DOI:10.13203/j.whugis20130744　　**文章编号**:1671-8860(2015)12-1669-08

东日本 Mw9.0 大地震前、同震及震后地壳水平运动

顾国华[1]　王武星[1]　占　伟[2]　梁洪宝[2]　朱　爽[2]

1　中国地震局地震预测研究所,北京,100036
2　中国地震局第一监测中心,天津,300180

摘　要:利用"中国地壳运动观测网络(二期)"245 个 GPS 连续观测站及其他站的大量观测结果,采用离震中很远的 7 个 GPS 站作为位错参考框架,得到 2011 年 3 月 11 日东日本 Mw9.0 大地震的同震水平位移和应变。此种参考框架的位移场解,符合弹性位错模型离震中很远且水平位移接近于 0 的要求,不仅有利于位错模型反演,也有利于合理分析此次大地震同震水平位移的影响范围。地震前后区域参考框架下远场 GPS 连续观测位移时间序列和同震位移弹性位错模型反演结果表明,东日本大地震同震水平位移既是地震断层破裂的结果,也是远场震前数月或数年水平位移的弹性回跳,据此可以进一步确认这些站震前水平位移前兆异常。由于这些震前异常位移中亦包含了同震位移量(方向相反),因此,弹性位错模型为定量研究大地震前远场地壳运动异常提供了一种理论模型。位错参考框架中的同震位移及其位错模型和区域参考框架的位移时间系列的综合研究有助于对此次大地震地壳运动异常的认识。这种持续时间为数月至数年的弹性形变异常,可以为大地震的中短期预测提供依据。

关键词:同震水平位移;弹性位错模型;东日本大地震;震前异常;地震预测

中图法分类号:P228.42　　**文献标志码**:A

"中国地壳运动观测网络"(以下简称网络)二期 240 多个 GPS(全球卫星定位系统)观测站已于 2010 年 7 月开始连续观测。观测期间发生了 2011 年 3 月 11 日东日本 Mw9.0 大地震(38.1°N,142.6°E)和我国境内多个大地震。东日本大地震后不久,相关学者利用中国大陆与周边一系列 GPS 连续观测站的观测结果发表了 GPS 观测得到的此次地震同震水平位移结果[1]和用这些结果及地震波等观测得到的弹性位错模型[2]。文献[3]利用 GPS 连续观测站的资料证明,此次地震同震水平位移是震前大范围异常水平位移的弹性回跳。

本文采用网络一期和二期的每周解及位错参考框架研究东日本大地震的同震水平位移,并通过区域参考框架位移时间序列分析,研究远场同震水平位移的成因、特点和地震前的地壳运动异常。采用中国地震局第一监测中心提供的数据,通过美国麻省理工学院等研制的 GAMIT/GLOBK 和董大南的 QOCA 数据处理软件解算得到每日解,涉及网络和 IGS(国际 GNSS 服务)全球网一些 GPS 连续观测站,总计达 300 站,观测时间为 2010 年 7 月～2013 年 4 月。

1　GPS 数据处理

本章所说的 GPS 数据处理,是指利用 GPS 观测数据处理得到全球参考框架下的坐标,并作进一步的处理和分析。GPS 数据处理涉及的首要问题是参考框架(或称为基准)的选择。

全球参考框架是 GPS 观测数据处理的基本框架。为满足区域大地测量和区域地壳相对运动研究的需要,各地区经常采用不同的区域参考框架,如 SNARF(稳定的北美参考框架)[4]和 EUREF(欧洲参考框架)等。作者采用中国大陆东部的稳定站为核心站的区域参考框架进行 GPS 数据处理,已获得不少研究结果[5-11]。该区域参考

收稿日期:2014-12-16
项目来源:国家自然科学基金资助项目(41274098);中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项资助项目(2013IES0407);中国地震局老专家科研基金资助项目。
第一作者:顾国华,教授,主要从事 GPS 数据处理、地壳运动和地震预测研究。E-mail:ggh@seis.ac.cn

框架核心站水平位移速率低，有长期良好的稳定性，位移时间序列噪声水平低，有利于研究区域的相对运动过程[5-11]。该框架不仅利于分析大地震前的地壳运动异常，也利于显示同震水平位移是震前位移的弹性回跳，证明大地震前存在地壳运动前兆异常[3,7]。

在处理网络一期GPS连续观测站数据时，在中国大陆东部选取6个核心站作为保留的水平位移区域参考框架，据此获取各站的水平位移及其时间序列，而区域网的核心站则更多[3,5-11]。由于网络二期连续观测站数量增多，本文选取的核心站数增加至21站，分布更合理(位于东部地区，即104°E以东和27°N以北，包括网络一期所用的5个核心站)。与网络一期25个GPS连续观测站观测结果相比较，一、二期中共同站的数据处理结果非常一致。这表明自1999年以来，这5个核心站长期保持稳定。

根据弹性位错模型理论，地震震级越大，离震中越远，同震位移才接近为0[12]。因此，为获取与此模型一致的同震位移场，应当采用离震中较远的(多个)站作为保留的同震位移场的参考框架，称为同震位移参考框架，简称为位错参考框架。当地震震级不太大时，不同参考框架的同震位移有可能非常一致，都可能作为位错参考框架。对于巨大地震，在利用位错参考框架位移场反演弹性位错模型时，由于此时远离震中的位移已与模型一致，因此，无须估计观测得的位移场相对于模型位移场的相似变换参数。

由于全球参考框架的核心站离大地震震中一般较远，以往研究中一般都将其直接当作获取同震位移的位错参考框架。在GPS观测数据处理时，即时删除靠近震中同震位移很大的全球参考框架的核心站。因为同震位移是极短时间内发生的现象，全球框架核心站缓慢的运动速率对获得的同震位移影响非常小。短时间快速急剧并残留的地壳运动是对全球参考框架的另一种影响，可明显改变处于形变区内的参考框架核心站的位置。因此，对于巨大地震，全球参考框架是否可当做同震位移位错参考框架，必须作具体分析。

根据自由网平差理论，位移场是多解的，但同一时刻，不同参考框架的位移解保持相似变换关系。在利用位移反演形变模型时，需估计不同参考框架的位移场相对于模型位移的相似变换参数，由此得到一致的形变模型。传统大地测量观测技术制约了同震位移的观测时间间隔、范围和精度，一般无法得到同震位移接近0的位错参考框架核心站，因此在模型反演，如位错模型反演时，必须采用位错模型参考框架(或基准)[13]。

2 东日本巨大地震同震水平位移和应变

据§1所述，选定位错参考框架核心站，得到(震中西侧)GPS连续观测站东日本Mw9.0地震的同震水平位移，如图1所示。图1中采用了两种位移比例尺，分别用红色和蓝色所示。此结果是利用大地震前后最接近的2个周解得到的，位错参考框架核心站离震中至少在4 000 km以上。所选核心站及其离震中的距离分别是位于印度洋的DGAR(8 125 km)，位于印度的IISC(6 610 km)，位于中亚的POL2(5 451 km)和SELE(5 271 km)，位于新疆的TASH(5 588 km)、WUSH(5 176 km)和URUM(4 490 km)。

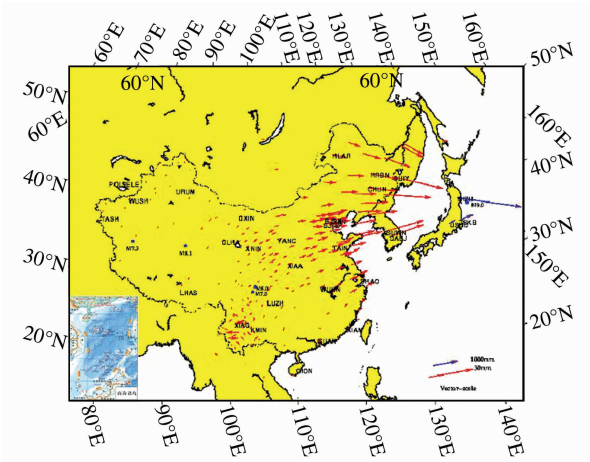

图1 网络等GPS观测站获得的位错参考框架东日本Mw9.0大地震同震水平位移

Fig. 1 Coseismic Horizontal Displacements of the Tohoku Earthquake of Mw9.0 on March 11, 2011, Japan

东日本大地震同震水平位移以E分量为主(图1)。取30°N～45°N之间GPS站水平位移E分量，得到位移随经度的分布(图2)，即东日本大地震同震水平位移与震中距离的大体关系。为比较，图2中给出两个解，红色为位错参考框架解，蓝色为全球参考框架解。图2中，两个解差约2 mm，系统平移十分明显，这表明全球参考框架中仍有核心站受同震水平位移影响。在位错参考框架位移解中，图1中距离震中1 000～3 000 km之间仍有IGS站有相对较大的位移，其中韩国的DAEJ和SUWN站向东水平位移达20 mm以上，还有其他站有3～19 mm的向东水平位移。

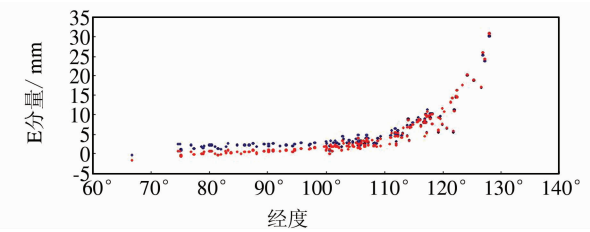

图 2　东日本 Mw9.0 大地震 GPS 站同震水平位移 E 分量沿经度的分布

Fig. 2　Coseismic Horizontal Displacements of the Tohoku Earthquake of Mw9.0 in Japan, Obtained at GPS Stations for the E Component Along the Longitudes

图 2 中离震中越远的站水平位移 E 分量越接近为 0，位移向量长度也接近为 0，与弹性位错理论模型位移分布规律一致，有利于合理估计同震水平位移的影响范围。图 2 中，若取水平位移的误差为 2 mm，由位错参考框架解估计得到的东日本大地震同震水平位移的影响范围约在 3 200 km 左右（达甘肃），而由相应的全球参考框架解估计的影响范围可达约 5 500 km 左右（达中亚）。

密集的 GPS 站利于应变计算[5,8]。图 3 为根据图 1 的水平位移按 Delaunay 三角形计算得到的东日本大地震同震水平应变。图 3 中根据应变大小采用了两种应变比例尺。东日本大地震的同震应变场以张应变为主，这也是图 1 中的直观结果。东日本大地震同震水平应变更易于显现同震形变的复杂性。我国南北地震带南部应变大于附近地区表明，此地区的地壳运动，甚至地震活动，在一定程度上与东日本大地震有关。GPS 测得此区域极为明显的旋转构造运动，且为中国大陆唯一复杂旋转构造运动区，地震频发，可能是同震水平形变复杂的主要原因。

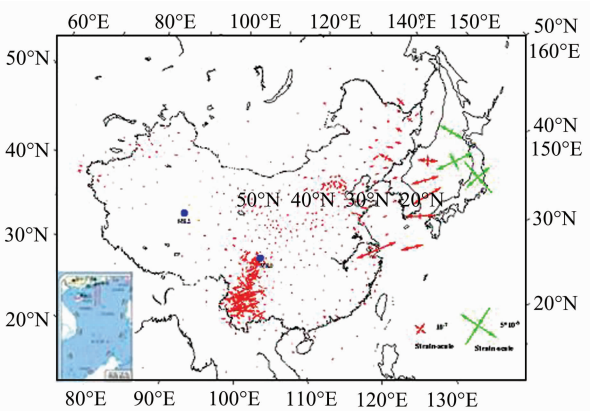

图 3　东日本 Mw9.0 大地震 GPS 站同震水平应变

Fig. 3　Coseismic Horizontal Strains of the Tohoku Earthquake of Mw9.0 in Japan

3　东日本大地震同震水平位移位错模型与震前地壳运动异常

位错模型是迄今研究地震断层破裂过程、地震波、同震位移场和震后位移最成功、最有意义的形变模型，从弹性半空间模型[12,14]发展到半空间分层介质模型，还包括粘弹性层。此后又有球形地球位错模型[15,16]出现，使位错模型更符合球面上大范围 GPS 等观测实际。

里德利用三角测量结果提出了地震发生的弹性回跳假说。传统大地测量曾获得大地震近场同震位移及位错模型反演结果[17]。有学者曾试图利用震前近场大地测量资料，包括 GPS 观测资料和弹性位错模型来预测地震，但未见进展。由于缺乏观测资料，或即使采用震前近场长期大地测量（连续）观测资料，依然未能观测到近场弹性形变的积累过程，而震前一段时间的近场形变已非弹性。至今还无观测资料直接证明近场同震位移是震前位移的弹性回跳，导致地震发生。

GPS 为观测和研究大地震前后、震时地震波和同震水平位移，特别是远场同震水平位移产生的过程或机理提供了可能。

不同的研究结果均证明，GPS 观测到的远场同震水平位移是此次大地震的地震断层弹性位错的结果。例如，Zhou 等[2]的研究结果与图 1 一致。图 4 为位于 31°N ～ 45°N 之间的同震位移 E 分量与球形地球位错理论[18-20]模拟结果随经度的分布。图 4 中 GPS 观测值结果与此位错模拟结果的位移幂函数拟合曲线重合。考虑 GPS 解算的误差精度约为 2 mm，根据幂函数衰减规律估算东日本 Mw 9.0 地震的同震水平位移随经度向西可达远离震中约 3 200 km 处。

为研究远场同震水平位移产生的过程或机理，还须分析 GPS 连续观测站震前长期的位移时间序列。中国大陆及其周边的多个 GPS 连续观测站在东日本大地震前均有 10 a 以上的连续观测资料，为研究此次大地震前后的形变形成过程提供可靠的依据。

全球的 GPS 观测可得到稳定的位错参考框架，获取与弹性位错模型一致的地震断层破裂产生的同震位移场。由于不同地区缓慢地壳运动包含复杂的构造运动，研究长期地壳运动时，不可能也采用与巨大地震同震位移相同的位错参考框架。对于本研究所在区域，将远场同震位移变换和统一到保持长期稳定的区域参考框架是唯一可

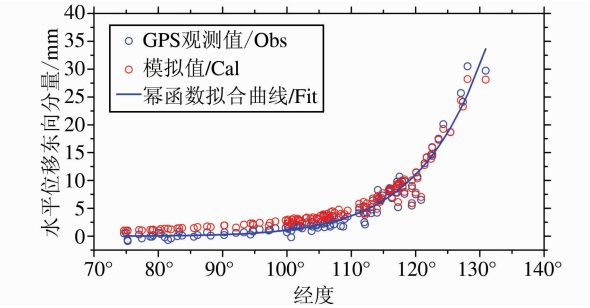

图4 GPS观测与位错模型模拟的东日本Mw9.0大地震远场同震位移东向分量随经度的分布及观测结果的幂指数函数拟合

Fig. 4 East Components of Far Field Coseismic Horizontal Displacements of the Mw 9.0 Tohoku Earthquake in Japan

行的选择，其核心站的水平位移年速率小于2 mm/a。而一般同震位移对远离震中的区域参考框架核心站影响较小。在长期稳定的中国大陆东部地区选择区域参考框架核心站是恰当的[5-11]。

图5为图1中GPS连续观测站在区域参考框架下东日本大地震远场同震水平位移。图5也采用了两种位移比例尺。图1和图5都标出了网络一期和中国大陆周边地区的GPS连续观测站，且已得到这些站在网络一期6个核心站的区域参考框架中东日本大地震的同震水平位移，结果与图5中相应站一致[3]。从图5中可以看出，中国大陆东北和韩国同震水平位移最显著，华北、华东和华南地区同震水平位移小，但西部直至中亚同震水平位移量显著变大。

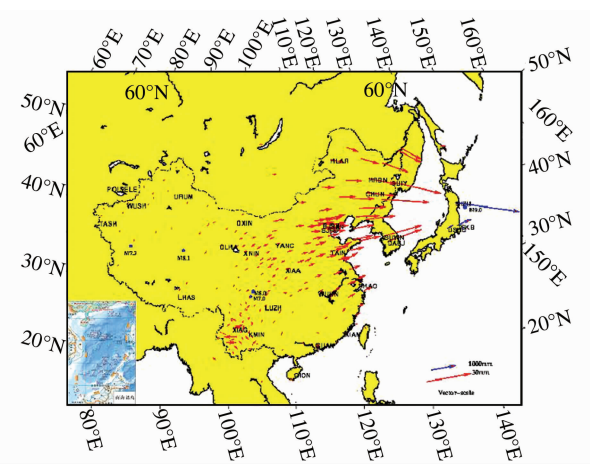

图5 网络GPS连续观测站获得的21个核心站区域参考框架下东日本Mw9.0大地震远场同震水平位移

Fig. 5 Coseismic Horizontal Displacements of the Tohoku arthquake of Mw 9.0 in Japan, Obtained at GPS Stations in CMONOC and Other GPS Stations Based on the Regional Reference Frame of 21 Core Stations

图6是1999年3月～2012年12月中国大陆及其周边多个GPS连续观测站，区域参考框架下水平位移N和E分量时间序列，表达东日本大地震远场同震水平位移前后的地壳运动过程，箭头为同震水平位移(图6中用到的GPS连续观测站位置在图1、图5中有标注)。YANC(宁夏盐池)和BJFS(北京房山)是网络一期区域参考框架6个核心站中的两个站，水平位移时间序列变化小且稳定(图6)。其他核心站水平位移至今也很小。网上给出的本文采用的几个GPS站全球框架解的位移时间序列，同本文的给出的时间序列差别极为显著。

在网络一期6个核心站区域参考框架下，震前中国大陆西部和中亚GPS连续观测站的位移时间序列变化空间分布特征与图5基本一致。在此区域参考框架时间序列中，位于亚洲大陆的GPS站同震水平位移是震前水平位移异常的弹性回跳[3]。

图6中，时间序列中的箭头为东日本Mw9.0大地震同震水平位移。从图6中可以看出，日本TSKB、USUD和MIZU站震后水平位移呈指数衰减，可用含粘弹性分层介质位错模型作拟合[21]。这种震后变化，在图6中我国东北和韩国的GPS站也有一定程度的显示。

图6表明，在东日本大地震震中东侧的日本和东亚，甚至到YANC(离震中3 043 km)GPS连续观测站，约从2008年5月开始出现以南北向或东西向为主的水平位移异常，位移量自东向西减小。震后日本研究人员发现，(几乎与此同期)日本的GPS连续观测网可能出现“东日本地震的前兆阶段”[22]。

2010年4月中国大陆西部和中亚的GPS连续观测站E分量开始出现前所未见的较大异常。对比区域和位错参考框架的同震水平位移，震前我国西部和中亚GPS连续观测站E分量的变化是由于所选择的区域参考框架核心站主要在中国大陆东部，而此地区除了各核心站间也有一定的差异运动(如YANC站因东部地区受挤压所显现的小幅向东位移)外，震前核心站还整体向西位移，因此得到图6中西部GPS连续观测站震前显著的向东水平位移异常。考虑到位移参考框架的整体位移，东日本大地震前，中国大陆的实际地壳运动异常范围和同震水平位移所能分辨的范围是一致的。

通过震后对位错和区域参考框架同震水平位移解的综合分析，确认区域参考框架核心站的整

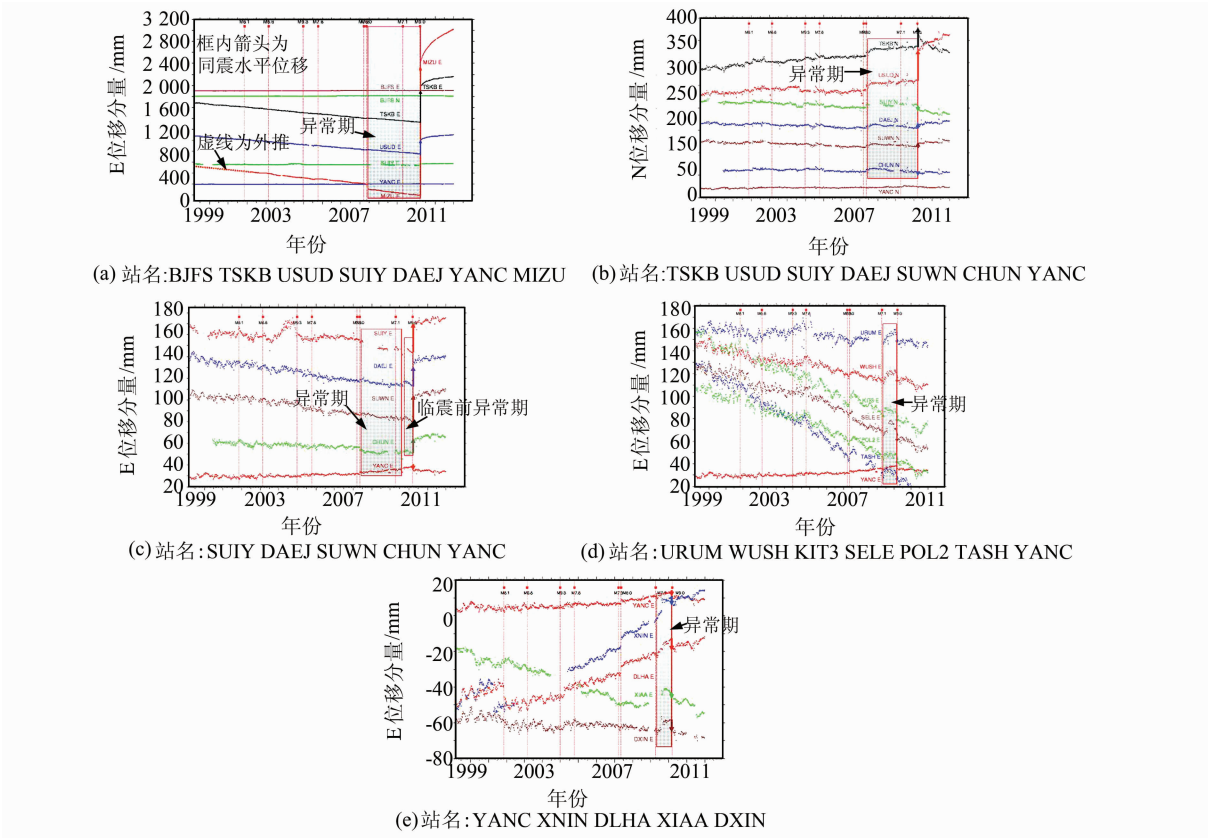

图 6　6 个核心站的区域参考框架下中国大陆西部和东北、日本、韩国和中亚 GPS 连续观测站周解 N 或 E 分量位移时间序列

Fig. 6　Time Series of E or N Displacement Components of Weekly Solutions at Continuous GPS Observation Stations in West China and North East China, Central Asia, South Korea and Japan

体位移,最终合理解释区域框架中的震前异常位移现象。当 GPS 站点较密集时,通过应变分析也许可在一定程度上弥补位移参考框架对此异常分析的影响。由于早前 GPS 站数量少,不宜作此项分析。

日本三个 GPS 站同震水平位移 N 和 E 分量差别很大,回跳主要出现在变化量大的 E 分量。而观测得到的水平位移时间序列表明,这三站的同震水平位移虽然有回跳现象,却并不能根据现有数据说明就是弹性回跳。

USUD 站距震中 435 km,若顾及 2008 年 5 月异常前的水平位移累积,E 分量 229.4 mm 同震水平位移显著小于图 6(b)中所示震前全部观测期间位移累积量,但明显大于异常开始后的位移累积量。

TSKB 站距震中 314 km,E 分量同震水平位移 596.8 mm,显著大于图 6 震前观测期间的位移累积量。TSKB 站早在 1993 年 12 月就开始了 GPS 连续观测。假设震前该站的水平位移速率一直保持为图 6 中震前速率,即使顾及开始观测后的累积位移量,同震水平位移仍显著大于震前观测期间的水平位移累积量。

MIZU 站离震中仅 172 km。由于本文数据处理中须顾及所有解的一致性(包括采用同一单位用同一软件的计算结果,且时间序列计算采用相同的起算时间),本文无法直接给出区域参考框架下 MIZU 站自 2002 年 3 月开始的水平位移时间序列。但从网上可得到其他数据中心的 MIZU、BJFS、DAEJ、SUWN、TSKB 和 USUD 等站的全球框架解坐标时间序列。由于 BJFS 是区域参考框架稳定的核心站之一,而此区域参考框架相对全球参考框架稳定保持平移关系,因此,MIZU 相对 BJFS 站的位移(见图 6(a)中 MIZU 站位移 E 分量时间序列)即接近或相应于 MIZU 站在所述区域框架中的位移。比较 DAEJ、SUWN、TSKB 和 USUD 等 4 个站相对 BJFS 站的位移和 4 个站在区域参考框架中的位移,发现两种方法得到的位移一致。由此得到相应于区域参考框架的 MIZU 站 E 分量同震水平位移为 2 313.1mm。假定 MIZU 站 2003 年之前的变化与 2003 年至震前的变化一致,图 6(a)中的虚线给出了此站外推至 1999 年的变化。即便顾及震前这段时间的变

化，MIZU站的同震水平位移比震前水平位移累积量大很多。这里所说的同震水平位移向量特指区域框架下的解，但因位移量大，与位错框架解相差仅数mm。在全球框架解中MIZU站E分量同震水平位移为2 319.1 mm。尽管只获得极少数离震中较近的GPS连续观测站有限时间段的观测结果，但结果已说明离震中越近，震前的变化越大越复杂，用目前积累的GPS观测资料无法直接证明这些站的同震位移是震前位移的弹性回跳。这些站的水平位移反映此时期近震中介质已处于非弹性形变状态。类似结果已见于多个大地震，本文不作列举。

图6中，我国东北和韩国GPS观测站还显示，在临震前E分量有快速向西位移。水平位移异常的时空发展表明，东日本大地震前弹性形变区逐步扩大，位移量也不断增大。而在地震断层破裂后，随着应力和能量的释放，出现同震位移，大范围弹性形变随即迅速消失。上述震前远场出现的水平位移异常主要是震中区外附加在构造运动之上的弹性形变。这是大地震震前中短期远场形变异常的特征或机理。

弹性位错模型研究表明，同震位移是地震断层破裂的结果；而GPS观测站的位移时间序列表明，远场同震水平位移是震前水平位移积累的弹性回跳。基于这样的关系，弹性位错模型可为研究震前远场异常地壳运动提供某种定量依据。震前还可能有哪些方式的地壳运动导致地震断层破裂，还需要长期积累观测资料，寻找答案。

震前中国大陆东部处于以挤压为主的状态(图6)；而同震和震后则处于以张性为主的松弛状态(见图1、图3和图6)，这至少在短期内有利于中国大陆东部地震活动水平的降低。

4 结 语

利用300个GPS连续观测站的观测结果，以弹性位错理论为依据，采用目前只有GPS观测可获得的位错参考框架，得到2011年3月11日Mw9.0东日本巨大地震远场同震水平位移。此次巨大地震是全球板块运动的结果。利用GPS观测结果，多位学者得到至今近场和远场站点分布密度最高、分布范围最广，因而最具说服力的弹性位错模型反演结果。本文采用的位错参考框架结果不仅有利于弹性位错模型反演，获得地震断层破裂机理，也有利于分析此次地震同震水平位移的影响范围。

大地震同震位移是公认的具有多种特征的、特有的地壳运动现象。区域参考框架中远场同震水平位移是震前水平位移的弹性回跳，因而震前这些站的水平位移异常是大地震的前兆异常。震后通过对位错参考框架和区域参考框架同震水平位移解的综合分析，最终合理解释了区域框架中东日本大地震的震前异常位移现象。震前远场位移异常区为弹性形变区，这在理论上符合大地震前介质性状的空间分布。持续数月甚至数年的远场弹性形变异常的存在，为大地震的中短期预报提供依据和可能。弹性位错模型是目前定量探索类似东日本大地震远场震前形变异常很有意义的理论模型之一。GPS观测结果还表明，由于震前一定时期震中区近场介质已不是弹性状态，因而不宜采用弹性模型研究震前此阶段近场异常形变。

东日本大地震远场GPS连续观测得到的同震水平位移弹性位错模型反演和区域参考框架水平位移时间序列观测结果，表明里德的地震发生的弹性回跳已不是个假说，而是科学理论。

GPS观测获得的东日本大地震远场同震垂直位移远不如水平位移显著，且震后变化复杂。

地震预测探索表明，地壳形变依然是地震预报中最值得重视的主要学科，震中近场的观测对于长期探索其他类型的形变异常，特别是短临异常必不可少[23]。GPS是至今最适宜于地震预测的形变观测技术之一[24,25]，GPS技术同时有利于获取巨大地震的同震位移场，利于建立位错参考框架，有利于研究大地震震前地壳形变异常理论模型。

本文研究局限于地震断层以西板块运动被动的大陆一侧，但大地震的孕育过程时间长，变化因素较多，介质和结构复杂，用震前资料作形变模型反演，预测地震，还有待观测资料的长期积累及深入的研究。

致谢：本项目采用了中国地震局第一监测中心和网络数据中心提供的网络GPS连续观测站数据处理结果。本文使用GMT软件绘图，在此一并感谢。

参 考 文 献

[1] Wang Min, Li Qiang, Wang Fan, et al. 2011 Far-field Coseismic Displacements Associated with the 2011 Tohoku-oki Earthquake in Japan Observed by Global Positioning System[J]. *Chinese Sci Bull*, 2011,56 (20):1 593-1 596(王敏，李强，王凡，等.

全球定位系统测定的 2011 年日本宫城 Mw9.0 级地震远场同震位移[J]. 科学通报,2011,56 (20): 1 593- 1 596)

[2] Zhou X, Sun W, Zhao B, et al. Geodetic Observations Detecting Coseismic Displacements and Gravity Changes Caused by the Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake [J]. *J Geophys*. Res., 2012, 117 (B05408), doi:10.1029/2011JB008849

[3] Gu Guohua , Wang Wuxing. Far-field Crustal Movements Before and After the 2011 Ms9.0 Japan Earthquake from GPS Observations[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2011,2(3): 1- 7

[4] Geoff B. Overview of the SNARF Working Group, Its Activities, and Accomplishments [C]. The 8th SNARF Workshop AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 2007

[5] Gu Guohua, Shen Xuhui, Wang Min, et. al. General Characteristcs of the Recent Horizontal Crustal Movement in Chinese Mainland [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2001,14(4): 384-393

[6] Gu Guohua, Fu Yang , Wang Wuxing. Horizontal Crustal Movement in Chinese Mainland from 1999 to 2001 [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2004,17 (Sup):53-60

[7] Gu Guohua, Wang Wuxing. Coseismic Displacements of the Great Wenchuan Earthquakes in Sichuan Detected by GPS Observations [J]. *Earthquake*,2009,29(1):92-99(顾国华,王武星. GPS 测得的汶川大地震同震位移[J]. 地震,2009,29(1): 92-99)

[8] Gu Guohua, Wang Wuxing, Meng Guojie , et al. Crustal Movements Before and After the Great Wenchuan Earthquake Observed by GPS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009,34(11):1 336-1 339(顾国华,王武星,孟国杰,等. 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, 2009,34(11): 1 336-1 339)

[9] Gu Guohua, Wang Wuxing, Xu Yueren, et al. Horizontal Crustal Movement Before the Great Wenchuan Earthquake Obtained from GPS Observations in the Regional Network [J]. *Earthquake Science*, 2009,22(5): 471-478

[10] Gu Guohua, Wang Wuxing. Vertical Crustal Movement Before and After the Great Wenchuan Earthquake Obtained from GPS Observations in the Regional Network[J]. *Earthquake*, 2011,31(3):1-8 (顾国华,王武星. 区域网 GPS 观测得到的汶川大地震前后的地壳垂直运动[J]. 地震, 2011,31(3): 1-8)

[11] Gu Guohua, Meng Guojie, Wang Wuxing. Anomalous Crustal Movements Before the Great Wenchuan Earthquake Obtained from GPS Observations [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2011,2(2): 13-22

[12] Huang Liren, Gu Guohua. Theory of Static Dislocations[M]. Beijing:Publishing House of Seismology,1982(黄立人,顾国华. 静力位错理论[M]. 北京: 地震出版社,1982)

[13] Gu Guohua. Datum Definition and the Inversion of Deformation Models in the Crustal Deformation Networks [J]. *Crustal Deformation and Earthquakes*, 1990,1:21-29 (顾国华. 形变网的基准与形变模型反演[J]. 地壳形变与地震, 1990,1: 21-29)

[14] Okada Y. Surface Deformation Caused by Shear and Tensile Faults in a Half-space [J]. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1985,75(4):1 135-1 154

[15] Pollitz F F. Coseismic Deformation from Earthquake Faulting on a Layered Spherical Earth [J]. *Geophys. J. Int.*, 1996,125:1-14

[16] Sun Wenke. Theory on Earthquake Dislocations [M]. Beijing:Science Publishing House,2012(孙文科. 地震位错理论[M]. 北京:科学出版社,2012)

[17] Chen Yuntai, Lin Banghui, Wang Xinhua, et al. A Dislocation Model of the Tangshan Earthquake of 1976 from the Inversion of Geodetic Data [J]. *Chinese J. Geophys*, 1979,22 (3): 201-217(陈运泰,林邦慧,王新华,等. 用大地测量资料反演的 1976 年唐山地震的位错模式[J]. 地球物理学报, 1979,22 (3): 201-217)

[18] Sun W, Okubo S, Fu G, et al. 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]. *Geophys. J. Int.*, 2009,177:817-833

[19] Wang W, Sun W, Wu Y, et al. Modification of Fault Slip Models of the Mw 9.0 Tohoku Earthquake by Far Field GPS Observations [J]. *Journal of Geodynamics*, 2014, 75: 22-33

[20] Wei S, Sladen A. Updated Result 3/11/2011(Mw 9.0), Tohoku-oki, Japan[OL]. http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/ 2011_taiheiyo-oki/,2011

[21] Pollitz F F. Postseismic Relaxation Theory on the Spherical Earth [J]. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1992,82: 422-453

[22] Shinzaburo O, Takuya N, Hiroshi M, et al. Preceding, Coseismic, and Postseismic Slips of the 2011 Tohoku Earthquake, Japan [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012,117, B07404, doi:10.1029/2011JB009120

[23] Gu Guohua, Meng Guojie , Fang Ying. Crustal

Movements in the Earthquake Area Before and After the Great Wenchuan Earthquake as Detected by Precise Single Epoch Positioning of GPS Observations [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2011,33(3): 319-326(顾国华,孟国杰,方颖.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[J].地震学报,2011,33(3):319-326)

[24] Gu Guohua. GPS-Useful Technique for Earthquake Prediction[M]. Beijing:Publishing House of the Peking University, 2012(顾国华. GPS——地震预测利器[M].北京:北京大学出版社,2012)

[25] Gu Guohua, Wang Wuxing. Advantages of GNSS in Monitoring Crustal Deformation for Detection of Precursors to Strong Earthquakes [J]. *Positioning*, 2013,4, 11-19

Preseismic, Coseismic and Postseismic Horizontal Crustal Movements of the Mw9.0 Tohoku Earthquake in Japan, 2011

GU Guohua[1] *WANG Wuxing*[1] *ZHAN Wei*[2] *LIANG Hongbao*[2] *ZHU Shuang*[2]

1 Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2 First Monitoring Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China

Abstract: In this paper the coseismic horizontal displacements and strains of the Mw9.0 Tohoku earthquake on March 11, 2011 in Japan are obtained from continuous GPS observations at 245 stations in the Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC) and other stations based on the dislocation reference frame with 7 core stations that are much more far away from the earthquake epicenter according to the elastic dislocation theory. The far field horizontal displacements at stations further away from the epicenter are close to zero and in good agreement with the theoretical elastic dislocation model. More reasonable elastic dislocation models can be inverted from the coseismic horizontal displacements observed by GPS in this reference frame. In addition, the influence area of this earthquake can be reasonably estimated from these displacements.

Time series of far field displacements in the regional reference frame at continuous GPS observation stations show that the coseismic horizontal displacements are not only the result of the rupture of the earthquake fault but also the elastic rebound of the displacements accumulated during several months or even several years before the earthquake. Therefore the preseismic displacements at these stations wereprecursory anomalous before the Tohoku earthquake in Japan and they contained at least the coseismic displacements at these stations in opposite sense. So the elastic dislocation model is one of the theoretical models that can also be used in qualitative studies on anomalous displacements before similar great earthquakes. Therefore, it is even more important that comprehensive studies on the coseismic horizontal displacements in the dislocation reference frame, their elastic dislocation model and the time series of horizontal displacements in the regional reference frame are instrumental to explaining and understanding of anomalous crustal movements before this giant event. The anomalous elastic displacements with a duration of several months or several years could be used in mid or short term earthquake predictions.

Key words: coseismic horizontal displacement; elastic dislocation mode; anomalies before the earthquake; earthquake prediction; Tohoku earthquake in Japan

First author: GU Guohua, professor, specializes in GPS data processing, crustal deformation and precursors to earthquakes. E-mail: ggh@seis.ac.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41274098; Basic Research Plan of the Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, No. 2013IES0407; Research Fund of the China Earthquake Administration for Senior Scientist.