

# 大地测量和地震数据联合反演地震震源破裂过程研究进展

许才军<sup>1</sup> 王乐洋<sup>1</sup>

(1 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘要:** 综述了近 10 多年来大地测量和地震数据联合反演地震震源破裂过程的研究成果及最新进展, 特别是大地测量和地震数据联合反演地震震源破裂过程的模型、算法及典型震例。展望了利用 GPS、InSAR 和地震波数据联合反演震源破裂过程中顾及先验信息、附有不等式约束时反演模型的建立方法, 以及相对权比的确立、全局优化方法的应用等问题。

**关键词:** 震源破裂过程; InSAR; GPS; 地震波数据; 联合反演

**中图法分类号:** P223; P227

天然地震震源破裂时空过程的反演是地震致灾机理研究的关键内容之一, 研究地震震源的时空破裂过程主要是根据地震所引发的地面运动的观测结果推断天然地震的震源性质及震源过程的细节, 对地震孕育、发生和致灾机理具有重要的科学意义, 同时对防灾减灾具有重要的现实意义。震源破裂过程反演的研究工作开始于 20 世纪 80 年代初期, 经过 20 多年的发展, 逐渐形成了多种不同的反演方法。目前的研究已从单一数据的反演逐步向多类数据的联合反演发展<sup>[1-37]</sup>, 从侧重于地震波数据反演到强调其他类观测数据的反演发展, 特别是大地测量数据(如 InSAR 数据和 GPS 数据)在反演地震震源破裂过程中起到了越来越重要的作用。研究地震的震源破裂过程本身是一个具有相当难度的课题, 单一数据仅能提供震源过程较差的部分图像, 联合反演可以给出稳健的破裂图像<sup>[38]</sup>, 此外有些地震并不具有明显的地表破裂, 因此多类数据的综合分析和联合反演是非常必要的。联合大地测量数据和地震波数据研究震源过程的运动学, 并通过反演震源破裂过程研究其动力学, 是目前国际地学界前沿热点问题。近 10 多年来, 地震震源破裂过程联合反演的

理论和方法取得了重要发展, 并在国内外多个震例研究中得到了广泛应用。本文综述了最近 10 多年来大地测量和地震数据联合反演地震震源破裂过程的研究成果及最新进展, 进一步讨论利用 GPS、InSAR 和地震波数据联合反演震源破裂过程需要研究的问题。

## 1 联合反演震源破裂过程模型的研究

地震震源破裂所激发的地球内部动力过程可以在地表力学响应的输出信号中得以体现, 这种响应是由地球内部震源介质的物理特性所激发的, 虽然各种响应互不相同, 但由这些信号反演的震源过程是相同的。

### 1.1 地震波数据的联合反演

Hartzell 等(1983)利用强地震动数据和远震体波的最小二乘逐点式反演方法推断了 1979 年加利福尼亚 Imperial Valley 地震的断层破裂历史, 并利用弹性参量随深度变化的平面断层模型代替实际的断层模型, 反演结果给出了平面断层上右行走滑和正常倾滑量的位移的时空变化, 反

收稿日期: 2010-01-18。

项目来源: 国家教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090141110055); 国家自然科学基金资助项目(40874003); 国家创新科研群体资助项目(40721001); 国家公益(地震)行业科研专项基金资助项目(200808080); 国家 863 计划资助项目(2009AA12Z317)。

演考虑了不同断层倾角和变化的破裂速度模型作为约束,为了反演的稳定性增加了光滑和正约束条件。Yagi等(2000)利用强地震动数据和远震体波联合反演了1999年土耳其地震的破裂过程,在反演过程中使用了多时间视窗反演;顾及观测记录的质量,确定近场数据、远场P波和远场S波的标准方差分别为它们振幅的10%、10%和20%,从而确定了它们在联合反演中的相对权比。

### 1.2 大地测量和地震波数据的联合反演

最早利用多类数据联合反演震源破裂模型并考虑相关权比问题的是Wald等(1994),他们利用大地测量数据(GPS和三边测量数据)、近场区域强地震动数据和宽频远震数据以及表面位移测量数据确定了1992年Landers7.2地震的震源破裂模型,反演过程中将断层模型参数化为一个包含滑移变化、多断层的有限断层模型,使得各种数据能够自洽,既能进行独立反演又能进行联合反演;使用了约束、阻尼最小二乘法来获得与位移波形和大地测量数据拟合最好的子断层位错值;在确定联合反演相对权比时,初始权是通过根据数据点的相对振幅和总数确定每类归一化数据的整体权,然后采用试错法扰动相对权比,从而使得每个数据点都能较好地拟合。

Wright等(1999)利用InSAR数据和地震体波数据确定1995年土耳其第纳尔Ms6.1地震的震源参数。近场强地震动数据可以为断层破裂过程的历史提供时间分辨率,可以用来推断断层面上破裂过程的细节。GPS可以获得高精度的地震同震形变场,为震源破裂过程的反演提供约束。Zeng等(2001)利用三维位错模型融合GPS和近场强地震动数据重建了1999年台湾集集地震震源破裂过程,利用广义反射和转换系数法计算了近场同震变形和强地面震动速度格林函数,在震源破裂过程的反演中使用了遗传算法。

Ma等(2001)利用近源强地震动数据、宽频远震体波数据数据和GPS研究了1999年台湾集集地震的破裂过程,使用了多时间窗震源时间函数,同样使用了Hartzell等(1983)的正约束、阻尼最小二乘反演方法获得的子断层位错能很好地拟合位移波形和大地测量数据。计算中使用了最小曲率技术来考虑邻近子断层在每个时间窗内位错的差别最小。

Delouis等(2002)、Pritchard等(2003,2007)都利用InSAR、GPS、远震数据和强地震动数据的联合反演研究了同震或震后滑动分布,其中Delouis等利用表面数据作为约束反演1999年8

月17日I'zmit地震滑移的时空分布,采用四段有限断层模型和非线性反演方法,允许滑移在幅度、方向、持续时间和破裂速度方面是可变的,根据正态拟合差来简单地确定各类数据的相对权比,并分析了不同数据的分辨率。

王卫民等(2005)使用GPS同震位移资料和远场P波记录,研究了1999年台湾集集地震震源破裂过程。其联合反演的过程是:首先利用GPS观测资料的水平和垂直位移量反演地震断面上的静力学滑动分布;然后再同时考虑GPS和远场P波波进行联合反演。

### 1.3 地质信息、大地测量和地震波数据的联合反演

王卫民等(2008)综合了地质构造、波形记录、InSAR、GPS等资料对汶川8.0级地震的震源破裂过程作了研究。利用远场体波波记录结合近场同震位移数据,根据地质资料和地震形成的地表破裂轨迹,构造了一个双“铲状”有限地震断层模型,以野外地质调查结果作为约束,以P波与SH波理论地震图与实际记录图的拟合差和同震位移采用Okada公式计算的理论与同震位移与观测资料的拟合差最小为反演目标函数,用模拟退火法求解汶川地震发生时断层面上破裂滑动的分布情况。

## 2 联合反演震源破裂过程算法的研究

理论成熟、计算速度较快的线性化反演方法,在震源研究中一直被大量使用<sup>[28,32]</sup>,还有一些研究使用共轭梯度法<sup>[14]</sup>。但线性反演方法的反演结果对反演模型中需要设定的破裂面大小、破裂方式、多破裂窗的个数和宽度等依赖性强,因而反演结果的稳定性不高<sup>[42]</sup>。所以,一些非线性反演算法得到了广泛的应用,主要有模拟退火算法<sup>[15-17,19]</sup>,并行模拟退火反演方法<sup>[33]</sup>,快速模拟退火反演方法<sup>[43]</sup>,遗传算法<sup>[6]</sup>,自适应全局混合反演算法<sup>[7,9,44]</sup>,非线性规划的新方法<sup>[21,42]</sup>,等等。地球物理学或大地测量地球物理学的反演问题大多是一个多参数、非线性、多极值、非连续函数的优化问题<sup>[44-46]</sup>。对于非线性反演问题,用局部方法反演的结果容易陷入局部极值解,而全局最优解的算法仍是需要进一步研究的问题。

## 3 典型震例震源破裂过程分析

1999年9月21日,台湾中部集集镇发生的

Mw7.6 级地震,是 20 世纪以来台湾岛内最大的地震,岛内拥有密集的地震观测台网和 GPS 永久以及临时观测台站,还有多颗雷达卫星等观测手段,从而获得了丰富的地震记录和高精度的地表形变资料,这些数据的获得为集集地震破裂过程的研究提供难得的多类数据。

对于震源破裂过程的研究,由于所采用的数据、断层模型、计算方法等等的不同,导致了反演结果的不同。集集地震地表破裂的现场观察显示,在南段 85 km 近南北向,而北段 15 km 近东西向,在断层模型选择时,有采用一段、两段<sup>[35]</sup>、三段<sup>[39]</sup>等断层模型;使用的数据有 InSAR 数据<sup>[47]</sup>、GPS 数据<sup>[48]</sup>、地震调查数据<sup>[49]</sup>、GPS 同震位移资料和远场 P 波记录<sup>[39]</sup>、高质量的近源强地震动数据、宽频远震位移波形数据和分布较好的 GPS 数据<sup>[35]</sup>等等。虽然使用的震源模型大都基于剪切位错震源,采用均匀半空间或分层介质模型,通过拟合地表静态位移和地震波形记录来研究地震震源破裂滑动,取得的结果大致能够相同,地表静态位移和地震波形资料的总体拟合度也较好,但局部地区的复杂位移拟合度仍存在较大误差<sup>[39]</sup>。

2008 年 5 月 12 日,发生在青藏高原东缘龙门山推覆构造带中段的 Mw7.9 级(Ms8.0 级)汶川地震是一次震惊世界的地震,也是一次罕见的逆冲斜滑型特殊地震。对于该地震震源破裂过程,许多学者从自己掌握的数据资料不同的角度和模型进行了深入的研究<sup>[25,28,40,41,50-53]</sup>,虽然给出的破裂过程基本相同但具体结果仍有不小的差别。

这两个典型震例也说明,对于震源破裂过程的重建要有丰富的数据(大地测量和地震数据)、合理的震源模型和断层模型(符合地震现场调查)、随机模型以及最优化反演算法,这样才能根据地震所引发的地面运动的观测结果推断出天然地震的震源性质及震源过程的细节。

## 4 大地测量和地震数据联合反演地震震源破裂过程的研究展望

利用 GPS、InSAR 和地震波数据联合反演震源破裂过程是今后研究的一个重点方向,而其中模型的建立、各类数据相对权比的确定以及非线性反演算法的选择则是十分重要的问题。

### 4.1 GPS、InSAR 和地震波数据联合反演震源破裂过程

联合多种数据反演震源破裂可以提高滑动时

空分布解的稳健性,具有更高的分辨能力。当靠近 GPS 和强地面运动观测站的 InSAR 数据较好时,可以获得最好的空间分辨率,远震数据虽然在断层上分布均匀,但是分辨率却很低。与地震数据相比,InSAR 数据可以为浅源地震的深度提供紧约束,由 InSAR 确定的深度与很好约束的地震定位在三维速度模型上具有一致性。InSAR 数据分析的一个严重不足是很差的时间覆盖(分辨率),但是 GPS 由于具有很高的时间分辨率,正好可以弥补 InSAR 的这个缺点。GPS 和 InSAR 数据可以为断层的形状和滑动分布提供很好的约束。远场体波资料可以提供断层位置和破裂总持续时间的信息,提高模型的垂直分辨率并约束总的运动;近场强地震动数据可以为断层破裂过程的历史提供时间分辨率,可以用来推断断层面上破裂过程的细节<sup>[54]</sup>,这些数据的联合应用提高了研究区域的空间采样<sup>[32]</sup>。因此,大地测量数据(GPS 和 InSAR 数据)和地震数据(强地震动和远震数据)的联合反演震源破裂将具有很好的时空分辨率,对于更好地认识地震破裂过程和断层构造特征将起到重要的作用。

利用有限断层模型描述震源的破裂过程,将断层面划分成若干子断层,构建 GPS/InSAR 数据和地震波数据联合反演模型。即

$$\left. \begin{aligned} y &= \lambda_1 \mathbf{V}_1^T \mathbf{P}_1 \mathbf{V}_1 + \lambda_2 \mathbf{V}_2^T \mathbf{P}_2 \mathbf{V}_2 + \lambda_3 \mathbf{V}_3^T \mathbf{P}_3 \mathbf{V}_3 + \\ &\lambda_4 \mathbf{V}_4^T \mathbf{P}_4 \mathbf{V}_4 = \min \\ \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 &= 1 \end{aligned} \right\}$$

式中, $\lambda_i (0 < \lambda_i < 1, i = 1, 2, 3, 4)$ 分别为 GPS、InSAR、远场体波和近场强地震动数据反演的相对权比例因子, $\mathbf{V}_1 = \mathcal{U}_{\text{GPS}}^{\text{fit}} - \mathcal{U}_{\text{GPS}}^{\text{obs}}, \mathbf{V}_2 = \mathcal{U}_{\text{InSAR}}^{\text{fit}} - \mathcal{U}_{\text{InSAR}}^{\text{obs}}, \mathbf{V}_3 = \mathcal{U}_{\text{远场体波}}^{\text{fit}} - \mathcal{U}_{\text{远场体波}}^{\text{obs}}, \mathbf{V}_4 = \mathcal{U}_{\text{强地震动}}^{\text{fit}} - \mathcal{U}_{\text{强地震动}}^{\text{obs}}, \mathbf{P}_i = \mathbf{Q}_i^{-1} (i = 1, 2, 3, 4)$ 分别为 GPS、InSAR、远场体波和近场强地震动数据的权阵。

### 4.2 方差分量估计法确定震源破裂过程联合反演的相对权比

在利用多类数据进行联合反演时,一个很关键的问题是相对权比的确定。权比确定正确与否将影响到反演结果的正确性,对于后续的反演解释影响也很大。相对权比通过影响模型空间的交集的大小,从而影响联合反演的模型空间的大小。目前的震源破裂联合反演中的相对权比的确定是一个没有得到很好解决的问题,在确定方法上基本上采用观测值初始方差确定或简单的“试错法”确定,具有一定的主观性<sup>[31,36]</sup>。Xu 等<sup>[55]</sup>讨论了联合反演中各类观测值相对权比的几种确定方法,认为采用赫尔墨特方差分量估计是其中最

的方法。进一步,需要考虑应用方差-协方差分量估计法确定 GPS、InSAR 数据和地震数据(强地震动和远震数据)的相对权阵比,使联合反演震源破裂过程更可靠,更加充分发挥各类数据在联合反演中应有的贡献。

#### 4.3 区间算法的应用

震源破裂过程的联合反演是一个非线性优化过程,涉及多类数据、多个模型参数,具有多极值、多约束、多先验信息及非连续的特征。由于模拟退火法及遗传算法等非线性算法可能搜索到局部最优解,因此一种真正的全局优化算法是联合反演中一个亟待解决的问题。区间算法是一种全局最优算法,并能证明解的存在性和惟一性,是一种“自证算法”,可无限逼近最优解,求出解的包含区间,并自动获得逼近误差,不依赖于初始值的选取,可用于可导和光滑问题的优化,也可用于不可导和非光滑问题的优化,可以用于无约束问题的优化,也可用于约束问题的优化<sup>[56]</sup>。将区间算法用来解决多类数据联合反演震源破裂过程,可以搜索到全局最优解,同时区间算法还有两个优点,一是可以解决多个约束问题,包括等式约束和不等式约束,以及概率不等式约束等;二是区间算法可以给出非线性问题解的精度评定,即以区间大小的方式给出解的范围。

#### 4.4 先验信息的利用和建模

通常情况,我们会有震源破裂过程的一些先验信息,如有关断层的几何参数、地下介质速度的信息等等。如何合理正确地应用这些先验信息,将对反演过程起着重要作用,因为先验信息的约束对于震源破裂反演不唯一的问题可以提供很好的约束,同时能提高反演速度。先验信息的表达方式有等式约束、不等式约束、概率约束等等。当先验信息十分明确时,建立的约束是确定的,可以采用附有等式或不等式约束的反演方法;地震震源破裂通常非常复杂,可能会带有随机或模糊参数,这时约束条件应该采用概率约束形式;而对于不确定的先验信息,可以取随机变量所对应的函数的概率平均值(数学期望),把随机概率约束反演转化为一个确定的约束反演,使目标函数的概率期望达到最优。

#### 4.5 系统误差的半参数估计处理方法

大地测量和地震数据联合反演震源破裂过程,和其他数据处理过程一样,也会遇到系统误差问题。系统误差的处理一般采用附加系统参数法、模型精化法,但这两种方法的应用效果主要取决于事先对客观现实的了解,即先验信息的掌握。

对客观现实了解比较清楚,先验信息充足和可靠,则可以建立准确的附加参数函数关系,或精确的数学模型,此时,采用这两种方法,能取得很好的效果。如果先验信息不准确,对系统误差或模型误差的规律掌握不透,或系统误差、模型误差关系复杂,则这两种方法难以取得理想的效果,针对震源破裂过程实际问题,大地测量和地震数据联合反演中可以采用半参数模型方法处理系统误差。半参数模型具有参数部分和非参数部分,参数部分表达与观测值确定的函数关系,非参数部分表达与观测值关系不确定的部分,因此相对于震源破裂过程的参数模型而言半参数模型具有更大的优越性,也更加符合客观实际。半参数模型可以通过削弱或者消除系统误差对观测值的影响而提高解算参数估值的有效性和可靠性。

#### 参 考 文 献

- [1] 郑天愉,姚振兴. 用近场记录研究唐山地震的震源过程[J]. 地球物理学报,1993,36(2):174-184
- [2] 高原,周蕙兰,刘振. 单侧破裂震源的破裂特征分析[J]. 中国科学院研究生院学报,1997,14(1):39-42
- [3] 高原,吴忠良,周蕙兰. 四川地区 1989 年中强地震系列的震源破裂研究[J]. 地震学报,1998,20(1):12-17
- [4] 何玉梅,郑天愉. 利用地震波形反演研究震源破裂时空过程[J]. 地球物理学报,1998,41(2):281-289
- [5] 许力生,陈运泰. 1997 年中国西藏玛尼 Ms7.9 地震的时空破裂过程[J]. 地震学报,1999,21(5):449-459
- [6] Lee Shiann-Jong, Ma Kuo-Fong. Rupture Process of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake from the Inversion of Teleseismic Data[J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 2000,11(3):591-608
- [7] 何玉梅,郑天愉,单新建. 1996 年 3 月 19 日新疆阿图什 6.9 级地震:单侧破裂过程[J]. 地球物理学报,2001,44(4):510-519
- [8] 许力生,陈运泰,高孟潭. 2001 年 1 月 26 日印度古杰拉特(Gujarat)Ms7.8 地震时空破裂过程[J]. 地震学报,2002,24(5):447-461
- [9] 单新建,何玉梅,朱燕,等. 新疆伽师强震群的震源破裂特征[J]. 地震地质,2002,24(1):59-68
- [10] 单新建,何玉梅,朱燕,等. 伽师强震群震源破裂特征的初步分析[J]. 地球物理学报,2002,45(3):416-425
- [11] 周云好,许力生,陈运泰. 2000 年 6 月 4 日印度尼西亚苏门答腊南部 Ms8.0 地震的时空破裂过程[J]. 中国地震,2002,18(3):221-229
- [12] 单新建,马瑾,宋晓宇,等. 利用星载 D-INSAR 技术

- 获取的地表形变场研究张北—尚义地震震源破裂特征[J]. 中国地震, 2002, 18(2): 119-126
- [13] 陈运泰, 许力生. 青藏高原及其周边地区大地震震源过程成像[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 57-62
- [14] 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[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2004, 34(3): 256-264
- [15] 王卫民, 李丽, 赵连锋, 等. 2003 年 2 月 24 日新疆伽师 Ms 6.5 级地震震源破裂过程研究[J]. 地球物理学报, 2005, 48(2): 343-351
- [16] 李娟, 王卫民, 赵连锋, 等. 2004 年 7 月 11 日西藏 Mw 6.2 级地震震源破裂过程研究[J]. 地球物理学报, 2005, 48(4): 843-850
- [17] Shiba Y, Irikura K. Rupture Process by Waveform Inversion Using Simulated Annealing and Simulation of Broadband Ground Motions[J]. Earth Planets Space, 2005, 57: 571-590
- [18] 周仕勇, Irikura K. 近震源地震波波资料反演震源破裂过程的可靠性分析[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 124-131
- [19] Ammon C J, Chen Ji, Thio H K, et al. Rupture Process of the 2004 Sumatra—Andaman Earthquake [J]. Science, 2005, 308: 1133-1139
- [20] Kreemer C, Blewitt G, Hammond W C, et al. Global Deformation from the Great 2004 Sumatra-Andaman Earthquake Observed by GPS: Implications for Rupture Process and Global Reference Frame[J]. Earth Planets Space, 2006, 58: 141-148
- [21] 周仕勇, 陈晓非. 近震源破裂过程反演研究——9·21 中国台湾集集地震破裂过程的近场反演[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2006, 36(1): 49-58
- [22] Piatanesi A, Lorito S. Rupture Process of the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake from Tsunami Waveform Inversion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(1): S1-S9
- [23] 夏曼, 吴忠良, 许洋. 用远震 P 波高频辐射能量快速估计 2008 年 5 月 12 日汶川 Ms8.0 地震的破裂特征[J]. 中国地震, 2008, 24(2): 97-104
- [24] 张勇, 许力生, 陈运泰, 等. 2007 年云南宁洱 Ms6.4 地震震源过程[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2008, 38(6): 683-692
- [25] 张勇, 冯万鹏, 许力生, 等. 2008 年汶川大地震的时空破裂过程[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2008, 38(10): 1186-1194
- [26] 张红霞, 许力生, 陈运泰, 等. 用频率域台阵技术推测 2001 年昆仑山口西大地震的破裂时间与几何特征[J]. 地震学报, 2008, 30(1): 12-25
- [27] 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[J]. 地球物理学报, 2009, 52(2): 372-378
- [28] 张勇, 许力生, 陈运泰, 等. 2008 年汶川大地震震源机制的时空变化[J]. 地球物理学报, 2009, 52(2): 379-389
- [29] Rastogi B K, Gupta H K, Mandal P, et al. The Deadliest Stable Continental Region Earthquake Occurred Near Bhuj on 26 January 2001[J]. Journal of Seismology, 2001, 5: 609-615
- [30] 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(6): 1553-1583
- [31] Yagi Y, Kikuchi M. Source Rupture Process of the Kocaeli, Turkey, Earthquake of August 17, 1999, Obtained by Joint Inversion of Near-field Data and Teleseismic Data[J]. Geophys. Res. Lett., 2000, 27: 1969-1972.
- [32] Wald D J, Heaton T H. Spatial and Temporal Distribution of Slip for the 1992 Landers, California, Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(3): 668-691
- [33] Wright T J, Parsons B E, Jackson J A, et al. Source Parameters of the 1 October 1995 Dinar (Turkey) Earthquake from SAR Interferometry and Seismic Bodywave Modelling[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1999, 172: 23-37
- [34] Zeng Yuehua, Chen Cuahuei. Fault Rupture Process of the 20 September 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2001, 91(5): 1088-1098
- [35] Ma Kuo-Fong, Mori J, Lee Shiann-Jong, et al. Spatial and Temporal Distribution of Slip for the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2001, 91(5): 1069-1087
- [36] Delouis B, Giardini D, Lundgren P, et al. Joint Inversion of InSAR, GPS, Teleseismic, and Strong-Motion Data for the Spatial and Temporal Distribution of Earthquake Slip: Application to the 1999 Izmit Mainshock[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2002, 92(1): 278-299
- [37] Pritchard M E. Recent Crustal Deformation in West-central South America[D]. California Institute of Technology, Pasadena, California, 2003
- [38] Pritchard M E, Norabuena E O, Ji C, et al. Geodetic, Teleseismic, and Strong Motion Constraints on Slip from Recent Southern Peru Subduction Zone Earthquakes [J]. J. geophys. Res., 2007, 112(B3): 1-4, doi:10.1029/2006JB004294.
- [39] 王卫民, 赵连锋, 李娟, 等. 1999 年台湾集集地震震源破裂过程[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 132-

147

- [40] 王卫民,赵连锋,李娟等. 四川汶川 8.0 级地震震源过程[J]. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1403-1410
- [41] 王卫民,姚振兴. 再谈汶川 8.0 级地震震源破裂过程 [OL]. [http://www.csi.ac.cn/sichuan/sichuan080512\\_110.htm](http://www.csi.ac.cn/sichuan/sichuan080512_110.htm)
- [42] 周仕勇,陈晓非,刘金朝,等. 近震源破裂过程反演研究——方法和数字试验[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2003, 33(5): 482-495
- [43] 王卫民. 中强地震震源的破裂过程[D]. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所, 2003
- [44] 艾印双,刘鹏程,郑天愉. 自适应全局混合反演[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 1998, 28(2): 105-110
- [45] 丁开华,许才军. 川滇地区地壳应变场的 GPS 与地震矩张量联合反演研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(3): 265-268
- [46] 温扬茂,许才军. 联合 GPS 与重力资料反演分析川滇地区现今地壳形变[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(5): 568-572
- [47] 刘国祥,丁晓利,李志伟,等. ERS 卫星雷达干涉测量: 1999 年台湾集集大地震震前和同震地表位移[J]. 地球物理学报, 2002, 45(增刊): 165-174
- [48] Yu ShuiBei, Kuo Longchen, Hsu Yaju, et al. Pre-seismic Deformation and Coseismic Displacements Associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2001, 91(5): 995-1012
- [49] 王彦斌,王永,李建成,等. 1999 年台湾集集大地震的地表断层破裂特征[J]. 地震地质, 2000, 22(2): 97-103
- [50] 王敏. 基于 GPS 同震位移场约束反演 2008 年 5.12 汶川大地震破裂空间分布[J]. 地球物理学报, 2009, 52(10): 2519-2526
- [51] Shen Zhengkang, Sun Jianbao, Zhang Peizhen, et al. Slip Maxima at Fault Junctions and Rupturing of Barriers During the 2008 Wenchuan Earthquake [J]. Nature Geoscience, 2009, 2: 718-724
- [52] Ji Chen, Hayes G. Preliminary Result of the May 12, 2008 Mw 7.9 Eastern Sichuan, China Earthquake [OL]. [http://earthquake.usgs.gov/eq-center/eqinthenews/2008/us2008ryan/finite\\_fault.php](http://earthquake.usgs.gov/eq-center/eqinthenews/2008/us2008ryan/finite_fault.php), 2009
- [53] 许才军,刘洋,温扬茂. 利用 GPS 资料反演汶川 Mw7.9 级地震滑动分布[J]. 测绘学报, 2009, 38(3): 197-215
- [54] 艾印双,郑天愉,何玉梅. 有限断层破裂时空过程反演结果误差的随机加权估计[J]. 地震学报, 1999, 21(4): 419-426
- [55] Xu Caijun, Ding Kaihua, Cai Jianqing, et al. Methods of Determining Weight Scaling Factors for Geodetic-geophysical Joint Inversion[J]. Journal of Geodynamics, 2009, 47: 39-46
- [56] 李爽. 大地测量联合反演的模式及算法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005

第一作者简介: 许才军, 博士, 教授, 博士生导师, 长江学者特聘教授。主要研究方向: 大地测量学与地球动力学; InSAR 与 GPS 数据融合处理理论与应用。

E-mail: cjxu@sgg.whu.edu.cn

## Progress of Joint Inversion of Geodetic and Seismological Data for Seismic Source Rupture Process

XU Caijun<sup>1</sup> WANG Leyang<sup>1</sup>

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** The achievement and new progress in joint inversion of geodetic and seismological data for seismic source rupture process in the recent decade are summarized in this paper. The models, algorithms and typical earthquake cases in joint inversion of geodetic and seismological data for seismic source rupture process are discussed. The establishment of joint inversion model with GPS, InSAR and seismological data considering prior information and with inequality constraints is discussed. The functions of various data, determination of relative weight ratio and application of global optimization algorithm are emphatically discussed.

**Key words:** seismic source rupture process; InSAR; GPS; seismological data; joint inversion

**About the first author:** Xu Caijun, Ph. D., Professor, Ph. D supervisor. Changjiang Scholars; majors in geodesy and geodynamics, theory and algorithm of syncretizing data of GPS and InSAR and its application.

E-mail: cjxu@sgg.whu.edu.cn