

顾国华. 2023. GNSS 测得的大地震前兆水平形变. 中国地震, 39(4):721~731.

GNSS 测得的大地震前兆水平形变

顾国华

中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

摘要 以 21 世纪全球各具特色且最典型的 6 次大地震, 尤其是巨大地震前后 GNSS 观测得到的地壳水平形变为重点, 回顾探寻前兆形变, 探索地震预测预报。6 次地震为: 2008 年汶川 8.0 级、2010 年智利 8.8 级、2011 年东日本 9.0 级、2015 年尼泊尔 8.1 级、2016 年日本九州岛 7.3 级地震及 2023 年土耳其 7.8 级双震。地壳形变是物理问题, 区域参考框架是利用 GNSS 连续观测研究前兆位物理问题的基本前提, 而同震水平位移是探寻前兆形变的关键现象。大震前震中及其附近既无明显的垂直位移积累, 也无明显的水平剪切位移积累。大地震震中及其附近前兆水平位移主要有两种形态, 水平位移达到峰值或为闭锁; 但近震中震前介质已非弹性, 仅远场介质为弹性。GNSS 观测结果表明震前震中主要为水平挤压, 震时产生剪切破裂, 这与岩石破裂实验结果一致, 因此“压-剪”(弹性)回跳模型符合 GNSS 观测结果, 但至今仅获得少数地震短临前兆形变观测结果。GNSS 依然是探索地震预测的主要观测手段, 但由于与地震断层破裂临界状态密切相关, 利用各种观测技术探索地震断层破裂的临界现象, 即地震短临前兆, 是突破地震短临预报的关键, 仍需要利用多学科各种观测技术。

关键词: 地震预测 GNSS GPS 地壳形变 同震水平位移

[文章编号] 1001-4683(2023)04-0721-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

目前, 地震预报仍是一大科学难题, 实现地震预报关键在于寻找地震前兆。地震前兆应与地震的发生有因果关系, 同一现象在不同震级地震前会重现, 应有定量的数理模型或定性的模型解释。

地壳运动或形变被普遍认为是地震的成因, 因而其是国内外地震预测最主要的观测项目之一。全球导航卫星系统 GNSS(Global Navigation Satellite System, 包括北斗和全球定位系统 GPS(Global Positioning System)等)是地壳形变的最佳观测技术, 全球主要震区已有不少多年观测的 GNSS 连续观测站。21 世纪初以来, 全球大地震活动极为活跃, 从 2004 年 12 月印度洋 9.3 级巨大地震, 到 2008 年汶川 8.0 级大地震, 再到 2023 年 2 月土耳其 7.8 级双震, 已造成多次巨大灾难。然而全球地震活跃期, 地震预报一再失败, GNSS 观测是否获得过大地震或至少获得过巨大地震的前兆形变, 直接关系地震预测探索实践工作, 理应认真研究总结。

[收稿日期] 2023-10-20 [修定日期] 2023-11-09

[项目类别] 中国地震局老专家科研基金(202305)资助

[作者简介] 顾国华, 男, 1944 年生, 研究员, 主要从事 GNSS 数据处理与地震预测研究。E-mail: ggh@seis.ac.cn

GNSS是目前唯一可在不同震级大地震前后连续、实时监测地壳形变的技术手段,可用高(精度高、采样率高、长期稳定性高)、大(大范围直至全球、观测值幅度大)、近(可于近震中观测)、快(快速、甚至实时处理)、低(低成本观测)五个字概括其技术优势(顾国华,2012;Gu et al,2013)。然而其不足是无法覆盖海洋,陆上观测站密度有限。定位根本上是数学问题,是多解的,由此得到的位移也是多解的。为获取前兆形变,特别是前兆位移,应从多解的GNSS观测中获取有物理或构造运动意义的地壳运动观测结果,须采用区域参考框架数据处理结果,作位移分析等(顾国华,2012;Gu et al,2013;Blewitt et al,2013)。

同震位移和地震波一样,也是地震特有的现象,是地震断层瞬间破裂时在其周围产生并残留的突变,可用位错模型作数值模拟(黄立人等,1982;Wang et al,2014;Kreemer et al,2006),是确凿的地壳形变。震级越大,形变范围越广,离震中越近,位移越大。至今只有GNSS连续观测可及时准确获得同震位移,是研究地震成因和震源机制的观测依据。同震位移是瞬间现象,当核心站远离震中时,同震位移结果不受参考框架影响。内华达大地测量实验室(NGL)网站^①(以下简称G网站)不仅给出全球参考框架的坐标时间序列,还可得到与序列中的同震位移突变相应时间发生的大地震和震中距等信息。

同震水平位移是利用GNSS观测得到的区域参考框架位移时间序列,分析大地震前兆地壳运动的关键现象。观测结果表明,GNSS观测到的震前地面水平位移与同震水平位移为因果关系,表明震前GNSS观测得到的地面形变即地壳形变,且是前兆地壳形变(顾国华等,2020)。

十多年来,笔者分析了全球60多次有GNSS观测的大震震例,观测时间最长达30多年,震级从5.8级至9.3级,几乎包括21世纪全部有GNSS观测资料的8级及以上大地震,涉及中国大陆、日本、智利、印尼苏门答腊近海、美国阿拉斯加州、夏威夷和加州、墨西哥、新西兰和土耳其等主要震区(顾国华等,2009a、2009b、2011、2015、2017、2019、2022、2023;Gu et al,2011a、2011b;顾国华,2023a、2023b)。其中,地震类型多,且受巨大地震影响的观测站数量多,观测站最远距震中数千千米,最近距震中不到一公里,得到了地震发生前后关键时期和地震震中及其附近关键区域的地壳形变观测结果,证明GNSS确实观测到了多种前兆(地壳)水平形变。此外,通过GNSS可观测短临电离层电子总含量(TEC)变化(Li et al,2009)。

本文仅选取21世纪初以来各具特色且最典型或最具代表性的6次大地震,尤其是巨大地震前后GNSS观测得到的地壳形变,探寻前兆形变,探索地震预测预报。6次大地震为:2008年汶川8.0级、2010年智利8.8级、2011年东日本9.0级、2015年尼泊尔8.1级、2016年日本九州岛7.3级地震及2023年土耳其7.8级双震。

1 汶川8.0级大地震——多种前兆形变

2008年5月12日(GPS周1479,周一)我国南北地震带上发生四川汶川8.0级大地震(31.0°N,103.4°E,震源深度14km)。

汶川大地震前就发现中国大陆西部GPS连续观测站DLHA、DXIN、XNIN和XIAA(Gu et al,2011a)水平位移SN分量有明显同步异常,同震水平位移与震前积累的水平位移反向,

^① <http://geodesy.unr.edu>

为确切的因果关系,证明有前兆形变。多个 GPS 连续观测站出现汶川大地震短临形变异常(顾国华等,2011)。GPS 观测还获得此次大地震前大范围电离层 TEC 短临异常(Li et al, 2009)。

中国地壳运动观测网络(一期)区域网 1000 个 GPS 观测站于 1999 年、2001 年(2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级地震前完成观测)、2004 年及 2007 年进行了 4 期 GPS 观测,自 2009 年起继续多期观测。汶川大地震震中周围区域网 GPS 观测站相当密集。自全球开展 GPS 观测以来,首次在 GPS 网内观测到 8 级地震前后的地壳运动(顾国华等,2009a、2009b; Gu et al, 2011a)。GPS 观测得到的 1999—2007 年水平位移(Gu et al, 2011a; 顾国华, 2023c)表明,汶川地震前中国大陆西部不断向震中水平挤压;最迟从 2008 年初起,震前震中附近一些 GPS 连续观测站未显现有明显的水平位移,即处于闭锁状态;震前震中区附近出现中国大陆唯一的大范围第一剪应变异常区(顾国华等,2009a),异常于 2004 年开始显现,此后范围逐渐扩大,至 2007 年第一剪应变异常区面积达近百万平方千米,涉及 300 多个 GPS 观测站,幅度逐渐增大,异常最大达 -9×10^{-7} 。区域网的水平位移和应变观测出现汶川大地震最为显著的前兆形变异常,第一剪应变的原始散点图显示结果的可靠性,而趋势面图突出异常的显著性。水平应变结果与参考框架无关,更利于分辨震前异常。2008 年汶川 8.0 级和 2011 年东日本 9.0 级地震同震水平位移大于 1mm 的范围半径 d 可由统计式(Herring et al, 2016)计算得到,即 $d = 2.5 \times 1.0^{-3} \times 5^M$ (单位:km)。两次地震前兆水平形变异常均在同震水平位移影响统计范围内或略超出计算范围。

2 智利 8.8 级与东日本 9.0 级巨大地震前兆形变——不同板块边界,相同峰值型前兆水平位移

环太平洋板块地震带东西两侧的智利和日本先后发生震级相近的 2 次巨大地震:2010 年 2 月 27 日(GPS 周 1572,周六)智利 8.8 级巨大地震($72.72^\circ\text{W}, 35.85^\circ\text{S}$,震源深度 35km)和 2011 年 3 月 11 日(GPS 周 1626,周五)东日本 9.0 级巨大地震($38.1^\circ\text{N}, 142.6^\circ\text{E}$,震源深度 20km)。

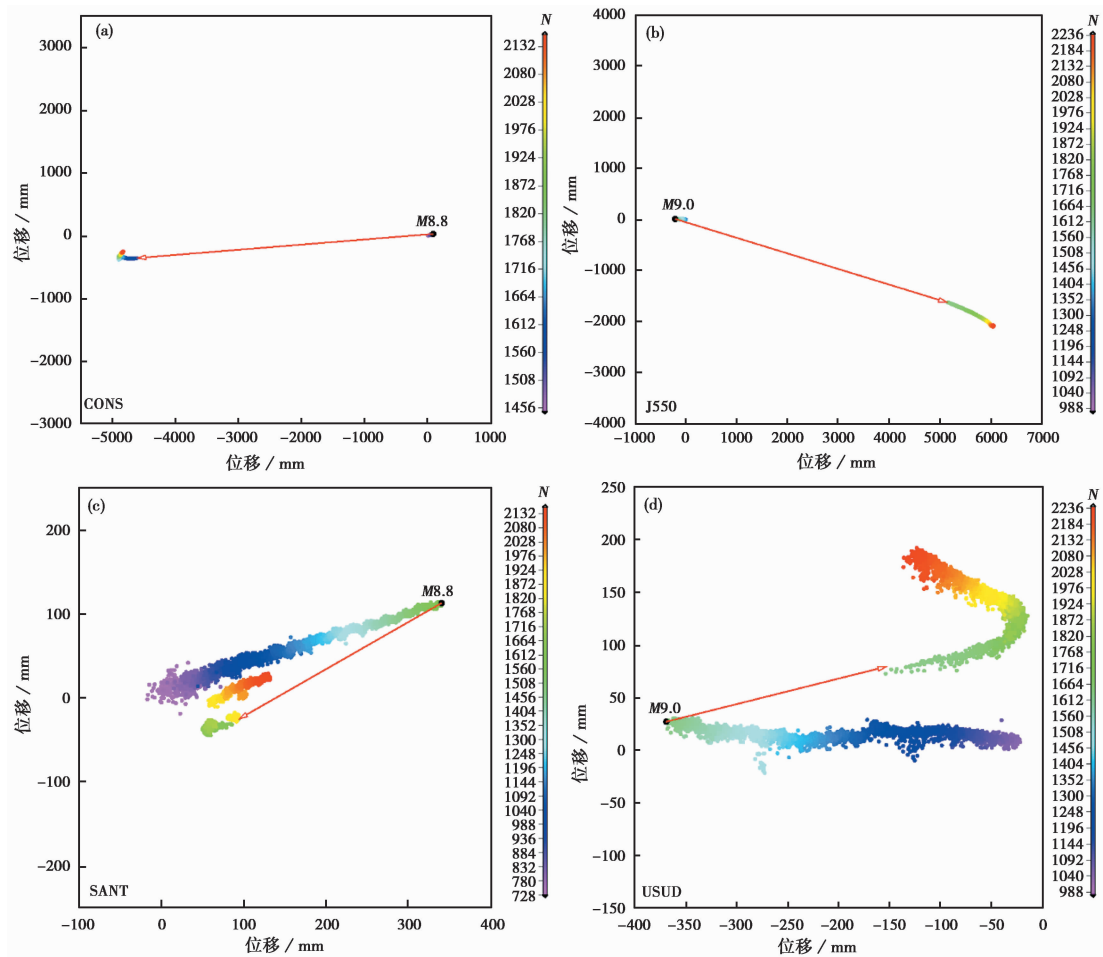
智利较早就有 GPS 连续观测,但站点密度较低;日本有 1200 多个 GPS 连续观测站。东日本大地震是全球开展 GPS 观测以来,地震前后 GPS 连续观测站数量最多、同震位移范围最广、近震中同震位移幅度最大的地震。

G 网站有南美洲 GPS 连续观测站南美板块参考框架(SA)的坐标或位移分量时间序列数据,可直接用于研究智利地震前后的地壳运动(顾国华等,2022)。采用位于中国大陆的 GPS 连续观测站作为核心站的区域参考框架,分析日本近海大地震前后的地壳运动(顾国华等,2020)。

利用智利 8.8 级大地震周围 39 个 GPS 连续观测站和日本 9.0 级大地震 1597 个 GPS 连续观测站的观测结果,获得了 2 次地震的同震水平位移(顾国华等,2015、2022),2 次地震同震水平位移方向均指向太平洋内部。比较中国大陆区域网 1999—2004 年水平位移(Gu et al, 2011a)、1999—2009 年水平位移(顾国华, 2023c)和 GPS 连续观测站的水平位移(顾国华等,2015)表明,日本、韩国和中国大陆东部,特别是东北部,9.0 级地震前水平位移向西的趋势未变。日本 9.0 级大地震同震水平位移(顾国华等,2015)与 1999—2009 年水平位移

(顾国华, 2023c) 和 GPS 连续观测站的水平位移(顾国华等, 2015)对比显示, 日本、韩国和中国大陆东部, 特别是东北部的同震水平位移是震前水平位移的反向突变, 是弹性回跳或回跳。东日本大地震同震垂直位移明显小于水平位移, 且范围也小得多(顾国华, 2023c), 下述 J550 站即为一例。

图 1 为智利 8.8 级和东日本 9.0 级大地震各 2 个 GPS 连续观测站的水平位移向量时间序列。水平位移向量时间序列图直观显示观测站水平位移曲线平面轨迹, 用 GPS 周色码表示水平位移向量各点的日期。GPS 还采用连续计数的周数表示日期, 也便于绘图中用色码表示位移点对应的日期。图 1 中红色箭头为同震水平位移, 标有震级的点为地震日期, 此日期前的点为震前位移, 箭头后的点为震后位移。



注: 各图右侧为用 GPS 周 N 表示水平位移向量日期的色码。

图 1 2010 年智利 8.8 级和 2011 年东日本 9.0 级大地震各 2 个 GPS 连续观测站的水平位移向量时间序列

CONS 站距智利 8.8 级地震 64km, 是距此地震最近的站点, 其同震水平位移最大, 达 4713mm, 是 GPS 观测到的全球第二大同震水平位移; SANT 站距智利 8.8 级地震 353km, 同震水平位移 283.0mm。J550 站距东日本 9.0 级大地震最近, 震中距为 98km, 同震水平位移

最大,达 5623.9mm,是 GPS 观测到的全球第一大同震水平位移,垂直位移达 -1093.4mm; USUD 站距东日本 9.0 级大地震震中 435km,同震水平位移 221.6mm,同震垂直位移仅 -17.0mm。显然,4 个站的同震水平位移与各站震前累积水平位移的方向相反。CONS 站与 J550 站距震中较近,观测结果相似,同震水平位移显著大于震前观测到的累积水平位移量,是震前累积的水平位移的回跳。SANT 站与 USUD 站距震中较远,观测结果也相似,同震水平位移是震前累积的水平位移的弹性回跳。2 次地震前,震中附近水平位移达到峰值,称之为峰值型前兆水平位移。

图 2(a)为距东日本地震较远的 5 个站点的水平位移东西分量时间序列,由图可见同震水平位移是震前积累的水平位移的反向突变,为弹性回跳。其中 YANC 站距震中达 3043km,在 9.0 级地震同震水平位移影响范围内,也在 3 年前汶川 8.0 级地震同震水平位移影响的边界。震前已发现 YANC 等站的异常,东日本大地震的前兆形变范围大是观测事实。

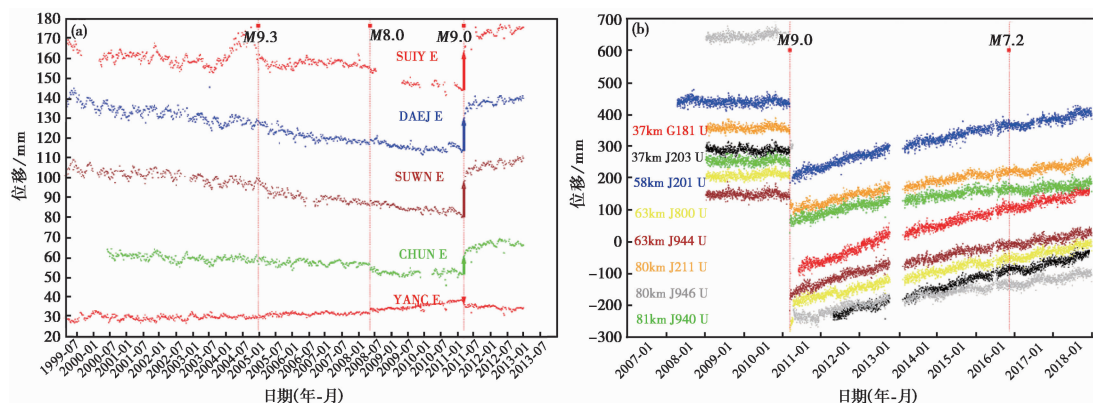


图 2 东日本 9.0 级地震远场水平位移东西分量 E(a)和近场垂直位移 U(b)时间序列

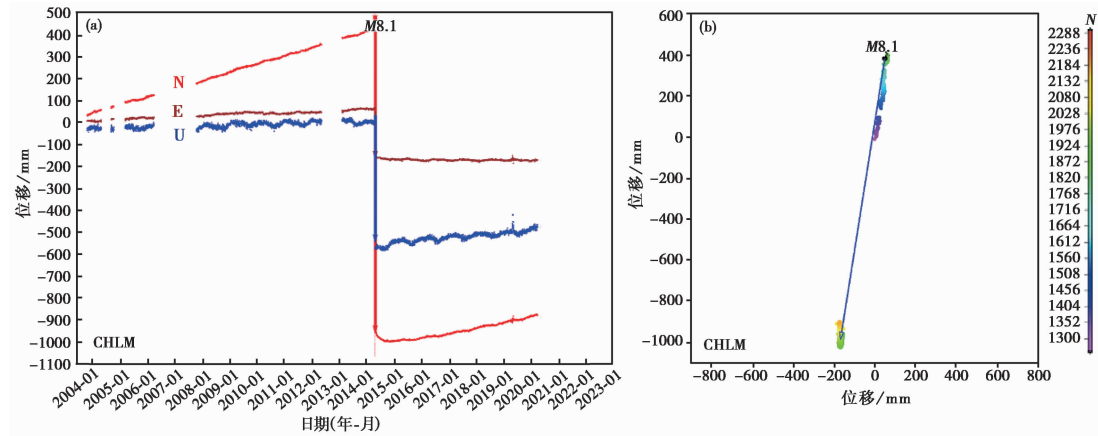
图 2(b)为区域参考框架下东日本大地震震前 GPS 连续观测获得的近场垂直位移时间序列。东日本大地震前 GPS 观测获得的近场垂直位移无明显积累,这是此次地震震前地壳形变最突出的特点之一。因东日本 9.0 级地震的震后松弛位移,2016 年 11 月 22 日本州东岸近海 7.2 级强余震前的垂直位移比 9.0 级主震震前要显著得多,更突出主震前震中及其附近无垂直位移积累。其他大地震前震中及其附近的 GPS 观测站也无明显的垂直位移积累,同震垂直位移也就无所谓回跳或弹性回跳,而仅是突变。还需指出,由于区域和全球参考框架垂直位移差别小,即使是全球参考框架中的结果也如此。

智利与东日本 2 次大地震前震中周围的水平位移显示太平洋海底扩张。2 次巨大地震震中附近,震后地壳运动十分显著且持续时间长,水平位移平面曲线有多种形态,与震前水平位移区别显著(顾国华等,2022)。

3 尼泊尔 8.1 级大地震前后水平位移时间序列图像

2015 年 4 月 25 日(GPS 周 1841,周六)尼泊尔发生 8.1 级逆冲断层地震(28.2°N, 84.7°E,震源深度 20km)。尼泊尔的 GPS 连续观测站 CHLM 距震中最近,在震中东 60km,观测数据连续性好,同震水平位移达 1409.0mm(图 3(b)蓝色箭头),同震垂直位移为下沉

-586.9mm。CHLM 站的同震水平位移与震前积累的水平位移方向完全相反,且几乎重合于同一直线,完美地显示了逆冲断层地震同震水平位移为震前水平位移积累的回跳(顾国华等,2020)。此外,震中东南 72km 的 KKN4 站水平位移时间序列与 CHLM 站结果相似。震前近震中的 GPS 连续观测站未观测到明显的垂直位移积累。



注:图右侧为用 GPS 周 N 表示水平位移向量日期的色码。

图3 尼泊尔 8.1 级地震 CHLM 站的位移分量时间序列(a)和水平位移向量时间序列(b)

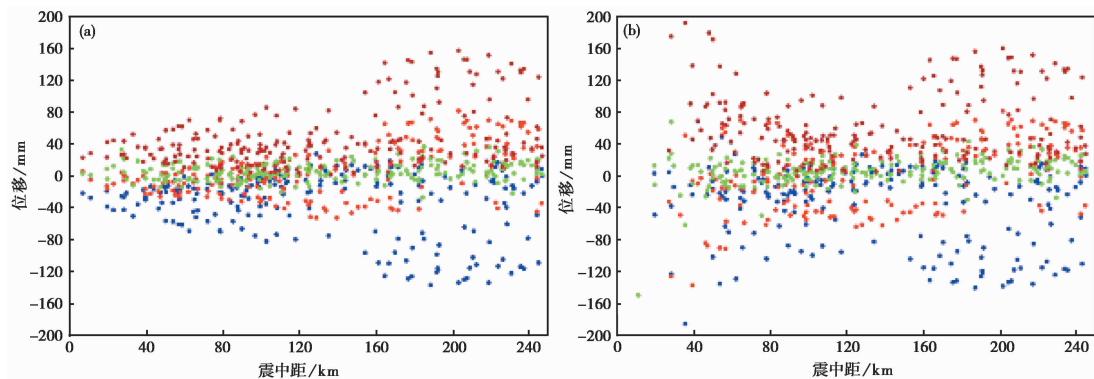
4 2016 年日本九州岛 7.3 级地震——震中前兆水平位移闭锁

2016 年 4 月 16 日(GPS 周 1892,周六)日本九州岛发生 7.3 级大地震(32.75°N , 130.80°E),距 2011 年东日本 9.0 级大地震有 5 年多的时间,2 次地震震中相距 1200km,在时空上九州岛大地震与东日本大地震关系已弱。九州岛地震震中周围有相当密集的 GPS 连续观测站,其中 G071 站震中距仅 6.6km, J701 站震中距为 23km。2012 年 4 月—2016 年 4 月震前区域参考框架下震中及其附近的水平位移变化小,处于闭锁状态(Gu et al, 2017),震中西侧比较稳定。在震中 200km 范围内水平构造运动总体向东增大(图 4(a)),或者说靠近震中位移亏量增大,但在 200km 外出现转折。同震水平位移则相反,远场同震位移使震中以东地区的地壳水平运动趋于均匀(图 4(b))。近场同震水平位移变化依然特殊,水平位移大,而垂直位移明显小于水平位移(Gu et al, 2017)。近震中的 G071 和 J701 站同震水平位移幅度大且方向相反(Gu et al, 2017),有非常典型的走滑型地震的特征,但震前这 2 个站点无相反方向的水平位移积累,与里德弹性回跳假说不一致。

九州岛大地震的 GPS 观测资料说明,同震水平位移使得观测站恢复到周围其他站震前的水平构造运动水平(Gu et al, 2017),表现为空间上弹性回跳。

5 土耳其 7.8 级双震——2 种前兆水平位移同现

2023 年 2 月 6 日(GPS 周 2248,周一)土耳其双震(37.15°N , 36.95°E ,震源深度 20km; 38.00°N , 37.15°E ,震源深度 20km)有如下特点:地震发生在构造复杂的阿纳托利亚板块、阿拉伯板块和非洲板块交界处;2 次地震相隔约 9h,相距 96km,只有 GPS 可分别观测到这 2 次地震的同震位移及其综合同震位移;地震断层均为近直立走滑断层;2 次地震震中附近分别出现上



注: 蓝色圆点为东西分量 E, 红色圆点为南北分量 N, 绿色圆点为垂直分量 U, 棕色圆点为水平位移向量 D。

图 4 日本九州岛大地震震前水平和垂直位移随震中距的变化(a) 以及震后震中 30km 以外位移随震中距的变化(b)

述震例所显现的水平位移峰值和闭锁 2 种不同方式的前兆水平位移(顾国华, 2023b)。

土耳其有部分 GPS 观测站于 2015 年 10 月后观测中断或未观测, 2022 年 9 月初部分站点开始了连续观测。其中, EKZ1 站距第 2 次地震震中仅 4km(或 7km), 是目前全球距如此大地震震中最近的 GPS 连续观测站, 其同震水平位移量达 4.4m, 次于上述智利 8.8 级和日本 9.0 级地震的同震水平位移。

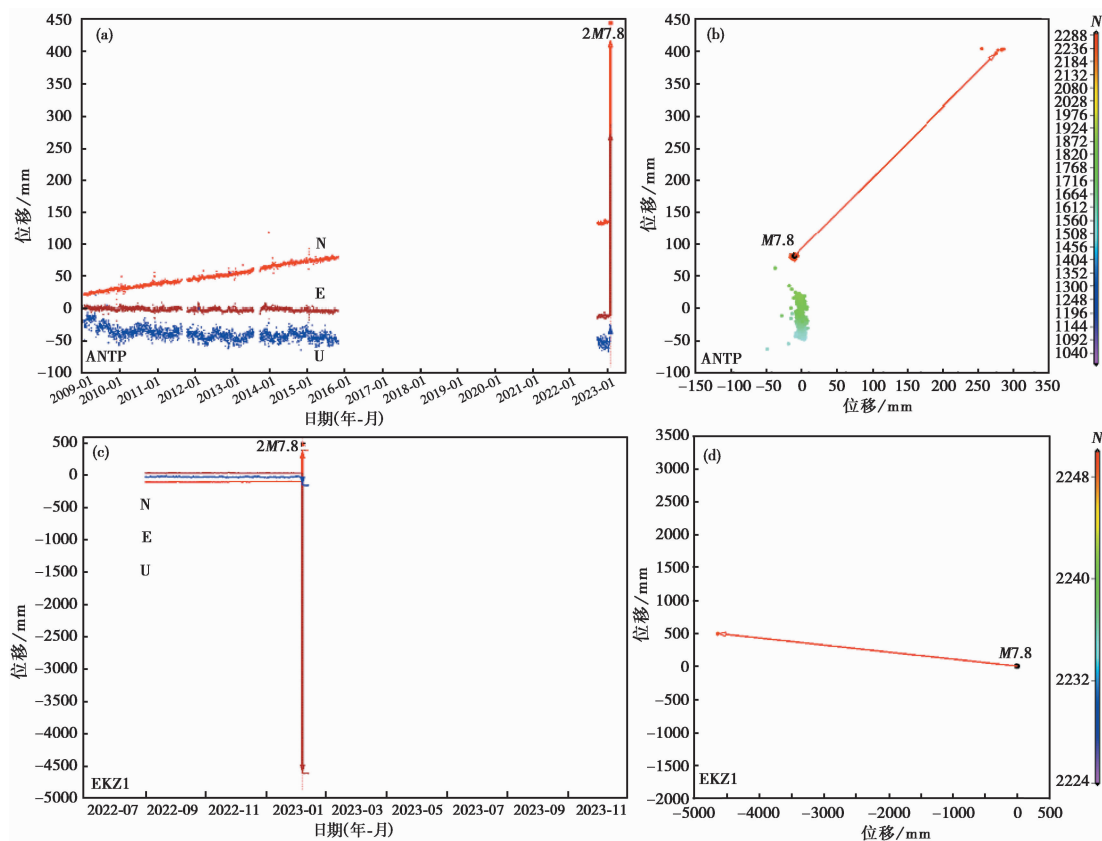
2 次地震的同震垂直位移均显著小于同震水平位移, 震后垂直位移幅度小, 突显近直立断层走滑型地震的特征。部分站点 2 次地震的同震垂直位移量值相近, 而方向相反, 同震垂直位移较大的站点此现象更显著, 表明 2 次地震的地壳垂直运动有一定的相互影响。

图 5 为 2 个 GPS 连续观测站欧亚参考框架下的每日解位移时间序列, 该图仅显示 2 次地震同震位移的综合影响。其中, ANTP 站和 EKZ1 站分别为距第一次和第二次地震震中最近的 GPS 连续观测站, ANTP 站距第一次地震最近, 仅为 39km。

由图可见, ANTP 站的水平位移分量和向量的时间序列与不少站大地震前后的变化一致, 即震前几乎沿直线水平位移, 达到最大值后出现大幅度同震水平位移, 且至少有一个分量的方向与震前相反, 前兆水平位移也是峰值型。此站东西向反向明显, 在位移时间序列中为显著的回跳现象(顾国华, 2023b)。与其他具有走滑运动的地震一样, 近震中同震水平位移一般与震前水平位移不重合于一条直线上或在同一方向。ANTP 站附近的其他站点均有类似现象, 且距震中稍远, 同震水平位移为弹性回跳。

尽管震前观测时间短, 但 EKZ1 站震前水平位移的特征仍非常明显, 即水平位移几乎不变, 或水平位移闭锁, 且东西分量 E 最为突出。2013 年四川芦山 7.0 级地震(顾国华等, 2020)和上述 2016 年日本九州岛 7.3 级地震等震前震中附近出现水平位移闭锁, 这些地震的同震水平位移显现为空间上(近震中)回跳或(远离震中)弹性回跳。EKZ1 站的同震水平位移使该站恢复到与临近站构造运动相同方向, 极大地弥补了该站震前水平构造运动量的亏缺。越近震中的站, 震前水平位移亏缺量越大。

GPS 首次观测到双震前震中附近水平位移出现峰值或闭锁这 2 种不同且极端的前兆现象。震前 2 种前兆区域同震水平位移是震前水平位移在时间或空间上的(弹性)回跳。因



注：(a)、(c)为水平位移东西E、南北N与垂直U分量时间序列，图中标出了有明显同震位移的地震震级；
(b)、(d)为水平位移向量时间序列，图右侧为用GPS周N表示水平位移向量日期的色码。

图5 土耳其双震2个GPS连续观测站位移分量和水平位移向量时间序列图

此,土耳其双震前是有前兆形变的,但因观测时空分布的不足,震前判别异常比其他区域难度更大。

MLY1等站2次地震同震水平位移均相当明显,同一站位移量与方向相近,南北分量N同震水平位移与震前水平位移方向相反,表明2次地震的孕育区不仅在上述站重合,且对2次地震影响相近,均受到非洲板块和阿拉伯板块向北挤压的共同影响。

2次地震震前震中附近的GPS站均无明显的垂直位移积累,同震垂直位移仅是突跳,而不是(弹性)回跳。

2次地震发生在东安纳托利断层带的两侧。GPS观测表明,2次地震的孕震模式差别明显,东安纳托利断层带南侧的站震前强烈水平运动持续,但在东北侧,运动受阻,水平位移闭锁,板块间强烈的水平碰撞最终导致2次地震的发生。

6 结论与讨论

21世纪60多次大或巨大地震的GPS观测结果表明,大地震的发生是板块运动的结果。导致预报失败的主要原因是缺乏对震前特殊地壳运动方式的认识,因而未能发挥GNSS在

地震预测中的作用。多次震例表明大地震前后地壳运动的特点主要为:

(1)同震位移是地震特有且确凿的地壳形变,同震水平位移是震前水平位移积累或闭锁在时空上的(弹性)回跳,震前水平位移积累或闭锁及同震水平位移与地震为因果关系,因此,同震水平位移是认识地震前兆水平形变的关键现象,大地震是有前兆地壳水平形变的。

(2)除某些震区的特殊部位(如 2016 年夏威夷 6.9 级地震火山口附近等(顾国华等, 2019))外,大地震前震中及其附近没有与同震垂直位移相反方向明显的垂直位移积累,这与全球垂直位移速率普遍较低是相对应的;走滑地震前也没有与同震走滑水平位移方向相反的水平位移积累,特别是在近地震断层两侧的观测站震前无相反方向的水平位移积累。可见,尽管同震位移各分量均为地震断层破裂产生的突跳或突变,但同震位移(弹性)回跳仅发生在产生挤压的水平位移积累方向。震前震中及其附近的介质已处于非弹性状态。

(3)岩石破裂实验表明,岩石破裂是受压产生的剪切破裂。根据 GPS 观测得到的这些现象和岩石破裂实验结果,“压-剪”(弹性回跳)模型符合 GNSS 观测结果(顾国华等,2017)。此模型说明,震前震中及其附近的形变主要为水平位移积累而呈现的水平挤压(也许还包括拉张,但未见震例),地震是水平挤压造成的剪切破裂,由此产生的(弹性)回跳主要发生在震前的水平挤压方向。同震形变以剪切形变为主,但震中及其附近,震前既无垂直位移积累,也无水平剪切位移积累。大量 GNSS 观测结果充分说明,不管何种类型的大地震前震中及其附近无里德弹性回跳假说所预言的剪切位移。

(4)前兆形变范围、幅度和持续时间与震级有关,震级越大,前兆形变范围越大,持续时间也越长,而近震中的水平形变幅度越大或近为 0,且与外围区域正常构造运动差别越大。利用同震水平位移的影响范围,可估计前兆形变范围。

(5)前兆形变幅度分布或形态(如震前震中水平位移闭锁或达峰值等)与地震发生的区域有关,也与震中距有关。越远离震中,形变越接近弹性,越临近地震的发生,越靠近震中,形变越偏离弹性。

(6)大地震的短临前兆是突破地震短临预报关键一环。在有与震级相应的密集 GNSS 观测站时,震前可发现中短期前兆形变异常,但至今仅观测到少数大地震的短临前兆形变。震前的断层预滑、预位移和应变异常区剪应变积累最大值,或有助于短临预测。震前地震断层破裂临界状态是突破短临预报的研究难点,需多学科综合观测研究,探寻地震短临前兆。

(7)GPS 观测表明,有些地区时空相近的大地震前后地壳运动有复杂的相互影响,由此也增加地震预测的难度。

(8)位错模型虽已成功应用于研究同震位移,但若用于震前观测数据反演,作地震预测,须研究震前水平挤压是如何转变到震时剪切破裂,以及震中介质的非弹性特征等;对于多个地震前后地壳运动有相互影响时,同震位移的模拟比以往采用的模型更复杂。

(9)大地震后震中及其附近会出现因软流圈粘弹性介质流变特性产生的指数衰减松弛现象,震级越大此种震后形变持续时间越长、影响范围也越大,可用粘弹性位错模型模拟;巨大地震后水平位移平面曲线有多种形态,比震前水平位移积累复杂。

GNSS 观测不断获得与地震发生有关的地壳运动新信息,不但证明 GNSS 是地震预测的利器,也证明 GNSS 是地震监测利器,是地球科学特别是地震学的基础观测设施。尽管已经获得了大地震的(某些)前兆地壳运动信息,但开展地震预测还必须有符合要求的观测网。

预测 7 级以上的大地震,GNSS 连续观测站必须有相当高的密度。

致谢: 本文采用 Geoffrey Blewitt 教授用 GIPSY 软件处理的大量 GPS 连续观测站坐标时间序列 (Blewitt et al,2018),并使用 GMT 软件绘图 (Wessel et al,1995),在此一并感谢。

参考文献

- 顾国华. 2012. GPS-地震预测利器. 见:科学与中国——十年辉煌光耀神州(10集)-气候与灾害科学技术卷. 北京:北京大学出版社,130~150.
- 顾国华. 2023a. 青海玛多 7.4 级和门源 6.9 级地震 GPS 观测结果. 见:地震预测咨询委集刊(2022). 北京:地震出版社,23~32.
- 顾国华. 2023b. GPS 观测得的 2023 年 2 月土耳其双震前后的地壳形变. 地球科学前沿,13(6):636~644.
- 顾国华. 2023c. GNSS 精密定位与地震预测研究. 北京:中国科学文化音像出版社有限公司.
- 顾国华,孟国杰,方颖. 2011. 汶川大地震前后 GPS 观测的精密单历元解得到的震区地壳运动. 地震学报,33(3):319~326.
- 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. 武汉大学学报·信息科学版,42(11):1673~1680.
- 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. 武汉大学学报·信息科学版,44(8):1191~1197,1204.
- 顾国华,王武星. 2020. GPS 观测得到的大地震前兆地壳形变震例. 地震科学进展,50(10):30~39.
- 顾国华,王武星. 2022. GPS 观测到的智利及其邻区多次大地震前后地壳运动. 地震科学进展,52(5):222~231.
- 顾国华,王武星. 2023. GPS 观测到的 2004 年印度洋 9.3 级等大地震前后地壳运动. 地震科学进展,53(9):437~448.
- 顾国华,王武星,孟国杰,等. 2009a. GPS 测得的汶川大地震前后的地壳运动. 武汉大学学报·信息科学版,34(11):1336~1339,1349.
- 顾国华,王武星,徐岳仁,等. 2009b. 区域网 GPS 观测得到的 2008 年汶川 M_s 8.0 地震前的地壳水平运动. 地震学报,31(6):597~605.
- 顾国华,王武星,占伟,等. 2015. 东日本 M_w 9.0 大地震前、同震及震后地壳水平运动. 武汉大学学报·信息科学版,40(12):1669~1676.
- 黄立人,顾国华. 1982. 静力位错理论. 北京:地震出版社.
- Blewitt G,Hammond W C,Kreemer C. 2018. Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science. Eos,99.
- Blewitt G,Kreemer C,Hammond W C, et al. 2013. Terrestrial reference frame NA12 for crustal deformation studies in North America. J Geodyn,72:11~24.
- Gu G H,Meng G J,Wang W X. 2011a. Anomalous crustal movements before great Wenchuan earthquake observed by GPS. Geod Geodyn,2(2):13~22.
- Gu G H,Wang W X. 2011b. Far-field Crustal Movements before and after the 2011 M_s 9.0 Japan Earthquake from GPS Observations. Geod Geodyn,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. Positioning,4(1):11~19.
- Gu G H,Wang W X. 2017. Preseismic and coseismic crustal movements of the $M7.3$ Kyushu earthquake on April 16,2016 in Japan. Earthq Res China,31(4):589~600.
- Herring T A,Melbourne T I,Murray M H, et al. 2016. Plate Boundary Observatory and related networks:GPS data analysis methods and geodetic products. Rev Geophys,54(4):759~808.
- Kreemer C,Blewitt G,Hammond W C, et al. 2006. Global deformation from the great 2004 Sumatra-Andaman earthquake observed by GPS:Implications for rupture process and global reference frame. Earth Planets Space,58(2):141~148.
- Li J Y,Meng G J,Wang M, et al. 2009. Investigation of ionospheric TEC changes related to the 2008 Wenchuan earthquake based on statistic analysis and signal detection. Earthq Sci,22(5):545~553.
- Wang W X,Sun W K,Wu Y Q, et al. 2014. Modification of fault slip models of the M_w 9.0 Tohoku Earthquake by far field GPS

observations. *J Geodyn*, **75**: 22~33.

Wessel P, Smith W H F. 1995. New version of the generic mapping tools released. *EOS, Trans Amer Geophys Union*, **76**(33):329.

Horizontal Deformations Detected by GNSS Observations as Precursory to Large Earthquakes

Gu Guohua

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

Abstract The paper focuses on the horizontal deformations detected by the GNSS measurement before and after 6 typical large earthquakes of particular characteristics, particularly huge earthquakes, to explore crustal deformations precursory to earthquakes for the purpose of earthquake forecasting. They are the Wenchuan earthquake of $M8.0$, the earthquake of $M8.8$ in Chile, the Tohoku earthquake of $M9.0$ in Japan, the $M8.1$ earthquake in Nepal, the 2016 $M7.3$ Kyushu earthquake and the doublet earthquakes of both $M7.8$ in 2023 in Turkiye. The regional reference frames are used in studies on the crustal deformations precursory to earthquakes to keep alignment for the requirement. And the coseismic horizontal displacements are the key phenomenon in exploring crustal deformations precursory to earthquakes. No accumulations of vertical and horizontal shear displacements were detected at or near the epicenters. There have been two patterns of precursory horizontal displacements at and near the epicenters of large earthquakes, that is, they reached peak values or were locked with no horizontal displacements. The media at and near the epicenters were non-elastic, but the media far from the epicenter were elastic. The GNSS observations showed that the epicentral areas were compressed before the events and there were shear break at the time of the earthquakes. The processes were similar to the rock failures in the rock tests. Therefore the “compression-shear” (elastic) rebound model is in agreement with the results of GNSS observations. But till now there were imminent precursory crustal deformations for only quite few earthquakes. Obviously even though there are problems in detecting imminent precursory deformations, GNSS has been one of the main observation techniques in earthquake forecasting. Because imminent precursory deformations are closely related with critical phenomenon in the failure process of earthquake faults, the critical phenomenon or imminent precursors are the key for the breakthrough in earthquake forecasting. Different observation techniques of multiple disciplines should be used to detect the imminent precursors.

Keywords: Earthquake forecasting; GNSS; GPS; Crustal deformation; Coseismic horizontal displacement