

岳冲,孙玺皓,牛安福,等,2022. 2021 年青海玛多  $M_s7.4$  地震同震应力场与形变台站同震阶变分布关系探讨. 中国地震, 38(2):189~198.

# 2021 年青海玛多 $M_s7.4$ 地震同震应力场 与形变台站同震阶变分布关系探讨

岳冲<sup>1,2)</sup> 孙玺皓<sup>3)</sup> 牛安福<sup>1)</sup> 吉平<sup>1)</sup> 李晓帆<sup>1)</sup> 赵静<sup>1)</sup>

1) 中国地震台网中心,北京 100045

2) 中国地震局地质研究所,地震动力学国家重点实验室,北京 100029

3) 青海省地震局,西宁 810000

**摘要** 利用基于升、降轨 InSAR 形变场及余震精定位结果反演得到的同震滑动模型,通过 PSGRN/PSCMP 程序获得同震水平形变场及应力场分布特征,结合玛多  $M_s7.4$  地震周边形变同震阶变台站分布特征,探讨同震应力场变化与同震阶变台站分布间的关系。模拟得到的水平形变场结果显示,此次玛多地震为左旋走滑运动特征,水平形变量主要集中在巴颜喀拉块体内,其次是北部的柴达木块体;羌塘块体以及祁连块体同震水平位移量较小;昆仑山口-江错断裂作为一条 NE 倾向的走滑型断裂,断层上盘区域滑动量明显大于下盘,模拟得到的最大水平形变量达 1380mm;形变同震阶变的台站主要集中分布在祁连山断裂带中东段以及西秦岭等地区,祁连山断裂带中东段位于此次玛多地震同震正应力变化正值区域,而西秦岭等地区则处于玛多地震同震剪切应力变化的正值区域,即出现同震阶变的台站与同震应力场变化的正值区域具有较好的一致性。

**关键词:** 玛多  $M_s7.4$  地震 同震阶变 正应力 剪切应力

[文章编号] 1001-4683(2022)02-0189-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

据中国地震台网正式测定,2021 年 5 月 22 日 2 时 4 分青海果洛州玛多县(34.59°N, 98.34°E)发生  $M_s7.4$  地震,震源深度 17km,震源机制解结果显示此次地震为一次走滑型为主的地震破裂事件(邓文泽等,2021)。全球地震矩张量解(GCMT)<sup>①</sup>给出的矩震级为  $M_w7.4$ ,节面 I 走向 13°、倾角 81°、滑动角 -173°,节面 II 走向 282°、倾角 83°、滑动角 -9°。对比已知的活动断层迹线和位置,并结合地质资料、实地野外考察以及 InSAR 地表破裂迹线,认为此次玛多  $M_s7.4$  地震的发震断层为昆仑山口-江错断裂。作为巴颜喀拉块体内部一条

[收稿日期] 2021-09-16 [修定日期] 2021-11-03

[项目类别] 中国地震局地震科技星火计划(XH20070Y、XH22040D)、中国地震台网中心青年基金(QNJJ-2021-21)共同资助

[作者简介] 岳冲,男,1989 年生,助理研究员,主要从事地壳形变监测及地球动力学研究工作。E-mail:yuechong@seis.ac.cn

① <https://www.globalcmt.org/>

与东昆仑断裂带主断裂近平行的次级断层,昆仑山口-江错断裂距离北部的东昆仑断裂带约70km,此次玛多地震地表破裂长度约210km(詹艳等,2021;华俊等,2021)。玛多 $M_s7.4$ 地震的发生更新了以往对巴颜喀拉块体主边界带发生7级以上强震的认识,玛多地震的发生对周边断层,尤其是巴颜喀拉主边界带的应力扰动引起的地震危险性,成为未来关注的方向。

玛多 $M_s7.4$ 地震震中附近的青藏高原东北缘、祁连山断裂带等地区布设了大量定点形变观测台站,地震发生后,中国地震局第一时间对现有观测资料数据进行梳理,发现周边大部分台站的倾斜类、应变类仪器均记录到显著的同震变化。但通过对比不同台站仪器的同震形态特征,发现不同台站之间存在较大差异,部分台站震后逐步恢复到震前的趋势水平,而在祁连山断裂带中东段、西秦岭等地区则集中出现同震阶跃的变形特征,即地震后无法恢复至震前水平而出现同震阶变。同震阶变是伴随地震出现的阶跃性突跳变化,可定义为地震期间地球应变场的一种准静态调整,当地震发生时,孕震体错动破裂释放能量,会在震源区周边产生应力-应变的传递,而仪器记录到的正是这种调整(Sacks et al, 1971)。前人曾对同震阶变在短临地震预报中的作用进行探索,认为同震阶变记录到地震引起的应力、应变的调整,而捕获微小前震的同震阶变则可成为用于进行短临预报的手段(杨军等,1984;杨军,1986);牛安福等(2005)对比8次地震震时不同形变台站的同震响应特征,分析同震响应幅度、同震信号持续时间与震中距以及震级之间的关系,探讨了短临形变前兆与未来地震的关系;王华柳等(2020)通过对比云南地区多组双震型地震形变同震阶变幅度与后续发生地震的关系,认为同震阶变的幅度可以为后续是否发生更大地震提供预测依据。上述的研究多从形变学科单一角度探讨同震阶变与地震之间的关系,但随着不同学科的融合发展,利用震后的远震体波、大地形变测量等手段可以在震后极短的时间反演得到地震同震滑动破裂模型,进而获得此次地震引起的应力、应变场变化特征,从而为对比分析同震阶变台站的分布提供参考。

本文针对玛多 $M_s7.4$ 地震,利用基于升、降轨 InSAR 形变场及余震精定位结果反演得到的同震滑动模型,计算玛多地震引起的震源区周边同震应力变化,探讨形变同震阶变台站分布与玛多地震同震应力间的关系,为后续震情研判工作提供参考依据。

## 1 形变台站概况

### 1.1 形变台站观测

祁连山断裂带、青藏高原东北缘等地区布设有大量形变台站(图1),这些台站的连续观测为开展玛多 $M_s7.4$ 地震的相关研究工作提供了重要支撑。台站形变观测仪器主要包括倾斜类(垂直摆倾斜仪、水平摆倾斜仪、水管倾斜仪、钻孔倾斜仪)和应变类仪器(洞体应变仪、钻孔应变仪),其采样率均为分钟值(中国地震局监测预报司,2003)。

玛多 $M_s7.4$ 地震发生后,我们统计了周边台站同震响应情况,受地震波的影响周边台站均出现了较为显著的同震变化,但进一步分析显示同震响应存在差异,例如表1所示的康定台垂直摆NS向同震变化与部分存在同震阶变的形变台结果(时间为2021年5月21—22日)。康定台垂直摆在地震波传至台站后出现较大摆幅变化,但垂直摆摆动稳定后观测数据并未出现阶跃变化,而其他台站在地震波传至台站后的第一时间记录到较大同震阶跃变化,即玛多

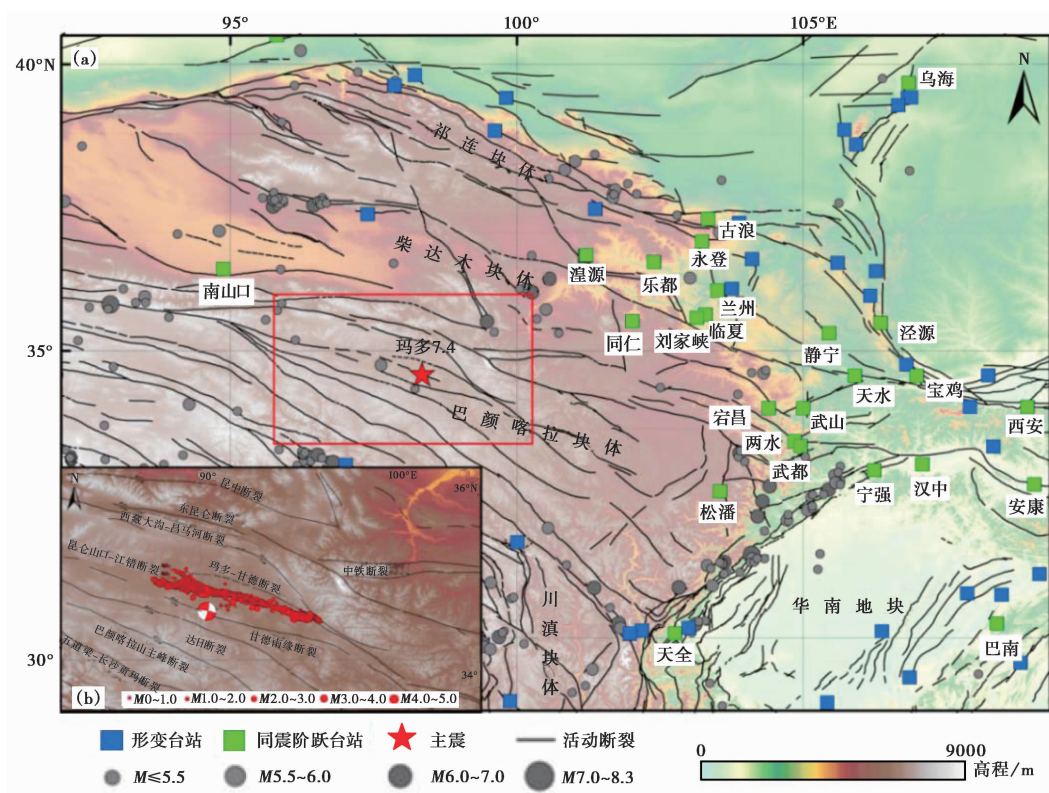


图1 历史地震及形变台站分布(a)及震源区地质构造示意图(b)

地震导致该台站区域附近应力、应变的同震阶变和震后应力、应变的调整。

### 1.2 形变台站分布

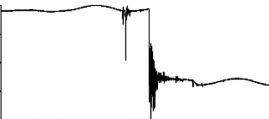
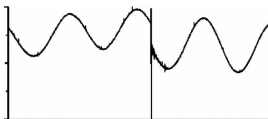
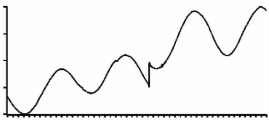
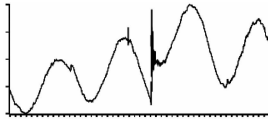
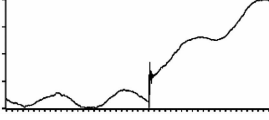
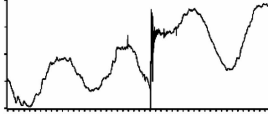




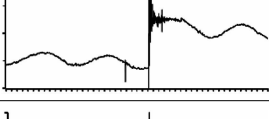
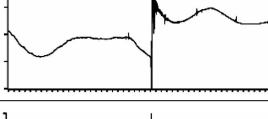
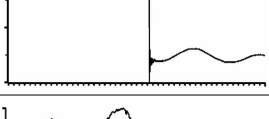
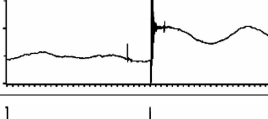


为研究记录到阶跃变化的形变台站的分布特征,对震源区周边形变台站的同震响应特征进行梳理。受周边地形的影响,台站主要分布在玛多  $M_s7.4$  地震东北部的祁连山断裂带以及西秦岭等地区,震中距多在 200km 以上,而震中西侧和南侧定点形变台站较少,震中南侧仅沿鲜水河断裂带布设有少量台站,西侧更是仅有南山口台站(震中距约 380km),台站分布的不均匀性为研究同震响应台站分布与此次地震同震应力分布间的关系增加了难度。从统计得到的同震阶变的台站分布结果(图1中绿色正方形所示)可以看到,存在同震阶变的台站主要集中在此次地震震中的东北部(祁连山断裂带中东段)以及东部区域(西秦岭等地区),西部仅有的南山口台站也出现了较为显著的同震阶变特征,震中北部以及南部出现同震阶变的台站数量较少,仅有龙门山南段天全台出现了同震阶变变化。

## 2 同震滑动模型及模型参数

### 2.1 同震滑动模型

采用中国地震局地质研究所利用升、降轨 InSAR 数据及余震精定位数据反演得到的同震滑动分布模型(图2),计算同震形变场以及同震应力分布。其中,发震断层倾向为 NE 向,断层面划分成  $5\text{km} \times 5\text{km}$  子断层,滑动模型结果显示玛多  $M_s7.4$  地震的同震滑动以左旋走滑

表 1 玛多  $M_s7.4$  地震部分形变台站同震变化

测项	经度 /(°E)	纬度 /(°N)	阶变形态略图	测项	经度 /(°E)	纬度 /(°N)	阶变形态略图
安康 垂直摆 NS	109.03	32.67		安西 钻孔 应变 NE	108.91	34.02	
巴南 钻孔 应变 EW	106.85	29.30		宝鸡 洞体 应变 NS	106.98	34.56	
宕昌 洞体 应变 NS	104.39	34.00		汉中 洞体 应变 EW	107.08	33.02	
湟源 钻孔 倾斜 EW	101.19	36.65		泾源 洞体 应变 NS	106.35	35.49	
乐都 洞体 应变 NE	102.39	36.55		两水 钻孔 应变 EW	104.85	33.42	
临夏 钻孔 倾斜 EW	103.29	35.63		南山口 钻孔 应变 EW	94.87	36.43	
天水 钻孔 应变 EW	105.9	34.56		武都 垂直摆 EW	104.95	33.34	
平利 洞体 应变 NS	109.4	32.38		康定 垂直摆 NS	101.97	30.06	

为主,断层走向为  $276^\circ$ ,倾角为  $80^\circ$ ,最大滑移量约为  $5.1\text{m}$ ,平均滑动角为  $4^\circ$ ,主体破裂区主要集中在  $0\sim 15\text{km}$  深度,此次地震完成了近  $210\text{km}$  的断层破裂,破裂带东段的同震滑动大于西段(华俊等,2021)。

### 2.2 模型参数

本文使用 Xin 等(2019)利用双差地震层析成像方法计算得到的中国大陆岩石圈高分辨率三维地震纵波速度( $v_p$ )和横波速度( $v_s$ )结构模型进行岩石圈分层,模型参数如图 3 所示,重点突出上、中、下地壳以及上地幔之间波速、地壳密度参数差异特征。利用 Wang 等(2006)给出的 PSGRN/PSCMP 程序计算同震形变场以及同震应力分布特征,该程序可以通

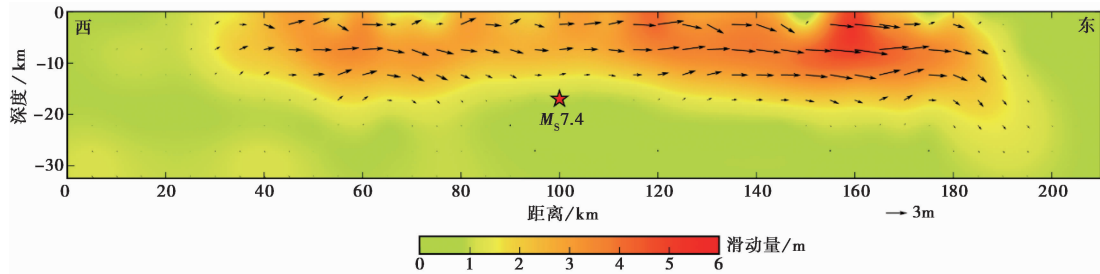


图2 玛多  $M_s7.4$  地震滑动分布模型

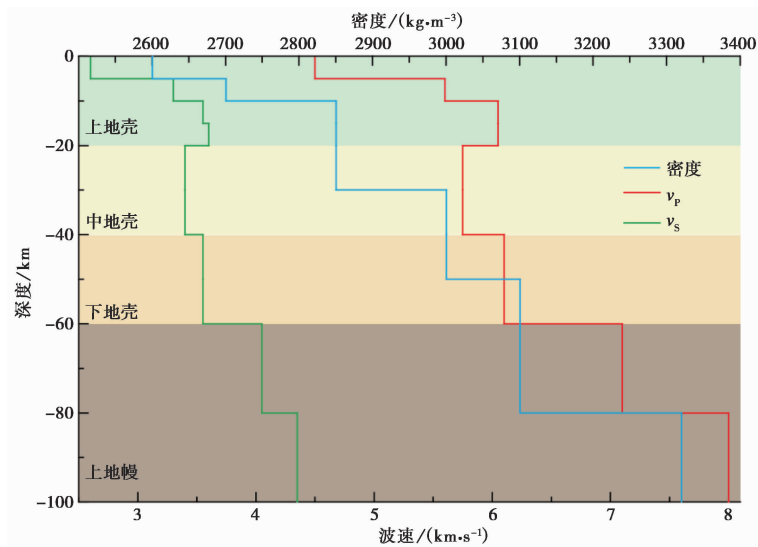


图3 岩石圈分层模型参数

过传播算法计算谱格林函数,并通过反混淆技术在快速傅立叶变换中获取空间域的格林函数,将地震的破裂面离散成许多离散的点位错,最终利用线性叠加的方法计算研究区同震以及黏弹性岩体震后变形(岳冲等,2021)。本文重点利用上述程序计算震源区周边区域的同震水平形变场以及同震正应力变化(以使断层解锁为正)和同震剪切应力变化(以沿断层滑动方向为正),并对同震应力变化结果与同震阶变台站分布进行对比分析。

### 3 同震形变及应力分布特征

#### 3.1 同震水平形变场

以滑动模型参数为接收断层参数(走向  $276^\circ$ 、倾角  $80^\circ$ 、滑动角  $4^\circ$ ),计算玛多  $M_s7.4$  地震引起的地表同震水平形变场,结果如图4所示。模拟得到的同震水平形变场呈现明显的左旋运动特征,以昆仑山口-江错断裂破裂段最东段为界线,断层上盘界线西侧呈现 NW 向运动特征,界线东侧则呈现 SW 向运动特征,而断层下盘界线西侧呈现 NE 向运动特征,界线东侧呈现 SE 向运动特征。对比模拟同震水平形变场和基于低频、高频 GNSS 观测的同震形变结果(李志才等,2021)可以看出,模拟结果与实测结果吻合度较高,其中同震位移较大的

QHAJ 台站,东方向形变量为 $-493\text{mm}$ ,北方向位移量为 $-317\text{mm}$ ,模拟得到的 QHAJ 台站附近位移量分别为东方向 $-555\text{mm}$ 、北方向 $-350\text{mm}$ ,略大于观测结果,但同震位移方向等与实测结果基本一致,与杨君妍等(2021)给出的同震水平位移结果相当,也进一步验证了利用 InSAR 等大地测量手段反演的断层滑动模型的可靠性(华俊等,2021)。与此同时,此次玛多地震的发震断层位于巴颜喀拉块体内部,因此同震造成的水平变形更多集中在巴颜喀拉块体内,位于断层上盘北部的柴达木块体、祁连块体以及南部的羌塘块体同震水平位移量均较小;昆仑山口-江错断裂作为一条 NE 倾向走滑型断裂,图 4(a) 也显示较大水平滑动量更多集中在断层上盘区域(红色箭头),利用断层滑动模型反演得到的最大水平形变量达  $1380\text{mm}$ 。

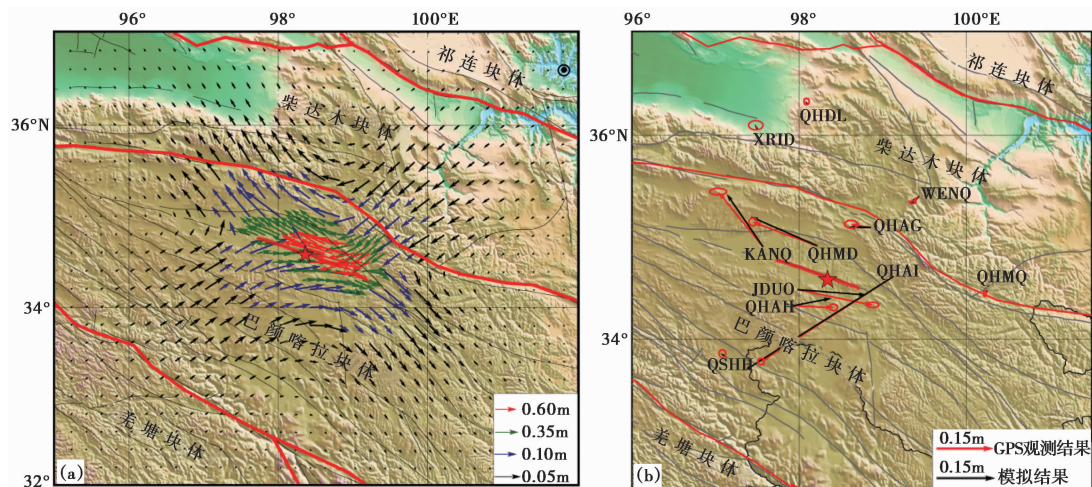


图 4 玛多  $M_s 7.4$  地震同震水平形变场 (a) 及模拟值与实测值对比 (b)

### 3.2 同震正应力、剪切应力分布

为进一步研究玛多  $M_s 7.4$  地震引起的地表应力集中传播方向,分别计算地表  $0\text{km}$  深度处震源区附近区域的同震正应力变化以及同震剪切应力变化,其中震源区接收断层参数为走向  $276^\circ$ 、倾角  $80^\circ$ 、滑动角  $4^\circ$ ,有效摩擦系数为  $0.4$ ,计算结果如图 5 所示。此次地震为一次走滑型地震,沿发震断层形成显著的剪切应力变化正值区,促进了发震断层地表处的进一步破裂,计算的剪切应力变化结果存在一定的不连续性,这或许是造成余震存在空区的原因。在发震断层东、西两端分别形成 2 个明显的剪切应力变化正值区,分别朝向发震断层的东、西两侧,西端剪切应力变化与发震断层的走向基本一致,朝向 NWW 向,而发震断层东侧的剪切应力变化则存在一定方向调整,王未来等(2021)给出的余震分布等结果显示,玛多  $M_s 7.4$  地震东端出现朝北部东昆仑断裂带方向扩展的现象,因此整个发震断层东端的剪切应力变化并非朝向 SEE 向,而是近 EW 向,这将直接对整个青藏高原东北缘地区近 EW 向断层产生同震剪切应力加载作用。

震源区周边正应力变化与剪切应力变化结果不同,除在发震断层形成不连续的应力变化正值段(断层解耦段)外,在发震断层东段上盘区域以及断层中西段下盘区域形成显著的正应力变化正值区,上述正值区对应同震水平形变场(图 4(a))中朝向发震断层运动的 2 个

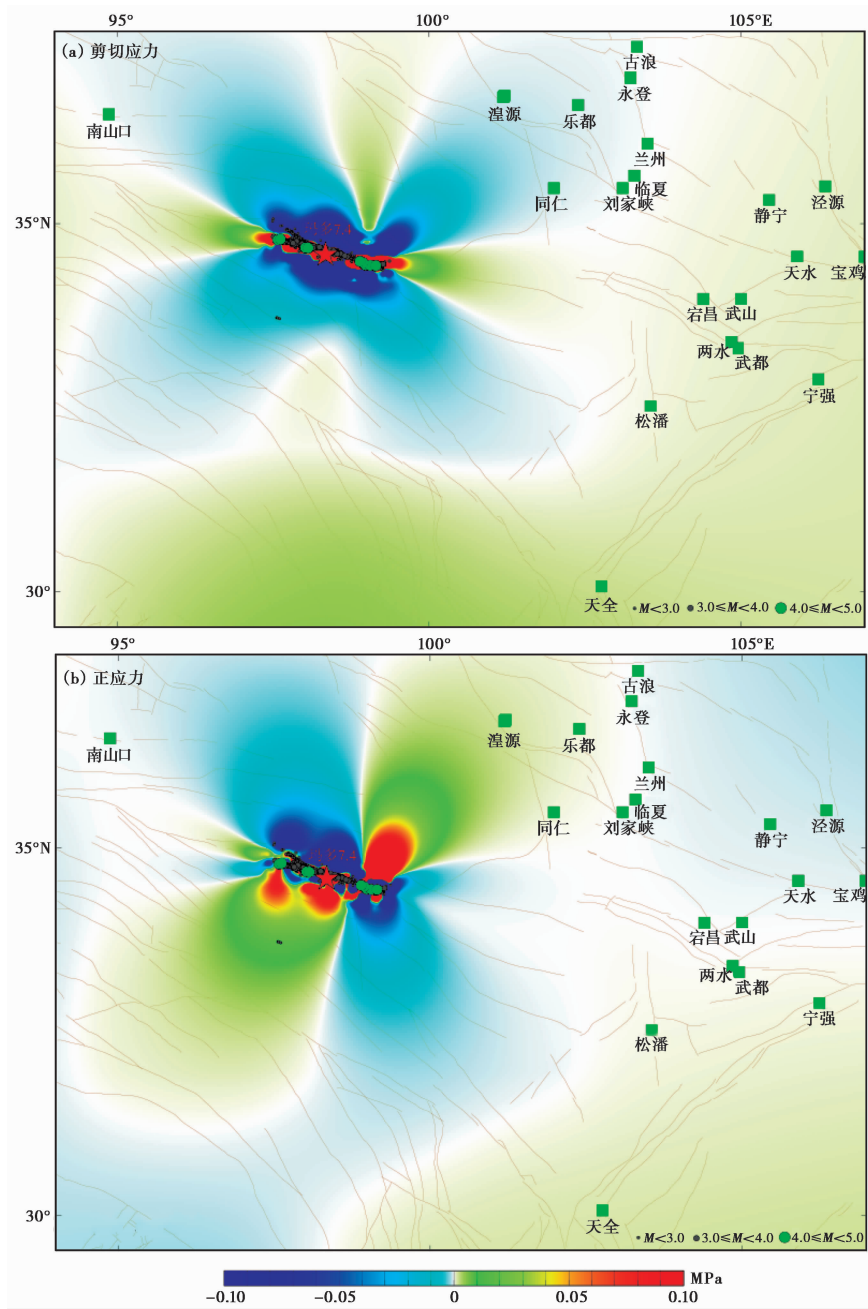


图 5 玛多  $M_s7.4$  地震地表同震剪切应力变化(a)与正应力变化(b)

区域,进一步说明玛多  $M_s7.4$  地震的发生使得朝向发震断层运动的区域产生比较突出的解耦作用,而在同震形变场朝远离发震断层运动的区域,正应力变化为负值区,说明玛多  $M_s7.4$  地震的发生进一步促进断层闭锁。

进一步对比出现阶跃的形变台站分布与地表断层同震应力场变化结果,发现同震阶跃台站更多集中在震中的东北部(祁连山断裂带中东段)以及东部区域(西秦岭等地区)。祁

连山断裂带中东段位于此次地震同震正应力变化正值区域,而西秦岭等地区则处于同震剪切应力变化的正值区域,即出现同震阶变的台站与同震正应力、同震剪切应力变化的正值区域具有较好的一致性,而上述区域正是 Li 等(2021)、华俊等(2021)和岳冲等(2021)计算的玛多  $M_s7.4$  地震引起的同震库伦应力变化正值区域,进一步说明同震正应力或同震剪切应力的加载作用在上述地区起到主要的作用。发震断层西侧与南侧台站数量较少,发震断层西端剪切应力、正应力变化同样为正值,南山口台站的同震阶变也同样突出,而发震断层中西段的断层下盘同样为正应力变化正值区,但位于甘孜-理塘断裂带的甘孜台钻孔倾斜、体应变并无显著的同震阶变存在,这可能与玛多  $M_s7.4$  地震在该断裂带的同震库伦应力作用为卸载(即剪切应力为卸载,且量级大于同震正应力变化的结果)相关(Li et al, 2021; 岳冲等, 2021)。

与此同时,龙门山断裂带南段的天全台站应变仪(洞体应变仪与钻孔应变仪)同样记录到同震阶变,而周边多个台站却并未出现同震阶变现象,这与上文中的认识还存在一定的差异。分析产生上述差异的原因,可能有以下几点:①形变台站中不同观测仪器观测精度有所差异,应变类仪器观测精度可达  $10^{-9} \sim 10^{-10}$  量级(中国地震局监测预报司, 2003; 牛安福, 2017),能够记录到变化量级较小的应力调整变化,不同形变台站中布置的观测仪器类型和数量有一定差异,可能会对统计结果产生一定的影响(樊俊屹等, 2021);②形变台站仪器观测结果可能受到台站周边地质构造、次级活动断裂等影响,使得同震反映与周边大型断裂的结果出现一定差异;③受观测仪器型号、布设山洞(钻孔)的地质条件、仪器耦合程度、数据采样率等因素的影响,仪器同震阶变的形态、阶变量级大小、阶变方向等可能出现差异性变化。从目前形变台站仪器观测到同震阶跃结果可以初步推断,同震阶跃变化与同震应力(正应力、剪切应力)加载作用区域分布较为一致,玛多  $M_s7.4$  地震引起西秦岭构造区、祁连山断裂带中东段的应力调整作用,而这种调整作用多以应力(正应力、剪切应力)增强为主。未来还将继续跟踪上述地区形变观测资料的进一步发展变化,为后续地震研判等工作提供震例参考资料。

## 4 结论

通过玛多  $M_s7.4$  地震震源区周边区域同震应力场的分布特征,结合地震周边形变同震阶变台站分布特征,分析了同震应力场变化与同震阶变台站分布的相关性,得到初步结论如下:

(1)受周边地形的影响,形变台站主要分布在震中北部、东部祁连山断裂带以及西秦岭等地区,震中距多在 200km 以上,而震中西侧和南侧定点形变台站较少,出现同震阶变的形变台站主要集中分布在祁连山断裂带中东段以及西秦岭等地区。

(2)模拟得到的水平形变场结果显示,此次玛多  $M_s7.4$  地震具有显著的左旋走滑运动特征,水平形变量主要集中在巴颜喀拉块体内,位于断层上盘北部的柴达木块体、祁连块体以及南部的羌塘块体同震水平位移量均较小;昆仑山口-江错断裂作为一条 NE 倾向的走滑型断裂,断层上盘区域滑动量明显大于下盘,模拟得到的最大水平形变量达 1380mm。

(3)形变同震阶变集中的祁连山断裂带中东段位于玛多  $M_s7.4$  地震同震正应力变化正值区域,而西秦岭等地区则处于同震剪切应力变化的正值区域,即出现同震阶变的台站与同



震正应力、同震剪切应力变化的正值区域具有较好的一致性。

**致谢:** 中国地震局地质研究所空间对地观测与地壳形变研究团队提供了玛多  $M_s7.4$  地震的断层滑动模型,文章部分图件采用 GMT 软件进行绘制,在此一并表示感谢。

### 参考文献

- 邓文泽,杨志高,席楠,等. 2021. 2021年5月22日青海玛多  $M_s7.4$  地震的快速测定与数据产品产出. 中国地震, **37**(2): 541~550.
- 樊俊屹,刘高川. 2021. 3种钻孔应变仪记录的玛多  $M_s7.4$  地震同震响应特征对比分析. 中国地震, **37**(3): 564~573.
- 华俊,赵德政,单新建,等. 2021. 2021年青海玛多  $M_w7.3$  地震 InSAR 的同震形变场、断层滑动分布及其对周边区域的应力扰动. 地震地质, **43**(3): 677~691.
- 李志才,丁开华,张鹏,等. 2021. GNSS 观测的 2021 年青海玛多地震 ( $M_w7.4$ ) 同震形变及其滑动分布. 武汉大学学报·信息科学版, **46**(10): 1489~1497.
- 牛安福, 2017. 地应力波与地震预测基础. 北京:地震出版社.
- 牛安福,张晶,吉平, 2005. 强地震引起的同震形变响应. 内陆地震, **19**(1): 1~7.
- 王华柳,蒋薇, 2020. 云南省双震与数字化定点形变同震阶变初探. 地震科学进展, **50**(2): 32~35.
- 王未来,房立华,吴建平,等, 2021. 2021年青海玛多  $M_s7.4$  地震序列精定位研究. 中国科学:地球科学, **51**(7): 1193~1202.
- 杨军, 1986. 同震阶变研究在短临预报中作用的探讨. 地震学刊, (3): 68~72.
- 杨军,张国民, 1984. 应变观测中地震前兆异常量级初探. 地壳形变与地震, (4): 422~427.
- 杨君妍,孙文科,洪顺英,等, 2021. 2021年青海玛多 7.4 级地震的同震变形分析. 地球物理学报, **64**(8): 2671~2683.
- 岳冲,屈春燕,牛安福,等. 2021. 玛多  $M_s7.4$  地震对周边断层的应力影响分析. 地震地质, **43**(5): 1041~1059.
- 詹艳,梁明剑,孙翔宇,等, 2021. 2021年5月22日青海玛多  $M_s7.4$  地震深部环境及发震构造模式. 地球物理学报, **64**(7): 2232~2252.
- 中国地震局监测预报司, 2003. 地壳形变数字观测技术. 北京:地震出版社.
- Li Y J, Huang L Y, Ding R, et al, 2021. Coulomb stress changes associated with the  $M7.3$  Maduo earthquake and implications for seismic hazards. Nat Hazards Res, **1**(2): 95~101.
- Sacks I S, Suyehiro S, Evertson D W, et al, 1971. Installation and observation of saxophone-Evertson strainmeter in Japan. Pap Meteorol Geophys, **22**(3~4): 195~208.
- 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. Comput Geosci, **32**(4): 527~541.
- Xin H L, Zhang H J, Kang M, et al, 2019. High-resolution lithospheric velocity structure of continental China by double-difference seismic travel-time tomography. Seismol Res Lett, **90**(1): 229~241.

## Discussion on the Relationship between the Co-seismic Stress Field and the Distribution Co-seismic Step among Deformation Observation Stations from the Maduo $M_s7.4$ Earthquake

Yue Chong<sup>1,2)</sup>, Sun Xihao<sup>3)</sup>, Niu Anfu<sup>1)</sup>, Ji Ping<sup>1)</sup>, Li Xiaofan<sup>1)</sup>, Zhao Jing<sup>1)</sup>

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

3) Qinghai Earthquake Agency, Xining 810000, China

**Abstract** In this paper, the co-seismic slip model inverted by the results of InSAR deformation field and precise aftershock location is used to study Maduo  $M_s7.4$  earthquake. The distribution characteristics of co-seismic horizontal deformation field and local stress field are obtained by PSGRN/PSCMP program. Combined with the distribution of deformation stations with co-seismic step around Maduo earthquake, the relationship between the variation of co-seismic stress field and the co-seismic step among deformation stations is discussed. The simulated horizontal deformation field shows that the Maduo earthquake is characterized by the sinistral-strike slip movement. The large horizontal displacements are mainly concentrated in the block of Bayan Har block, followed by the Qaidam block in the north, and the co-seismic horizontal displacement in Qiangtang block and Qilian block is quite small. Kunlun Shankou-Jiangcuo fault is a NE trending strike slip fault. The slip amount in the hanging wall of the fault is significantly greater than that in the footwall, and the maximum horizontal deformation obtained by simulation is about 1380mm. The deformation stations with co-seismic step are mainly distributed in the middle-east section of Qilian Fault zone and west Qinling Mountains area. The Middle-east section of Qilian Fault zone is located in the positive area of co-seismic normal stress variation of Maduo earthquake, while the west Qinling Mountains are located in the positive area of co-seismic shear stress variation of Maduo earthquake, that shows, the deformation stations with co-seismic step have good consistency with the positive area of co-seismic stress field variation.

**Keywords:** The Maduo  $M_s7.4$  earthquake; Co-seismic step; Normal stress; Shear stress