

冀战波, 王琼, 王海涛, 解朝娣. 2014. 2008年新疆于田 $M_s7.3$ 地震对后续地震的完全库仑应力触发作用. 地震学报, 36(6): 997–1009. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.06.002.

Ji Z B, Wang Q, Wang H T, Xie C D. 2014. Impact of complete Coulomb failure stress changes of the 2008 Xinjiang Yutian $M_s7.3$ earthquake on the subsequent earthquakes. *Acta Seismologica Sinica*, 36(6): 997–1009. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.06.002.

2008年新疆于田 $M_s7.3$ 地震对后续地震的完全库仑应力触发作用^{*}

冀战波^{1,2)} 王 琼³⁾ 王海涛³⁾ 解朝娣^{4),*}

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国北京 100871 北京大学地球与空间科学学院

3) 中国乌鲁木齐 830011 新疆维吾尔自治区地震局

4) 中国昆明 650091 云南大学资源环境与地球科学学院

摘要 在离散波数法基础上计算 2008 年 3 月 21 日新疆于田 $M_s7.3$ 地震造成的近场区域完全库仑应力变化, 分析该变化对余震发生所产生的影响, 得到了此次地震在 2008 年 10 月 5 日乌恰 $M_s6.8$ 地震震中处所产生的动态库仑破裂应力变化. 计算结果表明, 该地震近场区域库仑应力变化图像演化大概持续了 60 s, 库仑应力变化对余震的触发率达到 90% 以上, 其中动态库仑应力变化图像更好地解释了余震的分布. 余震震中处的完全库仑应力变化计算结果表明, 其动态库仑应力变化远远大于静态库仑应力变化. 于田 $M_s7.3$ 地震在乌恰 $M_s6.8$ 地震震中处造成的最大动态库仑应力变化为 0.12 MPa, 说明后者可能受到了于田 $M_s7.3$ 地震的动态应力触发作用, 但不显著; 而静态库仑应力则对其影响很小.

关键词 于田地震 完全库仑破裂应力变化 动态应力触发 静态应力触发

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.06.002 中图分类号: P315.72⁺7 文献标志码: A

Impact of complete Coulomb failure stress changes of the 2008 Xinjiang Yutian $M_s7.3$ earthquake on the subsequent earthquakes

Ji Zhanbo^{1,2)} Wang Qiong³⁾ Wang Haitao³⁾ Xie Chaodi^{4),*}

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

3) Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Ürümqi 830011, China

4) School of Resource Environment and Earth Science, Yunnan University, Kunming 650091, China

Abstract: Based on the discrete-wavenumber method, we calculated the complete Coulomb failure stress (CFS) changes of near-field region induced by 21 March 2008, Yutian, Xinjiang, $M_s7.3$ earthquake, and analyzed their impact

* 基金项目 地震科技星火计划项目(XH13027)和新疆地震科学基金(201303)联合资助.

收稿日期 2014-02-23 收到初稿, 2014-04-28 决定采用修改稿.

通讯作者 e-mail: xiechaodi1981@tom.com

on the aftershocks. We also get the dynamic CFS changes of the Yutian earthquake produced at the epicentral location of the Wuqia $M_s 6.8$ earthquake on 5 October 2008. The calculated results show that the evolution of CFS change patterns lasted for almost 60 s, and trigger ratio of aftershocks by the main shock is above 90%. Dynamic CFS change patterns can better explain the distribution of aftershocks. Complete CFS changes results of aftershocks indicate that the dynamic CFS changes are far greater than static ones. The maximum dynamic CFS change at the epicenter of Wuqia earthquake is 0.12 MPa, suggesting that the Wuqia event may be triggered by dynamic Coulomb stresses induced by the Yutian event, but the triggering effect is unremarkable and static CFS changes have little influence on it.

Key words: Yutian earthquake; complete Coulomb failure stress change; dynamic stress triggering; static stress triggering

引言

北京时间 2008 年 3 月 21 日,新疆于田县境内发生 $M_s 7.3$ 地震,震中位于东北向的阿尔金断裂与东西向的普鲁断裂交汇区,地质构造较为复杂.地震时和田、喀什等地震感强烈,震中烈度达到Ⅷ度.这次地震造成了部分建筑物损毁,但是没有人员伤亡.地震后又发生了一系列余震,截止到 2008 年 8 月 31 日,新疆维吾尔自治区地震局共测定出于田地地震序列 $M_s \geq 4.0$ 余震 60 次(李志海等, 2009). 同年 10 月 5 日,其西北 800 km 的新疆乌恰县境内发生 $M_s 6.8$ 地震,该地震微观震中位于乌恰县境内,与吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦接壤,该地震使乌恰县境内部分乡镇遭受到不同程度的地震灾害,而宏观震中位于吉尔吉斯斯坦共和国的努拉村,造成了努拉村 70 余人死亡(陈建波等, 2009).

这两次地震事件之后一些研究人员从不同学科角度对其进行了研究(尹光华等, 2008; 陈建波等, 2009; 李志海等, 2009; 王琼等, 2009; Wang *et al.*, 2009; Elliott *et al.*, 2010; 唐明帅等, 2010; 万永革等, 2010; Shan *et al.*, 2011; 王凡等, 2011; 张国宏等, 2011; 徐锡伟等, 2011; 唐兰兰等, 2012). 其中王琼等(2009)计算了这两次地震产生的静态库仑应力,分析了两次事件对 $M_s 3.0$ 以上余震以及天山中段、柯坪块体和喀什-乌恰交汇区地震活动性的影响(Wang *et al.*, 2009). 万永革等(2010)计算了此次地震对周围断层的影响,并讨论了该地震及其周围已发生的地震出现正断层机制的原因. 一次强震的发生所导致的应力变化对之后区域地震活动的影响被称为“应力触发”,一般分为静态应力触发和动态应力触发. 前者主要指发震断层错动在近场产生的永久性静态应力变化持续地对后续地震活动的触发作用; 后者则指强震破裂传播或激发出的地震波通过某一区域时产生的较强即时应力变化对后续地震的触发作用. 另外,也有部分研究人员提出了黏弹性应力触发(Pollitz, Sacks, 1997, 2002; Freed, Lin, 1998, 2001),指震后下地壳和上地幔黏弹性介质在震后松弛过程中造成地壳应力场的调整,改变接收断层所处的应力环境,影响地震断层的地震活动性(汪建军, 2010). 对于近场而言,静态和动态库仑应力变化的作用是分不开的(吴小平等, 2007). Kilb 等(2002)提出了完全库仑破裂应力概念,同时包含静态和动态库仑破裂应力变化.

Bouchon 和 Aki(1977)提出的离散波数法,能够精确地求解出完全格林函数,其特点

是能够计算全波场, 同时包括动态和静态的贡献. 本文基于离散波数法获取于田 $M_s7.3$ 地震的理论地震图, 分析该地震对近场区域余震的完全库仑应力触发影响, 并计算于田地震在乌恰地震震中处产生的动态库仑破裂应力变化.

1 活动构造及动力学背景

2008 年 3 月 21 日于田 $M_s7.3$ 地震震中位于青藏高原北缘 ENE 向阿尔金断裂西南端与近 EW 向康西瓦断裂及贡嘎错断裂的交汇部位(图 1). 断错地貌测量显示阿尔金断裂西段全新世左旋走滑速率可达 9—17.5 mm/a(徐锡伟等, 2003). 康西瓦断裂的西端终止于塔什库尔干谷地东部, 其东端在于田阿羌乡南部与阿尔金断裂相连, 近 EW 向延伸达 700 km, 断错地貌显示晚第四纪以来, 康西瓦断裂的平均左旋走滑速率为 8—12 mm/a(付碧宏等, 2006). 贡嘎错断裂在较大的阿尔金左旋走滑运动与较小的喀喇昆仑右旋走滑运动的共同作用下, 呈左旋张扭性质. 野外地质考察显示, 此次于田 $M_s7.3$ 地震走向为 358° , 近 SN 向的发震断层属于阿尔金断裂西南端 NE 向张性区构造(徐锡伟等, 2003, 2011; 王峰等, 2004; Cowgill *et al.*, 2009; 刁桂苓等, 2010). 帕米尔高原东北侧位处天山褶皱带、西昆仑造山带和塔里木块体等 3 大地质构造单元的交接地带. 印度板块与欧亚板块的碰撞和持续汇聚使其陆内俯冲和变形作用非常强烈, 并在推挤前缘形成了一系列壮观的北向凸出的弧型推覆构造, 这些大型推覆构造东部为正向逆冲, 向西渐变为斜冲-走滑大断裂, 断

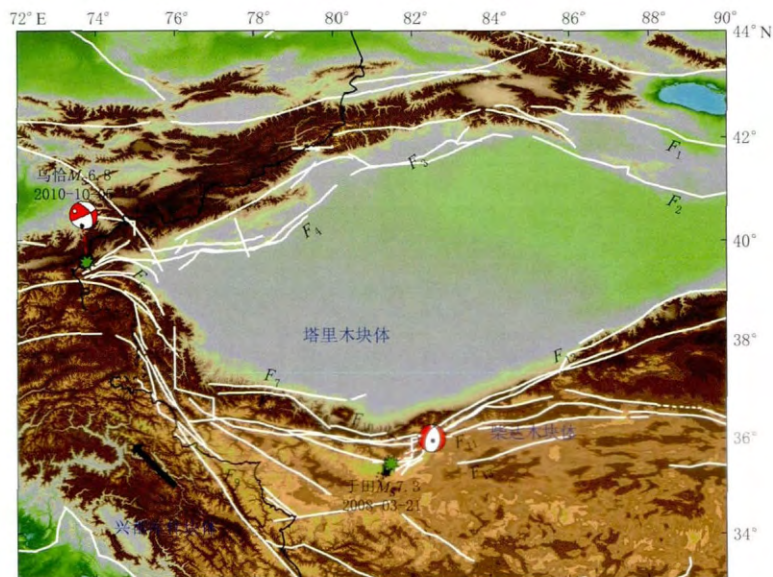


图 1 于田 $M_s7.3$ 、乌恰 $M_s6.8$ 地震主震震中位置及区域构造图

F_1 : 焉耆盆地南缘断裂; F_2 : 兴地断裂; F_3 : 北轮台断裂; F_4 : 柯坪断裂; F_5 : 卡兹克阿尔特断裂;
 F_6 : 米牙断裂; F_7 : 西昆仑断裂; F_8 : 康西瓦断裂; F_9 : 喀喇昆仑断裂; F_{10} : 普鲁断裂;
 F_{11} : 贡嘎错断裂; F_{12} : 阿尔金断裂; F_{13} : 龙木错—邦达错断裂

Fig. 1 Epicenters of Yutian $M_s7.3$ and Wuyia $M_s6.8$ earthquakes all well as regional tectonic settings

F_1 : Yanqi basin southern fringe fault; F_2 : Xingdi fault; F_3 : North Luntai fault; F_4 : Kalpin fault;
 F_5 : Stewart Katz Yasar fault; F_6 : Miya fault; F_7 : West Kunlun fault; F_8 : Kangxiwa fault;
 F_9 : Karakorum fault; F_{10} : Pulu fault; F_{11} : Gonggar Co fault; F_{12} : Altyn Tagh fault;
 F_{13} : Lungmu Co-Bangdag Co fault

层显示出东部右旋、西部左旋的活动特征. 其中位于北部的卡兹克阿尔特弧形活动褶皱-逆断裂带又由近 EW 向的卡巴加特弧和 NW 向的乌帕尔弧两个次级弧型构造构成, 是 6 级以上地震频发的场所. 2008 年 10 月 5 日的新疆乌恰 $M_s 6.8$ 地震就发生在卡兹克阿尔特断裂的中西段 (Molnar, 1988; Burtman, Molnar, 1993; 陈杰等, 1997; 唐兰兰等, 2012).

2 方法及原理

Bouchon 和 Aki(1977)发展了离散水平波数法, 并将其应用于层状介质中震源的近场波场研究. 本文在此进行简单解释. 二维情况下, 无限均匀介质中的一个线源稳态辐射可以用一个柱状波来表示, 或者等价于一系列均匀和非均匀平面波的连续叠加. 令 x 和 z 分别表示水平和垂直坐标轴, 则位移或应力可以表示为

$$F(x, z; \omega) = e^{i\omega t} \int_{-\infty}^{\infty} f(k, z) e^{-ikx} dk, \quad (1)$$

式中, ω 为角频率, k 为水平波数. 对其进行积分时, 如果介质有限或垂向不均匀, 积分就会存在极点和奇异点, 此时对水平波数的积分就会变得复杂和困难. 对于这个问题, 一个简单的解决方法就是用一系列轴上周期分布的复合源来代替上述式(1)中的单一源. 设定复合源为沿轴周期性分布的源阵列, 并且每两个相邻源之间都具有相同的距离间隔 L 和确定的时间延迟相, 则式(1)变为

$$G(x, z; \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(k, z) e^{-ikx} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{iknL} dk, \quad (2)$$

式中, L 为周期源的距离间隔, 对上述周期函数进行傅里叶展开严格求和, 则式(2)化为

$$G(x, z; \omega) = \frac{2\pi}{L} \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(k_n, z) e^{-ik_n x}, \quad (3)$$

式中, $k_n = (2\pi/L)n$. 如果其中的序列收敛, 则可用有限求和形式近似表示为

$$G(x, z; \omega) = \frac{2\pi}{L} \sum_{n=-N}^N f(k_n, z) e^{-ik_n x}. \quad (4)$$

由式(1)推到式(4), 将一个单一源问题转化成了包含无限周期源的复合源问题, 大大化简了运算. 下一步是将已经在频率域中解决的复合源问题再恢复至单一源问题. 但是实际操作时, 仅能计算出某些频率的函数 G , 因此使用离散傅里叶反变换来求得时间域的解. 这样, 一方面要处理一个含无限时间响应的单一源问题(由于假定了无限数目的周期源), 另一方面要使用离散傅里叶反变换得到一个有限持续时间为 $T = 2\pi/\Delta\omega$ 的信号. 这些实际上可通过复频率域中作傅里叶反变换实现:

$$g(x, z; \omega) = \int_{-\infty+i\omega_1}^{\infty+i\omega_1} G(x, z; \omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad (5)$$

式中, ω_1 表示角频率的虚部常数, 且满足

$$e^{\omega_1 T} \ll 1. \quad (6)$$

式(6)保证了先前无限时间响应解在时间窗 T 内的衰减. 如果选择的 L 足够大, 以至于在时间窗 T 内没有最邻近的源造成对接收点 (x, z) 的干扰, 那么时间域中单一源的解 $f(x, z; t)$ 便可以通过恢复频率域中复合源的解 $G(x, z; \omega)$ 而得到, 即

$$f(x, z; t) = e^{-\omega_1 t} \int_{-\infty}^{\infty} G(x, z; \omega) e^{i\omega_R t} d\omega_R. \quad (7)$$

将上述二维问题延伸至三维情况下, 与式(4)相对应有

$$G(x, y, z; \omega) = \frac{4\pi^2}{L_x L_y} \sum_{n_x=-N_x}^{N_x} \sum_{n_y=-N_y}^{N_y} f(k_{nx}, k_{ny}, z) e^{-ik_{nx}x} e^{-ik_{ny}y}, \quad (8)$$

式中, $k_{nx} = (2\pi/L_x)n_x$, $k_{ny} = (2\pi/L_y)n_y$.

与二维情况一样, 对式(8)进行傅里叶反变换, 把在频率域中已经解决的问题转换回时间域, 从而得到地震破裂产生的位移场(Bouchon, Aki, 1977; Bouchon, 2003). 离散波数法可以计算全波场, 可以得到完全库仑破裂应力变化, 同时包含动态和静态库仑应力变化(Kilb *et al*, 2002).

3 资料选取及模型建立

3.1 资料选取

本文选取哈佛大学给出的于田 $M_s 7.3$ 地震的基本参数, 并采用冀战波等(2014)反演得到的于田地震震源破裂模型进行动态应力触发作用的研究. 结合乌恰地震震后考察及发震构造性质(谭明等, 2008; 陈建波等, 2009), 考虑到体波资料能更多地反映地震的初始应力状况, 本文选用 P 波初动解作为乌恰地震的震源机制解. 于田 $M_s 7.3$ 地震的基本参数如表 1 所示, 地震震源模型如表 2 所示.

表 1 于田 $M_s 7.3$ 地震的基本参数

Table 1 Basic parameters of Yutian $M_s 7.3$ earthquake

发震时间 年-月-日	震中位置			M_s	深度 /km	节面 I			节面 II			资料来源
	北纬/°	东经/°	地点			走向/°	倾角/°	滑动角/°	走向/°	倾角/°	滑动角/°	
2008-03-21	35.43	81.37	新疆于田	7.3	12	358	41	-110	203	52	-74	哈佛大学
2008-10-05	39.562	73.766	中塔交界	6.8	12	327	51	172	62	84	40	新疆地震局

表 2 于田 $M_s 7.3$ 地震的震源模型

Table 2 Source model of Yutian $M_s 7.3$ earthquake

破裂速度 /($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	上升时间 /s	断层长度 /km	断层宽度 /km	上沿深度 /km	下沿深度 /km	震源深度 /km	M_0 /($10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$)
3.0	3.0	90.0	30.0	0.5	30.5	12.0	5.52

利用地震台阵可以较为准确地估算出于田 $M_s 7.3$ 地震信号的后方位角和慢度. 唐明帅等(2010)利用和田地震台阵数据, 应用宽频 $f-k$ 方法, 对于田地震序列(2008 年 3 月 21 日—8 月 31 日, 共 119 次 $M_L \geq 4.0$ 余震)进行了重新定位. 本文基于其余震精定位结果分析于田地震对近场区域余震的完全库仑应力触发影响.

3.2 计算范围及震源模型

对于近场和远场应力触发, 本文选用了不同的计算范围和震源模型. 在近场为了获得分辨率更高的模型, 选取 $1.2^\circ \times 1^\circ (35^\circ - 36.2^\circ \text{N}, 81^\circ - 82^\circ \text{E})$ 为计算范围, 以 $0.12^\circ \times 0.1^\circ$ 为步长共获得接收点即场点 121 个; 对于于田 $M_s 7.3$ 地震对乌恰 $M_s 6.8$ 地震的远场触发研究, 本文选取 $5^\circ \times 9^\circ (35^\circ - 40^\circ \text{N}, 73^\circ - 82^\circ \text{E})$ 为计算范围, 以 $0.5^\circ \times 0.9^\circ$ 为步长, 获得场点 121 个. 根据冀战波等(2014)对于田地震破裂过程的反演研究, 设震源为一个以有限速度扩展的双侧破裂正断层, 断层上沿埋深 0.5 km, 下沿埋深 30.5 km, 破裂传播速度为 3.0 km/s, 视摩擦系数 μ' 取为 0.5. 根据上节所述理论, 将震源断层分解成 10×5 个小单

元面, 相当于 50 个位错点源, 滑动振幅为 1.5 m. 本文所选用的介质模型参考了胥颐等 (2006) 的地壳速度结构 (表 3).

表 3 介质模型参数

Table 3 Layered structure model

层号	层厚/km	P 波速度 /(km·s ⁻¹)	S 波速度 /(km·s ⁻¹)	密度 /(kg·m ⁻³)	P 波 Q 值	S 波 Q 值
1	3	4.6	2.7	2.5	300	150
2	8	5.5	3.2	2.7	500	250
3	9	6.2	3.6	2.8	700	350
4	12	6.4	3.7	3.1	800	400
5	18	6.8	3.9	3.2	800	450
6	150	8.0	4.6	3.3	1000	500

4 计算结果及分析

4.1 于田 $M_s7.3$ 地震对近场区域余震的完全库仑应力作用

本文采用位错点源格林函数 (Bouchon, 1981), 利用 Bouchon (2003) 提供的位移理论地震图计算程序, 对上述模型计算其位移理论地震图; 进行弹性动力学转换后得到了于田 $M_s7.3$ 地震断层破裂在周围介质中产生的完全库仑破裂应力, 并将余震序列的精定位结果投影到库仑破裂应力变化的空间分布图上. 图 2 给出了于田 $M_s7.3$ 地震近场完全库仑应力变化的演化图像. 可以看到, 地震破裂开始后完全库仑应力图像发展很快, 从 40.00 s 之后库仑应力变化图像即趋于稳定, 在 60.39 s 以后图像已基本稳定. 此时由破裂产生的地震波已超出近场研究范围, 剩下的仅是由永久性位移造成的静态库仑应力变化. 大部分余震分布在库仑破裂应力为正的区, 仅少量分布在其边缘及负区. 因此, 静态库仑应力变化对余震有较为可靠的触发作用.

根据震源时间函数 (图 3) 可以看出, 地震矩释放在 13 s 左右达到峰值, 而库仑应力变化图像在发展到 13.33 s 时比 60.39 s 时有更多的余震落在了正区 (几乎在 90% 以上). 因此, 考虑到地震波的传播速度和时间, 有理由怀疑这部分在 13.33 s 时落在正区、而在 60.39 s 时落在了负区的余震是由动态库仑应力触发的. 尽管静态库仑应力对其产生了延迟触发作用, 但似乎动态库仑应力起到了最终的决定性作用. 而对于大部分的余震, 动态和静态库仑应力变化对其均起到了一定的触发作用, 但究竟是哪种库仑应力变化起到主导作用值得进一步研究.

为了更清楚地看到动态库仑应力和静态库仑应力变化各自对余震的触发影响, 本文计算提取了余震震中处的完全库仑应力变化. 在此以两次余震为例, 一次是发生于 2008 年 3 月 24 日 04 时 56 分 16 秒的 $M_L5.6$ 地震 (图 2 中余震 1), 震中为 35.59°N、81.31°E. 由于受本文模型精度的限制, 选取了最近的接收点 (35.60°N、81.30°E) 作为参考, 最终的完全库仑应力变化时程如图 4 所示. 可以看出, 最大完全库仑应力变化出现在 14.90 s, 达到 2.117 MPa, 远远高于动态触发阈值; 静态库仑应力变化稳定于 0.7 MPa 左右, 同样远远高于 0.01 MPa 的静态触发阈值. 因此, 动态和静态库仑应力变化可能对本次余震均有较明显的触发作用.

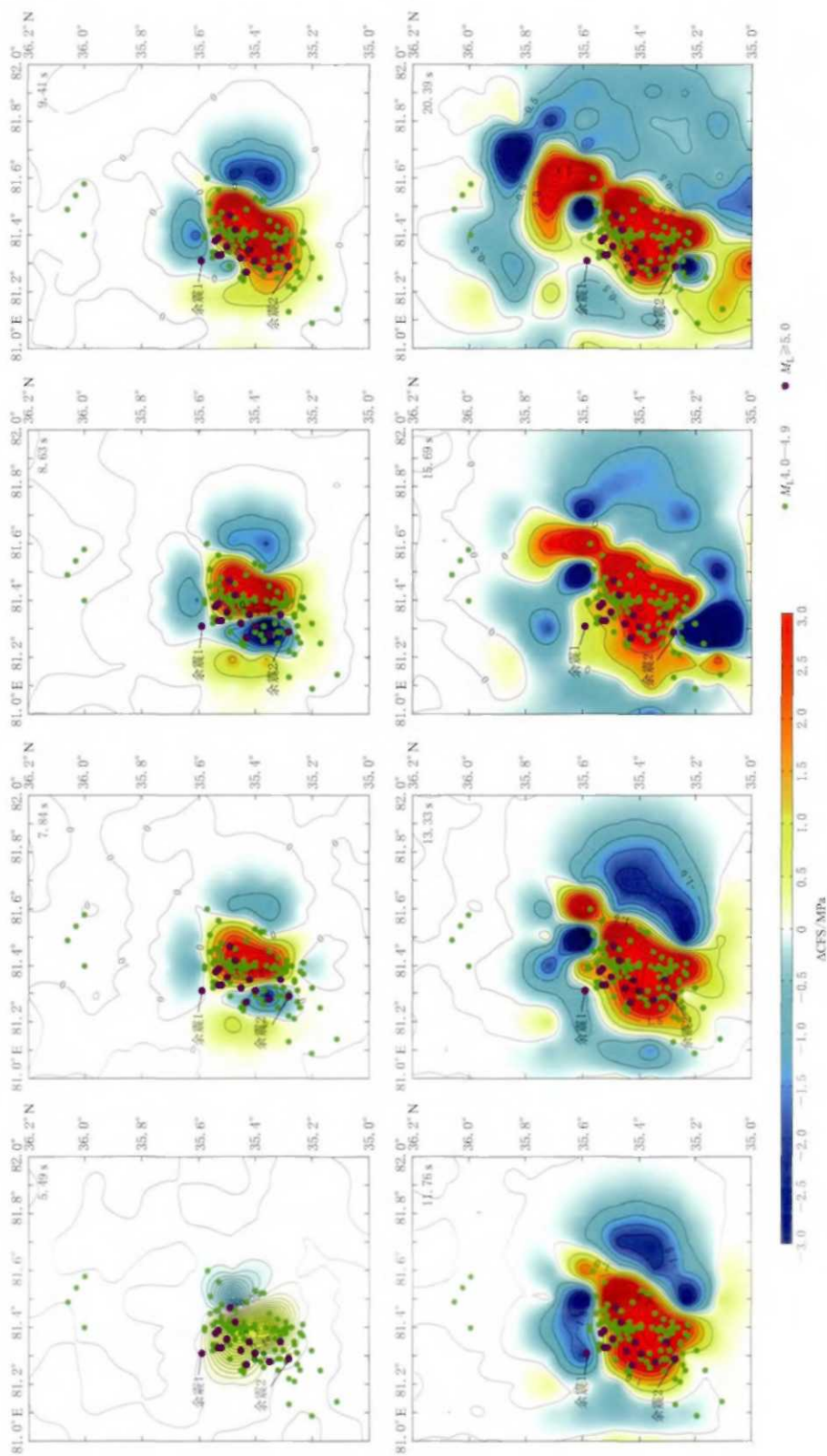


图2 于田 $M_s7.3$ 地震近场完全库仑应力变化的演化图像 (I)

Fig. 2 Evolution of complete Coulomb failure stress change patterns in near field for the 2008 Yutian $M_s7.3$ earthquake (I)

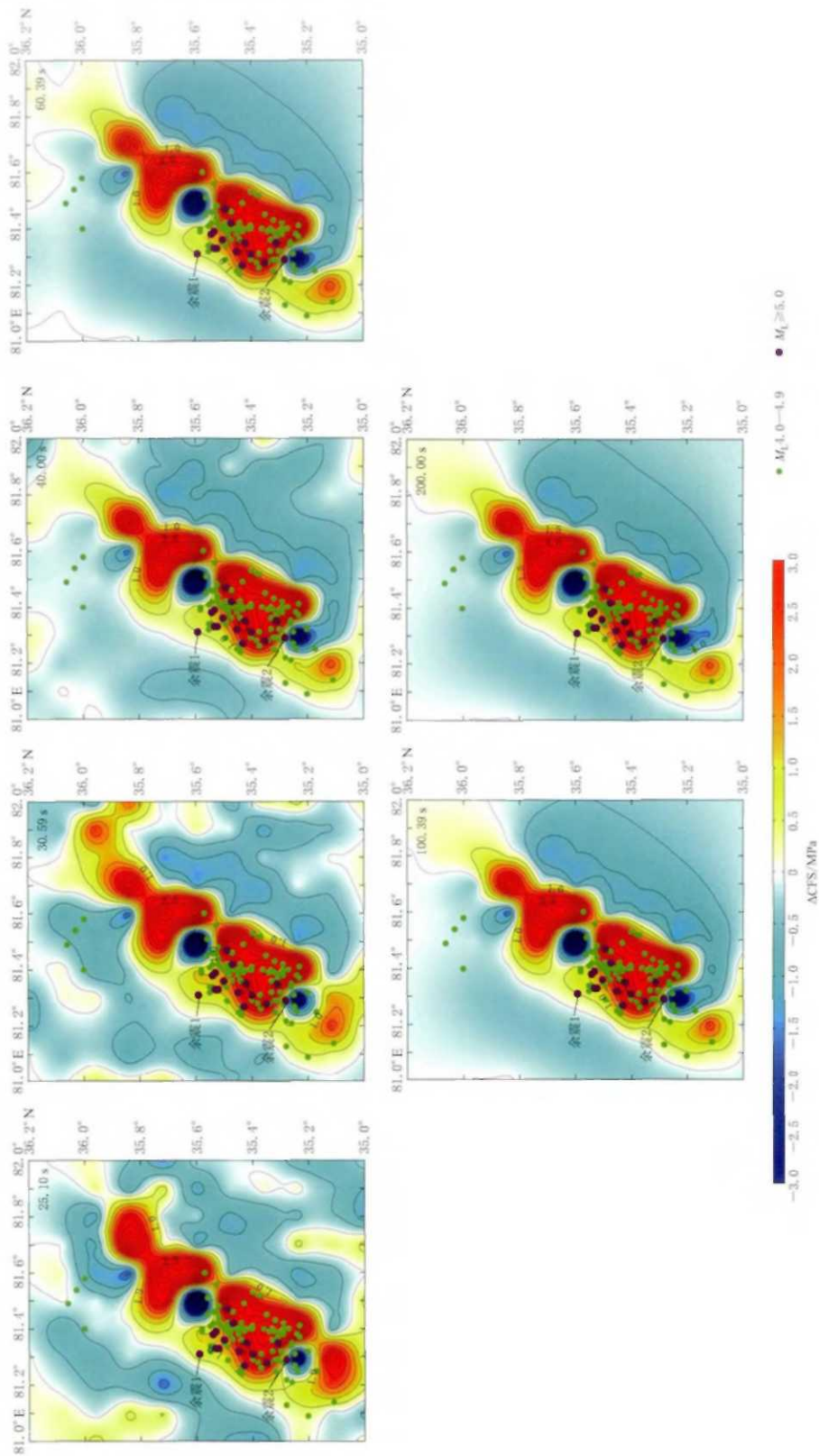


图2 于田 $M_s 7.3$ 地震近场完全库仑应力变化的演化图像(II)

Fig.2 Evolution of complete Coulomb failure stress change patterns in near field for the 2008 Yutian $M_s 7.3$ earthquake (II)

另外一次余震是发生于 2008 年 3 月 21 日 20 时 02 分 57 秒的 $M_L 5.4$ 地震(图 2 中余震 2), 震中为 35.28°N 、 81.31°E 。同样由于受本文模型精度的限制, 选取了最近的接收点(35.24°N 、 81.30°E)作为参考, 最终的完全库仑应力变化时程如图 5 所示。最终静态库仑应力变化稳定在 -2.5 MPa 左右, 超过了有意义的静态触发阈值 $\pm 0.01\text{ MPa}$; 正的完全库仑应力变化最大值出现在 10.20 s , 为 0.4257 MPa , 也接近有意义的动态触发阈值。这个接收点同时受到了静态库仑应力的延迟触发作用和动态库仑应力的促进触发作用, 于是在主震发生 14 个小时后, 此处发生了 $M_L 5.4$ 余震。同样的情

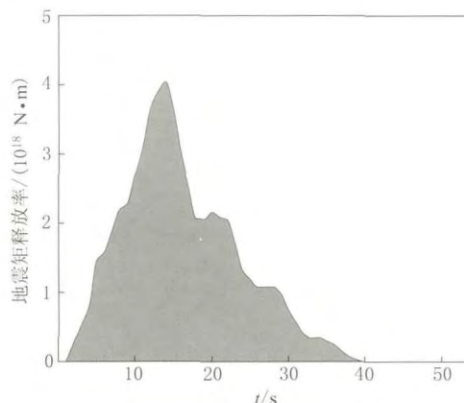
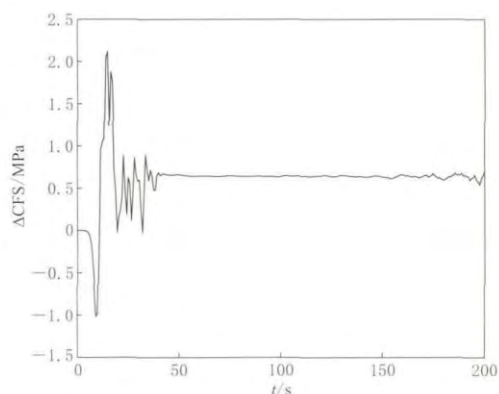
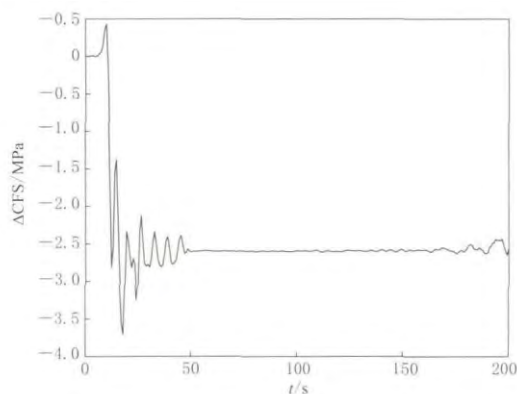


图 3 震源时间函数

Fig. 3 Source time function

图 4 $M_L 5.6$ 余震震中(35.60°N 、 81.30°E)处的完全库仑应力变化 ΔCFS Fig. 4 ΔCFS in the epicentral location (35.60°N , 81.30°E) of $M_L 5.6$ aftershock图 5 $M_L 5.4$ 余震震中(35.24°N 、 81.30°E)处的完全库仑应力变化 ΔCFS Fig. 5 ΔCFS in the epicentral location (35.24°N , 81.30°E) of $M_L 5.4$ aftershock

况, 在附近区域至少有 4 次 $M_L \geq 4.0$ 的震例。

在于田 $M_s 7.3$ 地震发生后, 66.6% 的 $M \geq 5.0$ 和 24.0% 的 M_4 余震发生在主震发生的当日, 35.7% 的 $M \geq 5.0$ 和 40.3% 的 M_4 余震发生在主震发生的一周内, 其它余震均发生在主震发生的一周以后。Kilb 等(2002)研究了美国 Landers $M 7.3$ 地震之后库仑应力的变化(ΔCFS 和 $\Delta\text{CFS}(t)$ 峰值)与地震活动率改变的空间关系, 认为应力变化能够大到足以改变断层及其周围介质的物理和化学性质, 使其更加接近于破裂。这种改变可能并不会导致断层立即破裂, 而是推迟一段时间。另外, 定量的统计学实验显示, ΔCFS 和 $\Delta\text{CFS}(t)$ 与地震活动率改变之间的对应关系要比地震活动率改变作为一种随机结果更好一些, 大约高 10%。虽然这 10% 并不起眼, 但是它具有重要的统计学意义。而且, 它已经是一个非常保守的统计学估计。对于一个在 4.5 km 深度处的模型, 静态库仑应力变化振幅阈值为 0.001—0.5 MPa, 而对于峰值动态库仑应力变化来说, 其阈值要 $\geq 0.5\text{ MPa}$; 其最佳的触发阈值分别为 0.1 和 4.0 MPa(Kilb *et al*, 2002)。

4.2 2008 年于田 $M_s7.3$ 地震对乌恰 $M_s6.8$ 地震的动态库仑应力作用

乌恰 $M_s6.8$ 地震发生在于田 $M_s7.3$ 地震的 6 个月之后, 两次地震震中相隔 800 km, 这两次地震事件之间是否存在应力触发关系是本文关心的问题. 如果应力触发关系存在, 那么是动态还是静态触发呢? 王琼等(2009)计算分析了于田地震事件在乌恰地震事件震中位置上产生的静态库仑应力变化, 结果为 0—1 kPa. 针对这个问题, 本文采用离散波数法

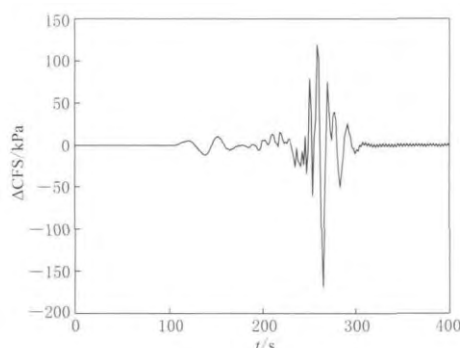


图 6 于田 $M_s7.3$ 地震在乌恰 $M_s6.8$ 地震震中处产生的动态库仑应力变化 ΔCFS

Fig. 6 ΔCFS in the epicenter of Wuyia $M_s6.8$ earthquake generated by the 2008 Yutian $M_s7.3$ earthquake

重新计算了两次地震的动态库仑应力变化, 得到了于田地震在乌恰地震震中位置产生的动态库仑破裂应力时程变化(图 6).

图 6 为乌恰 $M_s6.8$ 地震震中 12 km 深处的库仑应力变化. 于田 $M_s7.3$ 地震断层破裂在乌恰地震震中处造成的最大动态库仑应力变化为 0.12 MPa, 其正的最大峰值没有达到 0.5 MPa 的动态触发阈值, 静态库仑应力变化在 1 kPa 以内. 该结果与王琼等(2009)结果基本一致, 远远小于动态变化, 也未达到 0.01 MPa 的静态触发阈值. 因此本文认为, 乌恰 $M_s6.8$ 地震可能受到了于田 $M_s7.3$ 地震一定的动态应力触发作用, 但不显著, 而静态库仑应力则对其影响很小.

5 讨论与结论

5.1 于田 $M_s7.3$ 地震对近场区域余震的触发作用

于田 $M_s7.3$ 地震在近场区域的完全库仑应力演化图像显示, 库仑应力变化对余震的触发率达到 90% 以上. 整个图像演化大概持续了 60 s. 从地震波的传播速度和在近场研究区的传播时间来看, 与震源时间函数的反演结果有较好的一致性. 根据震源时间函数, 地震矩释放在 13 s 左右达到峰值, 而库仑应力变化图像在发展到 13.33 s 时比 60.39 s 时有更多的余震落在正区. 在 13.33 s 时, 有 1 个余震序列落在负区, 9 个余震序列落在不确定区域, 109 个余震序列落在正区, 约占全部余震序列的 91%; 在 60.39 s 时, 有 10 个余震序列落在负区, 10 个余震序列落在不确定区域, 99 个余震序列落在正区, 约占全部余震序列的 83%. 在这次地震中, 动态库仑应力变化图像更好地解释了余震的分布.

余震震中处的完全库仑应力变化计算结果表明, 动态库仑应力变化远远大于静态库仑应力变化. 2008 年 3 月 24 日的 $M_L5.6$ 地震最大动态库仑应力变化和静态库仑应力变化均远远高于各自触发阈值. 因此, 动态和静态库仑应力变化可能对其均有较明显的触发作用. 2008 年 3 月 21 日的 $M_L5.4$ 余震的震中接收点同时受到了静态库仑应力的延迟触发作用和动态库仑应力的促进触发作用, 在主震发生 14 个小时后, 此处发生了 $M_L5.4$ 余震. 同样的情况, 在附近区域至少有 4 个 $M_L \geq 4.0$ 的震例.

5.2 于田 $M_s7.3$ 地震对乌恰 $M_s6.8$ 地震的远程触发作用

于田地震断层破裂在乌恰地震震中造成的最大动态库仑应力变化为 0.12 MPa, 其正的最大峰值没有达到 0.5 MPa 的动态触发阈值, 但是远远高于 1 kPa 的静态库仑应力变

化。本文认为, 乌恰 $M_s6.8$ 地震可能受到了于田 $M_s7.3$ 地震一定的动态应力触发作用, 但不显著, 而静态库仑应力则对其影响很小。

在于田 $M_s7.3$ 地震中, 动态库仑应力变化图像更好地解释了余震的分布, 那么在余震的发生中, 两种库仑应力变化各自扮演了什么样的角色? 哪种库仑应力变化起到了更为重要的作用? 希望通过更多的震例和进一步的研究来厘清此问题。

新疆维吾尔自治区地震局唐明帅为本文提供了余震精定位结果, 审稿专家对本文提出了宝贵修改意见, 在此深表感谢。

参 考 文 献

- 陈杰, 曲国胜, 胡军, 冯先岳. 1997. 帕米尔北缘弧形推覆构造带东段的基本特征与现代地震活动[J]. 地震地质, **19**(4): 301–312.
- Chen J, Qu G S, Hu J, Feng X Y. 1997. Arcuate thrust tectonics and its contemporary seismicity in the eastern section of the external zone of the Pamir[J]. *Seismology and Geology*, **19**(4): 301–312 (in Chinese).
- 陈建波, 谭明, 寇大兵, 胡伟华, 高国英, 杜春清, 侯建盛, 李志强, 赵保宗, 张天罡, 宁宝坤. 2009. 2008 年 10 月 5 日新疆乌恰 6.8 级地震现场考察[J]. 中国地震, **25**(4): 455–462.
- Chen J B, Tan M, Kou D B, Hu W H, Gao G Y, Du C Q, Hou J S, Li Z Q, Zhao B Z, Zhang T G, Ning B K. 2009. Site investigation of the Wuqia earthquake with $M_s6.8$ on October 5, 2008, Xinjiang[J]. *Earthquake Research in China*, **25**(4): 455–462 (in Chinese).
- 刁桂苓, 王晓山, 高国英, 聂晓红, 冯向东. 2010. 以震源机制类型划分汶川、玉树地震构造块体归属[J]. 地球物理学报, **53**(8): 1778–1783.
- Diao G L, Wang X S, Gao G Y, Nie X H, Feng X D. 2010. Tectonic block attribution of Wenchuan and Yushu earthquakes distinguished by focal mechanism type[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **53**(8): 1778–1783 (in Chinese).
- 付碧宏, 张松林, 谢小平, 石许华, 王世锋. 2006. 阿尔金断裂系西段—康西瓦断裂的晚第四纪构造地貌特征研究[J]. 第四纪研究, **26**(2): 228–235.
- Fu B H, Zhang S L, Xie X P, Shi X H, Wang S F. 2006. Late Quaternary tectono-geomorphic features along the Kangxiwar fault, Altyn Tagh fault system, northern Tibet[J]. *Quaternary Sciences*, **26**(2): 228–235 (in Chinese).
- 冀战波, 赵翠萍, 王琼, 李志海, 王海涛. 2014. 2008 年 3 月 21 日新疆于田 $M_s7.3$ 地震破裂过程研究[J]. 地震学报, **36**(3): 339–349.
- Ji Z B, Zhao C P, Wang Q, Li Z H, Wang H T. 2014. Source rupture process of Yutian, Xinjiang, $M_s7.3$ earthquake on 21 March 2008[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **36**(3): 339–349 (in Chinese).
- 李志海, 马宏生, 曲延军. 2009. 2008 年 3 月 21 日新疆于田 7.3 级地震震构造与震前地震活动特征研究[J]. 中国地震, **25**(2): 199–205.
- Li Z H, Ma H S, Qu Y J. 2009. Study on seismogenic structure and seismic activity characteristics before the Yutian $M_s7.3$ earthquake on March 21, 2008, Xinjiang[J]. *Earthquake Research in China*, **25**(2): 199–205 (in Chinese).
- 谭明, 陈建波, 寇大兵, 高国英, 胡伟华, 杜春清. 2008. 2008 年 10 月 5 日新疆乌恰 6.8 级地震损失评估和震害调查[J]. 内陆地震, **22**(4): 361–368.
- Tan M, Chen J B, Kou D B, Gao G Y, Hu W H, Du C Q. 2008. Earthquake disaster evaluation and damage investigation of Wuqia earthquake with $M_s6.8$ [J]. *Inland Earthquake*, **22**(4): 361–368 (in Chinese).
- 唐兰兰, 赵翠萍, 王海涛. 2012. 2008 年新疆乌恰 6.8 级地震序列震源特征及帕米尔东北缘应力场研究[J]. 地球物理学报, **55**(4): 1228–1239.
- Tang L L, Zhao C P, Wang H T. 2012. Study on the source characteristics of the 2008 $M_s6.8$ Wuqia, Xinjiang earthquake sequence and the stress field on the northeastern boundary of Pamir[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(4): 1228–1239 (in Chinese).

- 唐明帅, 王海涛, 段天山. 2010. 利用和田地震台阵数据对 2008 年于田 7.3 级地震序列重新定位[J]. 内陆地震, **24**(3): 227–235.
- Tang M S, Wang H T, Duan T S. 2010. Relocating the seismic sequence of Yutian $M_s7.3$ earthquake in 2008 using the data of Xinjiang Hetian seismic array[J]. *Inland Earthquake*, **24**(3): 227–235 (in Chinese).
- 万永革, 沈正康, 盛书中, 徐晓枫. 2010. 2008 年新疆于田 7.3 级地震对周围断层的影响及其正断层机制的区域构造解释[J]. 地球物理学报, **53**(2): 280–289.
- Wan Y G, Shen Z K, Sheng S Z, Xu X F. 2010. The mechanical effects of the 2008 $M7.3$ Yutian, Xinjiang earthquake on the neighboring faults and its tectonic origin of normal faulting mechanism[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **53**(2): 280–289 (in Chinese).
- 汪建军. 2010. 同震、震后和震间应力触发[D]. 武汉: 武汉大学测绘学院: 3–4.
- Wang J J. 2010. *Coseismic, Postseismic and Interseismic Stress Triggering*[D]. Wuhan: School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University: 3–4 (in Chinese).
- 王凡, 陈为涛, 王敏, 沈正康, 王阎昭, 万永革. 2011. 利用 GPS 观测资料分析 2008 年于田 $M_s7.3$ 地震的同震位移及震后形变[J]. 地球物理学报, **54**(9): 2250–2255.
- Wang F, Chen W T, Wang M, Shen Z K, Wang Y Z, Wan Y G. 2011. Coseismic and postseismic deformation of $M_s7.3$ Yutian earthquake derived from GPS data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(9): 2250–2255 (in Chinese).
- 王峰, 徐锡伟, 郑荣章, 陈文彬. 2004. 阿尔金断裂带西段车尔臣河以西晚第四纪以来的滑动速率研究[J]. 地震地质, **26**(2): 200–208.
- Wang F, Xu X W, Zheng R Z, Chen W B. 2004. Late Quaternary slip-rate on the Altun fault west to the Qarqan river [J]. *Seismology and Geology*, **26**(2): 200–208 (in Chinese).
- 王琼, 聂晓红, 温和平. 2009. 2008 年新疆于田 $M_s7.3$ 地震前区域地震活动和应力状态特征初步研究[J]. 地震学报, **31**(3): 235–244.
- Wang Q, Nie X H, Wen H P. 2009. Preliminary research on the characteristics of regional seismic activity and stress state before the 2008 $M_s7.3$ earthquake in Yutian, Xinjiang of China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **31**(3): 235–244 (in Chinese).
- 吴小平, 虎雄林, Bouchon M, 黄雅, 胡家富, 解朝娣, 王绍晋, 胡毅力. 2007. 云南澜沧—耿马 $M_s7.6$ 地震的完全库仑破裂应力变化与后续地震的动态、静态应力触发[J]. 中国科学: D 辑, **37**(6): 746–752.
- Wu X P, Hu X L, Bouchon M, Huang Y, Hu J F, Xie C D, Wang S J, Hu Y L. 2007. Complete Coulomb failure stress changes and dynamic and static stress triggering on the subsequent earthquakes of Yunnan Lancang–Gengma $M_s7.6$ earthquake[J]. *Science in China: Series D*, **37**(6): 746–752 (in Chinese).
- 徐锡伟, Tapponnier P, van der Woerd J, Ryerson F J, 王峰, 郑荣章, 陈文彬, 马文涛, 于贵华, 陈桂华, Meriaux A S. 2003. 阿尔金断裂带晚第四纪左旋走滑速率及其构造运动转换模型讨论[J]. 中国科学: D 辑, **33**(10): 967–974.
- Xu X W, Tapponnier P, van der Woerd J, Ryerson F J, Wang F, Zheng R Z, Chen W B, Ma W T, Yu G H, Chen G H, Meriaux A S. 2003. Late Quaternary sinistral slip rate along the Altyn Tagh fault and its structural transformation model [J]. *Science in China: Series D*, **33**(10): 967–974 (in Chinese).
- 徐锡伟, 谭锡斌, 吴国栋, 陈建波, 沈军, 方伟, 宋和平. 2011. 2008 年于田 $M_s7.3$ 地震地表破裂带特征及其构造属性讨论[J]. 地震地质, **33**(2): 462–471.
- Xu X W, Tan X B, Wu G D, Chen J B, Shen J, Fang W, Song H P. 2011. Surface rupture features of the 2008 Yutian $M_s7.3$ earthquake and its tectonic nature[J]. *Seismology and Geology*, **33**(2): 462–471 (in Chinese).
- 胥颐, 刘建华, 刘福田, 朱令人, 龙海英, 魏斌. 2006. 天山—帕米尔结合带的地壳速度结构及地震活动研究[J]. 地球物理学报, **49**(2): 469–476.
- Xu Y, Liu J H, Liu F T, Zhu L R, Long H Y, Wei B. 2006. Crustal velocity structure and seismic activity in the Tianshan–Pamir conjunctive zone[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **49**(2): 469–476 (in Chinese).
- 尹光华, 蒋靖祥, 吴国栋. 2008. 2008 年 3 月 21 日于田 7.4 级地震的构造背景[J]. 干旱区地理, **31**(4): 543–549.
- Yin G H, Jiang J X, Wu G D. 2008. Tectonic background of the $M_s7.4$ earthquake at Yutian on March 21, 2008[J]. *Ar–id Land Geography*, **33**(2): 543–549 (in Chinese).

- 张国宏, 屈春燕, 单新建, 张桂芳, 宋小刚, 汪荣江, 李振洪, 胡植庆. 2011. 2008 年 $M_s7.1$ 于田地震 InSAR 同震形变场及其震源滑动反演[J]. 地球物理学报, **54**(11): 2753–2760.
- Zhang G H, Qu C Y, Shan X J, Zhang G F, Song X G, Wang R J, Li Z H, Hu Z Q. 2011. The coseismic InSAR measurements of 2008 Yutian earthquake and its inversion for source parameters[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(11): 2753–2760. doi:10.3969/j.issn.0001-5733 (in Chinese).
- Bouchon M, Aki K. 1977. Discrete wavenumber representation of seismic source wave fields[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **67**(2): 259–277.
- Bouchon M. 1981. A simple method to calculate Green's functions in elastic layered media[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **71**(14): 959–971.
- Bouchon M. 2003. A review of the discrete wavenumber method[J]. *Pure Appl Geophys*, **160**(3): 445–465.
- Burtman V S, Molnar P. 1993. Geological and geophysical evidence for deep subduction of continental crust beneath the Pamir[J]. *Geol Soc Am Spec Pap*, **281**: 1–76.
- Cowgill E, Gold R D, Chen X, Wang X F, Arrowsmith J R, Southon J R. 2009. Low Quaternary slip rate reconciles geodetic and geologic rates along the Altyn Tagh fault, northwestern Tibet[J]. *Geology*, **28**(3): 647–650.
- Elliott J R, Walters R J, England P C, Jackson J A, Li Z, Parsons B. 2010. Extension on the Tibetan Plateau: Recent normal faulting measured by InSAR and body wave seismology[J]. *Geophys J Int*, **183**(3): 503–535.
- Freed A M, Lin J. 1998. Time-dependent changes in failure stress following thrust earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **103**(10): 24393–24410.
- Freed A M, Lin J. 2001. Delayed triggering of the 1999 Hector Mine earthquake by viscoelastic stress transfer[J]. *Nature*, **411**(6834): 180–183.
- Kilb D, Gombert J, Bodin P. 2002. Aftershock triggering by complete Coulomb stress changes[J]. *J Geophys Res*, **107**(B4): 2060.
- Molnar P. 1988. Continental tectonics in the aftermath of plate tectonics[J]. *Nature*, **335**(6186): 131–137.
- 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 Seismol Soc Am*, **87**(1): 1–10.
- Pollitz F F, Sacks I S. 2002. Stress triggering of the 1999 Hector Mine earthquake by transient deformation following the 1992 Landers earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **92**(4): 1487–1496. doi:10.1785/0120000918.
- Shan X J, Zhang G H, Wang C S, Qu C Y, Song X G, Zhang G F, Guo L M. 2011. Source characteristics of the Yutian earthquake in 2008 from inversion of the co-seismic deformation field mapped by InSAR[J]. *J Asian Earth Sci*, **40**(4): 935–942.
- Wang Q, Wang H T, Xia A G. 2009. Features of seismicity in Xinjiang and its possible reason after the Yutian $M_s7.4$ earthquake, 2008[J]. *Earthquake Science*, **22**(6): 615–622.