

2014年四川康定 M_s 6.3 和 M_s 5.8 地震的 应力触发研究*

解朝娣^{1,2}, 王英楠¹, 闫如玉¹, 杨颖¹, 李孟洋¹, 于海英³, 刘本玉¹

(1. 云南大学 地球科学学院, 云南 昆明 650091; 2. 中国地震局地质研究所 地震动力学
国家重点实验室, 北京 100029; 3. 上海市地震局, 上海 200062)

摘要: 以2014年四川康定 M_s 6.3 和 M_s 5.8 地震为研究对象, 计算了2次主震在近场和周围断层造成的库仑破裂应力变化, 研究主震与余震的触发关系, 以及2次主震对周围断层施加的应力负荷作用。结果表明: 2次主震的共同作用控制了后续地震活动的演化趋势, 其中康定 M_s 6.3 地震产生的库仑破裂应力变化对后续余震事件的触发占主导作用。鲜水河断裂带南段和安宁河断裂带受到了一定的应力加载作用, 未来地震活动的趋势可能会加强。

关键词: 康定地震; 库仑破裂应力变化; 地震触发; 断层相互作用

中图分类号: P315.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2021)01-0009-06

0 引言

大地震产生的位错会改变地震震源破裂附近区域(近场区域)的应力状态, 也可能会改变周围断层发震的可能性, 这种现象属于地震的应力触发问题。通过计算地震造成的库仑破裂应力变化, 研究地震引发的应力触发问题, 并分析其地震后续活动与库仑破裂变化增强地区之间是否存在相关性, 如果具有相关性, 那就意味着主震会对后续活动产生触发作用(万永革等, 2000, 2002a, b; 吴小平等, 2007)。

近年来, 关于地震应力触发作用方面的研究取得了一系列进展, 在中强地震之间的触发关系方面, Deng 和 Sykes (1997) 研究了自1812年以来加利福尼亚南部地震所造成的库仑破裂应力的变化, 发现大多数 $M > 6.0$ 地震发生在库仑破裂应力变化显著增加地区; Papadimitriou 等 (2004) 研究了鲜水河断裂及邻近地区不断变化的应力因素, 发现自1893年以来 $M_s > 6.5$ 强震发生于应力增加区的断层上。以往多数研究主要针对主震与余震活动之间的触发作用, 如吴小平等 (2007) 对云

南澜沧—耿马地区地震活动的应力触发现象进行了研究, 发现9个 M_s 5.0 ~ 5.9 地震中, 有8个都是由澜沧 M_s 7.6 地震触发的; Hardebeck 等 (1998) 研究了 Landers 7.3 级地震对余震的触发作用, 发现85%的余震发生于应力增加区域; 解朝娣等 (2010) 利用5个不同的地震断层模型计算库仑破裂应力的分布, 得出汶川 M_s 8.0 地震在一定程度上触发了其后余震的结论。这些研究对于分析地震后余震活动的趋势以及周围断层的地震活动性具有一定的指示性, 而关于双震型地震的应力触发作用尚缺乏更多的研究。

本文选取2014年11月22日和25日四川康定 M_s 6.3 地震和 M_s 5.8 地震作为研究对象, 对2次主震在近场产生的静态库仑破裂应力变化进行计算。在此基础上, 计算了2次主震对周围断层造成的库仑破裂应力的变化, 分析了2次主震是否对周围断层施加了应力负荷作用。

1 研究方法

根据库仑准则 (Harris, 1998; Rice, Cleary, 1976), 导致岩石破裂的剪应力 τ 将受到其自身的

* 收稿日期: 2019-12-05.

基金项目: 国家自然科学基金 (41964001)、地震动力学国家重点实验室开放基金 (LED2019B04) 和同济大学海洋地质国家重点实验室开放基金 (MGK1827) 联合资助。

第一作者简介: 解朝娣 (1981-), 副教授, 主要从事地震学研究. E-mail: xiecd@ynu.edu.cn.

内聚应力 S ，正应力 σ_n 和孔隙流体压力 p_r 的影响，即 $S - \kappa(\sigma_n + p_r)$ 定义了岩石断面或软弱面的抗剪强度，其中 κ 为内部摩擦系数。 τ 与抗剪强度越接近，断层平面破裂的可能性就越大。描述岩石接近破坏程度的库仑破裂应力可以进一步定义为 (Green, 2012; Rice, 1992):

$$\sigma_f = |\tau| - [S - \kappa(\sigma_n + p_r)] \quad (1)$$

式中: $|\tau|$ 为破裂面上的剪应力的值。

库仑断裂应力变化通常用于估计应力的相对变化，因此库仑应力变化 (Harris, 1998) 定义为:

$$\Delta\sigma_f = \Delta|\tau| - [S - \kappa(\Delta\sigma_n + \Delta p_r)] \quad (2)$$

式中: $\Delta|\tau|$ 为剪应力变化 (应力变化张量投影到断层面); $\Delta\sigma_n$ 为正应力变化; Δp_r 为孔隙流体压力变化。

如果已知后续地震的断层滑动方向，则可在滑动方向上投影得到剪应力变化 $\Delta|\tau|$ 。假设介质是均匀的，断层比周围岩石更能够延伸，则 $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz}$ ， $\Delta\sigma_{kk}/3 = \Delta\sigma_n$ ，可以推出常见库仑断裂应力变化的描述为:

$$\Delta\sigma_f = \Delta|\tau| + \mu'\Delta\sigma_n \quad (3)$$

式中: μ' 称为有效摩擦系数，本文取为 0.4。

在计算近场库仑破裂应力变化的空间分布时，通常使用最优取向的断层平面投影方法 (Harris, 1998; King *et al.*, 1994)，最优取向断层面可由区域应力场约束。假设主震断层附近有足够数量的断层存在于所有的方向上；而在区域应力场约束条件下，在随后的地震中最有可能发生滑动的断层即为最优取向的断层。

2 构造背景

2014 年康定地震震中及邻区为中国地震最活跃的地区之一。欧亚板块和印度板块之间的相互碰撞，使该地区具有强烈的挤压变形、地壳缩短和增厚等构造特征。该地区及周边受青藏高原的强烈隆升以及高原地壳物质向东逃逸的影响，形成了一系列走滑断层，主要包括安宁河断裂带、龙门山断裂带、则木河断裂带、甘孜—玉树断裂

带和鲜水河断裂带等 (图 1)。自晚新生代以来，其运动表现出很强的左旋水平剪切的特点 (李大虎等, 2015; 孟宪纲等, 2016)。

自 2008 年以来，南北地震带发生过几次大地震 (图 1)，如 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震和 2013 年芦山 $M_s 7.0$ 地震都发生在龙门山断裂带上。2014 年 11 月 22 日康定 $M_s 6.3$ 地震发生在川滇菱形块体东边界的鲜水河断裂带上，11 月 25 日，又发生了 $M_s 5.8$ 地震 (廖林等, 2015)，2 次地震震中几乎在同一位置。本文依据我国西南地区现代构造应力场相关研究结果 (杜义等, 2009; 谢富仁, 祝景忠, 1993)，计算康定 2 次主震在近场区域产生的库仑破裂应力变化场，见表 1。

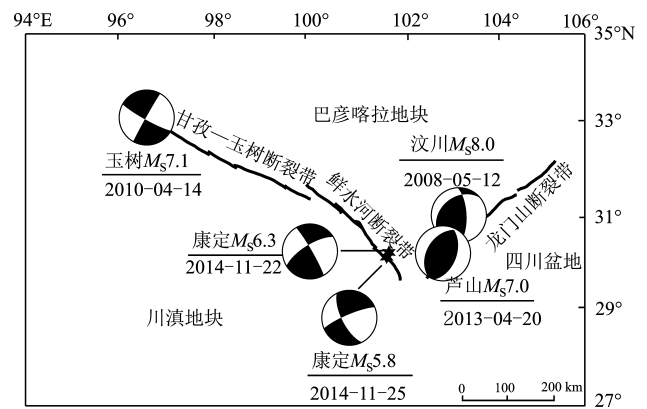


图 1 研究区构造背景

Fig. 1 Tectonic background of the study area

表 1 区域构造应力场主要参数

Tab. 1 Main parameters of regional tectonic stress field

主应力	方位角/ (°)	倾角/ (°)
最大主应力 σ_1	271	10
中间主应力 σ_2	5	21
最小主应力 σ_3	158	66

3 主震震源模型

本文选用张旭等 (2016) 提供的康定 $M_s 6.3$ 和 $M_s 5.8$ 地震震源模型数据 (表 2)，计算 2 次主震产生的库仑破裂应力的空间分布。 $M_s 6.3$ 和 $M_s 5.8$ 地震的断层面尺度分别为 $41 \text{ km} \times 26 \text{ km}$ 和 $21 \text{ km} \times 22 \text{ km}$ ，将断层面按 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 尺度划分为次一级的一系列子断层。图 2 显示了康定 2 次主震震源模型的滑动分布。

表 2 2014 年康定 $M_s6.3$ 和 $M_s5.8$ 地震的震源模型主要参数

Tab. 2 Main parameters of source models of the Kangding $M_s6.3$ and $M_s5.8$ earthquakes in 2014

地震事件	深度/ km	断层产状		断层大小	
		走向/(°)	倾角/(°)	长度/km	宽度/km
康定 $M_s6.3$	20	330	84	41	26
康定 $M_s5.8$	16	153	68	21	22

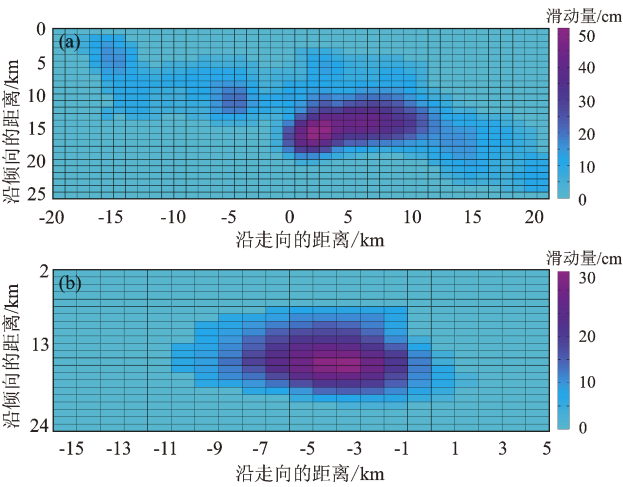


图 2 2014 年康定 $M_s6.3$ (a) 和 $M_s5.8$ (b) 地震震源模型的滑动分布

Fig. 2 Slip distribution of source models for the Kangding $M_s6.3$ (a) and $M_s5.8$ (b) earthquakes in 2014

4 计算结果分析

4.1 近场应力变化的空间分布及其与后续余震活动的关系

为凸显余震活动与应力变化空间分布的对应关系，本文仅计算了康定 2 次主震附近的应力场分布，库仑破裂应力变化的计算深度均取为和主震震源深度一致，分别为 20 km 和 16 km，剪切模量为 3.3×10^{10} Pa，泊松比为 0.25。康定 2 次主震引起的库仑破裂应力变化及 2014 年 11 月 22 日至 12 月 1 日后续余震事件的空间分布如图 3 所示。从图 3 可以看出，康定 2 次主震引起的库仑应力变化的空间分布呈现出应力增加区和减小区相间的特征，具有一定程度的对称性，表现为正应力和负应力变化交错的花瓣图案。从图 3a 可以看出，最大的应力增加区出现在主震断层的东北、西南、西北和东南方向，而主要的应力减小区分布在断层的東西两侧，断层南侧也呈现为显著的应力减小区域。从图 3b 可以看出，断层东西两侧为应力减小最显著的区域，而在断层的南北两端和稍远的东部、西部地区为应力显著增加的区域。离震中越远，库仑破裂应力的变化越小。

对比图 3a, b 可发现，康定 $M_s6.3$ 地震后发生的余震事件多数都位于库仑破裂正应力变化区，

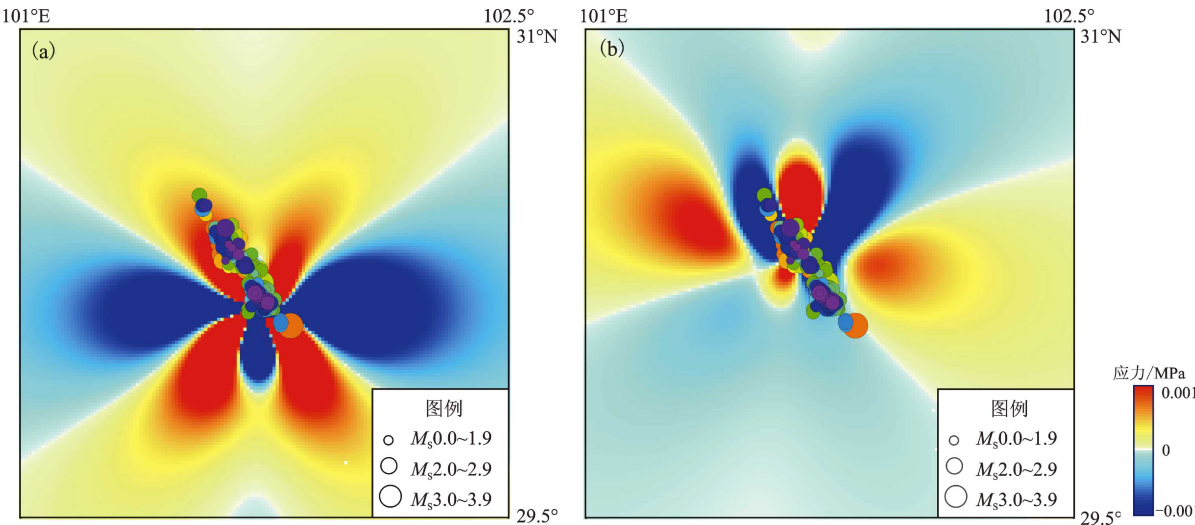


图 3 2014 年康定 $M_s6.3$ (a) 和 $M_s5.8$ (b) 地震产生的库仑应力变化及余震事件的空间分布

Fig. 3 Coulomb stress changes induced by the Kangding $M_s6.3$ (a) and $M_s5.8$ (b) earthquakes and the spatial distribution of aftershocks

这表明应力变化与余震活动的分布之间具有很好的相关性。而康定 $M_s 5.8$ 地震后的余震事件与应力增加区却并没有明显的相关性,可能表明 $M_s 5.8$ 地震引起的应力变化对后续余震事件没有显著的触发作用。以上分析表明,康定 $M_s 6.3$ 地震对后续余震事件的触发占主导作用。

为考察康定 2 次主震的共同影响,笔者计算了康定 2 次主震在周边地区共同产生的库仑破裂应力变化,计算深度取为 16 km,作图时有意减小色标范围,以便突出应力变化与余震分布的对比关系,结果如图 4a 所示。从图中可以看出,在 2 次主震的共同作用下,80% ~ 90% 的余震都

发生在应力增加区。由于 2 次主震的发震时间仅相隔 3 天,其余震不便于区分,因此,判定 2 次主震的共同作用控制了后续地震活动的演化趋势,其中康定 $M_s 6.3$ 地震对后续余震事件的触发占主导作用。

本文应力计算中存在不确定性因素,主要来源于计算初始参数设置、断层震源模型参数等。因此,通过保持其它参数不变,分析有效摩擦系数 μ' 对结果的影响,进行敏感性分析,如图 4b, c 所示。对比图 4 可以发现, μ' 对结果的影响较小,主要是改变了应力增加区的空间范围的大小。

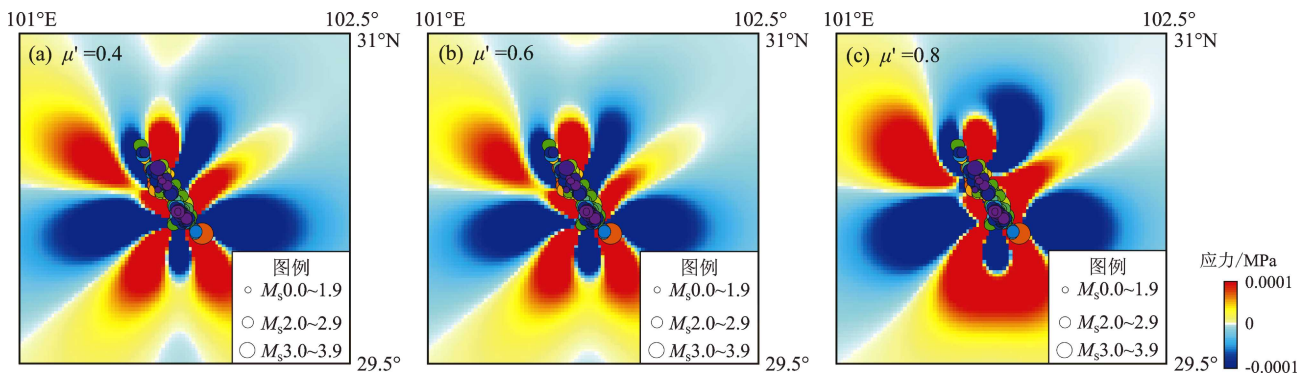


图 4 2014 年康定 2 次主震产生的库仑应力变化与后续余震活动的空间分布受有效摩擦系数 μ' 影响

Fig. 4 Coulomb stress changes induced by two Kangding earthquakes in 2014 and the spatial distribution of their aftershocks influenced by different effective friction coefficient μ'

4.2 康定地震对周围断层的应力加载和卸载作用

为进一步研究康定 2 次主震对周边断裂的影响,本文选取震中附近的主要活动断裂带为投影断层,计算康定地震在这些断裂带上产生的库仑破裂应力变化。在研究区内,根据中国活动构造相关研究结果(邓起东, 2007)选取投影断层,最终选定鲜水河断裂带、茂汶—汶川断裂带、北川—映秀断裂带、理塘断裂带、龙泉山断裂带、安宁河断裂带和则木河断裂带共 7 个典型断裂带。各投影断裂带的参数主要依据前人的相关研究结果(邓起东, 2007; 邓起东等, 1994; 单斌等, 2009; 徐锡伟等, 2005; 朱航, 闻学泽, 2012; 王晓芳等, 2016; 冉勇康等, 2008; 万永革等, 2009)确定,由于断裂带空间展布较长,有些断裂带甚至分为几个子段落,本文取中间值代表整

条断裂带的走向、倾角和滑动角;参考历史地震给出安宁河和则木河断裂带的滑动角参数,计算参数见表 3。康定 2 次主震在投影断层上产生的库仑破裂应力变化计算结果如图 5 所示。

表 3 研究区主要断裂带的参数

Tab. 3 Parameters of faults in the study area

断裂带名称	编号	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)
鲜水河断裂带	F ₁	150	90	23
茂汶—汶川断裂带	F ₂	35	44	94
北川—映秀断裂带	F ₃	40	33	142
理塘断裂带	F ₄	45	70	30
龙泉山断裂带	F ₅	30	50	90
安宁河断裂带	F ₆	7	70	30
则木河断裂带	F ₇	330	75	-11

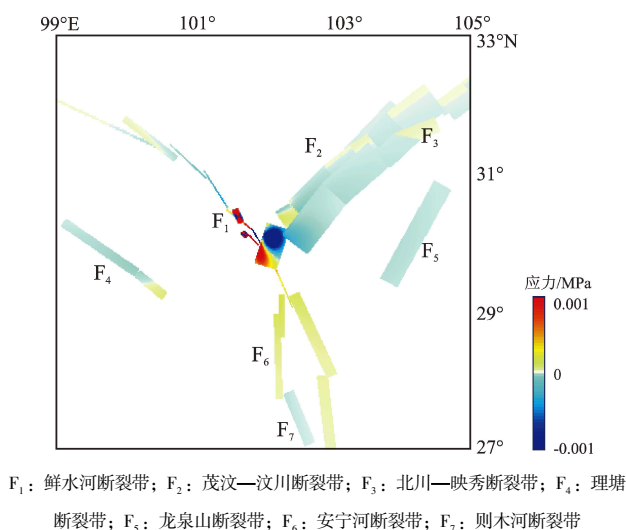


图5 2014年康定2次主震在附近断裂上引起的库仑破裂应力分布

Fig. 5 Distributions of Coulomb stress changes on the nearby faults induced by two Kangding earthquakes in 2014

从图5可以看出, 鲜水河断裂带受康定2次主震震源破裂的影响最大: 2次主震引起的库仑应力变化, 导致鲜水河断裂带南段承受了较大的应力加载作用, 从而可能导致后续破裂和滑移的发生。康定2次主震产生的库仑应力变化使安宁河断裂整体受到了应力加载作用, 使茂汶—汶川断裂带受到较明显的应力卸载作用。研究区内的其它邻近断裂带受地理位置、断层产状等因素的影响, 受到2次主震施加的应力加载和卸载影响并不明显。综上可以发现, 鲜水河断裂带南段和安宁河断裂带受到一定的应力加载作用, 未来地震活动的趋势可能会增强, 这种影响可能即刻发生, 也可能延迟发生。

从图5估计康定2次主震在周边断裂上产生的库仑应力变化峰值, 得到鲜水河断裂为0.03 MPa、茂汶—汶川断裂带为0.000 2 MPa、安宁河断裂带为0.000 2 MPa, 其它断裂带上应力变化值更小, 不作进一步考虑。根据王辉等(2008)对鲜水河断裂带康定段的研究结果, 鲜水河断裂带康定段的应力积累年平均速率为0.007 7 MPa, 则康定2次主震产生的库仑破裂应力变化引起的发震时间改变量为3.9年。

5 结论

本文以2014年11月22、25日四川康定 $M_s6.3$ 和 $M_s5.8$ 地震为研究对象, 探讨地震触发问题。首先, 基于该区的构造应力场, 利用最优方向断层平面进行投影, 计算康定2次主震产生静态应力变化的空间分布, 研究主震对余震的应力触发问题。在此基础上, 通过计算2次主震在周边断层上产生的库仑破裂应力变化, 分析其对周围断层的应力加载和卸载效应。康定2次主震产生的库仑破裂应力的空间分布均表现出正负变化交替呈现的特征, 正负变化呈花瓣状对称分布。尽管2次主震发震时间仅隔3天, 但应力增加区和减小区的分布存在显著差异。

从康定2次主震近场应力变化的空间分布与余震分布的对应关系看, $M_s6.3$ 地震产生的应力分布与随后的余震活动具有良好的相关性, 即 $M_s6.3$ 地震对于余震触发的作用是主导的。从康定地震对周围断层的影响来看, 受地理位置和震级等因素的影响, 鲜水河断裂带南段和安宁河断裂带承受了较明显的应力加载作用, 未来的地震活动趋势可能会增强。其他邻近断裂带受2次主震施加的应力加载和卸载效果不明显。

参考文献:

- 邓起东, 陈社发, 赵小麟. 1994. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. 地震地质, 16(4): 389-403.
- 邓起东. 2007. 中国活动构造图 1:400 万[M]. 北京: 地震出版社.
- 杜义, 谢富仁, 张效亮, 等. 2009. 汶川 $M_s8.0$ 级地震断层滑动机制研究[J]. 地球物理学报, 52(2): 464-473.
- 李大虎, 丁志峰, 吴萍萍, 等. 2015. 鲜水河断裂带南东段的深部孕震环境与2014年康定 $M_s6.3$ 地震[J]. 地球物理学报, 58(6): 1941-1953.
- 廖林, 姚琪, 刘杰, 等. 2015. 2014年康定 $M_s6.3$ 、 $M_s5.8$ 震群型地震发震机理讨论[J]. 中国地震, 31(4): 638-646.
- 孟宪纲, 王庆良, 陈聚忠, 等. 2016. 康定 $M_s6.3$ 级地震前形变变化与区域地震活动性[J]. 地球物理学进展, 31(5): 1986-1990.
- 冉勇康, 程建武, 宫会玲, 等. 2008. 安宁河断裂紫马跨一带晚第四纪地貌变形与断层位移速率[J]. 地震地质, 30(1): 86-98.
- 单斌, 熊熊, 郑勇, 等. 2009. 2008年5月12日 $M_w7.9$ 汶川地震导致的周边断层应力变化[J]. 中国科学: 地球科学, 39(5): 537-545.
- 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.

- 王永革, 吴忠良, 周公威, 等. 2000. 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.
- 王永革, 吴忠良, 周公威, 等. 2002a. 地震应力触发研究[J]. 地震学报, 24(5): 533–551.
- 王永革, 吴忠良, 周公威, 等. 2002b. 地震静态应力触发模型的全球检验[J]. 地震学报, 24(3): 302–316.
- 王辉, 刘杰, 石耀霖, 等. 2008. 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: 地球科学, 38(7): 808–818.
- 王晓芳, 肖捷, 许鹤华, 等. 2016. 龙门山和鲜水河断裂带对区域构造加载作用的动态响应[J]. 地球物理学报, 59(4): 1403–1413.
- 吴小平, 虎雄林, Michel, 等. 2007. 云南澜沧—耿马 $M_s 7.6$ 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: 地球科学, 37(6): 746–752.
- 解朝娣, 朱元清, Lei X L, 等. 2010. $M_s 8.0$ 汶川地震产生的应力变化空间分布及其对地震活动性的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 40(6): 688–698.
- 谢富仁, 祝景忠. 1993. 中国西南地区现代构造应力场基本特征[J]. 地震学报, 15(4): 407–417.
- 徐锡伟, 闻学泽, 于贵华, 等. 2005. 川西理塘断裂带平均滑动速率、地震破裂分段与复发特征[J]. 中国科学: 地球科学, 35(6): 540–551.
- 张旭, 严川, 许力生. 2016. 2014 年四川康定双震震源的勒夫波分析[J]. 地球物理学报, 59(7): 2453–2467.
- 朱航, 闻学泽. 2012. 小江—则木河断裂带大地震序列的静应力触发作用[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 37(1): 199–205.
- 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]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 102(B5): 9859–9886.
- Green D H. 2012. Fluid pressure response to undrained compression in saturated sedimentary rock[J]. Geophysics, 51(4): 948–956.
- Hardebeck J L, Nazareth J J, Hauksson E. 1998. The static stress change triggering model; Constraints from two southern California aftershock sequences[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 103(B10): 24427–24437.
- Harris R A. 1998. Introduction to Special Section; Stress Triggers, Stress Shadows, and Implications for Seismic Hazard[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 103(B10): 24347–24358.
- King G C P, Stein R S, Lin J. 1994. Static stress changes and the triggering of earthquake[J]. Bulletin Seismological Society of America, 84(3): 935–953.
- Papadimitriou E, Wen X, Karakostas V, et al. 2004. Earthquake Triggering along the Xianshuihe Fault Zone of Western Sichuan, China[J]. Pure & Applied Geophysics, 161(8): 1683–1707.
- Rice J R, Cleary M P. 1976. Some basic stress diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents[J]. Reviews of Geophysics, 14(2): 227–241.
- Rice J R. 1992. Fault Stress States, Pore Pressure Distributions, and the Weakness of the San Andreas Fault[J]. International Geophysics, 51: 475–503.

Study on Stress Triggering of 2014 Kangding $M_s 6.3$ and $M_s 5.8$ Earthquakes

XIE Chaodi^{1,2}, WANG Yingnan¹, YAN Ruyu¹, YANG Ying¹, LI Mengyang¹, YU Haiying³, LIU Benyu¹

(1. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, Yunnan, China)

(2. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

(3. Shanghai Earthquake Agency, Shanghai 200062, China)

Abstract

In this study, the problem of earthquake triggering is discussed by using the $M_s 6.3$ earthquake on Nov. 22, 2014 and the $M_s 5.8$ earthquake on Nov. 25, 2014 in Kangding, Sichuan Province. Firstly, based on the regional tectonic stress field in this area, we calculated the spatial distributions of static stress changes caused by the Kangding $M_s 6.3$ and $M_s 5.8$ earthquakes on the optimal fault planes, and studied the stress triggering effect of the main shock to the aftershocks. Furthermore, we analyzed the stress loading and unloading effects of the two main-shocks on the surrounding faults by calculating the Coulomb rupture stress changes on the surrounding faults. The results show that the joint action of the two main earthquakes controls the evolution trend of the subsequent seismicity. Moreover, the Coulomb failure stress change produced by the Kangding $M_s 6.3$ earthquake has a good correlation with the aftershocks, and the triggering effect on the subsequent events is dominant. In addition, the southern segment of the Xianshuihe fault and the Anninghe fault are subjected to certain stress loading by two earthquakes, and the seismic activity may be strengthened in the future.

Keywords: Kangding earthquake; Coulomb failure stress change; earthquake triggering; fault interaction effect