

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2017.03.009

基于 GPS 和水准数据的 2013 年芦山 7.0 级地震震源滑动模型

畅 柳 杨 博 张 风 霜 许 明 元 杨 国 华

(中国地震局第一监测中心, 300180 天津)

摘 要 利用 GPS 连续站和精密水准观测资料得到的同震形变结果作为 2013 年芦山 7.0 级地震地表 3 维形变场的约束, 在兼顾不同断层模型方案的基础上对地震震源参数等进行了反演计算, 结果表明: 以盲逆断层作为反演的断层模型优于以上边界到地表的断层作为反演的断层模型的结果, 矩形盲逆与铲状盲逆断层模型间的反演结果没有明显的差异, 芦山地震矩的最佳反演结果为 M_w 6.7, 位错在断层面上分布集中在 30km×30km 的范围内, 以逆冲为主兼有北翼右旋, 南翼左旋的特征, 左旋分量大于右旋分量, 是一种“楔型”形变模式。

关键词 芦山地震 GPS 水准 滑动模型

中图分类号: P315.72¹⁵

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2017)03-0561-11

0 引言

2013 年 4 月 20 日四川芦山发生 7.0 级地震。该地震发生在龙门山推覆构造带南段, 震区发育了 NE 走向的大邑隐伏断裂、双石-大川断裂、盐井-五龙断裂、耿达-陇东断裂等叠瓦状逆断层。虽然仪器记录的芦山地震微观震中位于双石-大川断裂下盘, 但此次地震未造成明显的地表破裂, 因此有关芦山地震的发震构造还存在较大争议。徐锡伟等(2013b)根据地表变形情况结合余震的空间分布特征、震源机制解等资料, 推测芦山地震属于典型的盲逆断层型地震, 并根据余震分布情况建立了铲形发震构造模型。张竹琪等(2013)提出余震分布指示的破裂面形态呈现 3 维的弯曲特征, 且断层面可能未延伸至浅部。房立华等(2013)使用双差法对芦山地震的主震和余震序列进行了重定位, 结果反映芦山地震的发震断层可能为 1 条铲形盲逆冲断层。吕坚等(2013)综合地震序列分布特征、主震震源深度、已有破裂过程的研究结果等初步推测发震构造为龙门山山前断裂, 也不排除主震震中东侧还存在 1 条未知的基底断裂发震的可能性。曾祥方等(2013)根据主震和余震定位结果认为芦山地震的发震断层为龙门山南段的双石-大川断裂。房立华等(2013)重新定位的余震分布结果显示, 余震区还存在与发震断层相交成 y 字型的向 SE 倾斜的余震带, 推测其为逆冲推覆构造中常见的反冲断层。

前人在利用同震形变以及地震波等进行芦山地震震源参数反演方面取得了一些结果。刘云华等(2014)基于芦山地震 InSAR 形变场进行了同震滑动分布的反演。金明培等(2014)基于 13 个近场强震动台的同震位移、以及 GPS 结果反演了震源参数。王卫民等(2013)用远场体波

资料和有限断层方法反演获得了芦山地震的震源破裂过程。Jiang 等(2013)采用 GPS 结果反演了断层同震滑动分布。由于大气折射、发射和接收天线相位中心误差等因素的存在,再加上非构造形变的影响,GPS 技术直接用于构造形变监测的垂向精度仅为 10mm(王敏,2009);武艳强等(2013)给出的同震位移场部分测站的垂向误差>10mm。InSAR 空间分辨率虽然较高,也有达到 mm 级精度的潜力,但是目前的结果及其精度受观测环境影响还很明显,在植被覆盖较少的区域精度远高于植被茂盛的区域;刘云华等(2014)给出的垂向同震位移精度在 cm 级。区域水准测量,相较于 GPS 和 InSAR 仍然是目前垂直形变观测精度最高的手段,可以达到 mm 级。因此目前在垂向形变监测方面,水准测量仍发挥着很重要的作用。

基于对芦山地震发震断层的争议,不同学者对芦山地震同震位移与破裂方式认识的差异,以及发震断层的构造模型对于反演结果可能有较大的影响。本文综合利用 GPS 与水准观测资料,通过建立不同的发震断层模型,采用不同的观测数据选取方案进行反演,并进行定量的对比分析,希望能为芦山地震发震构造的客观认识与深入研究提供参考。

1 数据简介与处理

本文采用芦山 7 级地震震中周围 100km 范围内 15 个流动站和 14 个连续站的 GPS 资料,获得了同震 3 维位移场。其中连续站同震形变结果主要基于 2013 年 4 月 16 日至 23 日共 8d 的数据解算得到;流动站同震形变结果主要基于 2009 年、2010 年、2011 年、2013 年 4 期数据解算得到,每期每个测点至少观测 3d。

水准资料覆盖的区域范围主要为龙门山断裂带的南段及周围地区,2010 年 1 月至 2011 年 1 月,2013 年 5—11 月 2 期数据。在水准数据处理时以四川盆地作为参考基准进行动态平差获得相对于四川盆地的垂直形变结果。选取震中 100km 范围内的 120 个水准点进行后续的处理分析。

GPS 数据处理与武艳强等(2013)文献中的方法类似,采用 GAMIT/ GLOBK 软件包完成。为了确定精密卫星轨道及实现 ITRF2000 参考框架,一并处理了全球近 80 个 IGS 站的数据。通过单日解的重复性检测,去除不稳定的 IGS 站并人为增大区域站个别粗值的误差,然后将包含有测站位置及其方差-协方差矩阵的单日松弛解作为水准测量估计所有 GPS 站的位置和区域站在地震时刻的偏差。

水准数据的时间跨度达 2a 左右,其形变信息中包含部分震间位移信息,需要将其扣除。震中附近有 3 个陆态网络 GPS 连续站 SCTQ、SCSM 和 SCXJ(图 2a),据此对它们 2010 年 1 月 1 日至 2013 年 4 月 19 日的垂向时间序列进行了粗差剔除、趋势判别以及周期项分析,并获得考虑了时间序列年周期与

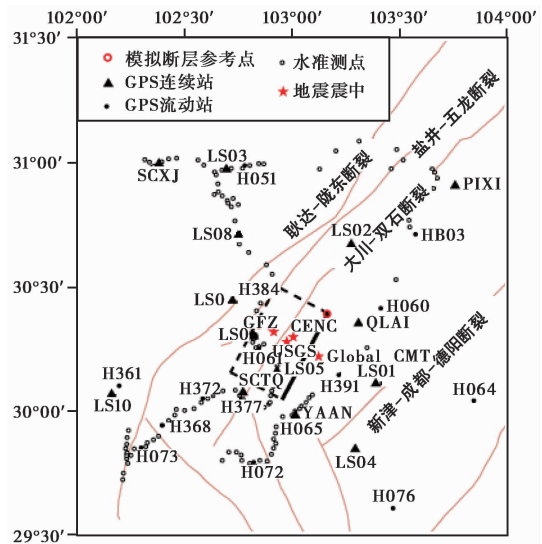


图 1 芦山 7.0 级地震震中周围 100km 范围内 GPS 台站与水准点分布

Fig. 1 Distribution of the GPS stations and leveling points used in this paper.

半年周期的运动速率值(黄立人等, 2012)。采用上述方法求得 SCTQ、SCSM、SCXJ 站的垂向分量的年速率分别为 (1.76 ± 0.26) mm/a、 (0.06 ± 0.13) mm/a 和 (-0.89 ± 0.17) mm/a。值得说明的是虽然 GPS 测量得到的是大地高, 水准测量得到的是正常高, 但是有关研究已证明 2 个高程系统的变化量之间差异极小可以视为等价(黄立人等, 2000)。由于离震中较近的 GPS 连续站只有 3 个站, 因此无法采用曲面拟合等空间拟合方法求得震中附近的形变, 本文采用距离倒数加权的方法进行形变改正。求水准点垂向年速率如式(1)所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} s_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \\ v = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{s_i} v_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{s_i}} \end{array} \right. \quad (1)$$

式(1)中, (x, y) 、 v 分别为代求垂向年速率点的坐标与代求速率; (x_i, y_i) 、 v_i 分别为已知垂向速率点的坐标与垂向速率; s_i 为未知点与已知点 i 之间的距离, n 为已知点个数。采用此方法求得水准点的震间垂向形变速率, 与观测间隔时间的乘积即为震间形变, 将前期处理的水准结果扣除震间形变, 获得同震形变结果。通过水准、GPS 获得的同震位移如图 2 所示。

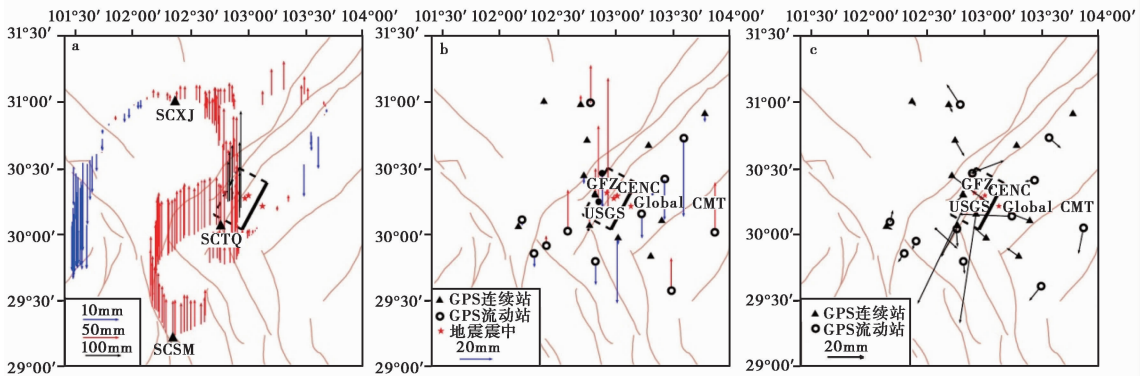


图 2 芦山地震前后的水准位移和 GPS 同震位移

Fig. 2 The surface displacement(2010—2013) before and after the Lushan M_s 7.0 earthquake.

a 水准测点位移(2010—2013); b, c 分别为 GPS 站点垂向、水平向同震位移

水准测点震间垂向位移的改正值在 $-1.1 \sim 1.9$ mm 之间, 与观测误差同量级, 由此可知, 芦山地震震区附近的震间形变并不明显, 后续的数值模拟对改正和未改正的数据分别作了反演与对比。由测点位置所观测到芦山地震垂向最大同震位移为 (276.5 ± 2.7) mm, E 向同震位移在 (-16.5 ± 0.8) mm 与 (24.1 ± 1.1) mm 之间, N 向同震位移在 (-66.8 ± 0.8) mm 与 (7.7 ± 1.0) mm 之间。

2 反演模型建立与结果比较

形变观测数据的误差特性以及由于地球介质、形状、断层几何的复杂性, 使得建立的函数模型不可避免地存在一定的系统误差或粗差(刘洋, 2012)。在进行大地测量反演时, 函数模型误差的处理方法主要取决于对客观现实先验信息的认识。进行反演首先要确定地震的发震

断层震源机制解。而芦山地震的震源机制解,不同机构和学者给出的结果均有所差异(陈运泰等, 2013; 刘瑞丰等, 2013; 房立华等, 2013; 金明培等, 2014), 走向 $198^{\circ} \sim 222^{\circ}$, 倾角 $33^{\circ} \sim 47^{\circ}$, 滑动角 $71^{\circ} \sim 112^{\circ}$, 矩心深度 $10 \sim 25 \text{ km}$, 断层破裂长度 $22.5 \sim 60 \text{ km}$, 宽度 $17.0 \sim 45.0 \text{ km}$ 。Jiang 等(2013)、王卫民等(2013)、金明培等(2014)、刘云华等(2014)的反演中采用的都是出露到地表的(模型上边界深度都为 0 km)矩形断层数值模型(文中该模型简称矩形地表), 其中刘云华等(2014)根据反演结果得出造成破裂的发震断层未出露到地表的结论。徐锡伟等(2013a)先给出了矩形盲逆断层的地质模型(文中该模型简称矩形盲逆)。然后, 徐锡伟等(2013b)给出了铲形盲逆断层的地质模型(文中该模型简称铲形盲逆)。为了分析不同断层模型的反演结果, 本文在参考 Cheloni 等(2010)反演参数选择方法以及已有文献结果的基础上经过试算调整, 设计出 3 类断层模型进行反演, 如表 1 所示。

表 1 断层模型设计方案

Table 1 The frameworks of fault models

模型简称	铲形盲逆	矩形盲逆	矩形地表
走向/ $(^{\circ})$	212	208	208
倾角/ $(^{\circ})$	54~35	43	43
顶边深度/km	7	7	0
长度/km	46	46	46
宽度/km	38	38	38
格网大小/km	2×2	2×2	2×2
断层起点	(30.400°N, 103.175°E)	(30.400°N, 103.175°E)	(30.400°N, 103.175°E)

注 其中断层起点为震源滑动模型的参考点(图 1), 也是模拟断层长、宽坐标为(0, 0)的点(图 3)。

GPS 和水准对形变分量的约束存在差异, 同时两者本身也存在不确定性, 如观测误差和参考系统等。为了分析分别或联合使用 GPS 和水准数据, 以及去除水准数据震间形变对反演的影响, 设计了 7 种数据选取方案(表 2)进行对比分析。

表 2 反演数据选取方案设计

Table 2 Data selection scheme of the inversion

数据选取	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7
水准_不去除震间位移	√			√		√	
水准_去除震间位移		√			√		√
GPS 水平			√	√	√	√	√
GPS 垂向			√			√	√

方案 1、2 为仅采用水准结果; 方案 3 为仅采用 GPS 结果; 方案 4、5 为采用水准结果与 GPS 水平方向的结果; 方案 6、7 为水准与 GPS 3 个方向的结果都采用。

基于以上的反演断层与反演数据选取方案的设计, 进行采用基于约束条件下最小二乘原理及最速下降法的反演方法(Wang *et al.*, 2006)进行芦山地震的震源滑动模型反演, 反演所用的软件采用汪荣江博士根据约束条件下最小二乘原理及最速下降法编写的 SDM2008 程序, 反

演的地壳速度结构采用吕坚等(2013)给出的地壳 1 维速度模型(表 3)。数-模相关系数可以反映模拟值与真实值之间的相近程度,其值越接近于 1 说明从统计角度模型越优,统计反演的震级与数-模相关系数如表 4 所示。

表 3 本文采用地壳分层模型

Table 3 Crustal velocity model used in this paper

地壳分层/km	$V_p/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_s/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
0~2.94	4.88	2.86	2.60
2.94~8.34	5.80	3.40	2.78
8.34~21.70	6.04	3.55	2.83
21.70~43.09	6.82	3.98	3.00
43.09~50	7.00	4.00	3.05
50+	7.85	4.40	3.30

表 4 反演结果统计

Table 4 Statistics of the inversion results

距震中 距离	方案	矩形地表		矩形盲逆		铲形盲逆	
		M_w	数-模相关系数	M_w	数-模相关系数	M_w	数-模相关系数
100km	方案 1	6.66~6.69	0.70	6.64~6.68	0.90	6.59~6.62	0.89
	方案 2	6.73~6.76	0.73	6.83~6.86	0.74	6.55~6.57	0.83
	方案 3	6.44~6.46	0.81	6.55~6.57	0.76	6.54~6.55	0.75
	方案 4	6.71~6.74	0.72	6.68~6.72	0.90	6.68~6.70	0.91
	方案 5	6.72~6.74	0.72	6.69~6.72	0.90	6.68~6.71	0.91
	方案 6	6.66~6.68	0.69	6.65~6.68	0.83	6.64~6.66	0.84
	方案 7	6.66~6.69	0.70	6.65~6.68	0.83	6.64~6.67	0.84
50km	方案 1	6.69~6.72	0.89	6.69~6.73	0.96	6.6~6.63	0.93
	方案 2	6.77~6.80	0.93	6.87~6.89	0.94	6.69~6.72	0.95
	方案 3	6.47~6.49	0.91	6.67~6.77	0.88	6.57~6.59	0.86
	方案 4	6.74~6.77	0.92	6.73~6.75	0.95	6.71~6.74	0.96
	方案 5	6.75~6.77	0.91	6.75~6.77	0.96	6.72~6.74	0.96
	方案 6	6.68~6.71	0.88	6.71~6.74	0.89	6.69~6.72	0.90
	方案 7	6.68~6.70	0.86	6.72~6.74	0.89	6.69~6.71	0.89

由表4的结果可以得出如下初步认识:

(1)采用距震中 50km 范围内的同震位移结果比采用距震中 100km 范围内的同震位移结果进行断层同震位错反演的数-模相关系数更接近于 1。推测这是由于距离震中越远,受到震源位错的影响越小,远场的观测结果成因较为复杂,远场地表位移对震源位错反映不灵敏造成的。因此,在进行断层位错反演时并非数据越多越好,需要同时考虑数据的有效性。

(2)对于同一数据选取方案,从数-模相关系数的角度比较不同断层模型的模拟效果,采用铲形盲逆断层反演的数-模相关系数最接近于 1,矩形盲逆断次之,矩形地表断层与 1 偏离最大。上述现象从一定程度上支持了关于芦山地震的发震断层是盲逆断层的论点。铲形盲逆

断层模型的数-模相关系数较矩形盲逆断层模型的数-模相关系数更接近 1。需要说明的是数-模相关系数仅可以作为模型评价参考标准,不同的模型反演结果仍然有其特定的物理意义。

(3)从方案 1 与方案 2、方案 4 与方案 5、方案 6 与方案 7 的反演结果比较可知,是否对水准数据进行震间位移去除反演出的震级及数-模相关系数差异都较小,说明本文 $-1.1 \sim 1.9\text{mm}$ 的震间地表垂直位移改正量对反演结果的影响不明显。

(4)从方案 4 与方案 6、方案 5 与方案 7 的反演结果比较可知,方案 4 明显优于方案 6、方案 5 明显优于方案 7,这样的结果反映出进行断层同震位错反演时垂向观测数据仅采用水准结果比同时采用水准与 GPS 垂向结果从数学拟合的角度看更优,推测原因:一是 GPS 垂向观测精度还是相对较差,其次是与起算基准难以完全一致有关。

(5)从方案 2 与方案 3 的反演结果比较可知,仅采用 GPS 或仅采用水准结果进行反演的数学拟合角度的优劣指向性并不明显。推测这是由于仅采用水准数据水平方向的同震位移缺失时很有可能对反演结果的客观性造成影响;仅采用 GPS 结果,测点较少,垂向精度不高,这样也势必对反演结果的客观程度造成不利影响。因此,缺乏必要的有一定密集程度的 3 维形变结果约束,其反演结果的客观性难以得到进一步提升。

(6)从方案 5、方案 2 和方案 3 进行比较可以看出,方案 5 整体上优于方案 2 和方案 3。也就是说采用 GPS 水平结果与水准垂直结果进行反演的效果是最优的。

基于以上看法,选取距震中 50km 范围内的方案 5 的数据反演结果相对最佳,因此本文将给出此方案 3 种不同断层模型的反演结果。

地震发生后中国地震台网中心和各国地震机构都给出了芦山地震的参数结果(表 5)。

表 5 不同机构给出的芦山地震震源参数

Table 5 Source parameters of the Lushan earthquake from different institutes

机构	中国地震台网中心 ^①	Global CMT ^②	USGS ^③	GFZ ^④
震中经度/(°)	103	103.12	102.97	102.91
震中纬度/(°)	30.3	30.22	30.28	30.32
深度/km	13	21.9	12	10
震级	$M_S 7.0$	$M_W 6.6$	$M_W 6.6$	$M_W 6.7$
走向/(°)	220	212	198	204
倾向/(°)	35	42	33	43
滑动角/(°)	101	100	71	84

注 ①<http://www.cenc.ac.cn/manage>[2014-7-21]; ②http://www.globalcmt.org/CMT_search.html[2014-7-21]; ③<ftp://hazards.cr.usgs.gov>[2014-7-21]; ④转引自吕坚,2013。

从图3可以观察到不论何种断层模型位错量最大值都在 15~20km 深度范围,铲形盲逆断层模型和矩形盲逆断层模型的一致性较好,二者都可以反映出芦山地震的发震断层北翼(图 3(4)系列图中为左侧)呈现右旋位错,断层南翼(图 3(4)系列图中为右侧)呈现左旋运动,且左旋明显大于右旋幅度(图 3(4)中正值部分量值与空间范围都大于负值部分),这是 1 种典型的“楔型”形变模式。而矩形地表断层模型在断层北翼既有左旋又有右旋,与实际情况有所偏离,这样从定性的角度证实了芦山 7.0 级地震的发震断层为盲逆断层。

以上实验方案较多,仅展示采用距震中 50km 范围内的方案 5 的数据反演结果,观测值与

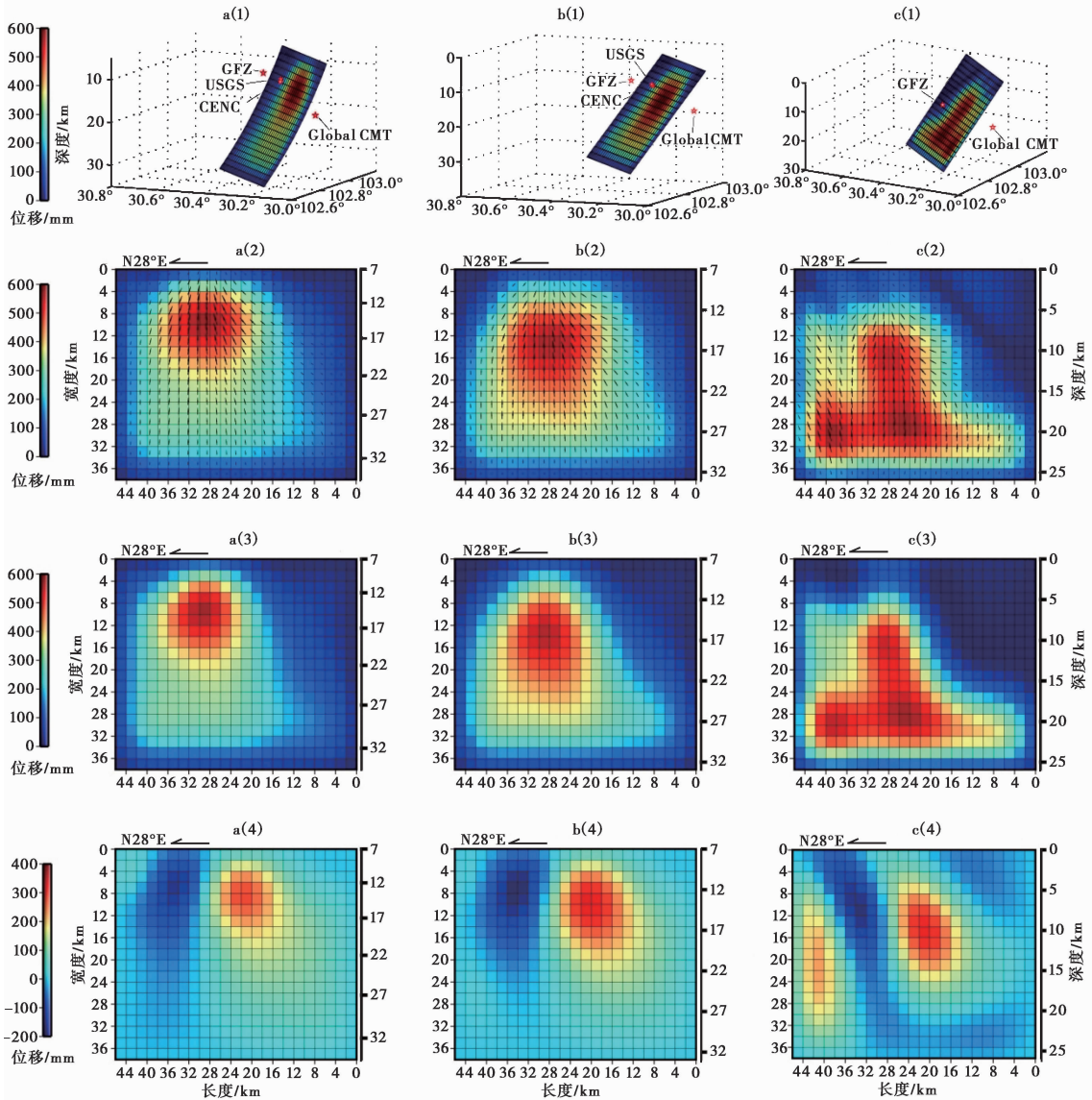


图 3 震中 50km 内采用方案 5 的不同断层模型反演结果

Fig. 3 The inversion results of different fault models using Scheme 5 with the data within the epicenter distance of 50km.

a 系列表示铲形盲逆断层反演结果, b 系列表示矩形盲逆断层反演结果, c 系列表示矩形地表断层的反演结果;

(1) 系列表示反演断层位错的 3 维展示, (2) 系列表示断层位错, (3) 系列表示断层位错的倾滑分量,

(4) 系列表示断层位错的走滑分量

反演后再正演得到的预测值如图 4 所示。从图 4 可以观测对于水平方向的位移, 在反演模拟断层内或距离反演模拟断层最近的 GPS 点预测值与原始值整体较为一致, 但是有部分点 (例如 LS06、H061) 预测值与观测值之间存在较大的差异, 整体为断层东南侧观测值与预测值一致性较好, 断层西侧一致性较差, 推测与数据的可靠性以及断层实际的形状比模拟的形状更为复杂

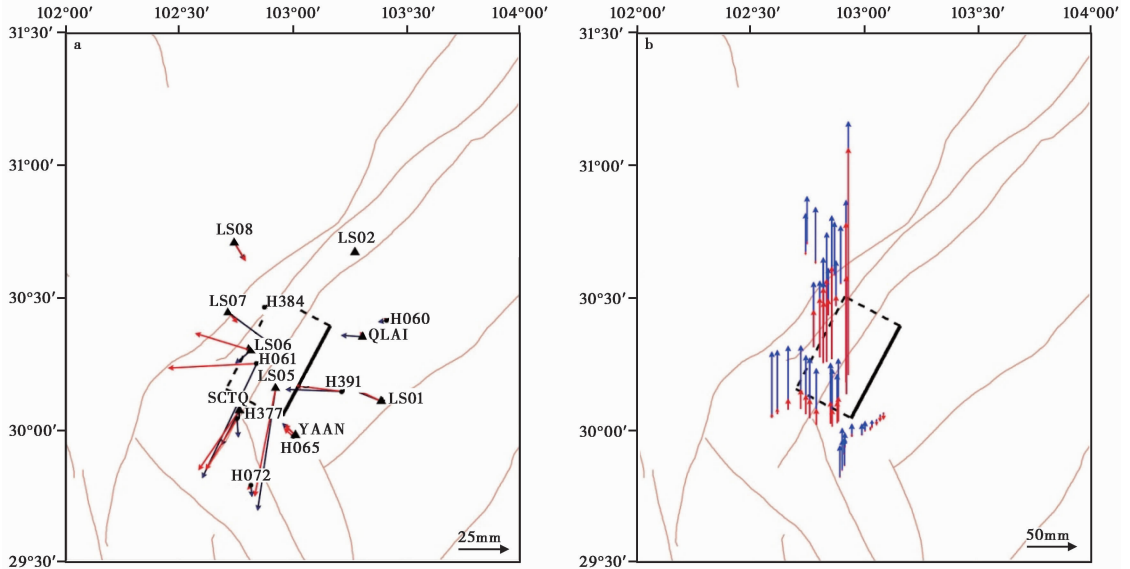


图4 芦山地震地表同震观测值与反演参数计算预测值

Fig. 4 The observed and predicted co-seismic displacement caused by Lushan $M_s 7.0$ earthquake.

蓝色箭头为观测值, 红色箭头为预测值; a 水平分量结果, b 垂直分量结果

有一定的联系。对于垂向分量, 模拟断层面区域内的观测值与预测值吻合较好, 距离模拟断层面越远其一致性越差, 紧挨震源南边缘的水准拟合残差十分明显。这样的现象与模拟断层面外的观测值是多种综合因素共同作用的反映, 且离震中距越远受地震同震影响越小, 该类观测值中实际同震位移所占比例较小有关; 也与模拟断层面外预测值约束没有断层面内约束强, 模型外推值可靠性弱于内插值有关。

3 结语与讨论

针对数据选取与断层模型选取的问题本文设计了7个数据类型选取方案、3个断层模型和2个数据覆盖范围选取方案。通过本文进行的大量试算结果说明GPS垂向结果用于以逆冲为主的发震断层反演中有时会产生负作用, 建议在类似情况下谨慎采用GPS垂向结果; 在进行反演数据选取时并不是数据空间范围越大越好, 远场位移受其它构造过程干扰明显, 排除距离发震断层较远的的数据对反演更有利。通过对不同断层模型反演效果的比较分析认为芦山地震发震断层为盲逆断层的可能性最大。

由于2010—2013年芦山地震震中附近震间形变量值很小, 水准数据震间形变剔除与否对结果影响并不是很明显, 但也不排除获取震间形变信息的测点较少及空间分布不够完善的因素, 就量级间的比例来看不会存在质的变化。

此外2013年芦山7.0级地震的震源滑动模型反演结果表明, 位错在断面上的分布集中在 $30\text{km} \times 30\text{km}$ 的范围内, 以逆冲为主兼有北翼右旋, 南翼左旋特征, 左旋分量大于右旋分量, 是1种“楔型”形变模式。

致谢 感谢汪荣江教授提供的反演程序以及审稿专家提出的宝贵意见。

参 考 文 献

- 陈运泰, 杨智娴, 张勇, 等. 2013. 从汶川地震到芦山地震 [J]. 中国科学(D 辑), 43(6): 1064—1072.
- CHEN Yun-tai, YANG Zhi-xian, ZHANG Yong, *et al.* 2013. From 2008 Wenchuan earthquake to 2013 Lushan earthquake [J]. Science in China(Ser D), 43(6): 1064—1072(in Chinese).
- 房立华, 吴建平, 王未来, 等. 2013. 四川芦山 $M_s7.0$ 地震及其余震序列重定位 [J]. 科学通报, 58(20): 1—9.
- FANG Li-hua, WU Jian-ping, WANG Wei-lai, *et al.* 2013. Relocation of the mainshock and aftershock sequences of $M_s7.0$ Sichuan Lushan earthquake [J]. Chinese Science Bulletin, 58(28): 3451—3459.
- 黄立人, 韩月萍, 高艳龙, 等. 2012. GNSS 连续站坐标的高程分量时间序列在地壳垂直运动研究中应用的若干问题 [J]. 大地测量与地球动力学, 32(4): 10—14.
- HUANG Li-ren, HAN Yue-ping, GAO Yan-long, *et al.* 2012. Several issues in application of elevation component time series of GNSS CORS in vertical crustal movement studying [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 32(4): 10—14(in Chinese).
- 黄立人, 匡绍君. 2000. 论地面垂直变形监测中应用 GPS 技术的可能性 [J]. 地壳变形与地震, 20(1): 30—37.
- HUANG Li-ren, KUANG Shao-jun. 2000. Possibility of application of GPS technique to vertical deformation measurement [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 20(1): 30—37(in Chinese).
- 金明培, 汪荣江, 屠泓为. 2014. 芦山 7 级地震的同震位移估计和震源滑动模型反演尝试 [J]. 地球物理学报, 57(1): 129—137.
- JIN Ming-pei, WANG Rong-jiang, TU Hong-wei. 2014. Slip model and co-seismic displacement field derived from near-source strong motion records of the Lushan $M_s7.0$ earthquake on 20 April 2013 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(1): 129—137(in Chinese).
- 刘瑞丰, 陈运泰, 邹立晔, 等. 2013. 2013 年 4 月 20 日四川芦山 $M_w6.7$ ($M_s7.0$) 地震参数的测定 [J]. 地震学报, 35(5): 652—660.
- LIU Rui-feng, CHEN Yun-tai, ZOU Li-ye, *et al.* 2013. Determination of parameters for the 20 April 2013 Lushan $M_w6.7$ ($M_s7.0$) earthquake in Sichuan Province [J]. Acta Seismologica Sinica, 35(5): 652—660(in Chinese).
- 刘洋. 2012. 顾及模型误差的震源参数 InSAR 反演 [D]. 武汉: 武汉大学.
- LIU Yang. 2012. InSAR inversion considering model error for hypocenter parameter [D]. Wuhan University, Wuhan (in Chinese).
- 刘云华, 汪驰升, 单新建, 等. 2014. 芦山 $M_s7.0$ 地震 InSAR 形变观测及震源参数反演 [J]. 地球物理学报, 57(8): 2495—2506.
- LIU Yun-hua, WANG Chi-sheng, SHAN Xin-jian, *et al.* 2014. Result of SAR differential interferometry for the co-seismic deformation and source parameter of the $M_s7.0$ Lushan earthquake [J]. Chinese Journal Geophysics, 57(8): 2495—2506.
- 吕坚, 王晓山, 苏金蓉, 等. 2013. 芦山 7.0 级地震序列的震源位置与震源机制解特征 [J]. 地球物理学报, 56(5): 1753—1763.
- LÜ Jian, WANG Xiao-shan, SU Jin-rong, *et al.* 2013. Hypocentral location and source mechanism of the $M_s7.0$ Lushan earthquake sequence [J]. Chinese Journal of Geophysics, 56(5): 1753—1763(in Chinese).
- 王敏. 2009. GPS 观测结果的精化分析与中国大陆现今地壳形变场研究 [D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- WANG Min. 2009. Analysis of GPS data with high precision & study on present-day crustal deformation in China [D]. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing(in Chinese).
- 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.

- WANG Wei-min, HAO Jin-lai, YAO Zhen-xing. 2013. Preliminary result for rupture process of Apr.20, 2013, Lushan earthquake, Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 56(4): 1412—1417(in Chinese).
- 武艳强, 江在森, 王敏, 等. 2013. GPS 监测的芦山 7.0 级地震前应变积累及同震位移场初步结果 [J]. 科学通报, 58(20): 1910—1916.
- WU Yan-qiang, JIANG Zai-sen, WANG Min, *et al.* 2013. Preliminary results pertaining to coseismic displacement and preseismic strain accumulation of the Lushan M_s 7.0 earthquake, as reflected by GPS surveying [J]. Chinese Science Bulletin, 58(28): 3460—3466.
- 徐锡伟, 陈桂华, 于贵华, 等. 2013a. 芦山地震发震构造及其与汶川地震关系讨论 [J]. 地学前缘, 20(3): 11—20.
- XU Xi-wei, CHEN Gui-hua, YU Gui-hua, *et al.* 2013a. Seismogenic structure of Lushan earthquake and its relationship with Wenchuan earthquake [J]. Earth Science Frontiers, 20(3): 11—20(in Chinese).
- 徐锡伟, 闻学泽, 韩竹军, 等. 2013b. 四川芦山 7.0 级强震: 一次典型的盲逆断层型地震 [J]. 科学通报, 58(20): 1887—1893.
- XU Xi-wei, WEN Xue-ze, HAN Zhu-jun, *et al.* 2013b. Lushan M_s 7.0 earthquake: A blind reserve-fault event [J]. Chinese Science Bulletin, 58(28): 3437—3443.
- 张竹琪, 王伟涛, 任治坤, 等. 2013. 芦山 7.0 级地震: 特殊的弯曲断层地震 [J]. 科学通报, 58(20): 1933—1940.
- ZHANG Zhu-qi, WANG Wei-tao, REN Zhi-kun, *et al.* 2013. Lushan M_s 7.0 earthquake: A special earthquake occurs on curved fault [J]. Chinese Science Bulletin, 58(28): 3483—3490.
- 曾祥方, 韩立波, 石耀霖. 2013. 四川芦山 M_s 7.0 地震震源机制解初步研究 [J]. 科技导报, 31(12): 15—18.
- ZENG Xiang-fang, HAN Li-bo, SHI Yao-lin. 2013. Focal mechanism solution of M_s 7.0 Lushan earthquake, April 20, 2013 [J]. Science & Technology Review, 31(12): 15—18(in Chinese).
- Cheloni D, D'Agostino N, D'Anastasio E, *et al.* 2010. Coseismic and initial post-seismic slip of the 2009 M_w 6.3 L'Aquila earthquake, Italy, from GPS measurements [J]. Geophysical Journal International, 181(3): 1539—1546.
- Jiang Z S, Wang M, Wang Y Z, *et al.* 2013. GPS constrained coseismic source and slip distribution of the 2013 M_w 6.6 Lushan, China, earthquake and its tectonic implications [J]. Geophysical Research Letters, 41(2): 407—413. doi: 10.1002/2013GL058812.
- Wang R J, Lorenzo-Martín F, Roth F. 2006. PSGRN/PSCMP: A new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory [J]. Computers & Geosciences, 32(4): 527—541.

GPS AND LEVELING CONSTRAINED CO-SEISMIC SOURCE AND SLIP DISTRIBUTION OF THE LUSHAN $M_s7.0$ EARTHQUAKE ON 20 APRIL 2013

CHANG Liu YANG Bo ZHANG Feng-shuang

XU Ming-yuan YANG Guo-hua

(*First Crust Deformation Monitoring and Application Center,
China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China*)

Abstract

Co-seismic deformation results calculated by the observations of GPS continuous sites and precise leveling are used as three-dimensional constraints for the deformation field of Lushan $M_s7.0$ earthquake on 20 April 2013. The inversion of seismic source parameters are calculated based on the consideration of different value-taking schemes and fault models. Seven data type selection schemes, three fault models and two data coverage selection schemes are designed in order to discuss the effect of data selection and fault model selection on the inversion results.

The results show that the fault model using blind reverse fault for the inversion is superior to the model using the fault that ruptures from its upper boundary to the earth's surface, which may indicate that the Lushan earthquake fault is most likely a blind reverse fault; there are no obvious differences in the inversion results between the blind listric reverse fault models and the rectangle blind reverse fault models.

The best inversion result of Lushan earthquake seismic moment is $M_w6.7$. And it also shows that the distribution of dislocations on the fault plane is concentrated in the range of $30\text{km} \times 30\text{km}$, the northern flank of the seismogenic fault of Lushan earthquake is of dextral faulting and the southern flank of the fault is of sinistral faulting, the sinistral component is larger than dextral component, showing a wedge deformation mode.

Key words Lushan earthquake, GPS, leveling, slip model

[作者简介] 畅柳, 女, 1990 年生, 2013 年于武汉大学测绘学院获大地测量与测绘工程专业硕士学位, 现主要从事大地测量在地震预测预报中的应用方面的研究, 电话: 18722111330, E-mail: 806032065@qq.com。