

文章编号:1001-1595(2009)02-0108-06

## 基于 GPS 观测数据的汶川地震断层形变反演分析

李志才<sup>1</sup>, 张 鹏<sup>1</sup>, 金双根<sup>2</sup>, 蒋志浩<sup>1</sup>, 温扬茂<sup>3</sup>

1. 国家基础地理信息中心 大地测量部, 北京 100044; 2. 得克萨斯大学 奥斯汀分校空间研究中心, 得克萨斯 奥斯汀 TX 78759; 3. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079

## Wenchuan Earthquake Deformation Fault Inversion and Analysis Based on GPS Observations

LI Zhi-cai<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, JIN Shuang-gen<sup>2</sup>, JIANG Zhi-hao<sup>1</sup>, WEN Yang-mao<sup>3</sup>

1. Department of Geodesy, National Geomatics Center of China, Beijing 100044, China; 2. Center for Space Research, University of Texas at Austin, TX 78759, USA; 3. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract :** The May 12th 2008 Wenchuan earthquake ( $M_w=8.0$ ) caused many people death and economic lost in Sichuan Province. The surface observation data were rapidly obtained using GPS technology by the State Bureau of Surveying and Mapping (SBSM) and China Earthquake Administration (CEA) after the earthquake broking. In this paper, the reliable co-seismic deformation field is derived from GPS measurements using the highly precise data processing method. The larger deformations are in Wenchuan, Qingchuan and Beichuan Counties rather in the epicenter, while the largest magnitude is up to 2.3 m in the horizontal and 0.7 m in the vertical direction in Beichuan. The co-seismic fault slip distributions are further inverted using the elastic half-space homogeneous model with distributed slip model. The inversion results show that the non-constrained fault slip is most according with the GPS observed co-seismic deformation and the seismic fault is not only right-lateral and thrust slip, but also with a little left-lateral slip and normal slip slide. The moment tensor is about  $2.38 \times 10^{21}$  N · M and the main forwardly-inverted co-seismic deformations are in Dujianyan-Wenchuan county and also in Beichuan, Qingchuan areas at the greatest deformation of about 4.5 m in the east direction and 0.8 m in the north direction with a strongly right-lateral characteristic, which are almost consistent with the wide geological survey results.

**Key words :** co-seismic deformation; fault slip; GPS; Wenchuan

**摘 要:** 通过高精度数据处理方法获取了 2008 年 5 月 12 日汶川地震 ( $M_w=8.0$ ) 可靠的同震形变位移, 较大形变主要在汶川、青川和北川县, 其中最大同震形变不在震源处, 而在北川县, 水平方向达到 2.3 m, 垂向为 0.7 m。并进一步采用分布滑动模型, 利用弹性半空间均匀位错理论反演得到同震断层滑动分布。研究结果表明, 不约束断层滑动特性的反演结果显示汶川地震断层不仅仅是右旋、逆断层, 还伴随着少许左旋走滑及正断层变化。其地震矩张量为  $2.38 \times 10^{21}$  N · M, 基于反演的断层滑动分布正演的区域同震形变场主要变形区域分别在都江堰—汶川县, 北川县, 青川县等一带, 地表最大变形达到东方向 4.5 m, 北方向 0.8 m, 具有极强的右旋走势, 均与野外地质调查结果相符合。

**关键词:** 同震变形; 断层滑动; GPS; 汶川

中图分类号: P227 文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金(40574006); 国家 863 科技项目(2006AA12Z323; 2007AA12Z316); 国家公益性行业(地震行业)科研专项(200808080)

## 1 引 言

2008 年 5 月 12 日, 发生在四川龙门山地区汶川县境内的 8.0 级地震, 造成了重大人员伤亡、地质灾害和经济损失。地震所在区域位于青藏高原东缘与四川盆地交界, 是由青藏高原向东强烈挤压四川盆地而形成的高山地区。川、滇两省西缘均为地震和构造运动十分活跃的地带, 属我国境内的南北地震带。该区自新生代以来一直受到

印度洋板块与欧亚板块, 即两陆—陆板块碰撞与挤压的强烈作用, 由于青藏高原的抬升和构造运动的制约, 新构造活动比较强烈。这里的新构造运动受到深部地壳结构影响明显、且为其深层过程强烈变化的界带, 并具有分区性。由于构造运动受到中、新代、特别是第四纪活动性断裂构造的影响, 故与相邻板块构造运动在成因上有着密切的内在联系<sup>[1]</sup>。地质调查表明, 龙门山构造带的几条主断裂带自晚第四纪以来均显示由北西向南

东的逆冲运动,并伴有显著的右旋走滑分量。单条断层平均水平滑动量与垂直滑动量大致相当,约为  $1\text{ mm/a}$  左右。GPS 观测到的跨龙门山断裂带 10 年时间尺度的现今构造变形不超过  $2\text{ mm/a}$ ,与地质尺度的观测量一致。因此在长期的北西南东方向区域构造应力场的作用下,在龙门山断裂带积累的应变能最终以大地震的方式释放,造成极大破坏<sup>[2]</sup>。

利用 GPS 可实时监测断层的活动性质,特别是在断层活动性较强的地区布设密集的 GPS 监测点,可为地震预测提供详细资料。美国利用 GPS 已经建立了南加利福尼亚整体网,旧金山海湾区域变形网,为该区的地形变研究提供了丰富的研究资料<sup>[3]</sup>。事实上,除了在断层发震前后布设的 GPS 观测变形主要反映为断层作用,对于长期布设的 GPS 观测点,其监测到的地面变形除了有因各种断层滑动产生的变形场外,主要是与该点所在块体的整体运动有关。美国、日本以及欧洲等国家建立了大量的 GPS 连续运行站以监测各自区域内的地震活动带。例如 1999 年台湾集集地震,2003 年印尼大地震,2005 年昆仑山口大地震,GPS 观测数据提供了地震区域活动断层位移和地壳流变属性<sup>[4~6]</sup>。本文利用 GPS 观测资料首次分析汶川地震同震形变及其断层滑动反演特征。

## 2 震区 GPS 观测和同震形变

2007 年~2008 年,国家测绘局开始了四川省区域大地水准面精化工作,至汶川地震前,在四川全省布设了 A、B、C 级点近 300 个,汶川地震发生的周边区域甘肃省、陕西省也在类似项目中先后布设了不同等级的 GPS 点。汶川地震发生后,为快速监测地震影响的地形变及测量基准变化,研究地震发生机制,国家测绘局重测了地震发生区域龙门山断层附近 40 多个重合点,国家地震局重新观测了区域网内地震发生区域 144 点,为研究大地基准变化、变形机制等提供了丰富的资料。

基于以上观测数据共获得地震周边地区约 200 个 GPS 监测点,作者所在研究小组对所有数据进行了精密的数据处理工作。数据处理采用 GAMIT/GLOBK 软件,利用周边 IGS 跟踪站作约束,获得所有观测点在 ITRF2000 框架下的同震变形位移(图 1,实线箭头为水平位移,空心箭

头为垂向位移,五角星代表震源,虚线代表龙门山地震断层迹线)。由于地震局观测的点于 2007 年观测,需转换观测历元。利用国际 IGS 站和国内跟踪站的精确坐标和速度场,分别求出国内 GPS 跟踪站震前和震后的结果(历元同为 2008.363),再利用国内 GPS 跟踪站震前和震后的结果,作为计算监测点震前和震后的基准进行数据处理,获得震区监测点的同震变形信息。从图 1 可以看出,同震形变最大为 H035(北川)点,水平方向达到  $2.3\text{ m}$ ,垂向为  $0.68\text{ m}$ ;同时也可以明显看出,震源处并不是地震发生时变形最大区域,汶川、青川、北川等区域实测变形较大。另外,地震破裂时瞬间的应力变化主要作用在断层附近区域,而距离断层受力范围较远点的变形很小,一般在  $1\text{ cm}$  量级以内,可忽略不计,这也与断层位错理论基本一致<sup>[7~9]</sup>。

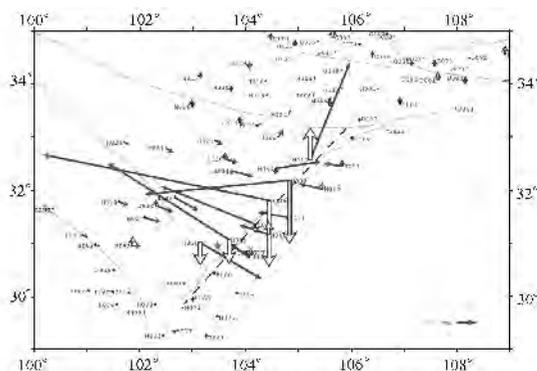


图 1 GPS 观测的同震形变

Fig. 1 The GPS observation co-seismic deformation

## 3 断层滑动分布反演

地震发生后地震专家依靠现有震源机制资料研究结果显示,此次地震发生在龙门山断层,汶川大地震为逆冲、右旋、挤压型断层地震。发震构造是龙门山构造带中央断裂带,在挤压应力作用下,由南西向北东逆冲运动;这次地震属于单向破裂地震,由南西向北东迁移,致使余震向北东方向扩张;挤压型逆冲断层地震在主震之后,应力传播和释放过程比较缓慢,因此导致余震强度较大,持续时间较长(<http://www.csi.ac.cn>)。

此次地震发生的震源参数有:震源深度:南段较深  $20\text{ km}$ ;北段较浅  $10\text{ km}$ ;震源机制:走向  $230^\circ$ ,倾向西北,倾角  $40^\circ$ ,逆冲兼右旋走滑;断层长度: $300\text{ km}$ ;断层宽度:南端  $30\text{ km}$ ,北端  $15\text{ km}$ ;

破裂方式:向北东方向的单侧破裂;破裂速度:2.8~3.1 km/s;破裂持续时间:总持续时间约120 s,但主要的能量释放时间约70 s;滑动分布:5个块体(映秀镇,汶川两个,北川,青川,康定南50 km)(http://www.csi.ac.cn)。

龙门山断层也是国内外学者重点关注的区域,国内学者和国外科研机构曾经在这一区域进行了重点观测<sup>[10]</sup>。中国地壳运动观测网络在川西这一区域布设了近200个GPS观测点,历经四期非连续观测(1999年,2001年,2004年,2007年),其中龙门山断层带也布设了大量的点。基于断层位错理论的反演结果表明龙门山断层为一般活跃断层,年活动量大约在3.9 mm左右,而鲜水河断层等的运动超过1 cm/a<sup>[9]</sup>。

为研究断层的活动机制,目前国际上主要有基于半空间,均匀介质的Okada模型<sup>[11~12]</sup>,基于球体分层介质的Pollitz模型<sup>[13~14]</sup>,基于球体分层的点源位错模型<sup>[15~17]</sup>。通过位错模型,基于地表的形变观测资料,如水准、重力、GPS, InSAR等,可反演断层体的滑动参数及几何位置参数,为深度研究发震断层的形变机制作深层次研究。

Ji Chen等收集了震后发生的地震纵、横波,通过有限元方法快速反演了地震断层的位错参数,该方法将汶川地震断层沿走滑方向15 km一个点,共21段,宽度沿倾滑方向5 km一段,划分了8段,共划分了21×8个子块体,反演后的断层显示距离震源50 km处、180 km处有两个滑动明显区域,均达到8~9 m滑动,深度分别在6~10 km、12 km处(http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2008/us2008ryan/finite\_fault.php)。首先基于其断层参数结果正演震区已有GPS观测点同震变形,并与实际观测比较(图2,空心箭头为GPS观测值,实线箭头为正演值,坐标轴单位km,五角星代表震源,黑色虚线代表龙门山地震断层迹线)。从图2可以看出,距离断层较远区域观测点与正演值符合的较好,方向大小基本一致,而在主震区,如汶川、北川、青川等地有明显较大的偏差,由于Ji Chen等反演结果仅考虑了全球地震波,而这些高频数据反映的是全球的信息,远非地面实测的局部变形信息更能反应地震断层活动机制,必然会带来一定的误差。为更可靠地反演发震断层的活动机制,本文将基于GPS实测数据的同震变形,反演汶川地震断层滑动位移,并分析其特性。

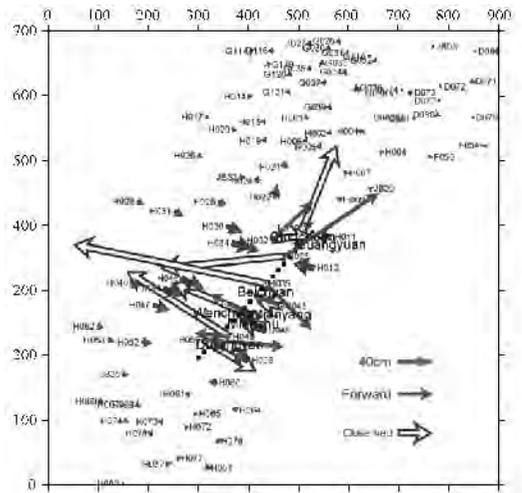


图2 基于Ji Chen地震波反演断层参数正演同震形变图

Fig. 2 The forward co-seismic deformation due to the fault slip parameters from Ji Chen's seismic wave inverted result

一般来说,断层位错模型参数计有断层位置、方位角、深度、倾角、长度、宽度、走滑量等参数,由于Ji Chen等已经通过地震波资料反演了168个断层块体的参数,为简单起见,现仅反演断层滑动量参数,而对位置、角度等参数均固定不反演,具体参数参见文献,则反演模型可表示为

$$\begin{bmatrix} d \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G \\ \kappa^2 \nabla^2 \end{bmatrix} m \quad (1)$$

其中,  $d$  为观测值(由于GPS垂向观测精度低,因此本文仅以水平方向位移作为观测值),  $\nabla^2$  为拉普拉斯平滑算子,可用滑动量的二阶差分近似代替,  $\kappa^2$  为平滑因子<sup>[18]</sup>,  $G$  为格林函数矩阵,依据Okada的均匀弹性半空间位错模型<sup>[12~13]</sup>,定义如下:

$$G = \begin{bmatrix} SS_1^1 & DS_1^1 & SS_1^2 & DS_1^2 & \cdots & SS_1^m & DS_1^m \\ SS_2^1 & DS_2^1 & SS_2^2 & DS_2^2 & \cdots & SS_2^m & DS_2^m \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ SS_n^1 & DS_n^1 & SS_n^2 & DS_n^2 & \cdots & SS_n^m & DS_n^m \end{bmatrix} \quad (2)$$

它表示单位走滑和单位倾滑在地表产生的形变量。不同断层几何结构对应不同的格林函数矩阵,矩阵中  $SS, DS$  分别表示1 m走滑和1 m倾滑,下标  $n$  表示反演观测值数据编号,上标  $m$  表示断层的段号。

由于地表位移是断层滑动量的线性函数,本文采用有界变量最小二乘算法(Bounded Varia-

ble Least-Squares, 简称 BVLS) 求解系统方程<sup>[19]</sup>,使目标函数  $V$  达到最小

$$V = ||\omega(d - Gm)||_{L_2} + ||\kappa^2 \nabla^2 ||_{L_2} \quad (3)$$

而目标函数的结果与平滑因子  $\kappa$  相关,基本上断层模型拟合残差与平滑度的关系以切线为主,所获得的反演模型滑动量为最优解<sup>[20~22]</sup>。

### 4 反演结果及分析

滑动量参数首先以最接近众多专家学者的研究结果即右旋走滑及逆断层为反演边界。断层滑动大小按照 10 m 作为断层滑动量约束,获得分布模型的反演值残差与断层平滑度关系见图 3 (\* 线为走滑平滑因子, + 线为倾滑平滑因子)。图中横轴为平滑度,纵轴为拟合残差,单位 cm。由图 3 可看出,残差 15.18 cm 所在点为最优反演结果,依据此点计算出的断层滑动分布见图 4。

从图 4 可以看出,汶川地震断层主要滑动有三个变化较大的地方,分别在距离震源 110 km 处、130~170 km 处、210~240 km 处,滑动量最大在距震源 30 km 处及 80 km 处,均达到 12 m 左右,说明汶川地震的破裂面主要有三处,右旋走滑主要发生在距离震源处,断层逆倾变化分布三处,而其他断层片区域则没有明显变化,依次对应地表汶川、北川、青川等地。而反演的 GPS 观测形变场则见图 5(空心箭头为 GPS 观测值,实线箭头为反演值,坐标轴单位 km,五角星代表震源,虚线代表龙门山地震断层迹线),从图 5 可以看出,断层两侧观测点均拟合的很好,而断层中间区域点如 H033, H035 点反演的同震变形相差较大,考虑到实际观测结果,似乎还伴随着左旋走滑及正断层变化,因此接下来将断层边界修正为  $\pm 10$  m,即同时考虑发震断层兼具左旋、右旋;正倾、逆断层变化。

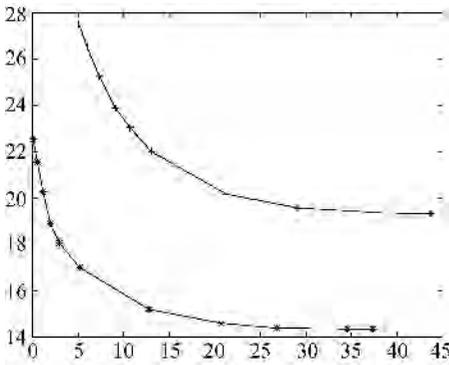


图 3 约束断层特性情况下,断层模型拟合残差与平滑度关系图

Fig. 3 The relationship between fault model simulated residual and smoothed degree on constrained fault slip characteristic

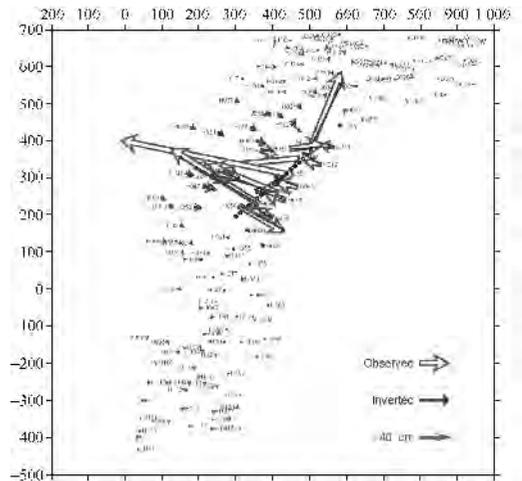


图 5 基于右旋走滑、逆断层特性反演 GPS 变形场拟合图

Fig. 5 The compared inverted and observation deformation due to constrained fault slip result

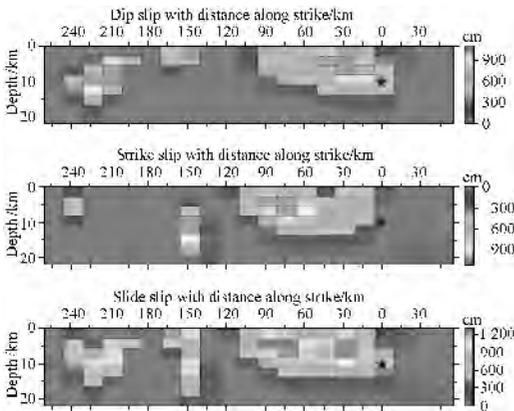


图 4 约束断层滑动特性的断层滑动分布图

Fig. 4 The fault slip distribution due to constrained the slip characteristic

今对断层滑动大小按照  $\pm 10$  m 作为断层滑动量约束,不以逆断层、右旋为主,获得分布模型的反演值残差与断层平滑度关系见图 6(\* 线为走滑平滑因子, + 线为倾滑平滑因子)。以残差 1.84 cm 所在点为最优反演结果,计算出的断层滑动分布见图 7。

从图 7 可以看出,不约束断层滑动特性的汶川地震断层反演结果显示主要滑动处没有大的变化,仍然集中在三个变化较大的地方,分别在距离

震源 0~30 km 处、60~100 km 处、210~240 km 处,滑动量最大在距震源 20 km 处及 80~90 km 处,均达到 13 m 左右,说明汶川地震的破裂面主要有三处,与王卫民等结果基本一致<sup>[2]</sup>。右旋走滑主要发生在距离震源处 15 km,深度 5~10 km,走滑量达 9.9 m;70~150 km 处有大量的右旋滑动,距离震源 200 km 处有大约 6 m 的左旋滑动,这点未见到相关研究结果,而相关的左旋滑动并不多见;断层倾滑以逆断层为主,主要为靠近发震断层区域,最大接近 10 m,具体在靠近震中向北 10~90 km,深度从地表到 12 km 左右;在距离震中往北 120~150 km 处有一定的正倾滑动,最大约 9 m,深度从地表到 5 km;而反演的 GPS 观测形变场则见图 8(空心箭头为 GPS 观测值,实线箭头为反演值,坐标轴单位 km,五角星代表震源,黑色虚线代表龙门山地震断层迹线),从图 8 可以看出,观测点变形均拟合的很好,说明考虑了断层所有滑动特性的反演结果比较适合实际的 GPS 观测同震形变场,则汶川地震断层并不仅仅是右旋、逆断层,还伴随着少许左旋走滑及正断层变化。而比较图 2,则形变场不仅在远场符合的较好,而且地震区域的同震变形反演前后符合的很好,反演结果的高度拟合,说明本文反演的断层较 Ji Chen 等利用地震波反演结果更符合实测情况。

地震的孕育、发生和断层及其运动紧密联系在一起。根据如下公式可以计算平均地震矩  $M_0$  :

$$M_0 = \mu AD \quad (4)$$

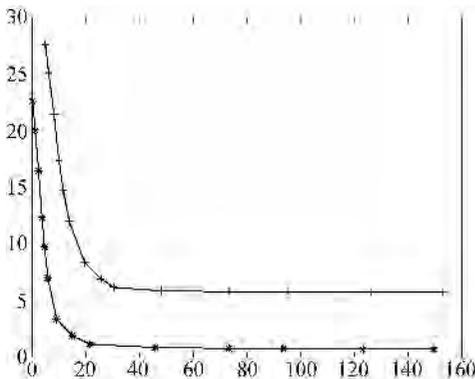


图 6 不约束断层运动特性情况下,断层模型拟合残差与平滑度关系图

Fig. 6 The relationship between fault model simulated residual and smoothed degree on non-constrained fault slip characteristic

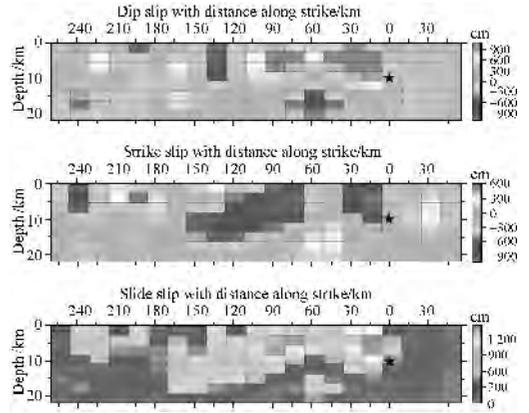


图 7 不约束断层滑动特性的断层滑动分布图

Fig. 7 The fault slip distribution due to non-constrained the slip characteristic

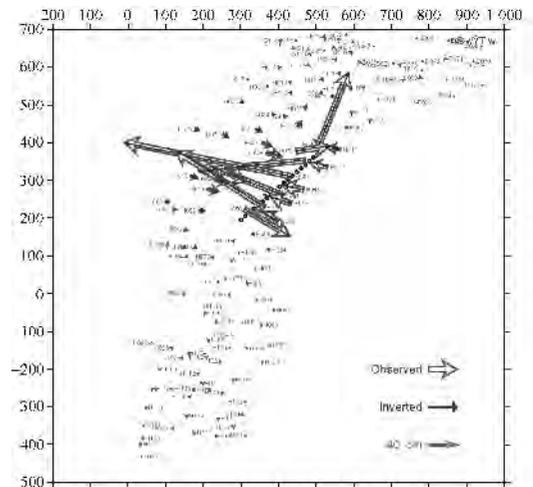


图 8 不约束断层滑动特性反演 GPS 变形场拟合图

Fig. 8 The compared inverted and observation deformation due to non-constrained fault slip result

其中,  $\mu$  为岩石剪切模量(川西地区大致取  $4.0 \times 10^{10}$ ,取自文献<sup>[23]</sup>),  $A$  和  $D$  分别为断层的面积和平均错距,利用前述反演结果,可计算汶川地震断层对应的平均地震矩张量为  $2.38 \times 10^{21} \text{ N} \cdot \text{M}$ ,与陈运泰等人根据地震资料反演结果基本相当(<http://www.csi.ac.cn>)。

由于龙门山区域西侧大都为山区,没有更多的 GPS 实测资料,因此利用反演出的断层参数结果模拟了地震区域周边点的同震变形,按照经纬度方向以 0.25 度间隔一个点,共计算了 693 个点的同震变形,由于地震破裂仅对主断层附近点影响较大,因此仅给出变化较大的点示意图 9(实线箭头代表模拟同震变形,空心箭头代表 GPS 观测

变形,五角星代表震源,虚线代表地震断层迹线)。从图 9 可以看出,基本上在有 GPS 观测点的区域符合得很好,包括北川点(H035)、青川点(H010)、都江堰点(H049)基本上附近模拟点均与观测点在形变方向、大小上保持一致。同震变形沿断层线向断层挤压,伴有截然不同的变形趋势。主要变形区域分别在都江堰~汶川县一带,其中最大变形达到东方向 4.5 m,北方向 0.81 m,具有极强的右旋走势;此外北川县、青川县也是地表形变较大的区域,这均与野外地质调查结果相符合。

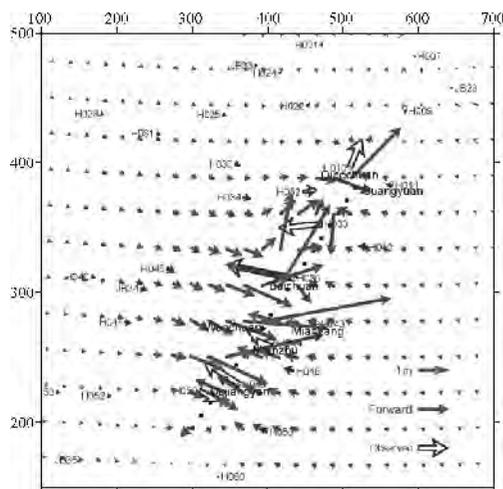


图 9 反演断层结果计算震区同震变形场

Fig. 9 The forward co-seismic deformation field due to inverted fault result

## 参考文献:

[1] TENG Ji-wen, BAI Deng-hai, YANG Hui, *et al.* Deep Processes and Dynamic Responses Associated with the Wenchuan Ms 8.0 Earthquake of 2008[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(5): 1385-1402. (滕吉文,白登海,杨辉,等. 2008 汶川 Ms8.0 地震发生的深层过程和动力学响应[J]. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1385-1402.)

[2] WANG Wei-min, ZHAO Lian-feng, LI Juan, *et al.* Rupture Process of the Ms 8.0 Wenchuan Earthquake of Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(5): 1403-1410. (王卫民,赵连锋,李娟,等. 四川汶川 Ms8.0 级地震震源过程[J]. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1411-1421.)

[3] SEGALL P, DAVIS J L. GPS Applications for Geodynamics and Earthquake Studies[J]. Annu Rev Earth Planet Sci, 1997, 25, 301-336.

[4] BANERJEE P, POLLITZ F F, *et al.* The Size and Duration of the Sumatra-Andaman Earthquake from Far-field Static Offsets[J]. Science, 2005, 308(5720): 1769-1772.

[5] YOSHIOKA S. Coseismic Slip Distribution of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake Deduced from Inversion Analysis of GPS Data[J]. B Seismol Soc Am, 2001, 91(5): 1182-1189.

[6] WAN Yong-ge, SHEN Zhen-kang, WANG Min, *et al.* Coseismic Slip Distribution of the 2001 Kunlun Mountain Pass West Earthquake Constrained Using GPS and InSAR Data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(4): 1074-1084. (万永革,沈正康,王敏,等. 根据 GPS 和 InSAR 数据反演 2001 年昆仑山口西地震同震破裂分布[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1074-1084)

[7] LI Zhi-cai, XU Cai-jun, ZHANG Peng, *et al.* The Co-seismic Deformation Inversion Analysis due to Different Seismic Fault Based on Crust Layering[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(3): 229-232. (李志才,许才军,张鹏,等. 基于地壳分层的地震断层同震变形反演分析[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2008, 33(3): 229-232.)

[8] LI Zhi-cai, XU Cai-jun, ZHAO Shao-rong, *et al.* Study of Difference among Different Earth's Structure Models in Co-seismic Deformation Analysis[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2005, 25(3): 39-44. (李志才,许才军,赵少荣,等. 同震变形分析中不同地球结构模型差异性研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(3): 39-44.)

[9] LI Zhi-cai. Research on the Geodesy Inversion Mode Considering the Earth Structure and Its Application[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (李志才. 顾及地球结构的大地测量反演模式与应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.)

[10] SHEN Z K, ZHAO C, LI Y, *et al.* Contemporary Crustal Deformation in East Asia Constrained by Global Positioning System Measurements[J]. J Geophys Res, 2000, 105:(B3): 5721-5734.

[11] OKADA Y. Surface Deformation Caused by Shear and Tensile Faults in a Half-space[J]. Bull Seismol Soc Am, 1985, 75(4): 1135-1154.

[12] OKADA Y. Internal Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half Space[J]. Bull Seism Soc Am, 1992, 82: 1018-1040.

[13] POLLITZ F F. Postseismic Relaxation Theory on the Spherical Earth[J]. Bull Seismol Soc Am, 1992, 82: 422-453.

[14] POLLITZ F F. Coseismic Deformation from Earthquake Faulting on a Layered Spherical Earth[J]. Geophys J Int, 1996, 125: 1-14.

[15] SUN W, OKUBO S. Surface Potential and Gravity Changes due to Internal Dislocations in a Spherical Earth, 1. Theory for a Point Dislocation[J]. Geophys J Int, 1993, 114: 569-592.

[16] SUN W, OKUBO S. Effects of the Earth's Spherical Curvature and Radial Heterogeneity in Dislocation Studies