

# 基于深度学习地震多属性融合的海上少井条件下河道型砂体构型解释 ——以西湖凹陷X气田为例

王喜鑫<sup>1,2</sup>, 倪雪儿<sup>1</sup>, 李少华<sup>1</sup>, 张昌民<sup>1</sup>, 段冬平<sup>3</sup>, 刘英辉<sup>3</sup>, 丁芳<sup>3</sup>, 李强强<sup>1</sup>

1 长江大学地球科学学院; 2 甘肃省油气资源研究重点实验室/中国科学院西北生态环境资源研究院;

3 中海石油(中国)有限公司上海分公司

**摘要** 砂体内部建筑结构(构型)控制了储层非均质性,进一步控制着油水运动规律。尤其在油气田开发中后期,砂体构型的精细解释是明确剩余油气分布规律及指导油气田进一步高效开发的关键。以东海陆架盆地西湖凹陷X气田始新统平湖组2号砂组为例,基于少井条件,以地震沉积学与构型分析理论为指导,采用聚类分析地震属性融合与深度学习地震属性融合相结合的方法,对河流相储层进行砂体构型精细解释。结果表明:单一地震属性与井点砂岩厚度的相关性较差,多种地震属性的聚类融合一定程度上可以提高砂体预测能力,但其所反映的砂体边界模糊不清。在聚类分析地震属性融合的基础上,通过建立虚拟井增加深度学习的样本数量,进而采用深度学习地震属性融合方法,对15种地震属性进行无差融合,有效提高了砂体预测及河道边界刻画的能力,消除了聚类地震属性融合图中的异常高值区。明确了研究区平湖组2号砂组河道型砂体5级、4级构型的平面展布特征以及井间砂体叠置关系:2号砂组单一河道呈曲流特征展布,弯曲指数为1.63,砂体以侧向切叠为主,宽度为150~480 m,点坝跨度为154~366 m。

**关键词** 少井条件; 地震属性; 深度学习; 构型解释; 平湖组; 西湖凹陷

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

## 0 前言

河流相储层是中国最重要的油气储层类型之一。由于河道频繁迁移、改道,河道砂体在空间上相互叠置、切割,因此河道储层非均质性较强<sup>[1-3]</sup>。在油气田开发的中后期,储层强烈的非均质性使剩余油气的分布规律更加复杂<sup>[4]</sup>,造成油气田进一步高效开发及提高采收率的难度较大,传统的沉积微相研究不能满足油气田开发中后期的生产需求,亟需对地下的河流相储层构型进行深入研究<sup>[5]</sup>。

储层构型研究的实质是描述储层内部的非均质性,对于油气储层而言,主要用于指导剩余油气的挖潜,从而提高油气采收率<sup>[6-7]</sup>。自Miall<sup>[8]</sup>提出构型分析方法至今,针对古代沉积、现代沉积的构型解释方法不断完善。随着储层构型理论以及其他

学科的发展,储层构型的研究经历了多方面的转变:其一是从野外露头 and 现代沉积到地下储层;其二是从简单的剖面露头测量到多种新技术新手段的综合应用,以三维探地雷达<sup>[9]</sup>、无人机智能摄影<sup>[10]</sup>的应用为典型代表;其三是从河流沉积体系到其他沉积体系。

针对地下储层,国内学者基于密井网信息,应用“层次分析、模式拟合、多维互动、动态验证”的思路对我国陆上油气田进行了深入的构型研究,取得了丰富的研究成果<sup>[11-15]</sup>。然而,在海上油气田,由于开发成本较高,钻井数量较少且井距较大,较为成熟的陆上多井构型分析方法不再适用<sup>[15]</sup>。针对海上少井条件,需要多角度、多维数据、多种技术手段来完善“以地震信息为导向、井震结合”的构型表征方法。

本文以东海陆架盆地西湖凹陷X气田平湖组2

收稿日期:2022-12-15; 改回日期:2023-04-23

本文受国家自然科学基金项目“少井条件下的储层不确定性建模与模型优选方法”(编号:42172172)、中国石油科技创新基金项目“陆相混合沉积不同岩性组合的储层质量差异机理”(编号:2021DQ02-0106)联合资助

**第一作者:** 王喜鑫,副教授,博士,硕士生导师,主要从事储层表征与建模方面的研究工作。通信地址:430100 湖北省武汉市蔡甸区大学路111号;E-mail: wangxixin86@hotmail.com

**通信作者:** 李强强,硕士研究生,主要从事储层表征与建模方面的研究工作。通信地址:430100 湖北省武汉市蔡甸区大学路111号;E-mail: 2276347029@qq.com

号砂组河道型储层为例,使用聚类分析地震属性融合和深度学习地震属性融合的手段对少井区河道型砂体构型进行解释。研究表明,深度学习属性融合可以显著提高砂体预测能力,砂体的边界刻画更为清晰,多级次构型要素的规模符合已有定量模式的认知。

## 1 地质概况

西湖凹陷是东海陆架盆地东部坳陷带的一部分,总体呈北北东走向(图1a)<sup>[16-17]</sup>。西湖凹陷新生界地层发育齐全,自下向上发育始新统平湖组,渐新统花港组,中新统龙井组、玉泉组和柳浪组,上新统三潭组及更新统东海群<sup>[18]</sup>。平湖组沉积期主要为河流、三角洲、海湾沉积环境,整体发育深灰色泥

岩与浅灰色细—粗砂岩互层,夹煤层,厚度平均在2 000 m左右。平湖组自上而下细分为13个砂组,本文研究目的层为2号砂组。2号砂组以曲流河沉积为主(图1b),岩性主要为粉砂岩、泥质粉砂岩。

研究区X气田主体位于西湖凹陷西部斜坡带,面积约为25 km<sup>2</sup>,截至目前已钻井5口(图1b, 11号井等井),井距为110~560 m,属于典型的少井型开发油气田。这5口井在2号砂组均钻遇2~3套砂体(薄层单砂体),总体上单砂体厚度较薄(平均为5.12 m),岩性主要为粉砂岩,呈泥包砂特征。在2号砂组的顶底所限定的时窗内,地震分辨率较低(主频为30 Hz),将钻遇的复合砂体标定在波谷上,强波谷为多套砂体的综合表现(图2)。如图2

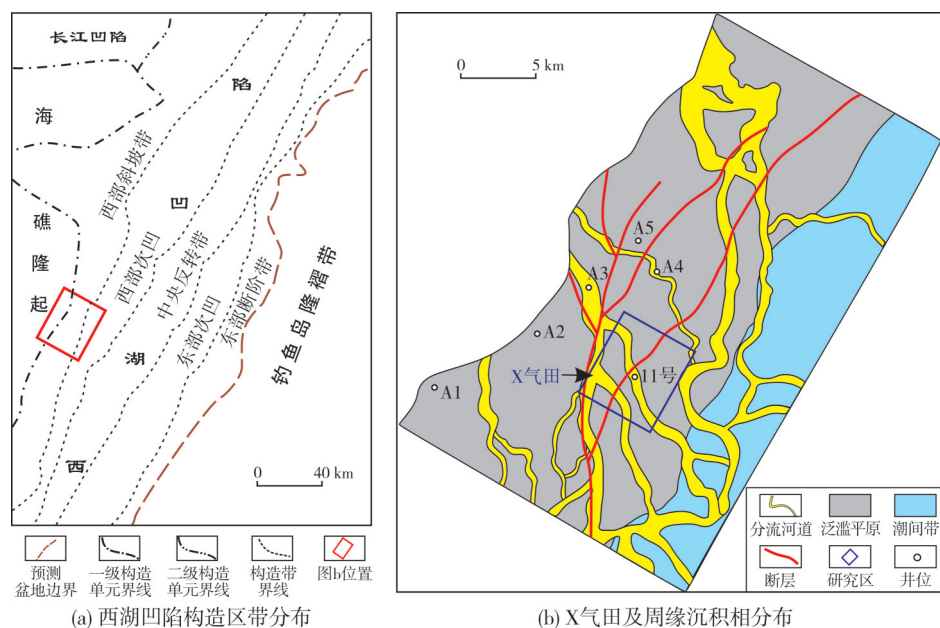


图1 西湖凹陷构造带划分及X气田周缘平湖组2号砂组沉积相图(据文献[19])

Fig. 1 Structural belt of Xihu Sag and sedimentary facies plan of No. 2 sand group of Pinghu Formation around X gas field (cited from reference [19])

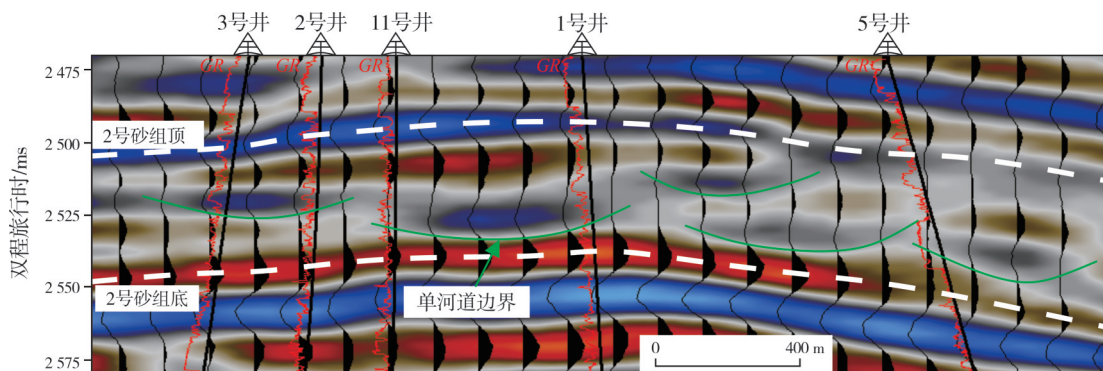


图2 X气田平湖组2号砂组连井地震解释剖面(剖面位置见图8)

Fig. 2 Inter-well seismic interpretation section of No. 2 sand group of Pinghu Formation in X gas field (location is shown in Fig. 8)

所示:2号井和3号井之间波谷较为连续;11号井和1号井处于波谷能量减弱的位置;5号井波谷宽度较大,能量稍弱。

## 2 聚类分析地震属性融合

地震属性分析及地层切片可以较好地预测砂体分布,在地震分辨率较高时甚至可以分辨单一成因砂体的空间展布。本次研究提取了X气田平湖组2号砂组15种层间地震属性,主要包括振幅/能量类、波长类、频率及相位类属性,其中振幅/能量类属性平面图可以反映曲流河道带的展布样式和方向。通过建立地震属性与井点地震属性的相关关系(表1),可见单一属性与钻井砂岩厚度的相关系数较低,在0.114~0.540之间,难以对砂体构型进行精细解释。

表1 X气田平湖组2号砂组砂岩厚度与单一地震属性相关系数

Table 1 Correlation coefficients between sandstone thickness and single seismic attribute of No. 2 sand group of Pinghu Formation in X gas field

地震属性	相关系数	地震属性	相关系数
均方根振幅	0.540	总能量	0.511
总峰值振幅	0.535	能量之半	0.447
总震级	0.494	平均能量	0.492
总谷值振幅	0.427	平均振幅	0.430
总振幅	0.401	平均峰值	0.125
弧长	0.202	穿零次数	0.177
平均瞬时频率	0.114	平均瞬时相位	0.152

本文采用聚类分析地震属性融合的方法提高融合地震属性与钻井砂岩厚度的相关性,进而为深度学习地震多属性融合提供虚拟学习样本。在提取的地震属性中,有5种地震属性与砂岩厚度的相关性大于0.49,分别是均方根振幅、总能量、总峰值振幅、总震级、平均能量(表1)。通过分析这5种地震属性的自相关性,选择相关性最高的均方根振幅和总能量作为融合的基础属性,并以相关系数作为两种属性的权重值,采用加权平均的方法计算融合地震属性。如图3所示,图中颜色代表融合属性值(无量纲),主要分布在0.2~0.6之间,可以清晰分辨出X气田平湖组2号砂组的砂体带状展布特征,砂体宽度在290~1 250 m之间。相应地,融合地震属性与井点砂岩厚度的相关性明显提高,达到0.79(图4)。聚类分析地震属性融合可作为深度学习地震多属性融合的基础。

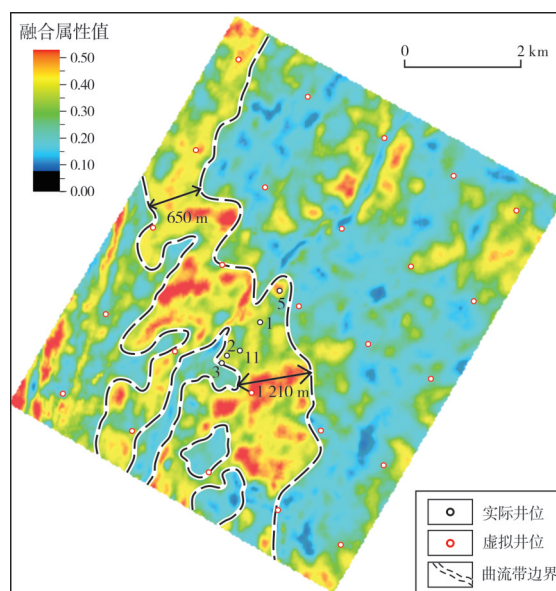


图3 X气田平湖组2号砂组聚类分析融合地震属性及虚拟井设置

Fig. 3 Fusion seismic attribute plan of No. 2 sand group of Pinghu Formation based on cluster analysis and virtual well setting in X gas field

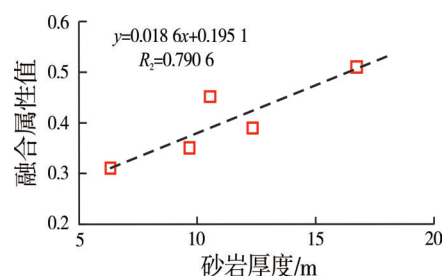


图4 X气田平湖组2号砂组砂岩厚度与融合地震属性相关关系

Fig. 4 Correlation between sandstone thickness and fusion seismic attribute of No. 2 sand group of Pinghu Formation in X gas field

## 3 深度学习地震多属性融合

在深度学习地震多属性融合过程中,本文使用Fitnet函数拟合神经网络对15种地震属性进行无差融合。Fitnet是一种前馈网络,用于拟合输入输出关系<sup>[20]</sup>。经过在Matlab软件中多次测试,本文构建的地震属性融合神经网络模型结构如图5所示,该网络包括1个输入层、3个隐含层以及1个输出层。输入层的主要作用是把这些自变量属性值输入到神经网络中。而隐含层的主要作用则是执行神经网络内部的复杂运算,隐含层的传递函数调用Matlab软件集成的Tansig函数,并设计45个神经单元参与神经网络的内部运算。一个具有隐含层和足够多隐含层神经元的前馈网络可以适应任何有限变量模型输入输出映射问题。

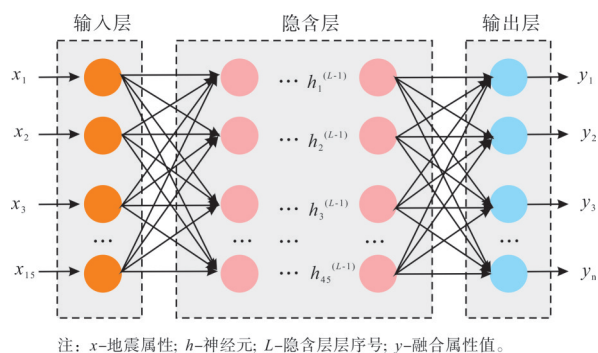


图5 函数拟合神经网络示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the function fitting neural network

设计好神经网络的组织架构后,需要对神经网络进行学习训练。将多种地震属性与钻井砂岩厚度作为输入层,研究区范围内的砂岩厚度作为输出层进行训练。Fitnet 函数拟合神经网络训练效果依赖于学习样本的数量。然而,研究区只有5口钻井数据,即在2号砂组只有5个砂岩厚度信息,学习样本较少。本次研究设置15口虚拟井,提取虚拟井井旁聚类分析融合地震属性值,根据聚类分析融合地震属性与砂岩厚度的相关关系计算虚拟井点位置的砂岩厚度,将其添加到学习样本中。为了客观反映X气田砂体发育情况,虚拟井均匀设置在整个研究区内(图3)。本文选用了Trainlm 函数完成神经网络的学习训练。通过随机处理将输入数据的80%划分为训练集,20%划分为验证集,经过反复迭代更新,得到输入与输出之间的非线性关系(图6),可以看出神经网络拟合曲线与砂岩厚度拟合较好。通过验证集进行误差检验,直至拟合精度达到85%,最后输出X气田2号砂组深度学习融合地震属性图(图7)。

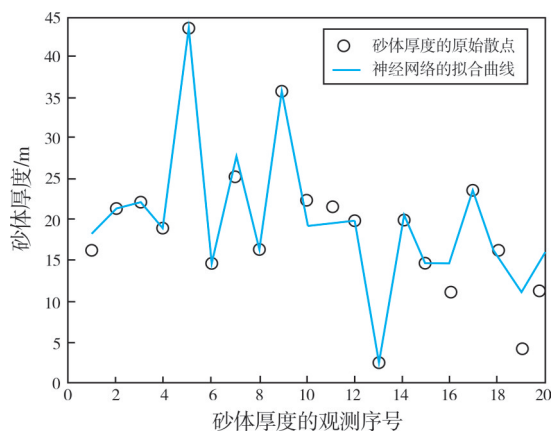


图6 X气田平湖组2号砂组砂岩厚度与神经网络拟合曲线

Fig. 6 Sandstone thickness and neural network fitting curve of No. 2 sand group of Pinghu Formation in X gas field

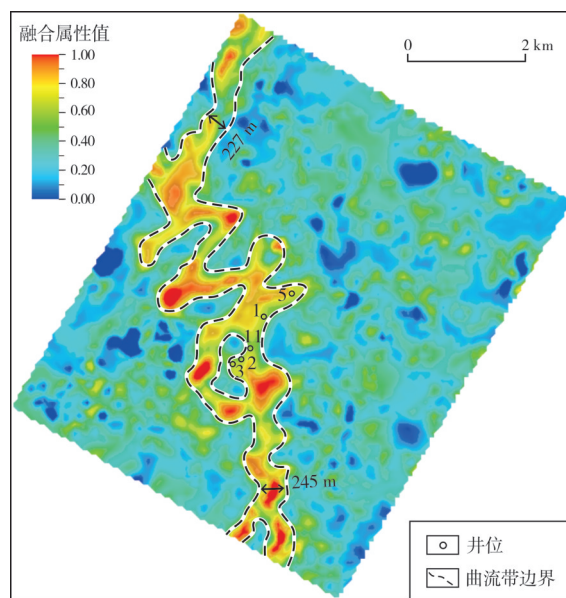


图7 X气田平湖组2号砂组深度学习融合地震属性图

Fig. 7 Fusion seismic attribute plan based on deep learning of No. 2 sand group of Pinghu Formation in X gas field

深度学习融合地震属性值分布在0~1(无量纲)之间,融合属性值越高,表示砂岩厚度越大。深度学习融合属性与井点砂岩厚度的相关性更高,可进一步提高砂体构型解释精度,降低了构型解释的多解性。与聚类分析融合属性图(图3)对比可见:在深度学习融合属性图中(图7),图3研究区东北部的一些土豆状的高值区被有效消除,而且条带状的高值区所反映的砂体边界更为清晰。根据 Leeder<sup>[21]</sup>与 Lorenz<sup>[22]</sup>的经验公式(1)与(2)计算曲流带宽度:

$$b_c = 6.8h^{1.54} \quad (1)$$

$$b_m = 7.44b_c^{1.01} \quad (2)$$

式中: $b_c$ 为河流满岸宽度,m; $h$ 为河流满岸深度,m; $b_m$ 为单一曲流带宽度,m。计算所得的X气田单一曲流带宽度在200~350 m之间,聚类分析融合地震属性所表现的单一河道带宽度在290~1 250 m之间(图3),深度学习融合属性所体现出的河道宽度在150~480 m之间(图7),可见后者更加符合已有定量模式的认知。

#### 4 井震结合砂体构型解剖

基于层次分析法,对复合曲流河道砂体进行逐级次的解剖,将曲流河储层划分为复合曲流带、单一曲流带、点坝以及点坝体内部侧积体等4个不同构型级次来进行表征。其中,单一曲流带为5级构型单元,单一点坝、废弃河道为4级构型单元,点坝

内部侧积体为3级构型单元。根据现有资料情况及生产需要,本次研究对X气田2号砂组的5级、4级构型进行精细解释。

#### 4.1 单一曲流带(5级)构型解释

根据单井构型单元识别成果及融合属性与砂岩厚度的关系,采用截断方法将融合属性值大于0.26的区域定义为曲流带,在构型模式的指导下完成了曲流带级次构型解释(图8)。X气田平湖组2号砂组主体发育1条单一曲流带,单一曲流带砂体由北向南呈窄条带状蜿蜒展布,曲流带弯曲指数为1.63,宽度为150~480 m。在地震剖面上,曲流带边界地震响应特征明显,表现为连续强波谷特征(图2);5口井分别钻遇不同的河道砂体,多个河道砂体相互搭接。在连井剖面上共刻画出5个河道(图9),其中,2号井与3号井钻遇同一河道,11号井与1号井钻遇同一河道,5号井单独钻

遇复合河道,1号井与5号井钻遇的砂体存在一定的搭接关系。

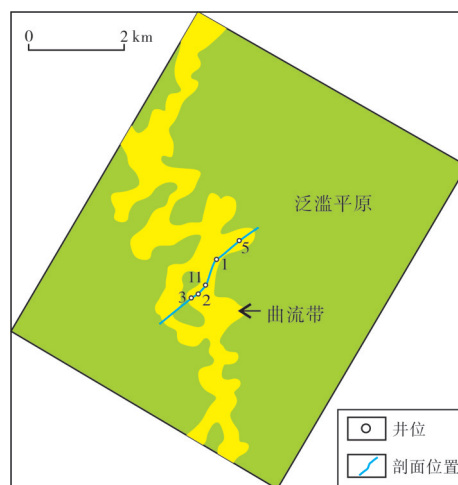


图8 X气田平湖组2号砂组曲流带平面构型分布  
Fig. 8 Plane distribution of meandering zone architecture of No. 2 sand group of Pinghu Formation in X gas field

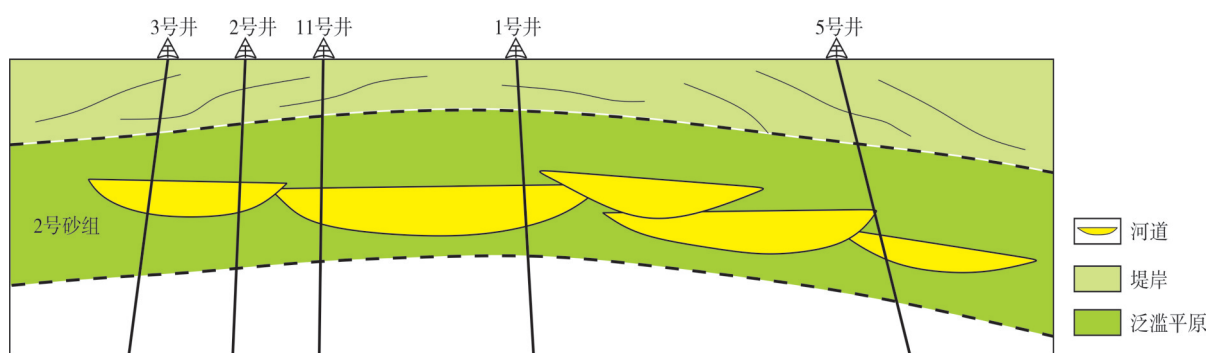


图9 X气田平湖组2号砂组连井曲流带构型解释剖面  
Fig. 9 Inter-well architecture interpretation of meandering zone of No. 2 sand group of Pinghu Formation in X gas field

#### 4.2 单一点坝(4级)构型解释

在曲流河构型模式<sup>[1]</sup>的指导下,结合深度学习融合地震属性以及单井构型解释<sup>[13]</sup>,在X气田平湖组2号砂组曲流带内部识别出曲流河道、废弃河道、点坝、泛滥平原等4级构型单元(图10)。点坝厚度比曲流河道大,融合属性值高,采用截断方法将融合属性值大于0.43的区域定义为点坝,融合属性值介于0.26~0.43之间的定义为曲流河道,而废弃河道的识别主要是根据曲流河截弯取直的模式来识别。受到后期河道切割改造,天然堤、河漫滩、决口扇等几类微相的砂体较薄,基于地震数据难以区分,统称为溢岸。X气田平湖组2号砂组主体曲流河道宽度为60~120 m,点坝跨度为154~366 m。

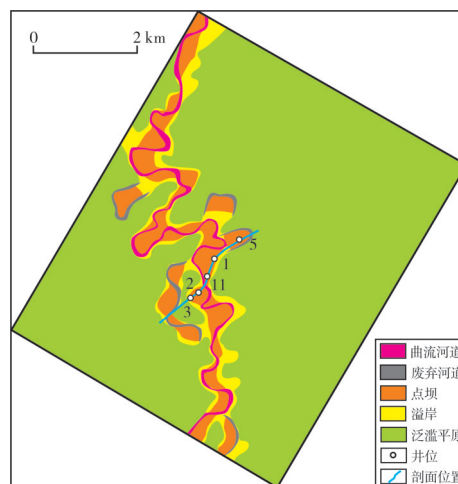


图10 X气田平湖组2号砂组4级构型单元平面分布  
Fig. 10 Plane distribution of fourth-order architecture units of No. 2 sand group of Pinghu Formation in X gas field

在5级构型剖面解释(图9)、4级构型平面解释(图10)的约束下,结合地震波形及测井曲线特征(图2),明确了X气田2号砂组的井间4级构型展布特征(图11)。在连井剖面上,砂体主要以侧向切叠为主。3号井发育3期点坝砂体,2号井发育3期点坝及溢岸,3号井与2号井平面上属同一复合点坝,连通性较好。11号井主要发育点坝,上部的点坝与1号井属于同一点坝,然而与2号井的点坝砂体不连通。1号井与5号井早期分别沉积点坝砂体,根据地

震剖面的波形特征判断,1号井a砂体与5号井的b砂体有间接搭接关系,但不能确定是否连通。实际地层压力测试资料显示,5号井b砂体原始地层压力系数为1.17,现今地层压力系数为1.01,因为只有1号井a砂体射孔生产,因此可以判断1号井a砂体与5号井的b砂体是连通的。井间构型解释成果与生产制度的综合分析表明,2号井与3号井的3套点坝砂体中天然气富集(2021年3号井射开2号砂组的①、④两套砂体,日产气量达到5 000 m<sup>3</sup>)。

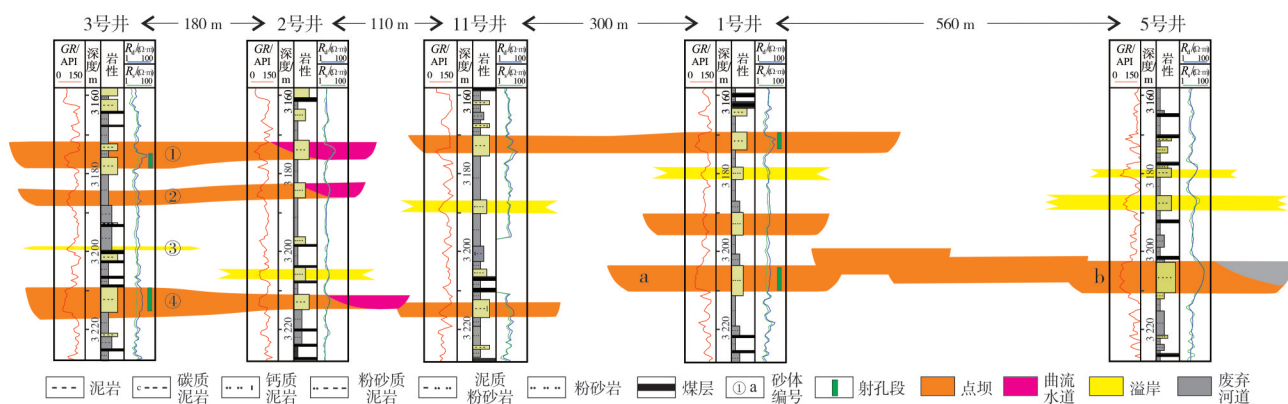


图11 X气田平湖组2号砂组连井4级构型解释剖面

Fig. 11 Inter-well interpretation section of fourth-order architecture of No. 2 sand group of Pinghu Formation in X gas field

## 5 结论

以东海陆架盆地西湖凹陷平湖组2号砂组为例,总结了一套适用于海上少井条件下的河道型砂体构型解释方法。

(1)聚类分析地震属性融合,虽然在一定程度上提高了属性与砂体厚度的相关性,能够识别复合砂体的展布特征,然而其预测的砂体宽度偏大而且边界不清。在此基础上,通过设置虚拟井增加深度学习地震属性融合的学习样本,充分挖掘地震地质信息,对多种地震属性进行无差融合,得到了深度学习融合地震属性。依据深度学习融合地震属性,可以明显提高砂体预测能力,河道边界更为清晰,而且预测的砂体宽度更符合定量模式的认知。

(2)综合深度学习融合地震属性与单井构型解释,进一步明确了研究区河道型砂体构型的展布特征:平湖组2号砂组主要发育一条曲流带(5级构型单元),曲流带弯曲指数为1.63,宽度为150~480 m;曲流带内部发育曲流河道、废弃河道、点坝等4级构

型单元,单一曲流河道宽度为60~120 m,点坝跨度为154~366 m。对砂体相互叠接关系的精细刻画,推动了富天然气目标砂体的高效开发。

## 参考文献

- [1] 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): 101-109.  
YUE Dali, WU Shenghe, TAN Heqing, et al. An anatomy of paleochannel reservoir architecture of meandering river reservoir: a case study of Guantao Formation, the West 7th block of Gudong Oilfield [J]. Earth science frontiers, 2008, 15(1): 101-109.
- [2] 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.  
ZHOU Yinbang, WU Shenghe, JI Bingyu, et al. Research progress on the characterization of fluvial reservoir architecture [J]. Advances in earth science, 2011, 26(7): 695-702.
- [3] 李阳. 河流相储层沉积学表征[J]. 沉积学报, 2007, 25(1): 48-52.  
LI Yang. Characterization of sedimentology in fluvial facies reservoir [J]. Acta sedimentologica sinica, 2007, 25(1): 48-52.

- [4] 杨少春, 赵晓东, 钟思琰, 等. 辫状河心滩内部非均质性及对剩余油分布的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(3): 1066–1074.  
YANG Shaochun, ZHAO Xiaodong, ZHONG Siying, et al. Inner heterogeneity within braided bar of braided river reservoir and its influence on remaining oil distribution[J]. Journal of Central South University (science and technology), 2015, 46(3): 1066–1074.
- [5] 刘钰铭, 侯加根, 王连敏, 等. 辫状河储层构型分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009, 33(1): 7–11, 17.  
LIU Yuming, HOU Jiagen, WANG Lianmin, et al. Architecture analysis of braided river reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum (edition of natural sciences), 2009, 33(1): 7–11, 17.
- [6] 商晓飞, 侯加根, 孙福亭, 等. 砂质滩坝储集层内部结构特征及构型模式: 以黄骅坳陷板桥油田古近系沙河街组为例[J]. 石油学报, 2014, 35(6): 1160–1171.  
SHANG Xiaofei, HOU Jiagen, SUN Futing, et al. Architectural characteristics and sedimentary models of beach-bar sandstone reservoirs: a case study of the Paleogene Shahejie Formation in Banqiao Oilfield, Huanghua Depression[J]. Acta petrolei sinica, 2014, 35(6): 1160–1171.
- [7] 岳大力, 吴胜和, 林承焰, 等. 山东五号桩油田桩74块剩余油分布规律及挖潜措施[J]. 现代地质, 2005, 19(3): 441–448.  
YUE Dali, WU Shenghe, LIN Chengyan, et al. Remaining oil distribution and its potential exploitation measures in block Zhuang 74 of Wuhaozhuang Oilfield, Shandong Province[J]. Geoscience, 2005, 19(3): 441–448.
- [8] MIALD A D. Reservoir heterogeneities in fluvial sandstones: lessons from outcrop studies[J]. AAPG bulletin, 1988, 72(6): 682–697.
- [9] 曹淞, 冯晷, 鹿琪, 等. 探地雷达在古河道砂岩体沉积储层刻画中的应用[J]. 世界地质, 2016, 35(1): 223–234.  
CAO Song, FENG Xuan, LU Qi, et al. Application of GPR in depicting sedimentary reservoir of paleochannel sandstone bodies[J]. Global geology, 2016, 35(1): 223–234.
- [10] 印森林, 谭媛元, 张磊, 等. 基于无人机倾斜摄影的三维露头地质建模: 以山西吕梁市坪头乡剖面为例[J]. 古地理学报, 2018, 20(5): 909–924.  
YIN Senlin, TAN Yuanyuan, ZHANG Lei, et al. 3D outcrop geological modeling based on UAV oblique photography data: a case study of Pingtouxian section in Lüliang City, Shanxi Province [J]. Journal of palaeogeography, 2018, 20(5): 909–924.
- [11] WANG Xixin, HOU Jiagen, LIU Yuming, et al. Studying reservoir heterogeneity by Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Logic, case study of Es1x formation of the Wangguantun oil-field, China[J]. Journal of petroleum science and engineering, 2017, 156: 858–867.
- [12] 贾爱林. 中国储层地质模型20年[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 181–188.  
JIA Ailin. Research achievements on reservoir geological modeling of China in the past two decades[J]. Acta petrolei sinica, 2011, 32(1): 181–188.
- [13] 胡光义, 王海峰, 范廷恩, 等. 海上油田河流相复合砂体构型级次解析[J]. 古地理学报, 2021, 23(4): 810–823.  
HU Guangyi, WANG Haifeng, FAN Ting'en, et al. Analysis of fluvial compound sand-body architecture hierarchy in offshore oil field[J]. Journal of palaeogeography, 2021, 23(4): 810–823.
- [14] 张显文, 范廷恩, 张晶玉, 等. 河流相储层不连续界面地震响应特征研究[J]. 中国海上油气, 2021, 33(2): 106–113.  
ZHANG Xianwen, FAN Ting'en, ZHANG Jingyu, et al. Study on seismic response characteristics of fluvial reservoir discontinuous boundary[J]. China offshore oil and gas, 2021, 33(2): 106–113.
- [15] 郭敬民, 马佳国, 孙恩慧, 等. 曲流河储层精细等效表征新方法及其在开发中的应用: 以渤海湾盆地C油田为例[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(4): 55–62.  
GUO Jingmin, MA Jiaguo, SUN Enhui, et al. A new method for fine characterization of meandering river reservoir and its application in oilfield development: a case of C Oilfield, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum geology and recovery efficiency, 2021, 28(4): 55–62.
- [16] 冯晓杰, 蔡东升, 王春修, 等. 东海陆架盆地中生代构造演化特征[J]. 中国海上油气(地质), 2003, 17(1): 33–37.  
FENG Xiaojie, CAI Dongsheng, WANG Chunxiu, et al. The Meso-Cenozoic tectonic evolution in East China Sea Shelf Basin [J]. China offshore oil and gas (geology), 2003, 17(1): 33–37.
- [17] 张国华, 刘金水, 秦兰芝, 等. 西湖凹陷渐新统花港组大型辫状河沉积体系特征[J]. 中国海上油气, 2018, 30(3): 10–18.  
ZHANG Guohua, LIU Jinshui, QIN Lanzhi, et al. Characteristics of the large braided river depositional system of the Oligocene Huagang Formation in the Xihu Sag[J]. China offshore oil and gas, 2018, 30(3): 10–18.
- [18] 张银国. 东海西湖凹陷花港组油气地质条件与油气分布规律[J]. 石油实验地质, 2010, 32(3): 223–226, 231.  
ZHANG Yinguo. Petroleum geology and hydrocarbon distribution pattern of Huagang Formation in the Xihu Sag of the East China Sea[J]. Petroleum geology and experiment, 2010, 32(3): 223–226, 231.
- [19] XU Huiyuan, GEORGE S C, HOU Dujie, et al. Petroleum sources in the Xihu Depression, East China Sea: evidence from stable carbon isotopic compositions of individual n-alkanes and isoprenoids[J]. Journal of petroleum science and

- engineering, 2020, 190: 107073.
- [20] Ahmad AL-ALLAF O N. Cascade-forward vs. function fitting neural network for improving image quality and learning time in image compression system[C]// Proceedings of the World Congress on Engineering 2012, July 4-6, 2012, London.
- [21] LEEDER M R. Fluvialite fining-upwards cycles and the magnitude of palaeochannels[J]. Geological magazine, 1973, 110 (3): 265-276.
- [22] LORENZ J C. Determination of widths of meander-belt sandstone reservoirs from vertical downhole data: ABSTRACT[J/OL]. AAPG Bulletin, 1983, 67. <http://dx.doi.org/10.1306/03b5b281-16d1-11d7-8645000102c1865d>.

编辑:董庸

## Architecture interpretation of channel sand body under offshore few well conditions based on deep learning seismic multi-attributes fusion: a case of X gas field in Xihu Sag, Donghai Shelf Basin

WANG Xixin, NI Xueer, LI Shaohua, ZHANG Changmin, DUAN Dongping,  
LIU Yinghui, DING Fang, LI Qiangqiang

**Abstract:** The internal architecture of sand body controls reservoir heterogeneity and further controls the movement law of oil and water. Especially in the middle and late stage of oil and gas field development, fine interpretation of sand body architecture is the key to clarify the distribution law of remaining oil and gas and guide the further efficient development of oil and gas fields. Taking the No. 2 sand group of Eocene Pinghu Formation of X gas field in Xihu Sag, Donghai Shelf Basin as an example, based on few well conditions, we make a fine interpretation of sand body architecture of fluvial reservoir guided by the theory of seismic sedimentology and architecture analysis. In this process, we apply the method of combining the seismic attributes fusion based on cluster analysis and the seismic attributes fusion based on deep learning. This study shows that the correlation between single seismic attribute and well point sandstone thickness is poor. The fusion of multiple seismic attributes can improve the ability of sand body prediction to a certain extent, but the predicted sand body boundary is not clear. Based on the conventional attribute fusion, we increase the number of samples for deep learning by establishing some virtual wells in regular grid, and further apply the deep learning seismic attribute fusion method to fuse 15 kinds of seismic attributes without difference. The deep learning of seismic integrated attributes effectively improves the ability of sand body prediction and channel boundary characterization, and eliminates the abnormal high value areas in the seismic attributes fusion map based on cluster analysis. The plane distribution and superposition relationship of the fifth-order and fourth-order channel sand body architecture of No. 2 sand group of Pinghu Formation are defined. The single channel of the No. 2 sand group in X gas field is characterized by meandering distribution, with bending index of 1.63, width of 150-480 m and point dam span of 154-366 m. This set of ideas and methods can be effectively promoted in areas with wide coverage of seismic data, but few well and uneven distribution.

**Key words:** few well conditions; seismic attributes; deep learning; architecture interpretation; Pinghu Formation; Xihu Sag

**WANG Xixin**, First author: PhD, Associate Professor at Yangtze University, mainly engaged in research on reservoir characterization and modeling. Add: No. 111 Daxue Rd., Caidian District, Wuhan, Hubei 430100, China

**LI Qiangqiang**, Corresponding author: a postgraduate, studying in the School of Geosciences, Yangtze University, major in reservoir characterization and modeling. Add: No. 111 Daxue Rd., Caidian District, Wuhan, Hubei 430100, China