



库仑应力变化及其在地震学中的应用研究进展^①

刘方斌^{1,2}, 王爱国^{1,2}, 冀战波^{1,3}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局地震预测研究所
兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000; 3. 新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:首先介绍了库仑应力的定义及其物理含义。阐述了库仑应力在强震对余震的触发作用、强震对后续地震序列的触发、应力影区对地震的抑制作用、地震活动性分析以及相关软件的应用等五个方面的应用研究进展。最后探讨了库仑应力在地震学应用中存在的不足与前景。

关键词: 库仑应力; 静态应力变化; 应力触发; 地震活动性

中图分类号: P315.727 文献标志码: A 文章编号: 1000-0844(2013)03-0647-09

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.03.0647

Research on Coulomb Stress Change and Its Application in Seismology

LIU Fang-bin^{1,2}, WANG Ai-guo^{1,2}, JI Zhan-bo^{1,3}

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China;
2. Lanzhou base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China;
3. Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: An earthquake is a natural phenomenon caused by the sudden breaking and slipping of crustal rocks when stress accumulates to a certain extent. The coseismic dislocations of a major earthquake not only cause stress state changes in adjacent areas, but also change the Coulomb stress. Earthquakes can be triggered by stress changes induced by other earthquakes; the most common examples are aftershocks. Static stress changes can increase or decrease seismicity in the surrounding regions. According to the Coulomb failure criteria, ΔCFS will affect the failure condition of a fault. When ΔCFS is positive, it will accelerate the speed of the stress rupture accumulation in the surrounding areas and cause the next earthquake to occur sooner, which is called stress triggering; on the contrary, when ΔCFS is negative, it will defer the accumulation. In recent years, seismic Coulomb stress changes generated by the earthquake and subsequent temporal relationships have been valued by seismologists all over the world. Studies have shown that a minor static Coulomb stress change of 0.1 bar may trigger earthquakes and make the regional seismic activity change in the future. Therefore, it is important to explore the relation between Coulomb stress changes and earthquake triggering not only for the study of long-term earthquake prediction and static stress changes triggering subsequent seismic events, but also for future regional

① 收稿日期: 2013-06-20; 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2013

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项

作者简介: 刘方斌(1989-), 男(汉族), 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事地球动力学及活动构造学研究。Email: liufangbin8908@163.com

通讯作者: 王爱国(1972-), 男(汉族), 湖北洪湖人, 副研究员, 主要从事地震地质、工程地震、寒区工程方向的研究。Email: waguo2008@163.com

seismic hazard analysis. In this paper, the definition and the physical meaning of Coulomb stress are explained, and then the research progress of the applications of Coulomb stress change in seismology are discussed from five aspects: 1) The triggering of aftershocks by a strong earthquake. Based on Okada's ([year\]) elastic half-space dislocation model, the Coulomb stress change images are calculated, and then the spatial distribution of aftershocks are studied. The positive and negative Coulomb stress distribution images are related to the activity of aftershocks directly and affect the regional seismic hazard assessment; 2) Triggering of the subsequent earthquakes by strong earthquake. The main way to trigger subsequent earthquakes is stress transfer, in which the stress before an earthquake event can have an effect on aftershocks; 3) Stress shadow. A so-called stress shadow means the negative Coulomb stress changes an area with the function of inhibiting or delaying the fault slip and rupture with a $\Delta CFS < 0$, which will either decrease the seismic activity or prolong the time of the next earthquake; 4) The analysis of seismic activity; and 5) The related application of software. Though limited by the inability to accurately predict the time of subsequent earthquakes, Coulomb stress changes have been proven to be very useful in predicting epicenter locations. There is still much research left to be conducted to predict the location and timing of future earthquakes accurately by Coulomb stress changes.

Key words: Coulomb stress; static stress changes; stress triggering; seismicity

0 引言

地震是在一定的构造应力场条件下断层相对运动的结果,断裂的运动方式与所受构造应力有关^[1]。一次大地震的同震位错会使周围断裂或临近区域的应力状态发生改变,从而引起了库仑应力变化^[2]。近年来,地震产生的库仑破裂应力变化与后续地震发生的时空关系引起了国内外地震学家的广泛关注^[3-6]。研究表明,很小的静态库仑应力变化(阈值为 0.1 bar)就可能会触发地震^[3-4],导致区域未来的地震活动性发生改变。因此,探索库仑应力变化与地震触发的关系对研究地震中长期预报和静态应力变化是否触发了后续地震事件有重要意义,同时也为未来区域地震危险性分析提供了理论依据。

1 库仑破裂应力的定义及其物理含义

根据库仑破裂准则,当岩石发生破裂时,促使它产生破裂的剪应力 τ 受到材料的内聚应力 S (内聚强度或剪切强度) 和乘以常数的平面法向应力 σ_n (张开为正) 及孔隙压力 p 的抵抗,即平面中的抗剪强度为 $S - \mu(\sigma_n + p)$ ^[7]。因此,破裂面上的库仑应力 (CFS) 可定义为

$$CFS = \tau + \mu(\sigma_n + p) - S \quad (1)$$

式中, τ 为破裂面上的剪应力; μ 为内摩擦系数; σ_n 为正应力, 张开为正, 压缩为负; p 为地壳内部的孔隙产生的张性应力。所以, 当剪应力 τ 越接近于 $S - \mu(\sigma_n + p)$, 材料就越容易破裂。倘若 μ 和 S 不随时间

的变化而变化, 那么, 库仑应力变化(图 1) 可以表示为

$$\Delta CFS = \Delta\tau + \mu(\Delta\sigma_n + \Delta p) - S \begin{cases} \Delta CFS > 0 \\ \Delta CFS < 0 \end{cases} \quad (2)$$

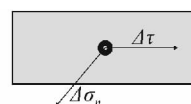


图 1 库仑应力变化演示图(改自 Harris^[62])
Fig. 1 Coulomb Failure Stress Change(Adapted from Harris^[62])

当 $\Delta CFS > 0$ 时断层处于加载状态, 会对后续地震起到触发作用; 相反则会延缓地震的发生。为了简化孔隙压力在库仑破裂应力变化上带来的影响, Rice 和 Cleary^[8] 及 Roeloffs^[9] 假设材料介质为均匀的各向同性。在静态应力发生变化后没有立即发生排泄, 流体自由流动之前, 规定孔隙压力变化为

$$\Delta p = -\beta' \Delta\sigma_{kk} / 3 \quad (3)$$

式中, β' 是斯肯普顿系数^[10-12], 其取值范围为 0.5 ~ 0.9^[11, 13-14]。 $\Delta\sigma_{kk}$ 是应力张量的对角线之和, 即 $\Delta\sigma_{kk} = \Delta\sigma_{11} + \Delta\sigma_{22} + \Delta\sigma_{33}$ 。若 $\Delta\sigma_{11} = \Delta\sigma_{22} = \Delta\sigma_{33}$, 则 $\Delta\sigma_{kk} / 3 = \Delta\sigma$ 。因此, 公式 3 变为

$$\Delta p = -\beta' \Delta\sigma \quad (4)$$

将公式(4)代入(2), 得

$$\Delta CFS = \Delta\tau + \mu' \Delta\sigma \quad (5)$$

其中, $\mu' = \mu(1 - \beta')$, 为视摩擦系数。Kagan^[15] 以

及 Kagan 和 Jackson^[16] 在研究哈佛地震目录时,取 $\mu' = 0$ 。Reasenber 等^[17] 在研究 Loma Prieta 余震数据时采用 $\mu' = 0.2$, 并阐明其值随着孔隙流体迁移时间的变化而变化, Gross 等^[18] 使用不同的方法估计, 结果发现采用较低的值比较合适, Deng 等^[19] 在研究南加州近十年的地震应力场的演化中指出 μ' 值在 $0 \sim 0.6$ 之间变化; 而 Massimo Cocco 等^[20] 将其范围定在 $0 \sim 0.75$; Stein^[21]、King^[22]、万永革^[23]、Troise^[24]、Astiz^[25] 根据计算, 将视摩擦系数定为 0.4。还有学者指出在蠕滑断层上, 低摩擦系数是比较合适的, 然而在年轻的正、逆断层上较高的摩擦系数相对来说比较合适^[26-27]。研究表明, 视摩擦系数不是材料的特质, 它依靠介质的应力变化率, 它的变化对计算库仑破裂应力变化空间分布不太影响, 只会对应力变化的大小产生影响^[23]。由于不同学者对视摩擦系数取值不一, 因此在计算库仑应力变化过程中应依据研究区域的背景资料来确定视摩擦系数的大小。

2 库仑破裂应力在震学中的应用研究进展

一次强震的震源断裂错动所造成的应力场变化可能扰动其后的区域地震活动的演化过程, 往往导致区域地震活动性的变化, 这类影响被称为应力触发。地震应力触发包括静态应力触发和动态应力触发。前者主要研究地震断层位错在附近产生的静态库仑破裂应力变化对后续地震的触发作用; 后者则是指大地震快速破裂错动激发的地震波(主要是面波)传播到某些处于临界状态的高应力区而即时引起的地震事件。

当库仑应力变化增加时断层面处于加载状态, 前一次地震会促使后期地震提前发生; 相反, 断层上的应力积累将会延缓, 从而抑制后期地震的发生^[22, 28-29]。库仑应力变化的大小取决于源断层, 即发震断层的几何性质和同震位错量, 以及接受断层的几何特征及摩擦系数^[22, 30]。

静态应力触发侧重于永久的断层位错的静态应力变化的触发效果, 对于这方面的研究主要包括以下几方面: (1) 强震对余震的触发研究; (2) 对强震序列的触发研究; (3) “应力影区”对地震的延缓作用; (4) 对地震活动性分析的研究。

2.1 强震对余震触发

对于余震的触发研究, 主要是基于 Okada 的弹性半空间位错模型, 对主震的发震断层的几何性质

和同震位错量进行计算, 计算出主震的库仑应力变化图像, 然后对后续余震的空间展布进行分析。然而, 库仑破裂应力的正负分布图像直接关系到对余震活动触发或延迟的分析结果, 从而影响到对一个区域地震危险性估计的结论。郝平等^[31-33] 分别对 1970 年通海 7.7 级大地震、2000 年姚安 6.5 级地震和 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震的后续地震序列进行研究, 得出大多数强余震分布在应力增加区, 尤其通海余震的 5 次强余震中有 4 次位于库仑应力增加区。万永革等^[23] 针对邢台、唐山、共和和丽江等 4 次中强震计算了可以近似为两次或两次以上子破裂事件的复杂震源过程中第一次较大的子破裂事件所产生的库仑破裂应力变化及其与后续子破裂事件的关系; 结果表明后续子破裂事件均落在库仑破裂应力变化为非负区域。刘桂萍等人^[35-41, 45-49] 分别对 1973 年炉霍等几次强地震序列研究时中均得出一致结论, 大部分余震位于主震产生的库仑破裂应力变化增加区, 其库仑变化值均大于 0.1 bar。汪建军^[41]、王莹^[42]、宋金^[43]、单斌^[44] 等人分别采用不同的理论模型计算了 2010 年玉树 $M_s 7.1$ 地震变化, 但结果基本相似, 大部分余震分布在同震库仑应力正区且余震触发率达 75% 以上。Toda^[34] 对 1998 年 8.1 级南极板块地震进行研究, 得出触发余震的库仑应力变化值为 0.1~0.2 bar。Troise 等^[50] 运用 Okada 提出的断层活动静应变变化公式计算了亚平宁山脉的几次地震的静态应力变化, 发现后续几次余震均被前一事件所触发, 得出几次事件在时空尺度上有很好的相关性。Toda 等^[51] 对日本 2011 年本州东海岸附近海域的 9.0 级 Tohoku 地震进行库仑应力变化测试时, 测试的 6 个源模型中计算出余震的 47% 发生在正应力变化区, 得出了应力的增长大有可能触发余震或者随后主震的可能性。Hardebeck^[52] 以及 Harris^[53] 分别对 1992 年 Landers 7.3 级地震余震触发情况进行计算, 分别得出主断层附近的 85%、80% 的余震事件与应力触发有关。

2.2 地震对后续地震序列的触发

强地震对后续地震的触发作用主要是通过应力转移的方式进行的, 即前事件的地震的应力变化会对后续地震序列产生一定的影响。Stein^[54] 通过对土耳其北安那托利亚断层在 1939—1992 年所发生的 10 次 $M \geq 6.7$ 地震的库仑应力破裂进行研究, 得出 10 次大地震中有 9 次是因为前震触发的, 其库仑应力增加值为 1~10 bar, 相当于 3~30 年的应力增

加效果。Stein^[55]和 King^[56]分别对美国兰德斯断裂 1992 年发生的 7.3 级地震后的 10 000 次 $M > 1$ 的地震进行研究,其中 67% 的地震发生在应力增加区,随后的 6.5 级 Big Bear 地震也在其中,库仑应力变化值为 3 bar,超过应力触发阈值 0.1 bar。Nalbant^[57]对土耳其西北地区和北爱琴海区域的自 1992 年以来的 29 次 $M \geq 6.0$ 地震的库仑应力的相互作用进行了调查取证,得出 23 次事件可能与先前事件有关系,13 次事件确定于之前时间相关,其中 1967 年之后的所有地震事件的发生都与先前地震存在着密切的关联。朱航等^[30]计算了 1973—1976 年四川松潘 4 次强震组成的序列引起的库仑应力变化图像,结果显示 1973 年的松潘黄龙 6.5 级地震导致虎牙断裂带中段上库仑应力的显著增加并触发了 1976 年 7.2 级地震;此后,又沿断层向南相继触发了 6.7 级和 7.2 级两次地震。该序列的绝大多数余震主要发生在主震发震断层的近场库仑应力增加区。吴小平等^[48]运用 DWN(离散波数)法计算和研究了 1988 年云南澜沧—耿马 $M_s 7.6$ 地震产生的完全库仑破裂应力变化的时空演化图像,证实了耿马 $M_s 7.2$ 地震受到了澜沧 $M_s 7.6$ 地震产生动态和静态库仑破裂应力的触发作用。刘桂萍^[58]根据 1920 年海原 8.5 级大地震等相关资料计算了 1927 年古浪 8.0 级地震,结果显示古浪地震可能是被海原地震触发,促使古浪地震提前 14 年发生。万永革等^[59]依托 GPS 等数据资料,依据多层麦克斯韦弹性介质中位错产生的应力变化统计并计算研究区内 20 次 $M \geq 7.0$ 地震中,其中 17 次大地震均发生在库仑破裂应力变化为正的区,触发率达 85% 之高。韩竹军^[60]采用新西兰地质与核子研究所提供的 GNStress 软件对南北地震带北部 5 次 $M \geq 7$ 级地震之间的触发关系进行研究,也得出了相应的结论。

2.3 应力影区

应力影区即库仑应力变化为负的区域。Simpson 等^[61]指出,对应力影模型预测,如果应力变化为负,那么它很有可能降低随后地震的活动性。如果断层破裂释放出一定的库仑应力,使得应力减小,那么此断层需要很长一段时间的应力积累才能达到稳定的状态^[62]。Felzer 等^[63]分别对 1989 年 7.0 级 Loma Prieta 地震、1992 年 7.3 级 Landers 地震、1994 年 6.7 级 Northridge 地震以及 1999 年 7.1 级 Hector Mine 4 次主震进行归一化计算,结果得出库仑应力变化值小于 0。这表明,震后的地震活动率

比在平时目录中相对要小一些。Harris 等^[64]在研究 1857 年 Fort Tejon 地震时,证明了由于应力影区对南加州后续地震的影响,使该断层上的地震活动性延迟了至少 50 年。Simpson 等^[61,23]及 Jaumé 等^[65]分别计算了 1906 年圣安德烈斯地震对附近断层的影响,发现这次地震对旧金山湾地区的断裂带起到了应力释放的作用,并使下一次大地震延迟了数十年,这进一步解释了应力影区能对地震产生延缓效应。

2.4 地震活动性分析

静态库仑应力变化与区域地震活动的关系,主要研究大震前后区域地震活动状态是否发生变化,即区域地震活动速率变化。当库仑应力变化为正值时,前一次地震事件的发生会促使后一次地震事件提前发生;相反,在应力影区就会延缓地震的发生,此区的地震活动性相对来说比较低。为了计算地震活动性,引入了 Dieterich^[66]速率—状态摩擦定律,它依赖于应力扰动幅度、断层的基本物理特性、应力加载速率和研究区的背景地震活动率。Dieterich 模型是被作为一种可靠的、基于物理的方法而提出的,它可以用于预测一次大震后邻近断裂的地震活动速率变化和地震发生概率变化。汶川地震发生后,国内外学者^[2,47,67,70]纷纷对其应力变化以及对周边地区地震活动性进行研究,得出鲜水河断裂、东昆仑断裂及岷江断裂一些区段的未来地震活动性比较高,抚边河断裂和虎牙断裂由于地处应力影区,未来地震活动性可能会降低。Toda 等^[68]从南加州 1986—2003 年地震产生的静态库仑破裂应力变化中得出,库仑应力变化对背景地震活动性有放大作用,即较小的应力变化就会引起较大的背景地震活动性,当在应力影区时,地震活动速率会大大减小。

3 Coulomb 软件介绍及应用

Coulomb 软件是日本京都大学的 Shinji Toda、美国地质调查局的 Ross, S. Stein 和 Volkan Sevilgen 以及美国伍兹霍尔海洋地理研究所的 Jian Lin 四位科学家研发的。此软件是基于 Matlab 环境下进行操作的免费软件,主要用于由地震、构造、火山引起的三维的地形变、静应力变化及地震触发等问题的计算。该软件操作简单,容易掌握,图像丰富适合多种文件格式,如 .eps、.ai、.jpg 等,计算结果可直接用于文章发表。

3.1 模型的构建

Coulomb 3.3 是在库仑破裂准则下基于 Okada

提出的弹性半空间位错模型,根据发震断层同震位错量来计算接受断层的库仑应力变化量(图 2)。因

表 1 库仑应力变化相关参数表

Table 1 The parameter of Coulomb stress change

编号	源断层参数						接受断层参数			
	起点 Lat./Lon.	终点 Lat./Lon.	走向/ (°)	倾角/ (°)	滑动角/ (°)	位错量/m 水平 垂直	深度/ (km)	走向/ (°)	倾角/ (°)	滑动角/ (°)

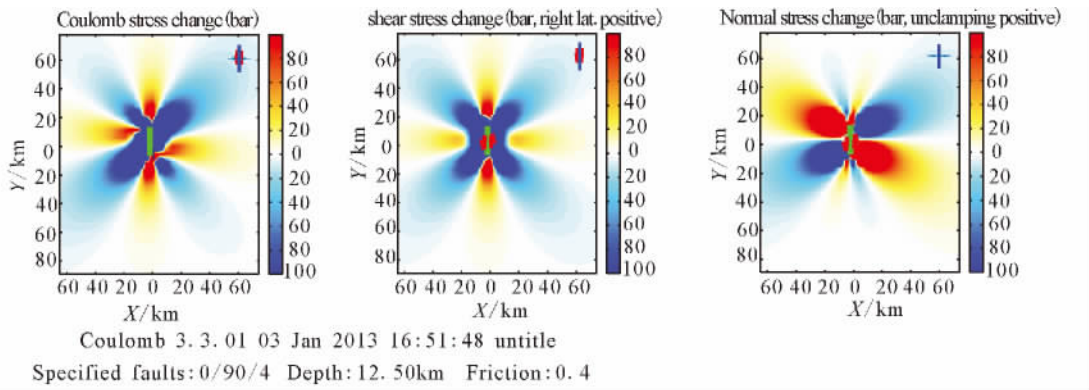


图 2 Coulomb 3.3 下的库仑应力变化图

Fig. 2 The map of Coulomb failure stress change in Coulomb 3.3

计算时我们需要输入震源断层及接受断层参数即可得出库仑应力变化图像,具体参数见表 1。对于历史地震来说,由于年代久远,断层破裂长度和宽度不确定,我们可以根据软件提供的经验公式输入断层类型及震级就可取得相关长度和宽度;对于接受断层资料的缺陷不能直接计算断层面上的库仑破裂应力变化,我们则采用最优取向断层面进行计算。对于最优取向断层面的解释,可参考王莹^[42]等人的文献。

3.2 相关参数取值范围

源断层参数是依据震源机制解得出,而震源机制解直接反映了地壳现今应力状况和断层构造运动特性^[69]。震源机制解中有两个节面,其中之一为实际的地震断层面,要确定实际断层面需要实地调查来确定。根据 Aki-Richard 规定的参数范围,如图 3 所示。

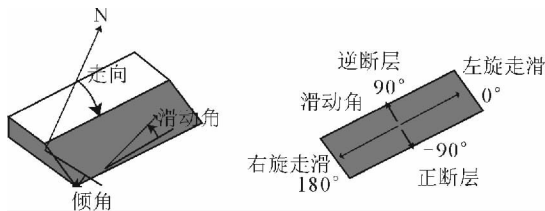


图 3 应力和震源机制规定简图

Fig. 3 Sketch of convention for resolving stress and for focal mechanisms

走向:断层面与水平面的相交的线为走向线,走

向线有两个方向。这里规定正北为 0,按顺时针方向增加,范围为 $0 \leq \text{Strike} \leq 360^\circ$;

倾角:断层面上与走向相互垂直并结沿断层面向下的线叫倾向线。倾斜线在水平面上的投影夹角则为倾角,其范围为 $0 \leq \text{Dip} \leq 90^\circ$;

滑动角:断层上盘在断层面上运动时留下的擦痕线与走向线间的夹角,范围为 $-180^\circ \leq \text{Rake} \leq 180^\circ$ 。

在 Coulomb3.3 软件中,规定右旋和逆断层的滑移量和滑动角为正,左旋和正断层为负。

3.3 相关参数的影响

根据本人对 Coulomb 软件的实际操作,并结合前人使用经验,总结出参数来源、参数变化、以及研究事件叠加个数等三方面对库仑应力变化影响最大。对于同一地震,国内外各部门所使用的资料以及计算震源机制的算法不尽相同,因此会引起库仑应力变化图像存在一定的差异。例如,王莹^[42]运用 5 组不同来源的震源参数分别对玉树 $M_s 7.1$ 地震进行库仑应力变化进行计算,得出不同结果;对于参数值变化,所有参数中除了地震断层深度以外,其他参数的变化对库仑应力变化均有影响,其中滑动角和位错量最为明显^[42];对于事件叠加个数方面,本人对祁连山东北缘自 1500 年以来的 9 次强震静态库仑应力变化分别通过先前地震事件的累加与单独事件对后续地震的触发关系进行计算,得出库仑应力变化图像存在一定差别(未发表)。

4 存在不足与展望

自上世纪80年代开始,静态库仑应力变化计算作为一种有价值的工具运用于地震活动性中,经过近三十多年的发展逐渐变得成熟起来,美国加州Landers地震的应力触发研究就是一个成功的实例。因此,地震触发已经作为一项重要的议题深受国内外相关组织的关注,例如,1997年3月南加利福尼亚地震中心(SCEC)和美国地质调查局(USGS)组织了“应力触发、应力影区及与地震危险性关系”的研讨班,议题为地震之间的相互作用。近年来又提出了各种模型计算地震产生的库仑破裂应力变化对后续地震的影响,如扩展和提高了应力触发研究的时空尺度,构建了基于速率-状态摩擦定律的地震触发理论模型。

尽管应力触发已经相当完善,但是其变化应用仍存在很大局限性。现存的模型过于简单,需要太多的假设,没有一个模型能非常满意的解释影响地震的各种机制,至今为止很多地震现象无法阐述。比如一些地震的后续事件特别是余震并没有发生在正库仑破裂应力变化区内,而是在负的库仑破裂应力变化区内,这与应力影区延缓地震的发生相反。因此我们在准确预测未来地震的位置和时间方面还有很长的路要走,有很多问题亟需我们解决并完善。现存的地震学知识以及先进技术为计算库仑应力变化提供了非常有利的条件,随着对地震新认识的积累以及先前成功的例子必将为我们打开未来地震危险性分析的大门。

致谢 本人在此由衷的感谢各位审稿专家对本文提出宝贵意见!

参考文献(References)

- [1] 庄培仁,常志忠,编著. 断裂构造研究[M]. 北京:地震出版社,1996.
ZHUANG Pei-ren, CHANG Zhi-zhong. Faults Study[M]. Beijing: Earthquake Press,1996. (in Chinese)
- [2] 解朝娣,朱元清, Xinglin LEI,等. 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,2010,40(6):688-698.
XIE Chao-di, ZHU Yuan-qing Q, Lei X L, et al. Pattern of stress change and its effect on seismicity rate caused by 8.0 Wenchuan earthquake[J]. Sci. China Earth. Sci., 2010, 40(6):688-698. (in Chinese)
- [3] Harris R A. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows and implications for seismic hazard[J]. J. Geophys. Res., 1998, 103: 24347-24358.
- [4] Stein R S. The role of stress transfer in earthquake occurrence [J]. Nature, 1999, 402: 605-609.
- [5] Steacy S, Gombert J, Cocco M. Introduction to special section: Stress transfer, earthquake triggering, and time-dependent seismic hazard[J]. J. Geophys. Res., 2005, 110: B05S01, doi: 10.1029/2005JB003692.
- [6] Gombert J, Felzer K. A model of earthquake triggering probabilities and application to dynamic deformations constrained by ground motion observations[J]. J. Geophys. Res., 2008, 113: B10317, doi: 10.1029/2007JB005184.
- [7] Jaeger J C, Cook N G W. Fundamental of Rock Mechanics [M]. New York: Methuen, 1969.
- [8] Rice J R, Cleary M P. Some basic stress diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents[J]. Rev. Geophys., 1976, 14: 227-241.
- [9] Roeloffs E A J. Fault stability changes induced beneath a reservoir with cyclic variations in water level[J]. Geophys. Res., 1988, 93: 2107-2124.
- [10] Skempton A W. The pore pressure coefficients A and B[J]. Geotechnique, 1954, 4: 4143-4147.
- [11] Rice J R, Cleary M P. Some basic stress diffusion solution for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents[J]. Rev. Geophys., 1976, 14: 227-241.
- [12] Kuempel H J. Poroelasticity: Parameters reviewed[J]. Geophys. J. Int., 1991, 105: 783-799.
- [13] Roeloffs E, J W Rudnicki. Coupled deformation diffusion effects on water level changes due to propagating creep events[J]. Pure Appl. Geophys., 1985, 122: 560-582.
- [14] Roeloffs E A. Adv. Poroelastic techniques in the study of earthquake-related hydrologic phenomena [J]. Geophys., 1996, 37: 135-195.
- [15] Kagan Y Y. Incremental stress and earthquakes, Geophys[J]. J. Int., 1994, 117: 345-364.
- [16] Kagan Y Y, D D Jackson. Spatial aftershock distribution: Effect of normal stress [J]. J. Geophys. Res., 1998, 103: 24453-24467.
- [17] Reasenber P A, Simpson R W. Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake[J]. Science, 1992, 255: 1687-1690.
- [18] Gross S, Btirgmann R. The rate and state of background stress estimated from the after shocks of the 1989 Loma Prieta, California earthquake[J]. J. Geophys. Res., 1998, 103: 4915-4927.
- [19] Deng J, Sykes L R. Evolution of the stress field in southern California and triggering of moderate-size earthquakes: A 200-year perspective[J]. J. Geophys. Res., 1997, 102: 9859-9988.
- [20] Massimo Cocco, James R Rice. Pore pressure and poroelasticity effects in Coulomb stress analysis of earthquake interactions [J]. J. Geophys. Res., 2002, 107 doi: 10.1029/2000JB000138.
- [21] Stein R S, King G C P, Lin J. Change in failure stress on the southern San Andreas fault system caused by the 1992 magni-

- tude=7.4 Landers earthquake[J]. *Science*, 1992, 258: 1328-1333.
- [22] King G C P, Stein R S, Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes[J]. *Bull Seism. Soc. Amer.*, 1994, 84: 935-953.
- [23] 万永革, 吴忠良, 周公威, 等. 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*, 2000, 22(6): 568-576.
WAN Yong-ge, WU Zhong-liang, ZHOU Gong-wei, et al. "Stress triggering" between different rupture events in several earthquakes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2002, 22(6): 568-576. (in Chinese)
- [24] Troise C, De Natale G, Pingue F, et al. Evidence for static stress interaction among earthquakes in south-central Apennines (Italy)[J]. *J. Geophys. int.*, 1998, 134: 809-817.
- [25] Astiz L, Shearer P M, Agnew D. Precise relocations and stress change calculations for the Upland earthquake sequence in southern California[J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105: 2937-2953.
- [26] Parsons T R S, Stein R W, Simpson P A, Reasenber. Stress sensitivity of fault seismicity: A comparison between limited-offset oblique and major strike-slip faults[J]. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104: 20, 183-120, 202.
- [27] Toda S, R S Stein. Response of the San Andreas fault to the 1983 Coalinga - Nuñez Earthquakes: An application of interaction-based probabilities for Park field[J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107, 10. 1029/2001JB000172.
- [28] Stein R S. The role of stress transfer in earthquake occurrence [J]. *Nature*, 1999, 402: 605-609.
- [29] Ross S Stein, Aykut A Barka, James H. Dieterich Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering[J]. *Geophysical Journal International*, 1997, 128: 594-604.
- [30] 朱航, 闻学泽. 1973—1976 年四川松潘强震序列的应力触发过程[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(4): 994-1003.
ZHU Hang, WEN Xue-ze. Stress triggering process of the 1973 to 1976 Songpan, Sichuan, sequence of strong earthquakes[J]. *Chinese J. Geophys.*, 2009, 52(4): 994-1003. (in Chinese)
- [31] 郝平, 傅征祥, 田勤俭, 等. 1970 年通海 7.7 级大地震强余震触发[J]. *地震*, 2004, 24(2): 38-46.
HAO Ping, FU Zheng-xiang, TIAN Qin-jian, et al. The stress triggering of large aftershocks following the 1970 Tonghai great earthquake ($M=7.7$)[J]. *Earthquake*, 2004, 24(2): 38-46. (in Chinese)
- [32] 郝平, 田勤俭, 傅征祥, 等. 2000 年 1 月 15 日姚安 6.5 级地震较强余震的应力触发[J]. *地震研究*, 2004, 27(3): 246-251.
HAO Ping, TIAN Qin-jian, FU Zheng-xiang, et al. Study of stress triggering of strong aftershocks following the Yao'an M_s 6.5 earthquake on January 15, 2000[J]. *Journal of Seismological Research*, 2004, 27(3): 246-251. (in Chinese)
- [33] 郝平, 傅征祥, 田勤俭, 等. 昆仑山口西 8.1 级地震强余震库仑破裂应力触发研究[J]. *地震学报*, 2004, 26(1): 30-37. HAO Ping, FU Zheng-xiang, TIAN Qin-jian, et al. Large aftershocks triggering by coulomb failure stress following the 2011 $M_s=8.1$ great Kunlun earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2004, 26(1): 30-37. (in Chinese)
- [34] Shinji Toda, et al. 1998 年 3 月 25 日 $M=8.1$ 南极板块地震的远离断层的大余震是应力触发引起的吗? [J]. *GRL*, 2000, 王俊国译, 侯森燕校.
Shinji Toda, Ross S. Stein. Did stress triggering cause the large off-fault aftershocks of the 25 March 1998 $M_w=8.1$ Antarctic plate earthquake? [J]. *GRL*, 1999. (in Chinese)
- [35] 刘桂萍, 傅征祥. 1973 年炉霍大地震 ($M_s=7.6$) 最大余震 ($M_s=6.3$) 的库仑破裂应力触发[J]. *中国地震*, 2002, 18(2): 175-182.
LIU Gui-ping, FU Zheng-xiang. The triggering mechanism of the largest aftershock ($M_s=6.3$) of the 1973 Luhuo great earthquake ($M_s=7.6$)[J]. *Earthquake Research In China* 2002, 18(2): 175-182. (in Chinese)
- [36] 王琼, 陈学忠, 王海涛. 2003 年 2 月 24 日新疆巴楚—伽师 M_s 6.8 地震的静态库仑应力触发作用[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2006, 23(2): 213-220.
WANG Qiong, CHEN Xue-zhong, WANG Hai-cao. Stress triggering of static coulomb stress of Xinjiang Bachu—Jiashi earthquake of M_s 6.8. Feb. 24, 2003 [J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2006, 23(2): 213-220. (in Chinese)
- [37] 王海涛, 王琼, 赵翠萍. 2003 年 2 月 24 日新疆巴楚—伽师 M_s 6.8 地震的应力触发作用研究[J]. *西北地震学报*, 2006, 28(4): 335-340.
Wang Hai-cao, Wang Qiong, Zhao Cui-ping. Research on stress triggering of Bachu—Jiashi M_s 6.8 Earthquake on Feb. 24, 2003, in Xinjiang [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2006, 28(4): 335-340. (in Chinese)
- [38] 王俊, 孙业君, 詹小艳, 等. 2005 年江西九江—瑞昌 M_s 5.7 地震破裂参数及余震静态应力触发研究[J]. *地震研究*, 2011, 34(1): 52-58.
Wang Jun, Sun Ye-jun, Zhan Xiao-yan, et al. Investigation on rupture parameters of the 2005 M_s 5.7 Jiujiang—Ruicha Jiangxi earthquake and static stress triggering of its aftershocks[J]. *Journal of Earthquake Research* 2011, 34(1): 52-58. (in Chinese)
- [39] 万永革, 沈正康, 尚丹. 2005 年 10 月巴基斯坦 M_w 7.6 地震对余震的触发研究[J]. *中国地震*, 2006, 22(3): 277-286.
WAN Yong-ge, SHEN Zheng-kang, SHANG Dan. Study on triggering effect of the October, 2005 Pakistan M_w 7.6 earthquake on its aftershocks[J]. *China Earthquake*, 2006, 22(3): 277-286. (in Chinese)
- [40] 周龙泉, 马宏生, 夏红, 等. 2007 年苏门答腊 8.5 级、8.3 级地震强余震库仑破裂应力触发研究[J]. *地震*, 2008, 28(1): 40-46.
ZHOU Long-quan, MA Hong-sheng, XIA Hong, et al. Large aftershocks triggering by coulomb failure stress following the 2007 M_s 8.5 and 8.3 Sumatra great earthquakes[J].

- Earthquake, 2008, 28(1): 40-46. (in Chinese)
- [41] 汪建军, 许才军, 申文斌. 2010年 M_w 6.9级玉树地震同震库仑应力变化研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(10): 1207-1211.
WANG Jian-jun, XU Cai-jun, SHEN Wen-bin. The Coseismic coulomb stress changes induced by the 2010 Mw 6.9 Yushu earthquake, China and its implication to earthquake hazards[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(10): 1207-1211. (in Chinese)
- [42] 王莹, 吴小平, 赵韬. 震源参数因素对玉树地震库仑破裂应力图像及其与余震活动统计关系的影响[J]. 地震学报, 2011, 33(5): 595-604.
WANG Ying, WU Xiao-ping, ZHAO Tao. Influence of source parameters of the 2011 Yushu earthquake on its Coulomb failure stress calculation and on aftershock activity[J]. Acta Seismologica Sinica, 2011, 33(5): 595-604. (in Chinese)
- [43] 宋金, 蒋海昆. 2010年4月14日玉树 M_S 7.1地震对余震的触发研究[J]. 中国地震, 2011, 27(4): 396-402.
SONG Jin, JIANG Hai-kun. The static stress triggering influence of the Yushu M_S 7.1 earthquake [J]. China Earthquake, 2011, 27(4): 396-402. (in Chinese)
- [44] 单斌, 李佳航, 韩立波, 等. 2010年 M_S 7.1级玉树地震同震库仑应力变化以及对2011年 M_S 5.2级囊谦地震的影响[J]. 地球物理学报, 2012, 55(9): 3028-3042.
SHAN Bin, LI Jiang-hang, HAN Li-bo, et al. Coseismic Coulomb stress change caused by 2010 M_S 7.1 Yushu earthquake and its influence to 2011 M_S =5.2 Nangqen earthquake [J]. Chinese J. Geophys. 2012, 55(9): 3028-3042. (in Chinese)
- [45] 盛书中, 万永革, 程佳, 等. 2011年日本9.0级大地震的应力触发作用初步研究[J]. 地震地质, 2012, 34(2): 325-336.
SHENG Shu-zhong, WAN Yong-ge, CHENG Jia, et al. Primary research on the coulomb stress triggering of the 2011 M_w 9.0 tohoku earthquake [J]. Seismology and Geology, 2012, 34(2): 325-336.
- [46] 吴小平, 黄雍, 胡家富, 等. 汶川 M_S 8.0巨震产生的完全库仑破裂应力变化及其强余震群[J]. 地震研究, 2008, 31(4): 317-323.
WU Xiao-ping, HUANG Yong, HU Jia-fu, et al. Complete coulomb failure stress changes produced by the Wenchuan, Sichuan, M_S 8.0 earthquake and its strong aftershock swarms, Journal of Seismological Research, 2008, 31(4): 317-323. (in Chinese)
- [47] 钱琦, 韩竹军. 汶川地震对龙泉山断裂地震发生概率的影响研究[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(2): 489-497.
QIAN Qi, HAN Zhu-jun. The research in the change of the earthquake occurrence probability in Longquan Shan fault after the Wenchuan earthquake [J]. Progress in Geophys, 2011, 26(2): 489-497. (in Chinese)
- [48] 吴小平, 虎雄林, Michel Bouchon, 等. 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, D辑: 地球科学, 2007, 37(6): 746-752.
WU Xiao-ping, HU Xiong-lin, Michel Bouchon, et al. Complete coulomb failure stress changes and subsequent dynamic and static stress triggering, of the M_S 7.6 Lancang—Gengma, Yunnan [J]. Science in China (D): Earthquake Science, 2007, 37(6): 746-752. (in Chinese)
- [49] Jiankun He, Gilles Peltzer. Poroelastic triggering in the 9—22 January 2008 Nima—Gaize (Tibet) earthquake sequence [J]. Geology, 2010, 38(10): 907-910.
- [50] Troise C, De Natale G, Pingue F, et al. Evidence for static stress interaction among earthquakes in south—central Apennines (Italy) [J]. Geophys J int, 1998, 134: 809-817.
- [51] Shinji Toda, Jian Lin and Ross S. Stein. Using the 2011 $M=$ 9.0 Tohoku earthquake to test the Coulomb stress triggering hypothesis and to calculate faults brought closer to failure [R]. the Tohoku Earthquake Special Issue of Earth Planets Space, 2011.
- [52] Hardebeck J L, Nazareth J J, Hauksson E. The static stress change triggering model: Constraints from two southern California aftershock sequences [J]. J Geophys Res, 1998, 103: 24427-24437.
- [53] Harris R A, Simpson R W. Changes in static stress on southern California faults after the 1992 Landers earthquake [J]. Nature, 1992, 360: 251-254.
- [54] Stein R S, Barka A A, Dieterich J H. progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering [J]. Geophys. J. Int., 1997, 128: 594-604.
- [55] Ross S. Stein. The role of stress transfer in earthquake occurrence [J]. Nature, 1999, 402: 605-609.
- [56] Geoffrey C P King, Ross S Stein, Jian Lin. Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(3): 935-953.
- [57] Nalbant S S, Hubert A, King G C P. Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and the north Aegean Sea [J]. J. Geophys. Res., 1998, 103: 24469-24486.
- [58] 刘桂萍, 傅征祥. 海原大地震对古浪大地震静应力触发研究 [J]. 地球物理学报. 2011, 44: 107-115. 增刊.
LIU Gui-ping, FU Zheng-xiang. A study on the great Gulang earthquake triggered probably by stastic stress change resulting from the great Haiyuan earthquake [J]. Chinese J. Geophys, 2011, 44: 107-115. (in Chinese)
- [59] 万永革, 沈正康, 曾跃华, 等. 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 [J]. 地震学报, 2007, 29(2): 115-129.
WAN Yong-ge, SHEN Zheng-kang, ZENG Yue-hua, et al. Evolution of cumulative coulomb failure stress in northeastern Qinghai—Xizang (Tibetan) plateau and its effect on large earthquake occurrence [J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(2): 115-129. (in Chinese)
- [60] 韩竹军, 董绍鹏, 谢富仁, 等. 南北地震带北部5次(1561—1920) $M \geq 7$ 级地震触发关系研究 [J]. 地球物理学报, 2008, 51(6): 776-784. 2007, 29(2): 115-129.
HAN Zhu-jun, DONG Shao-peng, XIE Fu-ren, et al.

- Earthquake triggering by static stress: the 5 major earthquakes with $M \geq 7$ (1561—1920) in the northern section of South—north seismic Zone[J]. China. Chinese J. Geophys, 2008, 51(6):1776-1784. (in Chinese)
- [61] Simpson R W, P Reasenber. Earthquake-induced static—stress changes on Central California faults[J]. U. S. Geol. Surv. Prof. ,1994,1550:55-89.
- [62] Ruth A Harris. Earthquake stress triggers, stress shadows, and seismic hazard[J]. Current Science, 2000, 79(9):1215-1225.
- [63] Karen Felzer, Emily Brodsky. Testing the stress shadow hypothesis[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110, B05S09, doi:10.1029/2004JB003277.
- [64] Ruth A Harris, Robert W. Simpson. In the shadow of 1857—the effect of the great Ft. Tejon earthquake on subsequent earthquakes in southern California[J]. Geophysical Research Letters, 1996, 23(3):229-232.
- [65] Jaime S C, L R Sykes. Change in the state of stress on the southern San Andreas fault resulting from the California earthquake sequence of April to June 1992[J]. Science, 1992, 258:1325—1328.
- [66] Dieterich J. A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering[J]. Journal of Geology Research, 1994, 99: 2601-2618.
- [67] Toda S, Lin J, Meghraoui M, et al. 12 May 2008 M_w 7.9 Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems[J]. Geophys. Res. Lett. ,2008, 35(L17305):doi:10.1029/2008GL034903.
- [68] Shinji Toda, Ross S Stein, Keith Richards—Dinger. Bozkurt. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110, B05S16, doi: 10.1029/2004JB003415.
- [69] 高国英 聂晓红 龙海英. 近期新疆震源机制解与地震活动特征研究[J]. 西北地震学报, 2012, ,34(1):57-63.
GAO Guo-ying, NIE Xiao-hong, LONG Hai-yang. Research on the Characteristics of Recent Focal Mechanism Solution and Seismic Activity in Xinjiang Area[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(1):57-63. (in Chinese)
- [70] 黄伟, 江娃利. 四川龙泉山断裂带及其活动性与潜在地震危险性讨论[J]. 西北地震学报, 2012, 34(1):50-56.
HUANG Wei, JIANG Wa-li. Discussion on the late quaternary activity and earthquake risk potential of Longquanshan fault in Sichuan [J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(1):50-56. (in Chinese)