

郁建芳, 谢石文, 张炳, 等. 安徽地区震源参数的相关性研究[J]. 华南地震, 2019, 39(3):32-41. [YU Jianfang, XIE Shiwen, ZHANG Bing, et al. Study on Source Parameters and Its Similar Relationship of Earthquakes Occurred in Anhui Region[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(3):32-41]

安徽地区震源参数的相关性研究

郁建芳, 谢石文, 张炳, 隆爱军, 韩成成, 杨波
(安徽省地震局, 合肥 230031)

摘要: 基于安徽数字地震台网 2010 年 1 月至 2017 年 12 月记录到的 M_L 2.5~5.0 级地震, 根据中小地震震源参数测定原理, 利用多台多地震联合反演 Atkinson 方法和 Moya 方法分别计算了安徽地区地壳平均非弹性衰减因子 Q 值和安徽 24 个省属专业地震的台站场地。在此基础上, 运用遗传算法求得安徽地区 96 个地震事件的震源谱参数, 进而根据 Brune 中小地震圆盘模型计算其拐角频率、地震矩、应力降、矩震级、震源尺度等震源参数, 并分析其特征及相互之间的关系。研究表明: 安徽地区中小地震的 M_L 震级与其他震源参数之间存在一定相关关系, 而地震矩 M_0 与应力降 $\Delta\sigma$ 、震源尺度 r 和拐角频率 f_c 之间并未表现出明显的相关关系。

关键词: 安徽地区; 非弹性衰减因子; 台站场地响应; 震源参数; 相关性

中图分类号: P315.33 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662(2019)03-0032-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.03.005

Study on Source Parameters and Its Similar Relationship of Earthquakes Occurred in Anhui Region

YU Jianfang, XIE Shiwen, ZHANG Bing, LONG Aijun,
HAN Chengcheng, YANG Bo
(Anhui Earthquake Agency, Hefei 230031, China)

Abstract: Based on the earthquakes with M_L 2.5-5.0 recorded by Anhui Digital Seismic Network from January 2010 to December 2017, this paper has gotten the average non-elastic attenuation factor Q by using the Atkinson method and the site response of 24 professional seismic stations in Anhui by the Moya method according to the principles of measuring source parameters. On the basis of the above calculation results, the source spectrum parameters of 96 earthquakes events in Anhui region were obtained by the genetic algorithm. Moreover, the source parameters such as corner frequency, seismic moment, stress drop, moment magnitude, and source scale of the above earthquakes were calculated according to the Brune earthquake disk model. And the characteristics of these parameters and their relationship with each other were analyzed at the same time. The

收稿日期: 2018-04-28

基金项目: 安徽省地震科研基金青年项目(20190402)

作者简介: 郁建芳(1987-), 女, 工程师, 主要从事地震监测和地震波应用理论研究等工作。

E-mail: zhimeigui2009@126.com.

results show that there is a certain correlation between the M_L magnitude and other source parameters. While there is no obvious correlation between seismic moment M_0 and stress drop σ , source scale r , and corner frequency f_c .

Keywords: Anhui region; Non-elastic attenuation factor; Site response; Source parameters; Similar relationship

0 前言

包含震源特征、地球内部介质以及观测台站场地响应等信息的数字地震观测资料在地震科学和地震预报研究中的应用日益广泛和深入,数字地震台网提供的传统地震目录参数主要是根据地震波运动学特征反演所得的时间和空间参数(T 、 λ 、 φ 、 h 、 M),即地震的发震时刻、震源位置、震级,所提供的参数个数明显少于描述地震事件发生所需的自由度。为进一步深入了解地震孕育的物理过程,数字地震台网在常规传统地震目录基础上,新增加了矩震级 M_w 、地震矩 M_0 、应力降 $\Delta\sigma$ 、震源尺度 r 四个具有明确物理含义的震源力学参数,称之为新地震参数目录^[1-5]。其中地震矩 M_0 是对断层滑动所引起的地震强度的直接测量,由地震波振幅的低频成分大小决定,反映了震源处破裂的大小;应力降 $\Delta\sigma$ 表征地震发生瞬间断层面上所释放的应力变化,与地震发生、震源介质以及区域构造应力水平密切相关;震源尺度是对震源区大小的一种度量,对于大地震往往用地震断层长度描述,对于小地震可用薄圆盘描述其震源区,圆盘半径 r 描述震源尺度;矩震级 M_w 反映了形变的大小,是目前量度地震大小最理想的物理量。目前,中国地震局已将震源新参数纳入测震台网地震参数目录日常产出工作,实现其常规化、日常化。

研究前期查阅相关文献,根据目前已公开的资料,戚浩^[6]等在2012年对安徽地区2009年1月至2011年8月期间 $M_L \geq 2.0$ 级地震的震源参数特征进行了系统分析和研究。2011年至今,安徽地区部分台站搬迁了地理位置,部分台站更换了地震仪器。本项目将基于安徽区域数字地震台网24个省属专业台站的最新台站参数和2010年至2017年期间记录到的信噪比较好的地震事件开展震源参数的联合反演研究,对本地区的震源特征、地震构造和其他科学研究具有现实意义。

1 地震记录与震源谱

对速度型地震仪所记录到的波形进行积分可得到位移记录,再利用傅里叶变换将其转换为频率域表达式:

$$U_{ij}(f) = [U_{io}(f) \cdot R_{\omega} \cdot P_{ij}(f) \cdot S_j(f) + N_j(f)] \cdot Surf \cdot I_j(f) \quad (1)$$

其中 $U_{ij}(f)$ 为第 j 个台站观测到的第 i 个地震的位移谱; $U_{io}(f)$ 为第 i 个地震的震源谱; R_{ω} 为辐射图型因子,在多台多震源联合反演中因平均效应而被消除; $S_j(f)$ 为第 j 个台站的场地响应; $N_j(f)$ 为噪声,可从地震波至前的地震仪器记录得到; $Surf$ 为自由表面效应,其中对于 SH 波严格取为 2; $I_j(f)$ 为仪器响应,可由仪器出厂值得到; $P_{ij}(f)$ 为传播路径效应,包括几何扩散的弹性衰减 $G(R_{ij})$ ^[7] 和非弹性衰减 q_{ij} ^[8]。其中非弹性衰减和台站场地响应是基于记录位移谱求解震源参数的基础。

2 非弹性衰减因子和台站场地响应

本文采用多台多地震联合反演 Atkinson 方法^[9]计算安徽地区地壳平均弹性衰减因子 Q 值,再运用多台多地震联合反演 Moya 方法^[10]计算地震台站场地响应,最后根据 Brune^[9-10]中小地震圆盘模型计算震源参数。

2.1 Atkinson 方法计算非弹性衰减因子 Q 值

多台多震源联合反演方法 Atkinson 方法的前提条件是假设不同台站得到的同一地震的震源谱是相同的,具体计算原理如下:

(1) 不考虑台站场地响应(将其设定为 1)的前提下,对给定的非弹性衰减系数 $c(f)$,通过对台站记录进行几何扩散和非弹性衰减校正,得到相对应的地震震源谱振幅,调整 $c(f)$ 值大小使得各个台站得到的同一地震的震源谱振幅残差最小。

(2) 设定某个地震的震源谱是不同台站得到的震源谱振幅的平均,而每个台站场地响应的对数就是此台站记录所得震源谱振幅对数与此地震的

震源谱振幅对数之差的平均值。

(3)考虑各台站的场地响应, 并对其进行校正, 重新计算每个台站校正后的震源谱振幅, 再次调整 c 值, 使得各台站得到的同一地震的震源谱振幅残差最小。

其中残差定义为:

$$k_{ij} = [\log A_{io}(f)]_j - \overline{\log A_{io}(f)} \quad (2)$$

式中 $\log A_{io}(f)$ 是第 i 个地震的平均震源谱振幅, 通过对记录到该地震的所有台站 n_i 计算得到的结果求平均得到。

参数的求解采用计算 $\text{sum} = \sum_i \sum_j |k_{ij}|$ 极小值的方式, 本文采用遗传算法^[12-13]求解, 通过反复迭代反演, 得到研究区域的非弹性衰减因子 Q 值, 进而得到介质的品质因子。

为了获取较清晰的地震波形, 并兼顾地震射线的较好覆盖, 首先挑选 2010—2017 年期间安徽地区发生的 $M_L \geq 2.5$ 级的地震, 筛选出其中每次地震至少被 3 个及以上台站记录到, 且每个台站至少有 3 次地震记录。基于这些地震记录, 采用 Atkinson 方法计算了安徽地区的非弹性衰减结果为 $Q(f) = 352.5f^{0.48}$, 从图 1 中可以看出 Q 值与频率变化的线性关系较好, 27 个频点在拟合线上下小幅度波动。对比戚浩等^[6]于 2012 年所得结果 $Q(f) = 315.9f^{0.51}$, 本文的 Q_0 值变大了, 衰减系数小了。受限于当时台站数量和建设情况以及所记录的地震事件, 戚浩等^[6]选用的地震波形与射线覆盖范围较有限。相对而言, 本文所得非弹性衰减结果较能客观反映安徽地区实际情况。

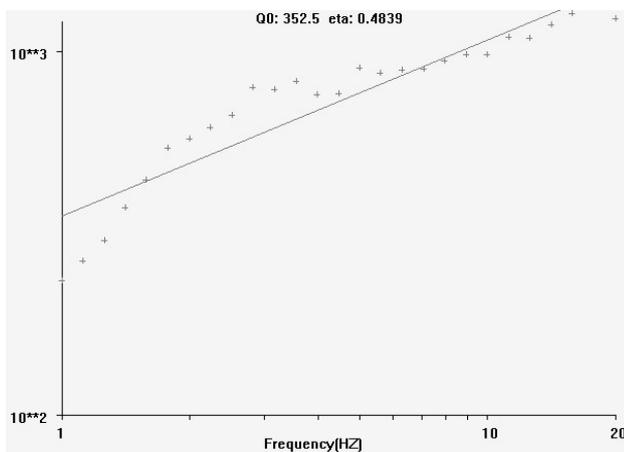


图 1 安徽地区介质品质因子与频率的线性关系

Fig.1 The relationship between Q value and frequency in Anhui area

2.2 Moya 方法计算台站场地响应

场地响应一般是指场地附近理想基岩之上覆盖的松软土层对地震波振幅的影响, 而理想基岩则被认为对地震波振幅是没有影响的, 场地响应反映的是介质的一种物理特征。多台地震联合 Moya 方法反演台站场地响应的前提是已知几何扩散和非弹性衰减, 并假定台站的场地响应与使用的地震无关。具体的方法原理如下:

(1)对每个地震选择 Brune 震源谱参数: 零频幅值 Ω_0 和拐角频率 f_c 。

(2)场地响应可在震源参数已知情况下, 由不同地震事件得到的台站记录得到。

(3)假定每个台站的场地响应由任意一个地震事件得到的均一性。

(4)运用遗传算法通过寻找不同的震源谱参数, 令不同地震事件得到某一台站的场地响应的标准偏差最小。

(5)最优震源谱参数计算出后, 将震源谱与经过几何扩散和非弹性衰减校正后的位移振幅谱相互比对即可得到各个台站的场地响应。

反演得到安徽地区部分台站场地响应结果如图 2 所示: 24 个省属专业台站的场地响应大部分都介于 1~10 倍范围内, 其中 6 个台站的场地响应值在 1 附近波动, 14 个台站在 2 附近波动, 阜阳 (FYT)、合肥 (HEF)、石家河 (SJH) 以及嘉山 (JAS) 四个台站的场地响应值曲线变化相对较大。

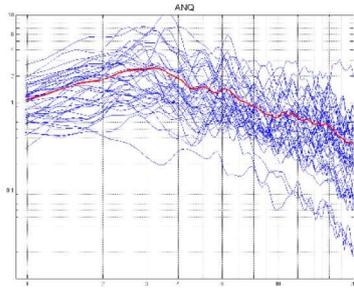
3 震源参数计算及结果分析

基于上述所得非弹性衰减和场地响应, 从观测谱中去除掉非弹性衰减、台站场地响应、几何扩散和自由表面影响等因素, 由此得到震源谱。由观测谱的形态估算 Ω_0 和 f_c 的可能取值范围, 利用遗传算法迭代计算直至理论震源谱与观测震源谱的残差达到极小值, 即可得 Ω_0 和 f_c 。图 3 显示的是 2015 年 12 月 21 日安徽肥东地震的震源谱参数, 蓝线代表各个台站记录到的此地震事件的震源谱, 绿线为平均震源谱, 红线为拟合的理论震源谱。

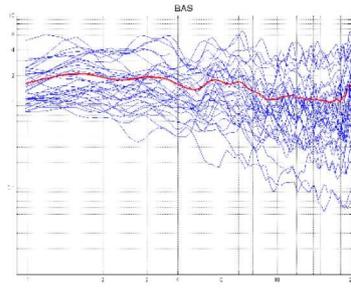
根据求得的 Ω_0 和 f_c , 应用 Brune 圆盘型模型求解中小地震震源参数的公式, 进而得到相应的震源参数。其中地震矩为:

$$M_0 = \frac{4\pi\rho V_s^3 \Omega_0}{2R_{\theta_0}} \quad (3)$$

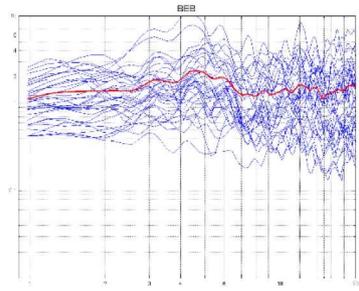
场地
响应



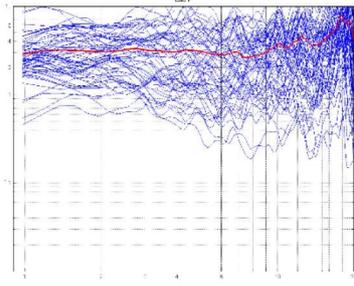
(a)



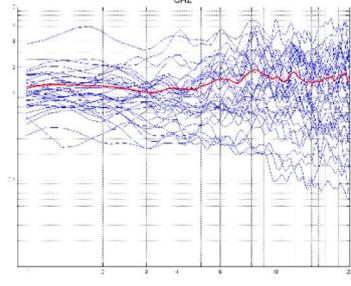
(b)



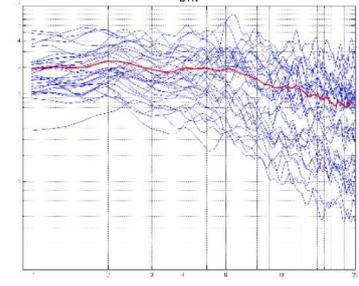
(c)



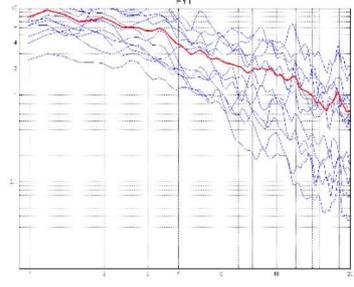
(d)



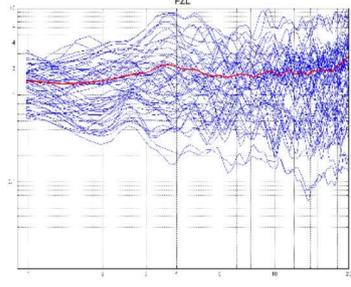
(e)



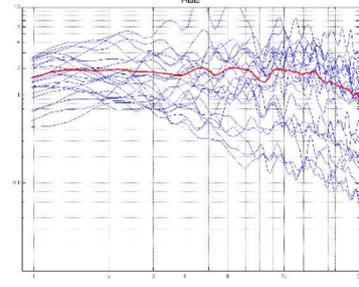
(f)



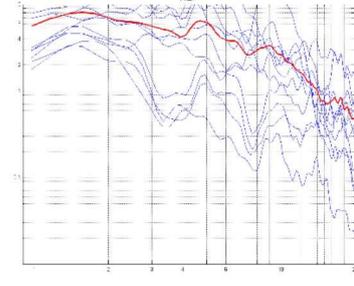
(g)



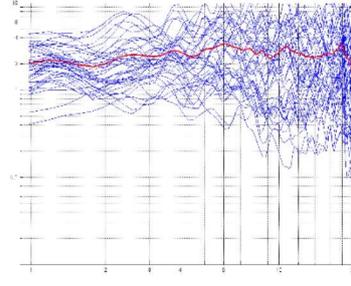
(h)



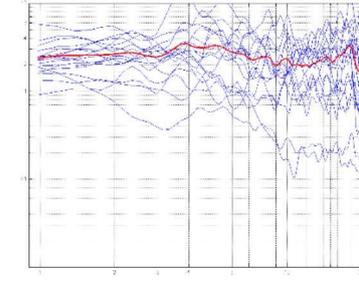
(i)



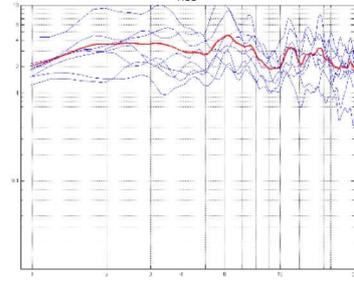
(j)



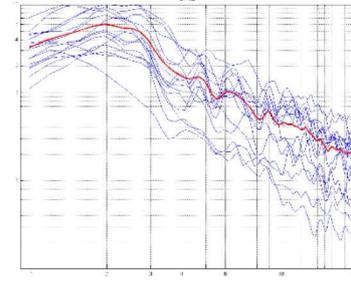
(k)



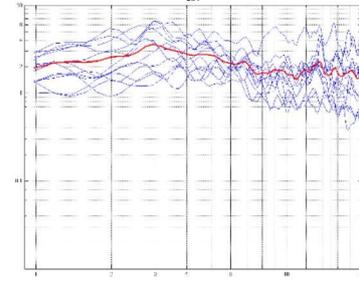
(l)



(m)



(n)



(o)

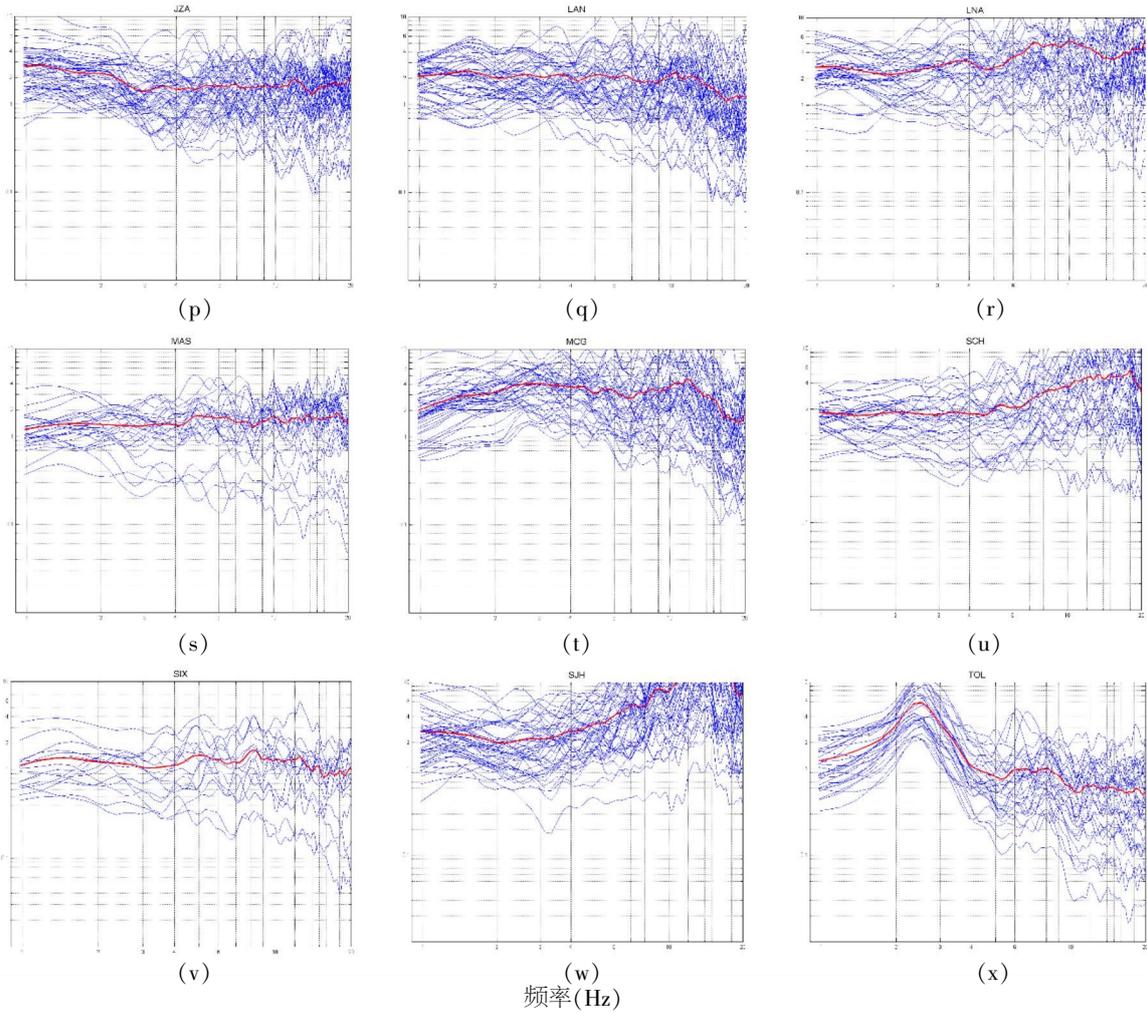


图2 安徽地区 24 个测震台站场地响应
Fig.2 Field response of 24 seismic stations in Anhui region

其中密度 ρ 取为 2.65 g/cm^3 ; S 波速度 V_S 取为 3.57 km/s ; R_{θ_p} 为 S 波的辐射花样系数, 对于 SH 波取震源辐射能量的平均值 $\sqrt{2/5}$ 。

$$\text{震源半径为: } r = \frac{2.34V_s}{2\pi f_c} \quad (4)$$

$$\text{应力降为: } \Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r^3} \quad (5)$$

$$\text{矩震级为: } M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 6.033 \quad (6)$$

3.1 震源参数的计算

基于上述计算公式, 我们得到了 2010 年 1 月至 2017 年 12 月期间安徽地区发生的 96 次 $M_L \geq 2.5$ 级地震的震源参数。鉴于安徽金寨和霍山地区的地震震中位置位于安徽省境边界, 台站包围效果相对较差, 不能满足参与反演的台站最大张角小于 180° , 将其计算结果排除在外。同时排除计算结果中台站分布参数 δU 大于 0.5 的地震事

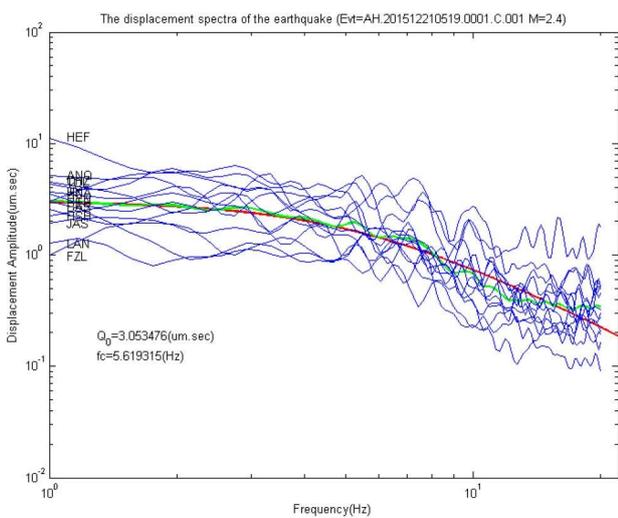


图3 2015-12-21 安徽肥东地震的震源谱
Fig.3 The source spectra of the earthquake occurred in eastern Hefei on 20151221

件, 最终得到 64 个地震的震源参数如表 1 所示。由表可知: 研究对象的地震矩 M_0 介于 $1.06 \times 10^{12} \sim 5.07 \times 10^{14} \text{ N}\cdot\text{m}$, 拐角频率 f_c 介于 $2.1 \sim 15 \text{ Hz}$, 应力降 $\Delta\sigma$ 介于 $0.088 \sim 15.021 \text{ Mpa}$, 矩震级 M_w 介于 $1.9 \sim 3.7$, 震源尺度 r 介于 $86.899 \sim 594.184 \text{ m}$ 。

3.2 M_L 震级与各震源参数之间的关系

在单对数坐标下, M_0 与 M_L 之间呈现出较好的相关性, 如图 4(a)所示。用最小二乘法对其进行

表 1 震源参数表(2010—2017 安徽 $M_L \geq 2.5$ 级地震)
Table 1 Seismic parameters (earthquakes with $M_L \geq 2.5$ in Anhui from 2010 to 2017)

发震时刻 年-月-日 h:min:s	纬度/(°)	经度/(°)	深度/km	M_L	频率/Hz	地震矩 M_0 / ($\text{N}\cdot\text{m}$)	矩震级/ M_w	应力降 $\Delta\sigma$ / (Mpa)	震源尺度 r / (m)
2010-08-12 13:24:51.4	32.42	117.44	7	2.6	5.8	3.38×10^{12}	2.3	0.128	229.232
2010-10-13 02:59:35.0	31.08	117.34	5	3.1	7.5	4.86×10^{12}	2.4	0.397	175.273
2010-12-20 02:04:0.5	32.82	117.54	6	3.2	8.5	4.94×10^{12}	2.4	0.596	154.418
2011-01-19 12:07:43.2	30.66	117.12	5	4.9	3.4	3.66×10^{14}	3.6	2.961	378.044
2011-01-25 10:09:44.9	30.64	117.08	7	2.7	10.6	1.91×10^{12}	2.1	0.452	125.429
2011-02-08 06:57:33.0	30.63	117.09	6	2.5	14	1.16×10^{12}	2	0.63	94.968
2011-06-16 11:31:15.5	30.92	116.89	8	2.6	15	1.32×10^{12}	2	0.883	88.637
2011-07-03 10:06:57.2	31.37	116.11	8	2.5	8.9	1.06×10^{12}	1.9	0.146	147.388
2011-07-10 14:29:57.4	33.11	116.72	6	3	12.8	3.11×10^{12}	2.3	1.283	103.871
2012-08-11 17:46:08.3	31.10	117.85	7	3.4	7.93	1.35×10^{13}	2.7	1.328	164.457
2012-08-24 02:49:34.6	30.96	117.17	6	2.8	5.76	4.31×10^{12}	2.4	0.162	226.442
2013-02-19 10:11:32.6	31.99	117.48	6	3	11.5	6.00×10^{12}	2.4	1.804	113.326
2013-05-25 04:11:50.2	33.03	116.25	6	2.8	9.9	3.60×10^{12}	2.3	0.691	131.652
2013-11-15 02:10:38.9	31.39	116.17	5	3	6.42	7.59×10^{12}	2.5	0.396	203.075
2013-12-24 20:21:51.0	31.57	116.50	6	3.5	10.45	1.72×10^{13}	2.8	3.876	124.746
2013-12-28 21:34:49.4	31.37	116.14	6	2.6	7.52	4.03×10^{12}	2.3	0.339	173.258
2014-02-11 21:10:50.7	31.39	116.18	6	2.6	7.03	3.86×10^{12}	2.2	0.518	185.77
2014-03-16 20:04:51.6	32.43	117.13	6	3.6	6.98	2.36×10^{13}	2.8	1.585	186.683
2014-03-16 20:26:21.0	32.43	117.13	7	3.1	6.98	2.36×10^{13}	2.8	1.585	186.683
2014-04-02 04:15:45.0	32.04	116.88	5	3.4	11.33	1.76×10^{13}	2.8	5.049	115.06
2014-04-15 23:24:10.4	32.27	116.13	6	3.1	14.93	5.59×10^{12}	2.4	3.672	87.333
2014-04-20 16:00:45.3	31.37	116.1	6	4.4	3.23	3.77×10^{14}	3.6	2.505	403.766
2014-07-25 00:48:54.5	31.99	117.47	6	3.7	10.85	3.05×10^{13}	2.9	7.713	120.098
2014-08-01 16:18:18.2	30.08	116.28	6	3.5	15	1.63×10^{13}	2.7	10.9	86.899
2014-10-22 13:34:53.6	31.52	115.51	6	3.7	4.49	3.15×10^{13}	2.9	0.563	290.316
2014-10-26 01:25:23.4	31.52	115.51	6	3.9	3.22	9.08×10^{13}	3.2	0.599	404.887
2014-11-11 03:01:55.2	31.51	115.51	6	3.6	3.85	4.17×10^{13}	3	0.469	338.746
2014-11-11 07:08:25.1	31.52	115.51	7	3.5	3.84	3.04×10^{13}	2.9	0.339	339.752
2015-02-01 05:14:06.0	31.41	116.19	5	3.3	6.66	1.52×10^{13}	2.7	0.889	195.677
2015-03-14 14:13:34.2	33.05	115.83	6	4.5	2.19	5.07×10^{14}	3.7	1.057	594.184

(转下表)

(接表 1)

发震时刻 年-月-日 h:min:s	纬度/(°)	经度/(°)	深度/km	M_L	频率/Hz	地震矩 M_0 / ($N \cdot m$)	矩震级/ M_w	应力降 $\Delta\sigma$ / (Mpa)	震源尺度 r / (m)
2015-03-23 04:27:09.7	33.06	115.83	6	4.1	4.36	1.11×10^{14}	3.3	1.812	298.869
2015-05-17 10:11:18.8	32.51	119.09	5	3.6	15	2.25×10^{13}	2.8	15.021	86.899
2015-05-20 04:24:22.3	31.71	116.63	6	3.6	5.74	3.44×10^{13}	3	1.287	227.058
2015-06-29 04:41:11.8	33.35	116.76	6	3.8	9.04	2.32×10^{13}	2.8	3.378	144.229
2015-08-18 04:01:26.6	31.54	116.42	6	2.8	9.20	4.30×10^{12}	2.4	0.662	141.632
2015-11-07 02:54:37.4	31.56	115.91	6	2.8	6.21	4.95×10^{12}	2.4	0.234	209.814
2015-12-13 07:12:11.3	31.64	116.23	8	2.8	14.77	2.72×10^{12}	2.2	1.729	88.262
2015-12-21 05:19:05.3	31.81	117.59	5	3.1	5.62	1.08×10^{13}	2.6	0.38	231.964
2016-01-13 11:22:55.8	30.64	116.92	6	2.6	7.84	2.55×10^{12}	2.2	0.243	166.244
2016-01-21 00:02:47.7	30.97	117.29	7	3	9.3	6.27×10^{12}	2.5	0.996	140.179
2016-02-03 05:42:29.6	31.56	116.41	6	3.4	6.1	2.11×10^{13}	2.8	0.943	213.791
2016-04-15 14:49:58.7	31.30	117.73	5	3.2	11.41	1.02×10^{13}	2.6	2.988	114.247
2016-04-15 17:55:42.6	31.31	117.74	6	3.6	8.64	1.99×10^{13}	2.8	2.535	150.806
2016-05-29 08:53:40.7	31.30	117.73	6	2.9	13.36	5.79×10^{12}	2.4	2.726	97.564
2016-09-24 14:21:23.8	31.27	117.27	10	2.8	14.49	3.40×10^{12}	2.3	2.043	89.964
2016-10-29 23:57:33.1	31.36	116.12	9	2.6	5.79	2.39×10^{12}	2.2	0.092	225.175
2017-02-15 15:43:12.8	32.10	117.56	5	2.6	15	2.12×10^{12}	2.1	1.41	86.899
2017-03-10 16:22:36.3	33.56	117.11	5	3	5.79	7.55×10^{12}	2.4	0.701	152.937
2017-03-28 22:05:42.3	32.85	116.20	5	2.5	5.67	2.44×10^{12}	2.2	0.088	229.728
2017-04-29 00:53:24.5	31.69	115.79	6	3.7	3.99	4.79×10^{13}	3	0.603	326.321
2017-04-29 01:16:56.5	31.68	115.79	7	2.8	9.92	4.75×10^{12}	2.4	0.916	131.409
2017-04-29 10:07:11.2	32.52	117.23	6	2.6	15	2.60×10^{12}	2.2	1.731	86.899
2017-05-01 07:29:37.9	31.67	115.80	6	2.7	13.55	2.63×10^{12}	2.2	1.292	96.194
2017-05-05 18:11:46.0	31.35	116.09	7	2.7	13.61	2.25×10^{12}	2.2	1.119	95.756
2017-05-18 20:31:14.1	31.68	115.79	7	2.6	6.48	3.02×10^{12}	2.3	0.163	201.207
2017-05-18 20:59:44.1	32.03	117.40	4	2.8	12.48	5.08×10^{12}	2.4	1.947	104.483
2017-06-02 14:00:42.4	31.46	115.79	8	2.8	11.06	3.65×10^{12}	2.3	0.975	117.911
2017-06-12 07:40:14.0	31.67	115.66	6	2.6	13.57	1.89×10^{12}	2.1	0.932	96.08
2017-07-05 14:55:04.2	31.18	116.69	8	2.6	15	3.02×10^{12}	2.2	2.012	86.899
2017-08-26 23:15:32.8	31.40	116.28	7	3.3	9.79	1.38×10^{13}	2.7	2.561	133.108
2017-09-10 19:26:07.8	31.71	116.68	6	2.6	15	2.48×10^{12}	2.2	1.651	86.899
2017-10-24 17:19:34.2	33.47	116.11	8	2.8	15	5.55×10^{12}	2.4	3.698	86.899
2017-11-20 04:52:23.9	31.67	115.78	7	2.5	14.46	1.81×10^{12}	2.1	1.08	90.141
2017-12-28 19:58:06.2	30.14	116.18	6	3.2	4.71	1.70×10^{13}	2.8	0.351	276.85

拟合, 得到两者之间的相关系数为 96.4%, 拟合得到两者之间的关系为:

$$\lg M_0 = 1.0853M_L + 9.5489 \quad 2.5 \leq M_L \leq 4.9 \quad (7)$$

根据 M_L 的定义, 它是根据 Wood-Anderson 地

震计的记录测定所得, 当地震的拐角频率与 Wood-Anderson 地震计的截止频率 1.2 Hz 相比较时, 则该地震的振幅与地震矩直接成正比, 即震级 M_L 与地震矩 M_0 的比例系数为 $1^{[14]}$ 。本研究中

64 个地震的拐角频率均大于 1.2 Hz。由式 (7) 可知, 所计算地震的地震矩与震级的关系在单对数坐标下斜率为 1.0853, 接近理论值 1。

根据计算结果可知本研究中地震震级越大, 拐角频率越小, 如图 4(b) 所示, 且拐角频率 f_c 与 M_L 震级之间存在一定的相关性:

$$f_c = -3.8274M_L + 21.186 \quad 2.5 \leq M_L \leq 4.9 \quad (8)$$

应力降是表征地震瞬间错动时位错面上的应力变化, 通过分析研究地震的应力降可以了解地震过程中的构造应力释放水平, 从而间接认识地震发生地区构造背景应力和构造破裂过程。Abercrombie 研究认为震级与应力降存在两种不同关系: 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相关性。图 4(c) 显示了研究对象的应力降 $\Delta\sigma$ 介于 0.088~15.021 Mpa, 优势分布在 0.5~8 Mpa, 当 $M_L \leq 3.5$ 时, 应力降分布较集中, 主要介于 0.5~2 Mpa, 显示出两者具有一定的相关性:

$$\Delta\sigma = 1.4389M_L - 2.7001 \quad 2.5 \leq M_L \leq 4.9 \quad (9)$$

震源尺度 r 与 M_L 震级之间的关系如图 4(d) 所示, 一般情况下, 震级越大, 震源尺度就越大, 两者之间的关系如下:

$$r = 123.73M_L - 208.99 \quad 2.5 \leq M_L \leq 4.9 \quad (10)$$

基于本研究对象而言, 矩震级 M_W 与 M_L 震级存在一定偏差, 且 M_L 震级越大, 两者之间的偏差相对较大。同时, 当 $M_L \leq 4.9$ 时, M_W 相对 M_L 偏小。

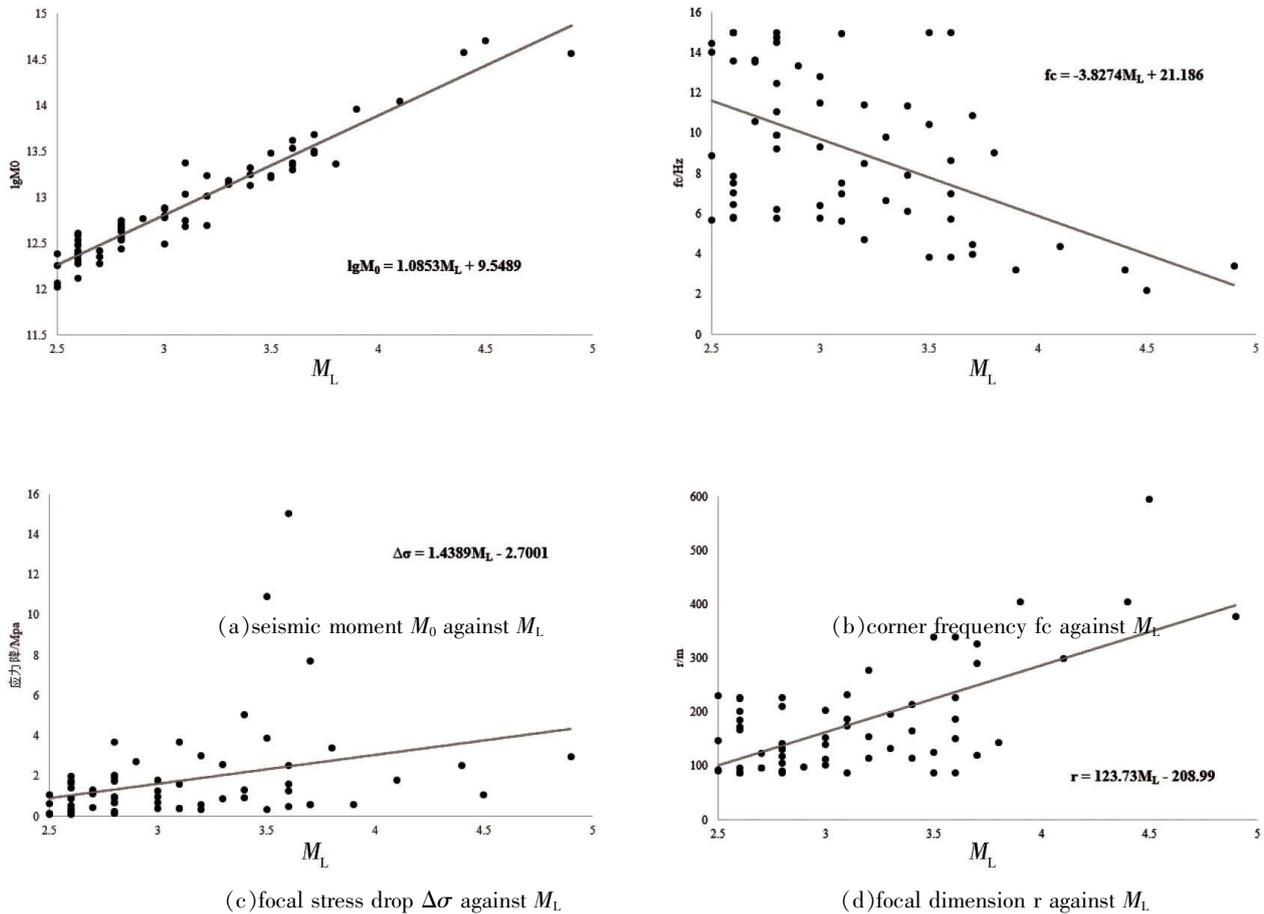


图 4 研究区各震源参数与 M_L 震级的关系

Fig.4 Relationship between source parameters and M_L magnitude in study area

3.3 地震矩 M_0 与各震源参数之间的关系

地震矩 M_0 是对断层滑动所引起的地震强度的直接测量, 由地震波振幅的低频成分大小决定, 反映了震源处破裂的大小, 它与应力降 $\Delta\sigma$ 、震源尺度 r 和拐角频率 f_c 之间的关系如图 5 所示, 这三个参数与地震矩之间并未表现出明显的相关关系。

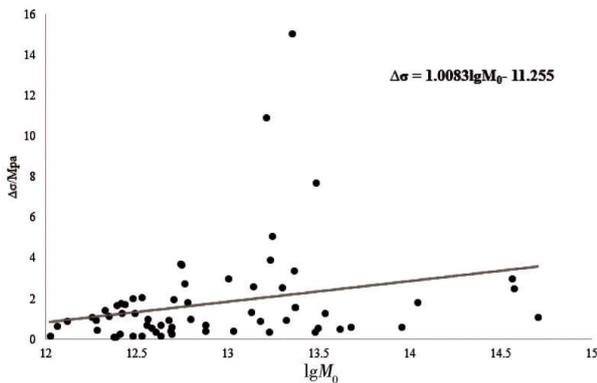
4 结语

根据安徽数字地震台网波形资料, 筛选记录清晰的地震波形, 兼顾地震射线的较好覆盖, 挑选出其中每次地震至少被 3 个及以上台站记录且每个台站至少有 3 次地震记录的波形资料, 采用

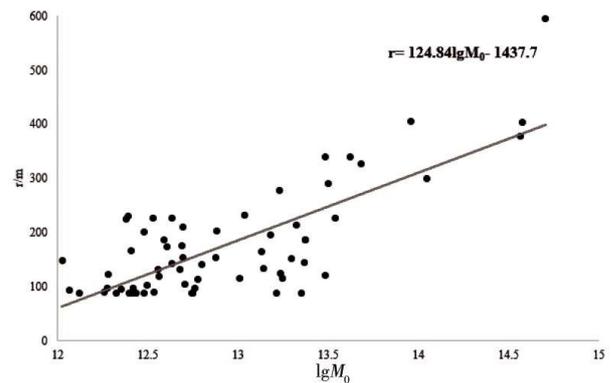
多台多地震联合反演 Atkinson 方法计算得到安徽地区的非弹性衰减,再利用 Moya 反演方法得到安徽地区 24 个测震台站的场地响应。在此基础上,从观测谱各项参数中去除几何扩散、非弹性衰减和台站场地响应及自由表面影响等得到震源谱,并将之与理论震源谱拟合得到各个地震的零频幅值 Ω_0 和拐角频率 f_c , 然后根据 Brune 中小地震圆盘模型利用遗传算法得到安徽地区 2010 年 1 月~2017 年 12 月期间 $M_L 2.5 \sim 5.0$ 级中小地震的震源参

数,并对其进行初步的研究分析,得到如下认识和结论:

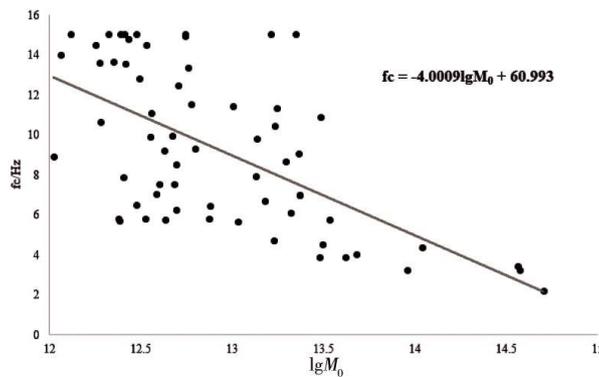
(1)安徽地区地壳的平均非弹性衰减结果为 $Q(f) = 352.5f^{0.48}$, Q 值与频率变化的线性关系较好。24 个省属专业台站的场地响应基本都介于 1~10 倍范围内,其中 6 个台站的场地响应值在 1 附近波动,14 个台站在 2 附近波动,4 个台站的场地响应值曲线变化相对较大。



(a) focal stress drop $\Delta\sigma$ against M_0



(b) focal dimension r against M_0



(c) corner frequency f_c against M_0

图 5 研究区各震源参数与地震矩 M_0 的关系

Fig.5 Relationship between source parameters and seismic moment M_0 in study area

(2)震源参数计算结果显示,在单对数坐标下安徽地区中小地震的地震矩 M_0 与 M_L 震级之间存在较好的线性关系,即 $\lg M_0 = 1.0853 M_L + 9.5489$ ($2.5 \leq M_L \leq 4.9$),其斜率为 1.0853,接近理论值 1。研究区应力降 $\Delta\sigma$ 介于 0.088~15.021 Mpa,优势分布在 0.5~8 Mpa,当 $M_L \leq 3.5$ 时,应力降分布较集中,主要介于 0.5~2 Mpa,显示出两者具有一定的相关性。同时,矩震级 M_w 与 M_L 震级之间存在一定偏差,地震震级越大,拐角频率越小,震源尺度越大。另一方面,地震矩 M_0 与应力降 $\Delta\sigma$ 、震

源尺度 r 和拐角频率 f_c 之间并未表现出明显的相关关系。

(3)本文的研究结果与戚浩^[6]等 2012 年在安徽地区、刘川琴等^[15]2017 年在安徽金寨地区开展的研究结论基本吻合:安徽地区地震矩与近震震级存在较好的线性关系;近震震级与矩震级之间存在一定偏差,且近震震级越大,两者之间的偏差越大;应力降与近震震级存在一定正相关;拐角频率与地震矩存在负相关。另一方面,由于研究区域较大,而地震样本数量相对较少,因此上述

结论有待在后续研究中利用更多相关资料加以印证和完善。

参考文献:

- [1] 张锦玲,朱新运,马起杨,等. 宁夏区域震源参数特征研究[J]. 大地测量与地球动力学,2017,37(8):808-812.
- [2] 唐兰兰,李志海. 新疆天山中东段地区地震波衰减、场地响应及震源参数研究[J]. 地震学报,2011,33(2):134-142.
- [3] 郑建常,王鹏,徐长朋,等. 乳山震群震源谱参数的稳健反演[J]. 地球物理学报,2016,59(11):4100-4112.
- [4] 邓菲,刘杰,杨文. 2011年盈江5.8级地震序列的震源参数和震源机制相关系数研究[J]. 地球物理学进展,2016,31(1):33-43.
- [5] 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.
- [6] 戚浩,夏仕安,张炳,等. 安徽地区震源参数特征研究[J]. 内陆地震,2012,26(3):257-262.
- [7] Atkinson G M, Mereu R F. The shape of ground motion attenuation curves in Southeastern Canada [J]. Bull Seism Soc Amer, 1992, 82(5):2014-2031.
- [8] 康清清, 廖发军, 张金川, 等. 江苏及邻区地震波非弹性衰减 Q 值、场地响应和震源参数研究[J]. 中国地震, 2016, 32(1): 72-82.
- [9] Brune J N. Tectonic stress and the spectrum of seismic shear waves from earthquakes [J]. J Geophys Res, 1970, 75(26):4997-5009.
- [10] Shearer, P.H., Introduction to Seismology [M]. California: University of California, 1999.
- [11] 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.
- [12] 刘杰, 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.
- [13] 于俊谊, 朱新运. 浙江珊溪水库地震震源参数研究[J]. 地震学报, 2016, 24(6): 379-387.
- [14] Randall M J. The spectral theory of seismic sources [J]. Bull Seism Soc Am, 1973, 63(1):1133-1144.
- [15] 刘川琴, 李发, 刘东旺, 等. 金寨地震序列震源参数研究[J]. 华南地震, 2017, 37(3): 69-73.