

用强震动观测资料估算 2007 年
宁洱 M_s 6.4 地震震源参数*

崔建文¹, 卢大伟², 高 东¹, 李世成¹

(1. 云南省地震局, 昆明 650224; 2. 中国地壳运动监测工程研究中心, 北京 100080)

摘要: 通过对 2007 年 6 月 3 日宁洱 M_s 6.4、 M_s 5.1 两次地震的强震动台站观测记录的谱分析, 估算了两次地震的辐射能量、地震矩、矩震级等震源参数。结果表明, 虽然对拐角频率、应力降等参数各台站的估算结果离散性较大, 效果不甚理想, 但利用近场强震动观测记录, 可以对地震辐射能量、地震矩、矩震级 3 个参数作出较好的估计。

关键词: 宁洱地震; 强震动记录; 傅氏位移谱; 震源参数

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 0666 (2009) 增刊 - 0443 - 06

0 概述

北京时间 2007 年 6 月 3 日 5:34:56, 云南省宁洱县境内发生 M_s 6.4 强烈地震, 震中位置 101.1°E、23.0°N。分布于震区及其周边地区的 20 多个数字强震动台站获取了主震及其随后发生的一系列余震地震动记录 (崔建文等, 2007)。利用地震动记录的谱分析方法 (Boatwright, 1978, 1980) 获取中强地震的震源参数如地震辐射能量 E_s 、地震矩 M_0 、矩震级 M_w 和拐角频率 f_c 等是一个较为成熟的方法, 在国内外均有广泛的应用 (秦嘉政等, 2003, 2005, 叶建庆等, 2007)。受观测资料的限制, 我国利用强震动观测记录的谱分析获取震源参数的工作还不多见。但通过“十五”项目《中国数字地震观测网络》的建设, 在

全国建成了由 2 000 多个台站组成的强震动观测网络, 经过几年的运行, 台网获取了一大批强震动观测数据, 与远场测震观测数据相比, 这些数据包含了更为丰富的地震震源的信息, 应用这些数据研究震源参数及震源过程, 将有可能更好地揭示地震的机制特征。

1 数据获取

在获取的强震动观测记录中, 本文选取了 M_s 6.4 主震及 M_s 5.1 强余震的具有高信噪比的观测记录进行震源参数估算。对于这两次地震, 云南省地震监测中心、中国地震台网中心和 USGS 给出的地震震级及位置不尽相同 (表 1), 对于震中, 本文采用云南地震台网的结果。表 2 给出了用于估算震源参数的强震动台站的情况。

表 1 宁洱 M_s 6.4、 M_s 5.1 地震参数
Tab. 1 The Parameters of Ninger M_s 6.4, M_s 5.1 earthquakes

	主震			强余震		
	震级	震中	深度/km	震级	震中	深度/km
云南地震监测中心	M_s 6.6	23.05°N 101.02°E	5	M_s 5.1	23.00°N 101.07°E	10
中国地震台网中心	M_s 6.4 M_w 6.0	23.08°N 101.13°E	6	M_s 4.9	23.03°N 101.21°E	6
USGS	M_s 6.3 M_w 6.1	23.03°N 101.05°E	5	M_w 4.9	23.03°N 101.16°E	10

* 收稿日期: 2009 - 11 - 23.
基金项目: 地震行业科研专项 (200808061) 和《云南省中青年学术技术带头人后备人才培养计划》(2004PY01 - 26) 联合资助。

表 2 部分获取 $M_s6.4$ 及 $M_s5.1$ 地震记录的强震动台
Tab. 2 Some strong motion stations obtaining recordings
of $M_s6.4$ and $M_s5.1$ earthquakes

台站 名称	台站 编号	北纬 /(°)	东经 /(°)	场地		获取记录情况	
				性质	类型	$M_s6.4$	$M_s5.1$
德化	53PDH	23.0019	100.884	土层	II	√	√
勐先	53PMX	23.0525	101.207	土层	II	√	√
正兴	53JZX	23.3306	100.964	土层	II	√	√
曼歇坝	53SML	22.6913	100.9382	土层	II	√	
六顺	53SLS	22.719	100.629	土层	II	√	√
普文	53JPW	22.5072	101.056	土层	II	√	√
大渡岗	53JDD	22.3712	100.930	土层	II	√	√
思茅港	53SMG	22.4914	100.5836	土层	II	√	

注：“√”表示获取记录。

2 计算方法

地震动 S 波位移 $d(t)$ 和速度 $v(t)$ 的傅氏振幅谱 $D(f)$ 、 $V(f)$ 可近似表示为 (Brune, 1970):

$$D(f) = \frac{\Omega}{1 + (f/f_c)^2}, \tag{1}$$

$$V(f) = \frac{2\pi f \Omega}{1 + (f/f_c)^2}. \tag{2}$$

式中, $D(f)$ 为地震动位移谱, $V(f)$ 地震动速度, f 为频率, f_c 为拐角频率, 为低频位移振幅谱平台值。根据 Andrew (1986) 的研究, 令:

$$I_D = 2 \int_0^\infty D^2(f) df, \tag{3}$$

$$I_V = 2 \int_0^\infty V^2(f) df. \tag{3}$$

则有

$$E_s = S_a \rho \beta I_V, \tag{5}$$

$$M_0 = 4\pi r \rho \beta^3 \Omega \tag{6}$$

式中 E_s 为地震辐射能量, M_0 为地震矩, ρ 为介质密度, 取 2.8 g/cm^3 , β 为剪切波速度, 取为 3.5 km/s , $S_a = 4\pi r^2$ 是球心在震源、半径为 r 的球形震源体的表面积, r 为台站到震源的距离。且有:

$$\Omega = 2 \frac{I_V^{0.75}}{I_D^{0.25}}, \tag{7}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{I_V}{I_D}}, \tag{8}$$

$$\Delta\sigma = 2\pi r \rho I_V^{5/4} I_D^{-3/4} / 2.34. \tag{9a}$$

根据 Brune 圆位错模式, 还可估计震源的等效位错半径 $\gamma = \frac{2.34\beta}{2\pi f_c}$, 断层破裂面积 $A = \pi \gamma^2$, 位错 $U = \frac{M_0}{\mu A}$, $\mu = 3.4 \times 10^{11} \text{ Dyne/cm}^2$ 。则应力降

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16\gamma^3}. \tag{9b}$$

根据 M_0 可确定矩震级 M_w (Kanamori, 1977)

$$M_w = \frac{2}{3} \lg M_0 - 10.7. \tag{10}$$

在获取地震动位移的情况下, 可以通过上述关系式确定震源的一系列参数。

3 数据处理及结果

强震动观测加速度纪录经一次积分得到速度时程, 经两次积分得到位移时程。受背景噪声等各种因素的影响, 在进行数值积分获取速度、位移时程时, 需要对全频带的加速度纪录进行低截滤波。图 1 为德化台记录的 $M_s6.4$ 主震加速度纪录及其速度和位移时程, 进行数值积分时, 低截滤波频率取 0.01 Hz , 没有做高频滤波。

从近场强震动记录中很难提取完整的 P 波震相, 本文的计算基于 S 波。选取 S 波时采用了加 5% cosine Taper 的矩形窗。三道中, 本文只针对 NS 向进行计算。对选取的速度、位移时程 S 波作傅氏变换, 可得到速度、位移时程傅氏振幅谱, 则按上述公式, 可计算地震的矩震级 M_w 、地震矩 M_0 、地震辐射能量 E_s 、拐角频率 f_c 、应力降 $\Delta\sigma$ 等震源参数。图 2、图 3 分别为两次地震各台站位移傅氏谱。表 3 是由各个观测台站估算的 $M_s6.4$ 主震以及 $M_s5.1$ 余震的震源参数。表中拐角频率的计算分别采用了位移傅氏振幅谱曲线拟合以及式 (8), 应力降分别采用式 (9a)、(9b) 计算。

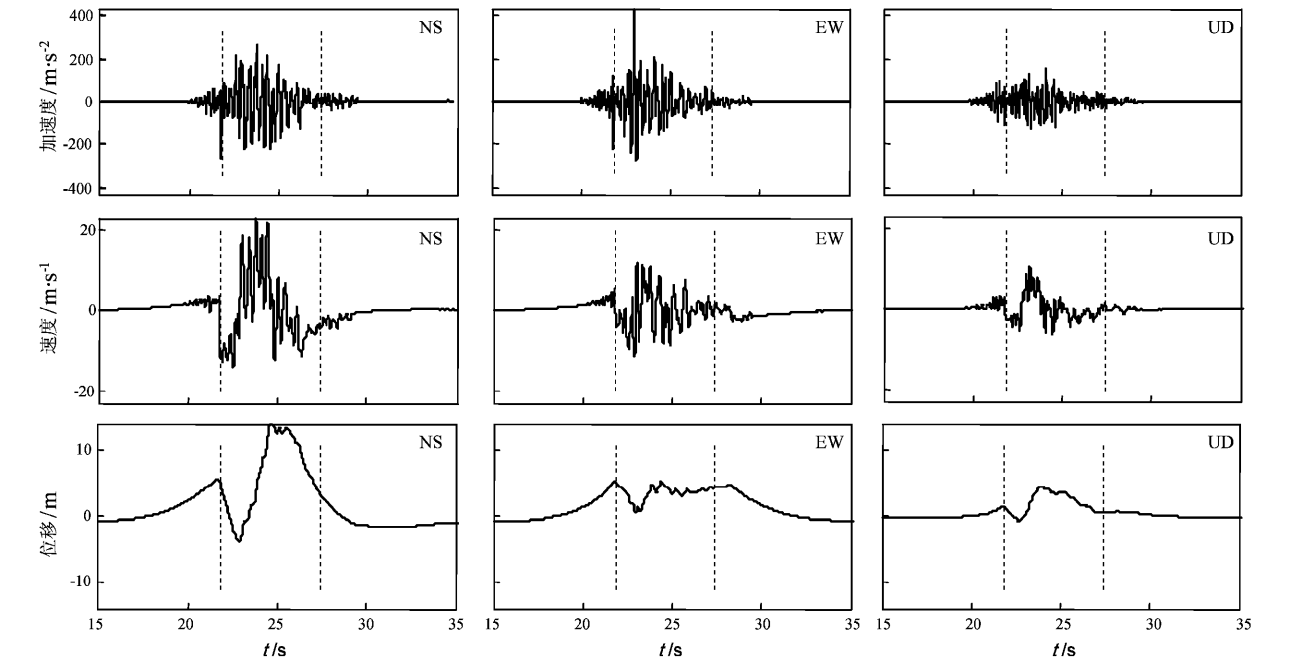


图 1 德化台 $M_s6.4$ 地震加速度、速度和位移时程（图中两条虚线之间为选取的 S 波）

Fig. 1 Acceleration, velocity and displacement time history of $M_s6.4$ earthquake in Dehua Station
(S wave is selected between two dash line)

4 讨论及结语

由表 3 可以看到，就平均值而言，两次地震的矩震级与 USGS 的结果相差不大，而各台站对矩震级 M_w 的估值在可接受的范围内，因此，虽然各台站对地震矩 M_0 和地震辐射能量 E_s 的估值差别较

表 3 由强震动观测记录估算的 $M_s6.4$ 主震和 $M_s5.1$ 余震的震源参数
Tab. 3 The source parameters of $M_s6.4$, $M_s5.1$ earthquakes from strong motion recordings.

震级	台站	震中距 /km	矩震级	地震矩 /dyn · cm	地震辐射能量 /ergs	拐角 频率 ^①	拐角 频率 ^②	应力降 ^③ /bar	应力降 ^④ /bar	位错半径 /km	破裂面积 /km ²	位错 /cm
$M_s6.4$	德化	14.6	6.60	1.007 71E + 26	1.395E + 22	0.157	0.160	77.28	254.93	8.29	216.10	137.15
	勐先	19.4	6.72	1.489 55E + 26	3.884E + 21	0.075	0.080	12.34	48.02	17.42	952.80	45.98
	大渡岗	76	5.67	4.053 19E + 24	6.813E + 20	0.512	0.498	107.24	309.62	2.55	20.39	58.46
	六顺	54.1	6.04	1.449 64E + 25	1.275E + 21	0.377	0.262	152.84	162.00	3.46	37.65	113.23
	曼歇坝	40.7	6.06	1.554 68E + 25	3.238E + 21	0.484	0.342	349.11	383.69	2.69	22.75	201.02
	思茅港	76.3	6.17	2.253 88E + 25	6.837E + 21	0.343	0.342	180.12	558.75	3.80	45.30	146.35
	正兴	34.6	5.87	7.944 08E + 24	1.535E + 22	0.214	0.898	15.28	3 559.27	6.10	117.05	19.96
	普文	60.5	6.30	3.560 22E + 25	9.852E + 21	0.378	0.285	378.39	509.74	3.45	37.45	279.58
	平均值		6.178 5	4.373 84E + 25	6.883E + 21	0.317 4	0.358 6	159.08	723.25	5.97	181.19	125.22
$M_s5.1$	德化	18.7	4.89	2.742 64E + 23	1.242E + 20	1.420	1.701	155.15	834.06	0.92	2.65	30.48
	勐先	15.5	4.62	1.078 37E + 23	1.92E + 19	2.264	1.701	247.37	327.95	0.58	1.04	30.47
	大渡岗	71.3	5.37	1.420 68E + 24	1.364E + 20	0.557	0.586	48.40	176.80	2.34	17.23	24.25
	六顺	54.7	4.78	1.881 3E + 23	1.369E + 19	0.667	1.048	11.04	134.03	1.95	11.99	4.61
	正兴	38.2	4.73	1.582 74E + 23	5.064E + 19	1.532	1.820	112.47	589.37	0.85	2.27	20.47
	普文	54.8	4.98	3.722 63E + 23	6.677E + 19	1.604	1.128	303.76	330.39	0.81	2.07	52.81
	平均值		4.896 5	4.202 4E + 23	6.848E + 19	1.340 8	1.330 7	146.36	398.77	1.24	6.21	27.18

注：① 位移傅氏振幅谱曲线拟合结果；② (8) 式计算结果；③ (9a) 式计算结果；④ (9b) 式计算结果。

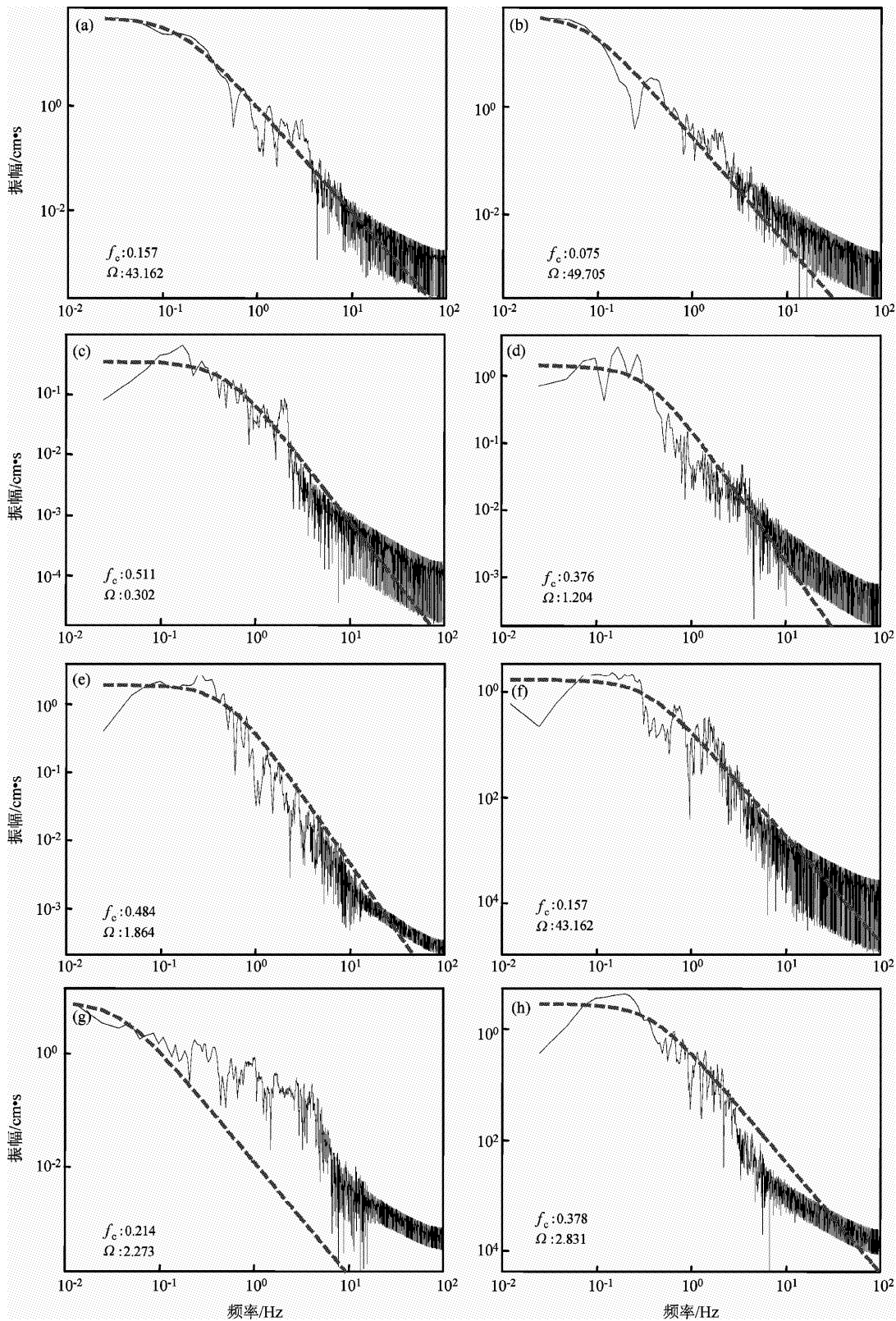


图2 $M_s6.4$ 地震强震动台位移振幅谱 (图中 f_c 、 Ω 为通过曲线拟合得到的拐角频率和位移谱低频平台值)
(a) 德化台; (b) 勐先台; (c) 大渡岗台; (d) 六顺台; (e) 曼歇坝台; (f) 思茅港台; (g) 正兴台; (h) 普文台
Fig. 2 The displacement amplitude spectrum of $M_s6.4$ earthquake
(f_c , Ω are corner frequency and displacement spectrum level in low frequency obtained through curve fitting.)
(a) Dehua; (b) Mengxian; (c) Dadugang; (d) Liushun; (e) Manxieba; (f) Simaogang; (g) Zhengxing; (h) Puwen

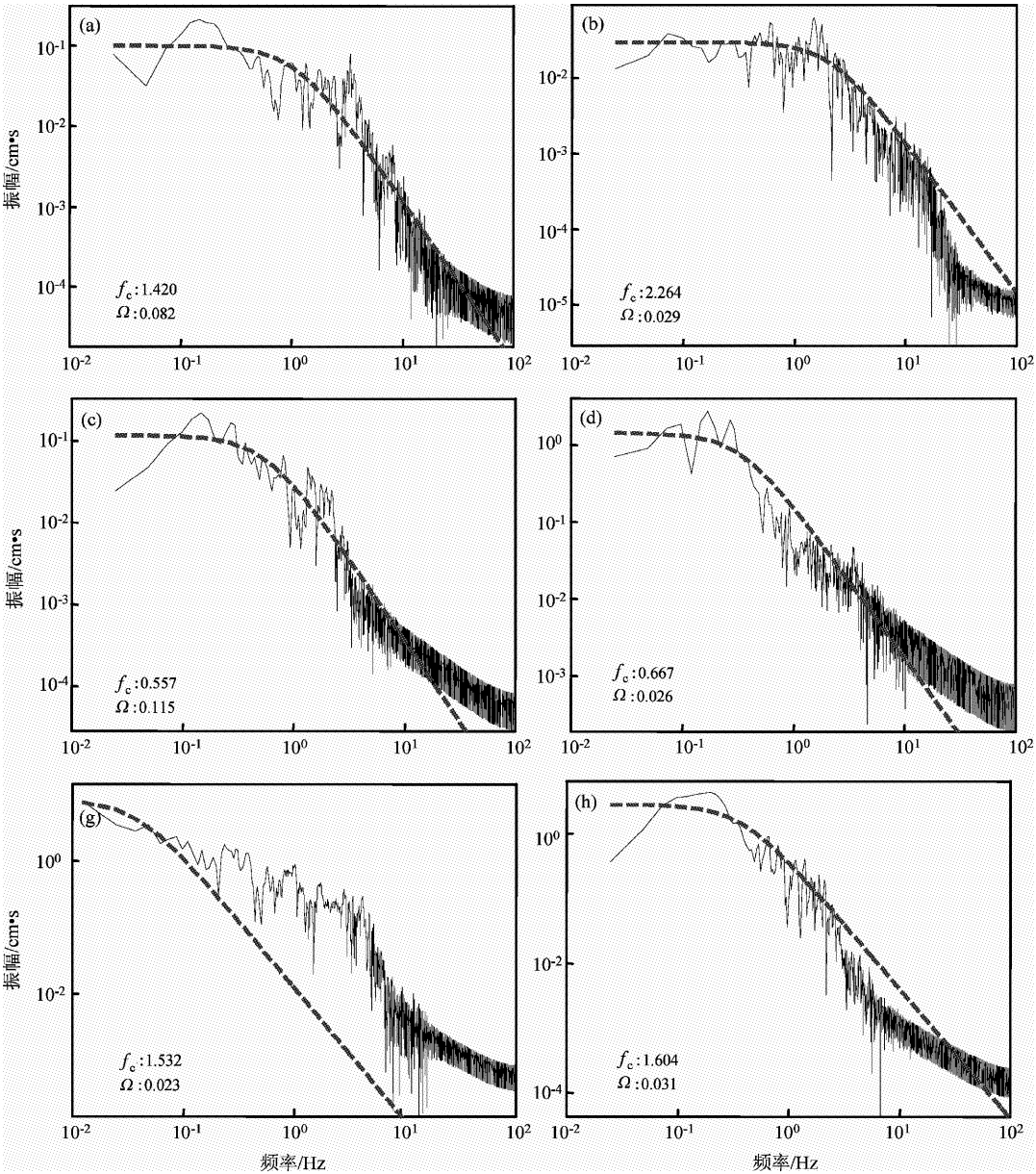


图 3 $M_s5.1$ 地震强震动台位移振幅谱

(a) 德化台; (b) 勐先台; (c) 大渡岗台; (d) 六顺台; (e) 正兴台; (f) 普文台

Fig. 3 The Displacement Amplitude Spectra M_s of $M_s5.1$ Earthquake

(a) Dehua; (b) Mengxian; (c) Dadugang; (d) Liushun; (e) Zhengxing; (f) Puwen

大,但也是可接受的。但对拐角频率、应力降、破裂半径、破裂面积和位错的估值较为离散,甚至超出了合理的范围,如对主震应力降的估值,正兴台的结果为 3559.27 bar,明显不合理。

对于拐角频率,多数情况下曲线拟合方法的计算结果与式(8)相近,但两种方法计算的应力降吻合程度很差。因此,从本文计算结果上看,近场强震动记录可以较好地用于确定地震的矩震级、地震矩和辐射能量,但对拐角频率、应力降

等其它参数的估值效果不佳,这可能与本文没有考虑影响谱分析方法的因素有关。首先,本文的计算简单地采用了 NS 向记录,如能将记录转换到径向和切向,应该有更好的效果;其次,震源距的精度对结果有较大的影响,本文之所以采用云南地震台网的定位结果,就是在计算过程中发现采用这一震中距能给出更为合理的矩震级估计,要获取更好的矩震级估值,就需要更精确的震源距;此外,场地效应的影响会造成地震谱成份的

失真，所以相应的场地影响校正十分必要。

本文的结果表明，应用强震动观测记录可以获取对矩震级、地震矩和地震辐射能量的合理估计，这对于提升强震动台网的功能具有重要的意义。

参考文献：

崔建文,李正光,赵云旭. 2007. 2007 年宁洱 6.4 级地震强震动观测记录[J]. 地震研究,30(4):384-388.

黄明伟. 2006. 使用强地动纪录估算 1999 年集集大地震余震之辐射能量与地震力矩[D]. 中坜市:台湾中央大学.

秦嘉政,钱晓东,叶建庆. 2005. 2001 年施甸 $M_s5.9$ 地震序列的震源参数研究[J]. 地震学报,27(3):250-259.

秦嘉政,叶建庆,钱晓东. 2003. 2000 年云南姚安地震的震源参数[J]. 地球物理学报,46(4):633-641.

叶建庆,张建国,杨晶琼,等. 2007. 红河断裂带两侧地块地震震源参数研究[J]. 地震研究,30(3):241-247.

Andrews D J. 1986. Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size[C]. //Das S, J Boatwright, C H Scholz, (Eds.), Earthquake Source Mechanics. Washington DC: Am Geophys Union, 259-267.

Boatwright J. 1980. A spectral theory for circular seismic sources: Simple estimates of source dimension, dynamic stress drop and radiated seismic energy[J]. BSSA, 70:1-27.

Boatwright J. 1978. Detailed spectral analysis of two small New York state earthquakes[J]. BSSA, 68:117-1131.

Brune J N. 1970. Tectonic stress and spectra of seismic shear wave from earthquake[J]. JGR, 75(4):4997-5009.

Kanamori H. 1977. The energy release in great earthquakes[J], JGR, 82(20):2981-2987.

Estimates of Source Parameters of 2007 Ninger $M_s6.4$ Earthquake from Strong Motion Recordings

CUI Jian-wen, LU Da-wei², GAO Dong¹, LI Shi-cheng¹

- (1. Yunnan Earthquake Administration Bureau, Kunming 650224, Yunnan, China)
- (2. National Earthquake Infrastructure Service, Beijing 100036, China)

Abstract

From the spectrum analysis on strong motion recordings of 3, June, 2007 Ninger $M_s6.4$, $M_s5.1$ earthquakes from some stations, this paper estimates the source parameters of two earthquake such as seismic radiated energies, seismic moments, moment magnitude and so on. The results show although the estimates of corner frequency, stress drop and so on in different stations vary widely, it is good to estimate seismic energies, seismic moment and moment magnitude.

Key words: Ninger Earthquake, Strong Motion Recordings, Fourier Spectrum, Seismic Source Parameters