

# GPS 解算的日本 Mw9.0 级地震的 远场同震地表位移

杨少敏<sup>1</sup> 聂兆生<sup>1</sup> 贾志革<sup>1</sup> 彭懋磊<sup>1</sup>

(1 中国地震局地震研究所,武汉市洪山侧路 40 号,430071)

**摘 要:**利用日本 Mw9.0 地震前后各 3 d 的 77 个 GPS 连续站观测资料和 JPL 精密星历,计算了该地震对周边各国及相邻板块运动的同震影响。结果显示,日本地震对日本、中国东北部、朝鲜半岛均有较大影响,其同震水平位移影响范围达 2 000 km,地震造成中国东北东移 1~3 cm,华北东移 3~8 mm,朝鲜半岛东移 2 cm。中国境内的 GPS 测站的垂直同震位移均呈上升趋势,但是上升幅度非常小。结合日本岛测定的 GPS 同震位移和约 20 m 高的海啸可以推断,本次日本地震的同震垂直位移具有波状起伏特征,符合逆冲挤压型地震的粘弹性理论模型。鉴于近年地震活动趋势,应该密切关注横贯中国东部的深大断裂带(郯庐断裂带)的断层活动,借助中国陆态网络密集覆盖提供的有利条件,跟踪研究郯庐断裂带附近 300 km 范围的区域地壳现今变形、应力应变场的时变过程等,分析郯庐断裂带的断层活动,捕捉异常信息。

**关键词:**同震变形; Mw9.0 日本地震; 郯庐断裂带; GPS  
**中图法分类号:**P228.42; P227

2011 年 3 月 11 日,在日本本州岛东海岸发生的 Mw9.0 地震属于典型的海洋俯冲型地震(低倾角、纯逆冲)。该地震发生在太平洋、菲律宾、欧亚和北美板块交汇处的日本海沟,震源位于仙台海岸线东 130 km 处,震源深度 24 km,发震断层向西的缓倾角不到 15°。该区域太平洋板块向西西北方向俯冲到北美板块下部,两者相对汇聚速率达 8.3 cm/a(<http://earthquake.usgs.gov>)。由于震源远离陆地,地震破裂分布无法直接通过野外地质考察或航拍影像给出,只能通过余震定位、地震波和 GPS 分析确定。震后多家机构利用地震波和/或 GPS 研究震源破裂分布,给出的破裂面最大同震滑移量从 20~55 m 不等,且均没有破裂到海沟(<http://supersites.earthobservations.org/sendai.php>)。Chen 综合利用 P 波、SH 波和长周期面波给出该地震在海底造成约为 300 km 长、100 km 宽的破裂面,破裂面上的最大滑移量达 55 m,其释放的地震矩能量为  $0.584 \times 10^{30}$  dyn · cm([http://www.geol.ucsb.edu/faculty/ji/big\\_earthquakes/2011/03/0311\\_v2/Honshu\\_2.html](http://www.geol.ucsb.edu/faculty/ji/big_earthquakes/2011/03/0311_v2/Honshu_2.html));Wang Rongjiang 利用 GPS

作为约束给出破裂面上的最大同震滑移量约 30 m(<http://supersites.earthobservations.org/sendai.php>)。

地震是地球内部累积的应力突然释放的结果,不仅造成震源附近破裂面的突然错动,同时可能导致大范围的地表永久变形<sup>[1]</sup>。2004 年,苏门答腊地震造成同震永久位移的影响范围达 6 000~7 000 km,影响到了我国川滇地区,同时造成川滇地区微震活动突然增强<sup>[1,2]</sup>。2008 年,汶川地震也造成了大范围的地壳变形<sup>[3]</sup>。我国东部地区距离日本 Mw9.0 地震的震中约 2 000~3 000 km 远,如果受到本次日本地震的影响,那么主导我国东部地区地震活动性的郯庐断裂带的构造活动则十分值得关注。郯庐断裂与日本海沟同属于一个地质构造系统,同样受太平洋板块俯冲的影响(<http://bbs.sciencenet.cn>)。洪川<sup>[4]</sup>通过 1978~2006 年 6 级以上地震活动时间序列的对比分析,认为郯庐与日本海沟地震带的地震活动性在时间分布上具有一致性。因此,鉴于近年地震活动趋于频繁的严峻形势,分析该地震对我国的同震影响极为重要和必要。

1 GPS 测定的远场同震位移场

震后,日本国土地理院迅速给出了日本境内密集 GPS 监测网(GEONET)的同震位移场<sup>[4,5]</sup>,该位移场显示本次 Mw9.0 地震造成日本岛整体东移,最大水平同震位移达 5.24 m,最大垂直沉降达 0.699 m。该结果没有包含中国的同震变形场分布。

表 1 GPS 解算的远场同震位移

Tab.1 Coseismic Displacement of Mw9.0 Earthquake in Eastern Coast of Honshu, Japan Observed by GPS

测站位置/(°)		同震位移/cm		误差/cm			站名
经度	纬度	东向分量	北向分量	东向误差	北向误差	相关性	
144.868 36	13.589 33	0.090	0.053	0.128	0.069	−0.058 78	▲GUAM
121.077 73	14.635 72	0.310	−0.226	0.130	0.060	−0.052 34	▲PIMO
145.743 09	15.229 70	−0.220	0.328	0.153	0.080	0.011 62	▲CNMR
109.845 01	19.029 44	0.077	0.177	0.197	0.081	−0.048 14	QION
110.303 96	21.154 86	0.306	−0.082	0.288	0.098	−0.156 45	GDZJ
116.603 07	23.417 88	0.411	−0.095	0.129	0.055	−0.123 36	GDST
153.978 66	24.290 10	−0.639	1.226	0.129	0.079	0.091 76	* MCIL
120.987 35	24.797 95	−0.196	−0.069	0.103	0.051	−0.070 60	TNML
120.018 56	26.877 01	0.423	−0.104	0.267	0.106	−0.170 65	FJXP
142.195 03	27.067 53	−0.557	0.159	0.089	0.052	−0.033 66	▲CCJ2
120.762 90	27.934 12	0.367	0.052	0.144	0.065	−0.121 84	ZJWZ
119.274 32	29.474 75	0.305	0.059	0.278	0.108	−0.192 84	ZJJD
121.988 51	30.070 77	0.116	0.213	0.266	0.110	−0.212 63	ZJZS
114.357 26	30.531 65	0.257	0.072	0.103	0.052	−0.134 60	WUHN
110.965 27	30.834 84	0.130	0.018	0.189	0.076	−0.143 77	HBZG
121.200 45	31.099 64	0.085	0.155	0.091	0.047	−0.109 16	SHAO
117.296 25	32.904 60	0.269	0.269	0.173	0.073	−0.169 24	AHBB
108.985 63	34.178 23	0.151	0.023	0.097	0.045	−0.110 15	XIAA
118.287 99	35.000 30	0.188	0.023	0.099	0.050	−0.128 22	SDLY
114.519 13	35.658 47	0.230	0.004	0.188	0.082	−0.143 69	HAHB
130.599 59	31.824 06	0.935	0.518	0.188	0.107	−0.102 65	# AIRA
139.488 12	35.710 34	22.789	6.323	0.625	0.370	0.327 83	# KGNU
140.657 67	35.955 37	75.678	−6.572	0.170	0.103	−0.165 75	# KSMV
140.087 50	36.105 68	57.298	4.478	0.081	0.052	−0.097 10	# TSKB
138.362 04	36.133 11	22.693	5.285	0.095	0.057	−0.165 53	# USU3
141.132 82	39.135 17	204.909	−125.045	4.812	4.651	0.137 71	# MIZU
117.123 10	36.214 48	0.522	0.082	0.177	0.095	−0.094 65	TAIN
127.374 48	36.399 43	2.005	0.282	0.085	0.049	−0.110 12	DAEJ
109.457 35	36.623 91	0.114	0.088	0.113	0.052	−0.024 00	SNYA
127.054 24	37.275 51	2.043	0.202	0.109	0.058	−0.256 82	SUWN
112.432 58	37.711 51	0.489	0.075	0.265	0.110	−0.137 73	SXTY
114.309 24	38.247 45	0.381	0.029	0.098	0.050	−0.128 61	HELQ
114.021 47	39.381 91	0.455	0.024	0.111	0.054	−0.219 74	SXLQ
117.530 48	40.076 04	0.320	−0.044	0.165	0.092	−0.158 73	JIXN
114.155 94	40.127 29	0.408	0.035	0.098	0.051	−0.125 63	HEYY
115.967 84	40.370 37	0.261	−0.058	0.259	0.115	−0.170 56	BJYQ
114.900 19	40.828 09	0.605	0.048	0.119	0.060	−0.075 33	HEZJ
129.504 50	42.874 79	2.341	−1.074	0.152	0.097	−0.148 40	JLYJ
122.627 22	43.303 48	0.823	−0.303	0.187	0.097	−0.256 79	NMAG
141.844 82	43.528 64	1.162	−2.516	0.144	0.102	−0.069 22	# STK2
125.444 20	43.790 69	1.465	−0.630	0.094	0.060	−0.132 94	CHAN
130.908 07	44.433 34	2.294	−1.444	0.171	0.104	−0.215 25	SUIY
116.963 02	45.513 10	0.528	−0.100	0.166	0.082	−0.189 36	NMDW
142.716 72	47.029 73	0.215	−0.119	0.079	0.058	−0.084 95	YSSK
135.046 16	48.521 45	0.912	−1.006	0.087	0.060	−0.132 37	KHAJ
119.741 26	49.270 49	0.303	−0.221	0.462	0.275	−0.121 44	HLAR

注: \* 表示此点为太平洋板块的 IGS 站; # 表示此点为日本境内的 IGS 站; ▲表示此点为菲律宾板块内的 IGS 站。

中国重大科学工程“中国大陆构造环境监测网络”计划建设 260 个覆盖全国的 GPS 连续跟踪站,同时提供 1 s 和 30 s 采样数据,目前正在调试阶段。震后,笔者迅速整理出了包括中国东部地区 CGPS 站和周边 IGS 核心站在内的 77 个站的数据(见表 1,由于篇幅限制,这里只取部分站的数据),共同参与解算本次地震在 3 000 km 尺度范围内引起的地表同震位移场。

理,3 月 11 日地震当天的数据只采用 UTC 时间 6:00 以后的数据。IGS 没有提供震后 5 d 内的 MIZU 站的数据,且地震当天只有 0:00~5:59 的数据,故进行同震解算时,MIZU 站震后只用了地震当天 5:50~5:59 时间段的数据,且每 30 s 解算一个解。单日时段坐标解算采用卡尔曼滤波平滑算法、固定美国喷气推进实验室(JPL)提供的无基准精密轨道,在较宽泛的统计约束下解算站坐标、钟差、大气参数和相位模糊度,以此获得单日时段解各自对应一个不同的参考框架。本文以 IGS 核心站作为公共站,采用 7 参数转换逐一将单日时段解旋转到统一的 ITRF2008 参考框架下,形成具有统一基准的单日时段解。在该参考框架下,绝大多数 GPS 站点单天解的坐标解算精度小于 5 mm<sup>[6]</sup>。

利用震前  $t_0$ 、震后  $t_i$  的测站位置  $y(t_0)$  和  $y(t_i)$  计算同震位移,可采用如下简化算式:

$$D = y(t_i) - y(t_0) - v(t_i - t_0) - P(t_i) \quad (1)$$

这里,  $P(t_i)$  表示测站震后由于断层余滑、下地壳-上地幔松弛、余震、断层周缘空隙流体变化等引起的位移,通常以某种形式的(对数或指数)函数代表;  $v(t_i - t_0)$  表示测站长期运动速度。由于用以求解同震位移的数据是地震发震时刻前后 3 d 的数据,长期构造变形和震后蠕滑效应均可忽略不计,解算结果能够反映地震瞬间的地表静态变形,同震位移的解算精度主要依赖于单天解的解算精度,因此可以认为水平同震变形的精度优于 5 mm,垂直精度优于 10 mm。

日本远场同震位移(图 1)显示,本次地震的影响范围超过 2 000 km,对中国东北、华北、朝鲜半岛均产生明显影响。中国东北的水平同震位移在 1~3 cm 幅度(如长春、哈尔滨和绥阳),中国华北和东部沿海一带也监测到近 2~8 mm 量级的运动;同震位移的值由东向西逐渐衰减,中国中西部地区(如成都、昆明、拉萨、乌鲁木齐)的同震位移量基本小于 3 mm,在 GPS 解算的误差范围之内,可以认为不受日本地震的影响。位于韩国的 SUWN 和 DAEJ 站均向震中方向运动 2.0 cm,位于太平洋板块内的 MCIL 站则向北西方向运动 1.3 cm,位于菲律宾板块内的 CCJ2 站向西北方向运动 6 mm,位于日本岛的 MIZU、TSKB、STK2 和 AIRA 站分别向震中方向运动 2.2 m、0.58 m、2.7 cm、1.0 cm,这和日本国土地理院的计算结果一致。综合震源周缘 2 000 km 范围内的 GPS 观测可以看出,所有测站的同震水平位移均指向震中,其随着远离震中逐渐衰减的分布特性符合弹性半空间逆冲挤压型破

裂造成的位移场分布特征<sup>[7]</sup>。

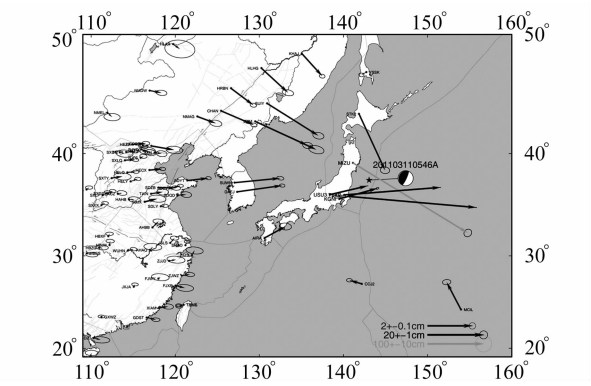


图 1 日本 Mw9.0 地震引起的远场同震位移场(误差椭圆代表 95% 的置信区间)

Fig. 1 Coseismic Displacement Derived from GPS for 2011 Tohoku Earthquake

震源机制解和地震波形反演均表明日本本州地震是一次低倾角逆冲型地震,该地震造成了一定范围的地壳垂直运动([http://www.gsi.go.jp/cais/topic110421\\_index\\_e.html](http://www.gsi.go.jp/cais/topic110421_index_e.html))。日本国土地理院利用地震前后 30 min 的数据给出的同震垂直位移显示,近海岸的 GPS 观测站沉降显著,其最大垂向位移达 0.69 m。位于日本的 TSKB 观测站,笔者计算其同震垂直位移为 7.6 cm,呈下降趋势,与日本国土地理院的结果一致。本次日本强震发生在日本海沟,距离海岸线 100 多 km,震中区没有 GPS 观测,无法知道震中区的实际同震位移,但是依据该地震造成 10 多 m 高的海啸推断,震中区的同震垂直位移不小于 10 m,其上盘作上升运动。依据日本国土地理院给出的同震位移结果,该地震造成日本岛离震中较近的近海区下沉,大约下降 3~6 dm,且垂直位移向西迅速衰减,逐渐转变为上升运动,中国大陆区域监测到的同震垂直位移基本呈上升趋势,但是量级非常微小。这种垂直同震位移分量呈上升、下降相间的起伏状态实际上反映了海洋板块俯冲带逆冲型地震引起的同震垂直位移是呈波状起伏的,这种现象在其他若干逆冲型海洋地震震例中也得到了证实,如 1964 年阿拉斯加地震、2004 年苏门答腊地震等<sup>[8]</sup>。

## 2 结 语

2011 年 3 月 11 日的日本地震造成严重的次生灾害影响范围达 2 000 km,不仅对太平洋板块、日本岛和朝鲜半岛造成同震影响,而且使我国东北地区向东运动约 2 cm,华北向东运动 3~8 mm,因此应该密切关注横贯中国东部的深大断

裂带(郯庐断裂带)的断层活动。中国东北属于深源震区,虽然不必担心太平洋板块在中国境内直接造成地震破坏,但是,郯庐断裂和日本海沟属于同一个地质构造体,内部断裂带相互关联,往往产生多米诺骨牌效应,使得地震具有丛集性。郯庐断裂带 1668 年曾发生 8.5 级强震<sup>[4]</sup>,但是某些区段属于地震空区,长期未发生强震,且断层处于闭锁和弹性应变累积状态,不排除未来若干年发生强震的可能性。另外,构造应力在不同地块间的传递会导致地震发生地点的迁移。因此,未来若干年,应该充分利用中国国家重大科学工程“中国大陆构造环境监测网络”密集覆盖提供的有利条件,跟踪研究郯庐断裂带附近 300 km 范围的区域地壳现今变形、应力应变场的时变过程等,分析郯庐断裂带的断层活动,捕捉异常信息。鉴于汶川地震的深刻教训,应多角度、多方位、全面地加强东北、华北地区地震的危险性分析,为区域防震减灾提供精确的基础依据。

致谢:感谢国家重大科学工程“中国大陆构造环境监测网络”提供的 GPS 观测。

参 考 文 献

[1] 王敏,张培震,沈正康,等. 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].

2006,51(3):365-368  
[2] Qiao X, Yang S, Du R, et al. GPS-derived Crustal Deformation in Southwestern China[J]. Australian Journal of Earth Science, 2007, 54(4): 521-529  
[3] 许才军,刘洋,温扬茂. 利用 GPS 资料反演汶川 Mw 7.9 级地震滑动分布[J]. 测绘学报, 2009, 38(3): 195-201  
[4] 洪川,窦振亚,刘锋涛. 郯庐地震带与日本海沟、琉球群岛地震带之间的地震活动群体特征联系[J]. 海洋地质动态, 2008, 24(10): 1-7  
[5] ARIA Team at JPL and Caltech. Preliminary GPS Displacement Data (Ver 0.3) [OL]. <http://super-sites.earthobservations.org/sendai.php>, 2011  
[6] 牛之俊,游新兆,杨少敏. 利用 GPS 分析天山现今地壳变形特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(2): 1-9  
[7] Okada Y. Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-space[J]. Bull Seism Soc Am, 1985, 75(4): 1 135-1 154  
[8] Plafker G. Tectonic Deformation Associated with the 1964 Alaska Earthquake[J]. Science, 1965, 148: 1 675-1 687

第一作者简介:杨少敏,博士,副研究员,主要从事地壳形变与地球动力学研究。  
E-mail: whgpsyang@gmail.com

Far-field Coseismic Surface Displacement Caused by the Mw9.0 Tohoku Earthquake

YANG Shaomin<sup>1</sup> NIE Zhaosheng<sup>1</sup> JIA Zhige<sup>1</sup> PENG Maolei<sup>1</sup>

(1 Institute of Seismology, China Earthquake Administration, 40 Hongshance Road, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Based on 3-day IGS and CGPS observations before and after the great Mw9.0 Tohoku earthquake, we presented the coseismic deformation field composed of 77 sites for China and surrounding area. The results show that significant displacements is detected in a wide area ranging from the Korean peninsula to the north and northeast of China. Almost all sites move forward to the epicenter. The horizontal displacement is up to 1-3 cm in the northeast of China, 3-8 mm in the north China, and 2 cm in the Korean peninsula. The vertical coseismic offsets of CGPS stations in China are uplift, but the magnitudes are very small. The up-down alternate phenomenon of far and near field coseismic vertical displacement reflects its undulating characteristics. In consideration of the earthquake relevance in the identical tectonic system, we should pay close attention to the activities of the Tan-lu fault belts which across the region of eastern China with the advantages provided by the intensive cover of CGPS.

**Key words:** coseismic deformation; Mw9.0 Tohoku earthquake; Tan-lu fault belts; GPS

About the first author: YANG Shaomin, Ph.D, associate researcher, majors in GPS data processing, the kinematics and dynamics of deforming continental lithosphere, etc.  
E-mail: whgpsyang@gmail.com