

赵静, 武艳强, 江在森, 牛安福, 刘杰, 王丽凤, 魏文薪. 2013. 芦山地震前龙门山断裂带闭锁程度与变形动态特征研究. 地震学报, 35(5): 681-691.  
Zhao Jing, Wu Yanqiang, Jiang Zaisen, Niu Anfu, Liu Jie, Wang Lifeng, Wei Wenxin. 2013. Fault locking and dynamic deformation of the Longmenshan fault zone before the 2013 Lushan  $M_s7.0$  earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 35(5): 681-691.

## 芦山地震前龙门山断裂带闭锁程度 与变形动态特征研究\*

赵 静<sup>1)</sup> 武艳强<sup>2),\*</sup> 江在森<sup>2)</sup> 牛安福<sup>1)</sup>  
刘 杰<sup>1)</sup> 王丽凤<sup>1)</sup> 魏文薪<sup>2)</sup>

1) 中国北京 100045 中国地震台网中心

2) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

**摘要** 利用 1999—2007 和 2009—2011 年中国大陆 GPS 水平速度场数据, 采用 DEFNODE (反演计算弹性岩石圈块体旋转、应变和块体边界断层闭锁或同震滑动的 Fortran 程序) 负位错反演程序估算了芦山地震前龙门山断裂带的三维闭锁程度, 并结合剖面结果分析了断层深浅部变形特征. GPS 反演结果表明, 1999—2007 年, 龙门山断裂中北段(闭锁比例为 0.99) 处于强闭锁(本文将闭锁比例大于 0.97 的称为强闭锁) 状态; 龙门山断裂南段地表以下深度 16 km 内为强闭锁, 深度 16—21 km 处闭锁比例降低为 0.62, 深度 21—24 km 处整条断裂逐渐转变为蠕滑状态. 2009—2011 年, 即汶川地震后, 龙门山断裂中北段处于震后蠕滑状态; 龙门山断裂南段深度 16—21 km 处闭锁比例降低为 0.45, 其它位置闭锁程度保持不变. GPS 剖面结果显示, 2009—2011 年, 即汶川地震后, 龙门山断裂中北段为逆冲兼右旋走滑运动; 而南段断层不能自由滑动、变形宽度较大. 综合分析认为, 汶川地震时, 龙门山断裂南段并没有发生破裂, 一直处于较强的闭锁状态, 汶川地震的发生又加速了芦山地震的孕育进程; 由于龙门山断裂带南段的闭锁深度较中北段浅, 因此芦山地震较汶川地震强度低、震级小、破裂范围窄.

**关键词** 芦山地震 DEFNODE 负位错反演 断层闭锁比例 滑动亏空 变形特征  
doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2013.05.007 中图分类号: P315.5 文献标志码: A

### Fault locking and dynamic deformation of the Longmenshan fault zone before the 2013 Lushan $M_s7.0$ earthquake

Zhao Jing<sup>1)</sup> Wu Yanqiang<sup>2),\*</sup> Jiang Zaisen<sup>2)</sup> Niu Anfu<sup>1)</sup>  
Liu Jie<sup>1)</sup> Wang Lifeng<sup>1)</sup> Wei Wenxin<sup>2)</sup>

1) *China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China*

2) *Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*

\* 基金项目 国家“十二五”科技支撑计划课题(2012BAK19B02-02, 2012BAK19B01-06)和中国地震台网中心青年科技基金(QNJJFZ-YBB-1309)共同资助.

收稿日期 2013-05-13 收到初稿, 2013-07-04 决定采用修改稿.

\* 通讯作者 e-mail: chdqyw@126.com

**Abstract:** By using the negative dislocation model of DEFNODE, a Fortran program to model elastic lithospheric block rotations and strains, and locking or coseismic slip on block-bounding faults, we inverted the GPS horizontal velocity observations during 1999—2007 and 2009—2011 for a 3-D fault locking model of the Longmenshan fault zone before the Lushan earthquake, and analyzed characteristics of fault deformation at different depth in combination with GPS profiles. The inversion results indicate that during 1999—2007 the middle-northern segment of the Longmenshan fault was tightly locked (locked fraction is 0.99). Meanwhile the southern segment of the Longmenshan fault was tightly locked from the surface to the depth of 16 km, and the locked fraction decreases to about 0.62 at the depth of 16—21 km. The whole fault turns to creeping gradually between the depth of 21 km and 24 km. During 2009—2011, i. e., after the Wenchuan earthquake, the middle-northern segment of the Longmenshan fault was in a creeping state. Meanwhile the locked fraction of the southern segment of the Longmenshan fault decreased to about 0.45 at the depth of 16—21 km, and remained unchanged at other depths. In addition, the GPS profiles of 2009—2011 show that the middle-northern segment of the fault was thrust and dextral slip after the Wenchuan earthquake. The southern segment could not slip freely and the deformation width was large. Comprehensive analysis indicates that the southern segment of the Longmenshan fault has no rupture after the Wenchuan earthquake and is still tightly locked, and the Wenchuan earthquake speeds up the preparation process of the Lushan earthquake. Because the locked depth of the southern segment is lower than that of the middle-northern segment, therefore intensity, earthquake magnitude and rupture range of the Lushan earthquake are all less than those of the Wenchuan earthquake.

**Key words:** Lushan earthquake; negative dislocation inversion of DEFNODE; locked fraction of fault; slip deficit; deformation characteristic

## 引言

2013年4月20日,在巴颜喀拉与华南地块交界的北东向龙门山断裂带南段发生了四川芦山  $M_S7.0$  地震,这是继2008年5月12日汶川  $M_S8.0$  地震后,龙门山断裂带上发生的又一次强震,震源机制结果显示芦山地震是一次以逆冲为主,兼有少量右旋走滑分量的地震(陈运泰等,2013;刘超等,2013)。曾祥方等(2013)利用近远震数字波形记录,探讨了芦山地震的震源机制解。通过分析波形反演中深度和震源区地震波速度模型对断层倾角的影响,并结合余震机制解,确认该地震是一个高角度逆冲型发震构造产生的地震。张勇等(2013)利用全球地震台网的远震地震波数据分析认为,芦山地震包括两次破裂子事件,都发生在断层面上震源附近,没有表现出明显的破裂方向性,也没有发现大规模出露地表的破裂迹象。王卫民等(2013)利用远场体波资料反演了芦山  $M_w6.7$  地震的震源破裂过程与地震断面上的滑动量分布,结果显示芦山逆冲型地震的最大滑动量为 159 cm。

汶川地震后,许多地震工作者对汶川地震的震前变形(杜方等,2009;江在森等,2009;李延兴等,2009;武艳强等,2011;赵静等,2012)、同震位移(徐锡伟等,2008;Shen *et al*, 2009;王敏,2009;许才军等,2009;Xu *et al*, 2009;Wang *et al*, 2011)、动力

机制(滕吉文等, 2008; 张培震等, 2008, 2009; 朱介寿, 2008)、破裂过程(陈运泰等, 2008; Nishimura, Yagi, 2008; 王卫民等, 2008; 张勇等, 2008; 赵翠萍等, 2009)和震后断层应力变化(单斌等, 2009; 万永革等, 2009; 邵志刚等, 2010)等进行了系统的研究, 获得了许多有意义的成果. 多数研究结果显示汶川地震的破裂扩展类型为自初始破裂点沿龙门山断裂带向北东方向单侧破裂, 且震后余震特别是  $M_s \geq 5.0$  余震都发生在主震位置的北东方向断层上, 而龙门山断裂带南段没有发生破裂且没有发生较大余震, 所积累的应变能并没有得到释放. 由于汶川地震后龙门山地震空区的剩余部分位于龙门山断裂西南段上, 因此多位学者对南段的地震危险性也进行了关注和研究(陈运泰等, 2008; 闻学泽等, 2009). 单斌等(2009)根据地震的静态触发原理, 利用弹性位错理论和分层地壳模型计算了汶川地震引起的周边断层同震应力变化, 认为彭县—灌县断裂、北川—映秀断裂南段所积累的构造应力未充分释放, 同震库仑应力的加载有可能在今后触发该区较强余震; 万永革等(2009)以汶川地震的破裂为驱动源, 计算了该地震造成周围断层上的静态库仑破裂应力变化, 结果表明汶川地震的发生使得龙门山断裂最南端的库仑破裂应力增加; 邵志刚等(2010)基于 Burgers 体黏滞松弛模型计算了汶川地震引起的库仑应力动态演化, 认为龙门山断裂南段的库仑应力显著增加, 存在较高的地震危险性; 闻学泽等(2011)通过对区域动力学背景与地震发生关系的研究认为, 巴颜喀拉块体东边界断裂系统有发生  $M_s \geq 7.0$  地震的危险性, 其中包括龙门山断裂带南段(汶川以南—康定).

利用 GPS 观测资料反演断层不同位置的闭锁程度和闭锁深度可以为判断断裂带未来一段时期内地震危险性提供参考. 随着汶川地震后陆态网络二期 GPS 连续站和流动站逐步投入使用, 龙门山断裂带及其附近地区 GPS 站点的分布密度得以较大提高, 能够为正反演计算提供更为有效的数据约束. 本文利用 1999—2007 年和 2009—2011 年 GPS 水平速度场结果, 采用 DEFNODE 负位错反演程序估算了芦山地震前龙门山断裂带闭锁程度和垂直断层的滑动亏空速率的三维变化情况, 并综合剖面结果分析了汶川地震前后断层深浅部变形的变化特征.

## 1 DEFNODE 负位错反演方法基本原理

McCaffrey(2002, 2007)公布了 DEFNODE 负位错反演程序. 该程序假定块体内部点的运动为块体旋转、块体内部整体均匀应变及块体边界由于断层闭锁产生的滑动亏空而引起的地表弹性变形之和. 若块体内部不存在整体均匀应变, 其原理如下(McCaffrey, 2002):

$$V_i(X) = \sum_{b=1, B} H(X \in \Delta_b) [{}_{R}\Omega_b \times X] \cdot i - \sum_{k=1, F} \sum_{n=1, N_k} \sum_{j=1, 2} \phi_{nk} G_{ij}(X, X_{nk}) [{}_{h}\Omega_f \times X_{nk}] \cdot j \quad (1)$$

式中  $X$  为 GPS 测站的位置,  $V_i(X)$  为测站  $X$  的速度,  $B$  为块体数目,  $\Delta_b$  为  $b$  块体模型区域的子集(如果点  $X$  在块体  $b$  范围内  $H=1$ , 否则  $H=0$ ),  $i$  为速度分量索引( $x$  或者  $y$ ),  $i$  为  $i$  方向的单位矢量,  ${}_{R}\Omega_b$  为块体  $b$  相对于参考框架的欧拉极,  ${}_{h}\Omega_f = {}_{h}\Omega_R - {}_{f}\Omega_R$  为断层下盘  $f$  相对于上盘  $h$  的欧拉极,  $F$  为断层数量,  $N_k$  为定义断层  $k$  的节点数,  $X_{nk}$  为断层  $k$  上节点  $n$  的位置,  $\phi_{nk}$  为断层  $k$  上节点  $n$  的闭锁程度,  $j$  为断层面上  $j$  方向的单位矢量(走向方向或垂直等深线方向),  $G_{ij}(X, X_{nk})$  为响应函数, 表示断层面上节点  $X_{nk}$  处  $j$  方向上的单位滑动速率引起的地表位置  $X$  处  $i$  方向的速度分量(McCaffrey, 2002; 赵静等, 2012).

$$\begin{bmatrix} V_\lambda \\ V_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \sin \theta_0 \Delta \lambda & R \Delta \theta & 0 \\ 0 & R \sin \theta_0 \Delta \lambda & R \Delta \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_\lambda \\ \dot{\epsilon}_{\lambda\theta} \\ \dot{\epsilon}_\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中  $\theta$  和  $\lambda$  分别表示余纬度和余经度,  $R$  为区域几何中心的平均曲率半径,  $\theta_0$  为区域几何中心余纬度,  $\Delta\theta$  和  $\Delta\lambda$  分别为测点到区域几何中心的余纬度差和余经度差,  $V$  为速度分量,  $\epsilon$  为应变率分量.

若块体内部存在整体均匀应变, 应变率的计算采用 Savage 等(2001)给出的公式. 此模型为式(1)加上式(2)计算得到的, 式(2)表示块体内部均匀应变引起的速度量值的大小.

利用 GPS 水平速度场数据反演块体旋转、块体内部均匀应变和断层闭锁程度等参数的过程中, 参数拟合的不符值可由式(3)表征.

$$\chi_n^2 = \frac{\sum_{i=1, n} \left( \frac{r_i}{f\sigma_i} \right)^2}{\text{dof}} \quad (3)$$

式中  $n$  为所有观测数据的数量, dof 为自由度(所有观测数据数量-自由参数数量),  $r_i$  为观测数据残差,  $\sigma_i$  为数据标准差,  $f$  为数据误差权重因子, 它可以平衡各种数据(如 GPS 水平速度场和 GPS 垂直速度场)的影响(McCaffrey, 2002; 赵静等, 2012).

为得到使  $\chi_n^2$  达到最小的一组最佳参数值, 本反演程序使用网格搜索和模拟退火算法求解, 并且对每个块体内部是否存在整体均匀应变进行检验. 检验完成后, 通过不断改变  $f$  值大小进行逐步择优, 寻求最满意的  $f$  值, 进而保证  $\chi_n^2 \approx 1$ , 此时模型能够最佳地解释观测数据.

## 2 龙门山断裂带计算结果

### 2.1 GPS 数据与断层模型

根据地质结果与现今大地测量结果, 本文研究区域以龙门山断裂带与鲜水河断裂带为界, 包含巴颜喀拉、华南和川滇 3 个地块的部分区域(图 1). 1999—2007 年有 98 个 GPS 水平速度参与反演(赵静等, 2012); 2009—2011 年有 159 个 GPS 测点参与反演(图 1), 其中巴颜喀拉地块 45 个、华南地块 90 个、川滇地块 24 个, 平均误差为 2.1 mm/a. 采用 GAMIT/GLOBK(Herring *et al.*, 2006a, b)和 QOCA(Dong *et al.*, 1998)软件解算得到速度场.

反演过程中, 沿龙门山断裂走向共有 6 条等深线, 深度依次为 0.1, 6, 12, 16, 21 和 24 km, 每条等深线上有 10 个节点, 节点间距离为 45—60 km; 根据文献(王卫民等, 2008; 徐锡伟等, 2008; 张培震等, 2008; 朱介寿, 2008; 杜方等, 2009; Xu *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2011)的研究结果, 每两排节点之间的断层倾角从地表至深部依次为  $55^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $7^\circ$  和  $7^\circ$ ; 断裂总长度为 475 km, 断层面总宽度为 92 km(图 2).

### 2.2 不同模型对比与最优模型

由于汶川地震前龙门山断裂带(特别是其中北段)处于强闭锁状态, 积累了足够的弹性应变能, 因此为了使断层闭锁产生的弹性应变能得到充分体现, 在处理 1999—2007 年 GPS 数据时, 认为 3 个地块内只存在整体旋转运动和由于断层闭锁而产生的弹性应变, 不存在整体均匀应变, 即采用式(1)的原理来进行反演计算, 然后通过反演残余速度计算残

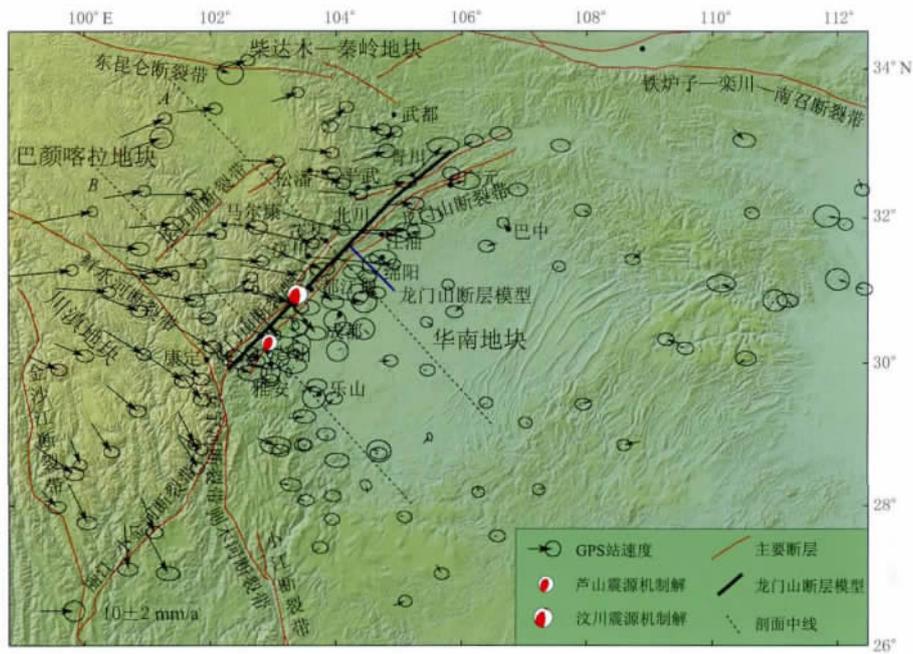


图 1 研究区 GPS 站 2009—2011 年水平运动速度场(相对于华南地块)与活动断裂分布

Fig. 1 The horizontal GPS velocity field during 2009—2011 (related to South China block) and active faults in the study region

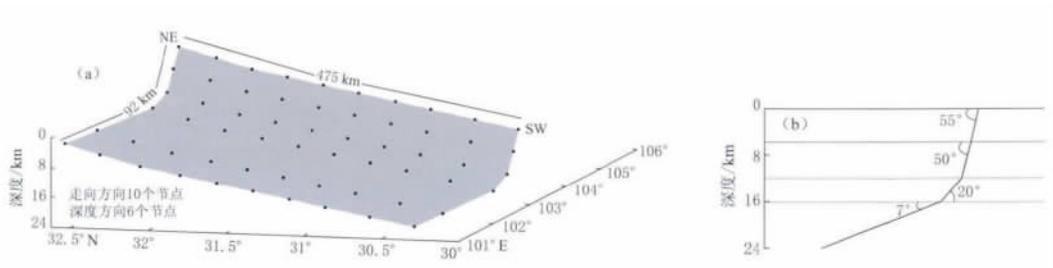


图 2 断层模型与节点设置

(a) 断层面结构与节点位置; (b) 断层剖面结构

Fig. 2 Fault model and node setting

(a) Fault surface geometry and nodes; (b) Vertical section of fault

差应变率. 通过大量试算得到了最优模型, 其中 GPS 水平速度场数据误差权重因子  $f$  取为 1.27,  $\chi_n^2=0.996$ (观测值个数为 196, 自由度为 169).

汶川地震后, 龙门山断裂带中北段附近积累的弹性应变能得到释放, 巴颜喀拉地块内靠近中北段附近的 GPS 测点运动速率明显加快(图 1), 在地块内部产生拉张应变. 因此在处理 2009—2011 年 GPS 数据时, 对于地块内部是否存在整体均匀应变进行了 8 种试算, 最优模型为巴颜喀拉地块和川滇地块内部存在整体均匀应变, 华南地块内部不存在整体均匀应变. GPS 水平速度场数据误差权重因子  $f$  取为 2.18,  $\chi_n^2=1.007$ (观测值个数为 318, 自由度为 285).

### 3 芦山地震前龙门山断裂地壳变形特征分析

#### 3.1 震前两个时段断层闭锁比例与滑动亏空速率分布

根据前面的最优模型得到了芦山地震前两个时段的龙门山断裂闭锁程度( $\phi$ )空间分布. 图 3 为 1999—2007 年 GPS 速度场反演结果(汶川地震的起始破裂深度取 19 km(刘启元等, 2008)). 结果表明, 汶川地震前龙门山断裂中北段处于强闭锁状态(闭锁比例 0.99), 而且闭锁深度约为 21 km; 南段只有地表以下 16 km 深度为强闭锁状态, 在 16—21 km 深度处闭锁比例降低为 0.62, 较中北段同一深度的闭锁程度稍弱, 在 21—24 km 深度处整条断裂均逐步由闭锁转变为蠕滑特征(赵静等, 2012).

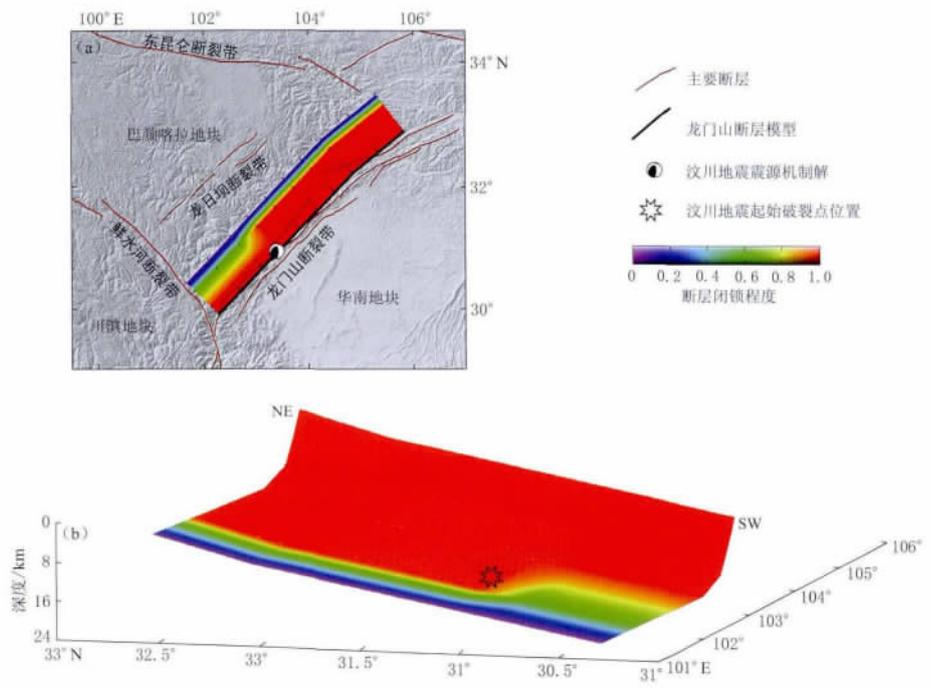


图 3 1999—2007 年龙门山断裂闭锁程度(引自赵静等, 2012)

(a) 断层闭锁地面投影; (b) 断层闭锁分布

Fig. 3 Locking level of the Longmenshan fault during 1999—2007

(a) Projection of fault locking; (b) Fault locking distribution

图 4 为 2009—2011 年 GPS 速度场反演结果. 其中芦山地震的震中(30.286°N, 102.956°E)、起始破裂深度(12.3 km)和震源机制参考 USGS 最初给出的结果. 反演结果表明, 在芦山地震前, 龙门山断裂中段和北段已经基本解锁(只有北段 0.1—6 km 深度的闭锁比例约为 0.15), 处于蠕滑状态, 属于大震后早期的愈合阶段; 龙门山断裂南段仍然是地表以下深度 16 km 内为强闭锁, 在深度 16—21 km 处闭锁比例降低为 0.45, 较汶川震前的 0.62 稍有降低, 在 21—24 km 深度处逐渐转变为蠕滑特征. 芦山地震的起始破裂点位于龙门山断裂南段的强闭锁位置(图 4b), 分析认为, 由于汶川地震的破裂扩展类型为自初始破裂点沿龙门山断裂向北东方向的单侧破裂, 且震后余震特别是  $M_s \geq 5.0$  余震都发生在主震位置的北东方向断层上, 而在汶川地震时龙门山断裂带南段并没有发生破裂, 汶川地震后也

没有发生较大余震, 因此其所积累的弹性应变能并未得到释放, 一直处于较强的闭锁状态, 存在发生中强地震背景. 同时, 由于龙门山断裂带南段的闭锁深度为 16 km, 较汶川地震前中北段的闭锁深度浅, 因此芦山地震较汶川地震强度低、震级小、破裂范围窄.

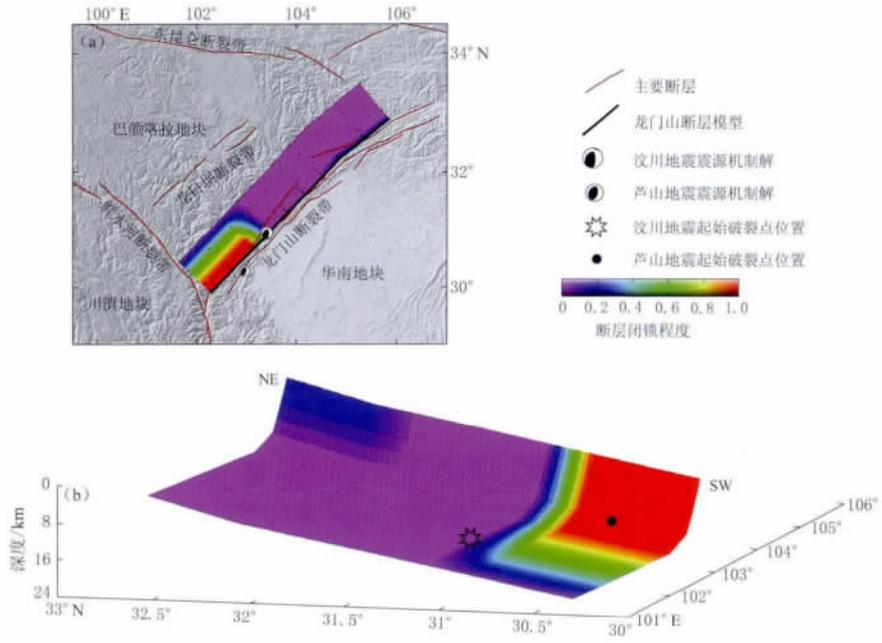


图 4 2009—2011 年龙门山断裂带闭锁程度

(a) 断层闭锁地面投影; (b) 断层闭锁分布

Fig. 4 Locking level of the Longmenshan fault during 2009—2011

(a) Projection of fault locking; (b) Fault locking distribution

图 5 给出了龙门山断裂两个时段的垂直断层方向的挤压滑动亏空速率分布. 图 5a 结果显示, 汶川地震前龙门山断裂南段从地表至深度 16 km 处滑动亏空速率约为 2.0 mm/a, 深度 16—21 km 处滑动亏空速率降低为 1.2 mm/a; 图 5b 结果显示, 汶川地震后龙门山断裂南段从地表至深度 16 km 处滑动亏空速率约为 10.5 mm/a, 深度 16—21 km 处滑动亏空速率降低为 4.8 mm/a, 深度 21—24 km 处断裂逐渐转变为蠕滑状态, 滑动亏空值逐渐降低为 0. 以上结果表明, 汶川地震后龙门山断裂南段的滑动亏空速率明显增大, 汶川地震的发生导致了龙门山断裂南段应变积累速率的提高. 结合图 1 速度场结果分析认为, 汶川地震后巴颜喀拉地块东向运动显著增强, 导致仍然处于闭锁状态的龙门山断裂带南段应变积累总量增加, 因此汶川地震的发生加速了芦山地震的孕育进程.

### 3.2 剖面结果分析

根据图 1 中剖面位置(剖面长均为 700 km、中段剖面 A 宽 180 km 和南段剖面 B 宽 120 km), 图 6 给出了龙门山断裂中段剖面 A 和南段剖面 B 的 2009—2011 年 GPS 水平观测值与模型值的剖面拟合结果. 图 6a 结果表明, 位于龙门山断裂带附近一些测点的垂直断层运动分量的拟合残差较大, 原因在于汶川逆冲型地震发生以后, 巴颜喀拉地块处于震后余滑与松弛状态, 因此断层附近 GPS 测点的垂直断层运动分量比远离断层 GPS 测点的垂直断层运动分量很大; 其它 GPS 测站的模型拟合残差较小, 基本保持在 3 mm/a 以内.

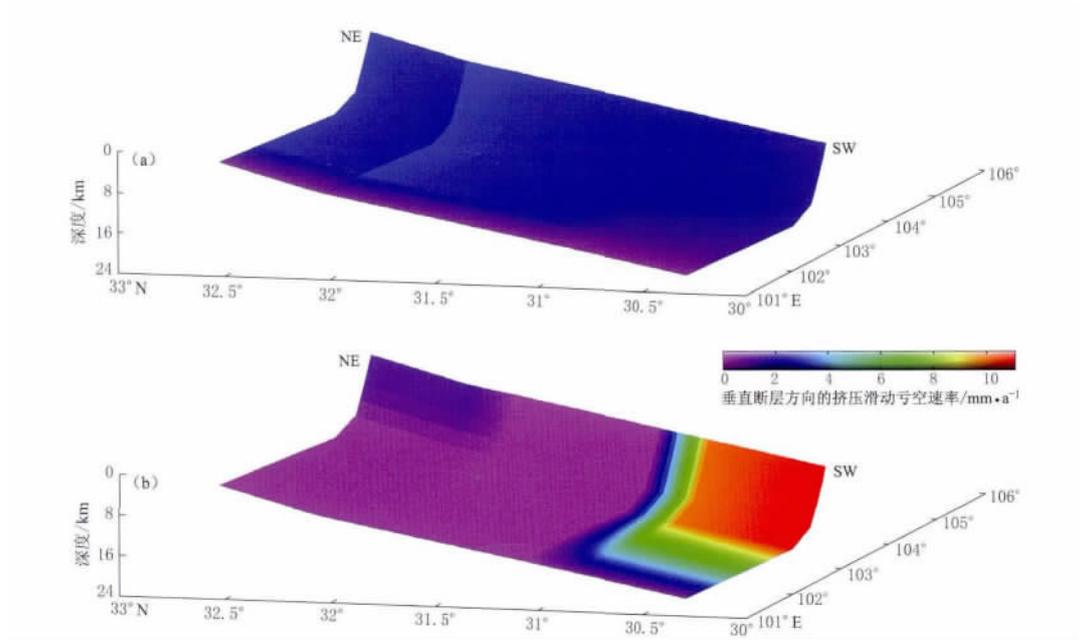


图 5 1999—2007 年(a)与 2009—2011 年(b)龙门山断裂垂直断层方向的挤压滑动亏空分布  
 Fig. 5 Normal compressional slip deficit rate of the Longmenshan fault during 1999—2007 (a) and 2009—2011 (b)

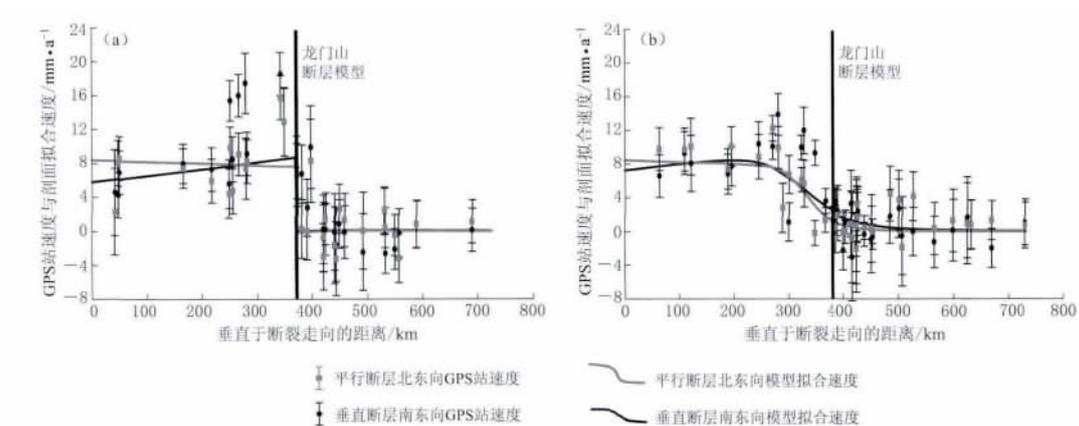


图 6 横跨龙门山断裂中段剖面 A 和南段剖面 B 的 2009—2011 年 GPS 站速度剖面 and 拟合结果(相对于华南地块)

剖面 A、B 位置见图 1 所示。图中灰色线为平行断层运动的模型值，斜率为正表示左旋，反之为右旋；  
 黑色线为垂直断层运动的模型值，斜率为正表示拉张，反之为挤压

Fig. 6 GPS velocity profiles A (a) and B (b) across the middle and the southern segments of the Longmenshan fault during 2009—2011, as well as model fitting results (relative to South China block)

Locations of profiles A and B see Fig. 1. Gray line denotes velocity parallel to fault, positive slope means sinistral slip and negative denotes dextral slip. Black line indicates velocity normal to fault, positive slope indicates extensional slip and negative indicates compressional slip

图 6a 结果表明, 龙门山断裂中段的逆冲和走滑分量均存在一个明显的阶跃变化, 表现出震后断裂滑动特征, 表明中段已经解锁, 处于震后蠕滑状态; 图 6b 结果表明, 龙门山断裂南段的逆冲与走滑分量均表现为连续变形特征, 断层变形宽度较大, 显示断层不能自由滑动, 仍然处于强闭锁状态. 赵静等(2012)的结果与本文图 6b 对比可知, 龙门山断裂带南段西北侧 250 km 范围内, 其垂直断层的水平缩短速率由汶川震前约 2 mm/a 增大到震后约 6 mm/a, 其平行断层的右旋扭动量由汶川震前 5 mm/a 增大到震后约 7 mm/a (此处按  $(32.22^{\circ}, 104.85^{\circ}-29.91^{\circ}, 102.28^{\circ})$  方位断层线投影, 而非芦山地震破裂方向投影), 对比表明汶川地震使龙门山断裂带南段西北侧的巴颜喀拉地块的逆冲与右旋走滑运动都有所加强. 同时在汶川地震后, 龙门山断裂南段仍处于较强的闭锁状态. 因此, 汶川地震后巴颜喀拉地块垂直断层的水平缩短速率和平行断层的右旋扭动量都增加了, 进而龙门山断裂南段的应变积累速率也增加了.

## 4 讨论与结论

1) DEFNODE 负位错反演方法在国际上已得到了较为广泛的应用 (McCaffrey *et al.*, 2000, 2007; McCaffrey, 2002, 2005; Wallace *et al.*, 2004a, b, 2006), 在国内仅有较少文章发表. 笔者在对静态问题进行模拟的基础上, 验证了该方法在低倾角与高倾角条件下反演结果均具有高度可靠性(赵静等, 2013). 本文将该方法应用于动态资料的反演中, 初步证明反演结果有效.

2) 1999—2007 年 GPS 数据反演结果表明, 汶川地震前龙门山断裂中北段处于强闭锁状态; 南段只有地表以下深度 16 km 内为强闭锁, 深度 16—21 km 处闭锁比例降低为 0.62, 较中北段同一深度的闭锁程度稍弱; 深度 21—24 km 处整条断裂逐渐转变为蠕滑状态. 2009—2011 年 GPS 数据反演结果表明, 汶川地震后龙门山断裂中北段处于蠕滑状态, 属于震后愈合阶段; 龙门山断裂南段仍然是地表以下深度 16 km 内为强闭锁, 深度 16—21 km 处闭锁比例降低为 0.45, 深度 21—24 km 处逐渐转变为蠕滑特征. 汶川地震发生在龙门山断裂带中段与南段交汇的位置, 震中两侧断层闭锁程度有所差异, 地震发生时从震中向北东向单向破裂而南段没有发生破裂; 芦山地震发生在汶川地震后依然处于较高闭锁状态的龙门山断裂南段, 反演破裂过程结果显示, 破裂具有各向同性——从一点开始, 以近似圆形向四面扩展(王卫民等, 2013; 张勇等, 2013).

3) 垂直断层方向的挤压滑动亏空速率结果显示, 汶川地震前, 龙门山断裂南段从地表至深度 16 km 处滑动亏空速率约为 2.0 mm/a, 深度 16—21 km 处滑动亏空速率降低为 1.2 mm/a; 汶川地震后, 龙门山断裂南段从地表至深度 16 km 处滑动亏空速率约为 10.5 mm/a, 深度 16—21 km 处滑动亏空速率降低为 4.8 mm/a. 这表明汶川地震后龙门山断裂南段的滑动亏空速率明显增大, 在没有发生蠕滑的情况下, 汶川地震促进了其应变积累速率的提高, 加速了芦山地震的孕育进程.

4) 2009—2011 年 GPS 水平观测值与模型值的剖面拟合结果较好. 汶川地震后, 龙门山断裂南段的逆冲和走滑分量均表现为连续变形特征, 断层变形宽度较大, 显示断层不能自由滑动, 仍然处于强闭锁状态; 龙门山断裂中段的逆冲和走滑分量均存在一个明显的阶跃变化, 表现出滑动特征, 表明中段已经解锁, 处于震后蠕滑状态. 龙门山断裂带南段西北侧 250 km 范围内, 其垂直断层的水平缩短速率由汶川震前约 2 mm/a 增大到震后约

6 mm/a; 其平行断层的右旋扭动量由汶川地震前 5 mm/a 增大到震后约 7 mm/a, 这表明龙门山断裂南段来自西北侧相对大尺度加载速率加大了, 使得龙门山断裂南段应变积累速度加快。因此, 汶川地震的发生促进了龙门山断裂南段应变积累速率的提高。

### 参 考 文 献

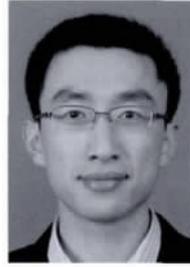
- 陈运泰, 许力生, 张勇, 杜海林, 冯万鹏, 刘超, 李春来. 2008. 2008年5月12日汶川特大地震震源特性分析报告[R/OL]. [2009-01-05]. [http://www.cea-igp.ac.cn/汶川地震专题/地震情况/初步研究及考察结果\(一\)](http://www.cea-igp.ac.cn/汶川地震专题/地震情况/初步研究及考察结果(一)).
- 陈运泰, 杨智娴, 张勇, 刘超. 2013. 从汶川地震到芦山地震[J]. 中国科学: 地球科学, 43(6): 1064-1072.
- 杜方, 闻学泽, 张培震, 王庆良. 2009. 2008年汶川8.0级地震前横跨龙门山断裂带的震间形变[J]. 地球物理学报, 52(11): 2729-2738.
- 江在森, 方颖, 武艳强, 王敏, 杜方, 平建军. 2009. 汶川8.0级地震前区域地壳运动与变形动态过程[J]. 地球物理学报, 52(2): 505-518.
- 李延兴, 张静华, 周伟, 胡新康, 郭良迁, 张中伏. 2009. 汶川 $M_s8.0$ 地震孕育发生的机制与动力学问题[J]. 地球物理学报, 52(2): 519-530.
- 刘超, 许力生, 陈运泰. 2013. 2013年4月20日四川芦山7.0级地震(1.0版)[EB/OL]. [2013-05-01]. <http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/266824.shtml>.
- 刘启元, 陈九辉, 李顺成, 李昱, 郭颀, 王峻, 齐少华. 2008. 汶川8.0级地震: 川西流动地震台阵观测数据的初步分析[J]. 地震地质, 30(3): 584-596.
- 单斌, 熊熊, 郑勇, 刁法启. 2009. 2008年5月12日 $M_w7.9$ 汶川地震导致的周围断层应力变化[J]. 中国科学: D辑, 39(5): 537-545.
- 邵志刚, 周龙泉, 蒋长胜, 马宏生, 张浪平. 2010. 2008年汶川 $M_s8.0$ 地震对周围断层地震活动的影响[J]. 地球物理学报, 53(8): 1784-1795, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.08.004.
- 滕吉文, 白登海, 杨辉, 闫雅芬, 张洪双, 张永谦, 阮小敏. 2008. 2008汶川 $M_s8.0$ 地震发生的深层过程和动力学响应[J]. 地球物理学报, 51(5): 1385-1402.
- 万永革, 沈正康, 盛书中, 徐晓枫. 2009. 2008年汶川大地震对周围断层的影响[J]. 地震学报, 31(2): 128-139.
- 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[J]. 地球物理学报, 52(10): 2519-2526, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.010.
- 王卫民, 郝金来, 姚振兴. 2013. 2013年4月20日四川芦山地震震源破裂过程反演初步结果[J]. 地球物理学报, 56(4): 1412-1417, doi:10.6038/cjg20130436.
- 王卫民, 赵连锋, 李娟, 姚振兴. 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.
- 闻学泽, 张培震, 杜方, 龙锋. 2009. 2008年汶川8.0级地震发生的历史与现今地震活动背景[J]. 地球物理学报, 52(2): 444-454.
- 闻学泽, 杜方, 张培震, 龙锋. 2011. 巴颜喀拉块体北和东边界大地震序列的关联性与2008年汶川地震[J]. 地球物理学报, 54(3): 706-716, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.03.010.
- 武艳强, 江在森, 杨国华, 刘晓霞, 赵静. 2011. 汶川地震前GPS资料反映的应变率场演化特征[J]. 大地测量与地球动力学, 31(5): 20-25.
- 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 马保起, 陈杰, 周荣军, 何宏林, 田勤俭, 何玉林, 王志才, 孙昭民, 冯希杰, 于贵华, 陈立春, 陈桂华, 于慎鄂, 冉勇康, 李细光, 李陈侠, 安艳芬. 2008. 汶川 $M_s8.0$ 地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, 30(3): 597-629.
- 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[J]. 测绘学报, 38(3): 195-201.
- 曾祥方, 罗艳, 韩立波, 石耀霖. 2013. 2013年4月20日四川芦山 $M_s7.0$ 地震: 一个高角度逆冲地震[J]. 地球物理学报, 56(4): 1418-1424, doi:10.6038/cjg20130437.
- 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 冉勇康. 2008. 2008年汶川8.0级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. 地球物理学报, 51(4): 1066-1073.
- 张培震, 闻学泽, 徐锡伟, 甘卫军, 王敏, 沈正康, 王庆良, 黄媛, 郑勇, 李小军, 张竹琪, 马胜利, 冉勇康, 刘启元, 丁志峰, 吴建平. 2009. 2008年汶川8.0级特大地震孕育和发生的多单元组合模式[J]. 科学通报, 54(7): 944-953.
- 张勇, 冯万鹏, 许力生, 周成虎, 陈运泰. 2008. 2008年汶川大地震的时空破裂过程[J]. 中国科学: D辑, 38(10): 1186-1194.

- 张勇, 许力生, 陈运泰. 2013. 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, **56**(4): 1408–1411, doi:10.6038/cjg20130435.
- 赵翠萍, 陈章立, 周连庆, 李志雄, 康英. 2009. 汶川  $M_w$ 8.0 地震震源破裂过程研究: 分段特征[J]. 科学通报, **54**(22): 3475–3482.
- 赵静, 江在森, 武艳强, 刘晓霞, 魏文薪, 李强. 2012. 汶川地震前龙门山断裂带闭锁程度和滑动亏损分布研究[J]. 地球物理学报, **55**(9): 2963–2972, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.015.
- 赵静, 江在森, 武艳强, 刘晓霞, 魏文薪, 王阅兵, 李强, 徐晶. 2013. Defnode 负位错模型反演结果的可靠性和稳定性分析[J]. 大地测量与地球动力学, **33**(1): 21–24.
- 朱介寿. 2008. 汶川地震的岩石圈深部结构与动力学背景[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, **35**(4): 348–356.
- Dong D, Herring T A, King R W. 1998. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data[J]. *J Geophys Res*, **72**: 200–214.
- Herring T A, King R W, McClusky S C. 2006a. *GAMIT Reference Manual*[M/OL]. Release 10.3. Massachusetts Institute Technology. [2013-04-29]. <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/index.htm>.
- Herring T A, King R W, McClusky S C. 2006b. *GLOBK Reference Manual*[M/OL]. Release 10.3. Massachusetts Institute Technology. [2013-04-29]. <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/index.htm>.
- McCaffrey R. 2002. Crustal block rotations and plate coupling; in plate boundary zones[J]. *Geodynamics Series*, **30**: 101–122.
- McCaffrey R. 2005. Block kinematics of the Pacific–North America plate boundary in the southwestern US from inversion of GPS, seismological, and geologic data[J]. *J Geophys Res*, **110**(B7): B07401, doi:10.1029/2004JB003307.
- McCaffrey R. 2007. *DEFNODE User's Manual*[M/OL]. Version 2007.10.25. [2013-04-29]. [http://web.pdx.edu/~mccaf/www/defnode/defnode\\_Q71025.html](http://web.pdx.edu/~mccaf/www/defnode/defnode_Q71025.html).
- McCaffrey R, Long M D, Goldfinger C, Zwick P C, Nabelek J L, Johnson C K, Smith C. 2000. Rotation and plate locking at the southern Cascadia subduction zone[J]. *Geophys Res Lett*, **27**: 3117–3120.
- McCaffrey R, Qamar A I, King R W, Wells R, Khazaradze G, Williams C A, Stevens C W, Vollick J J, Zwick P C. 2007. Fault locking, block rotation and crustal deformation in the Pacific Northwest[J]. *Geophys J Int*, **169**: 1315–1340, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03371.x.
- Nishimura N, Yagi Y. 2008. Rupture process for May 12, 2008 Sichuan earthquake[EB/OL]. [2009-06-05]. <http://www.geol.tsukuba.ac.jp/~nismura/20080512/>.
- Savage J C, Gan W J, Svarc J L. 2001. Strain accumulation and rotation in the eastern California shear zone[J]. *J Geophys Res*, **106**(B10): 21995–22007.
- Shen Z K, Sun J B, Zhang P Z, Wan Y G, Wang M, Bürgmann R, Zeng Y H, Gan W J, Liao H, Wang Q L. 2009. Slip maxima at fault junctions and rupturing of barriers during the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Nature Geosci*, **2**: 718–724, doi:10.1038/NGEO636.
- Wallace L M, Beavan J, McCaffrey R, Berryman K, Denys P. 2006. Balancing the plate motion budget in the South Island, New Zealand using GPS, geological and seismological data[J]. *Geophys J Int*, **168**(1): 332–352, doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03183.x.
- Wallace L M, Beavan J, McCaffrey R, Darby D. 2004a. Subduction zone coupling and tectonic block rotations in the North Island, New Zealand[J]. *J Geophys Res*, **109**(B12): B12406, doi:10.1029/2004JB003241.
- Wallace L M, Stevens C, Silver E, McCaffrey R, Loratung W, Hasiata S, Stanaway R, Curley R, Rosa R, Taugaloidi J. 2004b. GPS and seismological constraints on active tectonics and arc-continent collision in Papua New Guinea; Implications for mechanics of microplate rotations in a plate boundary zone[J]. *J Geophys Res*, **109**(B05): B05404, doi:10.1029/2003JB002481.
- Wang Q, Qiao X J, Lan Q G, Jeffrey F, Yang S M, Xu C J, Yang Y L, You X Z, Tan K, Chen G. 2011. Rupture of deep faults in the 2008 Wenchuan earthquake and uplift of the Longmen Shan[J]. *Nature Geosci*, **4**: 634–640, doi:10.1038/NGEO1210.
- Xu X W, Wen X Z, Yu G H, Chen G H, Klinger Y, Hubbard J, Shaw J. 2009. Coseismic reverse and oblique-slip surface faulting generated by the 2008  $M_w$ 7.9 Wenchuan earthquake, China[J]. *Geology*, **37**(6): 515–518, doi:10.1130/G25462A.1.

作者简介



缪森 中国地震局地壳应力研究所研究实习员, 中国地震局地球物理研究所在职博士研究生。2009年中国海洋大学勘查技术与工程专业毕业, 获学士学位; 2012年中国地震局地壳应力研究所固体地球物理学专业毕业, 获硕士学位。现主要从事地球动力学数值模拟方面的研究。



赵静 中国地震台网中心研究实习员。2012年中国地震局地震预测研究所固体地球物理专业毕业, 获硕士学位。硕士期间主要从事块体应变与断层滑动和闭锁的研究。现主要从事GPS数据处理与孕震信息提取、地震前兆信息分析等方面的研究。中国地震学会会员。



刘博研 中国地震局地壳应力研究所助理研究员。2006年中国地质大学(北京)固体地球物理专业毕业, 获学士学位; 2009年中国科学院研究生院(现为中国科学院大学)固体地球物理学专业毕业, 获硕士学位; 2012年中国科学院研究生院固体地球物理专业毕业, 获博士学位。曾从事强地面运动模拟、震源物理等方面的研究, 现从事断层动力学、地震活动性等方面的研究。中国地球物理学会终身会员, 美国地球物理学会(AGU)会员。



陈石 中国地震局地球物理研究所副研究员。2009年中国科学院研究生院(现为中国科学院大学)固体地球物理学专业毕业, 获博士学位。主要从事重磁位场数据处理及方法、地球动力学、数值建模和并行计算及可视化、地球重力场变化与地震活动性关系等方面研究。中国地球物理学会、中国地震学会终身会员。



牛安福 中国地震台网中心研究员。1986年山东师范大学应用数学专业毕业, 获学士学位; 1989年武汉地震研究所构造形变与地球动力学专业毕业, 获硕士学位; 2000年中国地震局地球物理研究所固体地球物理专业毕业, 获博士学位。主要从事地形变观测、前兆机理及地震预测方面的研究。中国地震学会、欧洲地球物理学会及美国地震学会会员。



石磊 中国地震局地球物理研究所助理研究员。2012年中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院地球探测与信息技术专业毕业, 获博士学位。主要从事重力资料处理与反演、解释方法及其应用方面的研究。美国地球物理学会(AGU)和勘探地球物理学家学会(SEG)会员。