

# 汶川地震震度分布与震源过程 相关性的初步研究<sup>1</sup>

吴 健 吕红山 刘爱文

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

**摘要** 汶川地震造成了靠近发震断层附近地区的工程结构的严重破坏, 由此导致了巨大的人员伤亡和财产损失。汶川地震后, 虽然目前还没有得到完整的强震记录, 但是作为震害宏观描述的地震震度, 在一定程度上反应了汶川地震近断层地震动与震源过程之间的相关性, 如近断层地震动的方向性效应和上盘效应。本文对此做了一些定性的分析, 认为高震度区的分布与震源机制和破裂过程存在一定的相关性, 并且在近断层地区很可能存在着较为显著的方向性效应和上盘效应。更详细的研究还需要在得到足够的强震记录后才能进行。

**关键词:** 汶川地震 震源机制 地震震度 上盘效应 方向性效应

## 概述

2008年5月12日发生的汶川8.0级地震, 是新中国成立以来破坏性最强、波及范围最广的一次地震。地震造成的大量房屋和其它工程结构的倒塌破坏, 是造成惨重人员伤亡的重要原因之一。震后国家地震现场应急工作队在第一时间, 以国家标准《地震现场工作第三部分: 调查规范(GB/T 18208.3-2000)》(中华人民共和国国家标准, 2000)和《中国地震震度表(GB/T 17742-1999)》(中华人民共和国国家标准, 1999)为技术标准, 开展了地震灾害调查工作。其中一个重要成果“汶川地震灾区地震震度分布图”发表在国家汶川地震专家委员会(2008)编辑出版的《汶川地震灾区地震地质灾害图集》中。本文作者作为应急工作队成员, 有幸参加了汶川地震的震度调查工作。根据《地震现场工作第三部分: 调查规范(GB/T 18208.3-2000)》第5.2条的规定, 地震震度的调查和评定“以房屋破坏程度和空间分布为重点, 在低震度区应包括人的感觉和器物的反应, 在高震度区应注意地面破坏和变形、地下水变化等”, 在汶川地震的高震度区中, 地震动是造成建筑物和工程结构破坏的主要原因之一。

震源过程和破裂方式与地震震度分布之间存在着一定的相关性, 这种相关性在过去发生

1 基金项目 中国地震局地球物理研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项 DQJB08B02 和 DQJB06A01 资助

【收稿日期】 2008-08-26

【作者简介】 吴健, 男, 生于1974年。助理研究员。2003年毕业于中国地震局地球物理研究所防灾减灾工程与防护工程专业, 获硕士学位。现主要从事地震危险性分析、地震动衰减关系和地震灾害预测等方面研究。Email: wujian@cea-igp.ac.cn

的 35 个地震实例中已基本得到证实 (陈颢, 1975), 在本次汶川地震中同样也发现了这种相关性。根据郝敏等 (2006) 的研究, 在台湾集集地震中根据《中国地震烈度表》评定的烈度, 在 4 个地震烈度较高的地区 (南投县 X 度, 台中县 IX 度, 苗栗县 VIII 度, 台北县 VII 度) 与地震动峰值加速度的相关系数达到 0.964, 与峰值速度、谱峰值加速度、谱峰值速度 3 个地震动参数的相关系数也都在 0.9 以上。因此, 在目前强震记录尚不可用的情况下, 可利用已得到的地震烈度作为地震动强度的某种等效的综合标度。

近 20 年以来, 随着几次较大地震中强震记录的积累, 一些近场强震记录表现出了与原有认识不同的分布特征, 例如断裂破裂的方向性效应 (Somervill 等, 1997)、上盘效应 (Abrahamson 等, 1996; 俞言祥等, 2001) 等。这些效应在近断层地区使得地震动的分布特性表现出了不同于较远地区分布特征的局部性特征, 从而使得近断层地区的工程结构所受到的地震动影响与原来认为的有较大的差异, 这将对今后的抗震设防和震后应急救援带来一些新的要求。一般认为, 这种近场地震动的分布特征与地震的震源特征相关。

本文将地震烈度作为地震动强度的一个表征, 并对地震烈度与震源特性的相关关系进行了一些初步的探讨。

## 1 汶川地震高烈度区分布特点

根据国家地震现场应急工作队的调查结果, 确定的汶川地震烈度分布如图 1 所示 (国家汶川地震专家委员会, 2008)。

从图 1 可以看出, 汶川地震的烈度分布符合我国地震烈度等值线一般呈椭圆分布的特征 (陈达生等, 1989), 并且符合我国西部川藏地区地震等震线内圈比较狭长的特征 (汪素云等, 2000)。但是, 汶川地震还具有一定的不同于其它地震的特征。从图 1 的 VIII 度及 VIII 度以上烈度等震线的形状及其分布来看, 汶川地震具有以下 3 个较为明显的特征: ①地震的震中位于极震区的一端; ②沿发震构造走向, 东北方向的等震线间距明显大于西南方向的等震线间距; ③沿垂直发震构造走向, 西北方向的等震线间距大于东南方向的等震线间距。

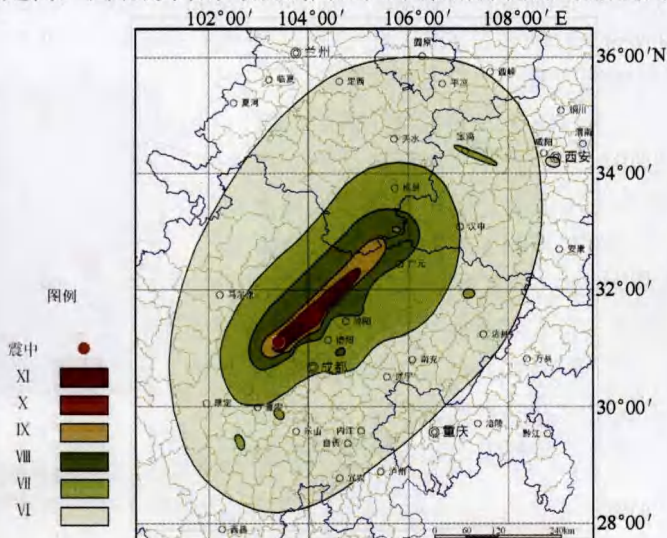


图 1 汶川地震烈度分布

Fig. 1 Intensity isoseismal map of Wenchuan earthquake

## 2 VIII度及VIII度以上地区地震烈度分布与震源破裂特征的相关性初步分析

### 2.1 震源机制及破裂过程

根据陈运泰等<sup>1</sup>的研究,汶川地震是一次以逆冲为主,兼有走滑分量的地震。震源破裂持续时间约为60s,沿发震构造向东北方向延伸(图2),主要由3个子事件组成,分别开始于破裂后的第15s、第17s和第48s,破裂长度约为300km,倾向西北。这样的破裂方式在震后进行的地表破裂调查(李勇等,2008)和地震灾区及周边地区地表变形测量<sup>2</sup>工作中基本得到证实。在震源过程中震源机制随着时间和空间在不断地变化,整个地震过程主要分为7个阶段,矩震级从7.1到7.6不等,开始时刻以逆冲为主,后来逐渐转变为走滑为主(图3)。

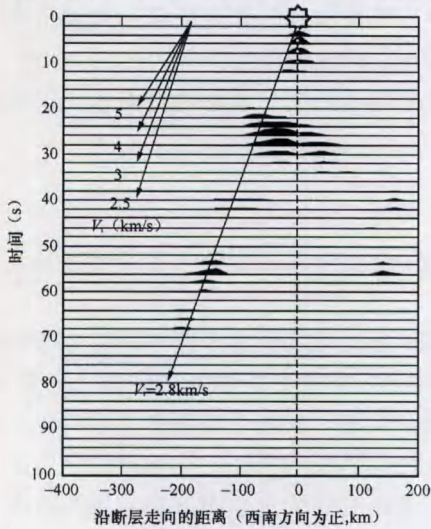


图2 破裂沿发震构造走向(230°)的传播情况  
Fig. 2 Rupture propagation along strike direction

### 2.2 高烈度区分布与震源过程

将图1中的烈度分布与图3中的各次子破裂的震源机制空间分布叠加在一起,如图4所示。从图4可以看出,地震过程的7个阶段的空间位置基本上被IX度区的外边界所包括(图3和图4中的红色实心圆为震中位置),其中的4个阶段(1次 $M_w$ 8.0、2次 $M_w$ 7.5和1次 $M_w$ 7.3)也基本上落在X度区内。2个烈度达到XI度的局部地区,在空间位置上也和3次主要破裂过程基本重合:距离震中较近的XI度区和第一、第二次破裂在空间上基本重合,另外1个XI度区和第三次破裂过程基本重合。

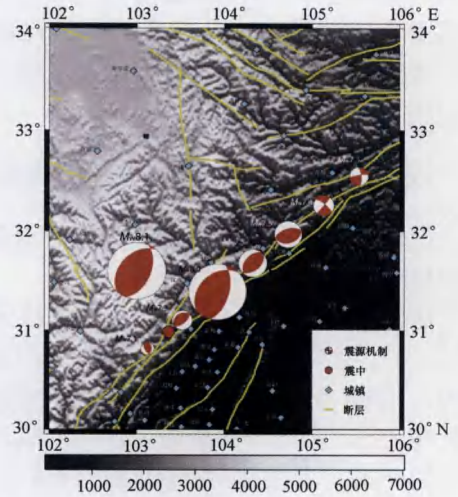


图3 震源机制随空间的变化<sup>1</sup>  
Fig. 3 Focal mechanism along the fault

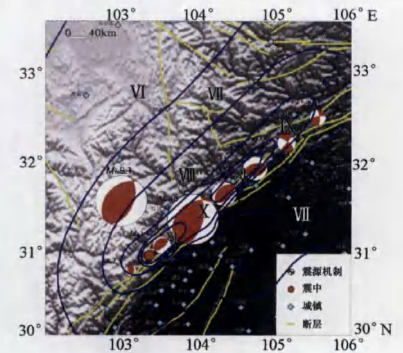


图4 震源过程与烈度分布的相关性  
Fig. 4 Earthquake source process and the intensity isoseismal in high intensity region

1 陈运泰, 许力生, 张勇等, 2008. 2008年5月12日汶川特大地震震源特性分析报告.  
2 国家测绘局, 中国地震局, 2008. 国家测绘局、中国地震局公告2008年第4号.

### 2.3 高烈度区分布与近场地震动特性

在近场地震动的特性中，破裂方向性效应和逆断层的上盘效应是两个主要的影响因素。为了对等震线的分布进行一些初步的定量分析，需要将等震线间距进行量化处理，如图 5 所示。由于东南侧 VIII 度区外边界起伏较大，不便于确定宽度，所以将其进行等效处理，划出近似位于平均位置的一条等效边界（图 5 中虚线段）。图 5 中剖面 AA' 的走向和位置基本上沿着破裂面，并向两端延伸至 VIII 度区外边界。在西南方向上与 XI 度区、X 度区、IX 度区、VIII 度区外边界，分别相交于 a1、a2、a3、a4 点，这样各个烈度区在此方向上的宽度分别为线段 a1—a2（X 度区）、a2—a3（IX 度区）、a3—a4（VIII 度区）的长度；在东北方向上的 4 个交点分别为 a1'、a2'、a3'、a4' 点，与西南方向类似，各个烈度区在此方向上的宽度分别为线段 a1'—a2'、a2'—a3'、a3'—a4' 的长度。剖面 BB' 穿过西南的 XI 度区中心并与 AA' 垂直，从中心向东南方向与 XI 度区、X 度区、IX 度区、VIII 度区外边界，分别相交于 b1、b2、b3、b4 点；向西北方向的 4 个交点分别为 b1'、b2'、b3'、b4' 点，由于图面在此位置较为拥挤，因此交点 b2、b3、b2'、b3' 没有标出。剖面 CC' 穿过东北的 XI 度区中心并与 AA' 垂直，各个交点的命名和在图上的表示与剖面 BB' 相同。图中各段长度及对应的比值见表 1。

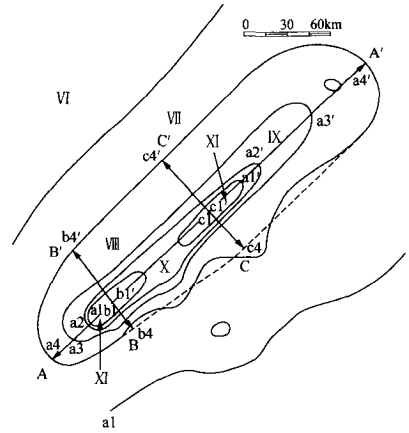


图 5 烈度分布的定量分析

Fig. 5 Quantitative analysis of intensity distribution

表 1 不同方向上各烈度区宽度及对应的比值

Table 1 Geometric parameters of intensity area (width, ratio of width and length) in different directions

剖面	烈度	方向 1	方向 1 宽度 L1 (km)	方向 2	方向 2 宽度 L2 (km)	L2/L1
AA'	X	a1—a2	3.4	a1'—a2'	24	7.1
	IX	a2—a3	19	a2'—a3'	69	3.6
	VIII	a3—a4	29	a3'—a4'	70	2.4
BB'	X	b1—b2	3.7	b1'—b2'	4.4	1.2
	IX	b2—b3	7.5	b2'—b3'	8.5	1.1
	VIII	b3—b4	11	b3'—b4'	39	3.5
CC'	X	c1—c2	3.3	c1'—c2'	5.7	1.7
	IX	c2—c3	4.3	c2'—c3'	12	2.8
	VIII	c3—c4	31	c3'—c4'	43	1.4

根据 Somerville 等 (1997) 的研究，断层破裂的方向性效应包括两个方面：①在断层破裂的传播方向上地震动水平分量平均值增大，而在破裂传播的反方向上地震动水平分量平均值减小；②平行于断层走向和垂直于断层走向的两个正交方向上的地震动存在系统性差异，对于地震动长周期成分，垂直断层方向的分量大于平行断层方向的分量。本文以地震烈度为研究对象，因此只能从第一个方面来考察是否存在方向性效应。汶川地震的破裂传播方向基本上是从震中开始，并沿着发震断裂持续向东北方向传播。从地震的等震线分布形态上看，VIII 度及 VIII 度以上烈度分布的范围（不含局部的烈度异常情况）沿着发震断裂呈狭长的近似椭圆的形状，在其东北方向端部相邻烈度区外边界的间距，明显大于西南方向端部相邻烈度区

外边界的间距(见图5和表1)。也就是说,在地震破裂的传播方向上烈度区的宽度要大于相反方向上的宽度。根据中国地震烈度表(GB/T 17742-1999),Ⅵ度到Ⅹ度区以房屋震害和其他震害现象综合考虑为主,Ⅷ度、Ⅸ度和Ⅹ度区的房屋分别以中等破坏、严重破坏和倒塌为主要破坏现象。地震动是导致建筑物这几种破坏的主要形式之一。在目前强震记录还不可用的情况下,利用地震烈度与地震动强度的相关性来描述宏观震害,可以定性的说明在汶川地震中由于破裂过程的单向传播,很可能导致了地震动的空间分布具有明显的方向性效应。

根据震源机制和相关地质构造背景研究结果可以确定,汶川地震在开始阶段以逆冲破裂为主,断层倾向西北(图3中从西南开始破裂的前4个阶段),即西北方向为上盘,然后转变为以走滑为主的破裂(图3中破裂的后3个阶段)。Abrahamson等(1996)对1994年美国加州Northridge地震的近场强震记录和其他逆断层地震的强震记录进行的研究表明,逆断层地震的上盘近场加速度峰值存在着一个系统性的增大。俞言祥等(2001)对1999年台湾集集地震的近场强震记录进行研究后也得到了类似的结论,即逆断层地震的上盘地震动明显大于下盘地震动。根据李勇等(2008)对汶川地震断裂的深部构造研究,在震源深度的位置上龙门山断裂带具有一定的倾角,与地表近似于直立不同,这就使得沿断层发生的逆冲破裂导致地表地震动的上盘效应成为可能。从图4可以看出,Ⅷ度、Ⅸ度和Ⅹ度区呈狭长形状,但这3个烈度的等震线形状沿长轴左右分布并不对称,发震断层的西北侧等烈度区的宽度(相邻烈度等震线间距)明显大于东南侧,这种现象在3个不同烈度区都有不同程度的体现(见图5和表1)。这种分布的形态说明,在发震断层的上盘受到的地震破坏要系统性的大于下盘。通过进一步的分析还可发现,这种不对称在发震断层的不同区段是有所不同的。在发震断层的西南端,这种不对称最为明显;而在东北端这种不对称现象就不明显(在东北端以Ⅷ度区的情况作为参照,见图5和表1)。如果不考虑烈度评定的不确定性和所受到的客观条件制约,则这种变化有可能与发震断层不同段落上的破裂机制相关:逆冲破裂为主的西南段上盘效应较为明显,而走滑破裂为主的东北段上盘效应微弱。

#### 2.4 上述讨论的局限性和实用性

这种直观的相关性似乎提示我们,震源特性与地震烈度分布之间也许存在着某种程度上的联系。但是由于在烈度评定中存在着一定的主观性,并且受到一些客观条件的限制,因此上述的分析需要在获得了足够的强震记录后才能进行深入的、定量的分析,以验证上述的结果。但同时也可以看到,地震烈度与震源特性之间确实存在着一定的相关性。这种相关性对于像汶川这样巨大的破坏性地震发生后,可以在仅有的实时获得的地震记录基础上,迅速判断出遭到毁灭性破坏区域的大致位置和范围,及时为震后应急和救灾提供重要的参考。同时这种方法与通讯、遥感、人员调查等相比,基本上不受到客观条件的限制和地震破坏的影响,具有不可替代的优势。

### 3 结论

本文讨论了地震烈度的分布与震源特征之间的相关关系并进行了一些初步的分析研究,得到了以下结论:

- (1) 汶川地震的Ⅸ度、Ⅹ度和Ⅺ度区与震源的破裂过程和破裂机制具有比较强的相关性。
- (2) 汶川地震的近断层地震动很可能同时存在较为明显的方向性效应和上盘效应。

以上结论是建立在烈度分布与地震动的相关性分析基础上得到的,对于近断层地震动的

特征, 还需要对强震记录进行定量分析才能得到确切的结论。因此, 此项工作还需要在对地震动记录进行分析的基础上深入进行。

## 参考文献

- 陈达生, 刘汉兴, 1989. 地震烈度椭圆衰减关系. 华北地震科学, **7** (3): 31—42.
- 陈颢, 1975. 测定浅震震源参数的宏观方法. 地球物理学报, **18** (4): 246—255.
- 国家汶川地震专家委员会, 2008. 汶川地震灾区地震地质灾害图集. 北京: 中国地图出版社.
- 郝敏, 谢礼立, 王家全, 2006. 9.21 台湾集集地震灾害最严重地区的烈度评定. 世界地震工程, **22** (4): 22—26.
- 李勇, 周荣军, 董顺利等, 2008. 汶川地震的地表破裂与逆冲-走滑作用. 成都理工大学学报 (自然科学版), **35** (4): 404—413.
- 汪素云, 俞言祥, 高阿甲, 阎秀杰, 2000. 中国分区地震动衰减关系的确定. 中国地震, **16** (2): 99—106.
- 俞言祥, 高孟潭, 2001. 台湾集集地震近场地震动的上盘效应. 地震学报, **23** (6): 615—621.
- 中华人民共和国国家标准, 2000. 地震现场工作第三部分: 调查规范 (GB/T18208.3-2000). 北京: 中国标准出版社.
- 中华人民共和国国家标准, 1999. 中国地震烈度表 (GB/T17742-1999). 北京: 标准出版社.
- Abrahamson N.A. and Somerville P.G., 1990. Effects of the hanging wall and footwall on ground motions recorded during the northridge earthquake. Bull. Seism. Soc. Am., **86** (1B): S93—S99.
- Somerville P.G., Smith N.F., W. Graves R. et al., 1997. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture direction. Seis. Res. Lett., **68** (1): 199—222.

# Preliminary Study on Correlation between Seismic Intensity and Earthquake Source Process in Wenchuan Earthquake of Sichuan, China

Wu Jian, Lu Hongshan and Liu Aiwen

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract** The  $M_s 8.0$  huge Wenchuan earthquake in Sichuan caused heavy casualties and serious economic losses because of engineering structures damage in high earthquake intensity regions. At present, the strong ground motion records are still in processing and can not be used in studies. However, earthquake intensity isoseismal, especially in near source region, as a macroscopic description of distribution of strong ground motion, shows the relativity with earthquake source process in some extent. In this paper, some qualitative analyses are carried out to study the characteristics of rupture process, such as rupture directivity and hanging wall effect. The further studies are needed after the strong ground motions are available.

**Key words:** Wenchuan earthquake; Earthquake source process; Earthquake intensity; Hanging wall effect; Rupture directivity effect