

文章编号: 0253-2697(2018)07-0792-10 DOI:10.7623/syxb201807006

# 基于地震波形结构属性识别河流相砂体叠置区

张运龙<sup>1,2</sup> 丁峰<sup>2</sup> 尹成<sup>2</sup> 胡光义<sup>3</sup> 范廷恩<sup>3</sup> 张显文<sup>3</sup>

(1. 中国石油新疆油田公司 新疆克拉玛依 834000; 2. 西南石油大学地球科学与技术学院 四川成都 610500;  
3. 中海油研究总院有限责任公司 北京 100028)

**摘要:**在河流相储层中,砂体叠置现象非常普遍,砂体单层厚度相对较薄,横向变化复杂,受地震资料分辨率所限及断层发育的影响,砂体边界不易识别,增加了河流沉积砂体的储层预测难度。在前人研究的基础上,首先建立河流相沉积砂体叠置模型,正演分析叠置砂体在地震记录上的波形强弱、尖锐度、稳定性、对称性变化特征以及同相轴的连续性;其次通过模型验证在一个周期时窗上提取波形结构属性的有效性,并提出利用波形结构属性识别砂体叠置区的方法;最后应用实际资料,验证了基于波形结构属性识别砂体叠置区方法的可行性。

**关键词:**地震波;河流相;叠置砂体边界;波形结构属性;时窗

**中图分类号:**TE122.2

**文献标识码:**A

## The identification of fluvial sand-body superimposed area based on seismic waveform structure attributes

Zhang Yunlong<sup>1,2</sup> Ding Feng<sup>2</sup> Yin Cheng<sup>2</sup> Hu Guangyi<sup>3</sup> Fan Ting'en<sup>3</sup> Zhang Xianwen<sup>3</sup>

(1. PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Xinjiang Karamay 834000; 2. School of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Sichuan Chengdu 610500; 3. CNOOC Research Institute Co. Ltd., Beijing 100028, China)

**Abstract:** The phenomenon of sand-body superimposition is commonly seen in the fluvial facies reservoirs where the sand-body has thin single-layer thickness and complex lateral variation. Limited by seismic resolution and the influence of fault development, it is not easy to identify the sand-body boundary, which increases the difficulty in the reservoir prediction of fluvial sedimentary sand-body. Based on previous research, the model of fluvial sedimentary sand-body superimposition is set up firstly for forward analysis on the seismic records of superimposed sand-body, such as the changes in waveform strength, sharpness, stability and symmetry as well as the continuity of event. Then, the model is used to validate the effectiveness of waveform structure attributes extracted from a time window of a period. Meanwhile, this study also proposes the method of applying waveform structure attributes to identify sand-body superimposed area. Finally, the feasibility of such method is verified by practical application.

**Key words:** seismic wave; fluvial facies; superimposed sand-body boundary; waveform structure attributes; time window

**引用:**张运龙,丁峰,尹成,胡光义,范廷恩,张显文.基于地震波形结构属性识别河流相砂体叠置区[J].石油学报,2018,38(7):792-801.

**Cite:** ZHANG Yunlong, DING Feng, YIN Cheng, HU Guangyi, FAN Ting'en, ZHANG Xianwen. The identification of fluvial sand-body superimposed area based on seismic waveform structure attributes[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(7): 792-801.

随着油气勘探工作的推进,在中国东部渤海湾盆地陆续发现了一批大油田。渤海湾盆地的石油、天然气资源量大,油气资源丰度高,主要有胜利、辽河、华北、大港、冀东、渤海等油田。在渤海湾盆地已开发油田中,发现多个油藏的储层类型主要为河流相沉积砂体,砂岩单层厚度基本都低于地震调谐厚度以下,并表现出典型的多期河道砂体叠置的沉积特征<sup>[1-3]</sup>。

河流相是陆相环境中的一种重要沉积类型,其中,曲流河和辫状河沉积砂体是油气储集的良好场所<sup>[4]</sup>。

其沉积特征主要有:在纵向上厚薄不均,砂泥互层;横向上连续性强弱不定,岩性变化非常快;由于河道纵横向的迁移变化,导致沉积砂体的空间叠置关系异常复杂。对于储层开发来讲,需要解决储层的连通性和非均质性这两个关键问题<sup>[5]</sup>,在河流相砂体储层开发中显得尤为重要。因此,河流相叠置砂体的类型、连通性、内部规律成为了研究的重点,对于油气勘探开发有着重要意义。

针对河流相叠置砂体类型的研究,目前已趋于完

**基金项目:**国家科技重大专项(2016ZX05025-001-001)和中国海洋石油有限公司科技外协项目(CCL2016RCPS0110RSN)资助。

**第一作者及通信作者:**张运龙,男,1992年2月生,2015年获西南石油大学理学学士学位,现为西南石油大学地球科学与技术学院地质资源与地质工程专业硕士研究生,主要从事正演分析与地震属性解释研究工作。Email:942687172@qq.com

善,最典型的分类由胡光义<sup>[6-9]</sup>等提出,将河流相沉积叠置砂体划分为3种类型7类样式。但是,对于河流相叠置砂体的连通性、内部规律等问题,前人大多从测井、井震结合、波形分类、传统地震属性方面做了大量研究。刘钰铭<sup>[10]</sup>等对辫状河砂体储层进行了研究,根据测井资料对砂体内部进行了详细解剖,并建立模型探讨其内部剩余油分布模式;赵春明<sup>[11]</sup>等依据岩性和测井资料,采用层次分析法,对曲流河和辫状河两种河流砂体的内部连通模式进行了对比,并探讨了不同河流砂体的开发特征和影响因素;高玉飞<sup>[12]</sup>等采用单井分析方法并结合地震资料,分析了河流相砂体内部叠置特征;张京思<sup>[13]</sup>等根据钻井资料和地震资料应用正演模拟技术探讨识别砂体横向连通性问题;田鑫<sup>[14]</sup>等将地震波形分类、相干体属性分析应用于薄层砂体识别,取得了较好地应用效果;陈妍<sup>[15]</sup>等利用地震波形识别技术,并介绍了波形分析的主要参数峰度、偏度,较好地识别和刻画出主要的沉积微相;井涌泉<sup>[16]</sup>等应用精细波形分类技术识别砂体叠置模式,并选择波形分类的时窗为一个周期;范洪军<sup>[17]</sup>等通过测井和三维地震,采用地震波形分类技术,研究叠置砂体的平面分布特征;闵小刚<sup>[18]</sup>等综合应用井-震数据表征河流相储层非均质性,通过阻抗反演并提取振幅和相干信息,识别平面岩相变化、废弃河道、点坝及小断层的分布;曹卿荣<sup>[19]</sup>等应用地震属性分析技术刻画河道砂体,采

用沿层地震属性切片较好地描述了砂体的展布特征。

笔者提出利用波形结构属性识别河流相砂体叠置区的方法,依据前人总结的河流相叠置砂体类型建立模型,通过正演模拟分析其地震响应特征,提出在一个周期时窗上提取波形结构属性的方法,并利用波形结构属性分析识别河流相砂体叠置区,以达到提高油气田勘探和开发成功率的目的,为地质解释提供一种技术手段。

## 1 河流相叠置砂体的地震波形特征

根据砂体的沉积结构、空间形态和增生样式,胡光义<sup>[6-9]</sup>等提出,将河流相沉积叠置砂体划分为3种类型7类样式,分别为孤立型、堆叠型和侧叠型,其中孤立型包括决口扇、孤立河道和下切侵蚀河道3个小类,侧叠型又分成紧密接触型、疏散接触型和离散接触型3个小类,并利用A/S比进行了合理的解释。依据渤海中南部地区的地质和测井资料<sup>[16,20]</sup>设定泥岩速度为2420 m/s,密度为2.2 g/cm<sup>3</sup>,砂岩速度为2340 m/s,密度为2.1 g/cm<sup>3</sup>。首先建立7个理论深度模型,并把孤立型和堆叠型又归为一类(表1),然后通过时深转换,应用褶积理论合成地震记录,雷克子波的参数为:主频为50 Hz(峰值频率约为39 Hz),采样率为1 ms,采样长度为101,由砂岩速度和雷克子波的主频可以算出四分之一波长为11.7 m。

表1 理论模型参数

Table 1 Parameters of theoretical model

类型及参数	孤立型与堆叠型			侧叠型			
	决口扇	孤立河道	下切侵蚀河道	堆叠型河道	离散接触河道	疏散接触河道	紧密接触河道
河道最大厚度/m	3	6	14	17	8	8	8
河道宽度/m	50	100	250	320	150	150	150
河道接触宽度/m	0	0	0	0	0	20	40
河道迁移高度/m	1	2	1	1	3~4	3~4	3~4

### 1.1 孤立型与堆叠型

决口扇是由于洪水期河水冲决天然堤,部分水流由决口流向河漫滩,砂、泥物质在决口处堆积而成的扇形沉积体。岩体形态呈舌状,向河漫平原方向变薄、尖灭,剖面上透镜状不明显。孤立河道在河流幼年期较发育,在这一阶段,河流以侵蚀作用为主,容易形成下切侵蚀河道<sup>[21]</sup>。相对于下切侵蚀河道,决口扇和孤立河道在地震上表现为较强振幅、不连续的弱反射。砂体的厚度影响着波形的强弱变化,峰谷干涉形成的复合波刻画着砂体的形态特征,模型及合成地震记录(图1)。

河流在老年期,容易形成网状分叉,产生很多分流和分泄,最后进入湖泊和海洋,堆叠型河流多发于此阶

段。下切侵蚀河道和堆叠型河道厚度一般都大于四分之一波长,在地震上表现为强振幅、连续的强反射,剖面上呈大透镜体状(图1)。但堆叠型河道内部隔夹层较多,非均质性很高,其波形的强弱、尖锐度、对称性等都会发生变化。

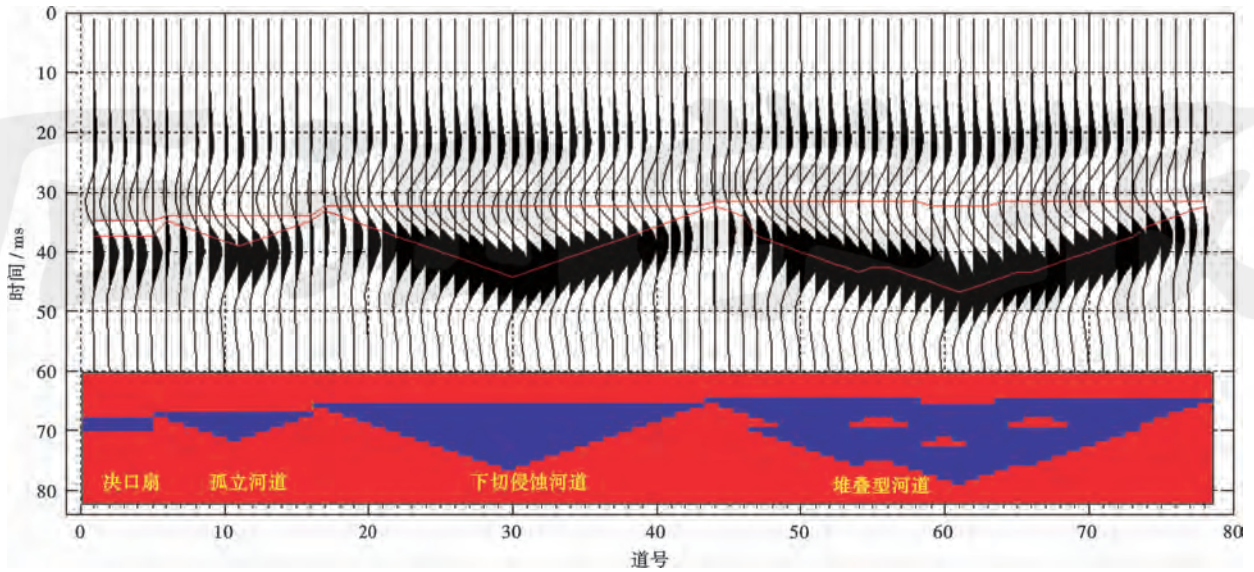
### 1.2 侧叠型

河流发育到壮年期,形成泛滥平原,河流弯曲度高,侧向侵蚀和加积作用使河流迁移,易形成侧叠型河道(图2)。从离散接触到疏散接触再到紧密接触型河道,其可容纳空间逐渐缩小,河道砂体由相对孤立到紧密接触,砂体之间连通性逐渐增强,在剖面上呈强振幅反射且连续性增强,由多个透镜体逐渐演化为条带状。由于波峰和波谷的干涉效应,砂体顶底界面不再一一



对应波形的峰谷,整个复合波都包含着砂体的信息。砂体的厚度和叠置情况,影响着波形的强弱、尖锐程度、稳定程度、对称性等。在砂体较厚区域,振幅较

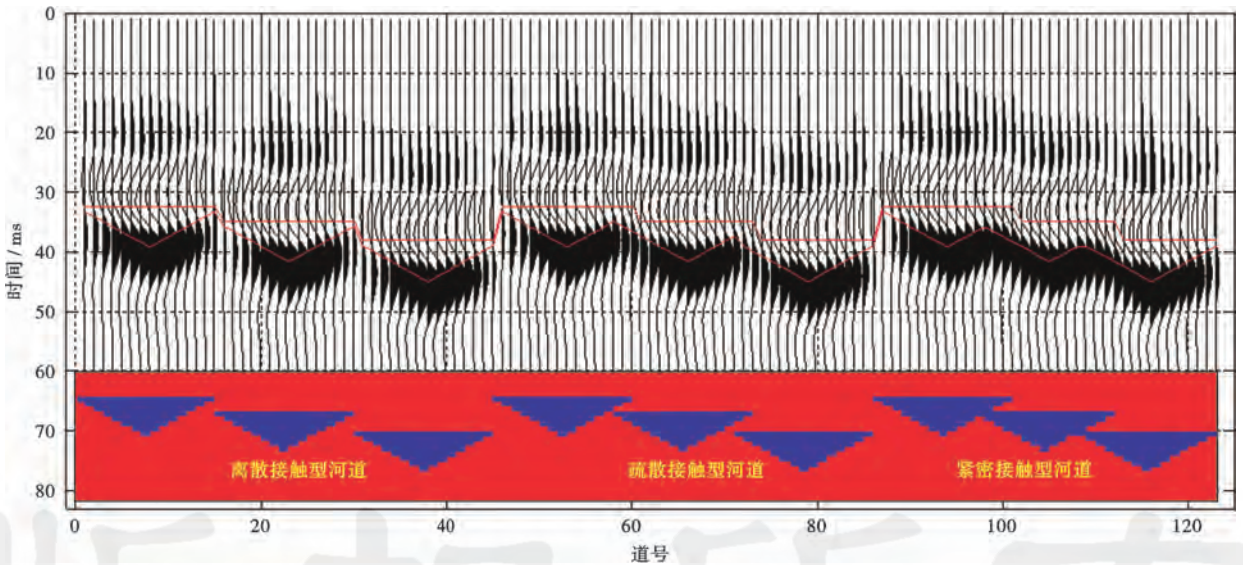
强,波形变胖。在砂体叠置形成的砂泥互层区,其波形有所拉伸和变形,波形峰度、波形对称性也发生了变化。



注:红线为深度模型转为时间模型的顶底界面,红色代表泥岩,蓝色代表砂体模型。

图 1 孤立型与堆叠型合成地震记录

Fig. 1 Synthetic seismograms of isolated and stacked sandstones



注:红线为深度模型转为时间模型的顶底界面,红色代表泥岩,蓝色代表砂体模型。

图 2 侧叠型合成地震记录

Fig. 2 Synthetic seismograms of lateral fold sandstones

## 2 地震波形结构属性

### 2.1 波形结构属性

在油气勘探与开发过程中,利用地震属性进行地震解释已经成为关键性技术。无论是构造解释、地层岩性解释,还是开发地震解释,地震属性都发挥着重要的作用<sup>[22-25]</sup>。通过正演分析,河道砂体对应的地震记

录,其波形发生了很多变化,波形的大小、振幅的强弱、同相轴的连续性均发生变化,同时波形也发生畸变、拉伸、压缩、变形。为了更好地识别河道砂体叠置边界,分析波形变化,笔者提出利用在特定时窗上提取的波形结构属性,来识别波形结构变化,最后达到识别河道砂体叠置边界的目的。

波形结构属性主要是指提取的一类层属性,其实

质是在一定时窗内,通过不同的数学计算方法来刻画时窗内的波形结构特征,如波形的强弱变化、尖锐程度、稳定程度、对称程度、相对变化等。将部分波形结构属性总结成了一张表(表2),这些属性的计算方法多借鉴于微积分、概率统计、差分等数学思想,波形结构属性可以有效地把振幅和波形随着时间的变化刻画出来,利用波形结构属性分析波形结构变化,有助于解释人员识别河道砂体叠置区。

表2 地震波形结构属性

Table 2 Seismic waveform structure attributes

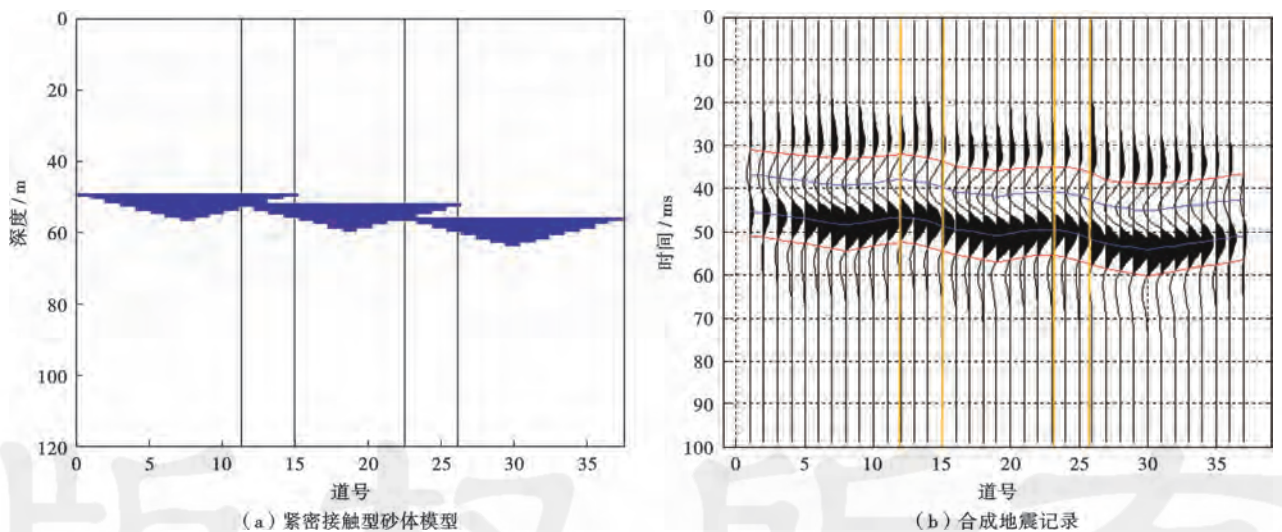
类型	属性名称	功能作用
积分类	波形面积 <sup>[23]</sup> 、波形长度 <sup>[23]</sup>	反映波形的强弱变化
统计类	变异系数 <sup>[15]</sup> 、峰度 <sup>[15]</sup> 、偏度 <sup>[15]</sup>	反映波形的稳定程度、尖锐程度、对称程度
差分类	复合包络差 <sup>[23]</sup> 、半时弯曲度差 <sup>[23]</sup> 、峰谷峰度差 <sup>[15]</sup>	反映波形的结构变化

## 2.2 时窗对比

在地震属性提取时,时窗的选择至关重要。Brown<sup>[26]</sup>指出,在地震反射记录中是否最大程度地提取地震信息,对地质解释影响很大。由于地震垂向分辨率的限制,小于调谐厚度的地质体的地震记录,其波形的峰谷不再对应地质体的顶底界面,而且波形的宽度基本处于恒定值<sup>[27]</sup>,当地层很薄时地震反射波会复合到一

起,因而,复合波包含了大量的储层地质信息,提取属性时应该最大可能地包含完整的复合波。如果时窗选的过大,则时窗内会被多余信息所干扰;如果时窗选的太小,则信息不全面,同样不利于分析和解释。如果以追层拾取的峰谷层位时窗去提取地震属性,难免会对薄层振幅信息包络不全。通过正演分析,河道砂体对应的地震记录,其波形均是峰谷对应,包含在一个周期内,本文提出在一个周期时窗上提取波形结构属性,该时窗能够更全面、合理的包含地质信息,更能准确反映出地质问题。

一个周期时窗,是基于峰谷层位时窗的基础上改进的时窗,该时窗最大可能地包含完整的复合波,包含完整的峰谷振幅,能够更全面准确地揭露地质目标体的地震响应特征,在这样的时窗上提取地震属性,可以为解释人员提供更有效、更可信的地质信息。以紧密接触型河道为例,其中12~15道和23~26道为叠置边界区域[图3(a)],峰谷层位时窗和一个周期时窗[图3(b)]。分别在一个周期时窗和峰谷层位时窗上,提取表2中的九种波形结构属性,并将积分类和统计类属性值以第8道为标准道作归一化处理,差分类属性值本身就是相对值,图4给出两种时窗提取的波形属性结果。



注:(b)图中黑线和黄线为叠置区间,红线是一个周期时窗,蓝线是峰谷层位时窗。

图3 叠置砂体时窗

Fig. 3 Time window of interbedded sandstones

波形面积、波形长度、波形平均弯曲度受时窗影响很小,3种波形结构属性在两种时窗上均表现出一致的变化趋势,且对叠置区的变化有一定响应,其属性值主要受厚度的影响,有利于识别更厚的河道砂体。对于峰度、偏度、变异系数这3种波形结构属性,在峰谷层位时窗与一个周期时窗上提取的属性值差异很大,在一个周期时窗上提取的效果更好,更

有利于地质解释。这3种属性,相对于厚度来讲,对叠置区的更敏感,有利于识别河道叠置区。对于复合包络差、半时弯曲度差、峰谷峰度差属性,在峰谷层位时窗与一个周期时窗上提取的属性值变化趋势大致一致,但在一个周期时窗上更加敏感,且其只对叠置区域敏感,更有助于地质人员解释,对识别河道叠置区非常有利。



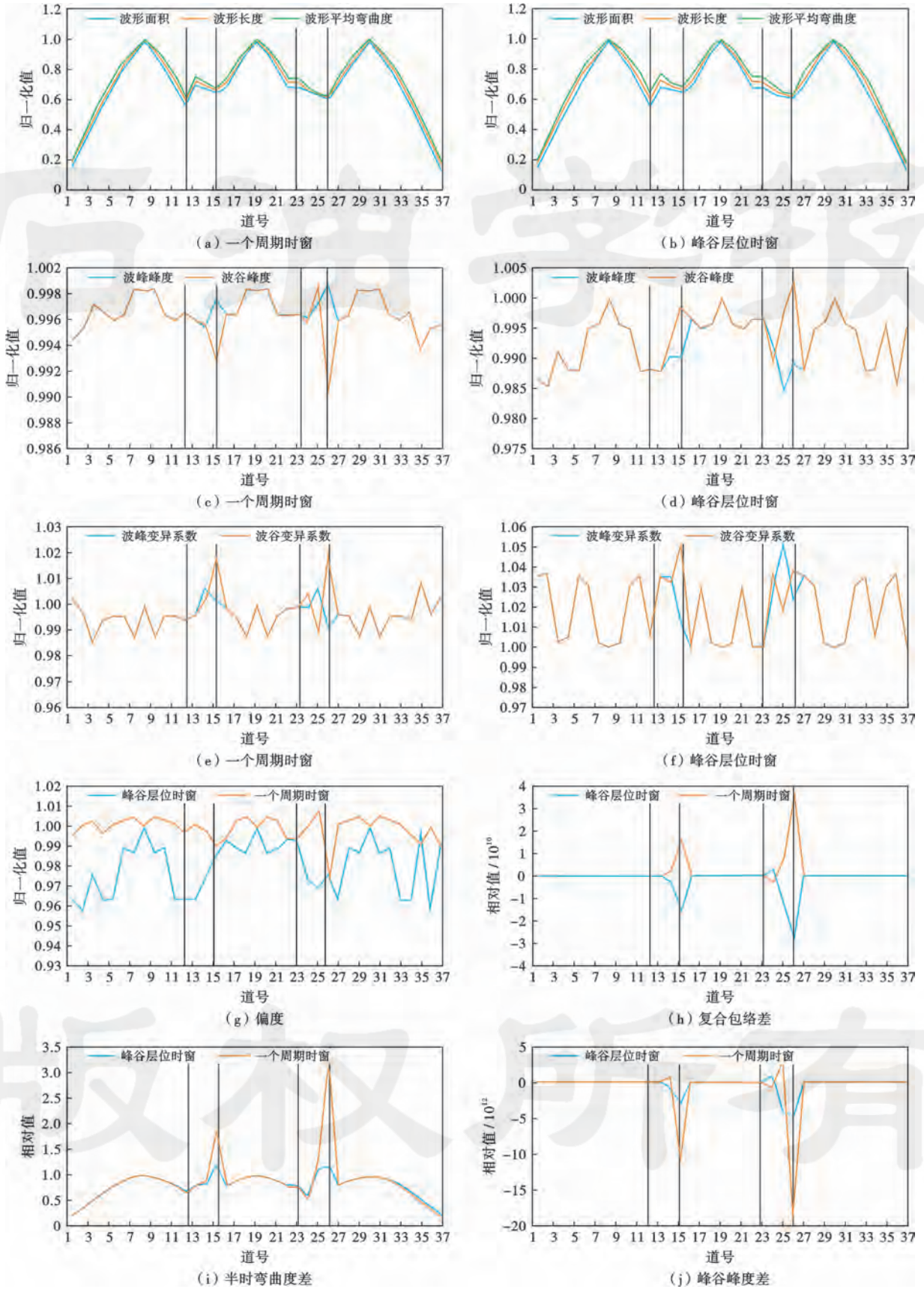


图4 波形结构属性

Fig. 4 Waveform structure attributes

从算法设计的角度看,对于峰度波形结构属性,在河道最厚处和叠置区应该表现为高值;变异系数这个波形结构属性,从算法上设计为在河道叠置区处于高值,且对于薄层敏感,易于区分薄层和厚层;而偏度波形结构属性反应波形的对称性,在河道叠置区应该表现为异常值。从两种时窗的对比可以发现,对于峰

度、偏度、变异系数、复合包络差、半时弯曲度差、峰谷峰度差这6个波形结构属性,从一个周期时窗上提取更好,表3给出两种时窗波形结构属性的敏感度(主要依据是叠置砂体模型正演模拟和波形结构属性分析,见图3和图4),以及波形结构属性对厚度和叠置区的敏感度。

表3 波形结构属性敏感度

Table 3 Sensitiveness of waveform structure attributes

属性敏感度	波形面积、波形长度、 波形平均弯曲度	峰度、半时 弯曲度差	变异系数、偏度	复合包络差、 峰谷峰度差
时窗	不敏感	很敏感	很敏感	较敏感
厚度	很敏感	较敏感	不敏感	不敏感
叠置区	不敏感	敏感	敏感	很敏感

### 2.3 波形结构属性砂体叠置区识别方法

在提取波形结构属性时,一个周期时窗比峰谷层位时窗更有优势,一个周期时窗内包含的振幅信息更全面,这样有助于准确地反映地质信息,更利于地质解释工作的推进。笔者认为,在一个周期时窗上提取地震波形结构属性,不仅能够对低于地震分辨率的河流相厚砂体区域进行识别,还能对厚砂体区域里面的薄砂体叠置区进行刻画。波形结构属性砂体叠置区的识别方法的具体步骤为:①通过波形的面积、长度、平均弯曲度属性刻画河流相砂体的厚薄展布情况,找到砂体较厚的分布区域;②通过峰度、变异系数、偏度属性,识别厚砂体区域中的薄砂体叠置区域;③通过复合包络差、半时弯曲度差、峰谷峰度差属性再次验证识别河道叠置区,同时和峰度、变异系数、偏度属性作联立分析以确定出厚砂体区域里面的薄砂体叠置区。

从理论上讲,通过上述方法可以识别河流相的厚砂体区域,以及厚砂体区域里面的薄砂体叠置区,从而为开发解释人员提供更可靠的分析理论依据。为了说明本方法能够在实际中得到应用,笔者基于模型讨论了不同分辨率和信噪比对该方法的影响。

首先,讨论抗噪能力。加入随机噪声的含量分别为:5%、10%、15%、20%、25%(对应的信噪比为19、9、5.67、4、3)。噪声加入的具体方法<sup>[28]</sup>为:①生成一个反射系数为随机分布的二维矩阵(与模型的时间反射系数维度相等),再褶积合成随机噪声记录;②根据不同的信噪比,将纯信号记录和随机噪声记录叠加,从而产生不同噪声含量的记录。总的来说,波形面积、波形长度、波形平均弯曲度的抗噪能力很强,当噪声含量为25%(信噪比为3)时,这3个属性仍然能刻画砂体的厚度情况;变异系数、偏度、复合包络差、半时弯曲度差的抗噪能力较强,当噪声含量为

20%(信噪比为4)时,这4个属性仍然能刻画出砂体的叠置区;峰度属性(包括波峰峰度、波谷峰度、峰谷峰度差)则对噪声很敏感,当噪声含量达到10%时,就会受到极大干扰。

其次,讨论分辨率的影响。采用不同主频(20 Hz、30 Hz、40 Hz、50 Hz、60 Hz、70 Hz)合成地震记录,主频越小则分辨率越小。波形面积、波形长度、波形平均弯曲度和偏度基本不受分辨率(主频)的影响,但偏度的属性值会发生极性反转;变异系数、复合包络差、半时弯曲度差会受分辨率的影响,随着分辨率的降低,变异系数会变得不稳定,当主频为20 Hz时,变异系数已经不能再识别砂体的叠置区;峰度属性随主频的变化较复杂,当分辨率很低时(比如主频20 Hz),对砂体的叠置情况刻画较清晰,当分辨率中等时(比如主频30、40 Hz),只能识别砂体叠置区其中的一个,当分辨率较高时(主频大于等于50 Hz),不仅对砂体的叠置情况刻画较清晰,还能反映砂体的厚度情况。

通过讨论不同信噪比和分辨率,可以认为,利用波形结构属性,从河流相的厚砂体区域中识别里面的薄砂体叠置区的整个过程中,对地震资料的品质要求有一定要求:①地震资料的噪声含量不能太高,最好不要超过20%(信噪比最小为4);②地震资料的分辨率也不能太低,其主频应达到约30 Hz;③为了在实际应用中能有效的应用本方法,在地震资料数据处理过程中,应适当做一些保幅处理工作,确保振幅的完整有效性。

## 3 实际工区应用

### 3.1 工区地质背景

本文提出利用波形结构属性识别河流相砂体叠置区的方法,并在BZ34-1油田进行应用,该油田位于渤



海湾盆地黄河口凹陷。该区域的构造活动相对稳定,在新近纪早期处于湖盆拗陷期,地形较为平缓,湖面水体大规模收缩,湖盆进入萎缩期,水体较浅,砂体受河流控制明显,主要呈枝状分布,相互切割。根据研究区的探井岩心分析、岩电曲线特征、地震相、区域沉积地质研究表明,黄河口凹陷新近系明化镇组下段总体表现为“泥包砂”特征,平均砂岩百分比为20%,代表了相对远源、搬运距离较长的浅水湖泊三角洲和曲流河沉积。BZ34-1油田沉积的砂体叠置关系复杂,储层横向变化快、连通性较差,加大了勘探开发难度<sup>[29-36]</sup>,在实际生产开发中,识别河流相砂体叠置区显得格外重要。

### 3.2 河道砂体叠置边界识别

将文中提出的方法应用于BZ34-1的1225层,在该层的峰谷层位上搜索优化得到一个周期时窗,再基于一个周期时窗分别提取波形面积、波形长度、波

峰变异系数、偏度、复合包络差和峰谷峰度差等属性(图5)。按照波形结构属性识别河流相砂体叠置区的方法,在图5的6张属性切片上进行试验。首先,通过波形面积、波形长度属性识别厚砂体的展布区域,在波形面积、波形长度属性切片上,红色越深代表砂体越厚,可以看出,这两个属性的深红色区域分布大体一致,而且在这些深红色厚砂体区域内没有明显断层的存在;其次,在波峰变异系数和偏度属性切片上,找到波形面积和波形长度属性切片上深红色厚砂体分布区域的对应位置,并寻找该厚砂体区域内部出现的条带(笔者猜测他们最有可能就是砂体叠置的边界);最后,再以复合包络差、峰谷峰度差属性切片作为验证,如果在这两种属性切片上对应的厚砂体区域内部也有重复的线条出现,那么就可以推断这些共有的线条可能就是砂体叠置边界。

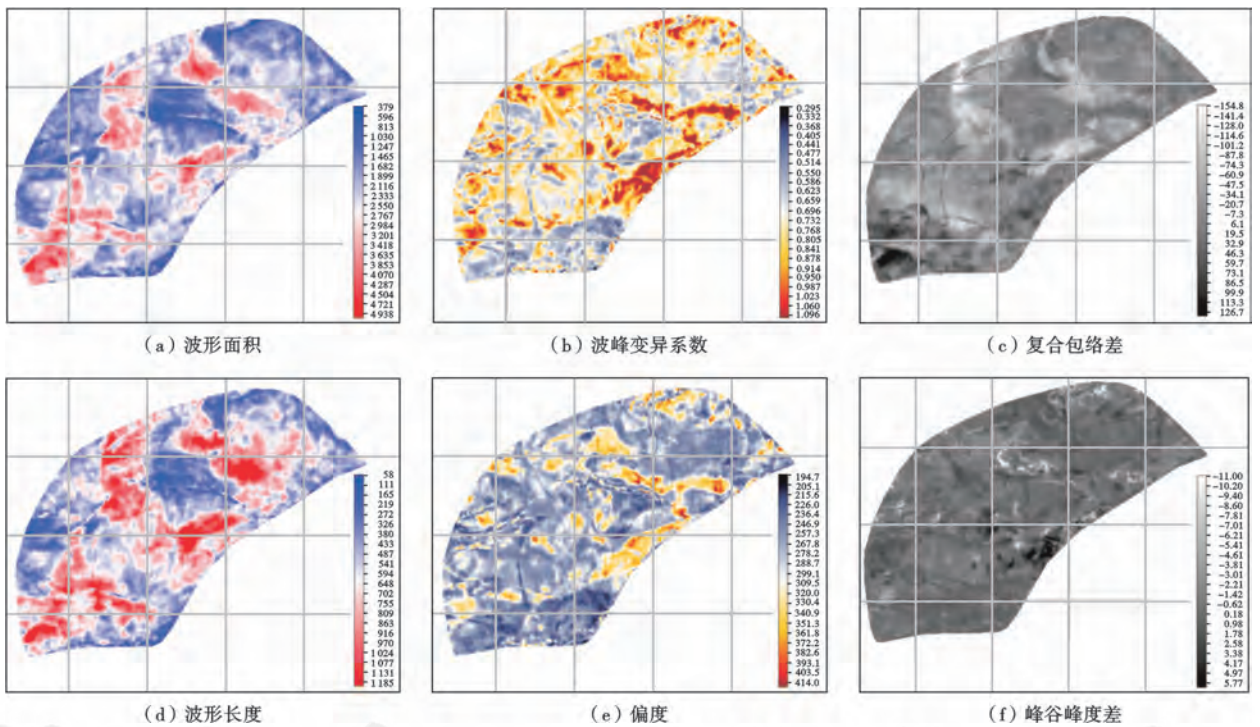


图5 波形结构属性切片  
Fig. 5 Slices of waveform structure attributes

由图5可以看到,在波峰变异系数、偏度、复合包络差、峰谷峰度差属性切片上,有一些清晰的曲线条,这些线条可能就是砂体叠置边界。为了进一步验证,笔者分析了C5井、C8井、E2井、E1H井、E16井的测井资料以及对应的过井剖面(图6)。在波峰变异系数的属性切片上能够看出,C5井、C8井、E2井、E1H井、E16井都位于砂体较厚区域和条带附近;从测井曲线和岩性解释可知,这5口井均存在砂体叠置;通过对这5口井的5条测线 Xline2695、Xline2749、Xline2769、

Xline2821、Inline1487过井剖面的波形特征,也能反映出砂体叠置的波形变化。厚砂体区域内部的线条就是砂体叠置区,说明利用波形结构属性识别河流相砂体叠置区,这种方法的确是有效的。

在图6中,波峰变异系数属性切片上的蓝色圆点分别对应着C5井、C8井、E2井、E1H井、E16井的位置,短红色的粗线代表剖面位置;剖面上较粗的红线是指一个周期时窗,十字交叉线则代表剖面 and 切片的对应位置。



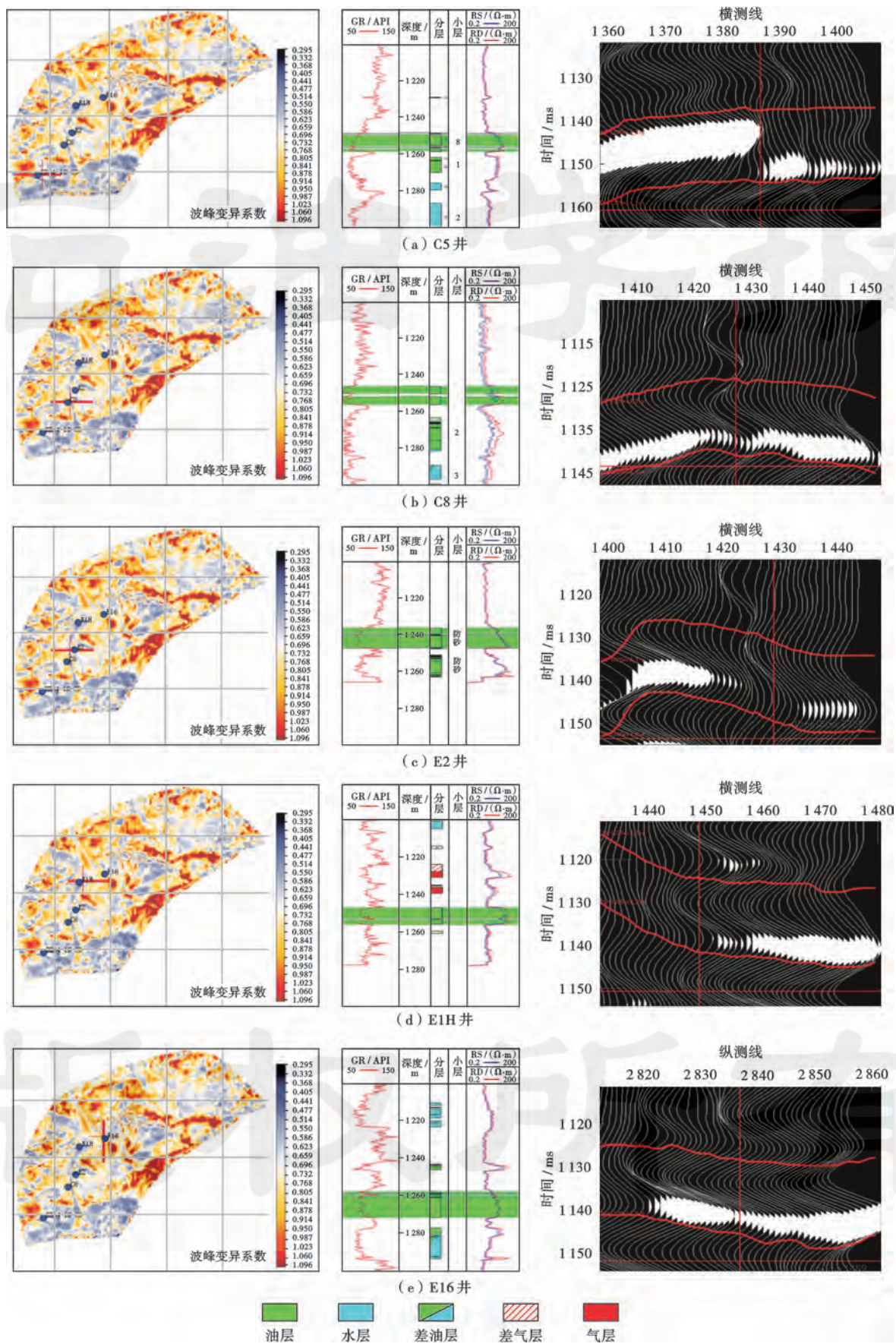


图 6 河道砂体叠置边界测井和剖面验证

Fig. 6 Logging and profiles verification of channel sandstones



## 4 结 论

(1) 河流相叠置砂体,其地震响应的波形发生了拉伸、压缩、畸变,振幅强弱不一,同相轴连续性复杂,且波形在一个周期内包含有一峰一谷。

(2) 在一个周期时窗上提取的波形结构属性,有效地结合了时间和振幅的变化,能够更全面、准确地表达地质信息。

(3) 通过叠置砂体模型正演和波形结构属性的联合分析,从理论上可以定量识别河流相的砂体叠置区。在实际应用中,在波形属性切片上识别的河流相砂体叠置区,也被测井资料和地震剖面所验证。所以,对河流相的砂体叠置区作定性和定量解释,波形结构属性的确提供了一个有效手段。

### 参 考 文 献

- [1] 张文昭. 中国陆相大油田的发现与分布[J]. 中国矿业, 1997, 6(1): 12-16.  
ZHANG Wenzhao. Discovery and distribution of continental oil fields in China[J]. China Mining Magazine, 1997, 6(1): 12-16.
- [2] 李小地. 中国大油田的分布特征与发现前景[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(2): 127-130.  
LI Xiaodi. Distribution characteristics and discovery prospect of giant oilfields in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(2): 127-130.
- [3] 崔永谦, 秦凤启, 卢永和, 等. 河流相沉积储层地震精细预测方法研究与应用——以渤海湾盆地冀中坳陷古近系河道砂为例[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(5): 668-672.  
CUI Yongqian, QIN Fengqi, LU Yonghe, et al. Research and application of detailed seismic prediction in fluvial reservoirs—an example from the palaeogene channel sand in the Jizhong Depression, the Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(5): 668-672.
- [4] 裘亦楠. 中国陆相碎屑岩储层沉积学的进展[J]. 沉积学报, 1992, 10(3): 16-24.  
QIU Yinan. Developments in reservoir sedimentology of continental clastic rocks in China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1992, 10(3): 16-24.
- [5] 裘亦楠. 石油开发地质方法论(一)[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(2): 43-47.  
QIU Yinan. The methodology of petroleum development geology (I)[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(2): 43-47.
- [6] 胡光义, 陈飞, 孙立春, 等. 高分辨率层序地层学在河流相油田开发中的应用[J]. 沉积学报, 2013, 31(4): 600-607.  
HU Guangyi, CHEN Fei, SUN Lichun, et al. Application of high-resolution sequence stratigraphy of fluvial facies in development of oilfield[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 600-607.
- [7] 胡光义, 陈飞, 范廷恩, 等. 渤海海域 S 油田新近系明化镇组河流相复合砂体叠置样式分析[J]. 沉积学报, 2014, 32(3): 586-592.  
HU Guangyi, CHEN Fei, FAN Ting'en, et al. Analysis of fluvial facies compound sandbody architecture of the Neogene Minghua-
- zhen Formation of S oilfield in the Bohai Bay[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(3): 586-592.
- [8] 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 Guangyi, CHEN Fei, FAN Ting'en, et al. Subdividing and comparing method of the fluvial facies reservoirs based on the complex sandbody architectures[J]. Petroleum Geology & Oil-field Development in Daqing, 2017, 36(2): 12-18.
- [9] 胡光义, 范廷恩, 陈飞, 等. 从储层构型到“地震构型相”——一种河流相高精度概念模型的表征方法[J]. 地质学报, 2017, 91(2): 465-478.  
HU Guangyi, FAN Ting'en, CHEN Fei, et al. From reservoir architecture to seismic architecture facies: characteristic method of a high-resolution fluvial facies model[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(2): 465-478.
- [10] 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.  
LIU Yuming, HOU Jiagen, WANG Lianmin, et al. Architecture analysis of braided river reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2009, 33(1): 7-11.
- [11] 赵春明, 胡景双, 霍春亮, 等. 曲流河与辫状河沉积砂体连通模式及开发特征——以渤海地区秦皇岛 32-6 油田为例[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(6): 88-91.  
ZHAO Chunming, HU Jingshuang, HUO Chunliang, et al. Sandbody interconnectivity architecture and development characteristics of meandering river and braided river deposits a case study of Qinhuangdao 32-6 oilfield, Bohai area[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(6): 88-91.
- [12] 高玉飞, 胡光义, 范廷恩, 等. 渤海湾盆地 Q 油田明化镇组复合砂体内部结构表征[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(5): 539-544.  
GAO Yufei, HU Guangyi, FAN Ting'en, et al. Characterization of inner structures of fluvial complex sandbody of Minghua-Formation in Q oilfield, Bohai Bay Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(5): 539-544.
- [13] 张京思, 揣媛媛, 边立恩. 正演模拟技术在渤海油田 X 井区砂体连通性研究中的应用[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(3): 127-132.  
ZHANG Jingsi, CHUAI Yuanyuan, BIAN Li'en. Application of forward modeling to study of sand body connectivity in X well field of Bohai oilfield[J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(3): 127-132.
- [14] 田鑫, 王绪本, 张铭, 等. 地震属性方法在油田开发阶段薄砂体识别中的应用——以印尼苏门答腊盆地 Gemah 油田 M 油层为例[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 533-538.  
TIAN Xin, WANG Xuben, ZHANG Ming, et al. Application of seismic attributes identifying Thin Sand Body: a example of M Formation in Gemah oilfield of Sumatrina Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3): 533-538.
- [15] 陈妍, 张明振, 罗霞, 等. 山东埕岛东部东营组三角洲砂体地震预测技术[J]. 中国地质调查, 2016, 3(2): 51-57.  
CHEN Yan, ZHANG Mingzhen, LUO Xia, et al. Application of seismic technology to predicting the delta sand body of Dongying Formation in Chengdao Eastern slope of Shandong Province[J]. Geological Survey of China, 2016, 3(2): 51-57.
- [16] 井涌泉, 范洪军, 陈飞, 等. 基于波形分类技术预测河流相砂体叠置模式[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(3): 1163-1167.  
JING Yongquan, FAN Hongjun, CHEN Fei, et al. Application of waveform classification in the prediction of fluvial facies interbedded

- sandstone reservoirs[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(3): 1163-1167.
- [17] 范洪军, 范廷恩, 王晖, 等. 地震波形分类技术在河流相储层研究中的应用[J]. *CT理论与应用研究*, 2014, 23(1): 71-80.  
FAN Hongjun, FAN Ting'en, WANG Hui, et al. Application of seismic waveform classification technique in the study of fluvial reservoir[J]. *CT Theory and Application*, 2014, 23(1): 71-80.
- [18] 闵小刚, 陈开远, 范廷恩. 井-震结合进行河流相储层非均质性表征——以渤海湾盆地黄河口凹陷渤中263油田为例[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(3): 375-381.  
MIN Xiaogang, CHEN Kaiyuan, FAN Ting'en. Heterogeneity characterization of fluvial facies reservoirs through integration of seismic and logging data: an example from Bozhong 263 oilfield in the Huanghekou Sag, the Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(3): 375-381.
- [19] 曹卿荣, 李佩, 孙凯, 等. 应用地震属性分析技术刻画河道砂体[J]. *岩性油气藏*, 2007, 19(2): 93-96.  
CAO Qingrong, LI Pei, SUN Kai, et al. Using seismic attributes to identify channel sand body[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2007, 19(2): 93-96.
- [20] 井涌泉, 余杰, 范廷恩, 等. 秦皇岛32-6油田明化镇组河流相储层地球物理参数影响因素研究[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(4): 1541-1547.  
JING Yongquan, YU Jie, FAN Ting'en, et al. Study on influence factors of fluvial facies reservoir geophysical parameters in QHD32-6 oilfield at Nm Formation[J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(4): 1541-1547.
- [21] 陈飞, 胡光义, 范廷恩, 等. 秦皇岛H油田陆相下切侵蚀河谷充填特征[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2015, 37(5): 33-39.  
CHEN Fei, HU Guangyi, FAN Ting'en, et al. The continental incised valley filling architecture in Qinhuangdao H oilfield, Bohai Bay[J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2015, 37(5): 33-39.
- [22] TANER M T, SCHUELKE J S, O'DOHERTY R, et al. Seismic attributes revisited[R]. *SEG* 1994, 1995: 1104-1106.
- [23] CHEN Q, STEVE S. Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring[J]. *The Leading Edge*, 1997, 16(5): 445-456.
- [24] BARNES A E. Seismic attributes past, present, and future[R]. *SEG* 1999, 1999: 1-4.
- [25] 陆基孟, 王永刚. *地震勘探原理*[M]. 3版. 东营: 中国石油大学出版社, 2009.  
LU Jimeng, WANG Yonggang. *Principle of seismic exploration* [M]. 3rd ed. Dongying: China University of Petroleum Press, 2009.
- [26] BROWN A R. The philosophy of top and bottom[J]. *The Leading Edge*, 2012, 31(6): 680-681.
- [27] JAMES S. A description of seismic amplitude techniques[J]. *Exploration Geophysics*, 2014, 45(3): 154-163.
- [28] 李庆忠. 关于低信噪比地震资料的基本概念和质量改进方向[J]. *石油地球物探*, 1986, 21(4): 343-364.  
LI Qingzhong. The concept of low S/N seismic data and the measures for improving the data quality [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1986, 21(4): 343-364.
- [29] 范廷恩, 李维新, 王志红, 等. 渤海渤中34区河流相储层预测与描述技术研究[J]. *中国海上油气*, 2006, 18(1): 13-16.  
FAN Ting'en, LI Weixin, WANG Zhihong, et al. A research of prediction and description techniques for fluvial reservoir in Bozhong 34 area, Bohai sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2006, 18(1): 13-16.
- [30] 覃雨璐, 张晓宝. 构造活动对渤中34区块油气成藏的影响[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(1): 60-67.  
QIN Yulu, ZHANG Xiaobao. Influence of tectonic activity on reservoir Formation in the Bozhong34 Block[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(1): 60-67.
- [31] 朱伟林, 李建平, 周心怀, 等. 渤海新近系浅水三角洲沉积体系与大型油气田勘探[J]. *沉积学报*, 2008, 26(4): 575-582.  
ZHU Weilin, LI Jianping, ZHOU Xinhui, et al. Neogene shallow water deltaic system and large hydrocarbon accumulations in Bohai Bay, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(4): 575-582.
- [32] 涂丹凤, 牛成民, 张新涛, 等. 黄河口凹陷BZ34-1复杂断块油藏滚动勘探实践[J]. *石油地质与工程*, 2015, 29(5): 67-70.  
TU Danfeng, NIU Chengming, ZHANG Xintao, et al. The rolling exploration practice of BZ34-1 complex fault block reservoir in Huanghekou sag[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2015, 29(5): 67-70.
- [33] 吴靖, 姜在兴, 童金环, 等. 东营凹陷古近系沙河街组四段上亚段细粒沉积岩沉积环境及控制因素[J]. *石油学报*, 2016, 37(4): 464-473.  
WU Jing, JIANG Zaixing, TONG Jinhuan, et al. Sedimentary environment and control factors of fine-grained sedimentary rocks in the upper fourth member of Paleogene Shahejie Formation, Dongying sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(4): 464-473.
- [34] 张凯逊, 白国平, 金凤鸣, 等. 层序地层格架内成岩作用——以饶阳凹陷中南部沙河街组三段砂岩为例[J]. *石油学报*, 2016, 37(6): 728-742.  
ZHANG Kaixun, BAI Guoping, JIN Fengming, et al. Diagenesis in sequence stratigraphical framework: a case study of sandstone of Member 3 of Shahejie Formation in the south-central Raoyang sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(6): 728-742.
- [35] 吴靖, 姜在兴, 潘悦文, 等. 湖相细粒沉积模式——以东营凹陷古近系沙河街组四段上亚段为例[J]. *石油学报*, 2016, 37(9): 1080-1089.  
WU Jing, JIANG Zaixing, PAN Yuewen, et al. Lacustrine fine-grained depositional model: a case study of the upper submember of the fourth Member of Paleogene Shahejie Formation in Dongying sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(9): 1080-1089.
- [36] 吴靖, 姜在兴, 梁超. 东营凹陷沙河街组四段上亚段细粒沉积岩岩相特征及与沉积环境的关系[J]. *石油学报*, 2017, 38(10): 1110-1122.  
WU Jing, JIANG Zaixing, LIANG Chao. Lithofacies characteristics of fine-grained sedimentary rocks in the upper submember of Member 4 of Shahejie Formation, Dongying sag and their relationship with sedimentary environment[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(10): 1110-1122.

(收稿日期 2017-12-06 改回日期 2018-05-06 编辑 宋宁)