

# 汶川 8.0 级地震序列的小震震源机制及应力场特征\*

张致伟, 张永久, 程万正, 吴朋, 龙锋, 阮祥

(四川省地震局, 成都 610041)

**摘要:** 利用区域地震台网的数字地震波记录资料, 由垂直向记录  $\bar{P}$  和  $\bar{S}$  振幅比值, 结合部分清晰的 P 波初动记录资料, 反演得到了 2008 年 5 月 12 日至 2009 年 4 月 12 日汶川 8.0 级地震序列中 829 个  $M_L \geq 3.5$  的小震震源机制解。采用统计和力轴张量计算方法, 分析了震源机制解参数并求取了余震区平均应力场。结果表明: 用余震区北段小震震源机制解求得的节面为直立或倾斜, 走向为 NNE-SSW 向, 主压应力  $P$  轴方位为 SWW-NEE 方向, 计算得到的平均应力张量  $\sigma_1$  方向为  $77.1^\circ$ ; 用余震区南段小震震源机制解求得的节面倾角较陡, 在  $50^\circ \sim 90^\circ$  之间, 走向相对较分散, 平均应力张量  $\sigma_1$  方向为  $92.4^\circ$ , 呈 EW 向。从余震区南、北段的平均应力场方位随时间演化过程可以看出, 余震区在 2008 年 8 月、9 月、12 月和 2009 年 1 月处于应力场调整阶段。最后研究了余震区南、北段的震源机制一致性参数  $\bar{\theta}$  及逆冲型地震类型随时间的变化, 得到了一些有意义的结果。

**关键词:** 汶川 8.0 级地震; 余震序列; 震源机制解; 应力场

**中图分类号:** P315.3<sup>+</sup>3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2010)01-0043-07

## 0 引言

汶川  $M_s 8.0$  地震沿龙门山断裂带中北段破裂, 形成地表破裂带。该地震余震活动丰富, 持续时间长, 序列地震活动衰减缓慢。根据四川省区域地震台网正式目录, 截止到 2009 年 4 月 12 日, 汶川 8.0 级地震余震区共发生 5 级以上强余震 70 次, 其中 5.0 ~ 5.9 级余震 62 次; 6.0 ~ 6.4 级余震 8 次, 最大强余震为 5 月 25 日青川 6.4 级地震。对于汶川 8.0 级地震及其强余震的震源机制、时空分布及余震区分段破裂特征, 已有很多研究结果(陈运泰等, 2008; 胡幸平等, 2008; 王卫明等, 2008; Cheng *et al.*, 2009; 张勇等, 2009)。汶川 8.0 级地震是一次以逆冲为主、兼少量右旋走滑分量的地震。主震及其强余震震源机制解给出的主压应力  $P$  轴方位为 NWW, 与龙门山构造带应力场方位一致。发生在龙门山中央断裂带上的强余震多呈现以逆冲为主、兼右旋走滑分量。而发生在余震区北段及青川断裂带的强余震多呈现走向滑动特征(Cheng *et al.*, 2009)。研究人员利用不同

资料给出了龙门山断裂带构造应力场的研究结果, 各个结果之间差别不明显。

为了进一步了解汶川地震后震源区的应力场和介质环境, 有必要利用丰富的余震资料进行研究。本文基于大量中小地震的震源机制解, 采用力轴张量法, 给出了整个余震区及南、北段的平均应力张量, 对余震区南北段的平均应力场随时间的演变过程进行研究, 同时还给出了余震区南北段单个震源机制解的力轴与区域应力张量的差异, 分析了余震区南北段震源机制解的一致性参数和逆冲型地震比例随时间的变化。

## 1 资料和分析方法

### 1.1 小震震源机制解测定方法

测定震源机制参数, 常用的方法是利用  $\bar{P}$  波初动求解, 但这种方法要求所选地震被较多台站记录到。如果观测台站稀少或分布不均匀, 则计算结果误差较大。由于大量中小地震仅能被数量有限的台站记录到, 采用  $\bar{P}$  波初动计算地震的震源机制解会受限制。因此, 梁尚鸿等(1984)提

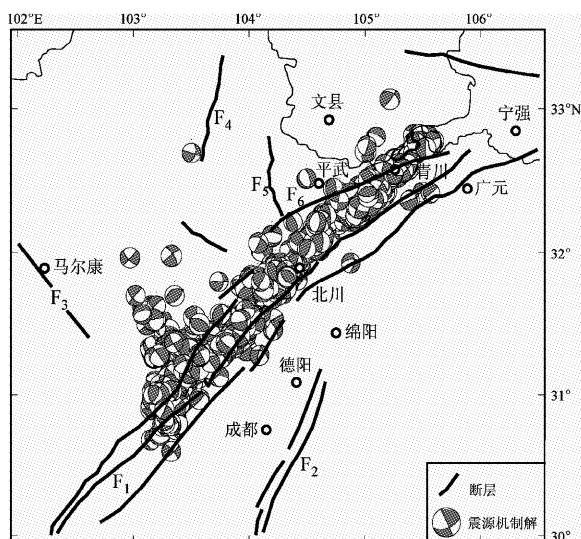
\* 收稿日期: 2009-07-24.

基金项目: “全国地震形势跟踪与判断”(2009020102) 及科技部支撑项目“川滇地区大震前应力方向趋于集中现象研究”(200808053) 联合资助。

出了利用区域地震台网的垂直向记录  $\bar{P}$  和  $\bar{S}$  振幅比资料求取小震震源机制的方法,即以层状介质中一点源位错震源模型,采用广义透射系数的快速算法和理论地震图拟合直达波最大振幅比来求取小震震源机制解。刁桂苓,于利民等(1992)在此方法基础上完善了计算程序,利用直达波  $\bar{P}$  和  $\bar{S}$  的地动位移振幅比值,结合部分记录清晰的 P 波初动资料求解震源机制解。笔者采用此程序计算了汶川地震序列的小震震源机制解。

## 1.2 使用的资料和测定结果

汶川 8.0 级地震的余震序列非常丰富,余震沿 NE 向龙门山断裂带中北段至青川断裂分布。密集余震总体地面直线分布尺度达 330 km。我们系统查阅了 2008 年 5 月 12 日至 2009 年 4 月 12 日四川区域地震台网和流动地震台网的  $M_L \geq 3.5$  地震的数字地震波资料,经反演计算,得到了汶川 8.0 级地震序列中 829 次中小地震的震源机制解(图 1)。由图 1 可以看出,余震序列的震源机制解覆盖了整个余震区,主要展布在龙门山中央断裂带( $F_1$ )上,并穿过青川断裂带( $F_6$ ),同时在余震区南段向西北方向部分突出。



$F_1$ : 龙门山断裂;  $F_2$ : 龙泉山断裂;  $F_3$ : 抚边河断裂;  
 $F_4$ : 岷江断裂;  $F_5$ : 虎牙断裂;  $F_6$ : 青川断裂

图 1 汶川地震序列小震震源机制解分布

Fig. 1 Focal mechanism solutions of the small earthquakes of the Wenchuan earthquake sequence

根据汶川 8.0 级地震震余震分布图像以及汶川地震震源参数的时空变化研究结果 (Cheng *et al.*,

2009; 王卫民等, 2008; 华卫等, 2009; 张勇等, 2009), 可以看出主震发生之后, 以虎牙—北川—安县为界, 空间上龙门山断裂带地震活动具有明显的分段性。因此, 我们也将基于余震区北段和南段中小地震的震源机制解分别进行分析。

## 2 震源机制解参数分析

### 2.1 震源断层节面分析

由于中小地震震源机制解的数目较多, 况且小地震的发生具有很强的随机性, 不便逐一进行具体分析, 我们在求取大量中小地震震源机制解的基础上, 统计分析各参数的分布。

我们将余震区北段 290 个小地震的震源机制参数按  $10^\circ$  间隔进行统计并计算出归一频数, 绘出图 2a。因为小地震的断层面和辅助面无法区分, 故在统计中同等看待, 合并在一起进行分析。小有优势的节面走向为 NNE-SSW 向, 其次为 NW-SEE 向。其中 NNE 向节面为  $N20^\circ \sim 40^\circ E$ 。  $60^\circ \sim 90^\circ$  的节面倾角所占比例最大, 斜角为  $30^\circ \sim 60^\circ$  的节面数目次之, 主要为直立和倾斜两种情况。根据滑动角分析震源力学作用方式, 节面主要呈现为逆倾型, 走向滑动, 正倾型相对较少, 但是依然独立存在。小地震的错动类型较多, 说明余震区处于应力调整状态。

采用同样的方法, 我们得出了余震区南段 539 个小地震的统计分析结果 (图 2b)。图 2b 中节面走向的分布表明节面取向比较分散, 且近乎均匀地分布在各个角域。节面倾角较陡, 主要在  $50^\circ \sim 90^\circ$  之间。由于中小地震的发生既受局部地质构造的影响, 也受区域构造应力场的影响, 因此根据滑动角分析震源力学作用方式得出, 南段余震区存在逆倾型、走向滑动型和正倾型地震。

### 2.2 震源机制力轴分析

余震区北段 290 个中小余震的震源机制解  $P$  轴方位归一分布如图 3a 所示。主压应力  $P$  轴方位以近 EW 向和 SWW-NEE 为优势方向, 倾角为  $0^\circ \sim 30^\circ$  的较多, 因而逆倾型的地震较多, 主张应力  $T$  轴的优势方向主要集中在 NNW-SSE 向, 倾角在  $0^\circ \sim 50^\circ$  范围内的较多。

采用同样的方法, 我们得出了余震区南段 539 个小地震的统计分析结果 (图 3b)。该段主压应力  $P$  轴方位分布比较分散, 各个角度都有,

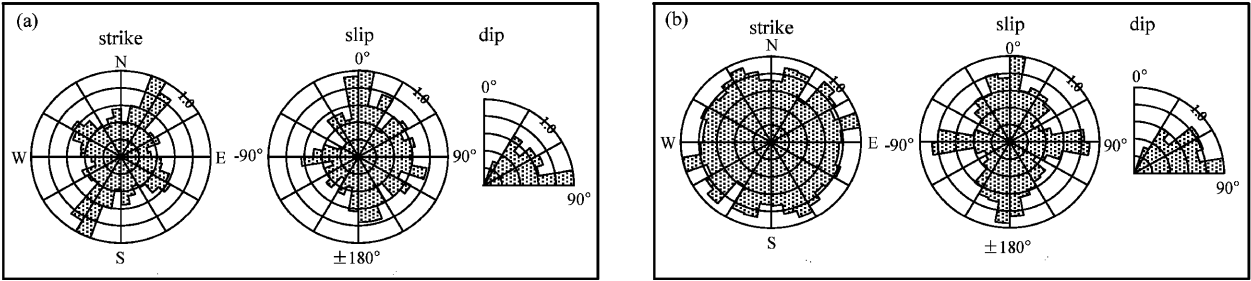


图 2 余震区北段 (a) 和南段 (b) 中小余震震源机制解的节面参数分析

Fig. 2 Nodal plane parameters of the focal mechanism solutions for middle and small earthquakes at northern (a) and southern (b) segment of aftershock area

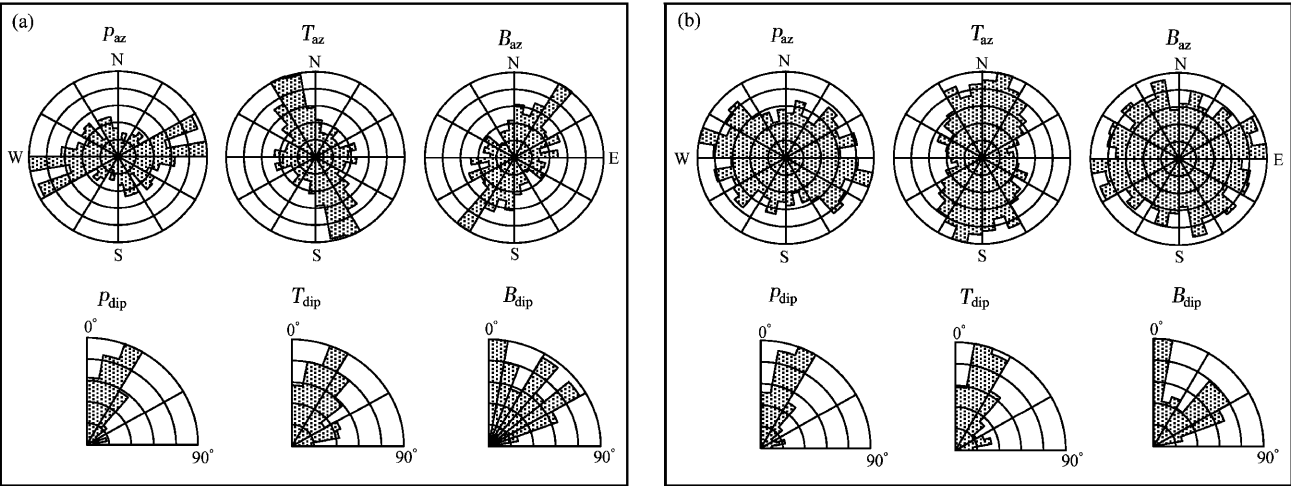


图 3 余震区北段 (a) 和南段 (b) 中小余震震源机制解的力轴参数分析

Fig. 3  $P$ ,  $T$  and  $B$  axis parameters of the focal mechanism solutions for middle and small earthquakes at northern (a) and southern (b) segment of aftershock area

小有优势的  $P$  轴方向为 NWW-SEE 向, 倾角为  $0^\circ \sim \pm 30^\circ$ 。主张应力  $T$  轴的优势方向主要集中在  $0^\circ \sim \pm 30^\circ$ 、 $150^\circ \sim 180^\circ$ 、 $-150^\circ \sim -180^\circ$  之间, 倾角在  $0^\circ \sim 30^\circ$  范围内的较多。

### 3 余震区平均应力场及其动态演化过程

#### 3.1 余震区平均应力场方向特征

为研究区域应力场的方向特征及震源断层类型, Ellsworth 和 Xu (1980) 根据震源机制解研究了应力张量的确定方法。许忠淮和戈澍漠 (1984)、许忠淮 (1985) 采用滑动方向拟合法, 反演了富蕴、唐山等地震区的应力场。Gephart 和 Forsyth (1984) 提出了联合求解应力场的方法。崔效锋和谢富仁 (1999) 将滑动方向拟合法引入

应力场分区等研究中。钟继茂和程万正 (2006) 基于震源断层面解的空间取向和断层滑动方向, 得出了相应力轴张量在地理坐标系中的表达式, 进而给出了计算平均力轴张量及主值的方法。通过求解相应的本征方程得到区域平均力轴主方向或平均应力场, 这种方法称为力轴张量计算法。

基于多个小地震震源机制解, 我们采用力轴张量法计算出汶川 8.0 级地震余震区及其南、北段平均应力张量值  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  (表 1)。整个余震区平均应力张量的计算结果为: 最大主压应力轴  $\sigma_1$  方向为  $86.9^\circ$ , 力轴仰角为  $1.0^\circ$ , 呈水平力作用; 根据余震区北段 290 次 3.5 级以上小震的震源机制解, 计算得到最大主压应力轴  $\sigma_1$  方向为  $77.1^\circ$ , 呈 NEE 向; 根据余震区南段 539 次 3.5 级以上小震的震源机制解, 计算得到最大主压应力轴  $\sigma_1$  方向为  $92.4^\circ$ , 呈 EW 向。

表 1 余震区地震平均应力张量的计算结果

Tab. 1 the results of the mean principal stress axes in aftershock area

区域范围	地震次数 ( $M_L \geq 3.5$ )	$\sigma_1$		$\sigma_2$		$\sigma_3$	
		Az/(°)	$\varphi$ /(°)	Az/(°)	$\varphi$ /(°)	Az/(°)	$\varphi$ /(°)
整个余震区	829	86.9	1.0	191.8	86.0	176.8	3.9
余震区北段	290	77.1	3.6	165.6	22.5	175.6	67.2
余震区南段	539	92.4	0.2	181.4	77.3	182.5	12.7

3.2 余震区平均应力场动态演化过程

基于前文中所求得的中小地震震源机制解，我们采用力轴张量计算方法，得到了汶川余震区南、北段在不同时段平均力轴张量或平均应力场，分析了南、北段的平均应力场随时间的演化过程。图 4 给出了余震区北段和南段平均应力场随时间的变化曲线。

在余震区北段，考虑到 5 月份发生的中小地震比较多，而且在 5 月 18 日、5 月 25 日和 5 月 27 日均发生较强余震，因此我们以这 3 次强余震的发震时间为界限，将 5 月份划分为 3 个时间段来计算北段的平均应力场。考虑到 2009 年 2~4 月发生的中小地震较少，因此将此 3 个月合并来求取平均应力场，其余结果都是按月计算所得。从图 4a 可见，在研究时段内，余震区北段平均应力场方位趋于稳定，方位角均值约为 80°，呈 NEE 向，仅在 9 月应力场扰动显著，从 8 月的 85°变化为 14°，随后又

变化为 103°。平均应力场方向接近南北方向扰动。在应力场调整期间，甘肃武都发生  $M_s5.7$  强余震。

在余震区南段，我们采用与北段相同的时间分段思路，计算得到其平均应力场方位随时间的变化曲线（图 4b）。由图可以看出，在 2008 年 8 月、9 月、12 月和 2009 年 1 月余震区南段的应力场扰动显著，平均应力场方位分别为 27°、46°、27°和 9°，平均应力场方向也接近南北方向扰动。在南段应力场调整期间，2008 年 8 月 13 和 15 日在北川和汶川分别发生  $M_s5.3$  和  $M_s5.1$  余震，2009 年 1 月 15 日汶川县又发生  $M_s5.4$  余震。

从余震区南、北段的平均应力场方位随时间演化的过程可以看出，余震区在 2008 年 8 月、9 月、12 月和 2009 年 1 月处于应力场调整阶段。

4 震源机制解类型及一致性的时间变化

4.1 震源机制解类型的变化

我们根据震源机制解参数中的滑动角，分析得到了整个余震区逆冲型地震比例随时间变化的情况。图 5 给出了逆冲型地震比例的变化曲线与强余震之间的关系。图 5 中所标注的地震均为 5.5 级以上强余震。逆冲型地震比例是采用 10 日滑动均值给出的。汶川地震序列中 5.5 级以上强余震主要发生在两个时段，其中余震区南段的强余震均发生在 5 月 16 日之前，而余震区北段的强余震则发生在 5 月 18 日之后。从图 5 中可明显看出，7 月 11~22 日这一时间段逆冲型地震的比例均为 0。随后逆冲型地震的个数开始增加，同时发生了一系列强余震，其中包括 7 月 24 日宁强 5.6 级和青川 6.0 级、8 月 1 日平武 6.1 级、8 月 5 日青川 6.1 级和 9 月 12 日甘肃武都 5.7 级地震。可见这些强余震均发生在逆冲型地震比例由 0 逐渐增加的阶段。由于 11 月份以后余震区发生的 3.5 级以上余震明显减少，所以统计得到的结果不太可靠，本文不予分析。

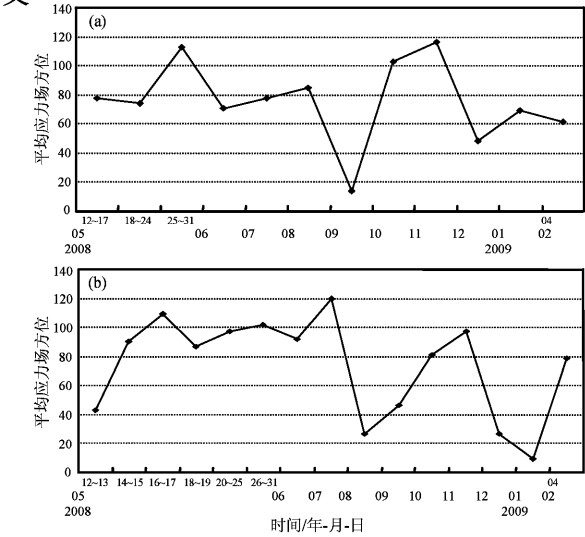


图 4 余震区北段 (a) 和南段 (b) 平均应力场方位随时间变化

Fig. 4 Change of average stress field with time at northern (a) and southern (b) segment of aftershock area

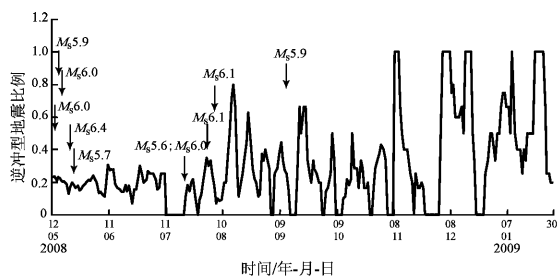


图5 余震区逆冲型地震比例随时间变化

Fig. 5 Proportional change of thrust-type earthquakes with time in the aftershock area

#### 4.2 震源机制解的一致性变化

基于大量震源机制解求得的平均应力方向虽与区域应力场方向并不完全一致,但大震之前小震震源机制趋近主震震源机制的现象在一定程度上表明应力方向集中于产生主震破裂的应力方向上。若将地震之前震源周围小震震源机制与主震震源机制的一致性作为参数加以研究,可以得到强余震前地震孕育过程中的某些信息(万永革, 2008)。钟继茂和程万正(2006)定义单个地震震源机制解的力轴与平均应力张量的差值为震源机制解的一致性参数 $\bar{\theta}$ 。根据这个理论,我们得到了余震区北段和南段一致性参数随时间的变化曲线(图6)。同时也给出了余震序列中5.5级以上强余

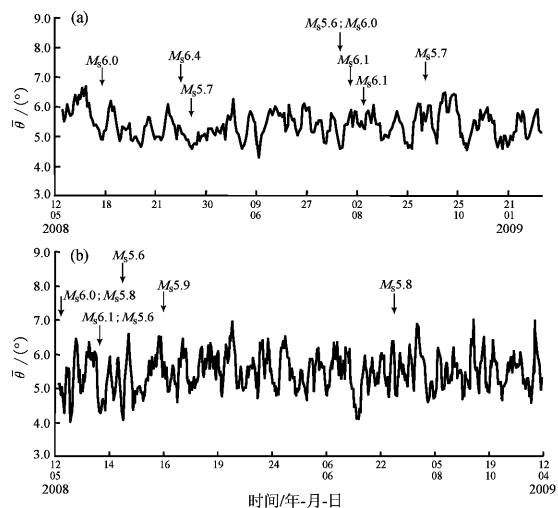


图6 余震区北段(a)和南段(b)中小地震震源机制解的一致性参数计算曲线

Fig. 6 Consistency parameter curve of focal mechanism solutions for medium and small earthquakes at northern (a) and southern (b) segment of the aftershock area

震与变化曲线的关系。图中是按照地震数依次绘出的,所以横轴各间隔不是等时长的。考虑到数值随机性强而且变化区间宽,所以本文采用五点滑动平均给出一致性参数  $\bar{\theta}$ 。余震区南、北段的值均在  $55^\circ$  线附近波动,曲线随时间的变化总体平稳,这与钟继茂和程万正(2006)给出的川青地块的一致性结果基本吻合。

## 5 结论和讨论

(1) 余震区北段 290 次小震震源机制统计特征显示: 小有优势的节面走向为 NNE-SSW 向, 在  $N20^{\circ} \sim 40^{\circ}E$  之间, 节面主要为直立和倾斜两种情况; 主压应力  $P$  轴方位以近 EW 向和 SWW-NEE 向为优势方向, 倾角为  $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ; 基于震源机制求得的最大主压应力轴方向也是 NEE 向, 角度为  $77.1^{\circ}$ 。余震区南段 539 次小震震源机制统计特征显示: 节面走向比较分散, 近乎均匀地分布在各个角域。节面倾角较陡, 主要为  $50^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ; 主压应力  $P$  轴方位分布也比较分散, 各个角度都有。小有优势的  $P$  轴方向为近 EW 向, 倾角为  $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ; 最大主压应力轴方向也是 EW 向, 角度为  $92.4^{\circ}$ 。可以看出余震区南段汶川余震序列存在非常复杂的情况,  $P$ 、 $T$  轴空间取向凌乱表明应力场较为复杂。

(2) 从余震区平均应力场随时间的演化过程可以看出, 在本研究时段内, 余震区北段平均应力场方位基本趋于稳定, 方位角均值约为  $80^{\circ}$ , 为 NEE 向。仅在 2008 年 9 月北段应力场扰动显著。方位角从 8 月的  $85^{\circ}$  变化为  $14^{\circ}$ , 随后又变化为  $103^{\circ}$ 。平均应力场方向接近 NS 方向扰动。在应力场调整期间, 甘肃武都发生  $M_s 5.7$  强余震。余震区南段在 2008 年 8 月、9 月、12 月和 2009 年 1 月的平均应力场扰动显著。平均应力场分别为  $27^{\circ}$ 、 $46^{\circ}$ 、 $27^{\circ}$  和  $9^{\circ}$ 。应力场方向接近 NS 方向扰动。在南段应力场调整期间, 2008 年 8 月 13 和 15 日在北川和汶川分别发生  $M_s 5.3$  和  $M_s 5.1$  余震; 2009 年 1 月 15 日汶川又发生  $M_s 5.4$  余震。从余震区南、北段的平均应力场方位随时间的演化过程可以看出, 余震区在 2008 年 8 月、9 月、12 月和 2009 年 1 月处于应力场调整阶段。

(3) 通过研究余震区逆冲型地震比例随时间的变化可以得到, 2008 年 7 月 11 ~ 22 日逆冲型地

震的比例为 0, 随后其个数开始增加, 期间发生了一系列的强余震, 包括 7 月 24 日宁强 5.6 级、7 月 24 日青川 6.0 级、8 月 1 日平武 6.1 级地震、8 月 5 日青川 6.1 级和 9 月 12 日甘肃武都 5.7 级地震。这些强余震均发生在逆冲型地震比例由 0 逐渐增加的阶段。而震源机制一致性反映了余震区南、北段的值均在  $55^\circ$  线附近波动, 曲线随时间的变化总体平稳。

(4) 汶川地震序列的小震震源机制受区域应力场的控制, 因而表现出优势取向的一致性, 然而震源机制类型众多, 由于汶川余震区有多条断裂参加活动, 每一断裂对其周围不同部位、以及对其它断裂的作用都不会相同, 并且余震区受多条断裂的相互影响和它们的迭加作用, 所以小震产生反向错动也是可以理解的 (刁桂苓等, 1996; 王曰风等, 2009)。

感谢河北省地震局刁桂苓研究员的帮助和指导。

## 参考文献:

- 崔效锋, 谢富仁. 1999. 利用震源机制解对中国西南及邻区进行应力分区的初步研究[J]. 地震学报, 21(5): 513-522.
- 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[R]. 中国地震局地球物理所 <http://www.csi.ac.cn/sichuan/chenyuntai.pdf>.
- 刁桂苓, 王绍晋, 龙晓帆, 等. 1996. 1976 年龙陵震群的小震震源机制[J]. 地震研究, 19(4): 331-339.
- 刁桂苓, 于利民. 1992. 震源机制解的系统聚类分析: 以海城地震序列为例[J]. 中国地震, 8(3): 86-92.
- 刁桂苓, 于利民, 宁杰远, 等. 1993. 1989 年大同震群的破裂特征[J]. 地球物理学报, 36(3): 360-368.
- 胡幸平, 俞春泉, 陶开, 等. 2008. 利用 P 波初动资料求解汶川地震及其强余震震源机制解[J]. 地球物理学报, 51(6): 1711-1718.
- 华卫, 陈章立, 郑斯华. 2009. 2008 年汶川 8.0 级地震震源参数分段特征的研究[J]. 地球物理学报, 52(2): 365-371.
- 梁尚鸿, 李幼铭, 束沛镒, 等. 1984. 利用区域地震台网 P、S 振幅比资料测定小震震源参数[J]. 地球物理学报, 27(3): 247-257.
- 万永革. 2008. 美国 Landers 地震和 Hector Mine 地震前震源机制与主震机制一致性现象的研究[J]. 中国地震, 24(3): 216-225.
- 王卫民, 赵连锋, 李娟, 等. 2008. 四川汶川 8.0 级地震震源过程[J]. 地球物理学报, 51(5): 1403-1410.
- 王曰风, 刁桂苓, 张秀萍, 等. 2009. 2001 年云南永胜 6.0 级地震余震序列震源机制解与震源区应力场分析[J]. 地震研究, 31(2): 119-123.
- 许忠淮, 戈漠漠. 1984. 用滑动方向拟合法反演富蕴地震断裂带应力场[J]. 地震学报, 6(4): 395-404.
- 许忠淮. 1985. 用滑动方向拟合法反演唐山余震区的平均应力场[J]. 地震学报, 7(4): 349-361.
- 张勇, 许力生, 陈运泰. 2009. 2008 年汶川大地震震源机制的时空变化[J]. 地球物理学报, 52(2): 379-389.
- 钟继茂, 程万正. 2006. 由多个地震震源机制解求川滇地区平均应力场方向[J]. 地震学报, 28(4): 337-346.
- Cheng W Z, Zhang Z W, Ruan X. 2009. Spatio-temporal variation and focal mechanism of Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake sequence [J]. Earthquake Science, 22(2): 107-117.
- Ellsworth W L, Xu Z H. 1980. Determination of the stress tensor from focal mechanism data[J]. Eos Trans, AGU, 61: 1117.
- Gephart J W, Forsyth D W. 1984. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: application to the San Fernando earthquake sequence [J]. JGR, 89: 9305-9320.

## Focal Mechanisms and Stress Field of Small Earthquakes of the $M_s$ 8.0 Wenchuan Earthquake Sequence

ZHANG Zhi-wei, ZHANG Yong-jiu, CHENG Wan-Zheng, WU Peng, LONG Feng, RUAN Xiang  
(*Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, Sichuan, China*)

### Abstract

Based on the data of digital seismic wave from May 12, 2008 to April 12, 2009 recorded by regional seismic network, the focal-mechanism solutions of 829 small events with  $M_L \geq 3.5$  of the  $M_s$  8.0 Wenchuan earthquake sequence were determined by the amplitude ratio of PG and SG in vertical component records with clear initial motion. Using the method of statistical analysis and stress axis tensor, the parameters of focal-mechanism solutions are analyzed and the average stress-field azimuth of aftershock area is calculated. The results show that the source-fracture plane of small earthquakes presents the strike of NNE direction, and the dip angles are near vertical or inclined at northern segment of the Longmenshan fault. The principal direction of compressive stress P-axis is SWW-NEE, the azimuth of maximum principal stress axis is  $77.1^\circ$ . At northern segment of aftershock area, the nodal plane strikes are relatively dispersed. The dip angles are steep, dispersed between  $50^\circ$  and  $90^\circ$ . The azimuth of maximum principal stress axis is EW, that is  $92.4^\circ$ . It can be seen from the evolution process of average stress-field with time at northern and southern segment of aftershock area, that the stress adjustment stages of aftershock area are August, September, December in 2008 and January in 2009. The consistency parameter curve and the proportional change of thrust-type earthquakes with time in the aftershock area are also studied, and then some significant results are given.

**Key words:**  $M_s$  8.0 Wenchuan earthquake; aftershock sequence; focal-mechanism solutions; stress field