第 31 卷　第 1 期(133 ~ 140)　中 国 地 震　Vol. 31　No. 1
2015 年 3 月　EARTHQUAKE RESEARCH IN CHINA　Mar. 2015

李晓帆、孟令媛、闫伟,2015,关于 2011 年 3 月东日本 M_W 9.0 地震与 M_W 7.3 地震关系的讨论,中国地震,**31**(1),133 ~ 140。

关于 2011 年 3 月东日本 M_W 9.0 地震与 M_W 7.3 地震关系的讨论

李晓帆[1,2)]　孟令媛[2)]　闫伟[2)]

1) 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号　430079

2) 中国地震台网中心,北京市西城区三里河南横街 5 号　100045

摘要　2011 年 3 月日本 M_W7.3 地震 51h 之后,发生了东日本 M_W9.0 地震并引发巨大灾难。地震学家多角度、多方法探讨了两次地震之间的关系,结果判断日本 M_W7.3 地震是东日本 9.0 级地震的前震。本文计算了 M_W7.3 前震和 2005 ~ 2011 年沿日本海沟一系列 7 级左右地震对 M_W9.0 地震的静态库仑应力,结果显示其并未直接触发 M_W9.0 主震,但对主震震中位置及周边区域的应力加载效应是明确的。利用 Suito 等(2011)基于 GPS 数据计算的板间地震滑移速率,分析了一般地震与有广义前震的地震在震后和同震释放能量的不同来分析 2005 年以来日本海沟发生的 5 次 7 级左右地震与 M_W9.0 地震的关系。总的来说,日本 M_W7.3 地震是东日本 M_W 9.0 地震的前震,从长时间尺度的 GPS 时间序列分析来看,2005 ~ 2011 年日本海沟一系列 7 级左右地震可能是东日本 M_W9.0 地震的广义前震。

关键词:　东日本 M_W9.0 地震　日本 M_W7.3 地震　前震　库仑应力变化　GPS

[文章编号] 1001-4683(2015)01-0133-08　[中图分类号] P315　[文献标识码] A

0　引言

地震序列中主震前发生的地震叫做前震,主震后发生的地震为余震。前震、主震和余震均处在主震震源区内,是震源区同一失稳过程的结果(陆远忠等,1985)。现阶段,前震一般来说分为直接前震与广义前震两种类型。主震发生前 40 天以内、距主震震中 100 km 内的地震被认为是有意义的前震,或称直接前震(梅世蓉等,1993);根据前震的定义,可直接将前震限定在强震孕育区内或与未来强震的孕育区关系密切的边缘区域(王林瑛等,2005);直接前震应发生在主震破裂区内,但不一定与主震起始破裂点一致。广义前震的定义是在直接前震定义上的拓延,陆远忠等(1985)将广义前震定义为:发生在一个地震序列之前较长时间(几个月、几年甚至更长)、较远距离(距震源数十千米甚至数百千米),与该序列孕育有关的单个地震(即前兆地震)或地震群(即前兆震群)以及它们的组合。

[收稿日期] 2015-01-05;[修定日期] 2015-01-11

[项目类别] 地震行业科研专项(201208009)资助

[作者简介] 李晓帆,女,1982 年生,武汉大学在读博士生,助理研究员,主要研究领域:地球动力学研究。

E-mail: lxf@ seis. ac. cn

前震研究对于地震研究具有非常重要的价值,2011 年 3 月 11 日东日本 M_W9.0 大地震前 2 天发生了 M_W7.3 地震,该地震是否为东日本 M_W9.0 大地震的前震,对前震研究具有一定的意义,本文对此进行了探讨。

1 2011 年 3 月东日本 M_W9.0 地震与 M_W7.3 地震概况

日本列岛处于太平洋板块、欧亚板块、北美板块和菲律宾海板块的共同作用地区(Kanamori, 1977;Taira, 2001),板块构造运动比较强烈,为火山和地震多发地区。太平洋板块每年以 7.9~9.2cm/a 的速度向日本东北俯冲,沿日本海沟发生了很多 7 级地震。但从 11 世纪有地震纪录以来至 2011 年,日本海域未发生过 8.5 级以上的地震(Suito, 2011)。

2011 年 3 月 9 日 02:45:12(UTC)日本海域发生 M_W7.3 地震并引起小规模海啸(Gusman et al, 2013),51h 之后即 3 月 11 日 05:47:32(UTC),距离 M_W7.3 地震震中约 45km 处海域发生 M_W9.0 地震,此次地震使日本东北部太平洋海岸附近海域的板块边界破裂(Ozawa et al, 2011),引发巨大海啸,并造成了灾难性的后果。诸多研究成果表明 M_W7.3 地震是此次 9.0 级地震的前震(Ando et al, 2011; Miyazaki et al, 2011;Hirose et al, 2011, Gusman et al, 2013)。

东日本 M_W9.0 地震之前的近 10 年来,沿日本海沟发生了一系列 7 级左右地震且出现了震后形变,它们分别是 2005 年 8 月 16 日宫城县海域 7.2 级、2008 年 5 月 8 日茨城县海域 6.8 级、2008 年 7 月 19 日福岛县海域 7.0 级、2010 年 3 月 14 日福岛县海域 6.5 级以及 2011 年 3 月 9 日三陆海域 7.3 级等地震(Suito et al, 2011)。这一系列 7 级左右地震与 2011 年 3 月 11 日 M_W9.0 地震的发生有没有关系值得研究。

2 M_W7.3 地震余震时空分布特征

2011 年 3 月 9 日 02:45:12(UTC)M_W7.3 地震发生后至同月 11 日 05:47:32(UTC)M_W9.0 地震前共发生 36 次 4 级以上地震,23 次 5 级以上地震;其中 6 级及以上地震 2 次,震级均为 6.0 级(美国国家地震信息中心 NEIC 地震目录)。

Ando 等(2011)对 JMA(Japanese nationwide seismic network)提供的 M_W7.3 地震发生后至 M_W9.0 地震发生前的 1 级以上地震进行了较为精确的定位,并选择 2.6 级以上的地震分析了地震活动的时空变化(图 1)。结果显示,地震活动从 M_W7.3 地震震源区的缓慢迁移大致反映了余震的传播方向。当 M_W7.3 地震余震迁移至 M_W9.0 地震震源位置时可能触发了主震破裂。由图 1 可见,余震震中颜色的逐步变化显示地震活动从 M_W7.3 地震震中区域开始迁移,最后到达 M_W9.0 地震震源附近;同时随着范围的扩大地震迁移速度渐缓。从 Ando 等(2011)的结果可以得出,M_W7.3 地震应为 M_W9.0 地震的前震,且对主震起一定的触发作用。

3 日本海沟 7 级地震静态库仑应力影响

Gusman 等(2013)利用东京大学与东北大学的海底测压仪和国土交通省港湾空港技术研究所的 GPS 波浪记录浮标所记录的海啸波形数据,构建 105km×90km 的板块界面模型,反演东日本 M_W7.3 地震的滑移速率分布。基于所得结果,Gusman 等(2013)计算了 M_W7.3

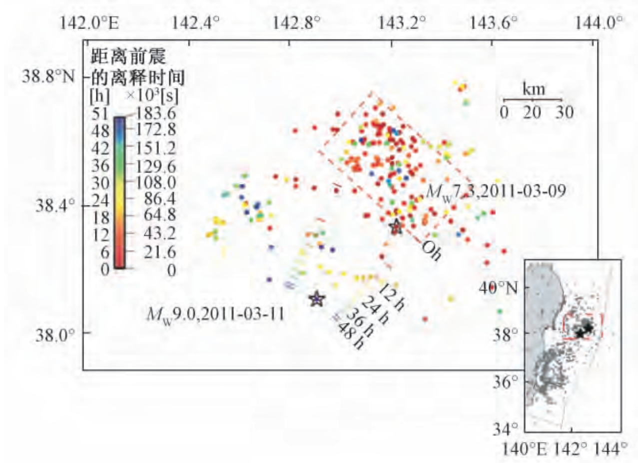

图 1　M_W7.3 地震发生至 M_W9.0 地震发震时所发生地震的震中分布图(据 Ando 等(2011))

圆点表示震中位置,圆点的颜色则表示距离 M_W7.3 地震发生的离释时间;五角星分别表示 M_W7.3、M_W9.0 地震的震中位置;红色虚线框内为 M_W7.3 地震的余震分布区域

地震对主震断层的静态库仑应力变化,结果显示在主震震源处库仑应力增加了 3.5bar。

为了计算 2005 年以来日本海沟一系列 7 级左右地震(包括 2011 年 M_W7.3 地震)对 M_W9.0 地震的静态库仑应力影响,我们应用 Coulomb3.3 软件计算了同震静态库仑应力,地震参数的选取详见表 1。图 2 显示了 M_W7.3 地震对 M_W9.0 地震静态库仑应力分布的影响。计算过程中我们将 1 号断层设定为源断层,2 号断层设为接收断层,计算过程采用设定最优接收方向的方式。因 2 号断层为主震发震断层,本文参照主要震源参数(如倾向、走向和滑动角)作为源断层计算同震静态库仑应力的最优方向。图 3 显示了日本海沟自 2005 年以来 5 次 7 级左右地震(包括 M_W7.3 地震)对 M_W9.0 地震静态库仑应力分布的影响。图 3 中的计算方法与图 2 相同,2 号断层为 3 月 11 日 M_W9.0 主震的发震断层,同时也为接收断层;1、3、4、5、6 号断层分别为 2005 年以来 5 次 7 级左右地震的发震断层,即为源断层。

表 1　　2011 年东日本海域 M_W9.0 地震和 M_W7.3 地震的发震断层几何参数及位错参数

地震事件		震中位置	震源深度 /km	走向/倾向/滑动角 /(°)
日期(年-月-日)	震级 M_W			
2005-08-16	7.2	142.06 N°, 38.25 E°	36	24/74/93
2008-05-08	6.8	141.54 N°, 36.14 E°	36.6	22/75/90
2008-07-19	7.0	142.21 N° 37.55 E°	22	22/74/91
2010-03-14	6.5	141.56 N°, 37.78 E°	39	20/66/90
2011-03-09	7.3	142.84 N°, 38.44 E°	32	23/83/92
2011-03-11	9.0	142.37 N°, 38.29 E°	30	25/80/90

注:来自美国 USGS,http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/results.php.

由图 2 可见,尽管主震(M_W9.0)的震中在加载范围区,但并未超过静态应力触发的阀值(0.1bar,相当于 0.01MPa)。如果先验地认为主震(M_W9.0)肯定会破裂,那前震(M_W7.3)破裂引起的同震静态应力变化并没有直接触发主震,但对主震震中位置及周边区域的应力加载效应是明确的。图 3 的计算结果与图 2 近似,5 次 7 级左右地震虽然没有达到触发阀值,

但对主震的应力加载是明确的。

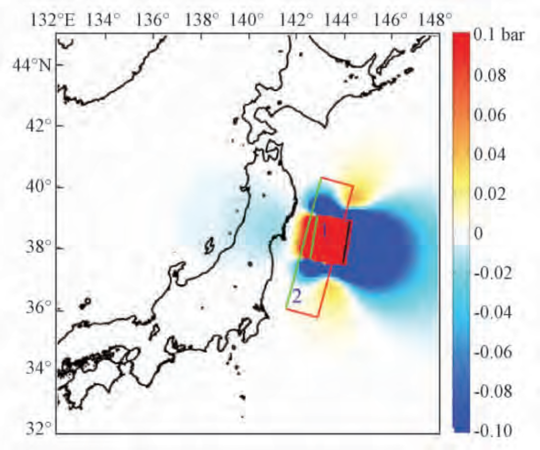

图 2 M_W7.3 地震静态库仑应力分布的影响

1 号断层是 2011 年 3 月 9 日地震(M_W7.3)发震断层;
2 号断层是 2011 年 3 月 11 日地震(M_W9.0)发震断层

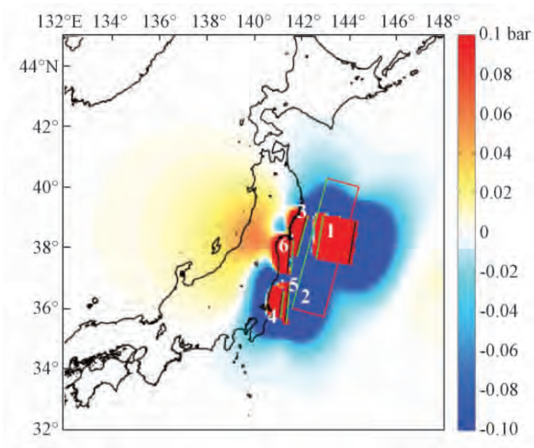

图 3 5 次 7 级左右地震(包括 M_W7.3 地震)静态库仑应力分布的影响

2 号断层为 2011 年 3 月 11 日 M_W9.0 地震的发震断层;1、3、4、5、6 号断层为 2005 年以来 5 次 7 级左右地震的发震断层

4 基于 GPS 数据的板间地震滑移特征

日本国土交通省国土地理院运维覆盖日本全国共 1300 多个 GPS 连续站,即 GEONET (GPS Earth Observation Network System)。GEONET 数据由 BERNESE Ver 5.0 和 IGS (International GNSS Service) 精密星力解算,GPS 时间序列以“F3 solutions”对外公布(Nishimura et al,2004;邵志刚等,2011)。

Suito 等(2011) 利用 GEONET 的 GPS 时间序列的东西分量,以 950154 做为基准,分析了 950172、950175、960550、950179、940038、950203、970800、950214 和 950216 等 9 个台站的数据(图 4(a))。1997 年 1 月 1 日 ~2002 年 1 月 1 日日本海域没有发生显著地震事件,Suito 等(2011)以此时间段为基准,利用最小二乘拟合将 GPS 时间序列中年度和半年尺度的线性变化去除。GPS 时间序列较好地显示了 2005 年以来沿日本海沟连续发生的一系列 7 级地震的同震及震后效应。Suito 等(2011)依据 GPS 数据计算同震、震后恢复时间及震后滑移释放能量,结果显示震后滑移释放的能量比同震滑移的要多(图 4(b))。这 5 次 7 级左右地震及震间滑移释放的总能量为东日本 M_W9.0 地震释放能量的 1.5%(表 2)。

表 2 沿日本海沟 5 次 7 级左右地震同震及震后滑移能量估值(据 Suito 等(2011))

地震名	发震日期	矩震级 M_W	同震		持续时间/a	震后	
			矩张量/(10^{19}N·m)	矩震级 M_W		矩张量/(10^{19}N·m)	矩震级 M_W
宫城地震	2005-08-16	7.2	6.60	7.15	2.72	12.19	7.32
茨城地震	2008-05-08	6.8	3.84	6.99	0.19	2.02	6.80
福岛地震	2008-07-19	7.0	4.20	7.02	1.65	14.96	7.38
福岛地震	2010-03-14	6.5	1.64	6.74	0.98	5.06	7.07
三陆地震	2011-03-09	7.3	10.59	7.28	—	—	—

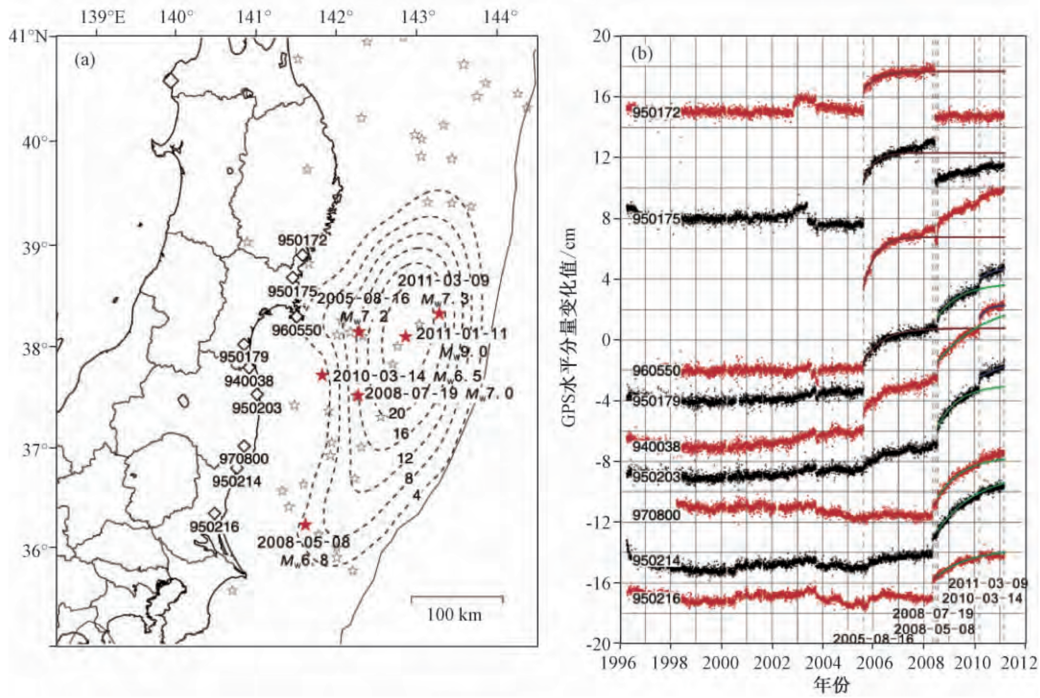

图 4　日本海沟 7 级左右地震和 $M_W9.0$ 地震震中分布图、GPS 台站分布图(a)及 GPS 时间序列(b)(据 Suito 等(2011))

图(a)中红色五角星表示研究区域 7 级左右地震和东日本 $M_W9.0$ 地震的震中;白色五角星表示自 1923 年以来 6.8 级以上地震的震中位置;白色菱形表示 GPS 台站位置。图(b)中指数函数分别用棕色、绿色和蓝色线表示,它们分别对应了 2005 年宫城地震、2008 年福岛地震和 2010 年福岛地震的震后滑移;垂直虚线标识图(a)中红色五角星所示地震同震滑移位置

在 1 条断层或者 1 个断层区域范围内,地震会重复发生。地震载荷周期一般分为震前、同震、震后以及震间等 4 个阶段(Scholz,2002)。对于单个地震而言,由于构造加载,剪应力在断层处逐渐积累,当剪应力达到临界水平时,准静态成核过程开始发生,然后动态破裂开始,同震阶段剪应力迅速释放,震后阶段剪应力缓慢释放,直至所积累的应力停止释放时,地震终止。图 5 为强震震前、同震和震后断层应变累积、释放示意图。

已有的研究显示,每个地震的衰减时间和显示的震后信息均有所不同。虽然其可能取决于地震震源机制,但相同的是由滑移引发的震后信息随着时间迅速衰减,同时震后位移等同或者小于同震补偿(Perfettini et al, 2010)。Suito 等 (2011) 的研究结果与上述观点有所不同,即如图 5 所示:一般地震发震后因断层运动产生的矩张量比同震矩力量小,而有广义前震的情况下有可能震后释放的能量比同震释放的能量大。其根据 GPS 时间序列计算的一系列 7 级地震震后形变和震后瞬时滑移释放矩张量相比同震矩张量大很多。由此,本文作者认同 Suito 等 (2011) 的观点,推测这一系列 7 级地震事件的发生不仅是震后应力释放过程,同时也是东日本大地震的准备和震前信号。

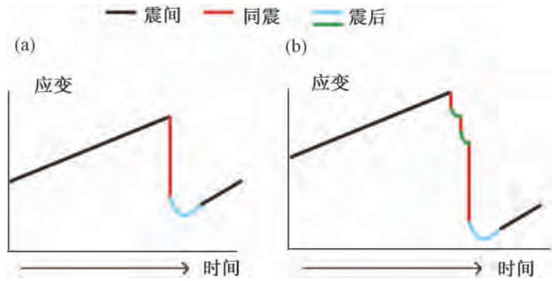

图 5 强震震前、同震和震后断层应变累积、释放示意图
（a）表示无前震的一般地震发震前后发震断层运动形态；
（b）表示有广义前震的地震发震前后发震断层运动形态
横轴为时间；纵轴为应力变化；蓝色表示一般强震震后应变释放；绿色为前兆性强震震后应变释放

5 讨论与结论

日本 M_W7.3 地震发生在日本 M_W9.0 地震之前 51h，其震中距离 M_W9.0 地震震中约 45km，依据前震的定义可以认作是日本 M_W9.0 地震的直接前震。已有的研究利用不同数据、不同方法得到的结果大致相同。Ando 等（2011）利用两次地震间前震的余震精定位结果所做的研究显示，地震活动从前震震源区缓慢迁移至主震震源位置时触发了主震破裂；Gusman 等（2013）利用 GPS 波浪记浮标所记录的海啸波形数据反演的滑移分布模拟结果显示，虽然前震没有破裂至主震动态破裂的起始破裂区域，但应力加载仍然高达 3.5bar，这可能触发了主震；我们应用 Coulomb3.3 软件计算了日本海沟自 2005 年以来 5 次 7 级左右地震（包括 M_W7.3 地震）的同震静态库仑应力，结果显示其并未直接触发 M_W9.0 主震，但对主震震中位置及周边区域的应力加载效应是明确的。尽管我们计算使用的静态库仑应力模型相对简化，但最直观的计算结果与现有的研究成果并不矛盾。Suito 等（2011）利用 GEONET 时间序列，依次分析 2005 年宫城 7.2 级、2008 年茨城 6.8 级、2008 年福岛 7.0 级、2010 年福岛 6.5 级和 2011 年三陆 7.3 级等地震的同震及震后的恢复时间及能量释放，结果显示震后滑移释放的能量比同震滑移的要多。通过一般地震和有广义前震的地震震后的能量释放与同震矩张量的对比分析可知，在 M_W9.0 地震之前发生的 5 次 7 级左右地震和震间滑移释放的总能量为 M_W9.0 地震释放能量的 1.5% 时，即可认为这一系列事件的发生不仅是震后应力释放过程，同时也是东日本大地震的准备和震前信号。

综上所述，可以初步得到以下研究结果：日本 M_W7.3 地震是东日本 M_W9.0 地震的前震，从现有研究成果来看其触发或者加速了主震的发生；从长时间尺度的 GPS 时间序列分析来看，2005 年以来的一系列 7 级左右地震（包括 2011 年 M_W7.3 地震）也许是东日本 M_W9.0 地震的广义前震。

致谢：本文在成稿过程中，邵志刚博士给予了有益的指导与帮助，作者谨表谢意。本文使用的 GPS 数据由 Geospatial Information Authority of Japan（GSI）提供。库仑应力变化由 Coulomb3.3 软件计算，在此一并致谢。衷心感谢评审人提出的宝贵意见。

参考文献

陆远忠、陈章立、王碧泉,1985,地震预报的地震学方法,111 ~ 150,北京:地震出版社。

梅世蓉、冯德益,1993,中国地震预报概论,69 ~ 73,北京:地震出版社。

邵志刚、武艳强、江在森等,2011,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,**54**(9),2243 ~ 2249。

王林瑛、陈佩燕、吴忠良等,2005,前震特征及其识别研究,地震学报,**27**(2),171 ~ 177。

Ando R, Imanishi K, 2011, Possibility of M_W 9.0 mainshock triggered by diffusional propagation of after-slip from M_W 7.3 foreshock, Earth Planets Space, **63**, 767 ~ 771.

Gusman A R, Fukuoka M, Tanioka Y, et al, 2013, Effect of the largest foreshock (M_W 7.3) on triggering the 2011 Tohoku earthquake (M_W 9.0), Geophysical Reasearch Letters, **40**, 497 ~ 500.

Gusman A R, Tanioka Y, Sakai S, et al, 2012, Source model of the great 2011 Tohoku earthquake estimated from tsunami waveformsand crustal deformation data, Earth Planet Sci Lett, 341 ~ 344, 234 ~ 242.

Hirose F, Miyaoka K, Hayashimoto N, et al, 2011, Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (M_W 9.0) - seismicity: foreshocks, mainshock, aftershocks, and induced activity, Earth Planets Space, **63**, 513 ~ 518.

Kanamori H, 1977, Seismic and aseismic slip along subduction zones and their tectonic implications, In Island Arcs, Deep Sea Trenches and Back Arc Basins (eds. M Talwani& W C Pitman III), American Geophyssical Union, 163 ~ 174.

Miyazaki S, McGuire J J, Segall P, 2011, Seismic and aseismic fault slip before and during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Earth Planets Space, **63**, 637 ~ 642.

Nishimura T, Hirasawa T, Miyazaki S, et al, 2004, Temporal change of interplate coupling in northeastern Japan during1995 - 2002 estimated from continuous GPS observations, Geophysical Journal International, **157**, 901 ~ 916.

Ozawa S, Nishimura T, Suito H, et al, 2011, Coseismic and postseismic slip of the 2011magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake, Nature, **475**, 373 ~ 376.

Perfettini H, Avouac J P, Tavera H, et al, 2010, Seismic and aseismic slip on the Central Peru megathrust, Nature, **465**, 78 ~ 81.

Scholz C H, 2002, The mechanics of earthquakes and faulting, 244 ~ 299, Cambridge: Cambridge University Press.

Suito H, Nishimura T, Tobita M, et al, 2011, Interplate fault slip along the Japan Trench before the occurrence of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake as inferred from GPS data, Earth Planets Space, **63**, 615 ~ 619.

Taira A, 2001, Tectonic evolution of the Japanese island arc system, Annu Rev Earth Planet Sci, **29**, 109 ~ 134.

The relationship between Japan M_W9.0 earthquake on Mar 11, 2011 and Japan M_W7.3 earthquake

Li Xiaofan[1),2)] *Meng Lingyuan*[2)] *Yan Wei*[2)]

1) School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract 51 hours after the M_W7.3 earthquake, the Tohoku M_W9.0 earthquake, Japan in March 2011 occurred and caused a huge disaster. Seismologists used many different data and methods to discuss the relationship between these two earthquakes and the results showed that the M_W7.3 earthquake was a foreshock of the Tohoku M_W9.0 earthquake of Japan. We calculated the static coulomb stress of the M_W7.3 earthquake and the M7.0-class sequence events, and the result shows both the M_W7.3 and the M7.0-class sequence events did not trigger the Tohoku M_W9.0 earthquake directly, but the stress load effect to the main shock and peripheral zone was clear. In general, the M_W7.3 earthquake triggered the Tohoku M_W9.0 earthquake, Japan. We use the results of Suitor et al., (2011) which analyses the difference of the general earthquakes and the earthquake with the generalized foreshocks based on the GPS data and geodetic inversion. In terms of the long-term GPS time series, the M7.0-class earthquakes from 2005 to 2011 might be regarded as the generalized foreshocks of the Tohoku M_W9.0 earthquake.

Key words: **Japan M_W9.0 earthquake Japan M_W7.3 earthquake Foreshock Coulomb stress change GPS observation**