

文章编号: 1001-1749(2023)02-0129-09

# 海上中深层强反射背景下的薄弱储层预测方法

满建, 胡林, 隋波, 马光克, 满勇

(中海石油(中国)有限公司海南分公司 南海西部石油研究院, 海口 570311)

**摘要:** 海上中深层薄互层岩性油气藏勘探是一大难点问题, 中深层的地震资料往往品质较差, 分辨率低, 且常常存在盖层强反射的遮挡问题, 制约单砂体预测研究。为解决此类薄砂层预测难点问题, 这里提出了一种面向海上中深层地震强反射干扰背景下的薄弱储层预测方法, 从地震资料出发进行两次优化处理, 以提高地震对薄层的分辨率, 通过子波反褶积对地震资料开展以储层预测为导向的拓频, 提高地震对薄层分辨率, 再考虑去除盖层强反射的影响, 采用匹配追踪算法对地震资料进行分解, 通过强反射层频率范围约束原子匹配过程, 识别出区域上的强反射层地震信息, 从拓频后的地震资料中剥离强反射轴, 利用二次优化后的地震资料开展叠前反演预测优质储层分布范围, 基于此策略解决复杂中深层储层预测难题。具体介绍了拓频和去强轴二次优化处理的原理, 并通过模型正演分析了薄砂层地震响应及盖层强反射轴的形成机理并验证了该方法的可行性。在南海西部某目标区块储层预测应用中, 该方法能很好地预测薄砂储层的分布特征, 提高了隐蔽型目标层的油气预测精度, 为此类中深层强反射干扰背景下隐蔽油气藏的预测提供了一种新的参考, 对油气勘探开发具有重要意义。

**关键词:** 海上中深层; 拓频; 强反射去除; 二次优化; 地震反演; 储层预测

**中图分类号:** P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.02.01

## 0 引言

随着我国海洋油气勘探开发力度的加大, 海上油气藏勘探工程技术也取得突飞猛进的发展, 目前已逐渐从浅海走向深海, 从勘探地球物理研究的角度, 中深层储层薄互层的精细刻画一直是一大难点问题。由于中深层地层埋深大, 采集到的地震资料衰减严重, 薄砂层地震响应较弱, 地震分辨率无法识别出较薄的砂体, 使得岩性储层预测的难度较大, 制约着储层的精细认识。而在我国南海西部海域复杂地质条件下, 流沙港组流三段 T86 地层上发育大套

油页岩, 岩石物理特征为低速度, 低密度, 低阻抗。该地层地震为“强波谷”特征, 由于流三段多套薄砂层反射相互干涉严重且与油页岩盖层强反射信息耦合, 在强反射信息遮挡的影响下, 目的层地震响应相对较弱, 直接通过原始地震资料开展反演获得地层弹性和物性参数, 通过主要目的层提取相关属性难以精细刻画出盖层屏蔽层之下薄砂层分布特征。为解决地震资料对储层预测的制约, 在开展地震反演储层预测工作之前, 我们需要对资料进行以储层预测为导向的优化处理, 合理地提高地震的分辨率, 充分挖掘薄层的反射信息。在提高地震资料品质方面, 李庆忠院士<sup>[1]</sup>在《走向精确勘探的道路》一书中详细

收稿日期: 2022-10-09

基金项目: 中海石油(中国)有限公司科技项目(YXKY-2019OZY-05)

第一作者: 满建(1992-), 男, 硕士, 工程师, 从事油气地球物理勘探工作, E-mail: manjian@cnooc.com.cn。

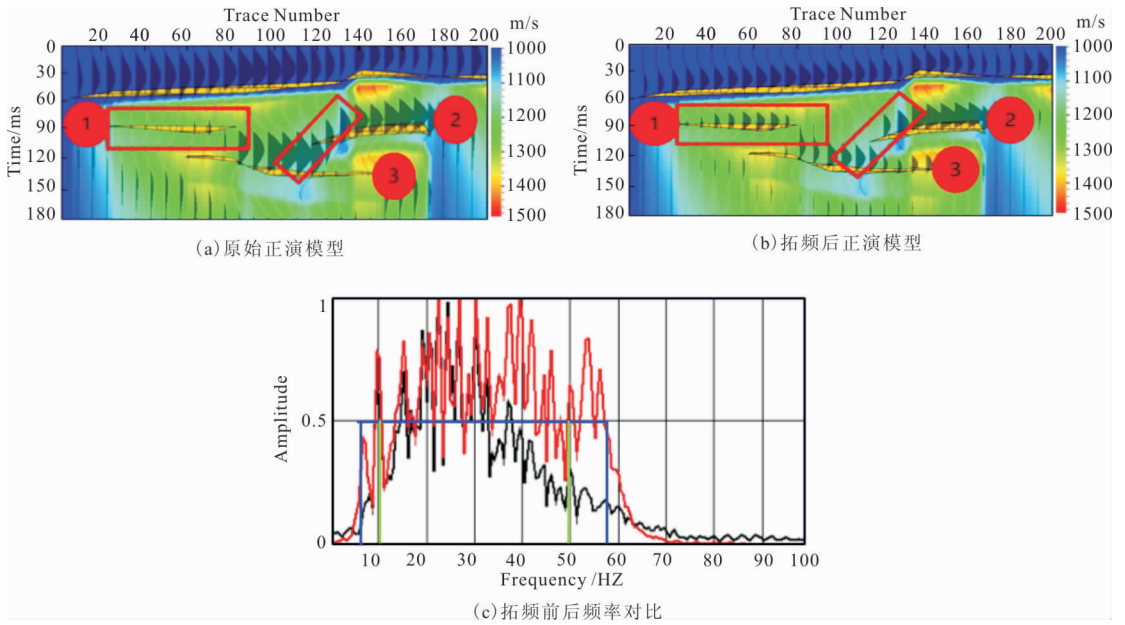


图1 拓频效果分析

Fig. 1 Frequency increasing effect analysis

介绍了地震资料的处理的理论基础。诸多专家学者也就提高地震资料分辨率问题做了深入地研究,并在实际生产研究中取得了很好的应用效果,目前常用的主要以反射系数褶积、反 Q 滤波、谱蓝化等方法<sup>[2-7]</sup>。在针对特殊岩性强反射识别研究方面,匹配追踪算法应用非常广泛,该算法最早是 Mallat<sup>[8]</sup>等提出的一种时频分解算法,学者们根据实际需求在算法上做了很多优化,不断简化了原子匹配过程,提高了计算的效率<sup>[9-14]</sup>,印兴耀等<sup>[15]</sup>研究了匹配追踪方法识别三角洲砂岩边界问题;李海山<sup>[16]</sup>利用匹配追踪算法有效的去除了地震资料中的煤层强反射;刘杰<sup>[17]</sup>将快速匹配追踪算法运用到海上地震资料强反射去除问题上,为海上资料烃类检测提供了很好的解决方案。总结前人在处理强反射问题的经验,通过稀疏算法对地震记录分解,基于振幅、频率、相位等信息匹配出强反射层地震信息,通过剥离强反射的干扰改善原始地震品质,发展系列针对强反射背景干扰下的储层预测方法研究,在煤系地层沉积、火成岩喷发、海侵灰质或泥岩脱水等复杂情况下都有很好的应用效果<sup>[14-19]</sup>,值得关注的是海上面临更为复杂的地质条件,深水深地采集的地震资料品质更差,深层沉积条件及储层结构复杂,往往物性较差,对海上中深层条件下的储层预测提出了更高的

要求,仍需进一步精细研究适用实际资料的有效方法。

## 1 以储层预测为导向的地震资料优化

### 1.1 反褶积拓频

地震资料具有带限特征,它本身没有获得的分辨率,我们也不可能通过某些数学方法来完全恢复<sup>[1]</sup>,因此,充分利用地震资料中隐藏的有用信息,我们知道在反褶积过程中地震子波决定着地震记录的分辨率,而反褶积首先要从原始地震记录中提取子波,通过子波可以达到拓宽频带的目的,要保证处理后资料在原始地震有效频宽带内而不含假频信息,既要提高分辨率,又要保真。因此,选取合适的子波是拓频成功的关键因素,笔者在提取子波时设计维纳滤波器对求反子波进行合理的滤波,因为俞氏子波的波形光滑连续,振幅谱具有良好的连续性,相位谱零点对称且峰值频率是灵活可调的,通过调整俞氏子波的频率调整期望子波,使得到的子波与设定的俞氏子波误差  $\delta$  最小,根据式(1)、式(2)可求出反褶积滤波算子  $\epsilon$ 。

$$\delta = \sum_{t=-\infty}^{\infty} \{\epsilon \cdot x(t) - \omega(t)\}^2 \quad (1)$$

$$d_{\text{new}}(t) = x(t) * d_{\text{ori}}(t) \quad (2)$$

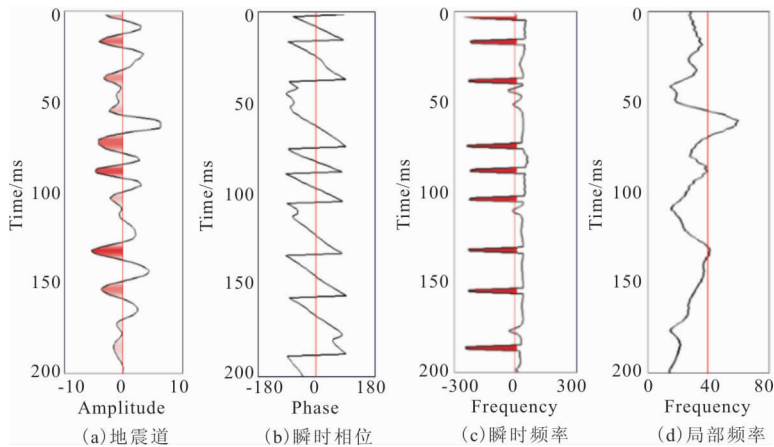


图 2 单道地震信号分析

Fig. 2 Single seismic signal analysis

式中:  $x(t)$  为从地震记录中提取的输入子波;  $\omega(t)$  为期望输出的俞氏子波;  $\epsilon$  为待求取的滤波算子, 再将其应用于地震道反褶积, 可得到改善分辨率和拓频后的地震记录。为了直观展示该方法的拓频效果, 设计了薄砂泥地质模型, 通过 20 Hz 雷克子波制作了合成地震记录如图 1(a) 所示, ①号砂体地震响应几乎无法识别, ②号和③号薄砂体地震响应相互耦合, 尖灭不清晰。拓频后的正演模型如图 1(b) 所示, 3 块薄砂体在地震上的反射信息得以凸显且砂体尖灭清晰, 砂体横向变化特征在地震上也得到更好的反映。对比拓频前后地震资料频谱特征, 处理前、后有效信息能量基本不变, 处理后的地震资料主频和频带宽度都有一定提高(图 1(c)), 在低频区间上拓宽了 4 Hz, 高频区间上拓宽了 8 Hz, 中心频提高到 25 Hz 左右, 有效提高了地震纵向和横向分辨率, 薄砂识别能力及砂体连通性增强, 该处理方法可以为地震解释及反演工作提供更好的基础资料。

## 1.2 快速匹配追踪强反射剥离技术

Mallat 等<sup>[10]</sup>提出的匹配追踪算法, 根据信号局部结构特征构建超完备的字典原子库, 在一组能够适应各种时频特性的原子上将信号展开, 最终利用有限个原子稀疏表示原始信号, 实现信号的自适应分解, 匹配追踪在地球物理的处理及解释过程应用广泛, 主要面临的问题是传统的匹配追踪算法本身是一种贪婪算法, 通过对时移振幅、频率和相位参数进行全局扫描, 创建超完备的时频原子库, 以寻找最佳相关的匹配原子, 但该算法每一次迭代的内积运算量大, 对信号的分解效率极低。近年来学者们对

匹配追踪算法这一弊端做了很多改善。考虑约束匹配原子的搜索范围, 以某些先验信息创建动态子波库, 使每一次迭代的内积运算量大为减小从而提高了分解效率。学者们在传统方法基础上引入原始信号的瞬时振幅、瞬时频率和瞬时相位等先验信息, 约束原子频率和相位的搜索邻域, 有效提高匹配追踪计算效率。然而考虑到以瞬时频率确定最优原子搜索范围过程存在一定问题, 瞬时频率是瞬时相位对时间的导数, 在计算结果存在“负频率”现象, 且受噪声干扰大, 计算结果极不稳定。当频率计算结果不合理时, 只能对时频原子的频率属性进行全局搜索, 并不是真正意义上的动态搜索。为此, 这里将局部率算法用于动态匹配追踪算法, 根据整形光滑理论, 利用差分算子综合某数据点邻域内的频率值, 计算得到该数据点的频率属性信息, 局部频率计算结果合理、稳定, 抗噪性较强, 因此可以直接用于确定最优时频原子的搜索邻域。式(3)为瞬时频率的表达式, 式(4)是根据 Home 理论求得的局部频率。

$$\omega(t) = \dot{\phi}(t) = (x(t)h'(t) - x'(t)h(t)) / (x^2(t) - h^2(t)) = u(t)/v(t) \quad (3)$$

$$W = [\epsilon^2 I + S(U + \epsilon^2 I)]^{-1} SU \quad (4)$$

图 2 分别是地震信号的瞬时相位, 瞬时频率和局部频率, 局部频率避免了瞬时频率的“负频率”现象, 提高了匹配追踪算法过程的稳定性和效率。

在频率约束条件下匹配出强反射地震信息  $d_{\text{strong}}$ , 通过多次尝试优选出最佳的去除因子  $\lambda$ , 使得强反射轴的能量与背景地震相当, 从而让主要目的层反射信息突显出来。

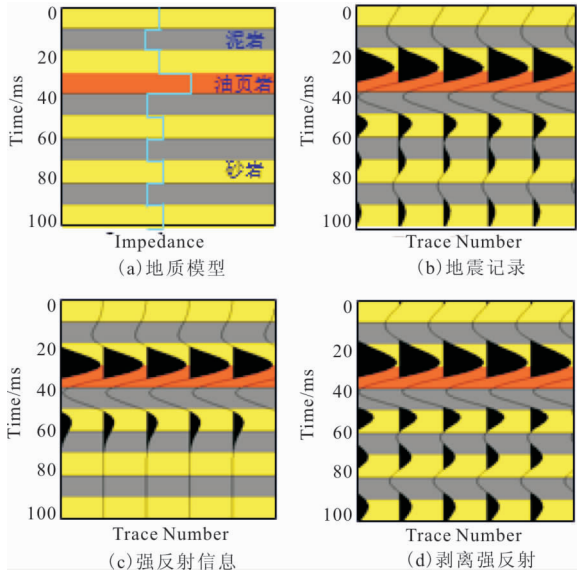


图3 强反射识别去除过程

Fig. 3 Removal process of strong reflection recognition

$$\frac{1}{a} \| E_{\text{ground}} \|_2^2 = \frac{1}{\infty} \| E_{\text{ori}} - \lambda * E_{\text{strong}} \|_2^2 \quad (5)$$

$$d_{\text{real}} = d_{\text{ori}} - \lambda * d_{\text{strong}} \quad (6)$$

式中<sup>[12]</sup>:  $E_{\text{ground}}$  为背景地震反射能量;  $E_{\text{ori}}$  为原始地震反射能量;  $E_{\text{strong}}$  为强反射能量;  $\lambda$  为去除因子;  $d_{\text{real}}$  为去除强反射后的地震记录;  $d_{\text{ori}}$  为原始地震;  $d_{\text{strong}}$  为强反射后的地震记录。

为了验证局部频率范围匹配追踪识别去除强反射信息方法的实用性,这里设计了简单的层状介质模型,砂泥岩互层中发育一套高速油页岩,其中油页岩的阻抗远高于砂岩,砂岩的阻抗高于泥岩。选用主频为 35 Hz 的雷克子波进行地震记录合成,利用局部频率范围匹配追踪方法对地震道进行匹配分解,识别出的强反射波形范围与地质岩性界面一致,通过对识别出来的强反射信息进行合理程度的剥离达到去除强反射的目的(图 3),处理后的地震道集与原始波形一致,而油页岩下部砂泥岩的反射界面相比于处理前更加清晰。

### 1.3 二维模型优化效果验证

为了进一步验证滤波反褶积拓频和匹配追踪方法去除强反射的实际效果,设计了层状介质模型,砂泥岩互层中发育一套高速油页岩,其中油页岩的阻抗远高于砂岩,砂岩的阻抗高于泥岩。选用主频为 30 Hz 的雷克子波进行地震记录合成,由于高速层的存在,在砂层上方形成强反射盖层,且砂体较薄,

地震特征不清晰。首先利用前面的滤波反褶积提频方法提高地震对薄砂层的分辨率,效果如图 4(c)所示,提频后砂体地震响应得以更好的显现,但上方强反射轴的屏蔽作用依然突出,利用局部频率范围匹配追踪方法对地震道进行匹配分解,识别出的强反射波形范围与地质岩性界面一致,通过对识别出来的强反射信息进行合理程度的剥离达到去除强反射的目的,处理后的地震道集与原始波形一致,而油页岩下部砂泥岩的反射界面相比于处理前更加清晰,薄砂体地震反射特征也得以凸显。

## 2 叠前弹性阻抗反演及参数提取

### 2.1 弹性阻抗反演原理

基于角度叠加地震数据反演弹性阻抗的方法与叠后波阻抗反演相似,叠前弹性阻抗反演的流程可简单概括为以下 4 个步骤:①叠前道集角度叠加处理;②测井数据标准化处理;③不同角度地震数据的子波的提取;④不同角度弹性阻抗体的反演。整个反演过程可以概括为求子波与反射系数褶积制作的合成地震记录与实际地震误差最小值,该方程可以采取最小二乘、梯度法、牛顿法求解。为了降低反演结果的多解性,以实际测井数据和地质模型作为约束条件增加确定性,将目标函数表达为:

$$R = \arg \min \{ \| d - \omega * R \|_2^2 + \alpha \| R \|_1 + \beta \| \epsilon - CR \|_2^2 \} \quad (7)$$

$$\ln EI = 2 \sum_{i=1}^n R(i) \quad (8)$$

式中:  $R$  为反射系数;  $d$  为地震记录;  $\omega$  为子波;  $\epsilon$  为阻抗模型;  $\alpha, \beta$  为约束系数。

### 2.2 弹性参数提取

由于弹性阻抗包含角度变化、纵横波速度及密度等岩石弹性参数的信息,这些属性信息可以体现岩石岩性及流体变化,因此通过建立这些弹性参数与不同角度的弹性阻抗之间的关系,利用数学算法把它们从数据体中提取出来从而描述地下储层的信息。由于横波速度不受孔隙流体的影响,纵波速度在含油气条件下变小,而泊松比可以用岩石横向压缩与纵向伸张的比值来表示,通常可用来反映岩性和含油气性。因此,利用弹性波阻抗反演技术可估算纵、横波速度和密度,进而得到能够用来预测岩性及检测烃类的泊松比或纵、横波速度比<sup>[20]</sup>。

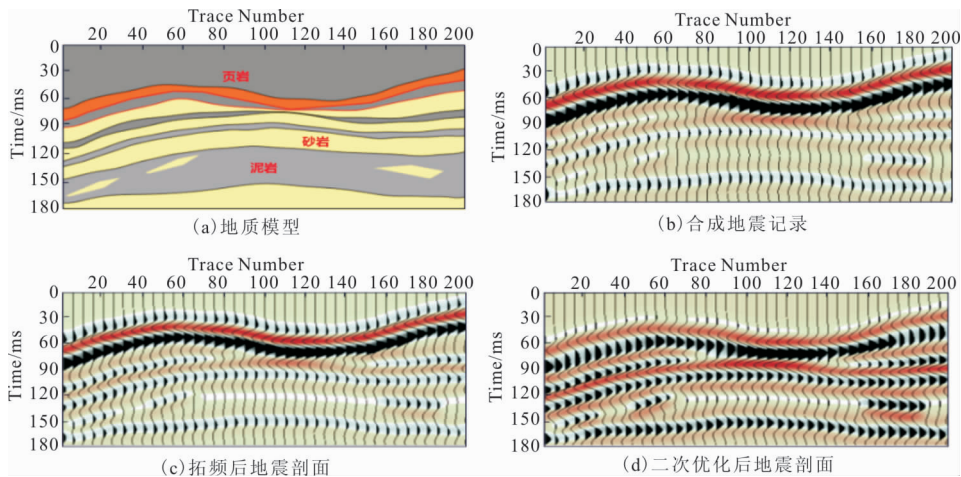


图4 模型方法效果验证

Fig. 4 Model method verification

$$\begin{bmatrix} \ln \frac{\rho(t_1)}{\rho_0} & \ln \frac{\alpha(t_1)}{\alpha_0} & \ln \frac{\beta(t_1)}{\beta_0} \\ \ln \frac{\rho(t_2)}{\rho_0} & \ln \frac{\alpha(t_2)}{\alpha_0} & \ln \frac{\beta(t_2)}{\beta_0} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \ln \frac{\rho(t_n)}{\rho_0} & \ln \frac{\alpha(t_n)}{\alpha_0} & \ln \frac{\beta(t_n)}{\beta_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(\theta) \\ b(\theta) \\ c(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln \frac{EI(t_1, \theta)}{EI_0} \\ \ln \frac{EI(t_2, \theta)}{EI_0} \\ \vdots \\ \ln \frac{EI(t_n, \theta)}{EI_0} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\sigma = ((\alpha/\beta)^2 - 2) / (2(\alpha/\beta)^2 - 2) \quad (10)$$

其中:  $\theta$  为入射角;  $\alpha$  为纵波速度;  $\beta$  为横波速度;  $\rho$  为密度;  $\alpha_0$ 、 $\beta_0$  和  $\rho_0$  为参考常数;  $\sigma$  为泊松比。

### 3 技术流程

针对海上中深层地震资料对薄层的分辨率低的问题,介绍了反褶积拓频的原理,并结合简单的模型验证了提频的效果;针对目的层上存在特殊地层形成强反射屏蔽有效信息的问题,叙述了基于匹配追踪算法的地震时频分解及强反射去除原理,笔者对常规的全局寻优匹配过程做了改进,通过分析强反射频率特征,采用局部频率作为约束条件大大减小了原子匹配效率,提高了计算速度。基于以储层预

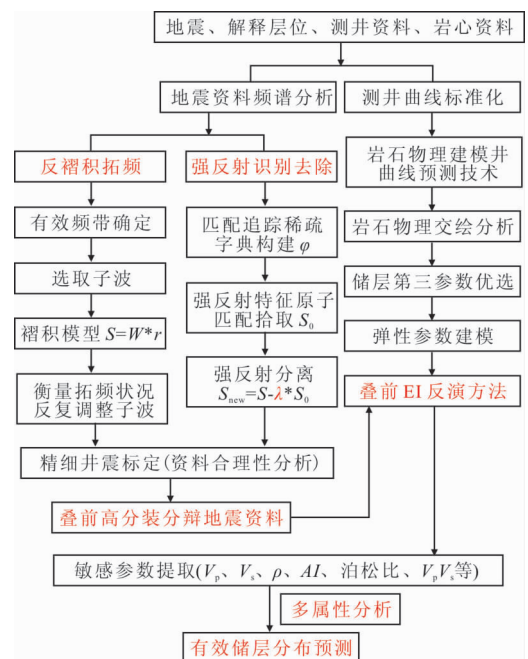


图5 技术流程图

Fig. 5 Technical flow chart

测为导向的地震资料开展叠前弹性阻抗反演,结合岩石物理对含油敏感性分析,提取相应的弹性参数数据集,结合多属性预测有利目标分布。具体的方法流程见图5。

### 4 实际资料应用

为了进一步论证了这里方法针对存在强反射层干扰的薄层隐蔽油气藏识别问题的实用性,将该方

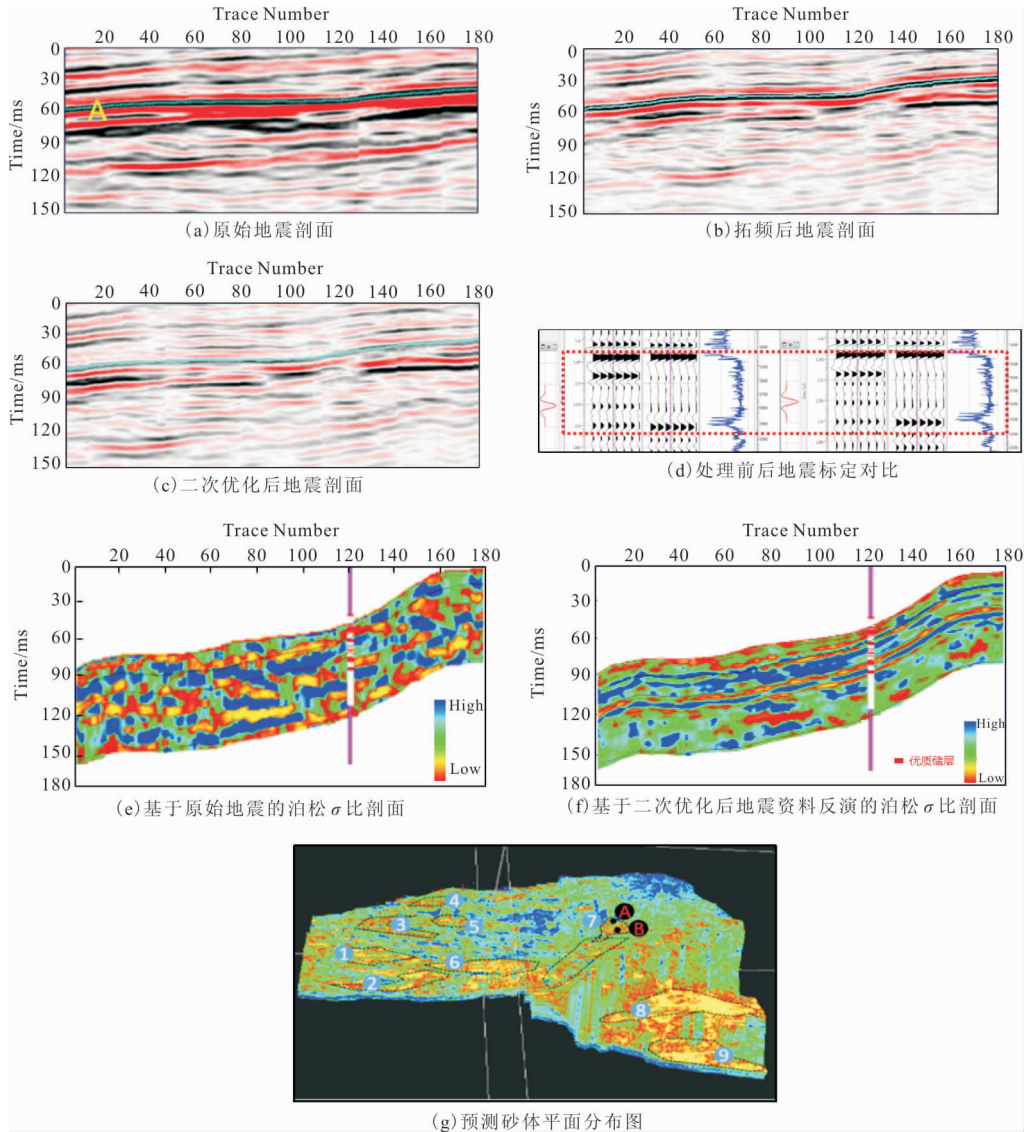


图 6 实际资料应用

Fig. 6 Actual application effect

法运用到解决实际工区甜点预测工作中。南海西部 X 油田实际地震资料剖面如图 6 所示,由于砂岩较薄,反射信息较弱,地震数据的分辨率达不到,薄砂层刻画难度较大。同时流沙港组 A 层发育一套低速油页岩地层,在地震剖面上形成强波谷反射轴,对砂岩反射信息存在较大屏蔽干扰,因此在开展储层甜点预测之前需要对充分挖掘砂岩储层的地震反射信息,消除油页岩强反射信息的干扰,提高地震对薄砂层的分辨能力。首先开展了提频处理,从图 6(b) 可以看到在时间域中,提频后地震剖面看似出现很多同相轴,但与拓频前剖面图 6(a) 细细对比后可以发现,这些多出来的同相轴在拓频前的剖面中是依

稀可见的,因为拓频增强了原数据体中、高频信号的能量,使得这些隐藏信息能够在时间域剖面中突显出。然而从实际资料图 6(b) 的效果看,仅通过提频处理仍然没有消除盖层强波谷反射轴的屏蔽作用。基于此,利用多道匹配追踪算法对地震信息进行稀疏分解,通过分析强反射轴的频率信息作为约束条件快速搜索出所有强反射原子,并从原始地震信号中剔除,两次处理后效果如图 6(c) 所示。为了验证提频资料的可行性,结合精细的井震标定结果分析,通过提频和强反射去除后的地震资料目的层反射轴更清晰,合成地震匹配较好,证实了两次优化处理结果的合理性,有利于开展叠前反演,研究砂岩的分布

范围。

通过大量的岩石物理交会分析,优选出能较好区分储层与非储层的敏感参数 $\sigma$ ,基于优化后的角度叠加地震资料开展弹性阻抗反演,并基于弹性阻抗提取泊松比敏感因子,图6(e)为原始地震数据反演得到了泊松比剖面,图6(f)为经过二次优化后的地震资料反演得到的泊松比结果。与单井解释结果对比,经过二次优化后的地震资料反演结果识别出4套优质储层,而原始地震反演结果只能识别出2套储层。优化后的地震资料反演得到的结果纵向分辨率大幅提高,横向连续性也更好。结合平面属性分析得到的含油气预测结果将整个目标区划分为9个优质区块,如图6(g)所示,在勘探开发过程中指导了7号区域两口井部署,实钻结果表明优质砂岩储层钻遇率很高,降低了实钻过程的风险,验证了本方法的优质砂岩储层预测结果的准确性。

## 5 结论

笔者研究了一种海上中深层薄弱储层预测方法,针对地震资料的中深层薄层分辨率低且上覆强反射干扰的情况,以提高地震分辨率和减小强反射干扰为目的,研究了反褶积拓频和匹配追踪去强轴两项地震资料优化技术,通过模型正演分析了薄层地震响应及强反射形成机理,验证了滤波反褶积拓频和强轴频带约束快速匹配追踪强反射识别去除联合优化技术的实用性和可靠性。采用优化后的地震开展叠前反演在解决中深层储层预测,具有较好的实用性,并得到以下几点认识:

1)反褶积过程中提取子波时将信噪比、振幅谱作为参考,由于俞氏子波的波形光滑连续,振幅谱具有良好的连续性,相位谱零点对称且峰值频率是灵活可调,以俞氏子波为期望子波,能在拓频的同时使得地震零相位化,值得注意的是提频过程要综合考虑分辨率和保真度之间的最佳效果。

2)通过局部频率约束匹配追踪算法快速识别强反射层地震信息,从地震资料中剥离盖层强反射轴,该方法与常规方法相比在匹配过程中加入了局部约束条件提高了计算效率。

3)实际问题过程中,利用二次优化后的地震资料,开展弹性阻抗反演并直接提取的敏感参数分辨率远高于原始资料反演结果,而且更符合实钻认识。

## 参考文献:

- [1] 李庆忠. 走向精确勘探的道路[M]. 北京:石油工业出版社,1993.  
LI Q Z. Accurate exploration road[M]. Beijing: Petroleum Press,1993. (In Chinese)
- [2] 蒋立,陈勇,肖艳玲,等. 地表过渡带近地表Q补偿与地表一致性反褶积处理效果对比研究[J]. 石油物探, 2018,57(06):870—877.  
JIANG L, CHEN Y, XIAN Y L, et al. A comparison of near surface Q compensation and surface consistent deconvolution in the near surface transition zone[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(06): 870—877. (In Chinese)
- [3] 王江,赵传军,李国福,等. 地震拓频处理技术在乌尔逊断陷北部储层预测中的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2021,40(04):125—131.  
WANG J, ZHAO CH J, LI G F, et al. Application of seismic frequency expanding processing technology in the reservoir prediction of north Wuerxun rift[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021,40(04):125—131. (In Chinese)
- [4] 袁红军,吴时国,王箭波,等. 拓频处理技术在大牛地气田勘探开发中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2008,43(1):69—75.  
YUAN H J, WU S G, WANG J B, et al. Application of frequency-broadening processing technique in exploration and development of Daniudi gas-field[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2008, 43(1):69—75. (In Chinese)
- [5] 曹思远,袁殿. 高分辨率地震资料处理综述[J]. 新疆石油地质, 2016,37(1):112—119  
CAO S Y, YUAN D. A review of high-resolution seismic data[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2016, 37(1):112—119. (In Chinese)
- [6] 李晓峰,潘龙,杨晓海,等. 准噶尔腹部沙漠区地震资料宽频处理关键技术及应用效果[J]. 石油物探, 2021,60(03):430—437.

- LI X F, PAN L, YANG X H, et al. Key technique for broadband processing of seismic data in a desert area in the middle of the Junggar Basin, China[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2021, 60(03): 430-437. (In Chinese)
- [7] 李振春, 张军华. 地震数据处理方法[M]. 东营: 石油大学出版社, 2004.
- LI Z C, ZHANG J H. Seismic data processing methods [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2004. (In Chinese)
- [8] MALLAT S, Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 41(12): 3397-3145.
- [9] 陈发宇, 杨长春. 对依据频率的匹配追踪快速算法的改进[J]. 石油物探, 2009, 48(1): 80-83.
- CHEN F Y, YANG C C. An improvement for frequency-dominated fast matching algorithm[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2009, 48(1): 80-83. (In Chinese)
- [10] 张繁昌, 李传辉, 印兴耀. 基于动态匹配子波库的地震数据快速匹配追踪[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(5): 667-673.
- ZHANG F C, LI C H, YIN X Y, et al. Seismic data fast matching pursuit based dynamic matching wavelet library [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(95): 667-673. (In Chinese)
- [11] 张繁昌, 刘汉卿. 复数道动态匹配追踪算法的改进[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(1): 183-189.
- ZHANG F C, LIU H Q. Improved complex-trace dynamic matching pursuit algorithm[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(1): 183-189. (In Chinese)
- [12] 许璐, 印兴耀. 基于局部频率约束的动态匹配追踪强反射识别与分离方法[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(3): 587-593.
- XU L, YIN X Y. Strong reflection identification and separation based on the local-frequency-constrained dynamic matching pursuit[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(3): 587-593. (In Chinese)
- [13] 杜泽源, 杨森, 陶永慧, 等. 基于局部峰值约束的快速正交匹配追踪地震数据分解方法[J]. 物探化探计算技术, 2021, 43(4): 420-428.
- DU Z Y, YANG S, TAO Y H, et al. Fast orthogonal matching pursuit seismic data decomposition method based on local peak constraint[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 43(4): 420-428. (In Chinese)
- [14] 张繁昌, 兰南英, 李传辉, 等. 地震匹配追踪技术与应用研究进展[J]. 石油物探, 2020, 59(4): 491-504.
- ZHANG F C, LAN L Y, LI C H, et al. A review on seismic matching pursuit[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(4): 491-504. (In Chinese)
- [15] 张繁昌, 李传辉, 印兴耀. 三角洲砂岩尖灭线的地震匹配追踪瞬时谱识别方法[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(1): 82-88.
- ZHANG F C, LI C H, YIN X Y. Delta fringe line recognition based on seismic matching pursuit instantaneous spectral characteristics[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(1): 82-88. (In Chinese)
- [16] 李海山, 杨午阳. 匹配追踪煤层强反射分离方法[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(5): 866-870.
- LING H S, YANG W Y. Coal seam strong reflection separation with matching pursuit[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(5): 866-870. (In Chinese)
- [17] 刘杰, 张忠涛, 刘道理, 等. 强反射背景下沉积体边界检测及流体识别方法[J]. 石油物探, 2016, 55(1): 142-149.
- LIU J, ZHANG Z T, LIU D L, et al. Sediment boundary identification and fluid detection for the seismic data with strong background reflections [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(1): 142-149. (In Chinese)
- [18] 朱博华, 向雪梅, 张卫华. 匹配追踪强反射层分离方法及应用[J]. 石油物探, 2016, 55(2): 280-287.
- ZHU B H, XIANG X M, ZHANG W H. Strong reflection horizons separation based on matching pursuit algorithm and its application [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(2): 280-287. (In Chinese)
- [19] 杨子鹏, 宋维琪, 刘军, 等. 多道联合约束的匹配追踪强反射轴压制方法[J]. 石油地球物理勘探, 2021, 54(1): 77-85.
- YANG Z P, SONG W Q, LIU J, et al. A method of combining multichannel signals to suppress the strong reflection through matching pursuit[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 54(1): 77-85. (In Chinese)
- [20] 王保丽. 叠前弹性阻抗反演理论与应用[M]. 青岛: 中

国石油大学(华东),2006.

WANG B L. Prestack elastic impedance inversion the-

ory and its application[M]. Qingdao:China University of Petroleum (East),2006. (In Chinese)

## Offshore mid-deep and thin reservoir prediction covered by strong reflection

MAN Jian, HU Lin, SUI Bo, MA Guangke, MAN Yong

(CNOOC China Limited, HaiNan Branch, Haikou 570311, China)

**Abstract:** The mid-deep thin interbedding lithologic oil reservoirs remain one of the challenging targets for offshore exploration. Mid-deep seismic data generally suffer from poor quality, low resolution, and strong reflections from the caprock. For better prediction on such types of reservoirs, a workflow that implements explicitly thin-layer oil prediction in the presence of substantial reflecting interference is proposed in this paper. The workflow applies two optimization processing on seismic data to improve the resolution for the thin sand layer. First, Optimized wavelet deconvolution is performed to broaden the frequency bands of seismic data. The enhanced high frequency may result in better resolution for thin sand layers, whereas the performance is limited on actual seismic data. The matching pursuit algorithm is used to decompose the seismic data to remove the influence of solid reflections the caprock. The strong seismic reflections are identified by the matching pursuit algorithm that is locally constrained by the frequency of strong reflections. The strong reflections can be removed from the seismic data after frequency broadening. Based on the optimized seismic data, pre-stack inversion and reservoir prediction are carried out for complex mid-deep reservoir prediction. This paper introduces the principle of processing of frequency broadening and vital reflections removal. It analyzes the seismic response of thin-sand layers and the formation of strong reflections due to caprock via forward modeling. The proposed techniques are applied to the reservoir prediction on real seismic data from the Western South China Sea. The results suggest that this workflow performs well in predicting the distribution characteristics of thin sand reservoirs and improving the subtle target layer's oil and gas prediction accuracy. The method may provide a new reference for the prediction of subtle oil and gas reservoirs in the presence of strong reflections in mid-deep layers and is of great significance to oil and gas exploration and development.

**Keywords:** offshore mid-deep layer; frequency broadening; strong reflections removal; quadratic optimization; seismic inversion; reservoir prediction