

云鹏水电站及其周围地震尾波 Q_c 值研究*

赵小艳, 付虹, 毛玉平, 邬成栋

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 利用云鹏水电站周边 5 个数字地震台站记录到的 2000 年 1 月至 2008 年 12 月间的 108 个地震的数字波形资料, 采用 Aki 单次散射模型, 计算了各台站周围 423 条地震记录的尾波 Q_c 值。结果显示: 云鹏水电站地区尾波的 Q_c 值与频率的关系为 $Q_c(f) = 90.2f^{0.94}$ 。该地区的 Q_c 值比云南其它构造活动强烈地区的要高, 因此属于中等构造活动地区。云鹏水电站蓄水后弥勒台记录到的 108 个地震的尾波 Q_c 值及频分 Q_c 值有所下降, 但下降幅度不大, 表明水库蓄水对库区及其附近区域地下介质性质有所影响, 但影响的程度有限。

关键词: 云鹏水电站; 尾波 Q_c 值; Aki 单次散射模型

中图分类号: P315.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2010)01-0055-08

0 引言

地震尾波是由地下介质的不均匀性所激发的, 它的存在可以认为是介质不均匀性的明显证据之一。Aki (1969) 在研究地震尾波时, 提出了一种统计模型来解释尾波的形成机制, 即由于地球介质的不均匀性, 地震波在传播过程中遇到不均匀介质时就会产生散射, 台站记录到这些延迟了的散射波, 形成尾波。Aki 和 Chouet (1975) 在研究中, 假设地震波在经过这些不均匀体时只发生一次散射, 从而得出了计算尾波功率谱的公式。在上述尾波理论的基础上, 尾波的研究工作得到了迅速发展, 国内外地震学家从不同方面对尾波开展了大量研究: 用尾波探讨小震震源频谱以及尾波形成的物理机制, 运用尾波衰减的时空特征探讨地球内部介质非均匀性, 研究尾波 Q_c 值平面分布与区域构造活动性的关系; 大震前后区域性尾波 Q_c 值随时间的变化特征在地震预测中的应用等, 并取得了一些研究成果。如 Suteau 和 Whitcomb (1979) 利用美国南加利福尼亚地区 CIT 台网记录到的 1972 ~ 1975 年的地震资料, 从理论上给出了用 M_L 计算尾波震级 M_c 的理论公式; Xie 和 Nuttli (1988) 根据尾波随机模型及单次各向同性散射模型, 提出了用单台记录叠加频谱比值法计算尾波 Q_c 值的方法, 并采用层析成像

方法研究了非洲地区尾波 Q_c 值的大尺度横向变化特征; 秦嘉政和阚荣举 (1986) 运用云南区域台网短周期地震仪器记录到的小震尾波资料, 估算出昆明周边地区频率约 1.0 Hz 的短周期波的地壳 Q_c 值的平均值为 191, 证明昆明属于低 Q_c 值地区; 王伟君和刘杰 (2004) 在研究 1999 年辽宁岫岩地震序列尾波 Q_c 值时, 发现其主震前后有较明显的变化——震前增高, 震后降低。

云南地区宽带数字化台网的建立, 为我们深入研究区域尾波衰减特征提供了大量的数字化记录资料, 使我们有可能对该地区尾波的 Q_c 值分布特征及其与区域构造的关系进行较为精细的研究。如马宏生等 (2006) 用云南地区 22 个区域数字地震台站记录到的 5 668 个地震的数字波形资料, 计算了各台站周围地震记录的尾波 Q_c 值, 并从地质构造、地震活动以及大地热流分布等方面对 Q_c 值分布特征予以初步解释。王伟君等 (2006) 用云南区域数字地震台网记录到的 22 个近震资料, 研究了云南地区地震尾波在 1 ~ 20 Hz 内 6 个频段的衰减特征, 并给出云南地区尾波 Q_c 值分布特征, 即滇东的 Q_c 值 > 滇西的 Q_c 值 > 滇西南的 Q_c 值。秦嘉政等 (2001)、李白基和秦嘉政 (2004)、钱晓东等 (2004)、李琼等 (2007, 2008) 用云南区域台网及大震后围绕震中建设的临时数字台网资料研究了不同区域或不同地震序列的尾波衰减特征。

* 收稿日期: 2009-06-10.

基金项目: 国家科技支撑计划“水库诱发地震监测与分析处理技术研究”(2006BAC01B04-02-01) 和云南省科技攻关项目“复杂构造区水库地震监测预警研究”(2006SG01) 联合资助。

2007 年 8~9 月,在云南省文山州的丘北县与红河州的泸西县交界地区发生了一群小地震。从震群所处的区域构造位置来看,北东向的南盘江断裂带应为其发震断裂。震群所在区域被云南数条著名的断裂所包围:震群西边 85 km 即为 SN 向的小江断裂带,震群西北 50 km 为 NNE 向的弥勒—师宗断裂;震群南边 50 km 为 NW 向的文山断裂。从更大的区域来看,震群所在的区域为由小江断裂和红河断裂所包围的相对稳定的华南块体(苏有锦等,1999)。川滇菱块深部物质向东南滑移,却遇到了较为坚固稳定的华南断块,从而形成该区孕震的主要力源(徐彦,2002)。对区域应力场的研究发现,该地区应力场压应力优势方向为 SSE 向(赵小艳等,2007)。

由于该震群所处的丘北—泸西一带历来为云南少震区,历史上从未有过如此密集且频繁的小震群活动,因此震群发生后,云南省地震局分析预报中心研究人员从各个方面对该震群进行了调查研究。在调查过程中我们了解到,在震群所在地有 1 座云鹏水电站,水库最低水位(死水位)高程 877 m,正常蓄水位高程 902 m,总库容 3.663 亿 m^3 。工程于 2007 年 3 月实现截流蓄水,至 6 月 22 日坝前水位高程达 898.1 m,库容 3.293 亿 m^3 。丘北震群最早的地震发生在 2007 年 3 月,与水库蓄水时间十分吻合。因此,我们判断该震群为云鹏水电站所诱发。为了研究云鹏水电站及其附近区域介质性质及其在蓄水前后是否发生变化,我们利用震群周边的数字地震台记录到的 2000~2008 年 108 个小震的近场数字化地震波形资料,采用尾波单次散射模型,研究了该地区地震尾波在 9 个中心滤波频率点的垂直向数据的衰减特征。

1 计算方法

依据尾波单次散射模型,地震波尾波峰值振幅 $A(f,t)$ 与尾波流逝时间 t 之间满足

$$A(f,t) = S(f)t^{-1}e^{-\pi f t/Q_c} \quad (1)$$

其中, $A(f,t)$ 为扣除了仪器响应和台站场地效应的台站的尾波振幅观测谱; $S(f)$ 代表尾波波源因子,它与震源和频率有关; f 为尾波频率; t 为发震时间与 S 波到时差。根据经验,尾波开始于 2 倍的 S 波走时,即 $t > 2R/v$ (R 为震中距, v 为 S 波速度); Q_c 为尾波衰减系数。

对方程式 (1) 取对数,稍加整理,移项,可得

$$\ln[A(f,t) * t] = \ln S(f) - \frac{\pi f}{Q_c} t \quad (2)$$

可以看出方程式 (2) 的右边是时间 t 的直线方程,我们可以对某个地震记录在某一频率上测出 $A(f,t)$ 和 t ,即可以求出直线的斜率 K ,从而可以得到品质因子

$$Q_c(f) = \pi f / k \quad (3)$$

由方程式 (3),可以求出不同频率的尾波 Q_c 值,利用 $Q_c(f) = Q_0 f^{-\eta}$,可以拟合求出 Q_c 与频率 f 的关系。具体计算步骤如下:

首先,对原始数据进行滤波。共计算 9 个中心滤波频率点:1.0 Hz、1.5 Hz、2.5 Hz、4.0 Hz、5.5 Hz、8.0 Hz、10.0 Hz、12.0 Hz、18.0 Hz。使用高斯滤波器滤波,其定义为

$$G(\omega) = \exp \left[-\alpha \left| \frac{\omega - \omega_c}{\omega_c} \right|^2 \right] \quad (4)$$

式中, $\omega = 2\pi f$ 为圆频率, ω_c 是中心点圆频率, α 为一常数,用来确定滤波器频带宽度,可在 1~99 间选择,值越大,频带宽度越窄。本文中 $\alpha = 40$ 。

第二步,去噪和滑移计算。从尾波到时开始,对滤波后的数据,取窗长为 2 s,以 0.8 s 间隔滑动计算,求出不同时间点(以窗的中心点为当前时间点)的平均振幅为

$$A_c = (A_T^2 - A_N^2)^{1/2} \quad (5)$$

式中, A_T 是窗口内信号的均方根振幅, A_N 是噪声均方根振幅。从记录开始处,选取 P 波到时前 2 s 长的记录为噪声计算均方根振幅。设窗口 T 内有 n 个离散数据,振幅为 x_i ($i=1, \dots, n$),则该窗口的均方根振幅定义为

$$A_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (6)$$

第三步,选择拟合开始点和窗长,用最小二乘法计算各个频率点的 Q_c 值。在拟合中,拟合开始点和拟合窗长对 Q_c 值是有较大影响的(安艺敬一,1991;黄才中,葛焕称,1995)。在 $2T_s$ 后一定范围内选择开始点对 Q_c 影响相对要小些。为了让 Q_c 值有可比性,并且不受有突跳点数据记录的影响,编制程序时采用在 $F(t) \cdot (t - t_s)$ 分布图上,手工选择拟合开始点和结束点,同时还要满足以

下条件：计算开始点在 $2T_s$ 附近，拟合窗长尽量保持一致，一般取 $15 \sim 30$ s。

2 地震资料及分析处理

2.1 资料选取

据云南地震台网测定，2007 年 8 ~ 9 月在云南丘北—泸西一带发生了一群小地震（图 1a），其中 1 ~ 1.9 级 43 次，2 ~ 2.9 级 122 次，3 ~ 3.9 级 23 次，最大为 2007 年 9 月 11 日 M_L 3.6 地震（图 1b）。我们以震群的中心点为圆心，选取半径为 50 km 范围内 2000 ~ 2008 年共 131 个地震的数据资料，对这些资料进行筛选、整理，从中挑选出信噪比高、尾波持续时间相对长且振幅不饱和、干扰小且 S 波清晰的 108 个地震事件约 423 条地震记录参与拟合 Q_c 值，震级为 2.5 ~ 3.7。

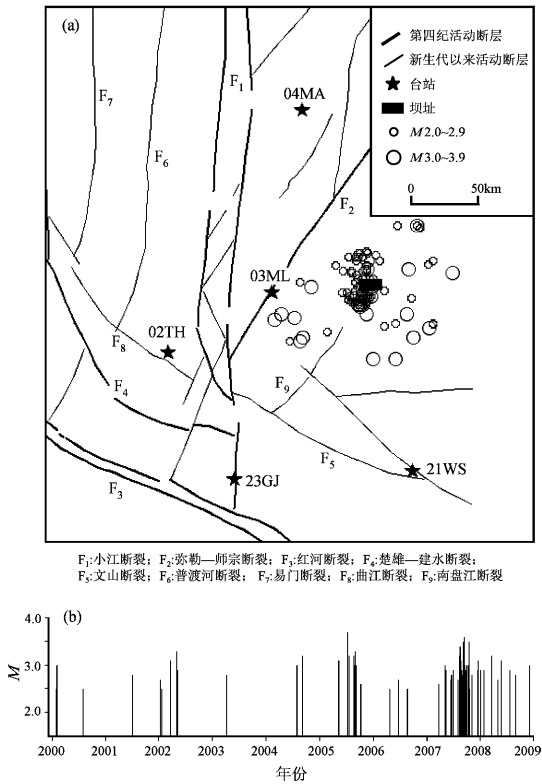


图 1 2007 年丘北—泸西小震群震中、台站、断裂、云鹏水电站位置分布图 (a) 及本研究所用地震 M - T 图 (b)

Fig. 1 Distribution of epicenters、stations、faults and Yunpeng Hydropower Station (a) and the M - T diagram of the selected earthquakes (b)

分布在震群周围且记录到该震群清晰的 P、S 波到时的台站共有 5 个，分别是通海台（02TH）、弥勒台（03ML）、马龙台（04MA）、文山台（21WS）、个旧台（23GJ）。这 5 个台站的仪器的采样率均为 50 Hz，在 0.1 ~ 20 Hz 具有速度平坦的响应。表 1 给出了这 5 个台站的基本参数。地震震中位置和周围相应台站的分布如图 1a 所示。在上述 5 个数字地震台中，弥勒地震台（03ML）距离该震群最近，记录到的地震波形数据最清晰。

表 1 震群周边数字地震台主要参数

Tab. 1 Main parameters of the digital seismic stations around the earthquakes

台号	台站名称	台站代码	台基	地震计型号
02	通海	02TH	灰岩	FBS-3A
03	弥勒	03ML	灰岩	FBS-3A
04	马龙	04MA	砂岩	FBS-3A
21	文山	21WS	灰岩	FBS-3A
23	个旧	23GJ	灰岩	FBS-3A

当尾波仅限于距台站很近而且震级较小的地震时，它所反应的介质特性不再依赖于震源和观测点位置，而是其所在区域平均物性的表现。因此尾波 Q_c 值主要反映的是以震源和记录台站为焦点的椭圆范围内介质的品质因子特征，地震尾波的研究及其结果可用于分析震源和地球内部结构分布特征。

2.2 分析处理结果

以弥勒台记录到的 2007 年 10 月 17 日 16 时 43 分 46 秒丘北 M_L 3.0 地震为例，笔者给出了此次地震垂直向的原始波形及该地震不同中心频率的滤波结果（图 2）。图 3a 为使用 Aki 模型以及上述计算步骤后，得到的 $\ln[A_c(f,t) * t]$ 与 t 的关系曲线。用最小二乘法求出各频率点的拟合结果后，可以由 9 个频率点的 Q_c 值拟合得到 $Q_c(f)$ 。图 3b 给出的是弥勒台（03ML）记录到的 56 号地震的尾波 Q_c 值拟合结果。

把某个地震台记录到的所有地震的不同中心频率都叠加到一张图上，即可以得到该台站记录到的所有地震的平均 Q_c 值和 η 值。图 4 为弥勒台记录到的 108 个地震的不同中心频率的尾波 Q_c 值，通过拟合得到弥勒台 Q_c 和 f 值的关系为 $Q_c(f) = 84.4f^{0.87}$ 。

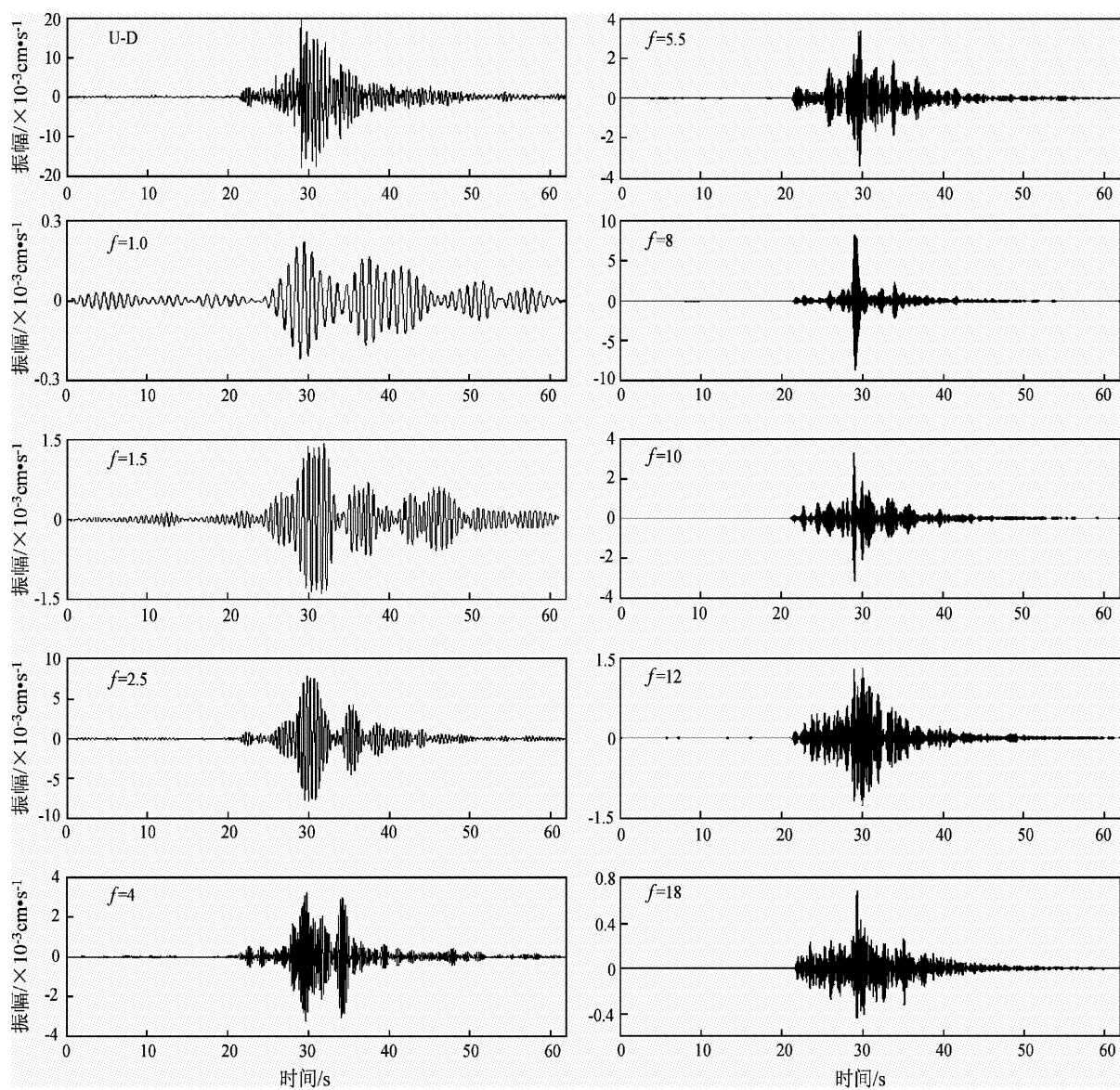


图2 丘北 $M_L3.0$ 地震原始波形及滤波后各中心频率的波形图
Fig.2 Primary waveform of Qiubei $M_L3.0$ earthquake and the waveform at different central frequency pots after filtered

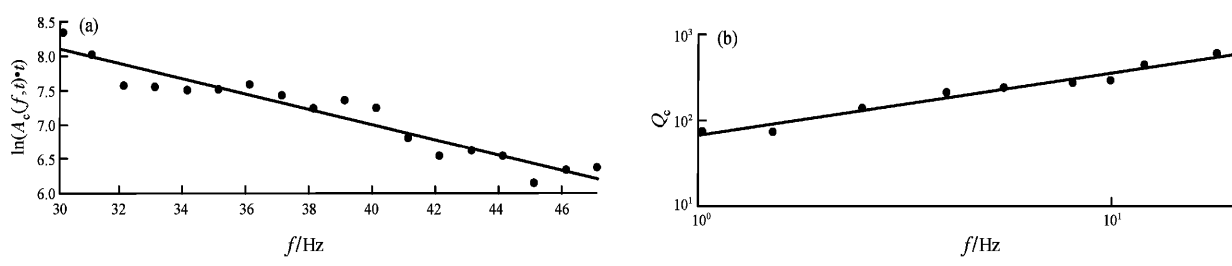


图3 中心频率为 10 Hz 的 $\ln[A_c(f, t) * t]$ 与 t 的数据点及回归线 (a) 和地震尾波 Q_c 值拟合结果 (b)
Fig.3 Pots and tropic between $\ln[A_c(f, t) * t]$ and t when centre frequency is 10 Hz (a) and the sketch map of the relationship between Q_c value and frequency (b)

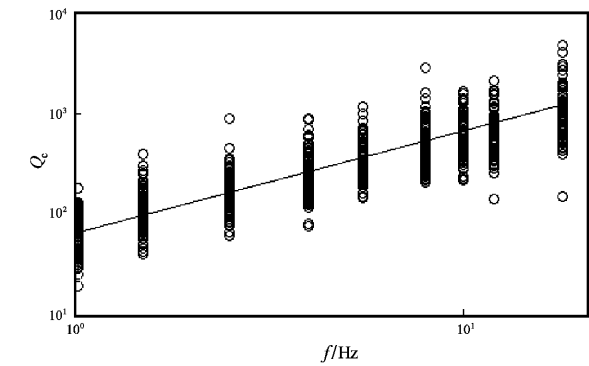


图 4 弥勒地震台记录的 108 个地震不同中心频率尾波 Q_c 值

Fig. 4 Q_c value of 66 earthquakes recorded by Mile digital seismic station at different centre frequency pots

3 计算结果与分析

地震波流逝时间的大小反映了椭球区域的大小和深度。根据 Pulli (1984) 的结果, 当流逝时间为 t 秒时, 所测定的尾波 $Q_c(f)$ 值反映的是以震源和台站为焦点的椭球体介质的平均性质。椭球体方程为

$$\frac{x^2}{(vt/2)^2} + \frac{y^2}{(vt/2)^2 - (r/2)^2} + \frac{z^2}{(vt/2)^2 - (r/2)^2} = 1. \tag{7}$$

式中 r 为震群到台站的大致距离, v 是 S 波传播速度, S 波在云南地区的传播速度平均值为 3.5 km/s。 x 、 y 为地表坐标, z 为深度坐标, t 为延迟时间, 本文中延迟时间为 45 s。针对本文所研究的地震, 以弥勒台为例, 由上式可以得出该台所记录的地震的尾波 Q_c 值反映的最大面积约为 18 000 km², 最大深度为 65 km, 结果主要反映的是震区地壳和上地幔顶部的介质品质因子特征,

所以我们所测算的 Q_c 值可能对震群及云鹏水电站所处区域都有效。

按照上述方法和步骤, 我们分别拟合得到了其它 4 个台站的 Q_0 和 η 值 (表 2), 以及 Q_c 值与频率 f 的关系曲线 (图 5)。图 5 为云鹏水电站周边 5 个台站 9 个分频的 Q_c 值取平均值后的分布结果。从图中可以看出, 5 个台站各个分频的 Q_c 值无明显偏离点, Q_c 值随 f 值增加而趋于分散、随 f 值减小而趋于集中分布。随着频率的增加, Q_c 值差异越来越大。除了弥勒台外, 另外 4 个台站的拟合曲线几乎重叠在一起, 这种高度的一致性可能是多个地震取平均值的结果, 但也可以清晰地看出, 弥勒台的尾波 Q_c 值最低, 弥勒台与震群的距离最近 (图 1), 由于选取的计算 Q_c 值的流逝时间 (从发震时刻开始计算) 比较小, 反映的深度较浅, 因此 Q_c 值很低。利用表 2 中各个台站的 Q_0 值, 可以算出云鹏水电站及其附近区域 Q_0 值的平均结果。采用公式 $Q_c(f) = Q_0 f^\eta$ 进行拟合, 得到 $Q_c(f) = 90.2 f^{0.94}$ 。

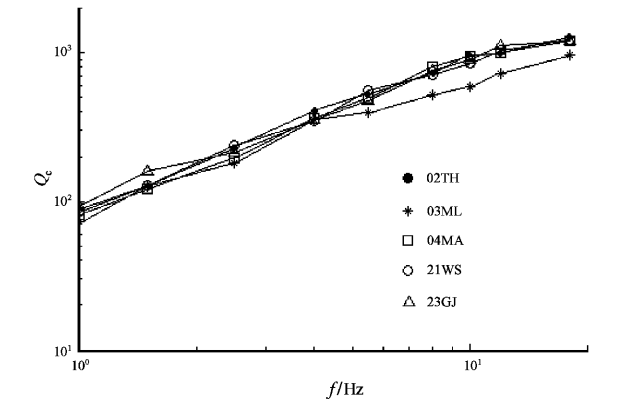
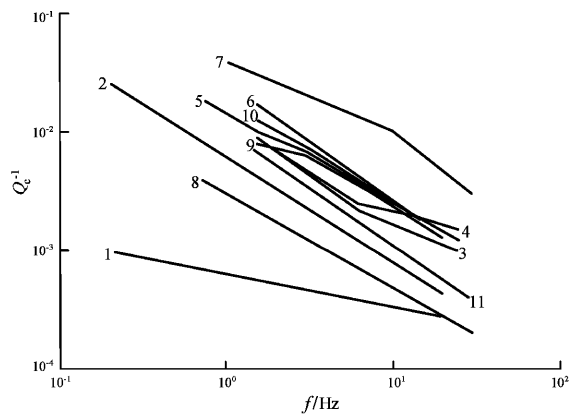


图 5 不同台站记录的地震尾波 Q_c 值及其与频率的关系

Fig. 5 Relation between Q_c value and frequency recorded by different digital seismic stations

表 2 云鹏水电站及其附近区域尾波 Q_c 值计算结果												
Tab. 2 Results of value of Q_c coda wave around Yunpeng Hydropower Station												
台站	地震数	频率点									拟合结果	
		1.0 Hz	1.5 Hz	2.5 Hz	4.0 Hz	5.5 Hz	8.0 Hz	10.0 Hz	12.0 Hz	18.0 Hz	Q_0	η
通海	84	89	125	225	400	522	724	966	990	1 275	93	0.97
弥勒	108	73	125	182	355	393	516	587	724	967	84	0.87
马龙	61	81	121	194	360	490	806	951	994	1 197	84	1.00
文山	94	86	129	236	348	562	713	853	1 038	1 229	92	0.96
个旧	76	92	160	212	352	479	757	905	1 121	1 203	99	0.93

根据已有的研究成果,姚安地震的尾波 $Q_c=49f^{0.95}$ (李白基,秦嘉政,2004),武定地震的尾波 $Q_c=59f^{0.95}$ (秦嘉政等,2001),宁洱余震序列的尾波 $Q_c=53f^{0.88}$ (李琼等,2007)。与这些值相比,云鹏水电站及附近地区的 Q_c 值较高,表明云鹏水电站所处的丘北地区的构造活动水平比姚安、武定等地要低。历史地震活动与这一结论类似——姚安、武定地区历史上都有6级地震活动,而丘北地区历史上有地震记录以来最大的一次地震仅为2000年1月27日丘北 $M_s5.5$ 地震。根据Singn和Herrmann(1983)、Woodgold(1990)、Hartzell等(1996)和秦嘉政等(2001)给出的国内外不同地区不同中心频率的地震尾波衰减公式,我们绘制了图6。从图中可以看到,丘北震群地区的尾波衰减与构造地震活动相对较弱的美国中东部地区和我国河北昌黎地区的尾波衰减明显不同,与构造地震活动频繁、强烈的美国加州斯通峡谷地区和我国云南武定、施甸、宁洱等地区也不尽相同,是介于两者之间的一种活动状况,应该是一种中强构造活动的表现。



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北京昌黎地区;
⑨云南施甸地区;⑩云南宁洱地区;
⑪云南丘北地区

图6 不同地区的尾波 Q_c^{-1} 随频率的变化特征
Fig. 6 Change characteristic of the Q_c^{-1} value and frequency among different areas

由上述方法得到某台站记录到的某次地震事件的尾波 Q_0 值,就可以对它进行时间序列作分析。图7分别给出了云鹏水电站蓄水前和蓄水后地震尾波 Q_0 值随时间变化趋势图。从图中可以看出

有一部分 Q_0 值畸高,这可能是由于计算或波形读取有误造成的,为消除这些畸异点的影响,我们采用1倍均方差(δ)的方法,取出总数据95%置信度内的数据。表3给出了弥勒台记录到的蓄水前后108个地震的2.5 Hz、8 Hz与12 Hz频率点的尾波 Q_c 值的变化情况,表中 \bar{Q}_c 为所有地震的尾波 Q_c 均值, \bar{Q}_1 表示水库蓄水前即2000年1月至2007年2月的平均尾波 Q_c 值, \bar{Q}_2 表示蓄水后即2007年3月至2008年12月的平均尾波 Q_c 值, \dot{Q} 表示尾波 Q_c 值的变化幅度,即 $\dot{Q}=(\bar{Q}_2-\bar{Q}_1)/\bar{Q}_1$ 。

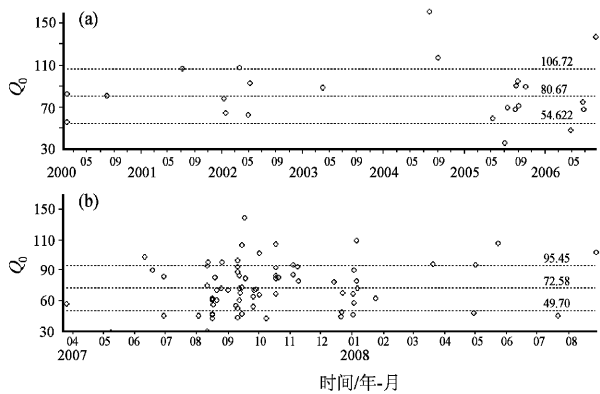


图7 弥勒台记录到的地震尾波 Q_0 值
随时间变化趋势图
(a) 蓄水前;(b) 蓄水后
Fig. 7 Coda Q_0 value variation with time recorded by Mile digital seismic station
(a) before the water storage;
(b) after the water storage

表3 弥勒台地震尾波 Q_c 值蓄水前后变化特征			
Tab. 3 Change of Coda Q_c value recorded by Mile digital seismic station before and after impound water			
参数	频率点		
	2.5 Hz	8.0 Hz	12.0 Hz
\bar{Q}_c	169.11	501.55	647.50
\bar{Q}_1	171.03	537.25	684.56
\bar{Q}_2	167.04	494.28	636.83
\dot{Q}	-2.36%	-8.57%	-7.37%

从图7和表3可以看出,云鹏水电站蓄水后,弥勒台记录到的108个地震的尾波 \bar{Q}_0 值及分频尾波 \bar{Q}_c 值有所下降,表明水库蓄水对水电站库区及其周边区域的地下介质有影响。研究表明,在水

库蓄水初期,短时间内水库水位快速升高,达到设计蓄水位。由于蓄水快速增长,使得库区及附近地区岩体荷载迅速增长。同时由于水的不断渗透,使得岩体孔隙压力不断增大,导致库区及附近地区岩体水文地质条件产生变化。但从蓄水前后的尾波 \bar{Q}_0 值及分频尾波 \bar{Q} 值的变化幅度以及 \bar{Q} 值所反映的韧性层应力积累状况来看,水库蓄水对区域介质影响的幅度较小,作用于此区域的应力没有显著调整的迹象,故水库蓄水短时期内不足以改变该区地下介质的原始状态。致于水库蓄水长时间段有何影响,还需进一步跟踪研究。

4 结论与讨论

本文采用 Aki 单次散射模型,使用高斯滤波器,利用云鹏水电站周边 5 个数字地震台记录到的 108 次地震事件的 423 个地震记录尾波 \bar{Q} 值进行了计算。结果表明,云鹏水电站及其周边地区 \bar{Q} 值与频率的关系为 $\bar{Q}(f) = 90.2f^{0.94}$ 。尾波 \bar{Q} 值与地震活动性呈负相关关系。在地震活动密度大、强度高的地区, \bar{Q} 值都较低,反之, \bar{Q} 值就偏高。本文计算结果表明云鹏水电站所处区域为中等构造活动地区。该区历来为云南强震的弱活动地区,1900 年以来仅发生了 4 次 5 级地震,但自 2000 年以后,该区强震活动有所加强,发生了 2000 年 1 月 27 日丘北 $M_s 5.5$ 、2005 年 8 月 13 日文山 $M_s 5.3$ 地震,因此本文结果对研究云南强震的弱活动地区的介质状态有一定意义。

对云鹏水电站蓄水前后尾波 \bar{Q}_0 值及分频尾波 \bar{Q} 值的变化幅度作对比研究发现,蓄水后尾波 \bar{Q}_0 值及分频尾波 \bar{Q} 值有所下降,但下降的幅度不是很大,表明水库蓄水对水电站库区及其周边区域的地下介质有所影响,但影响程度有限。关于水库蓄水对地震尾波 \bar{Q} 值的影响及其作用机制,目前国内外研究甚少,有待于进一步研究。

参考文献:

安艺敬一. 1991. 构造活动性的地球物理标志——尾波品质因素

- [J]. 魏淳,译. 世界地震译丛, (3): 68-87.
- 黄才中,葛焕称. 1995. 中国东部的尾波衰减特征和 \bar{Q} 值估计[J]. 地震学报, 17(2): 196-202.
- 李白基,秦嘉政. 2004. 云南姚安地区的尾波衰减[J]. 地震学报, 26(1): 47-51.
- 李琼,秦嘉政,钱晓东. 2007. 2007 年宁洱 6.4 级地震余震序列尾波 \bar{Q} 值研究[J]. 地震研究, 30(4): 337-343.
- 李琼,钱晓东,秦嘉政. 2008. 2005 年云南文山地震余震序列尾波 \bar{Q} 值研究[J]. 地震地磁观测与研究, 29(3): 22-28.
- 马宏生,刘杰,张国民,等. 2006. 云南地区尾波 \bar{Q} 值的分布特征及其初步解释[J]. 地震, 26(3): 37-43.
- 钱晓东,李白基,秦嘉政. 2004. 2001 年云南施甸 5.9 级地震余震序列尾波 \bar{Q} 值研究[J]. 地震地磁观测与研究, 25(1): 9-17.
- 秦嘉政,阚荣举. 1986. 用近震尾波估算昆明及其周围地区的 \bar{Q} 值及地震矩[J]. 地球物理学报, 29(2): 145-155.
- 秦嘉政,李白基,钱晓东,等. 2001. 云南武定地震余震近场尾波衰减的区域特征[J]. 地震学报, 23(1): 87-97.
- 苏有锦,刘祖荫,蔡民军,等. 1999. 云南地区强震分布的深部地球介质背景[J]. 地震学报, 21(3): 313-322.
- 王伟君,刘杰. 2004. 1999 年岫岩地震序列尾波 \bar{Q} 的变化过程[J]. 地震, 24(4): 37-44.
- 王伟君,刘杰,陈凌. 2006. 云南地区尾波衰减特征研究[J]. 地震学报, 28(1): 8-19.
- 徐彦. 2002. 澄江地震的后续丘北 5.5 级地震研究[J]. 西北地震学报, 24(1): 92-96.
- 赵小艳,苏有锦,付虹,等. 2007. 欧亚地震带现代构造应力场及其分区特征[J]. 地震研究, 30(2): 146-151.
- Aki K. 1969. Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scatter waves[J]. JGR, 74: 615-631.
- Aki K, Chout B. Origin of coda waves: source, attenuation and scattering effects[J]. JGR, 80: 3322-3342.
- Hartzell S, Leeds A, Frankel A, et al. 1996. Site response for urban Los Angeles using aftershocks of the Northridge earthquake[J]. BSSA, 86: 168-192.
- Puller J J. 1984. Attenuation of Coda Waves in New England[J]. BSSA, 74(4): 1149-1166.
- Singh S, Herrmann R B. 1983. Regionalization of crustal coda Q in the continental United States[J]. JGR, 88: 527-538.
- Suteau A M, Whitcomb J H. 1979. A local earthquake coda magnitude and its relation to duration, moment M_0 and local magnitude M_L [J]. BSSA, 69(2): 353-368.
- Woodgold C D R. 1990. Estimation of Q in eastern Canada using coda waves[J]. BSSA, 88: 411-429.
- Xie J, Nuttli O W. 1988. Interpretation of high-frequency coda at large distances: stochastic modeling and method of inversion[J]. Geophysical J. Int, 95(3): 579-595.

Research of Coda Q_c -Value of Yunpeng Hydropower Station and Its Adjacent Regions

ZHAO Xiao-yan, FU Hong, MAO Yu-ping, WU Cheng-dong

(*Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China*)

Abstract

The coda-wave-attenuation-quality factor Q_0 in Yunpeng Hydropower Station area and its adjacent regions is estimated using Aki's single-scattering attenuation model based on 108 local seismic events recorded by 5 regional digital seismic stations from January 2000 to December 2008. The result shows that the relationship between Q_0 and f can be described as $Q_c(f) = 90.2f^{0.94}$. Compared with the ones in other areas of Yunnan with strong tectonic seismic activity, the values are higher in this area with moderate tectonic activity. The Q_0 and Q_c values declined a little after the Yunpeng reservoir impounded water; this means that the water storage has influenced the medea character in this area, but the effect is limited.

Key words: Yunpeng Hydropower Station; Q_c -value of coda; Aki's single scattering attenuation model