

doi:10.3799/dqkx.2014.175

# 汶川 $M_s 8.0$ 地震强震动基线改正 及其在位错反演中的初步应用

邵志刚<sup>1</sup>, 周朝晖<sup>2</sup>, 徐晶<sup>3\*</sup>, 张永久<sup>2</sup>

1. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

2. 四川省地震局, 四川成都 610041

3. 中国地震局第二监测中心, 陕西西安 710054

**摘要:** 通过研究近场强震动记录, 发现汶川  $M_s 8.0$  地震近场峰值加速度在空间上存在较明显的上盘效应和方向性效应, 与汶川引起的地质灾害空间分布具有较好的一致性。但在所有强震仪所记录的汶川  $M_s 8.0$  地震同震加速度记录积分所得地壳同震速度中, 有的台站数据存在典型的线性偏移, 有的台站数据除线性偏移外还存在明显的非线性偏移。采用非线性基线改正方法处理汶川  $M_s 8.0$  强震同震记录, 改正后所得同震位移明显要比线性基线改正更合乎实际情况。以强震动、GPS 和 InSAR 同震位移处理结果做约束, 反演了汶川  $M_s 8.0$  地震同震位错分布, 对于汶川  $M_s 8.0$  地震主要同震破裂断裂(北川—映秀断裂), 强震动反演结果不仅较好地刻画了汶川  $M_s 8.0$  地震同震主断裂上地表破裂空间分布详细变化特征, 同时也较好地反映北端破裂衰减情况, 该结果表明: 强震动资料可以为强震后的救援和灾害评估等工作提供具有参考价值的研究结果; 另一方面, 受数据数量的制约, 用强震动改正后位移反演所得位错分布中仅汉旺断裂南段存在较为明显位错, 强震仪布设时应更多地考虑是否相对均匀地分布在具有发震潜势的断裂周缘, 以期更好地在震后应急救灾中发挥更好的作用。

**关键词:** 汶川  $M_s 8.0$  地震; 强震动; 基线改正; 位错反演; 天然地震。

中图分类号: P315.6

文章编号: 1000-2383(2014)12-1903-12

收稿日期: 2014-01-23

## Baseline Correction of Strong-Motion Records of Wenchuan $M_s 8.0$ Earthquake and Its Primary Application on Dislocation Inversion

Shao Zhigang<sup>1</sup>, Zhou Chaohui<sup>2</sup>, Xu Jing<sup>3\*</sup>, Zhang Yongjiu<sup>2</sup>

1. Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2. Sichuan Earthquake Administration, Chengdu 610041, China

3. Second Crust Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, China

**Abstract:** Based on the near-field strong-motion records, the distribution of peak acceleration near the Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake exists obvious hanging wall and directivity effect, it is consistent with the distribution of geological hazard caused by Wenchuan earthquake. However, among the crustal co-seismic velocities which are achieved by integrating the acceleration of Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake recorded by strong motion seismograph, there is a typical linear offset for some stations, and there are also obvious nonlinear offsets besides linear offset for some other stations. Using the approach of nonlinear baseline correction to process co-seismic records of Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake, the co-seismic displacement corrected by the nonlinear approach obviously is in better agreement with actual situation than the linear baseline correction approach. As a constraint of displacement processing results of strong-motion, GPS and InSAR, this paper inverts the distribution of co-seismic dislocation of Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake. For the main co-seismic rupture fault of Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake (Beichuan-Yingxiu fault), the inversion result of strong-motion is not only nicely characterize the detailed variation of distribution of co-seismic surface rupture on the main fault, but also well reflect the rupture attenuation on northernmost fault. The results show that,

**基金项目:** 国家科技支撑计划项目(No.2012BAK19B0104); 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(No.2014IES010106)。

**作者简介:** 邵志刚(1977—), 副研究员, 主要从事地球动力学与地震活动性方面的研究。E-mail: shaozg@seis.ac.cn

\* 通讯作者: 徐晶, E-mail: xjinggis@163.com

strong-motion data could provide valuable results for post-seismic rescue and disaster assessment. In addition, due to data limitations, for the location distribution which inverted from displacement corrected by strong motion, only the southern section of Hanwang fault exists obvious dislocation. It reveals that we should emplace the strong motion seismographs relatively uniform around the potential seismogenic faults, in order to play a better role in the post-seismic emergency rescue.

**Key words:** Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake; strong-motion; baseline correction; dislocation inversion; earthquake.

## 0 引言

2008 年 5 月 12 日,在青藏高原与华南地块交界的龙门山断裂上发生了四川汶川  $M_s 8.0$  地震,造成重大人员伤亡和经济损失。不同学科的研究人员从不同角度就汶川  $M_s 8.0$  地震的地表破裂(徐锡伟等,2008)、位错反演(王卫民等,2008;王敏,2009;许才军等,2009)、地质与地球物理学背景(张培震等,2008;闻学泽等,2009)、孕震机理(腾吉文等,2008)、震后效应(Toda *et al.*,2008;单斌等,2009)等方面进行了广泛的探讨,取得了众多重要认识,为相关研究提供重要参考与可靠依据。此次地震除四川省、甘肃省和陕西省有强烈震感外,还在中国境内的北京、上海、天津、宁夏、青海、山西、山东、河北、安徽、广西、西藏、江苏、重庆、贵州、云南、内蒙古、浙江、辽宁、福建和台湾等省、市、自治区产生不同程度的震感。在汶川  $M_s 8.0$  地震中,中国数字强震动观测台网系统中有 460 个台站记录到了同震加速度记录,共获得约 1 310 条的主震记录,这些资料为相关研究提供了宝贵的基础资料(Li *et al.*,2008)。“十五”期间四川省境内布设了 200 余套强震动记录仪器,191 个台站获得了汶川  $M_s 8.0$  地震同震记录,图 1 为汶川  $M_s 8.0$  地震地质构造与近场强震动台站分布情况(卢寿德等,2008)。

出于对建筑抗震问题研究的迫切性要求,1923 年日本关东大地震后,日本地震学家认为首先要设法度量地震引起的实际地面运动的强度和过程。日本地震学家率先提出了记录地震加速度时间过程的仪器设计方案;1932 年美国研制出 USCGS 型号的强震加速度仪;1932 年 3 月 10 日在加州获得第一个地震加速度记录;1964 年阿拉斯加大地震后,美国的一些城市对于新建筑做了一些规定,例如:芝加哥市明文规定,凡新建 6 层以上,面积  $5574 \text{ m}^2$  以上的建筑必须设置 3 台强震仪(谢礼力和于双久,1982)。近年来,如何有效利用强震动资料,并且更好地为震后快速灾害评估和及时救援提供有效科技支撑(Wang *et al.*,2011)逐渐成为学术界更为关注的问题。本文主要针对汶川  $M_s 8.0$  地震近场强震动资

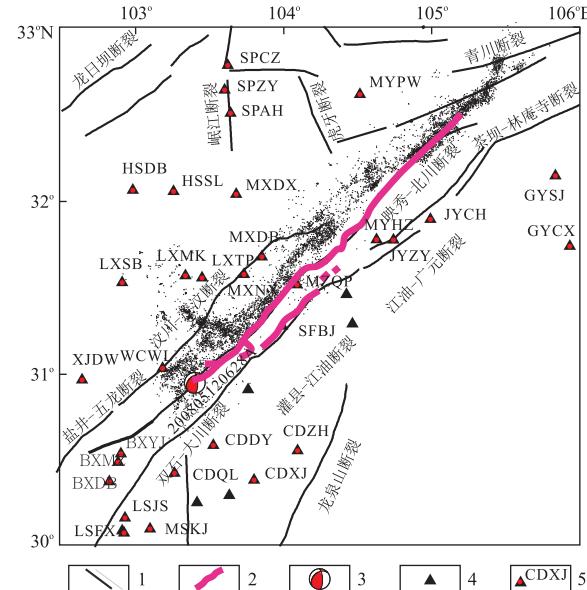


图 1 汶川  $M_s 8.0$  地震地质构造与近场强震动台站分布  
Fig.1 Regional tectonic and distribution of strong-motion networks near the Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake

1. 断裂;2. 汶川  $M_s 8.0$  地震同震地表破裂;3. 汶川  $M_s 8.0$  地震震源机制解;4. 汶川  $M_s 8.0$  地震强震记录台站;5. 本文所用强震台站及名称;紫色为同震地表破裂(徐锡伟等,2008);黑色三角为汶川  $M_s 8.0$  地震近场强震动台站;黑色点为汶川  $M_s 8.0$  地震余震(截止到 2008 年 12 月 31 日)

料,进行加速度基线改正,利用强震动资料得到同震强震位移,并尝试将其应用于汶川  $M_s 8.0$  地震同震位错反演。

## 1 汶川 $M_s 8.0$ 地震区域地震地质背景与近场强震动观测

2008 年 5 月 12 日四川汶川  $M_s 8.0$  地震发生在青藏高原东缘的龙门山断裂中北段。龙门山断裂带地处南北地震带中段地区,是巴颜喀拉活动地块与华南活动地块之间的边界带,东西两侧分别为成都盆地和川西高原。包括龙门山断裂带在内的南北地震带为中国大陆地区地震活动最为强烈的地区之一,该地震带历史上有记载的  $M_s 7.0$  以上地震达 72 次,其中  $M_s 8.0$  以上地震 9 次。自 1900 年以来南北

带共计发生  $M_s 7.0$  以上地震 35 次,占同期中国大陆西部强震总数的 55% (中国地震局监测预报司,2009).

由于印度板块对欧亚板块的强烈推挤作用,青藏高原整体发生强烈的隆升现象,同时,青藏高原的各地块还产生向东和南东方向的水平挤出运动 (Tapponnier *et al.*, 1982; Zhang *et al.*, 2004), 并受到华北地块鄂尔多斯和华南地块四川盆地等高强度块体的阻挡, 在青藏高原东缘形成局部挤压推覆构造带(邓起东等,1994), 包括巴颜喀拉活动地块与华南活动地块分界的龙门山推覆构造带. 巴颜喀拉块体属于青藏地块的次级块体之一, 在印度板块作用下深部壳幔物质向南东方向运移, 在龙门山断裂带受到相对坚硬的四川盆地阻挡, 其长达数千年持续作用, 和龙门山断裂带中段的中央与前山断裂的震间闭锁作用, 致使巴颜喀拉地块东端上地壳发生横向水平缩短变形和平行于断裂的水平右旋剪切变形(腾吉文等,2008; 张培震等,2008; 闻学泽等,2009).

野外科学考察表明, 2008 年 5 月 12 日汶川  $M_s 8.0$  地震同时使龙门山推覆构造带上 2 条 NW 倾向的叠瓦状逆断层(北川—映秀断裂和灌县江油断裂)发生地表破裂. 其中沿北川—映秀断裂展布的地表破裂长约 240 km, 为逆断层兼右旋走滑的地表破裂; 沿灌县—江油断裂上 90 km 范围内有地表破裂, 连续地表破裂长约 72 km, 为逆断层地表破裂(徐锡伟等,2008). 汶川  $M_s 8.0$  地震发生后, 不同学者以不同观测资料为约束, 反演得到了同震位错分布(许才军等,2009; 王敏,2009; Feng *et al.*, 2010; Shen *et al.*, 2009)或动态破裂过程(王卫民等,2008; 张勇等,2008). 虽然利用不同资料和不同方法, 其反演结果会存在些许差别, 但整体来讲, 位错滑动量相对较大的两个地区为江堰—映秀段和北川—青川段, 分别对应于地表破坏最为严重的两个区域.

利用四川省内所有触发的汶川  $M_s 8.0$  地震加速度记录, 本文绘制了汶川  $M_s 8.0$  地震近场峰值加速度场分布, 其空间上分布特征包含丰富的同震信息, 空间分布上存在较明显的上盘效应和方向性效应. 上盘地震动峰值加速度值衰减比下盘慢 (Abrahamson and Somerville, 1996), 由图 2 可知, 整体而言, 主动盘峰值加速度变化梯度相对较小, 也即空间上衰减相对较慢. 王秀英等(2010)的研究表明, 汶川  $M_s 8.0$  地震近场峰值加速度大于  $200 \text{ cm/s}^2$  的地区地震引起的次生地质灾害相对比较严重, 这与汶川

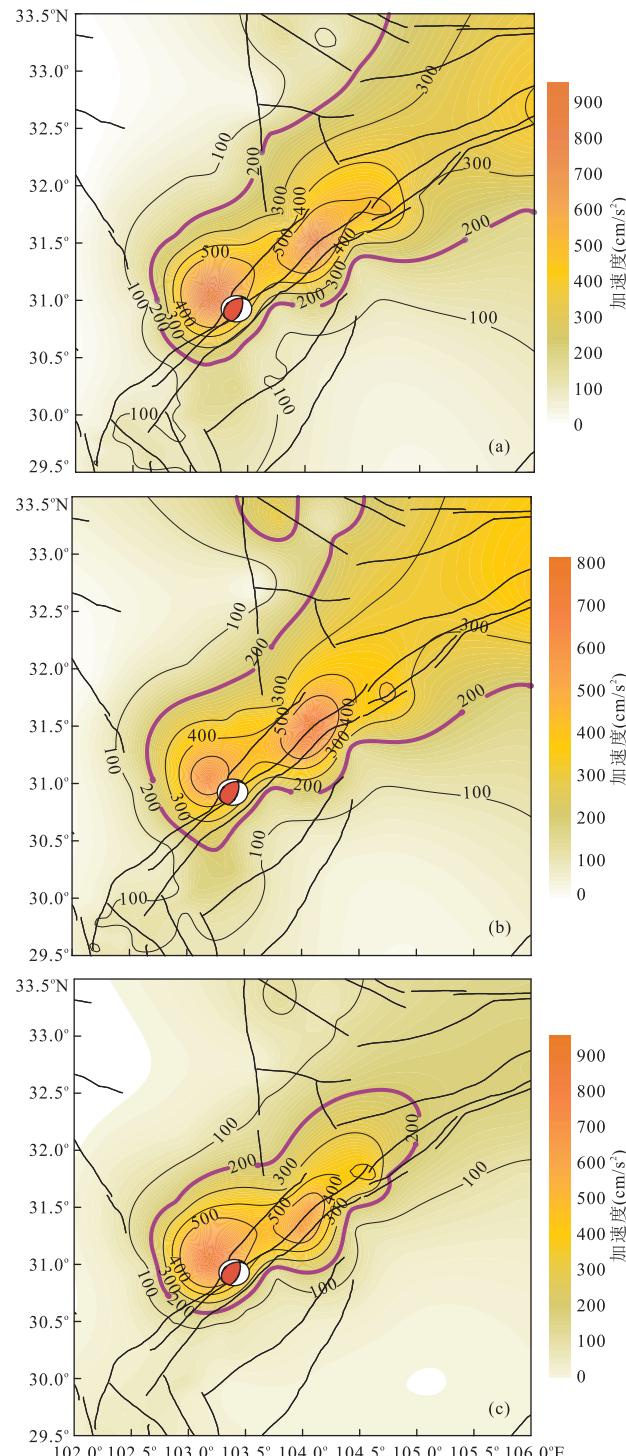


图 2 汶川  $M_s 8.0$  地震近场峰值加速度( $\text{cm/s}^2$ )分布

Fig.2 The distribution of peak acceleration ( $\text{cm/s}^2$ ) near the Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake  
a.东西向峰值加速度;b.南北向峰值加速度;c.垂向峰值加速度

引起的地质灾害空间分布具有较好的一致性, 同震破裂北西向重点灾害区分布较广; 而东南向的重点灾害区主要分布在同震破裂附近, 较大的峰值加速度基本沿着破裂方向展布, 而且震中往南峰值加速

度衰减很快,而沿同震破裂传播延伸方向的地震动峰值加速度在很大范围内仍保持较大值,水平向峰值加速度尤为明显,峰值加速度的这种空间分布很好地解释了甘肃和陕西部分地区遭受较严重的同震破坏,而龙门山南段地区没有遭受明显的同震破坏。

## 2 汶川 $M_s 8.0$ 地震强震动基线改正

理论上,可以通过数值积分由加速度时间序列直接得到速度和位移的时间序列,但是由于数据采集、仪器改正等不确定因素引起的误差会随周期的增加而增加,而且这些误差积分后明显增加。虽然强震加速度记录或多或少地存在基线偏移,但通过基线改正后同样可以得到可靠的同震位移(Iwan *et al.*, 1985)。Iwan *et al.*(1985)为由于传感器滞后现象(transducer hysteresis)而引发的基线偏移作用作了解释。强震记录中包含两部分基线偏移,加速度超过  $50 \text{ cm/s}^2$  时的基线变化(baseline shift)  $A_m$  和此后引起速度线性随时间增加的基线偏移(baseline offset)  $A_f$ ,Boore(2001)针对 1999 年 9 月 21 日集集地震强震记录进行改正,结果表明:在基线改正过程中如何确定  $A_m$  和  $A_f$  的起始时间是非常关键的问题。Iwan *et al.*(1985)利用  $50 \text{ cm/s}^2$  作为门限值来确定基线变化起始时间( $t_1$ )和基线偏移起始时间( $t_2$ ),加速度记录中首次达到  $50 \text{ cm/s}^2$  的时间为  $t_1$ ,最后达到  $50 \text{ cm/s}^2$  的时间为  $t_2$ 。基线偏移( $A_f$ )可由速度随时间线性变化趋势来确定:

$$V_f(t) = V_0 + A_f t, \quad (1)$$

由此可以确定基线变化( $A_m$ ):

$$A_m = \frac{V_f(t_2)}{(t_2 - t_1)}, \quad (2)$$

该方法简单易行,但是由此确定的基线变化起始时间( $t_1$ )和基线偏移起始时间( $t_2$ )也许并不准确。理论上,永久位移产生后,改正后的位移不应该随时间剧烈变化,Wu *et al.*(2006)据此定义“flatness”来确定永久位移产生时间  $t_3$ ,flatness 值越大,表明  $t_3$  越接近永久位移实际形成时间。1999 年 9 月 21 日集集  $M_w 7.6$  地震后,中国台湾地区得到大量的强震记录,相关研究人员开始讨论如何通过批量处理加速度记录来获得同震区域形变位移分布。Wu and Wu(2007)提出了自动改正的标准化过程:(1)计算峰值加速度,如果大于  $60 \text{ cm/s}^2$  进行改正;(2)选择首次达到  $50 \text{ cm/s}^2$  的时间和永久位移起始时间之间的较大值为  $t_1$ ,由 Wu *et al.*(2006)方法确定  $t_3$ ;(3)对速

度做基线改正,通过网格搜索使得 flatness 最大值的时间为  $t_2$ ;(4)利用获得的  $t_1$  和  $t_2$ ,对速度进行改正,积分后得到改正后的位移。Chao *et al.*(2009)在此基础上利用加速度记录的能量来确定  $t_1$  和  $t_3$ ,设定 P 波到时对应 0% 能量,记录结束时刻对应 100% 能量, $t_1$  时刻为小于 50% 能量时刻,大于 P 波到时; $t_3$  时刻为大于 50% 能量时刻,小于记录结束时刻,通过网格搜索得到最小位移。

本文主要对汶川  $M_s 8.0$  地震近场 31 个台站记录的强震动资料进行分析,台站分布如图 1 所示。首先利用 Chao *et al.*(2009)所用方法对汶川  $M_s 8.0$  地震近场强震加速度记录进行基线改正,改正后的位移分布如图 3 所示。整体来讲,由强震记录改正所得位移基本反映了汶川  $M_s 8.0$  同震位移空间分布特征,但存在两个明显问题:(1)宝兴民治(BXMZ)、宝兴盐井(BXYJ)等台站距离汶川  $M_s 8.0$  同震发震断层较远,理县木卡(LXMK)、理县沙坝(LXSB)、理县桃平(LXTP)等台站距离发震断层较近,但位移大小相当;(2)江油重华(JYCH)的位移明显偏大,且位于汶川  $M_s 8.0$  地震下盘的江油重华(JYCH)5 m 多的东向运动是很难解释的。

图 4 为绵竹清平(MZQP)台和江油重华(JYCH)台的速度及改正后位移,见图 4a 和图 4d,绵竹清平的速度是标准的线性偏移,通过线性改正后其永久位移非常稳定(图 4b),不会受到记录截止

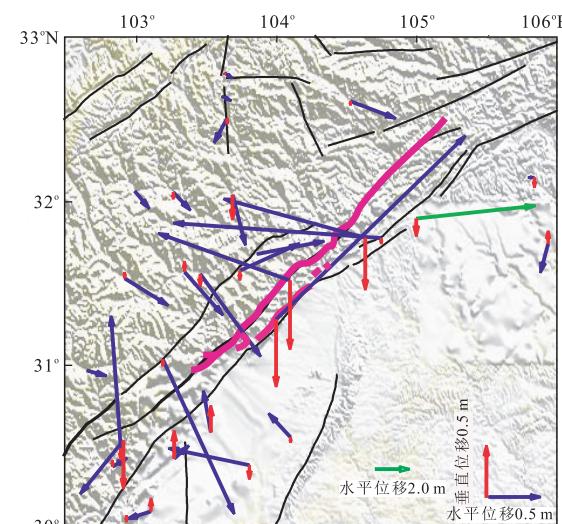


图 3 利用强震动加速度资料线性改正后所得汶川  $M_s 8.0$  地震近场位移

Fig. 3 Near-field displacement of the Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake which liner corrected based on the strong-motion acceleration data

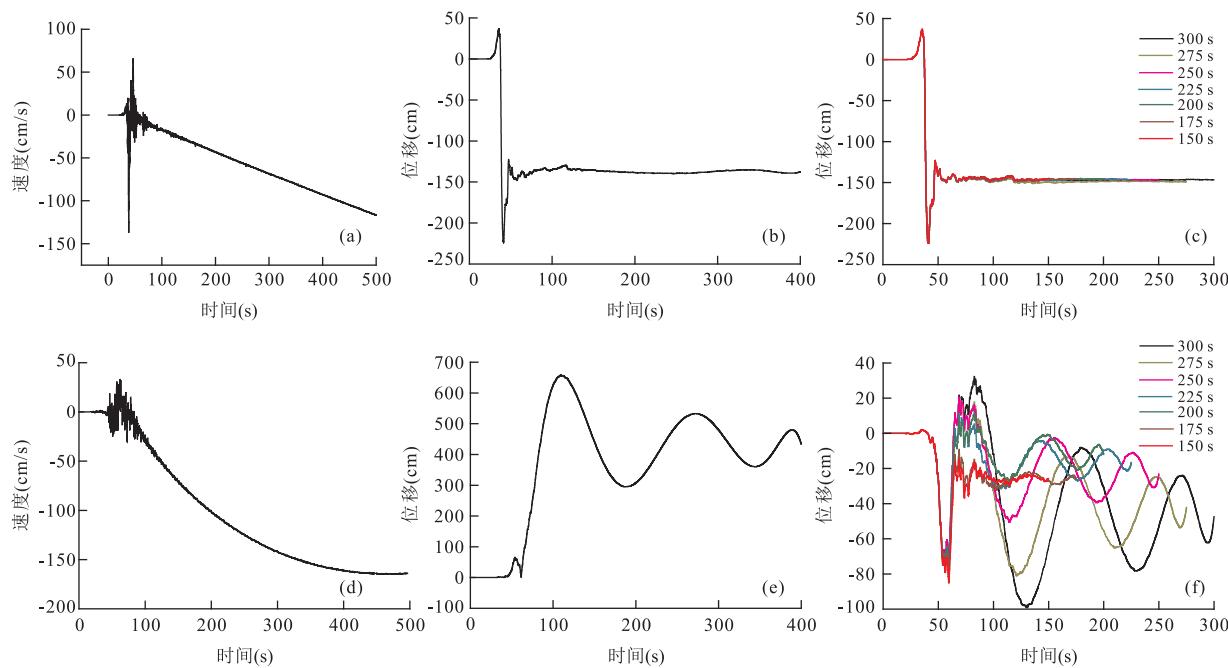


图 4 强震动东西向记录改正后位移与资料持续时间的关系

Fig.4 The relationship between data duration and the displacements which corrected by strong-motion E-W direction records, MZQP station and JYCH station

绵竹清平台:a.东西向未改正速度;b.400 s 资料线性改正后的位移;c.利用不同截止时间资料线性改正后的位移;江油重华台:d.东西向未改正速度;e.400 s 资料线性改正后的位移;f.利用不同截止时间资料线性改正后的位移

时间的影响(图 4c);而江油重华的速度不是线性偏移,通过线性改正后其永久位移波动较大(图 4d),受记录截止时间的影响较大(图 4e),截止时间越小越稳定,当截止时间为 150 s 时,改正后位移基本稳定,也即此时间内速度基本是线性偏移(图 4f),线性改正是有效改正,本文将通过网格搜索确定基线改正的有效截止时间。

对于距离发震断层稍远的台站,Chao *et al.* (2009)的方法往往存在过校正现象,而且阈值设置方法过于简单化,并不适用于基线漂移比较复杂的情况(Wang *et al.*, 2011).基于 Wu *et al.*(2006)的方法,Wang *et al.*(2011)提出了一种改进的自动基线校正方案,并给出了自动基线校正程序SMBLOC,本文采用上述程序和方法进行基线改正,其改正方案和相关参数定义与设置如下:

(1)  $T_0$ :地震波初值时间( $[0, T_1]$ 称为震前窗),为经验性门限值。

(2)  $T_1 (T_1 > T_0)$ :基线变化最早开始的初步估计时间,15% 加速度累积能量对应的时间, $E_a(T_1) = 0.15 E_a(T_{\text{tot}})$ ,其中能量积累为:

$$E_a(t) = \int_0^t A^2(\tau) d\tau \quad (3)$$

(3)  $T_2 (T_2 > T_1)$ :基线变化最晚结束的初步估

计时间( $[T_1, T_2]$ 称为事件窗),85% 加速度累积能量对应的时间, $E_a(T_1) = 0.85 E_a(T_{\text{tot}})$ ,但不小于  $T_0 + \Delta$ ( $\Delta$  为强震破裂持续时间).

(4)  $T_3 (T_2 < T_3 < T_{\text{tot}})$ :未改正速度趋势右侧截断时间(通常情况下等于数据总长度  $T_{\text{tot}}$ ,如果  $T_3 < T_{\text{tot}}$ ,则  $T_3$  后的数据将被删除, $[T_2, T_3]$  称为震后窗);在  $[T_2 + \delta, T_{\text{tot}}]$  区间内,通过网格搜索确定  $T_3$ ,使得  $[T_2, T_3]$  时段内线性拟合残差最小,即:

$$\frac{\int_{T_2}^{T_3} E_a(t) |V(t) - V_{\text{fit}}(t)| dt}{\int_{T_2}^{T_3} E_a(t) dt} = \min, \quad (4)$$

其中: $V_{\text{fit}}(t) = V_f + A_f(t - T_2)$ ,  $T_3 - T_2 \geq \frac{T_2 - T_1}{2} E_a(t)$  作为权重.改正后, $[T_2, T_3]$  时段内速度均值为零.

(5)  $T_b (T_1 < T_b < T_2)$ :基线变化实际结束时间(震后线性趋势向后延拓的最小时间).

(6)  $T_a (T_1 < T_a < T_b)$ :基线变化实际开始时间( $[T_a, T_b]$  瞬时基线变化时间窗).

(7) 在  $[T_1, T_2]$  区间内,通过网格搜索确定  $T_a$ ,  $T_b$ ,使得其间基线改正量能最好地拟合未改正的速度.利用事件后线性偏移  $V_{\text{fit}}(t)$  向后延拓量对  $[T_b,$

$T_2$ ]间速度进行改正,而 $[T_a, T_b]$ 区间内通过楔形函数 $V_{\text{tap}}(t)$ 对速度进行改正。在搜索 $T_b$ 过程中,如果在 $[T_1, T_b]$ 区间内出现线性趋势 $V_{\text{fit}}(t)=0$ ,则 $T_a$ 值依赖于 $T_b$ , $T_a=T_b-\frac{2V_{\text{fit}}(T_b)}{A_f}$ ,楔形函数为二阶多项式,

$$V_{\text{tap}}(t)=V_{\text{fit}}(T_b)\left(\frac{t-T_a}{T_b-T_a}\right)^2, \quad (5)$$

楔形函数满足光滑和连续条件: $V_{\text{tap}}(T_a)=0$ , $\frac{d}{dt}V_{\text{tap}}(T_a)=0$ , $V_{\text{tap}}(T_b)=V_f$ , $\frac{d}{dt}V_{\text{tap}}(T_b)=A_f$ .否则, $T_a$ 和 $T_b$ 均通过网格搜索来确定,楔形函数为三阶多项式,

$$V_{\text{tap}}(t)=\left\{V_f+[2V_f-A_f(T_b-T_a)]\frac{T_b-t}{T_b-T_a}\right\}\left(\frac{t-T_a}{T_b-T_a}\right)^2, \quad (6)$$

同样满足光滑和连续条件。实际上,大多数情况为第1种情况,这种情况下基线变化数学上是单调的;第2种情况相对较少,这种情况下基线变化是一个动态过程。

基线改正主要包括如下两步:(1)震前基线偏移改正;(2)强震引起的基线偏移改正,包括 $[T_b, T_3]$ 间的直线改正和 $[T_a, T_b]$ 时间窗内的瞬时基线变化非线性改正。本文所用基线改正参数设置与改正流程如图5。

利用上述方法对汶川 $M_s8.0$ 地震近场强震记

录进行基线改正,改正后位移如图6所示。由图6可知,近场强震台站大多分布在川西高原和龙门山断裂带内部,强震记录所得同震地表位移整体上反映了汶川 $M_s8.0$ 地震同震形变由南段的逆冲向北段右旋走滑过渡的空间演化特征(Wang et al., 2011)。另一方面,GPS台站大多分布在龙门山中央断裂东侧,因此本文试图利用不同数据,对汶川 $M_s8.0$ 地震同震位错进行联合反演。

### 3 汶川 $M_s8.0$ 地震同震位错联合反演

已有的汶川 $M_s8.0$ 地震同震位错断层模型中,Xu et al.(2010)参考了同震破裂和区域地质构造(Liu et al., 2009; Xu et al., 2009),主断裂分为两个逆冲断裂:北川—映秀断裂和灌县—江油断裂。北川—映秀断裂又可以分为虹口—岳家山断裂和北川—青川断裂,因此可以将汶川 $M_s8.0$ 地震同震破裂分为5个子断层:青川断裂、北川断裂、岳家山断裂、虹口断裂和汉旺断裂(Xu et al., 2010),编号依次为1~5.5个子断层的地表倾角分别为 $60^\circ, 46^\circ, 60^\circ, 42^\circ$ 和 $44^\circ$ ,倾角从地表到断层底部逐渐变小,每个子断层底部倾角为 $20^\circ$ ,其断层三维模型如图6所示。断层模型参数(表1)参考Xu et al.(2010)的模型,其中由于绵竹清平站明显处于断层东侧,参考地表破裂和活动断裂分布,将断层3向西平移约3 km。

在同震位错反演的相关研究工作中,地壳介质通常被设定为弹性半空间均匀无限介质模型(Okada, 1992),Bonafede et al.(2002)通过理论模拟认为,介质模型实际对正演模拟的影响是不容忽略的。许才军等(2009)利用GPS观测结果反演了汶川 $M_s8.0$ 地震同震位错反演,研究结果表明:利用相对比较接近实际的分层地壳介质模型的反演结果整体上要优于均匀半空间介质模型的反演结果,反演得到的同震滑动分布与地震、地质结果吻合较好。根据赵珠等(1997)给出的龙门山断裂带P波和S波地壳平均速度模型、王椿镛等(2002)通过波形反演给出的川滇及邻区的地壳三维速度结构以及Wang(2001)给出的中国大陆热流结构和强度的研究结果,本文反演所用地壳介质模型如表2所示(Xu et al., 2010)。

本文采用同震位错反演方法是约束条件下最小二乘原理及最速下降法(Xu et al., 2010; Diao

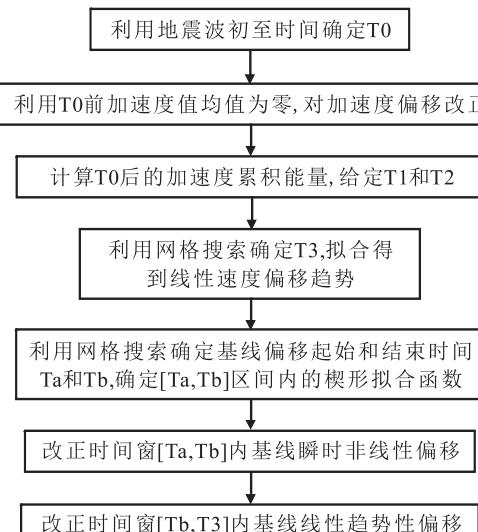
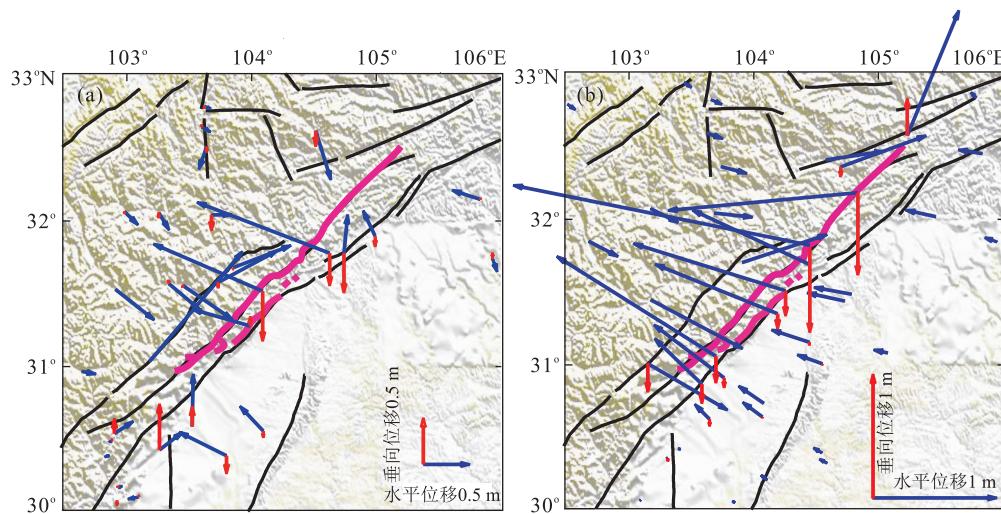


图5 基线改正参数设置与改正流程

Fig.5 The flow chart of the baseline correction and its parameter setting

图 6 汶川  $M_s 8.0$  地震近场位移,强震动改正后位移(a)和 GPS 观测位移(b)Fig.6 The near-field displacement of the Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake表 1 汶川  $M_s 8.0$  地震同震位错断层参数Table 1 Fault parameters of co-seismic dislocation of the Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake

序号	地表北端点纬度	地表北端点经度	长度(km)	宽度(km)	走向	倾角
1	32.64°N	105.45°E	81	39	228.8°	60°~20°
2	32.16°N	104.80°E	81	39	221.1°	46°~20°
3	31.61°N	104.17°E	66	39	223.9°	60°~20°
4	31.18°N	103.73°E	72	45	227.1°	42°~20°
5	31.63°N	104.37°E	111	27	228.4°	44°~20°

表 2 地壳分层介质模型参数

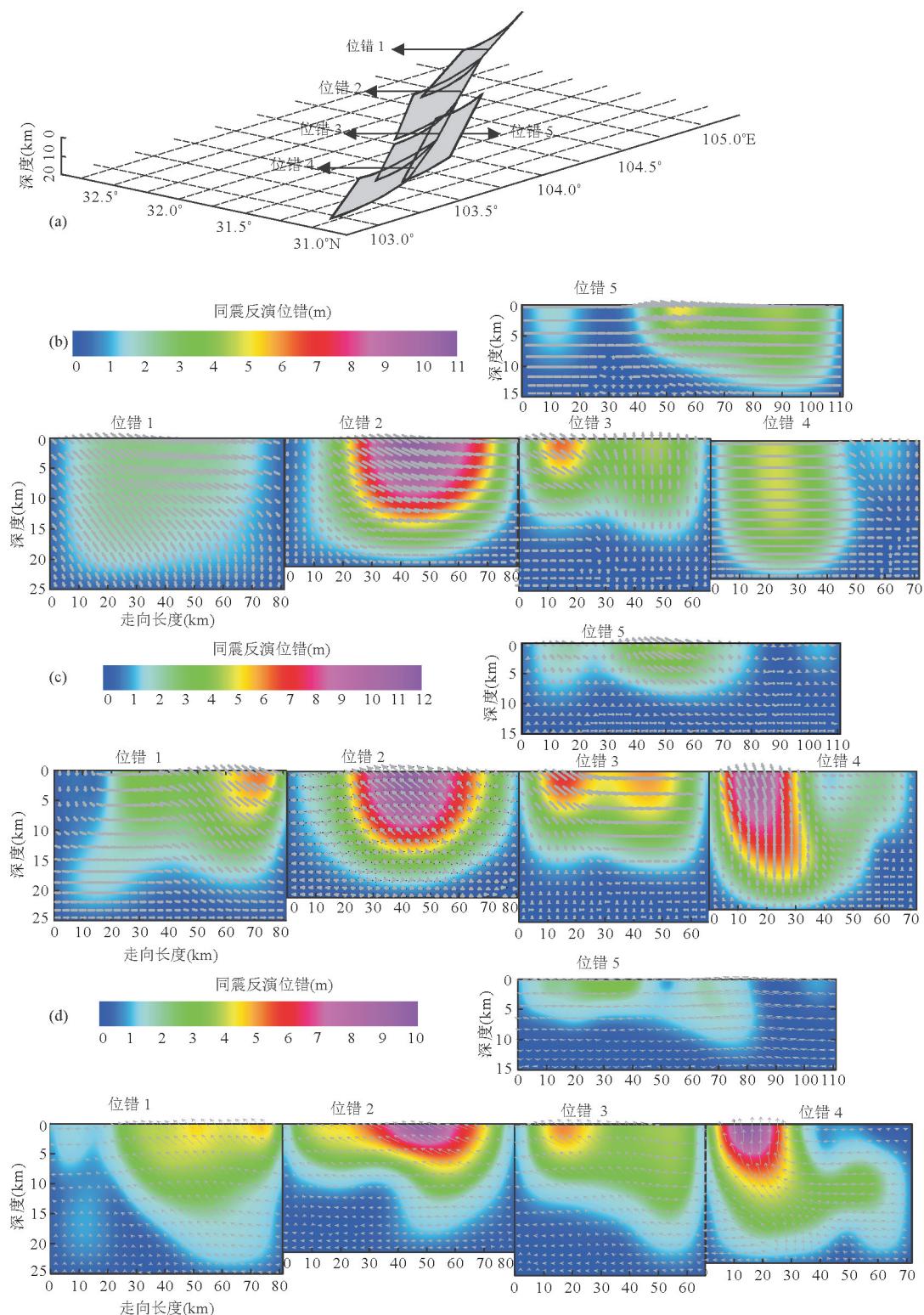
Table 2 Model parameters of layered crustal media

序号	深度(km)	$V_p$ (km/s)	$V_s$ (km/s)	密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
1	0~15	5.89	3.40	2.80
2	15~30	7.00	4.05	2.95
3	>30	7.95	4.60	3.25

*et al.*, 2011), 利用不同数据, 反演汶川  $M_s 8.0$  地震同震位错分布。上述断层模型中 5 个子断层离散为 1 681 个断层片 ( $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ ), 观测数据分为 3 组, 包括强震动改正后位移、GPS 观测位移和 InSAR 观测位移。国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”和国家重点基础研究发展计划项目“活动地块边界带的动力过程与强震预测”项目在龙门山断裂带两侧布设的 GPS 观测台站, 观测的汶川  $M_s 8.0$  地震同震位移包括 158 个水平位移和 46 个垂向位移(国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组, 2008).6 景 (Track 471, 472, 473, 474, 475) 高精度 L-band SAR 数据覆盖了整个汶川  $M_s 8.0$  地震同震破裂带 (Hashimoto *et al.*, 2009), 由于 InSAR 干涉数据较多, 反演所用数据是重采样的 3 801 个视

像线位移 (Xu *et al.*, 2010)。在联合反演中, 根据数据量的大致相对大小给不同权重, 强震动资料和 GPS 观测资料给定同等权重, 重采样的 InSAR 干涉数据量与 GPS 观测数据量大致是 30 : 1, 与此同时, GPS 和强震动观测数据包括东西向、南北向和垂向 3 个分量, 因此联合反演中强震动、GPS 和 InSAR 观测数据权重比为 10 : 10 : 1。上述 3 种资料各有优缺点, 强震动改正后位移和 GPS 观测位移空间覆盖上远不如 InSAR 观测位移, 但 InSAR 观测资料观测时段包括震后地壳变形信息; 相对于 GPS 和 InSAR, 强震动改正后位移虽然精度有待提高, 但它是 3 种资料中最具时效性, 能为震后应急救援提供最及时的近场信息。因此本文联合反演过程中对 3 种数据作等权处理, 即权重与数据量呈反比。

图 7b 为利用强震动改正后位移反演所得位错分布, 矩震级为  $M_w 7.96$ , 其中北川断裂和虹口断裂上位错量相对较大, 最大位错为 9.55 m, 位于北川断裂, 震中附近存在能量释放相对集中区域。图 7d 为利用强震动改正后位移、GPS 观测位移和 InSAR 观测位移联合反演所得位错分布, 矩震级为

图 7 汶川  $M_s 8.0$  地震断层模型与反演结果Fig.7 Fault model and the dislocation result of the Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake

a. 地震断层模型; b. 强震动位错反演结果; c. 强震动与 GPS 联合反演结果; d. 强震动、GPS 和 InSAR 联合反演位错结果

$M_w 7.92$ , 整体上与利用强震动资料反演结果基本一致, 汉旺断裂上位错分布差别较大, 而强震仪和 GPS 联合反演结果(图 7c)基本与利用强震动改正后位

移、GPS 观测位移和 InSAR 观测位移联合反演所得位错分布(图 7d)不仅空间分布比较一致, 而且与现场观测到同震地表破裂比较一致(图 8), 因此对

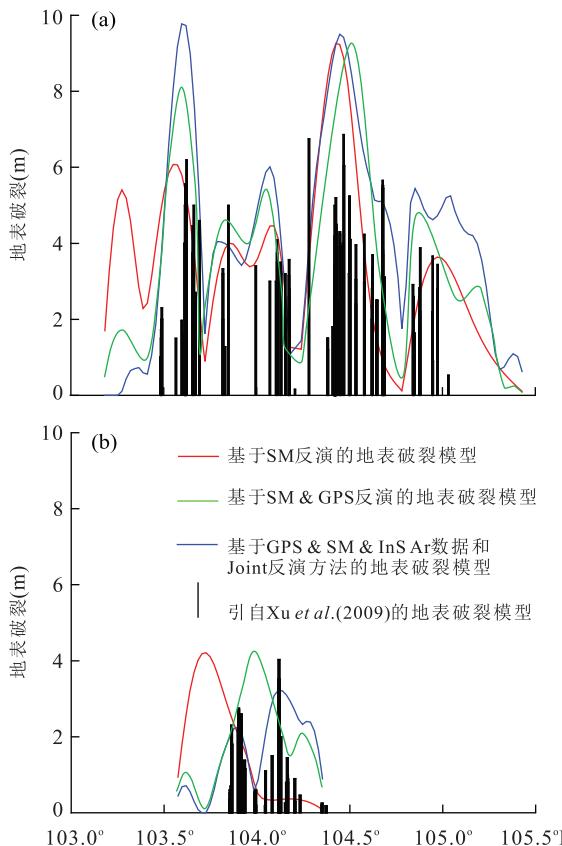
图 8 汶川  $M_s 8.0$  地震同震地表破裂观测结果与模拟结果

Fig.8 Observed and modeled co-seismic surface rupture of the Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake

a.北川—映秀地表破裂;b.灌县—江油地表破裂

于汶川  $M_s 8.0$  地震,如果强震仪空间分布达到强震仪和 GPS 台站的整体分布,则单独利用强震动改正后位移同样能得到较好的同震位错空间分布。图 8 为不同反演结果地表断层破裂与野外考察结果对比图,汶川  $M_s 8.0$  地震主要破裂在北川—映秀断裂上,不同反演结果基本均能较好地反映同震地表破裂空间分布特征,强震动反演结果不仅较好地刻画了汶川  $M_s 8.0$  地震同震主断裂上地表破裂空间分布详细变化特征,同时也较好地反映北端破裂衰减情况,联合反演结果较好地反映了南端破裂衰减情况。反演所用数据中,强震动台站仅有什邡八角(SFBJ)距离汉旺断裂较近,受数据数量的制约,用强震动改正后位移反演所得位错分布中仅汉旺断裂南段存在较为明显位错(图 7b,图 8b)。

## 4 结论与讨论

由近场强震动记录可知,汶川  $M_s 8.0$  地震近场峰值加速度空间上存在较明显的上盘效应和方向性

效应。整体而言,主动盘(上盘)峰值加速度变化梯度相对较小,即空间上衰减相对较慢;较大的峰值加速度基本沿着破裂方向展布,而且震中往南峰值加速度衰减很快,而沿同震破裂传播延伸方向,地震动峰值加速度在很大范围内仍保持较大值,水平向峰值加速度尤为明显,这些加速度空间分布特性与汶川引起的地质灾害空间分布具有较好的一致性(王秀英, 2010)。

强震仪所记录汶川  $M_s 8.0$  地震同震强震速度中,有的台站存在典型的线性偏移,有的台站则存在非常明显的非线性偏移。由江油重华(JYCH)速度来看,该台站速度偏移包括线性偏移和非线性偏移两部分。本文采用非线性基线改正方法处理汶川  $M_s 8.0$  强震同震记录,经改正后,距同震破裂较远的宝兴民治(BXMZ)、宝兴盐井(BXYJ)等台站位移明显比距同震发震断层较近的理县木卡、理县沙坝和理县桃平等台站位移小得多,明显要比线性基线改正更合乎实际汶川  $M_s 8.0$  地震同震地表位移分布。

对于汶川  $M_s 8.0$  地震主要同震破裂断裂(北川—映秀断裂),强震动反演结果不仅较好地刻画了汶川  $M_s 8.0$  地震同震主断裂上地表破裂空间分布详细变化特征,同时也较好地反映了北端破裂衰减情况,联合反演结果较好地反映了南端破裂衰减情况。因此在强震刚发生时,在仅有震源机制解的情况下,通过强震仪观测到地表加速度基线改正给出近场同震变形信息,以此约束给出同震位错空间分布,为震后应急与搜救提供及时近场信息。

反演所用数据中,强震动台站仅有什邡八角(SFBJ)台距离汉旺断裂较近,受数据数量的制约,用强震动改正后位移反演所得位错分布中,仅汉旺断裂南段存在较为明显位错。利用基线改正所得汶川  $M_s 8.0$  地震同震位移为约束,对同震位错空间分布进行反演,整体来讲有两点初步认识:(1)其结果基本上反映了汶川  $M_s 8.0$  地震同震地表破裂空间分布,对震后的救援和灾害评估等工作具有一定的参考意义;(2)在保证基本的观测密度基础上,强震仪布设时不必单单强调断裂带内部强震仪的观测密度,而应更多地考虑是否相对均匀地分布在存在发育潜势断裂周缘。

本文利用强震记录基线改正得到同震地表位移,并将其初步应用于同震位错反演,且结果与同震地表破裂观测具有较好一致性,但对相关的误差分析仍需开展相关研究工作。强震记录包含更多的强震同震信息,例如峰值加速度、频谱信息、加速度波

形信息等,有待开展深入的研究应用到同震位错或破裂过程反演,以期对强震后的救援和灾害评估等工作提供更有参考意义的研究资料。

**致谢:**感谢刘洋博士提供的汶川  $M_s 8.0$  地震同震 InSAR 处理结果;感谢德国波茨坦地学中心汪荣江博士提供的同震位错反演与强震记录基线改正相关程序。

## References

- Abrahamson, N. A., Somerville, P. G., 1996. Effects of the Hanging Wall and Foot Wall on Ground Motions Recorded during the Northridge Earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 86(1B): 93—99.
- Bonafede, M., Parenti, B., Rivalta, E., 2002. On Strike-Slip Faulting in Layered Media. *Geophysical Journal International*, 149(3): 698—723. doi: 10.1046/j.1365-246X.2002.01670.x
- Boore, D.M., 2001. Effect of Baseline Corrections on Displacements and Response Spectra for Several Recording of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 91(5): 1199—1211. doi: 10.1785/0120000703
- Chao, W. A., Wu, Y. M., Zhao, L., 2009. An Automatic Scheme for Baseline Correction of Strong-Motion Records in Coseismic Deformation Determination. *J. Seismol.*, 14(3): 495—504. doi: 10.1007/s10950-009-9178-7
- Deng, Q.D., Chen, S.F., Zhao, X.L., 1994. Tectonics, Seismicity and Dynamics of Longmenshan Mountains and Its Adjacent Regions. *Seismology and Geology*, 16(4): 389—403 (in Chinese with English abstract).
- Department of Earthquake Monitoring and Prediction, China Earthquake Administration, 2009. Research Report of Wenchuan  $M_s 8.0$  Earthquake. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Diao, F. Q., Xiong, X., Wang, R. J., 2011. Mechanisms of Transient Postseismic Deformation Following the 2001  $M_w 7.8$  Kunlun (China) Earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, 168(5): 767—779. doi: 10.1007/s00024-010-0154-5
- Feng, G.C., Hetland, E.A., Ding, X.L., et al., 2010. Coseismic Fault Slip of the 2008  $M_w 7.9$  Wenchuan Earthquake Estimated from InSAR and GPS Measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 37(1): L01302. doi: 10.1029/2009GL041213
- Hashimoto, M., Enomoto, M., Fukushima, Y., 2009. Coseismic Deformation from the 2008 Wenchuan, China, Earthquake Derived from ALOS/PALSAR Images. *Tectonophysics*, 491(1). doi: 10.1016/j.tecto.2009.08.034
- Iwan, W.D., Moser, M.A., Peng, C.Y., 1985. Some Observations on Strong-Motion Earthquake Measurement Using a Digital Accelerograph. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75(5): 1225—1246.
- Li, X. J., Zhou, Z. H., Huang, M., et al., 2008. Preliminary Analysis of Strong-Motion Recording from the Magnitude 8.0 Wenchuan, China, Earthquake of 12 May 2008. *Seismological Research Letters*, 79(6): 844—854. doi: 10.1785/gssrl.79.6.844
- Liu, Z.J., Zhang, Z., Wen, L., et al., 2009. Co-seismic Ruptures of the 12 May 2008,  $M_s 8.0$  Wenchuan Earthquake, Sichuan: East-West Crustal Shortening on Oblique, Parallel Thrusts along the Eastern Edge of Tibet. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 286(3—4): 355—370. doi: 10.1016/j.epsl.2009.07.017
- Lu, S.D., Li, X.J., Du, W., et al., 2008. Report on Strong Motion Records in China. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- National Major Scientific Project “Crustal Movement Observation Network of Chinese” Project Group, Coseismic Displacement field of the 2008 Earthquake in Wenchuan  $M_s 8.0$  Grade 2008.GPS Determination. *Science in China (Series D)*, 38(10): 1195—1208.
- Okada, Y., 1992. Internal Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82(2): 1018—1040.
- Shan, B., Xiong, X., Zheng, Y., et al., 2009. Stress Changes on Major Faults Caused by  $M_w 7.9$  Wenchuan Earthquake, May 12, 2008. *Sci. in China (Ser. D)*, 39(5): 537—545 (in Chinese).
- Shen, Z.K., Sun, J.B., Zhang, P.Z., et al., 2009. Slip Maxima at Fault Junctions and Rupturing of Barriers during the 2008 Wenchuan Earthquake. *Nature Geoscience*, 27(2): 718—724. doi: 10.1038/Ngeo636
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Le Dain, A.Y., et al., 1982. Propagating Extrusion Tectonics in Asia: New Insights from Simple Experiments with Plasticine. *Geology*, 10(12): 611—616. doi: 10.1130/0091-7613(1982)
- Teng, J.W., Bai, D.H., Yang, H., et al., 2008. Deep Processes and Dynamic Responses Associated with the Wenchuan  $M_s 8.0$  Earthquake of 2008. *Chinese J. Geophys.*, 51(5): 1385—1402 (in Chinese with English abstract).
- Toda, S., Lin, J., Meghraoui, M., et al., 2008. 12 May 2008  $M=7.9$  Wenchuan, China, Earthquake Calculated to Increase Failure Stress and Seismicity Rate on Three Major Fault Systems. *Geophysical Research Letters*, 35

- (17):doi:10.1029/2008GL034903
- Wang, C. Y., Mooney, W. D., Wang, X. L., et al., 2002. A Study on 3-D Velocity Structure of Crust and Upper Mantle in Sichuan-Yunnan Region, China. *Acta Seismologica Sinica*, 15(1):1—16 (in Chinese with English abstract).
- Wang, M., 2009. Coseismic Slip Distribution of the 2008 Wenchuan Great Earthquake Constrained Using GPS Coseismic Displacement Field. *Chinese J. Geophys.*, 52(10):2519—2526 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R. J., Schurr, B., Milereit, C., et al., 2011. An Improved Automatic Scheme for Empirical Baseline Correction of Digital Strong-Motion Records. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 101(5):2029—2044. doi:10.1785/0120110039
- Wang, W. M., Zhao, L. F., Li, J., et al., 2008. Rupture Process of the  $M_s$ 8.0 Wenchuan Earthquake of Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.*, 51(5):1403—1410 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. Y., Nie, Z. G., Wang, D. W., 2010. Research on Relationship between Landslides and Peak Ground Accelerations induced by Wenchuan Earthquake. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(1):82—89 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., 2001. Heat Flow Pattern and Lateral Variations of Lithosphere Strength in China Mainland: Constraints on Active Deformation. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 126(3—4):121—146. doi:10.1016/S0031-9201(01)00251-5
- Wen, X. Z., Zhang, P. Z., Du, F., et al., 2009. The Background of Historical and Modern Seismic Activities of the Occurrence of the 2008  $M_s$ 8.0 Wenchuan, Sichuan, Earthquake. *Chinese J. Geophys.*, 52(2):444—454 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. M., Chen, Y. G., Chang, C. H., et al., 2006. Seismogenic Structure in a Tectonic Suture Zone: With New Constraints from 2006  $M_w$ 6.1 Taitung Earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 33(22):L22305. doi:10.1029/2006GL027572
- Wu, Y. M., Wu, C. F., 2007. Approximate Recovery of Coseismic Deformation from Taiwan Strong-Motion Records. *J. Seismol.*, 11(2):159—170. doi:10.1007/s10950-006-9043-x
- Xie, L. L., Yu, S. J., 1982. Strong-Motion Observation and Analysis Theory. Seismological Press, Beijing, 258 (in Chinese).
- Xu, C. J., Liu, Y., Wen, Y. M., 2009.  $M_w$ 7.9 Wenchuan Earthquake Slip Distribution Inversion from GPS Measurements. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 38(3):195—201 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C. J., Liu, Y., Wen, Y. M., et al., 2010. Coseismic Slip Distribution of the 2008  $M_w$ 7.9 Wenchuan Earthquake from Joint Inversion of GPS and InSAR Data. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100(5B):2736—2749. doi:10.1785/0120090253
- Xu, X. W., Wen, X. Z., Ye, J. Q., et al., 2008. The  $M_s$ 8.0 Wenchuan Earthquake Surface Ruptures and Its Seismogenic Structure. *Seismology and Geology*, 30(3):597—629 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. W., Wen, X. Z., Yu, G. H., et al., 2009. Coseismic Reverse and Oblique-Slip Surface Faulting Generated by the 2008  $M_w$ 7.9 Wenchuan Earthquake, China. *Geology*, 37(6):515—518. doi:10.1130/G25462A.1
- Zhang, P., Shen, Z., Wang, M., et al., 2004. Continuous Deformation of the Tibetan Plateau from Global Positioning System Data. *Geology*, 32(9):809—812. doi:10.1130/G20554.1
- Zhang, P. Z., 2008. The Coseismic Displacement Field of Wenchuan  $M_s$ 8.0 Earthquake 2008. *Science in China*, 38(10):1195—1206 (in Chinese).
- Zhang, P. Z., Xu, X. W., Wen, X. Z., et al., 2008. Slip Rates and Recurrence Intervals of the Longmen Shan Active Fault Zone and Tectonic Implications for the Mechanism of the May 12 Wenchuan Earthquake, 2008, Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.*, 51(4):1066—1073 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Feng, W. P., Xu, L. S., et al., 2008. Spatio-Temporal Rupture Process of the 2008 Great Wenchuan Earthquake. *Science China (Ser. D)*, 38(10):1186—1194 (in Chinese).
- Zhao, Z., Fan, J., Zheng, S. H., et al., 1997. Precision Determination of the Crustal Structure and Hypocentral Locations in the Longmenshan Thrust Nappe Belt. *Acta Seismologica Sinica*, 19(6):615—622 (in Chinese).

## 附中文参考文献

- 邓起东,陈社发,赵小麟,1994.龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学.地震地质,16(4):389—403.
- 国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组,2008. GPS 测定的 2008 年汶川 Ms8.0 级地震的同震位移场. 中国科学(D辑),38(10):1195—1208.
- 卢寿德,李小军,杜玮,等,2008.汶川  $M_s$ 8.0 地震未校正加速度记录.北京:地震出版社.
- 单斌,熊熊,郑勇,等,2009.2008 年 5 月 12 日  $M_w$ 7.9 汶川地震导致的周边断层应力变化.中国科学(D辑),39(5):537—545.
- 滕吉文,白登海,杨辉,等,2008.2008 汶川  $M_s$ 8.0 地震发生的深层过程和动力学响应.地球物理学报,51(5):

- 1385—1402.
- 王椿镛,Mooney,W.D.,王溪莉,等,2002.川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究.地震学报,24(1):1—16.
- 王敏,2009.基于 GPS 同震位移场约束反演 2008 年 5·12 汶川大地震破裂空间分布.地球物理学报,52(10):2519—2526.
- 王卫民,赵连锋,李娟,等,2008.四川汶川  $M_s8.0$  地震震源过程.地球物理学报,51(5):1403—1410.
- 王秀英,聂高众,王登伟,2010.汶川地震诱发滑坡与地震峰值加速度对应关系研究.岩石力学与工程学报,29(1):82—89.
- 闻学泽,张培震,杜方,等,2009.2008 年汶川  $M_s8.0$  地震发生的历史与现今地震活动背景.地球物理学报,52(2):444—454.
- 谢礼力,于双久,1982.强震观测与分析原理.北京:地震出版社,258.
- 许才军,刘洋,温扬茂,2009.利用 GPS 资料反演汶川  $M_w7.9$  级地震滑动分布.测绘学报,38(3):195—201.
- 徐锡伟,闻学泽,叶建青,等,2008.汶川  $M_s8.0$  地震地表破裂带及其发震构造.地震地质,30(3):597—629.
- 张培震,徐锡伟,闻学泽,等,2008.2008 年汶川  $M_s8.0$  地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因.地球物理学报,51(4):1066—1073.
- 张勇,冯万鹏,许力生,等,2008.2008 年汶川大地震的时空破裂过程.中国科学(D 辑),38(10):1186—1194.
- 赵珠,范军,郑斯华,等,1997.龙门山断裂带地壳速度结构和震源位置的精确修订.地震学报,19(6):615—622.
- 中国地震局监测预报司,2009.汶川  $M_s8.0$  地震科学研究报告.北京:地震出版社.