王宏伟,任叶飞,温瑞智. 2017. 2017 年 8 月 8 日九寨沟 M_s7.0 地震震源谱及震中区域品质因子. 地球物理学报,60(10): 4117-4123,doi:10.6038/cjg20171036.

Wang H W, Ren Y F, Wen R Z. 2017. Source spectra of the 8 August 2017 Jiuzhaigou M_87 . 0 earthquake and the quality factor of the epicenter area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese),60(10):4117-4123,doi:10.6038/cjg20171036.

2017 年 8 月 8 日九寨沟 M_s7.0 地震震源谱及 震中区域品质因子

王宏伟,任叶飞*,温瑞智

中国地震局工程力学研究所,中国地震局地震工程与工程振动重点实验室,哈尔滨 150080

摘要 2017 年 8 月 8 日四川省九寨沟县发生 $M_{\rm s}7.0$ 地震,国家强震动台网中心正式发布了此次地震中收集的 66 组强震动记录,采用其中震源距不超过 150 km 且台站场地反应已确定的 8 组记录,基于 S 波傅氏谱反演方法确定 了此次地震的震源谱及震中区域的地壳介质品质因子.结果为:品质因子 $Q(f) = 84.9 f^{0.71}$,说明该区域的 S 波非弹 性衰减较为强烈;根据 ω^{-2} 震源谱模型,确定该地震的地震矩为 9.42×10¹⁸ Nm,其对数标准差为 0.12,相应的矩震 级 $M_{\rm w} = 6.616 \pm 0.079$,拐角频率为 0.131 ± 0.011 Hz,应力降为 3.854 MPa,该值明显低于全球板内地震的应力降 平均水平(4.89 MPa),但高于 2013 年芦山 $M_{\rm w} 6.6$ 地震的应力降.

关键词 九寨沟地震; 谱反演; 震源谱; 品质因子 doi:10.6038/cjg20171036 中图分类号 P315

收稿日期 2017-08-28,2017-09-22 收修定稿

Source spectra of the 8 August 2017 Jiuzhaigou M_s 7.0 earthquake and the quality factor of the epicenter area

WANG Hong-Wei, REN Ye-Fei*, WEN Rui-Zhi

Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration; Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration of China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

Abstract On August 8, 2017 an $M_87.0$ earthquake rocked Jiuzhaigou, Sichuan Province. The China Strong-Motion Networks Center (CSMNC) officially released 66 strong-motion recordings collected during this event. Eight of them obtained at stations up to 150 km from the hypocenter, of which the site responses are available, were used to retrieve the source spectra of this earthquake and the frequency-dependent quality factor in the vicinity of the epicenter. The resultant quality factor is $Q(f) = 84.9 f^{-0.71}$, indicating the strong non-elastic attenuation of S-waves. Based on the commonly used ω^{-2} source model, the grid-searching technique was used to determine the optimum source parameters for this earthquake. The results show that the seismic moment is 9.42×10^{18} Nm with the standard deviation 0.12 on the log₁₀ scale, corresponding to the moment magnitude $M_w = 6.616 \pm 0.079$, and the corner frequency f_c is 0.131 ± 0.011 Hz. Based on these values of M_w and f_c , the Brune-type stress drop was estimated as 3.854 MPa, significantly lower than the average of the global intraplate earthquakes (4.89 MPa) but higher

基金项目 国家自然科学基金(51778589,U1534202)、中国地震局创新团队发展计划和黑龙江省自然科学基金(E2017065)资助.

有一作者简介 王宏伟,男,1990年生,博士,主要从事工程地震等方面的研究. E-mail:whw1990413@163.com

^{*} 通讯作者 任叶飞, 男, 1983年生, 博士, 副研究员, 主要从事工程地震等方面的研究. E-mail: renyefei@iem. ac. cn

than that of the $M_{\rm W}$ 6.6 Lushan earthquake in 2013.

Keywords Jiuzhaigou earthquake; Spectral inversion; Source spectrum; Quality factor

1 引言

据中国地震台网测定,2017年8月8日21:19:46, 四川省阿坝藏族羌族自治州九寨沟县(震中: 33.20°N, 103.82°E)发生 M_s7.0 地震,震源深度 20 km,震中 距离 2008 年汶川大地震的破裂面大约 130 km (Fielding et al., 2013). 此次地震发生于玛曲一荷 叶断裂、岷江断裂与虎牙断裂之间,发震断层为虎牙 断裂向北部的延伸段.20世纪70年代,自北向南在 虎牙断裂上发生了一系列破坏性大地震,1973年黄 龙M6.2地震位于此次地震震中东南侧约 30 km 处,1976年松潘地震序列(M=7.2、6.7、7.2)距离 此次地震震中最近约 60 km. 已有研究表明虎牙断 裂有继续向北侧延伸的可能(Chen et al., 1994). 根据全球矩心矩张量(Global Centroid Moment Tensor,GCMT)目录提供的震源机制解(http:// www.globalcmt.org/),此次地震为走滑破裂,破裂 面走向为 N150°E,倾角为 78°.

地震发生之后,国家强震动台网中心正式发布 了 66 组强震动记录,其中四川省 21 组,甘肃省 14 组,陕西省 25 组,宁夏回族自治区 6 组.震源距 100 km 之内的记录仅有 7 组,100~200 km 内的记录有 20 组,其他记录的震源距均不小于 200 km.距离震中 最近的(震源距约 36.6 km)九寨百河台站(台站代 码:051JZB)获取了最大峰值地面加速度(PGA)记 录,其中 EW、NS 和 UD 分量的 PGA 分别为 129.5、 185.0 和 124.7 cm • s⁻².

此次地震震中东北-南侧触发的多数台站同时 在 2008 年汶川地震序列中也收集到了较多强震动 记录,Ren 等(2013)采用广义反演方法分离汶川余 震序列强震动记录的S波傅氏谱确定了部分强震动 台站的场地反应,其中包括在本次地震中触发的 11 个强震动台站,如图 1 所示.震源谱表示震源的特 征,在频域上移除传播路径和场地效应是估计地震 震源谱的常用方法(Allmann and Shearer, 2009; Kane et al., 2013; Pacor et al., 2016).本文利用 上述台站场地反应已确定的强震动记录,通过谱反 演方法估计此次九寨沟地震的震源谱及震中附近区 域的品质因子,并基于 Brune 震源模型(Brune, 1970),确定地震的地震矩、拐角频率和应力降.



绿色三角形表示场地反应已确定的 11 个台站(Ren et al., 2013),本文谱反演分析采用了震源距 150 km 范围内(蓝色 圆圈所示)的其中 8 个台站.

Fig. 1 Locations of some strong-motion stations triggered during the $M_87.0$ Jiuzhaigou earthquake Eleven stations at which the site responses were determined by Ren et al. (2013) are highlighted using green triangles. In this study, only 8 of them with hypocentral distances less than 150 km were adopted in spectral inversion analysis.

2 谱反演方法

震源形成的地震波在地壳介质中传播,经过多次反射、折射与透射,能量发生耗散而衰减,在上地 表浅层介质由于波阻抗降低而被动力放大,通过人 工布设传感器而被记录到.在频域上,第*i*个台站在 第*j*次地震中观测到的强震动记录 S 波的傅氏谱 *O_{ij}*(*f*)可以表示为(Iwata and Irikura, 1988):

$$O_{ij}(f) = S_j(f) \cdot G_i(f) \cdot R_{ij}^{-1} \cdot \exp\left[\frac{-\pi f R_{ij}}{\beta Q(f)}\right],$$
(1)

其中 $S_j(f)$ 和 $G_i(f)$ 分别表示第 j次地震的震源谱 和第 i 个台站的场地反应, R_{ij} 表示第 i 个台站到第 j次地震的震源距, R_{ij}^{-1} 表示几何扩散, β 为震源处的 剪切波速,本文取为3.6 km · s⁻¹ (Zheng et al., 2009),

Q(f)表示与频率 f 相关的品质因子.

式(1)两侧同时取自然对数可表示为线性叠加 形式:

$$\ln O_{ij}(f) - \ln G_i(f) + \ln R_{ij}$$

= $\ln S_j(f) + \frac{1}{Q(f)} \cdot \frac{-\pi f R_{ij}}{\beta},$ (2)

当台站的场地反应已知且只考虑一个地震时,(2)式 可表示为:

$$\begin{bmatrix} 1 & -\pi f R_1 / \beta \\ 1 & -\pi f R_2 / \beta \\ \vdots & \vdots \\ 1 & -\pi f R_N / \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ln S(f) \\ 1 / Q(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中 N 表示台站总数, $b_i = \ln O_i(f) - \ln G_i(f) + \ln R_i$, 本文采用线性最小二乘方法求解式(3)确定 地震震源谱 S(f)和品质因子 Q(f).

3 数据及处理

在此次九寨沟地震中触发了 66 个强震动台站, 其中 11 个台站的场地反应已由 Ren 等(2013)基于 汶川余震序列的强震动记录采用广义反演方法得以 确定,见图 1. 为了可靠地截取强震动记录的 S 波部 分(McNamara et al., 2012),本文只选取了震源距 150 km 以内的 8 个台站进行研究,包括 051HSD、 051HSL、051HSS、051JZW、051JZY、051MXD、062SHW 和 062WEX,震源距大约为 45~150 km,其场地反 应如图 2 所示.需要说明的是,此次地震中上述 8 个 台站记录的水平分量 PGA 均不超过 100 cm \cdot s⁻², 可近似认为其场地反应未进入非线性阶段(Ren et al., 2017),图 2 给出的这 8 个台站场地反应可用于 式(3)的线性反演过程.

首先对记录进行零线校正和 0.1~30 Hz 巴特 沃斯带通滤波处理,根据记录加速度时程的 Husid 函数(Husid, 1967)和累积均方根函数(McCann and Shah, 1979)截取记录两个水平分量(EW 和 NS)的 S 波部分,截取的 051JYW 台站记录的 S 波 部分如图 3 所示.为消除截断误差,对截取的 S 波部 分进行边瓣加窗处理,即在 S 波前后分别增加相当 于 S 波持续时间 10%长度的余弦函数(见图 3).之 后,计算两个水平分量的 S 波傅氏谱,并采用 *b*=20 的Konno和Ohmachi(1998)窗函数平滑傅氏谱,并



图 2 平文禾用的 8 千百站的初地及应及共加碱—信标准差池固(阴影区域) Fig. 2 Site responses for the eight stations used in this study. The shaded areas represent the ranges of mean plus and minus one standard error, respectively





Fig. 3 An example illustrating the extracted S waves for the two horizontal components at 051JZW station The portions marked by green colors represent the tapered windows added at the beginning and end

of the S-waves in order to remove the truncated errors.

将两个水平分量矢量合成以表示水平向S波的傅氏 谱.对上述8个台站都进行同样的处理.

4 震源谱与品质因子

基于上述8组记录的S波傅氏谱确定九寨沟地 震的位移震源谱,为考虑场地反应不确定性对震源 谱的影响,对于每个台站,均采用蒙特卡罗随机抽样 方法产生 500 个服从对数正态分布的随机数(随机 场地反应),其均值和标准差分别取台站场地反应的 平均值及标准差(见图 2),基于所有 8 个台站的第 k $(k=1\sim500)$ 个随机场地反应,由式(3)可确定第 k 个随机震源谱,如图 4a 所示,图中可见,500 个随机 震源谱相差不大,高频段的衰减与 ω^{-2} 震源谱形状 (Brune, 1970)接近.如果不进行上述随机采样处 理,仅以每个台站平均场地反应(图2中黑色实线) 反演震源谱,得到的结果与 500 个随机震源谱的对 数平均值十分接近,由此说明上述随机采样过程是 稳定的.另外,为检验反演过程是否稳健,取各台站 的平均场地反应用于反演,从8组记录中任意剔除 一组记录,基于剩余的7组记录根据式(3)重新计算 震源谱,每次剔除一组记录,重复进行8次,得到8 个不同结果的震源谱,将它们与基于所有8组记录 确定的震源谱进行比较(如图 4b),可以发现差异很 小,由此说明震源谱反演过程是较为稳健的.

采用 ω^{-2} 震源 谱模型 (Brune, 1970) 拟合震源 谱(见图 4b), ω^{-2} 震源谱可表示为:

$$S(f) = (2\pi f)^2 \cdot \frac{R_{\theta\Phi}VF}{4\pi\rho\beta^3 R_0} \cdot \frac{M_0}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}, \quad (4)$$

其中 R₀₀ 表示平均辐射模式的影响, Boore 和 Boatwright(1984)的研究系统地给出了发震断层类 型不同(走滑和倾滑)的地震的 P、S、SH 和 SV 波在 不同离源角范围(17°~25°、60°~120°和120°~ 180°)辐射花样系数的均方根、绝对值均值和对数平 均值,本文采用震源距大约在 45~150 km 范围内 的强震动记录的S波确定了近似为垂直走滑的九寨 沟地震的震源谱,并在对数空间下确定此次地震的 震源参数,因此本文 R_{@Φ}取为 0.60;V 表示水平向 S 波能量占总 S 波能量的比例,常取为 $1/\sqrt{2}$; F 表示 自由表面放大效应,由于场地反应已经考虑了2倍 的场地自由表面放大,在此取为1.0;ρ表示震源处 的介质密度,取为 2.7 g · cm⁻³; $R_0 = 1.0$ km 表示 参考距离;M。和 f。分别表示地震矩和拐角频率.对 于每个随机震源谱,本文采用网格搜索方法在 0.1~ 10.0 Hz 频段内确定其最佳的 M_0 和 f_{c} (见图 5), 使 ω^{-2} 理论震源谱与反演得到的震源谱最为接近,为 避免高频衰减的影响并未考虑大于 10.0 Hz 的频 段.图中可见,基于500个随机震源谱得到的地震矩服 从对数正态分布,其平均地震矩 $M_0 = 9.42 \times 10^{18}$ Nm, 对数标准差为0.12,而拐角频率服从正态分布,

 $f_c = 0.131 \pm 0.011$ Hz,根据矩震级 M_w 与 M_0 的关系 (Hanks and Kanamori, 1979), $M_w = 6.616 \pm$

0.079.GCMT 确定的 $M_0 = 7.62 \times 10^{18} \text{ Nm}$ 、 $M_w = 6.55$,本文结果与其较为接近.



图 4 (a) 考虑场地反应的不确定性,采用谱反演方法确定的 500 个随机位移震源谱及基于平均场地反应确定的 位移震源谱; (b) 检验反演过程的稳健性,仅基于 7 组记录确定的震源谱及最佳拟合的 ω⁻²震源谱
 Fig. 4 (a) 500 displacement source spectra derived from the spectral inversion analyses in order to consider the uncertainty of site responses and the source spectrum calculated using the mean of site response at each site. (b) The displacement source spectra calculated respectively using 7 recordings in order to test the robustness of inversion.





图 5 基于 500 个随机震源谱分别确定的地震矩 M₀ 和拐角频率 f_c

4121

Fig. 5 Values of seismic moment M_0 and corner frequency f_c estimated using 500 random source spectra

进一步根据 M_0 与 f_c ,可以计算地震的应力降 $\Delta\sigma$ (Brune, 1970):

$$\Delta \sigma = \frac{7M_0}{16} \cdot \left(\frac{2\pi f_c}{2.34\beta}\right)^3. \tag{5}$$

根据式(5),此次地震的应力降 $\Delta \sigma$ =3.854 MPa, 其对数标准差为 0.032,低于全球板内地震的应力 降平均水平 4.89 MPa(为与本文结果比较,统一转 化为 Brune 震源模型且 β=3.6 km · s⁻¹的结果) (Allmann and Shearer, 2009),但此次地震的应力 降明显高于 2013 年芦山 M_w 6.6 地震的应力降 $\Delta \sigma$ = 1.5 MPa(Hao et al., 2013).

本文同时给出了九寨沟地震震中附近区域(震 源距不超过 150 km)的 S 波品质因子 Q(f),如图 6 所示,品质因子通常可以表示为 Q₀ fⁿ 的形式,通过 最小二乘法拟合得到 $Q(f) = 84.9 f^{0.71}$,与 Ren 等 (2013)确定的汶川余震序列附近区域以及华卫等 (2009)确定的龙门山断裂带西侧山区的品质因子相 比,本文结果较小,表明九寨沟地震震中附近区域的 非弹性衰减更强.较小的品质因子可能与该区域更 大的地壳厚度(>50 km)有关(Laske et al., 2013). 我 们知道,品质因子与地震射线传播经过的地壳介质 有关,通常深部地壳介质的品质因子更大,非弹性衰 减更弱.当观测台站距离震源较远时,地震射线主要 沿莫霍面传播;台站距离震源较近时,地震射线主要 沿上地壳传播. 其临界距离大约是 2.5 倍的地壳厚 度(Atkinson and Mereu, 1992), 地壳厚度较大时 相应的临界距离也较大,在地壳厚度较大的地区可 能有更少的地震射线通过莫霍面传播至近源台站, 相应的品质因子更小.

5 结论与讨论

2017 年 8 月 8 日 21:19:46 四川省九寨沟县发 生 M_s 7.0 地震,本文采用震源距不超过 150 km 且 场地反应已确定的 8 个台站的强震动记录,基于 S 波傅氏谱反演方法同时确定了此次地震的震源谱和 震中附近区域地壳介质的品质因子.本文确定的九 寨沟地震的地震矩 $M_0 = 9.42 \times 10^{18}$ Nm,对数标准 差为 0.12,相应的矩震级 $M_w = 6.616 \pm 0.079$,拐角频 率 $f_c = 0.131 \pm 0.011$ Hz,应力降 $\Delta \sigma = 3.854$ MPa,其对 数标准差为 0.032,表明九寨沟地震的应力降较高, 震中附近区域的品质因子 $Q(f) = 84.9f^{0.71}$,地震波 的非弹性衰减较强.

本文采用的 8 个台站的方位角分布范围较为有 限,其中 4 个台站位于 N50°—120°E 范围内,4 个台 站位于 N180°—210°E 范围内,根据地壳介质 S 波 速度模型(Zheng et al., 2009),这 8 个台站的地震 波离源角在 97°~115°之间,而式(4)中 $R_{\theta\phi} = 0.60$ 是地震波离源角 $60^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 、方位角 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 范围的 对数平均值,因此这 8 个台站方位角和震源距范围 的限制可能会对 $R_{\theta\phi}$ 有一定的影响,进而影响 M_{0} 和 f_{\circ} 的估计.

震源破裂方向性通常会引起不同方位的视震源 谱差异,破裂前方视震源谱的视拐角频率大于破裂 后方,相应的破裂前方视震源谱高频段明显高于破 裂后方(Pacor et al., 2016),如果观测记录均匀分 布在方位角0°~360°范围内,震源是否存在破裂方 向性对f。的估计并无影响.然而本文采用的8个台



 10^{4}

图 6 九寨沟地震震中附近区域的 S 波品质因子 Fig. 6 S-wave frequency-dependent quality factors in the vicinity of the epicenter for the Jiuzhaigou event



Fig. 7 Apparent source spectra calculated using records at single stations used in this study

站主要位于 2 个方位角范围内,方位角分布有限,此 次地震破裂面走向约为 N150°E,这些台站可能同为 破裂前方台站或后方台站,由式(2)计算的单个台站 的视震源谱相差不大(见图 7)也证实了这一点,因 此并不能排除震源破裂方向性可能的影响.如果仅 从高应力降(即大拐角频率)的角度来看,猜测这些 台站可能均为破裂前方台站,即此次地震自震中主 要向 N150°E 方向破裂.本文的反演过程已证实较 为稳健,估计的 *M*w 与 GCMT 给出的结果也比较接 近,因此可推测台站的方位角和震源距范围单一对 *M*o、*f*。的反演结果影响有限,具体影响程度还需要 进一步深入研究.

致谢 感谢国家强震动台网中心提供的观测记录.

References

- Allmann B P, Shearer P M. 2009. Global variations of stress drop for moderate to large earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 114(B1): B01310, doi: 10.1029/2008JB005821.
- Atkinson G M, Mereu R F. 1992. The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada. Bulletin of the Seismological Society of America, 82(5): 2014-2031.
- Boore D M, Boatwright J. 1984. Average body-wave radiation coefficients. Bulletin of the Seismological Society of America, 74(5): 1615-1621.
- Brune J N. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. Journal of Geophysical Research, 75 (26): 4997-5009.
- Chen S F, Wilson C J L, Deng Q D, et al. 1994. Active faulting and block movement associated with large earthquakes in the Min Shan and Longmen Mountains, northeastern Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research, 99(B12): 24025-24038.
- Fielding E J, Sladen A, Li Z H, et al. 2013. Kinematic fault slip evolution source models of the 2008 M7. 9 Wenchuan earthquake in China from SAR interferometry, GPS and teleseismic analysis and implications for Longmen Shan tectonics. *Geophysical Journal International*, 194(2): 1138-1166,doi:10.1093/gji/ggt155.
- Hanks T C, Kanamori H. 1979. A moment magnitude scale. Journal of Geophysical Research, 84(B5): 2348-2350.
- Hao J L, Ji C, Wang W M, et al. 2013. Rupture history of the 2013 M_W6. 6 Lushan earthquake constrained with local strong motion and teleseismic body and surface waves. *Geophysical Research Letters*, 40(20): 5371-5376, doi: 10.1002/2013GL056876.
- Hua W, Chen Z L, Zheng S H. 2009. A study on segmentation characteristics of aftershock source parameters of Wenchuan

M8.0 earthquake in 2008. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 52(2): 365-371.

- Husid R. 1967. Gravity effects on the earthquake response of yielding structures [Ph. D. thesis]. Los Angeles: California Institute of Technology.
- Iwata T, Irikura K. 1988. Source parameters of the 1983 Japan sea earthquake sequence. Journal of Physics of the Earth, 36(4): 155-184.
- Kane D L, Shearer P M, Goertz-Allmann B P, et al. 2013. Rupture directivity of small earthquakes at Parkfield. *Journal of Geophysical Research*, 118(1): 212-221, doi: 10.1029/2012JB009675.
- Konno K, Ohmachi T. 1998. Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. Bulletin of the Seismological Society of America, 88 (1): 228-241.
- Laske G, Masters G, Ma Z, et al. 2013. Update on CRUST1. 0: a 1degree global model of Earth's crust. // EGU General Assembly 2013, EGU, EGU2013-2658.
- McCann M W, Shah H C. 1979. Determining strong-motion duration of earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, 69(4): 1253-1265.
- McNamara D, Meremonte M, Maharrey J Z, et al. 2012. Frequencydependent seismic attenuation within the Hispaniola Island region of the Caribbean Sea. Bulletin of the Seismological Society of America, 102(2): 773-782, doi: 10.1785/0120110137.
- Pacor F, Gallovič F, Puglia R, et al. 2016. Diminishing highfrequency directivity due to a source effect: Empirical evidence from small earthquakes in the Abruzzo region, Italy. *Geophysical Research Letters*, 43(10): 5000-5008, doi: 10.1002/2016GL068546.
- Ren Y F, Wen R Z, Yamanaka H, et al. 2013. Site effects by generalized inversion technique using strong motion recordings of the 2008 Wenchuan earthquake. *Earthquake Engineering* and Engineering Vibration, 12(2): 165-184, doi: 10.1007/ s11803-013-0160-6.
- Ren Y F, Wen R Z, Yao X X, et al. 2017. Five parameters for the evaluation of the soil nonlinearity during the M_S8. 0 Wenchuan earthquake using the HVSR method. *Earth*, *Planets and Space*, 69: 116, doi: 10.1186/s40623-017-0702-7.
- Zheng Y, Ma H S, Lü J, et al. 2009. Source mechanism of strong aftershocks (M_S≥5.6) of the 2008/05/12 Wenchuan earthquake and the implication for seismotectonics. Science in China Series D: Earth Sciences, 52(6): 739-753.

附中文参考文献

华卫,陈章立,郑斯华.2009.2008 年汶川 8.0 级地震序列震源参数分段特征的研究.地球物理学报,52(2):365-371.