

刘旭宙,张元生,秦满忠,等.九寨沟 $M_s7.0$ 地震震源机制解及构造应力场研究[J].地震工程学报,2017,39(5):913-918,doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.913

LIU Xuzhou, ZHANG Yuansheng, QIN Manzhong, et al. Focal Mechanism Solution and Tectonic Stress Field of the Jiuzhaigou $M_s7.0$ Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(5): 913-918, doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.913

九寨沟 $M_s7.0$ 地震震源机制解及构造应力场研究^①

刘旭宙, 张元生, 秦满忠, 郭 晓, 魏从信

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:2017 年 8 月 8 日四川九寨沟县发生 $M_s7.0$ 地震。根据中国地震台网固定台站的记录波形, 利用 gCAP 方法和 P 波初动符号反演方法求解了主震的震源机制解, 其结果与哈佛 CMT 震源机制解、美国地质勘探局发布的震源机制以及中国地震局发布的各震源机制解有很大的一致性。此外, 还求解了九寨沟地震震中附近 2010—2016 年间 28 次小震的震源机制解, 利用得到的小震震源机制解反演了该区域的构造应力场。结果表明, 这一区域构造应力场的最大应力轴与最小应力轴均为水平方向, 其中最大应力轴方向为 NWW 方向, 最小应力轴方向为 SSW 方向。

关键词:九寨沟 $M_s7.0$ 地震; 震源机制解; 构造应力场

中图分类号: P315.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)05-0913-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.0913

Focal Mechanism Solution and Tectonic Stress Field of the Jiuzhaigou $M_s7.0$ Earthquake

LIU Xuzhou, ZHANG Yuansheng, QIN Manzhong, GUO Xiao, WEI Congxin

(Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake occurred in Jiuzhaigou County, Sichuan Province on August 08, 2017. In this paper, the focal mechanism of the main shock was determined using gCAP and P-wave first motion methods based on the waveforms recorded at fixed stations in the China Earthquake Network Center. This proved to be consistent with the solutions published by Harvard CMT, the United States Geological Survey, and the China Earthquake Administration. We also determined the focal mechanisms of 28 small earthquakes that occurred in the region of the Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake from 2010 to 2016, and by the focal mechanisms the tectonic stress field in the area was inverted. The results show that the direction of the maximum and minimum principal stress axes was NWW and SSW, respectively, both in the horizontal direction. After the Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake, a series of aftershocks occurred, and, as they should continue for a certain time, we expect to eventually have more data for analysis of the changes in the tectonic stress field.

Key words: Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake; focal mechanism solution; tectonic stress field

① 收稿日期: 2017-09-17

基金项目: 地震星火计划(XH18050SX); 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2012IESLZ03)

作者简介: 刘旭宙(1976—), 男, 高级工程师, 从事地震学研究。E-mail: liuxz@gsdzj.gov.cn。

通信作者: 张元生(1965—), 男, 研究员, 从事地震学研究。E-mail: zhangys@gsdzj.gov.cn。

0 引言

2017 年 8 月 8 日四川九寨沟发生 $M_s7.0$ 地震,震中位于岷江断裂和塔藏断裂之间,距九寨沟县城永乐镇 39 km,震中位置为 33.21°N 、 103.84°E 。此次地震对当地人民和经济造成了巨大破坏。

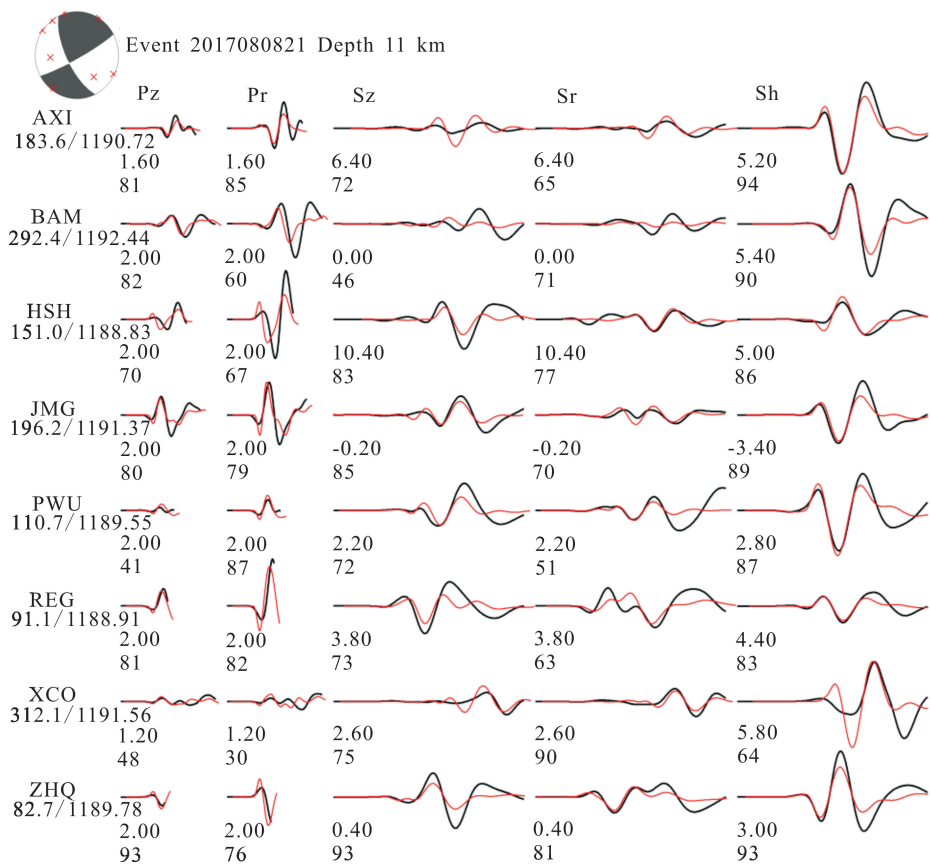
震后,中国地震局相关部门和研究机构发布了此次地震的主震定位结果、余震分布以及震源机制解等信息,美国地质勘探局及哈佛大学 CMT 项目也发布了主震的震源机制解。本文根据中国地震台网固定台站的记录波形,利用 gCAP 方法^[1]和 P 波初动符号反演方法分别求解此次主震的震源机制解,并与其他机构发布的震源机制解进行对比。此外,为了解此次地震的构造应力背景,本文根据该区域部分震相清晰、记录良好的小震记录求解 2010—2016 年间 28 次小震的震源机制解,并利用得到的小震震源机制解反演了九寨沟地震孕震区附近的构造应力场。

1 主震震源机制

1.1 震源机制求解

本文用 gCAP 方法和 P 波初动符号反演方法分别求解九寨沟主震的震源机制解,求解时用到的所有波形数据均来自于中国地震台网固定台站的记录。

gCAP 全矩张量反演方法是在 CAP^[2]波形反演震源机制双力偶解的基础上,将震源分解为主轴坐标系中的同性源部分(ISO)、无矩双力偶部分(DC)和补偿线性矢量偶极部分(CLVD)^[3],并通过对 Pnl (P 波震相及后续震相)和 S 波波形赋予不同权重后,根据理论与观测波形的拟合来反演地震矩张量的方法,近年来被许多学者所采用^[4-7]。本文将非双力偶分量 ISO 和 CLVD 约束为 0,求解出地震的最佳双力偶节面解(图 1、图 2),求得主震震级为 $M_w6.47$,最优震源深度为 10.8 km。在具体求解时根据以下步骤进行,选择的台站如表 1 所示:



左侧大写字母表示台站代码,其下方数字分别为震中距(km)和相对偏移时间(s);
各波形下方两行数字分别表示理论波形相对实际波形的移动时间和二者的相关系数

图 1 九寨沟主震 gCAP 震源机制解

Fig.1 Focal mechanism solution of the main shock using gCAP method

表 1 gCAP 方法求解震源机制解所用台站信息

Table1 Station information for focal mechanism solution using gCAP method

台站代码	经度/(°)	纬度/(°)	高程/m	震中距/km
AXI	104.4	31.6	587	183.6
BAM	100.7	32.9	3570	292.4
HSH	103.0	32.1	2344	151.0
JMG	105.6	32.2	801	196.2
PWU	104.5	32.4	882	110.7
REG	103.0	33.6	3470	91.1
XCO	105.9	31.0	336	312.1
ZHQ	104.4	33.8	1460	82.7

- (1) 将 seed 格式的波形记录转换为 sac 格式, 截取波形记录后写入 sac 头段信息;
- (2) 对 sac 波形进行去均值、去倾斜和去尖操作, 然后去除仪器响应;
- (3) 将 sac 波形旋转到垂向、径向和切向并进行重采样, 分解波形为 Pnl 波和 S 波, 并分别进行 0.05~0.2 Hz 和 0.02~0.08 Hz 的 4 阶带通滤波;
- (4) 计算拟合所需要的格林函数, 计算时速度模型来自 crust1.0;
- (5) 拟合求解震源机制解。

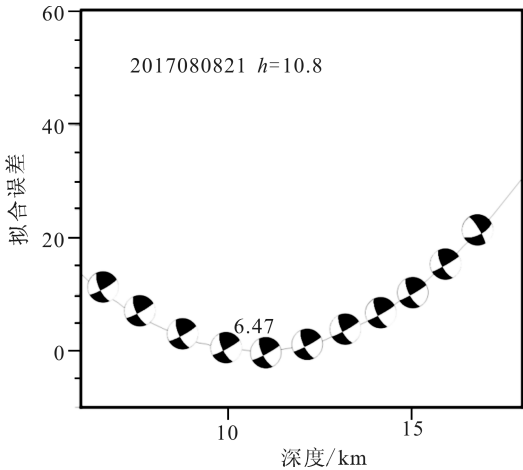


图 2 震源机制解拟合误差随深度变化图

Fig.2 Fitting error in different depth

近年来,中国地震台网已经布设了大量高质量的固定台站^[8],有很多固定台站记录到了此次地震主震的波形信息。这些台站对主震有很好的包络,根据其记录,非常适合用初动方法求解主震震源机制解。因此本文用测震固定台网中 153 个台站的 P 波初动做出了震源机制解,结果如图 3。

1.2 震源机制解对比

九寨沟地震后,中国地震台网中心、中国地震局预测研究所和中国地震局地球物理研究所均发布了

用不同方法得到的震源机制解(<http://www.csi.ac.cn/manage/eqDown/05LargeEQ/201708082119M7.0/zonghe.html>),此外哈佛大学 CMT 项目以及美国地质勘探局(USGS)也发布了各自的震源机制解。本文对上述震源机制解进行汇总,并与本文求出的震源机制解进行了对比(图 4)。为方便对比,所有震源机制解均为双力偶最优解。

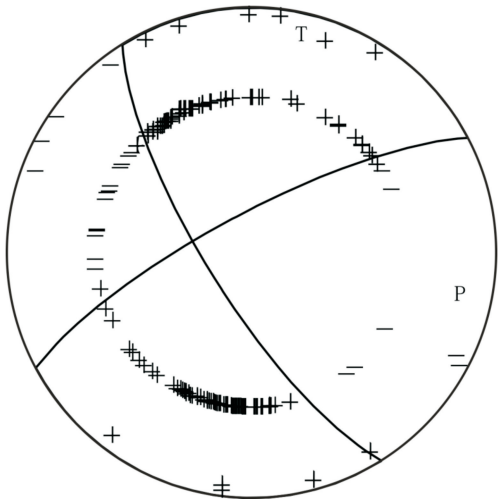
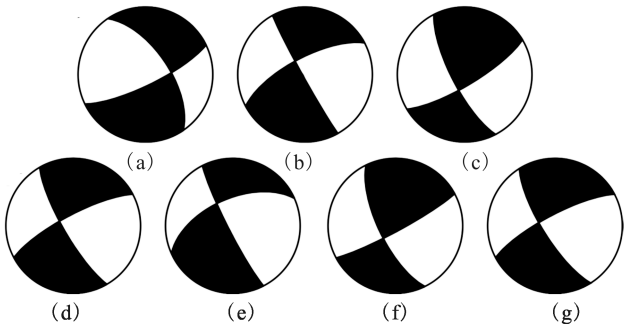


图 3 九寨沟主震 P 波初动震源机制解

Fig.3 Focal mechanism solution of the main shock using P-wave first motion method



(a)中国地震台网中心发布;(b)中国地震局地球物理研究所发布 P 波初动解;(c)中国地震局预测研究所发布矩张量解;(d)哈佛 CMT 发布矩张量解;(e)美国地质勘探局发布矩张量解;(f)本文 gCAP 解;(g)本文 P 波初动解

图 4 九寨沟主震震源机制解对比

Fig.4 Comparison between the focal mechanism solutions of Jiuzhaigou main shock

可以看出,各震源机制解基本相同,均主要表现为走滑方式,与九寨沟主震的震后判定一致。两条节面也大致相同,在具体参数上,节面走向、倾向和滑动角有一定的差异(表 2)。

2 构造应力场反演

地壳构造应力场的研究是地震学中的一个基本

表 2 九寨沟 $M_s7.0$ 震源机制解参数对比

Table 2 Comparison between parameters of different focal mechanisms of Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake

日期	节面 I / (°)			节面 II / (°)		
	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角
中国地震台网中心	326	62	-15	64	77	-151
中国地震局地球物理研究所	151	87	-20	242	70	-177
中国地震局预测研究所	59	77	164	152.7	74.4	13.5
哈佛 CMT	242	77	-168	150	78	-13
USGS	246	57	-173	153	84	-33
本文 gCAP 解	154	70	7	60	79	167
本文 P 波初动解	242	77	-164	148	75	-13

课题,一定地区的构造应力场决定着该地区强震的破裂方式。Mckenzie 提出单个地震的 P、B、T 轴反映的是地震前后震源区的应力变化,不能代表震源所在区域的构造应力场^[9],而多个地震的平均 P、B、T 轴方向则能够代表该区域平均构造应力场方向^[10]。相比强震的震源机制解,单个中小地震的震源机制在求解时资料相对较少、受到的干扰更大。但中小地震远远多于强震,因此利用多个小震的震源机制解来反演一定区域构造应力主轴的方向则对结果有更好的约束。大量的小震震源机制解可以将局部的构造条件影响降至更低的水平,从而凸显出整个区域的构造应力场特性^[11-12]。

对于利用小震反演构造应力场的方法,Gephart 等利用网格搜索来确定一定区域内一组震源机制解所对应的主应力的相对大小和应力比值^[13],但是其搜索应力场参数的搜索网格太大(最细的搜索网格为 5°),难以满足精确求解应力场的目的;另外 Michael^[9]和许忠淮等^[10]采用的方法也存在忽略数据精度和无法给出应力场参数误差等问题。万永革在上述问题的基础上给出一种方法,其能够采用不等精度的震源机制数据和更细的应力场参数网格(1°×1°)来搜索应力场参数的最优解,并且给出应力场估计参数的误差。本文求解应力场时所采用的正是此方法。

本文选择九寨沟主震附近(103.5°~104.3° E, 32.7°~N33.7° N)自 2010 年以来的 28 次小震,分别计算其震源机制解,然后根据计算结果反演了这一地区的构造应力场。其中 2010、2011 年的 9 次小震震源机制解采用 P 波初动方法求解,其资料来源于甘东南地区宽频带流动台阵在 2010—2011 年间获得的波形记录,各小震的 P 波初动数目均大于 10,并均先采用三维网格搜索法进行了定位^[14-15]。2011 年后甘东南地区宽频带流动台阵观测结束,因

考虑到小震台站记录较少且信噪比较低,故 2012—2016 年选取的 19 次小震震级均 $\geq M_L2.0$,对选取的小震记录用 gCAP 方法求解了震源机制解。小震分布及震源机制解如图 5。

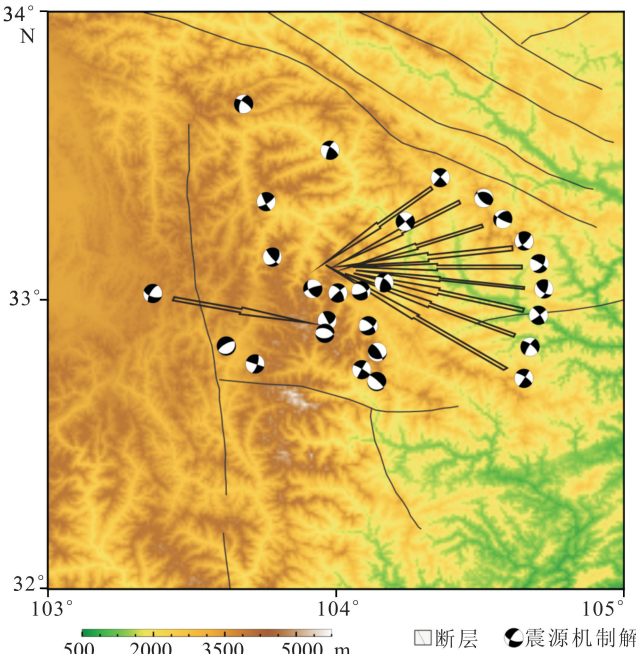


图 5 九寨沟地震附近近年来小震震源机制解分布图

Fig.5 Distribution of focal mechanisms of small earthquakes near the Jiuzhaigou earthquake in recent years

在求解了研究区域 28 次小震的震源机制解后,利用上文提到的反演方法反演了该区域的构造应力场。应力场反演结果为:

最大应力轴的不确定范围:方位角:263°~289°,倾角:-2°~2°。

中间应力轴的不确定范围:方位角:-5°~5°,倾角:84°~90°。

最小应力轴的不确定范围:方位角:172°~199°,倾角:-2°~3°。

最优解如表 3 所列。

表 3 构造应力反演结果						
最大应力轴		中间应力轴		最小应力轴		R
走向/(°)	倾角/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	
289.00	0.00	0.00	90.00	199.00	0.00	0.90

3 结论及讨论

本文用 gCAP 方法和 P 波初动符号反演方法分别求解了九寨沟主震的震源机制解,在和各研究机构发布的震源机制解对比后发现,各震源机制解基本相同,主震的破裂方式均主要表现为走滑方式,

与九寨沟主震的震后判定一致。各震源机制解对比中,本文的 gCAP 解与中国地震局预测研究所的矩张量解基本相同,各参数相近,可能是由于在求解时所采用的波形记录大致相似的缘故。本文的 P 波初动解和中国地震局地球物理研究所 P 波初动解、哈佛 CMT 双力偶最优解基本相同,可能三个结果在求解时所用台站对地震均有很好的包络。同时说明,在资料丰富、求解时台站对地震包络好的情况下,P 波初动方法可以得到很好的双力偶最优解。

九寨沟地震发震地区主要受到青藏高原块体、华南块体和鄂尔多斯块体的共同作用。本文构造应力场的反演结果表明在构造动力学背景下,这一区域的最大应力轴为 NWW 方向,呈近水平向分布;最小应力轴为 SSW 方向,同样为近水平向分布。这一结果与杜兴信在 1999 年用 1920—1996 年的震源机制解资料反演的结果相近^[16]。这一构造背景与九寨沟主震的震源机制解非常吻合,说明九寨沟主震正是在这样的构造背景下发生的。九寨沟 $M_s7.0$ 地震后发生了一系列余震,而余震还会持续更长一段时间,我们也期待在收集更多的余震资料后可以研究震前震后的应力场变化。

致谢:本文采用了万永革提供的应力场反演程序,在此致以衷心的感谢。本文在波形数据处理过程中使用了 SAC 软件,gCAP 求解使用了朱露培共享的 gCAP 程序,画图图中使用了 GMT 软件,在此一并表示谢意。

参考文献(References)

- [1] ZHU L P, Benzon Y. Parametrization of General Seismic Potency and Moment Tensors for Source Inversion of Seismic Waveform Data[J]. *Geophys J Int*, 2013, 194(2): 839-843.
- [2] ZHU L P, HELMBERGER D V. Advancement in Source Estimation Techniques Using Broadband Regional Seismogram[J]. *Bull Seism Soc Am*, 1996, 86(5): 1634-1641.
- [3] JULIAN B R, MILLER A D, FOULGER G R. Non-double-couple Earthquakes Theory[J]. *Reviews of Geophysics*, 1998, 36(4): 525-549.
- [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 Jianping, NI Sidao, FU Rongshan, et al. Source Mechanism of the 2006 $M_w5.1$ Wen'an Earthquake Determined from a Joint Inversion of Local and Teleseismic Broadband Waveform Data[J]. *Chinese J Geophys*, 2009, 52(1): 120-130.
- [5] 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:地球科学*, 2010, 40(6): 677-

687.

- LUO Yan, NI Sidao, ZENG Xiangfang, et al. A Shallow Aftershock Sequence in the North-eastern end of the Wenchuan Earthquake Aftershock Zone[J]. *China Earth*, 2010, 53(11): 1655-1664.
- [6] 李圣强,陈棋福,赵里,等.2011 年 5 月中国东北 $M_w5.7$ 深震的非同寻常震源机制:区域波形反演与成因探讨[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(9): 2959-2970.
LI Shengqiang, CHEN Qifu, ZHAO Li, et al. Anomalous Focal Mechanism of the May 2011 $M_w5.7$ Deep Earthquake in Northeastern China: Regional Waveform in Version and Possible Mechanism[J]. *Chinese J Geophys*, 2013, 56(9): 2959-2970.
- [7] 张广伟,雷建设.2011 年云南腾冲 5.2 级双震发震机理[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(4): 1194-1204.
ZHANG Guangwei, LEI Jianshe. Mechanism of the 2011 Tengchong, Yunnan, $M_s5.2$ Double Earthquakes[J]. *Chinese J Geophys*, 2015, 58(4): 1194-1204.
- [8] 刘瑞丰,高景春,陈运泰,等.中国数字地震台网的建设与发展[J]. *地震学报*, 2008, 30(5): 533-539.
LIU Ruifeng, GAO Jingchun, CHEN Yuntai, et al. Construction and Development of Digital Seismograph Networks in China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2008, 30(5): 533-539.
- [9] MCKENZIE D P. The Relation between Fault Plane Solutions for Earthquakes and the Directions of the Principal Stresses[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 1969, 59: 591-601.
- [10] 许忠淮,阎明,赵仲和.由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向[J]. *地震学报*, 1983, 5(3): 271-272.
XU Zhonghuai, YAN Ming, ZHAO Zhonghe. Evaluation of the Direction of Tectonic Stress in North China From Recorded Data of a Large Number of Small Earthquakes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1983, 5(3): 271-272.
- [11] 许忠淮,戈澍漠.用滑动方向拟合法反演富蕴地震断裂带应力场[J]. *地震学报*, 1984, 6(4): 365-404.
XU Zhonghuai, GE Shumo. Stress Field in the Fuyun, Xinjiang Earthquake Fracture Zone Determined by Fitting Fault Slip Vector Data[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1984, 6(4): 365-404.
- [12] 许忠淮,汪素云,高阿甲.地震活动反应的青藏高原东北地区现代构造运动特征[J]. *地震学报*, 2000, 22(5): 472-481.
XU Zhonghuai, WANG Suyun, GAO Ajia. Present T-day Tectonic Movement in the Northeastern Margin of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau as Revealed by Earthquake Activity[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2000, 22(5): 472-481.
- [13] GEPHART John W, DONALD Forsyth W. An Improved Method for Determining the Regional Stress Tensor Using Earthquake Focal Mechanism Data: Application to the San Fernando Earthquake Sequence[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89(B11): 9305-9320.
- [14] 惠少兴,张元生,李顺成. t-D 地震定位方法研究[J]. *西北地震学报*, 2012, 34(1): 10-13.
HUI Shaoxing, ZHANG Yuansheng, LI Shuncheng. Study on

the t-D Earthquake Location Method[J].Northwestern Seismological Journal,2012,34(1):10-13.

[15] 高见,张元生,郭彪,等.甘东南流动台阵微震监测结果[J].地震工程学报,2013,35(1):177-182.

GAO Jian, ZHANG Yuansheng, GUO Biao, et al. Micro Earthquake Location Determined by Portable Seismic Array Data in Southeast Gansu Province[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(1):177-182.

[16] 杜兴信,邵辉成.由震源机制解反演中国大陆现代构造应力场[J].地震学报,1999,21(4):354-360.

DU Xingxin, SHAO Huicheng. Modern Tectonic Stress Field in the Chinese Mainland Inversed from Focalmechanism Solutions[J].Acta Seismologica Sinica,1999,21(4):354-360.

(上接第 912 页)

[10] 建筑抗震设计规范:GB50011-2010[S].北京:中国建筑工程出版社,2010.

Code for Seismic Desing of Buildings:GB50011-2010[S].Beijing: China Architecture and Building Press,2010.

[11] 廖振鹏,袁一凡.地震工程中的波动问题[R].1988(I):60-61.

LIAO Zhenpeng, YUAN Yifan. Fluctuations in Earthquake Engineering[R].1988(I):60-61.

[12] 工程地质手册[M].第三版.北京:中国建筑工程出版社,1998:313.

Engineering Geology Handbook[M].The Third Edition. Beijing:China Architecture and Building Press,1998:315.