2021年5月22日青海玛多7.4级地震

科学考察报告

地震预测研究所 青海省地震局
地球物理研究所 地质研究所
工程力学研究所 地震台网中心
第一监测中心 第二监测中心
江苏省地震局 湖北省地震局
防灾科技学院 同济大学

指导单位:中国地震局科技与国际合作司 **牵头单位:**地震预测研究所、青海省地震局

二〇二一年八月

科考指挥部

- 指挥长:张晓东 杨立明
- 副指挥长:丁志峰 何宏林 王海功 马玉虎
- 秘书:李鹏郭葆庆
- **成 员:**李 鹏 郭葆庆 陈 波 蒋汉朝 温瑞智 赵 娟 李金育 杨延东 张永仙 常利军 孟国杰 屠泓为
 - 姚生海 冯丽丽 蒋丽雯

科考任务工作组

野外地质调查工作组组长:王海功、李文巧、李涛 **强地面运动与工程震害调查工作组组长:**温瑞智 **地震序列研究工作组组长:**张永仙、赵翠萍、王武星 **地震深部构造环境研究工作组组长:**常利军 **地球物理和地球化学异常变化研究工作组组长:**冯丽丽、 刘 磊、周晓成 **地壳应力应变场分析研究工作组组长:**孟国杰、甘卫军、

能 能

参与科考人员

丁	玲	万永	革	马	震	马玉	.虎	Ξī	.民	Ŧ	书目	Ē
王	友	王	龙	王未	来	王	芃	王同	庆	Ŧ	兴E	E
王武	弋星	王迪	晋	王海	功	Ŧ	洵	王勤	彩	尹	海木	Z
何法	云林	石	石砳	占	伟	冯丽	<u>III</u>	母若	愚		苗古	古
刘文	又邦	刘	刚	刘	泰	刘	琦	刘	石砳	许	卫]	I
孙玺	至皓	孙浩	越	苏	鹏	李	营	李	涛	李	人会	金金
李	鹏	李文	巧	李玉	来	李永	华	李启	雷	李	君	<u>+</u>
李忠	品武	李浩	峰	李	琦	李智	'敏	李静	+超	杨	立り	月
杨业	金鑫	杨光	亮	杨建	思	杨理	臣	杨	博	旲	忠自	Z
吴伯	韦伟	吴萍	萍	何亚	东	佘雅	文	余鹏	F	汪	云力	它
张	达	张友	源	张	兵	张风	雪	张永	仙	张	丽屿	备
张	怀	张昊	:宇	张金	川	张朋	涛	张彦	博	张	晓玄	K
张昉	8清	张盛	峰	张瑞	青	陈长	궃	陈	波	陈	桂生	上 -
武邦	色强	范莉	革	明跃	红	季灵	运	金	涛	周	晓反	戊
周昉	28峰	郑	玉	房立	华	孟国	杰	赵玉	红	赵	国引	虽
赵翠	是萍	胡朝	忠	胡维	云	胡维	云	哈广	浩	姚	生泪	每
秦丹	彡威	袁小	祥	袁兆	德	顾焕	杰	徐玮	阳	徐	当じ	几
徐岳	后仁	徐超	文	殷	翔	郭	鹏	郭慧	丽	唐	方う	Ł
黄	勇	黄	浩	曹学	来	龚	正	常利	军	盖	海力	它
梁注	宝	寇华	东	屠泓	为	董金	元	蒋	策	程	九	日
鲁邦	王王	管仲	国	熊仁	伟	熊仕	昭	熊	维	潘	佳钧	失
魏文	て薪											

摘要

青海玛多 7.4 级地震科学考察取得以下发现和认识:(1) 玛多地震使 NW 走向、左旋走滑的昆仑山口-江错断层江错 段发生破裂,在地表形成总长 160km 的破裂带,地表同震位 移为 1-2m;(2)玛多地震使东昆仑断裂带玛沁-玛曲段应力 积累水平升高;(3)工程震害调查表明近断层地震动的速度 大脉冲和强竖向分量是导致此次地震桥梁震害的主要原因; (4)未来 1 年需注意南北地震带中南段和南天山至西昆仑 交界发生 7 级地震的可能。科考获取了一批野外调查和观测 数据,将促进地震活动地块划分、地震危险区确定和区域地 震趋势等方向的科研与业务活动,并为争取国家科技资源持 续深入研究提供良好基础。同时,这次科考以实战方式探索 了面向业务化的地震科考的组织体系和队伍编成,与震后应 急响应协同、前后方双指挥长机制、信息报送等实践,将为 后续地震科考实施提供借鉴经验。

-,	主要科学问题及科考任务	.1
二、	地震科考进展及阶段性成果	.2
	(一) 野外地质调查	.2
	(二)强地面运动与工程震害调查	.5
	(三)地震序列研究	.9
	(四) 地震深部构造环境研究	13
	(五)地球物理和地球化学异常变化研究	22
	(六)地壳应力应变场分析研究	24

2021 年 5 月 22 日青海玛多 7.4 级地震 科学考察报告

2021年5月22日02时04分,青海果洛州玛多县发生 7.4级地震,震源深度17千米。22日16时,青海玛多7.4级 地震科考启动,由预测所、青海局牵头组织实施,指挥长为 张晓东、杨立明,副指挥长为丁志峰、何宏林、王海功、马 玉虎。目前现场地震科考已完成,现将相关工作报告如下。

一、主要科学问题及科考任务

青海玛多地震科考的主要科学问题包括: (一)从地质 学、地震学、地球动力学等方面研究地震发震构造,推动完 善我国大陆活动地块科学理论; (二)对地震发生于十年尺 度地震重点危险区和年度危险区以外的原因进行分析,完善 相关危险区确定技术方案; (三)本次地震对4号危险区等 地震趋势的影响。根据科学问题,分为6个工作组开展地震 科考,具体任务如下。

(一)野外地质调查:现场开展地震断层和地表破裂带 调查,研究同震地表变形(破裂)与地震灾害分布,判定发 震构造和变形机制,给出震区地震地表破坏与构造变形(破 裂)分布图。

(二)强地面运动与工程震害调查:对震区强地面运动 分布特征、地质灾害、工程震害进行调查,给出地面运动峰 值参数(PGA和PGV)分布图和地震烈度分布图,实现对主 震地震动场的构建;基于震害分析资料,对工程结构震害特征和破坏机理进行分析和研判,服务韧性城乡建设;校核与修订灾区地震区划图,服务灾区恢复重建工程。

(三)地震序列研究: 开展地震现场流动观测,分析处 理地震观测资料,通过地震序列精定位、震源机制解给出余 震序列精定位空间分布图,描绘地震破裂过程,判定地震序 列类型、发展趋势及对周边区域、中国大陆重点地区强震危 险性的影响,加强对触发地震的监测分析,研究巴颜喀拉块 体强震发展趋势。

(四)地震深部构造环境研究:利用地球物理观测资料, 对震源区地下结构和深部构造环境进行成像研究,给出深部 结构特征,分析地震发生的深部动力背景。

(五)地球物理和地球化学异常变化研究:基于震中及 周边区域地球物理和地球化学流动观测资料,对震后地球物 理和地球化学特征变化进行分析,给出深部流体运移特征, 研判震后趋势。

(六) 地壳应力应变场分析研究:基于 GNSS 等观测手段,计算震前区域地壳应力应变场,观测获取同震变形、震后弛豫变形,研究获取介质粘弹性参数,给出震前震后的形变变化特征。

二、地震科考进展及阶段性成果

(一) 野外地质调查

野外地质调查组由预测所、地质所、青海局 3 个单位 20

人组成,分为1个无人机测绘组和4个地表破裂带调查组。 震后1小时,青海局5人即启程前往震区,并于当日10时 抵达震区;预测所和地质所也于地震当日启程,分别于22日 24时和23日15时抵达灾区。6月8日结束地表破裂带调查, 6月15日结束地表破裂带无人机测绘。目前形成以下阶段性 科考成果:

1.发震构造与地表破裂带特征

玛多地震的发震断层为 NW 走向、左旋走滑的昆仑山口-江错断层,破裂段为江错段。地表破裂长 160km,主要由线 性剪裂隙、斜列张裂隙和张剪裂隙、挤压鼓包、地震陷坑等 多种构造类型组合而成,在河谷、沼泽地区伴有大量喷砂冒 水、砂土液化和重力滑坡等。



图 1 玛多地震地表破裂带分布图

图(a)为玛多 MS7.4 地震 InSAR 同震形变场(升轨,据华俊等,2021)、野外调查点和 同震地表破裂带;图(b)为 2021 年玛多地震序列精定位结果(据王未来等,2021)、野 外照片位置和同震地表破裂带。

地表破裂带自西向东可依次划分为鄂陵湖南段、黄河乡 段、冬草阿龙湖段和昌麻河乡段;不同段之间或走向差别较 大,或以大的拉张阶区分隔。其中鄂陵湖南段、黄河乡段的 西段、冬草阿龙湖段的中段和昌麻河乡段地震地表破裂带明 显且可连续追踪,尤以鄂陵湖南段地表破裂规模最大;其它 段地表破裂断续展布。根据冲沟、道路和拉张阶区裂隙宽度 等可确定地表同震位移量为1-2m。

2.地震地质灾害(滑坡)

地表破裂带东段有3个地震诱发滑坡,是典型的强震诱 发均质滑坡类型,滑动面不明显(图2)。由于位于青藏高 原腹地,地震事件发生前后几乎没有人类活动的干扰。这种 类型滑坡的发生、发展和变化与中国大陆和世界上人口密集 地区的滑坡有很大不同,特别是高海拔地区的季节性冻结和 融化以及黄河上游的风成沙沉积物提供了特殊的地质背景。 玛多地震同震滑坡的研究及其后对这些滑坡的时变过程的 深入研究,将为其他类似滑坡的破坏机制提供参考。这些滑 坡及相关的斜坡拉裂警告我们,我们应该高度重视震中地区 及周边地区的地质灾害,因为经过检测和防护的滑坡和裂缝 在降雨、冻融、强余震等因素作用下可能保持稳定。因此, 除了调查可见的山泥倾泻(已发生的山泥倾泻)外,我们亦

4



图 2 玛多地震东段同震触发滑坡

玛多地震沿风沙沙丘覆盖的黄河谷触发的三个同震滑坡的位置、分布及每个滑坡的 源区裂缝的细节

(二) 强地面运动与工程震害调查

强地面运动与工程震害调查由工力所、青海局、同济大 学等单位实施,现场工作在5月26日至31日开展,主要调 查了玛查理镇框架结构房屋、野马滩大桥、黑河中桥、野马 滩2号大桥、大野马岭大桥、吾儿美岗大桥、黄河乡建筑及 雅娘黄河大桥(新旧两桥)、昌马河镇民居建筑、通信设施 以及昌马河大桥破拆后的震害情况。目前形成以下阶段性科 考成果:

1.强震动观测和地震动模拟

地震后共收到青海省地震局 16 组强震动记录事件。其中大武台震中距最小,为 175.6km,东西、南北、垂直向加速度峰值分别为 46.0cm/s²、40.6cm/s²、-19.1cm/s²、速度峰值分别为 3.3cm/s、7.5cm/s、2.7cm/s,计算仪器地震烈度 6.0 度。

采用2类震源滑移分布模型——包括3个地震波的反演 结果与10组随机震源运动学模型,对地震区域内虚拟网格 点三维地震动模拟,得到近场地区强地面运动的三分量模拟 记录。模拟结果显示:基于中国地震烈度表得到模拟震区烈 度分布,不同震源滑移分布模型模拟结果与烈度图的一致性 较高,仅在极震区附近出现部分差异;模拟结果在近断层附 近的带状子区域内的烈度分布差异主要由滑移分布引起。模 拟烈度和调查烈度的一致性证明,随机方法不仅能够模拟地 震动影响场,在震后及时给出地震动强度指标的分布。基于 模拟结果还可以给出设定地震的烈度快速估计分布,实现对 情景地震下地震动空间分布的估计,对震区强震动分布及抗 震减灾工作提供理论参考。

6



图 3 基于不同地震破裂模型模拟记录给出的青海玛多 M_s7.4 地震的 地震烈度分布

(a)USGS 模型; (b)北京大学张勇教授模型; (c)中国地震局地质研究所模型; (d)破裂随机 模型。

2.公路桥梁震害调查

野马滩大桥距离发震断层非常近,综合此次地震中野马 滩大桥震害表现和地震动记录参数特性分析,考察组初步判 断此次野马滩大桥、野马滩2号桥整齐划一的落梁震害机理 应系近断层地震法向方向性效应的强脉冲作用所致,并且极 有可能是在同一强速度脉冲、几乎相同的时刻发生多跨落梁, 否则如果存在较大的时间差并且位移是由地震累积作用产 生的,则未必所有的落梁跨均为南侧落梁、北侧支承这种整

齐划一的模式。



图 4 野马滩大桥落梁震害

黑河中桥是位于野马滩大桥和野马滩2号桥两座出现落 梁严重破坏的桥梁中间的桥梁,仅发生轻微损伤。吾儿美岗 大桥南北方向的地震响应高于东西方向。雅娘黄河桥地处微 观震中区,仅见桥墩墩底显著的混凝土压溃破坏和旧桥盖梁 明显的压裂破坏,该桥未发生水平方向地震作用所导致的显 著震害特征,初步推断墩底的压溃破坏可能系震中竖向地震 动所致。

3.房屋建筑震害调查

紧邻微观震中的黄河乡建筑震害程度相对较轻,主要表 现为砖木结构房屋部分房屋落瓦,部分围墙倒塌,砖混结构 的少数承重砖墙及框架结构部分隔墙开裂,土木结构房屋部 分严重破坏。

而距微观震中以东 85 公里的昌马河工区建筑震害相对

较重,主要表现为无抗震措施的砖木结构房屋全部严重破坏 或倒塌,具备合理抗震措施的砖混结构基本完好或轻微破坏, 在建轻钢厂房均钢柱倾斜、维护墙明显开裂,围墙多数倒塌。

玛多县城距离震中约35公里,在地表破裂的北侧,同时 地势相对较高,无沙土液化,因此其震害的程度和表现形势 大体符合常规规律:具有抗震措施的 RC 框架主体结构基本 完好或轻微损伤,填充墙、装修等非结构构件明显震损。

4.地震沙土液化调查

玛多 7.4 级地震触发了海拔 4000m 以上区域近千平方公 里区域内的大规模液化现象,在液化研究史上罕见,其在液 化研究与地质环境相关性方面具有重要科学意义。

震区内典型工程破坏基本上都伴随液化现象,特别是发 生桥梁震害的场地均有显著液化现象,提示了在工程震害分 析中应注重液化的影响,也为液化致灾机理研究与工程防治 方法研究提供了实践基础。

(三) 地震序列研究

地震序列研究组由预测所、青海局、地球所等单位参加。 自 5 月 22 日起参加了 80 余次震情会商会(含 60 余次序列 震后应急会商)。相关阶段性成果如下:

1. 序列参数跟踪

据青海地震台网测定,2021年05月22日02时至2021年06月21日12时,玛多7.4级地震序列共记录到定位*M*L1级以上余震2013次,最大余震是5月22日5.1级地震。整

个序列参数计算结果是:b值为0.71,h值为2.1,p值为1.14。 利用序列参数及以往周边地震最大余震统计结果,分析认为 玛多7.4级地震序列为主余型地震,最大余震为5.5级左右。

根据b空间扫描计算结果,震区东段和中西段b值偏低, 是未来可能发生强余震的地区(图5)。5月21日之前*M*L3.5 以上余震的视应力都低于正常值,显示在跟踪阶段震区再次 发生较大地震的可能性不大。



图 5 玛多 7.4 级地震序列 b 值空间分布

2.震源机制

国内外9个研究机构和小组给出的10个震源机制结果 相近,显示该地震为左旋走滑为主的近乎直立的破裂,但 倾向有差异(图6左)。余震震源机制结果显示余震区破 裂性质比较复杂,存在局部张性和压性破裂(图6右)。



图 6 玛多 7.4 级地震震源机制解

左:多家机构的主震震源机制;右上:王勤彩解算的序列主震及多个余震震源机制;右下:李启雷解算的序列主震及多个余震震源机制。

3.破裂过程

收集了张勇、洪顺英、地球所、王卫民、王洵等反演的 地震破裂结果。所有结果都显示玛多地震为双侧破裂,主震 震中东部破裂量更大。根据反演结果,破裂长度为138-200km、 深度为20-30km、最大破裂位错为1.5-6m,存在差异的原因 主要是所用资料类别和反演模型差异所致。



图 7 玛多 7.4 级地震破裂过程解

4.小震精定位

利用精定位技术对玛多 7.4 级地震序列进行了重新定位。 从房立华小组、王勤彩小组、黄浩小组的结果看,共性是破 裂区约 170km,断层面近乎直立,破裂区有分段特征。但三 家的结果存在一定差异性,主要表现为:(1)房立华小组给 出的破裂区东、西两端均出现分叉现象,而黄浩和王勤彩小 组的破裂区仅在东端出现;(2)房立华小组给出的余震深度 最大值为 30km,优势分布深度为 7-15km;王勤彩小组给出 的余震深度最大值为 18km,优势分布深度为 6-13km。(图 8)



(四) 地震深部构造环境研究

地震深部构造环境研究组由地球所、湖北局等 24 人组 成。现场工作组 9 人 5 月 31 日到达玛多地震现场。6 月 1 日 至 6 月 5 日期间,科考组在玛多地震震源区开展了野外踏勘 和仪器布设工作,并于 6 月 5 日完成了 150 套地震仪的布设 任务。在观测 1 个月时间后,于 7 月 3 日至 7 月 6 日完成所 有台站的回收。7 月 10 日至 7 月 15 日将仪器运送到北京白 家疃国家地球观象台并完成数据提取和格式转换。如图 9a 所 示,短周期密集台阵点位主要分布在两条垂直主断裂的近南 北向剖面上,跨断层台站点间距为 0.5-1 km,剖面两端点间 距为 1-2 km,以及平行主断裂近南北向的剖面上,面上也有 一些点位稀疏分布,这些台站的点间距为 3-5 km。



30 Distance/km



图 9 短周期密集台阵布设点位及跨主断裂两条速度剖面 a: 短周期密集台阵布设点位图; b 测线 MA(西线)的 S 波速度剖面; c 测线 MB(东 线)的 S 波速度剖面。

基于两条测线的背景噪声互相关函数,通过提取沿测线 台站间的群速度频散曲线,反演了测线下方的S波速度结构。 图 9b 是测线 MA 的 S波速度剖面,图 9c 是测线 MB 的 S波 速度剖面。



(a)震中分布平面图及剖面位置; (b)地震震中沿断裂走向(Y1-0-Y2 剖面)的投影; (c)地震震中沿垂直于断裂方向(A-L 剖面)的投影

基于深度学习拾取到时、震相关联地震以及多种地震定 位算法构建了玛多 M.7.4 地震之后的第 14 天至 43 天内的绝 对定位地震目录和高分辨率地震目录(图10),结果显示地 震序列整体上沿着地表破裂带的偏北一侧呈现条带状展布, 走向为 NWW,发震深度主要在 15 km 以内。地震序列显示 出分段性: 西段走向近 E-W 向, 与整体走向呈现一定拐角, 地震活动性较强;中段地震活动性较弱,野马滩大桥两边地 震分布较宽且连续,野马滩大桥东边的地震不连续,存在小 的地震空区或稀疏区; 东段有一个向北凸起的弧度, 地震活 动性最强; 地震序列总体向北倾斜, 但不同分段在不同深度 上的倾斜形态存在差异: 西段断层倾向为近垂直, 发震优势 层为 8-12 km; 中段和东段的地震序列总体向北倾斜, 但在 深度 10km 左右转变为向南倾,显示了发震破裂面并非单一 的平面结构,具有复杂的空间结构和形态。



图 11 玛多 M_s7.4 地震中小型余震震源机制解分布图

获得的 15 次中小型余震的震源机制解(图 11)显示余 震序列大多为走滑型,与主震震源机制解较一致,在地表破 裂带发生转向及不连续处局部出现逆冲型。余震震源机制所 揭示的断层的走向大致与地表破裂带平行呈 NWW 向, 断层 的倾角整体较大,且在断层不同位置具有分段性差异,反映 出震源区构造形态的复杂性。余震震源机制解所揭示的 P 轴 优势方位为 NEE-SWW 向,倾伏角为 12°,表明相应时间段 内的余震序列活动仍然主要受到与区域构造应力场方向基 本一致的 NEE 向近水平应力场的控制。玛多 Ms7.4 地震的发 生与该地区分层且非均匀的上地壳结构、中下地壳软弱物质 的挤压和上涌密切相关。与主震相比,中小型余震的孕震机 制更为复杂,在区域构造应力场的控制下,同时受到震后应 力的调整、局部速度结构复杂性及多断层相互作用的综合影 响。





图 13 近垂直于发震断裂的速度剖面图

AA'、BB'、CC'、DD'、EE'、FF'、GG'、HH' 剖面的位置见图 3; 灰色点为距离对应剖面 5km 范围内地震的投影; 坐标 0 点为每个剖面于解译断层的交点。

近震 P 波双差走时成像获取了玛多地震源区及邻区高精 度三维上地壳 P 波速度结构(图 12 和图 13),初步获得以 下认识:玛多地震发震断层江错断裂周边存在明显的速度非 均匀性和分段性;鄂陵湖南段地表破裂带与发震主断裂存在 一定夹角,地震主要集中在破裂带附近,速度图像显示该破 裂带北部存在规模较大的高速异常,南边表现为低速特征, 说明该区域的可能受到北边高速体的阻挡作用,导致应力在 南边释放;野马滩大桥到黄河乡段断裂北部速度表现为高速 异常,高速体呈现向北倾斜特征。该段的地震发生频次明显 降低,发震深度主要在 6.0 km 以内,深部速度结构显示该区 域在深度 6 km 以下存在低速异常,可能该区域受到深部低 速体的阻隔,应力在浅部减弱,地震活动性相对较弱; 玛多 地震往东约 20 km 处存在规模大高、低速分界带,20 km 以 外表现为规模大的高速异常,20 km 以里出现近垂直延伸的 局部低速异常,该段地震频次最高,说明该区域可能受到东 部高速异常体和局部低速构造体的影响下,形成大规模的应 力积累,在玛多地震之后,应力释放,地震活动性强。



图 14 震源区横波分裂结果分布图





图中慢波延迟时间的大小用圆的大小和颜色表示。白色文本框给出了各区块的慢波延迟时 间的平均结果。



图 16 沿主破裂余震、震源机制结果、 速度剖面和横波分裂参数分布

(a)沿主破裂余震事件统计个数分布;
 (b)沿主破裂的速度剖面、余震分布和震源机制
 结果分布;
 (c)沿主破裂各台站快波偏振方向分布;
 (d)沿主破裂各台站慢波延迟时间
 分布。横坐标为剖面上各点与主震震中之间的距离。两个黑色箭头将沿主破裂余震密集区
 分为3个区块。

通过近震波形数据测量得到的横波分裂参数分析了震 源区上地壳的各向异性变化特征(图 14、图 15 和图 16), 获得了如下认识:从地表破裂带走向、余震序列展布、中小 型地震震源机制和上地壳三维精细结构结果来看,主破裂与 余震序列展布具有一致性, 且沿主破裂余震密集区具有明显 的分段性,本文得到的快波偏振方向也表现出与主破裂和余 震序列展布较好的一致性,且自西向东也呈现出分段性特征; 沿主破裂余震密集区的慢波延迟时间明显大于两侧,特别是 包括主震和高密度余震分布的主破裂东段的慢波延迟时间 最大,主破裂附近区域北侧的慢波延迟时间大于南侧,主破 裂余震密集区外两侧台站的慢波延迟时间随着台站与主破 裂距离的增大而逐渐减少,到一定距离后,变得基本稳定; 余震密集区外,台阵东线 MB 以中部跨主破裂余震密集区 ER 为中心,北侧和南侧的快波偏振方向表现出趋向于主破裂收 敛的特征,其他距主震和主破裂较远区域的快波偏振方向基 本为 NWW 向,与其所在区块内的断裂走向一致。震源区上 地壳各向异性空间展布反映了玛多地震孕育过程中, 应力积 累主要集中在沿主破裂余震密集区,且主破裂东段的应力积 累要强于中段和西段,主破裂附近的应力积累北侧强于南侧, 随着距主破裂距离的增加,应力积累效应减弱,到一定距离 后变得很弱。震源区横波分裂参数未能呈现出随时间的变化 特征,主要由于密集台阵在主震后第 12 天才开始布设并投

入观测,这时主震和大部分强余震已经发生,并且中小地震 的最高峰也过去,观测期内余震频次趋于稳定,孕震过程中 积累的应力尚未释放完全,应力释放和调整过程还将持续一 段时间。尽管台站 MAD 的记录跨越了主震前后,但它的横 波分裂参数也未表现出随时间的规律性变化特征,且其慢波 延迟时间很小,反映了其距离主破裂余震密集区较远,玛多 地震孕震过程中应力积累和调整对其影响很弱。

基于玛多科考密集台阵的观测数据,开展了噪声成像、 地震精定位、高精度三维地震成像、震源机制和横波分裂等 研究工作。结果显示,玛多地震的余震序列主要沿地表破裂 展布,且主破裂周边存在明显的速度非均匀性,沿主破裂余 震密集区各向异性慢波延迟时间明显大于南北两侧;沿主破 裂余震序列展布、上地壳各向异性快波偏振方向和地表破裂 方向具有很好的一致性,且呈现出分段性特征,但它们与发 震断裂——江错断裂的走向只有中段一致,在西段和东段不 同。在3个分段的两个拐点附近,震源机制解结果表现出挤 压型特征,且三维地震成像显示为高低速转换区。余震序列 主要分布在沿主破裂北侧,慢波时间延迟也显示主破裂北侧 大于南侧,速度结构显示主破裂北侧表现为高速异常,且高 速异常体表现向北倾斜, 南部为低速, 余震序列揭示的断层 几何形态同样表现出向北倾的特征;余震序列分布最密集的 区域为包括主震在内的东段,该段也是震源区高速异常体规

21

模最大和慢波延迟时间最大的区域。这些特征反映了玛多地 震孕震过程中积累的应力主要集中在沿主破裂北侧的余震 密集区,且受东部高速异常体阻挡,包括主震在内的东段是 应力积累和地震活动最强的区域。

(五) 地球物理和地球化学异常变化研究

地球物理和地球化学异常变化研究组由青海局、预测所 等单位组成,开展了流动地球化学采样和流动地磁观测。5月 23日至6月1日共考察震区喷砂冒水点32个,采集21份流 体样本和4份砂土样本;6月2日至7月2日,完成20条断 裂带CO2通量剖面测量;7月2日至8月1日,围绕玛多地 震破裂带在巴颜喀拉块体东部开展温泉流体地球化学流动 测量46个温泉点。6月8日至6月25日共完成20个流动地 磁矢量测点。对震前青海地区10项定点地球物理异常与3个 区域电磁异常进行了梳理,分析其与玛多7.4级地震的关系。 目前,取得以下初步结果:

1.玛多地震破裂带及其周围流体地球化学测量

玛多地震破裂带和东昆仑断裂带 21 个泉水的 TDS 的范 围为 113.2~1264.6 mg/L,水化学类型为 Ca·Mg-HCO₃、 Ca·Mg·Na-HCO₃、Ca-HCO₃、Na·Ca·Mg-HCO₃·Cl、Ca·Na·Mg-HCO₃·SO₄、Ca·Na·Mg-HCO₃·SO₄、Ca·Na-HCO₃,水岩反应程 度弱。地表破裂带内靠近震中的泉水存在异常氢同位素值 (δD=-59‰),且 Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻等离子出现高值或低值, 可能与本次地震相关。东昆仑断裂带附近泉水中的 Li (最大 值为 2014 μg/L) 远远大于地表破裂带周围泉水(6.56~43.0 μg/L); 而地表破裂带周围泉水中的 Pb、Ba、Cu、Zn 等金 属微量元素更富集。泉水的来源为大气降水,地表破裂带附 近泉水有周围水体的混入,东昆仑断裂带内温泉水循环深度 大,东昆仑断裂切割更深,有更多的深部元素补给;靠近玛多 震中的泉水中化学组分出现了高值.: 未来,对东昆仑断裂内 温泉水文地球化学监测与深入研究,对东昆仑断裂地震危险 性判断具有重要意义。

玛多地震地表破裂带 CO2 脱气强度要显著低于东昆仑断 裂玛沁-玛曲段。玛多地震地表破裂带 CO2 通量基本小于 100g·m⁻²d⁻¹,东昆仑断裂玛沁-玛曲段 CO2 通量多大于 100g·m⁻²d⁻¹。其原因可能是,东昆仑断裂是一条大型边界断 裂,其切割较深、规模较大,CO2 脱气强度要高于块体内次 级断裂。玛多地震地表破裂 CO2 脱气强度与地表变形强度相 关,地表变形强烈的位置,CO2 通量较高。鄂陵湖南侧、昌 麻河乡地表变形强烈,获得的 CO2 通量是玛多地震地表破裂 带上的高值,鄂陵湖南侧剖面 CO2 通量最大值为 97.68 g·m⁻²d⁻¹,昌麻河乡西侧剖面 CO2 通量最大值为 103.18 g·m⁻²d⁻¹。

以玛多县为中心,在巴颜喀拉板块东部龙日坝断裂、南 边界甘致—玉树断裂、通天河断裂、北边界东昆仑断裂范围 内考察46个泉,采集泉水样46组,泉逸出气样8组,为巴 颜喀拉块体温泉流体地球化学短临监测奠定了坚实的基础。 为这个地区深部流体运移给出了初步的结果。 2.定点地球物理资料同震响应分析

青海地区定点地球物理台站有 23 个测项对玛多地震有 同震响应,主要以形变类测项为主。响应形态主要呈尖峰状 或阶梯状。其中 18 个测项在震后迅速恢复,还有 5 个测点 的 7 个测项在震后未能恢复至震前水平或趋势。需要关注上 述未恢复台站后续资料的变化情况。

玉树水温测项自观测以来,在多次中强地震前均有震例 对应,自 2007 年开始观测以来异常一共出现 7 次,异常对 应率 100%,对应 5 级以上地震(图 17),一般在异常开始 后 3 个月内发震,地震分散在青藏高原内部。



图 17 玉树水温震例

(六) 地壳应力应变场分析研究

地壳应力应变场分析研究组由预测所、湖北局、一测中 心组成,其中一测中心 14 人 16 套 GNSS 设备,湖北局 9 人 33 套 GNSS 设备,预测所 7 人 4 套 GNSS 设备。截至 6 月 25 日,完成 14 个连续站、107 个流动站观测。对覆盖震中区 的欧空局 Sentinel 卫星和日本宇宙航空开发机构的 ALOS-2 卫星的 InSAR 数据进行了处理分析。

收集并初步处理了陆态网络流动站数据、国家测绘局数据、兵器工业研究院、青海测绘院连续站数据,以及本次科

24

考取得的 GNSS 观测数据,同时也收集了基于 InSAR 数据给出的震前区域形变场结果,通过分析取得了以下一些初步认识:

1.震前 GNSS 速度场

玛多地震前,震区 GNSS 相对于欧亚参考框架存在北东 东向的整体运动,量值在 15-25mm/yr,西南区到东北区速度 场量值逐渐减小(图 18)。以震中附近青海玛多(QHMD)作 为基准,揭示出震区西南部与东北部之间存在明显的相向运 动,表明区域整体应力以左旋挤压为主。



图(a)为相对于欧亚参考框架;图(b)为相对于青海玛多站。

震前分期 GNSS 速度结果显示出玛多地震震中位于最大 剪应变率高值区边缘,处于最大剪应变率动态调整过程中的 弱响应区。

2.GNSS 同震位移场

GNSS 同震结果显示玛多地震的最大破裂达 1m 以上, 断层南侧的变形稍大于北侧。震中范围 200km 范围可观测到 同震形变,同震位移呈四象限分布(图 19)。应变释放主要 集中在巴颜喀拉地块内部,震中邻近的东昆仑断裂带对此次 地震的响应不明显,在垂直断裂带方向上表现出少量的挤压 同震响应。



图 19 GNSS 同震位移场

3.基于 GNSS 的同震滑动模型

基于 GNSS 的同震滑动模型显示断裂带可能存在 4 处明显的凹凸体,最大滑动量接近 4m,发生在断层东端的昌马河 乡附近(图 20)。



图 20 玛多地震同震滑动模型

上图为基于 GNSS 的同震滑动模型,下图为 GNSS+InSAR 联合反演的滑动模型。

GNSS 与 InSAR 的联合反演获得的同震滑动模型同样勾 勒出 4 个主要破裂区域,最大滑动量 4.7m,位于昌马河段。 加入 InSAR 数据的联合反演模型显示出更多的细部特征。

4.同震及震后库仑应力结果

设定接收断层的倾角为 80°,东昆仑地区断裂带以左旋 走滑为主,滑动角设为 0°~45°,走向在 905~100°,假定有效 摩擦系数 μ=0.6。分别计算玛多地震同震和震后岩石圈松弛 在接收断层产生 10 km 深度的库伦应力变化。震后库伦应力 计算采用 3 个分层的岩石圈分层模型。

同震及震后库仑应力结果显示玛多地震引起东昆仑断 玛沁-玛曲段应力加载,表明该断裂段存在地震危险性增强的 特征,同时龙日坝断裂的北段同震和震后库仑应力变化也超 过应力触发的阈值,其地震危险性也值得关注。



玛多Mw7.4地震对周围断层库仑应力的影响



图 21 同震及震后库仑应力

上图玛多地震产生的同震库伦应力变化,下图粘弹性松弛引起的震后 20 年库伦应力变化。