

邵志刚,武艳强,江在森等. 基于 GPS 观测分析日本 9.0 级地震同震位错与近场形变特征. 地球物理学报, 2011, 54(9):2243~2249, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.006

Shao Z G, Wu Y Q, Jiang Z S, et al. The analysis of coseismic slip and near-field deformation about Japanese 9.0 earthquake based on the GPS observation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(9):2243~2249, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.006

基于 GPS 观测分析日本 9.0 级地震 同震位错与近场形变特征

邵志刚¹, 武艳强^{1,2*}, 江在森¹, 张浪平¹

1 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

2 中国地震局地质研究所, 北京 100029

摘 要 2011 年 3 月 11 日日本本州宫城县东海岸近海发生 M_w 9.0 级地震, 本文在对 GPS 同震位移场分布及误差特征分析的基础上, 反演了同震位错分布. 误差分析结果表明震源北西向 300 km、北北西向 550 km、南西向 700 km 范围内的同震位移量值明显大于误差, 可以为位错反演提供有效的地表位移约束. 沿震源北西向 GPS 剖面结果 and 位错反演位移剖面结果均表明同震近场位移符合指数衰减特征. 位错反演结果表明, 日本 9.0 级地震最大同震位错为 25.8 m, 位于震中附近; 位错量大于 10 m 的同震破裂集中在震中附近 400 km 范围内; 日本海沟南段同震位错量相对较小, 此次地震为日本海沟地区典型逆冲型地震. 根据此次 9.0 级地震和该地区以往强震破裂空间分布特征, 此次 9.0 级地震破裂既体现了强震原地复发的特点, 又体现了强震破裂的填充性.

关键词 日本 9.0 级地震, GPS 同震位移场, 有效位移约束, 同震位错反演

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.006

中图分类号 P542, P315

收稿日期 2011-03-31, 2011-07-15 收修定稿

The analysis of coseismic slip and near-field deformation about Japanese 9.0 earthquake based on the GPS observation

SHAO Zhi-Gang¹, WU Yan-Qiang^{1,2*}, JIANG Zai-Sen¹, ZHANG Lang-Ping¹

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

2 Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract An M_w 9.0 earthquake occurred on March 11, 2011 offshore the coast of Miyagi Prefecture of Honshu, Japan. In this paper, based on GPS coseismic displacement field and characteristics of error we invert for the distribution of coseismic dislocation. The result of error analysis shows that the coseismic displacement within 300 km in NW, 550 km in north, and 700 km in SW direction is significantly larger than the error, so can provide effective constraints to the inversion of surface displacement. The north-west section of GPS observation and inversion results show that near-field coseismic displacement is characterized by exponential decay with

基金项目 国家自然科学基金(60104205)资助.

作者简介 邵志刚, 1977 年生, 副研究员, 2007 年毕业于中国科学技术大学地空学院, 博士, 研究方向为地球动力学与地震活动性.

E-mail: shaozg@seis.ac.cn

* **通讯作者** 武艳强, 1978 年生, 副研究员, 中国地震局地质研究所读博士生, 研究方向为 GPS 数据处理与地球动力学.

E-mail: chdqyw@126.com

distance. Dislocation inversion results show that the largest coseismic dislocation is 25.8 m, located near the epicenter. Dislocation greater than 10 m occurs mainly within 400 km near the epicenter, the southern section of the Japan Trench has relatively smaller coseismic dislocation. According to the spatial distribution of seismic rupture, combined with previous earthquake rupture distribution of the region, the $M_w 9.0$ earthquake rupture embodies the characteristics of in situ recurrence, but also reflects the nature of earthquake rupture filling in the blank.

Keywords Japan $M_w 9.0$ earthquake, Coseismic displacement observed by GPS, Effective displacement constraint, Inversion of coseismic dislocation

1 引言

2011年3月11日日本海沟地区发生 $M_w 9.0$ 地震,引起海啸并造成惨重人员伤亡和巨大经济损失,是日本有地震记录以来震级最大的一次地震.中国地震台网中心(CENC)测定的微观震中位置是 $38.1^\circ\text{N}, 142.6^\circ\text{E}$,与中国地震局地球物理研究所、日本东京大学地震研究所和美国国家地震信息中心研究结果相近.由于此次地震位于日本本州宫城县东海岸附近海域,因此又称为本州或宫城近海 9.0 级地震(图1).地震发生后,日本、中国和美国的

不同研究机构分别公布了快速地震矩张量反演结果,这些结果给出的走向、倾角整体上与日本海沟板块俯冲浅层构造相吻合^[1],断层破裂机制与该地区断层运动方式也基本一致^[2,3],表明日本 9.0 级大地震是一次发生在日本海沟的典型逆冲型板间地震.

利用数字地震波形资料开展强震震源破裂过程研究,能够在大震发生数小时后,快速提供强震破裂尺度、断层错动方式以及断裂造成的位移分布等信息.这些信息不但能够给出地震发生造成严重破坏的区域及破坏方式,为震后快速判定灾害及救灾工作提供依据,同时也可判断断层活动特征及未来强余震发展趋势提供重要依据^[4].由不同研究结果给出的断层上静态滑动分布来看,此次地震破裂长达 $500\sim 600$ km,但不同结果的最大位移量存在很

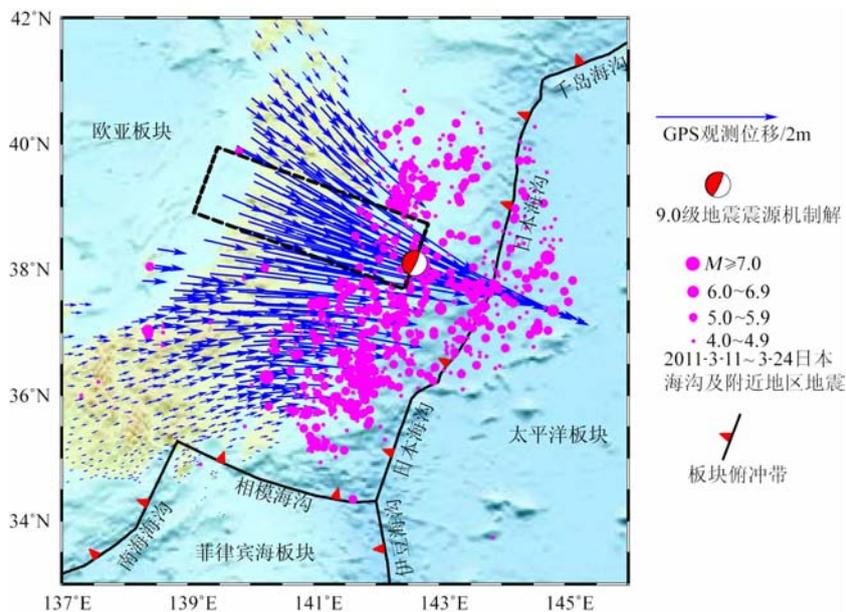


图1 日本 9.0 级地震及其余震分布和同震 GPS 观测近场地表位移
其中主震为哈佛大学给出的震源机制解;余震为 ISC(International Seismological Centre)给出的目录;
GPS 同震位移为 JPL(Jet Propulsion Laboratory)解算结果.

Fig. 1 The distribution of Japan 9.0 earthquake and its aftershocks and the coseismic near-field displacement observed by GPS

The focal mechanism solution of Japan 9.0 earthquake from Havard CMT; the aftershock from ISC (International Seismological Centre); coseismic displacement from JPL(Jet Propulsion Laboratory).

大差异,从 12~55 m 不等,且最大破裂的空间位置也存在较大差别,主要分为三类:(1)美国地质调查局^[5]、美国 Santa Barbara 大学^[6]和美国 Caltech 大学^[7]给出最大破裂均分布在震中附近;(2)日本东京大学地震研究所^[8]和中国地震局地震预测研究所^[9]给出的最大破裂分布在震中两侧;(3)日本筑波大学^[10]和中国地震局地球物理研究所^[11]给出的最大破裂位于震中以南 150 km 左右。

地震发生后日本国土地理院 Hashimoto 教授和美国 JPL 实验室利用覆盖日本列岛的 GEONET 1323 个 GPS 连续站,快速解算出同震位移场(图 1),以这些近场大量形变观测为约束,通过反演可能会给出相对可靠的同震位错模型.本文主要利用 GPS 观测得到的近场同震位移反演日本 9.0 级地震同震静态位错分布,并分析了同震地表形变空间变化特征。

2 基于连续 GPS 观测的同震位移分析

日本岛分布有 1300 多个 GPS 连续观测站,由于此次地震发生于海域(距离最近的 GPS 测点约 100 km,仅有极个别测点被地震破坏),因此绝大多数 GPS 测站均观测到了同震位移(<http://supersites.earthobservations.org/sendai.php>).对比汶川地震的同震位移场解算策略^[12],对此次日本 9.0 级地震的解算过程进行说明.汶川地震的同震位移为静态解算,利用震前的中国大陆地壳运动观测网络区域网观测资料(主要为 2007 年区域网观测数据)和震后科考数据(震后几天的 GPS 观测数据),结合部分连续观测数据综合解算得到,由于连续测点有限,无法区分同震位移和短时间的震后位移.此次日本 9.0 级地震的同震位移为动态解算,采用动态精确单点定位软件 GIPSY-OASIS 对地震前后以某一历元附近的 5 min 数据进行处理,解算得到 5:40 UTC 和 5:55 UTC 历元(地震发生于 05:46 UTC)的坐标结果,进而计算坐标差,求得同震位移结果.该结果仅包括同震位移,不包括短期震后滑移。

由于此次日本 9.0 级地震的同震位移采用 5 min 解算策略得到,因此决定了其解算结果中含有一定的误差.同震位移数据没有给出单分量的误差结果(仅给出了单点位移矢量的误差),通过对位移矢量误差进行统计得到了同震位移的平均误差约为 ±3 cm.由于 GPS 垂向误差明显大于水平向,根据 GPS 精密解算的误差分布特征按 3:1 比例进行折

算,得到水平位移(N 向位移、E 向位移)误差约为 ±0.9 cm,垂直向误差约为 ±2.7 cm.为了分析该误差水平是否影响同震位移的识别,图 2 给出了沿地表位移方向(震源的北西方向)的 GPS 剖面结果(图 1 中虚线框确定的剖面范围).对同震位移衰减进行指数拟合,可以达到较好的拟合结果(相关系数可达 0.99)。

采用上述同震位移的分析方法,分别对北北西向、南西向 GPS 剖面进行分析,可以发现震源北西向 300 km(观测数据仅覆盖到该范围)、北北西 550 km、南西向 700 km 范围内的同震位移量值明显大于误差,可以得到有效识别.因此,上述范围内的 GPS 数据可以为位错反演提供有效的地表位移约束。

3 日本 9.0 级地震断层模型和反演方法

据全球板块构造学说,日本及其附近区域是 4 个岩石层板块活动俯冲和碰撞地区,太平洋板块对日本东部的北美板块和欧亚板块西向俯冲;菲律宾海板块在日本西南地区俯冲到欧亚板块之下^[13].日本列岛地区板块构造运动十分强烈,火山和地震频发^[14].板间大震沿日本列岛的太平洋海岸近海的板块边界发生,此次 9.0 级地震发生在日本群岛东侧的日本海沟上,日本海沟北连千岛海沟,南接伊豆海沟和相模海沟(图 1)。

太平洋板块在日本海沟地区以约 8~9 cm/a^[15,16]的速度西向俯冲到欧亚板块之下,俯冲带从日本海沟俯冲到中国大陆东部地区^[17].该俯冲带是强震多发地区(包括浅、中和深源地震),震源深度由日本海沟向西逐渐加深到 600~700 km.由中源地震拟合所得俯冲倾角为 26°^[18],而由板块俯冲的构造力学

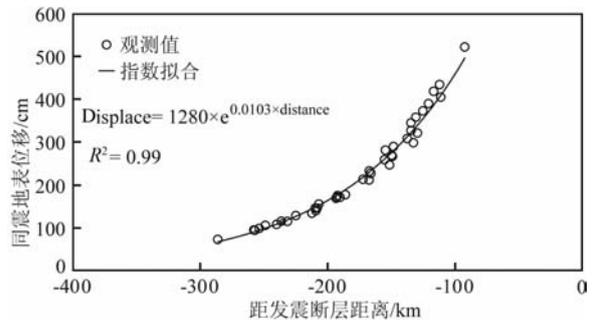


图 2 垂直于断层方向同震位移衰减结果
(图 1 中虚线框确定的剖面范围)

Fig. 2 The result of coseismic displacement perpendicular to the fault direction (the data from the section determined by dotted line in Fig. 1)

模型^[19],板间浅源强震倾角明显要小于中源地震.由哈佛大学给出的1976年以来该地区7级以上强震震源机制解来看,逆冲型浅源板间强震倾角为 $7^{\circ}\sim 19^{\circ}$ (表1).根据日本9.0级地震余震分布(图1),地震同震海底破裂有可能介于北纬 40° 与北纬 35° 之间,因此同震位错模型长度取600 km.参考日本海沟板块俯冲带几何性质、和Shao等(2011)^[6,20]的断层模型参数,本文选取断层模型参数为:走向为 198° ,宽度200 km,倾角为 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$,子断层走向长度为15 km,倾向宽度为10 km,共计800个子断层.鉴于介质模型对反演结果的影响^[22,23],本文介质模型参考Crust2.0给出的该地区壳幔速度模型.

本文以近场GPS观测所得地表同震位移为约束,利用SBIF(Sensitivity Based Iterative Fitting)反演程序^[24]反演日本9.0级地震位错同震分布.该反演方法参考Ward and Barrientos(1986)所采用的误差最小化过程^[25],是具有先验约束的梯度方法,误差函数定义为:

$$f(s) = \sum_{i=1}^n \left\{ y_i - \sum_{j=1}^m (G_{ij}^x s_j^x + G_{ij}^y s_j^y) \right\}^2, \quad (1)$$

其中 y_i ($i=1,2,\dots,n$)为 n 个GPS数据, $s_j = (s_j^x, s_j^y)$ ($j=1,2,\dots,m$)为 m 个断层位错离散矢量,该矢量沿走向和倾向两个分量.先验约束如下:

$$|s_j| \leq s_{\max}, \varphi_{\min} \leq \arctan\left(\frac{s_j^y}{s_j^x}\right) \leq \varphi_{\max}, \quad (2)$$

表1 哈佛大学给出的1976年以来日本海沟浅源7级以上地震^[21]

Table 1 The focal mechanism solution of shallow $M \geq 7.0$ earthquakes in Japanese trench since 1976 from Harvard CMT^[21]

序号	时间 年-月-日	震级 M_s	纬度 ($^{\circ}$ N)	经度 ($^{\circ}$ E)	倾角 ($^{\circ}$)	地震 类型
1	1978-06-12	7.6	38.02	142.07	14	逆冲
2	1981-01-18	7.0	38.15	143.04	15	逆冲
3	1982-07-23	7.0	35.98	141.91	14	逆冲
4	1989-11-01	7.4	39.95	143.08	14	逆冲
5	1994-12-28	7.7	40.56	142.99	12	逆冲
6	2003-10-31	7.0	37.89	142.68	9	逆冲
7	2005-08-16	7.2	38.24	142.05	16	逆冲
8	2005-11-14	7.0	38.22	144.97	43	正断层
9	2011-03-09	7.5	38.58	142.83	7	逆冲
10	2011-03-11	9.1	37.52	143.05	10	逆冲
11	2011-03-11	7.9	35.92	141.38	17	逆冲
12	2011-03-11	7.6	38.27	144.63	42	正断层

s_{\max} 为先验最大位错量,根据现有关于日本9.0级地震反演结果,本文设先验最大位错量为50 m; φ_{\min} 和 φ_{\max} 分别为最小和最大滑动角,因为子断层数越多,该先验约束所起作用越小^[26],因此本文没做滑动角约束,设滑动角范围为 $[0^{\circ}, 360^{\circ}]$.SBIF通过最小二乘迭代使得先验条件下(式(2))的误差函数(式(1))最小来得到最佳位错反演结果.

4 反演结果

选取近500个近场同震位移数据为约束,反演日本9.0级地震同震位错分布.图3a为反演得到的断层破裂剖面结果,其颜色表示位错量大小,箭头表示同震位错滑动方向和位错量大小;图3b为图3a反演结果在地表的地表投影,其颜色表示位错量大小.图4为近场GPS同震位移和反演同震位移,由图4a可以看出观测与反演的同震水平位移符合较好,表明反演所得位错模型可以较好地反映日本9.0级地震水平同震破裂情况.图4b结果给出了沿图1虚框剖面的GPS结果以及位错反演结果,二者的量值及分布特征基本一致,都满足随距离的指数衰减规律.为了定量分析模拟效果,对图4a的观测数据和模拟数据的残差标准差进行计算,得到残差绝对值均值为3.3 cm.其中绝对值小于1倍误差的残差所占比例为68.3%,小于2倍误差的残差所占比例为92.6%,小于3倍误差的残差所占比例为96.8%,该结果较好地满足正态性分布.通过与GPS同震水平位移平均误差(约为 ± 0.9 cm)对比可知,二者在量值上存在一定差异,但考虑到同震位移的量值较大,该拟合残差结果是可以接受的.

反演结果表明,此次地震震级为 $M_w 8.99$,最大同震位错为25.8 m;位错量大于10 m的同震破裂集中在震中附近400 km范围内,日本海沟南段同震位错量相对较小(图3).由同震子断层滑动矢量,此次日本9.0级地震同震位错以逆冲为主,为日本海沟地区典型的板间逆冲型地震(图3).

5 讨论与结论

日本海沟是板间强震多发地区,图5为该地区相关研究给出的强震破裂空间分布,该地区强震体现了板间强震原地复发的特征^[27],例如历史记录表明日本三陆地区8级强震的复发周期约为100 a,该

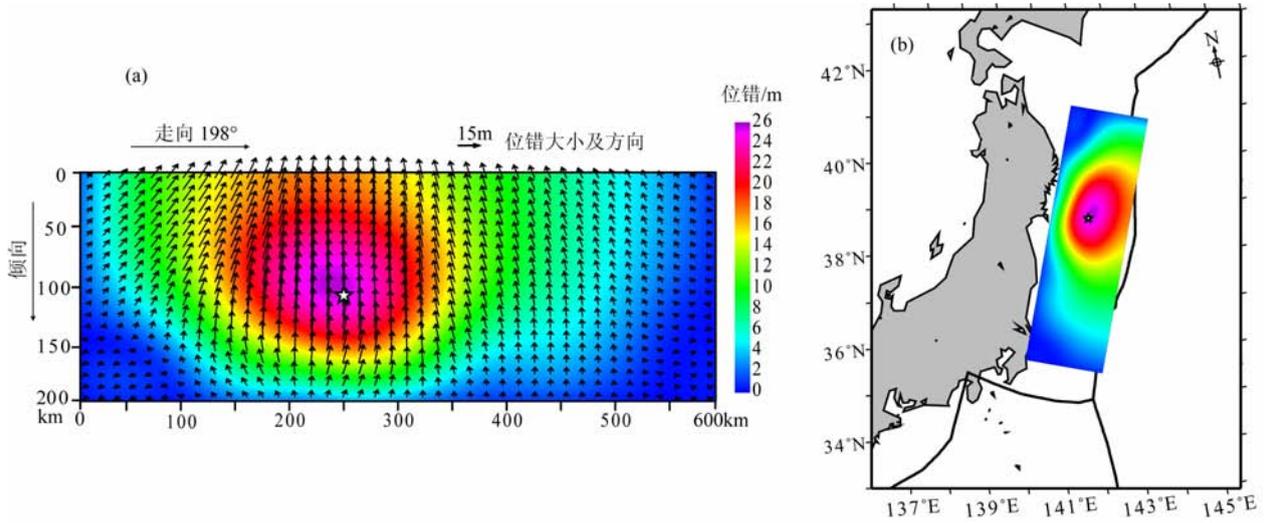


图 3 日本 9.0 级地震同震位错反演结果

(a)位错剖面;(b)位错地表投影.

Fig. 3 The inversed coseismic slip of Japan 9.0 earthquake

(a) Section of coseismic slip; (b) The projection of coseismic slip.

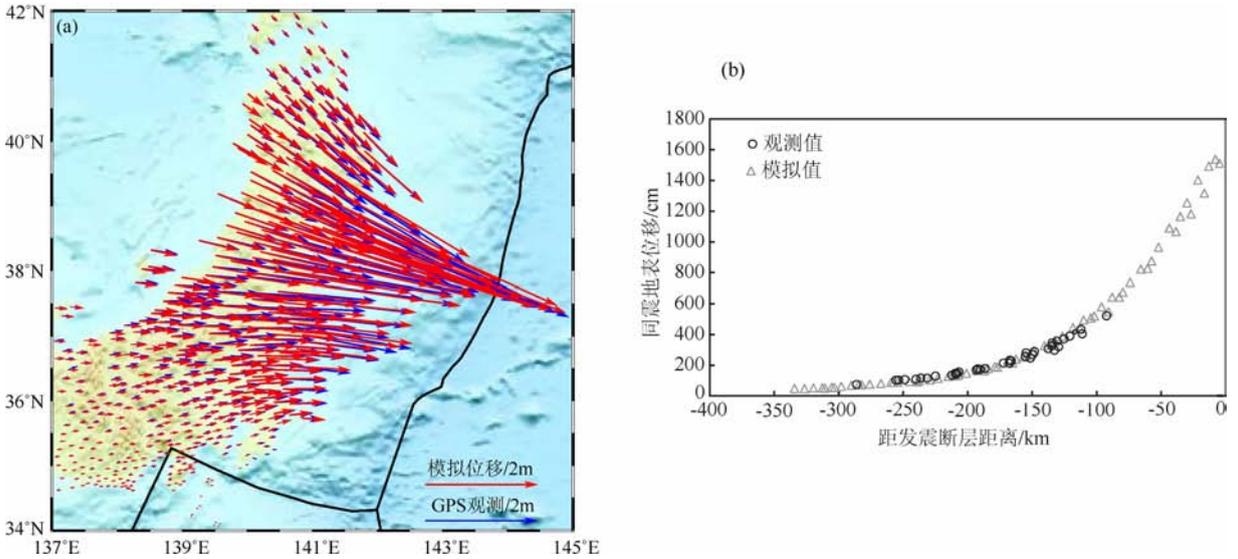


图 4 日本 9.0 级地震同震地表位移(蓝色为 GPS 观测结果,红色为反演所得结果)

(a)水平同震位移;(b)垂直于断层方向同震位移衰减结果.灰色三角形为位错反演结果,黑色圆形为 GPS 观测结果;投影范围为图 1 中虚线范围.

Fig. 4 The coseismic displacement of Japan 9.0 earthquake (blue and red arrows

are the modelled and observed horizontal displacements respectively)

(a) Horizontal coseismic displacements; (b) Coseismic displacement perpendicular to the fault direction. The grey triangles and the black circles are the modelled and observed horizontal displacements respectively, the data from the section determined by dotted line in Fig. 1.

地区分别在 1968 年和 1994 年发生了 8.2 级和 7.7 级地震,1968 年 8.2 级地震有南北两个凹凸体,1994 年 7.7 级地震则重复发生在 1968 年 8.2 级地震南边的凹凸体^[28]. 另一方面,这一地区强震特定时段内空间上表现为填充性,时间上表现为加速发生的特征^[29].

2011 年 3 月 9 日发生 $M_s 7.3$ 地震(38.5°N,142.8°E),

在 2 天后发生日本 $M_w 9.0$ 地震(38.1°N,142.6°E),震中位置非常接近,据中国地震台网中心测定,这两次地震震中相距不足 50 km. 位错反演结果表明,日本 9.0 级地震最大同震位错为 25.8 m,位于震中附近;位错量大于 10 m 的同震破裂集中在震中附近 400 km 范围内,为日本海沟地区典型逆冲型地震. 此次 9.0 级地震同震位错达到 5 m 的空间覆盖范围

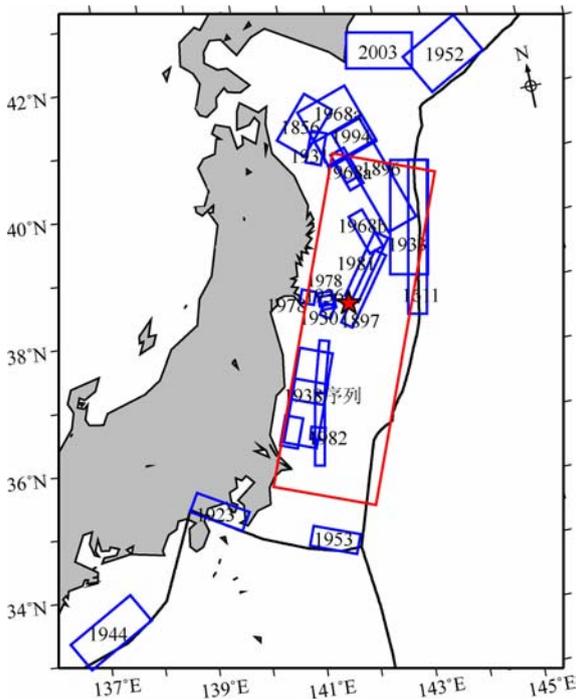


图 5 日本海沟地区强震破裂空间分布^[30~32]

Fig. 5 The distribution of ruptures of strong earthquakes in Japan trench^[30~32]

较大,既有以往 7 级以上强震重复发生的区域(震中东北的 39°N 附近),又包括强震发生频度较低的地区(震中以东和以南).此次地震既体现强震原地复发的特点,又体现了强震破裂的真空性(图 5).

本文基于 GPS 观测同震地表位移,反演日本 9.0 级地震同震位错分布,分析了其同震形变空间分布特征.但由于此次地震为板块俯冲地区的强震,同震地表形变观测以大陆一侧为主,如何弥补这种观测缺陷还有待于进一步研究;而对于强震原地复发和空间真空性的物理机制,相同地质构造带上强震动力学轮回特征等问题有待相关观测资料进一步的积累和相关理论研究的深入讨论.

致谢 感谢 JPL 提供的日本 9.0 级地震同震 GPS 位移场解算结果;ISC 提供的日本 9.0 级地震余震目录;感谢德国波茨坦地学中心 Dr. Wang 提供的 SBIF 反演程序.感谢闻学泽研究员、刘桂萍研究员和马宏生副研究员在本文研究过程中有益的讨论.

参考文献 (References)

- [1] Zhao D P, Hasegawa A, Horiuchi S. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**(B13): 19909~19928
- [2] 傅征祥, 刘桂萍, 邵志刚等. 板块构造和地震活动性. 北京: 地震出版社, 2009

- Fu Z X, Liu G P, Shao Z G, et al. Plate tectonics and seismic activity (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2009
- [3] 许忠淮. 东亚地区现今构造应力图的编制. *地震学报*, 2001, **23**(5): 492~501
- Xu Z H. A present-day tectonic stress map for eastern Asia region. *Acta Seismologica Sinica*, 2001, **23**(5): 492~501
- [4] 王卫民, 赵连锋, 李娟等. 四川汶川 8.0 级地震震源过程. *地球物理学报*, 2008, **51**(5): 1403~1410
- Wang W M, Zhao L F, Li J, et al. Rupture process of the $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake of Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(5): 1403~1410
- [5] Gavin Hayes (USGS). http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/usc0001xgp/finite_fault.php [2011-03-31]
- [6] Shao Guangfu & Ji Chen (University of California Santa Barbara). <http://www.geol.ucsb.edu> [2011-03-31]
- [7] Wei Shengji, Anthony Sladen, ARIA Group (Caltech). http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/2011_taiheiyo-oki/ [2011-03-31]
- [8] Poiata, Miyake, Koketsu (ERI, University of Tokyo). http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/eng/ [2011-03-31]
- [9] 赵翠萍, 周连庆, 陈章立 (中国地震局地震预测研究所). <http://www.seis.ac.cn> [2011-03-31]
- Zhao C P, Zhou L Q, Chen Z L (Institute of Earthquake Science, CEA). <http://www.seis.ac.cn> [2011-03-31]
- [10] Yagi Yuuzi, Naoki Nishimura (University of Tsukuba). <http://www.geol.tsukuba.ac.jp> [2011-03-31]
- [11] 张勇, 许力生, 陈运泰 (中国地震局地球物理研究所). <http://ddsep.cea-igp.ac.cn> [2011-03-31]
- Zhang Y, Xu L S, Chen Y T (Institute of Geophysics, China Earthquake Administration). <http://ddsep.cea-igp.ac.cn> [2011-03-31]
- [12] “中国地壳运动观测网络”项目组. GPS 测定的 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 级地震的同震位错场. *中国科学 D 辑*, 2008, **38**(10): 1195~1206
- Crustal Movement Observation Network of China. The coseismic displacement fields of Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake occurrence in 2008 using GPS data. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2008, **38**(10): 1195~1206
- [13] Kanamori H. Seismic and aseismic slip along subduction zones and their tectonic implications. In: Talwani M, Pitman W C III, eds. *Island Arcs, Deep Sea Trenches and Back Arc Basins*. American Geophysical Union, 1977. 163~174
- [14] 中国地震局监测预报司. 亚洲地震概要. 北京: 地震出版社, 2007
- Department of Earthquake Monitoring and Prediction. China Earthquake Administration. *Summary of the Asian Earthquake* (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2007
- [15] DeMets C R. Oblique convergence and deformation along the Kuril and Japan Trenches. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**(B12): 17615~17625

- [16] DeMets C R, Gordon R G, Argus D F, et al. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophys. Res. Lett.*, 1994, **21** (20):2191~2194
- [17] Huang J L, Zhao D P. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**: B09305, doi: 10. 1029/2005JB004066
- [18] Chen P F, Bina C R, Okal E A. A global survey of stress orientations in subducting slabs as revealed by intermediate-depth earthquakes. *Geophys. J. Int.*, 2004, **159**(2): 721~733
- [19] Isacks B L, Oliver J, Sykes L R. Seismology and the new global tectonics. *J. Geophys. Res.*, 1968, **73**(18): 5855~5899
- [20] Hayes G P. [http://earthquake.usgs.gov/research/data/slab/\[2011-03-31\]](http://earthquake.usgs.gov/research/data/slab/[2011-03-31])
- [21] [http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html\[2011-03-31\]](http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html[2011-03-31])
- [22] 李志才, 许才军, 张 鹏等. 基于地壳分层的地震断层同震形变反演分析. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, **33**(3): 229~232
Li Z C, Xu C J, Zhang P, et al. The co-seismic deformation inversion analysis due to different seismic fault based on crust layering. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (in Chinese), 2008, **33**(3): 229~232
- [23] 许才军, 刘 洋, 温扬茂. 利用 GPS 资料反演汶川 M_w 7.9 级地震滑动分布. 测绘学报, 2009, **38**(3):195~201
Xu C J, Liu Y, Wen Y M. M_w 7.9 Wenchuan earthquake slip distribution inversion from GPS measurements. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 2009, **38** (3):195~201
- [24] Wang R, Xia Y, Grosser H, et al. Das Bam Erdbeben 2003; Prazise Herdparameterbestimmung mit Hilfe der differentiellen Rada-Interferometrie. Zweijahresbericht, GeoForschungs Zentrum Potsdam, 2006
- [25] Ward S N, Barrientos S E. An inversion for slip distribution and fault shape from geodetic observations of the 1983, Borah Peak, Idaho, earthquake. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91** (B5): 9409~4919
- [26] Diao F Q, Xiong X, Wang R J, et al. Slip model of the 2008 M_w 7.9 Wenchuan (China) earthquake derived from co-seismic GPS data. *Earth Planets Space*, 2010, doi:10.5047/eps.2009.05.003
- [27] Yonekura N. Quaternary tectonic movements in the outer arc of southwest Japan with special reference to seismic crustal deformation. *Bull. Dept. Geogr. Univ. Tokyo*, 1975, **7**: 19~71
- [28] Kato N. Numerical simulation of recurrence of asperity rupture in the Sanriku region, northeastern Japan. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**:B06302, doi:10.1029/2007JB005515
- [29] 茂木清夫. 日本の地震予知. 日本株式会社, 1982
Mogi. Earthquake prediction in Japan (in Japanese). Japan Col. Ltd., 1982
- [30] Tanioka Y, Ruff L, Satake K. What controls the lateral variation of large earthquake occurrence along the Japan Trench? *The Island Arc*, 1997, **6**(3):261~266
- [31] Nanayama F, Satake K, Furukawa R, et al. Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kuril trench. *Nature*, 2003, **424**(6949): 660~663
- [32] Kanamori H, Miyazawa M, Mori J. Investigation of the earthquake sequence off Miyagi prefecture with historical seismograms. *Earth Planets Space*, 2006, **58**(12):1533~1541

(本文编辑 胡素芳)