

由余震分布确定 2017 年九寨沟 M_s 7.0 地震 发震断层面参数*

胡晓辉¹, 盛书中^{1,3,✉}, 万永革¹, 梁姗姗², 李泽潇¹, 刘敬光¹, 柴光斌¹

(1. 防灾科技学院, 河北 三河 065201; 2. 中国地震台网中心, 北京 100045;
3. 东华理工大学 地球物理与测控技术学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 基于 2017 年九寨沟 M_s 7.0 地震经过重定位的 4 035 个余震数据, 利用小震确定大震断层面方法, 得到该地震的断层面参数, 以余震稀疏区为界将余震分为南北两段进行分段拟合, 最后判定了此次地震的发震构造。结果表明: 九寨沟地震的发震断层走向 151.3° 、倾角 84.0° , 该结果可视为发震断层参数的一级近似; 南、北两段的走向和倾角分别为 147.4° 和 88.3° , 162.9° 和 76.8° , 南、北两段较大的差异可能是余震稀疏区的成因; 结合周边地质构造特征, 推测此次地震的发震断层为虎牙断裂 NW 向延伸的隐伏部分。

关键词: 九寨沟地震; 余震; 断层面参数; 断层分段

中图分类号: P315.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2019)03-0366-06

0 引言

2017 年 8 月 8 日 21 时 19 分, 四川省阿坝州九寨沟县 (33.20°N , 103.82°E) 发生 M_s 7.0 地震, 震源深度为 20 km。此次地震发生在青藏高原巴颜喀拉块体东缘, 震中附近区域构造复杂, 多条差异很大的断层相互交错, 主要发育有 NWW 向的塔藏断裂、近 EW 向的雪山梁子断裂、NS 向的岷江断裂和 NNW 向的虎牙断裂 (徐锡伟等, 2017)。该区域地震活动频繁, 周边断裂带上曾发生多次中强震, 如岷江断裂上发生 1933 年叠溪 M_s 7.5 地震, 虎牙断裂上发生 1973 年松潘黄龙 M_s 6.5 地震以及 1976 年松潘—平武 2 次 M_s 7.2 和 1 次 M_s 6.7 地震 (朱航, 闻学泽, 2009)。2017 年九寨沟地震震中又位于地震破裂空区 (徐锡伟等, 2017), 发震断层和活动断裂之间的关系不明确。对于此次地震的发震断层, 不同学者持不同意见, 主要有以下两种观点: 一种观点认为此次地震可能发生在虎牙断裂 NW 向延伸的潜伏断层上 (杨宜海等, 2017; 季灵运

等, 2017; 徐锡伟等, 2017; 鲁人齐等, 2018); 另一观点认为发震构造为塔藏断裂南侧分支——树正断裂, 或与虎牙断裂贯通 (易桂喜等, 2017; 姚鑫等, 2017)。本文利用万永革等 (2008) 给出的由小震数据确定断层参数的方法, 确定本次地震的发震断层面参数, 并将所得断层参数和周边断层参数进行对比分析, 判定了 2017 年九寨沟地震的发震断层。

1 数据与研究方法

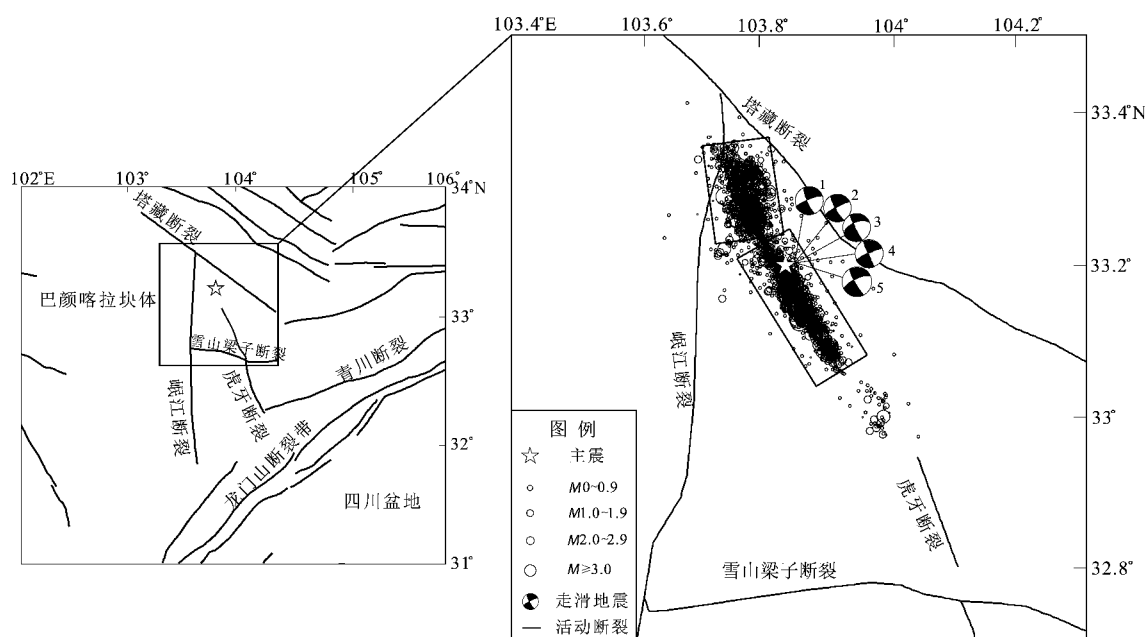
梁姗姗等 (2018) 根据四川省地震局的观测报告获得 2017 年九寨沟 M_s 7.0 地震的震相数据和初始震源参数, 选取 2017 年 8 月 8 日 21 时至 10 月 31 日 24 时共 6 453 次地震, 采用双差定位法对地震事件进行相对定位, 最终给出 4 036 个重定位地震事件, 包括 1 次主震和 4 035 次余震。重定位后的地震序列沿 NS, EW 和 UD 方向的平均相对误差较小, 均在 0.05 km 以下, 平均均方根残差为 0.03 s, 其余震序列空间分布情况如图 1 所示, 图中序号 1~5 为分别来自于易桂喜等

* 收稿日期: 2018-09-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41704053, 41674055) 和河北省地震科技星火计划 (DZ20170109001) 联合资助.

✉ 通讯作者: 盛书中 (1982-), 副教授, 主要从事构造应力场、地震应力触发等方面研究.

E-mail: ssz@cea-igp.ac.cn.

图1 2017年九寨沟 $M_s7.0$ 地震构造背景及余震分布图Fig. 1 Map of tectonics background and distribution of aftershocks of 2017 Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake

(2017)、全球矩心矩张量 (GCMT)、美国地质调查局 (USGS)、梁姗姗等 (2018) 和杨宜海等 (2017) 得到的主震的震源机制解。

大震发生后,大量的余震发生在断层及其附近区域,根据余震分布获得断层产状,可以勾画出断层的形状,推测地震的发震断层,尤其是对于发震断层比较复杂的地震,余震可以刻画出断层的三维形态 (万永革等, 2008)。王鸣和王培德 (1992) 最早采用此原理分析了山西省大同一阳高地震的发震断层面,但所采用的高斯-牛顿法依赖初始解,如果初始解选取的不合适,得到的解将会远离真实解。万永革等 (2008) 对此方法做了改进,假定发震断层面可以近似为一个平面或分段近似为多个平面,小震震源位置到假定断层面距离的平方和最小,建立求解断层面的数学模型,给出根据小震确定主震走向、倾角的模拟退火全局搜索和高斯-牛顿局部搜索相结合的方法,此方法可以在全局搜索最优解,避免了对初始解的依赖,被广泛应用于断层参数的确定 (李迎秋等, 2011; 杨超群等, 2013; Wang *et al.*, 2014; 盛书中等, 2014; 潘睿等, 2015)。但该方法通过人工筛选数据,可能存在偶然因素的影响。为了验证人工筛选数据是否对研究结果及稳定性造成影响,本文在数据筛选前进行了数据随机筛选测试。

本文进行了1 000次实验,每次从4 035个余震数据中随机选取90%的地震事件进行断层面参数拟合,所得断层的走向和倾角分布见图2。由图2可见,1 000次实验结果给出的走向和倾角分布比较集中,走向的拟合结果为 151.3° ,标准差为0.08,倾角的拟合结果为 84.0° ,标准差为0.27。由此可见断层面参数反演结果是稳定的,一方面反映了本次地震的余震分布集中,大体上分布于主震断层面上及其附近,另一方面反映了人为选

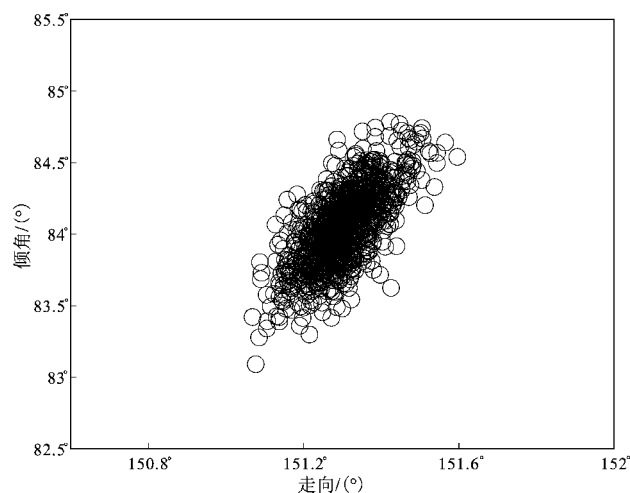


图2 1 000次随机试验获得的断层走向和倾角分布图

Fig. 2 Distribution of fault's strike and dip obtained by 1 000 times random experiments

取余震数据对本次研究结果的影响较小。因此, 本文将使用梁姗姗等 (2018) 计算得出的九寨沟地震 4 035 个重定位余震事件, 采用万永革等 (2008) 的小震确定大震断层面方法进行计算研究。

2 断层参数的确定

本文使用九寨沟地震全部精定位余震事件进行计算, 结果如图 3 所示 (图中白色虚线框和黑色虚线框为断层面)。图 3a, b 为余震在水平面和断层面的展布。从图 3c, d 中可以看出, 余

震主要集中在主震断层面 5 km 范围内, 说明大部分余震在所求断层面的附近, 并以断层面为中心呈对称分布。最终获得九寨沟地震发震断层的详细参数 (表 1)。

由余震分布确定九寨沟地震发震断层的走向和倾角分别为 151.3°和 84.0°, 与之前研究结果作比较 (表 2), 发现本文结果与美国地质调查局 (USGS)、中国地震局地球物理研究所、杨宜海等 (2017)、易桂喜等 (2017) 和梁姗姗等 (2018) 的结果是一致的; 走向结果与 GCMT、刘旭宙等 (2017)、谢祖军等 (2018) 的研究结果一致;

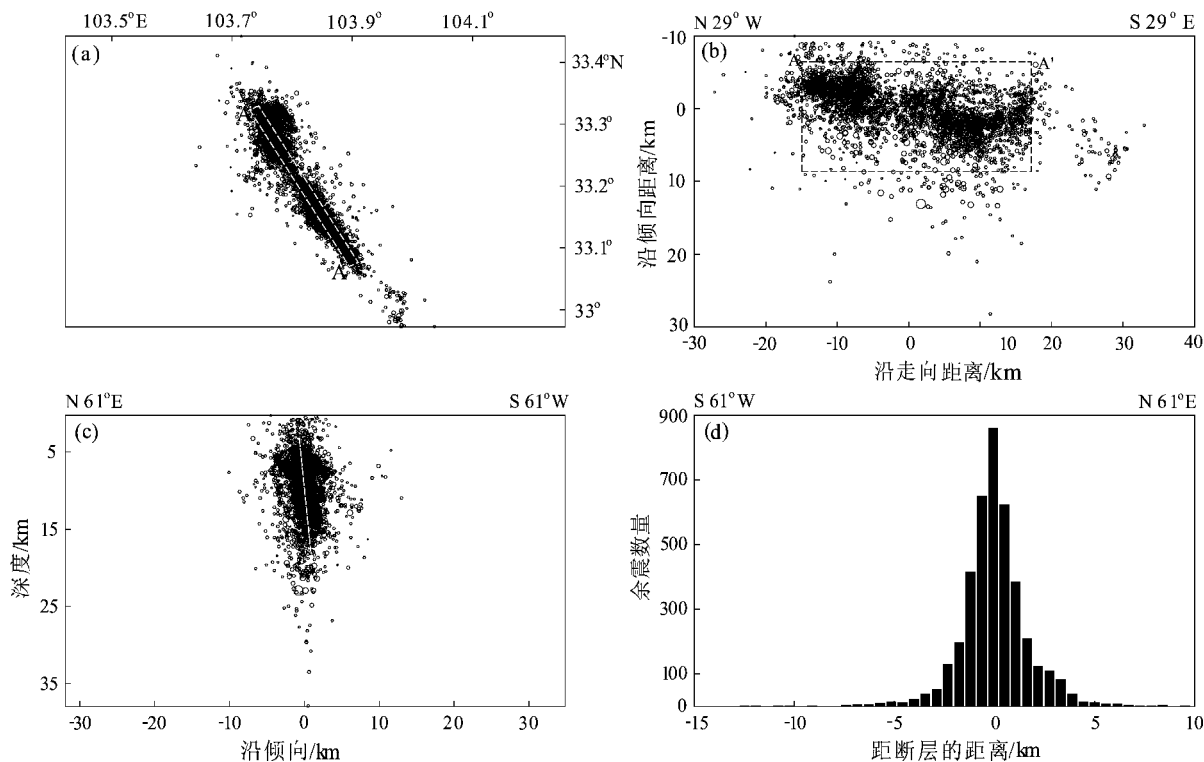


图 3 2017 年九寨沟 $M_s7.0$ 地震精定位余震在水平面 (a)、断层面 (b) 和垂直于断层的横断面 (c) 上的投影及小震到断层面距离的分布 (d)

Fig. 3 Projection of precisely located aftershocks of Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake in 2017 on horizontal (a), fault (b) surfaces and cross section vertical to fault (c), and distribution of distance from small earthquakes to fault plane (d)

表 1 2017 年九寨沟 $M_s7.0$ 地震发震断层参数计算结果

Tab. 1 The calculating results of seismic fault plane parameters of the 2017 Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake

断层	余震数	走向/(°)	走向标准差	倾角/(°)	倾角标准差	距离/km	距离标准差	平均演后残差/km
整体断层	4 035	151.3	0.17	84.0	0.46	0.00	0.02	2.80
断层南段	2 197	147.4	0.29	88.3	0.48	0.00	0.03	1.95
断层北段	1 838	162.9	0.68	76.8	0.80	0.00	0.04	2.94

倾角结果与刘旭宙等（2017）的结果差异最大，相差 14° ，以上结果一定程度上反映了用余震数据确定断层参数方法的稳定性和准确性均较高。震源机制解节面是复杂发震断层面的一个近似，因此，本文用全部余震数据所得结果可以视为发震断层参数的一级近似。

表 2 不同研究所得 2017 年九寨沟 $M_s7.0$ 地震断层参数对比
Tab. 2 Comparison of fault plane parameters of 2017 Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake by different research

来源	节面	
	走向/ ($^\circ$)	倾角/ ($^\circ$)
本文研究结果	151.3	84.0
美国地质勘探局 (USGS)	153.0	84.0
中国地震局地球物理研究所	151.0	87.0
杨宜海等 (2017)	150.0	80.0
易桂喜等 (2017)	156.0	79.0
梁姗姗等 (2018)	155.7	87.1
GCMT	150.0	78.0
刘旭宙等 (2017)	154.0	70.0
谢祖军等 (2018)	152.0	74.0

3 发震断层的分段

精定位后的余震呈 NW—SE 向分布，从图 1 可以看出，在主震的 WN 方向存在一段余震稀疏区，不同研究者对本次地震序列余震精定位研究结果也显示存在余震稀疏区（房立华等，2018；梁建宏等，2018）。季灵运等（2017）对 InSAR 观测结果的研究表明发震断层走向在余震稀疏区由 NW 向 NNW 过渡，即发震断层在余震稀疏区以南的走向为 NW 向，在余震稀疏区以北的走向为 NNW 向。那么主震发震断层是否存在转向，余震稀疏区是否是其转向的分段点？本文采用分段拟合断层参数的方法对发震断层进行分析，根据不同分段间差异大小，确定断层是否可以进一步分段。平均演后残差为每个余震震源到拟合断层面的最终平均残差（万永革等，2008）。本文根据平均演后残差的变化确定分段点的大致位置，将所有地震事件按纬度排列，从南向北，由 33.05°N 开始，用窗长为 0.1° ，步长为 0.025° 的滑动窗进行分段拟合，计算结果如图 4 所示。

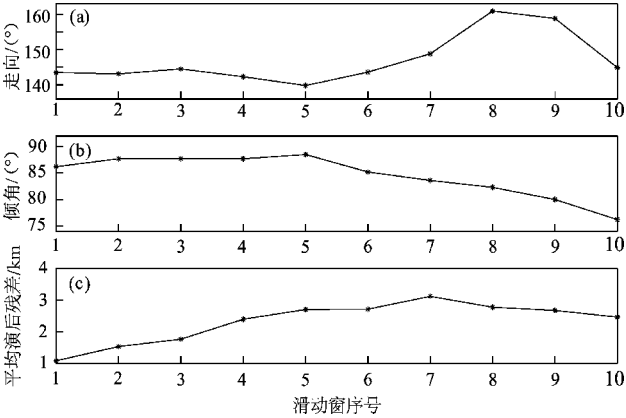


图 4 走向 (a)、倾角 (b) 和平均演后残差 (c) 分布图

Fig. 4 Distribution of strike (a), dip angle (b) and average post-mortem residual (c)

从图 4 可以看出，第 7 个滑动窗平均演后残差最大，反映该处断裂构造相对复杂，该滑动窗的范围为 $33.2^\circ \sim 33.3^\circ\text{N}$ ，横跨余震稀疏区。综上，大致以余震稀疏区为界将余震分为南、北两段分别计算，计算结果如表 1 所示。南、北两段断层走向的最优解及其标准差范围不重合，表明南、北两段走向存在差异，且发震断层的走向发生了变化，南、北段断层是对整体反演结果的进一步细化，可以认为是断层的次一级划分。从图 4 中可以看出，倾角也发生了变化，由 85° 变化到 75° 。谢祖军等（2018）通过建立九寨沟地震发震断层的三维模型，得到倾角范围为 $66^\circ \sim 89^\circ$ ，平均值为 84° ；房立华等（2018）通过剖面最小二乘线性拟合获得发震断层的倾角为 $74^\circ \sim 88^\circ$ ，东南段略高于西北段，与本文的计算结果一致。

对于余震稀疏区产生的原因，房立华等（2018）给出了 3 种可能成因：①断裂走向发生转折变化；②存在障碍物；③同震位错滑动量较大，应力释放充分。通过分析地震破裂反演结果（张旭等，2017）认为第 3 种成因可能性较大，但认为地震破裂反演结果基于发震断层面是一种平面的假设，而实际上断层面是非平面的，因此，上述第 3 种原因还有待于进一步证实。本文研究表明在余震稀疏区两侧发震断层的倾角和走向发生了较大的变化（图 4 和表 1），断层参数的变化可能对于发震不利，因此本文认为上述第 1 种原因的可能性较大。

4 发震构造讨论

2017 年九寨沟 $M_s7.0$ 地震属于左旋走滑型地震 (易桂喜等, 2017; 梁姗姗等, 2018; 谢祖军等, 2018), 震中位于塔藏断裂、岷江断裂、虎牙断裂和雪山梁子断裂所夹持的区域 (图 1), 多条性质不同的断裂交汇于此, 区域构造复杂。其中塔藏断裂位于东昆仑断裂的东端, 总体走向为 NW, 塔藏断裂与虎牙断裂及其附近的其他断裂分解了大部分东昆仑断裂带的左旋走滑分量 (徐锡伟等, 2017), 表现为左旋走滑性质, 与此次地震的运动性质相一致, 但余震的分布与塔藏断裂不重合, 判定不是此次地震的发震断层; 岷江断裂总体走向近 NS, 倾向 NW, 倾角 $60^\circ \sim 70^\circ$, 全长 170 km, 表现为逆冲运动性质 (徐锡伟等, 2017; 任俊杰等, 2017), 与九寨沟地震的左旋走滑机制不一致, 判定不是此次地震的发震断层; 雪山梁子断裂走向 EW, 倾向 N (Kirby *et al.*, 2000), 也不是此次地震的发震断层; 虎牙断裂位于龙门山断裂的 NW 侧, 全长 60 km, 松潘黄龙以北为虎牙断裂的北段断裂, 走向由 NNW 转为 NS 向, 倾向 E, 倾角 80° 左右, 以左旋走滑为主 (唐荣昌, 陆联康, 1981; 徐锡伟等, 2017), 黄龙以南, 以小河为界分为两段, 虎牙中、南段断裂走向由 NS 向 SE 偏转, 倾向 W, 倾角由 N 往 S 自 70° 变为 30° (唐荣昌, 陆联康, 1981), 表现为左旋走滑兼逆冲的运动方式, 其中虎牙南段断裂为逆冲型运动 (Jones *et al.*, 1984; 朱航, 闻学泽, 2009), 总体走向 NNW。从 2017 年九寨沟 $M_s7.0$ 地震余震的分布和断层参数来看, 走向和倾角与虎牙断裂北段相一致, 运动性质也与虎牙断裂北段相一致, 为左旋走滑机制。InSAR 观测 (季灵运等, 2017)、野外实地考察 (徐锡伟等, 2017) 以及同震滑动分布 (陈威等, 2018) 表明, 九寨沟地震未破裂到地表, 此次地震的发震断层为隐伏断层。因此, 推测此次地震的发震断层为虎牙断裂北端的隐伏断层。

5 结论

本文利用 2017 年九寨沟 $M_s7.0$ 地震重定位余震数据, 获得了该地震的发震断层参数, 并结合

周边地质构造推断了其发震构造, 获得的主要结论如下:

(1) 使用余震资料获得九寨沟地震发震断层走向和倾角分别为 151.3° 和 84.0° , 该结果和其他研究给出的断层参数较为一致, 可以视为发震断层参数的一级近似。

(2) 根据余震稀疏区以及断层总体走向的变化, 进一步给出了次一级的发震断层参数, 即将发震断层分为南、北两段, 南段断层的走向和倾角分别为 147.4° 和 88.3° , 北段断层的走向和倾角分别为 162.9° 和 76.8° 。对于余震稀疏区的成因, 本文认为可能是断层走向和倾角变化较大所致。

(3) 九寨沟地震属于高倾角左旋走滑型地震 (易桂喜等, 2017; 梁姗姗等, 2018; 谢祖军等, 2018), 发震断层与虎牙断裂的北段的运动性质、走向和倾角相一致, 推测此次九寨沟地震的发震断层为虎牙断裂 NW 向延伸的隐伏断层。

审稿专家给出宝贵的修改意见, 本文图件利用 MATLAB 和 Generic Mapping Tools (Wessel, Smith, 1998) 绘制, 震源数据从全球矩张量解 (GCMT) 网站上获得, 在此一并表示感谢!

参考文献:

- 陈威, 乔学军, 刘刚, 等. 2018. 基于 GNSS 与 InSAR 约束的九寨沟 $M_s7.0$ 地震滑动模型及其库伦应力研究 [J]. 地球物理学报, 61 (5): 2122 - 2132.
- 房立华, 吴建平, 苏金蓉, 等. 2018. 四川九寨沟 $M_s7.0$ 地震主震及其余震序列精确定位 [J]. 科学通报, 63 (7): 649 - 662.
- 季灵运, 刘传金, 徐晶, 等. 2017. 九寨沟 $M_s7.0$ 地震的 InSAR 观测及发震构造分析 [J]. 地球物理学报, 60 (10): 4069 - 4082.
- 李迎秋, 刘鑫, 万永革. 2011. 利用智利地震震源分布确定智利地区主震断层 [J]. 防灾科技学院学报, 13 (2): 51 - 56.
- 梁建宏, 孙丽, 刘杰. 2018. 2017 年四川九寨沟 $M_s7.0$ 地震及余震精确定位研究 [J]. 地球物理学报, 61 (5): 2152 - 2162.
- 梁姗姗, 雷建设, 徐志国, 等. 2018. 2017 年四川九寨沟 $M_s7.0$ 强震的余震重定位及主震震源机制反演 [J]. 地球物理学报, 61 (5): 2163 - 2175.
- 刘旭宙, 张元生, 秦满忠, 等. 2017. 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, 39 (5): 913 - 918.
- 鲁人齐, 徐锡伟, 陈立春, 等. 2018. 2017 年 8 月 8 日九寨沟 $M_s7.0$ 地震构造与震区三维断层初始模型 [J]. 地震地质, 40 (1): 1 - 11.
- 潘睿, 盛书中, 万永革. 2015. 2009 年姚安地震断层参数确定 [J]. 华北地震科学, 33 (2): 63 - 68.
- 任俊杰, 徐锡伟, 张世民, 等. 2017. 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 [J]. 地球物理学报, 60 (10): 4027 - 4045.

- 盛书中, 万永革, 王未来, 等. 2014. 2010 年玉树 $M_s7.1$ 地震发震断层参数的确定[J]. 地球物理学进展, 29(4): 1555 – 1562.
- 唐荣昌, 陆联康. 1981. 1976 年松潘、平武地震的地震地质特征[J]. 地震地质, 3(2): 41 – 47.
- 万永革, 沈正康, 刁桂苓, 等. 2008. 利用小震分布和区域应力场确定大震断层参数方法及其在唐山地震序列中的应用[J]. 地球物理学报, 51(3): 793 – 804.
- 王鸣, 王培德. 1992. 1989 年 10 月 18 日大同一阳高地震的震源机制和发震构造[J]. 地震学报, 14(4): 407 – 415.
- 谢祖军, 郑勇, 姚华建, 等. 2018. 2017 年九寨沟 $M_s7.0$ 地震震源性质及发震构造初步分析[J]. 中国科学: 地球科学, 48(1): 79 – 92.
- 徐锡伟, 陈桂华, 王启欣, 等. 2017. 九寨沟地震发震断层属性及青藏高原东南缘现今应变状态讨论[J]. 地球物理学报, 60(10): 4018 – 4026.
- 杨超群, 孟凡顺, 万永革. 2013. 采用精确定位小震资料反演伽师地震断层[J]. 地球物理学进展, 28(6): 2865 – 2871.
- 杨宜海, 范军, 花茜, 等. 2017. 近震全波形反演 2017 年九寨沟 $M7.0$ 地震序列震源机制解[J]. 地球物理学报, 60(10): 4098 – 4104.
- 姚鑫, 周振凯, 李凌婧, 等. 2017. 2017 年四川九寨沟 $M_s7.0$ 地震 In-SAR 同震形变场及发震构造探讨[J]. 地质力学学报, 23(4): 507 – 514.
- 易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 等. 2017. 2017 年 8 月 8 日九寨沟 $M7.0$ 地震及余震震源机制解与发震构造分析[J]. 地球物理学报, 60(10): 4083 – 4097.
- 张旭, 冯万鹏, 许力生, 等. 2017. 2017 年九寨沟 $M_s7.0$ 级地震震源过程反演与烈度估计[J]. 地球物理学报, 60(10): 4105 – 4116.
- 朱航, 闻学泽. 2009. 1973—1976 年四川松潘强震序列的应力触发过程[J]. 地球物理学报, 52(4): 994 – 1003.
- Jones L M, Han W B, Hauksson E, et al. 1984. Focal mechanisms and aftershock location of the Songpan earthquake of August 1976 in Sichuan, China [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978 – 2012), 89(B9): 7697 – 7707.
- Kirby E, Whipple K X, Burchfiel B C, et al. 2000. Neotectonics of the Min Shan, China implications for mechanisms driving Quaternary deformation along the eastern margin of the Tibetan plateau[J]. Geological Society of America Bulletin, 112(3): 375 – 393.
- Wang X, Feng X, Xu X, et al. 2014. Fault plane parameters of Sanhe – Pinggu $M8$ earthquake in 1679 determined using present – day small earthquakes[J]. Earthquake Science, 27(6): 607 – 614.
- Wessel P, Smith W H F. 1998. New, improved version of generic mapping tools released[J]. EOS Transactions, American Geophysical Union, 79(47): 579.

Fault Plane Parameters of 2017 Jiuzhaigou $M_s7.0$ Earthquake Determined by Aftershock Distribution

HU Xiaohui¹, SHENG Shuzhong^{1,3}, WAN Yongge¹, LIANG Shanshan²,
LI Zexiao¹, LIU Jingguang¹, CHAI Guangbin¹

(1. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China)

(2. China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

(3. School of Geophysics and Measurement-control Technology, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract

Based on the 4 035 relocated aftershock data of the 2017 Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake, we obtain the fault plane parameters of the earthquake by the method of determining the fault plane parameter according to the distribution of small earthquakes. Taking the sparse area of aftershocks as the boundry, the aftershocks are divided into north and south segments for segmentation fitting, and finally the seismogenic structure of the earthquake is determined. The results show that the parameters of the seismogenic fault of the Jiuzhaigou earthquake are as follows: the strike is 151.3° , the dip angle is 84.0° , the obtained parameters could be regarded as the first approximation of the fault plane parameter. The strike and dip angles of the north and south segments is 147.4° and 88.3° , 169.2° and 76.8° respectively, which caused the aftershock sparse area. Combining with the surrounding structural features, we infer that the seismogenic fault of the Jiuzhaigou earthquake is a concealed fault extending northwest from the Huya fault.

Keywords: Jiuzhaigou earthquake; aftershock; fault plane parameters; fault segmentation