

甘肃迭部 $M_s4.0$ 地震震源机制解和震源深度精确测定

张 辉^{1,2}, 王熠熙¹, 徐 辉¹

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要:综合利用了2011年2月23日迭部 $M_s4.0$ 地震的近震宽频带波形资料,采用CAP方法反演了该地震的震源机制解和震源深度,结合深度震相sPL对震源深度进行了精确确定。结果表明:迭部4.0级地震是一次走滑兼逆冲型地震;最佳双力偶解为节面I走向 110° 、倾角 57° 、滑动角 23° ;发震构造可能为光盖山-迭山北麓断裂;震源深度为7 km。

关键词: 甘肃迭部 $M_s4.0$ 地震; sPL震相; CAP方法; 震源机制; 震源深度

中图分类号: P315.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2013)04-908-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.04.908

Focal Mechanism Solutions and Accurate Determination of Focal Depth of Diebu $M_s4.0$ Earthquake

ZHANG Hui^{1,2}, WANG Yi-xi¹, XU Hui¹

(1. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou Gansu 730000, China;

2. Lanzhou National Observatory of Geophysics, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Seismic source is a main focus in seismologic research, and the focal mechanism solution and earthquake depth are important parameters. Researchers use the depth phase to enhance the precision of focal depth for $M \geq 5.0$ earthquakes by using the arrival time difference between teleseismic depth sP (or pP) and reference phase P to determine the focal depth of teleseismic activity. For the small, regional earthquakes, local depth phases such as sPL, sPg, sPmP, sPn, and sSmS may be observed in the proper distance range. If the regional depth phases can be identified, the focal depth of moderate-small earthquakes may be estimated.

To obtain accurate seismic parameters of the Diebu $M_s4.0$ earthquake occurring on February 23, 2010, this study uses local broadband waveforms and the cut-and-paste (CAP) method to obtain the best focal mechanism. The waveform fitting method for synthetic and observed seismograms is then used to further determine the focal depth of the earthquake. Because Minxian station (MXT) and the earthquake epicenter are 27 km apart, we use the data of that station to determine the depth phase sPL. Three component waveforms of MXT are first resolved to radial, tangential and vertical components, although the tangential component of the P wave energy is weakest for determining the best angle of rotation in obtaining the radial and tangential components. We next integrate the data of

投稿日期: 2013-05-13

基金资助: 中国地震局兰州地震研究所地震科技发展基金(2012M01); 国家自然科学基金(41174059)和中国地震局定向跟踪任务(2012020101)

作者简介: 张 辉(1978-), 男, 助理研究员, 主要从事地震学及数字地震资料的应用研究。

displacement and adopt a low-pass filter below 1 Hz. Finally, we use the waveform comparison method to accurately confirm focal depth.

The results show that the Pg and sPL phases of time and amplitude in synthetic and observed seismograms agree stronger at 7 km, as do the three components of these seismograms. Therefore, the most accurate focal depth of the Diebu $M_s4.0$ earthquake is 7 km, which implies that this event was a shallow earthquake in the upper crust.

Key words: Diebu $M_s4.0$ earthquake in Gansu; sPL phase; CAP method; focal mechanism; focal depth

0 引言

地震震源机制及深度的确定对于探索区域构造、孕震环境及成因等具有十分重要的意义,一直以来是地球科学家关注的问题。研究震源机制解的传统方法是P波初动法,该方法物理基础清晰,快速简单结果较为可靠^[1-2]。随着地震学家对震源机制理论和方法的研究,利用地震波形进行反演震源机制解,即使在台网相对稀疏、数据资料有限的情况下也能得到较可靠的结果^[3-6]。“剪切—粘贴”(CAP)方法^[7-8]同时利用宽频带近震记录的体波和面波波形记录联合反演矩张量解,分别拟合体波和面波,对速度结构和地壳横向差异不敏感,得到了广泛关注和引用^[9-11]。

如何精确确定震源深度一直是个难题。深度震相与其参考震相到时差对震中距离的变化不敏感,而对震源深度的变化非常敏感,这一特征可以很好的约束震源深度。理论上在适当震中距范围内可以观测到近震深度震相 sPL、sPg、sPmP、sPn、sSmS,近年来近震深度震相的研究为确定地震的震源深度提供了一种新的研究思路。Langston(1987)^[12]利用 sPg 与 Pg 的到时差研究了 1968 年澳大利亚 Meckering 近震序列的深度变化; Bock 等^[13]利用 sPmP 测量了近震震源的深度; Ma 和 Atkinson^[14]对 sPg、sPmP、sPn 等深度震相做了较详细的研究,利用 sPmP 和 PmP 的特征研究了近震震源深度。国内学者也利用这一方法开展了大量的研究工作:崇加军等^[15]验证了利用近震深度震相 sPL 可以精确的确定中小地震的震源深度;罗艳等^[16]通过利用 sPL 震相及面波体波振幅比的方法,证实了汶川地震余震区东北端青川 5.7 级地震的震源深度为 3 km。韩立波等^[17]采用理论地震图与观测地震图中的 SmS 与 sSmS 震相的对比分析,确定了河南太康两次中等地震的震源深度。

2010 年 2 月 23 日在甘肃迭部发生 $M_s4.0$ 地震,甘肃数字地震台网给出的定位深度为 8 km。本文利用近场宽频带波形资料,采用 CAP 方法反演本次地震的震源机制解;并通过岷县台不同深度的理论波形与实际波形的拟合及对比分析进一步确定地震精确的震源深度。

1 研究方法

1.1 震源机制解反演

CAP 方法是一种全波形反演的方法,具有所需台站少、反演结果对速度模型和地壳结构横向变化的依赖性相对较小等优点。该方法将宽频带地震记录分成 Pnl 和面波两个部分进行反演并允许相对浮动,在适当的时间变化范围内搜索出合成地震图和观测地震图全局差异最小的震源机制解,提高了 Pnl 的权重,且对地震深度有比较好的约束。

采用频率-波数(F-K)方法^[18]计算各震中距的格林函数获得理论地震图。F-K 方法适用于水平层地壳模型,通过对频率和波数分别进行积分,采用传播矩阵计算地震的全波场位移分布,计算各种频率下包含了体波和面波波形等成分的全部波形。

1.2 sPL 震相

定量地震学对 sPL 震相给出了定义,在近距离上,从震源出发的 SV 波入射到自由表面下方时将有一部分能量转换为 P 波,当临界入射时转换 P 波将沿着地表传播, Aki 称此波为“Surface P-wave”,它的水平视速度和 P 波速度相等,出现在临界距离上,随距离的变化衰减很快,具有与首波类似的性质^[19]。sPL 震相一般出现在震中距 50 km 以内,是 S 波向上传播在临界距离附近转换为 P 波并且沿着地表传播的波,在半空间情况下,由于自由表面下的速度梯度等结构的存在,sPL 包含 P 波在浅部的部分多次波或散射成分,特征表现为高频成分较少,其能量主要集中在径向分量,竖直分量上振幅相对较小,切向分量振幅为零。

2 地震概况及数据资料

2011 年 2 月 23 日在甘肃省甘南藏族自治州迭部县、定西市岷县交界(34.25°N, 103.86°E)发生一次 $M_s4.0$ 地震,震中位于临潭—宕昌断裂与光盖山—迭山北麓断裂之间,距两条断裂分别为 33 km 和 13 km。临潭—宕昌断裂是一条走向 NW、倾角较陡、逆冲性质的晚更新世以来的

活动断裂,断裂附近曾发生了2003年岷县5.2级和2004年岷县5.0级地震。光盖山—迭山北麓断裂是一条NNW走向、倾角陡、逆冲兼有左旋性质的晚更新世以来的活动断裂,沿着断裂曾发生过1960年舟曲5.25级、1987年迭部5.8级地震(图1)。

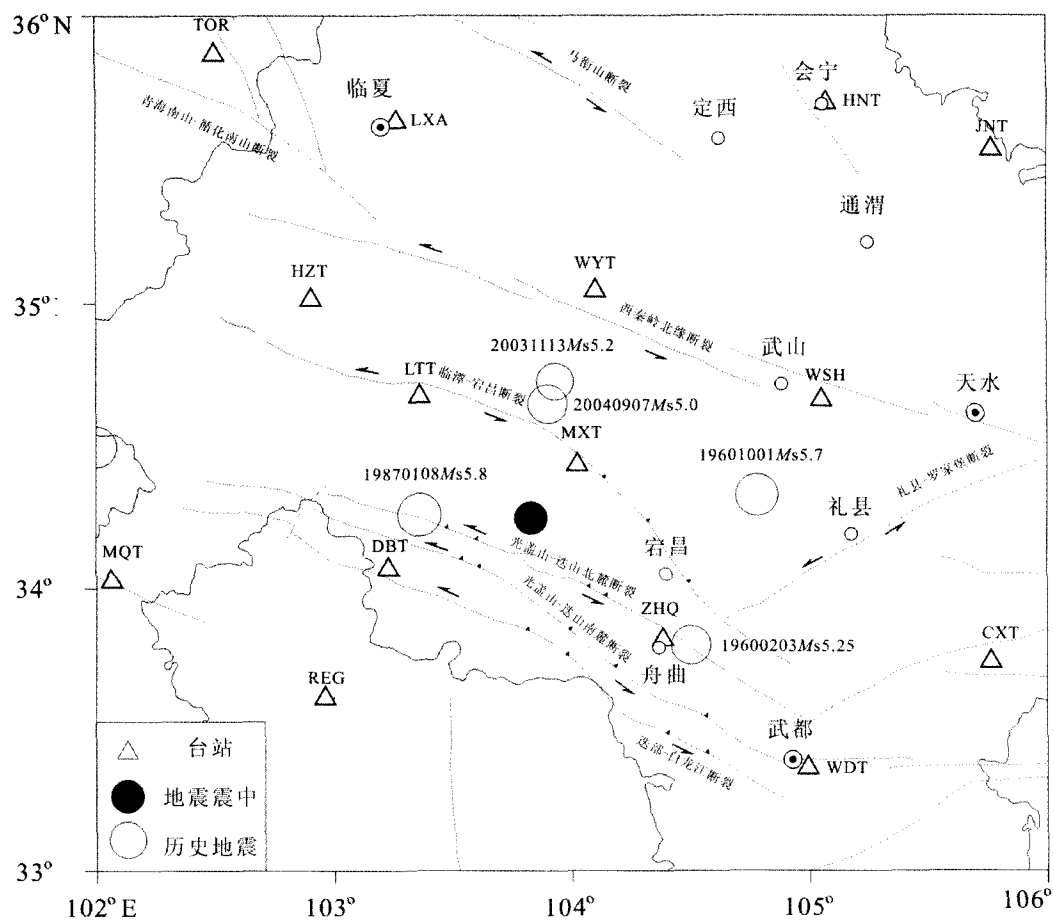


图1 地震震中及台站分布图
Fig.1 Distribution of earthquake epicenters and stations

本文所用资料来源于甘肃“十五”数字地震台网,图1为本次地震震中及数字地震台站的分布图。根据CAP反演所需台站方位角覆盖及波形信噪比的要求,挑选出震中距在120~230 km之间8个台站的数据。对挑选出的宽频带数据去除仪器响应,旋转至大圆路径得到径向、切向和垂向的位移记录,分成Pnl和面波两个部分,并将Pnl部分经带宽为0.05~0.2 Hz、面波部分经带宽为0.05~0.1 Hz的带通滤波器进行滤波。采用相同的滤波范围对计算得到的理论地震图进行滤波处理。

在CRUST2.0速度结构模型的基础上,结合李少华等^[20]的研究结果进行了部分修正,得到该区域的一维速度结构模型。

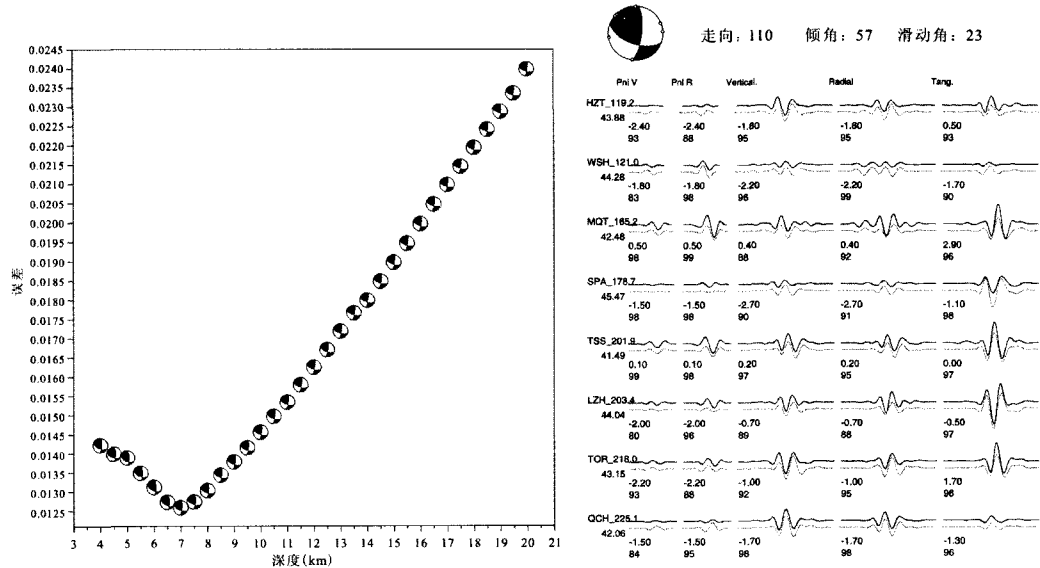
3 结果分析

3.1 震源机制解

基于图1中的近震台站记录,利用CAP方法在参数全

空间范围内搜索最佳震源机制解和震源深度,如图2所示。图2(a)为利用8个台站的波形资料,采用CAP方法在全空间范围内搜索震源机制解和震源深度,横轴为不同的地震深度,纵轴为该深度计算理论波形和实际观测的最小二乘误差值。结果显示,反演得到的震源机制较为稳定,随震源深度的变化不是很明显,震源深度7 km附近拟合误差最小。表1给出了7 km深度对应地震的最佳双力偶解,节面I参数走向为110°、倾角57°、滑动角23°,表现为走滑兼有逆冲的性质,与距本次地震最近的光盖山—迭山北麓断裂性质相对应。分析认为,光盖山—迭山北麓断裂可能是迭部4.0级地震的发震断层。

图2(b)为震源深度为7 km时的理论波形和实际观测的拟合情况,图中灰色波形为计算出的理论波形,黑色波形为实际观测的波形。由图可见,波形拟合互相关系数多数在90 %以上,表明波形Pnl和Sn1部分都有较好的对应关系。



(a)理论地震图(灰色)与观测地震图(黑色)的拟合; (b)不同深度误差和震源机制随震源深度的变化图

图2 迭部 $M_s4.0$ 地震的反演结果
Fig.2 CAP inversion for the Diebu $M_s4.0$ earthquake

表1 地震震源机制解

Table 1 Focal mechanism of the earthquake

节面 I			节面 II			T 轴		B 轴		P 轴	
走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	方位角/(°)	倾角/(°)	方位角/(°)	倾角/(°)	方位角/(°)	倾角/(°)
110	57	23	7	71	145	324	38	162	51	61	9

3.2 sPL 确定震源深度

图2(b)所示,震源机制解在深度范围6 km至9 km的偏差值较小,为进一步确认震源深度结果的可靠性,利用深度震相sPL与参考震相Pg对深度进行详细分析。

岷县台(MXT)与本次地震相距27 km。将MXT的三

分量波形记录旋转至径向、切向和垂向三个分量,旋转时通过使切向分量的P波能量最弱来寻找最佳的旋转角,避免水平位置定位误差导致不能获得较好的径向和切向分量。然后对数据采用1 Hz以下的低通滤波,并积分至地表位移。图3为地震处理后的三分量位移图。

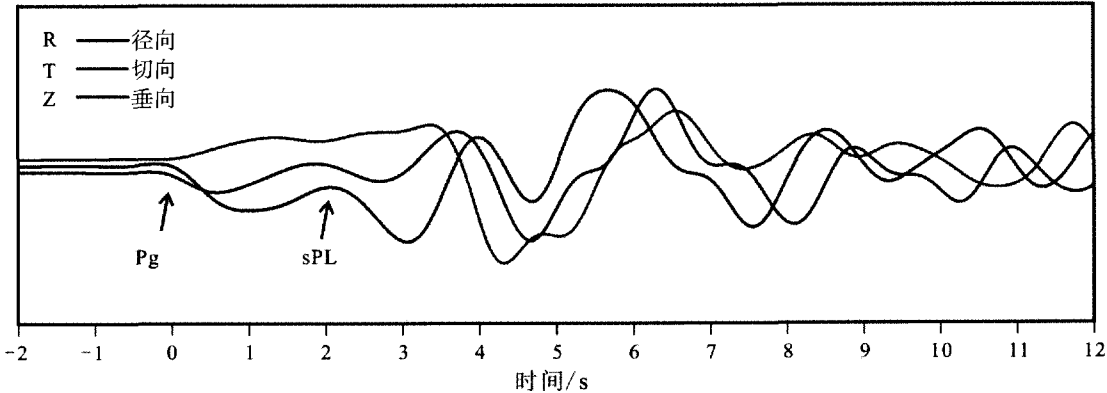


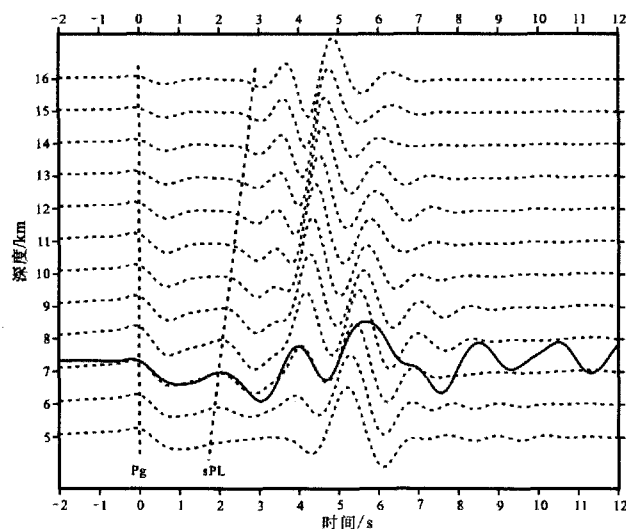
图3 地震在岷县台的位移波形图
Fig.3 Waveforms of the earthquake recorded at Minxian station

从图可以看出,sPL震相非常清晰、特征显著,出现在直达P波之后,S波之前;其能量主要集中在径向分量,垂

向分量的振幅相对径向要小,切向分量上的振幅很弱,波形呈现低频特征。在MXT观测到清晰的sPL震相,为确

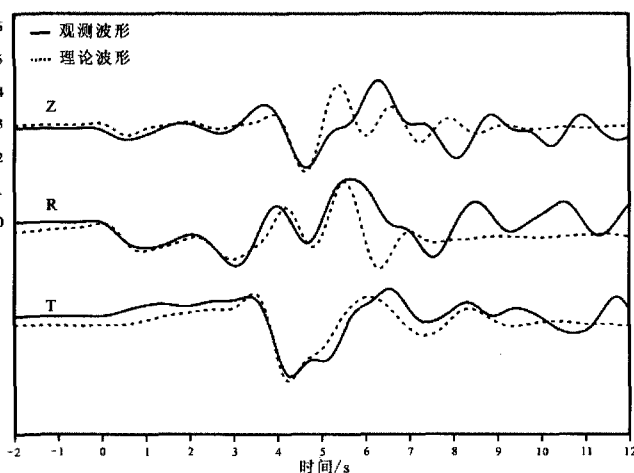
定震源深度提供了条件,通过Pg和sPL震相的相对到时差可以约束震源深度。

采用F-K方法计算本次地震在岷县台固定震中距上不同震源深度对应的格林函数,利用表1震源机制解合成



(a) 采用径向分量的震源深度测试结果(最佳的震源深度为7 km,其中虚线为理论波形,实线为观测波形)

每个测试深度上的理论地震图,并采用1 Hz以下的低通滤波。然后将实际波形与不同深度上的理论波形上的直达Pg和sPL震相的相对到时进行对比(图4)。



(b) 震源深度为7 km时理论波形(虚线)和观测位移波形(实线)对比图。

图4 波形对比法确定本次地震的震源深度

Fig.4 Focal depth determination for the earthquake with waveform comparison method

图4(a)为波形对比法确定震源深度的测试结果,及最佳震源深度对应的理论波形和观测波形径向分量的对比图。从理论波形(虚线)的sPL震相与Pg波的到时看出,随着深度的增加sPL震相出现的更晚,反映了sPL震相对深度变化的敏感特性。在7 km深度附近径向理论波形上的Pg和sPL震相理论到时和相应观测记录到时比较吻合,波形的振幅也对应较好。我们将实际数据三分量波形(实线)与震源深度为7 km的理论波形(虚线)进行比较(图4(b)),三个分量的波形吻合的非常好,证实了结果的可靠性。综合分析认为迭部4.0级地震的最佳深度为7 km,属于上地壳内的一次浅源地震事件。

4 结论

本文利用2011年2月23日迭部 $M_s 4.0$ 地震的近震宽频带波形,采用CAP方法反演了震源机制,最佳双力偶解节面I走向为 110° 、倾角 57° 、滑动角 23° ,是一次走滑兼有逆冲分量性质的地震,与距本次地震最近的光盖山-迭山北麓断裂性质相对应,推断光盖山-迭山北麓断裂可能是迭部4.0级地震的发震断层。

在距震中27 km的岷县台上观测到了清晰的sPL震相,结合震源机制解合成了岷县台不同深度的理论地震图,采用理论波形与实际波形拟合及对比分析的方法,确

定了本次地震的震源深度为7 km,与CAP方法搜索得到的震源深度一致,与甘肃数字地震台网给定8 km的深度基本一致。

通过对迭部 $M_s 4.0$ 地震震源机制解及震源深度定位的实例,说明在甘东南地区可以利用sPL震相得到比较精确的震源深度。对于中小地震,在观测到sPL震相的情况下,利用离震源50 km以内的一个三分量地震台站的波形,就可获得可靠的震源深度。因此,合理利用深度震相确定中小地震的震源深度,是一个有效测定震源深度的思路和方法,具有很好的应用意义。

致谢:本文使用了中国地震局甘肃区域地震台网提供的波形资料;CAP方法是美国圣路易斯大学朱露培教授的震源机制反演程序,由中国科学技术大学倪四道教授提供,深度震相由倪四道教授讲授!感谢监测预报司举办的2011年河北承德数字地震培训班!感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见和建议!

参考文献(References)

- [1] 汪素云, James Ni, 马宗晋, 等. 华北强震断层面解和震源深度特征[J]. 地球物理学报, 1991, 34(1): 42-54.
WANG Su-yun, James Ni, MA Zong-jin, et al. The Characteristics of Fault Plane Solutions and Focal Depths of Strong Earthquakes in North China[J]. Chinese J Geophys, 1991, 34

- (1):42–54.(in Chinese)
- [2] 张国民,汪素云,李丽,等.中国大陆地震震源深度及其构造含义[J].科学通报,2002,47(9):663–670.
ZHANG Guo-min, WANG Su-yun, LI Li, et al. Focal Depth of Continental Earthquakes in China and its Sesimotectonic Implications[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(9): 663–670. (in Chinese)
- [3] 张爱萍,倪四道,杨晓勇.2004年东乌珠穆沁旗地震震源参数研究[J].地震,2008,28(3):61–68
ZHANG Ai-ping, NI Si-dao, YANG Xiao-yong. Source Parameters of 2004–03–24 Xilin Gol League Earthquake[J]. Earthquake, 2008, 28(3): 61–68. (in Chinese)
- [4] 黄建平,倪四道,傅容珊,等.综合近震及远震波形反演2006文安地震($M_w5.1$)的震源机制解[J].地球物理学报,2009,52(1):120–130.
HUANG Jian-ping, NI Si-dao, FU Rong-shan, et al. Source Mechanism of the 2006 $M_w5.1$ Wenan Earthquake determined from a Joint Inversion of local and Teleseismic Broadband Waveform data[J]. Chinese J Geophys, 2009, 52(1): 120–130. (in Chinese)
- [5] 吕坚,郑秀芬,肖健,等.2012年9月7日云南彝良 $M_s5.7$ 、 $M_s5.6$ 地震震源破裂特征与发震构造研究[J].地球物理学报,2013,56(8):2645–2654.
LU Jian, ZHENG Xui-fang, XIAO Jian, et al. Rupture Characteristics and Seismogenic Structures of the $M_s5.7$ and $M_s5.6$ Yiliang Earthquakes of Sep. 7, 2012[J]. Chinese J Geophys, 2013, 56(8): 2645–2654. (in Chinese)
- [6] Langston C. Depth offaulting during the 1968 Mecherling, Australia, Earthquake sequence Determined From Waveform analysis of Local Seismograms[J]. Geophys Res, 1987, 92: 1561–1574.
- [7] Bock G, Grunthal G, Wylegalla K. The 1985/86 Western Bohemia Earthquakes: Modeling Source parameters with Synthetic Seismograms[J]. Tectonophysics, 1996, 261: 139–146.
- [8] Ma S T, Atkinson G M. Focal Depths for Small to Moderate earthquakes ($M_s \geq 2.8$) in Western Quebec, Southern Ontario, and northern New York[J]. Bull Seism Soc Amer, 2006, 96(2): 609–623.
- [9] 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):2620–2630.
CHONG Jia-jun, NI Si-dao, ZENG Xiang-fang. sPL, Aneffective Seismic Phase for Determining Focal Depth at Near-distance[J]. Chinese J Geophys, 2010, 53(11): 2620–2630. (in Chinese)
- [10] 罗艳,倪四道,曾祥方,等.汶川地震余震区东北端一个余震序列的地震学研究[J].中国科学:D辑,2010,40(6):677–687.
LUO Yan, NI Si-dao, ZENG Xiang-fang, et al. A Shallow aftershock Sequence in the North-eastern End of the Wenchuan Earthquake Aftershock Zone[J]. Science in China: Series D, 2010, 53(11): 1655–1664. (in Chinese)
- [11] 韩立波,蒋长胜,包丰.2010年河南太康 $M_s4.6$ 地震序列震源参数的精确确定[J].地球物理学报,2012,55(9):2973–2981.
HAN Li-bo, JIANG Chang-sheng, BAO Feng. Source Parameter Determination of 2010 Taikang $M_s4.6$ Earthquake Sequences[J]. Chinese J Geophys, 2012, 55(9): 2973–2981. (in Chinese)
- [12] Zhao LS, Helmberger D V. Source Estimation From Broadband Regional Seismograms[J]. Bull Seis Soc Am, 1994, 84(1): 91–104.
- [13] Zhu L P, Helmberger D V. Advancement in Source Estimation Techniques Using Broadband Regional Seismograms[J]. Bull Seism Soc Amer, 1996, 86: 1634–1641.
- [14] Zhu L P, Rivera L A. A Note on the Dynamic and Static Displacements From a point Source in Multilayered Media[J]. Geophys J Int, 2002, 148: 619–627.
- [15] Aki Richards. Quantitative Seismology (Second Edition) [M]. Sausalito, CA: University Science Books, 2002.
- [16] 郑勇,马宏生,吕坚,等.汶川地震强余震($M_s \geq 5.6$)的震源机制解及其与发震构造的关系[J].中国科学:D辑,2009,39(4):413–426.
ZHENG Yong, MA Hong-sheng, LÜ Jian, et al. Source Mechanism of Strong Aftershocks ($M_s \geq 5.6$) of the 2008/05/12 Wenchuan Earthquake and the Implication For seismotectonics[J]. Science in China: Series D, 2009, 52: 723–738. (in Chinese)
- [17] 谢祖军,郑勇,倪四道,等.2011年1月19日安庆 $M_s4.8$ 地震的震源机制解和深度研究[J].地球物理学报,2012,55(5):1624–1634.
XIE Zu-Jun, ZHENG Yong, NI Si-Dao, et al. Focal Mechanism and Focal Depth of the 19 January 2011 Anqing earthquake[J]. Chinese J Geophys, 2012, 55(5): 1624–1634. (in Chinese)
- [18] 张辉,王熠熙.2012年5月3日金塔-阿拉善盟5.4级地震震源机制解[J].西北地震学报,2012,34(2):205–206.
ZHANG Hui, WANG Yi-xi. Focal Mechanism of the 5.4 Earthquake Jintan–Alashanmeng of May 3, 2012[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(2): 205–206. (in Chinese)