

昆仑山口西 8.1 级地震强余震库仑 破裂应力触发研究^{*}

郝 平¹⁾ 傅征祥¹⁾ 田勤俭¹⁾ 刘 杰¹⁾ 刘桂萍²⁾

1) 中国北京 100036 中国地震局分析预报中心

2) 中国北京 100036 中国地震局监测预报司

摘要 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西发生 8.1 级地震,震后在地震断裂带附近发生了 5 次 $M_s > 5.0$ 的强余震.本文计算了昆仑山口西大地震后,主震分别在 5 次强余震破裂面上诱发的库仑破裂应力变化($\Delta\sigma_f$).结果表明,其中有 4 次强余震发生在库仑破裂应力增加($\Delta\sigma_f > 0$)的地区,增加的范围为 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ MPa;有一次强余震发生在库仑破裂应力变化为负的地区, $\Delta\sigma_f = -0.56$ MPa.本文的结果表明,主震位错产生的库仑破裂应力变化是昆仑山口西地震强余震活动的重要原因,但不是全部原因.

关键词 地震触发 库仑破裂应力—昆仑山口西 8.1 级地震

中图分类号: P315.72⁺7

文献标识码: A

引言

近年来对地震应力触发的研究表明,断层永久位移产生的静态应力变化,可以改变附近断层上发生地震的可能性,或者说可触发地震(Harris, 1998).

许多近场的触发地震,特别是触发余震的研究表明,静态应力变化为地震的触发因素. Reasenber 和 Simpson(1992)研究了 1989 年美国加州 Loma Prieta 地震后静应力场和区域地震活动的变化.结果表明,大多数地震活动速率增高的地区库仑破裂应力增加;而地震活动速率减小的地区,库仑破裂应力则减小. King 等(1994)对大地震后震中周围静应力场的变化与区域地震活动图象之间的对应关系进行了研究,认为大地震使区域应力发生的改变是区域地震活动增强的原因, Landers 地震的余震即分布在库仑破裂应力增长大于 0.03 MPa 的区域. Hardebeck 等(1998)研究了 1992 年 Landers $M_s 7.3$ 地震和 1994 年 Northridge $M_s 6.7$ 地震对“余震”触发的情况,结果表明:对 Landers 地震,在距离主断层 5~75 km 的范围内,85%的余震事件与静态应力变化一致;但对 Northridge 地震,静态应力变化则不能成功解释余震的分布. Toda(1998)计算了 1995 年日本阪神地震主震附近优势破裂面上的库仑破裂应力变化,发现其与地震活动速率有很好的相关关系. 刘桂萍和傅征祥(2002)的研究表明,1973 年炉霍大地震最大余震可能是由主震引起的库仑破裂应力变化触发的. 万永革等(2000)研究了几次复杂地震中不同破裂事件之间的“应力触发”问

^{*} 国家“十五”科技攻关项目(2001BA601B02-02-04)、中国—希腊国际地震合作研究项目和地震科学联合基金(103073)共同资助.

2002-09-28 收到初稿,2003-03-06 收到修改稿,2003-05-05 决定采用.

题, 认为第一次较大的子破裂事件所产生的库仑应力变化“有利于”触发后续破裂事件。

本研究计算了中国大陆西部昆仑山口西 $M_s 8.1$ 大地震(2001 年 11 月 14 日, 36.2°N 、 90.9°E , $h = 15 \text{ km}$)后, 主震分别在 5 次强余震破裂面上诱发的库仑破裂静应力变化($\Delta\sigma_i$)。结果表明, 其中有 4 次强余震发生在库仑破裂应力增加($\Delta\sigma_i > 0$)的地区, 增加的范围为 $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ MPa}$; 有一次强余震发生在库仑破裂应力变化为负的地区, $\Delta\sigma_i = -0.56 \text{ MPa}$ 。本研究结果可能表明, 主震位错产生的库仑破裂应力变化是昆仑山口西地震强余震活动的重要原因, 但不是全部原因。

1 基本原理

应用库仑破裂准则: 当断面上剪切应力达到摩擦强度时, 断面将发生剪切破坏。定义库仑破裂应力 σ_i (Coulomb failure stress) (Reasenber, Simpson, 1992; Harris, 1998) 如下:

$$\sigma_i = \tau + \mu(\sigma + p) - S \quad (1)$$

式中, τ 为断面上的剪切应力, μ 为内摩擦系数, σ 为断面上的正应力(拉伸应力为正值), p 为孔隙压强度, S 是内聚力强度或接触面固有剪切强度。假定 μ 和 S 是不随时间变化的常数, 则库仑破裂应力的变化

$$\Delta\sigma_i = \Delta\tau + \mu(\Delta\sigma + \Delta p) \quad (2)$$

式中, $\Delta\tau$ 是断面滑动方向上的剪应力变化, $\Delta\sigma$ 是断面上正应力的变化, Δp 是孔隙压强变化。Simpson 和 Reasenber(1994) 认为, 当介质是均匀各向同性时, 在静应力变化已经发生之后、流体有机会自由流动之前的这样一种不能排水的瞬间状态, 其孔隙压强变化 Δp 可表达为

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

σ_{kk} 是应力张量对角分量之和($\sigma_{kk} = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}$)。同时, 若断层带物质比周围介质的延性大, 则可假设 $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz}$, 即 $\Delta\sigma_{kk}/3 = \Delta\sigma$ 。这样

$$\Delta\sigma_i = \Delta\tau + \mu'\Delta\sigma \quad (4)$$

式中, $\mu' = \mu(1 - \beta)$ 。β 的理论范围由 0(干燥地表层) 到 1.0(流体完全饱和和地表层)。万永革等(2000) 数据实验表明, 改变 μ' 值对计算得到的库仑破裂应力变化的空间分布影响不大, 但可以对应力变化的大小有一定影响。在我们的计算中, 参照 Stein 等(1992)、King 等(1994) 和万永革等(2000) 的做法, 取 $\mu' = 0.4$ 。

Okada(1992)曾导出弹性半空间中, 任意一个长方形断层发生剪切和张性破裂所诱发静位移和应变的计算公式。应用 Okada 的公式去计算断面破裂后周围空间中任意一点上的应力, 然后计算在周围挑选的断面上的剪切应力变化、正应力变化和库仑破裂应力变化 $\Delta\sigma_i$, 并与区域地震活动空间分布进行对比。 $\Delta\sigma_i > 0$ 和 $\Delta\sigma_i < 0$ 分别表示断面上被加载(应力加大)或被卸载(应力松弛)的情况。

2 昆仑山口西 8.1 级地震位错模型

野外考察表明(Xu *et al*, 2002; 徐锡伟等, 2002; 赵瑞斌等, 2002), 昆仑山口西 8.1 级地震的地表破裂带由东、西两段破裂带组成, 它们约在布喀达板峰以东, 大体上是相互

平行的两段破裂,均为左旋走滑为主的破裂活动.东段破裂带长 350 km,最大左旋水平位错 7.6 m;西段破裂带长 26 km,最大左旋水平位错 3 m(图 1).根据图 1 的昆仑山口西 8.1 级地震地表破裂展布图(Xu *et al.*, 2002)可看出,东段破裂带总体平均走向 280°,西段破裂带总体平均走向 283°.许力生^①用全球地震台网的长周期波形资料,通过矩张量反演得到的震源机制解如表 2 和图 3 所示.由表 2 可以看出,节面 I 的走向、倾角和滑动角分别为 21°,80°和-175°;节面 II 的走向、倾角和滑动角分别为 290°,85°和-10°.认为这次地震的发震断层为走向、倾角和滑动角分别为 290°,85°和-10°的断层,这与地表破裂带基本一

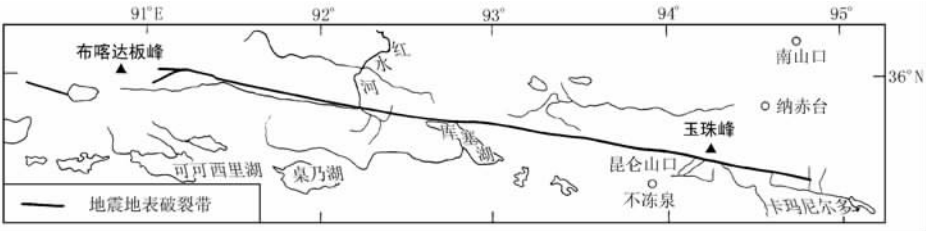


图 1 昆仑山口西 8.1 级地震地表破裂展布图(Xu *et al.*, 2002)

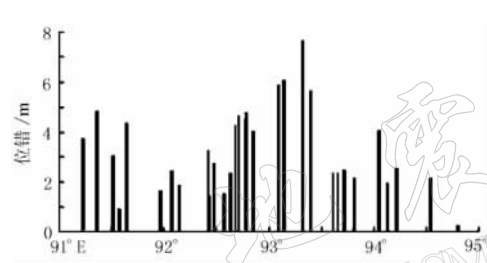


图 2 昆仑山口西 8.1 级地震东段破裂带沿地表破裂带产生的左旋水平同震位错分布图(Xu *et al.*, 2002)

致.昆仑山口西大地震震源所在地区地壳厚度约为 65 km(马杏垣,1989),大地震位错面深度有可能扩展到震源深度以下.许力生^①在反演震源破裂过程时断层宽度取 40 km,因此,本研究断层位错面宽度也取为 40 km.根据地表破裂资料和许力生的震源机制结果,提出昆仑山口西 8.1 级地震主震左旋走滑弹性静位错模型(表 1).图 2 是昆仑山口西 8.1 级地震东段沿地表破裂带产生的左旋水平同震位错分布图(Xu *et al.*, 2002).本研究还假定沿着断层

倾向方向,其位错量均与地表位错相同.

表 1 昆仑山口西 8.1 级地震主震的弹性静位错模型

破裂	破裂面西侧界面点位置		破裂长度/km	破裂宽度/km	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)
	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$					
东段	36.02	91.15	350	40	280	85	-10
西段	35.95	90.30	26	40	283	85	-10

3 昆仑山口西 8.1 级地震触发强余震研究

根据中国数字地震台网中心(CCDN)资料,昆仑山口西 8.1 级地震后,在主断裂附近共发生 5 次强余震($M_s \geq 5.0$).其发震时间、地点和震源机制解如表 2 和图 3 所示.

① 许力生, 2002. 个人交流.

表 2 昆仑山口西 8.1 级地震主震和强余震震源机制

发震日期 年-月-日	震中位置		深度 /km	M_s	节面 I			节面 II		
	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$			走向 / $(^{\circ})$	倾角 / $(^{\circ})$	滑动角 / $(^{\circ})$	走向 / $(^{\circ})$	倾角 / $(^{\circ})$	滑动角 / $(^{\circ})$
2001-11-14	36.20	90.90	15	8.1	21	80	-175	290	85	-10
2001-11-15	35.69	94.85	10	5.3	61	48	-102	259	44	-77
2001-11-19	35.60	93.80	10	5.7	80	43	88	263	47	92
2001-11-20	35.47	93.92	10	5.6	63	59	80	261	32	106
2001-11-30	36.10	90.90	10	5.1	275	82	6	184	84	172
2001-12-08	36.01	93.21	10	5.4	62	42	-93	246	48	-87

分别以震源机制解的两个节面作为破裂面，计算主震在 5 次强余震断层面上，在 10 km 深处产生的库仑破裂应力变化图象(切变模量取 3.0×10^{10} Pa，泊松比取 0.25，视摩擦系数取 0.4)，发现主震在 5 次强余震震源机制解的两个节面上产生的库仑破裂应力变化图象非常接近，但不完全一致(图 4)。

因为震源机制解的两个节面是正交的，故以两个节面的交线作为 z 轴，分别以两个节面的滑动方向作为 x 轴和 y 轴建立坐标系(图 5)。则由主震产生的应力变化张量为

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma_{xx} & \Delta\sigma_{xy} & \Delta\sigma_{xz} \\ \Delta\sigma_{yx} & \Delta\sigma_{yy} & \Delta\sigma_{yz} \\ \Delta\sigma_{zx} & \Delta\sigma_{zy} & \Delta\sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

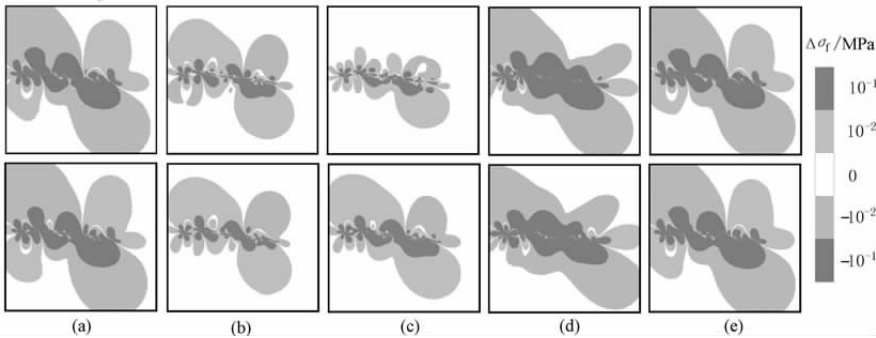


图 4 主震在 5 次强余震震源机制解的两个节面上产生库仑破裂应力变化图象对比(上图为节面 I 上产生的库仑破裂应力变化图象，下图为节面 II 上产生的库仑破裂应力变化图象)

主震在余震震源机制解节面 I 上产生的库仑破裂应力变化为 $\Delta\sigma_{f_1}=\Delta\sigma_{xx}+\mu'\Delta\sigma_{yy}$ ，在节面 II 上产生的库仑破裂应力变化为 $\Delta\sigma_{f_2}=\Delta\sigma_{xy}+\mu'\Delta\sigma_{xx}$ 。因为 $\Delta\sigma_{xy}=\Delta\sigma_{yx}$ ，所以当 $\mu'=0$ 时，两个节面上产生的库仑破裂应力变化完全相等；当 $\mu'\neq0$ 时，两节面上产生的库仑破裂应力变化相近但不完全相等，所以主震在 5 次强余震震源机制解的两个节面上产生的库

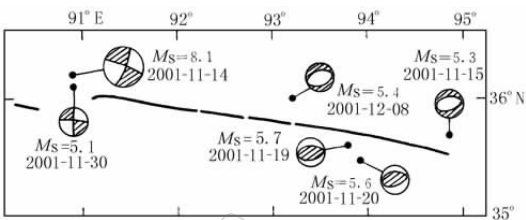


图 3 昆仑山口西 8.1 级地震主震和强余震分布及震源机制解

粗线为昆仑山口西 8.1 级地震地表破裂带

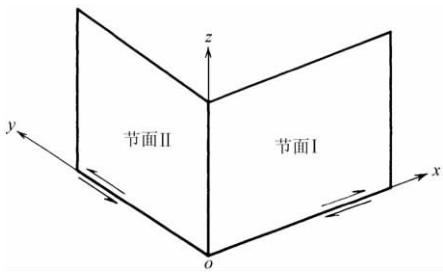


图 5 震源机制解的节面

静位错概貌, 东段破裂水平左旋位移按图 2 给出的位错量, 西段破裂按最大水平左旋位移 3 m, 我们分别计算了主震在 5 次强余震破裂面(节面 I 为破裂面)上诱发的库仑破裂应力变化($\Delta\sigma_f$)图象, 结果如图 6 和表 3 所示.

主震在走向 61° 、倾角 48° 、滑动角 -102° 、深度为 10 km 的破裂面上产生的库仑破裂应力变化图象如图 6a 所示. 2001 年 11 月 15 日的强余震发生在库仑破裂应力变化增加 0.21 MPa 的位置上, 主震在该强余震节面 II 上产生的库仑破裂应力变化为 0.17 MPa(表 3). 这说明主震触发了该次强余震, 或者说, 主震产生的库仑破裂应力“有利于”该次强余震的发生.

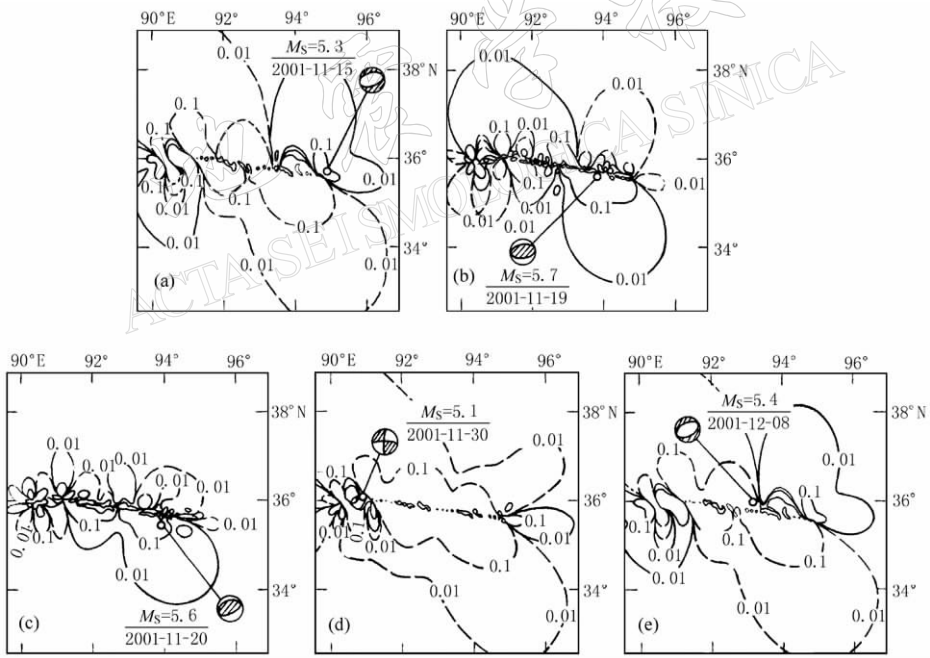


图 6 昆仑山口西 8.1 级地震诱发的库仑破裂应力变化($\Delta\sigma_f$)分布图(切变模量取 3.0×10^{10} Pa, 泊松比取 0.25, 视摩擦系数取 0.4. 图中实线为正值, 虚线为负值; 图中圆圈以强余震震中位置为圆心, 以 15 km 为直径)

(a) 走向 61° 、倾角 48° 、滑动角 -102° 、深度 10 km; (b) 走向 80° 、倾角 43° 、滑动角 88° 、深度 10 km; (c) 走向 63° 、倾角 59° 、滑动角 80° 、深度 10 km; (d) 走向 275° 、倾角 82° 、滑动角 6° 、深度 10 km; (e) 走向 62° 、倾角 42° 、滑动角 -93° 、深度 10 km

主震在走向 80° 、倾角 43° 、滑动角 88° 、深度为 10 km 的破裂面上产生的库仑破裂应力

变化图象如图 6b 所示. 2001 年 11 月 19 日的强余震发生在库仑破裂应力变化增加 0.11 MPa 的位置上, 主震在该强余震节面 II 上产生的库仑破裂应力变化为 0.12 MPa(表 3). 这说明主震触发了该次强余震, 或者说, 主震产生的库仑破裂应力“有利于”该次强余震的发生.

主震在走向 63°、倾角 59°、滑动角 80°、深度为 10 km 的破裂面上产生的库仑破裂应力变化图象如图 6c 所示. 2001 年 11 月 20 日的强余震发生在库仑破裂应力变化增加 0.11 MPa 的位置上, 主震在该强余震节面 II 上产生的库仑破裂应力变化为 0.22 MPa(表 3), 这说明主震触发了该次强余震, 或者说, 主震产生的库仑破裂应力“有利于”该次强余震的发生.

表 3 昆仑山口西 8.1 级地震在强余震破裂面上诱发的库仑破裂应力变化($\Delta\sigma_f$)

编号	发震日期 年-月-日	深度 /km	节面 I				节面 II			
			走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)	$\Delta\sigma_f$ /MPa	走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)	$\Delta\sigma_f$ /MPa
1	2001-11-15	10	61	48	-102	0.21	259	44	-77	0.17
2	2001-11-19	10	80	43	88	0.11	263	47	92	0.12
3	2001-11-20	10	63	59	80	0.11	261	32	106	0.22
4	2001-11-30	10	275	82	6	0.46	184	84	172	0.23
5	2001-12-08	10	62	42	-93	-0.56	246	48	-87	-0.51

主震在走向 275°、倾角 82°、滑动角 6°、深度为 10 km 的破裂面上产生的库仑破裂应力变化图象如图 6d 所示. 2001 年 11 月 30 日的强余震发生在库仑破裂应力变化增加 0.46 MPa 的位置上, 主震在该强余震节面 II 上产生的库仑破裂应力变化为 0.23 MPa(表 3). 这说明主震触发了该次强余震, 或者说, 主震产生的库仑破裂应力“有利于”该次强余震的发生.

主震在走向 62°、倾角 42°、滑动角 -93°、深度为 10 km 的破裂面上产生的库仑破裂应力变化图象如图 6e 所示. 2001 年 12 月 8 日的强余震发生在库仑破裂应力变化减少 0.56 MPa 的位置上, 主震在该强余震节面 II 上产生的库仑破裂应力变化为 -0.51 MPa(表 3). 这说明库仑破裂应力变化不是强余震活动的全部原因.

表 4 改变走向、倾角、滑动角时的库仑破裂应力变化($\Delta\sigma_f$)

发震日期 年-月-日	改变走向				改变倾角				改变滑动角			
	走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)	$\Delta\sigma_f$ /MPa	走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)	$\Delta\sigma_f$ /MPa	走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)	$\Delta\sigma_f$ /MPa
2001-11-15	51	48	-102	0.29	61	38	-102	0.19	61	48	-92	0.26
	71	48	-102	0.16	61	58	-102	0.21	61	48	-112	0.16
2001-11-19	70	43	88	0.20	80	33	88	0.12	80	43	78	0.022
	90	43	88	0.014	80	53	88	0.074	80	43	98	0.19
2001-11-20	53	59	80	0.16	63	49	80	0.18	63	59	70	0.055
	73	59	80	0.068	63	69	80	0.016	63	59	90	0.16
2001-11-30	265	82	6	0.38	275	72	6	0.44	275	82	-4	0.47
	285	82	6	0.48	95	88	-6	0.46	275	82	16	0.44
2001-12-08	52	42	-93	-0.58	62	32	-93	-0.51	62	42	-83	-0.60
	72	42	-93	-0.48	62	52	-93	-0.57	62	42	-103	-0.52

因为各次强余震的震中位置、震源机制都存在误差,下面我们讨论这些误差对我们的结论有何影响.图6中表示震中的圆圈是以震中为圆心,以15 km为直径.这些圆圈整体都落在库仑破裂应力变化图象的正区中(前4次强余震)或者负区中(最后一次强余震).所以强余震震中位置的误差应该不会对我们的研究结论产生影响.为了消除震源机制解误差对我们研究结果的影响,我们对5次强余震的破裂面(节面I)的走向、倾角和滑动角分别改变 $\pm 10^\circ$,然后计算在破裂面上产生的库仑破裂应力变化.结果发现(表4),库仑破裂应力变化正负值没有发生变化,只是库仑破裂应力变化的绝对值在 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ MPa范围内变化,这对我们的结论并没有影响.因为普遍认为,库仑破裂应力变化大于 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ MPa就有可能触发后续地震(万永革等,2000).

4 结论

1) 考虑到强余震位置与震源机制测定的误差,在4次强余震活动地点上昆仑山口西大地震诱发的库仑破裂应力变化($\Delta\sigma_f$)在 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ MPa范围内,这与目前已有某些构造断裂相互作用与地震活动关系的观测结果相一致.由不同地区计算大地震引起的区域库仑破裂应力变化约在 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ MPa范围内,这样大小的应力可能触发另一次大地震的发生.这样的应力,要比潮汐应力(10^{-3} MPa)或周期为14个月的极移应力(5×10^{-3} MPa)约大 $10^1 \sim 10^2$ 倍.因此,大地震断层位错产生的库仑破裂应力变化,对其它断层上的地震过程的影响值得注意.其影响范围可能达到几百公里,乃至上千公里,这与地震位错的大小有关.

2) 5次强余震中有一次强余震活动发生在昆仑山口西大地震诱发的库仑破裂应力变化($\Delta\sigma_f$)为负的地点上.这可能说明库仑破裂应力变化并不是强余震活动的全部原因.

参 考 文 献

- 刘桂萍,傅征祥. 2002. 1973年炉霍大地震($M_s=7.6$)最大余震($M_s=6.3$)的库仑破裂应力触发[J]. 中国地震, **18**(2): 175~182
- 马杏垣主编. 1989. 中国岩石圈动力学地图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 12~13
- 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
- 徐锡伟, 陈文彬, 于贵华, 等. 2002. 2001年11月14日昆仑山库赛湖地震($M_s 8.1$)地表破裂带的基本特征[J]. 地震地质, **24**(1): 1~12
- 赵瑞斌, 李军, 向志勇, 等. 2002. 昆仑山口西8.1级地震地壳破裂带西段考察[J]. 内陆地震, **16**(2): 175~179
- 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*, **98**: 4 461~4 472
- 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
- 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
- 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
- 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
- Simpson R W, Reasenber P A. 1994. Earthquake-induced static stress changes on central California faults[A]. In:

- Simpson R W ed. *The Loma Prieta, California Earthquake of October 17, 1989—Tectonic Processes and Models* [C]. *U S Geol Surv Prof Pap*, 55~89
- 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
- Toda S. 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
- Xu X, Chen W, Ma W, et al. 2002. Surface rupture of the Kunlunshan earthquake($M_S 8.1$), Northern Tibetan Plateau, China[J]. *Seism Res Lett*, **73**: 884~892

LARGE AFTERSHOCKS TRIGGERING BY COULOMB FAILURE STRESS FOLLOWING THE 2001 $M_S=8.1$ GREAT KUNLUN EARTHQUAKE

Hao Ping¹⁾ Fu Zhengxiang¹⁾ Tian Qinjian¹⁾ Liu Jie¹⁾ Liu Guiping²⁾

1) Center for Analysis and Predication, China Seismological Bureau, Beijing 100036, China

2) Department of Earthquake Monitoring and Predication, China Seismological Bureau, Beijing 100036, China

Abstract: The great Kunlun, earthquake occurred on Nov. 14, 2001 in Qinghai Province, China. Five large aftershocks with magnitude larger than 5.0 occurred near the Kunlun fault after main shock. Calculations of the change in Coulomb failure stress reveal that 4 of 5 large aftershocks occurred in areas with $\Delta\sigma_f > 0$ ($10^{-2} \sim 10^{-1}$ MPa) and one aftershock occurred in an area with $\Delta\sigma_f = -0.56$ MPa. It is concluded that the permanent fault displacement due to the main shock is the main cause of activity of large aftershocks, but not the whole cause.

Key words: aftershocks triggering; Coulomb failure stress; great Kunlun earthquake