

DOI:10.13203/j.whugis20180149



文章编号:1671-8860(2018)12-2085-08

地震应力触发回顾与展望

许才军^{1,2,3} 汪建军^{1,2,3} 熊维^{1,4}

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

3 地球空间信息技术协同创新中心,湖北 武汉,430079

4 中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室),湖北 武汉,430071

摘要:地震大地测量学是现代大地测量学深入地球科学研究领域所产生的新学科分支,利用大地测量资料进行地震应力触发研究是地震大地测量学的主要研究方向之一,其对地震预测预报和防灾减灾都具有重要意义。首先介绍了基于库仑应力失稳准则的库仑应力模型,然后从静态应力触发、动态应力触发和粘弹性应力触发 3 个方面回顾了地震应力触发研究成果,最后展望了地震应力触发研究发展方向。

关键词:库仑应力变化;地震应力触发;静态应力触发;动态应力触发;粘弹性应力触发

中图分类号:P335

文献标志码:A

现代大地测量学的发展日渐深入到地球科学研究领域。地震大地测量学是随着现代大地测量学观测技术上的进步及其与地震学、地质学的交叉融合而产生的一门新的学科分支。地震大地测量学的基本任务是:以现代大地测量学的观测技术、理论和方法为基础,观测和研究现今地壳运动与变形,研究地震孕育发生的力学机制,探究地震发生的成因和探索地震预测的可行途径与方法等。利用现代大地测量资料进行地震应力触发研究是地震大地测量学的主要研究方向之一。地震应力触发狭义地讲是指地震发生后造成后续断层面受力状态改变,抑制或促进断层错动的现象,而广义地讲是指一切构造和非构造运动与地震活动之间的应力响应关系。刻画这种响应关系的定量指标即为库仑应力,其为地震或火山活动等所激发的应力张量在断层面上沿断层滑动方向的投影(剪切力)和沿断层法向的投影(正应力)的线性组合。库仑应力是研究断层面上应力状态和区域地震危险性的重要技术指标之一。断层面上的库仑应力变化可能影响后续地震的时空分布:库仑应力增加,可能促进后续地震的发生,而库仑应力减少,则可能延缓后续地震的发生。

本文从静态应力触发、动态应力触发和粘弹

性应力触发 3 个方面对过去 30 多年地震应力触发领域的研究成果进行了回顾和综述,并对地震应力触发研究方向进行了展望。

1 库仑应力模型和地震应力触发分类

1.1 库仑应力模型

地震应力触发的理论模型基于库仑失稳准则。该准则为:断层面所受剪切力与摩擦力之和若为正,则断层面倾向于滑动;若断层面法向应力为拉张正应力,则断层上下两盘易于张裂。反之则不然。基于这种准则,库仑失稳函数(Coulomb failure function, CFF)为^[1-2]:

$$\Delta CFF = \Delta\tau + \mu(\Delta\sigma_n + \Delta P) \quad (1)$$

其中, $\Delta\tau$ 为沿断层面滑动方向的剪应力变化; $\Delta\sigma_n$ 为沿断层面法向的正应力变化(张应力为正); ΔP 为孔隙压力变化; μ 为摩擦系数,一般 $\mu \in [0.6, 0.8]$ ^[3]。根据弹性力学知识,剪切力变化和正应力变化分别为: $\Delta\tau = \mathbf{s}^T \boldsymbol{\sigma} \mathbf{n}$, $\Delta\sigma_n = \mathbf{n}^T \boldsymbol{\sigma} \mathbf{n}$, 其中, \mathbf{s} 为断层滑动方向单位矢量; \mathbf{n} 为断层法向单位矢量; $\boldsymbol{\sigma}$ 为地震(或火山)激发的二阶应力张量。

利用式(1)计算地震库仑应力变化时,需要已

收稿日期:2018-05-02

项目资助:国家自然科学基金重点项目(41431069);国家自然科学基金(41574002,41774011);国家 973 计划(2013CB733303)。

第一作者:许才军,博士,教授,博士生导师,“长江学者奖励计划”特聘教授,主要研究方向为大地测量学与地球动力学。cixu@sgg.whu.edu.cn

通讯作者:汪建军,博士,副教授。jjwang@sgg.whu.edu.cn

知接收断层、源断层和位错理论。接收断层是指地震应力张量的投影面,其由断层面的走向、倾角和滑动角参数确定。源断层是指发震断层,其由断层几何模型和滑动位错分布确定。位错理论是

指用于计算地震所激发的二阶应力张量的一整套公式,包括弹性半空间位错理论^[4]和球体分层位错理论^[5]。如果以上3类信息已知,便可计算地震激发的库仑应力变化(见图1)。

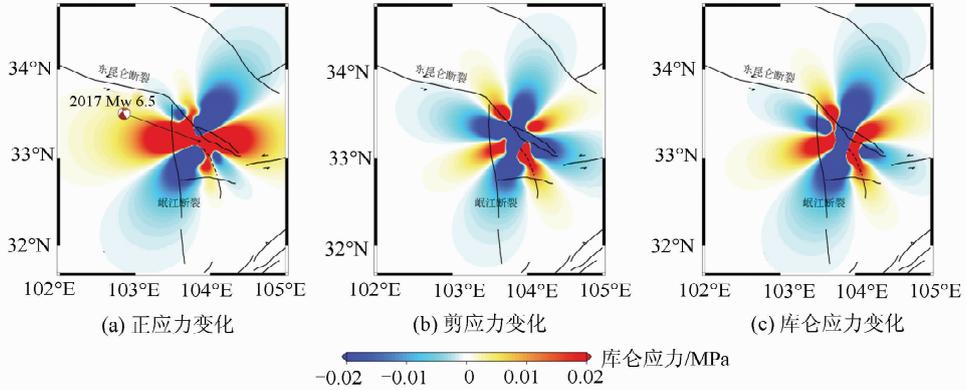


图1 2017年九寨沟地震激发的正应力变化、剪应力变化及同震库仑应力变化图像

Fig. 1 Subplots for the Changes in Normal Stress, Shear Stress and Coseismic Coulomb Stress Induced by the 2017 Jiuzhaigou Earthquake, Respectively

1.2 地震应力触发分类

地震周期大体上可分为同震、震间和震后3个阶段:在同震阶段,地震断层的快速错动导致周围地壳的永久形变,同时伴随地震波的快速震荡^[6],从而导致地壳介质应力状态产生瞬态变化;在震间阶段,震间应变积累造成板间及板内地震断层面的应力集中,当其突破临界状态时,将造成地震断层的快速错动、蠕滑和无震滑动等;在震后阶段,可能存在上地壳与具有粘弹性松弛性质的下地壳及上地幔间的应力耦合效应^[7]、断层面的震后余滑^[8]、地壳孔隙介质的孔隙回弹作用^[9]。由此,在整个地震周期中,地壳应力场的控制机制主要包括:同震阶段的断层错动;震间阶段的板块或块体的构造运动造成的断层闭锁段应变积累;震后阶段地震断层面的震后余滑、下地壳或上地幔的松弛、岩石介质中的流体恢复至静水平衡状态过程中的孔隙回弹。故依应力张量的来源,库仑应力可大致分为3类:静态库仑应力、动态库仑应力和粘弹性库仑应力。相应地,地震应力触发可分为静态应力触发、动态应力触发和粘弹性应力触发。

静态应力触发是指地震断层的同震错动造成地壳应力场的永久改变(地壳同震形变量不依赖于时间而发生变化)后的地震活动性变化。动态应力触发是指地震波传播过程中造成地壳介质的瞬时快速振荡,改变断层面的物理、化学性质及其应力状态,导致地震活动性增加。粘弹性库仑应力是指震后下地壳和上地幔粘弹性介质在震后松

弛过程中造成地壳应力场随时间而不断调整,改变接收断层所处的应力环境,影响地震断层受力状态。

2 地震应力触发研究进展

2.1 静态应力触发

静态应力触发研究主要采用断层同震滑动分布(或者火山Mogi模型)和位错模型计算同震应力张量,并结合前述库仑应力模型分析地震(或火山)的触发机制。静态库仑应力研究的经典震例是1992年6月28日发生在美国加州地区的Mw 7.3 Landers地震。Stein等^[10]研究认为,先前17年内所发生的小地震在此地震的震中产生了正的库仑应力变化。该地震的绝大多数余震位于库仑应力增加的区域。此次地震使得圣安德烈斯断层系统内部分断层面上库仑应力有所增加,预示着这些区域很可能是下一次大地震发生的危险地段。Landers地震震例研究涵盖了静态应力触发研究的3个主要研究方向:①主余震应力触发;②强震序列应力触发;③地震与断层相互作用。Stein等^[10]给出了静态库仑应力(亦称同震库仑应力)最优破裂面模型,并展示了其研究范式。

主余震触发的研究范式是:先计算同震库仑应力变化,然后统计余震触发率。Toda等^[11]在对2011年日本Tohoku-Oki地震同震库仑应力的研究中发现,该地震大部分的余震均位于主震激发的库仑应力升高区域;2015年尼泊尔地震同

震效应引起大部分震区库仑应力升高,余震主要分布在最大同震滑动等值线外部库仑应力升高区域^[12];2017 年 Mw 6.5 九寨沟地震激发的同震库仑应力变化仅在局部范围内超过 0.1×10^5 Pa,且 75% 的余震(约 12.7 d)受到该地震明显的同震应力触发作用^[13]。

强震序列应力触发的研究范式是:先计算强震序列中地震对同震库仑应力变化,然后分析每对地震间的同震应力触发关系。地震激发的正的静态库仑应力变化可能对后续地震的发生产生促进作用。如傅征祥等^[14]研究了青藏高原北缘 1920 年海原地震、1927 年古浪地震和 1932 年昌马地震三者之间的静应力触发关系,认为海原地震可能使古浪地震提前了 16~44 a 发生;Papadimitriou 等^[15]假定岩石圈为完全弹性,基于历史地震资料分析了鲜水河断裂历史地震所导致的库仑应力演化,发现历史强震均发生在之前地震所激发的库仑应力增强区域;2015 年尼泊尔地震的同震库仑应力加载作用同样提升了青藏高原南部地震活动性^[16]。另一方面,地震激发的负静态库仑应力变化可能对后续地震的发生产生抑制作用。如 1999 年 Hector Mine 地震被认为发生于 1992 年 Landers 地震的静态应力影区内^[17];Jia 等^[18]通过多种模型计算了 2008 年汶川 Mw 7.9 地震同震效应在 2017 年九寨沟 Mw 6.5 地震震源附近区域造成的应力扰动,认为汶川地震延迟了九寨沟地震的发生。

地震与断层相互作用的研究范式是:先计算地震激发的同震应力张量,然后将其投影到断层面上计算同震库仑应力变化,最后结合历史地震复发时间分析同震库仑应力升高和降低的断层段的地震危险性。Stein 等^[19]和 Nalbant 等^[20]研究了土耳其境内沿 Anatolian 断层区北段的大地震间的相互作用,发现大地震的发生与正库仑应力变化之间有强相关性,且均指出 1999 年 Mw = 7.4 Izmit 地震破裂区为未来大震危险段。McCloskey 等^[21]研究了 2004 年 Sumatra 地震,计算显示该地震在 Nias-Simeulue 段激发的静态库仑应力变化为正,表明此地段是未来地震的潜在地段,3 个月后在此处果然发生了 Mw 8.7 Nias 地震。2008 年 5 月 12 日,四川发生了 Mw 7.9 汶川地震,Toda 等^[22]研究结果显示此次地震对青藏高原东部的鲜水河段断层、昆仑断层和岷江断层的破裂起到加速作用。2015 年尼泊尔地震使其附近的喜马拉雅逆冲带和转换断层应力升高^[23]。2017 年九寨沟地震激发的同震库仑应力

也使岷江断层和东昆仑断层地震危险性提升^[24]。

2.2 动态应力触发

静态库仑应力一般随着离发震断层的距离倒数的 3 次方而迅速衰减^[2]。有些地震发生后在等距于一两个断层长度的距离之外也几乎同步有地震发生,甚至在数千公里以外亦如此。在这样的距离范围,静态库仑应力已经衰减得几乎可以忽略不计了,而地震波携带的动态应变能随距离衰减较慢,于是一些学者认为可能是地震波的振荡触发远程地震^[25]。1992 年美国加州发生的 Mw 7.3 Landers 地震是动态库仑应力触发的首个经典震例。这次地震使得与其震中相距 650 km 的内华达和加州地界、750 km 外的加州北部 Geysers 地热区,乃至 1 250 km 外的黄石国家公园出现大量震群^[26]。

自从对 1992 年 Mw 7.3 Landers 地震的分析证实了动态库仑应力触发的存在以来,世界各地纷纷出现动态库仑应力触发的震例报道。如东亚地区 2001 年以来的 4 次强震触发了北京附近八宝山断层和皇庄-高里营断层的小震活动^[27];2012 年东印度洋 M 8.6 地震在两天的时间内使全球 $M > 5.5$ 地震发生率升高了 $1/3$ ^[28];近年来, $M > 8.6$ 的逆冲带强震均使得其震中附近 10° 范围内的地震活动率升高^[29];2015 年尼泊尔地震所激发的 Rayleigh 波触发了中国重庆周边一系列 4 级左右的小震群^[30]。

动态应力既能触发远程地震,也能触发近场地震,因为在近场动态、静态应力变化都是存在的^[26]。Kilb 等^[31]研究了 1992 年加州 M 7.3 Landers 激发的静态库仑应力与动态库仑应力(完全库仑破裂应力)的空间分布与地震发生率变化的空间分布的关系,结果表明动态库仑应力能更好地解释地震发生率变化,特别是地震发生率变化的空间分布不对称性与动态库仑应力的空间分布不对称性之间有很好的—致性。

影响动态应力触发的因素具有多样性,如发震断层的走向、区域构造环境以及地震发生后地震波的振幅和频率以及断层本身对地震波的响应能力等等。但是动态应力触发的物理机制目前尚不清楚,近期研究认为动态应力触发更容易发生于张裂和转换断层或者富含孔隙水的区域^[32]。

2.3 粘弹性应力触发

地震发生后,下地壳和上地幔的粘弹效应会引发地壳应力场的持续调整。期间,应力转移会对后续地震产生迟滞或加速作用。采用粘弹性库仑应力来解释地震触发的经典震例是美国加州

1992 Mw 7.3 Landers 地震与 1999 Mw 7.1 Hector Mine 地震间的触发现象。Hector Mine 地震位于 Landers 地震所激发的同震应力影区内,然而 Freed 和 Lin^[17] 计算结果表明下地壳和上地幔的粘性流动导致 1999 年 Mw 7.1 Hector Mine 地震震中处的库仑应力增至 1~2 bars,从而合理解释了 Landers 地震与 Hector Mine 地震间的触发关系。2008 年汶川地震在 2013 年芦山地震震中区域激发的同震库仑应力变化低于 0.01 MPa^[33],也有研究认为芦山地震发生于汶川地震同震应力影区^[34]。不过,汶川地震的震后作用导致芦山地震震中区域应力持续升高,芦山地震震前其累积的库仑应力变化超过了 0.01 MPa^[33,35]。Segou 等^[36] 通过计算墨西哥俯冲带过去 40 年间历史强震导致的同震及震后应力变化,认为历史地震活动促进了近期两次强震的发生。

静态库仑应力一般在一两个断层长度的范围内发生作用,动态库仑应力虽可导致远程地震触发,但在作用时段上一般限于地震波的瞬时震荡期间,而下地壳和上地幔的粘性物质的流动造成的震后地壳应力场重新分配过程在空间上既可以发生在近场,又可在远场,在时间上既可以是短期的,又可以是长期的。这种断层同震错动所激发的下地壳和上地幔物质的粘弹性松弛,可以在全时段和全空间内导致地壳应力场的重新分配。

2.4 地震周期中的应力触发

地震周期中的应力触发研究范式是:基于地震断层的滑动分布和地震周期中同震、震后和震间位错模型正演地壳应力场的时空演化,然后借助库仑应力模型分析地震相继触发、断层相互作用以及地震与断层活动的耦合模式。喜马拉雅逆冲带区域构造运动强烈,历史强震频发,使其成为了断裂带地震周期内应力时空演化研究的热点区域,Cattin 等^[37] 研究了喜马拉雅主山前逆冲断裂在尼泊尔境内 350 年非震滑动所产生的构造应力积累,发现应力高值区分布于断裂深部 15~20 km 处,其与历史地震集中区域相符;Bollinger 等^[38] 基于大地测量资料和小微震分布,模拟了喜马拉雅地区构造应力演化,发现喜马拉雅地区构造运动对藏南正断层的形成存在促进作用;Xiong 等^[39] 综合分析了喜马拉雅主逆冲断裂历史强震引起的同震、震后及震间应力变化,发现喜马拉雅主逆冲断裂存在 4 处应力高值区,其与断裂带地震空区相符。

近年来,针对活动断裂带的地震周期库仑应力时空演化研究出现了一些新的动向。如 Shan 等^[40] 顾及同震、震后粘弹性应力变化及震间构造

应力积累,获取了鲜水河-小江断裂 1713 年以来库仑应力演化情况,认为历史强震基本发生于先前地震所激发的库仑应力正区,此外,鲜水河断裂康定段附近存在 100 km 左右的应力高值区,可能预示其较高的地震危险性,该结果与 Shao 等^[41] 的结论相接近;Wang 等^[42] 综合分析了巴颜喀拉块体内部及周边 1411 年以来的 $M>6$ 的历史地震所激发的同震及震后应力变化,获得了巴颜喀拉块体周边主要断层的应力演化图像,认为近期发生于巴颜喀拉块体周缘的多次强震均受到之前地震的促进作用。

2.5 强震复发概率预测

研究库仑应力触发的最终目的是成功实现地震预测。Stein 等^[19] 首次将用速率-状态摩擦定律描述的库仑应力转移过程同地震概率预测相结合。Hardebeck^[43] 发展了一种用库仑应力变化来表达地震发生概率的新方法,并应用到美国加州 1992 年 Mw 7.3 Landers 地震对 San Andreas 断层上的大震发生概率的影响。Gomberg 等^[44] 基于广义速率-状态摩擦模型并结合静态库仑应力转移建立了地震概率预测统一数学框架。Parsons^[45] 研究了因应力转移所造成的地震发生概率对其参量的敏感度。Toda 等^[22] 分析了 2008 年汶川地震对周边 3 个主断层系统的应力和地震活动性的扰动,评估了未来 10 年间 6 级和 7 级以上地震的发生概率。Shao 等^[41] 分析了汶川地震周边强震同震弹性效应及震后粘滞松弛效应引起的库仑应力变化,以鲜水河断裂带为例修正了其地震长期发生概率。利用现代大地测量观测资料并结合先进的数值模拟分析方法,进行地震库仑应力时空演化研究是地震危险性评估的有效方法,也是促使地震预测由经验预测转向物理预测的重要途径。

3 存在的问题

回顾过去近 30 年的发展历程,在以静态应力触发、动态应力触发和粘弹性应力触发为代表的三大分支的应力触发研究已取得长足的进展:发现了主震余震间、相邻强震间彼此耦合的普遍性;增加了应力触发的分析样本;拓展了应力触发研究的空间范围;提高了应力触发研究的时间尺度;加深了对断层相互作用、地震应力触发的物理机制的认识;研究了断裂带应力状态时空演化规律,并与地震物理预测模型相联系;评估了大量板间及板内地震断层带的地震空区,尤以对 1999 年发生在土耳其的 Izmit 地震以及 2005 年发生在苏门答腊附

近的 Nias 地震发震区域的成功预测而有力地推进了应力触发研究的深度和广度。然而,库仑应力触发领域仍存在一些尚待解决的问题。

3.1 库仑应力的可靠性问题

根据前述库仑应力数学模型,库仑应力的影响因素有 4 类:应力张量、接收断层、孔隙压力模型、摩擦系数,其中应力张量又和发震断层的滑动分布、发震断层的破裂模式及位错模型有关,其中任一因素的变动都会影响应力触发最终结论的可靠性,但上述因素均难以精确厘定。国外部分学者研究了发震断层模型误差、接收断层参数误差、格网划分误差对库仑应力的影响及速率-状态摩擦模型参数对地震活动性的影响^[46]。如 Wang 等^[47]在库仑应力数学模型的基础上研究了各项参数误差对应力计算结果的影响,给出了误差传播律,并将其应用于汶川地震震例中。在未来研究中,一方面要对应力触发的理论框架进一步重构,如在应力触发模型中引入随机性,建立起应力触发模型的精度评价体系;另一方面要开展基于高精度、高分辨率形变场的断层精细滑动分布反演研究。

3.2 库仑应力的触发阈值问题

虽然许多研究将 0.01 MPa 作为判定应力触发的阈值^[19,40-41],但是已有研究表明应力触发不存在阈值^[48]。近年来,部分库仑应力触发的研究并不论及应力触发阈值,转而将应力变化量与未来地震发生的提前/延迟时间量联系起来,如 Shan 等^[49]通过计算玉树地震同震库仑应力变化和周边断裂带震间构造运动加载速率,认为玉树地震所激发的同震应力变化相当于甘孜-玉树断裂当江段 6 年的构造应力积累量,因此推测该区域下一次的强震发生时间将提前 6 年;Wang 等^[35]的结果表明,相较于长期构造运动加载速率,汶川地震的同震及震后效应使芦山地震提前了 28.4 ~ 59.3 a 发生。这种对应力变化量的解释方式相较于阈值判定法在逻辑上或许更严密。

3.3 最佳破裂面问题

在主余震触发关系的研究中,常假设余震发生于最优破裂面上^[50]。最佳破裂面假设认为断层失稳受控于构造应力场和地震激发的应力场,其叠加应力场决定库仑应力变化最大的断层失稳面,亦即最优破裂面。但是,有关最优破裂面假设的严格论证还未见诸文献。另外,计算最优破裂面需要已知地壳构造应力场分布,然而该分布很难精确获得。未来应加强对重点监测区域的构造应力场观测,并结合高精度、高分辨率形变场反演精细的地壳应力场,以此作为最优破裂面的背景

构造应力场约束。

4 结语与展望

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)和 InSAR(interferometric synthetic aperture radar)两大现代空间大地测量技术的广泛应用,极大地提高了获取地壳形变场的时空分辨率。新一代对地观测技术的发展将进一步丰富地壳形变的数据集,从而不断提高同震、震后及震间断层滑动位错分布的时空分辨率。如新一代高频 GNSS 网的组建将提供更丰富的、用于表征地震与地壳形变耦合关系的数据集;升降轨、极化、多工作模式、更短重复轨道周期的 InSAR 卫星编队飞行更可以提供大范围、高时空分辨率的同震、震间、震后形变场。高精度、高分辨率的三维形变场数据可以用于反演地震断层的精细滑动分布和下地壳及上地幔的流变参数,从而推知整个地震周期过程中地壳库仑应力的局部变化,加深对控制岩石圈应力应变演化的瞬态过程的认识以及对整个断层系统相互作用的理解。

此外,采用边界元方法模拟计算湖库水负荷形变和季节性形变造成的地震断层面上库仑应力变化,并深入研究其与可能诱发的地震之间的关系也是重要的研究方向之一^[51]。利用波形匹配滤波技术探测长序列余震目录并分析精细的主余震应力触发关系,有助于进一步认识主余震的库仑应力触发模式^[52]。井下注水注气射流所造成的岩石孔隙压力变化和小地震群激发的库仑应力变化与地震发生之间的应力触发关系也值得深入研究^[53]。俯冲带慢滑移事件与后续强震的应力触发定量研究,将有利于进一步揭示俯冲板片上的库仑应力时空演化规律,阐明俯冲带逆冲型和正断型地震之间以及慢滑移事件与地震之间的各自应力相互作用机制^[54]。此外,断层蠕滑事件对板内地震激发的库仑应力变化响应研究,将有助于分辨静态库仑应力和动态库仑应力在蠕滑事件中占据的不同作用地位^[55]。

实现地震预测是人类梦寐以求的目标,而地震本身作为地球巨系统中的自然现象之一又是极为复杂的,因此多学科综合协同研究就显得极为必要。随着未来理论建模水平的不断提高和空间对地观测技术以及人工智能与高性能计算技术的不断进步,地震断层的几何形态、滑动习性和滑动分布及其深层作用的物理控制机理的认识水平必定会不断提高,并有力地推进人类实现地震预测

目标的最终进程。

参 考 文 献

- [1] King G C P, Stein R S, Lin J. Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes [J]. *Bull Seismol Soc Am*, 1994, 84(3):935-953
- [2] Steacy S, Gomberg J, Cocco M. Introduction to Special Section: Stress Transfer, Earthquake Triggering, and Time-Dependent Seismic Hazard [J]. *J Geophys Res*, 2005, 110(B05S01):1-12
- [3] Cocco M, Rice J R. Pore Pressure and Poroelasticity Effects in Coulomb Stress Analysis of Earthquake Interactions [J]. *J Geophys Res*, 2002, 107(B2):1-17
- [4] Okada Y. Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-space [J]. *Bull Seismol Soc Am*, 1992, 82(2):1 018-1 040
- [5] Pollitz F F. Postseismic Relaxation Theory on a Spherical Earth [J]. *Bull Seismol Soc Am*, 1992, 82(1):422-453
- [6] Hill D P, Reasenber P A, Michael J, et al. Seismicity Remotely Triggered by the Magnitude 7. 3 Landers, California, Earthquake [J]. *Science*, 1993, 260(5 114):1 617-1 623
- [7] Nalbant S S, McCloskey J. Stress Evolution Before and After the 2008 Wenchuan, China Earthquake [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2011, 307(1):222-232
- [8] Zhao B, Bürgmann R, Wang D, et al. Dominant Controls of Downdip Afterslip and Viscous Relaxation on the Postseismic Displacements Following the Mw 7. 9 Gorkha, Nepal, Earthquake [J]. *J Geophys Res*, 2017, 122(10):8 376-8 401
- [9] Jónsson S, Segall P, Pedersen R, et al. Post-Earthquake Ground Movements Correlated to Pore-pressure Transients [J]. *Nature*, 2003, 424(6 945):179-183
- [10] Stein R S, King G C P, Lin J. Change in Failure Stress on the Southern San Andreas Fault System Caused by the 1992 Magnitude=7. 4 Landers Earthquake [J]. *Science*, 1992, 258(5 086):1 328-1 332
- [11] Toda S, Lin J, Stein R S. Using the 2011 Mw 9. 0 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake to Test the Coulomb Stress Triggering Hypothesis and to Calculate Faults Brought Closer to Failure [J]. *Earth Planet Space*, 2011, 63:725-730
- [12] Xiong Wei, Tan Kai, Liu Gang, et al. Coseismic and Postseismic Coulomb Stress Changes on Surrounding Major Faults Caused by the 2015 Nepal Mw 7. 9 Earthquake [J]. *Chinese J Geophys*, 2015, 58(11): 4 305-4 316(熊维,谭凯,刘刚,等. 2015年尼泊尔 Mw 7. 9 地震对青藏高原活动断裂同震、震后应力影响 [J]. *地球物理学报*, 2015, 58(11): 4 305-4 316
- [13] Wang Jianjun, Xu Caijun. Coseismic Coulomb Stress Changes Associated with the 2017 Mw 6. 5 Jiuzhaigou Earthquake (China) and Its Impacts on Surrounding Major Faults [J]. *Chinese J Geophys*, 2017, 60(11): 4 398-4 420(汪建军, 许才军. 2017年 Mw 6. 5 九寨沟地震激发的同震库仑应力变化及其对周边断层的影响 [J]. *地球物理学报*, 2017, 60(11):4 398-4 420)
- [14] Fu Zhengxiang, Liu Guiping, Chen Qifu. Dynamic Analysis on Interaction Between the Haiyuan-Gulang-Changma Great Earthquake in the North Boundary of the Tibetan Plateau [J]. *Seismol Geol*, 2001, 23(1):35-42(傅征祥,刘桂萍,陈棋福. 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 [J]. *地震地质*, 2001, 23(1):35-42)
- [15] Papadimitriou E, Wen X Z, Karakostas V, et al. Earthquake Triggering Along the Xianshuihe Fault Zone of Western Sichuan, China [J]. *Pure Appl Geophys*, 2004, 161:1 683-1 707
- [16] Li L, Yao D, Meng X, et al. Increasing Seismicity in Southern Tibet Following the 2015 Mw 7. 8 Gorkha, Nepal Earthquake [J]. *Tectonophysics*, 2016, 714:62-70
- [17] Freed A M, Lin J. Delayed Triggering of the 1999 Hector Mine Earthquake by Viscoelastic Stress Transfer [J]. *Nature*, 2001, 411:180-183
- [18] Jia K, Zhou S, Zhuang J, et al. Did the 2008 Mw 7. 9 Wenchuan Earthquake Trigger the Occurrence of the 2017 Mw 6. 5 Jiuzhaigou Earthquake in Sichuan, China? [J]. *J Geophys Res*, 2018, doi: 10. 1002/2017JB015165
- [19] 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
- [20] 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(B10):24 469-24 486
- [21] McCloskey J, Nalbant S S, Steacy S. Indonesian Earthquake: Earthquake Risk from Coseismic Stress [J]. *Nature*, 2005, 434(7 031):291
- [22] Toda S, Lin J, Meghraoui M, et al. 12 May 2008 M = 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):1-6
- [23] Wan Yongge, Sheng Shuzhong, Li Xiang, et al.

- Stress Influence of the 2015 Nepal Earthquake Sequence on Chinese Mainland [J]. *Chinese J Geophys*, 2015, 58(11):4 277-4 286 (王永革, 盛书中, 李祥, 等. 2015 年尼泊尔强震序列对中国大陆的应力影响 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(11):4 277-4 286)
- [24] Shan B, Zheng Y, Liu C L, et al. Coseismic Coulomb Failure Stress Changes Caused by the 2017 $M 7.0$ Jiuzhaigou Earthquake, and Its Relationship with the 2008 Wenchuan Earthquake [J]. *Sci China Earth Sci*, 2017, 60(12):1-9
- [25] Brodsky E E, Elst N J V D. The Uses of Dynamic Earthquake Triggering [J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2014, 42(1):317-339
- [26] Freed A M. Earthquake Triggering by Static, Dynamic, and Postseismic Stress Transfer [J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2005, 33:335-367
- [27] Wu C, Peng Z, Wang W, et al. Dynamic Triggering of Shallow Earthquakes Near Beijing, China [J]. *Geophys J Int*, 2011, 185(3):1 321-1 334
- [28] Pollitz F F, Stein R S, Sevilgen V, et al. The 11 April 2012 $M = 8.6$ East Indian Ocean Earthquake Triggered Large Aftershocks Worldwide [J]. *Nature*, 2012, 490(7 419):250-253
- [29] Gombert J, Sherrod B. Crustal Earthquake Triggering Bymodern Great Earthquakes on Subduction Zone Thrusts [J]. *J Geophys Res*, 2014, 119:1 235-1 250
- [30] Han L, Peng Z, Johnson C W, et al. Shallow Microearthquakes Near Chongqing, China Triggered by the Rayleigh Waves of the 2015 $M 7.8$ Gorkha, Nepal Earthquake [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2017, 479:231-240
- [31] Kilb D, Gombert J, Bodin P. Earthquake Triggering by Dynamic Stress [J]. *Nature*, 2000, 408:570-574
- [32] Prejean S G, Hill D P. The Influence of Tectonic Environment on Dynamic Earthquake Triggering: A Review and Case Study on Alaskan Volcanoes [J]. *Tectonophysics*, 2018, 745:293-304
- [33] Xu Jing, Shao Zhigang, Ma Hongsheng, et al. Impact of the 2008 Wenchuan 8.0 and the 2013 Lushan 7.0 Earthquakes Along the Longmenshan Fault Zone on Surrounding Faults [J]. *Earthquake*, 2014, 34(4):40-49 (徐晶, 邵志刚, 马宏生, 等. 汶川 8.0 级地震和芦山 7.0 级地震对周边断层的影响 [J]. 地震, 2014, 34(4):40-49)
- [34] Lei Xinglin, Ma Shengli, Su Jinrong, et al. Inelastic Triggering of the 2013 $M 6.6$ Lushan Earthquake by the 2008 $M 7.9$ Wenchuan Earthquake [J]. *Seismol Geol*, 2013, 35(2):411-422 (雷兴林, 马胜利, 苏金蓉, 等. 汶川地震后中下地壳及上地幔的粘弹性效应引起的应力变化与芦山地震的发生机制 [J]. 地震地质, 2013, 35(2):411-422)
- [35] Wang Y, Wang F, Wang M, et al. Coulomb Stress Change and Evolution Induced by the 2008 Wenchuan Earthquake and Its Delayed Triggering of the 2013 $M 6.6$ Lushan Earthquake [J]. *Seismol Res Lett*, 2014, 85(1):52-59
- [36] Segou M, Parsons T. Testing Earthquake Links in Mexico from 1978 to the 2017 $M = 8.1$ Chiapas and $M = 7.1$ Puebla Shocks [J]. *Geophys Res Lett*, 2018, 45:708-714
- [37] Cattin R, Avouac J P. Modeling Mountain Building and the Seismic Cycle in the Himalaya of Nepal [J]. *J Geophys Res*, 2000, 105(B6): 13 389-13 407
- [38] Bollinger L, Avouac J P, Cattin R, et al. Stress Buildup in the Himalaya [J]. *J Geophys Res*, 2004, 109: B11405
- [39] Xiong W, Tan K, Qiao X J, et al. Coseismic, Postseismic and Interseismic Coulomb Stress Evolution Along the Himalayan Main Frontal Thrust Since 1803 [J]. *Pure Appl Geophys*, 2017, 174:1 889-1 905
- [40] Shan B, Xiong X, Wang R J, et al. Coulomb Stress Evolution Along Xianshuihe-Xiaojiang Fault System Since 1713 and Its Interaction with Wenchuan Earthquake, May 12, 2008 [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2013, 377-378 (5):199-210
- [41] Shao Z, Xu J, Ma H, et al. Coulomb Stress Evolution over the Past 200 Years and Seismic Hazard Along the Xianshuihe Fault Zone of Sichuan, China [J]. *Tectonophysics*, 2016, 670:48-65
- [42] Wang J J, Xu C J, Freymueller J T, et al. Probing Coulomb Stress Triggering Effects for a $M > 6.0$ Earthquake Sequence from 1997 to 2014 Along the Periphery of the Bayan Har Block on the Tibetan Plateau [J]. *Tectonophysics*, 2017, 694:249-267
- [43] Hardebeck J L. Stress Triggering and Earthquake Probability Estimates [J]. *J Geophys Res*, 2004, 109: B04310
- [44] Gombert J, Belardinelli M E, Cocco M, et al. Time-Dependent Earthquake Probabilities [J]. *J Geophys Res*, 2005, 110: B05S04
- [45] Parsons T. Significance of Stress Transfer in Time-Dependent Earthquake Probability Calculations [J]. *J Geophys Res*, 2005, 110: B05S02
- [46] Cattania C, Hainzl S, Wang L, et al. Propagation of Coulomb Stress Uncertainties Inphysics-based Aftershock Models [J]. *J Geophys Res*, 2014, 119:7 846-7 864
- [47] Wang J J, Xu C J, Freymueller J, et al. Sensitivity

- of Coulomb Stress Change to the Parameters of the Coulomb Failure Model; A Case Study Using the 2008 Mw 7.9 Wenchuan Earthquake [J]. *J Geophys Res*, 2014, 119(4): 3 371-3 392
- [48] Ziv A, Rubin A M. Static Stress Transfer and Earthquake Triggering: No Lower Threshold in Sight? [J]. *J Geophys Res*, 2000, 105(B6): 13 631-13 642
- [49] Shan B, Xiong X, Zheng Y, et al. The Co-seismic Coulomb Stress Change and Expected Seismicity Rate Caused by 14 April 2010 Ms = 7.1 Yushu, China, Earthquake [J]. *Tectonophys*, 2011, 510(3-4): 345-353
- [50] Jónsson S. Stress Interaction Between Magma Accumulation and Trapdoor Faulting on Sierra Negra Volcano, Galápagos [J]. *Tectonophys*, 2009, 471(1-2): 36-44
- [51] Kraner M L, Holt W E, Borsa A A. Seasonal Non-tectonic Loading Inferred from cGPS as a Potential Trigger for the M 6.0 South Napa Earthquake [J]. *J Geophys Res*, 2018, 123: 5 300-5 322
- [52] Yin X Z, Chen J H, Peng Z G, et al. Evolution and Distribution of the Early Aftershocks Following the 2008 Mw 7.9 Wenchuan Earthquake in Sichuan, China [J]. *J Geophys Res*, 2018, doi: 10. 1029/2018JB015575
- [53] Brown M R M, Ge S. Small Earthquakes Matter in Injection-Induced Seismicity [J]. *Geophys Res Lett*, 2018, 45: 5 445-5 453
- [54] Radiguet M, Perfettini H, Cotte N, et al. Triggering of the 2014 Mw 7.3 Papanao Earthquake by a Slow Slip Event in Guerrero, Mexico [J]. *Nat Geosci*, 2016, 9(11): 829-833
- [55] Xu X, Ward L, Jiang J, et al. Surface Creep Rate of the Southern San Andreas Fault Modulated by Stress Perturbations from Nearby Large Events [J]. *J Geophys Res*, 2018, doi: 10. 1029/2018GL080137

Retrospection and Perspective for Earthquake Stress Triggering

XU Caijun^{1,2,3} WANG Jianjun^{1,2,3} XIONG Wei^{1,4}

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

4 Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, China

Abstract: Earthquake geodesy is a new branch of modern geodesy, which was generated as a result of its thorough applications to various geoscience problems. Earthquake stress triggering based on geodetic data is one of the main research directions of earthquake geodesy, which is of great significance to earthquake prediction and disaster prevention and mitigation. This paper reviews and summarizes the researches on earthquake stress triggering from three aspects: static stress triggering, dynamic stress triggering and viscoelastic stress triggering, and introduces the latest progresses of relevant studies on earthquake stress triggering. The future development for the realm of earthquake stress triggering is also in prospect.

Key words: Coulomb stress change; earthquake stress triggering; static stress triggering; dynamic stress triggering; viscoelastic stress triggering

First author: XU Caijun, PhD, professor, Distinguished Professor of Changjiang Scholars Program of China, specializes in geodesy and geodynamics. E-mail: cjxu@sgg.whu.edu.cn

Corresponding author: WANG Jianjun, PhD, associate professor. E-mail: jjwang@sgg.whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (Key Program), No. 41431069; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41574002, 41774011; the National Basic Research Program (973 Program) of China, No. 2013CB733303.