

# 2013 年甘肃岷县 $M_s6.6$ 地震矩张量反演 及发震构造初探<sup>①</sup>

陈继锋<sup>1</sup>, 林向东<sup>2</sup>, 何新社<sup>1</sup>

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 北京市地震局, 北京 100080)

**摘要:**使用甘肃省测震台网记录的三分向宽频带长周期数字波形资料在时间域反演了 2013 年 7 月 22 日甘肃岷县  $M_s6.6$  地震的矩张量解, 并与 Harvard 大学 CMT 解进行了比较。最后结合该地区的地质资料和构造背景分析了岷县地震发震成因, 对可能的发震断层进行了讨论。

**关键词:** 岷县  $M_s6.6$  地震; 震源区; 矩张量反演; 震源机制; 发震构造

中图分类号: P315.22 文献标志码: A 文章编号: 1000-0844(2013)03-0425-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.03.0425

## Moment Tensor Inversion and Seismogenic Tectonics of the 2013 Minxian $M_s6.6$ Earthquake in Gansu

CHEN Ji-feng<sup>1</sup>, LIN Xiang-dong<sup>2</sup>, HE Xin-she<sup>1</sup>

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

2. Earthquake Administration of Beijing Municipality, Beijing 100080, China)

**Abstract:** On July 22, 2013, the Minxian magnitude 6.6 earthquake occurred beneath the north-east margin of the Tibetan plateau, Gansu, China. The earthquake and its aftershocks caused considerable damages, including more than 95 casualties, 2414 injuries, and approximately 17.5 billion yuan in property damage. More information on the source properties of such events can help to characterize fault the structures, which can contribute to an improved understanding of the hazards associated with future great earthquakes. As of August 28, 13:35, aftershocks have been recorded by the Gansu seismology network, including a magnitude 5.6 event following the mainshock. We analyzed the broadband waveforms for the mainshock with sufficient signal-to-noise levels to invert for seismic moment tensors. All stations involved in this study are broadband stations situated near the July 22 mainshock; data showing such problems as misorientation of horizontal components, mislabeling, and polarity reversal in one or more components (Niu et al., 2010) were removed. During the data processing, we removed the mean value and instrument response, detrended the waveforms, integrated the three-component velocity waveforms to displacement, and rotated the horizontal components to the radial and tangential directions. Before performing moment tensor inversion, waveforms were filtered with a Butterworth filter with frequencies between 0.016 Hz and 0.05 Hz. On the basis of the Crust 2.0 global crustal model, and considering the heterogeneity of the crust and the distances to the recording stations, various velocity models for each station were employed to account for variabilities in the crustal structure.

① 收稿日期: 2013-08-27; 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2013062

基金项目: 兰州地震研究所科技发展基金面上项目(2011M03); 地震行业科研专项课题(201208009)

作者简介: 陈继锋(1978-), 男(汉族), 甘肃清水人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地震台网和地震学的研究工作. Email: chenjf163@

To insure the quality of the results of the inversion process, we retained only the station with variance reduction (VR) is  $\geq 80$ , and got 6 stations for the inversion. After depth iteration, the best solutions obtained at a depth of 8 km were 87, 13, and 93 for double couple (DC), the compensated linear vector dipole (CLVD) component, and VR, respectively, which indicates high-quality results. The two panels strike, dip, and rake of the solution were  $195^\circ$ ,  $54^\circ$ , and  $149^\circ$  and  $305^\circ$ ,  $65^\circ$ , and  $40^\circ$  respectively. The moment tensor solutions showed considerable reverse features and contained part of the strike-slip component. Geologic survey indicated no surface rupture. Regarding tectonic framework and the aftershock distribution features, our inversion results were essentially consistent with the strike of the Lintan-Tanchang fault, and the aftershock distribution occurred near the fault. This phenomenon indicates that the Lintan-Tanchang fault was the main tectonic trigger for the Minxian magnitude 6.6 earthquake and that the seismogenic fault of the earthquake was a subfault of the Lintan-Tanchang fault.

**Key words:** Minxian  $M_s$ 6.6 earthquake; focal region; moment tensor inversion; focal mechanism solution; seismogenic tectonics

## 0 引言

震源机制解是地震学研究的重要组成部分,对研究地壳应力场、强地面运动模拟、地震灾害评估等方面有着重要的意义。测定震源机制解的方法有多种,比如 CAP<sup>[1]</sup>、FOCMEC<sup>[2]</sup>、TDMT<sup>[3]</sup>、HASH<sup>[4]</sup>等,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。其中应用矩张量概念对震源物理的研究是当代地震学的一个重要的前沿课题,地震矩张量可以直接从波形记录的反演中获得,既不需要对震源有任何先验的假设,也不需要大量的观测数据,因此在处理中等地震震源机制解中具有明显优势。近年来随着宽频带数字地震仪的广泛应用地震波形记录的质量明显提高,极大地推动了对震源物理过程研究的进展。对于区域性中等地震,由于区域性地震的波形记录包含了有关震源和区域地壳的丰富的信息,利用波形资料研究区域性中小地震的震源机制其结果有助于了解震源区和区域性应力状态以及断层的构造特性,也是理解地震孕育过程的重要途径。

由于中等地震的能量相对较小,通常难以利用远场波形反演地震矩张量解。利用P波初动求震源机制解,当近场没有足够的台站分布时,观测所能提供的初动资料数量以及这些初动点在震源球上分布的均匀程度对结果有相当大的影响,因此获得的震源机制解常常可靠性较差。随着新建的“十五”国家和区域数字地震台网的运行,利用区域震源宽频带记录进行中小地震的震源参数的研究成为近年来一个活跃的研究领域<sup>[5-9]</sup>。许多研究表明由于区域长周期地震波对速度结构的横向变化及密度的非均

匀性相对不敏感,如果震源位置比较准确,地震满足震源的同步,假设波形信噪比高,则用区域范围稀疏台站记录的三分量长周期波形就足以反演得到稳定的矩张量解。另外,由初动得到的机制解仅仅是初始破裂面,由波形反演结果得到的则是整个破裂过程的信息,由于初始破裂方向并不一定与地震的断层错动完全一致,因此矩张量解得到的震源机制结果相对更加完整和可靠<sup>[10-11]</sup>。

2013年7月22日在甘肃省定西市岷县、漳县交界处发生 $M_s$ 6.6地震,造成了严重的人员和财产损失。震区位于南北地震带北端的甘东南地区,是中强震的多发区,历史上和现今中强地震时有发生,特别是近十年以来在该地区发生了多次5级以上地震,因此也是近年地震监测专注的地区。本文使用震源区“十五”新建的宽频带三分量地震仪波形数据的长周期波形记录,利用TDMT方法<sup>[2]</sup>在时间域反演本次地震的矩张量解,并与Harvard大学CMT解进行比较,最后结合构造背景分析岷县地震发震成因。

## 1 研究方法

本文使用了Dreger等<sup>[3]</sup>提出的利用区域范围长周期体波三分量波形在时间域反演地震矩张量解的TDMT程序,方法原理详见文献<sup>[8]</sup>。该方法目前在南加州台网及全球多个国家台网中运行以提供近实时地震矩张量解,在我国伽师及汶川地震序列研究中也得到了应用<sup>[8]</sup>。合成地震图所需的格林函数使用Saikia<sup>[12]</sup>经改进的离散波数积分方法计算;当使用长周期波形资料时,地震满足震源为点源的

假设,震源时间函数直接取  $\delta$  函数。每个参加反演的台站可以分别使用不同的地壳速度、密度等。

具体反演过程是:首先对观测波形进行去均值去倾校正反褶积仪器传递函数将记录变为实际速度值(m/s),再旋转到  $Z$ 、 $R$ 、 $T$  分量并积分为位移值。然后对观测资料使用 Butterworth 带通滤波器滤波到需要的长周期频段(0.016~0.05 Hz),以剔除较低频和较高频噪声而不破坏用于矩张量反演的信息。对计算的 Green 函数也滤波到与观测数据同样的频率范围,最后采用迭代拟合相关系数的方法对观测波形和理论波形进行拟合。

## 2 数据准备及速度结构处理

近年来随着我国区域台网仪器布设数量剧增数字地震观测数据大量产出,应用这些数字地震资料的研究得到了快速发展,也对地震数据的高质量产出提出了要求。甘肃省地震局在“十五”期间通过新建、改建和升级等手段,在“九五”19 个数字测震台站的基础上,建成了一个覆盖全省,拥有 44 个宽频带台站的数字地震观测台网。Niu 等<sup>[13]</sup>通过对宽频带仪器远场直达波三分量的极性分析检测了全国宽频带地震台在运行期间可能出现的仪器方位角以及初至波极性倒转等问题。2013 年 5 月开始甘肃局对所属 44 个台站的方位角进行了全面的检查和校正,保障了本研究使用的台站方位角偏差造成的影响。

我们搜集了 2013 年 7 月 22 日岷县  $M_s6.6$  地震周边 300 km 范围内的所有宽频带波形记录资料,去除限幅和停记等有问题的台站,最终选定了 DBT(迭部台)、WDT(武都台)、HZT(合作台)、LTT(临潭台)、WXT(文县台)、JNT(静宁台)6 个台站的信噪比较高的宽频带波形记录的资料来反演矩张量解。这 6 个台基本为基岩山洞观测,仪器选用台站使用 BBVS-60 型宽频带地震计(频带宽度为 50 Hz~60 s,速度输出平坦)和 CMG-3ESPC 型宽频带地震计(频带宽度为 50 Hz~60 s,速度输出平坦)。地震数据采集器字长全部为 24 位,采样率为 100。

反演地震矩张量的重要步骤之一是计算格林函数,其计算结果在很大程度上影响反演结果的可靠性,因此速度模型的建立是一件非常基础而关键的工作。本文计算理论地震图使用了 Crust2.0 的  $2^\circ \times 2^\circ$  分层的速度和密度结构模型<sup>[14]</sup>,这是一个被广泛使用的模型。作者将该模型与甘肃地区深浅部结

构的研究结果<sup>[15-16]</sup>进行了对比,差别较小。同时由于反演方法使用区域范围长周期的波形数据反演结果对结构的依赖性不强,研究中根据各个台站的位置最终使用了各自台站的速度模型。

## 3 矩张量反演及结果分析

2013 年 7 月 22 日在甘肃省定西市岷县与漳县交界处发生  $M_s6.6$  地震,随后发生  $M_s5.6$  强余震,截止 2013 年 8 月 28 日共发生余震 1 335 次。图 1 为震中附近地震台站分布图,震中最近台站 MXT(岷县台)限幅。图 2 给出了本次地震的波形处理过程。

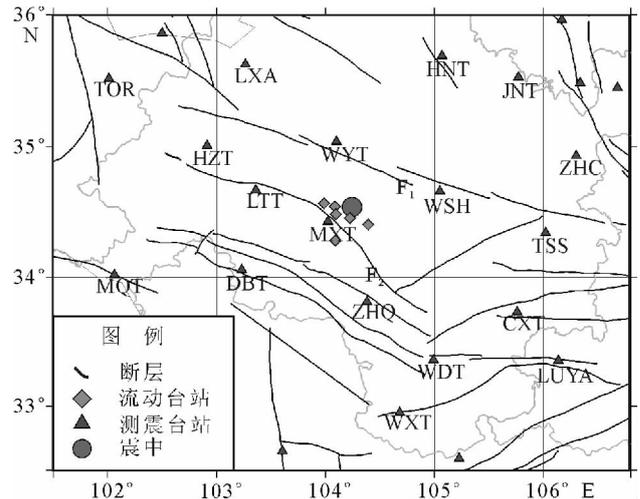


图 1 岷县  $M_s6.6$  地震震中附近台站分布图

Fig. 1 Distribution of seismic stations near the Minxian  $M_s6.6$  earthquake epicenter

图 3 为本次地震的 DBT(迭部台)、WDT(武都台)、HZT(合作台)、LTT(临潭台)、WXT(文县台)、JNT(静宁台)6 个台实际观测与理论波形以及反演结果双力偶震源机制解得下半球投影,同时绘出了 P、T 轴。6 个台理论波形和实际观测的波形互相关系数为 93.5%,可见此次地震以逆冲为主,兼具走滑分量的特征。

全球多家研究机构对地震矩张量进行反演研究,其中哈佛大学在此方面被公认为最权威的研究机构,他们对全球绝大部分  $M_w > 4.8$  地震矩张量作了反演。为进一步分析本文矩张量反演结果的可靠性,本文对比了哈佛大学的结果,数据显示本文的计算结果和哈佛大学的结果十分接近,也与韩立波计算的震源机制解基本一致(图 4)。具体参数见表 1。

在计算理论格林函数时,震源深度将影响理论地震图的形态,进而在一定程度上影响震源机制的

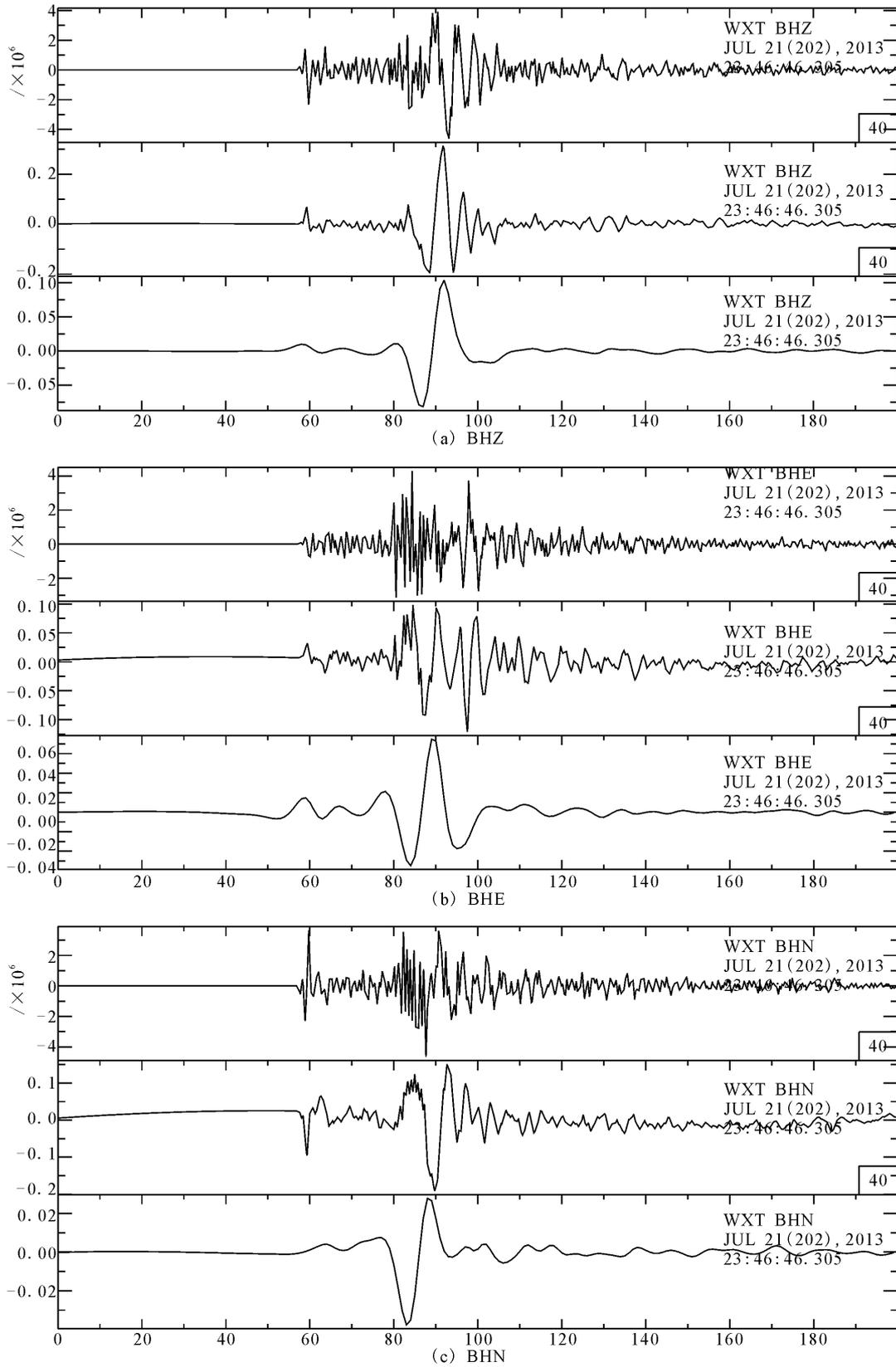


图2 文县台记录的岷县  $M_s6.6$  地震观测波形的滤波处理

Fig.2 The processing procedure of observed waveform of Minxian  $M_s6.6$  earthquake recorded at Wenxian station as example

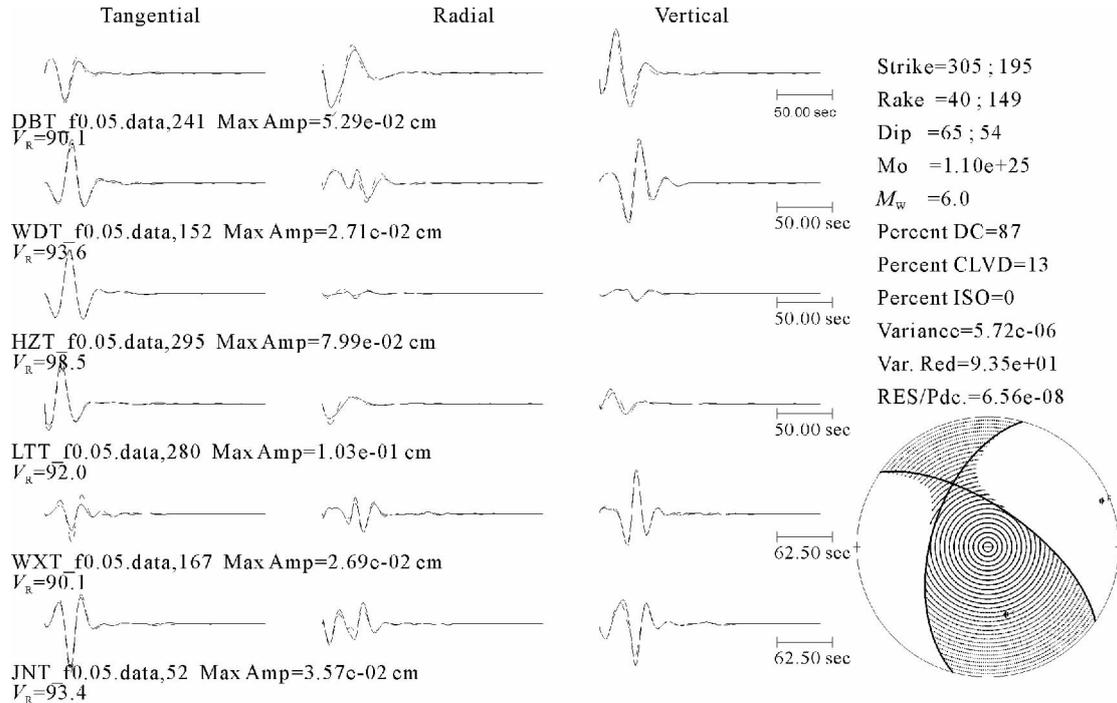


图 3 理论波形与实际波形拟合及反演结果(实线为记录波形,虚线为理论波形)

Fig. 3 The inversion results and comparison of the synthetic waveforms with the observed waveforms (Solid line represents observed data, dashed line represents the synthetic waveform)

表 1 岷县  $M_s$ 6.6 地震双力偶震源机制解

Table 1 The double-couple focal mechanism for Minxian  $M_s$ 6.6 earthquake

发震时间		$M_s$	$M_w$	节面 I			节面 II			地震矩	来源
日期	时刻			走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)		
2013-07-21	23:45:56.3	6.6	6.0	195	54	149	305	65	40	1.10e+25	本文
2013-07-21	23:45:56.3	5.9	6.0	196	50	153	304	69	43	1.26e+25	哈佛
2013-07-21	23:45:56.3	6.6	6.1	180	47	120	320	51	62		地球所韩立波

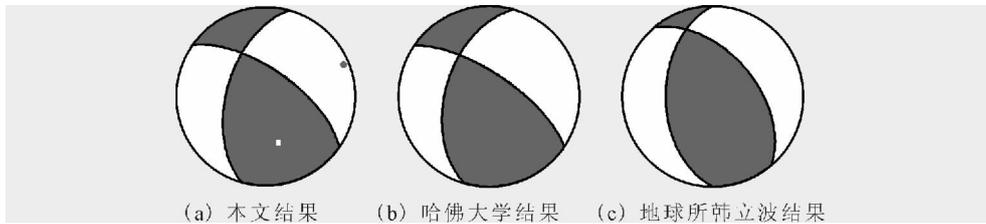


图 4 岷县  $M_s$ 6.6 地震双力偶震源机制解比较

Fig. 4 Comparison of three double-couple focal mechanisms for the  $M_s$ 6.6 event

反演结果。为了减少震源深度的误差对矩张量解的影响,我们在深度上进行了迭代,反演了若干个深度上的地震矩张量解,以波形拟合误差最小的震源深度和相应的矩张量解作为最佳结果。这样在对初始震源深度进行评价和校正的同时得到了最佳的矩张量解。从图 5 可以看出震源深度的变化对拟合误差具有一定的影响,在不同的深度,方差减小  $VR$  值变化很明显,有显著的高值点,即为本次地震破裂的矩心位置 8 km。然而在很宽的深度范围反演结果都

比较稳定,表明了方法的稳定性。

#### 4 讨论与结论

(1) 本文利用甘肃省测震台网记录的三分量宽频带波形资料反演了 2013 年 7 月 22 日岷县  $M_s$ 6.6 地震的矩张量解,数据显示与哈佛大学矩张量解十分相似。由图 1 和图 3 可以看到用于反演地震矩张量的这 6 个台站基本上包围了震中,且波形拟合较好。

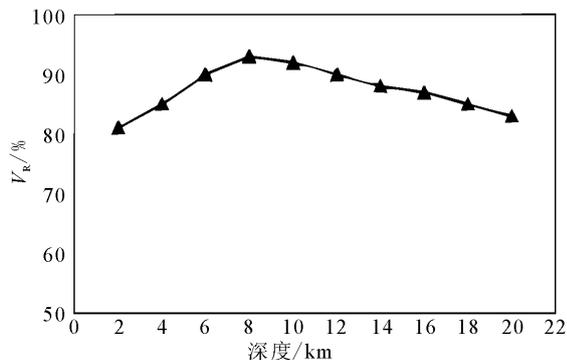


图5 不同震源深度上矩张量解及波形拟合方差减小VR值

Fig. 5 Moment tensor solutions and the variance reduction values at different focal depths

(2) 本次地震为一次中等强度地震,现场考察未发现地表裂缝、断层等构造现象<sup>[17]</sup>。通常发震断层的确定是由震源机制解结合震源区地质考察的断裂分布等方法来确定的,本次地震震中位置在两条规模的区域性断裂西秦岭北缘断裂( $F_1$ )和临潭—宕昌断裂( $F_2$ )中间,靠近临潭—宕昌断裂(图1),余震分布见图6。从目前掌握的该震源区附近的地质资料来看<sup>[17-19]</sup>临潭—宕昌断裂由多条规模不等、相互平行或斜列的次级断裂组合而成,断裂带影响宽度范围在5~10 km,在岷县东南断裂归并为一体,延至宕昌以南。断裂的总体性质是以向北逆冲为主,略具左旋走滑分量,断裂呈NW—NW向展布,倾

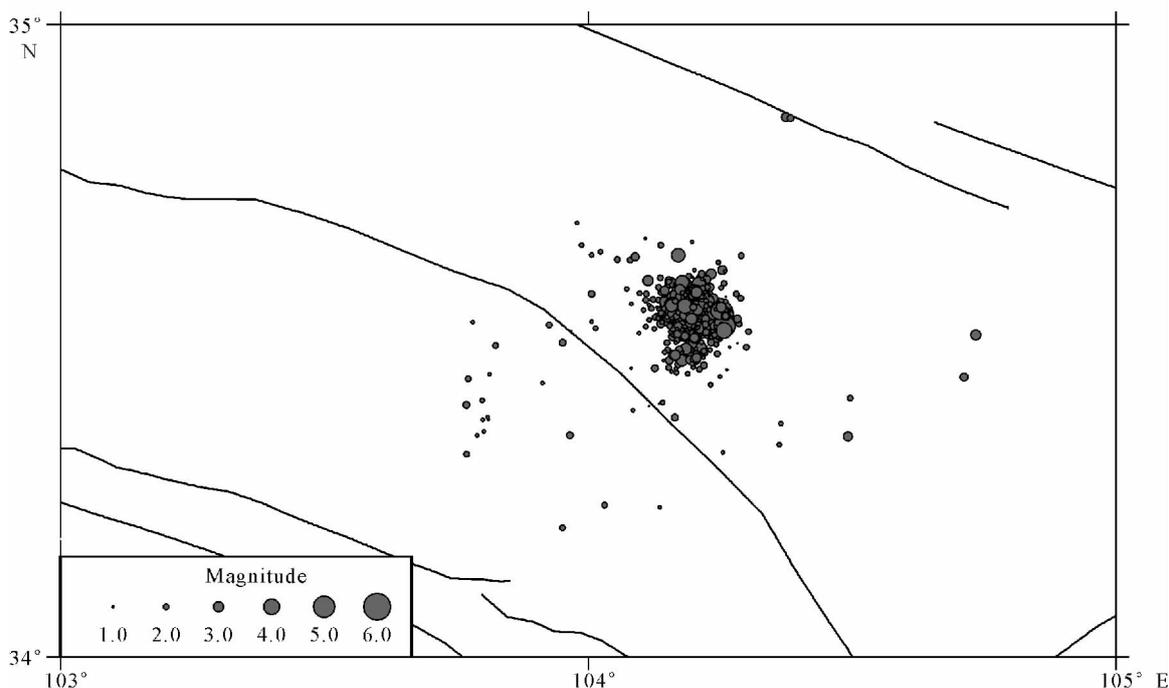


图6 2013年7月22日岷县 $M_s6.6$ 地震余震分布图

Fig. 6 The distribution of aftershocks on July 22, 2013, the Minxian magnitude 6.6 earthquake

向北东,倾角 $50^\circ\sim 70^\circ$ 。该地震震源机制解表明,节面II呈NW—NW向分布,以逆冲为主,兼具走滑分量的特征,这与临潭—宕昌断裂走向、破裂方式基本吻合,由此推测岷县地震的发生可能与临潭—宕昌断裂活动相关。震后考察结果也显示临潭—宕昌断裂带的中南段与本次地震关系密切,应该为本次甘肃省岷县 $M_s6.6$ 地震的孕震和发震构造。

(3) 本文利用区域范围长周期体波三分量波形在时间域反演了岷县地震的断层面解和地震矩心深度等,但这只是地震震源参数中的一部分,不足以完全揭示岷县地震的发生、发展和终止,还应通过各种

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:研究过程中使用了美国伯克利地震实验室的矩张量反演软件和SAC波形处理软件,大部分图件使用GMT绘制,特此申明。赵翠萍研究员辅导了TDMT程序的使用,在此一并感谢!

#### 参考文献(References)

- [1] Zhu L, Helmberger D V. Advancement in Source Estimation Techniques Using Broadband Regional Seismograms[J]. Bull

- Seism. Soc. Am., 1996, 86:1634-1641.
- [2] Snoke J A. Clyde and the Gopher: A Preliminary Analysis of the 12 May 1990 Sakhalin Island Event[J]. Seism. Res. Letters, 1990, 61: 161.
- [3] Dreger D S, Helmberger D V. Determination of Source Parameters at Regional Distances with 3-component Sparse Network Data[J]. J. Geophys. Res., 1993, 98(B5):8107-8125.
- [4] Hardebeck J L, Shearer P M. Using S/P Amplitude Ratios to Constrain the Focal Mechanisms of Small Earthquake[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 2003, 93:2434-2444.
- [5] Ghose S, Hamberger M W. Source Parameters of Moderate-sized Earthquakes in Tianshan, Central Asia from Regional Moment Tensor Inversion[J]. Geophys. Res. Lett., 1990, 25: 3181-3184.
- [6] Dreger D S, Savage B. Aftershocks of the 1952 Kern County, California, Earthquake Sequence[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1998, 89:1094-1108.
- [7] Kim S G, Kraeva N. Source Parameter Determination of Local Earthquakes in Lorea Using Moment Tensor Inversion of Single Station Data[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1999, 89(4):1077-1082.
- [8] 赵翠萍, 陈章立, 郑斯华, 等. 伽师震源区中等强度地震矩张量反演及其应力场特征[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 782-792.
- Zhao C P, Chen Z L, Zheng S H, et al. Moment Inversion of Moderate Earthquakes and the Locally Perturbed Stress Field in the Jiashi Source Region[J]. Chinese J. Geophys., 2008, 51(3):782-792. (in Chinese)
- [9] 唐兰兰, 赵翠萍, 王海涛. 2008 年新疆乌恰 6.8 级地震序列震源特征及帕米尔东北缘应力场研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(4):1228-1239.
- Tang L L, Zhao C P, Wang H T. Study on the Source Characteristics of the 2008  $M_s$ 6.8 Wuqia, Xinjiang Earthquake Sequence and the Stress Field on the Northeastern Boundary of Pamir[J]. Chinese J. Geophys., 2012, 55(4):1228-1239. (in Chinese)
- [10] Tan Y, Zhu L, Helmberger D V, et al. Locating and Modeling Regional Earthquakes with Two Stations[J]. J. Geophys. Res., 2006, 111, B01306, doi:10.1029/2005JB003775.
- [11] Dreger D S, Helmberger D V. Determination of Source Parameters at Regional Distances with Three-components Sparse Network Data[J]. J. Geophys. Res., 1993, 98:8107-8125.
- [12] Saikia K S. Modified Frequency-wavenumber Algorithm for Regional Seismograms Using Filon's Quadrature: Modeling of Lg Waves in Eastern North America[J]. Geophys. J. Int., 1994, 118(1):142-158.
- [13] Niu F L, Li J. Component Azimuths of the CEArray Stations Estimated from P-wave Particle Motion[J]. Earthquake Science, 2011, 24(1):3-13.
- [14] Bassin C, Laske G, Masters G. The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America[J]. EOS Trans AGU, 2000, 81:F897.
- [15] 王周元. 甘肃地区地壳分层结构[J]. 西北地震学报, 1984, 6(3):84-91.
- Wang Z Y. Layered Crustal Structure in Gansu Region[J]. Northwestern Seismological Journal, 1984, 6(3):84-91. (in Chinese)
- [16] 李少华, 王彦宾, 梁子斌, 等. 甘肃东南部地壳速度结构的区域地震波形反演[J]. 地球物理学报, 2012, 55(4):1186-1197.
- Li S H, Wang Y B, Liang Z B, et al. Crustal Structure in Southeastern Gansu from Regional Seismic Waveform Inversion[J]. Chinese J. Geophys., 2012, 55(4):1186-1197. (in Chinese)
- [17] 荣代路, 李亚荣. 甘肃岷县两次中强地震震源机制研究[J]. 地震研究, 2006, 29(4):344-348. Rong D L, Li Y R. Focal Mechanisms of Two Moderate Earthquakes in Minxian, Gansu, in 2003[J]. Journal of Seismological Research, 2006, 29(4):344-348. (in Chinese)
- [18] 张辉, 王熠熙, 冯建刚. 甘东南地区地壳介质各向异性特征[J]. 西北地震学报, 2011, 33(2):111-115.
- ZHANG Hui, Wang Yi-xi, FENG Jiang-gang. Seismic Anisotropy in the Crust in Southeastern Area of Gansu Province [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(2):111-115. (in Chinese)
- [19] 高见, 张元生, 郭颀, 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 J, Zhang Y S, Guo B, et al. Microearthquake Location Determined by Portable Seismic Array Data in Southeast Gansu Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1):177-182. (in Chinese)