

文章编号:1001-1595(2009)03-0195-07

利用 GPS 资料反演汶川 Mw 7.9 级地震滑动分布

许才军,刘 洋,温扬茂

武汉大学 测绘学院 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉 430079

Mw 7.9 Wenchuan Earthquake Slip Distribution Inversion from GPS Measurements

XU Caijun, LIU Yang, WEN Yangmao

The Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract : On 2008 May 12, The Mw 7.9 Wenchuan earthquake along the Longmenshan Fault zone, occurred at the eastern margin of the Tibetan Plateau, rupturing the Beichuan-Yingxiu and Guanxian-Jiangyou faults. Based on the segmenting fault model, we derive the fine slip distribution by utilizing a sensitivity-based iterative fitting method (SBIF) to GPS datasets mainly from the Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC), with the two models of the homogeneous half space and the stratified crustal structure. The results show: The coseismic slip distribution still can be inverted reasonably by applying a sensitivity-based iterative fitting method to the relatively minor GPS datasets; The inversion results considering the stratified crustal structure are superior to them from the homogeneous, half space in the mass; The coseismic slip is concentrated to above the 10~19 km depth. There exist five slip peak zones and obvious slip distribution at the lower part of SW Beichuan fault, in line with the field investigations and the aftershocks, also can resolve the GPS observations better; The Qingchuan fault experienced distinct right-lateral slip, and the magnitude of mean slip is 1.99 m. However, the Beichuan fault mainly experienced thrust slip, and the magnitude of mean slip is 3.35 m. The magnitude of mean slip for Guanxian fault is 0.65 m; The inverted moment is 8.74×10^{20} Nm (Mw 7.90), consistent with seismic estimates.

Key words : Wenchuan earthquake; GPS; stratified crustal structure model; a sensitivity-based iterative fitting method; coseismic slip distribution

摘 要 : 2008 年 5 月 12 日,青藏高原东缘龙门山断裂带发生 Mw 7.9 级汶川地震,该地震使得北川—映秀断裂、灌县—江油断裂带发生了同震破裂。本文主要利用“中国地壳运动观测网络”项目组提供的 GPS 同震位移资料,采用基于敏感度迭代拟合法(SBIF)及分段发震断层模型,分别应用均匀半空间和分层地壳结构两种方法反演分析该次地震的精细同震滑动分布。结果表明: SBIF 反演方法应用于相对较小的 GPS 数据集仍然可以获得理想的同震滑动分布; 采用考虑分层地壳结构模型的反演结果整体上要优于均匀半空间模型的结果; 同震滑动主要发生在 10~19 km 深度以上,且存在五个滑动峰值区域及北川断裂南西端存在明显的深部滑动区,与震后野外考察结果及余震分布相吻合,同时能够较好地解释 GPS 观测数据; 青川断裂存在明显的右旋走滑分量,其平均滑动量为 1.99 m,北川断裂主要发生逆冲滑动,平均滑动量为 3.35 m,灌县断裂的平均滑动量为 0.65 m; 反演得到的地震矩为 8.74×10^{20} Nm (Mw 7.90),与地震学结果吻合。

关键词 : 汶川地震; GPS; 分层地壳结构模型; SBIF 反演方法; 同震滑动分布

中图分类号: P227

文献标识码: A

基金项目: 国家 863 计划(2009AA12Z317); 国家自然科学基金及创新群体项目(40874003, 40721001); 国家公益(地震)行业科研专项(200808080)

1 引 言

2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分,发生在龙门山推覆构造带上的汶川 Mw 7.9 级地震是一次兼有右旋走滑运动的逆断层型破裂事件,迄今为止,在板内逆冲型地震中,汶川地震地表破裂带结构最复杂,地表可见破裂长度最长,该地震给人类带

来了巨大的灾难^[1]。汶川地震发生后,中国地震局、国家测绘局等组织汶川地震科学考察,及时开展了 GPS 观测及地震应急破裂考察,“中国地壳运动观测网络”项目组提供了 GPS 同震位移场^[2]。地质科考队通过对地形地貌、地质体和地面人工建筑物的错动变形观测,也给出了多条活

动断层同时参与地震破裂和同震位移的图像,该次地震发生在龙门山推覆构造带上,同时使得北川—映秀断裂、灌县—江油断裂断层发生了破裂^[1],随后许多学者利用 InSAR 或 GPS 资料对汶川地震的同震变形进行了研究^[3-7]。本文根据野外地质调查结果及 InSAR 资料建立了分段发震断层模型,采用 GPS 同震形变位移场,反演研究汶川地震的精细同震滑动分布,以便更好地探讨汶川地震机制。

2 汶川地震破裂模型及 GPS 同震位移场

除震后野外实地考察结果表明汶川地震使北川—映秀断裂、灌县—江油断裂断层发生破裂以外^[1],地震资料反演进一步表明,汶川 Mw 7.9 级地震可分解为沿倾角约 33° 的走滑逆断层向北东

方向单侧破裂扩展的两次同震位移量达 6~9 m 的次级地震事件,地震断层面上平均位移达 5 m^[8-10]。本文综合野外地质调查结果^[1]及 InSAR 研究结果^[7]将发震断裂带划分为 3 段(如图 1),分别是青川断裂、北川断裂和灌县断裂,对应的几何参数见表 1。本文采用的汶川地震同震位移场主要来自文献[2],GPS 观测点及同震位移场如图 1 所示,从图中可以看到:以主发震断裂为中心,两侧存在相向运动和强烈的水平缩短,且在北端具有明显的右旋水平位移;断裂下盘以下降为主,上盘只在距断裂很近处具有向上运动,很快又转为下降运动,显示汶川地震发震断层存在高角度逆冲滑动;GPS 观测点近于均匀分布,且在断层附近分布较密集,这些为反演同震滑动分布提供了较好的数据基础。

表 1 汶川地震发震断层参数

Tab. 1 The fault parameters of Wenchuan earthquake

No.	断层名称	经度/(°)	纬度/(°)	长度/km	宽度/km	走向/(°)	倾向/(°)	滑动角/(°)
1	青川断裂	105.445	32.639	80	40	228.817	65~20	80~180
2	北川断裂	104.8	32.16	220	40	224.0	65~20	80~180
3	灌县断裂	104.372	31.628 5	115	40	223.412 3	60~20	80~180

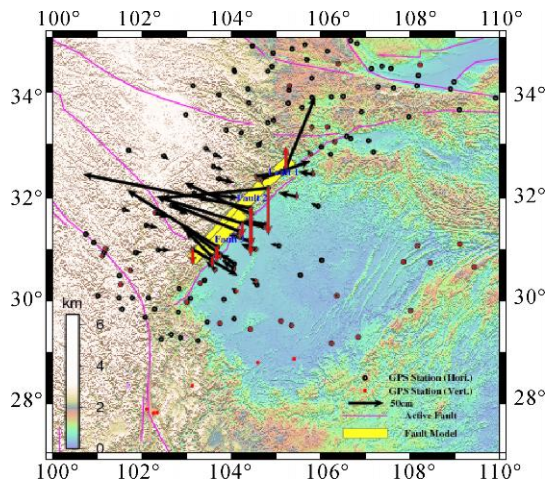


图 1 汶川地震同震 GPS 观测站分布、断层模型及周围地形图。黑色空心圆圈表示水平位移观测点,黑色红心圆圈表示同时进行水平及垂直位移观测,红实心表示垂直位移观测点

Fig. 1 The distribution of GPS stations about Wenchuan earthquake, fault models and shaded relief map. Black open circles denote the GPS stations with horizontal observation only, black red solid circles the GPS stations with horizontal and vertical observation, red solid circles the GPS stations with vertical observation only

3 汶川地震滑动分布研究

3.1 基于敏感度迭代拟合的反演模型及算法

目前,关于地震断层的大多数研究是基于 Okada 弹性半空间模型^[11]进行断层面上滑动分布讨论,在模型中采用矩形元(或三角元),将断层面离散化成一些连续排列的均匀或者非均匀的小矩形元(或小三角元),并在反演中对各个矩形元(或三角元)之间的滑动量施加一定的光滑性约束,采用约束最小二乘法反演得到断层面上的滑动分布。Wang, et al. 提出的基于敏感度迭代拟合法(Sensitivity-Based Iterative Fitting method, SBIF)用于 InSAR 大数据集的反演,先后用于 Bam 地震震源参数和地震滑动分布反演^[12-13]。其主要思想是:在反演过程中利用敏感度来进行迭代运算,而不采用对矩形元(或三角元)施加光滑性约束。在反演计算之前,输入断层几何参数并将其划分成大小合适的矩形单元,然后计算各个单元在弹性半空间或分层模型下的格林函数值。该方法首先逐块的计算其解释观测数据的能力(即地表形变量),该能力通过残差方差降低值

来表征:

$$(x_j) = \frac{(\text{original-data}) - (\text{residual-data})}{p} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2 / n} - \sqrt{\sum_{i=1}^n (d_i - G_{ij} s_j)^2 / n}}{p}$$

其中, d_i 为观测数据, G_{ij} 为格林函数, s_j 为滑移量, n 为观测数据集大小。

为了满足稳定性和分辨率之间的平衡,将敏感度(格林函数模的平方)作为方差降低值的权,则相应的滑移量可写为

$$S(x) = A \cdot (x) \cdot G(x) \quad (0 \leq x \leq 1)$$

其中, A 为待定参数, $G(x)$ 为格林函数, $S(x)$ 为敏感度。

然后采用最小二乘法来确定这个敏感度和滑动分布,从而获取滑动分布的一阶逼近,给出滑动分布模式。为了获取滑动分布的更高阶逼近,需要重复进行迭代求解,直到方差降低值达到规定要求,从而得到最终的滑动分布。在滑动反演中还可以根据已知断层的滑动性质,如左旋、右旋、走滑或倾滑等对反演过程施加一定的约束。

SBIF 反演方法已成功应用于 InSAR 大数据集中,本文将该方法应用到 GPS 观测数据反演汶川地震同震滑移分布中。在反演过程中以 GPS 同震位移场为主,充分考虑地面调查和地震学的研究成果,特别是发震破裂倾角从滑脱面向上逐渐变陡的情况^[1]对断层运动分段进行约束并进行随机搜索,以最大限度地解释 GPS 同震观测位移场得到满意的反演结果。

3.2 滑动分布反演

本文反演所用的 GPS 位移场,分水平位移场和垂向位移场两部分,前者又分为东西、南北两个方向,与垂向位移场叠加一起共 335 个观测值,其

中东西、南北向各 138 个,垂向 59 个。考虑 GPS 观测量解算的精度水平,将水平向、垂向位移量的相对权比定为 2。反演过程中,按照表 1 中给定的分段断层模型几何参数,将每个子断层进行分块处理,共可分为 256 + 704 + 368 个子块,即青川断裂(Fault 1)、北川断裂(Fault 2)及灌县断裂(Fault 3)依次划分为 256(16 × 16)、704(44 × 16)及 368(23 × 16)个子块,其中每一子块的大小为:走向 5 km,倾向 2.5 km。另外,采用前面建立的基于敏感度迭代拟合的反演模型及算法,本文首先在均匀半空间模型下反演同震滑动分布,其中泊松比值为 0.25;其次,由于汶川地震区域存在介质分层现象,故本文进一步进行顾及分层地壳结构的滑动分布反演。

3.2.1 均匀半空间滑动分布反演

均匀半空间滑动分布反演过程中,计算各向同性均匀半空间模型下位错面上单位滑动量在地表观测点产生的位移值大小,即相应的格林函数,然后按照 3.1 节中 SBIF 反演步骤来反演汶川地震的滑动分布。采用表 1 中的断层几何参数,其中每一子块的滑动角上下界分别为 180°和 80°。反演后的同震滑移分布如图 2 所示,表明同震滑移分布主要发生在 10 ~ 19 km 深度以上,最大滑动量达 12 m,子断层 1、2、3 的平均滑动量、平均滑动角见表 2,即青川断裂(Fault 1)存在明显的右旋走滑分量,北川断裂(Fault 2)和灌县断裂(Fault 3)主要发生逆冲滑动,与震后野外考察结果及余震分布相一致^[1, 14]。依据该滑动分布模型得到的地震矩为 4.70×10^{20} Nm,对应的矩震级为 Mw 7.81,与地震学、InSAR 等结果相当^[7-10]。

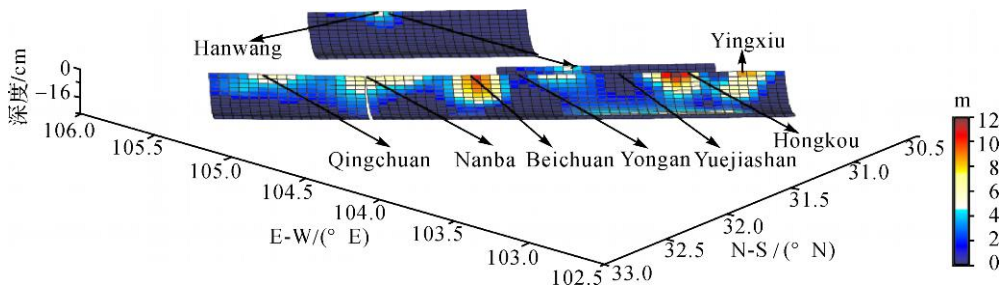


图 2 均匀弹性半空间模型下 3 个子断层的同震滑动分布

Fig. 2 The coseismic slip distribution of three sub-faults under homogeneous, elastic and half space

利用反演得到的测量点的模型预测位移与 GPS 测量数据的拟合情况如图 3 所示,图 4 为拟合残差的直方图,表 3 为 GPS 实测数据的拟合统计结果。

从图 3、4 可以看出,模型预测的水平及垂直位移场与实测 GPS 观测值吻合的较好,东西、南北及垂向均方根误差分别为 1.12 cm、0.72 cm 和 1.86 cm(表 3)。

表 2 均匀半空间及分层地壳结构滑动分布反演统计值

Tab. 2 The statistics of slip distribution inversed from homogeneous, half space and stratified crustal structure.

	均匀半空间滑动分布反演			分层地壳结构滑动分布反演		
	Fault 1	Fault 2	Fault 3	Fault 1	Fault 2	Fault 3
平均滑动量/ m	1.66	2.45	0.43	1.99	3.35	0.65
平均滑动角/ (°)	156.41	120.31	124.87	155.78	119.01	135.93

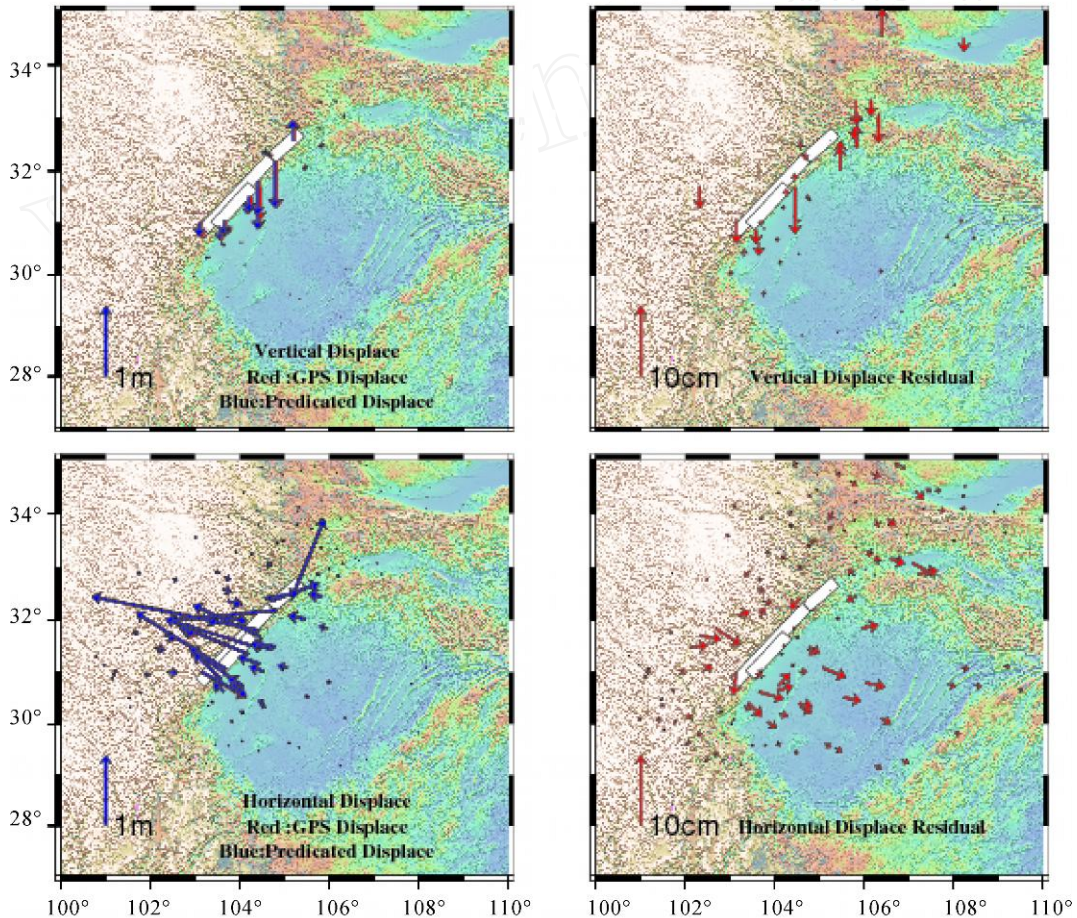


图 3 GPS 实测及图 2 模型预测的水平、垂直位移场 (左) 及相应的残差 (右)

Fig. 3 The horizontal and vertical displace field of GPS observing and model 2 predicating (left) , and the corresponding residuals (right)

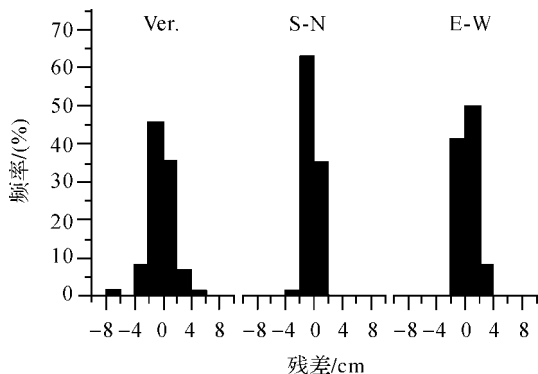


图 4 图 3 中 GPS 数据拟合残差直方图

Fig. 4 The histogram of GPS data fitting residuals from Fig. 3

表 3 GPS 实测数据的拟合统计情况

Tab. 3 The statistics of GPS data's fitting / cm

反演模式	均匀半空间滑动分布	分层地壳结构滑动分布
东西向拟合残差中误差/ 最大残差	1.12/ 3.55	0.99/ 2.64
南北向拟合残差中误差/ 最大残差	0.72/ 3.24	0.73/ 2.93
垂直向拟合残差中误差/ 最大残差	1.86/ 6.68	1.89/ 6.72

3.2.2 分层地壳结构滑动分布反演

虽然均匀半空间滑动分布反演模型能够较好

的拟合 GPS 观测值,但是汶川地震发生在青藏高原东缘龙门山推覆构造带上,已有研究表明该区域地壳结构复杂,存在明显的介质分层现象^[15-19]。为此,本小节进一步进行顾及地壳结构的滑动分布反演。

龙门山断裂带,作为青藏高原东部巴颜喀拉与华南两地块的分界断裂带,是中国大陆南北地震构造带中段的重要组成部分。该断裂带两侧岩石圈物质速度结构、电性结构、热结构等比较复杂^[15-16]。根据赵珠等给出的龙门山断裂带 P 波和 S 波的地壳平均速度模型^[17]、王椿镛等反演获得的川滇及邻近地区的地壳 3 维速度结构及汪洋对中国大陆热流结构和强度的研究结果^[18-19],同时参考张晁军等给出的炉霍地区地壳模型^[20],建立该地区的地壳结构模型,如表 4。

分层地壳结构滑动分布反演过程与均匀半空间滑动分布反演过程的区别在于:格林函数计算

的是分层地壳结构模型下位错面上单位滑动量在地表观测点产生的位移值大小。反演后的同震滑动分布如图 5 所示,其模式与均匀半空间滑动分布反演结果相近,但子断层 1、2、3 的平均滑动量分别为 1.99 m,3.35 m,0.65 m,明显大于均匀半空间滑动分布反演结果,见表 2。依据该滑动分布模型得到的地震矩为 8.74×10^{20} Nm,对应的矩震级为 Mw 7.90,与地震学、InSAR 等结果相吻合^[7-10]。

表 4 龙门山断裂带区域的地壳分层结构模型

Tab. 4 The stratified crustal structure parameters of Longmenshan area

No.	深度/ km	$V_p/$ (km/s)	$V_s/$ (km/s)	密度/ (kg/m ³)
1	0	5.89	3.45	2 800
2	15	5.89	3.45	2 800
3	15	6.35	3.95	2 950
4	30	6.35	3.95	2 950
5	30	7.5	4.3	3 250

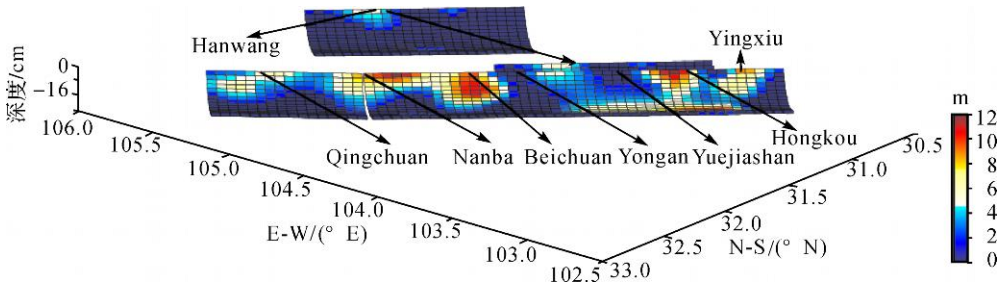


图 5 分层地壳结构模型下,3 个子断层的同震滑动分布

Fig. 5 The coseismic slip distribution of three sub-fault under the stratified crustal structure model, Guanxian

利用反演得到的测量点的模型预测位移与 GPS 测量数据的拟合情况如图 6 所示,图 7 为拟合残差的直方图。从图 6、7 可以看出,模型预测的水平及垂直位移场与实测 GPS 观测值吻合的较好,东西、南北及垂向均方根误差分别为 0.99 cm, 0.73 cm 和 1.89 cm,从表 3 给出的统计数据可以看出顾及地壳结构的滑动分布反演结果整体要优于均匀半空间的反演结果,其中东西向均方根误差优于均匀半空间滑动分布反演的结果达 12%。

拟合残差较大的个别点,可能有几个方面的原因,距破裂断层较远处的一些 GPS 观测点拟合较差主要可能与断层模型相关,如野外实地考察结果表明^[1]:沿着中央破裂带存在多处断层倾角达 70° 的地方,而本文中断层模型的最大倾角为 65°,再有地表破裂迹线不规则,而本文中采用 3 段规则的断层模型来模拟;而距破裂断层较远处

的一些点可能主要与 GPS 观测解算有关,一是观测有误差,另一方面是同震位移中可能包含有震后的变形等情况;另外,本文反演过程中未考虑断层上、下盘的横向介质差异性。

4 讨论与结论

从图 2、5 可以看出:汶川地震同震滑动分布主要发生在 10~19 km 深度以上,青川断裂存在明显的右旋走滑分量,其平均滑动量为 1.99 m,北川断裂主要发生逆冲滑动,平均滑动量为 3.35 m,灌县断裂的平均滑动量为 0.65 m,相应的地震矩为 8.74×10^{20} Nm (Mw 7.90),与地震学等结果相吻合^[8-10];该滑动分布从南西向北东显著不同,存在五个明显的峰值区域,其地理位置依次为映秀、虹口、北川、南坝及青川地区,最大值位于虹口镇附近,达 12 m,震后野外地质调

查及地表滑动观测结果表明了这一点^[1]；存在两个明显的滑动低值区域，地理位置上与虹口、龙门山镇—清平和北川—南坝次级破裂带的交汇处相对应，震后野外地质调查及地表滑动观测结果表明永安镇及岳家山地区为无地表破裂空段^[1]。

由于在反演过程中没有采用地表滑动的直接观测结果，所以它们对模型提供了独立的检验。反演得到的滑动分布与实地考察的地震位错总体一致性较好，与Li等人联合 InSAR 和 GPS 数据反演得到的滑动分布特征也基本相符^[7]。

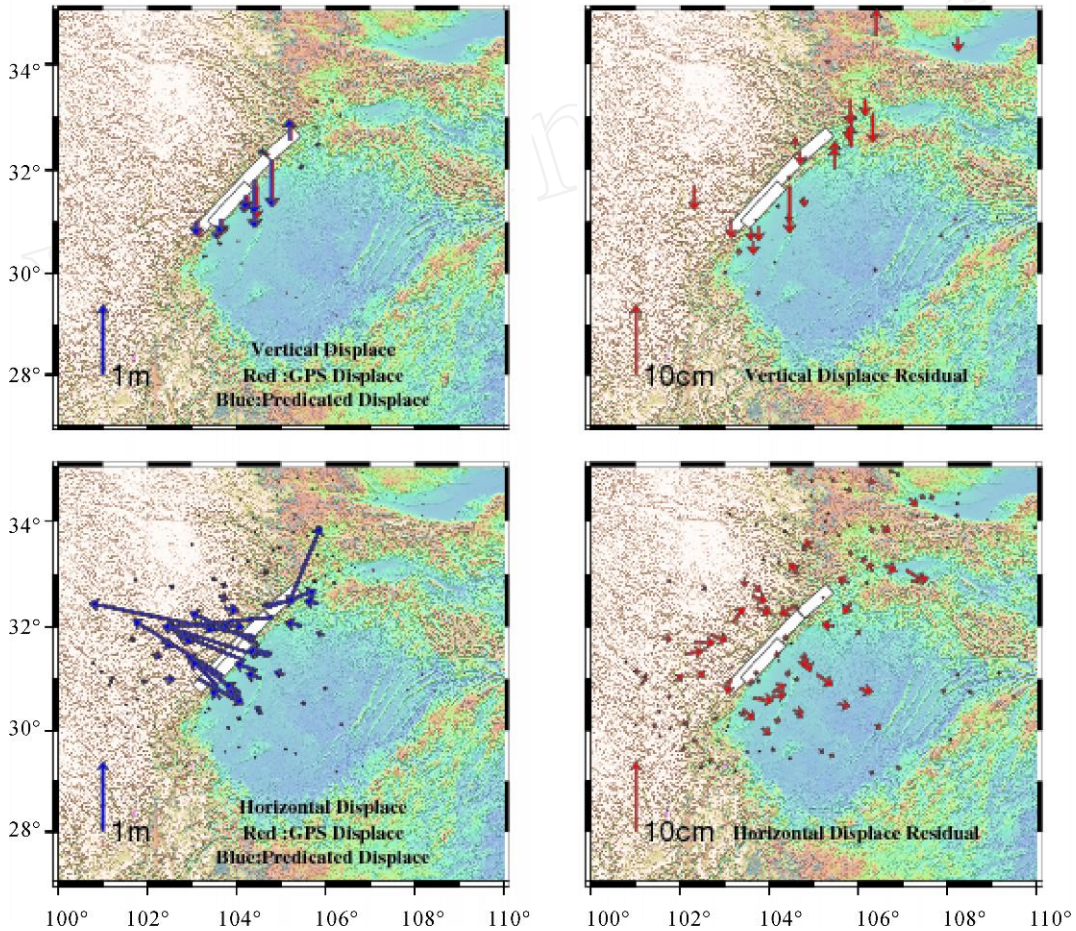


图 6 GPS 实测及图 5 模型预测的水平、垂直位移场 (左) 及相应的残差 (右)

Fig. 6 The horizontal and vertical displace field of GPS observing and model 5 predicating (left) , and the corresponding residuals (right)

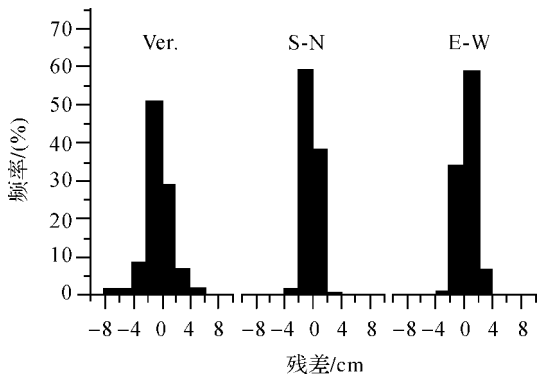


图 7 图 6 中 GPS 数据拟合残差直方图

Fig. 7 The histogram of GPS data fitting residuals from Fig. 6
另外,图 2、5 均显示,北川断裂南西端存在明

显的深部滑动区,为了检验这一特征的可靠性,本文尝试将北川断裂进一步分段,但所有结果均显示存在相似的深部滑动区,这与余震分布研究结果相吻合。黄媛等人余震序列重定位研究表明该地区存在明显的余震分布^[14],即表明子断层 2 的南西端的断层下部确实存在同震滑动。然而,就均匀半空间滑动分布反演而言,灌县断裂仅在距北东端 15~50 km 区域内发生破裂,而分层地壳结构滑动分布反演显示距灌县断裂北东端 15~90 km 区域内均发生破裂。震后野外测量表明灌县断裂的地表破裂长度约 72 km^[1],这或许说明在同震滑动分布反演过程中应考虑分层地壳

结构的影响。另外,前者结果显示地震的同震破裂的深度不超过 10 km,而后者显示出断层深部存在一 $2.5 \times 15 \text{ km}^2$ 的滑动区。从图 1 可知,灌县断裂距北川断裂仅 12 km 且近于平行,由于参与反演的 GPS 数据不够密集,二者之间的滑动应该具有一定的互补性,这或许能够解释二者反演结果的差异性,因此,融合 InSAR, GPS 两类观测数据有望能更好地反演灌县、北川断裂二者的同震滑动分布。

本文利用 GPS 同震位移场通过基于敏感度迭代拟合法(SBIF)反演分析了汶川 Mw 7.90 地震滑动分布,反演结果表明:SBIF 反演方法应用于相对较小的 GPS 数据集仍然可以获得理想的同震滑动分布;采用考虑分层地壳结构模型的反演结果整体上要优于均匀半空间模型的结果;反演得到的同震滑动分布与地震、地质结果相吻合。

参考文献:

- [1] XU Xiwei, WEN Xueze, YE Jianqing, et al. The Ms 8.0 Wenchuan Earthquake Surface Ruptures and its Seismogenic Structure [J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30(3): 597-629. (徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川 Ms 8.0 地震地表破裂带及其发震构造 [J]. *地震地质*, 2008, 30(3): 597-629.)
- [2] CMONOC. Coseismic Signals of the 2008 Ms 8.0 Wenchuan Earthquake Determined with GPS [J]. *Science in China: D*, 2008, 38(10): 1195-1206. (国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组. GPS 测定的 2008 年汶川 Ms 8.0 级地震的同震位移场 [J]. *中国科学: D 辑*, 2008, 38(10): 1195-1206.)
- [3] WANG Q, QIAO X, WANG M, et al. GPS-derived Coseismic Deformation Associated with the 12 May 2008 Wenchuan Earthquake [C]// AGU Fall Meeting 2008 Eos Trans 89 (53). San Francisco: American Geophysical Union, 2008.
- [4] HASHIMOTO M, ENOMOTO M, FU KUSHIMA Y, et al. Interferograms of Coseismic Deformation from the May 12, 2008, Sichuan, China, Earthquake obtained by ALOS/PALSAR [C]// AGU Fall Meeting 2008 Eos Trans, 89 (53). San Francisco: American Geophysical Union, 2008.
- [5] GEL, ZHANG K, NGA, et al. Near real-time radar interferometric mapping of the 12 May 2008 Ms 8.0 Wenchuan Earthquake in China [C]// AGU Fall Meeting 2008 Eos Trans, 89 (53). San Francisco: American Geophysical Union, 2008.
- [6] SUN J, SHEN Z, XU X, et al. Constraining the 2008 Wenchuan, China Earthquake Rupture Model Using SAR Interferometry Data and an Angular Dislocation Model [C]// AGU Fall Meeting 2008 Eos Trans, 89 (53). San Francisco: American Geophysical Union, 2008.
- [7] LI Zhenhong, ERIC J, TIM WRIGHT F, et al. Fault Trace and Slip in the 2008 Mw7.9 Sichuan, China Earthquake from InSAR and GPS Observations [C]// AGU Fall Meeting 2008 Eos Trans, 89(53). San Francisco: American Geophysical Union, 2008.
- [8] PARSONS T, CHEN Ji, KIRBY E. Stress Changes from the 2008 Wenchuan Earthquake and Increased Hazard in the Sichuan Basin [J]. *Nature*, 2008 (454): 509-510.
- [9] ZHANG Yong, FENG Wangpeng, XU Liheng, et al. The Time-spatial Rupture Process of the 2008 Large Wenchuan Earthquake [J]. *Science in China: D*, 2008, 38(10): 1186-1194. (张勇, 冯万鹏, 许力生, 等. 2008 年汶川大地震的时空破裂过程 [J]. *中国科学: D 辑*, 2008, 38(10): 1186-1194.)
- [10] WANG Weimin, YAO Zhenxing. Reissues for the Rupture process of the Ms 8.0 Wenchuan Earthquake [R/OL]. [2009-02-10]. http://www.csi.ac.cn/sichuan/sichuan080512_110.htm. (王卫民, 姚振兴. 再谈汶川 8.0 级地震震源破裂过程 [R/OL]. [2009-02-10]. http://www.csi.ac.cn/sichuan/sichuan080512_110.htm.)
- [11] OKADA Y. Internal Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-space [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1992, 82(2): 1018-1040.
- [12] WANG R, XIA Y, GROSSER H, et al. The 2003 Bam (SE Iran) Earthquake, Precise Source Parameters from Satellite Radar Interferometry [J]. *GJI*, 2004 (159): 917-922.
- [13] WANG Rongjiang, MOTAGH M, WALTER T R. Inversion of Slip Distribution from Co-seismic Deformation Data by a Sensitivity-based Iterative Fitting Method [C]// EGU General Assembly 2008. Vienna: EGU, 2008.
- [14] HUANG Yuan, WU Jianping, ZHANG Tianzhong, et al. the Relocation Research of the 8.0 Large Wenchuan Earthquake and the Aftershock Sequences [J]. *Science in China: D*, 2008, 38(10): 1242-1249. (黄媛, 吴建平, 张天中, 张东宁. 汶川 8.0 级大地震及其余震序列重定位研究 [J]. *中国科学: D 辑*, 2008, 38(10): 1242-1249.)
- [15] SONG Hongbiao. The Comprehensive Interpretation of Geological and Geophysical Data in the Orogenic Belt of Longmen Mountains, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 1994, 21(2): 79-88. (宋鸿彪. 龙门山造山带地质和地球物理资料的综合解释 [J]. *成都理工学院学报*, 1994, 21(2): 79-88.)
- [16] XU Xiwei, WEN Xueze, CHEN Guihua, et al. The Foundation and Tectonic Significance of Longriba Fault Belt in Bayankara Block [J]. *Science in China: D*, 2008, 38(10): 1242-1249. (徐锡伟, 闻学泽, 陈桂华, 等. 巴颜

(下转第 215 页)

- metric Radar Echoes[J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(5): 950-959.
- [2] LEE J S, AINSWORTH T L, GRUNES M R, GOLDSTEIN R M. Noise Filtering Interferometric SAR Images [C]// Proc SPIE European Symp Rome. Rome:[s. n.], 1994:735-742.
- [3] LIAO Mingsheng, LIN Hui. Radar Interferometry Measure—Principle and Signal Processing Foundation[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2003. (廖明生,林珺. 雷达干涉测量——原理与信号处理基础[M]. 北京:测绘出版社,2003.)
- [4] RODRIGUEZ E, MARTIN J M. Theory and Design of Interferometric Synthetic Aperture Radars[J]. IEE Proceedings-F, 1992, 139 (2): 147-159.
- [5] LEE J S, PAPANASSIOU K P, AINSWORTH T L, et al. A New Technique for Noise Filtering of SAR Interferometric Phase Images[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1998, 36(5): 1456-1465.
- [6] TROUVE E, NICOLAS J, MAITER H. Improving Phase Unwrapping Techniques by the Use of Local Frequency Estimates[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1998, 36 (6): 1963-1972.
- [7] WU N, FENG D Z, LI J X. A Locally Adaptive Filter of Interferometric Phase Images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(1): 73-77.
- [8] HE R Y, WANG Y N. InSAR Interferogram Filtering Based on Wavelet Transform[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica. 2006, 35(2): 128-132. (何儒云,王耀南. 一种基于小波变换的 InSAR 干涉图滤波方法[J]. 测绘学报,2006,35(2):128-132.)
- [9] YU Q, YANG X, FU S, et al. An Adaptive Contoured Window Filter for Interferometric Synthetic Aperture Radar [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2007, 4(1): 23-26.
- [10] WANG Huaiying, YU Shenglin, FENG Qiang. CNN for Extracting the Center of Interference Stripes [J]. Acta Metrologica Sinica. 2006, 27(2): 117-120. (王怀颖,于盛林,冯强. 一种用神经网络提取干涉条纹中心的新方法[J]. 计量学报,2006:27(2):117-120.)
- [11] CHUA L O, YANG L. Cellular Neural Networks: Applications[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1988, 35: 1273-1290.
- [12] YU Q F, SUN X Y. Removing Speckle Noise and Extracting the Skeletons from a Single Speckle Fringe Pattern by Spin Filtering with Curved-surface Window [J]. Optical Engineering, 2003, 41(1): 68-74.
- [13] AEBISCHER H A, WALDNER S. A Simple and Effective Method for Filtering Speckle Interferometric Phase Fringe Patterns[J]. Optics Communications, 1999, 162: 205-210.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期:2008-04-28

修回日期:2008-11-19

第一作者简介:王耀南(1957-)男,教授,博士生导师,主要从事图像处理识别理论及其应用、智能控制研究。

E-mail: peng_sr @126. com

First author: WANG Yaonan (1957-), male, professor, PhD supervisor. Majors in intelligent control theory and application, intelligent information processing and fusion. E-mail: peng_sr @126. com

(上接第 201 页)

- 喀拉地块龙日坝断裂带的发现及其大地构造意义 [J]. 中国科学:D 辑, 2008, 38(7): 785-796.)
- [17] ZHAO Zhu, FAN Jun, ZHENG Sihua, et al. The Crustal Velocity Structure of Longmenshan Fault Belt and the Fine Revised of Hypocentral Location [J]. Acta Seismologica Sinica, 1997, 19(6): 615-622. (赵珠,范军,郑斯华,等. 龙门山断裂带地壳速度结构和震源位置的精确修订[J]. 地震学报, 1997, 19(6): 615-622.)
- [18] WANG Chunyong, MOONEY W D, WANG Xili, et al. Study on 3-D Velocity Structure of Crust and Upper Mantle in Sichuan-Yunnan Region, China [J]. Acta Seismologica Sinica, 2002, 24(1): 1-16. (王椿镛, Mooney W D, 王溪莉,等. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究 [J]. 地震学报, 2002, 24(1): 1-16.)
- [19] WANG Y. Heart Flow Pattern and Lateral Variations of Lithosphere Strength in China Mainland: Constraints on Active Deformation [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2001, 126: 121-146.
- [20] ZHANG Chaojun, CAO Jianling, SHI Yaolin. The Viscosity Research of Lower Crust of the Qinghai-Tibet Plateau from Postseismic Deformation [J]. Science in China: D, 2008, 38(10): 1250-1257. (张晁军,曹建玲,石耀霖. 从震后形变探讨青藏高原下地壳黏滞系数[J]. 中国科学:D 辑, 2008, 38(10): 1250-1257.)

(责任编辑:张燕燕)

收稿日期:2009-02-11

修回日期:2009-04-07

第一作者简介:许才军(1964-),男,长江学者特聘教授,研究方向为大地测量学。

First author: XU Caijun (1964-), male, the Yangtse River scholar distinguished professor, majors in geodesy.