

芦山7.0级地震加速度动态变化及烈度分布特征研究

万秀红^{1,2}, 石玉成¹, 卢育霞¹, 刘琨¹, 盛志强¹, 李倩¹, 屠泓为²

(1.中国地震局兰州地震研究所,甘肃兰州 730000; 2.青海省地震局,青海西宁 810001)

摘要:本文以芦山地震为例,收集了70个该地震的强震波形记录,分析了峰值加速度随震中距的变化特征,讨论了空间加速度变化过程及相关波形传播特征,并运用计算获得的峰值加速度数据,根据经验加速度及烈度关系确定了芦山地震空间烈度分布,得出的最大烈度为IX度,地震灾害的重灾区位于芦山、宝兴区域,VIII度以上烈度区主要分布在以芦山为中心及以宝兴、天全、雅安、名山等地的交汇区域,V度以上烈度分布主要沿龙门山断裂带的灌县—安县断裂两侧呈NE向为长轴分布特征,所得到的烈度结果与中国地震局给出的较相似。另外,研究结果认为本次地震的时段峰值记录表明其初始破裂是以近乎纯逆断层性质的地震,与哈佛大学给出的此次地震震源机制解较为一致;峰值加速度的高值分布特征显示出了断裂构造对峰值加速度有一定的影响。实践表明本方法具有一定的实用性和可靠性,可为快速抗震救灾提供参考。

关键词:芦山地震; 加速度动态变化; 地震烈度分布

中图分类号:P315.9

文献标识码:A

文章编号:1000-0844(2013)04-900-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.04.900

Research on the Dynamic Change of Acceleration and Seismic Intensity Distribution of the Lushan $M_s7.0$ Earthquake

WAN Xiu-hong^{1,2}, SHI Yu-cheng¹, LU Yu-xia¹, LIU Kun¹, SHENG Zhi-qiang¹,

LI Qian¹, TU Hong-wei²

(1.Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou Gansu 730000, China;

2.Qinghai Earthquake Administration, Xining Qinghai 810001, China)

Abstract: In order to acquire the disaster loss assessment data accurately and quickly when a strong earthquake occurs, we need both the detailed information about the structural features of the earthquake occurring region and reliable seismic observation data. After the huge earthquake of Wenchuan $M_s8.0$ on May 12th, 2008, many observation stations have been deployed and some important research results have been obtained in the Longmenshan fault zone by the China Earthquake Administration (CEA), which also provided valuable data for investigating the Lushan $M_s7.0$ earthquake of April 20th, 2013. By analyzing the seismic waveform data recorded by 70 strong-motion seismographs, we reveal the variation characteristics of the peak ground acceleration (PGA) for different epicentral distances, discuss the spatial acceleration dynamic change and the related waveform propagation features, and calculate the seismic intensity distribution of the Lushan $M_s7.0$ earthquake based on the obtained PGA in this study and empirical formulae. Our results indicate that the highest seis-

投稿日期:2013-03-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51248005);中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目(2012IESLZ02);中国地震局星火计划(XH12051Y)

作者简介:万秀红(1983-),女(汉族),陕西汉中,硕士研究生,主要从事地震工程研究. E-mail:waxiuhong@sohu.com

通讯作者:石玉成(1966-),男(汉族),山东人,博士,研究员,主要从事地震工程研究工作. E-mail:shiyu@gsb.gov.cn

mic intensity is about IX degree and both the Lushan and Baoxing regions are among the severely afflicted areas. Areas in which the seismic intensities are above VIII are mainly located in the center of Lushan and jointly in the regions of Baoxing, Tianquan, Ya'an, Minshan, etc. Furthermore, seismic intensities above V have a NE long axis distribution along both sides of the Guanxian-Anxian fault in the Longmenshan fault zone. The characteristics of the seismic intensity shown in this study are consistent with the results reported by the CEA. In addition, the PGA shows that the initial rupture of the Lushan earthquake has a thrust fault, which agrees well with the focal mechanism solution of Harvard University. It is also noted that the large fault probably has an effect on the PGA distribution. As a result, our method of analysis is feasible and stable, and it can offer important references for earthquake relief work to the government.

Key words: Lushan earthquake; acceleration dynamic change; seismic intensity distribution

0 引言

地震发生后,如何对灾区做出快速、准确的灾害损失评估一直是地震学家研究的重点课题。尽管地震后可以快速得到震中位置和震级,但由于震中距、场地条件影响^[1-3],灾害分布也存在不确定性。因此这项研究的意义在于可以使应急救援工作发挥更加有效的作用。最近几年,很多专家在峰值加速度、地震烈度分布、场地条件的影响等方面的研究都做了很多工作,得出很多研究成果^[4-6]。一些专家通过改进震级强度来测定场地响应情况,在烈度分布方面做了相应的研究^[7-8],Diego A等^[9]运用PGA、PGV、震级、震中距及多重非线性统计改进了震级烈度的预测方式。胡聿贤院士^[10]在论述烈度同地面运动强度之间的关系时指出,在考虑烈度与加速度峰值之间的关系时,应考虑震级的因素。对同一烈度,由于震级的不同,加速度可以在一个数量级之间变化。峰值加速度PGA很早就被看作是表示地震动强弱的物理量,相应的研究也最多。近年来众多地震学者通过对强震动记录的分析,在峰值加速度分布及峰值加速度衰减、烈度分布方面做了进一步的研究^[11-14]。这一系列研究成果为地震烈度精细研究奠定了很好基础。但关于加速度动态变化等方面的研究尚比较鲜见,故本文以前人研究成果为基础,拟以2013年4月20日四川省雅安市芦山县境内的 $M_s7.0$ 级地震为例,对该地震加速度动态的变化及烈度分布特征等方面进行初步研究。

根据中国地震台网中心信息,芦山 $M_s7.0$ 级地震震中位于 30.3°N , 103°E ,震源深度约13 km,最大烈度为IX

度。这是我国继2008年汶川 $M_s8.0$ 及2010年玉树 $M_s7.1$ 地震后的又一次有重大伤亡的地震事件。地震发生后,我们收集了震中周围70个台站的强震加速度波形数据,对该地震的烈度分布、峰值加速度随时间变化等方面进行了快速提取和计算,并取得一系列认识,研究表明这种通过强震数据快速计算空间烈度分布和震害分析,对及时了解灾害分布特征、快速抗震救灾等方面均具有重要意义。

2 数据及处理

本文用到的数据为芦山震中周围强震仪器的加速度波形记录,采样率为200 Hz,单位为 cm/s^2 ,共约70个台站,地震及台站分布如图1所示。一般强震仪器是强震发生后自动触发波形记录的,正常情况下会记录到地震波到达前20 s左右以后的波形数据。强震发生后,我们可以马上回收这些数据进行震害分析,尤其是地震烈度空间分布分析,可为抗震救灾提供可靠的参考依据,进而还可进行多方面深入研究。

首先将获取的数据用平均值法进行基线校正,其目的是将波动的中心轴线尽可能的靠近 $y=0$ 的二维坐标轴,将偏离 $y=0$ 直线太多的台站数据仅作为参考而不参与计算。然后提取加速度时在进行绝对值计算,进而通过程序提取不同仪器记录的三分量最大值,见公式(1)。

$$S_{ij} = (\text{Max}(|a_{ij}|), \text{lon}_i, \text{lat}_i) \quad (1)$$

式中, S 为台站, a 为加速度值, lon 为经度, lat 为纬度, i 为台站编号,为台站各分量编号, $j=1,2,3$ 分别代表同一台站的东(EW)、北(NS)、垂直(UD)分量。

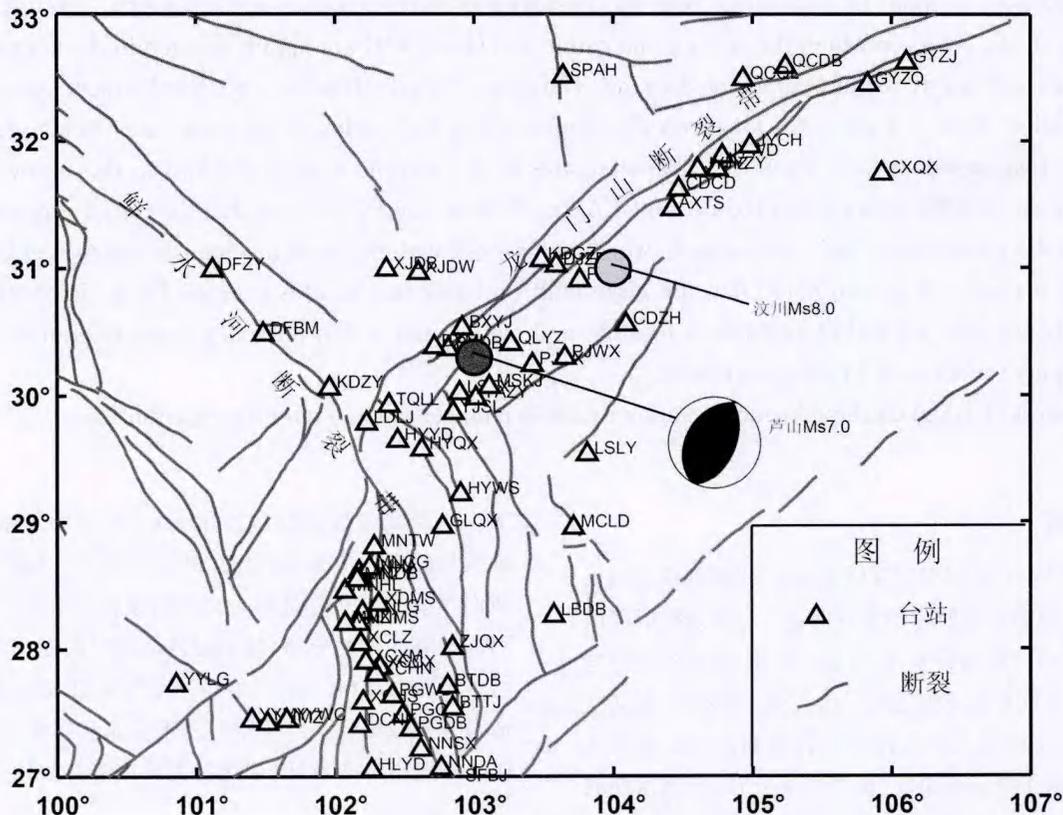


图1 芦山地震强震数据台站空间分布及震源机制解
 Fig. 1 Spatial distribution and focal mechanism solution of Lushan strong earthquake stations

图2为各台站记录的峰值加速度与震中距的关系图。由于考虑到台站分布不均匀及分析的合理性,运用二维线性插值法进行相关空间分布图的理论勾画。如图3、图5均为运用本方法做出的空间数据分布图。

为较合理的确定芦山地震烈度分布,我们对峰值加速度进行了计算。对于烈度的分析,参照 Worden 等^[15]给出的烈度与峰值加速度的关系式:

$$MMI = \begin{cases} 1.78 + 1.55 \lg(PGA) & \lg(PGA) \leq 1.57 \\ -1.60 + 3.70 \lg(PGA) & \lg(PGA) > 1.57 \end{cases} \quad (2)$$

式中 MMI 为地震烈度, PGA 为峰值加速度, 单位 cm/s^2 。通过计算得出了烈度分布(图5(b))。

2 结果分析

如图1的台站及地震分布图所示,本文所选取的强震记录台最远的震中距约390 km,最近的台站距离震中

约20 km,根据峰值加速度与震中距之间的关系画出了加速度随震中距变化的图(图2(a)),图中分别是峰值加速度三分量(EW, NS, UD)随震中距的变化情况。数据表明加速度在震中距30 km区域内有一个明显的突升过程,接下来开始下降,至120 km范围后,峰值加速度开始明显下降。根据台站的分布情况,我们分别提取了震中东北部及西南部的台站记录(见图2(b)及(c)),可以看出西南部100 km范围内峰值加速度明显高于东北部的记录值,这表明南部受到的冲击力明显大于东北部。另外,离极震区最近的台站 BXDB 台东西分量数据达到 1280 cm/s^2 ,而该仪器的其它方向均小于这个数值,考虑这个数值与邻近台站记录到的差别太大,分析其原因可能是局部场地效应所致,不一定可靠,故予以舍去,最后根据邻近台站相关性,统计得出最近台站的峰值加速度的三分量数值分别达到了 $400 \text{ cm/s}^2, 600 \text{ cm/s}^2, 280 \text{ cm/s}^2$ 。

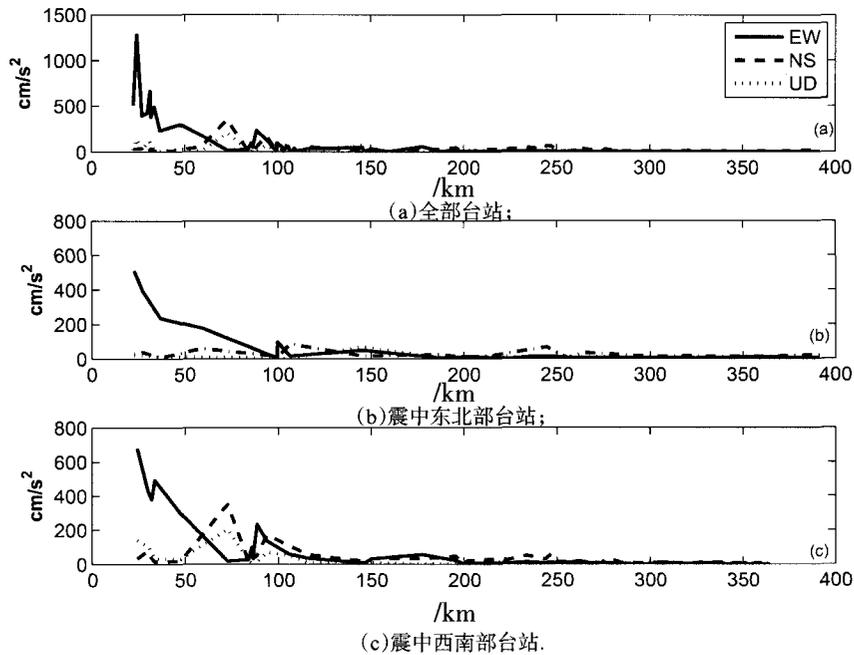


图2 峰值加速度随震中距的变化

Fig. 2 Variation of peak acceleration with epicentral distance

图3为运用前述的二维数值线性插值得到了峰值加速度空间分布图,图中加速度单位为 cm/s^2 ,通过色标对比,可以明显看出震中区域的大致影响范围,同时可观察到东西向(EW)和南北向(NS)的加速度在极震区附近均有NNW向的高值形态分布,而垂直向(UD)的高值变化范围较小。根据近距离压缩波和膨胀波的传播原理,分析认为,主压力方向应该是NNW向,参考图1的断裂分布,认为主压力源基本与龙门山断裂带垂直,构造背景和相关信息均表明,台站记录数据的空间分布状态及断层展布符合这种分析观点,哈佛大学GCMT结果也表明了本次地震的性质为逆断层,主压应力轴为NNW向,进一步证明了本分析的合理性。需要说明的是,本文运用的是台站仪器记录数据,而不是真正意义上的极震区的加速度,在初始时间内因台站还没有接收到相关波动信息而会出现一定偏差,当极震区邻近台站均接收到波形数据后,这种偏差将得到矫正。速度的分布也明显显示出波动的峰值分布方向。

关于地震加速度动态变化分析。是需要有地震仪器密集分布和正常记录才可以做的研究,对震源破裂过程的初步认识和地表破坏过程的了解均有重要意义。本文尝试对芦山7.0级地震以IASPEI91模型,选取P波速度为 $4\sim 6\text{ km/s}$,S波波速为 $2.3\sim 3.4\text{ km/s}$,运用三分量数值进行不同时间段的等效加速度计算,得出不同时间段的峰值加速度,并根据提取的信息进行空间数值分布计算和时空动态变化分析,讨论峰值加速度的传播特征和相应破坏的

动态变化,根据地震起始时间为起算数据以每 5 s 做一个峰值扫描,如图4为得到的加速度到达时程图,将最早记录到地震波形的起始时间定义为初始时间,将 0 s 至提取信息的时间点时段内的最大加速度值作为各台站的时段峰值,即 0 s 时台站未接收到明显的变化;根据数据及图1、图4可以看到, 5 s 时已有几个台站接收到了P波数据,数据开始有明显变化,芦山、宝兴、名山、天全等部分区域开始有感,数值显示波形有呈以NW向为长轴的一个椭圆型传播方向的特征,引起这种传播方向原因很多,震源区速度结构的不均匀性与地震破裂性质都有可能引起这种现象,本文的观点倾向于这种传播特征为地震的破裂性质引起的;理论计算最近台站的S波到达时间为 7 s 以后, 10 s 时离震中最近台站的时段峰值数据陆续到达,表明破坏过程开始; 15 s 时的时段峰值变化方向仍以NW方向椭圆特征为主; 20 s 时宝兴、芦山、名山等区域S波的峰值到达,明显为NW向,严重灾害开始发生,但西南区域波峰有转折变化现象; 25 s 时空间上开始表现为在NW向传播的基础上向北东向扩展; 30 s 时波峰分布显示为近圆形分布; 35 s 时西偏南区域有一峰值偏移高值区域; 40 s 以后,极震区域的时段峰值均已到达,故高值区域已无变化,仅仅是外围区域的峰值陆续到达而出现小幅变化,但对灾害已无显著影响。限于篇幅,本文未将 55 s 以后的动态变化图按每 5 s 罗列在图4中,只将最后记录时间(150 s)的时段峰值加速度图罗列在图5(a)中,即最终的峰值加速度。综合上述分析认为,本次地震的严重灾害

时间段为地震发生后的 10 s~35 s, 因为在这个时段的可造成破坏性的峰值加速度陆续到达, 根据数据记录认为震感最为强烈的区域分别为宝兴、芦山、雅安、名山等的交汇区域, 地震破坏最为严重的区域也分布于这一带。

动态变化分析的另一个意义在于可以用于研究地震破裂后波的传播特征。可由传播特征分析相关地震的破裂性质, 同时可以依据动态峰值加速度而确定烈度变化过程, 可以详细的分析地震灾区的破坏过程。对图 4 的数据变化形态分析, 可以认为该地震主压力源来自于 NNW 向, 最初的地震断层破裂性质符合逆断层波动传播特征, 30~35 s 有向西南发生次生破裂的趋势。参阅哈佛大学给出的本次地震 GCMT 解, 震源机制解亦表明本次地震的性质为近于纯逆断层性质, 略有走滑分量, 表明本文数据计算得到的分析结论是合理的。因此根据台站动态峰值波动记录分析地震的破裂形态、烈度分布分析等方面研究都是有意义的。

我们根据前述的信息对地震烈度分布进行分析, 结合前人研究成果^[7-14], 可认为影响烈度最大的因素为峰值加速度(以下简称为 PGA), 故本文进行了 PGA 计算, 并根据这些数据确定烈度分布, 图 5 为计算得出的 PGA 及烈度分布图。PGA 显示出有一个 NNW 向的高值分布带, 而在北东向存在一个次高值分布带(图 5(a)), 根据对该区域断层的分析, 显示这个高值区域的走向基本与龙门山断裂带垂直, 而次高值分布区域基本是沿着龙门山断裂带方向。分析认为 PGA 动态变化特征符合逆冲性质为主的地震数据记录状态, 本文根据波的辐射时序特征推断本次地震可能破裂特征为逆断层, 与哈佛大学 GCMT 震源机制解结果(图 1)及张勇等^[16]、杜方等^[17]给出的结论是一致的。统计表明, 逆断层地震损坏最为严重的区域多为断层上盘, 而图 5(b)的烈度分布也显示出了这种特性, 极

震区最高烈度为 IX 度, 与中国地震局给出最高烈度和烈度空间分布范围基本吻合^[19], 均是以 NE 向为长轴的烈度分布状态, 例如, V 度以上的分布特征为以 NE 向为长轴的一个椭圆状分布, 与中国地震局给出的烈度分布基本一致; 存在一些不同的方面主要表现为中国地震局的 VI 度为一个椭圆状分布, 而本文给出的烈度分布不是十分规则。考虑到中国地震局的烈度分布图是基于人为调查结果, 受接受调查的居民、建筑破坏、滑坡等分布及样本量的限制, 根据这些结果勾画的烈度分布图有一定的人为误差。而本文的烈度分布结果是基于台站的记录和空间分布得出的, 可能部分台站存在局部场地效应而造成误差, 台站分布不均匀和密集都会对分析结果造成影响。但根据仪器记录数据的计算是定量的分析, 不存在主观影响, 而根据调查信息得出的结果为定性的分析, 可能受人为影响更为大一些。随着强震仪器的增多和均匀分布, 运用数据分析烈度分布的优势将会更加显现出来。若从 IV 度烈度开始分析, 见图 5(b), 可以明显的看出存在两个优势的分布方向, 一个为沿龙门山断裂分布的优势方向, 另一个为沿鲜水河断裂带分布的优势方向, 根据邓起东对活动断层的研究^[18], 本次发震断层为龙门山断裂带上的灌县-安县断裂, 故 IV 度区是沿这个断裂方向即 NE 向为优势分布的, 而在西部区域被鲜水河断裂所限制, 显示有微弱的 NNW 向分布特征, 这说明了烈度的空间分布是受构造断层分布影响的。

总之, 动态峰值加速度和确定的烈度分布图都说明本次地震的重灾害区域为芦山、宝兴、以及邻近的名山、天全县部分区域, 芦山、宝兴局部区域的烈度可达 IX 度以上, 而名山及天全的烈度可达 VIII 度以上, 泸定、荥经、洪雅、蒲江、邛崃等区域烈度达 VII 以上, 事实也验证了这一计算结果。

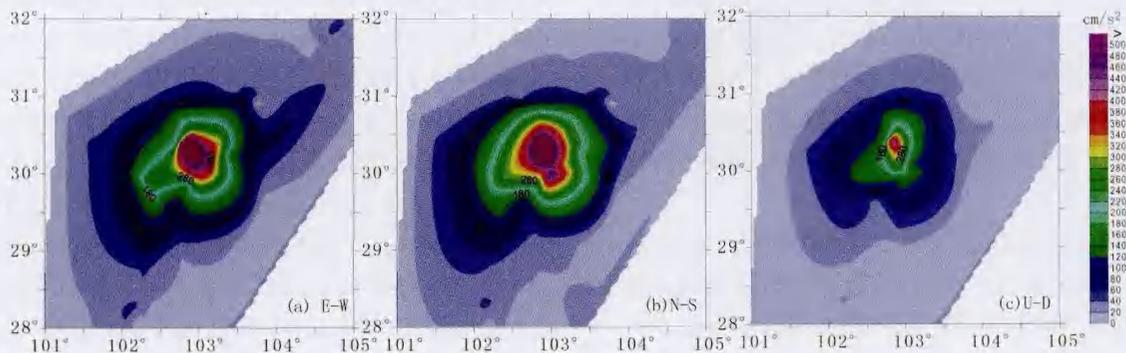


图 3 三分量加速度空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of three component acceleration

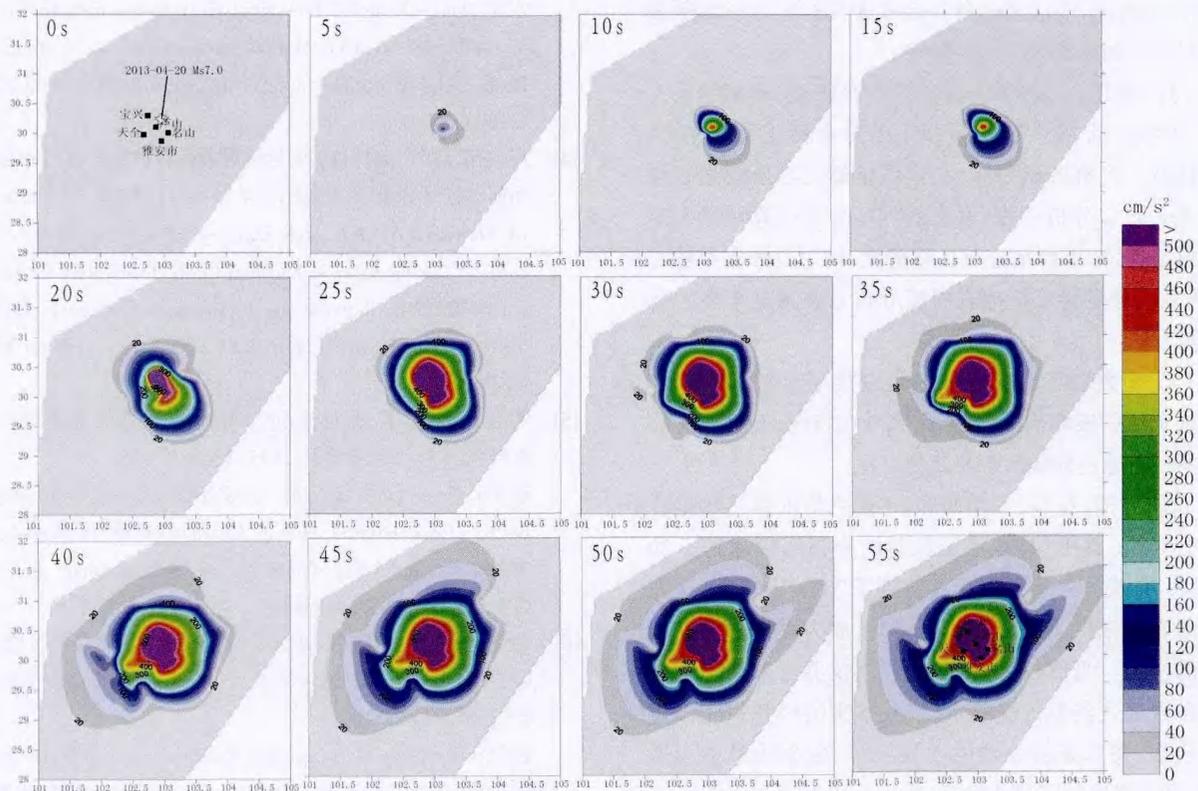


图4 峰值加速度动态变化
Fig. 4 Dynamic changes of peak acceleration

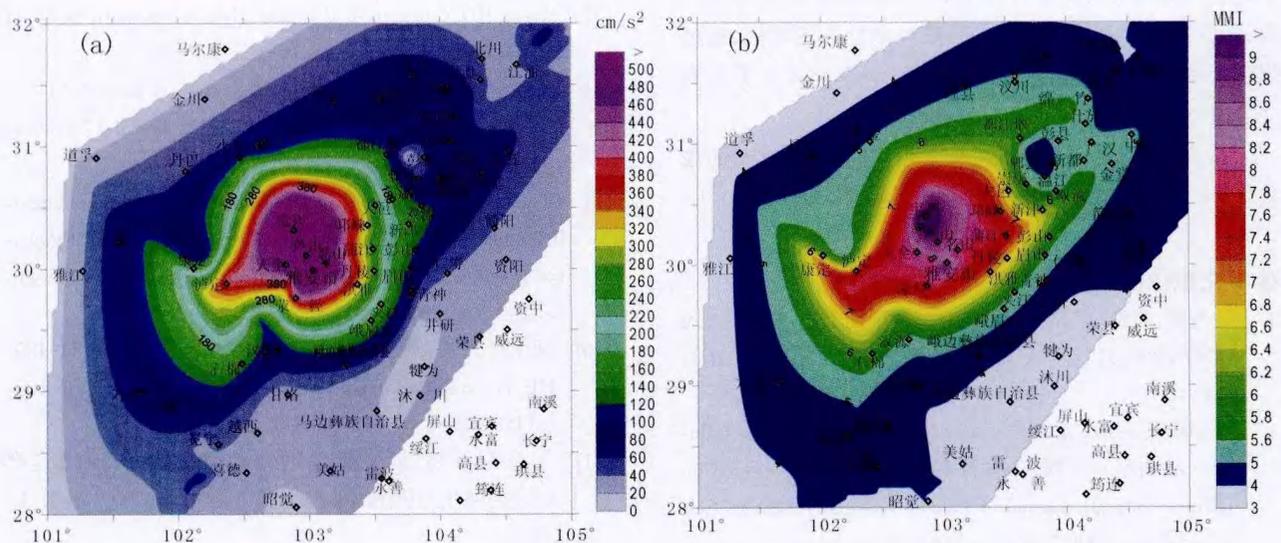


图5 峰值加速度及烈度分布
Fig. 5 Distribution of peak acceleration and intensity

3 结论

通过对芦山地震强震数据的计算和结果分析,初步得出如下结论:

(1) 极震区峰值加速度的三分量(EW,NS,UD)数值

分别达到了 400 cm/s^2 , 600 cm/s^2 , 280 cm/s^2 以上。

(2) 峰值加速度的动态变化及传播特征表明,本次地震初始破裂是以近乎纯逆断层性质的地震,主压力显示为NNW向,与哈佛大学给出的此次地震震源机制解近乎一致,表明了分析的可靠性。另外,高值分布区域以

NNW向为特征,而次高值分布区域为NE向,显示出断裂构造对峰值加速度有一定的影响。

(3) 确定出的震源区最高烈度为IX度,得出的重灾区域为芦山-宝兴一带,V度以上的分布特征为以NE向为长轴的一个椭圆状分布,与中国地震局给出的烈度分布基本一致。分析认为,本文的烈度分布计算结果为定量分析结果,如果台站分布足够密集、均匀及数据质量可靠,那么这种定量分析地震烈度分布方法将是未来的发展趋势。

(4) 研究表明,本方法不仅可以及时计算烈度分布、快速确定地震破坏范围、判断灾害分布特征,而且还能够进一步分析地震破裂形态及变化过程。

众所周知,日本、美国西部、中国台湾的强震数据资料十分丰富,其中,日本强震仪器的分布间距达到了20 km左右,各类型强震仪器总和达到了2 500个以上,这为相关的研究提供了宝贵的数据资料,成为世界各国竞相借鉴的模板。当然,我国目前的强震仪器还未达到这样的分布密度及实时传输的条件,故本文的研究只能作为一种设想,将来强震仪器的明显增多、数据质量更为提高、数据能够进行实时传输时,我们就可以通过本方法实时得到用于救灾的烈度分布和相关高质量的数据参考资料,将具有更为重要的实用性和参考性。所以,本文对芦山地震加速度、烈度等方面的分析研究,尚属于探索阶段,随着强震台站的增多以及强震监测能力的增强,通过强震加速度记录数据定量分析地震影响区将是十分有意义的研究。

致谢:本文收集了四川省地震局、甘肃省地震局的强震资料,在此一并致以谢意!

参考文献(References)

- [1] 王秀梅,赵艳,李化明,等.震中距对不同类别场地峰值加速度的影响[J].佳木斯大学学报:自然科学版,2009,27(3):414-418.
WANG Xiu-mei, ZHAO Yan, LI Hua-ming, et al. The Influence of Epicenter Distance to Peak Ground Acceleration on Different Sites[J]. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition, 2009, 27(3): 414-418. (in Chinese)
- [2] 懂娣,周锡元,徐国栋,等.集集地震中场地条件对地震动特性的影响[J].地震地质,2006,28(1):22-35.
DONG Di, ZHOU Xi-yuan, XU Guo-dong, et al. Some Analyses on Effects of Site Classification on Ground Motion Characteristics in Chi-Chi, Taiwan Earthquake[J]. Seismology and Geology, 2006, 28(1): 22-35. (in Chinese)
- [3] 朱东生,虞庐松,陈兴冲.地震动强度对场地地震反应的影响[J].世界地震工程,2005,21(2):115-119.
ZHU Dong-sheng, YU Lu-song, CHEN Xing-chong. Influence of Earthquake Ground Motion Intensity on Site Earthquake Response[J]. World Earthquake Engineering, 2005, 21(2): 115-119. (in Chinese)
- [4] 卢大伟,姚凯,闵祥仪,等.兰州观象台存放台阵汶川 $M_s8.0$ 强震动记录分析[J].西北地震学报,2011,33(2):171-176.
LU Da-wei, YAO Kai, MIN Xiang-yi, et al. Strong Motion Records of Paking Array in Lanzhou Earth Observatory for Wenchuan $M_s8.0$ Earthquake and Preliminary Analysis[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(2): 171-176. (in Chinese)
- [5] 乔震元,刘本玉,张远富.汶川 $M_s8.0$ 级地震峰值地震动特性研究[J].西北地震学报,2011,33(1):92-95.
QIAO Zhen-yuan, LIU Ben-yu, ZHANG Yuan-fu. Research on the Peak Ground Motion Characteristics of Wenchuan $M_s8.0$ Earthquake[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(1): 92-95. (in Chinese)
- [6] 赵雯佳,徐平,林向东,等.2011年10月12日北京市石景山区 $M_2.1$ 地震近场加速度记录初步分析[J].西北地震学报,2013,35(1):183-189.
ZHAO Wen-jia, XU Ping, LIN Xiang-dong, et al. Near-field Acceleration Records and Preliminary Analysis of $M_2.1$ Shijingshan District Earthquake on Oct. 12, 2011, Beijing[J]. Northwestern Seismological Journal, 2013, 35(1): 183-189. (in Chinese)
- [7] Wood HO, Neumann F. Modified Meralli Intensity Scale of 1931[J]. Bull Seismol Soc Am, 1931, 21: 277-283.
- [8] Dengler LA, Dewey JW. An Intensity Survey of Households Affected by the Northridge, California, Earthquake of 17 January 1994[J]. Bull Seismol Soc Am, 1998, 88(2): 441-462.
- [9] Diego A Alvarez, Jorge E. et al. Prediction of Modified Mercalli Intensity from PGA, PGV, Moment Magnitude, and Epicentral Distance Using Several Nonlinear Statistical Algorithms[J]. Seismol, 2012, 16: 489-511.
- [10] 胡聿贤.地震工程学[M].北京:地震出版社,1988:184-189.
HU Yu-xian. Earthquake Engineering[M]. Beijing: Seismological Press, 1988: 184-189. (in Chinese)
- [11] 于海英,王栋,杨永强,等.汶川8.0级地震强震动加速度记录的初步分析[J].地震工程与工程振动,2009,29(1):1-13.
YU Hai-ying, WANG Dong, YANG Yong-qiang, et al. The Preliminary Analysis of Strong Ground Motion Records from the $M_s8.0$ Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineer Vibration, 2009, 29(1): 1-13. (in Chinese)
- [12] 施伟华,李世成,李正光,等.宁洱 $M_6.4$ 地震的强震记录与地震烈度[J].地震研究,2010,33(4):337-344.
SHI Wei-hua, LI Shi-cheng, LI Zheng-guang, et al. Strong

- Motion Observation Records and Seismic Intensity of the Ninger $M_{6.4}$ Earthquake[J]. Journal of Seismological Research,2010,33(4):337-344.(in Chinese)
- [13] 刘旭宙,张元生,周民都,等.汶川 $M_{8.0}$ 地震兰州烈度速报强震动记录与初步分析[J].西北地震学报,2010,32(4):376-380.
LIU Xu-zhou,ZHANG Yuan-sheng,ZHOU Min-du et al. Strong Ground Motion Records of Wenchuan $M_{8.0}$ Earthquake from the Seismic Intensity Rapid Reporting Stations in Lanzhou and Its Preliminary Analysis[J]. Northwestern Seismological Journal,2010,32(4):376-380.(in Chinese)
- [14] 温瑞智,周宝峰,史大成,等.日本 $M_{9.0}$ 强震动观测与记录初步分析[J].国际地震动态,2011,388(4):16-21.
WEN Zhi-rui,ZHOU Bao-feng,SHI Da-cheng,et al. The Strong Ground Motion Observation and Data Analysis for off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake $M_{9.0}$ [J]. Recent Developments in World Seismology,2011,388(4):16-21.(in Chinese)
- [15] C B Worden,M C Gerstenberger,D A Rhoades,et al.Probabilistic Relationships between Ground Motion Parameters and Modified Mercalli Intensity in California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,2012,102(1):204-221.
- [16] 张勇,许力生,陈运泰.芦山4.20地震破裂过程及其致灾特征初步分析[J].地球物理学报,2013,56(4):1408-1411.
ZHANG Yong,XU Li-sheng,CHEN Yun-tai. Rupture process of the Lushan 4.20 Earthquake and Preliminary Analysis on the Disaster Mechanism[J]. Chinese Journal of Geophysics,2013,56(4):1408-1411.(in Chinese)
- [17] 杜方,龙锋,阮祥,等.四川芦山7.0级地震及其与汶川8.0级地震的关系[J].地球物理学报,2013,56(5):1772-1783.
DU Fang,LONG Feng,RUAN Xiang,et al.The $M_{7.0}$ Lushan Earthquake and the Relationship with the $M_{8.0}$ Wenchuan Earthquake in Sichuan,China[J]. Chinese Journal of Geophysics,2013,56(5):1772-1783.(in Chinese)
- [18] 邓起东,张培震,冉勇康,等.中国活动构造基本特征[J].中国科学:D辑,2002,32(12):1020-1030.
DENG Qi-dong,ZHANG Pei-zhen,RUAN Yong-kang,et al. China's Active Tectonic Characteristics[J].Chinese Science D, 2002,32(12):1020-1030.(in Chinese)
- [19] <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/124/197/20130426184832908150209/index.html>