2021年青海玛多 $M_s7.4$ 地震序列精定位研究

王未来¹, 房立华^{1,2*}, 吴建平^{1,2}, 屠泓为³, 陈立艺¹, 来贵娟¹, 张龙¹

1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;

2. 中国地震局震源物理重点实验室, 北京 100081;

3. 青海省地震局, 西宁 810001

* 通讯作者, E-mail: flh@cea-igp.ac.cn

收稿日期: 2021-06-03; 收修改稿日期: 2021-06-15; 接受日期: 2021-06-15; 网络版发表日期: 2021-06-17

国家重点研发计划项目(编号: 2018YFC1504103)、国家自然科学基金项目(批准号: 41774067)、中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项项目(编号: DQJB20X07)和青海省科技计划项目(编号: 2020-ZJ-752)资助

摘要 2021年青海玛多 $M_s7.4$ 地震是近30年来青藏高原巴颜喀拉地块发生的又一次大地震, 在空间上填补了该块体北边界东段的发震空白. 文章采用双差定位方法对震后8天的余震序列进行重定位研究. 结果显示: 玛多地震余震序列总长度约170km, 主震位于余震区中间, 呈双侧破裂特征. 余震主要呈北西西向的狭长条带状分布, 整体走向为 285° . 震源深度剖面显示发震断层近垂直, 在不同段落向西南和东北方向倾斜, 表明发震断层具有复杂的几何形态. 主震东南侧25km处存在余震稀疏段, 长度约20km. 在余震区东端出现马尾状分叉特征, 展现了大型走滑断裂带的末梢效应. 在西段北侧出现了NW向条带, 可能是此次地震触发的分支断裂活动. 本次余震序列的位置与昆仑山口-江错断裂东段距离最近, 两者在空间展布上具有一定的重合度, 推测其为本次地震的主要发震断层.

关键词 玛多地震, 余震序列, 双差定位, 昆仑山口-江错断裂

1 引言

据中国地震台网测定, 北京时间2021年5月22日2时4分, 在青海果洛州玛多县(34.59°N , 98.34°E)发生了 $M_s7.4$ 地震(简称“玛多地震”), 震源深度17km, 震中10km范围内平均海拔约4200m. 该区域属于牧区, 居民房屋分布分散, 人口密度较低. 根据中国地震台网中心资料统计, 截至2021年5月30日8时, 共记录到余震2979个. 其中, 最大余震为 $M5.1$ 级, $M4.0\sim4.9$ 级地震13个, $M3.0\sim3.9$ 级地震63个. 青海玛多地震最高烈度为X度, 宏观震中位于玛多县玛查理镇, 微观震中位

于玛多县黄河乡. VI度区及以上面积约53704km², 烈度图长轴呈北西西走向, 长度约381km, 短轴约165km (http://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202105/t20210528_386251.shtml).

玛多地震发生在青藏高原中部, 是在印度板块向北推挤、青藏高原地块隆升、巴颜喀拉次级地块向东挤出背景下的又一次大地震. 青藏高原被5个大的缝合带所切割, 由南向北形成了喜马拉雅、拉萨、羌塘、巴颜喀拉、柴达木和祁连等6个二级活动地块(图1; 汪一鹏, 1998; 张培震等, 2003). 自1997年玛尼7.5级地震以来, 中国大陆7级以上强震都发生在巴颜喀拉块体周

中文引用格式: 王未来, 房立华, 吴建平, 屠泓为, 陈立艺, 来贵娟, 张龙. 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, doi: [10.1360/SSTe-2021-0149](https://doi.org/10.1360/SSTe-2021-0149)

英文引用格式: Wang W, Fang L, Wu J, Tu H, Chen L, Lai G, Zhang L. 2021. Aftershock sequence relocation of the 2021 $M_s7.4$ Maduo Earthquake, Qinghai, China. Science China Earth Sciences, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9803-3>

图1 青藏高原地形及块体分界

红色五角星表示玛多 $M_S7.4$ 地震,震源机制来自全球质心矩张量数据库(GCMT)。黄色圆圈表示巴颜喀拉地块周缘1996年以来发生的7级以上地震。黑线为活动块体边界。I: 塔里木-华北克拉通; II: 柴达木地块; III: 巴颜喀拉地块; IV: 羌塘地块; V: 拉萨地块; VI: 喜马拉雅地块。F1: 西昆仑-祁连山加里东期缝合带; F2: 昆仑山华力西期缝合带; F3: 金沙江印支期缝合带; F4: 班公湖-怒江燕山期缝合带; F5: 雅鲁藏布江喜马拉雅期缝合带

缘断裂上,目前已发生两次8级以上地震和多次7级以上地震。从空间位置上看,喀喇昆仑山口7.1级地震(1996年)、玛尼7.5级地震(1997年)和玉树7.1级地震(2010年)发生在巴颜喀拉活动地块的南部边界上,汶川8.0级地震(2008年)、芦山7.0级地震(2013年)和九寨沟7.0级地震(2017年)发生在巴颜喀拉地块的东边界附近。对于巴颜喀拉地块北部边界带,昆仑山口西8.1级地震(2001年)发生在该边界带中段,新疆于田发生的两次7.0级以上地震(2008年和2014年)位于西段。此次玛多地震发生在北部边界东段,该强震的发生在空间上填补了这一区域7.0级以上地震的空白。

李钦祖等(1993)对中国大陆西部公元前193年至公元后1991年发生的7级以上地震进行分析,发现地震成组活动的概率达到70%。玛多地震的发生再次表明,目前巴颜喀拉块体仍然是中国大陆强震的主体活动地区之一,块体周围发生的系列强震具有很强的研究价值。根据地震与巴颜喀拉块体边界带的位置关系,可以看出玛多地震相对更靠近板块内部,这与近30年来地震主要发生在边界带上有一定差异。此外,余震区海拔高,地质构造研究程度低,不同地质学家根据卫星影像等资料解译的断层分布差异较大。此次玛多地震的发震断层是哪一条断裂?破裂面几何形态如何?余震活动有哪些特点?本文利用中国地震台网中心2021年5月22日至30日的震相观测报告,对此次地震

序列采用双差定位方法进行重新定位,探讨此次地震的发震构造和序列特征。

2 方法与数据

双差定位方法(Waldhauser和Ellsworth, 2000, 2002)是一种相对定位方法,其通过对一定空间范围内的地震事件两两组对,根据组对事件之间的震相到时差来获得事件对的相对空间分布,给出的地震位置可以很好地刻画发震断层的形态,已在国内几次重大地震序列精定位工作中发挥了重要作用(黄媛等, 2008; 郑勇等, 2009; 王未来等, 2012, 2014; 张广伟等, 2013; 房立华等, 2013, 2018; Han等, 2014; Xie等, 2015; 谢祖军等, 2018; 郑勇和郭汝梦, 2021)。双差定位方法的基本方程为

$$\Delta t_{jk} - \Delta t_{ik} = -S_{jk}\Delta X_j + S_{ik}\Delta X_i + \varepsilon_{jk} - \varepsilon_{ik}, \quad (1)$$

其中, Δt_{ik} 和 Δt_{jk} 分别对应地震*i*和*j*到台站*k*的到时(走时)残差; X_i 和 X_j 分别是两个震源的位置矢量; S_{ik} 和 S_{jk} 是两个震源位置到台站*k*的地震射线的慢度矢量, ε_{ik} 和 ε_{jk} 分别为地震在台站的到时拾取误差。从原理上可以看出,相对于常规单个事件定位方法,双差方法在较大程度上消除了地壳速度结构横向不均匀性带来的定位误差,进而在定位过程中较好地消除了射线路径上介质异常的影响(实际走时相对于由模型计算的理论走时的偏离)。

玛多地震发生后, 青海省地震局利用地震周边固定台站和流动台站对该地震序列进行了快速分析, 距主震400km范围内的53个台站为精定位研究提供了宝贵的数据. 为确保震相数据的可靠性, 我们对2021年5月22日至5月30日的震相观测报告数据进行了筛选, 从中挑选出满足以下两个条件的地震事件: (1) 参与定位的台站数量不小于4个; (2) 震级大于0. 选取的1480个地震的分布见图2a. 利用这些震相数据进行地震重定位, 要求震相数量不小于6个, 满足条件的地震有1413个. 经过地震事件组对后参与重定位的地震数量为1199个, 台站数量为52个(图2b). P波绝对到时52352个, S波绝对到时29624个. 在重定位过程中, 一维速度模型参考天然地震和人工地震的观测结果综合构建: 首先采用接收函数 $h-\kappa$ 扫描方法(Zhu和Kanamori, 2000; Wang等, 2017), 获得了震区邻近固定台站玛多台下方的地壳厚度和波速比, 分别为68km和1.72. 地震定位使用的P波速度模型参考人工地震测深结果(嘉世旭等, 2017)和区域地震层析成像结构(Xin等, 2018), 选取距离震源区最近的巴颜喀拉地块中央(花石峡炮)的模型, 对地壳厚度进行修正, 建立了重定位使用的速度模型(表1).

3 结果与讨论

3.1 地震序列重新定位

重定位结果显示, 主震位于34.652°N、98.398°E,

表 1 重定位时使用的一维P波速度模型

速度(km s ⁻¹)	顶界面深度(km)
5.50	0
5.80	2
6.00	18
6.60	34
6.90	55
8.00	68

震源深度7.6km(图3a). 重定位后, 纬度、经度和深度方向的平均定位误差分别为0.27、0.24和0.50km, 走时残差为0.12s(图4). 原始观测报告中未给出定位误差, 只有定位残差, 平均定位残差为0.54s. 重新定位后, 定位走时残差明显减小, 震源相对位置的定位精度有较大提高. 相比初始定位结果, 重定位后的地震序列呈现明显的NWW向线性分布的构造特征, 拟合得到余震震中的走向为285°, 主要分布在玛多-甘德断裂与达日断裂之间, 距离两条断裂约20km, 最东端与玛多-甘德断裂相交, 余震整体分布与昆仑山口-江错断裂在此处向东延伸一致. 除了这一线性分布特征, 在两端都出现了地震条带分叉特征. 在余震区西段北侧出现了NW向线性分布, 可能是此次地震触发的分支断裂活动. 在余震区的东端出现了马尾状分叉特征, 逐渐转向东西. 东段的分叉现象, 与2010年玉树地震序列有相似之处(王未来等, 2012). 在主震东侧25km处存

图 2 玛多地震序列震中和周边地震台站分布

(a) 玛多地震序列初始位置分布. 红色五角星和蓝色圆圈分别表示主震和余震. (b) 地震台站分布图. 红色三角形表示固定台站, 绿色三角形表示流动台站

图3 重定位后的玛多地震序列分布

(a) 震中分布图; (b) 震源深度剖面. 红色五角星和圆圈分别表示主震和余震震中, 红色虚线勾为余震稀疏段落, 色标表示地震序列距主震的相对时间

在一个余震稀疏段落, 长约20km. 图3b给出了沿AA'剖面的震源深度分布, 显示整个地震序列总长度约170km, 主震在水平方向上位于整个剖面正中央的位置, 在垂向上位于余震最为集中的位置(8km).

由于台网较为稀疏, 为保证震中的定位精度, 青海省地震局在初步定位时, 将多数余震的震源深度设为10km. 为分析震源深度初值的影响, 我们将震源深度设为5~15km的随机数, 进行重新定位, 发现整体趋势变化不大. 由于速度模型对定位结果也有一定影响, 我们又比较了人工测深模型和Crust 1.0速度模型, 发现利用不同速度模型确定的余震分布特征基本一致, 表明余震序列的震源深度可靠性较高. 重定位后的震源深度主要分布在4~16km(图5). 深地震探测剖面显示, 巴颜喀拉地块中部地壳具有较强的低速反射构造(嘉

世旭等, 2017). 区域面波成像反演研究也显示该地区中地壳(20~40km)存在低速层(Huang等, 2020). 这表明巴颜喀拉地块中部的中地壳力学强度较小, 以塑性变形为主, 不易发生地震. 该地区上地壳主要在2~17km范围内, 上部由强弱不同的梯度层及下部低速层构成(嘉世旭等, 2017), 力学强度较大的介质主要局限在10km深度附近. 重定位结果显示, 多数余震分布在8~13km深度范围内, 表明此次地震主要错断这一层位的介质.

图6给出了地震序列随时间的分布特征. 在主震发生后6小时内, 余震主要发生在距离主震较近的中部区域, 在西部地震呈发散状分布, 在东南段有一个约20km长的无震区域; 之后的18个小时, 余震更为集中地分布在主断裂上, 而且东南段的“余震稀疏段”也出

图 4 重定位后地震序列在纬度(a)、经度(b)和深度(c)方向的误差以及走时残差(d)柱状分布图

图 5 重定位后玛多地震序列的震源深度分布

现一定数量的地震。考虑到本文使用的目录均来自青海省地震局所分析的震相资料, 采用数据来自周边固定台站和2014年架设的加密流动台站, 不存在台站布局变化、处理方法变化等情况, 因此, 早期的地震稀

疏段落是客观存在的。

在震后第二天(图6c), 余震除了沿着早期断裂条带状分布外, 在东西两端都出现了分叉现象, 西部两支分叉相对较长约50km, 与地震集中带走向相差约20°, 可以看到明显的区分; 而东段地震两支分叉较短, 分叉的角度较小, 地震事件较多不好区分。图6d给出了主震发生两天之后的余震分布, 地震主要沿着早期的条带上分布, 其特征与图6c差异不明显。整体而言, 早期出现的“余震稀疏段”, 后期地震活动性也相对较弱, 根据地震破裂过程初步反演结果(<http://www.cea-igp.ac.cn/cxdt/278269.html>), 玛多地震为双侧破裂, 而且东南段能量相对更强, 东段分叉处存在一个从SEE到SE的较大转弯, 这可能导致东段转弯部位受力较大, 而在主震和转弯段之间地段受力相对较小。结合破裂过程和InSAR处理结果(<http://www.cea-igp.ac.cn/kydt/278249.html>), 这个稀疏段落是同震滑移量较大和形变较大的区域, 反映了同震破裂释放能量充分, 震后瞬时

图6 重定位后玛多地震序列余震震中位置随时间的变化

色标同图3

应力调整较少, 因此这一段落余震较少。

3.2 地震序列深度分布特征

图7显示地震序列在东西两端有分叉现象, 且西部北侧的分支呈线性分布, 这些事件主要分布在10~20km深度范围, 浅部较少, 这与其他剖面的分布特征略微不同。为了进一步分析地震序列的三维空间分布, 我们绘制了14个震源深度剖面(图7)。每个横截面在地面的投影如图7所示。MM'、NN'和OO'横截面的横向范围为 $\pm 4\text{km}$, 其他截面的横向范围为 $\pm 10\text{km}$ 。位于最西段的4个截面(BB'、CC'、DD'和EE'), 地震主要分布在 $\pm 4\text{km}$ 内, 西段深部的地震随着深度增加小幅向西南倾斜。FF'截面上地震近垂直分布, 而在距离主震较近的GG'、HH'、II'和JJ'这四个截面内, 地震随着深度增加略向东北倾斜, 这与西段的倾斜方向有所不同。KK'截面大致对应图6a的“余震稀疏段”, 事件数量相比其周围截面明显偏少, 但仍可看出地震事件近垂直分布。LL'截面余震较多, 有向西南倾斜的趋势。在南部两个分支上的MM'和NN'截面上, 南侧的分支MM'呈现两条竖线, 与该分支附近地震相对分散有关, 北侧的NN'剖面上的地震事件近垂直分布。综合地震条带及其分支的各截面特征, 余震序列主要近垂直分布, 呈现走滑断层型地震的特征, 这与此次玛多主震震源机制一致(图1)。

重定位结果显示, 在震源区西北侧有一个较为显著的余震分布条带, 走向北西, 长度约50km。从震源深度剖面图可以看出(图7), 西北侧分支断层(OO')和断层西端(BB'-EE')的余震分布深度有些差异: 主破裂带附

近地震以5~18km深度为主, 而西部的次级断层附近的地震深度相对较大, 多数地震主要分布在10~25km, 极少分布在浅部。地震科考表明, 该次级断裂在地表没有明显破裂, 只有不连续的地裂缝, InSAR反演结果也表明西北侧的次级断裂附近无地表破裂, 但是条纹有反应(李涛、冯万鹏, 私人通讯)。根据不同时段的余震演化(图6), 西侧次级断裂带附近在主震后6小时内并没有呈现条带状分布, 6小时后, 该次级断裂附近余震活动有些增强, 不过地震数量仍明显少于主破裂带, 因此推测西北侧的断裂没有参与主震破裂。然而, 该次级断裂位于与主破裂相连接的部位, 接近主破裂面从向西南倾斜到向东北倾斜转换的位置, 属于地震破裂带的不平整地带, 在地震破裂过程中容易改变周围地区的静态应力场, 进而触发该地区的地震活动。

为精细刻画发震断层迹线和断层形态的变化, 根据地震分布特征, 对主体条带和各分支进行框选, 然后标记主体条带和分支的主要特征节点(图8a中的正方形图标), 并获得各节点之间的方位情况。结果显示, 主体条带的8个节点按照 282° 方位角进行展布, 主震发生在第8个节点, 从该节点往东的三个线段方位角分别是 289° 、 297° 和 289° , 呈现一定的起伏, 再往东的三段方位角在 294° ~ 298° 范围内变化。由此可见, 这一主条带整体呈弧形, 而此次主震发生的中段区域是主条带上方位角偏转最大的区域, 偏转角度达 15° 。西北和东南两个分支也展现了一定的方位角变化, 西北分支由北向南方位角从 306° 逐渐减小到 295° ; 东南两个分支从主条带向东偏转, 在较短的距离上方位角分别从 282° 逐渐减小至 263° 、从 298° 逐渐减小至 268° , 呈现

图 7 玛多地震序列震源深度剖面

五角星和圆圈分别表示重定位后的主震和余震序列, 颜色代表地震序列的深度

明显的弧形条带。

图7显示各个截面上地震主要分布在横截面 $\pm 5\text{km}$ 范围内。我们将图8a的各节点相连, 用宽 $\pm 5\text{km}$ 、长 $\pm 5\text{km}$ 的窗体沿着地震条带或分支挑选地震, 然后分别计算 >16 、 $13\sim 16$ 、 $10\sim 13$ 、 $6\sim 10$ 和 $0\sim 6\text{km}$ 深度范围内震中位置的均值(图8b)。在主条带西段, 较深($>13\text{km}$)地震条带在浅部($<13\text{km}$)条带的西南侧; 但在主条带中段以及南侧的少震区段, 较深地震条带在浅部条带的东北侧; 在往南分支交汇部位以及东南那两个分支条带上, 各个深度地震条带基本合并在一起。从各个深度地震条带连续性和光滑度来看, $6\sim 10$ 和 $10\sim 13\text{km}$ 这两个深度的条带连续性好且最光滑, $0\sim 6\text{km}$ 深度条带在东南段的少震区连续性较差, 而在主震西北端出现不光滑偏移。 $13\sim 16$ 和 $>16\text{km}$ 的两个深度上的地震条带连续性最差, 出现多次的偏转, 暗示地震破裂面在

13km 以下的深度比浅部具有更复杂的几何形态。

最后, 我们选取图8a中的线段中间点, 采用长宽 $\pm 5\text{km}$ 的窗体选组地震, 并对这些地震的偏离距与深度进行线性拟合, 获得对应的倾角(图8b)。图中的数字代表各段的倾角。可以看出地震条带西段的倾向以西南为主, 最小的倾角为 76.6° 。从主条带与西北分支的交汇位置到东南段的“余震稀疏段”的倾向以东北为主, 其中西侧的交汇部位倾角最小为 76.7° , 该部位附近倾角变化最为显著。东段两个分支和西北的分支的倾角都接近 90° 。关于主震东侧的“余震稀疏段”, 根据拟合给出的断层迹线和各段倾角可以看出, 主震东侧的断层迹线更为平滑, 而且断层倾角更为直立, 因而主震破裂向东破裂可以更为充分。我们推测震后早期的“余震稀疏段”是由于主震时该段落积累的应变能得在同震阶段释放较完整造成的。后续随着时间的变化, 该段

图8 重定位后玛多地震序列的分段走向和不同深度上的水平位置展布

(a) 地震序列的分段及各段走向变化, 其中正方形为选取的各段主要节点, 图中数值表示各段走向($^{\circ}$); (b) 5个深度范围的地震序列水平位置均值及各段倾角($^{\circ}$), 倾角大于 90° 表示向西南倾斜. 不同颜色圆点为不同深度范围内的地震事件水平位置平均值

也逐渐产生了一定数量的余震, 推测该“余震稀疏段”短期内地震危险性较低. 根据余震序列分布特征, 玛多地震的破裂区域呈弧形, 而且在深部具有更为复杂的几何形态, 在地震破裂过程反演时, 考虑这一破裂面复杂形态可以获得更精细的结果.

3.3 发震断层与机理讨论

玛多地震发生在NWW走向的巴颜喀拉块体北部边界带附近, 是在印度板块向北推挤、青藏高原地块隆升、巴颜喀拉次级活动地块向东挤出背景下的又一次大地震. 从图4可以看出, 玛多地震周边有一系列平行的NWW向大型走滑断裂, 包括北边的东昆仑断裂

带、玛多-甘德断裂带, 南侧的达日断裂、巴颜喀拉山主峰断裂和清水河断裂带, 而距离本次地震序列最近的是昆仑山口-江错断裂带. 据邓起东等(2002)的活动断裂划分, 昆仑山口-江错断裂西段位于巴颜喀拉块体北部边界带上, 总长度超过650km, 断裂整体呈北西向展布, 断层倾向以北东为主, 多表现为强烈的左旋走滑性质; 新一代活动断裂图(徐锡伟等, 2008)已将此段标记为东昆仑断裂带的库赛湖-玛曲断裂的一部分. 2001年11月14日昆仑山口8.1级地震地表破裂带最东端未继续沿东昆仑主断裂破裂, 而是沿着昆仑山口-江错断裂向东破裂. 本次玛多地震的地表破裂与余震序列均位于昆仑山口-江错断裂的东段. 从东南端余震序

列的分叉来看, 主要为东西向, 长度较大, 且地震事件较多, 但它与主破裂面存在较大角度偏转, 这表明此处很有可能是断裂带的末梢位置, 这与昆仑山口-江错断裂分布范围大致相符. 无论是邓起东等(2002)的断裂分布图, 还是徐锡伟等(2008)的新一代活动断裂分布图, 东段的余震序列都以近东西向横穿玛多-甘德断裂带, 这与玛多-甘德断裂带在此处的西北走向具有很大的角度差异, 表明该断裂不大可能是本次强震的发震断层. 整个余震序列跟昆仑山口-江错断裂东段距离最近, 而且二者在空间展布上具有一定的重合度. 因此, 分析认为昆仑山口-江错断裂是本次强震的主要发震断层.

区域活动断裂分布显示, 东昆仑断裂带与昆仑山口-江错断裂西段相接, 往东一系列的断裂带(清水河断裂、巴颜喀拉山主峰断裂、达日断裂和玛多-甘德断裂带)依次与其相接, 并且向东呈现扫把状发散特征. 昆仑山口-江错断裂与东昆仑主断裂2001年昆仑山口地震地表破裂最东段, 在走向上同为东昆仑断裂带一条分支断裂, 1937年花石峡 $M7.5$ 级地震的断层为东昆仑主断裂, 位于本次玛多地震以北, 与昆仑山口-江错断裂近平行. 前人研究表明, 作为巴颜喀拉地块块体北边界的东昆仑断裂从西向东的滑动速率逐渐减小, 从大于 10mm a^{-1} 逐渐变成 $5\sim 6\text{mm a}^{-1}$, 最低至 2mm a^{-1} (Kirby等, 2007; 李陈侠等, 2011; 李煜航等, 2015). 断层性质向东逐渐从以走滑分量为主, 转变至以逆冲分量为, 而导致块体东端的汶川地震逆冲断层错动, 这些都表明巴颜喀拉地块东北部以块体挤压为主. 东昆仑断裂带的滑动速率向东逐渐减小, 意味着巴颜喀拉地块东部存在较强的内部变形, 起源于北部边界的NWW向断裂可能逐级分担东昆仑断裂带向东的滑动量. 根据地震与边界带的位置关系, 此次地震发生相对位置更靠近块体内部. 伴随青藏高原块体运动, 青藏高原7级以上强震主要沿大型块体边界断裂带分布(邓起东等, 2002; 张培震等, 2003), 当块体前缘受到相对坚硬的盆地阻挡, 板块内部会发生差异变形, 形成一系列与边界性质相同的断裂并发生强震活动.

4 结论

2021年5月22日的青海玛多 $M_s7.4$ 地震, 发生在NWW走向的巴颜喀拉块体北部边界带附近, 此次地

震相对位置更靠近块体内部, 这与近30年来地震主要发生在边界带上有一定差异. 本文采用双差定位方法对震后8天的地震序列进行重新定位研究, 获得了以下认识:

(1) 重定位结果显示整个地震序列总长度约170km, 主震东西两侧破裂长度各约85km, 震中呈现明显的NWW向线性分布, 通过拟合得到其平均走向为 285° . 在余震区两端都出现了余震分布分叉的特征, 在西端有一个NW向的分叉, 地震事件相对较少; 在东端的分叉呈东西向, 但地震事件较多. 主震东侧在震后6小时内存在一个“余震稀疏段”, 该段在后期的余震活动也相对较弱, 这可能与主震破裂过程中能量释放充分有关, 短期地震危险性不大.

(2) 震源深度剖面显示, 地震序列整体呈现近垂直分布, 但不同段落形态有一定差异: 西段总体上展现向西南小幅倾斜, 中段展现向东北小幅倾斜的特征, 在最东段的地震分叉两支则都呈近垂直分布. 通过对主体条带和分支的主要特征节点进行标定, 并按照节点给出了走向、倾向和倾角, 主条带整体呈弧形. 西段走向约 282° , 而从中段到东段的走向主要在 $289^\circ\sim 299^\circ$ 变化, 此次主震发生的中段区域是主条带上方位角偏转最大的区域, 偏转角度达 15° . $6\sim 13\text{km}$ 深度上的条带连续性良好且最光滑, 13km 以下的地震条带连续性差且出现多次偏转, 暗示地震破裂面在深部比浅部具有更复杂的几何形态.

(3) 距离本次地震序列最近的断裂是昆仑山口-江错断裂带, 该断裂西段位于巴颜喀拉块体北部边界带上, 是2001年昆仑山口8.1级地震的发震断层. 此次玛多地震序列东南段存在分叉现象, 且以东西向北侧分支为主导, 破裂面走向与中西部存在较大的角度偏转, 表明此处很有可能是昆仑山口-江错断裂带的末梢位置. 本次地震序列东段以东西向横穿玛多-甘德断裂带, 二者具有较大的角度差异, 表明该断裂不大可能是本次强震的发震断层. 整个序列跟昆仑山口-江错断裂东段距离最近, 而且二者在空间展布上具有一定的重合度, 因此, 综合判断昆仑山口-江错断裂是本次强震的主要发震断层.

致谢 感谢责任编辑和匿名审稿人的高效评审, 感谢中国地震台网中心和青海省地震局提供震相数据, 感谢郑勇教授、张勇教授、王墩教授、任治坤研究员、李涛研

究员、李智敏副研究员和冯万鹏副教授在本文成稿过程中提出的意见和建议。余震序列目录和断层迹线见网络版附件Maduo_reloc.txt和Maduo_fault_trace.txt。相关数据也可从中国地震科学探测台阵数据中心获取(www.chinarraydmc.cn/highlights/queryPage?mid=44&mpid=28)。

参考文献

- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 杨晓平, 闵伟, 楚全芝. 2002. 中国活动构造基本特征. 中国科学D辑: 地球科学, 32: 1020–1030
- 房立华, 吴建平, 王未来, 吕作勇, 王长在, 杨婷, 蔡妍. 2013. 四川芦山 $M_s7.0$ 级地震及其余震序列重定位. 科学通报, 20: 1901–1909
- 房立华, 吴建平, 苏金蓉, 王毛毛, 蒋策, 范莉苹, 王未来, 王长在, 谭夏露. 2018. 四川九寨沟 $M_s7.0$ 地震主震及其余震序列精定位. 科学通报, 63: 649–662
- 黄媛, 吴建平, 张天中, 张东宁. 2008. 汶川8.0级大地震及其余震序列重定位研究. 中国科学D辑: 地球科学, 38: 1242–1249
- 嘉世旭, 林吉焱, 郭文斌, 赵楠, 邱勇. 2017. 巴颜喀拉块体地壳结构多样性探测. 地球物理学报, 60: 2226–2238
- 李陈侠, 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 陈桂华, 杨虎, 安艳芬, 高翔. 2011. 东昆仑断裂带中东部地震破裂分段性与走滑运动分解作用. 中国科学: 地球科学, 41: 1295–1310
- 李钦祖, 于利民, 王吉易, 万迪, 陈绍绪. 1993. 中国大陆强地震的成组活动和概率预报. 中国科学B辑: 化学 生命科学 地学, 23: 519–526
- 李煜航, 崔笃信, 郝明. 2015. 利用GPS数据反演青藏高原东北缘主要活动断裂滑动速率. 地球科学(中国地质大学学报), 40: 1767–1780
- 汪一鹏. 1998. 青藏高原活动构造基本特征. 见: 活动断裂编委会, 编. 活动断裂研究(6). 北京: 地震出版社
- 王未来, 吴建平, 房立华, 王长在. 2012. 2010年玉树 $M_s7.1$ 地震及其余震的双差定位研究. 中国科学: 地球科学, 42: 1037–1046
- 王未来, 吴建平, 房立华, 来贵娟. 2014. 2014年云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列的双差定位. 地球物理学报, 57: 3042–3051
- 谢祖军, 郑勇, 姚华建, 房立华, 张勇, 刘成利, 王毛毛, 单斌, 张会平, 任俊杰, 季灵运, 宋美琴. 2018. 2017年九寨沟 $M_s7.0$ 地震震源性质及发震构造初步分析. 中国科学: 地球科学, 48: 79–92
- 徐锡伟, 于贵华, 马文涛, 林传勇, Yann Klinger, Paul Tapponnier. 2008. 昆仑山地震($M_w7.8$)破裂行为、变形局部化特征及其构造内涵讨论. 中国科学D辑: 地球科学, 38: 785–796
- 张广伟, 雷建设. 2013. 四川芦山7.0级强震及其余震序列重定位. 地球物理学报, 56: 1764–1771
- 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学D辑: 地球科学, 33: 12–20
- 郑勇, 马宏生, 吕坚, 倪四道, 李迎春, 韦生吉. 2009. 汶川地震强余震($M_s \geq 5.6$)的震源机制解及其与发震构造的关系. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 413–426
- 郑勇, 郭汝梦. 2021. 汶川-芦山地震间的空区危险性研究: 现状、思考和挑战. 中国科学: 地球科学, 51: 483–486
- Han L, Zeng X, Jiang C, Ni S, Zhang H, Long F. 2014. Focal mechanisms of the 2013 $M_w6.6$ Lushan, China earthquake and high-resolution aftershock relocations. *Seismol Res Lett*, 85: 8–14
- Huang S, Yao H, Lu Z, Tian X, Zheng Y, Wang R, Luo S, Feng J. 2020. High-resolution 3-D shear wave velocity model of the Tibetan Plateau: Implications for crustal deformation and porphyry Cu deposit formation. *J Geophys Res-Solid Earth*, 125: e19215
- Kirby E, Harkins N, Wang E, Shi X, Fan C, Burbank D. 2007. Slip rate gradients along the eastern Kunlun fault. *Tectonics*, 26: TC2010
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California. *Bull Seismol Soc Am*, 90: 1353–1368
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2002. Fault structure and mechanics of the Hayward Fault, California, from double-difference earthquake locations. *J Geophys Res*, 107: 1–5
- Wang W, Wu J, Fang L, Lai G, Cai Y. 2017. Sedimentary and crustal thicknesses and Poisson's ratios for the NE Tibetan Plateau and its adjacent regions based on dense seismic arrays. *Earth Planet Sci Lett*, 462: 76–85
- Xie Z, Zheng Y, Liu C, Xiong X, Li Y, Zheng X. 2015. Source parameters of the 2014 $M_s6.5$ Ludian earthquake sequence and their implications on the seismogenic structure. *Seismol Res Lett*, 86: 1614–1621
- Xin H, Zhang H, Kang M, He R, Gao L, Gao J. 2018. High-resolution lithospheric velocity structure of continental china by double-difference seismic travel-time tomography. *Seismol Res Lett*, 90: 229–241
- Zhu L, Kanamori H. 2000. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions. *J Geophys Res*, 105: 2969–2980

(责任编辑: 姚华建)