

刘 宁, 钮凤林, 陈棋福等. 地震台阵对 2010 M8.8 智利地震破裂过程的直接成像. 地球物理学报, 2010, 53(7): 1605~1610, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.07.011

Liu N, Niu F L, Chen Q F, et al. Imaging the rupture of the 2010 M8.8 Chile earthquake with a broadband seismic array. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(7): 1605~1610, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.07.011

地震台阵对 2010 M8.8 智利地震 破裂过程的直接成像

刘 宁^{1,2}, 钮凤林³, 陈棋福^{2*}, 陈 颢²

1 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

3 Rice University, Houston TX 77005, USA

摘 要 对 2010 年 2 月 27 日智利近海发生的 M8.8 级巨震, 本文反向投影美国地震台网宽频带台站记录到的远震 P 波辐射能量, 得到地震破裂前缘随时间的变化关系。图像表明, 智利 M8.8 级强震破裂过程是一次不均匀的双向破裂过程, 整个破裂过程持续了近 150 s, 破裂尺度跨越震中南端 80 km, 北北东向上近 200 km。

关键词 2010 M8.8 智利地震, 反向投影法, 破裂过程, 震源辐射能量

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.07.011

中图分类号 P315

收稿日期 2010-03-23, 2010-06-05 收修定稿

Imaging the rupture of the 2010 M8.8 Chile earthquake with a broadband seismic array

LIU Ning^{1,2}, NIU Feng-Lin³, CHEN Qi-Fu^{2*}, CHEN Yong²

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

2 *Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*

3 *Department of Earth Science, Rice University, Houston TX 77005, USA*

Abstract The major earthquake occurred off the coast of the Maule region of Chile on February 27, 2010 was rated 8.8 on the moment magnitude scale. The rupture front of the earthquake was imaged by back projecting teleseismic P-wave energy recorded by United States National Seismic Network. It is found that this earthquake had an asymmetrical bilateral rupture with a dominant direction from south to north. The rupture continued for at least 150 s and extended about 80km in the south and 200 km in the north direction along Chilean coastal line.

Keywords 2010 M8.8 Chile earthquake, Back-projection method, Rupture process, Radiated energy

1 引言

据美国地质调查局报道,2010年2月27日智利当地时间03时34分,在 35.846°S , 72.719°W (图1,红色五角星位置)发生8.8级巨震,震源深度35 km.发震位置位于智利比奥比奥大区,距离康塞普西翁(Concepción)115 km,距其首都圣地亚哥(Santiago)320 km.智利国家南北长4352 km,东西最窄96.8 km、最宽362.3 km,是世界上地形最狭长的国家.这次地震发生在智利近海、太平洋板块与南美板块交互作用形成的危险地质构造带上^[1].20世纪以来,特别是1906~1960年,接连发生的1906年 M_w 8.5、1922年 M_w 8.7、1928年 M_w 7.7、1939年 M_w 7.7、1943年 M_w 8.2、1960年 M_w 9.6级历史地震^[2,3](图1),破裂尺度几乎贯穿智利近海两千公里.2010年2月27日的 M 8.8级地震起始破裂于1960年 M_w 9.6地震发震位置北230 km、1906年 M_w 8.5地震发震位置南约320 km.截止2010年3月3日,智利政府报道,智利 M 8.8特大地震以及引发的海啸等灾害,已造成数百人死亡,超过150万所

房屋建筑倒塌,至少200万人受灾.

分析不同方位角上高频P波能量分布可以解析出大震破裂持续时间和破裂方向^[4].对地震破裂过程的成像是揭示震源破裂扩展进程最直接的方法,如运用体波反演有限断层滑动分布^[5~8],以及充分利用地震记录到时和波动振幅因子的反向投影方法,它避免了有限断层模型中各种表征断层特性参数的人为干扰,把来自于震源区域破裂过程中辐射的能量以时间反向传播投影到震源深度的阻抗界面来表示地震破裂过程图像.先前,Ishii等^[9]基于日本高灵敏的地震台阵(Hi-net)中井下100 m的短周期地震记录的高频成分,采用反向投影方法得到2004年苏门答腊-安德曼 M_w 9.2级地震的破裂时间、破裂方向和破裂速度;随后这种在大震的发震平面上,对每个可能的瞬时点源叠加地震台站记录波形,计算震源辐射能量值的反向投影方法被应用到许多大震破裂过程分析中^[10~14].本文选取美国地震台网(United States National Seismic Network)中震中距 $65^{\circ}\sim 81^{\circ}$ 范围内25个宽频带台站(图2),采取以地震波形相似性为权重的二次方叠加法追踪智利 M 8.8特大地震的破裂过程.

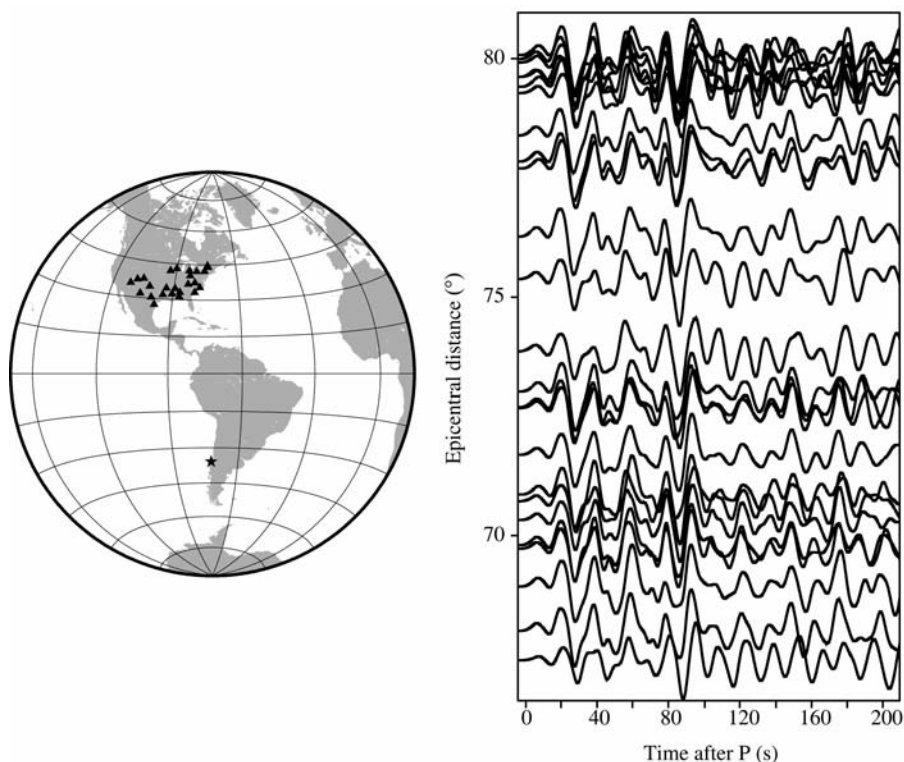


图2 选取的美国地震台网25个宽频带台站分布图(左)和初至210 s内波形(速度记录,经过低通10 s滤波)(右).

左图中黑色五角星代表智利 M 8.8级地震发震位置,黑色三角形代表台站位置

Fig. 2 Distribution of the 25 stations (solid black triangles) of US National Seismic Network (left) and the vertical recordings of the first 210 s after the direct P wave (lp10s Butterworth filter is applied) (right), the epicenter is shown by black star

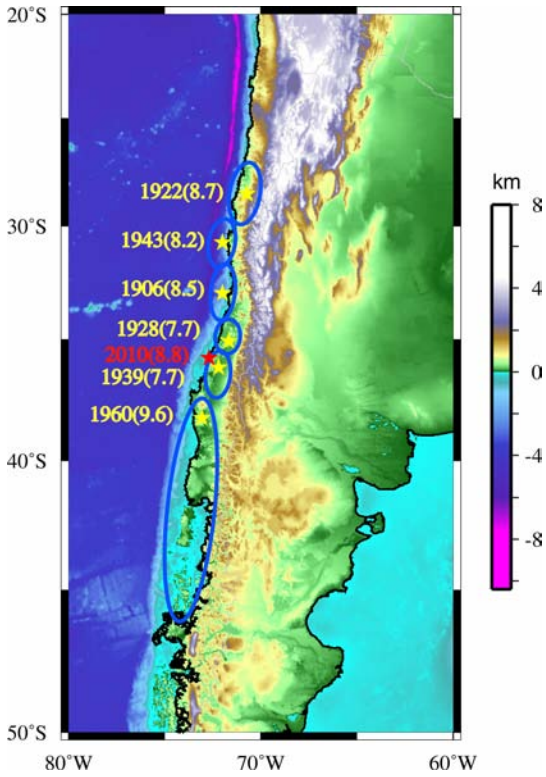


图 1 智利地震震发震位置(红色五角星)和历史地震(黄色五角星)破裂区^[2,3]分布图

Fig. 1 Source region of the 2010 M8.8 Chile earthquake, the epicenter is shown by red star; the oval sections are the approximate faults of the historical earthquakes (yellow stars)^[2,3]

2 方法和数据分析结果

为避免上地幔间断面对 P 波波列的干扰,截取速度记录中 P 波波列前 210 s 波形,未经过任何滤波处理,去除仪器响应,拾取初动并重对齐,得到波形一致性较好的地震记录图(图 2 右图).

地震接收台阵是由一系列相对均匀分布的台站组成的.首先,本文测试由美国地震台网中 25 个台站组成的接收台阵对智利 M8.8 特大地震的响应函数.台阵传递函数是衡量小到中等尺度孔径台阵空间分辨率的因子,它的原理是将穿越台阵的波束看作是慢度和表征台阵几何特性的孔径 r_j 的函数,即 $|H(\omega)|^2$ 是以慢度差异 $r_j \cdot (s_0 - s)$ 为权重的台阵几何形状的函数^[15].

$$|H(\omega)|^2 = \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\omega r_j \cdot (s_0 - s)} \right|^2 = \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\omega(t_j - t_0)} \right|^2 = \frac{1}{N} + \frac{2}{N^2} \sum_{j=1}^N \sum_{i=j+1}^N \cos\omega(t_j - t_i), \quad (1)$$

式中 s 代表慢度, r 代表台阵孔径, t 代表到时, N 为台站数;对于固定角频率 ω ,如果慢度差值发生变化,得到的波束反向投影到震源区就会有不同的振幅.

图 3 是本文将整个震源区域($39^\circ\text{S} \sim 32^\circ\text{S}$, $75^\circ\text{W} \sim$

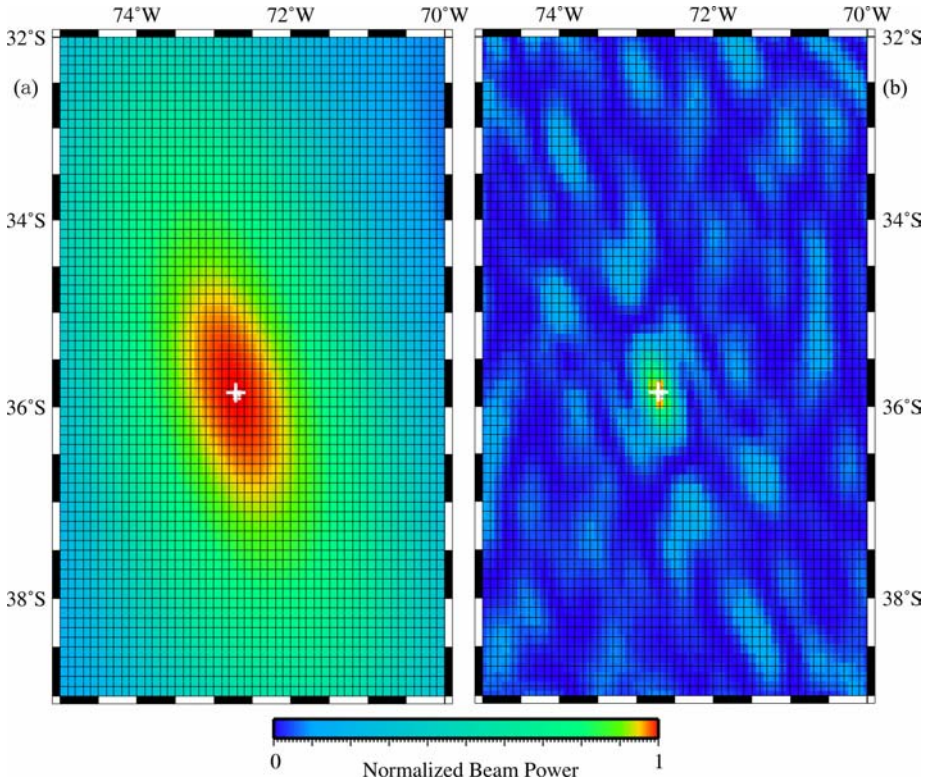


图 3 25 个宽频带台站组成的接收台阵相对震源区 0.1 Hz (a) 和 1 Hz (b) 响应函数

Fig. 3 Array response functions based on the teleseismic array with 25 US national seismic stations at 0.1 Hz (a) and 1 Hz (b)

70°W)以 0.1°为间隔进行网格划分,通过检测由 25 个宽频带地震台站组合对不同频率范围波束对应的台阵传递函数,这个接收台阵所对应的最优频率是 0.1~1 Hz.

本研究将 Ishii 等^[9,10]提出的反向投影法中线性叠加改进为以地震波形相似性 S_j 为权重的 s_j 二次方叠加(2nd-root stacking) $E_j(t_n) = s_j(t_n) \cdot S_j(t_n)$ 对震源区能量辐射成像.

$$s_j(t_n) = \sum_{t=t_n-T_0/2}^{t_n+T_0/2} |U'_k|^2 \cdot \text{sign}(U'_k), \quad (2)$$

$$U'_k = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |U_k(t-t_{jk}^p + \Delta t_k)|^{\frac{1}{2}} \times \text{sign}(U_k(t-t_{jk}^p + \Delta t_k)/A_k), \quad (3)$$

$$S_j(t_n) = \frac{\sum_{t=t_n-T_0/2}^{t_n+T_0/2} \left(\sum_{k=1}^N U_k(t-t_{jk}^p + \Delta t_k)/A_k \right)^2}{N \sum_{t=t_n-T_0/2}^{t_n+T_0/2} \sum_{k=1}^N U_k^2(t-t_{jk}^p + \Delta t_k)/A_k^2}. \quad (4)$$

对第 j 个震源位置,计算在连续时间窗($t_n - T_0/2$ 至 $t_n + T_0/2$)内辐射能量的二次方叠加 $s_j(t_n)$, U'_k 是中间叠加(an intermediate stack), U_k 表示第 k 个台站垂直道记录的地震波形, A_k 是初至压缩波的最大振幅, N 表示台站数, t_{jk}^p 是 P 波从第 j 个震源位置到第 k 个台站的理论走时(采用 iasp91 模型来计算理论走时), Δt_k 表示由初始的 P 波的互相关得出的台站修正, $S_j(t_n)$ 是地震波形相似性.

本文选取 60s 的时间窗长度,采用突出地震传

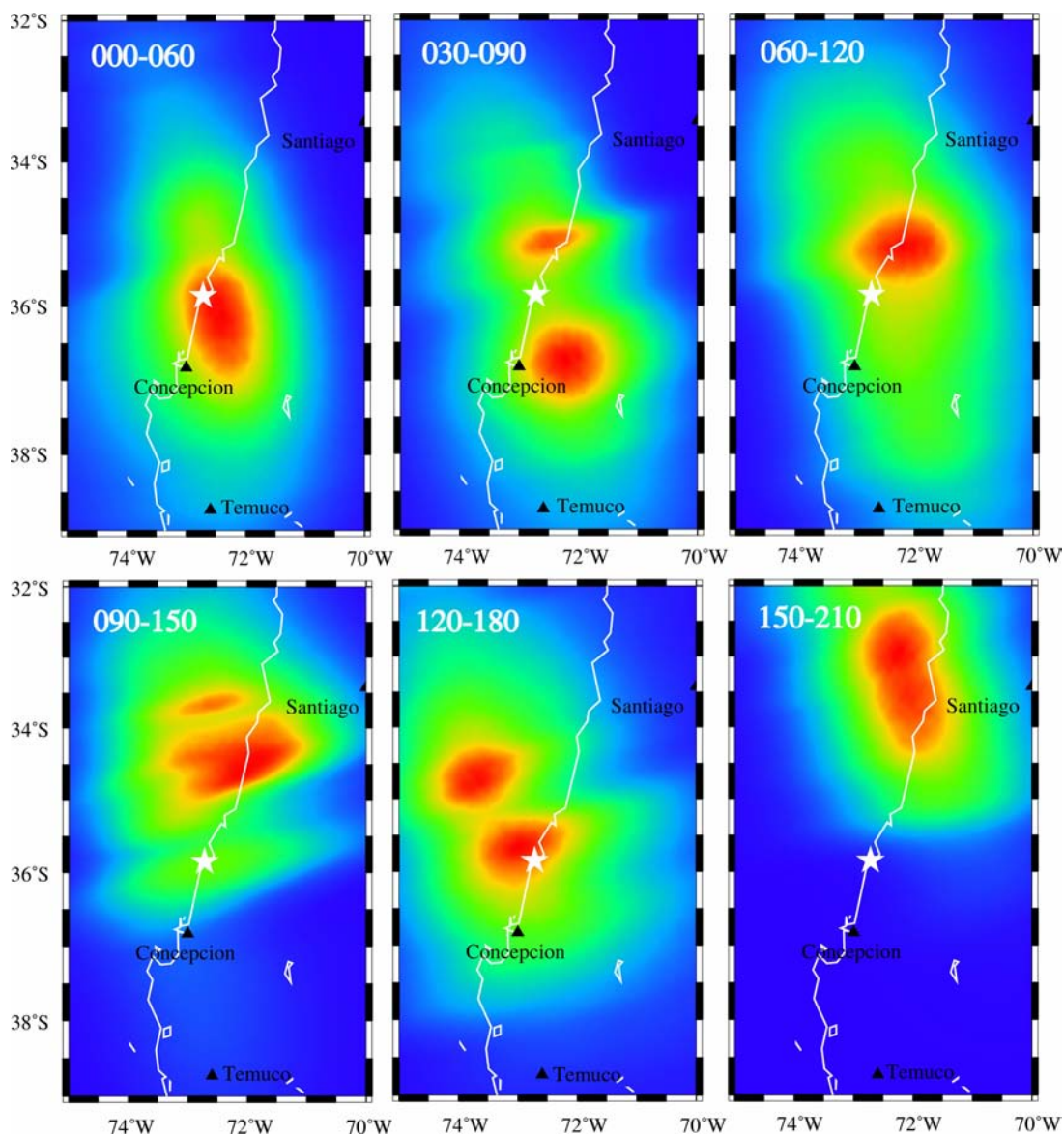


图 4 Back-projection 方法得到的震源辐射能量(以所在时间窗内辐射能量峰值归一化)随时间和空间变化

Fig. 4 Distribution of energy radiation in consecutive 60 s intervals (each 60 s time window is normalized by peak energy)

播共性特征的以波形相似性为权重的二次方叠加方法计算得到震源辐射能量分布(图 4 和图 5a)。由图可见,智利 M8.8 特大地震破裂前 60 s 主要呈现了双向破裂的特性,之后主要沿着智利近海岸线向北北东方向持续破裂。

通过累积震源区辐射能量可以得出破裂面的大小,即描述地震引起的区域构造应力减少的区域。地震学家通常通过余震分布,海岸线形变和地震的活

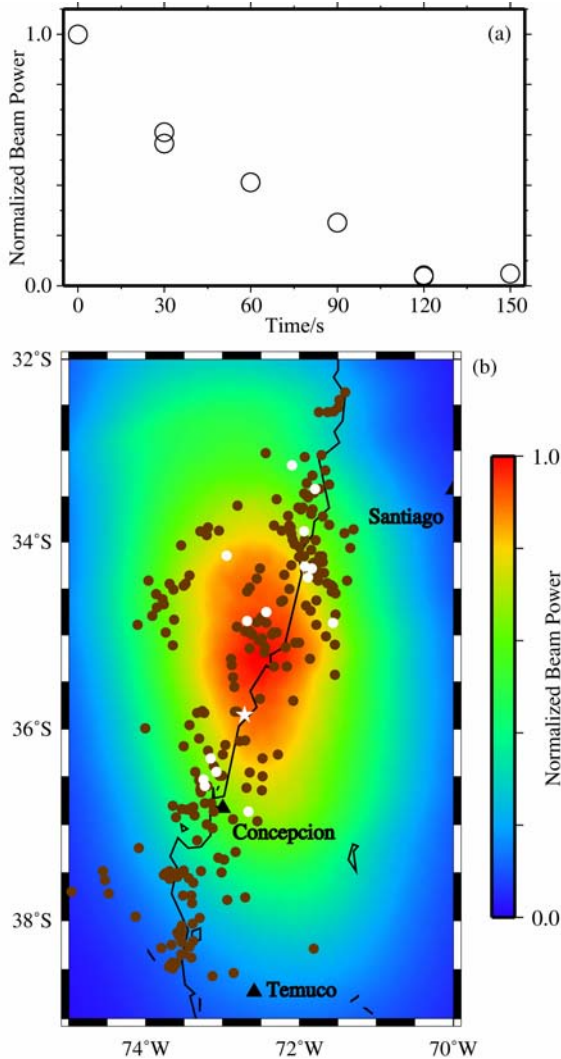


图 5 (a)震源区辐射能量峰值随时间变化;(b)辐射能量累积归一化图(棕色实心圆代表 20100227-20100315 期间 5 级以上余震,白色实心圆是 6 级以上余震,白色五角星是主震震中位置)

Fig. 5 (a) Normalized beam power versus time; (b) Cumulative radiated energy. Distributions of aftershock occurring from 27 February 2010 to 15 March, 2010 are shown by solid brown (magnitude between 5 and 6) circle, and white circles (magnitude between 6 and 8.8), the main shock is indicated by a white star

动性来划分强震造成的破裂面^[2]。反向投影方法则通过累积震源辐射能量确定主震造成的破裂面。累积图 4 中所有 60 s 时间窗内震源区辐射能量并归一化(图 5b)后,得到智利强震主震破裂面 80% 的释放能量主要跨越 36.5°S~33.9°S,50% 跨越 37°S~33°S,与震后截止到 2010 年 3 月 15 日 5 级以上(棕色实心圆)和 6 级以上(白色实心圆)余震分布一致。而且,震源区 80% 的释放能量分布区域,与震中南端的康塞普西翁和北北东向的圣地亚哥具有一段距离。智利 M8.8 级特大地震破裂过程中,前 150 s 时间内释放了大部分的能量,破裂尺度跨越震中南端 80 km,北北东向 200 km。据美国地质调查局公布,智利强震震中烈度为 XI 度,震中位于智利近海,离智利大陆还有一段距离。受这次特大地震破裂显著影响的智利城市主要位于 IX 度和 VIII 度破坏区,没有特高烈度,加之历经多次强震的智利对抗震设防的重视,所以大大减少了智利 M8.8 级强震造成的死伤人数和财产损失。

3 结论和讨论

强震破裂动态过程中初至能量主要来自震中附近,后续的能量则源于断层破裂前缘附近的滑动,如此,断层上初始滑动还没完成,后续的滑动则会附加在之前的滑动上。因此震源破裂的位置变化带来不同接收台站上相对到时的差异以及造成震相的叠加。反向投影直达 P 波能量到震源区不同网格点和不同时间的过程就是拆分不同台站波形之间共性和差异性的过程。这种方法与有限断层方法相比,避免了模型中有关断层参数和破裂速度的人为干扰,以及基于矩张量反演相应的格林函数的繁琐计算,仅依赖理论到时和震相信息,以波形相似性为权重的叠加方法,就能再现强震破裂基本的动态发展图像。

研究表明,相对智利 M8.8 级强震震中位置,利用震中距 65°~81° 范围内北北西向上美国地震台网中 25 个宽频带台站组成的接收台阵,运用以波形相似性为权重的二次方叠加方法,能够得到更加收敛的能量辐射分布范围,对解析这次强震破裂的动态过程具有较高的分辨率。2010 年 2 月 27 日,智利 M8.8 级强震是一次不均匀双向破裂的过程,破裂起始于震中南端,大部分能量在破裂前 150 s 内过程中释放,破裂长度近 280 km。

从某种意义上讲,震后救灾的发展是以地震学的发展为基础。随着全球范围内地震台站的逐步加

密,高密度的地震台阵记录到的海量地震数据也随之产出,因此地震学家在短时间内提供有关强震破裂过程的信息上具有很大的优势.总而言之,通过反向投影方法可以快速和精确地确定强震的破裂持续时间和破裂长度,这些参数对于政府和社会第一时间掌握震灾的严重程度和分布情况,从而合理地进行震后救灾工作具有重要意义.

致 谢 感谢审稿人对该文章提出的宝贵意见.

参考文献(References)

- [1] Barazangi M, Isacks B L. Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. *Geology*, 1976, **4**(11):686~692
- [2] Kelleher J A. Rupture zones of large south American earthquakes and some predictions. *J. Geophys. Res.*, 1972, **77**(11):2087~2103
- [3] Lee W H K, Kanamori H, Jennings P C, et al. International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. Academic Press, 2003
- [4] Ni S D, Kanamori H, Helmberger D. Seismology: energy radiation from the Sumatra earthquake. *Nature*, 2005, **434**(7033):582
- [5] 许力生,陈运泰. 1997年中国西藏玛尼 M_s 7.9地震的时空破裂过程. *地震学报*, 1999, **21**(5):449~459
Xu L S, Chen Y T. Tempo-spatial rupture process of the 1997 Mani, Tibet, China earthquake of M_s 7.9. *Acta. Seismol. Sin.* (in Chinese), 1999, **21**(5):449~459
- [6] 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
- [7] Ji C, Wald D J, Helmberger D V. Source description of the 1999 Hector Mine, California, earthquake, part I: Wavelet domain inversion theory and resolution analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2002, **92**(4):1192~1207
- [8] Ji C, Wald D J, Helmberger D V. Source description of the 1999 Hector Mine, California, earthquake, part II: Complexity of slip history. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2002, **92**(4):1208~1226
- [9] Ishii M, Shearer P M, Houston H, et al. Extant, duration and speed of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake imaged by the Hi-Net array. *Nature*, 2005, **435**(7044):933~936
- [10] Ishii M, Shearer P M, Houston H, et al. Teleseismic P wave imaging of the 26 December 2004 Sumatra-Andaman and 28 March 2005 Sumatra earthquake ruptures using the Hi-net array. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**:B11307
- [11] Krüger F, Ohrnberger M. Tracking the rupture of the M_w =9.3 Sumatra earthquake over 1150 km at teleseismic distance. *Nature*, 2005, **435**(7044):937~939
- [12] Walker K T, Ishii M, Shearer P M. Rupture details of the 28 March 2005 Sumatra M_w 8.6 earthquake imaged with teleseismic P waves. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**(24):L24303
- [13] 刘宁,陈棋福,钮凤林等. 利用初至压缩波对2004年苏门答腊—安达曼地震破裂直接成像. *科学通报*, 2007, **52**(11):1312~1316
Liu N, Chen Q F, Niu F L, et al. Rupture of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake inferred from direct P-wave imaging. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**(14):1986~1991
- [14] 杜海林,许力生,陈运泰. 利用阿拉斯加台阵资料分析2008年汶川大地震的破裂过程. *地球物理学报*, 2009, **52**(2):372~378
Du H L, Xu L S, Chen Y T. Rupture process of the 2008 great Wenchuan earthquake from the analysis of the Alaska-array data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(2):372~378
- [15] Rost S, Thomas C. Array seismology: Methods and applications. *Rev. Geophys.*, 2002, **40**(3):1008, doi:10.1029/2000RG000100

(本文编辑 胡素芳)