doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.04.010

芦山余震震源参数及震源区品质因子反演

温瑞智,王宏伟,任叶飞,冀 昆

(中国地震局 工程力学研究所,150080 哈尔滨)

摘 要:为了确定 2013 年 4 月 20 日芦山地震部分余震的震源参数及传播路径对地震波的衰减特性,选取 30 次余震中 15 个强震台站获取的 179 组加速度记录,选择其中一次余震作为参考事件,基于广义反演方法计算了芦山余震的位移震 源谱及品质因子,采用网格搜索方法确定余震震源参数,进一步确定了震源参数的定标关系.结果表明:芦山地震平均应 力降略低于汶川余震平均应力降,震级与应力降没有明显相关性,视应力与应力降正相关;该研究区域 0.5~20 Hz 频段 品质因子为 *Q*(*f*) = 31.867*f*^{4.0375},地震波衰减速度较快.

关键词: 芦山地震; 广义反演; 震源参数; 品质因子

中图分类号: P315 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2015) 04-0058-06

Estimation of source parameters and quality factor based on generalized inversion method in Lushan earthquake

WEN Ruizhi ,WANG Hongwei ,REN Yefei ,JI Kun

(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 150080 Harbin, China)

Abstract: A large number of strong ground motion recordings have been collected by the National Strong–Motion Observation Network System of China in the Lushan earthquake sequences after April 20, 2014. In order to estimate the source parameters of the Lushan aftershocks and the attenuation characteristic of the seismic waves, this study selected 179 acceleration recordings obtained from 15 strong motion stations in 30 aftershocks to estimate the displacement source spectrum and quality factor, based on the generalized inversion technique of the S-wave Fourier amplitude spectrum with one aftershock as the reference event. Various source parameters are estimated by using grid searching technique for each event on the basis of displacement source spectra. It is shown that the average stress drop is slightly lower in Lushan earthquake than that in Wenchuan earthquake. Stress drop is significantly independent on the magnitude, while the apparent stress and the stress drop have favorable positive correlation. The frequency-dependent quality factor Q(f) in this region is found to be 31. $867f^{4.037.5}$ with the frequency ranging from 0.5 to 20 Hz, the seismic wave attenuates quite faster in Lushan region.

Keywords: Lushan earthquake; generalized inversion; source parameters; quality factor

2013 年 4 月 20 日四川省芦山县发生 M_s 7.0 级地震,芦山主震震中位于龙门山断裂带西南端的 彭县-灌县断裂上,主震过后余震活动十分频繁,余 震沿发震断层向主震两侧延伸,主要分布在长约 32 km、宽约 15~20 km、深度为 5~24 km 的范围

基金项目: 国家自然科学基金 (51308515); 地震行业基金(21020814).

通信作者: 温瑞智 ,ruizhi@ iem.ac.cn.

内^[1] 余震破裂类型以逆冲型为主^[2].芦山地震发 震区域位于龙门山断裂及鲜水河-小江断裂的"Y" 形交界处,在过去的40年里,距离芦山地震震中 200km范围内发生过多次*M*s6.0级以上地震,其 中包括2008年*M*s8.0级汶川地震及其余震,这一 区域地震多发人口密集,地震危险性很高.

我国测震资料相对丰富,国内研究人员大多 基于 Atkinson 方法与遗传算法采用测震记录反演 我国地震多发地区的品质因子及震源参数,比如

收稿日期: 2014-05-07.

作者简介: 温瑞智(1968-), 男 研究员, 博士生导师.

甘肃、云南和四川地区^[3-5].随着我国高质量强震 动记录的增加,采用强震动记录反演中小地震震 源参数及品质因子已经逐渐得到推广[6-8].我国数 字强震动台网在龙门山地区密度相对较大,芦山 余震序列中台站多次触发,记录到 2.0~5.4 级余 震 176 次,共收集到超过1000组加速度记录,这 为反演芦山余震震源参数及品质因子提供了基础 数据.本文基于参考事件的广义反演方法估计了 发震区域剪切波品质因子及震源参数,包括地震 矩、拐角频率、应力降、破裂半径及地震波能量 进 一步确定了震源参数的定标关系.

1 广义反演方法

自由表面水平地震动剪切波加速度傅里叶幅 值谱可表示为

 $O_{ii}(f) = S_{i}(f) \cdot G_{i}(f) \cdot GS(R_{ii}) \cdot \exp(-\pi f R_{ii}/Q(f) V_{s}) ,$ (1)

式中: $O_{ii}(f)$ 表示第 *j* 个台站观测到第 *i* 个地震的 记录剪切波水平方向加速度傅里叶幅值谱; $S_i(f)$ 表示第 i 个地震的加速度震源谱; GS(R_{ii}) 表示几 何扩散; R;; 表示第 i 个地震到第 j 个台站的震源 距; exp(- $\pi f R_{ii} / Q(f) V_s$) 表示地震波非弹性衰 减; Q(f) 表示与频率f相关的品质因子; V。表示震 源处剪切波速 取为 3.6 km/s; $G_i(f)$ 表示第 j 个 台站的场地反应.

本文几何扩散采用 Atkinson 等^[9]给出的三段 线性衰减曲线 表示为

	$\int^{R^{-b_1}}$,	$R \leq R_{01};$	
GS(R) = d	$R_{01}^{-b_1}$,	$R_{01} < R \leq R_{02};$	(2)
	$R_{01}^{-b_1}$	• $R_{02}^{b_2}$ • R^{-b_2}	$R > R_{02}$.	

式中: $R_{01} = 1.5D R_{02} = 2.5D b_1 = 1.0 b_2 = 0.5$, D 表示地壳厚度. 芦山地震序列震中附近区域地 壳结构复杂,地壳厚度从西北侧的 52.5 km 减小 至东南侧的 41.5 km^[1],近似以平均地壳厚度 47 km作为地壳厚度,则 R₀₁ = 70.5 km, R₀₂ = 117.5 km.

式(1) 两边同时取对数 得到线性叠加形式: $\ln O_{ii}(f) - \ln GS(R_{ii}) = \ln S_i(f) + \ln G_i(f) \pi f R_{ii}/Q(f) V_{s}$, (3)

式(3)矩阵形式为

$$AX = b . (4)$$

式中: A 是每一行包含 3 个非零项(两个 1 和 $-\pi fR_{ii}/V_{s}$) 的稀疏矩阵; X 表示式(3) 右边所有 未知量的向量; b 表示式(3) 左边所有已知量的向 量.该矩阵方程可详细表示为式(5)所示形式.采 用奇异值分解方法求解式(4),在每个频率上确 定I(地震个数) + J(台站个数) + I(Q值) 个未知数 由于存在一个未加约束的自由度 需要考虑震 源与场地间的权衡问题,通常采用参考场地法或 参考事件法来解决. 芦山余震序列中6个触发基 岩台站水平/垂直谱比法估计的场地反应均不能 满足参考场地应在整个频段上不存在场地放大的 要求 因此本文采用参考事件法.

									$\ln S_1(f)$				
1	0	0	•••	1	0	0	•••	$-\pi f R_{11}/V$	$\ln S_2(f)$		$\ln Q_{11}(f) - \ln GS(R_{11})$		
1	0	0	•••	0	1	0		$-\pi f R_{12}/V$:		$\ln Q_{12}(f) - \ln GS(R_{12})$		
÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	:	$\ln S_l(f)$		•		
0	1	0	•••	1	0	0		$-\pi f R_{21}/V$	$\ln G_1(f)$	=	$\ln Q_{21}(f) - \ln GS(R_{21})$		(5)
0	1	0	•••	0	1	0	•••	$-\pi f R_{22}/V$	$\ln G_2(f)$		$\ln Q_{22}(f) - \ln GS(R_{22})$		
÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	:	:		:	1	
0	0		1	0	0	····	1	$-\pi f R_{IJ}/V$	$\ln G_{l}(f)$		$\ln Q_{IJ}(f) - \ln GS(R_{IJ})$	J	
震	家源	[]列)	场	뉀	(J列	J)	传播路径	1/Q(f)				

2 数据及数据处理

采用以下原则选取合适的强震记录用于广义 反演:

1) 记录震源距范围为 25~100 km. 芦山余震 震源深度主要分布于 5~24 km ,为避免震源深度 不确定性对震源距计算的影响和减少截取的剪切 波中面波引起的干扰分别设定最小和最大震源距 限制^[10].

2) 对原始数据进行零线校正及 0.1~30 Hz 巴特 沃斯带通滤波处理后,为减小噪声对记录的影响和 避免场地出现非线性反应选取三分量峰值地面加速 度均满足 5~100 cm/s² 的记录^[11].

3) 为减小反演结果的离散性,在满足1)和 2) 的基础上 选择同时满足不少于 4 次地震中触 发的台站以及不少于4个台站记录到的地震所对 应的记录.

根据上述 3 个原则选取了 25 个台站在 34 次

地震中记录到的 262 组记录,台站记录震源距分 布见图 1 ,图中阴影区域表示 5 km 间隔范围内记 录数量分布直方图围成的区域,64 表示最大频 数.由图 1 可见,纵坐标 51DXY 及以上台站(A 组),记录震源距大多不超过 70 km,主要分布于 25~45 km 范围内; 纵坐标 51DXY 以下台站 (B组),震源距主要分布于 80~90 km 范围内.A、 B 两组台站记录震源距差异决定了传播路径不 同,由于品质因子对地壳介质横向和垂直方向的 不均匀性特别敏感,A、B 两组台站记录品质因子 差异较大^[12].



图1 台站记录震源距分布

本文在 A 组台站数据中选取了 30 次地震中 15 个台站记录到的 179 组记录用于广义反演.台站 及余震震中分布见图 2.所有传播路径分布均匀且 交织在一起,方位角对震源影响及传播介质不均匀 性对品质因子影响可忽略.A 组记录震源距不超过 *R*₀₁(即70.5 km),几何扩散 *GS*(*R*)取为 *R*⁻¹.



图 2 台站、地震震中位置及震源与台站间传播路径分布

广义反演方法需截取记录的剪切波部分 剪切 波抵达时间和结束时间分别定义为 Husid 函数中地 震波能量开始急剧增加的点和累加均方根函数开始 下降的点对应的时间^[13].在截取的剪切波前后各乘 以 10%的剪切波持时的余弦边瓣窗口以消除截断误 差 计算剪切波两个水平方向的傅里叶谱,采用 *b* = 20 的 Konno 和 Ohmachi 窗口函数平滑傅氏谱^[14],并 以两个水平方向谱的矢量和作为记录水平傅氏谱.

3 参考事件震源谱

Ren 等^[11] 以 62WIX 台站作为参考场地基于 广义反演方法估计了 96 个汶川余震加速度震源 谱.本文选取 2013 年 4 月 20 日 09: 37: 29 发生的 4.9 级地震作为参考事件,从 96 个汶川余震中选 取与参考事件震级相差不超过 0.1 (4.9±0.1) 的 余震 13 个.采用下文 4.1 节提到的网格搜索方法 确定选取的 13 个余震的平均位移震源谱的理论 震源参数,地震矩 $M_0 = 2.427 \times 10^{23}$ dyne• cm、拐 角频率 $f_c = 0.89$ Hz、高频滚降系数 $\gamma = 2.0$,以该 理论震源谱作为参考事件的实际震源谱用于广义 反演.

4 结果分析及讨论

4.1 震源参数

基于参考事件的广义反演方法分离了上文所选 15 个台站的场地反应、30 个地震的加速度震源谱以及区域品质因子.反演得到的余震位移震源谱见图 3 图中可见,位移震源谱较符合 $Aki^{[15]}$ 提出的 ω^2 震源谱模型.采用震源参数(M_0 、 f_c)及 γ 表示的实际位移震源谱的理论形式:



图 3 反演得到的 30 次余震位移震源谱

$$S(f) = \frac{R_{\theta\phi}VF}{4\pi V^3 \rho R_0} \cdot \frac{M_0}{1 + (f/f_0)^{\gamma}} , \qquad (6)$$

式中: *R_{oo}* 为点源辐射图型因子 随方位角呈对称 性变化 在此取平均值 0.55; *V* 表示地震波水平分 量含剪切波能量的比例 ,取为 0.707; *F* 为半空间 表面放大 本文取为 1; ρ_s 为震源处介质密度,取为 2 700 kg/m³; R_0 为参考距离,通常取为 1 km.

其中矩震级 M_w 与地震矩有如下关系^[16]:

$$M_{\rm w} = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.7.$$
 (7)

采用网格搜索方法在 0.5~20 Hz 频段内搜 索满足理论位移震源谱与实际位移震源谱相对面 积差最小的 $M_w \int_c Q \gamma$ 即

$$\sum_{i=1}^{n-1} \frac{S_s(f_i) - S_o(f_i)}{S_o(f_i)} \cdot (f_{i+1} - f_i) = \min , (8)$$

式中: n 表示 0. 5~20 Hz 内所有频率点数; f_i 表示 第 i 个点的频率; $S_s(f_i)$ 与 $S_o(f_i)$ 分别表示搜索的 理论位移震源谱及基于广义反演方法确定的实际 位移震源谱.理论震源谱的搜索过程中 M_w 变化范 围为余震震级 ± 0. 5, 变化步长 0. 01; f_c 变化范围 为0. 01~5. 0 Hz, 变化步长为 0. 01 Hz; γ 变化范 围为2 ± 0. 3, 变化步长 0. 1.

最小二乘拟合地震矩与拐角频率可得:

 $\log M_0 = (23.24 \pm 0.41) - 3.00 \log f_c$,(10) 拟合结果见图 4, $M_0 f_c^3 = 1.73 \times 10^{23}$ dyne • cm • s⁻³, 略低于 Dutta 等^[17]研究阿拉斯加中南部地区中小地 震得 到 的 $M_0 f_c^3 = 2.09 \times 10^{23}$ dyne • cm • s⁻³和 Hassani 等^[13]研究伊朗中东部地区中小地震得到 的 $M_0 f_c^3 = 2.48 \times 10^{23}$ dyne • cm • s⁻³.芦山余震平 均应力降为 3.14 MPa,略低于喻畑等^[8]研究 13 次汶川余震 ($M_w > 5.0$) 震源参数得到的 3.80 MPa平均等效应力降.



图 4 地震矩与拐角频率关系(阴影区域表示加减一倍标 准差范围)

根据 Brune^[18]提出的圆盘形应力脉冲震源模式,计算了余震震源半径 r 及应力降 Δσ. 地震矩 与震源半径 r 的关系见图5,图中同时给出了余震 的应力降分布范围(1.0~10.0 MPa).应力降与震级没有明显的相关关系,与 Moya等^[19]研究阪神 地震余震得到的结论一致.





基于 Izutani-kanamori 理论谱方法同时考虑 地震波能量补偿将积分上限提高至最大拐角频率 (拐角频率上限为 5 Hz)的 10 倍 ,即 50 Hz^[20].本 文分别计算了地震波能量 E_s 和视应力 σ_A .

地震波能量与地震矩的关系见图 6,双对数 坐标下线性拟合得到 $\log E_s = 0.82 \log M_0 - 7.7$, 相关系数 R = 0.91 拟合直线斜率 0.82 接近 1.0, 近似有 $E_s \propto M_0$ 固定斜率为 1 拟合得

 $\log E_s = (-11.66 \pm 0.33) + \log M_0.$ (11)

 E_s/M_0 平均值为 2. 19×10⁻¹² 与 Hassani 等^[13] 得 到的 $E_s/M_0 = 2.50 \times 10^{-12}$ 较为接近,但明显大于 Dutta 等^[17] 得到的 $E_s/M_0 = 1.20 \times 10^{-12}$.



图 6 地震波能量与地震矩关系

本文确定的视应力为 0.17~2.21 MPa,低于 程万正等^[21]研究 2000—2004 年四川地区中小地 震得到的视应力变化范围 0.1~10.0 MPa,推断 可能是发生于主震破裂面的余震初始应力降低所 致.根据应力降与视应力的计算结果,线性拟合得 $\Delta \sigma = 6.78 \sigma_A - 1.05 R = 0.91$ 表明应力降越高视 应力越大 单位地震矩辐射的地震波能量越大 本 文余震 $\sigma_A / \Delta \sigma$ 的平均值为 0.258.

不考虑面波震级 M_s 和地方震级 M_L 之间的换 算,通过最小二乘法拟合可得到地震面波震级与 矩震级的关系: $M_w = 0.876 \ 2M_s + 0.563 \ 9 (R = 0.83)$,如图 7 所示,本文确定的矩震级与面波震 级关系与 Ren 等^[11]反演汶川余震得到的结果较 为一致,整体上矩震级拟合结果与面波震级一致, 对于小震级余震,矩震级略高于面波震级;对于中 等震级余震,矩震级略低于面波震级.



图 7 矩震级与面波震级关系

4.2 品质因子

品质因子 Q(f) 通常表示为 $Q_0 f^n$ 的形式,本 文反演确定的芦山余震区域剪切波品质因子见图 8 拟合得到 0.5~20 Hz 频段品质因子为 Q(f) = 31.867f^{1.0375},芦山地震近场区地震波衰减表现出 吸收快且与频率依赖性强的特点(低 Q_0 高n). 芦 山发震区与汶川地区临近,其频率相关的品质因 子对频率的依赖性相近 即 n 值较一致 ,一定程度 上可推断本文反演的品质因子较为可靠. 与四川 其他地区相比^[4,5,11],本文反演确定的芦山余震 区域品质因子结果较小,主要原因有两方面:1) 广义反演方法确定的品质因子反映了所有传播路 径的平均非弹性衰减,本文选取的余震震源深度 主要分布于 10~25 km 范围内,该研究区域地壳 平均厚度约为 47 km 震源距集中在 25~45 km 范 围 地震波传播路径主要集中在上地壳 而其他研 究成果采用较远震源距的记录,地震波传播路径 主要集中在下地壳,众所周知地壳深处0值相对 较大;2) 本文研究区域集中于芦山地震发震区, 该区域地壳活动强烈 ,一般认为 在地壳活动相对 稳定地区 Q 值相对较高 在地壳活动强烈的地区 0 值相对较小.



图 8 频率相关的品质因子

5 结 论

1) 采用芦山强余震记录基于广义反演方法 估了余震震源参数 ($M_0 \f_s, r \\Delta \sigma \ E_s, \sigma_A$) 及该区 域剪切波品质因子 Q(f),并给出了震源参数间的 定标关系.

2) 芦山余震 $M_0 f_c^3 = 1.73 \times 10^{23}$ dyne • cm • s⁻³, 相应于 3.14 MPa 的平均应力降,略低于汶川地震 余震 平均 等效 应力 降; 应力 降 主 要 在 0.1~ 10.0 MPa范围内变化,与震级没有明显的相关 性;视应力与应力降正相关,由芦山余震视应力低 于 2000—2004 年四川余震结果推断发生于主震 断层面上的余震初始应力可能较低. 芦山余震震 源参数 $M_0 f_c^3$ 及 E_s/M_0 与 Hassani 等^[13] 研究伊朗 中东部中小震级地震的结果十分接近,初步推断 两地区余震震源破裂过程以及区域构造环境可能 存在相似性.

3) 0.5~20 Hz 频段内本文估计的剪切波品质 因子 Q(f) = 31.867f^{4.0375},分析表明地震波衰减 吸收较快且与频率的依赖性较强;本文获得的芦 山地震区域品质因子低于四川其他地区的结果, 主要是由于所用记录震源距相对较小且该区域地 壳活动较为活跃.另外,需要说明的是,本文研究 区域位于青藏高原与四川盆地过渡地带,存在地 壳介质横向不均匀性.广义反演确定的品质因子 仅体现该区域的平均水平,该方法无法考虑单一 区域内品质因子的横向变化性.考虑到本文研究 区域相对较小(半径约70 km),暂不考虑地壳介 质横向不均匀性对本文反演结果的影响.

参考文献

- [1] 陈晨, 胥颐. 芦山 M_s 7.0 级地震余震序列重新定位及 构造意义 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(12): 4028-4036.
- [2] 林向东 、葛洪魁 徐平 、等. 近场全波形反演: 芦山 7.0

级地震及余震矩张量解[J]. 地球物理学报, 2013 56 (12): 4037-4047.

- [3] 华卫 陈章立 郑斯华 等. 三峡水库地区震源参数特 征研究[J]. 地震地质, 2010, 32(4):533-542.
- [4] 乔慧珍 涨永久 程万正. 川西北地区介质衰减特性 研究[J]. 地震地磁观测与研究 2006 27(4):1-7.
- [5] 张永久,乔慧珍,程万正.四川盆地地区介质衰减特 性研究[J].地震研究 2007 30(1):43-48.
- [6] 章文波,谢礼立,郭明珠.利用强震记录分析场地的 地震反应[J].地震学报 2001 23(6):604-614.
- [7] 刘杰,郑斯华,黄玉龙.利用遗传算法反演非弹性衰减系数、震源参数和场地响应[J].地震学报,2003, 25(2):211-218.
- [8] 喻畑、李小军. 汶川地震余震震源参数及地震动衰减 与场地影响参数反演分析[J]. 地震学报, 2012,34 (5):621-632.
- [9] ATKINSON G M, MEREU R F. The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1992, 82(5): 2014-2031.
- [10]MCNAMARA D, MEREMONTE M, MAHARREY J Z, et al. Frequency-dependent seismic attenuation within the Hispaniola island region of the Caribbean sea [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2012, 102(2):773-782.
- [11] REN Yefei , WEN Ruizhi , HIROAKI Yamanaka , et al. Site effects by generalized inversion technique using strong motion recordings of the 2008 Wenchuan earthuake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration , 2013 , 12(2) : 165–184.
- [12] PETUKHIN A, IRIKURA K. A method for the separation of source and site effects and the apparent Q structure from strong motion data [J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(20): 3429–3432.

- [13] HASSANI B, ZAFARANI H, FARJOODI J, et al. Estimation of site amplification, attenuation and source spectra of S-waves in East-Central Iran [J].Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2011, 31(2011): 1397–1413.
- [14] KONNO K, OHMACHI T. Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1998, 88(1): 228–241.
- [15] AKI K. Scaling law of seismic spectrum [J]. Journal of Geophysical Research , 1967 , 72(4) : 1217–1231.
- [16] HANKS T C , KANAMORI H. A moment magnitude scale [J]. Journal of Geophysical Research , 1979 , 84 (B5): 2348-2350.
- [17] DUTTA U, BISWAS N, MARTIROSYAN A, et al. Estimation of earthquake source parameters and site response in Anchorage, Alaska from strong motion network data using generalized inversion method [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2003, 137:13-29.
- [18] BRUNE J N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear-waves from earthquake [J]. Journal of Geophysical Research , 1970, 75(26): 4997-5009.
- [19] MOYA A, IRIKURA K. Estimation of site effects and Q factor using a reference event [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(4): 1730– 1745.
- [20]华卫 陈章立,郑斯华. 2010 年 4 月 14 日青海玉树
 7.1 级地震序列中小地震辐射能量的估计 [J]. 地球
 物理学进展 2012 27(1):8-17.
- [21]程万正,陈学忠,乔慧珍.四川地震辐射能量和视应 力的研究[J].地球物理学进展,2006,21(3):692-699.

(编辑 赵丽莹)