间预测存在极大的不确定性。

储层构型分析的难点在于井间预测。遵循层级约束下的界面趋势借鉴、河道宽深比、废弃定边等原则和经验的井间预测, 虽有一定的继承性, 但难以保证准确性。在这种情况下, 前人提出地震构型相, 即不同级次储集层构成单元的形态、规模、方向及其叠置关系在地震剖面上所反映的主要特征的总和<sup>[10]</sup>。充分发挥地震资料的空间分辨率优势, 利用平面地震属性进行地震构型分析, 可以为砂体构型的井间预测提供必不可少的数据支持, 这也是降低井间预测的不确定性的有效途径<sup>[11-14]</sup>。

笔者以胜坨油田沙河街组二段辫状河储层为例, 应用地震构型分析方法, 即通过深度学习方法预测地震构型相的平面分布, 结合图像处理技术的构型边界检测结果, 应用地震构型相和边界双重信息来进行井间砂体构型解剖, 以此推动地震沉积学在

收稿日期: 2023-09-18

基金项目: 中国石化科技攻关项目(P20070-4)

第一作者: 崔文富(1970—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事油田地质及提高采收率研究, E-mail: cuiwenfu\_slyt@sinopec.com。

通信作者: 黄旭日(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事地震—油气藏一体化研究, E-mail: xrhuang@sunrisepst.com。

辫状河储层构型精细表征。

### 1 研究区地质概况

胜坨油田位于渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷北

部,北邻陈家庄凸起,东部为垦东青坨子凸起,西部为滨县凸起,南部与洼陷相沟通。研究区胜坨二区是在胜北断层控制下形成的逆牵引背斜构造油田,总体构造呈“扇形”分布,自北东向西南方向倾没,见图 1 所示。

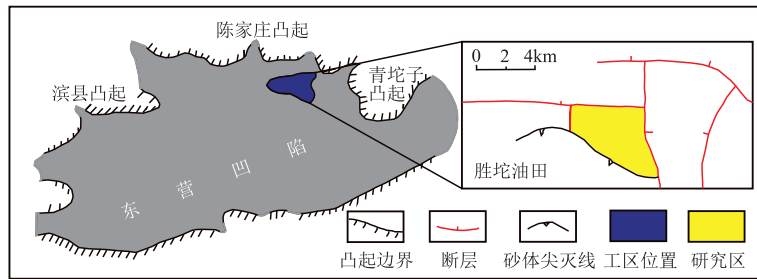


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of the study area

研究区北邻物源供应充足的陈家庄凸起,具有近物源、坡降大的特点,在沙二上亚段沉积时期主要发育辫状河沉积。根据研究区内井数据目的层段砂体的测井曲线特征,尤其以 GR 和 SP 曲线为主,对砂体进行归类。按照测井曲线的圆滑或锯齿程度、幅度、砂体厚度和隔层等,将单井构型相分为四类,即切叠型、单夹层型、多夹层型和薄砂型,见表 1。

切叠型砂体构型的测井曲线较圆滑、呈箱形、幅度大,表示单期砂体或多期切叠砂体,内部无夹层,

代表复合心滩坝首部;单夹层型砂体构型的测井曲线较圆滑、呈钟形或指形叠加,幅度大,表示两期叠置砂体,内部含夹层,代表复合心滩坝主体;多夹层型砂体构型的测井曲线为锯齿状、呈多个指形叠加、幅度大,表示多期叠置砂体,内部包含多个隔夹层,代表复合心滩坝尾部;薄砂型砂体构型的测井曲线呈指形、幅度小,表示砂体边部或薄砂体,代表河漫砂。

表 1 辫状河砂体沉积构型相分类

Tab. 1 Classification of sedimentary architecture facies of braided river sand body

序号	砂体类别	典型测井曲线	曲线特征	地质含义
1	切叠型		幅度大,呈箱形	单期或多期切叠砂体,无夹层,心滩坝首部
2	单夹层型		幅度大,呈钟形或指形叠加	两期砂体叠置,含单个夹层,心滩坝主体
3	多夹层型		幅度大,呈多个指形叠加	多期砂体叠置,含多个夹层,心滩坝尾部
4	薄砂型		幅度小,呈指形	砂体边部或薄砂体,河漫砂

## 2 砂体沉积构型地震响应

根据单井构型相分类结果,总结得到复合砂体的概念模型,见图 2 所示。它们分别代表单期薄砂、单期厚砂、两期砂体和多期砂体。结合井上砂体厚度建立正演模型,见图 3 所示。

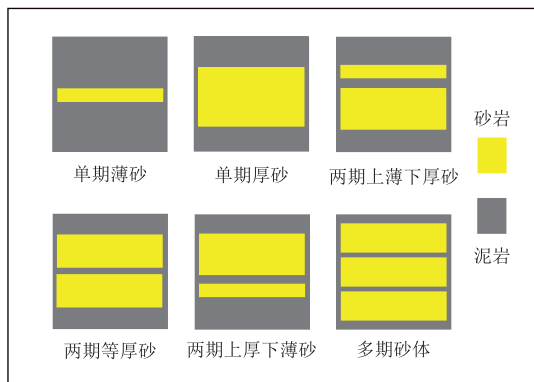


图 2 复合砂体概念模型

Fig. 2 Conceptual model of composite sand body

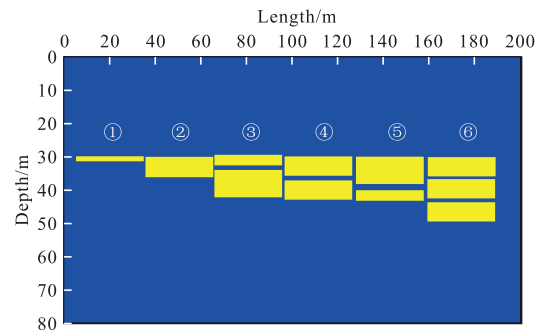


图 3 复合砂体正演模型

Fig. 3 Forward model of composite sand body

其中模式①为单期薄砂,厚度设置为 1 m;模式②为单期厚砂,厚度设置为 6 m;模式③为两期上薄下厚砂,薄砂厚度为 2 m,厚砂厚度为 8 m,泥岩夹层 2 m;模式④为两期等厚砂,砂体厚度为 5 m,泥岩夹层为 2 m;模式⑤为两期上厚下薄砂,厚砂厚度为 8 m,薄砂厚度为 2 m,泥岩夹层为 2 m;模式⑥为多期砂体,砂体厚度为 5 m,泥岩夹层为 2 m。

表 2 正演模型参数表

Tab. 2 Parameters of the forward model

参数	参数值	参数	参数值
砂岩速度	2 915 m/s	砂岩密度	2.165g/cm <sup>3</sup>
泥岩速度	2 500 m/s	泥岩密度	2.25g/cm <sup>3</sup>
地震子波	雷克子波	子波主频	30 Hz

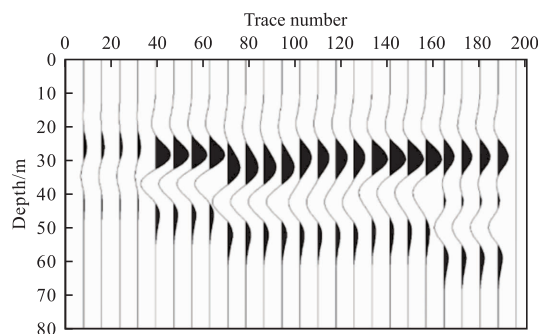


图 4 正演模型地震响应特征

Fig. 4 Seismic response characteristics of the forward model

图 4 所示为正演模型的地震响应特征,正演参数见表 2。可见,调谐厚度以下地震波形表现为复合波,最大振幅值随砂体厚度增大而增大,两期砂体的波形向厚砂处偏歪,多期砂体的波形开始分离。

图 5 所示为沿峰谷时窗提取的十种层间敏感性。可见,两期等厚砂的波形具有对称性,在多数地震平面属性中体现出稳定中间值特征,可以此作为

构型分析的对比标准。单期薄砂的波形同样具有对称性,振幅幅度较小,在多数地震属性中体现出稳定低值。单期厚砂的波形同样具有对称性,振幅幅度较大,在多数地震属性中体现出相对高值。两期上薄下厚砂的波形靠波谷拉伸,对平均波谷振幅属性具有敏感性;两期上厚下薄砂的波形靠波峰拉伸,对平均波峰振幅、最大绝对值振幅属性具有敏感性;多

期型波形出现分离,在大多数属性中体现为相对低值,但对波形变异系数较敏感。

正演结论认为,根据地震属性值域较难区分单期厚砂、两期上薄下厚砂和两期上厚下薄砂等

含厚砂构型,但能够区分单期薄砂、含厚砂构型、两期等厚砂体和多期砂体,分别对应研究区单井构型的薄砂型、切叠型、单夹层型和多夹层型砂体构型。

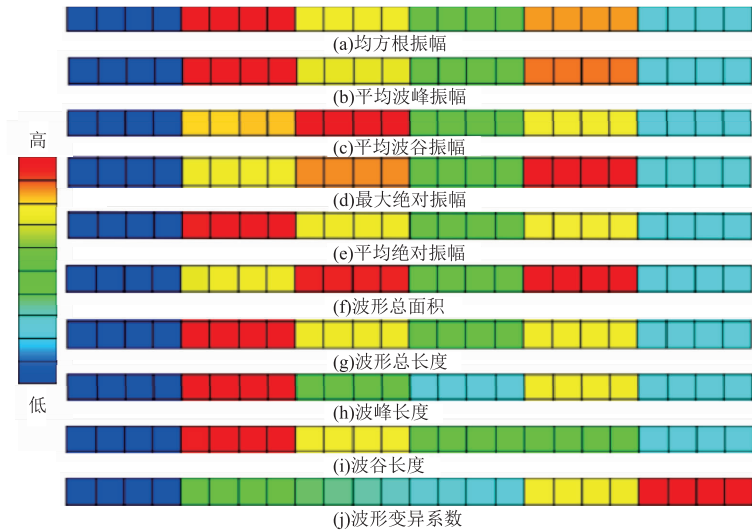


图 5 模型敏感地震属性分析

Fig. 5 Model sensitive seismic attribute analysis

### 3 砂体地震构型预测

地震构型分析方法表征薄砂体储层构型的井间分布特征,主要包括地震构型相和构型边界两个方面,其技术流程如图 6 所示。在地震构型相预测中,

将单井构型相模式作为标签,将敏感地震属性作为特征,采用有监督的机器学习算法进行模式识别,从而得到井监督的地震模式平面分布图。在构型边界检测中,先对敏感地震属性进行主成分分析法融合,然后对融合属性进行边界检测,从而得到砂体构型的边界平面分布图。

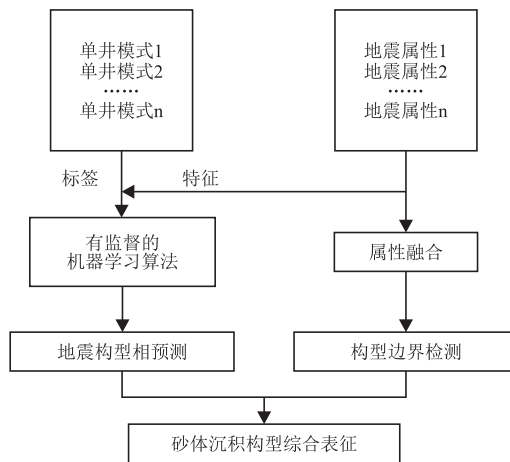


图 6 地震构型分析方法流程图

Fig. 6 Workflow of seismic architecture analysis method

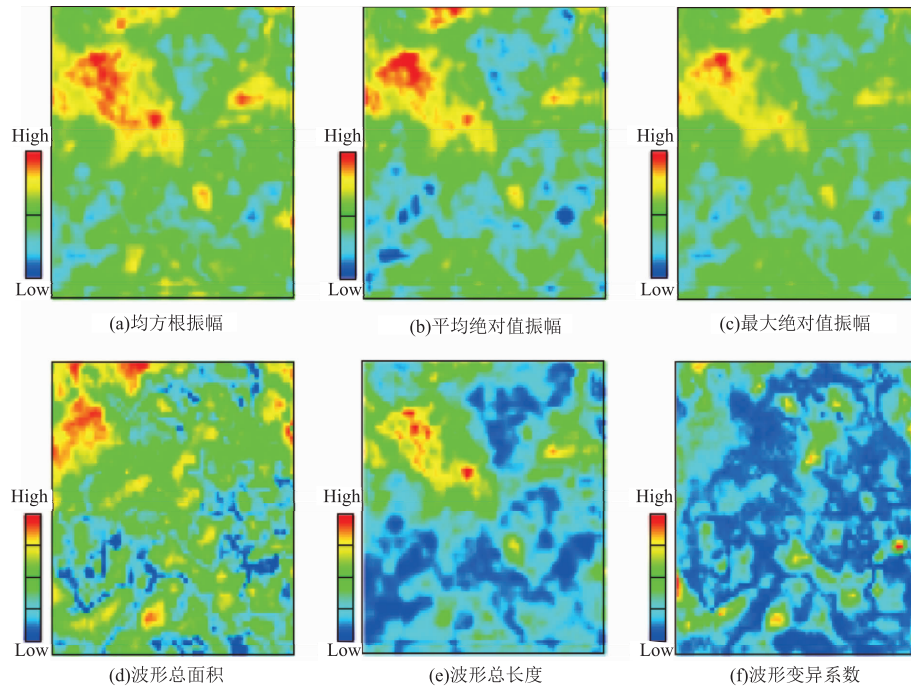


图 7 工区数据敏感地震属性  
Fig. 7 Field data sensitive seismic attributes

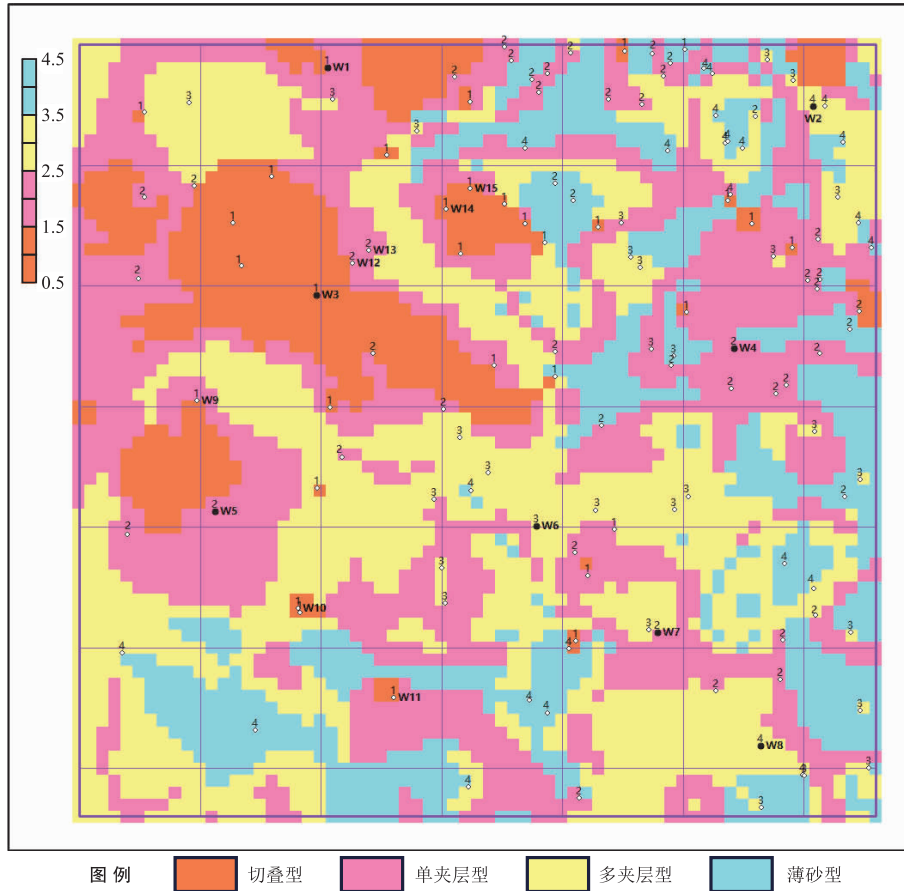


图 8 地震构型相预测结果  
Fig. 8 Prediction results of seismic architecture facies

对研究区目的层段提取层间敏感地震属性,显示于图 7。其中,图 7(a)为均方根振幅,图 7(b)为平均绝对值振幅,图 7(c)为最大绝对值振幅,图 7(d)为波形总面积,图 7(e)为波形总长度,f 为波形变异系数。可见,每种地震属性均刻画了沉积地质体的一个方面,需要多属性综合分析才能有效降低地震解释的多解性。

概率神经网络是一种有监督的前馈型机器学习

算法,可以用于模式识别<sup>[15-16]</sup>。按照单井构型分类标准,将工区内各井进行分类,结合敏感地震属性进行地震构型相预测,结果显示于图 8。其中,橙色代表切叠型砂体构型,粉色代表单夹层型砂体构型,黄色代表多夹层型砂体构型,天蓝色代表薄砂型构型。选择预留的 8 口井进行地震构型相检验,检验结果如表 3 所示,符合率达到了 75%。

表 3 井检验统计表

Tab. 3 Well inspection statistics table

井名	单井构型	预测值	准确率/%
W1	1	1	75
W2	4	3	
W3	1	1	
W4	2	2	
W5	2	2	
W6	3	3	
W7	2	2	
W8	4	3	

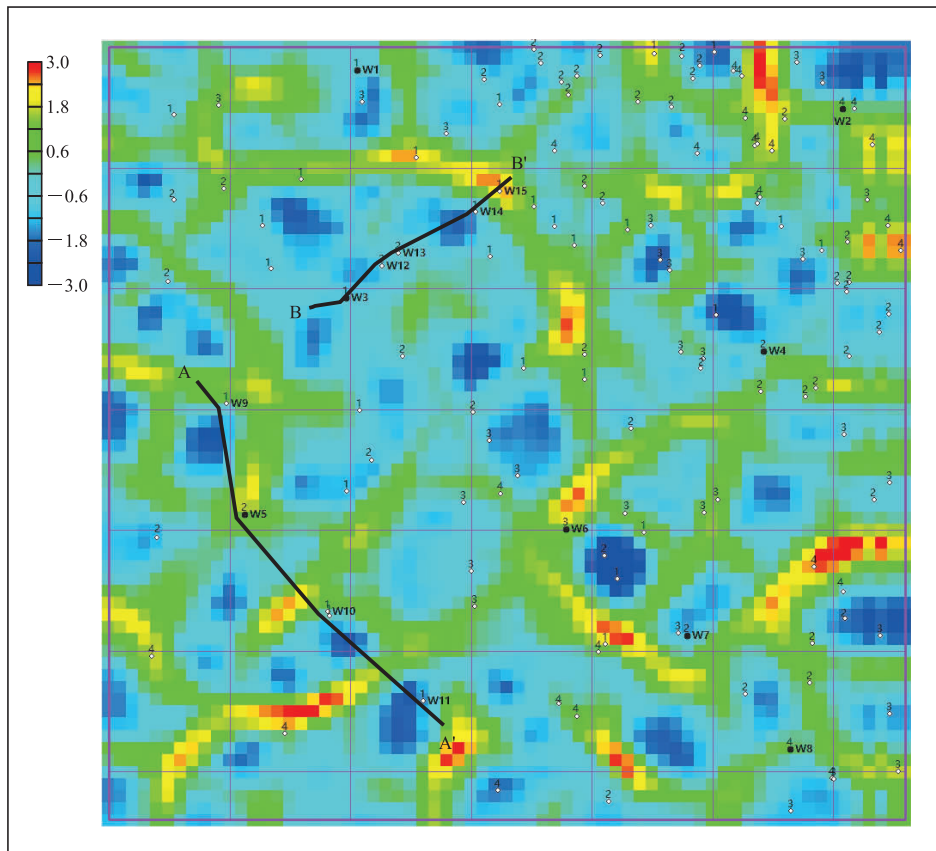


图 9 构型边界检测结果

Fig. 9 Detection results of architecture boundary

将平面地震属性值域的“连续—不连续”与储层非均质性关联起来,可以认为构型单元内部近似为

相对均质,而构型单元之间则存在突变界面<sup>[17-18]</sup>。那么,进行边界检测便可以对砂体构型的边界进行刻

画。图 9 所示为采用梯度算法进行构型边界检测的结果,其中低值代表背景,高值表示边界梯度强度。

#### 4 砂体沉积构型表征

地震构型分析预测结果表征了沉积地质体的平面分布特征,地震构型相反映了砂体的连续性信息,构型边界反映了砂体的不连续性信息。结合钻井信息,井震综合分析,便可实现井间砂体沉积构型的精细表征,结果显示于图 10。

在构型表征结果中,选取局部复合心滩坝进行精细解剖。图 11 所示为复合心滩坝顺水流方向演化过程。当心滩坝两侧的流水较为对称时,主要发生顺流加积和垂向加积作用。心滩坝的迎水面持续被流水冲刷,主要发生侵蚀作用,砂体发育间歇的泥质沉积不易保存,砂体厚度较大,形态较陡;其背水面受流水冲刷力较小,接受来自上游的沉积物而不

断增生,增生体之间垂向叠加,夹层发育,形态较缓。

图 9 和图 10 显示,W9 井在单一心滩坝主体上;W5 井位于心滩坝主体与坝尾之间,图 9 中明显位于边界上;W10 井位于单一心滩坝主体上;W10 井和 W11 井之间有一明显界线,W11 井位于另外一个单一心滩坝主体上。

图 12 所示为复合心滩坝垂直水流方向演化过程。当心滩坝两侧的流水不对称时,主要发生侧向加积和垂向加积作用。心滩坝靠主水道一侧的迎水面受流水冲刷力较强,背水面沉积速度也较快;而靠次水道一侧的迎水面受流水冲刷力较弱,背水面沉积速度也较慢,导致心滩坝向次水道下游侧向迁移。

通过图 9 和图 10 综合分析可得,W3 井位于单一心滩坝主体上;W12 和 W13 井之间有一弱分界线;W14 井位于单一心滩坝主体;W15 井右侧为较强的边界线。

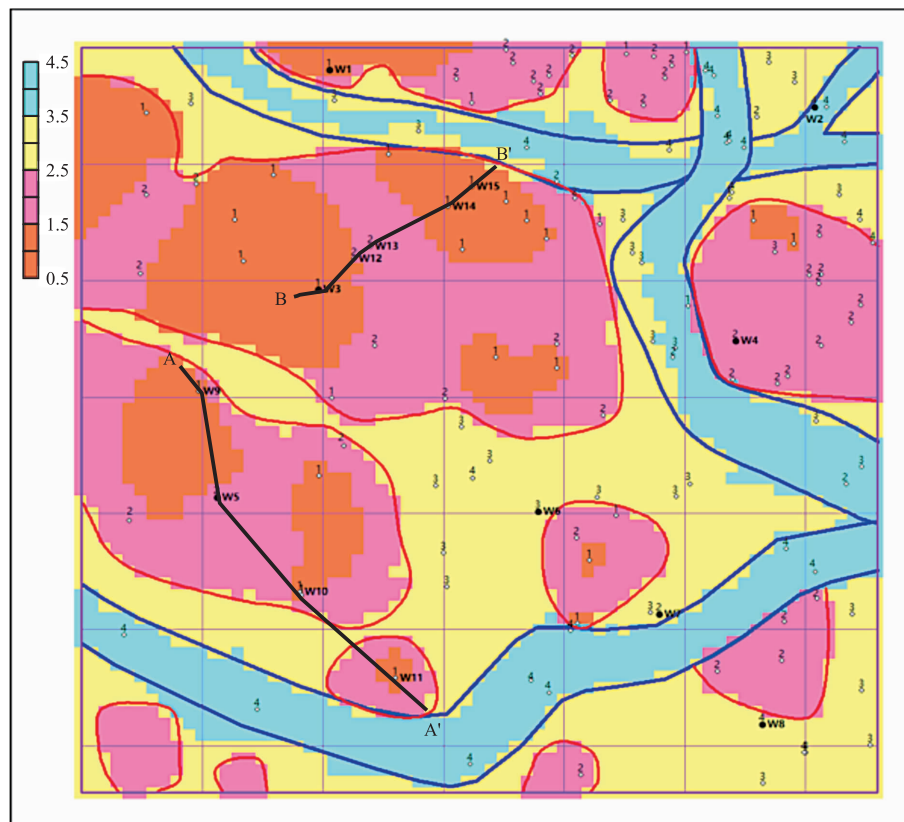


图 10 砂体沉积构型表征结果

Fig. 10 Characterization results of sand body deposition architecture

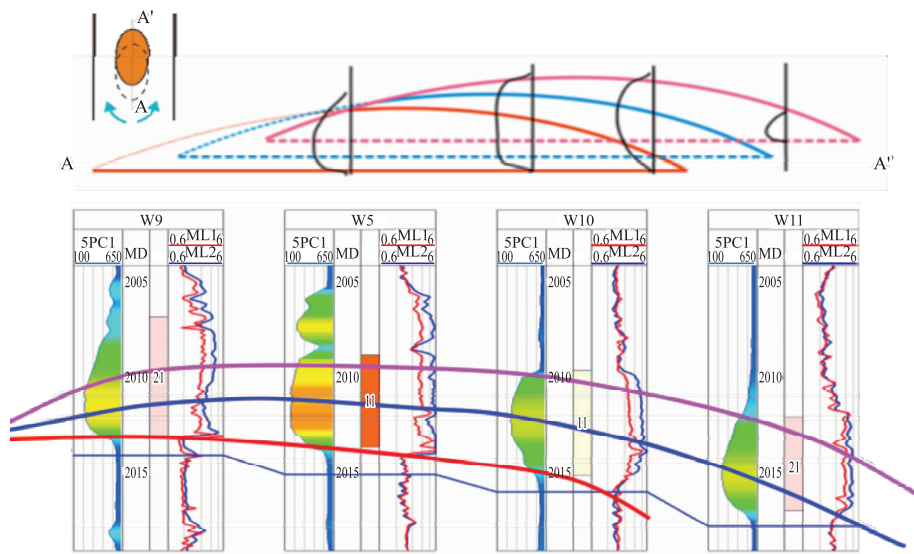


图 11 复合心滩坝顺水流方向演化过程

Fig. 11 Evolution process of composite sand bar along the flow direction

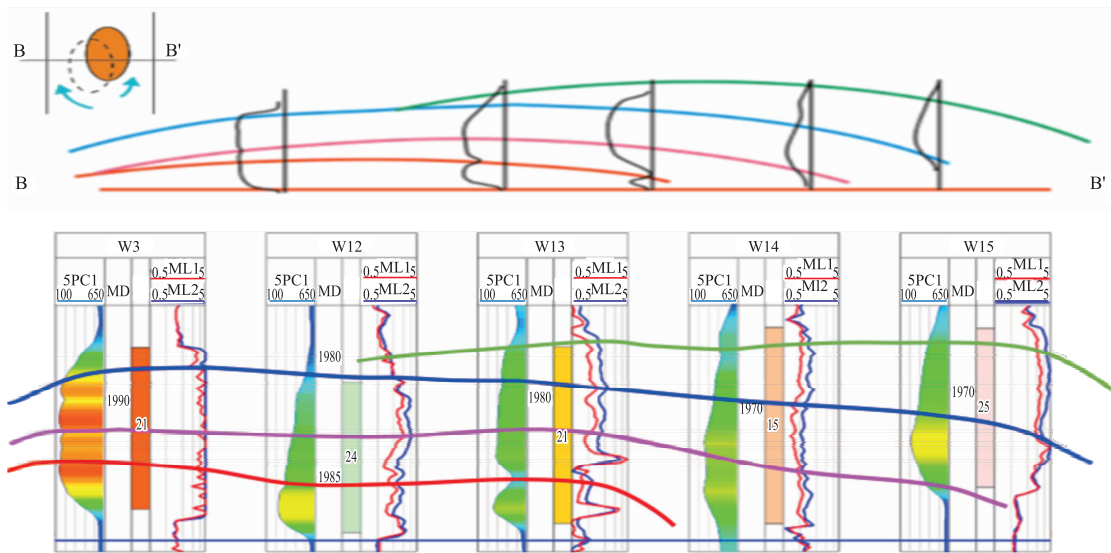


图 12 复合心滩坝垂直水流方向演化过程

Fig. 12 Evolution process of composite sand bar vertical flow direction

### 5 结论

心滩坝是辫状河储层的主要沉积单元,一般呈底平顶凸的透镜状分布于辫状水道之间。流水条件的不断变化影响着心滩坝的生长和演化,持续发生垂向加积、顺流加积和侧向加积等沉积作用,最终形成复合心滩坝砂体,具有十分复杂内部构型。对辫

状河沉积复合心滩坝构型的精细刻画,能够增强对高含水期储层结构的认识,促进剩余油开发。

主要结论与认识如下:

1)复合心滩坝砂体具有典型的单井构型相特征,通过分析测井曲线的幅度、圆滑或锯齿程度、砂体厚度和隔层等,可以将其分为切叠型、单夹层型、多夹层型和薄砂型构型。

2)地震属性对复合心滩坝的单井构型相具有一

定的辨识度,可以通过多属性分析辨识单期薄砂、含厚砂构型、两期等厚砂体和多期砂体等构型模式。

3)地震构型分析方法通过预测地震构型相和构型边界的平面变化特征,为井间砂体构型预测提供了客观数据支持,利于井震结合精细表征砂体沉积构型。

#### 参考文献:

- [1] MIALL A D. Architectural—element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits [J]. *Earth—Science Reviews*, 1985, 22(4): 261—308.
- [2] 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.  
YUE D L, WU S H, LIU J M. An accurate method for anatomizing architecture of subsurface reservoir in point bar of meandering river[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(4): 99—103. (In Chinese)
- [3] 马世忠, 孙雨, 范广娟, 等. 地下曲流河道单砂体内薄夹层建筑结构研究方法[J]. *沉积学报*, 2008, 26(4): 632—639.  
MA S Z, SUN Y, FAN G J, et al. The method for studying thin interbed architecture of burial meandering channel sandbody[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(4): 632—639. (In Chinese)
- [4] 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(增刊1): 111—121.  
WU S H, YUE D L, LIU J M, et al. Study on hierarchical modeling for reservoir architecture of underground paleochannel [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2008, 38(Suppl 1): 111—121. (In Chinese)
- [5] 吴胜和, 纪友亮, 岳大力, 等. 碎屑沉积地质体构型分级方案探讨[J]. *高校地质学报*, 2013, 19(1): 12—22.  
WU S H, JI Y L, YUE D L, et al. Discussion on hierarchical scheme of architectural units in clastic deposits[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2013, 19(1): 12—22. (In Chinese)
- [6] 岳大力, 胡光义, 李伟, 等. 井震结合的曲流河储层构型表征方法及其应用: 以秦皇岛 32—6 油田为例[J]. *中国海上油气*, 2018, 30(1): 99—109.  
YUE D L, HU G Y, LI W, et al. Meandering fluvial reservoir architecture characterization method and application by combining well logging and seismic data: A case study of QHD32—6 oilfield[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2018, 30(1): 99—109. (In Chinese)
- [7] 胡光义, 陈飞, 范廷恩, 等. 基于复合砂体构型样式的河流相储层细分对比方法[J]. *大庆石油地质与开发*, 2017, 36(2): 12—18.  
HU G Y, CHEN F, FAN T E, et al. Subdividing and comparing method of the fluvial facies reservoirs based on the complex sandbody architectures[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2017, 36(2): 12—18. (In Chinese)
- [8] 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.  
FAN T E, WANG H F, HU G Y, et al. Anatomy method of composite sand body architecture in offshore oilfield and its application[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2018, 30(4): 102—112. (In Chinese)
- [9] 吴小军, 苏海斌, 张士杰, 等. 砂砾质辫状河储层构型解剖及层次建模: 以新疆油田重 32 井区齐古组油藏为例[J]. *沉积学报*, 2020, 38(5): 933—945.  
WU X J, SU H B, ZHANG S J, et al. Architecture anatomy and hierarchical modeling of sand—gravel braided river reservoirs: A case study of Zhong32 wells area, Qigu formation reservoir, Fengceng oilfield [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(5): 933—945. (In Chinese)
- [10] 胡光义, 肖大坤, 范廷恩, 等. 河流相储层构型研究新理论、新方法: 海上油田河流相复合砂体构型概念、内容及表征方法[J]. *古地理学报*, 2019, 21(1): 143—159.  
HU G Y, XIAO D K, FAN T E, et al. New theory and method of fluvial reservoir architecture study: Concepts, contents and characterization of offshore oilfield fluvial compound sand—body architecture [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2019, 21(1): 143—159. (In Chinese)
- [11] 肖佃师, 张飞飞, 卢双舫, 等. 井震联合识别复合砂体中单一河道: 以朝 44 区块扶余油层为例[J]. *石油地球物理勘探*, 2016, 51(1): 148—157.  
XIAO D S, ZHANG F F, LU S F, et al. Single channel identification in compound sand bodies by well and seismic data integration: An example in area of Chao 44 region, Fuyu oilfield [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, 51(1): 148—157. (In Chinese)
- [12] 王海峰, 范廷恩, 胡光义, 等. 海上油田开发中后期砂岩储层构型剖析与表征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(1): 114—125.  
WANG H F, FAN T E, HU G Y, et al. Analysis and characterization of sandstone reservoir architecture in middle and late stages of offshore oilfield development

- [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(1): 114–125. (In Chinese)
- [13] 姚舒萍,李少华,王军,等. 辫状河内部构型递进式建模方法[J]. *物探化探计算技术*. 2019, 41(2): 257–262.  
YAO S P, LI S H, WANG J, et al. Progressive modeling method of braided river internal architecture[J]. *Computing techniques for geophysical and geochemical exploration*. 2019, 41(2): 257–262.
- [14] 王燕, 杨少春, 吴力耘, 等. 辫状河三角洲水下分流河道储层构型研究[J]. *物探化探计算技术*. 2014, 36(5): 613–618.  
WANG Y, YANG S C, WU L Y, et al. Study on architectural element in underwater distributary channel of braided river delta. *Computing techniques for geophysical and geochemical exploration*. 2014, 36(5): 613–618.
- [15] 王延光, 李皓, 李国发, 等. 一种用于薄层和薄互层砂体厚度估算的复合地震属性[J]. *石油地球物理勘探*, 2020, 55(1): 153–160.  
WANG Y G, LI H, LI G F, et al. A composite seismic attribute used to estimate the sand thickness for thin bed and thin interbed[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2020, 55(1): 153–160. (In Chinese)
- [16] 罗浩然, 尹成, 丁峰, 等. 概率神经网络的平滑参数分析及在地震属性分析中的应用[J]. *石油物探*, 2017, 56(4): 551–558.  
LUO H R, YIN C, DING F, et al. The smoothing parameter analysis of probabilistic neural network and its application in seismic attribute analysis[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2017, 56(4): 551–558. (In Chinese)
- [17] 丁峰, 胡光义, 尹成, 等. 基于地质信息约束的概率神经网络地震反射模式预测方法[J]. *中国海上油气*, 2018, 30(1): 127–131.  
DING F, HUG Y, YIN C, et al. A method under the constraint of geological information for prediction of seismic reflection patterns with probabilistic neural network[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2018, 30(1): 127–131. (In Chinese)
- [18] ZHANG D, HUANG X R, FAN T E, et al. Fluvial reservoir architecture interpretation below the seismic resolution in an offshore oilfield[J]. *Interpretation*, 2021, 9(3): T623–T635.
- [19] 张栋, 黄旭日, 范廷恩, 等. 稀疏井网地震分辨率以下复合砂体构型地震检测方法及应用[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(12): 4874–4886.  
ZHANG D, HUANG X R, FAN T E, et al. Seismic detection method and application of composite sand body architecture below seismic resolution with sparse well spacing[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(12): 4874–4886. (In Chinese)

## Application of seismic architecture analysis method in characterization of braided river reservoir in Shengtuo oilfield

CUI Wenfu<sup>1</sup>, HUANG Xuri<sup>2,3</sup>, TANG Jing<sup>2,3</sup>, ZHANG Dong<sup>2,3</sup>, CHEN Yonghong<sup>2,3</sup>

(1. Shengli Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257051, China;

2. School of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** The complex architecture of braided river sedimentary sand body reservoir is the fundamental reason for controlling the connectivity between sand bodies, which restricts the development of remaining oil in clastic sedimentary reservoirs. In the past, the precision of sand architecture characterization based on well data was determined by the degree of well control. The prediction between wells is uncertain due to a lack of data support. Therefore, the key to detailed architecture characterization is to use seismic data to predict between wells. The research shows that the seismic recognizable architecture mode can be determined by the single well architecture facies of the composite sand bar combined with the seismic forward response. We used the seismic architecture analysis method to predict the plane distribution characteristics of seismic architecture facies and architecture boundaries, which can provide objective data support for the prediction between wells.

**Keywords:** reservoir architecture; composite sand bar; single well architecture facies; seismic architecture facies; architecture boundary