



西藏米林M6.9级地震及其余震序列地震定位

韦伟¹, 谢超^{1,2}, 周本刚^{1*}, 郭志¹, 尹昕忠¹, 李保华³, 王萍¹, 董绍鹏¹, 魏费翔¹, 王禹钦¹

1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029;

2. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036;

3. 云南省地震局, 昆明 650224

*联系人, E-mail: zhoubg@ies.ac.cn

2017-12-08 收稿, 2018-03-31 修回, 2018-04-02 接受, 2018-05-09 网络版发表

地震行业科研专项(201508024)和中央级公益性科研院所基本科研业务专项(IGCEA1711)资助

摘要 利用布设在南迦巴瓦构造结及其周边地区流动地震台的观测数据, 测定了2017年11月18日西藏米林M6.9级地震的主震位置, 主震震中位于29.87°N, 95.05°E, 震源深度12 km. 采用Geiger法和双差定位法对余震序列进行了地震定位. 定位结果表明余震沿着主震的北西和南东向两侧扩展分布, 其展布长度约40 km, 宽度约10 km. 米林地震发生在西兴拉断裂带最南侧的一条次级断裂上, 震源深度剖面 and 主震震源机制研究结果揭示发震断层以高角度、北东倾向为主要特征, 米林地震触发了靠近主震发震断层北东侧一条近平行断层的地震活动. 米林地震表明, 南迦巴瓦构造结顶部目前仍处于较高的构造挤压状态, 南迦巴瓦变质体持续向北东方向推进, 导致构造结内部块体缩短变形, 其东西两侧的墨脱断裂和米林断裂存在未来发生大震的可能性.

关键词 西藏米林地震, 地震定位, 南迦巴瓦构造结, 逆冲断裂, 震源机制

据中国地震台网中心测定, 北京时间2017年11月18日6时34分, 西藏自治区林芝市米林县发生了M6.9级强烈地震(简称米林地震), 震中位于29.75°N, 95.02°E, 震源深度10 km, 这是继1950年察隅Ms 8.6级大地震之后, 西藏林芝地区发生的最强烈的一次地震事件. 米林地震发生之后, 余震活动十分频繁, 仅在地震当天, 发生余震超过200次, 其中最大的一次余震为5.0级, 发生在林芝市巴宜区.

米林地震发生在南迦巴瓦峰(海拔7784 m)的北缘, 喜马拉雅东构造结的核心部位, 是印度、欧亚板块碰撞汇聚的前缘地带. 作为青藏高原挤压隆升演化过程中地壳运动与构造变形最为强烈的地区, 喜马拉雅东构造结以其巨大的地貌差异和复杂的构造格局, 直接地反映出多期构造变形的不断叠加和反复改造^[1,2]. 喜马拉雅东构造结主要由南迦巴瓦构造结、桑构造结以

及阿萨姆构造结所组成, 其中南迦巴瓦构造结位于派镇与图定之间, 为南迦巴瓦地块向NE方向倾伏到冈底斯岛弧地块之下的过程中形成的大型背形构造^[3,4]. 构造结东、西边界分别为墨脱断裂和米林断裂, 其顶部发育了宽约13 km、北西走向的西兴拉和迫龙-旁辛断裂构造带(图1).

为了研究南迦巴瓦构造结的地震活动性及其隆升动力学机制, 国内外学者在南迦巴瓦构造结及周边地区所开展的宽频带流动地震观测项目一直在持续进行, 取得了丰富的研究成果^[8~15]. 先前的研究表明, 南迦巴瓦构造结及周边地区3.0级以上地震数量较少且分布比较分散, 该区整体地震活动性水平较弱^[9]. 米林地震发生后, 中国地震局地质研究所迅速启动应急响应, 科考队成员于当日下午15:30分赶赴机场, 次日清晨到达林芝地区, 并立即开展野外地震地质考察、地震灾

引用格式: 韦伟, 谢超, 周本刚, 等. 西藏米林M6.9级地震及其余震序列地震定位. 科学通报, 2018, 63: 1493–1501

Wei W, Xie C, Zhou B G, et al. Location of the mainshock and aftershock sequences of the M6.9 Mainling earthquake, Tibet (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 1493–1501, doi: 10.1360/N972017-01286

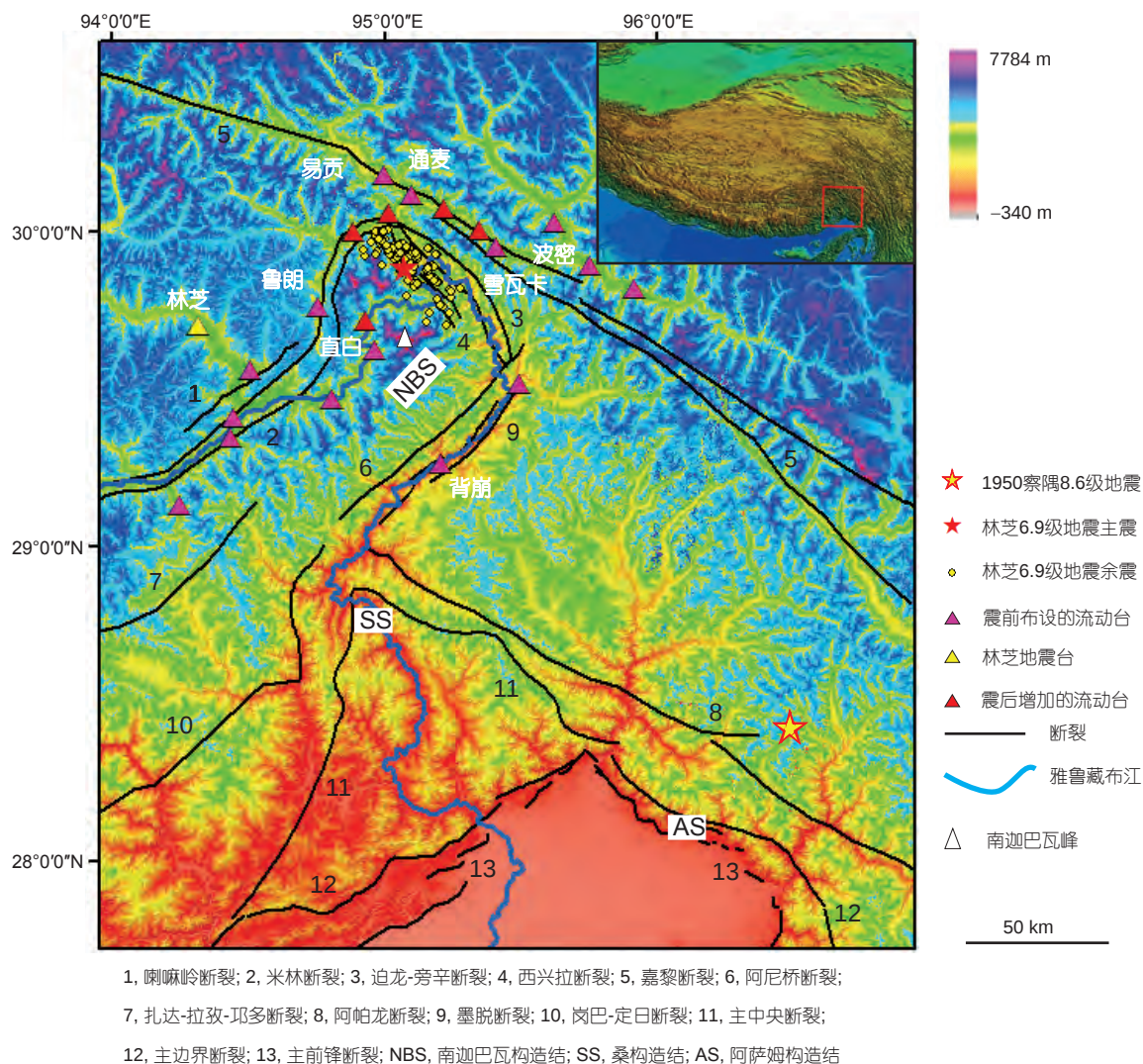


图1 研究区域主要活动断裂分布图。断裂分布改自邓起东等^[5]; 西藏自治区1:25万地质图^[6]; 西藏自治区1:50万地质图^[7]; 中国地震局地质研究所内部资料

Figure 1 Distribution of major active faults of the study region. The locations of faults are modified from Deng et al.^[5], the 1:250000 Geological Map of Tibet Autonomous Region^[6], the 1:500000 Geological Map of Tibet Autonomous Region^[7], and the internal data from Institute of Geology, China Earthquake Administration

害调查以及对布设在该地区的宽频带流动地震台地震数据回收和处理方面的工作。科考队成员于11月23日公布了米林地震主震以及震后2 h余震的初步定位结果。定位结果显示余震呈北西向分布, 主要发生在一个高角度、偏北东倾向的狭小空间内(<http://www.eq-igl.ac.cn/contents/41/29071.html>)。

1 台站和数据

在地震行业专项“南迦巴瓦地区水电工程地震安全性评价关键技术研究”的支持下, 项目组成员在南迦

巴瓦构造结地区布设了15套宽频带地震仪, 主要目的是为了监测该地区的地震活动性和危险性, 为发震构造鉴定以及地震构造模型建立提供地震数据支撑。前人的研究表明, 南迦巴瓦地区的地震主要分布在南迦巴瓦构造结的顶部和东南边缘^[9,16]。因此我们在流动地震台选址上首要确保地震台网能够对地震多发区进行良好的空间覆盖, 提高地震监测能力和定位精度。另外, 流动地震台还要尽量保持均匀分布的特性, 这对于研究地区的三维结构和构造比较有利。布设的流动地震台站位置如图1所示, 台站间距大致为10~20 km,

所用地震计为CMG-3ESPC, 数据采集器为REFTEK-130. 流动站台的观测时间预定为2年, 从2016年8月~2018年8月.

米林地震发生后, 我们尽快回收了流动地震台站记录的地震数据, 除波密台由于电瓶供电问题, 地震记录出现中断外, 其余14个地震台对本次米林地震的主震和余震序列都有完整的地震记录. 图2(a)和(b)分别显示流动地震台站记录的米林地震主震事件和一次余震事件的波形数据. 由于布设的台站距离米林地震震中较近, 震中距小于120 km (图2(a)), 所有台站对于主震的观测记录都出现了大振幅限幅现象, 但是这些台站都记录了非常清晰的P波初至 (图2(a)), 可用于主震定位. 由于观测资料具有较好的信噪比, 在地震图上可以比较准确地标识余震事件的P波和S波的初至到时 (图2(b)), 这些近震数据对于提高米林地震余震序列的地震定位精度有着非常重要的作用.

2 主震震源机制

米林地震发生之后我们使用IRIS分布在全球的宽频带地震台记录的主震波形资料, 采用W-phase震相波形资料拟合反演方法^[17-19], 开展震源机制反演工作获

得主震的震源机制. 反演开始之前对原始波形资料进行重新采样为1 SPS. 去除波形资料中的均值、趋势和仪器响应信息. 最后使用带宽为150~70 s, 4阶Butterworth带通滤波器对原始数据进行滤波. 为了获取可靠反演结果, 首先开展三次初步反演, 挑选拟合误差较小的台站数据参加接下来反演. 初步反演中根据实际观察资料与理论波形图的均方差, 去除拟合误差较大的台站数据. 经过挑选获得24台站, 41个三分量数据. 最后使用初步反演挑选剩下波形资料, 开展空间搜索(经度, 纬度及深度)获取最终的反演结果. 反演结果表明米林地震的两个可能发震断层为: 节面I, 走向117.5°, 倾角30.2°, 滑动角70.4°; 节面II, 走向319.9°, 倾角61.7°, 滑动角101.0°. 矩震级 M_w 6.45(图3(a)). 图中也给出其他研究机构发布的震源机制解作为对比. 可以看出(图3(a)), 本文获取的结果与中国地震台网中心及哈佛大学结果比较接近; 而与USGS发震断层倾角存在明显差异(约25°). 本研究及USGS都是使用W-phase反演方法获取震源机制, 推测可能受到反演中使用Butterworth滤波器带通频率及台站资料影响, 导致本研究获取震源机制解与USGS存在明显差异. 总体来说, 本研究及其他研究机构发布结果都表明本次地震为逆断

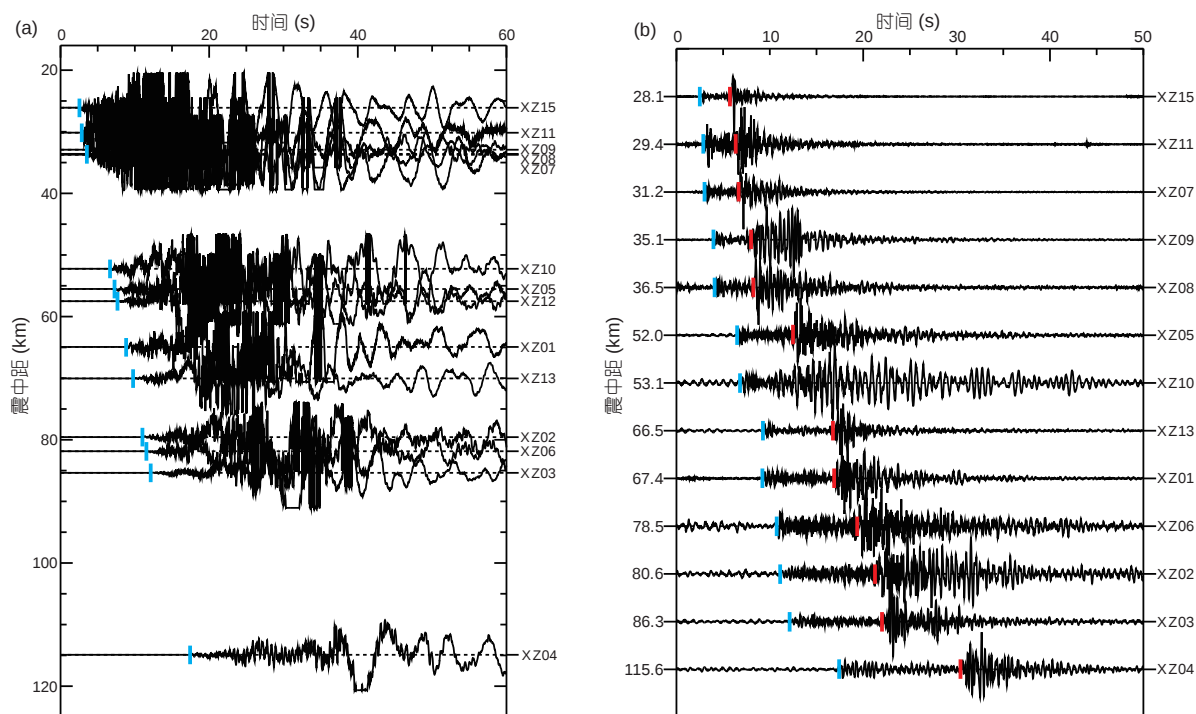


图2 流动地震台站垂直分量记录的米林地震主震事件(a)及一次余震事件(b)的波形. 蓝色和红色短线分别代表人工拾取的P波和S波初至到时
Figure 2 Vertical-component seismograms of the Mainling earthquake (a) and one aftershock (b) recorded by temporary seismic stations. The blue and red short lines represent the hand-picking onset times of the P- and S-wave first arrivals, respectively

层地震破裂事件. 图3(b)给出部分参加反演台站的波形拟合对比图, 从波形拟合图中可以看出, 实际观测波形与理论波形拟合较好. 波形拟合图右边地图给出参加反演所有地震台站的空间分布(橙色圆点), 图中(图3(b))显示西面及北面台站分布较为稀疏, 南面及东面覆盖相对较为密集, 总体来说台站的空间分布可以为获取稳定可靠的震源机制解提供足够的方位角覆盖.

3 地震定位

随着地震观测技术的进步和地震学方法的不断发展, 目前地震定位方法比较成熟, 普遍采用Geiger法^[20,21]对主震和余震序列进行绝对定位, 再利用双差定位法^[22]对余震序列进行相对定位, 提高定位精度. 本

研究中, 我们利用HYPOINVERSE2000软件(<https://earthquake.usgs.gov/research/software/#HYPOINVERSE>) 确定地震发震位置, 利用hypoDD软件对余震序列进行精确定位 (<http://www.ldeo.columbia.edu/~felixw/hypoDD.html>).

3.1 主震定位

对于本次米林地震的震中位置, 不同机构给出的测定结果存在一定的差异. 中国地震台网中心的定位结果为29.75°N, 95.02°E, 震源深度10 km (<http://news.ceic.ac.cn/CC20171118063419.html>), 美国地质调查局(USGS)定位结果为 29.83°N, 94.98°E, 震源深度8 km (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/>

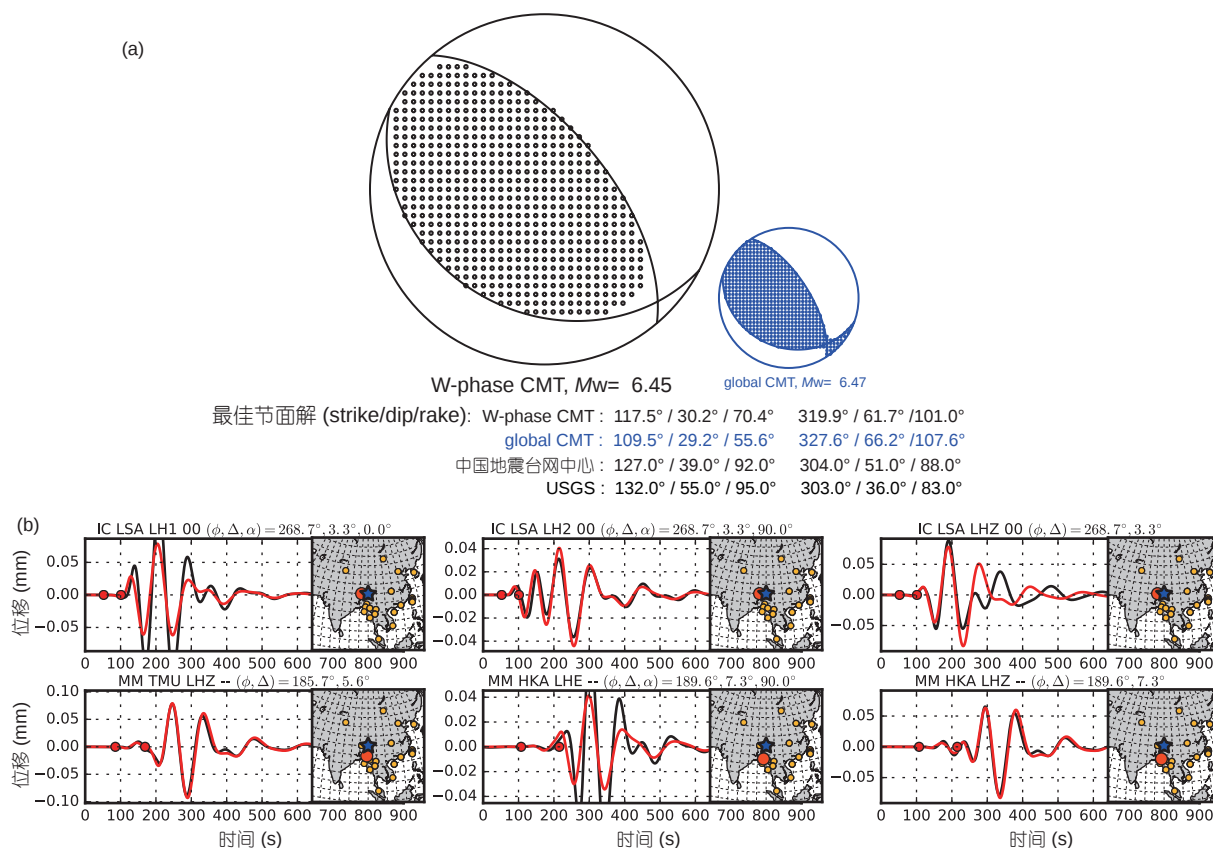


图3 米林地震主震震源机制解与其他研究机构发布结果对比(a)和参加W-phase反演部分台站的波形对比(b). 波形对比图中黑色曲线表示实际观测资料, 红色曲线表示理论波形图, 波形曲线中两个红色圆圈中间部分波形表示参加W-phase反演的波形资料. 波形拟合对比图右边地图给出所有参加W-phase反演地震台站的分布图. 红色圆圈表示当前台站的位置, 橙色圆圈表示参加反演其他台站的位置, 蓝色五角星表示震中位置

Figure 3 (a) Comparison of the source mechanism of the Mainling earthquake obtained by this study with results of others. (b) Comparison of the waveform data used in the W-phase inversion. The observed waveforms and corresponding synthetics computed from the updated W-phase solution are represented by black and red curves, respectively. The W-phase time window is bounded by two dots. All the stations used in the W-phase inversion are shown on the right part of each map of waveform fitting. The red circle denotes the location of the station that records the waveform data on each map, while the orange circles denote other stations that are also used in the W-phase inversion. The blue star shows the location of the Mainling earthquake

us2000bqsn#executive); 全球质心矩张量解 (GCMT) 目录给出的定位结果为 29.70°N , 95.14°E , 震源深度12 km (<http://www.globalcmt.org>); 中国科学院青藏高原研究所科研人员利用近台和远台数据的重定位结果为 29.87°N , 95.02°E , 震源深度7 km^[23]。我们在该地区布设的流动台站围绕主震有着较好的空间方位覆盖, 非常有利于主震和余震序列的精定位(图1)。由于南迦巴瓦地区地质构造复杂, 研究程度较低, 目前对该地区的精细结构还缺乏了解。在对主震定位过程中, 我们尝试使用了不同的初始模型, 主要包括(1) Crust1.0模型, (2) 1维区域速度模型^[24], (3) 3维区域速度模型^[25]。利用这3种模型对于主震事件重定位结果在经纬度方向上比较一致, 即震中位于 29.87°N , 95.05°E 。对于主震深度, 利用速度模型(2)和(3)的定位结果比较一致, 在本研究中我们采用(2)的定位结果, 即主震的震源深度为12 km。水平和垂直方向上的定位误差分别为0.5和1.0 km, 定位后走时残差均方根(RMS)为0.1 s。在主震定位研究中, 我们使用的距离震中最近的台为通麦台, 震中距为26 km, 距离震中35 km内的台站共5个, 分别为通麦台、直白台、鲁朗台、易贡台和雪瓦卡台(图1), 这些近台位于主震不同方位, 所记录的地震数据能够比较准确地限定主震的发震位置。

3.2 余震定位

米林地震发生之后余震活动频繁, 所布设的流动地震台站获得了大量的余震记录。对余震事件的精定位, 了解其时空变化特征, 有助于了解发震断层, 破裂的延展范围。由于缺乏研究区地区尺度的三维速度模型以及可靠的泊松比资料, 在本研究中, 只采用P波数据对余震序列进行定位, 使用的模型为1维分层速度模型^[16,24]。该模型将南迦巴瓦地区地壳结构分为两层, 在上地壳(0~25 km), P波速度为6 km/s; 在下地壳(25~55 km), P波速度为6.6 km/s; 在上地幔顶部, P波速度为8.1 km/s。采用Geiger法定位后, 余震序列在水平向上的平均定位误差为0.6 km, 平均RMS残差为0.07 s, 在主震过后28 h内, 共定位余震148个。为了提高余震序列的定位精度, 本研究中还采用了双差定位方法, 该方法利用相对走时残差来修订地震位置, 对地壳速度模型的依赖性相对较小。使用双差定位后, 余震序列在南北、东西和垂直向上平均定位误差分别为0.23, 0.26和1.43 km, 平均RMS残差为0.04 s, 平均定位误差和残差进一步减小。

4 余震分布特征

图4展示了主震和余震序列分布的平面图和纵剖面图。从平面图上看, 余震以主震为中心, 沿着主震的北西和南东向两侧扩展分布, 其中主震北西向的余震数量明显多于东南向的余震数量。这条余震分布带的西边界距离拉月村约8 km(图4), 东边界位于南迦巴瓦峰的东北缘(图1)。余震展布宽度沿北西-南东走向发生明显变化, 在余震带的西边界, 余震分布宽度为5 km左右, 在米林地震附近, 余震分布宽度可达10 km, 主要分布在断裂F1和F2上(图4)。西藏自治区1:25万地质图^[6]显示西兴拉断裂带可能是由两条(F1和F2)或一组北东倾向的次级断裂组成, 米林地震发生在其最南侧的一条次级断裂(F1)上。

纵剖面图显示了余震序列的时空变化。如剖面 AA' , BB' , CC' 和 DD' 所示, 震后两小时的定位结果显示余震主要发生在一个高角度, 北东倾向的狭小空间, 我们认为该时间段内的余震主要发生在发震断层面F1上, 发震断层以高倾角, 北东倾向为主要特征。剖面 EE' 的走向为 135° ($E'E$ 走向为 315°), 与F1断裂带西侧的走向近平行(图4), 与主震震源机制两组解中节面II的走向(319.9°)比较一致, 另外节面II的高倾角特征也与F1断层面余震分布的特征比较一致(图4), 上述结果表明主震震源机制解中的节面II(图3)为发震断层面F1(图4)。震源深度剖面显示震源区的破裂长度约为40 km(剖面 EE'), 破裂宽度约为12 km(BB')。定位结果显示, 米林地震还触发了靠近主震发震断层北东侧一条近平行断层F2的地震活动。除了断层F2, 主震还可能触发了其他邻近断层的地震活动, 例如沿 BB' 剖面, 在断层F1和F2之间可能还存在一条与F1和F2近平行的断层; 而沿 CC' 和 DD' 剖面, 在断层F2东北侧, 可能还存在一条高角度, 与断层F1和F2近平行的断层。本研究结果表明西兴拉断裂带可能由一组高角度近平行的断层组成。沿 EE' 剖面余震分布结果显示, 余震发生在15 km之上, 在主震的西北沿线, 余震震源深度较深, 数量较多, 而在其东南沿线, 余震数量较少, 震源深度大多在10 km之内。米林地震发生后, 科考队成员在南迦巴瓦构造结及其周边地区增加了5个流动地震台观测点(图1), 使得距离主震震中35 km内的台站从5个增加到10个, 提高了台网对震源区的空间覆盖程度, 这对后续余震的精定位, 更深入地了解本次林芝地震的发震构造有着非常重要的作用。

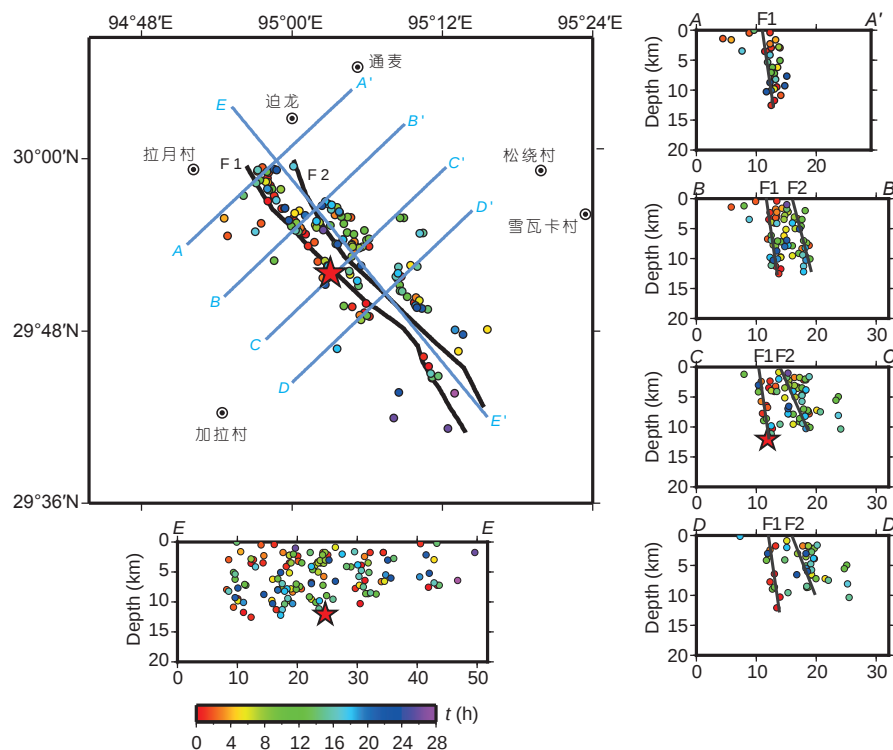


图4 余震分布的横剖面 and 纵剖面图。红色五角星代表主震的发震位置, 彩色圆点代表余震的分布位置, 颜色代表主震后的时间。横剖面图上的黑色实线F1和F2表示西兴拉断裂带的两条次级断裂(据西藏自治区1:25万地质图^[6]); 纵剖面图上的黑色实线表示推测的发震断层F1以及其北东侧断层F2在上地壳中的位置分布, 地震到剖面轴线的距离小于7 km

Figure 4 Map view and vertical cross sections of aftershock distribution. The red star indicates the mainshock of the Mainling earthquake. The locations of aftershocks are represented by solid circles. Colors in circles denote the times after the mainshock. Black lines F1 and F2 on the map view denote the geometry of the two faults in the Xixingla fault zone (1:250000 Geological Map of Tibet Autonomous Region^[6]). On the cross sections, the black solid lines represent the speculated location of seismogenic fault F1 and another fault F2 that is located in NE side of F1 in the upper crust. The aftershocks located within 7 km from each profile are projected

5 讨论和结论

利用布设在南迦巴瓦东构造结及其周边的近台数据, 对米林地震的主震及其余震序列进行了地震定位。定位结果显示, 米林地震震中位于 29.87°N , 95.05°E , 即地震发生在南迦巴瓦构造结顶部的北西向西兴拉及迫龙-旁辛断裂构造带内, 震源深度12 km。我们的定位结果与中国地震台网中心定位结果在水平向上相差约13 km, 由于我们在定位过程中使用了较多的近台数据, 定位结果更加可靠, 与余震的分布位置更加协调。GPS主应变率分布显示, 本次地震震源区以NE-SW向的挤压应变为主, 且该地区处于最大剪应变率和面应变率的高梯度带上(<http://www.eq-igl.ac.cn/contents/43/29092.html>)。同时, GPS同震位移场结果显示出了震源区北东侧地壳隆升, 西南侧地壳下降的NE-SW向地壳运动特征(<http://www.eq-igl.ac.cn/contents/43/29092.html>)。

结合主震震源机制及余震分布特征, 认为米林地震发震构造为一条北东倾向, 高角度的逆冲断裂F1。主震震源机制研究表明F1断裂以逆冲为主兼具右旋走滑特征(图3), 揭示构造结顶部西兴拉断裂带内的构造活动特征以挤压为主兼右旋侧向挤出。先前的研究表明, 逆冲型地震的余震分布通常较为复杂^[26-29], 本研究的余震定位结果显示米林地震触发了其北东侧一条近平行的断层活动(图4)。

南迦巴瓦构造结位于印度大陆与欧亚大陆碰撞的前缘部分, 碰撞导致的强烈挤压使南部印度大陆向北楔入欧亚大陆, 使雅鲁藏布江缝合带在该地区强烈错位和急剧转折形成的拇指状构造结, 在构造结内部形成海拔7400 m以上的南迦巴瓦峰和加拉白垒峰。谢超等人^[30]根据东喜马拉雅构造结不同区域构造地貌特征, 并结合GPS速度场资料, 认为目前南迦巴瓦变质体向北的推进速度已经非常缓慢, 在其顶部形成较弱的构造

挤压应力, 导致南迦巴瓦构造结相对于其东南侧区域具有较小的隆升速率. 南迦巴瓦构造结在3.5~3.2 Ma时间段内的剥蚀速率达到10 mm/a, 2.2 Ma至今的剥蚀速率降低至3.0 mm/a^[31], 间接反映了构造结受到较小的构造挤压, 其隆升强度在逐渐减弱. 米林地震表明, 南迦巴瓦构造结顶部目前仍处于较高的构造挤压状态, 南迦巴瓦变质体持续向北东方向推进, 导致构造结内部块体缩短变形. 南迦巴瓦构造结东、西两侧的墨脱断裂和米林断裂全新世以来均发生过强烈的活动^[32], 1862年林芝西南约20 km发生了6.4级地震, 距米林断裂约17 km, 目前尚没有发现此次地震形成的地表破裂, 无法判断其发震构造. 米林断裂和墨脱断裂附近历史上没有发生大地震的文字记录. 综上所述, 南迦巴瓦变质体向北东方向的运动有可能增加墨脱断裂和米林断裂未来发生大震的可能性.

米林地震发震构造面表现为北西走向, 倾向北东的高角度断层, 为一逆冲兼走滑型地震. 这次地震反映

了南迦巴瓦变质体现今持续向北东方向推进, 南迦巴瓦构造结顶部目前仍有构造挤压应力积累, 构造挤压形成的变质体内部的缩短变形可能是南迦巴瓦背斜现今持续隆升的主要机制. GPS资料显示在印度板块框架下, 欧亚板块向南运动的分量存在明显的差异, 即板块在阿萨姆地区向北运动的速度大于在南迦巴瓦构造结地区向北的运动速度^[33], 导致阿萨姆构造结区域形成了明显强于南迦巴瓦构造结顶部的构造挤压, 该区域也成为了东喜马拉雅地区的隆升中心^[30]. 在挤压应力、应变快速积累的构造环境下, 阿萨姆构造结区域1950年发生了8.6级察隅大地震, 该次地震发震断裂受近南北向压应力作用, 构造面NWW走向、倾向NNE^[34], 与米林地震发震断层面几何特征相似, 所处的构造应力场基本一致, 均受到印度板块向北持续推进、挤压的作用. 但阿萨姆构造结区域相对于南迦巴瓦构造结顶部构造挤压作用更为强烈. 因此, 阿萨姆构造结区域未来发生特大地震的可能性要明显高于南迦巴瓦构造结区域.

致谢 本项目观测数据由中国地震局科学探测设备取得, 两位审稿专家对论文进行了认真审阅并提出了宝贵的修改意见, 在此表示感谢.

参考文献

- 1 Zhong D L, Ding L. Dynamic mechanism of the uplift of the Tibetan Plateau (in Chinese). *Sci China Ser D-Earth Sci*, 1996, 326: 289–295 [钟大赉, 丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨. *中国科学D辑: 地球科学*, 1996, 326: 289–295]
- 2 Xu Z Q, Cai Z H, Zhang Z M, et al. Tectonics and fabric kinematics of the Namche Barwa terrane, Eastern Himalayan Syntaxis (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2008, 24: 1463–1476 [许志琴, 蔡志慧, 张泽明, 等. 喜马拉雅东构造结—南迦巴瓦构造及组构运动学. *岩石学报*, 2008, 24: 1463–1476]
- 3 Burg J P, Nievergelt P, Oberli F, et al. The Namche Barwa syntaxis: Evidence for exhumation related to compressional crustal folding. *J Asian Earth Sci*, 1998, 16: 239–252
- 4 Ding L, Zhong D, Yin A, et al. Cenozoic structural and metamorphic evolution of the eastern Himalayan syntaxis (Namche Barwa). *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 192: 423–438
- 5 Deng Q D, Ran Y K, Yang X P, et al. Map of Active Tectonic in China (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2007 [邓起东, 冉勇康, 杨晓平, 等. 中国活动构造图 (1:400万). 北京: 地震出版社, 2007]
- 6 The 1:250000 Geological Map of Tibet Autonomous Region (in Chinese). Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, 2003 [西藏自治区1:25万地质图. 成都地质矿产研究所, 2003]
- 7 The 1:500000 Geological Map of Tibet Autonomous Region (in Chinese). Tibet Autonomous Region Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, 1999 [西藏自治区1:50万地质图. 西藏自治区地质矿产勘查开发局, 1999]
- 8 Sol S, Meltzer A, Bürgmann R, et al. Geodynamics of the southeastern Tibetan Plateau from seismic anisotropy and geodesy. *Geology*, 2007, 35: 563–566
- 9 Shao C R. Seismicity of the Yarlung Tsangpo Grand Canyon Region, China (in Chinese). Master Dissertaion. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2009 [邵翠茹. 雅鲁藏布大峡谷地区地震活动性研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2009]
- 10 Yao H, van der Hilst R, Montagner J. Heterogeneity and anisotropy of the lithosphere of SE Tibet from surface wave array tomography. *J Geophys Res*, 2010, 115, <http://dx.doi.org/10.1029/2009JB007142>
- 11 Jiang M, Peng M, Wang Y X, et al. Geophysical evidence for deep subduction of Indian lithospheric plate beneath Eastern Himalayan Syntaxis (in

- Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2012, 28: 1755–1764 [姜枚, 彭森, 王有学, 等. 喜马拉雅东构造结岩石圈板片深俯冲的地球物理证据. 岩石学报, 2012, 28: 1755–1764]
- 12 Xu Q, Zhao J, Pei S, et al. Distinct lateral contrast of the crustal and upper mantle structure beneath northeast Tibetan plateau from receiver function analysis. *Phys Earth Planet Inter*, 2013, 217: 1–9
- 13 Chang L J, Wang C Y, Ding Z F, et al. Upper mantle anisotropy of the eastern Himalayan syntaxis and surrounding regions from shear wave splitting analysis (in Chinese). *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2015, 45: 577–588 [常利军, 王椿镛, 丁志峰, 等. 喜马拉雅东构造结及周边地区上地幔各向异性. 中国科学D辑: 地球科学, 2015, 45: 577–588]
- 14 Cheng C, Bai L, Ding L, et al. Crustal structure of Eastern Himalayan Syntaxis revealed by receiver function method (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2017, 60: 2969–2979 [程成, 白玲, 丁林, 等. 利用接收函数方法研究喜马拉雅东构造结地区地壳结构. 地球物理学报, 2017, 60: 2969–2979]
- 15 Peng M, Jiang M, Chen Y L, et al. Crustal structure under the eastern Himalayan Syntaxis seismic array and its geodynamic implications derived from receiver functions (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2017, 60: 70–85 [彭森, 姜枚, Chen Y L, 等. 利用远震接收函数揭示的喜马拉雅东构造结台阵下方地壳结构及其动力学意义. 地球物理学报, 2017, 60: 70–85]
- 16 Zeitler P, Meltzer A, Brown L, et al. Tectonics and topographic evolution of Namche Barwa and the easternmost Lhasa block, Tibet. In: Nie J, Hoke G D, Horton B, eds. *Towards an Improved Understanding of Uplift mechanisms and the Elevation History of the Tibetan Plateau*. *Spec Pap Geol Soc Am*, 2014, 507: 23–58
- 17 Duputel Z, Rivera L, Kanamori H, et al. W phase source inversion for moderate to large earthquakes (1990–2010). *Geophys J Int*, 2010, 189: 1125–1147
- 18 Hayes G, Rivera L, Kanamori H. Source inversion of the W phase: Real-time implementation and extension to low magnitudes. *Seismol Res Lett*, 2009, 3: 800–805
- 19 Kanamori H, Rivera L. Source inversion of W phase: Speeding up seismic tsunami warning. *Geophys J Int*, 2008, 175: 222–238
- 20 Geiger L. Probability method for determination of earthquake epicenters from arrival time only. *Bull St Louis Univ*, 1912, 8: 60–71
- 21 Tian Y, Chen X F. Review of seismic location study (in Chinese). *Prog Geophys*, 2002, 17: 147–155 [田玥, 陈晓非. 地震定位研究综述. 地球物理学进展, 2002, 17: 147–155]
- 22 Waldhauser F. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward Fault, California. *Bull Seismol Soc Am*, 2000, 90: 1353–1368
- 23 Bai L, Li G H, Song B W. The source parameters of the $M_{6.9}$ Mainling, Tibet earthquake and its tectonic implications (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2017, 60: 4956–4963 [白玲, 李国辉, 宋博文. 2017年西藏米林6.9级地震震源参数及其构造意义. 地球物理学报, 2017, 60: 4956–4963]
- 24 Zurek B. The evolution and modification of continental lithosphere, dynamics of “Indenter Corners” and imaging the lithosphere across the Eastern Syntaxis of Tibet. Doctor Dissertation. Pennsylvania: Lehigh University, 2008
- 25 Wei W, Zhao D, Xu J. P-wave anisotropic tomography in Southeast Tibet: New insight into the lower crustal flow and seismotectonics. *Phys Earth Planet Inter*, 2013, 222: 47–57
- 26 Chen J H, Liu Q Y, Li S C, et al. Seismotectonic study by relocation of the Wenchuan $M_{8.0}$ earthquake sequence (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2009, 52: 390–397 [陈九辉, 刘启元, 李顺成, 等. 汶川 $M_{8.0}$ 地震余震序列重新定位及其地震构造研究. 地球物理学报, 2009, 52: 390–397]
- 27 Fang L H, Wu J P, Wang W L, et al. Relocation of the mainshock and aftershock sequences of $M_{7.0}$ Sichuan Lushan earthquake. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 3451–3459 [房立华, 吴建平, 王未来, 等. 四川芦山 $M_{7.0}$ 地震及其余震序列重定位. 科学通报, 2013, 58: 1901–1909]
- 28 Zeng X F, Luo Y, Han L B, et al. The Lushan $M_{7.0}$ earthquake on 20 April 2013: A high-angle thrust event (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2013, 56: 1418–1424 [曾祥方, 罗艳, 韩立波, 等. 2013年4月20日四川芦山 $M_{7.0}$ 地震: 一个高角度逆冲地震. 地球物理学报, 2013, 56: 1418–1424]
- 29 Han L, Zeng X, Jiang C, et al. Focal mechanisms of the 2013 M_{w} 6.6 Lushan, China earthquake and high-resolution aftershock relocations. *Seismol Res Lett*, 2014, 85: 8–14
- 30 Xie C, Zhou B G, Li Z F. Geomorphic features of eastern Himalayan syntaxis and its tectonic implications (in Chinese). *Seismol Geol*, 2017, 39: 276–286 [谢超, 周本刚, 李正芳. 东喜马拉雅构造结地貌形态及其构造指示意义. 地震地质, 2017, 39: 276–286]
- 31 Burg J P, Davy P, Nievergelt P, et al. Exhumation during crustal folding in the Namche-Barwa syntaxis. *Terra Nova*, 1997, 9: 53–56
- 32 Xie C, Yang X P, Huang X N, et al. Geological evidences of late quaternary activity of Motuo fault in Eastern Himalayan Syntaxis (in Chinese). *Seismol Geol*, 2016, 38: 1095–1106 [谢超, 杨晓平, 黄雄南, 等. 东喜马拉雅构造结墨脱断裂晚第四纪活动地质证据的发现. 地震地质, 2016, 38: 1095–1106]
- 33 Vernant P, Bilham R, Szeliga W, et al. Clockwise rotation of the Brahmaputra Valley relative to India: Tectonic convergence in the eastern Himalaya, Naga Hills, and Shillong Plateau. *J Geophys Res Solid Earth*, 2014, 119: 6558–6571
- 34 Li B K, Diao G L, Xu X W, et al. Redetermination of the source parameters of the Zayu, Tibet $M_{8.6}$ earthquake sequence in 1950 (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2015, 58: 4254–4265 [李保昆, 刁桂苓, 徐锡伟, 等. 1950年西藏察隅 $M_{8.6}$ 强震序列震源参数复核. 地球物理学报, 2015, 58: 4254–4265]

Summary for “西藏米林M6.9级地震及其余震序列地震定位”

Location of the mainshock and aftershock sequences of the *M*6.9 Mainling earthquake, Tibet

Wei Wei¹, Chao Xie^{1,2}, Bengang Zhou^{1*}, Zhi Guo¹, Xinzhong Yin¹, Baohua Li³, Ping Wang¹, Shaopeng Dong¹, Feixiang Wei¹ & Yuqin Wang¹

¹ Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China;

² Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China;

³ Yunnan Earthquake Administration, Kunming 650224, China

* Corresponding author, Email: zhoubg@ies.ac.cn

We measured the location of the mainshock of the November 18, 2017, earthquake (*M*6.9) that occurred in Mainling County, Nyingchi City, Tibet, by using arrival-time data recorded by temporary seismic stations deployed on the Namche Barwa syntaxis and surrounding regions. The seismic stations offered good coverage of the hypocenter region and provided a good opportunity to precisely locate the mainshock and aftershock sequences. The Mainling earthquake was located at 29.87° N, 95.05° E, and the focal depth is 12 km. We investigated the focal mechanism of the mainshock by applying the W phase source inversion algorithm from the broad-band records of global seismic networks accessed from the IRIS data center. First, we resampled the original waveform to 1 SPS and then removed the mean, trend, and instrument response of the waveform, filtering it with a bandwidth of 150–70 s. After inversion, we obtained a solution with *M*_w = 6.45 and a best double couple given by strike/dip/rake=319.9°/61.7°/101.0°. This result suggested that the seismogenic fault of the Mainling earthquake was characterized by a high-angle and NE-dipping thrust. We determined the location of the aftershock sequences by applying Geiger and double difference (DD) algorithms. Due to the lack of the local-scale tomographic model and reliable Poisson's ratio data in the hypocentral region, we used only the P-wave arrival times to locate the aftershock sequences. We determined absolute locations for 148 aftershocks with high quality P-wave arrivals recorded by 14 temporary seismic stations and estimated the locations using the 1-D velocity model, in which the P-wave velocity was 6 km/s in the upper crust, 6.6 km/s in the lower crust, and 8.1 km/s in the uppermost mantle. The location errors were 0.6 km in the horizontal direction with an average residual of 0.07 s. In addition, we used the DD location algorithm in an attempt to minimize uncertainties in the aftershock locations. It was confirmed that the DD location algorithm greatly improved the relative location accuracy of events that are close to one another compared to the traditional Geiger location method. After DD location, the location errors of the aftershock sequences are 0.23, 0.26, and 1.43 km in the north-south, east-west, and vertical directions, respectively. The results indicated that the aftershocks were distributed along both sides (NW and SE directions) of the mainshock, which spread approximately 40 km in length and 10 km in width. Results of the focal depth profiles suggested that the aftershocks were located at depths above 15 and 10 km in the NW and SE directions of the mainshock, respectively. The aftershocks were mainly located at two sub-parallel faults. In the first two hours, the *M*6.9 Mainling earthquake and aftershocks were mainly distributed at fault F1, and after that the aftershocks were distributed at fault F2. This suggested that the Xixingla fault zone is composed of a series of high-angle and NE-dipping faults, and the *M*6.9 Mainling earthquake occurred at the south most one. The *M*6.9 Mainling earthquake triggered seismic activities of a sub-parallel fault located to the northeast. The occurrence of the *M*6.9 Mainling earthquake indicates that the Namche Barwa syntaxis is still in a high tectonic compression state at present. The Namche Barwa terrane continues moving towards the NE direction, leading the shortening deformation in the interior of the terrane. It is possible that a large earthquake may occur at Motuo and Mainling faults in the future along both sides of the Namche Barwa syntaxis.

mainling earthquake, earthquake location, Namche Barwa syntaxis, thrust fault, focal mechanism

doi: 10.1360/N972017-01286