

陈俊磊, 郑勇, 张路等. 2020. 基于分频波形拟合方法的鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列震源机制解研究. 地球物理学报, 63(4):1472-1483, doi:10.6038/cjg2020N0386.

Chen J L, Zheng Y, Zhang L, et al. 2020. Focal mechanism solutions of the 2014 Ludian $M_s6.5$ earthquake sequence derived from multiple-bandwidth waveform fitting. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 63(4):1472-1483, doi:10.6038/cjg2020N0386.

基于分频波形拟合方法的鲁甸 $M_s6.5$ 地震 序列震源机制解研究

陈俊磊^{1,2,3}, 郑勇⁴, 张路^{1,2}, 武振波⁵, 侯爵^{1,2,6},
郭桂红⁷, 刘有山¹, 徐涛^{1,8}, 白志明¹

1 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 云南省地震局, 昆明 650224

4 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

5 成都理工大学, 地球物理学院, 成都 610059

6 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

7 兰州大学, 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州 730000

8 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101

摘要 2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震造成了极大的人员伤亡和经济损失, 其孕震机理和动力学成因为国内外学者广泛关注. 由于目前的反演主要采用单一的反演方法进行处理, 导致结果的不确定性较大, 使得该地震的发震构造及孕震机理等问题仍存在较大争议. 针对目前研究存在的不足, 本文基于近震波形求解震源机制解的 gCAP (general Cut And Paste) 方法和全波形拟合方法, 分别反演了鲁甸地震主震及其 9 次余震的震源机制解, 以此评价近震数据反演震源机制解结果的可靠性与稳定性. 结果表明数据方位角覆盖对 gCAP 解的稳定性有较大影响. 针对全波形拟合方法反演过程中, 低频信号稳定、高频信号解析度高的特点, 采用 0.01~0.05 Hz 和 0.01~0.2 Hz 分频段波形拟合思路: 在低频段剔除拟合差的数据, 进一步在高频段进行高解析度波形拟合, 从而获得主震可靠稳定的震源机制解. 研究结果表明鲁甸地震主震倾角为 $76^\circ\sim 83^\circ$ 、滑动角为 $-157^\circ\sim -164^\circ$, 为一次高倾角走滑型地震. 两种方法获得的余震震源机制解比较一致, 验证了结果的可靠性. 研究结果显示, 鲁甸地震的高倾角破裂特征, 会导致其能量释放快速且完整, 这可能是导致鲁甸地震地面破坏加重及缺乏较大震级余震的主要原因.

关键词 鲁甸地震; 近震波形拟合; 震源机制解; 高倾角

doi:10.6038/cjg2020N0386

中图分类号 P315

收稿日期 2019-11-05, 2020-01-12 收修定稿

Focal mechanism solutions of the 2014 Ludian $M_s6.5$ earthquake sequence derived from multiple-bandwidth waveform fitting

CHEN JunLei^{1,2,3}, ZHENG Yong⁴, ZHANG Lu^{1,2}, WU ZhenBo⁵, HOU Jue^{1,2,6},
GUO GuiHong⁷, LIU YouShan¹, XU Tao^{1,8}, BAI ZhiMing¹

1 State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China

基金项目 国家重点研发计划项目“深地资源勘查开采”重点专项(2016YFC0600302, 2016YFC0600101, 2016YFC0600201), 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0701), 国家自然科学基金(41874053, 41674064, 41704042, 41804060, 41674046, 41774097)和云南省地震局地震科技自立项目(2017K04)联合资助.

第一作者简介 陈俊磊, 男, 1985 年生, 在读博士, 助理研究员, 研究方向为地震学. E-mail: jlchen@mail.iggcas.ac.cn

2 *University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*

3 *Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China*

4 *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*

5 *College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*

6 *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

7 *The Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environmental in Western China, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*

8 *CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Science, Beijing 100101, China*

Abstract The 2014 Ludian $M_s6.5$ earthquake caused dramatic death and significant economic losses, and received much attention. Many studies have been made on the focal mechanisms of this earthquake sequence. However, due to the limitation of the inversion method and the complex structures of the seismic area, there are still some disputes on this issue, especially concerned with the dip-angle causative fault of the mainshock. In this work, we use regional seismic waveform inversion based on the gCAP method and the full waveform modeling to invert focal mechanism solutions of the mainshock and 9 aftershocks of the Ludian earthquake sequence. Results show that the azimuthal coverage has a significant effect on the reliability and stability of gCAP's inversion. To solve this problem, a two-bandwidth method is proposed in this paper, in which the bandwidths are $0.01\sim 0.05$ Hz and $0.01\sim 0.2$ Hz, respectively. With this inversion, this work determines that the dip angle and rake of the mainshock $76^\circ\sim 83^\circ$ and $157^\circ\sim -164^\circ$, respectively, implying a high-dip strike-slip rupture. The stabilities of the gCAP method and the full waveform modeling are verified by the good consistence between the derived mechanisms of the aftershocks. Our research suggests that the high-dip character of the Ludian earthquake might lead to the fast and complete energy release, which may be the main reason for the aggravating destruction and the lack of larger aftershocks.

Keywords Ludian earthquake; Regional waveform inversion; Focal mechanisms; high-dip event

0 引言

北京时间 2014 年 8 月 3 日 16:30, 在云南省鲁甸县发生 $M_s6.5$ 地震(简称鲁甸地震), 造成了 617 人遇难、112 人失踪, 直接经济损失 198.49 亿元(2014 年 08 月 03 日云南鲁甸 6.5 级地震灾害直接经济损失评估报告). 该地震震级不大但致灾严重, 引起国内外广泛关注. 很多学者从该地震震源深度浅(张广伟等, 2014; 王未来等, 2014)、破裂过程的共轭破裂特征(张勇等, 2014, 2015)、能量辐射方位复杂性(许力生等, 2014)、余震精定位和发震构造(房立华, 2014; 王未来等, 2014; Riaz et al., 2017)、野外地质和地表破裂特征(徐锡伟等, 2014; 李西等, 2014; Xu et al., 2015; Li et al., 2015)等多方面地震学证据分析了此次地震致灾严重的原因. 但是目前关于该地震的断层构造特征及致灾机理方面, 仍然存在着很多争议.

相比其他震源性质和参数, 震源机制解可以直观反映地震破裂几何特征和运动学特征及地震活动性. 因此, 利用主震和余震的震源机制解, 结合地震位置和其他地震活动性参数, 可以为确定地震的发震构造, 评估地震灾害损失, 判断地震活动趋势提供重要信息. 国内外不同机构和学者利用不同方法测定了鲁甸地震震源机制解(表 1), 其中, 美国地质调查局(USGS)和美国哥伦比亚大学全球矩心矩张量解中心(Global CMT, 前哈佛大学矩心矩张量中心)分别采用远震体波(Dziewonski et al., 1981)和长周期面波(Ekström et al., 2012)测定此次地震震源机制解. 该两组解给出的断层节面走向与地质考察得到的断层走向比较吻合(徐锡伟等, 2014; 李西等, 2014; 徐涛等, 2015; Li et al., 2015). 由于远震采用的地震波数据周期较长, 且受到路径效应的影响, 其分辨率相对近震波形反演结果低一些. 因此, 采用近震波形反演, 或者近震联合远震波形的震源参数反演结果更为可靠. 然而, 针对鲁甸地震的主

震和余震序列的震源机制,近震体波方法(赵旭等, 2014)、近震 gCAP 方法(张广伟等, 2014)、近震 CAP 方法(何晓慧等, 2015; Xie et al., 2015)等结果虽然给出的走向(表 1, 截面 II)与 USGS、Harvard GCMT 等远震结果,以及地表破裂推测的包谷埡—小河断裂走向比较吻合,但在断层倾角大小上存在明显的差异,分别为 57° 、 77° 、 72° 和 56° . 虽然余震深度分布显示出高倾角的分布特征(房立华等, 2014; 王未来等, 2014; Riaz et al., 2017),但由于该地震发震构造断层比较复杂(Riaz et al., 2017; Xie et al., 2015),存在着两条不同走向的余震分布区,因此,基于余震分布得到的倾角可能与主震断层倾角存在着较大差异,同时,深度定位的误差也进一步加大了利用余震空间分布特征确定主震的断层倾角的不确定性. 因此,对于鲁甸地震是否具有高倾角特征目前仍存在很大的争议,而主震的发震构造与此次地震灾害成因的关系仍需要深入研究.

表 1 不同机构发布的鲁甸地震主震震源机制解
Table 1 Focal mechanism solutions of the Ludian earthquake by different research groups

来源	方法	数据	震源机制解	
			节面 I / ($^\circ$)	节面 II / ($^\circ$)
USGS	体波	远震	162/86/6	72/84/176
Global CMT	体波	远震	160/90/5	70/85/180
张广伟等(2014)	gCAP	近震	162/70/-14	257/77/-159
赵旭等(2014)	体波	近震	342/83/-34	76/57/-172
何晓慧等(2015)	CAP	近震	168/76/18	73/72/165
Xie 等(2015)	CAP	近震	165/90/34	75/56/180

造成不同结果之间的差异可能与研究方法的特性有关. 当采用远震长周期信号计算震源机制解时,震源更加符合点源假定,结果更稳定(Langston et al., 1982). 但对于中小地震而言,远震记录信噪比降低,因此对于中小地震一般采用近震方法计算震源机制解. 近震波形拟合的 gCAP 方法仅拟合 Pnl 和 S(或面波)数据段,且对不同数据段采用不同频带滤波,并对到时进行相关性调整,降低了对初始模型的依赖(Zhao and Helmberger, 1994; Zhu and Helmberger, 1996). 由于地震大小与激发的主频有关,震级越小激发的频率越高(Herrmann and Ammon, 1997),因此震源机制解求解过程中,讨论不同频率范围对全波形拟合的影响,显得尤为重要. 传统的 gCAP 和 CAP 方法,以及远震反演方法,一般都是通过经验或者试错法对波形进行滤波,没有定量的

分析不同频率范围对不同波形和震相的影响,导致反演结果存在一定的不确定性. 针对上述震源机制解的差异,为了进一步评价近震震源机制解的可靠性和稳定性,确定鲁甸地震的倾角是否为高倾角,本文分别采用 gCAP 和全波形分频拟合两种方法,反演鲁甸地震主震及 9 次 $M_s \geq 3.5$ 余震序列的震源机制解,并对结果的可靠性和稳定性进行探讨分析.

1 理论与方法

1.1 gCAP 方法

由点源模型可知,给定地球模型可以计算不同距离和震源深度下的格林函数(Gilbert, 1971; Helmberger, 1974; Langston and Helmberger, 1975). 理论地震图 $\mathbf{g}(t)$ 可由格林函数 $\mathbf{G}(t)$ 的线性组合表达(Zhu and Zhou, 2016; Yu et al., 2016)为

$$\mathbf{g}(t) = \mathbf{D}_{ij} \mathbf{G}_{ij} * \mathbf{S}(t), \quad (1)$$

$\mathbf{S}(t)$ 为震源时间函数, \mathbf{D}_{ij} 为震源“标准化”矩张量. \mathbf{D}_{ij} 可分解为各向同性(ISO)、双力偶(DC)和补偿线性矢量偶极(CLVD)三个分量(Zhu and Ben-Zion, 2013),即:

$$\mathbf{D}_{ij} = \zeta \mathbf{D}_{ij}^{\text{ISO}} + \sqrt{1 - \zeta^2} (\sqrt{1 - \chi^2} \mathbf{D}_{ij}^{\text{DC}} + \chi \mathbf{D}_{ij}^{\text{CLVD}}), \quad (2)$$

其中, $\mathbf{D}_{ij}^{\text{ISO}}$ 、 $\mathbf{D}_{ij}^{\text{DC}}$ 、 $\mathbf{D}_{ij}^{\text{CLVD}}$ 分别为 ISO、DC 和 CLVD 张量,三个分量可由标量地震矩 M_0 、走向 θ 、倾角 δ 、滑动角 λ 确定. ζ 和 χ 分别为量化 ISO 和 CLVD 的无量纲参数.

由此可知,完整的地震矩张量 \mathbf{D}_{ij} 由 M_0 、 θ 、 δ 、 λ 、 ζ 和 χ 六个独立参数确定,当不考虑 ISO 和 CLVD 时, ζ 和 χ 为 0, (2) 式退化为只包含 DC 分量. 若 $f(t)$ 为观测数据, $\mathbf{g}(t)$ 为理论地震图, τ 为 $f(t)$ 与 $\mathbf{g}(t)$ 之间存在的相对时移,可由归一化后的互相关函数得到:

$$\mathbf{C}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \mathbf{g}(t + \tau) dt / \left(\int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{g}^2(t) dt \right)^{1/2}, \quad (3)$$

若 C_{fg} 表示剪切成为 Pnl 和 S 波(或面波)各数据段与相应合成数据互相关函数 $\mathbf{C}(\tau)$ 的最大正值. 求取 C_{fg} 后,则可估计理论数据与实测数据的相对时移 τ 及 M_0 、 θ 、 δ 、 λ 、 ζ 和 χ 六个独立参数. 当退化为仅含 DC 分量时,仅搜索 M_0 、 θ 、 δ 、 λ 四个参数.

1.2 全波形拟合方法

(1) 方法原理

全波形拟合方法(Herrmann and Ammon, 1997, 2002; Herrmann et al., 2008; Herrmann, 2013)为在

θ, δ, λ 参数空间计算理论地震图 $g(t)$ 与观测数据 $f(t)$ 拟合的方法. 拟合前采用互相关方法计算时移, 对三分量进行时移校正后与理论地震图进行拟合. 每个分量 c 的拟合度由式(4)给出:

$$r_c = g(t)_c \cdot f(t)_c / (|g(t)_c| |f(t)_c|), \quad (4)$$

其中 $c=R, T, Z$. 由每个分量的波形最大振幅比求得矩震级 M_0 . 每搜索一个深度值和震源机制解将得到三个分量的 r_c 和 M_0^c . 由 $r = (r_z, r_R, r_T)$, $M = (M_0^Z, M_0^R, M_0^T)$ 和 $L = (1, 1, 1)$, 有:

$$r_g = M \cdot L / (|L| |M|), \quad (5)$$

$$r_b = r \cdot L / (L \cdot L), \quad (6)$$

其中 r_g 估计矩震级的相似度, r_b 为 r 向量单个元素的最佳值. 当 $RB = r_g r_b$ 取最大值时得到最佳波形匹配值.

综上, 本文采用的全波形拟合方法与 gCAP 方法均是基于参数空间搜索的方法. 区别在于 gCAP 方法将特征震相剪切(Cut)出来后拼贴(Paste)在一起拟合, 而全波形拟合方法是直接拟合观测数据与理论波形.

(2) 分频全波形拟合

根据 Xie 等(2015)的研究指出, 鲁甸地震主震的破裂持续时间约 15 s、破裂长度约 15 km. 在这样

的断层尺度下, 将震源视为有限断层源比点源更为合理. 但是, 通常的反演方法均基于点源假设, 因此方法本身带来了不确定性. Zhu 和 Zhou(2016)指出低频信号可以降低点源假设带来的不确定性. 因此, 为了考虑频率对震源机制反演的影响, 兼顾震源机制总体的特征和震源机制解的细节, 我们发展了多频段全波形震源机制反演方法, 针对全波形拟合方法采取以下步骤: 首先, 由于精确的地下结构未知, 因此计算的理论地震图总是无法与实际数据完全匹配, 于是先在低频段 0.01~0.05 Hz 进行全波形拟合, 在保证方位角覆盖的前提下, 剔除拟合度低于 50% 的数据. 然后, 将频段拓宽为 0.01~0.2 Hz, 再一次对挑选后的数据进行拟合. 这种策略既能保证低频段信号对震源机制解整体特征的控制, 又能兼顾高频段信号对震源机制解细节的解析.

2 研究资料

本文的数据来源于国家测震台网数据备份中心(郑秀芬等, 2009). 选用 2014 年 8 月 3 日—9 月 10 日期间云南鲁甸 $M_s6.5$ 级地震主震及 $M_s \geq 3.5$ 余震, 共 10 次地震(图 1), 所选台站如图 1 所示, 红星

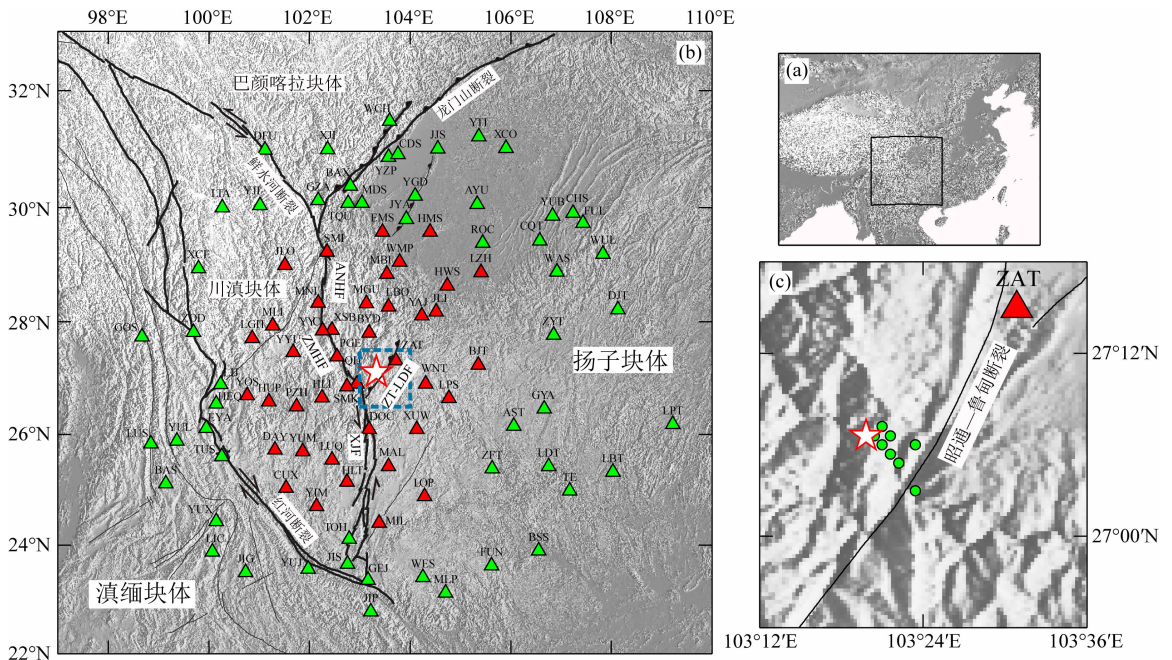


图 1 2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列震中及台站分布

(a) 研究区位置; (b) 红心为震中, 红色三角表示震中距 300 km 以内台站, 绿色三角表示震中距 300~500 km 的台站, ANHF 安宁河断裂, ZMHF 则木河断裂, XJF 小江断裂, ZT-LDF 昭通—鲁甸断裂; (c) 红心为主震震中, 绿色圆点为余震震中, 黑线为昭通—鲁甸断裂.

Fig. 1 Map showing epicenters of Ludian earthquake sequence and the distribution of seismic stations

(a) Location of research region; (b) Red star denotes main shock, red triangles denote stations within 300 km from epicenter, green triangles denote stations within 300~500 km epicenter distance. ANHF: Anninghe fault, ZMHF: Zemuhe fault, XJF: Xiaojiang fault, ZT-LDF: Zhaotong-Ludian fault; (c) Green dots denote aftershocks, black line denotes the Zhaotong-Ludian fault.

位置为主震震中位置,红色三角为震中距在 300 km 以内的台站,绿色三角为震中距 300~500 km 的台站。

3 鲁甸地震序列震源机制解结果

3.1 gCAP 结果

首先运用 $F-K$ 方法 (Zhu and Rivera, 2002) 计算格林函数,采用的速度模型如图 2a 所示。主震和余震选用震中距 300 km 以内的数据参与反演。在震源机制解反演前,先对数据去均值、去趋势、去仪器响应并旋转到 R、T、Z 方向。反演时对理论地震图和实测数据用相同滤波器滤波, Pnl 和 S 波滤波范围分别为 0.05~0.2 Hz 和 0.02~0.1 Hz。搜索深度步长 1 km, 网格步长 5°。表 2 展示本文反演结果,以及张广伟等 (2014) 和 Xie 等 (2015) 的结果。

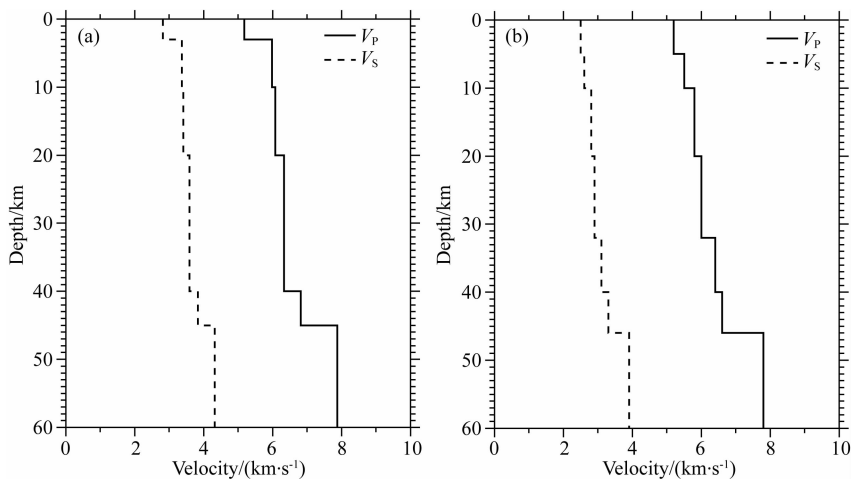


图 2 (a) 本文采用的速度模型(取自 Xie et al., 2015); (b) 张广伟等 (2014) 采用的速度模型

Fig. 2 (a) Velocity model used in this paper (from Xie et al., 2015); (b) Velocity model of Zhang et al. (2014)

表 2 本文 gCAP 结果与张广伟等 (2014) 和 Xie 等 (2015)

Table 2 The results of gCAP in this research and the results of Zhang et al. (2014) and Xie et al. (2015)

序号	发震时间	gCAP		Xie et al. 2015		张广伟等	
		节面 I / (°)	节面 II / (°)	节面 I / (°)	节面 II / (°)	节面 I / (°)	节面 II / (°)
1	2014-08-03 16:30:12.0	163/67/-8	256/83/-157	165/90/34	75/56/180	162/70/-14	257/77/-159
2	2014-08-03 19:07:21.2	277/86/-155	185/66/-4	70/68/-161	332/72/-23	96/90/156	186/66/4
3	2014-08-03 21:47:10.2	185/85/3	95/87/175	186/85/2	95/88/174	184/87/3	94/87/177
4	2014-08-03 22:28:30.5	171/79/-4	261/90/-169	173/85/3	82/87/174	351/76-4	81/90/-166
5	2014-08-04 03:30:31.6	188/66/5	96/85/156	189/73/6	97/84/162	188/68/6	96/84/158
6	2014-08-04 07:06:10.8	105/89/151	196/61/1	105/85/145	198/55/6	—	—
7	2014-08-08 14:39:28.8	166/66/-9	260/82/-156	179/67/-8	272/82/-156	—	—
8	2014-08-10 12:39:12.1	220/37/106	20/55/78	231/40/119	15/55/67	—	—
9	2014-08-13 20:16:28.6	98/86/163	189/73/4	99/90/172	189/82/0	—	—
10	2014-09-10 16:59:30.0	258/56/-149	150/65/-38	258/60/-152	153/66/-33	—	—

表 3 本文 CPS330 结果与张广伟等(2014)和 Xie 等(2015)

Table 3 The results of CPS330 in this research and the results of Zhang et al. (2014) and Xie et al. (2015)

序号	CPS330		Xie et al. (2015)		张广伟等(2014)	
	节面 I / (°)	节面 II / (°)	节面 I / (°)	节面 II / (°)	节面 I / (°)	节面 II / (°)
1	170/70/20	73/71/159	165/90/34	75/56/180	162/70/-14	257/77/-159
2	93/85/160	190/65/10	70/68/-161	332/72/-23	96/90/156	186/66/4
3	185/85/5	95/85/175	186/85/2	95/88/174	184/87/3	94/87/177
4	350/80/0	80/90/-170	173/85/3	82/87/174	351/76-4	81/90/-166
5	185/70/10	92/81/160	189/73/6	97/84/162	188/68/6	96/84/158
6	285/81/-150	190/60/-10	105/85/145	198/55/6	—	—
7	160/70/-5	257/85/-160	179/67/-8	272/82/-156	—	—
8	229/42/121	10/55/65	231/40/119	15/55/67	—	—
9	99/85/165	190/75/5	99/90/172	189/82/0	—	—
10	258/57/-156	155/70/-35	258/60/-152	153/66/-33	—	—

表 4 不同滤波频带及主震震源机制解

Table 4 Two kinds of bandwidth and the focal mechanism solutions of main shock

	Pnl	S	CPS330		
			频段	节面 I / (°)	节面 II / (°)
张广伟等(2014)	0.05~0.2 Hz	0.02~0.1 Hz	0.02~0.2 Hz	160/75/-15	254/76/-164
Xie et al. (2015)	0.02~0.1 Hz	0.01~0.1 Hz	0.01~0.1 Hz	160/75/-20	255/71/-164

地震主震震源机制解. 结果表明,不同频带的反演结果误差在一个步长.

3.4 结果讨论及可靠性分析

在表 2 和表 3 的结果中,张广伟等(2014)采用 gCAP 方法,Pnl 和 S 波滤波范围分别为 0.05~0.2 Hz 和 0.02~0.1 Hz. Xie 等(2015)采用 CAP 方法,Pnl 和 S 波滤波范围分别为 0.02~0.1 Hz 和 0.01~0.1 Hz. 序号 1 为主震,其余为余震. 对于主震,张广伟等(2014)与 Xie 等(2015)的节面 I 结果相比, δ 和 λ 分别存在 20°和 48°较大误差. 在他们的结果中,2 号地震的一致性也很差. 还可看到,在表 2 和表 3 中,本文用 gCAP 和 CPS330 反演的结果除主震一致性较差外,余震的一致性均很好,误差基本在 1 个搜索步长(即 5°)以内.

在表 2 中,3、4、5 号余震三组反演结果一致性较好,2、7 号余震与 Xie 等(2015)的反演结果一致性不好. 在表 3 中,本文用 CPS330 反演 2 至 5 号地震的反演结果与张广伟等(2014)的一致性更好,误差基本在一个步长范围以内. 本文结果中 2 号和 7 号余震与 Xie 等(2015)的结果一致性较差,其余余震一致性较好.

由表 2 和表 3 可知,1 号主震的反演结果差别较大. 通常情况下,以下 4 个因素会影响结果的不确

定性(Xie et al., 2015):(1)地震定位误差;(2)模型不确定性;(3)数据质量;(4)反演过程的控制参数. 为了判断造成反演差异的原因,我们采用张广伟等(2014)的滤波频段及方法,同时不用其速度模型(图 2b),而选用 Xie 等(2015)采用的速度模型(图 2a),获得与张广伟等(2014)一致性较好的结果(图 3,图 4),表明该方法对速度模型具有较小的依赖性(郑勇, 2009; 谢祖军等, 2012; Yu et al., 2016). 同时,由于 CAP 和 gCAP 方法采用了互相关方法进行拟合,对地震位置的敏感度也比较低,因此基本可以排除(1)和(2)两个因素. 考虑到张广伟等(2014)和 Xie 等(2015)采用了不同的滤波频段和不同的控制参数进行反演,本文采用 CPS330 验证不同滤波范围产生的误差(表 4). 图 5a 为在 0.01~0.05 Hz 频段的拟合结果. 图 5b 为在 0.01~0.2 Hz 频段的拟合结果. 图 5c 展示了在频段 0.01~0.05 Hz 去除拟合度低于 50%的波形拟合图. 同时为了兼顾方位角覆盖,留用部分拟合度在 40%以上的数据. 图 5d 为将频段拓宽为 0.01~0.2 Hz 的波形拟合图. 由表 4 可知,不同滤波范围对震源机制解产生的误差在 1 个搜索步长范围内,大大小于目前两者结果的差异. 因此,可以推测最有可能导致这种不一致性的因素是:他们选用了不同震中距和方位角的数据.

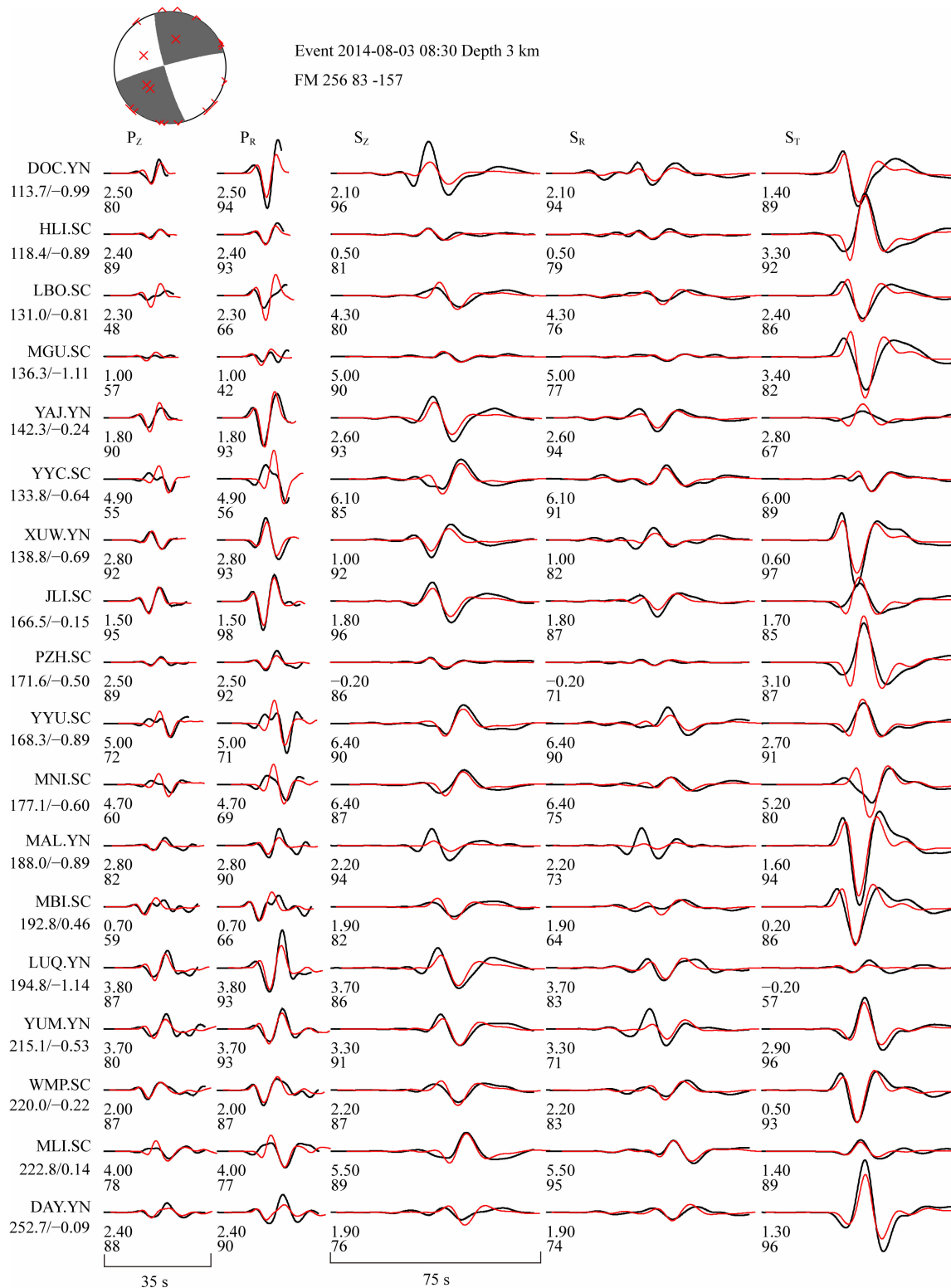


图 3 鲁甸地震最佳深度波形拟合图

其中,黑色为观测波形,红色为拟合波形,左侧字母为台站名,数字为震中距和相对偏移时间,波形下方数字为相对时移和相关系数.

Fig. 3 The waveform fitting of the best depth of Ludian Ms6.5 main shock

The black and red traces are observed and synthetic, respectively. The station names are given on the left and the numbers below each station are the epicentral distance and the relative time shift. The numbers below traces are relative time shift and cross-correlation coefficient.

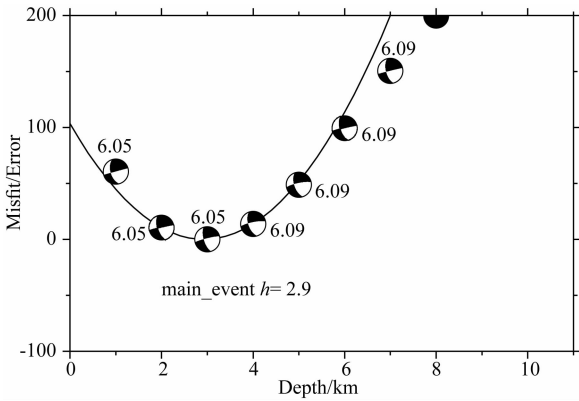


图 4 鲁甸地震不同震源深度震源机制解误差分布

Fig. 4 The gCAP focal mechanism solutions and misfits of Ludian $M_s6.5$ main shock at different depths

因此,为了验证结果的可靠性,我们仍然用 CPS330 对主震(1号地震)重新计算,其中台站选取震中距在 500 km 以内,为了保证结果的可靠性,我们只保留了拟合度在 70% 以上的数据得到的结果。不过,这样对数据进行选择,一方面导致台站分布不均匀,另一方面对不同震级的事件采用不同拟合度标准,使得结果可靠性的判定出现不统一的问题。为了解决这一问题,我们采用了分频拟合的策略进行反演。首先采用 0.01~0.05 Hz 的频段进行反演拟合,得到整体的拟合情况;在此基础上,以 0.01~0.2 Hz 的更高频段进行反演,以提高震源机制反演的分辨率。

图 5a 显示,在 0.01~0.05 Hz 频段反演得到的结果整体具有较低的失配比,结果较为平稳,但对拟合深度不敏感。在 3~5 km 范围内存在不明显的最佳拟合深度范围,该深度范围与 gCAP 方法获取的最佳拟合深度一致性较好,可能表明 gCAP 方法主要采用低频信息约束深度。图 5b 表明,当拓宽到 0.01~0.2 Hz 后,虽然失配比变高,但反演结果对深度更加敏感,能获得可信而稳定的反演结果。同时表明,不同频率成分对深度的敏感度不同。最佳拟合深度 10 km 也许与在 500 km 震中距范围内将鲁甸地震视为点源的假设有关,即震源具有的尺度允许拟合出不同的深度。

表 4 中的结果即是通过“分频拟合”反演得到。该结果与本研究 gCAP 的结果(图 3)和张广伟等(2014)的结果具有很好的一致性。而同时证明采用不同震中距和方位角覆盖的数据对结果的稳定性有很大的影响。需要重点指出的是,本研究通过“分频拟合”获得鲁甸地震主震的倾角为 76° ,而采用 gCAP 获得的倾角为 83° 。这两个结果与 USGS 和

Global CMT 给出的倾角具有很好的一致性,表明鲁甸地震为高倾角地震,与野外考察和余震的分布具有高度的一致性。同时也表明采用近震数据只要数据方位角覆盖良好,也可获得较为稳定的结果。

4 分析与讨论

通过 gCAP 反演结果与 CAP 反演结果对比,我们认为尽管反演数据选择过多会出现过度拟合(刘超和陈运泰, 2017; 徐志国等, 2019)的情况,但是在选择数据时,需考虑数据的方位角覆盖,从而提高结果的稳定性。

利用 0.01~0.05 Hz 和 0.01~0.2 Hz 分频段拟合方法有效提高了全波形反演结果的稳定性:该方法在低频段剔除数据保证了结果的稳定性,且兼顾高频段信号高解析度的特点。将这种反演策略应用于鲁甸地震主震的震源机制解反演,获得了与 USGS 及 Global CMT 等远震方法较为一致的结果,表明鲁甸地震为一次高倾角($76^\circ\sim 83^\circ$)的走滑型(滑动角为 $-157^\circ\sim -164^\circ$)地震。

根据鲁甸地震主震最佳拟合质心深度可知主震震源较浅(图 4, 图 5b),我们认为此次地震为在上地壳内(徐涛等, 2014, 2015; 李大虎等, 2019)发生的走滑型、高倾角地震。主震后一月内最大余震震级为 $M_s4.4$,无 5~6 级强余震,4~5 级强余震 8 次,可见强余震频次不高、震级不大,即主震能量一次性释放较为完整。根据破裂过程研究显示(Luo et al., 2018),主震约 90% 的能量在 2~13 s 内释放完毕。我们推测高倾角发震破裂面上的摩擦阻力相对较小,导致应力集中区破裂时能量快速且完整地释放。是否所有高倾角地震均显示能量快速且完整地释放这一特征? 在近期能量相当(鲁甸地震 $M_w6.1$)的中强地震震例中,九寨沟地震($M_w6.5$)同样为一次高倾角、走滑型地震(房立华等, 2018; 梁建宏等, 2018; Han et al., 2018; Sun et al., 2018; 王莹等, 2019; 熊维等, 2019)。根据余震演化历史显示,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(蒋长胜等, 2017; 孟令媛等, 2018)。根据九寨沟地震破裂过程研究显示(郑绪君等, 2017),该地震能量释放在 4~6 s 达到峰值,所有能量在破裂开始后 8~10 s 内基本释放完毕。可见九寨沟地震的能量释放也具有快速且完整的特点。由此可见高倾角、走滑型地震具有能量释放快速且完整的特点并非特例,具有一定的普适性,但尚需更多

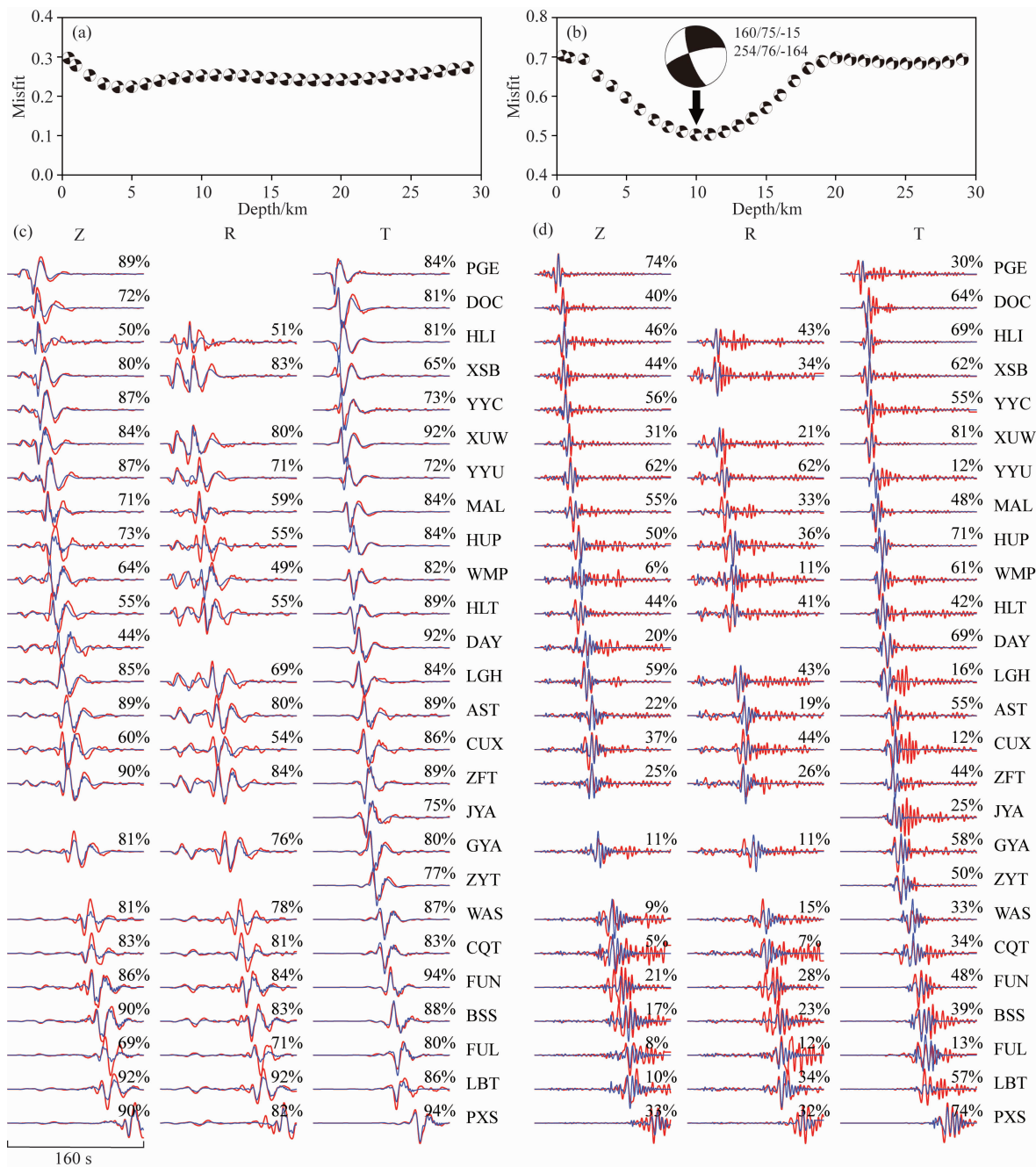


图5 (a) 鲁甸地震主震在频带 0.01~0.05 Hz 的深度拟合图；(b) 在频带 0.01~0.2 Hz 的深度拟合图；(c) 在频带 0.01~0.05 Hz 的波形拟合图，其中，红色为观测波形，蓝色为拟合波形，右侧为拟合度和台站名；(d) 在频带 0.01~0.2 Hz 的波形拟合图

Fig. 5 (a) The depth fitting of the results with bandwidth 0.01~0.05 Hz of Ludian earthquake; (b) The depth fitting of the results with bandwidth 0.01~0.2 Hz; (c) The best depth full-waveforms fitting of the main shock after deleting the low fitness waveforms in bandwidth of 0.01~0.05 Hz. The red and blue traces are the observed and predicted, respectively. The fitness and station name are on the right of each traces; (d) The best depth full-waveforms fitting of the main shock after widening the bandwidth of 0.01~0.2 Hz

震例加以验证。总之，我们应该更加重视高倾角、走滑型地震的特点：一是能量释放快速且完整将导致更加严重的地面破坏和经济损失；二是能量完整的

释放意味着短期内缺乏较大震级余震。这两方面的特点对抗震救灾及震后趋势预判具有重要指导价值。

5 结论

本文采用基于近震波形求解震源机制解的 gCAP 方法和全波形拟合方法,分别反演了鲁甸地震主震及其 9 次余震的震源机制解,获得如下主要认识:

(1)通过对不同速度模型反演,结果表明 gCAP 与全波形拟合方法均采用互相关方法计算时移,减小了对初始模型和震中的依赖。

(2)通过对鲁甸地震主震采用不同滤波频段反演,结果存在一定误差,但不影响结果的可靠性。

(3)基于全波形拟合方法,本文采用“分频拟合”策略,提高数据方位角覆盖,增强反演结果的稳定性。

(4)将“分频拟合”策略应用于鲁甸地震主震的震源机制解反演,获得了与 USGS 及 Global CMT 等远震方法较为一致的结果,表明鲁甸地震为一次高倾角、走滑型地震。

致谢 感谢中国地质大学(武汉)谢祖军博士、中国地震局地壳应力研究所张广伟博士和陕西省地震局杨宜海博士对论文提出的宝贵意见,感谢两位审稿人提出的建设性意见。

References

Bouchon M. 1981. A simple method to calculate green's functions for elastic layered media. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(4): 959-971.

Dziewonski A M, Chou T A, Woodhouse J H. 1981. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B4): 2825-2852.

Ekström G, Nettles M, Dziewoński A M. 2012. The global CMT project 2004—2010: Centroid-moment tensors for 13, 017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200: 1-9.

Fang L H, Wu J P, Su J R, et al. 2018. Relocation of mainshock and aftershock sequence of the $M_s7.0$ Sichuan Jiuzhaigou earthquake. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 63(7): 649-662, doi: 10.1360/N972017-01184.

Fang L H, Wu J P, Wang W L, et al. 2014. Relocation of the aftershock sequence of the $M_s6.5$ Ludian earthquake and its seismogenic structure. *Seismology and Geology* (in Chinese), 36(4): 1173-1185, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2014.04.019.

Gilbert F. 1971. Excitation of the normal modes of the earth by earthquake sources. *Geophysical Journal International*, 22

(2): 223-226, doi: 10.1111/j.1365-246x.1971.tb03593.x.

Han L B, Cheng J, An Y R, et al. 2018. Preliminary report on the 8 August 2017 $M_s7.0$ Jiuzhaigou, Sichuan, China, Earthquake. *Seismological Research Letters*, 89(2A): 557-569, doi: 10.1785/0220170158.

Haskell N A. 1964. Radiation pattern of surface waves from point sources in a multi-layered medium. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 54(1): 377-393.

He X H, Ni S D, Liu J. 2015. Rupture directivity of the August 3rd, 2014 Ludian earthquake (Yunan, China). *Science China Earth Sciences*, 58(5): 795-804, doi: 10.1007/s11430-015-0503-2.

Helmberger D V. 1974. Generalized ray theory for shear dislocations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(1): 45-64.

Herrmann R B. 1978. A note on causality problems in the numerical solution of elastic wave propagation in cylindrical coordinate systems. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 68(1): 117-123.

Herrmann R B. 2013. Computer programs in seismology: an evolving tool for instruction and research. *Seismological Research Letters*, 84(6): 1081-1088, doi: 10.1785/0220110096.

Herrmann R B, Ammon C J. 1997. Faulting parameters of earthquakes in the New Madrid, Missouri, region. *Engineering Geology*, 46(3-4): 299-311, doi: 10.1016/S0013-7952(97)00008-2.

Herrmann R B, Ammon C J. 2002. Computer programs in seismology. <http://www.eas.slu.edu/People/RBHerrmann/CPS330.html>.

Herrmann R B, Withers M, Benz H. 2008. The April 18, 2008 Illinois earthquake: an ANSS monitoring success. *Seismological Research Letters*, 79(6): 830-843, doi: 10.1785/gssrl.79.6.830.

Jiang C S, Zhuang J C, Wu Z L, et al. 2017. Application and comparison of two short-term probabilistic forecasting models for the 2017 Jiuzhaigou, Sichuan, $M_s7.0$ earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(10): 4132-4144, doi: 10.6038/cjg20171038.

Langston C A, Barker J S, Pavlin G B. 1982. Point-source inversion techniques. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 30(2-3): 228-241.

Langston C A, Helmberger D V. 1975. A procedure for modelling shallow dislocation sources. *Geophysical Journal International*, 42(1): 117-130.

Li D H, Ding Z F, Wu P P, et al. 2019. Deep structure of the Zhaotong and Lianfeng fault zones in the eastern segment of the Sichuan-Yunnan border and the 2014 Ludian $M_s6.5$ earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 62(12): 4571-4587, doi: 10.6038/cjg2019M0450.

Li X, Xu X W, Ran Y K, et al. 2015. Compound fault rupture in the 2014 $M_s6.5$ Ludian, China, earthquake and significance to disaster mitigation. *Seismological Research Letters*, 86(3): 764-774, doi: 10.1785/0220140198.

Li X, Zhang J G, Xie Y Q, et al. 2014. Ludian $M_s6.5$ earthquake surface damage and its relationship with structure. *Seismology*

- and Geology* (in Chinese), 36(4): 1280-1291, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2014.04.026.
- Liang J H, Sun L, Liu J. 2018. A high precision relocation study of the $M_s7.0$ Jiuzhaigou earthquake and the aftershocks occurred in 2017. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 61(5): 2152-2162, doi: 10.6038/cjg2018L0604.
- Liu C, Chen Y T. 2017. A time-domain inversion for the asymmetric seismic moment tensor: theory and method. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 39(2): 155-175, doi: 10.11939/jass.2017.02.001.
- Luo Y, Hsieh M C, Zhao L. 2018. Source rupture process of the 2014 $M_s6.5$ Ludian, Yunnan, China, earthquake in 3D structure: the strain green's tensor database approach. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(6): 3270-3277, doi: 10.1785/0120180090.
- Meng L Y, Zhou L Q, Zang Y. 2018. Characteristics of source parameters, observed strong ground motion and intensity of the Jiuzhaigou, Sichuan, $M_s7.0$ earthquake. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 33(6): 2251-2258, doi: 10.6038/pg2018BB0536.
- Riaz M S, Zheng Y, Xiong X, et al. 2017. Refined 3D seismic-velocity structures and seismogenic environment of the $M_s6.5$ Ludian earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(6): 3023-3036.
- Sun J B, Yue H, Shen Z K, et al. 2018. The 2017 Jiuzhaigou earthquake: A complicated event occurred in a young fault system. *Geophysical Research Letters*, 45(5): 2230-2240, doi: 10.1002/2017GL076421.
- Wang C Y, Herrmann R B. 1980. A numerical study of P-, SV-, and SH-wave generation in a plane layered medium. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70(4): 1015-1036.
- Wang W L, Wu J P, Fang L H, et al. 2014. Double difference location of the Ludian $M_s6.5$ earthquake sequences in Yunnan province in 2014. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(9): 3042-3051, doi: 10.6038/cjg20140929.
- Wang Y, Zhao T, Li C X, et al. 2019. Relocations and focal mechanism solutions of the 2017 Jiuzhaigou, Sichuan $M_s7.0$ earthquake sequence. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 34(2): 469-478, doi: 10.6038/pg2019CC0050.
- Xie Z J, Zheng Y, Liu C L, et al. 2015. Source parameters of the 2014 $M_s6.5$ Ludian earthquake sequence and their implications on the seismogenic structure. *Seismological Research Letters*, 86(6): 1614-162, doi: 10.1785/0220150085.
- Xie Z J, Zheng Y, Ni S D, et al. 2012. Focal mechanism and focal depth of the 19 January 2011 Anqing earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55(5): 1624-1634, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.020.
- Xiong W, Wang D J, Yu P F, et al. 2019. Coulomb stress impact on 2017 Jiuzhaigou $M_w6.5$ earthquake induced by historical earthquakes and Regional Seismic Hazard. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 34(1): 19-26, doi: 10.6038/pg2019BB0562.
- Xu L S, Zhang X, Yan C, et al. 2014. Analysis of the Love waves for the source complexity of the Ludian $M_s6.5$ earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(9): 3006-3017, doi: 10.6038/cjg20140925.
- Xu T, Zhang M H, Tian X B, et al. 2014. Upper crustal velocity of Lijiang-Qingzhen profile and its relationship with the seismogenic environment of the $M_s6.5$ Ludian earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(9): 3069-3079, doi: 10.6038/cjg20140932.
- Xu T, Zhang Z J, Liu B F, et al. 2015. Crustal velocity structure in the Emeishan large igneous province and evidence of the Permian mantle plume activity. *Science China Earth Sciences*, 58(7): 1133-1147, doi: 10.1007/s11430-015-5094-6.
- Xu X W, Jiang G Y, Yu G H, et al. 2014. Discussion on seismogenic fault of the Ludian $M_s6.5$ earthquake and its tectonic attribution. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(9): 3060-3068, doi: 10.6038/cjg20140931.
- Xu X W, Xu C, Yu G H, et al. 2015. Primary surface ruptures of the Ludian $M_w6.2$ earthquake, southeastern Tibetan plateau, China. *Seismological Research Letters*, 86(6): 1622-1635, doi: 10.1785/0220150038.
- Xu Z G, Liang S S, Liu J, et al. 2019. Focal mechanism solution and relocation of the aftershock sequences of the 2017 Jinghe $M_s6.6$ earthquake in Xinjiang. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 34(4): 1357-1365, doi: 10.6038/pg2019CC0213.
- Yu H Y, Zhao L, Liu Y J, et al. 2016. Stress adjustment revealed by seismicity and earthquake focal mechanisms in northeast china before and after the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Tectonophysics*, 666: 23-32, doi: 10.1016/j.tecto.2015.10.009.
- Zhang G W, Lei J S, Liang S S, et al. 2014. Relocations and focal mechanism solutions of the 3 August 2014 Ludian, Yunnan $M_s6.5$ earthquake sequence. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(9): 3018-3027, doi: 10.6038/cjg20140926.
- Zhang Y, Chen Y T, Xu L S, et al. 2015. The 2014 $M_w6.1$ Ludian Yunnan, earthquake: A complex conjugated ruptured earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 58(1): 153-162, doi: 10.6038/cjg20140930.
- Zhang Y, Xu L S, Chen Y T, et al. 2014. Rupture process of the 3 August 2014 Ludian, Yunnan, $M_w6.1$ ($M_s6.5$) earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(9): 3052-3059, doi: 10.6038/cjg20140930.
- Zhao L S, Helmberger D V. 1994. Source estimation from broadband regional seismograms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(1): 91-104.
- Zhao X, Liu J, Fang W. 2014. The kinematic characteristics of the $M_s6.5$ Ludian Yunnan earthquake IN2014. *Seismology and Geology* (in Chinese), 36(4): 1157-1172, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2014.04.018.
- Zheng X F, Ouyang B, Zhang D N, et al. 2009. Technical system construction of Data Backup Centre for China Seismograph Network and the data support to researches on the Wenchuan earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 52(5): 1412-1417, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.031.
- Zheng X J, Zhang Y, Wang R J. 2017. Estimating the rupture

- process of the 8 August 2017 Jiuzhaigou earthquake by inverting strong-motion data with IDS method. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(11): 4421-4430, doi: 10.6038/cjg20171128.
- Zheng Y, Ma H S, Lü J, et al. 2009. Source mechanism of strong aftershocks ($M_s \geq 5.6$) of the 2008/05/12 Wenchuan earthquake and the implication for seismotectonics. *Science in China Series D: Earth Sciences* (in Chinese), 52(6): 739-753, doi: 10.1007/s11430-009-0074-3.
- Zhu L P, Ben-Zion Y. 2013. Parametrization of general seismic potency and moment tensors for source inversion of seismic waveform data. *Geophysical Journal International*, 194(2): 839-843, doi: 10.1093/gji/ggt137.
- Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(5): 1634-1641.
- Zhu L P, Rivera L A. 2002. A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media. *Geophysical Journal International*, 148(3): 619-627, doi: 10.1046/j.1365-246X.2002.01610.x.
- Zhu L P, Zhou X F. 2016. Seismic moment tensor inversion using 3d velocity model and its application to the 2013 Lushan earthquake sequence. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 95: 10-18, doi: 10.1016/j.pce.2016.01.002.
- 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定位. *科学通报*, 63(7): 649-662, doi: 10.1360/N972017-01184.
- 房立华, 吴建平, 王未来等. 2014. 云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震余震重定位及其发震构造. *地震地质*, 2014, 36(4): 1173-1185, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2014.04.019.
- 何晓慧, 倪四道, 刘杰. 2015. 2014年8月3日云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震破裂方向性研究. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(3): 253-263.
- 蒋长胜, 庄建仓, 吴忠良等. 2017. 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*, 60(10): 4132-4144, doi: 10.6038/cjg20171038.
- 李大虎, 丁志峰, 吴萍萍等. 2019. 川滇交界东段昭通、莲峰断裂带的深部结构特征与2014年鲁甸 $M_s6.5$ 地震. *地球物理学报*, 62(12): 4571-4587, doi: 10.6038/cjg2019M0450.
- 李西, 张建国, 谢英情等. 2014. 鲁甸 $M_s6.5$ 地震地表破坏及其与构造的关系. *地震地质*, 36(4): 1280-1291, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2014.04.026.
- 梁建宏, 孙丽, 刘杰. 2018. 2017年四川九寨沟 $M_s7.0$ 地震及余震精定位研究. *地球物理学报*, 61(5): 2152-2162, doi: 10.6038/cjg2018L0604.
- 刘超, 陈运泰. 2017. 非对称地震矩张量时间域反演: 理论与方法. *地震学报*, 39(2): 155-175, doi: 10.11939/jass.2017.02.001.
- 孟令媛, 周龙泉, 臧阳. 2018. 九寨沟 $M_s7.0$ 地震震源参数及致灾特征初步分析. *地球物理学进展*, 33(6): 2251-2258, doi: 10.6038/pg2018BB0536.
- 王未来, 吴建平, 房立华等. 2014. 2014年云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列的双差定位. *地球物理学报*, 57(9): 3042-3051, doi: 10.6038/cjg20140929.
- 王莹, 赵赓, 李陈侠等. 2019. 2017年四川九寨沟7.0级地震序列重定位和震源机制特征分析. *地球物理学进展*, 34(2): 469-478, doi: 10.6038/pg2019CC0050.
- 谢祖军, 郑勇, 倪四道等. 2012. 2011年1月19日安庆 $M_L4.8$ 地震的震源机制解和深度研究. *地球物理学报*, 55(5): 1624-1634, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.020.
- 熊维, 王迪晋, 余鹏飞等. 2019. 历史强震对2017九寨沟 $M_w6.5$ 地震的应力影响及区域地震危险性. *地球物理学进展*, 34(1): 19-26, doi: 10.6038/pg2019BB0562.
- 许力生, 张旭, 严川等. 2014. 基于勒夫波的鲁甸 $M_s6.5$ 地震震源复杂性分析. *地球物理学报*, 57(9): 3006-3017, doi: 10.6038/cjg20140925.
- 徐涛, 张明辉, 田小波等. 2014. 丽江—清镇剖面上地壳速度结构及其与鲁甸 $M_s6.5$ 级地震孕震环境的关系. *地球物理学报*, 57(9): 3069-3079, doi: 10.6038/cjg20140932.
- 徐涛, 张忠杰, 刘宝峰等. 2015. 峨眉山大火成岩省地壳速度结构与古地幔柱活动遗迹: 来自丽江—清镇宽角地震资料的约束. *中国科学: 地球科学*, 45(5): 561-576.
- 徐锡伟, 江国焰, 于贵华, 等. 2014. 鲁甸6.5级地震发震断层判定及其构造属性讨论. *地球物理学报*, 57(9): 3060-3068, doi: 10.6038/cjg20140931.
- 徐志国, 梁姗姗, 刘杰等. 2019. 2017年新疆精河 $M_s6.6$ 主震震源机制解反演及余震序列重定位. *地球物理学进展*, 34(4): 1357-1365, doi: 10.6038/pg2019CC0213.
- 张广伟, 雷建设, 梁姗姗等. 2014. 2014年8月3日云南鲁甸 $M_s6.5$ 级地震序列重定位与震源机制研究. *地球物理学报*, 57(9): 3018-3027, doi: 10.6038/cjg20140926.
- 张勇, 陈运泰, 许力生等. 2014. 2014年8月3日云南鲁甸 $M_w6.1$ ($M_s6.5$) 地震破裂过程. *地球物理学报*, 57(9): 3052-3059, doi: 10.6038/cjg20140930.
- 张勇, 陈运泰, 许力生等. 2015. 2014年云南鲁甸 $M_w6.1$ 地震: 一次共轭破裂地震. *地球物理学报*, 58(1): 153-162, doi: 10.6038/cjg20150113.
- 赵旭, 刘杰, 冯蔚. 2014. 2014年云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震震源运动学特征. *地震地质*, 36(4): 1157-1172, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2014.04.018.
- 郑秀芬, 欧阳颺, 张东宁等. 2009. “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*, 52(5): 1412-1417, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.031.
- 郑绪君, 张勇, 汪荣江. 2017. 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*, 60(11): 4421-4430, doi: 10.6038/cjg20171128.
- 郑勇, 马宏生, 吕坚等. 2009. 汶川地震强余震($M_s \geq 5.6$)的震源机制解及其与发震构造的关系. *中国科学 D辑: 地球科学*, 39(4): 413-426.