

doi:10.3799/dqkx.2012.020

小江—则木河断裂带大地震序列的静应力触发作用

朱航¹, 闻学泽^{1,2}

1. 四川省地震局, 四川成都 610041

2. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

摘要: 通过计算和研究 1733—1850 年期间发生在小江—则木河断裂带上的、由 4 次 $M \geq 7$ 地震组成的大地震序列引起的库仑应力变化图像, 分析先发大地震破裂对后发大地震破裂的静态应力触发作用。结果表明, 在该序列中, 后发大地震破裂均发生在先发大地震破裂引起的库仑应力显著增加区内。其中, 1733 年小江断裂带北段的 $7^{3/4}$ 级大地震破裂和 1833 年中段的 8 级大地震破裂均引起则木河断裂带较显著的库仑应力正值变化, 亦即 1850 年则木河断裂带发生的 $7^{1/2}$ 级大地震与前 2 次大地震破裂引起的应力触发作用有关; 1733 年小江断裂带北段和中—南段的 $7^{3/4}$ 级和 1789 年 2 次 7 级大地震均对该断裂带中段产生了十分显著的库仑应力触发作用, 与此相关的是 1833 年 8 级大地震的发生。因此, 认为小江断裂带各段之间以及该断裂带与则木河断裂带之间存在显著的力学上的相互作用。

关键词: 小江—则木河断裂带; 库仑应力变化; 静态应力触发; 地震; 序列; 构造。

中图分类号: P315.72

文章编号: 1000-2383(2012)01-0199-08

收稿日期: 2011-06-10

Effects of Static Stress Triggering of the Major Earthquake Sequence on Xiaojiang-Zemuhe Fault Zone

ZHU Hang¹, WEN Xue-ze^{1,2}

1. Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

2. Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract: In this article, we calculate and map the patterns of Coulomb stress changes induced by a major earthquake sequence of 4 events $M \geq 7$ on the Xiaojiang-Zemuhe fault zone in 1733 to 1850, and analyze the effects of the static stress triggering induced by the individual preceding events to the following events. The results show that, in the sequence of major earthquakes, every following event occurred in an area where Coulomb stress had been remarkably increased by the preceding event (s). For instance, both the $M=7^{3/4}$ earthquake of 1733 on the northern segment of the Xiaojiang fault zone and the $M=8$ earthquake of 1833 on the middle segment of the fault zone induced positive increments of Coulomb stress on the Zemuhe fault zone, suggesting that the occurrence of the $M=7^{1/2}$ earthquake of 1850 on Zemuhe fault zone is related to the stress triggering effects caused by the 2 preceding major events. Again, the $M=7^{3/4}$ earthquake of 1733 on the northern segment of the Xiaojiang fault zone and the $M=7$ earthquake of 1789 on the middle-southern segment of the fault zone produced remarkable Coulomb stress triggering effects on the middle segment of the fault zone, that is related with the occurrence of the $M=8$ earthquake of 1833 on the middle segment of the fault zone. Therefore, we believe that mechanically significant interactions exist among the different segments of the Xiaojiang fault zone, as well as between the fault zone and the Zemuhe fault zone.

Key words: Zemuhe-Xiaojiang fault zone; Coulomb stress change; static stress triggering; earthquakes; sequence; tectonics.

静态应力触发是指由先发地震事件的同震位错引起的周边其他断层(段)上的静态应力增加作用, 其可能是先发地震之后几分钟或数十年触发的新地

震(Stein *et al.*, 1997; Freed, 2005). 采用数值方法计算与分析大地震的发生是否受到先发地震静应力触发作用的影响, 以及大地震的发生是否会改变

附近地区断层的应力状态、进而触发新的强震或大震,已成为国际国内地震构造力学研究的重要领域(Scholz, 1990; King *et al.*, 1994; Deng and Sykes, 1997; Stein *et al.*, 1997; Stein, 1999; Papadimitriou and Sykes, 2001; 马瑾等, 2002; 沈正康等, 2003; Papadimitriou *et al.*, 2004; Freed, 2005; 崔笃信等, 2009; 朱航和闻学泽, 2009; Zhu and Wen, 2010).

研究地震的空间格局及迁移规律是地震预测与区划、防震减灾工作的重要基础,其成果也是板块构造研究的重要证据之一;所谓强震的迁移就是指同一构造单元内强震在一定时空范围内所表现出的运动“轨迹”(周成虎等, 2003). 川滇活动地块的东南边界是近 S-N 向小江断裂带及其以北的 NNW 向则木河断裂带. 1733—1850 年期间,沿这 2 条相连的左旋走滑活动断裂带发生了一个由 4 次 7~8 级地震组成的大地震序列,它们是 1733 年云南东川—巧家间 $7^{3/4}$ 级地震、1789 年云南华宁 7 级地震、1833 年云南嵩明 8 级地震、以及 1850 年四川西昌南 $7^{1/2}$ 级地震. 这 4 次地震的破裂区几乎覆盖了这 2 条断裂带.

那么,在这个序列中的先发大地震破裂是否存在对后发大地震破裂的静应力触发作用? 小江断裂带上的 3 次大地震破裂是否触发了则木河断裂带上 1850 年的大地震破裂? 本文拟利用库仑应力分析的方法与思路,研究 1733—1850 年期间小江—则木河断裂带上的大地震序列引起的应力变化图像,并做出合理解释.

1 原理、方法与计算程序

当发生强震时,同震位错会引发震断层及其附近区域的静态应力变化,即应力转移. 当引起的相邻断层(段)上的库仑应力变化为正值时,该断层(段)重新发生粘滑错动的可能性增大,或许会很快触发另一次地震,这种情况即地震的应力触发作用;当引起的相邻断层(段)上的库仑应力变化为负值时,该断层(段)重新发生粘滑错动的可能性降低. 一般称库仑应力变化的正值区域为应力触发区,负值区域为应力影区. 引起应力变化的地震和破裂面分别称为“源地震”和“源断层”,区域中其他先存的、拟研究的断层称为“接受断层”(King *et al.*, 1994; Stein, 1999). 在应力转移分析中,本文采用 Okada(1992)提出的均匀各向同性弹性半空间模型和 King *et al.*

(1994)进一步推导的库仑应力变化公式和发展的相关算法,以及远田晋次开发的 Coulomb 3.1 软件(<http://quake.usgs.gov/research/deformation/modeling/coulomb/index.html>)和源断层的同震位错来计算接受断层的库仑应力变化 $\Delta\sigma_f$:

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau_s + \mu' \Delta\sigma_n, \quad (1)$$

其中, $\Delta\tau_s$ 为断层面的剪切应力变化(沿滑动方向为正), $\Delta\sigma_n$ 为正应力变化(张性为正), μ' 为断层面的摩擦系数. 计算中,地壳的剪切模量取 3.3×10^{10} Pa,泊松比取 0.25. 另外,King *et al.* (1994)曾讨论过式 1 中 μ' 的取值问题,发现改变 μ' 值对库仑应力变化图像影响并不大,本文沿用 $\mu' = 0.4$ 的经验取值.

接受断层上的库仑应力变化,取决于源断层的几何特征(断层走向、倾角、滑动角)、源地震的同震位错、接受断层的几何特征、断层摩擦系数,以及接受断层与源断层的距离(King *et al.*, 1994). 根据以上库仑应力原理及 Coulomb 3.1 软件,本文分别计算了 1733—1850 年期间由小江—则木河断裂带上的大地震序列引起的静态库仑应力变化,并通过应力变化图像分析可能存在的触发作用.

2 小江—则木河断裂带的构造与强震活动

青藏高原东南隅川滇活动地块被右旋走滑的金沙江断裂带、红河断裂带以及左旋走滑的鲜水河—安宁河—则木河—小江断裂带围限,并朝南东方向作“挤出”运动(图 1). 该地块的东南边界是近 S-N 向小江断裂带及其以北的 NNW 向则木河断裂带. 小江断裂带的北端在巧家附近与 NNW 向则木河断裂带和近 S-N 向大凉山断裂带相连,巧家—东川之间的小江断裂带北段走向 NNW,东川及其以南的中、中—南和南段的地表形迹主要分成东、西 2 个分支,走向近 S-N-NNE,总体呈现向东微凸出的弧形(图 1). 小江—则木河断裂带在 1733—1850 年期间共发生 $M \geq 7$ 地震 4 次,构成一个大震发生序列(表 1). 其中,1733 年云南东川—巧家间 $7^{3/4}$ 级地震首先发生在小江断裂带北段,随后,1789 年在小江断裂带中—南段发生了云南华宁 7 级地震,1833 年在小江断裂带中段发生了云南嵩明 8 级地震,最后于 1850 年在则木河断裂带发生了四川西昌南 $7^{1/2}$ 级地震. 这 4 次大地震的破裂区覆盖了小

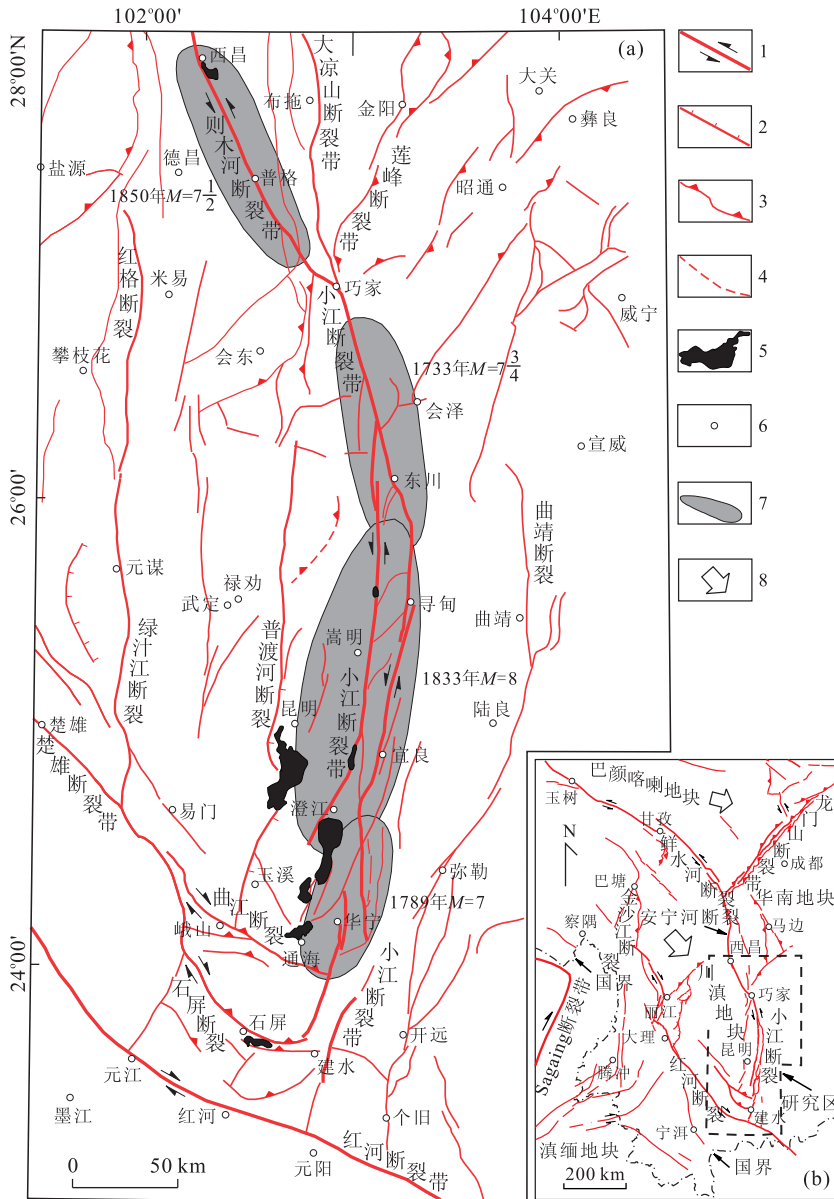


图 1 (a)小江—则木河断裂带 1733 年以来 $M \geq 7$ 地震破裂区和(b)研究区在区域活动构造系统中的位置

Fig. 1 (a) Map of ruptured areas for $M \geq 7$ earthquakes on the Xiaojiang-Zemuhe fault zone since 1733 and (b) index map showing the position of the study area in the regional active tectonic system

1. 主干走滑断层; 2. 正断层; 3. 逆断层; 4. 推测断层; 5. 湖泊; 6. 城镇; 7. 地震破裂区; 8. 地块运动方向; 历史地震的破裂区范围引自闻学泽等(2011)

表 1 1733—1850 年期间小江—则木河断裂带大地震序列事件

Table 1 Events of the major earthquake sequence on the Xiaojiang-Zemuhe fault zone in 1733 to 1850

编号	时间	震中位置		震级 M	震中烈度	地点
	年-月-日	北纬	东经			
1	1733-08-02	26.3°	103.1°	7 ^{3/4}	X	云南东川—巧家间
2	1789-06-07	24.2°	102.9°	7	IX+	云南华宁
3	1833-09-06	25.0°	103.0°	8	≥X	云南嵩明
4	1850-09-12	27.7°	102.4°	7 ^{1/2}	X	四川西昌南

江—则木河断裂带的绝大部分段落(图 1). 随后, 小江断裂带和则木河断裂带进入了应变积累时段, 至今已有 160 a 未发生 $M \geq 7$ 的大地震.

3 发震断层产状与同震位错模型

基于均匀各向同性弹性半空间模型(Okada, 1992)及其库仑应力变化的相关算法(King *et al.*, 1994)与程序进行库仑应力变化计算 (<http://quake.usgs.gov/research/deformation/modeling/>

coulomb/index.html)时,必须了解并输入源断层和接受断层的几何特征参数(断层走向、倾角、滑动角)以及源断层上先发地震的同震位错量(断层面上的同震走滑和倾滑分量).对于现今地震,可以用由地震波记录反演的或者地震现场地质考察得到的地震断层参数来计算.然而,本文研究的年代久远的历史大地震,有关的参数只能通过经验方法估计.

3.1 1733 年云南东川—巧家间 $7^{3/4}$ 级地震

有关研究反映 1733 年云南东川—巧家间 $7^{3/4}$ 级地震的震源破裂方向为 347° (刘祖荫等, 2002),再考虑小江断裂带北段的断层面倾向 SWW,由右手法则确定此地震发震断层的走向为 167° . 2005 年 8 月 5 日云南会泽 5.3 级地震(震中 $26^\circ55'N, 103^\circ15'E$)发生在 1733 年小江断裂带北段上 $7^{3/4}$ 级地震破裂区的中部,其震源深度为 21 km,震源机制解显示发震断层倾角为 65° 、断层面滑动角为 -10° (秦嘉政和钱晓东, 2005). 因此,假定 2005 年会泽 5.3 级地震断层面参数可近似代表 1733 年 $7^{3/4}$ 级地震的断层面参数,近似得到 1733 年 $7^{3/4}$ 级地震发震断层的走向 167° 、倾角 65° 、同震位错的滑动角为 -10° .

图 1 中各次大地震破裂区的延伸是根据川滇地区地震破裂延伸—烈度分布的经验关系(Wen *et al.*, 2008)确定的,每一破裂区沿发震断裂的长度近似于破裂长度.因此,对于 1733 年 $7^{3/4}$ 级地震的同震位错,笔者采用如下方法估计:从图 1 量出这次地震破裂的近似长度为 115 km,根据走滑型地震地表破裂长度 SRL 与平均同震位错 AD 的经验公式(Wells and Coppersmith, 1994):

$$\log(AD) = -1.70 + 1.04 \times \log(SRL), \quad (2)$$

估算出平均左旋走滑同震位错量为 2.8 m,再根据断层面滑动角估计出平均同震位错的倾滑分量.

3.2 1833 年云南嵩明 8 级地震

1833 年云南嵩明 8 级地震发生在小江断裂带中段西支断层上,其震源破裂方向为 9° (刘祖荫等,

2002),由于该断层面倾向为 W,由右手法则确定此地震发震断层的走向为 189° . 1989 年 9 月 20 日在这次大地震的破裂段上发生的云南嵩明 5.0 级地震(震中在 $25^\circ24'N, 103^\circ05'E$)的震源深度为 10 km、发震断层倾角 55° 、断层面滑动角为 -6° (黄云宝, 2000). 因此,近似得到 1833 年 8 级地震发震断层的走向 189° 、倾角 55° 、同震位错的滑动角 -6° .

从图 1 量出的 1833 年 8 级地震的破裂长度为 162 km,根据公式 2 计算出平均左旋走滑同震位错为 4.0 m,再根据断层面的同震滑动角估算出平均同震位错的倾滑分量.

3.3 1789 年云南华宁 7 级地震

1789 年云南华宁 7 级地震的震源破裂方向为 5° (刘祖荫等, 2002),由于小江断裂带中—南段断层面倾向 W,由右手法则确定此地震发震断层的走向为 185° . 自有仪器记录以来,小江断裂带中—南段未发生过 5 级以上地震,本研究暂时沿用前述估计的 1833 年 8 级地震的断层面参数,即认为 1789 年华宁 7 级地震的发震断层面走向 185° 、倾角 55° 、滑动角 -6° .

从图 1 上量出的 1789 年 7 级地震的近似破裂长度为 78 km,根据公式 2 计算的平均左旋走滑同震位错为 1.9 m,再根据断层面的滑动角估算出平均同震位错的倾滑分量.

3.4 1850 年四川西昌南 $7^{1/2}$ 级地震

1850 年西昌南 $7^{1/2}$ 级地震的地表破裂区几乎覆盖了整个则木河断裂带(图 1). 则木河活动断裂带的总体走向为 330° (则木河活断裂填图组, 2000),断层面倾角取 75° (Gkarlaouni *et al.*, 2008). 地质调查发现这次大地震时断层的运动方式为左旋正断(俞维贤等, 2001). 从图 1 量出的 1850 年 $7^{1/2}$ 级地震的地表破裂长度为 114 km,根据公式 2 计算的平均走滑同震位错为 2.8 m,再根据断层面滑动角计算平均同震倾滑位错分量.

表 2 1733—1850 年期间小江—则木河断裂带 $M \geq 7$ 地震的地震断层参数

Table 2 Parameters of the seismogenic faults of $M \geq 7$ earthquakes on Xiaojiang-Zemuhe fault zone in 1733 to 1850

编号	时间 年—月—日	震中位置		震级 M	地点	发震断层产状				地表破裂长度 (km)	走滑位错 (m)	倾滑位错 (m)
		北纬	东经			走向	倾向	倾角	滑动角			
1	1733—08—02	26.3°	103.1°	$7^{3/4}$	云南东川—巧家间	167°	SWW	65°	-10°	115	2.8	0.5
2	1789—06—07	24.2°	102.9°	7	云南华宁	185°	W	55°	-6°	78	1.9	0.2
3	1833—09—06	25.0°	103.0°	8	云南嵩明	189°	W	55°	-6°	162	4	0.4
4	1850—09—12	27.7°	102.4°	$7^{1/2}$	四川西昌南	330°	NEE	75°	-11°	114	2.8	0.5

综合上面的分析,笔者得到 1733—1850 年期间则木河—小江断裂带 $M \geq 7$ 地震的发震断层产状与同震位错模型参数(表 2)。

4 库仑应力演化图像及其分析

根据表 2 给出的 1733—1850 年期间小江—则木河断裂带 4 次 $M \geq 7$ 地震的发震断层模型参数,依时间顺序分别计算每一次地震(源地震)的同震位错在特定接受断层上引起的静态库仑应力的相对变化量,并在包含发震断层几何特征的地图上绘出库仑应力变化图像(图 2)。如果已发生第 2~3 次破裂,则对已发生破裂事件引起的库仑应力变化进行线性叠加。计算中,将第一次大地震发生前(1733 年 8 月 2 日前)的库仑应力变化量归为零。

图 2a 为 1733 年 8 月 2 日云南东川—巧家间 $7^{3/4}$ 级地震施加的、以 1789 年 6 月 7 日云南华宁 7 级地震破裂段作为接受断层的库仑应力变化图像。其显示在源断层的两端均存在库仑应力变化的高值区,应力变化量随与源断层距离的增加而减小。源断层以南的库仑应力增加区覆盖了小江断裂带的中段和中—南段,中—南段的库仑应力平均增加了约 0.002 MPa,1789 年 6 月 7 日云南华宁 7 级地震发生在小江断裂带的中—南段上。那么,源断层北西方向的则木河断裂的情况如何呢?

图 2b 为 1733 年 8 月 2 日 $7^{3/4}$ 级地震施加的、并以 1850 年 9 月 12 日四川西昌南 $7^{1/2}$ 级地震破裂段作为接受断层的库仑应力变化图像,显示则木河断裂处于库仑应力增加区内,库仑应力增量平均约为 0.002 MPa。

图 2c 为 1733 年 8 月 2 日云南东川—巧家间 $7^{3/4}$ 级和 1789 年 6 月 7 日云南华宁 7 级地震共同施加的、并以 1833 年 9 月 6 日云南嵩明 8 级地震破裂段作为接受断层的库仑应力变化图像。此时最明显的库仑应力增加区出现在小江断裂带的中段,包括东、西支断层(即小江断裂带中段的两端)均为高值。1833 年 9 月 6 日云南嵩明 8 级地震即发生在小江断裂带中段的西支断层上(至震源处,小江断裂带的东、西支可能合并为一支);而先前已经发生过 1789 年华宁 7 级地震的小江断裂带中—南段的库仑应力变化为负值。

图 2d 为前述 3 次大地震破裂共同引起的、并以 1850 年 9 月 12 日四川西昌南 $7^{1/2}$ 级地震破裂段作为接受断层的库仑应力变化图像。此时小江断裂带

的主体已基本被这 3 次大地震的破裂区所覆盖(图 1),但小江断裂带以北的 NNW 向则木河断裂带则完全处于库仑应力的增加区之中,此时库仑应力累积增量平均约为 0.004 MPa,随后 1850 年 9 月 12 日四川西昌南 $7^{1/2}$ 级大地震即沿 NNW 向则木河断裂带发生。

以上分析表明:小江断裂带北段的 1733 年 $7^{3/4}$ 级大地震破裂和中段的 1833 年 8 级大地震破裂均引起则木河断裂带较显著的库仑应力正值变化。所以,则木河断裂带上的 1850 年 $7^{1/2}$ 级大地震的发生显然与前 2 次大地震破裂引起的应力触发作用有关。小江断裂带北段和中—南段的 1733 年 $7^{3/4}$ 级和 1789 年 7 级 2 次大地震均对该断裂带中段产生了十分显著的库仑应力触发作用。因此,1833 年小江断裂带中段 8 级大地震的发生与该断裂带上前 2 次大地震的应力触发作用密切相关。

5 结论与讨论

川滇活动地块东南边界的小江—则木河断裂带在 1733—1833 年期间的大地震活跃期中,发生了由 4 次 7~8 级地震组成的大地震破裂序列。本文的计算与分析表明,在该序列中后发大地震破裂均发生在先发大地震破裂引起的库仑应力显著增加区内。其中,小江断裂带北段的 1733 年 $7^{3/4}$ 级大地震破裂和中段的 1833 年 8 级大地震破裂均引起则木河断裂带较显著的库仑应力正值变化,亦即 1850 年则木河断裂带发生的 $7^{1/2}$ 级大地震与前 2 次大地震破裂引起的应力触发作用有关;小江断裂带北段和中—南段的 1733 年 $7^{3/4}$ 级和 1789 年 7 级地震均对该断裂带中段产生了十分显著的库仑应力触发作用,与此相关的是 1833 年 8 级大地震的发生。因此,小江断裂带各段之间以及该断裂带与则木河断裂带之间存在显著的、力学上的相互作用。

相比于那些间隔为数分钟、数天至数年的触发强震或大地震破裂序列的例子(King *et al.*, 1994; Stein *et al.*, 1997; Stein, 1999),本次研究中相继大地震破裂的时间间隔要长得多,在 17~56 a 之间,尽管各断裂段/带之间也存在由先发大地震引起的、明显的应力触发作用。因此,受到先发地震引起的、库仑应力明显增加的断裂段是否会在较短时间内发生触发型强震或大地震,似乎取决于该断裂段是否已存在高的、接近临界的应力积累背景。

本例研究中,因库仑应力变化而触发的大地震

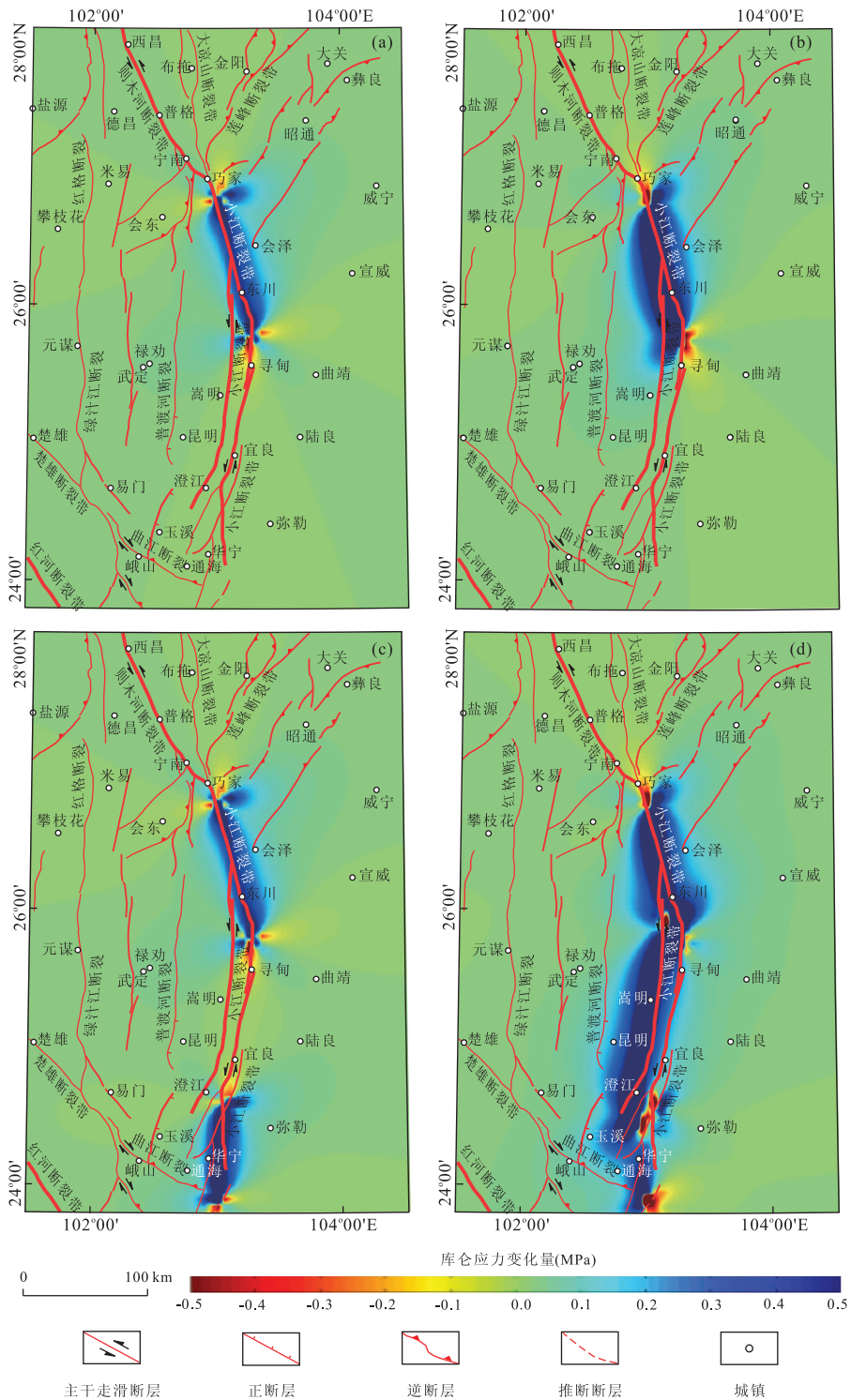


图 2 1733—1850 年期间小江—则木河断裂带大地震序列的库仑应力变化

Fig. 2 Maps showing Coulomb stress changes during the major earthquake sequence on the Xiaojiang-Zemuhe fault zone in 1733 to 1850

a. 1733 年 8 月 2 日 $7^{3/4}$ 级地震破裂引起的库仑应力变化(以 1789 年 6 月 7 日 7 级地震破裂段作为接受断层); b. 1733 年 8 月 2 日 $7^{3/4}$ 级地震破裂引起的库仑应力变化(以 1850 年 9 月 12 日 $7^{1/2}$ 级地震破裂段作为接受断层); c. 前一破裂以及 1789 年 6 月 7 日 7 级地震破裂引起的库仑应力变化(以 1833 年 9 月 6 日 8 级地震破裂段作为接受断层); d. 前 3 次破裂引起的库仑应力变化(以 1850 年 9 月 12 日 $7^{1/2}$ 级地震破裂段作为接受断层)

并非发生在与先发大地震破裂紧邻的断裂段上,而是“跃过”与先发破裂紧邻的断裂段后再发生。例如,小江断裂带中段 1833 年 8 级大地震破裂并没有触发 2 个紧邻段落——北段和中—南段的破裂,而是触发了不相邻的则木河断裂带的 1850 年破裂(图 1, 2)。笔者注意到未被触发的 2 个紧邻的断裂段——小江断裂带北段和中—南段,分别在 1733 年和 1789 年发生过 $7^{3/4}$ 级和 7 级地震破裂,至 1833 年的时间分别仅 100 和 44 a。因此,与大地震破裂相邻而不被触发的一个重要原因似乎是:发生大地震破裂后不久,重新积累的应力应变还较低。

致谢:本研究用于计算静态库仑应力变化的 Coulomb 3.1 软件是由日本地质调查局的远田晋次(<http://quake.usgs.gov/research/deformation/modeling/coulomb/index.html>)、美国地质调查局的 Ross Stein 和 Volkan Sevilgen,以及美国 Woods Hole 海洋学研究所的林间(Jian Lin)等科学家编制的。感谢美国地质调查局在网络上提供使用这一软件。

References

- Cui, D. X., Hu, Y. X., Wang W. P., et al., 2009. Coulomb stress accumulation along Haiyuan fault zone. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(4): 641—650.
- 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.*, 103: 9859—9886. doi:10.1029/96JB03897
- Freed, A. M., 2005. Earthquake triggering by static, dynamic, and postseismic stress transfer. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33: 335—367. doi: 10.1146/annurev.earth.33.092203.122505
- Gkarlaoui, C. H., Papadimitriou, E. E., Karakostas, V. G., et al., 2008. Implication of fault interaction to seismic hazard assessment in Sichuan-Yunnan region of south-eastern China. Translated by Yang, J. L.. *Acta Seismologica Sinica*, 30(2): 176—197 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Y. B., 2000. The Songming, Yunnan Province, earthquake of M 5.0 of September 20th, 1989. In: Zhang, Z. C., Zheng D. L., Luo P., et al., eds., *Earthquake cases in China (1989—1991)*. Seismological Press, Beijing, 43—58 (in Chinese).
- King, G. C. P., Stein, R. S., Lin, J., 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 84(3): 935—953.
- Liu, Z. Y., Su, Y. J., Qin, J. Z., et al., 2002. Seismicity in Yunnan on 20th Century. Seismological Press, Beijing, 75—79 (in Chinese).
- Ma, J., Ma, S. L., Liu, L. Q., et al., 2002. Experimental study on patterns of fault interaction. *Progress in Natural Sciences*, 12(5): 503—508 (in Chinese with English abstract).
- Okada, Y., 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 82(2), 1018—1040.
- Papadimitriou, E. E., Sykes, L. R., 2001. Evolution of the stress field in the northern Aegean Sea (Greece). *Geophys. J. Int.*, 146(3): 747—759. doi: 10.1046/j.0956-540x.2001.01486.x
- Papadimitriou, E. E., Wen, X. Z., Karakostas, V., et al., 2004. Earthquake triggering along the Xianshuihe fault zone of western Sichuan, China. *Pure Appl. Geophys.*, 161(8): 1683—1707. doi: 10.1007/s00024-003-2471-4
- Qin, J. Z., Qian, X. D., 2005. Study on the Huize M 5.3 and Wenshan M 5.3 earthquakes in Yunnan. *Journal of Seismological Research*, 28(4): 403—407 (in Chinese with English abstract).
- Scholz, C. H., 1990. The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 439.
- Shen, Z. K., Wan, Y. G., Gan, W. J., et al., 2003. Viscoelastic triggering among large earthquakes along the East Kunlun fault system. *Chinese J. Geophys.*, 46(6): 786—795 (in Chinese with English abstract).
- Stein, R. S., 1999. The role of stress transfer in earthquake occurrence. *Nature*, 402(6762): 605—609. doi: 10.1038/45144
- Stein, R. S., Barka, A. A., Dieterich, J. H., 1997. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophys. J. Int.*, 128(3): 594—604. doi: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb05321.x
- Wells, D. L., Coppersmith, K. J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 84(4): 974—1002.
- Wen, X. Z., Du, F., Long, F., et al., 2011. Tectonic dynamics and correlation of major earthquake sequences of the Xiaojiang and Qujiang-Shiping fault systems, Yunnan, China. *Sci. China Earth Sci.*, 54. doi: 10.1007/s11430-011-4231-0
- Wen, X. Z., Ma, S. L., Xu, X. W., et al., 2008. Historical pattern and behavior of earthquake ruptures along the eastern boundary of the Sichuan-Yunnan faulted-block,

- southwestern China. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 168(1-2): 16-36. doi: 10.1016/j.pepi.2008.04.013
- Working Group for Geologic Mapping on Zemuhe Fault, 2000. Geologic mapping and comprehensive analysis on the active faults of Zemuhe. *Earthquake Research in Sichuan*, (Supple) (in Chinese with English abstract).
- Yu, W. X., Song, F. M., Wen, X. Z., et al., 2001. Study of the surface rupture zone of Xichang earthquake in 1850. *Journal of Seismological Research*, 24(4): 346-350 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, C. H., Pei, T., Li, Q. L., et al., 2003. Research on spatial pattern and temporal-spatial migration model of strong earthquakes in China and its adjacent areas. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(3): 306-314.
- Zhu, H., Wen, X. Z., 2009. Stress triggering process of the 1973 to 1976 Songpan, Sichuan, sequence of strong earthquakes. *Chinese J. Geophys.*, 52(4): 994-1003. doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.016
- Zhu, H., Wen, X. Z., 2010. Static stress triggering effects related with Ms 8.0 Wenchuan earthquake. *Journal of Earth Science*, 21(1): 32-41. doi:10.1007/s12583-010-0001-8
- 的意义. 杨家亮译. 地震学报, 30(2): 176-197.
- 崔笃信, 胡亚轩, 王文萍, 等, 2009. 海原断裂带库仑应力积累. 地球科学——中国地质大学学报, 34(4): 641-650.
- 黄云宝, 2000. 1989年9月20日云南省嵩明5.0级地震. 见: 张肇诚, 郑大林, 徐京华, 等编, 中国震例(1989-1991). 北京: 地震出版社, 43-58.
- 刘祖荫, 苏有锦, 秦嘉政, 等, 2002. 20世纪云南地震活动. 北京: 地震出版社, 75-79.
- 马瑾, 马胜利, 刘力强, 等, 2002. 断层相互作用型式的实验研究. 自然科学进展, 12(5): 503-508.
- 秦嘉政, 钱晓东, 2005. 云南会泽和文山5.3级地震研究. 地震研究, 28(4): 403-407.
- 沈正康, 万永革, 甘卫军, 等, 2003. 东昆仑活动断裂带大地震之间的黏弹性应力触发研究. 地球物理学报, 46(6): 786-795.
- 闻学泽, 杜方, 龙锋, 等, 2011. 小江和曲江-石屏两断裂系统的构造动力学与强震序列的关联性. 中国科学(D辑), 41(5): 713-724.
- 俞维贤, 宋方敏, 闻学泽, 等, 2001. 1850年西昌地震地表破裂带的考察研究. 地震研究, 24(4): 346-350.
- 则木河活断裂填图组, 2000. 则木河活动断裂带1:5万地质填图及综合研究. 四川地震, (增刊).
- 周成虎, 裴韬, 李全林, 等, 2003. 近500年中国及邻区强震空间格局及迁移模式初步分析. 地球科学——中国地质大学学报, 28(3): 306-314.
- 朱航, 闻学泽, 2009. 1973-1976年四川松潘强震序列的应力触发过程. 地球物理学报, 52(4): 994-1003.

附中文参考文献

- Gkarlaouni, C. H., Papadimitriou, E. E., Karakostas, V. G., 等, 2008. 断层相互作用对中国川滇地区地震危险评估