

# 地质需求导向的子波处理技术创新

## Innovation of Geological Demand-oriented Wavelet Processing Technology

刘士靖<sup>1,2</sup> 肖玲<sup>1</sup> 郝贺晨<sup>2</sup> 马辉<sup>2</sup>

Shijing Liu<sup>1,2</sup> Ling Xiao<sup>1</sup> Hechen Hao<sup>2</sup> Hui Ma<sup>2</sup>

1. 西安石油大学地球科学与工程学院 中国·陕西 西安 710065

2. 中国石油东方地球物理公司研究院 中国·河北 涿州 072750

1. School of Geoscience and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi, 710065, China

2. BGP Inc, CNPC, Zhuozhou, Hebei, 072750, China

**摘要:** 随着油气勘探程度的提高, 油气藏的研究思路正逐步由大规模构造型油气藏朝着复杂型精细化油气藏转变, 现有地震资料往往不能满足高分辨率精细化研究需求, 因此需要对地震资料进行提频处理。零相位子波能够更加准确地对应地层界面, 分辨率最高。因此, 基于零相位子波条件下的零相位反褶积能够更好地保持地质体信息的真实性, 从而达到真实刻画精细储层目的。论文创新提出了基于地质需求导向的子波处理技术, 首先根据目标区域地质研究需求, 制定合理的提频策略和频带拓宽范围, 然后在子波零相位化的基础上进行子波频带拓宽和频谱优化。应用该地质需求导向的子波处理技术后, 地震资料分辨率明显提高, 为后续的高分辨率精细化研究工作奠定了基础。

**Abstract:** With the improvement of oil and gas exploration, the research ideas of oil and gas reservoirs are gradually changing from large-scale structural oil and gas reservoirs to complex refined oil and gas reservoirs. The existing seismic data often cannot meet the requirements of high resolution refined oil and gas reservoirs, so it is necessary to improve the frequency processing of seismic data. The zero-phase wavelet can correspond to the formation interface and has the highest resolution more accurately. Therefore, zero-phase deconvolution based on zero-phase wavelet can better maintain the authenticity of geological body information, so as to achieve the true characterization of fine reservoir. In this paper, a novel wavelet processing technique based on geological demand orientation is proposed. Firstly, according to the geological research needs of the target region, a reasonable frequency lifting strategy and frequency band broadening scope are developed. Then, wavelet band broadening and spectrum optimization are carried out on the basis of wavelet zero phase. The resolution of seismic data is improved obviously after the application of the geological demand-oriented wavelet processing technology, which lays a foundation for the subsequent high-resolution fine research work.

**关键词:** 地质需求导向; 子波处理技术; 子波零相位化; 子波频谱拓宽及优化

**Keyword:** geological demand orientation, wavelet processing technology, zero-phase wavelet, wavelet spectrum broadening and optimization

**DOI:** 10.12346/se.v4i1.6410

## 1 引言

随着油气勘探程度的提高, 油气藏的研究思路正逐步由大规模构造型油气藏朝着复杂型精细化油气藏转变, 现有地震资料往往不能满足高分辨率精细化研究需求, 重新采集成本高昂, 目前对地震资料进行提频处理是一种经济有效的方

法。目前常见的提高地震资料分辨率的处理技术主要有: 反褶积技术、谱白化技术、反 Q 滤波等技术, 这些处理技术都有其优势及局限性。为了合理地提高地震资料的分辨率, 有效识别勘探区的精细储层, 论文创新性地提出了基于地质需求导向的子波处理技术方案: 首先根据目标区域地质研究

【作者简介】刘士靖(1993-), 女, 中国河北邯郸人, 本科, 工程师, 从事地震解释及综合分析研究。

需求, 制定合理的提频策略和频带拓宽范围; 其次利用零相位子波分辨率最高的特点, 进行子波零相位化; 最后在零相位数据的基础上进行子波频带拓宽和频谱优化。该技术成功地应用在了中国四川川东北凉高山组页岩油气研究项目中, 取得了较好的效果。

## 2 技术方法及原理分析

川东北凉高山组沉积中心位于盆地东部, 龙岗—平昌一带地层厚度最大, 是泥页岩发育的有利区带, 大庆矿权内页岩油气有利勘探区超过 5000km<sup>2</sup>, 勘探领域巨大。2021 年平安 1 水平井在凉高山组获高产油气流, 为了进一步推动页岩油气研究工作, 挖掘勘探潜力, 油田公司提出了针对平安 1 井水平段钻遇页岩层顶、底及压裂 21 号、20 号、19 号层顶面开展构造精细解释, 完成水平段页岩顶、底构造图及厚度图的工作要求。但是目前原始数据地震分辨率略低, 凉上底部砂岩位于强波谷内, 凉下顶部页岩段一半位于强波谷, 一半位于强波峰, 不能很好地区分精细小分层, 无法满足甲方提出的工作要求。

### 2.1 地质需求导向的地震资料分析

首先根据目标区域地质研究需求, 对地震资料进行分析: 地震数据的相位为混合相位, 因此需要对地震子波零相位化, 提高资料分辨率。凉上底部砂岩与凉下顶部页岩段在井资料中的时差约为 30~40ms, 通过频率计算公式, 想要在凉上底部砂岩与凉下顶部页岩段中区分出三套压裂层段的理论频率应为 75~80Hz<sup>[1]</sup>。而地震资料的主频为 20Hz 左右, 如图 1 所示。因此, 在凉上底部砂岩与凉下顶部页岩段中区分出三套小层地震资料频率应提高至 80Hz。

子波是地震记录的基本单元, 子波与地层反射系数褶积形成地震剖面。地震子波经过傅里叶变换之后得到振幅谱和相位谱<sup>[2]</sup>, 在地震数据处理中先通过子波零相位化, 使相位谱归零, 提高地震资料分辨率, 再通过拓宽地震子波振幅谱进一步提高地震剖面的分辨率。基于地质需求导向的子波处理技术同时针对振幅谱和相位谱进行双重优化从而提高地震资料的分辨率<sup>[3]</sup>。地震资料提频技术策略如图 2 所示。

### 2.2 地震资料相位谱归零

通过地质需求导向的地震资料分析, 明确了提频策略和频带拓宽范围。子波中的相位情况及频率成分决定了地震分辨率的高低, 因此首先需要地震子波进行零相位化。零相位子波是关于零时刻对称的非物理可实现信号, 且最大振幅位置位于零时刻。地震子波在零相位的条件下分辨率最高, 有利于地震解释、反演和储层预测, 而在地震资料采集中得所激发的震源子波一般是最小相位或混和相位的物理可实现信号。

为了提高地震资料的分辨率, 利用测井资料求取实际地

震资料平均子波, 将子波的振幅谱保持不变, 相位谱转化为零相位得到期望零相位子波, 零相位化算子的求取如图 3 所示。在拥有初始子波和期望零相位子波条件下, 通过褶积得到滤波算子, 地震数据应用算子完成零相位化工作。地震子波经过改造后从研究区地震数据体中提取的实际地震子波几乎逼近零相位, 并且地震剖面分辨率有了一定程度的提高, 如图 4 所示。最终得到的零相位子波可以被看作多个正弦波的合成<sup>[4]</sup>, 且这些都是以一个波峰或波谷时间为基线的。不同频率的波峰或者波谷相互的叠加作用, 使得零相位子波的主峰谷值最大, 具有最高的分辨率<sup>[5]</sup>。地震资料相位谱归零同时也为下一步地震资料频谱拓宽工作奠定基础。

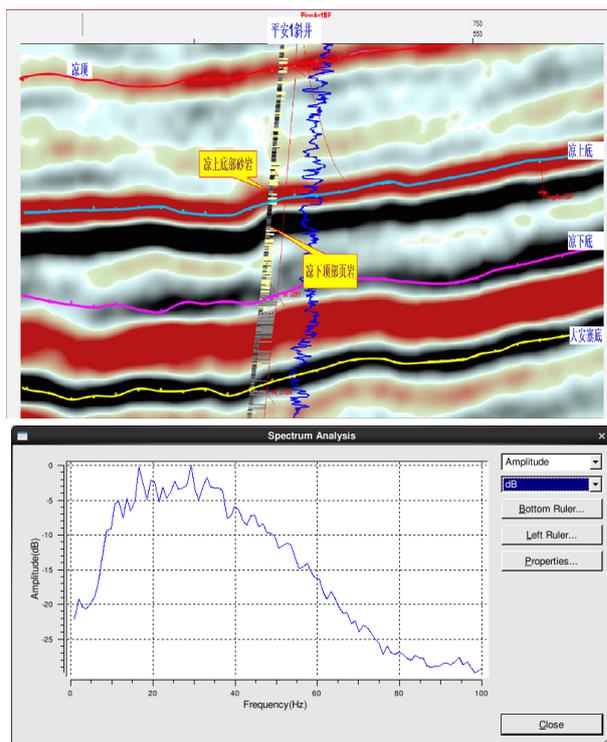
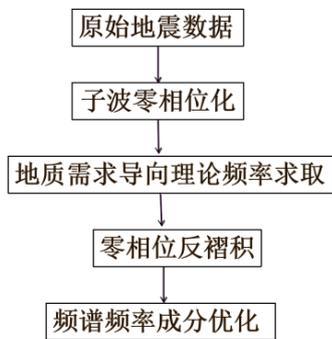


图 1 研究区目的层频谱分析



技术流程图

图 2 地质需求导向的子波处理技术流程图

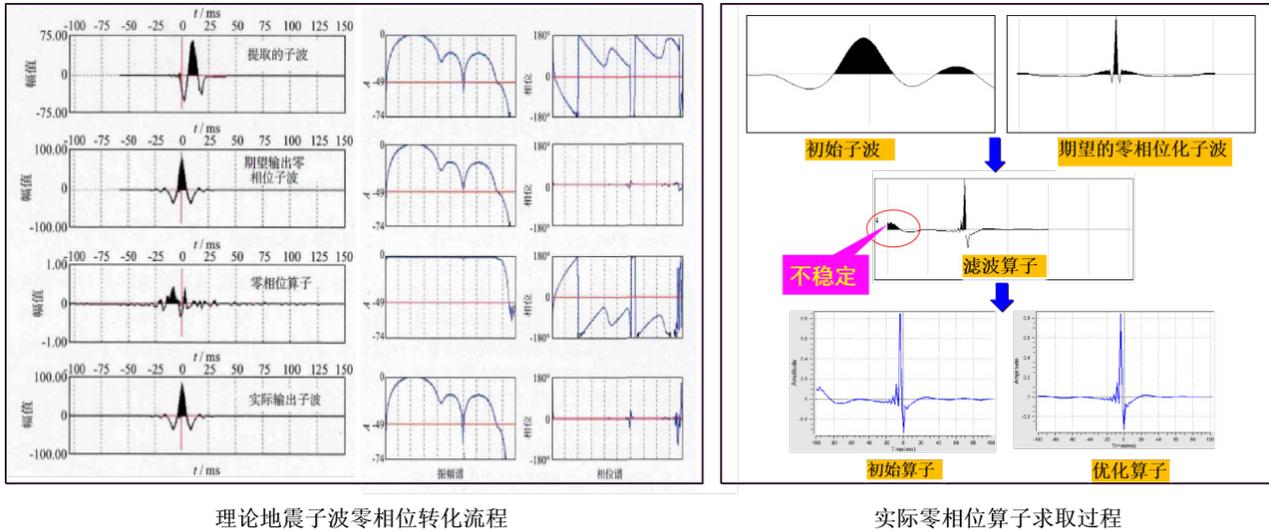


图 3 理论与实际零相位化算子求取原理

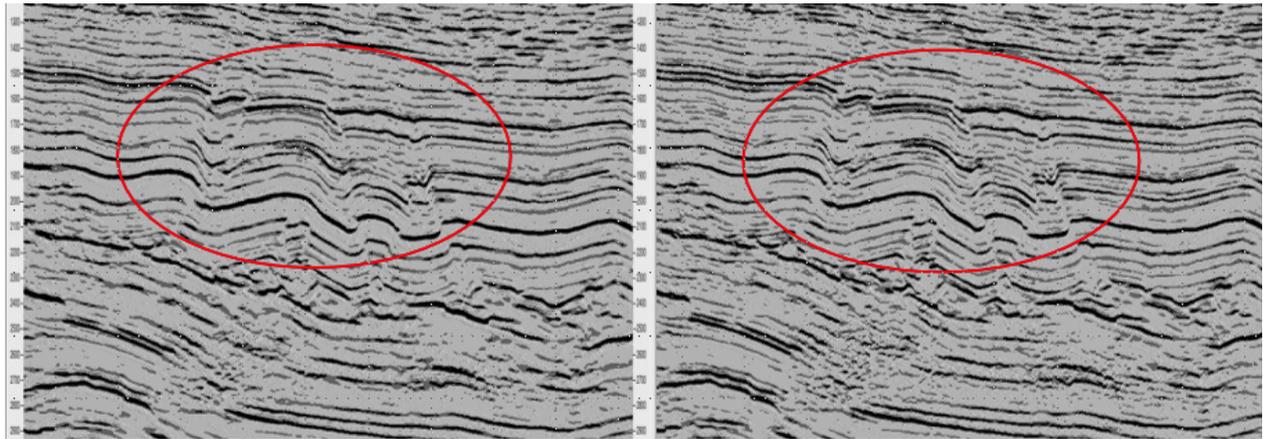


图 4 相位谱归零前（左）、后（右）地震剖面

### 2.3 地震资料频谱拓宽

子波相位谱归零只改变资料频率—相位谱，而频率—振幅谱保持不变。通过地质导向的地震资料分析，在凉上底部砂岩与凉下顶部页岩段中区分出三套小层地震资料频率应提高至 80Hz。通过大量试验结合以往项目经验，最终选择零相位反褶积对地震资料频率—振幅谱进行拓宽。零相位反褶积也称为纯振幅反褶积或保持相位反褶积，该方法只对地震道的振幅进行处理，而不改变地震道的相位<sup>[1]</sup>。地震资料相位归一化和零相位反褶积配套使用，可以使反褶积的结果保持零相位特征，同相轴无时移现象，同时拓宽资料频谱至 80Hz。

零相位反褶积原理简述如下：

设  $F_j(j=1, 2, 3 \dots m)$  为一系列频带为  $(f_i, f_{ij})$  的带通滤

波器， $X(t)$  为输入地震道，其滤波输出为：

$$r_j = X(t) * F_j(t) \quad (j=1, 2, 3 \dots m)$$

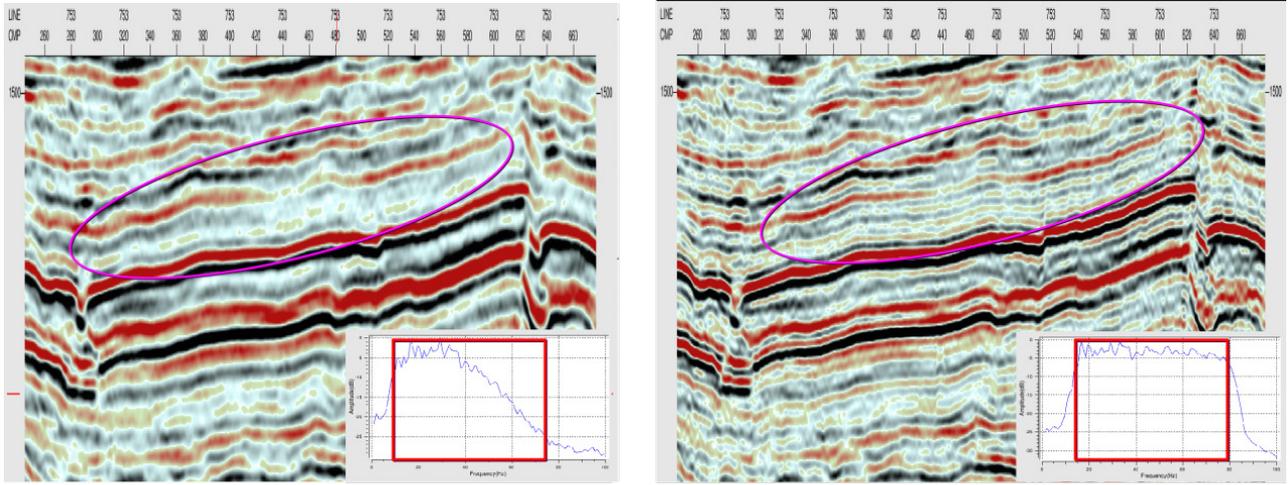
其中，

$$F_j(t) = \frac{4}{(f_4 - f_3)^2} \frac{\sin(f_3 + f_4)t}{\pi t} \frac{\sin^2\left(\frac{\pi(f_4 - f_3)t}{2}\right)}{\pi^2 t^2} - \frac{4}{(f_2 - f_1)^2} \frac{\sin(f_1 + f_2)t}{\pi t} \frac{\sin^2\left(\frac{\pi(f_4 - f_3)t}{2}\right)}{\pi^2 t^2}$$

$$(f_1 = f_{li}, f_2 = f_3, f_4 = f_{hj})$$

输出地震道为  $R(t) = \sum_{j=1}^m r_j(t) * w_j(t)$ ， $w_j(t)$  为加权系数：

当选择均衡加权输出时， $w_j(t)$  为浅层动平衡权系数；当选择保持振幅相对关系时， $w_j(t)$  为分段均值。通过应用零相位反褶积，在有效拓展资料频宽、提高资料分辨能力的同时更好地保持了数据的低频成分，零相位反褶积频谱拓宽前后的效果如图 5 所示。



原始数据地震剖面

零相位反褶积后数据地震剖面

图 5 零相位反褶积前 (左) 后 (右) 地震剖面对比

### 2.4 地震子波频谱优化

地震资料零相位化和频谱拓宽后, 地震资料分辨率有了显著的提高, 但是地震资料仍然存在着低频成分能量强, 高频成分能量弱, 部分区域资料无法完全满足地质解释需求的问题, 因此需要进一步对地震子波频谱进行优化, 突出地震子波中的高频成分, 从而进一步提高地震剖面分辨率。频谱优化原理简述如下:

假设原始数据为  $s(t)$ , 期望输出数据为  $d(t)$ , 设计优化系数为  $f(t)$ , 输出结果为  $y(t)$  与  $A(t)$  之间的最小平方误差为最小, 其中  $y(t)=f(t) \times s(t)$ 。误差  $E$  定义为:

$$E = \sum_t (d(t) - y(t))^2$$

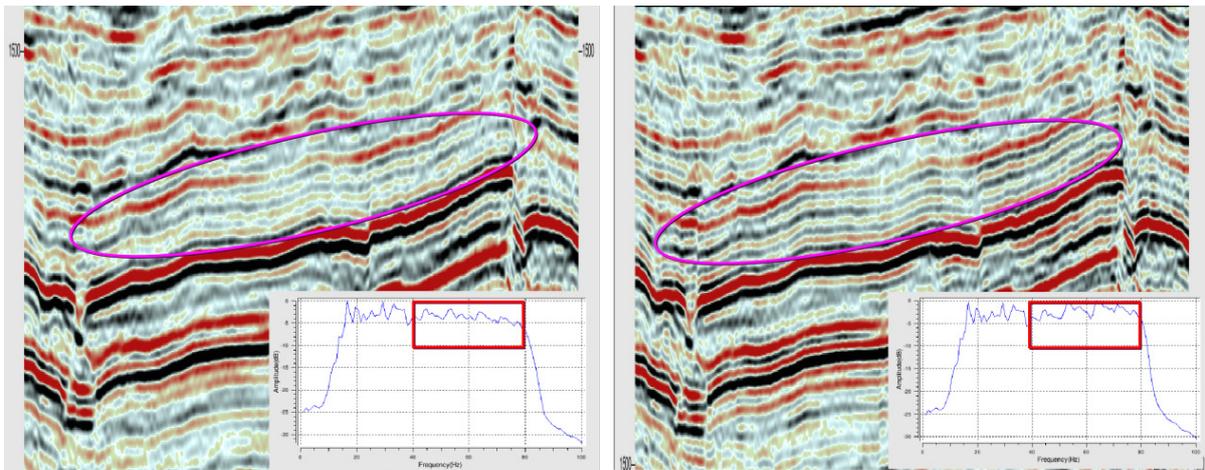
解上述方程, 计算系数  $(f_0, f_1, \dots, f_{n-1})$  以使误差最小。首先将平方项展开, 将结果表达式代入, 则有:

$$E = \sum_t d_t^2 - 2 \sum_t d_t \sum_{\tau} f_{t-\tau} s_{t-\tau} + \sum_{\tau} f_{t-\tau} (\sum_{\tau} f_{t-\tau} s_{t-\tau})^2$$

欲使误差  $E$  最小, 则对上式取偏微分并令其为零, 则有

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & \dots & r_{n-1} \\ r_1 & r_0 & \dots & r_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n-1} & r_{n-2} & \dots & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ \vdots \\ f_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ \vdots \\ g_{n-1} \end{bmatrix}$$

其中,  $(r_0, r_1, \dots, r_{n-1})$  是原始数据  $s(t)$  的自相关,  $(g_0, g_1, \dots, g_{n-1})$  是期望输出  $d(t)$  与原始数据的互相关。利用最小二乘法得到优化系数  $(f_0, f_1, \dots, f_{n-1})$ , 应用该算子优化地震资料频谱。优化后地震资料频谱高频成分能量增强, 频谱能量更加均衡, 地震剖面分辨率进一步提高, 地震子波频谱优化前后的剖面对比如图 6 所示。



零相位反褶积后数据地震剖面

频谱优化后数据地震剖面

图 6 频谱优化前 (左) 后 (右) 地震剖面对比

### 3 应用效果分析

基于地质需求导向的子波处理技术在四川盆地平昌地区进行了实际应用。应地质需求导向的子波处理技术前地震资料分辨率难以有效识别该地区钻井压裂层段储层薄。应用该技术后地震资料分辨率明显提高,对平安1斜井进行合成记录标定,波组关系对应较好,相关系数达到0.8。应用提频后地震数据对平安1斜井进行压裂层段识别,有效地识别出了19号、20号、21号精细储层及水平段页岩的顶底,如图7所示。

### 4 结论与认识

通过对四川盆地平昌地区川东北凉高山组页岩油气处理解释一体化研究,总结出以下几点结论与认识:①地震资料频率拓宽并不是无限制的,需要根据采集参数,地质目标等综合考虑,制定合理的提频方案与频率拓宽范围;②地震子波零相位化和子波频带拓宽都可以有效提高地震剖面的分辨率,在子波频带拓宽方法选取需注意保持原有子波相位成分一致;如果子波频谱优化可以在保持子波相位关系,频带宽度不变的情况下,对各个频率成分的振幅“再平衡”,突出子波频谱中的期望成分,以满足高分辨率精细化地解释研究需求。

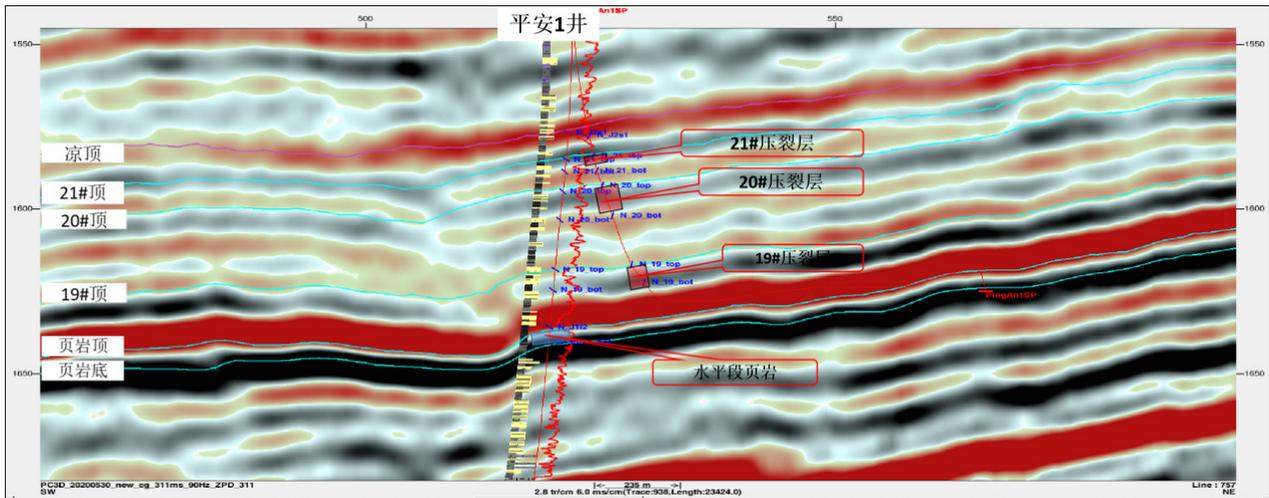


图7 子波处理后地震数据体标定及精细储层识别效果图

### 参考文献

- [1] 吕磊,黄云峰,田彦灿,等.零相位反褶积在不整合接触关系保真处理中的应用[J].石油地球物理勘探,2018,53(S2):20-23.
- [2] 魏小涵,赵俊.基于高阶谱估计地震子波[J].西部探矿工程,2014,26(4):117-119+123.
- [3] 苏贵仕,沈克非,丁学垠.地震数据处理中关于地震子波相位特性的探讨[J].石油地球物理勘探,2008,43(S2):121-124+178.
- [4] 程慧.基于地震资料的地质建模及效果评价[D].北京:中国石油大学,2009.
- [5] 李佳胜,李勇.90°相位转换技术在石油地质薄砂层解释上的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2013,33(15):137+139.