

综述

地震应力触发研究*

万永革^{1,2)} 吴忠良¹⁾ 周公威¹⁾黄静¹⁾ 秦立新¹⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国北京东燕郊 101601 中国地震局防灾技术高等专科学校

摘要 介绍地震应力触发基本理论. 从地震静态和动态应力触发、粘弹性模型在地震应力触发中的应用、火山喷发或爆炸与地震触发及地震触发的其它解释等几个方面, 综述近年来地震应力触发的研究进展, 并对地震应力触发研究近期的发展进行展望.

关键词 库仑破裂应力变化 地震静态应力触发 地震动态应力触发 粘弹性介质

中图分类号: P315.72⁷

文献标识码: A

引言

所谓地震“应力触发”, 是指前面地震产生的应力变化张量投影到后续地震的断层面和滑动方向上, 考虑到正应力、孔隙压力和摩擦系数的影响得到库仑破裂应力变化($\Delta\sigma_c$). 若库仑破裂应力变化方向与后续地震断层滑动方向一致, 即库仑应力变化为正, 前面地震产生的应力变化促使断层破裂, 则地震可能被触发, 地震危险增大; 反之, 负库仑破裂应力变化抑制断层的破裂, 发生地震的可能性降低, 此区域称为“应力影区”.

大部分地震发生后伴随着大量余震或后续破裂事件. 这些余震或后续破裂事件与主震有何关系、通过何种方式相互作用、究竟在哪里发生、延迟时间有多长? 虽然随着数字地震资料的使用, 地震震源理论有了很大的发展, 但这些问题仍然是国际地震界争论的焦点之一. 1997年3月21~22日, 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. 这个研讨班加速了对地震间“应力触发”理论和应用的研究(Harris, 1998). 近年来, 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. 地震应力触发的计算结果也分布在世界的不同地区. 特别需要说明的是, 1999年8月17日土耳其的伊兹米特地区发生强烈地震, 而在此地震发生之前, Stein等(1997)和Nalbant等(1998)通过计算几十年内地震产生的库仑破裂应力变化就得出, 此地区一直处于库仑破裂应力增加较大的地区, 并指出此地区是地震危险性较高的地区. 这件事在国际地震界产生了很大的轰动, 促使地震学家重视地震产生的库仑破裂应力变化的问题(Hubert-Ferrari *et al.*, 2000; Parsons,

* 地震科学联合基金(602005)和国家自然科学基金(49725410)共同资助. 中国地震局地球物理研究所论著 02AC1033.
2001-11-14 收到初稿, 2002-01-15 收到修改稿, 2002-03-11 决定采用.

Dreger, 2000). 下面我们从库仑破裂应力变化的基本概念、地震静态和动态应力触发、粘弹性模型与地震应力触发、火山喷发或爆炸与地震触发等几个方面综述近年来的研究进展.

1 库仑破裂应力

库仑认为, 趋于使一平面产生破坏的剪应力 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 (膨胀为正) 及孔隙压力的抵抗, 即平面中的抗剪强度 (Jaeger, Cook, 1969) 是: $S - \kappa(\sigma_n + p_r)$. 其中, κ 为材料的内摩擦系数的常数, p_r 为地壳内部孔隙流体产生的作用在该平面上的张应力. 因此, τ 越趋近于 $S - \kappa(\sigma_n + p_r)$, 材料越容易破裂. 我们运用库仑破裂假设, 可以定义描述该物体趋近破裂程度的库仑破裂应力 (σ_f) 为

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

这里, $|\tau|$ 为地震破裂面上剪切应力的大小. 精确确定地下应力张量是很难的, 因此, 通常定义库仑破裂应力变化. 如果 κ 和 S 不随时间变化, 根据式 (1) 库仑应力变化 (Harris, 1998) 定义为

$$\Delta\sigma_f = \Delta|\tau| + \kappa(\Delta\sigma_n + \Delta p_r) \quad (2)$$

导致地壳库仑破裂应力变化的原因很多, 如固体潮、爆破、火山喷发、板块运动等. 式 (2) 中的 $\Delta|\tau|$ 、 $\Delta\sigma_n$ 为这些事件产生的应力变化张量在断层面的上的投影, Δp_r 为这些事件导致的孔隙流体压力变化.

注意, 式 (2) 右边第一项隐含地假定破裂面为各向同性. 若已确定后续地震断层的滑动方向, 则可将剪切应力变化投影到滑动方向上, 此时, 第一项为 $\Delta\tau_{\text{rake}}$, 表示滑动方向上的剪切应力变化.

为了简化孔隙压力变化的影响, 假定介质为各向同性均匀介质, 则产生静态应力变化之后、流体自由流动之前, 流体压力变化和膨胀应力变化有如下关系 (Rice, Cleary, 1976; Roeloffs, 1988):

$$\Delta p_r = \frac{\beta' \Delta\sigma_{kk}}{3} \quad (3)$$

这里, β' 为依赖于岩石体膨胀系数和流体所占体积比例的常数 (Rice, Cleary, 1976). 其取值范围为 0.47~1, 但人们常用的取值范围为 0.7~1 (Green, Wang, 1986); $\Delta\sigma_{kk}$ 为应力变化张量的对角元素之和.

如果假定断层处比周围岩石更具有延展性, 则 $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz}$, $\Delta\sigma_{kk}/3 = \Delta\sigma_n$ (Rice, 1992), 并假定 $\mu' = k(1 + \beta')$, 可以得到

$$\Delta\sigma_f = \Delta|\tau| + \mu' \Delta\sigma_n \quad (4)$$

这就是文献中常见的库仑破裂应力变化的描述. μ' 称为视摩擦系数, 包括了孔隙流体和断层面的上的介质特性. 严格说来, 虽然 μ' 可以解释为瞬时孔隙流体行为, 但在某些情况下,

比如 Rice(1992) 的模型中, 就不是这样. 比较公式(2~4)可以得到

$$\mu' = \kappa \left(1 + \frac{\beta'}{3} \frac{\Delta \sigma_{kk}}{\Delta \sigma_n} \right) \quad (5)$$

在一般文献中, 常忽略孔隙流体行为的细节, 而将 μ' 看成常数.

不同的研究者取的视摩擦系数 μ' 有很大不同. Deng 和 Sykes(1997a)在计算地震产生的静态库仑应力对后续地震的影响时指出, μ' 在 0~0.6 之间取值均可得到较好的“应力触发”效应. Reasenberg 和 Simpson(1992)对 Loma Prieta 地震的静态应力触发研究结果表明: $\mu'=0.2$ 时可以运用地震“静态应力触发模型”很好地解释 Loma Prieta 余震数据. Gross 和 Bürgmann(1998)运用不同的方法估计 μ' 值, 发现采用较低的值比较合适. Stein 等(1992)、King 等(1994)、Troise 等(1998)、Astiz 等(2000)在研究地震静态应力触发问题时取 μ' 值为 0.4. Ziv 和 Rubin(2000)在研究地震静态应力触发是否存在更低的阈值时取 μ' 值为 0.6. Robinson 和 McGinty(2000)在研究新西兰的 Authur 山口地震的余震分布与主震产生的应力场之间的关系时, 取 μ' 值为 0.75. Seeber 和 Armbruster(2000)研究兰德斯地震序列时发现, $\mu'=0.8$ 可以使兰德斯地震促使余震破裂与抑制余震破裂数目比例达到最大. Kagan 和 Jackson(1998)运用哈佛矩心矩张量目录和南加利福尼亚的强震目录得到的视摩擦系数为零. Parsons 等(1999)指出, 对于不同类型的断层视摩擦系数应分别取值. Stein(1999)指出主断层上的视摩擦系数较低 ($\mu' \leq 0.2$), 而小断层上的视摩擦系数较高 (≥ 0.8). 还有一些人提出, μ' 可能由于孔隙流体的迁移而在震后随时间变化 (Reasenberg, Simpson, 1992; Harris, Simpson, 1992). 因此, 计算库仑破裂应力变化, μ' 值的大小要根据当地的其它资料(例如, 热状态、流体观测结果, 所研究断层的大小等)确定.

将 μ' 取为常数, 并假定后续地震断层面的几何参数和滑动方向已知, 则库仑破裂应力变化可表示为

$$\Delta \sigma_f = \Delta \tau_{\text{rake}} + \mu' \Delta \sigma_n \quad (6)$$

式中, $\Delta \tau_{\text{rake}}$ 为被触发地震断层面和滑动方向上的静态剪切应力变化. 计算地震在周围空间产生的静态应力变化已有很多成熟的理论研究成果 (Stekette, 1958a, b; Chinnery, 1961, 1963; Press, 1965; Mansinha, Smylie, 1971; 陈运泰等, 1975). 目前流行的做法是按照 Okada(1992)给出的弹性半空间任意地震断层产生的静态位移及其在空间偏导数的解析表达式 (Troise *et al.*, 1998; 刘桂萍, 傅征祥, 2000; 万永革等, 2000) 或 Erickson(1986)给出的计算程序 (Anderson, Johnson, 1999; Astiz *et al.*, 2000) 计算静态应变张量, 按照 Cotton 和 Coutant(1997)给出的计算分层均匀介质内地震产生的动态应变张量, 由胡克定律计算应力张量, 投影到被触发地震断层面和滑动方向上可求出断层面滑动方向上的剪切应力 $\Delta \tau_{\text{rake}}$ 和正应力 $\Delta \sigma_n$, 代入式(6)可求出地震在周围空间产生的库仑破裂应力变化. Cotton 和 Coutant(1997)指出, 动态库仑破裂应力的计算除了法向力和剪切力随时间变化外, 与静态应力计算相同. 计算静态库仑应力不需要考虑前面地震断层的破裂过程,

而被触发地震的动态库仑破裂应力变化 $\Delta\sigma_f(t)=\Delta\tau_s(t)+\mu'\Delta\sigma_n(t)$ 的计算,则需考虑前面地震的震源时间函数. 如果没有某一地区的断层滑动方向和几何参数,假定此地区地下应力状态保持不变,根据地下构造应力场叠加地震产生的静态应力场计算得到可能性最大的断层走向和滑动方向. 在此基础上计算地震破裂产生的滑动方向上的剪切应力变化 $\Delta\tau_{\text{rake}}$ (Nostro *et al.*, 1997; Troise *et al.*, 1998; Astiz *et al.*, 2000; Robinson, McGinty, 2000).

2 地震静态应力触发

地震产生的静态应力变化估算由来已久. 在 20 世纪 60~80 年代就有一些早期的研究成果. 例如, Smith 和 Van de Lindt (1969) 曾讨论过南加州地震后的应变调整; Rybicki (1973) 曾用位错理论探讨过主震应力调整对余震的影响; Yamashina (1979) 对板内浅源地震触发问题进行了探讨; 王仁等 (1980, 1982) 基于弹塑性力学原理模拟了华北地区地震迁移规律, 确定了最后一次地震之后华北地区地震危险性的变化, 说明了大震发生后对其它地区和断层的影响. 近年来研究天然地震产生的静态应力变化对后续地震序列时间和位置影响的工作已遍布世界范围, 如非洲东北部的 Asal Rift (Jacques *et al.*, 1996)、智利 (Delouis *et al.*, 1998)、意大利 (Nostro *et al.*, 1997; Troise *et al.*, 1998)、日本 (Yamashina, 1978, 1979; Kato *et al.*, 1987; Yoshioka, Hashimoto, 1989a,b; Okada, Kasahara, 1990; Pollitz, Sacks, 1995, 1997)、沿着 Macquarie 海岭 (Das, 1992)、墨西哥 (Mikumo *et al.*, 1999)、新西兰 (Robinson, 1994; Robinson, McGinty, 2000)、土耳其 (Roth, 1988; Nalbant *et al.*, 1996; Stein *et al.*, 1997; Pinar *et al.*, 2001)、美国的加利福尼亚 (Smith, Van de Lindt, 1969; Rybicki, 1971, 1973; Das, Scholz, 1981; Mavko, 1982; Stein, Lisowski, 1983; Mavko *et al.*, 1985; Li *et al.*, 1987; Simpson *et al.*, 1988; Oppenheimer *et al.*, 1988; Hudnut *et al.*, 1989; Michael, 1991; Reasenber, Simpson, 1992; Harris, Simpson, 1992; Jaumé, Sykes, 1992; Stein *et al.*, 1992; Du, Aydin, 1993; Oppenheimer *et al.*, 1993; Stein *et al.*, 1994; King *et al.*, 1994; Bennett *et al.*, 1995; Harris *et al.*, 1995; Harris, Simpson, 1996; Deng, Sykes, 1997a, b; Bürgmann *et al.*, 1997; Astiz *et al.*, 2000)、内华达 (Hodgkinson *et al.*, 1996; Caskey, Wesnousky, 1997) 和中国 (黄福明, 王廷韞, 1983; 黄福明, 陈修启, 1992; 傅征祥, 刘桂萍, 1999; 刘桂萍, 傅征祥, 2000; 万永革等, 2000) 等.

2.1 静态库仑破裂应力变化与余震发生

在静态库仑应力触发余震的研究中, 许多研究者采用主震的弹性位错模型计算库仑应力增量, 并检查后续地震的空间分布. Das 和 Scholz (1981) 发现, 1968 年 4 月 9 日加利福尼亚 Borrego Mountain 地震的大部分余震分布在断层面及断层两边与断层走向垂直的方向上, 呈“十”字形. 1975 年海城地震 (谷继成等, 1982)、1979 年 3 月 15 日的 Homestead Valley 地震以及 1972 年尼加拉瓜的 Managua 地震的余震也是这种分布. 这种分布与主震产生的静态应力变化一致. Troise 等 (1998) 利用 Okada (1992) 给出的计算断层滑动产生的静态应力变化的解析表达式, 计算了亚平宁山脉 (意大利) 的几次地震导致的静态库仑应力变化, 得出

地震的每一次余震事件都连续地被前面的破裂事件所触发. Hardebeck等(1998)定量估计了1992年Landers $M_s7.3$ 地震和1994年Northridge $M_s6.7$ 地震对余震的触发情况, 结果表明: 对Landers地震, 在距离主震断层 $5\sim75$ km的范围内, 85%的余震事件与地震静态应力触发模型一致, 但该模型不能成功地解释Northridge地震的余震分布. 他们推测为构造体系、区域应力水平和断层强度在这两个地震断层上可能不同. Toda等(1998)计算了神户地震主震附近单位体积内最佳破裂面上的库仑破裂应力变化, 发现与地震活动速率变化有很好的对应关系. Pauchet等(1999)研究了法国Pyrenees东部Agly massif 1996年2月18日 $M_L5.2$ 地震之后的余震活动, 发现大部分余震集中在库仑破裂应力增加大于 0.2 MPa的区域内. Toda和Stein(2000)研究了南极板块1998年3月25日 $M_w8.1$ 地震对余震的触发情况, 指出余震位置处库仑破裂应力变化的典型值为 $0.1\sim0.2$ MPa. Seeber和Armbruster(2000)研究了Landers地震之后的地震活动性, 发现地震触发余震具有95%的置信度, 他们还根据促使余震破裂与抑制余震破裂数目比例最大得到了解断层面的滑动分布, 得出的滑动分布与其它资料(地形变、波形)得出的滑动分布基本一致. Robinson和McGinty(2000)根据他们得出的地下应力状态, 研究了Authur山口地震产生的余震分布, 发现在远离断层面处, 正库仑应力变化与地震活动性增加有很好的相关性, 他们采用的滑动在断层面的分布模型为随远离断层中心而线性减少的滑动分布模型. Wang(2000)运用弹性半空间位错模型, 计算了台湾集集主震($M_L7.3$)产生的库仑破裂应力变化, 发现逆冲带的大部分余震与主震在逆冲断层上产生的库仑破裂应力变化有关, 车龙甫断层两端的走滑运动也可能被静态应力转移作用所加强. 刘桂萍和傅征祥(2000)研究了唐山地震之后的地震活动性, 也得出了主震之后的地震活动性与库仑应力变化相关的结论. Pinar等(2001)指出, 马尔马拉海域东部的地震活动性的增强是静态应力增加触发所致.

2.2 大地震的静态触发

在地震触发另一次地震的研究中, Deng和Sykes(1997a, b)通过研究南加利福尼亚地区1812年以来地震产生的库仑破裂应力变化得出: 95%的 $M\geq6$ 的地震均发生在库仑应力变化驱使断层破裂的地区; 1932~1995年间85%的 $M\geq5$ 地震发生在正库仑应力变化区. Stein等(1997)研究了土耳其北安那托利亚断层自1939~1992年间的10次 $M\geq6.7$ 地震的应力转移情况, 计算得到9次地震在库仑破裂应力变化“驱使”下发生, 库仑破裂应力变化的典型值为 $0.1\sim1$ MPa, 相当于3~30年的长期应力加载效果; 在将应力转移转化为发震概率时, 给定1999年发生大地震的伊兹米特地区存在12%的发震概率. Nalbant等(1998)也研究了土耳其西北地区和北爱琴海地区的29次 $M_s\geq6$ 的地震, 发现16次地震与前面地震产生的库仑应力变化有关, 并给定伊兹米特为未来可能发生地震的地区, 结果伊兹米特在1999年果真发生了大地震. 由于单独由地震产生的静态库仑应力变化数值太小, 以上计算均考虑了由地形变观测资料得到的断层加载过程. Mikumo等(1999)计算了1985年墨西哥Michoacan $M_w8.1$ 逆冲地震在其上方的1997年垂直正断层 $M_w7.1$ 地震断层面上产生的库仑应力变化, 发现1997年地震发生在1985年地震的最大同震应力增加区, 其动态破裂图式也与计算的应力相互作用模式一致. 傅征祥和刘桂萍(1999)计算了1920年12月26日宁夏海原大地震($M_s8.5$)在1927年5月23日甘肃古浪大地震($M_s8.0$)断层面和滑动方向上产生的静态库仑应力变化, 其中大小为 0.01 MPa的数量级, 从而得出古浪大地震可能被海

原大地震触发,提前6年或20年发生的结论. Robinson和McGinty(2000)计算得到了1994年Authur山口地震在1995年Cass地震破裂面上产生的库仑破裂应力变化大于0.05 MPa,说明Authur山口地震对Cass地震有一定的触发作用. Papadimitriou等(2001)计算了1999年8月17日 M_w 7.4 Izmit地震产生的库仑破裂应力变化,发现1999年9月20日 M_w 5.8地震和1999年11月12日 M_w 7.2地震均发生在8月17日地震产生的库仑破裂应力变化为正的区城.

2.3 地震产生的应力影区

如果地震产生的正静态库仑应力变化能使断层上的地震活动性增高,那么,负库仑应力变化能否使断层上的地震活动性能降低呢?1983年加利福尼亚的Coalinga地震之后, Simpson等(1988)根据圣安德烈斯右旋断层左旋移动的地形变观测记录,计算了地震产生的“影区”(静态库仑应力变化为负的区域)效应,他们估计1983年的Coalinga地震使加利福尼亚中部的圣安德烈斯断层上的下一次中等地震至少延迟一年. Jaumé和Sykes(1996)研究1906年旧金山大地震对周围断层的影响时指出,旧金山湾地区的许多断层位于旧金山大地震产生的应力影区,这次大地震的发生使后续大地震至少延迟了几十年. Lienkaemper等(1997)发现Loma Prieta地震产生的应力影区可以减少Hayward断层上的蠕动速率,这使得Jaumé和Sykes(1996)的估计更加有效. Ziv和Rubin(2000)根据加利福尼亚中部断层的合理长期加载速率,研究了负库仑破裂应力变化导致后续地震破裂时间的延迟,发现大部分事件是在长期构造加载弥补了负库仑破裂应力变化后才发生的.

2.4 静态应力触发机制

似乎0.01 MPa(0.1 bar)大小的静态应力变化可以影响到余震的位置(Reasenber, Simpson, 1992; King *et al.*, 1994; Hardebeck *et al.*, 1998; Harris, 1998; Stein, 1999). Rydelek和Sacks(1999)运用细胞自动机模型的模拟结果也与此结论一致. 然而,这是物理触发的低阈值还是仅仅是地震台网检测能力的低阈值,仍然是一个未解决的问题(Harris, 1998; Hardebeck *et al.*, 1998). 0.01 MPa这个值仅是地震过程中应力降(~ 10 MPa的量级)的很小一部分. 在一些例子中,更小一点的应力变化(小于0.01 MPa)确实显示出与地震活动的模式相同(Ziv, Rubin, 2000; 刘桂萍, 傅征祥, 2000). 与地球岩石层中已经积累起来的应力相比,通过地震释放的应力不过是一个很小的部分(Main, 1996; Grasso, Sornette, 1998);与地球提供给板块运动的能量相比,地震所释放的能量也仅仅是很小的部分. 这样,地球板块仿佛一直处在不稳定的边缘,而地震似乎可以看成是围绕这一“临界状态”的“涨落”(吴忠良, 2000). 由此看来,触发地震似乎无须非常大的应力变化. 但这一说法还有很大讨论的余地.

2.5 一些反例

虽然地震静态应力触发模型在解释余震的空间分布和后续地震的发震时间、位置取得了肯定结果,但对某些地震是不成功的. Beroza和Zoback(1993)以及Kilb等(1997)研究Loma Prieta地震余震序列的结果表明,主震产生的静态应力变化不能充分解释每次余震的震源机制. Perfettini等(1999)研究了1988年6月27日及1989年8月8日Lake Elsman地震和1989年10月18日Loma Prieta地震的触发关系,发现1988年6月27日的事件产生的静态库仑破裂应力变化有利于1989年8月8日事件的发生,但这两个事件产生的静态库仑

破裂应力变化总和并不利于Loma Prieta地震的发生,而是使其断层面的正应力减小.他们发现在正应力减小最大的地区滑动量最大.这些结果与Parsons和Dreger(2000)计算的1992年Landers地震对1999年Hector Mine地震的静态应力作用结果一致.1987年11月24日Elmore Ranch $M_{\text{L}}6.2$ 地震也同样地减少了Superstition Hill地震断面上的正应力,然而静态库仑应力变化为负,即不利于后续破裂的发生.这也许可以从变化的视摩擦系数得到解释(Anderson, Johnson, 1999).Astiz等(2000)研究了加利福尼亚1990年Upland $M_{\text{L}}5.5$ 地震余震的精定位分布,指出库仑破裂应力变化几乎是关于断层对称的,而离开断层的余震大部分分布在断层的一侧.他们指出,这可能与地震震源的非对称性因素(如流体)有关.Horikawa(2001)研究了日本1997年3月26日地震对5月13日地震的影响,发现5月13日地震震源位置落在3月26日地震产生的应力影区之中.

3 地震动态应力触发

1992年6月28日,加利福尼亚Landers地震发生之后,在数秒到数天内,远离Landers震中1250 km的地方地震活动性突然增加(Hill *et al.*, 1993; Anderson *et al.*, 1994; Bodin, Gomberg, 1994).加利福尼亚Long Valley地区和The Geysers地区在Landers地震产生的Love和Rayleigh面波到达后地震活动性就增加了,3.5小时之后发生了Big Bear地震.6月29日远离震中280 km处发生了 $M_{\text{S}}5.4$ Little Skull Mountain地震(约22小时后).其西部的地震活动性至少持续了一个月(Gomberg, Davis, 1996).Wen等(1996)检验了台湾地区地震活动性的远程“触发”问题,发现远处的大地震可以触发中等地震,触发的最大距离为3000 km.被远处(几个震源尺度)的地震触发了较小地震的例子在日本(Kanamori, 1972)、哥斯达黎加(Protti *et al.*, 1995)也被观测到.这种现象促使地震学家开始研究地震远程触发问题.

3.1 地震产生的动态应力变化与后续地震

在如此远的距离,地震产生的静态库仑破裂应力变化太小(小于触发阈值0.01 MPa),不能触发地震.最常见的解释是地震产生的低频率地震波破坏了趋于破裂边缘的断层稳定性(Hill *et al.*, 1993; Anderson *et al.*, 1994).Kilb等(2000)研究了Landers地震在近场产生的动态库仑破裂应力变化峰值以及震后地震活动性的改变,发现Landers地震产生的动态库仑应力变化峰值与静态库仑应力变化在空间延伸方向上是一致的,动态库仑应力变化峰值由于具有非对称性而能更好地解释地震之后地震活动性的改变.Gomberg(1996)由宽频带地震波资料计算了动态应变和应力,并研究了Landers地震之后的远程地震触发问题,她比较了触发区(地震活动增加区)和未触发区的动态库仑破裂函数和应变图,指出虽然地震产生的动态应变比静态应变大得多,但不能解释被触发地震活动性的空间分布.Landers地震之后,震中北部的Great Basin地区地震活动性急剧增加,而在较近距离的圣安德烈斯断层上(Parkfield)却没有可分辨的触发作用(Hill *et al.*, 1993).Parkfield地区的形变测量数据表明,圣安德烈斯断层在Parkfield地区已加载到接近破裂的水平(Segall, Harris, 1986).一般说来,如果远处的触发作用明显,则近处的触发作用应更明显(Spudich *et al.*, 1995).另外,Joshua Tree地震产生的动态应变的时空分布与Landers地震基本相同,并没有触发远处的地震活动性(Gomberg, 1996).这些现象均与传统的动态“应力触发”

概念不一致. 地震波导致地球内部应变的频率成分是否与触发有关呢? Gomberg 和 Davis (1996) 通过对 The Geysers 地区的远程地震触发问题研究, 认为触发临界应变阈值随频率的减小而增加. 他们还给出了具体函数关系, 给出地震触发的应变频带宽度为 0.05~0.25 Hz. Hill 等 (1993) 和 Anderson 等 (1994) 在研究 Landers 地震的动态应力触发问题时指出: 地震之后动态应力触发的最大延迟时间为 15 天. Wen 等 (1996) 在检验台湾地震被远处地震触发时就采用了 15 天, 他们发现地震可触发远处 4 级左右的中等地震.

地震动态触发是否与被触发地震的类型有关呢? Spudich 等 (1995) 计算得到 Landers 地震在 412 km 远的 Parkfield 地区产生的应力水平分量较大的区域集中在 5~6 km 深处, 可以触发走滑或正断层机制的地震活动, 而 Parkfield 地区的圣安德烈斯断层为压性构造, 因此, 动态应力变化不易触发这里的地震活动. Gomberg 和 Bodin (1994) 也指出, Landers 地震产生的动态应变有利于触发正断层机制地震. Hill 等 (1993) 指出, 被触发的地震发生在火山或地热区, 其典型的机制为走滑断层或正断层, 但 Anderson 等 (1994) 指出, 大量被 Landers 地震触发的地震活动 (东加利福尼亚和西内华达) 没有发生在地热区或火山区. Brodsky 等 (2000) 研究了土耳其伊兹米特 $M_w 7.4$ 地震后希腊境内距震中 400~1 000 km 远的地震活动性, 也发现被动态应力变化触发的地震活动在非火山区. 因此, Landers 地震产生的动态应力可能有利于张性构造地区地震的发生, 而与地热或火山构造无关, 这样就可以解释了圣安德烈斯断层处缺乏地震活动的现象.

为了解释地震活动性随时间的变化, Gomberg 等 (1997) 假定地震为一个粘滑过程, 并运用弹簧滑块模型和依赖于速率状态的摩擦本构关系, 模拟了动态加载的应力变化导致地震时间的提前. 结果表明, 瞬态加载可以导致发震时间的提前, 并且发生在振动之后 (而不是振动中). 触发作用延迟或提前发震时间的程度非线性地依赖于地震周期. 另外, 高频、持续时间较长的地震波使发震时间提前较多. 他们的模拟结果还表明, 幅度大的地震波还可以使本来以稳定状态滑动的断层变为粘滑, 从而致使没有地震的地区出现地震. Gomberg 等 (1998) 运用弹簧滑块模型, 研究了地震时间提前与在地震周期中不同点受到动态和静态扰动的关系. 他们发现, 静态应力扰动在地震周期后期导致的发震时间提前小于地震周期前期; 而动态应力变化在地震周期后期导致的发震时间提前大于地震周期前期.

“地震动态应力触发”阈值随地点的不同而不同, 依赖于所属地块的特性和响应, 并与滑动不稳定理论有关 (Gomberg, 1996). 在远场范围内, 动态应力变化大大超过了静态应力变化. 但是在近场, 两者可能都很重要 (Cotton, Coutant, 1997). 现已观测到一次地震几秒钟之后触发另一次地震的例子 (Harris, 1998). 当地震产生的正库仑应力变化沿着断层走向分布并触发那里的破裂时, 会导致较大的地震和较复杂的破裂过程 (Harris *et al.*, 1991; Harris, Day, 1993).

3.2 地球潮汐与地震触发

地球的潮汐是用来研究地震触发的天然动态应力过程. 地震学家很早就对固体潮触发地震进行了研究 (Knopoff, Gardner, 1964; Ryall *et al.*, 1968; Shlien, 1972; Heaton, 1975; 高锡铭等, 1981; 丁中一等, 1983), 但未得到一致的结论. 潮汐应力速率比我们现在认为的与地震有联系的构造加载速率快得多. 虽然最近 Vidale 等 (1998a) 在检查了潮汐应力在地震触发中的作用时, 曾得出速率为 0.001 MPa/h (0.01 bar/h) 的动态应力不能独

自触发地震, 但 Lockner 和 Beeler(1999)对实验室样品进行周期应力加载模拟潮汐作用, 发现 0.01 MPa 的应力变化与余震活动性有关. Vidale 等(1998b)用重复实验产生了 27 500 个震动事件, 发现在潮汐库仑破裂应力峰值处的地震活动速率变化比平时高 1.0%, 置信水平为 95%, 因此得出的结论是, 潮汐可改变地震活动速率, 但影响很小. Perfettini 和 Schmittbuhl(2001)研究了蠕滑断层上变化的正应力和剪切应力对断层滑动的影响, 发现潮汐触发作用可能存在, 但难以准确观测.

3.3 大震产生的地球自由振荡与地震触发

Whiteside 和 Ben-Zion(1995)提出了一种地震触发模型. 其物理意义是, 对那些已加载并处于破裂边缘的断层, 在外源应力的作用下会引发一些小震. 这些小震总是要发生的, 但由于外部附加应力的作用使它们提前几秒或几分发生, 即它们是外加应力触发的. 他们提出的外加应力源为地球上任何一个地方发生的震级足够大地震产生的地球自由振荡. 虽然地球自由振荡产生的应力量级远远小于固体潮量级, 而固体潮本身所产生的应力量级明显小于或接近于触发地震所需的应力阈值(Klein, 1976; Bodri, Iizuka, 1989; Hartzell, Heaton, 1990). 但假定小震若能由地球自由振荡所产生的应力触发, 则在有限区域内地震数目的增加将预示着这个地区处于高应力状态, 是一个潜在的大震区. 而 Costello 和 Tullis(1999)运用这种模型检验了 1989 年 10 月 18 日的 Loma Prieta 地震之前的情况, 发现 Loma Prieta 地震之前触发参数并没有增大.

4 粘弹模型与地震触发

前面提到动态库仑应力触发, 然而如果我们将动态库仑破裂应力的频谱移到极低的一端, 则对应于岩石层和软流层的长期加载和松弛效应. 一些研究者为了更好地解释初始地震事件和被触发事件之间的数十年的长时间关联而引入了粘弹性效应(Freed, Lin, 1998, 2001). Rice 和 Gu(1983)运用粘弹性模型, 解释了地震引起的大范围震后效应、并进而可触发后续地震的现象. Dmowska 等(1988)运用一维模型, 研究了地震周期中消减带的应力涨落(变化)对主震之后大余震或后续主震的影响. 在其它构造背景下, Pollitz 和 Sacks(1997)对粘弹性模型地震触发的研究表明, 1995 年日本神户地震被约 50 年前发生的 1944 年和 1946 年日本两次 8 级大地震所触发. 粘弹性分析被广泛应用于转换断层地区, Roth(1988)分别运用弹性和粘弹性模型, 研究了北安那托利亚断层西部的地震活动性, 发现对于 $M \geq 6$ 地震的时空分布, 两种模型均能很好地解释. Ben-Zion 等(1993)运用粘弹性模型, 研究了发生在圣安德烈斯断层上的 1857 年 Fort Tejon 和 1906 年旧金山地震对 Parkfield 地震(位于两次地震之间)发震时间的调制作用. 他们指出, 1857 年 Fort Tejon 地震由于距离 Parkfield 地震震源较近, 影响其发震时间; 1906 年的旧金山地震距离太远, 无法对 Parkfield 地震发震时间产生较大的影响. Ghosh 等(1992)对弹性介质覆盖于半空间粘弹性介质之上的情况, 研究了两个平行走滑断层的相互作用. 他们描述了断层蠕动对邻近断层上发生地震可能性的影响. Deng 和 Sykes(1997a, b)在研究南加利福尼亚的应力演化与中、小地震活动性之间的关系时也考虑了粘弹性的影响.

5 火山喷发或爆炸与地震触发

像地震可以引起震源周围的应力变化一样, 岩浆运移也会使其周围的应力场产生变化 (Stuart, Johnston, 1975). 因此, 触发地震的库仑破裂假说也可以通过火山和地震活动性之间的关系来验证. 早在 20 世纪 80 年代, Thatcher 和 Savage (1982) 就运用岩浆膨胀模型, 计算了日本 Izu 半岛 3 个地震断层面上的正应力和剪切应力, 并运用库仑破裂准则, 发现有两次地震在膨胀产生的应力驱使下发生; 虽然应力变化只有 0.1 MPa 的数量级, 但等价于几十年到一个世纪的长期加载结果. Nostro 等 (1998) 根据维苏威 (Vesuvius) 火山喷发记录和意大利南平宁地震记录, 研究库仑破裂应力变化能否解释火山喷发与地震事件之间的时间上和空间上的分布. 结果表明, 库仑破裂应力变化可以解释所有的观测结果. Ágústsson 等 (1999) 研究了冰岛南部 Vatnafjöll 火山区 1987 年地震活动与火山喷发情况, 发现开始于前震之后 10 分钟缓慢的应变变化, 可能预示着岩浆活动的开始, 岩浆喷发和应力释放可能影响周围的应变场并触发主震. Nishimura 等 (2001) 发现, 日本北部 Iwate 火山岩浆膨胀使 1998 年 9 月 3 日 $M6.1$ 地震震源处的库仑破裂应力增加 0.33 MPa (为同震应力降的 7%), 因此, 火山活动可以触发地震. Nikolaev (1995) 根据地下核爆炸后的地震数据统计, 得出地下核爆炸可以影响远离爆破源地地震活动性的结论. 但对这一点目前还有争议.

6 地震影响后续地震的其它解释

孔隙流体迁移导致孔隙压力变化在解释人工导致的地震活动性方面获得了成功 (Seeber *et al.*, 1998). 这种效应也被用来解释地震之间的关系. Nur 和 Booker (1972) 指出, 主震产生的孔隙压力变化可以控制余震的发震时间. Li 等 (1987) 试图观测由于孔隙流体流动而导致的余震位置的时空迁移. Hudnut 等 (1989) 运用孔隙压力变化解释 1987 年 Elmore Ranch 和 Supersition Hill 两次地震之间的 11 小时的延迟. Jaumé 和 Sykes (1992) 讨论了 1992 年 Landers 地震造成的孔隙流体的潜在效应. Noir 等 (1997) 对 Afar 中部地震序列的研究也支持流体流动影响地震活动迁移的假说. 另一方面, 一些研究者提出, 流体流动不可能是触发余震的唯一机制 (Mendoza, Hartzell, 1988; Scholz, 1990).

Lomnitz (1996) 指出, 1992 年 6 月 28 日 Landers $M7.3$ 地震之后的地震活动性分为两个区: 余震区和 300~1 000 km 范围内的触发地震活动区. 这两个区由环形空区分隔. 这种“墨西哥草帽”图式是由于地震之后流体流动恢复所致. 他的结论是, 触发的地震活动性是由于地球深部流体流动对地震的响应.

7 存在问题及未来的研究

虽然地震“静态应力触发”问题研究已在全世界范围内展开, 但同一地震不同破裂事件之间的静态应力触发问题研究相对较少. 近年来, 随着数字 (宽频带) 地震学的发展, 人们可以得到地震的比较准确的震源参数, 并在一定程度上得到地震的详细破裂过程, 这就为定量研究地震之间和同一次地震中不同破裂事件之间的静态应力触发问题提供了有利的条件. 因此, 积累地震震例 (个例) 研究结果, 仍然是今后一段时间的研究内容.

虽然大地震产生的静态应力触发后续地震活动的震例被广泛报道, 然而研究过静态应力触发的地震大部分集中在加利福尼亚、内华达以及土耳其、日本和中国, 远未达到全球的系统性. 另外, 由于每个研究者所采用模型、地震资料以及数据处理方法的不同, 因而很难进行比较以检验地震静态应力触发模型的正确性. 图 1 为从文献中查出的库仑破裂应力变化与后续地震延迟时间的关系图, 我们很难从中找到确定的规律. 自 1976 年以来, 哈佛大学的地震矩张量目录和 USGS 提供了优质详细的全球地震参数, 为我们对地震应力触发模型进行检验提供了可靠的数据, 使得运用统一标准数据对应力触发模型进行检验成为可能. 地震静态应力触发模型是对所有地震成立, 还是局限于某一类型的地震, 这是一个至今没有明确的问题. 运用全球地震资料对正断层、逆断层、走滑断层等分别进行检验, 可以明确哪种类型地震更适合于静态应力触发模型, 这也许是一项有意义的课题. 另外, 自 1920 年宁夏海原大地震以来, 中国积累了详细的地震震源机制资料. 利用中国及邻区地震资料对静态应力触发模型进行检验, 确定该模型在中国及邻区的适用程度, 对中国的防震减灾事业更具有实际意义.

目前地震静态应力触发问题的研究要求准确的震源机制资料和地震参数信息. 如果地震机制资料的误差太大, 将会导致地震产生的应力触发区域不明确, 从而无法对静态应力触发问题进行深入细致的研究. 因此, 考虑震源机制测定误差对地震静态应力触发模型计算结果的影响, 对应力触发问题进行检验是一项有意义的研究课题.

地震断层错动在后续地震破裂面和滑动方向上产生的库仑破裂应力变化太小, 大约为 0.01 MPa 的数量级. 这样大小的应力变化比典型的地震应力降 (约 10 MPa 的数量级) 小 3 个数量级, 比震源深度处的应力值 (约 100 MPa 的数量级) 小 4 个数量级. 这样大小的库仑应力变化影响后续地震破裂事件的位置令人难以置信. 在 Deng 和 Sykes (1997a, b) 以及 Nalbant 等 (1998) 计算 1999 年土耳其伊兹米特地震发震概率的研究中, 也许是由于地震产生的库仑破裂应力变化太小, 他们还考虑了地震断层的长期加载结果. 目前对地震之间或同一地震不同破裂事件之间的触发机理的研究还没有明确的结果.

目前地震静态应力触发模型的研究很少考虑构造应力场的影响, 而是自零应力状态开始计算. 虽然目前构造应力场的完全确定几乎是不可能的, 但大致勾画出一个可能范围是必要的 (石耀霖, 2001). 结合构造应力场, 研究库仑破裂应力变化对后续地震的影响可能是应力触发研究的一个努力方向.

在地震应力触发计算中, 常采用比较简单的弹性半空间模型. 实际上, 地球介质的三维不均匀结构对库仑破裂应力变化的计算结果有一定影响. 另外, 由于地球的粘弹性松弛效应, 大地震后会产生应变的扩散 (Rundle, 1978; Rydelek, Sacks, 1990, 1999; Deng et

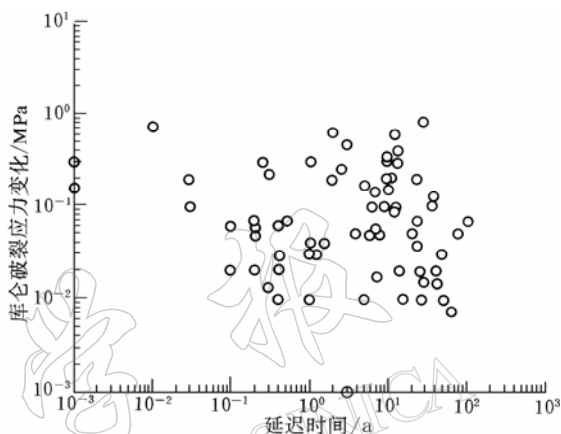


图 1 自文献查出的库仑破裂应力变化与后续地震延迟时间分布图

al., 1999), 这些效应也会对应力触发的检验结果产生一些影响. 考虑这方面的影响, 逐渐趋于真实的介质模型是一个努力方向.

高孔隙压力流体的存在, 可以成功地解释圣安德烈斯断层地热流量密度低和断层外围主压应力方向与断层成近乎垂直的高角度现象(石耀霖, 2001). 巴巴多斯俯冲带的地震和钻探结果, 以及最近日本、新西兰地震层析成像和大地电磁测深的成果也都提供了高孔隙水压存在的观测证据(Zhao *et al.*, 1996), 因而, 地震产生的应力变化导致的流体在含水层中的迁移可能是在中等时间尺度(几天至几个月)上影响后续地震发生的因素之一(Hudnut *et al.*, 1989; Noir *et al.*, 1997). 因此, 定量估计流体在孕震过程中的力学作用, 在应力触发问题的研究中是有意义的.

断层本身的强度是随时间变化的, 在实验室研究认为, 断层错动后强度随时间对数增加. 最近在加州对大地震后断裂带内波速的重复测量也观测到断层内波速增加的现象. 表明其强度可能恢复(Li *et al.*, 1998). 这种强度变化对后续地震的发生也是有影响的, 定量或定性考虑这些影响, 对于应力触发研究是有意义的.

尽管大部分地震释放的能量和断层位移与大地震相联系, 但某些活动断层上的小震对应力调整的影响也是不容忽略的. Nadeau 和 McEvilly (1999) 在加州的 Parkfield 附近地下 250 m 安装了钻孔地震台阵(这样可降低噪音), 并记录到 1966 年地震震中区的一 1 级地震. 在过去的 11 年内共记录到 6 000 多次微震, 它们大多在空间上呈明显的成群分布. 共辨认出 300 多群, 经历了大约 20 次重复的“特征”地震. 这说明在一些特定情况下, 小震错动量及其对应力调整的作用也是不容忽视的. 虽然精确考虑每一次小震的精确震源参数, 估计其对区域应力场的贡献是困难的, 但在统计意义上考虑小震的影响, 是应力触发研究的一个可能有意义的方向.

大多数地震静态应力触发研究, 没有考虑不产生地震波辐射的“慢地震”转移的库仑应力变化对后续破裂事件的影响. 慢地震随着观测技术的提高而逐渐被人们所认识(Crescentini *et al.*, 1996; McGuire *et al.*, 1996; Kerr, 1997; Takai *et al.*, 1999). 实际上, 慢地震在地震活动性的动力学研究中具有重要的意义(Dragoni, Tallarico, 1992; Peresan *et al.*, 1999; 吴忠良, 2000; 石耀霖, 2001). Peresan 等(1999)曾用 CN 方法——这是由俄罗斯科学院国际地震预测理论与数学地球物理研究所发展起来的一种地震预测方法. 这一方法使用模式识别技术, 通过地震活动性的研究来判断地震发生的“概率增加时段”(TIP)——对意大利北部进行地震预测试验. 在所划定的“地震危险时段”中大多有地震发生, 但在 1972~1976 年的一段“危险时段”并没有地震发生. 然而从 1973 年开始, 在意大利北部 Trieste 附近的倾斜仪上记录到明显的“静地震”信号, 这表明这段时间的异常不是与地震, 而是与“静地震”联系在一起的; 或者说, 所观测到的地震学前兆异常的确反映了震源区应力场的某种变化, 但应变的释放不是通过地震, 而是通过静地震实现的. Kawasaki 等(2001)在日本海沟地震的研究中, 同时考虑了地震和静地震的作用, 把“地震空区”的概念推广为“矩释放空区”. 在静态应力触发问题讨论中, 地震和静地震的发生都是通过库仑破裂应力变化, 触发或抑制另一次地震发生的. 然而在静地震的分布和性质未知的情况下, 单纯从地震的分布和震源机制计算得到的库仑破裂应力变化的变化图象肯定是不完善的. 原则上讲, 由此而带来的结果偏差远大于由地壳结构和震源过程细

节所带来的偏差。目前通过形变观测, 已经可以记录到完整的静地震序列(Linde *et al.*, 1996; Crescentini *et al.*, 1996), 并通过静地震参数的标度关系的研究来约束静地震的动力学模型。值得注意的是, 甚宽频带地震观测技术的发展, 已经开始在一定程度上模糊了形变观测和地震观测的界限。利用甚宽频带地震观测资料进行静地震的研究, 将成为一个重要的发展方向。此外, 还有一些报道, 用长周期地震资料研究地震之前的静地震(Jordan, 1991; Ihmle *et al.*, 1993; Ihmle, Jordan, 1994; McGuire *et al.*, 1996), 不过在这方面还有争议(Kedar *et al.*, 1994)。积累地震矩释放与形变观测资料的比较表明, 在所能观测到的地壳形变中, 通过地震释放的形变只占全部形变的很小一部分(Ward, 1998a, b)。因此, “静地震”对库仑破裂应力变化的影响似乎是不可忽视的。另外, 1999 年 8 月 17 日土耳其伊兹米特地震震前、震后的 GPS 测量及 InSAR 测量表明, 地震时发生了大幅度的同震位移, 断层错动最大可达 5.7 m, 而震后 75 天继续发生无震滑动, 错动最大达 0.43 m, 相当于一次 7 级地震(Reilinger *et al.*, 2000)。这种无震滑动在应力场调整估计中也是不可忽略的因素。

随着地震学的发展和对地球结构的深入了解以及资料的积累, 考虑上述因素对应力触发问题进行研究, 可以进一步揭开地震之间的相互作用之谜, 为地震危险性估计和防震减灾研究提供基础资料。

本文及有关研究工作得到中国地震局地球物理研究所许忠淮、张天中、张东宁研究员, 陈运泰院士; 中国地震局分析预报中心张国民、傅征祥研究员; 中国地震局地壳应力研究所黄福明研究员等的帮助和支持。在此一并致谢。

参 考 文 献

- 陈连旺, 陆远忠, 刘杰, 等. 2001. 1966 年邢台地震引起的华北地区应力场动态演化过程的三维粘弹性模拟[J]. 地震学报, 23(5): 480~491
- 陈运泰, 林邦慧, 林中洋, 等. 1975. 根据地面形变的观测研究 1966 年邢台地震的震源过程[J]. 地球物理学报, 18(3): 164~182
- 丁中一, 贾晋康, 王仁. 1983. 潮汐应力对地震的触发作用[J]. 地震学报, 5(2): 172~184
- 傅征祥, 刘桂萍. 1999. 海原大地震可能触发古浪大地震的力学机制[A]. 见: 陈运泰主编. 中国地震学会成立 20 周年纪念文集[C]. 北京: 地震出版社, 234~243
- 高锡铭, 殷志山, 王威中, 等. 1981. 固体潮应力张量对地震的触发作用[J]. 地震学报, 3(3): 264~275
- 谷继成, 谢小碧, 赵莉. 1982. 强余震的空间分布特征及其理论解释[J]. 地震学报, 4(4): 380~388
- 黄福明, 王廷崑. 1983. 多段断层均匀滑动的应力分布特征[J]. 地球物理学报, 26(增刊): 678~692
- 黄福明, 陈修启. 1992. 大震广义影响场的讨论[J]. 地震学报, 14(4): 400~406
- 刘桂萍, 傅征祥. 2000. 1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级地震触发的区域地震活动和静应力场变化[J]. 地震学报, 22(5): 17~26
- 石耀霖. 2001. 关于应力触发和应力影概念在地震预报中应用的一些思考[J]. 地震, 21(3): 1~7
- 万永革, 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
- 王仁, 何国琦, 殷有泉, 等. 1980. 华北地区地震迁移规律的数学模拟[J]. 地震学报, 2(1): 32~42
- 王仁, 孙苟英, 蔡永恩. 1982. 华北地区近 700 年地震序列的数学模拟[J]. 中国科学(B 辑), (8): 745~753
- 吴忠良. 2000. 地震震源物理中的临界现象[M]. 北京: 地震出版社, 86~109
- Ágústsson K, Linde A T, Stefánsson R, *et al.* 1999. Strain changes for the 1987 Vatnafjöll earthquake in south Iceland and possible magmatic triggering[J]. *J Geophys Res*, 104: 1 151~1 161
- Anderson J G, Brune J N, Louie J N, *et al.* 1994. Seismicity in the western Great Basin apparently triggered by the Landers, California, earthquake, 28 June 1992[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 84: 863~891

- Anderson G, Johnson H. 1999. A new statistical test for static stress triggering: Application to the 1987 Superstition Hills earthquake sequence [J]. *J Geophys Res*, **104**: 20 153~20 168
- Astiz L, Shearer P M, Agnew D. 2000. Precise relocations and stress change calculations for the Upland earthquake sequence in southern California [J]. *J Geophys Res*, **105**: 2 937~2 953
- Bennett R A, Reilinger R E, Rodi W, *et al.* 1995. Coseismic fault slip associated with the 1992 M_w 6.1 Joshua Tree, California, earthquake: Implications for the Joshua Tree-Landers earthquake sequence [J]. *J Geophys Res*, **100**: 6 443~6 461
- Ben-Zion Y, Rice J R, Dmowska R. 1993. Interaction of the San Andreas fault creeping segment with adjacent great rupture zones and earthquake recurrence at Parkfield [J]. *J Geophys Res*, **98**: 2 135~2 144
- Beroza G C, Zoback M D. 1993. Mechanism diversity of the Loma Prieta aftershocks and the mechanics of mainshock-aftershock interaction[J]. *Science*, **259**: 210~213
- Bodin P, Gomberg J. 1994. Triggered seismicity and deformation between the Landers, California, and Little Skull mountain, Nevada, earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **84**: 835~843
- Bodri B, Iizuka S. 1989. On the correlation between Earth tidal and microseismic activity[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **55**: 126~134
- Brotsky E E, Karakostas V, Kanamoro H. 2000. A new observation of dynamically triggered regional seismicity: Earthquakes in Greece following the August, 1999 Izmit, Turkey earthquake[J]. *Geophys Res Lett*, **27**: 2 741~2 744
- Bürgmann R, Segall P, Lisowski M, *et al.* 1997. Postseismic strain following the 1989 Loma Prieta earthquake from GPS and leveling measurements[J]. *J Geophys Res*, **102**: 4 933~4 955.
- Caskey S J, Wesnousky S G. 1997. Static stress changes and earthquake triggering during the 1954 Fairview Peak and Dixie Valley earthquakes, central Nevada[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **87**: 521~527
- Chinnery M A. 1961. The deformation of the ground surface faults[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **50**: 355~372
- Chinnery M A. 1963. The stress changes that accompany strike-slip faulting[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **53**: 921~932
- Costello S W, Tullis T E. 1999. Can free oscillations trigger foreshocks that allow earthquake prediction?[J]. *Geophys Res Lett*, **26**: 891~894
- Cotton F, Coutant O. 1997. Dynamic stress variations due to shear faulting in a plane-layered medium[J]. *Geophys J Int*, **128**: 676~688
- Crescentini L, Amoroso A, Scarpa R. 1996. Constraints on slow earthquake dynamics from a swarm in central Italy[J]. *Science*, **266**: 2 132~2 134
- Das S. 1992. Reactivation of an oceanic fracture by the Macquarie Ridge earthquake of 1989[J]. *Nature*, **357**: 150~153
- Das S, Scholz C. 1981. Off-fault aftershock clusters caused by shear stress increase?[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **71**: 1 669~1 675
- Delouis B, Philip H, Dorbath L, *et al.* 1998. Recent crustal deformation in the Antofagasta region (northern Chile) and the subduction process[J]. *Geophys J Int*, **132**: 302~338
- Deng J, Hudnut K, Gurnis M, *et al.* 1999. Stress loading from viscous flow in the lower crust and triggering of aftershock following the 1994 Northridge, California, earthquake[J]. *Geophys Res Lett*, **26**: 3 209~3 212
- Deng J, Sykes L R. 1997a. Evolution of the stress field in southern California and triggering of moderate-size earthquakes: A 200-year perspective[J]. *J Geophys Res*, **102**: 9 859~9 886
- Deng J, Sykes L R. 1997b. Stress evolution in southern California and triggering of moderate-, small-, and micro-size earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **102**: 24 411~24 435
- Dmowska R, Rice J R, Lovison L C, *et al.* 1988. Stress transfer and seismic phenomena in coupled subduction zones during the earthquake cycle[J]. *J Geophys Res*, **93**: 7 869~7 884
- Dragonì M, Tallarico A. 1992. Interaction between seismic and aseismic slip along a transcurrent plate boundary: a model for aseismic sequences[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **72**: 49~57
- Du Y, Aydin A. 1993. Stress transfer during three sequential moderate earthquakes along the central Calaveras fault, California[J]. *J Geophys Res*, **98**: 9 947~9 962
- Erickson L L. 1986. *A three-dimensional dislocation program with applications to faulting in the earth*[D]: [Master's Thesis]. Palo, Calif: Stanford Univ, 167
- Freed A M, Lin J. 1998. Time-dependent changes in failure stress following thrust earthquake[J]. *J Geophys Res*, **103**: 24 393~24 409
- Freed A M, Lin J. 2001. Delayed triggering of the 1999 Hector Mine earthquake by viscoelastic stress transfer[J]. *Nature*, **411**: 180~183
- Ghosh U, Mukhopadhyay A, Sen S. 1992. On two interacting creeping vertical surface-breaking strike-slip faults in a two-layer model of the lithosphere[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **70**: 119~129
- Gomberg J. 1996. Stress/strain changes and triggered seismicity following the M_w 7.3 Landers, California, earthquake[J]. *J Geophys Res*, **101**: 751~764

- Gomberg J, Beeler N M, Blanpied M L, *et al.* 1998. Earthquake triggering by transient and static deformations[J]. *J Geophys Res*, **103**: 24 411~24 426
- Gomberg J, Blanpied M L, Beeler N M. 1997. Transient triggering of near and distant earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **87**: 294~309
- Gomberg J, Bodin P. 1994. Triggering of the $M_s=5.4$ Little Skull mountain, Nevada, earthquake with dynamic strain[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **84**: 844~853
- Gomberg J, Davis S. 1996. Stress/strain changes and triggered seismicity at The Geysers, California[J]. *J Geophys Res*, **101**: 733~749
- Grasso J R, Sornette D. 1998. Testing self-organized criticality by induced seismicity[J]. *J Geophys Res*, **103**: 29 965~29 987
- Green D H, Wang H F. 1986. Fluid pressure response to undrained compression in saturated sedimentary rock[J]. *Geophysics*, **51**: 948~956
- Gross S, Bürgmann R. 1998. The rate and state of background stress estimated from the aftershocks of the 1989 Loma Prieta, California, earthquake[J]. *J Geophys Res*, **103**: 4 915~4 927
- Hardebeck J L, Nazareth J J, Hauksson E. 1998. The static stress change triggering model: Constraints from two southern California aftershock sequences [J]. *J Geophys Res*, **103**: 24 427~24 437
- Harris R A. 1998. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard[J]. *J Geophys Res*, **103**: 24 347~24 358
- Harris R A, Archuleta R J, Day S M. 1991. Fault steps and the dynamic rupture process: 2-d numerical simulations of a spontaneously propagating shear fracture[J]. *Geophys Res Lett*, **18**: 893~896
- Harris R A, Day S M. 1993. Dynamics of fault interaction: parallel strike-slip fault[J]. *J Geophys Res*, **98**: 4 461~4 472
- Harris R A, Simpson R W. 1992. Changes in static stress on southern California faults after the 1992 Landers earthquake[J]. *Nature*, **360**: 251~254
- Harris R A, Simpson R W. 1996. In the shadow of 1857—The effect of the great Ft. Tejon earthquake on subsequent earthquakes in southern California[J]. *Geophys Res Lett*, **23**: 229~232
- Harris R A, Simpson R W, Reasenberg P A. 1995. Influence of static stress changes on earthquake locations in southern California[J]. *Nature*, **375**: 221~224
- Hartzell S, Heaton T. 1990. The fortnightly tide and the tidal triggering of earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **80**: 504~505
- Heaton T H. 1975. Tidal triggering of earthquakes[J]. *Geophys J R astr Soc*, **43**: 307~323
- Hill D P, Reasenberg P A, Michael A, *et al.* 1993. Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers, California, earthquake[J]. *Science*, **260**: 1 617~1 623
- Hodgkinson K M, Stein R S, King G C P. 1996. The 1954 Rainbow Mountain–Fairview Peak–Dixie Valley earthquakes: A triggered normal faulting sequence[J]. *J Geophys Res*, **101**: 25 459~25 471
- Horikawa H. 2001. Earthquake doublet in Kagoshima, Japan: rupture of asperities in a stress shadow[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **91**: 112~127
- Hubert-Ferrari A, Barka A, Jacques E, *et al.* 2000. Seismic hazard in the Marmara Sea region following the 17 August 1999 Izmit earthquake[J]. *Nature*, **404**: 269~272
- Hudnut K W, Seeber L, Pacheco J. 1989. Cross-fault triggering in the November 1987 Superstition Hills earthquake sequence, southern California[J]. *Geophys Res Lett*, **16**: 199~202
- Ihmle P F, Harabaglia P, Jordan T H. 1993. Teleseismic detection for a slow precursor to the great 1989 Macquarie Ridge earthquake[J]. *Science*, **261**: 177~183
- Ihmle P F, Jordan T H. 1994. Teleseismic research for slow precursors to large earthquakes[J]. *Science*, **266**: 1 547~1 551
- Jacques E, King G C P, Tapponnier P, *et al.* 1996. Seismic activity triggered by stress changes after the 1978 events in the Asal Rift, Djibouti[J]. *Geophys Res Lett*, **23**: 2 481~2 484
- Jaeger J C, Cook N G W. 1969. *Fundamental of Rock Mechanics*[M]. New York: Methuen, 153
- Jaumé S C, Sykes L R. 1992. 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*, **258**: 1 325~1 328
- Jaumé S C, Sykes L R. 1996. Evolution of moderate seismicity in the San Francisco Bay region, 1850 to 1993: Seismicity changes related to the occurrence of large and great earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **101**: 765~789
- Jordan T H. 1991. Far-field detection of slow precursors to fast seismic ruptures[J]. *Geophys Res Lett*, **18**: 2 019~2 022
- Kagan Y Y, Jackson D D. 1998. Spatial aftershock distribution: Effect of normal stress[J]. *J Geophys Res*, **103**: 24 453~24 467
- Kanamori H. 1972. Relation between tectonic stress, Great earthquake and earthquake swarms[J]. *Tectonophysics*, **14**: 1~12
- Kato T, Rybicki K, Kasahara K. 1987. Mechanical interaction between neighboring active faults—An application to the Altera fault, central Japan[J]. *Tectonophysics*, **144**: 181~188
- Kawasaki I, Asai Y, Tamura Y. 2001. Space-time distribution of interplate moment release including slow earthquakes and the

- seismo-geodetic coupling in the Sanriku-oki region along the Japan trench[J]. *Tectonophysics*, **330**: 267~283
- Kedar S, Watada S, Tanimoto T. 1994. The 1989 Macquarie Ridge earthquake: seismic moment estimation from long-period free oscillations[J]. *J Geophys Res*, **99**: 17 893~17 907
- Kerr R A. 1997. Geophysicists ponder ancient chills and elusive quakes[J]. *Science*, **276**: 1 792~1 793
- Kilb D, Ellis M, Gomborg J, *et al.* 1997. On the origin of diverse aftershock mechanisms following the 1989 Loma Prieta earthquake [J]. *Geophys J Int*, **128**: 557~570
- Kilb D, Gomborg J, Bodin P. 2000. Triggering of earthquake aftershocks by dynamic stresses[J]. *Nature*, **408**: 570~574
- King G C P, Stein R S, Lin J. 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **84**: 935~953
- Klein F W. 1976. Earthquake swarms and the semidiurnal solid earth tide [J]. *Geophys J R astr Soc*, **45**: 245~295
- Knopoff L, Gardner J R. 1964. Earth tides as a triggering mechanism for earthquake [J]. *Bull Seism Soc Amer*, **54**: 1 865~1 870
- Li V C, Seale S H, Cao T. 1987. Post seismic stress and pore pressure readjustment and aftershock distributions [J]. *Tectonophysics*, **144**: 37~54
- Li Yong-Gang, Vidal J E, Aki K, *et al.* 1998. Evidence of shallow fault zone strengthening after the 1992 *M*7.5 Landers, California, earthquake[J]. *Science*, **279**: 217~219
- Lienkaemper J J, Galehouse J S, Simpson R W. 1997. Creep response of the Hayward fault to stress changes caused by the Loma Prieta earthquake[J]. *Science*, **276**: 2 014~2 016
- Linde A T, Gladwin M T, Johnston M J S, *et al.* 1996. A slow earthquake sequence on the San Andreas fault [J]. *Nature*, **383**: 65~68
- Lockner D A, Beeler N M. 1999. Premonitory slip and tidal triggering of earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **104**: 20 133~20 152
- Lomnitz C. 1996. Search of a worldwide catalog for earthquakes triggered at intermediate distances[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **86**: 293~298
- Main I. 1996. Statistical physics, seismogenesis, and seismic hazard[J]. *Rev Geophys*, **34**: 433~462
- Mansinha L, Smylie D E. 1971. The displacement fields of inclined faults[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **61**: 1 433~1 440
- Mavko G M. 1982. Fault interaction near Hollister, California[J]. *J Geophys Res*, **87**: 7 807~7 816
- Mavko G M, Schulz S, Brown B D. 1985. Effects of the 1983 Coalinga, California, earthquake on creep along the San Andreas fault[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **75**: 475~489
- McGuire J J, Ihmle P F, Jordan T H. 1996. Time-domain observations of slow precursor to the 1994 Romanche transform earthquake[J]. *Science*, **274**: 82~85
- Mendoza C, Hartzell S H. 1988. Aftershock patterns and main shock faulting[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **78**: 1 438~1 449
- Michael A J. 1991. Spatial variations of stress within the 1987 Whittier Narrows, California, aftershock sequence: New techniques and results[J]. *J Geophys Res*, **96**: 6 303~6 319
- Mikumo T, Singh S K, Santoyo M A. 1999. A possible stress interaction between large thrust and normal faulting earthquakes in the Mexican subduction zone[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **89**: 1 418~1 427
- Nadeau R M, McEvilly T V. 1999. Fault slip rates at depth from recurrence intervals of repeating microearthquakes[J]. *Science*, **285**: 718~721
- Nalbant S S, Barka A A, Alptekin Ö. 1996. Failure stress change caused by the 1992 Erzincan earthquake ($M_s=6.8$)[J]. *Geophys Res Lett*, **23**: 1 561~1 564
- Nalbant S S, Hubert A, King G C P. 1998. Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and the north Aegean Sea[J]. *J Geophys Res*, **103**: 24 469~24 486
- Nikolaev A. 1995. Inducing of earthquakes by underground nuclear explosions[A]. In: Console R, Nikolaev A eds. *Earthquakes Induced by Underground Nuclear Explosions: Environmental and Ecological Problems*[C]. Heidelberg: Springer Verlag, 11~19
- Nishimura T, Fujiwara S, Murakami M, *et al.* 2001. The *M*6.1 earthquake triggered by volcanic inflation of Iwate volcano, northern Japan, observed by satellite radar interferometry[J]. *Geophys Res Lett*, **28**: 635~638
- Noir J, Jacques E, Békri S, *et al.* 1997. Fluid flow triggered migration of events in the 1989 Dobi earthquake sequence of central Afar[J]. *Geophys Res Lett*, **24**: 2 335~2 338
- Nostro C, Cocco M, Belardinelli M E. 1997. Static stress changes in extensional regimes: An application to southern Apennines (Italy)[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **87**: 234~248
- Nostro C, Stein R S, Cocco M, *et al.* 1998. Two-way coupling between Vesuvius eruptions and southern Apennine earthquakes, Italy, by elastic stress transfer[J]. *J Geophys Res*, **103**: 24 487~24 504
- Nur A, Booker J R. 1972. Aftershocks caused by pore fluid flow?[J]. *Science*, **175**: 885~887
- Okada Y. 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **82**: 1 018~1 040
- Okada Y, Kasahara K. 1990. Earthquake of 1987, off Chiba, central Japan and possible triggering of eastern Tokyo earthquake of 1988[J]. *Tectonophysics*, **172**: 351~364

- Oppenheimer D, Beroza G, Carver G, *et al.* 1993. The Cape Mendocino, California, earthquakes of April 1992: Subduction at the triple junction [J]. *Science*, **261**: 433~438
- Oppenheimer D H, Reasenber P A, Simpson R W. 1988. Fault plane solutions for the 1984 Morgan Hill, California, earthquake sequence: Evidence for the state of stress on the Calaveras fault[J]. *J Geophys Res*, **93**: 9 007~9 026
- Papadimitriou E E, Karakostas V G, Papazachos B C. 2001. Rupture zones in the area of the 17. 08. 99 Izmit (NW Turkey) large earthquake (M_w 7. 4) and stress changes caused by its generation[J]. *Journal of Seismology*, **5**: 269~276
- Parsons T, Dreger D S. 2000. Static-stress impact of the 1992 Landers earthquake sequence on nucleation and slip at the site of the 1999 $M=7. 1$ Hector Mine earthquake, southern California[J]. *Geophys Res Lett*, **27**: 1 949~1 952
- Parsons T, Stein R S, Simpson R W, *et al.* 1999. Stress sensitivity: A comparison between limited-offset oblique and major strike-slip faults[J]. *J Geophys Res*, **104**: 20 183~20 202
- Parsons T, Toda S, Stein R S, *et al.* 2000. Heightened odds of large earthquakes near Istanbul: an interaction-based probability calculation[J]. *Science*, **288**: 661~665
- Pauchet H, Rigo A, Rivera L, *et al.* 1999. A detailed analysis of the February 1996 aftershock sequence in the eastern Pyrenees, France[J]. *Geophys J Int*, **137**: 107~127
- Peresan A, Costa G, Panza G F. 1999. Seismotectonic model and CN earthquake prediction in Italy[J]. *Pure Appl Geophys*, **154**: 281~306
- Perfettini H, Schmittbuhl J. 2001. Periodic loading on a creeping fault: Implications for tides[J]. *Geophys Res Lett*, **28**: 435~438
- Perfettini H, Stein S S, Simpson R, *et al.* 1999. Stress transfer by the 1988~1989 $M=5. 3$ and $5. 4$ Lake Elsman foreshocks to the Loma Prieta fault: Unclamping at the site of peak mainshock slip[J]. *J Geophys Res*, **104**: 20 169~20 182
- Pinar A, Honkura Y, Kuge K. 2001. Seismic activity triggered by the 1999 Izmit earthquake and its implications for the assessment of future seismic risk[J]. *Geophys J Int*, **146**: F1~F7
- Pollitz F F, Sacks I S. 1995. Consequences of stress changes following the 1891 Nobi earthquake, Japan[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **85**: 796~807
- Pollitz F F, Sacks I S. 1997. The 1995 Kobe, Japan, earthquake: A long-delayed aftershock of the offshore 1944 Tonankai and 1946 Nankaido earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **87**: 1~10
- Press F. 1965. Displacements, strains and tilts at teleseismic distance[J]. *J Geophys Res*, **70**: 2 395~2 412
- Protti M, McNally K, Pacheco J, *et al.* 1995. The March 25, 1990($M_w=7. 0$, $M_L=6. 8$), earthquake at the entrance of the Nicoya Gulf, Costa Rica: its prior activity, foreshocks, and triggered seismicity[J]. *J Geophys Res*, **100**: 20 345~20 358
- Reasenber P A, Simpson R W. 1992. Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake[J]. *Science*, **255**: 1 687~1 690
- Reilinger R E, Ergintav S, Bürgmann R, *et al.* 2000. Coseismic and postseismic fault slip for the 17 August 1999, $M=7. 5$, Izmit, Turkey earthquake[J]. *Science*, **289**: 1 519~1 523
- Rice J R. 1992. Fault stress states, pore pressure distribution, and the weakness of the San Andreas fault[A]. In: Evans B, Wong T F eds. *Fault Mechanics and Transport Properties of Rock*[C]. London: Academic Press, 475~503
- Rice J R, Cleary M P. 1976. Some basic stress diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents[J]. *Rev Geophys*, **14**: 227~241
- Rice J R, Gu J C. 1983. Earthquake aftereffects and triggered seismic phenomenon[J]. *Pure Appl Geophys*, **121**: 187~219
- Robinson R. 1994. Shallow subduction tectonics and fault interaction: The Weber, New Zealand, earthquake sequence of 1990~1992[J]. *J Geophys Res*, **99**: 9 663~9 676
- Robinson R, McGinty P J. 2000. The enigma of the Authur's Pass, New Zealand, earthquake 2. The aftershock distribution and its relation to regional and induced stress field[J]. *J Geophys Res*, **105**: 16 139~16 150
- Roeloffs E A. 1988. Fault stability changes induced beneath a reservoir with cyclic variations in water level[J]. *J Geophys Res*, **93**: 2 107~2 124
- Roth F. 1988. Modeling of stress patterns along the western part of the North Anatolian fault zone[J]. *Tectonophysics*, **152**: 215~226
- Rundle J B. 1978. Viscouelastic crustal deformation by finite quasi-static sources[J]. *J Geophys Res*, **83**: 5 937~5 945
- Ryall A, Van Wormer J D, Jones A E. 1968. Triggering of microearthquakes by earth tides, and other features of the Truckee, California earthquake sequences of September, 1966[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **58**: 215~248
- Rybicki K. 1971. The elastic residual field of a very long strike-slip fault in the presence of a discontinuity[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **61**: 79~82
- Rybicki K. 1973. Analysis of aftershocks on the basis of dislocation theory[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **7**: 409~422
- Rydelek P A, Sacks I S. 1990. Asthenospheric viscosity and stress diffusion: a mechanism to explain correlated earthquakes and surface deformation in NE Japan[J]. *Geophys J Int*, **100**: 39~58
- Rydelek P A, Sacks I S. 1999. Large earthquake occurrence affected by small stress changes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **89**: 822~828

- Scholz C H. 1990. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*[M]. Cambridge: Cambridge Univ Press, 439
- Seeber L, Armbruster J G. 2000. Earthquakes as beacons of stress change[J]. *Nature*, **407**: 69~72
- Seeber L, Armbruster J G, Kim W Y, *et al.* 1998. The 1994 Cacoosing Valley earthquakes near Reading, Pennsylvania: A shallow rupture triggered by quarry unloading[J]. *J Geophys Res*, **103**: 24 505~24 521
- Segall P, Harris R. 1986. Slip deficit on the San Andreas fault at Parkfield California, as revealed by inversion of geodetic data[J]. *Science*, **233**: 1 409~1 413
- Shlien S. 1972. Earthquake-tide correction[J]. *Geophys J R astr Soc*, **28**: 27~34
- Simpson R W, Schulz S S, Dietz L D, *et al.* 1988. The response of creeping parts of the San Andreas fault to earthquakes on nearby faults: Two examples[J]. *Pure Appl Geophys*, **126**: 665~685
- Smith S W, Van de Lindt W. 1969. Strain adjustments associated with earthquakes in southern California[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **59**: 1 569~1 589
- Spudich P, Steck L K, Hellweg M, *et al.* 1995. Transient stresses at Parkfield, California, produced by the M7.4 Landers earthquake of June 28, 1992: Observations from the UPSAR dense seismograph array[J]. *J Geophys Res*, **100**: 675~690
- Stein R S. 1999. The role of stress transfer in earthquake occurrence[J]. *Nature*, **402**: 605~609
- Stein R S, Lisowski M. 1983. The 1979 Homestead Valley earthquake sequence, California: Control of aftershocks and postseismic deformation[J]. *J Geophys Res*, **88**: 6 477~6 490
- Stein R S, King G C P, Lin J. 1992. Change in failure stress on the southern San Andreas fault system caused by the 1992 magnitude = 7.4 Landers earthquake[J]. *Science*, **258**: 1 328~1 332
- Stein R S, King G C P, Lin J. 1994. Stress triggering of the 1994 $M = 6.7$ Northridge, California, earthquake by its predecessors[J]. *Science*, **265**: 1 432~1 435
- Stein R S, Barka A A, Dieterich J H. 1997. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering[J]. *Geophys J Int*, **128**: 594~604
- Stekette J A. 1958a. On Volterra's dislocation in a semi-infinite elastic medium[J]. *Can J Phys*, **36**: 192~205
- Stekette J A. 1958b. Some geophysical applications of the elasticity theory of dislocations[J]. *Can J Phys*, **36**: 1 168~1 197
- Stuart W D, Johnston M J S. 1975. Intrusive origin of the Mutsushiro earthquake swarm[J]. *Geology*, **3**: 63~67
- Takai K, Kumagai H, Fujii N. 1999. Evidence for slow slip following a moderate-size earthquake ($M_w=5.7$) in subducting plate[J]. *Geophys Res Lett*, **26**: 2 113~2 116
- Thatcher W, Savage J C. 1982. Triggering of large earthquakes by magma-chamber inflation, Izu Peninsula, Japan[J]. *Geology*, **10**: 637~640
- Toda S, Stein R S. 2000. Did stress triggering cause the large off-fault aftershocks of the 25 March 1998 $M_w=8.1$ Antarctic plate earthquake?[J]. *Geophys Res Lett*, **27**: 2 301~2 304
- Toda S, Stein R S, Reasenber P A, *et al.* 1998. Stress transferred by the 1995 $M_w=6.9$ Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities[J]. *J Geophys Res*, **103**: 24 543~24 565
- Troise C, De Natale G, Pingue F, *et al.* 1998. Evidence for static stress interaction among earthquakes in south-central Apennines (Italy)[J]. *Geophys J Int*, **134**: 809~817
- Vidale J, Agnew D, Johnston M, *et al.* 1998a. Absence of earthquake correlation with earth tides: An indication of high preseismic fault stress rate[J]. *J Geophys Res*, **103**: 24 567~24 572
- Vidale J, Agnew D, Oppenheimer D, *et al.* 1998b. A weak correlation between earthquakes and extensional stress and stress rate from lunar tides, *EOS*, **79**(Suppl.): 641
- Wang W H. 2000. Static stress transfer and aftershock triggering by the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, **11**: 631~642
- Ward S N. 1998a. On the consistency of earthquake moment rates, geological fault data, and space geodetic strain: the United State[J]. *Geophys J Int*, **134**: 172~186
- Ward S N. 1998b. On the consistency of earthquake moment release and space geodetic strain rates: Europe[J]. *Geophys J Int*, **135**: 1 011~1 018
- Wen K L, Beresnev I A, Cheng S N. 1996. Moderate- magnitude seismicity remotely triggered in the Taiwan region by large earthquakes around the Philippine Sea Plate[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **86**: 843~847
- Whiteside L S, Ben-Zion Y. 1995. Universal triggering pattern in earthquake sequences and the use of triggering for earthquake prediction(Abstract)[J]. *EOS*, **76**: 532
- Yamashina K. 1978. Induced earthquakes in the Izu Peninsula by Izu-Hanto-Oki earthquake of 1974, Japan[J]. *Tectonophysics*, **51**: 139~154
- Yamashina K. 1979. A possible factor which triggers shallow intraplate earthquakes[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **18**: 153~164
- Yoshioka S, Hashimoto M. 1989a. A quantitative interpretation on possible correlation between intraplate seismic activity and interplate great earthquakes along the Nankai trough[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **53**: 173~191

- Yoshioka S, Hashimoto M. 1989b. The stress field induced from the occurrence of the 1944 Tonankai and the 1946 Nankaido earthquakes, and their relation to impending earthquakes[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **56**: 349~370
- Zhao D, Kanamori H, Negishi H, *et al.* 1996. Tomography of the source area of the 1995 Kobe earthquake: Evidence for fluids at the hypocenter?[J]. *Science*, **274**: 1 891~1 894
- Ziv A, Rubin A M. 2000. Static stress transfer and earthquake triggering: No lower threshold in sight?[J]. *J Geophys Res*, **105**: 13 631~13 642

RESEARCH ON SEISMIC STRESS TRIGGERING

Wan Yongge^{1,2)} Wu Zhongliang¹⁾ Zhou Gongwei¹⁾
Huang Jing¹⁾ Qin Lixin¹⁾

1) *Institute of Geophysics, China Seismological Bureau, Beijing 100081, China*

2) *College of Disaster Prevention and Mitigation Technique, China Seismological Bureau, Yanjiao 101601, China*

Abstract: This paper briefly describes basic theory of seismic stress triggering. Recent development on seismic stress triggering has been reviewed in the views of seismic static and dynamic stress triggering, application of viscoelastic model in seismic stress triggering, the relation between earthquake triggering and volcanic eruption or explosion, other explanation of earthquake triggering etc. And some suggestion for further study on seismic stress triggering in near future are given.

Key words: Coulomb failure stress change; seismic static stress triggering; seismic dynamic stress triggering; viscoelastic medium