

董非非,袁丽文,邓辉. 台湾集集地震对福州小震群的动态库仑破裂应力分析[J]. 华南地震, 2022, 42(4): 54–59. [DONG Feifei, YUAN Liwen, DENG Hui. Dynamic Coulomb Failure Stress Analysis of Fuzhou Small Earthquake Swarm Caused by Chi-Chi Earthquake in Taiwan Province [J]. South China journal of seismology, 2022, 42(4): 54–59]

台湾集集地震对福州小震群的动态 库仑破裂应力分析

董非非¹, 袁丽文², 邓 辉¹

(1. 江西省地震局, 南昌 330096; 2. 福建省地震局, 福州 350003)

摘要: 根据库仑破裂准则, 采用离散波数法计算了1999年台湾集集7.6级地震对福州 M_L 3.8级地震的动态库仑应力变化影响, 结果显示: 震后105.1 s、114.51 s、116.08 s以及127.84 s时应力变化值超过了触发阈值, 116.08 s时达到最大值约为0.74 MPa, 说明台湾集集7.6级地震能够动态应力触发福州 M_L 3.8地震。此外根据台湾集集7.6级地震发生后不同时刻的动态库仑破裂应力场传播图可看出, 其最大余震的发生可能受到了台湾集集7.6级地震的动态和静态触发共同作用。

关键词: 台湾集集7.6级地震; 福州 M_L 3.8级地震; 东南沿海东部地区; 动态库仑破裂应力

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2022)04-0054-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.04.08

Dynamic Coulomb Failure Stress Analysis of Fuzhou Small Earthquake Swarm Caused by Chi-Chi Earthquake in Taiwan Province

DONG Feifei¹, YUAN Liwen², DENG Hui¹

(1. Jiangxi Earthquake Agency, Nanchang 330096, China; 2. Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, China)

Abstract: In this paper, according to Coulomb fracture criterion, the discrete wave number method is used to calculate the dynamic Coulomb stress variation of the 1999 Chi-Chi M_S 7.6 earthquake in Taiwan on Fuzhou M_L 3.8 earthquake. The results show that the stress change value exceeds the trigger threshold at 105.1, 114.51, 116.08 and 127.84 seconds after the earthquake, and the maximum value is about 0.74 MPa at 116.08 seconds, which shows that the Chi-Chi M_S 7.6 earthquake in Taiwan can trigger the Fuzhou M_L 3.8 earthquake by dynamic stress. In addition, according to the dynamic Coulomb fracture stress field propagation diagram at different times after the 7.6 earthquake, it can be seen that the occurrence of the largest aftershock may be jointly triggered by the dynamic

收稿日期: 2022-03-10

基金项目: 江西省防震减灾与工程地质灾害探测工程研究中心开放基金(SDGD202016)与(SDGD202011)联合资助。

作者简介: 董非非(1982-), 女, 高级工程师, 主要从事数字地震学研究方面的工作。

E-mail: 187385067@qq.com

and static triggering of the Chi-Chi earthquake.

Keywords: Chi-Chi $M_s7.6$ earthquake in Taiwan Province; Fuzhou $M_L3.8$ earthquake; East of the southeast coast; Dynamic Coulomb fracture stress

0 引言

台湾集集地区在1999年9月21日发生了7.6地震后,9月24日开始福州地区出现了小震群活动,最大震级为 $M_L3.8$ 。福州位于东南沿海东部地区,与台湾地区毗邻。台湾强震发生后,是否会对东南沿海东部地区的应力场产生影响,进而影响其后续地震的发生呢?根据福建局测震台网编目的结果,福州小震群活动的区域从1970年到震群发生前并未记录到地震,它的发生是否与台湾集集地震有关呢?

对于库仑破裂应力的研究包括静态和动态两种。现有的静态研究表明^[1],1976年以来台湾的强震对福建地区的地震活动没有静态应力触发作用。目前该区尚缺乏动态的研究。动态库仑触发作用有即刻触发和延时触发(数天或数十天内触发)两种,相比于静态的库仑应力作用,动态具有传播距离长,影响范围广的特点^[2],那么台湾强震产生的动态应力是否足以引起福建地区的震群活动呢?

1976年以来台湾地区发生的13次强震中,有6次在其发生后的15 d内,东南沿海东部地区对应发生了 $M_L3.0$ 以上地震。但由于年代较早且震级较小,这对应的6次地震中本文仅收集到2次的震源机制解,分别为1994年5月24日台湾海峡7.0级地震对应的1994年5月24日福建永安4.8级地震,以及1999年9月21日台湾集集7.6级地震对应的1999年9月24日福建福州 $M_L3.8$ 级地震。综合考虑震级和距离等因素的影响,本文将主要以其中最大的台湾集集7.6地震为研究对象,分析其是否与福州小震群之间存在动态库仑应力触发关系。该研究将有助于我们量化分析台湾强震与东南沿海东部地区地震活动的相关性,为东南沿海东部地区的地震灾害分析以及震情趋势预测研究提供科技支撑。

1 地震地质背景

东南沿海东部地区属于华南地块东南沿海地震带,包括台湾海峡南部—闽粤赣交界及其近海

地区。根据近年来的地震动力学研究成果,菲律宾海板块不均匀挤压碰撞欧亚板块产生的作用力构成了控制东南沿海东部地区现代构造应力场的主要力源^[3-5],其现代构造应力场的主压应力方向大致为NWW-SEE方向^[6-7]。区内主要的控震构造为NE、NEE向活动断裂带,该组断裂带规模较大,以右旋为主;活动年代较新且较为发育的NW、NNW向活动断裂带是近代主要的发震构造,规模较小,以左旋为主^[8]。该区历史上发生5.0~5.9级地震95次,6.0~6.9级地震25次,7.0~7.9级地震5次,最大震级为7.5级;最近几年又相继发生了2016年广西苍梧5.4级、2018年台湾海峡6.2级、2019年广西北流5.2级和靖西5.2级等显著地震,近期仍将可能维持5级左右地震活跃的特征。

从外部动力环境看,东南沿海东部地区受到了台湾强震活动的影响。受南海洋壳沿马尼拉海沟向菲律宾海板块俯冲和菲律宾海板块沿琉球海沟向欧亚板块俯冲的相对俯冲体系相互作用影响,台湾岛及其附近海域的构造背景十分复杂。断裂作用是台湾及其附近海域最普遍的新构造运动形式,而其中又以逆断层为主,并且部分兼有走滑断层性质。台湾岛的活动断层主要分布于西部麓山带碰撞增生楔前缘地区和台东纵谷碰撞缝合线地区。1999年台湾集集7.6级地震发生在台湾中央山脉以西的台湾西部地区,沿着分布于西部麓山带西部、呈近NS走向、兼具左旋走滑性质向西逆冲的车笼埔活动断层进行^[9],距离福州 $M_L3.8$ 地震大约300 km。

福建省地震构造表现为NE向活动断裂“纵切成条”,NW向活动断裂“横切成块”的构造格局,上述两组方向的断裂构成了福建地区的主要发震构造,强震多发生在其交汇地段。在大陆边缘,NW向活动断裂是主要控震构造,强震均发生在上述两组活动断裂控制下的断陷盆地(如漳州盆地)和海湾里(如泉州湾);7级以上的强烈地震则发生在近岸海域两组活动性较强烈断裂的交切闭锁段^[10]。其中隶属于闽东南沿海断块差异活动区(三级新构造区)的闽江下游断陷区(四级新构造区)内发生了1999年福州 $M_L3.8$ 级震群,该震群所在的福州盆地处于长乐—诏安断裂带北端西侧、闽江断裂带东南段,由NW、NNW和NE、NEE向断裂控

制发育而成^[11-12],盆地内部发育有NNW向隐伏断裂^[13]。福州盆地及周边地区历史地震活动水平不高, $M_s \geq 4\frac{3}{4}$ 级地震记载仅有2次,分别为1574年福州—连江交界处 $5\frac{3}{4}$ 级地震和1825年永泰 $4\frac{3}{4}$ 级地震。自1971年有福建台网观测以来,福州盆地

及周边地区以小震活动为主,未发生 $M_L 4.0$ 以上地震,且小震活动并不活跃。其中福州 $M_L 3.8$ 震群活动是有台网观测以来区域最显著的地震活动,该震群发生在鼓山山前断裂以东 $5 \sim 8$ km的一条近南北向断裂处。

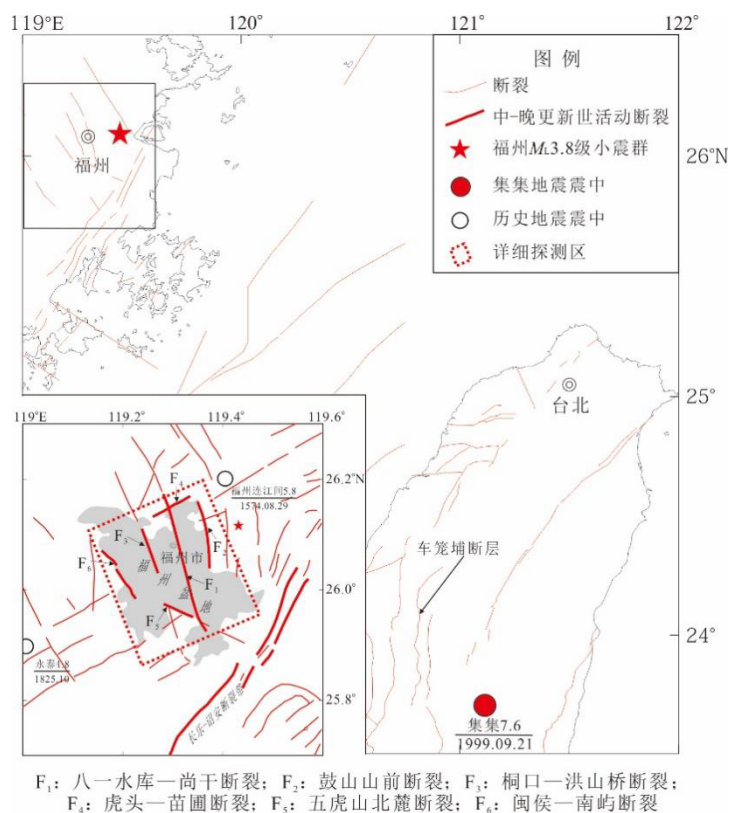


图1 地震地质背景图

Fig.1 Seismic geological background map

2 计算模型及参数

本文主要根据库仑破裂准则,采用离散波数法对动态库仑破裂变化应力场进行了计算,理论及方法详见^[2, 14-15]。将研究区域($119.0^\circ \sim 121.5^\circ \text{E}$, $23.5^\circ \sim 26.5^\circ \text{N}$),划分为 14×14 个网格,以台湾集集7.6级地震为研究对象,速度模型及强震震源参数采用与李强等^[1]同样的模型,设断层长度为100 km^[16],破裂速度为 2.8 km/s ^[1],上升时间为 3.5 s ^[17]。因福州小震群震中位置较集中,故可将 $M_L 3.8$ 地震的发震断层做为接收断层,震源参数采用福建省地震局的计算结果(详见表1)。根据台湾交通部中央气象局公布的地震序列震源深度结果,设断层上沿深度为2 km,下沿深度28 km,震源深度8 km。

动态应力变化峰值数量级是由震源破裂产生的最大位错量决定的^[2],综合许力生等^[16]以及许华杞和黄振义^[18]的研究结果,本文最大位错量选用6 m。视摩擦系数选0.6^[2]。动态库仑破裂应力触发阈值假设为 0.5 MPa ^[2]。

3 计算结果及分析

采用上述模型与参数,利用离散波数法计算台湾集集7.6级地震发生后200 s时间内(时间采样点256个),在震源深度8 km处每个网格点上的动态库仑破裂变化应力场。其中离福州 $M_L 3.8$ 地震震中最近网格点(119.36°E , 26.07°N)处的动态库仑破裂应力变化值如图2所示。可以看出,网格点处大约在50 s开始受到动态应力扰动,100 s左右时开始受到较明显扰动,大约持续了30 s。当105.1

s、114.51 s、116.08 s以及127.84 s时应力变化值超过了触发阈值，116.08 s时达到最大值约为0.74 MPa，117.65 s时达到最小值约-0.91 MPa。由此可见，台湾集集7.6级地震能够触发福州 M_L 3.8地震。

表1 地震的基本参数
Table 1 Basic parameters of earthquakes

日期/年-月-日	震中地名	经度/(°)	纬度/(°)	震级	深度/km	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)
1999-09-21	台湾集集	121.10	23.70	M_s 7.6	8	37	25	96
1999-09-24	福州	119.43	26.12	M_L 3.8	13	341	72	160

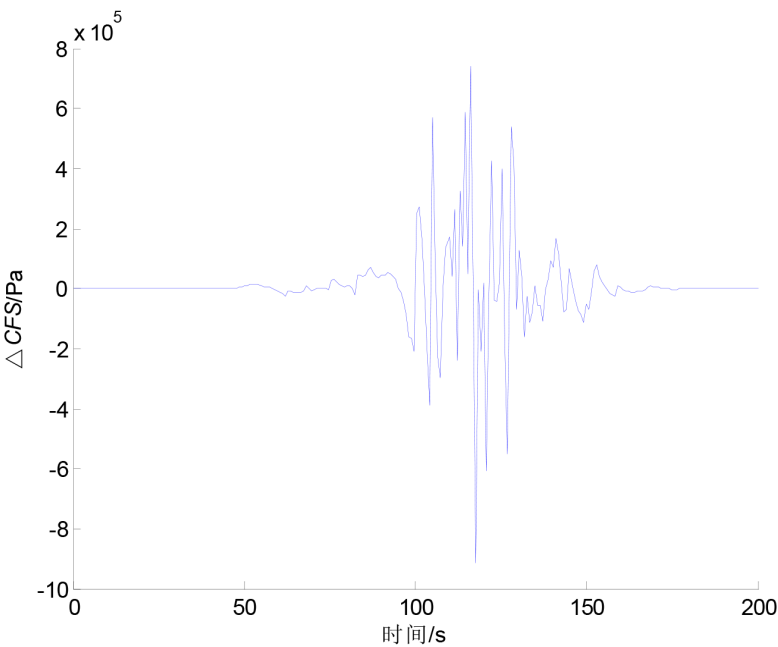


图2 台湾集集7.6级地震震后距离福州 M_L 3.8地震震中最近网格点处的动态库仑破裂应力变化值图
Fig. 2 The dynamic Coulomb fracture stress variation at the nearest grid point to the epicenter of the Fuzhou M_L 3.8 earthquake after the Chi-Chi M 7.6 earthquake in Taiwan

图3为台湾集集7.6级地震发生后不同时刻的动态库仑破裂应力场传播图，从图中可看出，台湾集集7.6级地震震中及邻近区域应力场在90 s左右趋于稳定，170 s时除了该区域外，研究区的其它地区几乎不再受到库仑应力作用影响，理论上动态应力变化数值稳定后，其值等效于静态同震的变化值^[2]，此时研究区以静态库仑应力作用为主。170 s时福州 M_L 3.8地震处的应力变化值约为0.005 MPa，对比李强等^[1]的结果量级相当，没有到达静态应力触发阈值0.01 MPa，表明未受到静态的触发作用。主震发生大约4 h后，发生了7.0级最大余震，图中离7.6级地震最大余震震中最近的网格点处的应力值在研究时段内始终高于触发阈值，可见最大余震的发生可能受到了7.6级地震的动态和静态共同触发作用。

4 讨论与结论

台湾集集7.6级地震震后在福州 M_L 3.8地震震中最近网格处的最大动态库仑应力变化值约为0.74 MPa，略大于触发应力阈值，说明7.6级地震对于 M_L 3.8地震可能存在动态延时触发作用。7.6级地震是1976年以来台湾地区发生的13次7.0级以上地震中的最大地震，其震中位置距离福建地区相对较近。对于其它强震，或因震级较小，滑动量小，或因震中位置较远，对福建地区的动态应力触发作用可能都不够明显。并且倘若作用区域地应力尚未达到临界状态，那么即使动态库仑应力变化值超过触发阈值，也可能无法触发地震。

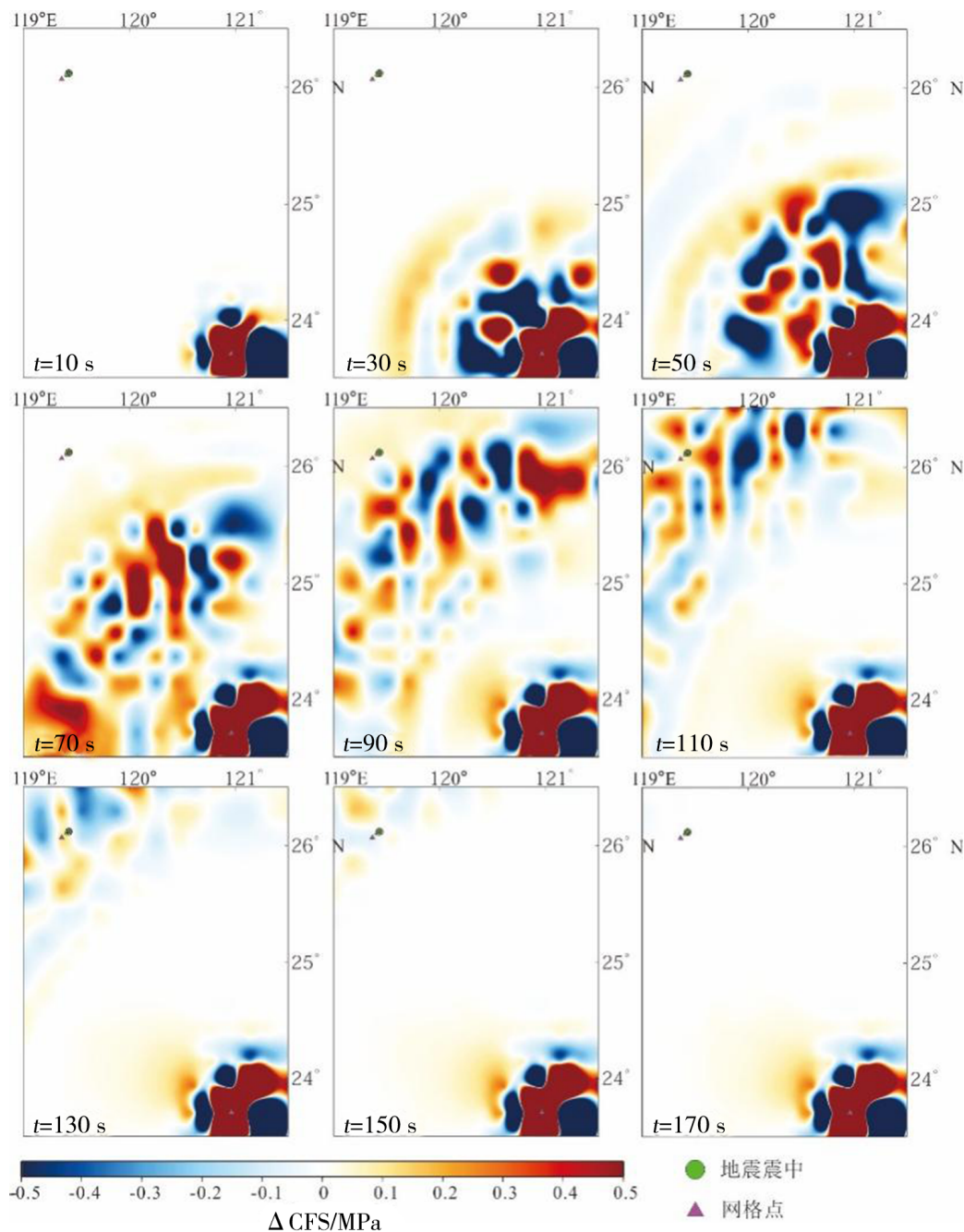


图3 台湾集集7.6级地震震后的动态库仑破裂应力场传播图

Fig.3 Propagation map of dynamic Coulomb rupture stress field after the Chi-Chi $M7.6$ earthquake in Taiwan

综合上述分析，我们可以得到以下结论：

(1)福州 $M_L3.8$ 地震的发生，可能受到了台湾集集7.6级地震的动态触发作用。由此可见东南沿海东部地区的地震活动与台湾强震可能存在动态触发关系。

(2)台湾集集7.6级地震最大余震的发生可能受到了其动态和静态触发共同作用。

参考文献

[1] 李强,袁丽文,李军,等. 基于库仑应力变化研究台湾强震对福建地区地震触发作用[J]. 华南地震,2018,38(01):24-30.

[2] 解朝娣. 巨震的动态库仑破裂应力及其对远场地震活动的触发作用[D]. 昆明:云南大学,2007.

[3] Yu S B, Kuo L C, Punongbayan R S, et al. GPS observation of crustal deformation in Taiwan-Luzon region[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(7): 923-926.

- [4] 傅容珊,黄建华,徐耀民,等. 印度与欧亚板块碰撞的数值模拟和现代中国大陆形变[J]. 地震学报,2000,22(1):1-7.
- [5] 李延兴,胡新康,李智,等. 台海地区的地壳运动与变形[J]. 地震学报,2002,24(5):487-495.
- [6] 汪素云,陈培善. 中国及邻区现代构造应力场的数值模拟[J]. 地球物理学报,1980,23(1):78-90.
- [7] 谢富仁,崔效锋,赵建涛,等. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J]. 地球物理学报,2004,47(4):654-662.
- [8] 吕坚,张福平,高建华,等. 东南沿海地震带的地震丛集窗及震级结构特征分析[J]. 地震,2003,23(1):83-88.
- [9] 耿威,张训华,黄龙,等. 台湾及其附近海域区域地质特征与新构造运动[J]. 海洋地质与第四纪地质,2014,34(6):73-82.
- [10] 国家地震局. 中国岩石圈动力学地图集[M]. 北京:中国地图出版社,1989.
- [11] 丁祥焕,黄卿团,庄进耀. 福建省长乐—诏安断裂带晚第四纪活动性的分析[M]//国家地震局地质研究所. 活动断裂研究(2). 北京:科学出版社,1992.
- [12] 黄卿团,丁祥焕,庄进耀. 福建东南沿海晚第四纪断陷构造的形成和发育[M]//国家地震局地质研究所. 活动断裂研究(4). 北京:科学出版社,1999.
- [13] 朱金芳,黄宗林,张先康,等. 福州市活断层探测与地震危险性评价[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [14] King G C P, Stein R S, Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes[J]. Bull Seism Soc Am, 1994, 84(3):935-953.
- [15] Harris, Ruth 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.
- [16] 许力生,杨智娴,陈运泰. 集集地震序列和震源破裂过程初步分析[M]//中国地震学会. 中国地震学会成立20周年纪念文集. 北京:地震出版社,1999.
- [17] 吴小平,虎雄林,Michel Bouchon,等. 云南澜沧—耿马 $M_{\text{w}}7.6$ 地震的完全库仑破裂应力变化与后续地震的动态、静态应力触发[J]. 中国科学(D辑:地球科学),2007,37(6):746-752.
- [18] 许华杞,黄振义. 1935年新竹—台中地震与1999年台湾地震的断层及其构造背景[J]. 地震科技情报,2001(2):24-28.