

张 勇, 陈运泰, 许力生. 2009 年 4 月 6 日意大利拉奎拉(L'Aquila)  $M_w$ 6.3 地震的破裂过程——视震源时间函数方法与直接波形反演方法比较. 地球物理学报, 2010, **53**(6):1428~1439, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.021

Zhang Y, Chen Y T, Xu L S. Rupture process of 6 April 2009 L'Aquila, Italy,  $M_w$ 6.3 earthquake—a comparison between apparent source time function method and direct wave inversion method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(6):1428~1439, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.021

## 2009 年 4 月 6 日意大利拉奎拉(L'Aquila) $M_w$ 6.3 地震的破裂过程 ——视震源时间函数方法与直接波形反演方法比较

张 勇, 陈运泰\*, 许力生

中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

**摘 要** 通过对视震源时间函数方法和直接波形反演方法在意大利拉奎拉(L'Aquila)  $M_w$ 6.3 地震破裂过程反演中的应用, 分析比较了两种方法的特点. 视震源时间函数结果表明, 这次地震的破裂过程由两次子事件组成, 其中第二次子事件的多普勒效应显著, 表明破裂主要朝震中的东南方向传播. 分别采用视震源时间函数方法和滑动角固定以及滑动角可变的直接波形反演方法对拉奎拉地震时空破裂过程进行反演所得到的结果一致表明: 断层面上有两块滑动量集中的区域, 分别位于震源处和沿走向( $132^\circ$ )方向距震源 5~10 km 处, 最大滑动量分别约为 1.2 m 和 1.0 m. 破裂持续时间约为 9.5 s. 最大滑动速率达 0.6~0.7 m/s, 快速的破裂和上盘一下盘效应导致了拉奎拉城的严重破坏.

**关键词** 视震源时间函数, 地震破裂过程, 拉奎拉(L'Aquila)地震

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.021

中图分类号 P315

收稿日期 2009-11-17, 2010-05-20 收修定稿

## Rupture process of 6 April 2009 L'Aquila, Italy, $M_w$ 6.3 earthquake — a comparison between apparent source time function method and direct wave inversion method

ZHANG Yong, CHEN Yun-Tai\*, XU Li-Sheng

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

**Abstract** The characteristics of apparent source time function (ASTF) method and direct wave inversion method were discussed and the spatio-temporal rupture process was investigated by application of the two methods to L'Aquila earthquake. ASTF results show that there were two sub-events in this earthquake and the rupture mainly propagated southeastwards as indicated by the obvious seismic Doppler effect of the second sub-event. The spatio-temporal rupture processes obtained by the ASTF method, direct wave inversion method with fixed and without rake consistently show that there were two slip-concentrated patches which were located at the hypocenter and 5~10 km along strike direction and have the maximum slip of 1.2 m and 1.0 m, respectively. The source rupture duration time is about 9.5 s and the maximum slip-rate is about

**基金项目** 国家自然科学基金项目(40904013 和 40874026), 博士后基金项目(20080440435)资助.

**作者简介** 张 勇, 男, 1981 年生, 中国地震局地球物理研究所副研究员, 主要从事震源运动学研究.

\* **通讯作者** 陈运泰, 男, 研究员, 主要从事地震学和地球物理学研究. E-mail: chenyt@cea-igp.ac.cn

0.6~0.7 m/s. The high slip-rate and the hanging wall /foot wall effect were responsible for the tremendous damage in L'Aquilacity.

**Keywords** Apparent source time function (ASTF), Earthquake rupture process, L'Aquila earthquake

## 1 引 言

视震源时间函数方法<sup>[1~4]</sup>和直接波形反演方法<sup>[5,6]</sup>是近 30 年来地震破裂过程研究中最常见的两种反演方法.这两种方法在形式上的主要区别在于:前者首先通过反褶积提取视震源时间函数,然后通过反演视震源时间函数得到震源破裂过程;后者则直接通过反演波形资料得到破裂过程,而不需要事先提取视震源时间函数.在我国,陈运泰、许力生等运用视震源时间函数的方法最早研究了大地震的破裂过程<sup>[3,4,7~9]</sup>;而在直接波形反演方法方面,包括姚振兴和纪晨<sup>[10]</sup>,周云好、陈运泰和许力生<sup>[11,12]</sup>,以及周仕勇和陈晓非等<sup>[13]</sup>开展了大量的工作,发展了包括线性和非线性反演技术的直接波形反演方法,并在一些地震研究中得到了应用.近年来,张勇等<sup>[14,15]</sup>发展了滑动角固定和滑动角可变的直接波形反演方法,其中滑动角固定的反演方法已应用于 2007 年宁洱地震和 2008 年汶川地震的破裂过程研究,得到了稳定的结果.本文将以 2009 年 4 月 6 日意大利拉奎拉(L'Aquila)地震为例,分别以视震源时间函数方法和直接波形反演方法反演这次地震的破裂过程,比较和讨论这两种方法的优缺点.

2009 年 4 月 6 日 01:32:41 UTC(协调世界时)(当地时间 6 日凌晨 3:32:41,北京时间 9:32:41),在意大利中部地区(震中位置 42.35°N, 13.38°E)发生了  $M_w$ 6.3 级地震(<http://portale.ingv.it>).

这次地震震中位于罗马东北约 85 km 的阿布鲁佐地区(Abruzzo Region)首府拉奎拉(L'Aquila)市附近,造成了 299 人丧生,1500 人受伤.由于破坏严重,拉奎拉地震在意大利和国际上都受到了广泛的关注. Anzidei 等<sup>[16]</sup>和 Atzori 等<sup>[17]</sup>运用大地测量资料(InSAR 和 GPS 测量资料)反演了这次地震的断层静态(最终)滑动,Cirella 等<sup>[18]</sup>运用近场地震资料和 GPS 资料联合反演了这次地震的震源过程,Pino 和 Luccio<sup>[19]</sup>通过分析区域地震台站处的视震源时间函数,获得了断层走向方向上的静态滑动量分布.以上研究多侧重于讨论拉奎拉地震的断层静态滑动,较少涉及这次地震的震源时间过程和破裂

的时空演化特征.因此,本文将同时采用视震源时间函数方法与直接波形反演方法,研究讨论拉奎拉地震的震源时空破裂过程和致灾机理.

## 2 数 据

采用由 IRIS 数据中心提供的全球地震台网(GSN)远震宽频带数据.由于垂直向直达 P 波波信噪比较高,且波形受其他震相的干扰较小,比较适合于地震破裂过程的分析研究.经过仔细挑选,我们选取了 24 个方位分布较均匀且具有较高信噪比的宽频带地震台站的垂直向直达 P 波记录(图 1).运用反射率方法<sup>[20]</sup>和经过展平变换的 IASPEI91 速度结构模型<sup>[21]</sup>计算表示震源到台站之间的路径效应的格林函数.

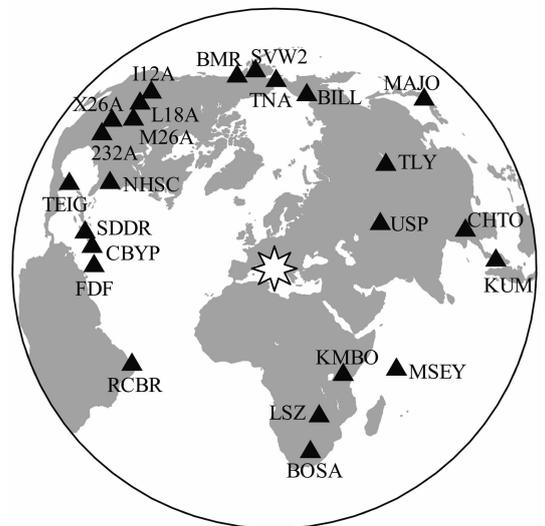


图 1 用以研究拉奎拉地震破裂过程的地震台站分布  
白色八角星表示震中位置,黑色三角形为台站位置.

Fig. 1 Distribution of seismic stations used in the rupture process inversion of the L'Aquila earthquake  
White aniseed star denotes the epicenter and black triangle denotes the seismic station.

## 3 视震源时间函数

拉奎拉地震发生后,刘超等<sup>[22]</sup>采用线性迭代求解地震矩张量和震源时间函数的方法,反演了这次

地震的地震矩张量,确定了这次地震的断层面机制为走向  $132^\circ$ /倾角  $53^\circ$ /滑动角  $-103^\circ$ . 该方法的特点在于考虑了震源时间过程的复杂性,相对于需预先对震源时间函数形状进行假定的方法,在理论上更具合理性. 本文采用刘超等<sup>[22]</sup>得到的震源机制结果,合成得到了相应机制下的理论格林函数.

将地震台站观测得到的地震记录和特定机制下震源到台站之间的格林函数进行反褶积,可以得到该台站处的视震源时间函数. 视震源时间函数是反映震源性质的重要参数,在有限断层震源模型中,它等同于经过时间平移(平移量为子断层相对于震源到台站的到时差)的子断层震源时间函数的叠加,因此携带了地震矩释放的时空过程的有效信息. 如果地震破裂过程具有明显的方向性,各台站处的视震源时间函数将会显示出明显的地震多普勒效应. 因此,通过系统分析视震源时间函数的形态,可以较好地把握所研究地震的破裂过程的总体特征.

基于观测资料和理论格林函数,作者采用“映射兰德韦伯反褶积方法”(Projected Landweber Deconvolution, PLD)方法<sup>[23]</sup>,提取了这次地震的视震源时间函数. 图 2 显示了拉奎拉地震的视震源时间函数随方位角的分布(图 2a)及其平均结果(图 2b). 由图 2 可以看出,整个破裂过程由两个主要的子事件组成,其中第一个子事件规模略小于第二个子事件. 根据地震多普勒效应,通过对比两个子事件的峰值在不同方位角处所出现的时刻,可以判断两个子事件的破裂特征. 第一个子事件的峰值在各个方位角上出现的时刻大致相同,意味着这个子事件是一次双侧破裂;而第二个子事件的峰值在方位约为  $132^\circ$  的方向、即走向方向上出现的时间最早,说明这个子事件分布在震源的走向方向上. 鉴于第二个子事件的规模大于第一个子事件,可以判定此次地震破裂由震源处开始,主要朝东南方向、即断层走向方向传播.

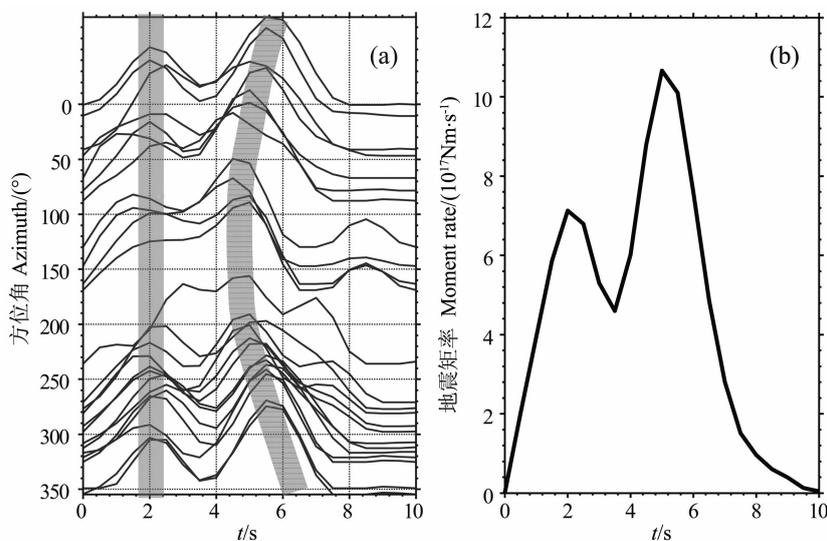


图 2 视震源时间函数随方位角的分布(a)及平均视震源时间函数(b)

图(a)中的两条灰色粗线表示两次子事件的峰值随方位角的变化示意.

Fig. 2 Variation of apparent source time functions with azimuth (a) and the averaged apparent source time function (b)

The two thick gray curves in (a) denote the temporal variation of the two peaks of the apparent source time functions.

## 4 破裂过程反演

### 4.1 视震源时间函数方法反演

由视震源时间函数反演地震破裂过程的方程如下:

$$\begin{bmatrix} s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \\ \lambda_1 \mathbf{D} \\ \lambda_2 \mathbf{T} \end{bmatrix} [m], \quad (1)$$

式中,  $s$  为经过面积归一化处理的视震源时间函数,  $\delta$  为根据子断层相对于震源到台站的到时差所构建的稀疏矩阵<sup>[7]</sup>,  $m$  为所有子断层的震源时间函数,  $\mathbf{D}$  和  $\mathbf{T}$  分别为空间光滑和时间光滑的约束矩阵,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为对应的光滑权重的大小.

在由视震源时间函数对破裂过程总体特征进行上述分析的基础上,采用由式(1)构建的反演方法,通过反演视震源时间函数求得了这次地震的震源破裂过程. 在断层所在的平面,即走向  $132^\circ$ , 倾角  $53^\circ$

的平面上,选取了一个长 30 km、宽 16 km 的区域,将其划分为  $15 \times 8 = 120$  个子断层,每个子断层的尺寸为  $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ . 经过试验,选择沿走向方向第 6 个、沿倾向方向第 4 个的子断层作为初始破裂点(震源). 根据视震源时间函数所显示的视破裂持续时间,反演时以 10 s 作为地震破裂持续时间的上限.

#### 4.2 滑动角固定的直接波形反演

滑动角固定的直接波形反演方法所用的方程如下<sup>[24]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \lambda_0 U \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_0 \mathbf{G} \\ \lambda_1 \mathbf{D} \\ \lambda_2 \mathbf{T} \\ \lambda_3 \mathbf{Z} \end{bmatrix} [m], \quad (2)$$

式中,  $U$  为经过处理后的地震台站的波形记录,  $\mathbf{G}$  为格林函数矩阵,  $\mathbf{Z}$  为标量地震矩最小约束矩阵.  $\lambda_0$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  代表不同方程组的权重,其中  $\lambda_0$  是一个稀疏矩阵,用于调节各台站资料在反演中的权重大小,  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  为常数.

采用与视震源时间函数方法反演相同的断层面模型. 与视震源时间函数反演方程不同的是:滑动角固定的直接波形反演引入了标量地震矩最小约束条件,其具体原因将在下文中述及.

#### 4.3 滑动角可变的直接波形反演

滑动角可变的反演方程是滑动角固定的反演方程(2)的简单扩展:

$$\begin{bmatrix} \lambda_0 U \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_0 [\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2] \\ \lambda_1 \begin{bmatrix} \mathbf{D} & 0 \\ 0 & \mathbf{D} \end{bmatrix} \\ \lambda_2 \begin{bmatrix} \mathbf{T} & 0 \\ 0 & \mathbf{T} \end{bmatrix} \\ \lambda_3 \begin{bmatrix} \mathbf{Z} & 0 \\ 0 & \mathbf{Z} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中,下标“1”和“2”为两个正交的滑动方向.  $G_1$  和  $m_1$  分别为第 1 个滑动方向对应的格林函数矩阵和子断层震源时间函数;  $G_2$  和  $m_2$  分别为第 2 个滑动方向对应的格林函数矩阵和子断层震源时间函数. 参考刘超等<sup>[21]</sup>通过地震矩张量反演给出滑动角的结果( $-103^\circ$ ),我们定义两个正交的滑动方向分别为  $-148^\circ$  ( $-103^\circ - 45^\circ$ ) 和  $-58^\circ$  ( $-103^\circ + 45^\circ$ ),通过求解非负的反演结果,可以约束子断层滑动角在这两个正交滑动方向之间变化),这种做法有助于在获取滑动角变化信息的同时保持反演的稳定.

## 5 反演结果

### 5.1 静态滑动量分布

以上述三种方法反演得到的拉奎拉地震静态(最终)滑动量分布如图 3 所示,尽管所用的方法不同,但所得结果在主要特征上比较相似. 由图 3 可见,断层面上发生破裂的区域长约 20 km,宽约 10~15 km,包括两个滑动量集中的区域,分别位于初始破裂点(震源)附近和走向方向上距震源 5~10 km 处,二者的最大滑动量分别约为 1.2 m 和 1.0 m.

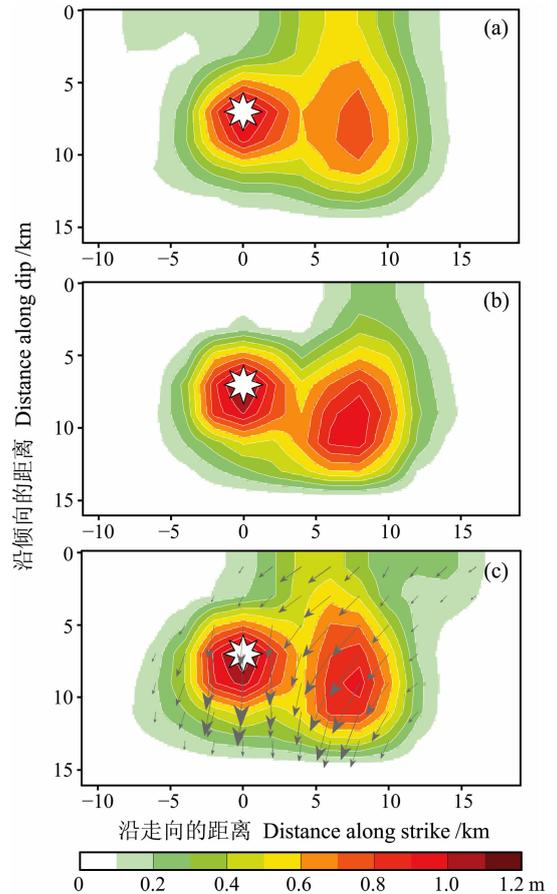


图 3 断层面上静态滑动量分布

(a)由视震源时间函数方法反演得到的结果;(b)由滑动角固定的直接波形反演方法得到的结果;(c)由滑动角可变的直接波形反演方法得到的结果. 图中白色八角星表示初始破裂点在断层面上的位置,灰色箭头表示滑动方向.

Fig. 3 Static slip distribution on the fault plane

(a) Results inverted from apparent source time function method; (b) Results inverted from direct wave inversion method with rake fixed; (c) Results inverted from direct wave inversion method without rake fixed. The white aniseed star is the position of rupture initiation point on the fault plane, and the gray arrow denotes the slip vector.

从滑动角可变的直接波形反演所获取的滑动角信息来看,初始破裂点(震源位置)附近的滑动量集中区域的滑动角接近 $-90^\circ$ ,即接近纯正断层错动模式,在走向方向上距震源 $5\sim 10$  km处的第二个滑动量集中区域的右旋走滑分量略大一些.对滑动角可变的直接波形反演方法所得结果中所有子断层滑动矢量进行加权平均,得到这次地震的平均滑动角为 $-113^\circ$ .也就是说,由滑动角可变的直接波形反演方法所得的走滑分量比矩张量反演得到的走滑分量要大一些.

## 5.2 滑动速率的时空分布

图4(a)、(b)和(c)分别显示了三种方法反演得到的断层面上滑动速率随时间的变化分布.由这三种方法分别得到的滑动速率时空分布具有较好的一

致性.地震的主要破裂过程包括两个阶段.若以发震时刻(即地震破裂起始时刻)为时间原点,则这两个阶段分别发生于 $0\sim 4.0$  s和 $4.0\sim 7.0$  s.在第一个阶段,破裂开始于震源处,以类似于圆盘形破裂的方式向四周扩展,滑动速率在 $2.0\sim 2.5$  s达到峰值,滑动速率约为 $0.6\sim 0.7$  m/s,随后逐渐减弱,在 $4.0$  s时基本停止.第二个阶段的破裂开始于 $4.0$  s,位于上文所述的第二个滑动量集中的区域,此阶段的滑动速率在 $5.5\sim 6.0$  s达到峰值,滑动速率约为 $0.5$  m/s,此后逐渐下降,至 $7.0\sim 7.5$  s滑动完全停止.

在滑动速率时空分布的细节方面,以上三种方法存在一些差别,如最大滑动速率分别约为: $0.6$  m/s,  $0.6$  m/s和 $0.7$  m/s.由图4c可见,在滑动角可变的直接波形反演方法结果中,在 $8.5\sim 9.5$  s还发生了一

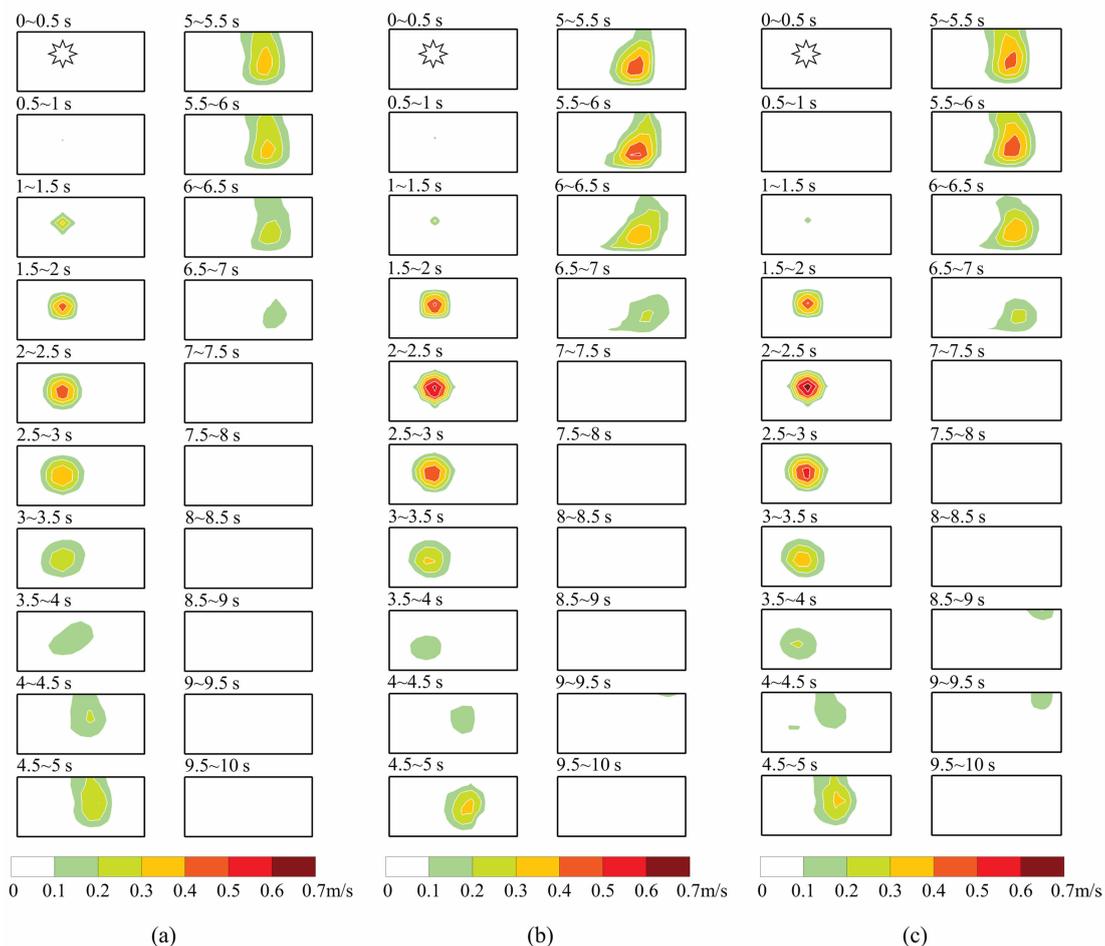


图4 断层面上滑动速率分布随时间的变化

(a)、(b)和(c)分别表示视震源时间函数方法、滑动角固定的直接波形反演方法和滑动角可变的直接波形反演方法反演得到的结果.

子图左上方的数字为子图所对应的时间段,白色八角星表示震源(初始破裂点)在断面上的位置.

Fig. 4 Temporal variation of the distribution of slip-rate on the fault plane

Panels (a), (b) and (c) are the results inverted from apparent source time function method, direct wave inversion method with and without rake fixed, respectively. Number on the top left of each rectangular denotes the time period. White aniseed star denotes the position of hypocenter (rupture initiation point) on the fault plane.

次较小的子事件,但滑动比较微弱,最大滑动速率不到 0.2 m/s.

我们还注意到,尽管第二个子事件的地震矩释放规模大于第一个子事件,但由于破裂面积较大,其最大滑动量和滑动速率反而稍小于第一个子事件.这说明破裂事件的地震矩释放强度和滑动幅度受多种因素影响,并不存在单一的关系.

### 5.3 震源时间函数

断层面上滑动速率随时间变化的分布(图 4)表示了滑动速率的空间分布随时间的变化过程,而断层面上子断层的震源时间函数(图 5)则是滑动速率的时间过程随空间位置的变化分布,二者从不同角

度展示了地震时空破裂过程.图 5 显示了用上述三种方法反演得到的所有子断层的震源时间函数(5A),以及通过对所有子断层震源时间函数进行叠加得到的整个地震的震源时间函数(5B).由拉奎拉地震的震源时间函数以判断该地震主要由两次子事件组成,分别位于 0~3.5 s 和 3.5~7.5 s,峰值分别位于 2.5 s 和 5.5 s.此外,在 8.5~9.5 s 之间,还有一次较小的子事件.整个地震破裂的持续时间约为 9.5 s.从子断层的震源时间函数的最大幅度来看,滑动量集中的两个区域同时也是地震矩率最高的两个区域.从子断层的震源时间函数的形状来看,在地震矩率较高区域的中心,地震矩释放的过程比较简

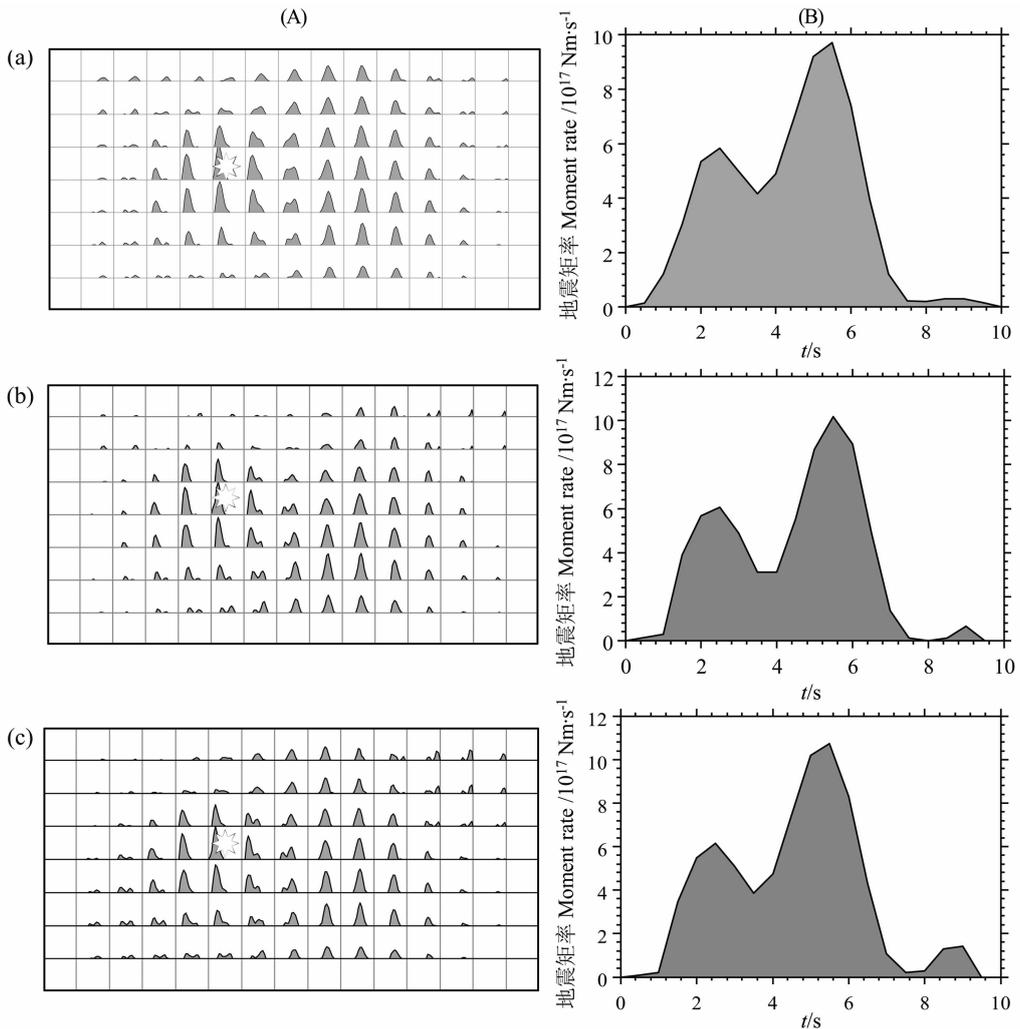


图 5 断层面上子断层震源时间函数的空间分布(A),以及整个地震的震源时间函数(B)

(a) 视震源时间函数方法结果; (b) 滑动角固定的直接波形反演方法结果; (c) 滑动角可变的直接波形反演方法结果.

左侧图中白色八角星表示初始破裂点所在子断层的位置.

Fig. 5 Distribution of source time functions of sub-faults on the fault planes (left), and the source time functions of the earthquake (right)

(a) Results inverted from apparent source time function method; (b) Results inverted from direct wave inversion method with rake fixed; (c) Results inverted from direct wave inversion method without rake fixed. Aniseed star on the left panel is the rupture initiation point.

单;而在地震矩率较高的区域边缘,地震矩释放过程则相对比较复杂.震源时间函数的这种形态特征意味着滑动量集中的区域及其边缘可能分别对应于断层面上凹凸体和障碍体的位置.

由图 5 还可看到,由上述三种方法得到的子断层震源时间函数的形状也存在一定的差别,但总体而言,震源时间函数幅度较大的子断层具有相似的震源时间函数,而幅度较小的子断层的震源时间函数则差别明显.这说明三种反演方法虽然能够一致地反映破裂过程的主要特征,但在细节上仍然不可避免地存在一些差别.

#### 5.4 观测波形与合成波形比较

反演模型能够很好地解释观测资料是反演结果可靠的必要条件之一.图 6 比较了观测视震源时间函数与合成视震源时间函数(为了方便显示,本文将长度为 10 s 的视震源时间函数补零至长度 20 s),其平均相关系数约为 0.97.图 7 分别比较了视震源时间函数反演方法(图 7a)、滑动角固定的直接波形反演方法(7b)和滑动角可变的直接波形反演方法(7c)的观测波形与合成波形.由图可见,根据反演结果计算得到的合成波形很好地解释了几乎所有的观测波形:视震源时间函数方法对应的观测-合成波形之间的平均相关系数约为 0.75;滑动角固定的直接波形反演方法的观测-合成波形之间的平均相关系数约为 0.78;滑动角可变的直接波形反演方法的观

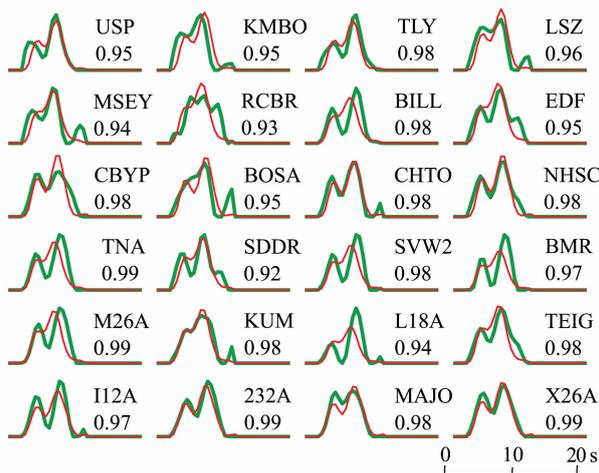


图 6 观测视震源时间函数与合成视震源时间函数的比较  
每个子图中,绿线表示观测视震源时间函数,红线表示合成视震源时间函数.字母为台站名和观测-合成波形的相关系数.

Fig. 6 Comparison between observed and synthetic apparent source functions

In each sub-graph, the green line is the observed ASTF and the red line is the synthetic ASTF. On the right of each sub-graph are the station name and correlation coefficient, respectively.

测-合成波形之间的平均相关系数约为 0.81.由于视震源时间函数方法是拟合视震源时间函数,而不是直接拟合观测波形,因此相对于直接波形反演方法,其观测波形与合成波形之间的相关系数略低.此外由于放弃了对滑动角的限制,滑动角可变的直接波形反演相对于滑动角固定的反演的观测-合成波形的拟合情况要好一些.这说明两点:一是子断层滑动角在地震破裂过程中确实存在变化;二是断层面上滑动角的变化在观测地震波形中有所反映,即在地震观测资料中携带了反映滑动角变化的有效信息.

## 6 讨论与结论

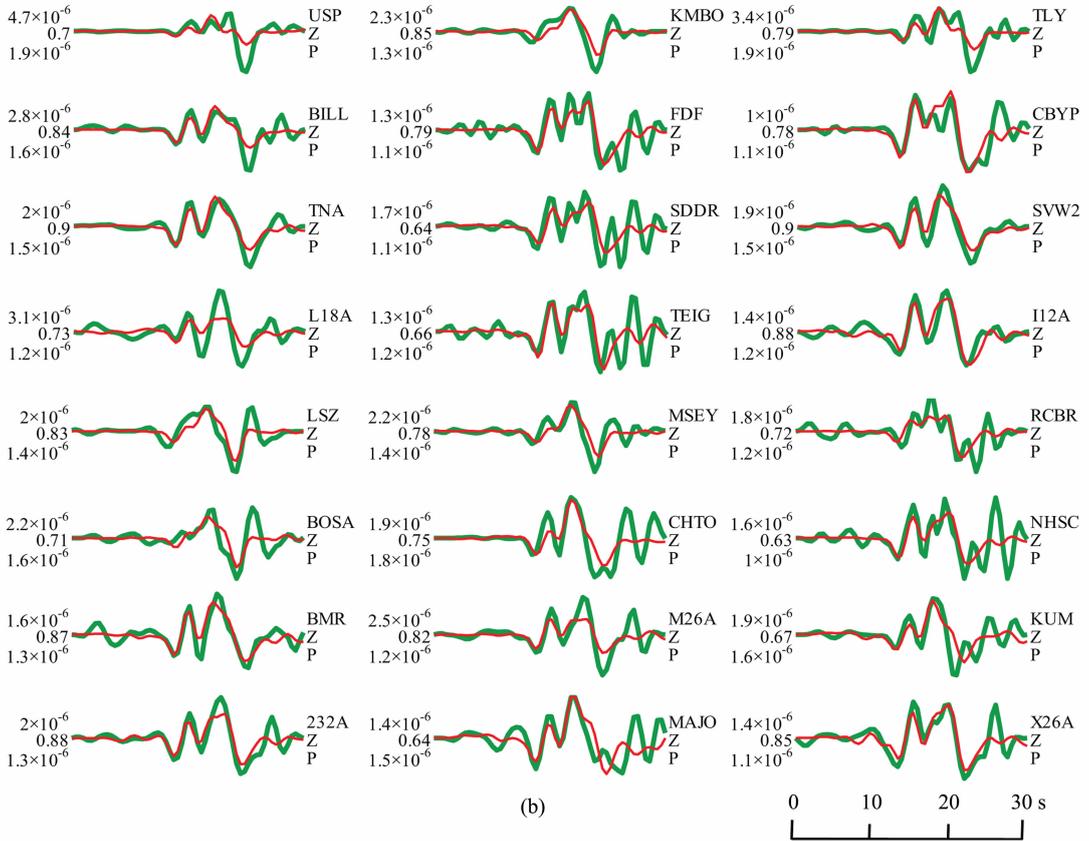
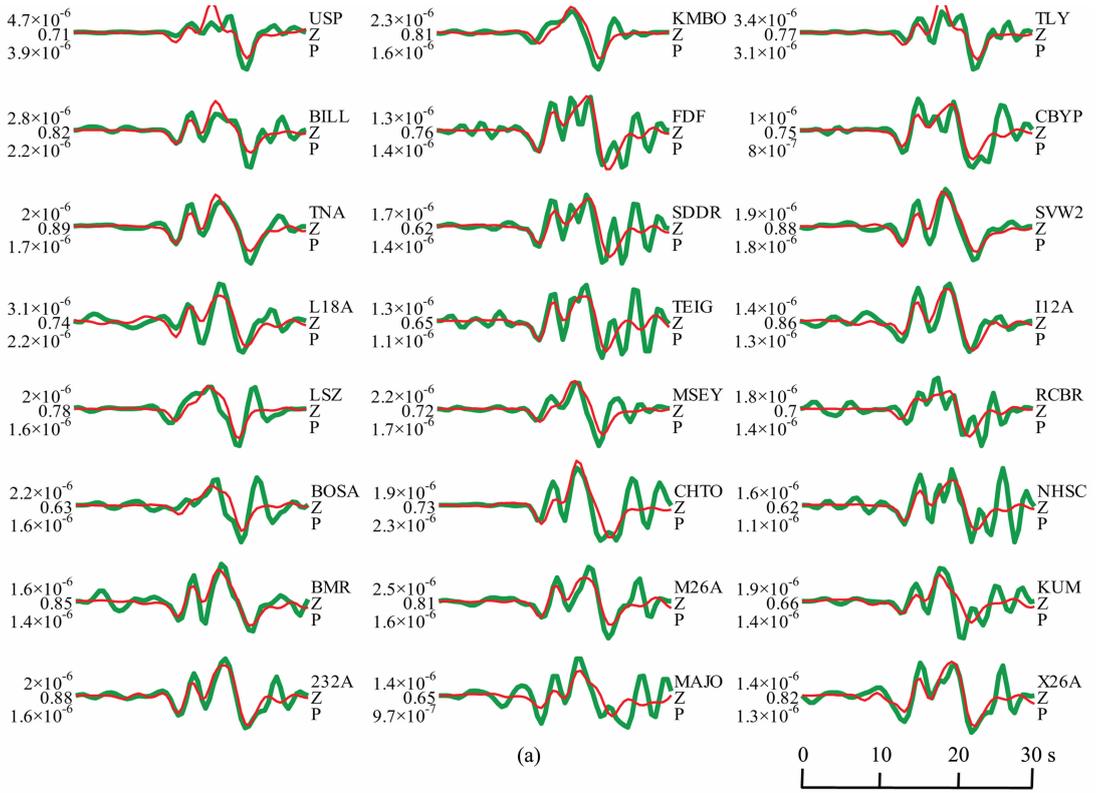
### 6.1 视震源时间函数方法和直接波形反演方法

以上分析表明,视震源时间函数方法与直接波形反演方法都是破裂过程反演的有效方法.在拉奎拉地震的研究中,使用两种方法都得到了基本一致的结果,从一个侧面印证了这两种方法的正确性和有效性.然而由于在反演方式和操作流程(是否提取视震源时间函数)上的差别,两种反演方法在很多方面具有不同的特点(表 1):(1)众所周知,破裂过程反演通常具有很强的不稳定性.在视震源时间函数方法中,这种不稳定性主要体现在提取视震源时间函数的反褶积阶段(不过,本文采用 PLD 方法可有效克服这一不稳定性).在反演视震源时间函数得到破裂过程时,系数矩阵  $\delta$  的条件数不大,反演比较稳定,因此不需要运用标量地震矩最小的约束条件.对于直接波形反演方法,系数矩阵病态程度通常比较严重,在误差不可避免的情况下,标量地震矩最小的约束条件一般不可或缺.(2)在计算效率方面,视震源时间函数方程中的系数矩阵是非常稀疏的矩阵,反演中可以采用稀疏矩阵算法以大幅度地节省计算资源、缩短计算时间.在对程序进行同等优化的情况下,我们在普通 PC 机上对拉奎拉地震的震源破裂

表 1 视震源时间函数方法和直接波形反演方法的比较

Table 1 Comparison of the characteristics between apparent source time function method and direct wave inversion method

	视震源时间函数方法	直接波形反演方法
反演稳定性	稳定	易不稳定
计算效率	高	低
适用范围	较窄	较广
操作过程对部分破裂信息的损伤	可能	不易



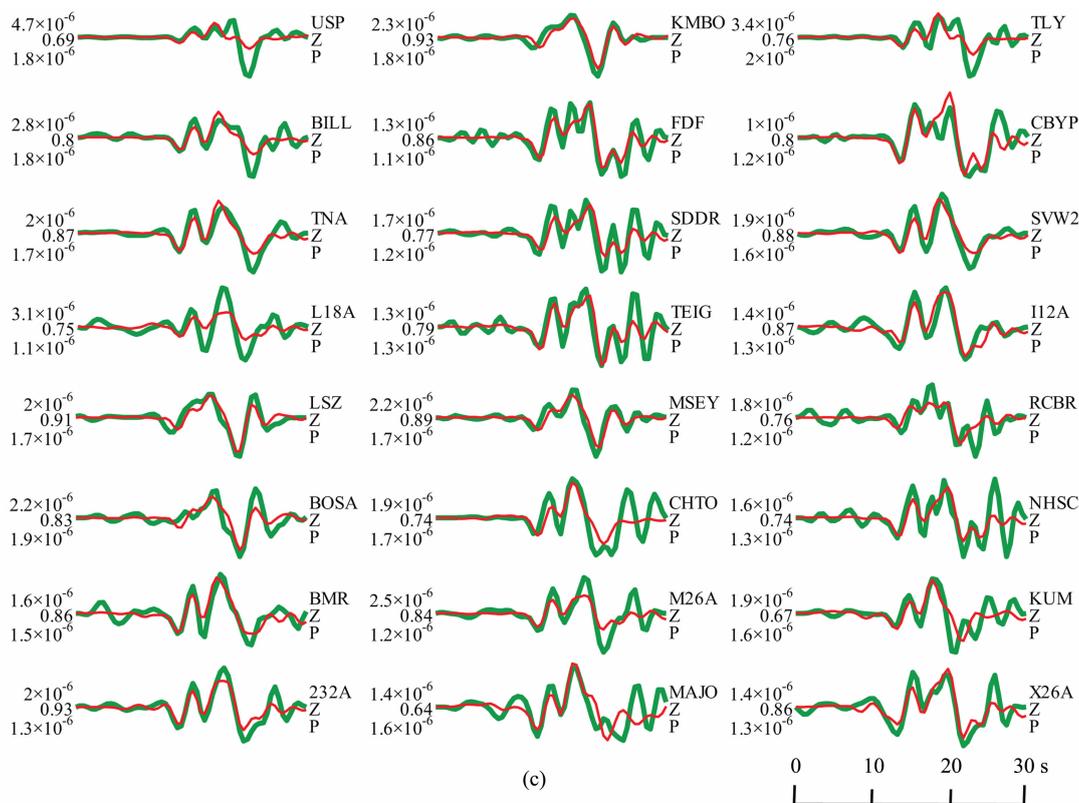


图 7 观测波形与合成波形的比较

在每个子图中,绿线表示观测波形,红线表示合成波形。(a)为观测视震源时间函数方法的观测地震图与合成地震图的比较;(b)和(c)分别为滑动角固定和滑动角可变的直接波形反演方法的观测地震图与合成地震图的比较。地震波形振幅的单位为 m/s。子图左侧的数字从上到下依次为:观测地震波形的最大振幅、观测地震图与理论合成地震图之间的相关系数、理论地震波形的最大振幅。子图右边的字符从上到下依次为对应的台站名、分量名和震相名

Fig. 7 Comparison between observed and synthetic waveforms

In each sub-graph, green line is the observed waveform and red line is the synthetic waveform. (a) Comparison between observed and synthetic seismograms of apparent source time function method. Panels (b) and (c) are the comparison between observed and synthetic waveforms of direct wave inversion methods with and without rake fixed, respectively. The wave amplitude is in m/s. In each sub-graph, on the left from top to bottom are the maximum amplitudes of observed waves, correlation coefficients of observed and synthetic waves, and the maximum amplitudes of synthetic waves, respectively. On the right from top to bottom are the stations names, component names and phase names, respectively.

过程进行反演所耗时间的长短做了统计。视震源时间函数方法、滑动角固定和滑动角可变的直接波形反演方法所耗费的时间分别为:0.8 s(包括提取视震源时间函数耗时 0.05 s),3.6 s 和 7.3 s。滑动角固定的直接波形反演方法耗时约为视震源时间函数方法的 4.5 倍,而滑动角可变的直接波形反演方法约为其 9 倍左右,相差近一个数量级。可见视震源时间函数方法在计算效率方面相对于直接波形反演方法具有较大的优势,且这种优势在观测资料长度远大于地震持续时间时(比如反演面波资料)将体现得更为明显。(3) 从适用范围来看,视震源时间函数方法仅适用于震源机制固定不变且台站震中距远大于震源尺度的情况,其适用范围受到苛刻的限制。直接波形反演方法则可以适用多种情况:如震源机制可

变和近场地震资料的反演等。(4) 最后,从震源信息的提取操作流程来看,视震源时间函数方法需要事先提取视震源时间函数,所提取的视震源时间函数的质量直接影响破裂过程反演结果,而对每个台站单独提取视震源时间函数有可能在一定程度上损伤各台站所共有的破裂信息。直接波形反演方法则是一次性反演得到破裂过程结果,等同于同时从所有台站中获取共有的震源破裂信息,相对于视震源时间函数方法,它可以避免对单个台站进行视震源时间函数提取操作时可能引起的偏差。

在直接波形反演方法中,本文分别应用了滑动角固定和滑动角可变两种方法,相对于前者,后者的待解参数多了一倍,计算耗时也因此增加了一倍。两种方法得到的结果基本一致,但是用滑动角可变的

反演方法可以提取出滑动角在断层面上如何变化的信息。

综合以上对视震源时间函数方法和直接波形反演方法特点所做的分析,可见这两种方法在破裂过程反演中各有所长,如能将两者结合起来进行分析,将有助于保证结果的可靠性。因此,作者认为,在具体分析地震实例时,宜采取以下技术路线:(1) 首先通过提取视震源时间函数,获得对地震破裂持续时间、震源时间函数大致形态和破裂的方向性等震源性质的初步认识。(2) 在此基础上,采用直接波形反演方法,进一步获取有关地震破裂过程的细节的信息。

## 6.2 拉奎拉地震构造背景及致灾机理

拉奎拉地震位于意大利中部构造与地质活动都很复杂的亚平宁山脉中段,与沿亚平宁造山带占优势的东向西拉伸构造相联系,这里发育着一系列走向南东、倾向南西的正断层系统<sup>[25]</sup>,地震频度较高。历史上,这一区域曾经发生过多次破坏性地震,最大的一次地震发生在公元 1703 年,震级为 6.7,造成

了数千人的死亡,该地震的宏观震中位于此次拉奎拉西北 30 km 处,其所处的发震断层的南端位于这次拉奎拉地震余震集中分布区域(图 8)的北沿<sup>[17]</sup>。此外,这一区域还分别在 1461 年、1762 年、1916 年和 1958 年发生过多次震级介于 5.2 至 6.4 级之间的地震<sup>[16]</sup>。可见,拉奎拉地震是位于亚平宁山脉中段的正断层系统在东西向拉伸的构造活动背景下的一种响应,是该地区一次典型的正断层地震事件。

本文分别从视震源时间函数和时空破裂过程的角度分析了拉奎拉地震的震源特征。几乎所有台站的视震源时间函数和时空破裂过程反演得到的震源时间函数都非常一致地表明,这次地震由两次较大的子事件组成。这一显著的特征与 Pino 和 Luccio<sup>[19]</sup>对区域地震资料进行分析得到的视震源时间函数结果一致。两次子事件分别对应为震源附近和断层走向方向上的两个滑动量集中的区域,二者最大滑动量分别约为 1.2 m 和 1.0 m。图 8 显示了由三种方法反演所得的断层面上滑动量分布在地表的投影,以及拉奎拉地震震后 1 个月内发生的余震震中位置

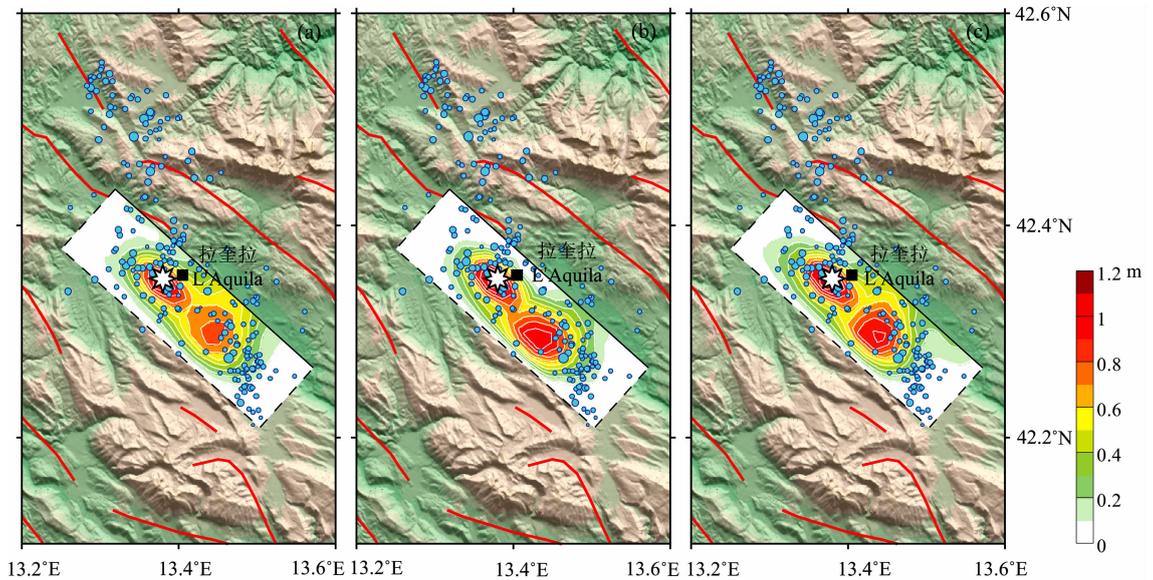


图 8 拉奎拉地震断层面静态(最终)滑动量分布在地面的投影

(a) 视震源时间函数方法反演结果;(b) 滑动角固定的直接波形反演方法反演结果;(c) 滑动角可变的直接波形反演方法反演结果。白色八角星为震中位置,黑色方块为拉奎拉城位置,红色线条为拉奎拉地震震中区域主要活动正断层<sup>[25]</sup>,实黑线表示断层与地表的交线,虚黑线为断层其他 3 条边界在地表的投影,青色圆圈为拉奎拉地震主震之后 1 个月内发生的余震震中位置

(<http://earthquake.rm.ingv.it/earthquake.php>).

Fig. 8 Projection of final static slip distribution on the fault plane of L'Aquila earthquake on ground surface

(a) Results of apparent source time functions method. (b) Results of direct wave inversion method with rake fixed. (c) Results of direct wave inversion method without rake fixed. White aniseed star is the epicentral location. Black square denotes the location of L'Aquila city. Red lines are the active normal faults<sup>[25]</sup> in the epicentral region of L'Aquila earthquake. Solid black lines are the fault traces, i. e. the intersection of fault plane and ground surface. Dashed black line is the projection of the 3 other edges of fault plane on ground surface. Cyan circle represents the location of aftershocks of L'Aquila earthquake occurred within 1 month after the occurrence of the main shock.

分布.从滑动量分布和余震震中分布的关系来看,余震主要发生在两个滑动量集中区域的外围,这可能是位于滑动量集中区域外围的障碍体应力缓慢释放过程的一种反映.此外,在主震震中西北——虽然该区域未能观测到滑动量的分布——但却分布着数目较多的地震,可能是主震破裂触发所致.结合前面所做的分析,作者认为,拉奎拉地震虽然最大滑动量仅为 1.2 m,但最大滑动速率高达 0.6~0.7 m/s,表明了这次地震是一次滑动速率较大的地震,断层上盘一下盘间较高的相对滑动速率必然导致震中区域较高的地震烈度.拉奎拉城大部分处于断层上盘(图 8),在较高的断层滑动速率与上盘一下盘效应两种因素的同时作用下,遭受了严重破坏.

拉奎拉地震的震源机制与以逆断层错动为主的汶川大地震不同,其规模比汶川大地震小得多、破裂持续时间也短得多、破裂过程也比较简单.特别是这次地震的破裂没有像汶川地震一样大规模贯穿到地表,使地震烈度和破坏程度相对于破裂大规模贯穿到地表的情形要弱一些.但是这次地震是一次以朝东南方向传播为主的不对称双侧破裂事件,致使震感与破坏总体上都是以震中东南较为强烈;不对称破裂传播的共同性表明了与地震破裂的传播相联系的地震波能量聚焦效应是地震致灾的重要因素.

## 参考文献(References)

- [1] Mori J, H. Hartzell S. Source inversion of the 1988 upland, California, earthquake: determination of a fault plane for a small event. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1990, **80**:507~517
- [2] Dreger D S. Empirical Green's function study of the January 17, 1994 Northridge, California earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 1994, **21**:2633~2636
- [3] Chen Y T, Xu L S. 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. *Geophys. J. Int.*, 2000, **143**:407~416
- [4] Xu L S, Chen Y T, Teng T L, Patau G. Temporal and spatial rupture process of the 1999 Chi-Chi earthquake from IRIS and GEOSCOPE long period waveform data using aftershocks as empirical Green's functions. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2002, **92**:3210~3228
- [5] Olson A H, Apsel R J. Finite faults and inverse theory with applications to the 1979 Imperial Valley earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1982, **72**:1969~2001
- [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. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1983, **73**:1553~1583
- [7] 许力生. 地震破裂的时空过程研究[博士论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 1995  
Xu L S. Study on the tempo-spatial rupture process of earthquakes [Ph. D. dissertation] (in Chinese). Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 1995
- [8] 许力生, 陈运泰, 高孟潭. 1997年中国西藏玛尼  $M_s7.9$  地震的时空破裂过程. *地震学报*, 1999, **21**:449~459  
Xu L S, Chen Y T, Gao M T. Earthquake rupture process of the 1997  $M_s7.9$  Mani, in Tibet, China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1999, **21**(5):449~459
- [9] 许力生, 陈运泰. 从全球长周期波形资料反演 2001年11月14日昆仑山口地震时空破裂过程. *中国科学 D 辑, 地球科学*, 2004, **34**:256~264  
Xu L S, Chen Y T. Temporal and spatial rupture process of the great Kunlun Mountain Pass earthquake of November 14, 2001 from the GDSN long period waveform data. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, **48**(1):112~122
- [10] 姚振兴, 纪晨. 时间域内有限地震断层的反演问题. *地球物理学报*, 1997, **40**(5):691~701  
Yao Z X, Ji C. The inverse problem of finite fault study in time domain. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1997, **40**(5):691~701
- [11] 周云好. 用远场体波反演震源破裂过程研究[博士论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2002  
Zhou Y H. Source rupture process study with teleseismic body waves [Ph. D. dissertation] (in Chinese). Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2002
- [12] Zhou Y H, Xu L S, Chen Y T. Source process of the 4 June 2000 southern Sumatra, Indonesia, earthquake. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 2002, **92**(5):2027~2035
- [13] 周仕勇, 陈晓非. 近震源破裂过程反演研究—I. 方法和数值试验. *中国科学 D 辑 地球科学*, 2003, **33**:482~495  
Zhou S Y, Chen X F. Inversion of near-field waveform data for earthquake source rupture process (I): Method and numerical test. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, **46**(11):1089~1102
- [14] 张勇, 许力生, 陈运泰等. 2007年云南宁洱  $M_s6.4$  地震震源过程. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, **38**(6):683~692  
Zhang Y, Feng W P, Xu L S et al. Source process of  $M_s6.4$  earthquake in Ning'er, Yunnan in 2007. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, **52**(2):180~188
- [15] 张勇, 冯万鹏, 许力生等. 2008年汶川大地震的时空破裂过程. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, **38**(10):1186~1194  
Zhang Y, Feng W P, Xu L S et al. Spatio-temporal rupture process of the 2008 great Wenchuan earthquake. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, **52**(2):145~154
- [16] Anzidei M, Boschi E, Chini M, et al. Coseismic deformation of the destructive April 6, 2009 L'Aquila earthquake (central Italy) from GPS data. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, **36**, L17307, doi:10.1029/2009GL039145

- [17] Atzori S, Hunstad I, Chini M, et al. Finite fault inversion of DInSAR coseismic displacement of the 2009 L' Aquila earthquake (central Italy). *Geophys. Res. Lett.*, 2009, **36**, L15305, doi:10.1029/2009GL039293
- [18] Cirella A, Piatanesi A, Cocco M, et al. Rupture history of the 2009 L' Aquila (Italy) earthquake from non-linear joint inversion of strong motion and GPS data. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, **36**, L19304, doi:10.1029/2009GL039795
- [19] Pino N A, Luccio F D. Source complexity of the 6 April 2009 L' Aquila (central Italy) earthquake and its strongest aftershock revealed by elementary seismological analysis. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, **36**, L23305, doi:10.1029/2009GL0041331
- [20] Kennett B L N. *Seismic Wave Propagation in Stratified Media*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. 1~339
- [21] Kennett B L N, Engdahl E R. Travel times for global earthquake location and phase identification. *Geophys. J. Int.*, 1991, **105**:429~465
- [22] 刘 超, 许力生, 陈运泰. 2009 年 4 月 6 日意大利拉奎拉(L' Aquila)地震快速矩张量解. *地震学报*, 2009, **31**(4):464~466
- Liu C, Xu L S, Chen Y T. Quick moment tensor solution for 6 April 2009, L' Aquila, Italy, earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 2009, **22**(5):449~450
- [23] 张 勇, 许力生, 陈运泰. 提取视震源时间函数的 PLD 方法及其对 2005 年克什米尔  $M_w$ 7.6 地震的应用. *地球物理学报*, 2009, **52**(3):672~680
- Zhang Y, Xu L S, Chen Y T. PLD method for retrieving apparent source time function and its application to the 2005 Kashmir  $M_w$ 7.6 earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(3):672~680
- [24] 张 勇, 2008. 震源破裂过程反演方法研究[博士学位]. 北京: 北京大学地球与空间科学学院, 2008
- Zhang Y. Study on the inversion methods of source rupture process [Ph. D. dissertation] (in Chinese). Beijing: School of Earth and Space Science, Peking University, 2008
- [25] Roberts G P, Michetti A M. Spatial and temporal variations in growth rates along active normal fault systems: an example from The Lazio-Abruzzo Apennines, central Italy. *Journal of Structural Geology*, 2004, **26**:339~376

(本文编辑 汪海英)