

周少辉,曲均浩,苗庆杰,等.山东长岛地区地震波非弹性衰减 Q 值、场地响应及震源参数研究[J].地震工程学报,2018,40(6):1312-1321.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1312

ZHOU Shaohui, QU Junhao, MIAO Qingjie, et al. Inelastic Attenuation Q value, Site Response, and Seismic Source Parameters in Changdao Region, Shandong [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(6): 1312-1321. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1312

山东长岛地区地震波非弹性衰减 Q 值、 场地响应及震源参数研究

周少辉^{1,2}, 曲均浩^{1,2}, 苗庆杰^{1,2}, 李 铂¹, 郭宗斌¹, 刘方斌^{1,2}

(1. 山东省地震局, 山东 济南 250014; 2. 山东省地震局《地震监测产品服务》团队, 山东 济南 250014)

摘要: 利用山东台网记录的长岛震群 2017 年 2 月 14 日—9 月 1 日期间的波形与震相资料研究长岛地区非弹性衰减系数, 得到该地区介质平均 Q 值与频率 f 的关系式为 $Q(f) = 363.9f^{1.3741}$ 。采用 Moya 等^[1]提出的利用遗传算法联合反演得到长岛周边台站的场地响应, 根据 Brune 模型震源参数计算公式求解长岛震群序列地震震源参数。结果显示, 各个震源参数之间均存在一定的相关关系, 地震矩随 M_L 震级的增大而增加, 地震矩与破裂半径 R 之间存在半对数关系, 拐角频率 f_c 随地震矩的增大而减少; 长岛地震序列的应力降数值普遍偏小, 最大不超过 0.9 MPa, 这意味着长岛震源区整体构造应力较低, 也可能指示长岛震群为低摩擦应力的断层作用; 震源参数随时间的变化方面, 整体而言, 长岛震群地震应力降变化起伏很大, 在 $M4.1$ 地震发生前, 拐角频率与应力降均发生快速下降后随即翻转上升的现象, 证明在 $M4.1$ 地震发生前震源区整体应力的挤压逐渐增强。

关键词: 非弹性衰减系数; 震源参数; 场地响应; 震群序列

中图分类号: P315.3⁺³

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)06-1312-10

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1312

Inelastic Attenuation Q Value, Site Response, and Seismic Source Parameters in Changdao Region, Shandong

ZHOU Shaohui^{1,2}, QU Junhao^{1,2}, MIAO Qingjie^{1,2}, LI Bo¹, GUO Zongbin¹, LIU Fangbin^{1,2}

(1. Earthquake Agency of Shandong Province, Jinan 250014, Shandong, China; 2. Team of "R & D and Service of Seismic Monitoring Products", Earthquake Agency of Shandong Province, Jinan 250014, Shandong, China)

Abstract: Based on the waveform and seismic phase data of the Changdao earthquake swarm from February 14 to September 1, 2017, the inelastic attenuation coefficient of the Changdao area is studied, and the relationship between the average Q value and the frequency f in the

收稿日期: 2017-11-06

基金项目: 中国地震局星火计划项目(XH19027, XH16025); 山东省自然科学基金(ZR2014DQ019); 山东省地震局科技创新团队基金(SDST-07-2018)

第一作者简介: 周少辉,男,助理工程师,主要从事地震序列及余震预测研究。E-mail: 674891062@qq.com。

通信作者: 曲均浩,男,博士,高级工程师,主要从事数字地震波应用及余震活动机理研究。E-mail: gisquh@126.com。

Changdao area is $Q(f) = 363.9f^{1.3741}$. The site responses of stations around Changdao are obtained using the joint conversion of genetic algorithm proposed by Moya, and the source parameters of Changdao earthquake swarm sequence are calculated by the Brune model formula. The results show that there are some correlations between the various source parameters: the seismic moment increases with the local magnitude M_L , and there is a semilogarithmic relationship between the seismic moment and the rupture radius R . The corner frequency f_c decreases with the increase of seismic moment. The stress drop values of the Changdao earthquake sequence are generally small, and the maximum does not exceed 0.9 MPa, which means the overall structural stress in Changdao focal area is low. Considering the changes of source parameters over time, the changes in stress drop of the earthquake swarm is very irregular. Before the occurrence of the M4.1 earthquake, the corner frequency and stress drop both decreased rapidly and immediately increased. This proves that the overall stress in the Changdao focal area increased before the M4.1 earthquake.

Keywords: inelastic attenuation coefficient; seismic source parameter; site response; earthquake swarm sequence

0 引言

随着数字地震观测环境的不断完善,基于数字地震资料计算震源及介质参数、开展余震预测的研究逐渐受到重视,成为今后震后趋势判定的一个重要发展方向^[2]。地震是指源区介质在外加载荷应力作用下产生的破裂错动或震源区原有断层的扩展失稳。破裂错动与原有断层扩展失稳都是在应力作用下岩石产生形变且超过一定程度的结果。换言之,地震的产生与岩石发生错动处的应力状态有关。震源区应力状态强弱的判定,对序列地震活动趋势的判定具有重要意义^[3]。由于地震发生在地下深部,震源区的应力状态在现有技术条件下无法直接测定,往往通过震源机制、震源参数等来研究局部应力场的强弱、作用方向及作用方式^[4]。通过分析震源参数如拐角频率、应力降、震源破裂半径等,可以间接了解震源区的应力状态,进行序列后续地震活动判定以及分析局部地区的地震危险性。

要求得震源参数,首先需要在台站接收的地震观测谱中准确扣除地震波传播路径效应以及接收台站的场地响应。根据地震波在地球内部介质的传播特征选取三段几何扩散模型^[5-6],采用多台多震联合反演可以较好地求取介质 Q 值(品质因子);采用 Moya 等^[1]、刘杰等^[7]提出的遗传算法联合反演接收台站的场地响应。这两种方法目前已经广泛应用于我国很多区域台站的地震波传播路径效应、接收

台站的场地响应计算中。

本文通过整理山东长岛震群序列波形和震相资料,首先计算得到长岛地区地震波传播的非弹性衰减系数和接收台站的场地响应结果;其次采用 Brune 圆盘模型,计算得到长岛地震序列中 $M_{L2.5} \sim 3.0$ 地震事件的震源参数,并研究长岛震群序列震源参数的总体特征,重点探寻震群序列震源参数时间变化对后续序列地震活动的指示意义。

1 方法原理

1.1 介质品质因子 Q 值计算方法原理

台站记录的地震位移谱 $U_{ij}(f)$ 可表达为:

$$U_{ij}(f) = [S_i(f)R_{\theta\varphi}P_{ij}(f)L_j(f) + N_j(f)] \cdot I_j(f)Sur_j \quad (1)$$

式中: $U_{ij}(f)$ 指地震 i 被台站 j 接收到的实际位移谱; f 指频率; $S_i(f)$ 指地震 i 的震源谱; $R_{\theta\varphi}$ 为震源辐射图像因子; $P_{ij}(f)$ 指地震波从震源传播至台站 j 受到的传播路径的影响,描述传播过程中地震波的衰减,与地震波的传播距离有关,包括非弹性衰减与几何扩散衰减; $L_j(f)$ 指台站 j 的场地响应,描述地震台周围近地表地层对地震地面运动的放大作用; $N_j(f)$ 指台站 j 周围的地表运动噪音; $I_j(f)$ 指台站 j 中具体记录仪器的仪器响应; Sur_j 指台站 j 周围地层表层的自由表层效应,是地震波入射地表自由表面的反射特征。

目前通常的做法是,利用延迟窗谱技术^[8-9] 在

将地震信号由时间域转为频率域的过程中消除噪音项;由于仪器响应是指地震仪观测系统各部分的综合效应,因而可由仪器标定来进行校正^[10-11]。由式(1)可知,从地震波记录中消除仪器与噪音项的影响后为:

$$U_{ij}(f) = P_{ij}(f) \cdot L_j(f) \cdot R_{\theta\varphi} \cdot S_i(f) Sur_j \quad (2)$$

其中 $P_{ij}(f)$ 可表示为:

$$P_{ij}(f) = G_{ij} e^{-\frac{\pi f R_{ij}}{Q_{ij}(f) V_{ij}}} \quad (3)$$

式中: G_{ij} 为几何扩散参数,是指地震波在介质中由震中区域向外传播时波阵面随传播距离逐渐增大而增大,同时地震波通过单位面积波阵面的能量在逐步减小; R_{ij} 指震源距; V_{ij} 指波速; $Q_{ij}(f)$ 为介质品质因子,描述波在介质中由震中向外传播时地震波能量由于介质的不均匀与非完全弹性而产生的“耗损”。

针对体波,根据地震波在地球内部介质的传播特征选取三段几何扩散模型^[5-6]:

$$\begin{cases} \lg S_i(f) = \lg U_{ij}(f) + b_1 \lg R_{ij} + C_{ij}(f) R_{ij} - \lg L'_j(f), & R_{ij} \leq R_1 \\ \lg S_i(f) = \lg U_{ij}(f) + b_1 \lg R_1 + b_2 \lg \frac{R_{ij}}{R_1} + C_{ij}(f) R_{ij} - \lg L'_j(f), & R_1 \leq R_{ij} \leq R_2 \\ \lg S_i(f) = \lg U_{ij}(f) + b_1 \lg R_1 + b_2 \lg \frac{R_2}{R_1} + b_3 \lg \frac{R_{ij}}{R_2} + C_{ij}(f) R_{ij} - \lg L'_j(f), & R_{ij} \geq R_2 \end{cases} \quad (6)$$

其中:

$$C_{ij}(f) = \frac{\pi \lg e}{V Q(f)} f \quad (7)$$

已知 $U_{ij}(f)$ 、 R_{ij} 与 V , 需要求解 b_1 、 b_2 、 b_3 、 R_1 、 R_2 、 $L'_j(f, R)$ 和 $Q(f)$ 。为此定义残差为:

$$\epsilon = \sum_{i=1}^{n_0} \sum_{j=1}^{n_i} |D_{ij}(f)| \quad (8)$$

$$D_{ij}(f) = \lg S_i(f) - \sum_{j=1}^{n_i} \lg S_i(f) / n_i$$

其中: n_i 指接收到地震 i 的台站个数; n_0 指研究中参与分析运算的地震总数。

联合反演得出最佳的 b_1 、 b_2 、 b_3 、 R_1 、 R_2 、 $L'_j(f, R)$ 和 $Q(f)$,使得残差 ϵ 最小。由于需求解较多参数,因此需要首先对地震记录作滤波处理,并对 R_1 、 R_2 假设初始值,求取其余参数。而后相应调整 R_1 、 R_2 初始值再次重新反演,直到残差 ϵ 不再减小。根据已有研究,一般使 $R_1 \approx 1.5H$, $R_2 \approx 2.5H$, H 为研究区域的地壳厚度^[11]。

1.2 场地响应的获取

本文采用 Moya 等^[1]、刘杰等^[17]提出的遗传算法联合反演台站场地响应。本理论以 Brune 模型为

$$G(R) = \begin{cases} R_{ij}^{-b_1}, & R_{ij} \leq R_1 \\ R_1^{-b_1} R_1^{-b_2} R_{ij}^{-b_2}, & R_1 < R_{ij} \leq R_2 \\ R_1^{-b_1} R_1^{-b_2} R_2^{-b_2} R_2^{-b_3} R_{ij}^{-b_3}, & R_{ij} > R_2 \end{cases} \quad (4)$$

将式(3)代入式(2)得:

$$U_{ij}(f) = G_{ij}(f) e^{-(\pi f R_{ij} / Q(f) \beta)} \cdot L'_j(f) \cdot R_{\theta\varphi} \cdot S_i(f) Sur_j \quad (5)$$

本文采用多台多震联合反演求取介质 Q 值(品质因子)。多台平均可在一定程度上消去震源辐射图像对结果的影响,即式(5)中不必出现震源辐射图像因子 $R_{\theta\varphi}$;对于自由表面效应 Sur_j ,理论 SH 波在到达地表时只发生了反射,则其反射波和入射波的位移大小相等,那么在地表的台站记录到的位移恰好是入射波位移的二倍,即对在地表台站记录的 SH 波,式(1)中的 $Sur_j = 2$,而对井下摆记录则有 $Sur_j = 1$;因此也可忽略自由表面效应 Sur_j 。

将式(4)代入式(5),取对数并进一步整理后为:

$$\begin{cases} \lg S_i(f) = \lg U_{ij}(f) + b_1 \lg R_{ij} + C_{ij}(f) R_{ij} - \lg L'_j(f), & R_{ij} \leq R_1 \\ \lg S_i(f) = \lg U_{ij}(f) + b_1 \lg R_1 + b_2 \lg \frac{R_{ij}}{R_1} + C_{ij}(f) R_{ij} - \lg L'_j(f), & R_1 \leq R_{ij} \leq R_2 \\ \lg S_i(f) = \lg U_{ij}(f) + b_1 \lg R_1 + b_2 \lg \frac{R_2}{R_1} + b_3 \lg \frac{R_{ij}}{R_2} + C_{ij}(f) R_{ij} - \lg L'_j(f), & R_{ij} \geq R_2 \end{cases} \quad (6)$$

基础,首先对记录到的地面运动位移谱实施路径校正处理,并假定对于不同的地震事件来说,同一接收台站的场地响应均相同;在此基础上,可由 Brune 模型求出具体每一个地震震源谱参数的初始值,进而获取每一个台站对应于每一个地震的场地响应。因此任一台站记录到多少记录谱就会对应有多少场地响应,进而利用遗传算法搜索震源谱参数,最终使得由不同地震获得的同一接收台站场地响应的标准偏差最小,即可获得台站场地响应。虽然在算法上可较好地将场地响应与路径效应分开,但实际最终得到应为平均场地响应。

根据 Brune 圆盘模型,在不考虑非弹性衰减的情况下,地震的理论位移震源谱为:

$$\Omega_0(f) = \frac{\Omega_0}{1 + (f/f_c)^2} \quad (9)$$

其中: Ω_0 指震源谱的零频极限; f_c 指拐角频率。当可以确定 Ω_0 和 f_c 时就可以求出理论位移震源谱。

因此在第 k 个频率上,利用第 i 个地震的位移谱计算出的第 j 个台站的场地响应可表示为:

$$S_{ij}(f_k) = \frac{A_{ij}^{\text{corr}}(f_k)}{\Omega_0(1 + (f/f_c)^2)} \quad (10)$$

其中: $A_{ij}^{corr}(f_k)$ 指校正后的地面运动位移谱。

全部台站所有频点场地响应的归一化标准偏差公式如下:

$$\text{sum} = \sum_j \sum_k \frac{\text{std}[S_{ij}(f_k)]}{\text{mean}[S_{ij}(f_k)]} \quad (11)$$

式中: $\text{std}[S_{ij}(f_k)]$ 是台站 j 通过 i 个地震获得的在频点 k 的场地响应的标准偏差; $\text{mean}[S_{ij}(f_k)]$ 是台站 j 通过 i 个地震获得的在频点 k 的场地响应平均值。运用遗传算法通过不断迭代使其归一化标准偏差减少到最小,即可求出每一个地震的震源谱参数:拐角频率 f_c 与零频极限 Ω_0 ,从而得到最稳定的台站场地响应。

1.3 震源参数的获取

由式(1)可知,从地震波记录 $U_{ij}(f)$ 中消除 $N_j(f)$ 、 $I_j(f)$ 、 $P_{ij}(f)$ 和 $L'_j(f)$ 后,即可得到震源谱 $S_i(f)$ 。获得震源谱后,利用遗传算法对地震震源谱与理论震源谱进行拟合,进而得到零频极限 Ω_0 和拐角频率 f_c ^[1,17,12-13]。本文主要研究中小地震,故满足 Brune 圆盘模型,可用如下公式求解应力降 $\Delta\sigma$ 、地震矩 M_0 和震源半径 R 等震源参数^[14-15]。

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \cdot \frac{M_0}{R^3} \quad (12)$$

$$M_0 = \frac{4\pi\rho v_s^3 \Omega_0}{R_{\theta\varphi}} \quad (13)$$

$$R = \frac{2.34v_s}{2\pi f_c} \quad (14)$$

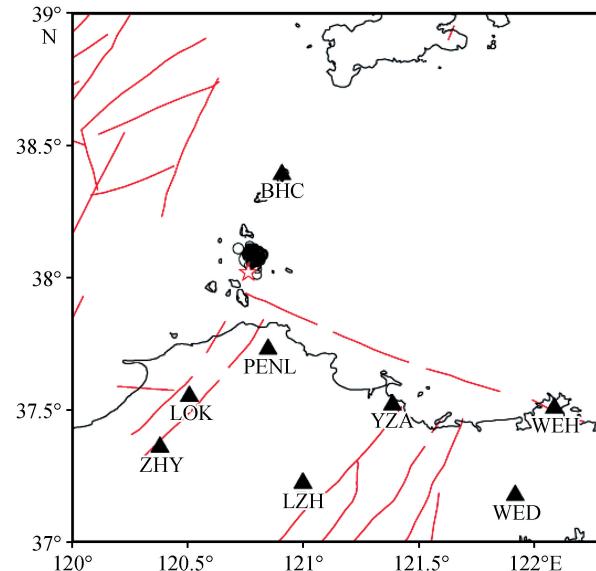
其中: ρ 为研究区域介质密度; v_s 为 S 波传播速度,胶东地区一般取 $\rho=2.7 \text{ g/cm}^3$, $v_s=3.5 \text{ km/s}$; $R_{\theta\varphi}$ 选取 SH 波在全震源球上的平均震源辐射因子 0.41 ^[16]。

2 数据资料

本文重点研究震群地震活动的震源参数特征。长岛震群序列从 2017 年 2 月 14 日的 $M_L 2.8$ 地震开始,截止到 2017 年 9 月 1 日共记录 $M_L \geq 2.5$ 余震 124 次,其中 $M_L 2.5 \sim 2.9$ 余震 79 次, $M_L 3.0 \sim 3.4$ 余震 34 次, $M_L 3.5 \sim 3.9$ 地震 6 次, $M_L 4.0$ 以上地震 5 次,最大震级地震为 2017 年 3 月 3 日 $M_L 4.5$ 地震。

本文选取震相清晰、有 8 个台站记录到的长岛地震序列波形资料(图 1,表 1),长岛地震台由于距离震中太近未被选取。同时遵循每个地震能够至少被三个台站记录到、同时每个台站能够包含三条以

上地震事件记录的原则^[7,17],挑选波形分辨率高、能经过 1.5 倍信噪比检验的地震记录用于研究。



三角形为本次选用的地震台站,红线为区域中主要的断裂带分布,圆圈为长岛地震序列 2017 年 2 月 14 日—2017 年 9 月 1 日 $M_L \geq 2.5$ 地震分布,红色五角星为 $M 4.5$ 级地震

图 1 研究区断层、台站及震中分布

Fig.1 Distribution of faults, stations, and epicenters in the study area

表 1 长岛地震序列参与计算的台站参数

Table 1 Station parameters involved in the calculation of the Changdao earthquake sequence

台站代码	地震计型号	数据采集器型号	频带范围
BHC	BBVS-60	EDAS-24IP	60 s~50 Hz
PENL	BBVS-60	EDAS-24IP	60 s~50 Hz
LOK	BBVS-60	EDAS-24IP	60 s~50 Hz
ZHY	BBVS-60	EDAS-24IP	60 s~50 Hz
YTA	BBVS-120	DAS-24GN	120 s~50 Hz
LZH	BBVS-60	EDAS-24IP	60 s~50 Hz
WEH	FSS-3DBH	EDAS-24IP	2 s~50 Hz
WED	BBVS-60	EDAS-24IP	60 s~50 Hz

3 计算结果及分析

3.1 地震波衰减与台站场地响应

选取地震序列附近的 8 个固定测震台站记录的 17 次地震资料(图 2),计算得出长岛震源区非弹性衰减系数 Q 值为 $Q(f) = 363.9f^{1.374 \pm 1}$ 。可以看出,长岛地区有相对较大的 Q_0 值和较低的 η 值,本次计算采用同一序列地震且与台站的震中距较小的资料,其结果反映的是该区域浅层 Q 值。同时,对于有较大 Q 值的介质,地震波在传播过程中的能量耗损较小、衰减较慢。一般而言,地质构造活动较稳定的地区,介质的均匀程度相对较高, Q 值较高;而地

质构造活动强烈的地区, Q 值相对较小^[18-19]。本次计算结果与长岛附近的辽宁区域(地震活动相对较稳定)非弹性衰减系数 $Q(f) = 552.7f^{0.2801}$ ^[20] 以及

山东中西部地区(地震活动相对较稳定)非弹性衰减系数 $Q(f) = 382.2f^{0.443}$ ^[21] 相比, Q 值相对较小, 与研究区构造活动实际情况相一致。

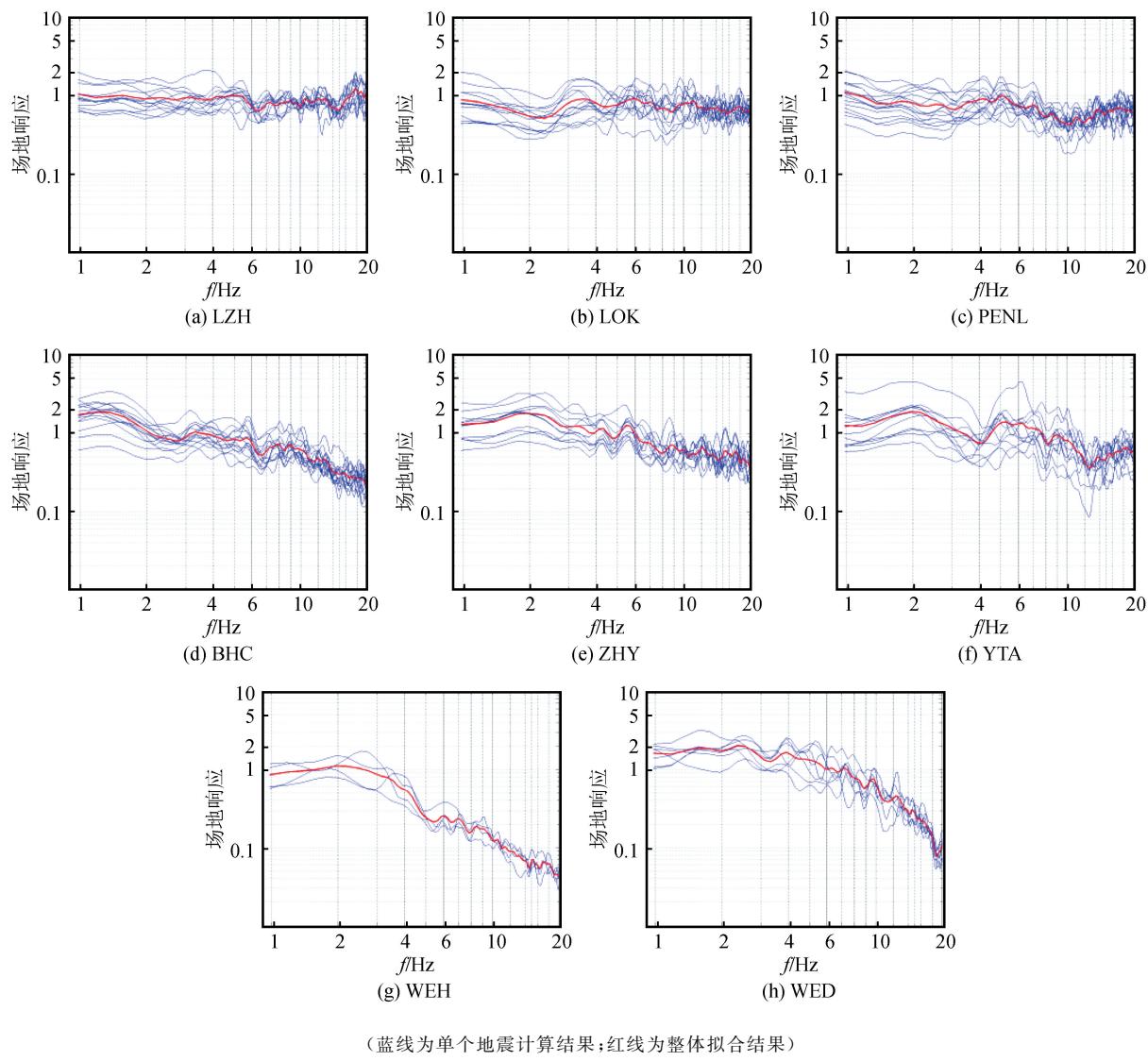


图 2 长岛震区附近台站场地响应

Fig.2 Site responses of stations near Changdao earthquake area

由图 2 可见, 8 个台站的场地响应值都为 1~2。其中 LZH、LOK、PENL 台站的场地响应相对平稳, 响应值均在 1 附近, 没有明显的频率放大, 可较好地记录该频段内的地震动情况; WEH、WED 台站的场地响应在 1~20 Hz 频率范围内有明显变化, 高频端显著降低, 同时 ZHY、YTA、BHC 台站场地响应从低频向高频端虽有较明显的变化, 但变化幅度并不是很大, 也可相对较好地记录地震动。场地响应主要的影响因素包括: 台站台基条件、台站所在位置的地形地貌和局部地质构造等^[22], 松软的沉积场地对地震动放大作用明显, 坚硬的基岩场地则较小, 基

岩台基台站的场地响应在大部分频段内平坦^[23]。此外, 台站周围介质对震源谱高频端有相对较强的吸收能力, 而对低频端的吸收差异很小, 因此台站周围局部介质特征对地震谱的高频部分有着重要影响^[24-26]。长岛震源区中, PENL 台站的台基岩性为砾岩, WEH、WED、LOK、LZH 台站为凝灰岩, BHC、ZHY 台站为花岗岩, YTA 台站为云闪母片麻岩。在已知的这几种岩石中, 砾岩硬度最低, 其次分别为凝灰岩与云闪母片麻岩, 而花岗岩硬度最高。因而由图 2 明显可见, WEH、WED 台站高频段明显减少, 这可能是由于二者台基均为较软的凝灰岩以

及受威海地区的局部介质特点的影响较大。此外,由于场地响应受多种因素综合影响,因此也不能单纯根据台基岩性对场地响应进行比较,需结合台站所处位置的地形地貌以及局部地质构造等多种因素作进一步的分析。

3.2 长岛震群序列地震震源参数整体特征

鉴于目前应力降与震级的关系存在争议。有部分研究者认为应力降随地震矩不变,近似于常数^[27-28];也有部分研究者认为应力降呈现随震级增大而增大的趋势^[29-30];同时有研究指出拐角频率随震级增大而减少^[11,31]。因而在应用震源参数方法时需消除或避免震级对结果产生额外的影响。为了在扣除震级影响的同时还尽可能地保留足够多的地震样本进行分析,在计算长岛震群震中及附近区域介质品质因子 Q 值和台站场地响应的基础上,本文将着重对长岛震群序列中震级为 M_L 2.5~3.5 且满足其他计算条件的地震的震源参数进行研究分析。

地震矩 M_0 表征地震强度大小,其数值大小与地震所释放的能量密切相关。本次获取的地震矩 M_0 主要分布在 $10^{12} \sim 10^{14}$ N·m 间(图 3),图 4 为地震矩 M_0 与 M_L 震级关系图,在本次研究的震级范围内呈现出震级越大地震矩越大的现象,同时地震矩 M_0 与 M_L 震级在单对数坐标下也存在很好的线性关系: $\log M_0 = 9.755 + 1.190 M_L$ 。本次计算得到的二者关系与其他地震学家得到的全球其他地区的二者关系基本相似^[32],其相关系数为 0.926。震源破裂半径 R 和地震强度、震源区介质结构等有关^[33]。图 5 为震源破裂半径 R 与地震矩关系图。从图中可看出地震矩和震源破裂半径 R 之间存在半对数关系: $\log M_0 = 11.882 + 0.005 R$,其相关系数

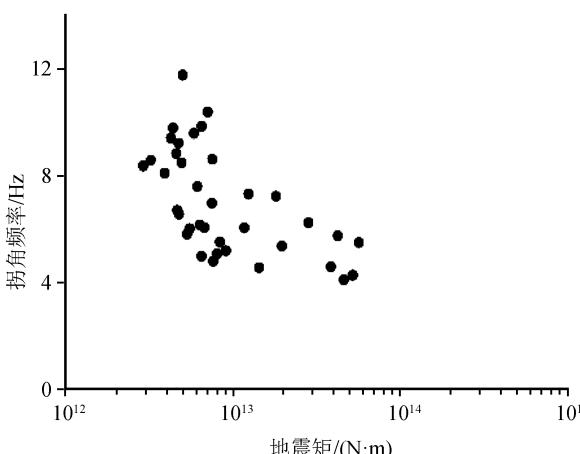


图 3 拐角频率与地震矩关系图

Fig.3 The relationship between corner frequency and seismic moment

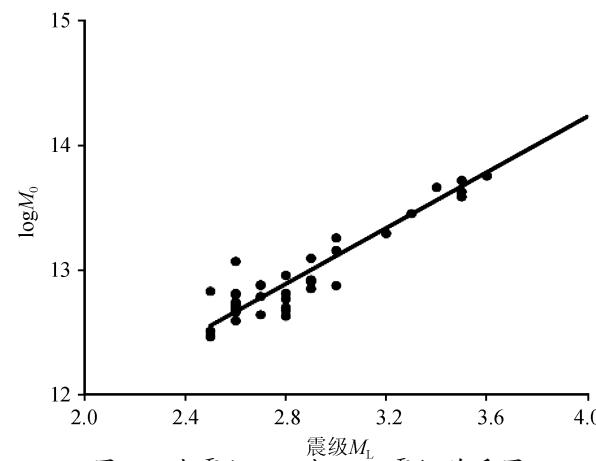


图 4 地震矩 M_0 与 M_L 震级关系图

Fig.4 The relationship between seismic moments M_0 and magnitude M_L

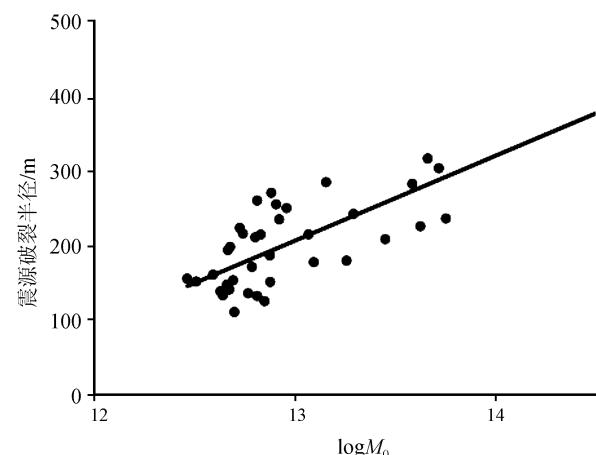


图 5 破裂半径 R 与地震矩 M_0 关系图

Fig.5 The relationship between rupture radius R and seismic moment M_0

为 0.785。拐角频率 f_c 指频谱中低频渐近线与高频渐近线相交点的频率,反映地震波高频和低频能量的分布及地震波的衰减变化特征,实际上为反映震源尺度大小的物理量^[14,31]。本次获得的拐角频率 f_c 数值范围在 4~12 Hz 间,整体而言,拐角频率与地震矩存在一定的相关性,随地震矩增大而减少(图 3),相关系数为 -0.404;这一二者相关性结果亦与前人的研究相一致^[11,31]。

图 6 为长岛震群序列 M_L 2.5~3.0 地震应力降分布统计。从图中可看出应力降数值分布较为集中,且普遍偏小,其最大不超过 0.9 MPa,平均值只有 0.593 MPa,中位值为 0.605 MPa。由于地震所释放应力降的高低表征震源区应力水平的高低^[2],因而这意味着长岛震源区整体构造应力环境较低,这也可能暗示长岛震群为低摩擦应力的断层作用。

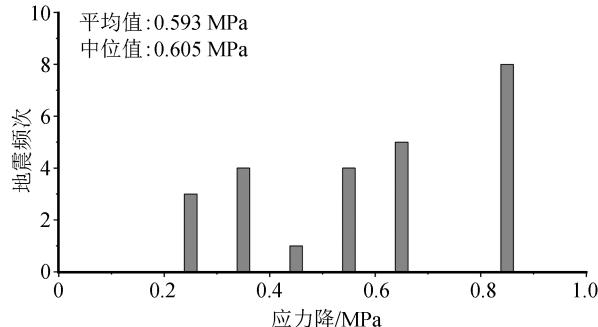


图 6 长岛震群序列应力降分布统计
Fig.6 Distribution of stress drop in Changdao earthquake swarm

3.3 长岛地震序列震源参数随时间的变化

拐角频率是对远场位移谱宽度的一种估计,实际上可反映震源尺度大小,其随震级的增大而减少^[11,31]。由于本文选取的震级研究区间范围较小,可近似认为震级对拐角频率的误差影响很小。图 7 为拐角频率随时间变化图。从图中可看出在 150 天之前,绝大部分地震事件的拐角频率都高于整体拐角频率的平均值,且拐角频率随时间有起伏的小幅上升,随后开始快速下降,紧接着就立刻上升,直到 M4.1 地震发生,随后拐角频率逐渐稳定在平均值附近。

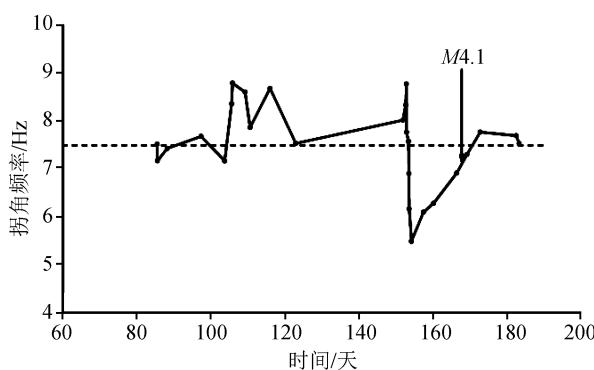


图 7 拐角频率随时间变化图(横线为拐角频率平均值)
Fig.7 Variation of corner frequency over time

拐角频率的这种变化可能与长岛区域的应力场有关,对于震级相同的地震而言,如其产生于高背景应力环境,则其震源脉冲高而窄,高频成分较多,拐角频率较大;反之,则其震源脉冲低而宽,高频成分往往很少,拐角频率较小^[34]。在拐角频率随序列时间变化方面,如震级相同的地震所处的时间进程位置不同,所对应的背景应力环境也不同,因而拐角频率也不相同。由此,这一拐角频率随时间的变化可能表征了震源区的应力调整过程,即在 150 天之前,震源区整体环境应力较高,且应力小幅度逐渐挤压

增强;达到一定程度后逐渐稳定,同时这一时期地震频次明显减少(140~150 天),未有 $M_{L} \geq 2.5$ 以上地震发生(图 8),似乎重新处于相对强的“闭锁”状态;紧接着在短时间内发生一系列中小地震,应力快速释放,即拐角频率快速下降,随后由于震源区局部应力场在短期内快速调整,可能造成局部应力增强,拐角频率快速增加,直到 M4.1 地震发生;随后震源区整体应力环境重新处于稳定状态。

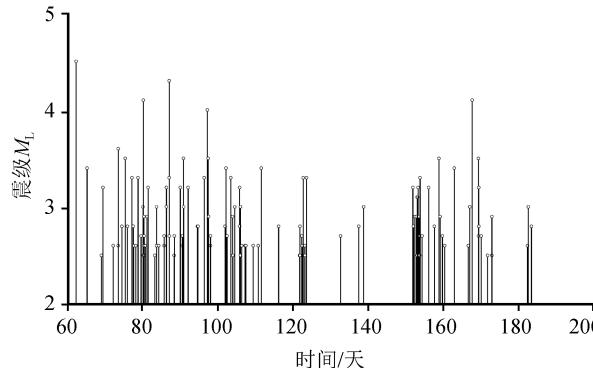


图 8 长岛地震序列 $M_{L} \geq 2.5$ 地震 $M-t$ 图
Fig.8 $M-t$ of the $M_{L} \geq 2.5$ earthquakes in the Changdao earthquake sequence

应力降指断层位错面在地震产生瞬间错动时所作用的应力变化,中小地震应力降随时间变化可能反映了应力状态随时间的变化^[11]。通过分析地震应力降随时间的变化,可以间接了解地震序列活动过程中局部构造应力的变化。图 9 给出长岛地震序列中 $M_{L} 2.5 \sim 3.0$ 地震应力降随时间的变化。由图 9 可见,整体而言,长岛震群地震应力降变化起伏很大,早期阶段应力降逐渐上升,随后发生 M4.0 地震,应力降继续上升,且大大高于整个序列应力降的

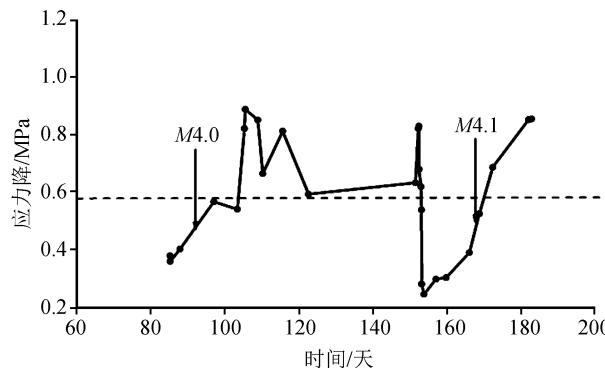


图 9 长岛震群序列 $M_{L} 2.5 \sim 3.0$ 地震应力降随时间的变化(横线为应力降的平均值)
Fig.9 Variation of stress drop of $M_{L} 2.5 \sim 3.0$ earthquakes in the Changdao swarm over time

平均值,随后在约 150 天左右开始极速下降,并立刻开始上升,直到在 175 天左右发生 M_{4.1} 地震,随后应力降继续上升,直到并未记录到 M_{1.2.5} 以上的地震为止。

这一应力降随时间的变化可能表征了震源区的应力调整过程,即早期阶段余震区应力状态随时间逐渐增加,震源区局部应力出现挤压增强趋势;之后应力维持在相对高值,即在 100~140 天之间的所有地震释放的应力降均高于平均值;随后在短时间内应力降快速降低,并紧接着快速上升,直至 M_{4.1} 地震发生。从力学作用的观点来看,中小地震在高应力状态下所释放的应力降一般会比低应力状态下所释放的应力降高,这是高应力状态下介质性质的综合反映^[35]。这表明 M_{4.1} 地震发生前,长岛区域整体应力环境在短时间内快速剧烈调整,局部区域可能确实整体处于短时间的挤压增强阶段。

4 讨论和结论

(1) 长岛震源区非弹性衰减系数 Q 值为 $Q(f) = 363.9f^{1.3741}$;长岛地区有相对较大的 Q₀ 值和较低的 η 值,与周边地震活动相对稳定的区域相比 Q 值相对较小,与构造活动程度的实际情况相一致。8 个长岛地区台站的场地响应值都为 1~2,均可以较好地记录该频段内的地震动;但由于场地响应受多种因素综合影响,因此需结合台站所处位置的地形地貌以及局部地质构造等多种因素对其进行进一步的分析。

(2) 各个震源参数之间均存在一定的相关关系,地震矩随 M_L 震级增大而增加,二者存在很好的线性关系: $\log M_0 = 9.755 + 1.190M_L$, 相关系数为 0.926; 地震矩与破裂半径 R 之间存在半对数关系: $\log M_0 = 11.882 + 0.005R$, 其相关系数为 0.785。拐角频率 f_c 数值范围在 4~12 Hz 之间,随地震矩增大而减少,相关系数为 -0.404; 长岛地震序列的应力降数值普遍偏小,最大不超过 0.9 MPa,由于地震所释放应力降的高低表征震源区应力水平的高低,因而意味着长岛震源区整体构造应力环境较低,也可能意味着长岛震群为低摩擦应力的断层作用。

(3) 在震源参数随时间的变化方面,在 150 天之前拐角频率为有起伏的小幅度上升,随后开始快速下降,紧接着就立刻上升,直到 M_{4.1} 地震发生,随后拐角频率逐渐稳定在平均值附近。这一拐角频率随时间的变化可能表征了震源区的应力调整过

程:早期阶段震源区整体应力逐渐挤压增强,达到一定程度后逐渐稳定,同时这一时期地震频次明显减少(140~150 天),似乎重新处于相对强的“闭锁”状态,紧接着在短时间内发生一系列中小地震,应力快速释放,即拐角频率快速下降,随后由于震源区局部应力场在短期内快速调整,造成局部应力增强,拐角频率快速增加,直至发生 M_{4.1} 地震。但值得注意的是,本次研究震例很少,对于拐角频率的这种变化是否为地震前兆还需进一步的详细研究。

整体而言,长岛震群地震应力降变化起伏很大,在早期阶段应力降逐渐上升,随后发生 M_{4.0} 地震,之后应力降仍继续上升,且大大高于整个序列应力降的平均值,在约 150 天左右开始极速下降,并紧接着开始上升,直至 175 天左右发生 M_{4.1} 地震;两次 M_{4.0} 以上地震均发生在应力降上升阶段,且均在应力降还未上升到平均值时发生,尤其是后续 M_{4.1} 地震发生在应力降短期内快速下降后的上升阶段。因而序列应力降随时间转折升高的变化对后续序列地震活动判定可能有一定的指示意义。

震源参数随时间的变化与地震序列中较强地震的发生有一定关系,跟踪序列震源参数的时间变化可能为后续序列地震活动判定提供一定的参考。但本文的资料有限,尚需更多震例的验证。

参考文献(References)

- [1] MOYA C A, AGUIRRE J, IRIKURA K. Inversion of Source Parameters and Site Effects from Strong Ground Motion Records Using Genetic Algorithms [J]. Bull Seism Soc Am, 2000, 90(4): 977-992.
- [2] 蒋海昆, 杨马陵, 付虹, 等. 震后趋势判定参考指南 [M]. 第 1 版. 北京: 地震出版社, 2015.
- [3] JIANG Haikun, YANG Maling, FU Hong, et al. Guidelines for Post-earthquake Trend Determination [M]. Version 1. Beijing: Seismological Press, 2015.
- [4] 钟羽云, 张帆, 张震峰, 等. 应用强震应力降和视应力进行震后趋势快速判定的可能性 [J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(1): 8-14.
- ZHONG Yuyun, ZHANG Fan, Zhang Zhenfeng, et al. Possibility of Earlier Judgement on Seismic Tendency After Strong Earthquake Based on Apparent Stress and Stress Drop [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(1): 8-14.
- [5] 陈学忠. 2001 年昆仑山口西 8.1 级大地震前后震源区应力水平估计 [J]. 地震学报, 2005, 27(6): 605-609.
- CHEN Xuezong. Estimation of the Stress Levels in the Focal Region Before and After the 2001 M8.1 Western Kunlun

- Mountain Pass Earthquake[J].Acta Seismologica Sinica,2005,27(6):605-609.
- [5] ATKINSON G M, MEREU R F. The Shape of Ground Motion Attenuation Curves in Southeastern Canada[J]. Bull Seism Soc Am, 1992, 82(2):14-31.
- [6] ATKINSON G M, BOORE D. New Ground Motion Relations for Eastern North America[J]. Bull Seism Soc Am, 1995, 85(1):17-30.
- [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.
- LIU Jie, ZHENG Sihua, HUANG Yulong. The Inversion of Non-elasticity Coefficient Source Parameters, Site Response Using Genetic Algorithms[J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 25(2):211-218.
- [8] CHAEL E. Spectral Scaling of Earthquakes in the Miramichi Region of New Brunswick[J]. Bull Seism Soc Am, 1987, 77(2):347-365.
- [9] 黄玉龙, 郑斯华, 刘杰, 等. 广东地区地震动衰减和场地响应的研究[J]. 地球物理学报, 2003, 46(1):54-61.
- HUANG Yulong, ZHENG Sihua, LIU Jie, et al. Attenuation of Ground Motion and Site Response in Guangdong Region[J]. Chinese J Geophys, 2003, 46(1):54-61.
- [10] 刘丽芳, 刘杰, 苏有锦, 等. 2001年施甸震群非弹性衰减及震源参数特征研究[J]. 中国地震, 2005, 21(4):475-485.
- LIU Lifang, LIU Jie, SU Youjin, et al. Study on Non-elasticity Attenuation and Source Parameters of the Shidian Swarm in 2001[J]. Acta Seismologica Sinica, 2005, 21(4), 475-485.
- [11] 华卫. 中小地震震源参数定标关系研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2007.
- HUA Wei. Study on Scaling Relation of Source Parameters for Moderate and Small Earthquake[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2007.
- [12] HOLLAND J H. Adaptation in Nature and Artificial System [M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975:1-132.
- [13] 王鹏, 郑建常, 赵金花. 胶东半岛地区震源波谱参数研究[J]. 地震工程学报, 2013, 35(2):360-365.
- WANG Peng, ZHENG Jianchang, ZHAO Jinhua. Status of Seismic Source Spectral Parameters in the Jiaodong Peninsula[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(2):360-365.
- [14] BRUNE J N. Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Waves from Earthquakes[J]. J Geophys Res, 1970, 75(75): 4997-5009.
- [15] BRUNE J N. Correction[J]. J Geophys Res, 1971, 76(20): 5002.
- [16] STORK A L, ITO H. Source Parameter Scaling for Small Earthquakes Observed at the Western Nagano 800-m-deep Borehole, Central Japan[J]. Bull Seism Soc Am, 2004, 94(5): 1781-1794.
- [17] 华卫, 陈章立, 郑斯华. 2008年汶川8.0级地震序列震源参数分段特征的研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(2):365-371.
- HUA Wei, CHEN Zhangli, ZHENG Sihua. A Study on Segmentation Characteristics of Aftershock Source Parameters of Wenchuan M8.0 Earthquake in 2008[J]. Chinese J Geophys, 2009, 52(2):365-371.
- [18] 李祖宁, 杨贵, 陈光. 福建地区地震波非弹性衰减Q值、场地响应及震源参数研究[J]. 地震研究, 2012, 35(3): 381-386, 442.
- LI Zuning, YANG Gui, CHEN Guang. Research on Inelastic Attenuation Q-value, Site Response and Source Parameters in Fujian Region[J]. Journal of Seismological Research, 2012, 35(3):381-386, 442.
- [19] 曲均浩, 王长在, 刘方斌, 等. 乳山序列地震分布与震源区速度结构的关系研究[J]. 地震地质, 2019(待刊).
- QU Junhao, WANG Changzai, LIU Fangbin, et al. Study on Relationship Between Seismic Distribution of Rushan Sequence and Velocity Structure[J]. Seismology and Geology, 2019 (For Publication).
- [20] 李恩来, 王承伟, 王帅, 等. 辽宁地区S波非弹性衰减Q值及台站场地响应研究[J]. 防灾减灾学报, 2016, 32(4):12-17.
- LI Enlai, WANG Chengwei, WANG Shuai, et al. The S Wave Inelastic Attenuation Q-value and Station Site Effectiveness Research in Liaoning Area[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 32(4):12-17.
- [21] 季爱东, 周彦文, 吴丹彤, 等. 山东中西部及邻近地区震源参数和场地响应的反演[J]. 华北地震科学, 2008, 26(3):31-35.
- JI Aidong, ZHOU Yanwen, WU Dantong, et al. Inversion of Source Parameters and Site Response in Central and Western Shandong and Its Adjacent Area[J]. North China Earthquake Sciences, 2008, 26(3), 31-35.
- [22] 张红才, 徐嘉雋, 陈智勇. 基于噪声谱比法的福建台网观测台站的场地响应研究[J]. 地震学报, 2015, 37(6):1045-1058.
- ZHANG Hongchai, XU Jiajun, CHEN Zhiyong. Site Response of Fujian Seismic Monitoring Stations Based on Nakamura H/V Spectral Ratio Method[J]. Acta Seismologica Sinica, 2015, 37(6):1045-1058.
- [23] SHEARER P M. Introduction to Seismology[M]. New York: Cambridge University Press, 1999.
- [24] 叶建庆. 丽江地震场地响应分析研究[J]. 地震研究, 1998, 21(2):3-9.
- YE Jianqing. Analyses and Studies of Site Response for Lijiang Earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 1998, 21(2):3-9.
- [25] 曲均浩, 蒋海昆, 李金, 等. 2013—2014年山东乳山地震序列发震构造初探[J]. 地球物理学报, 2015, 58(6):1954-1962.
- QU Junhao, JIANG Haikun, LI Jin, et al. Preliminary Study for Seismogenic Structure of the Rushan Earthquake Sequence in 2013—2014[J]. Chinese J Geophys, 2015, 58(6): 1954-1962.
- [26] 曲均浩, 刘方斌, 郑建常, 等. 乳山地震序列区域台网及台阵定位结果对比[J]. 震灾防御技术, 2018, 13(1):148-157.

- QU Junhao, LIU Fangbin, ZHENG Jianchang, et al. Comparison of Location of Rushan Seismic Sequence Between Region Network and Array Network[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2018, 13(1): 148-157.
- [27] SHEARER P M, PRIETO G A, HAUKSSON E. Comprehensive Analysis of Earthquake Source Spectra in Southern California[J]. J Geophys Res, 2006, 111(B6): 3197-3215.
- [28] ANNEMARIE B, SATOSHI I, GEMAN P, et al. Variability in Earthquake Stress Drop and Apparent Stress[J]. Geophys Res Lett, 2011, 38(6): 122-133.
- [29] TUSA G, GRESTA S. Frequency-dependent Attenuation of P Waves and Estimation of Earthquake Source Parameters in Southeastern Sicily, Italy[J]. Bull Seism Soc Am, 2008, 98(6): 2772-2794.
- [30] 周少辉,蒋海昆.景谷 6.6 级、鲁甸 6.5 级地震序列应力降变化对比研究[J].中国地震,2017,33(1):23-37.
ZHOU Shaohui, JIANG Haikun. Comparative Study of Changes in Stress Drop of Earthquake Sequences of Yunnan Jinggu M_S 6.6 and Luddian M_S 6.5[J]. Earthquake Research in China, 2017, 33(1): 23-37.
- [31] SAVAGE J C. Relation of Corner Frequency to Fault Dimensions[J]. Journal of Geophysical Research, 1972 (77): 3788-3795.
- [32] ALLMANN B P, SHEARER P M. Global Variations of Stress Drop for Moderate to Large Earthquakes[J]. J Geophys Res, 2009, 114(B1): 310-332.
- [33] 曲均浩,刘瑞峰,李金,等. CAP 方法反演 2014 年山东乳山 M4.2、M4.0 地震震源机制解[J].地震工程学报,2014,36(4):1076-1080.
QU Junhao, LIU Ruifeng, LI Jin, et al. Focal Mechanism of M4.2, M4.0 Earthquakes in Shandong Rushan in 2014 Inverted by the CAP Method[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4), 1076-1080.
- [34] 陈培善, DUDA S J. 地震辐射能对环境应力的依赖性[J]. 地震学报, 1993, 15(2): 146-152.
CHEN Peishan, DUDA S J. The Dependence of Stress Radiant Energy to the Environment Stress[J]. Acta Seismologica Sinica, 1993, 15(2): 146-152.
- [35] 刘丽芳,苏有锦,刘杰,等. 云南和四川中小地震应力降时空特征研究[J]. 地震研究, 2010, 33(3): 314-319.
LIU Lifang, SU Youjin, LIU Jie, et al. Study on Temporal and Spatial Features of Stress Drop for Low-to-moderate Earthquakes in Sichuan and Yunnan Region[J]. Journal of Seismological Research, 2010, 33(3): 314-319.