www.cagsbulletin.com

# 2017 年九寨沟 7.0 级地震序列震源机制解和 构造应力场特征

祁玉萍,龙锋\*,肖本夫,路茜,江鵰

四川省地震局,四川成都 610041

摘 要: 九寨沟余震序列的震源机制和构造应力场有助于认识本次地震的发震构造和孕震机理。本文基于四 川区域地震台网的波形资料,采用波形拟合(CAP)方法和 P 波初动+振幅比(HASH)方法反演得到 2017 年 8 月 8 日九寨沟 7.0 级地震序列中 59 次 *M*<sub>L</sub>≥3.0 地震的震源机制解,并基于该结果采用阻尼线性逆推法(DRSSI), 计算研究区域的平均构造应力场,给出该区域的应力场特征。结果显示,利用 CAP 方法反演得到的本次主震 的最佳双力偶机制解节面 I: 走向 248°/倾角 86°/滑动角-169°,节面 II: 走向 157°/倾角 79°/滑动角-4°,矩震 级为 *M*<sub>w</sub>6.31,矩心深度 5 km,属走滑型地震事件;大部分余震的震源机制解错动类型与主震一致,矩心深度 集中在 3~10 km;应力场反演结果显示,该区域周边的应力性质为走滑型,最大主应力方向呈 NWW-SEE 向, 与该区域的应力场方向一致,表明本次地震主要受区域应力的控制。结合该区域的地震地质构造等已有研究 成果,分析认为此次地震的发震断层为走向 NW-SE、倾向 SW 的左旋走滑断裂——树正断裂,巴颜喀拉块体 向 E-SE 向的水平运动受到华南块体的强烈阻挡导致此次地震的发生,汶川地震的发生对本次地震具有一定 的促进作用。

关键词: 九寨沟地震; 震源机制解; 构造应力场; 发震构造 中图分类号: P315.1; P315.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2018.061901

# Focal Mechanism Solutions and Tectonic Stress Field Characteristics of the 2017 M<sub>s</sub>7.0 Jiuzhaigou Earthquake Sequence

QI Yu-ping, LONG Feng<sup>\*</sup>, XIAO Ben-fu, LU Qian, JIANG Peng

Sichuan Earthquake Agency, Chengdu, Sichuan 610041

Abstract: Focal mechanism solutions and stress field for the 2017 Ms7.0 Jiuzhaigou earthquake sequence can help to understand the seismogenic structure and mechanism. Based on the digital waveforms of Sichuan seismic network, the authors calculated focal mechanisms of the Jiuzhaigou earthquake sequence of 59  $M_L \ge 3.0$  by employing the CAP method and HASH method, and then used the focal mechanism solutions to calculate the stress field through the DRSSI. The nodal plane parameters of the main event are as follows: strike=248°, dip=86°, rake = -169°, and strike =157°, dip=79°, rake = -4°, the moment magnitude of the main shock is 6.31 and the depth is about 5 kilometers, suggesting a strike-slip seismic event. The type of focal mechanisms of  $M_L \ge 3.0$ aftershocks is consistent with the main shock, the depths of the Jiuzhaigou earthquake sequence are between 3 and 10 kilometers. The stress regime around the epicenter area is of the strike-slip type, and the maximum dominant direction is near NWW-SEE, almost consistent with that of the type of focal mechanisms, which shows that the occurrence of the earthquake was mainly controlled by regional stress. In combination with the seismic

本文由中国地震局监测预报司震情跟踪青年课题(编号: 2018010122)、四川省地震局地震科技专项(编号: LY1802; LY1817)和 2018 年 地震大形势跟踪任务联合资助。

收稿日期: 2018-03-23;改回日期: 2018-06-14;网络首发日期: 2018-06-22。责任编辑:魏乐军。

第一作者简介: 祁玉萍, 女, 1989 年生。工程师。主要从事数字地震学方法应用、地震预报研究。通讯地址: 610041, 四川省成都市武 侯区人民南路三段 29 号四川省地震局。电话: 028-85450172。E-mail: vickey112@163.com。

<sup>\*</sup>通讯作者: 龙锋, 男, 1981 年生。高级工程师。主要从事地震定位和统计地震学研究。E-mail: longfeng1981@gmail.com。

geological structure, the authors hold that the  $M_s7.0$  Jiuzhaigou earthquake was formed by the NW-SE trending SW dipping Shuzheng fault. The E-SE trending horizontal movement of the block of the Bayan Har was strongly blocked by the South China Block, which probably led to the occurrence of this earthquake.

Key words: Jiuzhaigou earthquake sequence; focal mechanism; tectonic stress field; seismogenic structure

2017 年 8 月 8 日 21 时 19分在四川省阿坝州九 寨沟地区发生 7.0级地震,震中位于北纬 33.22°,东 经 103.83°,震源深度 20 km。截止 2018 年 1 月,九 寨沟 7.0级地震共记录到 10 000 余次余震,该地震 序列主要以小震为主,其中 *M*3.0~3.9 地震 39 次, *M*4.0~4.9 地震 5 次,最大余震为 8 月 9 日发生的 *M*4.8(*M*<sub>L</sub>5.2)地震。

九寨沟 7.0 级地震发生在南北地震带中段, 青 藏高原东缘巴颜喀拉块体与东部华南地块碰撞挤压 边界带上,震中及其邻区发育有东昆仑断裂带东端 塔藏断裂、虎牙断裂和岷江断裂(图 1), 它们不仅作 为巴颜喀拉块体北边界断裂和东边界断裂,在新构 造属性上还组成了 NWW 向东昆仑断裂带东端向东 或东南散开的马尾巴状构造(徐锡伟等, 2017a)。东 昆仑断裂带是青藏高原北部的一条巨型左旋走滑断 裂, 具明显的分段特征, 塔藏断裂为东昆仑断裂系 东延的主要断裂之一,属全新世活动断裂,在压剪 切作用控制下以左旋运动为主,兼有少量逆冲分量, 左旋滑动速率为 3.0 mm·a<sup>-1</sup>, 古地震复发间隔约为 2 300 a, 该断裂为历史地震破裂空段(Wen et al., 2007; 付俊东等, 2012; 胡朝忠等, 2017)。NNW 向 虎牙断裂、近 NS 向岷江断裂和近 EW 向的雪山梁 子断裂带共同构成了岷山构造带,岷江断裂为岷山 隆起西边界主控断层,近NS向延伸,断面西倾,平 均左旋走滑速率为 0.37~0.53 mm·a<sup>-1</sup>, 历史上曾发 生过 1713 年叠溪 7.0、1748 年漳腊北 6<sup>1</sup>/2、1933 年 叠溪 7<sup>1</sup>/2 和 1960 年松潘 6<sup>3</sup>/4 级地震(赵小麟等, 1994; Chen et al., 1994; 周荣军等, 2000); 虎牙断裂位于 岷山构造带东缘,该断裂的北段走向为 NNW 向、 倾向 NE, 显示出兼有逆冲分量的左旋走滑性质, 雪山梁子断裂以南其走向顺时针旋转为近 NS 向, 断面西倾, 表现为由W向E的逆冲和地壳缩短作用, 第四纪垂直走滑速率约为 0.5 mm·a<sup>-1</sup>, 左旋走滑速 率约为1.4 mm·a<sup>-1</sup>, 1973年松潘东6.5级地震和1976 年松潘 7.2级地震(震群)均发生在该断裂南段, 北部 尚无 6.5级以上地震记载(周荣军等, 2000; 张岳桥等, 2008; 朱航和闻学泽, 2009)。该区域的地震危险性一 直备受关注, M7 专项工作组(2012)根据地质、地震 活动性、大地测量等多种资料综合分析认为东昆仑 断裂带东段及其若干分支的甘一青—川交界具有发 生强震的背景;徐锡伟等(2017b)基于地震地质学标 志给出玛沁一玛曲危险区未来有发生 6.5 级以



Fig. 1 Tectonic map and strong earthquakes around the M7.0 Jiuzhaigou earthquake in 2017

上地震的可能, 而本次地震就发生在该危险区内。

大地震的孕育和发生是在一个大区域内应力 长期积累、集中、加强并在应力区突然释放的结果, 而震源机制解在一定程度上反映了孕震过程中震源 应力场随时间的变化,同时也是研究区域构造应力 场的基础资料。地震发生后,美国地质调查局 (USGS)、GCMT 及中国地震局地球物理研究所 (IGP-CEA)等研究机构快速给出了主震震源参数, 结果显示本次地震为一次左旋走滑型地震;相关研 究者在震后反演得到主震及部分强余震的震源机制 解,并对其发震构造进行分析,杨宜海等(2017)推 测此次九寨沟 7.0 级地震序列可能发生在虎牙断裂 向北延伸的隐伏断裂上,易桂喜等(2017)认为本次 地震的主发震构造为位于岷江断裂与塔藏断裂之间 的树正断裂。

中等强度的地震携带了区域构造应力场的主要信息,而小地震则能够更好地反映应力在空间上的分布和在时间上的变化(Seeber and Armbruster, 2000)。为了深入研究余震序列的震源机制及震源区的应力场特征,本文基于四川区域地震台网记录的地震波形资料,采用 CAP(Cut And Paste)波形反演方法(Zhao and Helemberger, 1994; Zhu and Helemberger, 1996)和 P 波初动+振幅比(HASH)法(Hardebeck and Shearer, 2002)确定了九寨沟余震序

列中 59次*M*<sub>L</sub>≥3.0 地震的震源机制解,统计分析节 面参数及节面特征,再将其作为基础数据,利用阻 尼线性逆推(DRSSI)法(Hardebeck and Michael, 2006) 计算得到震源区应力场,分析该区域的时空应力场 特征,结合地质构造、InSAR、GPS等已有研究成果 进一步探讨九寨沟地震的发震构造和孕震机制,从 而加深对青藏高原东缘地壳运动和动力来源的认 识。

# 1 震源机制解

#### 1.1 资料与方法

本文所用的波形数据源自于四川省地震局,主 要使用了震中 350 km 范围内、台站方位角分布均 匀、三分量波形完整且信噪比高的波形记录,包含 四川、甘肃、青海、陕西区域台网的 45 个地震台站, 从其空间分布来看具有较好的覆盖(如图 2)。鉴于此 次地震发生在川西高原,文中采用了赵珠和张润生 (1987)提出的西部模型(表 1),杨智娴等(2012)、易 桂喜等(2015)都基于该模型对川西地区进行了相关 研究,并获得一定的研究成果;结果显示选取该模 型所得的结果相对稳定,能够较好地反映该区域的 深部结构。

求解震源机制解的常用方法主要包括初动符 号法和波形反演法,初动符号法主要依据波形的初



图 2 九寨沟 7.0 级地震震中附近台站分布 Fig. 2 Distribution of seismic stations around the epicenter of the M7.0 Jiuzhaigou earthquake

动极性信息来获取震源机制解,而波形反演法则充 分利用了波形资料求解矩张量解(祁玉萍等,2015)。 对于  $M_L \ge 3.5$ 的地震,本文采用了由 Zhao 和 Helmberger(1994)提出,Zhu 和 Helmberger(1996)发 展的 Cut And Paste(CAP)波形拟合反演方法,该方 法主要是将宽频带区域波形数据分成 Pnl 部分和面 波部分,对其分别进行拟合来求得震源机制解,在 中强地震的震源机制解求取中得到了广泛应用(李 金等,2016;易桂喜等,2016)。

鉴于九寨沟 7.0 级主震震级较大, 较近台站存 在限幅且不满足点源模型假设,因此我们选取了震 中距 150~350 km 范围内波形, 余震均选用震中距 250 km 以内的波形资料。解算过程中我们首先扣除 仪器响应后积分得到位移记录,再将位移记录从 UD-NS-EW 旋转到 Z-R-T 分量, 并对 Pnl 部分和面 波部分赋予不同的权重。为了提高信噪比得到比较 可靠的结果,我们对 Pnl 部分选用的带通滤波频带 宽度为 0.05~0.2 Hz、面波部分选用的带通滤波频带 宽度为 0.05~0.1 Hz, 选择这样的滤波范围不仅可以 压制噪声,也可以减小地壳精细结构所造成的影响, 既可以得到恰当的标量地震矩也能充分反映地震波 携带的震源信息(Tan and Helemberger, 2007)。研究 中采用频率-波数(F-K)方法(Zhu and Rivera, 2002) 计算格林函数获得各震中距上的理论地震图,反演 对计算得到的理论地震图采用与观测地震图相同的 分解、滤波规则。通过格点搜索及互相关方法,在 不同的深度搜索出合成理论地震图与观测地震图所 对应的误差,误差函数最小值即为最佳震源机制解, 其所在的深度即为所求的震源深度。

对于  $3.0 \le M_L \le 3.5$  的地震,采用 Hardebeck 和 Shearer(2002)提出的初动+振幅比(HASH)方法,该 方法综合考虑了水平定位和深度定位误差,以及地 壳速度模型的误差引起的计算结果不确定性,这种 考虑一方面提高了计算结果的可靠性,另一方面还 给出了结果的质量分级,对于小震震源机制解的解 算具有一定的意义。在解算过程中,我们选取了震 相清晰的地震事件,标注 P 波初动,截取 P 波和 S 波的最大振幅双周期,量算最大振幅值,主要利用 四川松潘台(SPA)、四川九寨沟台(JZG)、四川平武 台(PWU)、四川若尔盖台(REG)、四川黑水台(HSH)、

表1	反演所用的一维地壳速度模型	

Table 1 Velocity mo	odel used in the inversion
---------------------	----------------------------

Table 1 velocity model used in the inversion											
层号	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
厚度/km	0.87	10.80	10.00	6.40	2.00	21.85	10.78	19.17	4.95		
P波速度/(km·s <sup>-1</sup> )	4.55	5.75	5.97	6.16	6.69	7.06	7.84	8.04	8.39		
S波速度/(km·s <sup>-1</sup> )	3.35	3.38	3.54	3.73	3.92	4.29	4.84	4.96	5.01		

甘肃文县台(WXT)、甘肃舟曲台(ZHQ)、甘肃迭部 台(DBT)、甘肃岷县台(MXT)、甘肃武都台(WDT) 的数字波形数据,这 10 个台(图 2 中黄色三角形)能 够比较好地包围研究区,且震中距不超过 250 km, 保证了波形数据记录清晰易辨。

#### 1.2 震源机制解结果分析

采用 CAP 方法利用 34 个台站波形数据反演得 到 2017 年 8 月 8 日 7.0 级地震的震源机制解、反演 过程中尽可能选取 Pn 波的互相关系数大于 70%, 面波互相关系数大于 75%的波形资料来保证结果的 可靠性,不同深度上的震源机制解均显示本次地震 为走滑型地震(图 3),较为一致的结果也说明了反 演结果的稳定性,最终得到最佳矩心深度为 5 km, 矩震级为 M<sub>w</sub>6.31、断层面解为: 节面 I 走向 248% 倾角 86°/滑动角-169°, 节面 II 走向 157°/倾角 79°/ 滑动角-4°, P 轴方位为 NWW-SEE 向, 仰角为 11°。 为对比结果的可靠性, 笔者还利用 HASH 法对主震 计算了震源机制解,在解算过程中对 49 个台站的 波形标定初动、量取振幅、得到此次地震的震源机 制解: 节面 I 走向 236°/倾角 71°/滑动角为 77°、节 面 II 走向 327°/倾角 87°/滑动角 19°、与前述 CAP 方法得到的结果接近。

此外,本文还收集了国内外不同研究机构给出 的此次 7.0 级地震的震源机制解(表 2),对比发现本 文给出的震源机制解与 GCMT、GFZ 研究机构给出 的结果更为接近,各研究机构采用不同的反演方 法、选取不同的台站数据、设定不同的反演参数以 及选用不同的地壳速度结构模型都可能导致反演结 果存在一定差异,但该结果仍属于可接受范围内, 进一步表明了结果的可靠性。

使用 CAP 方法和 HASH 方法反演得到 2017 年 8 月 8 日至 10 月 6 日共计 59 个 *M*<sub>L</sub>≥3.0 地震的震 源机制解,包括 33 个 *M*<sub>L</sub>≥3.5 地震和 26 个 3.0 ≤ *M*<sub>L</sub> < 3.5 地震(表 3)。按照 Frohlich(2001)的划分规 则,基于力轴空间取向划分地震类型(图 4),得到本 次地震序列中 43 次余震为走滑型地震(SS), 主要沿 着断裂展布, 4 次地震为逆冲型地震(TF), 集中分布 在破裂带的 NW 段, 5 次地震为正断型(NF), 同时还 存在 7 次混合类型的地震(U)。图 5 显示, 该地震序 列的走向主要以 NW-SE 向和 NE-SW 向为优势方 向, 滑动角显示以走滑为主, 倾角分布在 70°~ 90°, 大部分余震的走向、倾角、震源机制解类型与 主震的相似, 表明整个余震序列与主震有共同的动 力来源和发震构造。震源机制解的 P 轴方位以 NWW-SEE 向为优势方向, 分布在 90°~120°区间, 倾角水平, 不仅与九寨沟主震 P 轴方位一致, 也与 阚荣举等(1977)、王晓山等(2015)所给出的区域现代 构造应力场方向吻合。

从整个空间分布来看(图 6),该区域的余震主 要沿着 NW 向断裂展布,且在主震两侧分布,主震 SE 段的地震呈密集线状分布,其震源机制解类型 相对统一,以走滑型地震为主。而 NW 段的地震分 布相对分散,震源机制解结果也相对散乱,部分地 震的震源机制解性质为逆冲或兼有逆冲分量,地震 空间分布弥散且震源机制一致性较低,说明主震触 发了该区域可能预先存在的一条或多条具有不同断 层属性的分支断裂。

震源深度对于厘定余震与发震构造的关系及 理解主余震孕震机理具有重要的意义。根据震相识 别得到的深度为初始破裂点深度,而矩心深度表征 着地震能量释放的深度,在一定程度上更能反映震 源区的孕震环境。A-A'剖面给出了本文基于 CAP 方法得到的矩心深度主要集中在 3~10 km 范围内, InSAR 结果显示地震破裂主要位于地下 16 km 深度 范围内(单新建等, 2017;季灵运等, 2017),但并未 出露地表,与现场地质调查结果一致,表明九寨沟 及附近区域的脆性破裂层位于脆性的中上地壳,有 孕育地震发生的背景; B-B'剖面显示了主震 NW 段 地震的深度分布,该段发生的 *M*<sub>L</sub>3.5 以上地震次数 较少,深度上显示相对散乱,震源机制解类型也并

	表 2 各机构给出的九寨沟 7.0 级地震主震震源机制解
Table 2	Focal mechanism of the M7.0 Jiuzhaigou earthquake from different institutions

 节面I			节面Ⅱ			P轴		T	<i>T</i> 轴		B 轴		震源机制	
走向 /°	倾角 /°	滑动角 /⁰	走向/°	倾角 /°	滑动角 /⁰	方位 /°		方位 /°	仰角 /°	方位/°	仰角 /°	Mw	解图示	结果来源
248	86	-169	157	79	-4	113	11	22	5	268	78	6.31		CAP 方法
236	71	177	327	87	19	100	11	193	15	335	71	_	- Z	初动+振幅比
65	82	-137	328	48	-11	296	35	190	22	74	47	_	2	中国地震局地球所
243	77	-168	150	78	-13	106	18	196	0	288	72	6.50	- Z	GCMT
243	85	168	334	78	5	289	5	198	12	41	77	6.40		GFZ
246	57	-173	152	84	-33	104	27	204	18	323	56	6.50	- Č	USGS

注: GCMT 结果源自 http://www.globalcmt.org/; USGS 结果源自 http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/; GFZ 结果源自 http://geofon.gfz-potsdam.de/; 中国地震局地球物理研究所结果源自 http://www.cea-igp.ac.cn/。





a, b-2017年8月8日21时19分九寨沟M7.0地震理论地震图和观测地震图部分波形拟合及反演误差随深度的变化,该地震的矩心深度为5 km; c, d-2017年8月9日10时17分M4.8地震理论地震图和观测地震图部分波形拟合及反演误差随深度的变化,该地震的矩心深度为7 km; 红线代表理论波形,黑线表示观测波形,绿线表示该震相不参与反演,其下数字分别表示理论地震图和观测地震图的相对移动时间和二者的相关系数(%)

a, b-focal mechanism solution and comparison between synthetic (red) and observed (black) waveforms and the residuals of inverted focal mechanism versus depth of the M7.0 Jiuzhaigou earthquake on August 8, 2017, the depth of the earthquake is 5 km; c, d-focal mechanism solution and comparison between synthetic (red) and observed (black) waveforms and the residuals of inverted focal mechanism versus depth of the  $M_L5.2$  (M4.8) Jiuzhaigou earthquake on August 9, 2017, the depth of the earthquake is 7 km; Synthetic wave is red, observational data are black, green means that the seismic facies failed to participate in the version, the numbers below each trace are relative time shift and the second line indicates the correlative coefficients in percentage (%)



图 4 九寨沟地震序列震源机制解分类 Fig. 4 The classification of focal mechanism of Jiuzhaigou earthquake sequence

不一致; 而 C-C'剖面显示, SE 段地震相对丛集, 发 震面陡立, 略 SW 向倾斜, 倾角约 70°, 与震源机制 解的结果相佐证。

### 2 构造应力场特征

利用震源机制解分析发震断层和发震应力场, 是研究地震参数以及介质状况的重要途径,对此地 震学家提出多种方法反演应力场(Angelier, 1979; Angelier et al., 1984; Gephart and Forsyth, 1984; Michael, 1987, 1991; 钟继茂和程万正, 2006), 但大 多数方法对应力场分区有着较大的依赖性,不同的 分区可能导致结果存在一定的差异,Hardebeck 和 Michael(2006)为了解决反演的应力模式依赖于分区 的问题,提出了区域尺度的阻尼线性逆推法 (DRSSI),该方法无需人为划分地震,对反演应力 的时空变化具有较好的效果(Zhao et al., 2013;罗艳 等, 2015)。

应力张量阻尼反演法主要通过构建一组可调整的阻尼参数模型,引入平滑约束来抑制相邻单元 之间应力模式的差异,然后使用最小二乘法得到稳 定解。在阻尼线性逆推问题中,应力场的反演问题 就变成了求下列方程的最小二乘解:

#### $(G^T G + e^2 D^T D)m = G^T d$

式中, *m* 即为待求解的模型矢量,包括每个网 格单元应力张量; *d* 为观测数据,包括模型相对应的 网格点内地震断层面滑移矢量的各分量; *G* 为地震 断层面法向量所定义的系数矩阵, *G<sup>T</sup>*为*G* 的转置矩 阵。再加入一个模型平滑因子,用来最小化相邻格 点之间应力张量的差异,因此引入一个阻尼矩阵 *D*, *e* 为阻尼系数,代表在最小化过程中控制数据拟合 误差和模型长度的相对权重。

基于阻尼线性逆推法(DRSSI),利用 MSATSI 软件(Patricia et al., 2014)进行应力张量反演,由于



图 5 九寨沟地震序列节面走向、倾角、滑动角、P(T)轴方位角和仰角统计 Fig. 5 Strike, dip and rake of fault planes, azimuth and dip of P(T) axis of the Jiuzhaigou earthquake sequence



图 6 九寨沟余震震源机制解分布及沿 A-A'、B-B'和 C-C'剖面的深度分布 Fig. 6 Focal mechanism spatial distribution and the projection along profile A-A', B-B' and C-C'of Jiuzhaigou earthquake sequence





damping parameter is shown with a cross

地震分布相对集中,地震样本量相对较少,我们将 震源区及周边地区以 0.02°×0.02°进行网格化,并选 取每个网格节点及其周围至少 5 个地震震源机制解, 在 95%的置信区间对原始数据进行 600 次 Bootstrap 重采样。另外,阻尼参数 e 在反演中起着折衷调节 作用,选取合适的阻尼系数,可以更好地在反演过 程中分配理论值与观测数据之间错配值和模型长度 的相对权重,阻尼系数过大,简化模型,则错配值 升高,反演误差增大;阻尼系数过小,则反演误差 减小,模型逐渐变得复杂化,甚至失去了阻尼约束 的意义。文中我们采用 0.9 为最佳阻尼系数(图 7)。

震源区的构造应力场方向总体表现出空间一致 性的特征(如图8),其最大水平主应力方向呈 NWW-SEE向,倾角集中在0~20°之间,呈近水平方 向,最小主应力优势方向为NNE-SSW向,与最大主 应力方向基本垂直,整个震源区平均最大主应力轴 σ1的方向为98.38°,倾角为9.45°,平均最小主

	(h) <b>25</b> a 1 <b>2</b> 1	/ de arter				अन्द्र संद क	<b>矩心深度</b>		节面I		-	节面口	
序号	发震时间	纬度/ºN	│ 经度/°E	<b>震级 M</b> L	震级 Mw	深度/km	/km	走向/°	倾角/°	滑动角/°	走向/°	倾角/°	滑动角/°
1	2017-08-08T23:04:56	33.26	103.80	3.6	3.95	14	2	346	36	40	222	68	119
2	2017-08-08T23:49:17	33.28	103.78	3.6	3.80	19	10	247	59	160	348	73	33
3	2017-08-08T23:51:12	33.12	103.89	3.7	3.70	12	6	249	85	-161	157	71	-5
4	2017-08-09T00:35:17	33.16	103.84	4.0	4.00	21	9	245	74	-156	148	67	-17
5	2017-08-09T05:37:13	33.13	103.86	4.2	4.28	23	8	146	76	-4	237	86	-166
6	2017-08-09T05:41:08	33.17	103.85	3.8	4.11	16	9	155	68	-12	250	79	-158
7	2017-08-09T06:24:48	33.15	103.84	3.6	3.77	18	9	149	69	-22	247	70	-158
8	2017-08-09T06:49:03	33.13	103.87	3.9	3.88	16	8	136	75	-4	227	86	-165
9	2017-08-09T08:29:03	33.30	103.80	4.4	4.36	18	10	0	45	85	187	45	95
10	2017-08-09T09:22:14	33.16	103.84	4.2	4.20	21	10	330	76	41	228	50	162
11	2017-08-09T09:32:47	33.28	103.74	4.3	4.10	16	7	125	29	2	33	89	119
12	2017-08-09T10:17:02	33.15	103.84	5.2	4.70	14	8	156	68	-16	252	75	-157
13	2017-08-09T01:39:24*	33.27	103.80	3.4		9		68	89	168	158	78	1
14	2017-08-09T17:22:54*	33.24	103.78	3.1		5		252	86	170	343	80	4
15	2017-08-09T20:03:04	33.16	103.85	3.6	3.40	17	7	219	61	161	318	73	30
16	2017-08-10T02:30:50	33.16	103.84	3.6	3.54	23	3	271	39	-124	132	59	-66
17	2017-08-10T03:02:12	33.25	103.77	4.1	4.02	22	3	245	78	-165	152	75	-12
18	2017-08-10T03:14:03*	33.25	103.78	3.0		18		240	53	-160	138	74	-39
19	2017-08-10T05:05:54	33.18	103.82	4.5	4.60	27	9	160	74	5	69	85	164
20	2017-08-10T09:52:51*	33.27	103.79	3.0		15		234	73	169	141	79	-17
21	2017-08-10T09:54:02	33.18	103.84	4.0	3.85	14	7	326	81	18	233	72	171
22	2017-08-10T17:48:34	33.20	103.81	4.4	4.27	16	10	334	90	23	244	67	-180
23	2017-08-10T18:27:00*	33.15	103.85	3.1		14		244	39	-163	141	79	-52
24	2017-08-10T21:12:04*	33.15	103.85	3.4		17		268	79	-176	177	86	-11
25	2017-08-11T08:05:09	33.18	103.84	3.5	3.33	17	7	238	74	168	331	78	16
26	2017-08-11T19:26:21	33.12	103.86	4.0	3.89	. 16	8	46	83	166	138	76	7
27	2017-08-11T19:59:54*	33.13	103.88	3.4		17		241	88	166	332	76	2
28	2017-08-11T21:36:18*	33.32	103.74	3.2		16		15	80	-123	270	34	-18
29	2017-08-12T07:56:39	33.11	103.86	4.2	4.07	16	8	230	90	-167	140	77	0
30	2017-08-12T17:46:01*	33.12	103.86	3.4		15		52	79	-140	313	51	-14
31	2017-08-13T03:57:46*	33.16	103.85	3.1		12		239	89	-155	149	65	-1
32	2017-08-13T22:38:31	33.09	103.89	4.0	3.84	16	8	143	75	-16	237	75	-164
33	2017-08-14T04:13:20*	33.20	103.83	3.3		10		249	89	-155	159	65	-1

街 斑 ₩

崁

浵
Ħ
脥

1

续表3

1	₹
I	Ĥ
ł	164
I	म्प स्रोप
I	भाग
I	20
I	17
I	ÉL.
I	÷.
I	5
I	/# *∕
I	£
I	2
I	110
I	£3
I	Ē
I	题
I	
	1
ł	灁
	邂
į	ゆ
ļ	畫
1	漫
	*
	불
	۶Ľ
	돈
	L L
	逐
	夲
	俼

		(古	经度/°E	震级 ML	震级 M <sub>w</sub>	深度/km	度/km   矩心深度 /km    /km		节面I		〒〒 节面Ⅱ			
序号	反農时间	댹度/°N						km 走向/°	倾角/°	滑动角/°	走向/°	<b>倾角/°</b>	滑动角/°	
34	2017-08-14T16:16:36*	33.20	103.83	3.3		14		248	74	-160	152	71	-17	
35	2017-08-15T16:06:27*	33.12	103.87	3.4		18		235	59	-179	144	89	-31	
36	2017-08-16T14:59:02*	33.18	103.82	3.0		10		304	31	-25	56	77	-119	
37	2017-08-16T17:39:50*	33.16	103.84	3.2		15		258	47	-149	146	68	-47	
38	2017-08-19T19:52:11	33.12	103.90	3.9	3.91	12	7	346	75	42	243	50	160	
39	2017-08-23T04:45:23*	33.32	103.78	3.4		14		152	28	28	37	77	115	
40	2017-08-25T04:28:51	33.08	103.90	3.7	3.69	10	4	239	86	-172	148	82	-4	
41	2017-08-26T06:31:30*	33.08	103.90	3.1		13		243	73	177	334	87	17	
42	2017-08-27T08:58:13	33.22	103.75	3.9	3.93	15	10	43	81	135	142	46	13	
43	2017-08-28T03:02:20*	33.30	103.80	3.4		13		238	58	161	338	74	33	
44	2017-08-28T03:02:49*	33.30	103.80	3.5		11		250	62	-164	152	76	-29	
45	2017-09-06T01:57:20	33.25	103.78	3.8	3.82	16	3	157	85	-3	247	87	-175	
46	2017-09-07T12:15:30	33.11	103.89	3.9	3.85	12	4	140	85	-42	234	48	-173	
47	2017-09-09T23:58:50*	33.31	103.75	3.4		15		60	41	-178	328	89	-49	
48	2017-09-13T03:31:57*	33.20	103.81	3.4		13		190	86	113	289	23	10	
49	2017-09-13T07:59:42	33.27	103.77	3.7	3.76	7	3	254	74	-1 <b>71</b>	162	82	-16	
52	2017-09-18T23:37:06*	33.24	103.77	3.4		9		131	20	-167	29	86	-70	
51	2017-10-05T03:18:12	33.32	103.78	3.8	3.67	9	6	81	85	172	172	82	5	
52	2017-10-06T18:25:34	33.26	103.78	4.4	3.91	17	8	223	54	158	326	72	38	
53	2017-10-14T11:02:15	33.23	103.78	3.7	3.67	7	6	82	79	145	179	56	13	
54	2017-11-07T05:31:08	33.22	103.78	4.8	4.54	15	6	30	58	94	202	32	84	
55	2017-11-29T20:52:09*	33.15	103.87	3.5		18		240	39	-152	128	73	-54	
56	2017-12-10T08:14:12*	33.28	103.73	3.3		15		241	71	-172	148	82	-19	
57	2018-01-04T00:19:29*	33.32	103.76	3.2		14		188	89	123	280	33	2	
58	2018-01-26T10:14:52*	33.23	103.77	3.3		10		235	66	-157	135	69	-26	

注:\*为利用 HASH 方法计算得到的九寨沟地震序列的震源机制解。

应力轴 σ3 方向为 9.85°, 倾角为 9.64°, 虽然 NW 段 有逆冲型或带有逆冲分量的地震, 但结果显示应力 方向与性质等未发生明显变化, 整个区域受到近 EW 向的水平挤压, 总体与前人研究所给出的应力 场特征一致, 表明此次地震发生在大的区域构造应 力场背景下, 其性质整体以走滑为主。

#### 3 发震构造与机理分析

对于本次地震的发震构造,不同的学者给出了 不同的结论意见。一种观点认为本次九寨沟 7.0 级地 震发震断层为 NNW 向虎牙断裂北段,是其北侧延伸 分支(徐锡伟等, 2017a;杨宜海等, 2017;季灵运等, 2017);另一种观点认为此次地震是东昆仑断裂带在 东端向东扩展的结果,可能属于左旋走滑的东昆仑 断裂的分支断裂(任俊杰等,2017;易桂喜等,2017)。 地震现场地质考察发现在塔藏断裂和岷江断裂之间 存在一条 NW-SE 向,倾向 SW,倾角近乎直立的断 裂——树正断裂(易桂喜等,2017;朱航和屈勇, 2017)。结合余震分布、GPS、InSAR 等已有研究成 果(庞亚瑾等,2017;单新建等,2017)分析认为九寨 沟地震极有可能是发生在该断裂上的一次左旋走滑 性质的构造地震,其走向和倾向与震源机制节面 I 参 数一致,因此将走向为 NW-SE 的节面确定为本次 地震的发震断层面。学术上关于此次地震的发震



#### 图 8 九寨沟余震区主应力空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of the stress field orientation around the Jiuzhaigou M7.0 earthquake a-最大主应力分布; b-最小主应力分布; 蓝色表示走滑类型, 红色表示逆冲类型, 黑色表示正断型, 绿色表示混合类型; 线段的方向表 示方位角; 线段的长短表示倾角的大小, 线段越小表示倾角越大, 越接近直立, 越长表示倾角越小, 越接近水平

a-the maximum principal stress; b-the minimum principal stress; blue represents the strike-slip fault, red represents the reverse fault, black represents the normal fault, and green represents the mixed. The direction of the line segment represents azimuth, the length of the line segment indicates the size of the inclination angle; the smaller the line segment, the larger the inclination angle, the closer it is to the upright position; the longer the line segment, the smaller the inclination angle, the closer it is to the horizontal direction



图 9 中国大陆西部 GPS 速度场及块体运动方向(GPS 数据源自 Gan et al., 2007) Fig. 9 GPS velocity field and the block motion direction in western China (GPS data after Gan et al., 2007)

构造到底是东昆仑东段分支构造(树正断裂)还是虎 牙断裂北延的争论,表面上看上去似乎是对于一条

"新发现"的断裂在命名上存在异议,然而其实质 在于对发震机理的理解以及看待问题角度的差异。 认为发震构造为虎牙断裂北延的观点依据是九寨沟 序列的走向在空间上与虎牙断裂存在继承性,并且 该序列充填了 1973 年和 1976 年虎牙断裂北部 4 次 6.0 级以上地震围限而成的地震空区(季灵运等, 2017;李勇等,2017),宏观上展现为一种同一构造 的多段破裂模式。而认为发震构造为东昆仑断裂东 段分支(树正断裂)依据的是九寨沟序列在空间上与 东昆仑主干断裂的迹线相交,且序列震源机制解所 反映的发震构造的左旋走滑运动特性与东昆仑断裂 一致,而这恰恰有悖于以逆冲为主的虎牙断裂。至 于东昆仑断裂东段分支(树正断裂)与虎牙断裂在构 造上的何种联系,则需要更进一步科学调查和分析 来进行研究。

GPS 观测资料(Gan et al., 2007)显示在印度板 块与欧亚板块碰撞后继续向北推进、引起青藏高原 形成的同时,青藏高原的若干构造块体分别沿大型 走滑断裂带向 E 和 SE 方向"逃逸",表明该区域 最新构造变动的主要力源来自于青藏高原物质的 E 向运动(图 9)。而巴颜喀拉块体在朝 E-SE 方向运动 的过程中,东部受到克拉通型华南块体的阻挡,使 该区域产生了强烈的构造变形和应力积累,九寨沟 地震就是在青藏高原东缘物质的E向挤出过程中发 生的一次破坏性地震。汶川地震后,GPS 结果显示 九寨沟震源区附近的地壳速度变形量明显大于震前 (庞亚瑾等, 2017;姚鑫等, 2017),库仑应力在该区 域处于"加载"状态(Toda, 2008),表明汶川地震的 应力传递与触发是此次地震的诱因。

#### 4 结论

本文利用 2017 年 8 月 8 日以来四川及周边区 域地震台网的波形资料,利用波形拟合(CAP)方法 和 P 波初动+振幅比法(HASH)反演得到九寨沟 7.0 级地震序列中 59次 *M*<sub>L</sub>≥3.0 地震的震源机制解,并 以该数据为基础,根据阻尼线性逆推法(DRSSI)计 算出研究区域的平均构造应力场,初步分析了本次 地震的发震构造及成因机理,结果显示:

(1)采用 CAP 方法反演得到的矩心深度相对较 浅,约5 km,矩震级为 M<sub>w</sub>6.31,机制解节面 I 走向 248°/倾角 86°/滑动角-169°,节面 II 走向 157°/倾角 79°/滑动角-4°;同时利用 HASH 方法得到的节面 I 走向 236°/倾角 71°/滑动角 177°,节面 II 走向 327°/ 倾角 87°/滑动角 19°,与 CAP 方法得到的结果接近, 表明本次地震为一次走滑型地震。

(2)计算序列中部分 *M*<sub>L</sub>3.0 以上余震的震源机制 解,大部分震源机制解以走滑为主,与主震具有一 定的相似性,表明震源区的余震活动受主震影响较 大,NW 段部分余震带有逆冲分量,可能和主震触 发周边不同断层属性的分支断裂相关。CAP 方法反 演 *M*<sub>L</sub>3.5 以上地震得到的矩心深度主要集中在 3~ 10 km 范围,表明九寨沟及附近区域的脆性破裂层 位于中上地壳,该区域有孕育地震发生的背景。

(3)利用阻尼线性逆推法(DRSSI),以 0.02° × 0.02°间距的网格计算研究区域的空间应力,结果显示九寨沟余震区的应力性质均表现为走滑,最大主应力方向为 NWW-SEE 向,最小主应力场方向为 NNE-SSW 向,与震源区所处的现代构造应力场应力场方向一致。

(4)基于震源机制解,结合余震分布、InSAR、 GPS 和震源区附近的构造展布,分析认为 NW-SE 向的树正断裂为本次九寨沟 7.0 级地震的发震构造, 与该断裂走向和倾向一致的节面 I(CAP 方法)为发 震断层面。巴颜喀拉块体 E-SE 向的水平运动受到 华南块体的强烈阻挡导致此次地震的发生, 汶川地 震的发生加速了此次地震孕育。

致谢:本文 CAP 反演程序源于美国圣路易斯大学 朱露培博士,应力场反演使用 MSATSI(Patricia et al.,2014),图件绘制采用GMT绘图软件(Wessel and Smith,1991),四川省地震局杜方研究员、朱航研究 员在工作中给予悉心指导,审稿专家对本文提出宝 贵的意见和建议,作者在此一并表示感谢。

#### **Acknowledgements:**

This study was supported by China Earthquake Administration (No. 2018010122), Sichuan Earthquake Agency (Nos. LY1802 and LY1817) and 2018 Earthquake Situation Tracking Project.

## 参考文献:

- 付俊东,任金卫,张军龙,熊仁伟,杨攀新,陈长云,胡朝忠. 2012. 东昆仑断裂带东段塔藏断裂晚第四纪古地震研究[J]. 第四纪研究, 32(3): 473-483.
- 胡朝忠,任金卫,杨攀新,熊仁伟,陈长云,付俊东.2017. 东昆 仑断裂东端塔藏断裂压剪活动与高原隆升作用讨论[J]. 地 质学报,91(7):1401-1415.
- 季灵运,刘传金,徐晶,刘雷,龙锋,张致伟.2017. 九寨沟 *M*<sub>8</sub>7.0 地震的 InSAR 观测及发震构造分析[J]. 地球物理学 报,60(10):4069-4082.
- 阚荣举,张四昌,晏凤桐,俞林胜.1977.我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨[J].地球物理学报, 20(2):96-109.

李金, 王琼, 吴传勇, 向元. 2016. 2015 年 7 月 3 日皮山 6.5 级地

震发震构造初步研究[J]. 地球物理学报, 59(8): 2859-2870.

- 李勇, 邵崇建, 李芃字, 周荣军, 刘玉法, 张威, 马超, 颜照坤, 闫亮, 王伟明. 2017. 九寨沟 Ms7.0 级地震的左旋走滑作用 与动力机制[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 44(6): 641-648.
- 罗艳,赵里,曾祥方,高原.2015. 芦山地震序列震源机制及其 构造应力场空间变化[J]. 中国科学:地球科学,45(4): 538-550.
- M7 专项工作组. 2012. 中国大陆大地震中-长期危险性研究[M]. 北京: 地震出版社.
- 庞亚瑾,程惠红,张怀,石耀霖.2017.巴颜喀拉块体东缘形变 及九寨沟地震孕震环境数值分析[J].地球物理学报,60(10): 4046-4055.
- 祁玉萍,李闽峰,李圣强,王斌,刘桂平,肖本夫,江鹏.2015. 准实时中小地震震源机制波形自动反演系统的构建及在首 都圈地区的应用[J]. 地震,35(4):99-108.
- 任俊杰,徐锡伟,张世民,罗毅,梁欧博,赵俊香.2017. 东昆仑 断裂带东端的构造转换与 2017 年九寨沟 M<sub>s</sub>7.0 地震孕震机 制[J]. 地球物理学报,60(10): 4027-4045.
- 屈新建,曲春燕,龚文瑜,赵德政,张迎峰,张国宏,宋小刚, 刘云华,张桂芳. 2017. 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 7.0 级 地震 InSAR 同震形变场及断层滑动分布反演[J]. 地球物理 学报,60(12): 4527-4536.
- 王晓山, 吕坚, 谢祖军, 龙锋, 赵小艳, 郑勇. 2015. 南北地震带 震源机制解与构造应力场特征[J]. 地球物理学报, 58(11): 4149-4162.
- 徐锡伟,陈桂华,王启欣,陈立春,任治坤,许冲,魏占玉,鲁 人齐,谭锡斌,董绍鹏,石峰.2017a.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.
- 徐锡伟, 吴熙彦, 于贵华, 谭锡斌, 李康. 2017b. 中国大陆高震级地震危险区判定的地震地质学标志及其应用[J]. 地震地质, 39(2): 219-275.
- 杨宜海, 范军, 花茜, 高见, 王朝亮, 周鲁, 赵韬. 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.
- 杨智娴, 陈运泰, 苏金蓉, 陈天长, 吴朋. 2012. 2008 年 5 月 12 日汶川 M<sub>w</sub>7.9 地震的震源位置与发震时刻[J]. 地震学报, 34(2): 127-136.
- 姚鑫,周振凯,李凌婧,刘星洪,姚佳明. 2017. 2017 年四川九 寨沟 M<sub>s</sub>7.0 地震 InSAR 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, VALLAGE A, KLINGER Y, 梁明剑, 王思维. 2016. 2013 年芦山地震序列震源机制与震源区构造变形特 征分析[J]. 地球物理学报, 59(10): 3711-3731.
- 易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 张会平, 赵敏, 叶有清, 张致伟, 祁玉 萍, 王思维, 宫悦, 乔惠珍, 汪智, 邱桂兰, 苏金蓉. 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.
- 易桂喜, 龙锋, 闻学泽, 梁明剑, 王思维. 2015. 2014 年 11 月 22 日康定 M<sub>w</sub>6.3 级地震序列发震构造分析[J]. 地球物理学报, 58(4): 1205-1219.

- 张岳桥,杨农,施炜,董树文. 2008. 青藏高原东缘新构造及其 对汶川地震的控制作用[J]. 地质学报,82(12): 1668-1678.
- 赵小麟,邓起东,陈社发. 1994. 龙门山逆断裂带中段的构造地 貌学研究[J]. 地震地质, 16(4): 422-428.
- 赵珠,张润生.1987.四川地区地震波分区走时表的编制[J].四 川地震,(3):29-35.
- 钟继茂,程万正.2006.由多个地震震源机制解求川滇地区平均 应力场方向[J].地震学报,28(4):337-346,450.
- 周荣军, 蒲晓虹, 何玉林, 黎小刚, 戈天勇. 2000. 四川岷江断 裂带北段的新活动、岷山断块的隆起及其与地震活动的关 系[J]. 地震地质, 22(3): 285-294.
- 朱航, 屈勇. 2017. 九寨沟 Ms7.0 地震静态库仑应力触发及对附 近断层影响分析[J]. 中国地震, 33(4): 471-479.
- 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.

#### **References:**

- ANGELIER J, TARANTOLA A, VALETTE B, MANOUSSIS S. 1982. Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress. single phase fault populations: A new method of computing the stress tensor[J]. Geophys. J. R. astr. Soc, 69(3): 607-621.
- ANGELIER J. 1979. Determination of the mean principal direction of stresses for a given fault population[J]. Tectonophysics, 56(3): 17-26.
- CHEN S F, WILSON C J L, DENG Qi-dong. 1994. Active faulting and block movement associated with large earthquakes in the Minshan and Longmen mountains, northeastern Tibetan plateau[J]. Journal of Geophyscial Research: Solid Earth, 99(B12): 24025-24038.
- FROHLICH C. 2001. Display and quantitative assessment of distributions of earthquake focal mechanism[J]. Geophysical Journal International, 144(2): 300-308.
- FU Jun-dong, REN Jin-wei, ZHANG Jun-long, XIONG Ren-wei, YANG Pan-xin, CHEN Chang-yun, HU Chao-zhong. 2012. Research on late Quaternary pale earthquake on Tazang Fault on the eastern section of the Kunlun active fault[J]. Quaternary Sciences, 32(3): 473-483(in Chinese with English abstract).
- GAN W J, ZHANG P Z, SHEN Z K, NIU Z J, WANG M, WAN Y G, ZHOU D M, CHENG J. 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements[J]. Journal of Geophysical Research, 112(B08416): 1-14.
- GEPHART J W, FORSYTH D W. 1984. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: application to the San Fernando Earthquake Sequence[J]. Journal of Geophysical Research, 89(B11): 9305-9320.
- HARDEBECK J L, MICHAEL A J. 2006. Damped regional-scale stress inversions: Methodology and examples for southern California and the Coalinga aftershock sequence[J]. Journal of

Geophysical Research, 111: B11310.

- HARDEBECK J L, SHEARER P M. 2002. A new method for determining first-motion focal mechanisms[J]. Bulletin of the Seismological Society America, 92(6): 2264-2276.
- HU Chao-zhong, REN Jin-wei, YANG Pan-xin, XIONG Ren-wei, CHEN Chang-yun, FU Jun-dong. 2017. Discussion on the Compression-shear activity of the Tazang fault in East Kunlun and uplift of plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 91(7): 1401-1415(in Chinese with English abstract).
- JI Ling-yun, LIU Chuan-jin, XU Jing, LIU Lei, LONG Feng, ZHANG Zhi-wei. 2017. InSAR observation and inversion of the seismogenic fault for the 2017 Jiuzhaigou M<sub>S</sub>7.0 earthquake in China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(10): 4069-4082(in Chinese with English abstract).
- KAN Rong-ju, ZHANG Si-chang, YAN Feng-tong, YU Lin-sheng. 1977. Present tectonic stress field and its relation to the characteristics of recent tectonic activity in southwestern China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 20(2): 96-109(in Chinese with English abstract).
- LI Jin, WANG Qiong, WU Chuan-yong, XIANG Yuan. 2016. Preliminary study for seismogenic structure of the Pishan M<sub>8</sub>6.5 earthquake of July 3, 2015[J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(8): 2859-2870(in Chinese with English abstract).
- LI Yong, SHAO Chong-jian, LI Peng-yu, ZHOU Rong-jun, LIU Yu-fa, ZHANG Wei, MA Chao, YAN Zhao-kun, YAN Liang, WANG Wei-ming. 2017. Left-lateral strike-slip effect and dynamic mechanism of the Jiuzhaigou Ms7.0 eqrthquake in the eastern margin of Tibetan Plateau, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 44(6): 641-648(in Chinese with English abstract).
- LUO Yan, ZHAO Li, ZENG Xiang-fang, GAO Yuan. 2015. Focal mechanisms of the Lushan earthquake sequence and spatial variation of the stress field[J]. Science China: Earth Sciences, 45(4): 538-550(in Chinese with English abstract).
- MICHAEL A J. 1987. Use of focal mechanisms to determine stress: A control study[J]. Journal of Geophysical Research, 92(B1): 357-368.
- MICHAEL A J. 1991. Spatial variations in stress within the 1987 Whittier Narrows, California, aftershock sequence: New techniques and results[J]. Journal of Geophysical Research, 96(B4): 6303-6319.
- PANG Ya-jin, CHENG Hui-hong, ZHANG Huai, SHI Yao-lin. 2017. Numberical modeling of crustal deformation in the eastern margin of the Bayan Har block and analysis of seismogenic environment of the 2017 Jiuzhaigou earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(10): 4046-4055(in Chinese with English abstract).
- PATRICIA M G, GRZEGORZ K, MICHELE L, MACRO B. 2014. MSATSI: A MATLAB package for stress inversion combining solid classic methodology, a new simplified user-handling, and a visualization tool[J]. Seismological Research Letters, 85(4): 1-9.

- QI Yu-ping, LI Min-feng, LI Sheng-qiang, WANG Bin, LIU Gui-ping, XIAO Ben-fu, JIANG Peng. 2015. Quasi-automatic waveform inversion for focal mechanisms of small to moderate earthquakes and its application in the capital area[J]. Earthquake, 35(4): 99-108(in Chinese with English abstract).
- REN Jun-jie, XU Xi-wei, ZHANG Shi-min, LUO Yi, LIANG Ou-bo, ZHAO Jun-xiang. 2017. Tectonic transformation at the eastern termination of the Eastern Kunlun fault zone and seismogenic mechanism of the 8 August 2017 Jiuzhaigou M<sub>s</sub>7.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(10): 4027-4045(in Chinese with English abstract).
- SEEBER L, ARMBRUSTER J G. 2000. Earthquakes as beacons of stress change[J]. Nature, 407(6800): 69-72.
- SHAN Xin-jian, QU Chun-yan, GONG Wen-yu, GONG Wen-yu, ZHAO De-zheng, ZHANG Ying-feng, ZHANG Guo-hong, SONG Xiao-gang, LIU Yun-hua, ZHANG Gui-fang. 2017.
  Coseismic deformation field of the Jiuzhaigou M<sub>5</sub>7.0 earthquake from Sentinel-1 A InSAR data and fault slip inversion[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(12): 4527-4536(in Chinese with English abstract).
- TAN Y, HELEMBERGER D. 2007. A new method for determining small test earthquake source parameters using short-period P waves[J]. Bulletin of the Seismological Society America, 97(4): 1176-1195.
- TODA S, LIN J, MEGHRAOUI M, STEIN R S. 2008. 12 May 2008 M=7.9 Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicitiy rate on three major fault systems[J]. Geophysical Research Letters, L17305.
- WANG Xiao-shan, LIU Jian, XIE Zu-jun, LONG Feng, ZHAO Xiao-yan, ZHENG Yong. 2015. Focal mechanisms and tectonic stress field in the North-South Seismic Belt of China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(1): 4149-4162(in Chinese with English abstract).
- WEN X Z, YI G X, XU X W. 2007. Background and precursory seismicities along and surrounding the kunlun fault before the MS8.1, 2001, Kokoxili Earthquke, China[J]. Journal of Asian Earth Science, 30(1): 63-72.
- WESSEL P, SMITH W H F. 1991. Frees of tware helps map and display data[M]. Eos Trans AGU, 72(41): 441.
- Working Group of M7. 2012. Study on the mid-to long-term potential of large earthquakes on the Chinese Continent[M]. Beijing: Seismological Press(in Chinese with English abstract).
- XU Xi-wei, CHEN Gui-hua, WANG Qi-xin, CHEN Li-chun, REN Zhi-kun, XU Chong, WEI Zhan-yu, LU Ren-qi, TAN Xi-bin, DONG Shao-peng, SHI Feng. 2017a. Discussion on seismogenic structure of Jiuzhaigou earthquake and its implication for current strain state in the southeastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(10): 4018-4026(in Chinese with English abstract).
- XU Xi-wei, WU Xi-yan, YU Gui-hua, TAN Xi-wei, LI Kang. 2017b. Seismo-geological signatures for identifying  $M \ge 7.0$

earthquake risk areas and their preliminary application in mainland China[J]. Seismology and Geology, 39(2): 219-275(in Chinese with English abstract).

- YANG Yi-hai, FAN Jun, HUA Qian, GAO Jian, WANG Chao-liang, ZHOU Lu, ZHAO Tao. 2017. Inversion for the focal mechanisms of the 2017 Jiuzhaigou M7.0 earthquake sequence using near-field full waveforms[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(10): 4098-4104(in Chinese with English abstract).
- YANG Zhi-xian, CHEN Yun-tai, SU Jin-rong, CHEN Tian-chang, WU Peng. 2012. The hypocenter and origin time of the Mw7.9
  Wenchuan earthquake of May 12, 2008[J]. Acta Seismologica Sinica, 34(2): 127-136(in Chinese with English abstract).
- YAO Xin, ZHANG Zheng-kai, LI Ling-jing, LIU Xing-hong, YAO Jia-ming. 2017. InSAR co-seismic deformation of 2017 M<sub>S</sub>7.0 Jiuzhaigou earthquake and disscussions on seismogenic tectonics[J]. Journal of Geomechanics, 23(4): 507-514(in Chinese with English abstract).
- YI Gui-xi, LONG Feng, AMAURY V, YANN KLINGER, LIANG Ming-jian, WANG Si-wei. 2016. Focal mechanism and tectonic deformation in the seismogenic area of the the 2013 Lushan earthquake sequence, southwestern China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(10): 3711-3731(in Chinese with English abstract).
- YI Gui-xi, LONG Feng, LIANG Ming-jian, ZHANG Hui-ping, ZHAO Min, YE You-qing, ZHANG Zhi-wei, QI Yu-ping, WANG Si-wei, GONG Yue, QIAO Hui-zhen, WANG Zhi, QIU Gui-lan, SU Jin-rong. 2017. Focal mechanism solutions and seismogenic structure of the 8 August 2017 M7.0 Jiuzhaigou earthquake and its aftershocks, northern Sichuan[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(10): 4083-4097(in Chinese with English abstract).
- YI Gui-xi, LONG Feng, WEN Xue-ze, LIANG Ming-jian, WANG Si-wei. 2015. Seismogenic structure of the M6.3 Kangding earthquake sequence on 22 Nov. 2014, Southwest China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(4): 1205-1219(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yue-qiao, YANG Nong, SHI Wei, DONG Shu-wen. 2008. Neotectonics of eastern Tibet and its control on Wenchuan earthquake[J]. Acta Geological Sinica, 82(12): 1668-1678(in Chinese with English abstract).

- ZHAO L S, HELEMBERGER D V. 1994. Source estimation from broadband regional seismograms[J]. Bulletin of the Seismological Society America Bulletin of the Seismological Society America, 84: 91-104.
- ZHAO L, LUO Y, LIU T Y, LUO Y J. 2013. Earthquake focal mechanisms in Yunnan and their inference on the regional stress field[J]. Bulletin of the Seismological Society America, 103(4): 2498-2507.
- ZHAO Xiao-ling, DENG Qi-dong, CHEN She-fa. 1994. Tectonic geomorphology of the central segment of the Longmenshan trust belt, western Sichuan southwestern China[J]. Seismology and Geology, 16(4): 422-428(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Zhu, ZHANG Rui-sheng. 1987. The compilation of regional travel time table in Sichuan[J]. Earthquake Research in Sichuan, (3): 29-35(in Chinese with English abstract).
- ZHONG Ji-mao, CHENG Wan-zheng. 2006. Determination of directions of the mean stress field in Sichuan-Yunnan region from a number of focal mechanism solutions[J]. Acta Seismologica Sinica, 19(4): 359-369, 450(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Rong-jun, PU Xiao-hong, HE Yu-lin, LI Xiao-gang, GE Tian-yong. 2000. Recent activity of Minjiang Fault zone uplift of minshan block and their relationship with sesmicity of Sichuan[J]. Seismology and Geology, 19(2): 115-124(in Chinese with English abstract).
- ZHU Hang, QU Yong. 2017. Analysis on the triggering of the Jiuzhaigou  $M_{\rm S}7.0$  earthquake's static Coulomb stress and its influences on its adjacent faults[J]. Earthquake Research in China, 33(4): 471-479(in Chinese with English abstract).
- ZHU Hang, WEN Xue-ze. 2009. Stress triggering process of the 1973 to 1976 Sonpan, Sichuan, sequence of strong earthquakes[J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(4): 994-1003(in Chinese with English abstract).
- ZHU L P, HELEMBERGER D V. 1996. Advancement in source estimation technique using broad-bandregional seismograms[J]. Bulletin of the Seismological Society America, 86: 1634-1641.
- ZHU L P, RIVERA L A. 2002. A note on the dynamic and static displacement from a pointsource in multilayered media[J]. Geophysical Journal International, 148: 619-627.