

戴丹青,席楠. 2023. 2023 年 8 月 6 日山东平原  $M5.5$  地震破裂过程快速反演. 中国地震, 39(3):689~694.

# 2023 年 8 月 6 日山东平原 $M5.5$ 地震 破裂过程快速反演

戴丹青 席楠

中国地震台网中心,北京 100045

**摘要** 北京时间 2023 年 8 月 6 日 2 时 33 分,山东德州市平原县发生  $M5.5$  地震。震后第一时间利用国家烈度速报与预警工程项目在山东地区建成的强震台站数据对该次地震进行破裂过程快速反演。基于破裂方向性效应,通过趋势面拟合的方法确定了此次地震的主破裂面。反演得到的破裂模型表明,破裂面呈现 NE-SW 走向,破裂主要由震中向 NE 方向拓展,地震破裂持续时间为 8s,破裂长度约为 8km,最大滑动量为 0.024m。相对于 6 级以上地震,此次地震震级相对较小,破裂最大滑动量偏小,破裂过程也相对简单。震后统计的余震分布与破裂模型显示的破裂区域能够较好地吻合,在破裂区域的边界附近余震分布也较为集中,推断可能是由于积累的应力能量进一步释放引发的余震。

**关键词:** 震源破裂过程 预警台站 趋势面分析 余震分布

[文章编号] 1001-4683(2023)03-0689-06 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

据中国地震台网中心测定,2023 年 8 月 6 日 2 时 33 分在山东德州市平原县发生  $M5.5$  地震,震中位于  $37.16^{\circ}\text{N}$ ,  $116.34^{\circ}\text{E}$ ,震源深度 10km。据山东省应急管理厅统计<sup>①</sup>,截至 8 月 6 日 16 时,地震共造成 24 人轻伤(德州 23 人、聊城 1 人),213 处房屋及墙体受损(德州 165 处、聊城 48 处),震区水、电、通信等基础设施正常。据 1970 年以来的历史地震统计,此次地震震中 100km 范围内  $M3.0$  级及以上地震共发生 8 次,其中 3.0~3.9 级地震 6 次,4.0~4.9 级地震 1 次,5.0~5.9 级地震 1 次,最大为本次山东德州市平原县 5.5 级地震。

地震发生后,尽快了解震源特性(尤其是对破裂过程的认识)对于震情判断意义重大。通过地震破裂过程反演,可以得到地震破裂的持续时间和滑动位移的空间分布,推测地震破坏的烈度范围,用于后续灾情评估以及抢险救援。震源破裂过程反演根据所用数据类型可分为远震资料反演和近场强震资料反演,从震后应急产出快速响应的角度来说,近场强震资料反演更具优势。基于近场全波形数据迭代反褶积与叠加(IDS)方法(Zhang et al, 2014)具

[收稿日期] 2023-08-22 [修定日期] 2023-09-04

[项目类别] 中国地震科学实验场项目协作任务(DQJB23Z03-04)资助

[作者简介] 戴丹青,男,1990 年生,工程师,主要从事地震预警运维和震源破裂过程研究工作。E-mail: daidanqing@seis.ac.cn

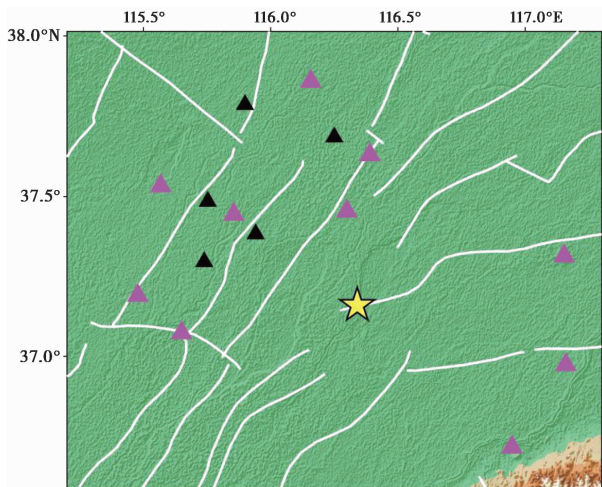
席楠,通讯作者,男,1986 年生,高级工程师,主要从事地震烈度速报与地震预警研究。E-mail: xinan314@seis.ac.cn

① [https://news.cctv.com/2023/08/06/ART15\\_JriUFDpFzEZZNvzQyVa230806.shtml](https://news.cctv.com/2023/08/06/ART15_JriUFDpFzEZZNvzQyVa230806.shtml)

有稳定、高效以及受主观因素影响小的特点,已在多次震例研究中得到成功检验。国家烈度速报与预警工程项目在全国建设了大量台站,结合预警台网实时高密度的数据台站,可以实现快速、稳定以及高度流程自动化的地震破裂过程反演。利用此套方法进行国内大震震后破裂过程快速产出已逐渐成熟化(戴丹青等,2022a;2022b)。对于国内6级以上地震的震源破裂过程产出,中国地震台网中心预警速报团队已经积累了许多成功的经验,得益于预警台网密集的数据台站,此次5.5级地震也得出了稳定可靠的震源破裂过程结果,该结果拓宽了国内中强震震源破裂过程应急产出的震级下限。

## 1 数据准备

震后数据自动获取程序根据发震时间对预警实时流数据进行事件截取。对于数据台站优先就近选取,此次地震距离震中较近的山东平原地区,80km范围内共有15个强震仪记录到数据。在反演之前对数据进行预处理。首先,将数据波形按照地震发震时刻进行对齐,对数据以0.5s的时间间隔进行重采样并将加速度记录积分到速度记录。对数据波形进行基线校正以及0.05~0.11Hz的带通滤波,从而减弱数据可能存在的基线漂移以及浅层结构放大效应的影响,保证子断层点源近似条件的成立(郑绪君等,2017)。所有台站数据经过初次反演,通过波形拟合度(拟合度大于0.4)筛选了10个台站参与最终模型的迭代反演(图1)。



注:黄色五角星代表震中;紫色三角形为最终反演所用台站;黑色三角形为筛除台站。

图1 台站分布

在反演之前要考虑不同子断层到台站的路径差异,需要计算格林函数,可直接从提前准备构建好的格林函数库中进行调用。格林函数的计算基于全球 crust1.0(Laske et al,2013)局部一维地壳速度结构模型(图2),采用Wang等(2017)的计算方法得到。在反演方法上采用由Zhang等(2014)提出的迭代反褶积叠加法(IDS),该方法利用近场强震数据反演震源破裂过程,具有稳定、高效以及用时较短的特点,适用于震后大震应急的需求,已在多次国内大震应急中应用并取得良好效果(戴丹青等,2022;2023)。

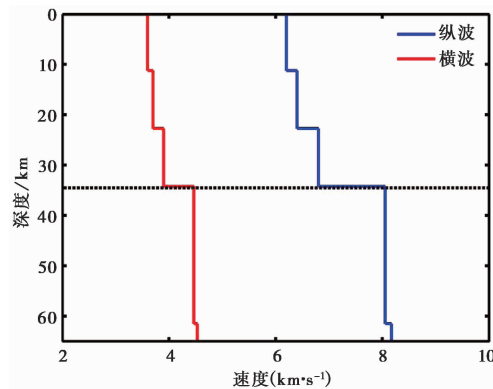


图 2 地壳速度结构模型(地壳厚度 35km)

## 2 破裂方向判断与破裂面选取

震后第一时间,中国地震台网中心利用 W 震相反演的方法 (Kanamori et al, 2008) 给出了此次地震的震源机制,涉及 2 个节面(节面 I:走向 = 225°,倾角 = 69°,滑动角 = -150°;节面 II:走向 = 123°,倾角 = 62°,滑动角 = -24°),分别呈现 NE-SW 走向与 NW-SE 走向。席楠等(2021)利用趋势面拟合的方法来快速判定地震破裂方向。趋势面分析利用多元回归分析的手段,可以有效分析某一属性数据在空间上的分布规律与变化趋势(张宏伟等,2000;王江萍等,2009)。这里趋势面分析采用的是多项式拟合,其表达式为

$$Z = a + bx + cy \tag{1}$$

其中,  $x, y$  为观测点的平面横、纵坐标,  $Z$  为观测值。

由于地震的多普勒效应(胡进军等,2011),地震波振幅在沿着地震破裂的方向上增强,在相反方向上减弱。地震烈度的分布同样遵循这一规律,选取距离震中范围 60km 内的 88 个预警台站,去除场地效应后,计算了由三分量合成的峰值速度得到的烈度值数据(IPGV),将这些台站数据代入公式(1),得到超定方程,即

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m & y_m & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b \\ c \\ a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ \vdots \\ Z_m \end{pmatrix} \tag{2}$$

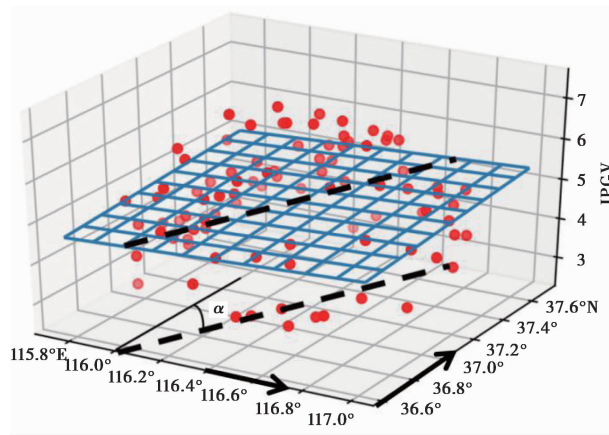
通过最小二乘法求解方程组可以得到结果,即

$$Z = 0.309x + 0.418y - 46.505 \tag{3}$$

数据变化趋势的优势方向即是拟合趋势面的坡向,其与正北的夹角为

$$\alpha = \arctan\left(\frac{a}{b}\right) \times \frac{180}{\pi} = 36.475^\circ \tag{4}$$

通过计算得到了台站 IPGV 分布的方向趋势(图 3),可以看到数据变化趋势的优势方向呈现 NE-SW 分布,即反映了地震破裂的优势方向,故这里选取节面 I 作为主破裂面进行破裂过程的反演。



注：红点代表台站数据，网格平面代表拟合趋势面，黑色虚线代表了变化趋势优势方向。

图 3 IPGV 分布趋势面分析

### 3 破裂模型反演

以节面 I 作为主破裂面进行反演，取一个长与宽均为 34km 的平面作为破裂断层面，划分为 289 个子断层，每个子断层尺度均为 2km×2km。需要注意的是，破裂面的选取既不能太小，以至于破裂在断层面上还没有结束，也不能过大，从而引入干扰。初始可以给定一足够大的、包含全部破裂的断层面，然后根据反演结果进行调整，使得断层面大小刚好包含全部破裂信息而又不引入过多干扰。基于 IDS 方法反演得到此次地震的破裂模型(图 4)，由图 4

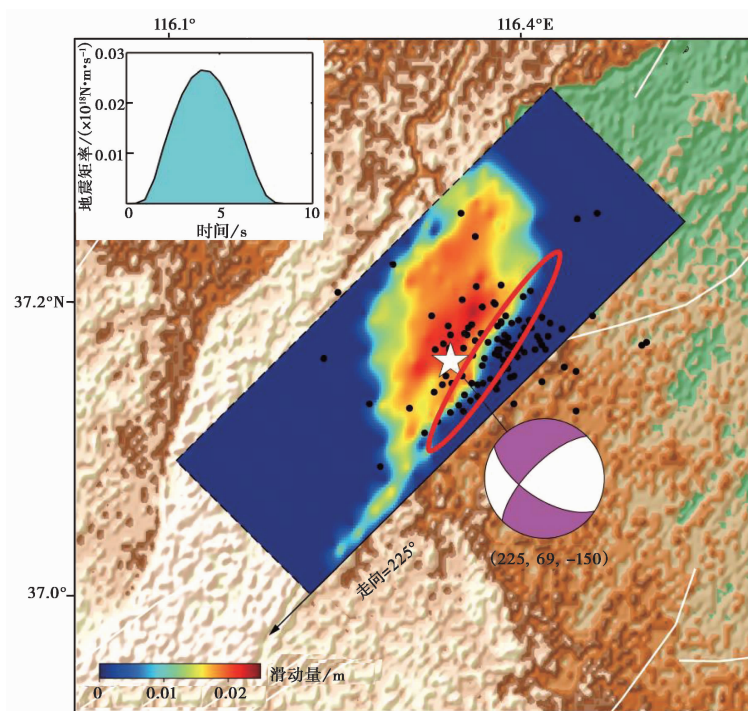


图 4 破裂模型



可见,破裂面呈现 NE-SW 走向,破裂主要由震中向 NE 方向拓展,最大破裂点位于破裂初始点 NE 方位 5.7km 处,最大滑动量为 0.024m。相对于 6 级以上地震,此次地震震级偏小,地震破裂过程相对简单,破裂最大滑动量也较小(戴丹青等,2022a;2022b)。从震源时间函数来看,整个地震持续时间为 8s,只包含一次破裂事件,破裂主要集中在 2~6s,在 4s 达到峰值,释放的地震矩为  $4.8 \times 10^{17} \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

震后截至 8 月 13 日 20 时,共统计到  $M_L 1.0$  以上余震 111 个,可以看到,余震呈 NE-SW 走向分布,其空间位置与地震破裂分布吻合度较高。值得注意的是,在破裂区域的边界附近(图 4 红色椭圆处),余震分布较为密集,这可能是由于主震破裂引发了周边断层活动,构造应力能量在破裂边界处并未完全释放,从而引发了后续一系列余震的发生。

## 4 结论与展望

利用预警强震数据对此次山东平原  $M_{5.5}$  地震进行了震源破裂过程快速产出。基于破裂方向性效应,通过趋势面拟合的方法,确定了此次地震破裂方向为 NE-SW 走向。得到的破裂模型表明,破裂面呈现 NE-SW 走向,破裂主要由震中向 NE 方向拓展。此次地震破裂持续时间为 8s,释放的地震矩为  $4.8 \times 10^{17} \text{ N} \cdot \text{m}$ 。此次地震破裂长度约为 8km,最大滑动量为 0.024m,位于破裂初始点 NE 方位 5.7km 处。

相对于 6 级以上地震,此次地震震级相对较小,破裂最大滑动量较小,破裂过程也相对简单。震后通过统计余震分布,发现其与破裂模型显示的破裂区域能够较好地吻合,同时也发现在破裂区域的边界附近余震分布也较为集中,推断可能是由于主震破裂引发了周边断层活动,积累的应力能量进一步释放引发了后续一系列余震。通过此次地震的震源破裂过程产出,可以看到,得益于预警国家烈度速报与预警工程建设的大量台站,对于震级为 5 级以上的中强震,在台站数据较为丰富的地区也能够得到稳定的破裂模型,这对于震源特性研究、余震预测以及震后救灾意义重大。

## 参考文献

- 戴丹青,孙丽,杨志高. 2022. 2022 年 9 月 5 日四川泸定  $M_w 6.6$  地震破裂过程研究. 地震地磁观测与研究, **43**(5):186~192.
- 戴丹青,杨志高,孙丽. 2023. 2022 年 1 月 8 日青海门源  $M_s 6.9$  地震破裂过程. 地震学报, **45**(5):814~822.
- 胡进军,谢礼立. 2011. 地震破裂的方向性效应相关概念综述. 地震工程与工程振动, **31**(4):1~8.
- 王江萍,马民涛,张菁. 2009. 趋势面分析法在环境领域中应用的评述及展望. 环境科学与管理, **34**(1):1~5.
- 席楠,李小军,杨天青. 2021. 基于实时观测数据快速判定地震破裂方向的方法研究. 中国地震, **37**(1):185~196.
- 张宏伟,陈学华,胡占峰. 2000. 活动断裂研究中的趋势面分析方法. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), **19**(3):225~228.
- 郑绪君,张勇,汪荣江. 2017. 采用 IDS 方法反演强震数据确定 2017 年 8 月 8 日九寨沟地震的破裂过程. 地球物理学报, **60**(11):4421~4430.
- Kanamori H, Rivera L. 2008. Source inversion of W phase: speeding up seismic tsunami warning. Geophys J Int, **175**(1):222~238.
- Laske G, Masters G, Ma Z T, et al. 2013. Update on CURST1.0-A1-degree global model of Earth's crust. In: EGU General Assembly 2013. Vienna: EGU.
- Wang R J, Heimann S, Zhang Y, et al. 2017. Complete synthetic seismograms based on a spherical self-gravitating Earth model with an atmosphere-ocean-mantle-core structure. Geophys J Int, **210**(3):1739~1764.

Zhang Y, Wang R J, Zschau J, et al. 2014. Automatic imaging of earthquake rupture processes by iterative deconvolution and stacking of high-rate GPS and strong motion seismograms. *J Geophys Res Solid Earth*, **119**(7):5633~5650.

## **Rapid Inversion of the Rupture Process of the *M*5.5 Earthquake in Shandong Pingyuan on August 6, 2023**

Dai Danqing, Xi Nan

China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

**Abstract** At 2:33a. m. on August 6, 2023 (Beijing time), an *M*5.5 earthquake occurred in Pingyuan county, Dezhou city, Shandong Province. Shortly after the earthquake, the rupture process of the earthquake was quickly inverted using the data of the strong motion stations in the Shandong region built by the National Intensity Rapid Reporting and Early Warning Engineering Project. Based on the directional effect of the rupture, the main fault plane of this earthquake was determined through trend surface fitting. The inversion rupture model shows that the rupture plane is in NE-SW trend, and the rupture mainly extends from the epicenter to the northeast. The rupture duration is 8 seconds, the length of the rupture is about 8 kilometers, and the maximum sliding amount is 0.024 meters. The magnitude of this earthquake is relatively small, so the maximum sliding amount of the rupture is relatively small, and the rupture process is also simple. The distribution of aftershocks is in good agreement with the rupture area shown by the rupture model. The aftershock distribution near the boundary of the rupture area is also relatively concentrated, suggesting that the earthquake may be caused by the further release of accumulated stress energy.

**Keywords:** Rupture process; Early warning station; Trend-surface analysis; Aftershock distribution