

鲁豫交界地区尾波 Q_c 值分析研究*苏道磊^{1,2}, 刘财¹, 刘希强³, 周彦文³, 董晓娜³

(1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026; 2. 济南市地震局, 山东 济南 250099; 3. 山东省地震局, 山东 济南 250014)

摘要:该文对濮阳台记录的21次地震进行了地震波衰减研究,讨论了地球介质品质因子随频率变化的关系;利用不同地震采用不同流逝时间的尾波品质因子测定方法,有效去除了由于不同地震或同一地震的地震散射波在纵向介质中穿透深度的不同而导致对品质因子测量结果的影响,从而有利于扑捉到品质因子的异常变化特征与地震孕育过程的关系。利用改进后的模型,对鲁豫交界地区尾波值进行了计算,得到了该地区品质因子随频率的变化关系和区域介质衰减的时间变化特征。

关键词:地球介质;品质因子;尾波;测量方法;特征

中图分类号:P315.6

文献标识码:A

0 引言

品质因子 Q 值是描述地球介质特性的主要参数。由于应力变化造成的岩石性质的变化,如裂隙状态、流体迁移、热物质上涌等,都可造成品质因子 Q 值的变化。由于地震波在介质中的衰减与 Q 值直接相关,因此通过天然地震研究地球介质的 Q 值,以进一步了解地球内部介质的特性是地震学的主要研究方向之一。

地震波能量耗损包括内摩擦和散射两个方面。因此,相应的 Q 值也由内摩擦和散射两部分组成。内摩擦意指地震波在传播过程中,介质在短暂的应力作用下,其微粒(质点)运动需克服微粒之间的摩擦阻尼,从而使地震波的能量耗损,相应的衰减称为固有衰减或吸收衰减;散射“耗损”意指由于地球介质不均匀,地震波在传播过程中遇到许多散射体,波发生散射,使地震波能量在波场中重新分配,故在台站接收到的仅是原来波的能量的一部分,相应的衰减称为散射衰减。根据研究, Q 值为频率的函数,通常表述为 $Q_c = Q_0 f^n$ 。研究发现,地壳和上地幔横波品质因子的地区性变化是显著的,稳定地区的品质因子测值明显比构造活动地区高。

体波衰减和面波衰减均可表征地球介质的品质因子 Q 值,但研究证明,S 波尾波对地震构造应力所导致的破裂、温度变化非常敏感,能提供区域介质物性变化的综合信息。国内外有大量研究利用尾波监视介质性质和应力场随时间的变化,并发现了地震前后尾波 Q_c 值随时间的变化与特征地震频次具有强的正相关性。尾波 Q_c 值与构造活动的相关性显示出一定的前兆特征,因此,采用合理的物理模型对特定地区的尾波衰减进行研究,具有重要的理论和实际意义。

地震在孕育过程中震源和介质性质或多或少要发生变化,通过震源、介质参数的测量可望捕捉到地震前兆异常。但另一方面,不同地震的地震波传播路径或范围的差异也会引起震源、介质参数的“异常”变化。如何通过改进测量方法,提高测量精度分离出假“异常”信息,有效地分辨出地震在孕育过程中震源和介质参数的异常变化信息是今后努力要解决的课题。基于此,该文将改进后的测量尾波 Q_c 值的方法应用在鲁豫交界地区,研究得到该区品质因子随频率的变化关系和区域介质衰减的时间变化特征与地震孕育过程之间的关系。

* 收稿日期:2010-08-14;修订日期:2010-09-16;编辑:程光锁

作者简介:苏道磊(1980—),男,山东泰安人,在读硕士研究生,主要从事地震波处理与应用的研究;E-mail:sulei810212@163.com。

1 尾波品质因子的测量方法及其改进

1.1 基于 Sato 单次散射模型的测量方法

在众多测量 Q 值的方法中^[1], 根据体波来测量 Q 值的振幅衰减和频散衰减是目前普遍采用的方法。该文根据 Sato 的单次散射模型^[2], 指定频率 f 和流逝时间 t 的尾波均方根振幅 $A(f, t)$ 与品质因子的关系可表示为^[3]:

$\log[A(f, t)/A_s(f)^2 \cdot K^{-1}(\alpha)] = \ln C(f) - \log e \cdot 2\pi f / Q_c(t - t_s)$ (1)
式中: $A_s(f)$ 指指定频率 f 的 S 波最大振幅, 当 $\alpha = t/t_s$ 时, 函数 $K(\alpha) = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{\alpha + 1}{\alpha - 1}$ 。上述公式适用条件是 S 波及其尾波。许多研究表明, 品质因子的大小与流逝时间具有明显的相关性。流逝时间越长, 品质因子越大; 品质因子随震中距和震源深度增加而变大, 与震级无明显关系^[4]。

当震源和台站不在同一点上时所测定的尾波反应的 $Q_c(f)$ 是以震源和台站为焦点的椭球体里介质的平均性质。椭球体的模型可做如下假设: x, y, z 表示空间坐标, r 表示震源距, β 为平均横波波速, Δ 和 h 分别表示震中距和震源深度, z_m 表示散射波波阵面围成的椭球体。散射椭球体的大小可表示为^[5]:

$$\frac{x^2}{\beta^2 t^2 / 4} + \frac{y^2}{\beta^2 t^2 / 4 - r^2 / 4} + \frac{z^2}{\beta^2 t^2 / 4 - r^2 / 4} = 1 \quad (2)$$

从公式(2)中可知, 散射椭球的长半轴等于 $\beta t / 2$, 其他两个短半轴等于 $\sqrt{(\frac{\beta t}{2})^2 - \frac{r^2}{4}}$ 。刘希强等^[6]推导出各种情况下椭球体的体积, 进而得出了最大流逝时间 t_{\max} 与散射椭球体深度 z_m 、震源深度 h 和震中距 Δ 之间的解析关系:

$$t_{\max} = \frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{4 \times (z_m - \frac{h}{2})^2 \times (h^2 + \Delta^2)}{\Delta^2} + h^2 + \Delta^2} \quad (3)$$

对近似相同震中距的地震而言, z_m 越深, 散射椭球体体积越大, 尾波流逝时间就越长; 对不同震中距的地震而言, 只有有条件的选取不同的流逝时间才能保证一致的散射椭球体深度。因此, 不同的流逝时间对应于不同散射椭球体的体积, Q_0 和 η 值的大小反映了以震源和记录台站为两个焦点的散射椭球体范围内介质品质因子的地震波衰减特性。

1.2 测量方法改进

基于上述研究, 刘希强等对传统测量方法进行

改进。即固定椭球体的深度, 不同地震选取不同流逝时间窗的话, 可解决由于不同地震的地震波传播路径的纵向差异而引起品质因子的差异变化问题。改进的测量方法主要是确定了 z_m 体积、应用了新的划分频率带宽和确定中心频率的方法^[7,8], 提出了新的流逝时间选取的方法, 以确定各数据窗所对应不同中心频率的振幅 $A(t, f)$ 。

对 $\log[(A_c(t, f)/A_s(f))^2 \cdot K^{-1}(t/t_s)]$ 随 $t - t_s$ 变化曲线进行拟合得到斜率 b 和误差, 拟合值与实际离散值的相关系数应大于 0.80。根据 $Q_c = 2\pi f \log e / b$ 计算得到品质因子, $Q_c = Q_0^n$ 即品质因子随频率的变化则根据高斯—牛顿非线性最小二乘拟合方法对测量的 $Q(f)$ 进行拟合, 得到各系数, 进而给出幂指数拟合曲线。

2 资料

2.1 濮阳台周围地震活动概况

自 1996 年以来, 河南濮阳、范县地区出现的 2 级以上中小地震集中区, 小震活动经历了两次增强过程, 第一次是 1997 年下半年至 1999 年上半年, 期间于 1998 年 12 月和 1999 年 5 月在区内发生了两次 4.0 级地震; 第二次增强始于 2002 年, 期间于 2003 年 4 月 27 日、2005 年 4 月 27 日和 2006 年 4 月 9 日发生了 4.0、4.3 和 4.7 级中等地震。2006 年 4 月 9 日 4.7 级地震后, 2007 年该区地震活动明显减弱, 但 2007 年 11 月至今, 该集中区发生 2 级以上地震 29 次, 其中 3.0~3.9 级地震 7 次, 地震活动明显增强, 表明该集中区进入了新的加速发展阶段。

2.2 濮阳地震台观测记录

濮阳地震台测震观测始于 1992 年 9 月, 位于濮阳市区胜利路、昆吾路交叉口西南侧, 东经 $115^\circ 00' 14''$, 北纬 $35^\circ 45' 54''$, 高程 55 m。2003 年底, 濮阳市地震台进行了数字化改造。濮阳地震台深井观测层位为 320m, 观测岩性为粉细砂。观测系统由 EDAS-24IP 型数据采集器和 FSS-3DBH 型深井地震计组成。系统采样率在 2007 年 7 月后调整为 100 Hz, 之前为 50 Hz, 地震计的自然周期为 1 秒, 系统频带宽度 1~40 Hz, 配有 GPS 接收机, 受时精度为 $1 \mu\text{s}$ 。

为提高尾波品质因子测定的准确性, 该文选取濮阳地震台的数字化记录 21 条。濮阳地震台距离该集中区较近, 所有地震记录均为地方震记录, 震相

清晰。所选 21 条 2.0 级以上地震记录自 2004 年 8 月—2010 年 3 月,其中 2.0~2.9 级地震 6 次,3.0~3.9 级地震 12 次,4.0~4.9 级地震 3 次,最大震级为 2006 年 4 月 9 日 4.6 级地震。21 个地震均位于濮阳地震集中区,震中距最大为 42.85 km,最小为 23.04 km,满足品质因子测定对地震记录的要求。震源深度最大为 25 km,最小为 5 km,无震源深度记录的地震的震源深度均按 10 km 进行计算(图 1)。

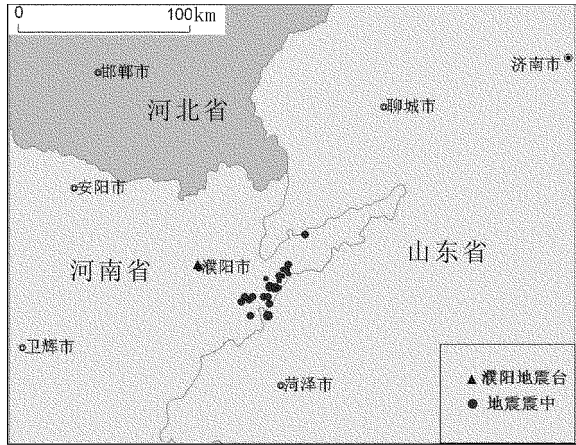


图 1 濮阳地震台位置及测定品质因子所选用的地震震中分布图

3 结果分析

为了更有利于提高测量结果的可比较性,该文未采取根据台网确定的发震时刻来确定每次地震的 S 波走时和尾波流逝时间,而是根据表 1 的一维区域速度模型和实际量取的直达 S 波与 P 波的到时差来确定 S 波走时和尾波流逝时间。利用改进后的品质因子测量方法,依次对上述 21 次地震进行了计算。根据鲁西南地区地壳一维速度模型和每个地震直达 S 波与 P 波的到时差,计算了地震震中距、S 波走时和尾波流逝时间。图 2,3 分别给出了 2010 年 3 月 25 日 3.4 级地震垂直向震相和水平向尾波波相。

表 1 鲁西南地区地壳一维速度模型

地壳层位	P 波速度 (km/s)	S 波速度 (km/s)	地壳分层 厚度(km)
1	4.40	2.57	5.2
2	5.96	3.49	13.2
3	6.62	3.87	11.9
Moho	8.03	4.70	

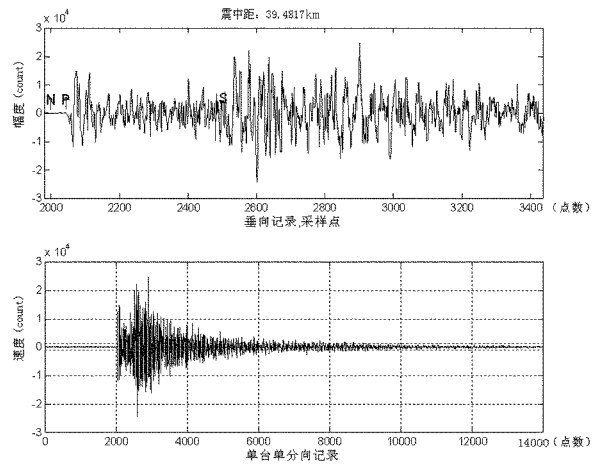


图 2 2010 年 3 月 25 日 3.4 级地震垂直向震相记录

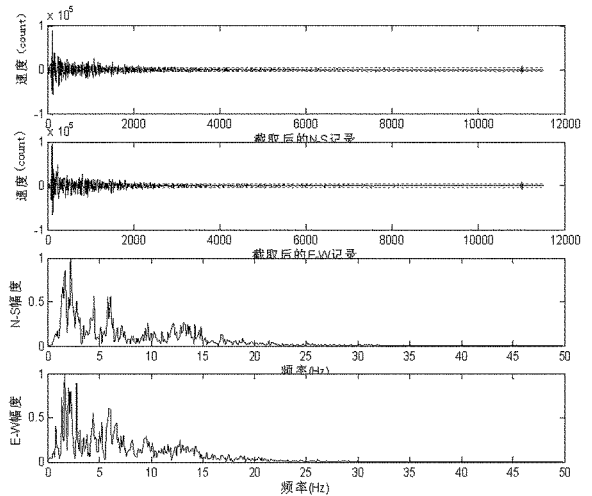


图 3 2010 年 3 月 25 日 3.4 级地震水平向尾波记录

3.1 品质因子区域总体特征

根据三分之一倍频程谱来划分频率带宽和确定中心频率,对每个地震的水平向分量做带通滤波处理,同时计算 $Q_c(f)$ 。在滤波地震图上,从直达 S 波开始,取一系列长度为 2s 的数据窗,每窗重复 1 s,根据公式(1)计算 $A_c(t, f)$,应用非线性拟合算法拟合得到不同中心频率的品质因子、计算误差及其相关系数。品质因子与频率之间满足幂指数关系,计算得到了每次地震尾波的品质因子和相关参数,详见表 2。由 21 次地震拟合得到了品质因子与频率之间的统计关系为 $Q_c = 28.7f^{1.15}$,其中 $Q_0 = 28.7, \eta = 1.15, Q_0$ 和 η 值的 95% 置信误差分别为 8.65 和 0.13。图 4 所示为 Q 值与频率的幂指数拟合曲线。

表2 濮阳台记录的地震及尾波品质因子计算参数和结果

序号	发震时刻 (年月日时分秒)	纬度 (度)	经度 (度)	震级	深度 (km)	震中距 (km)	S波起始 时间(s)	流逝时间 窗(s)	Q_0	η 值
1	20040805025807	35.62	115.27	3.4	19	27.89	10.03	18.8	10.39	1.55
2	20050127231629	35.63	115.25	3.0	10	32.78	10.41	19.1	36.85	1.17
3	20050427102647	35.55	115.37	4.0	5	40.37	12.44	18.5	63.20	0.94
4	20060129122042	35.61	115.23	3.4	22	23.04	9.32	21.8	40.17	0.93
5	20060409172021	35.67	115.41	4.6	12	31.91	10.32	18.8	69.10	0.69
6	20061219134620	35.63	115.35	3.1	13	41.08	12.97	15.4	89.40	0.67
7	20070314210907	35.55	115.28	3.3	25	31.49	11.59	15.6	39.62	0.92
8	20070712123120	35.63	115.37	3.4	8	38.28	11.90	18.0	24.27	1.24
9	20071028085555	35.67	115.38	3.2	12	37.93	12.01	16.7	14.95	1.36
10	20080622213239	35.67	115.40	2.3	8	38.94	12.09	17.8	48.09	1.00
11	20080826153812	35.77	115.48	3.6	13	39.12	12.42	16.0	58.06	0.68
12	20080915173457	35.73	115.48	2.6	10	42.85	13.29	16.0	14.22	1.47
13	20090311184113	35.75	115.47	3.0	7	40.76	12.59	17.6	37.53	1.11
14	20090321115728	35.75	115.45	2.2	6	40.01	12.35	18.2	12.35	1.58
15	20090615222703	35.70	115.43	2.4	8	41.16	12.73	17.2	16.57	1.36
16	20090623151400	35.72	115.43	2.3	6	34.88	10.85	19.7	38.22	0.92
17	20090803134530	35.63	115.29	3.1	8	30.92	9.79	20.3	17.44	1.35
18	20090804041242	35.71	115.36	2.5	8	31.46	9.93	20.2	13.33	1.56
19	20091027080600	35.72	115.43	3.9	10	38.74	12.11	17.1	8.17	1.83
20	20100115171551	35.75	115.32	4.2	10	30.01	9.63	20.1	16.64	1.45
21	20100325042101	35.70	115.44	3.4	10	35.25	11.12	18.2	6.97	2.01

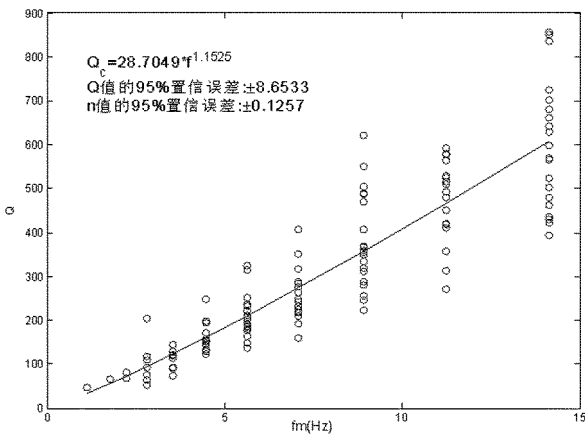


图4 不同地震不同频率 Q 值分布及 Q 值与频率的幂指数拟合曲线

从单个地震的 Q_0 来看,濮阳地区品质因子变化存在一定的不稳定性,且存在较大的差距。品质因子最大为 89.40,最小为 6.97。分析认为品质因子变化较大主要是由该地区介质的不均匀性引起的。根据 21 次地震拟合得到的 Q_0 值为 28.7,反应了该地区地震波衰减的平均特性。刘希强等(2009)对 2003 年 6 月至 2005 年 2 月 19 次青岛崂山地震序列进行拟合,得到了品质因子与频率之间的统计关系:
 $Q_c(f) = (26.4 \pm 4.2) f^{1.21 \pm 0.067} (1\text{Hz} \leq f \leq 15\text{Hz})$

已有研究表明,构造活动强的地区为低 Q_c 地区,构造活动相对稳定的地区为高 Q_c 值背景区。濮阳地区品质因子与青岛崂山地区相当,表明两地区构造活动强度相似。

3.2 品质因子随时间的变化关系

该文在得出该区域尾波衰减总体特征的基础上,还计算了不同频段品质因子随时间的变化关系,结合地震活动实况,初步分析了该区地震活动水平与不同频段尾波 Q_c 值的对应关系,得出区域构造应力随时间变化特征,使 Q_c 这一物理量能够直接应用于该地区地震分析预报。该地区对低频成份的地震波散射反映较弱,高频成份的地震波散射反映较好,故选取拟合结果较好的高频成分的 Q 值得出了 6 个频段品质因子随时间的变化关系(图 5)。

对于 Q_c 值的变化机理,Aki(2004)认为,由地震断层滑动加载的地震活动可能是脆性层局部应力源引起的; Q 值变化与频率的依赖关系可能主要来源于断裂引起的散射衰减,破裂的增加会导致 Q_c 值减小,反之破裂的愈合会导致 Q_c 值变大。通过对该区域不同频段品质因子时间变化序列分析发现,地震活动水平增强的过程与地震应力水平增强的过程具有较好的一致性。2009 年以来,该区中小地震活

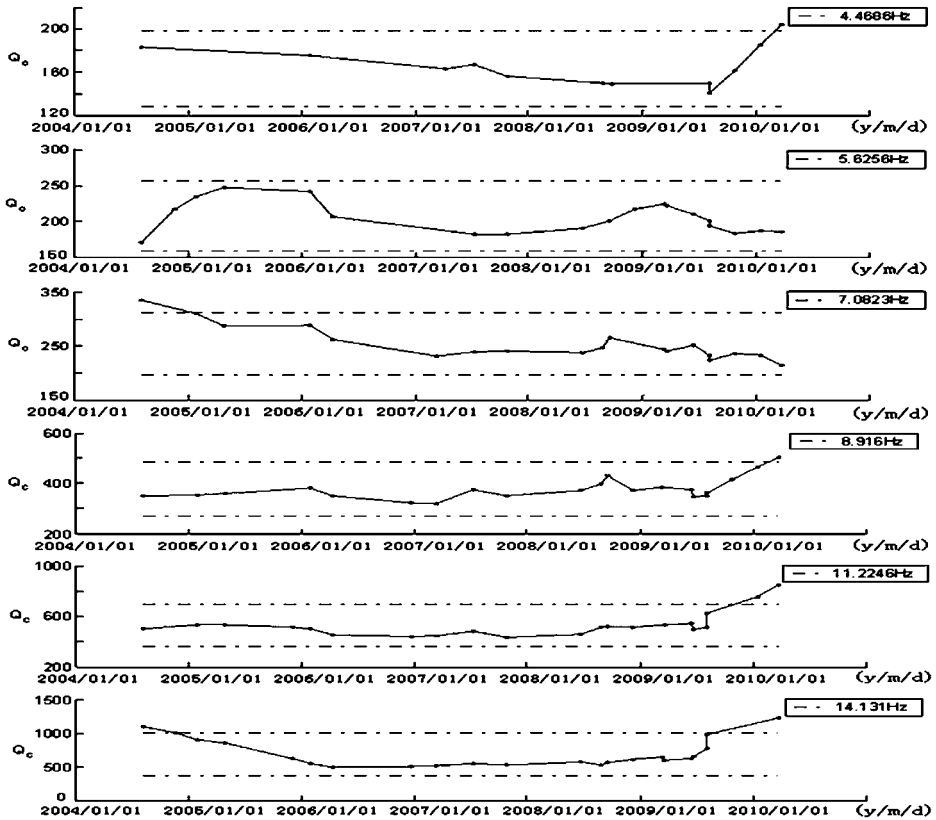


图 5 不同频段品质因子随时间的变化关系曲线

动频繁,发生 2.0 级以上地震 9 次,而 2009 年以来,高频成份 Q_0 值增高趋势明显,反映了该地区构造应力有逐渐增强的趋势。根据不同频段品质因子随时间的变化关系,分析认为濮阳地区地震活动水平有进一步增强的可能。

4 结论

(1) 区域品质因子大小与区域介质横向和纵向非均匀性程度有关、与散射椭球体的范围有关、与区域应力场的变化有关。不同地区的区域介质非均匀性的差异是引起这些地区的品质因子具有背景水平差异的原因;在近似相同的地区(指不同地震的震源距有变化、散射波穿透深度有变化),散射椭球体的范围不同是引起品质因子具有波动变化的原因;在相同的地区,区域应力场的增强或减弱是引起品质因子具有(大幅)波动变化的原因。因此,建立区域介质参数的变化规律,排除品质因子的非震干扰因素,研究其与应力场变化的关系,探索地震形成的机理是实现地震物理预测的有效途径。

(2) 联合 S 波和尾波记录得到了濮阳地震集中区地震波的衰减特征。根据 Sato 模型,由 21 次地震拟合得到了品质因子与频率之间的统计关系为

$$Q_0 = 28.7f^{1.15} (1\text{Hz} \leq f \leq 15\text{Hz})$$

其中 $Q_0 = 28.7$, $\eta = 1.15$, Q_0 和 η 值的 95% 置信误差分别为 8.65 和 0.13。频率衰减指数 η 并不总是小于 1,当流逝时间较小往往要大于 1。

(3) 改进后的品质因子测量方法可有效去除由于不同地震或同一地震的地震散射波在纵向介质中穿透深度的不同而导致对品质因子测量结果的影响,从而有利于扑捉到品质因子的异常变化特征与地震孕育过程的关系。

(4) 为了研究地震在孕育过程中,某固定区域介质性质的时间变化特征,必须对不同震中距和不同震源深度的地震记录进行尾波流逝时间窗长的有条件选取,同时对品质因子随震中距的变化进行归一化处理。基于此,该文分析得到了不同频段品质因子随时间的背景变化特征,2009 年下半年以来冀鲁豫交界地区地震活动增强, Q_0 值有所升高,表明研究区域构造应力有进一步增强的可能。

(5) 该文分析结果是初步的, 缺乏更长资料的积累和更多台站记录的分析比较以及较大地震震例的检验。

参考文献:

- [1] Bianco F, Castellano M, DelPezzo E and Ibanez J. 1999. Attenuation of the short period seismic waves at Mt. Vesuvius, Italy[J]. *Geophys. J. Int.* 138:67~76.
- [2] Sato H. 1977. Single isotropic scattering model including wave conversions; Simple theoretical model of the short - period body wave propagation[J]. *J. Phys. Earth* 25:163 - 176.
- [3] Dominguez T, Rebollar C J. 1997. Attenuation of coda waves at the Cerro Prieto Geothermal Filed, Baja California, Mexico[J]. *Bull. Seim. Soc. Am.* 87: 1368 - 1374.
- [4] Cong L J, Mejia Mitchell B J. 2000. Attenuation dispersion of P waves in near the New Madrid seismic zone[J]. *Bull. Seim. Soc. Am.* 90(3):679 - 689.
- [5] Pulli J J. 1984. Attenuation of coda waves in New England[J]. *Bull. Seim. Soc. Am.* 74:1149 - 1166.
- [6] 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.
- [7] 刘明, 徐洪波, 宁国勤编著. 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.
- [8] 王济, 胡尧编著. 2005. MATLAB 在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水利出版社, 134 - 137.

Analysis on Q_c Value of Coda in the Boundary Area between Shandong and Henan Province

SU Daolei^{1,2}, LIU Cai¹, LIU Xiqiang³, ZHOU Yanwen³, DONG Xiaona³

(1. Geo - exploration Science and Technology College of Jilin University, Jilin Changchun 130026, China; 2. Jinan Earthquake Administration Bureau, Shandong Jinan 250099, China; 3. Shandong Earthquake Administration Bureau, Shandong Jinan 250014, China)

Abstract: According to previous research results of 21 times seismic wave attenuation earthquake records in Puyang station, the relationship between the quality factors accompanying with versus frequency is discussed. Different earthquakes are determined by using different wave quality factors. It can eliminate the impact of the quality factors measurements caused by the earthquake seismic wave scattering in the vertical penetration depth at the same or different earthquakes. It will help to capture the relationship between the abnormal changes characteristics of the quality factors and the earthquake preparation process. By using the improved model, coda wave Q_c value of boundary between Shandong and Henan province is calculated, then the relationship of quality factors with frequency attenuation and the temporal changes of the regional media attenuation is gained as well.

Key words: Earth media; quality factors; coda; determination method; characteristics