

# 利用零井源距 VSP 资料进行品质因子反演

张大伟<sup>①②</sup> 孙赞东\*<sup>①③</sup> 王学军<sup>②</sup>

邹雯<sup>②</sup> 冯晓燕<sup>④</sup> 路遥<sup>⑤</sup>

(①中国石油大学(北京)地质地球物理综合研究中心,北京昌平 102249; ②东方地球物理公司研究院,

河北涿州 072751; ③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;

④东方地球物理公司物探职业教育学校,河北涿州 072751; ⑤长江大学地球科学学院,湖北荆州 434023)

张大伟,孙赞东,王学军,邹雯,冯晓燕,路遥. 利用零井源距 VSP 资料进行品质因子反演. 石油地球物理勘探, 2011, 46(增刊 1): 47~52

**摘要** 品质因子  $Q$  值是描述地震波衰减的一个重要物理参数,它描述了介质非完全弹性特征,是地层内部本质特征,所以研究和估算  $Q$  值在地震勘探中的作用越来越重要。谱比法和质心频移法是现在常用的两种方法。本文详细介绍了两种方法的原理并用无噪声理论模型验证了两种方法的可行性。反演结果显示在无噪声的条件下两种方法都能很好地估算介质的品质因子。通过对含有不同强度噪声的理论数据、全波场理论数据和实际零井源距 VSP 数据的处理,对两种方法进行了比较。结果表明,质心频移法反演的结果比谱比法更精确、更可信。

**关键词** 品质因子 VSP 质心频移法 谱比法

**中图分类号**: P631 **文献标识码**: A

## 1 引言

地震波在地层中传播时,因能量被介质吸收,因而产生了波的衰减和频散。地震波的衰减通常用品质因子  $Q$  值来度量。实验室和实际数据测量结果皆表明,品质因子与岩石物性、流体类型及流体饱和度等因素有关。因此,品质因子可作为油气储层识别和烃类检测的一个判断标志。另外,应用品质因子更好地解释 AVO 效应、提高地震视分辨率以及时移地震中检测和监视储层流体等都有重要的意义。因此,准确地反演出品质因子的值有着重要意义<sup>[1]</sup>。对于品质因子的估算,前人提出了很多方法,这些方法有的是在时间域进行的,有的是在频率域进行的。时间域比较有代表性的方法有脉冲振幅衰减法、脉冲上升时间法和脉冲展宽方法;频率域的方法有谱比法,质心频移法和峰值频率偏移法等<sup>[2,3]</sup>。时间域地震脉冲的幅度信息经常受到散射、几何扩

散和其他因素影响,所以很难估计出高精度的  $Q$  值。与时间域方法相比,频率域方法受到的影响因素少,反演的  $Q$  值精度较高。本文利用频率域的两种比较常用的方法—谱比法和质心频移法对理论数据以及实际数据进行了估算  $Q$  值,并对两种方法的结果进行了比较。

## 2 方法原理

### 2.1 谱比法

谱比法<sup>[4~6]</sup>是最常用也是最著名的一种方法,它基于  $Q$  值与频率无关的假设条件,通过最小二乘拟合振幅谱比值的对数随频率的变化斜率,进而估算层间  $Q$  值。

考虑地层的吸收衰减,地震波的振幅可以用下式近似表示

$$B(f, t) = A(t)B(f) \exp\left(-\frac{\pi ft}{Q}\right) \quad (1)$$

\*北京市昌平区府学路 18 号中国石油大学(北京)地质地球物理综合研究中心,102249。Email:samzdsun@yahoo.com, szd@cup.edu.cn

本文于 2011 年 3 月 8 日收到,最终修改稿于 2011 年 10 月 8 日收到。

本文研究由国家重点基础研究发展规划 973 项目(2011CB201103)“中国西部叠合盆地深部有效碳酸盐岩储层形成机制与分布预测”与国家油气重大专项(2011ZX05004003)“海相碳酸盐岩储层地震描述与油气藏有效预测技术研究”资助。

其中: $B(f)$ 为初始时刻的地震波振幅; $A(f)$ 表示与频率无关的其他方面的影响。对上式取 $t_1$ 和 $t_2$ 两时刻,可以得到

$$B(f, t_1) = A(t_1)B(f)\exp\left(-\frac{\pi ft_1}{Q}\right) \quad (2)$$

和

$$B(f, t_2) = A(t_2)B(f)\exp\left(-\frac{\pi ft_2}{Q}\right) \quad (3)$$

式(3)与式(2)相比并取对数,整理得

$$\ln\left[\frac{B(f, t_2)}{B(f, t_1)}\right] = C - \frac{\pi f(t_2 - t_1)}{Q} \quad (4)$$

其中: $C = \ln\left[\frac{A(t_2)}{A(t_1)}\right]$ 作为常数; $f$ 和 $B$ 为未知量。这里,假定 $Q$ 值是与频率有关的,对于每一个频率,都可以利用式(4)中的谱比取对数值,该对数值是关于频率的一次函数,其斜率为 $-\frac{\pi(t_2 - t_1)}{Q}$ 。每对应一个频率,就可以得到一个 $Q$ 值。

(1)对于单一地层的任意时刻,可直接根据式(4)计算 $Q$ 值

$$Q = -\frac{\pi f(t_2 - t_1)}{\ln\left[\frac{B(f, t_2)}{B(f, t_1)}\right] - C} \quad (5)$$

(2)对于多层地层的情况,本文采用等效 $Q$ 值原理。假设地层为 $n$ 层,每一层的品质因子分别为 $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ ,地震波在每一层的传播时间是 $t_1, t_2, \dots, t_n$ ,地层的等效 $Q_{\text{eff}}$ 值有如下关系

$$Q_n = \frac{t_n - t_{n-1}}{Q_{n, \text{eff}} Q_{n-1, \text{eff}}} \quad (6)$$

## 2.2 质心频移法

考虑地震波在衰减介质中传播质心频率逐渐减小,Quan<sup>[7,8]</sup>等提出质心频移法(Centroid Frequency Shift),通过分析信号的质心频率的变化来研究岩石的地震波衰减特性。

为了估算地层的衰减,假定大地是一个线性滤波器,地震波在地层中的传播就相当于进行了一次线性滤波。如果入射波的振幅谱是 $S(f)$ ,地层和接收仪器的响应是 $G(f)H(f)$ ,那么接收点的振幅谱可以表示为

$$R(f) = G(f)H(f)S(f) \quad (7)$$

其中: $G(f)$ 包括几何发散、检波器响应、源和接收点的耦合效应等; $H(f)$ 描述了地震波的振幅衰减影响,反映地层的衰减效应。根据Ward等<sup>[9]</sup>的理论, $H(f)$ 响应可以表示成为

$$H(f) = \exp\left(-f \int_{\text{ray}} \alpha_0 dl\right) \quad (8)$$

现定义源点子的质心频率为

$$f_s = \frac{\int_0^\infty fS(f)df}{\int_0^\infty S(f)df} \quad (9)$$

源点子的方差为

$$\sigma_s^2 = \frac{\int_0^\infty (f - f_s)S(f)df}{\int_0^\infty S(f)df} \quad (10)$$

同理,接收点子的质心频率为

$$f_R = \frac{\int_0^\infty fR(f)df}{\int_0^\infty R(f)df} \quad (11)$$

接收点子的方差为

$$\sigma_R^2 = \frac{\int_0^\infty (f - f_R)R(f)df}{\int_0^\infty R(f)df} \quad (12)$$

在因子 $G$ 与频率无关的条件下,假定零井源距VSP以雷克子波为源波的数据,其衰减因子为

$$\alpha_0^i = \frac{\Delta f_i}{\sigma_i^2 \Delta z_i} \quad (13)$$

其中: $\Delta f_i = f_i - f_{i+1}$ 是连续两个接收点的质心频率差; $\Delta z_i$ 是连续两个接收点的距离; $\alpha_0^i$ 是连续两个接收点的衰减系数的平均值; $\sigma_i^2$ 是第 $i$ 个接收点数据的方差。

## 3 两种算法理论模型的验证及比较

本文为了验证算法的可行性及在不同的噪声干扰下的稳定性,分别对只有下行波的零井源距VSP理论模型数据和全波场的零井源距VSP理论模型数据进行计算,其中只有下行波的零井源距VSP理论模型数据分为无噪声、较小噪声、中等噪声和较强噪声四种情况。

### 3.1 算法可行性验证

为了验证上述两种算法的可行性及对比其的精度,我们用一个五层的只有下行波无噪声的理论模型数据进行测试。理论模型的地层参数见表1。模型的震源选择50Hz的雷克子波,震源置于井口,井口与第一个检波器的距离为600m,道间距为10m,共135道。

表 1 理论模型地层参数

地层	厚度/m	速度/(m·s <sup>-1</sup> )	Q
1	600	1345	无衰减
2	1000	1345	20
3	320	1530	60
4	150	1875	40
5	400	2010	80

图 1 为模拟地震剖面,图 2 分别是用质心频移法和谱比法反演的品质因子。从图中可以看到,两种方法在无噪声干扰的理论模型中,都可以较准确地反演出品质因子的值,从而证明两种方法对零井

源距 VSP 资料估算品质因子是可行的。对比两种方法结果的误差,质心频移法的反演结果比谱比法更精确。

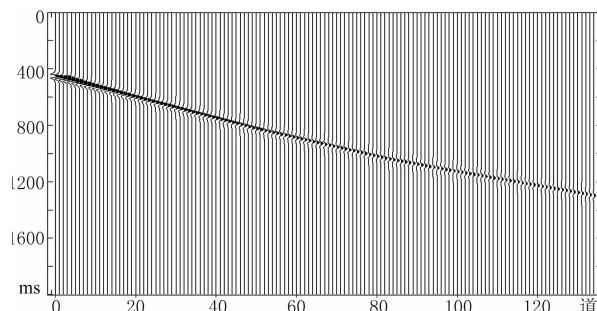


图 1 无噪声零井源距 VSP 地震记录

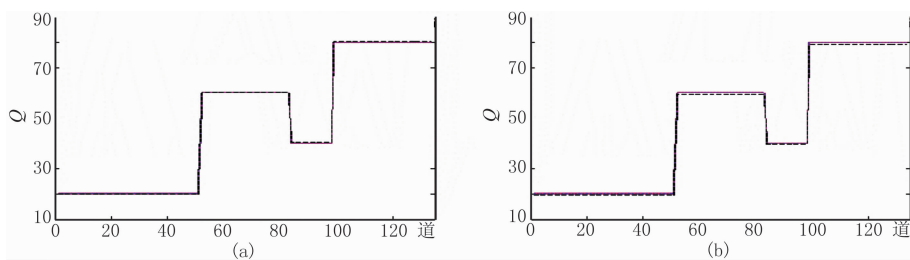


图 2 两种算法结果的对比(实线为理论值,虚线为反演值)

(a)质心频移法,四层的相对误差分别为 1.18%、0.28%、0.86%和 0.31%;  
 (b)谱比法,四层的相对误差分别为 3.95%、1.10%、0.61%和 1.06%

### 3.2 算法稳定性验证

为了验证算法在含有噪声时的稳定性,对上述数据加入不同强度的噪声,比较其反演结果。图 3、图 4、图 5 是分别含有较小、中等、较强噪声的理论数据。图 6、图 7、图 8 分别是其 Q 值反演结果。

对比反演结果可以看到,在含较小和中等噪声的情况下,质心频移法反演结果与理论值匹配得很好;谱比法反演结果没有质心频移法的结果准确,不过其误差还是在可以接受的范围。在含有较强噪声的资料中,两种方法反演结果在浅层与理论值匹配得很好,随着深度的增加,信号能量减小、信噪比降低,反演结果与理论值的偏差比较大。相比较而言,

质心频移法得到的结果更接近理论值。但是,在较强噪声的干扰下,两种方法的反演结果可定性分析衰减的变化趋势,如果想用此结果进行反Q滤波则

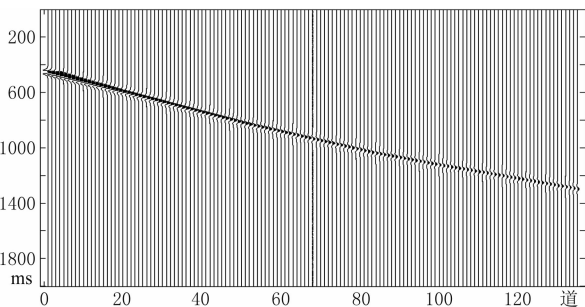


图 3 较小噪声零井源距 VSP 地震记录

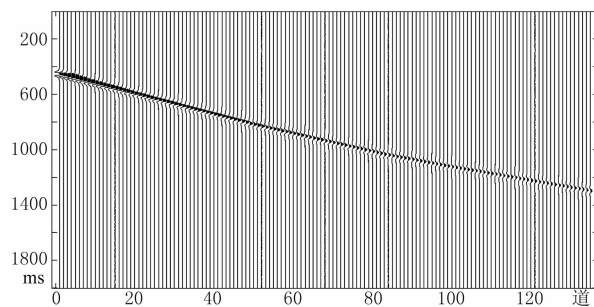


图 4 中等噪声零井源距 VSP 地震记录

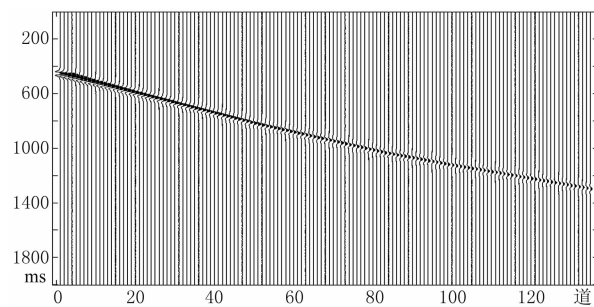


图 5 较强噪声零井源距 VSP 地震记录

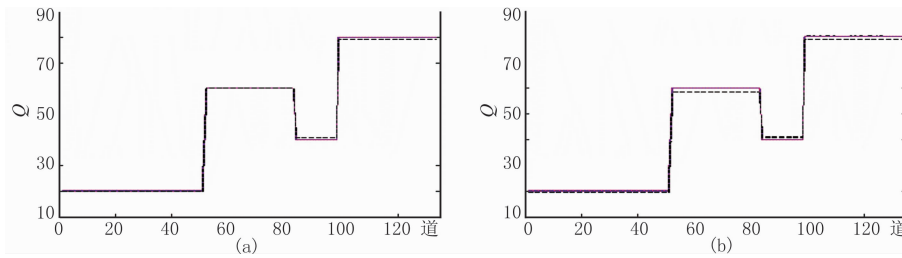


图6 较小噪声时两种方法结果对比(实线为理论值,虚线为反演值)

(a)质心频移法,四层的相对误差分别为 1.00%、0.25%、1.23%和 1.44%;  
(b)谱比法,四层的相对误差分别为 5.45%、2.08%、1.80%和 1.96%

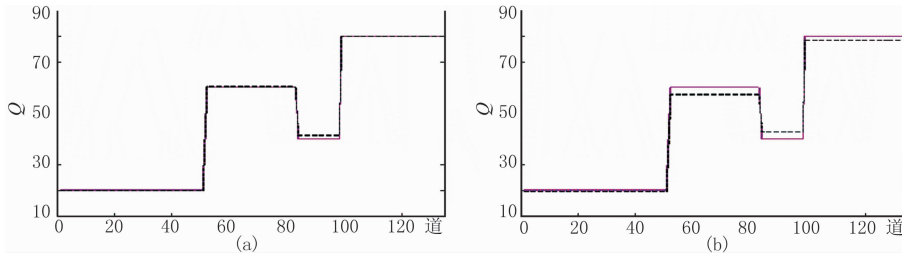


图7 中等噪声时两种方法结果对比(实线为理论值,虚线为反演值)

(a)质心频移法,四层的相对误差分别为 1.40%、0.65%、3.10%和 0.26%;  
(b)谱比法,四层的相对误差分别为 3.95%、4.39%、6.98%和 1.95%

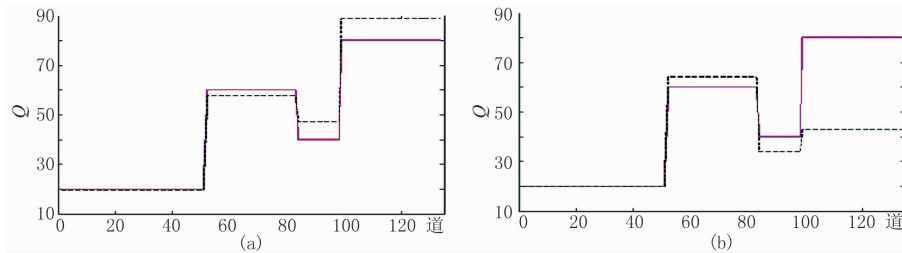


图8 较强噪声时两种方法结果对比(实线为理论值,虚线为反演值)

(a)质心频移法,四层的相对误差分别为 2.27%、3.70%、17.72%和 10.95%;  
(b)谱比法,四层的相对误差分别为 1.24%、6.68%、15.32%和 46.74%

需要对反演结果进行必要的再处理。

### 3.3 全波场下算法稳定性比较

上述所用模型数据是基于射线理论模拟结果,射线理论的优点是计算速度快,能很好地反映地震波的运动学特点。但是射线理论模型在反映地震波的动力学特征方面效果不好。为此基于波动方程理论模拟的全波场零井源距 VSP 数据,对两种方法的反演结果进行比较。

表 2 是全波场零井源距 VSP 四层模型参数,模型震源选择 50Hz 的雷克子波置于井口,第一级检

表 2 全波场零井源距 VSP 模型参数

地层	厚度/m	速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	Q
1	100	2000	无衰减
2	200	2000	30
3	400	2950	50
4	300	3226	80

波器距井口 100m,道间距为 10m。图 9 为波动方程正演的全波场零井源距 VSP 模拟数据,图 10 为用两种方法反演结果。

对比两种方法对全波场数据反演的品质因子的结果及误差,可以看到,两种方法在浅层时反演结果很接近理论值,但是到了深层,两种方法反演结果的误差都很大。质心频移法反演的结果与理论值的误

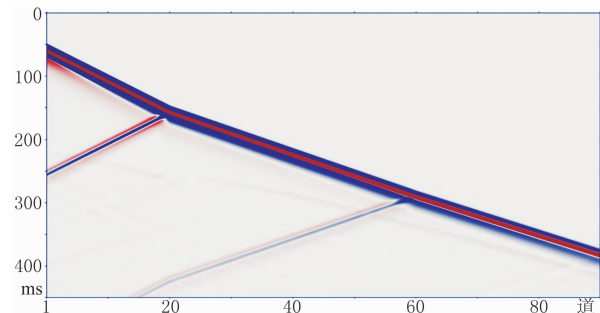


图9 全波场零井源距 VSP 地震记录

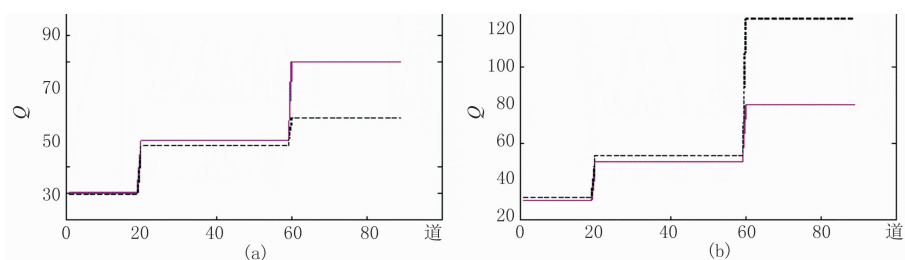


图 10 全波场零井源距 VSP 数据反演结果对比

(a)质心频移法,三层的相对误差分别为 1.57%、3.88%和 26.78%;  
 (b)谱比法,三层的相对误差分别为 5.73%、6.59%和 56.11%

差要小于谱比法的反演结果。可见质心频移法的精度更高,得到的结果更可信。

### 4 两种算法在实际零井源距 VSP 资料的应用

应用质心频移法和谱比法对轮古 38 井的零井源距 VSP 资料进行处理。通常品质因子的变化趋

势与速度的变化趋势是相同的,因此用反演的品质因子与测井速度曲线进行对比,来验证反演结果的可靠性。实际资料(图 11)井源距为 240m,检波点深度为 580m~5530m,其中 1~73 道的道间距为 20m;73~424 道的道间距为 10m。

在反演品质因子之前,为减少上行波的影响,对 VSP 资料用 *F-K* 滤波做上、下行波场分离,除此之外不做其他任何处理。图12是分别用两种方法求

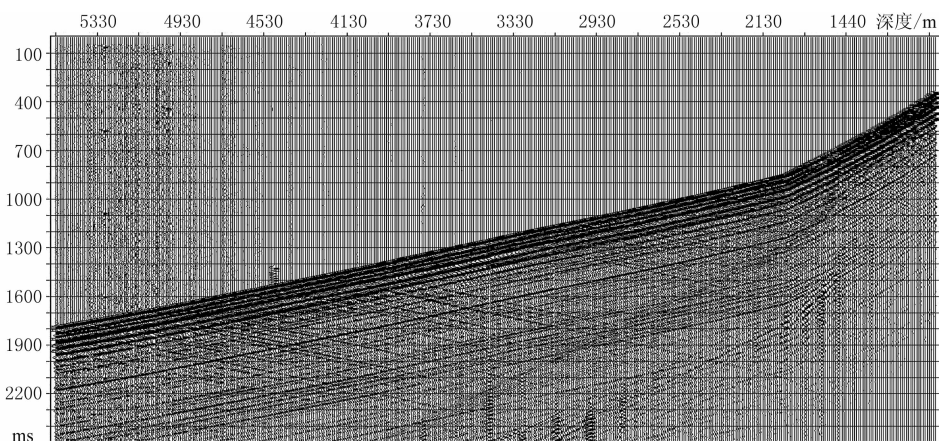


图 11 轮古 38 井零井源距 VSP 地震剖面

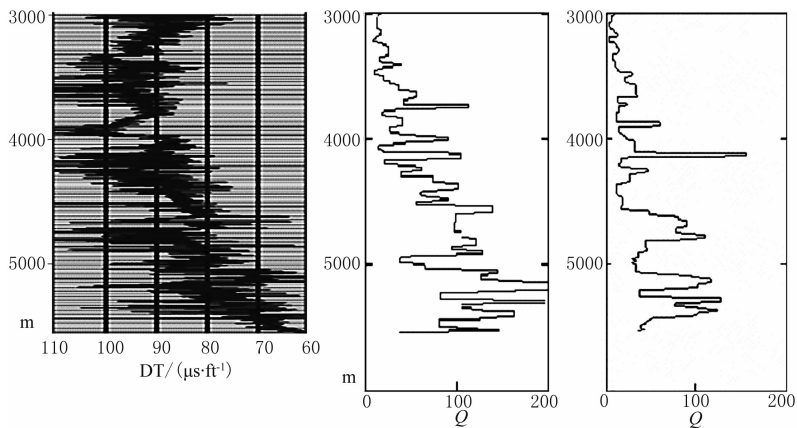


图 12 实际数据反演结果与测井速度曲线对比

左为声波测井速度曲线;中为质心频移法反演结果;右为谱比法反演结果



出的品质因子,对比反演出的品质因子的值与速度测井曲线(3000~5530m),质心频移法反演结果随深度变化的趋势和速度的趋势大体相同。相比之下,谱比法反演结果中Q值与速度测井曲线的一致性较差。从中可以看出,在实际资料中质心频移法的结果更可信。

## 5 结论

本文用质心频移法和谱比法两种方法分别对含有不同强度噪声的零井源距VSP理论数据和全波场的零井源距VSP理论数据进行了品质因子的反演,得到如下结论。

(1)对于不含噪声的零井源距VSP理论数据,两种方法都能比较准确地反演品质因子,质心频移法反演结果比谱比法更精确。

(2)对于含中等、较强噪声的零井源距VSP理论数据,两种方法浅层反演结果比较准确,深层反演结果误差较大,但质心频移法的误差较小。当噪声再增大时两种方法反演结果都不准确。

(3)对于实际零井源距VSP数据的处理,对比测井速度曲线,质心频移法反演结果随深度变化的趋势和声波速度曲线大体相同。相比之下,谱比法Q值反演结果与测井速度曲线的一致性较差。因此,在实际资料反演中质心频移法的结果更可信。但是,由于实际资料的信噪比低而且存在各种未知的影响因素造成了数据品质差,目前对实际资料还只能是定性计算。

感谢地质地球物理综合研究中心提供的良好技

术平台与科研氛围;感谢赵海波博士、孙文博博士、白海军、谢春辉等人给予的建设性意见。

### 参考文献

- [1] 高静怀,杨森林,王大兴. 利用VSP资料直达波的包络峰值处瞬时频率提取介质品质因子. 地球物理学报, 2008, 51(3): 853~861  
Gao Jing-huai, Yang Sen-lin, Wang Da-xing. Quality factor extraction using instantaneous frequency at envelope peak of direct waves of VSP data. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(3): 853~861
- [2] Tonn R. Comparison of seven methods for the computation of Q. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1989, 55(3~4): 259~268
- [3] 马昭军. 地震波衰减反演研究综述. 地球物理学进展, 2005, 20(4): 1074~1081  
Ma Zhao-jun. A summary of research on seismic attenuation. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(4): 1074~1081
- [4] Hauge P. Measurements of attenuation from vertical seismic profiles. *Geophysics*, 1981, 46(11): 1548~1558
- [5] Wang Yang-hua. Quantifying the effectiveness of stabilized inverse Q filtering. *Geophysics*, 2003, 68(1): 337~345
- [6] Wang Yang-hua. Inverse Q-filter for seismic resolution enhancement. *Geophysics*, 2006, 71(3): 51~60
- [7] Quan You-li et al. Seismic attenuation tomography based on centroid frequency shift. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1993, 12: 41~44
- [8] Quan You-li et al. Seismic attenuation tomography using the frequency shift method. *Geophysics*, 1997, 62(3): 895~905
- [9] Ward R W, Toköz M N. Causes of regional variation of magnitude. *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 1971, 61(3): 649~670

(本文编辑:宜明理)