

王璞,王成虎,武志德,等.基于案例分析的库仑应力变化触发地震机理探索[J].地震工程学报,2019,41(4):1006-1016.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.1006
WANG Pu, WANG Chenghu, WU Zhide, et al. Exploration of the Mechanism of Earthquake Triggering by Coulomb Stress Change Based on a Case Analysis[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4): 1006-1016. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.1006

基于案例分析的库仑应力变化触发地震机理探索

王璞^{1,2}, 王成虎^{1,2}, 武志德³, 孙军昌³, 贾晋^{1,2}, 侯正阳^{1,2,4}, 杨汝华^{1,2,4}

(1. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085; 2. 中国地震局地壳动力学重点实验室, 北京 100085;
3. 中国石油勘探开发研究院河北省廊坊分院, 河北 廊坊 065007; 4. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要:在许多地震触发研究案例中,不少学者都利用大地震造成的库仑应力变化研讨其对后续地震的影响,但众多结果中存在的共同规律尚未得到很好的统计与归纳。基于库仑应力变化理论,通过统计多个地震序列与典型事件中库仑应力研究结果,分别从震级、触发距离、触发地震库仑应力变化(ΔCFS)以及触发时间4个方面进行分析。结果表明,静态库仑应力的最优影响范围在5~50 km间,触发地震的应力条件多在0.01~0.4 MPa,触发地震震级与距离和主震震级无明显对应关系;动态触发的作用范围在100~2500 km间,主震震级通常较高,触发地震的震级都小于主震震级,在几个典型远程触发的事件分析中,主震震级与可触发距离呈正相关,但触发次数与其他所分析因素均无关;震后应力转移的三种机制,从理论上合理地解释了长时间尺度延迟触发的现象,但精确计算应力转移的量值可能对库仑应力变化与触发地震之间关系的更合理解释有推动作用,需引起关注。

关键词: 库仑应力变化; 静态触发; 动态触发; 震后应力转移

中图分类号: P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2019)04-1006-12
DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.1006

Exploration of the Mechanism of Earthquake Triggering by Coulomb Stress Change Based on a Case Analysis

WANG Pu^{1,2}, WANG Chenghu^{1,2}, WU Zhide³, SUN Junchang³, JIA Jin^{1,2},
HOU Zhenyang^{1,2,4}, YANG Ruhua^{1,2,4}

(1. Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Agency, Beijing 100085, China;
2. Key Laboratory of Crustal Dynamics, China Earthquake Agency, Beijing 100085, China;
3. Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang 065007, Hebei, China;
4. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In many cases of seismic triggering, several scholars have studied the effects of Coulomb stress changes caused by large earthquakes on subsequent earthquakes. In this study, based on the Coulomb stress change theory and through the statistics of the Coulomb stress results in the study of some earthquake sequences and typical events, we carried out the analysis from four

收稿日期: 2018-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(41574088); 中国大陆综合地球物理场观测仪器研发专项项目(Y201706)

第一作者简介: 王璞,男,固体地球物理专业,在读硕士研究生。E-mail: wangpu171@mails.ucas.ac.cn.

通信作者: 王成虎,男,研究员,研究方向为地应力与地质力学。E-mail: huchengwang@163.com.

aspects; magnitude, triggering distance, Coulomb stress change, and triggering time. The results show that the optimal influence range of static Coulomb stress is 5—50 km, and the stress condition of triggering earthquakes is usually 0.01—0.4 MPa; however, the triggering magnitude has no clear correlation with the distance and the magnitude of the main shock. The range of dynamic triggering is mostly 100—2 500 km; the magnitude of the main shock is always high, and the magnitudes of the triggered earthquakes are all smaller than that of the main shock. The magnitude of the main earthquake is positively correlated with the triggering distance, but the triggering times are independent of other factors in the analysis of several typical remote triggering events. The phenomenon of delay triggering in a long-term scale is reasonably explained by three mechanisms of post-earthquake stress transfer, but the accurate calculation of stress transfer may have a positive effect on the reasonable interpretation of the relationship between Coulomb stress change and earthquake triggering.

Keywords: coulomb stress change; static triggering; dynamic triggering; post-earthquake stress transfer

0 引言

在地球物理学界,以库仑破裂准则为基础探讨地震的应力触发,即地震引起的库仑应力变化与余震分布关系以及触发地震的可能性,已经成为当前研究热点之一^[1]。许多地震余震分布研究都与静态库仑应力计算相关,如 Nostro 等^[2]通过库仑应力增加有关的地震触发机理解释了 1980 年伊尔皮尼亚正断层所发生的地震序列;Stein 等^[3]系统考察了 1979 年加州地震造成沿破裂面的库仑应力变化和后续余震分布关系;King 等^[4]计算了 1992 年兰德斯 7.3 级地震造成破裂面附近沿最优方向的库仑应力变化,并在 1994 年发表了一篇关于静态库仑应力变化计算的综述文章,讨论了在接收断层未知的情况下,通过测定最危险滑动面从而预测余震分布;Stein 等^[3]计算在 1939—1992 年间发生在土耳其北安纳托利亚断裂带 10 个 6.7 级以上地震的库仑破裂应力演化过程,发现其中 90% 的地震是被先前地震触发的。这些研究大都表明强震造成的库仑应力增加有利于附近区域余震或是后续地震的发生,从而可以通过计算静态库仑应力对后续触发地震的趋势进行估计。

地震的触发也在区域断层网络之外被观察到,这类地震触发现象通常被称为动态触发或远程触发,意味着强震可以造成远距离的应力变化。例如 1992 年 6 月 28 日加利福尼亚兰德斯 7.3 级地震发生之后,距离兰德斯震中 1 250 km 的地方地震活动性突然增加^[5-6]。加利福尼亚长谷地区和间歇泉地区在兰德斯地震产生的 Love 和 Rayleigh 面波到达后地震活动性就出现增加,3.5 小时之后发生了大

熊地震,离震中 280 km 处发生了小骷髅山 $M_s 5.4$ 地震(约 22 小时后),其西部的地震活动性至少持续了一个月^[7];Pankow 等^[8]估算了德纳里峰地震后,距离 3 000 km 远的犹他州的峰值动应力范围为 0.12~0.35 MPa,这一量级的应力变化足以触发地震。与“远距离”触发相对应,震后应力转移的观点解释了如同“1992 年兰德斯地震是如何引发了 1999 年的海克特矿震”这类“大时间”尺度上的地震触发与一些余震群集的问题^[9-11]。

之前的研究大都以一个或几个地震事件为研究对象,计算应力变化与触发地震之间的联系,没有从多个地震事件的角度出发,寻找地震触发事件的一些“共通”的特点。本文列举了众多库仑应力的经典研究案例,在之前许多库仑应力计算结果的基础上,通过详细统计不同典型事件的库仑应力计算研究中主震震级、震中距离、触发地震震级以及库仑应力变化的具体量值,探讨它们之间一些可能对应关系,分析了动态触发与震后应力转移的一些特点,为今后在可能触发地震地区的跨断层应力监测提供一些可供参考的依据。

1 静态触发

库仑破裂准则是在实验室中测量岩石试样的剪应力和正应力时形成的。在岩石测量领域库仑破裂准则被广泛应用,试验表明受压岩石的破裂近似遵守库仑破裂准则,而且也与很多的实际观测相符^[10]。这一准则同样在地球物理学界也受到众多的关注和应用,地震引起的应力变化大小,即库仑破裂应力(CFS)根据库仑破裂假设被定义为:

$$CFS = \tau + \mu(s + p) - S \tag{1}$$

其中： τ 为断层面上剪切应力的大小； s 是断面上的正应力（拉伸为正）； p 是孔隙压力； S 是内聚力； μ 是摩擦系数。如果假设 μ 和 S 始终为常数，可以利用 CFS 估计值计算邻近断层区域的剪应力和正应力的变化情况。如果我们不知道断层上应力的完整数据，也可以用下式计算库仑应力的变化^[4]：

$$\Delta CFS = \Delta \tau + \mu(\Delta s + \Delta p) \tag{2}$$

式中： $\Delta \tau$ 、 Δs 、 Δp 分别为剪应力、正应力与孔隙水压力的变化大小。库仑应力变化理论被成功运用到稳定断层上，从这之中可以推断出一个断层是快要发生地震（库仑应力增加， $\Delta CFS > 0$ ）还是不易发生地震（库仑应力减少， $\Delta CFS < 0$ ）。因此处于稳定或是应力阴影内的断层，可以计算其从长期构造应力载荷下恢复到静态应力所需要的时间变化，其可以简单地表示为 $\Delta CFS / \tau$ 。通常认为孔隙流体压力变化与正应力变化成正比^[12]，所以可以定义一个有效摩擦系数如下：

$$\mu' = \mu(1 - B) \tag{3}$$

其中： μ' 是有效摩擦系数； B 是 Skempton 系数，岩石实验通常认为它介于 0.5 ~ 0.9 之间^[13]，同震应力变化研究中的有效摩擦系数的变化范围为 0 ~ 0.75，通常使用平均值 $\mu = 0.4$ 。

很多已经公开出版的静态库仑应力变化计算值都是 1992 年加利福尼亚南部 7.3 级的兰德斯地震之后得出的，该地震库仑应力的计算结果为图 1，可以明显看出在兰德斯—约书亚树—大熊地震序列中，多数余震（白色圆圈）都处于计算得到的库仑应力增加区。

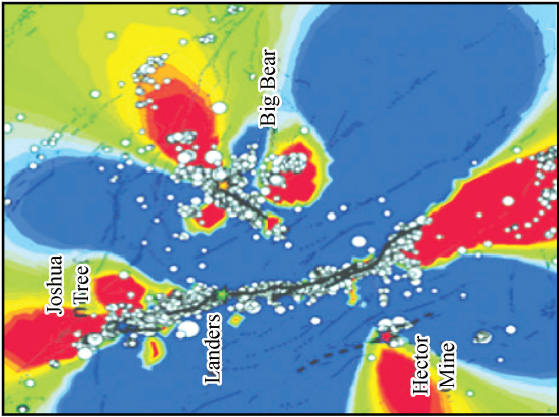


图 1 兰德斯—约书亚树—大熊地震后 ΔCFS 与余震分^[14]

Fig.1 Aftershock distribution and ΔCFS after the Landers-Joshua tree-big bear earthquake

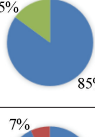
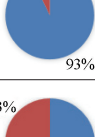
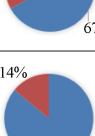
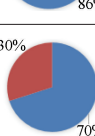
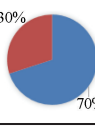
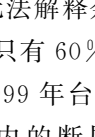
不过更早在 1979 年加利福尼亚家园谷 5.5 级地震之后，Andrew 等^[14] 计算得到的同震库仑应力变化区与余震分布有比较明显的对应关系，余震大多处于库仑应力增加区，在这些区域断层方向与应力加载方向一致，应力增量 0.1~0.3 MPa 便足以引发地震活动，而在库仑应力减少区，相同数量的应力减少便可以有效地抑制地震的发生。

1987 年 Ranch/Superstition Hills 地震序列^[21]、1989 年 7.1 级洛马普列塔地震序列^[22-23]、1992 年兰德斯地震序列^[24-25]、1995 年日本神户地震以及 6.5 级科灵加地震和 6 级努内兹地震^[26]，这些地震后计算所得的库仑应力变化都很好解释了余震分布，其中图 2 以兰德斯地震为例，给出了库仑应力变化与余震分布对应关系。为了进一步说明库仑应力与余震分布的关联性，表 1 中统计了几个典型地区库仑应力变化与地震分布的关系。在这几个典型地区，地震分布与区域库仑应力变化的契合度都高于 67%，最高甚至高达 95%，这不难说明库仑破裂理论在地震活动性分析中是十分可行的。

在之后一些典型的余震研究中，为了更加精确地使用静态库仑应力解释余震分布，不少学者计算了主震之后不同地震地点的静态库仑应力变化，并将有触发关系的两次地震称为“地震对”。Kagan 等^[27] 给出了 9 对浅源强震“地震对”库仑破裂应力变化计算；Harris 等^[28] 计算给出了时间间隔小于 1.5 年的 16 个地震对。虽然其他库仑应力研究中没有直接给出“地震对”计算结果，但通过收集有触发关系的地震，得到了唐山、伽师、汶川等其他几个地区的“地震对”，具体结果如图 2 所示。这些地震对的主震震级在 5.5~8.1 之间，对应触发的余震震级在 4.6~7.3 之间，通过拟合直线可以看出通常情况下主震震级越高，所触发的余震震级也越高，能够通过静态库仑应力触发地震的距离也越远。但很明显可以发现触发地震多“群集”于 5~50 km 范围内，这与静态库仑应力的作用效果有关。Andrew^[14] 认为通常情况下，在距离断层以外的几公里处库仑应力变化与余震分布的契合度最高。距离断层较近的区域存在一些未知的断层滑动分布与结构破坏细节，影响了应力变化；距离断层较远的区域，计算得到的库仑应力影响范围可能超出了实际范围，实际可能并无静态触发关系。不同触发地震发生地的具体库仑应力变化通常都小于 0.4 MPa，大于 0.01 MPa，这与公认的库仑应力触发阈值 0.01 MPa 相符^[14]。但需要指出的是，触

发地震所需的库仑应力变化大小与触发地震的震级无明显关系,低库仑应力增加可以导致小地震,同样也可以导致 7 级以上的大地震,这与具体触发区的断层情况有关,所以库仑应力触发地震是“压死骆驼的最后一根稻草”,但一共有多少根稻草,同触发地震的震级一样都很难预测。

表 1 几个地区静态库仑应力变化与地震分布关系^[15-20]
Table 1 Relation between static coulomb stress change and seismic distribution in several areas^[15-20]

时间	地点	约束条件	地震发 生位置	增加区■ 减少区■ 交界区■	备注
1812—1995	南加利福尼亚	①采用应力演化模型;②主断层滑动速率在 3 mm/y;③5 级以上地震			文献[16]
1932—1995	南加利福尼亚	①同上①②;②6 级以上地震			文献[16]
1992	兰德斯	①7.1 级兰德斯地震之后;②5 km、10 km、15 km 三个深度			文献[17]
1999	台湾集集	①采用 Okada 模型与 Wang(2001)的断层滑动模型;②采用 KS 统计方法($\mu=0.1、0.4、0.7$)			文献[18]
2013	四川芦山	①汶川与芦山地震共同作用;② ΔCFS 大于 0.01 MPa 区域			文献[19]
2001	昆仑山口西	①昆仑山口西 8.1 级地震后;②5 级以上余震;③考虑优势构造面应力			文献[15]
2008	汶川	①汶川 8 级地震之后;②三个模型(姚振兴、陈运泰;USGS)			文献[20]

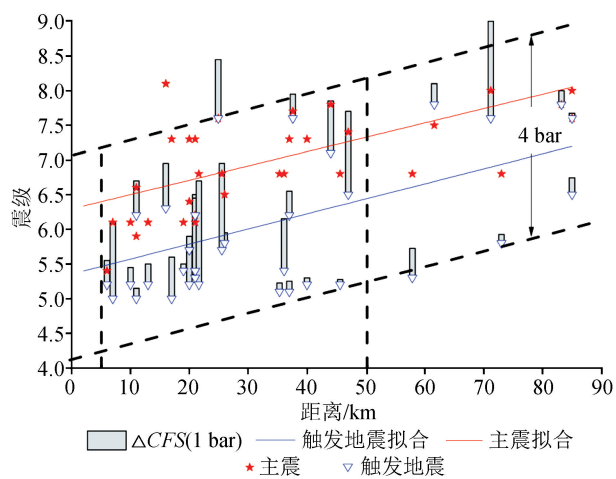


图 2 震中距-震级关系图

Fig.2 Epicentral distance-magnitude diagram

一些其他研究也表现出不同的观点,认为某些

情况下库仑理论无法解释余震分布情况,如 1994 年北岭地震发生后,只有 60%的余震发生在库仑应力增加的地区^[24];1999 年台湾集集地震之后,有两个位于应力阴影区内的断层出现了明显的余震活动^[28]。甚至有人发现地震序列可能并不会产生明显的应力阴影,如 Felzer 等^[29]在兰德斯地震后发现所观测到的地震活动率减少量与断层破裂面距离并没有显著的关系。应力阴影区的消失或是库仑理论的不适用,其中很可能的原因就是断层滑动模型的过度简化,或是因为震前背景活动通常都比较少,很难提供足够的统计学上的样本,从而导致推断出地震发生的概率下降。同时库仑理论中,仅仅根据应力的增减并不能解释余震活动与时间的相关性,如断层滑动速率的变化、应力随时间衰减以及断层末端的地震活动。为此 Toda 等^[30]提出了一个包含

速率和摩擦状态的应力变化模型,速率指的是断层的滑动速率,状态指的是断层面或者破裂面的物理性质,断层上的摩擦大小是时间、滑动距离及滑动速度的函数,称为 Dieterich 准则^[31],具体表达公式为:

$$\mu(t)=\mu_0+a\ln\frac{V(t)}{V_0}+b\ln\frac{\xi(t)V_0}{d_c}\tag{4}$$

$$\frac{d\xi}{dt}=1-\frac{\xi(t)V(t)}{d_c}\tag{5}$$

式中: μ 是摩擦系数; t 是时间; μ_0 是参考摩擦系数; V 是断层滑动速度; V_0 是参考滑动速度; d_c 是特征滑动距离; a 和 b 是实验室实验确定的无量纲系数; $\xi(t)$ 表示断层接触面的物理状态,根据式(5)可解得。但由于此式在 $V=0$ 处未定义,导致在这一点处数值计算出现病态,所以需要在此处对摩擦系数进行定义,并且定义有别于一般的脆性抗剪强度与破坏准则。为避免这种情况, Ruina^[32] 之后提出另外一种改进准则,称为 Ruina 准则,具体表达式如下:

$$\mu(t)=\mu_0+a\ln\frac{V(t)}{V_0}+b\ln\frac{\xi(t)V_0}{d_c}\tag{6}$$

$$\frac{d\xi}{dt}=-\frac{V(t)\xi(t)}{d_c}\ln\frac{\xi(t)V(t)}{d_c}\tag{7}$$

式中各个量的物理意义与前式相同。在这个表达式中弱化了静态摩擦与强度恢复的真实关系,并且通过准静态下有效接触时间,分别与 d_c 做比值从而得到有效速率的方法,将与时间有关的静态摩擦和与速度有关的滑动摩擦很好地联系了起来。

Marone^[33] 在测量岩石与岩石槽表面动态摩擦力的大小后,结果显示滑动摩擦会随速度的增加而减小,这种现象被称为滑动弱化。在之前的一些研究表明,光滑岩石表面滑动速度在一定范围内时,岩石接触面才会表现出摩擦速度弱化的现象。其后的一些研究又发现在有岩石颗粒的岩石槽面上发生剪切作用时,会表现出滑动速度由弱化转变为强化的现象。其中滑动强化或者滑动弱化可以从摩擦系数的变化直接表现出来,具体如图 3 所示。

3 动态触发

尽管静态库仑理论可以很好地解释一些地震之后发震断层周围余震分布情况,也在预测地震中发挥了一些作用,但是 Andrew 等^[14] 发现,在 1992 年兰德斯地震发生几分钟后,在距离震中超过 1 000 km 的地方地震活动率明显增加,这个距离超过了约 2 个断层的长度。这些地区包括了内华达州和加

利福尼亚州的边界及内华达山脉(650 km),加利福尼亚北部的盖瑟斯热区(750 km),加利福尼亚州北部的喀斯喀特南部山脉(900 km),爱达荷州西部(1 100 km),黄石国家公园(1 250 km 以外)等地区。这些地震的持续时间由几小时到几周不等,平均延迟时间为一天^[35],这些都证明了兰德斯地震与其后这些地震有着较强的因果关系,并且 Hill 等^[5] 通过对比 1992 年前后,也就是兰德斯地震前后同一地区的地震活动率,发现了累积地震数在这一时间点发生了急剧增加,同时通过随机统计的方法确定有 90% 的地震是由兰德斯地震引发的。

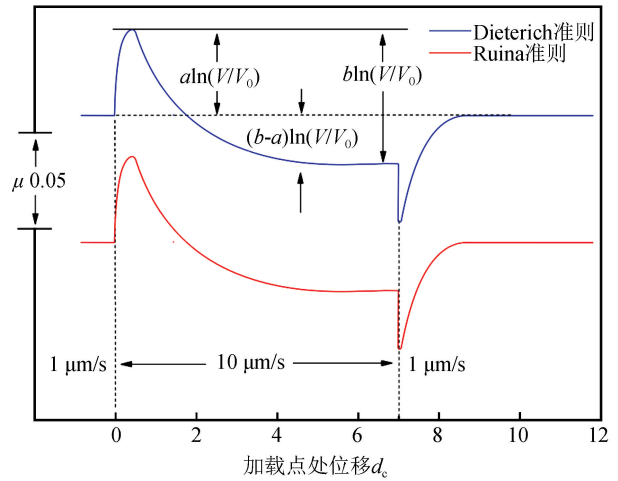


图 3 两种准则中摩擦系数与位移的函数关系图
($a=0.01, b=0.015, d_c=20\text{ }\mu\text{m}, k=0.01\text{ }\mu\text{m}^{-1}, V_0=1\text{ }\mu\text{m/s}$)

Fig.3 Function relation diagram of friction coefficient and displacement in two laws ($a=0.01, b=0.015, d_c=20\text{ }\mu\text{m}, k=0.01\text{ }\mu\text{m}^{-1}, V_0=1\text{ }\mu\text{m/s}$)

在其他一些较大地震中同样发现了远程触发的现象,1999 年 7.1 级海克特矿地震 30 s 与 10 min 之后,在加利福尼亚与墨西哥触发了 4.7 级与 4.4 级两次中级地震^[36];2000 年 7.4 级伊兹米特地震之后,在距离希腊 400 km 到 1 000 km 的范围内地震活动性增加^[37];1995 年 7.3 级亚喀巴湾地震之后,500 km 之外的死海断层内触发了一系列地震活动^[38];2002 年 7.9 级德纳里峰地震之后,造成 3 500 km 之外的地震活动以及湖面船只晃动^[39]。

如此之远的触发距离,显然已经不能使用断层断裂所直接造成的静态库仑应力变化解释,那另一种远程触发的方式就是发震断层发出的地震波在经过某些断层时造成了应力的变化,毕竟应力变化只要达到 0.01 MPa 就足以触发地震。通过统计二十

几个易触发地区的远程触发事件,如图 4 中所示,图中径向长度代表震级(以左侧轴量值大小为参考),圆心角大小代表触发距离(震中距),可以清楚看到动态触发事件的以下几个特点:(1)动态触发事件的主震震级通常都在 7 级或 7 级以上,触发地震的震级通常小于 6 级,但也不排除一些特大地震(如苏门答腊 8.7 级地震)触发一些大型地震(柴达木盆地 6.7 级地震)^[40];(2)动态触发虽然有远程触发地震的能力,但由于地震波的传播过程中能量不断衰减,所影响的范围必定有一个上限,在所统计地区触发地震的震中距 86.3% 介于 100~2 500 km 之间,2 500 km 以上震中距的远程触发现象较少,且这类触发现象的主震通常为巨大地震($M_s \geq 8$);(3)一些微震或弱震经常由远程触发,但由于监测手段的限制,许多远程触发的微震都未被准确检测并记录到震级,这也是统计数据中明显缺少 2 级以下触发地震的原因。

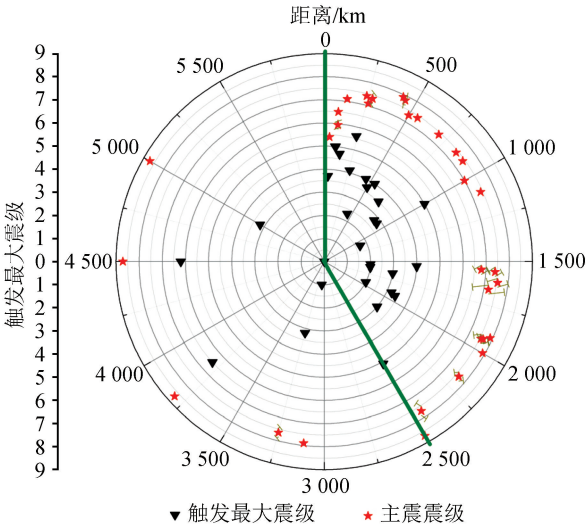


图 4 易触发地区震中距-震级统计图

Fig.4 Statistics of epicentral distance-magnitude diagram in trigger-prone areas

如果从主震的角度出发,虽然直接统计到一次大地震远程触发了哪几个地震的可能性较小,或者一次大地震可能由于构造等其他因素根本不会产生动态触发事件。但通过统计几次主要地震的远程触发,发现它们都有一些共同的特点:主震震级与触发距离呈正相关,且同样 9 个主震中有 7 个远程触发的最大距离都小于 2 500 km,触发地震的震级都小于等于 6 级,符合之前易触地区得到的结论;触发地震的个数与震级与距离无明显关系,可能与主震周边地区的易触程度有关;同样由于检测技术的限制,通常只记录到触发地震的最大震级,对于微小地震

存在缺失,所以同样统计数据中也鲜有 2 级以下触发地震。

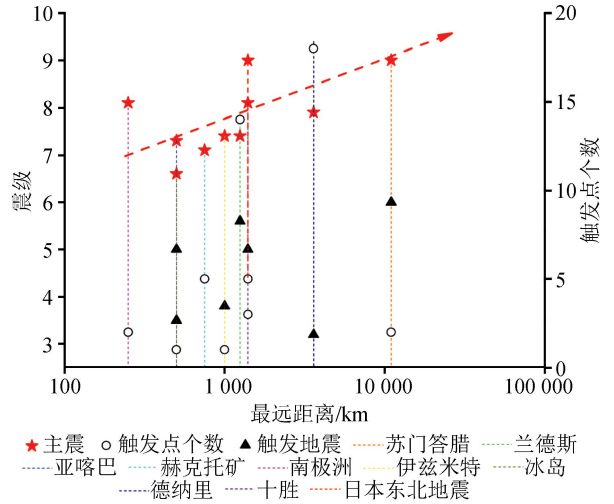


图 5 几个典型大地震动态触发距离-震级/频率图

Fig.5 Distance-magnitude/frequency diagram in dynamic trigger of several typical large earthquakes

如果地震波产生的动态应力变化足以触发几百公里之外发生地震,那么必然可以在断层周围触发地震,但一般情况下在远距离处,动态应力的作用大于静态应力,而在近距离处则相反。Gomberg 等^[41]通过比较全球十几个地震之后破裂的方向性,发现在 9 次单向破裂的地震中,有 8 次地震在沿其破裂方向上地震活动率增加更高。由于断层破坏的方向只与动态应力有关,这一结果说明地震波产生的动态应力变化在近场触发中发挥了一定的作用。

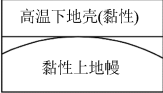
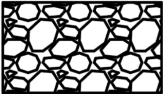
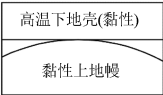
但动态触发机制中存在一个明显的问题是其瞬时性,即地震波造成的动应力变化是瞬时的,其造成的应力状态不会永久改变^[14],地震波经过之后,只能通过库仑破裂引发地震活动。之后有人利用如速率状态函数类似的加速破坏的过程、孔隙压力瞬时增加的破裂机制以及地震波震荡应力触发机制等来解释这一不足,至此,动态地震波的传播便成为解释地震远程触发的主要手段。

4 震后应力转移

无论是动态触发还是静态触发,都很难直接解释触发过程中时间上的延迟现象,尤其是较长时间的延迟触发。动态触发过程中地震波的传播需要一定的时间,这可以说明地震触发中短时间的延迟触发,但仍旧无法解释如同 1992 年兰德斯地震与 1999 年海克特矿地震之间时间跨度长达 7 年的延迟触发现象。Felzer 等^[42]最初将其解释为之后的

地震是由主震触发的其他余震触发的,并认为超过 50% 的余震都是由其他余震触发的。但之后有一些更加合理的解释机制,主要有下面三种:(1)高温下地壳或上地幔的黏性松弛。当地震产生的应力变化作用到下地壳或者上地幔时黏性区时,由于地震发生时间十分短暂,所以产生时弹性变形,但是之后这些区域开始松弛,其黏性流动反作用于上地壳引起上地壳的应力增加从而造成库仑应力改变触发地震。(2)孔隙流体压力回弹。当同震应力在近场区域产生过量流体压力时,这些过量的流体压力会在之后产生衰减使流体回弹到震前的状态,这些衰减掉的应力会引起震后地壳的应力变化,从而触发地震。(3)震后滑动。地震之后由于断层面上未完全消散的应力会引起断层的无震滑动,导致上地壳某些区域应力增加,从而造成附近断层应力加载触发地震。

表 2 震后应力转移机制表

Table 2 Mechanism of post-earthquake stress transfer				
转移机制	应力转移地点	示意图	典型事件	校正方法
黏性松弛	下地壳或上地幔		1992 年兰德斯地震导致海克特矿触发延迟	采用分层模型
孔隙弹性回弹	孔隙流体		2009 年意大利拉奎拉 6.3 级地震通过孔隙压力激活其他断层	调整断层 μ 值
震后微滑	深部断层		1999 年伊兹米特地震导致迪兹杰地震最终震源加载	增加等效边界条件

上述几种应力转移的过程通常都需要一定的时间,并且其时间跨度有时会非常得大,跨度不等的应力转移时间恰好能够解释地震触发的延迟现象,并且与触发延迟时间从几天到几年的大跨度相对应。一些相关研究结果也印证了这一观点,圣安德列斯断层系统北部和南部的地震活动可以和下地壳黏性流动产生的应力传递耦合起来^[43],非牛顿黏性软流圈理论解释了 1965 年阿拉斯加州鼠岛地震后余震向海迁移的现象^[44],兰德斯地震后孔隙弹性效应解释了海克特矿震源应力的重新分布^[45],1999 年伊兹米特地震后的断层无震滑动导致迪兹杰地震震源处应力进一步加载,两次地震相差 87 天。只要能够引起应力改变,那么都存在应力转移的可能,所以在静态触发与动态触发的过程中都存在应力转移的现象,而在这些应力转移机制与库仑破裂准则基础上,

断层运动形成了“粘滑机制”,由此产生了周期模型、时间可预测模型和滑动可预测模型三种理想化地震复发模型^[43],其控制因素基本与上述应力转移的几种情况吻合,主要是未来发震断层的构造剪切应力加载速率、断层本身的摩擦性质和周边地震对未来发震断层的影响,例如区域应力场出现了扰动(静态和动态应力变化及地壳内部流体压力变化等),则断层上的应力加载或卸载会导致断层演化周期改变或断层摩擦强度变化,从而引起断层失稳时间提前或推后。

如何运用这三种应力转移机制来更合理地解释库仑应力触发地震,必须考虑实际地震发生区域内的地质构造,使用不同的计算模型或适当改变计算参数与边界条件。如王辉等^[47]在计算于田两次 7 级地震之间的黏弹性应力转移作用时,发现均匀弹性位错模型计算结果与实际余震活动对应较差,在采用分层粘弹性模型分析后,发现中、下地壳的黏性松弛效应导致 2008 年于田地震后应力调整,有利于 2014 年于田地震的发生;沈正康等^[48]在东昆仑破裂带大地震之间的应力转移和断层相互作用研究中,模拟了黏弹性成层介质中地震断层错动产生的应力演化过程,发现四个地震中有三个地震由粘弹性松弛造成的库仑应力变化远远大于同震形变所造成的变化。所以,根据地质构造确定可能发生应力转移方式(区域地壳参数、孔隙压力情况、断层分布特点),再建立合理的模型分析计算,是分析震后应力转移对触发地震影响较为可行的途径。

5 讨论

自 1992 年兰德斯地震之后,库仑应力变化触发地震的研究工作已经有了很大的进展,由最初的简单计算地震造成的库仑应力变化分析触发地震分布,到动态地震波造成的应力变化远程触发,以及震后应力转移各种机制成功解释延迟触发现象。并基于速率-状态方程完善了静态触发中一些之前未得到合理解释的触发地震或是地震序列,随着库仑应力触发地震理论的成熟,越来越多的学者开始着眼于利用库仑破裂应力变化来进行地震危险性分析,采用摩擦本构(即速率-状态方程)来计算地震发生概率,进一步研究地震危险性。虽然库仑应力变化触发地震研究有了长足的发展,但是仍存在一些内容需要深入研究和改进。

库仑应力触发地震案例的总体规律还没有得到很好地总结,很多研究只是具体问题具体分析,没有

指出多个案例中共同的特点。本文通过简单类比分析多个静态、动态触发地震案例,发现了主震/余震震级、触发距离、触发地震库仑应力之间存在的相关性,所得到的最优触发距离,可触发地震库仑应力变化范围以及主震与触发地震震级之间的关系,对今后库仑应力计算有一定的参考意义,更主要的是对跨断层应力监测或是地震危险性分析工作提供一定依据。但对于分析结果的准确性、分析要素的全面性以及个别案例的复杂性,因为目前能收集到的数据有限,以及已有数据采集过程中由于技术手段限制导致数据的不完整,所以没有进行深入探讨,有待进一步完善。

从主震震级与触发地震震级的关系角度来看,动态触发与静态触发有明显不同,主要表现在动态触发地震震级基本都小于主震震级,而静态触发中二者没有明显关系,既有“小触大”,也有“大触小”,这可能是因为要触发地震必须同时满足断层处于临界失稳状态与应力扰动大于触发阈值两个条件,而而造成以“小触大”,还需要满足触发地震断层孕震过程存储的能量大于主震断层的能量,远程触发过程中地震波想要“偶遇”到这样的断层同时保证能量损失在能触发地震阈值之上,对本就发生概率较小的远程触发来说更加苛刻。而就静态触发而言,由于地震一般都发生在某一断裂带上,其区域断层应力状态基本相近,如其中一条断层失稳发生地震,触发到比其储能更高的断层的可能较远程触发来说要高,例如地震分类中较为常见的前震—主震型地震,这只是合理的解释之一,其他可能的原因有待后续研究补充。

库仑应力触发地震的类型可以分为正断型、逆断型、走滑型与中间型,这些不同类型的触发地震在本文所统计的一些典型震例中所涉及的触发震级、应力变化、触发距离等几个特征参数没有表现出关于地震类型的显著变化特点,但所有触发案例中,逆断型触发地震数量远远居多,这与万永革等^[49]对地震静态应力触发模型全球性检验结果一致,表明在今后的库仑应力观测工作中逆断层或者板间地震为主要研究对象。

静态触发中速率-状态方程通过建立摩擦系数与断层滑动速率的关系,而摩擦系数两个明显的变化阶段相对应地解释了地震发生过程中断层强化与断层弱化的现象,这仅是对于已经发生的地震或是地震序列而言,但对于未来还未发生的地震,由于方程中待定参数 a 、 b 、 V_0 、 d_c 的确定方法还没有定论,

同时由于方程本身是在实验室常温条件下得出的,而在某些高温条件下断层的滑动是否适用于速率-状态方程还在争论过程中,所以要将其运用于准确定位或预测地震触发,除了考虑参数的确定方法,方程的适用条件同时也是考虑的因素之一。

应力转移可使触发地震的时间产生不同程度的延迟,延迟程度取决于不同的作用机制以及具体的应力转移量值,然而通常情况下都是多种转移机制共同作用,这给本就具有较高计算难度的应力量又增加了难度,故震后应力转移中应力转移的定量计算亟待进一步研究。除了库仑破裂模型,结合 R-S 摩擦定律与地震复发周期也可讨论地震触发的提前与推后,结果与库仑应力模型不尽相同。解梦雨等^[46]基于一维弹簧滑块模型,推导了地震复发周期的解析表达式,将解析模型与数值模拟的结果进行对比,认为当断层演化处于自加速/成核阶段时,失稳时间的提前量或推后量 Δt 的大小取决于应力加载的时刻,这一点与库仑模型不同,为地震周期中的非地震滑移解释提供了新的认识,也是目前地震成因与地震预测研究的热点。若两种模型计算结果差别不大,对于地震复发的研究可通过两种模型同时计算,如果与实际震例相符,则周边断层的加载作用使其大地震发生率的增加量可以通过库仑破裂模型计算,复发期望时间的提前量可以通过地震周期模型计算,从而达到两种模型相互验证,提高置信水平。将基于应力转移的模型与基于周期复发的模型结合讨论,可以为中长期地震预测提供更可靠的参考。

地震发生的过程可以分为震源初破裂产生地震波作用期、断层发生位移造成区域应力重分布期以及震后应力缓慢平衡期,这恰与静态触发、动态触发以及震后应力转移三种触发机制相对应(图6)。

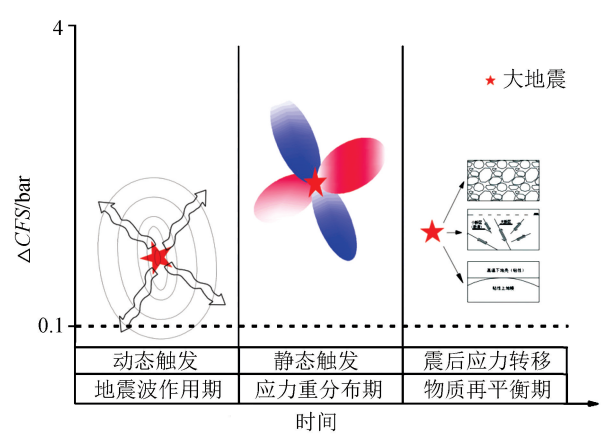


图 6 三种触发机制对比图

Fig.6 Comparison diagram of three trigger mechanisms

般情况下三种机制在作用时间上基本以天、月、年的近似界限分开,造成库仑应力变化的平均大小关系通常为静态触发>震后应力转移>动态触发。但很多时候三种机制并不是单独作用,此时的触发机理就变得更为复杂。如何在一次触发地震中将可能同时存在的几种机制耦合起来更好地解释具体触发现象,也是今后研究方向之一。

6 结论

通过对库仑应力变化触发地震机制进行梳理,并统计不同类型触发地震特征,得到如下结论:

(1) 静态库仑应力的作用范围通常在 5~50 km 之间,超过 100 km 的触发事件是因为主震断层长度大于一般情况。触发地震的库仑应力范围一般保持在 0.01~0.4 MPa 之间,与公认的触发阈值相吻合,触发地震与主震震级有明显的正相关关系,但库仑应力变化与触发地震震级无明显相关性。而关于断层滑动过程中库仑应力与时间的关系,可以通过速度-状态方程以及其改进后的方程进行解释。

(2) 与静态触发相类似,动态触发的由于地震波的传递距离很远,所以其对应力的作用范围也远超过动态触发。分析结果表明动态触发的作用距离在 100~2500 km 之间,但不排除强震造成的超远距离动态触发的可能。能够造成动态触发的主震震级也较高,一般在 7 级以上,且在几个主要事件中表现出与触发距离成正相关的关系。

(3) 震后应力中黏性松弛、孔隙弹性回弹、震后微滑三种转移机制已经可以合理地解释大时间跨度地震间的触发机理,也是延迟触发的主要原因之一,且不同机制可以很好的与几天至几年不等的延迟触发时间相对应,运用不同机制可以准确解释不同情况下延迟触发现象。

参考文献(References)

- [1] 邵志刚,傅容珊,薛霆斌,等.库仑应力变化与余震对应关系的初步探讨-以集集地震为例[J].地球物理学进展,2009,24(2):367-374
SHAO Zhigang,FU Rongshan,XUE Tingxiao,et al.Discussion about the Relation of Coulumb Stress Changes and Distribution of Aftersocks for the Case of the Chi-Chi Earthquake[J].Progress in Geophysics,2009,24(2):367-374.
- [2] MCCLOSKEY J,NALBANT S S,STEACY S,et al.Structural Constraints on the Spatial Distribution of Aftershocks[J].Geophysical Research Letters,2003,30(12):1610.
- [3] MCCLOSKEY J,NALBANT S S,STEACY S,et al.Structural Constraints on the Spatial Distribution of Aftershocks[J].Geophysical Research Letters,2003,30(12):6477-6490.
- [4] KING GCP,STEIN R S,LIN J.Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes[J].Bulletin of the Seismological Society of America,1994,84(3):935-953.
- [5] HILL D P,REASENBERG P A,MICHAEL A,et al.Seismicity Remotely Triggered by the Magnitude 7.3 Landers,California,Earthquake[J].Science,1993,260(5114):1617-1623.
- [6] ANDERSON J G,BRUNE J N,LOUIE J N,ZENG Y H,SAVAGE M,et al.Seismicity in the Western Great Basin Apparently Triggered By the Landers,California,Earthquake,28 June 1992[J].Bulletin of the Seismological Society of America,1994,84(3):863-891.
- [7] GOMBERG J,DAVIS S.Stress/strain Changes and Triggered Seismicity at the Geysers,California[J].Journal of Geophysical Research:Solid Earth,1996,101(B1):733-749.
- [8] PANKOW K L.Triggered Seismicity in Utah from the 3 November 2002 Denali Fault Earthquake[J].Bulletin of the Seismological Society of America,2004,94(6B):S332-S347.
- [9] FREED A M,LIN J.Delayed Triggering of the 1999 Hector Mine Earthquake by Viscoelastic Stress Transfer[J].Nature,2001,411(6834):180-183.
- [10] JEAGER N C,COOK,et al.Fundamentals of Rock Mechanics [M].London:Chapman and Hall,1979.
- [11] ZENG Y H.Viscoelastic Stress-Triggering of the 1999 Hector Mine Earthquake by the 1992 Landers Earthquake[J].Geophysical Research Letters,2001,28(15):3007-3010.
- [12] COCCO M.Pore Pressure and Poroelasticity Effects in Coulomb Stress Analysis of Earthquake Interactions[J].Journal of Geophysical Research,2002,107(B2):2030.
- [13] ROELOFFS E.Poroelastic Techniques in the Study of Earthquake-Related Hydrologic Phenomena[M]//ROELOFFS E,eds.Advances in Geophysics Volume 37.Elsevier,1996:135-195.
- [14] FREED A M.Earthquake Triggering by Static,Dynamic,and Postseismic Stress Transfer[J].Annual Review of Earth and Planetary Sciences,2005,33(1):335-367.
- [15] ANDERSON G,JOHNSON H.A New Statistical Test for Static Stress Triggering:Application to the 1987 Superstition Hills Earthquake Sequence[J].Journal of Geophysical Research:Solid Earth,1999,104(B9):20153-20168.
- [16] REASENBERG P A,SIMPSON R W.Response of Regional Seismicity to the Static Stress Change Produced by the Loma Prieta Earthquake[J].Science,1992,255(5052):1687-1690.
- [17] PARSONS T,STEIN R S,SIMPSON R W,et al.Stress Sensitivity of Fault Seismicity: A Comparison between Limited-Offset Oblique and Major Strike-Slip Faults[J].Journal of Geophysical Research:Solid Earth,1999,104(B9):20183-20202.
- [18] HARDEBECK J L,NAZARETH J J,HAUKSSON E.The

- Static Stress Change Triggering Model: Constraints from Two Southern California Aftershock Sequences[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103 (B10): 24427-24437.
- [19] WYSS M. Change in the Probability for Earthquakes in Southern California Due to the Landers Magnitude 7.3 Earthquake [J]. *Science*, 2000, 290(5495): 1334-1338.
- [20] TODA S, STEIN R S, REASENBERG P A, et al. Stress Transferred by the 1995 $M_w = 6.9$ Kobe, Japan, Shock: Effect on Aftershocks and Future Earthquake Probabilities [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103 (B10): 24543-24565.
- [21] KANG Y Y, JACKSON D D. 全球浅源强震的成对现象[J]. 世界地震译丛, 2000, 31(6): 28-36.
KANG Y Y, JACKSON D D. Worldwide Doublets of Large Shallow Earthquakes[J]. *Translated World Seismology*, 2000, 31(6): 28-36.
- [22] HARRIS R A, SIMPSON R W, REASENBERG P A. Influence of Static Stress Changes on Earthquake Locations in Southern California[J]. *Nature*, 1995, 375(6528): 221-224.
- [23] 黄禄渊, 张贝, 瞿武林, 张怀, 石耀霖. 2010 智利 Maule 特大地震的同震效应[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(03): 972-984.
HUANG Luyuan, ZHANG Bei, QU Wulin, et al. Coseismic effect of 2010 Maule earthquake in Chile[J]. *Journal of geophysics*, 2017, 60(03): 972-984.
- [24] WANG W H. Static Stress Transferred by the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake: Effects on the Stability of the Surrounding Fault Systems and Aftershock Triggering with a 3D Fault-Slip Model[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004, 91(5): 1041-1052.
- [25] FELZER K R, BRODSKY E E. The Absence of Stress Shadows[J]. *Seismol. Res. Lett.*, 2003, 75: 285.
- [26] TODA S. Toggling of Seismicity by the 1997 Kagoshima Earthquake Couplet: A Demonstration of Time-Dependent Stress Transfer[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(B12): 2567.
- [27] DIETERICH J H. Modeling of Rock Friction: 1. Experimental Results and Constitutive Equations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84(B5): 2161.
- [28] RUINA A. Slip Instability and State Variable Friction Laws [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1983, 88 (B12): 10359-10370.
- [29] MARONE C. Laboratory-Derived Friction Laws and Their Application to Seismic Faulting[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1998, 26(1): 643-696.
- [30] DIETERICH J. A Constitutive Law for Rate of Earthquake Production and Its Application to Earthquake Clustering[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1994, 99(B2): 2601-2618.
- [31] ANDERSON J G, BRUNE J N, LOUIE, ZENG Y H, SAVAGE M, et al. Seismicity in the Western Great Basin Apparently Triggered By the Landers, California, Earthquake, 28 June 1992[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84(3): 863-891.
- [32] GLOWACKA E. Fault Slip, Seismicity, and Deformation in Mexicali Valley, Baja California, Mexico, after the $M7.1$ 1999 Hector Mine Earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92(4): 1290-1299.
- [33] BRODSKY E E, KARAKOSTAS V, KANAMORI H. A New Observation of Dynamically Triggered Regional Seismicity: Earthquakes in Greece Following the August 1999 Izmit, Turkey Earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(17): 2741-2744.
- [34] MOHAMAD R, DARKAL A N, SEBER D, et al. Remote Earthquake Triggering along the Dead Sea Fault in Syria Following the 1995 Gulf of Aqaba Earthquake ($M_S = 7.3$) [J]. *Seismological Research Letters*, 2000, 71(1): 47-52.
- [35] EBERHART-PHILLIPS D. The 2002 Denali Fault Earthquake, Alaska: A Large Magnitude, Slip-Partitioned Event [J]. *Science*, 2003, 300(5622): 1113-1118.
- [36] 马寅生, 史大年, 安美建等. 苏门答腊地震对柴达木地方震的触发作用[J]. *地质力学学报*, 2005, 11(2): 110-116.
MA Yinsheng, SHI Dayin, AN Meijian et al. The Triggering Effect of the Sumatran Earthquake on the Local Earthquake of Qaidam[J]. *Journal of geological mechanics*, 2005, 11(2): 110-116.
- [37] 黄禄渊, 张贝, 程惠红, 罗纲, 瞿武林, 石耀霖. 2015 年智利 Illapel $M_w 8.3$ 地震同震效应及其对南美大陆地震危险性影响[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(1): 163-173.
HUANG Luyuan, ZHANG Bei, CHENG Huihong, et al. The Co-seismic Effect of the 2015 Illapel $M_w 8.3$ Earthquake in Chile and Its Impact on the Earthquake Hazard in South America[J]. *Journal of Geophysics*, 2017, 60(1): 163-173.
- [38] GOMBERG J. Observing Earthquakes Triggered in the near Field by Dynamic Deformations[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003, 93(1): 118-138.
- [39] FELZER K R, BECKER T W, ABERCROMBIE R E, et al. Triggering of the 1999 $M_w 7.1$ Hector Mine Earthquake by Aftershocks of the 1992 $M_w 7.3$ Landers Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107(B9): ESE 6-1-ESE 6-13.
- [40] LYNCH J C, BÜRGEMANN R, RICHARDS M A, et al. When Faults Communicate: Viscoelastic Coupling and Earthquake Clustering in a Simple Two-Fault System[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(6): 116-125.
- [41] MELOSH H J. Nonlinear Stress Propagation in the Earth's Upper Mantle[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1976, 81 (32): 5621-5632.
- [42] MASTERLARK T. Transient Stress-Coupling between the 1992 Landers and 1999 Hector Mine, California, Earthquakes

- [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2002, 92(4): 1470-1486.
- [43] 解孟雨, 史保平, XIE Mengyu, 等. 断层演化过程中的周期和非周期地震滑移及非地震滑移: 一维断层模型分析[J]. 地震学报, 2016, 38(4): 590-608.
- XIE Mengyu, SHI Baoping, XIE Mengyu, et al. The Periodic and Aperiodic Slip during Earthquake Faulting and Aseismic Faulting Slip: 1D Fault Model Analysis[J]. Acta Seismologica Sinica, 2016, 38(4): 590-608.
- [44] 王辉, 曹建玲, 洪顺英, 等. 2008 年和 2014 年 2 次新疆于田 M7 地震之间的黏弹性应力转移[J]. 地震地质, 2016, 38(3): 646-659.
- WANG Hui, CAO Jianling, HONG Shunying, et al. Viscoelastic Stress Transfer between 2008 and 2014 Yutian M7 Earthquakes, Xinjiang[J]. Seismology and Geology, 2016, 38(3): 646-659.
- [45] 沈正康, 万永革, 甘卫军, 等. 东昆仑活动断裂带大地震之间的黏弹性应力触发研究[J]. 地球物理学报, 2003, 46(6): 786-795.
- SHEN Zhengkang, WAN Yongge, GAN Weijun, et al. Viscoelastic Triggering among Large Earthquakes along the East Kunlun Fault System [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(6): 786-795.
- [46] 万永革, 吴忠良, 周公威, 等. 地震静态应力触发模型的全球检验[J]. 地震学报, 2002, 24(3): 302-316.
- WAN Yongge, WU Zhongliang, ZHOU Gongwei, et al. Global Test of Seismic Static Stress Triggering Model[J]. Acta Seismologica Sinica, 2002, 24(3): 302-316.
- [47] 陈兵, 崔笃信, 张晓亮, 等. 区域优势构造面和余震节面库仑应力变化相关性与地震预测意义[J]. 地震学报, 2009, 31(4): 357-366.
- CHEN Bing, CUI Duxin, ZHANG Xiaoliang, et al. Correlation between the Coulomb Stress Change on Regional Dominant Faults and that on Aftershock Nodal Planes, and Its Implication for Earthquake Prediction[J]. Acta Seismologica Sinica, 2009, 31(4): 357-366.
- [48] DENG J S, SYKES L R. 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, 1997, 102(B5): 9859-9886.
- [49] PERFETTINI H, AVOUAC J P. Modeling Afterslip and Aftershocks Following the 1992 Landers Earthquake[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(B7): B07409.
- [50] 缪森, 朱守彪. 2013 年芦山 $M_s 7.0$ 地震产生的静态库仑应力变化及其对余震空间分布的影响[J]. 地震学报, 2013, 35(5): 1,619-631.
- MIAO Miao, ZHU Shoubiao. The Static, Coulomb Stress Change of the 2013 Lushan $M_s 7.0$ Earthquake and Its Impact on the Spatial Distribution of Aftershocks [J]. Acta Seismologica Sinica, 2013, 35(5): 619-631.
- [51] 石耀霖, 曹建玲, SHI Yao-Lin, 等. 库仑应力计算及应用过程中若干问题的讨论: 以汶川地震为例[J]. 地球物理学报, 2010, 53(1): 102-110.
- SHI Yaolin, CAO Jianling, SHI Yaolin, et al. Some Aspects in Static Stress Change Calculation: Case Study on Wenchuan Earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(1): 102-110.
- [52] 张国民, 张晓东, 刘杰, 等. 印尼苏门答腊 8.7 级大震对中国陆区的影响[J]. 地震, 2005, 25(4): 11.
- ZHANG Guomin, ZHANG Xiaodong, LIU Jie, et al. The Effects of Sumatra Earthquake with Magnitude 8.7 in China's Mainland[J]. Earthquake, 2005, 25(4): 11.
- [53] BRODSKY E E, KARAKOSTAS V, KANAMORI H. A New Observation of Dynamically Triggered Regional Seismicity: Earthquakes in Greece Following the August 1999 Izmit, Turkey Earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(17): 2741-2744.
- [54] ÁRNADÓTTIR T, GEIRSSON H, EINARSSON P. Coseismic Stress Changes and Crustal Deformation on the Reykjanes Peninsula Due to Triggered Earthquakes on 17 June 2000[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2004, 109(B9):
- [55] MIYAZAWA M. Detection of Triggered Deep Low-Frequency Events from the 2003 Tokachi-Oki Earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(10): L10307.
- [56] HILL D P, JOHNSTON M J S, LANGBEIN J O, et al. Response of Long Valley Caldera to the $M_w = 7.3$ Landers, California, Earthquake[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1995, 100(B7): 12985-13005.
- [57] WEST M. Periodically Triggered Seismicity at Mount Wrangell, Alaska, after the Sumatra Earthquake[J]. Science, 2005, 308(5725): 1144-1146.
- [58] 焦明若, 王海燕, 李芳, 等. 印尼 8.7 级地震对辽宁地区的影响[J]. 东北地震研究, 2005, 21(4): 1-9.
- JIAO Mingruo, WANG Haiyan, LI Fang, et al. Effects of Indonesia Earthquake with Magnitude 8.7 in Liaoning Area[J]. Seismological Research of Northeast China, 2005, 21(4): 1-9.
- [59] PREJEAN S G. Remotely Triggered Seismicity on the United States West Coast Following the $M_w 7.9$ Denali Fault Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2004, 94(6B): S348-S359.
- [60] MOHAMAD R, DARKAL A N, SEBER D, et al. Remote Earthquake Triggering along the Dead Sea Fault in Syria Following the 1995 Gulf of Aqaba Earthquake ($M_s = 7.3$) [J]. Seismological Research Letters, 2000, 71(1): 47-52.
- [61] ANDERSON J G, BRUNE J N, LOUIE J N, et al. Seismicity in the Western Great Basin Apparently Triggered By the Landers, California, Earthquake, 28 June 1992[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(3): 863-891.

WANG Guoquan, ZHOU Xiyuan. Baseline Correction of Near Fault Groundmotion Recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake[J]. Seismology and Geology, 2004, 26(1): 1-14.

[8] 荣棉水, 彭艳菊, 喻畑, 等. 近断层强震观测记录基线校正的优化方法[J]. 土木工程学报, 2014, 47(增刊 2): 300-306.

RONG Mianshui, PENG Yanju, YU Tian, et al. Optimized Baseline Correction Method for the Near-fault Observation Strong Motion Records[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(Supp2): 300-306.

[9] 周宝峰, 于海英, 温瑞智, 等. 一种识别永久位移的新方法[J]. 土木工程学报, 2013, 46(增刊 2): 135-140.

ZHOU Baofeng, YU Haiying, WEN Ruizhi, et al. A New Way of Permanent Displacement Identification[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(Supp2): 135-140.

[10] LI X, ZHOU Z, HUANG M, et al. Preliminary Analysis of Strong-motion Recordings from the Magnitude 8.0 Wenchuan, China, Earthquake of 12 May 2008[J]. Seismological Research Letters, 2008, 79(6): 844-854.

(上接第 1016 页)

[62] AAGAARD B T. Dynamic Rupture Modeling of the Transition from Thrust to Strike-Slip Motion in the 2002 Denali Fault Earthquake, Alaska[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2004, 94(6B): S190-S201.

[63] 张彬, 杨选辉, 陆远忠, 等. 地震动态应力触发研究进展[J]. 西北地震学报, 2008, 30(3): 298-303.

ZHANG Bin, YANG Xuanhui, LU Yuanzhong, et al. Development in the Research of Seismic Dynamic Stress Triggering[J]. Northwestern Seismological Journal, 2008, 30(3): 298-303.

[64] 马寅生, 史大年, 安美建, 等. 苏门答腊地震对柴达木地方震的触发作用[J]. 地质力学学报, 2005, 11(2): 110-116.

MA Yinsheng, SHI Danian, AN Meijian, et al. Triggering of Local Earthquakes in the Qaidam Basin by the Sumatra Earthquake[J]. Journal of Geomechanics, 2005, 11(2): 110-116.

[65] WEN K, BERESNEV I A, CHENG S. Moderate-magnitude Seismicity Remotely Triggered in the Taiwan Region By Large Earthquakes Around the Philippine Sea Plate[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, 86(3): 843-847.

[66] GOMBERG J, REASENBERG P A, BODIN P, et al. Earthquake Triggering by Seismic Waves Following the Landers and Hector Mine Earthquakes[J]. Nature, 2001, 411(6836): 462-466.