

DOI:10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.06.010

1990 年菲律宾 $M_w7.7$ 级强震对 马尼拉俯冲带静态应力触发影响

李健^{1,2}, 詹文欢^{1,2}, 朱俊江^{3,4}, 孙杰¹, 冯英辞^{1,2}, 姜莲婷¹, 郭磊^{1,2}, 唐琴琴^{1,2}

(1. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室(南海海洋研究所), 广州 266100;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100;

4. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质功能实验室, 青岛 266237)

摘要:基于震源机制解模型和弹性半空间模型, 计算了 1990 年 7 月 16 日 $M_w7.7$ 级地震所产生的静态库伦应力变化, 研究结果表明 $M_w7.7$ 级地震触发了其后 $M_w6.0$ 级和 $M_w6.5$ 级 2 次强余震的发生, 应力加载值分别达到了 21.63 bars 和 9.15 bars。依据地震重复原则和构造外推原则, 以马尼拉俯冲带及其附近区域 $M_w6.0$ 级以上地震震源机制解中的一个节面作为接收断层, 计算了 $M_w7.7$ 级地震对马尼拉俯冲带区域静态库伦应力的影响, 结果表明其对马尼拉俯冲带的影响主要集中在西吕宋海槽的部分断层上, 但变化量值很小, 对马尼拉俯冲带北部区域基本不产生影响。

关键词:应力触发; 震源机制解; 马尼拉俯冲带

中图分类号: P738

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2017)06-0093-07

静态应力触发是指地震发生后造成断层的力学性质及物理化学性质的改变, 抑制或加速断层错动的现象^[1]。应力触发已经成为研究地震间相互作用的重要手段之一, 并且已被诸多的震例研究结果所证实。Stein 等^[2]对北安纳托利亚断裂带 1939—1992 年 10 个 6.7 级以上地震的研究表明, 90% 的地震之间具有应力触发关系, 而 1999 年土耳其 Izmit 地区 $M_w7.6$ 级地震恰好位于其预测的潜在发震区中。Toda 等^[3]对汶川 $M_w7.9$ 级地震的研究结果表明主震破裂面西南方的鲜水河断裂带至康定段是主要的应力加载区和潜在的大震孕震区, 而 2014 年 11 月 22 日康定 $M_s6.3$ 级地震的发生证实了他们的预测。

1990 年 7 月 16 日发生在菲律宾吕宋岛的 $M_w7.7$ 级地震是建立现代地震台网以来记录到的最大走滑型地震之一, 此次地震的震中位于菲律宾断裂吕宋岛段的中部, 形成了近百千米的地表破裂带, 造成至少 1 621 人遇难, 1 000 多人失踪^[4]。菲律宾断裂是一条纵贯菲律宾群岛的左旋走滑型断

裂, 从吕宋岛北部延伸至棉兰老岛东南部, 长度为 1 250 km^[5], 其西边为马尼拉海沟, 东边为东吕宋海槽和菲律宾海沟。吕宋岛弧由于受到菲律宾板块和南海板块双向俯冲的共同作用, 使其处在一个复杂的构造应力场环境中。菲律宾板块以约 80~90 mm/a 的速度沿 NW 向运动^[6], 南海板块沿 NE 向俯冲于菲律宾板块之下形成的马尼拉俯冲带, 其俯冲速度自北部巴丹岛的 85 mm/a 向南递减至民都洛岛北部的 49 mm/a^[7]。大地测量的研究结果表明菲律宾断裂的滑动速度自吕宋岛北部的 24 mm/a 向南递增至 40 mm/a^[8]。此外, 南海海盆在 15 Ma 扩张结束后, 扩张中脊由于火山作用而逐渐发展成为现今的黄岩海山链, 海山链随南海板块向马尼拉海沟俯冲, 其越过海沟的位置正好是菲律宾断裂切过海沟的位置, 现今的维甘高地和斯图尔特浅滩原来均为古扩张脊的一部分, 由于古扩张脊的俯冲而被菲律宾左旋走滑断裂错动到了更北的位置^[9,10], 显然, 菲律宾断裂对该区的板块运动和应力场调整发挥着重要作用。

1990 年菲律宾 $M_w7.7$ 级地震后不久, 沿欧亚板块和菲律宾板块边界的地震活动变化显著, 我国的台湾地区、日本的九州地区以及吕宋岛弧相继发生震群现象^[11]。吕宋岛西侧的马尼拉俯冲带作为南海唯一的俯冲带, 是南海地震主要的活动区域, 同时也是中国主要的海啸高风险区之一, 强震引发的

基金项目:国家自然科学基金项目(41376063)

作者简介:李健(1990—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为海洋新构造与地震地质学。E-mail: fjzxlijian@163.com

通讯作者:詹文欢(1963—), 男, 研究员, 主要研究方向为海洋新构造与地质灾害。E-mail: whzhan@scsio.ac.cn

收稿日期: 2017-11-07; **改回日期:** 2017-12-17。 文凤英编辑

月 1 日至 2017 年 3 月 31 日发生在马尼拉俯冲带区域($12^{\circ}\sim 23^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$) $M_w \geq 6.0$ 级、震源深度小于 70 km 的浅源地震震源机制解资料,以其中最有可能是断层面的震源机制解节面作为接收断层面。选取依据为:(1)根据震源机制解周边的断层资料,选取距离最近断层走向较为一致的节面作为断层面;(2)对于仅根据节面走向难以判断出断层面,且两个节面倾角相差较大的情况,若震源机制解为正断层型,选取两个节面中倾角较大的节面作为断层面,因为节面倾角较大有利于正断层型地震的发生;若震源机制解为逆冲型,选取节面倾角较小的节面作为断层面,因为节面倾角较小有利于逆冲型地震的发生;(3)当地震周围没有明确断层,或是上述依据也难以区分时,为了减少结果的不确定性,则舍弃掉该震源机制解^[26]。基于上述原则,最终获得了 63 个 $M_w \geq 6.0$ 级地震的震源机制解资料(图 2)。对于没有明确发震模型的地震,本文断层的破裂长度依据不同震源机制解类型适用的矩震级-断层破裂长度经验关系式计算得到^[27]。

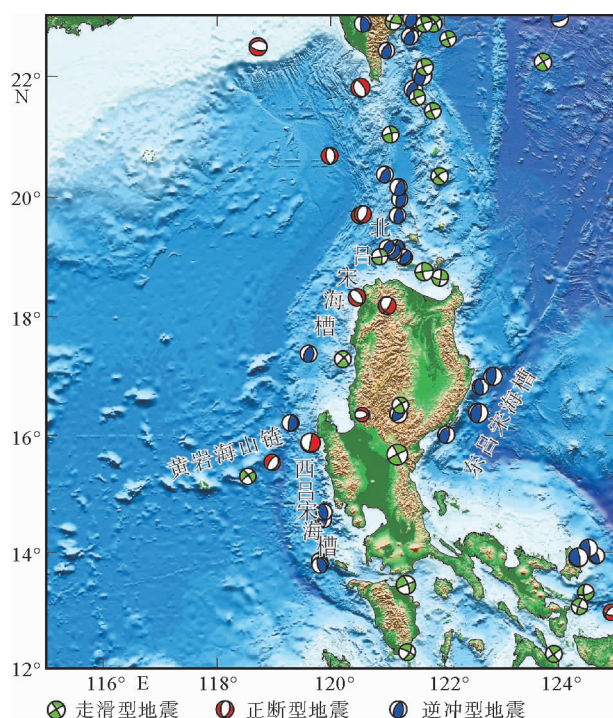


图 2 $M_w \geq 6.0$ 级地震震源机制解空间分布

Fig. 2 The distribution of focal mechanism ($M_w \geq 6.0$)

4 静态库伦应力计算结果及分析

研究走滑断层的优势在于应力变化图像不会随

深度变化很大^[17],尽管不同学者给出的 $M_w7.7$ 级地震的震源深度不尽一致(表 1),并且余震的震源深度也有较大的不确定性,但仍可通过断层面周围的应力变化研究主震与余震的应力触发关系。对于具有明显滑动的走滑断层而言,通常选取较低的摩擦系数^[17,28]。因此依据静态库伦应力计算原理,设定有效摩擦系数 μ' 取值为 0.4,杨氏模量取值为 8×10^5 bars,泊松比为 0.25,发震断层参数使用 Dziewonski 等^[20]的数据。下文将通过 Coulomb3.3 软件分别计算分析 $M_w7.7$ 级地震静态库伦应力变化与后续余震的分布关系以及对马尼拉俯冲带静态应力触发的影响。

4.1 $M_w7.7$ 级地震的余震序列与库伦应力变化

根据美国地质调查局(USGS)地震目录的数据显示,1990 年 7 月 16 日至 1991 年 7 月 16 日的时间范围内,在主震破裂面的周围($14^{\circ}\sim 18^{\circ}\text{N}$, $118^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$)共发生 4.0 级以上地震 328 次,其中 4.0~4.9 级余震 251 次,5.0~5.9 级余震 74 次,6.0~6.9 级余震 3 次。

$M_w7.7$ 级地震静态库伦应力变化如图 3 所示,静态库伦应力的取面深度为 15 km。计算结果表明应力卸载区主要集中在断层面的两侧,应力加载区位于断层的两端呈纺锤形对称分布。7 月 16 日共发生余震 78 次(图 3a),余震主要集中在主震的西北部,呈 NW 向分布。由图 3 和表 2 的计算结果可知,7 月 17 日发生的 $M_w6.0$ 级和 $M_w6.5$ 级余震均位于主震西北部的应力加载区,应力加载值分别为 21.63 和 9.15 bars,远大于静态库伦应力的触发阈值 0.1 bar^[1,14,17,18],表明 $M_w7.7$ 级主震对随后的两次强余震具有触发作用。截至到 12 月 31 日共发生余震 194 次(图 3c),表现为向主震西北向集中的趋势,而东南余震较少。截至到 1991 年 7 月 16 日共发生余震 328 次(图 3d),在主震的西南方向出现余震集中分布的现象,这可能与主震周围的应力调整相关。图 3d 中可见存在着一定数量的余震分布在静态库伦应力卸载区,为了减少因余震震级较小,定位不准而造成的影响,将震级小于 5.0 级的余震剔除,统计 $M_w \geq 5.0$ 级余震的位置分布。统计分析的结果表明处于应力加载区的数量占有余震数量的 51%,表明此次主震对其后续余震的触发比率并不高。

表 2 M_w 6.0 和 M_w 6.5 两次强余震参数
Table 2 The parameters of 2 strong after shocks of M_w 6.0 and M_w 6.5

日期	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	深度/km	震级	走向/ $(^{\circ})$	倾角/ $(^{\circ})$	滑动角/ $(^{\circ})$	数据来源	$\Delta\sigma_f$ /bars
1990-07-17 18:06:39	120.930	16.460	15	M_w 6.0	135	90	7	文献[20]	21.63
1990-07-17 21:14:44	120.981	16.495	23	M_w 6.5	211	46	79	文献[21]	9.15

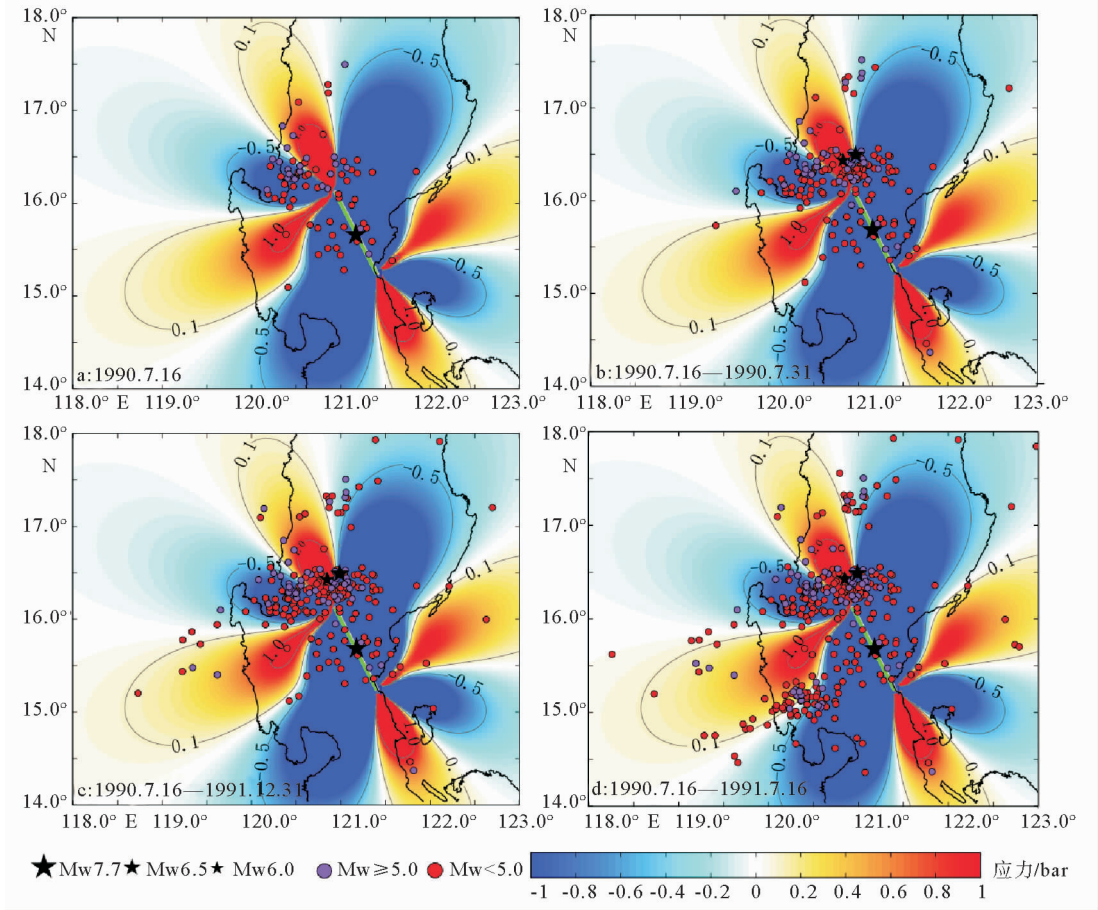


图 3 1990 年 7 月 16 日 M_w 7.7 级地震静态库伦应力变化与余震分布

Fig. 3 The 16 July 1990 M_w 7.7 Philippines earthquake stress changes and aftershocks distribution

4.2 M_w 7.7 级地震对马尼拉俯冲带静态应力触发

为了研究此次强震产生的静态库伦应力变化对马尼拉俯冲带及其附近区域地震活动性的影响,本文以 M_w 7.7 级地震作为源断层,将收集到的 63 个 $M_w \geq 6.0$ 级地震震源机制解资料中最有可能为断层面的节面作为接收断层面。根据静态库伦应力计算原理,计算了 M_w 7.7 级地震在每一个接收断层面上产生的静态库伦应力,计算深度为各个地震的震源深度,所得结果见图 4 所示。

由图 4 可见,1990 年 M_w 7.7 级地震对马尼拉海沟断层的库伦应力加载主要集中在距离源断层相对较近的区域。主震的两次 M_w 6.0 级和 M_w 6.5

强余震断面上的库伦应力加载值分别为 21.63 和 9.15bars。东吕宋海槽以逆冲型地震分布为主,其中距离源断层较近的部分断层主要以应力卸载为主,较远的断层则受到了应力加载作用,其中 1977 年 7 月 22 日 M_w 6.8 级地震断层面上应力加载值达到 0.053bar。西吕宋海槽处于应力加载区,其中 1999 年 12 月 11 日 M_w 7.2 级地震断层面上应力加载值达到 0.077bar。吕宋岛北部区域库伦应力变化值较小,靠近台湾岛区域的断层应力变化值几乎为零,表明主震对该区的影响很小。综上所述, M_w 7.7 级地震对马尼拉俯冲带的北部区域基本不产生影响,对马尼拉俯冲带的影响主要集中在其西侧的西吕宋海槽区域,但应力加载值均较小,未达到

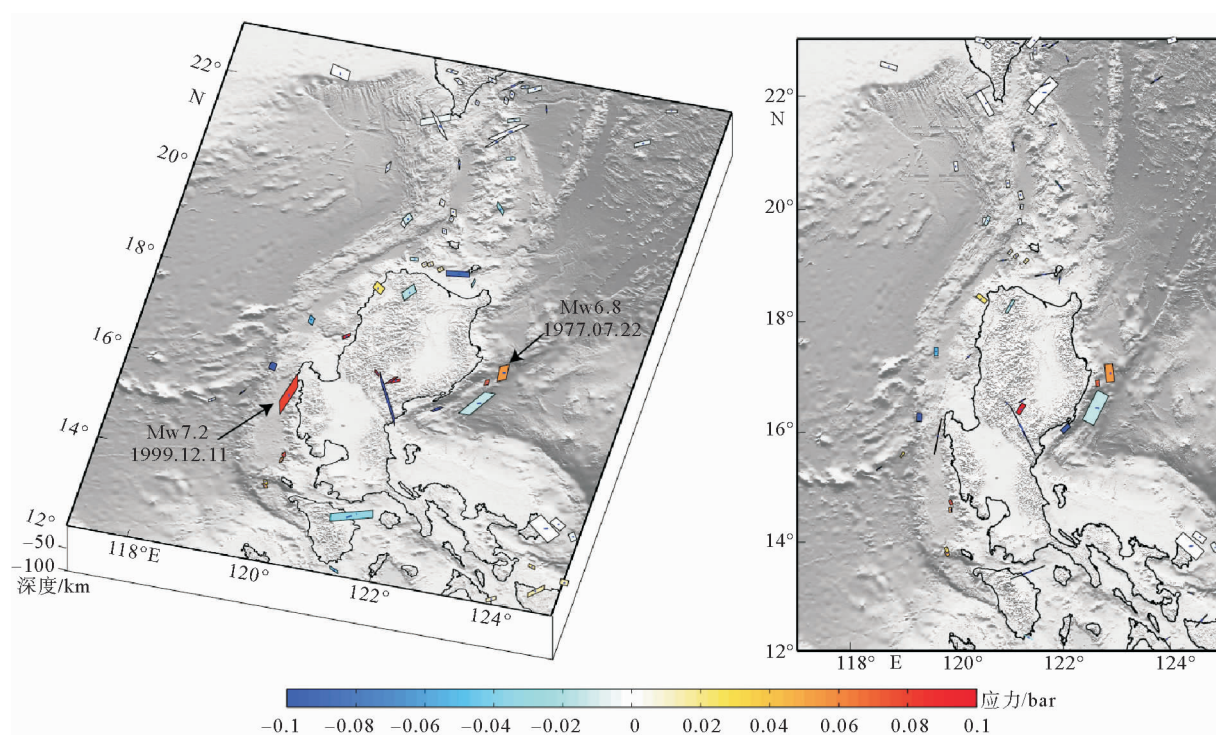


图 4 震源机制解节面上的库伦应力分布

Fig. 4 The distribution of Coulomb stress on the nodal plane of each focal mechanism

静态库伦应力的触发阈值 0.1bar。

5 讨论

本文利用库伦应力方法首先计算分析了 1990 年 7 月 16 日 $M_w7.7$ 级地震的静态库伦应力变化与后续余震的分布关系,研究结果表明落入静态库伦应力加载区的余震数量并不明显多于应力卸载区的余震数量。一方面这可能与菲律宾岛处于一个双向俯冲的特殊地理位置相关。缪森和朱守彪^[29]分别计算了俯冲带上三次特大地震所产生的静态库伦应力变化,考察俯冲带上特大地震库伦应力变化对其后续余震空间分布的影响,结果表明 2011 年日本 $M_w9.1$ 级地震、2010 年智利 $M_w8.8$ 级地震、2004 年苏门答腊-安达曼 $M_w9.0$ 级地震的大量余震未受到触发作用,余震处于应力加载区的比例分别占有所有余震数量的 47%、47.6%、49.8%。由此可以推知,因受俯冲带特殊构造背景的影响,大地震产生的静态库伦应力对后续余震的触发效果并不明显。另一方面在计算过程中未考虑初始构造应力场的影响,仅计算了该次地震产生的静态应力变化。应力卸载区只是减小了该区域地震发生的概率,并不等同于完全抑制地震的发生^[30],地震的发生与否是该区域内背景地震活动和库伦应力变化共同作

用的结果。

研究静态应力触发问题,精确的断层模型是计算地震库伦应力变化的基础,其需要有明确的发震断层和接收断层参数(走向、倾向、滑动角)。当选取震源机制解不同节面作为发震断层面和接收断层面时,会对静态库伦应力的计算结果产生影响。以 $M_w7.7$ 级地震作为源断层,将收集到的震源机制解资料中最有可能为发震层面的节面作为接收断层面,探讨强震对马尼拉俯冲带地震的静态应力触发。虽然马尼拉海沟为强震的多发地带,但缺乏对详细的发震模型的研究,如发震断层面、断层破裂尺度等参数根据历史地震重复原则和构造外推原则以及经验公式等得出,势必会使计算结果有所偏差,致使对处于库伦应力高值区的危险断层段的判断不够准确。

6 结论

(1)1990 年 7 月 16 日 $M_w7.7$ 级地震触发了其后续的 $M_w6.0$ 级和 $M_w6.5$ 级强余震的发生,主震在其后续两次强余震震中产生的静态库伦应力加载值分别达到了 21.63 和 9.15bars,远超静态库伦应力的触发阈值 0.1bar,说明主震对其具有触发作用。

(2)1990 年 7 月 16 日 $M_w7.7$ 级地震的余震序列分布在静态库伦应力加载区的比例为 51%, 表明此次主震对其后续余震的触发比例并不高。

(3)1990 年 7 月 16 日 $M_w7.7$ 级地震产生的静态库伦应力对马尼拉俯冲带的影响主要集中在西吕宋海槽的部分断层上, 但变化量值很小, 对马尼拉俯冲带的北部区域基本不产生影响。

参考文献 (References)

- [1] Harris R A. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B10): 24347-24358.
- [2] Stein R S, Barka A A, Dieterich J H. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering[J]. *Geophysical Journal International*, 1997, 128(3): 594-604.
- [3] Toda S, Lin J, Meghraoui M, et al. 12 May 2008 $M=7.9$ Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(17): L17305, doi: 10.1029/2008GL034903
- [4] 张洪由. 1990 年 7 月 16 日菲律宾强烈地震概况[J]. *国际地震动态*, 1991(1): 16-19. [ZHANG Hongyou. Strong earthquake in Philippines in July 16, 1990[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 1991(1): 16-19.]
- [5] Tsutsumi H, Perez J S. Large-scale active fault map of the Philippine fault based on aerial photograph interpretation[J]. *Active Fault Research*, 2013, 39: 29-37.
- [6] Seno T, Stein S, Gripp A E. A model for the motion of the Philippine Sea Plate consistent with NUVEL-1 and geological data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(B10): 17941-17948.
- [7] Yu S B, Hsu Y J, Bacolcol T, et al. Present-day crustal deformation along the Philippine fault in Luzon, Philippines[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 65: 64-74.
- [8] Hsu Y J, Yu S B, Song T R A, et al. Plate coupling along the Manila subduction zone between Taiwan and northern Luzon [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 51: 98-108.
- [9] Hayes D E, Lewis S D. A geophysical study of the manila trench, luzon, philippines I. Crustal structure, gravity, and regional tectonic evolution[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89(B11): 9171-9195.
- [10] Pautot G, Rangin C. Subduction of the south China sea axial ridge below Luzon (Philippine)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1989, 92(1): 57-69.
- [11] 尾池和夫, 沈耀龙, 张维德. 1990 年菲律宾地震前后菲律宾海板块俯冲带地区地震活动的变化[J]. *世界地震译丛*, 1994(1): 5-9. [WEI Chihefu, SHEN Yaolong, ZHANG Weide. Changes of seismic activity in the Philippines Sea plate subduction zone before and after the Philippines earthquake in 1990[J]. *Translated World Seismology*, 1994(1): 5-9.]
- [12] 魏柏林, 康英, 陈玉桃, 等. 南海地震与海啸[J]. *华南地震*, 2006, 26(1): 47-60. [WEI Bolin, KANG Ying, CHEN Yutao, et al. Earthquake and tsunami of the South China Sea [J]. *South China Journal of Seismology*, 2006, 26(1): 47-60.]
- [13] Doo W B, Hsu S K, Armada L. Philippine island arc system tectonic features inferred from magnetic data analysis[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2015, 26(6): 679-686.
- [14] King G C P, Stein R S, Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84(3): 935-953.
- [15] Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1992, 82(2): 1018-1040.
- [16] Toda S, Stein R S. Response of the San Andreas fault to the 1983 Coalinga-Nuez earthquake: An application of interaction-based probabilities for Parkfield[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B6): ESE 6-1-ESE 6-16.
- [17] Lin J, Stein R S. Stress triggering in thrust and subduction earthquakes and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2004, 109(B2): B02303, doi: 10.1029/2003JB002607.
- [18] Toda S, Stein R S, Richards-Dinger K, et al. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(B5): B05S16, doi: 10.1029/2004JB003415.
- [19] Bautista M L P, Oike K. Estimation of the magnitudes and epicenters of Philippine historical earthquakes[J]. *Tectonophysics*, 2000, 317(1-2): 137-169.
- [20] Dziewonski A M, Ekström G, Woodhouse J H, et al. Centroid-moment tensor solutions for July-September, 1990[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1991, 67(3-4): 211-220.
- [21] Yoshida Y, Abe K. Source mechanism of the Luzon, Philippine earthquake of July 16, 1990[J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, 19(6): 545-548.
- [22] Velasco A A, Ammon C J, Lay T, et al. Rupture process of the 1990 Luzon, Philippines ($M_w=7.7$), earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(B10): 22419-22434.
- [23] Nakata T, Tsutsumi H, Punongbayan R S, et al. Surface faulting associated with the Philippine earthquake of 1990 [J]. *Journal of Geography*, 1990, 99(5): 515-532.
- [24] 李保昆, 刁桂苓, Shapira A, 等. 唐山与通海两大地震的强余震的差别及其原因探讨[J]. *西北地震学报*, 2009, 31(2): 161-166. [LI Baokun, DIAO Guiling, Shapira A, et al. Differences between the strong aftershock of Tonghai and Tangshan earthquakes and discussion on its mechanism[J].

- Northwestern Seismological Journal, 2009, 31 (2): 161-166.]
- [25] 袁一凡, 田启文. 工程地震学[M]. 北京: 地震出版社, 2012: 221-222. [YUAN Yifan, TIAN Qiwen. Engineering Seismology[M]. Beijing: Seismological Press, 2012: 221-222.]
- [26] 盛书中, 万永革, 蒋长胜, 等. 2015 年尼泊尔 $M_s 8.1$ 级强震对中国大陆静态应力触发影响的初探[J]. 地球物理学报, 2015, 58 (5): 1834-1842. [SHENG Shuzhong, WAN Yongge, JIANG Changsheng, et al. Preliminary study on the static stress triggering effects on China mainland with the 2015 Nepal $M_s 8.1$ earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(5): 1834-1842.]
- [27] Wells D L, Coppersmith K J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(4): 974-1002.
- [28] Harris R A, Simpson R W, Reasenber P A. Influence of static stress changes on earthquake locations in south California[J]. Nature, 1995, 375(6528): 221-224.
- [29] 缪森, 朱守彪. 俯冲带上特大地震静态库伦应力变化对后续余震触发效果的研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55 (9): 2982-2993. [MIAO Miao, ZHU Shoubiao. A study of the impact of static Coulomb stress changes of megathrust earthquakes along subduction zone on the following aftershocks [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55 (9): 2982-2993.]
- [30] 单斌, 李佳航, 韩立波, 等. 2010 年 $M_s 7.1$ 级玉树地震同震库仑应力变化以及对 2011 年 $M_s 5.2$ 级囊谦地震的影响[J]. 地球物理学报, 2012, 55 (9): 3028-3042. [SHAN Bin, LI Jiahang, HAN Libo, et al. Coseismic Coulomb stress change caused by 2010 $M_s = 7.1$ Yushu earthquake and its influence to 2011 $M_s = 5.2$ Nangqen earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(9): 3028-3042.]

A PRELIMINARY STUDY ON STATIC STRESS TRIGGERING EFFECTS ON MANILA SUBDUCTION ZONE BY THE PHILIPPINE $M_w 7.7$ EARTHQUAKE 1990

LI Jian^{1,2}, ZHAN Wenhuan^{1,2}, ZHU Junjiang^{3,4}, SUN Jie¹, FENG Yingci^{1,2},
JIANG Liantin¹, GUO Lei^{1,2}, TANG Qinqin^{1,2}

(1. CAS Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

4. Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266237, China)

Abstract: Based on the solutions of earthquake focal mechanism and the half space homogeneous elastic model, we calculated the variation in stress fields after the $M_w 7.7$ earthquake. Our results show that the two subsequent strong aftershocks were triggered by the $M_w 7.7$ earthquake of 16 July 1990, and the static Coulomb stress increased by 21.63 bars and 9.15 bars, respectively. Based on the principles of earthquake recurrence and the structural extrapolation, we used the earthquake focal mechanism solutions for the events greater than $M_w 6.0$ along the Manila Trench and its adjacent region, one of the nodal plane of the focal mechanism was taken as the receive fault plane in the static stress triggering calculation. The results show that the effect of static Coulomb stress on the Manila subduction zone caused by the $M_w 7.7$ is mainly concentrated in some faults of the West Luzon Trough, but the variation in Coulomb stress is very small, which has little effect on the northern area of the Manila subduction zone.

Key words: stress triggering; focal mechanism; Manila subduction zone