

引用格式: 程燕, 蒋亚楠, 侯中健, 等, 2024. 2016 年和 2022 年青海门源强震活动的 InSAR 形变观测与区域强震危险性分析 [J]. 地质力学学报, 30 (6): 965–977. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023197](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023197)

Citation: CHENG Y, JIANG Y N, HOU Z J, et al., 2024. InSAR deformation observation and regional severe earthquake hazard analysis of the 2016 and 2022 strong earthquake activities in Menyuan, Qinghai [J]. Journal of Geomechanics, 30 (6): 965–977. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023197](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023197)

2016 年和 2022 年青海门源强震活动的 InSAR 形变观测与区域强震危险性分析

程 燕^{1,2}, 蒋亚楠^{1,2}, 侯中健¹, 曾 锐^{1,2}, 罗祎沅²

CHENG Yan^{1,2}, JIANG Yanan^{1,2}, HOU Zhongjian¹, ZENG Rui^{1,2}, LUO Huiyuan²

1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059;

2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059

1. School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China

InSAR deformation observation and regional severe earthquake hazard analysis of the 2016 and 2022 strong earthquake activities in Menyuan, Qinghai

Abstract: [Objective] Over the past 30 years, Menyuan Country, Qinghai, has experienced three strong earthquakes, demonstrating active seismic activity. The focal mechanisms of these earthquakes showed remarkable differences and the epicenters were all located near the Lenglongling fault. [Methods] In order to quantitatively analyze the activity characteristics of the Menyuan seismic sequence using InSAR technology to obtain the coseismic deformation field of the Menyuan earthquake of 2016 and 2022 and establish an appropriate fault model, the fine slip distributions of the two earthquakes were obtained through steepest decent method (SDM). Furthermore, the static Coulomb stress changes on the faults in the region and its surroundings caused by the Menyuan M_w 6.6 earthquake in 2022 were evaluated. [Results] The coseismic deformation field in 2016 exhibited a single elliptical uplift center, with predominantly thrust motion. In contrast, the spatial distribution of the deformation field in 2022 was more complex, showing a Y-shaped distribution, and there was a slight variation in the rupture direction from west to east, with primarily horizontal deformation. [Conclusion] The two earthquakes also differed in their slip patterns and shallow and deep structural styles. In 2016, the seismic activity was weak, with a slip zone existing at depths between 8 km and 12 km, where the maximum slip was only 0.23 m. The fault plane had a low inclination angle, which is a characteristic of deep-seated slip. By contrast, the 2022 earthquake was a typical shallow-focus earthquake featuring three distinct slip areas. The primary rupture occurred in the Lenglongling section, concentrated in the shallow part from 1 km to 7 km, with a maximum displacement of 3.22 m. A significant slip also occurred along the western extension of the Lenglongling fault, reaching a maximum slip of 2.59 m. The Tuolaishan section experienced rupturing mainly between 3 km and 8 km, with the maximum slip recorded as 2.1 m. [Significance] Combined with the analysis of the Menyuan earthquake activity in 1986, it is inferred that the Menyuan earthquake sequence is dominated by the activity of the Lenglongling fault, which is continuously adapting to new structures and stress

基金项目: 四川省重点研发计划项目 (2023YFS0435, 2023YFS0439); 国家自然科学基金项目 (42304042)

This research is financially supported by the Key Research and Development Program of the Sichuan Province (Grants No. 2023YFS0435 and 2023YFS0439) and Province National Natural Science Foundation (Grant No. 42304042).

第一作者: 程燕 (2000—), 女, 硕士, 从事 SAR/InSAR 在地震地质中的应用研究。Email: chengyan@stu.cdut.edu.cn

通讯作者: 蒋亚楠 (1988—), 女, 博士, 副教授, 主要从事时序 SAR/InSAR 技术地质灾害识别与监测以及 SAR/InSAR 观测与地学模型的耦合研究工作。Email: jiangyanan@cdut.edu.cn

收稿日期: 2023-12-26; 修回日期: 2024-05-19; 录用日期: 2024-05-31; 网络出版日期: 2024-11-29; 责任编辑: 范二平

adjustments in its northeast extension and shows compressive-shortening activity trend. The 2022 Menyuan Mw 6.6 earthquake had a significant impact range, and earthquake hazards need to be continuously monitored and studied further, especially in areas where static Coulomb stress changes exceed the hazard threshold.

Keywords: Menyuan earthquake sequence; Lenlongling fault; InSAR; activity characteristics; coulomb stress

摘要: 30多年来青海省门源县先后经历了3次强震,显现出活跃的地震活动。3次地震的震源机制存在显著差异,且震中均位于冷龙岭断层附近。为定量分析门源地震序列的活动特征,利用InSAR技术测量2016年和2022年门源地震引发的地表形变,详细分析了同震形变场的空间特征及发震断层,并据此建立了断层模型,通过最速下降法(SDM)获得2次地震的精细滑动分布,最后基于静态库仑应力变化评估了2022年门源 M_w 6.6地震对该区域及周边断层的应力扰动。研究发现2016年地震同震形变场表现为单一的椭圆隆升中心,运动属性以逆冲为主;而2022年地震形变场空间分布较为复杂,呈Y型分布,破裂走向自西向东有轻微变化,以水平形变为主。2次地震的滑动模式和深浅构造样式也存在明显差异:2016年地震活动性弱,在深部8~12 km存在一个滑动区,最大滑动量仅有0.23 m,断层面倾角低,具有深部滑动特点;而2022年地震为典型的浅源地震,存在3个明显的滑动区域,主破裂发生在冷龙岭段,集中在浅部1~7 km,最大位错量为3.22 m,冷龙岭断层向西延伸段也发生了明显滑动,最大滑动量达到2.59 m,托莱山段破裂深度集中在3~8 km,最大滑动量为2.1 m。结合1986年门源地震活动分析,推断门源地震序列受冷龙岭断层活动支配,冷龙岭断层在北东向扩展以及挤压缩短的活动趋势中,不断适应新的构造和应力调整。2022年门源 M_w 6.6地震位错影响范围较大,地震危险性需持续关注和深入研究,尤其是静态库仑应力变化超过了危险性阈值的部分。

关键词: 门源地震序列; 冷龙岭断层; InSAR; 活动特征; 库仑应力变化

中图分类号: P315.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616(2024)06-0965-13

DOI: 10.1090/j.issn.1006-6616.2023197

0 引言

青藏高原自西向东内部构造千差万别,地质构造变形丰富。祁连山位于青藏高原东北缘,其内部的走滑断层与前陆逆冲断层共同调节了高原物质的斜向汇聚(Allen et al., 2017; Zuza et al., 2018; Guo et al., 2019; 郑文俊等, 2019)。第四纪晚期以来,青藏高原在持续向北东向扩张的过程中,与周围的阿拉善地块和鄂尔多斯地块相互作用,导致构造应力积累,断层系统的活跃性增强。历史上,祁连-海原断层带曾发生过1920年海原8.5级和1927年古浪8.0级2次重大地震(Gaudemer et al., 1995)。近年来,其中段冷龙岭断层显示出较高的地震活动性,相继发生了3次震源机制截然不同的强震。其中,1986年 M_s 6.4门源地震和2016年 M_s 6.4门源地震具有相似的特征,震源机制同为逆冲型,发生在冷龙岭断层北部不同的次级断层上,未产生大规模的地表破裂(Li et al., 2016; 胡朝忠等, 2016; He et al., 2020)。2022年 M_s 6.9门源地震是发生在冷龙岭主断层上震级最高、破坏力最强的事件,造成兰新高

铁停运,现场挤压鼓包、断层陡坎和张裂缝等现象明显(梁宽等, 2022; 潘家伟等, 2022; 韩帅等, 2022)。同一地质区域内频繁发生强震,反映着该区应力集中、断层持续活跃,具有再次发生强震的高风险性(He et al., 2020)。因此,研究门源强震活动特征对该区的地震危险性分析具有重要意义。

2022年门源地震发生后,李振洪等(2022)率先采用InSAR技术获取同震形变场和同震滑动分布,揭示其为左旋走滑型地震,发震断层为冷龙岭断层,最大滑动量(3.5 m)位于4 km深处。此后,其他研究者基于InSAR技术,建立了不同断层模型来深入研究门源地震的震源机制和破裂过程(Yang et al., 2022; Li et al., 2022; 余鹏飞等, 2022; Luo and Wang, 2022; Wang et al., 2023; Zhang et al., 2023; 王欣等, 2023)。其中, Wang et al. (2023)通过解译高分辨遥感影像确定更为准确的地表破裂走向,据此建立了含冷龙岭和托莱山破裂段的双断层模型;研究结果表明发震主断层在地下4 km处达到最大滑动量(4 m),次级断层最大滑动量为2.7 m。Luo and Wang (2022)采用像素偏移量分析地震破裂特征,显示从冷龙岭断层传播至托莱山断层的破裂轨迹具有不

同的走向,故将发震断层细分为6个断层面,其最优滑动模型表明此次地震最大滑动量(约为3.6 m)发生在1.5~3 km的较浅深度。由此可见,不同断层模型得到的滑动量和深度存在较大差异。简化的双断层模型可能无法捕捉到复杂的地质结构或破裂过程,而过于复杂的模型可能导致过拟合(Wang et al., 2020)。准确的断层模型对于揭示断层活动特征至关重要,同时,也影响区域强震危险性的分析(许光煜等, 2022)。因此,对于2022年门源 M_s 6.9地震这类涉及多断层破裂的事件,建立一个合适的断层模型很重要。

2022年门源地震发生后,梁宽等(2022)基于GF-7号卫星数据及现场调查发现,破裂带沿南北2支展布,并且地表破裂带超越冷龙岭断层西端,向西续展约10 km。在此基础上,潘家伟等(2022)利用手持GPS、小型无人机对破裂带进行了更为详细的地质调查,实地勘察和航片解译表明破裂段走向存在变化,并据此将破裂段细分为西段、中段和东段。赵凌强等(2022)利用大地电磁技术探究该地震的孕震环境,发现冷龙岭断层在不同区段具有独特的深部延展特征,呈现出明显的分段性。根据野外调查及大地电磁技术的研究可知,三断层模型更符合2022年门源地震断层特征与地表同震位移分布,有助于更精确地描述断层的几何特征和滑动行为。因此,在建立断层模型时,参考野外实地考察获得的地表破裂带的精确分布位置,并考虑冷龙岭断层向西延伸的破裂段,根据破裂段的走向变化,将2022年门源发震断层划分为3段;同时,针对2016年 M_s 6.4门源地震与2022年 M_s 6.9门源地震震源机制的差异,使用InSAR技术处理Sentinel-1A升、降轨数据,得到2次地震的同震地表形变,根据拟合残差结果获得最优三维滑动分布,在此基础上探讨了门源地震序列的活动特征;此外,根据2022年门源地震反演得到的最优滑动模型,计算静态库仑应力变化对周围地壳的应力扰动,对区域强震活动进行分析并探讨未来地震危险性。

1 活动构造背景

门源地震序列极震区所在的大地构造位置位于北祁连造山带内。新生代以来,印度板块与欧亚板块碰撞引发远程效应,区内构造变形极为复杂(Zuza et al., 2018; 陈宣华等, 2019; 吴晨等, 2023),广

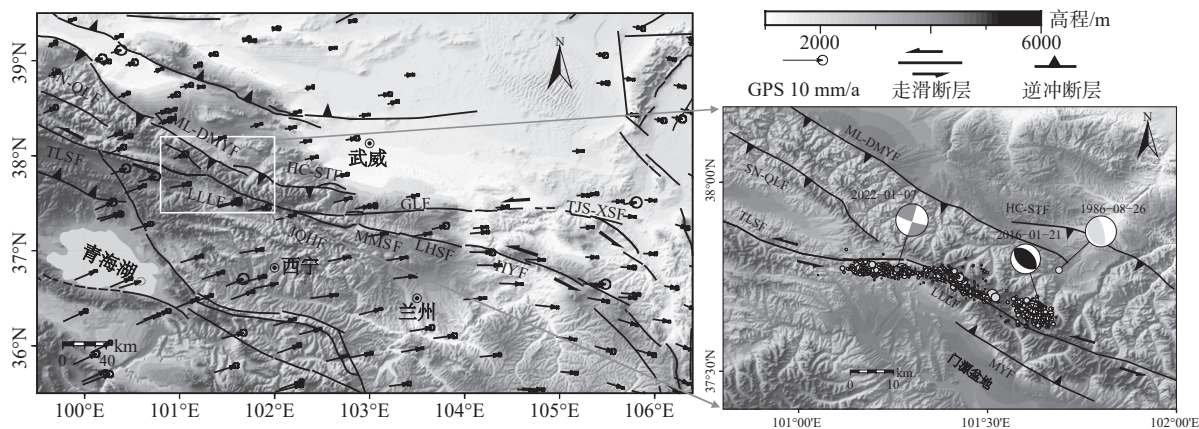
泛分布着活动逆冲断层、活动褶皱和走滑断层。祁连-海原断层系统长约1000 km,在空间上呈现弧形展布,东起六盘山,向西归并到祁连山(陈宣华等, 2019)。10 km宽的天祝拉分盆地将祁连-海原断层系统划分为东南段和西北段(Gaudemer et al., 1995; Daout et al., 2016),东南段变形主要沿着古浪断层、海原断层和香山-天景山断层发生。在西北段西海原断层系统容纳6.9~10 mm/a的左旋滑动,祁连山逆冲系统缩短2.3~4.8 mm/a(Daout et al., 2016)。其中冷龙岭断层和托莱山断层为海原断层系统走滑活动向西延伸的主干活动断层。托莱山断层在全新世形成较新的断层陡坎、沟槽等地貌,总体走向 $290^\circ\sim 300^\circ$,倾向南西,局部带逆冲成分(袁道阳等, 2023)。冷龙岭断层沿东祁连山脉展布,穿越岗什卡雪峰,全长约120 km,是一条全新世具有垂直分量的左旋走滑活动断层,左旋滑动速率和逆冲速率分别为 4.6 ± 0.8 mm/a和 5.9 ± 0.8 mm/a(He et al., 2020),在地表形成了一系列断层地貌,出现沟壑、水系、冲洪积阶地、山脊和冰碛等同步左旋位错现象(何文贵等, 2010; Guo et al., 2017)。冷龙岭断层近代活动性较强,相继发生了1986年门源 M_s 6.4地震、2016年门源 M_s 6.4地震和2022年门源 M_s 6.9地震。

门源地震序列从北至南还发育多条活动断层,包括民乐-大马营断层、皇城-双塔断层、肃南-祁连断层和门源断层等(图1)。民乐-大马营断层位于祁连山北缘断层带最南端,长约250 km,倾向南西,分割了祁连山隆起带与河西走廊的沉积盆地。最新研究在谢河发现第四纪晚期发育良好的变形阶地,记录了民乐-大马营断层在第四纪晚期的活跃逆冲,估算其垂直滑移率为 0.9 ± 0.2 mm/a(Xiong et al., 2017)。皇城-双塔断层在全新世也很活跃,全长超过120 km,倾向南西(刘白云等, 2015)。肃南-祁连断层为昌马-俄博断层的中东段,倾向南西,该断层东西两段活动性较弱,主要为晚更新世活动(袁道阳等, 2023)。门源断层晚更新世晚期以来活动性呈减弱趋势,全长约70 km,倾向北东,以逆冲运动为主,是门源盆地与冷龙岭山地的边界断层(马保起和李德文, 2008)。

2 InSAR 观测处理与同震形变场

2.1 InSAR 观测处理

InSAR技术能捕捉到高精度地表形变,具有刻



箭头表示 GPS 速度场 (数据来自 Wang and Shen, 2020); 3 个沙滩球分别代表 2022 年 M_w 6.6、2016 年 M_w 5.9 和 1986 年 M_w 5.9 地震; 圆点分别是 Fan et al. (2022) 和 Liu et al. (2019) 在 2022 和 2016 年地震中重新定位的余震

TLSF—托莱山断层; LLLF—冷龙岭断层; JQHF—金强河断层; MMSF—毛毛山断层; HYF—海原断层; LHSF—老虎山断层; GLF—古浪断层; MYF—门源断层; SN-QLF—肃南-祁连断层; ML-DMYF—民乐-大马营断层; HC-STF—皇城-双塔断层; TJS-XSF—天景山-香山断层

图 1 冷龙岭断层带及周边活动构造

Fig. 1 Lenglongling fault and surrounding active structures

The arrows represent the GPS velocity field (from Wang and Shen, 2020). Three colored beach balls represent the 2022 M_w 6.6, 2016 M_w 5.9, and 1986 M_w 5.9 earthquakes; dots are the relocated aftershocks of the 2022 and 2016 earthquakes from Fan et al. (2022) and Liu et al. (2019) respectively. TLSF—Tuolaishan fault; LLLF—Lenglongling fault; JQHF—Jinqianghe fault; MMSF—Maomaoshan fault; HYF—Haiyuan fault; LHSF—Laohushan fault; GLF—Gulang fault; MYF—Menyuan fault; SN-QLF—Sunan-Qilian fault; ML-DMYF—Minle-Damayin fault; HC-STF—Huangcheng-Shuangta fault; TJS-XSF—Tianjingshan-Xiangshan fault

画地表运动情况的能力, 在地震学研究中扮演着重要的角色 (季灵运等, 2017; 赵德政等, 2023)。选用覆盖 2016 年和 2022 年门源震中区的升降轨 SAR 影像 (表 1), 运用“二轨法”分别对升、降轨进行差分干涉处理, 重建 2 次门源地震同震形变场。数据处理过程中, 采用 NASA (National Aeronautics and Space

Administration) 公开的 30m 分辨率 SRTM 数字高程模型消除地形效应, 通过采用多视和滤波处理, 抑制干涉相位噪声, 提升干涉图质量。相位解缠采用适用于低相干区的最小费用流 (Minimum cost flow) 方法进行, 最后通过地理编码, 得到地理坐标系下升、降轨同震形变场。

表 1 Sentinel-1A 数据参数

地震	成像模式	轨道	飞行方向	主影像日期	辅影像日期
2016-01-21	IW	128	升轨	2016-01-13	2016-02-06
	IW	33	降轨	2016-01-18	2016-02-11
2022-01-08	IW	128	升轨	2022-01-05	2022-01-17
	IW	33	降轨	2021-12-29	2022-01-10

2.2 同震形变场

2016 年同震形变场位于冷龙岭主断层北侧构造隆起区 (图 2a、2b), 沉降运动不明显, 只有一个椭圆隆升中心, 沿升、降轨视线向的形变最大值分别为 5.9 cm、7.8 cm, 反映此次地震运动属性以逆冲为主。形变场连续分布, 地表形变梯度影响范围有限, 未出现失相干区域。降轨的变形椭球较升轨位置东移, 这是由于不同的卫星航向和入射角导致 (Li

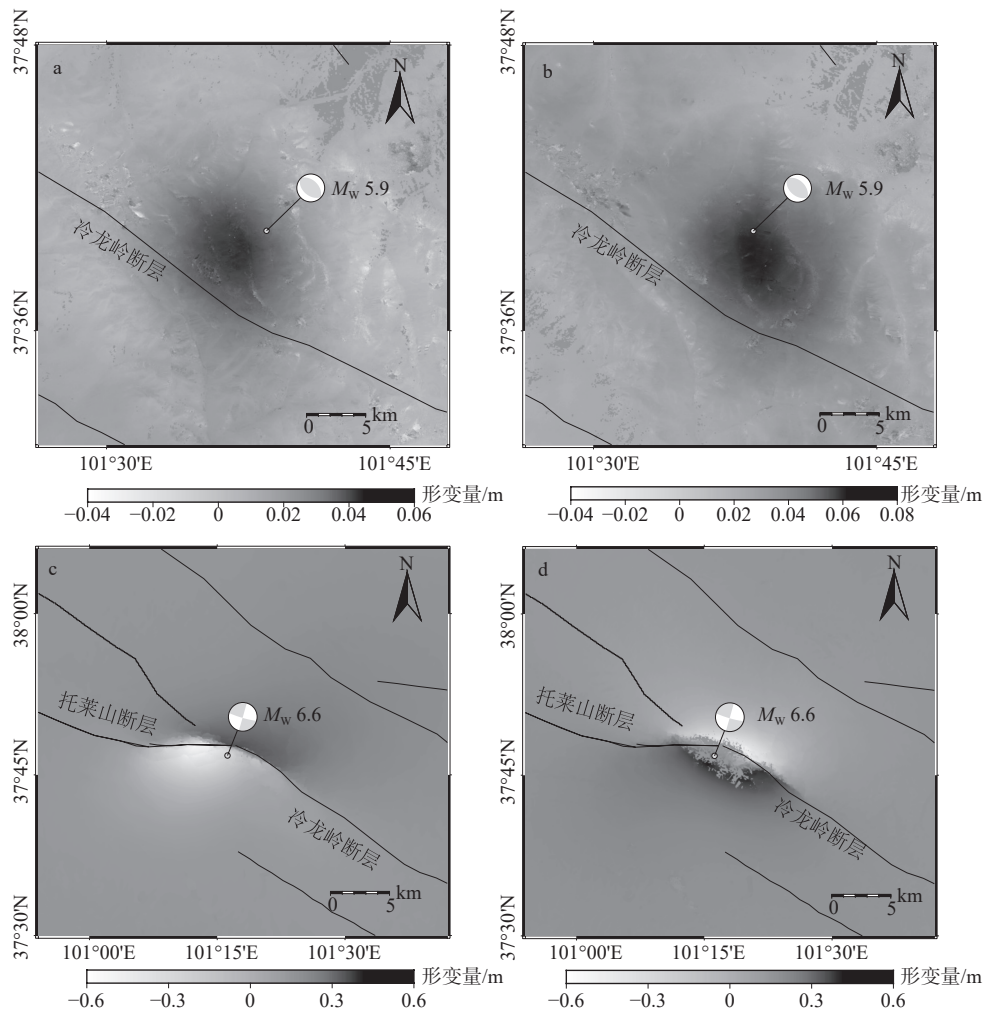
et al., 2016)。

2022 年升、降轨 InSAR 同震视线位移表现出完全相反的形变 (图 2c、2d), 初步表明此次地震以水平形变为主, 地面沉降和隆起也较明显。近场附近的破裂形变梯度过大, 导致信号失相干, 但形变场很好地描述了强震的形态空间范围和分布特征。参考该区域活动断层分布图, 冷龙岭断层和托莱山断层的展布与 2022 年门源地震形变场相对应, 形变

场整体呈北西西—南东东向。该地震破裂比较复杂, 在西段出现了分叉现象, 破裂走向自西向东略有改变, 与相关学者在野外考察的结论相符(潘家伟等, 2022; 韩帅等, 2022)。

利用 InSAR 技术获得了大范围的地表形变信

息, 但数据点数量多、密度大, 这在一定程度上制约反演速率。故采用四叉数降采样法对 2016 年和 2022 年同震形变场进行降采样处理, 以减少数据量, 同时保留形变场数据的主要特征, 有助于提高反演效率和精度。



黑色线段代表断层

a—2016 年升轨形变场; b—2016 年降轨形变场; c—2022 年升轨形变场; d—2022 年降轨形变场

图 2 2016 年 M_w 5.9 和 2022 年 M_w 6.6 同震形变场

Fig. 2 Coseismic deformations of the 2016 M_w 5.9 and 2022 M_w 6.6 Menyuan earthquakes

(a) Coseismic deformations of ascending orbits in 2016; (b) Coseismic deformations of descending orbits in 2016; (c) Coseismic deformations of ascending orbits in 2022; (d) Coseismic deformations of descending orbits in 2022

Beach balls represent the 2016 M_w 5.9 and 2022 M_w 6.6 earthquakes, and black lines denote active faults.

3 断层模型及滑动分布反演

3.1 断层模型

建立断层几何模型是 InSAR 数据运动学反演的关键步骤(季灵运等, 2017)。2016 年 M_w 5.9 门源

地震与 1986 年 M_w 5.9 门源地震相似, 均未在地表形成明显的破裂带, 这可能与震区复杂的构造环境和断层活动有关。震区附近的主要活动断层包括冷龙岭左旋走滑断层和民乐—大马营逆冲断层, 这 2 条断层距离震中最近。依据已有的 2016 年门源地震研究成果, 倾向确定为南西(Liu et al., 2018; Xiong et

al., 2019), 结合 InSAR 同震形变场形态, 在冷龙岭断层和民乐大马营断层之间建立了一个单断层模型 M1。

冷龙岭断层西段和托莱山断层东段穿过 2022 年门源地震同震形变场, 且重新定位的余震空间分布与野外考察等先验信息也揭示了 2022 年地震破裂带主要是由南支(托莱山断层)和北支(冷龙岭断层)2 条组成(潘家伟等, 2022; 韩帅等, 2022; Fan et al., 2022; 袁道阳等, 2023), 故将 2022 年门源地震发震断层总体分为 2 段。进一步观察同震形变场的展布, 可以发现北支的形态微凸, 具有明显的分段性。野外地表破裂调查中, 发现北支破裂段以硫磺沟河道为界, 两侧走向略有变化(潘家伟等, 2022)。此外, 北支破裂并未终止于冷龙岭断层西端, 而是继续向西延伸(梁宽等, 2022)。在建立断层模型时, 参考野外现场考察获得的地表破裂带的精确分布位置, 并考虑冷龙岭向西扩展的破裂段, 根据破裂段的走向变化, 将 2022 年门源发震断层划分为 3 个子断层(F1、F2、F3), 自西向东绘制了这 3 条断层迹线。其中, F1 沿着托莱山断层东部展布; F2 沿着北支最西端(37°49′59.117″N、101°8′0.324″E)至硫磺沟河道(梁宽等, 2022; 潘家伟等, 2022); F3 沿着硫磺沟河道东侧段破裂带。结合已有研究结果(Liu et al., 2018; Xiong et al., 2019; 潘家伟等, 2022; Luo and Wang, 2022), 确定每个子断层的初始值, 经拟合数据得到较为理想的结果作为最终反演的参数(表 2)。

表 2 子断层反演基本参数

Table 2 Basic parameters for sub-faults inversion					
时间	断层	起始位置经度/(°)	起始位置纬度/(°)	走向/(°)	倾角/(°)
2022 年	F1	101.123	37.793	90.113	82.270
	F2	101.130	37.833	108.030	88.050
	F3	101.281	37.792	118.890	88.270
2016 年	M1	101.556	37.779	125.000	46.000

3.2 滑动分布反演

采用 SDM (Steepest Decent Method) 程序分别求解 2016 年和 2022 年门源地震的精细滑动分布(Wang et al., 2013)。在反演过程中, 联合升、降轨形变场约束, 考虑实际地壳介质垂向分层差异, 使用 crust 1.0 地壳模型计算 Green 函数, 将断层离散化成若干个 1 km×1 km 小子断层, 以便分析破裂过程中断层面上各处的滑动情况。此外, 为避免滑动分布产生震荡解, 对断层施加平滑约束。

2016 年门源地震的最优滑动模型显示(图 3), 深部存在一个椭圆状的滑动区, 且地震活动未扩展至地表, 发震断层主要表现为低倾角的逆冲运动。同震滑动集中在 8~12 km 深度, 最大滑动量为 0.23 m, 这与郑博文等(2018)研究结果相似。反演得到的矩震级为 M_w 5.96。根据地质背景和反演结果, 推断发震构造位于冷龙岭主断层北侧, 表现为一条逆冲性质的盲断层。2022 年地震存在 3 个明显的滑动区域(图 4), 主要集中在浅层 1~7 km, 是一次典型的浅层构造地震。根据运动方向所示, 该地震具有高倾左旋走滑型特征, 局部还包含少量逆冲活动成分。其中, 主要破裂发生在冷龙岭段(F3)上, 在深

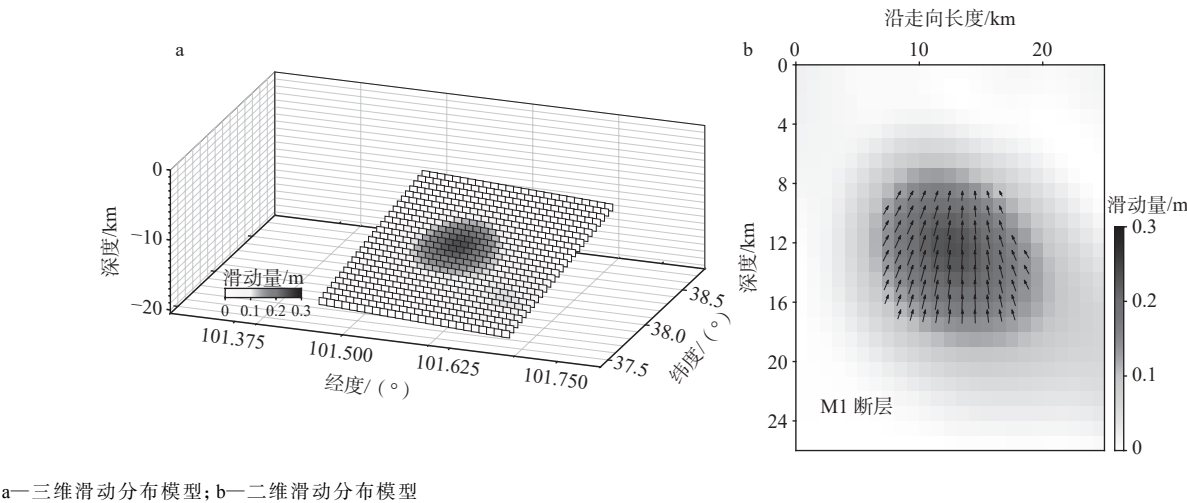
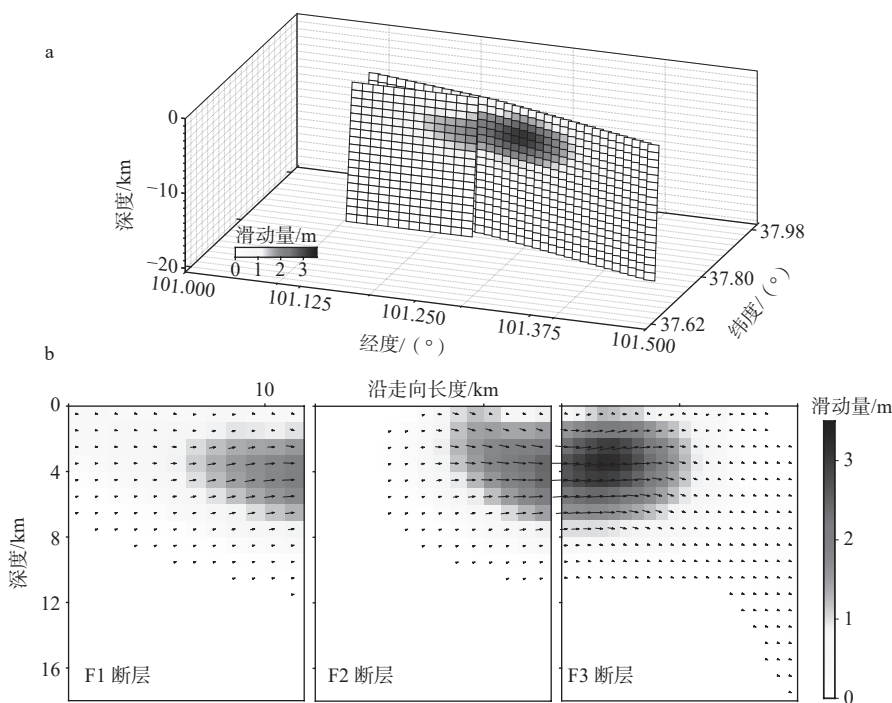


图 3 2016 年 M_w 5.9 门源地震断层滑动分布图
Fig. 3 Slip distribution models of the 2016 M_w 5.9 earthquake
(a) Three-dimensional (3D) slip distribution; (b) Two-dimensional (2D) slip distribution

度 3.5 km 处达到最大位错量 3.22 m, 并向两端逐渐衰减。冷龙岭断层西延段落(F2)也发生了明显的滑动, 最大滑动量为 2.59 m, 发生在地下 4.5 km。梁宽等(2022)推测冷龙岭断层向西延伸可能更为广泛。相对而言, 托莱山段(F1)破裂规模比冷龙岭段小, 滑动兼具少量逆冲走滑, 破裂深度集中在 3~8 km, 最大滑动量(~ 2.1 m)发生在 4.46 km 深度。反演得到的矩震级为 M_w 6.626, 与 USGS 机构公布的数据一致。2022 年门源地震滑动分布近地表, 部分段落观察不到明显的破裂, 这可能与地表破裂带不连续的现象有关(韩帅等, 2022)。2016 年和 2022 年门源地震地表形变场、模拟值及残差分布见图 5 和

图 6。模拟值整体与观测值趋势较为一致。2016 年地震反演在断层近场及远场产生的残差可能与建立的模型存在一定的简化有关, 除此以外 InSAR 结果中残余的大气误差可能会影响到数据的精度(刘洋等, 2019)。但整体残差较小, 地震活动反演拟合度达 0.97。2022 年地震活动由于近场大梯度形变可能导致信号低相干甚至失相干, 残差主要出现在震中附近, 但残差整体上要小于模拟结果, 观测值与模拟值的拟合度为 0.98。这说明模型具有较高的可靠性。总的来说, 2 次地震的反演拟合结果反映出 InSAR 数据对断层浅部提供了良好的约束, 同时也凸显了门源地区地质构造的复杂性。



a—三维滑动分布模型; b—二维滑动分布模型

图 4 2022 年 M_w 6.6 门源地震断层滑动分布图

Fig. 4 Slip distribution models of the 2022 M_w 6.6 earthquake

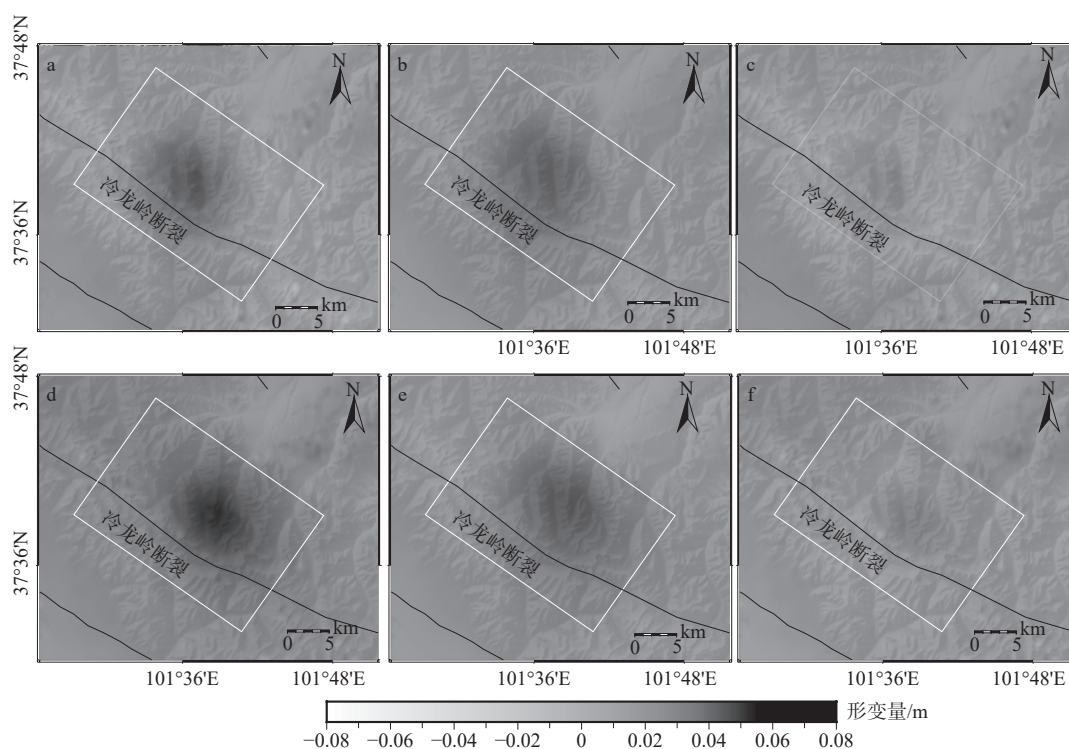
(a) 3D slip distribution; (b) 2D slip distribution

4 地震序列活动特征及危险性分析

4.1 地震序列活动特征

门源地震之间的相互作用及其内在联系引起了科学界的广泛关注, 这对于深入洞悉该地区的构造运动和地震活动模式具有重要的科学意义。2022 年门源 M_w 6.9 地震发生在冷龙岭主断层上, 而 1986 年和 2016 年 M_w 5.9 门源地震发生在冷龙岭断层带北侧的次级断层中, 不同断层之间可能相互作

用和影响。3 次地震震中位置各异, 地表破裂方式和深部滑动分布也各具特征。2016 年门源地震位于冷龙岭断层北侧的盲断层上, InSAR 同震形变场显示, 沉降运动并不明显, 仅存在一个椭圆隆升中心, 表明逆冲主导运动。相比之下, 2022 年升、降轨上、下盘呈现相反的运动趋势, 主要表现为水平方向的变形, 地表破裂分段性明显。反演得到的最优滑动模型显示, 2016 年地震活动性较弱, 最大滑动量为 0.23 m, 发生在平缓、南西倾向的断层面上, 在深部 8~12 km 释放能量, 矩震级 M_w 为 5.96; 而



矩形表示断层面的表面投影

a—升轨数据观测值; b—升轨数据模拟值; c—升轨数据残差; d—降轨数据观测值; e—降轨数据模拟值; f—降轨数据残差

图5 2016年门源地震反演拟合情况

Fig. 5 Inversion and fitting status of the 2016 Menyuan earthquake

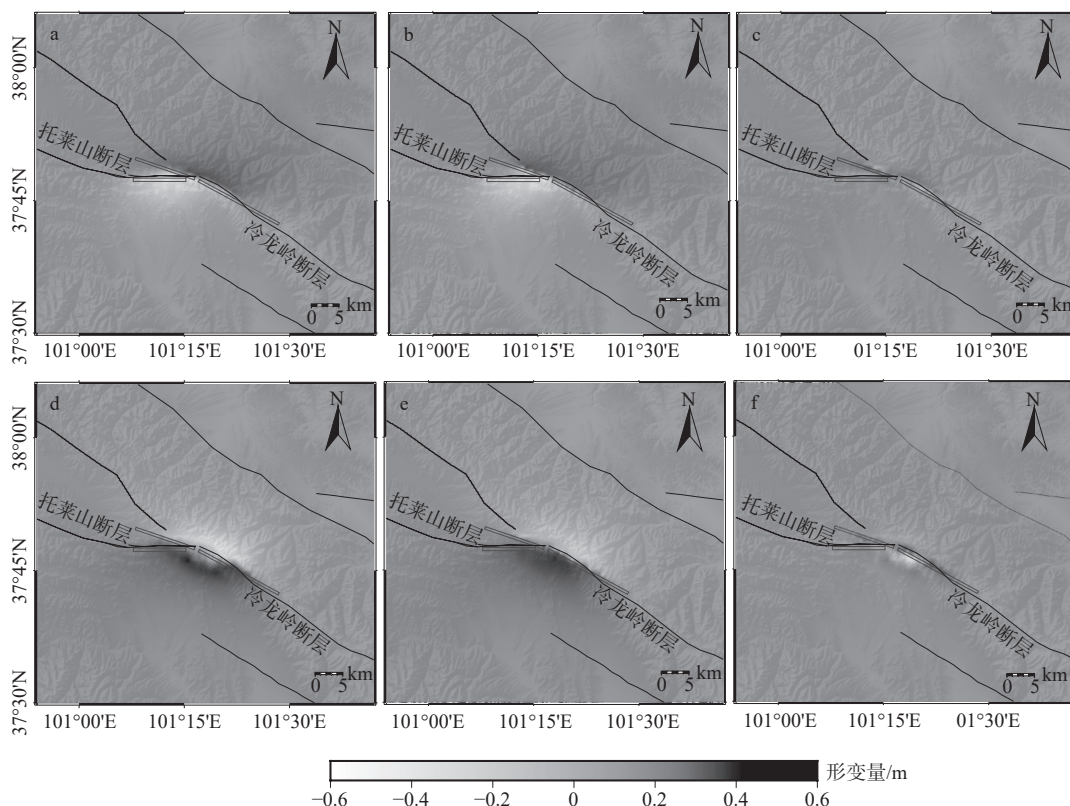
(a) InSAR observation from ascent; (b) InSAR simulation from ascent; (c) InSAR residual from ascent; (d) InSAR observation, simulation and residual from descent; (e) InSAR simulation from descent; (f) InSAR residual from descent

The rectangle represents the surface projection of the fault plane.

2022年地震活动强烈,存在3个明显的滑动区域,主要破裂发生在陡峭、近乎直立的冷龙岭主断层面上,矩震级 M_w 为6.626;位错区间集中在浅部1~7 km,在深度3.5 km处达到最大位错量3.22 m;冷龙岭断层西延段也发生了明显的滑动,最大滑动量达到2.59 m;托莱山段最大滑动量为2.1 m,规模相对较小。以往的研究结果显示,1986年地震震源深度约为7 km,对应于民乐—大马营断层东端(He et al., 2020; Zhang et al., 2020),是一次逆冲型地震。这些数据揭示出门源地震活动的复杂性和多样性。3次门源地震位置相对集中,显示出走滑断层与逆冲断层的空间关联性,与震源深度和震源机制的宏观差异性相呼应。震中位置的变化可能暗示冷龙岭断层在长时间向北东向扩展以及挤压缩短的活动趋势中适应新的构造和应力调整情况。

自第四纪晚期以来,祁连山地区的地壳斜向汇聚被分解为沿祁连山山前褶皱—逆冲带和沿祁连—海原断层带高角度左旋走滑运动(Gaudemer et al.,

1995; Daout et al., 2016; Allen et al., 2017)。1927年发生的 M_w 7古浪地震的滑动分割揭示了逆冲和走滑双重破裂特征(Guo et al., 2019)。近期门源地区的地震活动突显了冷龙岭主断层及其相邻逆冲断层之间的紧密互动,这进一步证实了祁连山地区斜向汇聚的运动模式。冷龙岭断层西段较复杂,走滑兼具轻微的逆冲运动,向东逐渐转变为走滑运动(袁道阳等, 2023)。2022年地震活动发生在冷龙岭断层西段,2016年与1986年地震活动发生在冷龙岭断层中东段北侧的次级断层,具体的破裂方式与运动学特征可能与冷龙岭断层的分段特性相关联,故三维结构上将冷龙岭断层进行了分段。综合发震区域内活动断层相关研究,位于几千米深处的浅层断层似乎与位于山脉下方更深、更陡峭的断层相交(赵凌强等, 2022),据此建立冷龙岭区域的三维发震构造模型(图7)。综上所述,陡倾的冷龙岭断层与缓倾逆冲断层相互作用可能会产生复杂的应力状态,从而影响地震活动模式。



矩形表示断层面的表面投影

a—升轨数据观测值; b—升轨数据模拟值; c—升轨数据残差; d—降轨数据观测值; e—降轨数据模拟值; f—降轨数据残差

图 6 2022 年门源地震反演拟合情况

Fig. 6 Inversion and fitting status of the 2022 Menyuan earthquake

(a) InSAR observation from ascent; (b) InSAR simulation from ascent; (c) InSAR residual from ascent; (d) InSAR observation, simulation and residual from descent; (e) InSAR simulation from descent; (f) InSAR residual from descent

The rectangle represents the surface projection of the fault plane.

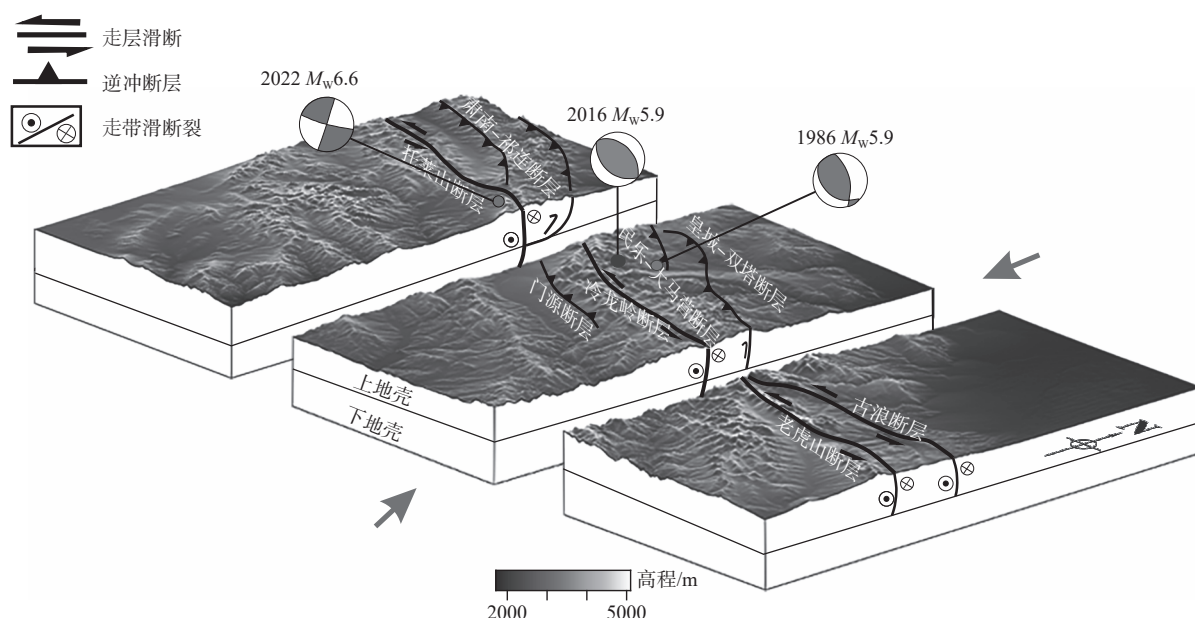
4.2 危险性分析

门源地震所处的青藏高原东北缘是中国大陆地震活动最为强烈的地区之一, 该区域历史上经历了众多重大破坏性地震, 例如 1920 年海原 8.5 级地震、1927 年古浪 8.0 级地震、1932 年昌马 7.6 级地震、1954 年民勤 7.0 级地震和 1954 年山丹 7.0 级地震。近代中强震也频发, 如 1986 年和 2016 年 M_w 5.9 门源地震。通过对青藏高原北部历史强震的研究发现, 过去的地震事件对 2022 年门源地震的发生有着显著的影响(朱琳等, 2022; 汤大委等, 2023), 特别是 1920 年海原地震、1927 年古浪地震和 1954 年山丹地震对 2022 年门源地震加载作用最为显著, 促使门源地震的提前发生。此外, 1986 年门源地震卸载作用最为明显, 使其延迟约 14.4 a(汤大委等, 2023)。综上所述, 历史强震通过改变地壳的应力状态, 为 2022 年 M_w 6.6 门源地震的孕育提供了一定的触发条件。2022 年门源地震是该地区又一次重

要的地震活动事件, 文中基于获得的最优断层滑动模型, 使用 PSGRN/PSCMP 程序计算 2022 年门源地震同震位错引发的静态库仑应力变化。

研究区域为东经 100.5°—102°E、北纬 37°—38°N。计算库仑应力变化涉及许多变量输入, 地下分层结构参数根据 crust 1.0 模型来设置, 并采用 Burgers 体模拟中下地壳和上地幔的流变性质, 建立更为接近实际情况的弹性—黏弹性分层半空间模型; 将该模型输入到 PSGRN 的 input 文件中, 计算给定层状黏弹性模型在 10 km 深度处的 Green 函数, 为 PSCMP 提供数据基础(Wang et al., 2006); 鉴于祁连—海原断层带有效摩擦系数较低(He et al., 2013), 使用 2 个不同的有效摩擦系数(0.1、0.4), 对应于 10 km 深度处同震位错引发的静态库仑应力进行计算, 以了解 2022 年门源地震对周边及主要活动断层的影响, 并推测可能引发的灾害危险。

总体来看, 2022 年门源地震位错产生了较大的



箭头表示区域最大主压应力方向; 沙滩球分别代表 2022 年 M_w 6.6 地震、2016 年 M_w 5.9 地震和 1986 年 M_w 5.9 地震

图 7 冷龙岭断层发震三维构造模型

Fig. 7 Three-dimensional structural model of the Lenglongling fault for seismic activity

The arrow indicates the direction of the maximum principal stress in the region, whereas the three beach balls represent the 2022 M_w 6.6, 2016 M_w 5.9 and 1986 M_w 5.9 earthquakes.

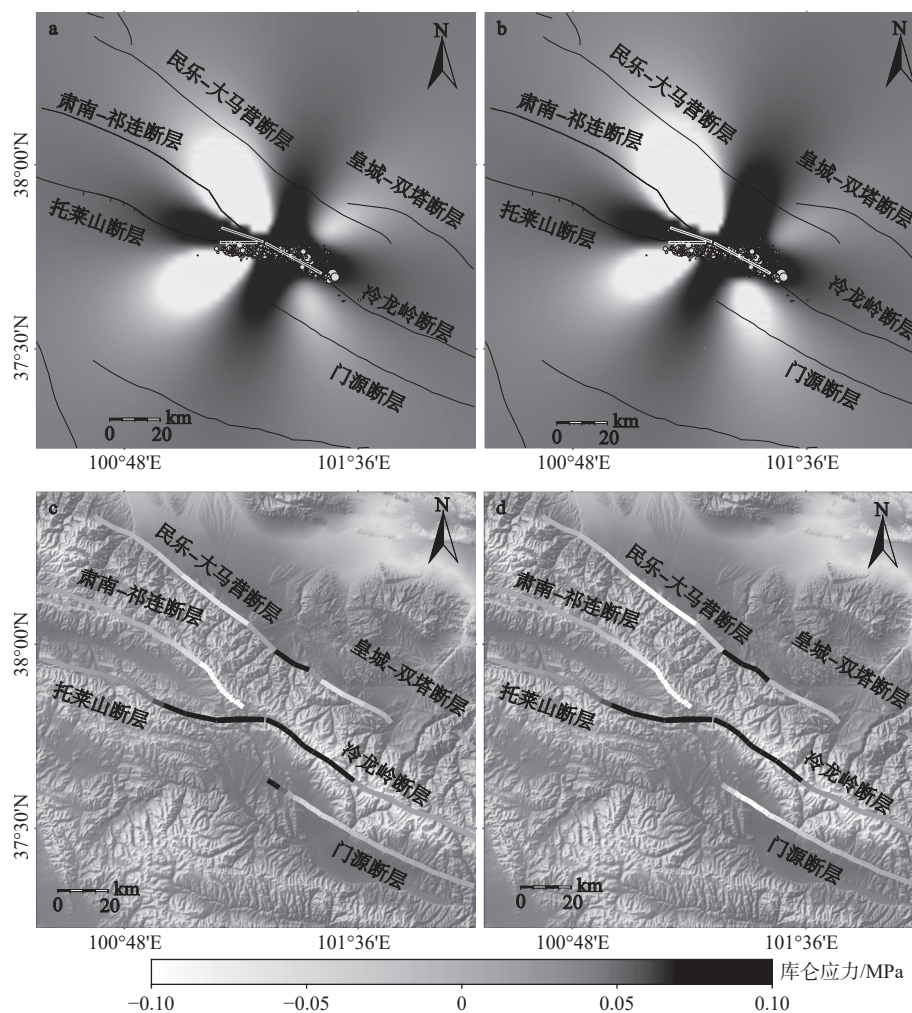
影响范围, 随着有效摩擦系数改变, 正负影区颜色深浅存在些许差异, 但总体趋势一致, 得到的结论不会改变(图 8)。在 2022 年门源地震中观察到在 10 km 深度的破裂带区域出现了库仑应力变化的显著增加。这种现象可以从多个角度解释: 首先由于地震波的传播和地下介质的不均匀性, 主震能量释放并不均匀, 导致不同深度的岩石受力状态发生变化; 其次余震序列主要集中在 7~12 km 的深度范围 (Fan et al., 2022), 表明这个深度区间内可能存在较高的应力集中。冷龙岭断层向西延伸段的库仑应力加载区并没有余震分布, 后期的危险性依旧很高; 区域内的肃南-祁连断层东段、门源断层以及民乐-大马营断层东段大部分位于应力阴影区, 皇城-双塔断层受影响不大; 民乐-大马营断层东段尾端部分、托莱山断层和冷龙岭断层的库仑应力改变超过阈值 0.01 MPa, 产生了较大的应力加载。GPS 速度矢量变化暗示该区正经历着北东向挤压和地壳缩短, 区域应力积累水平较高 (赵凌强等, 2022), 短时间尺度内, 门源地震会频繁发生, 推测祁连山内部断层受到应力扰动时容易失稳滑动。位于应力加载区的断层段未来地震危险性需持续关注并加强研究, 以便更好地应对可能的地震风险。

5 结论

(1) 2016 年 M_w 5.9 和 2022 年 M_w 6.9 门源地震破裂方式。2016 年地震的 InSAR 同震形变场显示, 隆升现象明显, 逆冲主导运动, 发震于冷龙岭断层北侧盲断层上。相比之下, 2022 年门源地震 InSAR 升降轨上、下盘呈现相反的运动趋势, 表现为水平方向的变形, 此次地震破裂复杂, 涉及多条断层, 自西向东观察到了破裂走向发生变化。

(2) 2016 年 M_w 5.9 和 2022 年 M_w 6.9 门源地震深部滑动分布特征。2016 年地震在深部 8~12 km 释放能量, 最大滑动量 0.23 m, 发生在平缓、南西倾向的断层面上, 地震活动未扩展至地表, 主要表现为低倾角的逆冲运动; 而 2022 年地震滑动集中在浅部 1~7 km, 主破裂发生在陡峭、近乎直立的冷龙岭段上, 最大滑动量为 3.22 m, 冷龙岭断层西延段也发生了明显的滑动, 最大滑动量达到 2.59 m, 托莱山段最大滑动量为 2.1 m, 规模相对较小, 表现出高倾左旋走滑型地震特征。

(3) 2022 年 M_w 6.9 门源地震同震库仑应力变化结果显示, 该地震对震中及附近区域施加了显著的库仑应力加载, 注意到冷龙岭断层向西延伸区域的



圆点是 Fan et al. (2022) 在 2022 年地震中重新定位的余震; 黑色线段为断层; 矩形为发震断层面的表面投影

a—摩擦系数为 0.1 的区域静态库仑应力变化; b—摩擦系数为 0.4 的区域静态库仑应力变化; c—摩擦系数为 0.1 的周围断层库仑应力扰动情况; d—摩擦系数为 0.4 的周围断层库仑应力扰动情况

图 8 2022 年 M_w 6.6 门源地震在不同摩擦系数下引起的静态库仑应力变化

Fig. 8 The Coulomb stress changes caused by the 2022 M_w 6.6 Menyuan earthquake under different friction coefficients

(a) Regional static Coulomb stress changes under friction coefficient of 0.1; (b) Regional static Coulomb stress changes under friction coefficient of 0.4; (c) Disturbance of Coulomb stress from surrounding faults under friction coefficient of 0.1; (d) Disturbance of Coulomb stress from surrounding faults under friction coefficient of 0.4

Dots in pink are the relocated aftershocks of the 2022 earthquake from Fan et al. (2022). The black line represents the fault, whereas the rectangle represents the surface projection of the fault plane.

库仑应力加载区并没有余震分布, 后期的危险性依旧很高。通过分析周边断层的同震库仑应力扰动情况发现, 民乐-大马营断层东段尾端部分、托莱山断层和冷龙岭断层的库仑应力改变超过阈值 0.01 MPa, 产生了较大的应力加载, 表明断层应力持续积累和孕震能力的持续增强。

References

ALLEN M B, WALTERS R J, SONG S G, et al., 2017. Partitioning of ob-

lique convergence coupled to the fault locking behavior of fold-and-thrust belts: evidence from the Qilian Shan, northeastern Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 36(9): 1679-1698.

CHEN X H, SHAO Z G, XIONG X S, et al., 2019. Fault system, deep structure and tectonic evolution of the Qilian Orogenic Belt, Northwest China[J]. *Geology in China*, 46(5): 995-1020. (in Chinese with English abstract)

DAOUST S, JOLIVET R, LASSERRE C, et al., 2016. Along-strike variations of the partitioning of convergence across the Haiyuan fault system detected by InSAR[J]. *Geo-physical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 205(1): 536-547.

FAN L P, LI B R, LIAO S R, et al., 2022. High-precision relocation of the af-

- tershock sequence of the January 8, 2022, M_s 6.9 Menyuan earthquake[J]. *Earthquake Science*, 35(2): 138-145.
- GAUDEMER Y, TAPPONNIER P, MEYER B, et al., 1995. Partitioning of crustal slip between linked, active faults in the eastern Qilian Shan, and evidence for a major seismic gap, the 'Tianzhu gap', on the western Haiyuan Fault, Gansu (China)[J]. *Geophysical Journal International*, 120(3): 599-645.
- GUO P, HAN Z J, AN Y F, et al., 2017. Activity of the Lenglongling fault system and seismotectonics of the 2016 M_s 6.4 Menyuan earthquake[J]. *Science China Earth Sciences*, 60(5): 929-942.
- GUO P, HAN Z J, MAO Z B, et al., 2019. Paleoearthquakes and rupture behavior of the Lenglongling fault: implications for seismic hazards of the northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(2): 1520-1543.
- HAN S, WU Z H, GAO Y, et al., 2022. Surface rupture investigation of the 2022 Menyuan M_s 6.9 Earthquake, Qinghai, China: implications for the fault behavior of the Lenglongling fault and regional intense earthquake risk[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(2): 155-168. (in Chinese with English abstract)
- HE J K, LU S J, WANG W M, 2013. Three-dimensional mechanical modeling of the GPS velocity field around the northeastern Tibetan plateau and surrounding regions[J]. *Tectonophysics*, 584: 257-266.
- HE W G, YUAN D Y, GE W P, et al., 2010. Determination of the slip rate of the Lenglongling fault in the middle and eastern segments of the Qilian mountain active fault zone[J]. *Earthquake*, 30(1): 131-137. (in Chinese with English abstract)
- HE X H, ZHANG Y P, SHEN X Z, et al., 2020. Examination of the repeatability of two M_s 6.4 Menyuan earthquakes in Qilian-Haiyuan fault zone (NE Tibetan Plateau) based on source parameters[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 299: 106408.
- HU C Z, YANG P X, LI Z M, et al., 2016. Seismogenic mechanism of the 21 January 2016 Menyuan, Qinghai M_s 6.4 earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(5): 1637-1646. (in Chinese with English abstract)
- JI L Y, LIU C J, XU J, et al., 2017. InSAR observation and inversion of the seismogenic fault for the 2017 Jiuzhaigou M_s 7.0 earthquake in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(10): 4069-4082. (in Chinese with English abstract)
- LI Y S, JIANG W L, ZHANG J F, et al., 2016. Space geodetic observations and modeling of 2016 M_w 5.9 Menyuan earthquake: implications on seismogenic tectonic motion[J]. *Remote Sensing*, 8(6): 519.
- LI Y S, JIANG W L, LI Y J, et al., 2022. Coseismic rupture model and tectonic implications of the January 7 2022, Menyuan M_w 6.6 earthquake constraints from InSAR observations and field investigation[J]. *Remote Sensing*, 14(9): 2111.
- LIANG K, HE Z T, JIANG W L, et al., 2022. Surface rupture characteristics of the Menyuan M_s 6.9 earthquake on January 8, 2022, Qinghai Province[J]. *Seismology and Geology*, 44(1): 256-278. (in Chinese with English abstract)
- LIU B Y, ZENG W H, YUAN D Y, et al., 2015. The research on fault parameter and sliding behavior of the 1927 Gulang $M_8.0$ earthquake[J]. *Seismology and Geology*, 37(3): 818-828. (in Chinese with English abstract)
- LIU M, LI H Y, PENG Z G, et al., 2019. Spatial-temporal distribution of early aftershocks following the 2016 M_s 6.4 Menyuan, Qinghai, China Earthquake[J]. *Tectonophysics*, 766: 469-479.
- LIU Y H, ZHANG G H, ZHANG Y F, et al., 2018. Source parameters of the 2016 Menyuan earthquake in the northeastern Tibetan Plateau determined from regional seismic waveforms and InSAR measurements[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 158: 103-111.
- LIU Y, XU C J, WEN Y M. 2019. InSAR observation of Menyuan M_w 5.9 earthquake deformation and deep geometry of regional fault zone [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*. 44(7): 1035-1042. (in Chinese with English abstract)
- LI Z H, HAN B Q, LIU Z J, et al., 2022. Source parameters and slip distributions of the 2016 and 2022 Menyuan, Qinghai earthquakes constrained by InSAR observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 47(6): 887-897. (in Chinese with English abstract)
- LUO H, WANG T, 2022. Strain partitioning on the western Haiyuan fault system revealed by the adjacent 2016 M_w 5.9 and 2022 M_w 6.7 Menyuan earthquakes[J]. *Geophysical Research Letters*, 49(16): e2022GL099348.
- MA B Q, LI D W, 2008. Stages of the neotectonic movement of the Menyuan Basin in the middle segment of the Qilian mountains[J]. *Journal of Geomechanics*, 14(3): 201-211. (in Chinese with English abstract)
- PAN J W, LI H B, CHEVALIER M L, et al., 2022. Coseismic surface rupture and seismogenic structure of the 2022 M_s 6.9 Menyuan earthquake, Qinghai Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(1): 215-231. (in Chinese with English abstract)
- TANG D W, GE W P, YUAN D Y, et al., 2023. Triggering effect of historical earthquakes in the northern Tibetan Plateau on the Coulomb stress of the 2022 Menyuan M_s 6.9 earthquake and subsequent earthquakes[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 66(7): 2772-2795. (in Chinese with English abstract)
- WANG J Y, DING L, HE J K, et al., 2023. Research of seismogenic structures of the 2016 and 2022 Menyuan earthquakes, in the Northeastern Tibetan Plateau[J]. *Remote Sensing*, 15(3): 742.
- WANG K, DREGER D S, TINTI E, et al., 2020. Rupture process of the 2019 Ridgecrest, California M_w 6.4 foreshock and M_w 7.1 earthquake constrained by seismic and geodetic data[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110(4): 1603-1626.
- WANG M, SHEN Z K, 2020. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2): e2019JB018774.
- WANG R J, LORENZO-MARTÍN F, ROTH F, 2006. PSGRN/PSCMP: a new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory[J]. *Computers & Geosciences*, 32(4): 527-541.
- WANG R J, DIAO F Q, HOECHNER A, 2013. SDM-A geodetic inversion code incorporating with layered crust structure and curved fault geometry[C]//EGU general assembly conference abstracts. Vienna, Austria: EUG.
- WANG X, LI S P, KANG J, 2023. InSAR observations constrained coseismic slip distribution and Coulomb stress variation of M_w 6.7 Menyuan earthquake in 2022[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*(7): 32-38. (in Chinese with English abstract)
- WU C, CHEN X H, DING L, 2023. Tectonic evolution and Cenozoic deformation history of the Qilian orogen[J]. *Earth Science Frontiers*, 30(3): 262-281. (in Chinese with English abstract)
- XIONG J G, LI Y L, ZHONG Y Z, et al., 2017. Latest Pleistocene to Holocene thrusting recorded by a flight of strath terraces in the eastern Qilian Shan, NE Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 36(12): 2973-2986.
- XIONG W, CHEN W, ZHAO B, et al., 2019. Insight into the 2016 Menyuan

- M_w 5.9 earthquake with InSAR: a blind reverse event promoted by historical earthquakes[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 176(2): 577-591.
- XU G Y, XU X W, YI Y N, et al., 2022. Seismogenic structure of the 2022 Menyuan M_w 6.6 earthquake, Qinghai Province, constrained by InSAR and Gaofen-7 observation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(12): 4704-4724. (in Chinese with English abstract)
- YANG H F, WANG D, GUO R M, et al., 2022. Rapid report of the 8 January 2022 M_s 6.9 Menyuan earthquake, Qinghai, China[J]. *Earthquake Research Advances*, 2(1): 100113.
- YU P F, CHEN W, QIAO X J, et al., 2022. Slip model of the 2022 Menyuan M_s 6.9 earthquake constrained by multi-source SAR data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 47(6): 898-906. (in Chinese with English abstract)
- YUAN D Y, XIE H, SU R H, et al., 2023. Characteristics of co-seismic surface rupture zone of Menyuan M_s 6.9 earthquake in Qinghai Province on January 8, 2022 and seismogenic mechanism[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 66(1): 229-244. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y F, SHAN X J, ZHANG G H, et al., 2020. The 2016 M_w 5.9 Menyuan earthquake in the Qilian orogen, China: a potentially delayed depth-segmented rupture following from the 1986 M_w 6.0 Menyuan earthquake[J]. *Seismological Research Letters*, 91(2A): 758-769.
- ZHANG Y F, CHEN J, GONG W Y, et al., 2023. Geodetic modelling of the 2022 M_w 6.6 Menyuan earthquake: insight into the strain-partitioned northern Qilian Shan fault system and implications for regional tectonics and seismic hazards[J]. *Geophysical Journal International*, 233(3): 1987-2003.
- ZHAO D Z, QU C Y, ZHANG G F, et al., 2023. Applications and advances for the coseismic deformation observations, earthquake emergency response and seismogenic structure investigation using InSAR[J]. *Seismology and Geology*, 45(2): 570-592. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO L Q, SUN X Y, ZHAN Y, et al., 2022. The seismogenic model of the Menyuan M_s 6.9 earthquake on January 8, 2022, Qinghai Province and segmented extensional characteristics of the Lenglongling fault[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(4): 1536-1546. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG B W, GONG W Y, WEN S Y, et al., 2018. Study on the seismogenic fault characteristics of 2016 Mw5.9 Menyuan earthquake based on Sentinel-1A data[J]. *Seismol. Geol.* 40: 872-82. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG W J, ZHANG P Z, YUAN D Y, et al., 2019. Basic characteristics of active tectonics and associated geodynamic processes in continental China[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(5): 699-721. (in Chinese with English abstract)
- ZHU L, DAI Y, SHI F Q, et al., 2022. Coulomb stress evolution and seismic hazards along the Qilian-Haiyuan fault zone[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 44(2): 223-336. (in Chinese with English abstract)
- ZUZA A V, WU C, REITH R C, et al., 2018. Tectonic evolution of the Qilian Shan: an early Paleozoic orogen reactivated in the Cenozoic[J]. *GSA Bulletin*, 130(5-6): 881-925.
- 结构与构造演化[J]. *中国地质*, 46(5): 995-1020.
- 韩帅, 吴中海, 高扬, 等, 2022. 2022年1月8日青海门源 M_s 6.9地震地表破裂考察的初步结果及对冷龙岭断裂活动行为和区域强震危险性的启示[J]. *地质力学学报*, 28(2): 155-168.
- 何文贵, 袁道阳, 葛伟鹏, 等, 2010. 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[J]. *地震*, 30(1): 131-137.
- 胡朝忠, 杨攀新, 李智敏, 等, 2016. 2016年1月21日青海门源6.4级地震的发震机制探讨[J]. *地球物理学报*, 59(5): 1637-1646.
- 季灵运, 刘传金, 徐晶, 等, 2017. 九寨沟 M_s 7.0地震的InSAR观测及发震构造分析[J]. *地球物理学报*, 60(10): 4069-4082.
- 梁宽, 何仲太, 姜文亮, 等, 2022. 2022年1月8日青海门源 M_s 6.9地震的同震地表破裂特征[J]. *地震地质*, 44(1): 256-278.
- 刘洋, 许才军, 温扬茂, 等, 2019. 门源 M_w 5.9级地震形变InSAR观测及区域断裂带深部几何形态[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 44(07): 1035-1042.
- 李振洪, 韩炳权, 刘振江, 等, 2022. 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[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 47(6): 887-897.
- 刘白云, 曾文浩, 袁道阳, 等, 2015. 1927年古浪8级大地震断层面参数和滑动性质[J]. *地震地质*, 37(3): 818-828.
- 马保起, 李德文, 2008. 祁连山中段门源盆地新构造运动的阶段划分[J]. *地质力学学报*, 14(3): 201-211.
- 潘家伟, 李海兵, CHEVALIER M L, 等, 2022. 2022年青海门源 M_s 6.9地震地表破裂带及发震构造研究[J]. *地质学报*, 96(1): 215-231.
- 汤大委, 葛伟鹏, 袁道阳, 等, 2023. 青藏高原北部历史强震对2022年门源 M_s 6.9地震及后续地震库仑应力触发作用[J]. *地球物理学报*, 66(7): 2772-2795.
- 王欣, 李水平, 康晶, 2023. InSAR观测约束2022年门源 M_w 6.7级地震同震滑动分布和库伦应力变化[J]. *测绘通报* (7): 32-38.
- 吴晨, 陈宣华, 丁林, 2023. 祁连造山带构造演化与新生代变形历史[J]. *地学前缘*, 30(3): 262-281.
- 许光煜, 徐锡伟, 易亚宁, 等, 2022. 2022年青海门源 M_w 6.6地震发震构造: 来自InSAR和高分影像约束[J]. *地球物理学报*, 65(12): 4704-4724.
- 余鹏飞, 陈威, 乔学军, 等, 2022. 基于多源SAR数据的2022年门源 M_s 6.9地震同震破裂模型反演研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 47(6): 898-906.
- 袁道阳, 谢虹, 苏瑞欢, 等, 2023. 2022年1月8日青海门源 M_s 6.9地震地表破裂带特征与发震机制[J]. *地球物理学报*, 66(1): 229-244.
- 赵德政, 屈春燕, 张桂芳, 等, 2023. 基于InSAR技术的同震形变获取、地震应急监测和发震构造研究应用进展[J]. *地震地质*, 45(2): 570-592.
- 赵凌强, 孙翔宇, 詹艳, 等, 2022. 2022年1月8日青海门源 M_s 6.9地震孕震环境和冷龙岭断裂分段延展特征[J]. *地球物理学报*, 65(4): 1536-1546.
- 郑文俊, 张培震, 袁道阳, 等, 2019. 中国大陆活动构造基本特征及其对区域动力过程的控制[J]. *地质力学学报*, 25(5): 699-721.
- 郑博文, 龚文瑜, 温少妍, 等, 2018. 基于Sentinel-1A的2016年青海门源 M_w 5.9地震发震构造特征[J]. *地震地质*, 40(04): 872-882.
- 朱琳, 戴勇, 石富强, 等, 2022. 祁连-海原断裂带库仑应力演化及地震危险性[J]. *地震学报*, 44(2): 223-236.

附中文参考文献

陈宣华, 邵兆刚, 熊小松, 等, 2019. 祁连造山带断裂构造体系、深部