

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018100901

# 基于 HHT 方法的地层 Q 值补偿方法研究

颜中辉<sup>1,2</sup>, 徐华宁<sup>1,2</sup>, 李攀峰<sup>1,2</sup>, 刘鸿<sup>1,2</sup>, 杨佳佳<sup>1,2</sup>, 陈珊珊<sup>1,2</sup>, 杨传胜<sup>1,2</sup>

1. 自然资源部油气资源和环境地质重点实验室, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071

**摘要:**常规的基于叠后地震资料的地层 Q 值补偿方法受数据平均效应的影响, Q 值估算精度较低, 导致保真性差, 而 HHT 时频分析可以反映出信号的局部信息, 基于以上原因, 提出一种基于 HHT 方法的地层 Q 值补偿方法。首先应用 HHT 分频技术将浅层、中深层地震数据分成不同的频率范围, 得到不同目标层频率尺度的地震数据; 然后在 HHT 时频域内通过谱比法提取 Q 值; 最后分别进行地层 Q 值振幅补偿和相位补偿。该方法针对不同的目标地层将地震数据分解成不同的频率尺度, 避免了不同频率成分之间的干扰, 而且可针对性处理目标层的频率信息, 提高了地层 Q 值提取的稳定性。模型试算和实际资料应用表明, 该方法能够有效地对振幅和相位进行补偿, 使中深层反射波形得到恢复, 主频提高, 频带展宽, 地震资料的品质得到提升。

**关键词:**HHT 变换; 分频技术; 品质因子; 振幅补偿; 相位补偿

**中图分类号:**P631.4      **文献标识码:**A

## Research of compensation method for formation Q value based on HHT method

YAN Zhonghui<sup>1,2</sup>, XU Huaning<sup>1,2</sup>, LI Panfeng<sup>1,2</sup>, LIU Hong<sup>1,2</sup>, YANG Jijia<sup>1,2</sup>, CHEN Shanshan<sup>1,2</sup>, YANG Chuangsheng<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of Marine Environmental Geology, Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

**Abstract:** The conventional Q-value compensation method based on post-stack seismic data is affected by the data average effect, and the estimation accuracy of Q value is always low that results in poor fidelity. Fortunately, the HHT time-frequency analysis may reflect the local information of the signal. Therefore, this paper proposed a formation Q-value compensation method based on HHT. First, using the HHT spectral decomposition technology to divide the shallow, medium and deep seismic data into different frequency ranges, and the seismic data for different target layer frequency scales are acquired. Then, the Q value is extracted with spectral ratio method from the HHT time-frequency domain, and finally, the formation Q amplitude compensation and phase compensation are respectively realized. The method may decompose seismic data into different frequency scales for different target strata, avoid interference between different frequency information components, effectively deal with the frequency information of the target layer, and improve the stability of formation Q value extraction. Trial model calculation and practical data application demonstrate that the method can effectively compensate the amplitude and phase, restore the mid-deep reflection waveform, improve the main frequency, widen the frequency band, and improve the quality of seismic data.

**Key words:** HHT transform; frequency division technique; quality factor; amplitude compensation; phase compensation

随着复杂油气藏勘探精度的提高, 精细的地震属性反演、油气储层的定量描述都需要高分辨率的地震资料。而地层的吸收衰减作用是影响地震资料分辨率的一个主要因素<sup>[1]</sup>, 从而导致了有效反射波频带变窄, 相位产生畸变, 分辨率和信噪比降低,

从而影响了地震资料的成像精度。Q 补偿作为一种确定性的处理技术<sup>[2]</sup>, 不仅可以补偿地震反射信号的频率和振幅衰减, 同时能改善地震子波的相位特性, 使中深层的高频部分得到加强, 频谱被拓宽, 从而有效提高地震资料的质量。

**资助项目:**山东省自然科学基金培养基金项目“基于 HHT 变换的多波地震资料去噪应用研究”(ZR2015PD006); 山东省自然基金博士基金“地质约束下的重磁三维反演在南黄海盆地崂山隆起的应用”(ZR2016DB33); 青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金“多分量地震波逆时偏移拉伸校正及其并行”(QNLM2016ORP0206); 国家自然科学基金青年基金“东海北部外陆架晚更新世以来两期古三角洲的时空展布特征及物源属性研究”(41706069)

**作者简介:**颜中辉(1986—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事地震资料处理、多波多分量研究, E-mail: zhonghui4564573@163.com

**通讯作者:**徐华宁, 男, 博士, 教授级高工, 主要从事海洋地球物理调查研究, E-mail: xuhuaning1973@163.com

**收稿日期:**2018-10-09; **改回日期:**2019-04-16. 周立君编辑

反Q滤波补偿方面也有许多学者进行了研究,基本可以分为3类:用级数展开作近似高频补偿的反Q滤波、基于波场延拓的反Q滤波和其他反Q滤波方法。最早Hale提出Futterman模型进行反Q滤波的方法<sup>[3]</sup>,该方法基于预测误差滤波分析迭代求出Q值,然后进行Q补偿,其缺点是计算量大。Bickel和Natarajan根据复函数分析技术提出一种反Q滤波方法,此方法基于平面波假设,通过复数对平面波传播进行描述,从而得到时变的Q补偿<sup>[4]</sup>。Hargreaves和Calvert根据常Q模型得到相位Q补偿方法<sup>[5]</sup>,其做法是通过波场外推来计算常Q模型,从而对相位进行补偿,缺点是未考虑振幅的影响。Bano利用常Q模型发展到层常Q值模型的相位Q补偿方法,优势在于补偿结果能稳定地改善相位的畸变,而且准确性比较高,但同样忽略了振幅的影响<sup>[6]</sup>。WANG基于等间隔形式的Q模型提出一种稳定有效的反Q滤波方法,此方法以波场延拓理论为基础,并对Q值求取的抗噪性和稳定性进行深入讨论,并不断完善,形成了最常用的反Q滤波算法<sup>[7-9]</sup>。严红勇和刘洋在WANG方法的基础上,发展成沿射线路径进行波场延拓从而进行Q补偿的方法,主要是针对多分量资料进行处理<sup>[10]</sup>。刘财等提出基于频率域分时窗吸收补偿的反Q滤波方法<sup>[11]</sup>;Zhang和Ulrych在反Q滤波过程中引入了最小二乘方法和Bayesian原理,从而弥补了Q求取的不稳定性,并在实际数据中得到了很好的效果<sup>[12]</sup>;王本锋等结合反演的思想正则化方法提出了一种新的补偿方法,该方法基于波场延拓的正Q滤波方程,对有效频带内的频率分量进行分析,提高了计算效率,补偿结果稳定高效<sup>[13]</sup>。叶秋焱利用广义S变换求取时频域表层Q值的方法,通过表层Q值与井控深层Q值建立综合Q体,从而对地震数据进行Q补偿<sup>[14]</sup>。

虽然地层Q值补偿方法的理论和算法比较成熟,但是在实际地震资料处理应用中一直存在其稳定性和抗噪性不足的问题<sup>[15-19]</sup>,尤其是地层Q值的准确性。本文在HHT方法的基础上,基于EMD自适应分解和HHT时频谱局部刻画能力<sup>[20-23]</sup>,通过将地震资料分成不同的频率段,在HHT时频域计算不同目标层的地层Q值,从而进行Q值补偿。确保了Q值提取精度和Q值补偿的准确性。

## 1 基于HHT的地层Q值提取

HHT方法的核心内容是固有模态分解(EMD)<sup>[24-25]</sup>,

其主要思路是将具有复杂尺度成分的非平稳、非线性信号分解成一组较优Hilbert变换性能的固有模态函数(IMF)之和。我们给定复杂信号 $X(t)$ ,经过EMD自适应分解可表示为:

$$X(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (1)$$

式中, $c_i(t)$ 是固有模态函数, $r_n(t)$ 称为余量。EMD分解其优势在于信号分解过程是自适应的。得到的各个不同尺度IMF都是平稳窄带信号,从而使得波形轮廓对称更好。实际上,EMD方法主要是从频率特征尺度进行分解,第一步得到的是信号中频率特征尺度最小的IMF分量;第二步得到频率特征时间尺度较大的IMF分量;最后分离出来的IMF具有频率特征时间尺度最大的特征。

原信号 $X(t)$ 分解成多个不同尺度IMF后,基于复数道构建技术,可以构成解析信号 $Z(t)$ ,

$$Z(t) = X(t) + iY(t) \quad (2)$$

$$Z(t) \text{ 可写为: } Z(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (3)$$

$Y(t)$ 为 $X(t)$ 经过Hilbert变换的信号,每一个IMF分量经过Hilbert变换后,构造解析函数可以表示为:

$$H(t) = \sum_{j+1}^n a_j(t) \exp \left[ i \int w_j(t) dt \right] \quad (4)$$

其中, $a_j(t)$ 为分解的第 $j$ 阶IMF分量, $w_j(t)$ 为特定的瞬时频率,对照上式看出,HHT变换实际是傅里叶变换的扩展,优势在于容易反映局部振幅和频率的信息。去除残余函数,展开后得到Hilbert幅值谱,记作:

$$H(w, t) = \text{Re} \sum_{j+1}^n a_j(t) e^{i \int w_j(t) dt} \quad (5)$$

基于HHT分频技术的地层Q值提取方法如下:首先基于HHT时频分析技术对目的层进行分析,选择适合目的层的优势频率范围;然后利用EMD分解技术对地震数据根据频率尺度进行分解,选择只含有目的层优势频率范围的地震数据重构;最后在HHT时频域内通过谱比法计算地层Q值<sup>[26]</sup>。本文方法在实际地震数据对地层Q补偿应用中的具体步骤为:将实际地震数据分成浅层、中深层,分别对这两套数据进行HHT时频分析,提取局部的频率属性特征,选择适合不同层的频率范围,基于EMD分解技术对这两套数据进行分解、选择、重构处理<sup>[27]</sup>,得到具有不同频率尺度的地震资料;基于复数道技术,在HHT时频域内通过谱比法计算Q值。此做法的优势在于不同频率成分地震

信号估算的Q值避免了造成相互影响,同时局部的Q值异常求得更加准确,补偿效果更佳。HHT时频域内谱比法是假定地震子波为零相位子波,其估算地层Q值的公式为:

$$\ln \frac{W(a, t_1)}{W(a, t)} = -\alpha \left( \frac{t_1 - t}{Q} \right) \quad (6)$$

其中,  $\alpha = \pi \left( \frac{f_1 + \tau f}{\tau + 1} \right)$

式中,  $\tau$  表示能量衰减率,为一常数,  $f_1$  表示零相位子波的视频率;  $f$  表示平面波频率;  $t$  和  $t_1$  表示平面波从地面开始传播到目的层上下界面所用的时间。  $W(a, t)$  表示HHT时频谱。通过公式(6)进行线性回归可以求得地层Q值<sup>[28]</sup>。

## 2 地层Q值补偿

地震波在地下传播时,由于信号的中心频率要向较低的频率方向移动,因此找出Q和中心频率的关系至关重要。以此通过Q补偿可以消除地震波在地下介质中传播的频散吸收,提高地震数据的垂向分辨率<sup>[29-31]</sup>。

在均匀介质中传播的平面波频域表达式为:

$$U(f) = U_0(f) \exp[i(2\pi ft - kx)] \quad (7)$$

式中,  $U_0(f)$  表示震源脉冲响应;  $k$  为波数;  $x$  为波前面沿着射线路径从震源传播到检波器的距离。假如介质是粘弹性,则  $k$  为复数,表达式如下:

$$k(f) = \frac{2\pi f}{c(f)} = \frac{2\pi f}{v(f)} - i\alpha(f) \quad (8)$$

其中,  $c(f)$  为复速度,  $v(f)$  为相速度,  $\alpha(f)$  为衰减系数。

在Kolsky-Futterman模型中,相速度和衰减系数对应的关系满足:

$$\alpha(f) = \frac{\pi}{v(f)Q} f \quad (9)$$

$$\frac{1}{v(f)} = \frac{1}{v_r} \left( 1 - \frac{1}{\pi Q} \ln \left| \frac{f}{f_r} \right| \right) \quad (10)$$

式中,  $f_r$  代表参考频率;  $v_r$  代表参考相速度。

于是将公式(8)至公式(10)代入公式(7)中,展开后对应表达式:

$$U(f) = U_0(f) \exp \left[ - \left( \frac{\pi ft}{Q} + i \frac{2ft}{Q} \ln \left| \frac{f}{f_r} \right| \right) \right] \quad (11)$$

式中,  $t = \frac{x}{v_r}$ 。

定义  $G(f, t) = \exp \left[ - \left( \frac{\pi ft}{Q} + i \frac{2ft}{Q} \ln \left| \frac{f}{f_r} \right| \right) \right]$  大地滤波算子,则反Q滤波算子为:

$$G^{-1}(f, t) = A(f, t) P(f, t) = \exp \left( \frac{\pi ft}{Q} + i \frac{2ft}{Q} \ln \left| \frac{f}{f_r} \right| \right) \quad (12)$$

式中,  $P(f, t) = \exp \left( i \frac{2ft}{Q} \ln \left| \frac{f}{f_r} \right| \right)$  是相位补偿算子,

$A(f, t) = \exp \frac{\pi ft}{Q}$  是振幅补偿算子。

由此推导出地震波衰减补偿在时频域的表达式:

$$U_0(f, t) = U(f, t) A(f, t) P(f, t) \quad (13)$$

最后进行HHT反变换,得到补偿后的时间域地震信号。

## 3 模型试验

基于上述理论基础,首先进行模型参数的试验,通过层状介质的衰减模拟分析,以及Q值求取与补偿研究对理论进行验证。模型参数如下:对应层的速度依次为1500、2000、3000 m/s, Q值依次为120、60、120。正演模拟采用基于单程波动方程的分步傅里叶波场延拓方法,采用的地震子波为雷克子波,频率为30 Hz,时间采样间隔1 ms。图1a为模拟得到的地震记录,图2a为放大的波形显示。由于地下介质吸收衰减作用,体现出振幅减小和波形畸变的现象,从放大的波形分析,子波波形不再是零相位,即分辨率逐渐降低。

图3是基于小波分频技术提取的地层Q值曲线,与模型参数基本一致。图1b、图2b是经过本文方法进行补偿后的结果。对比图1a和图2a可以看出,通过Q补偿处理的不同深度地层反射波形均恢复到了原始的雷克子波形态,对应每一层地震信号的振幅和相位都得到了恢复。图4是经过Q补偿前后的振幅谱对比,蓝色为补偿前的频谱,红色为补偿后的频谱。由图可以看出,补偿后的频谱得到展宽。由此可以说明,通过本文方法对地层进行Q值补偿,能够达到使地震子波波形恢复原状,主频提高,频带变宽,提高分辨率的作用。

为了验证本文Q补偿方法的抗噪性,通过对模型数据加入8%的随机噪声,同样的步骤对加噪的数据进行Q补偿测试。图5为补偿前后的数据对比,图6为补偿前后的频谱对比。从图中的对比分析,补偿后的地震记录有效信息得到加强恢复,噪声的部分基本没变。也就是说本文方法在信号补偿的同时,也能确保信噪比。

## 4 实际数据应用

本文选择某海域地震资料实际数据对本文方

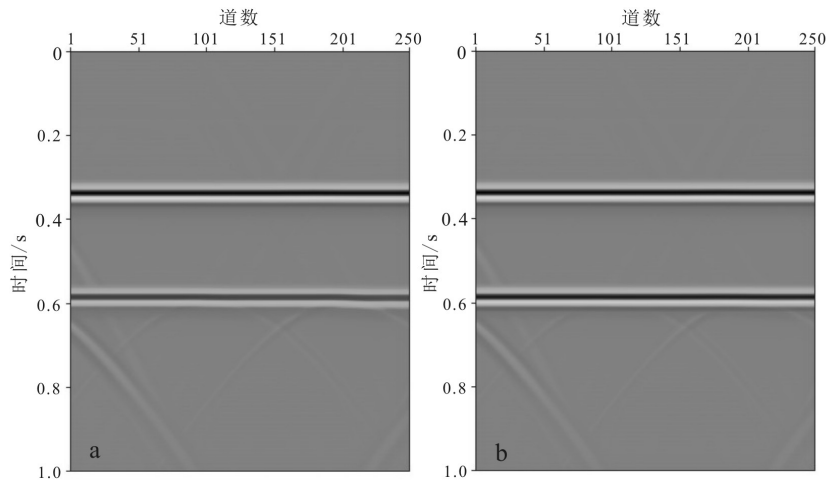


图1 模型数据 Q 补偿前后的对比

a. 补偿前的地震数据, b. 补偿后的地震数据。

Fig.1 Comparison of model seismic data before and after Q compensation

a. Model data before compensation, b. Model data after compensation.

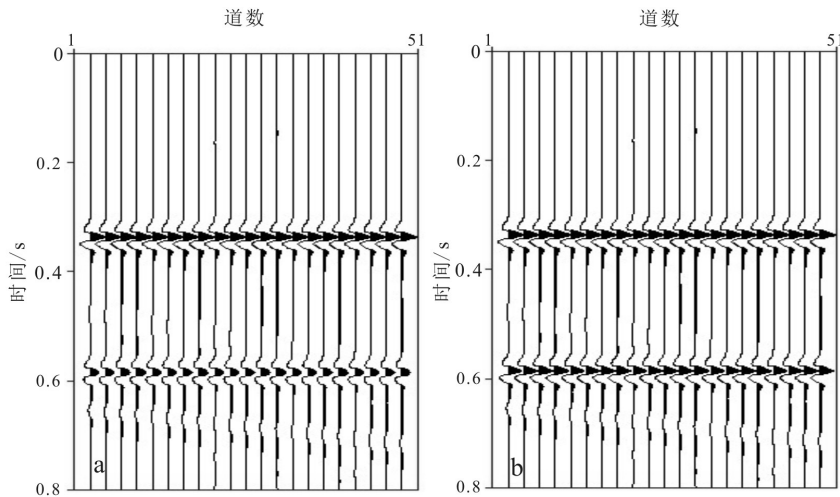


图2 模型数据 Q 补偿前后的波形显示对比

a. 补偿前的波形显示, b. 补偿后的波形显示。

Fig.2 Waveform comparison of model seismic data before and after Q compensation

a. Waveform before compensation, b. Waveform after compensation.

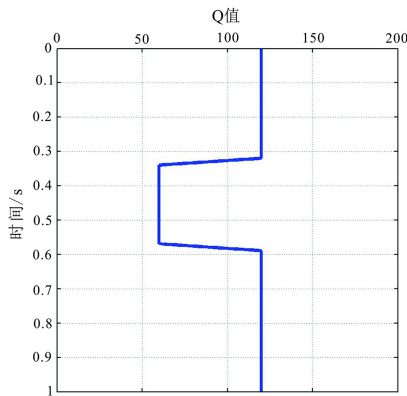


图3 基于 HHT 方法提取的地层 Q 值曲线

Fig.3 Formation Q-value curve extracted based on HHT method

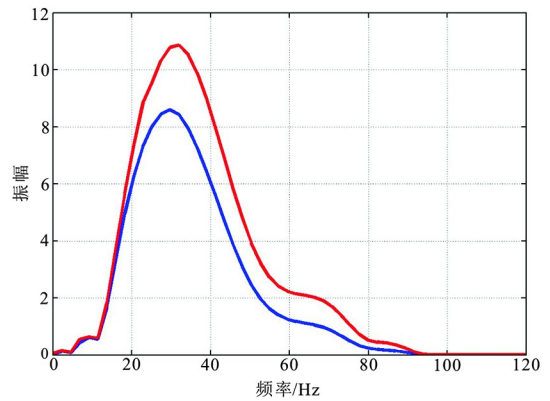


图4 模型数据 Q 补偿前后的频谱对比

Fig.4 Spectrum comparison before and after model data Q compensation

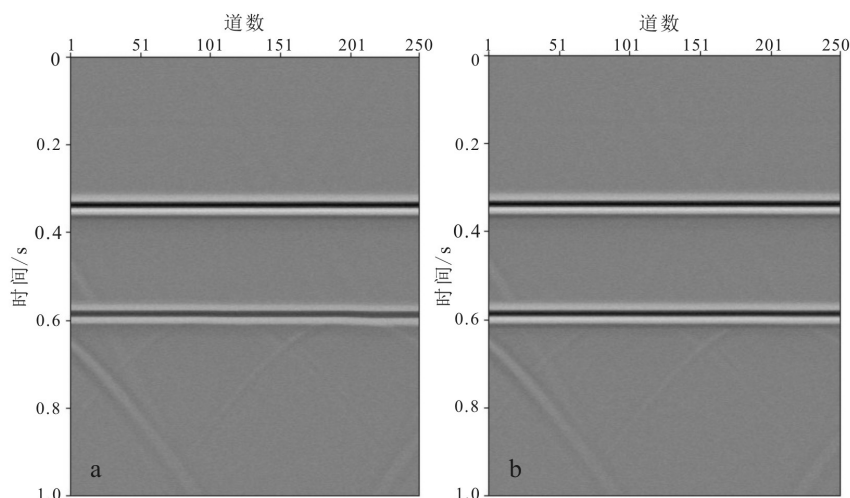


图 5 加噪的模型数据 Q 补偿前后的对比  
a. 补偿前的地震数据, b. 补偿后的地震数据。

Fig.5 Comparison of model seismic data with noise before and after Q compensation

a. Model data before compensation, b. Model data after compensation.

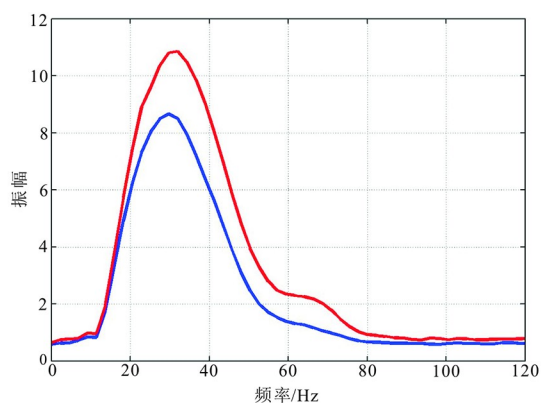


图 6 加噪的模型数据 Q 补偿前后的频谱对比

Fig.6 Spectrum comparison of model seismic data with noise before and after Q compensation

法进行应用效果分析。选取某一段信噪比较好的资料, 对其浅层、中深层进行 Hilbert 分频处理, 选择适合不同层的频率区间在 HHT 时频域计算地层的 Q 值, 进而进行反 Q 滤波, 实现对地层振幅和相位的补偿。图 7 对应的是根据本文方法求得的 Q 值剖面, 图 8a 是原始的叠后剖面, 从图中可看出 Q 值剖面跟地层吻合较好。图 8b 是整个剖面进行补偿后的效果, 可以看出分辨率有了显著提高, 同时剖面的信噪比也能得到很好的保持。图 9 为浅层经过补偿后的对比图, 补偿后同相轴的连续性有了明显的改善。图 10 是中深层补偿后的对比图, 同样的, 补偿后的剖面分辨率更高, 地层信息更加丰富。

图 11 是整个补偿前后振幅谱对比图, 图 12 为

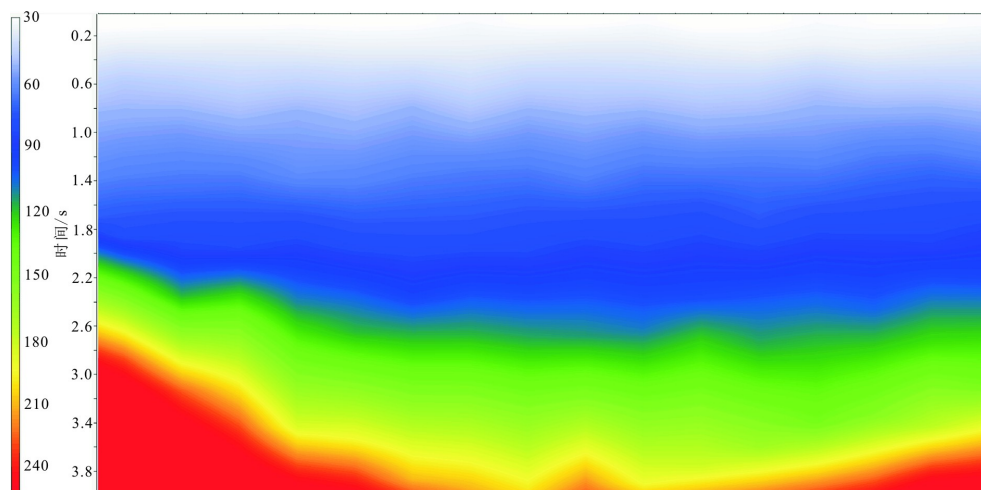


图 7 基于 HHT 方法提取的地层 Q 值剖面

Fig.7 Formation Q-value profile extracted with HHT method

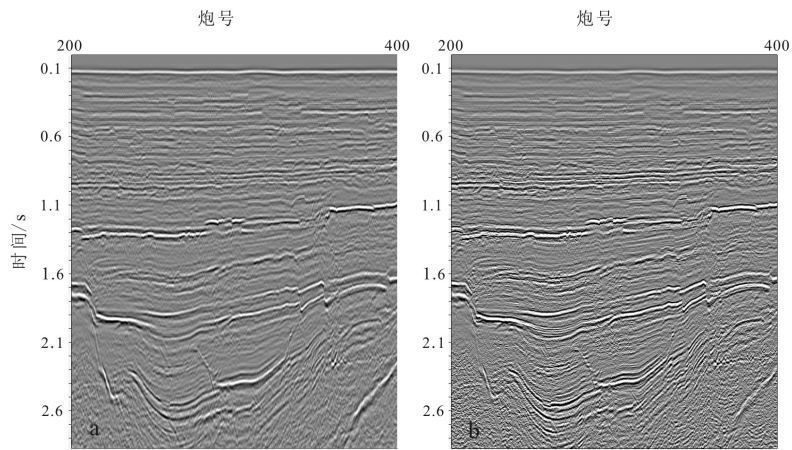


图8 实际地震数据 Q 补偿结果对比

a. 补偿前的地震数据, b. 补偿后的地震数据。

Fig.8 Comparison of actual seismic data before and after Q compensation

a. Seismic data before compensation, b. Seismic data after compensation.

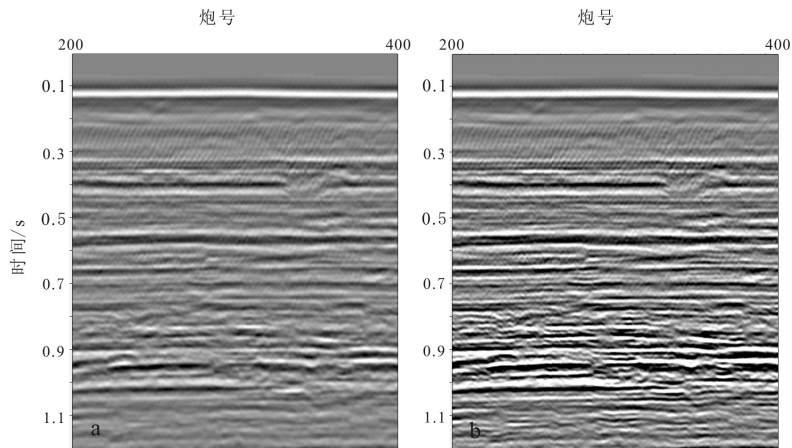


图9 浅层数据 Q 补偿结果对比

a. 补偿前的地震数据, b. 补偿后的地震数据。

Fig.9 Comparison of shallow data before and after Q compensation

a. Seismic data before compensation, b. Seismic data after compensation.

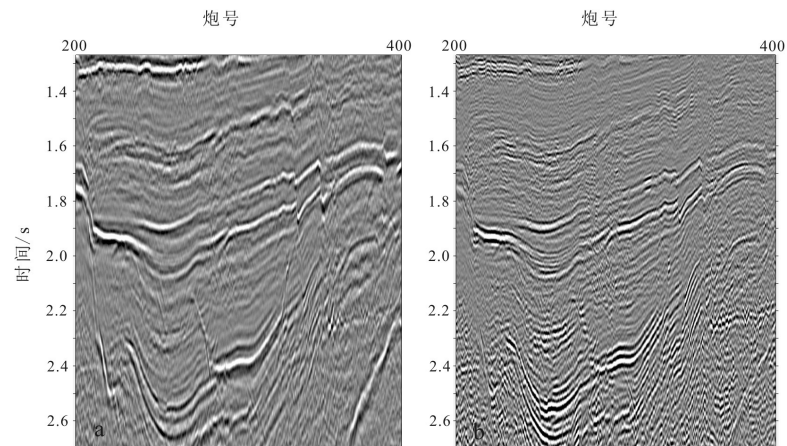


图10 中深层数据 Q 补偿结果对比

a. 补偿前的地震数据, b. 补偿后的地震数据。

Fig.10 Comparison of deep data before and after Q compensation results

a. Seismic data before compensation, b. Seismic data after compensation.

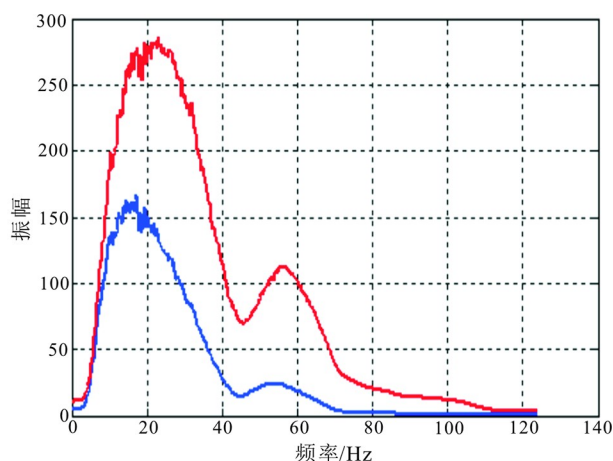


图 11 实际数据 Q 补偿前后频谱对比

Fig.11 Spectrum comparison before and after Q compensation

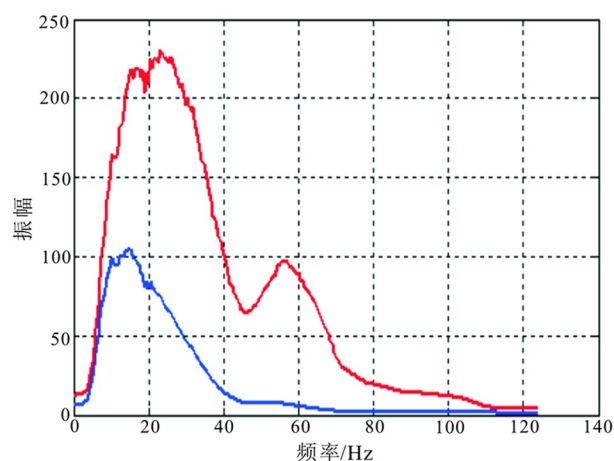


图 13 中深层数据 Q 补偿前后频谱对比

Fig.13 Spectrum compensation before and after Medium-deep data Q-compensation

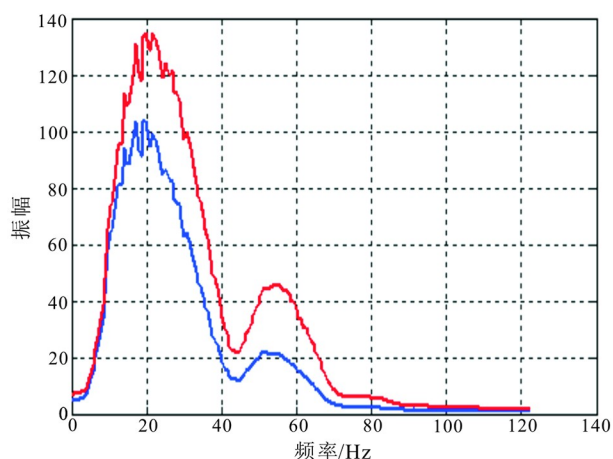


图 12 浅层数据 Q 补偿前后频谱对比

Fig.12 Spectrum comparison of shallow data before and after Q compensation

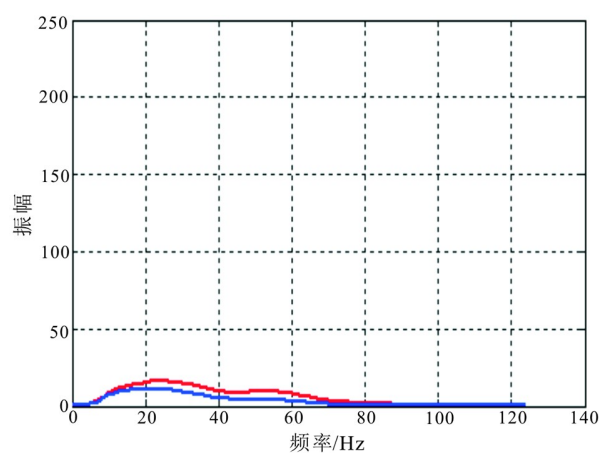


图 14 噪音成分 Q 补偿前后频谱对比

Fig.14 Spectrum comparison before and after noise component Q-compensation

浅层补偿前后频谱对比图。对比可知, Q 补偿后的数据频谱有了较大的改善, 从浅层到深层表现出高频能量提高, 数据主频范围向高频移动, 且频谱的形态基本没发生变换, 说明补偿是有效的, 同时频带变宽, 对应的剖面高频成分也有很明显的补偿效果, 分辨率有所提高。尤其对中深层的补偿, 从图 13 分析可知, 原始资料的高频部信息缺失严重, 通过 Q 补偿后, 高频的有效信息被恢复。由于实际数据为海上资料, 补偿后高频部分振幅能量得到加强, 相应的会导致海上虚反射引起的陷波点效应加剧, 海上常规资料处理的方法是通过鬼波压制解决。

为了验证本文方法在提高分辨率的同时, 不会损失信噪比, 提取噪音部分进行频谱分析, 如图 14 所示, Q 补偿后的频谱基本没变换, 也就是说噪音的成分没有加强。从补偿的剖面来看, 存在信噪比

降低的表现, 其实只是整个资料主频向高频移动的表现。

## 5 结论

(1) HHT 变换具有很高的局部分析能力, 因此, 基于 HHT 时频谱的地层 Q 值提取方法能得到更加准确的地层 Q 值, 同时 EMD 分解算法是基于频率尺度进行分解, 可针对不同目标区频率区间进行地震数据的 Q 补偿, 从而达到提高资料分辨率的目的。

(2) 通过本文方法进行 Q 值补偿, 在有效提高地震资料主频, 展宽频带, 提高分辨率的同时, 确保了资料的信噪比。从模拟数据到实际地震数据的测试表明本文方法是可行且有效的。

(3) 由于 EMD 分解的过程存在模态混叠效应,

同时  $Q$  值提取的正确性对资料信噪比有一定的要求。因此,在处理之前应对地震数据进行去噪预处理,以达到最佳的补偿效果。

### 参考文献 (References)

- [1] 李振春, 王清振. 地震波衰减机理及能量补偿研究综述[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(4): 1147-1152. [LI Zhenchun, WANG Qingzhen. A review of research on mechanism of seismic attenuation and energy compensation [J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(4): 1147-1152.]
- [2] 王珺, 杨长春, 乔玉雷. 用稳定高效的反 $Q$ 滤波技术提高地震资料分辨率[J]. *地球物理学进展*, 2008, 23(2): 456-463. [WANG Jun, YANG Changchun, QIAO Yulei. Improve the seismic resolution with a stable and efficient inverse  $Q$  filter [J]. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(2): 456-463.]
- [3] Hale D.  $Q$ -adaptive deconvolution[C]//Proceedings of 1982 SEG Annual Meeting. Dallas, Texas: Society of Exploration Geophysicists, 1982: 133-158.
- [4] Bickel S H, Natarajan R R. Plane-wave  $Q$  deconvolution [J]. *Geophysics*, 1985, 50(9): 1426-1439.
- [5] Hargreaves N D, Calvert A J. Inverse  $Q$  filtering by Fourier transform [J]. *Geophysics*, 1991, 56(4): 519-527.
- [6] 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.
- [7] Wang Y H. A stable and efficient approach of inverse  $Q$  filtering [J]. *Geophysics*, 2002, 67(2): 657-663.
- [8] Wang Y H. Quantifying the effectiveness of stabilized inverse  $Q$  filtering [J]. *Geophysics*, 2003, 68(1): 337-345.
- [9] Wang Y H. Inverse  $Q$ -filter for seismic resolution enhancement [J]. *Geophysics*, 2006, 71(3): V51-V60.
- [10] Yan H Y, Liu Y. Estimation of  $Q$  and inverse  $Q$  filtering for prestack reflected PP-and converted PS-waves [J]. *Applied Geophysics*, 2009, 6(1): 59-69.
- [11] 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, 44(2): 116-118. [LIU Cai, LIU Yang, WANG Dian, et al. A method to compensate strata absorption and attenuation in frequency domain [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2005, 44(2): 116-118.]
- [12] Zhang C J, Ulrych T J. Seismic absorption compensation: a least squares inverse scheme [J]. *Geophysics*, 2007, 72(6): R109-R114.
- [13] 王本锋, 陈小宏, 李景叶, 等. 基于反演的稳定高效衰减补偿方法[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(4): 1265-1274. [WANG Benfeng, CHEN Xiaohong, LI Jingye, et al. A stable and efficient attenuation compensation method based on inversion [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(4): 1265-1274.]
- [14] 叶秋焱, 崔宏良, 叶玮, 等. 一种基于叠前数据的综合 $Q$ 值求取及应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2017, 52(2): 304-308. [YE Qiuyan, CUI Hongliang, YE Wei, et al. Integrated  $Q$ -value estimation based on prestack seismic data [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2017, 52(2): 304-308.]
- [15] Gao J H, Yang S L, Wang D X, et al. Quality factors estimation using wavelet's envelope peak instantaneous frequency[C]//2009 SEG Annual Meeting. Houston, Texas: SEG, 2009: 2457-2461.
- [16] Wang X J, Yin X Y, Wu G C. Estimation of layer quality factors from pre-stack seismic data[C]//Proceedings of the 80th Annual International Meeting. Denver, Colorado: SEG, 2010: 192-196.
- [17] Zhang F C, Zhang Y Y, Liu H Q. Seismic wave absorption attenuation compensation based on the matching pursuit algorithm[C]// (2015)SEG Technical Program Expanded Abstracts: 5179-5183.
- [18] 王文闯, 李合群. 混合法 $Q$ 吸收补偿[J]. *石油地球物理勘探*, 2012, 47(2): 244-248. [WANG Wenchuang, LI Hequn. A hybrid method for  $Q$ -compensation [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2012, 47(2): 244-248.]
- [19] 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 Jinli, LI Zhenchun, GUAN Luping, et al. Seismic wave attenuation and compensation method [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 39(3): 456-465.]
- [20] Battista B M, Knapp C, McGee T, et al. Application of the empirical mode decomposition and Hilbert-Huang transform to seismic reflection data [J]. *Geophysics*, 2007, 72(2): H29-H37.
- [21] Huang N E. Computer implicated empirical mode decomposition method, apparatus, and article of manufacture: US, U.S. Patent, 5983162[P]. 1996.
- [22] Mijovic B, De Vos M, Gligorijevic I, et al. Source separation from single-channel recordings by combining empirical-mode decomposition and independent component analysis [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2010, 57(9): 2188-2196.
- [23] 颜中辉, 栾锡武, 王赟, 等. 基于经验模态分解的分数维地震随机噪声衰减方法[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(7): 2845-2857. [YAN Zhonghui, LUAN Xiwu, WANG Yun, et al. Seismic random noise attenuation based on empirical mode decomposition of fractal dimension [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(7): 2845-2857.]
- [24] 梁岳, 顾汉明, 姚知铭. 改进的希尔伯特-黄变换在储层预测中的应用[J]. *石油物探*, 2016, 55(4): 606-615. [LIANG Yue, GU Hanming, YAO Zhiming. Application of improved Hilbert-Huang transform in reservoir prediction [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2016, 55(4): 606-615.]
- [25] 颜中辉, 方刚, 徐华宁, 等. 希尔伯特谱白化方法在海洋地震资料高分辨率处理中的应用[J]. *海洋地质与第四纪*, 2018, 38(4): 212-220. [YAN Zhonghui, FANG Gang, XU Huanning, et al. The application of Hilbert spectral whitening method to high resolution processing of marine seismic data [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(4): 212-220.]
- [26] Braga L L S, Moraes F S. High-resolution gathers by inverse  $Q$  filtering in the wavelet domain [J]. *Geophysics*, 2013, 78(2): V53-V61.
- [27] 杨凯, 刘伟. 基于希尔伯特—黄变换的地震资料高分辨率处理[J]. *工程地球物理学报*, 2015, 12(1): 22-26. [YANG Kai, LIU Wei. The marine seismic data high resolution processing based on Hilbert-Huang transform [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2015,



- 12(1): 22-26.]
- [28] 王小杰, 印兴耀, 吴国忱. 基于叠前地震数据的地层  $Q$  值估计[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(3): 423-428. [WANG Xiaojie, YIN Xingyao, WU Guochen. Estimation of stratigraphic quality factors on pre-stack seismic data [J]. Petroleum Geophysical Prospecting, 2011, 46(3): 423-428.]
- [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 Hequn, MENG Xiaohong, ZHAO Bo. Application studies on  $Q$  absorption and compensation for seismic data [J]. Petroleum Geophysical Prospecting, 2010, 45(2): 190-195, 229.]
- [30] 杨学亭, 刘财, 刘洋, 等. 基于连续小波变换的时频域地震波能量衰减补偿[J]. 石油物探, 2014, 53(5): 1001-1441. [YANG Xueting, LIU Cai, LIU Yang, et al. The attenuation compensation of seismic wave energy in time-frequency domain based on the continuous wavelet transform [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014, 53(5): 1001-1441.]
- [31] 安静娟, 于亮. 一种改进的  $Q$  值求取方法[J]. 长江大学学报: 自科版, 2014, 11(2): 90-91, 101. [AN Jingjuan, YU Liang. An improved method for obtaining  $Q$  value [J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2014, 11(2): 90-91, 101.]