



2013年芦山Ms 7.0级地震断层参数模型反演

王乐洋^{1,2,4} 李海燕^{1,3} 陈汉清¹

1 东华理工大学测绘工程学院,江西 南昌,330013

2 东华理工大学流域生态与地理环境监测国家测绘地理信息局重点实验室,江西 南昌,330013

3 江西信息应用职业技术学院测绘工程系,江西 南昌,330043

4 东华理工大学江西省数字国土重点实验室,江西 南昌,330013

摘要:2013年4月20日四川芦山地区发生了Ms 7.0级地震。利用GPS三维同震形变数据获取地表形变场,基于位错模型反演芦山地震的断层几何参数及滑动分布。首先采用多峰值颗粒群算法(multiple peak particle swarm optimization, MPSO)得到断层几何参数,其中断层走向206.47°,倾角44.11°,长度21.94 km,离地表最浅处为7.66 km,最深处为17.84 km。为了反演断层面的精细滑动分布,分析地震所在的龙门山断裂西南段破裂面具有的铲状型特征,将芦山地震破裂面确立为铲状模型,即将断层的倾角预设为上陡下缓,倾角变化范围为21°~50°。结果显示,断层破裂面在不同深度区域出现了两个滑动峰值,其中最大滑动量为0.68 m,深度位于13 km。地震释放的能量为 1.47×10^{19} N·m,对应的矩震级为Mw 6.74,与地震学的研究结果一致。

关键词:芦山地震;多峰值颗粒群优化算法(MPSO);断层几何参数;滑动分布

中图分类号:P228;P315

文献标志码:A

2013年4月20日8时(北京时间)四川芦山(30.3°N, 103.0°E)发生逆冲型Ms 7.0级地震,此次地震是继2008年四川汶川Mw 7.9级地震后发生在龙门山断裂带的又一次大地震^[1]。地震发生后,许多学者对震源机制进行了详细的研究。中国地震台网确定的震源深度为13 km,倾角为35°;文献[1]依据地震发生后应急科考获得的次生地表破裂资料,结合重新定位的主震、余震信息,讨论了发震构造模型,研究认为发震断层为盲逆冲型,断层走向212°,倾向为北西(northwest, NW),倾角约为35°±4°,其中断层上部存在倾角为54°±4°的断层条带;文献[2]利用远场体波地震资料得到的断层面走向为205°,倾角为35.8°,最大滑动量深度在11~14 km;文献[3]利用合成孔径雷达干涉测量获取的同震形变场来反演震源参数,确定的走向为213°,倾角则为39°~43°,最大滑动量深度为13 km;文献[4]通过震中200 km范围内的33个GPS同震形变数据来约束地震模型,反演了断层的几何参数和滑动量分布,倾角为43°,最大滑动量为0.61 m,深度为13.5

km。关于芦山地震的研究结果,差别比较大的参数是断层倾角。针对这一问题,文献[5]联合近场位移数据,研究认为芦山地震的破裂面几何形状与2008年汶川Mw 7.9级地震映秀-北川段断层的破裂面相似^[6-7],将断层确定为铲状的双断层模型,即上断层模型的倾角较大(46.8°),下断层模型的倾角较小(26.5°),分别在上下两个断层的不同深度得到了大于0.5 m的峰值。双断层模型并不能真实地反映破裂面在不同深度的倾角变化。文献[8]研究得到芦山地震的矩震级为Mw 6.55,震源深度约15 km,其中与震源区断裂带走向及余震分布长轴向的走向域一致的节面Ⅱ为主震破裂面,节面Ⅱ走向219°,倾角43°,滑动角101°,倾向北西(NW)。本文对芦山地震破裂面的几何参数和滑动量分布作进一步研究。

本文采用文献[4]所提供的33个GPS连续站得到的三维同震形变数据来反演地震断层的几何参数和滑动量分布。首先利用多峰值颗粒群算法(multiple peak particle swarm optimization, MPSO)^[9-11]反演得到均匀断层模型的几何参数

和均匀滑动量。相比于常用的遗传算法^[12]、模拟退火^[13-14]及总体最小范数^[15]等优化算法, MPSO 算法具有控制参数少、全局收敛效率高、解稳定可靠的优点, 非常适合于断层参数非线性反演。在确定断层几何参数的基础上, 本文将断层破裂面确定为倾角上陡下缓的铲状模型, 即倾角随深度的减小而逐渐增大, 变化范围为 21°~50°, 采用最小二乘法反演断层滑动分布, 得到最大滑动量为 0.68 m, 深度为 13 km, 滑动量峰值所在的深度分别为 13 km 和 25 km。这不同于均匀倾角模型所反演的滑动量分布结果。

1 地震构造背景和 GPS 同震形变资料

龙门山断裂带处于四川盆地和青藏高原东缘交汇处, 地质构造及其演化历史十分复杂^[16], 芦山地震破裂带主要发生在龙门山西南段, 该构造带约 80 km, 主要由叠瓦状逆断层组成, 从北西到

南东包括耿达-陇东断裂、盐井-五龙断裂、双石-大川断裂及大邑隐伏断裂等。研究表明^[17-18], 类似于 2008 年汶川大地震的成因, 芦山地震同样是巴彦喀拉块体向东南运动时受到华南块体的强烈阻挡而引起块体间龙门山断裂推覆构造带南段以较小倾角逆冲产生的一次强烈地震。地质调查及重定位主震、余震研究发现, 芦山地震没有明显的地表破裂, 由此推断这是一次盲逆断层型地震^[1]。地震发生后, 芦山周边地区布设的 GPS 连续站^[4]为地震形变观测提供了精度较高的数据。图 1 中的 33 个 GPS 连续点^[4]位于离震中 200 km 范围内, 且距震中 150 km 范围内的点的形变量都在毫米级及以上, 最大形变位移点位于震中以南 15 km 左右, 水平位移约 6.8 cm, 垂直位移约 8.4 cm。其中, 蓝色矢量代表观测的同震位移, 黑色和红色矢量分别代表由等倾角和变倾角模型反演的位移。从图 1 中可明显看出, 断层下盘往 NW 方向逆冲。

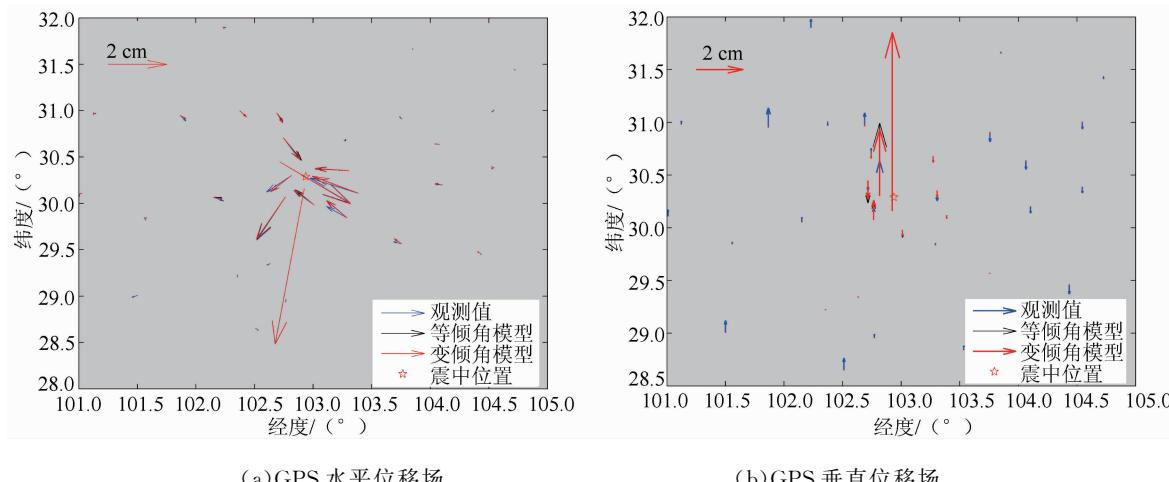


图 1 GPS 同震形变场

Fig. 1 GPS Coseismic Displacement Field

2 地震断层参数反演

2.1 断层几何参数反演

位错模型是利用大地测量观测资料求解震源参数的有效模型^[19], 也是最常用的模型之一。本文利用弹性半空间均匀矩形位错模型^[20-21]来反演地震震源参数, 震源参数包括断层几何参数(位置、长度、走向、倾向、顶深、底深)及滑动参数(滑动量和滑动角)。断层参数与 GPS 地表形变存在如下方程:

$$\mathbf{d}_{\text{gps}} = G(\mathbf{m}) + \boldsymbol{\epsilon} \quad (1)$$

式中, \mathbf{d}_{gps} 表示地表 GPS 形变量; $G(\cdot)$ 表示断

层参数与地表形变量的关系函数; \mathbf{m} 为断层滑动参数; $\boldsymbol{\epsilon}$ 表示形变量的观测误差。反演时, 目标函数设为 $\| \mathbf{w}(\mathbf{d}_{\text{gps}} - G(\mathbf{m})) \|_2^2 = \min$, \mathbf{w} 表示地表形变量的权值。

由位错理论可知, 断层参数与地表形变观测值的关系是高度非线性的, 所以采用非线性优化方法求得最优参数。颗粒群优化算法又称为粒子群优化算法, 类似常用的遗传算法、模拟退火算法, 是一种基于智能的非线性启发式全局最优算法。但在断层参数反演时, 遗传算法、模拟退火等算法往往涉及的控制参数相对较多, 难以快速有效地得到全局最优值。MPSO 算法是在局部颗粒群优化算法的基础上, 以颗粒在空间的密度函

数作为优化指标,根据密度函数的峰值点确定若干个初始模型(局部解),再结合具有高效收敛效率的单纯型(Simplex)算法,最后根据目标函数从更优的结果中选出最优解,作为可能的全局最优解^[9]。关于 MPSO 算法的基本原理详见文献[9]。为了验证 MPSO 算法的优越性,本文模拟断层参数,分别采用 MPSO 算法和遗传算法搜索最优解,断层参数真值及反演结果见表 1。算法以目标函数的最小值达到稳定作为收敛条件,MPSO 算法参数选择时,要考虑算法的收敛效率

及解的稳定性,本文的粒子数为 100,优化迭代次数为 30。实验结果表明,算法的解稳定且收敛效率高。关于遗传算法,本文使用 Matlab2010b 中的成熟的 GA 工具箱进行计算,经过反复实验,最终确定初始群体大小为 300,交叉概率为 0.85,变异概率为 0.1,迭代次数为 500。实验结果表明,GA 解的收敛效率较低。表 1 为 3 次反演实验的结果,从表 1 中可以看出,相对于 GA 算法,MPSO 算法的解更接近真值。

表 1 MPSO 算法和 GA 算法反演结果

Tab. 1 Inversion Results of MPSO and GA Algorithms

反演算法	相关指标	顶深/km	底深/km	长度/km	走向/(°)	倾角/(°)	滑动量/m	滑动角/(°)
MPSO	真值	0	14.70	48.98	70	60	1.42	90
	区间	[0,10]	[10,30]	[30,60]	[40,90]	[30,90]	[0,3]	[70,120]
	结果 1	0	14.71	48.98	70.00	60.00	1.42	90.00
	结果 2	0	14.71	48.98	70.00	60.00	1.42	90.00
	结果 3	0	14.70	48.98	70.00	60.10	1.42	90.00
	结果 1	0	14.78	48.96	69.98	60.20	1.44	88.30
GA	结果 2	0	14.52	48.99	70.09	60.47	1.38	93.22
	结果 3	0.02	14.67	48.97	70.01	60.49	1.42	89.78

表 2 给出了芦山地震单一均匀模型下断层模型参数的最优估计值,其中搜索区间根据文献[4]的反演结果给出一个较大的区间范围。结果表明,模型参数与文献[4]接近。为了验证本文算法的稳定性及可靠性,根据获得的 GPS 形变观测数据的误差模拟了 100 组观测数据集,通过这 100 组数据集分别反演得到 100 组断层模型参数。表 2 给出了 100 组反演参数的统计均值及在 95% 置信水平下的标准偏差,统计均值非常接近最优估计值,而且统计结果表现了以均值为中心的高斯分布,表明本文所反演的断层参数具有较高的可靠性。从图 2 中可以看出,滑动量与顶深、底深、长度、经度、纬度间都存在近似线性的关系,说明其存在一定的相关性;倾角与走向以及经度与顶深、底深也都存在一定的相关性;其他参数间的关

系则是随机性的。

2.2 滑动分布反演

为了进一步确定断层破裂面的精细滑动分布,本文在上述确定的断层位置、走向、深度等参数的基础上,沿走向方向将破裂面长度扩展至 46 km,倾向方向上,破裂面确定为倾角随深度变化的铲状型,倾角变化范围为 21°~50°,矩形单元间倾角变化间距为 1°,并将破裂面延伸至地表,剖分为 2 km×2 km 的矩形单元,共得到了 690 个单元。同样采用 Okada 矩形位错模型来反演滑动分布,在确定了断层的几何参数后,地表形变量与滑动参数的关系为线性关系。同时为了避免由于人为对断层面进行剖分导致滑动参数解的不稳定,需要对滑动参数间施加必要的光滑约束,则需要构建下列方程:

表 2 地震断层模型参数搜索区间、最优值及统计最优值

Tab. 2 Searching Interval, Optimums and Statistical Optimums for Fault Model Parameters

相关指标	震源参数								
	断层中心(E)/(°)	断层中心(N)/(°)	顶深/km	底深/km	走向/(°)	倾角/(°)	长度/km	滑动量/m	滑动角/(°)
搜索区间	102.938°±50 km	30.295°±50 km	[4,10]	[10,20]	[180,220]	[30,90]	[0,30]	[0,3]	[60,120]
最优值	102.937 9	30.289 0	7.66	17.84	206.47	44.11	21.94	0.75	80.13
统计均值 ^a	102.939 2	30.288 9	7.57	17.89	206.27	44.30	21.81	0.77	80.02
标准偏差 ^b	±0.000 8	±0.000 1	±0.13	±0.22	±0.32	±0.17	±0.33	±0.02	±0.45
GA	102.939 0	30.289 6	7.66	17.69	206.38	44.16	22.38	0.75	79.82
文献[4]	102.938	30.295	7.7	19.29	208	43	22.5	0.7	81.7

注:a 为 100 组反演参数的高斯分布均值;b 为置信水平为 95% 时的标准偏差

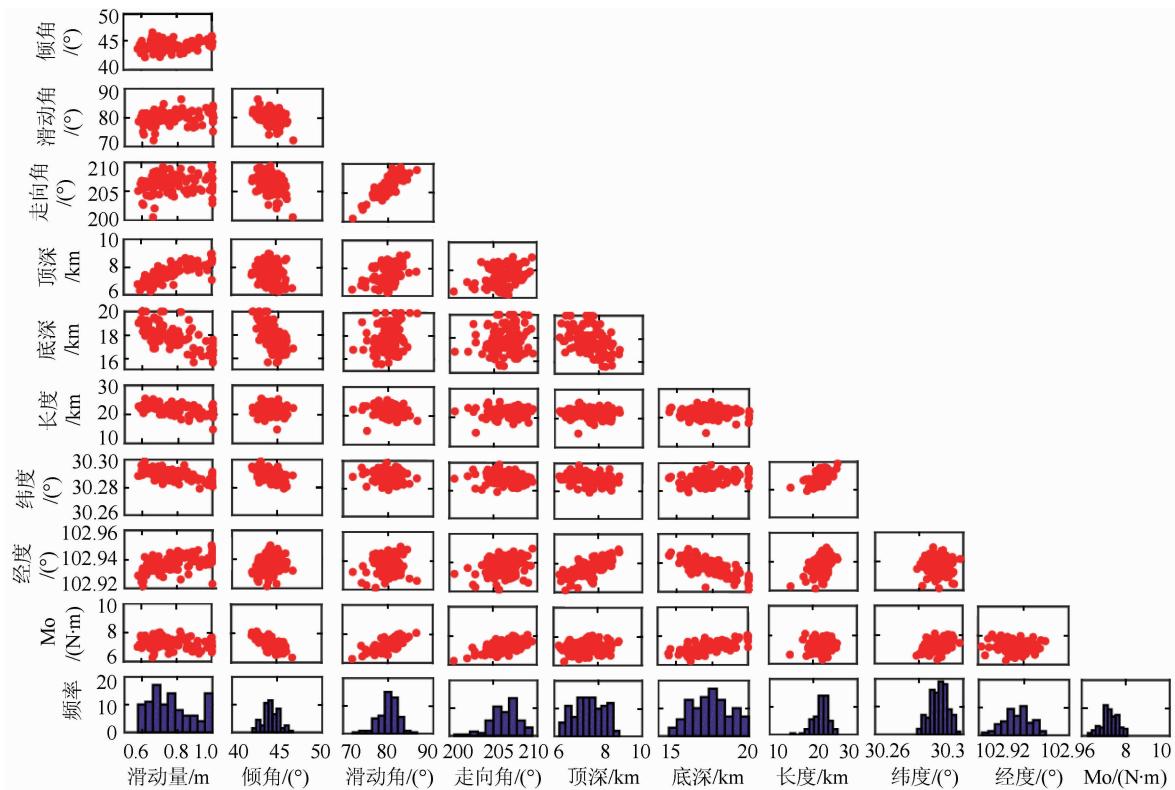


图2 断层模型参数反演的不确定性分析

Fig. 2 Uncertainty Analysis on Inversion of Fault Model Parameters

$$\begin{bmatrix} \mathbf{d}_{\text{gps}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G} \\ \alpha^2 \mathbf{H} \end{bmatrix} \mathbf{M} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, \mathbf{H} 为二阶拉普拉斯平滑算子; \mathbf{G} 为剖分后的各矩形单元单位走滑和单位倾滑产生的形变量构成的格林系数矩阵; \mathbf{M} 为各矩形单元对应的走滑分量和倾滑分量; α^2 为平滑因子, 其值可以通过粗糙度 $\|\mathbf{HM}\|_2^2$ 与拟合残差 $\|w(\mathbf{GM} - \mathbf{d})\|_2^2$ 的折衷曲线来确定, $\hat{\mathbf{M}}$ 表示 \mathbf{M} 的估计值。通过分析粗糙度和拟合残差的关系(见图3), 本文选取图3中曲线接近拐点处对应的平滑因子作为最优平滑因子, 且最优平滑因子为0.07。式(2)可以通过最小二乘方法^[22]得到断层滑动参数解。

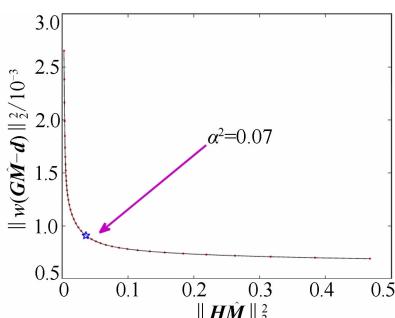


图3 数据拟合残差与粗糙度的折衷曲线

Fig. 3 Trade-off Curve Between Data Fitting

Residual and Roughness

为了比较不同倾角下的破裂面模型的反演结果, 本文同时给出了在倾角固定为上述单一均匀模型下的最优值(44.11°)时的滑动分布。如图4所示, 包括倾角在 $21^\circ \sim 50^\circ$ 范围的断层模型(图4(a))和倾角为常数时的断层模型(图4(b))及两者的滑动分布(图4(c)、4(d))。表3是不同模型下的滑动分布情况与部分已有研究文献的比较。从图4中可以看出, 在本文的铲状模型中, 主要滑动区域出现在两个深度范围, 即在约为 $4 \sim 20$ km 与 $24 \sim 26$ km 范围出现了大于 0.2 m 的滑动峰值, 这与文献[5]利用双断层模型反演得出的上下两个模型都出现了滑动峰值(主要滑动深度分别为 $10 \sim 20$ km 和 $25 \sim 30$ km)的结论一致; 最大滑动量深度为 13 km, 最大滑动量 0.68 m, 稍大于文献[4]的最大滑动量 0.61 m, 而小于文献[5]的 1.5 m; 平均滑动量为 0.18 m, 地震矩为 1.47×10^{19} N·m, 对应的矩震级为 Mw 6.74。为了验证滑动分布模型与观测数据的拟合效果, 本文利用反演得到的最优滑动分布模型参数计算了拟合的地表 GPS 同震形变场(见图1)。从图1中可以看出, 等倾角滑动模型与变倾角滑动模型(铲状模型)的地表水平方向形变预测值很接近, 垂直方向个别形变稍有差异, 且变倾角滑动模型的预测值更接近于观测形

变值,说明变倾角模型反演结果能较好拟合观测数据;变倾角模型反演的拟合残差中误差为 3.0 mm,稍小于等倾角模型的拟合残差中误差 3.1 mm。

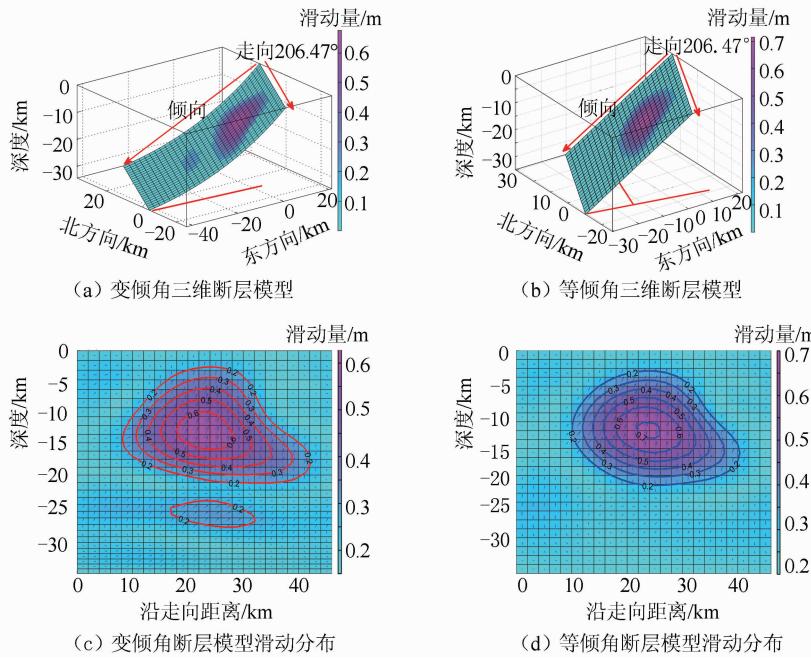


图 4 断层三维几何模型及滑动分布

Fig. 4 3D Geometry and Slip Distribution of the Fault

表 3 同震滑动分布的比较

Tab. 3 Comparison of the Coseismic Slip Distribution

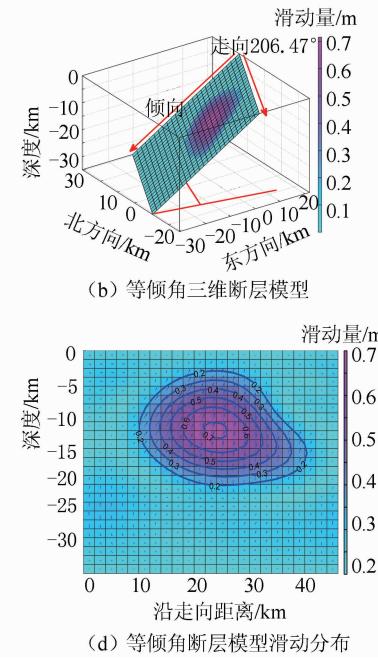
相关参数	倾角 $21^{\circ} \sim 50^{\circ}$	倾角 44.11°	文献[4]	文献[5]
主要滑动范围/km	4~20 24~26	4.5~21	5~20	10~20 25~30
最大滑动量/m	0.68	0.72	0.61	1.5
最大滑动量深度/km	13.0	13.5	13	13.2
平均滑动量/m	0.18	0.17		
最大滑动量的滑动角/(°)	69.0	69.8		
地震矩/(10^{19} N·m) ^a	1.47	1.17	1.14	0.95
矩震级(Mw)	6.74	6.68	6.6	6.6
残差中误差/mm	3.0	3.1		4.0

注:a 表示计算中涉及的剪切模量 $\lambda = 30$ GPa

3 讨 论

从研究结果分析,在固定断层位置、走向等参数的基础上,本文确定的铲状模型反演得到的矩震级为 Mw 6.74,最大滑动量为 0.68 m;单一均匀断层模型下的矩震级为 Mw 6.54,最大滑动量为 0.75 m。倾角为 44.11° 时,滑动分布反演的矩震级为 Mw 6.68,最大滑动量为 0.72 m。三者结果无论是震级还是最大滑动量都比较接近。文献[4]与本文使用的 GPS 数据相同,其通过网格搜索法确定的断层走向为 208° ,倾角为 43° ,与本文确定的断层走向(206.46°)非常接近,其滑动分布

相比垂直形变的拟合程度,水平形变的拟合程度更为理想,这与 GPS 数据的精度有关,总体上水平形变的精度比垂直形变的精度高。



反演得到矩震级为 Mw 6.6,最大滑动量为 0.61 m;文献[5]联合不同机构收集的 GPS 数据,最终反演得出的矩震级为 Mw 6.6,最大滑动量为 1.5 m;文献[3]使用 InSAR 数据反演了断层的断层参数和滑动分布,得到的矩震级为 Mw 6.45,最大滑动量为 0.91 m;文献[2]则综合了地震的震源机制及断层的地质构造资料确定断层的位置、走向和倾角等,反演给出的地震级为 Mw 6.7,最大滑动量为 1.6 m。从上述结果可以看出,由于不同研究的数据源不同,以及预设的断层位置、走向、倾角等参数有一定区别,导致最后得出的矩震级和最大滑动量都不尽相同,最大滑动量甚至有较大差别,主要原因可能与约束地震的数据源

有关。

已有观测资料和研究结果表明,芦山地震和汶川地震的破裂面均具有类似的铲状型的结构,且存在上陡下缓的特征。针对这个问题,本文在反演断层面的滑动分布时,设定破裂面的倾角从地表的较高倾角连续变化到接近水平的低倾角的铲状模型。从反演的结果来看,本文滑动分布出现了两个大于0.2 m的滑动区域;而等倾角的矩形模型的滑动分布则集中在一个区域,即在深度为25 km附近没有明显的滑动。本文结论与文献[1]认为芦山地震是盲逆断层型地震的相关结论及文献[5]将芦山破裂面固定为上下不同倾角的双断层铲状模型的结论是一致的,但文献[5]虽然考虑了破裂面的铲状形特征,但只是把下断层面确定为低倾角(26.5°),上断层面倾角为较高倾角(46.8°),这是铲状型破裂面的简化模式,并没有体现出铲状模型随深度不同而连续变化的特征,而且,从数据拟合结果来看,本文确定的铲状模型优于等倾角的矩形模型。因此,一定程度上本文以低角度连续递增至较高角度来刻画芦山地震破裂面的铲状模型更合理。

4 结语

从震源200 km范围内GPS连续点的同震形变观测数据来看2013年四川芦山Ms 7.0地震的破裂模型,地震导致的GPS最大形变点(102.924°E, 30.16°N)位于震中以南15 km左右,水平位移达6.8 cm,垂直位移达8.4 cm。GPS形变场及单一均匀滑动反演表明地震破裂面走向为南西南,走向角为206.47°,破裂以逆冲为主兼有少量左旋走滑,未延伸至地表面,是一次典型的盲逆断层型地震。

本文利用非线性MPSO算法反演得到了均匀滑动的断层参数模型,通过模拟实验及芦山地震实例反演,结果表明,相比其他优化算法,MPSO算法具有控制参数少、收敛效率高、稳定性及可靠性好的优点。本文分析认为芦山地震发生地所在的龙门山断裂西南端破裂面具有铲状形特征,通过实验比较了将断层面确定为铲状型和矩形平面时的滑动分布结果,发现铲状型破裂面反演结果较优。较优的结果表明,同震滑动在深度为4~20 km及24~26 km的两处范围都比较明显,最大滑动量0.68 m,深度13 km;地震矩为 1.47×10^{19} N·m,对应的矩震级为Mw 6.74。

本文采用的GPS连续点只有33个,而且还

有部分点位于远场区域。虽然反演结果表明这些数据较好地约束了断层破裂模型,但与文献[3]利用合成孔径雷达干涉测量数据和文献[5]联合了多个机构的GPS近场数据的反演结果相比,可以发现,本文的最大滑动量0.68 m比文献[3]的0.9 m及文献[5]的1.5 m都要小。如果能联合更多种类的数据来约束断层破裂面,会使反演结果更加可信。

参 考 文 献

- [1] Xu Xiwei, Wen Xuez, Han Zhujun, et al. Lushan Ms 7.0 Earthquake: A Blind Reserve-Fault Earthquake[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(20): 1 887-1 893(徐锡伟,闻学泽,韩竹军,等. 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,2013, 58(20): 1 887-1 893)
- [2] Wang Weimin, Hao Jinlai, Yao Zhenxing. Preliminary Result for Rupture Process of Apr. 20, 2013, Lushan Earthquake, Sichuan, China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4): 1 412-1 417(王卫民,郝金来,姚振兴. 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, 2013, 56(4): 1 412-1 417)
- [3] Liu Yunhua, Wang Chisheng, Shan Xinjian, et al. Results of SAR Differential Interferometry for the Co-seismic Deformation and Source Parameter of the Ms 7.0 Lushan Earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(8): 2 495-2 506(刘云华,汪驰升,单新建,等. 芦山Ms 7.0级地震InSAR形变观测及震源参数反演[J]. 地球物理学报, 2014, 57(8): 2 495-2 506)
- [4] Jiang Z S, Wang M, Wang Y Z, et al. GPS Constrained Coseismic Source and Slip Distribution of the 2013 Mw 6.6 Lushan China, Earthquake and Its Tectonic Implications [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41 (2): 407-413
- [5] Tan Kai, Wang Qi, Ding Kailua, et al. Rupture Models of the 2013 Lushan Earthquake Constrained by Nearfield Displacements and Its Tectonic Implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(9): 3 169-3 182(谭凯,王琪,丁开华,等. 近场位移数据约束的2013年芦山地震破裂模型及其构造意义[J]. 地球物理学报, 2015, 58(9): 3 169-3 182)
- [6] Tan Kai, Yang Shaomin, Qiao Xuejun, et al. Rupture of Ramp-decollement Faults in the 2008 Wenchuan Earthquake-Geodetic Evidence for the Uplift of the Longmen Shan Driven by Convergent De-

- formation [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(5): 1 506-1 516(谭凯, 杨少敏, 乔学军, 等. 2008 年汶川中断坡-滑脱断层破裂: 龙门山挤压隆升的大地测量证据[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1 506-1 516)
- [7] Xu Caijun, Liu Yang, Wen Yangmao. Mw 7.9 Wenchuan Earthquake Slip Distribution Inversion from GPS Measurements [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(3): 195-201(许才军, 刘洋, 温扬茂. 利用 GPS 资料反演汶川 Mw 7.9 级地震滑动分布[J]. 测绘学报, 2009, 38(3): 195-201)
- [8] Yi Guixi, Long Feng, Vallage A, et al. Focal Mechanism and Tectonic Deformation in the Seimogenic Area of the 2013 Lushan Earthquake Sequence, Southwestern China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(10): 3 711-3 731(易桂喜, 龙锋, Vallage A, 等. 2013 年芦山地震序列震源机制与震源区构造变形特征分析[J]. 地球物理学报, 2016, 59(10): 3 711-3 731)
- [9] Feng Wanpeng, Li Zhenhong. A Novel Hybrid PSO/Simplex Algorithm for Determining Earthquake Source Parameters Using InSAR Data [J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(4): 1 189-1 196(冯万鹏, 李振洪. InSAR 资料约束下震源参数的 PSO 混合算法反演策略[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(4): 1 189-1 196)
- [10] Feng Wanpeng, Xu Lisheng, Li Zhenhong. Fault Parameters of the October 2008 Damxung Mw 6.3 Earthquake from InSAR Inversion and Its Tectonic Implication [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(5): 1 134-1 142(冯万鹏, 许力生, 李振洪. 2008 年 10 月当雄 Mw 6.3 级地震断层参数的 InSAR 反演及其构造意义[J]. 地球物理学报, 2010, 53(5): 1 134-1 142)
- [11] Wen Yangmao, Xu Caijun, Liu Yang, et al. The 2007 Ali Earthquake Inversion from Ascending and Descending InSAR Observation [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(6): 649-654(温扬茂, 许才军, 刘洋, 等. 升降轨 InSAR 数据约束下的 2007 年阿里地震反演分析[J]. 测绘学报, 2015, 44(6): 649-654)
- [12] Nunnari G, Puglisi G, Guglielmino F. Inversion of SAR Data in Active Volcanic Areas by Optimization Techniques [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2005, 12: 863-870
- [13] Jonsson S, Zebker H, Segall P, et al. Fault Slip Distribution of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California Earthquake, Estimated from Satellite Radar and GPS Measurements [J]. *Bull Seism Soc Am*, 2002, 92(4): 1 377-1 389
- [14] Pedersen R, Jonsson S, Arnadottir T, et al. Fault Slip Distribution of Two June 2000 Mw 6.5 Earthquake in South Iceland Estimated from Joint Inversion of InSAR and GPS Measurements [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 213: 487-502
- [15] Wang Leyang, Xu Caijun, Wen Yangmao. Fault Parameters of 2008 Qinghai Dachaidan Mw 6.3 Earthquake from STLN Inversion and InSAR Data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(2): 168-176(王乐洋, 许才军, 温扬茂. 利用 STLN 和 InSAR 数据反演 2008 年青海大柴旦 Mw 6.3 级地震断层参数[J]. 测绘学报, 2013, 42(2): 168-176)
- [16] Zhang Peizhen. Current Tectonic Deformation, Strain Distribution and Deep Dynamic Process of Eastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau in Western Sichuan [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2008, 38(9): 1 041-1 056(张培震. 青藏高原东缘川西的现今构造变形、应变分配与深部动力过程[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(9): 1 041-1 056)
- [17] Xu X W, Wen X Z, Yu G H, et al. Coseismic Reverse- and Oblique-Slip Surface Faulting Generated by the 2008 Mw 7.9 Wenchuan Earthquake, China [J]. *Geology*, 2009, 37: 515-518
- [18] Zhang P, Wen X, Shen Z, et al. Oblique, High-Angle, Listric-Reserve Faulting and Associated Development of Strain: The Wenchuan Earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China [J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2010, 38: 353-382
- [19] Xu Caijun, Yin Zhi. Progress in Inversion for Tectonic Stress-Strain Fields Using Geodetic Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(10): 1 135-1 146(许才军, 尹智. 利用地测量资料反演构造应力应变场研究进展[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(10): 1 135-1 146)
- [20] Okada Y. Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75(4): 1 135-1 154
- [21] 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): 1 018-1 140
- [22] Funning G J, Parsons B, Wright T J, et al. Surface Displacements and Source Parameters of the 2003 Bam (Iran) Earthquake from Envisat Advanced Synthetic Aperture Radar Imagery [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(B09): 406-411

Source Parameters and Slip Distribution Inversion of 2013 Lushan Ms 7.0 Earthquake

WANG Leyang^{1,2,4} LI Haiyan^{1,3} CHEN Hanqing¹

1 Faculty of Geomatics, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China

2 Key Laboratory of Watershed Ecology and Geographical Environment Monitoring, NASG, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China

3 Department of Geomatics, Jiangxi Vocational and Technical College of Information Application, Nanchang 330043, China

4 Jiangxi Province Key Lab for Digital Land, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China

Abstract: On April 20th 2013, Ms 7.0 earthquake occurred on the southern section of the Longmen Shan fault, in Sichuan Province. In this research, the three-dimensional coseismic displacement field that GPS data from 33 continuous stations are used to invert for fault geometry parameters and the slip distribution. The MPSO (multiple peak particle swarm optimization) algorithm has been successfully applied to invert for the fault model parameters. Compared with the commonly used algorithm, such as genetic algorithm, simulated annealing and the overall minimum norm optimization algorithm, MPSO algorithm has the advantages of less control parameters, high global convergence efficiency, and is very suitable for nonlinear inversion of fault parameters. The result indicates that the seismogenic fault is a thrust with a strike of 206.47°, a dip of 44.11°, and length of 21.94 km. The minimum and maximum depth is 7.66 km and 17.84 km, respectively. The fracture surface was determined as listric surface by analysis. In order to obtain the detailed slip distribution, the listric surface model is set with the default dip angle varying from 50° on the top boundary of the surface to 21° on the bottom boundary. Our inversion result shows that the rupture surface has two slip peaks at different depths. The maximum slip is 0.68 m at the depth of 13 km. The inverted geodetic moment is 1.47×10^{19} N·m and the moment magnitude Mw is 6.74, which is consistent with the result of seismology.

Key words: Lushan earthquake; MPSO algorithm; fault geometry parameters; slip distribution

First author: WANG Leyang, PhD, associate professor, specializes in geodetic inversion and geodetic data processing. E-mail: wleyang@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41874001, 41664001, 41204003; Support Program for Outstanding Youth Talents in Jiangxi Province, No. 20162BCE23050; the National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFB0501405; Science and Technology Project of the Education Department of Jiangxi Province, No. GJJ150595; the Project of Key Laboratory for Digital Land and Resources of Jiangxi Province, No. DLLJ201705.