

胶东半岛地区震源波谱参数研究^①

王 鹏, 郑建常, 赵金花

(山东省地震局, 山东 济南 250014)

摘 要:利用山东数字地震台网记录到的胶东半岛及附近地区 2010 年以来的地震波形资料, 采用 Brune 模型, 并结合遗传算法反演了本区 134 次 2.0 级以上地震的震源波谱参数。结果表明胶东半岛地区中小地震的地震矩在 $9.76 \times 10^{11} \sim 5.9 \times 10^{14} \text{ N} \cdot \text{M}$ 之间; 应力降范围在 $0.017 \sim 25 \text{ MPa}$ 之间, 均值是 0.97 MPa ; 视应力范围在 $0.06 \sim 10.2 \text{ MPa}$, 平均应力水平在 0.396 MPa 。地震矩、应力降和视应力都与震级呈正相关关系, 拐角频率与震级的关系不是很明显; 地震矩和拐角频率成负相关关系。根据本区震源参数和震级的定量统计关系, 去除震级影响, 通过应力降和视应力随时间的变化得到目前正处于应力的释放时期。

关键词: 胶东半岛; 震源参数; 地震矩; 视应力; 拐角频率

中图分类号: P315.31

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2013)02-0360-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.02.0360

Status of Seismic Source Spectral Parameters in the Jiaodong Peninsula

WANG Peng, ZHENG Jian-chang, ZHAO Jin-hua

(Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan Shandong 250014, China)

Abstract: Source parameters calculations are generally carried out in the frequency domain. Seismic wave data from station records can be used for site response, instrument response, geometric diffusion path attenuation, and focal radiation directivity factor correction. A genetic algorithm can be used to obtain the parameters of low-frequency spectral amplitude limit and corner frequency, and thus, the theoretical formula for calculating stress drop, source radius, and seismic moment. The geological structure of Jiaodong Peninsula is complex. The area spread by the Jiaodong fault was uplifted, and the area of the northern Yellow Sea fault was bent, so the Jiaodong Peninsula fault structure is mainly monoclinic or relief synclinal. Brittle faults are well developed, mainly related to the eastern section of the Yanshan-Bohai fault zone. In contrast, at the intersection with the Tan-Lu fault in the Bohai are two sets of faults in the NNE-NE and NWW directions. The faults in the area are strong, and the structure is extremely complex; this was a high activity area in the North China earthquake. In recent years, the seismic activity has concentrated and strengthened. Regional stress changes have been analyzed in recent years in order to study the risk to Jiaodong Peninsula of strong earthquakes. Based on digital seismograms of Jiaodong Peninsula and the surrounding areas recorded by the Shandong digital seismic network since 2010, the Brune model, combined with a genetic algorithm, has been used to calculate the spectral parameters of 134 earthquakes above 2.0 in the Jiaodong Peninsula. Results show that seismic moments were between $9.76 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}$ and $5.9 \times 10^{14} \text{ N} \cdot \text{m}$; pressure drops were

① 收稿日期: 2012-11-06

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAK19B04-01-05); 中国地震局震情跟踪青年课题项目(2013020116)

作者简介: 王 鹏(1983-), 男(汉族), 山东东营人, 硕士, 工程师, 主要从事地震活动性和数字地震学方面研究。

E-mail: wangpeng@eqsd.gov.cn

between 0.017 MPa and 25 MPa (0.97 MPa mean); and apparent pressures were between 0.06 MPa and 10.2 MPa (0.396 MPa mean). Seismic moment, stress drop, and apparent stress were positively correlated with magnitude, with the magnitude of the rise increasing. By using a linear fit of robust regression functions, a quantitative relationship has been developed for the Jiaodong Peninsula, which is consistent with the findings of other scholars. The relationship between corner frequency and magnitude is not obvious; seismic moment and corner frequency were negatively correlated. According to the quantitative statistical relationships between the Jiaodong Peninsula source parameters and magnitude (in addition to the effect of magnitude), and by the changes in stress drop and apparent stress over time, we can clearly see that a Jiaodong Peninsula stress adjustment has caused the stress to currently be in a period of weakening, compared to its previous high-stress state.

Key words: Jiaodong Peninsula; Seismic source parameter; Seismic moment; Apparent stress; Corner frequency

0 引言

胶东半岛地区地质构造复杂,主要涉及燕山—渤海断裂带东段,郯庐断裂带在渤海与之交汇。主要断裂方向为 NNE—NE 向和 NWW 向。该区断裂活动强烈,是华北 7 级强震的高活动区。曾发生 1548 年渤海海峡 7 级、1597 年渤海 7 级、1888 年渤海湾 7½ 级、1969 年渤海 7.4 级以及 1948 年的威海西北海域 6 级地震。

地震波谱是地震波的动力学特征,利用地震波形资料提取有关的波谱信息一直是获得中强震前后震源区应力状态与孕震状态变化的一种重要方法,国内外许多地震学者已做了大量的研究,并取得了初步的进展^[1-3]。震源参数的计算一般在频率域进行。在对台站记录的地震波资料进行场地响应、仪器响应、几何扩散、路径衰减、震源辐射方向性因子校正之后,通过遗传算法可以获得低频波谱振幅极限、拐角频率等参数,进而根据一定的理论公式可计算应力降、震源半径、地震矩等。本文利用朱新运等^[4]研制的小震震源参数计算软件研究胶东半岛地区的地震震源波谱参数。

1 震源参数计算方法

地面运动的位移谱可以表示为

$$A_{ij}(f) = A_{i0}(f) \cdot G(R_{ij}) \cdot S_j(f) \cdot e^{-k(f)R_{ij}} \quad (1)$$

式中, $A_{ij}(f)$ 为第 i 个地震在第 j 个台站的观测谱; $A_{i0}(f)$ 为第 i 个地震的震源谱; R_{ij} 为第 i 个地震到第 j 个台站的震源距; $G(R_{ij})$ 为几何扩散函数; $S_j(f)$ 为第 j 个台站的场地响应; $k(f)$ 为非弹性衰减系数。对于某次地震的某个台站记录,从振幅谱中扣除仪器响应、噪声影响、传播路径影响、场地响应,

就可以得到该台站记录的震源位移谱 $A_{i0}(f)$ 。这样,对于某次地震的每个台站记录都求出震源位移谱 $A_{i0}(f)$,再求平均震源谱来作为该地震的观测震源谱:

$$\bar{A}_0(f) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N A_{i0}(f)_j \quad (2)$$

根据 Brune(1970)的 ω^2 模型,理论震源位移谱可以表示为

$$|O_{th}(f)| = \Omega_0 * [1 + (f/f_0)^2]^{-1} \quad (3)$$

式中, $O_{th}(f)$ 表示理论震源谱; Ω_0 表示震源谱低频极限值; f_0 表示拐角频率。把 Ω_0 和 f_0 作为独立变量,根据式(3),利用遗传算法使观测谱和理论谱具有最小残差,确定 Ω_0 和 f_0 ,并利用得到的 Ω_0 和 f_0 求出地震矩、震源半径、应力降等:

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

这里 ρ 是介质密度,本研究取为 2.8 g/cm^3 ; V_s 是 S 波速度,本研究取为 3.5 km/s ; $R_{\theta\phi}$ 是辐射花样系数,理论上与震源机制相关,但单个小震的震源机制难以确定,也存在误差较大的影响;因而在实际工作中一般 $R_{\theta\phi}$ 取 $\sqrt{2/5}$ 。应力降为

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r^3} \quad (5)$$

2 资料选取

2011 年下半年至 2012 年 9 月,胶东半岛及近海区域($118^\circ \sim 123^\circ \text{E}$, $36^\circ \sim 38^\circ \text{N}$) 3 级地震持续活跃,发生了 18 次 3 级地震,而且主要发生在内陆地区。历史上如此高频度的小震集中增强只出现在唐山地震前。为了研究胶东半岛地区发生中强地震的危险性,分析近几年来该区域应力的变化,本文选取

了 2010 年 1 月至 2012 年 9 月胶东半岛地区的 134 次 2 级以上小震的波形资料(地震与台站分布见图 1),通过震源谱获得地震矩、拐角频率、应力降和视

应力等震源参数,统计分析各种参数间的关系,分析研究区应力状态,希望对该区域地震孕育、发生、发展过程有一定认识。

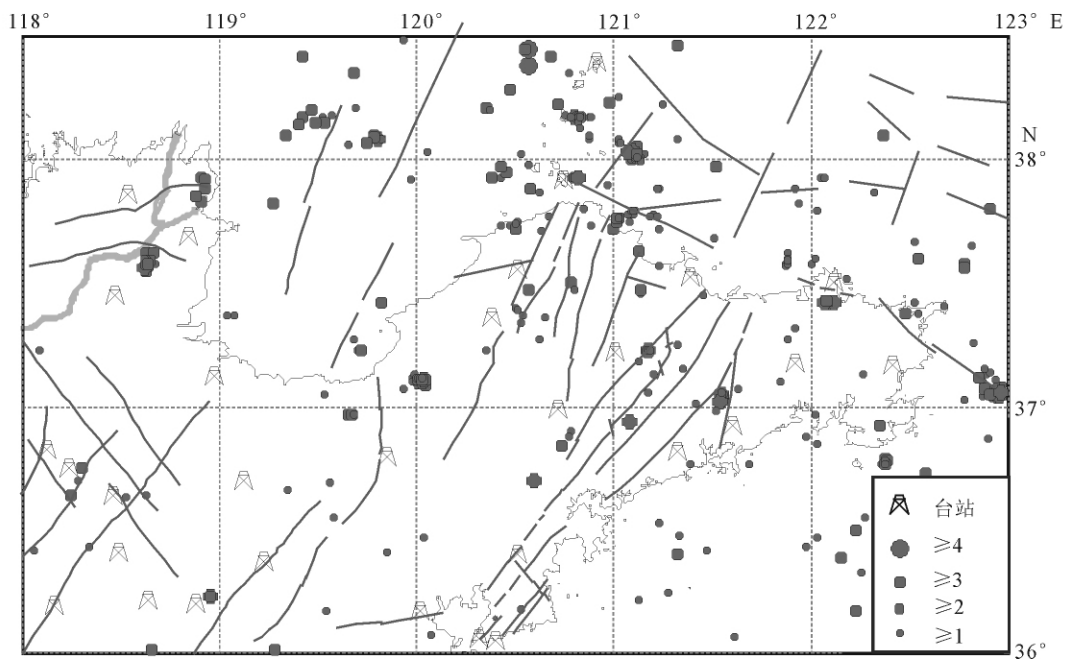


图 1 胶东半岛地区地震和台站分布图

Fig. 1 Distribution of the epicenters and seismic stations in Jiaodong peninsula region of Shandong province.

3 震源波谱参数的计算结果分析

根据上述计算方法,地震位移谱包含着两个独立参数,即零频极限和拐角频率,通过观测谱获得这两个参数是计算震源参数的重要一环^[5-9]。首先对地震波形进行挑选,选取 S 波较清晰的波形进行波谱计算。图 2 为 2012 年 7 月 13 日莱州 $M_L 3.8$ 地震的计算实例,依据此流程,计算了 2010 年以来胶东半岛地区 134 个 2 级以上小震的震源波谱参数。

3.1 地震矩与近震震级的关系

地震矩是常用的震源参数之一,它表示震源的等效双力偶模型的力偶矩^[10]。根据 134 个小震的地震矩计算结果,胶东半岛的地震矩范围在 $9.76 \times 10^{11} \sim 5.9 \times 10^{14} \text{ N} \cdot \text{M}$ 之间。

地震矩和震级的关系可由关系式 $\log M_0 = aM + b$ 表达。由于所统计地震的区域不同,关系式中 a 和 b 在数值上略有差异,不同的 a 和 b 反映了不同地区介质应力水平和介质非均匀程度的不同^[9]。胶东半岛地区地震矩与震级的关系用稳健回归函数线性拟合,去除异常点的影响,可以表示为

$$\lg M_0 = 0.83 M_L + 10.97 \quad (6)$$

线性回归的相关系数为 0.98,线性回归残差的标准差为 0.33(图 3)。

胶东半岛的地震矩和近震震级的拟合关系与其他学者的研究结果基本一致。比如李一正^[11]研究的滇西实验场地区结果;秦嘉政^[12]得到的昆明地区结果;李立平^[13]得到的滇中禄劝地区的结果;刘学军^[14]等得到的姚安地区结果;张永久^[15]得到的雅江、马尔康地区的结果;师海阔^[16]得到的宁夏地区的结果等,这些结果的斜率分布在 0.8~1.2 之间,截距在 9.91~12.01 之间。

3.2 地震应力降

应力降表征地震瞬间断层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构造应力释放水平,从而间接地认识地震发生地区的构造场的背景应力^[17-18]。

本文根据 134 个小震的应力降计算结果得到应力降随时间的变化曲线。分析应力降 3 年内的变化,计算得到的应力降 ΔP 在 0.017~25 MPa 之间,均值在 0.97 MPa 之间;根据胶东半岛地区应力降与震级的定量统计关系(式(7)),去除了震级的影响,统一折算到 2 级地震的应力降水平,来分析应力降随时间的变化(图 4),可以较清楚的看到应力降在均值附近随时间存在增强—减弱的波动过程。2010 年以来每年的 7 月份左右应力升高达到高值,

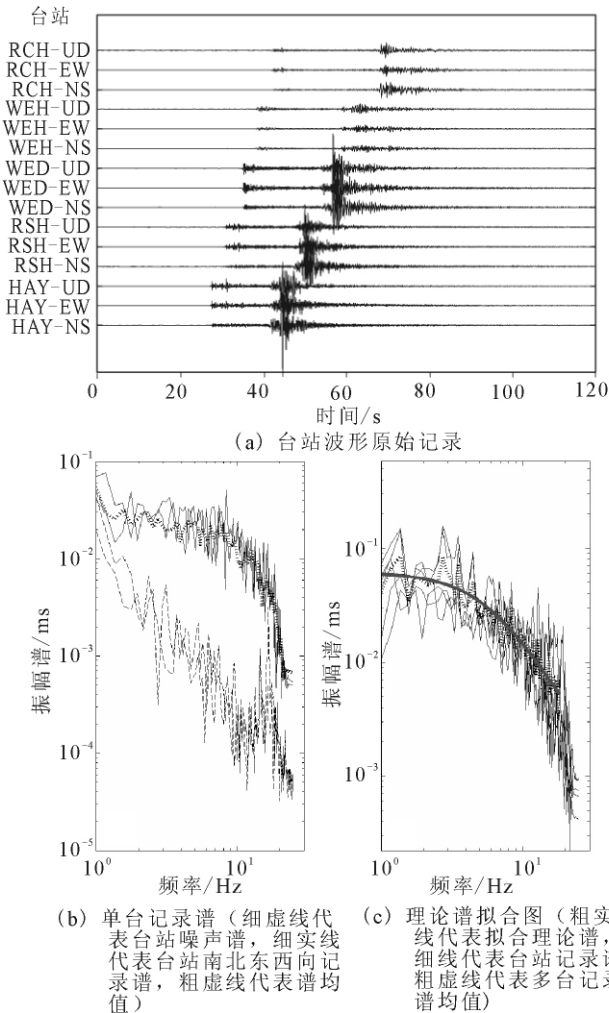
图 2 2012 年 7 月 13 日莱州 M_L 3.8 地震的波谱

Fig. 2 The seismic wave spectrum of the Laizhou M_L 3.8 earthquake on July 13, 2012.

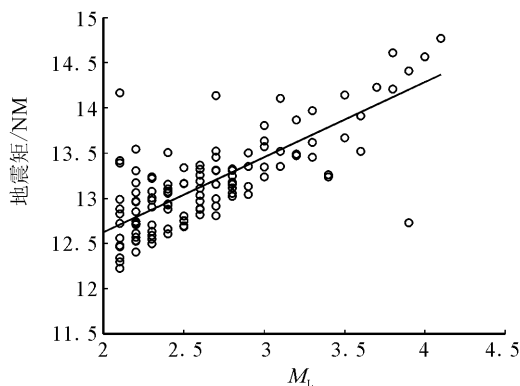


图 3 地震矩与近震震级的关系

Fig. 3 The relationship between the seismic moment and local magnitude.

随后慢慢下降,目前处在应力降的下降期。

胶东半岛东部地区应力降与震级表现出正相关的关系,即应力降随着震级的增加而升高(图 5)。

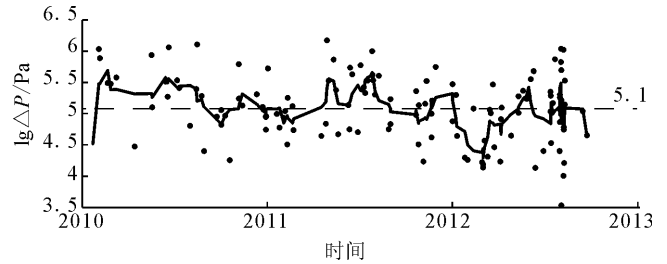


图 4 应力降随时间的变化曲线

Fig. 4 Stress drop changing curve with time.

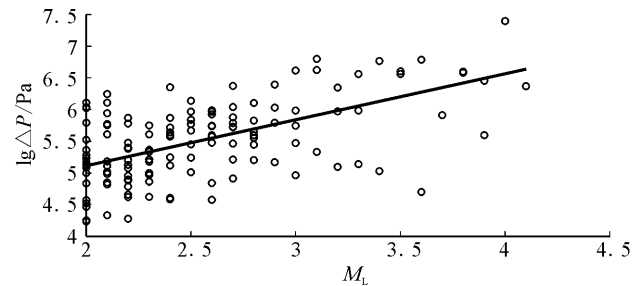


图 5 应力降与震级的关系

Fig. 5 The relationship of stress drops and magnitudes.

用稳健回归函数线性拟合,去除了偏差大的点的影响,得到

$$\lg \Delta P = 0.73 M_L + 3.66 \quad (7)$$

线性回归的相关系数是 0.98,线性回归残差的标准差为 0.54。

3.3 视应力

视应力的变化反映了震源区应力积累和释放的水平,从而可用于判定区域地震趋势^[19]。

通过计算,胶东半岛 134 次地震的地震视应力为 0.06~10.2 MPa,研究区平均视应力为 0.396 MPa。同样根据胶东半岛地区视应力与震级的定量统计关系(式 8),去除了震级的影响,统一折算到 2 级地震的视应力水平,来分析视应力随时间的变化(图 6),可以看到目前视应力处于减弱的时期。

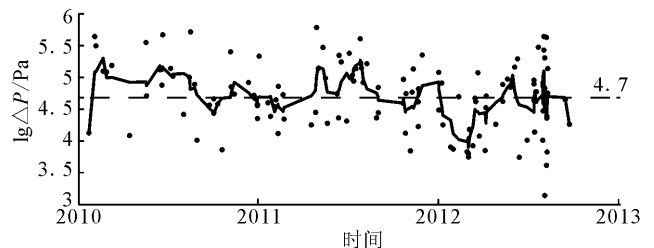


图 6 视应力随时间的变化曲线

Fig. 6 Apparent stress changing curve with time.

吴忠良等^[20-21]研究发现中国大陆的视应力分布在 0.1~2.6 MPa 之间,平均视应力水平在 0.8 MPa。胶东半岛东部区域的平均视应力与上述研究

结果基本一致,低于中国大陆平均水平,本研究区属于低应力释放地区。

胶东半岛东部地区视应力也表现出随着震级的增加而升高的现象(图 7)。

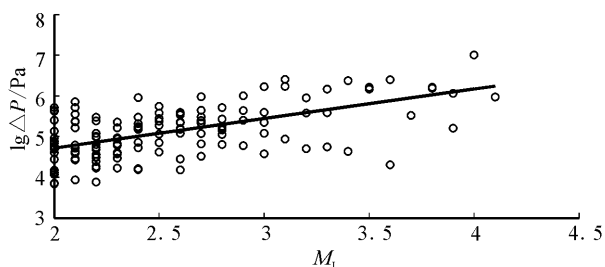


图 7 视应力与震级的关系

Fig. 7 The relationship of apparent stresses and magnitudes.

用稳健回归函数线性拟合,去除了偏差大的点的影响,得到

$$\lg P = 0.73M_L + 3.27 \quad (8)$$

线性回归的相关系数是 0.98,线性回归残差的标准差为 0.54。

3.4 地震矩与拐角频率的关系

图 8 给出了胶东半岛东部地区地震的拐角频率和地震矩的关系,可以看到震级与拐角频率的关系不是很明显,可能是由于地震样本数太少,相应震级地震缺失造成的。

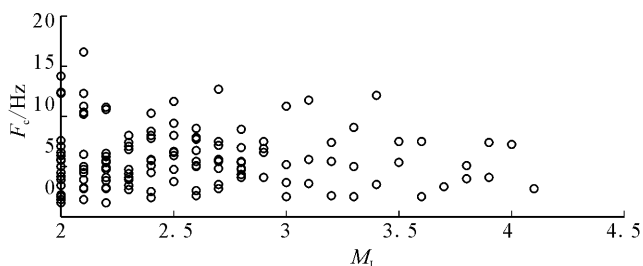


图 8 拐角频率和震级的关系

Fig. 8 The relationship of corner frequencies and magnitudes.

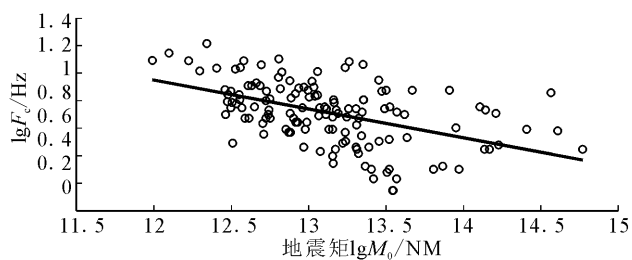


图 9 拐角频率和地震矩的关系

Fig. 9 The relationship of corner frequencies and seismic moments.

其他地区^[16-18]的研究结果地震矩和拐角频率存在明显的依赖关系,即地震矩越大,拐角频率越小,这一规律在胶东半岛这个区域也是适用的,胶东半岛东部地区的地震矩与拐角频率也呈明显的负相关关系,稳归函数线性拟合关系为

$$\lg f_c = -0.2M_L + 3.46 \quad (9)$$

线性回归的相关系数是 0.99,线性回归残差的标准差为 0.21。

4 结论与讨论

本研究利用胶东半岛地区近震数字地震台网记录得到小震波形资料,根据 Brune 模型,采用遗传算法计算了 2010 年以来 134 次 2 级以上地震的小震震源波谱参数,得到的胶东半岛地区中小地震的地震矩在 $9.76 \times 10^{11} \sim 5.9 \times 10^{14} \text{ N} \cdot \text{M}$ 之间;应力降范围在 0.017~25 MPa 之间,均值是 0.97 MPa;视应力范围在 0.06~10.2 MPa,平均应力水平为 0.396 MPa。地震矩、应力降和视应力都与震级呈正相关关系,随震级的增加而升高。得到了适应于胶东半岛地区的定量关系,与其他学者的研究结果基本一致。拐角频率与震级的关系不是很明显,地震矩和拐角频率呈负相关关系。

通过应力降和视应力随时间的变化,可以较清楚的看到胶东半岛地区应力的调整相较于之前的高应力状态,目前正处于应力的减弱时期。对了解该区域的应力状态和孕发震过程有一定的指导意义。由于地震序列地震条目较少,震级偏低,结论的可靠性还有待于进一步检验。

本文成文过程中受到朱新运博士的指导,特此感谢。

[参考文献]

- [1] Moya C A, Aguirre J, Irikura K. Inversion of Source Parameters and Site Effects from Strong Ground Motion Records Using genetic Algorithms[J]. B. S. S. A., 2000, 90(4): 977-992.
- [2] Bindi D, Spallarossa D, Augliera P, et al. Source Parameters Estimated from the Aftershocks of the 1997 Umbria—Marche (Italy) Seismic Sequence[J]. B. S. S. A., 2001, 91: 448-455.
- [3] Giampiccolo E, D Amico S, Patane D, et al. Attenuation and Source Parameters of Shallow Microearthquakes at Mt. Etna Volcano, Italy[J]. B. S. S. A., 2007, 97: 184-197.
- [4] 朱新运, 于俊谊. 基于 MATLAB 的小震震源参数计算软件研制[J]. 西北地震学报, 2008, 30(4): 380-384.
ZHU Xin-yun, YU Jun-yi. The Data Processing Software of Source Parameters for Middle or Small Earthquakes Based on MATLAB[J]. Northwestern Seismological Journal, 2008, 30

- (4):380-384.
- [5] 于俊谊,朱新运. 浙江珊溪水库地震震源参数研究[J]. 中国地震, 2008, 24(4):379-387.
YU Jun-yi, ZHU Xin-yun. Hypocentral Parameters Research of the Shanxi Reservoir Area in Zhejiang[J]. Earthquake Research in China, 2008, 24(4):379-387.
- [6] 阮祥,程万正,乔惠珍,等. 安宁河—则木河地震带震源参数及应力状态的研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(1):46-50.
RUAN Xiang, CHENG Wan-zheng, QIAO Hui-zhen, et al. Research on Source Parameters and Stress State in Anninghe—Zemuhe Earthquake Belt [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(1):46-50.
- [7] 潘振生,刘辉,谷美菊,等. 新疆柯坪块体震源参数的初步研究与应用[J]. 西北地震学报, 2010, 32(1):357-362.
PAN Zhen-sheng, LUI Hui, GU Mei-ju, et al. Preliminary Study on Source Parameters of Earthquakes Occurred in Keping Block, Xinjiang[J]. Northwestern Seismological Journal, 2010, 32(1):357-362.
- [8] 刘薇,张晓清,石玉成,等. 利用格林函数库计算 2008 年青海大柴旦 6.4 级地震的余震震源机制[J]. 西北地震学报, 2012, 34(2):154-160.
LIU Wei, ZHANG Xiao-qing, SHI Yu-cheng, et al. Using Green Function Database and Quick Moment Tensor Inversion Calculating the Focal Mechanism Solution of Aftershocks of Dachaidan M_s 6.4 Earthquake in 2008 in Qinghai Province[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(2):154-160.
- [9] 张永久,乔惠珍. 紫坪铺水库库区震源波谱参数研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(2):117-122.
ZHANG Yong-jiu, QIAO Hui-Zhen. Study on Seismic Source Parameters in Zipingpu Reservoir Area [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(2):117-122.
- [10] 钟羽云,朱新运,张震峰. 不同类型地震的地震矩—震级标度关系研究[J]. 西北地震学报, 2004, 26(1):57-61.
ZHONG Yu-yun, ZHU Xin-yun, ZHANG Zhen-feng. Study on Relations between Seismic Moment and Magnitude for Various Types of Earthquake Sequence[J]. Northwestern Seismological Journal, 2004, 26(1):57-61.
- [11] 李一正. 滇西地区震级与地震矩标度[J]. 地震研究, 1985, 8(6):617-632.
LI Yi-zheng. The Western Yunnan Magnitude and Seismic Moment Scale[J]. Journal of Seismological Research, 1985, 8(6):617-632.
- [12] 秦嘉政. 用近震尾波估算昆明及其周围地区的 Q 值和地震矩[J]. 地球物理学报, 1986, 29(2):145-156.
QI Jia-zheng. Nearly Coda Q Value Estimate Kunming and Its Surroundings and Seismic Moment[J]. Geophysics, 1986, 29(2):145-156.
- [13] 李立平,叶建庆,谢庆茵. 澜沧—耿马地震震源动力学参数研究[J]. 地震研究, 1990, 13(3):223-232.
LI Li-ping, YE Jian-qing, XIE Qing-yin. A Research on Focal Dynamic Parameters of Lancang—Gengma Earthquake [J]. Journal of Seismological Research, 1990, 13(3):223-232.
- [14] 刘学军,叶建庆,蔡绍平. 姚安地震序列的震源参数研究[J]. 地震研究, 2002, 25(3):240-245.
LIU Xue-jun, YE Jian-qing, CAI Shao-pin. Study on Focal Parameters for the Yao—an Earthquake Sequence[J]. Journal of Seismological Research, 2002, 25(3):240-245.
- [15] 张永久,程万正. 用 S 波研究雅江地震序列震源波谱[J]. 中国地震, 2003, 19(4):340-350.
ZHANG Yong-jiu, CHENG Wan-zheng. Study on Source Parameters for the Yajiang Earthquake Sequence Using S wave[J]. Earthquake Research in China, 2003, 19(4):340-350.
- [16] 师海阔,朱新运,贺永忠. 宁夏及邻区地震震源参数研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(增刊):38-43.
SHI Hai-kuo, ZHU Xin-yun, HE Yong-zhong. Research on Hypocentral Parameters of Ningxia and Adjacent Region[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(Supp.):38-43.
- [17] 钟羽云,朱新运. 温州珊溪水库 M_L 3.9 震群震源参数特征[J]. 地震, 2004, 24(3):107-114.
ZHONG Yu-yun, ZHU Xin-yun, ZHANG Zhen-feng. Source Parameter Characteristics of M_L 3.9 Earthquake Swarm Occurred in Shanxi Reservoir, Wenzhou, Zhejiang Province[J]. Earthquake, 2004, 24(3):107-114.
- [18] 李发,李罡风,裴红云. 安庆 4.8 级地震序列的地震波谱变化研究[J]. 高原地震, 2012, 24(1):23-27.
LI Fa, LI Gang-feng, PEI Hong-yun. Study on Seismic Wave Spectrum of Anqing M_L 4.8 Earthquake Sequence[J]. Plateau Earthquake Research, 2012, 24(1):23-27.
- [19] 盛书中,万永革. 地震视应力及其物理意义的探讨[J]. 地震地磁观测研究, 2008, 29(1):36-43.
SHENG Shu-zhong, WAN Yong-ge. Apparent Stress and the Discussion of Its Physical Implication[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2008, 29(1):36-43.
- [20] 吴忠良,黄静,林碧苍. 中国西部地震视应力的空间分布[J]. 地震学报, 2002, 24(3):294-301.
WU Zhong-liang, HUANG Jing, LIN Bi-cang. Distribution of Apparent Stress in Western China[J]. Acta Seismologica Sinica, 2002, 24(3):294-301.
- [21] 邬成栋,付虹,赵小艳. 小湾水库近场区地震震源参数初步研究[J]. 地震研究, 2010, 33(1):50-54.
WU Cheng-dong, FU Hong, ZHAO Xiao-yan. Primary Study on Source Parameters near Xiaowan Reservoir[J]. Journal of Seismological Research, 2010, 33(1):50-54.