广义余弦宽带频谱反演及其在准噶尔盆地的应用

王金铎[1]，王千军[1]，薛姣[2*]，徐佑德[1]，袁青[1]，袁玲[1]，何松[3]，谭星宇[1]，张文博[1]

1. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院，山东 东营 257015；
2. 中国地质大学（武汉）地球物理与空间信息学院，武汉 430074；
3. 中国石油大庆油田有限责任公司成都勘探开发研究院，成都 610051

第一作者，E-mail：wangjinduo.slyt@sinopec.com

* 通信作者，E-mail：xuejiao@cug.edu.cn

2025-03-13 收稿；2025-07-23 修回；2025-08-04 接受

基金项目：中国石油化工股份有限公司科技部项目“准噶尔盆地超深层多类型优质储层成因机制及分布规律”（P25045）

中图分类号：P618.13；P631.8　　文章编号：2096-8523(2025)05-0029-11　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20250117

摘　要：准噶尔盆地勘探目的层埋深大，地震波高频吸收衰减严重，地震子波主频低、频带窄，导致地震数据分辨率不足，严重影响了砂泥岩薄互层的识别精度。反褶积是提高地震数据分辨率的重要手段，提出了一种频率域反褶积方法，通过优化目标谱设计达到拓宽地震数据有效频带范围、提高地震数据垂向分辨率的目的。首先构建了广义余弦宽带目标谱，根据目标谱与地震记录频谱对角矩阵和拓频因子之间的关系建立了拓频正演模型，然后利用整形正则化反演方法进行了拓频因子反演，最终实现了对地震数据的拓频处理。模型测试结果验证了基于广义余弦宽带目标谱反演的拓频方法的有效性，准噶尔盆地实际数据应用结果表明地震频带得到了有效拓宽，薄层识别能力得到了有效提高。广义余弦目标谱设计灵活，具有较宽的频带范围，其对应子波旁瓣振幅小，旁瓣宽度窄，基于广义余弦宽带频谱反演可有效提高地震资料分辨率，为非常规油气勘探提供可靠的数据支撑。

关键词：准噶尔盆地；薄互层；广义余弦宽带谱；地震分辨率

准噶尔盆地是我国西部重要的大型叠合型含油气盆地，属于典型的断-坳叠合盆地，具有多期演化与改造、多期成藏与调整、多层系运聚与成藏的特征[1-4]，盆地深层存在火山岩、碎屑岩和云质混积岩有效储集层，勘探潜力大[5-8]。准噶尔盆地腹部下组合（二叠系-三叠系）是近期油气勘探突破的重点领域，其中二叠系下乌尔禾组（P_2w）、上乌尔禾组（P_3w）和三叠系克拉玛依组（T_2k）取得了不错的勘探效果[9]。然而，准噶尔盆地准中地区地表主体为厚沙漠覆盖层，地震波吸收衰减严重，主要勘探目的层埋深 7000 多 m，深层反射能量弱，地震信噪比低，同时高频成分迅速衰减，有效波频率偏低，制约了薄砂体预测解释评价，无法满足当前阶段综合研究需要。

地震数据可以看作地下反射系数序列与地震子波褶积的结果，反褶积是提高地震数据分辨率的一种重要手段，能够更准确地揭示地下地质构造和油气藏信息[10-12]。常见的反褶积方法有最小平方反褶积、脉冲反褶积、预测反褶积、同态反褶积、子波整形反褶积、最小熵反褶积[13-16] 等。反褶积可以在时间域或频率域进行，通常基于估计子波构建反褶积因子，对地震数据进行反滤波，其核心目标是压缩地震子波，拓宽地震数据的频带。常用的子波估计方法有谱模拟[17-19]、地震谱平滑[20] 和倒谱平滑[21] 等。CHEN 等[22] 在时域对估计子波进行了压缩，构建目标函数，基于整形正则化反演进行了反褶积。YUAN 等[23] 和程朝辉等[24] 提出了一种宽带子波反褶积方法，根据多道统计原理，提取最小相位子波，将宽带子波作为期望输出求解

著录信息：王金铎，王千军，薛姣，等. 广义余弦宽带频谱反演及其在准噶尔盆地的应用 [J]. 地质科技通报，2025，44(5)：29-39.
WANG Jinduo, WANG Qianjun, XUE Jiao, et al. Spectral inversion using generalized cosine broadband spectrum and its application in the Junggar Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(5): 29-39.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

反褶积因子，不但能够提高地震数据的分辨率，也能保持地震资料原有的信噪比。近年来，深度学习也被应用于反褶积处理[25-26]，倪文军等[27]利用宽频子波构建标签，提出了基于卷积神经网络的深度学习子波整形反褶积，MIN 等[28]结合通道注意力 U-Net 和物理卷积算法，增强了 U-Net 处理地震数据的灵活性，提高了地震数据的分辨率和同相轴横向连续性。

在时域中对地震子波进行压缩意味着频域中信号频谱的拉伸，CHEN 等[29]利用尺度因子对估计子波进行压缩得到了压缩子波，进一步利用估计子波和压缩子波构建了反褶积因子；ALAEI 等[30]将该方法推广到时频域，实现了非平稳反褶积。XUE 等[31]和杨培杰[32]设计了一个宽频目标谱，通过不同的反演方法，计算了频域反褶积因子。赵宝银等[33]利用宽带 Ricker 子波作为期望目标进行频谱整形，利用谱平滑方法计算子波谱，应用谱白化方法将频谱补偿成白谱，提高了地震记录分辨率。

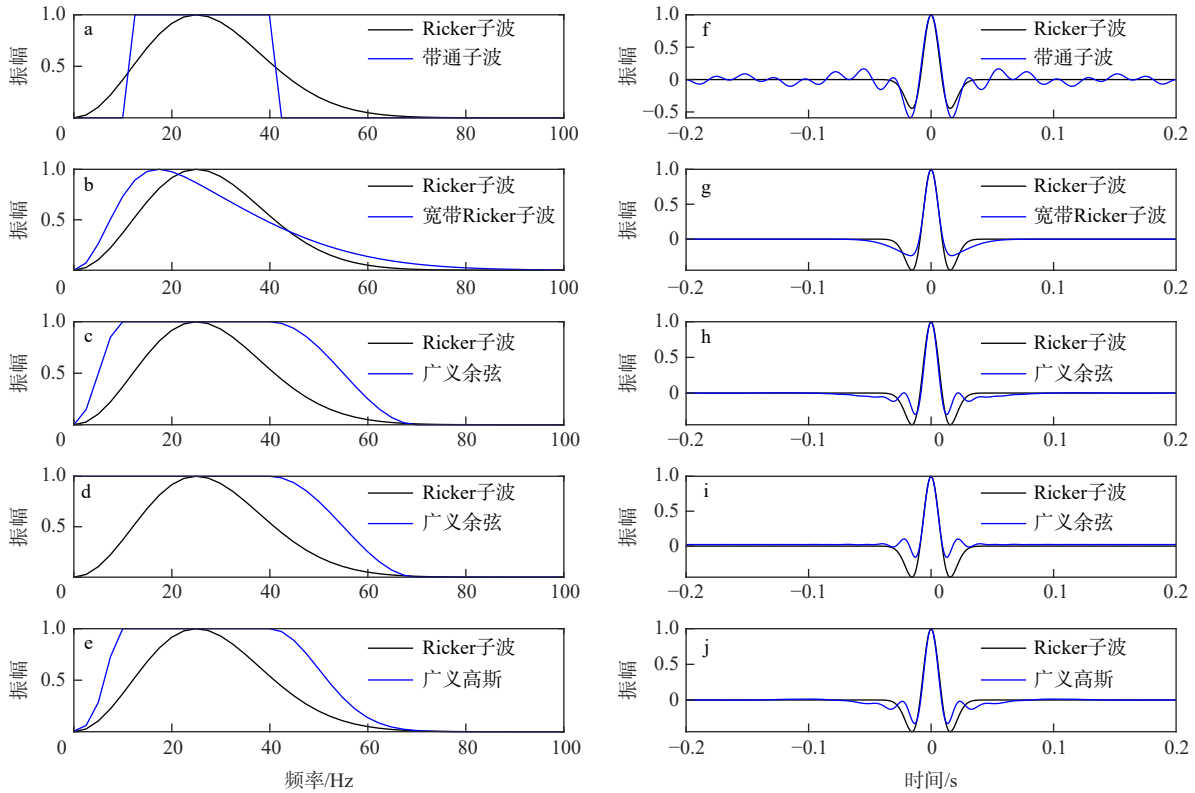
本研究构建广义余弦宽带目标谱，建立目标谱和地震频谱之间的关系方程，直接反演频域拓频因子，无需进行子波估计，可有效提高地震资料分辨率，将该方法应用于准噶尔盆地深层–超深层薄互层识别，取得了显著的应用效果。

1　方法原理

1.1　宽带目标谱

频率域拓频的关键技术之一是目标谱的设计。Ricker 子波主瓣两侧各有一个旁瓣，形状简单，但是旁瓣幅值较大[34]（图 1 中黑色曲线为 Ricker 子波，主频 25 Hz）。带通子波谱呈矩形（图 1a），可以看作是通带内各个频率的谐波合成的结果，有很多旁瓣，形状复杂，子波延续时间很长（图 1f）。宽带 Ricker 子波，也称俞氏子波，是由不同主频的 Ricker 子波合成的，具有主瓣窄、旁瓣幅度小和波形简单的特点。宽带 Ricker 子波的谱在频率域的分布由 Ricker 子波峰值频率积分的下限 p 和上限 q 2 个参数控制，其振幅谱[35]为：

$$W_{\mathrm{g}}(f)=\frac{1}{(q-p)\sqrt{\pi}}\left[\mathrm{e}^{-(f/q)^2}-\mathrm{e}^{-(f/p)^2}\right], \tag{1}$$



a. 带通子波，低频截止频率 10 Hz，高频截止频率 40 Hz；b. 宽带 Ricker 子波，p = 10 Hz，q = 40 Hz；c. 广义余弦，lp = 10 Hz，hp = 40 Hz，hc = 70 Hz；d. 广义余弦，lp = 0 Hz，hp = 40 Hz，hc = 70 Hz；e. 广义高斯，f_{L} = 10 Hz，f_{H} = 40 Hz；p，q 分别为 Ricker 子波峰值频率积分的下限和上限；lp，hp，hc 分别为广义余弦目标谱的低通频率、高通频率和高截频率；f_{L}，f_{H} 分别为广义高斯目标谱的低通频率和高通频率

图 1　理论目标谱 (a ~ e) 及其对应子波 (f ~ j)

Fig. 1　Theoretical expected spectra (a-e) and the corresponding wavelets (f-j)

式中：$W_g(f)$ 为宽带 Ricker 子波振幅谱；f 为频率。

与 Ricker 子波振幅谱相比，宽带 Ricker 子波振幅谱向低频方向下降得快，向高频方向下降得慢（图 1b），宽带 Ricker 子波旁瓣幅度小，但是旁瓣宽度更宽（图 1g）。

杨培杰[32] 通过给定低通频率 f_L 、高通频率 f_H 、以及低通和高通标准差 σ_L 和 σ_H，利用广义高斯理论目标谱进行最小二乘拓频，广义高斯目标谱（$W_g'(f)$）可以表示为：

$$W_g'(f)=\begin{cases}\exp\left[-\dfrac{(f-f_L)^2}{2\sigma_L^2}\right], & f\leqslant f_L\\ 1, & f_L<f<f_H\\ \exp\left[-\dfrac{(f-f_H)^2}{2\sigma_H^2}\right], & f\geqslant f_H\end{cases}。\quad(2)$$

王华忠[36] 提出了几种客户定制反射子波，其振幅谱是分段余弦函数。我们在客户定制反射子波的基础上，设计广义余弦目标谱（$W_g''(f)$）：

$$W_g''(f)=\begin{cases}\dfrac{1}{2}+\dfrac{1}{2}\cos\left[\dfrac{\pi(f-lp)}{lp}\right], & 0\leqslant f<lp\\ 1, & lp\leqslant f<hp\\ \dfrac{1}{2}+\dfrac{1}{2}\cos\left[\dfrac{\pi(f-hp)}{hc-hp}\right], & hp\leqslant f<hc\end{cases},\quad(3)$$

式中：lp 为广义余弦目标谱低通频率；hp 为广义余弦目标谱高通频率；hc 为广义余弦目标谱高截频率。

假设低通频率为 10 Hz，高通和高截频率分别为 40，70 Hz，广义余弦目标谱具有更宽的频带范围，且其设计更加灵活（图 1c），广义余弦谱对应子波的旁瓣振幅较小，第一旁瓣的宽度更窄（图 1h）。将低通频率设为 0 Hz，低频的补充使得子波的整体延续时间变短（图 1i），但是常规采集技术中 10 Hz 以下低频信息受噪声影响严重[37]，地震数据处理面波去除也会影响低频信息，因此目标谱的低通频率一般不能设置过低。广义高斯目标谱的低截和高截频率是由标准差 σ_L 和 σ_H 决定的，如果标准差 σ_L 较小会造成频谱形态较为陡峭，如果 σ_L 较大则会使得目标谱零频率位置处的幅值较大，影响反褶积效果，调整标准差使广义高斯目标谱的低截频率和高截频率与广义余弦目标谱最为接近（图 1e），此时广义余弦子波的第一个旁瓣幅值小于广义高斯目标子波（图 1j）。

1.2 基于频谱反演的拓频方法原理

地震记录可以看作地震子波与地层反射系数序列的褶积，在频率域可以表示为子波频谱与反射系数谱的乘积：

$$S(f)=W(f)R(f),\quad(4)$$

式中：$S(f)$，$W(f)$，$R(f)$ 分别为地震记录、子波和反射系数的谱。

对地震子波进行压缩或拉伸可以改变子波的频带，从而改变地震信号的频带。假设拓频因子为 $H(f)$，原始子波谱 $W(f)$ 和广义余弦宽带目标谱 $W_g''(f)$ 之间的关系为：

$$W_g''(f)=W(f)H(f)。\quad(5)$$

通常先对地震数据进行子波估计得到原始子波谱 $W(f)$，然后计算拓频因子：

$$H(f)=\frac{W_g''(f)}{W(f)}。\quad(6)$$

子波谱可以看作地震记录频谱的光滑部分或低频部分，因此我们根据式(5)建立正演方程[31]：

$$\boldsymbol{d}=\boldsymbol{LPm},\quad(7)$$

式中：$\boldsymbol{d}=\left[W_g''(f_1),\ \cdots,\ W_g''(f_N)\right]^{\mathrm{T}}$ 为广义余弦宽带目标谱组成的向量；$\boldsymbol{m}=[H(f_1),\ \cdots,\ H(f_N)]^{\mathrm{T}}$ 为待求拓频因子；N 为频率个数；$\boldsymbol{P}$ 为平滑整形矩阵；$\boldsymbol{L}$ 为地震记录频谱组成的对角阵。

$$\boldsymbol{L}=\begin{bmatrix}|S(f_1)| & & & \\ & |S(f_2)| & & \\ & & \ddots & \\ & & & |S(f_N)|\end{bmatrix}。\quad(8)$$

利用整形正则化[38-40] 反演拓频因子：

$$\boldsymbol{m}=\left[\lambda^2\boldsymbol{I}+\boldsymbol{X}\left(\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L}-\lambda^2\boldsymbol{I}\right)\right]^{-1}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{d},\quad(9)$$

式中：$\boldsymbol{X}$ 为整形算子，可以选择高斯平滑算子；λ^2 为正则化系数，正则化参数的量级与矩阵 $\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L}$ 的数据量级相匹配，本研究基于核矩阵范数计算正则化系数 $\lambda^2=\left\|\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L}\right\|_2^2$；$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵。

将频域拓频因子与原始地震记录频谱相乘，得到拓频后地震数据频谱 $S_g(f)=H(f)S(f)$，再对其进行傅里叶反变换得到时间域地震数据。

2 模型测试

利用不含噪声的理论模型数据对基于广义余弦宽带目标谱反演的拓频方法进行测试。将反射系数序列（图 2a）与主频为 18 Hz 的 Ricker 子波褶积得到合成地震记录（图 2b）。子波的主频较低，导致地震记录的分辨率较低，难以分辨反射界面距离较近的薄层。合成地震记录的振幅谱相对于反射系数的谱

表现出明显的带限特征(图 2c)。

将宽带目标谱分别设置为带通子波目标谱、宽带 Ricker 子波目标谱、广义余弦目标谱和广义高斯目标谱,其中带通子波的低通频率为 10 Hz,高通频率为 40 Hz;宽带 Ricker 子波的积分下限为 10 Hz,积分上限为 40 Hz;广义余弦目标谱的低通频率为 10 Hz,高通频率为 40 Hz,高截频率为 70 Hz;广义高斯目标谱的低通和高通频率分别为 10, 40 Hz。利用本研究给出的频谱反演方法对合成地震数据进行拓频处理,基于广义余弦目标谱反演的拓频方法得到的地震数据具有更高的分辨率,例如对于 0.2, 1.6 s 附近的薄层具有很好的识别效果(图 3)。广义余弦目标谱反演结果与广义高斯目标谱反演结果差别较小,但是对于薄储层(0.2 s 位置)广义余弦目标谱反演结果的分辨率更高(图 3d),基于广义余弦目标谱拓频后有效频带范围更宽(图 4),这是由广义余弦目标谱的形态决定的,即在低截频率左侧和高截频率右侧,离截止频率越近振幅衰减越慢;离截止频率越远振幅衰减越快。在地震数据中加入 20% 高斯白噪声(图 5a),基于不同目标谱进行了拓频处理,基于频谱反演的拓频方法具有较好的抗噪性,广义余弦目标谱反演得到的地震数据分辨率相对于带通子波和宽带 Ricker 子波目标谱反演效果更好,分辨率更高;广义余弦目标谱反演略优于广义高斯目标谱反演的地震数据,0.2 s 位置的 2 个相邻反射界面更容易识别(图 5)。

3　实例应用

准噶尔盆地腹部下成藏组合埋藏较深,但更靠近主力烃源岩,具有近源多层系立体含油的特征,是勘探突破的重点领域。研究工区位于准噶尔盆地,自上而下发育三叠系白碱滩组(T_3b),克拉玛依组(T_2k)和百口泉组(T_1b),二叠系上乌尔禾组(P_3w)和下乌尔禾组(P_2w)。位于东道海子凹陷的 C 井首次揭示了准中地区下乌尔禾组厚层优质烃源岩,并且在下乌尔禾组测井解释气层 5.5 m/1 层,上乌尔禾组试油见气,克拉玛依组试油见油。位于沙湾凹陷的 Z10 井已经累计产油 271 m^3,表明准噶尔盆地超深层具有极大的勘探潜力,但研究工区目的层普遍埋藏深,储层整体较致密,非均质性强,目的层砂体厚度薄,受限于现有地震资料品质,难以有效识别超深层薄层砂组。

Z10 井完井油气显示主要在百口泉组顶部及下乌尔禾组顶部。在井柱上标注了各个地层的底,其中白碱滩组岩性以泥岩为主,6 091 ~ 6 096 m 存在夹薄的泥质粉砂岩储层,综合解释为差气层;克拉玛依组中下部的细砂岩和泥质细砂岩段综合解释为水层(图 6a, c);百口泉组顶部岩性以泥质细砂岩、细砂岩

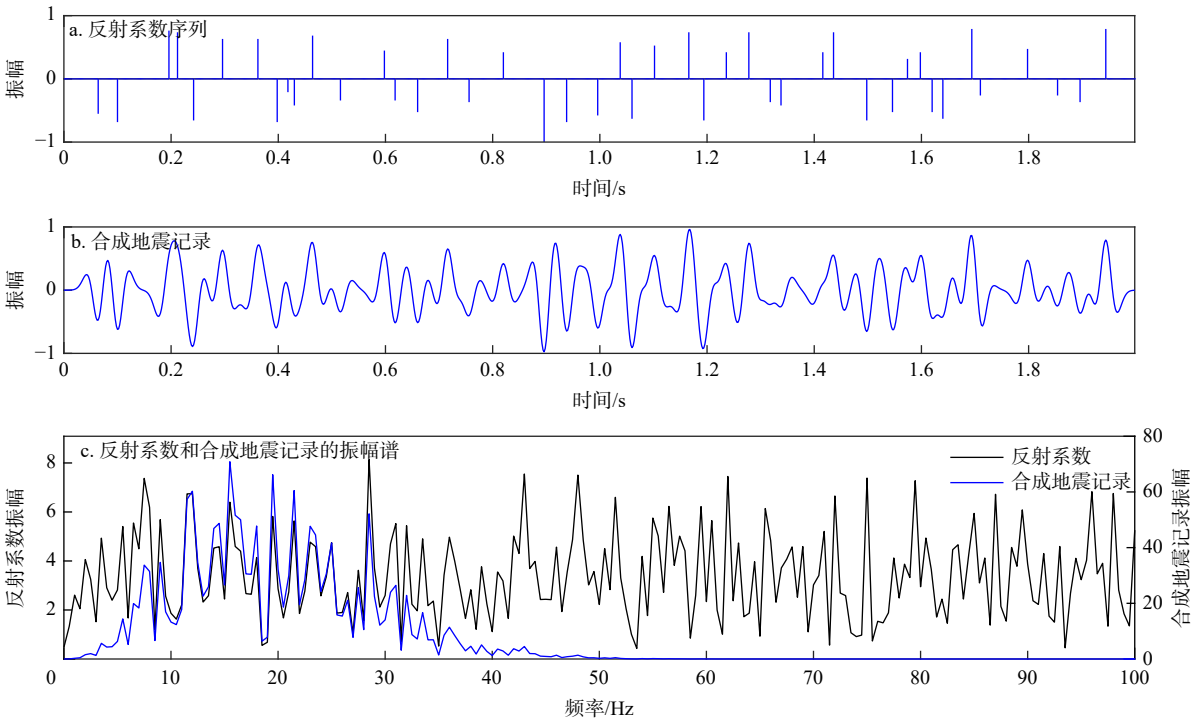


图 2　合成地震数据

Fig. 2　Synthetic seismic data

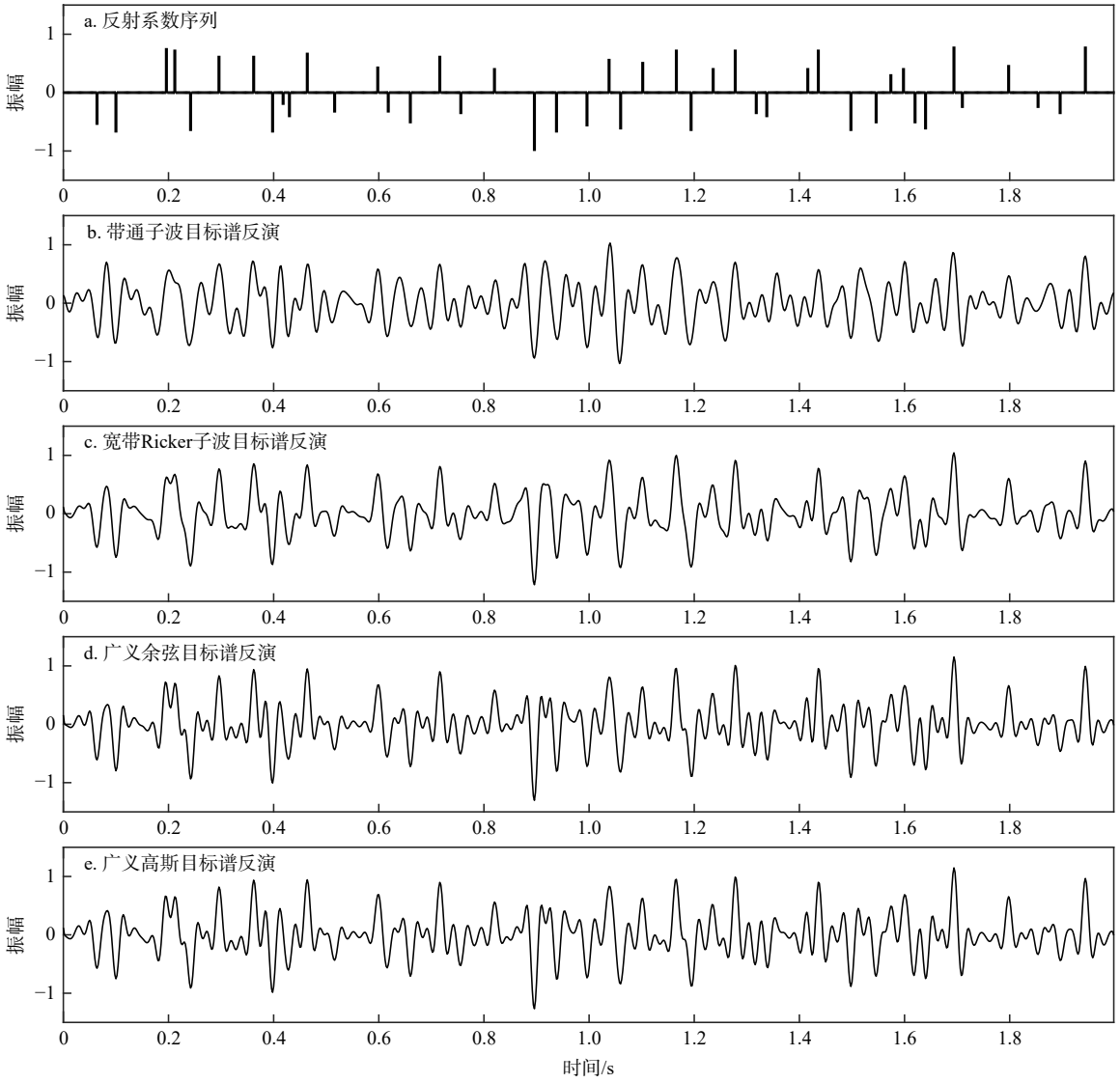


图 3　基于不同目标谱的拓频结果（不含噪声）

Fig. 3　Spectral extension results with different expected spectra (without noise)

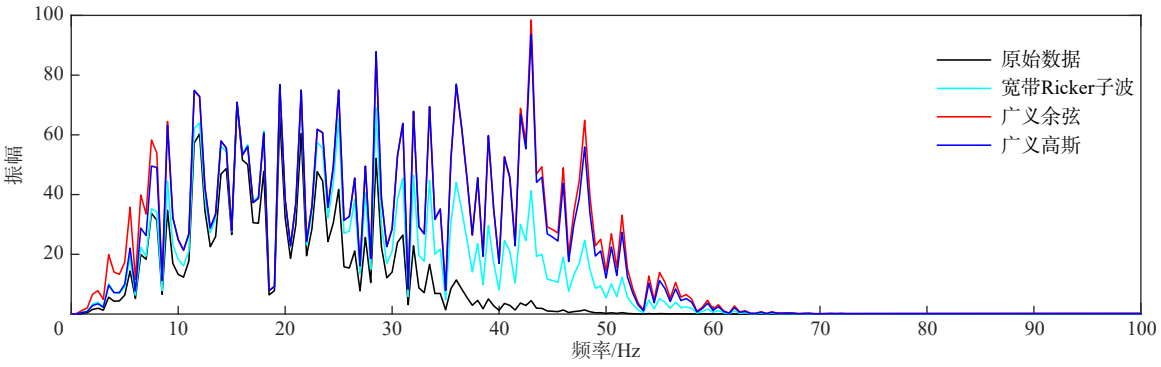


图 4　合成地震记录拓频前后频谱对比

Fig. 4　Comparison of seismic spectra of synthetic seismic records before and after spectral extension

及砂砾岩为主，细砂岩储层物性较好，岩性细，综合解释为气层，下部为砂砾岩、细砂岩和泥质细砂岩，综合解释为干层(图 6)；上乌尔禾组存在细砂岩和泥岩互层，综合解释不含油气；下乌尔禾组顶部岩性为砂砾岩，物性好，综合解释为气层，中上部储层岩性为砂砾岩，储层物性变差，综合解释为干层(图 6b, d)。

在对实际地震数据进行拓频处理时，广义余弦目标谱的低截频率为 0 Hz，低通频率一般为 8 ~ 16 Hz，

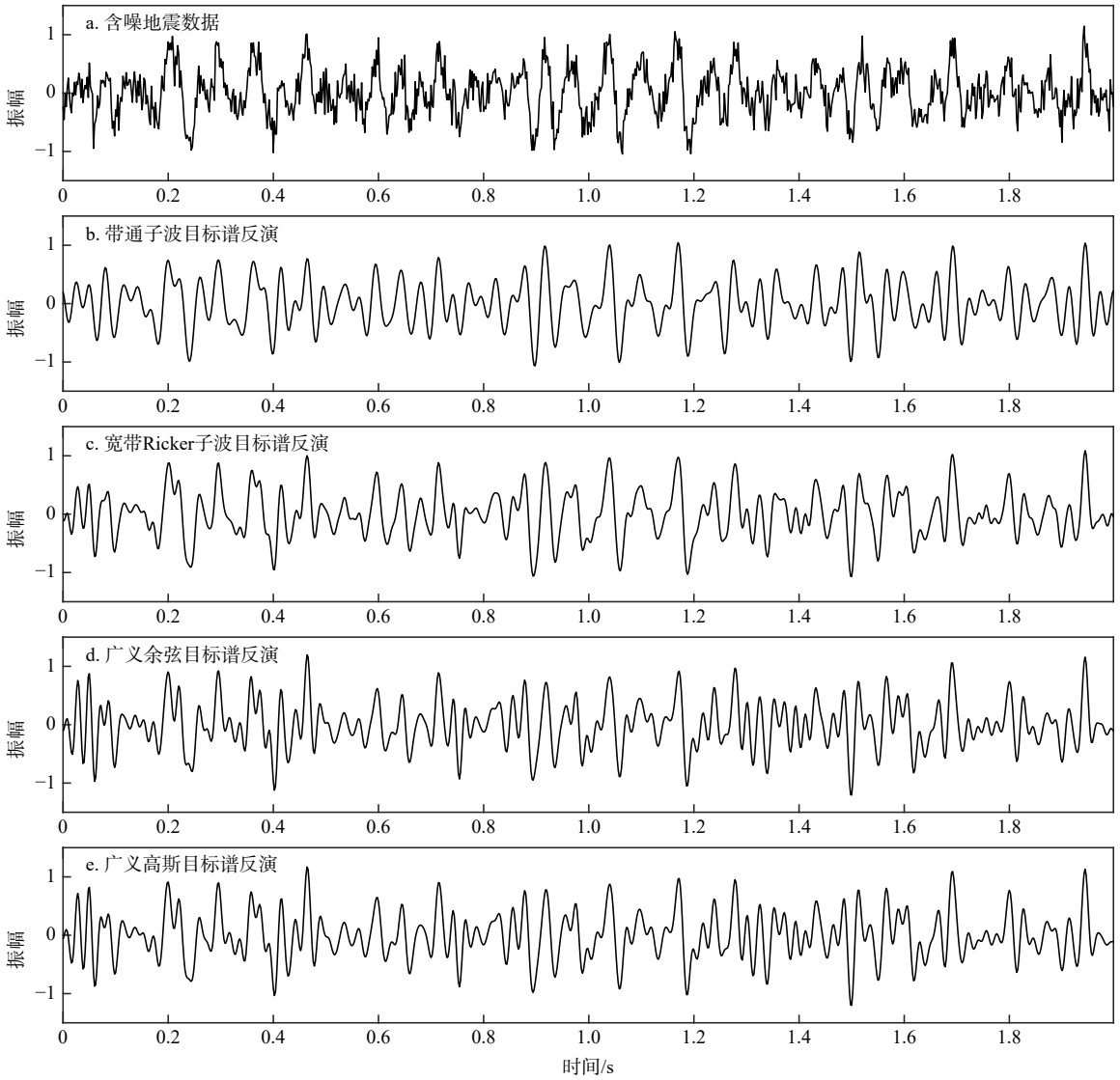


图 5　基于不同目标谱的拓频结果（含 20% 噪声）

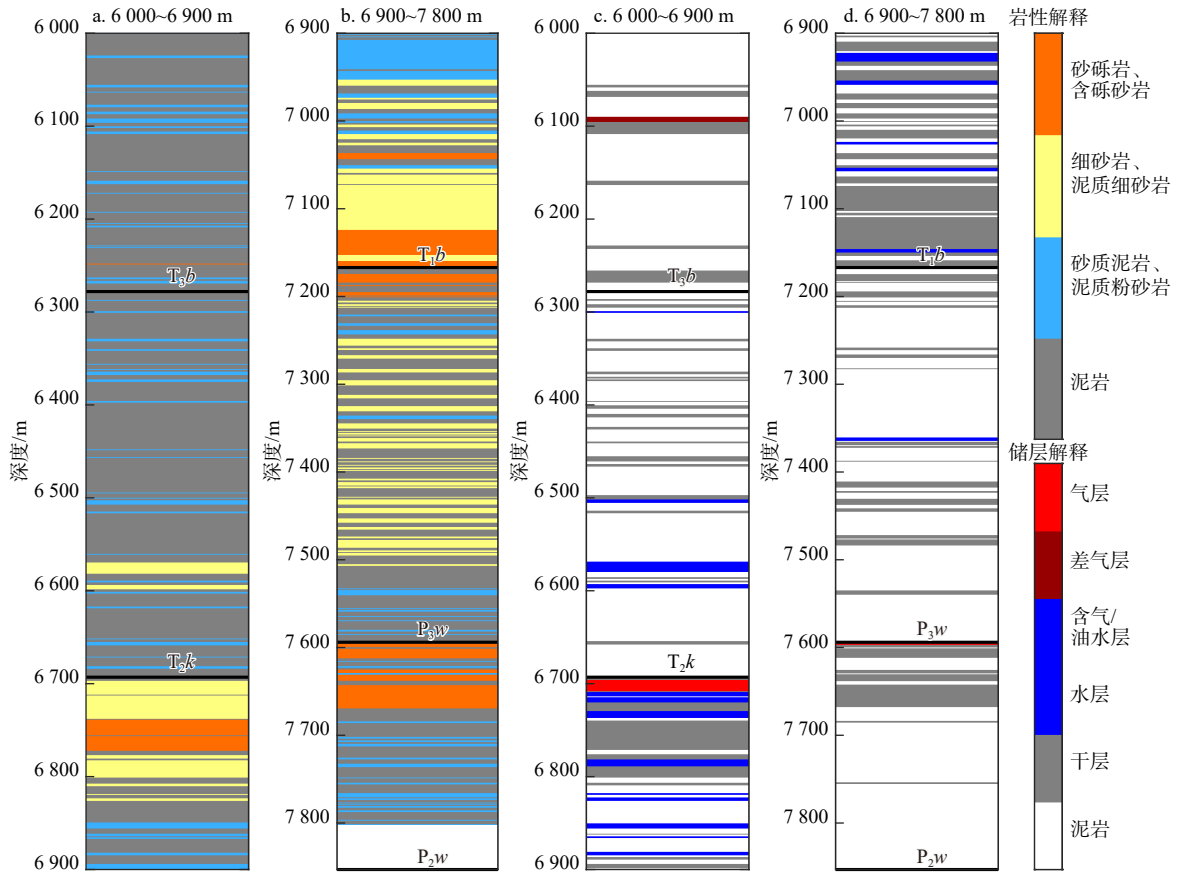
Fig. 5　Spectral extension results with different expected spectra (data with 20% noise)

根据数据的有效频带范围进行调整。依据原始数据的频谱范围选择广义余弦目标谱的高通频率，根据期望有效频带范围选择目标谱的高截频率。对地震数据(图 7)进行傅里叶变换，将信号振幅谱衰减到峰值的−14 dB 时对应的频率当作有效频带边界，此时对应的频带范围为 6 ~ 40 Hz，将高频边界频率 40 Hz 设置为广义余弦目标谱的高通频率，拓频处理后的高频边界频率约等于高通频率和高截频率的均值，将广义余弦目标谱的高截频率设置为 70 Hz，低通频率设置为 10 Hz，则拓频处理后的地震数据有效频带范围为 5 ~ 55 Hz(图 8a)。广义余弦目标谱反演拓频处理后 4 400 ms 位置处的 2 组泥质粉砂岩反演以及 4 530 ms 位置处的砂砾岩和细砂岩互层能够在地震剖面中得到有效识别，T_1b 顶部的含气储层更易在地震剖面中进行解释和追踪(图 9)。理论上频带范围越宽，地震数据的分辨率越高，对于实际地震数据当目标谱设置过宽时，会降低地震数据信噪比(图 8b, 9b)，从而影响后续的解释和反演结果。

4　结　论

(1)本研究提出的广义余弦目标谱设计灵活，具有更宽的频带范围。与 Ricker 子波相比广义余弦目标谱对应的子波旁瓣振幅更小，第一旁瓣宽度更窄；与广义高斯目标谱相比，高截和高通频率的设计相对于标准差更加直观。

(2)将广义余弦目标谱当作原始子波频谱与拓频因子的乘积，建立广义余弦宽带目标谱和拓频因子之间的正演方程，利用整形正则化进行拓频因子反演。无需进行子波估计，可直接反演得到拓频因



T_3b. 白碱滩组; T_2k. 克拉玛依组; T_1b. 百口泉组; P_3w. 上乌尔禾组; P_2w. 下乌尔禾组; 下同

图 6　Z10 井测井岩性（a，b）和储层解释（c，d）

Fig. 6　Lithology and reservoir interpretation of Well Z10

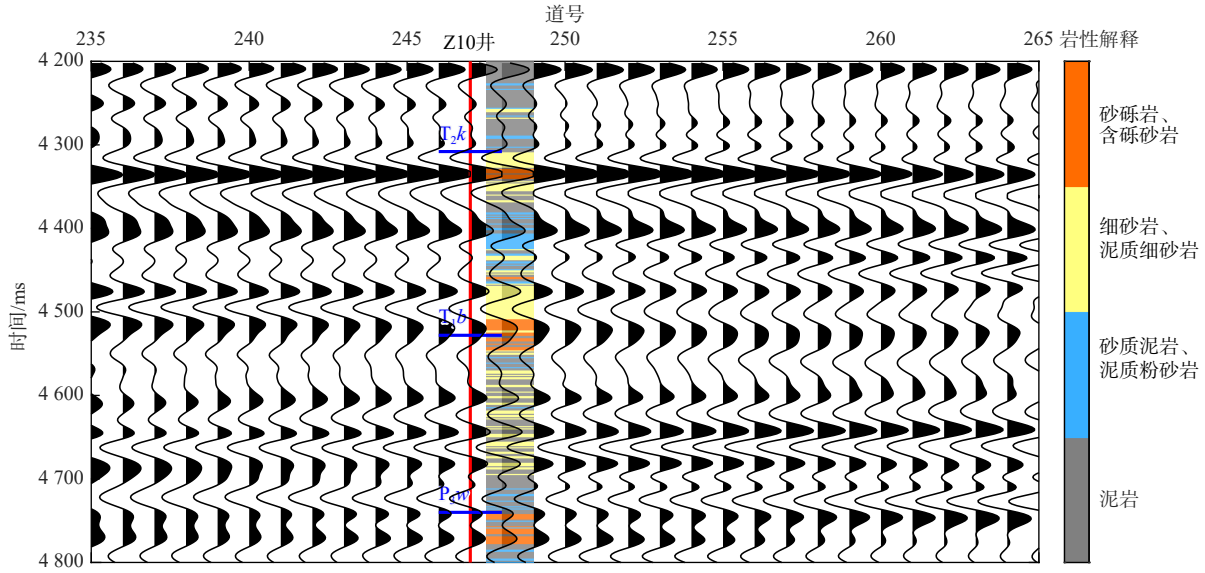


图 7　原始地震剖面

Fig. 7　Original seismic profile

子, 对数据进行拓频处理, 模型测试验证了该方法的有效性。

(3)针对准噶尔盆地实际地震数据进行拓频处理, 结果表明适合工区目的层的广义余弦宽带目标谱的低通频率为 10 Hz, 高通频率为 40 Hz, 高截频率为 70 Hz。实际地震数据广义余弦宽带谱反演结果显示地震频带得到了有效拓宽, 提高了地震资料对薄层的识别能力。

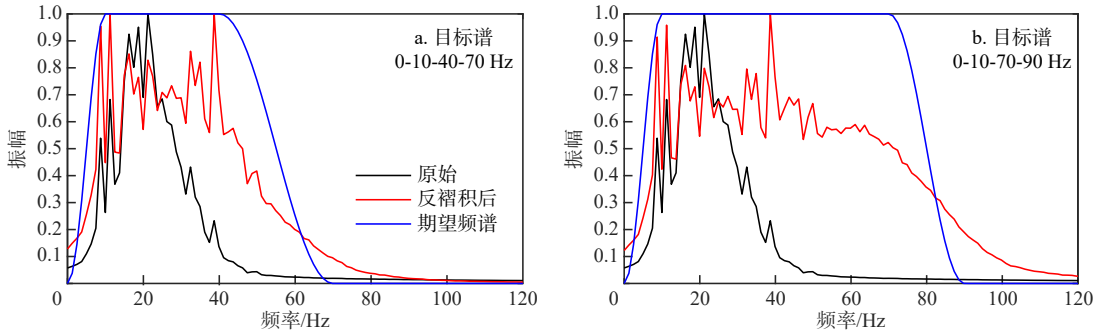


图 8　实际地震数据拓频前后频谱对比

Fig. 8　Comparsion of seismic spectra of actual seismic data before and after spectral extension

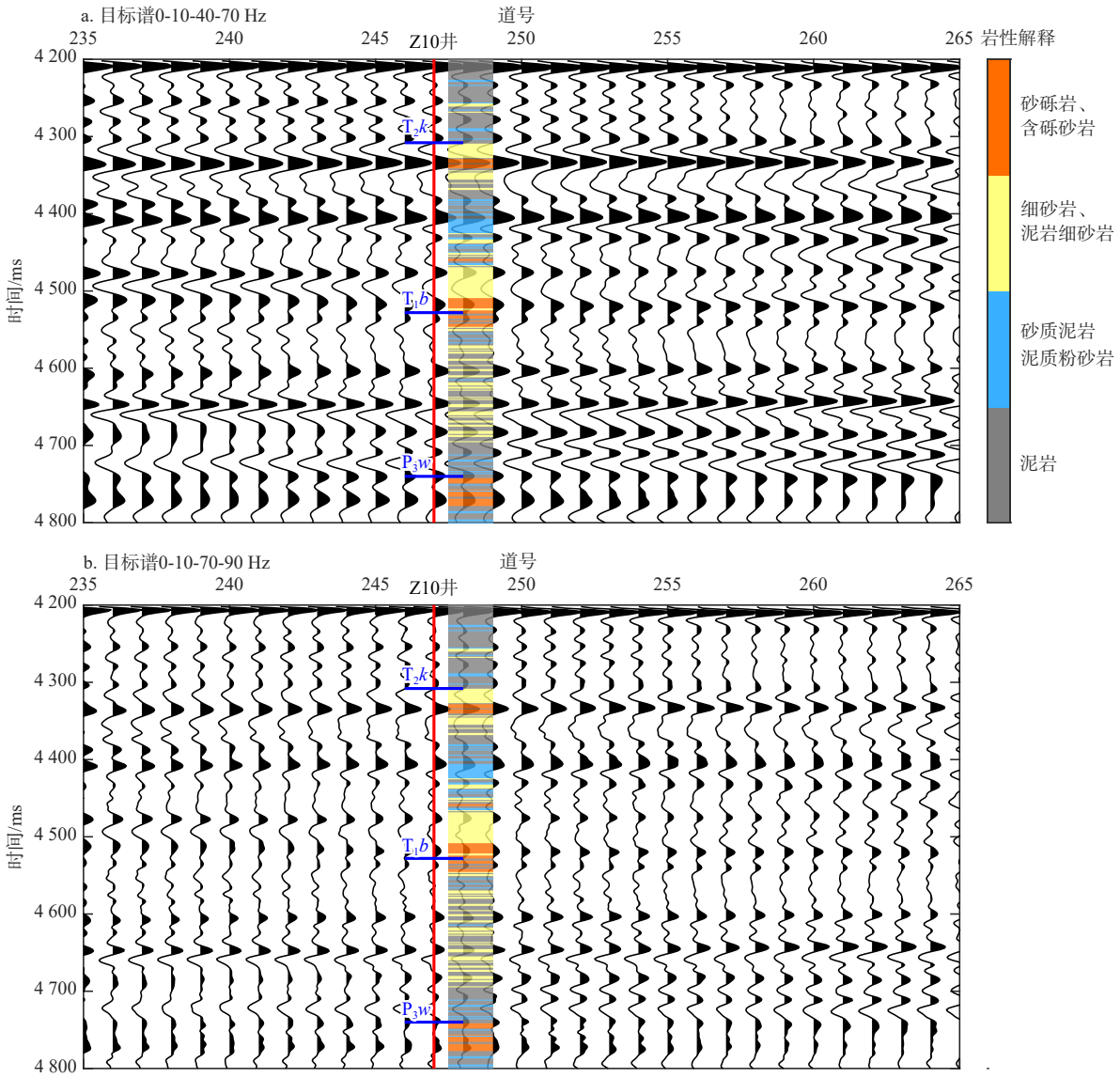


图 9　拓频处理后地震剖面

Fig. 9　Seismic profile after spectral extension

(4)基于广义余弦宽带频谱反演的拓频方法可有效提高地震资料垂向分辨率,但是该方法忽略了道间的相关性,后续研究可以在断层识别基础上开展分区拓频处理,在其他可靠资料或先验信息辅助下对连续沉积地层施加空间方向导数约束,保持地层波形横向一致性,对断层及岩性突变带采用边界保护算法,保留不连续性特征;或者采用结构导向的多道联合反演框架,进一步提高拓频结果的横向地

质合理性。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 何登发, 张磊, 吴松涛, 等. 准噶尔盆地构造演化阶段及其特征 [J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 845-861.
HE D F, ZHANG L, WU S T, et al. Tectonic evolution stages and features of the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 845-861. (in Chinese with English abstract)

[2] 夏世威, 马强, 黄传炎, 等. 准噶尔盆地东部吉木萨尔–吉南凹陷构造演化及原型盆地恢复 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(3): 170-179.
XIA S W, MA Q, HUANG C Y, et al. Tectonic evolution and prototype basin reconstruction in the Jimsar and Jinan depressions, eastern Junggar Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(3): 170-179. (in Chinese with English abstract)

[3] 于宝利, 贾承造, 刘可禹, 等. 准噶尔盆地南缘多滑脱层控制的冲断构造特征及深层油气勘探方向 [J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(3): 593-606.
YU B L, JIA C Z, LIU K Y, et al. Multi-detachment-controlled thrust structures and deep hydrocarbon exploration targets in southern margin of Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(3): 593-606. (in Chinese with English abstract)

[4] 龚德瑜, 刘泽阳, 何文军, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组有机质多元富集机制 [J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(2): 260-272.
GONG D Y, LIU Z Y, HE W J, et al. Multiple enrichment mechanisms of organic matter in the Fengcheng Formation of Mahu Sag, Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(2): 260-272. (in Chinese with English abstract)

[5] 何文军, 费李莹, 阿布力米提·依明, 等. 准噶尔盆地深层油气成藏条件与勘探潜力分析 [J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 189-201.
HE W J, FEI L Y, ABLIMITI Y M, et al. Accumulation conditions of deep hydrocarbon and exploration potential analysis in Junggar Basin, NW China[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 189-201. (in Chinese with English abstract)

[6] 蔡忠贤, 陈发景, 贾振远. 准噶尔盆地的类型和构造演化 [J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 431-440.
CAI Z X, CHEN F J, JIA Z Y. Types and tectonic evolution of Junger Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 431-440. (in Chinese with English abstract)

[7] 党文龙, 高岗, 尤新才, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷大油区不同类型原油分布及成因 [J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(4): 731-741.
DANG W L, GAO G, YOU X C, et al. Genesis and distribution of oils in Mahu Sag province, Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 731-741. (in Chinese with English abstract)

[8] 史乐, 李婷, 杜引鱼, 等. 准噶尔盆地西北缘 LQ 区石炭系火山岩风化壳储层分带性及勘探方向 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(3): 82-93.
SHI L, LI T, DU Y Y, et al. Zonality and exploration direction of Carboniferous volcanic weathering crust reservoirs in the LQ area, northwest margin of the Junggar Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(3): 82-93. (in Chinese with English abstract)

[9] 王大兴, 胡海燕, 邹佳群, 等. 准噶尔盆地东道海子凹陷二叠系下乌尔禾组陆相页岩气形成富集条件及主控因素 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(4): 98-112.
WANG D X, HU H Y, ZOU J Q, et al. Enrichment conditions and main controlling factors of continental shale gas in the Permian Lower Wuerhe Formation in the Dongdaohaizi Sag, Junggar Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(4): 98-112. (in Chinese with English abstract)

[10] WANG Y J, GAO X Y, ZHANG G Q, et al. Seismic multichannel deconvolution via 2-D K-SVD and MSD-oCSC[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62: 5904713.

[11] SUN Y G, CAO S Y, CHEN S Y, et al. Blind spectral inversion of seismic data[J]. Geophysical Prospecting, 2024, 72(9): 3436-3447.

[12] WANG Y, ZHANG G, LI H, et al. The high-resolution seismic deconvolution method based on joint sparse representation using logging-seismic data[J]. Geophysical Prospecting, 2022, 70(8): 1313-1326.

[13] SACCHI M D, VELIS D R, COMÍNGUEZ A H. Minimum entropy deconvolution with frequency-domain constraints[J]. Geophysics, 1994, 59(6): 938-945.

[14] 卫泽, 潘树林, 程祎, 等. 自适应变分模态分解同态反褶积方法 [J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(1): 105-113.
WEI Z, PAN S L, CHENG Y, et al. Homomorphic deconvolution method based on adaptive variational mode decomposition[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2023, 58(1): 105-113. (in Chinese with English abstract)

[15] DE MACEDO I A S, DE FIGUEIREDO J J S, DE SOUSA M C, et al. Estimation of the seismic wavelet through homomorphic deconvolution and well log data: Application on well-to-seismic tie procedure[J]. Geophysical Prospecting, 2020, 68(4): 1328-1340.

[16] ROSEC O, BOUCHER J M, NSIRI B, et al. Blind marine seismic deconvolution using statistical MCMC methods[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2003, 28(3): 502-512.

[17] MAMASANI M G, MANAMAN N S, KAZEMI K, et al. Resolution enhancement of seismic data using spectral modeling based on dominant Ricker components and separable nonlinear least squares[J]. The Leading Edge, 2017, 36(6): 480-486.

[18] ROSA A L R, ULRYCH T J. Processing via spectral modeling[J]. Geophysics, 1991, 56(8): 1244-1251.

[19] 孙成禹. 谱模拟方法及其在提高地震资料分辨率中的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35(1): 27-35.
SUN C Y. Spectrum modeling method and its application to seismic resolution improvement[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2000, 35(1): 27-35. (in Chinese with English abstract)

[20] LIU X W, GAO F X, ZHANG Y Y, et al. Seismic resolution enhancement in shale-oil reservoirs[J]. Geophysics, 2018, 83(5): 281-287.

[21] OTIS R M, SMITH R B. Homomorphic deconvolution by log

spectral averaging[J]. Geophysics, 1977, 42(6): 1146-1157.

[22] CHEN Y K, JIN Z Y. Simultaneously removing noise and increasing resolution of seismic data using waveform shaping[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(1): 102-104.

[23] YUAN Y J, LI Y C, ZHOU S C. Multichannel statistical broadband wavelet deconvolution for improving resolution of seismic signals[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(2): 1772-1783.

[24] 程朝辉, 苑益军, 刘晟, 等. 宽带子波反褶积方法在致密储层地震资料处理中的应用 [J]. 石油物探, 2023, 62(1): 119-129.
CHENG Z H, YUAN Y J, LIU S, et al. Application of wideband wavelet deconvolution for tight oil exploration[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2023, 62(1): 119-129. (in Chinese with English abstract)

[25] ZHAO Y X, LI Y, WANG S N, et al. Physical model and super-resolution theory-guided unsupervised deep learning deconvolution for seismic resolution enhancement[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2025, 63: 5905813.

[26] YU H Z, CHEN W C, WANG X K, et al. Unsupervised diffusion model for seismic deconvolution[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2025, 22: 7504405.

[27] 倪文军, 刘少勇, 王丽萍, 等. 基于深度学习的子波整形反褶积方法 [J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(6): 1313-1321.
NI W J, LIU S Y, WANG L P, et al. Wavelet shaping deconvolution based on deep learning[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2023, 58(6): 1313-1321. (in Chinese with English abstract)

[28] MIN F, TANG J Y, PAN S L, et al. CAUC: Combining channel attention U-Net and convolution for seismic data resolution improvement[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2023, 20: 3003105.

[29] CHEN S Q, WANG Y H. Seismic resolution enhancement by frequency-dependent wavelet scaling[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(5): 654-658.

[30] ALAEI N, ROSHANDEL KAHOO A, KAMKAR ROUHANI A, et al. Seismic resolution enhancement using scale transform in the time-frequency domain[J]. Geophysics, 2018, 83(6): 305-314.

[31] XUE J, CAI C G, GU H M, et al. Seismic resolution enhancement by spectral shaping using shaping-regularized inversion[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 19: 7506905.

[32] 杨培杰. 复数域约束最小二乘拓频 [J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(6): 1244-1253.
YANG P J. Constrained complex-domain least-squares spectrum blueing[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(6): 1244-1253. (in Chinese with English abstract)

[33] 赵宝银, 陈思远, 陶钰, 等. 应用宽带 Ricker 子波的期望目标频谱整形 [J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(3): 541-547.
ZHAO B Y, CHEN S Y, TAO Y, et al. Spectrum shaping of desired targets based on broadband Ricker wavelets[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(3): 541-547. (in Chinese with English abstract)

[34] 唐甜, 巴素玉, 时瑞坤, 等. 基于正交匹配追踪的深度波数谱分解及其在含油气储层预测中的应用 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(1): 360-370.
TANG T, BA S Y, SHI R K, et al. Depth wavenumber spectral decomposition based on orthogonal matching pursuit and its application in hydrocarbon reservoir prediction[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(1): 360-370. (in Chinese with English abstract)

[35] 俞寿朋. 宽带 Ricker 子波 [J]. 石油地球物理勘探, 1996, 31(5): 605-615.
YU S P. Wide-band Ricker wavelet[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1996, 31(5): 605-615. (in Chinese with English abstract)

[36] 王华忠. 客户定制反射子波的可控震源地震勘探方法 [J]. 石油物探, 2020, 59(5): 683-694.
WANG H Z. Vibroseis seismic exploration with customized wavelet[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(5): 683-694. (in Chinese with English abstract)

[37] ZHANG J H, ZHANG B B, ZHANG Z J, et al. Low-frequency data analysis and expansion[J]. Applied Geophysics, 2015, 12(2): 212-220.

[38] FOMEL S. Shaping regularization in geophysical-estimation problems[J]. Geophysics, 2007, 72(2): 29-36.

[39] 乐友喜, 陈艺都, 吴佳伟, 等. 自适应整形正则化迭代最小二乘谱反演方法 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(3): 54-61.
YUE Y X, CHEN Y D, WU J W, et al. Iterative least squares spectrum inversion based on adaptive shaping regularization[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2022, 46(3): 54-61. (in Chinese with English abstract)

[40] 薛姣, 顾汉明, 贺梅, 等. 基于自适应整形正则化的 AVAz 反演 [J]. 地球物理学报, 2024, 67(6): 2429-2438.
XUE J, GU H M, HE M, et al. AVAz inversion using adaptive shaping regularization[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2024, 67(6): 2429-2438. (in Chinese with English abstract)

Summary for “广义余弦宽带频谱反演及其在准噶尔盆地的应用”

Spectral inversion using generalized cosine broadband spectrum and its application in the Junggar Basin

WANG Jinduo[1]，WANG Qianjun[1]，XUE Jiao[2*]，XU Youde[1]，YUAN Qing[1]，YUAN Ling[1]，HE Song[3]，TAN Xingyu[1]，ZHANG Wenbo[1]

1. Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying Shandong 257015, China；
2. School of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China；
3. Chengdu Exploration and Development Research Institute of PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Chengdu 610051, China

First author，E-mail：wangjinduo.slyt@sinopec.com

* Corresponding author， E-mail：xuejiao@cug.edu.cn

Abstract：[**Objective**] In the Junggar Basin，the exploration targets are deeply buried beneath the earth surface，posing significant challenges for seismic exploration. Specifically，this result in severe high-frequency absorption and attenuation of seismic wave energy. The recorded seismic data are characterized by a limited bandwidth with low dominant frequency，which significantly compromises the accuracy of the sandstone-shale thin interbed identification. Thus，the poor quality of the seismic data makes the reservoir distribution and potential hydrocarbon prediction tasks extremely challenging. Deconvolution is a key technique to improve the seismic data resolution. It aims to reverse the effects of wavelet convolution in the recorded seismic data，and can be performed in either the time domain or the frequency domain. Frequency domain deconvolution usually uses the estimation of seismic spectrum to construct a spectral-broadening operator，thereby expanding the frequency band and increasing the dominant frequency of the seismic data. We develop a frequency-domain deconvolution method to enhance the vertical seismic resolution. The key to this method lies in the use of an optimized target spectrum，and the final goal is to expand the seismic bandwidth effectively. [**Methods**] We propose a generalized cosine broadband spectrum and incorporate it into the spectral inversion. Based on the relationship between the expected spectrum and diagonal matrix of the seismic spectrum，a spectral-broadening forward model is established. Subsequently，a shaping regularization inversion method is used to invert for the spectral-broadening operator. Ultimately，by applying the obtained spectral-broadening operator to the seismic data，the vertical seismic resolution can be enhanced. This is beneficial for more accurate geological interpretation and hydrocarbon exploration. [**Results**] We use a theoretical model and field seismic data in the Junggar Basin to validate of the proposed method. The theoretical model has verified the effectiveness of the proposed method using the generalized cosine broadband spectrum. Subsequently，we apply the method to real seismic data from the Junggar Basin，where an optimized generalized cosine broadband spectrum is constructed based on the original seismic spectrum. The real seismic data processing results show that the frequency bandwidth of the seismic data has been effectively increased，leading to improved resolution of thin interbeds. The theoretical and field data results confirm the robustness and practical applicability of the proposed method. [**Conclusion**] The generalized cosine broadband spectrum has a wide frequency band range，and can be flexibly designed. Additionally，the corresponding wavelet exhibits low side-lobe amplitude and narrow side-lobe width，which minimizes interference from reflected waves. The proposed spectral inversion using the generalized cosine broadband spectrum can be used to improve the seismic resolution and provides reliable seismic data for unconventional hydrocarbon exploration.

Key words: Junggar Basin；thin interlayer；generalized cosine broad-band spectrum；seismic resolution

Received：2025-03-13；Revised：2025-07-23；Accepted：2025-08-04

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20250117