

山东及邻近地区中小地震震源参数的测定^{*}

季爱东¹, 赵英萍², 郑建常¹, 赵金花¹, 李 铂¹, 吴丹桐¹

(1. 山东省地震局, 山东 济南 250014; 2. 河北省地震局, 河北 石家庄 050021)

摘 要: 采用谱分析方法, 利用山东数字地震台网的观测资料, 计算了2004~2007年期间山东地区44次3级以上地震的波谱, 估算了地震矩、拐角频率、应力降、震源破裂半径, 讨论了各震源参数之间的相互关系以及拐角频率的时间分布特征。分析结果表明, 地震矩与震级、地震矩与拐角频率、地震矩与震源破裂半径有明显的依赖关系。

关键词: 波谱分析; 震源参数; 山东地区

中图分类号: P315.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2008)01-0113-05

0 前言

通常认为在地震孕育过程中, 地壳介质所处的应力状态, 地震波频谱特征、衰减特征等会出现一些异常变化。因此, 对某一地区的地震波进行波谱分析, 可以得到表征震源破裂特征的震源参数(包括地震矩、震源尺度和应力降等), 并由此推断震源区的构造应力环境, 能够使人们在一定程度上了解震源区的应力状态。过去由于受资料限制, 开展震源参数研究受到一定程度限制, 精度也较低。目前我国数字地震观测台网建设日趋完善, 已得到大量的区域数字化地震记录, 近几年中国地震局预测研究所数字地震学实验室在震源参数测定方面开展了深入研究, 并获得了大量的研究成果^[1-10]。

随着山东数字化地震台网的不断扩建, 利用数字化台网记录的大量地震波形资料, 可以很方便计算地震的震源参数, 可望为地震预测提供一些有价值的信息。本文采用了中国地震局预测研究所数字地震学实验室在全国推广的多台多地震联合反演震源参数的方法, 计算了山东地区的震源参数。

1 方法

震源参数的测定主要是用震源谱分析方法。

地震仪记录到的地震波是一种综合信息, 包含了地震震源效应、地震波的传播路径效应、台站场地响应及仪器响应。要想测定震源参数, 必须设法区分地震记录中震源效应、传播路径效应、台站场地响应及仪器响应。目前一般采用 Atkinson^[8]提出的三段几何衰减模型来计算传播路径的影响, 采用多台、多地震联合反演的 Moya^[11]方法计算台站的场地响应。通过迭代反演^[7], 分别求出各个台站的场地响应 $S_i(f)$, 以及各频率点的非弹性衰减系数。

根据上述研究结果, 对台站记录扣除传播路径、场地响应及仪器响应的的影响, 得到地震序列中每个地震的震源谱。这样对某个地震, 就可以得到第 j 个台站记录的该地震的震源位移谱 $[A_0(f)]_j$ 再对台站得到的震源谱求出平均, 即是该地震的震源谱 $\bar{A}_0(f)$ 。采用由二次方衰减震源谱模型作为理论震源谱 $A_{theo}(f)$ ^[12], 利用遗传算法求解由 $\bar{A}_0(f)$ 和 $A_{theo}(f)$ 定义的残差为极小的震源参数 Ω_0 和 f_0 , 这里 Ω_0 是零频振幅, f_0 是拐角频率^[6]。

利用上面得到的震源谱参数求解各种震源参数, 地震矩为

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

式中: ρ 为密度, 取 $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$; V_s 为 S 波速度, 取 $V_s = 3.2 \text{ km/sec}$; $R_{\theta\phi}$ 为辐射花样系数, 取 $R_{\theta\phi} = \sqrt{2/5}$ 。

应力降为

^{*} 收稿日期: 2007-08-01

基金项目: 山东省地震局合同制课题(06Y15)

作者简介: 季爱东(1970-), 女, 山东济南人, 工程师, 主要从事地震预报研究工作. E-mail: jadedq@163.com

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r^3}, \quad (2)$$

震源半径为

$$r = \frac{2.34V}{2\pi f_0}. \quad (3)$$

2 资料处理

山东数字地震台网 2000 年正式投入观测, 考虑台站编号与名称的统一以及仪器记录的完整性,

我们从 2004 年 6 月 ~ 2007 年 7 月期间共 22 个台站资料中, 通过波形资料连续性、噪声水平等考察, 共选出 44 个地震 16 个台站共计 321 条记录用于分析。

所使用的台站都位于基岩上, 都是三分量数字地震仪, 除两个台在 0.05 Hz ~ 20 Hz 之间具有速度平坦的响应, 其余台都在 1 Hz ~ 20 Hz 之间具有速度平坦的响应。地震信号以 50 Hz 的采样率通过 DDN 专线实时地传输到山东省地震局台网中心。震中及台站分布见图 1。

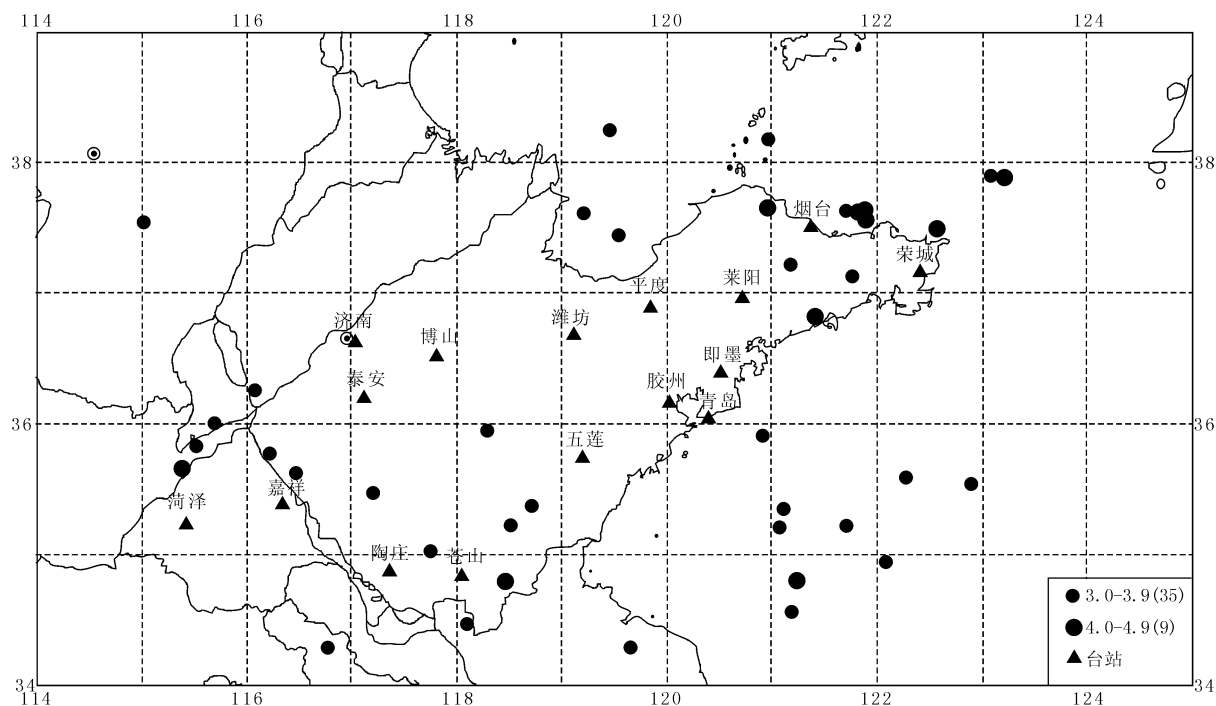


图 1 山东数字地震台网参加计算的台站与地震震中分布图

把从 S 波开始到包含 90% S 波总能量的时间段定义为“ S 窗”。在近震源距离, “ S 窗”内只包含了直达波; 在较大距离上, 它包含了从地壳内间断面和莫霍面的反射波; 在更远的距离上(数百 km), 它包含了 S_n 和 L_g 震相。对于每一条记录, 截取“ S 窗”^[8]。对包含所有可识别的 S 震相的“ S 窗”内的信号进行波谱分析。对于同一个地震, 由于各台站的震中距不同, “ S 窗”的长度也不同。一般随震中距增大, “ S 窗”长也增大。为了得到具有相同频率间隔的震源谱, 本研究采用平移窗谱方法。首先将“ S 窗”内的波形分成若干个包含有 256 个采样点的数据段, 并使相邻数据段之间有 50% 的重叠。对于采样率为 50 Hz 的地震记录, 每个数据段的时间长度是 5.1 s。在每一数据段的起始和末尾加以 5% 的余弦边瓣(cosine-taper)后, 通过快速傅里叶变换(FFT)得到每个数据段的傅里叶谱。这样对于每一个台站的记

录, 我们可以得到频率间隔为 0.196 Hz 的傅里叶谱。然后对每个数据段的傅里叶谱进行仪器响应校正, 得到整个“ S 窗”信号的速度谱振幅^[8], 根据 P 波初动前 256 个采样点的噪声记录, 可以计算归一到与信号相同持续时间的噪声速度振幅, 然后对观测信号扣除噪声, 得到经过噪声校正的速度谱振幅。图 2(a) 给出了青岛台记录到的 2005 年 1 月 18 日山东乳山 $M_L 4.3$ 级地震的波形以及 S 波窗的范围, 图 2(b)(c) 为其合成位移谱, 图 2(d) 为其 S 波震源波谱。

3 震源参数的测定结果及其相互关系分析

表 1 是用 S 波波谱计算得出的山东及邻近地区的震源参数结果, 表中的震中位置及震级取自《山东省地震目录》。

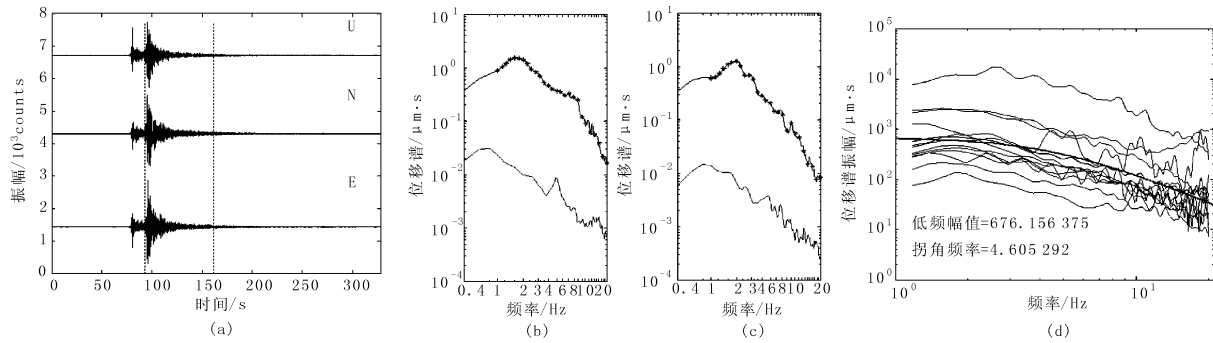


图2 (a)青岛台记录到的2005年1月18日山东乳山 M_L 4.3级地震的波形
(b)水平分向的合成位移谱;(c)垂直分向的合成位移谱;(d) S 波震源波谱

表 1

山东及邻近地区的震源参数结果

编号 No	日期 年-月-日	震级 M_L	经度 ($^{\circ}$)	纬度 ($^{\circ}$)	拐角频率 Hz	地震矩 $N \cdot m$	应力降 MPa	震源半径 m
1	2004-06-29	3.5	118.12	34.48	3.9	1.43×10^{14}	1.67	344.19
2	2004-10-21	3.3	121.18	37.22	6.35	4.76×10^{13}	2.41	205.2
3	2005-01-18	4.3	121.43	36.82	4.61	1.06×10^{15}	1.91	624.49
4	2005-01-23	3.6	119.47	38.25	3.82	1.14×10^{14}	1.26	340.86
5	2005-02-15	3.8	121.72	37.63	3.76	1.99×10^{14}	2.09	346.65
6	2005-02-23	3.1	115.02	37.55	3.59	5.79×10^{13}	0.53	362.81
7	2005-03-06	2.9	119.59	37.26	5.19	1.47×10^{13}	0.41	251.19
8	2005-04-12	3.7	117.75	35.03	2.83	2.95×10^{14}	1.33	459.85
9	2005-04-12	3.6	117.77	35.03	4.48	7.06×10^{13}	1.35	290.68
10	2005-04-27	3.2	115.52	35.83	2.98	7.57×10^{13}	0.39	437.81
11	2005-04-27	4.3	115.37	35.63	1.3	1.44×10^{15}	0.62	1004.96
12	2005-05-09	4.5	121.83	37.62	2.35	1.77×10^{15}	4.52	554.77
13	2005-05-10	3.3	121.87	37.57	4.67	5.96×10^{13}	1.2	278.93
14	2005-05-10	4.0	121.91	37.57	3.63	3.62×10^{14}	3.41	359.49
15	2005-06-09	3.8	121.08	35.22	2.51	2.37×10^{14}	0.74	518.5
16	2005-06-10	4.3	118.47	34.80	4.44	6.01×10^{14}	10.42	293.3
17	2005-07-22	4.3	122.58	37.50	4.82	3.67×10^{14}	8.14	270.29
18	2005-09-08	3.6	121.90	37.62	7.72	6.33×10^{13}	5.75	168.92
19	2005-10-02	3.4	116.08	36.25	7.26	4.38×10^{13}	3.31	179.5
20	2005-12-18	3.6	120.97	38.18	3.35	1.70×10^{14}	1.27	388.62
21	2006-02-01	3.9	122.90	35.55	3.5	3.08×10^{14}	2.61	372.41
22	2006-02-08	3.2	118.52	35.22	3	1.23×10^{14}	0.66	434.24
23	2006-02-17	3.1	116.77	34.30	1.53	1.57×10^{14}	0.11	851.42
24	2006-02-21	3.0	121.90	37.65	3.36	6.95×10^{14}	1.01	261.82
25	2006-04-09	4.7	115.40	35.67	1.04	4.00×10^{15}	0.88	1256.5
26	2006-04-25	3.5	116.22	35.78	6.23	1.26×10^{14}	6.01	209.3
27	2006-04-27	3.4	118.72	35.37	2.2	2.89×10^{14}	0.61	591.18
28	2006-05-06	3.4	114.97	37.50	2.5	2.97×10^{14}	0.92	520.36
29	2006-05-08	3.1	122.27	35.6	5.3	6.01×10^{13}	1.76	246.04
30	2006-06-05	3.3	121.12	35.35	3.79	1.49×10^{14}	1.6	343.82
31	2006-06-27	3.4	118.30	35.95	3.89	7.73×10^{13}	0.9	335.15
32	2006-07-10	3.3	122.08	34.95	5.73	9.84×10^{13}	3.36	277.4
33	2006-07-24	3.3	121.72	35.23	1.35	3.44×10^{14}	0.17	965.15
34	2006-08-21	3.9	120.93	35.92	3.54	2.16×10^{14}	1.89	368.73

续表 1

35	2006-10-26	3.2	123.08	37.90	2.73	1.94×10^{14}	0.78	477.5
36	2006-11-07	3.3	121.77	37.13	7.39	3.92×10^{13}	3.13	176.3
37	2006-12-16	4.0	123.22	37.88	4.27	2.92×10^{14}	4.49	305.52
38	2006-12-26	3.5	116.47	35.62	5.14	6.99×10^{13}	1.87	253.84
39	2006-12-28	3.2	115.27	37.68	3.51	5.28×10^{13}	0.45	371.49
40	2007-03-07	3.3	119.08	37.57	9.61	2.95×10^{13}	5.18	135.57
41	2007-04-08	3.9	115.62	35.98	3.59	7.75×10^{14}	7.06	363.54
42	2007-05-06	3.9	119.62	34.22	3.06	8.13×10^{14}	4.61	425.56
43	2007-05-23	3.9	121.20	34.57	5.67	1.94×10^{14}	6.98	229.8
44	2007-07-10	4.4	121.00	37.60	2.2	8.55×10^{14}	1.81	591.29

波谱的拐角频率作为地震波谱的主要特征反映了地震波高、低频能量的分布特征,拐角频率随震级的增大,有明显的下降。山东地区中小地震的 S 波拐角频率在 $1.3\text{ Hz} \sim 9.61\text{ Hz}$ 之间(见表 1),拐角频率不随时间变化(图 3),这也许是因为所取资料的时间段太短所至,拐角频率在较大地震前的变化早有报道^[9],但拐角频率的变化是否是一项地震前兆还有待于更多的研究加以证实。

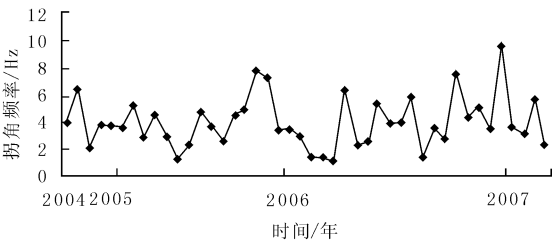


图3 拐角频率 f_c 随时间的变化

中小地震的应力降与震级大小有关,但由于应力降水平与区域应力状态密切相关,所以尽管有些地震震级相同,但其应力降可能各不相同(图 4)。

地震矩是表示地震强度的物理量,是一个描述地震大小的绝对的力学量,其数值大小与地震能量有关。图 5 是地震矩与震级的关系图,地震矩随震级的增大而增大, $\log M_0$ 与震级存在着很好的线性关系,其相关系数为 0.78。同时,地震矩与拐角频率之间存在着对数线性关系(图 6),其相关系数为 0.67;震源破裂半径 r 是一个与地震强度、震源区地下结构等相关的量(图 7)。地震矩与震源破裂半径 r 存在着半对数关系,其相关系数为 0.67。各个震源参数之间的拟合关系见表 2。

表 2 各个地震参量之间的拟合关系

地震参量	拟合关系	相关系数
M_0 与 M_L	$\log M_0 = 0.902\ 9M_L + 11.003$	0.78
M_0 与 f_c	$\log M_0 = 14.985 - 1.345\ 3\log f_c$	0.67
M_0 与 r	$\log M_0 = 0.003\ 4r + 13.03$	0.67

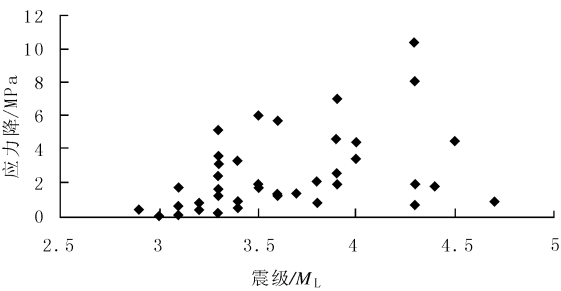


图4 应力降 drop 与震级 M_L 的关系图

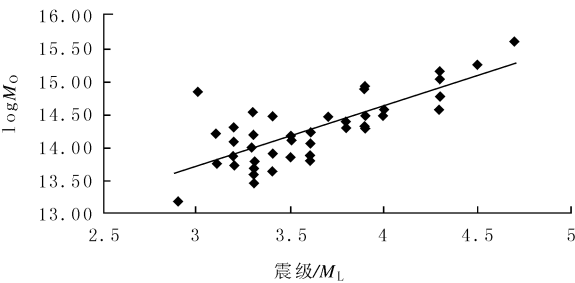


图5 $\log M_0$ 与震级 M_L 的关系图

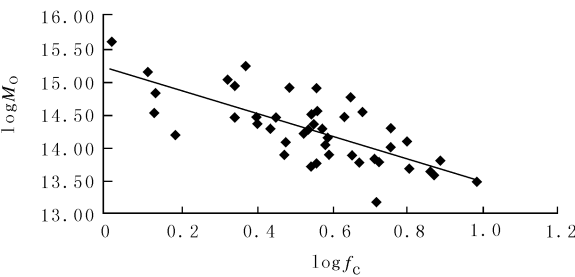


图6 $\log M_0$ 与 $\log f_c$ 的关系图

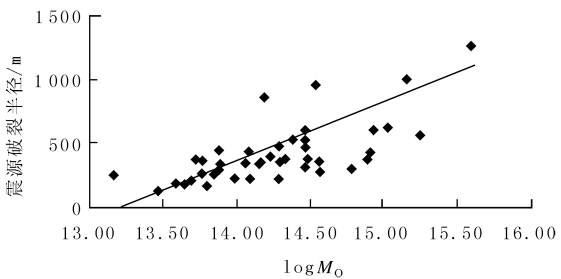


图7 $\log M_0$ 与震源破裂半径 r 的关系图

4 讨论

本文采用波谱分析的方法, 应用 Brune 震源模型, 求得各次地震的地震矩、拐角频率、应力降和震源破裂半径等震源参数, 地震矩与震级之间存在着较好的半对数关系; 地震矩与拐角频率之间存在着对数线性关系; 地震矩与震源破裂半径之间存在着半对数关系。

如果应力降与构造应力成正比, 则有可能通过估算应力降来监测地震孕育所处的阶段, 有可能为地震预报提供依据^[10]。需要指出的是, 当将应力降作为一种地震前兆时, 应该考虑到应力降与地震矩也即震级大小的关系, 一个与地震大小无关的应力降, 也许更能发现真正的异常^[9], 这还需要我们做更多的研究工作和震例总结。

许多人用同样的方法对震源参数及其相互关系进行过研究^[1-6], 本文得到的结果与它们的结果相比较大体是一致的。

致谢: 本研究得到了刘希强研究员的热情帮助, 在此表示感谢!

参考文献:

[1] 兰从欣, 刘杰, 郑斯华, 等. 北京地区中小地震震源参数反

演[J]. 地震学报, 2005, 27(8): 498-507.

- [2] 吸永清, 苏燕, 贾建喜, 等. 山西地区非弹性衰减系数、场地响应和几种震源参数的研究[J]. 地震学报, 2004, 26(4): 369-378.
- [3] 康英, 郑斯华, 刘杰, 等. 中小地震震源参数的求解及其相似关系[J]. 华南地震, 2004, 24(2): 11-21.
- [4] 刘红桂, 缪发军, 吴晶. 场地响应、震源参数与介质衰减的同时反演[J]. 地震, 2004, 24(4): 27-36.
- [5] 王勤彩, 高景春, 郑斯华, 等. 华北中北部地区震源参数和场地响应的联合反演[J]. 中国地震, 2004, 20(2): 187-196.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Atkinson G M, Mereu R F. The shape of ground motion attenuation curves in Southeastern Canada [M]. Bull Seism Soc AMER, 1992: 2014-2031.
- [9] 张天中, 马云生, 黄蓉良, 等. 1995 年陡河地震前后小震震源参数及其相互关系[J]. 地震学报, 2000, 22(3): 233-240.
- [10] 何璟琳, 闻刚刚, 吕金水. 新丰江 $M_L 4.9$ 地震序列的波谱分析[J]. 华南地震, 2000, 20(4): 65-70.
- [11] Moya A, Aguirre J, Irikura K. 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] Brune J N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake [J]. J Geophys Res, 1970, 75(26): 4997-5009.

Determination of the Focus Parameters of the Moderate and Small Earthquakes in Shandong and Its Adjacent Areas

Ji Aidong, Zhao yinping, Zheng Jianchang, Zhao Jinhua, Li Bo and Wu Dantong

(1. Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China;

2. Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Using the observational data of the Shandong regional digital seismographic network, the seismic waveform spectra are calculated by use of the data records of 44 earthquakes with magnitude equal to or greater than 3 in Shandong region in the period from 2004 to 2007. The seismic moment, corner frequency, stress drop, source radius of each earthquake are roughly estimated. The relations between the source parameters are discussed and the characters of the corner frequency distribution with time are analyzed. The results show the marked dependence of the seismic moment on the magnitude, the seismic moment on the corner frequency and the seismic moment on the source radius.

Key words: waveform spectra; source parameter; Shandong region