

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):0692-0697.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0692

DONG Zong-min, LIU Bai-yun. Discussion of Small Earthquake Relocation in the Area of the 1927 Gulang M8 Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(4): 0692-0697.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0692

1927年古浪8级大震区小震重新定位及问题讨论^①

董宗明^{1,2}, 刘白云^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 73000; 2. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 73000)

摘要: 联合利用甘肃及周边测震台网记录的古浪及周边地区4 592次地震的P波绝对到时和相对到时资料,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,地震主要发生在断裂的下盘;而东段地震却主要发生在上盘,断层活动以局部拉张为主。还首次发现在皇城—双塔断裂带的中段与主破裂呈垂直方向存在一条主震发生时新产生的共轭断层,基于小震的断层面参数反演显示该断裂是一高倾角运动性质以右旋为主兼具正断的断裂。

关键词: 古浪地震; 双差地震定位; 皇城—双塔断裂

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)04-0692-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0692

Discussion of Small Earthquake Relocation in the Area of the 1927 Gulang M8 Earthquake

DONG Zong-min^{1,2}, LIU Bai-yun^{1,2}

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

2. Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Based on the data recorded by 67 stations in the Gansu digital seismic network and its adjacent seismic network from 2000 to 2015, we relocated 4 592 small earthquakes that occurred at the epicenter of the 1927 Gulang M8 earthquake and in its adjacent areas via a double-difference earthquake relocation algorithm. The results show that the eastern and western segments of the Huangcheng-Shuangta fault zone exhibit different mechanical motion properties. While the western segment is primarily dominated by thrust faulting, and earthquakes occurred mainly in the footwall of the fault, and in the eastern segment earthquakes mainly occurred in the hanging wall of the fault. Moreover, we first found a conjugate fault located in the middle segment of the Huangcheng-Shuangta fault that nearly perpendicular to the main fault. Based on the inversion of fault parameters of these small earthquakes, we also found that this high dip-angle fault mainly

① 收稿日期:2017-05-05

基金项目:中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2017IESLZ02);甘肃省省青年科技基金计划项目(145RJYA316);中国地震局监测预报司2016年度“测震台网青年骨干培养专项”(20160525)

作者简介:董宗明(1965—),女,工程师,主要从事地震定位、地震编目等方面工作。E-mail:598504510@qq.com。

通信作者:刘白云(1980—),男,高级工程师,主要从事于小震定位、层析成像、断层面参数反演等方面的研究工作。

E-mail:421121833@qq.com。

exhibits right-lateral strike-slip faulting with a minor tension component.

Key words: Gulang earthquake; double difference location; Huangcheng-Shuangta fault

0 引言

1927年古浪8级地震发生在青藏高原北部边缘的祁连山—河西走廊构造带内,位于大黄山—冷龙岭北北西向隆起带和武威压陷盆地的结合部位^[1],是继1920年海原8.5级地震之后发生在青藏高原东北缘的又一次特大地震^[2-4]。这次地震以甘肃古浪、凉州(今武威)受灾最重,受灾区域纵长600 km,宽约200 km。尽管此次地震造成了大面积的地震灾害和人员伤亡,但迄今发现的地震破裂带却很短,与同样发生在青藏高原东北缘地区的同级别地震在构造特征上有着明显差异。

前人通过地震地质调查^[5-6]、数值模拟^[7]、断层面参数解^[8-9]、电磁测深^[10-11]和静态库仑应力变化^[12]等多种地质和地震学手段对此次地震的发震断裂、形成机制、深部构造特征等做了一定程度的研究。较一致地认为在北东—南西向挤压应力作用下,皇城—双塔活动断裂带和武威—古浪活动断裂带交汇处形成的应力汇集区破裂后形成了此次地震。但对诸如震区其他断裂是否参与了此次地震、孕震过程、地震地表破裂长度、破裂性质及形成机制等方面仍存有重大分歧。

地震精确定位被认为是研究地下隐伏断裂、获得深部介质结构的重要方法^[13-16]。Waldhauser等^[17]于2000年提出了双差地震定位方法。双差算法通过在各台站同时记录到的两个相邻事件的观测与理论计算走时差的残差(即双差)来确定其相对位置。它可消除共同模式的误差,尤其是与速度结构横向变化以及台站接收一边有关的误差,无需台站校正和对走时的准确估计而能够大幅度提高其相对定位精度。本文利用双差地震定位法对古浪震区2000—2015年的4 592次地震进行重新定位,着重讨论重新定位后地震活动性所揭示的地震构造活动信息,以弥补传统地质构造研究方法的不足和局限,这对深入了解古浪地震的孕震过程、深部介质条件有重要意义。

1 方法与资料

1.1 地震资料

本文收集了距离古浪8级主震400 km范围内甘肃及周边测震台网共67个台站于2000年1月1日—2015年8月29日记录到的Pg、Sg到时数据。所用台站包括甘肃省地震台网30个固定台、内蒙古自治区地震台网2个固定台、宁夏自治区地震台网11个固定台、青海省地震台网的10个固定台和14个流动台站(图1)。

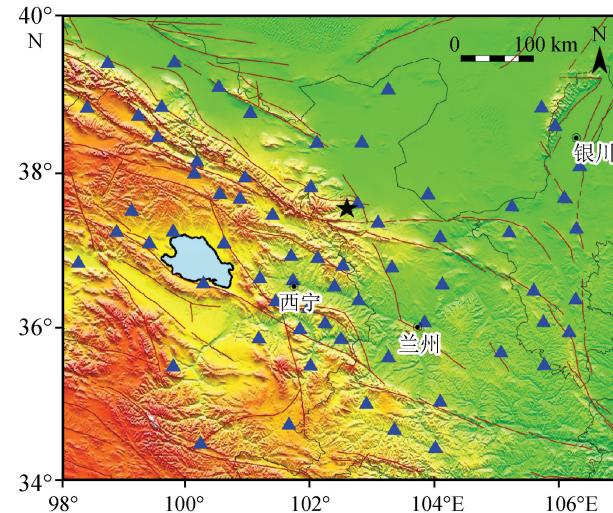


图1 研究区域所用台站分布图(黑色五角星表示古浪主震;蓝三角表示地震台站;曲线表示断裂)

Fig.1 Distribution of seismic stations used in this study. (The black star denotes Gulang mainshock; blue triangles denote seismic stations; red lines denote faults)

研究区域地理范围为37.0°~38.4°N,101.4°~103.4°E。基于甘肃及周边地震台网产出的观测报告,收集到研究区初始地震事件8 052条(2000年1月1日—2015年8月29日)。由于数据的选取关系到反演结果的准确性,对上述资料进行重新筛选,筛选原则为仅选取震级 $M_L \geq 0.5$,走时残差 ≤ 0.5 s地震事件的震相数据,同时保证这样的地震至少被4个以上台站记录到。最终挑选出5 075次地震事件,震级范围 $M_L 0.5 \sim 5.9$,初始震源深度分布范围0~48 km。然后对挑选出的地震数据进行双差定位,在地震对匹配时要求地震对之间最大距离为10 km,每个地震最多可以和30个地震组成地震对。

1.2 双差地震定位方法

双差地震定位方法的基本基础理论如下:

震源*i*到台站*j*的体波观测到时*T*基于射线理论可描述为如下积分路径:

$$T_k^i = \tau^i + \int_i^k u \, ds \quad (1)$$

其中: τ^i 为第*i*个震源的初始地震发生时刻; T_k^i 是第*i*个震源到*k*个台站的走时; u 为慢度矢量。由于式(1)为非线性关系,若用Taylor展开对其做线性化

处理,在三维模型中可将其写成一个线性等式:

$$\begin{aligned} r_k^i &= \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^i}{\partial x_l^i} \Delta x_l^i + \Delta \tau^i + \int_i^k \delta u \mathrm{d}s \\ &= \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^i}{\partial x_l^i} \Delta x_l^i + \Delta \tau^i + \sum_{m=1}^{M_{ik}} \sum_{n=1}^N w_{mn} \Delta u_n \Delta s_m \quad (2) \end{aligned}$$

同样道理,对于第 j 个地震到 k 个观测站,也可以写成:

$$\begin{aligned} r_k^j &= \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^j}{\partial x_l^j} \Delta x_l^j + \Delta \tau^j + \int_j^k \delta u \mathrm{d}s \\ &= \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^j}{\partial x_l^j} \Delta x_l^j + \Delta \tau^j + \sum_{m=1}^{M_{jk}} \sum_{n=1}^N w_{mn} \Delta u_n \Delta s_m \quad (3) \end{aligned}$$

因此在相同的观测点 k ,地震间有如下关系:

$$\begin{aligned} r_k^i - r_k^j &= \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^i}{\partial x_l^i} \Delta x_l^i + \Delta \tau^i + \int_i^k \delta u \mathrm{d}s - \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^j}{\partial x_l^j} \Delta x_l^j - \\ &\quad \Delta \tau^j - \int_j^k \delta u \mathrm{d}s = \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^i}{\partial x_l^i} \Delta x_l^i + \Delta \tau^i + \\ &\quad \sum_{m=1}^{M_{ik}} \sum_{n=1}^N w_{mn} \Delta u_n \Delta s_m - \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^j}{\partial x_l^j} \Delta x_l^j - \\ &\quad \Delta \tau^j - \sum_{m=1}^{M_{jk}} \sum_{n=1}^N w_{mn} \Delta u_n \Delta s_m \quad (4) \end{aligned}$$

上式表示两个事件 i 和 j 在同一台站 k 的观测走时差 $(t_k^i - t_k^j)^o$ 与理论计算走时差 $(t_k^i - t_k^j)^c$ 的残差,即双差。 $\Delta m^i = (\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta \tau^i)^T$ 是为了使模型更好地拟合数据所做的第 i 个地震震源参数 (x^i, y^i, z^i, τ^i) 的改变量。

将所有台站($k=1, 2, \dots$)、所有事件对($i, j=1, 2, \dots, N$)得到的形如式(4)的方程构成一个线性系统,以矩阵形式表示为:

$$\mathbf{WGm} = \mathbf{Wd} \quad (5)$$

式中: \mathbf{G} 是一个 $M \times 4N$ 的偏微分矩阵;而 M 是双差观测数, N 是地震数; \mathbf{d} 是双差数据向量; \mathbf{m} 是待定震源参数改变量 $(\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta \tau^i)^T$, ($i = 1, 2, \dots, N$) 的 $4N$ 维向量; \mathbf{W} 是用于对每个方程加权的对角矩阵。在反演过程中,对所有地震经重新定位的各震源参数(即三个方向上的坐标和发震时刻)加上了使其平均移动(即矩心)为零的约束条件:

$$\sum_{i=1}^N \Delta m_i = 0 \quad (6)$$

1.3 定位结果

本文反演采用的初始模型(图 2)参考了该地区人工地震、层析成像等研究结果。对上述挑选出的地震都以共轭梯度(LSQR)解方程,在反演中对不同质量的数据做加权处理。震相本身的特征决定了其识别的难易程度,亦即读取的精度。从测震学的

角度看,P 波到时读取的质量一般要好于 S 波,因此对两种震相分别赋予 1.0 和 0.5 的权重。计算使用一定搜索半径将地震配对,建立连接作相对定位。使用的搜索半径不同,得到的定位精度和定出的地震数目不同。考虑研究区范围不是很大,采用 10 km 做搜索半径。根据前后单个地震走时均方根残差分布统计可以看出,重定位前地震走时残差主要位于 80~520 ms,而定位后地震均方根残差显著降低,主要集中在 0~120 ms 间(图 3)。最终有 4 592

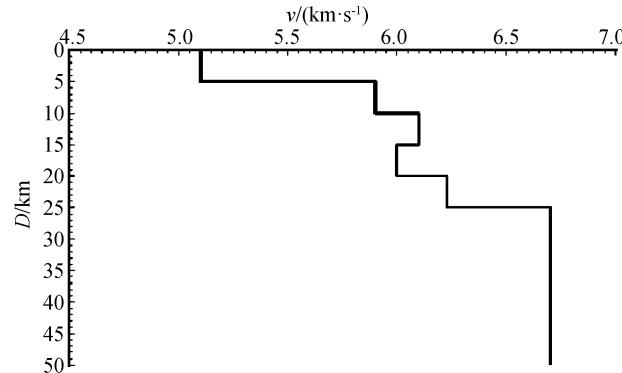


图 2 双差定位中采用的初始一维 P 波速度模型

Fig.2 1-D initial P wave velocity model used for double difference algorithm

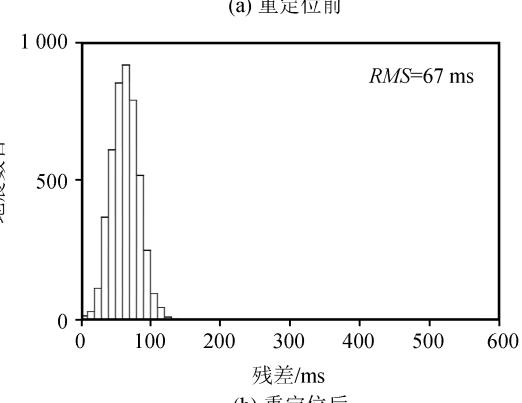
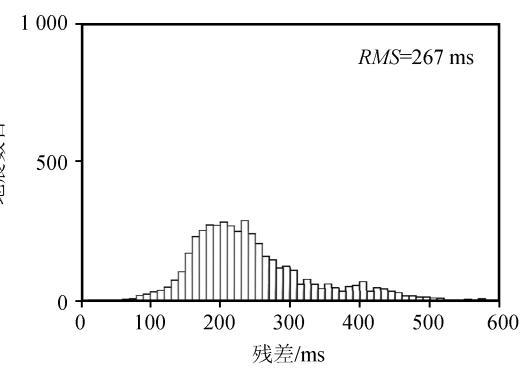


图 3 定位前后地震走时残差均方根直方图

Fig.3 Histograms of travel time residual RMS before and after relocation

次地震获得了重新定位(图4),其中绝对到时有66 277条,P波相对到时数据有904 165条。重新定位后地震走时残差均方根由定位前的267 ms降为67 ms。定位偏差在E-W方向1.5 km,N-S方向1.4 km,垂直方向1.2 km。图4是重定位前后的震中对比分布图。可以看出重新定位后地震明显沿断裂集中分布,显示出与活动构造更加密切的关系。

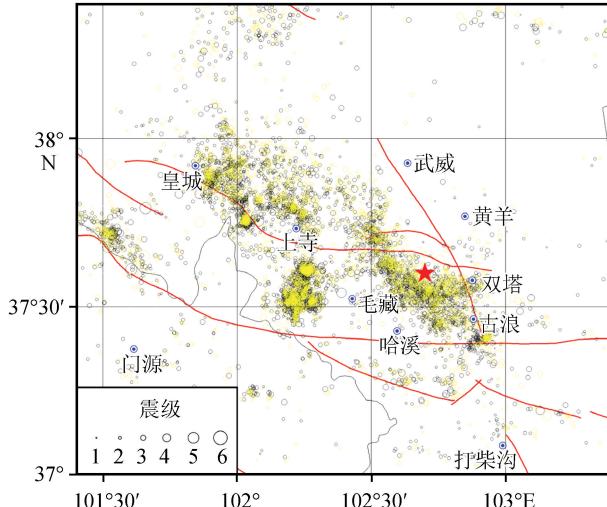


图4 重新定位前后小震分布(蓝色圆圈表示重新定位前小震震中分布,黄色圆圈表示重新定位后小震震中分布)

Fig.4 Distribution of small earthquakes before and after relocation in Gulang area (Blue circles denote epicenters distribution before relocation; yellow circles denote epicenters distribution after relocation)

2 古浪震区现今小震分布特征

古浪地区小震重新定位后总体走向为NW向,长约105 km,主要集中分布在皇城—双塔断裂带附近(图5)。以上寺为界,在该断裂的东、西两侧,地震活动呈现出截然不同的特征。地震在西北侧主要分布在断裂的下盘,而东南侧则主要分布在断裂的上盘。这可能是由于断裂中段上寺古生代基岩的阻挡以及中段北东向断裂的切割阻碍作用,造成了断裂两段不同性质的活动。断裂西侧的活动性质与整条断裂的力学性质相一致,为逆冲运动,地震时冷龙岭隆起区向皇城盆地俯冲,地震主要发生在盆地内部。而在东段地震主要发生在皇城—双塔断裂东段的上盘,这是因为受周围断裂的围陷,地震时东段由SW向NE方向发生了冲断运动在东段主断裂(北断层)上的逆冲运动引起位于该段上盘的正断层(南

断层)的局部拉张运动,地震主要在该段断层上盘的正断层上发生^[18]。

从小震分布横剖面(图6中AA'剖面)可以看出,小震的发生呈向东、西两个方向扩展的趋势。结合震源区速度结构与小震分布纵剖面推断层面(图6中BB'剖面红色虚线示例的F₁)倾向NE,倾角近于直立。在皇城—双塔断裂带的中段,小震分布出现一条明显的NE向分支带,它与小震总体的NW向分布带相垂直,可能是主震发生同时形成的一条共轭断层。小震的断层面参数反演显示该断裂是一长21 km、走向210°的高倾角以右旋为主兼具正断的断裂,这同样可在小震分布纵剖面上清楚地显示出来(图6中BB'剖面所示共轭断裂的位置)。相互垂直的两条断裂同时破裂也造成了该地区很强的地面运动。这种形式的破裂在汶川M8.0地震中曾出现过。

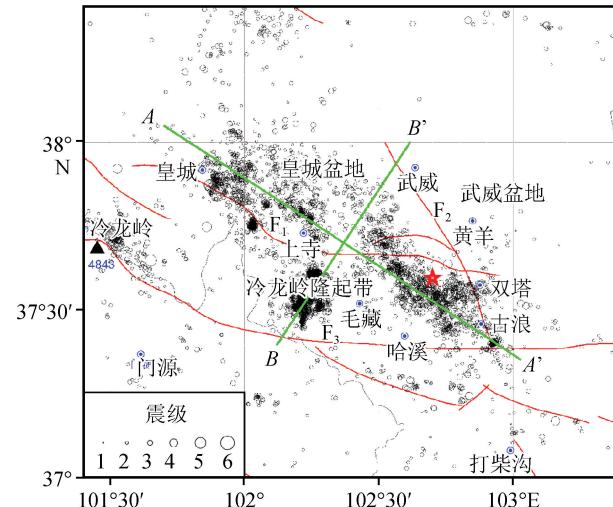


图5 重定位地震分布及剖面图(红色五角星表示古浪主震;圆表示重定位地震;AA'和BB'表示剖面位置,F₁:皇城—双塔断裂;F₂:武威—古浪断裂;F₃:西海原断裂)

Fig.5 Distribution of relocated events and position of two profiles (The red pentagram denotes Gulang mainshock; circles denote relocated events; AA' and BB' denote position of the profiles; F₁: Huangcheng—Shuangta fault; F₂: Wuwei—Gulang fault; F₃: West Haiyuan fault)

3 结论

古浪震区小震分布总体走向为NW方向,主要集中分布在皇城—双塔断裂带附近。由于受断裂中段上寺古生代基岩的阻挡以及中段NE向断裂的切割阻碍作用,皇城—双塔断裂带东、西两段表现出不

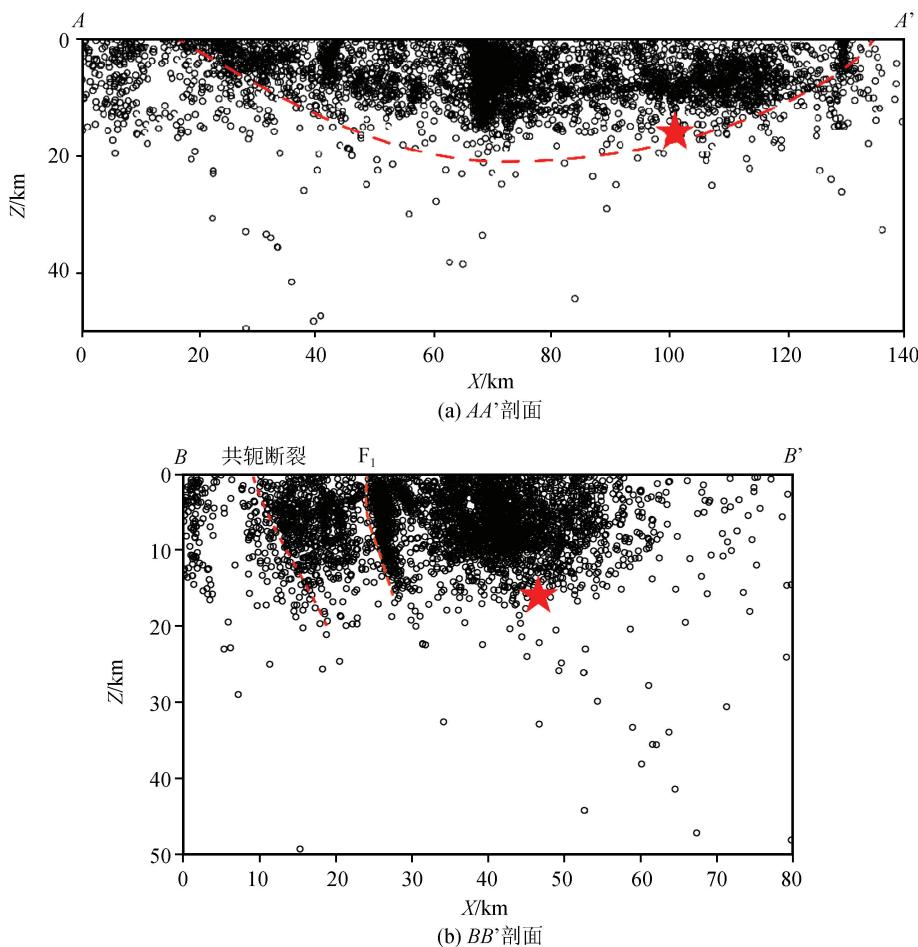


图 6 重定位后小震分布横、纵剖面图(红色五角星表示古浪主震;黑色圆圈表示小震;BB'剖面中红色虚线表示根据地表断层位置和小震空间分布推断的断裂位置)

Fig.6 Diagram of transverse and longitudinal profiles of small earthquakes distribution after relocation (The red pentagram denotes Gulang mainshock; the black circle denotes small earthquake; the red dotted line in profile BB' denotes the fault location inferred by the fault location on the surface and small earthquakes distribution)

同的力学运动性质。西段以逆冲运动为主,冷龙岭隆起区向皇城盆地俯冲,地震主要在皇城盆地内部发生。而东段以局部拉张运动为主,地震主要发生在该段的上盘。皇城—双塔断裂这种差异性运动特征完全可以从P波速度的垂直剖面上清晰地勾勒出来。皇城—双塔断裂带的中段与主破裂近垂直的小震分布带是主震发生时新产生的一条共轭断裂,基于小震的断层面参数反演显示该断裂是一高倾角、以右旋为主兼具正断的断裂。

参考文献(References)

- [1] 侯康明,邓起东,刘百篪,等.对古浪8级大震孕育和发生的构造环境及发震模型的讨论[J].中国地震,1999,15(4):339-348.
HOU Kang-ming,DENG Qi-Dong,LIU Bai-chi,et al.Research on Tectonic Environment and Seismogenic Mechanism of 1927

Gulang Great Earthquake[J].Earthquake in China,1999,15(4):339-348.(in Chinese)

- [2] 邓起东,张维歧,汪一鹏,等.海原断裂带和1920年海原地震断层的基本特征及其形成机制[M]//现代地壳运动研究(3).北京:地震出版社,1987.
DENG Qi-dong,ZHANG Wei-qi,WANG Yi-peng,et al.Main Features of Haiyuanfault Zone and 1920 Haiyuan Earthquake Faults and Their Formation Mechanism[M]//Research on Recent Crustal Movement(3).Beijing:Seismological Press,1987.(in Chinese)
- [3] 田勤俭,丁国瑜.青藏高原东北隅似三联点构造特征[J].中国地震,1998,14(4):27-35.
TIAN Qin-jian,DING Guo-yu.The Tectonic Feature of a Quasi-tri-junction in the Northeast Comer of Qinghai-Xizang Plateau[J].Earthquake in China,1998,14(4):27-35.(in Chinese)
- [4] 刘启民,赵俊猛,卢芳,等.用接收函数方法反演青藏高原东北

- 缘地壳结构[J].中国科学:地球科学,2014,44(4):668-679.
- LIU Qi-min, ZHAO Jun-meng, LU Fang, et al. Crustal Structure of Northeastern Margin of the Tibetan Plateau by Receiver Function in Version[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(4): 668-679. (in Chinese)
- [5] 周光.甘肃山丹地震的地质现象[J].地质学报,1954,34(3):391-400.
ZHOU Guang. The Geological Phenomenon of Shandan Earthquake in Gansu Province[J]. Journal of Geology, 1954, 34(3): 391-400. (in Chinese)
- [6] 贾云鸿.1927年古浪大地震地质构造背景及其成因的初步探讨[J].西北地震学报,1982,4(3):78-82.
JIA Yun-hong. Preliminary Discussion of Geotectonical Background and Genesis of Gulang Strong Earthquake in 1927[J]. Northwestern Seismological Journal, 1982, 4 (3): 78-82. (in Chinese)
- [7] 侯康明,邓起东,刘百篪,等.1927年古浪8级大震破裂的三维数值理论模拟[J].西北地震学报,1998,20(3):59-65.
HOU Kang-ming, DENG Qi-dong, LIU Bai-chi, et al. 3-D Numerical Simulation of Surface Rupture Caused by the 1927 Gulang M₈ Earthquake[J]. Northwestern Seismological Journal, 1998, 20(3): 59-65. (in Chinese)
- [8] Nabelek J L. Determination of Earthquake Source Parameters from Inversion of Body Waves[D]. Mit, Cambridge, MA.
- [9] 刘白云,曾文浩,袁道阳,等.1927年古浪8级大地震断层面参数和滑动性质研究[J].地震地质,2015,37(3):818-828.
LIU Bai-yun, ZENG Wen-hao, YUAN Dao-yang, et al. The Research on Fault Parameter and Sliding Behavior of the 1927 Gulang M_{8.0} Earthquake[J]. Seismology and Geology, 2015, 37(3): 818-828. (in Chinese)
- [10] 张云琳,安海静,刘晓玲,等.我国西北部分地区地壳-土地幔电性横向变化特征与地震活动关系[J].地震地质,1988,10(2):65-73.
ZANG Yun-lin, AN Hai-jing, LIU Xiao-ling, et al. The Relation of the Lateral Change of Electric Property in Crust-upper Mantle with Great Earthquake in Partial Region of Northwest China[J]. Seismology and Geology, 1988, 10 (2): 65-73. (in Chinese)
- [11] 詹艳,赵国泽,王继军,等.1927年古浪8级大震区及其周边地块的深部电性结构[J].地球物理学报,2008,51(2):511-520.
ZHAN Yan, ZHAO Guo-ze, WANG Ji-jun, et al. Deep Electric Structure Beneath the Epicentre of the 1927 Gulang M₈ Earthquake and Its Adjacent Areas from Magnetotelluric Sounding[J]. Chinese J Geophys, 2008, 51 (2): 511-520. (in Chinese)
- [12] 刘方斌,王爱国,袁道阳.北祁连山东段强震间静态库仑应力变化与触发作用研究[J].地震工程学报,2014,36(2):360-371.
LIU Fang-bin, WANG Ai-guo, YUAN Dao-yang. Static Coulomb Stress Changes and Triggering Interaction Among Strong Earthquakes in the Eastern Segment of North Qilian Mountain[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36 (2): 360-371. (in Chinese)
- [13] 吴建平,杨婷,王未来,等.小江断裂带周边地区三维P波速度结构及其构造意义[J].地球物理学报,2013,56(7):2257-2267.
WU Jian-ping, YANG Ting, WANG Wei-lai, et al. Three Dimensional P-wave Velocity Structure around Xiaojiang Fault System and Its Tectonic Implications[J]. Chinese J Geophys, 2013, 56(7): 2257-2267. (in Chinese)
- [14] 邓起东,程绍平,马冀,等.青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势[J].地球物理学报,2014,57(7):2025-2042.
DENG Qi-dong, CHENG Shao-ping, MA Ji, et al. Seismic Activities and Earthquake Potential in the Tibetan Plateau[J]. Chinese J Geophys, 2014, 57(7): 2025-2042. (in Chinese)
- [15] 邓文泽,陈九辉,郭巍,等.龙门山断裂带精细速度结构的双差层析成像研究[J].地球物理学报,2014,57(4):1101-1110.
DENG Wen-ze, CHEN Jiu-hui, GUO Biao, et al. Fine Velocity Structure of the Longmenshan Fault Zone by Double-difference Tomography[J]. Chinese J Geophys, 2014, 57 (4): 1101-1110. (in Chinese)
- [16] 朱艾斓,徐锡伟,胡平,等.首都圈地区小震重新定位及其在地震构造研究中的应用[J].地质论评,2005,51(3):268-274.
ZHU Ai-lan, XU Xi-wei, HU Ping. Relocation of Small Earthquakes in Beijing Area and Its Implication to Seismotectonics [J]. Geological Review, 2005, 51(3): 268-274. (in Chinese)
- [17] Waldhauser F, Ellsworth W. Fault Structure and Mechanics of the Hayward Fault, California, from Double-difference Earthquake Locations[J]. J Geophys Res, 2002, 107 (B3): ESE3-1-ESE3-15.
- [18] 侯康明.1927年古浪8级大震地表破裂特征及形成机制[J].地震地质,1998,20(1):19-26.
HOU Kang-ming. Characteristics of Ground Ruptures Caused by 1927 Gulang M₈ Earthquake and Their Causative Mechanisms[J]. Seismology and Geology, 1998, 20 (1): 19-26. (in Chinese)