

应用强震动观测资料估算 2014 年 鲁甸 M_s 6.5 地震震源参数^{*}

崔建文, 段建新, 杨黎薇, 钟玉盛, 赵 昆

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 通过对 2014 年鲁甸 M_s 6.5 地震 13 个强震动台站观测记录的谱分析, 估算了地震矩、矩震级等震源参数, 得到的平均矩震级 $M_w = 6.3$ 。讨论了震源 Brune 模型位移谱形状系数以及局部场地条件对估算参数的影响, 结果显示, 谱形状系数对参数估算影响不大, 但 ω^2 和 ω^3 源谱模型分别能与远场和近场记录获取的源谱吻合更好; 同时, 仅在场地的卓越频率小于 1 Hz 时, 场地条件影响参数的估算, 由于 13 个台站均处于 I ~ II 类场地上, 局部场地条件对本文参数计算结果影响不大。

关键词: 鲁甸地震; 强震动记录; 震源参数; 位移谱

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)04-0605-08

0 前言

震源参数谱分析 (Boatwright, 1978, 1980; 黄明伟, 2006) 是个被广泛应用的方法, 在云南地区, 秦嘉政等 (2003, 2005)、叶建庆等 (2007) 应用该方法研究了发生于云南的多个地震序列, 对地震特征获得了有益的认识。2014 年 8 月 3 日, 云南省鲁甸县发生 M_s 6.5 强烈地震, 震中位置 (27.1°N, 103.3°E), 震源深度 12 km。分布于震区及其周边地区的 80 多个强震动台站获取了主震记录 (崔建文等, 2014)。本次地震发生在两条断层的交汇处, 具有较为复杂的震源过程 (Li *et al.*, 2015; 张勇等, 2015), 对这次地震更深入的了解, 有赖于获取震源的更多信息。本文从 80 多个强震动记录中, 选取部分信噪比较高的记录, 采用震源参数谱分析方法计算震源参数 (地震矩 M_0 、矩震级 M_w 、拐角频率 f_c 以及断层尺度等), 其结果有助于加深对本次地震的物理过程、震源特征认识。

1 数据

各地震监测机构给出的鲁甸 M_s 6.5 地震震级

及震中位置不尽相同 (表 1), 中国地震台网中心 (CENC) 给出的震中位置与云南地震台网中心结果是一致的, 只是前者给出的数据精度仅到小数点后 1 位, USGS 虽然也给出高精度的震中坐标, 但从现场破坏情况看, 其坐标位置偏离了极震区, 后期开展的一些地震定位工作 (徐甫坤等, 2014; 何晓慧等, 2015; 王未来等, 2014; 张广伟等, 2014; 赵小艳, 孙楠, 2014) 均给出了与云南地震台网中心相近的震中坐标, 但震源深度从 9.5 km 到 15 km 不等, 有明显差距。张广伟等 (2014) 采用 gCAP 方法, 得到震源最佳质心深度为 5 km, 其双差分定位的震源深度是 13.3 km, 前者反映了地震破裂面的质心深度, 代表了地震能量的集中点, 后者是地震破裂的开始点, 表明地震由较深的位置开始破裂, 然后向浅部发展, 与张勇等 (2014, 2015) 的震源破裂过程相一致。

表 1 鲁甸 M_s 6.5 地震参数

Tab. 1 Parameters of Ludian M_s 6.5 earthquakes

震源参数	云南地震台网	CENC	USGS
震级	M_s 6.5	M_s 6.5, M_w 6.2	M_s 6.3, M_w 6.1
$\varphi_N / (^\circ)$	27.099 4	27.1	27.245
$\lambda_E / (^\circ)$	103.340 0	103.3	103.427
深度/km	5	12	10

* 收稿日期: 2016-04-20.

基金项目: 国家自然科学基金——基于竖向台阵记录数据的强震动作用下土非线性动力特征的实证研究 (51578514) 资助.

表 2 参与震源参数计算的强震动台站概况

Tab. 2 Basic parameters of strong motion stations used in source parameter estimation

台站名称	台站代码	北纬/(°)	东经/(°)	震中距/km	场地	
					性质	类型
茨院	53LDC	27.104	103.384	27.8	土层	II
龙头山	53LLT	27.220	103.601	3.4	土层	II
马树	53QMS	26.757	103.249	40.2	土层	II
铅厂	53QQC	26.942	103.237	21.6	土层	II
巧家	53QJT	26.911	102.922	47.8	基岩	I
迤车	53HYC	26.815	103.514	36.3	土层	II
者海	53HZH	26.563	103.623	66.2	土层	II
会泽	53HZX	26.413	103.312	77.1	土层	II
昭通	53ZTT	27.320	103.710	42.7	基岩	I
会东新街	51HDX	26.822	102.744	68.0	土层	II
会东铅锌	51HDQ	26.672	102.820	71.5	土层	II
布拖拖觉	51BTT	27.542	102.842	69.5	土层	II
普格白水	51PGB	27.324	102.575	80.4	土层	II

$$D(f) = \frac{\Omega_0}{1 + (f/f_c)^n}, \tag{3}$$

$$V(f) = \frac{2\pi f \Omega_0}{1 + (f/f_c)^n}. \tag{4}$$

式中， f_c 为拐角频率， Ω_0 为震源位移谱零频极限值， n 是控制谱形状的常数。对实际观测的台站地面运动加速度记录，经积分获取速度、位移时程，通过式（2）消除几何衰减、场地响应和介质非弹性耗损等因素后，可得到震源的地震动位移和速度的傅里叶谱 $D_0(f)$ 、 $V_0(f)$ ，相应的振幅谱 $|D_0(f)|$ 、 $|V_0(f)|$ 曲线可用式（3）、（4）进行拟合，从而可确定式中的参数 Ω_0 、 f_c 。

确定了 Ω_0 、 f_c 之后，可确定地震矩 $M_0 = 4\pi r \rho \beta^3 \Omega_0 / R_{\theta\varphi}$ 、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 $U = \frac{M_0}{\mu A}$ 、应力降 $\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16\gamma^3}$ 等参数。其中， r 为台站到震源的距离， $\rho = 2.8 \text{ g/cm}^3$ 为介质密度， β 为剪切波速度， $R_{\theta\varphi}$ 为辐射因子，取为 0.63， $\mu = 3.4 \times 10^4 \text{ MPa}$ 为剪切模量。

进一步可确定矩震级 M_w 为（Kanamori, 1977）

$$M_w = \frac{2}{3} \lg M_0 - 10.7. \tag{5}$$

3 数据处理及结果

3.1 记录时程积分及旋转

强震动加速度记录经一次积分得到速度时程，经两次积分得到位移时程。两次积分获取位移时程时存在着严重的漂移（Akkar, Boore, 2009）。目前，已有多种消除漂移的方法（Akkar, Boore, 2009；Chiu, 2012, Huang *et al*, 2013），其中，高通滤波是最常用也非常有效的方法，但会丢失在震源参数谱分析法中最具价值的低频信息，采用多项式拟合方法消除地震动时程中存在的趋势项，可以在保留地震动低频信息的同时，解决加速度时程积分产生的漂移问题。图 4 显示了采用高次多项式拟合消除时程趋势的效果，图 4a 是鲁甸地震龙头山台的東西向未进行漂移校正的位移记录，图 4b 是经过 21 次多项式趋势校正的位移记录，可以看到，大的趋势漂移已经基本消除。实际处理时，多项式的次数根据漂移的程度选择。

对记录进行谱分析时，选用记录的 SH 波，为此，将 2 个记录水平向旋转到地震波传播方向（径向 R）及垂直地震波传播的方向（切向 T），并从切向记录中选择 SH 波。图 5 显示了位移时程曲线方位角旋转前后及 SH 波选取情况。

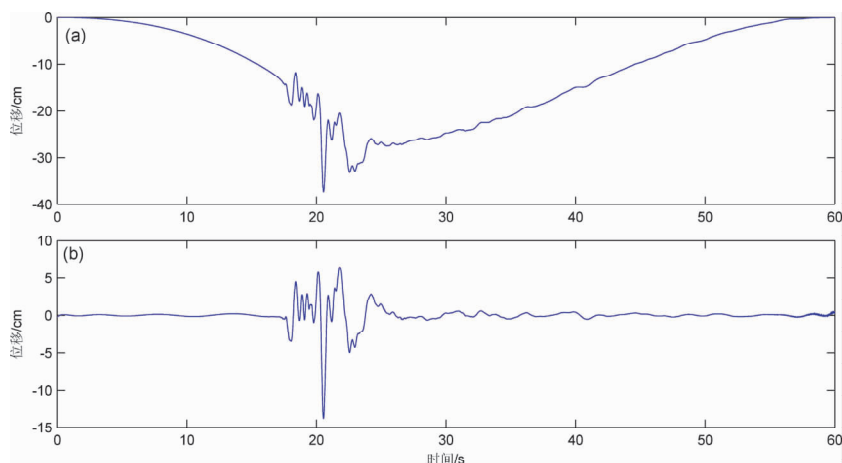


图4 高次多项式位移时程曲线漂移校正前 (a) 及校正后 (b) 效果对比

Fig. 4 Effect comparison of displacement time-history curve drifting with high order polynomial (b) before correction (a) and after correction (b)

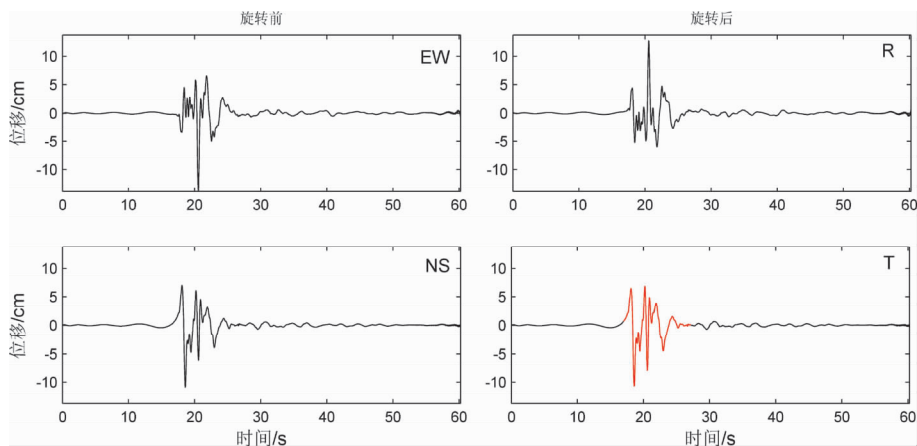


图5 时程记录旋转 (图中红线为在切向时程中的SH波)

Fig. 5 The rotation of recording (the red line is SH wave in tangential time history)

3.2 影响校正

将观测的地面运动谱还原到震源的运动谱, 需进行仪器、传播路径和局部场地影响的校正。由于获取记录的强震动仪的幅频特性曲线在 0 ~ 200 Hz 内是值为 1 的平坦直线, 在本文讨论的频带内不需进行仪器的影响校正。

传播路径的影响包括波的几何扩散和非弹性衰减。几何扩散效应校正采用 Atkinson 和 Mereu (1992) 的模型:

$$G(R) = \begin{cases} r^{-b_1}, & r \leq r_1; \\ r_1^{b_2-b_1} r^{-b_2}, & r_1 \leq r < r_2; \\ r_1^{b_2-b_1} r_2^{b_3-b_2} r^{-b_3}, & r_2 \leq r. \end{cases} \quad (6)$$

式中, r 为震源距, 并且取 $b_1 = 1.0$, $b_2 = 1.0$, b_3

$= 1.0$, $r_1 = 60$ km, $r_2 = 100$ km (Lam, 2000; 阮祥, 2007)。

对云南东部地区, 苏有锦等 (2006) 研究得到的介质非弹性品质因子 $Q = 199.6f^{0.434}$, 则在式 (1) 中取 $c(f) = \frac{\pi f}{Q(f)\beta}$ 可对获取的位移时程频谱

进行介质的非弹性衰减校正, 其中 β 为剪切波速。

局部场地的校正需要场地的频率响应, 但由于场地响应在 1 Hz 以上时才有较明显的效应, 主要影响高频成分, 对于 1 Hz 以下的地震动影响有限, 因此, 这里不做考虑, 后面结合实际数据分析结果, 讨论其影响。

3.3 数据处理结果

对 13 个时程记录进行方位角旋转、积分、漂移校正以及各种影响校正, 对选取的 SH 波进行

5% Cosine Taper 的矩形窗处理。对选取的速度、位移时程 SH 波作傅氏变换,可得到震源的速度、位移傅氏振幅谱,用式(3)拟合震源位移傅氏振幅谱,确定 Ω_0 、 f_c 。拟合时,对式(3)中的控制形状的常数 n ,同时取 2、3 两种情况,并采用遗传算法搜寻使拟合误差最小的 Ω_0 、 f_c ,进而计算地震的矩震级 M_w 、地震矩 M_0 、应力降 $\Delta\sigma$ 等源参数。这里,以震中龙头山台记录为例,图 6a 显示了该台站位移源谱及其拟合情况。表 3 是由各个观测台站估算的 $M_s6.5$ 主震的震源参数,可以看到,利用各台站记录计算得到的震源参数有差异,最终结果通过平均 13 个台站的结果得到。为消除个别台站的异常值,采用了 Archuleta 方法(王生文等, 2014) 计算平均值,其计算公式为

$$\begin{cases} x = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln x_i\right), \\ \Delta x = \exp\left(\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\ln x_i - \ln x)^2}\right). \end{cases} \quad (7)$$

式中, x_i 为第 i 个台站的参数, x 为 Archuleta 平均值, Δx 为对应的标准差。

此外,可在频域里计算各台站源谱的平均值,再进行 Brune 源模型拟合求相关参数。图 6b 显示了 13 个台站的源谱线、其平均谱曲线以及拟合的源谱。

ω^2 模型和 ω^3 模型给出的源参数非常相近,相应的结果列于表 3 中(表中仅列出了 ω^3 模型的结果)。

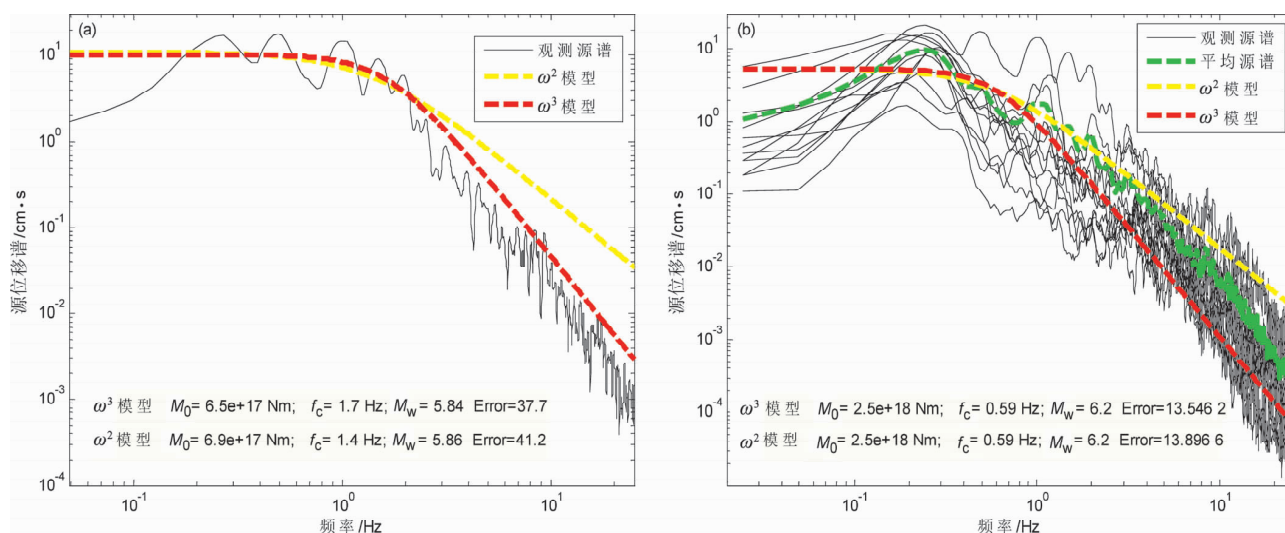


图 6 龙头山台 (a)、13 个台站 (b) 震源位移谱及其平均以及 ω^2 、 ω^3 源模型

Fig. 6 The source displacement spectrums of Longtoushan Station (a) and thirteen stations (b), and its average value and the corresponding ω^2 , ω^3 source model

4 讨论

4.1 结果分析

从表 3 可以看到, 13 个台站之间参数估计结果有差异, 就地震矩、矩震级、拐角频率而言, 除龙头山台站以外, 其他台站的离散性较小, 平均矩震级 $M_w = 6.3$, 与实际情况相吻合; 但震源的等效位错半径、应力降、断层位错等参数离散较大, 其原因在于, 震源的等效位错半径对拐角频率较敏感, 后者的较小变化将导致前者较大的变化, 而应力降、断层位错等其他参数均与震源

的等效位错半径的平方、三次方成正比或反比, 小的拐角频率差异在应力降等参数中得到了相当程度的放大。导致各台站估计结果差异的因素有很多, 如信噪比、拟合方法等, 而台站的震中距、方位的分布也应该是因素之一。在一个方位上, 估计值也许会偏大, 而在另一个方位上, 也许会偏小, 因此, 如果能拥有在震中距、方位角上完善分布的台站, 则这些台站的估计值的平均值应该能接近于期望的结果。本文 13 个台站分布在除震中上方 NNW—NNE 方位以外其它方位和震中距上, 较好地包含了方位角、震中距影响的信息, 13 个台站估计值的平均应能较好地消除各台站因方

表 3 由强震观测记录估算的 $M_s6.5$ 主震的震源参数 (ω^2 、 ω^3 模型)Tab. 3 The source parameters of $M_s6.5$ main shock estimated from strong motion observation recordings (ω^2 、 ω^3 model)

震级	台站	震中距/km	M_w	M_0/Nm	f_c/Hz	应力降/MPa	位错半径/km	破裂面积/ km^2	位错/m
$M_s6.5$	茨院	27.8	6.0	1.12E+18	0.63	72.39	1.89	11.24	2.93
	龙头山	3.4	5.8	6.45E+17	1.65	748.91	0.72	1.64	11.58
	马树	40.2	6.0	1.01E+18	0.65	71.69	1.83	10.56	2.81
	铅厂	21.6	6.1	1.74E+18	0.46	43.78	2.59	21.09	2.43
	巧家	47.8	6.4	4.54E+18	0.50	146.69	2.38	17.85	7.48
	迤车	36.3	6.4	4.10E+18	0.43	84.26	2.77	24.13	5.00
	者海	66.2	6.5	5.52E+18	0.41	98.34	2.91	26.54	6.12
	会泽	77.1	6.2	1.91E+18	0.54	77.74	2.21	15.30	3.67
	昭通	42.7	6.1	1.72E+18	0.53	66.19	2.25	15.88	3.18
	会东新街	68	6.2	2.61E+18	0.44	57.47	2.71	23.05	3.33
	会东铅锌	71.5	6.2	2.44E+18	0.43	50.14	2.77	24.13	2.97
	布拖拖觉	69.5	6.0	1.16E+18	0.44	25.54	2.71	23.05	1.48
	普格白水	80.4	5.8	6.42E+17	0.43	13.19	2.77	24.13	0.78
	平均值	50.2	6.3	3.25E+18	0.52	118.12	2.29	16.50	5.79
	ω^2 模型		6.2	2.52E+18	0.59	133.78	2.02	12.82	5.78
	ω^3 模型		6.2	2.49E+18	0.59	132.18	2.02	12.82	5.71

位角、震中距影响导致的估值偏差。

龙头山台的估计值矩震级明显偏小、拐角频率明显偏大,这可能与该台非常靠近震源而与 Brune 模型的远场假定不符有关,此外普格白水台的矩震级估计结果也明显偏小,但拐角频率估值合理,其原因有待探讨。

4.2 Brune 源谱模型常数 n 的影响

在 Brune 源谱模型式 (3) 中,虽然大量的研究都支持谱形状控制常数 n 取为 2,即称之为 ω^2 模型 (Chael, 1987; Shearer, 1999),但也有许多研究认为震源谱为 ω^3 模型 (Savage, 1972) 或其它模型 (Boatwright, Choy, 1992; Joyner, 1984; Atkinson, Silva, 1997)。本文同时采用了 ω^2 和 ω^3 模型进行参数计算,对于所有参与计算的台站,2 种模型都给出了几乎相同的参数,即模型的基本选择不影响 f_c 、 M_0 和 M_w 等主要震源参数的估计。图 7 是 13 个台站中震中距最大的台站的震源谱及其拟合情况,可以看到,在频率高于 2 Hz 以后, ω^2 模型与观测谱吻合比 ω^3 模型更好,而在震中距很小的图 6a 显示的频率范围内, ω^3 模型比 ω^2 模型更符合实际。就 13 个台站采用 ω^2 和 ω^3 模型的拟合效果而言,随着震中距的增加,在高频段,好的拟合效果逐渐由 ω^3 模型过渡为 ω^2 模型。因此,近场宜用 ω^3 模型,远场宜用 ω^2 模型。

4.3 场地影响

局部场地对地震动有强烈影响,一般情况下,基岩上的覆盖土层放大地震动,用这种受到影响的记录来估计源谱参数,必然会影响参数估计的结果。但这种影响有多大,是否会导致结果出现重大的偏差,则是个值得探讨的问题。从表 3 可以看到,13 个台站得到的 M_w 有较大的离散性,如果通过场地影响校正可以降低这种离散性,则这种校正就具有较大的价值。

在以拟合误差为控制的观测源谱与 Brune 模型拟合估计源谱参数时,低频成分 (小于 1 Hz) 远远大于高频成分,因此低频成分起主导作用,高频成分的变化不影响拟合结果,采用 ω^2 和 ω^3 模型得到相近的结果能很好地说明这一结论。因此,如果说场地效应只对高频成分产生影响,则不进行场地影响校正并不影响源谱参数的估计结果,但如果场地对低频成分有影响,则就必须进行场地校正。局部场地对地震动的影响虽然是个复杂的问题,但还是有规律可循,在 I ~ IV 类场地中,场地卓越周期由小变大,对应着对地震动频率成分的影响由高频逐渐向低频过渡,场地的卓越周期大约为 $T = 4H/v_s$ (H 为场地土层厚度, v_s 为土层剪切波速),则按照建筑抗震设计规范 (GB50011—2010),I 类场地的卓越频率约大于

12.5 Hz, II类场地的在3~12.5 Hz范围内, III类场地的在0.47~3 Hz之间, IV类场地的小于0.47 Hz。因此, I、II类场地的场地效应不会影响源谱参数的估计, 部分III类场地有影响, 而IV类场地有大的影响。本文中13个台站, 其场地类型大部分为II类, 仅有昭通台和铅厂台为I类, 进行场地校正并不能改善参数估计的结果。

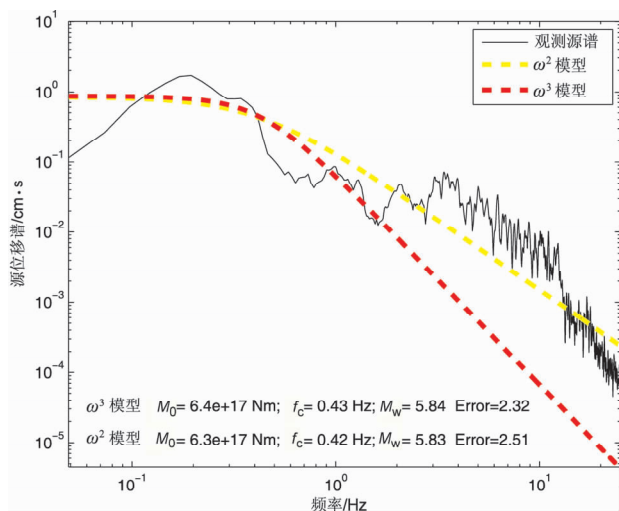


图7 普格白水台记录震源位移谱及其平均以及 ω^2 、 ω^3 源模型

Fig. 7 The Source displacement spectrum of Beshui Station, Puge, and its average value and the corresponding ω^2 , ω^3 source model

5 结论

本文基于鲁甸地震13个强震动台站获取的强震动观测记录, 应用震源参数的谱分析方法估计主震的地震矩、矩震级、拐角频率等。结果表明, 13个台站参数估计的平均值可给出合理的结果, 矩震级 M_w 的估计平均值为6.3。除龙头山台站外, 其它台站频率拐角值差异不大, 但基于拐角频率计算的其它参数, 较大程度对拐角频率的差异进行了放大, 导致了13个台站的应力降、震源的等效位错半径等参数的估计值之间有较强的离散性。除改进方法外, 采用多个能很好地环绕震中分布的台站可改善参数估计的效果。

进行谱曲线拟合估计参数时, 无论采用 ω^2 还是 ω^3 模型, 结果均相近, 但近场时, 宜采用 ω^3 模型, 远场时 ω^2 更好。

仅在台站场地为III、IV类时场地效应会影响

源参数的估计, 在场地为I、II类时, 可不进行场地影响的校正。

两位匿名审稿专家对本文提出了许多建设性的修改意见, 部分图件采用了GMT软件绘制, 笔者在此表示衷心地感谢。

参考文献:

- 崔建文, 刘琼仙, 段建新. 2014. 2014年云南鲁甸6.5级地震强震动观测记录及初步分析[J]. 地震研究, 37(4): 542-548.
- 何晓慧, 倪四道, 刘杰. 2015. 2014年8月3日云南鲁甸 $M_6.5$ 地震破裂方向性研究[J]. 中国科学: 地球科学, 45(3): 253-263.
- 黄明伟. 2006. 使用强震动记录估算1999年集集大地震余震之辐射能量与地震力矩[D]. 台湾: 国立中央大学地球物理研究所.
- 秦嘉政, 钱晓东, 叶建庆. 2005. 2001年施甸 $M_5.9$ 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.
- 阮祥. 2007. 川滇中小地震震源参数的研究[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所.
- 苏有锦, 刘杰, 郑斯华等. 2006. 云南地区S波非弹性衰减Q值研究[J]. 地震学报, 28(2): 206-212.
- 王生文, 李艳娥, 郭祥云等. 2014. 1999年11月29日岫岩 $M_5.4$ 地震序列视应力的再研究[J]. 地震, 34(3): 50-61.
- 王未来, 吴建平, 房立华等. 2014. 云南鲁甸地震序列的双差定位[J]. 地球物理学报, 57(9): 3042-3051.
- 徐甫坤, 李静, 苏有锦. 2014. 2014年云南鲁甸6.5级地震序列重定位研究[J]. 地震研究, 37(4): 241-247.
- 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.
- 张广伟, 雷建设, 梁姗姗等. 2014. 2014年8月3日云南鲁甸6.5级地震序列重定位与震源机制研究[J]. 地球物理学报, 57(9): 3042-3051.
- 张勇, 陈运泰, 许力生等. 2015. 2014年云南鲁甸 $M_w6.1$ 地震: 一次共轭破裂地震[J]. 地球物理学报, 58(1): 153-162.
- 张勇, 许力生, 陈运泰等. 2014. 2014年8月3日云南鲁甸 $M_w6.1$ ($M_s6.5$)地震破裂过程[J]. 地球物理学报, 57(9): 3052-3059.
- 赵小艳, 孙楠. 2014. 2014年云南鲁甸6.5级地震震源位置及震源区速度结构联合反演[J]. 地震研究, 37(4): 523-531.
- Akkar S, Boore D M. 2009. On baseline corrections and uncertainty in response spectra for baseline variations commonly encountered in digital accelerograph records[J]. Bull Seism Soc Am, 99(9): 1671-1690.
- Atkinson G M, Mereu R F. 1992. The shape of ground motion attenuation curve in Southeastern Canada[J]. Bull Seism Soc Am, 82(5): 2014-2031.
- Atkinson G, Silva W. 1997. An empirical study of earthquake source spectra for California earthquakes[J]. Bull Seism Soc Am, 87(1): 97-113.

- Boatwright J, Choy G L. 1992. Acceleration source spectra anticipated for large earthquakes in northeastern North America[J]. *Bull Seism Soc Am*, 82(2): 660–682.
- Boatwright J. 1978. Detailed spectral analysis of two small New York state earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Am*, 68(4): 1117–1131.
- Boatwright J. 1980. A spectral theory for circular seismic sources; Simple estimates of source dimension, dynamic stress drop and radiated seismic energy[J]. *Bull Seism Soc Am*, 70(1): 1–27.
- Brune J N. 1970. Tectonic stress and spectra of seismic shear wave from earthquake[J]. *J Geophys Res*, 75(4): 4997–5009.
- Chael E P. 1987. Spectral scaling of earthquakes in the Miramichi region of New Brunswick[J]. *Bull Seism Soc Am*, 77(2): 347–365.
- Chiu H – C. 2012. A Compatible Baseline Correction Algorithm for Strong – Motion Data[J]. *Terr Atmos Ocean Sci*, 23(2): 171–180.
- Huang J Y, Wen K L, Li X J, *et al.* 2013. Coseismic Deformation Time History Calculated from Acceleration Records Using an EMD – Derived Baseline Correction Scheme; A New Approach Validated for the 2011 Tohoku Earthquake[J]. *Bull Seism Soc Am*, 103(2B): 1321–1335.
- Joyner W B. 1984. A scaling law for the spectra of large earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Am*, 74(4): 1167–1188.
- Kanamori H. 1977. The energy release in great earthquakes[J]. *J Geophys Res*, 82(20): 2981–2987.
- Lam N T K, Wilson J L, Hutchinson G L. 2000. Generation of synthetic earthquake accelerograms using seismological modeling: a review [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 4(3): 321–354.
- Li X, Xu X W, Ran Y K, *et al.* 2015. Compound Fault Rupture in the 2014 $M_s 6.5$ Ludian, China, Earthquake and Significance to Disaster Mitigation[J]. *Seismological Research Letters*, 86(3): 764–774.
- Savage J C. 1972. Relation of corner frequency to fault dimensions[J]. *J Geophys Res*, 77(20): 3788–3795.
- Shearer P M. 1999. *Introduction to Seismology* [M]. New York: Cambridge University Press, 16.
- GB50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].

Source Parameters Estimation of 2014 Ludian $M_s 6.5$ Earthquake Based on Strong Motion Recordings

CUI Jianwen, DUAN Jianxin, YANG Liwei, ZHONG Yusheng, ZHAO Kun
(*Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China*)

Abstract

Through spectrum analysis of observation recordings of Ludian $M_s 6.5$ earthquake in 2014 recorded by 13 strong motion station, we estimated the source parameters of the earthquake such as seismic moments, moment magnitude, corner frequency etc. and obtained the average moment magnitude $M_w = 6.3$. Then we discussed the influence of the displacement spectrum shape coefficients of the Brune source model and the local site condition on the source parameter estimation. The results show that the influence of the spectrum shape coefficients on the source parameter estimation is small, but source spectrum model ω^2 and ω^3 fit the source spectrums of recordings from far site and near – site separately. At the same time, only when the predominant site frequency is smaller than 1 Hz, the site condition could influence the source parameter estimation. The studied 13 stations are all located at I and II sites, so the local site condition does not influence the results of the source parameter estimation.

Key words: Ludian earthquake; strong motion recordings; source parameters; displacement spectrum