

张莹莹, 安艳茹. 利用近震和远震波形快速测定地震震源深度——以2013年4月20日四川芦山 $M_s7.0$ 级地震为例[J]. 华南地震, 2016, 36(3): 75–80. [ZHANG Yingying, AN Yanru. Rapid Determination of the Earthquake Focal Depth by Using Near Earthquake and Teleseismic Waveforms: a Case Study of $M_s7.0$ Earthquake on April 20th, 2013 [J]. South china journal of seismology, 2016, 36(3): 75–80.]

利用近震和远震波形快速测定地震震源深度 ——以2013年4月20日四川芦山 $M_s7.0$ 级地震为例

张莹莹, 安艳茹

(中国地震台网中心, 北京 100045)

摘要: 利用四川台网近震波形资料, 精确拾取初至震相, 采用网格搜索法, 通过调整震源深度来控制近台定位残差, 给出芦山7.0级地震的震源深度。同时利用全球台网远震波形资料, 给定震源位置利用Taup计算理论走时, 通过拟合sP到时, 验证近震给出的震源深度。通过和其他研究结果对比, 结果表明: 利用近震和远震相结合的方法分析给出的芦山地震的震源深度14 km的结果是合理的。在限定的较短时间内, 利用近震结合远震判定地震深度的办法简单高效, 可以很好的应用于速报工作中。

关键词: 近震; 远震; 深度震相; 震源深度

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2016) 03-0075-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2016.03.011

Rapid Determination of the Earthquake Focal Depth by Using Near Earthquake and Teleseismic Waveforms: a Case Study of $M_s7.0$ Earthquake on April 20th, 2013

ZHANG Yingying, AN Yanru

(China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

Abstract: By using the waveforms recorded by Sichuan province regional stations, the first arrival P phases by precisely manual picking, and a grid search method, the paper gets the depth result of Lushan $M_s7.0$ earthquake through controlling the location residuals by modifying the deep values. Meanwhile, based on the teleseismic waveforms data recorded by global network stations and the given source location, the paper uses Taup to calculate the theoretical arrival time of surface reflections sP, and verifies the focal depth determined by the

收稿日期: 2015-07-29

作者简介: 张莹莹(1986-), 女, 助理工程师, 硕士研究生, 主要从事地震监测、地壳速度结构和各向异性方面的研究。

E-mail: zyycugb1986@163.com.

near earthquake waveforms by fitting the arrival time of sP. The result shows that the focal depth of Lushan earthquake with 14 km is reasonable which is determined by jointly using the waveforms recorded by regional stations and teleseismic stations. In a limited short time, the method which jointly use the waveforms recorded by regional stations and teleseismic stations is simple and effective, so it will be very suitable to be used in earthquake quick report work.

Key words: Near earthquake; Teleseismic; Depth phases; Focal depth

0 引言

震源深度是描述震源的最基本参数之一, 它的准确测定关系到对震源过程、断层构造、壳幔结构、应力积累状态、板块运动等一系列重要问题的正确认识; 但在现代地震目录中, 它几乎已经成为最不准的参数之一^[1]。随着研究的深入现今测定震源深度的方法越来越多, 例如: 通过利用 sPn^[2-3]、sPL^[4]、sP 和 pP^[5]等深度震相来测定震源深度的方法; 通过模拟面波振幅谱确定震源深度^[5-6]; 以上方法都需要对大量事件波形进行专业的处理和分析, 一般耗时较长, 不能满足快速测定震源深度的需求。隶属于中国地震台网中心的国家测震台网中心作为地震速报参数的第一发布者, 要求在规定的时间内完成地震的发震时间、空间和强度信息的准确测定, 震源深度是否准确将极大地影响到对灾情的预判, 因此如何在速报规定的时间内准确测

定震源深度是一个非常值得探讨的问题。结合实际工作, 本文以 2013 年 4 月 20 日四川芦山 M_s 7.0 级地震为例, 探讨了如何在规定时间内用近震结合远震波形资料快速准确测定震源深度的方法。

1 数据来源及分析方法

近震波形资料来自 11 个四川区域台网, 远震波形资料是国家台网共享的 25 个全球地震台网 (Global Seismographic Network) 记录的事件波形 (图 1)。本文利用目标函数搜索法进行地震定位, 分析近震资料时采用中国地区模型^[7], 分析远震资料时采用 iasp91 模型^[8], 每千米深度的震相走时表是利用 taup 软件^[9]计算得到的。定位软件采用国家测震台网中心开发并不断改进的国家数字地震台网中心实时处理及大地震速报软件系统^[10]。

本文采用的目标函数搜索法是在全空间范围

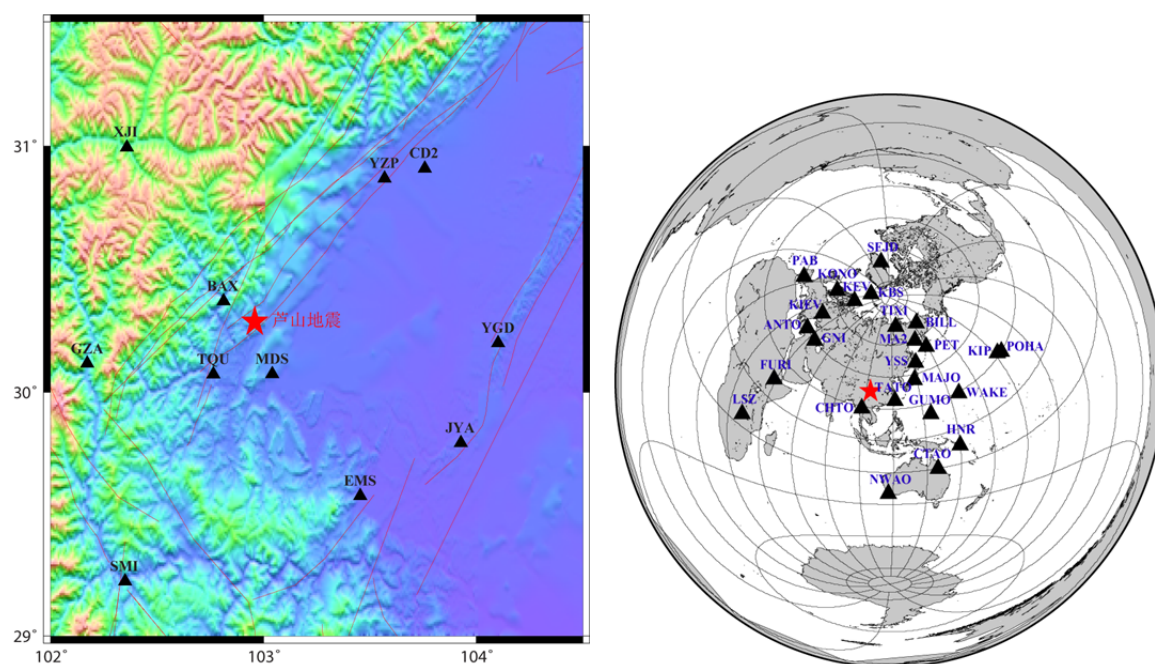


图 1 参与定位的四川区域台和全球台网台站分布

Fig.1 The distribution of Sichuan regional stations and global stations used in the location

内寻找一个点 (x, y, z) , 根据最小二乘法原理, 如果在该点发生地震, 地震波到达各台站的理论到时与实际观测到时差的平方和最小(与其他点相比), 可认为该点是发生地震最可能的位置, 目标函数如下:

$$F(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^n (T_i - \hat{T}_i(x, y, z, t))^2 \quad (1)$$

式(1)中, T_i 为 i 地震台的观测到时, \hat{T}_i 为 i 地震台的计算到时^[6]。

具体实现过程是网格搜索, 该方法最早被 Sambridge 和 Kennet^[7]应用于远震定位, 后来被 Dreger 等^[8]用于稀疏区域台网的地震定位。本文将全球分成网格, 扫描网格点, 寻找残差值最小的点。将全球经度从 $-180^\circ \sim +180^\circ$, 纬度从 $-90^\circ \sim 90^\circ$, 分成 2° 的网格, 沿着网格逐点扫描搜索残差最小的点。然后再以 0.5° , 0.1° 的网格, 搜索残差最小的点。这样既可保证精度, 又可保证速度。最后给出各深度对应的残差分布图, 通过残差的分布情况, 给出合理的深度结果。

1.1 用近震资料分析震源深度

对于给定的合理地壳速度模型, 台站的布局决定定位结果的精确度。台站间隙角和震中距越小, 对深度的约束就越好。本文利用近震资料, 精确拾取直达P波到时, 给定不同的深度值, 利用网格搜索法进行地震定位, 考虑近台残差及总体残差, 当残差达到最小时, 认为深度值最接近真实值。

1.2 用远震资料分析震源深度

对于远震射线, 地球介质可以简化为均匀、各向同性、完全弹性、球层状介质, 图2为sP、pP和P射线路径示意图, 直达P和sP的到时差可以表示为^[11]:

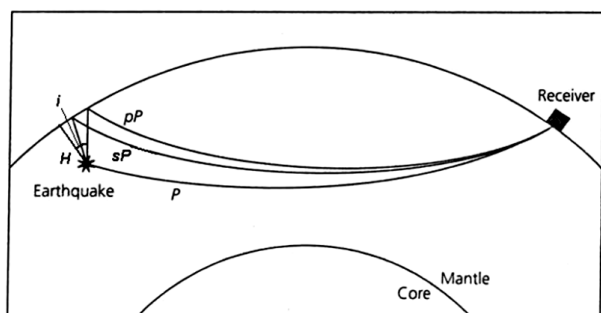


图2 sP和P射线路径示意图

Fig.2 The ray paths of the sP and P

$$\delta t_{sp} = (h/a)(\cos i + (3 - \sin^2 i)^{1/2}) \quad (2)$$

式(2)中, h 为震源深度, i 为pP的入射角, a 为P波速度。

深度震相sP与P震相的到时差是震源深度的函数, 到时差随震源深度的增加显著增加^[12], 所以用sP震相可以可靠的约束震源深度^[13-15]。

实际工作中可以结合近震给出的经纬度和深度估计, 利用 taup 软件计算理论sP走时。观察在理论到时位置处是否存在sP震相。sP震相的特征是: 在震中距 12° 以后即可观测到, 初动方向与P相同^[16], 振幅比P波强, 周期比P波长^[12]。为了保证正确的识别sP震相, 在单台识别的基础上, 利用多台进行震相的对比识别。远震的深震相到时拟合和利用区域台站近震资料直接测定深度的方法在深度测定过程中可以互为验证来得到可靠的深度估计, 如果区域台站分布不理想, 可以利用远震波形, 通过选定不同深度来拟合深震相到时, 作为单独手段来估计地震深度。

2 数据处理过程及结果

2.1 近震波形资料分析

选用震中距在30 km以内的11个近台, 来分析2013年4月20日四川芦山发生的 $M_s 7.0$ 级地震的深度。以往的研究表明龙门山断裂带周围相对容易积累应变, 并且5~19 km深度是高应力聚集区^[7]。我们将发生在龙门山断裂带南段的芦山地震的深度范围设定为1~30 km, 以1 km为步长, 并对经纬度进行网格搜索, 获得各台站残差及平均残差, 残差最小值对应的深度最接近实际的震源深度。众所周知, 台站的震中距越小对深度的约束越好, 本文震中距最小的两个台为BAX和MDS, 分别为18 km和25 km, 这就较好的约束了震源深度。

表1是网格搜索给出的残差, 按平均残差从小到大的顺序给出了对应深度, 图3为各深度对应的定位残差曲线, 可以直观的看出, 在深度为14 km时, BAX和MDS台的走时残差达到最小, 并且符号相反(BAX和MDS台站位于地震的两侧), 同时参与定位的所有台站的平均残差也达到最小, 因此, 近震给出的震源深度估计为14 km, 给出的其他定位结果参数分别为: 发震时刻: 2013-04-20 08:02:47.1, 纬度: 30.29° , 经度: 102.97° 。

表 1 芦山 7.0 级地震各深度下的定位残差

Table 1 The location residuals with every depth of Lushan M_s 7.0 earthquake

残差均值/s	BAX 台残差/s	MDS 台残差/s	深度/km	残差均值/s	BAX 台残差/s	MDS 台残差/s	深度/km
0.130	-0.09	0.02	14	0.438	0.87	0.73	8
0.143	0.09	0.16	13	0.446	-0.93	-0.63	24
0.157	-0.27	-0.04	15	0.471	0.88	0.81	7
0.160	-0.22	-0.15	16	0.486	-1.02	-0.69	25
0.193	0.25	0.29	12	0.509	0.96	0.87	6
0.193	-0.34	-0.2	17	0.51	-1.06	-0.75	26
0.217	-0.39	-0.27	18	0.534	0.89	0.93	5
0.246	-0.49	-0.28	19	0.545	0.88	0.97	4
0.261	0.43	0.43	11	0.547	-1.14	-0.812	7
0.292	-0.62	-0.33	20	0.551	0.84	1.01	3
0.330	-0.72	-0.39	21	0.556	0.79	1.04	2
0.332	0.6	0.55	10	0.559	0.72	1.06	1
0.366	-0.8	-0.44	22	0.584	-1.23	-0.86	28
0.383	0.74	0.65	9	0.622	-1.31	-0.91	29
0.406	-0.89	-0.5	23	0.659	-1.59	-0.92	30

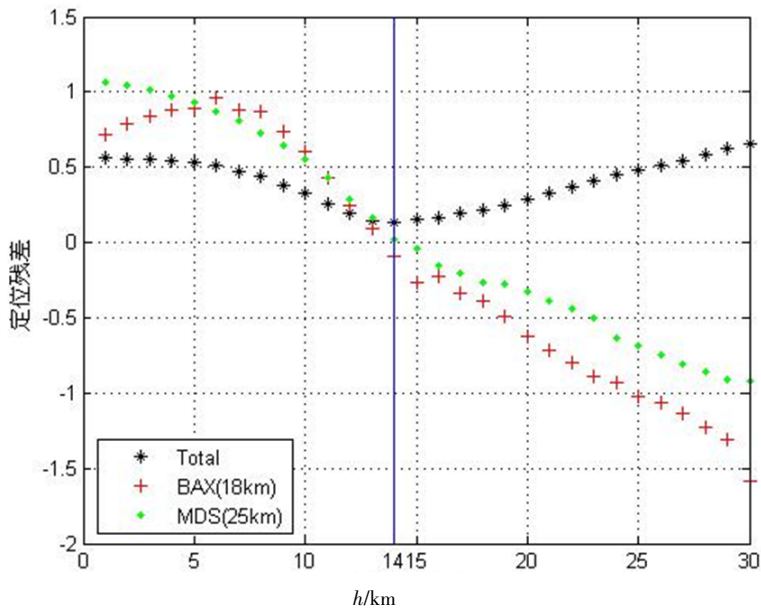


图 3 芦山 7.0 级地震定位残差曲线

Fig.3 The location residuals curves of Lushan M_s 7.0 earthquake

3.2 远震波形资料分析

近台能够很好的控制地震的震中位置，本文用 taup 软件计算了 25 个 GSN 台站记录到的芦山地震的理论 P 波和 sP 的走时，并在波形上标出了理论到时，如图 4 所示，25 各台站除 KEV、WAKE、SFJD 和 POHA 台站记录情况不好外，T1 标记的理论 P 波到时和 T2 标记的 sP 到时，与波形的震相比较吻合，在用时较短的情况下能够直观的判断出所选深度的合理性。

4 结语

利用近震资料分析得到的芦山地震深度为 14 km，定位结果的平均残差为 0.13 s 处于较低值。由于远震波形中标出的 sP 到时理论值和观测较为匹配，这就证明了可以将震源深度选定为 14 km。综上，本文认为 2013 年 4 月 20 四川芦山 M_s 7.0 级地震的震源深度为 14 km 是合适的。

芦山地震发生后，关于震源位置的研究陆续

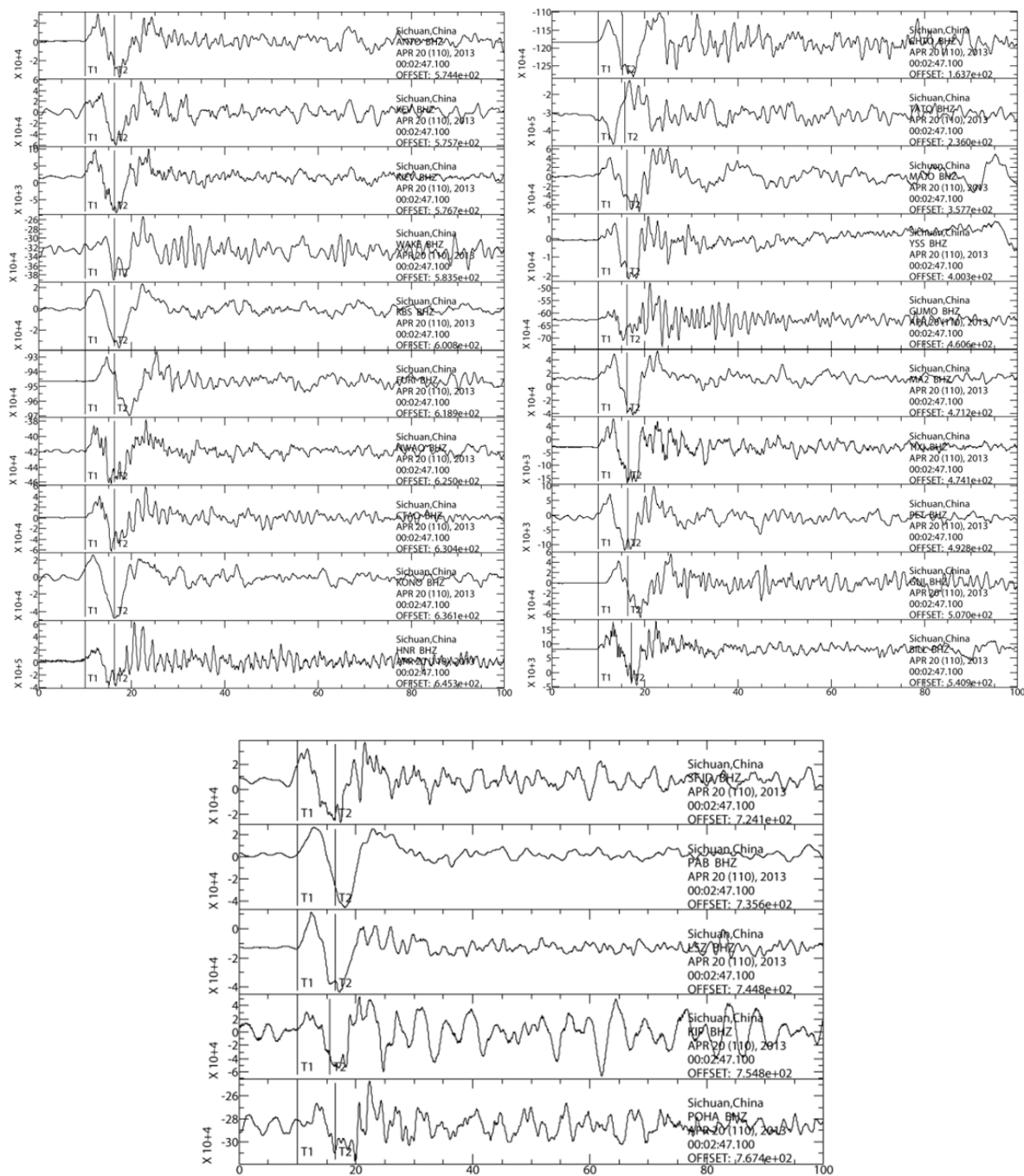


图 4 芦山地震 GSN 台站的波形记录

Fig.4 The waveforms of Lushan earthquake recorded by GSN stations

发表, 其中刘杰等^[18]利用四川台网记录的地震波形资料, 采用 CAP 波形反演方法得到的主震最佳拟合深度约为 19 km; 曾祥方等^[19]通过近远震波形数据联合反演, 得出震源深度为 12 km; 吕坚等^[20]采用双差定位方法, 利用人工地震测深和天然地震反演得到的地壳速度结构对主震和余震的震源位置进行重新定位, 最终得到的主震深度为 14 km。

以上各项研究侧重点不同, 得到的结果也存

在一定的差别。震源机制给出的是震源“质心”位置, 利用震相到时给出的是震源的初始破裂位置, 考虑到龙门山断裂带地区地壳结构比较复杂, 并且芦山地震存在一定的破裂尺度, 这些差别是完全可以接受的。综合前人的研究结果, 本文给出的芦山地震的深度结果为 14 km 是比较可靠的; 在限定的较短时间内, 利用近震结合远震判定地震深度的办法简单高效, 能够很好的应用于速报工作中。

参考文献:

- [1] 高原, 周惠兰, 郑斯华, 等. 测定震源深度的意义的初步讨论[J]. 中国地震, 1997, 13 (4): 321-329.
- [2] 王登伟. 用 sPn 与 Pn 波走时差测定近震震源深度的方法[J]. 地震, 2011, 31 (1): 12-19.
- [3] 孙茁, 吴建平, 蔡妍. sPn 震相特征及在震源深度测定中的应用[J]. 地震地磁观测与研究, 2014, 35 (3/4): 89-95.
- [4] 崇加军, 倪四道, 曾祥方. sPL 一个近距离确定震源深度的震相[J]. 地球物理学报, 2010, 53 (11): 2 620-2 630.
- [5] Alireza Alinaghi and Frank Krüger. Seismic array analysis and redetermination of depths of earthquakes in Tien - Shan: implications for strength of the crust and lithosphere Geophys[J]. J. Int. 2014, 198: 1 111-1 129.
- [6] Fox, B.D., Selby, N.D., Heyburn, R. et.al. Shallow seismic source parameter determination using intermediate -period surface wave amplitude spectra [J]. Geophys. J. Int., 2012, 191: 601-615.
- [7] 郭履灿, 唐友梅, 阎志德, 等. 中国地区地震 P 波和 S 波走时表[J]. 地震学报, 1981, 3 (2): 198-210.
- [8] Kennett B. L. N., Engdahl E. R. Traveletimes for global earthquake location and phase identification[J]. Geophys. J. Int., 1991, 105: 429-465.
- [9] Crotwell H. P., Owens T. J., Ritsema J. The TauP Toolkit: Flexible seismic travel -time and ray -path utilities [J]. Seismological Research Letters, 1999, 70 (2): 154-160.
- [10] 宋锐, 顾小虹, 王永力, 等. 国家数字地震台网中心实时处理及大地震速报软件系统[J]. 地震, 2001, 21 (4): 44-59.
- [11] Stein S. Wyssession M. An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure[M]. Xfoed:Blackwell Publishing, 2003, 231-232.
- [12] 张诚. 地震分析基础[M]. 北京: 地震出版社, 1986.
- [13] Chen W. P., Nabelek J. L., Fitch T. J., et al. An intermediate depth earthquake beneath Tibet: Source characteristics of the event of September 14, 1976[J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86 (B4): 2 863-2 876.
- [14] Zhao L. S., Helmberger D. V. Geophysical implications form relocations of Tibetan earthquake: hot lithosphere[J]. Geophys Res. Lett., 1991, 18 (12): 2 205-2 208.
- [15] Engdahl E. R., Van Der Hilst R., Buland R. Global teleseismic earthquake relocation with improved travel time and procedure for depth determination [J]. Bull Seismol Soc Amer, 1998, 88: 722-743.
- [16] 中国地震局监测预报司. 实用数字地震分析[M]. 北京: 地震出版社, 2009.
- [17] 陈棋福, 华诚, 李乐, 等. 龙门山断裂带深部构造变形的黏弹性模拟及其与强震活动的关联性探讨[J]. 地球物理学报, 2015, 58 (11): 4 129-4 137.
- [18] 刘杰, 易桂喜, 张致伟, 等. 2013 年 4 月 20 日四川芦山 $M7.0$ 级地震介绍[J]. 地球物理学报, 2013, 56 (4): 1 404-1 407.
- [19] 曾祥方, 罗艳, 韩立波, 等. 2013 年 4 月 20 日四川芦山 $M_s7.0$ 地震: 一个高角度逆冲地震[J]. 地球物理学报, 2013, 56 (4): 1 418-1 427.
- [20] 吕坚, 王晓山, 苏金蓉, 等. 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, 2013, 56 (5): 1 753-1 763.