

用 CAP 方法反演 2010 年 6 月 5 日山西阳曲 $M_s4.6$ 地震震源机制解^①

宋美琴¹, 李华玥², 韩立波³, 李 丽¹, 王秀文¹, 梁向军¹

(1. 山西省地震局, 山西 太原 030021; 2. 石家庄经济学院, 河北 石家庄 050031;

3. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要:利用 CAP 方法反演了 2010 年 6 月 5 日阳曲 $M_s4.6$ 地震震源机制解, 得到震级 M_w 为 4.5, 节面 I 走向 213° 、倾角 47° 、滑动角 -161° , 节面 II 走向 109° 、倾角 76° 、滑动角 -44° , 属于倾滑型; 精确定位显示震中处于石岭关隆起区, CAP 反演和精定位结果推断本次地震的震源深度为 $17\sim 20$ km。震源机制解节面参数与震中附近的山根底断裂和系舟山西麓断裂产状存在差异, 这两条断裂不是阳曲地震的发震断裂, 由于现场野外地质考察未发现地表断裂, 不排除本次地震为隐伏断层活动的结果。

关键词: 阳曲 4.6 级地震; CAP 方法; 震源机制解; 震源深度; 发震断裂

中图分类号: P315.33

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2013)03-0692-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.03.0692

Focal Mechanism of the $M_s4.6$ Yangqu Earthquake of June 5, 2010, Determined from the CAP Method

SONG Mei-qin¹, LI Hua-yue², HAN Li-bo³, LI Li¹, WANG Xiu-wen¹, LIANG Xiang-jun¹

(1. Earthquake Administration of Shanxi Province, Taiyuan Shanxi 030021, China;

2. Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang Hebei 050031, China; 3. Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China)

Abstract: On June 5, 2010, a magnitude $M_s4.6$ earthquake occurred in the Yangqu region, which was located on the Shilingguan uplift between the Taiyuan basin and the Xinding basin in the Shanxi rift. This was a moderately strong earthquake felt in Yangqu and surrounding areas. The earthquake ruptured on the Shangendi fault, which controlled the tectonic activities in the east side of the Taiyuan basin. Based on the seismicity distribution, it appears that this earthquake was also located in the seismic gap of the Taiyuan basin. To better understand the seismotectonics of this region, we relocated this event and further studied its focal mechanism based on the local broadband waveform data recorded by the regional seismic network in the Shanxi Province. In this work, the earthquake was initially relocated by means of the absolute relocating method, and then the focal mechanism and focal depth were determined by the "Cut and Paste" (CAP) method. We inversed the focal mechanism using waveforms in seven stations near the epicenter with high SNR ratios and clear P wave polarization, and the stations were evenly azimuthally distributed. The results of the focal mechanism and focal depth were testified by comparing the observed records and the synthetic waveforms. The results indicate that the Yangqu earthquake was a nor-

① 收稿日期: 2013-05-02

基金项目: 山西省自然科学基金(2012011029); 山西省科技攻关项目(20100311129-220090311084); 中国地震局星火计划(xh1005、xh12008y, xh13004)

作者简介: 宋美琴(1968-), 女(汉族), 山西忻州人, 高级工程师, 现从事地震活动性分析及预测预报工作。Email: smq28@126.com

mal fault earthquake with a small percentage of strike-slip components. The best double couple solution is 213° , 47° , and -161° for strike, dip, and slip angles, respectively, for one nodal plane, and 109° , 76° , -44° for another. The moment magnitude was $M_w 4.5$, and the estimated focal depth was $17\sim 20$ km, as determined by the CAP method and absolute relocation method, which suggests that this event was a shallow earthquake. The focal depth of the Yangqu earthquake was consistent with the relocation of small to moderate earthquakes in the Shanxi rift. The Yangqu earthquake occurred about 6 km away from the Shangendi fault, which is the eastern boundary fault of the Taiyuan basin and is about 9.7 km away from the Xizhoushan—Xilu fault, which is the western boundary fault of the Xinding basin. The focal mechanism of the Yangqu earthquake was dramatically different with the tectonic settings of the Shangendi fault and the Xizhoushan—Xilu fault near the epicenter. Based on the relocated location, the Yangqu earthquake should occur in the Shilingguan uplift. However, there is no evidence to show that the Shangendi fault and the Xizhoushan xilu fault extend into the uplift region; furthermore, there is no fracture that is consistent with the mechanism solution of the Yangqu earthquake. Thus, combining previous studies and our results, we suggest that the Shangendi fault and the Xizhoushan—Xilu fault are not the seismogenic fault of the Yangqu earthquake. Because the energy is too weak to transport the rupture to the surface, no surface rupture has been found in the field survey. Therefore, we suggest that a buried fault may be the seismogenic structure of this event. This conclusion still needs further investigation with ambient noise imaging, active fault detecting, a dense network of high dynamic range seismometers, and geological field work in Yangqu and its surrounding areas.

Key words: Yangqu $M_s 4.6$ earthquake; Cut and Paste method; focal mechanism; focal depth; seismogenic fault

0 引言

2010 年 6 月 5 日距离太原市 35 km 左右的阳曲地区发生 4.6 级地震,太原市区震感明显,但现场野外地质考察未发现地表断裂。这次地震是 2008 年汶川地震后山西地震带发生的第四次 4 级以上有感地震,引起了广泛的关注。宋美琴等通过对山西地震带 $M \geq 3.5$ 地震韵律特征分析,认为从 2009 年原平 4.2 级地震开始山西地震带进入了第五活跃时段,未来几年中等以上地震将持续活跃^[1]。这一地震的发生进一步印证了这一观点。这次地震发生在太原盆地东侧控盆边界断裂——山根底断裂附近,又位于根据历史地震破裂区及活断层破裂分段特征识别出的太原盆地地震破裂空段内^[2]。距离震中 60 km 范围内最大地震为 1102 年太原 6.5 级地震,最近的一次地震是 2002 年太原 4.7 级地震。这次地震发生在具有强震潜在危险的破裂空段内,其发震构造是什么及对未来的可能影响值得深入探讨。本文的目的是利用 CAP 方法研究阳曲 4.6 级地震的震源机制解,并结合山西中部地质构造特征、阳曲地震精确定位结果,分析本次地震是否与山根底断

裂活动有关。

在震源机制的研究中,国内外学者在这方面经过系统研究积累了大量宝贵的经验,已经取得了大量重要成果。其中 Zhao 和 Helmberger 等^[3-4]等提出的 CAP(Cut And Paste)方法获取震源机制解,在国内外诸多研究成果中得到了充分证明;而且 CAP 方法由于采用分段的波形拟合,其中 Pnl 波和面波部分包含了有效确定震源深度的深度震相信息,因此可作为研究震源深度的一种方法^[5-15]。CAP 方法其优点体现在反演震源机制解时使用的是近震宽频带波形资料,弥补了利用 P 波初动求解震源机制解受台站数量限制的缺陷。本文收集了山西省宽频带数字地震仪的近震波形数据,利用 CAP 方法对震源机制解和震源深度进行反演。

1 CAP 方法原理和反演模型

1.1 方法原理简述

CAP 方法的主要思想是将近震整个波形分为 P 波部分(Pnl)和面波部分(Sur),对两部分的 3 分量共 5 部分(Pnl 不存在切向分量)给定不同的

权重进行反演,分别计算实际地震记录和理论地震图的误差函数,在给定参数空间范围内采用格点搜索法进行网格搜索,得到相对误差最小时的震源机制解和震源深度^[3-4]。

1.2 数据基本情况

考虑阳曲地震震级较小,本研究首先选取震中距小于 230 km 的台站数据,共有 20 个台;最终遴选出 7 个信噪比较高、P 波初动明显、台站方位分布良好的台站记录参与反演计算(图 1)。

1.3 速度模型的选取

CAP 方法反演震源机制解主要是通过计算给定震源机制解的理论波形与实际观测波形进行对比,不断改变震源参数,拟合最好的机制解为最终的反演结果。在计算理论波形时先用 F-K^[4] 方法在给定速度模型下计算各个台站位置的格林函数,然后由震源函数和格林函数合成理论波形。在反演过程中,越可靠的速度模型得到的反演结果越可靠。

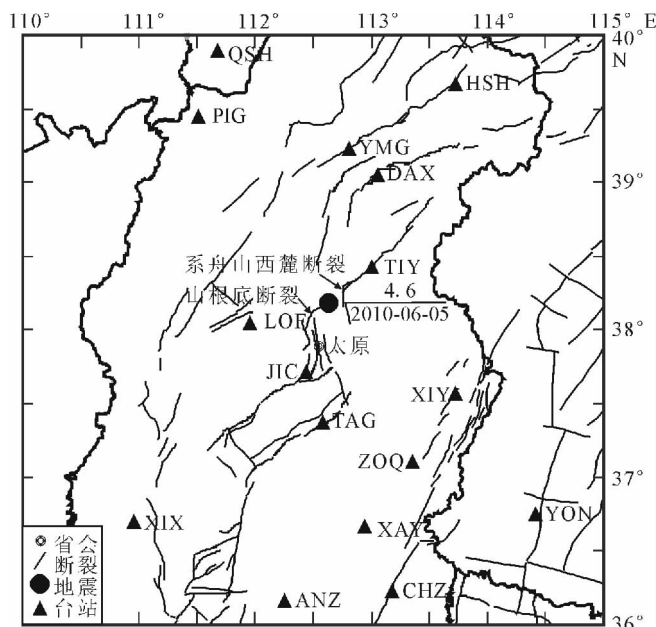


图 1 震中位置和研究中用到的台站分布情况

Fig. 1 The seismic epicenter and seismic stations used in study

表 1 研究区地壳速度模型

Table 1 The crustal velocity model used in study region

层厚/km	2	2	4	3	6	9	12	15
P 波速度/(km · s ⁻¹)	5.65	6.0	6.1	6.2	6.4	6.5	7.15	8
S 波速度/(km · s ⁻¹)	3.26	3.46	3.52	3.58	3.70	3.75	4.13	4.62
密度/(×10 ³ kg · m ⁻³)	2.48		2.66			2.80	2.89	3.33

阳曲 $M_s 4.6$ 地震发生在太原盆地北端,靠近东侧控盆断裂。许多学者在这一区域采用不同的方法获得了该区的地壳和上地幔的精细结构^[16-18]。考虑到 CAP 方法使用的是一维速度模型,本文综合考虑了人工地震测深剖面、波形拟合和接收函数研究结果,建立速度模型(表 1)。

2 反演结果与分析

2.1 震源机制解

基于前述 7 个台的近震波形数据和表 1 中的速度模型,利用 CAP 方法,经过全局搜索,在震源深度 20 km 附近的拟合误差最小,如图 2 所示。震级为 $M_w 4.5$,对应的震源机制节面 I 的参数为:走向角 213° ,倾角 47° ,滑动角 -161° ;节面 II 的参数为:走向 109° ,倾角 76° ,滑动角 -44° 。地震震源是倾滑型。从图 2 可以看出在不同方位角台站上计算得到的理论波形都能较好地与实际记录到的波形匹配,且其绝对振幅大小也较为相似,互相关系数大于 60% 的占 81%。选用的 7 个台站在方位角上具有较好的分布。从以上统计分析可以看出拟合效果比

较理想。反演结果与用振幅比方法得到的结果基本一致^①。

2.2 震源深度

从图 3 中可以看出,反演得到的震源机制解在各个深度较为一致,最佳震源深度出现在 20 km 附近。而当深度增加或者减小时,拟合误差会相应的变大,由此可以判定阳曲 $M_s 4.6$ 地震震源深度为 20 km 左右。该结果与中国地震台网中心给出的震源深度 6 km 差别较大,但从本文的反演结果来看 6 km 的拟合误差明显大于 20 km,因此我们认为 20 km 是比较可靠的。另外,作者采用 hypo2000 绝对定位方法^[19]对本次地震进行了重新定位,精定位结果显示震中水平位置与中国地震台网中心给出的水平位置一致,但震源深度有明显差别。精定位震源深度为 17 km,深度误差 1.04 km,精确定位深度与 CAP 拟合深度相差较小,说明阳曲 4.6 级地震震源应该处于地下 17~20 km 范围内。这一深度与宋美琴、郑勇等山西精定位研究结果显示太原盆地北

① 山西省地震局. 2011 年度山西省地震趋势研究报告. 2011.

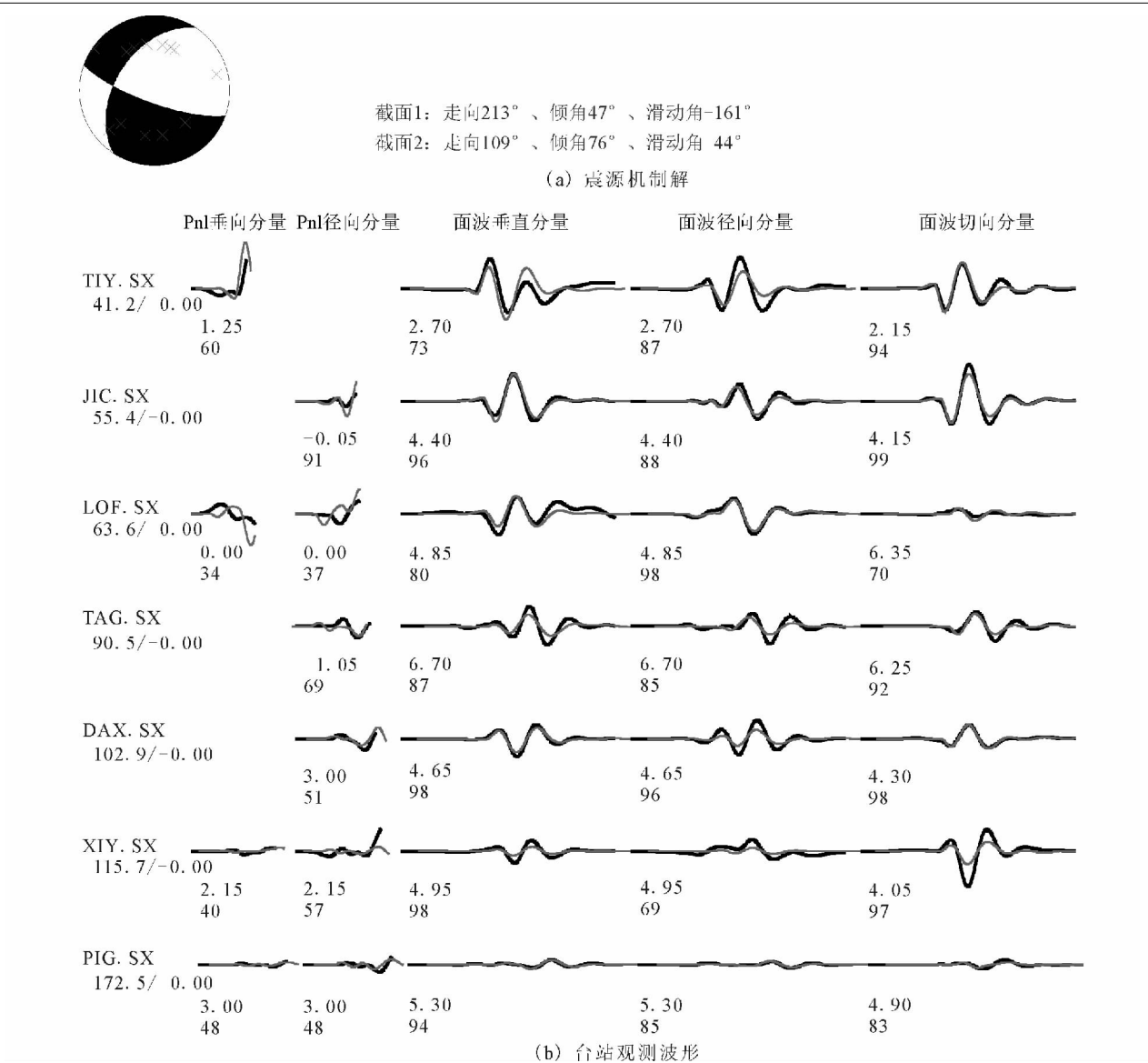


图 2 阳曲 4.6 级地震理论图与观测图(红线波形是计算出的理论波形,黑线波形是实际观测的波形,波形左侧为台站名、震中距(km) 和方位角,波形下面的数字依次为反演误差及互相关系数。滤波范围:P 波部分为 0.05~0.2 Hz,面波部分为 0.03~0.1 Hz)

Fig. 2 Comparison between the theoretical and the observed seismograms of Yangqu $M_s4.6$ earthquake and focal mechanism solution. (Red curves are theoretical seismograms, and black curves are observation seismograms. There are the station names, epicentral distances (unit: km) and azimuths at the left side of the waveform curves, the first line below the curves are the inversion error, and the second lines are their correlation coefficients (unit: %). The filtering range: 0.05 ~0.2 Hz for the P wave, and 0.03~0.1 Hz for the Surfaces wave)

端中小地震多发生在 5~30 km 结论相吻合^[12]。

3 发震断裂探讨

从地震所处的位置看,阳曲 $M_s4.6$ 地震位于太原盆地东侧的山根底断裂附近(图 1)。震中位置距离太原盆地东边界山根底断裂 6 km 左右,距离控制忻定盆地西侧边界的系舟山西麓断裂 9.7 km。距震中最近的山根底断裂是否与阳曲 $M_s4.6$ 地震

有关值得探讨。山根底断裂为交城断裂 NE 向的延伸部分,全长 22 km,走向 NE—NNE,倾向 SE,倾角 65°~70°,为全新世活动正断层。据历史地震记载在断裂附近无 5 级以上地震发生。用 CAP 方法获得的震源机制解中近 EW 向(走向 109°,倾角 76°)的节面倾向 SE,与山根底断裂走向相差约 30°,倾向一致。假定其为发震断裂,根据震源深度与地震距断裂的水平距离测算断裂倾角为 73°与 II 节面

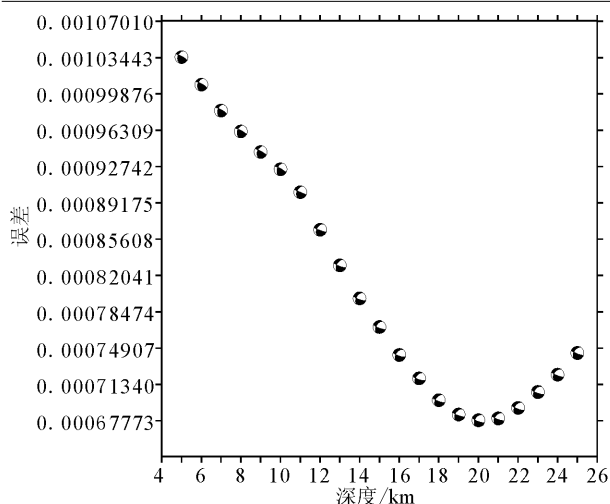


图3 不同深度误差和震源机制随不同震源深度的变化图

Fig. 3 Variation of focal mechanism solution and mismatch with different focal depths

倾角非常接近。因此从计算结果推测其为发震断裂的可能性大。由于阳曲 $M_s 4.6$ 地震位于山根底断裂走向的延长线上,高精度地形图上显示本次地震位于与太原盆地东北端毗邻的石岭关隆起区,而山根底断裂止于太原盆地与石岭关横向隆起的交界部位,且震源机制解结果显示其为正断活动为主,兼有一定的斜滑,理论上震源位置应该处于断裂的上盘,即倾向太原盆地的一侧,这与阳曲 $M_s 4.6$ 地震处于太原盆地以北的石岭关隆起区(断裂的下盘)相矛盾。因此山根底断裂应该不是阳曲地震的发震构造。

而距离阳曲 4.6 地震 9.7 km 左右的系舟山西麓断裂,全长 30 km,走向近 SN,倾向 W,倾角 70° ,为一全新世右旋剪切的正倾滑断裂,是控制忻定盆地与石岭关隆起的边界断裂。据历史地震记载在断裂附近无 5 级以上地震发生。阳曲地震的震源机制解的一个节面的走向 213° ,倾向 W,倾角 47° ,这与系舟山西麓断裂产状接近。但目前尚未找到系舟山西麓断裂延伸至石岭关隆起区的相关证据。因此系舟山西麓断裂也不是阳曲地震的发震构造。

本次地震现场野外考察并未发现地表破裂带。在中国东部的一些中等和弱的地震活动区,地震时地表常无地震破裂带发育,它们可能是地表尚未显露断层的隐伏断层或深部断层活动的结果^[20]。阳曲 4.6 级地震位于横向隆起区,震源机制解结果与震区附近断裂存在一定的差异,而目前也未发现与机制解相符的断裂。结合前人研究成果,认为阳曲

地震不排除隐伏断层活动的可能,对此认识仍需做进一步的探讨与研究。

4 结论

(1) 用 CAP 方法反演得到 2010 年 6 月 5 日阳曲 $M_s 4.6$ 地震的 M_w 为 4.5。震源机制解节面 I 走向角 213° 、倾角 47° 、滑动角 -161° ;节面 II 走向角 109° 、倾角 76° 、滑动角 -44° ,属于倾滑型。

(2) 确定位显示震中处于石岭关隆起区,CAP 反演和精定位结果推断本次地震的震源深度为 17~20 km。

(3) AP 方法反演获得的震源机制解节面参数与震中附近的山根底断裂和系舟山西麓断裂产状存在一定的差异,因此认为两条断裂均不是阳曲地震的发震断裂,认为有可能是隐伏断层活动结果。

致谢:山西省监测信息中心提供了波形数据,中国科学院测量与地球物理研究所郑勇研究员对本文给予了技术指导,山西省地震局预报中心王霞绘制了部分图件,谨致谢意!

参考文献(References)

- [1] 宋美琴,梁向军,李斌. 2009 年 3 月 28 日原平 $M_L 4.5$ 地震对周边地震形势影响[J]. 地震地磁观测与研究, 2012, 33(3/4): 18-22.
SONG Mei-qin, LIANG Xiang-jun, LI Bin. Sequence Characteristics of Yuanping $M_L 4.5$ Earthquake on 28 March 2009 and Its Influence on Surrounding Earthquake Situation[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2012, 33(3/4): 18-22. (in Chinese)
- [2] M7 专项组. 中国大陆大地震中一长期危险性研究[M]. 北京: 地震出版社, 2012.
Working Group of M7. Study on the Mid- to Long-term Potential of Large Earthquakes on the Chinese Continent[M]. Beijing: Seismological Press, 2012. (in Chinese)
- [3] Zhao L S, Helmberger D V. Source Estimation from Broadband Regional Seismograms[J]. Bull. Seis. Soc. Amer., 1994, 84(1): 91-104.
- [4] Zhu L P, Helmberger D V. Advancement in Source Estimation Techniques Using Broadband Regional Seismograms[J]. Bull. Seis. Soc. Amer., 1996, 86(5): 1634-1641.
- [5] 刘薇,张晓清,石玉成,等. 利用格林函数库计算 2008 年青海大柴旦 6.4 级地震的余震震源机制[J]. 西北地震学报, 2012, 34(2): 154-160.
LIU Wei, ZHANG Xiao-qing, SHI Yu-cheng, et al. Using Green Function Database and Quick Moment Tensor Inversion Calculating the Focal Mechanism Solution of Aftershocks of Dachaidan $M_s 6.4$ Earthquake in 2008 in Qinghai Province[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(2): 154-160. (in Chinese)

- Chinese)
- [6] 张辉. 2012 年 5 月 11 日甘肃南 $M_s 4.9$ 地震震源机制解[J]. 西北地震学报, 2012, 34(2): 207-208.
ZHANG Hui. Focal Mechanism of the Sunan $M_s 4.9$ Earthquake in Gansu Province on May 11, 2012[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(2): 207-208. (in Chinese)
- [7] 赵凌云、邓津、陈俊华, 等. 基于 CAP 方法的震源机制研究[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(5): 81-84.
ZHAO Ling-yun, DENG Jin, CHEN Jun-hua, et al. Study on Source Mechanism of $M_s 4.1$ and $M_s 3.2$ Earthquakes in Hubei—Zigui with CAP Method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(5): 81-84. (in Chinese)
- [8] 张辉、徐辉、姚军, 等. 祁连山东中段基于 CAP 方法的中小地震震源机制研究[J]. 山西地震, 2010, (1): 25-29.
ZHANG Hui, XU Hui, YAO Jun, et al. Small-moderate Earthquakes in Middle-east Segment of Qilian Mountain[J]. Earthquake Research in Shanxi, 2010, (1): 25-29. (in Chinese)
- [9] 吕坚、郑勇、倪四道, 等. 2005 年 11 月 26 日九江—瑞昌 $M_s 5.7$ 、 $M_s 4.8$ 地震的震源机制解与发震构造研究[J]. 地球物理学报, 2008, 5(1): 158-164.
LV Jian, ZHENG Yong, NI Si-dao, et al. Focal Mechanisms and Seismogenic Structures of the $M_s 5.7$ and $M_s 4.8$ Jiujiang—Ruichang Earthquakes of Nov. 26, 2005[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 5(1): 158-164. (in Chinese)
- [10] Zheng Y, Ma H S, Lv J, 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(6): 739-753.
- [11] Zheng Y, Ni S D, Xie Z J, et al. Strong Aftershocks in the Northern Segment of the Wenchuan Earthquake Rupture Zone and Their Seismotectonic Implications[J]. Earth Planets Space, 2010, 62(11): 881-886.
- [12] 宋美琴、郑勇、葛荣, 等. 山西地震带中小震精确定位及其显示的山西地震构造特征[J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 513-525.
SONG Mei-qin, ZHENG Yong, GE Can, et al. Relocation of Small to Moderate Earthquakes in Shanxi Province and Its Relation to the Seismogenic Structures[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(2): 513-525. (in Chinese)
- [13] 宋美琴、李斌、吕芳, 等. 2010 年 1 月 24 日山西河津—万荣 $M_s 4.8$ 地震特征[J]. 地震地磁观测与研究, 2012, 33(1): 18-22.
SONG Mei-qin, LI Bin, LV Fang, et al. Characteristics of Hejin—Wanrong $M_s 4.8$ Earthquake on January 24, 2010[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2012, 33(1): 18-22. (in Chinese)
- [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] 谢祖军、金笔凯、郑勇, 等. 近远震波形反演 2013 年芦山地震震源参数[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 1010—1019.
XIE Zu-jun, JIN Bi-kai, ZHENG Yong, et al. Source Parameters Inversion of the 2013 Lushan Earthquake by Combining Teleseismic Waveforms and Local Seismograms[J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 43: 1010-1019. (in Chinese)
- [16] 赵金仁、张先康、张成科, 等. 山西五台山地区地壳深部结构特征研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 123-129.
ZHAO Jin-ren, ZHANG Xian-kang, ZHANG Cheng-ke, et al. Features of Deep Crustal Structure Beneath the Wutai Mountain Area of Shanxi Province[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(1): 123-129. (in Chinese)