

顾国华, 王武星. 2020. 2016 年日本本州东岸近海 $M_s7.2$ 地震前后的地壳运动. 地震学报, 42(2): 196–204. doi: 10.11939/jass.20190096.

Gu G H, Wang W X. 2020. Crustal movements of the eastern Honshu offshore $M_s7.2$ earthquake in Japan in 2016. *Acta Seismologica Sinica*, 42(2): 196–204. doi: 10.11939/jass.20190096.

2016 年日本本州东岸近海 $M_s7.2$ 地震前后的地壳运动*

顾国华[†] 王武星

(中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所)

摘要 2016 年 11 月 22 日日本本州东岸近海发生东日本 $M_w9.0$ 大地震的 $M_s7.2$ 强余震. 本文利用美国内华达大学内华达大地测量实验室网站获得此次大地震周围共 30 多个 GPS 连续观测站及其它台站的 IGS08 全球参考框架坐标时间序列, 采用北京附近的 GPS 连续观测站 BJSH 作为区域位移参考框架的核心站, 获取了此次 $M_s7.2$ 强余震的同震水平位移和区域参考框架位移时间序列, 得到了此次强余震前后的位移时空变化图像. 结果显示: 尽管本州东岸近海 $M_s7.2$ 地震作为东日本 $M_w9.0$ 地震的强余震, 受其震后形变的影响强烈, 但其地壳水平形变的前兆规律与已观测到的大地震一致; 不同的是东日本 $M_w9.0$ 地震前的垂直位移无积累, 而本州东岸近海 $M_s7.2$ 地震前后的垂直位移保持 $M_w9.0$ 地震后均匀而缓慢的衰减变化; 临震前震中附近的 GPS 连续观测站的东西分量明显减速, 有的甚至减至零, 是明显的短期前兆异常. 此外, 本文还进一步讨论了两同震位移及其成因, 并推断地壳水平运动挤压是此次地震的成因.

关键词 GPS GNSS 地震前兆 2016 年日本本州东岸近海 $M_s7.2$ 强余震 同震位移
doi: 10.11939/jass.20190096 中图分类号: P228.4 文献标识码: A

Crustal movements of the eastern Honshu offshore $M_s7.2$ earthquake in Japan in 2016

Gu Guohua[†] Wang Wuxing

(Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China)

Abstract: In Japan, on November 22, 2016, occurred the eastern Honshu offshore $M_s7.2$ earthquake, which was the aftershock of the 2011 Tohoku $M_w9.0$ earthquake. Time series of coordinates of a large number of GPS stations in the world are available at the website of the Nevada Geodetic Laboratory of the Nevada University. Based on the time series of coordinates in the global reference frame of IGS08 at more than 30 stations of continuous GPS observations, downloaded from the website and with the station of continuous GPS observation BJSH near Beijing used as the core station in the regional reference frame, the coseismic displacements and time series of horizontal displacements before and after the earthquake are analyzed

* 基金项目 国家自然科学基金面上项目(41274098)、中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(2013IES0407)和中国地震局老专家科研基金资助.

收稿日期 2019-05-30 收到初稿, 2019-10-10 决定采用修改稿.

† 通信作者 e-mail: ggh@seis.ac.cn



in time and space. The results show, though the eastern Honshu offshore $M_S7.2$ earthquake, as the aftershock of the 2011 Tohoku $M_W9.0$ earthquake, was intensely affected by the postseismic crustal deformation of the main shock, the precursory horizontal deformations were in good agreement with those of other large earthquakes. The prominent feature of the Tohoku earthquake is that there was no significant preseismic vertical displacement accumulation, whereas the vertical displacements before and after the eastern Honshu offshore $M_S7.2$ earthquake show slow and uniform decaying as those after the main shock. Shortly before the earthquake, the stations of continuous GPS observations near the epicenter showed significant decrease in velocities or even zero as for the east component, which were short term precursory anomalies. Moreover, two types of coseismic displacements and their cause were discussed, and the horizontal compression in the crust was the cause of the aftershock.

Key words: GPS; GNSS; precursor to earthquake; 2016 eastern Honshu offshore $M_S7.2$ earthquake in Japan; coseismic displacement

引言

日本东侧受太平洋板块运动的挤压, 致使该地区大地震频发. 研究表明 2011 年 3 月 11 日东日本 $M_W9.0$ 巨大地震前后地壳运动涉及范围非常之广(Gu, Wang, 2011; 顾国华等, 2015), 震后地壳运动延续时间较长, 距震中越近的地区受其影响越大, 但位移量不断衰减. 东日本 $M_W9.0$ 巨大地震后, 除了随之发生的强余震, 还有 2016 年 4 月 16 日九州岛发生的 $M_S7.3$ 大地震, 该地震离东日本大地震震中约 1 200 km, 在时空上与东日本大地震关系较弱(顾国华, 2017; 顾国华, 王武星, 2017); 2016 年 11 月 22 日本州东岸近海发生 $M_S7.2$ 地震, 震中位置为(37°39'N, 141°38'E), 震源深度为 10 km, 日本气象厅确定其为 2011 年东日本 $M_W9.0$ 大地震的强余震, 距主震震中约 133 km, 受东日本大地震震后形变影响显著. 而此后 2018 年 9 月 6 日日本北海道地区发生 $M_S6.9$ 地震, 震中位置为(42°65'N, 142°00'E), 震源深度为 40 km, 距东日本 $M_W9.0$ 大地震震中 510 km, 距本州东岸近海 $M_S7.2$ 地震 590 km, 该地震被确定为独立主震.

日本 GPS 连续观测站分布密集且较为均匀, 存有自 2007 年以来甚至更早时期的 GPS 连续观测资料, 且多数观测站靠近大地震震中, 为大地震的地壳运动监测和地震预测研究, 包括强余震的地壳运动前兆研究, 积累了丰富的观测资料. 本文主要采用 Blewitt 等(2018)使用美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, 缩写为 JPL)研发的 GIPSY 软件处理得到的日本这次地震周围的 GPS 连续观测站及其它站的 IGS08 全球参考框架坐标时间序列(资料截至 2019 年 1 月中旬), 对 2016 年本州东岸近海 $M_S7.2$ 强余震前后的地壳运动进行深入分析.

1 GPS 数据处理与分析

运动或位移具有相对性, 利用大地测量自由网平差数学方法可给出不同的相对位移解, 但鉴于地壳运动为物理现象, 因此必须选取其中同时具有物理和构造运动意义的解. 多年来研究人员给出了许多不同的位移场解, 但部分解将数学上的最优作为选取标准, 缺乏具体的物理或构造运动意义. 全球参考框架除了满足几何定位的要求外, 还可用于研究全球板块运动, 而采用区域参考框架进行区域地壳运动研究可得到符合物理事实的运动或位移的基本要求. 在形变小的稳定区域选择区域参考框架的核心站(或称为基准)是分析地壳运动的关键(顾国华等, 2009; 顾国华, 2012; Blewitt *et al.*, 2013; Gu, Wang, 2013). 区域参考框架不仅

有利于分析大地震前的地壳运动异常, 还有利于显示同震水平位移是震前位移的(弹性)回跳, 是证明大地震存在地壳运动前兆的关键(Gu *et al*, 2011; 顾国华, 2012; Gu, Wang, 2013; 顾国华, 王武星, 2017).

由于日本陆地范围小, 且地壳运动复杂, 不可能像中国和美国那样, 在其本土通过选取长期稳定的核心站建立稳定的区域参考框架来研究区域地壳运动(Gu *et al*, 2011; Blewitt *et al*, 2013). 中国大陆东部是东亚地区地壳形变小且长期稳定的地区, 此区内可选多个 GPS 连续观测站作为位移区域参考框架的核心站, 其中包括北京附近的 BJSH 观测站. 此参考框架不仅适用于中国大陆位移场, 也适用于获取东亚位移场(顾国华等, 2009; Gu, Wang, 2013; 顾国华, 王武星, 2017). 然而, 由于美国内华达大学内华达大地测量实验室网站无更多中国大陆资料, 故取距此次地震震中 2 000 多千米的 BJSH 观测站作为此次地震位移参考框架的核心站, 该站的观测结果由中国地震局第一监测中心利用 GAMIT/GLOBK 软件处理, 不仅易于获取数据, 还符合对解的基本要求, 便于数据处理. 由于日本相对中国大陆的运动主要是水平平移, 取 BJSH 一个观测站作为核心站所得的位移场, 与多个观测站的结果十分一致, 其不足之处是位移的噪声水平有所增大, 可能会受此单站位移短期变化的影响, 但此位移参考框架不影响同震位移和位移的长期变化趋势, 因而不影响研究结论. 本文选取本州东岸近海 $M_s7.2$ 地震震中西侧陆地上的 30 多个 GPS 连续观测站资料, 其中距此次地震最近的连续观测站为 J203, 其震中距为 37 km. GPS 观测站和两次地震的分布如图 1 所示.

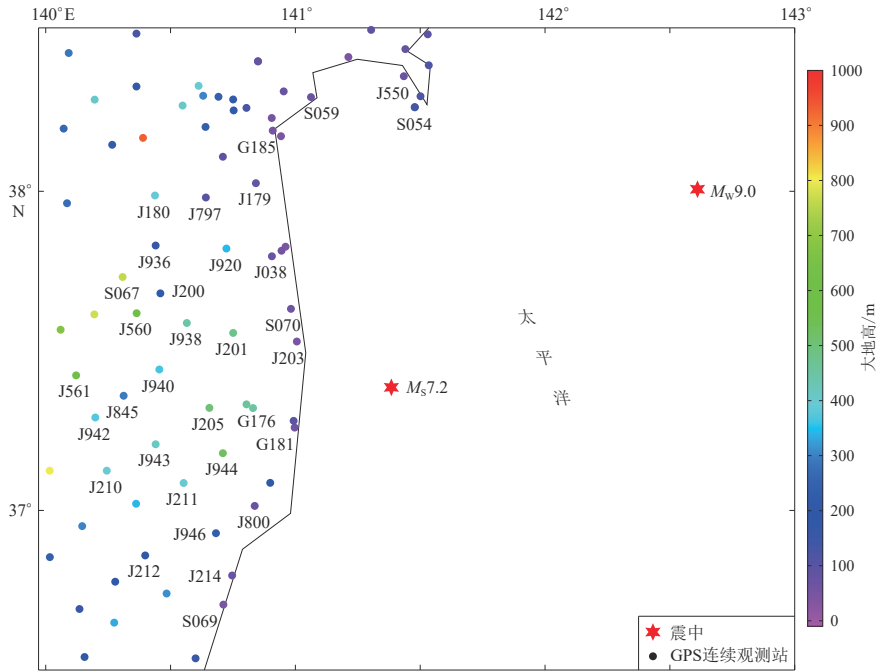


图 1 2016 年日本本州东岸近海 $M_s7.2$ 余震及其主震震中位置和附近 GPS 连续观测站分布

图中标有代码的观测站为本文计算所采用

Fig. 1 The eastern Honshu offshore $M_s7.2$ aftershock in 2016 and its main shock of $M_w9.0$ in 2011 in Japan as well as stations of continuous GPS observations near them
The stations marked with station codes are used in this study

2 本州东岸近海 $M_S7.2$ 大地震同震水平位移

同震形变是震源区地震断层破裂在其周围残留的地壳形变,是大地震特有的现象.同震位移是同震形变最基本的形式,早已被传统大地测量观测到,且可以通过数值模拟得到该大地震的震源机制. GPS 可大范围、准时且精准地观测得到大地震同震位移,最利于同震位移的观测研究. 本文利用全球参考框架的结果获得 2016 年日本本州东岸近海 $M_S7.2$ 余震的同震位移(图 2). 由于 BJSH 台站距离此次地震的震中较远,所获同震位移与以此站为核心站的区域参考框架无关(顾国华等, 2015). 同震水平位移是震前积累位移的(弹性)回跳,可根据同震水平位移图从整体上推断震前(积累的)水平位移的大致图像.

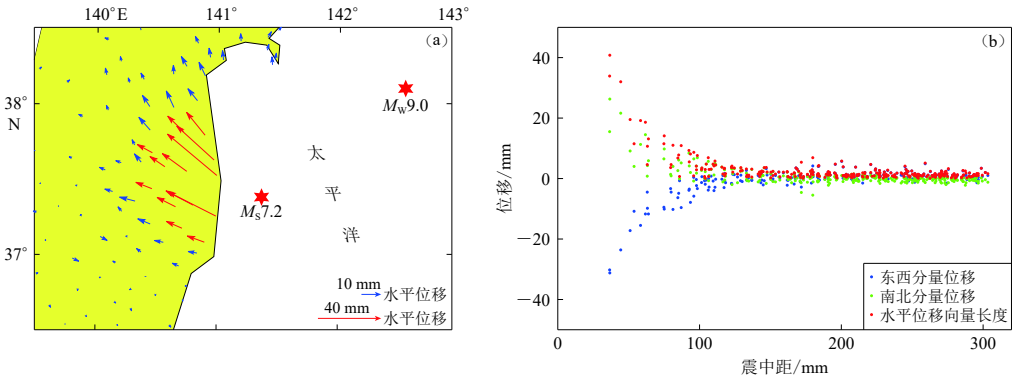


图 2 2016 年日本本州东岸近海 $M_S7.2$ 余震的同震水平位移(a)以及各位移分量和水平位移向量长度随震中距的衰减(b)

Fig. 2 Coseismic horizontal displacements for the eastern Honshu offshore $M_S7.2$ aftershock in 2016 (a) and the decaying of coseismic displacement components with the epicentral distances (b)

2016 年日本本州东岸近海 $M_S7.2$ 强余震陆上的同震位移以水平位移为主(图 2a), 幅度较大的同震水平位移几乎均为北西向拉张, 倾滑地震特征明显. 所有台站中, J203 站的震中距最小, 为 37 km, 测得的水平位移最大, 为 40 mm, 垂直位移仅为 -11 mm. J203 站的主震震中距为 154 km, 主震的同震水平位移达 3 181 mm, 垂直位移达 -525 mm. 东日本 $M_W9.0$ 地震的同震水平位移约为 40 mm 的 GPS 观测站, 距震中约 800 km. 主震与此强余震的影响范围差别巨大. 由图 2b 可以看出, 此次地震同震水平位移随震中距的衰减趋势与其它大地震相同.

3 本州东岸近海 $M_S7.2$ 大地震的位移时间序列与位移前兆

由于 GPS 可以对不同范围直至全球进行不同采样率的高精度连续观测, 由此得到大地震前后的地壳运动时空演变过程, 有助于研究成因、地震机制和预测.

包括此次地震在内的 GPS 连续观测结果表明, (远场)同震水平位移是前兆水平位移的弹性回跳, 因而同震水平位移是震后地震形变前兆研究的关键. 一类弹性回跳可直接从各站的水平位移时间序列看出, 即同震水平位移是震前积累水平位移相同量级的反向变化, 汶川 $M_S8.0$ 地震和东日本 $M_W9.0$ 大地震远场很多观测站的水平位移变化属于此种类型(Gu, Wang, 2011; Gu et al, 2011; 顾国华等, 2015; 顾国华, 王武星, 2017). 本文分析的此次本州东岸近海 $M_S7.2$ 地震周围 GPS 连续观测站得到的水平位移也属于此类.

2011 年东日本 $M_w9.0$ 大地震震后在本州东岸近海大地震周围产生的水平和垂直位移均非常强烈, 水平位移大幅度直线向东, 垂直位移为明显的匀速上升. 本州东岸近海 $M_s7.2$ 强余震所产生的幅度较大的同震水平位移几乎均为北西向(图 2), 而震前水平位移累积方向为东向或东南向, 地震前后变化幅度大的观测站的水平位移形态基本一致. 图 3 给出离此次震中 37 km, 离东日本大地震 154 km 的 GPS 观测站 J203 的水平位移向量时间序列图和位移分量时间序列图. 因变化太大, 图 3 未显示 J203 站观测所得东日本 $M_w9.0$ 大地震大幅度同震和震前水平位移. 其它观测站也有类似的变化, 不一一列举.

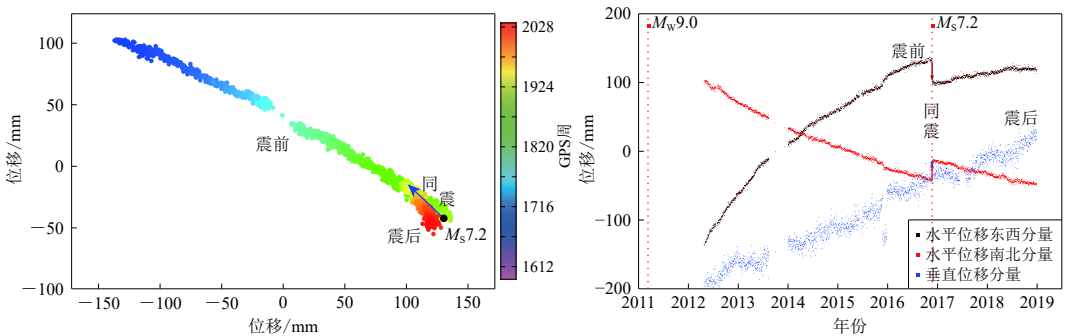


图 3 2016 年 11 月 22 日(1924GPS 周, 周二)本州东岸近海 $M_s7.2$ 强余震前后 GPS 观测站 J203 的水平位移向量时间序列(a)和位移分量时间序列(b)

Fig. 3 Time series of the horizontal displacement vectors (a) and three components displacement at the station J203 (37 km away from the epicenter) of continuous GPS observation before and after the eastern Honshu offshore $M_s7.2$ strong aftershock on November 22, 2016 (Tuesday of GPS week 1924)

图 4 为近本州东岸近海震中 8 个 GPS 连续观测站的位移分量时间序列, 未显示东日本 $M_w9.0$ 地震震前水平分量幅度过大的变化, 但可显示 7 个观测站垂直分量在 $M_w9.0$ 主震前后的变化. 图 4 中震前各观测站东西分量先快速向东移动, 临震 3 个月前开始同步减速, 甚至减至速率为零, 震前短期异常明显. 强余震改变了有的观测站 $M_w9.0$ 大地震震后东西向水平位移的方向.

为进一步说明同震位移的意义, 图 5 以东日本 $M_w9.0$ 大地震震后 GPS 连续观测站 TSKB 的观测结果为例(顾国华等, 2015), 给出同震水平位移的分解. GPS 台站对于多次大地震的连续观测(例如图 3, 5, 6)表明, 至少近震中的观测站, 震前水平位移几乎沿直线累积, 被称为(水平位移)累积方向或累积直线. 虽然同一地震不同观测站的累积直线方向有一定的差别, 但大方向基本一致, 显示了一定时期板块运动的稳定性. 同震水平位移可分解为沿累积直线方向的分量(简称为沿线分量)和与此累积直线正交的分量(简称为正交分量). GPS 观测(图 3, 4 和 6)表明, 震前没有与同震垂直位移方向相反的垂直位移积累, 也没有与同震水平位移正交分量方向相反的水平位移积累. 这与里德弹性回跳模型所预测的震前剪切形变不一致. 震时的剪切破裂, 包括地震断层倾滑破裂产生的垂直位移和走滑破裂产生的同震水平位移正交分量, 都是突跳或突变, 而只有同震水平位移的沿线分量为(弹性)回跳.

GPS 观测得到的地震前和同震垂直位移与水平位移的对比说明, 地壳水平运动的挤压是大地震的成因(顾国华等, 2015). GPS 观测表明, 震前积累的水平位移对震源区形成挤压, 最终导致地震断层倾滑剪切破裂及(或)水平走滑剪切破裂, 即地震. 随之, 挤压即刻消

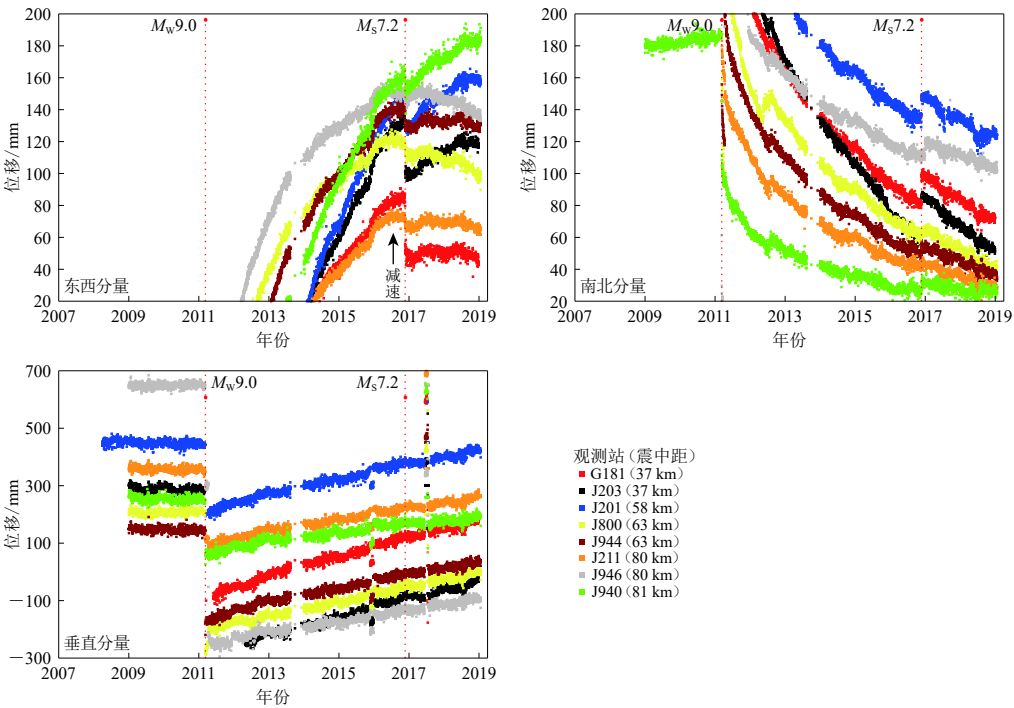


图 4 2016 年 11 月 22 日(1924GPS 周, 周二)本州东岸近海 $M_S7.2$ 强余震前后震中附近 8 个 GPS 连续观测站的位移三分量时间序列

Fig. 4 Time series of displacement components at eight stations of continuous GPS observations near the epicenter before and after the eastern Honshu offshore $M_S7.2$ aftershock on November 22, 2016 (Tuesday of GPS week 1924)

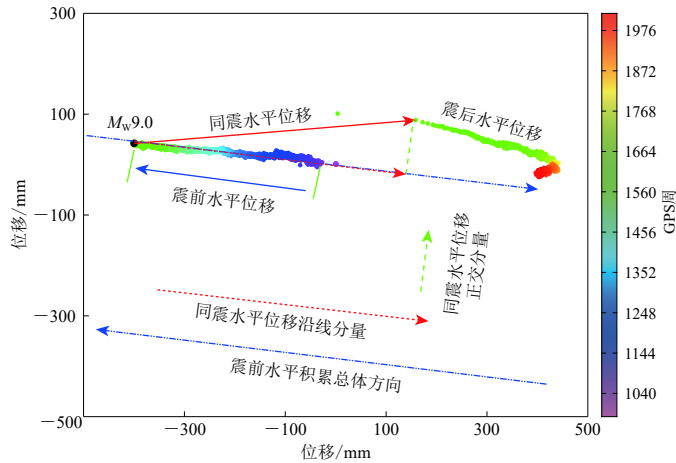


图 5 东日本 $M_W9.0$ 大地震前后 GPS 连续观测站 TSKB 记录到的同震水平位移的分解

Fig. 5 Decomposition of the coseismic horizontal displacement vector of the Tohoku $M_W9.0$ earthquake recorded at the continuous GPS observation station of TSKB in Japan

失, 挤压方向的地壳水平形变也随之消失, 震中产生大幅度的同震形变, 而周围其它地方的地壳形变部分或完全回复至地震孕育前的状态, 同震水平位移沿线分量是地壳形变状态恢

复的表现,是震前相应分量水平位移积累的(弹性)回跳. 2018 年夏威夷 $M_s6.9$ 地震前,在火山口附近,而非震中附近,观测到震前垂直位移积累,与此反向的同震垂直位移也是震前垂直位移的弹性回跳(顾国华,王武星,2019).

由图 4 可看到: $M_w9.0$ 主震前与此次强余震前的垂直位移对比更突出;几个距离东日本地震震中较近的观测站(还有更近的站),在 $M_w9.0$ 地震前较长一段时间,未见较为显著的垂直位移积累,而 $M_s7.2$ 强余震前后垂直位移在 $M_w9.0$ 主震后却一直保持均匀且显著的趋势变化,这表明此次强余震前震中附近的介质状态明显不同于主震.

如图 5 所示,走滑型地震的同震水平位移包括了上述的(弹性)回跳同震水平位移沿线分量和以突变出现的同震水平位移正交分量,此时同震水平位移不可能回复至累积直线完全相反的方向,而是有一定的方向差.

对于倾滑型地震,同震水平位移方向应与累积直线方向完全(或接近于完全)相反. 图 3 中 J203 观测站的水平位移是一例,图 6 为更典型的震例. 2015 年 4 月 25 日尼泊尔发生 $M_s8.1$ 逆冲断层地震,其震中位置为 $(28.2^\circ\text{N}, 84.7^\circ\text{E})$,震源深度为 20 km. 将距离震中约 3 000 km 的北京附近的 GPS 连续观测站 BJFS 作为核心站,得到位于震中以东 60 km 尼泊尔境内 GPS 连续观测站 CHLM 的水平位移向量时间序列图和三个位移分量的时间序列图,如图 6 所示. 可见 CHLM 观测站的同震水平位移与震前的水平位移方向完全相反,且几乎在同一直线上,震前却无明显的垂直位移积累,与上述仅有倾滑破裂的地震的同震水平位移特点一致. 位于震中东南 72 km 的 KKN4 站三个分量的变化与 CHLM 几乎完全一致.

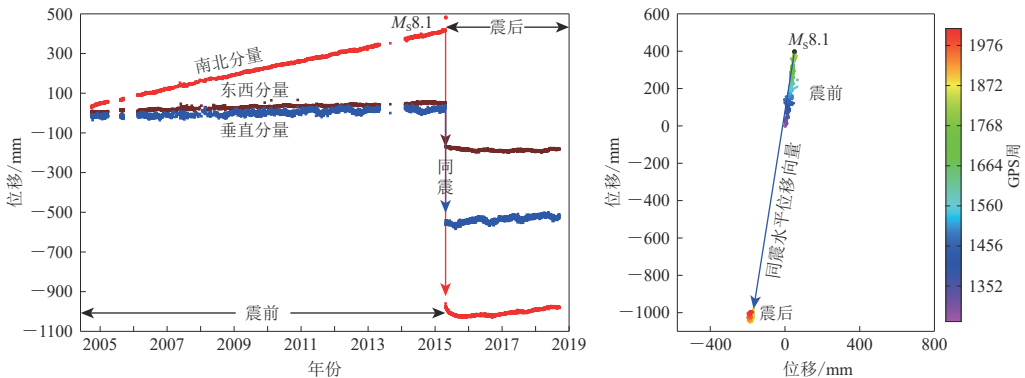


图 6 2015 年 4 月 25 日(1841GPS 周,周六)尼泊尔 $M_s8.1$ 地震前后距离震中 60 km 的 GPS 连续观测站 CHLM 位移三分量及同震水平位移向量时间序列

Fig. 6 Time series of displacement components and the horizontal displacement vector at the station CHLM of continuous GPS observation, 60 km away from the epicenter, before and after the Nepal earthquake of $M_s8.1$ on April 25, 2015 (Saturday of GPS week 1841)

本州东岸近海 $M_s7.2$ 地震是东日本大地震后地壳松弛向东南、水平位移局部受水平挤压而发生,这也是强余震的证据.

4 讨论与结论

2011 年东日本 $M_w9.0$ 大地震后,先后发生 2016 年 4 月九州岛 $M_s7.3$ 大地震、2016 年 11 月本州东岸近海 $M_s7.2$ (东日本大地震的强余震)和 2018 年北海道地区 $M_s6.9$ 地震等. 对

本州东岸近海 $M_s7.2$ 大地震前后 GPS 连续观测结果的分析, 有助于了解强余震的地壳形变特征. 震前的水平位移对比表明, 本州东岸近海 $M_s7.2$ 地震是东日本大地震震后松弛地壳向东南水平位移, 继而局部受挤压所致的强余震. 震前近震中各观测站东西分量先快速向东位移, 临震 3 个月前开始同步减速, 甚至减至速率为零, 震前短期异常明显.

为进一步分析同震位移特点和成因, GPS 连续观测得到的多次地震和本文此次地震同震位移观测时间序列表明, 至少最接近震中的 GPS 观测站震前水平位移沿直线累积, 可将同震水平位移分解为沿线分量和正交分量. 同震位移可分为两种: 一种为同震水平位移, 是震前沿直线方向累积并产生挤压的水平位移的(弹性)回跳; 另一种仅为震时的突变或突跳, 震前无相应的与同震位移方向相反的垂直或水平位移积累, 同震垂直位移和走滑型地震产生的同震水平位移正交分量均属此种同震位移. 本文给出的 2015 年 4 月 25 日尼泊尔 $M_s8.1$ 地震前后震中以东 60 km 的 GPS 连续观测站 CHLM 的水平位移向量图和三个位移分量时间序列图, 说明倾滑型地震前后的位移特征, 即同震水平位移与震前的水平位移方向完全相反, 震前无明显垂直位移积累.

多次大地震 GPS 连续观测表明, 在一定的范围或区域, 地震前后的地壳形变有(弹性)回跳现象, 且震时震中及其附近为剪切形变, 但大地震是震前地壳水平运动挤压造成的, 而不是震前剪切形变造成的, 因此作者将此(弹性)回跳模型称为压-剪模型.

本文所用 GPS 连续观测站坐标时间序列为 Geoffrey Blewitt 教授使用 GIPSY 软件处理所得, GPS 连续观测站 BJSH 的坐标时间序列为中国地震局第一监测中心利用 GAMIT/GLOBK 软件处理所得, 本文图件由 GMT 软件(Wessel, Smith, 1995)绘制, 评审人对本文进行了细心评审并提出了宝贵建议, 作者在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- 顾国华, 王武星, 孟国杰, 徐岳仁. 2009. GPS 测得的汶川大地震前后的地壳运动[J]. 武汉大学学报(信息科学版), **34**(11): 1336–1339.
- Gu G H, Wang W X, Meng G J, Xu Y R. 2009. Crustal movements before and after the Wenchuan earthquake as detected by GPS observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, **34**(11): 1336–1339 (in Chinese).
- 顾国华. 2012. GPS: 地震预测利器[M], 北京: 北京大学出版社: 130–150.
- Gu G H. 2012. *GPS: Useful Technique for Earthquake Prediction*[M], Beijing: Peking University Press: 130–150 (in Chinese).
- 顾国华, 王武星, 占伟, 梁洪宝, 朱爽. 2015. 东日本 $M_w9.0$ 大地震前、同震及震后地壳水平运动[J]. 武汉大学学报(信息科学版), **40**(12): 1669–1676.
- Gu G H, Wang W X, Zhan W, Liang H B, Zhu S. 2015. Preseismic, coseismic and postseismic horizontal crustal movements of the $M_w9.0$ Tohoku earthquake in Japan[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, **40**(12): 1669–1676 (in Chinese).
- 顾国华. 2017. 2016 年日本九州岛 7.3 级地震前及同震地壳运动[J]. 地震, **37**(3): 28–37.
- Gu G H, Wang W X. 2017. Preseismic and coseismic crustal movements of the $M7.3$ Kyushu earthquake on April 16, 2016 in Japan[J]. *Earthquake Research in China*, **31**(4): 589–600.
- 顾国华, 王武星. 2017. 2016 年新西兰 7.8 级大地震 GPS 观测结果与弹性回跳模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), **42**(11): 1673–1680.
- Gu G H, Wang W X. 2017. Results of GPS observations for $M7.8$ earthquake in 2016 in New Zealand and discussion on elastic rebound model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, **42**(11): 1673–1680 (in Chinese).
- 顾国华, 王武星. 2019. GPS 测得的 2018 年夏威夷 6.9 级地震与火山喷发地壳运动[J]. 武汉大学学报(信息科学版),

44(8): 1191–1197.

Gu G H, Wang W X. 2019. Crustal motions observed from GPS observations for the $M6.9$ earthquake in Hawaii and the eruption of the Kilauea volcano in 2018[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, **44**(8): 1191–1197 (in Chinese).

Blewitt G, Kreemer C, Hammond M C, Goldfarb J M. 2013. Terrestrial reference frame NA12 for crustal deformation studies in North America[J]. *J Geodyn*, **72**: 11–24.

Blewitt G, Hammond W C, Kreemer C. 2018. Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science[J/OL]. *EOS*, **99**. doi: 10.1029/2018EO104623.

Gu G H, Meng G J, Wang W X. 2011. Anomalous crustal movements before great Wenchuan earthquake observed by GPS[J]. *Geodesy Geodynam*, **2**(2): 13–22.

Gu G H, Wang W X. 2011. Far-field crustal movements before and after the 2011 $M_s9.0$ Japan earthquake from GPS observations[J]. *Geodesy Geodynam*, **2**(3): 1–7.

Gu G H, Wang W X. 2013. Advantages of GNSS in monitoring crustal deformation for detection of precursors to strong earthquakes[J]. *Positioning*, **4**: 11–19.

Wessel P, Smith W H F. 1995. New version of the generic mapping tools[J]. *EOS*, **76**(33): 329.