

四川芦山 M_s 7.0 级地震震源机制解初步研究

曾祥方¹, 韩立波², 石耀霖¹

1. 中国科学院计算地球动力学重点实验室; 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049
2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘要 震源机制解研究是认识地震发震断层的重要手段,也是理解深部构造应力和地震发震机制的重要依据。2013年4月20日四川芦山发生 M_s 7.0 级地震,利用近震直达 P 波初动极性反演了地震机制解,同时利用全球地震台网波形记录,反演了地震机制解和矩心深度。两种方法所得发震断层走向倾角滑动角分别为 $208^\circ/41^\circ/98^\circ$ 和 $220^\circ/46^\circ/93^\circ$,表明这次地震为一高角度逆冲型地震,远震波形反演得到的矩心深度为 12km。

关键词 芦山 M_s 7.0 级地震;地震震源机制解;矩心深度

中图分类号 P315.63

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.12.001

Focal Mechanism Solution of M_s 7.0 Lushan Earthquake, April 20, 2013

ZENG Xiangfang¹, HAN Libo², SHI Yaolin¹

1. Key Laboratory of Computational Geodynamics of Chinese Academy of Sciences; College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract Focal mechanism provides key information on seismogenic fault and helps to understand tectonic stress field and . First-motion of direct P wave recorded at regional seismic station and teleseismic body wave were employed to invert focal mechanism of Lushan M_s 7.0 earthquake, April 20, 2013. The strike, dip and rake of fault planes of our results are $208^\circ/41^\circ/98^\circ$ and $220^\circ/46^\circ/93^\circ$ respectively. Both fault plane and centroid depth are close to results provided by other institutes with different methods and dataset.

Keywords Lushan M_s 7.0 earthquake; focal mechanism solution; centroid depth

0 引言

据中国地震台网测定,北京时间 2013 年 4 月 20 日 08:02:46 四川省雅安市芦山县 (30.3°N , 103.0°E) 发生 M_s 7.0 级地震 (图 1),造成重大的人员伤亡和财产损失。据主震和余震定位结果,本次地震可能的发震断层为龙门山断裂带南段的双石—大川断裂^[1]。

震源机制解研究是认识地震发震断层的重要手段,也是理解深部构造应力的主要依据。目前研究震源机制解的主要方法有两种:一种是利用 P 波初动符号,后期加入 S/P 波振幅比等信息;另一种是利用波形信息。P 波初动类方法尽管要求较好的台站覆盖以及较为准确的速度模型,但因其具有简单

易行,依赖信息少,稳健,快速等优点,在国内应用较为广泛。波形信息类方法充分利用到时和振幅信息,不仅可以得到地震断层解,还可以得到地震矩张量、标量矩、矩心深度等信息。本文采用芦山地震的近震数据和远震数据,分别采用上述两种方法,对该地震的震源机制进行研究。

1 近震数据研究

震后国家数字测震台网数据备份中心快速提供了四川、云南、重庆等地震台网的数字波形记录^[2](图 2)。在震源 120km 以内大部分台站记录上有清晰的 P 波信号,但后续 S 波和面波部分出现了限幅,因此难以采用全波形反演地震机

收稿日期: 2013-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41204044)

作者简介: 曾祥方,博士,研究方向为数字地震学,电子信箱: zengxf@ucas.ac.cn; 石耀霖(通信作者),教授,中国科学院院士,第三世界科学院院士,研究方向为地球动力学,电子信箱: shiy@ucas.ac.cn

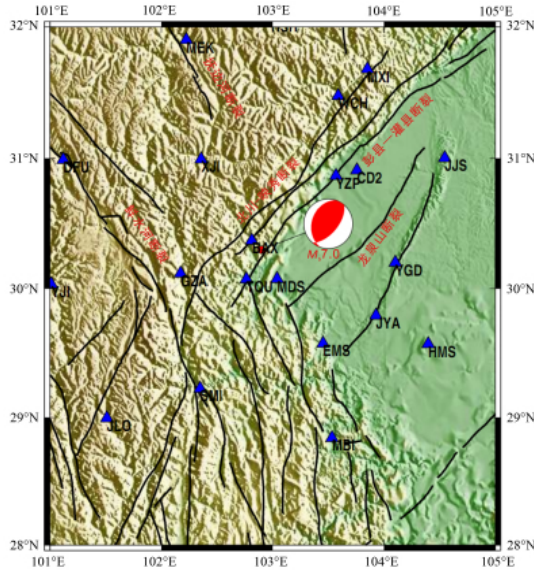


图 1 芦山地震震源区主要断裂(黑线)和地震台站(蓝色三角)分布

Fig. 1 Main faults (black line) and seismic station (blue triangle) distribution map of epicenter region of Lushan earthquake

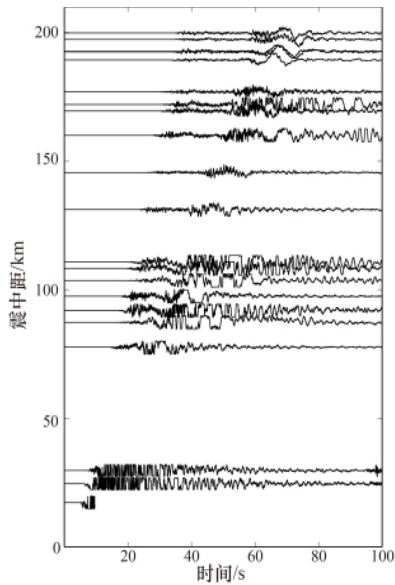


图 2 芦山地震竖直向原始波形图

Fig. 2 Raw vertical seismic records of Lushan earthquake

制解。研究搜集了 200km 以内 21 个台站宽频带波形记录, 读取了竖直向 P 波初动方向。

初动反演过程中需要计算 P 波离源角, 采用 Crust Model 2.0 (<http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/rem.html>) 在震源处给出模型。在地壳深部该模型与地震测深结果相近, 但考虑到震中位于山区, 剥去了模型中的沉积层部分(表 1)。反演采用 Hardebeck 和 Shearer 发展的 HASH 方法^[9], 通过对所有可能的断层面进行网格搜索, 比较所有观测和理论初动方向差异, 得到最优解。

表 1 芦山地震震源区地壳地震波速度模型
Table 1 Seismic velocity model of epicenter region of Lushan earthquake

层厚/km	P 波速度 $/(km \cdot s^{-1})$	S 波速度 $/(km \cdot s^{-1})$	密度 $/(g \cdot cm^{-3})$
22.0	6.10	3.50	2.75
20.0	6.30	3.60	2.80
4.0	7.20	4.00	3.10

图 3 给出了初动反演得到的断面解, 走向为 208° , 倾角为 41° , 滑动角为 98° 。图中+表示 P 波初动为正, ○表示初动为负, 红色表示震源球中压缩部分(预测初动为正), 可见大多数台站的 P 波初动方向与这一断面预测的方向相符。由断面解可见, 芦山地震是一个比较典型的逆冲地震, 主要受北西西-南东东方向挤压应力控制, 与区域构造应力场相符^[4-5]。

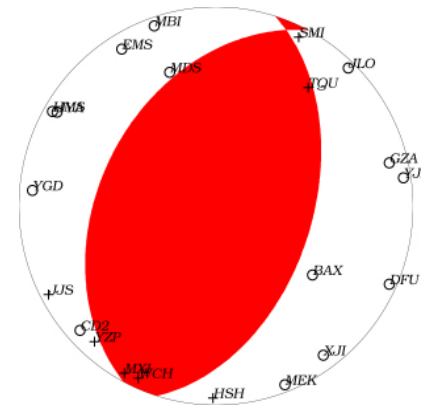


图 3 P 波初动反演结果

Fig. 3 Inversion results of P wave first-motion

2 远震数据研究

远震体波传播路径主要位于地幔, 受三维结构的影响较小, 同时较少出现限幅情况。考虑到上地幔间断面造成的复杂性, 研究选取了震中距范围为 $35^\circ \sim 85^\circ$ 的全球地震台网 (Global Seismographic Network, GSN) 宽频带波形记录, 通过去倾斜、去除仪器响应、旋转等数据预处理后, 选取了 35 个台站的竖直向直达 P 波和切向直达 SH 波记录, 用于反演地震机制解(图 4)。

远震体波的传播过程可以分解为源区地壳项、地幔传播项、台站区地壳项的卷积, 针对较为简单的地幔传播项可以利用射线理论快速计算弹性传播效应, 再与非弹性效应进行卷积得到, 地壳部分则采用传播矩阵方法进行计算。地幔部分采用初步地球参考模型 (Primarily Reference Earth Model), P 波的 T^* 为 0.8s, S 波为 4s, 源区地壳采用近震研究中的模型。

反演方法采用改进后的远震剪切——粘贴法 (CAPtel)^[6], 误差函数为理论地震图和实际记录的 L2 范数差, 将 P 波和 SH 波分别滤波到 0.05~0.1Hz 和 0.05~0.08Hz, 窗口长度为 60s。在 2~20km 范围内, 以 2km 为间隔, 搜索每个深度的最佳

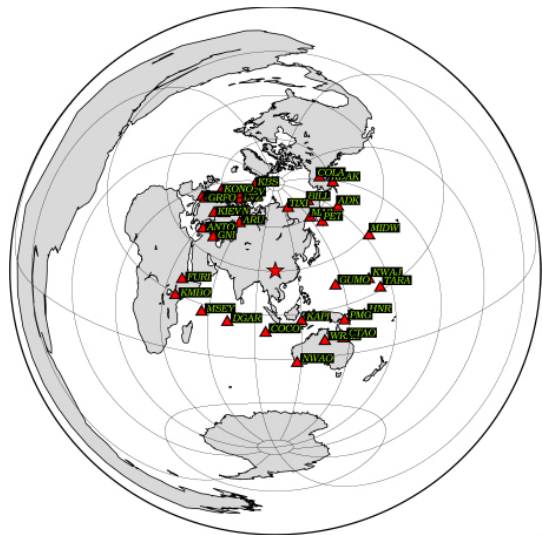


图 4 本文所用 GSN 台站分布

Fig. 4 GSN station distribution and epicenter location map

双力偶解。图 5 中震源球给出不同深度对应的最佳双力偶解。震源机制解随矩心深度变化较小,矩心深度为 12km 时,拟合误差最小,对应的最佳机制解为,断层面走向 220°,倾角为 46°,滑动角为 93°,震级为 7.0。基本断层参数与近震初动反演得到结果接近,但是由于远震波形出射角较小,对逆冲断层的走向约束较差,所以有一定差异。图 6 给出了波形对比结果,波形下方数字分别为偏移时间和相关系数,P 波波形初始段较末段拟合好,可能原因是由于采用点源近似,不足以反映破裂过程的复杂性。有研究表明破裂过程可能由两个子事件构成,一个发生在震后 0~10s,一个发生在震后 10~25s^[1]。

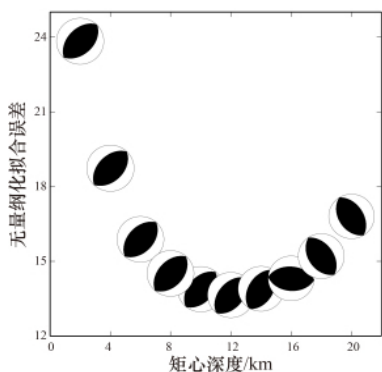


图 5 无量纲化拟合误差随矩心深度变化

Fig. 5 Nondimensional fitting error with changed different centroid depths

3 讨论与结论

震后不同研究机构采用各种波形数据和方法,对芦山地震震源机制解做了初步研究,与本文结果对比见表 2,其中 USGS(US Geological Survey)结果分别采用 W phase 和体波反演得到,W phase 和 Global CMT(www.globalcmt.org)利用的远震面波信号,均为较长周期信号,CEA-IGP^[1]利用近震体波和

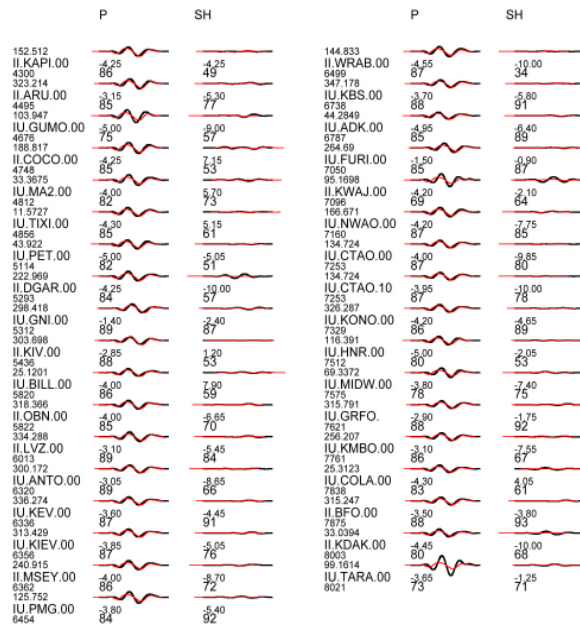


图 6 波形对比图(黑线为实际记录,红线为理论波形)

Fig. 6 Waveform modeling comparison results (black line denotes real recording, red line denotes theoretical seismograms)

表 2 本文所得断层面解结果与其他研究机构结果对比

Table 2 Fault planes derived from this research and other institutes

机构	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)
USGS Wphase	218	39	103
USGS 体波	216	47	93
GlobalCMT	210	38	96
CEA-IGP ^[1]	220	50	107
初动反演	208	41	98
CAPtel	220	46	93

面波信号,通过剪切——粘贴方法得到。大部分断层面解的走向基本与龙门山断裂带南段走向一致;不同解的倾角虽然散布较大,大多数倾角都高于汶川地震倾角(Global CMT 解中为 33°),但是这一结果与地质考察提供的双石—大川断裂倾角接近^[7];滑动角也表明芦山地震是一个逆冲型地震。

龙门山断裂带位于青藏高原东南缘,由于青藏高原隆升引起的地壳物质东流,在此遇到四川盆地阻挡,因此应变能长期积累,超过一定阈值后发生地震。定量计算模拟表明^[8],整个龙门山断裂带上地壳底部都是应力高增长率区。汶川地震虽然释放了大量累积应变(约相当于数千年积累量),但是其破裂主要从震中向东北传播,破裂总长度近 300km,而龙门山断裂带西南段约 100km 并没有发生破裂。一些研究表明,汶川地震不仅没有释放龙门山断裂带西南段累积的应变,反而由其引起的库仑应力变化,加大了西南段的地震危险性^[9-11]。完全弹性情况下,该段库仑应力增加量可达 0.015MPa^[9],考虑黏弹性情况,芦山地震震源区附近库仑应力增加量达 0.01MPa,并随

着汶川地震后离逝时间增加而增加^[10]。虽然库仑应力的计算受断层破裂模型、摩擦系数等因素的影响,但是在被认可的几种模型和等效摩擦系数可信范围内,龙门山断裂带南段在汶川地震后库仑应力都有所增加^[11]。汶川地震后在龙门山断裂带南段进行的地应力测量表明,浅部的地应力水平仍较高,有一定的危险性^[5]。但与汶川地震相比,这次地震规模较小,以双侧破裂为主,破裂主要集中于 20km×20km 范围内,最大位错约为 1.5m^[1],释放的应变能远小于龙门山断裂带北段,是否还有下一次地震仍有待研究。

本文利用近震 P 波初动和远震体波波形分别反演了地震断层解、地震矩心深度等,但这只是地震震源参数中的一部分,不足以完全揭示芦山地震的发生、发展和终止。通过各种地球物理方法研究地震破裂过程、震源区的精细结构、构造应力场等,并结合震源物理学、野外地质考察等研究将会进一步明确这次地震的发震机理。

致谢 中国地震局地球物理研究所国家数字测震台网数据备份中心为本研究提供地震波形数据,GSN 台网数据由 IRIS DMC 提供,本文图片采用 Generic Mapping Tools 绘制,在此一并表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] 中国地震局地球物理研究所. 2013 年 4 月 20 日四川芦山 7.0 级地震 (2.0 版)[EB/OL]. [2013-04-20]. <http://www.cea-igp.ac.cn/tpwx/266810.shtml>.
Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. Lushan M7.0 Earthquake April 20, 2013 (Version 2.0) [EB/OL]. [2013-04-20]. <http://www.cea-igp.ac.cn/tpwx/266810.shtml>.
- [2] 郑秀芬, 欧阳飏, 张东宁, 等. “国家数字测震台网数据备份中心”技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑[J]. 地球物理学报, 2009, 52(5): 1412-1417.
Zheng Xiufen, Ouyang Biao, Zhang Dongning, et al. Chinese Journal Geophysics, 2009, 52(5): 1412-1417.

- [3] Hardebeck L, Shearer P. A new method for determining first-motion focal mechanism[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2002, 92(6): 2264-2276.
- [4] 钟继茂, 程万正. 由多个地震震源机制解求川滇地区平均应力场方向[J]. 地震学报, 2006, 28(4): 337-346.
Zhong Jimao, Cheng Wanzheng. Acta Seismologica Sinica, 2006, 28(4): 337-346.
- [5] 秦向辉, 陈群策, 谭成轩, 等. 龙门山断裂带西南段现今地应力状态与地震危险性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S1): 2870-2876.
Qin Xianghui, Chen Qunce, Tan Chengxuan, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S1): 2870-2876.
- [6] 陈伟文, 倪四道, 汪贞杰, 等. 2010 年高雄地震地震参数的近震波形联合反演[J]. 地球物理学报, 2012, 55(7): 2319-2328.
Chen Weiwen, Ni Sidaao, Wang Zhenjie, et al. Chinese Journal Geophysics, 2012, 55(7): 2319-2328.
- [7] 杨晓平, 蒋溥, 宋方敏, 等. 龙门山断裂带南段错断晚更新世以来地层的证据[J]. 地震地质, 1999, 21(4): 341-345.
Yang Xiaoping, Jiang Pu, Song Fangmin, et al. Seismology and Geology, 1999, 21(4): 341-345.
- [8] 刘畅, 朱伯靖, 石耀霖. 粘弹性数值模拟龙门山断裂带应力积累及大震复发周期[J]. 地质学报, 2012, 86(1): 157-169.
Liu Chang, Zhu Bojing, Shi Yaolin. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(1): 157-169.
- [9] Shan B, Xiong X, Zheng Y, et al. Stress Changes on major faults caused by M_w 7.9 Wenchuan earthquake, May 12, 2008 [J]. Science in China Series d-earth Sciences, 2009, 52(5): 593-601.
- [10] 邵志刚, 周龙泉, 蒋长胜, 等. 2008 年汶川 M_s 8.0 地震对周边断层地震活动的影响[J]. 地球物理学报, 2010, 53(8): 1784-1795.
Shao Zhigang, Zhou Longquan, Jiang Changsheng, et al. Chinese Journal Geophysics, 2010, 53(8): 1784-1795.
- [11] 石耀霖, 曹建玲. 库仑应力计算及应用过程中若干问题的讨论—以汶川地震为例[J]. 地球物理学报, 2010, 53(1): 102-110.
Shi Yaolin, Cao Jianling. Chinese Journal Geophysics, 2010, 53(1): 102-110.

(责任编辑 吴晓丽)

· 学术动态 ·

芦山地震与汶川地震有何异同

4 月 20 日, 多名地震专家认为, 芦山地震和汶川地震的机制一致。

中国地震局地质研究所研究员周本刚认为, 芦山地震、汶川地震都是逆冲型地震。周本刚解释, 地层断裂处分成相对上下两盘, 根据上下盘的不同运动分成 3 种: 第 1 种是断层两盘水平交错, 称为“走滑型”; 第 2 种是断层上盘往下运动, 称为“正断型”; 第 3 种是上盘往上运动, 这便是“逆冲型”。芦山地震、汶川地震与龙门山断裂带运动性质一致, 是青藏高原的巴颜喀拉地块向东南运动, 受到四川盆地阻挡, 应力积累和释放的结果。

中国地球物理学会科普委员会委员张晓南认为, 芦山地震、汶川地震都是主余震型, 但差别也很大, 最大的差别是其破坏力。虽然芦山地震与汶川地震震级只相差 1 级, 但在爆发的能量上却差 33 倍。汶川地震震级高、烈度也大, 芦山地震的破坏性相比较小 (<http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2013/4/277024.shtml>)。