

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/359056054>

Seismic faults of the 2022 Mw6.6 Menyuan, Qinghai earthquake and their implication for the regional seismogenic structures

Preprint · April 2022

DOI: 10.1360/TB-2022-0154

CITATIONS

0

READS

684

6 authors, including:



Wanpeng Feng

Sun Yat-Sen University

76 PUBLICATIONS 1,045 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Xiaohui He

Sun Yat-Sen University

23 PUBLICATIONS 161 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Yi-Peng Zhang

Sun Yat-Sen University

23 PUBLICATIONS 53 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Lihua Fang

Institute of Geophysics, China Earthquake Administration

152 PUBLICATIONS 1,511 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Artificial Intelligence in Seismology [View project](#)



Fine Scale Earthquake Location [View project](#)

2022年青海门源Mw6.6地震的发震断层及孕震构造模式

冯万鹏¹, 何晓慧², 张逸鹏², 房立华³, Sergey Samsonov⁴ and 张培震⁵

Citation: [科学通报](#) (2022); doi: 10.1360/TB-2022-0154

View online: <https://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2022-0154>

Published by the [《中国科学》杂志社](#)

Articles you may be interested in

[2010年青海玉树地震震源过程](#)

SCIENTIA SINICA Terrae **40**, 819 (2010);

[冷龙岭断裂系活动性与2016年门源6.4级地震构造研究](#)

SCIENTIA SINICA Terrae **47**, 617 (2017);

[2013年芦山地震滑坡空间分布样式对盲逆断层构造的反映](#)

Chinese Science Bulletin **59**, 979 (2014);

[龙门山断裂带西南段4.20芦山7.0级地震区的深部结构和孕震环境](#)

Chinese Science Bulletin **58**, 1917 (2013);

[断层的亚临界扩展和地震的孕育过程](#)

Chinese Science Bulletin **28**, 1325 (1983);

2022 年青海门源 $M_w6.6$ 地震的发震断层及孕震构造模式

冯万鹏^{1,2}, 何晓慧^{1,2*}, 张逸鹏^{1,2}, 房立华³, Sergey Samsonov⁴, 张培震^{1,2}

1 中山大学地球科学与工程学院, 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 珠海 519000;

2 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519000;

3 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;

4 Canada Center for Mapping and Earth Observations, Natural Resources Canada, Ottawa, ON K1A0G1, Canada

* 联系人, E-mail: hexiaoh5@mail.sysu.edu.cn

第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0901)、国家自然科学基金(41804039)、西藏拉萨地球物理国家野外科学台站开放课题(NORSLS20-02)和广东省引进人才创新创业团队(2016ZT06N331)-环南海地质过程与灾害创新团队项目资助

摘要:

2022 年 1 月 8 日青海门源盆地北缘发生 $M_w6.6$ 地震, 震源机制反演表明此次地震属于左旋走滑事件. 震后 10 天内, 近 600 个余震被检测到, 最大余震为 $M5.1$ 级. 此次地震发生在祁连-海原左旋走滑断裂系统的冷龙岭段, 该断裂段全长 127 km, 由古地震研究确定的特征地震大小在 $M_w7.3\sim7.5$. 为了更为全面理解此次地震的震源机制以及当地孕震模式, 我们分析了地震波形, 获取了主震和 17 个 $M_s\geq3.0$ 余震的震源机制和矩心深度. 利用升、降轨道 SAR 数据获取的像元偏移数据和同震干涉相位(InSAR), 确定了两条地表破裂带的位置, 并利用 InSAR 数据反演了主震的滑动模型. 研究发现此次地震破裂带对应于冷龙岭断裂西段和托莱山断裂的阶区, 发震断层存在三个形变中心, 最大滑动量约 4 m, 出现在冷龙岭断裂上, 形变中心深度为 4 km. 滑动模型显示释放了累计能量 $\sim 1.58\times 10^{19}$ Nm, 约合矩震级 $M_w6.68$, 与本文利用地震学方法得到的 $M_w6.58$ 接近. 结合区域活动构造特征、1986 年和 2016 年两次门源地震的位置及震源机制, 推断祁连-海原断裂非对称花状构造结构可能是祁连山地区一种重要的应变卸载模式. 同震滑动驱动下的库伦应力变化分析显示 72.2% 的余震分布符合同震触发效应. 考虑到当前余震发展主要向东南扩展, 库伦应力升高的破裂区西南部也存在相对较高的地震风险, 需要进一步关注.

关键字: 门源地震; 冷龙岭断裂; 震源机制; 花状构造; 同震形变

1. 引言

据中国地震台网中心测定, 北京时间 2022 年 1 月 8 日凌晨 1 时 45 分, 在青海海北州门源县发生 $M_w6.6$ 级地震, 震中位于 37.77°N , 101.26°E , 震源深度 10 km(图 1a). 截至目前, 已经相继有数篇相关研究从地震学、大地测量学和野外观测对该地震进行了分析讨论^[1-4]. Fan 等^[1]开展了余震序列的精定位研究, 震后 10 天内的重定位余震结果显示 $M>0.1$ 级及以上余震 585 次, 其中 5.0-5.9 级地震 2 次, 最大余震为 1 月 8 日 2 时 9 分的 5.1 级地震, 沿震中向两侧展布约 30km. Yang 等^[2] 和李振洪等^[3]采用震后两天内获取的第一幅降轨道同震干涉(InSAR)图像分析了此次地震的同震形变场, 结果指示此次地震发生在祁连山内部,

沿祁连-海原断裂带中部的冷龙岭段。早期野外调查结果初步印证了上述研究结果,此次地震的主要地表破裂出现在冷龙岭断裂上,破裂长达 17 km,累计地表破裂长度约 22 km,最高烈度为 IX 度,最大水平位错约 3 m,并同时发现向托莱山断裂过渡的阶区内尚存长约 5 km 地表破裂,水平位错约 0.5 m (图 1a) (<https://news.lzu.edu.cn/c/202201/87019.html>)。震中人员伤亡稀少,未见人员伤亡报道,但对穿过震区的兰新铁路造成显著破坏,导致该线路停运^[2]。同时,上述两篇以 InSAR 为主要资料的研究还开展了滑动分布反演,一致揭示了此次地震以左旋走滑为主,但是断层划分方案并不一致。其中 Yang 等^[2]采用了两段相互交叉断层方案并固定倾角统一为 82°,最大滑动~4 m,而李振洪等^[3]利用覆盖震区的高分光学图像直接限定了沿着冷龙岭断层的破裂位置,并采用了 80°断层倾角,得到一个相对连续的滑动分布模型,最大滑动~3.5 m。许英才等^[4]基于地震学观测数据得到初始破裂深度在 7~8 km 之间,而矩心深度仅 4 km,主震的节面解为 (290°/81°/16°和 197°/74°/171°)。可见,当前不同机构和研究小组对此次地震震源的认知,由于方法和数据的不同,得到的震源参数信息尚存差异。同时,此次地震以东 38 km^[3,5]处曾于 2016 年发生 Ms 6.4 逆冲型门源地震,区域上相邻两次地震破裂机制的显著差异显示了当地构造活动的复杂性。因此,对这次地震开展深入剖析,将有助于我们进一步确认发震断层的几何参数,探索当地地震活动的迁移规律,以及理解区域应变卸载模式。

祁连山构造带是古生代原特提斯洋的俯冲-碰撞,以及晚新生代青藏高原的隆升和扩展过程联合作用的直接结果,当前已逐渐演化成为青藏高原和戈壁-阿拉善地块之间构造转换带^[6-8] (图 1a)。祁连山主体呈北西-南东向展布,西连阿尔金,东至六盘山,是青藏高原东北部的构造边界和地貌边界;晚新生代以来,区域以逆冲和走滑作用为主的活动断裂成为中国大陆地震活动最为频繁且强烈的区域之一^[9,10]。仅在 20 世纪内,祁连山地区就发生了三次 $M>7.5$ 强震,即 1920 年 $M8.5$ 海原地震,1927 年 $M8.0$ 古浪地震和 1932 年 $M7.6$ 昌马地震 (图 1a) ^[11,12]。冷龙岭断裂是区内近东西展布的左旋走滑祁连-海原断裂系统的中段,东起甘肃天祝,西至门源-祁连公里八道班,全长约 127 km^[13]。地质学证据显示该段落特征滑移事件为 $M_w7.3\sim7.5$,上次事件可能要追溯到 1815~1065 a BP. ^[12,14]。

基于地质学、地震学和空间测量学方法等手段,在祁连-海原断裂系统的不同段落已经积累了大量研究成果^[12,15,16]。现有的 GPS 观测与滑动速率约束表明,祁连-海原断裂带以左旋走滑方式有效调节了构造带内部的变形和高原物质向东挤出^[17-19] (图 1b),自西向东走滑速率表现为显著的差异性特征,其中冷龙岭段的滑动速率 3.4~6.4 mm/a 之间。古地震研究成果表明,冷龙岭段内已探明 6 次古地震事件,其复发间隔在 1643 ± 568 年^[20],与区内七级

地震复发间隔约为 1.6 ka 相吻合^[21]。当地微震记录和现代测量学结果一致揭示了祁连-海原断裂在祁连山北东-南西向收缩构造变形中,调节了青藏高原前缘与阿拉善块体之间的差异运动^[22]。考虑到此次震中以东约 38 km 外,曾于 2016 年发生 M_s 6.4 逆冲型门源地震^[5],可见当地应变能可以通过不同的破裂机制得以释放。因此,未来该地区地震如何发展仍有待进一步研究。

本文联合近远震波形数据分析了主震和余震的震源机制及优势深度,获取了 InSAR 同震形变场并开展发震断层空间展布解译,以 SAR 形变产品为数据约束确定了同震滑动的三维展布及特征,讨论了主震与区域活动构造系统的归属关系,结合区域活动构造断层的几何学和运动学特征,确认了祁连山地区的活动构造系统和孕震构造特征,并对未来的地震危险性进行了分析。

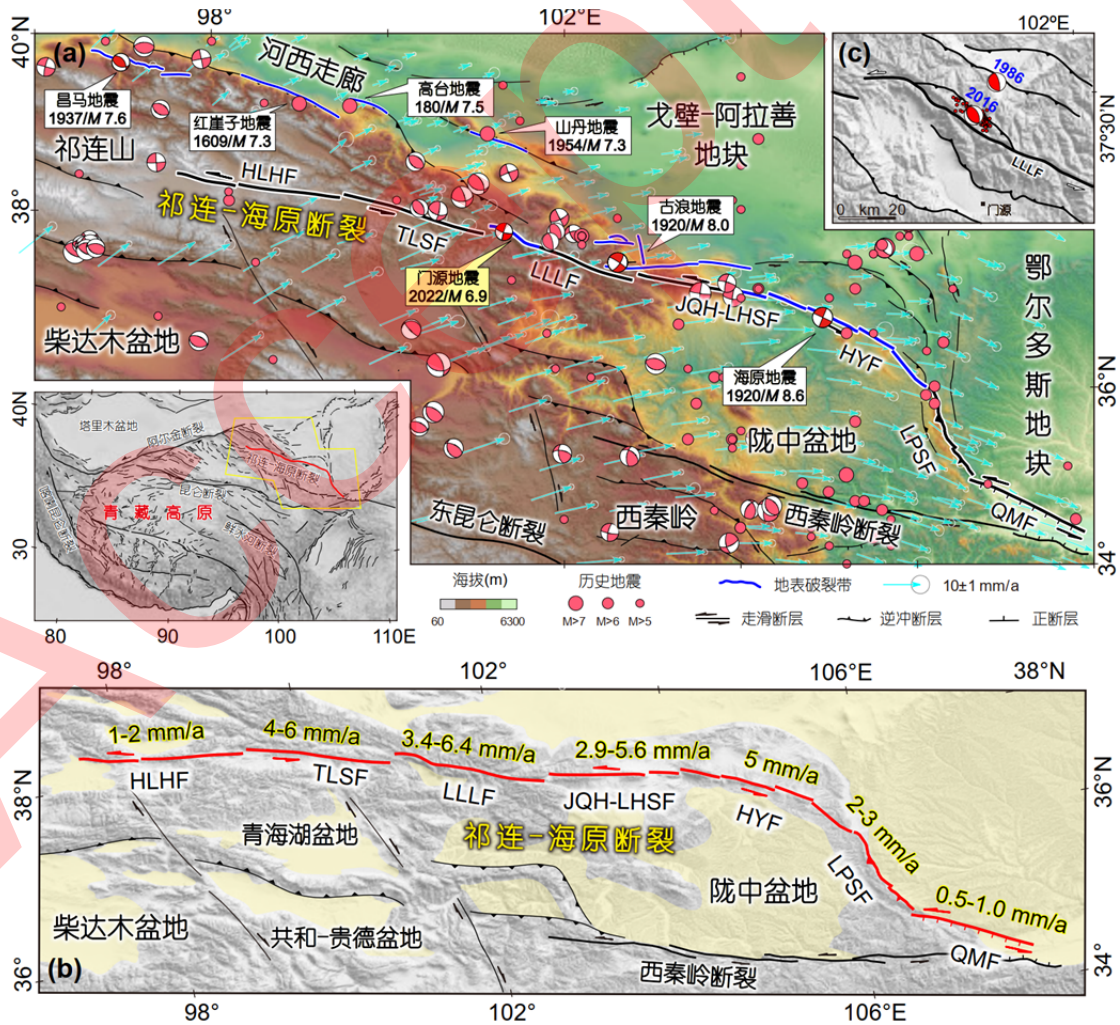


图 1. (网络版彩色) (a)青藏高原东北缘主要活动断裂与分布图。地表破裂来源:^[21,23,24];震源机制解来源于 Global CMT(1976.01.01~2022.01.01); GPS 数据来源:^[17]。其中祁连-海原断裂带^[25](QLHYF)自西向东包括如下重要段落,HLHF:哈拉湖段,TLSF:托莱山段,LLL:冷龙岭段,JQH-LHSF:金强河-老虎山段,HYF:海源段,LPSF:六盘山段和 QMF:岐

山-马召段。(b)祁连-海原断裂滑动速率分布图^[9,26-30]。(c)1986 年和 2016 年门源 Ms 6.4 级地震和余震分布^[5]。

Figure 1. (a) Active faults along the east-north margin of Tibet plateau. The sources of faults are from previous studies ^[21,23,34]. Mechanisms used in the plot are from Global CMT (1976.01.01-2022.01.01). The GPS data are from Wang et al ^[17]. The Qilian-Haiyuan fault zone (QLHYF) is composed of following segments^[25], including Halahu fault (HLHF), Tuolaishan fault (TLSF), Lenglongling Fault (LLL), Jinqianghe-Laohushan fault (JQH-LHSF), Haiyuan fault (HYF), Liupanshan fault (LPSF) and Qishan-Mazhao fault (QMF). (b) The slip rates along Qilian-Haiyuan fault are obtained in the previous studies ^[9,26-30]. (c) The 1986 and 2016 Ms6.4 Menyuan earthquakes and aftershocks ^[5].

2. 由地震数据约束的主余震参数

为深入了解本次门源地震的发震机制，我们联合使用近远震波形数据，采用 CAPjoint 方法^[31]反演了主震的震源机制解、震源深度和震源持续时间，并利用区域地震波形和 CAP 方法^[32]反演了 20 个 Ms 3.0 以上余震（截止至 1 月 26 日）的震源机制解和震源深度。

主震反演中，收集了震中距 300 km 内的固定台网和震中距 30°~90°的全球地震台网（GSN）及澳大利亚地震台网（AU）的三分量宽频带波形记录，手动剔除波形限幅、波形不完整或信噪比低的记录，共保留 28 个区域台站及 28 个远震台站。之后，进行去仪器响应、去均值、去线性趋势、旋转至大圆路径等预处理。考虑到 Crust2.0 速度模型（<https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html>）在 2016 年门源地震震源参数反演中波形拟合效果较好^[5,33]，本研究继续使用该模型并分别利用 FK 算法^[34]和 tel4 算法^[35]计算近、远震格林函数。在 CAP 反演中，区域台站 Pnl 及面波部分窗长分别为 30 s 和 60 s，远震 P 波和远震 SH 波部分窗长分别为 30 s 和 60 s，不同震相采用的滤波频段均为 0.05~0.15 Hz。调整近远震波形权重使得台均误差近似 1:1 后，格点搜索了震源持续时间 1.0~11.0 s 和质心深度 1~20 km，图 2 展示了反演误差随持续时间和深度的变化，最佳拟合结果为质心深度 4 km，矩震级 6.58，震源持续时间 8 s，震源机制为走滑型，两个双力偶节面分别为 197°/83°/-162°和 104°/72°/-7°。部分远震台站 P 波拟合不甚理想，主要表现为直达 P 波之后延续一个较大震相，推测其可能为破裂过程复杂性（多断层或多子事件）所造成的波形复杂性。

与波形反演方法相比，P 波初动极性对应初始破裂点的运动性质，反映了早期破裂的信息，因此，本文通过初动极性反演来共同约束地震破裂起始点的断层几何。手动拾取了震中距 500 km 内初动信号清晰的 69 个台站的 P 波初动极性，台站分布的最大及次大方位角间隙为 30°和 26°。利用 FOCMEC 算法^[36]进行了 2000 次反演，反演中，每个台站权重一致，允许矛盾符号占比为 1/69。最终得到的平均震源机制解为 95°/74°/-1°，2000 次反演结果中

走向、倾角、滑移角与平均值偏差在 $\pm 5^\circ$ 内的占比分别为 92%、93%和 52%，表明初动极性对该节面的走向和倾角的约束较好。利用波形反演和初动反演得到的两组机制解最小旋转角约 12° ，与 GlobalCMT 机制解(节面 1 $104^\circ/82^\circ/1^\circ$ ，节面 2 $14^\circ/89^\circ/172^\circ$)最小旋转角约 $12\sim 13^\circ$ ，均小于浅源地震的震源机制不确定范围 (15°)^[37]，表明获得的震源机制结果较为可靠。同时，初动反演得到的节面走向与波形反演得到的节面走向有一定差异，推断地震发生在走向不同的两条（或多条）断层。

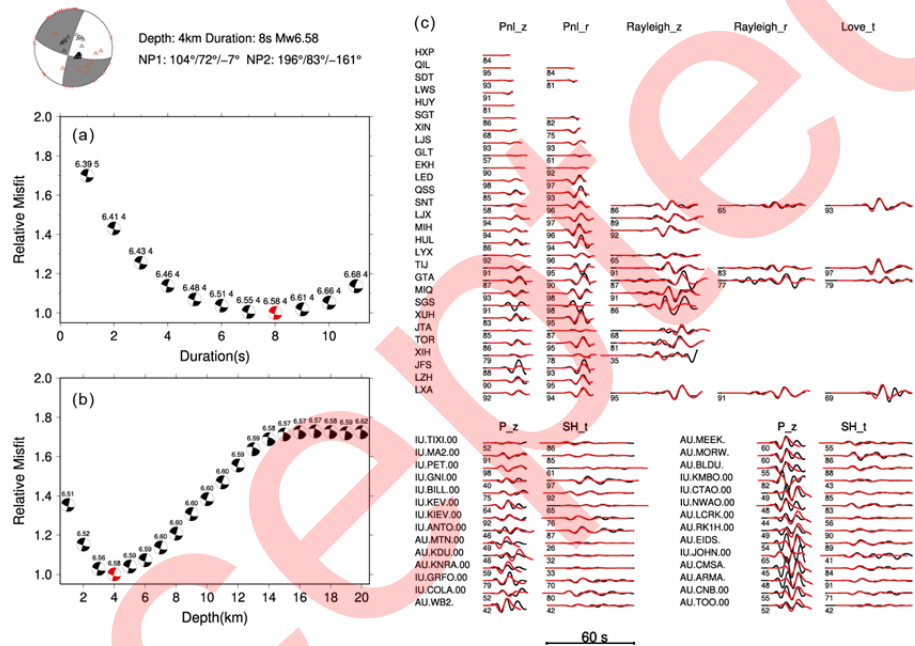


图 2 (彩色) 主震点源参数反演结果。(a) 波形拟合残差随持续时间分布。红色震源球对应最小误差，震源球上方数字分别为最佳拟合矩震级及质心深度。(b) 最佳持续时间下波形拟合残差随深度分布。红色震源球对应最小误差，震源球上方数字分别为最佳拟合矩震级。(c) 波形拟合结果，红色和黑色波形分别为理论和观测数据，波形下方数字为互相关系数。缺失波形大多数为限幅截断而丢弃的数据

Figure 2 Point source inversion result of the mainshock. (a) Waveform misfits versus source duration. (b) Waveform misfit versus depth with the optimal source duration. (c) Waveform comparison for regional and teleseismic records. Black and red traces show the synthetics and observations, respectively. The numbers below the seismograms are cross-correlation coefficients. The removed waveforms were mostly clipped records

对于余震，由于远震记录信噪比低，仅利用区域地震波形反演点源参数。采用类似的数据处理流程，尝试反演了 20 个 M3.0 以上地震的震源机制解和震源深度，共获取了其中 17 个地震的点源参数（表 1）。结果显示，震源机制以走滑型为主，深度分布区间为 3~9 km（图 3a）。在主震震中附近，余震深度较浅（4~5 km），震源机制解两个节面主要为近东西向和近南北向。随着水平位置的向外拓展，余震深度大体呈现出由浅变深的趋势（至 7~9 km）。在余震区最东侧的 M4.5 地震和 M5.2 地震，深度 3~4 km，两个节面走向为 NW 和

NE，与主震有显著差异，推测其发生在与主震不同的断层。

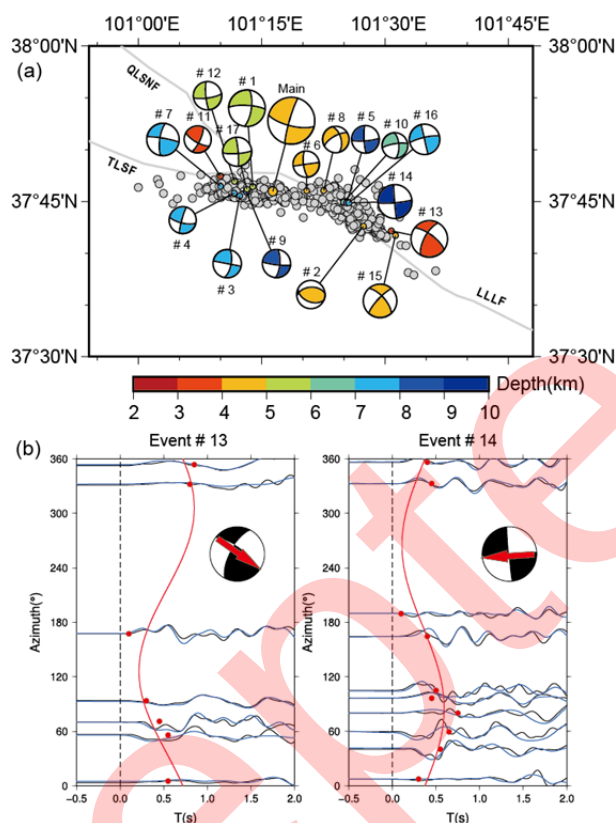


图 3 (彩色) (a) $M_s3.0$ 以上余震的震源机制分布. 灰色圆圈为截至 1 月 23 日的余震分布^[1]. 灰色断层线基于活动构造图^[25,38], LLLF:冷龙岭断裂, TLSF: 托莱山断裂, SNQLF: 肃南-祁连断裂. (b) 两次强余震的破裂方向性拟合. 黑色及蓝色波形为主事件观测和经验格林函数卷积震源时间函数波形, 红点为每个台站最大互相关系数对应的震源持续时间, 红线为对震源持续时间的理论拟合值.

Figure 3 (a) Spatial distribution of $M_s>3.0$ aftershocks. The gray dots are aftershocks relocated by Fan et al^[1]. The regional active faults (gray lines) are from previous studies^[25,38], where LLLF means Lenglongling fault, TLSF means Tuolaishan fault, and SNQLF means Sunan-Qilian fault. (b) Rupture directivity fitting of two large aftershocks event#13 and event #14. Black and blue traces are the observations and modeled waveforms. Red dots show the resolved relative source duration at each station, and the red line shows the best-fitting prediction.

表 1 $M_s3.0$ 以上余震的点源参数 (截至 1 月 26 日)

Table 1 Point source parameters of $M_s>3$ aftershocks (before 26th of January)

编号#	发震时刻/北京时间	位置* 经度/纬度	M_s/M_w	矩心深度(km)	节面 1 走向/倾角/滑移角(°)	节面 2 走向/倾角/滑移角(°)
1	01-08 02:09:05	101.2319°E/37.7740°N	5.1/5.13	5	273/76/-20	8/70/-166
2	01-08 04:18:36	101.4560°E/37.7102°N	3.1/3.97	4	266/45/71	112/47/108
3	01-08 04:45:22	101.2054°E/37.7591°N	3.3/3.97	7	101/89/23	11/67/180
4	01-08 06:53:03	101.1944°E/37.7634°N	3.1/3.78	7	103/72/-7	195/83/-161
5	01-08 10:06:21	101.4227°E/37.7494°N	3.4/3.86	8	85/81/-8	177/82/-171
6	01-08 11:07:35	101.3416°E/37.7674°N	3.2/3.69	4	81/89/-17	172/73/-180
7	01-08 14:30:05	101.1664°E/37.7747°N	4.0/4.55	7	280/84/17	188/73/173
8	01-09 00:44:42	101.3758°E/37.7676°N	3.2/3.70	4	240/69/-36	344/56/-154
9	01-09 13:50:49	101.2188°E/37.7656°N	3.5/3.95	8	97/83/20	4/70/172
10	01-10 15:21:24	101.4160°E/37.7492°N	3.2/3.60	6	261/78/-26	356/64/-166
11	01-10 18:08:18	101.1659°E/37.7905°N	3.0/3.79	3	120/72/16	24/74/161
12	01-12 05:06:55	101.1948°E/37.7825°N	3.6/3.98	5	82/77/-10	174/80/-166
13	01-12 18:20:40	101.5128°E/37.7028°N	5.2/5.12	3	209/68/160	306/71/23

14	01-12 20:16:17	101.4222°E /37.7476°N	4.8/4.76	9	85/84/-2	175/88/-173
15	01-12 21:01:53	101.5211°E /37.6954°N	4.5/4.70	4	223/78/157	318/67/13
16	01-13 00:17:59	101.4269°E /37.7480°N	4.0/4.27	7	256/78/0	347/90/-169
17	01-26 19:15:25	101.22°E /37.77°N	3.8/4.08	5	86/80/6	254/84/169

*地震位置引自^[1]

在点源参数的基础上，破裂方向性参数能够判定地震的发震断层，因此利用近台资料（150 km 内）和震源时频特征方法^[31,39]反演了 4 个 Ms4.5 以上余震（编号#1，#13，#14，#15，见表 1）的破裂方向性参数。对每个较大余震均将其视为主事件，选取主事件附近的较小余震为参考事件，以参考事件的竖直分量观测波形为经验格林函数。将经验格林函数卷积不同持续时间（0.1~2 s）的震源时间函数，计算卷积后波形与主事件 P 波观测的互相关函数。互相关计算的窗长为 2 s，滤波频段为低通 5 Hz，对每个台站取互相关系数最高所对应的震源持续时间为该台站的视震源持续时间，按照公式 1 进行拟合，得到破裂方向和破裂长度。

$$t_d(az) = 2 \times t_r + \frac{L}{v_f} - \frac{L}{v_p} \times \cos(az - stk) , \quad (1)$$

其中， t_d 为不同台站的相对震源持续时间， az 为台站的方位角， stk 为破裂方向（假设沿任一节面走向破裂）， v_f 为破裂速度，假定为震中地区剪切波速度的 0.85 倍， v_p 为 P 波速度，待求解量 L 为破裂长度， t_r 为相对上升时间。

对每个主事件，需要选取位置接近、震源机制解类似的较小地震作为参考事件。对事件#13，选择参考事件为事件#15；对于事件#14，选择参考事件为事件#10（图 3a，表 1）。由于事件#1 受主震尾波影响，P 波信噪比低；事件#15 附近暂无合适的参考事件，最终获得了事件#13 事件和事件#14 的破裂方向性参数。结果显示，事件#13 沿着 306°节面向 SE 破裂约 1.9 km，事件#14 沿着 85°节面向西破裂约 1.5 km（图 3b）。这两个大余震均体现出左旋走滑运动，与主震的机制解一致，推测其发震构造为主震的同震破裂断层，而没有发生在共轭断层上。

3. InSAR 同震形变场及地震断层的厘定

利用欧洲空间局合成孔径雷达卫星 Sentinel-1A (S1A) 获取的覆盖震区地震前后的卫星数据, 采用差分干涉的技术方法, 我们获取了此次地震的同震形变场。截至 1 月 30 日, S1A 已经沿 T33, T26 和 T128 轨道 (表 2) 先后三次实现了对震区的形变场覆盖, 其中 T128 和 T33 两个轨道揭示了此次地震的完整形变场。本文基于自动化 InSAR 形变场处理环境 pSAR 开展了同震干涉处理分析, 同时应用传统相位差分 and 基于强度数据的亚像元偏移 (Sub-pixel Offset, SPO) 技术获取了此次地震形变场结果^[40]。值得指出的是, S1A 数据在相干性良好的区域, 其亚像元偏移测量结果的距离向 (Range) 分量可以得到与相位差分精度基本一致的形变信息^[41]。受震源区积雪的影响, 传统干涉处理中极震区的相位相干性沿破裂带迅速衰减, 同时受多条近平行断裂带共同活动的限制, 极震区原始缠绕相位的相位恢复极为困难。为了减小由于形变梯度过大导致的解缠困难, 处理中采用原始分辨率开展干涉分析, 即沿距离向和方位向的视数取为 4 和 1, 同时 Goldstein 频谱滤波前采用高斯滤波也有助于保持形变场中的线性信息^[42,43]。SPO 技术抵抗相干影响的能力更强, T33 和 T128 轨道干涉像对的 SPO 产品清晰显示了此次地震断层的出露, 为解译断层位置奠定了条件 (见图 4)。

表 2 本文采用卫星雷达数据的信息列表

Table 2 Information of SAR data used in this study.

轨道	时间 (YYYYMMDD)		飞行方向	空间基线 (m)	震后覆盖 (d)
	主图	从图			
T26	20211229	20220110	升轨	-96.2	2
T33	20211229	20220110	降轨	53.5	2
T128	20220105	20220117	升轨	38.7	9

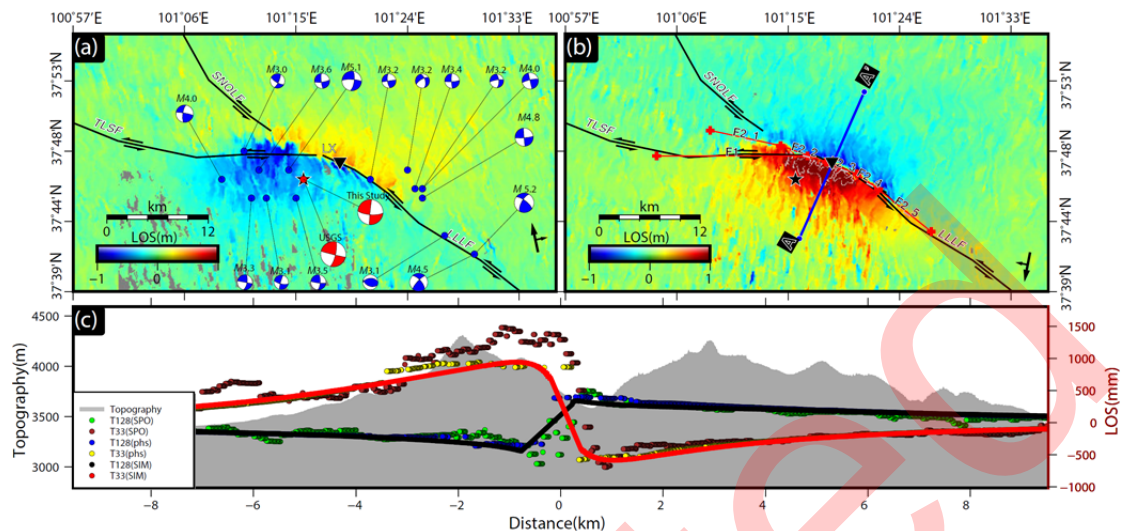


图 4 (彩色) 基于 Sentinel-1A 合成孔径雷达数据利用亚像元偏移技术获取的同震形变场。(a) 由 T128 升轨道雷达数据获取的视线向 (Light of Sight, LOS) 同震形变场, 其中蓝色震源球为本研究基于 CAP 方法得到, 同震双力偶解包括了 USGS 的 W-phase 结果. 黑色断层线基于活动构造图^[25,38], LLLF:冷龙岭断裂, TLSF: 托莱山断裂, SNQLF: 肃南-祁连断裂. 其中, LX 代表兰新铁路路径的一处涵洞。(b) 由 T33 降轨道资料得到的同震 LOS 向形变场. 红色断层线为本研究经对 SAR 同震结果分析得到的本次地震断层的地表迹线。(c) 沿着 AA'剖面观测同震形变场及模拟结果的比较,其中灰色阴影区为剖面的地形分布, 红色线条是基于最优拟合模型模拟的 T33 轨道同震干涉位移剖面, 黑色线条是 T128 轨道的最优拟合剖面

Figure 4 Coseismic deformation of the mainshock derived from subpixel offset techniques using Sentinel-1A SAR data. (a) the coseismic Light-of-Sight (LOS) deformation. The blue beach ball is the focal mechanism estimated from this study. The seismic solutions of the mainshock are from the CAP solution in this study and USGS W-phase solution, respectively. The regional active faults (black lines) are from previous studies^[24,42], where LLLF means Lenglongling fault, TLSF means Tuolaishan fault, and SNQLF means Sunan-Qilian fault. LX is the location of a large deformation along Lanxin rail line. (b) Coseismic LOS deformation from track 33. The red lines are faults ruptured in the mainshock. (c) the observed and modelled coseismic deformation along the profile AA' for the T33 and T128 coseismic deformation data

SPO 结果主要利用 SAR 数据的强度信息, 该方法对相干性变化的敏感性相较相位测量较低。如图 4 所示, 极震区仍保持较好的形变连续性, T33 和 T128 两幅图像同时表现出尖锐的形变突变。整合缠绕相位和相干性图, 可以推断形变突变的位置对应发震断层的出露。其中 Yang 等^[2]中展示的兰新铁路在一处涵洞口发生显著地表变形的地点对应于图 4 中黑色三角的位置。参考当地活动构造解译结果^[38], 此次地震破裂带与冷龙岭断裂带、拖莱山断裂和肃南-祁连断裂的空间展布相对应 (图 4)。为了充分考虑发震构造沿破裂带走向的变化对形变场的影响, 我们基于 SPO 形变图 (图 4b) 手动确定了两条主要的断层分支, F1 和 F2。其中 F1 主要沿着贯穿拖莱山断裂和冷龙岭断层的阶区 (该部分在形变条纹图中保存更好的特征); F2 断层主要沿着冷龙岭断裂及其西延段落, 该段落的走向从西向东逐渐从 100.9°

走向过度到 127.2°（表 3 和图 4b）

表 3 本文基于 SAR 形变产品的发震断层解译结果

Table 3 Detailed information of the fault traces mapped from the SAR deformation products.

分段		定位	走向(°)	倾角*(°)	长度(km) [#]
F1		101.17461°E, 37.79490°N	88.65	70	17.9
F2	F2_1	101.19257°E, 37.81408°N	100.9	88	8.5
	F2_2	101.27058°E, 37.79730°N	108.1	88	5.7
	F2_3	101.32183°E, 37.78218°N	110.3	88	3.9
	F2_4	101.35690°E, 37.76754°N	123.9	88	3.1
	F2_5	101.40695°E, 37.73677°N	127.2	88	8.0

注：*，其中断层倾角由早期余震的空间展布^[1,44]得到. #，其中断层端部做了适当延伸以确保反演模型覆盖所有滑动的子断层.

为了减小同震滑动反演中的计算负担，我们对 T128 和 T33 两个轨道同震视线向（Light-of-Sight, LOS）位移场分别基于四叉树算法进行降分辨率采样^[45]。该算法所得到的最终采样点主要集中在地震断层两侧，距离断层越近，采样点密度越高。单一数据点的绝对误差评价在缺少独立观测情形下很难准确实现，从而空间上采样点的分布密度即为一种潜在数据权重，影响着滑动反演结果。地球物理反演通常是多解问题，尤其随着子断层的增加，反演参数的增多令反演结果可能存在显著多解性。本研究中受断层复杂度、采样点分布密度和视线向形变幅度的影响，由单次运行该算法得到的采样数据不能充分满足对断层滑动参数的有效约束。为解决该问题，我们采用迭代的方式，即以反演的残差图作为依据，对较大误差的区域再次进行加密采样，并重新运行反演过程，直至最终足以解译空间上绝大多数形变样式为止。本文中通过两轮迭代后，残差图已经不存在显著的系统偏差。该方法已在 2015 年尼泊尔地震和 2017 年伊朗地震的滑动反演实践中取得了良好的效果^[46,47]。由于 SPO 结果与相位干涉结果反映同样的形变几何，并没有增加额外的震源相关的信息量，且考虑其信噪比远低于干涉相位结果（图 4c），因此反演中未使用该部分信息。

李振洪等^[3]基于主震后最早的两幅同震干涉图（两天后获取）开展了快速震源快速研究，整合高分光学遥感资料和 SAR 相位产品进行断层解译，得到两段断层，与本文中的 F2 段落大体对应，但并未考虑本文中确定的 F1 段落。相对早期快速处理数据，T128 轨道数据 LOS 向绝对形变幅度稍小，有助于恢复近断层形变，进而具有更强的滑移约束能力。

4. 震源滑动模型与破裂机制

根据 InSAR 同震形变场解译结果, 可见此次地震是一次破裂过程复杂的事件。InSAR 图像直接揭示了 F1 和 F2 两条相对独立的地震断层(表 3), 且 F2 自西向东走向发生明显变化。采用地表断层迹线固定断层位置后, 对单一段落而言仅断层倾角这一唯一非线性参数未知。为了减小数值分析的复杂度, 本研究中我们直接采用余震重定位结果来限定断层的倾角, F1、F2 段分别根据早期余震的空间展布设置为 70° 和 88° ^[1,44]。为了解释破裂过程中断层面上的滑动细节, 我们采用深度相关的断层离散方案^[48], 即设定在地表(0 km 深度)采用 $0.25 \text{ km} \times 0.25 \text{ km}$ 子单元大小和与深度相关的阻尼系数 1.15 来划分断层, 最终得到 1280 个子断层。考虑到 InSAR 形变场和主震震源机制(图 3a)皆显示此次地震近乎以纯左旋走滑形式发展, 反演中计算采用了沿如下两个滑动角矢量 $(-20^{\circ}, 20^{\circ})$ 格林函数, 以此来适当放宽滑动矢量的约束, 且滑动反演问题进一步转化为确定两个沿着特定滑动方向的非负滑动量。进而, 基于无限半空间弹性位错模型, 利用非负约束的共轭梯度线性最小二乘算法反演了此次地震非均匀滑动^[49,50]。反演中为了减小解的不平稳性影响, 我们在线性方程组中增加了相邻断层滑动一致(光滑)的条件约束, 其调整光滑强度的超参数可由迭代过程来确定, 并最终通过选择数据残差和模型粗糙度的拐点来确定最优解^[51]。本研中所有数值分析皆采用作者团队开发的 PSOKINV 反演软件完成, 该软件目前已经成功应用于数十个地震研究^[3,52-55]。

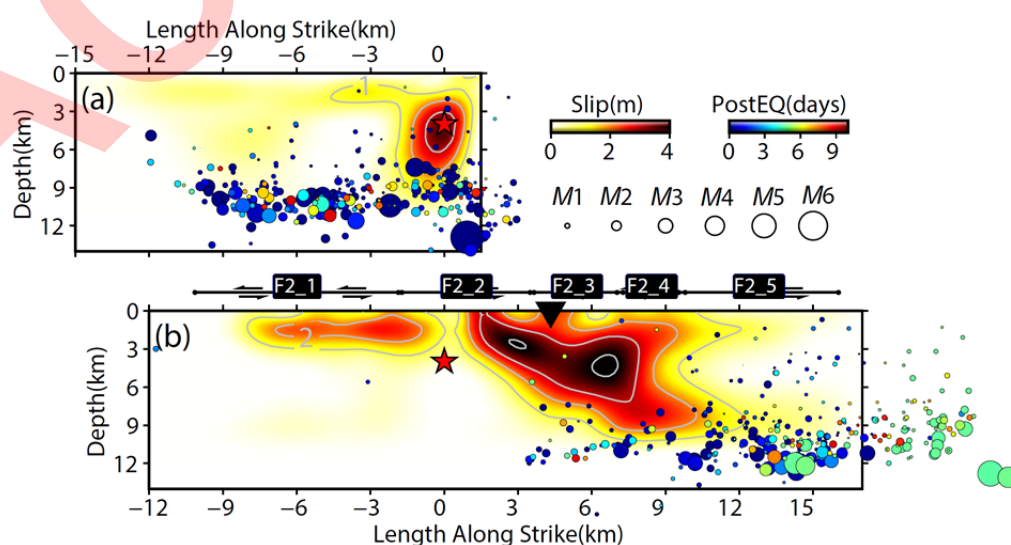


图 5 (彩色) 同震二维滑动模型. (a) F1 段滑动量在沿走向垂直剖面上的投影. 彩色点为余震重定位(截至 1 月 17 日)结果^[1], 红色五角星为联合参考了本文确定的主震矩心深度和中国

地震台网中心测定的震中位置等信息. (b)为 F2 不同子段落沿平均走向垂直剖面的投影分布. 其中黑色三角标注了兰新铁路涵洞的位置.

Figure 5 The slip distribution of the mainshock. (a) the slip along the segment F1. The color dots are relocated aftershocks ^[2]. The red star marks the hypocenter of the mainshock based on the CENC solution and the centroid depth obtained in this study. (b) The slip distribution along F2. The dark triangle is the location of a large deformation site along the Lanxin rail line.

图 5 给出了本研究中所确定的最优拟合解。其中 F1 段滑动主要发生在与 F2 交接的位置附近, 本研究中的应用地震学方法估算的矩心与该处的滑动中心重合, 最大滑动约 3m, 发生在地下 4 km 深度上。最大滑动未出露地表, 沿 F1 段自震中向西南延伸 12km 距离内出现埋深 4 km 以上区域分布亚米 (<1 m) 的滑动分布。相对而言, 主要能量出现在 F2 断层上, 并以震中为界, 分为显著差异的两个滑动中心。震中以西, 以 F2_1、F2_2 两个子段落为主向西扩展约 6 km, 最大滑动量约 2 m, 主要分布在 4 km 以上的区域。震中以西 1.5 km 和 5 km 的位置上具有显著的两处地表位移过程, 左旋滑动幅度>1 m。震中以东滑动中心显示, 优势深度约 4 km。其中多处地表位移达到 2-3 m。早期野外调查结果发现的兰新铁路涵洞洞口变形就在其中一处地表位移较大的地方(图 5b)。采用 30 GPa 的刚性系数, 最优拟合模型释放了 1.53×10^{19} Nm 的地震能量, 约合矩震级 M_w 6.68。该值略高于地震学估算的 M_w 6.58, 考虑本研究使用的最新 SAR 数据获取于震后 10 天, 因此模型中可能包含了一定早期余滑的贡献。

基于最优拟合空间滑动模型(图 5), 我们模拟了 T128 和 T33 两幅同震干涉结果(图 6)。由图 6 可见, T33 同震干涉条纹在断层两侧较为对称, 与之对应 T128 轨道的同震干涉条纹中断层南盘形变幅度略大于北部, 可见升降轨道数据在同震信息方面具有显著的互补性。整体而言, 最优拟合模型可以重现两轨道的同震条纹分布(图 6b 和图 6e), 其中最大残差主要出现在断层附近, 尤其在 F1 和 F2_2 所辖的位置(图 6c 和图 6f), 很可能局部出现的一些更为细小的破裂结构未能充分在反演中充分体现所致。但从整体拟合效果而言, 本次地震中的主要滑动样式和能量分布应该已经得到了较好的约束和重现。本文所得到的地震断层模型与 Yang 等^[2]结果大体一致, 但是在断层倾角的取舍略有不同。由于使用的 InSAR 数据(本文较之以往研究^[2,3]多采用了 T128 像对同震形变场)、断层离散和光滑参数等不同, 反演得到的滑动细节存在一定差异。

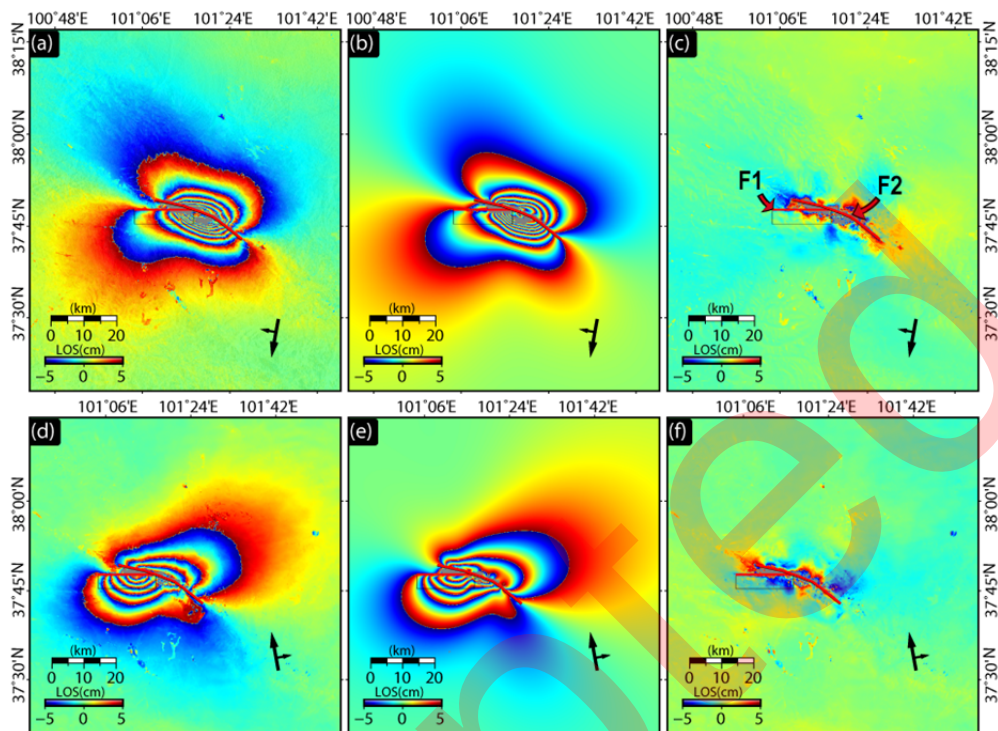


图 6 (彩色) 基于最优拟合滑动模型的数据拟合.(a-c)分别为由降轨轨道 T33 (20211229-20220110) 相对获取的同震干涉条纹 (重缠绕结果), 基于本文获取的最优拟合模型得到的模拟干涉图, 以及前者的差. (d-f) 与 (a-c) 类似, 基于升轨数据的数据拟合分析图. 其中每幅子图中的长箭头代表获取数据时卫星的飞行方向, 短箭头代表传感器的 LOS 向. 其中红线代表解译断层的地表迹线, 黑框为断层面的地表投影. 值得指出的是, 出于显示效果的考虑, 成图中对原始干涉结果中的低相关区域进行插值处理, 从而得到如图 (a) 和 (d) 所示的连续同震干涉图

Figure 6 Data misfits of the InSAR coseismic observations from the best-fitting slip model. (a-c) observed, modelled and difference of the T33 coseismic interferogram (20211229-20220110). The results are all re-wrapped within a range of $[-5, 5]$ cm. Note that the nan-hole of the interferogram is filled in the only consideration of visualization. (d-f) as like (a-c), but for the pair of the T128 coseismic interferogram

5. 讨论

5.1 非对称花状结构的孕震构造模式

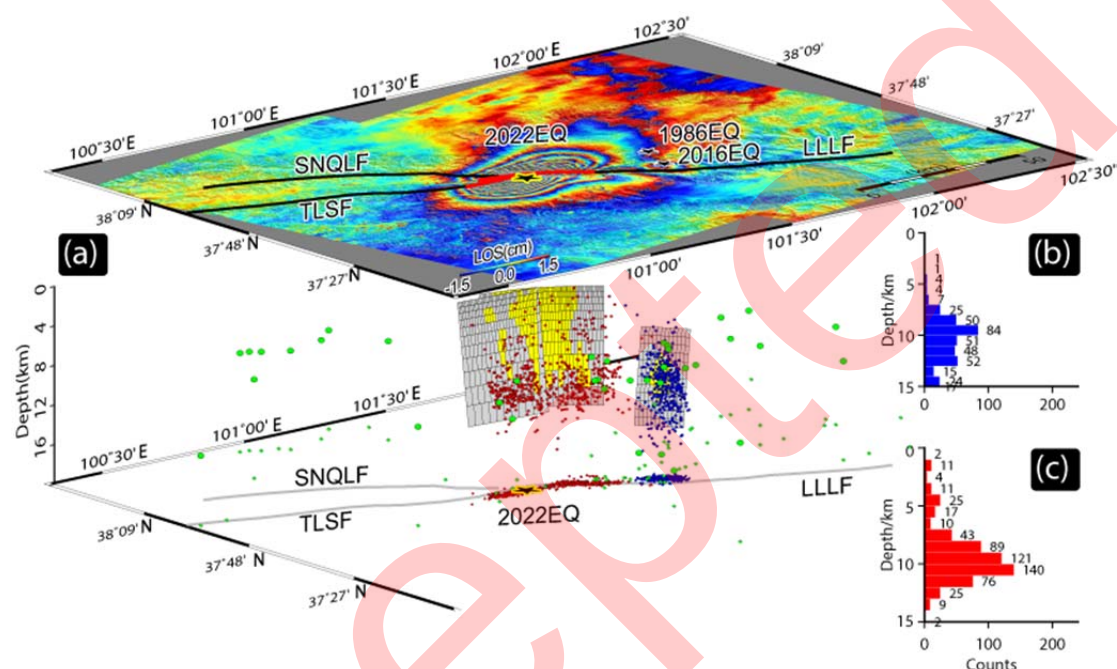


图 7 (彩色) 2022 年门源地震序列的综合解译图. (a) 断层、余震和地表形变场 (沿 T128 轨道 2016 和 2022 门源地震的累计 InSAR 形变场) 的三维透视图. 绿点代表 2022 年门源地震前所有 $M>2.5$ 的地震记录, 红点为本次地震的余震序列 (截至 1 月 17 号)^[1], 蓝色点为 2016 年门源地震的余震序列. 矩形单元代表地震断层建模设置的断层模型, 滑动 >0.5 m 的子块被填充了黄色. (b) 2016 年门源地震余震垂直分布直方图^[56]. (c) 2022 年门源地震余震深度分布直方图^[1]

Figure 7 Integrated interpretation of the 2022 Menyuan earthquake sequence. (a) the surface ruptures, aftershocks and cumulated surface formation of the 2016 and 2022 Menyuan earthquakes in track T128 in a 3D perspective plot. The green dots are the all regional seismicity before the 2022 Menyuan mainshock. The red dots are aftershocks following the 2022 mainshock, while the blue dots are aftershocks following the 2016 mainshock. The rectangles are sub-faults used in the modelling, in which the patches of slip >0.5 are filled in yellow. (b) the histogram of depths of the aftershocks of the 2016 mainshock^[56]. (c) as (b), but for the aftershocks of 2022 mainshock^[1]

地震精确定位表明, 本次地震发生在祁连-海原断裂带冷龙岭段和托莱山段交汇部位的阶区部位。地震主要破裂了两个断层分支 (F1 和 F2) (图 4 和 5), F1 走向近东西, 是两个段落交汇区内部的断裂, F2 是走向北西西的冷龙岭断裂, 二者之间存在显著的走向变化 (图 4 和 7a)。主要能量释放的区域 F2_3 和 F2_4 则主要分布在冷龙岭断裂带上 (图 5b 和 7a)。据此推断, 此次地震是初始破裂发生在托莱山断裂阶区的一次事件, 地震启动于阶区

内, 并进一步沿冷龙岭断裂向两侧延展, 具有双侧破裂特征(图 5b)。本文基于波形初动极性得到的主震断层面解为倾角为 $95^{\circ}/74^{\circ}/-1^{\circ}$, 与阶区内发震断层 F1 几何参数大体一致。本文中 CAP 波形反演频段为 0.05~0.15 Hz (6.7~20 s), 相比 P 波初动要更接近矩心信息, 但与 GCMT 频段(体波面波 50~150 s, 地幔波 150~300 s)^[57]、USGS W-phase 频段(100~1000 s)^[58]相比仍然相对高频。因此, 从 P 波初动解($95^{\circ}/74^{\circ}/-1^{\circ}$), 到 CAP 解($104^{\circ}/72^{\circ}/-2^{\circ}$), 到 GCMT 解($104^{\circ}/82^{\circ}/1^{\circ}$), 再到 USGS W-phase 解($104^{\circ}/88^{\circ}/15^{\circ}$), 随着应用波形数据的频段愈加长周期, 所反映的断层几何信息也应当愈加趋近矩心位置, 即主要能量位置。本次地震的主要滑动分布在冷龙岭断裂带上, 重定位余震支持该段断层近垂直的特征。综上所述, 本文确定的发震断层模型不但可以重现 InSAR 同震形变场, 同时与地震学结果也有较高的一致性。F2_1 和 F2_2 段落为冷龙岭断裂带的西延, 具有较浅的滑动特征, 余震重定位结果显示震后 10 天内未见显著余震发生(图 5b)。

如图 7a 所示, 2022 年门源地震破裂带的东端点曾在 2016 年发生过 $M_s6.4$ 门源地震^[3,5,59]。为了分析同震形变的影响范围, 我们将 T128 轨道两次同震形变场直接相加(图 7a), 可以看到 2016 年地震的同震地表形变区与此次地震地表变形直接相连, 并不显著重叠。同时, 紧随两次主震的余震水平投影也几乎不交叉重叠(图 7a)。2022 年门源地震余震深度(图 7c)统计上略深于 2016 年的余震(图 7b), 并皆主要分布在 6 km 以下。考虑到余震定位深度信息可能存在较大不确定性, 未来有待开展地震学工作对该特征予以进一步厘清。2016 年地震以北 14 km 的民乐-大马营断裂上曾发生 1986 年 $M_s6.4$ 级地震(图 7)^[5]。可见, 该地区 1986 年以来的三次 $M>6$ 的地震事件发生在不同的断层上, 指示了区域中强震迁移的复杂性。

本次地震的主要破裂和能量释放主要沿冷龙岭主断裂发生, 几乎纯左旋走滑(图 2 和 4)。2016 年门源地震发生在冷龙岭断裂北侧~5 km 的一条次级断裂—北冷龙岭断裂上, 该断裂向南倾斜, 是一条逆冲断裂。前人研究表明^[3,5,59], 该次地震是一次几乎纯逆冲的地震事件, 震源深度为~9 km, 余震基本上沿北冷龙岭断裂的发生, 深度集中在 8~12 km 范围。1986 年民乐地震发生在距北冷龙岭断裂以北~14 km 的民乐-大马营断裂上, 同样为一次逆冲型地震, 震源深度为~7 km^[5]。当前水平 GPS 速度场方向与快剪切波偏振方向分析结果方向趋于一致^[17,60], 共同表征了当地最大构造主压应力沿着北东(NE)方向, 与祁连-海原断裂带系统斜交。考虑到这三次地震的断层倾角存在显著差别, 如 1986 和 2016 年的逆冲事件的断层倾角约 50° , 2022 年门源地震断层则更陡($>70^{\circ}$), 从而可以推断在统一构造力场下断层几何可能是控制发震机制的主要因素之一。上述地震事件也同时清晰地揭示了冷龙岭断裂的花

状构造孕震模式（图 8）：在青藏高原向北东方向斜向扩展的收缩构造背景下，祁连山内部的祁连-海原大型左旋走滑断裂带形成的造山带尺度的花状构造调节了区域的差异运动，受断层几何的控制，闭锁的高角度的冷龙岭断裂主要受水平剪切应力控制，当积累的应力超过走滑断裂的剪切破裂强度时，就会失稳破裂，发生左旋走滑型地震，2022 年门源地震就是刚刚发生的一例；而对于倾角较缓的次级断裂带，水平挤压分量则体现其显著性，超过其摩擦强度时就发生沿这些次级断裂发生逆冲型地震，1986 年和 2016 年地震就是这类事件。断层的规模往往决定了可能发生的最大震级，由于冷龙岭断裂不论是平面延伸长度还是垂向切割深度都大于分支逆冲断裂，所以沿主断裂发生的走滑型地震最大震级会远大于分支断裂上逆冲型地震的震级（图 8）。从已有的历史地震记录来看，2022 年地震确实是发生在主断裂上的左旋走滑型事件，震级也大于 2016 年和 1986 年两次分支断裂上的逆冲型地震。从这三次历史地震勾画出来的孕震结构来看，“非对称花状构造”可能更准确地描述孕震模式，虽然较短的历史地震记录暂不一定能反映真实结构。南冷龙岭断裂完全具备发生逆冲型中等强度地震，但向北倾斜的门源盆地南缘断裂指示着冷龙岭断裂带本身就是一个非对称的花状构造。

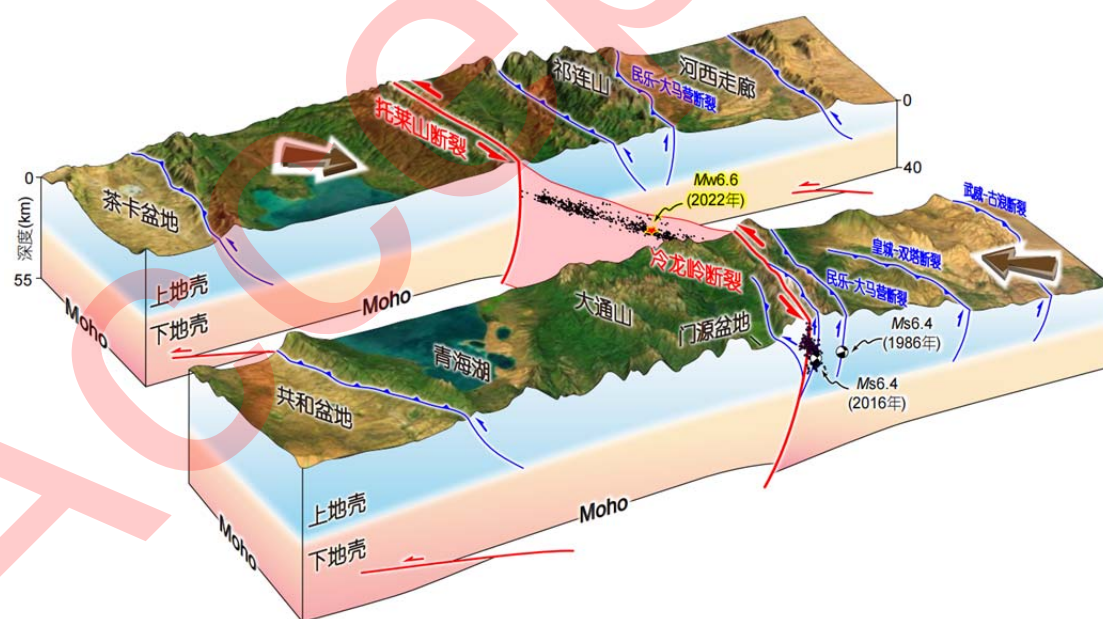


图 8 (网络版彩色) 非对称祁连-海原构造系统花状构造模式图。其中断层位置来源于 Yuan 等^[25,38]，区域地壳结构参考自 Ye 等^[61]。黑色箭头表示区域最大主压应力方位^[60]

Figure 8 Illustration of the Qilian-Haiyuan asymmetric flower structure. The faults used in the plot is from the study ^[25,38], while the crust structures are from a latest study ^[61]. The regional maximum principle stress direction is from Zhang et al^[60], marked by the dark arrows

5.2 未来地震危险性分析

利用最优滑动模型,我们基于弹性位错模型开展同震应力触发分析^[62,63]。由滑动模型产生的库伦应力变化量,可由 $\Delta CFS = \Delta\tau + \mu'\Delta\sigma$ 计算而来,其中 μ' 为综合考虑当地孔隙压力的变化影响的等效摩擦系数,本文中取 0.6。我们以冷龙岭断裂,托莱山断裂,以及冷龙岭向西延伸的肃南-祁连断裂带为接收断层,此处只考虑左旋剪切的情形,并将接收断层倾角统一预设为 88° (仅从简化计算角度考虑)。计算结果显示地震发生后沿破裂区周边产生了强烈的应力扰动(图 S1),其中浅部表现为库伦应力降低,而深部主要表现为受同震触发而库伦应力升高。同时,震区周边的剪切应力变化较正应力变化更为显著,成为主导局部应力场的变化控制因素。

同震浅部破裂触发深部库伦应力升高的作用,可以产生两个效应:一是触发深部余震活动,释放已经积累的应力,降低未来强震危险;二是对深部断裂加载,导致应力进一步集中,增强未来强震危险。从目前的余震深度分布的总体趋势来看,前者的可能性较大,但也不能忽视后者的可能性。以 Fan 等^[1]提供的重定位余震结果作为参考,其中包含了 $M \geq 0.1$ 的 585 次事件,以主震的平均机制作为输入,计算了余震位置上的库伦应力的大小。结果显示,72% 的余震分布于 $\Delta CFS > 0.1 \text{ MPa}$ 的区域,表明主震对其具有显著的触发效应。此处忽略了余震定位误差潜在的影响。值得指出的是,余震发生具有较强的方向性特征,主要沿主震断面向东扩展(图 5b),并已经在震后 10 天内达到 2016 年余震分布的区域边缘。相较而言,沿西部存在 $\Delta CFS > 1 \text{ MPa}$ 的库伦应力提升区,但没有显著的余震扩展。因此,需要进一步对当地开展工作,为潜在后续地震风险做好准备。

现有的古地震分析表明,冷龙岭断裂的大震(特征震级在 7.3~7.5)复发间隔为 $1643 \pm 568 \text{ yr}$ ^[14],毛毛山断裂的大震复发间隔为 1000 a ^[16]。尽管祁连-海原断裂存在多种尺度破裂的特征,古地震序列记录的震级也有差异,以具有准周期性的海原断裂西段而言,其大震复发间隔约为 $1950 \pm 450 \text{ a}$ 。三维有限元模拟表明^[64],1927 年古浪 $M 8.0$ 级地震释放了海原断裂西段的库伦破裂应力,而金强河-毛毛山断裂段由 GPS 与地质资料的联合反演结果显示其闭锁深度达到 $20 \sim 25 \text{ km}$,地震矩积累率已经达到较高水平^[65]。一方面,考虑到冷龙岭断裂带的特征震级可能在 7.3~7.5 之间^[14],此次地震未达到该能量水平,进而该段落上仍存潜在地震风险。另一方面,Yao and Yang^[66]的研究也揭示了仅利用震间滑移亏损量会过高评估地震强度的可能。判断冷龙岭断层的可能最大震级已经超出了本文研究范畴,值得未来进一步开展

工作。同时，此次地震周边以及金强河断裂和毛毛山断裂地震危险性仍值得未来重点关注。

6 结论

本文联合分析近远场震波形信息和 InSAR 数据，详细探究了 2022 年 1 月 8 日青海门源 Mw6.6 地震的发震构造和破裂机制，讨论了同震触发作用下的地震危险性，并联合区域构造结构特征和历史地震活动性分析了当地应变卸载模式，主要收获包括如下几点：

1) 地震学和测地学资料一致揭示此次地震是一次发生在高倾角冷龙岭断裂带上的左旋走滑事件，矩心深度仅为 4 km，矩震级为 Mw 6.58~6.68（根据地震学和测地学不同信息源）。

2) 由升、降两轨道数据得到的亚像元偏移结果和同震干涉条纹联合确定了两段同震破裂结构（F1 和 F2）：F1 沿着托莱山断裂的阶区展布，走向 88.6°；F2 沿冷龙岭断裂带西端，自西向东走向从 100.9°变化到 127.2°。联合地震学定位结果，初步认定此次地震是一次启动于断裂阶区的双侧破裂左旋走滑事件。

3) 同震 InSAR 形变场确定的同震模型揭示了此次地震最大位移达到~4 m，深度为 4 km，与地震学的矩心深度一致。Fan 等人^[1]提供的震后 10 天内的余震精定位空间展布与同震滑动呈现互补分布，由同震滑动模型的静态库伦应力分析也揭示了触发率在 72%以上。同时，应力分析结果显示同震破裂西端的库伦应力显著提高，且当地未见显著的余震分布，需对未来潜在地震风险提高警惕。

4) 综合区域构造结构和历史地震活动性，推测祁连-海原断层系统为非对称的花状构造结构，既可以通过左旋走滑，也能以逆冲的方式释放区域应力积累。这个复杂的构造结构为当地地震风险评估提出了挑战。

致谢

地震波形数据来自中国地震局地球物理研究所国家测震台网数据备份中心（doi：10.11998/SeisDmc/SN）和 IRIS-DMC，部分图件由 GMT5.4.5 绘制^[67]。感谢中国地震局地质研究所李涛研究员的有意义的讨论，代尔夫特大学博士研究生王雨晴协助完成了部分数据收集工作。感谢三位评审专家提出的宝贵修改意见，使本文得以完善。

参考文献

- 1 Fan L, Li B, Liao S, et al. Precise earthquake sequence relocation of the January 8, 2022, Qinghai Menyuan Ms6.9 earthquake. *Earthq Sci*, 2022, 35
- 2 Yang H, Wang D, Guo R, et al. Rapid report of the 8 January 2022 Ms 6.9 Menyuan earthquake, Qinghai, China. *Earthq Res Adv*, 2022, 2
- 3 Li Z H, Han B Q, Liu Z J, et al. Source Parameters and Slip Distributions of the 2016 and 2022 Menyuan, Qinghai Earthquakes Constrained by InSAR Observations (in Chinese). *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, [李振洪, 韩炳权, 刘振江, et al. InSAR 数据约束下的2016年和2022 年青海门源地震震源参数及其滑动分布. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022]
- 4 Xu Y C, Guo X Y, Feng L L. Relocation and focal mechanism solutions of the MS6.9 Menyuan earthquake sequence on January 8, 2022 in Qinghai Province (in Chinese). *Acta Seismologica Sinica*, 2022, 44:1-16 [许英才, 郭祥云, 冯丽丽. 2022年1月8日青海门源 MS6.9地震序列重定位和震源机制研究. *地震学报*, 2022, 44:1-16]
- 5 He X, Zhang Y, Shen X, et al. Examination of the repeatability of two Ms6.4 Menyuan earthquakes in Qilian-Haiyuan fault zone (NE Tibetan Plateau) based on source parameters. *Phys Earth Planet Inter*, 2020, 299: 106–408
- 6 Fang X, Zhang W, Meng Q, et al. High-resolution magnetostratigraphy of the Neogene Huaitoutala section in the eastern Qaidam Basin on the NE Tibetan Plateau, Qinghai Province, China and its implication on tectonic uplift of the NE Tibetan Plateau. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 258: 293–306
- 7 Yuan D-Y, Ge W-P, Chen Z-W, et al. The growth of northeastern Tibet and its relevance to large-scale continental geodynamics: A review of recent studies. *Tectonics*, 2013, 32: 1358–1370
- 8 Meyer B, Tapponnier P, Bourjot L, et al. Crustal thickening in Gansu-Qinghai, lithospheric mantle subduction, and oblique, strike-slip controlled growth of the Tibet plateau. *Geophys J R Astron Soc*, 1998, 135: 1–47
- 9 Zhang P-Z, Burchfiel BC, Molnar P, et al. Late Cenozoic tectonic evolution of the Ningxia-Hui Autonomous Region, China. *Geol Soc Am Bull*, 1990, 102: 1484–1498
- 10 Zheng W, Zhang P, He W, et al. Transformation of displacement between strike-slip and crustal shortening in the northern margin of the Tibetan Plateau: Evidence from decadal GPS measurements and late Quaternary slip rates on faults. *Tectonophysics*, 2013, 584: 267–280
- 11 Dong Z P, Feng J G, Wang X, et al. Analysis on Characteristics of Seismic Migration Activity in Qilianshan Tectonic Zone (in Chinese). *Recent Developments in World Seismology*, 2007, 10: 8-14 [董治平, 冯建刚, 王先, 等. 祁连山构造带地震迁移活动特征分析. *国际地震动态*, 2007, 10: 8–14]
- 12 Guo P, Han Z J, Jiang W L, et al. Holocene Left-Lateral Slip Rate of the Lenglongling Fault, Northeastern Margin of the Tibetan Plateau (in Chinese). *Seismology and Geology*, 2017, 39: 323-341 [郭鹏, 韩竹军, 姜文亮, 等. 青藏高原东北缘冷龙岭断裂全新世左旋滑动速率.

- 地震地质, 2017, 39: 323–341.]
- 13 He W G, Yuan D Y, Ge W P, et al. Determination of the Slip Rate of the Lenglongling Fault in the Middle and Eastern Segments of the Qilian Mountain Active Fault Zone (in Chinese). *Earthquake*, 2010, 30: 131–137. [何文贵, 袁道阳, 葛伟鹏, 等. 祁连山活动断裂带中东段冷龙岭断裂滑动速率的精确厘定. *地震*, 2010, 30: 131–137]
 - 14 Guo P, Han Z, Mao Z, et al. Paleoeearthquakes and Rupture Behavior of the Lenglongling Fault: Implications for Seismic Hazards of the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau. *J Geophys Res Solid Earth*, 2019, 124: 1520–1543
 - 15 Lasserre C, Gaudemer Y, Tapponnier P, et al. Fast late Pleistocene slip rate on the Leng Long Ling segment of the Haiyuan fault, Qinghai, China. *J Geophys Res*, 2002, 107
 - 16 Liu-Zeng J, Klinger Y, Xu X, et al. Millennial Recurrence of Large Earthquakes on the Haiyuan Fault near Songshan, Gansu Province, China. *Bull Seismol Soc Am*, 2007, 97: 14–34
 - 17 Wang M, Shen Z K. Present-Day Crustal Deformation of Continental China Derived from GPS and its Tectonic Implications. *J Geophys Res Solid Earth*, 2020, 125: e2019JB018774
 - 18 Ge W P, Wang M, Shen Z K, et al. Intersiesmic kinematics and defromation patterns on the upper crust of Qaidam-Qilianshan block(in Chinese). *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(9): 2994–3010 [葛伟鹏, 王敏, 沈正康, 等. 柴达木—祁连山地块内部震间上地壳块体运动特征与变形模式研究. *地球物理学报*, 2013, 56: 2994–3010]
 - 19 Li Q, Jiang Z S, Wu Y Q, et al. Present-day Tectonic Deformation Characteristics of Haiyuan-Liupanshan Fault Zone (in Chinese), *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2013, 33, 18–22 [李强, 江在森, 武艳强, 等. 海原-六盘山断裂带现今构造变形特征. *大地测量与地球动力学*, 2013, 33: 18–22]
 - 20 Guo P, Han ZJ, An YF, et al. Activity of the Lenglongling fault system and seismotectonics of the 2016 M_S6.4 Menyuan earthquake. *Sci China Earth Sci*, 2017, 60: 929–942
 - 21 Li Z, Xu X, Tapponnier P, et al. Post-20 ka Earthquake Scarps Along NE-Tibet's Qilian Shan Frontal Thrust: Multi-Millennial Return, ~Characteristic Co-Seismic Slip, and Geological Rupture Control. *J Geophys Res Solid Earth*, 2021, 126
 - 22 Zhou L, Ji L, Li Z., et al. Study on Current Deformation Process and Seismicity of Lenglongling Area based on Small Earthquakes and GPS Data (in Chinese). *Journal of Seismological Research*, 45(1):1–7 [周琳, 季灵运, 李长军, 等. 利用小震和GPS资料分析冷龙岭地区现今变形过程与地震活动. *地震研究*, 2022, 45: 1–7]
 - 23 Zhang Y-P, Zheng W-J, Zhang D-L, et al. Late Pleistocene left-lateral slip rates of the Gulang Fault and its tectonic implications in eastern Qilian Shan (NE Tibetan Plateau), China. *Tectonophysics*, 2019, 756: 97–111
 - 24 Xu X, Yeats R obert S, Yu G. Five Short Historical Earthquake Surface Ruptures near the Silk Road, Gansu Province, China. *Bull Seismol Soc Am*, 2010, 100: 541–561
 - 25 Yuan DY, Champagnac JD, Ge WP, et al. Late Quaternary right-lateral slip rates of faults adjacent to the lake Qinghai, northeastern margin of the Tibetan Plateau. *Bull Geol Soc Am*, 2011, 123: 2016–2030
 - 26 Li C-Y, Zhang P-Z, Yin J-H, et al. Late Quaternary left-lateral slip rate of the Haiyuan fault, northeastern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 2009, 28: 357–369
 - 27 Zheng W-J, Zhang P-Z, Ge W-P, et al. Late Quaternary slip rate of the South Heli Shan Fault (northern Hexi Corridor, NW China) and its implications for northeastward growth of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 2013, 32: 271–293

- 28 Liang S, Zheng W, Zhang D, et al. Paleoearthquakes Constrained by Stratigraphic Sequences of Different Drainages Since Late Pleistocene: A Case Study Along the Gulang Fault, NE Tibetan Plateau. *Front Earth Sci*, 2021, 9: 640
- 29 Yu J, Zheng W, Kirby E, et al. Kinematics of late Quaternary slip along the Yabrai fault: Implications for Cenozoic tectonics across the Gobi Alashan block, China. *Lithosphere*, 2016, 8: 199–218
- 30 Li X, Zhang P, Zheng W, et al. Kinematics of Late Quaternary Slip Along the Qishan-Mazhao Fault: Implications for Tectonic Deformation on the Southwestern Ordos, China. *Tectonics*, 2018, 37: 2983–3000
- 31 Chen W, Ni S, Kanamori H, et al. CAPjoint, a computer software package for joint inversion of moderate earthquake source parameters with local and teleseismic waveforms. *Seismol Res Lett*, 2015, 86: 432–441
- 32 Zhu L, Helmberger D V. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms. *Bull Seismol Soc Am*, 1996, 86: 1634–1641
- 33 Bassin C, Laske G, Masters G. The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America. *EOS Trans AGU*, 2000, 81
- 34 Zhu L, Rivera LA. A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media. *Geophys J Int*, 2002, 148: 619–627
- 35 Bai Q, Ni S, Chu R, et al. GCAPjoint, a software package for full moment tensor inversion of moderately strong earthquakes with local and teleseismic waveforms. *Seismol Res Lett*, 2020, 91: 3550–3562
- 36 Snoke JA. FOCMEC: FOCal MECHANism determinations. *Int Geophys*, 2003, 81: 1629–1630
- 37 Helffrich GR. How good are routinely determined focal mechanisms? Empirical statistics based on a comparison of Harvard, USGS and ERI moment tensors. *Geophys J Int*, 1997, 131: 741–750
- 38 Zhang P Z, Min W, Deng Q D, et al. Paleo-earthquakes and recurrence of strong earthquakes in the Haiyuan fault zone (in Chinese). *Sci China Ser D Earth Sci*, 2003, 33: 705–713 [张培震, 闵伟, 邓起东, 等. 海原活动断裂带的古地震与强震复发规律. *中国科学D辑: 地球科学*, 2003, 33: 705–713]
- 39 He X, Liang H, Zhang P, et al. The 2019 Ms 4.2 and 5.2 Beiliu Earthquake Sequence in South China: Complex Conjugate Strike-Slip Faulting Revealed by Rupture Directivity Analysis. *Seismol Res Lett*, 2021, 92: 3327–3338.
- 40 Feng W, Omari K, Samsonov SV V. An automated insar processing system: potentials and challenges. 2016 IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp., vol. 2016- Novem, 2016, 3209–10.
- 41 Feng W, Samsonov S, Qiu Q, et al. Orthogonal Fault Rupture and Rapid Postseismic Deformation Following 2019 Ridgecrest, California, Earthquake Sequence Revealed From Geodetic Observations. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: 1–10
- 42 Sandwell D, Mellors R, Tong X, et al. Open Radar Interferometry Software for Mapping Surface Deformation. *EOS, Trans Am Geophys Union*, 2011, 92: 234
- 43 Goldstein RM, Werner CL. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 4035–4038
- 44 Wan Y G, Shen Z K, Diao G L, et al. An algorithm of fault parameter determination using distribution of small earthquakes and parameters of regional stress field and its application to Tangshan earthquake sequence (in Chinese). *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(3):

- 793-804. [万永革, 沈正康, 刁桂苓, 等. 利用小震分布和区域应力场确定大震断层面参数方法及其在唐山地震序列中的应用. 地球物理学报, 2008, 51: 793–804]
- 45 Simons M, Fialko Y, Rivera L. Coseismic Deformation from the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, Earthquake as Inferred from InSAR and GPS Observations. *Bull Seism Soc Am*, 2002, 92: 1390–1402
- 46 Feng W, Lindsey E, Barbot S, et al. Source characteristics of the 2015 MW 7.8 Gorkha (Nepal) earthquake and its MW 7.2 aftershock from space geodesy. *Tectonophysics*, 2017, 712–713: 747–758
- 47 Feng W, Samsonov S, Almeida R, et al. Geodetic Constraints of the 2017 Mw7.3 Sarpol Zahab, Iran Earthquake, and Its Implications on the Structure and Mechanics of the Northwest Zagros Thrust-Fold Belt. *Geophys Res Lett*, 2018, 45: 6853–6861
- 48 Fialko Y. Evidence of fluid-filled upper crust from observations of post-seismic deformation due to the 1992 M_w 7.3 Landers earthquake. *J Geophys Res*, 2004, 109
- 49 Ward SN, Barrientos SE. An inversion for slip distribution and fault shape from geodetic observations of the 1983, Borah Peak, Idaho, Earthquake. *J Geophys Res*, 1986, 91: 4909
- 50 Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull Seism Soc Am*, 1985, 85: 1135–1154
- 51 Wan Y G, Shen Z K, Wang M, et al. Coseismic slip distribution of the 2001 Kunlun mountain pass west earthquake constrained using GPS and InSAR data (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2008, 51: 1074-1084 [万永革, 沈正康, 王敏, 等. 根据GPS和InSAR数据反演2001年昆仑山口西地震同震破裂分布. 地球物理学报, 2008, 51: 1074–1084]
- 52 Feng W P, Xu L S, Li Z H. Fault parameters of the October 2008 Damxung Mw6.3 earthquake from InSAR inversion and its tectonic implication (in Chinese). *Chinese J Geophys*, 2010, 53(5): 1134-1142 [冯万鹏, 许力生, 李振洪. 2008年10月当雄Mw6.3级地震断层参数的InSAR反演及其构造意义. 地球物理学报, 2010, 53: 1134–1142]
- 53 Li Y, Luo Y, Zhang J, et al. The 2015 Mw 6.4 Pishan earthquake, China: geodetic modelling inferred from Sentinel-1A TOPS interferometry. *Surv Rev*, 2017: 1–9
- 54 Feng W, Samsonov S, Tian Y, et al. Surface deformation associated with the 2015 Mw 8.3 Illapel earthquake revealed by satellite-based geodetic observations and its implications for the seismic cycle. *Earth Planet Sci Lett*, 2017, 460: 222–233
- 55 Li Z, Elliott JR, Feng W, et al. The 2010 MW 6.8 Yushu (Qinghai, China) earthquake: Constraints provided by InSAR and body wave seismology. *J Geophys Res Solid Earth*, 2011, 116
- 56 Liu M, Li H, Peng Z, et al. Spatial-temporal distribution of early aftershocks following the 2016 Ms 6.4 Menyuan, Qinghai, China Earthquake. *Tectonophysics*, 2019, 766: 469–479
- 57 Ekström G, Nettles M, Dziewoński AM. The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Phys Earth Planet Inter*, 2012, 200–201: 1–9
- 58 Duputel Z, Rivera L, Kanamori H, et al. W phase source inversion for moderate to large earthquakes (1990-2010). *Geophys J Int*, 2012, 189: 1125–1147.
- 59 Li Y, Jiang W, Zhang J, et al. Space Geodetic Observations and Modeling of on Seismogenic Tectonic Motion. *Remote Sens*, 2016: 1–11.
- 60 Zhang H, Gao Y, Shi Y T, Liu X F, Wang Y X. Tectonic stress analysis based on the crustal seismic anisotropy in the northeastern margin of Tibetan Plateau (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2012, 55(1): 95-104 [张辉, 高原, 石玉涛, 等. 基于地壳介质各向异性分析青藏高原东北

- 缘构造应力特征. 地球物理学报, 2012, 55: 95–104]
- 61 Ye Z, Gao R, Lu Z, et al. A lithospheric-scale thrust-wedge model for the formation of the northern Tibetan plateau margin: Evidence from high-resolution seismic imaging. *Earth Planet Sci Lett*, 2021, 574: 117170
- 62 Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull Seismol Soc Am*, 1992, 82: 1018–1040
- 63 King GCP, Stein RS, Lin J. Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes. *Bull Seism Soc Am*, 1994, 84: 935–953
- 64 Xiao J, He J. 3D finite-element modeling of earthquake interaction and stress accumulation on main active faults around the northeastern Tibetan plateau edge in the past ~100 years. *Bull Seismol Soc Am*, 2015, 105: 2724–2735
- 65 Li Y, Shan X, Qu C, et al. Fault locking and slip rate deficit of the Haiyuan-Liupanshan fault zone in the northeastern margin of the Tibetan Plateau. *J Geodyn*, 2016, 102: 47–57
- 66 Yao S, Yang H. Hypocentral dependent shallow slip distribution and rupture extents along a strike-slip fault. *Earth Planet Sci Lett*, 2022, 578: 117296
- 67 Wessel P, Smith WHF, Scharroo R, et al. *Generic Mapping Tools: Improved Version Released*. EOS, Trans Am Geophys Union, 2013, 94: 409–410

Seismic faults of the 2022 Mw6.6 Menyuan, Qinghai earthquake and their implication for the regional seismogenic structures

Wanpeng Feng^{1,2}, Xiaohui He^{1,2*}, Yipeng Zhang^{1,2}, Lihua Fang³, Sergey Samsonov⁴ & Peizhen Zhang^{1,2}

1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Geodynamics and Geohazards, School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519000, China;
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China;
3. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China;
4. Canada Center for Mapping and Earth Observations, Natural Resources Canada, Ottawa, ON K1A0G1, Canada

* Corresponding author, E-mail: hexiaoh5@mail.sysu.edu.cn

The Mw6.6 Menyuan earthquake occurred on January 8th of 2022 on the northern margin of Menyuan Basin, Qinghai. It was followed by over 600 aftershocks with magnitudes of up to M5.1. The mainshock was located on the Lenglongling (LLL) segment of the Qilian-Haiyuan (QLHYF) sinistral fault system, a 127-km-long active fault with a characteristic event of Mw7.3–7.5. In this study, we used seismic and geodetic data for the characterization of this seismic event and its large aftershocks. Using the seismic data and the CAPjoint inversion method, we obtained the centroid

depths and focal mechanisms of the mainshock and the 17 largest ($M_s \geq 3.0$) aftershocks. We determined that the mainshock was a strike-slip event with a moment magnitude of 6.58, centroid depth of 4 km, and the two nodal planes of 197/83/-162 and 104/72/-7. Most of the estimated aftershocks were also strike-slip events located at depths ranging from 3-9 km at the periphery of the earthquake centroid. We analyzed the rupture directivity of the two large aftershocks ($M_s 5.2$ and $M_s 4.8$) with the azimuthal variation of source duration and found that both events ruptured 1.5-2.0 km segments along the sinistral fault plane. We also processed Sentinel-1 SAR data acquired on tracks 026, 033, and 128 using an automated InSAR processing package, pSAR. The SAR-derived results that include subpixel offsets, coherence maps, and differential interferometry consistently reveal two major surface rupture segments that correlate with a step-over of Tuolaishan fault and the western segment of LLLF, respectively. We performed a geodetic inversion of the ascending and descending coseismic InSAR observations using a geodetic inversion package PSOKINV in order to determine geometric parameters and subsurface slip on the fault. During the inversion, the surface fault traces were fixed based on the observations from the subpixel offsets and coherence maps produced from the SAR data. The geodetic inversion indicates that the sinistral strike-slips on the two steep-dipping fault segments are responsible for the mainshock, having three distinct slip patterns with a maximum slip of about 4 m at a depth of 4 km, which is consistent with the seismic solutions. The geodetic moment from the slip model was 1.58×10^{19} Nm, corresponding to M_w 6.68, which is slightly greater than M_w 6.58 estimated from the seismic data. We also compared the seismic source solutions produced by the different seismic methods to the multiple earthquake fault segments inferred from the InSAR results obtained in this study. We found that the significant variations of the seismic solutions from P first motion polarizations, CAPjoint, GCMT and USGS W-phase are mainly due to the different periods of the seismic data used in the inversions. The solution derived from the P first motions is consistent with the fault F1 determined from the offset maps presented in this study that corresponds to the step-over of Tuolaishan fault. With longer periods, the seismic focal mechanism solutions turn out closer to the epicenter of the earthquake. This could help with the understanding of seismic solutions for other earthquakes, particularly those with significant strike variations along the rupture. Combining with regional tectonic structures and historical earthquakes, e.g. the 1986 and 2016 M_s 6.4 thrust-slip Menyuan earthquakes, we suggest that an asymmetrical flower structure along QLHYF may have been a key model for unleashing the regional strain. The coseismic slip-derived stress analysis indicates that the earthquake significantly increased the Coulomb stress in the vicinity of the hypocenter, particularly at the western end of the earthquake rupture, where few aftershocks were observed, drawing our attention to the increased seismic risk in that region.

Keywords: Menyuan Earthquake; Lenglongling Fault; focal mechanism; flower structure; coseismic deformation.