

王韶稳、詹文欢、张帆等 2011, 1994 年 9 月 16 日台湾海峡 7.3 级地震静态库仑应力变化及断裂危险性初步研究, 中国地震 27(4) 419~430。

1994 年 9 月 16 日台湾海峡 7.3 级地震静态库仑应力变化及断裂危险性初步研究

王韶稳^{1 2)} 詹文欢¹⁾ 张帆^{1 2)} 朱俊江¹⁾

1) 中国科学院南海海洋研究所边缘海地质重点实验室, 广州市新港西路 164 号 510301

2) 中国科学院研究生院, 北京市玉泉路 19 号(甲) 100049

摘要 利用 1994 年 9 月 16 日台湾海峡 7.3 级地震震源机制解及滑动分布模型的资料, 计算了由台湾海峡 7.3 级地震造成的静态库仑应力变化。对余震的分布进行了研究与分析, 从震后余震的分布与应力场的情况及历史上这一地区的震源地分布的角度对库仑应力的变化进行了分析。结果显示, 基于滑动分布模型正演的静态库仑应力变化在距震中相对较远的区域与余震分布的一致性较好, 约 90% 的余震发生在库仑应力增加的区域; 在震中附近计算出的库仑应力变化比较复杂, 与余震的分布序列并不完全一致。在距震中较远的区域, 库仑应力变化能比较好的反映余震的分布, 而在震中附近库仑应力变化与余震分布的对应关系则比较复杂。以闽粤滨海断裂带为接收断层计算了其上的库仑应力变化, 结果显示其西南段上的应力增加, 促使其活动性增强, 认为在闽粤滨海断裂带与 NW 走向的上杭-东山断裂交汇的南澎岛-东山岛海域发生地震的潜在危险性较大。

关键词: 库仑应力变化 台湾海峡 7.3 级地震 震源机制解 断裂危险性

[文章编号] 1001-4683(2011)04-0419-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

1994 年 9 月 16 日中国台湾海峡南部地区(22.52°N, 118.67°E)发生 7.3 级地震(表 1), 这是台湾海峡地区有地震记录以来最大的一次地震(冯绚敏等, 1996)。这次大地震由于其发生的位置、断层错动性质以及未来对我国大陆地区破坏性地震发生趋势预测研究等具有重大意义(陈祥熊等, 1996), 已经引起了学界的广泛重视和研究。

应力触发是指地震发生后造成后续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。在过去近一、二十年内, 库仑应力(Coulomb Stress)已成为地震研究中的新兴方向且应力触发机制已被诸多震例研究所证实(Stein et al, 1994; King et al, 1994; Deng et al, 1997; Harris, 1998; Parsons et al, 2000, 2008; Nalbant et al, 2002, 2006; McCloskey

[收稿日期] 2011-11-02

[基金项目] 国家自然科学基金(U0933006)、广东省“908”专项课题(GD908-JC-03, GD908-JC-10)、国家自然科学基金(41006030, A1176054)共同资助

[作者简介] 王韶稳, 男, 1989 年生, 中国科学院南海海洋研究所硕士研究生。主要研究方向为海洋新构造与地震地质学。E-mail: wangshw@scsio.ac.cn

et al 2003; Steacy et al 2005; Toda et al 2008)。国内的一些学者在这方面也进行了比较多的研究(陈连旺等 2008; 周宇明等 2008; 傅征祥等 2001), 万永革等(2007)以青藏高原北缘的海原、古浪、昌马等 3 次大地震为对象,探讨了大地震间的相互触发作用; 石耀霖等(2010)以汶川地震为例讨论了库仑应力计算过程中的若干问题; 王力伟等(2010)以汶川地震为例分析了地震触发的静态库仑应力计算的不确定性; 邵志刚等(2009)以台湾集集地震为例研究了库仑应力变化与余震的对应关系。特别是 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震以后,库仑应力研究方法在国内迅速发展(张培震等 2008; 和泰名等 2011; 彭华等 2009)。这些结果使得库仑应力模型成为研究地震间相互作用的有力工具,应力触发已然成为研究地震发生的力学驱动机制的重要方向。

表 1 1994 年 9 月 16 日台湾海峡 7.3 级地震主要参数

发震时刻 (年-月-日 T 时:分:秒)	震中位置		震源 深度(km)	震级				数据来源
	东经(°)	北纬(°)		M_s	m_B	m_b	M_w	
1994-09-16 T06:20:19.4	118.67	22.52	23	7.2	6.9	6.3		中国地震台网 (CSN) 目录
1994-09-16 T06:20:19	118.75	22.52	19	6.9		6.4		国际地震中心 (ISC) 地震目录
1994-09-16 T06:20:18.74	118.711	22.528	13.1	6.7		6.5	6.8 6.7 (USGS) (HRV)	美国国家地震 信息中心(NEIC) 地震目录

注: USGS 为美国国家地质调查局; HRV 为哈佛大学

目前国内关于地震引发库仑应力的研究主要集中在 2008 年汶川 8.0 级和 2010 年玉树 7.1 级地震两个震例上,对于其他地震的研究还比较少。东南沿海地区地质构造复杂,地震活动频繁,并且人口稠密,经济发展迅速,对这一地区的地震活动展开库仑应力方面的研究具有重要意义。本文在以往研究成果的基础上,对 1994 年 9 月 16 日台湾海峡 7.3 级地震所产生的静态库仑应力变化与余震分布等问题进行了初步研究,以便为进一步研究该区域及我国东南沿海的断裂活动性以及地震活动特征和未来地震发生的趋势提供一些参考。

1 震区地质构造背景

台湾海峡 7.3 级地震震中位于海峡南端的出口开阔部位,即台湾浅滩南侧(任镇寰等, 1998)。台湾海峡地区在大地构造位置上是西太平洋海沟-岛弧-边缘海体系的一部分(丁学仁, 1998),该区断裂构造发育,各级构造单元的地质特征复杂,尤其是全新世以来构造运动相当活跃,地质演化、地质构造差异显著。其强震活动在东南沿海地震带中占有重要地位,历史上曾发生多次 6 级以上破坏性地震(丁学仁, 1998)。

台湾海峡南部有多组活动断裂(图 1),并以 NE-NNE 向和 NW 向等两组活动断裂为主体组成新生代活动构造网络,控制着台湾海峡南部的构造运动和地震活动(吕浩江, 1997)。

本区主要的断裂按其走向可分为 NE 向、NEE 向、NW 向,各细述如下。

F1 为闽浙大陆边缘断裂(南澳-长乐断裂带),沿着海岸线展布。北起福鼎,经长乐、泉州、厦门、东山、南澳入海,长约 500km,宽约 50km(任镇寰等, 1998)。

F2 为闽粤滨海断裂带,走向 NE-NNE 向,该断裂是台湾海峡与福建陆地的一条边界大断裂。大致沿海水 50m 等深线分布,北东起自福建平潭牛山岛附近,向西南经兄弟屿近海,

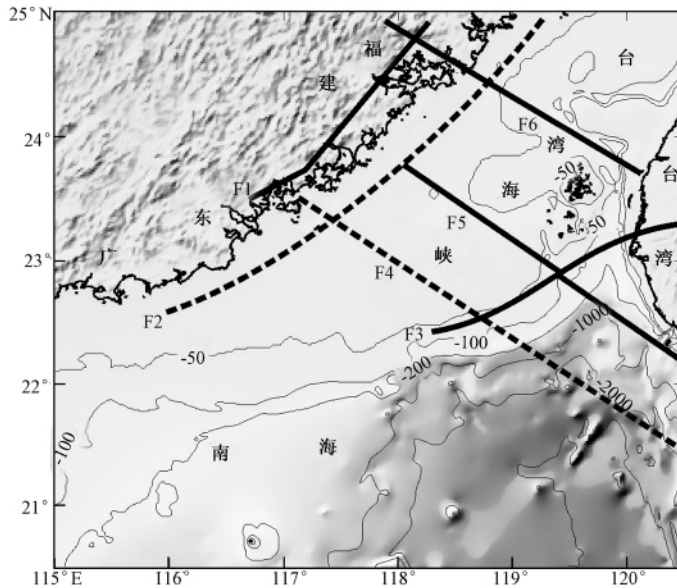


图 1 台湾海峡南部地区主要断裂分布图

F1 南澳-长乐断裂带; F2 闽粤滨海断裂带; F3 义竹断裂带; F4 巴士系断裂带;
F5 九龙江-鹅鸾鼻断裂; F6 泉州-嘉义断裂

可能延至澎湖列岛附近,长达 400km 以上,倾向 SE,倾角 $65^{\circ} \sim 75^{\circ}$ (任镇寰等, 1998)。它一直控制着台湾海峡盆地西部边界,切断基底和上部新生代沉积,是一条活动性较强的断裂 (任镇寰等, 1998)。

F3 为义竹断裂带,走向 NE-NEE 向,是本区最主要的断裂。位于台湾浅滩南,向东延入台湾西南平原嘉义以南的义竹,向西延伸至东沙群岛隆起北缘以西。走向 $NEE60^{\circ} \sim 70^{\circ}$,倾向 SE,倾角 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$,为右旋平移正断层 (任镇寰等, 1998)。这条断裂是在渐新世-中新世期间,随着南海发生两幕大规模海底扩张而伴生的新断裂,断裂活动以重击差异运动作为主要特征 (吕浩江, 1997),是本区构造的主要控制断裂。刘昭蜀等 (2001) 认为其断裂深至岩石圈,将其称为陆坡北缘张性岩石圈断裂。该断裂东段嘉义、义竹地区历史上发生过多次 6 级以上乃至 7 级地震,证明这是一条强活动断裂 (任镇寰等, 1998)。

F4 为巴士系断裂带,这是多条断裂组成的 NW 向的一组断裂带,主要分布于南海东北部,即台湾及台湾海峡的南侧 (丁原章等, 1992)。这组断续分布的断裂带斜交菲律宾海板块边缘的南北向弧形构造带,向北西穿过海峡伸入大陆,延伸至粤闽赣 3 省交界地区 (梁芳, 1998; 任镇寰等, 1998)。其相对义竹断裂形成时间较晚,切割 NE 向的义竹断裂,具有剪切性质 (刘昭蜀等, 2001)。

F5 为九龙江-鹅鸾鼻断裂,位于台湾西南海域,走向 $NW40^{\circ} \sim 45^{\circ}$ (任镇寰等, 1998),倾向 SW,向西经过澎湖,穿过海峡伸入大陆,向东南可能达到巴士海峡。很多学者对该断裂都有过描述 (刘昭蜀等, 2001; 张训华, 2008),认为此断裂规模宏大,断深至岩石圈,控制南海基本构造格局及地形轮廓,对构造单元的划分有重要意义。

F6 为泉州-嘉义断裂。郑天愉等(1996)曾在文献中提到此断裂,走向 NW 向,自泉州向东南延伸至台湾嘉义。历史上泉州地区发生过几次大地震,可能与泉州-嘉义断裂的活动性有关。

2 余震序列特征

根据中国地震台网(CSN)地震目录上的数据,1994年9月16日~12月31日约100天的时间,在本区域($21.00^{\circ} \sim 25.00^{\circ} \text{N}$, $117.00^{\circ} \sim 120.00^{\circ} \text{E}$)共发生了3.0级以上的余震70次,其中3.0~3.9级27次,4.0~4.9级36次,5.0~5.9级7次,最大余震震级为5.7级。其中9月16日地震当天发生余震15次,9月17~21日发生余震18次,9月22~30日发生余震12次,10月1~12月31日发生余震25次。为了更好地分析随时间的推移余震分布的变化情况,本文将主震发生后不同时间段的余震分布情况进行对比分析(图2)。

由图2可以得出:①在图2(a)中,主地震发生于1994年9月16日06时20分,在当天不到18h的时间里发生余震15次,在主震震中附近相对密集,整体呈WN方向分布。②图2(b)和图2(c)分别表示主震发生后5、15天内的余震分布情况,可见主震附近余震有所增加,WN方向余震有所发展。③图2(d)表示截至12月31日的余震分布情况。余震整体呈NW向分布,主震震中位于余震序列的偏西南方向。④对比分析以上各图可以看出,主震发生后,随时间的推移余震的发生主要呈现两个趋势,一是主震震中附近余震聚集,二是余震向主震震中的西北方向发展的趋势明显。

本次大地震震源深度为23km,余震震源深度不一(图3)。由图3可以看出,余震震源深度主要在14~19km区间内,占总数的44%,其中有23次余震的震源深度为15km;震源深度在20km以上和7km以下的余震都较少,分别只有12次和5次。由此可见,余震震源深度多数为15km左右,10km左右也有相对比较多的余震,在深度特别深和特别浅的位置则比较少有余震发生。

综合以上分析,余震震中整体主要呈现NW向的序列特征;余震在震中附近比较密集;余震向主震震中的西北方向发展趋势明显;余震震源深度主要在15km左右,其次在10km深度左右余震也相对较多。

3 库仑破裂应力变化

应力触发模型是建立在库仑破裂准则之上的。库仑破裂准则(Coulomb failure criterion)是诸多现存岩石破裂准则中应用较为广泛的一种,被岩石压缩实验及野外地质调查所证实(张国宏等,2008)。基于各向同性介质弹性半空间模型(Okada,1992),通过震源机制解获取发震断层参数,利用地震波数据或地表形变数据反演所得的断层滑动分布模型,通过(1)式可计算由地震产生的库仑应力变化。

$$\Delta CFS = \Delta \tau + \mu' \Delta \sigma_n \quad (1)$$

式中 ΔCFS 为库仑破裂应力变化, $\Delta \tau$ 为剪切应力变化, $\Delta \sigma_n$ 为正应力变化, μ' 为根据试验确定的断层有效摩擦系数,包含了孔隙流体压力变化造成的影响。根据库仑破裂准则,断层面上的剪切应力大于或等于阻碍滑动的摩擦应力时,沿断层面就会发生摩擦滑动。诸多震例研究成果表明,中强地震所产生的库仑应力增加的区域有利于后续地震的发生,而负值区则明显抑制后续地震的发生(Lin et al 2004; Toda et al 2011)。

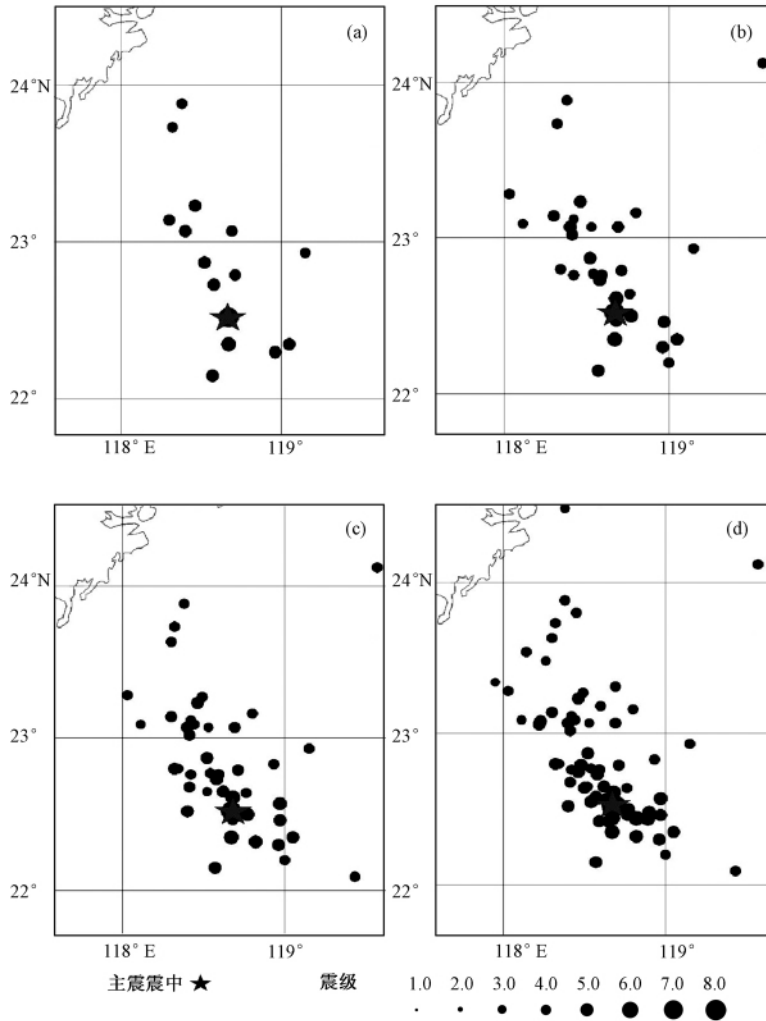


图 2 1994 年 9 月 16 日台湾海峡 7.3 级地震余震的分布情况

- (a) 9 月 16 日主震发生当天的余震分布; (b) 主震发生截至 9 月 21 日的余震分布;
 (c) 主震发生截至 9 月 30 日的余震分布; (d) 主震发生截至 12 月 31 日的余震分布

4 震源机制解和断层滑动分布模型

台湾海峡地区位于亚欧板块的边缘,处于菲律宾板块与亚欧板块相互挤压作用的俯冲边缘,应力分布复杂,构造活动强烈。台湾海峡的地质构造是一个新生代的构造盆地,称为台湾海峡盆地,其中分布有多条活动强烈的断裂。

1994 年 9 月 16 日台湾海峡 7.3 级地震发生在台湾海峡南部台湾浅滩的南部边缘,震中位于 22.52°N、118.67°E(中国地震台网(CSN)地震目录^①),根据前人对这一区域的地质构

① http://www.csndmc.ac.cn/newweb/cgi-bin/csndmc/csn_catalog_p003.pl?mode=catalog&ot=19940916_0620194

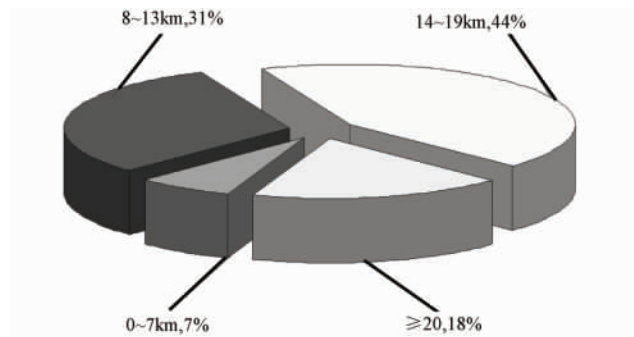


图3 1994年9月16日台湾海峡7.3级地震余震震源深度分布及所占比例示意图

造背景的分析,此处位于NE向的义竹断裂和NW向的巴士系断裂带相交汇的区域,由于地震发生在海中,无法到震中区作地震地质、地面宏观现象以及地震影响场等方面的实地调查与研究,加之地震观测台网偏于西侧,对于地震的定位带了一定的影响(误差),因此对这次地震的发震构造等问题存在颇多争议(任镇寰等,1998)。台湾7.3级地震发生之后,很多学者和地震研究机构对此展开了研究,并陆续公布出了不同的震源机制解。

根据表2中冯绚敏等(1996)、彭美凤等(1997)和丁学仁(1998)反演出的震源机制解数据,可以看出一组节面为NEE向,另一组节面为NW向,NEE走向的节面为正断层,其走向和断层性质与震源区义竹断裂一致。世界标准地震台网(WWSSN)、美国地质调查局(USGS)、和哈佛大学(HRV)等国际台网震源机制解资料,表面上看起来与冯、彭和丁的结果稍有差别,但仔细分析仍然是接近的。4组资料中均有一个节面是NEE向或者近EW向的,但震中区域只有很发育的NEE向断裂和NEE的断陷、隆起等构造(任镇寰等,1998)。因此,差异可能是由于采取的震源数据资料的不同以及资料处理中的正常误差而造成的。

表2 1994年台湾海峡7.3级地震震源机制解(单位:度(°))

序号	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		N 轴		资料来源
	走向	倾向	倾角	走向	倾向	倾角	方位	倾角	方位	倾角	方位	倾角	
1	59	NW	45	328	SW	88	274	31	22	29	147	45	冯绚敏等(1996)
2	63	334	45	317	220	75	260	40	17	18	126	40	彭美凤等(1997)
3	243	334	45	137	223	75	268	40	17	18	126	40	丁学仁(1998)
4	275	35	-90	95	55	-90	5	80	185	10	0	95	WWSSN
5	296	29	-125	155	67	-73	93	64	232	20	328	16	USGS
6	256	35	-116	107	59	-73							HRV

根据以上收集到的震源机制解,断层的滑动方式均为正断层或者走滑正断层。假如发震断裂为NW向,可以计算出NW走向的断裂发生正断层滑动对自身断裂造成的库仑应力变化为负值,也就是抑制后续余震的发生。这与余震主要呈NW向展布且大量分布在主震震中附近的事实是相矛盾的。因此,本文认为发震断裂应该为NE向。这与前人(冯绚敏等,1996;吕浩江,1997;任镇寰等,1998)从地质背景、地球物理、地震活动空间特征等方面分析并得出的结论是相一致的。

计算可靠的库仑应力变化需要建立更为真实的断层分布模型。现将本区域主要断层的

相关参数列于表 3。

表 3 主要断层的空间产状参数

编号	名称	走向	倾向	倾角(°)	深度(km)	备注	资料来源
1	南澳-长乐断裂带	NE	SE			长 500km, 宽约 50km	任镇寰等(1998)
2	闽粤滨海断裂带	NE 30°~50°	SE	较陡, 近于直立	约 20~30	长 400km 以上, 右旋走滑	任镇寰等(1998) 黄昭等(2006)
3	义竹断裂带	NEE 60°~70°	SE	70~80	约 20~30	右旋正断层	任镇寰等(1998) 张训华等(2008)
4	巴士系断裂带	NW 300°~320°	SW	35~45	20 以上	左旋正断层	梁劳(1998)、任镇寰等 (1998)、黄慈流等(1997)
5	九龙江-鹅鸾 鼻断裂	NW 40°~345°	SW				任镇寰等(1998) 张训华等(2008)
6	泉州-嘉义断裂	NW	SW				

5 计算结果与分析

本文对余震分布序列进行了深入的分析,并结合断层滑动产生的库仑应力变化特征,参考前人的研究资料和成果(冯绚敏等,1996;吕浩江,1997;任镇寰等,1998),判定 1994 年台湾海峡 7.3 级地震的发震断层为 NEE 走向的义竹断裂。主震断层的具体参数采用哈佛大学震源机制解的节面 I 的数据:走向(strike)角为 256°,倾角(dip)为 35°,滑动角(rake)为 -116°。其次,设定断层的有效摩擦系数 μ 为 0.4,弹性材料参数泊松比为 0.25,杨氏模量为 8×10^4 MPa。结果表明,摩擦系数 μ 的变化对库仑破裂应力变化值有影响,而对应力变化空间分布的影响不大。从断层相互作用的角度出发,接收断层用于描述区域内断裂的综合特性,不同类型的接收断层反映了对地震所产生的库仑破裂应力的不同响应(张国宏等,2008)。利用不同的接收断层参数计算出的静态库仑应力变化结果是不同的。为了更好地分析库仑应力变化与余震分布的对应关系,本文分别计算了以 NW 走向的巴士系断裂带为接收断层的库仑应力变化和沿余震序列的一个切面上的库仑应力变化分布图。

利用日本京都大学 Shinji Toda 教授提供的 Coulomb3.3 程序计算得到台湾海峡 7.3 级地震产生的静态库仑应力变化的结果如图 4.5 所示。

由计算出的库仑应力变化图像(图 4)和沿 A-B 切面上的库仑应力变化图像(图 5)可以得出:①在主震震中附近,区域库仑应力变化情况比较复杂,此处余震序列呈 NW 向展布,沿此方向上库仑应力变化依次为减小-增加-减小相间变化,应力变化与余震震中分布没有明显的一致关系,余震震中处在应力增加区域和减小区域的数量大致相等;②发震断层的 WN 方向为应力增加的区域,距发震断层相对较远的余震绝大部分都处在库仑应力增加的此区域,只有极少数的余震震中处在库仑应力变化的边界附近。这与主地震发生后余震向 WN 方向发展的趋势一致。应力增加值的大小随距主震震中距离的增加而减小,余震大多数都处在应力增加值在 0.1~0.4bar 的区域,只有 1~2 个余震震中处的应力增加值小于 0.1bar。

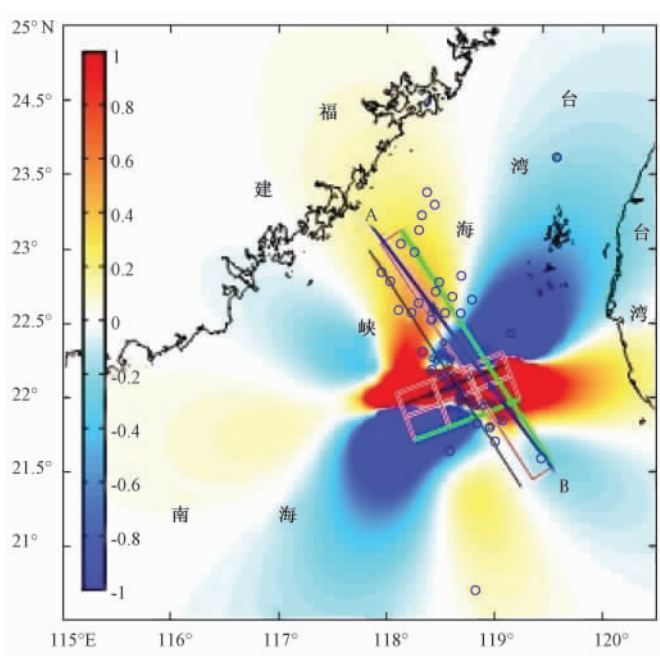


图4 以巴士系断裂带为接收断层计算出的库仑应力变化图(计算深度:15km)
红色区域为库仑应力增加的区域,蓝色区域为库仑应力减小的区域,图中网格线表示
发震断层在15km深度平面的投影(应力单位:bar)

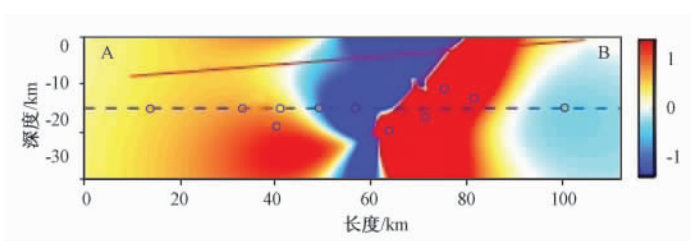


图5 沿图4中A-B切面上的库仑应力变化(切面深度:30km)
红色区域为库仑应力增加的区域,蓝色区域为库仑应力减小的区域(应力单位:bar)

总体来说,震中附近区域应力变化较为复杂,与余震的分布不完全一致;在距震中相对较远的区域,库仑应力变化与余震序列的分布吻合较好,约90%的余震都处在应力增加的区域。因此,震中附近区域由于复杂的断层构造及几何关系,计算出的库仑应力变化与余震序列分布的对应关系也更为复杂,所以在震中附近区域利用库仑应力变化来预测余震发生的可靠性并不大。在距震中相对较远的区域,库仑应力变化能较好地反映与余震分布的对应关系,说明静态库仑应力的增加可以触发余震,应力减小则可以抑制余震的发生。

6 断层危险性分析

台湾海峡是一个新生代残留陆缘裂谷盆地,裂谷西界为闽粤沿海断裂,东界为屈尺-老浓断裂,与两岸的闽浙中生代火山断隆区、台湾新生代岛弧褶断区为邻,北界为基隆-马祖断裂,

南界为漳州-高雄断裂,与东海、南海裂谷相接;被 NE 向和 NW 向的一系列正断层切割,呈 NE 向分块, NW 向分带,隆拗相间排列,总体向东陷落的不对称箕状地堑和地垒系特征。

台湾海峡主要发育 NE 向、NW 向和近 SN 向 3 组断裂,大多为张性正断层。1994 年 9 月 16 日的 7.3 级地震所产生的库仑应力与其他不同走向的断层相互作用,引发了这一区域应力场的重新调整。库仑应力计算结果显示,此次 7.3 级地震的发震断层为 NE 向的义竹断裂,地震使 NW 向的巴士系断裂带上的应力增加,触发其上发生了大量的余震。

巴士系断裂带是一系列 NW 向的断裂的组合,起始于菲律宾海板块边缘,活动强烈。1994 年台湾 7.3 级地震造成巴士系断裂带 WN 段的大部分处在应力增加的区域,触发了大量余震。其位于此次 7.3 级地震发震断层 ES 的部分区域应力也有增加,但增加值不大。它切割古老的 NE 向断裂,在断裂交汇处附近应力容易集中,易发生地震。最近十几年里该断裂带上没有发生大地震,其应力逐渐聚集,是发生大震的危险区。

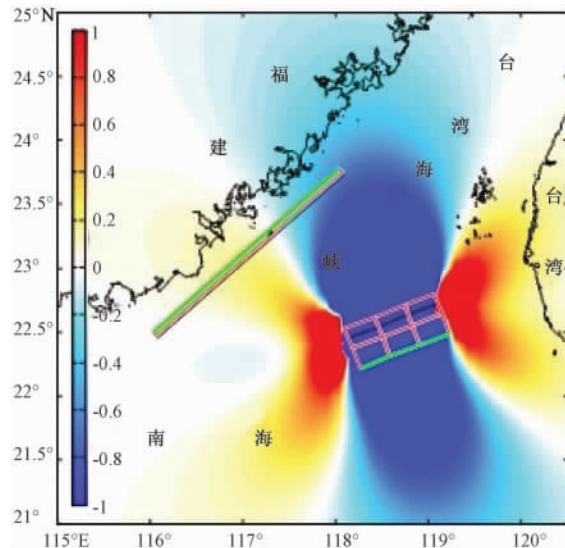


图 6 以闽粤滨海断裂带为接收断层计算出的库仑应力变化图(计算深度:15km)

红色区域为库仑应力增加的区域,蓝色区域为库仑应力减小的区域,图中网格线表示

发震断层面在 15km 深度平面的投影(应力单位: bar)

闽粤滨海断裂带是本区的一条深切地壳的大型断裂带,由若干条互相平行的正断层组成,沿 40~60m 等深线分布。沿断裂带地震活动强烈,曾发生 1604 年泉州海外 8.0 级地震和 1918 年南澳岛 7 级地震,在兄弟屿和南澎列岛一带,近代小震活动十分频繁密集。但沿此强活动断裂带近几十年来没有发生过 6.0 级以上的地震。1994 年台湾海峡 7.3 级地震造成此断裂带上汕头近海区段应力增加,正是构造活动性强地震危险性高的南澎岛附近海域,但是没有触发大地震。因此,推断认为在闽粤滨海断裂带与 NW 走向的上杭-东山断裂交汇的南澎岛-东山岛海域发生地震的潜在危险性较大,且不排除发生较大地震的可能性。

7 讨论与结论

台湾西南地区一向被认为是台湾最有可能发生地震的地区(林明圣等,2004)。20 世纪

以来,共发生过 5 次破坏性地震,都被报道与断裂活动有关,即分别是 1906 年嘉义 7.1 级地震与梅山断裂(Omori,1907)、1941 年中埔 7.2 级地震与义竹断裂(林明圣等,1998)、1946 年台南 6.1 级地震与新化断裂(张丽旭等,1947)、1994 年台湾海峡南部 7.3 级地震与义竹断裂(Kao et al,1996),以及 1999 年嘉义 6.4 级地震与梅山-义竹双轨构造带(Biq,2000)。这 5 次地震都与义竹断裂带的活动有直接或间接的关系。海峡西部的滨海断裂带也是一条活动性比较强的深大断裂带,台湾海峡地区强烈的地震活动有可能会触发滨海断裂带的活动,对福建、广东等沿海地区可能会造成很大的危险性。由于本区域位于海洋中,无法进行震后地质与断裂的实地调查和现代应力积累情况的测量,所以本文仅从地震所触发的静态库仑应力变化情况的角度加以分析,未能考虑区域先存应力场的影响。目前不少学者在此区域开展过调查与研究,但是地震的发生是一个非常复杂的过程,要对此区域的地质构造、断裂活动性及其强震间的相互触发等有一个比较清楚的认识,已有的工作还远远不够。

本文基于震源机制解断层模型及滑动分布模型,正演了 1994 年 9 月 16 日台湾海峡 7.3 级地震所产生的静态库仑应力变化,从余震分布的拟合对比及断层相互作用的角度,分析了震后控制余震分布的主要构造因素和区域内断层的危险性,并获得了断层模型上的静态库仑应力的变化值。

(1) 基于建立的滑动模型进行静态库仑应力变化正演的结果在距震中相对较远的区域库仑应力变化与余震序列的分布吻合较好,约 90% 的余震都处在应力增加的区域。库仑应力变化能较好地反映与余震分布的对应关系。而在震中附近区域,由于复杂的断层构造及几何关系,库仑应力变化较为复杂,与余震的分布不完全一致,所以在震中附近区域利用库仑应力变化来预测余震发生的可靠性并不高。

(2) 将主地震发生后随时间推移的不同时间段里余震分布情况分别做图,并根据余震分布序列的不同特征,将其划分为不同区域,分别进行分析。相比于前人直接对余震的分布进行分析来说,这样能更加明确地得出余震分布及发生的趋势性规律,进而判断出区域的断裂分布。对余震震源深度进行分段划分,找出余震分布较为密集的深度,为确定库仑应力计算时的计算深度提供参考,提高计算结果的精确度。

(3) 在对余震进行区别分析的基础上,结合区域构造背景,针对区内主要断裂,以其为接收断层计算断层上的库仑应力改变并据此分析了断裂的活动危险性。闽粤滨海断裂带部分区段上库仑应力有所增加,但没有触发地震,推断认为在其与 NW 走向的上杭-东山断裂交汇的南澎岛-东山岛海域发生地震的潜在危险性较大,而且不排除发生较大地震的可能性。

参考文献

- 陈连旺、张培震、陆远忠等 2008 川滇地区强震序列库仑破裂应力卸载效应的数值模拟,地球物理学报,51(5),1411~1421。
- 陈祥熊、袁定强、吴长江,1996,台湾海峡南部 M_s 7.3 级地震震源破裂特征及东南沿海地震形势分析,地震学报,18(2),145~155。
- 丁学仁,1998,闽粤海外历史地震与台湾海峡现今强震活动图像,中国地震,14(3),51~59。
- 丁原章、梁芳,1992,巴士系构造的地震危险性,华南地震,12(2),1~14。
- 冯均敏、胡瑞贺,1996,台湾海峡 7.3 级地震序列特征,华南地震,16(3),9~16。
- 傅征祥、刘桂萍、陈棋福,2001,青藏高原北缘海原、古浪、昌马大地震间相互作用的动力学分析,地震地质,23(1),35~42。

- 和泰名、李世愚、张洪魁等 2011 滑动弱化模型下的库仑应力变化与远程触发问题,地震学报,33(2),165~186。
- 黄慈流、芳达权、陈汉宗等 1997,台湾海峡西部地质、地球物理和地球化学综合调查研究,56~68,厦门:厦门出版社。
- 黄昭、王善雄 2006,台湾海峡滨海断裂带的构造特征与活动性,大地测量与地球动力学,26(3),16~22。
- 梁劳,1998,巴士系断裂带的构造应力场特征,华南地震,18(1),119~124。
- 林明圣、萧谦丽 2004,台南盆地的地震构造,地震学报,26(4),404~410。
- 林明圣、萧谦丽、郑世楠,1998,地震诱发的滑坡湖—台湾草岭与四川摩岗岭,海峡两岸山地灾害与环境研究,1,263~267。
- 刘昭蜀、赵焕庭、范时清等 2001,南海地质,255~258,北京:科学出版社。
- 吕浩江,1997,台湾海峡南部 1994 年 9 月 16 日 7.3 级地震活动空间特征与发展构造,福建地理,12(1),7~11。
- 彭华、马秀敏、姜景捷 2009,龙门山北端青川断层附近应力测量与断层稳定性,地质力学学报,15(2),114~130。
- 彭美凤、林世敏、林树,1997,台湾海峡 7.3 级地震及其震后地震趋势研究,地震,17(2),184~194。
- 任镇寰、钟貽军、罗振暖,1998,1994 年 9 月 16 日台湾浅滩 7.3 级地震发震构造的讨论,地壳形变与地震,18(4),38~47。
- 邵志刚、傅容珊、薛霆毓等 2009,库仑应力变化与余震对应关系的初步探讨——以集集地震为例,地球物理学进展,24(2),367~374。
- 石耀霖、曹建玲,2010,库仑应力计算及应用过程中若干问题的讨论——以汶川地震为例,地球物理学报,53(1),102~110。
- 万永革、沈正康、曾跃华等,2007,青藏高原东北部的库仑应力积累演化对大地震发生的影响,地震学报,29(2),115~129。
- 王力伟、陈棋福 2010,以 2008 汶川 8.0 级地震为例分析地震触发的静态库仑应力计算的不确定性,中国地震,26(3),251~264。
- 张国宏、单新建、李卫东 2008,汶川 M_s 8.0 地震库仑破裂应力变化及断层危险性初步研究,地震地质,30(4),935~944。
- 张丽旭、周敏、陈培源,1947,民国三十五年十二月五日之台南地震,台湾省地质调查所汇刊,1,11~16。
- 张培震、徐锡伟、闻学泽等 2008,2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因,地球物理学报,51(4),1066~1073。
- 张训华 2008,中国海域构造地质学,204~217,北京:海洋出版社。
- 郑天愉、刘鹏程,1996,1994 年 9 月 16 日台湾海峡地震及其构造背景研究,地球物理学报,39(1),68~79。
- 周宇明、单斌、熊熊,2008,静态应力触发中影响库仑应力变化的参数敏感性分析,大地测量与地球动力学,28(5),21~26。
- Biq C 2000,The 1999 Chial earthquake of Taiwan and the co-seismic strike slip duplexing, Central Geol Surv Spec Pub,12,183~190。
- Deng J, Sykes L R, 1997, Evolution of the stress field in southern California and triggering of moderate-size earthquakes: a 200-year perspective, J Geophys Res,102,9859~9886。
- Harris R A, 1998, Introduction to special section: stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard, J Geophys Res,103,24347~24358。
- Kao H, Wu F T, 1996, The 16 September 1994 earthquake in the Taiwan Strait and its tectonic implication, Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science,7(1),13~29。
- King G C P, Stein R S, Lin J, 1994, Static stress changes and the triggering of earthquakes, Bull Seismic Soc Am,84(3),935~953。
- Lin J, Stein R S, 2004, Stress triggering in thrust and subduction earthquakes and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults, J Geophys Res,109,B02303, doi: 10.1029/2003JB002607。
- McCloskey J, Nalbant S S, Steacy S, 2003, Structural Constraints on the spatial distribution of aftershocks, Geophys Res Lett,30(2),1610, doi: 10.1029/2003GL017225。
- Nalbant S S, McCloskey J, Steacy S, et al 2002, Stress accumulation and increased seismic risk in Eastern Turkey, Earth Planet Sci Lett,195,291~298。
- Nalbant S S, Steacy S, McCloskey J, 2006, Stress transfer relations among the earthquake that occurred in Kerman province, southern Iran since 1981, Geophys J Int,167,309~318。

- Okada Y ,1992 ,Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space ,*Bull Seism Soc Amer* **82** ,1018 ~ 1040.
- Omori F ,1907 ,Preliminary note on the Formosa earthquake of March 17 ,1906 ,*Imp Earthquake Laves Comm Bull* **2** ,53 ~ 69.
- Parsons T ,Dreger D S 2000 ,Static-stress impact of the 1992 Landers earthquake sequence on nucleation and slip at the site of the 1999 $M = 7.1$ Hector Mine earthquake ,southern California ,*Geophys Res Lett* **27**(13) ,1949 ~ 1952.
- Parsons T ,Ji C ,Kirby E 2008 ,Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan Basin ,*Nature* **454** ,509 ~ 510 ,doi: 10. 1038/nature0717.
- Steady S ,Nalbant S ,McCloskey J ,et al 2005 ,Onto what planes should Coulomb stress perturbations be resolved? ,*J Geophys Res* ,**110**(B05S15) ,doi: 10. 1029/2004JB003356.
- Stein R S ,King G C P ,Lin J ,1994 ,Stress triggering of the 1994 $M = 6.7$ Northridge ,California ,earthquake by its predecessors ,*Science* **265** ,1432 ~ 1435.
- Toda S 2008 ,Coulomb stress imparted by the 25 March 2007 $M_w = 6.6$ Noto-Hanto ,Japan earthquake explain its ‘butterfly’ distribution of aftershocks and suggest a heightened seismic hazard ,*Earth Planet Space* **60**(10) ,1041 ~ 11046.
- Toda S ,Lin J ,Stein R S 2011 ,Using the 2011 $M_w = 9.0$ off the Pacific coast of Tohoku earthquake to test the Coulomb stress triggering hypothesis and to calculate faults brought closer to failure ,*Earth ,Planets and Space* ,**63** ,725 ~ 730 ,doi: 10. 5047/eps. 2011. 05. 010.

The coulomb stress change associated with the Taiwan Strait $M_s7.3$ earthquake on Sep.16 ,1994 and the risk prediction of its surrounding faults

Wang Shaowen^{1,2)} Zhan Wenhuan¹⁾ Zhang Fan^{1,2)} Zhu Junjiang¹⁾

1) CAS ,Key Laboratory of Marginal Sea Geology ,South China Sea Institute of Oceanology ,Guangzhou 510301 ,China

2) Graduate University of Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100049 ,China

Abstract Using the focal mechanism and slip distribution model of the Taiwan Strait $M_s7.3$ earthquake on Sep. 16 ,1994 , we calculated the static coulomb stress change stemming from the earthquake. Based on the distribution of aftershocks and stress field as well as the location of historical earthquake , we researched the coulomb stress change of Taiwan Strait $M_s7.3$ earthquake. The result shows that: static coulomb stress change forward modeling based on slip distribution model is quite consistent with the location of aftershocks in the area that is far away from the epicenter. Ninety percent aftershocks occurred in the stress increased areas. The coulomb stress change is not entirely consistent with the distribution of aftershocks near the epicenter. It follows that coulomb stress change can better reflect the aftershock occurrence far away from epicenter , while such corresponding relationship becomes quite complex near epicenter. Through the calculation , we find that the coulomb stress change in southwest part of Min-Yue (Fujian-Guangdong) coastal fault zone is increased , and this enhances the seismic activity. As it is the intersection area of Min-Yue coastal fault with Shanghang-Dongshan fault , we considered the Nanyang Island-Dongshan Island surroundings have a high potential seismic risk.

Key words: Coulomb stress change The Taiwan Strait $M_s7.3$ earthquake Focal mechanism Fracture risk