

杨贵,李祖宁,林彬华,等.福建仙游  $M_L$  5.0 震群序列震源参数研究[J].华南地震,2017,37(3):74-80. [YANG Gui, LI Zuning, LIN Binhua, et al. Analysis on Characteristics of Source Parameters in Fujian Xianyou  $M_L$  5.0 Earthquake Swarm Sequence[J]. South China journal of seismology,2017,37(3):74-80.]

## 福建仙游 $M_L$ 5.0 震群序列震源参数研究

杨贵<sup>1</sup>,李祖宁<sup>1</sup>,林彬华<sup>1</sup>,徐嘉隽<sup>1</sup>,许振栋<sup>2</sup>

(1.福建省地震局,福州 350003; 2.平潭地震台,福建 平潭 350400)

**摘要:**应用2012年9月至2015年4月福建区域数字地震台网及边界线附近邻省共享数据台站记录的108个地震事件波形资料,首先采用Atkinson方法求得覆盖福建省较广的地壳平均地震波非弹性衰减,再用Moya方法求得98个台站的场地响应。在此基础上,精确测定得到了福建仙游  $M_L$  5.0 震群序列  $M_L \geq 2.0$  的45个地震的震源参数,通过定标参数间关系的研究,表明:地震矩  $M_0$  随震级  $M_L$  的增大而增大,两者之间存在较好的线性关系,统计关系为  $\log M_0 = 1.06 \times M_L + 9.9$ ;震源半径与震级之间的关系式为:  $r = 112.7 \times M_L - 152.8$ ;拐角频率总体随着震级的增大而变小,线性关系为:  $f = -3.2 \times M_L + 17.7$ ;应力降随震级的增大总体变大,关系式为:  $\Delta\sigma = 1.52 \times M_L - 3.28$ 。

**关键词:**福建仙游;震源参数;地震矩;应力降

中图分类号: P315.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2017) 03-0074-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.03.011

## Analysis on Characteristics of Source Parameters in Fujian Xianyou $M_L$ 5.0 Earthquake Swarm Sequence

YANG Gui<sup>1</sup>, LI Zuning<sup>1</sup>, LIN Binhua<sup>1</sup>, XU Jiajun<sup>1</sup>, XU Zhendong<sup>2</sup>

(1. Fujian Earthquake Agency, FuZhou 350003, China;

2. Pingtan Seismic Station in, Pingtan 350400, China)

**Abstract:** Using the the108 seismic event waveform data recorded by Fujian regional digital seismic network and sharing data of seismic stations in the neighboring province during September 2012 to April, 2015, the paper firstly used the Atkinson method to calculate the average crustal seismic wave attenuation in Fujian, and then used Moya method to obtain 98 station site response. On the basis of above, the paper calculated the source parameters of 45 earthquakes with  $M_L \geq 2.0$  of the Fujian Xianyou  $M_L$  5.0 earthquake swarm sequence and calibrated the relations among the parameters. The results show that: in single logarithmic coordinates, seismic moment  $M_0$  increase with increasing magnitude  $M_L$ , there is a good linear relationship as the statistical relationship for  $\text{Log}M_0 = 1.06 \times M_L + 9.9$ ; relationship between the focal radius and the earthquake magnitude is  $r =$

收稿日期: 2016-06-07

作者简介: 杨贵 (1978-), 男, 高级工程师, 主要从事地震监测与数字地震应用研究工作。

E-mail: 765068979@qq.com.

$112.7 \times M_L - 152.8$ ; corner frequency reduce with increasing magnitude  $M_L$ , the linear relationship is  $f = -3.2 \times M_L + 17.7$ ; stress drop increase with increasing magnitude  $M_L$ , the linear relationship is  $\Delta\sigma = 1.52 \times M_L - 3.28$ .

**Keywords:** Fujian xianyou; Source parameters; Seismic moment; Stress drop

## 0 前言

福建测震台网现自有 88 个测震台站, 通过数据共享接入有周边邻省等 24 个台站, 在日常工作中, 邻近福建省边界线外 30 km 范围的 13 个外省台, 常参与地震速报、编目等工作, 通过近几年的运行记录, 积累了较丰富的省内及周边 30 km 范围内的中小地震。数字地震记录包含了震源、地球内部介质以及台站场地响应等信息, 由地震波形资料研究地震波衰减、台站场地响应, 估算地震震源参数, 如地震矩、应力降、破裂半径、矩震级等, 对探索地震震源性质和进行地震预测与地震危险性分析具有十分重要的意义。Atkinson<sup>[1]</sup> 等利用多台、多地震联合反演的方法, 对于计算几何扩散系数和非弹性衰减有比较好的结果。Moya<sup>[2]</sup> 等利用遗传算法多台多地震联合反演, 能较好求得震源谱参数和场地响应。在中国地震局预测研究所推广下, 上述方法已较广泛应用于我国的区域地震台网进行区域非弹性衰减与台站场地响应的计算, 进而计算各中小地震的震源参数。李祖宁<sup>[3]</sup> 等采用以上方法对福建地区地震波非弹性衰减, 台站场地应及震源参数进行了研究, 得到非弹性衰减  $Q$  值随频率  $f$  的关系式  $Q(f) = 366.50 f^{0.4282}$  和 36 个地震台站的场地响应及中小地震震源参数间关系。

2013 年 9 月 4 日 06 时 23 分, 福建仙游发生了  $M_L 5.0$  地震, 此次地震是该地区自福建测震台网有记录以来记录的最大地震, 台网较好的记录到此次震群序列地震。本文通过计算、分析仙游震群序列震源参数, 以期进一步探索对这些参数的应用。

## 1 计算方法

要求得震源力学参数, 就必须在地震观测谱中扣除台站场地响应、传播路径效应、仪器响应及噪声的影响。我们首先应用 Atkinson<sup>[1]</sup> 等的方法, 采用三段几何衰减模型, 使用多台多地震联合反演的方法<sup>[3-6]</sup>, 计算福建地区地壳平均非弹性衰减, 再用多台多地震联合反演的 Moya 方法<sup>[6]</sup> 计算了地震台站场地响应。

经过精确计算地震波非弹性衰减和台站场地

响应之后, 采用 Atkinson 单个地震、多台记录求平均的反演方法计算震源谱参数, 从观测谱中扣除传播路径效应和场地响应等因素的影响, 得到各台记录的震源位移谱, 然后利用遗传算法<sup>[3-6]</sup> 对震源位移谱进行拟合, 进而得到震源谱参数——零频极限  $\Omega_0$  和拐角频率  $f_c$ 。根据 Brune<sup>[7]</sup> 等效圆盘断层模型, 应用求得的震源谱参数, 采用下列表达式计算出地震矩、震源半径和应力降等震源参数, 对于地震矩:

$$M_0 = \frac{4\pi\rho V_s^3 \Omega_0}{2R_{\theta\phi}} \quad (1)$$

式(1)中  $\rho$  是密度, 本研究取为  $2.65 \text{ g/cm}^3$ ;  $V_s$  是 S 波速度, 取为  $3.55 \text{ km/s}$ ;  $R_{\theta\phi}$  是 S 波的辐射花样系数, 对于 SH 波取震源辐射能量的平均值为  $\sqrt{2/5}$ 。

对于震源半径:

$$r = \frac{2.34V_s}{2\pi f_c} \quad (2)$$

对于应力降:

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

对于矩震级<sup>[8]</sup>:

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 6.033 \quad (4)$$

## 2 资料处理及计算结果

福建台网自有的 88 个测震台站中, YTFQ、PTAQ、ZPYF 三个台于 2016 年 3 月 1 日正式运行, 因运行时间短, 积累的地震记录数据较少, 没有纳入到计算中。计算非弹性衰减和场地响应时, 按照一个地震至少被 3 个以上台站记录到, 一个台衰减和场地响应时, 按照一个地震至少被 3 个以上台站记录到, 一个台站至少记录到 3 个以上地震且信噪比大于 2 倍的原则, 我们在 2012 年 9 月至 2015 年 4 月时段内, 从福建省内及福建省边界线外近 30 km 范围内, 挑选出较均匀分布的 108 个  $M_L \geq 2.0$  的地震, 有 98 个测震台, 共 1 996 条射线。在 88 个自有测震台站中, YTFQ、PTAQ、ZPYF 三个台, 因运行时间短, 积累的数据较少,

没有纳入到计算中。图 1 给出了所挑选地震及台站的射线路径分布图。应用这些地震，采用 Atkinson<sup>[1]</sup> 的方法计算得到福建地区的非弹性衰减结果为  $Q(f)=452.4.3 f^{0.3338}$ ，见图 2。对比李祖宁<sup>[3]</sup>等所做的结果： $Q(f)=366.5 f^{0.4282}$ ， $Q_0$  值变大了，衰减系数小了。与周边省所做的结果进行比较：广东省<sup>[9]</sup> $Q(f)=437.5 f^{0.3937}$  和  $Q(f)=423.6 f^{0.3912}$ ，浙江省<sup>[10]</sup>  $Q(f)=361.0 f^{0.458}$ ，此次计算结果与广东省的  $Q_0$  值与衰减系数较相近。李祖宁等受当时台站建设情况

及记录地震事件的影响，使用的测震台站少，选用的地震及射线覆盖范围较有限，特别是在福建北部及西部地区，几乎都没什么射线穿过，共采用了 70 个地震事件，28 个测震台，561 条射线，所反演的  $Q$  值结果更多的是代表射线集中的闽南区域。本次工作，把福建邻省位于福建省边界的台站及发生于福建省边界的地震纳入计算，使得射线基本可以覆盖福建省，所得的  $Q$  值应能较客观反映福建省情况。

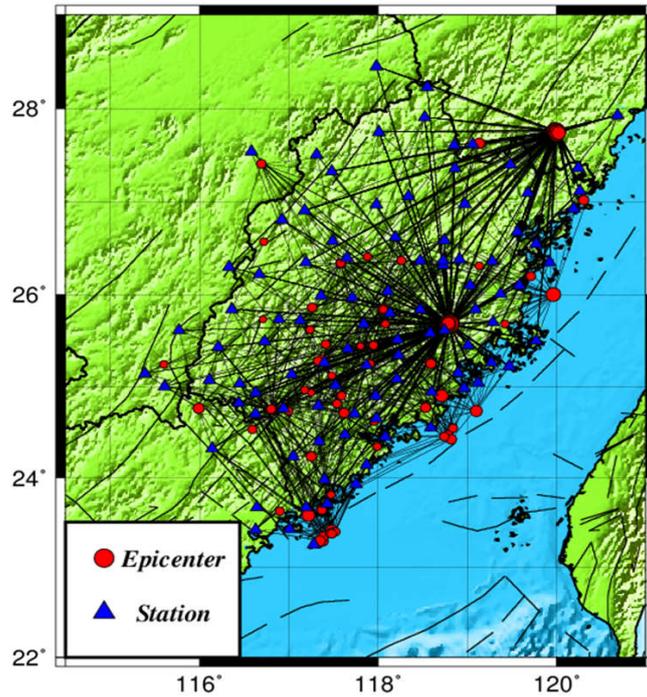


图 1 计算  $Q$  值和场地响应所选用地震的震中和射线分布

Fig.1 Epicenters of earthquakes which are selected to calculate  $Q$ -value and site response and ray distribution

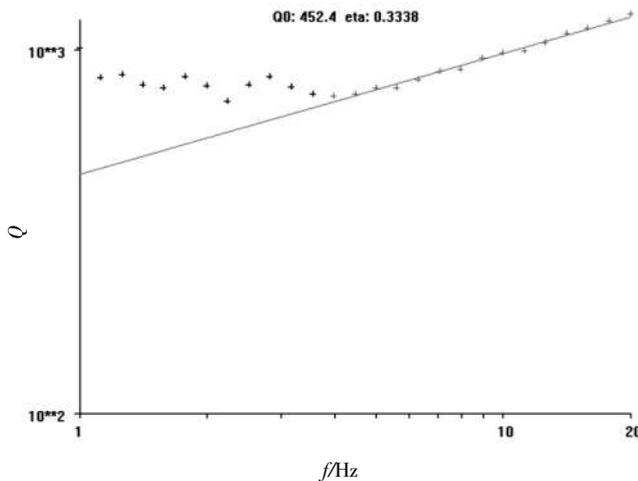


图 2 福建地区介质品质因子与频率的关系

Fig.2 The relationship between  $Q$  value and frequency in Fujian area

在求得介质的品质因子等系数后，应用 Moya<sup>[6]</sup> 的方法计算得到 98 个测震台站的场地响应结果曲线图(见图 3)。98 个台站场地响应中有 62 个台的场地响应值总体在 1 附近波动(见图 3(a~p))，有 12 个台站场地响应在 2 附近波动(见图 3(q~s))，有 24 个台的场地响应曲线变化较大，有的在高频呈较大的放大或衰减等(见图 3(t~y))。

在求得地震波非弹性衰减及台站场地响应后，就可以从观测谱中扣除传播路径效应和场地响应的影响，利用遗传算法<sup>[2-5]</sup>对单事件、多台记录的震源位移谱进行拟合，得到震源谱参数零频极限和拐角频率，代入 Brune 模型公式(1-3)，计算得到震源参数。图 4 显示求解一个地震的震源谱参数，蓝线代表这个事件各个台记录的震源谱，绿线为平均震源谱，红线为拟合的理论震源谱。

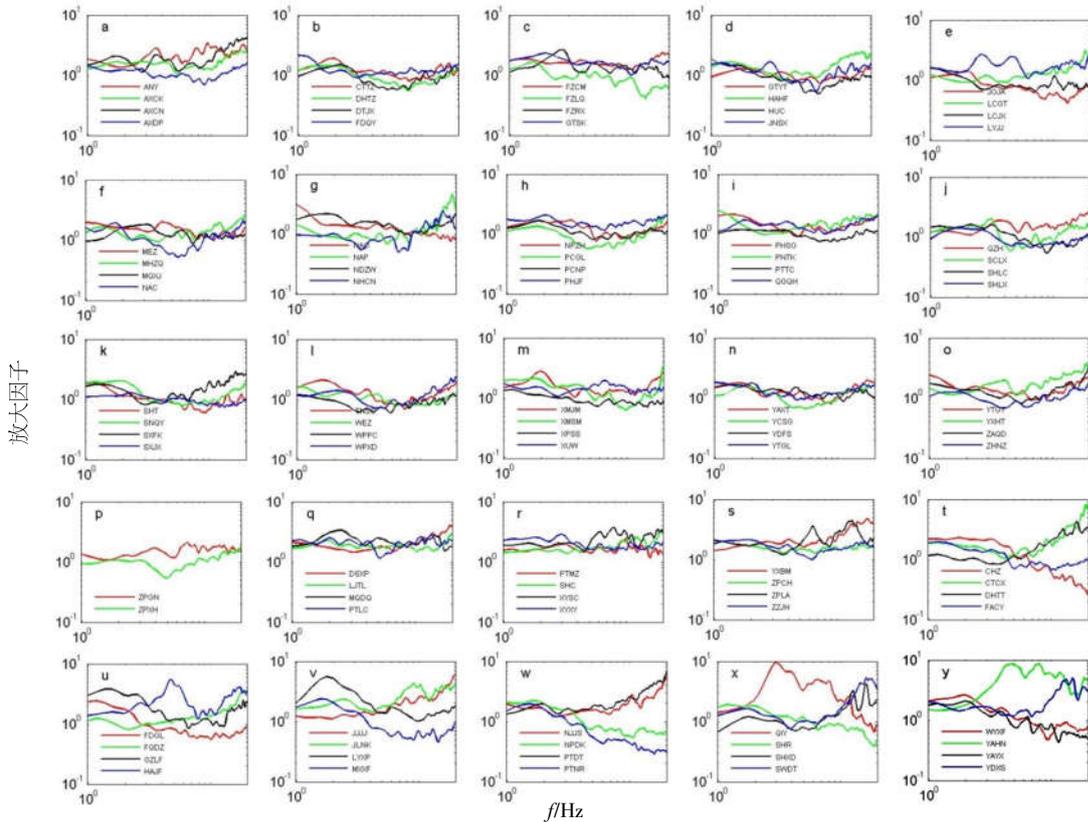


图3 98个测震台站场地响应平均值曲线图

Fig.3 Average site response of 98 seismic stations

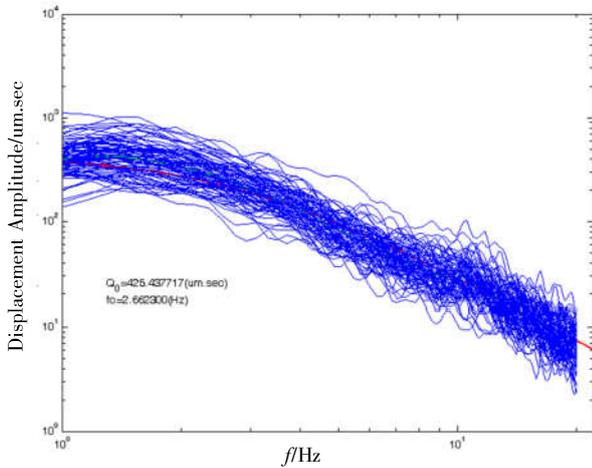


图4 震源谱参数拟合图

Fig.4 Fitting figure of source spectral parameter

2013年9月4日,福建仙游发生  $M_L$  5.0 地震,此次地震前,该区域就经常记录有地震的发生。统计该区域地震数字化以来的记录,该区域于2010年8月4日首次记录到地震。地震资料选取了2010年8月4日至2016年1月31日仙游震群  $M_L \geq 2.0$  地震事件123个,不予计算双震叠加的地震事件,反演的地震事件要求具有3个台以上记录且信噪比大于1.5,要求台站间最大夹角要小于

180°,以利于在反演结果时尽量消除震源的辐射花样影响,这样共计算得到45个地震的震源谱参数和震源参数,结果汇总见表1。

表1中  $H$  为震源深度,  $M_L$  为地方性震级,  $\Omega_0$  为零频极限,  $M_0$  为地震矩,  $f_c$  为拐角频率,  $r$  为震源半径,  $\Delta\sigma$  为应力降,  $M_w$  为矩震级,台数为参与拟合震源谱的台站数。

由表1中台数可知,参与各个事件计算的台站数为3~82个不等,绝大部分台数都大于7个台,在计算震源谱参数时,应能较有效地消除震源的辐射花样影响。

### 3 震源参数结果及其相互关系分析

#### 3.1 地震矩、震源尺度、拐角频率、应力降和震级之间的关系

求得结果的45个地震的震级范围为  $M_L$  2.0~5.0,地震矩  $M_0$  范围为  $1.0526 \times 10^{12} \sim 1.5459 \times 10^{15} \text{ N}\cdot\text{m}$ ,在单对数坐标下,地震矩  $M_0$  随震级  $M_L$  的增大而增大,两者有较好的线性关系(见图5a),用最小二乘法进行拟合,关系式为  $\log M_0 = 1.06 \times M_L + 9.9$ ;震源半径  $r$  的结果范围为88~496 m,随震

级  $M_L$  的增大总体呈线性增大(见图 5b), 两者之间最小二乘法拟合关系式为  $r=112.7 \times M_L - 152.8$ ; 拐角频率  $f$  的结果范围为 2.662~15 Hz, 总体随着震级  $M_L$  的增大而线性变小(见图 5(c)), 最小二乘法拟

合关系式为  $f=-3.2 \times M_L + 17.7$ ; 应力降  $\Delta\sigma$  的结果范围为 0.177~5.523 MPa, 总体随震级  $M_L$  的增大而变大(见图 5d), 用最小二乘法拟合出两者间关系式为  $\Delta\sigma=1.52 \times M_L - 3.28$ 。

表 1 仙游  $M_L \geq 2.0$  级地震的震源参数反演结果

Table 1 Source parameters of earthquakes with  $M_L \geq 2.0$  in XianYou

序号	发震时刻		震中位置		$H/km$	$M_L$	$\Omega_0/(\mu m \cdot s)$	$f_c/Hz$	$M_0/(N \cdot m)$	$M_w$	$\Delta\sigma/MPa$	$r/m$	台数
	年-月-日	时:分:秒	$\varphi_N/(\circ)$	$\lambda_E/(\circ)$									
1	2011-12-30	02:38:39.1	25.653	118.726	20	2.9	3.029	4.398	1.100 8 E+13	2.6	0.177	300	8
2	2012-01-13	22:02:25.4	25.596	118.777	20	2.6	0.990	10.259	3.596 4 E+12	2.3	0.735	128	5
3	2012-04-15	11:57:01.1	25.660	118.708	13	4.1	58.406	4.146	2.122 3 E+14	3.5	2.864	318	39
4	2012-04-15	12:02:02.7	25.653	118.717	14	3.4	7.432	6.561	2.700 7 E+13	2.9	1.444	201	33
5	2012-05-11	22:39:22.4	25.653	118.721	18	3.2	3.866	8.664	1.404 7 E+13	2.7	1.729	152	23
6	2012-05-24	18:02:17.9	25.653	118.724	17	2.8	1.627	9.097	5.910 5 E+12	2.4	0.842	145	16
7	2012-06-10	16:17:54.8	25.657	118.717	17	2.5	0.981	10.091	3.563 4 E+12	2.3	0.693	131	3
8	2012-11-25	07:48:49.3	25.631	118.748	17	3.8	16.236	6.173	5.899 7 E+13	3.1	2.628	214	40
9	2012-11-25	17:42:39.1	25.629	118.749	17	3.4	6.123	7.061	2.224 9 E+13	2.8	1.483	187	26
10	2012-11-30	14:59:13.4	25.627	118.749	18	3.3	6.270	7.455	2.278 4 E+13	2.8	1.787	177	30
11	2013-01-12	22:57:21.0	25.637	118.740	10	2.4	0.760	10.711	2.760 6 E+12	2.2	0.642	123	4
12	2013-02-10	03:25:46.1	25.633	118.742	14	2.5	1.122	10.290	4.077 9 E+12	2.3	0.841	128	9
13	2013-02-23	23:23:14.8	25.638	118.741	11	3.0	2.428	10.144	8.822 4 E+12	2.6	1.744	130	12
14	2013-08-03	02:43:56.5	25.635	118.746	10	4.2	50.164	4.908	1.822 8 E+14	3.4	4.080	269	48
15	2013-08-03	05:23:36.5	25.631	118.748	8	2.8	1.773	8.727	6.442 9 E+12	2.5	0.811	151	9
16	2013-08-09	13:38:40.9	25.631	118.747	11	3.5	12.860	5.933	4.673 0 E+13	3.0	1.848	222	43
17	2013-08-09	13:53:24.0	25.629	118.748	11	2.9	2.284	8.336	8.300 6 E+12	2.5	0.910	158	25
18	2013-08-19	17:36:20.0	25.630	118.748	10	3.8	25.660	4.244	9.324 3 E+13	3.2	1.350	311	53
19	2013-08-19	18:05:28.7	25.633	118.744	9	2.7	1.304	8.969	4.738 8 E+12	2.4	0.647	147	11
20	2013-08-23	05:02:01.4	25.631	118.750	10	4.5	130.698	3.415	4.749 2 E+14	3.7	3.580	387	76
21	2013-08-24	00:49:57.4	25.627	118.752	11	3.0	3.371	9.041	1.225 0 E+13	2.7	1.714	146	25
22	2013-09-04	06:23:26.8	25.629	118.752	11	5.0	425.438	2.662	1.545 9 E+15	4.1	5.523	496	82
23	2013-09-06	07:23:38.0	25.636	118.718	9	2.3	0.617	11.850	2.241 0 E+12	2.2	0.706	111	4
24	2013-09-08	22:56:38.9	25.627	118.750	9	2.5	0.848	9.005	3.082 0 E+12	2.3	0.426	146	5
25	2013-09-14	02:59:50.8	25.622	118.756	10	3.4	7.752	5.136	2.816 8 E+13	2.9	0.723	257	69
26	2013-10-18	14:05:23.6	25.631	118.744	10	3.3	5.678	8.679	2.063 3 E+13	2.8	2.554	152	43
27	2013-10-30	01:50:12.3	25.631	118.750	10	4.5	153.254	3.160	5.568 9 E+14	3.8	3.326	418	82
28	2013-11-04	20:34:40.5	25.619	118.755	11	3.0	3.097	7.884	1.125 4 E+13	2.6	1.044	167	21
29	2013-11-06	21:31:24.6	25.619	118.756	11	2.8	2.033	6.328	7.388 6 E+12	2.5	0.354	208	17
30	2013-11-19	03:03:58.9	25.623	118.755	10	3.2	5.487	6.270	1.993 7 E+13	2.8	0.930	210	35
31	2013-12-16	19:01:36.0	25.639	118.739	10	3.1	3.405	6.704	1.237 1 E+13	2.7	0.706	197	17
32	2014-01-02	13:56:38.3	25.638	118.740	10	2.5	0.927	8.899	3.367 2 E+12	2.3	0.449	148	7
33	2014-01-02	23:34:08.6	25.640	118.738	10	2.3	0.554	10.632	2.012 2 E+12	2.1	0.458	124	4
34	2014-01-07	06:43:42.6	25.636	118.740	10	2.9	2.125	7.512	7.720 0 E+12	2.5	0.619	176	16
35	2014-01-27	13:50:18.8	25.640	118.738	10	3.1	4.020	9.333	1.460 7 E+13	2.7	2.248	141	25
36	2014-01-27	13:53:04.1	25.641	118.738	10	2.5	1.124	7.416	4.084 5 E+12	2.3	0.315	178	5
37	2014-02-02	00:03:47.5	25.640	118.737	10	2.0	0.290	15.000	1.052 6 E+12	1.9	0.673	88	7
38	2014-02-27	14:32:29.7	25.637	118.742	10	2.5	1.100	6.493	3.997 1 E+12	2.3	0.207	203	8
39	2014-03-14	19:53:36.0	25.634	118.743	11	3.8	22.457	5.266	8.160 4 E+13	3.2	2.255	251	52
40	2014-05-12	18:24:19.3	25.638	118.739	10	3.0	3.302	6.920	1.199 9 E+13	2.6	0.753	191	20
41	2014-05-24	00:14:12.5	25.639	118.737	10	2.8	2.081	9.104	7.563 1 E+12	2.5	1.080	145	18
42	2014-07-03	17:14:26.7	25.639	118.738	11	3.0	2.222	14.169	8.073 5 E+12	2.5	4.348	93	20
43	2014-07-19	01:50:15.9	25.639	118.739	9	3.3	6.216	5.566	2.258 7 E+13	2.8	0.737	237	32
44	2014-07-27	20:28:59.1	25.643	118.734	10	2.6	0.933	7.234	3.392 1 E+12	2.3	0.243	182	7
45	2014-07-27	20:52:40.7	25.641	118.736	9	2.3	0.584	10.202	2.122 9 E+12	2.1	0.427	129	5

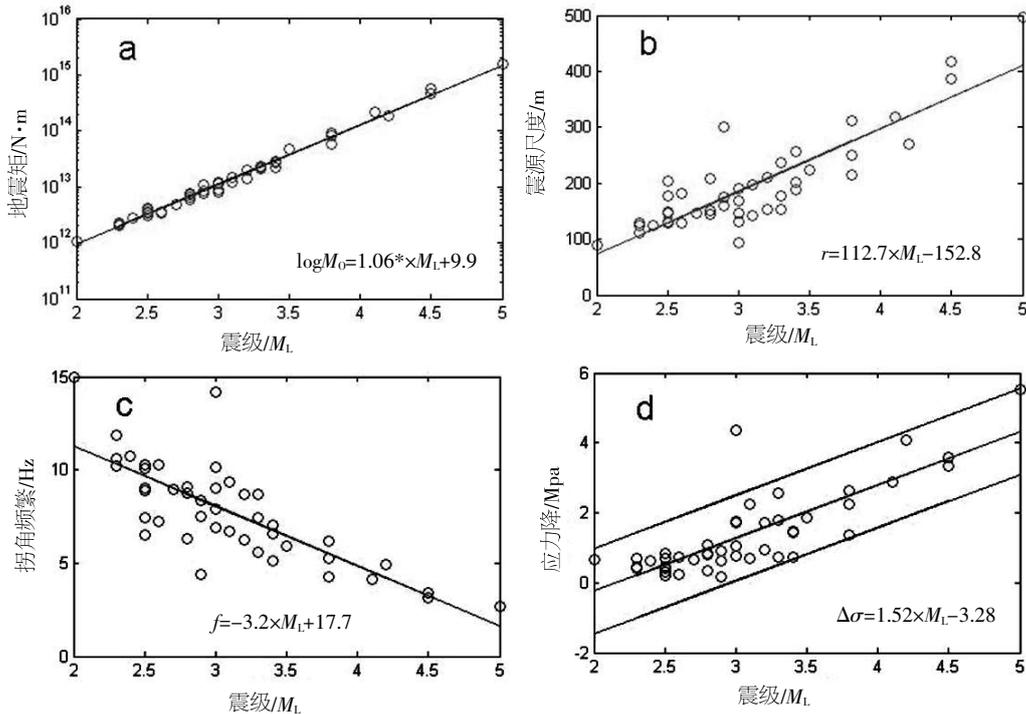


图5 震源参数与震级的关系

Fig.5 Relationship between seismic moment(a), seismic source radius(b), corner frequency(c), stress drop and magnitude  $M_L$

### 3.2 应力降的时序变化特征

绘制 45 个地震事件的应力降与震级时间序列分布图, 见图 6, 图中震级标注指向的是相应的应力降值。Abercrombie<sup>[11]</sup>研究认为震级与应力降存在 2 种不同结果, 一是震级与应力降存在正相关关系, 二是震级与应力降不存在明显的相关性。图 5

(d) 显示震群应力降与震级有较好的正相关关系, 以一倍的标准偏差做为判断, 可以看出, 图中有 2 个地震事件的应力降偏大, 相对应于图 4 中 2013 年 9 月 4 日  $M_L 5.0$  主震和余震衰减后期 2014 年 7 月 3 日  $M_L 3.0$  地震。整体看, 主震前应力降未有明显的异常值出现, 主震表现为较高的应力降, 余震衰减后期出现了 1 次异常值较高的应力降。

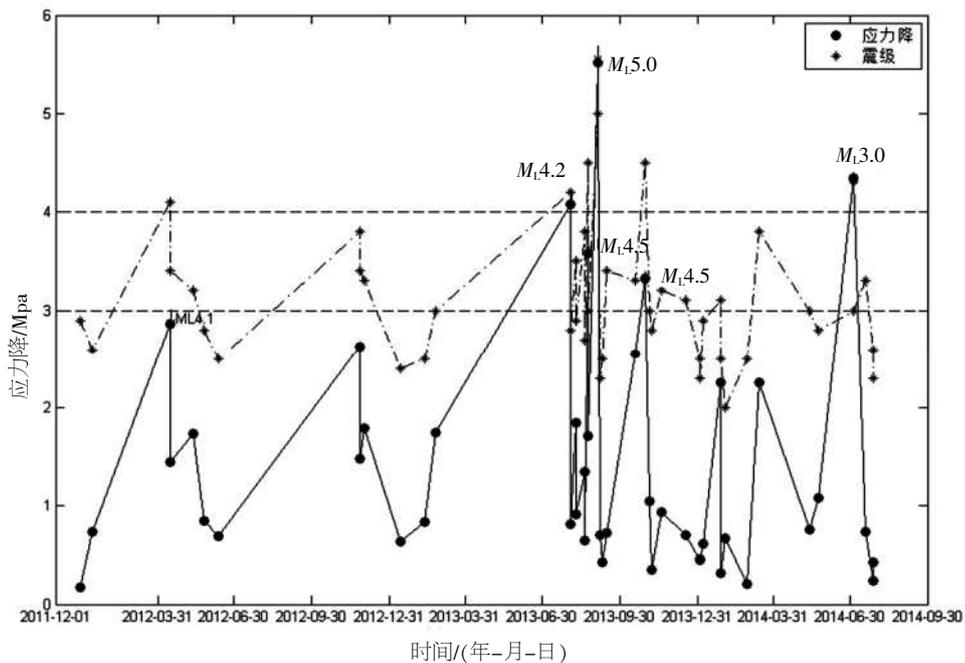


图6 应力降与震级的时序变化图

Fig.6 The time course changing diagram of earthquake stress drop and  $M_L$

由  $M_L$  4.0 以上的 5 个地震看主震前 1 个月的  $M_L$  4.2 地震应力降明显大于其它 3 个 4 级多的地震, 主震前的  $M_L$  4.5 地震的应力降小于  $M_L$  4.2 的, 主震后的  $M_L$  4.5 地震的应力降更小, 显示主震前应力降值经历低-高-低的变化特征, 主震后应力降有下降的过程。余震衰减后期出现的高应力降值  $M_L$  3.0 地震, 可能与震源区破裂体有关, 其震源半径明显偏小。

## 4 结语

本文采用 Atkinson 等的方法计算得到福建地区的地震波衰减特征, 再采用 Moya 等的方法反演得到福建测震台网及邻省周边近 30 km 范围内的共计 98 个地震台站的场地响应, 在此基础上计算得到仙游  $M_L$  5.0 震群序列 45 个  $M_L \geq 2.0$  地震的震源参数, 进行初步研究分析, 得到如下结果与认识。

(1) 福建地区地壳的平均非弹性衰减结果为  $Q(f) = 452.4 f^{0.3338}$ , 与广东具有较相近的  $Q_0$  和  $\eta$  值。计算得到的 98 个台站场地响应值曲线, 有 62 个台整体在 1 附近波动, 12 个台在 2 附近波动, 24 个台的曲线变化较大。

(2) 仙游震群序列的计算结果表明, 地震矩  $M_0$  的单对数随震级  $M_L$  的增大而增大, 统计关系式为  $\log M_0 = 1.06 \times M_L + 9.9$ , 两者有较好的线性关系; 震源半径  $r$  随震级  $M_L$  的增大而线性增大, 两者之间的统计关系式为:  $r = 112.7 \times M_L - 152.8$ ; 拐角频率  $f$  总体随着震级  $M_L$  的增大而线性变小, 统计关系式为:  $f = -3.2 \times M_L + 17.7$ ; 应力降  $\Delta\sigma$  总体随震级  $M_L$  的增大而变大, 统计关系式为:  $\Delta\sigma = 1.52 \times M_L - 3.28$ , 震级与各参数间有较好的线性关系。

(3) 通过拟合仙游震群序列应力降与震级关系, 发现 2 个高异常应力降值的地震。由整体应力降时序变化看, 主震前应力降未有明显的异常值出现; 由  $M_L$  4.0 以上地震应力降时序看主震前应力降值经历低-高-低的变化特征, 主震后应力降有下降的过程。

致谢: 本文所用程序由中国地震局地震预测研究所赵翠萍研究员、华卫研究员、高景春研究员等提供, 他们在理论与方法上给予诸多指导和帮助, 在此深表谢意。

## 参考文献:

- [1] Atkinson G M, Mereu R F. The shape of ground motion attenuation curves in Southeastern Canada[J]. Bull Seism Soc Amer, 1992, 82(5): 2 014-2 031.
- [2] Moya C A, Aguirre J. Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithms[J]. Bull Seism Soc Amer, 2000, 90 (4): 977-992.
- [3] 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.
- [4] 刘杰, 郑斯华, 郑斯华. 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.
- [5] 黄玉龙, 郑斯华, 刘杰, 等. 广东地区地震波衰减和场地响应[J]. 地球物理学报, 2003, 46(1): 54-61.
- [6] 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.
- [7] Moya C A, Aguirre J. Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithms[J]. Bull Seism Soc Amer, 2000, 90 (4): 977-992.
- [8] Brune J N. Tectonic stress and the spectrum of seismic shear waves from earthquakes [J]. J Geophys Res, 1970, 75(26): 4997-5009.
- [9] Kanamori H. The energy release in great earthquake[J]. J. Geophys. Res., 1977, 82(20): 2 981-2 987.
- [10] 康英, 吕金水, 杨选, 黄文辉. 广东新地震参数目录的编制[J]. 华南地震, 2010, 30 (S1): 19-27.
- [11] 邹振轩. 应用 Moya 方法反演浙江地震震源参数和台站场地响应[J]. 东北地震研究, 2006, 22(1): 40-46.
- [12] Abercrombie R E. 1995. Earthquake source scaling relationships from -1 to 5 ML using seismograms recorded at 2.5 km depth[J]. J. Geophys. Res., 1995 (100): 24 015-240 36.