

赵立波, 赵连锋, 谢小碧等. 2016. 2014 年 2 月 12 日新疆于田  $M_w7.0$  地震源区静态库仑应力变化和地震活动率. 地球物理学报, 59(10):3732-3743, doi:10.6038/cjg20161018.

Zhao L B, Zhao L F, Xie X B, et al. 2016. Static Coulomb stress changes and seismicity rate in the source region of the 12 February, 2014  $M_w7.0$  Yutian earthquake in Xinjiang, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 59(10):3732-3743, doi:10.6038/cjg20161018.

## 2014 年 2 月 12 日新疆于田 $M_w7.0$ 地震源区 静态库仑应力变化和地震活动率

赵立波<sup>1,2</sup>, 赵连锋<sup>2\*</sup>, 谢小碧<sup>3</sup>, 曹俊兴<sup>1</sup>, 姚振兴<sup>2</sup>

1 成都理工大学地球物理学院, 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610059

2 中国科学院地质与地球物理研究所, 地球与行星物理重点实验室, 北京 100029

3 美国加州大学圣克鲁兹分校, 地球物理与行星物理研究所, 圣克鲁兹 CA 95064

**摘要** 2014 年 2 月 12 日新疆于田  $M_w7.0$  地震源区位于巴颜喀拉块体与西昆仑块体的连接部位, 东西向拉张构造发育, 距离 2008 年 3 月 21 日于田  $M_w7.1$  地震震中位置约 100 km. 根据有限断层地震破裂过程模型, 计算了 2008 年新疆于田地地震产生的静态库仑应力变化. 此次地震的断层面呈北偏东方向, 在断层两端出现 3 个应力加载区, 2014 年于田主震位于破裂前端的库仑应力加载区. 这一结果表明, 2008 年于田地震可能对 2014 年地震事件起到了触发作用. 2008 和 2014 年新疆于田地地震产生的静态库仑应力变化与余震事件的空间分布具有明显的相关性, 大多数余震位于应力加载区, 发生在卸载区的余震较少. 静态库仑应力变化与余震序列吻合较好. 2014 年 3 月 21 日新疆于田地震之后 40 天, 在北西方向发生  $M_w5.2$  强余震, 其震中位置的应力增量达到  $0.63 \times 10^5$  Pa. 通过比较, 发现静态库仑应力变化和地震活动率之间具有较好的相关性. 地震活动率较高的区域与静态库仑应力加载区相对应, 如康西瓦断裂东段、贡嘎错断裂中段和东北段等区域.

**关键词** 于田地震; 静态库仑应力变化; 余震; 地震活动率

doi:10.6038/cjg20161018

中图分类号 P315

收稿日期 2016-02-15, 2016-03-30 收修定稿

### Static Coulomb stress changes and seismicity rate in the source region of the 12 February, 2014 $M_w7.0$ Yutian earthquake in Xinjiang, China

ZHAO Li-Bo<sup>1,2</sup>, ZHAO Lian-Feng<sup>2\*</sup>, XIE Xiao-Bi<sup>3</sup>, CAO Jun-Xing<sup>1</sup>, YAO Zhen-Xing<sup>2</sup>

1 State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2 Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California at Santa Cruz, CA 95064, California, USA

**Abstract** On February 12, 2014, an  $M_w7.0$  earthquake occurred in Yutian region, Xinjiang, China. The epicenter of this earthquake is located in an area linking the Bayan Har block and west Kunlun block, a region with highly developed east-west trend tension structures. This earthquake is approximately 100 km away from a previous earthquake, the 2008  $M_w7.1$  Yutian earthquake. We investigate the Coulomb stress changes due to the 2008 earthquake and its

**基金项目** 国家自然科学基金(41374065, 41474036)资助.

**作者简介** 赵立波, 男, 1991 年生, 硕士研究生, 主要从事地震学研究. E-mail: zhaolibo@mail.iggcas.ac.cn

\* **通讯作者** 赵连锋, 男, 1972 年生, 副研究员, 主要从事地震学研究. E-mail: zhaolf@mail.iggcas.ac.cn

triggering effect on the 2014 earthquake. The Coulomb stress changes caused by the two mainshocks and their effects on the subsequent aftershock sequences are also investigated. The main fracture of the 2008 earthquake extends along the NE direction. Based on the finite-sized fault model, we calculate its static Coulomb stress, which has three stress increase lobes at each ends. The 2014 Yutian earthquake is located in the increased Coulomb stress lobe of the 2008 earthquake, therefore it may be triggered by the 2008 earthquake. For both earthquakes, their aftershock distributions are correlated with their Coulomb stress changes caused by the mainshocks calculated based on their optimal orientations. We find that most of the aftershocks occurred in the increased Coulomb stress lobe, while few aftershocks occurred in the stress shadow zone. An apparent correlation is obtained between the mainshock stress changes and the observed spatial distribution of the aftershock occurrence, demonstrating the usefulness of the stress maps in predicting likely upcoming aftershock locations. An  $M_w5.2$  aftershock occurred in the NW of the 2014 mainshock where the stress increases for  $0.63 \times 10^5$  Pa. The observation indicates that the regions with high seismicity rate are highly correlated with regions with high Coulomb stress changes, e. g., the eastern of the Kangxiwar fault, the middle and EN segments of Gonggar Co fault, etc.

**Keywords** Yutian earthquake; Static stress changes; Aftershocks; Seismicity rate

## 1 引言

2014年2月12日17时19分(北京时间),新疆于田县发生了  $M_w7.0$  强烈地震.震源区位于塔里木盆地南缘与青藏高原西北部的结合处(图1).由于印度板块和欧亚板块对青藏高原的南北向挤压作用(郑剑东,1993),该区存在明显的东西向地壳形变和拉张构造(Taylor and Yin, 2009; Tapponnier and Molnar, 1976).该地震的主震断层为从北东到南西方向的左旋走滑断层(王卫民等,2014),位于巴颜喀拉块体与西昆仑块体的连接部位,即阿尔金断裂带的尾部拉张区(程佳等,2014).

当作用在活动断层上的应力超过其所能承受的强度时,断层发生破裂,释放积累的应力,从而改变断层周围及邻近区域的应力状态.这种应力的改变就是库仑应力变化(Mitsakaki et al., 2013).库仑应力变化与断层的几何产状、滑动量和有效摩擦系数有关(Stein et al., 1994).

地震产生的断层破裂过程在周围地壳中引起静态应力变化(Sarkarinejad and Ansari, 2014).静态库仑应力变化有可能成为触发因素,影响到其后地震发生的时-空分布.由地震破裂过程导致的局部应力变化经常富集在断层破裂方向上(Parsons et al., 2006).

计算库仑应力变化主要考虑两种接收断层方

向,即给定的接收断层方向和最优断层方向.给定的接收断层方向是假定接收断层具有主震相似的走向、倾角和滑动角,通常用邻近区域的断层面.最优断层方向是由地震产生的最大库仑破裂应力变化确定,需要考虑主震的应力扰动和震源区的应力范围.

根据速率-状态定律,Dieterich(1994)认为应力突然加载会引起地震活动率的快速增加,随时间衰减,最终恢复平静.根据余震的发生,库仑应力变化和地震活动率之间可以建立关系模型(Toda et al., 2008).余震序列主要发生在应力加载区,在卸载区一般较少发生.

地震源区静态库仑应力变化能够指示地震之间的相互触发关系、余震空间分布规律和周边活动断层的地震危险性(例如, Das and Scholz, 1981; Stein, 1999; Deng et al., 1999; Lin and Stein, 2004; Toda et al., 2008; Parsons et al., 2008; 单斌等, 2009; 万永革等, 2010).很多研究者证实了库仑破裂应力和地震活动率之间的相关性(例如, Reasenber and Simpson, 1992; Toda et al., 1998; Parsons et al., 1999; Parsons, 2002). King 等(1994)计算了兰德斯  $M_w7.3$  地震在最优断层方向上产生的库仑应力变化,其库仑应力变化与余震的空间分布具有良好的对应关系.周龙泉等(2008)计算了2007年苏门答腊  $M_s8.5$  地震产生的库仑应力变化,计算结果显示,其变化值都大于经验触发值  $0.1 \times 10^5$  Pa(Harris,1998),较强余震均位于加载区.解朝

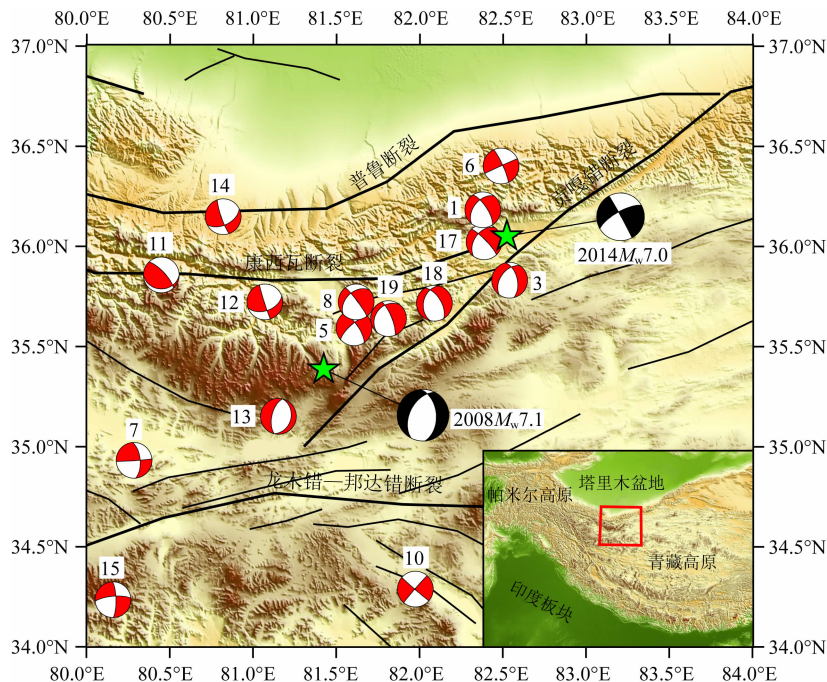


图 1 区域构造和震源机制解空间分布

绿色五角星分别表示 2008 年和 2014 年新疆于田地震的震中位置, 对应的震源机制解分别来自王卫民等 (2014) 和 Shao 和 Ji (2008).

标有续号的红色震源机制解表示新疆于田地区  $M_w \geq 5.0$  的地震事件, 机制解取自全球矩心矩张量解目录, 其他参数列于表 1.

Fig. 1 Map showing the regional structures and epicenters of all  $M_w \geq 5.0$  earthquakes along with their focal mechanisms

The green stars are epicenters of the 2008 and 2014 Xinjiang Yutian earthquakes, and their focal mechanisms are from Wang et al. (2014) and Shao and Ji (2008), respectively. The numbered red focal mechanisms are for other  $M_w \geq 5.0$  earthquakes in this region. Their focal mechanisms are from GCMT catalogues, and other parameters are listed in Table 1.

娣等 (2010) 根据不同的地震破裂过程模型计算  $M_s 8.0$  汶川地震产生的库仑应力变化, 无论用 Ji (2008) 还是王卫民等 (2008) 给出的有限断层模型, 计算所得的库仑应力变化的空间分布与余震活动空间分布都能够较好地吻合, 西秦岭南缘断裂带大部分处于加载区域. 这一结果与万永革等 (2009) 计算的汶川地震对主要断层产生的应力的结果非常接近. 汶川  $M_s 8.0$  地震触发了 2013 年芦山  $M_s 7.0$  地震, 85% 的余震是由两次地震共同作用的结果 (缪森和朱守彪, 2013). 宋金和蒋海昆 (2011) 计算玉树  $M_s 7.1$  地震在最优断层面上产生的静态库仑破裂应力变化对余震的触发率达 75%, 与汪建军等 (2012) 计算的玉树地震产生的库仑应力变化对余震触发率达 76.4% 的结果很相近, 都说明玉树地震对余震具有触发作用. Reasenberg 和 Simpson (1992) 计算了 1989 年美国加州 Loma Prieta 地震产生的库仑应力变化和地震活动率变化, 应力加载区域地震活动率增加, 卸载区域地震活动率减小. 刘桂萍和傅征祥 (2000) 研究了 1976 年唐山地震后静应力场和区域地震活动速率变化, 唐山大地震可能触发了震源区以外 3 个区域的地震, 使得地震活动增强.

根据有限断层模型, 我们分别计算 2008 年新疆于田  $M_w 7.1$  地震和 2014 年新疆于田  $M_w 7.0$  地震产生的库仑应力变化, 分析两次地震的关联性以及对各自余震序列的影响. 使用 2014 年新疆于田  $M_w 7.0$  地震前后地震事件, 计算地震活动率变化, 调查静态库仑应力变化与地震活动率之间的对应关系.

## 2 静态库仑应力计算

利用弹性位错理论, 计算静态应力 (Okada, 1992). 根据库仑破裂准则 (Jaeger and Cook, 1969), 库仑破裂应力变化  $\Delta\sigma_f$  为 (Harris, 1998; Stein et al., 1992)

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau_s + \mu(\Delta\sigma_n + \Delta p), \quad (1)$$

其中,  $\Delta\tau_s$  和  $\Delta\sigma_n$  为断层面上的剪切应力变化 (滑动方向为正) 和正应力变化 (拉张为正),  $\mu$  为摩擦系数,  $\Delta p$  为孔隙流体压力变化. 有效摩擦系数  $\mu' = \mu(1-B)$  (Rice, 1992),  $B$  为 Skempton 系数, (1) 式为

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

计算在最优断层面上库仑应力变化时, 由地震产生的应力  $\sigma_{ij}^a$  和区域应力  $\sigma_{ij}^r$  共同作用, 其总应力

$\sigma_{ij}^t$  为

$$\sigma_{ij}^t = \sigma_{ij}^a + \sigma_{ij}^r. \quad (3)$$

图2是最优破裂面库仑应力计算坐标系(King et al., 1994). 图中  $\theta$  是最大主应力轴和  $x$  轴的夹角,  $\beta$  为最大主应力与破裂面的夹角, 最佳破裂角度  $\psi_0 = \theta \pm \beta$ . 虽然  $\sigma_{ij}^t$  决定着最佳断层, 但是正应力和剪切应力的变化仅由地震引起的应力变化  $\sigma_{ij}^a$  确定, 最优断层面的正应力和剪切应力变化可以表示为

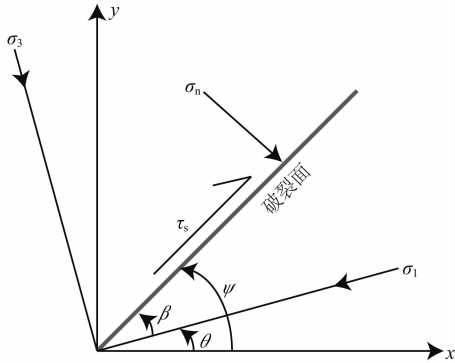


图2 最优破裂面库仑应力计算坐标系(引自 King et al., 1994)  
Fig. 2 The axis system used for calculating Coulomb stresses on optimum failure planes (after King et al., 1994)

$$\sigma_{33} = \sigma_{xx}^a \sin^2 \psi_0 - 2\sigma_{xy}^a \sin \psi_0 \cos \psi_0 + \sigma_{yy}^a \cos^2 \psi_0, \quad (4)$$

$$\tau_{13} = \frac{1}{2}(\sigma_{yy}^a - \sigma_{xx}^a) \sin 2\psi_0 + \tau_{xy}^a \cos 2\psi_0. \quad (5)$$

则最优破裂面上的库仑应力变化

$$\Delta\sigma_f^{\text{opt}} = \Delta\tau_{13} - \mu' \Delta\sigma_{33}, \quad (6)$$

其中,  $\Delta\sigma_f > 0$ , 有利于余震的发生; 反之, 抑制发生。

### 3 震源区静态库仑应力变化

新疆于田地区 6 年之内发生了两次强震, 即 2008 年  $M_w 7.1$  地震和 2014 年  $M_w 7.0$  地震。从空间分布上看, 这两次地震事件沿着贡嘎错断裂从西南向东北迁移(图 1)。2008 年新疆于田  $M_w 7.1$  地震是正断兼左旋分量的断裂(Xu et al., 2013), 该地震造成了多处房屋损坏, 震中的海拔高度约为 5.5 km (万永革等, 2010)。计算过程中, 震源断层采用 Shao 和 Ji(2008)给出的 2008 年于田  $M_w 7.1$  地震有限断层模型(表 1), 该模型由  $14 \times 5$  个滑移单元组成。王卫民等(2014)给出的 2014 年新疆于田  $M_w 7.0$  地震震源机制解节面(走向  $240^\circ$ 、倾角  $71.9^\circ$ 、滑动角  $-2.2^\circ$ )作为接收断层(表 1)。在物性参数方

表 1 2014 年 2 月 12 日于田地震前后  $M_w \geq 5.0$  地震的震源参数

Table 1 The hypocentral and source parameters of the  $M_w \geq 5.0$  earthquake of before and after the 12 February 2014 Yutian earthquake

编号	日期 (年-月-日)	纬度 ( $^\circ\text{N}$ )	经度 ( $^\circ\text{E}$ )	深度 (km)	矩震级	走向 ( $^\circ$ )	倾角 ( $^\circ$ )	滑动角 ( $^\circ$ )	长度 (km)	宽度 (km)	滑动量 (cm)	参考文献
1	2014-03-22	36.23	82.35	25.3	5.2	218/326	47/71	-26/-134				GCMT
2	2014-02-12	36.10	82.50	10.1	7.0	240/330.6	71.9/87.9	-2.2/-177.8	85	21	279	王卫民等(2014)
3	2012-08-12	35.88	82.52	16.7	6.2	215/346	47/55	-52/-123				GCMT
4	2012-04-10	34.49	82.59	33.4	5.2	223/133	83/84	6/173				GCMT
5	2011-10-20	35.63	81.57	24.0	5.0	228/324	72/72	-19/-161				GCMT
6	2011-09-15	36.45	82.46	12.9	5.3	335/245	82/89	-179/-8				GCMT
7	2009-10-25	34.94	80.25	17.6	5.0	353/84	62/88	178/28				GCMT
8	2009-08-09	35.76	81.58	18.3	5.1	226/322	43/84	-8/-133				GCMT
9	2008-03-20	35.42	81.39	10	7.1	206/354	48/47	-67/-113	66	34	126	Shao et al. (2008)
10	2007-05-05	34.33	81.97	23.9	6.1	220/130	88/88	2/178				GCMT
11	2003-05-29	35.87	80.38	33	5.0	88/315	23/74	45/107				GCMT
12	1997-10-15	35.75	81.02	33	5.2	69/161	49/87	-4/-139				GCMT
13	1992-06-27	35.18	81.12	33	5.0	12/192	30/60	-90/-90				GCMT
14	1992-04-05	36.17	80.75	17	5.7	62/159	52/81	-11/-141				GCMT
15	1986-07-06	34.24	80.15	15	5.9	263/357	74/76	-15/-164				GCMT
16	1985-06-15	34.55	83.37	10	5.3	40/145	61/64	-30/-147				GCMT
17	1982-10-31	36.07	82.36	10	5.4	215/315	45/80	-15/-134				GCMT
18	1980-10-07	35.76	82.06	15	5.8	192/328	39/60	-53/-116				GCMT
19	1978-07-31	35.68	81.78	10	5.5	219/337	28/75	-32/-115				GCMT

面,杨氏模量取值  $8 \times 10^{10}$  Pa,剪切模量为  $3.2 \times 10^{10}$  Pa,泊松比为 0.25,有效摩擦系数取 0.4(King et al., 1994),计算深度为 10 km.利用 Coulomb 3.3 软件(Lin and Stein, 2004; Toda et al., 2005)计算库仑应力变化值的空间分布.

图 3a 为 2008 年新疆于田地震在 2014 年新疆于田地震断层面上产生的应力变化.首先确定了 3 个应力加载区和 2 个卸载区.加载区即应力重新集聚的区域,是可能再次发生较大地震的地段.卸载区则是应力释放的区域,通常认为相对稳定,不易发生较大地震.应力加载区主要显示在东北到西南向和北西向,应力卸载区展现出西北到东南走向.2014 年新疆于田地震破裂面位于应力加载区,大约增加

$0.05 \sim 0.25 \times 10^5$  Pa.震中位置增加了  $0.053 \times 10^5$  Pa,根据 Ziv 和 Rubin(2000)的研究,库仑应力变化增量小于经验触发值  $0.1 \times 10^5$  Pa 也可能触发地震.因此,可以推测 2008 年新疆于田地震可能对 2014 年于田地震事件起到了触发作用.

图 3b 为 2008 年新疆于田地震在 2014 年新疆于田地震断层面上产生的库仑应力变化剖面.2014 年新疆于田主震断裂全部位于库仑应力加载区,2008 年于田主震断裂在深度 13 km 以上几乎全部处于库仑应力卸载区,13 km 以下断裂均在库仑应力加载区.2014 年于田主震震中处于库仑应力加载区,库仑应力变化小于  $0.1 \times 10^5$  Pa(Harris, 1998).2008 年新疆于田地震同震滑动产生的库仑应力增

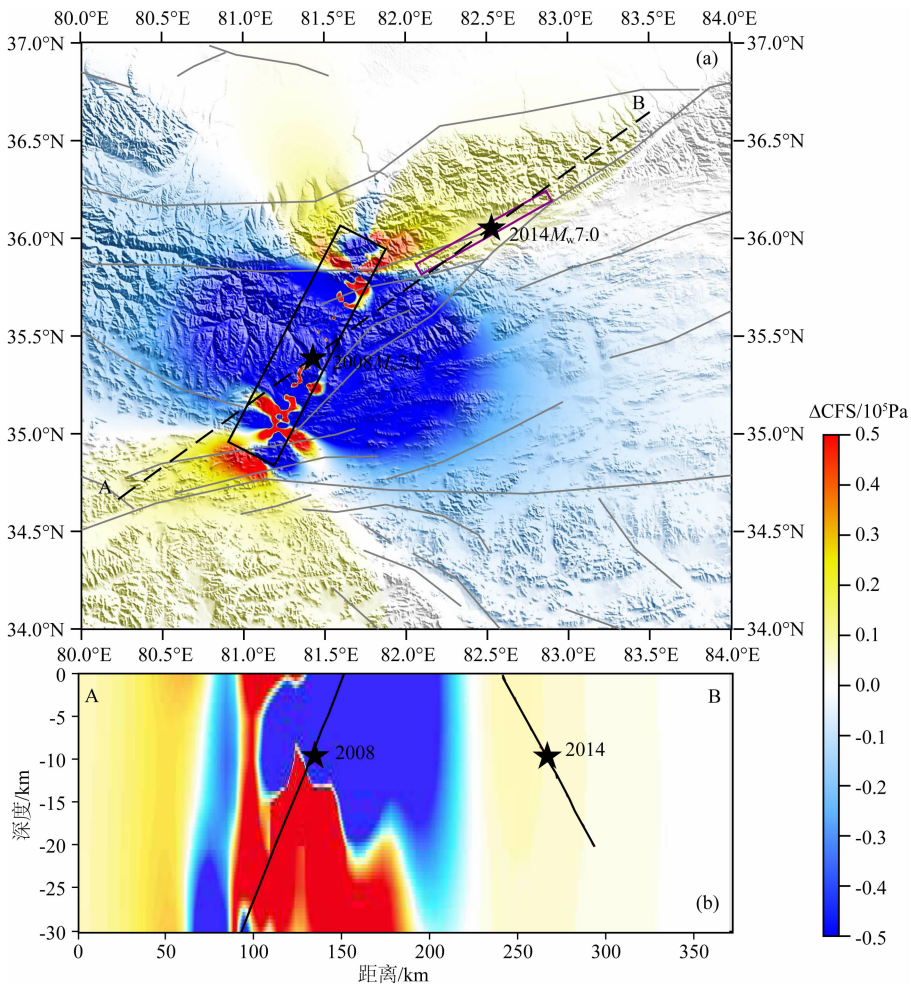


图 3 (a) 2008 年新疆于田地震在 2014 年新疆于田地震破裂面上产生的库仑应力变化;(b) 沿虚线 AB 的深度剖面,红色和蓝色分别代表库仑应力增加和减小,黑色五角星为主震位置,黑色和紫色矩形框分别表示 2008 年和 2014 年于田地震破裂面在地表的投影

Fig. 3 (a) Map showing the Coulomb stress changes caused by the 2008 Xinjiang Yutian earthquake over the representative fault planes of 2014 Xinjiang Yutian earthquake; (b) Cross-sectional view of the Coulomb stress change along the dashed line AB. Colors between red and white stand for increase, and between blue and white stand for decrease of  $\Delta CFS$ . Black stars show the main shock locations. The black and purple rectangles represent surface projections of the 2008 and 2014 Xinjiang Yutian earthquake ruptures



加量的转移已经影响了2014年新疆于田地震的发生。

2014年新疆于田  $M_w7.0$  地震发生后,断层边缘及周边区域发生大量余震.我们使用2014年2月12日到2015年1月1日的地震事件来研究2014年新疆于田地震后续余震空间分布.余震发生机制以应力腐蚀开裂为主,余震序列能量主要由介质中贮存的蠕变应变能提供(谷继成等,1979).谷继成等(1982)认为强余震空间分布具有平面性,迁移范围与主震破裂长度相当,总迁移范围及方向与主震破裂方式有关.该地震后余震主要向北部和东北部延伸(图4),多数集中在主震断层边缘及震中位置周边断层,少部分随机分布在其他区域,例如,贡嘎错断裂西南段和康西瓦断裂中段北部等.我们通过计算主震产生的库仑应力变化尝试去解释余震空间分布.

通常以主震在最优破裂面上计算的库仑应力变化来解释余震空间分布(King et al., 1994; Toda et al., 2005).计算时假定最大主应力方向为  $N45^\circ E$ , 大小为  $100 \times 10^5$  Pa(King et al., 1994),符合当地

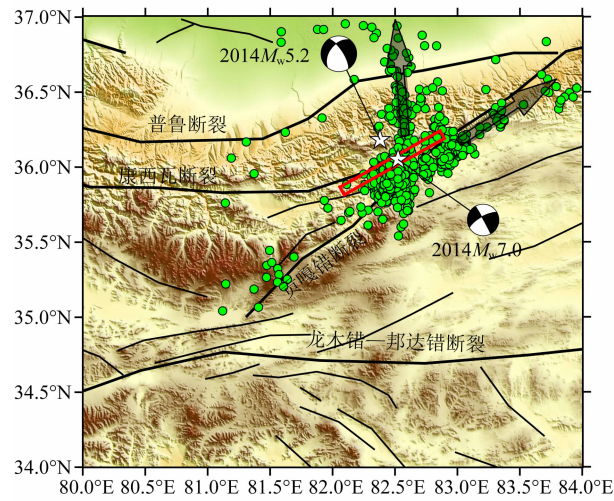


图4 区域构造和余震震中(绿色圆圈)分布

黑色震源机制解分别表示2014年新疆于田  $M_w7.0$  地震和  $M_w5.2$  余震.红色长方形为王卫民等(2014)反演的2014年于田地震破裂过程模型在地表的投影.绿色圆圈表示余震空间分布.灰色箭头指示余震沿NE和近SN向延伸.

Fig. 4 The regional structures and the epicentral locations for the aftershocks (green dots)

The black focal mechanisms denote the 2014 Yutian  $M_w7.0$  earthquake and the  $M_w5.2$  aftershock, respectively. The red rectangle represents surface projection of the rupture plane of the 2014 Yutian earthquake obtained by Wang et al. (2014). The green dots denote the aftershocks. The gray arrows indicate that the aftershocks extend along the NE and near NS directions.

区域应力场特征(马杏垣, 1987; 徐纪人和赵志新, 2006).对于正断层和走滑断层,库仑应力等式中将出现低摩擦系数(Lin and Stein, 2004; Ma et al., 2005),因此,计算的有效摩擦系数取0.4,其他物性参数如上所述.此外,2014年于田  $M_w7.0$  地震导致的同震静态库仑应力场变化也会影响其周边断层上的应力累积.不同深度对应不同的应力变化增量,最大应力增量决定了触发作用(Lin and Stein, 2004).因此,我们采用5 km的深度间隔计算应力分布,选取决定触发作用的最大应力增量(周云等, 2015).计算过程中,断层参数如表2所示.

图5为2014年新疆于田地震在最优破裂面上产生的库仑应力变化.灰色长方形为有限断层在地表上的投影,白色五角星为2014年新疆于田地震震

表2 研究区域所用地质断层参数(周云等,2015)

Table 2 Fault segment parameters of earthquake zone

断层面	倾角/( $^\circ$ )	倾向	性质	滑动角/( $^\circ$ )
普鲁断裂	45	南	逆冲	90
康西瓦断裂	90	/	左旋	0
贡嘎错断裂	75	南东	左旋兼正断	-30
龙木错-邦达错断裂	90	南	左旋	0

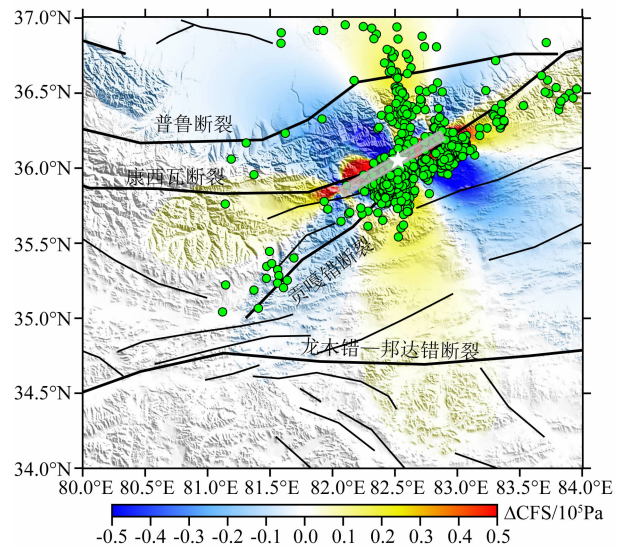


图5 2014年于田地震在最优破裂面上产生的库仑应力变化.白色五角星为震中位置,灰色长方形表示破裂面在地表的投影(王卫民等, 2014).

Fig. 5 Coulomb stress change due to the 2014 Yutian earthquake calculated using the optimal fracture direction. The white star shows the epicenter of the 2014 mainshock. The gray rectangle is the surface projection of the rupture plane (Wang et al., 2014).

中位置. 根据 King 等 (1994), 长和短的走滑断层两端的应力加载区有相似的强度和尺寸, 长断层的卸载区主要垂直于断层走向并向外延伸, 短断层则是沿着断层走向, 两侧卸载区逆对称. 2014 年新疆于田地震是短走滑破裂, 应力加载区主要分布在主震断层的两端、南北方向及主震断层边缘部分, 应力卸载区主要有 4 个突出部分, 东北和东南走向相对于其他部分突出, 应力下降  $(0.2 \sim 0.5) \times 10^5$  Pa.

图 5 比较了 2014 年新疆于田地震产生的库仑应力变化和余震空间分布. 有 75.4% 余震处于应力加载区, 应力增加大于  $0.15 \times 10^5$  Pa, 24.6% 余震发生在卸载区, 应力减小了  $(0.2 \sim 0.5) \times 10^5$  Pa.

图 6 为 2014 年新疆于田地震对周边主要活动断层产生的应力累积. 普鲁断裂由西到中段应力逐渐加载, 在中段达到  $0.21 \times 10^5$  Pa, 东段进入卸载区, 应力下降到  $0.34 \times 10^5$  Pa. 康西瓦断裂东段以卸载为主, 断裂中段应力加载, 达到  $0.37 \times 10^5$  Pa, 断裂西段沿走向方向随着远离震中位置, 应力逐渐下降. 贡嘎错断裂东北段应力加载, 沿走向方向靠近震中位置应力加载更大, 中段位于应力卸载区, 断裂西南段应力卸载逐渐减小. 龙木错—邦达错断裂由于距离震中位置较远, 在断裂上产生的库仑应力变化不明显. 普鲁断裂中段、康西瓦断裂中段和贡嘎错断裂东

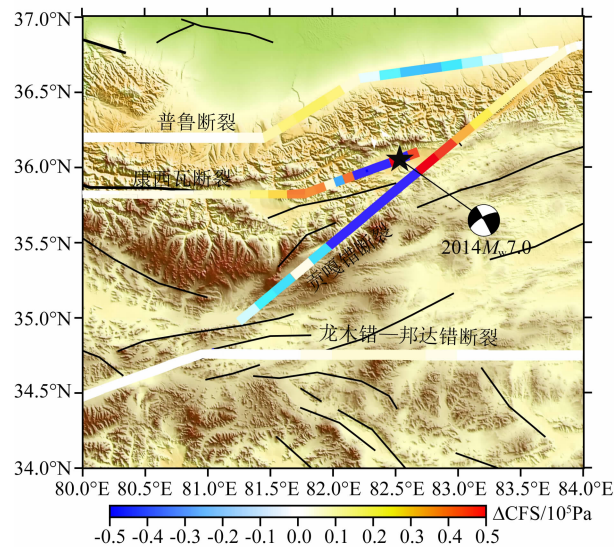


图 6 2014 年于田地震引起的周边主要断层的库仑应力变化

黑色五角星为主震位置, 黑色震源机制解表示 2014 年新疆于田  $M_w 7.0$  地震.

Fig. 6 Coulomb stress changes in major faults caused by the 2014 Yutian earthquake

The black star and focal mechanism denote the 2014 Yutian  $M_w 7.0$  earthquake.

北段应力加载值均大于经验触发值  $0.1 \times 10^5$  Pa, 这些断层上发生地震的概率加大.

图 7 为 2008 年新疆于田地震在最优断层面上产生的库仑应力变化. 白色长方形为有限断层在地表上的投影, 白色五角星为 2008 年新疆于田地震震中位置. 应力加载区主要是北东到南西走向. 应力卸载区主要位于主震断层的两侧, 西北到东南走向, 应力下降  $(0.2 \sim 0.5) \times 10^5$  Pa. 图 7 中的绿色圆点表示 2008 年新疆于田地震余震事件, 这些数据来自国家地震科学数据共享中心. 余震序列近南北分布, 65% 余震事件位于康西瓦断裂和贡嘎错断裂之间, 20% 余震位于贡嘎错断裂和龙木错—邦达错断裂之间, 有 15% 余震位于龙木错—邦达错断裂南部和康西瓦断裂北部. 由图 7 可见, 84.6% 余震位于 2008 年新疆于田地震静态库仑应力加载区, 应力增加大于  $0.1 \times 10^5$  Pa, 15.4% 余震主要处于应力卸载区, 应力减小了  $(0.15 \sim 0.4) \times 10^5$  Pa.

2008 和 2014 年新疆于田地震的余震事件分别有 84.6% 和 75.4% 处于库仑应力加载区, 库仑应力变化与余震空间分布吻合较好. 因此, 余震充分吸收了主震未完全释放的应力, 有助于震源区应力恢复平衡. 在 2014 年于田地震北西向, 发生了一个具有

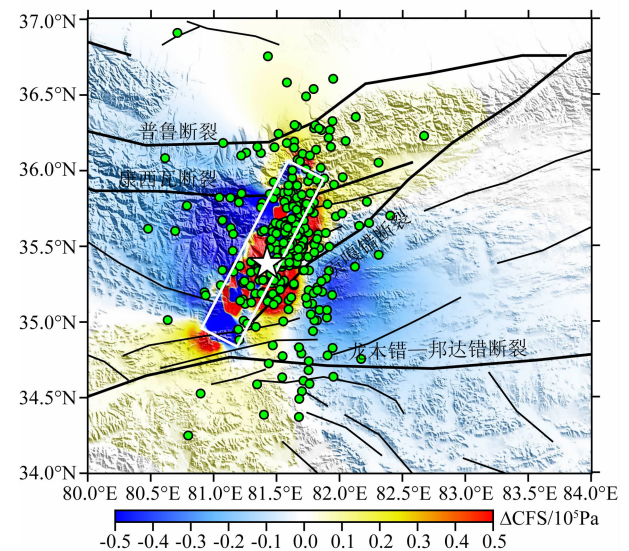


图 7 2008 年新疆于田地震在最优破裂面上产生的库仑应力变化

其中白色五角星为震中位置, 白色矩形框为破裂面在地表的投影 (Shao and Ji, 2008), 绿色圆圈表示余震空间分布.

Fig. 7 Coulomb stress changes on optimally oriented fault planes from the 2008 Xinjiang Yutian earthquake. The white star shows the epicenter location. The white rectangular is the surface projection of the rupture plane (Shao and Ji, 2008). The green dots denote aftershocks.



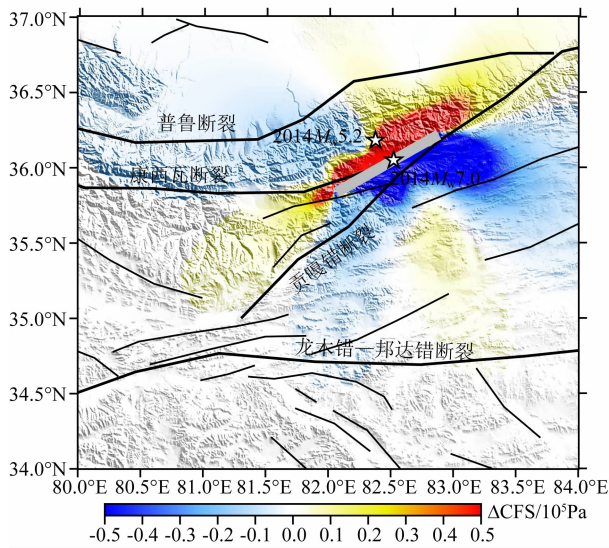


图 8 2014 年新疆于田地震在  $M_w$  5.2 余震破裂面上产生的库仑应力变化

Fig. 8 Coulomb stress changes caused by the 2014 Xinjiang Yutian earthquake on the representative fault planes of the  $M_w$  5.2 aftershock

正断兼走滑机制的  $M_w$  5.2 余震事件(图 4)。结合当地地质资料,接收断层参数为走向  $218^\circ$ 、倾角  $47^\circ$ 、滑动角  $-26^\circ$ 。2014 年新疆于田地震在其节面上产生的库仑应力变化显示了这个余震位于应力加载区,如图 8,余震事件的震中位置的应力增量达到  $0.63 \times 10^5$  Pa。因此,2014 年 2 月 12 日新疆于田地震对其后的  $M_w$  5.2 余震事件存在明显的触发作用。

#### 4 地震活动率变化

库仑应力变化的增加或减小分别可以促进或抑制后续地震(Reasenber and Simpson, 1992)。为了检验计算的库仑应力变化是否影响地震活动率变化,我们通过比较主震前后两个时期的平均地震活动率计算速率变化(Toda et al., 1998)。不同于地震矩率,地震活动率通过累积地震数反映,与震级无关,小震越丰富对地震活动率的影响越大(Toda and Stein, 2002)。一般静态库仑应力变化大于等于  $0.1 \times 10^5$  Pa 影响地震活动率(King et al., 1994)。我们从国家地震科学数据共享中心(<http://data.earthquake.cn/data/>)下载新疆于田地区 2009 年以来震级大于  $M_L$  1.0 的地震事件目录,调查地震活动率变化。

为了保证地震事件的独立性和随机性,去除研究区域的丛集和余震(Reasenber and Simpson,

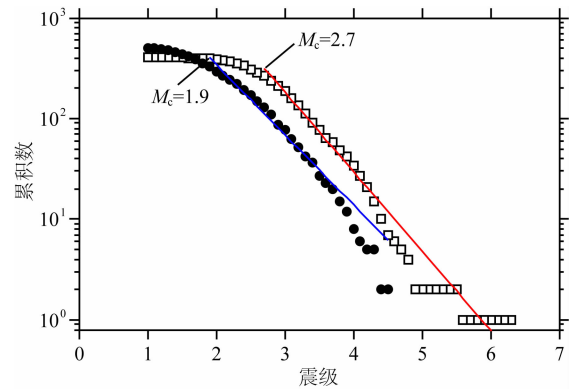


图 9 最小完整性震级. 2014 年新疆于田地震之前(方块)和之后(圆圈)地震事件个数,最小完整性震级分别是 2.7 和 1.9

Fig. 9 The minimum magnitudes of completeness,  $M_c$ , which are 2.7 and 1.9 from numbers of earthquakes before (square) and after (circle) the 2014 Xinjiang Yutian  $M_w$  7.0 earthquake, respectively

1992),使用 Zmap(Wiemer, 2001)软件确定 2014 年于田地震前后两个时期的  $M_c$ (图 9)来保证地震目录的完整性.2014 年于田地震的背景地震目录为 2009 年 1 月 1 日到 2013 年 12 月 31 日的数据,2014 年于田地震后的数据取 2014 年 2 月 12 日到 2014 年 12 月 31 日的地震目录.背景地震的最小完整性震级  $M_c = 2.7$ ,主震后的最小完整性震级  $M_c = 1.9$ .根据  $M_c$  定义的理想震级下限来计算地震活动率变化.通过计算 2014 年于田  $M_w$  7.0 地震后期平均地震率( $R$ )与前期平均地震率( $r$ )的比值来表示地震活动率变化.计算过程中,我们选取  $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$  的网格单元,光滑半径为 25 km(Wyss and Wiemer, 2000),通过高斯滤波对地震活动率进行光滑处理(Toda et al., 1998)。

2014 年新疆于田  $M_w$  7.0 地震之后,震源区内普鲁断裂东段、康西瓦断裂东段、贡嘎错断裂中段和东北段的地震活动率增加(图 10a)。为了检验地震活动率变化的显著性,我们应用 Zmap 软件(Wiemer, 2001)计算出震源区 2014 年新疆于田地震前后两个时期的 Z 值统计(Habermann, 1983)结果.图 10b 显示了研究区域 Z 值分布,Z 值只表示地震活动率变化的统计学意义,而不是变化的值.正负 Z 值分别表示地震活动率降低和增加.由于只研究主震后触发区地震活动的现象,所以只关注负 Z 值的变化.图 10a 中地震活动率增加较大区域与图 10b 中较大负 Z 值区域(低于  $-2.807$ )相符合,除了普鲁断裂东段区域的地震活动率降低外,其他区域地震活动率变化都是增加的。



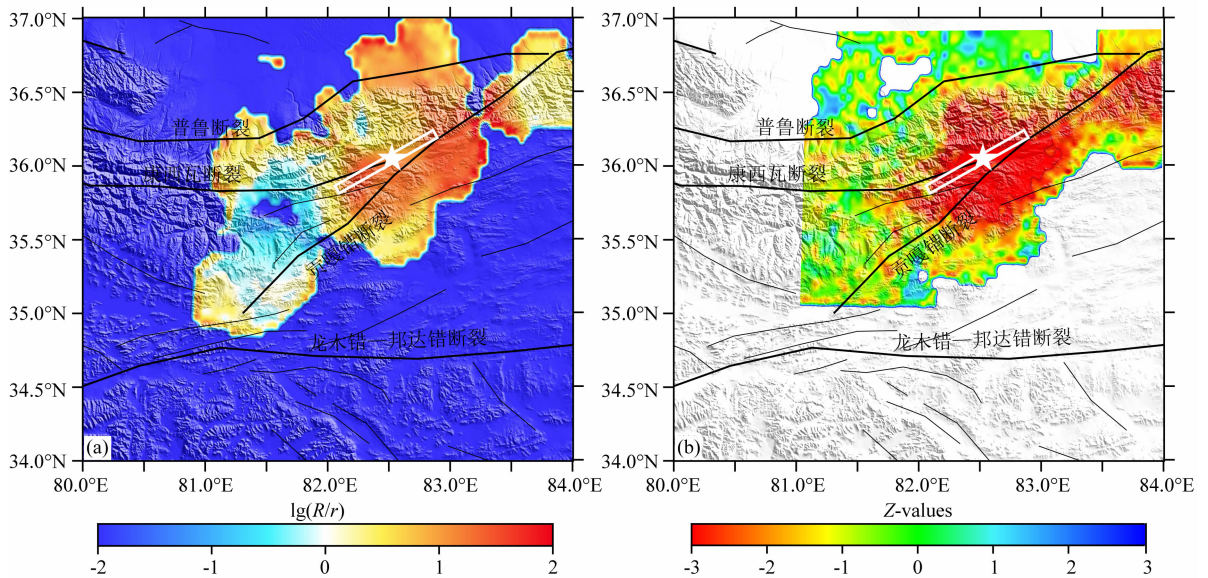


图 10 2014 年于田地震前后地震活动率变化

(a) 由震前地震率( $r$ )和震后地震率( $R$ )的比值( $R/r$ )得到地震活动率变化,正值表示地震率增加;

(b) 地震活动率变化的  $Z$  值分布,其中正值表示地震率减小.

Fig. 10 Seismicity rate changes before and after the 2014 Yutian earthquake

(a) The seismicity rate changes calculated by the ratio between the mean postmainshock and premainshock rates. The positive seismicity rate changes correspond to the increasing seismicity rates. (b) Calculated  $Z$  values describing the seismicity rate changes. The positive  $Z$  values denote seismicity rate decreases.

## 5 讨论与结论

由于地震破裂过程的复杂性,不同模型对库仑应力计算结果有较大的影响,尤其是邻近断层面的区域.我们仅采用 Shao 和 Ji (2008) 和王卫民等 (2014) 给出的 2008 年和 2014 年新疆于田地震的有限断层破裂过程模型,没有做出与其它模型计算结果的比较.随着更多地质资料和 GPS 数据的开放,综合约束发震模型和静态库仑应力变化,结果会更可靠.我们使用比较简单的弹性半无限空间各向同性模型计算静态库仑应力变化,与分层地壳模型的结果进行比较,得出非常相近的结果(程佳等, 2014).大地震发生后,地球的粘弹性松弛效应会造成应变扩散(沈正康等, 2003).万永革等(2010)认为粘弹性松弛效应在发生时间间隔几十年到几个世纪的邻近大地震之间的作用不可忽略,发震时间间隔较短可忽略.新疆于田地区两次较大强震时隔 6 年,因此,可忽略粘弹性松弛效应在震源区的应力扰动.计算地震活动率变化时,采用了有限的地震目录.随着时间的推移,可以收集更多的地震目录事件进行计算,增加地震活动率计算的可靠性.另外,充分考虑实际地球的三维不均匀性、动态触发的作用、

流体作用等因素的影响,能够提高计算精度.

先期地震对之后地震或余震发展的影响,可以利用先期地震产生的附加库仑应力场为作为后续地震和余震发生的判据.但是地震发生主要取决于外在应力和地壳本身所存在的缺陷.断层是地壳中的薄弱处,因此地震总是沿着一些断层反复发生.主震发生后,震源区更是处于严重的破碎状态.后续地震的空间和时间分布规律,即它们是否能够由“触”而“发”主要取决于其自身原因,即区域应力和地壳薄弱部位等,而库仑应力场仅为触发因素.

根据已发布的有限断层模型和静态库仑应力触发原理,结合弹性位错理论计算静态库仑应力变化.利用地震目录,通过比较 2014 年于田地震前后两个时期的平均地震活动率和计算  $Z$  值分布来指示地震活动率变化,得到了以下主要结论:(1)在新疆于田地区发生 2008 年  $M_w 7.1$  和 2014 年  $M_w 7.0$  两次较大的地震事件.通过计算震源区的静态库仑应力变化,发现 2014 年地震位于 2008 年地震之后静态库仑应力的加载区,可能指示了它们之间的触发关系.(2)2008 年新疆于田  $M_w 7.1$  地震和 2014 年新疆于田  $M_w 7.0$  地震在最优破裂面上产生的库仑应力变化与余震空间分布一致.应力释放较为完全,近期发生强震的可能性较低.(3)通过分析 2014 年新

疆于田地震前后地震活动率变化,发现了地震活动较为显著的区域,静态库仑应力增加.同样可以说明,地震活动率增加,有助于应力释放,降低强震发生的机率.

**致谢** Coulomb3.3 软件和 Zmap 软件来自 USGS 网站,地震目录来自国家地震科学数据共享中心(CEDC),震源机制解来自 GCMT (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>),图件绘制采用 GMT 软件 (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>).作者之一的谢小碧感谢 AFRL 基金 FA9453-12-C-0234 部分支持.

## References

- Cheng J, Liu J, Sheng S Z, et al. 2014. Tectonic background of the Yutian  $M_s 7.3$  earthquake and its relationship with the Yutian  $M_s 7.3$  earthquake in 2008. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 30(2): 143-150.
- Das S, Scholz C H. 1981. Off-fault aftershock clusters caused by shear stress increase. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 71(5): 1669-1675.
- Deng J S, Hudnut K, Gurnis M, et al. 1999. Stress loading from viscous flow in the lower crust and triggering of aftershocks following the 1994 Northridge, California, Earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 26(21): 3209-3212.
- Dieterich J. 1994. A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering. *J. Geophys. Res.*, 99(B2): 2601-2618.
- Freed A M. 2012. Earthquakes: Casting stress shadows. *Nature Geoscience*, 5(6): 371-372.
- Gu J C, Xie X B, Zhao L. 1979. On temporal distribution of large aftershocks of the sequence of a major earthquake and preliminary theoretical explanation. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 22(1): 32-46.
- Gu J C, Xie X B, Zhao L. 1982. On spatial distribution of large aftershocks of the sequence of a major earthquake and preliminary theoretical explanation. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 4(4): 380-388.
- Habermann R E. 1983. Teleseismic detection in the Aleutian Island arc. *J. Geophys. Res.*, 88(B6): 5056-5064.
- Harris R A. 1998. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard. *J. Geophys. Res.*, 103(B10): 24347-24358.
- Jaeger J C, Cook N G W. 1969. *Fundamentals of Rock Mechanics*. London: Methuen, 153.
- Ji C. 2008. Preliminary Result of the May 12, 2008  $M_w 7.97$  Sichuan Earthquake ([http://www.geol.ucsb.edu/faculty/ji/big\\_earthquakes/2008/05/12/ShiChuan.html](http://www.geol.ucsb.edu/faculty/ji/big_earthquakes/2008/05/12/ShiChuan.html)).
- King G C P, Stein R S, Lin J. 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 84(3): 935-953.
- Lin J, Stein R S. 2004. Stress triggering in thrust and subduction earthquakes and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults. *J. Geophys. Res.*, 109(B2): B02303, doi: 10.1029/2003JB002607.
- Liu G P, Fu Z X. 2000. Regional seismicity triggered by the  $M_s = 7.8$  Tangshan event of July 28, 1976 and the static stress field change. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 22(1): 17-26.
- Ma K F, Chan C H, Stein R S. 2005. Response of seismicity to Coulomb stress triggers and shadows of the 1999  $M_w = 7.6$  Chi-Chi, Taiwan, earthquake. *J. Geophys. Res.*, 110(B5): B05S19, doi: 10.1029/2004JB003389.
- Ma X Y. 1987. Summary of the lithospheric dynamics in China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), (2): 113-125.
- Miao M, Zhu S B. 2013. The static Coulomb stress change of the 2013 Lushan  $M_s 7.0$  earthquake and its impact on the spatial distribution of aftershocks. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 35(5): 619-631.
- Mitsakaki C, Rondoyanni T, Anastasiou D, et al. 2013. Static stress changes and fault interactions in Lefkada Island, western Greece. *J. Geodyn.*, 67: 53-61, doi: 10.1016/j.jog.2012.04.007.
- Nalbant S S, McCloskey J. 2011. Stress evolution before and after the 2008 Wenchuan, China earthquake. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 307(1-2): 222-232.
- Okada Y. 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half space. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 82(2): 1018-1040.
- Parsons T, Stein R S, Simpson R W, et al. 1999. Stress sensitivity of fault seismicity: A comparison between limited-offset oblique and major strike-slip faults. *J. Geophys. Res.*, 104(B9): 20183-20202.
- Parsons T. 2002. Global Omori law decay of triggered earthquakes: Large aftershocks outside the classical aftershock zone. *J. Geophys. Res.*, 107(B9): ESE 9-1-ESE 9-20, doi: 10.1029/2001JB000646.
- Parsons T, Yeats R S, Yagi Y, et al. 2006. Static stress change from the 8 October, 2005  $M = 7.6$  Kashmir earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 33: L06304, doi: 10.1029/2005GL025429.
- Parsons T, Ji C, Kirby E. 2008. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan basin. *Nature*, 454(7203): 509-510.
- Reasenber P A, Simpson R W. 1992. Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake. *Science*, 255(5052): 1687-1690.
- Rice J R. 1992. Fault stress states, pore pressure distribution, and the weakness of the San Andreas fault. // Evans B, Wong T F eds. *Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks*. London: Academic Press, 47-530.
- Sarkarinejad K, Ansari S J. 2014. The coulomb stress changes and seismicity rate due to the 1990  $M_w 7.3$  Rudbar earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 104(6): 2943-2952.
- Shan B, Xiong X, Zheng Y, et al. 2009. Stress changes on major

- faults caused by  $M_w$ 7.9 Wenchuan earthquake, May 12, 2008. *Sci. China Ser. D-Earth Sci.*, 52(5): 593-601, doi: 10.1007/s11430-009-0060-9.
- Shao G F, Ji C. 2008. Preliminary Result of the Mar 20, 2008  $M_w$ 7.14 Xinjiang Earthquake ([http://www.geol.ucsb.edu/faculty/ji/big\\_earthquakes/2008/03/20/Xinjiang\\_206.html](http://www.geol.ucsb.edu/faculty/ji/big_earthquakes/2008/03/20/Xinjiang_206.html)).
- Shen Z K, Wan Y G, Can W J, et al. 2003. Viscoelastic triggering among large earthquakes along the east Kunlun fault system. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 46(6): 786-795.
- Song J, Jiang H K. 2011. The static stress triggering influence of the Yushu  $M_s$ 7.1 earthquake. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 27(4): 396-402.
- 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. *Science*, 258(5086): 1328-1332.
- Stein R S, King G C P, Lin J. 1994. Stress triggering of the 1994  $M$ =6.7 Northridge, California, earthquake by its predecessors. *Science*, 265(5177): 1432-1435.
- Stein R S. 1999. The role of stress transfer in earthquake occurrence. *Nature*, 402(6762): 605-609.
- Tapponnier P, Molnar P. 1976. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics. *Nature*, 264(5584): 319-324.
- Taylor M, Yin A. 2009. Active structures of the Himalayan-Tibetan orogen and their relationships to earthquake distribution, contemporary strain field, and Cenozoic volcanism. *Geosphere*, 5(3): 199-214.
- Toda S, Stein R S, Reasenberg 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. Geophys. Res.*, 103(B10): 24543-24565.
- Toda S, Stein R S. 2002. Response of the San Andreas fault to the 1983 Coalinga-Nuñez earthquakes: An application of interaction-based probabilities for Parkfield. *J. Geophys. Res.*, 107(B6): ESE 6-1-ESE 6-16, doi: 10.1029/2001JB000172.
- Toda S, Stein R S, Richards-Dinger K, et al. 2005. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer. *Geophys. Res. Lett.*, 110(B5): B05S16.
- Toda S, Lin J, Meghraoui M, et al. 2008. 12 May 2008  $M=7.9$  Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems. *Geophys. Res. Lett.*, 35(17): L17305.
- Wan, Y G, Shen Z K, Sheng S Z, et al. 2009. The influence of 2008 Wenchuan earthquake on surrounding faults. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 31(2): 128-139.
- Wan, Y G, Shen Z K, Sheng S Z, et al. 2010. The mechanical effects of the 2008  $M_s$ 7.3 Yutian, Xinjiang earthquake on the neighboring faults and its tectonic origin of normal faulting mechanism. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 53(2): 280-289, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.02.006.
- Wang, J J, Xu C J, Shen W B. 2012. The Coseismic coulomb stress changes induced by the 2010  $M_w$ 6.9 Yushu Earthquake, China and its implication to earthquake hazard. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 37(10): 1207-1211.
- Wang W M, Hao J L, Yao Z X. 2014. Preliminary result for Rupture Process of Feb. 12, 2014,  $M_7.3$  Earthquake, Yutian, Xinjiang, China ([http://www.igg.cas.cn/xwzx/yjcg/201402/t20140214\\_4032524.html](http://www.igg.cas.cn/xwzx/yjcg/201402/t20140214_4032524.html)).
- Wang W M, Zhao L F, Li J, et al. 2008. Rupture process of the  $M_s$ 8.0 Wenchuan earthquake of Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 51(5): 1403-1410.
- Wiemer S. 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismol. Res. Lett.*, 72(3): 373-382.
- Wyss M, Wiemer S. 2000. Change in the probability for earthquakes in Southern California due to the landers magnitude 7.3 earthquake. *Science*, 290(5495): 1334-1338.
- Xie C D, Zhu Y Q, Lei X L, et al. 2010. Pattern of stress change and its effect on seismicity rate caused by  $M_s$ 8.0 Wenchuan earthquake. *Sci. China Earth Sci.*, 53(9): 1260-1270, doi: 10.1007/s11430-010-4025-9.
- Xu J R, Zhao Z X. 2006. Characteristics of the regional stress field and tectonic movement on the Qinghai-Tibet Plateau and in its surrounding areas. *Geology in China* (in Chinese), 33(2): 275-285.
- Xu X W, Tan X B, Yu G H, et al. 2013. Normal-and oblique-slip of the 2008 Yutian earthquake: Evidence for eastward block motion, northern Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 584: 152-165.
- Zheng J D. 1993. Karakorum Fault and Taxkorgan seismic deformation zone. *Seismology and Geology* (in Chinese), 15(2): 107-112.
- Zhou L Q, Ma S H, Xia H, et al. 2008. Large aftershocks triggering by coulomb failure stress following the 2007  $M_s$ 8.5 and 8.3 Sumatra great earthquakes. *Earthquake* (in Chinese), 28(1): 40-46.
- Zhou Y, Wang W M, Xiong L, et al. 2015. Rupture process of 12 February 2014, Yutian  $M_w$ 6.9 earthquake and stress change on nearby faults. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(1): 184-193, doi: 10.6038/cjg20150116.
- Ziv A, Rubin A M. 2000. Static stress transfer and earthquake triggering: No lower threshold in sight?. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012), 105(B6): 13631-13642.

## 附中文参考文献

- 程佳, 刘杰, 盛书中等. 2014. 2014年新疆于田  $M_s$ 7.3 强震构造背景及其与 2008年  $M_s$ 7.3 地震之间的关系讨论. *中国地震*, 30(2): 143-150.
- 谷继成, 谢小碧, 赵莉. 1979. 强余震的时间分布特征及其理论解释. *地球物理学报*, 22(1): 32-46.
- 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. *地震学报*, 4(4): 380-388.



- 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. 地震学报, 22(1): 17-26
- 马杏垣. 1987. 中国岩石圈动力学概要. 地质学报, (2): 113-125.
- 缪森, 朱守彪. 2013. 2013年芦山  $M_s$ 7.0 地震产生的静态库仑应力变化及其对余震空间分布的影响. 地震学报, 35(5): 619-631.
- 单斌, 熊熊, 郑勇等. 2009. 2008年5月12日  $M_w$ 7.9 汶川地震导致的周边断层应力变化. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39(5): 537-545.
- 沈正康, 万永革, 甘卫军等. 2003. 东昆仑活动断裂带大地震之间的黏弹性应力触发研究. 地球物理学报, 46(6): 786-795.
- 宋金, 蒋海昆. 2011. 2010年4月14日玉树  $M_s$ 7.1 地震对余震的触发研究. 中国地震, 27(4): 396-402.
- 万永革, 沈正康, 盛书中等. 2009. 2008年汶川大地震对周围断层的影响. 地震学报, 31(2): 128-139.
- 万永革, 沈正康, 盛书中等. 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. 地球物理学报, 53(2): 280-289, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.02.006.
- 汪建军, 许才军, 申文斌. 2012. 2010年  $M_w$ 6.9 级玉树地震同震库仑应力变化研究. 武汉大学学报: 信息科学版, 37(10): 1207-1211.
- 王卫民, 郝金来, 姚振兴. 2014. 2014年2月12日新疆于田  $M_s$ 7.3 级地震震源破裂过程反演初步结果 ([http://www.igg.cas.cn/xwzx/yjcg/201402/t20140214\\_4032524.html](http://www.igg.cas.cn/xwzx/yjcg/201402/t20140214_4032524.html)).
- 王卫民, 赵连锋, 李娟, 等. 2008. 四川汶川8.0级地震震源过程. 地球物理学报, 51(5): 1403-1410.
- 解朝娣, 朱元清, Lei X L 等. 2010.  $M_s$ 8.0 汶川地震产生的应力变化空间分布及其对地震活动性的影响. 中国科学: D 辑, 40(6): 688-698.
- 徐纪人, 赵志新. 2006. 青藏高原及其周围地区区域应力场与构造运动特征. 中国地质, 33(2): 275-285.
- 郑剑东. 1993. 喀喇昆仑断层与塔什库干地震形变带. 地震地质, 15(2): 107-112.
- 周龙泉, 马宏生, 夏红等. 2008. 2007年苏门答腊8.5级、8.3级地震强余震库仑破裂应力触发研究. 地震, 28(1): 40-46.
- 周云, 王卫民, 熊林等. 2015. 2014年2月12日  $M_w$ 6.9 于田地震震源破裂过程及对周围断层的应力影响. 地球物理学报, 58(1): 184-193, doi: 10.6038/cjg20150116.

(本文编辑 胡素芳)