

张勇, 许力生, 陈运泰, 汪荣江. 2014. 2014 年 2 月 12 日于田 $M_w6.9$ 地震破裂过程初步反演: 兼论震源机制对地震破裂过程反演的影响. 地震学报, 36(2): 159–164. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.02.001.
Zhang Y, Xu L S, Chen Y T, Wang R J. 2014. Fast inversion for the rupture process of the 12 February 2014 Yutian $M_w6.9$ earthquake: Discussion on the impacts of focal mechanisms on rupture process inversions. *Acta Seismologica Sinica*, 36(2): 159–164. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.02.001.

2014 年 2 月 12 日于田 $M_w6.9$ 地震破裂 过程初步反演: 兼论震源机制对地震 破裂过程反演的影响^{*}

张 勇^{1,2),*} 许力生¹⁾ 陈运泰¹⁾ 汪荣江²⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 德国波茨坦 14473 亥姆赫兹波茨坦中心-德国地学中心

摘要 通过反演 2014 年 2 月 12 日新疆于田 $M_w6.9$ 地震的远震波形记录, 比较和分析了各种断层面倾角的破裂过程模型, 于震后 2.2 小时确定并发布了这次地震的破裂过程结果, 并讨论了震源机制不确定性对破裂过程反演的影响. 根据所确定的破裂模型可知, 2014 年于田 $M_w6.9$ 地震的滑动量分布比较集中, 具有朝西南延伸的优势破裂方向的特征. 这一特征与该地震的余震分布具有较好的一致性.

关键词 地震波形反演 破裂过程 2014 年 2 月 12 日于田 $M_w6.9$ 地震

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.02.001

中图分类号: P315.3⁺3

文献标志码: A

Fast inversion for the rupture process of the 12 February 2014 Yutian $M_w6.9$ earthquake: Discussion on the impacts of focal mechanisms on rupture process inversions

Zhang Yong^{1,2),*} Xu Lisheng¹⁾ Chen Yun-tai¹⁾ Wang Rongjiang²⁾

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

2) Helmholtz Centre Potsdam GFZ-German Research Centre for Geosciences,
Potsdam 14473, Germany

Abstract: The rupture process of the 12 February 2014 Yutian, Xinjiang, $M_w6.9$ earthquake was fast estimated about 2.2 hours after the earthquake occurrence by inverting teleseismic data and comparatively analyzing various rupture models of different dip angles. The impacts of the focal mechanisms on the rupture model were also discussed. From the final determined model, the fault slip of the 2014 Yutian $M_w6.9$ earthquake is concentrately distributed but still shows

^{*} 基金项目 地震行业基金(201108002)、国家自然科学基金(41090291)和中国地震局地球物理研究所基本业务费(DQJB12C01)资助.

收稿日期 2014-02-20 收到初稿, 2014-02-25 决定采用修改稿.

⁺ 通讯作者 e-mail: zhygn@163.com, zhang-yong@pku.edu.cn

dominant rupture direction toward the SW, which is in good agreement with the spatial distribution of the aftershocks.

Key words: seismic waveform inversion; earthquake rupture process; 12 February 2014 Yutian, Xinjiang, M_w 6.9 earthquake

引言

据中国地震台网中心测定, 2014 年 2 月 12 日 17 时 19 分(北京时间), 在新疆维吾尔自治区和田地区于田县境内发生了面波震级 M_s 7.3 (矩震级 M_w 6.9) 地震. 地震发生之后, 作者开展了破裂过程的快速测定工作, 于震后 2.2 小时确定并发布了这次地震的破裂过程反演结果. 在这次地震的破裂过程快速反演中, 由于当时可资利用的震源机制解的断层面倾角差异较大, 采用不同倾角进行反演得到的破裂模型存在明显差别. 经过比较和分析, 作者倾向于节面为倾向西北的发震断层. 据此, 得到了滑动量分布相对集中的破裂模型. 在反演中, 发震断层参数的不确定性对结果确定造成了困扰, 但也带给我们新的认识, 促使我们作进一步的思考. 在本文中, 我们将介绍 2014 年于田 M_w 6.9 地震的破裂过程快速测定工作, 并对震源机制的快速准确确定工作做简单讨论与展望.

1 快速反演与分析

快速反演采用由 IRIS 数据中心提供的全球地震台网(GSN)远震宽频带数据, 按照离源角与方位角最小间隔大约为 5° 的原则, 筛选得到了震中距介于 30° — 90° 的 33 个台站的垂直向 P 波波形数据. 根据 AK135 全球大陆速度结构模型(Kennett *et al.*, 1995), 采用 Wang(1999)的方法计算得到格林函数. 反演中, 设定子断层尺度为 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$; 为保证子断层符合点源近似条件, 波形数据低通滤波的拐角频率取为 0.2 Hz. 按照 P 波最小传播速度约为 6 km/s 估算, 拐角频率为 0.2 Hz 的低通滤波可保证 P 波的最小波长大于 30 km, 满足波长远大于子断层尺度的要求. 考虑到全球地震台网(GSN)仪器幅频响应的特点, 取高通滤波的拐角频率为 0.01 Hz. 我们采用滑动角可变的线性反演技术(Chen, Xu, 2000; Xu *et al.*, 2002)求解此次地震的破裂过程. 该方法在 Zhang 等(2012)的文章中已有详细介绍, 此处不再赘述.

震后 1.5 小时左右, 我们完成了数据下载和资料初步处理工作, 但要进行破裂过程反演, 还需要以震源机制解给出的断层面参数作为基础数据. 当时可资利用的地震矩张量解主要是美国地质调查局(USGS)最早发布的体波矩张量解和 W 震相矩张量解. 由体波矩张量解与 W 震相矩张量解给出的于田 M_w 6.9 地震震源机制解基本一致, 均显示这次地震是一次以左旋走滑错动为主的事件. 考虑到于田地区的地震构造背景, 可以判断这次地震的发震断层沿 SW-NE 方向延伸. 根据这一认识, USGS 的体波矩张量解和 W 震相矩张量解给出的于田 M_w 6.9 地震的发震断层参数分别为走向 242° 、倾角 78° 、滑动角 -3° 和走向 63° 、倾角 61° 、滑动角 -1° . 两者的断层面走向相差 179° , 滑动角差别很小, 但断层面在空间的取向差别较大, 其夹角约为 $41^\circ [= (90^\circ - 78^\circ) + (90^\circ - 61^\circ)]$. 我们分别采用这两套断层面参数进行反演, 发现所得破裂模型之间存在明显差别. 进一步, 我们逐渐改变断层面倾角, 并逐一比较了断层面上滑动量分布随倾角的变化情况(图 1), 发现当断层面倾向为东南时, 破裂分布比较零散, 最大滑动量较小, 但主要破裂出露地表; 而当断层面朝西北

倾斜时，滑动量分布则比较集中，最大滑动量相对较大，主要破裂发生在浅处，但未明显出露地表。不同的断层面参数导致的破裂过程结果差别较大，表明破裂过程反演结果比较依赖于发震断层参数的选取。由于此次地震不大，与不同反演结果对应的数据拟合程度相差也不大，因此很难单纯根据数据拟合情况来确定最优结果。

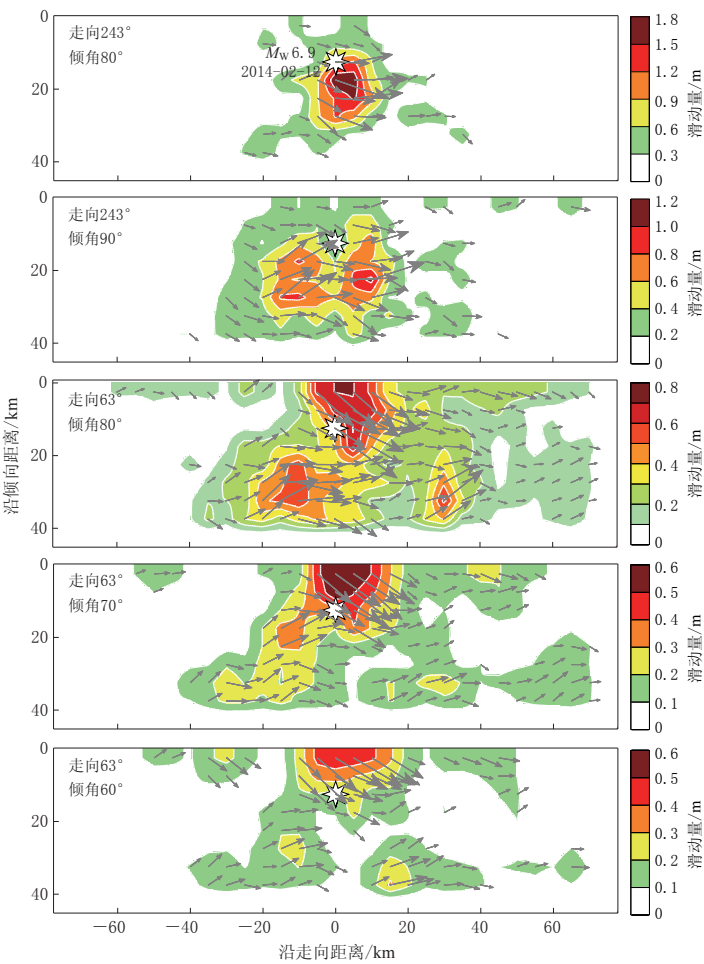


图 1 采用不同断层面参数得到的断层面上静态滑动量分布

Fig.1 Static fault slip distributions obtained with different fault parameters

在震源破裂过程反演中，由于数据不足以分辨所有的破裂细节，通常要引入一些物理上合理的约束条件，比如空间光滑约束条件。引入这一约束条件的基本思想之一，是地震破裂造成的残余应力集中程度最弱。基于上述考虑，在其它条件均相近的情况下，我们倾向于接受滑动量分布比较集中且比较光滑的模型。据此推测，由倾向西北的断层面(走向 242° 、倾角 78° 、滑动角 -3°)得到的破裂过程结果比较合理。

震后 2.2 小时，我们确定并发布了于田 $M_w6.9$ 地震的破裂过程反演结果(图 2)。结果表明，虽然此次地震破裂的滑动量分布比较简单和集中，但并非简单地以震源为中心分布，而是呈现出一定的方向性。在走向方向上，破裂沿西南的延伸范围和强度都略强于东北，表明此次地震的优势破裂方向为西南方向。此次地震的震源时间过程包含了若干次子

事件，显示该地震的破裂在时间进程上具有一定的复杂性，同时也表明滑动集中区域可能发生了多次破裂。

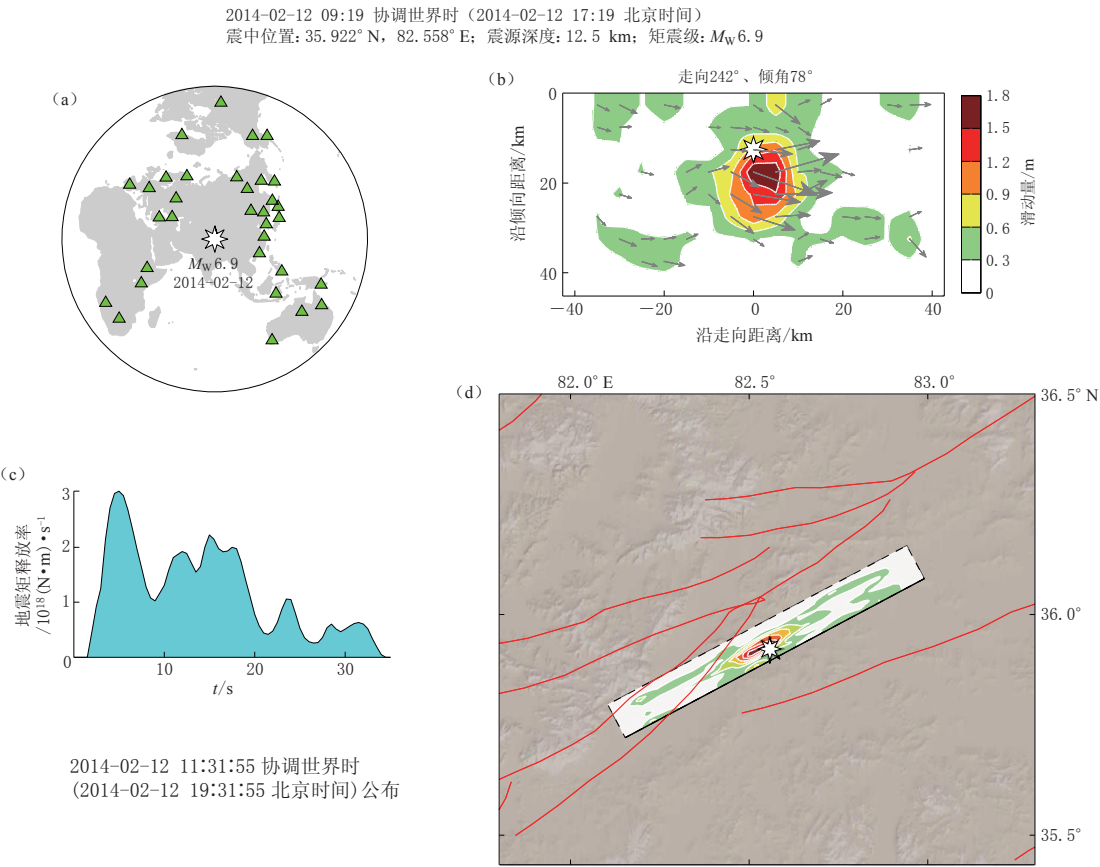


图 2 2014 年于田 M_w 6.9 地震破裂过程快速反演结果

(a) 震中与台站位置分布图; (b) 静态滑动量分布; (c) 震源时间函数; (d) 滑动量分布在地面的投影。图中的红线表示震中附近区域的活断层分布(引自邓起东等, 2002)

Fig. 2 Fast inversion results of the rupture process of the 2014 Yutian M_w 6.9 earthquake
(a) Distribution of the mainshock epicenter and seismic stations; (b) Static fault slip distribution;
(c) Source time function; (d) Surface projection of fault slip distribution. Red lines represent the active faults near the epicentral area (Deng *et al.*, 2003)

从反演得到的合成波形与观测波形的拟合情况看(图 3)，波形拟合总体尚好，在全部 33 个地震台中，有 27 个台的相关系数在 0.8 或以上。即使如此，与作者研究过的其它一些震级较大的地震相比，仍然不是很理想。原因可能有两个方面：一是这次地震较小，矩震级只有 M_w 6.9，导致在远震距离上波形记录的信噪比较弱；二是地震的震源机制以走滑错动为主，根据走滑型地震的 P 波辐射图型，与两个正交的节面相对应的 4 个方位附近的台站，震源机制的微小误差，都会导致反演结果的较大变化，致使观测波形难以得到较好的拟合。

2 讨论与结论

对于大地震和灾害性地震，破裂过程快速反演可以快速确定地震的破裂性质与致灾的

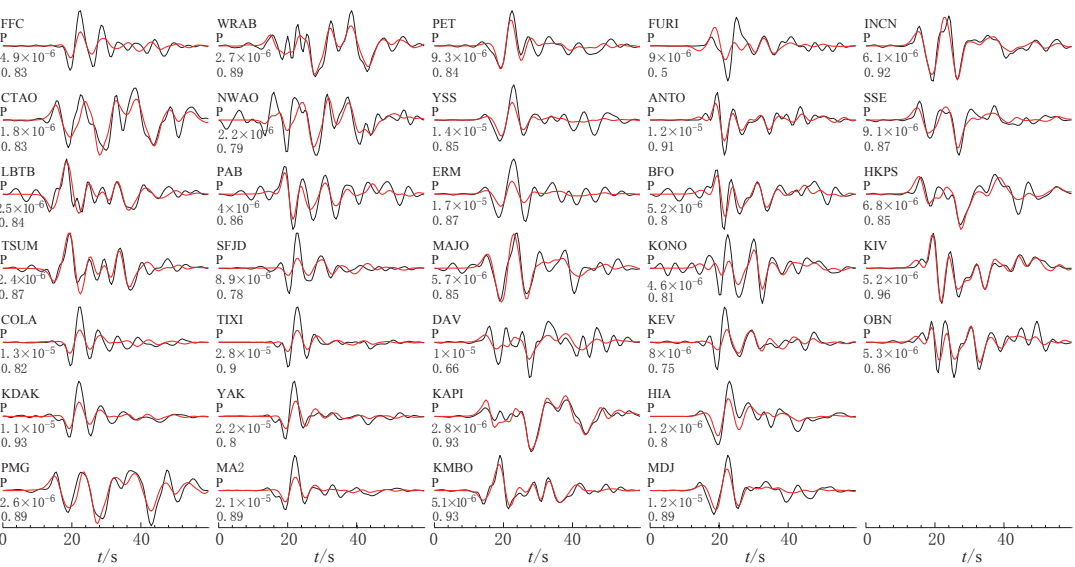


图 3 合成波形与观测波形的比较

黑线表示观测波形，红线表示合成波形。子图左方的字母和数字从上到下依次为台站名、震相名、
观测地震与合成波形的最大幅度(单位：m/s)以及合成波形与观测波形之间的相关系数

Fig. 3 Comparison of synthetic and observed waveforms

Black lines are observed waves and red lines are synthetic waves. In each sub-graph, on the left from top to bottom are station code, phase name, maximum amplitude of observed and synthetic waves (in m/s), and the correlation coefficient of synthetic and observed waveforms, respectively

震源破裂特征，为灾害估计、震后救援等工作提供基础信息。然而，破裂过程反演需要一些基础震源信息，包括震中位置、震源深度、断层面参数等。通过地震定位，我们可以得到震中位置和震源深度。但由地震矩张量解，我们只能得到两个可能的发震断层面，在没有其它信息可供参考的情况下，往往不易确定哪一个断层面是真实的发震断层面。对于破裂尺度较大的大地震，可以分别尝试两个断层面，并根据反演残差最小的原则确定真实的断层面参数；但对于中等大小的地震，由于震源尺度较小，两个正交的节面导致的波形残差可能没有明显区别，此时就需要通过地形和震中区附近的地质构造等信息，确定发震断层面的参数，进行破裂过程反演。然而，这种确定方式是建立在地震发生在已有的且震源机制明确的断层的基础认识之上，如果地震发生在新断裂或者震源机制不明确的断裂上，就不容易作出正确的判断。

可见，面向地震应急的震后破裂过程快速反演不仅依赖于数据和反演方法，还依赖于发震断层参数。实际上，断层参数的快速准确确定一直未能得到圆满的解决，采用远震地震波反演地震矩张量得到的断层面走向、倾角和滑动角一般具有 15° 左右的平均误差 (Helffrich, 1997)。对于一些特殊的地震，比如俯冲带地震，由于其倾角较小，即使走向变化较大，在反演得到的地震矩张量元素中也几乎没有什么反映，差别很小，也就是说通过矩张量反演得到的断层面走向的误差可能会非常大。对于本文讨论的 2014 年 2 月 12 日于田 $M_w6.9$ 地震，由于断层面倾角不能得到很好的约束，故采用不同断层面参数进行反演所导致的破裂过程反演结果差别十分明显。根据经验，我们认为倾向西北的发震断层面较为合理，并由此确定破裂模型。但这种基于经验的判断不能从根本上解决问题，存在出错

的可能. 为在震后快速准确地确定发震断层参数, 开展破裂过程快速反演, 未来需要做两个方面的工作: 一是建立详细的关于断层几何学和运动学性质的数据库, 为甄别地震的发震断层参数提供参考; 二是加强孕震断层附近大地测量手段的观测, 并发展采用大地测量资料快速确定震源机制的方法. 由于不存在时空折中(trade-off)效应, 采用大地测量资料所反映的同震形变信息确定震源机制将具有较高的稳定性和较小的误差. 比如对于本文遇到的倾角不确定性问题, 如果能够及时收集到近断层处的同震形变数据, 根据断层两边同震形变的分布就能够准确地确定断层面的倾角.

本文介绍了 2014 年 2 月 12 日于田 $M_w 6.9$ 地震的破裂过程快速反演工作. 在这一工作中, 我们基于经验选用了倾向西北的节面为发震断层面进行破裂过程快速反演. 地质考察结果显示, 这次地震所在的阿尔金断裂的西段确实存在朝北陡倾左旋滑移的迹象(李海兵等, 2008). 这是对本文断层面倾角选择正确性的一个有力支持. 此外, 快速反演结果显示这次地震滑动分布比较集中, 破裂主要往西南方向扩展. 这一结果与迄今已测定的于田 $M_w 6.9$ 地震余震的空间分布图像基本一致(<http://www.ceic.ac.cn/>), 也是本文得到的反演结果的佐证.

本文数据取自 IRIS 数据中心. 作者对中国地质科学院地质力学研究所周春景副研究员对本研究的建议和帮助, 以及审稿专家对本文的修改意见和建议, 一并表示感谢.

参 考 文 献

- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 杨晓平, 闵伟, 楚全芝. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学: D 辑, **32**(12): 1020–1030.
- Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, Yang X P, Min W, Chu Q Z. 2003. Basic characteristics of active tectonics of China [J]. *Science in China: Series D*, **46**(4): 356–372.
- 李海兵, Woerd J V, 孙志明, Mriaux A S, Tapponnier P, Ryerson F J, 司家亮, 潘家伟. 2008. 阿尔金断裂带康西瓦段晚第四纪以来的左旋滑移速率及其大地震复发周期的探讨[J]. 第四纪研究, **28**(2): 198–213.
- Li H B, Woerd J V, Sun Z M, Mriaux A S, Tapponnier P, Ryerson F J, Si J L, Pan J W. 2008. Late Quaternary left-slip rate and large earthquake recurrence time along the Kangxiwar (or Karakax) segment of the Altyn Tagh fault, Northern Tibet[J]. *Quaternary Sciences*, **28**(2): 198–213 (in Chinese).
- 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.
- Helffrich G R. 1997. How good are routinely determined focal mechanisms? Empirical statistics based on a comparison of Harvard, USGS and ERI moment tensors[J]. *Geophys J Int*, **131**(3): 741–750.
- 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.
- 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.
- Xu L S, Chen Y T, Teng T L, Patau G. 2002. 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[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **92**(8): 3210–3228.
- Zhang Y, Feng W P, Chen Y T, Xu L S, Li Z H, Forrest D. 2012. 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]. *Geophys J Int*, **191**(3): 1417–1426. doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05694.x.