

利用流动 GPS 测定 2011 年日本 M_w 9.0 地震远场同震位移^{*}

赵静旸, 武艳强, 梁洪宝, 杜凯夫, 时爽爽

(中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

摘要: 采用 1999—2017 年我国东北和华北地区的流动 GPS 观测资料, 对比坐标时间序列直接解算、连续 GPS 同震位移插值结果约束解算、位错模型模拟同震位移约束解算和由上述 2 种外部数据同时约束解算等 4 种解算策略, 获得了 2011 年日本 M_w 9.0 地震远场同震位移, 并由该远场同震位移约束反演了此次地震的静态位错。结果表明: 在利用流动 GPS 解算量级较小的同震位移时, 由外部可靠数据作为约束可获得较为理想的结果; 流动 GPS 测定的 2011 年日本 M_w 9.0 地震在我国东北和华北地区造成的远场同震位移最大可达 33 mm, 以东向位移为主; 由远场同震水平位移和近场同震垂直位移约束得到的静态位错对应的矩震级 M_w 为 8.77, 最大同震位错量为 21.09 m。

关键词: 流动 GPS; 约束解算; 同震位移; 日本 M_w 9.0 地震

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2018)03-0451-06

0 引言

精确的震区形变场, 有助于构建精细的地震破裂模型、认识和理解地震发生机理。GPS、InSAR 等现代大地测量技术, 具有观测连续性好、空间覆盖率高等特点, 已被广泛应用于多次地震的同震变形特征分析工作中(万永革等, 2004; 郝明等, 2012; 单新建等, 2014; 杨国华等, 2015; 占伟等, 2015; Wu *et al.*, 2016; 季灵运等, 2017)。2011 年 3 月 11 日, 日本海沟地区 (38.3°N, 142.4°E) 发生 M_w 9.0 地震, 并引起了强烈的海啸。得益于日本良好的地震监测基础, 此次地震在近场引起的同震地壳形变, 通过 GPS、InSAR、海底形变观测等手段得到了很好的解读, 相关结果已应用于此次地震同震位错、破裂过程反演等研究(刁法启等, 2011, 2012; Wang *et al.*, 2012; Bletery *et al.*, 2015)。

大地震除了会在震中区形成位移之外, 还会导致大区域的变形, 如 Plafker (1965) 发现 1964 年阿拉斯加地震的同震位移发生在俯冲带 400 ~ 600 km 范围内, 王敏等 (2006) 的研究结果表明

2004 年印尼苏门答腊 M_w 9.3 地震的同震位移东西、南北的范围均达到 6 000 ~ 7 000 km。相关研究表明, 日本地震同样在中国大陆产生了永久的变形影响: 王敏等 (2011) 的研究结果显示此次地震造成我国东北和华北地区产生毫米至厘米级的同震水平位移, 最大值为 35 mm; 杨少敏等 (2011) 认为此次地震水平位移影响范围达 2 000 km, 造成中国东北东移 1 ~ 3 cm, 华北东移 3 ~ 8 mm, 朝鲜半岛东移 2 cm; 蔡华等 (2012) 解算分析了整个中国大陆地区的远场同震位移, 认为东北地区的同震位移接近 20 cm, 华北地区同震位移在 10 cm 左右, 鄂尔多斯及周围、阿尔金—祁连山—阿拉善、新疆等地区同震位移为 5 mm 左右。以上研究成果均是通过 GPS 连续观测数据获得, 由于测站分布稀疏, 上述分析仅为区域概略结果, 难以了解此次地震在中国大陆远场同震形变细部的大小与空间的变化, 而远场同震位移的获取对研究地壳构造运动、地震动力学特征及判定未来地震趋势均具有重要意义。

随着中国地壳运动观测网络和中国大陆构造环境监测网络的建立, 中国大陆目前建立了相对密集的 GPS 流动监测网络, 这些测站自 1999 年开

^{*} 收稿日期: 2018-04-23.

基金项目: 一测中心科技创新主任基金 (FMC2016001)、地震科技星火计划项目 (XH16055Y) 和 2018 年度震情跟踪定向工作任务 (2018010208) 联合资助。

始观测, 目前已在 2011 年前后积累了相对丰富的观测数据, 为利用流动 GPS 资料解算此次日本巨震在中国大陆的远场同震形变提供了条件。本文充分利用已有密集流动 GPS 观测资料, 对比相关数据处理方法, 提取受此次日本巨震影响显著的我国华北和东北地区的同震形变信息, 并利用该远场形变作为约束反演此次地震的静态位错分布。

1 GPS 数据处理

根据前人的研究成果, 日本 $M_w 9.0$ 地震在中国大陆产生的同震形变在甘肃、四川边界以及华南块体附近不显著, 因此, 本文选定的流动 GPS 数据分布在 ($110^\circ \sim 135^\circ E$, $30^\circ \sim 55^\circ N$) 范围内。该区域内流动 GPS 一般逐年或隔年观测 1 期, 每期至少观测 4 d, 为了保证解算结果的可靠性, 选取的测站自 1999 年开始观测, 观测截止时间为 2017 年, 在 2011 年 3 月 11 日前后至少有 3 期观测数据。经统计, 有 318 个测站符合选定标准。基础数据由 GAMIT/GLOBK 软件完成, 先以单天观测为一解算时段, 采用双差模式处理得到单日松弛解, 继而选定全球 80 个 IGS 站作为框架点, 处理得到各测站在 ITRF2014 框架下的坐标时间序列。

在利用 GPS 资料分析地壳运动的过程中, 对于地震发生前后, GPS 点在任意时刻 t_i 的坐标分量 $y(t_i)$ 可表示为 (国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组, 2008):

$$y(t_i) = y(t_0) + v_1(t_i - t_0) + \sum_{j=1}^n a_j \cos[2\pi f_j(t_i - t_0) + \varphi_j] + r_i, \quad t_i < t_{eq} \quad (1)$$

$$y(t_i) = y(t_0) + v_1(t_{eq} - t_0) + v_2(t_i - t_{eq}) + \sum_{j=1}^n a_j \cos[2\pi f_j(t_i - t_0) + \varphi_j] + c + p \log[1 + (t_i - t_{eq})/\tau] + r_i, \quad t_i \geq t_{eq} \quad (2)$$

式中: t_0 为任意选定的初始时刻; $y(t_0)$ 为 t_0 时刻的位置; v 为构造运动速度; 三角函数表示非构造运动引起的周期信号; a_j , f_j , φ_j 分别表示周期信号的振幅、频率和初相位; r_i 为未能模型化的观测噪声; t_{eq} 表示地震发生时刻; c 为地震的同震位移; 对数函数表示震后变形; p 为震后位移系数; τ 为震后弛豫时间。由于采用的流动 GPS 观测间隔

较长, 且远场变形量级较小, 本文忽略震后变形和周期性的非构造变形, 假设地震发生前后的构造运动速度不同, 将 $y(t_0)$, v_1 , v_2 和 c 作为待定参数通过最小二乘进行求解。由于流动观测点获得的垂向位移缺乏可靠性, 本文的求解仅针对水平坐标分量。

2 流动 GPS 同震位移解算策略对比分析

为了克服流动 GPS 数据观测间隔时间长、观测误差不易剔除等缺陷, 获取可靠的同震形变信息, 对比分析 4 种解算策略, 分别为: 利用坐标时间序列直接解算; 利用连续 GPS 观测计算的同震位移在流动点位上的插值进行约束解算; 利用位错模型模拟的流动点位上的同震位移约束解算; 同时采用上述 2 种外部同震位移约束解算。

利用坐标时间序列直接解算时, 由各坐标值的误差确定其权重, 同震位移解算结果如图 1a 所示。图 1a 显示 2011 年日本 $M_w 9.0$ 地震引起的研究区内的同震位移以东向运动为主, 位移整体上稍显杂乱, 反映了不同区域对同一构造活动的敏感度不同。图 2a 为直接解算获得的东向位移分量与经度分布的关系图, 显示随着震中距的加大, 位移量不断减小, 个别测站出现表示西向位移的负值。Wang 等 (2014) 的研究表明, 弹性半空间中逆冲破裂造成的同震水平位移符合随着震中距的加大而指数下降的变化特征, 因此我们利用如式 (3) 所示的指数函数对东向位移和经度进行拟合, 以拟合值和实测值的差异水平作为评价所获同震位移精度的标准:

$$D = a \cdot e^{b \cdot lon} \quad (3)$$

式中: D 表示东向位移分量; lon 表示经度; a 和 b 表示指数函数系数。上述直接解算的同震位移拟合得到拟合值和实测值差异的均方根值为 5.78 mm。

地震发生后, 短则数小时之内, 长则数天之内, 即可利用连续 GPS 观测获取较高精度的同震形变信息, 但受限于连续测站的分布, 此类信息往往空间分辨率不足。将 Wang 等 (2014) 解算的分布于中国大陆的陆态网络基准站的同震位移, 通过最小二乘配置法插值到流动观测点位上, 对

于每一个单个点位, 将插值结果作为一个观测方程参与观测方程组的解算, 对流动点位的同震位移进行约束解算, 解算时除流动观测本身的误差外, 还考虑连续站同震位移本身的精度。获取的同震位移如图 1b 所示, 显示在此约束条件下获得的同震位移表现出有序的特性, 整体上仍然以东向位移为主, 位移量值从 3.3 mm 到 33.1 mm 不等。同样用指数函数拟合东向位移分量与经度的关系, 如图 2b 所示, 拟合值和实测值差异的均方根值为 2.90 mm。

除实测的同震位移外, 地震发生之后可以利用地震波等手段快速获取初步的断层运动信息, 继而可以通过位错模型模拟获得地表点位的同震位移, 该模拟信息也可作为外部数据对流动 GPS 观测进行约束解算。本文的模拟同震位移通过球状分层地球位错理论 (Sun *et al.*, 2010) 计算获得, 其中断层滑动模型采用 Wei 等 (2012) 的研究结果, 地球模型采用 Wang 等 (2014) 的 PREM2 模型。由于模拟同震位移没有误差信息, 解算时对于相应测站结果赋予 2 倍连续 GPS 插值

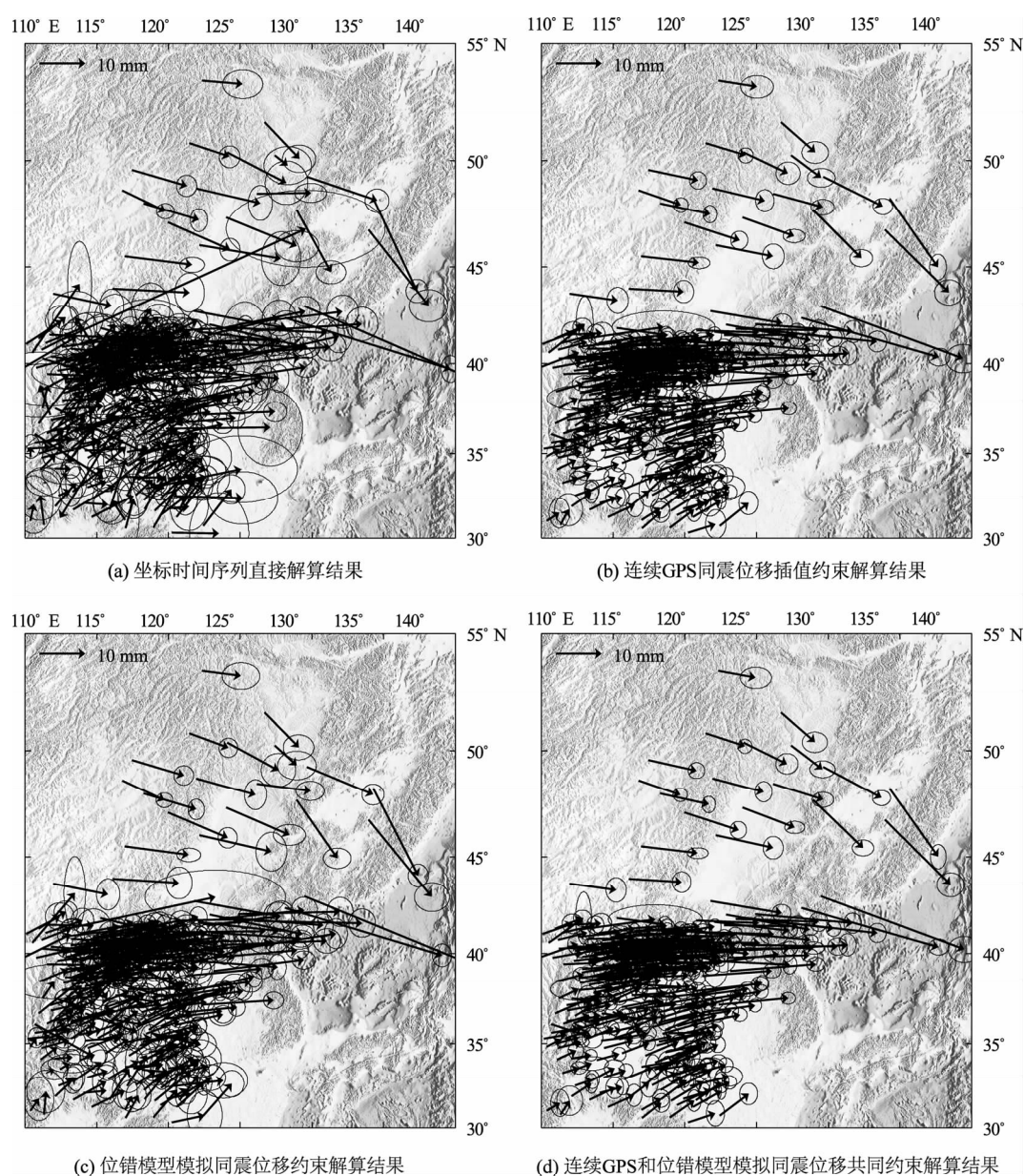


图1 流动 GPS 测定的 2011 年日本 $M_w 9.0$ 地震在中国东北部地区引起的同震位移
Fig. 1 Coseismic horizontal displacements of the 2011 Tohoku $M_w 9.0$ earthquake calculated by the campaign GPS observation data in northeastern China

结果的误差。获取的同震位移如图 1c 所示, 显示由模拟数据约束解算的结果有序性优于直接解算的结果, 劣于连续 GPS 观测约束解算的结果, 个别测站仍有如东西向位移与其它测站相反的现象。指数函数拟合东向位移分量与经度的关系 (图 2c), 拟合值和实测值差异的均方根值为 3.99 mm。

除上述 3 种解算策略外, 利用连续 GPS 结果和位错模型模拟结果同时约束进行流动 GPS 同震

位移的解算, 外部数据的精度影响因素设置同上, 解算结果如图 1d 所示。该结果与仅使用连续 GPS 信息进行约束的解算结果相近, 同震位移显示出较好的有序性, 位移方向均指向震中, 位移量值从 3.4 mm 到 33.3 mm 不等, 最大位移出现在辽宁和吉林东部地区。利用指数函数拟合东向位移分量与经度的关系 (图 2d), 拟合值和实测值差异的均方根值为 2.81 mm。

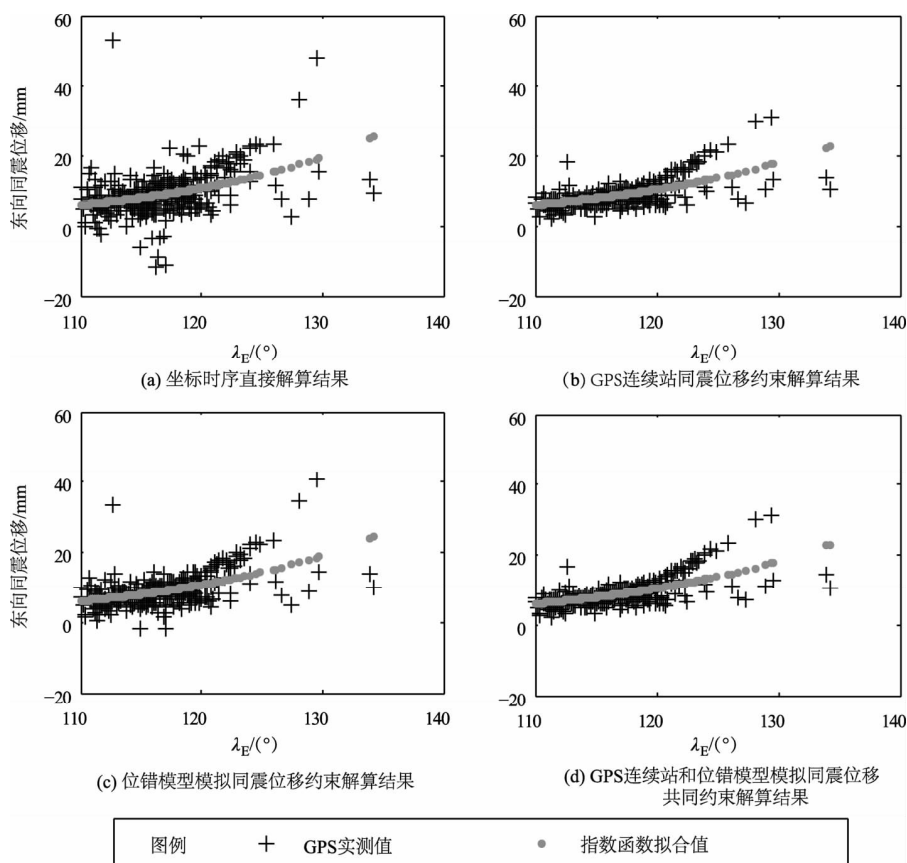


图 2 东向位移分量随经度变化分布及指数拟合

Fig. 2 Distribution and the best exponential function fitting of east components of the coseismic displacements with longitude

3 静态位错反演

为了验证远场同震位移在地震静态位错反演中的作用, 以由 2 种外部数据同时约束获得的远场水平同震位移场和由日本岛陆地连续 GPS 获得的垂直同震位移场为约束, 反演日本 $M_w 9.0$ 地震断层上的滑动分布, 其中日本岛垂直位移场由美国 ARIA 研究组提供 (ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/usr/ARIA/AIRA_coseismic_offset.v0.3.table)。

反演采用 SDM 程序 (Wang *et al.*, 2011, 2013) 进行, 断层模型参考震中位置, 北端边界设定在 40°N , 上边缘沿日本以东的海沟展布, 深度至 60 km, 断层倾角在上边界设定为 7° 并随深度线性变化。反演时, 断层被离散为 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 的若干子断层, 滑动角约束在 $65^\circ \sim 115^\circ$ 变化, 分层介质模型参数与刁法启等 (2011) 一致, 取自 CRUST2.0。具体反演过程附加断层面上的应力平滑作为约束条件, 平滑因子根据模型粗糙度和数据拟合残差之间的折中曲线确定为 0.2。反演结

果如图 3 所示, 结果显示最大同震位错为 21.09 m, 位错以逆冲性滑动为主, 平均滑动角为 98.71° , 相应的矩震级 M_w 为 8.77, 这与刁法启等 (2011, 2012) 利用近场陆地同震位移约束反演获得的结果相近, 但滑动量和矩震级略有偏小, 这是由于近场形变观测的约束能力比远场形变观测的约束能力强造成的。

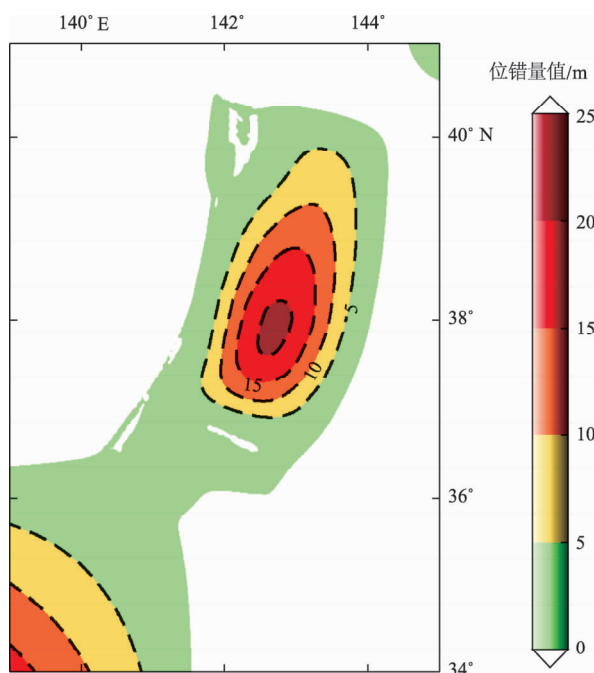


图 3 利用远场同震水平位移和近场垂直同震位移约束反演的位错分布

Fig. 3 Dislocation distribution inverted with the constraint of both far-field coseismic horizontal displacements and near-field coseismic vertical displacements

4 讨论与结论

本文利用我国东北和华北地区 1999—2017 年的流动 GPS 观测资料, 对比了利用坐标时序直接解算、附加连续 GPS 同震位移插值结果约束解算、附加位错模型模拟同震位移约束解算以及同时附加上述 2 种外部同震位移约束解算 4 种同震位移解算策略, 获取 2011 年日本 $M_w 9.0$ 地震在中国大陆引起的远场同震水平位移, 并利用获得的远场水平位移结合近场垂直位移对震中区的静态滑动分布进行了反演。研究结果表明:

(1) 直接通过流动 GPS 坐标时间序列解算获得

的远场同震位移能够显示局部的变形特征, 但由于观测间隔时间较长, 流动观测易受观测环境变化等偶然因素的影响, 且偶然影响引起的观测质量下降不易被有效识别, 直接解算的结果中难免含有一定程度的误差, 特别是对于华北等本身构造运动量级不大、人类活动丰富的地区。

(2) 附加可靠的外部约束条件, 可以有效改善流动 GPS 资料解算同震位移的精度, 如利用连续 GPS 同震位移插值结果约束和利用位错模型模拟同震位移结果约束等解算方案, 其中由于连续 GPS 解算的同震位移的精度较高, 4 种解算策略中, 有该资料参与约束的两种解算方案得到的同震位移结果相近、精度最高。解算结果显示 2011 年日本 $M_w 9.0$ 地震在我国东北和华北地区引起的同震变形以东向位移为主, 位移方向指向震中, 位移量值从 3 mm 到 33 mm 不等, 最大位移出现在辽宁和吉林东部地区。

(3) 远场同震形变可以有效地辅助震源区同震位错特征信息的获取, 但以远场形变约束为主的反演结果较以近场形变约束的反演结果的滑动量级和震级均较小, 本文反演的静态位错对应的矩阵级 M_w 为 8.77, 最大同震位错量为 21.09 m。

参考文献:

- 蔡华, 孙汉荣, 赵齐乐, 等. 2012. GPS 测定的 2011 年日本 9.0 级地震的中国大陆地区同震位移场[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 37(8): 953–955.
- 单新建, 屈春燕, 郭利民, 等. 2014. 基于 InSAR 与 GPS 观测的汶川同震垂直形变场的获取[J]. 地震地质, 36(3): 718–730.
- 刁法启, 熊熊, 倪四道, 等. 2011. 利用 GPS 位移反演日本 $M_w 9.0$ 仙台地震及 $M_w 7.9$ 强余震静态位错模型[J]. 科学通报, 56(24): 1999–2005.
- 刁法启, 熊熊, 郑勇. 2012. $M_w 9.0$ 日本 Tohoku 大地震静态位错模型: 陆地 GPS 资料和海底 GPS/Acoustic 资料联合反演的结果[J]. 科学通报, 57(18): 1676–1683.
- 国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组. 2008. GPS 测定的 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 级地震的同震位移场[J]. 中国科学: 地球科学, 38(10): 1195–1206.
- 郝明, 王庆良, 崔笃信, 等. 2012. 根据 GPS 和水准资料反演 2008 年汶川地震同震破裂模型[J]. 地震研究, 35(3): 323–329.
- 季灵运, 刘传金, 徐晶, 等. 2017. 九寨沟 $M_s 7.0$ 地震的 InSAR 观测及震构造分析[J]. 地球物理学报, 60(10): 4069–4082.
- 万永革, 王敏, 沈正康, 等. 2004. 利用 GPS 和水准测量资料反演 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震的同震滑动分布[J]. 地震地质, 26(3): 393–404.
- 王敏, 李强, 王凡, 等. 2011. 全球定位系统测定的 2011 年日本宫城 $M_w 9.0$ 地震远场同震位移[J]. 科学通报, 56(20): 1593

- 1596.
- 王敏, 张培震, 沈正康, 等. 2006. 全球定位系统(GPS)测定的印尼苏门达腊巨震的远场同震地表位移[J]. 科学通报, 51(3): 365 - 368.
- 杨国华, 朱爽, 梁洪宝, 等. 2015. 芦山 $M_s 7.0$ 级地震震前及同震地表形变[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 40(1): 121 - 127.
- 杨少敏, 聂兆生, 贾志革, 等. 2011. GPS 解算的日本 $M_w 9.0$ 级地震的远场同震地表位移[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 36(11): 1336 - 1339.
- 占伟, 武艳强, 梁洪宝, 等. 2015. GPS 观测结果反映的尼泊尔 $M_w 7.8$ 地震孕震特征[J]. 地球物理学报, 58(5): 1818 - 1826.
- Bletery Q, Sladen A, Delouis B, *et al.* 2015. A detailed source model for the $M_w 9.0$ Tohoku - Oki earthquake reconciling geodesy, seismology, and tsunami records[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 119(10): 7636 - 7653.
- Plafker G. 1965. Tectonic Deformation Associated with the 1964 Alaska Earthquake: The earthquake of 27 March 1964 resulted in observable crustal deformation of unprecedented areal extent[J]. Science, 148(3678): 1675 - 1687.
- Sun W, Okubo S, Fu G, *et al.* 2010. General formulations of global coseismic deformations caused by an arbitrary dislocation in a spherically symmetric earth model—applicable to deformed earth surface and space - fixed point[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 177(3): 817 - 833.
- Wang C, Ding X, Shan X, *et al.* 2012. Slip distribution of the 2011 Tohoku earthquake derived from joint inversion of GPS, InSAR and seafloor GPS/acoustic measurements[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 57(6): 128 - 136.
- Wang R, Schurr B, Milkereit C, *et al.* 2011. An Improved Automatic Scheme for Empirical Baseline Correction of Digital Strong - Motion Records[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 101(5): 2029 - 2044.
- Wang R, Parolai S, Ge M, *et al.* 2013. The 2011 $M_w 9.0$ Tohoku Earthquake: Comparison of GPS and Strong - Motion Data[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 103(2B): 1336 - 1347.
- Wang W, Sun W, Wu Y, *et al.* 2014. Modification of fault slip models of the $M_w 9.0$ Tohoku Earthquake by far field GPS observations[J]. Journal of Geodynamics, 75(4): 22 - 33.
- Wei S, Graves R, Helmberger D, *et al.* 2012. Sources of shaking and flooding during the Tohoku - Oki earthquake: A mixture of rupture styles[J]. Earth & Planetary Science Letters, 333 - 334(6): 91 - 100.
- Wu Y, Jiang Z, Liang H, *et al.* 2016. Coseismic deformations of the 2015 $M_w 7.8$ Gorkha earthquake and interseismic strain accumulation in the Himalayan tectonic belt and Tibetan plateau[J]. Tectonophysics, 670: 144 - 154.

Far - Field Coseismic Displacements Associated with the 2011 Tohoku - oki $M_w 9.0$ Earthquake, Japan, Observed by Campaign GPS Observation Data

ZHAO Jingyang, WU Yanqiang, LIANG Hongbao, DU Kaifu, SHI Shuangshuang
(The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China)

Abstract

The campaign GPS observations in the northeastern China from 1999 to 2017 are used to derive the far - field coseismic displacements of the 2011 Tohoku - oki $M_w 9.0$ earthquake, Japan. The strategies include direct calculation with the coordinate time series, constrained calculation with the interpolated coseismic displacements from continuous GPS observations, constrained calculation with the simulated coseismic displacements from dislocation model and constrained calculation with both the above two external data are compared. Then the best far - field coseismic horizontal displacements as well as the near field coseismic vertical displacements are used to invert the static dislocation model of the earthquake. The results show that when the campaign GPS data are used to inverse the coseismic displacements of small magnitude, using external reliable data as constraint is conducive to getting more satisfactory results. And the maximum far - field coseismic displacements in northeastern China can reach 33 mm and the dominated displacements is eastward. The resultant moment magnitude corresponding to the coseismic dislocation inversion is $M_w 8.77$ and the largest dislocation of this earthquake is 21.09 m.

Keywords: campaign GPS observation; constrained calculation; coseismic displacement; the Tohoku - oki $M_w 9.0$ earthquake