

喜马拉雅东构造结附近强震对滇西南地区 断层的影响研究^{*}

孟令媛, 史海霞, 周龙泉

(中国地震台网中心, 北京 100045)

摘要: 以在喜马拉雅东构造结发生的2000年6月7日缅甸 $M_s6.9$ 地震、2011年3月24日缅甸 $M_s7.2$ 地震和2012年11月11日缅甸 $M_s7.0$ 地震作为主要破裂源, 计算3次地震震后周围应力的空间变化, 给出其对滇西南地区断层造成的静态库仑应力变化的时间影响范围。结果表明: 3次地震对滇西南地区活动断层库仑破裂应力变化主要为负值, 即受到应力卸载的影响, 其中包括大盈江断裂、龙陵—瑞丽断裂、南汀河西支断裂、南汀河东支断裂、孟连—澜沧断裂、打洛—景洪断裂和怒江断裂, 量值范围在 $-0.06 \sim -0.002$ bar (1 bar = 0.1 MPa), 卸载影响最大的断裂为打洛—景洪断裂, 为 -0.06 bar, 木嘎断裂和龙陵—澜沧断裂受到加载的影响, 断层的库仑破裂应力分别为 $+0.002$ bar 和 $+0.004$ bar。

关键词: 缅甸地震; 喜马拉雅东构造结; 库仑破裂应力; 断层相互作用

中图分类号: P315.727

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)01-0058-08

0 引言

喜马拉雅造山带包含喜马拉雅弧、东构造结和西构造结3个基本组成部分, 是大陆碰撞后印度板块继续向北移动, 并向青藏高原下俯冲产生的构造变形系统向南凸出的弧形, 东、西构造结的变形过程在时间、空间上的差异, 是西藏东部下地壳向东、东南流动的部分原因(滕吉文等, 2006; 马晓静, 高祥林, 2011)。依据构造地质学划分喜马拉雅造山带区域, 东构造结为北东走向的马蹄形同轴弧, 主要是由主边界逆断层东端和缅甸弧构成, 还包含几条大致平行的断层弧, 最显著的构造特征是环绕东构造结的大尺度顺时针旋转运动, 以及缅甸弧东边的宽阔右旋剪切变形带, 其中实皆(Sagaing)断裂是缅甸弧及东构造结的重要组成部分, 也是整个喜马拉雅造山带的东边界(尹安, 2006)。实皆断裂是缅甸中部近南北向高角度右旋走滑断裂, 长约1 200 km, GPS资

料研究表明, 该断裂右旋走滑速率为 $15 \sim 18$ mm/a(宋健等, 2011), 是东构造结强震最为活跃的断裂带, 且靠近我国滇西南地区, 自1900年以来发生过多次 $M \geq 7$ 地震, 最近一次为2012年11月11日的缅甸 $M_s7.0$ 地震, 其震中位置为发生在实皆断裂带上的1946年 $M_s7.8$ 地震和1956年 $M_s7.0$ 地震中间的空段内, 震源深度约20 km, 震中位置距离我国云南省边境约200 km^①。

近年来, 国际地震界广泛关注强震产生的库仑破裂应力变化及其对周围断层的影响, 主要涉及后续地震的发震位置和时间(Harris, 1998; Stein, 1999)。即某一断层发生地震时, 不仅在该发震断层上产生应力降及应变能的释放, 同时应力还会被传递至其周围的断层上, 进而使得这些断层发生应力的改变和调整(Harris *et al.*, 1995; Toda *et al.*, 1998)。万永革等(2002)针对中国大陆发生的4次大震震后应力变化情况指出, 后续破裂事件均受到前面发生的地震事件的影响, 即前面的地震事件对后续地震事件均存在某种程度

^{*} 收稿日期: 2013-09-15.

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划青年项目(XH14055Y)、国家自然科学基金(41404045)、中国地震台网中心青年科技基金(QNJJPZ-YBB-1307)及中国地震局监测预报司震情跟踪合同制定向工作任务(2013020106)联合资助。

① <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/result.php>.

的触发作用。断层之间的相互作用不仅可以通过触发来体现,而且当某一断层发生地震时,对其周围断层应力的影响或者有增加或者有减少,即加速或者延缓地震的发生时间,产生触震和缓震效应(King *et al.*, 1994; 张秋文等, 2003),如1857年Ft. Tejon大地震产生的缓震效应对南加州后续地震的抑制作用十分明显(Harris, Simpson, 1996)。此外,针对2008年汶川地震后对周边断层地震活动性影响的研究中指出,汶川地震的发生使得鲜水河断裂道孚—康定段及则木河断裂的库仑破裂应力增加,金沙江断裂的库仑破裂应力减小(万永革等, 2009; 邵志刚等, 2010)。

本文针对2000年以来喜马拉雅东构造结发生的3次7级左右地震后周围应力场的变化进行分析,计算其对我国滇西南地区断层静态库仑破裂应力的具体影响,讨论滇西南断层间的相互影响及加卸载效应,并估计该区域潜在的地震危险性。

1 计算方法

地震的发生主要由地下岩石的错动造成,地震发生前后较短时间内实现了弹性能的快速释放,假设地球介质为半无限空间且空间内各向同性,若已知地震位错的几何参数和错动大小,即可求出半无限空间内部的位移场和应变场。基于库仑定律,断层面上库仑破裂应力变化的表达式为

$$\Delta CFS = \Delta\tau + f(\Delta\sigma_n + \Delta p). \quad (1)$$

式中: $\Delta\tau$ 为剪切应力变化; $\Delta\sigma_n$ 为正应力变化; f 为断层面介质摩擦系数; Δp 为孔隙压力变化,实际上 Δp 调节着断面上的有效正应力, Δp 减少摩擦系数的效应可以用 $f' = f(1 - B)$ 表示,其中 B 为 Skempton 系数,取值范围为 0~1,当岩石应力的改变远远快于岩石中 Δp 的扩散,则 Δp 可以通过 B 值在式(1)中得到体现,且转换为

$$\Delta CFS = \Delta\tau + f'\Delta\sigma_n. \quad (2)$$

其中, f' 包含了孔隙流体和断层面上介质的特性,一般取值为 0.2~0.8 (King *et al.*, 1994)。

基于式(1)和(2),采用 Toda 等(1998)开发的 Coulomb3.3 软件对库仑破裂应力变化进行计算。计算中地壳的剪切模量取 3.3×10^4 MPa,泊

松比取值 0.25, f' 取值 0.4,该值为 King 等(1994)通过不同 f' 取值相应库仑破裂应力图像变化情况给出的经验取值。通常引起应力变化的地震和破裂面称为“源地震”和“源断层”,区域中的其它先存在的断层为“接收断层”,Coulomb3.3 软件的计算过程中,接收断层的 ΔCFS 的计算结果受到源断层的走向、倾角和滑动角,源地震的同震位错,以及接收断层的几何特征和摩擦系数的综合影响(King *et al.*, 1994)。

活动断层库仑破裂应力的变化对其地震的活动性存在着一定的影响,简单的对应关系即为应力增加,则地震活动性增强,最后会慢慢回归到背景的水平,而应力减小则可能使周围的地震活动性的进程受到延缓。断层的演化过程一般可分为3个阶段:稳定滑动阶段、加速阶段、瞬态失稳阶段。第一阶段即为断层的闭锁阶段,通常占到整个演化阶段的约90%的时间进程,而同震过程则对应于第三阶段,即断层的动态破裂,通常在几十秒到上百秒内完成。弹性位错(Elastic Dislocation)理论下的触震效应和缓震效应的时间变化量 Δt 可表示为

$$\Delta t = \Delta CFS / \tau'. \quad (3)$$

式中, τ' 为剪应力加载速率,式(3)被广泛应用于对地震加卸载区成因的讨论和解释(Harris, 1998; Toda *et al.*, 1998; Parsons *et al.*, 2000)。剪应力加载速率 τ' 无法直接测得,需要基于理论计算求得,通常根据剪应力加载速率 τ' 和静态应力降 $\Delta\tau_s$ 及地震回复周期 t_r 之间的近似关系(Dieterich, 1994)求得:

$$\tau' = \Delta\tau_s / t_r. \quad (4)$$

式中, $\Delta\tau_s$ 为主震静态应力降,可以表示为(Knopoff, 1958)

$$\Delta\tau_s = 2\mu D / \pi W. \quad (5)$$

其中: μ 为剪切模量,且 $\mu = 3 \times 10^{10}$ Pa; W 为发震断层宽度; D 为地震的平均滑动位移。

在计算过程中,选取喜马拉雅东构造结靠近滇西南地区2000年以来发生的2000年6月7日缅甸 $M_s 6.9$ 地震、2011年3月24日缅甸 $M_s 7.2$ 地震和2012年11月11日缅甸 $M_s 7.0$ 地震作为源地震

(图 1)。把滇西南地区靠近边境的大盈江断裂、龙陵—瑞丽断裂、南汀河西支断裂、南汀河东支断裂、孟连—澜沧断裂、打洛—景洪断裂、怒江断裂、木嘎断裂和龙陵—澜沧断裂 9 条断层设定为接收断层,并将 9 条断层各自的走向、倾角和滑动角作为相应接收断层的几何输入参数(图 1)。根据以上方法和程序,计算这 3 次地震引起的周围应力的变化情况,并针对滇西南地区大盈江断裂等 9 个断层所受到的 ΔCFS 进行计算,从而进一步分析喜马拉雅东构造结附近强震对滇西南地区断层的加卸载影响。

2 地震参数选取及周围断层参数的设定

2000 年 6 月 7 日缅甸 $M_S 6.9$ 地震、2011 年 3 月 24 日缅甸 $M_S 7.2$ 地震和 2012 年 11 月 11 日缅甸

$M_S 7.0$ 地震 3 次地震的发震断层产状以及位错参数见表 1。为计算滇西南地区库仑破裂应力的变化,需要明确计算区域内断层的几何参数及运动学特征,笔者主要参照邓起东等(2002)依据地质和地震信息提供的活动断层相关数据来构建断层模型参数(表 2),这些断层即为应用 Coulomb3.3 软件的计算过程的接收断层。图 1 中给出的 $F_1 \sim F_9$ 断层主要考虑滇西南地区靠近缅甸 3 次 7 级左右强震的位置及影响范围,实皆断裂为近 NS 向的走滑型,因此, $F_1 \sim F_6$ 均为 NE 向,其中 F_6 打洛—景洪断裂展布相对较长,且靠近 2011 年缅甸 $M_S 7.2$ 地震, F_7 为距离 2000 年缅甸 $M_S 6.9$ 、2012 年缅甸 $M_S 7.0$ 两次地震较近,且与实皆断裂近乎平行的怒江断裂, F_8 、 F_9 则为靠近 2011 年地震的两条 NW 向断裂,其中 F_9 为龙陵—澜沧断裂的南段部分,本文考虑的计算长度约占总长的 1/4。

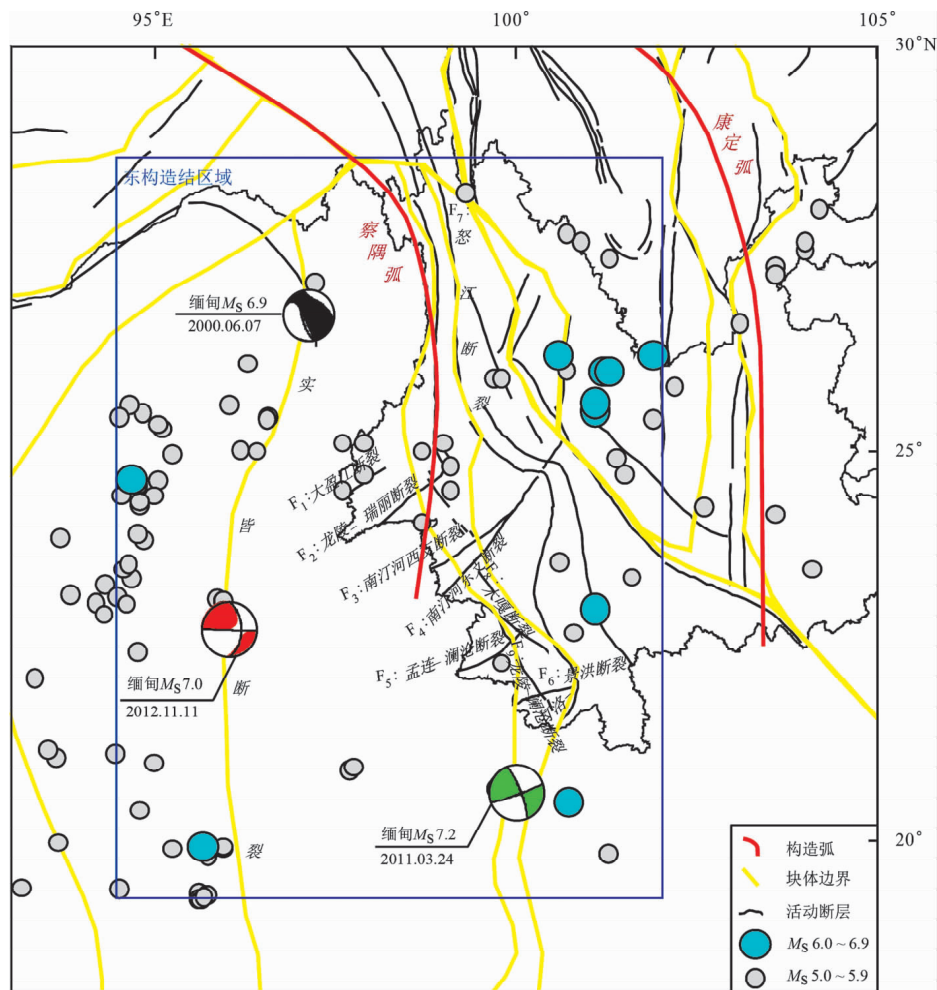


图 1 喜马拉雅东构造结及滇西南地区地质构造背景

Fig. 1 Schematic map of tectonic around the eastern Himalayan tectonic syntaxis and Southwest Yunnan area

表 1 喜马拉雅东构造结附近 3 次 7.0 级左右地震的发震断层几何参数及位错参数
Tab. 1 Geometric and dislocation parameters on the seismogenic fault of three $M7.0$ earthquakes
around the eastern Himalayan tectonic syntaxis

地震事件		震中位置/(°)	震源深度	走向/倾向/滑动角	平均滑动位移	破裂长度
发震时间/年-月-日	震级	(φ_N, λ_E)	/km	/(°)	/m	/km
2000-06-07	$M_S 6.9^{\text{①}} M_W 6.3^{\text{②}}$	(27.0, 97.2) ^①	23 ^①	322/36/66 ^{①②}	1.9 ^③	38 ^③
2011-03-24	$M_S 7.2^{\text{①}} M_W 6.9^{\text{②}}$	(20.8, 99.8) ^①	20 ^① , 8.0 ^②	250/86/-2 ^{①②}	2.8 ^③	51 ^③
2012-11-11	$M_S 7.0^{\text{①}} M_W 6.8^{\text{②}}$	(22.8, 96.0) ^①	20 ^① , 14 ^②	3/67/-176 ^{①②}	2.2 ^③	42 ^③

注：①中国地震台网中心，<http://www.ceic.ac.cn/AdvSearchHandler>；②美国 USGS，<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/results.php>；③ $\lg(D) = -3.37 + 0.53M$ ， $\lg(L) = -1.39 + 0.43M$ ，其中， D 和 L 分别为平均滑动位移和破裂长度（邓起东等，1992）。

表 2 滇西南地区接收断层几何参数
Tab. 2 Geometric parameters of the receiver faults in Southwest Yunnan area

No	断层名称	断层长度/km	走向/(°)	倾向/(°)	倾角/(°)	断层性质	水平滑动速率/mm·a ⁻¹
F ₁	大盈江	120 ^①	NE ^①	NW ^①	60~80 ^①	正左旋 ^①	3.7 ^①
F ₂	龙陵—瑞丽	150 ^①	NE ^①	NW/SE ^①	70~90 ^①	正左旋 ^①	4.0 ^①
F ₃	南汀河西支	200 ^①	NE ^①	NW ^①	80 ^①	左旋 ^①	3.6 ^①
F ₄	南汀河东支	56 ^③	140° ^③	NW ^①	75 ^③	—	1.0 ^③
F ₅	孟连—澜沧	100 ^①	NE ^①	NW ^①	80 ^①	左旋 ^①	4.19 ^①
F ₆	打洛—景洪	90 ^①	NE ^①	NW ^①	90 ^①	—	—
F ₇	怒江	300 ^①	NW ^①	NE ^②	45 ^②	—	—
F ₈	木嘎	80 ^①	NW ^①	NE ^①	90 ^①	—	—
F ₉	龙陵—澜沧南段	95 ^①	NW ^①	NE ^①	80 ^①	右旋 ^①	—

注：①邓起东等（2002）；②万永革等（2009）；③Gkarlaoui 等（2008）。

3 计算结果

根据已设定的地震断层模型和活动断层性质及滑动特性，计算投影到断层面和滑动方向上的库仑破裂应力变化（图2）。本研究选取的3次7级左右地震对滇西南地区活动断层的影响主要以应力卸载为主，其中大盈江断裂（F₁）、龙陵—瑞丽断裂（F₂）、南汀河西支断裂（F₃）、南汀河东支断裂（F₄）、孟连—澜沧断裂（F₅）和打洛—景洪断裂（F₆）呈NE向展布，与滇西南地区西侧靠近实皆断裂的整体构造相对一致，库仑破裂应力均为负值，受应力卸载的影响，量值范围在-0.06~-0.01 bar之间，这6条NE向断裂的 ΔCFS 由北至南依次为-0.01 bar、-0.04 bar、-0.02 bar、-0.02 bar、-0.03 bar和0.06 bar；怒江断裂（F₇）、木嘎断裂（F₈）和龙陵—澜沧断裂（F₉）为NW向展布，其中怒江断裂（F₇）为应力卸载影响， ΔCFS 为-0.02 bar，木嘎断裂（F₈）和龙陵—澜沧断裂（F₉）为应力加载影响，

ΔCFS 分别为 0.002 bar 和 0.004 bar。
参照图 1，2000 年缅甸 $M_S 6.9$ 地震发生之后至 2011 年缅甸 $M_S 7.2$ 地震之间，滇西南地区 $M \geq 5.0$ 地震主要集中分布在大盈江断裂（F₁）和龙陵—瑞丽断裂（F₂）附近，相对平静的断层周围为南汀河西支断裂（F₃）、南汀河东支断裂（F₄）和怒江断裂（F₇）；缅甸 2011 年 $M_S 7.2$ 地震发生之后截至 2012 年 12 月 31 日，滇西南地区 $M \geq 5.0$ 地震仍分布在 F₁ 和 F₂ 附近区域。对比图 2，可将滇西南靠近缅甸一侧的 9 条活动断层大体分为 3 个区域：第一个区域（A）包含 NE 向的 F₁、F₂ 和 NNE 向的 F₇；第二个区域（B）包含 2 个 NE 向的 F₃ 和 F₄；第三个区域（C）则由 NE 向的 F₅、F₆ 和 NW 向的 F₈、F₉ 组成。A 区和 B 区均为库仑破裂应力卸载区域，A 区持续有 $M \geq 5.0$ 地震活动，但没有达到 $M \geq 6.0$ ，B 区自 2000 年缅甸 $M_S 6.9$ 地震之后持续 $M \geq 5.0$ 地震平静；C 区为库仑破裂应力加载区域，且自 2011 年缅甸 $M_S 7.2$ 地震之后至 2012 年底，C 区的地震活动同样处于持续的 $M \geq 5.0$ 地震平静之中。

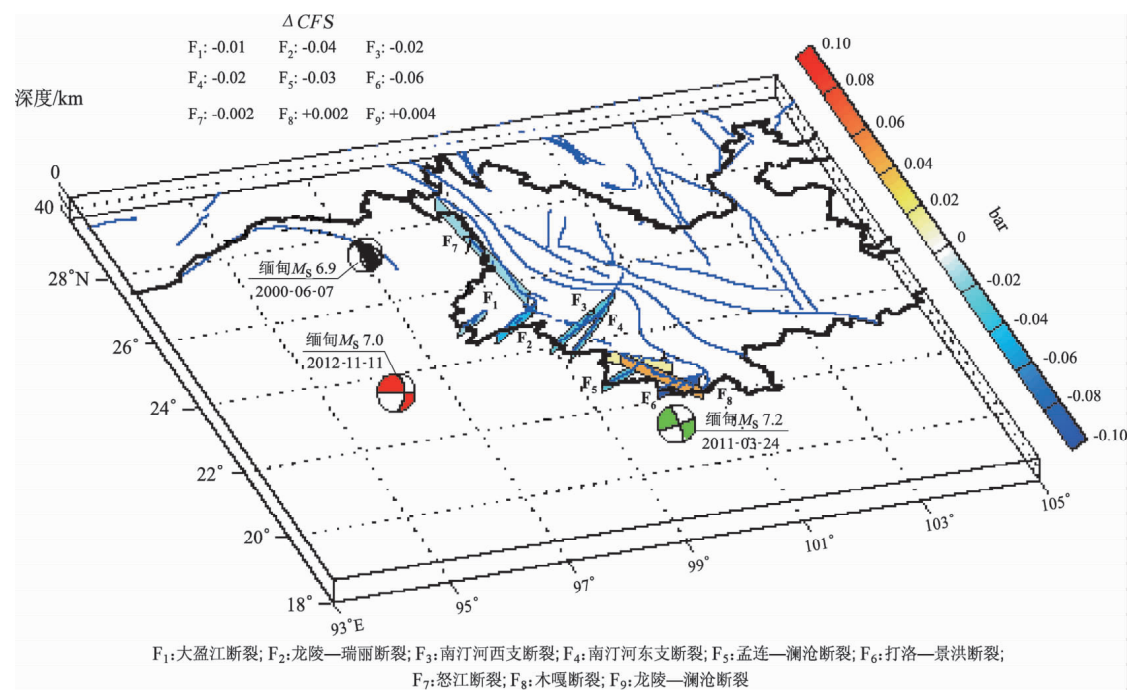


图2 3次7.0级左右地震产生的影响投影到滇西南地区活动断层的断层面和滑动方向上的库仑破裂应力变化

Fig. 2 Coulomb stress changes on fault plane and slip direction of the active faults in the Southwest Yunnan induced by the three *M*7.0 earthquakes around the eastern Himalayan tectonic syntaxis

针对本研究涉及的9条活动断层,定义其分别作为特征断层历史距今发生 $M\geq 5.0$ 地震的时间间隔为视复发周期,即 t_r^* ,最近一次 $M\geq 5.0$ 地震的主震的静态应力降为 $\Delta\tau_s'$,则基于式(4)则有 $\tau'=\Delta\tau_s'/t_r^*$ 。利用图2和式(3),可以近似给出本文所涉及的9条活动断层的触震和缓震效应推算

结果(表3)及示意图(图3)。本研究给出的结果是假设库仑破裂应力的扰动发生在断层演化的第二阶段,即加速阶段,则表3中利用式(3)给出的 Δt 计算结果均为假设所分析的活动断层已处在加速阶段的前提下,受到 ΔCFS 扰动的触震和缓震影响。

表3 滇西南地区接收断层触震/缓震计算结果

Tab. 3 Results of the triggering and delaying on the receiver faults in Southwest Yunnan area

断层	距今最近5.0级地震 ^① 发震时间/年-月-日	M_S ^①	t_r^* ^① /a	$\Delta\tau_s'$ ^② /bar	ΔCFS /bar	$\Delta t/a$
F ₁	2011-03-10	5.8	81	1.2	-0.01	-0.32
F ₂	1966-09-21	5.0	35	1.4	-0.04	-0.47
F ₃	-	-	-	-	-0.02	-
F ₄	1989-05-07	6.2	48	1.2	-0.02	-0.38
F ₅	1988-11-30	6.7	36	1	-0.03	-0.54
F ₆	1943-02-24	5.7	20	0.8	-0.06	-0.69
F ₇	2001-06-08	5.3	21/13~28/13	2.9	-0.002	-0.21/-0.13~-0.28/-0.2
F ₈	-	-	-	-	+0.002	-
F ₉	1988-11-06	7.6	30	1.6	+0.004	+0.35

注: ①中国地震台网中心; ② $\Delta\tau_s' = 2\mu D/\pi W$, 其中 $\mu = 3.0 \times 10^{10}$ Pa, D 和 W 分别为平均位移和断层的宽度, $\lg(D) = -1.39 + 0.43M$ (邓起东等, 1992), W 取为20 km.

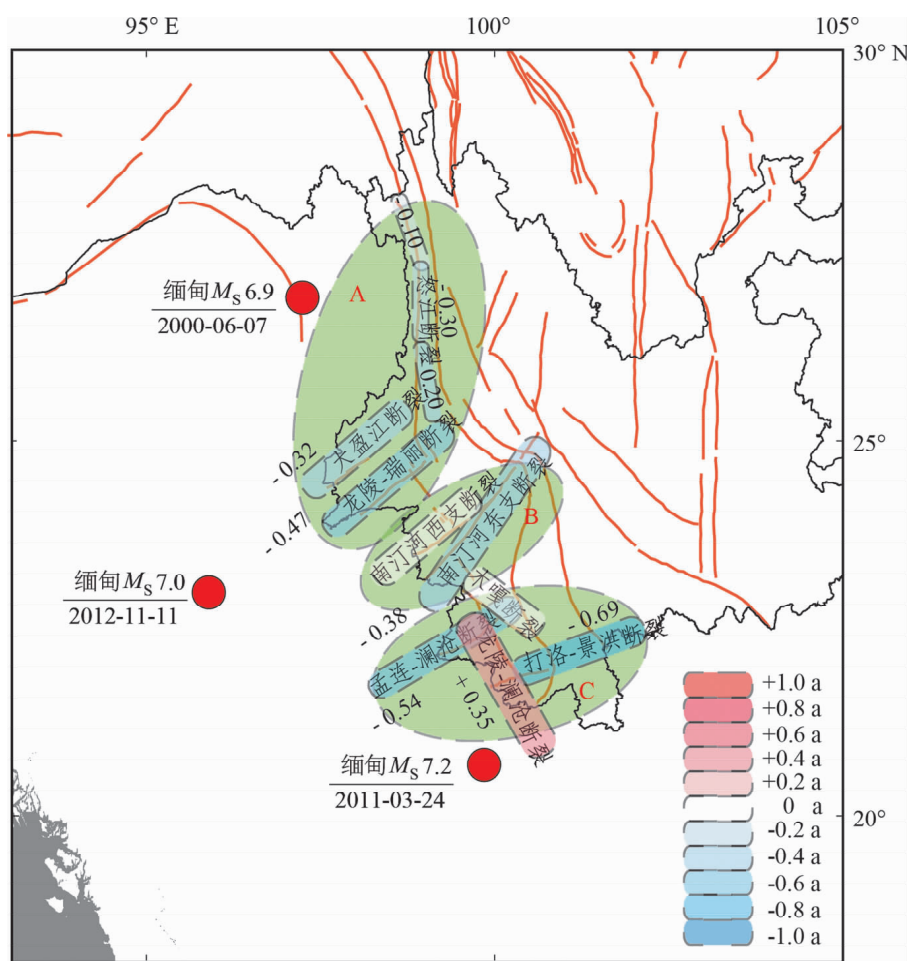


图3 滇西南地区活动断层受库仑破裂应力影响的触震（红色）和缓震（蓝色）效应示意图

Fig. 3 Schematic diagram of earthquake triggering (red) and delaying (blue) effects of the faults in Southwest Yunnan induced by the dynamic Coulomb failure stress

实际上，关于视复发周期的定义，一方面，特征断层上历史上距今最近一次的大地震和前一次大地震的间隔可以定义为视复发周期；另一方面，如果距今仅发生过一次较大地震，由于本研究给出的结果是假设库仑破裂应力的扰动发生在断层演化的第二阶段，则可以认为这一次地震距离现在的时间间隔为视复发周期。

图3中C区则为触震效应的影响区，对比“M7专项”针对南北带南段—中—长期大地震危险性的研究成果，指出腾冲—瑞丽地区为 $M \geq 7.0$ 地震中—长期危险性值得注意地区（M7专项工作组，2012；闻学泽等，2012）。对比图3中A区和腾冲—瑞丽注意地区不包含怒江断裂（ F_7 ），主要以大盈江断裂（ F_1 ）和龙陵—瑞丽断裂（ F_3 ）为主，B区和C区孟连—澜沧断裂（ F_5 ）的附近区域为地震空区部分，C区龙陵—澜沧断裂附近区域

为强震破裂区。

4 讨论与结论

本研究主要涉及喜马拉雅东构造结2000年以来的3次7级左右地震对我国滇西南地区空间应力变化及活动断层静态库仑应力变化的影响，这3次7级左右地震震中位置均在我国西南边境境外区域。同时，由于东构造结范围较广，且实皆断裂展布较长，本研究计算区域大于 $1 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，受到计算能力的限制，在针对滇西南地区活动断层计算库仑破裂应力变化时，没有对单一活动断层进行分段化处理，而是将每一个活动断层作为整体计算 ΔCFS 取值。3次7级左右地震的震源深度范围大致在20 km（表1），可以认为该区域地壳的脆性破裂向下不超过25 km。在库仑破裂应力变化

计算过程中,将断层面深度范围取值地表至地下 20 km 处,根据 Coulomb3.3 软件的算法原理,现有的计算结果为地表以下 10 km 深度库仑破裂应力的变化情况。结果显示,选取的 3 次 7 级左右地震对滇西南地区活动断层的影响主要以应力卸载为主,其中大盈江断裂、龙陵—瑞丽断裂、南汀河西支断裂、南汀河东支断裂、孟连—澜沧断裂和打洛—景洪断裂呈现 NE 向展布,与滇西南地区西侧靠近实皆断裂的整体构造相对一致,库仑破裂应力均为负值,受到应力卸载的影响,量值范围在 $-0.06 \sim -0.01$ bar; NW 向的怒江断裂为应力卸载影响, ΔCFS 为 -0.02 bar,而木嘎断裂和龙陵—澜沧断裂为应力加载影响, ΔCFS 分别为 $+0.002$ bar 和 $+0.004$ bar。

实际上,在本文所选取的 9 条接收断层境内的附近区域 2000 年以来也有 6 级左右的地震发生,这些地震同样会对这些接收断层产生一定的库仑破裂应力影响,本文仅选取了境外的 3 次 7 级左右地震作为源地震进行研究,主要是考虑了这 3 个震例分布由北至南,基本展布滇西南地区的境外空间。基于现有的计算结果,得出初步结论为:2000 年的缅甸 $M_s 6.9$ 地震和 2012 年的缅甸 $M_s 7.0$ 地震距离滇西南地区接收断层距离较远,发震断层空间展布以近南北向为主(图 1),二者的影响较小且主要以应力卸载为主;而 2011 年的缅甸 $M_s 7.2$ 地震,距滇西南地区,近且发震断层展布为 NE 向,其对周围接收断层的加卸载影响则均相对略大。这一初步结论,对这一区域未来发生的 7 级左右强震对滇西南地区断层的库仑破裂应力影响有一定的参照意义。

通常情况下触震和缓震的作用是相对的,并且 $M \geq 5.0$ 地震的成核过程也要相对复杂,孕育时间也不是绝对的。3 次 7 级左右地震对大盈江断裂、龙陵—瑞丽断裂、南汀河西支断裂、南汀河东支断裂、孟连—澜沧断裂、打洛—景洪断裂、怒江断裂的缓震效应影响在 $-0.69 \sim -0.21$ a,对龙陵—澜沧断裂的触震影响为 $+0.35$ a(表 3)。表 3 中给出的 9 条活动断层的 ΔCFS 的绝对数值也较小,主要是由于所选择的这 3 个 7 级左右地震距离 9 条活动断层相对较远,但库仑破裂应力的影响是存在的,由式(3)推算出来的触震和缓震效应的 Δt 也是在假设扰动发生在断层演化的加速阶段中。因此,表 3 中给出的 Δt 的计算结果对于设定

区域短临期(1 a 左右尺度)地震活动性的研究具备一定的参考价值。

本文在撰写过程中,刘桂萍研究员、刘杰研究员、蒋海昆研究员和张永仙研究员给予了有益的指导与帮助,作者在此一并表示感谢。

参考文献:

- 邓起东,于贵华,叶文华. 1992. 地震地表破裂参数与震级关系的研究[A]//国家地震局地质研究所. 活动断裂研究(2). 北京:地震出版社,247-264.
- 邓起东,张培震,冉永康,等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学(D 辑),32(12):1020-1030.
- 马晓静,高祥林. 2011. 横跨喜马拉雅造山带的构造运动转换与变形分配[J]. 地球物理学报,54(6):1528-1535.
- 邵志刚,周龙泉,蒋长胜,等. 2010. 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震对周边断层地震活动的影响[J]. 地球物理学报,53(8):1784-1795.
- 宋健,唐方头,邓志辉,等. 2011. 喜马拉雅东构造结周边地区主要断裂现今运动特征与数值模拟研究[J]. 地球物理学报,54(6):1536-1548.
- 滕吉文,王谦身,王光杰,等. 2006. 喜马拉雅“东构造结”地区的特异重力场与深部构造[J]. 地球物理学报,49(4):1045-1052.
- 万永革,沈正康,盛书中,等. 2009. 2008 年汶川大地震对周围断层的影响[J]. 地震学报,31(2):128-139.
- 万永革,吴忠良,周公威,等. 2002. 几次复杂地震中不同破裂事件之间的“应力触发”问题[J]. 地震学报,22(6):568-576.
- 尹安. 2006. 喜马拉雅造山带新生代构造演化:沿走向变化的构造几何形变、剥露历史和前陆沉积的约束[J]. 地学前缘,13(5):416-515.
- 张秋文,张培震,王乘,等. 2003. 鲜水河断裂带断层间相互作用的触震与缓震效应[J]. 地震学报,25(2):143-153.
- Dieterich J. H. 1994. A Constitutive Law for Rate of Earthquake Production and its Application to Earthquake Clustering[J]. J. Geophys. Res.,99(B2):2601-2618.
- Gkarlaouni C., Papadimitriou E. E., Karakostas V. G., et al. 2008. 断层相互作用对中国川滇地区地震危险评估的意义[J]. 地震学报,30(2):176-197.
- Harris R. A., Simpson R. W., Reasenber P. A. 1995. Influence of Static Stress Changes on Earthquake Locations in Southern California[J]. Nature,375(6528):221-224.
- Harris R. A., Simpson R. W. 1996. In the Shadow of 1957—the Effect of the Great Ft Tejon Earthquake on Subsequent Earthquake in Southern California[J]. Geophys Res Lett,23(3):229-232.
- Harris R. A. 1998. Introduction to Special Section: Stress Triggers, Stress Shadows, and Implications for Seismic Hazard[J]. J Geophys Res, 103(B10):24347-24358.
- King G. C. P., Stein R. S., Lin J. 1994. Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes[J]. Bull. Seismol. Soc. Amer., 84(3):935-953.
- Knopoff L. 1958. Energy Release in Earthquakes[J]. Geophys. J., 1

- (1); 44–52.
- M7 专项工作组. 2012. 中国大陆大地震中—长期危险性研究[M]. 北京:地震出版社, 234–248.
- Parsons T. S., Toda R. S., Stein A., *et al.*. 2000. Heightened Odds of Large Earthquakes Near Istanbul: an Interaction-based Probability Calculation[J]. *Science*, 288(5466), 661–665.
- Stein R. S. . 1999. The Role of Stress Transfer in Earthquake Occurrence 1999[J]. *Nature*, 402(6762): 605–609.
- Toda S., Stein R. S., Reasenberg P. A., *et al.*. 1998. Stress Transferred by the 1995 $M_w = 6.9$ Kobe, Japan, Shock-Effect on Aftershocks and Future Earthquake Probabilities[J]. *Journal of geophysical research*, 103(B10), 24543–24565.

Research on Influence of Strong Earthquakes nearby the Eastern Himalayan Syntaxis on Surrounding Faults in Southwest Yunnan

MENG Ling-yuan, SHI Hai-xia, ZHOU Long-quan
(China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

Abstract

Taking the hypocenters of the Myanmar $M_s 6.9$ earthquake on Jun. 7, 2000, the Myanmar $M_s 7.2$ earthquake on Mar. 24, 2011, and the Myanmar $M_s 7.0$ earthquake on Nov. 11, 2012 which occurred nearby the Sagaing Fault in the Eastern Himalayan Syntaxis as the main rupture source, we estimated the spatial variation of the regional tectonic stress field after three earthquakes, and calculated the time range of the static Coulomb stress variation of the surrounding faults in Southwest Yunnan. This variation was induced by the three strong earthquakes. The results suggest that the Coulomb failure stress in Southwest Yunnan was negative because of the influence of the stress unloading. The Coulomb stress decreased on the Dayingjiang Fault, the Longling-Ruili Fault, the Western Nantinghe Fault, the Eastern Nantinghe Fault, the Menglian-Lancang Nantinghe Fault, the Daluo-Jinghong and Nujiang Faults. The values ranged from -0.06 to -0.002 bar ($1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa}$). The largest decrease of the Coulomb stress on the Daluo-Jinghong Fault was 0.06 bar. The increase on the Muga Fault was 0.002 bar, on the Longling—Lancang Fault was 0.004 bar, which was influenced by stress loading.

Key words: Myanmar earthquake; Eastern Himalayan Syntaxis; Coulomb failure stress; fault interaction