

时空变自适应反 Q 滤波

郭志伟^{1,2}, 曹思远^{1,2*}, 袁殿³

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球物理学院, 北京 102249

3 北京亿华通科技股份有限公司, 北京 100084

* 通信作者, siyuan.caoff@gmail.com

收稿日期: 2019-03-04

国家自然科学基金(41674128)、国家重点研发计划(SQ2017YFGX030021)、中国石油科技创新基金项目“陆上层间多次波压制技术”(2017D-5007-0302)联合资助

摘要 大地吸收效应是造成地震波能量衰减、分辨率降低的重要因素, 反 Q 滤波能够对衰减能量进行有效恢复、提高资料分辨率。常规的反 Q 滤波采用增益函数, 能自适应地减小高频能量的补偿系数, 但并不能对资料的信噪比进行很好的自适应。针对该问题, 在原有增益函数的基础上, 设计与资料局部信噪比有关的增益参数。该参数具有时空变特征, 能较好地适应资料本身的特点。在高信噪比区域, 取较大的增益参数, 对高频成分进行相对充分的补偿; 在低信噪比区域, 取较小的增益参数, 对高频成分进行相对有限的补偿。模型测试和资料处理表明, 该方法对资料的适应性较好, 且取得了较好的补偿效果。

关键词 吸收衰减; 反 Q 滤波; 稳定因子; 增益参数; 时空变; 自适应

Time-space variant adaptive inverse Q filtering

GUO Zhiwei^{1,2}, CAO Siyuan^{1,2}, YUAN Dian³

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 College of Geophysics, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 Beijing Sinohtec Limited Liability Company, Beijing 100084, China

Abstract The earth absorption effect is an important factor resulting in the energy attenuation of seismic waves and the degradation of resolution. The inverse Q filtering method helps to restore attenuated energy and improve data resolution. The conventional inverse Q filtering method employs a gain function, which can adaptively reduce the compensation coefficient of high-frequency energy but cannot adapt to the signal to noise ratio (SNR) of data very well. Therefore, the gain parameter related to the local data SNR has been specially designed and proposed based on the gain function. A gain parameter with attributes of spatial and temporal variability can better adapt to the features of data. In high SNR regions, if the chosen value of the gain parameter is high, it can adequately compensate for the high frequency components in a effective manner. In contrast, in low SNR regions, if the chosen value of the gain parameter is smaller, it can only compensate for the high frequency components in a relatively limited manner. Model testing and data processing demonstrates that the inverse Q filtering method can be well adapted to data and achieve a good compensation effect.

Keywords absorption attenuation; inverse Q filtering; stability factor; gain parameter; time-space variant; adaptive

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2019.02.011

引用格式: 郭志伟, 曹思远, 袁殿. 时空变自适应反 Q 滤波. 石油科学通报, 2019, 02: 123-133

GUO Zhiwei, CAO Siyuan, YUAN Dian. Time-space variant adaptive inverse Q filtering. Petroleum Science Bulletin, 2019, 02: 123-133.

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2019.02.011

1 引言

目前,全球油气勘探呈现着明显的全面(常规和非常规)、多样(各种类型油气资源)、更深(深层和超深层)的特点^[1]。随着地震勘探要求的日益提高,高分辨率的地震资料处理对后期的油藏描述和开发显得至关重要。地震波在地层介质传播过程中的吸收衰减是影响地震资料分辨率的主要原因,主要表现为振幅衰减、相位畸变、频率降低等特征^[2]。地层介质的吸收衰减作用是造成地震波能量衰减的一个重要因素,频率越高,衰减越快,严重影响了地震资料的中深层成像能力和储层预测的精度^[3]。反 Q 滤波是对吸收衰减进行有效补偿的方法,能较好地补偿振幅和校正相位,具有较准确的物理机制^[4]。在反 Q 滤波的实现算法方面,不同学者进行了大量的研究^[5-14]。Robinson^[15-16]提出了频率域内插值的相位反 Q 滤波及其改进算法。Hale^[17-18]根据Futterman模型提出了用泰勒级数展开近似高频补偿的反 Q 滤波。Bickel等^[19]提出了基于复函数平面波的反 Q 滤波算法。McCarley^[20]提出了基于自回归模型的常 Q 滤波方法。Varela等^[21]提出了Hale反 Q 滤波算法的改进方法。裴江云等^[22]通过麦克劳林级数展式推导了基于Kjartansson模型的高阶近似反 Q 滤波公式,其一阶近似式与Hale的反 Q 滤波式一致。Bano^[23]将常 Q 模型相位反 Q 滤波拓展到层 Q 值模型。在补偿过程中,由于低信噪比和机器误差等因素,高频成分出现补偿溢出现象。针对该缺点,人们提出了增益补偿函数,其作用是实现各频率振幅合理有效的补偿,通常在某个频率点之后逐渐减小补偿系数(即遵循低频充分补偿、中频欠补偿、高频不补偿的原则)。Wang^[24-28]基于波场向下延拓提出了稳定高效的Gabor域反 Q 滤波,采用的增益函数只需一个控制参数(稳定因子法),即可实现自适应的稳定补偿处理。李合群等^[29]在对比不同增益控制方法的基础上,提出了选择性更灵活的补偿算子,取得了较好的补偿效果。张固澜等^[30]针对固定增益函数容易造成深层资料高频补偿不足的缺点,提出了时变增益函数,较好地恢复地震有效频带内的能量。吴吉忠等^[31]提出了一种基于等效 Q 值的反 Q 滤波算法,进行补偿高频能量耗散和相位畸变校正。SHI等^[32]将增益限与稳定因子设为随时间和地层 Q 值连续变化的参数,提出变增益限的反 Q 滤波方法,该方法能够补偿深层能量衰减,提高分辨率。赵岩^[33]提出了一种变稳定因子的反 Q 滤波方法,其中稳定因子是地震波的传播距离、地震记录的频率以及品质因子 Q 的函数。WEI等^[34]引入整形正

则矩阵来实现振幅补偿的稳定计算,利用增益控制因子和噪声压制系数来压制噪声,改进了稳定化反 Q 滤波方法。XUE等^[35]提出一种自适应稳定的反 Q 滤波方法,该方法利用同步压缩变换对地震信号主频段有效成分进行重构,同时压制主频段外环境噪声,能有效地补偿振幅衰减,抑制环境噪声,提高地震资料分辨率。

由于反 Q 滤波处理过程中需要兼顾信噪比,一般情况下,地震资料的信噪比越高,则期望补偿越充分。稳定因子法中的增益函数只有一个控制参量,其值越大,对高频的补偿越充分。基于上述特点和处理目标,通过建立增益参数和信噪比的映射关系,对资料不同信噪比的区域进行不同程度的补偿处理,即自适应增益反 Q 滤波。

2 基本原理

2.1 反 Q 滤波

根据地层吸收衰减等价于偏移的思想,地表波场的向下延拓可以表示为:

$$U(r + \Delta r, \omega) = U(r, \omega) \exp(-ik(\omega)\Delta r) \quad (1)$$

其中, $U(r, \omega)$ 是角频率为 ω 传播距离为 r 的平面波波场, $k(\omega)$ 代表波数, i 是虚数单位。地震剖面图记录了从震源到反射点然后再回到地表的反射波。在波数的定义中引入地层品质因子 Q :

$$k(\omega) = \left(1 - \frac{i}{2Q}\right) \frac{\omega}{v(\omega)} \quad (2)$$

$v(\omega)$ 为与频率有关的相速度,将复波数 k 代入式(1)得:

$$U(r + \Delta r, \omega) = U(r, \omega) \exp\left[-\left(\frac{1}{2Q} + i\right) \frac{\omega \Delta r}{v(\omega)}\right] \quad (3)$$

用旅行时增量 $\Delta \tau = \Delta r/v(\omega_r)$ 代替距离增量,得到大地 Q 滤波的表达式:

$$U(\tau + \Delta \tau, \omega) = U(\tau, \omega) \exp\left[-\frac{\omega \Delta \tau v(\omega_r)}{2Qv(\omega)}\right] \exp\left[-i \frac{v(\omega_r)}{v(\omega)} \omega \Delta \tau\right] \quad (4)$$

$v(\omega_r)$ 参考频率 ω_r 对应的相速度。根据Wang提出的改进的Kolsky频散模型,相速度 $v(\omega)$ 近似为:

$$v(\omega) = v(\omega_r) \left[\frac{\omega}{\omega_h}\right]^\gamma \quad (5)$$

ω_h 为调谐频率, 一般取值为地震带宽的最高频率, 可以在反 Q 滤波时提供相对准确的相位校正。其中 $\gamma = (\pi Q_r)^{-1}$ 。注意: 在频散式(5)中只考虑正频率, 将之代入式(4)得:

$$U(\tau + \Delta\tau, \omega) = U(\tau, \omega) \exp\left[-\frac{\omega\Delta\tau}{2Q} \left(\frac{\omega}{\omega_h}\right)^{-\gamma}\right] \exp\left[-i \left(\frac{\omega}{\omega_h}\right)^{-\gamma} \omega\Delta\tau\right] \quad (6)$$

式(6)为基于波场延拓的 Q 滤波的基本公式, 根据该式得到反 Q 滤波式:

$$U(\tau + \Delta\tau, \omega) = U(\tau, \omega) \exp\left[\frac{\omega\Delta\tau}{2Q} \left(\frac{\omega}{\omega_h}\right)^{-\gamma}\right] \exp\left[i \left(\frac{\omega}{\omega_h}\right)^{-\gamma} \omega\Delta\tau\right] \quad (7)$$

式中有两个指数算子, 前者为振幅补偿算子, 后者为相位补偿算子。反 Q 滤波是在频率域进行的, 最后对所有平面波求和得到补偿后的时间域地震信号:

$$u(\tau + \Delta\tau) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} U(\tau + \Delta\tau, \omega) d\omega \quad (8)$$

2.2 自适应增益函数

直接对振幅进行补偿时会放大随机噪声与机器噪声, 产生极大的不稳定性。为解决振幅补偿值溢出和低频噪声增大问题, 采用稳定因子法构建增益函数。

衰减函数为 $\beta(\tau, \omega)$:

$$\beta(\tau, \omega) = \exp\left[-\int_0^{\tau} \left(\frac{\omega}{\omega_h}\right)^{-\gamma(\tau')} \frac{\omega}{2Q(\tau')} d\tau'\right] \quad (9)$$

增益函数为 $\Lambda(\tau, \omega)$:

$$\Lambda(\tau, \omega) = \frac{\beta(\tau, \omega) + \sigma^2}{\beta^2(\tau, \omega) + \sigma^2} \quad (10)$$

$$\sigma^2 = \exp[-(0.23G_{\text{lim}} + 1.63)]$$

其中, σ^2 为稳定因子, G_{lim} 为增益参数(一般取 $10 \sim 100$), 值越高, 补偿越充分。根据式(10), 当 ω 非常大时, $\Lambda(\tau, \omega)$ 趋向于 1, 表明增益函数对该高频段不补偿也不压制。

我们接收到的地震记录一般包括有效地震反射波和各种各样的噪音, 不同时刻的信噪比是不同的, 即记录的信噪比是时间和空间的函数。以信噪比函数作为自适应增益参数的选取准则, 建立 G_{lim} 与信噪 $SNR(\tau)$ 之间的映射关系 F , 则有

$$\begin{aligned} \tilde{G}_{\text{lim}}(\tau) &\equiv F(SNR(\tau)) \\ \tilde{\sigma}^2(\tau) &= \exp\{-[0.23\tilde{G}_{\text{lim}}(\tau) + 1.63]\} \\ \tilde{\Lambda}(\tau, \omega) &= \frac{\beta(\tau, \omega) + \tilde{\sigma}^2(\tau)}{\beta^2(\tau, \omega) + \tilde{\sigma}^2(\tau)} \end{aligned} \quad (11)$$

式中, 稳定因子 $\tilde{\sigma}^2$ 和增益参数 \tilde{G}_{lim} 与地震资料的信噪比有关, 是时变参量, 增益函数 $\tilde{\Lambda}(\tau, \omega)$ 具有自适应特征。当资料信噪比在时空域变化较大时, 有必要采用式(11)来确定自适应稳定的增益参数进行反 Q 滤波。

映射关系 F 可根据信噪比 $SNR(\tau)$ 的实际特征设计, 本文给出一种简单的线性定义:

$$\begin{aligned} \tilde{G}_{\text{lim}}(\tau) &\equiv F(SNR(\tau)) \\ &= G_{\text{min}} + \frac{SNR(\tau) - SNR_{\text{min}}}{SNR_{\text{max}} - SNR_{\text{min}}} (G_{\text{max}} - G_{\text{min}}) \end{aligned} \quad (12)$$

式中, 待定参量 G_{min} 、 G_{max} 分别为最小和最大自适应增益参数, SNR_{min} 、 SNR_{max} 分别为 $SNR(\tau)$ 的最小和最大值。

3 模型测试

3.1 无噪模型

设计 5 个反射系数界面的模型, 反射系数值为 1, 分别位于 200 ms、350 ms、500 ms、650 ms 和 800 ms, 地面初始地震子波为 50 Hz 主频的 Ricker 子波, 地下介质 Q 值为 100。图 1a 是基于波场延拓正演的无噪衰减记录(不含几何扩散、反射/透射损失等固有衰减), 随着传播距离的增加, 地震子波的延续长度逐渐增加、振幅衰减、相位改变。图 1b 是利用式(10)反 Q 滤波的结果, 增益参数 G_{lim} 取 50。可以看到, 在无噪情况下, 中深层地震子波的波长、振幅和相位都得到较好的恢复和校正。图 2 是反 Q 滤波前(2a)、后(2b)时频谱的对比, 吸收衰减降低了中深层记录的主频, 反 Q 滤波较好地恢复了中深层记录的中高频成分。

3.2 含噪模型

对无噪模型添加不同程度的随机噪音, 考虑在不同信噪比条件下, 对比固定增益参数和自适应增益参数的反 Q 滤波效果。

图 3a 是含噪记录一, 在无噪模型的基础上添加了 0.75% 的随机噪音, 图 3b 是固定增益参数反 Q 滤波结果, 图 3c 是自适应增益参数反 Q 滤波结果, 其中, 固定增益参数(见图 4a)取 30, 自适应增益参数(见图

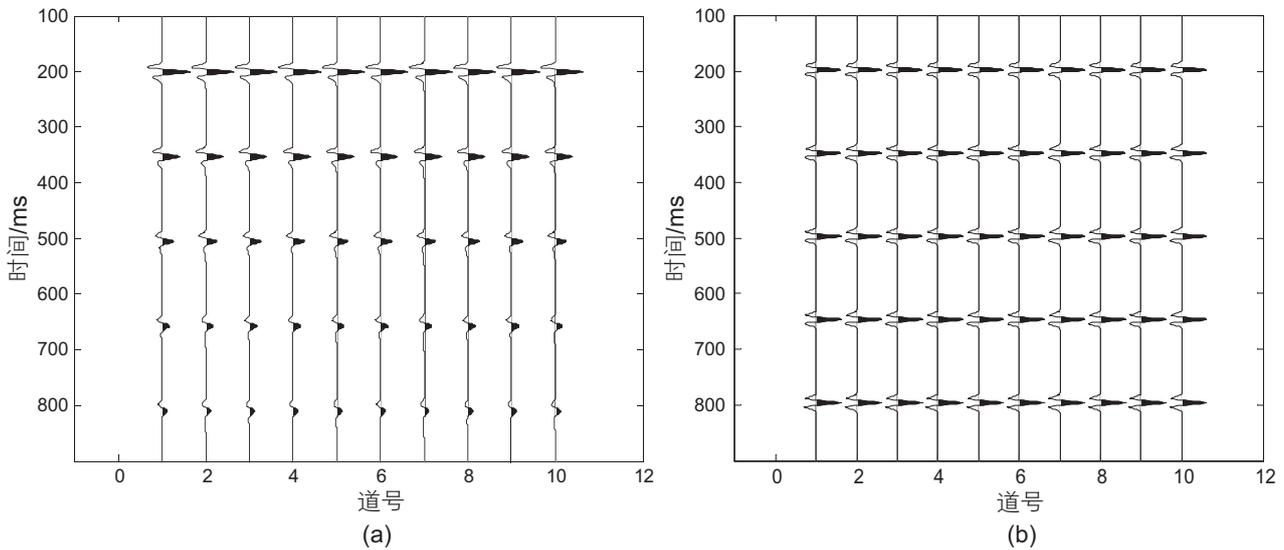


图1 无噪模型反 Q 滤波剖面对比 (a)反 Q 滤波前; (b)反 Q 滤波后

Fig. 1 Comparison of inverse Q filtering profile of the noise-free model. (a)before inverse Q filtering; (b)after inverse Q filtering

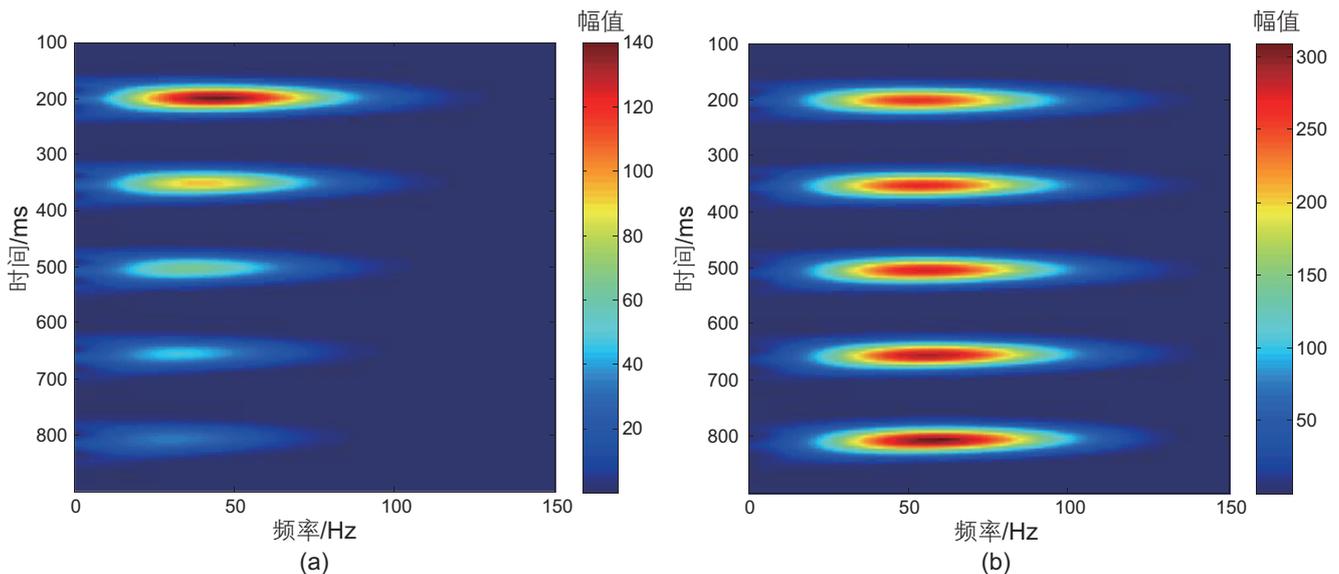


图2 无噪模型反 Q 滤波时频谱对比 (a)反 Q 滤波前; (b)反 Q 滤波后

Fig. 2 Spectrum comparison of the noise-free model with inverse Q filtering. (a)before inverse Q filtering; (b)after inverse Q filtering

4b)最大值取30,最小值取5。对比图3a和图3b,采用固定增益参数的反 Q 滤波较好地恢复了深层的弱反射信息(如800 ms处的同相轴),同时扩大了随机噪音,大幅降低了信噪比水平;对比图3b和图3c,采用自适应增益参数的反 Q 滤波在恢复弱反射信息的同时,有效地控制了噪音的放大,深层的信噪比得到较好的改善。图5是反 Q 滤波前后的时频谱对比,图5a是原始含噪记录一的时频谱,图5b是固定增益参数反 Q 滤波记录的时频谱,图5c是自适应增益参数反 Q 滤波记录的时频谱。可以看到,固定增益参数的反 Q 滤波对噪音中高频成分的放大效果较为明显,自适应增

益参数的反 Q 滤波则较好地控制了低信噪比区域的噪音(见红色圈中部分),提高了时频谱的整体信噪比水平。

图6a是含噪记录二,在无噪模型的基础上添加了5%的随机噪音,图6b是固定增益参数反 Q 滤波结果,图6c是自适应增益参数反 Q 滤波结果,其中,固定增益参数(见图7a)取20,自适应增益参数(见图7b)最大值取20,最小值取1。图6a中的含噪记录,随着传播距离的增加,信噪比越来越低,500 ms和650 ms处的有效反射波较弱,同相轴信息不明显,800 ms处的反射信息淹没在随机噪音中,几乎看不到同相轴。图

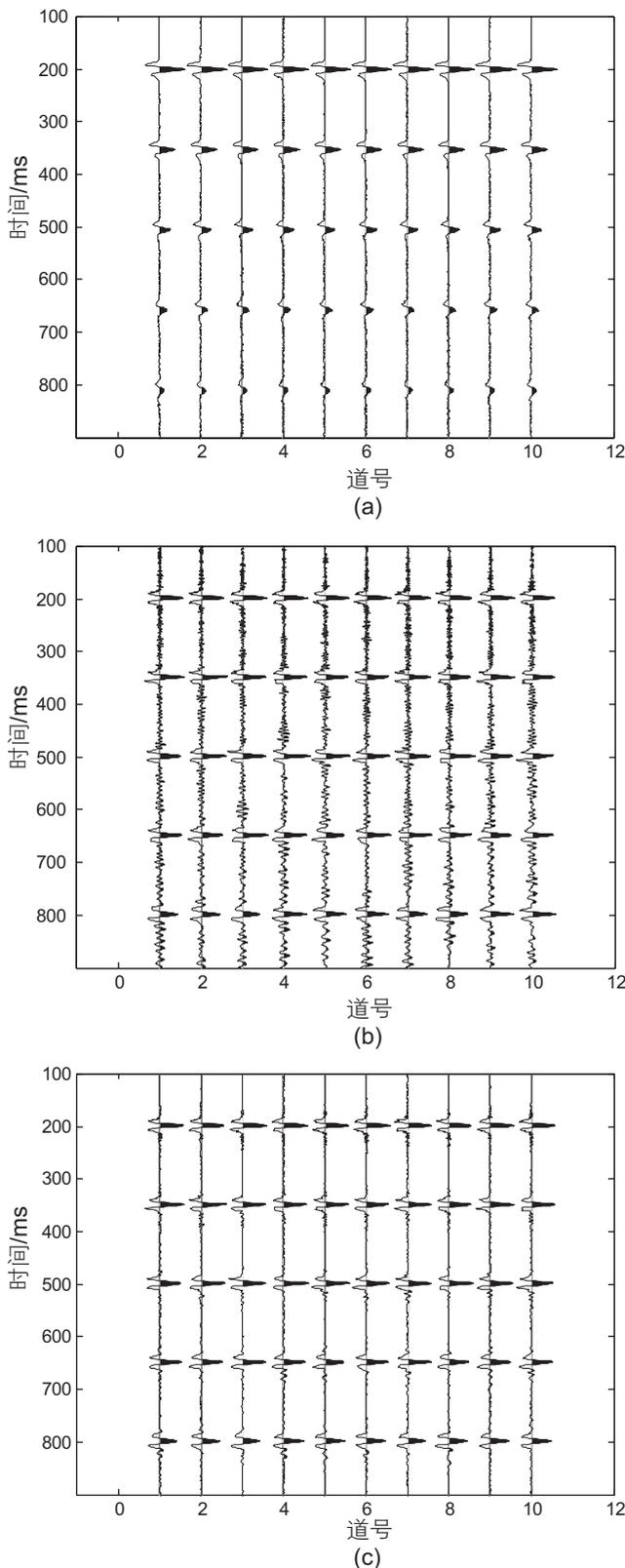


图 3 含噪模型一(0.75%随机噪声)反 Q 滤波剖面对比(a)原始含噪记录;(b)固定增益反 Q 滤波; (c)自适应增益反 Q 滤波
 Fig. 3 Comparison of inverse Q filtering profile in noise model 1 (0.75% random noise) (a)original noise recording; (b)fixed gain inverse Q filtering; (c)adaptive gain inverse Q filtering

6b是采用固定增益参数的反 Q 滤波结果,与反 Q 滤波前剖面相比,信噪比进一步降低,500 ms和650 ms处的反射信息淹没在随机噪音中,分辨能力还不如反 Q 滤波前的剖面。图 6c是采用自适应增益参数的反 Q 滤波结果,500 ms和650 ms处的反射信息得到较好的增强,信噪比得到较好的控制,800 ms处的弱反射同相轴得到一定的恢复,分辨能力得到一定的改善。图 8 是反 Q 滤波前后的时频谱对比,图 8a是原始含噪记录二的时频谱,图 8b是固定增益参数反 Q 滤波记录的时频谱,图 8c是自适应增益参数反 Q 滤波记录的时频谱。在原始含噪记录的时频谱中(图 8a),650 ms以下的随机噪音与反射波的能量在同一量级;如果采用固定增益参数进行反 Q 滤波,对噪音的增强效果大于对有效反射波的恢复效

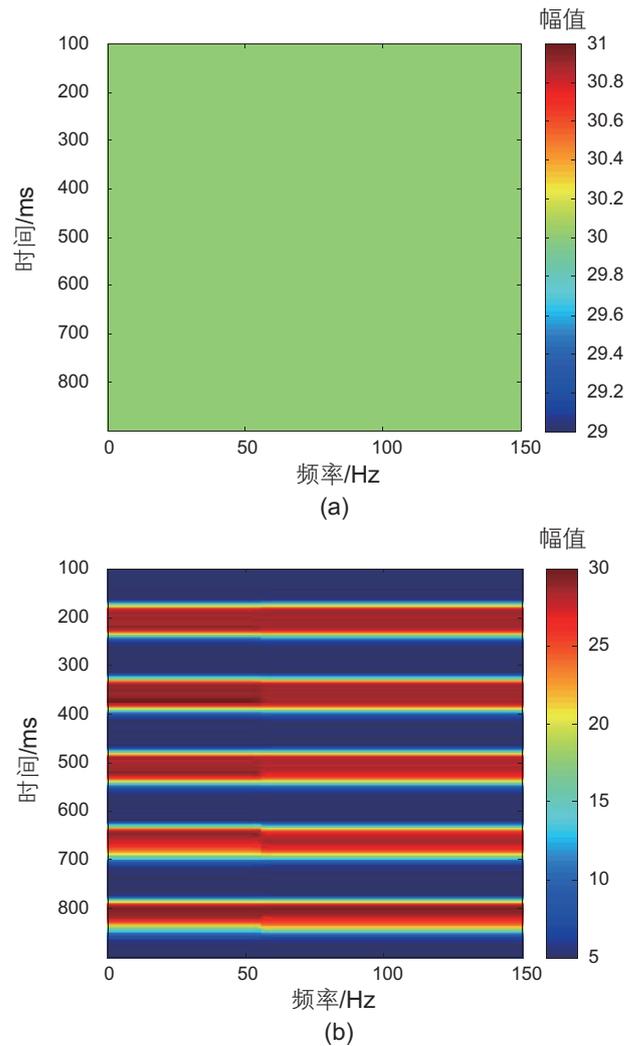
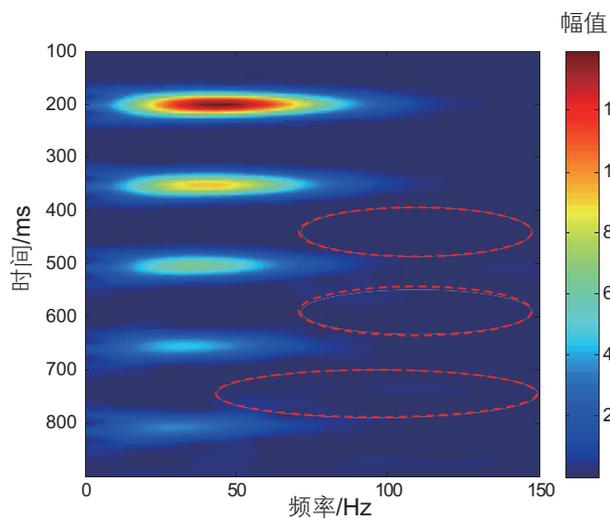
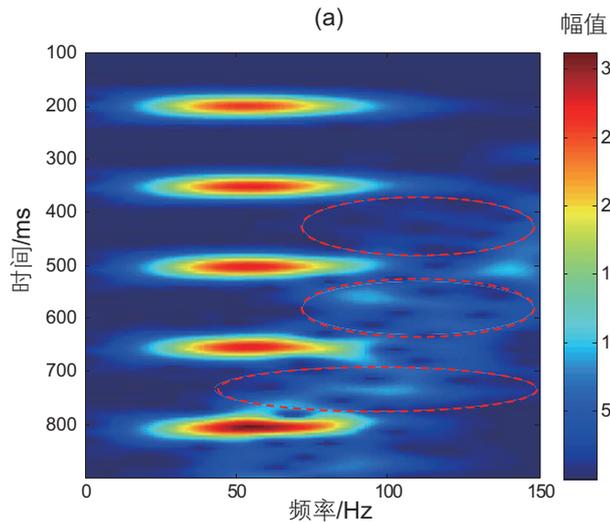


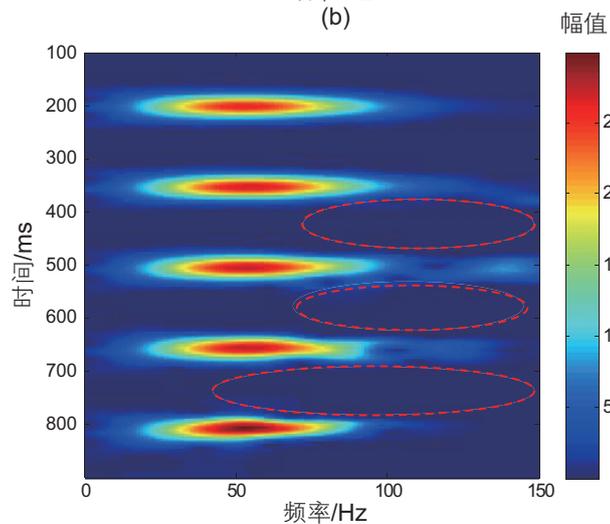
图 4 模型一增益参数(a)固定增益参数;(b)自适应增益参数
 Fig. 4 Model 1 gain parameter (a)fixed gain parameter; (b)adaptive gain parameter



(a)

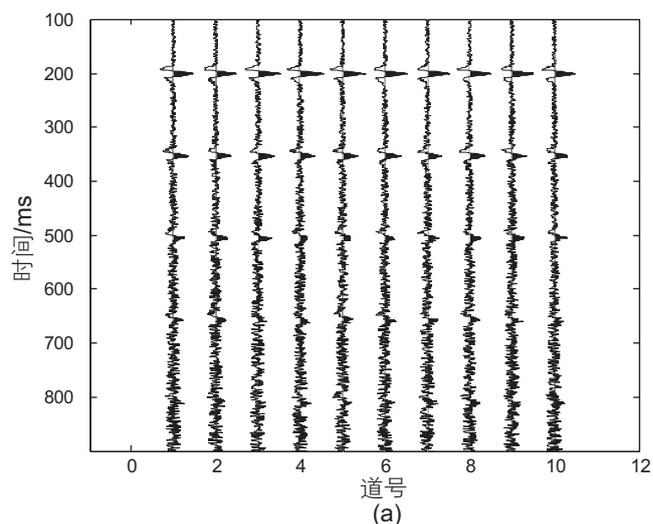


(b)

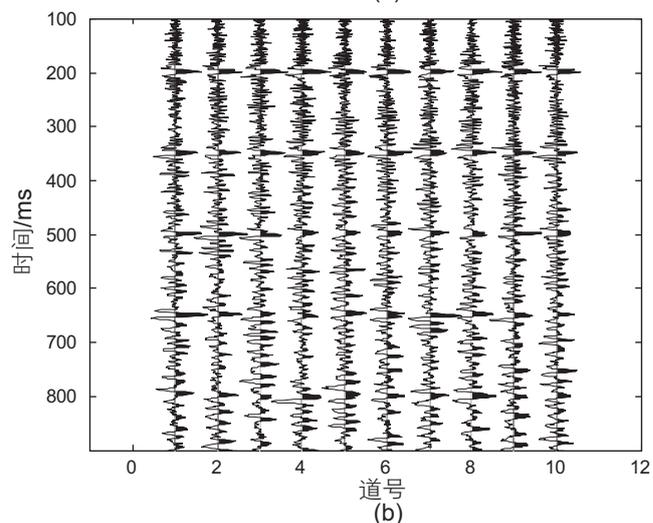


(c)

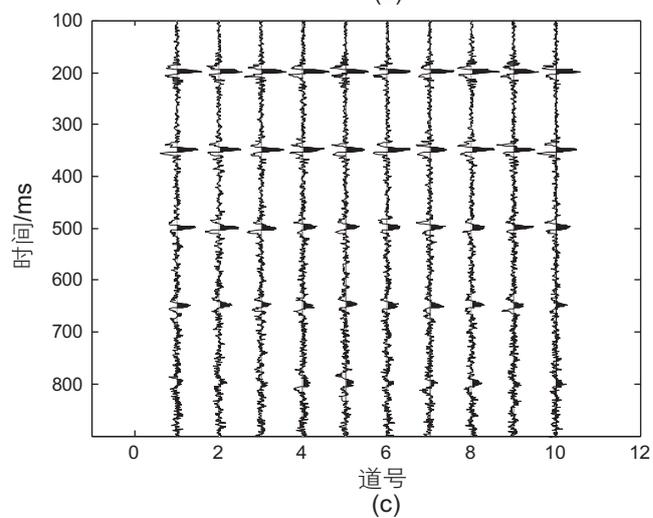
图5 含噪模型一(0.75%随机噪音)反 Q 滤波时频谱对比(a)原始含噪记录;(b)固定增益反 Q 滤波;(c)自适应增益反 Q 滤波
Fig. 5 Spectrum comparison of inverse Q filtering with noise model 1 (0.75% random noise) (a)original noise records; (b)fixed gain inverse Q filtering; (c)adaptive gain inverse Q filtering



(a)



(b)



(c)

图6 含噪模型二(5%随机噪音)反 Q 滤波剖面对比(a)原始含噪记录;(b)固定增益反 Q 滤波;(c)自适应增益反 Q 滤波
Fig. 6 Comparison of inverse Q filtering profile of noise model 2 (5% random noise) (a)original noise records; (b)fixed gain inverse Q filtering; (c)adaptive gain inverse Q filtering

果(图 8b 中红圈), 导致剖面中(图 6b)500 ms 以下的同相轴淹没在随机噪音中, 不可分辨; 如果采用自适应增益参数进行反 Q 滤波, 650 ms 和 800 ms 处的有效反射振幅得到较好的恢复, 有效反射的能量团在时频谱中仍然占主要成分(图 8c 红圈), 清晰可辨。

4 资料处理

实际资料来自于沙漠工区, 由于近地表吸收衰减严重, 导致记录的主频较低(约为 15~20 Hz), 严重影响了中深层的成像精度。图 9a 是原始叠加剖面, 目的层 4 s 附近, 图 9b 是采用固定增益参数的反 Q 滤波结果, 图 9c 是采用自适应增益参数的反 Q 滤波结果, 图 9d 是图 9b 与图 9c 所示的剖面之差。图 10 为固定增益参数与自适应增益参数对比, 其中, 固定增

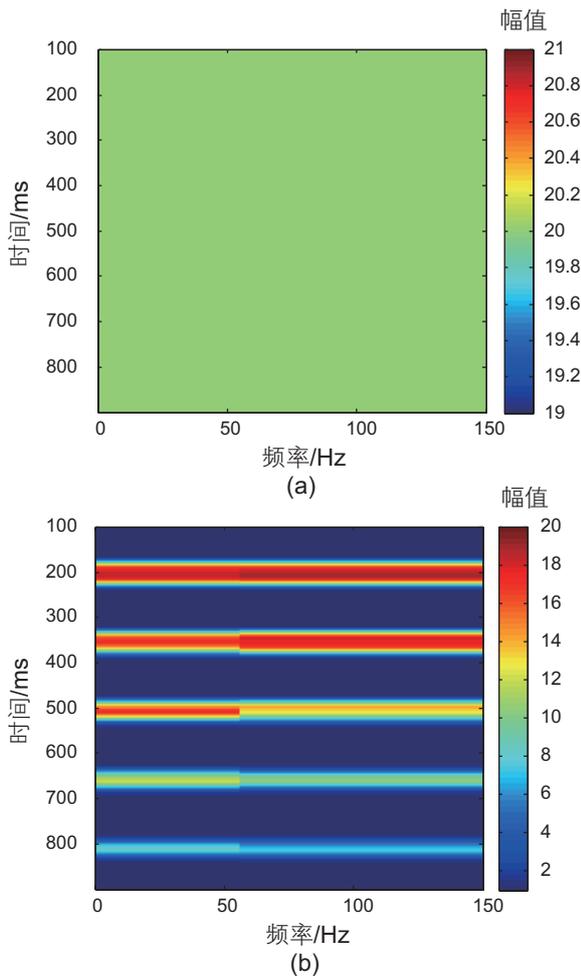


图 7 模型二增益参数 ((a)固定增益参数; (b)自适应增益参数)
 Fig. 7 Model 2 gain parameter ((a)fixed gain parameter; (b)adaptive gain parameter)

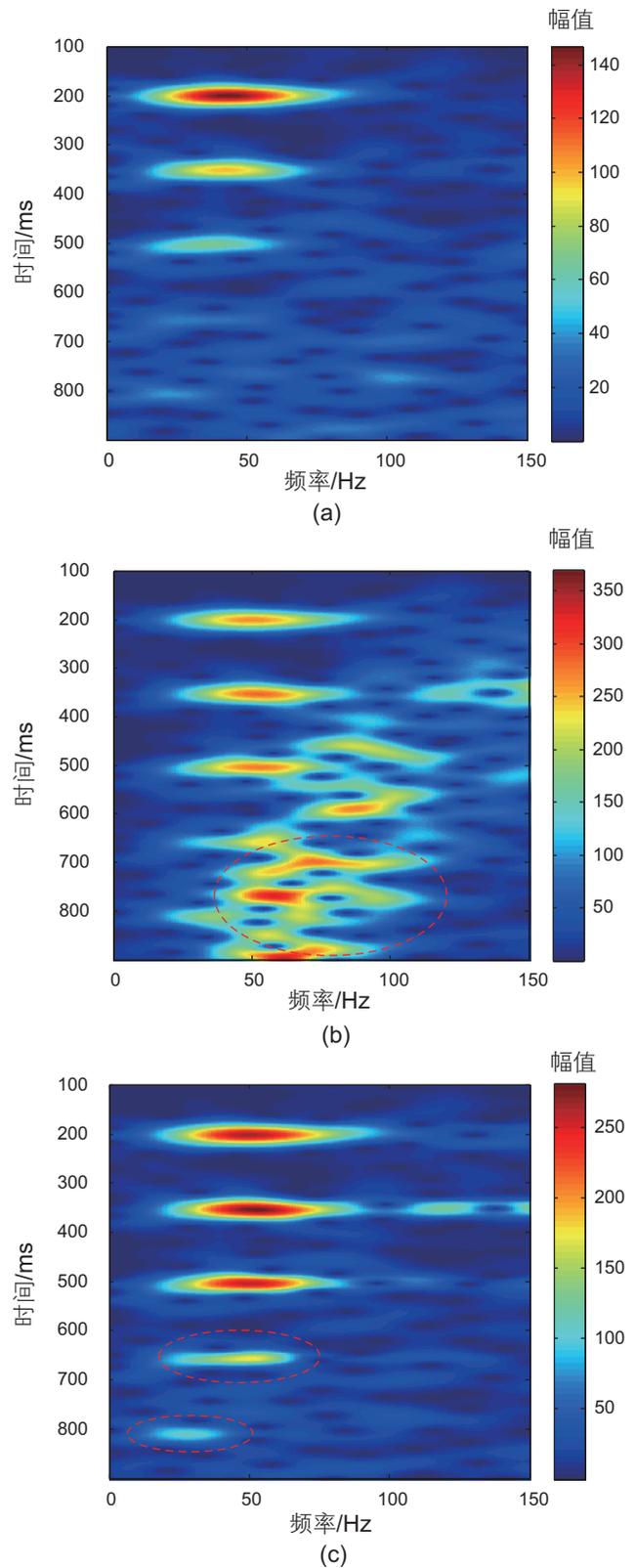


图 8 含噪模型二(5% 随机噪音)反 Q 滤波时频谱对比 (a)原始含噪记录; (b)固定增益反 Q 滤波; (c)自适应增益反 Q 滤波
 Fig. 8 Spectrum comparison of inverse Q filtering with noise model 2 (5% random noise) (a)original noise records; (b)fixed gain inverse Q filtering; (c)adaptive gain inverse Q filtering

益参数为40(图10a);自适应增益参数(图10b)最小值为10,最大值为60,主要分布范围在25~45。对比图9a、图9b和图9c,反 Q 滤波后剖面的同相轴变细,垂向分辨率得到提高(见黑色箭头);对比图9b和图9c,两个剖面的分辨率相近,但图9c的信噪比高于图9b(如黑圈部分),图9d显示了两者的之差,主要是凌乱的反射和随机噪音,如果把这部分信息加到图9c中,则只会降低资料的信噪比,而对分辨率的提升却有限,这表明采用自适应增益参数的反 Q 滤波能较好地控制低信噪比区域的噪音扩大,有效改善反

Q 滤波剖面的信噪比。

图11是叠加记录反 Q 滤波前后的时频谱对比,图11a是原始叠加记录的时频谱,图11b是固定增益参数反 Q 滤波记录的时频谱,图11c是自适应增益参数反 Q 滤波记录的时频谱。对比发现,反 Q 滤波前叠加记录的时频谱(图11a)能量主要分布在10~30 Hz,经反 Q 滤波处理后,时频谱(图11b和图11c)能量主要集中在15~40 Hz之间,中高频成分得到较好的恢复;图11c的高频成分比图11b弱,这是由于该段记录的信噪比相对较低,采用了较小的增益参数(小于固定增益

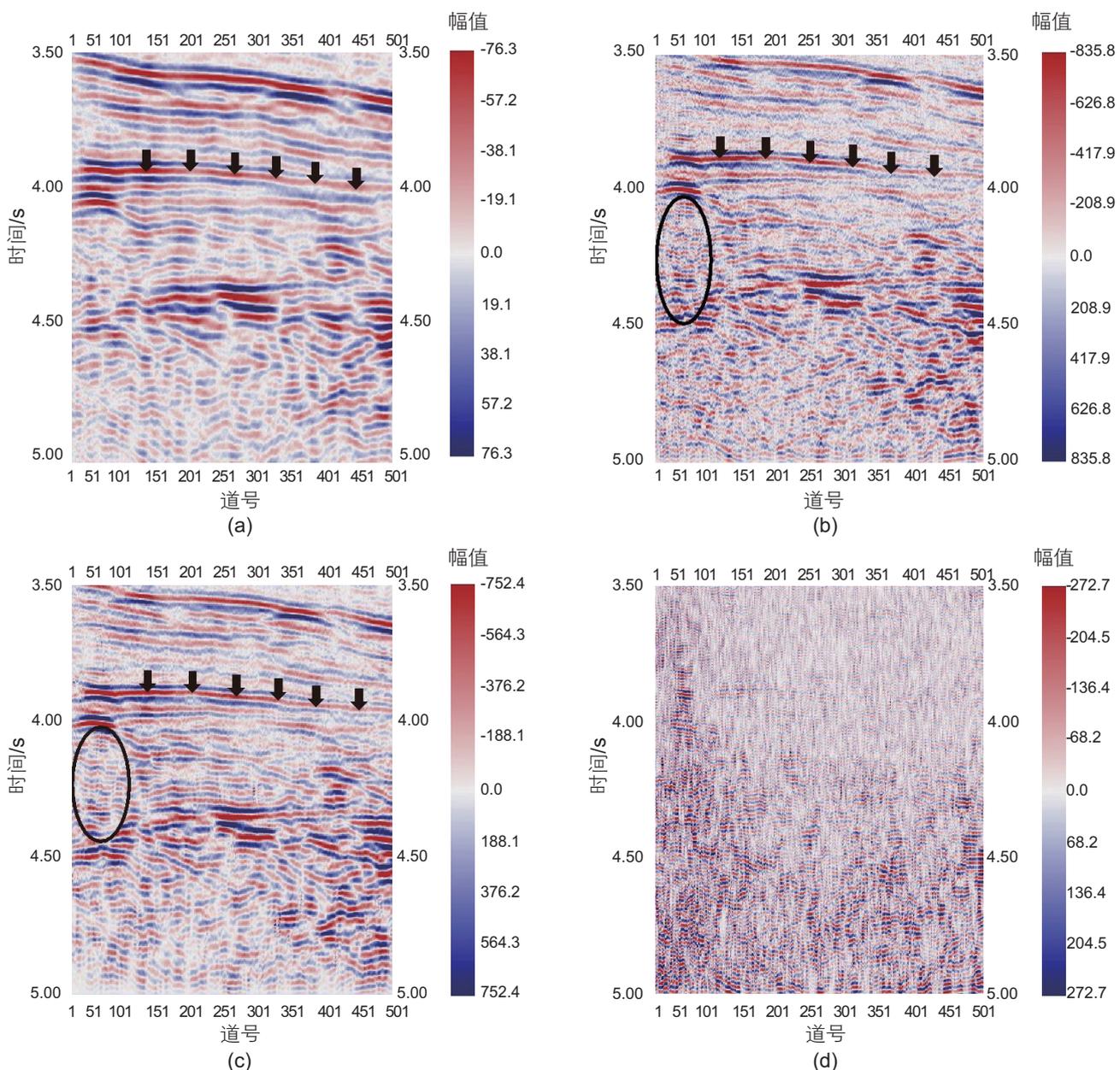


图9 叠后资料反 Q 滤波剖面对比(a)原始叠加记录;(b)固定增益反 Q 滤波;(c)自适应增益反 Q 滤波;(d)剖面b与剖面c之差
Fig. 9 Comparison of inverse Q filtering profile of post-stack data (a)original overlay records; (b)fixed gain inverse Q filtering; (c)adaptive gain inverse Q filtering; (d)the difference between section b and section c

参数 40) 进行反 Q 滤波。值得注意的是, 在图 11b 中, 4000 ms 处的主频(约为 40 Hz)明显高于 4500 ms 处的主频(约为 32 Hz), 在图 11c 中, 4000 ms 和 4500 ms 处的主频基本一致(约为 30 Hz), 这说明自适应增益参数能较好地调节不同信噪比区域的补偿效果。

5 结论

稳定的反 Q 滤波处理为了兼顾分辨率和信噪比, 需要不断调试增益参数, 将原始资料的信噪比作为先验信息, 用于约束增益参数的选取, 可实现地震资料自适应的反 Q 滤波处理。采用自适应增益参数的反 Q 滤波, 根据资料不同区域的信噪比水平, 能自动调节补偿效果, 有效控制低信噪比区域的补偿, 避免噪音被过度放大。需要注意的是, 为避免反 Q 滤波剖面的突变, 自适应增益参数应进行适当的二维平滑处理。

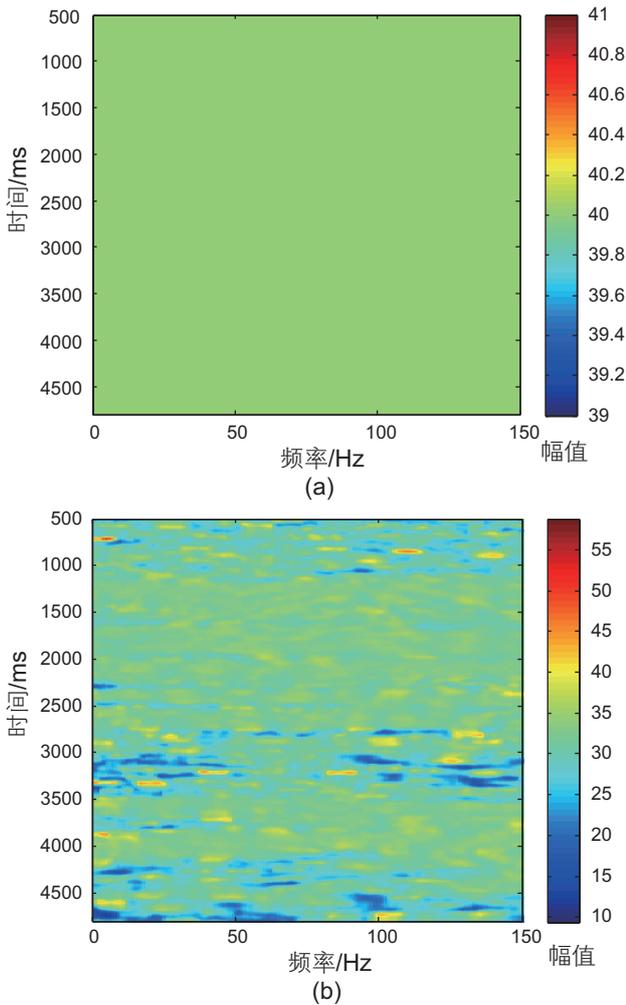


图 10 实际资料增益参数。(a)固定增益; (b)自适应增益
Fig. 10 Actual data gain parameter. (a)fixed gain; (b)adaptive gain

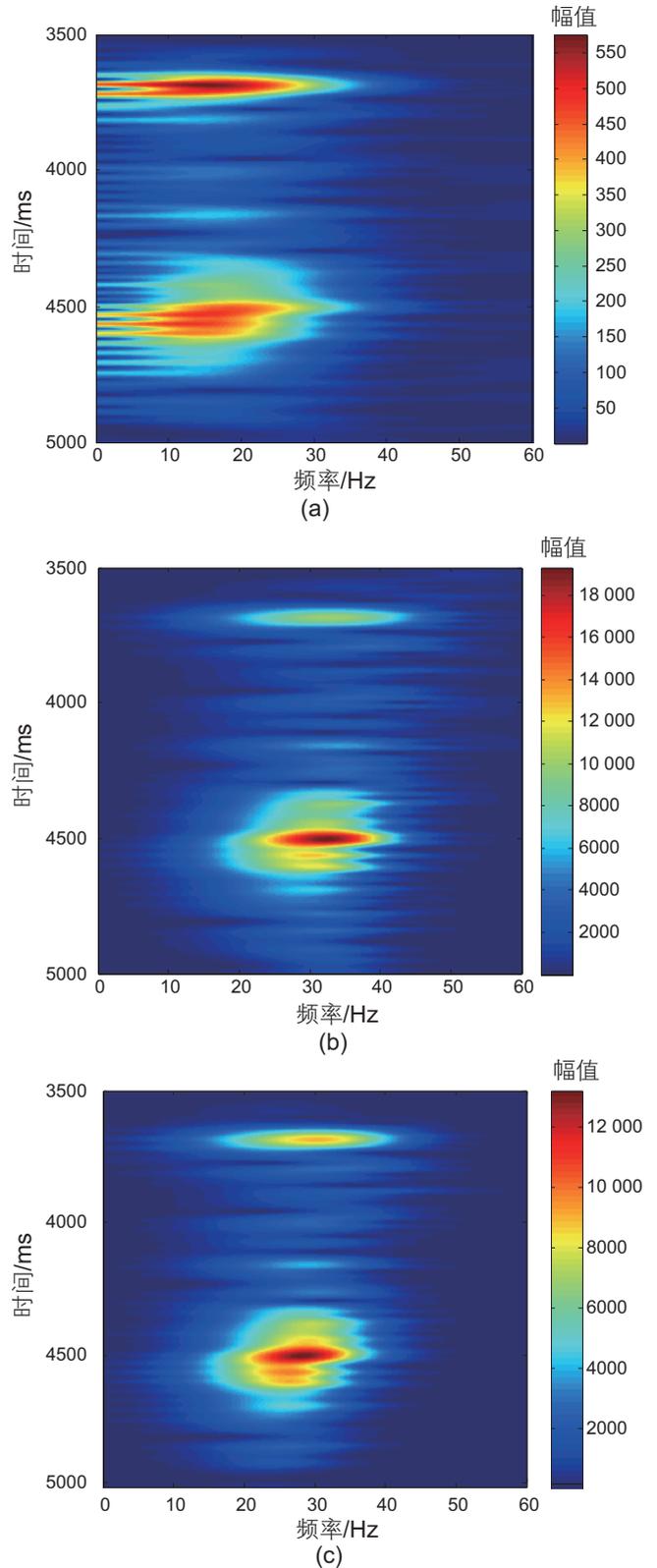


图 11 叠加记录反 Q 滤波时频谱对比。(a)原始叠加记录; (b)固定增益反 Q 滤波; (c)自适应增益反 Q 滤波
Fig. 11 Spectrum comparison inverse Q filtering is recorded in superposition records. (a)original superposition records; (b)fixed gain inverse Q filtering; (c)adaptive gain inverse Q filtering

参考文献

- [1] 贾承造, 庞雄奇, 姜福杰. 中国油气资源研究现状与发展方向[J]. 石油科学通报, 2016, 01: 2–23. [JIA C Z, PANG X Q, JIANG F J. Research status and development directions of hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 01: 2–23.]
- [2] WANG Y H. Seismic Inverse Q Filtering[M]. Oxford, Blackwell Scientific Publication, 2008.
- [3] 严红勇, 刘洋. 地震资料Q值估算与反Q滤波研究综述[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(2): 606–615. [YAN H Y, LIU Y. A summary of research on estimation of Q and inverse Q filtering for seismic wave [J]. Progress in Geophysics. 2011, 26(2): 606–615.]
- [4] 李金丽, 李振春, 管路平, 等. 地震波衰减及补偿方法[J]. 物探与化探, 2015, 39(3): 456–465. [LI J L, LI Z C, GUAN L P, et al. The method of seismic attenuation and energy compensation[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(3): 456–465.]
- [5] HARGREAVES N D, CALVERT A J. Inverse Q filtering by Fourier transform[J]. Geophysics, 1991, 56: 519–527.
- [6] HARGREAVES N D. Similarity and the inverse Q filter: Some simple algorithms for inverse Q filtering[J]. Geophysics, 1992, 57(2): 944–947.
- [7] VAN DER BAAN M. Bandwidth enhancement: Inverse Q filtering or time-varying Wiener deconvolution[J]. Geophysics, 2012, 77(4): V133–V142.
- [8] 陈增保, 陈小宏, 李景叶, 等. 一种带限稳定的反Q滤波算法[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(1): 68–75. [CHEN Z B, CHEN X H, LI J Y, et al. A band-limited and robust inverse Q filtering algorithm[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(1):68–75.]
- [9] MARGRAVE G F. Theory of nonstationary linear filtering in the Fourier domain with application to time-variant filtering[J]. Geophysics, 1998, 63(1): 244–259.
- [10] ZHANG C J, TADEUSZ J U. Seismic absorption compensation: A least squares inverse scheme[J]. Geophysics, 2007, 72(6): 109–114.
- [11] STOLT R H. Migration by Fourier transform[J]. Geophysics, 1978, 43: 23–48.
- [12] 姚振兴, 高星, 李维新. 用于深度域地震剖面衰减与频散补偿的反Q滤波方法[J]. 地球物理学报, 2003, 46(2): 229–230. [YAO Z X, GAO X, LI W X. The forward Q method for compensating attenuation and frequency dispersion used in the seismic profile of depth domain[J]. Chinese Journal of geophysics, 2003, 46(2): 229–230.]
- [13] 刘财, 刘洋, 王典, 等. 一种频域吸收衰减补偿方法[J]. 石油物探, 2005, 20(4): 1074–1082. [LIU C, LIU Y, WANG D, et al. A method to compensate strata absorption and attenuation in frequency domain[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2005, 20(4): 1074–1082.]
- [14] 李雪英, 吕喜滨, 张江杰, 等. 稳定高效的时域反Q滤波方法[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(1): 211–218. [LI X Y, LU X B, ZHANG J J, et al. A stable and efficient approach of inverse Q filtering in the time domain[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(1): 211–218.]
- [15] ROBINSON J C. A technique for the continuous representation of dispersion in seismic data[J]. Geophysics, 1979, 44: 1345–1351.
- [16] ROBINSON J C. Time-variable dispersion processing through the use of phased sinc functions[J]. Geophysics, 1982, 47: 1106–1110.
- [17] HALE D. An inverse Q-filter[J]. Stanford Exploration Project Report, 1981, 26: 231–243.
- [18] HALE D. Q-adaptive deconvolution[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1982, 1(1): 520.
- [19] BICKEL S H, NATARAJAN R R. Plane-wave Q deconvolution[J]. Geophysics, 1985, 50(9): 1426–1439.
- [20] MCCARLEY L A. An autoregressive filter model for constant Q attenuation[J]. Geophysics, 1985, 50(5):749–758.
- [21] VARELA C L, ROSA A L R, ULRYCH T J. Modelling of attenuation and dispersion[J]. Geophysics, 1993, 58: 1167–1173.
- [22] 裴江云, 何樵登. 基于Kjartansson模型的反Q滤波[J]. 地球物理学进展, 1994, 9(1): 90–99. [PEI J Y, HE Q D. Inverse Q filtering according to Kjartansson model[J]. Progress in Geophysics, 1994, 9(1): 90–99.]
- [23] BANO M. Q-phase compensation of seismic records in the frequency domain[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, 86(4): 1179–1186.
- [24] WANG Y H. A stable and efficient approach of inverse Q filtering[J]. Geophysics, 2002, 67(2): 657–663.
- [25] WANG Y H. Quantifying the effectiveness of stabilized inverse Q-filtering. Geophysics, 2003, 68(1): 337–345.
- [26] WANG Y H, GUO J. Modified Kolsky model for seismic attenuation and dispersion. Journal of Geophysics and Engineering, 2004, 1(3): 187–196.
- [27] WANG Y H. Inverse Q-filter for seismic resolution enhancement[J]. Geophysics, 2006, 71(3): 51–60.
- [28] WANG Y H. Inverse Q filtered migration. Geophysics, 2008, 73(1): S1–S6.
- [29] 李合群, 孟小红, 赵波. 地震数据Q吸收补偿应用研究[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(2): 190–195, 229. [LI H Q, MENG X H, ZHAO B. Application studies on Q absorption and compensation for seismic data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(2): 190–195, 229.]
- [30] 张固澜, 林进, 王熙明, 等. 一种自适应增益限的反Q滤波[J]. 地球物理学报, 2015, 58(7): 2525–2535. [ZHANG G L, LIN J, WANG X M, et al. A self-adaptive approach for inverse Q-filtering[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(7): 2525–2535.]

- [31] 吴吉忠, 杨晓利, 龙洋. 一种稳定高效的等效 Q 值反 Q 滤波算法及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(1): 63–70. [WU J Z, YANG X L, LONG Y. A robust approach of inverse Q filtering with equivalent Q [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(1): 63–70.]
- [32] SHI Y, HUANG R, et al. A variable gain-limited inverse Q filtering method[C]. SEG 2017 Workshop: OBN/OBC Technologies and Applications. Beijing, China, 4–6 September 2017.
- [33] 赵岩. 基于变稳定因子的反 Q 滤波方法[C]. 中国地球科学联合学术年会, 北京, 2017. [ZHAO Y. Inverse Q filtering method based on variable stability factor[C]. Annual Meeting of Chinese Geoscience Union, Beijing, 2017.]
- [34] WEI Q, CHEN S Q. An improved stabilization inverse Q -filtering via shaping regularization scheme[C]. 2018 SEG International Exposition and 88th Annual Meeting, Beijing, 2018.
- [35] XUE Y J, CAO J X, WANG X J. Inverse Q filtering via synchrosqueezed wavelet transform[J]. Geophysics, 2019, 84 (2): V121–V132.

(编辑 付娟娟)