

# 基于低秩约束的多道叠前道集AVA特征恢复方法

高洋,石学文,张洞君,刘鑫,罗浩然,周智文

(中国石油西南油气田公司页岩气研究院,四川成都610051)

**摘要:**随着油气勘探目标向更深层复杂储层拓展,地层吸收效应更为显著,导致叠前数据振幅衰减与相位畸变问题加剧,严重制约地震储层表征精度。针对现有单道补偿方法抗噪性差、横向连续性不足的缺陷,提出一种基于低秩约束的多道叠前道集振幅随角度变化(AVA)特征恢复方法。首先,构建非稳态地震数据正演模型,显式表征黏弹性介质的空变吸收衰减效应;其次,利用叠前道集的横向一致性,通过块组矩阵构造低秩约束项,结合核范数正则化抑制噪声并保持空间相关性;最后,采用交替方向乘子算法(ADMM)求解凸优化问题,实现稳定补偿。模型数据测试表明,与传统方法相比,本方法能有效补偿弱反射同相轴能量,恢复振幅随角度变化的特征,且对品质因子精度依赖性低,抗噪性显著提升。实际资料应用进一步验证了其在复杂地质条件下改善横向连续性、恢复AVA响应特征的优势。

**关键词:**叠前吸收补偿;低秩约束;多道反演;AVA特征恢复

**中图分类号:**TN929.5

**文献标志码:**A

## Low-rank constrained AVA attribute recovery for multi-trace prestack gathers

GAO Yang, SHI Xuewen, ZHANG Dongjun, LIU Xin, LUO Haoran, ZHOU Zhiwen

(Research Institute of Shale Gas, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610051, China)

**Abstract:** With exploration targets shifting to deeper and more complex reservoirs, viscoelastic absorption becomes more pronounced, causing amplitude loss and phase distortion in prestack data and degrading amplitude variation with angle (AVA) analysis. We propose a low-rank-constrained AVA-attribute recovery method for multi-trace prestack gathers. First, a nonstationary seismic data forward model was constructed to explicitly characterize the spatially varying absorption and attenuation effects of viscoelastic media. Second, by leveraging the lateral coherence of prestack gathers, a low-rank constraint term is formulated through a block Hankel matrix structure, and nuclear norm regularization is combined to suppress noise and preserve spatial correlations. Finally, the alternating direction method of multipliers (ADMM) was employed to solve the convex optimization problem, achieving stable compensation. Tests on synthetic data demonstrate that, compared to conventional methods, the proposed approach effectively restores the energy of weak reflection events, recovers angle dependent amplitudes, reduces sensitivity to inaccuracies in the quality factor, and improves noise robustness. Field applications further demonstrate enhanced lateral continuity and clearer AVA responses under complex geology.

**Key words:** prestack absorption compensation; low-rank constraints; multi-channel inversion; AVA feature recovery

随着全球油气勘探向深层、复杂储层领域拓展,勘探目标逐渐由构造特征清晰的常规油气藏,转向受岩性-物性-流体多参数耦合控制的隐蔽型岩性油气藏<sup>[1]</sup>。在此背景下,叠前振幅随角度变化(amplitude variation with angle, AVA)反演技术成为页岩气甜点预测、致密气储层分级评价的核心手段。然而,实际地

收稿日期:2025-06-30

基金项目:中国石油天然气股份有限公司科技项目(2023ZZ21YJ04);中国石油西南油气田公司科研项目(2025D210)

作者简介:高洋(1995—),男,河北任丘人,工程师,博士,主要从事页岩气储层预测工作。

E-mail:gaoy\_2024@petrochina.com.cn

下介质具有黏弹性<sup>[2]</sup>,导致地震波的AVA特征发生畸变,严重制约了地震属性对含油气性的表征精度。因此,发展面向叠前道集的地层吸收补偿技术,重建高保真AVA响应,对提高油气勘探精度具有重要意义。

地下介质的吸收特性通常采用品质因子(quality factor, Q)定量表征。基于Q理论,学界先后建立了多套衰减数学模型<sup>[3]</sup>,为吸收补偿技术奠定了理论基础。当前吸收补偿方法可依据实现策略分为两大类:即Q逆时偏移(Q reverse time migration, Q-RTM)和反Q滤波。Q-RTM通过补偿地层吸收效应显著提升了深部薄储层成像分辨率与振幅保真度,但其补偿效果易受Q模型误差和噪声干扰的影响,且计算成本较高,实际应用相对受限<sup>[4]</sup>。而反Q滤波是一种经济高效的补偿技术,最初是由Robinson开创性地建立的相位校正补偿理论,首次实现对波场频散效应的数学描述,但未解决振幅恢复难题<sup>[5]</sup>;Hargreaves等<sup>[6]</sup>引入快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)加速波场延拓算法,奠定了工业化应用基础;Wang<sup>[7]</sup>提出增益限制稳定因子法,通过分式重构抑制高频噪声放大,使振幅补偿稳定性大幅提升。在此基础上,相关研究进一步改进了反Q滤波的稳定性。Oliveira等<sup>[8]</sup>突破性应用 $L_1$ 范数约束,相对于传统方法大大提升了抗噪能力;Ma等<sup>[9]</sup>考虑地震数据横向上的可预测性,提出多道吸收补偿方法,从地震数据中提取反射结构约束算子引入目标函数中,得到横向连续性好、信噪比高的补偿结果。

当前叠后数据衰减补偿技术已发展至较高水平,但受限于对实际射线传播路径与吸收衰减耦合作用,其方法体系难以直接迁移至叠前数据处理领域。叠前地震信号在传播过程中呈显著的非稳态衰减特征,传播路径的差异性引起衰减量动态变化,致使AVA特征畸变,进而影响叠前弹性参数反演精度<sup>[10]</sup>。为应对上述挑战,近年来的研究多聚焦于叠前补偿算法的创新。程万里等<sup>[11]</sup>结合Tikhonov正则化,使用 $L_1$ 范数约束优化了反演过程的稳定性。然而以上方法均基于单道地震数据进行处理,未考虑叠前道集的横向一致性,抗噪性差且易导致AVA响应特征的空间畸变。因此,发展多道协同约束的叠前吸收补偿方法势在必行。

本研究提出一种基于低秩约束的多道叠前AVA特征恢复方法,基于反演框架实现对叠前道集的稳态化补偿。具体而言,首先推导多道叠前道集的正演公式并融入吸收衰减效应,显式表征振幅衰减与相位畸变的空变特征;然后,基于叠前道集的横向一致性,以地震数据内在的相似性揭示叠前道集在时空域的低秩本质,构建核范数约束以保持空间相关性,将其引入多道反演目标函数;最后,将衰减补偿问题转化为凸优化问题,采用交替方向乘子算法(alternating direction method of multipliers, ADMM)与奇异值分解法(singular value decomposition, SVD)进行求解,兼顾计算效率与稳定性。理论模型与实际数据测试表明,该方法在弱信号恢复、抗噪性及品质因子鲁棒性方面均显著优于传统单道补偿技术,为复杂储层高分辨率地震勘探提供了新的解决方案。

## 1 方法技术

### 1.1 非稳态地震数据正演

在实际地下黏弹性介质中,相速度表达式为:

$$\frac{1}{v(\omega)} = \frac{1}{v_r} \left[ 1 - \frac{1}{\pi Q_r} \ln \left( \frac{\omega}{\omega_h} \right) \right] \approx \frac{1}{v_r} \left| \frac{\omega}{\omega_h} \right|^{-\gamma} \quad (1)$$

式中: $\omega$ 为角频率; $v_r$ 和 $Q_r$ 分别为参考频率处的速度和品质因子, $\gamma=1/\pi Q_r$ ;根据经验,通常设定 $\omega_h$ 为地震频带范围内的最大频率。

地震复波数定义为:

$$k(\omega) = \frac{\omega}{v(\omega)} - i\alpha(\omega) \quad (2)$$

式中; $i$ 为虚数单位, $\alpha(\omega)$ 为衰减系数,

$$\alpha(\omega) = \frac{|w|}{2v_r Q_r} \quad (3)$$

地下某深度处的平面波表达式为:

$$P(z, t, \omega) = w(\omega) e^{i(\omega t - k(\omega)z)} \quad (4)$$

式中,  $w(\omega)$  表示地震子波的频谱。

以图 1 所示的水平层状介质模型阐述地震波的传播。其中, 第  $i$  层与第  $i-1$  层之间的厚度为  $h_i$ , 层速度为  $v_i$ , 入射角为  $\theta_i$ 。若地震波由  $z_0$  层传播至  $z_i$  层后被地表检波器接收, 则该过程可写为:

$$s(z_i, \omega, t, \theta) = r(z_i, \theta) w(\omega) e^{i\omega t} e^{-i\omega \sum_{k=1}^i \frac{2h_k}{v(z_k) \cos \theta_{i,k}}} \quad (5)$$

式中,  $r$  为反射系数,  $\theta_{i,k}$  表示传播至第  $z_k$  层的入射角, 可由 Snell 定律得到。

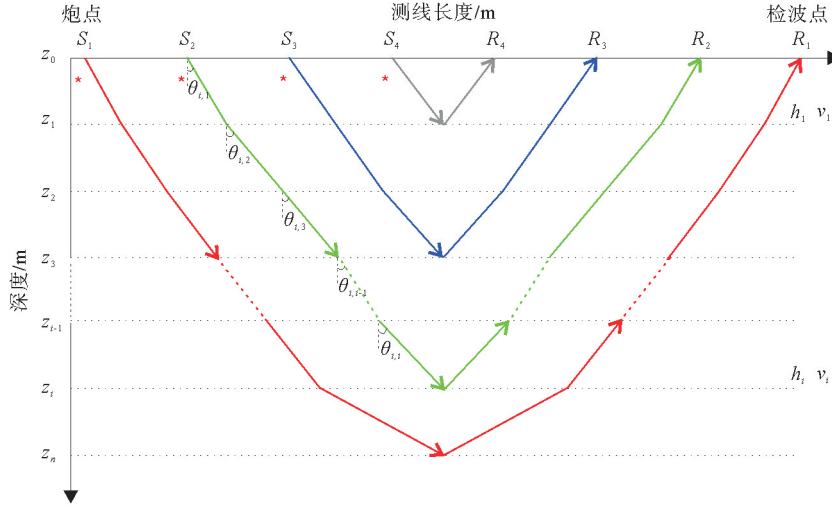


图 1 水平层状介质入射角道集传播路径示意图

Fig. 1 Ray-path schematic for incident angle gathers in a horizontally layered medium

将式(1)相速度代入式(5)中, 用旅行时替换传播距离, 式(5)可改写为:

$$s(z_i, \omega, t, \theta) = r(z_i, \theta) w(\omega) e^{i\omega t} \underbrace{e^{-i\omega \sum_{k=1}^i \frac{\tau_k}{\cos \theta_{i,k}} \left| \frac{\omega}{\omega_h} \right|^{-\gamma}} e^{-i\omega \sum_{k=1}^i \frac{\tau}{2 \cos \theta_{i,k}} Q_r \left| \frac{\omega}{\omega_h} \right|^{-\gamma}}}_{a(\omega, \tau)} \quad (6)$$

对不同深度点的反射系数  $r(z_i, \theta)$  产生的简谐波求和, 即可得到完整的地震记录:

$$s(\omega, t, \theta) = \sum_{k=1}^i r(z_k, \theta) w(\omega) e^{i\omega t} \underbrace{e^{-i\omega \sum_{k=1}^i \frac{\tau_k}{\cos \theta_{i,k}} \left| \frac{\omega}{\omega_h} \right|^{-\gamma}} e^{-i\omega \sum_{k=1}^i \frac{\tau}{2 \cos \theta_{i,k}} Q_r \left| \frac{\omega}{\omega_h} \right|^{-\gamma}}}_{a(\omega, \tau)} \quad (7)$$

对所有角频率求和得到衰减介质中叠前数据的时间域正演模型:

$$s(t, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^i r(z_k, \theta) w(\omega) e^{i\omega t} \underbrace{e^{-i\omega \sum_{k=1}^i \frac{\tau_k}{\cos \theta_{i,k}} \left| \frac{\omega}{\omega_h} \right|^{-\gamma}} e^{-i\omega \sum_{k=1}^i \frac{\tau}{2 \cos \theta_{i,k}} Q_r \left| \frac{\omega}{\omega_h} \right|^{-\gamma}}}_{a(\omega, \tau)} d\omega \quad (8)$$

将式(8)表示为矩阵-向量形式:

$$\begin{bmatrix} s(t_1, \theta) \\ s(t_2, \theta) \\ \vdots \\ s(t_N, \theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g(t_1, \tau_1, \theta) & g(t_1, \tau_2, \theta) & \cdots & g(t_1, \tau_N, \theta) \\ g(t_2, \tau_1, \theta) & g(t_2, \tau_2, \theta) & \cdots & g(t_2, \tau_N, \theta) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g(t_N, \tau_1, \theta) & g(t_N, \tau_2, \theta) & \cdots & g(t_N, \tau_N, \theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r(\tau_1, \theta) \\ r(\tau_2, \theta) \\ \vdots \\ r(\tau_N, \theta) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$\mathbf{S} \qquad \qquad \mathbf{G} \qquad \qquad \mathbf{R}$

图 2 展示了非稳态地震数据正演过程, 其中  $\mathbf{S}$  和  $\mathbf{R}$  分别表示地震数据和反射系数,  $\mathbf{G}$  为非稳态子波矩阵。

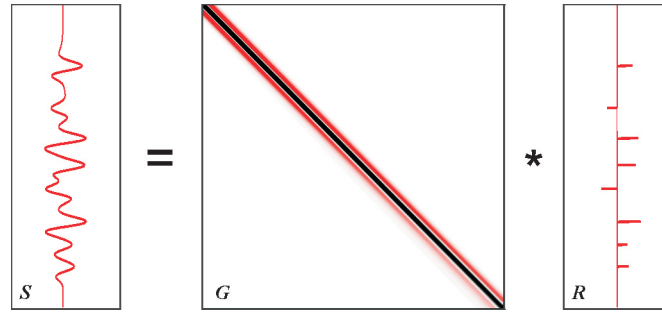


图 2 非稳态褶积模型

Fig. 2 Nonstationary convolution model

### 1.2 基于低维流形约束的多道吸收补偿

在上述非稳态正演模型的基础上,基于叠前道集的横向一致性,可进一步扩展为多道正演模型:

$$\begin{bmatrix} S_{\theta_1} \\ S_{\theta_2} \\ \vdots \\ S_{\theta_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{\theta_1} & & & \\ & G_{\theta_2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & G_{\theta_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{\theta_1} \\ R_{\theta_2} \\ \vdots \\ R_{\theta_N} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$\bar{S} \qquad \qquad \bar{G} \qquad \qquad \bar{R}$

式中:  $S_{\theta}$  与  $R_{\theta}$  分别为入射角为  $\theta$  时的地震记录和反射系数,  $G_{\theta}$  为对应的非稳态子波矩阵,  $\bar{S}$  由一系列  $S$  排列组成,  $\bar{G}$  是由多个  $G$  组成的块状矩阵,  $\bar{R}$  由一系列  $R$  排列组成。简记为:

$$\bar{S} = \bar{G}\bar{R}. \quad (11)$$

为了获得稳定的结果,叠前道集补偿可以表述为如下最小化问题:

$$\bar{R} = \underset{\bar{R}}{\operatorname{argmin}} \|\bar{S} - \bar{G}\bar{R}\|_2^2 + \mu\phi(\bar{R}). \quad (12)$$

式中:  $\|\cdot\|_2$  为  $L_2$  范数运算符,  $\phi(\cdot)$  表示正则化项,  $\mu$  为正则化参数。

叠前地震信号的信噪比通常较低,弱信号可能被强背景噪声所掩盖,为了增强叠前补偿的稳定性和横向一致性,引入低秩约束<sup>[12]</sup>,通过降低反演结果的秩以消除噪声的影响。地下介质的地质结构通常具有空间延展性,反映在地震数据中表现为非局部相似特征——即某一地震数据块(如含有效信号的子集)在空间其他位置也可找到具有相似波形结构的子数据块(图 3)。通过将此类非局部相似数据块堆叠为矩阵,可构造具有显著低秩特性的块组矩阵。低秩约束通过最小化矩阵的核范数(奇异值之和),迫使解空间中的噪声分量被压制,同时保留有效信号的结构一致性。将其引入多道叠前道集吸收补偿反演框架,可得到如下目标函数:

$$\bar{R} = \underset{\bar{R}}{\operatorname{argmin}} \|\bar{S} - \bar{G}\bar{R}\|_2^2 + \mu \|\mathbf{H}(\bar{R})\|_*. \quad (13)$$

式中:目标函数第一项为数据拟合项,第二项为低秩约束项,  $\mathbf{H}(\cdot)$  表示将地震数据转为块组矩阵的运算符,  $\|\cdot\|_*$  表示核范数,  $\mu$  为正则化参数。

为了更好地求解目标函数,采用交替方向乘子法<sup>[13]</sup>与奇异值分解法<sup>[14]</sup>求解。

首先,引入辅助变量  $\mathbf{Z} = \mathbf{H}(\bar{R})$ ,将式(13)改写为:

$$\begin{aligned} \varphi = \underset{\bar{R}, \mathbf{Z}}{\operatorname{argmin}} \quad & \|\bar{S} - \bar{G}\bar{R}\|_2^2 + \mu \|\mathbf{Z}\|_*, \\ \text{s. t.} \quad & \mathbf{Z} = \mathbf{H}(\bar{R}). \end{aligned} \quad (14)$$

构建增广拉格朗日函数

$$\mathbf{L}(\bar{R}, \mathbf{Z}, \mathbf{U}) = \frac{1}{2} \|\bar{S} - \bar{G}\bar{R}\|_2^2 + \mu \|\mathbf{Z}\|_* + \frac{\rho}{2} \|\mathbf{Z} - \mathbf{H}(\bar{R}) + \mathbf{U}\|_F^2. \quad (15)$$

式中,  $\mathbf{U}$  为拉格朗日乘子,  $\rho$  为惩罚参数,  $F$  为 Frobenius 范数。



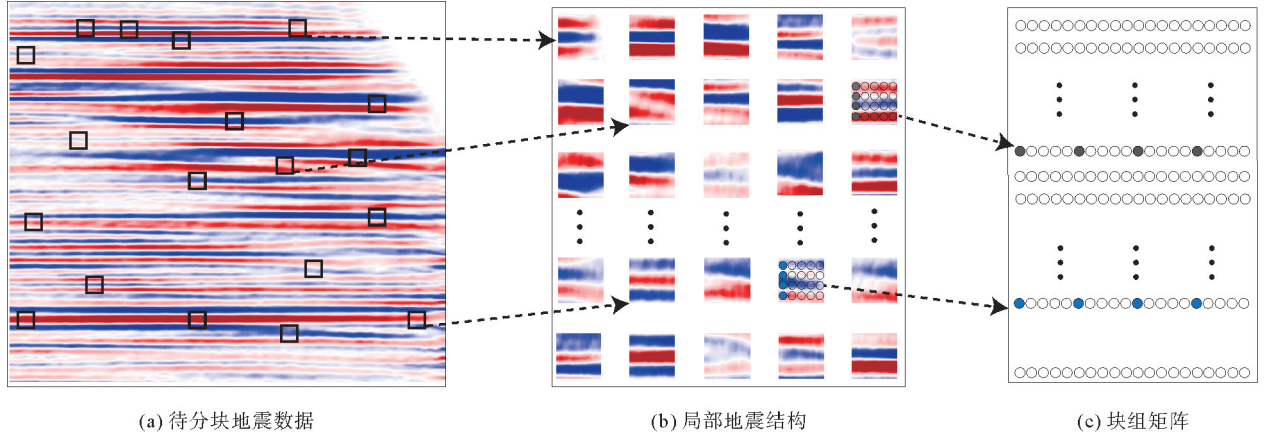


图 3 低秩块组矩阵的构造流程

Fig. 3 Flowchart of low-rank block-group matrix construction

然后,通过以下步骤交替迭代求解。

第一步,固定  $\mathbf{Z}$  和  $\mathbf{U}$ ,更新  $\bar{\mathbf{R}}$ :

$$\bar{\mathbf{R}}^{k+1} = \underset{\bar{\mathbf{R}}}{\operatorname{argmin}} \frac{1}{2} \|\bar{\mathbf{S}} - \bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{R}}^k\|_2^2 + \frac{\rho}{2} \|\mathbf{Z}^k - \mathbf{H}(\bar{\mathbf{R}}^k) + \mathbf{U}^k\|_F^2. \quad (16)$$

第二步,固定  $\bar{\mathbf{R}}$  和  $\mathbf{U}$ ,更新  $\mathbf{Z}$ :

$$\mathbf{Z}^{k+1} = \underset{\mathbf{Z}}{\operatorname{argmin}} \lambda \|\mathbf{Z}\|_* + \frac{\rho}{2} \|\mathbf{Z} - \mathbf{H}(\bar{\mathbf{R}}^{k+1}) + \mathbf{U}^k\|_F^2. \quad (17)$$

第三步,固定  $\bar{\mathbf{R}}$  和  $\mathbf{Z}$ ,更新  $\mathbf{U}$ :

$$\mathbf{U}^{k+1} = \mathbf{U}^k + \mathbf{Z}^{k+1} - \mathbf{H}(\bar{\mathbf{R}}^{k+1}). \quad (18)$$

其中,第二步可通过 SVD 软阈值法求解:

- 1) 计算矩阵:  $\mathbf{M} = \mathbf{H}(\bar{\mathbf{R}}^{k+1}) - \mathbf{U}^k$ ;
- 2) 对  $\mathbf{M}$  进行奇异值分解:  $\mathbf{M} = \mathbf{u}\mathbf{\Lambda}\mathbf{v}^T$ ;
- 3) 对奇异值  $\sigma_i$  进行软阈值操作,形成新对角矩阵:  $\mathbf{\Lambda}_\tau = \operatorname{diag}(\max(\sigma_i - \frac{\mu}{\rho}, 0))$ ;
- 4) 重构低秩矩阵:  $\mathbf{Z}^{k+1} = \mathbf{u}\mathbf{\Lambda}_\tau \mathbf{v}^T$ 。

当达到收敛条件或最大迭代次数时跳出循环,得到最终反演结果。

## 2 模型数据测试

为验证多道叠前吸收补偿方法的有效性,设计了一个具有 9 层水平层状介质的模型,如图 4 所示。模型参数包括纵波速度、横波速度、密度及品质因子。选用主频 30 Hz 的雷克子波作为震源,在不考虑几何扩散、透射损失及动校正拉伸的理想条件下,基于 Aki-Richard 近似公式计算  $0 \sim 40^\circ$  入射角(间隔  $1^\circ$ )的反射系数。通过式(9)合成叠前角道集,合成的稳态数据如图 5(a)所示,经吸收衰减并添加 20% 随机噪声后的地震数据如图 5(b)所示。可见,经吸收衰减后各个地层的反射波能量均被削弱,2 050、2 200 ms 处的弱反射同相轴消失,同时旁瓣与 2 250 ms 处的同相轴干涉在一起,破坏了原有的振幅随入射角变化特征(红色箭头所示)。

使用常规吸收补偿方法与本方法分别对图 5(b)所示地震数据进行补偿,结果如图 5(c)、5(d)所示。可以看到,两种方法均能有效补偿振幅能量,恢复弱反射同相轴(蓝色箭头所示)。但是常规方法的抗噪性和同相轴连续性均较差,而本方法在放大有效信号能量的同时,避免了噪声的放大,保持了良好的横向一致性(绿色箭头所示)。这是因为本方法既考虑了不同角度的吸收差异,又通过引入低秩约束考虑了地震数据的空间相关性与不规则噪声的稀疏性,从本质上实现信号与噪声的分离。

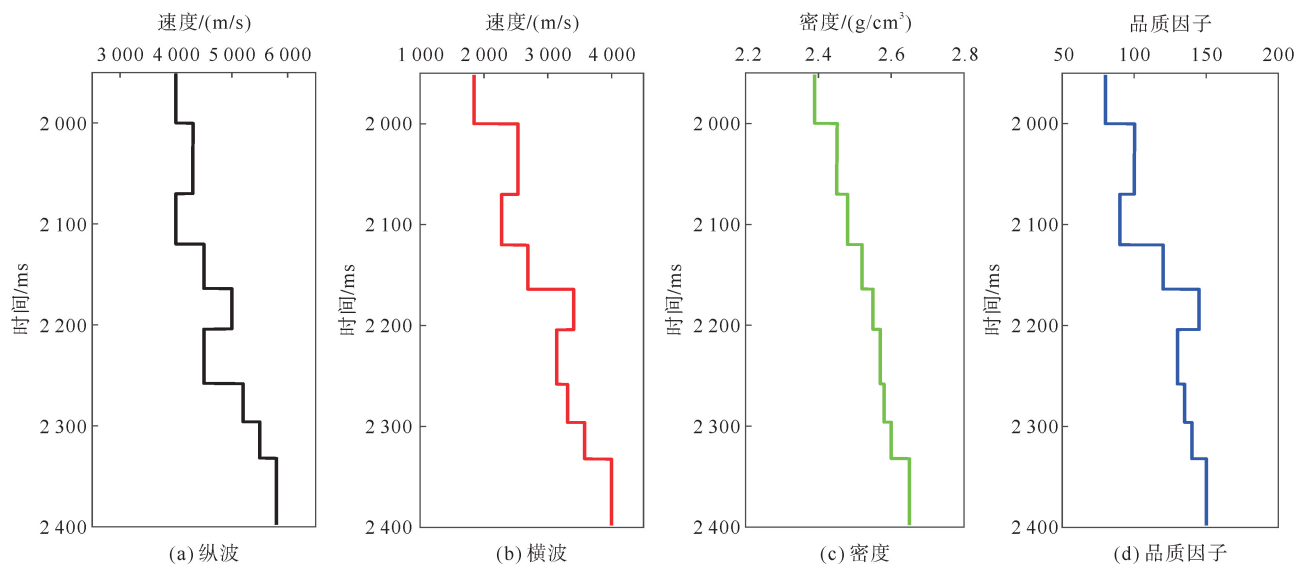


图4 水平层状介质模型参数

Fig. 4 Parameters of the horizontal layered medium model

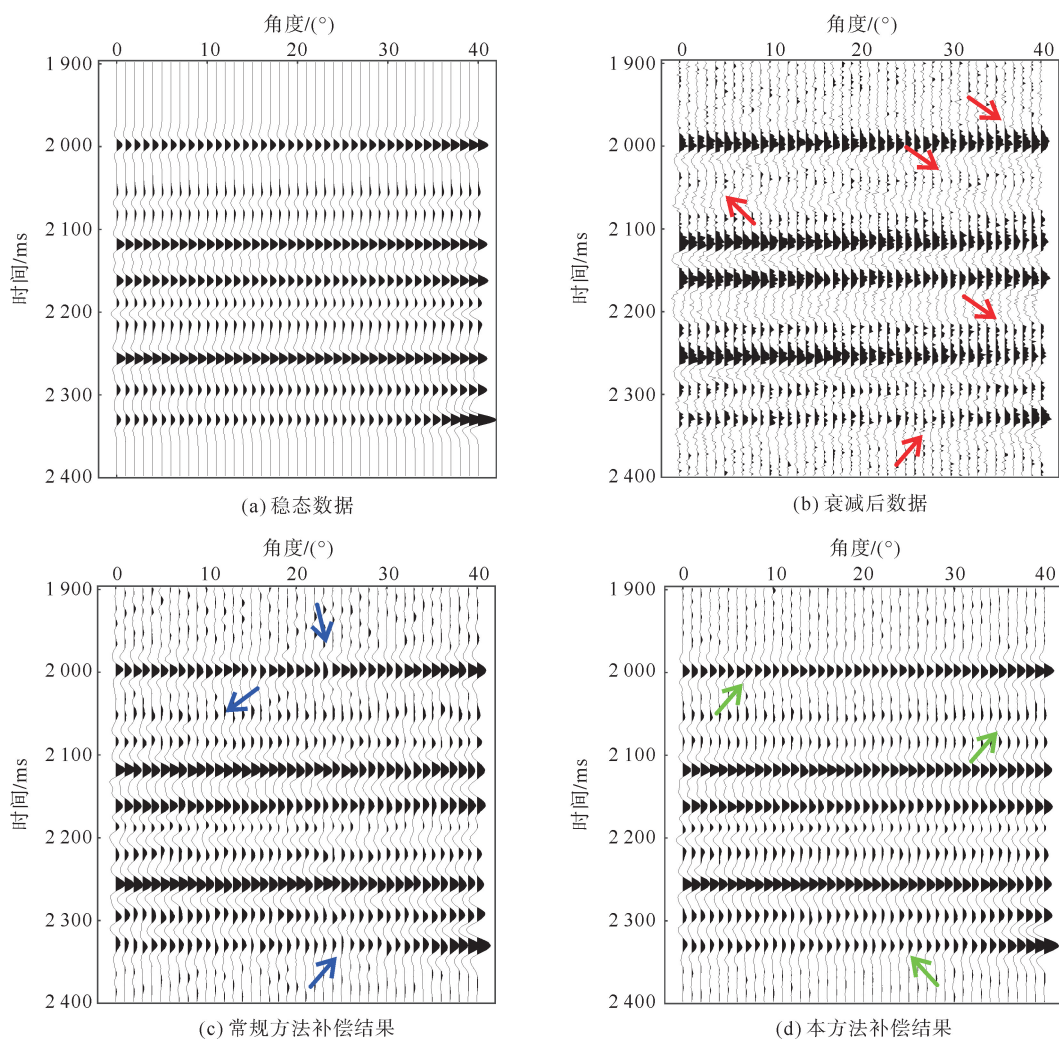


图5 模型数据补偿结果对比

Fig. 5 Comparison of compensation results on synthetic data

提取  $25^\circ$  入射角地震道进行对比分析,如图 6 所示。本方法补偿结果(蓝色线)波形特征与合成稳态数据(黑色线)高度吻合,弱反射特征得到较好恢复(紫色箭头所示);而常规方法对弱振幅的恢复效果不理想。为进一步分析 AVA 效应与频率特征的恢复效果,提取 2 000 ms 处反射界面的 AVA 曲线(图 7(a))、主频随角度变化(dominant frequency variation versus angle, DFVA)曲线(图 7(b))以及振幅谱(图 7(c))。由图 7 可见,受角度依赖的非均匀吸收影响,未经补偿的数据 AVA 反射特征出现显著畸变(红色线)。常规方法补偿后虽然振幅能量得到增强,但不能充分还原大角度的 AVA 信息(绿色线)。本方法由于考虑道间的吸收差异,有效消除了随入射角变化的衰减差异,使 AVA 曲线形态更接近理论特征(蓝色线)。由图 7(b)可见,衰减导致反射波主频随入射角增大而降低(红色线)。常规方法在小、中角度的主频恢复较好,但大角度仍存在频带损失;而本方法则显著改善了主频的角度一致性,提升了叠前道集的横向连续性。振幅谱对比(图 7(c))进一步验证了本方法在频带恢复与高频噪声压制方面的优势。

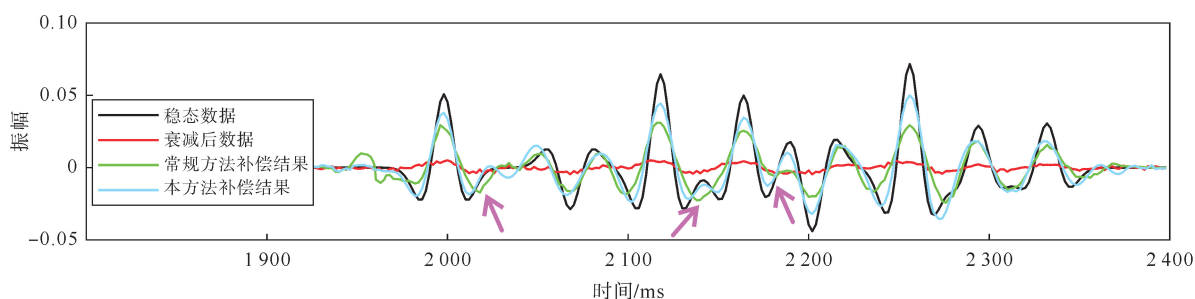


图 6 补偿结果单道对比

Fig. 6 Single-trace comparison of compensation results

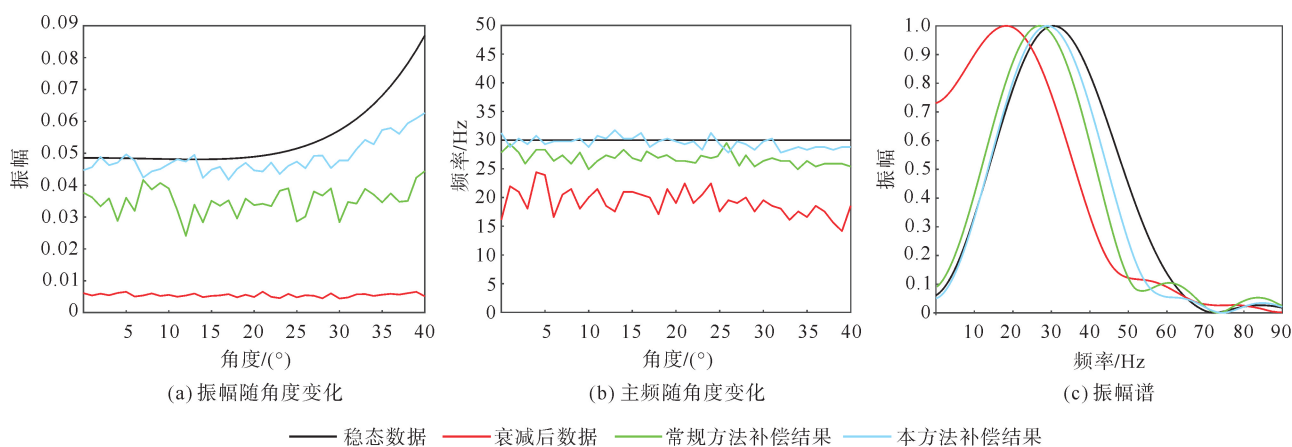


图 7 图 5 数据在 2 000 ms 处同相轴振幅及频率特征

Fig. 7 Amplitude and frequency characteristics of 2 000 ms seismic event of Fig. 5 data

在叠前地震资料吸收衰减补偿过程中,品质因子  $Q$  模型的精度直接影响补偿效果,但实际生产中往往难以建立高分辨率、高精度的模型。为系统研究本方法对品质因子精度的依赖性,设计如下品质因子敏感性分析实验(图 8~10):①在图 4(d)所示品质因子模型基础上施加最大幅度为 20% 的随机扰动,构建含误差的扰动模型;②对该扰动模型分别采用不同尺度平滑算子,生成 31 点平滑(图 8(c))和 51 点平滑(图 8(d))的低频模型;③基于各低频模型,应用本方法对衰减道集(图 9(b))进行补偿。实验结果如图 9(c)、9(d)所示,无论采用 31 点还是 51 点平滑的模型,均能有效恢复原始道集的振幅能量与相位特征,显著削弱干涉效应。为进一步量化分析补偿效果,提取并对比 2 000 ms 处反射同相轴的振幅随角度变化曲线(图 10(a))及主频随角度变化曲线(图 10(b))。结果表明,即使采用低频背景品质因子模型,补偿后道集的 AVA、DFVA 特征与理论模型保持高度一致,验证了本方法对品质因子精度的弱依赖性。

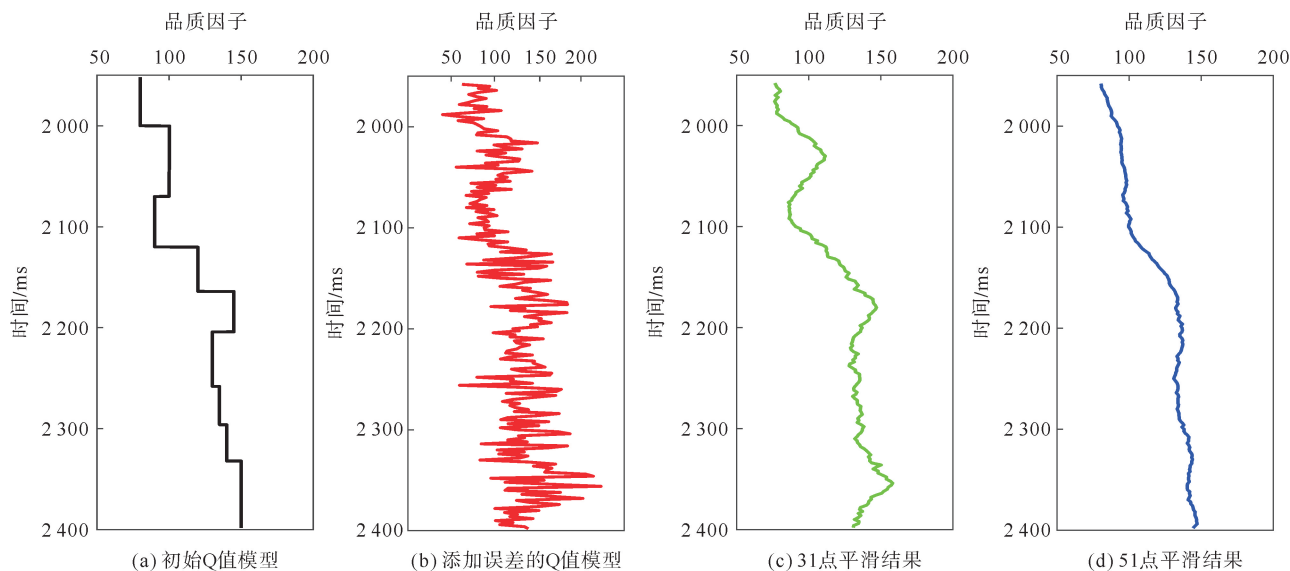


图8 加入20%高斯随机误差的品质因子模型

Fig. 8 Quality factor with 20% Gaussian random error added

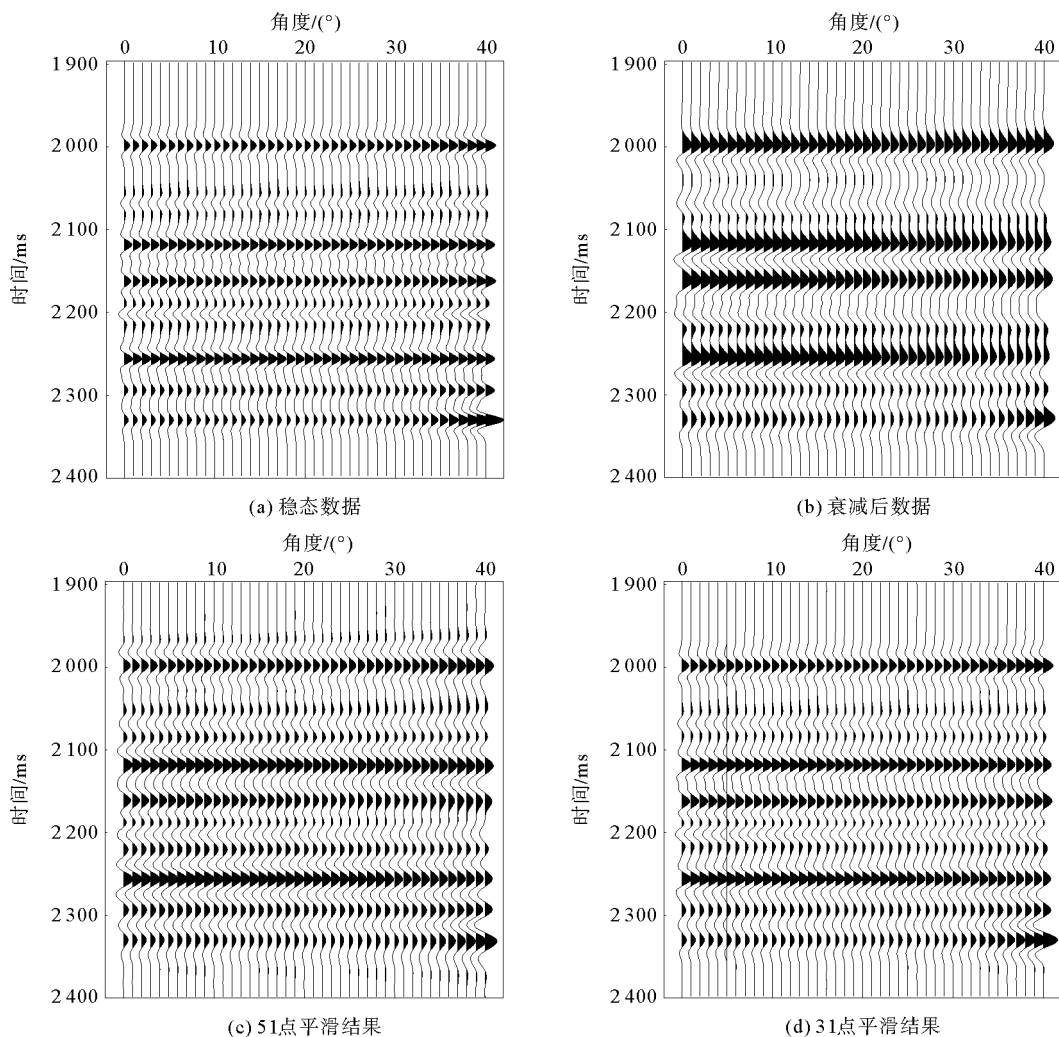


图9 不同品质因子的补偿结果

Fig. 9 Compensation results using different quality factor

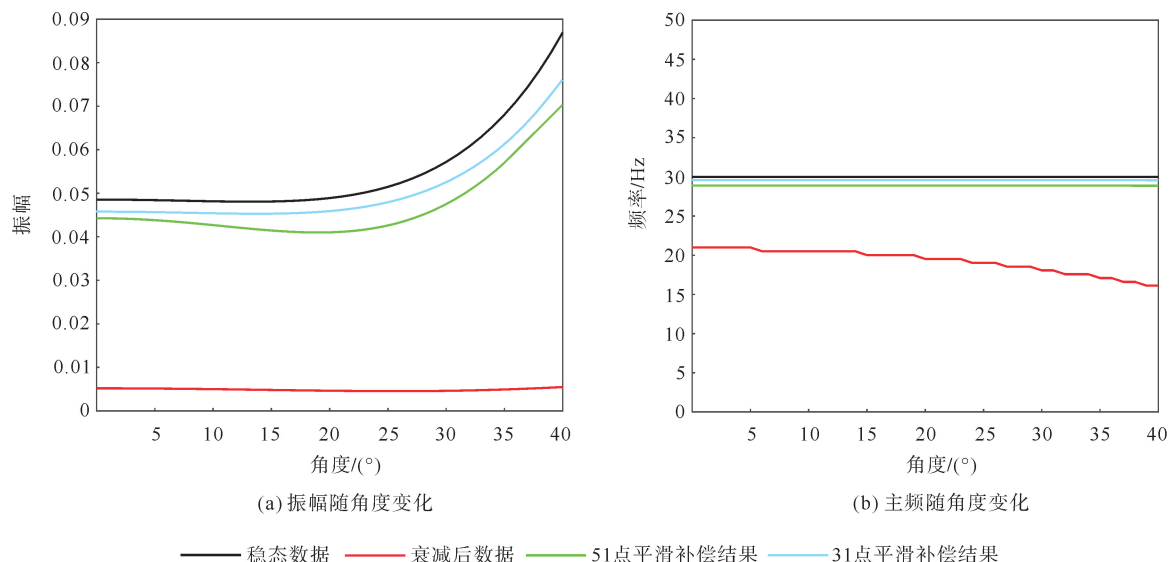


图 10 图 9 数据 2 000 ms 处同相轴振幅及频率特征

Fig. 10 Amplitude and frequency characteristics of 2 000 ms seismic events of Fig. 9 data

### 3 实际数据测试

为验证多道叠前吸收补偿方法在复杂地质条件下的适用性,对四川盆地川南地区筇竹寺组页岩气储层实际采集的角道集开展测试分析。该目的层段纵波速度、横波速度、密度及品质因子如图 11 显示。受地层吸收效应影响,原始地震道集(图 12(a))表现为显著的频带损失与振幅衰减,且深层反射波主频降低、同相轴连续性变差,尤其在 2 150~2 250 ms 层段出现相位干涉(红色箭头指示),横向一致性较差。采用常规补偿方法和本方法分别对该数据进行补偿,结果如图 12(b)、12(c)所示,并以井正演合成记录(图 12(d))作为基准参考。结果显示,两种方法均能有效恢复深层振幅能量,矫正相位畸变,但本方法补偿结果的横向连续性更强,纵向分辨率更高,剖面特征与合成记录更加相似。从图 12 剖面中提取入射角为  $5^\circ$  的单道数据进行分析(图 13),本方法补偿结果(蓝色线)与测井合成记录(黑色线)在波形特征上呈现更高匹配度。

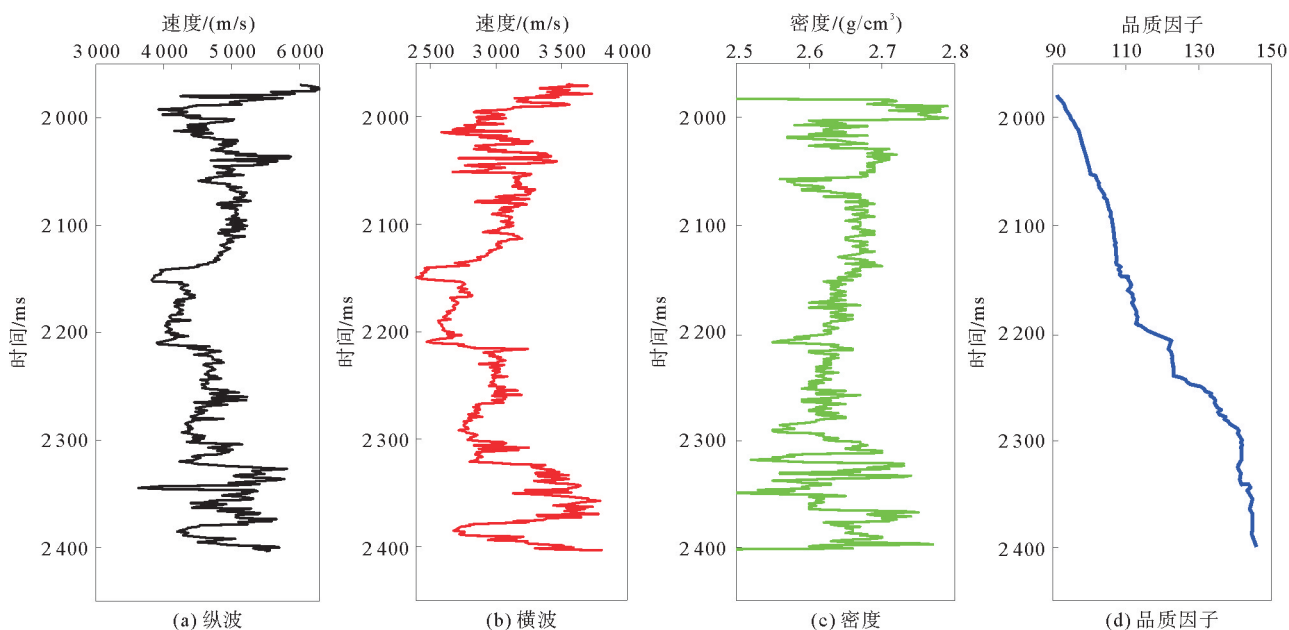


图 11 实际数据参数

Fig. 11 Field data parameters



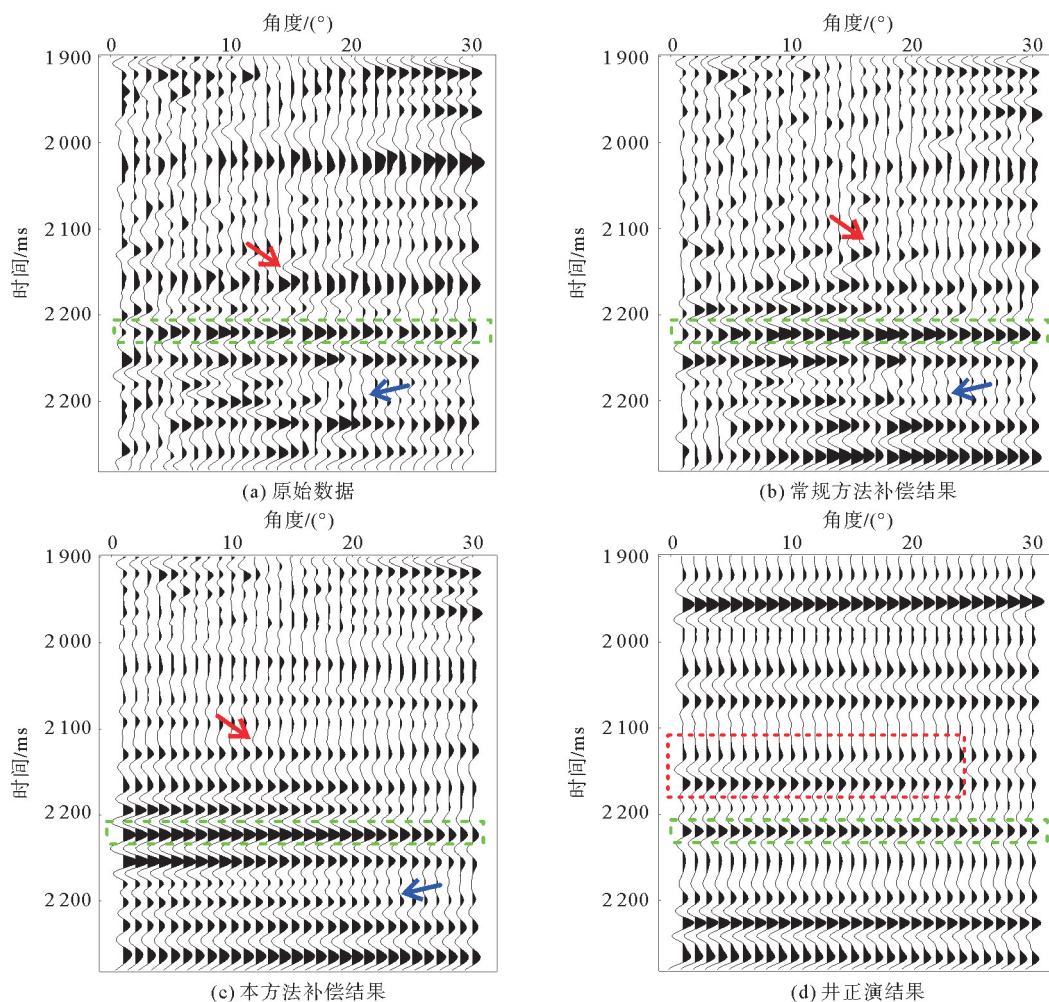


图 12 实际数据补偿结果对比

Fig. 12 Comparison of compensation results on field data

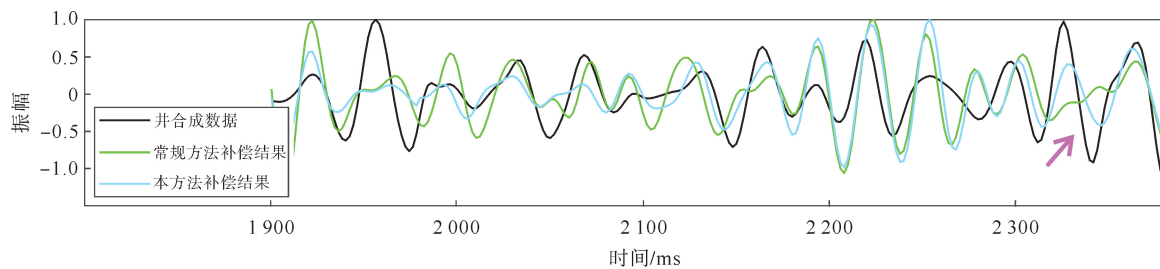


图 13 补偿结果单道对比

Fig. 13 Single-trace comparison of compensation results

进一步提取 2 220 ms 处关键层位的 AVA 曲线(图 14)。与理论特征曲线(黑色线)相比,吸收衰减效应畸变了原有的 AVA 特征(红色线);常规方法补偿后(绿色线)未能恢复原有响应,而经本方法补偿后(蓝色线)的 AVA 曲线与理论曲线保持高度吻合。上述结果表明,本方法能有效克服实际资料中的复杂吸收效应,显著改善叠前道集的振幅保真度。

## 4 结论

针对叠前地震数据吸收衰减引起的 AVA 特征畸变问题,提出一种基于低秩约束的多道吸收补偿方法。通过多道正演框架中融合黏弹性吸收效应,结合叠前道集的横向相似性构建低秩块组矩阵,以核范数作为低秩正则抑制噪声,并采用 ADMM 算法高效求解目标函数。模型试验表明,该方法不仅能够有效恢复弱反射信号的振幅与相位特征,还显著提升补偿结果的横向连续性,且对品质因子具有较强的鲁棒性。实际资料应用中,补偿后的叠前道集与测井合成记录高度吻合,AVA 曲线形态更接近理论特征,验证了本方法的实用性与可靠性。未来研究可进一步优化算法计算效率,并探索其在三维地震数据中的扩展应用。

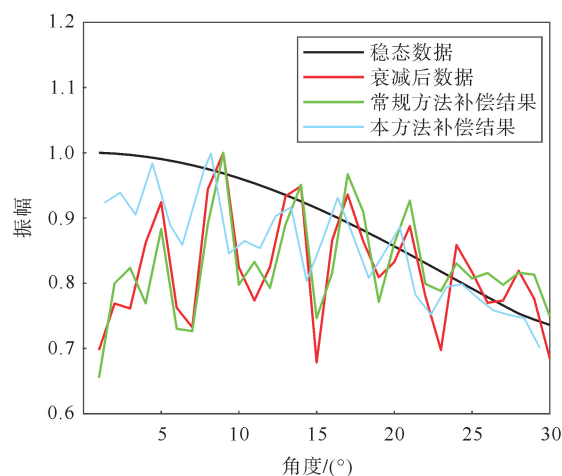


图 14 2 220 ms 处同相轴振幅随入射角变化

Fig. 14 Variation of reflection amplitude with incident angle at 2 220 ms

## 参考文献:

- [1] 赵邦六,董世泰.“两宽两高”地震勘探技术及应用成效[J].世界石油工业,2024,31(4):24-34.  
ZHAO Bangliu,DONG Shitai.“Two widths and two heights” seismic exploration technology and application results[J].World Petroleum Industry,2024,31(4):24-34.
- [2] 杨思通,程久龙,李守军,等.Kelvin-Voigt 黏弹介质地震波衰减影响因素研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2010,29(5):1-7.  
YANG Sitong,CHENG Jiulong,LI Shoujun,et al. Study on influence factors of seismic wave attenuation in Kelvin-Voigt viscoelastic media[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2010,29(5):1-7.
- [3] LI Z L,ZHANG S H,LI G F,et al. Stable high-frequency components recovery via multichannel absorption compensation [J/OL]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2025,63. DOI:10.1109/TGRS.2025.3566400.
- [4] MA X,LI H,LI G F,et al. Frequency-domain reverse time migration with attenuation compensation[J/OL]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2023,61. DOI:10.1109/TGRS.2023.3267775.
- [5] 赵岩,毛宁波.两种抗噪反 Q 滤波方法对比及应用[J].地球物理学进展,2020,35(2):714-720.  
ZHAO Yan,MAO Ningbo. Comparison and application of two anti-noise inverse Q filtering methods[J]. Progress in Geophysics,2020,35(2):714-720.
- [6] HARGREAVES N D,CALVERT A J. Inverse Q filtering by Fourier transform[J]. Geophysics,1991,56(4):519-527.
- [7] WANG Y H. A stable and efficient approach of inverse Q filtering[J]. Geophysics,2002,67(2):V657-V663.
- [8] OLIVEIRA S A M,LUPINACCI W M. L1 norm inversion method for deconvolution in attenuating media[J]. Geophysical Prospecting,2013,61:771-777.
- [9] MA X,LI G F,LI H,et al. Multichannel absorption compensation with a data-driven structural regularization[J]. Geophysics,2019,85(1):V71-V80.
- [10] 魏建,孙祥斌.VTI 介质中基于降阶补偿处理的旅行时计算方法[J].山东科技大学学报(自然科学版),2022,41(1):86-91.  
WEI Jian,SUN Xiang'e. A method of traveltime calculation based on descending order compensation processing in VTI medium[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2022,41(1):86-91.
- [11] 程万里,王守东,孟巾钰,等.基于  $L_1$  范数正则化约束的叠前数据衰减补偿方法[J].石油地球物理勘探,2023,58(3):

567-579.

CHENG Wanli, WANG Shoudong, MENG Jinyu, et al. Prestack data attenuation compensation based on  $L_1$ -norm regularization constraint[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2023, 58(3): 567-579.

- [12] 朱丹, 刘天佑, 李宏伟. 利用数据低秩性和稀疏性的位场分离[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(4): 925-936.

ZHU Dan, LIU Tianyou, LI Hongwei. Potential field separation based on the low rank and sparse characteristics[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(4): 925-936.

- [13] 段中钰, 李婷婷, 肖勇, 等. 基于压缩感知的 SR-ADMM 地震数据重建[J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(6): 1220-1228.

DUAN Zhongyu, LI Tingting, XIAO Yong, et al. Seismic data reconstruction by SR-ADMM algorithm based on compressed sensing[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(6): 1220-1228.

- [14] 周子翔, 吴娟, 袁成, 等. 一种新的 K-SVD 字典学习地震数据去噪方法[J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(5): 1072-1083.

ZHOU Zixiang, WU Juan, YUAN Cheng, et al. A novel K-SVD dictionary learning approach for seismic data denoising[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2023, 58(5): 1072-1083.

(责任编辑:高丽华)