

蒋生森, 易磊, 张旭, 温扬茂. 2016 年日本熊本地震破裂时空过程联合反演. 地震学报, 40(1): 13-23. doi: 10.11939/jass.20170097.

Jiang S M, Yi L, Zhang X, Wen Y M. 2018. Joint inversion of teleseismic and co-seismic InSAR data for the rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake in Japan. *Acta Seismologica Sinica*, 40(1): 13-23. doi: 10.11939/jass.20170097.

## 2016 年日本熊本地震破裂时空 过程联合反演\*

蒋生森<sup>1), †</sup> 易磊<sup>2)</sup> 张旭<sup>1)</sup> 温扬茂<sup>2)</sup>

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国武汉 430079 武汉大学测绘学院

**摘要** 为了深入认识 2016 年 4 月 15 日日本熊本地震破裂的复杂性, 利用远场体波资料 and 同震 InSAR 资料联合反演了此次地震的震源破裂时空过程. 联合反演结果表明: 熊本地震的震源破裂持续时间约为 25 s, 整个破裂过程释放的总标量矩为  $6.03 \times 10^{19}$  N·m, 对应于矩震级  $M_W 7.1$ ; 同震滑动主要集中分布于浅部, 破裂以右旋走滑为主, 但在沿倾向 0—5 km 范围内, 破裂呈较强的正断特征; 此次地震破裂的最大同震滑动量约为 4.9 m, 且最大同震位错区位于背离断层走向上、距离起始破裂点约 5—10 km 的区域; 破裂前期(0—7 s), 在倾向上向浅表发生破裂, 在走向上向东北和西南两侧扩展; 大约 7 s 后, 破裂背离断层走向主要向东北方向扩展. 根据有限断层联合反演结果推测, 此次熊本地震破裂可能出露至地表.

**关键词** 2016 年熊本地震 远场体波 同震 InSAR 资料 地震破裂过程 联合反演  
doi: 10.11939/jass.20170097 中图分类号: P315.3<sup>3</sup> 文献标识码: A

### Joint inversion of teleseismic and co-seismic InSAR data for the rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake in Japan

Jiang Shengmiao<sup>1), †</sup> Yi Lei<sup>2)</sup> Zhang Xu<sup>1)</sup> Wen Yangmao<sup>2)</sup>

1) *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

2) *School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China*

**Abstract:** On April 15, 2016, a disastrous earthquake struck Kumamoto county in Japan. Aiming to further understand the complexity of the earthquake rupture in detail, we conduct a joint inversion of teleseismic waveforms and co-seismic InSAR data for the spatio-temporal rupture process of this earthquake. The results show that, the whole process lasted for about 25 s and released scalar moment up to  $6.03 \times 10^{19}$  N·m, corresponding to moment magnitude  $M_W 7.1$ . The major co-seismic slip distribution was centered in shallow region, and it was dominated by dextral strike. But the rupture had strong normal characteristics in the range of 0—5 km along the dip direction. The maximum co-seismic slip is about 4.9 m, and the major rupture patch was about 5—10 km away from the initial rupture point opposite to the strike direc-

\* 基金项目 中央公益类科研院所基本科研业务专项(DQJB16B17)资助.

收稿日期 2017-04-17 收到初稿, 2017-06-27 决定采用修改稿.

† 通信作者 e-mail: jiangshengmiaob@163.com



tion. In the early stage (0–7 s), it ruptured toward to the shallow region along the dip direction, and ruptured bilaterally along strike direction; about 7 s later, it ruptured toward to the northeast opposite to the strike direction. The joint inversion results suggest that the Kumamoto earthquake may rupture to the earth surface.

**Key words:** 2016 Kumamoto earthquake; teleseismic body waveforms; co-seismic InSAR data; earthquake rupture process; joint inversion

## 引言

根据美国地质调查局地震信息中心(USGS, 2016)测定, 2016年4月15日16时25分(UTC)日本熊本县发生  $M_w$ 7.0 强震, 震中位于(32.791°N, 130.754°E), 震源深度为 10 km. 主震前发生了 3 次  $M_w \geq 5.5$  前震, 主震后发生了一系列余震并动态触发了一次  $M_w$ 5.7 强余震(Uchide *et al.*, 2016; Yoshida, 2016), 熊本强震序列造成了严重的地震灾害. 美国地质调查局发布的熊本地震强地面运动估算结果显示, 极震区最大烈度约为 IX 度(USGS, 2016). 此外, USGS(2016)的 W-震相矩张量反演结果表明, 此次强震发震断层对应的几何特征为走向 224°, 倾角 66°, 滑动角 -152°, 该次事件以右旋走滑为主, 兼有正断分量. 图 1 给出了熊本地震的区域构造及其破裂特征.

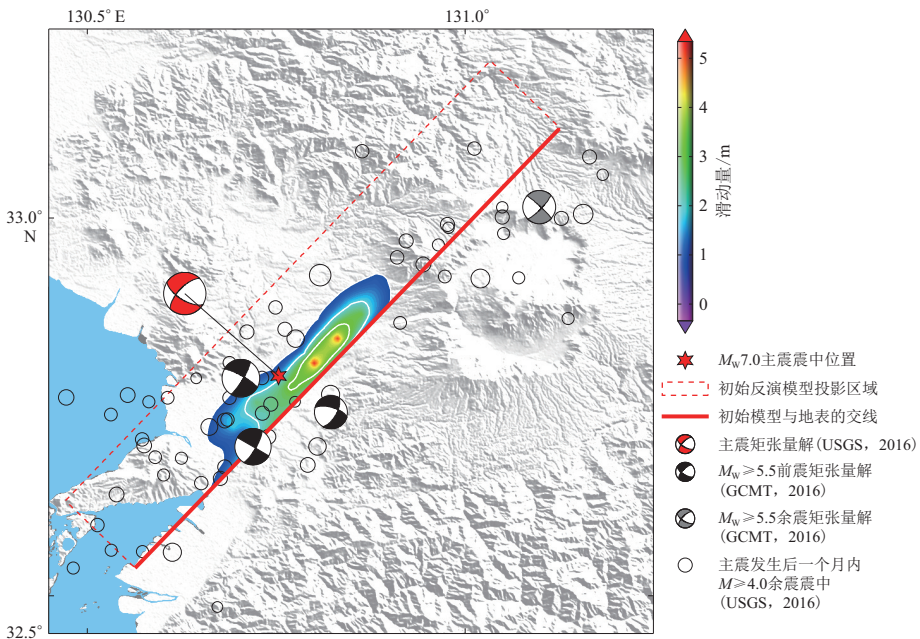


图 1 熊本  $M_w$ 7.0 地震区域构造及其破裂特征

Fig. 1 Regional tectonic settings and rupture characteristics of the 2016 Kumamoto  $M_w$ 7.0 earthquake

对于此次熊本地震, 已有一些研究人员利用远场地震波形资料(Yagi *et al.*, 2016)和联合近场强地面运动数据(Hao *et al.*, 2017)反演得到了此次事件的破裂时空过程结果. Fukahata 和 Hashimoto(2016)以及 Himematsu 和 Furuya(2016)分别利用合成孔径雷达干涉成像(interferogram synthetic aperture radar, 简称为 InSAR)资料反演得到了此次事件对应的同震滑动分布特征. 但由于此次熊本地震的破裂过程较为复杂, 不同反演结果间的显著差异性表明, 单独利用地震

波形数据或静态大地测量数据来反演地震破裂时空特征会存在不同程度的局限性. 鉴于此, 本文拟利用远场体波和同震 InSAR 资料对此次熊本强震进行有限断层联合反演, 更好地约束此次事件的破裂时空历史, 以期深入认识复杂地质构造背景下熊本地震活动性的时空演化特征及其震害形成机理.

## 1 数据与方法

### 1.1 数据

从美国地震学联合研究会 (Incorporated Research Institutions for Seismology, 简称为 IRIS) 数据中心提供的全球地震台网 (Global Seismographic Network, 简称为 GSN) 下载震中距处于  $30^{\circ}$ — $90^{\circ}$  范围内的信噪比较好且方位覆盖较为均匀的 46 个台站 (图 2a) 的远场宽频带垂直向波形记录, 对波形资料进行  $0.02$ — $0.1$  Hz 的带通滤波用于弱化长周期噪声以及三维复杂地球结构引起的短周期信号干扰. 对经过上述预处理的 46 个台站的波形资料, 采用总长度为 60 s 的时间窗 (P 波初动前 10 s, P 波初动后 50 s) 截取波形资料用于后续破裂过程的反演. 基于 AK135 全球一维速度模型 (Kennett *et al.*, 1995), 采用反透射系数法 (Wang, 1999) 来计算不同远场台站处对应的地震波传播路径效应 (理论格林函数), 并对合成的理论格林函数同样进行  $0.02$ — $0.1$  Hz 的带通滤波.

InSAR 资料来源于 2 景哨兵一号 (Sentinel-1) 卫星 2016 年 4 月 8 日和 2016 年 4 月 20 日的合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, 简称为 SAR) 影像资料. SAR 卫星数据为干涉宽幅 (Interferometric Wide Swath, 简称为 IWS) 模式, 由 3 个含若干猝发的子幅组成, 幅宽为 250 km. 为获取熊本地震的同震地表形变场, 对资料进行基于二通法的差分干涉处理. 为保证方位

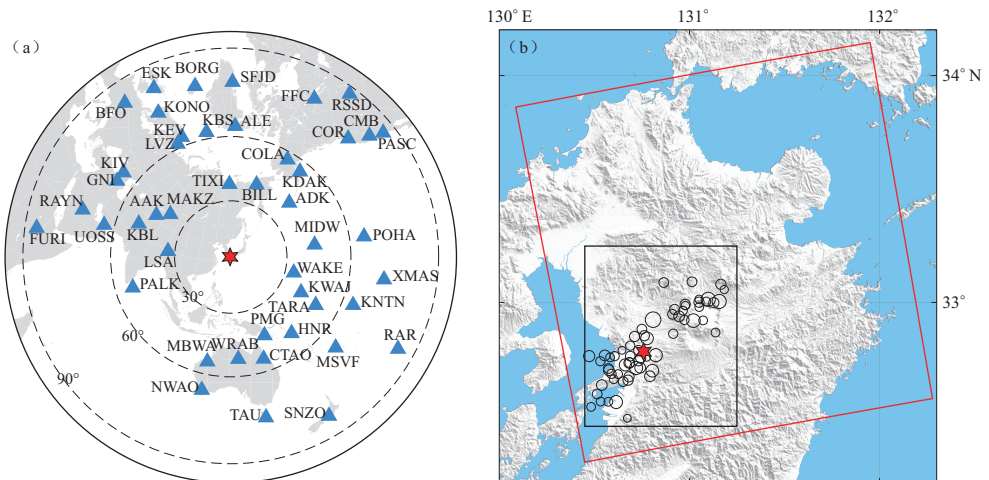


图 2 用于熊本地震破裂过程联合反演的远场体波台站分布(a)以及同震 InSAR 资料覆盖区域(b) 红色星形表示主震震中位置. 图(a)中蓝色三角形表示台站; 图(b)中红色方框表示 InSAR 覆盖区域, 黑色框表示图 1 中的展示区域, 黑色圆圈表示主震发生后一个月内  $M_w \geq 4.0$  余震的震中分布 (USGS, 2016)

Fig. 2 Distribution of used teleseismic stations (a) and co-seismic InSAR coverage (b) for joint inversion of rupture process of Kumamoto earthquake

The red star represents the mainshock epicenter. The blue triangles in Fig. (a) represent the stations. The red rectangular in Fig. (b) is the co-seismic coverage, the black rectangular delineates the region shown in Fig. 1, and black circles are the  $M_w \geq 4.0$  aftershocks within one month after the main shock (USGS, 2016)

上的配准精度达到千分级像素,消除相邻猝发间可能出现的相位跳跃(Scheiber, Moreira, 2000),我们在递进地形扫描方式干涉处理中,采用考虑地形影响的重采样技术和估计重叠猝发区相位差的谱分离方法(Farr *et al.*, 2000),利用欧洲航天局(European Space Agency, 简称为ESA)提供的精密轨道数据和美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, 简称为NASA)提供的90 m分辨率的全球数字高程模型(shuttle radar topography mission digital elevation model, 简称为SRTM DEM)数据去除地形相位的影响.与此同时,为降低干涉相位的噪声水平、提高干涉图的信号质量,我们采用基于能量谱的局部自适应滤波和枝切法来解缠得到差分干涉相位(Goldstein *et al.*, 1988),最终得到用于联合反演此次熊本地震的同震InSAR资料的覆盖区域如图2b所示.

## 1.2 初始破裂模型与反演方法

根据前述USGS测定的熊本地震主震震源位置信息(32.791°N, 130.754°E, 10.0 km)以及W-震相矩张量反演结果中的断层几何特征(走向224°,倾角66°),本文构建90 km×35 km的初始有限断层模型用于破裂时空过程的反演,对应的子断层网格尺寸为5 km×5 km.

本文采用基于地震波形资料和静态大地测量资料的有限断层破裂时空过程联合反演方法.该联合反演方法不需要预先给定子断层的震源时间函数形状(Chen, Xu, 2000; Xu *et al.*, 2002; 张勇, 2008; 张旭, 2016),而是通过共轭梯度法(Ward, Barrientos, 1986)来迭代反演子断层的震源时间函数,从而避免了由于给定的先验子断层震源时间函数不合适造成反演结果出现偏差;并且子断层在破裂过程中相对于平均滑动角允许存在±45°的滑动变化范围.在反演过程中,为了稳定反演结果,本文采用时空光滑约束(Yagi *et al.*, 2004; 张勇, 2008)使子断层的震源时间函数相邻时刻间的差异和相邻子断层间同震滑动量的差异最小化,并将标量地震矩最小约束(Hartzell, Heaton, 1983; Antolik, Dreger, 2003; 张勇, 2008)用于压制较弱的噪

声信号对反演结果的影响.此外,在反演过程中,经过多次尝试,预先给定熊本地震的最大破裂速度为3.0 km/s,子断层最大上升时间为15 s.

在联合远场P波波波形与同震InSAR资料反演此次熊本地震的震源破裂时空过程前,需要给定不同资料间的相对权重值.在上述选定的破裂速度和子断层上升时间的约束条件下,对同震InSAR资料相对于远场P波资料的权重值进行一维网格搜索(如图3所示).为了定量地描述反演结果的可靠性,定义方差降VR(Kim, Dreger, 2008)用于评估反演结果对资料的解释程度.

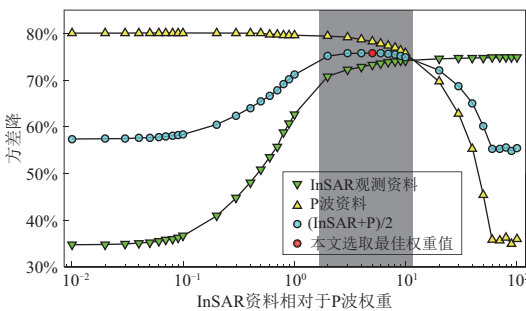


图3 有限断层联合反演中不同资料相对权重值搜索结果

Fig. 3 Search result of relative weights between co-seismic InSAR data and teleseismic P waveforms for joint inversion

$$VR^w = \left[ 1 - \frac{\sum_j \sum_i (d_j^w(t_i) - s_j^w(t_i))^2}{\sum_j \sum_i (d_j^w(t_i))^2} \right] \times 100 \quad (1)$$

$$VR^G = \left[ 1 - \frac{\sum_j (d_j^G - s_j^G)^2}{\sum_j (d_j^G)^2} \right] \times 100 \quad (2)$$

为地震波形资料 and 同震 InSAR 资料分别对应的方差降。式(1)中,  $d_j^w(t_i)$  和  $s_j^w(t_i)$  分别表示观测波形资料和合成波形资料; 式(2)中  $d_j^G$  和  $s_j^G$  分别表示观测 InSAR 资料和合成 InSAR 资料。

根据不同相对权重值情形下破裂模型对 P 波波形和同震 InSAR 资料的平均解释程度(如图 3 中青色圆圈所示), 最终选取用于联合反演的 InSAR 资料相对于远场 P 波资料的最佳权重值为 5。

## 2 有限断层联合反演结果

图 4 给出了基于远场体波资料 and 同震 InSAR 资料所得的熊本地震破裂过程的联合反演结果, 可以看出: 该地震的震源破裂持续时间约为 25 s, 但主要能量集中在前 15 s 内释放, 整个破裂过程释放的总标量矩为  $6.03 \times 10^{19} \text{ N}\cdot\text{m}$ , 相当于矩震级  $M_w 7.1$ 。同震滑动主要集中于浅部, 破裂以右旋走滑为主, 但在沿倾向 0—5 km 范围内, 破裂存在较强的正断特征; 在深部区域, 滑动以走滑机制为主, 兼有较弱的逆冲作用, 但鉴于联合反演得到的深部滑动量总体相对较弱, 较弱的逆冲分量滑动特征可能是由于反演所用资料对深部滑动约束较弱而造成反演解的不确定性所致。

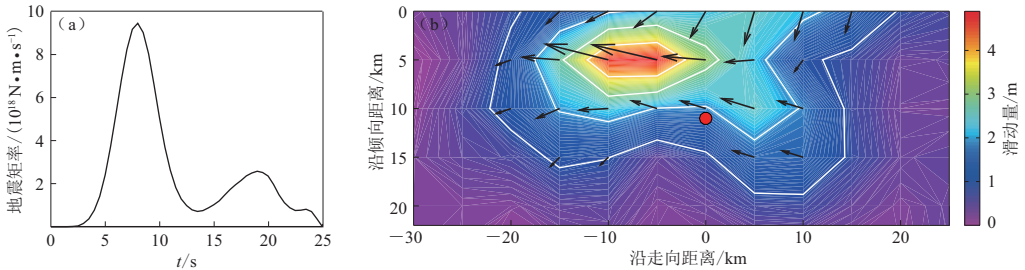


图 4 基于远场体波资料 and 同震 InSAR 资料所得的熊本地震破裂过程联合反演结果

(a) 地震矩率函数; (b) 同震滑动分布, 红色圆点表示起始破裂点

Fig. 4 Joint inversion result of rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake from teleseismic P waveforms and co-seismic InSAR data

(a) Seismic moment rate function; (b) Distribution of co-seismic slip, where the red dot indicates the initial rupture point

图 5 给出了此次熊本地震破裂过程的滑动速率快照, 可以看出: 起始阶段破裂较弱, 沿倾向向浅表发生破裂, 且破裂沿走向向东北和西南两侧扩展, 破裂前期(0—7 s)在走向上无明显的破裂方向性特征; 大约 7 s 之后, 破裂沿断层走向主要向东北方向扩展; 整个破裂阶段, 子断层最大滑动速率约为 0.6 m/s, 且破裂沿断层走向向西南扩展约 10—15 km, 背离断层走向向东北扩展约 20 km。此次熊本地震破裂的最大同震滑动量约为 4.9 m, 且最大同震位错区位于背离断层走向方向、距离起始破裂点 5—10 km 的范围内(图 4)。根据有限断层联合反演结果, 此次熊本地震破裂可能出露地表。

基于联合反演得到的震源破裂时空过程模型, 本文合成相应的远场垂直向 P 波波形资料, 并与对应台站处的观测波形资料进行对比, 结果如图 6 所示。对比结果表明, 联合反演模型对波形资料的解释程度(方差降 VR 值)可达 75.6%。另外, 基于有限断层联合反演模型

合成同震 InSAR 资料的视线向 (line-of-sight, 简称为 LOS) 位移, 并与观测的 LOS 位移进行对比, 结果如图 7 所示. 结果显示, 联合反演模型对同震 InSAR 资料的解释程度可达 71.3%, 仅在 LOS 位移过渡区域有少许观测点所对应的残差值较大.

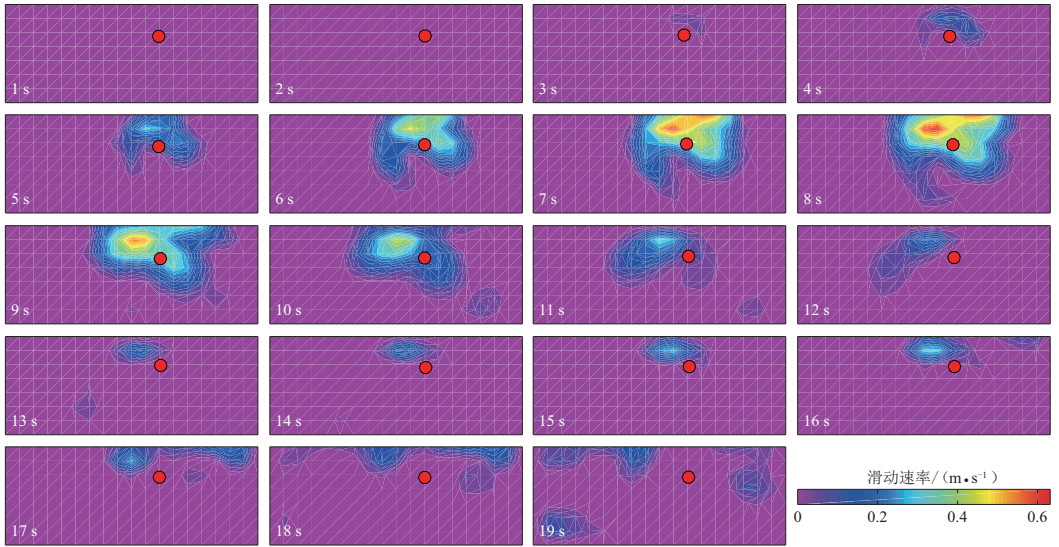


图 5 熊本地震破裂过程滑动速率快照结果. 红色圆圈表示起始破裂点位置  
 Fig. 5 Snapshots of slip rate for the rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake  
 The red circles are initial rupture points

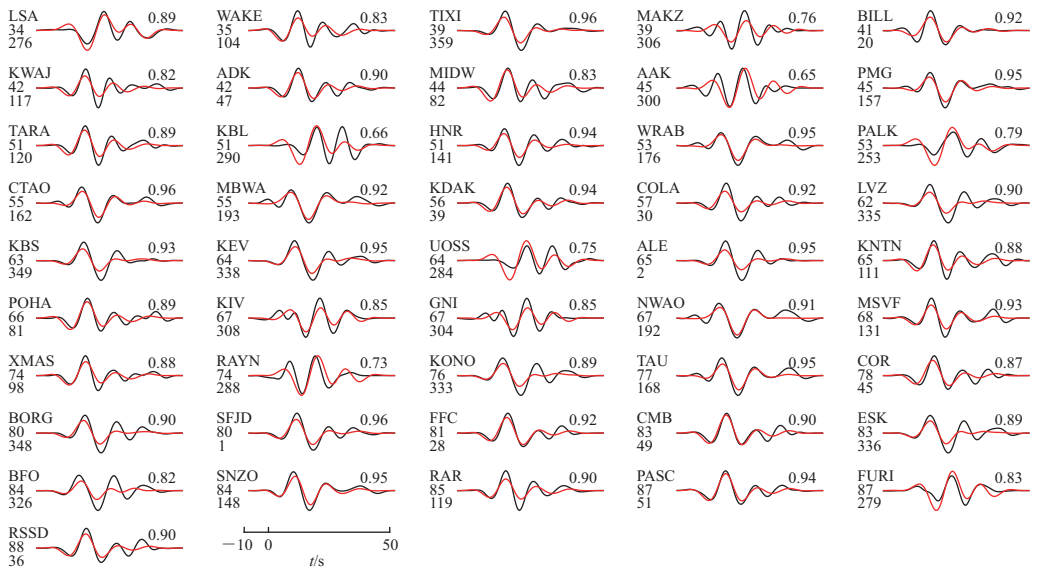


图 6 基于联合反演结果的观测波形(黑色)与合成波形(红色)比较  
 每幅子图波形的左侧从上至下依次为台站名、震中距(单位:  $^{\circ}$ )和方位角(单位:  $^{\circ}$ ),  
 右侧为合成波形与观测波形的相关系数

Fig. 6 Comparison of the observed waveforms (black) with synthetic ones (red) based on joint inversion results  
 On the left side of the waveforms in each subplot are station code, epicentral distance (unit in  $^{\circ}$ ),  
 and on the right side is correlation coefficient between synthetic waveforms and observed ones

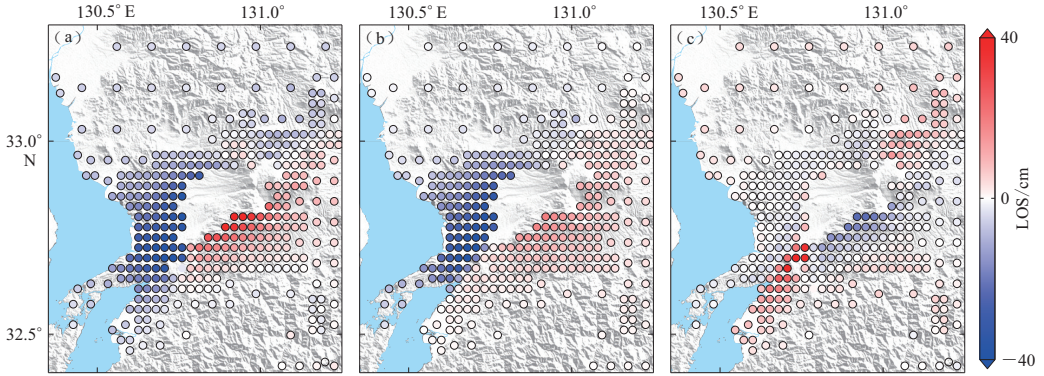


图 7 同震 InSAR 观测资料与基于联合反演模型的 InSAR 合成资料对比

(a) 观测资料; (b) 合成资料; (c) 残差

Fig. 7 Comparison of observed and modeled LOS displacements from interferogram

(a) Observations; (b) Model predictions; (c) Residuals

### 3 讨论与结论

针对此次熊本地震的破裂特征, 本文分别只利用远场体波资料和同震 InSAR 资料进行了单独反演, 考察单一类型资料对熊本地震破裂时空过程的分辨特征, 结果如图 8 所示. 远场体波单独反演结果(图 8a 和 8b)表明此次地震的破裂持续时间亦为 25 s, 主要破裂集中在

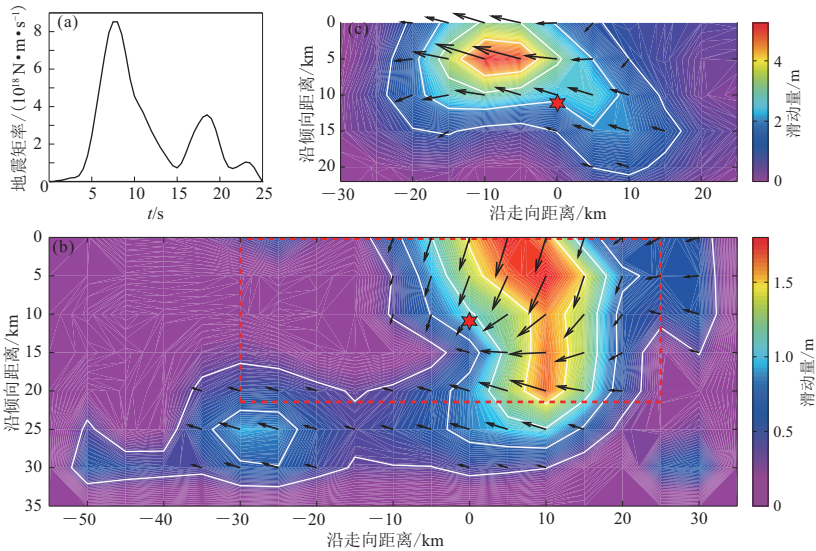


图 8 熊本地震破裂过程远场体波单独反演结果及同震 InSAR 资料单独反演结果

(a) 远场体波反演得到的破裂过程地震矩率函数; (b) 远场体波反演得到的同震滑动分布; (c) 同震

InSAR 资料反演得到的同震滑动分布. 图(b)中红色虚线方框尺度与图(c)相同

Fig. 8 Inversion results of teleseismic waveforms and co-seismic InSAR data for the rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake

(a) Seismic moment rate function from inversion result of teleseismic waveforms; (b) Distribution of co-seismic slip from inversion result of teleseismic waveforms; (c) Distribution of co-seismic slip from inversion result of co-seismic InSAR data. The geometric dimensions of the red dotted rectangular in Fig. (b) are the same as in Fig. (c)

前 15 s 内, 同震滑动区主要沿断层倾向朝浅部扩展, 最大滑动量约为 1.8 m. 基于远场体波反演得到的破裂过程结果的合成波形资料与观测波形资料拟合情况如图 9 所示. 可以看出, 除 AAK 台的合成波形与观测波形拟合的相关系数为 0.68 外, 其它台站的相关系数均大于 0.70, 并且所有台站的平均相关系数为 0.89, 表明单独基于远场体波的反演模型对观测资料具有较好的解释程度.

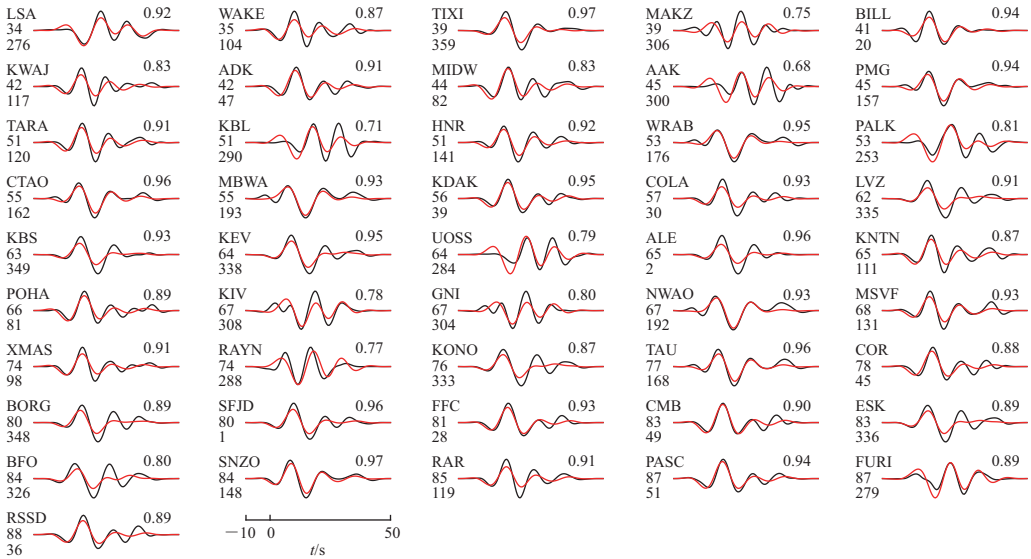


图 9 基于远场体波单独反演结果的观测波形(黑色)与合成波形(红色)比较

每幅子图波形的左侧从上至下依次为台站名、震中距(单位:  $^{\circ}$ )和方位角(单位:  $^{\circ}$ ),  
右侧为合成波形与观测波形的相关系数

Fig. 9 Comparison of the observed waveforms (black) and synthetic ones (red) based on the teleseismic body waveform inversion results

On the left side of the waveforms in each subplot are station code, epicentral distance (unit in  $^{\circ}$ ) and azimuth (unit in  $^{\circ}$ ), and on the right side is correlation coefficient between synthetic waveforms and observed ones

远场体波资料反演结果表明, 此次熊本地震的滑动机制以走滑为主, 但随着深度的增加, 滑动特征从正断分量向逆冲分量转变, 这可能是由于破裂区区域应力结构的不均匀性分布所致. 与正断分量相比, 逆冲分量主要位于破裂区较深的区域, 且逆冲分量的滑动量相对较弱. 基于远场体波资料反演的破裂过程结果计算得到此次熊本地震破裂的平均滑动角为  $-154^{\circ}$ , 表明此次熊本地震的整体破裂特征以走滑为主, 兼有正断分量, 这与 USGS (2016) 给出的 W-震相矩张量解也比较一致. 近年来对其它一些灾害性地震破裂过程的研究也发现了相似的破裂机制发生变化的现象(e.g., Hollingsworth *et al.*, 2017; 张旭等, 2017).

相比于有限断层联合反演结果而言, 远场体波单独反演结果的破裂时间过程与联合反演结果基本一致, 但同震滑动区范围更广, 主要滑动区沿断层走向向西南有所偏移, 并且在深部亦有部分破裂, 这主要是由于远场体波对破裂过程的空间约束能力较弱、空间分辨率相对较低所致.

同震 InSAR 资料单独反演结果(图 8c)中的同震滑动空间特征与有限断层联合反演结果相似, 但在破裂面浅部(沿断层倾向 0—5 km 范围内), 同震 InSAR 单独反演结果表明破裂以



右旋走滑为主, 兼有逆冲分量. 同震 InSAR 观测资料与基于 InSAR 单独反演结果合成资料的对比如图 10 所示. 单独反演同震 InSAR 资料得到的同震滑动对应的较弱逆冲分量特征, 与联合反演结果以及 USGS (2016) 给出的 W-震相矩张量反演结果中对应的正断分量特征相比有些偏差, 这可能是由于不同资料的分辨能力差异或不同资料、方法反演解的不确定性所致. 这种差异性在利用地震资料 and 同震 InSAR 资料对 2016 年阿克陶  $M_{S6.7}$  强震的震源机制解反演中也有所体现(Feng *et al.*, 2017).

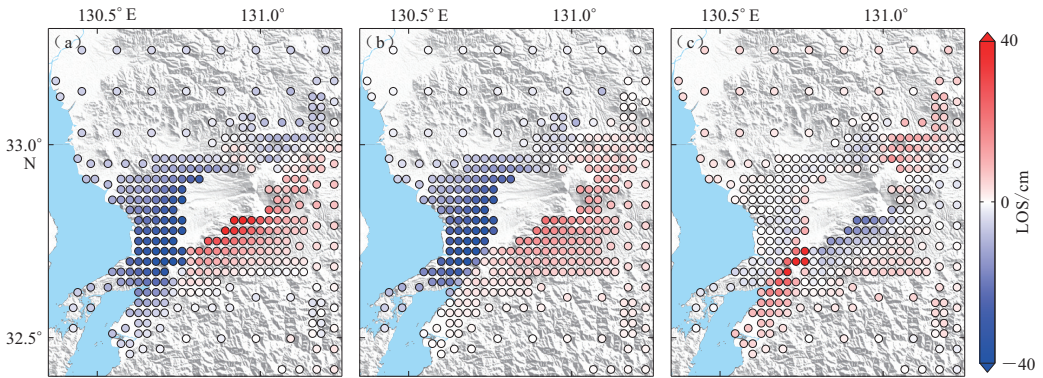


图 10 基于同震 InSAR 数据单独反演结果的 LOS 合成资料与观测资料对比

(a) 观测资料; (b) 合成资料; (c) 残差

Fig. 10 Comparison of observed and modeled LOS displacements from interferogram based on the coseismic InSAR data inversion results

(a) Observations; (b) Model predictions; (c) Residuals

本文基于远场体波资料 and 同震 InSAR 资料联合反演得到的此次熊本  $M_{W7.1}$  地震破裂时空过程的主要特征与已有的分别单独利用远场体波资料(Yagi *et al.*, 2016)、同震 InSAR 资料(Himematsu, Furuya, 2016)和近场强地面运动数据(Hao *et al.*, 2017)所得反演结果基本一致. 同震滑动分布主要集中在较浅区域内, 释放的标量地震矩主要集中在大约 15 s 内释放. 与同震 InSAR 资料反演结果(Himematsu, Furuya, 2016)不同, 本文的联合反演结果与 Yagi 等(2016)和 Hao 等(2017)的结果均显示在破裂面靠近地表的区域内具有较强的滑动分布, 表明破裂可能出露地表, 这也与震区场地调查得到的沿 ENE 向延伸的长约 30 km 的地表破裂较为一致(Shirahama *et al.*, 2016; Toda *et al.*, 2016). 此外, 联合反演结果表明正断分量主要集中在破裂面的浅部, 而 Hao 等(2017)的反演结果中正断分量主要集中在破裂面相对较深的区域. 由于此次熊本地震的破裂以走滑为主, 正断分量相对较弱, 所以对于正断分量的深度分布特征尚需后续结合其它数据和资料进一步分析和讨论.

地震破裂过程对于地表同震位移变化具有直接的影响(张贝等, 2015), 可靠的有限断层地震破裂模型有助于地表同震位移变化估计. 我们利用上述基于远场体波和同震 InSAR 资料的地震破裂过程有限断层联合反演结果, 使用 Wang 等(2003)的方法估计了震区东西、南北及垂直方向的地表同震位移变化(图 11). 对于水平方向的地表同震位移变化而言, 震区西北区域主要朝东北方向运动, 而在东南区域则主要朝南方向运动; 对于垂直方向而言, 震区西北区域地表以下沉为主, 而在东南区域地表则有较弱的隆升.

本文中我们利用远场长周期体波资料以及同震 InSAR 资料联合反演了此次日本熊本地

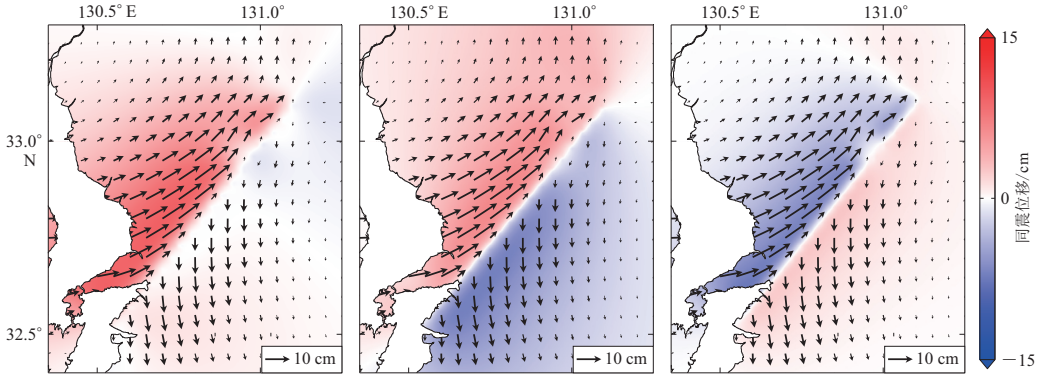


图 11 基于有限断层联合反演模型的熊本地震震源区东西向(左)、南北向(中)和垂直向(右)的地表同震位移变化估计

Fig. 11 Estimation of the earth surface co-seismic displacements in E-W (left), N-S (middle) and vertical (right) directions in source region based on the joint inversion result of the rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake

震的震源破裂时空过程结果. 根据联合反演结果, 对于此次熊本灾害性地震的破裂复杂性特征, 我们有如下认识:

此次日本熊本地震的震源破裂持续时间约为 25 s, 但主要能量集中在前 15 s 内释放, 整个破裂过程释放的总标量矩为  $6.03 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$ , 相当于矩震级  $M_w 7.1$ . 同震滑动分布主要集中于浅部, 破裂以右旋走滑为主, 但在沿倾向 0—5 km 范围内, 破裂存在较强的正断特征, 最大同震滑动量约为 4.9 m, 且最大同震位错区位于背离断层走向、距离起始破裂点约 5—10 km 范围内. 破裂前期(0—7 s), 在倾向上向浅表发生破裂, 在走向上向东北和西南两侧扩展; 大概 7 s 之后, 破裂沿断层走向主要向东北方向扩展. 地震破裂过程联合反演结果表明, 此次熊本地震破裂可能出露地表.

## 参 考 文 献

- 张贝, 程惠红, 石耀霖. 2015. 2015年4月25日尼泊尔  $M_S 8.1$  大地震的同震效应[J]. 地球物理学报, **58**(5): 1794–1803.
- Zhang B, Cheng H H, Shi Y L. 2015. Calculation of the co-seismic effect of  $M_S 8.1$  earthquake, April 25, 2015, Nepal[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(5): 1794–1803 (in Chinese).
- 张旭. 2016. 基于视震源时间函数的震源过程复杂性分析新方法研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 1–218.
- Zhang X. 2016. *Study on New Methods for Analysis of the Complexity of Source Rupture Process Based on Apparent Source Time Functions*[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration: 1–218 (in Chinese).
- 张旭, 严川, 许力生, 李春来. 2017. 2016年阿克陶  $M_S 6.7$  地震震源复杂性与烈度[J]. 地球物理学报, **60**(4): 1411–1422.
- Zhang X, Yan C, Xu L S, Li C L. 2017. Source complexity of the 2016 Aketao  $M_S 6.7$  earthquake and its intensity[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **60**(4): 1411–1422 (in Chinese).
- 张勇. 2008. 震源破裂过程反演方法研究[D]. 北京: 北京大学地球与空间科学学院: 1–17.
- Zhang Y. 2008. *Study on the Inversion Methods of Source Rupture Process*[D]. Beijing: School of Earth and Space Sciences, Peking University: 1–17 (in Chinese).
- Antolik M, Dreger D S. 2003. Rupture process of the 26 January 2001  $M_w 7.6$  Bhuj, India, earthquake from teleseismic broad band data[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **93**(3): 1235–1248.
- Chen Y T, Xu L S. 2000. A time-domain inversion technique for the tempo-spatial distribution of slip on a finite fault plane with applications to recent large earthquakes in the Tibetan Plateau[J]. *Geophys J Int*, **143**(2): 407–416.
- Farr T G, Rosen P A, Caro E, Crippen R, Duren R, Hensley S, Kobrick M, Paller M, Rodriguez E, Roth L, Seal D, Shaffer S, Shimada J, Umland J, Werner M, Oskin M, Burbank D, Alsdorf D. 2000. The shuttle radar topography mission[J]. *Rev*

- Geophys*, **45**(2): 37–55.
- Feng W P, Tian Y F, Zhang Y, Samsonov S, Almeida R, Liu P. 2017. A slip gap of the 2016  $M_w$ 6.6 Muji, Xinjiang, China, earthquake inferred from Sentinel-1 TOPS interferometry[J]. *Seismol Res Lett*, **88**(4): 1054–1064.
- Fukahata Y, Hashimoto M. 2016. Simultaneous estimation of the dip angles and slip distribution on the faults of the 2016 Kumamoto earthquake through a weak nonlinear inversion of InSAR data[J]. *Earth Planets Space*, **68**: 204.
- GCMT. 2016. Global CMT search results[EB/OL]. [2017-01-07]. <http://www.globalcmt.org/cgi-bin/globalcmt-cgi-bin/CMT4/form?itype=y&mo=4&day=15&oyr=2016&omo=4&oday=16&jyr=1976&jday=1&ojyr=1976&ojday=1&otype=nd&nday=1&lmw=0&umw=10&lms=0&ums=10&lmb=0&umb=10&llat=-90&ulat=90&llon=-180&ulon=180&lhd=0&uhd=1000<s=-9999&uts=9999&lpe1=0&upe1=90&lpe2=0&upe2=90&list=0>.
- Goldstein R M, Werner C L. 1998. Radar interferogram filtering for geophysical applications[J]. *Geophys Res Lett*, **25** (21): 4035–4038.
- Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. 1988. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping[J]. *Radio Sci*, **23**(4): 713–720.
- Hao J L, Ji C, Yao Z X. 2017. Slip history of the 2016  $M_w$ 7.0 Kumamoto earthquake: Intraplate rupture in complex tectonic environment[J]. *Geophys Res Lett*, **44**(2): 743–750.
- Hartzell S H, Heaton T H. 1983. Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **73**(6A): 1553–1583.
- Himematsu Y, Furuya M. 2016. Fault source model for the 2016 Kumamoto earthquake sequence based on ALOS-2/PALSAR-2 pixel-offset data: Evidence for dynamic slip partitioning (EPSP-D-16-00163)[J]. *Earth Planets Space*, **68**(1): 169.
- Hollingsworth J, Ye L L, Avouac J P. 2017. Dynamically triggered slip on a splay fault in the  $M_w$ 7.8, 2016 Kaikoura (New Zealand) earthquake[J]. *Geophys Res Lett*, **44**(8): 3517–3525.
- Kennett B L N, Engdahl E R, Buland R. 1995. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes[J]. *Geophys J Int*, **122**(1): 108–124.
- Kim A, Dreger D S. 2008. Rupture process of the 2004 Parkfield earthquake from near-fault seismic waveform and geodetic records[J]. *J Geophys Res*, **113**(B7): B07308.
- Scheiber R, Moreira A. 2000. Coregistration of interferometric SAR images using spectral diversity[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, **38**(5): 2179–2191.
- Shirahama Y, Yoshimi M, Awata Y, Maruyama T, Azuma T, Miyashita Y, Mori H, Imanishi K, Takeda N, Ochi T, Otsubo M, Asahina D, Miyakawa A. 2016. Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan[J]. *Earth Planets Space*, **68**: 191.
- Toda S, Kaneda H, Okada S, Ishimura D, Mildon Z K. 2016. Slip-partitioned surface ruptures for the  $M_w$ 7.0 16 April 2016 Kumamoto, Japan, earthquake[J]. *Earth Planets Space*, **68**: 188.
- Uchide T, Horikawa H, Nakai M, Matsushita R, Shigematsu N, Ando R, Imanishi K. 2016. The 2016 Kumamoto-Oita earthquake sequence: Aftershock seismicity gap and dynamic triggering in volcanic areas[J]. *Earth Planets Space*, **68**: 180.
- USGS. 2016.  $M7.0-1$  km, E of Kumamoto-shi, Japan[EB/OL]. [2017-01-07]. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20005iis#executive>.
- Wang R J. 1999. A simple orthonormalization method for stable and efficient computation of Green's functions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **89**(3): 733–741.
- Wang R J, Martin F L, Roth F. 2003. Computation of deformation induced by earthquakes in a multi-layered elastic crust: FORTRAN programs EDGRN/EDCMP[J]. *Comput Geosci*, **29**(2): 195–207.
- Ward S N, Barrientos S E. 1986. An inversion for slip distribution and fault shape from geodetic observations of the 1983, Borah Peak, Idaho, earthquake[J]. *J Geophys Res*, **91**(B5): 4909–4919.
- Xu L S, Chen Y T, Teng T L, Patau G. 2002. Temporal-spatial rupture process of the 1999 Chi-Chi earthquake from IRIS and GEOSCOPE long-period waveform data using aftershocks as empirical Green's functions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **92**(8): 3210–3228.
- Yagi Y, Mikumo T, Pacheco J, Reyes G. 2004. Source rupture process of the Tecomán, Colima, Mexico earthquake of 22 January 2003, determined by joint inversion of teleseismic body-wave and near-source data[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **94**(5): 1795–1807.
- Yagi Y, Okuwaki R, Enescu B, Kasahara A, Miyakawa A, Otsubo M. 2016. Rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake in relation to the thermal structure around Aso volcano[J]. *Earth Planets Space*, **68**: 118.
- Yoshida S. 2016. Earthquakes in Oita triggered by the 2016  $M7.3$  Kumamoto earthquake[J]. *Earth Planets Space*, **68**: 176.