

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 (1): 24–30. [LI Qiang, YUAN Liwen, LI Jun, et al. Effect of Earthquake Triggering in Fujian by the Taiwan Strong Earthquakes Based on Coulomb Stress Changes[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(1): 24–30.]

## 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

李 强, 袁丽文, 李 军, 邱 毅, 黄艳丹

(福建省地震局, 福州 350003)

**摘要:** 考虑同震位错与震后黏弹性弛豫效应, 采用分层地壳介质模型, 定量计算了台湾地区  $M_s \geq 7.0$  强震对福建地区部分  $M_L \geq 4.0$  地震的库仑应力影响。结果显示: 台湾强震对福建  $M_L \geq 4.0$  地震的发生影响较小, 远没有达到地震触发阈值, 不具有触发作用, 其主要原因是这两地区距离较远。结合台湾与福建地区  $M-T$  图, 认为虽然台湾强震与福建地震不属触发关系, 但可以用“同期活跃”的特征来描述。当大区域背景应力状态处于较高水平时, 台湾地区  $M_s \geq 7.0$  强震与福建地区  $M_L \geq 4.0$  地震同时较为活跃。在此情况下, 台湾  $M_s \geq 7.0$  强震与福建地区  $M_L \geq 4.0$  地震哪个先发生都是可能的。

**关键词:** 库仑应力变化; 地震触发; 台湾强震

中图分类号: P631.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2018) 01-0024-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.01.003

## Effect of Earthquake Triggering in Fujian by the Taiwan Strong Earthquakes Based on Coulomb Stress Changes

LI Qiang, YUAN Liwen, LI Jun, QIU Yi, HUANG Yandan

(Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, Chian)

**Abstract:** Considering the coseismic dislocation and postseismic viscoelastic relaxation effect, the paper quantitatively calculated Coulomb stress effect of  $M_s \geq 7.0$  strong earthquakes in Taiwan regions on some  $M_L \geq 4.0$  earthquakes in Fujian region by using the layer crust model. This result shows that strong earthquakes in Taiwan regions had a very small effect on  $M_L \geq 4.0$  earthquakes in Fujian region. This effect did not reach the triggering threshold in large degree and had no triggering effect. The main reason is that the distance between the strong earthquakes with  $M_s \geq 7.0$  in Taiwan regions and earthquakes with  $M_L \geq 4.0$  in Fujian region is too far. Although relation between the Taiwan strong earthquakes and Fujian earthquakes can not be depicted by triggering effect, it can be seen as “synchronous active period” through the  $M-T$  of the area of the Taiwan and Fujian region. When the level of the background stress state in the large scale area is high,  $M_s \geq 7.0$  strong earthquakes

收稿日期: 2017-05-10

基金项目: 地震星火科技计划(项目编号 XH16019Y)

作者简介: 李 强(1985-), 男, 助理工程师, 主要从事数字地震与活动性研究。

E-mail: liqiangies@126.com.

in Taiwan regions and  $M_L \geq 4.0$  earthquakes in Fujian region would be active synchronously. Under the circumstances, either of  $M_S \geq 7.0$  earthquakes in Taiwan regions or  $M_L \geq 4.0$  earthquakes in Fujian region could first occur.

**Keywords:** Coulomb stress change; Triggering of earthquake; Strong earthquakes in Taiwan region

## 0 引言

台湾地区地处亚欧板块与菲律宾板块挤压碰撞的前沿地带,区域动力背景复杂,该区域地震活动具有频次高,强度大的特点。根据《中国强震目录》,台湾地区1900年以来发生52次7级以上地震,其中87%的7级地震复发间隔小于4年,6级以上地震平均每年3次,5级以上地震平均每年多达10次,其地震活跃的强烈程度可见一斑。

一直以来,围绕台湾强烈的地震活动可能对周边地区所产生的影响问题,相关研究人员开展了较为丰富的研究。顾瑾萍等<sup>[1]</sup>的研究显示台湾西带6级强震后1年内华南地区中强震的对应率接近0.5。黄耘等<sup>[2]</sup>认为台湾地区7级以上强震孕育范围较大,明显影响和控制了江苏及部分地区的震群活动。也有研究<sup>[3]</sup>显示湖北西部地区地震活动和台湾地区强震活动有较好的相关性。章纯<sup>[4]</sup>通过数值模拟显示,台湾不同区域地震发生所产生的应力变化对华南与华东地区有不同的影响。这些研究结果均显示台湾地震对周边区域产生了比较明显的影响。然而,宋金<sup>[5]</sup>等研究则显示,1971年以来的台湾7级以上强震在福建水口地区产生的同震库仑应力扰动很小,并不足以触发福建水口地区地震活动。由此引发一个问题,台湾强震对周边地区,特别是对福建地区的地震发生是否具有触发作用,值得深入分析。根据应力触发理论<sup>[6]</sup>,库仑应力增强相当于断层应力的加载,促进未来地震的发生;库仑应力减弱区相当于断层应力部分卸载,延迟未来发生地震的发生。由于库仑应力变

化的力学意义明确,是判定强震触发作用最为直接的工。考虑到在整个大陆地区,福建距离台湾地区最近,研究台湾强震在福建地区产生的库仑应力变化有利于分析台湾强震触发的作用。虽然宋金等<sup>[5]</sup>已分析了台湾强震在水口地区产生的同震库仑应力扰动,但其研究范围限于福建的水口一个地区,还无法较全面的反映出台湾强震对整个福建地区的地震触发作用。因此,本文将基于地壳分层模型,顾及同震和震后黏弹性弛豫作用,计算台湾强震在福建地区的库仑应力变化,进而分析台湾地震对福建地区地震的触发作用。

## 1 原理和方法

地震同震产生的静态库仑破裂应力变化可以下式表示:

$$\Delta\sigma_f = \Delta|\tau| - \mu\Delta\sigma_n \quad (1)$$

式(1)中, $\Delta|\tau|$ 为发震断层面上的剪应力变化, $\mu$ 为有效摩擦系数,它既包含了孔隙流体的影响,也包括了断层区介质性质的影响,参考前人经验<sup>[7]</sup>设置为0.4, $\Delta\sigma_n$ 为发震断层面上的正应力变化。

除了同震产生的库仑应力扰动外,大地震震后黏弹性松弛效应随着离逝时间的增加其影响逐渐增大<sup>[8]</sup>。在研究黏弹性松弛效应时,Pollitz等<sup>[9]</sup>和邵志刚等<sup>[10]</sup>研究表明,利用Burgers体岩石圈流变模型来模拟震后变形的演化过程更合理。Burgers体是由kelvin体和Maxwell体串联而成(图1),此模型是瞬时弹性响应、指数衰减短期响应、线性增加的长期稳态响应三种效应的叠加。

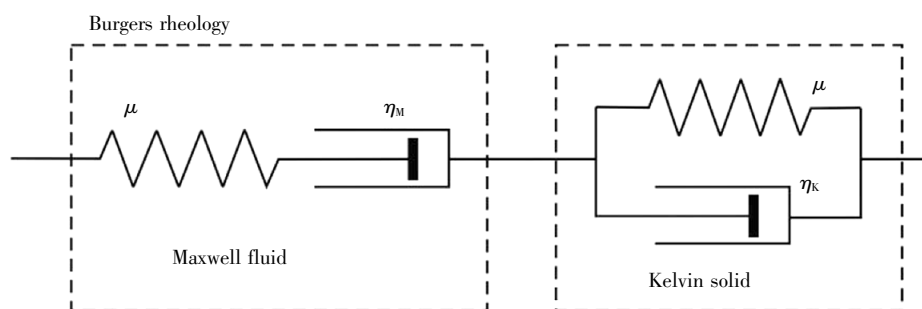


图1 Burgers体模型示意图<sup>[11]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of the Burgers mode

本文以 Burgers 体为模型,地壳粘滞系数参考朱守彪等<sup>[12]</sup>,该粘滞系数是针对台湾地区的,由于福建不像台湾一样地壳形变剧烈,因此使用时将粘滞系数适当增加,以此来反映台湾至福建平均效应。最终将中下地壳反映短期和长期效应的粘滞系数分别取  $\eta_k$  为  $5.0\times10^{18}$  和  $\eta_m$  为  $1.0\times10^{20}$ 。

2 数据资料

2.1 地震资料

计算台湾强震引起的福建地区库仑应力变化影响,需要已知台湾强震的发震断层震源机制解,由于哈佛大学矩张量解提供的震源机制解是从 1976 开始,故仅使用 1976 年以来的台湾强震。考虑到震级小的地震产生的库仑应力变化影响有限,

因此台湾地震震级取 7 级以上(表 1 和图 2)。发震断层节面的选择参考宋金等<sup>[5]</sup>。

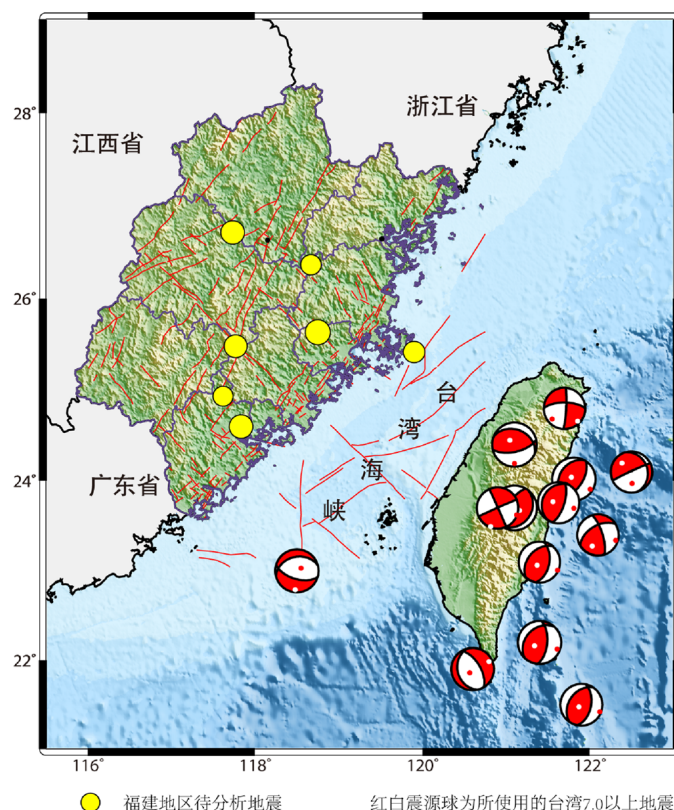
福建地区地震强度总体不高,其中  $M_L\geq4.0$  的地震可以视为显著地震。2006 年台湾 7.2 级地震后,从 2007 年起,福建地区  $M_L\geq4.0$  地震活跃,分布于福建地区多个地方,位于不同的断裂带上,选取这些地震作为研究台湾强震触发的对象,当同一地点有多次  $M_L$  4.0 以上地震时,选取其中震源机制已知的一个地震即可。对于各地震发震断层节面解,参考前人成果<sup>[13-15]</sup>和福建地区断裂分布具体确定,最终选定 7 次地震为待分析地震(表 2 和图 2)。对于库仑应力计算深度,参考各地震的震源深度确定,除水口地区使用 5 km 外,其他均采用 10 km。

表 1 1976 年以来台湾地区  $M_s$  7.0 以上地震震源机制解  
Table 1 Focal mechanism solutions of earthquakes with  $M_s \geq 7$  in Taiwan region since 1976

序号	地震参数					节面 I			节面 II		
	时间/(年-月-日)	经度/(°)	纬度/(°)	震级	深度/km	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)
1	1978-07-23	121.40	22.20	7.3	28.9	5	61	69	224	36	123
2	1978-12-23	122.10	23.40	7.0	20.7	239	53	158	343	72	39
3	1986-11-15	121.81	24.02	7.3	33.2	33	57	92	210	33	87
4	1990-12-14	121.63	23.76	7.0	17.5	17	68	84	212	23	104
5	1994-05-24	122.50	24.10	7.0	15	245	87	-66	343	24	-172
6	1994-06-05	121.70	24.80	7.0	20.6	3	84	-157	270	67	-6
7	1994-09-16	118.50	23.00	7.3	15	256	35	-116	107	59	-73
8	1996-09-06	121.90	21.50	7.1	30.8	11	52	75	214	41	108
9	1999-09-21	121.10	23.70	7.6	21.2	37	25	96	211	65	87
10	1999-09-21	120.90	23.70	7.0	19.8	246	89	179	336	89	1
11	2002-03-31	121.10	24.40	7.5	39	77	63	72	292	32	121
12	2003-12-10	121.40	23.10	7.0	25	10	51	69	221	44	113
13	2006-12-26	120.60	21.90	7.2	19.6	329	61	-98	165	30	-76

表 2 福建地区地震  
Table 2 The earthquakes selected in Fujian region

地震事件					发震断层节面解		
地点	时间/(年-月-日)	震级/ $M_L$	经度/(°)	纬度/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)
福建顺昌	2007-03-13	4.9	117.73	26.72	87	87	-37
福建华安	2007-06-12	4.0	117.62	24.93	71	51	155
福建永春	2007-08-29	4.6	117.77	25.48	168	80	-10
福建水口	2008-03-06	4.1	118.67	26.37	299	64	-78
福建长泰	2008-07-05	4.7	117.83	24.6	219	63	-170
平潭海域	2009-03-23	4.3	119.9	25.42	33	87	-16
福建仙游	2013-09-04	5.0	118.75	25.63	140	82	-167

图 2 福建( $M_L \geq 4.0$ )与台湾( $M_S \geq 7.0$ )地震分布Fig.2 The distribution of earthquakes ( $M_L \geq 4.0$ ) in Fujian region and earthquakes ( $M_S \geq 7.0$ ) in Taiwan region

除震源机制解外,台湾地震破裂长度和宽度以及同震位错量也是需要已知的。由于多数台湾强震发震时间较早,并没有断层滑动分布数据可用,因此采用经验关系<sup>[16]</sup>获取破裂参数。破裂长度  $L$  和宽度  $W$  可利用矩震级  $M_w$  由经验公式<sup>[16]</sup>得到:

$$L = \begin{cases} 10^{-2.57+0.62 M_w} & \text{走滑断层} \\ 10^{-2.42+0.58 M_w} & \text{逆断层} \\ 10^{-1.88+0.50 M_w} & \text{正断层} \end{cases} \quad (2)$$

$$W = \begin{cases} 10^{-0.76+0.62 M_w} & \text{走滑断层} \\ 10^{-1.61+0.41 M_w} & \text{逆断层} \\ 10^{-1.14+0.35 M_w} & \text{正断层} \end{cases} \quad (3)$$

同震位错量  $D$  可利用破裂长  $L$  度由经验关系<sup>[17]</sup>计算:

$$\log D = a \times \log L + b \quad (4)$$

式(4)中,  $a$  和  $b$  根据条件确定取值,对于走滑型断层,  $L \leq 3.4$  km 时,  $a=1$ ,  $b=0$ ;  $3.4$  km  $\leq L \leq 45$  km 时,  $a=0.833$ ,  $b=-3.84$ ;  $L \geq 45$  km 时,  $a=0.5$ ,  $b=-2.29$ ; 对于倾滑型,  $L \geq 5.5$  km 时,  $a=0.833$ ,  $b=-3.80$ 。

## 2.2 地壳分层结构模型

在计算区域格林函数时,需要使用区域地壳

速度结构模型。由于研究区域涉及福建和台湾地区,在该范围内地壳除纵向分层外,横向也具有不均匀性,而目前横向不均匀格林函数解析解的计算尚不成熟,因此采用横向均匀,纵向分层模型,速度结构选取时应忽略具体细节,大致反映该区域结构特征。参考该区域已有的相关研究成果<sup>[18-20]</sup>,最终模型如表 3 所示。

## 3 计算结果与分析

### 3.1 库仑应力触发作用分析

基于上述模型参数,利用 PSCMP/PSGRN 计算程序<sup>[21]</sup>,以 2007 后福建地区 7 次 4.0 以上地震震源处为接收断层,计算了 1976 年以来台湾地区 13 次 7 级以上强震在这些地区产生的同震及震后库仑应力变化,结果如表 4 所示。

以上可知,台湾强震对福建地区地震触发作用非常有限。其中 1999 年 9 月 16 日台湾海峡 7.3 级地震的同震及震后效应产生的库仑应力变化使福建地区应力增强最大,对长泰地震的发生贡献了 0.006 224 MP,该地震震中距离福建长泰地震震源位置约 190 km,相比于地震触发阈值 0.01

MP 而言, 该量值依然相对小的, 其触发作用不明显。而台湾其他强震所产生的库仑应力扰动则更小, 这表明了台湾强震的单次地震影响, 对于福建地区的地震发生来说, 实际上并不具有触发作用。台湾 1976 年以来台湾 7.0 以上的 13 次强震在福建地区产生的库仑应力变化积累结果显示, 使福建地区应力增强的地震有华安地震、永春地震、水口地震和长泰地震, 而对顺昌地震、平潭海域地震和仙游地震的发生贡献为负值, 具有抑制作用, 但量值较小, 作用较弱。

表 3 地壳分层介质模型  
Table 3 The medium model of multi-layered crust

层名	厚度	$V_p/(km \cdot s^{-1})$	$V_s/(km \cdot s^{-1})$	$\rho/(km \cdot m^{-3})$	$\eta_k/(Pa \cdot s)$	$\eta_m/(Pa \cdot s)$
上地壳	5	5.4	3.1	2 600	弹性	
	12	6.0	3.45	2 650		
下地壳	8	6.4	3.7	2 900	$5.0 \times 10^{18}$	$1.0 \times 10^{20}$
	5	6.8	3.9	3 000	$5.0 \times 10^{18}$	$1.0 \times 10^{20}$
上地幔	—	8.0	4.57	3 300	0	$1.0 \times 10^{20}$

表 4 库仑应力变化计算结果  
Table 4 The results of Comb stress changes calculated

序号	台湾强震		同震与震后库仑应力变化对福建地区地震影响/MPa						
	时间	震级	顺昌	华安	永春	水口	长泰	平潭海域	仙游
1	1978-07-23	7.3	-0.000 018	0.000 049	0.000 078	-0.000 005	-0.000 102	0.000 105	0.000 072
2	1978-12-23	7.0	0.000 048	-0.000 082	-0.000 072	0.000 039	-0.000 043	-0.000307	0.000 074
3	1986-11-15	7.3	-0.000 343	0.000 292	0.000 194	0.000 012	0.000 391	-0.001265	-0.000 592
4	1990-12-14	7.0	-0.000 092	0.000 12	0.000 1	-0.000 018	0.000 124	0.000 115	-0.000 145
5	1994-05-24	7.0	-0.000 047	0.000 035	0.000 017	-0.000 011	0.000 038	-0.000 199	-0.000 846
6	1994-06-05	7.0	-0.000 074	-0.000 085	-0.000 139	-0.000 003	-0.000 089	-0.001 855	-0.000 473
7	1994-09-16	7.3	<b>0.000 368</b>	0.000 314	-0.000 031	<b>0.000 479</b>	<b>0.006 224</b>	0.000 188	-0.000 562
8	1996-09-06	7.1	-0.000 025	0.000 025	0.000 038	-0.000 007	-0.000 035	0.000 063	0.000 05
9	1999-09-21	7.6	-0.000 907	<b>0.000 913</b>	<b>0.000 786</b>	-0.000 227	0.001 114	<b>0.001 764</b>	-0.000 154
10	1999-09-21	7.0	0.000 166	-0.000 282	-0.000 227	0.000 111	-0.000 247	-0.000 866	-0.000 37
11	2002-03-31	7.5	-0.000 853	0.000 275	0.000 065	0.000 109	0.000 559	-0.006 637	-0.002 7
12	2003-12-10	7.0	-0.000 039	0.000 083	0.000 082	-0.000 007	0.000 034	0.000 178	<b>0.000 093</b>
13	2006-12-26	7.2	0.000 003	-0.000 007	-0.000 029	0.000 002	-0.000 015	-0.000 051	-0.000 005
	累计贡献		-0.001 813	0.001 652	0.000 862	0.000 474	0.008 353	-0.008 767	-0.005 558
	触发作用		无	无	无	无	不明显	无	无
	延迟作用		有	无	无	无	无	有	有

注: 表中加粗数字为台湾单次地震触发作用的最大贡献值

库仑应力变化大小的影响因素有多种, 如地震的震级、发震断层的震源机制、接收断层的震源机制、震中距、摩擦系数、发震断层长宽比以及地壳介质结构等。台湾强震在福建地区产生的库仑应力变化量值较小, 其主要原因是距离较远, 通常库仑应力扰动在 100 km 范围外几乎衰减至 0<sup>[5]</sup>。台湾强震距离福建地震最近的距离也能达到 190 km 左右 (1994 年台湾海峡 7.3 级地震与 2008 年福建长泰地震之间距离), 且绝大多数都相距 400 km 以上, 因此台湾强震在福建地区所产生的库仑应力变化

已经非常微弱, 不再具有触发作用。此外, 虽然计算中包括了震后粘滞效应, 但实际上震后影响并不大, 13 次地震中震后效应产生的库仑应力最大为 0.000 035 MP, 表明震后效应产生的库仑应力总体较小, 库仑应力变化主要仍由同震作用产生。由于福建是整个华南距离台湾最近的地区, 由此来看, 台湾强震对整个华南地区的地震也不会具有触发作用。

2006 年 12 月 26 日, 台湾南部恒春海域发生 7.2 级地震, 该地震发生后, 在 2007—2009 年,

福建地区发生多次  $M_L$  4.0 以上地震,  $M_L$  4.0 以上地震较前几年明显活跃, 似乎显示了这些  $M_L$  4.0 以上地震发生与恒春海域 7.2 级地震所产生的触发作用有关。然而, 库仑应力计算结果显示, 台湾恒春海域地震所产生的库仑应力变化对福建地区地震的贡献微乎其微, 并且其中部分库仑应力变化是负值, 不会产生触发作用。因此, 在 2007—2009 年间, 福建地区  $M_L$  4.0 以上地震与恒春海域地震的静态库仑应力和震后粘弹性触发作用无关。

### 3.2 福建地区地震的动力来源

由于台湾强震产生的库仑应力变化对福建地震没有触发作用, 福建地区的地震一部分是属于在区域先存构造应力场作用下的“背景地震”, 如顺昌地震、华安地震、永春地震、长泰地震及平潭海域地震, 这部分地震主要是在亚欧板块与菲律宾板块相互作用的动力背景下, 由区域构造应力积累, 在断层处集中-释放产生。另一部分属于水库诱发地震, 除有区域背景应力积累外, 还受到水库水位加卸载过程产生的附加应力场扰动影响, 由区域应力积累和水库水体加载或孔隙压变化产生, 如水口地震和仙游地震。

### 3.3 福建地区地震与台湾强震关系

尽管台湾强震对福建地区没有触发作用, 但这两个地区地震在时间还是存在一定的关联性。选取 1971 年以来台湾地区  $M_s \geq 7.0$  和福建地区  $M_L \geq 4.0$  的地震, 将某次台湾发生  $M_s \geq 7.0$  地震之前或之后的一年内, 福建地区相应发生  $M_L$  4.0 以上地震的情况划分为一组(图 3 中粉色框), 表示在该时间段内, 台湾与福建地区地震同时具有活跃特征。若将该特征称为“同期活跃”, 则 1971 年以来, 台湾地区与福建地区对应存在 8 组“同期活跃”特征(图 3), 其中 5 组是福建地区先发生地震, 3 组是台湾地区先发生地震。“同期活跃”时段内的地震占据了台湾地区  $M_s$  7.0 级以上与福建地区  $M_L$  4.0 以上绝大多数地震, 表明该特征能够大致反映福建地区与台湾强震的关系。这种“同期活跃”特征可能源于他们大区域背景动力源相同, 即亚欧板块与菲律宾板块相互碰撞作用。当板块间相互作用至一定程度时, 大区域背景场应力状态已达到较高水平, 此时, 处于板块边界处的台湾和与其相近的福建地区, 发生各自区域内较大的地震(台湾地区  $M_s$  7.0 级以上, 福建地区  $M_L$  4.0 以上)。

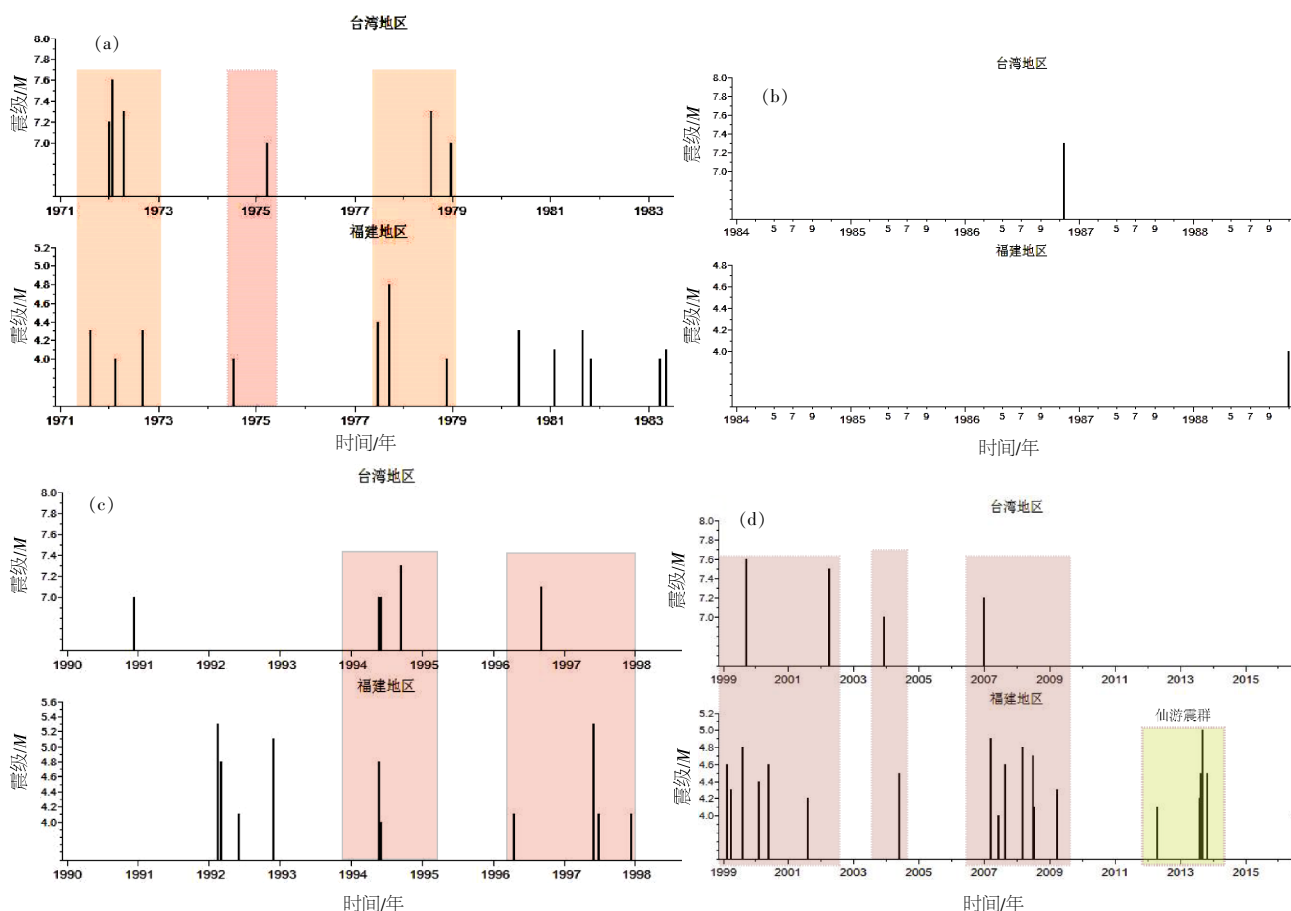


图 3 1971 年以来台湾地区  $M_s \geq 7.0$  与福建  $M_L \geq 4.0$  地震  $M-T$  图

Fig.3  $M-T$  map of earthquakes ( $M_L \geq 4.0$ ) in Fujian region and earthquakes ( $M_s \geq 7.0$ ) in Taiwan region since 1971

在 2012—2013 年, 福建仙游地区发生多次  $M_L$  4.0 以上地震(图 3d 中黄色方框内), 而该时段内, 台湾地区没有相应的 7 级以上地震发生。相关研究显示<sup>[2]</sup>, 仙游地震受金钟水库水位调制作用尤为明显, 仙游  $M_L$  4.0 以上地震多发生在水库水位快速下降阶段。这表明在该时段内, 福建与台湾地区本身并没有达到“同期活跃”所需的大区域背景应力水平, 但受金钟水库蓄水活动影响, 使得福建仙游地区提前发生了数次显著地震, 因此, 该时段并不违背“同期活跃”特征。除了 2012—2013 年外, 存在个别时段没有体现出“同期活跃”特征, 但从 1971 年以来的长时间看, “同期活跃”特征是符合大多数情况的。

## 4 结语

(1) 台湾强震对福建地震的发生影响较小, 远没有达到地震触发阈值, 不具有触发作用。同时, 由于福建是华南距离台湾最近的地区, 这也表明了台湾强震对整个华南地区的地震发生也不会具有触发作用。

(2) 虽然台湾  $M_s$  7.0 以上强震与福建地区  $M_L$  4.0 以上地震不属于触发与被触发的关系。但大体上可用“同期活跃”的特征来描述, 这种同期活跃可以为未来福建发生  $M_L$  4.0 以上地震或台湾发生  $M_s$  7.0 级以上地震提供一种预测参考。

(3) 本文所分析的地震触发作用包括了静态触发和震后效应, 并不包括地震波所产生的动态触发作用。同时, 如果大区域背景场处于较高的应力状态, “同期活跃”空间范围上可能不仅涉及福建地区, 是否还会覆盖华南的其他地区, 这些问题还有待后续进行更深入的研究。

## 参考文献:

- [1] 顾瑾萍, 吕培苓, 彭美凤, 等. 华南地区地震活动特征与台湾强震影响[J]. 地震, 2004, 24(1): 55–59.
- [2] 黄耘, 孙业君, 叶碧文, 等. 江苏及邻区震群活动成因探讨[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(6): 695–699.
- [3] 吕培苓. 湖北西部地区小震活动与台湾强震关系研究[J]. 地震, 2004, 24(1): 71–75.
- [4] 章纯. 台湾地震对华南及华东地区应力场影响的数值模拟研究[J]. 地震, 2007, 27(3): 28–33.
- [5] 宋金, 蒋海昆. 台湾强震对福建水口库区的库仑应力触发研究[J]. 华南地震, 2010, 30(1): 16–25.
- [6] King G C P, Stein R S, Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes [J]. Bulletin Seismological Society of America, 1994, 84(3): 935–953.
- [7] 王辉, 刘杰, 石耀霖, 等. 鲜水河断裂带强震相互作用的动力学模拟研究[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2008(7): 808–818.
- [8] 程佳, 刘杰, 甘卫军, 等. 1997 年以来巴颜喀拉块体周缘强震之间的黏弹性触发研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(8): 1 997–2 010.
- [9] Pollitz F F, Wicks C, Thatcher W. Mantle flow beneath a continental strike-slip fault: Postseismic deformation after the 1999 Hector Mine earthquake[J]. Science, 2001, 293(5 536): 1 814–1 818.
- [10] 邵志刚, 傅容珊, 薛霆斌. 以 Burgers 体模型模拟震后粘弹性松弛效应[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(5): 31–37.
- [11] Yan H, Wang K. Spherical-Earth finite element model of short-term postseismic deformation following the 2004 Sumatra earthquake[J]. Journal of Geophysical Research, 2012(117): (B05404).
- [12] 朱守彪, 蔡永恩. 利用 GPS 观测的时间序列资料反演地壳地幔黏性结构[J]. 地球物理学报, 2006, 49(3): 771–777.
- [13] 袁丽文, 郑斯华, 周峥嵘, 等. 福建地区地震活动特征及区域应力场研究[J]. 防灾减灾学报, 2009, 25(3): 37–44.
- [14] 许仪西, 方章华, 陈新泽, 等. 2008 年 7 月 5 日长泰  $M_L$  4.7 地震前流动地磁观测结果的分析 [J]. 地震地磁观测与研究, 2010, 31(1): 39–42.
- [15] 陈文明, 杨贵, 陈祥熊, 等. 福建顺昌  $M_L$  4.9 级地震序列的精确定位、震源机制及其地震构造背景分析[J]. 华南地震, 2011, 31(2): 37–44.
- [16] 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.
- [17] Leonard M. Earthquake Fault Scaling: Self-Consistent Relating of Rupture Length, Width, Average Displacement, and Moment Release [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(5A): 1 971–1 988.
- [18] 张路. 福建东南沿海盆地第四纪构造运动模式与动力学成因[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2008.
- [19] 陈祥熊, 林树, 李祖宁, 等. 福建-台湾地区一维地壳速度结构的初始模型[J]. 地震, 2005, 25(2): 61–68.
- [20] 王卫民, 赵连锋, 李娟, 等. 1999 年台湾集集地震震源破裂过程[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 132–147.
- [21] Wang R, Lorenzo-Martín F, Roth F. PSGRN/PSCMP—a new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory[J]. Computers & Geosciences, 2006, 32(4): 527–541.
- [22] 李强, 李军, 袁丽文, 等. 福建仙游震群序列  $M_L \geq 4.0$  事件震源机制与序列活动特征[J]. 地震, 2015, 35(4): 147–156.