

## 2023年12月21日甘肃积石山6.2级地震应急产品

郭祥云, 张旭, 张, 韩立波, 房立华, 陈鲲, 刘瑞丰, 王永哲

## Emergency product report related to the 19 December 2023 $M_w$ 6.0 Jishishan earthquake Gansu province

Guo Xiangyun, Zhang Xu, Zhang Zhe, Han Libo, Fang Lihua, Chen Kun, Liu Ruifeng, and Wang Yongzhe

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2023-197>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 逆断层地震作用下三维沉积盆地地震动谱元法模拟

Spectral element method simulation of three-dimensional sedimentary basin under reverse-fault earthquakes  
地震科学进展. 2020(10): 13–22

#### 2020年7月12日唐山古冶5.1级地震揭示的北京城区地震动场地效应分析

Analysis on site effect of ground motion in Beijing urban area revealed by strong-motion records in  $M5.1$  Guye, Tangshan earthquake on 12<sup>th</sup> July, 2020  
地震科学进展. 2020(7): 14–19

#### 基于希尔伯特-黄变换的九寨沟 $M7.0$ 地震加速度记录时频分析

Time-frequency analysis of Jiuzhaigou  $M7.0$  seismic acceleration record based on Hilbert-Huang transform  
地震科学进展. 2019(7): 9–16

#### 2019年四川长宁 $M_s6.0$ 地震前破裂区内视应力和 $b$ 值的变化

Variations in apparent stress and  $b$  value in the rupture area before the 2019  $M_s6.0$  Changning earthquake  
地震科学进展. 2021(2): 49–58

#### 甘肃地震应急专题图改进设计与研究

Improved design and research of earthquake emergency thematic map in Gansu  
地震科学进展. 2019(10): 12–18

#### 2020年7月12日唐山古冶5.1级地震影响信息与启示

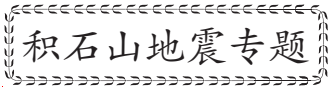
Information and enlightenment from the  $M5.1$  Guye, Tangshan earthquake on 12<sup>th</sup> July, 2020  
地震科学进展. 2020(7): 1–8



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郭祥云, 韩立波, 张旭, 等. 2023 年 12 月 18 日甘肃积石山 6.2 级地震震源参数和破裂特征 [J]. 地震科学进展, 2024, 54(1): 75-85. doi:10.19987/j.dzqxjz.2023-197

Guo X Y, Han L B, Zhang X, et al. Source parameters and rupture characteristics of the M6.2 Jishishan earthquake in Gansu Province on December 18, 2023[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2024, 54(1): 75-85. doi:10.19987/j.dzqxjz.2023-197



## 2023 年 12 月 18 日甘肃积石山 6.2 级 地震震源参数和破裂特征

郭祥云\* 韩立波 张旭 张喆 房立华 陈鲲 刘瑞丰 王永哲

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

**摘要** 2023 年 12 月 18 日 23 时 59 分(北京时间)甘肃积石山发生 6.2 地震。中国地震局地球物理研究所在震后启动快速响应, 组织相关领域研究人员对此次地震的震源参数、震源机制、破裂过程和地震辐射能量等进行了估计, 余震序列进行了重定位, 基于震源模型进行了震动图模拟、同震形变场模拟。结果表明, 此次地震发生在拉脊山东侧, 以逆冲机制为主, 能量集中在前约 8 s 内释放; 极震区震动烈度可能达 VIII 度以上, 可能的受灾范围近 6000 km<sup>2</sup>; 此次地震引起了显著的同震位移, 最大水平向位移达到 7.8 cm, 垂直向位移达到 15.8 cm。

**关键词** 震源参数; 破裂过程; 余震重定位; 地震动强度预测; 地震辐射能量; 同震形变场

中图分类号: P315 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2024)01-0075-11

doi: 10.19987/j.dzqxjz.2023-197

### Source parameters and rupture characteristics of the M6.2 Jishishan earthquake in Gansu Province on December 18, 2023

Guo Xiangyun, Han Libo, Zhang Xu, Zhang Zhe, Fang Lihua, Chen Kun, Liu Ruifeng, Wang Yongzhe

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract** At 23:59 on December 18, 2023 (Beijing time), a M6.2 earthquake occurred in the Gansu Province of Jishishan. The Institute of Geophysics, China Earthquake Administration initiated the response mechanism after this earthquake and organized geophysics researchers to estimate the source parameters, focal mechanism, rupture process, earthquake radiation energy and earthquake relocation of this earthquake. Based on the source model, the Shakemap and the coseismic deformation field simulation are carried out. The results demonstrate that the earthquake is of dominant thrusting mechanism. The energy was concentrated and released in the first 8 seconds. The earthquake intensity in the extreme seismic area possibly exceeded VIII, resulting in an estimated disaster range of approximately 6000 km<sup>2</sup>. This earthquake caused apparent horizontal coseismic displacement with maximum displacements reaching 7.8 cm and 15.8 cm.

收稿日期: 2023-12-24; 采用日期: 2023-12-30。

基金项目: 国家科技基础资源调查专项(2023FY101502-01)资助。

\* 通信作者: 郭祥云(1975-), 女, 高级工程师, 主要从事震源机制及构造应力场反演方面的研究。E-mail: ldazui@sina.com。



**Keywords** source parameters; rupture process; earthquake relocation; Shakemap prediction; earthquake radiation energy; coseismic deformation

## 0 引言

据中国地震台网正式测定,北京时间2023年12月18日23时59分在甘肃积石山发生6.2级地震,震源深度10 km,震中位于(35.7°N, 102.79°E)。此次地震发生在拉基山北缘断裂带东支。周边地震活动较弱,1900年以来震中附近50 km内仅发生这一次6级以上地震,100 km范围内发生2次6级以上地震,这次和1936年2月7日的甘肃康乐西南6.4级地震震中相距64 km(图1)。拉脊山断裂带地处中国南北地震带的北部,是青藏高原东北缘的一个重要组成区域,该地区由于青藏高原的隆起,加上欧亚板块与印度板块的长期挤压作用,是我国构造变形和地震活动最为强烈的地区之一。

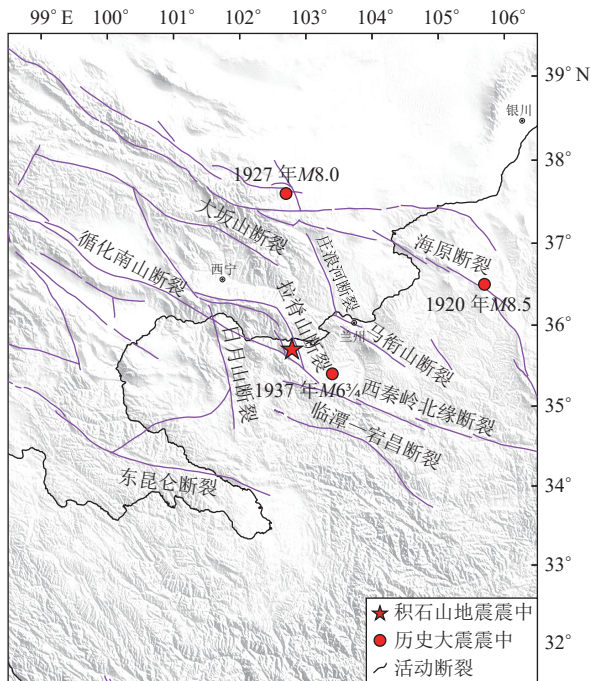


图1 积石山震中附近历史地震与断裂分布

Fig. 1 Historical earthquakes and fault distribution near the epicenter of Jishishan earthquake

准确估计精定位、震源特征以及地震动强度和地表形变,对于发震构造的厘定以及此次地震可能造成的震害等具有重要的意义。2023年12月18日甘肃积石山地震发生后,中国地震局地球物理研究所启动快速响应机制,组织相关研究人员,产出了震源破裂过程、震源参数、余震序列精定位、地震动强度预测、地震辐射能量估计、三维及InSAR同震形

变场模拟等科技支撑产品。

## 1 震源破裂过程

采用的远震体波波数据来自于IRIS数据中心震中距在30°~90°范围内GSN台网和FDSN台网的宽频带地震仪。根据波形数据的信噪比水平和台站空间分布的均匀性,选取了其中22个台站的垂直向记录。并采用ak135全球一维速度模型<sup>[1]</sup>和正交归一化方法<sup>[2]</sup>来计算理论格林函数。此外,本文还采用了Zhang等<sup>[3]</sup>发展的滑动角可变的时间域反演方法来反演震源破裂过程。该反演方法不需要预先给定子断层震源时间函数形状,而是通过共轭梯度法<sup>[4]</sup>迭代反演子断层震源时间函数,从而避免了先验假定给反演结果带来的影响,同时该反演方法允许子断层的滑动方向在给定的滑动角附近( $\pm 45^\circ$ )发生变化。

另外,为了稳定反演结果以使其具有可接受的物理意义,本文还引入了时间域和空间域光滑约束<sup>[3,5]</sup>以及标量地震矩最小约束<sup>[3,6-7]</sup>。时间域光滑约束用于抑制子断层震源时间函数相邻时刻的不连续性,空间域光滑约束用于消除相邻子断层间位错的不连续性,而标量地震矩最小约束则用于压制较弱的过低频滑动。

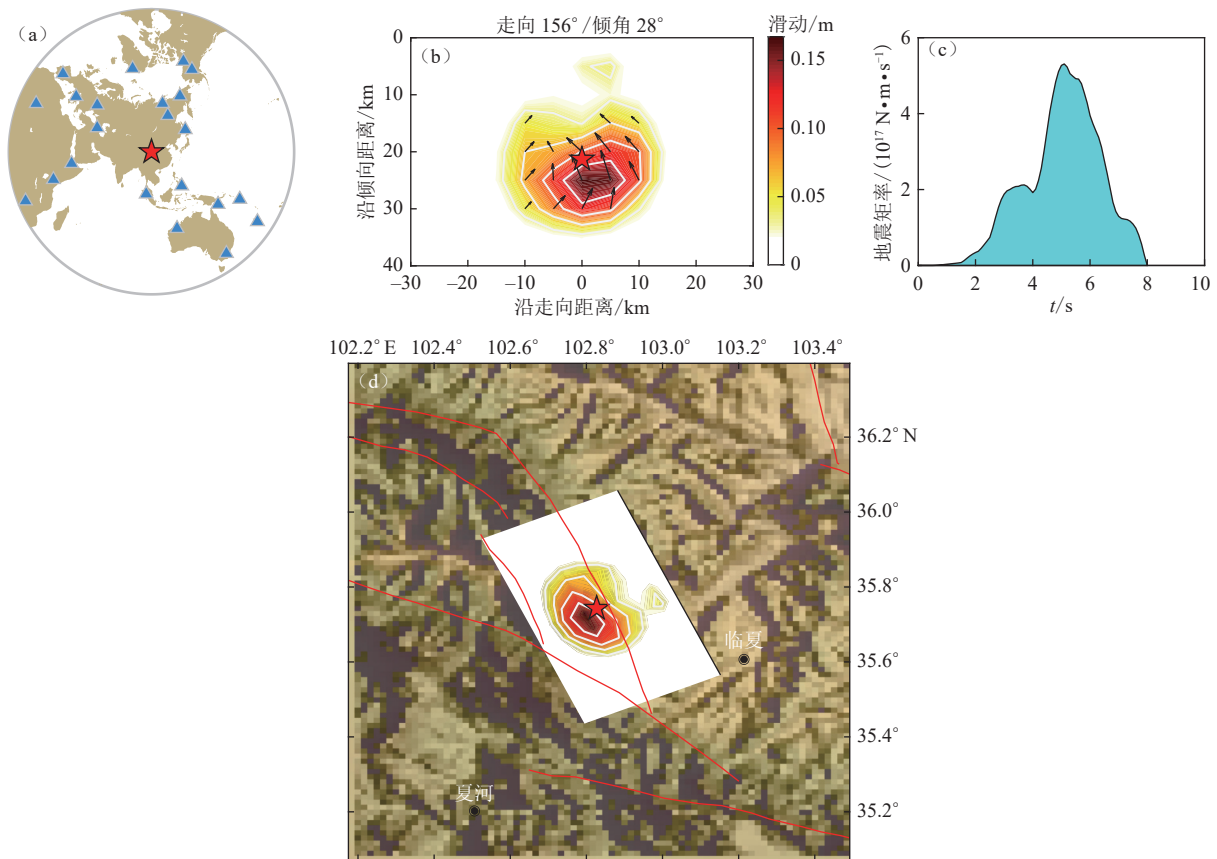
初步反演结果(图2)表明,此次地震以逆冲机制为主,破裂持续时间约8 s,似乎并未造成明显的地表破裂。

## 2 震源参数

积石山地震的震源参数,研究所有3位同志用不同的方法进行了反演。

### 2.1 方法一: 矩心矩张量+同步源反演

矩心矩张量+同步源<sup>[8-9]</sup>反演采用了震中距在7.81°~89.88°之间的59道宽频带垂直分量体波数据作为观测资料,滤波频带为0.015~0.040 Hz。矩张量与震源时间函数的最优模型结果表明,此次地震的标量地震矩为 $1.0759 \times 10^{18}$  N·m、换算为矩震级 $M_w 6.0$ ,矩率函数的峰值时刻为3.4 s,矩心坐标为(35.7023°N, 102.8120°E),矩心深度12.0 km。断层面解为节面I:走向307°、倾角50°、滑动角70°;节面II:走向156°、倾角44°、滑动角112°。双力偶成分占比96%,观测数据与合成数据整体相关度为0.94



(a) 远震台站分布; (b) 同震滑动分布; (c) 震源时间函数; (d) 投影到地表的滑动分布  
 (a) Distribution of the used teleseismic stations; (b) Distribution of coseismic slip; (c) Source time function;  
 (d) Distribution of the coseismic slip projected onto the surface

图 2 破裂过程初步反演结果

Fig. 2 Preliminary rupture process inversion result

(图 3—图 5)。

## 2.2 方法二: CAP 波形反演

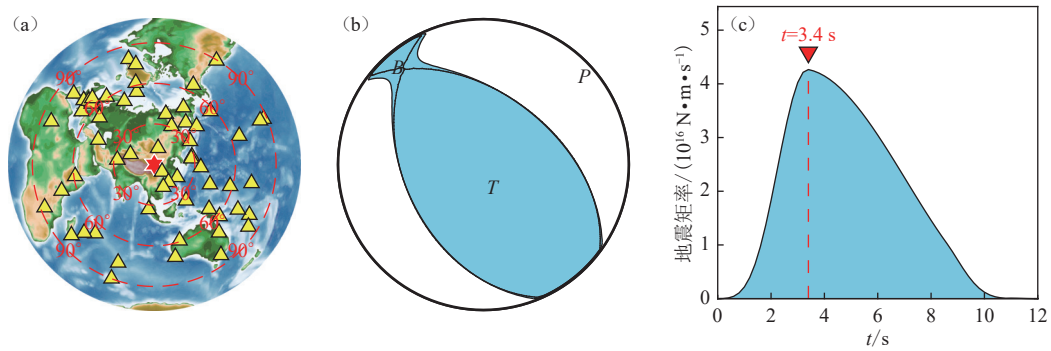
利用国家数字测震台网数据备份中心<sup>[10]</sup>提供的青海、甘肃等区域台网的宽频带数字地震波形记录,按照方位角覆盖及信噪比的要求,挑选出 16 个宽频带地震台数据(图 6),采用 CAP 波形反演方法<sup>[11-12]</sup>获得了甘肃积石山 6.2 级地震的震源机制解和矩心深度。该方法是利用近震数据,把宽频带数字波形记录分为体波部分(Pnl)和面波部分,分别计算它们的理论地震图和实际观测波形的目标误差函数,在给定参数空间中进行网格搜索,同时反演震源机制解和震源深度。在实际计算中,速度结构模型使用了 Crust 2.0(<http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html>),利用频率—波数法<sup>[13]</sup>计算格林函数,选取的体波和面波的滤波频段为 0.05~0.1 Hz,采用格点搜索法寻找最适合的走向、倾角、滑动角、震源深度和矩震级。

图 6 给出了本次地震理论波形与观测波形的拟

合情况图,大部分台站各震相拟合效果较好。图 7 给出了观测波形与理论波形拟合误差随深度的变化分布,据此得到最佳地震震源深度为 8 km,主震最佳双力偶解为节面 I: 走向 298°、倾角 58°、滑动角 61°;节面 II: 走向 164°、倾角 42°、滑动角 127°。此外,反演得到的矩震级为  $M_w$ 6.0。由图 7 还可看出,随着震源深度的改变,震源机制解变化并不显著,说明反演得到的震源机制解较为稳定。

## 2.3 方法三: 贝叶斯自助优化算法反演

采用贝叶斯自助优化 BABO(Bayesian Bootstrap Optimisation)算法<sup>[14]</sup>反演了甘肃积石山 6.2 级地震序列的矩心矩张量解。在反演过程中,利用来自于国家数字测震台网数据备份中心提供的青海、甘肃、陕西区域台网的数字地震波形记录,选取震中距 200~350 km 范围内的固定台站宽频带地震记录的高信噪比波形。理论波形计算时采用的格林函数是依据积石山地区的 Crust 2.0 一维速度模型从格林函数库中



(a) 三角形表示台站，六角星表示震中；(b) 沙滩球包括矩张量解、主轴与最佳双力偶解；(c) 源函数

图3 矩心矩张量解

Fig. 3 Moment tensor solution

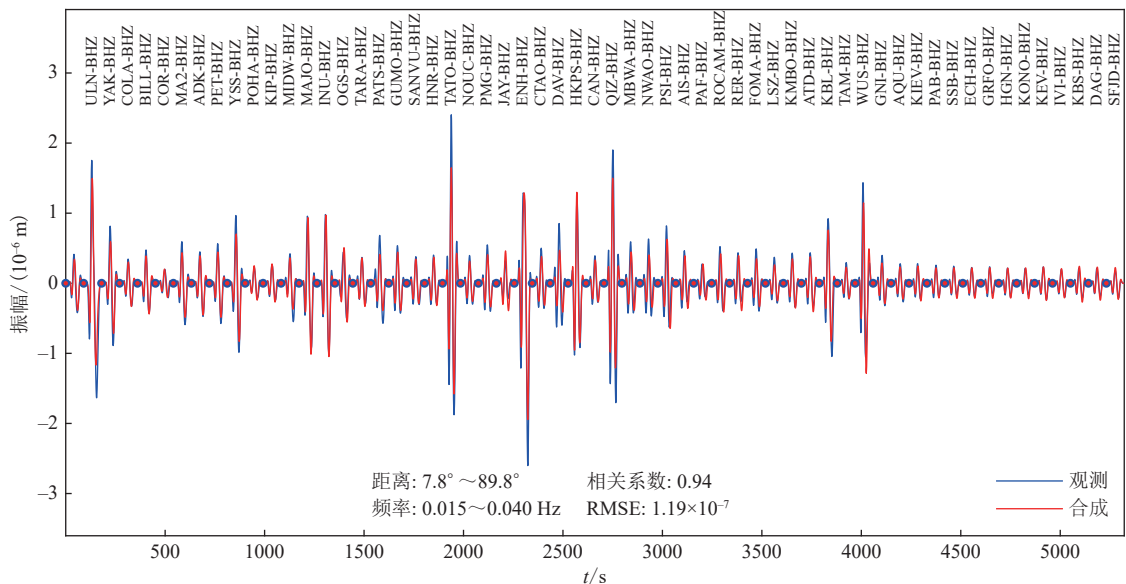


图4 观测数据(蓝色)与合成数据(红色)整体对比

Fig. 4 Overall comparison between observed data (blue) and synthesized data (red)

直接调用的。波形数据的处理则采用由  $f_1/factor$ 、 $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_2 \times factor$  定义的余弦侧窗进行非因果带通滤波，滤波频段为 0.01~0.08 Hz， $factor$  取 1.5。图 8 给出了矩张量解在 Hudson 震源类型图上的投影。从图中可见，在震源双力偶区域向-Isotopic(塌陷)偏离，即带有少量的各向同性成份，表明此次地震的破裂方式以逆冲为主，有微小的体积变化，但基本可以忽略；图 9 展示了主震的矩心位置变化，最佳矩心深度为 12 km；2 个双力偶节面分别为：节面 I：走向 169°、倾角 47°、滑动角 127°；节面 II：走向 301°、倾角 54°、滑动角 57°。

表 1 列出上述 3 种方法反演得到的震源参数。总体来说，虽然方法不同，但结果有较好的一致性。

### 3 余震序列精定位

截止 2023 年 12 月 23 日 8 时 7 分(北京时间)，采用地震序列精定位自动处理系统<sup>[15]</sup>，得到了 514 次余震的位置(图 10)。重定位结果表明，余震主要呈北北西向分布，震源深度集中在 6~15 km。

### 4 地震动强度预测图

利用快速生成考虑场地效应的震动图方法<sup>[16]</sup>，考虑地震的震中位置以及地震的震源机制解，计算了研究区范围内均匀网格点(30"×30")上的基岩峰值加速度值；进一步考虑地震动参数的局部场地效应，将基岩峰值加速度值转换到地表土层上，获得了地表土层上的峰值加速度估计值，最后利用反距离权重法进行空间插值，获得峰值加速度在地表上的

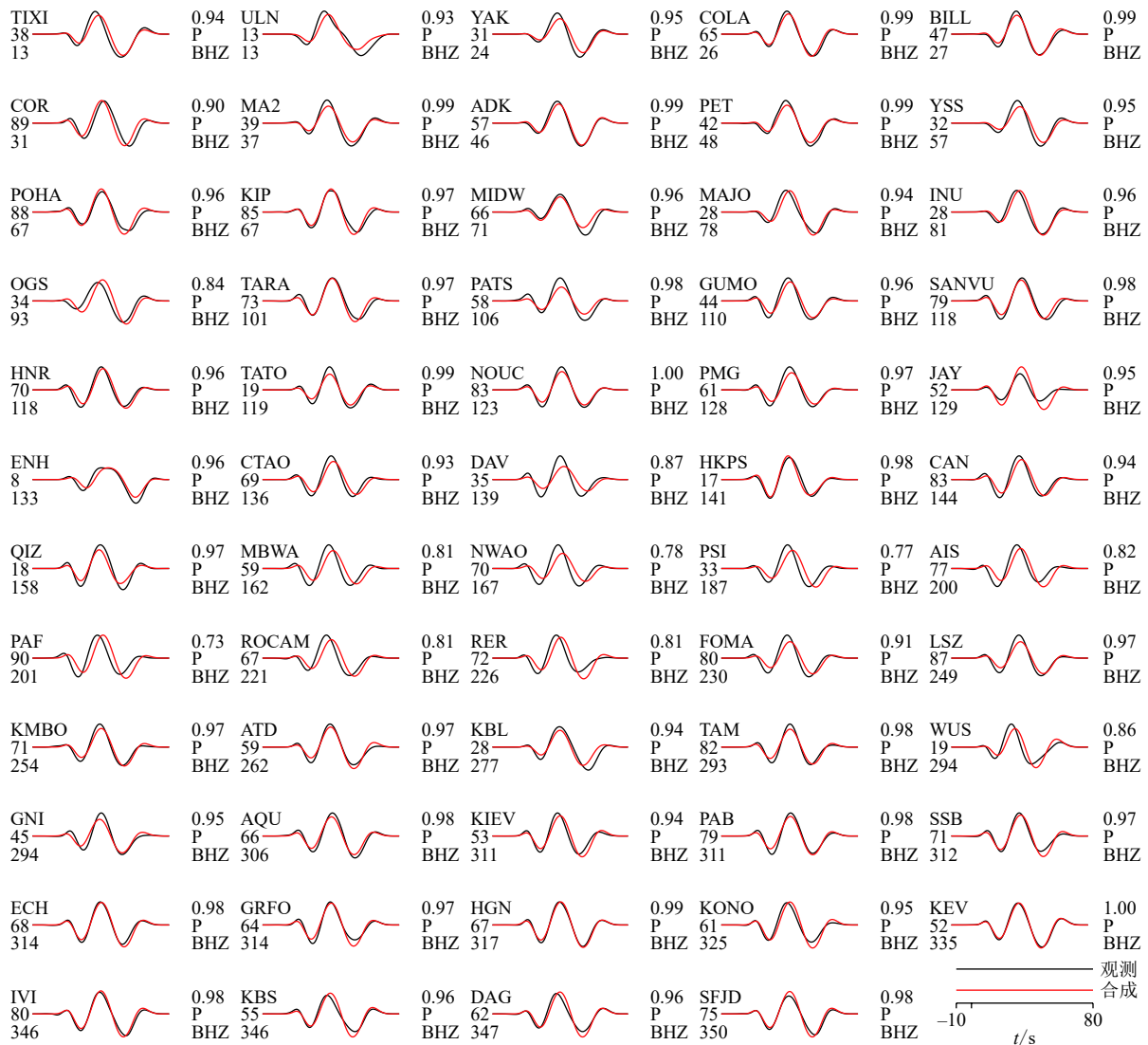


图 5 每一道记录的观测数据与合成数据对比

Fig. 5 Comparison between observed data and synthesized data for each record

空间分布(图 11)。

在计算过程中考虑了地震动的局部场地效应,其宏观场地分类的  $V_{S30}$  数据是利用美国地质调查局地形坡度与  $V_{S30}$  的相关关系获得的<sup>[16-20]</sup>。基岩地震动参数转换至地表土层,使用了由近地表剪切波速  $V_{S30}$  量化的依赖于地震动幅值和频率的场地放大系数<sup>[20]</sup>。地震动衰减关系选用的是第四代区划图中中国西部长短轴峰值加速度衰减关系的几何平均值<sup>[21]</sup>。

根据对这次地震预测的震动图分布特征,预计极震区震动烈度可能达Ⅷ度以上,可能的受灾范围近 6 000 km<sup>2</sup>。

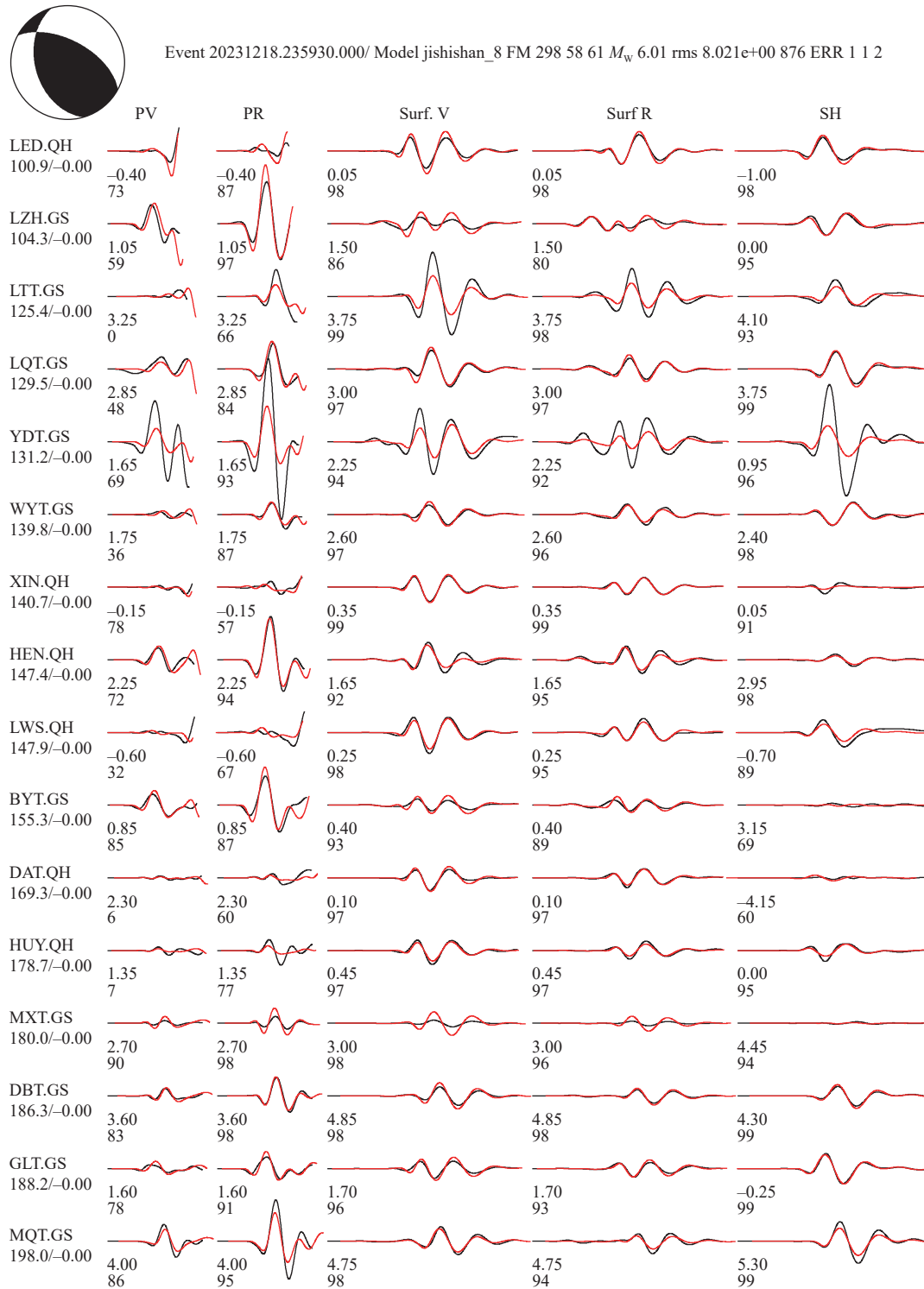
### 5 地震辐射能量估计

利用区域地震台网提供的宽频带记录,基于震

源谱拟合和能流密度法<sup>[22]</sup>开展了此次积石山地震的震源参数测定工作(图 12—图 13)。结果显示,本次地震的辐射能量为  $2.0 \times 10^{13}$  J,折合为能量震级  $M_e$  为 5.9,地震矩为  $4.7 \times 10^{17}$  N·m,折合为矩震级  $M_w$  为 5.8。

### 6 三维及 InSAR 同震形变场模拟

基于均匀弹性半空间位错理论<sup>[23]</sup>,将本文震源机制解参数(方法二反演结果的节面 I)作为输入,模拟了此次地震的三维同震形变场,并利用 Sentinel-1 卫星的 SAR 成像几何参数分别计算了升、降轨 InSAR 地表形变干涉图(图 14)。模拟中所用的 SAR 成像几何参数包括卫星的飞行方位角和雷达入射角,升轨成像的参数分别为  $-12.9^\circ$  和  $39.7^\circ$ ,降轨成像的参数分别为  $-167.0^\circ$  和  $39.7^\circ$ 。模拟结果显示,此次



波形左侧字母为台站名，其下方分别为震中距(单位：km)以及理论地震图相对实际观测数据整体移动时间；  
波形下方的数字为观测波形相对于理论波形的移动时间(单位：s)和二者的相关系数(单位：%)

Letters on the left of waveforms are station names, under the station codes are epicenter distance(in kilometer) and relative time shifts and time shifts between synthetics and the observed data; Under the waveforms are the time shifts (in second) of the observed traces relative to the synthetic traces and corresponding cross-correlation coefficients (in percentage)

图6 积石山6.2级地震矩张量解最佳拟合深度的观测波形(黑)与理论波形(红)拟合图

Fig. 6 Comparison between the observed (black) and synthetic (red) waveforms at the best fitting depth of the M6.2 Jishishan earthquake

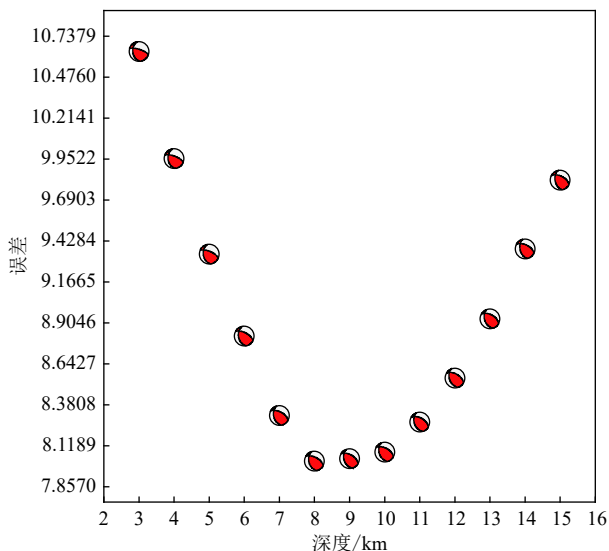
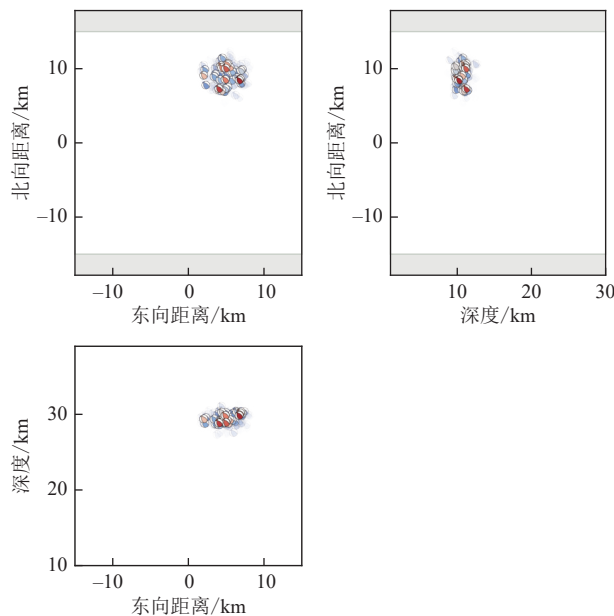


图 7 积石山 6.2 级地震矩张量反演中波形拟合误差随深度变化

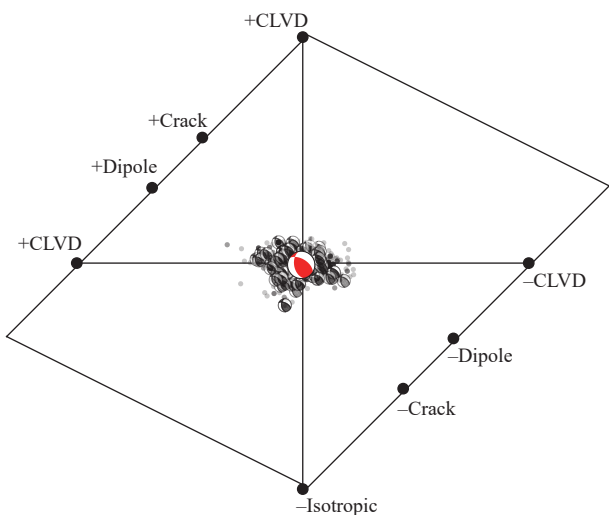
Fig. 7 Waveform fit errors as function of depth in Jishishan M6.2 earthquake moment tensor inversion



符号显示最佳的双力偶解；红色为低失配误差，蓝色为高失配误差

图 9 积石山地震的矩心位置

Fig. 9 Earthquake moment tensor location of Jishishan earthquake



红色震源球为最优解，黑色震源球为 10% 最优采样解集，其他采样解以点表示；DC：双力偶；+Crack：张裂缝；-Crack：闭合裂缝；+Isotropic：爆炸；-Isotropic：塌陷；±CLVD：错动方向相反补偿线性矢量偶极子；±Dipole：错动方向相反的偶极子

图 8 2023 年 12 月 18 日积石山地震的矩张量解在 Hudson 震源类型图上的投影

Fig. 8 Project of Jishishan earthquake moment tensor solution on Hudson source type map

地震引起了明显的地表同震位移，最大水平向位移达到 7.8 cm、垂直向位移达到 15.8 cm。形变区主要集成在震源附近。由此可知，在观测环境条件好以及有 SAR 数据成像的情况下，可以利用 Sentinel-1 的

表 1 积石山地震震源参数

Table 1 Source parameters of the Jishishan earthquake

节面 I			节面 II			矩震级 ( $M_w$ )	矩心 深度 /km	采用的 方法
走向 / $^{\circ}$	倾角 / $^{\circ}$	滑动角 / $^{\circ}$	走向 / $^{\circ}$	倾角 / $^{\circ}$	滑动角 / $^{\circ}$			
307	50	70	156	44	112	6.0	12	法一
298	58	61	164	42	127	6.0	8	法二
301	54	57	169	47	127	6.0	12	法三

SAR 数据通过 InSAR 处理观测到地表同震形变场。该结果对于震害的评估以及是否可利用 InSAR 观测到显著的地表形变具有参考意义。

### 7 结论

中国地震局地球物理研究所针对 2023 年 12 月 18 日 23 时 59 分(北京时间)发生于甘肃积石山的 6.2 级地震启动了应急快速响应，组织相关领域研究人员进行应急产品快速产出，产品主要包括此次地震的震源破裂过程、震源机制、余震序列精定位和地震辐射能量估计等，以及基于震源模型的震动图模拟、同震形变场模拟。

此次地震的震源参数、震源机制解、破裂过程模型、地震辐射能量等结果表明，此次地震以逆冲机制

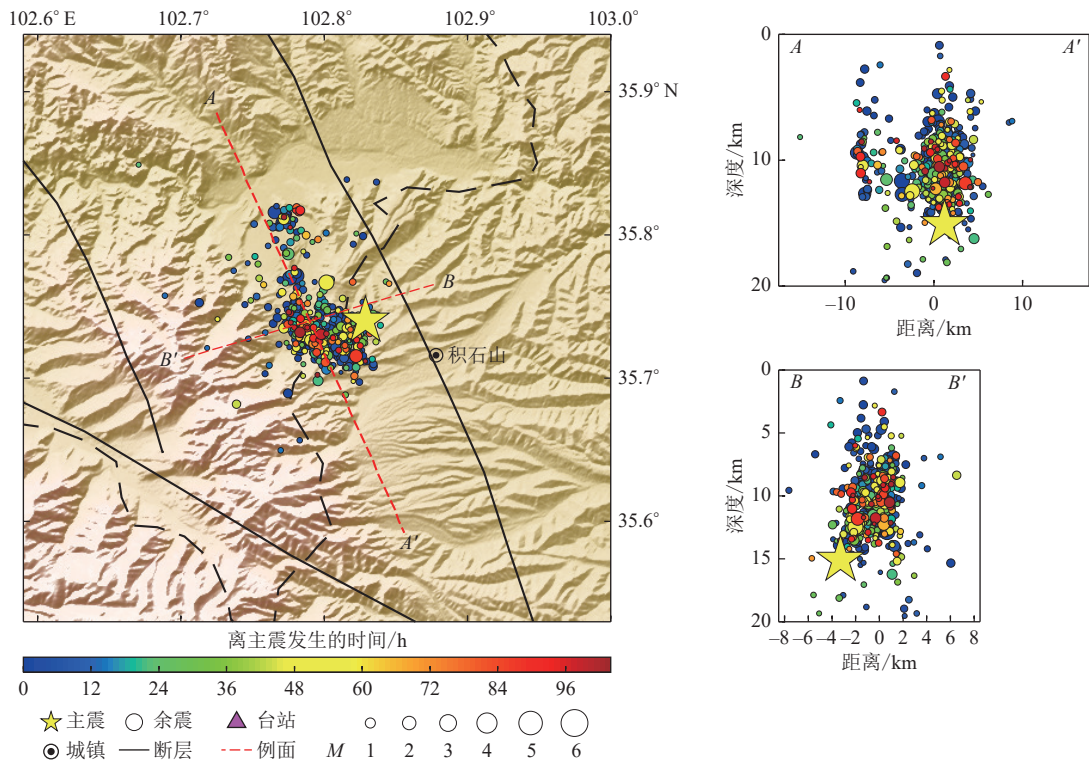


图 10 甘肃积石山 6.2 级地震余震分布图

Fig. 10 Aftershock distribution map of the Gansu Jishishan M6.2 earthquake

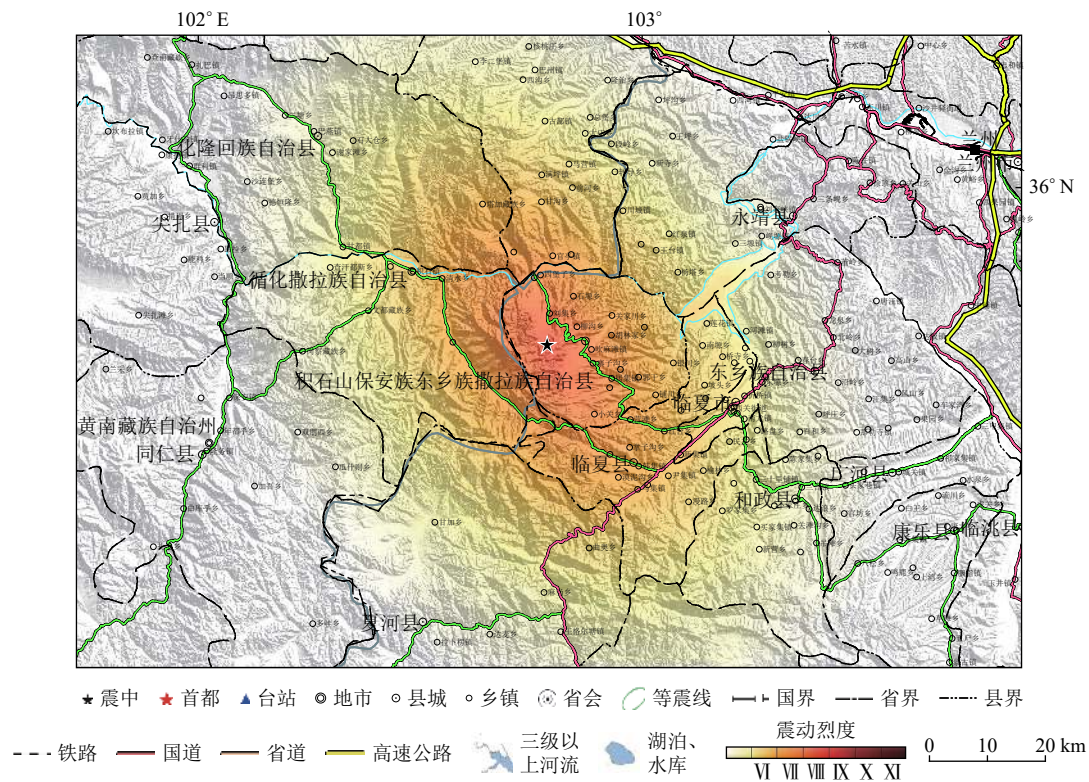
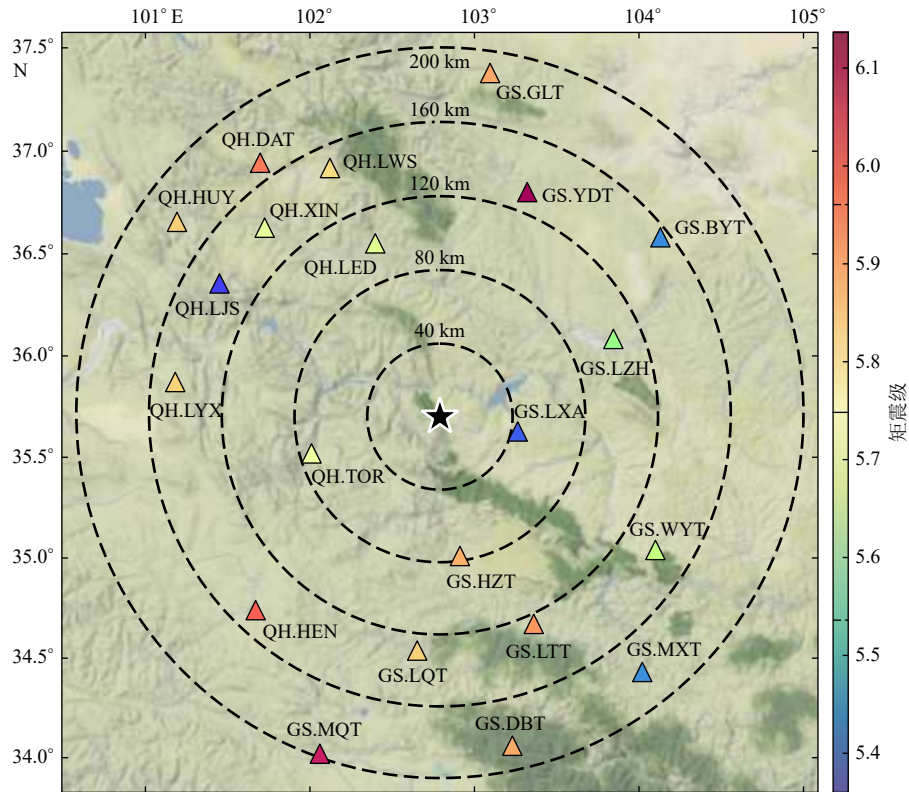


图 11 2023 年 12 月 18 日甘肃积石山 6.2 级地震的地震动强度预测图

Fig. 11 Earthquake ground motion intensity map of the Jishishan, Gansu M6.2 earthquake on 18 December 2023



星号为震中位置, 三角为台站位置, 虚线为台站的震中距

图 12 甘肃积石山 6.2 级地震单台矩震级分布图

Fig. 12 Distribution of single station moment magnitude for the M6.2 earthquake in Jishishan, Gansu Province

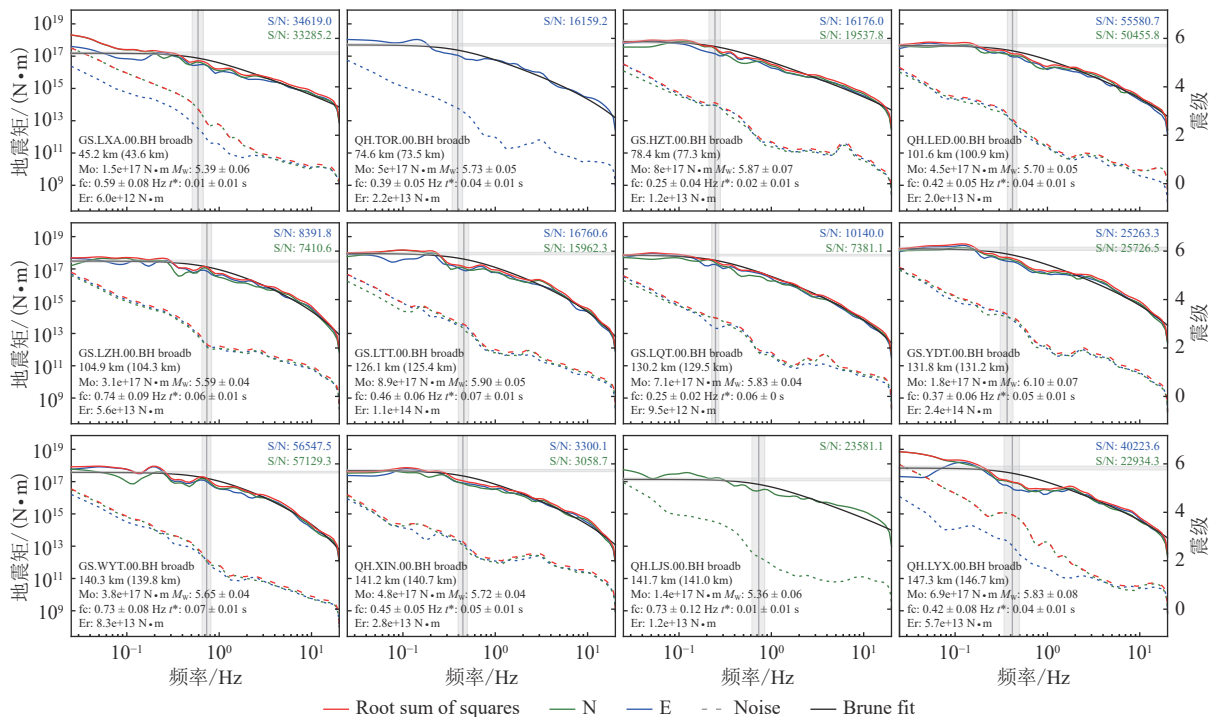
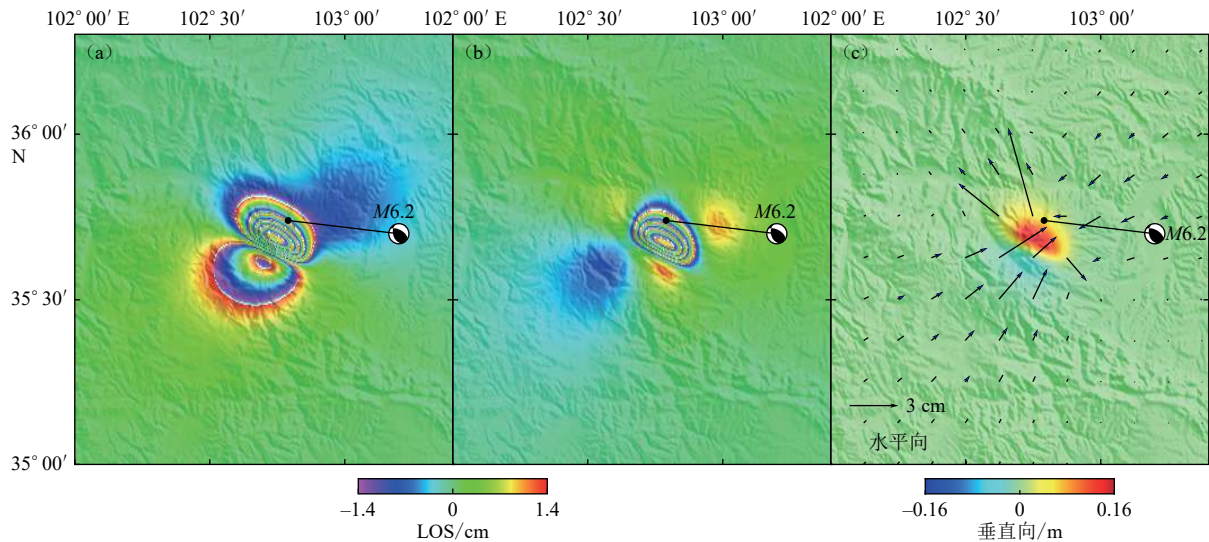


图 13 震中距小于 150 km 的台站震源谱拟合图

Fig. 13 Source spectrum fitting diagram for stations with epicenter distance less than 150 km



模拟的升(a)、降(b)轨干涉图, 每个条纹对应沿雷达视线方向 2.8 cm 的地表位移;

(c)三维形变场, 箭头矢量代表水平位移

Simulated ascending (a) and descending (b) interferograms, each fringe represents 2.8 cm surface displacement along the Radar line-of-sight; (c) Demonstrates the three-dimensional deformation field, arrow vectors represent the horizontal displacements

图 14 三维及 InSAR 同震形变场模拟结果

Fig. 14 Simulation results of three-dimensional and InSAR coseismic deformation fields

为主, 能量集中在前约 8 s 内释放, 地表没有明显的破裂; 重定位结果表明此次地震序列主要呈北北西向分布, 发生在拉脊山东侧, 震源深度集中在 6~15 km; 地震能量震级大于矩震级, 视应力高于大陆地震平均水平; 震动图模拟结果显示, 极震区震动烈度可能达Ⅷ度以上, 可能的受灾范围近 6000 km<sup>2</sup>; 同震形变场模拟结果表明, 此次地震引起了地表明显的

同震位移, 最大水平向位移达到 7.8 cm、垂直向位移达到 15.8 cm。

### 致谢

感谢中国地震局地球物理研究所蒋长胜研究员对稿件修改提出的建设性建议。同时, 感谢审稿专家提供的宝贵修改意见和建议。

### 参考文献

- [1] Kennett B L N, Engdahl E R, Buland R. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes[J]. *Geophysical Journal International*, 1995, 122(1): 108-124
- [2] Wang R J. A simple orthonormalization method for stable and efficient computation of Green's functions[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1999, 89(3): 733-741
- [3] Zhang Y, Feng W P, Chen Y T, et al. The 2009 L'Aquila  $M_w$ 6.3 earthquake: A new technique to locate the hypocentre in the joint inversion of earthquake rupture process[J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 191(3): 1417-1426
- [4] Ward S N, Barrientos S E. An inversion for slip distribution and fault shape from geodetic observations of the 1983, Borah Peak, Idaho, earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, 91(B5): 4909-4919
- [5] Yagi Y, Mikumo T, Pacheco J, et al. Source rupture process of the Tecoman, Colima, Mexico earthquake of 22 January 2003, determined by joint inversion of teleseismic body-wave and near-source data[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004, 94(5): 1795-1807
- [6] Hartzell S H, Heaton T H. Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1983, 73(6A): 1553-1583
- [7] Antolik M, Dreger D S. Rupture process of the 26 January 2001  $M_w$ 7.6 Bhuj, India, earthquake from teleseismic broadband data[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003, 93(3): 1235-1248
- [8] 张喆, 房立华, 许力生. 2022年四川泸定  $M_s$ 6.8地震震源基本特征[J]. *地球物理学报*, 2023, 66(4): 1397-1408

- Zhang Z, Fang L H, Xu L S. Primary source characteristics of the 2022 Sichuan Luding  $M_S$ 6.8 earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(4): 1397-1408
- [ 9 ] Zhang Z, Xu L S, Fang L H. The  $M_w$ 5.5 earthquake on August 6, 2023, in Pingyuan, Shandong, China: A rupture on a buried fault[J]. *Earthquake Science*, 2024, 37(1): 1-12
- [ 10 ] 郑秀芬, 欧阳飏, 张东宁, 等. “国家数字测震台网数据备份中心”技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(5): 1412-1417
- Zheng X F, Ouyang B, Zhang D N, et al. Technical system construction of Data Backup Centre for China Seismograph Network and the data support to researches on the Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(5): 1412-1417
- [ 11 ] Zhao L S, Helmberger D V. Source estimation from broadband regional seismograms[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84(1): 91-104
- [ 12 ] Zhu L P, Helmberger D V. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, 86(5): 1634-1641
- [ 13 ] Zhu L P, Rivera L A. A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media[J]. *Geophysical Journal International*, 2002, 148(3): 619-627
- [ 14 ] Heimann S, Isken M, Kühn D, et al. Grond: A probabilistic earthquake source inversion framework.V.1.0. GFZ Data Services [EB/OL]. [2023-12-24]. <https://doi.org/10.5880/GFZ.2.1.2018.003>
- [ 15 ] Fang L H, Wu J P, Wang W L, et al. Aftershock observation and analysis of the 2013  $M_S$ 7.0 Lushan earthquake[J]. *Seismological Research Letters*, 2015, 86(4): 1135-1142
- [ 16 ] 陈颀, 俞言祥, 高孟潭. 考虑场地效应的 ShakeMap 系统研究[J]. *中国地震*, 2010, 26(1): 92-102
- Chen K, Yu Y X, Gao M T. Research on ShakeMap system in terms of the site effect[J]. *Earthquake Research in China*, 2010, 26(1): 92-102
- [ 17 ] Wald D J, Allen T I. Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2007, 97(5): 1379-1395
- [ 18 ] Allen T I, Wald D J. On the use of high-resolution topographic data as a proxy for seismic site conditions ( $V_{S30}$ )[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2009, 99(2A): 935-943
- [ 19 ] Heath D C, Wald D J, Worden C B, et al. A global hybrid  $V_{S30}$  map with a topographic slope-based default and regional map insets[J]. *Earthquake Spectra*, 2020, 36(3): 1570-1584
- [ 20 ] Borcherdt R D. Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification)[J]. *Earthquake Spectra*, 1994, 10(4): 617-653
- [ 21 ] 汪素云, 俞言祥, 高阿甲, 等. 中国分区地震动衰减关系的确定[J]. *中国地震*, 2000, 16(2): 99-106
- Wang S Y, Yu Y X, Gao A J, et al. Development of attenuation relations for ground motion in China[J]. *Earthquake Research in China*, 2000, 16(2): 99-106
- [ 22 ] Newman A V, Okal E A. Teleseismic estimates of radiated seismic energy: The  $E/M_0$  discriminant for tsunami earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B11): 26885-26898
- [ 23 ] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75(4): 1135-1154