

# 沂沭断裂带及其附近地区尾波衰减特征<sup>\*</sup>

李霞, 刘希强, 李小晗, 赵金花

(山东省地震局, 山东 济南 250102)

**摘要:** 依据沂沭断裂带及其附近地区断裂特征和应力场分布的分段特性将其划分为4个子区域, 利用改进后的尾波  $Q_c$  值测定方法计算了2010—2017年各子区域内  $M_L \geq 2.0$  地震的尾波  $Q_c$  值, 并对其空间分布特征进行了研究。结果显示: ①沂沭断裂带尾波  $Q_c$  值(1 Hz时的  $Q_c$  值)整体差异不大, 但显示出较好的分段特性, 即莱州湾和附近海域平均尾波  $Q_c$  值(34.95)明显高于其它区段, 潍坊—孟瞳段(23.22)、新沂—宿迁段(21.12)平均尾波  $Q_c$  值相对偏低; ②尾波  $Q_c$  值空间分布与区域介质的地壳构造特点及地质环境关系紧密, 揭示了沂沭断裂带作为构造边界带的属性。

**关键词:** 尾波衰减; 方法改进; 空间分布; 沂沭断裂带

**中图分类号:** P315.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2019)03-0372-07

## 0 引言

地震波在地球介质内的传播过程中, 岩石的非弹性吸收和非均匀性散射会造成地震波能量的衰减(陈颢等, 2009; 王志伟等, 2018; Das *et al*, 2018)。在地震学中用介质品质因子  $Q$  值来度量地震波的衰减和表征介质的属性。介质品质因子主要是利用天然地震的体波、尾波、 $L_g$  波等波形资料的振幅衰减或频散衰减的速率测得, 通过获取传播路径或区域平均  $Q$  值, 反映区域介质参数的变化信息和承载的应力状态(Giampiccolo *et al*, 2002; Liu *et al*, 2005; Chandrani *et al* 2015; 何静等, 2017; 张锦铃等, 2015; 史水平等, 2018; 詹小艳等, 2018)。

基于弱散射原理(Aki, Chouet, 1975; Sato, 1977)的地震波衰减研究表明,  $Q$  值随震中距、震源深度及流逝时间的增加而增大(Cong, Mejia, 2000; Liu *et al*, 2005; Negi *et al*, 2015)。Kumar等(2005)的研究结果进一步显示, 对于同一台站、不同震中范围的尾波记录, 随不同的椭球体平均深度越深,  $Q_0$  值趋势越大, 衰减指数  $\eta$  值趋势越小。也就是说地震波在纵向介质中穿透深度不同而导致不同地震之间的品质因子无法比对。

针对这一问题, 刘希强等(2009)提出了针对不同地震采用不同流逝时间, 实现由散射波波阵面所围成的椭球体具有同一深度的尾波  $Q$  值测定方法。

沂沭断裂带现代中小地震活动呈现出南强北弱、东强西弱的分布格局。为了解该区域介质特性及应力状态, 郭爱香等(1991)基于尾波衰减的研究结果显示, 沂沭断裂带北段  $Q_c$  值高于南段, 认为这一差异似乎与大震的重复间隔有一定的关联。李秉锋等(1989)利用P波频谱分析法得到的沂沭断裂带  $Q_p$  值分布同样是北高南低。近年来, 山东地震台网发展迅速, 沂沭断裂带及其附近地区监测台站由十几个增加到几十个, 监控能力由  $M_L 1.8$  提高到  $M_L 0.5$ , 为获得更精细的区域介质  $Q$  值提供了有利条件。本文选取2010—2017年沂沭断裂带及其附近地区精定位后586个地震的波形资料, 利用改进后的尾波  $Q_c$  值测量方法估算尾波衰减特征, 并探讨其空间分布与地震活动的关系。

## 1 区域构造断裂及应力场分布特征

沂沭断裂带是胶辽断块与鲁西断块的构造边界带, 由近乎平行的5条深大断裂组成, 整体呈NNE向展布。该断裂带晚更新世晚期以来的构造

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2018-04-11.

基金项目: 山东省地震局重点基金(JJ1701)和山东省地震局数字地震学应用团队联合资助.

活动主要集中在东侧的安丘—莒县断裂附近, 曾发生 1668 年郯城 8½ 级地震, 其西侧一系列 NNW 向断裂也是中强地震的主体活动区, 曾发生 1829 年益都 6½ 级地震、1995 年苍山 5.2 级地震。沂沭断裂带向北延伸至渤海中部与 NWW 向燕山—渤海断裂交汇处, 构造格局复杂, 是华北地区 7 级地震复发间隔最短的区域 (图 1)。沂沭断裂带新构造活动期的区域应力状态为 NEE—SWW 向挤压, 但其构造变形沿走向表现不均一。晁洪太等 (1997) 根据松散堆积物特征、断错地貌及断层泥的显微构造标志将沂沭断裂带全新世活断层自北向南划分为安丘段、莒县—郯城段、新沂—泗洪段 3 个独立的破裂段。周翠英等 (2003) 以中小震震源机制解推断出的沂沭断裂带现代构造应力场与华北地区应力场基本一致, 但带内主压应力方向差异明显。在 P 轴方向上安丘段近似为 NWW 向、莒县—

郯城一带为 NE 或 NEE 向, 新沂附近为近 EW 向。其北部的莱州湾及附近海域, 地壳运动以拉张为主, 加上 NW 向燕山—渤海构造带的较强运动产生的局部附加应力场影响, 使该区应力场方向与邻区差异明显。鉴于沂沭断裂带具有明显分段特征, 本文将其由北向南划分为莱州湾及附近海域 (I 区)、潍坊—孟瞳 (II 区)、高桥—郯城 (III 区)、新沂—宿迁 (IV 区) 4 个子区域, 并利用地震波衰减特性研究各子区域中上地壳构造背景和现代应力状态 (图 1)。

## 2 研究方法

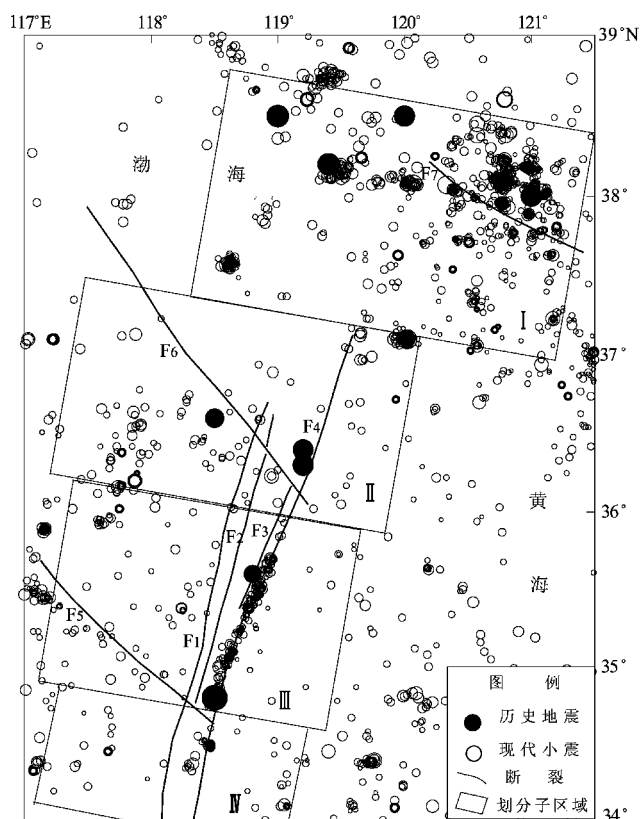
$Q$  和  $\eta$  值的大小反映了地震波在以震源和记录台站为焦点的散射椭球体内传播时的衰减特性。震源距、S 波速度结构、流逝时间的大小决定着椭球体的形状和最大深度。传统尾波流逝时间窗的测定方法是从 2 倍的 S 波走时开始至高于一定背景噪声的信号为止, 但可能导致所得到的  $Q$  和  $\eta$  值的变化是由椭球体的位置或体积不同引起的, 而非孕震过程中介质状态变化引起的。为解决由于不同地震的地震波传播路径的纵深差异所引起的品质因子的变化问题, 刘希强等 (2009) 对传统测量方法进行了改进, 基于适用于 S 波及其尾波的 Sato (1977) 单次散射模型估算  $Q_c$  值:

(1) 取研究区内地壳的平均深度为  $\bar{z}$ , 平均横波速度为  $\bar{v}$ 。

(2) 为有效去除品质因子的深度影响, 假定固定地壳厚度  $Z_m$  后所计算的流逝时间为  $t$ , 相对于 S 波到时, 不同地震的流逝时间窗确定方法为  $t_w = 2t - 2t_s$ 。

(3) 资料窗的起始时间  $t_s$  和震中距  $\Delta$  由区域速度模型和实际测量的到时差 ( $t_s - t_p$ ) 来确定。

(4) 取地震信号均方根值小于背景噪声 (P 波前 5 s 数据) 均方根时所对应流逝时间为垂直向最大流逝时间  $t_{\max}$ 。根据给定  $Z_m$ 、实际震源深度、震中距及 S 波速度计算得到流逝时间  $t$ 。当  $t_{\max} \geq t$  时, 取流逝时间位于  $[t_s, t]$  数据, 将其分割成窗长为 2 s、滑动步长为 1 s 的数据窗, 对信号进行不同带宽滤波后得到各窗不同中心频率的振幅  $A_c(t, f)$ 。通过拟合  $\lg[A_c(t, f)/A_s(f)^2 \cdot k^{-1}(a)]$  与  $t - t_s$  的关系得到拟合直线的斜率  $b$  和误差, 其中



F<sub>1</sub>: 唐吾—葛沟断裂; F<sub>2</sub>: 汤头—沂水断裂; F<sub>3</sub>: 安丘—莒县断裂; F<sub>4</sub>: 昌邑—大店断裂; F<sub>5</sub>: 苍尼断裂; F<sub>6</sub>: 无棣—益都断裂; F<sub>7</sub>: 蓬莱—威海断裂

图 1 沂沭断裂带及其附近地区地震分布及子区域划分  
Fig. 1 The earthquakes distribution and sub-region division in Yishu fault and its nearby areas

$A_s(f)$  为指定频率  $f$  的 S 波最大振幅, 当  $a = t/t_s$  时,  $k(a) = \frac{1}{a} \ln \frac{a+1}{a-1}$ 。

(5) 在指定频段内, 研究不同地震得到的  $Q_c$  和衰减指数  $\eta$  随时间的变化关系。

以 2015 年 12 月 9 日乳山  $M_L 3.1$  地震为例, 介绍使用改进方法计算尾波  $Q_c$  值的全过程。首先依据胶东地区地质构造特点, 确定地壳平均深度为 34 km, 平均 S 波速度为 3.48 km/s; 利用区域一维速度模型和实际测量的直达波到时差  $t_s - t_p = 1.51$  s 计算出震中距为 12.59 km, 流逝时间  $t$  为 10.51 s。其次根据三分之一倍频程谱划分频率带宽, 并在 1~15 Hz 范围内确定了 12 个中心频点, 利用 remez 算法 (刘明等, 2006), 以阻带宽度为 0.1 Hz、通带波动 0.1 dB、阻带最小衰减为 80 dB 的线性相位 FIR 滤波器, 对水平向记录信号进行不同带宽的带通滤波, 并在各滑动窗内得到不同中心频率的振幅  $A_c(t, f)$ 。图 2a, b 分别是乳山台记录 NS 和 EW 向信号的原始波形及以 2.2 Hz, 5.6

Hz, 8.9 Hz 为中心频率的带通滤波波形; 图 2c 为不同频率的尾波  $Q_c$  值, 是由滤波后的地震信号在各滑动窗内的水平向最大尾波振幅, 用非线性拟合算法得到斜率  $b$ , 然后依据  $Q_c = 2\pi f \lg \frac{1}{b}$  计算

出的相应中心频点的尾波  $Q_c(f)$  和置信度为 95% 条件下的测量误差及拟合相关系数; 图 2d 是由 12 个中心频点得到的尾波  $Q_c$  与频率  $f$  之间的幂指数统计关系  $Q_c = 43.097 2 f^{1.061 9}$ , 其中:  $Q_0 = 43.097 2$ ,  $\eta = 1.061 9$ ,  $Q_0$  和  $\eta$  值的 95% 置信误差分别为 6.293 4 和 0.062 6。这样就得到了乳山台至该次地震震源传播路径中介质衰减特征的一个标度值。

### 3 资料处理与结果分析

#### 3.1 资料收集与处理

本文收集了 2010—2017 年沂沭断裂带及其附近地区共 61 个地震台站 (包括江苏、安徽地震台网部分台站) 记录到的数字地震波形资料, 其记

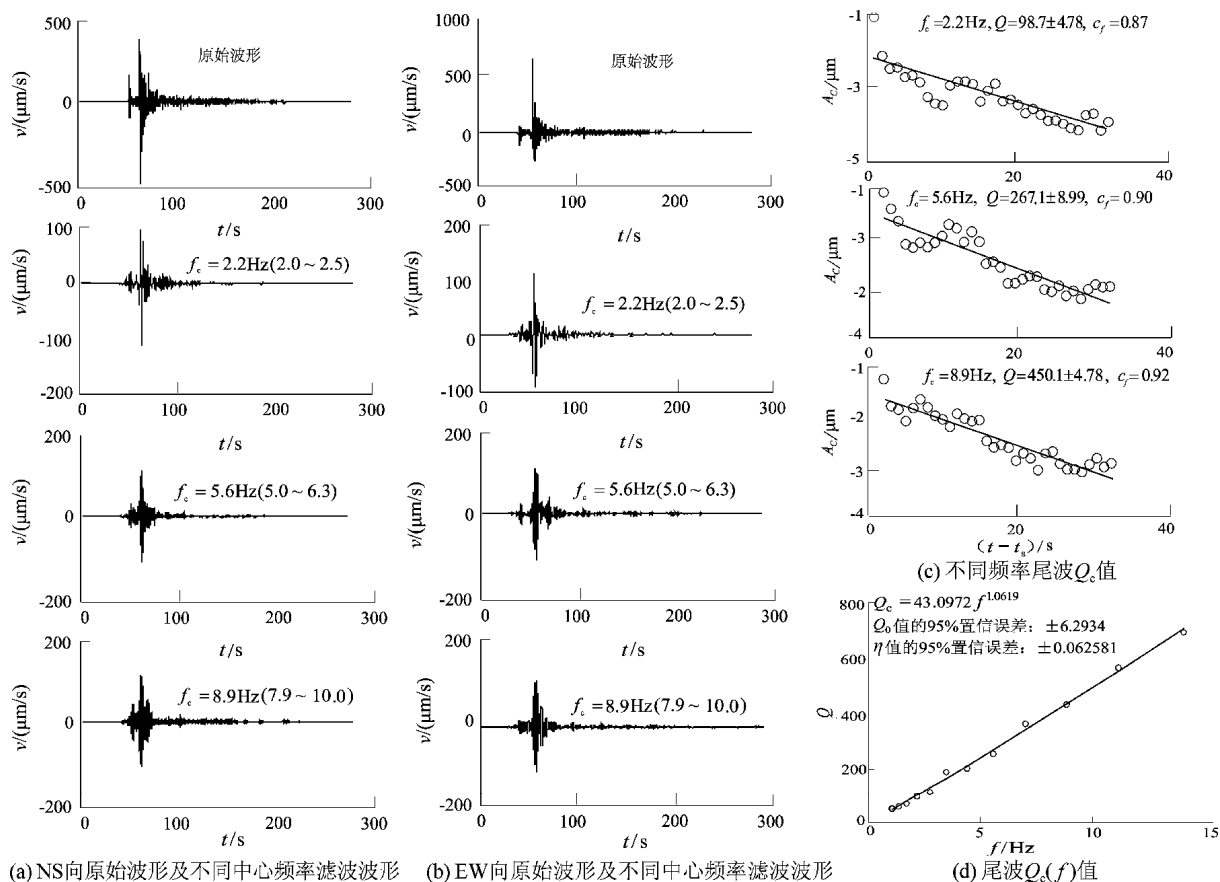


图 2 乳山台记录 2015 年 12 月 9 日乳山  $M_L 3.1$  地震原始波形和带通滤波结果及不同频率拟合品质因子

Fig. 2 The original waveform and band-pass filter results of Rushan  $M_L 3.1$  earthquake on Dec. 9, 2015 and fitting quality factor in different bands recorded by Rushan station

录的地震计自然周期为 1 s、系统采样率为 100 Hz、幅频特性的平坦范围为 1 ~ 20 Hz。其中沂沭断裂带中南段台站覆盖率较高, 平均台间距约 40 km, 其北段至莱州湾因地理原因及地震活动偏弱等因素的影响, 台站布局相对稀疏 (图 3)。为使初至波清晰可辨、尾波部分有足够的发育长度, 选用震源深度为 4 ~ 24 km 的  $M_L 2.0 \sim 4.5$  地震, 其中沂沭断裂带主干断裂及两侧地区震源深度为 8 ~ 21 km 的地震占 71%, 胶东半岛及附近海域震源深度为 5 ~ 15 km 的地震占绝大多数, 因此计算介质品质因子主要反映了研究区中上地壳的尾波衰减特征。

计算过程中仅选用震中距在 100 km 范围内的台站记录, 依据震中位置分别用给定的沂沭断裂带及其附近地区、胶东地区的一维速度模型计算尾波流逝时间  $t$ , 仅保留  $A_c(t, f)$  实际离散值与拟合值相关系数大于 0.8 时得到的  $Q_c(f)$  值。在计算子区域平均  $Q_c$  值及研究区尾波衰减特征空间分布时以台站至震中位置连线的中点作为该条射线得到  $Q_c$  值的空间位置, 用克里格插值做空间扫描。由图 3 可见, 射线辐射路径完全覆盖研究区域。

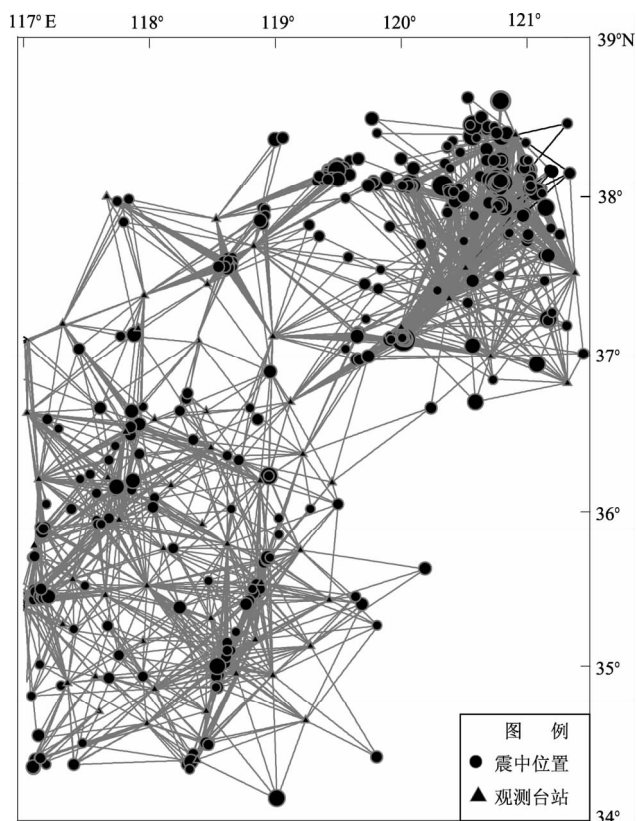


图 3 研究区选用射线路径分布图

Fig. 3 Distribution of selected ray paths in study area

### 3.2 各子区域尾波 $Q_c$ 值空间分布特征

本文讨论频率为 1 Hz 时得到的尾波  $Q_c$  值空间分布特征。由沂沭断裂带及其附近地区尾波衰减特征值可见, 研究时段内各子区域中小地震的平均尾波  $Q_c$  值一致性相对较好, 反映了研究区地壳介质结构具有整体性并受控于统一的应力环境。同时也表现出了同一构造单元内各子区段的构造环境及应力状态的细节差异。

(1) 莱州湾及附近海域 (I 区)。该区记录地震 436 次, 有效射线路径 1 744 条, 获得平均尾波  $Q_c$  值拟合关系为  $Q_c = 34.95 \pm 5.41f^{1.22 \pm 0.117}$ 。如图 4 所示, 该区  $Q_c$  值高于沂沭断裂带其它区段, 并表现出明显的横向不均匀性, 胶东半岛东侧及北部海域测值较西侧偏高, 蓬莱—长岛呈狭长低值分布, 莱州湾内部又表现出相对高值, 这一差异与地壳结构的层析成像和电磁测深资料大体相符。三维 P 波速度成像结果显示, 胶北隆起区及近海古老的结晶基底岩提高了地壳浅层介质的稳定性,

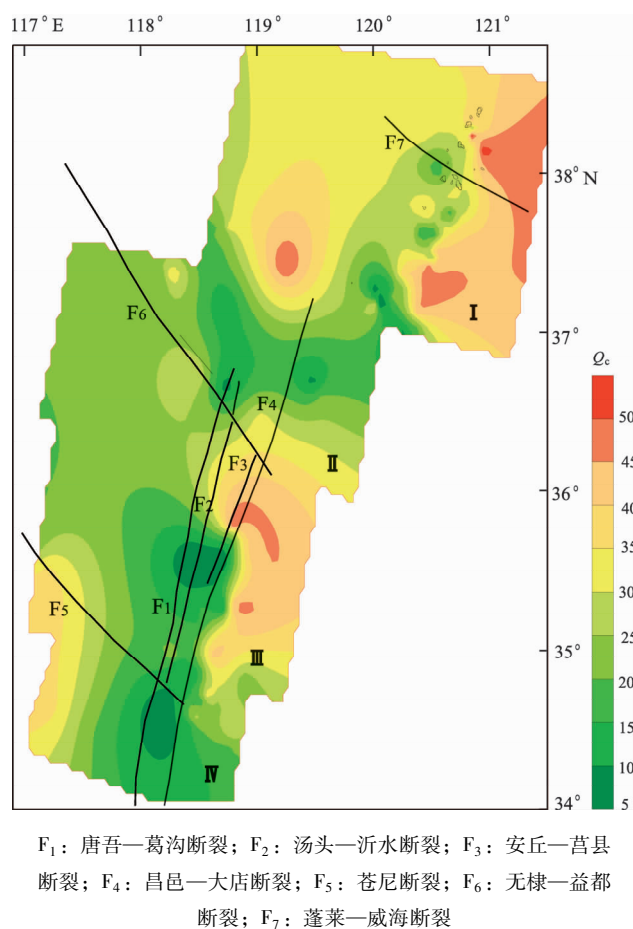


图 4 研究区尾波  $Q_c$  值空间分布

Fig. 4 Coda wave  $Q_c$  values distribution in study area

呈现高速异常;而 4~13 km 处烟台、蓬莱经渤海海峡至辽东半岛却由低速异常体相连(汪晟等, 2017)。莱州湾大地电磁测深结果显示, 沂沭断裂带东支断裂下方存在数十千米的低阻带, 而西支断裂在地壳中、下部为高阻带(胡惟等, 2014)。由此可见, 沂沭断裂带在渤海海域内构造横向差异是客观存在的。研究表明, 断裂下方的低速层往往是壳内易于变形的塑性层, 与其交汇的 NW 向蓬莱—威海断裂不仅控制了地壳浅部及基底断裂的分布格局, 也影响到地壳深部的构造变形(王志才等, 2006), 这种复杂的构造环境使莱州湾及附近海域具有较强的地震危险性。

(2) 潍坊—孟疃段(Ⅱ区)。该区记录地震 30 次, 有效尾波射线路径 146 条, 平均尾波  $Q_c = 23.22 \pm 7.96f^{1.02 \pm 0.416}$ 。由图 3 可知, 该区域地震活动稀疏, 中小地震多由 NW 向分支断裂的活动引起,  $Q_c$  值总体低于莱州湾及附近海域(Ⅰ区), 并在东营—潍坊一带显示出明显的低值。莱州湾内沂沭断裂带的构造格局与山东内陆一致, 与其南侧的东营—潍坊形成华北盆地的一个拗陷中心, 远震 P 波层析成像显示地壳介质为低速异常, 并在地壳中下部向南延伸, 分割了鲁西和胶东半岛南部的高速异常(李志伟, 2006)。穿过潍北凹陷的深部地壳电性结构显示, 断裂带内 5~20 km 深处为巨厚的异常低阻层, 其东侧的白垩纪胶莱盆地上地壳中、下部同样为巨厚的低阻层(胡惟等, 2014), 与该区段  $Q_c$  值空间分布结果一致。研究表明, 沂沭断裂的破碎带由南向北逐渐变窄, 在这一段表现为揉皱状态, 其中、下层地壳介质明显破碎, 可能是由于在中生代之前及中生代沉积过程中断裂带有过强烈活动, 仍存在的破碎状态使其不易聚集应变能而使地震活动减弱(苏道磊等, 2016; 范小平等, 2017)。也有研究认为该处断裂内部整体表现为低阻带, 这类软弱低阻层易于滑动, 吸收位移, 因而很难积累应力, 从而成为完全的蠕滑区且不易诱发地震(胡惟等, 2014; 刘保金等, 2015)。

(3) 高桥—郯城段(Ⅲ区)。该区记录地震 86 次, 有效射线路径 1 062 条,  $Q$  值拟合关系为  $Q_c = 25.89 \pm 7.24f^{1.48 \pm 0.455}$ 。中小地震集中发生在安丘—莒县断裂附近, 为沂沭断裂带现代中小地震最活跃的地区。其  $Q_c$  值空间分布显示, 从莒县—宿迁沿沂沭断裂带主干断裂表现出大范围低  $Q_c$

值区域, 其两侧的鲁西隆起区及鲁东地区则为高值区域。从构造来看, 该段为沂沭断裂带中地壳扭曲变形最强烈的区段, 多期次断层的活动使该段中、下地壳中的岩石变得破碎, 并伴有热液充填其中, 其东侧分支断裂附近地表地层主要为白垩纪及新近纪以来的沉积底层, 速度较低, 而西侧主要为古生代地层, 速度同样较低。深地震测深结果表明, 鲁西隆起为稳定的高速块体结构, 其高速异常特征一直延续到莫霍面附近(吕子强等, 2013; 胥颐等, 2016)。沂沭断裂带东侧的高  $Q_c$  值区域位于苏鲁超高压变质岩带, 其波速特征主要表现在上地壳顶部的高速层。深部电测深结果同样显示鲁西隆起区地壳为高阻体, 沂沭断裂带内部则为高、低阻交错, 电性变化复杂, 而鲁东隆起区富含低导层(张继红等, 2010)。由此可见, 计算获得的  $Q_c$  值所反映的地壳韧性层介质衰减特征与区域构造是相吻合的, 作用于此区域的应力目前没有表现出明显调整迹象, 可能仍会以中小地震活动为主。

(4) 新沂—宿迁段(Ⅳ区)。该区记录地震 34 次, 有效射线路径 178 条, 平均尾波  $Q_c = 21.12 \pm 6.61f^{1.14 \pm 0.347}$ 。该区域现代地震活动较弱, 从  $Q_c$  值空间分布来看, 其延续了高桥—郯城段的分布特征, 沿主干断裂走向  $Q_c$  值明显偏低, 断裂东西两侧表现出高值, 且东侧低于西侧, 低值区域向东南地区有所延展。地壳速度结构结果显示, 新沂—宿迁段为相对低速段, 没有发生过大地震, 现代小震也较少, 而断裂带外西侧高于东侧, 西侧徐州附近为古生代地层, 速度略高(熊振等, 2016)。遥感与重力多源信息研究的结果显示郯城—嘉山断陷盆地产生重力低异常现象, 断裂带两侧表现为条带状重力高异常现象(姜文亮等, 2011)。由此可见重力异常分布与速度结构及  $Q_c$  值空间分布十分相似, 反映了块体单元分区及物性差异。沂沭断裂带新沂以南地区地壳断裂不明显, 地表破裂程度趋于减弱, 由于缺失中、下地壳低速异常体, 地震活动水平偏弱。

诸多研究显示, 大地震发生前随着应力增强, 震中区附近  $Q$  值显著升高, 这是因为在高应力状态下岩石裂隙闭合, 介质的完整性相对较好, 从而降低了地震波的散射和吸收能力, 因此尾波衰减速率降低而  $Q$  值变大。震后震源体介质应力释放, 岩石破碎, 渗入裂隙的流体增强了地震波的

损耗,相应  $Q$  值就会变小。分析沂沭断裂带 4 个分区的尾波  $Q_e$  值分布与地震活动关系发现,莱州湾附近海域 (34.95)、高桥—郯城段 (25.89) 尾波  $Q_e$  值均略高,现代中小地震密集。2010 年以来莱州湾及附近海域以中小地震或震群活动为主,2013 年以来环渤海地区  $M_L \geq 4.0$  地震集中增强,且该区域 1548 年曾发生过渤海 7.0 级强震,是具有发生强震构造背景和孕震能力的区段。高桥—郯城段现代以频繁小震活动为主,其 NW 向分支断裂 1995 年发生过苍山 5.2 级地震。据推断 1668 年郯城 8 $\frac{1}{2}$  级大震就发生在该段,强震使震中附近地壳介质出现较高级别的破裂,导致介质稳定性变弱,并且沂沭断裂带为直立、深大超壳断裂,上地幔热流上涌,致使岩石圈变薄而不易于积累应变能,使断层以蠕滑方式释放能量 (杨从杰等, 2016; 林吉炎等, 2014)。潍坊—孟瞳段 (23.22)、新沂—宿迁段 (21.12) 尾波  $Q_e$  值均较低,现代小震活动稀疏。公元前 70 年潍坊—孟瞳段发生过安丘 7.0 级地震,距今已 2 000 多年,而新沂—宿迁段历史上未曾发生过大地震,并且断裂在这 2 个区段的变形相对较弱。依据地震活动特点及断裂带上破裂空段原则认为新沂—宿迁段可能处于应力的闭锁状态,是未来可能发生强震的区段 (李家灵等, 1994)。但从整体来看,沂沭断裂带尾波  $Q_e$  值北边 2 个区段高于南边的 2 个区段,因此北段所承载的应力水平相对高于南段,发生地震的危险性也略高。

## 4 结论

通过对 2010—2017 年沂沭断裂带及其附近地区  $M_L \geq 2.0$  地震的尾波  $Q_e$  值空间分布特征进行分析研究,认为:

(1) 沂沭断裂带及其附近地区  $Q_e$  值整体性较好,呈现北高南低的特点。同时该断裂也表现出明显的分段特征,即莱州湾及附近海域 (I 区) 平均尾波  $Q_e$  值最高 (34.95), 其次是高桥—郯城段 (III 区) (25.89), 略高于潍坊—孟瞳段 (II 区) (23.22) 和新沂—宿迁段 (IV 区) (21.12), 说明地壳深部构造复杂、现代中小地震活动水平相对较高的区域尾波  $Q_e$  值相对偏高。

(2) 地震波衰减率特征主要反映了研究区中、上地壳的介质信息,通过与相关区段地壳速度结

构、大地电磁深部电性结构及地球物理场的观测结果对比分析,认为本文所获得的尾波  $Q_e$  值空间分布特征与研究区构造特征、地质环境以及地震活动性相符,与郭爱香等 (1991) 和李秉锋 (1989) 研究结果基本一致。 $Q_e$  空间分布图能明显反映出苏鲁超高压变质岩带及历史强震后地壳介质破碎带的展布,并且沂沭断裂带作为构造区间的边界接触带是明显的,因此认为在其两侧  $Q_e$  值变化较大的区域附近易于发生中强地震。

(3) 改进后的尾波  $Q_e$  值测定方法克服了地震散射波由于穿透深度不同对测量结果的影响,但计算结果的精度仍与台网的分布密度、空间范围的划分密切相关。在射线样本充足的条件下,采用与孕震尺度大小相当的小台网或近台资料,才能更真实地反映区域介质应力状态的动态变化过程。

## 参考文献:

- 晁洪太,李家灵,崔昭文,等. 1997. 郯庐断裂带潍坊—嘉山段全新世活断层的活动方式与发震模式 [J]. 地震研究, 20 (2): 218-226.
- 陈颙,黄庭芳,刘恩儒. 2009. 岩石物理学 [M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 496.
- 范小平,何奕成,王俊菲,等. 2017. 郯庐断裂带中南段地壳介质散射强度 [J]. 地球物理学报, 60 (5): 1725-1734.
- 郭爱香,刁守中,王保平. 1991. 沂沭断裂带近期介质品质因子  $Q$  值特征 [J]. 地震, (1): 31-35.
- 何静,吴庆举,李永华,等. 2017. 天然地震  $L_g$  波衰减研究进展及其在中国大陆地区的应用 [J]. 地球物理学进展, 32 (2): 466-475.
- 胡惟,朱光,严乐佳. 2014. 探路断裂带中段地震活动性与深部地壳电性结构关系的探讨 [J]. 地质评论, 60 (1): 80-90.
- 姜文亮,张景发,陈丁. 2011. 利用遥感、重力多源信息研究郯庐断裂带苏—鲁段构造特征 [J]. 地球学报, 32 (2): 143-153.
- 李秉锋,郭英琪,郭爱香,等. 1989. 沂沭断裂带及其附近小震应力降和介质  $Q$  值 [J]. 地震学刊, (3): 19-37.
- 李家灵,晁洪太,崔昭文,等. 1994. 郯庐活断层的分段及其大震危险性分析 [J]. 地震地质, 16 (2): 121-126.
- 李志海,胥颐,郝天珩,等. 2006. 环渤海地区的地震层析成像与地壳上地幔结构 [J]. 地球物理学报, 21 (2): 370-378.
- 林吉炎,嘉世旭,段永红,等. 2014. 郯庐断裂带中段东西两侧地壳结构差异及构造意义研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 34 (5): 50-55.
- 刘保金,鄧少英,姬计法,等. 2015. 郯庐带中南段的岩石圈精细结构 [J]. 地球物理学报, 58 (5): 1610-1621.
- 刘明,徐洪波,宁国勤. 2006. 数字信号处理原理与算法实现 [M]. 北京:清华大学出版社, 207-212.
- 刘希强,石玉燕,曲均浩,等. 2009. 品质因子的尾波测定方法讨论



- [J]. 中国地震, 25(1): 11–23.
- 吕子强, 郑建常, 刘希强. 2013. 郯庐断裂带中段重力场变化及地震活动特征[J]. 地球物理学进展, 28(6): 2838–2844.
- 史水平, 周斌, 黄树生, 等. 2015. 广西平果震群尾波衰减特征研究[J]. 中国地震, 31(4): 710–720.
- 苏道磊, 范建柯, 吴时国, 等. 2016. 山东地区地壳 P 波三维速度结构及其与地震活动的关系[J]. 地球物理学报, 59(4): 1335–1349.
- 汪晟, 胥颐, 孟晓春. 2017. 渤海海峡及周边区域地壳结构的层析成像特征[J]. 地球物理学报, 60(1): 112–122.
- 王志才, 邓起东, 杜宪宋, 等. 2006. 莱州湾海域探路断裂带活断层探测[J]. 地震学报, 28(5): 493–503.
- 王志伟, 符力耘, 张艳, 等. 2018. 龙马溪组页岩数字岩芯超声响应数值模拟级散射特征分析[J]. 地球物理学报, 61(3): 1069–1082.
- 熊振, 李清河, 张元生. 2016. 郯庐断裂带鲁苏皖段地壳速度结构的分段特征及其地质意义[J]. 地球物理学报, 59(7): 2433–2443.
- 胥颐, 汪晟, 孟晓春. 2016. 渤海海域郯庐断裂带的地震层析成像特征[J]. 科学通报, 60(8): 891–900.
- 杨从杰, 李清河, 王俊, 等. 2016. 郯庐断裂带中段中上地壳介质非均匀性[J]. 地震学报, 38(1): 29–40.
- 詹小艳, 王恒知, 王俊, 等. 2018. 基于波谱包络特征的地震事件检测[J]. 地震研究, 41(2): 258–263.
- 张继红, 赵国泽, 肖马斌. 2010. 郯庐断裂带中段(沂沭断裂带)电性结构研究与孕震环境[J]. 地球物理学, 53(3): 605–611.
- 张锦玲, 朱新运, 马起杨, 等. 2018. 应用 Sato 模型探究宁夏区域尾波  $Q$  值特征[J]. 地震, 38(4): 11–18.
- 周翠英, 华爱军, 蒋海昆, 等. 2003. 以格点尝试法求取的山东地区现代中小地震震源机制解[J]. 东北地震研究, 19(1): 1–11.
- Aki K, Chouet B. 1975. Origin of coda waves: Source, attenuation and scattering effects[J]. Journal of Geophysical Research, 80(32): 3322–3342.
- Chandrani S, Safarjia M, Sagar S, et al. 2015. Study of time dependence coda  $Q$  in the Andaman Islands using the aftershocks of the 2002 earthquake ( $M_w 6.5$ ) [J]. Natural Hazards, 75(1): 779–793.
- Cong L J, Mejia M B J. 2000. Attenuation dispersion of P waves in near the New Madrid seismic zone[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 90(3): 679–689.
- Giampiccolo E, Tusa G, Langer H, et al. 2002. Attenuation in Southeastern Sicily (Italy) by applying different coda methods[J]. Journal of Seismology, 6(4): 487–501.
- Kumar N, Parvez I A, Virk H S. 2005. Estimation of coda wave attenuation for NW Himalayan region using local earthquakes[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 151(3): 243–258.
- Liu X Q, Sun Q W, Hong L I, et al. 2005. Variation of  $Q$  value before and after the 1999 Xiuyan, Liaoning Province,  $M = 5.4$  earthquake on the basis of analysis of P waves[J]. Acta Seismologica Sinica, 18(5): 510–520.
- Das, R. Mukhopadhyay S, Singh R K, et al. 2018. Lapse time and frequency – dependent coda wave attenuation for Delhi and its surrounding regions[J]. Tectonophysics, 738(1): 51–63.
- Negi S S, Paul A, Joshi A, et al. 2015. Body Wave Crustal Attenuation Characteristics in the Garhwal Himalaya, India[J]. Pure and Applied Geophysics, 172(6): 1451–1469.
- Sato H. 1977. Single isotropic scattering model including wave conversions: Simple theoretical model of the short – period body wave propagation[J]. Earth Planets & Space, 25(2): 163–176.

## Characteristics of Coda Wave Attenuation in Yishu Fault and Its Adjacent Area

LI Xia, LIU Xiqiang, LI Xiaohan, ZHAO Jinhua

(Shandong Earthquake Agency, Jinan 250102, Shandong, China)

### Abstract

According to the characteristics of the tectonic fault and stress field orientation in the Yishu fault zone and its adjacent area, we divided the study area into four sub-areas. Then we calculated the  $Q_c$  value of  $M_L \geq 2.0$  earthquakes in each sub-areas from 2010 to 2017 by the improved  $Q_c$ -value measurement method, and studied the temporal and spatial distribution characteristics. The results show that: ①The  $Q_c$  value of the coda wave ( $Q_c$  value at 1 Hz) of Yishu fault changes a little overall, but the segmentation characteristics is significant, that is the average  $Q_c$  value (34.95) in Laizhou Bay and its adjacent sea areas is significantly higher than that of other sections. The average  $Q_c$  value of the Weifang-Mengtuan section (23.22), Xinyi-Suqian section (21.12) is relatively low; ②The spatial distribution of the coda wave  $Q_c$  value is closely related to the structural characteristics of the regional crustal medium, which clearly revealed the attribution of Yishu fault as the structural boundary zone.

**Keywords:** coda attenuation; method improvement; spatial distribution; Yishu fault