

引用格式:张晶玉,范廷恩,王海峰,等.海相薄砂岩储层精细描述及地震沉积学认识——以南海珠江口盆地H油田为例[J].油气藏评价与开发,2021,11(5):680-687.

ZHANG Jingyu, FAN Tingen, WANG Haifeng, et al. Marine thin sandstone reservoir prediction method and seismic sedimentology study: A case study of H Oilfield in the Pearl River Mouth Basin of the South China Sea[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(5):680-687.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.05.003

# 海相薄砂岩储层精细描述及地震沉积学认识

## ——以南海珠江口盆地H油田为例

张晶玉<sup>1,2</sup>, 范廷恩<sup>1,2</sup>, 王海峰<sup>1,2</sup>, 高玉飞<sup>1</sup>, 董洪超<sup>1</sup>, 何明薇<sup>1</sup>

(1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 2. 海洋石油高效开发国家重点实验室, 北京 100028)

**摘要:**珠江口盆地H油田主要发育三角洲前缘沉积, 储层厚度薄、横向变化快, 对岩性边界及砂体连通性的认识不清, 严重制约了油田的高效开发。地震波形指示反演能够充分利用地震波形的横向变化信息建立井插值模型, 井间预测能力较好, 特别适合横向变化快、非均值性强、薄互层储层的高精度预测。而地震沉积学方法则是在等时地层格架指导下, 利用地震属性切片对储层的横向展布特征进行精细刻画, 对地质体沉积规律进行演绎, 对于垂向上不可分辨的薄储层的平面沉积特征具有较好的检测效果。综合上述2种方法, 形成了一套针对海相薄砂岩储层精细描述和沉积特征刻画的技术流程, 并在H油田取得了良好的应用效果, 为研究区剩余油预测和调整挖潜提供了有效的技术支持。

**关键词:**储层预测; 地震沉积学; 地震波形指示反演; 油田开发; 地震属性

中图分类号: TE122

文献标识码: A

### Marine thin sandstone reservoir prediction method and seismic sedimentology study: A case study of H Oilfield in the Pearl River Mouth Basin of the South China Sea

ZHANG Jingyu<sup>1,2</sup>, FAN Tingen<sup>1,2</sup>, WANG Haifeng<sup>1,2</sup>, GAO Yufei<sup>1</sup>, DONG Hongchao<sup>1</sup>, HE Mingwei<sup>1</sup>

(1. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China;

2. State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, Beijing 100028, China)

**Abstract:** H Oilfield in the Pearl River Mouth Basin mainly develops delta front deposits. Its reservoir thickness is thin, the lateral change is fast, and the understanding of lithologic boundary and sand body connectivity is not clear, which seriously restricts the efficient development of oil field. Seismic waveform indication inversion can fully use the lateral changes of seismic waveforms to carry out high-frequency component estimation, and establish the interpolation model which is more consistent with the sedimentary characteristics. This method has good inter-well prediction ability, and is particularly suitable for high-precision prediction of fast lateral changes, strong non-average, and thin interbedded sand and mudstone reservoirs. While for another method, seismic sedimentology, is to use the seismic attribute slice to describe the lateral distribution range and sedimentary characteristics of the reservoir under the guidance of isochronous stratigraphic framework. It has a good detection effect on the plane sedimentary characteristics of thin reservoir which cannot be resolved vertically. Combined with the above two methods, a set of technical processes for fine description and sedimentary characterization of marine thin sandstone reservoirs is formed and has achieved good application results in H Oilfield, meanwhile provides effective technical support for remaining oil prediction and potential tapping adjustment in the study area.

**Keywords:** oilfield development, seismic waveform inversion, seismic sedimentology, reservoir prediction, seismic attribute

收稿日期: 2020-09-02。

第一作者简介: 张晶玉(1987—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事油藏地球物理、地震资料解释及储层预测工作。地址: 北京市朝阳区太阳宫南街6号院中海油大厦A座1201, 邮政编码: 100028。E-mail: zhangjy53@cnooc.com.cn

随着中国海上油田陆续进入中—高含水期,对于油田储层描述和剩余油预测的精度要求也明显提高。国内海上油田新近系储层以河流相和三角洲相沉积类型为主,具有砂泥岩互层结构特征,油田开发单元的储层厚度常常小于或近似于地震资料的极限分辨率 $\lambda/4$ 。在实际油田生产研究中,为实现油田的高效开发,需要解决以下几个方面的问题,落实探明储量、设计合理的开发方案、分析储层内部连通性及预测剩余油分布、薄储层单元纵向及横向展布特征、沉积微相精细刻画。常规稀疏脉冲反演和平面属性分析手段预测精度较低,对低于地震分辨能力的薄储层预测问题难度较大,严重制约了油田的高效开发<sup>[1-3]</sup>。

地震反演是根据区域地质规律,利用地震保真处理数据,以已钻井资料作为约束,求取地下介质的岩性物性参数,如速度、密度等,从而对地下含油气性进行评价的一项重要手段。在过去的几十年中,地震反演技术被普遍应用于油气勘探和开发,传统的稀疏脉冲反演方法分辨率较低,薄储层和隔夹层反演预测效果不佳,因此,叠后反演方法已从传统稀疏脉冲反演发展到地质统计学随机反演等多种方法<sup>[4-8]</sup>。目前,地质统计学反演已发展成为高分辨率储层预测的一项代表技术,该技术利用变差函数随机模拟方法获得反演高频成分,能够突破地震分辨率限制,实现薄层的随机模拟,且与井的对应关系较好<sup>[9-11]</sup>。但由于地质统计学方法在高频段的预测是完全随机的,因此,反演结果的横向预测精度降低,平面规律性变差,与沉积模式常常不相符合。地震波形指示反演是在地质统计学基础上改进、发展形成的新统计学反演方法。它利用地震波形横向变化信息代替变差函数分析使储层预测不受井位分布影响,建立的插值模型更符合地质沉积特征,使井间预测能力提升,特别适用于具有横向变化快、非均值性强、薄互层等特征储层的高精度预测<sup>[12-15]</sup>。

地震沉积学方法是在等时地层格架指导下,综合利用地层切片、地震属性分析等手段,对储层的横向展布特征和沉积微相进行精细刻画,对地质体沉积规律进行演绎。自2000年左右引入至今,地震沉积学方法的理论不断完善,并在薄储层识别的多个案例中取得了良好的应用效果,对于垂向上不可分辨的薄储层,地层切片上可以清晰地检测到沉积现象。确保地层切片参考层的沉积等时性,以及根据

井上沉积旋回发育期次合理地劈分时间单元,建立地层切片与井资料的对应关系,是地震沉积学方法取得成功应用的关键<sup>[16-18]</sup>。

在现有研究的基础上,以海相薄砂岩储层精细描述为目标,形成了基于地震波形指示反演和地震沉积学方法的组合技术流程,并在南海H油田取得了良好的应用效果,实现了薄储层纵向、横向展布特征的精确刻画,为研究区剩余油预测和调整挖潜提供了有效的技术支持。

## 1 研究区概况

H油田位于南海珠江口盆地东沙隆起西北斜坡,靠近惠州凹陷南部,是发育在基底古隆起上的披覆背斜,构造幅度较缓,构造由深至浅继承性较好,构造高点相对稳定,构造走向主要为近东西向,构造完整,含油范围内无断层切割。含油层系为新近系中新统珠江组,纵向上共发育了13个油藏,油藏分布主要受构造控制,局部受岩性控制。珠江组发育一套辫状河三角洲沉积体系,随着海平面逐渐上升,自下而上由三角洲平原向三角洲前缘、前三角洲演化,H油田区域沉积模式如图1所示。

主力含油层系L30up探明储量占整个油田探明储量的85%,为该油田的重点研究对象。L30up为辫状河三角洲前缘沉积,发育水下分流河道、河口坝、席状砂等沉积微相,储层埋深约2 600 m,井点钻遇储层厚度为2~13 m,平均厚度小于10 m。地震资料在L30up层的频带宽度约为8~80 Hz,主频约为40 Hz。测井统计此段地层平均层速度约为3 100~4 300 m/s,计算得到垂向可分辨地层厚度约

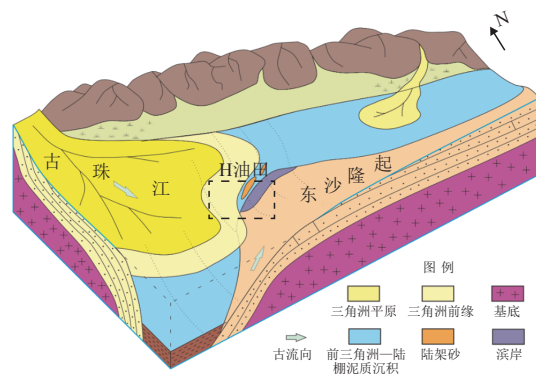


图1 南海珠江口盆地H油田区域沉积模式  
Fig. 1 Regional sedimentation mode of H Oilfield in the Pearl River Mouth Basin of the South China Sea

为20~27 m,储层的平均厚度小于地震垂向分辨能力,储层预测难度较大。

油田采用天然能量开采,在开发井生产过程中,地层能量下降快,生产井产量降低。为更好地实现油藏高效开发,考虑部署注水井,实施注水开发方案。因此,对于该油藏单元的沉积微相和储层结构的精细刻画需求迫切。

## 2 地震波形指示反演

### 2.1 方法技术

地震波形的横向变化反映了沉积环境和岩性组合特征的变化,即能够反映储层空间的相关信息。相比传统地质统计学反演基于变差函数的空间插值方法,地震波形指示反演利用波形横向变化信息进行井间插值,同时分析岩性的纵向组合特征,更好地体现了相控,提高了井间预测精度,扩大了方法适用的领域。

地震波形指示反演技术流程(图2)主要包括以下3个步骤:①样本井选择:根据已钻井的钻遇岩性组合关系和井旁地震道的波形特征,结合波形相似性和距离优选样本井,然后计算样本井位置的波阻抗。②匹配滤波处理:将地震频带范围的反演阻抗与初始模型进行匹配滤波,计算似然函数。如果两口井的相似性高,高频成分可能因不同微相而存在较大差异,但采用该方法也限制了高频段的取值

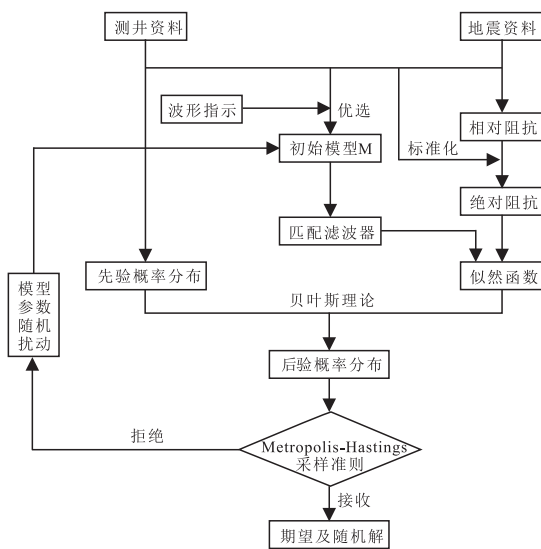


图2 地震波形指示反演技术流程  
Fig. 2 Flow of seismic waveform indication inversion technology

范围,反演结果的低频部分确定性增强,说明沉积环境相似,反演低频成分与地震有效频道范围一致。③求解期望输出:根据贝叶斯理论,利用测井资料得到的先验概率分布和似然函数,将目标函数设为后验概率分布,并将目标函数最大的解作为一个有效实现,对求解模型进行扰动,获得多次有效实现并将其平均值作为期望输出<sup>[19-20]</sup>。

### 2.2 岩石物理分析

岩石物理分析是优选反映储层岩性、物性、流体性质的弹性参数。通过建立关系图版,可以辅助反演结果的定性和定量解释。H油田测井资料较为齐全,地质分层及测井解释成果较完整,其中,工区内声波、密度曲线完整的井共9口,计算纵波阻抗,并采用直方图法进行岩石物理分析(图3a),纵波阻抗对岩性有一定的区分能力,砂岩整体表现为低阻抗的特征,但砂泥纵波阻抗有较大的叠置区,以叠后阻抗反演结果区分岩性具有一定的不确定性。

为了提升反演结果识别岩性的能力,考虑原始声波曲线对岩性区分能力较弱,因此,采用特征曲线对测井声波曲线进行重构。该方法是将原始声波曲线作为低频曲线,岩性敏感曲线作为高频曲线,低频

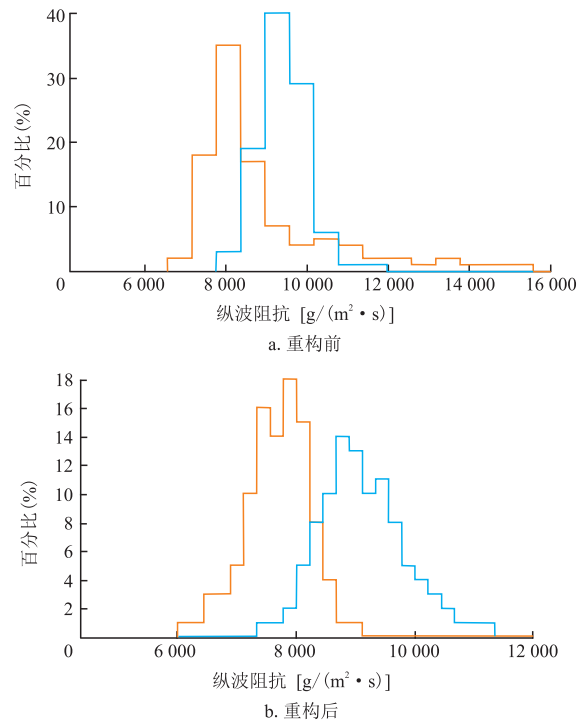


图3 纵波阻抗重构前和重构后对比  
Fig. 3 P-wave impedance-lithology histogram before and after reconstruction

和高频的频率界限为原始地震最大有效频带,然后将两条曲线在频率域合并。

利用原始声波和伽马曲线合并得到重构声波曲线,然后计算新的波阻抗曲线,从重构后的纵波阻抗—岩性直方图(图3b)可以看出:重构后的纵波阻抗对砂泥岩的识别能力明显提升,同时,由于保持了原始曲线的中低频成分,重构后的测井曲线依然能保持与原始曲线相同的井震相关性。

## 2.3 关键参数选取

在地震波形指示反演的实际操作中,4个关键参数的选择对于反演效果影响较大,即:有效样本数、最佳截止频率、平滑半径和目标体采样。

### 2.3.1 有效样本数

有效样本数反映地震波形的空间变化对储层的影响程度,是控制地震波形指示反演和样本优选的关键参数。有效样本数的大小反映了储层横向变化的程度和纵向结构的复杂程度,在设置时应参考已钻井所反映的研究区沉积特征。在储层变化小、非均质性弱的沉积稳定地区,应设置较多的样本数;在横向变化快、非均质性强的地区,可适当减少样本数。对H油田9口井进行地震波形指示反演,综合考虑参数的质量控制窗口和沉积特征,得出有效样本数优选值为3。

### 2.3.2 最佳截止频率

地震波形指示反演结果的高频成分主要受具有相同沉积结构的样本控制,频率越高,随机性越强。设置合适的最佳截止频率,即合理限定高频和低频的范围,对反演效果具有重要意义。如果需要获得一个确定性较强的结果,则应降低对纵向分辨率的要求,截止频率不宜设置太高;反之,如果不介意高频成分是随机获得的,则可以设置较高的截止频率。在H油田的应用中更侧重于获得一个相对可靠的反演结果,不过于追求提高分辨率,因此,经过试验,最佳高截频率优选值为150 Hz。

### 2.3.3 平滑半径

平滑半径设置越大,则得到的反演结果横向连续性越好,反演剖面越平滑,储层的非均值特征越不明显。在对参数进行优选时,需要综合已钻井和

区域地质背景,对研究区储层非均值性进行预估。H油田主体区1 km<sup>2</sup>内实钻的多口井存在储层发育特征差异明显的情况,砂体厚度存在变化,因此,平滑半径不宜设置过大。经过反复试验,平滑半径优选值为2 m。

### 2.3.4 目标体采样

采样时间越小,反演结果的分辨率越高,反演数据体越平滑,但对计算时间和存储空间的要求也越高。根据H油田储层描述精度的需求,目标体采样优选值为0.5 ms。

## 2.4 反演效果分析

利用优选的技术流程,以工区内9口井的参数作为输入,进行地震波形特征指示反演。从地震波形指示反演与原始地震波形叠合剖面可以看出:反演结果与地震波形的横向变化具有显著相关性,能够准确反映储层的横向变化,反演剖面具有较高的纵向和横向分辨率(图4)。

从过某水平井的地震剖面和地震波形指示反演剖面(图5)可以看出:地震波形指示反演结果能准确地反映水平井钻遇的砂岩和泥岩段,说明对储层横向展布的预测结果准确可靠。

## 3 地震沉积学认识

### 3.1 储层平面展布预测

L30up层属于辫状河三角洲前缘沉积,发育水下分流河道、河口坝、席状砂等沉积微相。利用顶底界面解释成果和反演数据提取多个属性进行对比分析,其中,平均振幅地震属性与井上统计砂地比的相关性最好,因此,选取该属性表征储层平面分布(图6)。平均振幅属性对辫状河三角洲沉积特征具有很好的刻画效果,能够比较清楚地反映辫状河三角洲的整体沉积形态。结合平面属性及井钻遇砂体信息可以判断,可能存在多期朵叶体的平面叠置,但无法区分单一朵叶体的分布范围及沉积期次的早晚。

### 3.2 储层沉积期次演绎

为进一步刻画储层内部结构,基于地震沉积学方法,针对目标层开展地震属性分析研究。地震属性切片演绎是利用地震数据描述储层沉积规律,刻

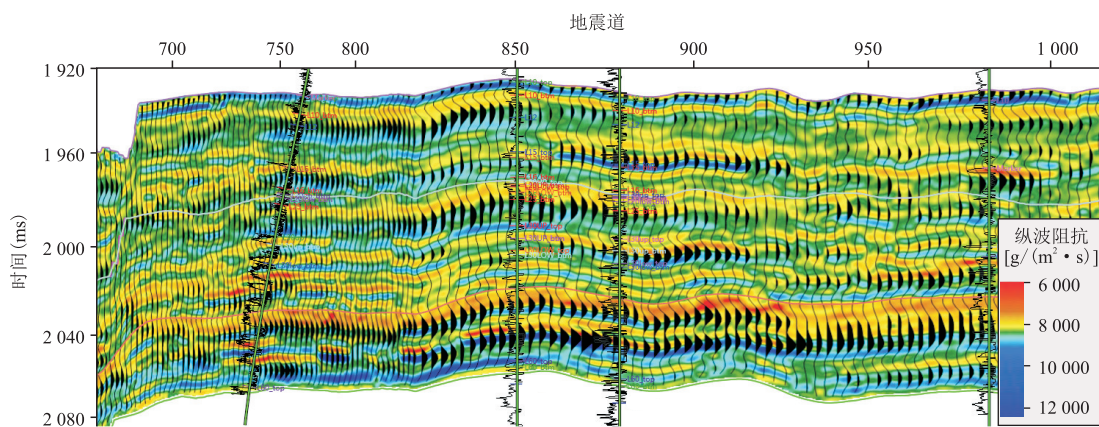


图4 地震波形指示反演剖面

Fig. 4 Seismic waveform indication inversion profile

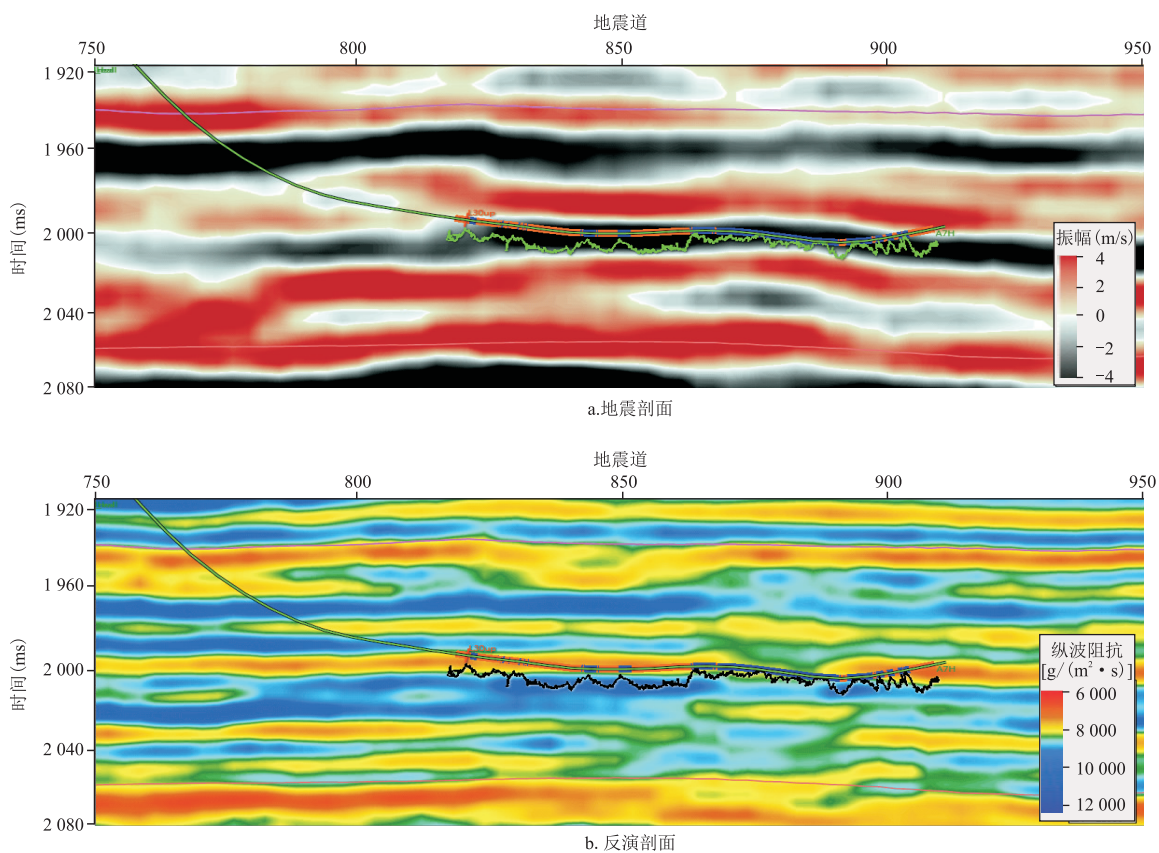


图5 过水平井剖面

Fig. 5 Horizontal well profile

画不同沉积时期储层平面展布特征的一种常用手段。属性切片的常用类型包括:时间切片、层位切片和地层切片(图7)。其中,地层切片技术是在常规地震属性切片演绎基础上,重点强调了具有沉积等时地层意义的顶底界面选取,以保证切片的等时地质意义,是地震沉积学理论中的一项关键技术。

在油田实际应用中,特别是在油田开发阶段聚

焦单一储量单元的精细储层预测时,往往存在沉积等时意义的顶底界面选取困难,离目标砂体距离较远,解释误差累积量较大等问题。为更贴近开发需求,在实际应用中经过反复试验,对地层切片演绎方法进行了改进,具体步骤为:①选取目标储层上部距离最近的,同时地震反射稳定的短期或者中期旋回等时界面作为等时地层界面,再将等时地层界面下

移若干毫秒至目的层上部作为地震属性分析的顶界面;②目标储层的底界面或其下部砂体的顶界面能够反映沉积时的古地形,可作为属性分析时窗的底界面;③顶底界面之间劈分单元,则以已钻井钻遇砂体期次为参考,同时根据属性切片演绎效果共同确定。

以研究区为例,H油田珠江组发育一套辫状河三角洲沉积体系,随着海平面逐渐上升,自下而上由三角洲平原向三角洲前缘、前三角洲演化。主力油层L30up位于低位—海侵体系域内,层序划分结果和

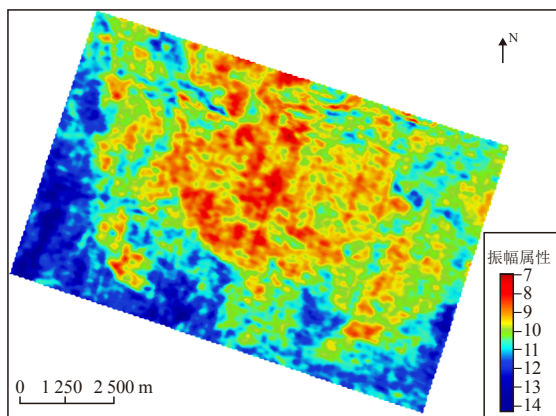


图6 南海珠江口盆地H油田L30up层振幅属性平面  
Fig. 6 Amplitude attribute of L30up layer in H Oilfield in the Pearl River Mouth Basin of the South China Sea

井震响应特征分析表明,上部的最大海泛面L10层具有明显的等时意义,且区域分布稳定、地震同相轴全区可稳定追踪,因此,作为等时地层反射界面。将L10等时界面往下时移若干毫秒,形成若干地层切片层位,若地层切片层位超过目标储层底界面深度,则将该位置的地层切片深度赋为储层底界面的时间深度值,以保证地层切片层位始终位于储层内部,形成的2个切片之间即为1个时间单元,纵向时间单元个数对应储层纵向沉积期次。

油田范围内有2口定向井和4口直井在L30up储层钻遇2期砂体,而沉积地貌反映油田范围存在2个低洼部位,其中,西部低洼部位深度和可容纳空间较油田主体区更大。根据上述条件,生成3个等时地层切片,与沉积古地形界面共同形成3个纵向时间单元(图8),再以2个地层切片作为时窗范围,利用地震数据提取层间地震属性,用于反映每个时间单元沉积的储层平面展布特征。从图9a到9c为深度从深到浅各时间单元的地震属性切片。

分析不同时间单元的地震属性特征,可以看出:目标储层L30up各期砂体由下至上具有自西向东的沉积顺序,在第1个时间单元主要发育2个朵叶体;第2个时间单元发育油田主体区的2个朵叶体和油田东部的1个朵叶体;第3个时间单元主要发育东部

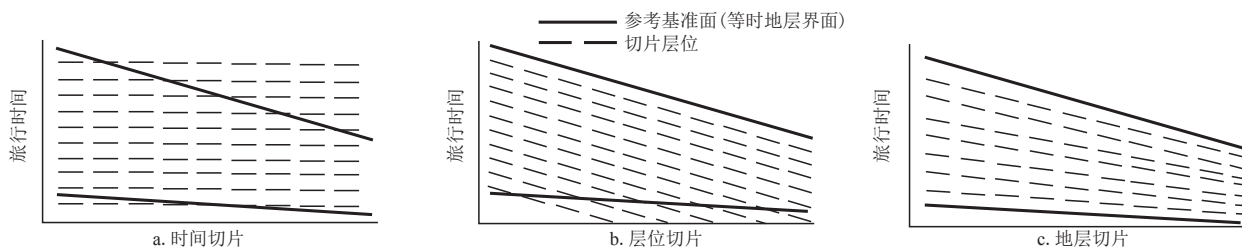


图7 三维地震属性切片对比  
Fig. 7 Comparison of 3D seismic attribute slices

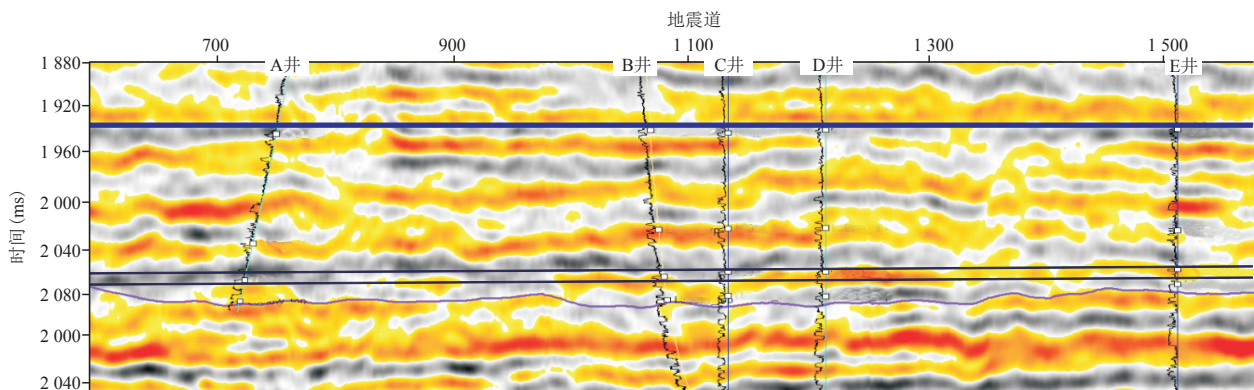


图8 地层切片生成与纵向时间单元划分  
Fig. 8 Stratigraphic slice generation and longitudinal time unit division

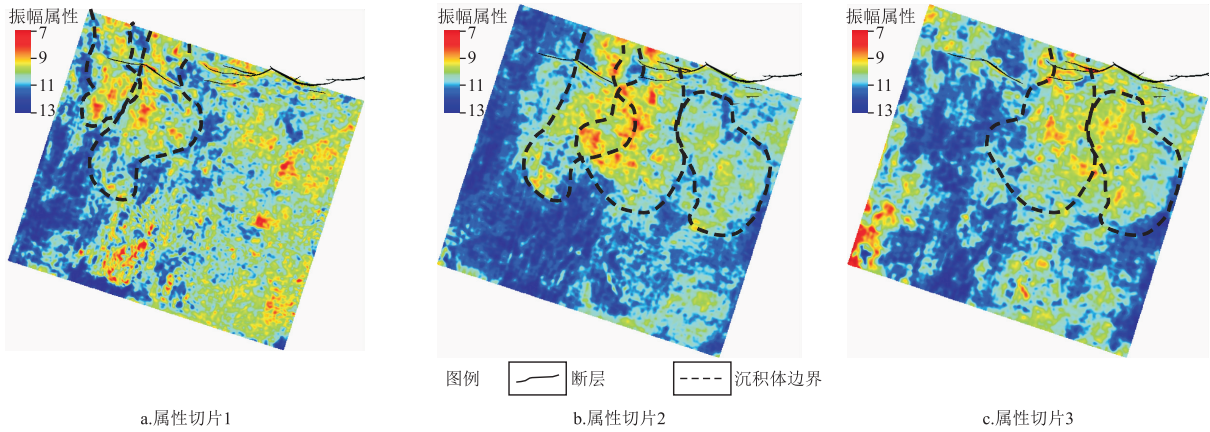


图9 地震属性切片演绎平面

Fig. 9 Seismic attribute slice interpretation

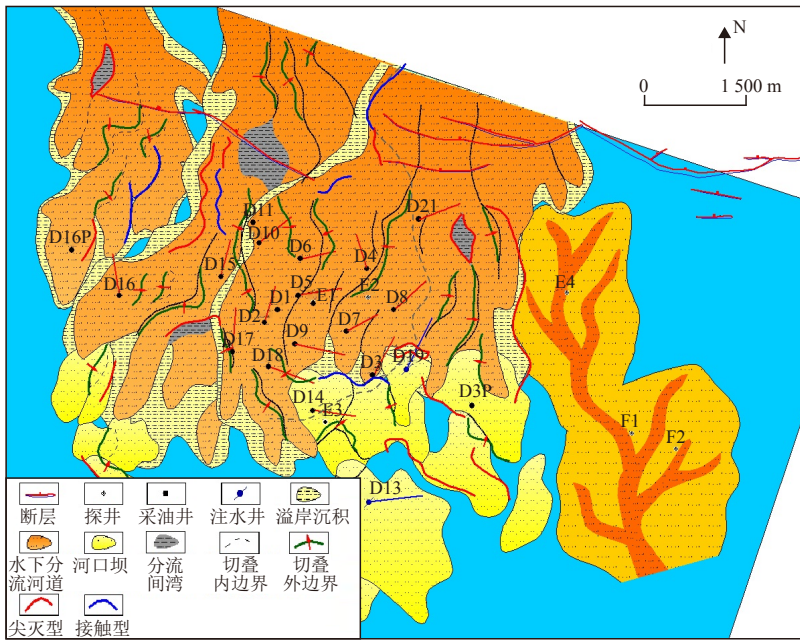


图10 南海珠江口盆地H油田L30up层平面沉积相图

Fig. 10 Planar sedimentary facies of L30up layer in H Oilfield in the Pearl River Mouth Basin of the South China Sea

的2个朵叶体。因此,油田及周边在平面上可划分4个朵叶体,其中,主体区主要发育2个朵叶体,且西部的朵叶体早于东部朵叶体,2个朵叶体在油田主体区大范围叠置,东部的第4个朵叶体与相邻油田属于同1个朵叶体沉积,经过岩心证实该朵叶体为浊流沉积。根据以上认识绘制了目标储层的平面沉积相图(图10)。

### 4 结论

以海相砂岩薄储层的精细描述和沉积微相刻画为目标,通过构建地震波形指示反演和地震属性切

片演绎方法组合技术流程,实现了小于地震分辨能力的薄砂岩储层空间展布预测和沉积规律认识。

1) 地震波形指示反演方法充分利用地震波形横向变化特征,具有较高的井间预测能力,更好地体现了“相控”思想,具有较高的预测精度和可靠程度。

2) 以地震沉积学为指导,基于等时地层格架合理选取等时地层界面,通过对目标薄储层合理划分时间单元进行地震属性切片演绎,能够获得储层平面沉积规律认识。

#### 参考文献

[1] 于兴河.油田开发中后期储层面临的问题与基于沉积成因的地质表征方法[J].地学前缘,2012,19(2):1-14.

- YU Xinghe. Existing problems and sedimentogenesis- based methods of reservoir characterization during the middle and later periods of oilfield development[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 1-14.
- [2] 宋春华,何贤科,景凤江.海上高含水油田增产挖潜技术——以海上A油田为例[J].*石油天然气学报*,2012,34(1): 123-127.
- SONG Chunhua, HE Xianke, JING Fengjiang. Technology for enhancing oil recovery and tapping the potential for high water-cut offshore oilfields-by taking an offshore oilfield for example [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2012, 34(1): 123-127.
- [3] 俞启泰.俞启泰油田开发论文集[M]北京:石油工业出版社, 1999.
- YU Qitai. Proceedings on oilfield development by YU Qitai[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999
- [4] SABARESAN M, KATHERINE S, ZHU H F. Impact of full-azimuth and long-offset acquisition on full waveform inversion in deep water, Gulf of Mexico[C]// Paper SEG- 2013- 0102 presented at the 2013 SEG Annual Meeting, September 22-27, 2013, Houston, Texas.
- [5] 撒利明,杨午阳,姚逢昌,等.地震反演技术回顾与展望[J].*石油地球物理勘探*,2015,50(1):184-202.
- SA Liming, YANG Wuyang, YAO Fengchang, et al. Past, present and future of geophysical inversion[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2015, 50(1): 184-202.
- [6] 张晶玉,范廷恩,王宗俊,等.多属性储层参数反演方法在M油田中的应用[J].*油气藏评价与开发*,2019,9(1): 8-14.
- ZHANG Jingyu, FAN Ting'en, WANG Zongjun, et al. Application of reservoir parameters inversion method by using multi-attributes in M oilfield[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2019, 9(1): 8-14.
- [7] 杨午阳,王西文,雍学善,等.地震全波形反演方法综述[J].*地球物理学进展*,2013,28(2):766-776.
- YANG Wuyang, WANG Xiwen, YONG Xueshan, et al. The review of seismic full waveform inversion method, 2013, 28(2): 766-776.
- [8] 胡滨.有色反演技术在海外A油田评价中的应用[J].*石油地质与工程*,2019,33(1):25-29.
- HU Bin. Application of colored inversion technology in overseas evaluation of A oilfield[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2019, 33(1): 25-29.
- [9] 曹绍贺.地质统计学反演方法在杭锦旗区块煤系地层储层预测中的应用[J].*石油地质与工程*,2019,33(5):41-44.
- CAO Shaohe. Application of geostatistical inversion method in reservoir prediction of coal measure strata in Hangjinqi area[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2019, 33(5): 41-44.
- [10] DUBRULE O, THIBAUT M, LAMY P, et al. Geostatistical reservoir characterization constrained by 3D seismic data[J]. *Petroleum Geoscience*, 1998, 4(2): 121-128.
- [11] 朱可丹,王雅春,林彤,等.地质统计学反演方法对单一河道砂体的刻画[J].*地球物理学进展*,2019,34(1):278-286.
- ZHU Kedan, WANG Yachun, LIN Tong, et al. Application of geostatistic inversion method to predicting single sandbody of distributary channel reservoir[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(1): 278-286.
- [12] 杨涛,乐友喜,吴勇.波形指示反演在储层预测中的应用[J].*地球物理学进展*,2018,33(2):769-776.
- YANG Tao, YUE Youxi, WU Yong. Application of the waveform inversion in reservoir prediction[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(2): 769-776.
- [13] 高君,毕建军,赵海山,等.地震波形指示反演薄储层预测技术及其应用[J].*地球物理学进展*,2017,32(1):142-145.
- GAO Jun, BI Jianjun, ZHAO Haishan, et al. Seismic waveform inversion technology and application of thinner reservoir prediction[J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(1): 142-145.
- [14] 熊冉,高亮,杨姣,等.曲线重构反演在储层横向预测中的应用[J].*西南石油大学学报(自然科学版)*,2012,34(1):83-89.
- XIONG Ran, GAO Liang, YANG Jiao, et al. Application of curve recomposition inversion in lateral reservoir prediction[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & technology edition)*, 2012, 34(1): 83-89.
- [15] 赵继龙,熊冉,陈戈,等.分频重构反演及在薄互层储层预测中的应用[J].*西南石油大学学报(自然科学版)*,2014,36(4): 47-54.
- ZHAO Jilong, XIONG Ran, CHEN Ge, et al. Seismic inversion of frequency divisions reconstruction and its application thin interbedded sand reservoir prediction[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & technology edition)*, 2014, 36(4): 47-54.
- [16] 刘书会,宋国奇,杨培杰.地震沉积学在陆相盆地中的应用——东营三角洲勘探实例[J].*石油地球物理勘探*,2014,49(2): 360-368.
- LIU Shuhui, SONG Guoqi, YANG Peijie. Seismic sedimentology in the exploration of a continental basin: A case history of Dongying delta[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2014, 49(2): 360-368.
- [17] 陈文浩,王志章,侯加根,等.地层切片技术在沉积相研究中的应用[J].*石油地球物理勘探*,2015,50(5):1007-1015.
- CHEN Wenhao, WANG Zhizhang, HOU Jiagen, et al. Strata slices in sedimentary facies research[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2015, 50(5): 1007-1015.
- [18] 夏竹,李中超,贾瑞忠,等.井震联合薄储层沉积微相表征实例研究[J].*石油地球物理勘探*,2016,51(5):1002-1011.
- XIA Zhu, LI Zhongchao, JIA Ruizhong, et al. Thin reservoir sedimentary microfacies characterization based on well logging and seismic data: a case study[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, 51(5): 1002-1011.
- [19] 顾雯,章雄,徐敏,等.强屏蔽下薄储层高精度预测研究——以松辽盆地三肇凹陷为例[J].*石油物探*,2017,56(3):439-448.
- GU Wen, ZHANG Xiong, XU min, et al. High precision prediction of thin reservoir under strong shielding effect and its application: a case study from Sanzhao Depression, Songliao Basin[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2017, 56(3): 439-448.
- [20] 李亚哲,王力宝,郭华军,等.基于地震波形指示反演的砂砾岩储层预测——以中拐—玛南地区上乌尔禾组为例[J].*岩性油气藏*,2019,31(2):134-142.
- LI Yazhe, WANG Libao, GUO Huajun, et al. Prediction of glutenite reservoir based on seismic waveform indicative inversion: A case study of the upper Urho formation in Zhongguai-Manan area[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2019, 31(2): 134-142.

(编辑 余聪)