

# 三维 $Q$ 值层析成像人机交互软件 及其在地震数据处理中的应用\*

樊计昌<sup>†</sup>, 刘明军, 海 燕

(中国地震局地球物理勘探中心, 郑州 450002)

(2010 年 7 月 12 日收稿; 2010 年 10 月 29 日收修改稿)

Fan J C, Liu M J, Hai Y. Interactive software for three-dimensional  $Q$  tomography and its application to seismic data processing[J]. Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011, 28(4): 475–480.

**摘 要**  $Q$  值结构对了解地壳的非弹性性质、地壳内部构造、热活动状态、地壳介质非均匀性以及断层分布有着重要的意义. 编写了基于吸收特征时间  $t^*$  的三维  $Q$  值层析成像人机交互软件, 可以方便快捷地计算地震体波(P 波和 S 波)的振幅谱并通过拟合振幅谱得到反映地震波衰减的吸收特征时间  $t^*$ , 并利用  $t^*$  资料通过三维  $Q$  值层析成像方法得到三维  $Q$  值结构. 实际观测资料处理结果表明, 文中给出的方法和软件是有效且可行的.

**关键词** 三维  $Q$  值层析成像, 吸收特征时间,  $Q$  值结构, 地震波形, 人机交互软件

**中图分类号** TP319; TN911.72

$Q$  值是岩石重要的本质属性, 是反映岩石衰减地震波的一个重要参数, 它与岩石的物理状态(如压力、温度、流体饱和度和流体的粘滞系数等)密切相关. 通常岩石中波的衰减对岩石的物理状态变化的反应比波速更敏感<sup>[1]</sup>, 如在上地幔中, 地震波速度的横向变化不过百分之几, 而地震波衰减的横向变化可能达到 50% ~ 100%<sup>[2]</sup>.

目前, 利用地震体波获得  $Q$  值结构主要有 3 种方法: 频谱比法、Atkinson 方法和  $Q$  值层析成像方法<sup>[3-5]</sup>.

在  $Q$  值层析成像方法中, 从利用地震波的信息角度而言, 有主要利用质心频率(centroid frequency)的, 由于质心频率信息受畸变较小, 据此得到的  $Q$  值精度较高<sup>[6]</sup>; 有主要利用振幅的<sup>[7-9]</sup>, 由于影响振幅的因素较多, 通常难以通过数据处理手段进行有效的校正, 使得  $Q$  值精度不高; 有利用波形的<sup>[10-15]</sup>, 从利用信息量的角度而言, 波形所含信息量最多.

本文针对地震体波资料(天然地震 S 波和人工地震 P 波), 编写了基于吸收特征时间  $t^*$  的三维  $Q$  值层析成像的人机交互软件, 利用地震波的波形信息来研究地壳和上地幔顶部 S 波和 P 波品质因子.

## 1 三维 $Q$ 值层析成像方法

首先对根据地震波走时所选的地震波形(对应于某震相)做谱分析, 选择好待分析震相的波形段, 使其尽量少包含其他震相的波形和干扰. 根据某震相的走时调整其波形范围, 使之得到主要反映该震相的振幅谱(称其为实测振幅谱). 然后, 对天然地震, 根据 S 波远场位移谱与  $t^*$  的关系式(2); 对人工地

\* 国家自然科学基金(40774071, 40974033)资助

<sup>†</sup>E-mail: fanjc8@163.com

震,根据 P 波远场位移谱与  $t^*$  的关系式(3),计算理论振幅谱并与实测振幅谱进行最小二乘拟合,得到观测的吸收特征时间  $t_{\text{obs}}^*$ .最后利用  $t_{\text{obs}}^*$  反演三维  $Q$  值结构.

### 1.1 吸收特征时间 $t^*$ 的定义

$t^*$  通常是频率和空间位置的函数.实验室以及实际地震测量都表明<sup>[16-18]</sup>:对于固体, $Q$  值在地震观测的短周期频段内基本上与频率无关.在忽略地震波频散并采用定常  $Q$  模式(即, $Q$  与频率无关)之后,三维介质中  $t^*$  的定义为:

$$t^* = \int_{r(x,y,z)} \frac{1}{Q(x,y,z)} \cdot \frac{1}{V(x,y,z)} dr(x,y,z), \quad (1)$$

(1)式中, $Q$  为表观品质因数, $1/Q$  为表观衰减,包括固有衰减  $1/Q_i$  和散射衰减  $1/Q_s$ ,其中  $Q_i$  主要与内摩擦有关. $Q_s$  主要与散射有关. $V$  为波速, $r$  为射线路径.

$Q$  的定义<sup>[19]</sup>为  $1/Q = \Delta E/2\pi E$ ,其中, $\Delta E$  为地震波在一个周期内或一个波长内的运动过程中波动能量的衰减, $E$  为波动能量的最大值. $Q$  值反映了地震波能量衰减的大小,其值越大,能量衰减越小;反之能量衰减越大.

### 1.2 地震波位移谱与 $t^*$ 的关系

对天然地震,利用布伦圆盘位错模式<sup>[20-21]</sup>得到的 S 波远场位移谱为

$$U(f) = \frac{\Omega_0}{\left[1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2\gamma}\right]^{1/2}} \exp(-\pi f t^*), \quad (2)$$

(2)式中, $f$  为频率, $\Omega_0$  为零频振幅, $f_c$  为拐角频率, $\gamma$  为源谱高频段衰减指数, $t^*$  由式(1)定义.

对人工地震,利用人工爆炸源的震源谱表达式<sup>[22]</sup>得到的 P 波远场位移谱为

$$U(f) = \frac{\Omega_0}{\left[1 + \left(\frac{2f}{3f_c}\right)^2 + \left(\frac{2f^2}{3f_c^2}\right)^2\right]^{1/2}} \exp(-\pi f t^*), \quad (3)$$

(3)式中各物理量含义同式(2).

### 1.3 三维 $Q$ 值层析成像

三维  $Q$  值模型离散网格节点上  $Q$  值的扰动经射线路径而引起地震波  $t^*$  的扰动<sup>[13]</sup>为

$$\delta t^* = \sum_{l=1}^{N_l} -\frac{\Delta S_l}{2} \left( \frac{1}{V_{l-1} Q_{l-1}^2} \sum_{\substack{m=i \\ n=j \\ q=k}}^{i+1, j+1, k+1} \frac{\partial Q_{l-1}}{\partial Q^{m,n,q}} \delta Q^{m,n,q} + \frac{1}{V_l Q_l^2} \sum_{\substack{m=i \\ n=j \\ q=k}}^{i+1, j+1, k+1} \frac{\partial Q_l}{\partial Q^{m,n,q}} \delta Q^{m,n,q} \right). \quad (4)$$

$Q$  值的层析成像问题归结为迭代求解下式:

$$\mathbf{A} \Delta \mathbf{m} = \Delta \mathbf{d}, \quad (5)$$

(5)式中, $\mathbf{A}$  是由  $\delta t^*/\delta Q$  组成的 Frechet 矩阵, $\Delta \mathbf{m}$  是  $Q$  值残差构成的向量, $\Delta \mathbf{d}$  是观测的  $t_{\text{obs}}^*$  与计算的  $t_{\text{cal}}^*$  构成的残差向量.

层析成像过程为:给定初始  $Q$  值模型并迭代,每次迭代重新计算 Frechet 矩阵,以使修正量  $\Delta \mathbf{m}$  更合理,如此不断迭代直到残差  $\Delta \mathbf{d}$  小于给定值.

## 2 地震体波三维 $Q$ 值层析成像的人机交互软件

地震体波三维  $Q$  值层析成像人机交互软件总控制界面如图 1 所示.分 4 部分.第 1 部分拾取地震波走时和根据走时截取待分析震相的波形.第 2 和第 3 部分主要是求取实测振幅谱和吸收特征时间.第 4 部分根据求出的吸收特征时间成像三维  $Q$  值结构.

图 2 为求实测振幅谱的人机交互界面,通过点击图 1 频谱分析的按钮便得到.界面分 2 个区,左边

为控制区, 从上到下依次为打开文件按钮、保存文件按钮、窗函数选择下拉框和文件列表框, 以及滤波编辑框. 文件列表框中显示的是以接收点炮检距或震中距命名的文件, 文件中含有做谱分析用的地震波形数据. 右边是显示区, 从上到下依次为振幅谱、地震记录、做振幅谱的地震记录段.

图 3 为振幅谱拟合人机交互界面, 通过点击图 1 求吸收特征时间的按钮便得到. 界面分控制区和显示区. 左边和右下为控制区, 左边从上向下依次为打开文件按钮、文件列表框以及天然地震和人工地震数据选择按钮. 列表框中显示的是以台站震中距或接收点炮检距命名的文件, 文件中含有振幅谱数据. 右上是振幅谱拟合显示区, 右下为人工拟合参数控制区. 图 3 给出了炮检距为 2.502km 处的地震记录的振幅谱拟合图, 软件的缺省设置为自动拟合, 如果自动拟合的效果不理想, 可以通过图右下的控制区人工修改拟合参数进行拟合.

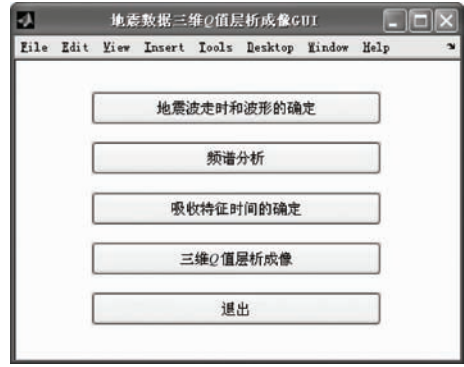


图 1 地震体波三维  $Q$  值层析成像 GUI

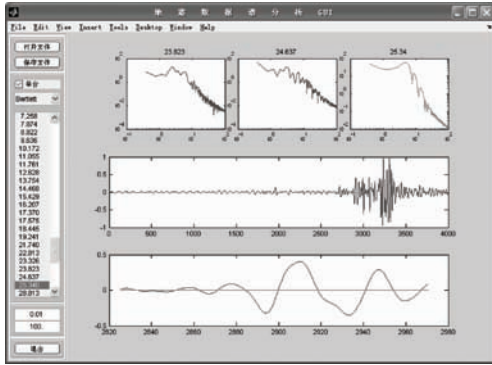


图 2 地震体波振幅谱程序的 GUI

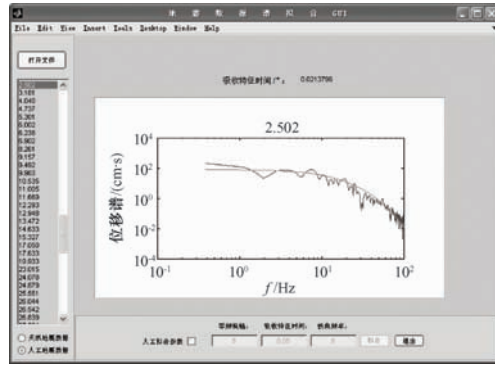


图 3 振幅谱拟合程序 GUI

### 3 应用实例

实例旨在说明吸收特征时间层析成像方法在实际中的应用效果. 该方法对场地效应和仪器频率特性进行了校正, 用非线性阻尼最小二乘法对理论振幅谱和实测振幅谱进行拟合, 从而得到观测吸收特征时间. 最后, 利用我们改编的既能计算走时也可计算吸收特征时间  $t^*$  的三维射线追踪程序, 对理论吸收特征时间与观测吸收特征时间进行迭代层析成像. 当达到给定精度后, 终止迭代, 最终得到三维  $Q$  值模型.

该实例是本文作者完成的“国家自然科学基金项目 (40774071)”工作的一部分<sup>[23]</sup>. 图 4 是辽宁省岫岩县陨石坑 P 波部分振幅谱拟合图. 图 5 是该陨石坑三维  $Q$  值结构沿 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.7km 不同深度的水平切片, 不同深度的水平切片上的  $Q$  值与该坑地质构造和岩性结构有一定的相关性.

### 4 结论

本文编写了基于吸收特征时间的三维  $Q$  值层析成像人机交互软件, 可方便快捷地计算地震体波 (P 波和 S 波) 资料的振幅谱, 通过拟合理论振幅谱和观测振幅谱可得到表征地震波衰减的吸收特征时间  $t^*$ .

实例表明, 利用基于吸收特征时间的三维  $Q$  值层析成像方法, 得到辽宁省岫岩县陨石坑的三维  $Q$  值结构, 不同深度的水平切片上的  $Q$  值与该坑的地质构造和岩性有一定的相关性, 为该坑撞击构造的整体认识提供了依据. 结果表明, 文中给出的方法和软件是有效且可行的.

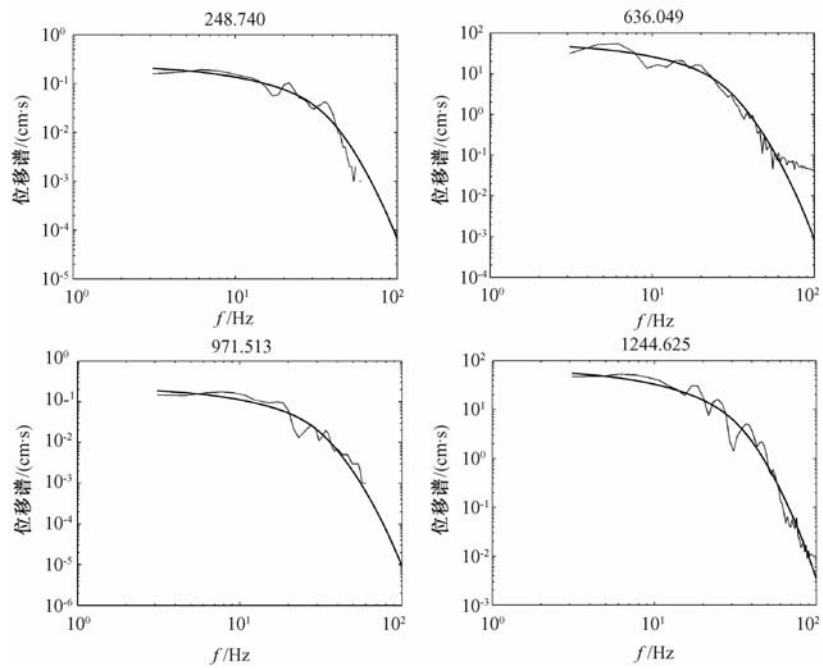


图 4 P 波振幅谱拟合图

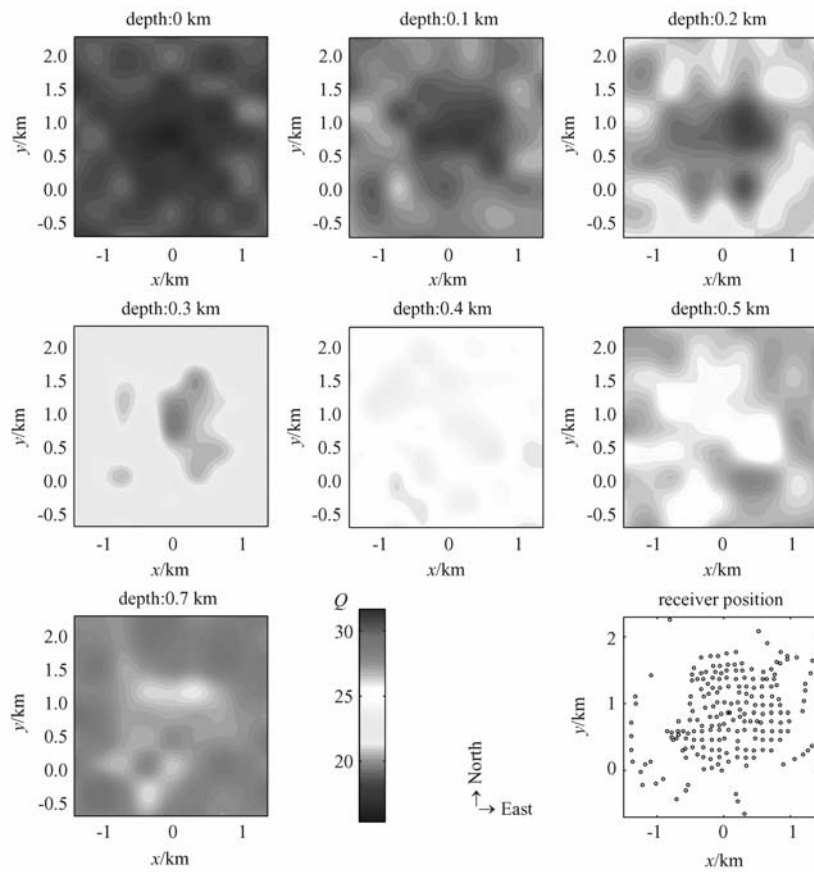


图 5 三维  $Q$  值结构沿不同深度的切片

## 参考文献

- [ 1 ] Best A I, McCann C, Sothcott J. The relationships between the velocities, attenuations, and petrophysical properties of reservoir sedimentary rocks[J]. *Geophys Prosp*, 1994, 42: 151-178.
- [ 2 ] Hong X H, Zhu J S, Chao J M, et al. Tomography of the 3-D S-wave quality factor of the crust and upper-mantle in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(5): 642-651 (in Chinese).  
洪学海,朱介寿,曹家敏,等. 中国大陆地壳上地幔 S 波品质因子三维层析成像[J]. *地球物理学报*, 2003, 46(5): 642-651.
- [ 3 ] Zhou L Q, Zhao C P, Xiu J G, et al. Methods and developments of research on crustal  $Q$  value by using earthquakes [J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2008, 350(2): 1-11 (in Chinese).  
周连庆, 赵翠萍, 修济刚, 等. 利用天然地震研究地壳  $Q$  值的方法和进展[J]. *国际地震动态*, 2008, 350(2): 1-11.
- [ 4 ] Ma Z J, Liu Y. A summary of research on seismic attenuation[J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(4): 1074-1082 (in Chinese).  
马昭军, 刘洋. 地震波衰减反演研究综述[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(4): 1074-1082.
- [ 5 ] Xu Y, Su Y J, Qin J Z. Development of  $Q$ -value studies[J]. *Journal of Seismological Research*, 2004, 27(4): 385-389 (in Chinese).  
徐彦, 苏有锦, 秦嘉政.  $Q$  值研究动态[J]. *地震研究*, 2004, 27(4): 385-389.
- [ 6 ] Youli Quan, Jerry M H. Seismic attenuation tomography using the frequency method[J]. *Geophysics*, 1997, 62(3): 895-905.
- [ 7 ] Guo L C, Wen Z G, Yang H. Inversion of surface-wave  $Q$ -value using ART method[J]. *CT Theory and Applications*, 1996, 5(4): 9-15 (in Chinese).  
郭履灿, 闻则刚, 杨辉. 用代数重建法反演面波品质因数  $Q$  值空间分布[J]. *CT 理论与应用研究*, 1996, 5(4): 9-15.
- [ 8 ] Wang H, Chang X, Liu Y K, et al. Seismic neighboring traces attenuation tomography in time domain[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44(3): 396-403 (in Chinese).  
王辉, 常旭, 刘伊克, 等. 时间域相邻道地震波衰减成像研究[J]. *地球物理学报*, 2001, 44(3): 396-403.
- [ 9 ] Wang S Y, Pei S P, Thomas M H. Crustal S-wave  $Q$  estimated from ML amplitude II:  $Q$  lateral variation in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(1): 133-139 (in Chinese).  
汪素云, 裴顺平, Thomas M H. 利用 ML 振幅研究地壳横波  $Q$  值 II:  $Q$  横向变化特征[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(1): 133-139.
- [ 10 ] He J D, Liang G H.  $Q$ -value inversion using nonlinear parameter curve fitting method[J]. *Global Geology*, 1990, 9(2): 4-10 (in Chinese).  
何樵登, 梁光河. 用非线性参数曲线拟合反演  $Q$  值[J]. *世界地质*, 1990, 9(2): 4-10.
- [ 11 ] Liang G H, Liu Q L, He J D.  $Q$ -value inversion using nonlinear parameter curve fitting method[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1992, 27(2): 230-274 (in Chinese).  
梁光河, 刘清林, 何樵登. 用非线性参数拟合反演  $Q$  值[J]. *石油地球物理勘探*, 1992, 27(2): 230-274.
- [ 12 ] Jonathan M L, Grant T L. Three-dimensional attenuation tomography at Lomo Prieta-Inversion of  $t^*$  for  $Q$  [J]. *J Geophys Res*, 1994, 99(134): 6843-6863.
- [ 13 ] Fan J C, Li S L, Lai X L, et al. Three dimensional  $Q$  structure in Jiashi earthquake region of Xinjiang region [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2001, 23(6): 570-581 (in Chinese).  
樊计昌, 李松林, 赖晓林, 等. 新疆伽师地震区三维  $Q$  值结构[J]. *地震学报*, 2001, 23(6): 570-581.
- [ 14 ] Zhao J M, Fan J C, Li Z C.  $Q$  value structure of geoscience transect from Korla to Jimsar and its geodynamic implication [J]. *Science in China (Ser D)*, 2003, 33(3): 202-209 (in Chinese).  
赵俊猛, 樊计昌, 李植纯. 库尔勒-吉木萨尔剖面  $Q$  值结构及其动力学意义[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(3): 202-209.
- [ 15 ] Li Z N, Zhou Z R, Lin S, et al. Joint inversion of  $Q$ -value, site response and focus parameters in Fujian area[J]. *Seismology and Geology*, 2005, 27(3): 437-445 (in Chinese).  
李祖宁, 周峥嵘, 林树, 等. 利用数字地震台网资料联合反演福建地区  $Q$  值、场地响应和震源参数[J]. *地震地质*, 2005, 27(3): 437-445.
- [ 16 ] Knopoff L.  $Q$ [J]. *Rev of Geophys*, 1964, 2(4): 625-660.
- [ 17 ] Pock G, Clements J R. Attenuation of short-period P, PcP, ScP, and pP waves in the earth's mantle[J]. *J G R*, 1982, 87: 3905-3918.
- [ 18 ] Zohun A D, Alison C L. Methodologies for estimating  $t^*(f)$  from short—period body waves and regional variations of  $t^*$  in the United States [J]. *Geophys J Rastr Soc*, 1985, 82: 125-140.
- [ 19 ] Aki K, Richards P G. *Quantitative seismology*[M]. San Francisco: W H Freeman and Co, 1980: 168-169.
- [ 20 ] Brune J N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes[J]. *J Geophys Res*, 1970, 75: 4997-5009.
- [ 21 ] Hanks T C, Thatcher W. A graphical representation of seismic source parameters[J]. *J Geophys Res*, 1972, 77: 4393-4405.
- [ 22 ] 郑治真. *波谱分析基础*[M]. 北京: 地震出版社, 1979: 244-249.
- [ 23 ] Fan J C, Liu M J, Zhao C B, et al. Three-dimensional  $Q$  value tomography for xiuyan meteorite impact crater[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(10): 2367-2375 (in Chinese).  
樊计昌, 刘明军, 赵成彬, 等. 岫岩陨石坑三维  $Q$  值层析成像[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(10): 2367-2375.

## Interactive software for three-dimensional $Q$ tomography and its application to seismic data processing

FAN Ji-Chang, LIU Ming-Jun, HAI Yan

(*Geophysical Exploration Center, China Seismological Administration, Zhengzhou 450002, China*)

**Abstract**  $Q$ -value structure of the crust is of great significance for understanding of non-elastic nature of crustal structure, thermal activity, crustal inhomogeneity, and fault distribution. We present an interactive software for three-dimensional  $Q$  tomography based on absorption characteristic time  $t^*$ . Amplitude spectra of seismic data (P-wave and S-wave) can then be calculated quickly and easily, absorption characteristic times can be obtained through fitting amplitude spectra, and three-dimensional  $Q$  structure can be obtained by using the  $Q$  tomography method and  $t^*$  data. The real example shows that the method and software are effective and feasible.

**Key words** three-dimensional  $Q$  tomography, absorption characteristic time,  $Q$  value structure, seismic waveform, interactive software