同震位移烈度方法在菏泽5.9级地震中的应用

王 鹏[1]，刘希强[1]，殷海涛[1]，尹相好[2]
(1.山东省地震局,山东 济南 250014; 2.日照市地震局,山东 日照 276826)

摘要:选择适合山东实际的地壳速度模型建立了山东地区虚拟台站格林函数库。利用菏泽5.9级地震的震源参数,在已知地震三要素和断层走向、倾角和滑动角的情况下计算得到了震区周围的地表同震位移,通过同震位移和烈度的经验对应关系快速得到了发震区周围的烈度分布结果。验证表明同震位移烈度与宏观烈度对应较好,这对山东地区中强地震预警、震后快速灾害评估和应急救援都有很重要的指导作用。

关键词: 格林函数; 同震位移; 地震烈度; 菏泽5.9级地震; 地震预警
中图分类号:P315.331 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-0844(2013)04-914-07
DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.04.914

An Application of the Co-seismic Displacement Intensity Method to the Heze 5.9 Earthquake

WANG Peng[1], LIU Xi-qiang[1], YIN Hai-tao[1], YIN Xiang-hao[2]
(1.Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan Shandong 250014, China;
2. Rizhao Seismological Bureau, Rizhao Shandong 276826, China)

Abstract: In this paper, the crust velocity model of Shandong was selected and Shandong virtual station's Green's function database was established. The surface co-seismic displacement around the earthquake zone was calculated using the Heze 5.9 earthquake source parameters, based on the earthquake time, location, magnitude, fault strike, dip, and slip. At first, a generalized empirical relationship between the co-seismic displacement and earthquake intensity is established and then the intensity distribution of the strong earthquake zone is quickly obtained. By comparing with the Heze 5.9 earthquake macroseismic intensity data, it is seen that the co-seismic displacement intensity is similar to it. These data have a very important guiding role in the early warning of strong earthquakes, rapid disaster assessment after the earthquake, and guiding emergency rescue. Quick reporting of seismic intensity especially big earthquake intensity data can provide a new earthquake monitoring technology and a new means of reducing earthquake related disasters. Within a few minutes after a devastating earthquake, a quick determination of the spatial distribution of the seismic intensity is required which estimates the extent of damage in different regions and enables the government to carry out emergency rescue and relief operations. Then rescue workers can timely and accurately reach the epicenter area, search and rescue, thereby reducing loss of life and property. Currently,

收稿日期:2013-06-08
基金项目:国家科技支撑计划(2012BAK19B04-02-04);山东省地震局重点科研基金(JJ1306Y)
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预警方面研究. E-mail: wangpeng@eqsd.gov.cn

many earthquake-prone countries and regions have paid more attention to quick reports of earthquake intensities which have been widely used. An earthquake structure is very complex, but for most earthquakes, it may be approximately inferred that they are caused by sudden dislocations along fault planes. Calculation of the co-seismic displacement field was considered to change over a very short time scale and mainly included elastic dislocation effects which were simulated ground motion changes at the time of occurrence of the earthquake. Through this change we can approximate the extent of the earthquake damage. Intensity and co-seismic displacements have a direct relationship in strong earthquake zones. Therefore, we can use the co-seismic displacement intensity to approximate the seismic intensity. Through comparisons and global experiments on several earthquakes, the strong earthquake zone was found to have a significant effect. Although this theoretical calculation had some errors that need to be corrected using follow-up information, this method does not depend on the distribution of stations. They play a very important guiding role in giving early warnings of big earthquakes, particularly in regions that have less number of stations. Based on the Shandong velocity model, this paper established the Shandong virtual station's Green's function database and the co-seismic displacement theory was applied to the Heze 5.9 earthquake to validate that application of the method was also possible for the Shandong moderately strong earthquake epicenter area.

Key words: Green's function;co-seismic displacement; seismic intensity; Heze earthquake; earthquake early warning

0 引言

地震烈度速报特别是大震烈度速报技术是地震监测的新技术和减轻地震灾害的新手段,可以在破坏性大地震发生后数分钟内快速判别出地震烈度的空间分布,估计不同地区的受灾程度,为政府开展应急救援并合理分配救援力量提供决策依据。目前强震烈度速报已在多个地震多发国家和地区引起重视并得到了广泛应用,如日本、美国等[1]。日本政府投放大量资金,布设了密集的数字化强震网络,因此能够在破坏性大地震发生后很短时间(2~10 min)内提供地面运动峰值和仪器烈度值;美国Wald等[2-3]回归分析了发生在南加州的8个典型地震,分别得到了该地区PGA、PGV与修正默卡利烈度(MMI)之间的衰减关系,并以此为依据得到南加州仪器烈度值分布图;美国地质调查局(USGS)下的国家地震信息中心(National Earthquake Information Center,NEIC)在Wald等的研究基础上研制了ShakeMap系统,利用模拟远震地震动图技术和地震波反演结合于2006年开始对全球发生的大地震快速报告Shakemap结果。

目前我国对地震烈度的确定方法有以下几种:(1)通过震后现场宏观考查的方式绘制烈度图。这种方法虽然最接近实际震区的破坏情况,但是费时费力,时效性差。(2)通过测震台网产出仪器地震烈度。由于我国台站分布很不均匀,在仪器布设较少地区或观测资料缺乏的地区,震动图只能依赖于假定的地面运动衰减模型,采用计算机模拟内插和场地效应修正等方法。在强震区还可能造成仪器的近台限幅甚至数据传输中断。(3)通过强震台网产出地震烈度。由于目前强震台网不是实时记录传输,不能达到烈度速报的要求,而且在极震内很可能出现仪器损坏,数据无法采集。(4)通过网络和地震信息员收集信息来获得地震烈度情况。我国在部分大震频发的地区布置过地震信息员采集破坏情况,效果不明显。同时极震区网络很可能被破坏,造成网络信息获取十分困难。

天然地震发震构造很复杂,但对多数地震,总体上可将地震近似看成是沿一个平面断层发生的突然错动引起的。同震位移场的计算是考虑时间尺度很短的变化,主要是弹性位错效应,模拟地震发生瞬间引发的地面运动状态的变化,通过这种变化来近似估计地震所造成的破坏程度。许多学者研究发现,在极震区烈度和同震位移有直接的关系[4-5],在此基础上张晁军等[6-7]提出了同震位移烈度理论,通过同震位移烈度来近似地震烈度。通过全球几次强震的实验和对比,在极震区的效果很好,同时将同震位移烈度的速报计算应用于我国境内的汶川地震、玉树地震和芦山地震等几次大震,有效发挥了大震地震烈度快速产出的作用。

尽管这种理论计算会存在误差,需要用后续资料来

进行修正,但这种方法不依赖于台站分布,对于台站稀疏地区的强地震预警具有很重要的指导作用。本文基于山东的速度模型建立区域格林函数库,将同震位移理论应用于山东菏泽5.9级地震,结合震源参数计算同震位移烈度,并与菏泽地震现场烈度考察结果进行对比分析,来验证该方法对于中强地震的极震区确定的可行性。

1 模型选择和方法流程

1.1 模型选择

地震震源参数的准确测定要基于一个合理的地壳模型,地震引起的位移一方面依赖于地震震源的错动方式,另一方面依赖于包括场地条件在内的地震波传播路径。为了得到真实的震源信息,只能针对具体问题取实际传播路径的合理近似。

地壳模型包含地壳分层参数和纵波、横波分层速度和分层密度等参数。赵冰[8-9]等在前人的研究基础上针对山东地区比较了J-B模型、IASPI91模型、华南模型和滕吉文修改模型对定位精度的影响,应用这4种不同的速度模型结合山东地区的地震进行定位结果的分析,得到了华南速度模型与山东地区真实的速度模型更为接近的结论。

此外,在地震现场考察中发现一般软弱地基上的震害比坚硬地基上的震害严重得多。随着近一步研究,人们认识到浅层速度结构对场地强地面运动有很大影响[10],表现为对地震动的放大或者缩小,因此在数值计算中浅层速度结构对强地面运动的影响必须被考虑,而且在表层加入粘弹性介质的衰减作用,通常认为760 m/s为一般情况下基岩的速度结构[11]。

因此,地壳模型采用华南速度模型[8]进行计算,并且考虑浅层速度结构[11]的影响,如表1所示。

表1 菏泽地区地壳模型

Table1 Crustal model in Heze area

分层	层厚/km	V_P/(km·s^{-1})	V_S/(km·s^{-1})	ρ/(kg·m^{-3})
1	2	2	0.76	1500
2	21.4	6.01	3.65	2500
3	32.4	6.88	3.93	3000
4	>32.4	7.98	4.58	3500

1.2 格林函数库的建立

通过格林函数的计算可分析地震波传播路径的影响,但将耗费大量的计算时间。为了解决上述不足,需要借助半成品化的格林函数库来完成这个任务。

在地壳模型已知的基础上本文提出在柱坐标系下建立虚拟台站格林函数库的方法。假定研究区域内模拟地表观测台站之间的最小距离为10 km,则同心圆半径的步长为10 km,在震源深度方向上,假定1 km为源深度差,即分辨精度为1 km。在此假定条件下求取格林函数,则当一次地震发生时从格林函数库中总可以找到震源深度误差不超过1 km、震中距误差不超过5 km的虚拟台站的格林函数,近似的代替观测台站对应的格林函数[12]。

适当放大山东及邻边地区的范围,取建立格林函数库的空间半径为500 km范围,同心圆的圆心表示地震震中,同心圆半径步长为10 km,可能的台站位置分布在同心圆上,具体取决于计算中模拟观测系统的选取。

1.3 方法流程

格林函数库建立之后,结合研究区域的观测系统,分为散点观测,即模拟台站的具体坐标;一维观测,即在断层两边布设测线观测;二维观测,即在断层周边布设二维测网。在此基础上计算震源区的同震位移,所需参数和计算步骤如下:

(1) 地震后第一时间通过地震速报网得到地震的时间、地点、震级和深度。

(2) 通过地震的震源机制解的计算来求取断层的走向、倾角和滑动角。

(3) 通过经验关系求取地震的断层参数和滑动参数[13]。

断层破裂长度 L (km) 由华北地区地震活断层的地震震级-震源破裂尺度经验关系[14]求得:

$$\lg L = 0.54M - 2.05 \tag{1}$$

断层宽度 W(km)可以由震源深度 h 和断层倾角(dip)的关系求得:

$$W = h/\sin(dip) \tag{2}$$

破裂面积 A(km^2)可以通过长度 L 与宽度 W 的乘积得到,也可以由经验公式[14]直接得到,由两种方法进行约束:

$$\lg A = 1.05M - 4.33 \tag{3}$$

断层错距与地震矩有如下的关系式:

$$M_0 = \mu DA \tag{4}$$

同时根据经验关系式[15]

$$\lg M_0 = 1.5M_S + 9.1 \tag{5}$$

由式(3)和式(4)推导得到

$$D = 10^{1.5M_S+9.1}/\mu A \tag{6}$$

式中,μ 是刚度系数,一般取 $\mu = 3\times10^{10}$ N/m^2。

在无法快速得到断层参数的情况下,可以提前将研究区域内根据历史地震活动和地质调查得到的信息建立断层参数数据库,根据离地震发生地点周围最近的断层提取数据库中的参数进行估算。

(4) 已知格林函数和上述参数后,利用同震位移计算程序[16],快速计算地震的同震位移。

(5) 求取同震位移的模,即绝对同震位移。根据式

(6)和式(7)得到震中烈度 I_0 和断层错距 D 的关系，由 D 可代入程序计算得到同震位移，继而可求得绝对同震位移和烈度的对应关系，再将绝对同震位移换算成地震烈度：

$$I_0 = 1.5M - 3.5\log h + 3.0 \quad (h \leqslant 80\ \text{km}) \tag{7}$$

此公式是Shebalin[17]根据全球大量深度小于80 km的地震在地表的烈度衰减统计得到的，式中 I_0 是震中烈度；M是震级；h(单位：km)为地震震源深度。

2 实例检测：1983年11月7日菏泽5.9级地震

1983年11月7日在山东省菏泽市发生5.9级破坏性地震，震后国家地震局和山东省地震局相关专家进行了震后趋势判定和现场调查等工作[18-20]，对于菏泽5.9级地震的断裂和地震活动情况有了详细的考查和研究[21-25]。研究结果表明：菏泽5.9级地震发生在聊考断裂的南段东侧，该区位于菏泽凸起西缘与东濮凹陷交界附近，深部发育有NWW向的东明-成武隐伏断层和NE向的地壳构造变异带，它们的交汇处正是本次地震的发震部位。聊考断裂是山东地区现今强烈活动的断裂，控制着附近地区的构造运动和地震活动[21]。聊考断裂以西的东濮凹陷至今仍在急剧下沉，南段早第三纪沉降中心在前梨园，落差达7 500m，晚第三纪沉降中心南移至河南兰考的固阳附近，而断裂东侧的菏泽凸起则相对抬升，显示出断裂两侧的两个块体在反向运动。

据考察，菏泽5.9级地震的宏观震中在菏泽市的西南，由二郎庙、三教堂、李朝花、油寨、高林寨、杨柚、前刘庄、后刘庄、黄庙等村庄所围限范围的几何中心，即北纬35°14′，东经115°16′，宏观震源深度为14 km。震中烈度为Ⅶ度强[20-21]。具体的宏观考察烈度分布[22]如图1所示。

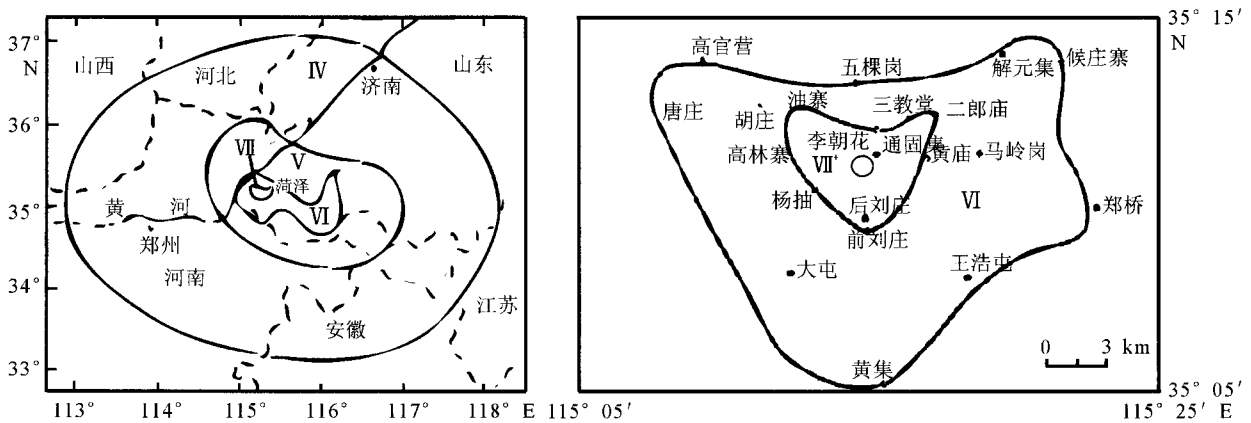

图1 1983年11月7日菏泽5.9级地震等震线图

Fig. 1 Isoseismal line figure of Heze 5.9 earthquake on November 7, 1983

在菏泽5.9级地震震中附近历史上曾于1937年发生过菏泽7.0级地震，1948年又发生菏泽5.5级地震。这些地震的发震构造主要是附近的聊考断裂及其东侧深部的北东向地壳构造变异带，以及王寨分支断层乃至更次一级的小断层，它们形成的时代晚，新构造活动更明显[20]。另外，还有NWW向的东明-成武隐伏断层。这些断裂及其它们的新构造活动与菏泽5.9级地震的孕育和发生有着直接的关系。

综合上述文献[26-29]，以断层参数的经验计算值为约束，得到菏泽5.9级地震的断层模型如表2。

表2 菏泽5.9级地震的断层模型

Table 2 Fault model of Heze 5.9 earthquake

断层数	经度/(°)	纬度/(°)	深度/km	长度/km	宽度/km	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	滑动距
1	35.27	115.28	12	13.68	5.36	114	78	-29	0.4

菏泽地震周边的场地响应一些学者也进行过相关研究[30-32]，发现菏泽地震周边的基岩没有明显的放大作用，因此在模拟计算中，忽略了场地的放大作用。

由式(5)、(7)，结合菏泽5.9级地震的实际情况，计算得到深度为12 km时绝对同震位移和烈度的对应关系(表3)，根据表3将绝对同震位移转换成相应的烈度值。

表3 绝对同震位移与烈度的对应关系

Table 3 Correspondence between absolute co-seismic displacement and the intensity

绝对同震位移/m	烈度
≥15	Ⅻ
15~5.5	Ⅺ
5.5~1.3	Ⅹ
1.3~0.3	Ⅸ
0.3~0.065	Ⅷ
0.065~0.011	Ⅶ
0.011~0.0015	Ⅵ
0.0015~0.0003	Ⅴ
0.0003~5.0×10^{-5}	Ⅳ
5.0×10^{-5}~1.0×10^{-5}	Ⅲ
1.0×10^{-5}~1.3×10^{-6}	Ⅱ
<1.3×10^{-6}	Ⅰ

图2为绝对同震位移的等值线图。因绝对同震位移数值量级很小，将绝对同震位移取对数，得到绝对同震位移的分布图；将同震位移转换成烈度后，再把烈度分布绘制在省界的图上，就可得到震中烈度分布图(图3)。将图3与图1对比可以看到，在宏观烈度考察中极震区烈度为Ⅶ度，形态为四角突出，西北角尤其明显，而在南北两个方向上略向内凹，形成不对称的“蝶形”，长轴呈NW向，向NE和NW出现局部突出[20]；由同震位移方法计算的烈度分布与实际宏观考察得到的烈度分布有较好的一致性。特别是在极震区(图3中红色部分)对应效果更好，这也是大震应急救援所最关注的地区，尽管结果比较粗糙，但对于震后灾害快速评估，紧急救援起到很重要的作用。

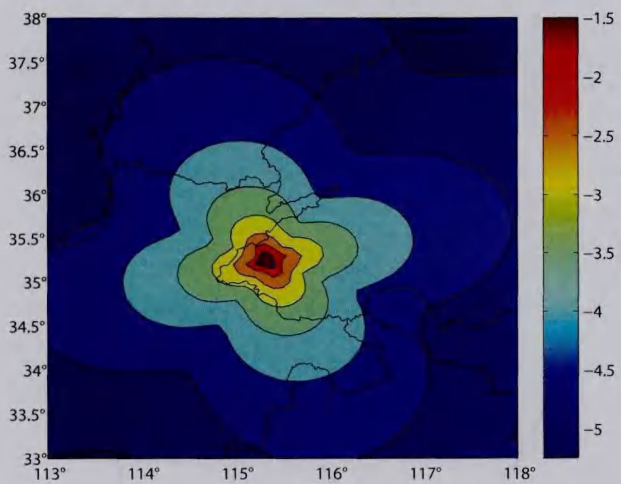

图2 绝对同震位移分布图

Fig. 2 Absolute coseismic displacement distribution

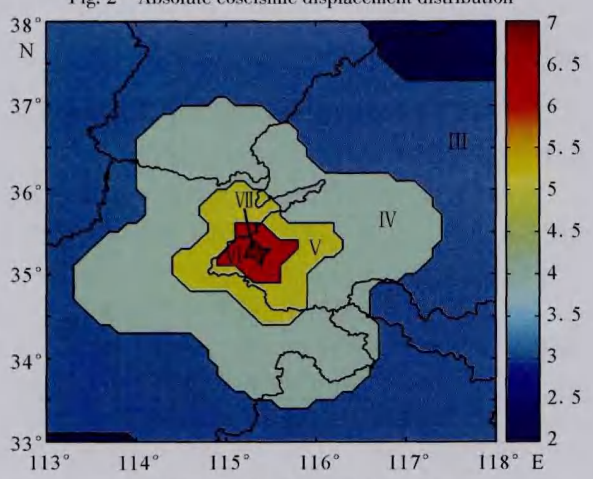

图3 同震位移烈度分布图

Fig. 3 Coseismic displacement intensity distribution

3 结论与讨论

(1) 通过菏泽5.9级地震进行检验，可以看出由同震位移转换得到的同震位移烈度与实际地震烈度有较好的一致性，特别是极震区的烈度对应很好，这是大震应急和紧急救援最关心的区域，可见同震位移烈度理论对于中强地震的震后烈度快速产出是可行的。

(2) 根据研究区域的实际情况，建立相应的地壳模型，计算得到格林函数库，发生地震后根据地震三要素和震源机制解可以快速的计算地表的同震位移，节省了格林函数计算时的大量时间，说明格林函数库这种半成品化的数据库对于震后烈度速报是十分必要的，对进一步提高预警目标区烈度估计的时效性也具有重要意义。

(3) 此方法可应用于山东地区的中强地震应急中，哪怕结果是比较初步的、粗糙的，对应急工作也会有一定的指导意义。

(4) 同震位移反映的是在地震发生时在地表短时间内的形变的大小，而断层错动引起的位移实际包括震前地壳运动、同震位移以及震后余震的余滑效应和深度滑动效应等。由同震位移计算地震烈度也只是一种近似计算，它除了表示地震动的强弱，还包含了地表的运动情况和断层几何结构模式等内容。在实例计算中由于菏泽地震震级较小，选用的是单断层模型，往往大震的断层运动是由不同的断层运动的叠加而成的，计算时会造成结果有一定偏差，都需要更深入的细化研究。

(5) 同震位移烈度图往往是蝴蝶型，与极震区的烈度分布比较符合，低烈度区对应效果稍差，与传统地震区划图中速度(PGV)或者加速度(PGA)转换得到烈度有所偏差，还需要通过其他数据资料不断修正完善。

参考文献(References)

[1] 陈会忠，侯燕燕，王东斌，等. 汶川地震综合参数处理与地震台网救灾作用研究[J].地震，2009，29(1)：207-215.
CHEN Hui-zhong, HOU Yan-yan, WANG Dong-bin, et al. On the Comprehensive Processing of Wenchuan Earthquake Parameters and the Disaster Relief Role of Seismic Network[J]. Earthquake, 2009, 29(1): 207-215. (in Chinese)

[2] David J Wald, Robert W, Graves. The Seismic Response of the Los Angeles Basin, California[J].Bulletin of the Seismological Society of America, 1998,88(2): 337 - 356.

[3] Joyner W, D Boore. Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong- motion Records Including Records From The 1979 Imperial Valley, California, Earthquake[J]. BSSA,1981, 71(3): 2011-2038.

[4] Muramatsu I.Relationship between Seismic Intensity and Earthquake Magnitude[J]. Research Report of the Faculty of Education, Gifu University,1969, (4): 168-174.

[5] 张勇，冯万鹏，许力生，等. 2008年汶川大地震的时空破裂过程[J].中国科学:D辑，2008，38(10)：1186-1194.
ZhANG Yong, FENG Wan-peng, XU Li-sheng, et al. 2008

Wenchuan Earthquake Rupture Process of the Temporal and Spatial[J]. Science in China: Series D, 2008, 38(10): 1186-1194. (in Chinese)

[6] 张晁军,李卫东,李大辉,等. 有关地震烈度速报信息化发展的思考[J]. 国际地震动态,2010,(4): 23-31.
Zhang Chao-jun, Li Wei-dong, Li Da-hui,et al. Some Thoughts Concerning Development of Rapid Report of Seismic Intensity Information[J]. Recent Developments in World Seismology, 2010,(4): 23-31.(in Chinese)

[7] 张晁军,李卫东,李大辉,等. 由同震形变理论计算地震烈度分布的讨论[J]. 地震,2011,31(1):98-106.
ZHANG Chao-jun, LI Wei-dong, LI Da-hui, et al. Discussion on the Seismic Intensity Distribution Calculated by Co-seismic Deformation Theory[J].Earthquake, 2011,31(1):98-106. (in Chinese)

[8] 赵冰,刘希强,李红,等. 地震快速准确定位的系统解决方案及应用[J]. 地震研究,2012,35(4):522-528.
ZHAO Bing, LIU Xi-qiang, LI Hong. Solution for Rapid and Accurate Earthquake Location System and Its Application[J]. Journal of Seismological Research, 2012, 35(4): 522-528. (in Chinese)

[9] 刘希强,孙亚强,赵冰.地震震中实时动态定位的方法研究[J].西北地震学报,2012,34(4):342-349.
LIU Xi-qiang, SUN Ya-qiang, ZHAO Bing. Research on Real-time Evolutionary Earthquake Epicentral Location[J].Northwestern Seismological Journal,2012,34(4):342-349.(in Chinese)

[10] 王伟君,刘澜波,陈棋福,等.应用微动 *H/V* 谱比法和台阵技术探测场地相应和浅层速度结构[J].地球物理学报,2009,52(6):1515-1525.
WANG Wei-Jun, LIU Lan-Bo, CHEN Qi-Fu, et al. Applications of Microtremor *H/V* Spectral Ratio and Array Techniques in Assessing the Site Effect and near Surface Velocity Structure[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009,52 (6): 1515-1525.(in Chinese)

[11] 申文豪,仲秋,刘博研. 基于改进的随机有限断层模型进行区域烈度速报[J]. 地球物理学进展,2012,28(2):695-705.
SHEN Wen-hao, ZHONG Qiu, LIU Bo-yan. Rapid Regional Estimation of MMI Base on the Modified Stochastic Finite Fault Modeling[J]. Progress in Geophysics, 2012, 28(2): 695-705.(in Chinese)

[12] 刘薇,张晓清,石玉成.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. Using Green Function Database and Quick Moment Tensor Inversion Calculating the Focal Mechanism Solution of Aftershocks of Dachaidan *Ms*6.4 Earthquake in 2008 in Qinghai Province[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(2): 154-160. (in Chinese)

[13] 周慧芳,张景发,胡乐银,等.青海玉树地震的InSAR数据同震形变场模拟与参数反演分析[J].地球信息科学学报,2011,13(3):418-423.
ZHOU Hui-fang, ZHANG Jing-fa, HU Le-yin, et al. Co-seismic Deformation Field and Parameters Inversion of the Yushu Earthquake from InSAR[J]. journal of Geo-information Science, 2011,13(3):418-423.(in Chinese)

[14] 龙锋,闻学泽,徐锡伟,等. 华北地区地震活断层的震级-破裂长度、破裂面积的经验关系[J].地震地质,2006,28(4):511-535.
LONG Feng, WEN Xue-ze, XU Xi-wei, et al. Empirical Relationships between Magnitude and Rupture Area, for Seismogenic Active Faults in North China[J]. Seismology and Geology, 2006,28(4):511-535.(in Chinese)

[15] Peter Borman. New Manual of Seismological Observatory Practice: Volume 1, Apter 3, Magnitude of seismic Event[M]. IASPEI, Potsdam: GeoForschungsZentrum,2002.

[16] Wang R,Francisco Lorenzo Martin, Frank Roth.PSGRN / PSCMP-A New Code for Calculating Co- and Postseismic deformation, Geoid and Gravity Changes based on the Visco-elastic-gravitational Dislocation Theory[J]. Computers & Geosciences,2006,32:527-541.

[17] Shebalin N V. Seismic Scale and Methods of Measuring Earthquake Intensity[S]. Foci of Strong Earthquakes in the USSR,1978:87-10.

[18] 山东省建委抗震办公室. 1983年11月7日菏泽5.9级地震震害概况[J].国际地震动态,1984, (9):10-12.
Construction Seismic Committee Office of Shandong Province. Heze 5.9 Earthquake Damage Overview on November 7 in 1983[J]. Recent Developments in World Seismology, 1984, (9):10-12.(in Chinese)

[19] 宋龙伯,沈大开,严新育. 山东菏泽5.9级地震震害调查[J]. 地震学刊,1984, (2):75-79.
SONG Long-bo, SHEN Da-kai, YAN Xin-yu. Heze 5.9 Earthquake Damage Survey[J]. Journal o f Seismology, 1984, (2):75-79.(in Chinese)

[20] 李家灵,吴庭章,蔡全利.菏泽5.9级地震的发震构造[J]. 地震科学研究, 1984, (6):1-6.
LI Jia-ling, WU Ting-zhang, CAI Quan-li. Heze 5.9 Seismogenic Structure[J]. Earthquake Research, 1984, (6): 1-6.(in Chinese)

[21] 商宏宽,吕梦林.晋、冀、鲁、豫交界地区地震地质条件[J].华北地震科学,1985,3(3):1-16.
SHANG Hong-kuan, LV Meng-lin. Shanxi, Hebei, Shandong, Henan Border Area Seismic Geological Conditions[J].

North China Earthquake Sciences, 1985,3(3):1-16.(in Chinese)

[22] 魏光兴,周翠英,许坤福.1983年菏泽5.9级地震[J].地震学报,1985,7(1):118-123.
WEI Guang-xing, ZHOU Cui-ying. XU Kun-fu. Heze 5.9 Earthquake in 1983[J]. Acta Seismologica Sinica 1985, 7(1):118-123.(in Chinese)

[23] 胡连英,高中和.菏泽5.9级地震极震区、构造背景和发震构造的初探[J].地震学刊,1985,(4):35-39.
HU Lian-ying, GAO Zhong-he. Heze 5.9 Earthquake Preliminary of Epicenter Area, tectonic Setting and Seismogenic Structures[J]. Journal of Seismology,1985,(4):35-39.(in Chinese)

[24] 赵兴兰,魏光兴,周翠英.菏泽5.9级地震前地震活动图象[J].地震,1986,(2):62-64.
ZHAO Xing-lan, WEI Guang-xing, ZHOU Cui-ying. Heze 5.9 Earthquake Seismic Activity Image[J]. Earthquake,1986,(2):62-64.

[25] 王金周,刘文龙,陈宇卫.地震空区及条带附近地震破裂特征的震例研究[J].西北地震学报,2002,24(2):167-173.
WANG Jing-zhou, LIU Wen-long, CHEN Yu-wei. Study on Three Earthquake Cases for Fracture of Moderate and Small Shocks Near Seismic Belts and Gaps[J].Northwestern Seismological Journal, 2002,24(2):167-173.(in Chinese)

[26] 刘万琴,魏光兴,周翠英. 1983年11月7日菏泽5.9级地震震源过程研究[J].地震学报,1989,11(3):282-290.
LIU Wan-qin, WEI Guang-xing, ZHOU Cui-ying. Heze 5.9 Earthquake Focal Process on November 7 in 1983[J]. Acta Seismologica Sinica, 1989,11(3):282-290.(in Chinese)

[27] 刘西林.菏泽5.9级地震的发震构造及其前兆构造活动[J].地震学刊,1996,(2):1-6.
LIU Xi-lin, Heze 5.9 Seismogenic Structure and Its Precursor Tectonic Activity[J]. Journal of Seismology, 1996,(2):1-6.(in Chinese)

[28] 周翠英,耿杰. 山东地区地震分析预报手册[M].北京:地震出版社, 2010:332-344.
ZHOU Cui-ying, GENG Jie. Shandong Earthquake Analysis and Prediction Manual[M].Beijing Earthquake Press, 2010:332-344.(in Chinese)

[29] 谢智,刘尧兴,胡卫建.河南及邻区地震的震源机制[J].西北地震学报,2002,24(3):283-286.
XIE Zhi, LIU Yao-xing, HU Wei-jian. The Focal Mechanism of Earthquake in Henan and Its Adjacent Region[J]. Northwestern Seismological Journal,2002,24(3):283-286.(in Chinese)

[30] 苗庆杰,许萍. 山东及近邻区地震烈度衰减关系探讨[J].西北地震学报,2008, 30(3):282-287.
MIAO Qing-jie, XU Ping. Study on the Formula of Seismic Intensity Attenuation in Shandong and Its Adjacent Areas[J]. Northwestern Seismological Journal, 2008, 30(3):282-287.(in Chinese)

[31] 石玉燕,郑斯华,胡旭辉.山东地区地震动衰减和场地响应的研究[J].华南地震,2008,28(1):92-100.
SHI Yu-yan, ZHENG Si-hua, HU Xu-hui. A Study on Seismic Attenuation and Site Response in Shandong Area[J]. South China Journal of Seismology, 2008,28(1):92-100.(in Chinese)

[32] 季爱东,周彦文,吴丹彤. 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 Ai-dong, ZHOU Yan-wen, WU Dan-tong. 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.(in Chinese)