

# 南天山西段强震应力触发作用研究\*

王琼 聂晓红 唐丽华

(新疆维吾尔自治区地震局,乌鲁木齐 830011)

**摘要** 通过计算新疆南天山西段的喀什-乌恰地区和柯坪断块区 1955 年以来部分 6 级以上地震产生的静态库仑破裂应力变化,研究了该区强震对后续地震的触发作用。研究表明,喀什-乌恰地区多数强震的发生有利于其邻区后续地震活动增强;而柯坪块区多数强震的发生则在一定程度上缓解了其邻区的地震危险性。

**关键词** 南天山西段 喀什-乌恰地区 柯坪断块区 静态库仑破裂应力 加速矩释放模型

中图分类号:P315.72<sup>+8</sup>

文献标识码:A

## ON STRESS TRIGGERING STRONG EARTHQUAKES IN WESTERN PART of SOUTHERN TIANSHAN MOUNTAIN

Wang Qiong, Nie Xiaohong and Tang Lihua

(*Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011*)

**Abstract** By calculating the static Coulomb failure stress changes of some  $M_s \geq 6$  earthquakes in Kashi-Wuqia region and Keping block region in the western part of southern Tianshan mountain, Xinjiang since 1955, the triggering effect on the following earthquakes is analyzed. The result shows that most strong earthquakes in Kashi-Wuqia region encourage the following earthquake activity increasing, while most strong earthquakes in Keping block region relieve earthquake risk in its neighboring region to some degree.

**Key words:** the western part of southern Tianshan mountain, Kashi-Wuqia region, Keping block region, static Coulomb failure stress, accelerating moment release model

## 1 引言

国内外许多学者研究了地震产生的静态库仑应力变化对后续地震发生的时间和位置的影响,认为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先发生的较大破裂事件所产生的库仑应力变化“有利于”触发后续破裂事件的发生<sup>[1-3]</sup>。研究还表明大地震前未来主震一定范围内出现地震活动增强、区域地震应变能加速释放的现象,即“加速矩释放”(AMR)<sup>[4-7]</sup>。

新疆地处欧亚板块腹地,是我国大陆强震的主要活动区之一。为了研究地震活动规律,本文将静态库仑破裂应力变化和加速矩释放模型相结合探讨了喀什-乌恰地区和柯坪块区内 6 级以上强震产生的静态库仑破裂应力对后续地震的作用,并依据强震产生的静态库仑应力变化的空间分布确定可能的地震活动增强区(正库仑应力变化区)和平静区(负库仑应力变化区),分析两区内地震活动的加速矩释放特征和静态应力变化对其邻区地震活动的可能影响。同时,还研究了南天山西段强震产生的库仑

\* 收稿日期:2007-04-09

基金项目:新疆地震科学基金(200502);地震科学联合基金(A07095)

作者简介:王琼,女,副研究员,硕士,主要从事地震预报研究工作. E-mail:wang\_qiong00@yahoo.com.cn

应力变化作用的时空影响范围。

## 2 资料选取

研究资料中的定位结果采用新疆维吾尔自治区地震局区域台网定位结果,1977年以前的地震断层面解采用P波初动结果,1977年之后的地震断层面解采用哈佛大学矩张量解(表1)。破裂面的确定依据区域构造应力场和余震分布。断层长、宽和位错量的估算依据郝平的方法<sup>[8]</sup>。计算本尼奥夫应变时,为了避免余震和相似震级地震事件的干扰,对资料进行了预处理:删除余震;确定震级下限为低于主震震级3个震级单位;将与主震差1.2个震级单位之内的事件剔除<sup>[7]</sup>。

## 3 研究方法

一些研究表明,很小的静态库仑应力变化就可能对地震活动产生较大的影响,从而对后续地震活

动的时空分布产生影响。依据强震产生的静态库仑应力变化的空间分布特征,确定地震活动的增强区和平静区,将有助于从应力转移和断层相互作用的角度研究强震对后续地震活动的可能影响作用。

### 3.1 静态库仑破裂应力

依据 Okada<sup>[9]</sup>提出的适用于各种类型断层的解析表达式和库仑破裂准则,断层面上的库仑破裂应力变化( $\Delta CFS$ )为:

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau_s + \mu(\Delta\sigma_n - \Delta P) \quad (1)$$

式中, $\Delta\tau_s$ 为剪切应力变化, $\Delta\sigma_n$ 为法向应力变化(张开为正), $\mu$ 为摩擦系数, $\Delta P$ 为孔隙压力变化。孔隙压力减少摩擦系数的效应可用 $\mu' = \mu(1 - B)$ 表示。其中, $B$ 是 Skempton 系数,理论上其范围为0~1。由此,式(1)可变为,

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau_s + \mu'\Delta\sigma_n \quad (2)$$

表1 研究区强震震中位置及其断层面参数

Tab.1 Epicenter location of strong earthquakes and fault parameters in the studied region

研究区	发震时间 (年月日)	震中位置		震级 ( $M_s$ )	震源深度 (km)	断层面参数			断 错 性 质
		$\Phi_N$ ( $^\circ$ )	$\lambda_E$ ( $^\circ$ )			走向 ( $^\circ$ )	倾角 ( $^\circ$ )	滑动角 ( $^\circ$ )	
喀什-乌恰 地区	1)1955-04-15	39.90	74.60	7.0	20	81	78	21	走滑
	2)1967-05-11	39.31	73.81	6.2	20	296	83	150	走滑
	3)1974-08-11	39.23	73.83	7.3	10	304	78	161	走滑
	4)1978-10-08	39.50	74.80	6.0	10	133	74	123	逆断
	5)1983-02-13	40.24	75.24	6.7	20	323	84	-149	走滑
	6)1983-04-05	40.14	75.14	6.1	20	319	80	-138	走滑
	7)1985-08-23	39.44	75.49	7.1	15	315	29	159	逆断
	8)1990-04-17	39.46	74.56	6.4	15	118	68	156	走滑
	9)1993-12-01	39.44	75.49	6.2	20	128	87	164	走滑
柯坪 块区	1)1961-04-01	39.90	77.80	6.2	18	292	69	22	走滑
	2)1969-02-12	41.40	79.21	6.5	10	230	55	66	逆断
	3)1971-03-24	41.32	79.37	6.1	10	235	31	90	逆断
	4)1972-01-16	40.33	79.07	6.2	10	35	61	34	走滑
	5)1977-12-19	39.90	77.42	6.2	20	286	27	125	逆断
	6)1987-01-24	41.44	79.27	6.4	15	65	47	74	逆断
	7)1991-02-25	40.34	79.00	6.5	15	68	50	94	逆断
	8)1996-03-19	40.13	76.63	6.7	22	273	26	109	逆断
	9)1998-03-19	40.12	76.82	32.7	6	243	23	79	逆断
	10)2005-02-15	41.60	79.40	6.3	25	300	8	133	逆断
	11)1969~1971年 成组6级地震	41.40	79.30	6.6	20	230	55	155	逆断

### 3.2 地震活动加速模型

Bufe and Varnes<sup>[10]</sup>提出用震前地震序列预测主震发生时间和震级的破裂时间,

$$d\Omega/dt = C/(t_f - t)^n \quad (3)$$

式中  $t$  为时刻,  $t_f$  为主震发生时间,  $\Omega$  为描述应力状态的可测量,  $C, n$  为常数。

由式(3)积分:

$$\sum \Omega = A + B(t_f - t)^m \quad (4)$$

式中  $A, B$  为常数,  $m = 1 - n$ 。可测量  $\Omega$  可取应变释放或地震矩。当取应变释放时,式(4)为

$$\sum \sqrt{E} = A + B(t_f - t)^m \quad (5)$$

式中  $A, B, m$  和  $t_f$  为描述方程的4个参数,与区域某

一时期地震活动过程有关,其中  $A$  为某活动期内已发生地震的总应变释放; $B$  是常数; $0 < m < 1$  表明震前地震序列处于加速状态, $m > 1$  则表明震前地震序列处于减速状态。

对于某一区域、某一地震活跃期内的地震事件,根据震级  $M_s$  与能量  $E$  的经验关系式

$$\log(E) = 1.5M_s + 4.8 \quad (6)$$

式(4)可写为

$$y_i = \sum_{k=1}^i 10^{0.75M_k + 2.4} = A + B(t_f - t_i)^m \quad i = 1, \dots, l \quad (7)$$

$i$  为地震事件数。上式是非线性方程组,采用拟合非线性方程组的方法求解 4 个参数。拟合时,先给定参数的初值,进行迭代计算函数极小点参数值,再用非线性最小二乘曲线拟合方法得到终值。

## 4 研究结果分析

本研究选取南天山西段自 1955 年以来 6 级以上地震(图 1)并计算这些强震在其邻区后续地震断层面上产生的静态库仑破裂应力变化。研究中依据静态库仑破裂应力变化的空间分布特征,确定后续地震活动的可能增强区(正  $\Delta CFS$  区)和平静区(负  $\Delta CFS$  区)范围,应用累积贝尼奥夫应变定量研究两区内中等地震活动的矩释放特征,并据此定量论证强震产生的库仑应力变化对后续地震产生影响的可靠性。

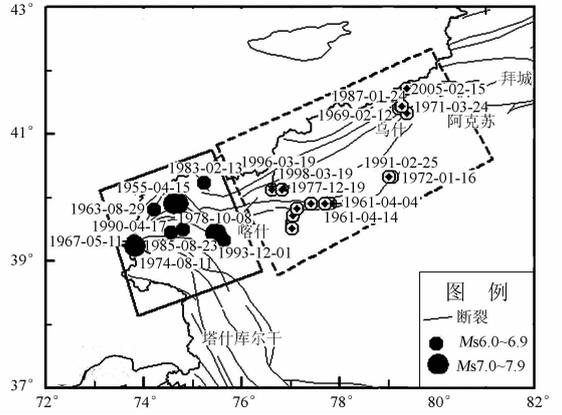


图 1 研究区内选取的  $M_s \geq 6.0$  强震震中分布

Fig. 1 Epicenter distribution of selected  $M_s \geq 6.0$  strong earthquakes in the studied region

### 4.1 南天山西段喀什-乌恰地区

#### 4.1.1 静态库仑破裂应力变化计算结果

喀什-乌恰地区 1955 年以来 6 级以上地震震中分布如图 1。地震对邻区后续地震断层面上产生的库仑破裂应力变化值见表 2。从表 2 可见该区 8 次地震中有 6 次后续中强地震发生在先发生的强震产生的正  $\Delta CFS$  区域,即 1955 年 4 月 15 日乌恰  $M_s 7.0$  地震和 1967 年 5 月 11 日乌恰  $M_s 6.2$  地震在 1974 年 8 月 11 日乌兹别里山口  $M_s 7.3$  地震破裂面上产生的  $\Delta CFS$  分别为  $0 \sim 0.005$  MPa 和  $0.005 \sim 0.01$  MPa;1983 年 2 月 13 日  $M_s 6.7$  地震在 1983 年 4 月 5

表 2 南天山西段强震产生的  $\Delta CFS$  的时空范围及强震前中等地震的加速度矩释放特征

Tab. 2 The spatial and temporal range of  $\Delta CFS$  from strong earthquakes in the western part of southern Tianshan mountain and the accelerating moment release characters of medium earthquakes before the strong earthquakes

研究区	地震事件 (年月日 $M_s$ )	目标地震 (年月日 $M_s$ )	延迟时间 (年)	空间范围 (km)	$\Delta CFS$ (MPa)	加、减速特征 (年月日 $M_s$ )
喀什-乌恰地区		1974-08-11 7.3	19.32	100	$0 \sim 0.005$	
	1955-04-15 7.0	1978-10-08 6.0	23.48	49	$0.01 \sim 0.02$	1978-10-08 6.0 +
		1983-02-13 6.7	27.83	65	$0.02 \sim 0.03$	1983-02-13 6.7 +
	1967-05-11 6.2	1974-08-11 7.3	7.23	10	$0.005 \sim 0.01$	
	1978-10-08 6.0	1990-04-17 6.4	11.52	23	$0.005 \sim 0.01$	1990-04-17 6.4 +
	1983-02-13 6.7	1983-04-05 6.1	0.14	14	$0 \sim 0.005$	
		1985-08-23 7.1	2.52	91	$-0.005$	1985-08-23 7.1 -
	1985-08-23 7.1	1990-04-17 6.4	4.65	80	0	
柯坪断块区		1993-12-01 6.2	8.27	18	$-1.0$	1993-12-01 6.2 -
		1996-03-19 6.7	10.61	126	$0 \sim 0.005$	1996-03-19 6.7 +
	1961-04-01 6.8	1972-01-16 6.2	10.80	117	$0 \sim -0.005$	
		1977-12-19 6.2	16.72	25	$-0.03 \sim -0.05$	1977-12-19 6.2 -
	1969-02-12 6.5	1971-03-24 6.1	2.12	16	$-0.2 \sim -0.1$	
	1971-03-24 6.1	1987-01-24 6.3	15.84	15	$-0.08 \sim -0.05$	1987-01-24 6.3 -
	1987-01-24 6.3	1991-02-25 6.5	3.09	125	0	1991-02-25 6.5 /
		2005-02-15 6.3	18.06	33	$0.02 \sim 0.03$	2005-02-15 6.3 -
	1996-03-19 6.7	1998-03-19 6.0	2.0	17	$0.04 \sim 0.05$	1998-03-19 6.0 +
	1969 ~ 1971 年 3次6级地震	1974 ~ 1976 年 成组5级地震	3.0	150	$0 \sim 0.001$	

注: + 加速; - 减速; / 不明显

日乌恰  $M_s6.1$  地震破裂面上产生的  $\Delta CFS$  为  $0 \sim 0.005$  MPa;1978 年 10 月 8 日乌恰  $M_s6.0$  地震在 1990 年 4 月 17 日乌恰  $M_s6.4$  地震破裂面上产生的  $\Delta CFS$  为  $0.005 \sim 0.01$  MPa;1996 年 3 月 19 日阿图什  $M_s6.7$  地震发生在 1985 年 8 月 23 日乌恰  $M_s7.1$  地震产生的  $\Delta CFS$  为  $0 \sim 0.005$  MPa 的区域,表明这几次强震的发生有利于后续强震的发生。

8 次地震中只有 2 次后续中强地震发生在先发生的强震产生的负  $\Delta CFS$  区域,即 1983 年  $M_s6.7$  地震在 1985 年 8 月 23 日乌恰  $M_s7.1$  地震破裂面上产生的  $\Delta CFS$  为  $0 \sim -0.005$  MPa;1985 年乌恰  $M_s7.1$  地震在 1993 年 12 月 1 日疏附  $M_s6.2$  地震破裂面上产生的  $\Delta CFS$  为  $-1.0$  MPa,表明这两次强震的发生可能使后续强震的发生延迟了。

#### 4.1.2 南天山西段喀什-乌恰地区加速矩释放模型

南天山西段强震产生的  $\Delta CFS$  较小( $0 \sim 0.01$  MPa),这样量级的库仑应力变化能否对其周围的地震活动产生影响?为此,我们分析了南天山西段喀什-乌恰地区 1978 年以来 6 次  $M_s \geq 6.0$  地震前中等地震的加、减速特征,6 次 6 级以上地震前中等地震加速模型结果表明(表 2),4 次 6 级以上强震发生前  $\Delta CFS$  正区内中等地震存在加速现象,2 次强震发生前  $\Delta CFS$  负区内中等地震存在减速现象(图 2)。

##### 1) 加速特征地震

将 1955 年 4 月 15 日乌恰  $M_s7.0$  地震在 1978 年乌恰  $M_s6.0$  地震断层面上产生的  $\Delta CFS$  正区作为研究区,得到 1978 年  $M_s6.0$  地震前中等地震的累

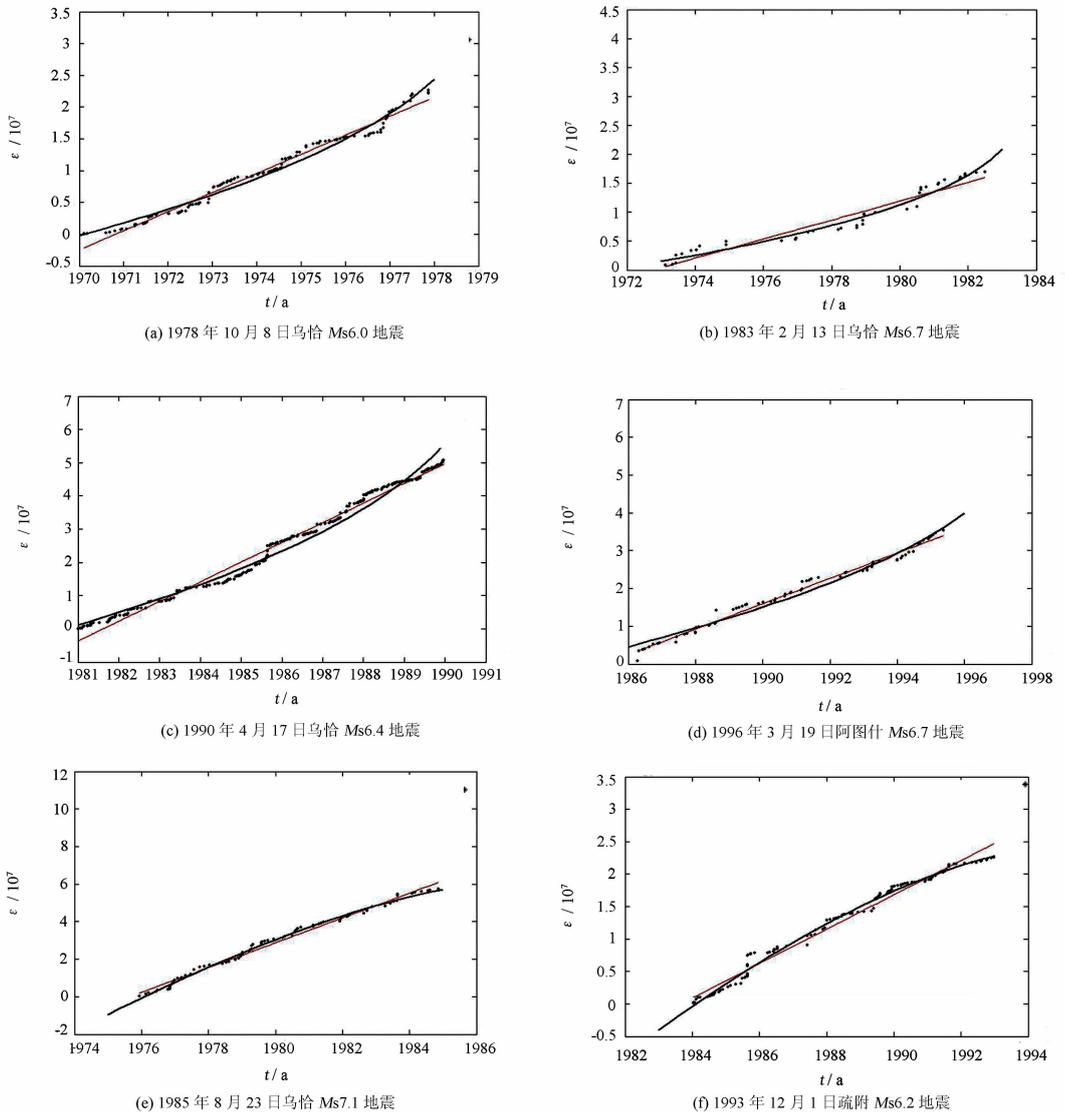


图 2 喀什-乌恰地区 6 级以上强震前中等地震累积本尼奥夫应变时序曲线(散点)及模型拟合曲线(实线)

Fig.2 Charts for accumulative Benioff strain(dot line) of medium earthquakes before  $M_s \geq 6.0$  strong earthquakes in Kashi-Wuqia region and their fitting curves(real line)

积本尼奥夫应变时序曲线(图 2(a)),这两次地震前该区能量释放总体表现出加速特征, $m = 0.4$ 。将 1955 年 4 月 15 日乌恰  $M_s7.0$  地震在 1983 年乌恰  $M_s6.7$  地震断层面上产生的  $\Delta CFS$  正区作为研究区,得到 1983 年乌恰  $M_s6.7$  地震前中等地震的累积本尼奥夫应变曲线(图 2(b)),本次地震前该区能量释放表现为加速特征, $m = 0.4$ 。将 1978 年 10 月 8 日乌恰  $M_s6.0$  地震在 1990 年乌恰  $M_s6.4$  地震断层面上产生的  $\Delta CFS$  正区作为研究区,得到 1990 年乌恰  $M_s6.4$  地震前中等地震的累积本尼奥夫应变曲线(图 2(c)),本次地震前该区能量释放表现为加速释放特征, $m = 0.4$ 。将 1985 年 8 月 23 日乌恰  $M_s7.1$  地震在 1996 年阿图什  $M_s6.7$  地震断层面上产生的  $\Delta CFS$  正区作为研究区,得到 1996 年阿图什  $M_s6.7$  地震前中等地震的累积本尼奥夫应变曲线(图 2(d)),1996 年阿图什  $M_s6.7$  地震前该区能量释放表现为加速特征, $m = 0.4$ 。

## 2) 减速特征地震

将 1983 年乌恰  $M_s6.7$  地震在 1985 年乌恰  $M_s7.1$  地震断层面上产生的  $\Delta CFS$  负区作为研究区,得到 1985 年乌恰  $M_s7.1$  地震前中等地震的累积本尼奥夫应变曲线(图 2(e)),本次地震前该区能量释放表现为减速特征, $m = 1.6$ 。将 1985 年乌恰  $M_s7.1$  地震在 1993 年疏附  $M_s6.2$  地震断层面上产生的  $\Delta CFS$  负区作为研究区,得到 1993 年疏附  $M_s6.2$  地震前中等地震的累积本尼奥夫应变曲线(图 2(f)),本次地震前该区能量释放表现为减速特征, $m = 1.1$ 。

### 4.1.3 分析和讨论

喀什-乌恰地区 6 级以上地震在后续中强地震破裂面上产生的  $\Delta CFS$  计算结果表明,多数后续中强地震发生在先发生的强震产生的正  $\Delta CFS$  区域。6 次 6 级以上地震前中等地震加速模型结果表明(表 1),4 次 6 级以上地震发生前  $\Delta CFS$  正区内中等地震存在加速现象,2 次强震发生前  $\Delta CFS$  负区内中等地震存在减速现象。该区  $\Delta CFS$  正区内 6 级以上地震发生前存在加速现象, $\Delta CFS$  负区内存在减速现象,即静态库仑应力变化计算结果与加速模型结果具有一致性,说明该区先发生的强震在其周围地区产生的较小的静态应力变化对后续中强地震的具有一定的触发或抑制作用。

## 4.2 南天山西段柯坪断块区

### 4.2.1 静态库仑破裂应力变化计算结果

柯坪块区 1961 年以来 6 级以上地震在其邻区后续地震破裂面上产生的静态库仑破裂应力变化见

表 2。该区 8 组强震中有 4 次产生的静态库仑破裂应力变化不利于后续地震的发生,1961 年 4 月 1 日巴楚  $M_s6.8$  地震在 1972 年巴楚  $M_s6.2$  地震和 1977 年巴楚  $M_s6.2$  地震破裂面上产生的  $\Delta CFS$  分别为  $0 \sim -0.005$  MPa 与  $-0.03 \sim -0.05$  MPa;1969 年 2 月 12 日乌什  $M_s6.5$  地震在 1971 年 3 月 24 日乌什  $M_s6.1$  地震破裂面上产生的  $\Delta CFS$  为  $-0.1$  MPa;1971 年巴楚  $M_s6.1$  地震在 1987 年 1 月 24 日柯坪  $M_s6.4$  地震破裂面上产生的  $\Delta CFS$  为  $-0.08 \sim -0.05$  MPa。

8 组强震中有 3 组产生的库仑应力变化有利于后续地震的发生,1987 年柯坪  $M_s6.4$  地震在 2005 年乌什  $M_s6.3$  地震破裂面上产生的  $\Delta CFS$  为  $0.02 \sim 0.03$  MPa;1996 年 3 月 19 日阿图什  $M_s6.7$  地震在 1998 年伽师 6 级强震破裂面上产生的  $\Delta CFS$  为  $0.04 \sim 0.05$  MPa;1974 ~ 1976 年柯坪块体普昌断裂以西地震活动显著增强,连续发生 5 次 5 级以上地震,这种增强活动可能与 1969 ~ 1971 年乌什连续发生 3 次 6 级地震有关。计算结果表明,1974 ~ 1976 年发生在普昌断裂以西的成组 5 级以上地震位于 1969 ~ 1971 年乌什成组 6 级地震产生的  $\Delta CFS$  为  $0 \sim 0.001$  MPa 的正区。

1987 年 1 月 24 日柯坪  $M_s6.4$  地震在 1991 年柯坪  $M_s6.5$  地震断层面上产生的  $\Delta CFS$  近于 0,表明 1987 柯坪  $M_s6.4$  地震产生的  $\Delta CFS$  对 1991 年柯坪  $M_s6.5$  地震的影响不大。

### 4.2.2 南天山西段柯坪断块区加速释放模型

考虑到资料的完备性,本文仅选取了柯坪断块区 1977 年以来 6 级以上地震,依据其产生的静态库仑应力空间分布确定研究区范围,研究分析了该区强震发生前研究区内中等地震矩释放特征。

#### 1) 加速特征地震

将 1996 年阿图什  $M_s6.7$  地震在 1998 年 3 月 19 日阿图什  $M_s6.0$  地震断层面上产生的正  $\Delta CFS$  区作为研究区,得到 1998 年阿图什  $M_s6.0$  地震前累积本尼奥夫应变曲线(图 3(a)),此次地震前该区域能量释放表现出一定程度的加速特征, $m = 0.3$ 。

#### 2) 减速特征地震

依据 1961 年巴楚 6.8 地震在 1977 年柯坪 6.2 级地震断层面上产生的  $\Delta CFS$  空间分布,确定平静区的范围,得到 1977 年柯坪 6.2 级地震前累积本尼奥夫应变曲线(图 3(b)),此次地震前该区域能量释放表现为弱减速特征, $m = 1.1$ 。特别是震前 1.5 年,中等地震活动出现了较明显的减速特征。

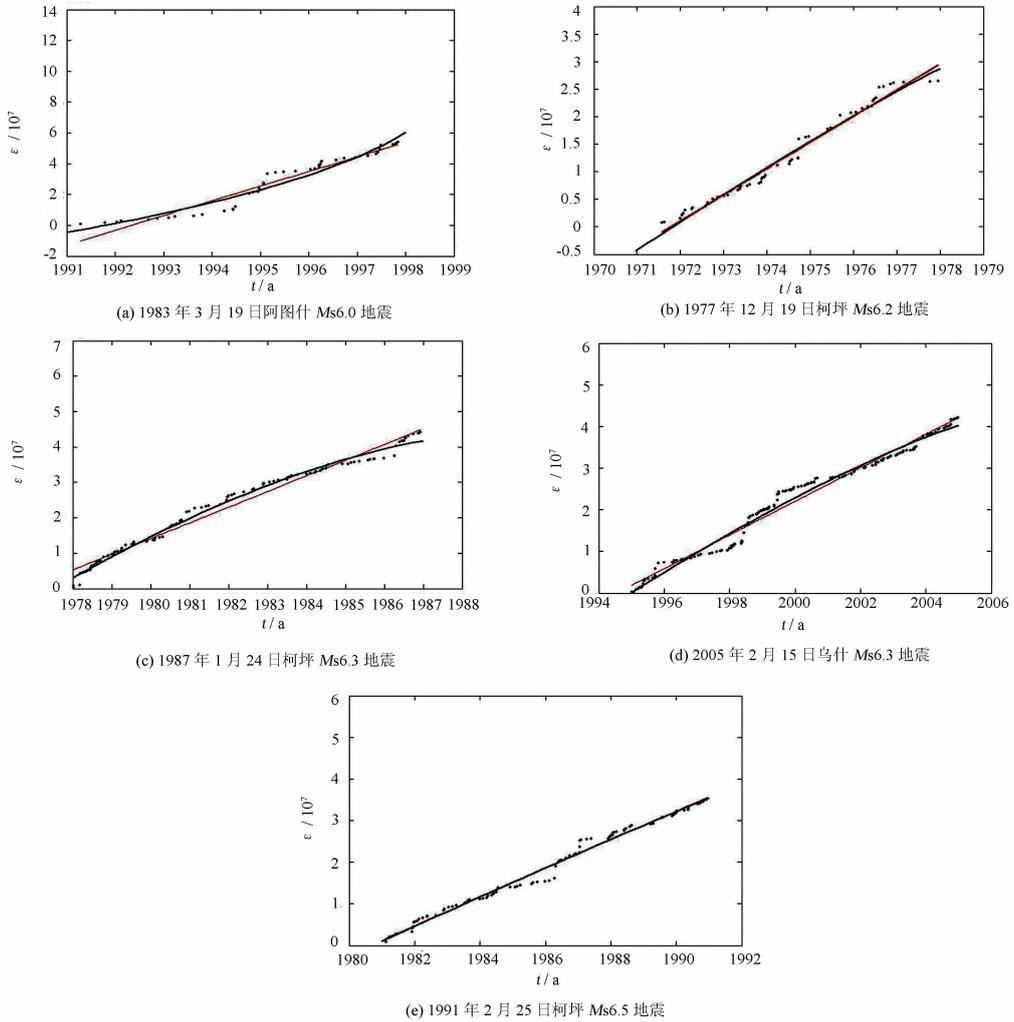


图3 柯坪断块区6级强震前中等地震累积本尼奥夫应变时序曲线(散点)及模型拟合曲线(实线)

Fig. 3 Charts for accumulative Benioff strain(dot line) of medium earthquakes before  $M_s \geq 6.0$  strong earthquakes in Keping block region and fitting curves(real line)

将1971年巴楚  $M_s6.1$  地震在1987年柯坪  $M_s6.3$  地震断层面上产生的负  $\Delta CFS$  区作为研究区,得到1987年柯坪  $M_s6.3$  地震前累积本尼奥夫应变曲线(图3(c)),此次地震前该区域能量释放主要表现为减速特征,  $m = 1.1$ 。

将1987年柯坪  $M_s6.4$  地震在2005年乌什  $M_s6.3$  地震断层面上产生的正  $\Delta CFS$  区作为研究区,得到柯坪  $M_s6.3$  地震前累积本尼奥夫应变曲线(图3(d)),此次地震前该区域能量释放表现出弱减速特征,  $m = 1.1$ 。这与多数正  $\Delta CFS$  区中强震前中等地震活动表现为加速特征不一致。

3) 无加减速特征地震

将1987年柯坪  $M_s6.3$  地震在1991年柯坪  $M_s6.5$  地震断层面上产生的  $\Delta CFS < -0.005$  MPa 的区域作为研究区,得到柯坪  $M_s6.5$  地震前累积本尼奥夫应变曲线(图3(e)),此次地震前该区域能量释放未出现加、减速特征,即表现为线性特征,  $m$

$= 1$ 。这表明1987年柯坪  $M_s6.3$  地震产生的  $\Delta CFS$  对柯坪  $M_s6.5$  地震影响不大。

4.2.3 分析与讨论

柯坪断块区8组强震中有4次强震产生的静态库仑应力变化不利于后续地震的发生,3组强震的发生有利于后续地震的发生。5次6级以上地震前中等地震加速模型结果表明,  $\Delta CFS$  正区内2次强震中1次强震发生前中等地震存在一定程度的加速特征,1次存在减速特征;  $\Delta CFS$  负区内2次强震发生前中等地震均存在减速现象;  $\Delta CFS$  为0区内1次强震前无加、减速现象。上述结果表明,该区中强地震产生的  $\Delta CFS$  对邻区地震活动的影响作用较复杂。

表2统计了南天山西段喀什-乌恰和柯坪块区各强地震产生的静态库仑应力对其邻近区域后续中强地震的时空影响范围,喀什-乌恰地区6级以上地震产生的静态库仑破裂应力作用的时间范围51天

至 30 年,空间影响范围为 10 ~ 155 km。柯坪断块区 6 级以上地震产生的静态库仑应力作用的时间范围 10 个月至 18 年,空间影响范围为 16 ~ 150 km。

## 5 结论

1) 喀什-乌恰地区多数 6 级强震产生的  $\Delta CFS$  有利于其邻区后续中强震的发生,多数强震发生前中等地震活动存在加速特征。 $\Delta CFS$  的空间分布确定的增强区和平静区内中等地震加速矩释放特征与  $\Delta CFS$  结果较为一致,表明该区强震在其周围地区产生的较小应力变化仍有利于后续中强地震的发生;

2) 柯坪断块区部分强震产生的正  $\Delta CFS$  有利于后续中强地震的发生,部分强震产生的负  $\Delta CFS$  一定程度上减缓了后续地震的发生。该区 6 级以上强震产生的  $\Delta CFS$  正区和其内后续强震前中等地震加速现象不完全一致;而  $\Delta CFS$  负区与其内中等地震的减速特征较一致。表明该区强震的产生的负  $\Delta CFS$  对邻区地震活动有减震的作用;

3) 南山西段的喀什-乌恰地区和柯坪断块区强震产生的静态应力变化对其邻区的地震活动影响作用不同,喀什-乌恰地区多数强震的发生有利于其邻区后续地震活动增强,可能与该区 6 级以上强震的断错性质多为走滑型有关,即走滑型地震易被“触发”;而柯坪断块区先发生的强震对后续地震活动的影响则比较复杂,主要表现在一定程度上缓解了其邻区的地震的发生,可能与该区存在以逆断性质为主的地震类型有关,即非走滑型地震(逆断型)不易被“触发”。这与万永革等<sup>[1]</sup>的研究结果“非走滑断层地震触发效应较为明显,而走滑断层类型的地震静态应力触发效应微弱”不一致,是否由于震级下限不同和局部区域特征造成还有待研究;

4) 南天山西段发生的中强地震产生的库仑应力变化对其邻区地震活动影响的时间范围为几十天至几十年,空间范围为 10 ~ 200 km;

5) 以  $\Delta CFS = 0.005 \text{ MPa}$  为阈值,确定应力增强区和减弱区,研究了中强地震前中等地震加减速特征。研究结果表明,较小的库仑应力变化一定程度上可能使得后续地震的发生提前或延迟。

## References

1 Harris R A and Simpson R W. Changes in static stress on

- southern California faults after the 1992 Landers earthquakes [J]. *Nature*, 1992, 360, 251 - 254.
- 2 Reasenber P A and Simpson R W. Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake [J]. *Science*, 1992, 255, 1 687 - 1 690.
- 3 万永革,等. 地震应力触发研究 [J]. *地震学报*, 2002, 24 (5): 533 ~ 551.
- 3 Wang Yongge, et al. Research on seismic stress triggering [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2002, 24(5): 533 - 551. (in Chinese)
- 4 Jaume S C and Sykes L R. Evolving towards a critical point: a review of accelerating seismic moment/energy release prior to large and great earthquake [J]. *Pure Appl Geophys*, 1999, 155: 279 - 306.
- 5 Bowman D D and G King C P. Accelerating seismicity and stress accumulation before large earthquakes [J]. *Geophys Res Lett*, 2001, 28; 4 039 - 4 042.
- 6 马禾青,等. 地震活动加速模型在西北地区的应用 [J]. *西北地震学报*, 2003, 25(4): 344 ~ 347.
- 6 Ma Heqing, et al. Application of seismicity acceleration model in northwest region of China [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2003, 25(4): 344 - 347. (in Chinese)
- 7 蒋长胜,吴忠良,史勇军. 中强震前地震活动矩释放加速现象(AMR)的普遍性问题 [J]. *中国地震*, 2004, 20(2): 119 ~ 125.
- 7 Jiang Changsheng, Wu Zhongliang and Shi Yongjun. Generality of accelerating (AMR) before moderately strong earthquake [J]. *Earthquake Research in China*, 2004, 20(2): 119 - 125. (in Chinese)
- 8 郝平,等. 2000 年 1 月 15 日姚安 6.5 级地震较强余震的应力触发 [J]. *地震研究*, 2004, 27(3): 246 ~ 251.
- 8 Hao Ping, et al. Study on stress triggering of strong aftershocks following the Yao'an  $M_s$  6.5 earthquake on Jan. 15, 2000 [J]. *Journal of Seismological Research*, 2004, 27(3): 246 - 251. (in Chinese)
- 9 Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space [J]. *Bull Seism Soc Amer*, 1992, 82; 1 018 - 1 040.
- 10 Bufe C G and Varnes D J. Predictive modeling of the seismic cycle of the greater San Francisco Bay Region [J]. *J Geophys Res*, 1993, 98: 9 871 - 9 883.
- 11 万永革,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.
- 11 Wan Yongge, et al. Global test of seismic static stress triggering model [J]. *Acta Seismologica, sinica*, 2002, 24(3): 302 - 316. (in Chinese)