

四川九寨沟 $M_s7.0$ 地震主震及其余震序列精定位

房立华^{1,2*}, 吴建平^{1,2}, 苏金蓉³, 王毛毛⁴, 蒋策⁵, 范莉苹¹, 王未来¹, 王长在¹, 谭夏露¹

1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;

2. 中国地震局地震观测与地球物理成像重点实验室, 北京 100081;

3. 四川省地震局, 成都 610041;

4. 河海大学海洋学院, 南京 210098;

5. 广东省地震局, 广州 510070

* 联系人, E-mail: flh@cea-igp.ac.cn

2017-11-13 收稿, 2018-02-07 修回, 2018-02-08 接受, 2018-03-01 网络版发表

国家自然科学基金(41774067, 41774102)和中国地震局“四川省九寨沟 7.0 级地震科学研究”项目资助

摘要 采用基于三维速度模型的定位方法, 测定了九寨沟 $M_s7.0$ 级地震的主震位置, 震中为 103.806°E , 33.201°N , 震源深度为20.4 km. 使用最近一个强震台(51JZB)的S-P到时差, 估算了主震初始破裂点的深度不浅于14.3 km. 利用流动观测获得定位精度较高的余震, 对早期余震位置进行校正, 并采用双差方法对震后一个月的余震进行了重定位, 获得了3030个地震的位置. 余震呈北西西向的条带状分布, 长约42 km, 余震北临塔藏断裂, 南接虎牙断裂北端. 主震位于余震带的中央, 其两侧各有长约20 km的余震带, 西北侧有一长约5 km的余震稀疏段. 西北段余震深度较浅, 余震带宽度约6 km; 东南段余震深度较深, 余震带较窄, 约4 km. 余震震源深度的优势分布范围在4~20 km之间. 发震断层倾角较陡, 平均值约为 84° . 断层倾向和倾角沿走向方向有明显变化, 断层在浅部向西南倾斜, 深部略向北东倾斜. 主震初始破裂点深度大于矩心深度和余震平均深度, 地震破裂由深向浅传播. 余震沿断层走向有明显的时空扩展特征, 震源区可能存在余滑.

关键词 九寨沟地震, 余震序列, 双差定位, 震源深度, 发震断层

2017年8月8日21时19分(北京时间), 四川省阿坝州九寨沟县发生 $M_s7.0$ 强震(简称九寨沟地震). 根据中国地震台网中心测定的结果, 震中位置为 33.20°N , 103.82°E , 震源深度20 km. 震中距九寨沟县39 km, 距松潘县66 km, 距成都市285 km. 此次地震的最大烈度为IX度, 等震线长轴总体呈北北西走向. IX度区主要在漳扎镇, 面积约139 km²(<http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/464/478/20170812211337414565961/index.html>). 地震造成25人死亡, 525人受伤. 截至9月8日24时, 四川省地震台网共记录到6838次余震, 其中2次 $M4.0\sim4.9$, 30次 $M3.0\sim3.9$, 最大余震为8月9日

10时17分 $M4.8$ 地震.

九寨沟地震发生在青藏高原东缘、巴颜喀拉地块东北边界(图1). 此次地震是继2008年汶川 $M_s8.0$ 地震和2013年芦山 $M_s7.0$ 地震后, 在四川发生的又一次破坏性地震. 九寨沟地震附近有塔藏断裂、虎牙断裂、岷江断裂和雪山梁子断裂等多条活动断裂带(图2). 这些断裂是青藏高原或其块体的边界断裂带, 周边地震活动极为强烈. 震中附近200 km内曾发生9个7.0级以上历史地震, 其中包括1654年甘肃天水8.0级地震和1879年甘肃武都8.0级地震^[3,4].

地震发生后, 国内外不同机构和研究组迅速开

引用格式: 房立华, 吴建平, 苏金蓉, 等. 四川九寨沟 $M_s7.0$ 地震主震及其余震序列精定位. 科学通报, 2018, 63: 649–662

Fang L H, Wu J P, Su J R, et al. Relocation of mainshock and aftershock sequence of the $M_s7.0$ Sichuan Jiuzhaigou earthquake (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 649–662, doi: 10.1360/N972017-01184

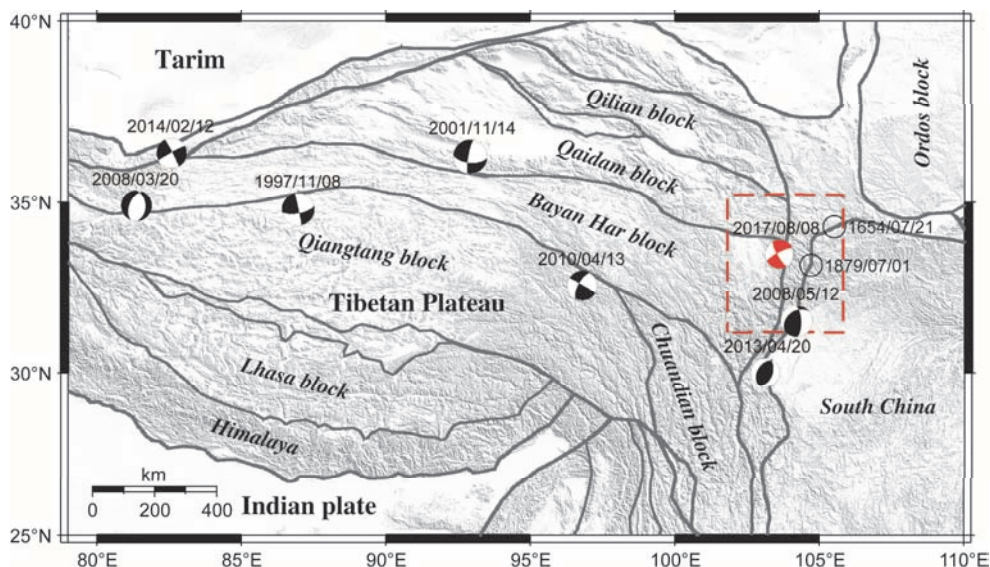


图1 九寨沟地震位置及周边活动块体分布图. 红色方框表示本文的研究区域. 块体边界数据引自文献[1]. 图中标注了巴颜喀拉块体周缘的 $M \geq 7.0$ 地震的发生时间和震源机制

Figure 1 Tectonic blocks and large earthquakes since 1997 in the Tibetan Plateau and its adjacent region. The red dashed rectangular defines the study area of this research. Black lines indicate block boundaries. The block boundary data are from Ref. [1]. The occurrence times and focal mechanisms of $M \geq 7.0$ earthquakes around Bayan Har block are indicated in the figure

展了相关研究, 产出了震源参数、震源机制、破裂过程和余震精定位等成果, 为深入研究这次地震奠定了基础^[5-9]. 然而, 由于使用的观测数据不同、方法不同, 目前的结果存在较大差异. 比如, 中国地震台网中心给出的震源深度为20 km, 矩心深度为9 km, 而美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)确定的震源深度为9 km, 矩心深度为13.5 km. 由于震源区地处高山峡谷地区, 平均海拔接近4 km, 相关的地质和地球物理研究较少. 暂未发现同震导致的地表破裂, 关于发震断层还存在不同认识. 九寨沟地震的发震断层究竟与哪条断裂有关? 发震断层的几何形态是什么样式? 主震是由深向浅破裂还是由浅向深破裂? 这些问题仍不清楚.

在本研究中, 我们联合使用震中附近的测震和强震观测数据, 基于三维速度模型测定了主震位置, 并对震后一个月的余震序列进行了精确定位, 分析了余震的时空演化特征, 确定了发震断层的形态. 本文的结果, 对研究九寨沟地震的发震断层, 细化震源破裂过程, 构建发震构造模型, 深入解剖这一地震, 以及分析区域地震危险性都具有重要意义.

1 台站和数据

(i) 台站分布. 九寨沟地震震中附近300 km范

围内有32个固定地震台站. 地震发生后, 四川省地震局和甘肃省地震局在地震当天开始在震源区周围架设流动台站. 至8月12日共架设6个流动地震台站(图2). 流动台站的观测数据实时传回四川省地震局, 观测资料由四川地震台网中心统一处理. 固定地震台站和流动地震台站构成的地震观测网对余震区形成了较好的方位覆盖, 且有4个近台站(震中距小于20 km), 保证了地震定位结果的可靠性.

(ii) 观测数据. 本研究使用的震相数据和初始定位结果来自四川省地震局的快报观测报告, 并经中国地震台网中心统一检查和汇总. 截至2017年9月8日24时, 四川省地震台网给出的地震目录中包含6838个余震(震中 $\pm 0.5^\circ$ 范围内, 其中单台记录的地震1884个), 震级分布范围从 $M2.0 \sim M4.8$. 四川省地震局对余震定位时, 使用的是基于三维速度模型的定位方法^[10-12], 给出的震源深度是相对于地表的深度. 初始定位结果显示, 余震震源深度分布较宽, 在1~29 km深度范围内都有余震, 且早期余震比较弥散, 后期余震主要集中在10 km深度附近. 在本研究中, 为了保证获得较为可靠的定位结果, 我们只选择记录台站 ≥ 4 、震相数 ≥ 8 的3061个地震事件进行重定位. 图3是根据四川省地震局的观测报告绘制的震中分布和震源深度沿经度、纬度方向的分布. 重定位时

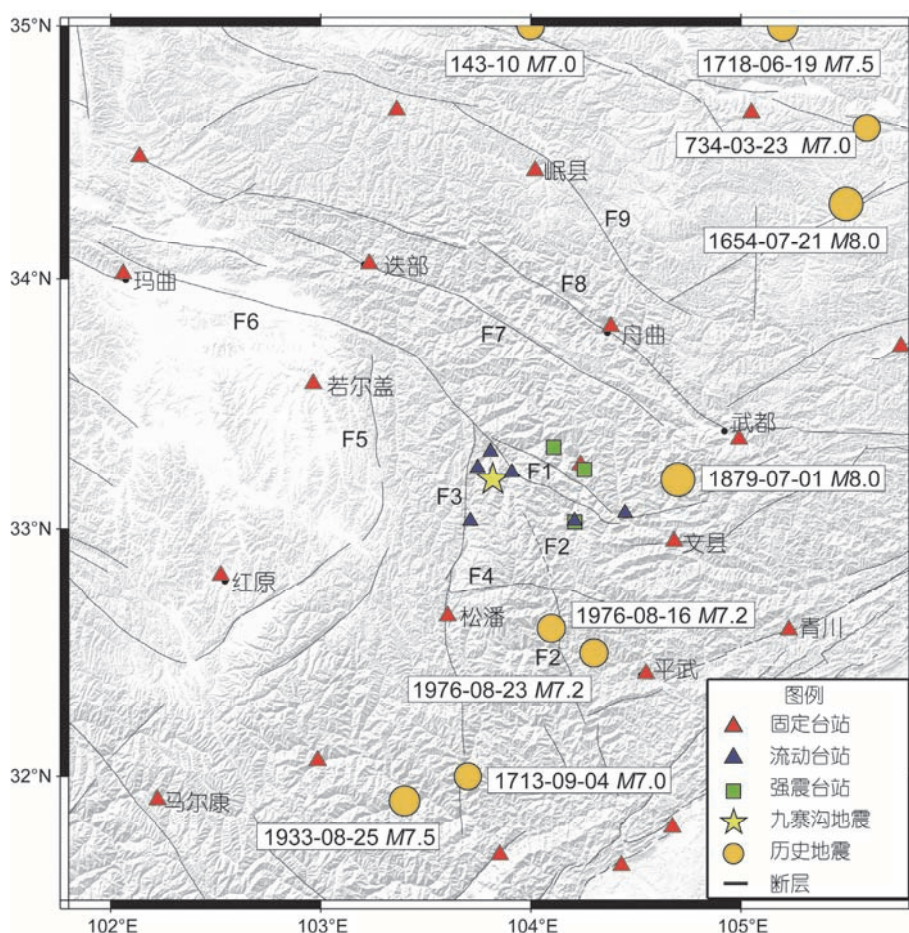


图2 研究区周边台站、历史地震和活动断裂. 红色三角形表示固定地震台站, 绿色方块表示强震台站, 蓝色三角形表示震后架设的应急流动台站. 黄色五角星表示九寨沟地震的震中位置, 黄色圆圈表示 7.0 级以上的历史地震. F1, 塔藏断裂; F2, 虎牙断裂; F3, 岷江断裂; F4, 雪山梁子断裂; F5, 龙日坝断裂; F6, 东昆仑断裂; F7, 白龙江断裂; F8, 光盖山-迭山北麓断裂; F9, 临潭-宕昌断裂. 断层数据引自文献[2]

Figure 2 Seismic stations, historical earthquakes and active faults around the source area of the Jiuzhaigou earthquake. Red triangles mark the permanent broadband seismic stations. Green squares represent strong-motion sites. Blue triangles indicate temporary seismic stations deployed after the mainshock. The yellow star shows the location of the M_s 7.0 Jiuzhaigou earthquake. Yellow circles show large historical earthquakes ($M > 7.0$). F1, Tazang fault; F2, Huya fault; F3, Minjiang fault; F4, Xueshanliangzi fault; F5, Longriba fault; F6, East Kunlun fault; F7, Bailongjiang fault; F8, Guanggaishan-Dieshanbeilu fault; F9, Lintan-Dangchang fault. The active faults are from Ref. [2]

主要使用了震中距300 km以内的44个台站的观测数据. 对震相走时数据的分析表明, P波和S波震相到时标注和初始地震定位结果误差较小, 观测报告的可靠性较高.

2 定位方法

2.1 主震重定位

由于震源区平均海拔接近4000 m, 地震台站平均海拔约1600 m, 如果定位时不考虑地形的影响, 将会对定位结果, 尤其是震源深度测定带来较大偏差. 在本研究中, 我们利用国家数字测震台网数据备份

中心提供的波形数据^[13], 使用LOC3D(川滇三维走时表)定位软件^[10-12], 对九寨沟地震的主震进行了重定位. 该定位方法考虑了台站高程、地形起伏和地球扁率等因素的影响, 基于三维速度间断面和三维速度模型计算理论走时, 可同时使用Pg, Pn, Sg, Sn和sPn等震相数据.

我们选择震中距 $<5^\circ$ 、信噪比高、震相清楚、方位覆盖较好的宽频带和加速度地震台站对主震进行定位. 首先标注较近台站(100 km以内)的Pg和Sg震相到时, 给出较为可靠的震中位置. 当没有近台时, 单独使用上行的Pg和Sg震相难以对震源深度进行有效约束. 我们又标注了震中距较远(200 km以外)、初动

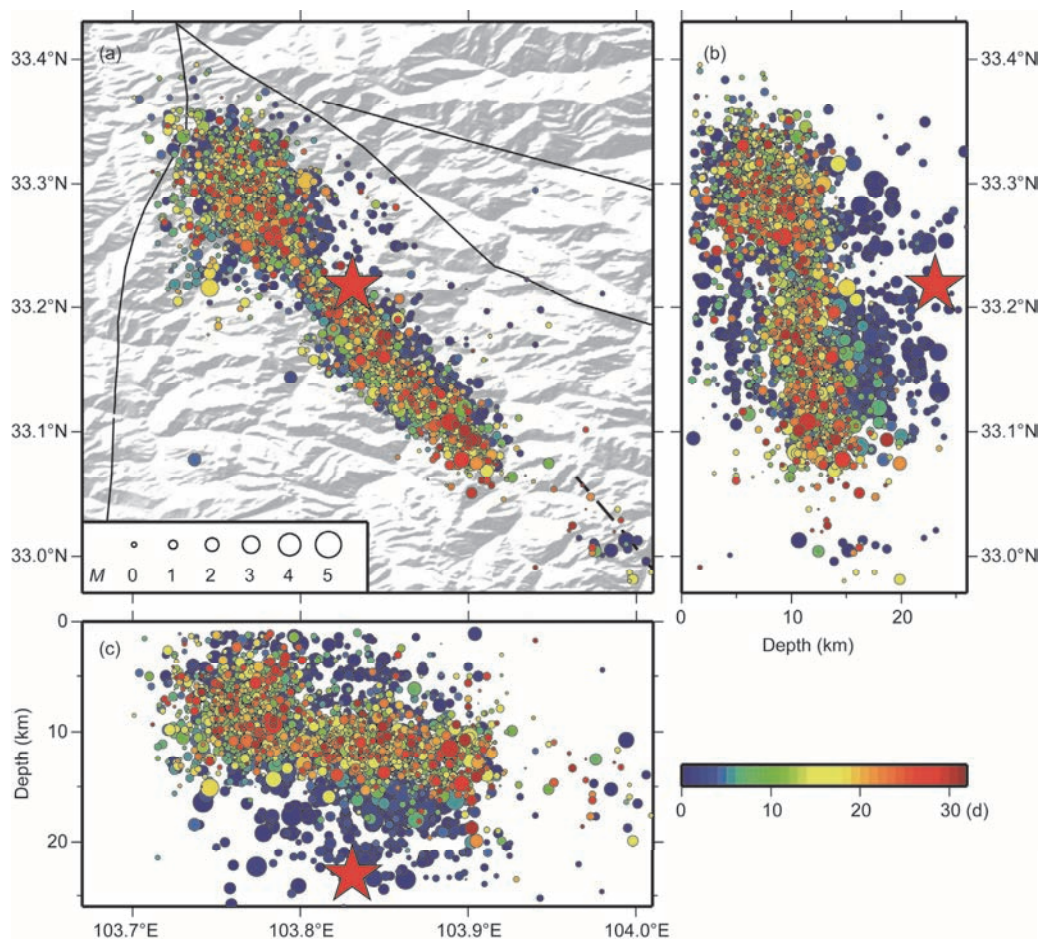


图3 初始震中分布图(a)和震源深度沿纬度(b)、经度(c)方向的剖面图。数据来自四川省地震台网。红色五角星表示九寨沟主震的位置,圆圈表示余震,其大小与震级呈正比。不同圆圈的颜色随时间增加由蓝变红。黑色虚线表示推测的虎牙断裂

Figure 3 Distributions of initial epicenter (a) and focal depth cross-sections along the latitude (b) and longitude (c). The data are from observation reports of Sichuan seismic network. Red star represents the location of mainshock. Circles represent aftershocks with magnitude proportional to its size. The color of the circles changes with time from blue to red. Black dashed line indicates the inferred Huya fault

清楚的Pn震相到时,保证不同象限、不同震中距都有台站分布,以期对震源深度进行较好的约束。最终使用47个地震台站(包括3个强震台)、53条震相数据对主震进行定位。重新测定后的主震震中为 103.806°E , 33.201°N ,震源相对于地表的深度为20.4 km,相对于海平面的深度为17.7 km。

2.2 余震序列重定位

为获得高精度的余震序列目录,我们采用双差定位方法对主震和余震序列一起进行重定位。该方法利用震相的走时差反演震源位置,可较好地消除震源至台站间共同传播路径效应,对地壳速度模型的依赖性较小^[14]。在观测条件较好的情况下,其相对定位精度可以达到百米量级甚至更优。该方法在

国内外地震序列重定位中得到了广泛应用^[11,12,15,16]。

震后架设的流动台站会改善余震区的观测条件,但由于增加了较近的台站,流动观测前后余震的震中、震源深度和定位误差会发生系统性变化^[11,12]。在本研究中,我们参考2013年芦山 $M_s7.0$ 地震序列的处理方法,利用流动台站架设后的、定位精度较高的余震对早期余震进行校正,这样可以进一步提高余震序列的定位精度^[11,12]。我们将余震数据分为参考事件和一般事件两类。参考事件选取记录台站大于4个、震相数量大于8个的余震。每个参考事件的近台震中距小于10 km,在40 km震中距内至少有3个观测台,最大孔隙角小于 120° 。符合条件的参考事件共有196个,其余的为一般事件。每次从一般事件中选择100个余震和参考事件一起进行相对定位,并用重定

位之后的结果更新一般事件的发震时刻、震源位置和走时,如此重复29次。最后,使用双差方法对所有的余震进行重定位。

双差定位时,一维速度模型参考了奔子栏-唐克人工地震探测剖面的P波速度结构^[17](每层的顶界面深度分别为0, 18, 24, 30, 40, 54 km; 相应的P波速度为5.8, 5.9, 6.15, 6.65, 6.80, 7.80 km/s), 该剖面位置距九寨沟地震的主震震中约100 km。剖面显示, 松潘-甘孜块体内部地壳分层和速度结构横向变化较小。本文采用的速度模型能较好地代表震源区周边的平均速度结构。波速比根据接收函数 $h-k$ 扫描结果^[18], 选择震中周边(50 km以内)16个台站的平均值, 将其设定为1.75。

观测报告中, 震相数据有39614条, 其中P波震相19542个, S波震相20072个, 平均每个地震有13条震相数据(约7个台站)。初始定位水平误差、垂直误差和定位残差的平均值分别为1.0 km, 2.6 km和0.19 s, 震源深度分布范围为1~29 km。在地震组对时, 设置的最小连接数(MINLNK)和最小观测数(MINOBS)为8, 震源间距小于10 km, 事件对到台站的距离小于220 km。在定位时设定P波到时的权重为1.0, S波震相到时的权重为0.7。地震定位时分3组、12次迭代。在迭代过程中, 采用标准偏差的4倍作为截断值, 剔除计算过程中残差过大的数据。定位时, 选用共轭梯度法求解方程, 得到阻尼最小二乘解。

3 结果分析

图3是四川省地震局给出的包括主震在内的3061地震的初步定位结果。本文使用双差定位方法对上述地震进行重新定位, 获得了其中3030个地震的位置参数, E-W, N-S和U-D三个方向的平均定位误差分别为0.18, 0.16, 0.20 km, 平均定位残差为0.10 s, 定位误差和残差较四川省地震局的初步定位结果明显减小。为进一步提高定位精度, 采用本文前述的余震校正方法, 将定位精度提高了10%左右, E-W, N-S和U-D三个方向的平均定位误差分别为0.16, 0.15, 0.18 km, 平均定位残差为0.09 s, 结果如图4所示。

与原始定位结果相比, 重新定位后的震中分布更加集中, 线性趋势更加明显, 余震带宽度也明显变窄。从平面图上看, 余震主要位于塔藏断裂西南, 呈北北西向分布, 北接岷江断裂和塔藏断裂, 向南与虎牙断裂相接。主震位于余震带的中央, 两侧余震分布

长度相当, 表明此次地震为双侧破裂。西北段的余震带比东南段宽, 约为6 km; 东南侧余震展布宽度仅为4 km左右。主震西北侧附近余震较少。在余震区的东南末端, 靠近推测的虎牙断裂北段附近, 也有少量余震发生。

图5给出了重定位后的震源深度分布, 剖面位置如图4所示。重定位结果显示, 90%的余震主要分布在4~20 km深度范围内, 地壳浅部(0~4 km)余震较少, 可能不会形成明显的地表破裂。震源深度沿AA'剖面存在明显变化, 大致以横坐标的0 km为界, 震源深度总体呈现西北浅、东南深的特征。早期余震深度分布范围较宽, 可能与缺少近台观测, 定位误差较大有关。后期发生的余震主要集中在5~15 km深度。震级较大的余震主要分布在主震东南侧。震源区破裂长度约42 km。余震带中间有一长度约5 km的地震稀疏段。深度剖面显示发震断层倾角较陡, 近垂直, 断层倾向和倾角沿走向方向有明显变化。主震附近的断层呈弧形, 浅部向西南倾斜, 深部略向北东倾斜(图5(d))。

4 讨论

4.1 主震震源深度

震源深度是影响地震致灾程度的一个重要参数。一般而言, 震源越浅, 灾害越强。九寨沟地震虽然震级较大, 但震害相对较小。因此, 准确测定主震的震源深度, 对于深入分析地震致灾机理和地震破裂过程等研究都有重要意义。

地震发生后, 国内外不同机构快速测定了九寨沟地震主震的震源深度和矩心深度, 但结果存在较大差异(表1)。中国地震台网中心和USGS给出的震源深度差异达11 km, 不同研究人员和机构给出的矩心深度差异达17 km。这种差异一方面是由于使用的数据、模型和参数不同引起的。比如, 中国地震台网中心使用的是近台数据, 而USGS使用的是远震数据。当没有近台和深度震相约束时, 单独使用走时数据难以对震源深度进行有效约束。另一方面是此次地震震源区海拔较高, 平均海拔约4000 m。测定震源深度时, 定位方法中考虑地形和台站高程引起的深度差异可能会达到1~2 km。最后, 震源深度(初始破裂深度)有别于矩心深度。初始破裂深度一般通过到时定位方法得到。矩心深度一般由波形反演方法得到, 反映的是地震滑动分布的平均深度。两种深度的差

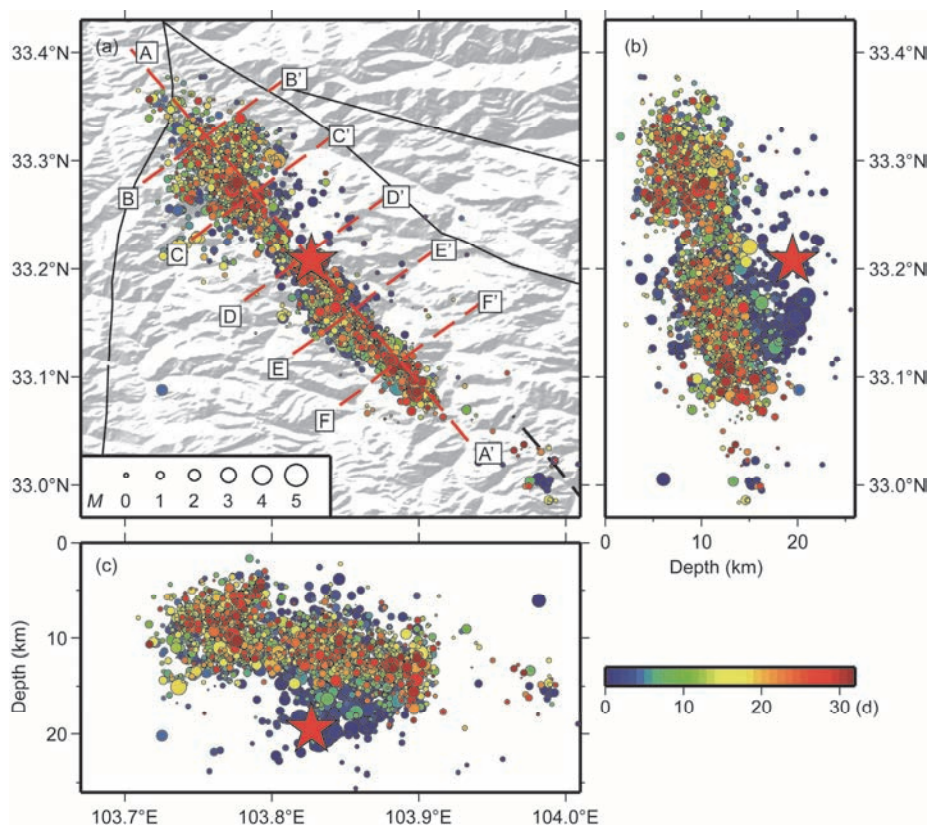


图4 重定位后的余震分布图(a)和震源深度沿纬度(b)、经度(c)方向的剖面图。图例同图3

Figure 4 Distribution of relocated aftershocks (a) and focal depth cross-sections along the latitude (b) and longitude (c). Legends are the same as in Figure 3

异与破裂方向性和震级有关,可达破裂尺度的一半^[20]。对于有一定破裂尺度的 $M_s 7.0$ 级地震,两者的差异可能超过10 km。

研究表明,距离震中1.4倍震源深度的范围内有台站,且有准确的S波到时,才能对震源深度进行有效约束^[21]。距离主震震中最近的一个宽频带地震台是JZG台,震中距约40 km。由于S波出现限幅,导致S波到时无法准确拾取。比较幸运的是,距震中30 km左右,有一个强震台(51JZB)完整地记录下了主震波形。我们使用STA/LTA^[22]和偏振分析方法^[23]计算得到了这个台站的P波和S波到时(图6),S波和P波的到时差约为4.60 s。S-P到时差是震源深度、P波速度、波速比和震中距的函数。根据震中附近人工地震探测和接收函数波速比的研究结果^[17,18],我们将地表至震源处的P波平均速度变化范围设为5.8~6.1 km/s,震中距变化范围为27~31 km,波速比变化范围1.70~1.80,并考虑主震震中和51JZB台的高程差异(约为2.5 km),通过搜索得到了震源深度的变化范围

为14.3~32.5 km,中值为24.2 km。虽然这一方法不能给出初始破裂点的准确深度,但由此可以确定主震初始破裂点的深度不浅于14.3 km。

对主震定位时,本研究加入了最近的3个强震台的P波和S波到时数据,使用了三维速度模型和三维间断面模型,而且还考虑了地形的影响,震源深度测定结果较为可靠。定位结果表明,主震相对于地表的深度为20.4 km,相对于海平面的深度为17.7 km,与使用强震台S-P到时差估算的震源深度基本一致。我们使用bootstrap方法对主震的定位误差进行了分析^[14,24]。将每次地震定位得到的走时残差加在观测到时上,重新定位,重复采样2000次,得到了定位误差椭圆,置信区间为95%。E-W, N-S和U-D三个方向的定位误差分别为1.7, 1.5, 1.9 km。

余震序列重定位结果表明,约90%的余震分布在4~20 km的深度范围内,平均震源深度为12.0 km。矩张量反演表明^[4],此次地震的矩心深度约为14 km。余震序列的平均深度和矩心深度基本相同,均浅于

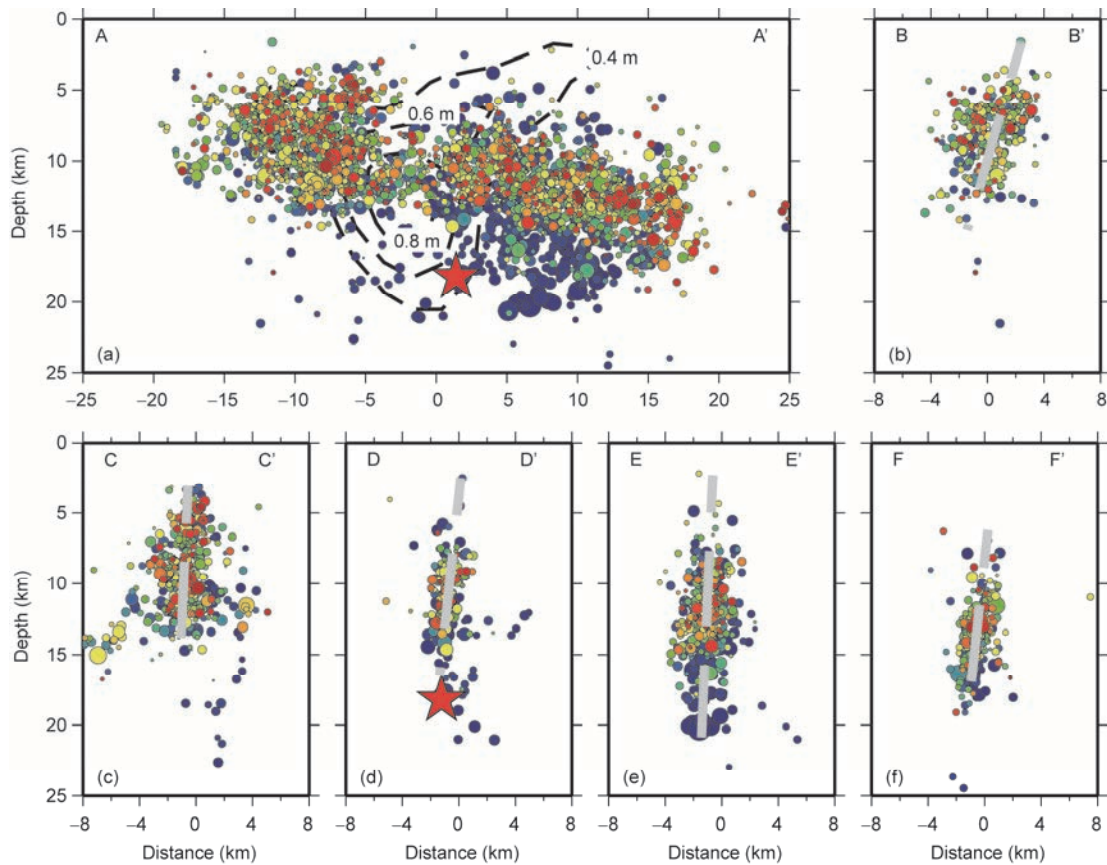


图5 震源深度分布剖面. 剖面位置见图4, 每个地震到剖面轴线的距离小于2 km. 灰色虚线表示拟合的断层位置. (a)中的等值线表示同震破裂的滑动量^[8]. 色标同图3和4

Figure 5 Focal depth cross-sections of the aftershocks and mainshock. The locations of each cross-section are indicated in Figure 4. The distance between each earthquake and the axis of the cross-section is less than 2 km. Gray dashed line represents the deduced shape of the seismogenic fault with least-square fitting. The contours in (a) show co-seismic slip distribution with 0.4, 0.6 and 0.8 m^[8]. Other legends are the same as in Figures 3 and 4

表1 国内外不同机构和研究人员测定的九寨沟地震的主震深度^{a)}

Table 1 Focal depth of the Jiuzhaigou earthquake determined by different agencies and researchers

单位/作者	震源深度(km)	矩心深度(km)
CENC	20	9
USGS	9	13.5
GCMT	—	14.9
Han等人 ^[5]	—	14
谢祖军等人 ^[6]	—	6
易桂喜等人 ^[7]	—	5
季灵运等人 ^[19]	—	22
本文	20.4	—

a) CENC, 中国地震台网中心; USGS, 美国地质调查局; GCMT, 哈佛大学矩张量解

初始破裂点的深度. 对地震成核与破裂传播的震例分析表明, 多数中强地震易于在孕震层深度成核, 并

向上传播^[25-27]. 例如, 2010年青海玉树地震^[28], 2014年美国纳帕地震^[29,30], 2014年云南鲁甸地震^[31], 2014年云南景谷地震^[32]和2014年四川康定地震^[33], 这些走滑型地震都显示主震位于余震序列的底部, 地震从深部向浅部破裂. 数值模拟表明, 由于摩擦强度和应力降随深度逐渐增加, 在高应力降区域(孕震层深部)成核的地震易于向浅部扩展成大地震, 而在低应力降区域(地壳浅部)成核的地震则很难向地壳深部扩展为大地震^[27,34]. 根据初始破裂点深度和矩心深度、余震平均深度的位置关系, 可以确定此次地震是一次由深部向浅部破裂的事件. 由于主震震源深度较深, 虽然震级较大, 但造成的人员伤亡和经济损失相对较小.

4.2 发震断层及形态

九寨沟地震发生在东昆仑左旋走滑断裂带与龙

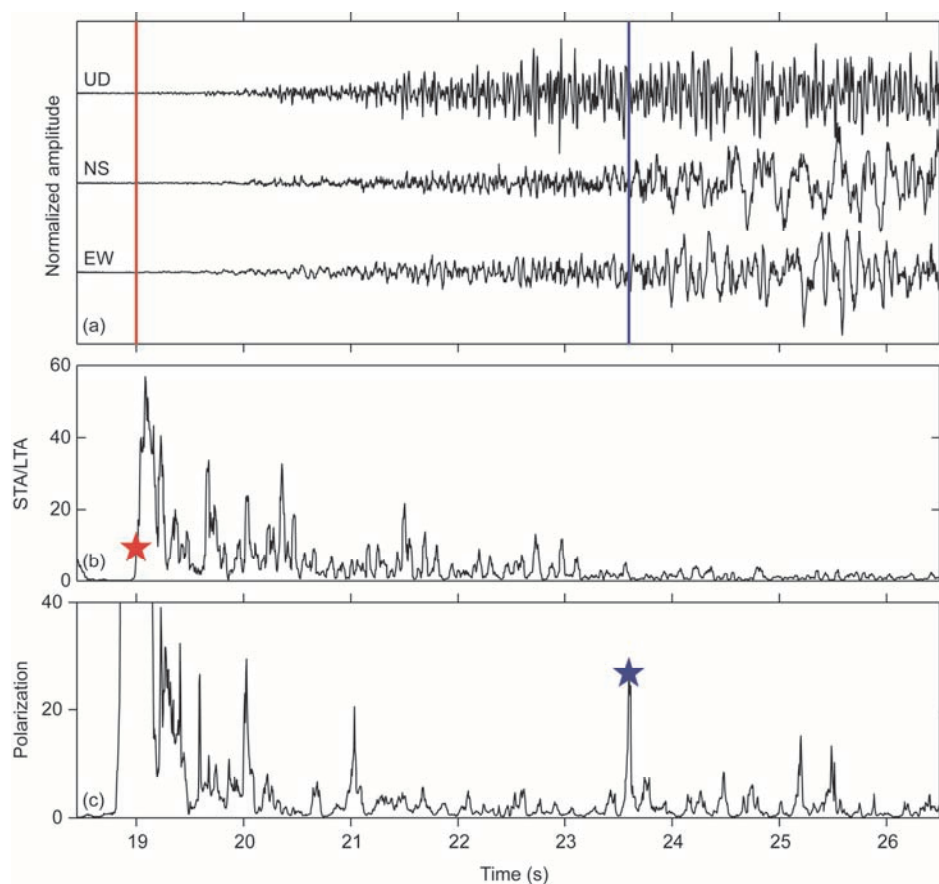


图6 51JZB强震台的P波和S波到时。(a) 51JZB 强震台的三分量波形, 红色和蓝色实线分别表示P波和S波到时; (b) 长短窗分析结果, 红色五角星表示P波到时; (c) 偏振分析结果, 蓝色五角星表示S波到时

Figure 6 P- and S-wave arrival time of 51JZB strong-motion site. (a) Three-component waveforms of the mainshock. Red and blue lines represent P- and S-wave arrival time respectively. (b) P-wave arrival time analyzed with STA/LTA method. The red star indicates P-wave arrival time. (c) S-wave arrival time obtained with polarization analysis. The blue star indicates S-wave arrival time

门山逆冲断裂带的交汇部位, 属于巴颜喀拉块体北边界向东边界过渡的构造转换区, 周边活动断裂构造十分复杂, 附近有北西西向的塔藏断裂、近南北向的虎牙断裂、岷江断裂和近东西向的雪山梁子断裂等多条活动断裂带^[35-37]。由于本次地震暂时未发现与发震断层相关的同震地表破裂带, 因此关于发震断层究竟是哪条断裂还存在很大争议。

重定位结果显示, 余震震中主要沿虎牙断裂北西向的延长线上分布, 余震条带西北止于岷江断裂。余震震源深度剖面显示, 余震带较窄, 发震断层倾角较陡, 符合典型走滑型地震的余震分布特征。对定位误差的分析表明, 早期余震(前4 d)由于缺少流动台站观测, 定位误差略大。之后, 定位误差逐渐减小。因此, 一些定位误差较大的早期余震有可能没有反映发震断层的真实形态。我们选取距剖面小于2 km、

平均定位误差小于0.2 km的余震, 使用最小二乘法线性拟合得到了发震断层的倾角(图5)。发震断层总体向西南倾, 但倾角沿走向略有变化。断层西北段的倾角略小于东南段。自西向东5条剖面拟合得到的断层倾角分别为74°, 88°, 84°, 88°和84°, 平均值为84°。

国内外不同机构分别使用近震和远震波形数据给出了此次地震的震源机制解。使用近震波形数据和CAP方法确定的断层面的走向、倾角和滑动角分别为156°/65°/9°, 250°/82°/-154°^[5]。其他研究组使用CAP方法反演得到的走向、倾角和滑动角分别为152°/74°/8°, 60°/82°/164°; 156°/79°/-9°, 248°/81°/-169°^[6,7]。USGS和GCMT使用远震数据给出的断层面参数分别为153°/84°/-33°, 246°/57°/-173°; 150°/78°/-13°, 242°/77°/-168°。可见, 不同研究组给出的断层走向差异较小, 但断层倾角差异较大, 变化范围为65°~84°。

本文根据余震分布拟合得到的断层倾角略高于震源机制解反演结果,这种差异是因为震源机制反演基于点源等效力假设,得到的倾角是断层面的平均值,难以反映复杂断层面的几何形态.如果断层面形态较复杂,加之倾角较陡,由于震源机制反演的不确定性,不同研究人员得到的断层倾角可能存在较大差异,甚至可能出现倾向相反的情况.相比之下,余震可以很好地刻画发震断层的三维形态.余震揭示的发震断层不是单一倾向、单一倾角的简单断层结构.这种复杂的断层形态可能会导致使用不同数据、不同方法得到的震源机制解差异较大.结合重定位后的余震分布和主震的震源机制,本文认为发震断层走向为南南东 150° 方向,倾向西南,断层倾角较陡,平均值约 84° .

为进一步确定发震断层的三维几何形态,根据余震重定位结果和主震震源机制等数据,使用Paradigm GoCAD三维建模软件,建立了九寨沟地震发震断层的三维模型.我们采用GoCAD软件的离散内插方法(discrete smooth interpolation, DSI),以网格三角面网(Tsurf)的形式来建立三维同震断层面的几何形态.在该建模系统中,将主震、余震的定位结果以点数据(PointSet)形式输入,在构造建模流程(structural modeling workflow)模块中,将离散数据转换成连续曲面.再通过添加震源机制解以及曲线(curves)等约束条件,进行插值拟合,得到断层面曲

面模型,对原始曲面进行局部编辑处理,进而建立起最接近真实的发震断层面形态.图7显示,发震断层总体沿北西向延伸,倾角范围在 $66^{\circ}\sim 89^{\circ}$,平均值在 84° 左右,呈高角度走滑特征.发震断层面在空间上呈复杂的几何形态,断层面主要分北东($30^{\circ}\sim 90^{\circ}$,图7中蓝色区域)和南西($220^{\circ}\sim 270^{\circ}$,图7中浅红色区域)两组倾向.主震附近的断层略呈弧形.在 $3\sim 15$ km深度范围内,断层主要向西南倾斜,在 15 km深度以下,断层面逐渐变为北东倾向.InSAR观测也表明,同震形变存在非对称性分布,说明发震断层并非是完全近直立,深浅部倾角可能存在差异^[19].在构建发震构造模型、反演破裂过程时,应当充分考虑发震断层复杂的三维几何形态.

东昆仑断裂带在东南尾端发生了构造转换,岷江断裂、塔藏断裂、迭部-白龙江断裂和光盖山-迭山断裂形成了帚状撒开的尾端构造,共同承担和分解了东昆仑断裂东向的走滑速率^[37,38].岷江断裂呈南北向延伸,是一条西倾的逆冲断层^[37,39].塔藏断裂,总体呈北西走向,东南段断层面北倾^[40].虎牙断裂走向北北西,倾向西,为逆冲断层^[41].其中,雪山梁子断裂以北部分为推测断裂^[37].1976年松潘-平武2次7.2级地震的震源机制解表明虎牙断裂是一条具左旋走滑性质的逆冲断层^[42].由于九寨沟地震的余震带北段终止于岷江断裂,南段几乎与虎牙断裂相连,从

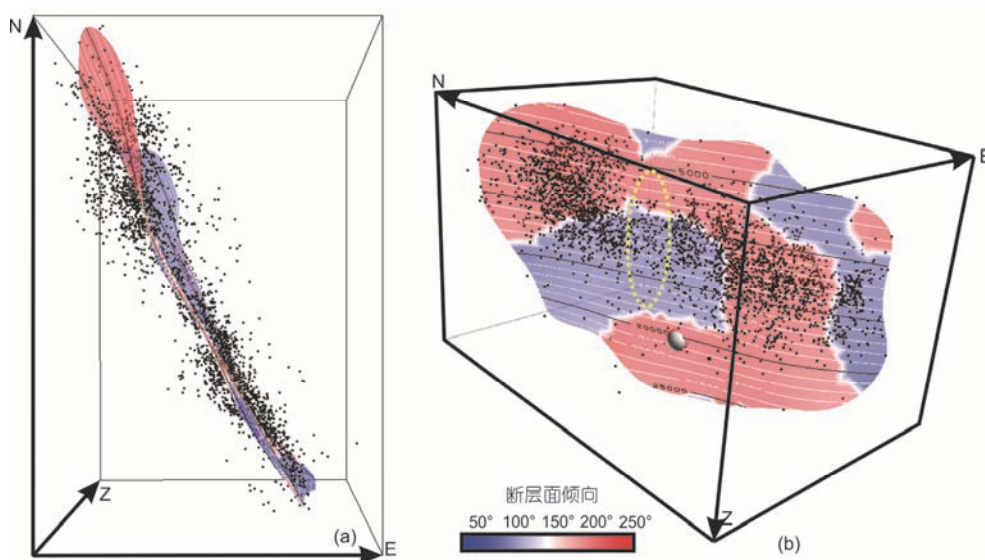


图7 九寨沟地震发震断层三维模型. (a) 发震断层的平面俯视图; (b) 发震断层的三维透视图. 灰色圆圈表示主震位置, 黄色椭圆表示余震稀疏段

Figure 7 3D model of the seismogenic fault of the Jiuzhaigou earthquake. (a) Plane view of the seismogenic fault; (b) 3D perspective drawing of the seismogenic fault. The gray circle indicates the location of the mainshock. The yellow ellipse represents segment with few aftershocks

主震震源机制、余震震中分布,以及根据余震拟合的断层倾向和倾角来看,发震断层与岷江断裂的逆冲性质不一致,也与已知的、北倾的塔藏断裂倾向不一致,而与虎牙断裂具有较高的相关性.因此,九寨沟地震的发震断层可能是虎牙断裂从南段兼具左旋走滑的逆断层,向北过渡为以走滑为主的转换性断裂.雪山梁子断裂以北、推测的虎牙断裂可能是真实存在的,而且可能和此次九寨沟地震的发震断层是相贯通的.此次地震是巴颜喀拉块体东南向运动过程中,东昆仑断裂东南段扫帚状尾端应力调整的结果.

4.3 余震时空分布特征

应力从主震破裂区向外传播过程中,经常伴随余震的扩展现象.这一现象在主震之后的前几天尤其明显,随后趋于稳定^[43-45].我们把原始余震目录投影到断层面上,分析余震时空演化特征(图8).可以看出,余震沿断层走向有明显的双侧扩展特征.在震后1 h,余震区长度约为25 km.在震后2 d,余震区长度扩展至42 km.之后,余震区范围基本没有变化.将震级下限分别调整为 $M1.0$, $M1.5$, $M2.0$,除扩展长度略有变化外,其他主要特征基本不变.九寨沟余震序列的扩展范围与时间呈对数关系,西北侧和东南侧的扩展速度略有差异,平均约为 $1.3 \text{ km}/\log(s)$,这与其他震例研究基本一致^[46-48].2004年美国Parkfield M_w 6.0地震序列研究表明,余震沿断裂走向和下倾方向有明显的迁移特征,余震扩展范围和时间呈对数关系^[46],与余滑传播引起的余震扩展数值模拟一致^[49];余震累计数量随震后变形线性增加,认为余震主要是由余滑驱动的^[46].

我们推测九寨沟震区可能存在余滑,主要依据有:(1)余震沿断层走向有明显的扩展特征,扩展范围与时间呈对数关系.(2)一些有密集GPS观测的震例研究表明, $M6.0$ 以上地震有能力触发余滑^[50,51].2013年芦山 M_s 7.0地震、2014年Napa M_w 6.1地震、2015年新西兰Wanaka M_L 6.0地震也发现了类似的余震扩展现象^[47,48].(3)余滑一般发生在滑动亏损区域^[52].九寨沟地震的震源破裂过程反演表明,地壳浅部的滑动量小于0.2 m,可能不会形成地表破裂^[7].震后现场考察也未发现同震地表破裂带^[37].因此,九寨沟震区的地壳浅部可能存在滑动亏损.(4)九寨沟地震的最大余震震级为 $M4.8$,明显缺失震级较大的余震^[53],部分应力可能通过余滑等其他震后变形方式释放.

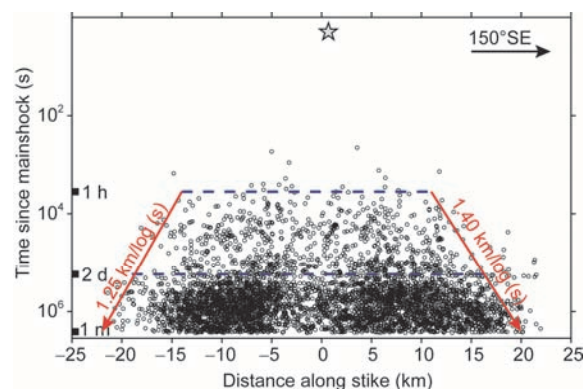


图8 九寨沟余震序列时空扩展图.灰色五角星表示主震,蓝色虚线表示震后1 h和2 d的时间位置,红色箭头表示余震区扩展速率.扩展速率为扩展距离与扩展时间取对数之后的比值

Figure 8 The occurrence times of aftershocks since the Jiuzhaigou earthquake versus the along-strike distances. The blue dashed lines mark 1-h and 2-d after the mainshock. The red line with arrow indicates the approximate slope of aftershock migration along the fault. The rate of the aftershock migration is defined as the ratio of expansion length with time after taking the logarithm

重定位结果显示,主震西北侧存在着一个约5 km长的余震稀疏段,该段与东西两侧的余震分布有明显差异,仅在10 km深度附近有少量余震.这一余震稀疏段的成因有以下3种:(1)同震位错滑动量较大,应力释放较充分;(2)断裂走向发生转折变化;(3)存在未破裂的障碍体.从余震震中分布来看,发震断层整体呈北西向线性展布,虽然断层迹线略有变化,但在余震稀疏段不存在明显的阶区和错断.由于余震稀疏段的西侧有大量的余震活动,长度约14 km,同震破裂跃过这一尺度较小的障碍体,继续向西北传播的可能性较小.地震破裂过程反演结果显示,震源区存在两个同震滑动量较大的区域.其中一个主要滑动区距起始破裂点较近,位于主震西北侧6 km以内,最大滑动量在1.1 m左右,深度范围集中在6~20 km^[8].这个余震稀疏区域恰好是同震滑动位移较大的区域,震前积累的应力在主震破裂时得到了较充分的释放,因此余震很少,而周边同震滑动较小的区域则以余震的形式逐步释放应力.

5 结论

利用四川地震台网和流动地震台站的观测数据,对九寨沟地震的主震和余震序列进行了重新定位.使用最近一个强震台的S-P到时差,估算了主震的初始破裂深度不浅于14.3 km.使用三维速度模型测定的主震震中位置为 $103.806^\circ\text{E}\pm 1.7^\circ$, $33.201^\circ\text{N}\pm$

1.5 km, 震源深度为 20.4 ± 1.9 km.

利用流动观测获得的定位精度较高的余震, 对早期余震位置进行校正, 将九寨沟余震序列的定位精度提高了10%左右. 重定位结果表明, 余震呈北西-南东东向的条带状分布, 走向约 150° , 长度约42 km. 发震断层倾角较陡, 平均值约 84° , 主要向西南倾斜. 断层倾向和倾角沿走向方向有明显变化, 西北侧倾角略缓, 东南侧略陡. 西北段余震深度较浅, 余震带较宽; 东南段余震深度较深, 余震带较窄. 主震附近的断层呈弧形, 浅部向西南倾斜, 深部略向北东倾斜. 断层切割较深, 至少延伸到20 km深度. 九寨沟地震的发震断层与虎牙断裂具有较高的相关性, 可

能是虎牙断裂从南段兼具左旋走滑的逆断层, 向北转换为以走滑为主的过渡性断裂. 此次地震是巴颜喀拉块体东南向运动过程中, 东昆仑断裂东南段扫帚状尾端断裂应力调整的结果.

九寨沟地震序列有明显的时空迁移现象, 余震向北西和东南两侧扩展, 具双侧破裂特征, 震源区可能存在余滑. 主震西北侧存在着一个约5 km长的余震稀疏段, 震前在此段积累的应力在主震破裂时得到了较充分的释放, 导致余震较少. 矩心深度和余震平均深度均小于初始破裂点的深度, 此次地震是一次由深部向浅部破裂的事件. 由于震源深度较深, 导致此次地震震级较大, 但震害损失相对较小.

致谢 四川省地震局、甘肃省地震局、中国地震局地球物理研究所等参与地震应急流动观测的人员, 为本文获取更加精确的震源位置提供了宝贵的观测资料. 四川地震台网为本研究提供了高质量的震相数据, 中国地震局地球物理研究所“国家数字测震台网数据备份中心”为本研究提供地震波形数据, 中国地震局工程力学研究所“国家强震台网中心”提供了强震波形数据. 中国地震局地质研究所刘静研究员和两位审稿人对论文进行了认真审阅并提出了宝贵建议, 在此表示衷心感谢.

参考文献

- 1 Zhang P, Deng Q, Zhang G, et al. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China. *Sci Chin Ser D-Earth Sci*, 2003, 46: 13–24
- 2 Xu X W, Han Z J, Yang X P, et al. *Seismotectonic Map of China and Surrounding Area* (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2016 [徐锡伟, 韩竹军, 杨晓平, 等. 中国及邻近地区地震构造图. 北京: 地震出版社, 2016]
- 3 The Earthquake Disaster Prevention Department of China Earthquake Administration. *Catalogue of Chinese Historical Strong Earthquakes* (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1995. 1–514 [中国地震局震害防御司. 中国历史强震目录. 北京: 地震出版社, 1995. 1–514]
- 4 The Earthquake Disaster Prevention Department of China Earthquake Administration. *Catalogue of Chinese Present Earthquakes* (in Chinese). Beijing: China Science and Technology Press, 1999. 1–637 [中国地震局震害防御司. 中国近代地震目录. 北京: 中国科学技术出版社, 1999. 1–637]
- 5 Han L B, Cheng J, An Y R, et al. Preliminary report on the 8 August 2017, $M_s 7.0$ Jiuzhaigou, Sichuan, China, earthquake. *Seismol Res Lett*, 2018, doi: <https://doi.org/10.1785/0220170158>
- 6 Xie Z J, Zheng Y, Yao H J, et al. Preliminary analysis about source characteristics and seismogenic structure of the Jiuzhaigou $M_s 7.0$ earthquake in 2017. *Sci China Earth Sci*, 2018, 61, doi: 10.1007/s11430-017-9161-y [谢祖军, 郑勇, 姚华建, 等. 2017年九寨沟 $M_s 7.0$ 地震震源性质及发震构造初步分析. 中国科学: 地球科学, 2018, 48: 79–92]
- 7 Yi G X, Long F, Liang M J, et al. Focal mechanism solutions and seismogenic structure of the 8 August 2017 $M 7.0$ Jiuzhaigou earthquake and its aftershocks, northern Sichuan (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2017, 60: 4083–4097 [易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 等. 2017年8月8日九寨沟 $M 7.0$ 地震及余震震源机制解与发震构造分析. 地球物理学报, 2017, 60: 4083–4097]
- 8 Zhang X, Feng W P, Xu L S, et al. The source-process inversion and the intensity estimation of the 2017 $M_s 7.0$ Jiuzhaigou earthquake (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2017, 60: 4105–4116 [张旭, 冯万鹏, 许力生, 等. 2017年九寨沟 $M_s 7.0$ 级地震震源过程反演与烈度估计. 地球物理学报, 2017, 60: 4105–4116]
- 9 Zheng X J, Zhang Y, Wang R J. Estimating the rupture process of the 8 August 2017 Jiuzhaigou earthquake by inverting strong-motion data using IDS method (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2017, 60: 4421–4430 [郑绪君, 张勇, 汪荣江. 采用IDS方法反演强震数据确定2017年8月8日九寨沟地震的破裂过程. 地球物理学报, 2017, 60: 4421–4430]
- 10 Wu J P, Huang Y, Zhang T Z, et al. Aftershock distribution of the $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake and three dimensional P-wave velocity structure in and around source region (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2009, 52: 320–328 [吴建平, 黄媛, 张天中, 等. 汶川8.0级地震余震分布及震源区三维P波速度结构. 地球物理学报, 2009, 52: 320–328]

- 震分布及周边区域 P 波三维速度结构研究. 地球物理学报, 2009, 52: 320–328]
- 11 Fang L H, Wu J P, Wang W L, et al. Relocation of the mainshock and aftershock sequences of $M_s7.0$ Sichuan Lushan earthquake. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 3451–3459
 - 12 Fang L H, Wu J P, Wang W L, et al. Aftershock observation and analysis of the 2013 $M_s7.0$ Lushan earthquake. *Seismol Res Lett*, 2015, 86: 1135–1142
 - 13 Zheng X F, Ouyang B, Zhang D N, et al. Technical system construction of Data Backup Centre for China Seismograph Network and the data support to researches on the Wenchuan earthquake (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2009, 52: 1412–1417 [郑秀芬, 欧阳颢, 张东宁, 等. “国家数字测震台网数据备份中心”技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑. 地球物理学报, 2009, 52: 1412–1417]
 - 14 Waldhauser F, Ellsworth W L. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California. *Bull Seismol Soc Am*, 2000, 90: 1353–1368
 - 15 Chen J H, Liu Q Y, Li S C, et al. Seismotectonic study by relocation of the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake sequence (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2009, 52: 390–397 [陈九辉, 刘启元, 李顺成, 等. 汶川 $M_s8.0$ 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]
 - 16 Lei J S, Zhang G W, Xie F R. The 20 April 2013 Lushan, Sichuan, mainshock, and its aftershock sequence: Tectonic implications. *Earthq Sci*, 2014, 27: 15–25
 - 17 Wang C Y, Han W B, Wu J P, et al. Crustal structure beneath the eastern margin of the Tibetan Plateau and its tectonic implications. *J Geophys Res*, 2007, 112: B07307
 - 18 Wang W L, Wu J P, Fang L H, et al. Sedimentary and crustal thicknesses and Poisson's ratios for the NE Tibetan Plateau and its adjacent regions based on dense seismic arrays. *Earth Planet Sci Lett*, 2017, 462: 76–85
 - 19 Ji L Y, Liu C J, Xu J, et al. InSAR observation and inversion of the seismogenic fault for the 2017 Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake in China (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2017, 60: 4069–4082 [季灵运, 刘传金, 徐晶, 等. 九寨沟 $M_s7.0$ 地震的 InSAR 观测及发震构造分析. 地球物理学报, 2017, 60: 4069–4082]
 - 20 Luo Y, Zeng X F, Ni S D. Progress on the determination of focal depth (in Chinese). *Progr Geophys*, 2013, 28: 2309–2321 [罗艳, 曾祥方, 倪四道. 震源深度测定方法研究进展. 地球物理学进展, 2013, 28: 2309–2321]
 - 21 Gomberg J S, Shedlock K M, Roecker S W. The effect of S-wave arrival times on the accuracy of hypocenter estimation. *Bull Seismol Soc Am*, 1990, 80: 1605–1628
 - 22 Allen R. Automatic phase pickers: Their present use and future prospects. *Bull Seismol Soc Am*, 1982, 72: S225–S242
 - 23 Jurkevics A. Polarization analysis of three-component array data. *Bull Seismol Soc Am*, 2002, 78: 1725–1743
 - 24 Shearer P M. Improving local earthquake locations using the L1-norm and waveform cross-correlation: Application to the Whittier Narrows, California, aftershock sequence. *J Geophys Res*, 1997, 102: 8269–8283
 - 25 Sibson R H. Fault zone models, heat flow, and the depth distribution of earthquakes in the continental crust of the United States. *Bull Seismol Soc Am*, 1982, 72: 151–163
 - 26 Sibson R H. Continental fault structure and the shallow earthquake source. *J Geol Soc (Lond)*, 1983, 140: 741–767
 - 27 Das S, Scholz C H. Why large earthquakes do not nucleate at shallow depths. *Nature*, 1983, 305: 621–623
 - 28 Wang C Z, Wu J P, Fang L H, et al. The relationship between wave velocity structure around Yushu earthquake source region and the distribution of aftershocks (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2013, 56: 4072–4083 [王长在, 吴建平, 房立华, 等. 玉树地震震源区速度结构与余震分布的关系. 地球物理学报, 2013, 56: 4072–4083]
 - 29 Brocher T M, Baltay A S, Hardebeck J L, et al. The M_w 6.0 24 August 2014 South Napa earthquake. *Seismol Res Lett*, 2015, 86: 309–326
 - 30 Ji C, Archuleta R J, Twardzik C. Rupture history of 2014 M_w 6.0 South Napa earthquake inferred from near-fault strong motion data and its impact to the practice of ground strong motion prediction. *Geophys Res Lett*, 2015, 42: 2149–2156
 - 31 Fang L H, Wu J P, Wang W L, et al. Relocation of the aftershock sequence of the $M_s6.5$ Ludian earthquake and its seismogenic structure (in Chinese). *Seismol Geol*, 2014, 36: 1173–1185 [房立华, 吴建平, 王未来, 等. 云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震余震重定位及其发震构造研究. 地震地质, 2014, 36: 1173–1185]
 - 32 Chen H, Chen X F. Focal mechanism inversion and relocation of the Yunnan Jinggu M_w 6.2 earthquake on 7 October 2014 (in Chinese). *Progr Geophys*, 2016, 31: 1413–1418 [陈浩, 陈晓非. 2014 年 10 月 7 日云南景谷 $M_w6.2$ 地震震源机制解反演和重定位. 地球物理学进展, 2016, 31: 1413–1418]
 - 33 Yi G X, Long F, Wen X Z, et al. Seismogenic structure of the M 6.3 Kangding earthquake sequence on 22 Nov 2014, Southwestern China (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2015, 58: 1205–1219 [易桂喜, 龙锋, 闻学泽, 等. 2014 年 11 月 22 日康定 $M6.3$ 级地震序列发震构造分析. 地球物理学报, 2015, 58: 1205–1219]
 - 34 Mori J, Abercrombie R E. Depth dependence of earthquake frequency-magnitude distributions in California: Implications for rupture initiation. *J Geophys Res*, 1997, 102: 15081–15090

- 35 Wen X Z, Du F, Zhang P Z, et al. Correlation of major earthquake sequences on the northern and eastern boundaries of the Bayan Har block, and its relation to the 2008 Wenchuan earthquake (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2011, 54: 706–716 [闻学泽, 杜方, 张培震, 等. 巴颜喀拉块体北和东边界大地震序列的关联性与 2008 年汶川地震. *地球物理学报*, 2011, 54: 706–716]
- 36 Ren J J, Xu X W, Yeats R S, et al. Millennial slip rates of the Tazang fault, the eastern termination of Kunlun fault: Implications for strain partitioning in eastern Tibet. *Tectonophysics*, 2013, 608: 1180–1200
- 37 Xu X W, Chen G H, Wang Q X, et al. Discussion on seismogenic structure of Jiuzhaigou earthquake and its implication for current strain state in the southeastern Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2017, 60: 4018–4026 [徐锡伟, 陈桂华, 王启欣, 等. 九寨沟地震震断层属性及青藏高原东南缘现今应变状态讨论. *地球物理学报*, 2017, 60: 4018–4026]
- 38 Zheng W J, Yuan D Y, He W G, et al. Geometric pattern and active tectonics in Southeastern Gansu Province: Discussion on seismogenic mechanism of the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake on July 22, 2013 (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2013, 56: 4058–4071 [郑文俊, 袁道阳, 何文贵, 等. 甘肃东南地区构造活动与 2013 年岷县-漳县 $M_s6.6$ 级地震孕震机制. *地球物理学报*, 2013, 56: 4058–4071]
- 39 Ren J J, Xu X W, Zhang S M, et al. Tectonic transformation at the eastern termination of the Eastern Kunlun fault zone and seismogenic mechanism of the 8 August 2017 Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2017, 60: 4027–4045 [任俊杰, 徐锡伟, 张世民, 等. 东昆仑断裂带东端的构造转换与 2017 年九寨沟 $M_s7.0$ 地震孕震机制. *地球物理学报*, 2017, 60: 4027–4045]
- 40 Hu C Z, Ren J W, Yang P X, et al. Discussion on the compression-shear activity of the Tazang fault in east Kunlun and uplift of plateau (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2017, 91: 1401–1415 [胡朝忠, 任金卫, 杨攀新, 等. 东昆仑断裂东端塔藏断裂压剪活动与高原隆升作用讨论. *地质学报*, 2017, 91: 1401–1415]
- 41 Deng Q D, Chen S F, Zhao X L. Tectonics, seismicity and dynamics of Longmenshan mountains and its adjacent regions (in Chinese). *Seismol Geol*, 1994, 16: 389–403 [邓起东, 陈社发, 赵小麟. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学. *地震地质*, 1994, 16: 389–403]
- 42 Jones L M, Han W, Hauksson E, et al. Focal mechanisms and aftershock locations of the Songpan earthquakes of August 1976 in Sichuan, China. *J Geophys Res*, 1984, 89: 7697–7707
- 43 Chatelain J L, Cardwell R K, Isacks B L. Expansion of the aftershock zone following the Vanuatu (New Hebrides) earthquake on 15 July 1981. *Geophys Res Lett*, 1983, 10: 385–388
- 44 Tajima F, Kanamori H. Global survey of aftershock area expansion patterns. *Phys Earth Planet Interior*, 1985, 40: 77–134
- 45 Henry C, Das S. Aftershock zones of large shallow earthquakes: Fault dimensions, aftershock area expansion and scaling relations. *Geophys J Int*, 2001, 147: 272–293
- 46 Peng Z, Zhao P. Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake. *Nat Geosci*, 2009, 2: 877–881
- 47 Wu J, Yao D, Meng X, et al. Spatial-temporal evolutions of early aftershocks following the 2013 M_w 6.6 Lushan earthquake in Sichuan, China. *J Geophys Res*, 2017, 122: 2873–2889
- 48 Warren-Smith E, Chamberlain C J, Lamb S, et al. High-Precision analysis of an aftershock sequence using matched-filter detection: The 4 May 2015 M_L 6 Wanaka earthquake, southern Alps, New Zealand. *Seismol Res Lett*, 2017, 88, 4: 1065–1077
- 49 Kato N. Expansion of aftershock areas caused by propagating post-seismic sliding. *Geophys J Int*, 2007, 168: 797–808
- 50 Barbot S, Fialko Y, Bock Y. Postseismic deformation due to the M_w 6.0 2004 Parkfield earthquake: Stress-driven creep on a fault with spatially variable rate-and-state friction parameters. *J Geophys Res*, 2009, 114: B07405
- 51 Wei S J, Barbot S, Graves R, et al. The 2014 M_w 6.1 South Napa earthquake: A unilateral rupture with shallow asperity and rapid afterslip. *Seismol Res Lett*, 2015, 86: 344–354
- 52 Marone C. Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 1998, 26: 643–696
- 53 Jiang C S, Zhuang J C, Wu Z L, et al. Application and comparison of two short-term probabilistic forecasting models for the 2017 Jiuzhaigou, Sichuan, $M_s7.0$ earthquake (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2017, 60: 4132–4144 [蒋长胜, 庄建仓, 吴忠良, 等. 两种短期概率预测模型在 2017 年九寨沟 7.0 级地震中的应用和比较研究. *地球物理学报*, 2017, 60: 4132–4144]

Summary for “四川九寨沟 $M_s7.0$ 地震主震及其余震序列精定位”

Relocation of mainshock and aftershock sequence of the $M_s7.0$ Sichuan Jiuzhaigou earthquake

Lihua Fang^{1,2*}, Jianping Wu^{1,2}, Jinrong Su³, Maomao Wang⁴, Ce Jiang⁵, Liping Fan¹, Weilai Wang¹, Changzai Wang¹ & Xialu Tan¹

¹ Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China;

² Key Laboratory of Seismic Observation and Geophysical Imaging, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China;

³ Sichuan Earthquake Administration, Chengdu 610041, China;

⁴ College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China;

⁵ Guangdong Earthquake Administration, Guangzhou 510070, China

* Corresponding author, E-mail: flh@cea-igp.ac.cn

An earthquake of $M_s7.0$ struck Jiuzhaigou Country in Sichuan Province on 8 August 2017. It occurred at the northeastern boundary of the Bayan Har block. The Jiuzhaigou earthquake was one of the largest earthquakes in continental China since the 2013 $M_s7.0$ Lushan earthquake, and it was widely felt across Sichuan and adjacent provinces. The earthquake left 25 dead and up to 500 injured. Because the Jiuzhaigou earthquake did not produce obvious surface ruptures, the causative fault of this event was much debated. The shape of the seismogenic fault, the focal depth of the mainshock and the characteristics of the aftershock sequence were also not very clear. The Sichuan earthquake administration deployed 6 temporary seismic stations around the source region within 4 d of the mainshock. In this study, we collected seismic waveform data and phase arrival data recorded by permanent and temporary stations. We present a systematic investigation about the location of the Jiuzhaigou earthquake sequence with high precision. These results provide new constraints for refining earthquake rupture process, constructing seismogenic models, and evaluating regional earthquake risks. The mainshock of the Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake was relocated using a 3D velocity model. The procedure takes station elevation, topography and the Earth's ellipticity into consideration. The location of the mainshock was found to be 103.806°E , 33.201°N , and the focal depth to be 20.4 km. The depth of the initial rupture point of the mainshock was estimated to be below 14 km with S-P arrival time difference recorded at the nearest strong motion station. The locations of early aftershocks were corrected with latter aftershocks recorded using dense temporary seismic stations. A double difference algorithm was used to relocate 1-month aftershock sequence of the Jiuzhaigou earthquake. The locations of 3030 aftershocks were here determined. The average location error was found to be 0.16, 0.15, and 0.18 km in the E-W, N-S, and U-D directions, respectively. The relocation results showed that the aftershocks spread approximately 42 km, trending NWW. The aftershock zone was found to connect the Tazang fault to the north and to the Huya fault to the south. The mainshock is located at the center of the aftershock zone, with similar aftershock length at the both sides. There is a ~5 km sparse aftershock segment to the NW of the mainshock which is consistent with large coseismic slip area. This phenomenon can be explained due to the large amount of stress released during the mainshock rupture. The depth of the aftershock in the northwest end was relatively shallow, and the aftershock zone was about 6 km wide. The depth of aftershock in the southeast section was deeper and the area was narrower, about 4 km. The predominant distribution of the focal depth is 4–20 km. The dip angle of the seismogenic fault is steep, with an average value of about 84° , and changes obviously along the strike direction. The seismogenic fault inclined to the southwest in the shallow part and to the northeast in the deep part. The complex fault shape should be considered when constructing seismogenic model and inverting earthquake rupture process. The depth of the initial rupture point of the mainshock is deeper than the centroid depth and average depth of the aftershock sequence, indicating that the earthquake rupture spreads from deep space to shallow. We find that the aftershocks migrated in the along-strike direction with logarithmic time since the mainshock. The length of the aftershock area expanded from 25 to 42 km in 2 d. The rate of spread was approximately 1.3 km/log(s), consistent with aftershock expansion caused by propagating afterslip. There may be afterslip in the source area of the Jiuzhaigou earthquake.

Jiuzhaigou earthquake, aftershock sequence, double difference location, focal depth, seismogenic fault

doi: 10.1360/N972017-01184