

2013 年山东莱州 $M_{4.6}$ 地震序列发震构造初探^①

曲均浩^{1,2}, 杨玉永², 刘永贵³, 范晓易², 曲 利², 崔 鑫², 赵金花², 钟普浴²

(1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029; 2. 山东省地震局, 山东 济南 250014; 3. 山东省国土测绘院, 山东 济南 250102)

摘要:采用双差定位法对山东莱州地震序列重新定位, 通过 CAP 方法反演 $M_{4.6}$ 地震震源机制, 在此基础上初步探讨莱州地震序列发震构造。结果显示: 精确定位震中位置主要位于柞村—仙舛断裂的 NW 方向, 深度剖面显示从 SE 方向到 NW 方向断层深度呈由浅逐渐变深的趋势, 这均与柞村—仙舛断裂位置、走向、倾向特征较为吻合; $M_{4.6}$ 地震震源机制解的节面 I 与柞村—仙舛断裂走向、倾角较为接近。综合精确定位震中位置、剖面深度分布特征、 $M_{4.6}$ 地震震源机制解及宏观调查烈度分布等结果与柞村—仙舛断裂产状之间的关系, 初步推测柞村—仙舛断裂可能为莱州地震序列的发震断层。

关键词: 莱州序列; 发震构造; 双差定位; CAP 方法

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0546-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0546

Causative Structure of the 2013 Laizhou Earthquake Sequence

QU Jun-hao^{1,2}, YANG Yu-yong², LIU Yong-gui³, FAN Xiao-yi²,

QU Li², CUI Xin², ZHAO Jin-hua², ZHONG Pu-yu²

(1. Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China;

2. Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan, Shandong 250014, China;

3. Shandong Provincial Institute of Land Surveying and Mapping, Jinan, Shandong 250102, China)

Abstract: The $M_{4.6}$ earthquake in Laizhou, Shandong, occurred on November 23, 2013, and it was the largest earthquake recorded since 1970. This event was also notable as the most potent earthquake in the interior regions since the $M_{5.2}$ earthquake of Cangshan 18 years earlier. The Shandong Digital Earthquake Network Center has recorded 86 aftershocks until March 02, 2014, including 18 earthquakes of more than $M_L 2.0$. The earthquake occurred between the Jingzhi and Yishu faults (along NE direction) with the Liucun—Laizhou, Zuocun—Xiankuan, Matou—Dagu faults around the epicenter. The focal mechanism describes the nature and source of the rupture process, and is an important foundation for understanding the stress state of the source region, earthquake faults, and analyzing the causes of the seismic event. Therefore, the determination of the earthquake focal mechanisms is of great significance in the understanding of the mechanical process of earthquakes, for seismic interpretation, and for the understanding of the post-earthquake seismogenic stress distribution mechanism. Thus the causative structure of the Laizhou earthquake sequence is discussed on the basis of relocating the Laizhou earthquake sequence using the double-difference method and analyzing the focal mechanism of the stronger earthquake using the “cut and paste” (CAP) method. Eighty-six earthquakes were relocated using the double-difference method, and 75 basic earthquake parameters were obtained. The precise epicenter was located

① 收稿日期: 2014-05-05

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目专题(2012BAK15B06); 山东省自然科学基金(ZR2014DQ019)

作者简介: 曲均浩(1981—), 男, 工程师, 在读博士生, 主要从事数字地震学应用及地震序列研究. E-mail: gisqjh@126.com

along the direction of Zuocun—Xiankuan fault, which is consistent with the location, strike, and dip of the Zuocun—Xiankuan fault. The depth of the entire earthquake sequence was found from 4 to 9 km, and the advantages of depth was at 5~7 km. The result showed that the main earthquake rupture occurred in the upper crust. The analysis of the vertical profile by precise positioning showed that the focal depth from SE to NW gradually becomes deeper, and the dip direction is in the NW direction, which are consistent with location, strike, and dip of the Zuocun—Xiankuang fault. The focal mechanism of the 4.6 earthquake was inverted using the CAP method. Thus, the synthetic seismograms fit well with the observed seismograms, and the inversion result is verified. The focal mechanism showed that the moment magnitude of the M4.6 earthquake was $M_w = 4.5$, one nodal plane had a strike of 193° , a rake of 144° , and a dip of 69° , and another nodal plane had a strike of 298° , a rake of 25° , and a dip of 57° . The first nodal plane appeared to have occurred close to the Zuocun—Xiankuang fault. Combining the precise relocation results, profile depth distribution, focal mechanism of the M4.6 earthquake, and intensity distribution by macroscopic investigation using the relationship of Zuocun—Xiankuang fault occurrence, it was concluded that the Zuocun—Xiankuang fault may be the seismogenic fault of Laizhou earthquake sequence.

Key words: Laizhou earthquake sequence; causative structure; double-difference location; CAP method

0 引言

2013 年 11 月 23 日 13 时 44 分在山东莱州发生 M4.6(M_L 5.0)地震,该次地震是莱州地区自 1970 年以来最大的一次地震,亦是山东内陆地区自 1995 年苍山 M5.2 地震 18 年后的又一次显著地震事件。据山东数字地震台网测定,截止到 2014 年 3 月 2 日莱州 M4.6 地震序列共记录余震 86 次(图 1),其中 M_L 2.0 以上地震 18 次。该次地震发生在 NE 向沂沭断裂带的景芝断裂与平度—招远断裂之间,震中附近有留村—莱州断裂、柞村—仙岔断裂、马头—大崮顶断裂等次级断裂(图 2)。因而,确定本次地震序列的发震构造,研究地震序列的震源性质,对理解地震的孕震机理,分析未来可能的发震趋势及危险性均有重要的现实意义。

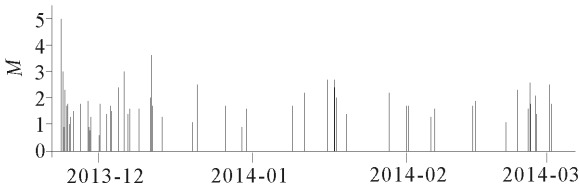
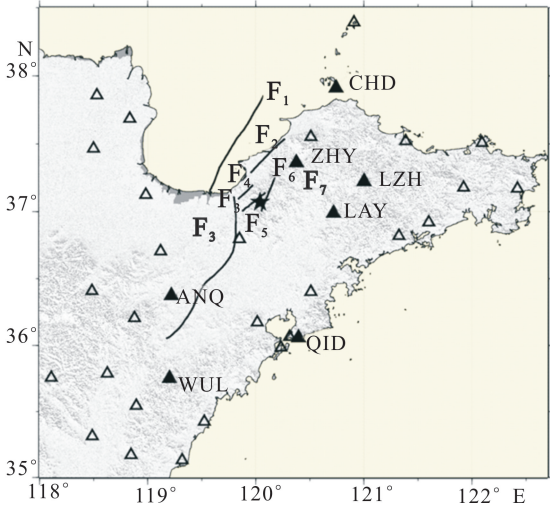


图 1 莱州地震序列 M-t 图

Fig.1 M-t plot of the Laizhou earthquake sequence

本文采用双差定位方法对莱州地震序列进行重新定位,通过 CAP 方法反演 M4.6 地震震源机制,在此基础上,结合区域构造环境和宏观烈度调查探

讨地震序列的发震构造和震源性质。



F₁ 营潍东支东侧;F₂ 黄县弧形断裂;F₃ 景芝断裂;F₄ 留村—莱州断裂;F₅ 柞村—仙岔断裂;F₆ 马头—大崮顶断裂;F₇ 招远—平度断裂;
△为参与精确定位的台站;▲为参与精确定位及震源机制反演的台站;★为发震位置

图 2 莱州序列发震位置及周围台站、断层分布
Fig.2 Location of the Laizhou earthquake sequence and distribution of surrounding seismic stations and faults

1 方法及原理

1.1 双差定位

地震精定位在地震序列研究中具有重要的意义,高精度的定位结果能够更加准确地刻画断层在

地壳深部的展布形态,有助于震源破裂面的确定。区域台网一般使用绝对定位方法确定地震三要素^[1],该方法通过各个台站的到时计算震源位置,由于计算走时的速度模型本身存在误差,每个台站的到时数据精度都会直接影响地震定位的结果^[2]。Waldhauser 等^[2]提出的双差定位方法消除了震源至地震台站共同的传播路径效应,将每个台站观测的事件都与台站组成台站-事件对,使地震对的观测和理论走时之差的残差最小,从而获得较高精度的相对空间位置分布。

在双差定位法中,由每两个相邻地震的观测走时差减去理论计算值的走时差得到的残差构成一个观测方程。对于 N 个待定事件和 K 个观测台站,如果每个台站都记录到每次地震,就有 $N(N-1)K/2$ 个观测方程,但通常情况并非如此。假如取得双差观测的数据数目为 M ,则反演方程为:

$$\mathbf{W}\mathbf{G}\mathbf{m} = \mathbf{W}\mathbf{d} \quad (1)$$

式中的系数矩阵 $\mathbf{G}$ 就是一个 $M \times 4N$ 的偏微商矩阵, M 是双差观测的数目, N 是地震数; $\mathbf{d}$ 是双差资料矢量; $\mathbf{m}$ 是由待定的震源参数改变量 $(\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta \tau^i = 1, 2, \dots, N)$ 构成的维数为 $4N$ 的矢量; $\mathbf{W}$ 是对每个方程加权的对角线矩阵。反演中,引进了一个表示所有的地震经重新定位后其平均“位移”为零的约束条件。

$$\sum_{i=1}^N \Delta m^i = 0 \quad (2)$$

以阻尼最小二乘法求解式(1),此时,问题归结为:

$$\mathbf{W} \begin{bmatrix} \mathbf{G} \\ \lambda \mathbf{I} \end{bmatrix} \mathbf{m} = \mathbf{W} \begin{bmatrix} \mathbf{d} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

式中, λ 为阻尼因子; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵。实际过程中,采用共轭梯度法求解式(2)得到阻尼最小二乘解。同时将奇异值分解法应用于部分资料,以获得有关模型参数的误差、分辨率等信息^[3]。

1.2 CAP 方法

地震震源机制直观地反映了地震破裂几何特征和运动学特征,它不仅是研究区域构造应力的基础,对认识地震活动与地质构造之间的关系,勾画活动断层形态也起着非常重要的作用。地震震源机制的求解中,P 波初动法是最常用的方法。该方法要求在球面投影中存在大量离散、均匀的台站,然而对于莱州地震序列,北侧面临海域,西侧台站受地质环境影响初动记录不清晰,对该次地震包围效果相对较差。相比 P 波初动方法,全波形 CAP (Cut and

Paste)反演方法^[4-11]可靠性、准确性更高一些。

Zhao 等^[5]提出用近震宽频带地震波形反演震源机制解,设 $u(t)$ 是台站记录到的去除仪器响应后的地震波形, $s(t)$ 是相应的理论计算出的波形,则有

$$s(t) = M_0 \sum_{i=1}^3 A_{ij}(\phi - \theta, \delta, \lambda) G_{ij}(h, t) \quad (3)$$

其中, $j=1, 2, 3$,对应垂向、径向、切向分量; $\mathbf{G}_{ij}$ 是对应各个方向的格林函数; A_{ij} 是辐射的衰减系数; M_0 是地震的矩张量; ϕ 是地震的方位角; θ, δ, λ 分别是走向、倾角、滑动角。

令 $u(t) = s(t)$,反演得到地震震源深度 h 、走向 θ 、滑移角 λ 。采用频率-波数方法(F-K)^[4]计算台站各处的格林函数,把整个波形分为 P 波部分(Pnl)和面部部分(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,充分考虑各部分对反演结果的贡献。考虑到不同震中距台站记录的波形存在数量级的差别,采用归一化的误差测量函数(公式),通过格点搜索方法在适当范围内循环震源深度、方位角、倾角、滑移角,得到相对误差最小时的震源机制解和震源深度。

$$e = \frac{\|u(t) - s(t)\|}{\|u(t)\| \cdot \|s(t)\|} \quad (4)$$

2 资料及模型

2.1 精确定位

莱州地震序列震中位于莱州市柞村镇(图 2),其北侧没有测震台站,周围台站平均间距约 40 km。选取震中距小于 300 km、能够尽量最大范围包围震中位置的台站参与定位,共计 34 个台站(图 2)。选取震相记录清晰且至少有四个台记录的可定位地震进行重新定位,经筛选符合条件的地震为 86 次。根据 Pg, Sg, Pn, Sn 的时距曲线,剔除有明显错误或者误差较大的震相数据,确定最后震相用于重新定位,其中 Pg 波记录 454 条, Sg 波记录 446 条, Pn 波记录 78 条, Sn 波记录 26 条。

双差定位虽然对速度模型的依赖性相对较小,但由于算法中采用了水平分层速度模型,震源所在层的速度值会对定位结果产生影响。该值虽不影响事件间的方位分布,但会影响事件簇分布图像的尺度,因而仍需尽可能地选用接近真实的地壳速度模型,参考利用层析成像、探测剖面资料、地震测深剖面技术得到的渤海湾西南缘地壳速度模型^[11-13],确定本文速度模型如表 1 所列。

表 1 地壳速度模型
Table 1 Crustal velocity model

深度/km	$v_p/(km \cdot s^{-1})$	v_p/v_s
0	4.00	
5	5.40	
10	6.10	
20	6.40	1.73
30	7.00	
35	8.10	

2.2 震源机制求解

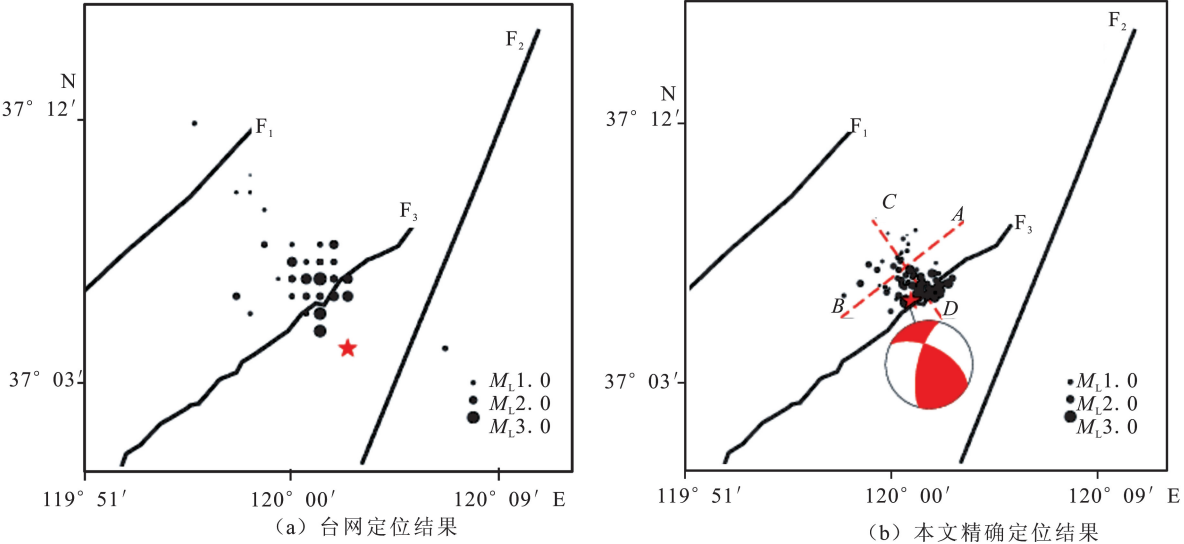
CAP 方法以精确定位的震中和发震时刻作为计算的参考数据,删除零漂过大、缺数等有明显错误的台站记录。莱州地震序列北侧为渤海湾,没有地震台站;西侧的东营、河口、垦利、潍坊、海化均为短周期仪器设备,无法用于 CAP 方法的反演计算。本文筛选出宽频带的招远(ZHY)、莱阳(LAY)、莱州(LZH)、安丘(ANQ)、长岛(CHD)、青岛(QID)、五莲(WUL)等 7 个相对包围震中较好的台站(图 2),震中距主要集中在 40~160 km。基于表 1 中速度模型,将原始的速度记录扣除仪器响应、积分到位移,再将位移记录从 UD-NS-EW 分量旋转成 Z-R-T 分量,分成 Pnl 和面波两部分,将 Pnl 部分经带宽为 0.04~0.2 Hz、面波部分经带宽为 0.02~0.1 Hz

的 4 阶 Butterworth 带通滤波器滤波。滤波即可以滤掉长周期的地脉动和由积分造成的长周期飘移,减少地壳精细结构和噪声带来的影响,又可以充分保留地震波携带的震源信息。根据 Pnl 和面波的波形特点,设置两者相对权重为 2:1,充分利用两者的振幅比对震源深度及机制解的更好约束。理论计算图采用频率-波数法(F-K 方法)^[4-5],根据传播矩阵计算地震的位移场分布,得到各种频率下的体波和面波波形。经上述处理,得到每个台的 Z 分量、R 分量的 Pnl 震相和 3 个分量的面波震相。

3 结果与讨论

3.1 莱州序列精确定位结果

莱州地震序列 86 个地震经双差法重新定位后,得到 75 个地震的基本参数。图 3 给出山东台网定位结果(图 3(a))与本文精确定位结果(图 3(b))的对比,重新定位后地震分布更为集中。其中 M4.6 地震精确定位后震中位置为 37.10°N,120.01°E,震源深度 6.8 km,山东台网定位结果为 37.07°N,120.04°E,震源深度 6 km,精确定位前后震中位置相差约 4.7 km。



F₁ 留村—莱州断裂;F₂ 马头—大固顶断裂;F₃ 柞村—仙乔断裂
(实心圆为序列地震震中位置,五角星为 M4.6 地震震中,震源球为 M4.6 地震震源机制)

图 3 莱州序列精定位与台网结果对比图

Fig.3 Comparison of the precise relocation results by the study and location results of the shandong Digital Earthquake Network Center

3.2 M4.6 地震震源机制

对 M4.6 地震采用 CAP 方法反演震源机制,图 4 是该地震震源机制随不同震源深度的变化,纵轴

为该理论模拟波形与实际观测波形的最小二乘拟合残差。每个深度反演得到的震源机制的两个节面参数基本相同,反演结果稳定。根据拟合残差,震源矩

心深度在 7 km 时,震源机制解反演方差达到极小值,该深度与 $M_{4.6}$ 地震精确定位深度 6.8 km 较为接近。

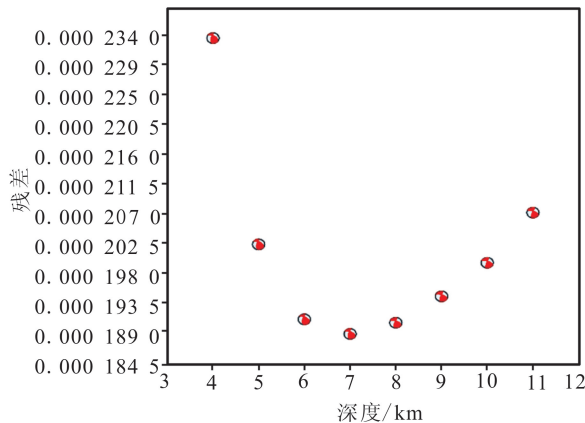


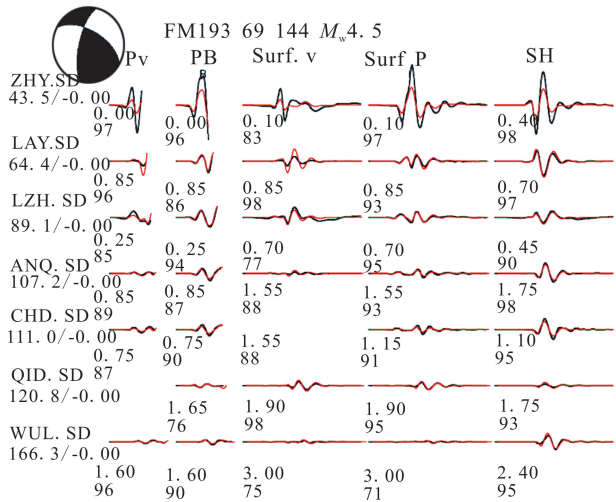
图 4 11 月 23 日 $M_{4.6}$ 地震 CAP 反演拟合残差与震源机制随深度的变化

Fig.4 Fitting error of the $M_{4.6}$ earthquake inverted by the CAP method and variation of focal mechanism with depth

图 5 给出 7 km 深度理论合成波形与实测波形的拟合情况,7 个台站记录的 35 个震相相关系数大于 0.7 的有 33 个,约占 94%;相关系数大于 0.9 的有 22 个,约占 63%;总体上理论地震图与观测地震图拟合较好,反演结果可信,反演方差为 $1.88\text{e}-4$ 。该深度对应的双力偶解为最佳震源机制解,其结果为:矩震级 $M_w=4.5$,节面 I 走向 193° 、倾角 69° 、滑动角 144° ,节面 II 走向 298° 、倾角 57° 、滑动角 25° 。

3.3 莱州序列发震构造讨论

莱州地震序列震中位于胶北地块,该区域内断裂十分发育,断裂的方位及发育程度明显受控于胶北地区的东、西边界两大断裂系统,即西部的 NNE 向郯庐断裂和东部的牟平—即墨 NE 向断裂。这两类断裂是区内最醒目的线性构造,东西向古断裂常被其切割,北西向断裂形成时代晚,常受其限制^[14]。莱州地震序列周围有三条断裂,离震中最近的断裂为柞村—仙岔断裂,其走向 225° ,倾向 315° ,倾角 65° ,该断裂切割震旦纪玲珑超单元,为燕山晚期伟德超单元所侵,带内岩性为碎裂岩、糜棱岩,发育断层泥。震中东侧为马头—大崮顶断裂,其走向 20° ,倾向 110° ,倾角 75° ,断裂被 NW 向断裂切割,带内发育碎裂岩化,挤压面为不规则状、波状弯曲。震中西北侧为留村—莱州断裂,其走向 $240^\circ\sim 260^\circ$,倾向 $330^\circ\sim 350^\circ$,倾角为 $60^\circ\sim 90^\circ$,断裂为粉子山群与栖霞超单元之边界,沿带有玲珑超单元脉状体贯入,并遭韧性切割,带内发育挤压构造片岩、花岗质碎裂岩



红线是理论地震图,黑线是观测地震图;波形下第 1 行数字为理论地震图相对观测地震图的移动时间 1 s,第 2 行数字为二者的相关系数 / %

图 5 $M_{4.6}$ 地震 CAP 方法反演的震源机制解、理论地震图和观测地震图对比

Fig.5 Focal mechanism and comparison between the synthetic and observed seismograms of the $M_{4.6}$ earthquake inverted by the CAP method

及各种碎裂岩石^[15]。上述三条断裂中留村—莱州断裂、马头—大崮顶断裂倾向均背离地震序列震中位置,不可能为发震断层。

精确定位结果位于柞村—仙岔断裂的 NW 一侧,与柞村—仙岔断裂空间位置、走向、倾向特征较为吻合(图 3)。结合 $M_{4.6}$ 地震震源机制解,其中节面 I 走向 193° 、倾角 69° 、滑动角 144° ,与柞村—仙岔断裂走向 225° 、倾角 65° 较为接近,初步推测柞村—仙岔断裂可能为莱州地震序列的发震断层。

沿柞村—仙岔断裂的垂直方向(图 3 中 C-D 方向)对精确定位结果剖面分析,整个地震序列震源深度集中在 $4\sim 9$ km,优势深度分布为 $5\sim 7$ km(图 6),表明地震的主体破裂发生在上地壳。从 SE 方向到 NW 方向断层深度呈由浅逐渐变深的趋势(图 6),倾向为 NW 方向,与柞村—仙岔断裂产状接近一致。

震后山东省地震局及烟台市地震局迅速开展了对震害造成的受损建筑物的排查和震后灾害评估工作^①,并快速计算得出较为精确的震区烈度图(图 7)。根据调查,地震宏观震中位于莱州市柞村镇小台头村村西,地理坐标为 $37.11^\circ\text{N}, 120.00^\circ\text{E}$,与精

① 山东省地震局.20131123 山东省莱州市 $M_{4.6}$ 级地震宏观调查报告.2013

确定位结果相差 1.6 km,与台网定位相差 6.3 km。震中最大地震烈度为 V 度,长轴走向 NE,西南起自柞村镇大马驿村,东北至东李家庄菜园村一带,约 20 km;短轴走向 NW,西北起自文昌路街道东升村附近,东南至柞村镇盟格庄带,约 11 km。宏观调查表明 V 度区等震线长轴方向与柞村—仙亢断裂走向基本一致,绝大部分 V 度区位于柞村—仙亢断裂倾向一侧(NW 方向),据此推测柞村—仙亢断裂为莱州地震序列的发震断层得到进一步证实。

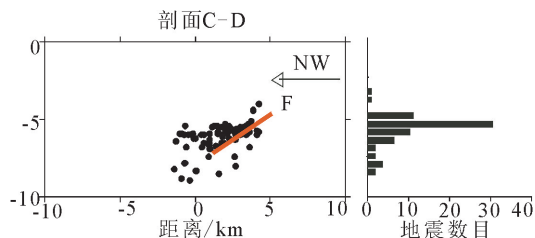
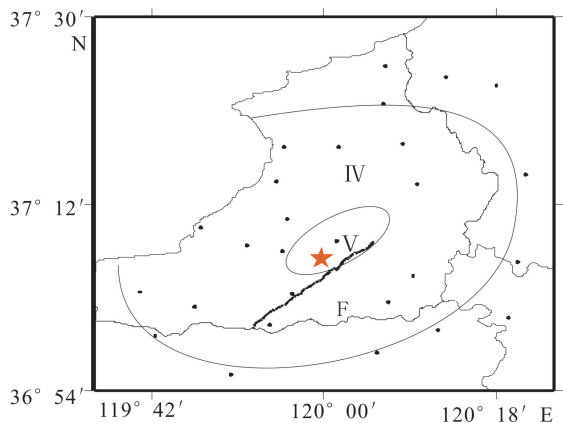


图 6 沿 C-D 剖面的震源深度分布图(F 为推测的断层位置)

Fig. 6 Distribution of the focal depths along C-D cross-section (F is the inferred fault location)



五角星为宏观震中位置;F 为柞村—仙亢断裂;实心圆圈为乡镇

图 7 莱州 M4.6 地震烈度分布图

Fig.7 Intensity map of the Laizhou M4.6 earthquake

4 结论

(1) 经双差定位法对莱州序列 86 个地震精确定位后,获得 75 个地震基本参数。精确定位震中位置主要位于柞村—仙亢断裂的 NW 方向,与柞村—仙亢断裂位置、走向、倾向特征较为吻合。整个地震序列深度集中在 4~9 km,其中优势深度为 5~7 km,地震的主体破裂发生在上地壳。沿柞村—仙亢断裂的垂直方向对精确定位结果剖面分析,结果表明:从 SE 方向到 NW 方向断层深度有由浅逐渐变深的趋势,倾向为 NW 方向,与柞村—仙亢断裂产

状接近一致。

(2) 利用 CAP 方法反演莱州 M4.6 地震震源机制解,在震源矩心深度 7 km 附近对应的双力偶解为最佳震源机制解。其结果为:矩震级 $M_w=4.5$,节面 I 走向 193° 、倾角 69° 、滑动角 144° ;节面 II 走向 298° 、倾角 57° 、滑动角 25° 。其中节面 I 与柞村—仙亢断裂产状较为接近。

(3) 综合精确定位震中位置、剖面深度分布特征、M4.6 地震震源机制解及宏观调查烈度分布等结果与柞村—仙亢断裂产状之间的关系,初步推测柞村—仙亢断裂可能为莱州地震序列的发震断层。

致谢:山东省莱州地震现场工作队提供了宏观调查报告资料,王冬雷、许洪泰等在地质构造、断层解译等方面给予了帮助,韩立波博士、郑建常博士、李金、李霞等在程序运行、方法计算方面对本文提供了帮助,在此一并表示谢意!

参考文献(References)

- [1] Geiger L. Probability Method for the Determination of Earthquake Epicenters from Arrival Time Only[J]. Bull. St. Louis Univ., 1912: 60-71.
- [2] Waldhauser F, Ellsworth W L. A Double-difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California[J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 2000, 90(6): 1353-1368.
- [3] 杨智娴, 陈运泰. 用双差地震定位法再次精确测定 1998 年张北—尚义地震序列的震源参数[J]. 地震学报, 2004, 26(2): 115-120.
Yang Z X, Chen Y T. Relocation of the 1998 Zhangbei—Shangyi Earthquake Sequence Using the Double-difference Earthquake Location Algorithm[J]. Acta Seismologica Sinica, 2004, 26(2): 115-120. (in Chinese)
- [4] Zhu L P, Helmberger D V. Advancement in Source Estimation Techniques Using Broadband Regional Seismograms[J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 1996, 86(5): 1634-1641.
- [5] Zhao L S, Helmberger D V. Source Estimation from Broadband Regional Seismograms[J]. Bull. Seis. Soc. Amer., 1994, 84(1): 91-104.
- [6] 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 Y, Ma H S, Lü J, et al. Source Mechanism of Strong Aftershock of ($M_s \geq 5.6$) of Wenchuan Earthquake and the Implication for Seismotectonic[J]. Sci. China: Ser. D, 2009, 39(4): 413-426. (in Chinese)
- [7] 韦生吉, 倪四道, 崇加军, 等. 2003 年 8 月 16 日赤峰地震: 一个可能发生在下地壳的地震? [J]. 地球物理学报, 2009, 52(1): 111-119.
Wei S J, Ni S D, Chong J J, et al. The 16 August 2003 Chifeng

Earthquake:Is It a Lower Crust Earthquake? [J].Chinese J Geophys,2009,52(1):111-119.(in Chinese)

[8] 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定位[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)

[9] 曲均浩,刘瑞峰,李金,等.CAP 方法反演 2014 年山东乳山 $M4.2$ 、 $M4.0$ 级地震震源机制解[J].地震工程学报,2014,4(4):1076-1080.
Qu J H,Liu R F,Li J,et al.Focal Mechanism of $M4.2$ 、 $M4.0$ Earthquakes in Shandong Rushan in 2014 Inverted by the CAP Method[J].China Earthquake Engineering Journal,2014,4(4):1076-1080.(in Chinese)

[10] 李晓峰,裴惠娟,徐辉,等.2013 年 7 月 22 日岷县漳县 6.6 级地震震源机制解[J].地震工程学报,2013,35(3):459-462.
Li X F,Pei H J,Xu H,et al.Focal Mechanism of the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake [J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(3):459-462.(in Chinese)

[11] 张岭,刘劲松,郑天珧,等.利用 Ground-Truth 资料和 Messy GA 方法反演渤海湾盆地及其邻区地壳 P 波速度模型[J].地球物理学进展,2005,20(1):186-197.
Zhang L,LIU J S,Zheng T Y,et al.Inverse Crustal P-wave Velocity Model of Bohai Bay Basin and Its Adjacent Area by Using Messy GA with Ground-Truth Data [J].Progress in Geophys,2005,20(1):186-97.(in Chinese)

[12] 王帅军,王夫运,张建狮,等.渤海湾西南缘及其邻近地区地壳结构特征[J].地震地质,2013,35(2):278-289.
Wang S J,Wang F Y,Zhang J S,et al.Crustal Structure and its Features in the Southwest Margin of Bohai Bay and Adjacent Areas[J].Seismology and Geology,2013,35(2):278-289.(in Chinese)

[13] 李霞,刘希强,李亚军,等.山东及邻区地震的重新定位及其与活动构造的关系[J].中国地震,2012,28(4):381-392.
Li X,Liu X Q,Li Y J,et al.Relocation of Earthquake in Shandong and its Neighboring Areas in China and Relationship Between Their Tectonics [J].Earthquake Research in China,2012,28(4):381-392.(in Chinese)

[14] 吴时国,余朝华,邹东波,等.莱州湾地区郯庐断裂带的构造特征及其新生代演化[J].海洋地质与第四纪地质,2006,26(6):101-110.
Wu S G,Yu Z H,Zou D B,et al.Structural Features and Cenozoic Evolution of the Tan-lu Fault Zone in the Laizhou bay, Bohai Sea [J].Marine Geology and Quaternary Geology,2006,26(6):101-110.(in Chinese)

[15] 孔庆友,邹国强.山东省矿产资源储量报告编制指南[M].济南:山东省地图出版社,2010:274-280.
Kong Q Y,Zou G Q.Preparation Guidelines of Shandong Province Mineral Resources Reserves Report [M].Jiannan: Map Publishing House of Shandong Province,2010:274-280.(in Chinese)

更正

因原稿有误,在本刊 2015 年第一期上发表的“天津地区覆盖层土动力学参数统计分析”一文,将通讯作者(即第四作者)“郭宝震”名字错写成“郭保正”,在此更正。