

# 2003年2月24日新疆巴楚—伽师 $M_s6.8$ 地震的应力触发作用研究

王海涛<sup>1,2</sup>, 王琼<sup>2</sup>, 赵翠萍<sup>2</sup>

(1. 中国地震局预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃兰州 730000;

2. 新疆维吾尔自治区地震局, 新疆乌鲁木齐 830011)

**摘要:**自1997—1998年新疆伽师强震群后,伽师震区余震活动渐趋平静。2003年1月4日伽师发生了5.4级地震,其后50天在距其20km左右在巴楚—伽师地区发生了 $M_s6.8$ 地震,其后发生了7次 $M_s5.0$ 以上强余震,序列的余震丰富、强度大。通过计算几次强余震破裂面上产生的静态库仑破裂应力变化,结合余震活动的时空演化特征定量探讨了强余震活动的可能机理。结果表明,巴楚—伽师 $M_s6.8$ 地震不仅有利于分布与主破裂面方向较一致的余震发生,而且触发了与其共轭方向的地震活动。

**关键词:**静态库仑破裂应力;巴楚—伽师 $M_s6.8$ 地震;应力触发

中图分类号: P315.3+3 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2006)04-0335-06

## Research on Stress Triggering of Bachu—Jiashi $M_s6.8$ Earthquake on Feb. 24, 2003, in Xinjiang

WANG Hai-tao<sup>1,2</sup>, WANG Qiong<sup>2</sup>, ZHAO Cui-ping<sup>2</sup>

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China;

2. Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, CEA, Urumqi 830011, China)

**Abstract:** Since the last  $M_s6$  earthquake event in 1997 to 1998 Jiashi strong earthquake swarm, the seismicity in this region tended to quiet. Then occurred Jiashi  $M_s5.4$  earthquake on Jan. 4, 2003, and Bachu—Jiashi  $M_s6.8$  earthquake about 20 km far from the  $M_s5.4$  earthquake 50 days later. After that 7 strong aftershocks ( $M_s \geq 5.0$ ) followed it, and the aftershocks of the sequence are richer and strong. By calculating static Coulomb rupture stress changes of the mainshock acting on the rupture surfaces of strong aftershocks, combining spatial and temporal characters of aftershock evolution, the quantitatively possible mechanism of the strong aftershock activity is discussed. The result shows that Bachu—Jiashi  $M_s6.8$  earthquake not only encouraged saftershock occurring, whose direction of epicenter distribution is consistent with main rupture surface, but also triggered seismicity in the conjugated direction of the main rupture surface.

**Key words:** Static coulomb rupture stress; Bachu—Jiashi  $M_s6.8$  earthquake; Stress triggering

### 0 引言

大地震后震中周围余震活动的时空分布特征及其机理是地震学研究的重要内容之一。与主震断层破裂状态有关的余震主要有3种类型<sup>[1]</sup>: ①余震分

布在已破裂的断层上,其机制可能是对主震断层面上残存破裂非均匀性的调整;②余震发生在破裂带边缘,其原因可能是主震破裂区周边存在没有破坏

收稿日期: 2006-05-12

基金项目: 新疆自治区科技攻关项目(200333116); 国家“十五”科技攻关项目(2004BA601B01-04-01)

作者简介: 王海涛(1961—),男(汉族),安徽泗县人,研究员,主要从事地震预报研究。

的障碍物,导致应力集中;③余震发生在主破裂之外,可能是主震产生的区域应力场变化诱发了主震断层以外的断层活动的结果,主震产生的静态库仑应力变化是可能的触发机制。

近年来,国内外学者广泛研究了地震产生的静态应力变化与余震的空间分布关系及其对后续地震的影响。如 Troise 等<sup>[2]</sup>研究了意大利亚平宁山脉几次地震产生的静态库仑破裂应力变化,结果表明各地震的余震都被前面的破裂事件所“触发”。Seeber 和 Armbruster<sup>[3]</sup>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。刘桂萍和傅征祥<sup>[1]</sup>研究认为,1973 年炉霍大地震最大余震可能是由主震引起的静态库仑应力变化触发的。郝平等<sup>[4]</sup>研究认为,2000 年姚安 6.5 级主震和前震产生的库仑应力变化是姚安 6.5 级地震序列中较强余震活动的主要原因。Harris, R. A. 等<sup>[5]</sup>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。King, G. C. P. 等<sup>[6]</sup>关于大地震后震中周围静应力场的变化与区域地震活动图像之间的对应关系研究表明,大地震使区域应力发生改变是区域地震活动增强的原因。

1997 年 1 月 21 日—1998 年 8 月 27 日新疆伽师地区相继发生 9 次 6 级强烈地震,震群活动的强度和时空集中程度为我国大陆地震所罕见<sup>[7]</sup>。强震群活动最后一次 5 级以上地震是 2000 年 3 月 27 日的 5.3 级地震,其后余震活动渐趋平静。时隔近 3 年之后,2003 年 1 月 4 日伽师震区再次发生 5.4 级地震;之后 50 天,在距其 20 km 左右于 2003 年 2 月 24 日发生了巴楚—伽师  $M_s6.8$  地震。前者的发生是否会对后者产生影响呢? 巴楚—伽师  $M_s6.8$  地震后发生了 7 次  $M_s5$  以上的强余震,序列的余震丰富、强度大(图 1);  $M_s6.8$  主震是否对后续  $M_s5$  以上的强余震活动具有触发作用? 本研究即依据  $M_s6.8$

地震发生前后地震活动特征,结合  $M_s6.8$  主震在其后几次强余震破裂面上产生的静态库仑应力变化,探讨其余震序列的时空演化过程及其发生的可能机理。

### 1 资料选取

本研究采用哈佛大学提供的 2003 年 1 月 4 日伽师  $M_s5.4$  地震和 2 月 24 日巴楚—伽师  $M_s6.8$  地震序列的矩心矩张量解和赵翠萍(2005)得到的伽师  $M_s5.4$  地震和巴楚—伽师地震序列精定位结果作为研究资料,深度采用哈佛大学提供的矩心深度结果(表 1)。依据区域构造应力场方向和余震分布方向,选择近东西向的节面 II 作为  $M_s6.8$  主震的主破裂面,断层的长、宽和位错量的估算依据文献<sup>[4]</sup>。静态库仑应力变化计算采用万永革提供的程序。

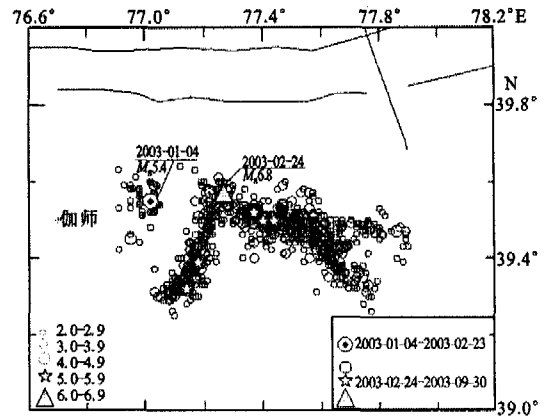


图 1 2003 年 1 月 4 日伽师  $M_s5.4$  地震和 2 月 24 日巴楚—伽师  $M_s6.8$  地震序列精定位结果

Fig. 1 The result of the precise locating of Jiashi seismic sequence of  $M_s5.4$  earthquake on Jan. 4, 2003, and Bachu—Jiashi seismic sequence of  $M_s6.8$  earthquake on Feb. 24, 2003.

### 2 方法

应力触发是指前面地震产生的应力变化张量投

表 1 精定位结果和哈佛大学矩心张量解

序号	日期	震中				应力主轴/ $^{\circ}$						节面/ $^{\circ}$					
		纬度 N/ $^{\circ}$	经度 E/ $^{\circ}$	深度 /km	震级 /M <sub>s</sub>	PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP
1	2003-01-04	39.55	77.02	17.0	5.4	1	293	64	26	26	203	341	71	-162	245	73	-202
2	2003-02-24	39.57	77.27	20.0	6.8	69	37	15	263	15	169	239	33	62	92	61	107
3	2003-02-25	39.52	77.37	28.0	5.6	19	67	71	247	0	337	110	77	166	203	77	14
4	2003-03-12	39.50	77.44	26.0	5.8	74	24	9	259	13	167	245	33	73	85	58	101
5	2003-03-16	39.56	77.26	25.0	5.1	27	290	57	63	22	190	330	57	178	61	89	33
6	2003-03-31	39.50	77.40	25.0	5.1	79	5	0	273	11	183	273	34	89	93	56	90
7	2003-05-04	39.39	77.18	25.0	5.8	24	269	53	36	26	166	308	53	-179	218	89	-37
8	2003-06-05	39.46	77.61	21.0	5.2	80	195	2	93	9	3	90	36	87	274	54	92

影到后续地震的断层滑动方向上,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,若库仑破裂应力变化方向与后续地震断层滑动方向一致,即库仑破裂应力变化为正,前面地震产生的应力变化促使断层破裂,则震后可能触发后续地震,地震危险性增大;反之,负的库仑破裂应力变化抑制断层的破裂,发生后续地震的可能性降低,此区成为“应力影区”。

依据 Okada(1992)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,定义断层面上的库仑破裂应力变化( $\Delta CFS$ )<sup>[8]</sup>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。当介质为各向同性均匀介质,孔隙压力减少摩擦系数的效应可简化为用  $\mu' = \mu(1 - B)$  表示。其中  $B$  是 Skempton 系数,理论范围为 0~1。由此式(1)可变为

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

### 3 结果分析

#### 3.1 2003 年 1 月 4 日伽师 $M_s$ 5.4 地震对 2 月 24 日巴楚—伽师 $M_s$ 6.8 地震的静态库仑应力触发作用

以伽师震区 200 km 范围作为研究区,根据  $\lg N - M$  图选择 1987 年以来  $M_s \geq 1.0$  地震,分析其背景地震活动水平,图中虚线为研究区  $M_s \geq 1.0$  地震的年平均发生频次。由图 2 可知,伽师  $M_s$ 5.4 地震发生前后研究区小地震活动水平未发生显著变化;图 1 也表明  $M_s$ 6.8 地震震区的地震活动也未发生显著改变,表明伽师  $M_s$ 5.4 地震在其周围区域产生静态应力场变化不大。

伽师  $M_s$ 5.4 地震断错类型为走滑型,主压应力  $P$  轴方向为 NNE,与 1997—1998 年伽师强震群较相似。该地震应力降为  $82.6 \times 10^5$  Pa(高于 1997—1998 年伽师系列强震的应力降  $1 \times 10^5$  Pa 左右<sup>[9]</sup>),一定程度上表明此时区域应力水平相对较高。

伽师  $M_s$ 5.4 地震产生的正  $\Delta CFS$  区域范围很有限,巴楚—伽师  $M_s$ 6.8 地震发生在  $\Delta CFS$  为 0~

-0.01 Mpa 的区域(表 2),故认为伽师  $M_s$ 5.4 地震对巴楚—伽师  $M_s$ 6.8 地震未产生触发作用。 $M_s$ 5.4 地震本身的破裂面不大,而且具有走滑断错性质,可能导致了伽师 5.4 级地震产生静态应力变化影响范围较小。这与伽师  $M_s$ 5.4 地震发生前后小地震活动特征相吻合。

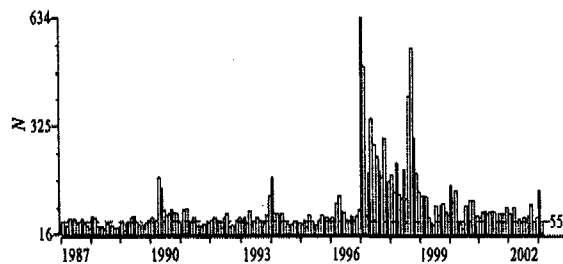


图 2 伽师  $M_s$ 5.4 地震地区  $M_s \geq 1.0$  地震频次图

Fig. 2 Frequency of  $M_s \geq 1.0$  earthquake in the region of Jiashi  $M_s$ 5.4 earthquake.

#### 3.2 2003 年 2 月 24 日巴楚—伽师 $M_s$ 6.8 地震的静态库仑应力触发作用

巴楚—伽师  $M_s$ 6.8 地震发生在 1997—1998 年伽师震区东南约 20 km 左右。李松林<sup>[10]</sup>关于伽师震区地壳速度结构反演研究表明,伽师震区 12 km 以下存在 NNE 向和 NNW 向的低速带,推测认为低速带对应了地壳深部的两条断裂。 $M_s$ 6.8 地震及其强余震的  $P$  轴方位以 NNW 向为主,余震在 NNW 和 NNE 向呈共轭分布,其中 NNW 向为余震优势分布方向,由此可知地震的发生可能与这两条断裂有关。 $M_s$ 6.8 地震序列断层类型为逆断和走滑性质,主震应力降为  $61 \times 10^5$  Pa<sup>[11]</sup>,一定程度上表明该地震之前震区已积累了较高的能量,区域构造应力水平相对较高。

为了研究 2003 年巴楚—伽师  $M_s$ 6.8 地震发生期间其地震活动和静态应力场的演化,本文结合背景地震活动水平和余震序列的时空演化过程,探讨其地震序列的应力触发作用。

##### (1) 地震活动背景分析

伽师强震群发生后伽师及其周围地区小震活动水平增强,高于背景水平,2003 年巴楚—伽师  $M_s$ 6.8 地震即是在此增强的背景下发生的。由图 3 可知,在该地震余震序列衰减至背景地震水平时(实心

表 2 2003 年 1 月 4 日伽师  $M_s$ 5.4 地震在巴楚—伽师  $M_s$ 6.8 地震破裂面上产生的  $\Delta CFS$

序号	发震时间	纬度 $\varphi^\circ(N)$	经度 $\lambda^\circ(E)$	深度 /km	震级 / $M_s$	断层性质	延迟 时间/天	距离 /km	库仑应力变化量 $\Delta CFS/Mpa$
1	2003-01-04	39.55	77.02	17.0	5.4	走滑断层	51	22.4	0~-0.01

柱),小地震活动高于主震前已增强的地震活动水平,表明该地震的发生再次使得区域应力水平增高。

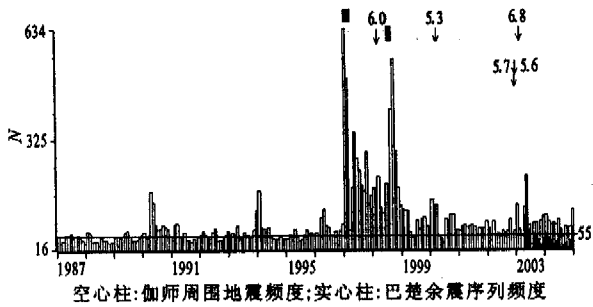


图 3 伽师强震群周围地区  $M_s \geq 1.0$  地震频次图  
Fig. 3 Frequency of  $M_s \geq 1.0$  earthquake in the region of Jiashi strong earthquake swarm.

(2) 地震序列时空演化特征

2003 年 2 月 24 日  $M_s 6.8$  主震至 2 月 25 日  $M_s 5.6$  地震前,余震主要分布在 NWW 向,破裂沿主震的 SE 向延伸(图 4(a))。2 月 25 日至 3 月 12 日  $M_s 5.8$  地震前,余震在 NWW 向和 NNE 向呈共轭分布,表明此阶段出现新的破裂生长点,开始沿主震的 SW 向发展(图 4(b));3 月 12 日至 3 月 16 日  $M_s 5.1$  地震前,余震主要分布在 NWW 向,表明地震活动重新调整回到 NW 向(图 4(c));3 月 16 日 3 月 31 日  $M_s 5.1$  地震前,余震主要分布在 NWW 向(图 4(d));3 月 31 日至 5 月 4 日  $M_s 5.8$  地震前,余震主要分布在 NWW 向(图 4(e));5 月 4 日至 6 月 5 日  $M_s 5.2$  地震前,余震主要分布在 NE 向,应力重新调整到 NE 向,与 2 月 25 日  $M_s 5.6$  地震相比,余

震向 SW 方向迁移,表明破裂开始向 SW 方向延伸(图 4(f));6 月 5 日至 9 月,余震主要分布在 NWW 向(图 4(g))。

依据区域应力场方向和余震分布,认为  $M_s 6.8$  主震的破裂面近水平向,地震序列的余震优势分布方向为 NWW 向。2 月 25 日  $M_s 5.6$  地震后的余震和 5 月 4 日  $M_s 5.8$  地震及其余震呈 NE 向分布,表明主破裂带由主震 SE 方向扩展至 SW 向。上述  $M_s 6.8$  地震序列时空演化特征定性地反映了破裂过程和主震对后续余震的影响。

(3) 主震产生的静态库仑应力对后续中强余震的触发作用

为了定量分析上述现象,本文计算了  $M_s 6.8$  主震在其后续中强余震破裂面上产生的静态库仑破裂应力的变化。图 5(a)–(e)是  $M_s 6.8$  主震在 5 次中强余震(实心圈)破裂面上产生的静态库仑应力变化情况及其后的  $M_s 2.0$  以上余震分布(图中的空圈)。为了研究其影响信度,本文统计了不同时段分布在库仑破裂应力变化为正的区域的余震数与相应阶段所有余震数之比( $N_+/N$ ,表 3)。

$M_s 6.8$  主震在 2 月 25 日  $M_s 5.6$  地震破裂面上产生的  $\Delta CFS$  为  $0 \sim 0.01$  Mpa(图 5(a)),其后  $M_s 2.0$  以上余震在 NWW 向和 NE 向呈现共轭分布,此间 NE 向发生 4 次 4 级地震,表明主震和  $M_s 5.6$  地震的发生可能触发了 NE 向地震活动,而且多数余震( $N_+/N=260/281$ )分布在  $\Delta CFS$  为正

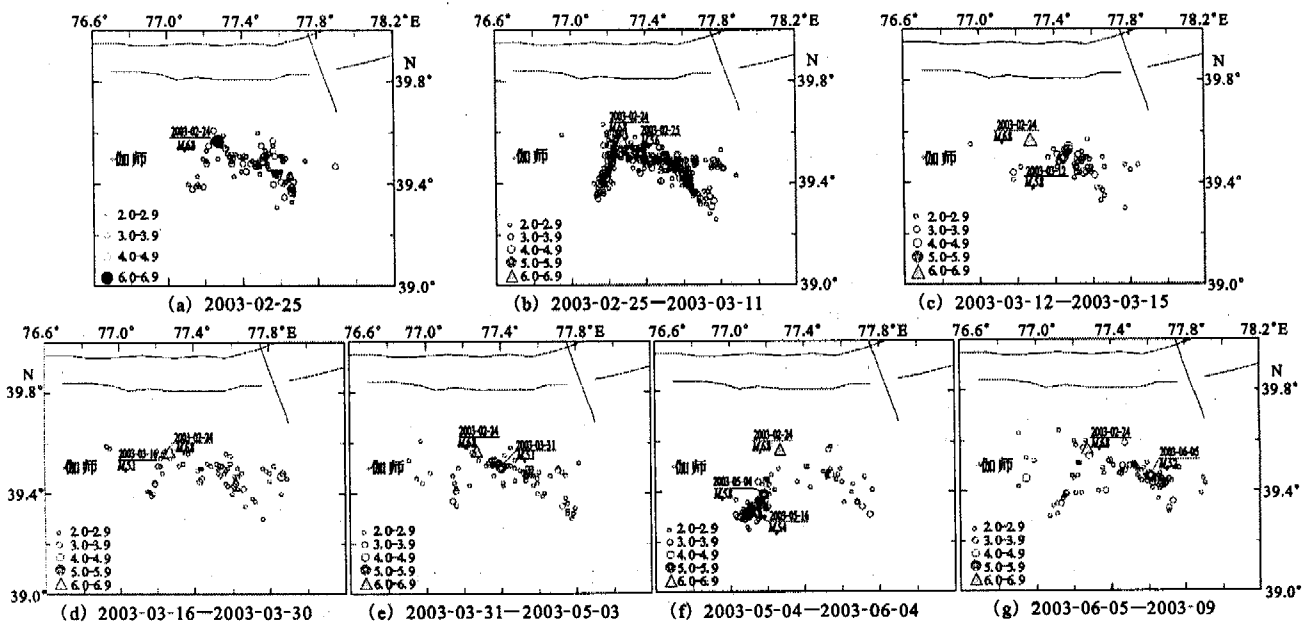


图 4 巴楚—伽师  $M_s 6.8$  地震序列时空演化过程

Fig. 4 Spatial and temporal evolution of Bachu—Jiashi  $M_s 6.8$  earthquake sequence.

表 3 2003 年 2 月 24 日伽师  $M_s6.8$  地震在其后续中强余震破裂面上产生的  $\Delta CFS$

序号	地震	震级 / $M_s$	纬度 $\varphi^\circ N$	经度 $\lambda^\circ E$	深度 /km	地震类型	延迟时间/天	哈佛大学 FMS 结果和新疆区域台网震中定位结果			
								距离主震的距离/km	$\Delta CFS/Mpa$	累积 $\Delta CFS/Mpa$	
								$N_{II}$	$N_+/N/\%$		
1	2003-02-24	6.8	39.57	77.27	20	逆断层					
2	2003-02-25	5.6	39.57	77.37	28	走滑断层	1	10.3	0~0.01	92.53	0~0.01
3	2003-03-12	5.8	39.56	77.44	26	逆断层	16	16.6	0.03~0.04	96.55	0.03~0.04
4	2003-03-31	5.1	39.52	77.40	25	逆断层	35	13.6	0.07~0.08	94.81	0.07~0.08
5	2003-05-04	5.8	39.40	77.17	25	走滑断层	69	21.4	0.01~0.02	97.86	0.01~0.02
6	2003-06-05	5.2	39.46	77.61	21	逆断层	100	32	0.04~0.05	92.47	0.04~0.05

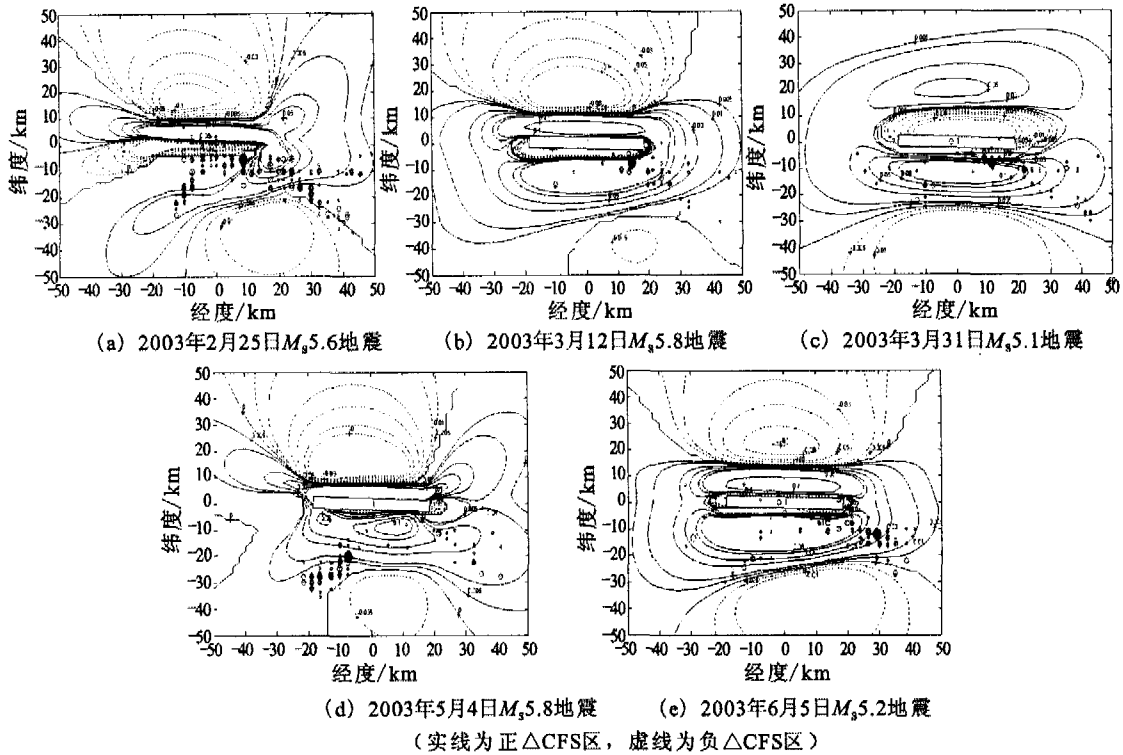


图 5 巴楚—伽师  $M_s6.8$  地震在其后续中强余震破裂面上产生的  $\Delta CFS$  等值线图

Fig. 5  $\Delta CFS$  contour maps for the rupture surfaces of the mid-strong aftershocks of Bachu—Jiashi  $M_s6.8$  earthquake.

的区域;主震在 3 月 12 日  $M_s5.8$  地震破裂面上产生的  $\Delta CFS$  为 0.03~0.04 Mpa(图 5(b)),其后的多数余震( $N_+/N=56/58$ )分布在  $\Delta CFS$  为正的区城;主震在 3 月 31 日  $M_s5.1$  地震破裂面上产生的  $\Delta CFS$  为 0.07~0.08 Mpa(图 5(c)),其后多数余震( $N_+/N=273/277$ )分布在  $\Delta CFS$  为正的区城;主震在 5 月 4 日  $M_s5.8$  地震破裂面上产生的  $\Delta CFS$  为 0.01~0.02 Mpa(图 5(d)),其后余震主要分布在 NE 向上,表明主震和 5 月 4 日  $M_s5.8$  地震可能触发了 NE 向地震活动;多数余震( $N_+/N=137/140$ )分布在  $\Delta CFS$  为正的区城;主震在 6 月 5 日  $M_s5.2$  地震破裂面上产生的  $\Delta CFS$  为 0.04~0.05 Mpa(图 5(e)),其后多数余震( $N_+/N=86/93$ )分布在  $\Delta CFS$  为正的区城。3 月 16 日  $M_s5.1$  余震距  $M_s6.8$  主震小于 10 km,  $\Delta CFS$  可能产生奇异解,故其信度不高。

(4) 分析和讨论

$M_s6.8$  地震序列中多数余震分布在  $\Delta CFS$  为正的区城,其中 NE 向余震表明  $M_s6.8$  主震产生的静应力场变化触发了主破裂面以外的断层活动,使得主破裂带由主震 SE 方向扩展至 SW 向。这表明  $M_s6.8$  主震产生的  $\Delta CFS$  对后续余震具有较显著的触发作用( $\Delta CFS$  为 +0.01~+0.08 Mpa),不仅有利于与主破裂面方向较一致的余震的发生( $\Delta CFS$  为 +0.03~+0.08 Mpa),而且触发了与其共轭方向的区域地震活动( $\Delta CFS$  为 +0.01~+0.02 Mpa),是其后中强余震活动的主要原因。

为了分析序列中强余震之间的触发作用,本研究分析了主震和强余震共同对后续中强余震的触发作用,结果表明主震与余震产生的累积  $\Delta CFS$  与主震独自产生的  $\Delta CFS$  基本一样,即序列中强余震主要是受主震的触发作用,而余震间的相互影响很小。

不同断层类型地震的静态应力触发作用是不同的。 $M_s6.8$ 地震序列中强震的断错类型以逆断层为主。由表3可见,从时空变化、地震大小的角度分析,序列中逆断层地震的静态库仑应力变化量比走滑断层地震的静态库仑应力变化量稍大。这也与万永革等<sup>[12]</sup>的结果一致。

#### 4 结论

2003年巴楚—伽师 $M_s6.8$ 地震孕育于压性的、应力水平相对较高的构造背景下。 $M_s6.8$ 地震序列时空演化特征显示, $M_s6.8$ 地震序列的余震优势分布方向为NWW向,而2月25日 $M_s5.6$ 地震后的余震和5月4日 $M_s5.8$ 地震及其余震呈NE向分布,则表明主震SW方向地震活动因受到触发而增强,主破裂带由主震SE向扩展至SW向。 $M_s6.8$ 主震在后续中强余震破裂面上产生的静态库仑破裂应力变化表明,巴楚—伽师 $M_s6.8$ 地震的发生不仅有利于与主破裂面方向较一致的余震的发生,而且触发了与其共轭方向的区域地震活动。

#### [参考文献]

- [1] 刘桂萍,傅征祥. 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, 2002, 18(2): 175—182.
- [2] Troise C, DeNatale G, Pingue F, et al.. Evidence for static stress interaction among earthquakes in south-central Apennines (Italy)[J]. Geophys. J. Int., 1998, 134: 809—817.
- [3] Seeber L, Armbruster J G. Earthquakes as beacons of stress change[J]. Nature, 2000, 407: 69—72.
- [4] 郝平,田勤俭,傅征祥,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.
- [5] Harris R A, R W Simpson. Changes in static stress on southern California faults after the 1992 Landers earthquakes[J]. Nature, 1992, 360: 251—254.
- [6] King G C P, R S Stein, J Lin. Static stress changes and the triggering of earthquakes [J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1994, 84: 935—953.
- [7] 陈祺福主编. 中国震例(1997—1999)[M]. 北京:地震出版社, 2002.
- [8] 万永革,吴忠良,周公威,等. 地震应力触发研究[J]. 地震学报, 2002, 24(5): 533—551.
- [9] 周仕勇,许忠准. 震源谱推断1997年新疆伽师强震群破裂特征[J]. 地震学报, 2000, 22(2): 113—124.
- [10] 李松林,张先康, W D Mooney, 等. 伽师地震区地壳细结构及发震断层的初步研究[J]. 地球物理学报, 2002, 45(1): 76—82.
- [11] 赵翠萍,夏爱国,等. 新疆巴楚—伽师 $M_s6.8$ 地震序列震源特征的初步研究[J]. 内陆地震, 2003, 17(2): 182—189.
- [12] 万永革,吴忠良,周公威,等. 地震静态应力触发模型的全球检验[J]. 2002, 地震学报, 24(3): 302—316.