

2009年云南姚安 M_s 6.0 地震余震序列 尾波 Q_c 值研究*

李琼, 秦嘉政, 钱晓东, 赵小艳, 毛慧玲

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 利用云南大姚地震台记录到的2009年姚安6.0级地震余震序列的数字化波形观测资料, 基于尾波单次散射理论, 估算该次地震震源区尾波 Q_c 值。结果表明: 中心频率为1.5 Hz时, 振幅衰减率 $\beta(f)$ 在-0.141 27 ~ -0.043 05之间, 平均值为-0.074 60; Q_c 值在33.3 ~ 99.8之间, 平均值为65.5。并得出 Q_c 值与频率的关系: 尾波波源因子与震级成正比, 与频率成反比。主震发生后头几天, 尾波 Q_c 值(1.5 Hz)波动较大, 之后在 ± 1.5 倍方差线内趋于稳定, 且没有超过5级的强余震发生。姚安地区尾波 Q_c 值具有构造运动活跃、地震活动频繁地区的低 Q_c 值特征。

关键词: 姚安地震; 尾波衰减; 余震序列; 地壳 Q_c 值

中图分类号: P315.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2011)03-0300-08

0 引言

随着数字化地震观测系统的增多和完善, 数字化地震记录资料越来越多, 使得利用数字化波形资料求解 Q_c 值的研究变得更为方便。20世纪60年代, Aki (1969) 提出尾波散射理论, 用散射模型解释了尾波的形成原因, 即由于地球介质有很不相同的均匀尺度, 弹性波在传播过程中, 遇到这些不均匀体时, 就会产生散射, 台站记录到这些延迟了的散射波, 就形成了尾波。随后, Herrmann (1980) 研究发现, 尾波衰减系数和S波衰减系数一致, 因此利用尾波研究地震波衰减就成为一种简便有效的方法。对于同一个地震台站记录到的同一地区的地震, 其尾波变化具有相同的衰减形态, 与地震震级大小(一般小于6级)、台站、震中距无关, 只与时间 t 和频率 f 有关, 在此基础上, Herrmann 提出了一种利用尾波的衰减特征求取区域介质品质因子 Q 的方法, 应用这种方法可以得到尾波 Q_c 值的频率依赖特性及区域性变化的一些特征。单台尾波 Q_c 值主要反映的是以震源和记录台站为两个焦点的椭球范围内的品质因

子特性。众多研究 (Jin, Aki, 1986; 秦嘉政, 1989; 陈学庭, 1992; 李白基等, 2000; 钱晓东等, 2004) 发现, 大震前 Q 值有异常下降, 临近大震又逐渐回升; 地震活动频繁的地区对应低 Q 值, 地震活动相对平静的地区对应高 Q 值。

2009年云南省姚安县发生了 M_s 6.0 地震, 主震之后, 距离震中最近的大姚地震台记录到大量余震数字化波形资料, 为研究该区尾波 Q_c 值提供了很好的基础。笔者利用这些近场数字化观测资料, 研究了姚安地区尾波振幅衰减率 $\beta(f)$ 的变化特征, 探讨了震源区尾波 Q_c 值状态, 以期探寻该区地震活动与地球内部介质性质的关系。

1 资料

云南地震台网测定, 2009年7月9日19时19分14秒云南省姚安县发生 M_s 6.0 中强地震, 震中位置 25.34°N , 101.01°E , 震源深度7 km。笔者选用7月9日至30日, 大姚地震台记录到的符合条件的71次余震数字化波形记录求取尾波 Q_c 值, 选取条件为: (1) 震级范围2.0 ~ 4.0级; (2) 尾波持续时间长、干扰小、S波记录清晰(图1)。

* 收稿日期: 2010-10-12.

基金项目: 云南省人民政府十项措施“云南强震活动与板缘动力学机制研究”(JCYB-20080601-4)和“地球物理场和化学场动态变化与强震活动关系研究”(JCYB-20080601-5)联合资助。

大姚地震台场地类型为山洞, 台基岩性为砾岩, 海拔 1 877 m, 观测仪器为 KS-2000M 型数字化地震记录仪, 采集器为 EDAS-24IP 型, 采样率为 100 Hz。

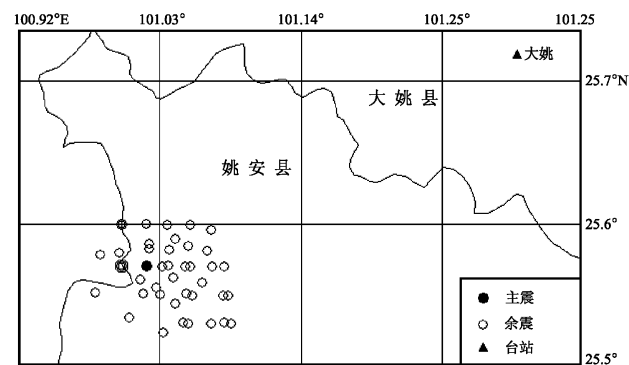


图 1 用于计算的地震震中及台站分布图
Fig. 1 Earthquake epicenters used to calculate and the station distribution

2 方法原理及数据处理

2.1 方法原理

单次散射模式看起来虽然简单, 但与高龙生 (1987) 提出的多次散射模式相比, 所得到的结果相差不大。秦嘉政 (1992) 研究认为, 滇西南地区多次散射模式所得的 Q_c 值比单次散射模式降低约 20%, 而高龙生等 (1987) 研究北京地区的多次散射模式 Q_c 值比单次散射模式降低约 30%。

依据 Aki 等 (1975) 的单次散射模型, 尾波谱振幅为

$$A(f, t) = S_0(f) R(f) t^{-u} e^{-\pi f t / Q_c(f)}. \quad (1)$$

式中, $A(f, t)$ 是台站观测谱; t 是发震时间和 S 波到时差; $S_0(f)$ 是震源项; $R(f)$ 是场地项; 一般 $t > 2R/v_s$, R 为震中距; v_s 为 S 波速度; u 是常数, 体波的 $u=1$, 面波的 $u=0$; t^{-1} 表示以体波为主要成分的尾波几何扩散影响; $Q_c(f)$ 值是对应于中心频率点 f 的尾波介质品质因子。

$A_0(f)$ 为尾波波源强度因子, 与震源强度有关, 可表示为

$$A_0(f) = S_0(f) R(f). \quad (2)$$

对 (1) 式两边取自然对数, 且 $u=1$, 可得

$$\ln[A(f, t) \times t] = -\frac{\pi f}{Q_c} \times t + \ln A_0(f), \quad (3)$$

即

$$\ln[A(f, t) \times t] = \beta(f) \times t + \ln A_0(f). \quad (4)$$

式中, $\beta(f)$ 为尾波振幅衰减率。从 (4) 式可以看出, 右边是 t 的直线方程, $\ln[A(f, t) \times t]$ 与 t 是线性关系。从某个地震记录在某一频率上可以测出 $A(f, t)$ 和 t , 将所有数据点分别代入 (4) 式, 用最小二乘法可求出直线的斜率 $\beta(f)$ 和 $\lg A_0(f)$, 从而得到该地震记录该频率点的品质因子

$$Q_c(f) = -\frac{\pi f}{\beta(f)}. \quad (5)$$

计算不同中心频率下的尾波 $Q_c(f)$ 值, 利用 Sing 和 Herrmann (1983) 提出的关系式 $Q_c(f) = Q_0 f^n$, 就可以拟合求得 $Q_c(f)$ 与频率 f 的关系。

2.2 数据处理

尾波窗的选取: 根据经验和大部分地震的实际观测, 尾波开始时间选 $t > 2R/v_s$, 截止时间不超过 70 s。笔者对时间窗长的选取不是固定的, 对每一个事件, 根据其具体的尾波衰减时间, 求取 Q 值, 不同的拟合时间窗长选在其衰减部分。

求取尾波 Q_c 值: 在计算 Q 值与 f 的关系时, 首先对原始波形进行滤波, 得到不同频率 f 的波形记录, 笔者选用高斯滤波器对 $A(f)$ 进行滤波

$$G(\omega) = \exp\left(-\alpha \left[\frac{\omega - \omega_c}{\omega_c}\right]^2\right). \quad (6)$$

式中, ω 为圆频率; ω_c 是中心点圆频率; α 为常数, 滤波器的宽度在 1~99 之间选择, 值越大, 频带宽度越窄, 本文取 $\alpha=40$ 。本次研究选取的中心频率分别为 1.0、1.5、2.5、4.0、5.5、8.0、10.0、12.0、18.0 Hz。图 2 为表 1 中 02 号地震的原始波形及滤波结果。

取 2 s 为窗长, 以 1 s 间隔为步长滑动, 求出不同窗内平均振幅和时间

$$A_c = (A_T^2 - A_N^2)^{1/2}. \quad (7)$$

式中, A_T 是信号均方根振幅值; A_N 是噪声均方根振幅值。用计算出来的数据建立时间 t 和 $[A(f, t) \times t]$ 的坐标系, 利用最小二乘法拟合得出 Q_c 值。

在双对数坐标中标出不同频率点的 Q 值, 然后用最小二乘法拟合, 就可以求得 Q_0 值和 η 值。

3 计算结果

3.1 尾波振幅衰减率

利用计算出来的 71 组数据, 对各个中心频率, 作出时间 t 与 $[A(f,t) \times t]$ 的关系图, 用最小二乘法进行直线拟合, 求出直线的斜率 $\beta(f)$, 然后根据公式 (5) 即可求出不同中心频率的介质品质因子 Q_c 值。图 3 为各个中心频率对应的 t 与 $[A(f,t) \times t]$ 的数据点和回归直线。表 1 仅给出中心频率为 1.5 Hz 的低频 Q_c 值结果。图 4 给出了不同中心频率的尾波 Q_c 值。

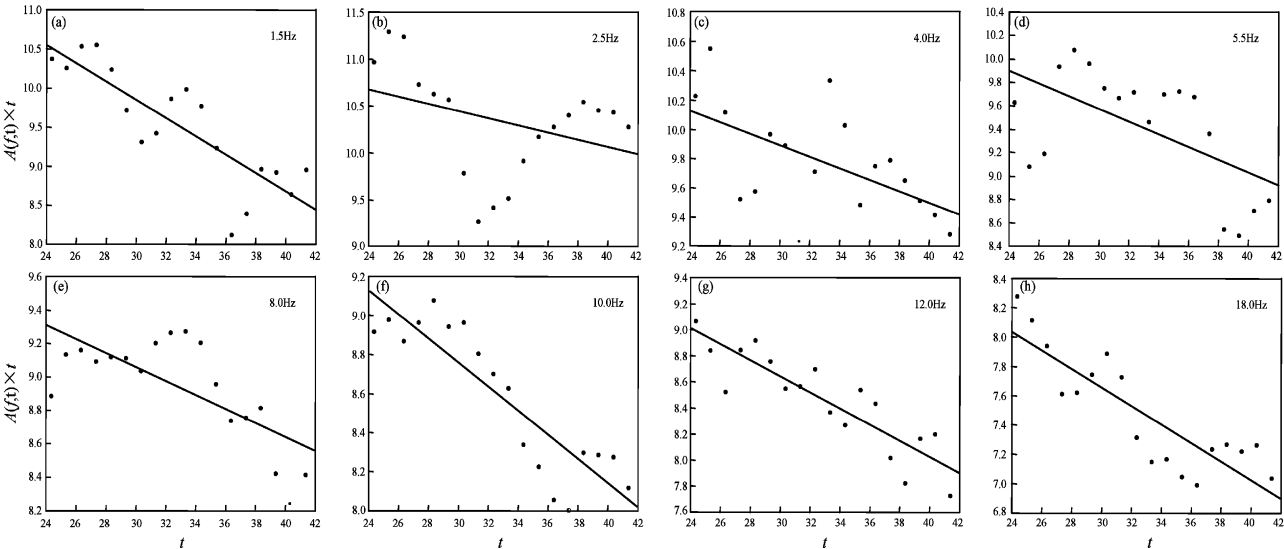


图 3 各中心频率对应的 t 与 $[A(f,t) \times t]$ 的数据点及回归直线
Fig. 3 Data points and regression line between t and $[A(f,t) \times t]$ corresponding to different center frequency

从表 1 可以看出, 中心频率为 1.5 Hz 时, 姚安地震台记录到的姚安地震余震序列的尾波振幅衰减率 β 在 $-0.141\ 27 \sim -0.043\ 05$ 之间变化, 其中有 83% 介于 $-0.10 \sim -0.04$ 之间; 尾波 Q_c 值在 $33.3 \sim 99.8$ 之间, 约 58.5% 的值在 65 以上, 小于 50 的值占总数的 14.1%, 平均值为 65.5。这个结果与李白基等 (2004) 使用 Sato 模型研究 2001 年姚安 6.5 级地震余震序列时, 在中心频率为 1.5 Hz 时得到的尾波 Q_c 值结果 (67) 非常一致。其它频率段的尾波振幅衰减率 $\beta(f)$ 、波源因子 $\ln A_0(f)$ 及尾波 Q_c 值的均值见表 2。

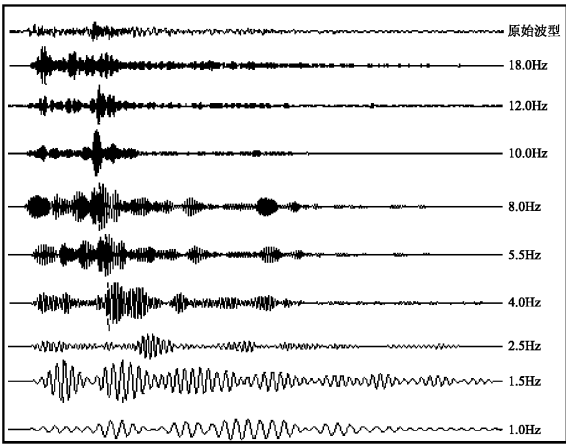


图 2 表 1 中 02 号地震原始波形及滤波结果图
Fig. 2 Original waveforms and filtering results of No. 02 earthquake in Tab. 1

3.2 尾波波源因子 $A_0(f)$ 与震级 M_L 和频率 f 的关系

从公式 (2) 可以看出, 波源因子 $A_0(f)$ 项与场地项和震源项有关, 对于单台来讲, 场地项是一个常数, 所以波源强度因子 $A_0(f)$ 只与震源项 $S_0(f)$ 有关, 且是一个描述尾波激发强度的物理量。理论上, 波源强度因子与震级成正比关系, 震级大时, 波源强度因子也较大。图 5 给出了实际测量的姚安地震余震系列的波源因子与震级的关系。从图 5 中可以看出, 尾波波源强度因子与震级成正比关系。利用最小二乘法, 可以拟合得出

表 1 姚安地震余震序列尾波振幅衰减率 $\beta(f)$ 及 Q_c 值

Tab. 1 Attenuation ratio $\beta(f)$ and the coda Q_c values for aftershock sequences of Yao'an earthquake

编号	发震时刻/年-月-日 时:分	$\lambda_E/(^{\circ})$	$\varphi_N/(^{\circ})$	M_L	$\ln A_0(f)$	$\beta(f)$	Q_c
01	2009-07-09 19:35	101.03	25.57	2.2	14.215	-0.081 16	58.2
02	2009-07-09 20:00	101.03	25.57	3.9	14.324	-0.045 33	81.7
03	2009-07-09 20:28	101.10	25.55	2.8	12.043	-0.057 64	81.7
04	2009-07-09 20:48	101.05	25.57	2.7	12.327	-0.085 00	55.4
05	2009-07-09 22:13	101.05	25.58	2.6	12.078	-0.078 83	59.8
06	2009-07-09 22:18	101.08	25.55	2.3	11.198	-0.073 01	64.5
07	2009-07-09 22:53	101.03	25.57	2.7	13.382	-0.117 64	40.0
08	2009-07-09 23:09	101.05	25.55	3.5	14.422	-0.087 41	53.9
09	2009-07-10 01:11	101.02	25.57	2.9	13.102	-0.079 95	58.9
10	2009-07-10 01:27	101.03	25.55	2.1	11.254	-0.093 89	50.2
11	2009-07-10 01:29	101.03	25.57	2.8	13.572	-0.099 21	47.5
12	2009-07-10 03:51	101.02	25.57	3.4	13.228	-0.067 35	70.0
13	2009-07-10 04:28	101.03	25.60	2.4	12.344	-0.090 92	51.8
14	2009-07-10 04:56	101.08	25.55	3.6	15.112	-0.105 70	44.6
15	2009-07-10 05:43	101.05	25.57	3.2	13.615	-0.082 60	57.0
16	2009-07-10 06:05	101.08	25.57	2.5	11.356	-0.059 84	78.7
17	2009-07-10 06:32	101.02	25.57	2.2	10.201	-0.066 35	71.0
18	2009-07-10 08:36	101.00	25.57	4.0	14.279	-0.067 82	69.5
19	2009-07-10 09:47	101.02	25.60	2.1	10.198	-0.074 61	63.1
20	2009-07-10 11:30	101.03	25.58	2.1	10.059	-0.056 34	83.6
21	2009-07-10 17:29	101.05	25.57	2.8	11.934	-0.050 11	94.0
22	2009-07-10 18:04	101.00	25.60	3.3	14.909	-0.100 81	46.7
23	2009-07-10 19:18	101.03	25.57	2.3	10.231	-0.04719	99.8
24	2009-07-10 21:11	101.00	25.58	2.3	13.136	-0.138 70	34.0
25	2009-07-11 01:49	100.98	25.55	3.8	14.625	-0.093 17	50.6
26	2009-07-11 22:45	101.02	25.57	2.3	10.360	-0.055 36	85.1
27	2009-07-12 02:34	101.02	25.58	2.7	11.709	-0.061 79	76.3
28	2009-07-12 02:56	101.00	25.58	2.2	10.079	-0.056 77	83.0
29	2009-07-12 04:38	101.02	25.58	2.9	11.355	-0.043 05	70.8
30	2009-07-12 07:04	101.03	25.55	2.3	10.903	-0.060 11	78.4
31	2009-07-12 08:30	101.07	25.57	2.0	9.4693	-0.060 49	77.9
32	2009-07-12 08:47	101.08	25.53	2.0	10.748	-0.108 57	43.4
33	2009-07-12 18:29	101.02	25.58	3.4	11.811	-0.032 58	85.5
34	2009-07-12 20:17	101.02	25.58	2.8	11.387	-0.064 77	72.7
35	2009-07-12 21:04	101.02	25.57	2.0	12.344	-0.141 27	33.3
36	2009-07-12 21:35	101.02	25.57	2.0	9.1467	-0.040 84	91.6
37	2009-07-12 22:05	101.05	25.55	2.1	10.127	-0.069 34	67.9
38	2009-07-12 22:37	101.03	25.55	2.0	10.767	-0.090 29	52.2
39	2009-07-13 00:08	101.03	25.57	2.5	12.176	-0.095 46	49.4
40	2009-07-13 00:54	101.02	25.58	2.0	9.8188	-0.069 59	67.7
41	2009-07-13 01:04	101.05	25.55	3.6	11.536	-0.069 14	63.0
42	2009-07-13 15:15	101.05	25.55	3.1	14.436	-0.116 33	40.5
43	2009-07-13 21:47	101.03	25.57	2.1	9.3707	-0.055 99	84.1

续表 1

编号	发震时刻/年-月-日 时:分	$\lambda_E/(^{\circ})$	$\varphi_N/(^{\circ})$	M_L	$\ln A_0(f)$	$\beta(f)$	Q_c
44	2009-07-14 06:00	101.03	25.55	2.6	13.279	-0.109 94	42.9
45	2009-07-14 07:44	101.02	25.58	2.3	10.377	-0.044 16	94.9
46	2009-07-14 13:39	101.00	25.57	3.4	14.512	-0.09413	50.0
47	2009-07-14 15:22	101.07	25.53	2.2	11.366	-0.086 98	54.2
48	2009-07-14 17:44	101.02	25.57	2.0	9.0742	-0.057 59	81.8
49	2009-07-14 18:04	101.00	25.58	2.0	9.7078	-0.056 22	83.8
50	2009-07-15 06:14	101.05	25.53	2.0	9.1352	-0.047 13	99.0
51	2009-07-15 15:16	101.05	25.53	3.4	13.901	-0.105 83	44.5
52	2009-07-15 17:15	101.05	25.57	2.5	11.333	-0.071 73	65.7
53	2009-07-16 11:33	101.00	25.58	2.1	9.5371	-0.042 22	65.8
54	2009-07-16 18:58	101.03	25.57	2.8	12.545	-0.067 54	69.8
55	2009-07-17 14:10	100.98	25.58	2.0	11.240	-0.131 95	35.7
56	2009-07-17 21:11	101.05	25.57	2.2	11.065	-0.075 12	50.9
57	2009-07-18 14:22	101.00	25.57	2.2	10.296	-0.062 67	75.2
58	2009-07-18 20:42	101.02	25.57	2.3	10.324	-0.063 93	73.7
59	2009-07-19 05:18	101.00	25.58	2.4	11.092	-0.089 52	52.6
60	2009-07-20 05:07	101.03	25.55	2.7	11.946	-0.067 37	69.9
61	2009-07-20 20:35	101.03	25.58	2.2	10.393	-0.069 24	68.0
62	2009-07-21 03:04	101.00	25.60	2.7	12.040	-0.076 07	61.9
63	2009-07-21 09:14	101.02	25.60	2.0	10.371	-0.089 95	52.4
64	2009-07-22 08:42	101.08	25.55	2.3	10.940	-0.079 62	59.2
65	2009-07-22 20:22	101.02	25.58	2.4	10.881	-0.062 65	75.2
66	2009-07-23 00:24	101.02	25.55	2.0	10.103	-0.062 20	75.8
67	2009-07-24 10:16	101.00	25.57	2.0	9.7690	-0.066 47	70.9
68	2009-07-25 14:57	101.02	25.55	2.1	10.071	-0.057 82	81.5
69	2009-07-26 12:44	101.03	25.57	2.0	11.119	-0.111 97	42.1
70	2009-07-29 06:11	101.00	25.57	2.0	9.3646	-0.049 84	94.5
71	2009-07-30 17:09	101.03	25.55	2.0	9.2636	-0.068 72	68.6

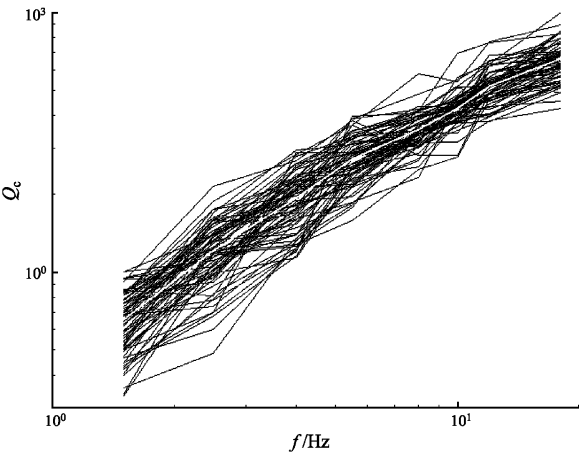


图 4 尾波 Q_c 值与频率 f 变化特征
(粗线表示各中心频率平均值)
Fig. 4 Variation diagram between the coda value Q_c and frequency f

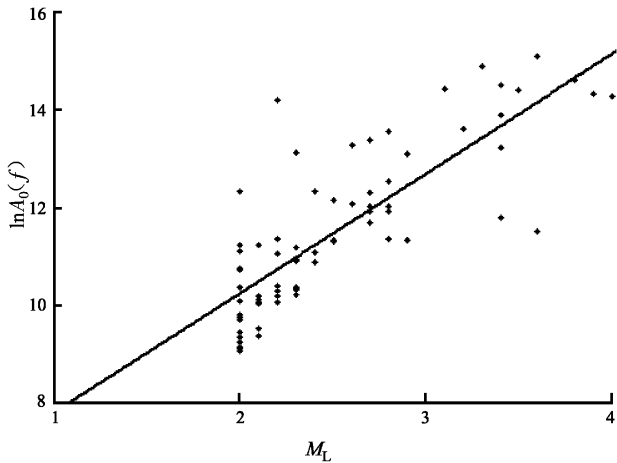


图 5 尾波波源因子 $\ln A_0(f)$ 与震级 M_L 的关系
Fig. 5 Relationship between the coda factor $\ln A_0(f)$ and magnitude M_L

姚安地震余震系列尾波波源强度因子 $A_0(f)$ 与震级 M_L 的关系为

$$\ln A_0(f) = 2.443M_L + 5.37.$$

(8)

尾波波源强度因子也与频率有关，成反比关系，即随着频率 f 的增大， $\ln A_0(f)$ 呈线性衰减。利用各次地震不同中心频率的平均值，采用最小二乘法拟合得出如下关系

$$\ln A_0(f) = -0.0667f + 12.025.$$

(9)

3.3 尾波 Q_c 值与频率 f 的关系

利用不同中心频率的尾波平均 Q_c 值（表2），按照关系式 $Q_c(f) = Q_0 f^\eta$ ，进行拟合得到如下关系

$$Q_c(f) = 45.3f^{0.97}.$$

(10)

李白基等（2004）利用 Sato 单次散射模型研究 2000 年姚安 6.5 级地震（与本研究主震震中相距 11 km）余震尾波，得出值 Q_0 为 49， η 值为 0.95，与本文测算的 Q_0 值 45.3， η 值 0.97 非常相近。

表2 姚安台估算的不同中心频率平均 $\beta(f)$ 值和 Q_c 值
Tab.2 Average attenuation ratio $\beta(f)$ and the coda Q_c values of different center frequency estimated through data recorded by Yao'an station

f/Hz	$\ln A_0(f)$	$\beta(f)$	Q_c
1.5	-0.074 6	11.545 1	65.5
2.5	-0.070 3	12.100 8	120.9
4.0	-0.069 1	11.828 9	193.4
5.5	-0.066 2	11.571 3	273.8
8.0	-0.072 8	11.617 4	353.2
10.0	-0.072 8	11.466 3	428.8
12.0	-0.074 4	11.296 2	519.4
18.0	-0.088 3	10.666 7	661.7

3.4 尾波 Q_c 值的时间分布

姚安震源区位于滇中块体内的滇中中台陷的中南部。滇中块体在扬子准地台西端，由一级断裂小江、红河、安宁河断裂和二级断裂剑川—丽江断裂所围限（阚荣举等，1977）。滇中中台陷是地台“活化”的产物，新构造运动产生了第四纪的类磨拉石建造，其地壳分6层，厚约53 km（胡鸿翔等，1986）。在滇中中台陷周边，磨盘山—绿

汁江断裂、楚雄—建水断裂、永胜—宾川断裂和程海断裂诸活动断裂历史上地震活动频繁，曾发生多次6级以上地震。图6给出了 $f=1.5\text{ Hz}$ 时，姚安地震余震尾波 Q_c 值随时间变化关系。从图6可以看出，主震发生后的前6天，尾波 Q_c 值有一个调整阶段，波动较大，7月25日之后， Q_c 值在 ± 1.5 倍方差线内趋于稳定。钱晓东等（2004）研究了2001年施甸5.9级地震余震尾波 Q_c 值随时间变化关系，王伟君和刘杰（2006）研究了2003年大姚6.2级地震余震尾波 Q_c 值随时间变化关系，他们都发现发现主震后尾波 Q_c 值在短时间内不趋于稳定，而是上升持续高值或下降持续低值，均预示着后面会有5级以上中强余震或者双震的发生。这些研究结果表明，尾波 Q_c 值与地壳活动和介质状况密切相关，在日常地震监测预报中可以作为判断主震后该地震序列类型的一个参考依据。

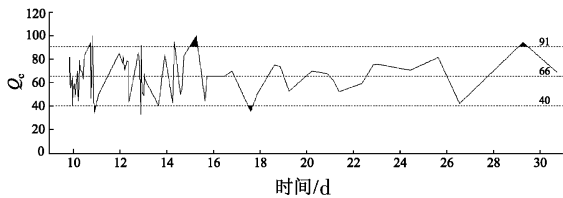


图6 2009年姚安地震余震序列尾波 Q_c 值随时间变化（上下两条虚线为1.5倍方差）
Fig.6 Coda Q_c values of Yao'an aftershock sequences change over time in 2009
(Upper and lower dashed lines represent twice of variance)

3.5 不同地区尾波 Q_c 值

地震波传播品质因子 Q 是度量衰减（ Q^{-1} ）的地球介质的基本物理参数之一，是介质非均匀性和非弹性的反映，与地区的构造活动性和地震活动性密切相关。这一特性曾作为地震预测的一个因素而加以研究（Chouet，1979；Jin，Aki，1986，1989）。很多研究（秦嘉政等，1992，1995；李琼等，2007；钱晓东等，2006）表明，构造活动相对稳定的地区为高 Q_c 值背景区；构造活动强烈的地区为低 Q_c 值背景区。根据一些学者（Singn，1983；Woodgold，1990；Hartzell *et al*，1996；李白基等，2000；钱晓东等，2004）给出的国内外不同地区不同频段的尾波 Q_c 值，笔者绘制出图7。本文研究的姚安震源区位于滇中中台陷中心附近，靠近滇深282地震测深工程的洱源—江川测线（胡鸿翔等，1986），是地震构造活动十分频繁和

强烈的地区。利用 2009 年姚安 6.0 级地震余震资料估算, 当 $f = 1.5 \text{ Hz}$ 该区的尾波 Q_c 平均值为 65.5, 相应的 Q_0 值为 45.3, 具有构造运动十分强烈的地区的低 Q 值特征。从图 7 可以看到, 笔者研究的云南姚安地区的尾波衰减特征与美国中东部地区和河北昌黎地区明显不一样, 而与美国加州斯通峡谷、云南武定地区和云南施甸地区极为相似。

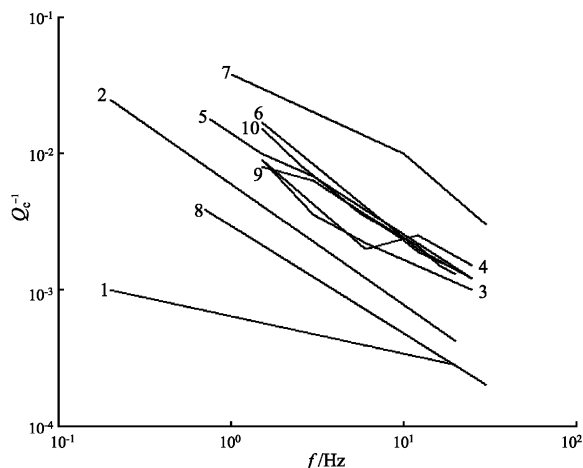


图 7 不同地区尾波衰减 Q_c^{-1} 值随频率的变化特征
(1. 美国中东部地区; 2. 美国西部地区; 3. 日本关东地区; 4. 日本大石山地区; 5. 美国加州斯通峡谷地区;
6. 云南武定地区; 7. 美国加州帝王谷地区; 8. 河北昌黎地区; 9. 云南施甸地区; 10. 云南姚安地区)

Fig. 7 Coda Q_c^{-1} value variation with frequency in different areas

- (1. Central and eastern United States; 2. Western United States; 3. Japan's Kanto region; 4. Japan's Ishiyama areas; 5. Stone Canyon area, California, United States; 6. Wuding region in Yunnan; 7. Imperial valley region, California, United States; 8. Changli area in Hebei; 9. Shidian area in Yunnan; 10. Yao'an area in Yunnan)

4 讨论和结论

本文利用大姚地震台记录到的 2009 年云南姚安 6.0 级地震余震序列波形资料, 依据单次散射模型, 研究了震源区尾波振幅衰减率 $\beta(f)$ 和地壳尾波的 Q_c 值, 得到以下几点结论。

(1) 中心频率为 1.5 Hz 的振幅衰减率 $\beta(f)$ 在 $-0.14127 \sim -0.04305$ 范围内变化, 平均值为 -0.07460 ; 尾波 Q_c 值在 33.3 ~ 99.8 之间变化, 平均值为 65.5。李白基等 (2004) 研究 2001

年姚安 6.5 级地震震源区相同频率尾波 Q_c 值 67 一致性很好, 两次地震相距 11 km。尾波衰减 Q_c^{-1} 值随频率变化不同于构造运动稳定、地震活动相对平静的美国东部地区和河北昌黎地区; 而与构造运动活跃、地震活动较频繁地区接近, 如云南武定地区。

(2) 估算得到的尾波波源强度因子 $A_0(f)$ 与震级 M_L 成正比的关系, 拟合斜率值为 2.443; 与频率 f 成反比关系, 较低的频率对应较强的波源因子。

(3) 主震发生后几天, 尾波 Q_c 值波动较大, 之后在 ± 1.5 倍方差线内趋于稳定, 之后没有超过 5 级以上的强余震发生, 这与王伟君和刘杰 (2006) 研究 2000 年姚安 6.5 级主震后的尾波 Q_c 值随时间变化所得的结论一致。这为主震后判断强余震发生的危险性提供了一个方法。

(4) 震源区位为一级断裂小江、红河、安宁河断裂和二级断裂剑川—丽江断裂所围限, 构造运动十分活跃, 属于地震频发地区。笔者计算得到 Q_0 值为 45.3, η 值为 0.97。秦嘉政等 (2004) 研究 2000 年姚安 6.5 级地震余震尾波后, 得出 Q_0 值为 49, η 值为 0.95, 由于两次地震震中仅相距 11 km, 结果比较一致。李白基等 (2000) 研究云南武定 1995 年地震余震尾波, 得出田心台 Q_0 值为 59, η 值为 0.95; 云龙台 Q_0 值为 52, η 值为 0.90, 与本文结果非常接近, 都属于以低 Q_0 值、高 η 值为特征的构造活跃地区的尾波性质。武定和姚安都在滇中块体内, 它们有类似的介质不均匀性和散射, Q_0 值和 η 值的一致性合理的结果。

笔者利用大姚台记录的云南姚安 2009 年 6.0 级地震余震序列数字化波形资料, 估算了振幅衰减率 $\beta(f)$ 和尾波 Q_c 值, 测量结果表明, 震源区尾波 Q_c 值具有构造运动活跃、地震活动较为频繁的地区尾波衰减特征。

参考文献:

- 陈学庭. 1992. 澜沧和耿马大地震 Q 值随时间的变化 [M] // 中国地球物理学会年刊. 北京: 地震出版社.
高龙生, 华正兴, 李瑞瑄. 1987. 用尾波的强度和衰减估算北京地区 S 波的平均自由程 [J]. 地震学报, 9(4): 347 ~ 363.
胡鸿翔, 陆函行, 王椿镛, 等. 1986. 滇西地区地壳结构的爆破地震研究 [J]. 地球物理学报, 29(2): 133 ~ 144.
闾荣举, 张四昌, 晏凤桐, 等. 1977. 我国西南地区现代构造应力场与构造活动特征的探讨 [J]. 地球物理学报, 20(2): 96 ~ 109.
李白基, 秦嘉政, 钱晓东, 等. 2004. 云南姚安地区的尾波衰减 [J]. 地

- 震学报, 26(1): 47–52.
- 李白基, 秦嘉政, 谢庆茵, 等. 2000. 云南武定 1995 年地震余震尾波 Q_c 值 [J]. 地震地磁观测与研究, 21(2): 1–6.
- 李琼, 秦嘉政, 钱晓东. 2007. 2007 年宁洱 6.4 级地震余震序列尾波 Q_c 值研究 [J]. 地震研究, 30(4): 337–343.
- 钱晓东, 李白基, 秦嘉政. 2004. 2001 年云南施甸 $M_s5.9$ 地震余震序列尾波 Q_c 值研究 [J]. 地震地磁观测与研究, 25(1): 9–17.
- 钱晓东, 秦嘉政, 李白基. 2006. 澜沧江流域水电工程地区的尾波衰减 [J]. 地震研究, 29(3): 215–220.
- 秦嘉政, 刘祖荫, 龙晓帆. 1995. 滇西实验场两次中强地震前后尾波衰减的区域特征分析 [J]. 中国地震, 11(3): 212–221.
- 秦嘉政. 1989. 云南地区短周期波区域 Q 值与地震烈度衰减 [C]// 云贵地区地震危险性研究文集. 昆明: 云南科技出版社, 253–260.
- 秦嘉政. 1992. 澜沧—耿马地震后尾波衰减的区域特征 [J]. 地震学报, 14(1): 71–82.
- 王伟君, 刘杰. 2006. 云南 4 个地震序列 Q_c^{-1} 值变化特征对比研究 [J]. 地震, 26(1): 19–25.
- Aki K. 1969. Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves [J]. J Geophys Res, 74(2): 615–631.
- Chouet B. 1979. Temporal variation in the attenuation of earthquake coda near Stone Canyon, California [J]. Geophys Res Lett, 6(3): 143–146.
- Hartzell S, Leeds A, Franbel A, et al. 1996. Site response for urban Los Angeles using aftershocks of the Northridge earthquake [J]. BSSA, 86(1B): S168–S192.
- Herrmann R B. 1980. Q estimates using the coda of local earthquakes [J]. BSSA, 70(2): 447–468.
- Jin A, Aki K. 1986. Temporal change in Q before the Tangshan earthquake of 1976 and the Haicheng earthquake of 1975 [J]. J Geophys Res, 91(B1): 665–673.
- Jin A, Aki K. 1989. Spatial and temporal correlation between coda Q and seismicity and its physical mechanism [J]. J Geophys Res, 94(B10): 14 041–14 059.
- Sing S, Herrmann R B. 1983. Regionalization of crustal coda Q in the continental United States [J]. J Geophys Res, 88(B1): 527–538.
- Woodgold C R D. 1990. Estimation of Q in eastern Canada using coda waves [J]. BSSA, 80(2): 411–429.

Study on the Coda Q_c -value for aftershock sequence of Yao'an $M_s6.0$ earthquake in Yunnan in 2009

LI Qiong, QIN Jia-zheng, QIAN Xiao-dong, ZHAO Xiao-yan, MAO Hui-ling
(Earthquake Administration of Yunnan province, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

The coda-wave attenuation factor Q_c at the source region of Yao'an, Yunnan, $M_s6.0$ earthquake in 2009 is estimated through single-scattering theory of coda wave on the basis of the digital waveform data of aftershock sequence recorded by Da'yao Station. When central frequency $f = 1.5$ Hz, the coda attenuation ratio $\beta(f)$ in Yao'an region ranges from $-0.141\ 27$ to $-0.043\ 05$, and the average is $-0.074\ 60$. The Q_c -value of coda ranges from 33.3 to 99.8 , and the average is 65.5 . The relation between the Q_c -value and frequency f is $Q_c(f) = 45.3 f^{0.97}$. The coda factor is in direct proportion to magnitude, and in inverse proportion to frequency. In the first few days after the main shock, the Q_c -value (1.5 Hz) of coda fluctuated obviously, it showed a tendency toward stabilization within the line of ± 1.5 times of variance, and the strong aftershocks smaller than $M5$ will occur. The Yao'an region has the characteristics of active tectonic-movement, frequent seismic-activity, and low Q_c -value.

Key words: Yao'an earthquake; coda attenuation; aftershock sequence; crustal Q_c -value