

鞠慧超,张元生,刘旭宙.2019年甘肃张掖 M5.0 地震余震序列重定位[J].地震工程学报,2019,41(6):1396-1401.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1396

JU Huichao,ZHANG Yuansheng,LIU Xuzhou,Relocation of the Aftershock Sequence of the Zhangye M5.0 Earthquake in Gansu Province in 2019[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(6):1396-1401.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1396

2019 年甘肃张掖 M5.0 地震余震序列重定位

鞠慧超¹,张元生^{1,2},刘旭宙^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所,甘肃兰州 730000;

2. 甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站,甘肃兰州 730000)

摘要: 本文使用祁连山主动源台网和甘肃省数字测震台网记录到的地震资料,应用双差定位方法和遗传算法对 2019 年甘肃张掖 M5.0 地震及其余震进行重定位,获得了 30 个地震事件的重定位结果,双差定位显示主震位置为 38.502°N,100.254°E,震源深度 14.7 km。重定位结果显示余震分布在昌马—俄博断裂,较为集中,震源深度主要分布在 5~15 km 范围内,余震序列沿 SW—NE 向空间分布。

关键词: 甘肃张掖 M5.0 地震;余震序列;双差定位;遗传算法

中图分类号: P315.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)06-1396-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1396

Relocation of the Aftershock Sequence of the Zhangye M5.0 Earthquake in Gansu Province in 2019

JU Huichao¹, ZHANG Yuansheng^{1,2}, LIU Xuzhou^{1,2}

(1. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Lanzhou National Observatory of Geophysics, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: In this paper, using seismic data recorded by the active source network of the Qilian Mountain and the digital seismic network of the Gansu Province, we relocated the Zhangye M5.0 earthquake in 2019 and its aftershock using the double-difference location and genetic algorithms. Relocation results of 30 seismic events were also obtained. These results indicated that the main position of the earthquake was 38.502°N, 100.254°E, and the focal depth was 14.7 km. The aftershocks were relatively concentrated and distributed along the Changma—Ebo fault. The source depth was mainly distributed in a range of 5—15 km, while the aftershock sequence was distributed along the SW-NE.

Keywords: Zhangye, Gansu M5.0 earthquake; aftershock sequence; double-difference location; genetic algorithm

收稿日期:2019-06-19

基金项目:国家重点研发(2018YFC1503206);国家自然科学基金(41574044);地震监测、预报、科研、三结合课题(3JH-201901002);甘肃省科技计划(17JR5RA337);甘肃省自然科学基金(17JR5RA340)

第一作者简介:鞠慧超,女,助理工程师,主要从事地震定位与地震层析成像研究。E-mail:jhc0727@163.com。

通信作者:刘旭宙,男,副研究员,主要从事地震学研究。E-mail:liuxz@gstdzj.gov.cn。

0 引言

据中国地震台网测定,北京时间 2019 年 9 月 16 日 20 时 48 分在甘肃张掖市甘州区(38.60°N, 100.35°E)发生 M5.0 级地震,震源深度 11 km,震中及其周边地区震感强烈。地震发生在昌马—俄博断裂,震源机制解显示主震为逆冲型地震,余震分布较为集中。对主震及余震进行精定位,可以描绘震后震源区地震时空活动图像,确定发震断层范围和空间展布^[1]。M5.0 级地震震中在祁连山主动源探测区域内,祁连山主动源观测台站较大弥补了这一地区的微震监测能力。本文分析祁连山主动源观测台站和甘肃省测震固定台站的波形数据,在初步定位的基础上,利用双差地震定位方法^[2]和遗传算法^[3-4]对主震及其余震序列进行重定位,获得较为精确的震源位置,确定余震的空间分布特征,并探讨本次地震的断层形态。

1 研究区构造背景

此次地震构造上属于青藏高原东北缘,阿拉善地块南缘,鄂尔多斯块体以西,是印度洋板块和欧亚板块碰撞作用下由近南北方向向东和北东方向转换的重要场所^[5]。印度板块与欧亚板块碰撞后持续的向北推挤和楔入作用造就了青藏高原的隆升和强烈变形,其影响范围直达 1 600 km 以外的祁连山北缘和河西走廊盆地^[6]。该区域断裂构造复杂,分布着不少大型深断裂带,断裂活动频繁。

该次地震震中位于昌马—俄博断裂,该断裂位于祁连山西段,是祁连山系列次级断裂与阿尔金断裂东段的重要构造转换断层之一,昌马断裂部分段落表现出低角度的逆冲推覆活动,形成其特有的低角度走滑现象,以吸收阿尔金断裂东段的左旋位移。基于昌马—俄博断裂的活动特征和几何分布将其分为 4 段,总体走向 NWW,局部段落方向略有变化,各分段方向呈反 S 型延伸^[7]。通过重定位获取余震时空分布特征,对认识发震断裂有积极作用。

2 方法与数据

2.1 双差定位法和遗传算法的基本原理

双差定位法是一种比较成熟的相对定位方法,近些年来已被广泛应用于余震序列重定位中。该方法比绝对定位方法精度高,适用于比主事件法空间跨度大的地震事件群体,利用相邻地震事件相对于

同一台站的观测走时差与理论走时差之差(双差)来反演震源位置,能够有效地消除震源至台站共同传播路径效应,对地壳速度模型的依赖性相对较小^[8]。双差定伴法用公式表示为:

$$dr_{ij} = (t_i - t_j)_{\text{obs}} - (t_i - t_j)_{\text{cal}} \quad (1)$$

其基本思想是如果两个地震震源之间的距离小于地震事件到台站的距离和速度不均匀的尺度,那么震源区和这个台站之间的整个射线路径几乎相同。这时,在某个台站观测到的两个事件的走时差来自于事件之间的高精度的空间偏移^[9]。黄媛等^[10]将近台记录和区域台网数据联合用于双差地震定位算法,对 2003 年新疆巴楚—伽师 M_s6.8 强震后 404 个 M_L3.5 余震序列运用双差法重新精确定位,精定位后震中分布图像更加集中,残差和误差均减小;王光明等^[11]用双差定位方法对 2014 年鲁甸 M_s6.5 地震及其强余震序列进行了重定位,得出鲁甸地震的 4 次强余震序列是区域应力场和主震引发的震源区应力场共同作用的结果;董宗明等^[12]采用双差地震定位方法对古浪震源区小震进行重新定位后发现,皇城—双塔断裂带东、西两段表现出不同的力学运动性质,西段以逆冲运动为主,东段断层活动以局部拉张为主。

遗传算法是一种非线性全局优化方法,它不是通过某种形式的扰动对单一模型进行改善,而是首先用随机过程产生一组模型,然后同时对这组模型进行改善^[3-4]。遗传算法在参数空间的搜索点的顺序是随机的,即它从参数空间的一个点到另一个点是不确定的,然而其收缩和集中于最优解是确定的,这种简单的随机过程能导致高效的搜索机制。该方法可适应于震源定位,走时和波形的反演等^[13]。目前,这一方法已被用在较多地区的地球物理反演研究中^[13-15]。

利用 GABWIT 地震层析成像软件对余震序列进行重定位,该软件是应用地震体波走时资料反演地壳三维速度结构,反演方法为遗传算法,已得到广泛应用^[16]。

2.2 数据

本文数据来源于祁连山主动源台网和甘肃省数字测震台网。祁连山主动源台网于 2014 年 7 月完成建设,并正式运行,由 40 个短周期台站组成,分布于以激发场为中心的 300 km 半径范围内,包括祁连山北部地区、河西走廊以及走廊北部山区,大部分台站沿断裂分布^[17],如图 1 所示。大部分主动源台

站都加装有无线传输装置,具备实时无线传输数据功能,该台网运行以来大大提高了该地区地震监测能力,同时提高了地震定位精度^[18]。主动源监测区域的测震固定台站有 14 个,在本次地震余震资料分析中,主要有 ZHY、SNT、QIL 和 MEY 台站的数据

参与定位。观测台网在震中附近各方位均有一定分布,保证了地震定位结果的可靠性。图 2 所示为祁连山主动源台网 ZDY27 台站和 QIL 台主震波形记录,ZDY27 台站位于震中 23 km,本次地震该台站的记录信噪比很高。

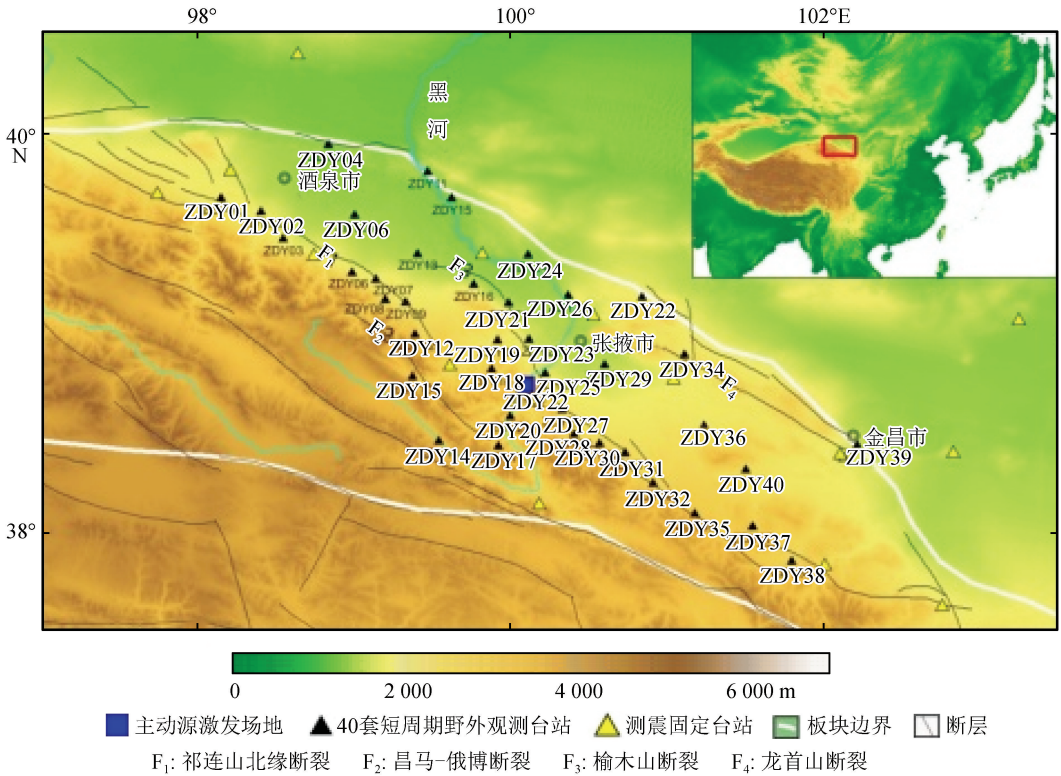


图 1 主动源台网系统分布图

Fig.1 Distribution diagram of active source network system

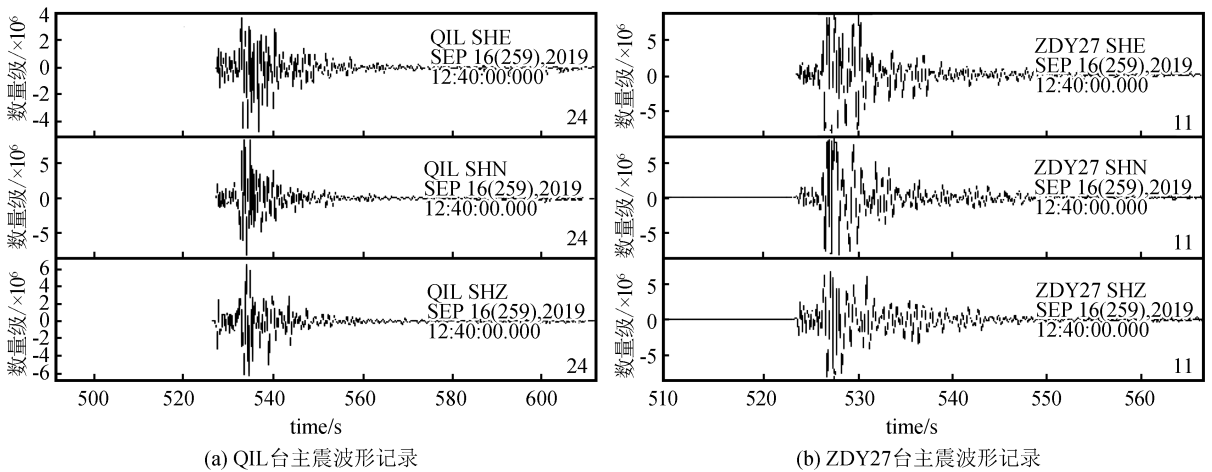


图 2 QIL 台和 ZDY27 台站主震波形记录

Fig.2 Waveform record of main shock at QIL and ZDY27 stations

本文收集了研究区域内主震发生后截止到 2019 年 9 月 19 日 8 点的地震资料。首先对数据进行整合及格式转换^[19],然后利用地震分析软件 MSDP 进行地震识别及初定位,共识别出余震 40

次,形成初步震相报告。在初定位时,根据时距曲线,对震相数据进行复查,剔除有明显错误或误差较大的震相数据。在初定位的基础上,用双差定位方法和遗传算法进行重定位。遗传算法所采用的

速度模型参考了周民都等^[13]的体波走时反演结果和王椿镛等^[5]青藏高原东北部的人工测深剖面研究,其中 S-P 资料、P 资料用的速度模型见表 1 所列。

表 1 重定位一维速度模型

Table 1 One-dimensional velocity model used for relocation

深度/km	0.00~6.00	6.00~49.00
速度/(km·s ⁻¹)	5.53	6.12
波速比(用于 S-P 资料重定位)	1.71	1.74

3 重定位结果

采用双差重定位后,共得到 27 个地震的重定位结果,主震位置为 38.502°N,100.254°E,震源深度 14.7 km。采用遗传方法,共得到 30 个地震的重定位结果,其中 P 资料定出主震位置为 38.472°N,100.205°E,震源深度 9.30 km,S-P 资料定出主震位置为 38.466°N,100.199°E,震源深度 8.90 km。图 3 给出了双差重新定位后的震中分布图像,余震分布较为集中,本次地震余震较少,大多数发生在 9 月 16 日当天。

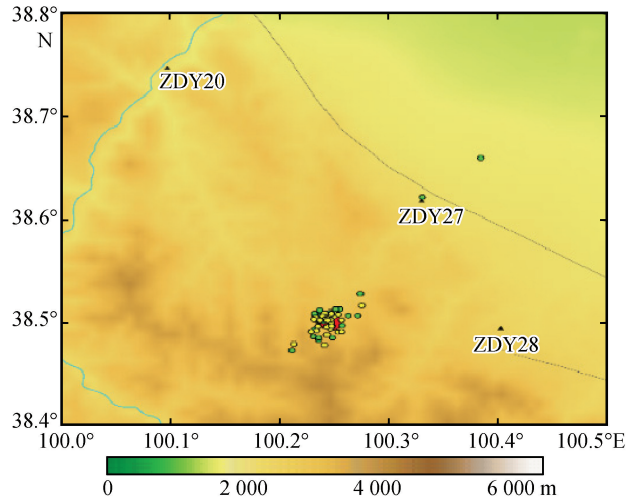


图 3 重定位前后的地震震中分布图

Fig.3 Epicenter distribution before and after relocation

图 4 为深度—频度统计直方图。为更直观地了解地震的震源深度分布,以 2 km 为统计间隔对不同震源深度的地震次数进行定量统计。震源深度的优势分布范围在 5~15 km,统计结果表明,余震序列主要发生在中上地壳。图 5 显示重定位后地震序列

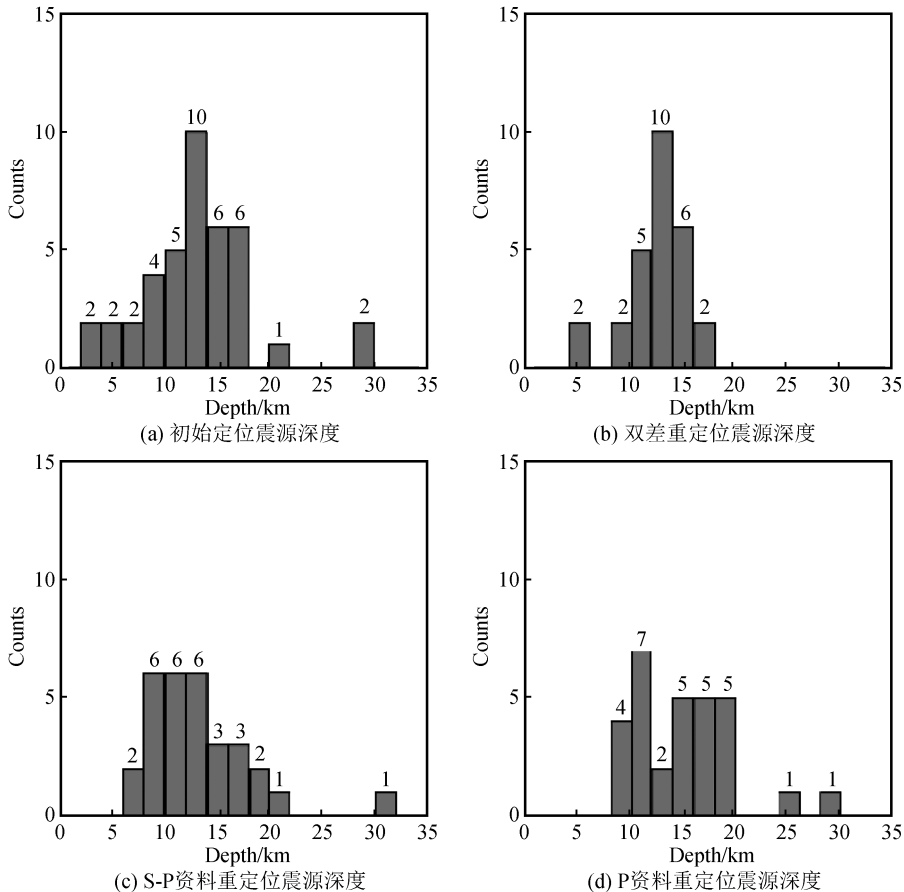
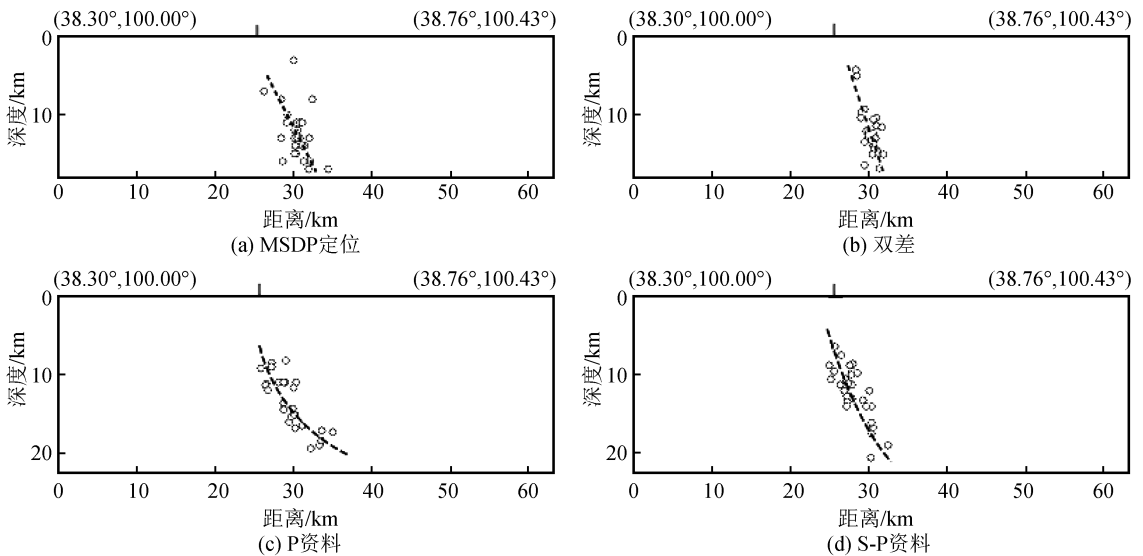


图 4 重定位前后地震序列深度分布图

Fig.4 The focal depth distribution before and after relocation



虚线为垂直断层剖面方向,红线为断层地表出漏位置

图5 重定位后地震序列沿剖面分布图

Fig.5 Distribution of earthquake sequence along the profile after relocation

沿剖面分布,(a)图为MSDP初始定位结果,(b)图为双差重定位结果,(c)图为P资料重定位结果,(d)图为S-P资料重定位结果。四幅剖面图表示四种不同定位方法,结果一致显示,地震分布沿SW-NE向,推断发震断层形态倾向NE,具有逆冲性质。

4 讨论与结论

本研究利用祁连山主动源台网和甘肃省数字测震台网地震观测数据,共识别出余震39次,利用双差定位算法和遗传算法对张掖地震的主震和余震序列进行了重定位,获得了30个较为精确的震源位置。得到以下初步结论:

(1) 两种重定位方法得到的结果基本一致,双差重定位结果显示,本次地震为主余型地震,主震位置为 38.502°N , 100.254°E ,震源深度14.7 km,余震震源深度的优势分布范围在5~15 km,分布较初定位更为集中,余震序列沿SW—NE向空间分布。

(2) 根据余震震源深度剖面分布,推断发震断层形态具有倾向NE方向特征,震源机制解显示该次主震为逆冲型地震,结合昌马断裂构造性质,推断发震断层为昌马—俄博断裂。

本研究只是使用了主震后三天的数据,后续还要收集更多的余震资料,继续关注张掖地震余震分布情况,研究余震序列特征和发震构造。

致谢:本文使用了GMT(Wessel and Smith, 1995)^[20]进行制图,在此表示感谢。

参考文献(References)

- [1] 梁建宏,孙丽,刘杰.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,2017,61(5):2152-2162.
LIAN G Jianhong, SUN Li, LIU Jie. A high Precision Relocation Study of the $M_s7.0$ Jiuzhaigou Earthquake and the After-shocks Occurred in 2017 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 61(5): 2152-2162.
- [2] WALDHAUSER F, ELLSWORTH W L. A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90(6): 1353-1368.
- [3] 张元生,李清河,徐果明.联合利用走时与波形反演技术研究地壳三维速度结构(I)——理论与方法[J].西北地震学报,1998, 20(2): 8-15.
ZHANG Yuansheng, LI Qinghe, XU Guoming. Combining Inversion Technique to Study 3-D Crustal Velocity Structure by using Seismic Wave Travel-time And Waveform (I)-Theory Andmethod [J]. Northwestern Seismological Journal, 1998, 20 (2): 8-15.
- [4] SAMBRIDGE M, DRIJKONINGEN G. Genetic Algorithms in Seismicwaveform Inversion [J]. Geophys J Int, 1992, 109: 323-342.
- [5] 王椿镛,李永华,楼海.与青藏高原东北部地球动力学相关的深部构造问题[J].科学通报,2016, 61: 2239-2263.
WANG Chunyong, Li Yonghua, Lou Hai. Issues on Crustal and Upper-mantle Structures Associated with Geodynamics in the Northeastern Tibetan Plateau [J]. Chin Sci Bull, 2016, 61: 2239-2263.
- [6] 邓起东,张培震,冉勇康,等.中国活动构造基本特征[J].中国科学(D辑),2002, 32(12): 1020-1030.
DENG Qidong, ZHANG Peizhen, RAN Yongkang, et al. Basic

- Characteristics of Active Tectonics of China[J]. *Science in China (Series D)*, 2002, 32(12): 1020-1030.
- [7] 何文贵,袁道阳,等.昌马断裂带古地震活动特征的新认识[J]. *地震工程学报*, 2016, 38(4): 632-669.
LUO Hao, HE Wengui, YUAN Daoyang, et al. New Insight on Paleoequake Activity Along Changma Fault Zone[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2016, 38(4): 632-669.
- [8] 杨智娴,陈运泰,郑月军,等.双差地震定位法在我国中西部地区地震精确定位中的应用[J]. *中国科学 D 辑:地球科学*, 2003, 33(增刊): 129-134.
YANG Zhixian, CHEN Yuntai, ZHEN Yuejun, et al. Accurate Relocation of Earthquakes in Central-western China Using The double difference Earthquake Location Algorithm[J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33: 129-134.
- [9] 房立华,吴建平,王未来,等.四川芦山 $M_S7.0$ 级地震及其余震序列重定位[J]. *科学通报*, 2013, 58(20): 1901-1909.
FANG Lihua, WU Jianping, WANG Weilai, et al. Relocation of Mainschock and After Shock Sequences of $M_S7.0$ Sichuan Lushan Earthquake[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(20): 1901-1909.
- [10] 黄媛,杨建思,张天中.2003 年新疆巴楚—伽师地震序列的双差法重新定位研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(1): 162-169.
HUANG Yuan, YANG Sijian, ZHANG Tianzhong. Relocation of the Bachu—Jiashi, Xinjiang Earthquake Sequence in 2003 Using the Double-difference Location Algorithm.[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(1): 162-169.
- [11] 王光明,赵小艳,付虹,等.2014 年鲁甸 $M_S6.5$ 地震及其强余震序列重定位[J]. *地震学报*, 2018, 40(5): 582-594.
WANG Guangming, ZHAO Xiaoyan, FU Hong, et al. Relocation of the 2014 Ludian $M_S6.5$ Earthquake and Its Large Aftershock Sequence[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2018, 40(5): 582-594.
- [12] 董宗明,刘白云.1927 年古浪 8 级大震区小震重新定位及问题讨论[J]. *地震工程学报*, 2017, 39(4): 692-697.
DONG Zongming, LIU Baiyun. Discussion of Small Earthquake Relocation in the Area of the 1927 Gulang M8 Earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2017, 39(4): 692-697.
- [13] 周民都,张元生,石雅鏐等.青藏高原东北缘地壳三维速度结构[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(1): 127-134.
ZHOU Mindu, ZHANG Yuansheng, SHI Yaliu, et al. Three-dimensional Crustal Velocity Structure in the Northeastern margin of the Qinghai—Tibetan Plateau[J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(1): 127-134.
- [14] 周民都,吕太乙,张元生,等.青藏高原东北缘地质构造背景及地壳结构研究[J]. *地震学报*, 2000, 22(6): 645-653.
ZHOU Mindu, DENG Taiyi, ZHANG Yuansheng, et al. Geological Tectonic Background and Crustal Structure of Northeastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2000, 22(6): 645-653.
- [15] 张元生,周民都,荣代骞,等.祁连山东中段地区三维速度结构研究[J]. *地震学报*, 2004, 26(3): 247-255.
ZHANG Yuansheng, ZHOU Mindu, RONG Dailu, et al. 3-D Velocity Structure in the Central-eastern Part of Qilian Shan[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2004, 26(3): 247-255.
- [16] 张元生,李清河,刘耀炜,等[J].地震层析成像软件. *西北地震学报*, 2003, 25(2): 170-174.
ZHANG Yuansheng, LI Qinghe, LIU Yaowei, et al. The Seismic Tomography Software[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2003, 25(2): 170-174.
- [17] 张元生,王宝善,陈颀,等.两次强震发生前后主动源观测走时数据的变化[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(10): 3815-3822.
ZHANG Yuansheng, WANG Baoshan, CHEN Yong, et al. Changes of Travel-time Variations Before, And After Two Major Earthquakes Derived from Active-source Seismic Data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(10): 3815-3822.
- [18] 张元生,郭晓,秦满忠,等.甘肃祁连山主动源重复探测项目建设及震源重复性分析[J]. *中国地震*, 2016, 32(2): 209-215.
ZHANG Yuansheng, GUO Xiao, QIN Manzhong, et al. The Construction of Active Source Repeated Monitoring in the Qilian Mountains of Gansu Province[J]. *Earthquake Research in China*, 2016, 32(2): 209-215.
- [19] 刘旭宙,张元生,李顺成.流动地震观测台阵数据快速整合研究[J]. *地震学报*, 2014, 36(4): 730-737.
LIU Xuzhou, ZHANG Yuansheng, LI Shuncheng. Data Rapid Integration of Mobile Seismic Array[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2014, 36(4): 730-737.
- [20] WESSEL P, SMITH W H F. New Version of Generic Mapping Tools Released. *Eos Trans Am Geophys Union*, 1995, 76, 329.