

贾科, 周仕勇. 2018. 基于库仑应力改变和地震活动性研究巴颜喀拉块体周缘强震序列的触发关系及其构造意义. 地震学报, 40(3): 291-303. doi: 10.11939/jass.20170201.

Jia K, Zhou S Y. 2018. Triggering relationship in strong earthquake sequence around the Bayan Har block and its tectonic significance based on Coulomb stress changes and seismicity. *Acta Seismologica Sinica*, 40(3): 291-303. doi: 10.11939/jass.20170201.

# 基于库仑应力改变和地震活动性研究巴颜喀拉块体周缘强震序列的触发关系及其构造意义\*

贾科<sup>1), †</sup> 周仕勇<sup>2)</sup>

1) 中国西安 710129 西北工业大学自动化学院

2) 中国北京 100087 北京大学地球与空间科学学院

**摘要** 自本世纪以来, 青藏高原巴颜喀拉块体周缘密集地发生了 7 次  $M_w \geq 6.5$  强震事件, 包括伤亡惨重的 2008 年汶川  $M_w 7.9$  地震和 2017 年九寨沟  $M_w 6.5$  地震. 本文根据这 7 次强震事件中先前地震对后续地震的库仑应力改变(dCFS)的计算结果, 结合基于 ETAS 模型得到的背景地震活动性的变化结果, 研究了强震间的触发关系, 以试图解释发生在环巴颜喀拉块体的几次强震的震发机理并探讨其构造意义. 结果表明, 各个强震的库仑应力变化与其造成的背景地震活动性变化呈正相关, 并且在这 7 次强震中, 汶川地震对芦山地震有显著的触发作用, 并造成芦山地区背景地震活动性的显著提高. 同时汶川地震对九寨沟地震的发生具有一定的延迟作用, 造成九寨沟地区背景地震活动性降低. 除此之外, 其它地震之间均无明显的触发/延迟作用或显著的背景地震活动性变化. 这表明该强震序列的孕震机制主要是巴颜喀拉块体东南向持续挤压的构造运动, 推断巴颜喀拉块体目前仍处于构造运动活跃期, 因此包括巴颜喀拉块体周缘在内的我国西南地区未来的强震危险性值得持续关注.

**关键词** 汶川地震 巴颜喀拉块体 ETAS 模型 库仑应力改变 强震相互作用  
doi: 10.11939/jass.20170201 中图分类号: 315.02 文献标识码: A

## Triggering relationship in strong earthquake sequence around the Bayan Har block and its tectonic significance based on Coulomb stress changes and seismicity

Jia Ke<sup>1), †</sup> Zhou Shiyong<sup>2)</sup>

1) School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China

2) School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100087, China

**Abstract:** Seven major earthquakes of  $M_w \geq 6.5$  have occurred around the Bayan Har block in

\* 基金项目 中央高校基本科研业务费专项资金(3102017OQD024)、航天科学技术基金(2017-HT-XG)和国家自然科学基金(41274052, 41474033)联合资助.

收稿日期 2017-11-21 收到初稿, 2018-02-06 决定采用修改稿.

† 通信作者 e-mail: jk@nwpu.edu.cn



the Tibetan Plateau since this century, including the devastated 2008 Wenchuan earthquake and the recent 2017 Jiuzhaigou earthquake. Here we investigate the triggering effects among those major earthquakes by calculating the Coulomb stress changes and analyzing the background seismicity rate changes, and furthermore to understand the tectonic activity of the Bayan Har block. Our results show that, the Coulomb stress changes positively correlate with the background seismicity rate changes. Also, the results show that the Wenchuan earthquake triggered the Lushan earthquake and delayed the Jiuzhaigou earthquake. Besides, there is no significant triggering/delay effect among other major earthquakes. These findings imply that the remarkable earthquake sequence results from the southeastward movement of the Bayan Har block, and the Bayan Har block is still in the highly active seismic period. Furthermore, the seismic hazards of the Bayan Har block and its adjacent faults in the southwestern China should be paid more attention.

**Key words:** Wenchuan earthquake; Bayan Har block; ETAS model; Coulomb stress change; stress interaction among earthquakes

## 引言

近年来,从强震之间的应力交互角度开展强震间相互作用的研究,已成为震源物理学的一个热点课题(Harris, 1998; Perfettini *et al.*, 1999; Stein, 1999; King, Cocco, 2001; Steacy *et al.*, 2005).通过计算强震序列中前一次事件对后续事件的库仑应力改变量,可以定量地判断前者对后者的触发/延迟作用,帮助研究人员理解强震序列的孕育过程(Wan, Shen, 2010; Wang *et al.*, 2014; Jia *et al.*, 2018).同时,大地震的发生将显著影响其周缘地区的应力场状态,并可能造成周围断层提前或推迟发生地震,影响区域地震危险性(Parsons *et al.*, 2008; Toda *et al.*, 2008; Hu *et al.*, 2017).此外,以统计学的方法研究区域地震活动性的时空演化规律已成为刻画、了解地震事件之间的因果关系及区域构造活动的有力手段(Zhuang *et al.*, 2005; Peng *et al.*, 2012; Jia *et al.*, 2014, 2018).自1970年我国国家地震台网建立以来,地震目录越来越完备,这为统计分析地震活动特征提供了数据基础.在速率-状态本构关系框架下(Dieterich, 1979; Ruina, 1983),强震引起的库仑应力变化会直接导致地震活动性的时空变化,从而将库仑应力变化和地震活动性变化从理论上衔接起来,为强震之间的触发机制以及未来区域地震危险性的评估提供了有效方法(Aron, Hardebeck, 2009; Cocco *et al.*, 2010; Toda, Enescu, 2011; Ishibe *et al.*, 2015).

青藏高原是我国最主要的地震活动区之一,尤其是青藏高原中部的巴颜喀拉块体周缘,近20年来发生了一系列强震事件,显示了其构造运动正处于活跃期(程佳等, 2011; 闻学泽等, 2011; Jia *et al.*, 2012; 徐锡伟等, 2017).自本世纪初开始,巴颜喀拉块体周缘相继发生了2001年可可西里  $M_w$ 7.8地震、2008年于田  $M_w$ 7.1地震、2008年汶川  $M_w$ 7.9地震、2010年玉树  $M_w$ 6.9地震、2013年芦山  $M_w$ 6.6地震、2014年于田  $M_w$ 6.9地震和2017年九寨沟  $M_w$ 6.5地震(图1).这7次强震在时间和空间上的密集发生,造成了巨大的人员伤亡和财产损失,引起了学术界和公众的普遍关注.从动力学的角度看,这些强震的发震机制均与巴颜喀拉块体东南向的运动相吻合,可能是块体构造运动的产物(Jia *et al.*, 2012; 徐锡伟等, 2017).另一方面,一些研究表明,强震间的触发/延迟作用也可能主导了某些强震的发生(Jia *et al.*, 2014, 2018).因此,深入地细致地研究该强震序列之间可能存在的触发/延迟机制,有助于理解该

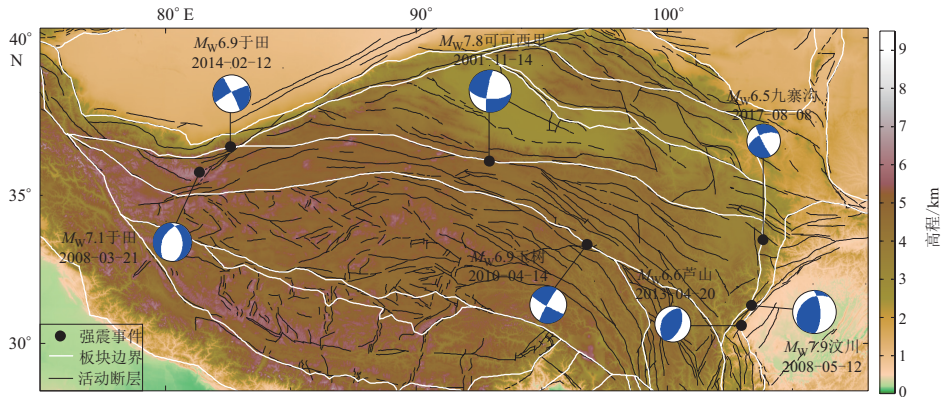


图 1 巴颜喀拉块体构造背景及 7 次强震事件(活动断层数据引自张培震等, 2003)

Fig. 1 The tectonic background of the Bayan Har block and the seven major earthquakes  
(The active faults data is from Zhang *et al.*, 2003)

强震序列的孕震机理和巴颜喀拉块体及周缘构造区的强震危险性。

多项研究表明, 部分强震之间存在应力交互现象, 并且强震的发生会对周围其它发震断层产生触发或抑制的作用, 影响余震丛集、强震孕育等地震活动(Stein *et al.*, 1992; Harris, 1998; Stein, 1999; King, Cocco, 2001; Pollitz *et al.*, 2003; Steacy *et al.*, 2005). King 等(1994)研究了强震引起的同震库仑应力改变, 并运用于 1992 年  $M_w$ 7.3 Landers 地震, 成功地解释了 Landers 地震的余震空间分布, 即大多数余震发生在库仑应力增加的区域, 只有少量地震发生在库仑应力减小的区域. Freed 和 Lin (2001) 首次使用黏弹性应力触发假说解释了 1992 年 Landers  $M_w$ 7.3 地震对 1999 年 Hector Mine  $M_w$ 7.1 地震的延迟触发作用, 使得黏弹性应力触发机制在地震触发中的作用被广泛关注. 1999 年土耳其  $M_w$ 7.4 Izmit 地震提高了其后续  $M_w$ 7.1 Duzce 地震的震源破裂起始点的黏弹性应力, 增加量达 70% (Hearn *et al.*, 2002). 上述研究表明各个时空尺度的地震触发已成为一种普遍存在的现象, 可为地震孕震机理提供更多的信息.

另一方面, 使用统计学的方法分析地震活动的时空特征, 进而判断地震之间的触发关系, 也成为地震触发关系研究的热点内容之一. 其中, 结合了大森-宇津(Omori-Utsu)定律和古登堡-里查德(Gutenberg-Richter)定律的传染性余震序列(epidemic type aftershock sequence, 简称为 ETAS 模型)(Ogata, 1988, 1998; Zhuang *et al.*, 2002; Ogata, Zhuang, 2006), 因其提供了一种有效区分背景地震和丛集(触发)地震的方法, 而被广泛应用于不同构造背景的地震活动性研究中(Zhuang *et al.*, 2005; 蒋长胜, 庄建仓, 2010; Peng *et al.*, 2012; Jia *et al.*, 2014, 2018). Dieterich (1994) 从理论上将地震活动性与库仑应力改变直接联系起来, 证实了两者之间存在定量的正相关关系, 从而为结合地震活动性分析和库仑应力改变来探究地震触发关系提供了理论依据. 因此, 同时考虑地震活动性变化和库仑应力改变, 能够互相印证地甄别地震之间的触发关系, 有助于深入理解区域构造活动和地震危险性.

巴颜喀拉块体周缘强震序列之间是否存在触发关系是科学界普遍关注的问题. 尤其是关于 2008 年汶川地震与 2013 年芦山地震及 2017 年九寨沟地震之间, 以及 2008 年和 2014 年两次于田地震之间的关系, 科学界存在不同的看法. 刁桂苓等(2010)研究发现, 于田地区的地震活动性在汶川地震发生之后显著增强, 进而推断 2008 年于田地震和汶川地震之间可能存在触发关系. 而关于芦山地震是否是汶川地震的余震这一科学问题, 学术界仍存在争论:

既有学者认为是余震的(陈运泰等, 2013; 王为民等, 2013), 也有研究推断是构造事件的(杜方等, 2013; Xu *et al.*, 2013); 同时, 一些研究人员认为芦山地震的发生既有汶川地震的触发作用, 也有构造应力加载的贡献(Jia *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2014); Jia 等(2014)定量分析了汶川地震对芦山地区背景地震活动性的改变, 认为芦山地震是汶川地震余震的概率是 62%; Wang 等(2014)以构造应力和库仑应力改变的比例为判断依据, 推断芦山地震是汶川地震余震的概率是 85%. 针对 2017 年九寨沟地震与汶川地震的关系, 也存在不同的声音: 一些学者认为前者是后者触发引起的(单斌等, 2017; Hu *et al.*, 2017), 另一些研究则表明后者延迟了前者的发震时间(Wang *et al.*, 2014; Jia *et al.*, 2018). 关于两次于田地震之间的关系, 多项研究均表明, 2008 年于田地震所引起的静态和黏弹性应力的增加提前了 2014 年于田地震的发生(Li *et al.*, 2015b; Wang *et al.*, 2017). 程佳等(2011)考虑黏弹性应力作用, 计算了玛尼地震、可可西里地震和汶川地震所形成的同震和震后形变场的变化过程和特征, 认为各地震之间的影响很微弱. 以上针对巴颜喀拉块体周缘强震之间触发关系的研究, 对理解该强震序列的发震机理是构造运动还是触发作用, 或者两者皆有, 均具有重要的科学意义.

本文拟对自本世纪初起发生在巴颜喀拉块体边界的 7 次强震之间的触发关系进行系统研究(表 1). 以库仑应力改变量和地震活动性的改变为依据, 甄别地震之间的交互作用. 根据发震时间和震中距离的不同, 本文对汶川地震-芦山地震-九寨沟地震、两次于田地震进行单独研究, 将其余强震作为一个序列进行分析讨论, 再根据这些地震之间的触发关系, 推断巴颜喀拉块体现今的构造运动和未来的地震危险性.

表 1 巴颜喀拉块体周缘 7 次强震的震源机制解

Table 1 The focal mechanism solutions of seven major earthquakes occurred around the Bayan Har block

序号	发震时间 年-月-日	东经/ $^{\circ}$	北纬/ $^{\circ}$	$M_w$	走向/ $^{\circ}$	倾角/ $^{\circ}$	滑动角/ $^{\circ}$	深度/km
1	2001-11-14	92.91	35.80	7.8	94	51	-12	15.0
2	2008-03-21	81.37	35.43	7.1	203	52	-74	12.0
3	2008-05-12	104.10	31.44	7.9	231	35	138	12.8
4	2010-04-14	96.79	33.05	6.9	300	88	23	15.7
5	2013-04-20	103.12	30.22	6.6	212	42	100	21.9
6	2014-02-12	82.57	36.22	6.9	242	86	-5	18.3
7	2017-08-08	103.90	33.21	6.5	150	78	-13	14.9

注: 数据参考 Ekström 等(2012).

## 1 库仑应力改变

由于各强震间发震时刻的间隔(数年)远大于动态应力触发的特征时间(数小时至数周), 因此本文不考虑该强震序列的动态应力改变, 仅关注同震时的静态应力改变和震后的黏弹性应力改变. 本研究根据巴颜喀拉块体深部结构的研究结果, 将地球模型简化为包含弹性上地壳、黏弹性下地壳和黏弹性上地幔的层状模型, 其中下地壳和上地幔的粘性系数分别为  $1 \times 10^{18} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  和  $1 \times 10^{20} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 模型具体细节请参考 Xiong 等(2010)和 Jia 等(2012). 由于汶川地震与芦山地震、九寨沟地震以及两次于田地震之间的空间距离较近, 且相关研究较多(Wang *et al.*, 2014; 赵立波等, 2016; 单斌等, 2017). 为了方便对比研究, 分别将汶川地震对芦山地震和九寨沟地震的影响, 芦山地震对九寨沟地震的影响, 以及 2008 年于田地震对 2014 年于田地震的影响进行单独分析. 同时定量地计算可可西里地震、2008 年于田地震、汶

川地震和玉树地震之间的库仑应力改变量。

### 1.1 库仑应力改变的计算方法

库仑应力改变的计算公式为(Robinson, 2005; Jia *et al.*, 2014)

$$dCFS = d\tau_s + \mu \left( d\tau_n - \left( \frac{\beta}{3} \right) \sum \tau_{ii} \right), \quad (1)$$

式中,  $d\tau_s$  为剪切应力改变量,  $\mu$  为摩擦系数,  $d\tau_n$  为正应力改变量(拉张为正),  $\beta$  为 Skempton 系数。相比于部分研究使用视摩擦系数综合孔隙压的变化, 我们更倾向于使用 Skempton 系数来更准确地刻画孔隙压力的变化, 因为前者可能导致库仑应力计算结果不准确(Beeler *et al.*, 2000)。Skempton 系数根据实验室和野外观测的结果取 0.5, 而摩擦系数因不同发震断层所处的环境不同而取不同数值, 取值范围介于 0—1.0 之间(Robinson, 2005; Jia *et al.*, 2014)。使用 PSGRN/PSCMP 程序(Wang *et al.*, 2006), 给定地震滑动分布模型, 接受断层的发震机制, 即可根据黏弹性位错模型计算出强震引起的静态及黏弹性应力改变量。

### 1.2 可可西里地震、2008 年于田地震、汶川地震和玉树地震之间的库仑应力改变

可可西里地震、2008 年于田地震和汶川地震的破裂模型分别参考 Lasserre 等(2005)、张国宏等(2011)以及 Ji 和 Hayes (2008)的结果。摩擦系数和 Skempton 系数根据实验室和野外观察的结果, 分别选取 0.75 和 0.5 (Robinson, 2005)。库仑应力的计算结果列于表 2。其中由于 2008 年于田地震和汶川地震的震中相距非常远(2 500 km), 而同震应力改变与两次地震的震中距离呈二次反比的关系, 因此这两次地震之间的同震应力改变可以忽略; 同时这两次地震的发震时间间隔较短(52 天), 远小于震后黏弹性应力释放发挥作用的特征时间, 因此震后黏弹性应力改变也可以忽略, 所以表 2 中并未列出这两次地震之间的库仑应力改变量。从表 2 可见, 可可西里地震对后续 2008 年于田、汶川和玉树地震的库仑应力改变非常小, 远小于可能引起地震活动性变化的阈值 0.01 MPa (Reasenberg, Simpson, 1992; Stein *et al.*, 1992)。类似的, 2008 年于田地震和汶川地震对玉树地震的库仑应力改变量也非常小。由上述结果可以推断, 这 4 次地震事件之间并无触发作用。

表 2 巴颜喀拉强震序列在其后续地震发震位置所引起的库仑应力变化

Table 2 The dCFS results induced by the strong earthquake sequence occurred around the Bayan Har block on following earthquakes

	2001 年可可西里地震		2010 年玉树地震	
	同震应力改变 /MPa	震后应力改变 /MPa	同震应力改变 /MPa	震后应力改变 /MPa
于田地震	$7.00 \times 10^{-5}$	$1.30 \times 10^{-4}$	$7.28 \times 10^{-7}$	$8.00 \times 10^{-7}$
汶川地震	$1.14 \times 10^{-5}$	$1.20 \times 10^{-5}$	$-1.32 \times 10^{-4}$	$-2.50 \times 10^{-4}$
玉树地震	$-7.15 \times 10^{-4}$	$-1.35 \times 10^{-3}$		

注: 震后应力改变指同震和震后黏弹性松弛共同导致的结果。

### 1.3 汶川地震、芦山地震和九寨沟地震之间的库仑应力改变

为了讨论汶川地震对芦山地震和九寨沟地震的影响, 以及芦山地震对九寨沟地震的影响, 本文使用不同的滑动分布模型和摩擦系数计算强震之间的库仑应力改变量, 计算结果如图 2 所示。汶川地震的滑动模型使用 Ji 和 Hayes (2008) 以及 Wang 等(2011)的反演结果, 芦山地震使用 Jiang 等(2014)和 Zhang 等(2014)的反演结果。由图 2a 可知, 分别使用 Wang 等(2011)、Ji 和 Hayes (2008)的破裂模型, 汶川地震对芦山地震的同震库仑应力改变分别达到了 0.006—

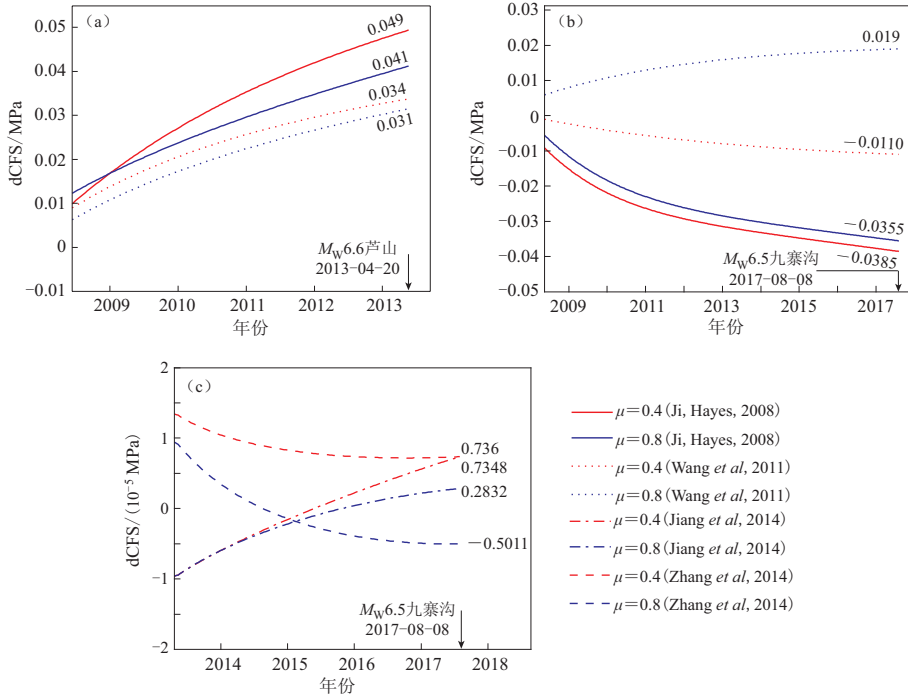


图 2 强震之间的库仑应力改变随时间的变化

- (a) 汶川地震对芦山地震的库仑应力改变; (b) 汶川地震对九寨沟地震的库仑应力改变;
- (c) 芦山地震对九寨沟地震的库仑应力改变

Fig. 2 Coulomb stress changes dCFS of strong earthquakes versus time

- (a) The dCFS induced by the Wenchuan earthquake on the Lushan earthquake; (b) The dCFS induced by the Wenchuan earthquake on the Jiuzhaigou earthquake; (c) The dCFS induced by the Lushan earthquake on the Jiuzhaigou earthquake

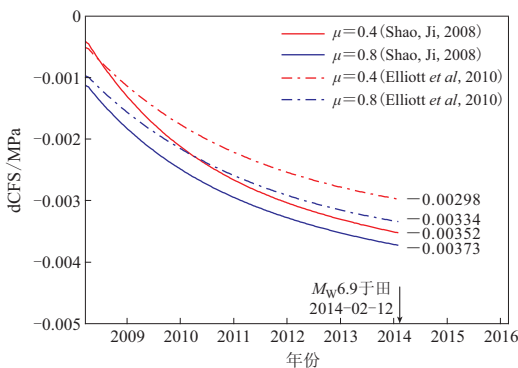


图 3 2008 年于田地震对 2014 年于田地震的库仑应力改变量

Fig. 3 The dCFS induced by the 2008 Yutian earthquake on the 2014 Yutian earthquake

0.009 MPa 和 0.010—0.012 MPa, 而总体的库仑应力改变(同震与震后库仑应力改变之和)分别为 0.031—0.034 MPa 和 0.041—0.049 MPa. 显然, 这种程度的库仑应力改变量表明汶川地震对芦山地震具有一定的触发作用, 也与其它研究结果相似(Parsons et al, 2008; Toda et al, 2008; 单斌等, 2009; Wan, Shen, 2010; Jia et al, 2014; Wang et al, 2014). 由图 2b 可知, 除了使用 Wang 等(2011)的模型在  $\mu=0.8$  的条件下, 库仑应力改变为正值外, 在  $\mu=0.4$  以及使用 Ji 和 Hayes (2008) 的模型时, 库仑应力改变量均为负值. 这是由库仑应力改变的计算结果对摩擦系数有较高的敏感度造成的, 也能解释为何针对汶川地震对九寨沟地震的库仑应力

改变, 不同研究可能得到相反的结果(Parsons et al, 2008; Toda et al, 2008; Luo, Liu, 2010;

Wan, Shen, 2010; Nalbant, McCloskey, 2011; Wang *et al.*, 2014; Hu *et al.*, 2017). 通常, 断层面上摩擦系数的精确值很难获得, 因而仅假设其取值范围介于0—1.0之间. Li等(2015a)通过汶川地震断裂带科学钻探项目直接观测到断层面上温度数据, 推断龙门山断裂带处于低摩擦环境( $\mu < 0.2$ ). 因此, 使用低摩擦系数计算得到的负库仑应力改变量更为可信, 表明汶川地震可能对九寨沟地震具有一定的延迟作用. 由图2c可知, 芦山地震对九寨沟地震的库仑应力改变量非常微弱, 约为 $10^{-6}$  MPa, 可以推断芦山地震对九寨沟地震并无影响.

#### 1.4 两次于田地震之间的库仑应力改变

使用同样的方法计算两次于田地震之间的库仑应力改变量(图3), 解析深度为10 km. 由图3可知, 2008年于田地震对2014年于田地震的库仑应力改变量从同震时的约-0.001 MPa至2014年于田地震前的约-0.003 MPa, 虽然是负值, 但其强度较小. 该结果与前人的研究结果并不完全一致(Li *et al.*, 2015b; 王辉等, 2016), 但各项计算结果均显示库仑应力改变量非常小(赵立波等, 2016; Wang *et al.*, 2017), 表明这两次地震事件之间触发关系很微弱.

## 2 地震活动性改变

### 2.1 ETAS模型和随机除丛法

ETAS模型结合了古登堡-里查德定律、大森-宇津定律及地震发生率与震级的关系等统计学规律, 将某一地区某一时段内大于某震级的地震活动性描述为点过程, 并将整体地震活动性看作不随时间变化的背景活动性和余震活动性之和. 最重要的是, ETAS模型中的每次地震(包括余震)均有能力触发其余震, 这种触发能力与其震级大小有关. ETAS模型以概率的形式来定义每次地震, 即每次地震均有一定概率是其之前地震的余震, 余下的概率作为背景地震的概率. 然而在现实中无法实际观测到每次地震与其余震之间的关系, 而只能记录到地震的时间序列. 但ETAS模型能够通过对其地区的地震目录建模, 拟合其模型参数, 从而分辨出各地震的余震概率和背景概率.

ETAS模型的数学含义为: 给定时刻 $t$ 之前的地震目录, 在单位时间内, 位置 $(x, y)$ 处震级大于完备震级 $M_c$ 的地震数目, 其表达式为(Ogata, 1998; Zhuang *et al.*, 2005)

$$\lambda(t, x, y) = \mu(x, y) + \sum_{(i:t_i < t)} \kappa(M_i) g(t - t_i) f(x - x_i, y - y_i; M_i), \quad (2)$$

$$\kappa(M_i) = A e^{\alpha(M_i - M_c)}, \quad M_i \geq M_c, \quad (3)$$

$$g(t) = \frac{p-1}{c} \left(1 + \frac{t}{c}\right)^{-p}, \quad (4)$$

$$f(x, y; M_i) = \frac{q-1}{\pi D e^{\gamma(M_i - M_c)}} \left[1 + \frac{x^2 + y^2}{D e^{\gamma(M_i - M_c)}}\right]^{-q}, \quad (5)$$

式中:  $\mu(x, y)$ 为背景地震活动率, 假设其不随时间变化;  $\kappa(M_i)$ 为地震发生率, 即震级为 $M_i$ 的主震能够触发的余震数目;  $g(t)$ 为大森-宇津定律的概率密度函数;  $f(x, y; M_i)$ 为空间概率密度函数;  $A, \alpha, p, c, q, D, \gamma$ 均为模型参数, 表示给定区域地震活动性的统计特征. 给定完备的地震目录和合适的模型参数初始值, 通过最大似然法即可估计出各模型参数的值.

### 2.2 ETAS模型拟合

将整个巴颜喀拉块体看作一个整体进行ETAS模型拟合, 空间范围为(29°N—37°N,

79°E—105°E), 时间范围为1980年1月1日至2017年8月27日. 前人的研究表明, 强震发生之后存在小地震无法被记录到的现象(Enescu *et al.*, 2007; Peng *et al.*, 2012), 导致地震目录不完备, 进而引起ETAS模型拟合参数的不稳定(Utsu *et al.*, 1995; Ogata, 1998). 这一问题可以通过选用高于完备震级的地震目录来解决. 由于观测到汶川地震之后大量小震( $M \leq 4.0$ )缺失, 因此本研究选取的完备震级为4.0(Jia *et al.*, 2014, 2018). 利用最大似然法估计ETAS模型参数, 最终结果为 $\mu=0.754$ ,  $A=0.474$ ,  $c=0.025$ ,  $\alpha=0.839$ ,  $p=1.134$ ,  $D=2.848 \times 10^{-2}$ ,  $q=1.765$ ,  $\gamma=0.46$ .

### 2.3 背景地震活动性变化

得到ETAS模型参数之后, 可以计算地震事件 $j$ 处背景地震活动率与整体地震活动率的比值, 即地震事件 $j$ 的背景概率, 其表达式为

$$\varphi_j = \frac{\mu(x_j, y_j)}{\lambda(t_j, x_j, y_j)}. \quad (6)$$

为了描述背景地震活动率随时间的变化, Zhuang等(2005)定义了累积背景地震概率 $S(t)$ 为

$$S(t) = \sum_{t_i < t} \varphi_i. \quad (7)$$

对于构造运动稳定的地区, 背景地震活动性不随时间变化, 因此 $S(t)$ 曲线应为随时间稳定上升的直线. 当 $S(t)$ 曲线发生突然变化时, 预示着该区域背景地震活动性的突变.

根据活动构造与地震活动性空间分布的特征, 在7次强震周围分别选取6个研究区(图4), 展示其各自的地震活动性随时间的变化规律. 由于2008年与2014年两次于田地震的震中位置较近, 故将这两次地震的发震区域作为同一个研究区来分析地震活动性的变化.

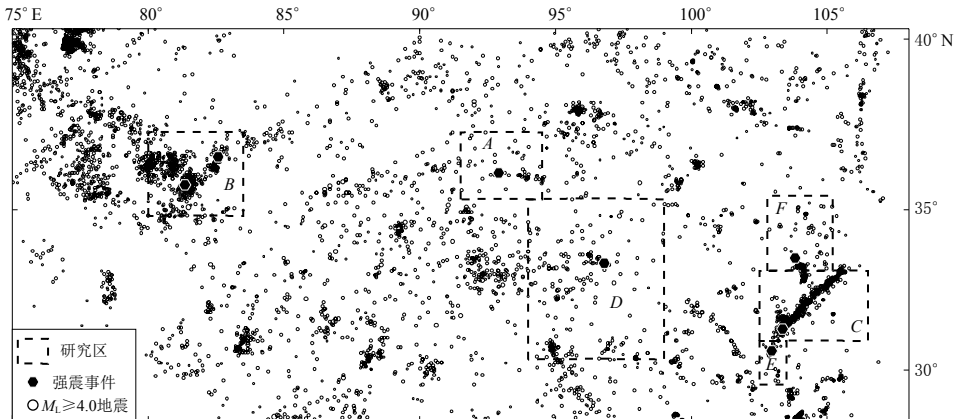


图4 青藏高原北部地震活动性空间分布及各研究区空间范围

Fig. 4 Seismicity of the northern Tibetan Plateau and the spatial region of the studied area

图5给出了各个研究区的总体地震活动性和背景地震概率累积曲线, 可以根据后者随时间的变化推断各地区构造活动的变化, 进而推断该研究区被强震影响的可能性. 从图5a可以看出, 2001年可可西里地震之后, 该地区背景地震活动性显著升高, 表明该地区构造运动活跃; 从图5b可以看出, 于田地区背景地震活动性在每次强震发生时均无明显变化, 表明其它地震对两次于田地震并无明显影响, 两次于田地震之间也无显著触发/延迟关系. 同时也可以看出, 两次于田地震也并未提升该地区的背景地震活动性; 类似的, 汶川地区背景地震



活动性在可可西里地震时并未出现显著变化, 而 2008 年汶川地震显著提高了该地区的背景地震活动性(图 5c); 玉树地区在可可西里地震、2008 年于田地震和汶川地震前后背景地震活动性也均未发生显著变化(图 5d), 指示了玉树地区并未受这 3 次地震事件的影响; 而芦山地区的背景地震活动性也仅仅在 2008 年汶川地震之后有明显升高, 表明汶川地震对芦山地震有触发作用(图 5e); 九寨沟地区在汶川地震后背景地震活动性出现明显降低, 而在其它地震发生时则无显著变化(图 5f), 表明汶川地震对九寨沟地区地震活动性有压制作用。

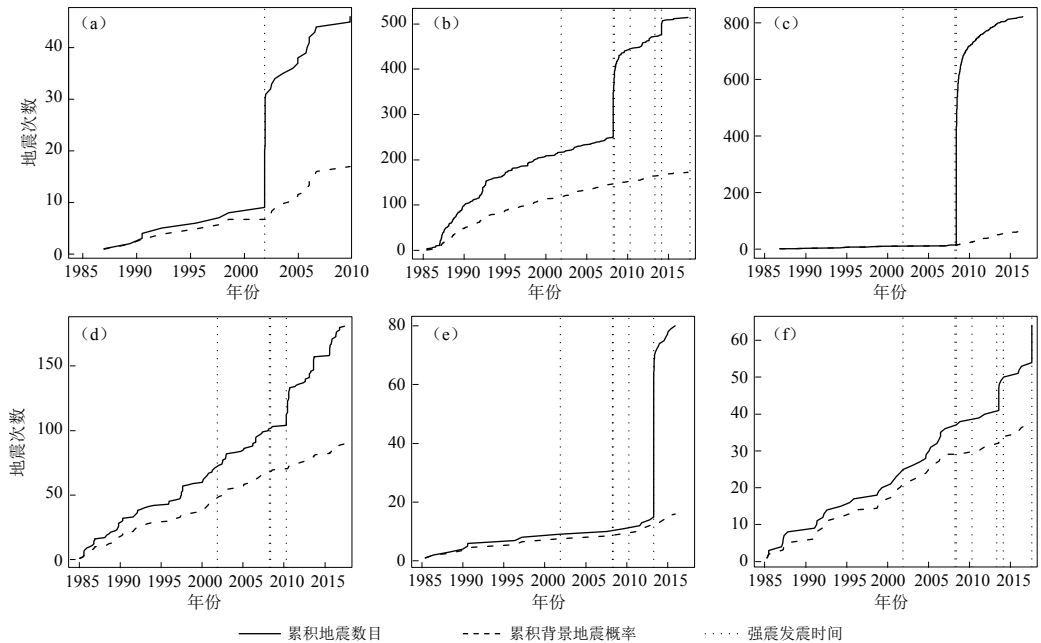


图 5 累积地震次数和背景地震概率

(a) 可可西里; (b) 于田; (c) 汶川; (d) 玉树; (e) 芦山; (f) 九寨沟

Fig. 5 The cumulative total earthquakes and the cumulative background earthquake probabilities

(a) Hoh Xil; (b) Yutian; (c) Wenchuan; (d) Yushu; (e) Lushan; (f) Jiuzhaigou

综合库仑应力改变和地震活动性变化的结果可以看出, 各强震的库仑应力变化结果与其造成的背景地震活动性变化相一致. 在该强震序列中, 汶川地震对芦山地震和九寨沟地震均有显著的库仑应力改变以及背景地震活动性变化, 而其它地震之间均无明显触发/延迟作用以及显著的背景地震活动性变化.

### 3 讨论与结论

强震之间的应力交互是一个复杂的物理过程. 由于计算参数的不确定性, 例如缺乏约束的摩擦系数或滑移分布模型的不一致性等, 往往很难准确地计算出强震引起的库仑应力改变. 此外, 观测到的地震活动性不仅包含来源于构造运动的背景地震事件, 还包含了强震触发引起的触发地震. 利用 ETAS 模型能够有效地区分出背景地震和触发地震, 从而为分析背景地震活动性的时空变化提供基础. 库仑应力改变与地震活动性改变呈正相关, 通过速率-状态摩擦率有机地联系在一起, 为研究强震之间的触发机制提供有力的证据.

总体来说, 本文针对巴颜喀拉块体周缘的强震序列, 从库仑应力改变和地震活动性这两

个角度进行探讨分析, 试图辨别这一备受关注的强震序列是构造运动的产物还是触发作用的结果, 并进一步讨论了巴颜喀拉块体未来的地震危险性. 库仑应力改变和地震活动性分析的结果均表明, 汶川地震对芦山地震的触发作用和对九寨沟地震的延迟作用较为明显, 展现出局部地区也存在强震之间互相影响的特征. 除此之外, 其它地震之间均无明显的触发或延迟作用. 这表明该强震序列的孕震机制主要来源于巴颜喀拉块体不断向东南挤压的构造运动. 因此, 可以推断巴颜喀拉块体目前的构造运动较为活跃, 该区域未来的地震危险性不可忽视. 同时, 强震触发/延迟周围活动断层的破裂也是值得关注的现象.

中国地震局地球物理研究所蒋长胜研究员提供了整理和修正后的地震目录, 德国波茨坦地学研究中心汪荣江研究员提供了 PSGRN/PSCMP 的程序, 日本数理统计研究所庄建仓教授提供了 ETAS 模型和随机除丛法的程序, 两位匿名评审专家为本文的撰写提出了宝贵的意见和建议, 作者在此一并表示衷心的感谢.

### 参 考 文 献

- 陈运泰, 杨智娴, 张勇, 刘超. 2013. 从汶川地震到芦山地震[J]. 中国科学: 地球科学, **43**(6): 1064–1072.
- Chen Y T, Yang Z X, Zhang Y, Liu C. 2013. From 2008 Wenchuan earthquake to 2013 Lushan earthquake[J]. *Scientia Sinica Terrae*, **43**(6): 1064–1072.
- 程佳, 刘杰, 甘卫军, 余怀忠. 2011. 1997年以来巴颜喀拉块体周缘强震之间的黏弹性触发研究[J]. 地球物理学报, **54**(8): 1997–2010.
- Cheng J, Liu J, Gan W J, Yu H Z. 2011. Coulomb stress interaction among strong earthquakes around the Bayan Har block since the Manyi earthquake in 1997[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(8): 1997–2010 (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**(5): 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**(5): 1778–1783 (in Chinese).
- 杜方, 龙锋, 阮祥, 易桂喜, 官悦, 赵敏, 张致伟, 乔慧珍, 汪智, 吴江. 2013. 四川芦山7.0级地震及其与汶川8.0级地震的关系[J]. 地球物理学报, **56**(5): 1772–1783.
- Du F, Long F, Ruan X, Yi G X, Gong Y, Zhao M, Zhang Z W, Qiao H Z, Wang Z, Wu J. 2013. The  $M_{7.0}$  Lushan earthquake and the relationship with the  $M_{8.0}$  Wenchuan earthquake in Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(5): 1772–1783 (in Chinese).
- 蒋长胜, 庄建仓. 2010. 基于时-空 ETAS 模型给出的川滇地区背景地震活动和强震潜在危险区[J]. 地球物理学报, **53**(2): 305–317.
- Jiang C S, Zhuang J C. 2010. Evaluation of background seismicity and potential source zones of strong earthquakes in the Sichuan-Yunan region base on the space-time ETAS model[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **53**(2): 305–317 (in Chinese).
- 单斌, 熊熊, 郑勇, 刁法启. 2009. 2008年5月12日  $M_{7.9}$  汶川地震导致的周边断层应力变化[J]. 中国科学: D辑, **39**(5): 537–545.
- Shan B, Xiong X, Zheng Y, Diao F Q. 2009. Stress changes on major faults caused by  $M_{7.9}$  Wenchuan earthquake, May 12, 2008[J]. *Science in China: Series D*, **52**(5): 593–601.
- 单斌, 郑勇, 刘成利, 谢祖军, 孔军. 2017. 2017年  $M_{7.0}$  级九寨沟地震同震库仑应力变化及其与2008年汶川地震的关系[J]. 中国科学: D辑, **47**(11): 1329–1338.
- Shan B, Zheng Y, Liu C L, Xie Z J, Kong J. 2017. Coseismic Coulomb failure stress changes caused by the 2017  $M_{7.0}$  Jiuzhaigou earthquake, and its relationship with the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Science in China: Series D*, **60**(12): 2181–2189.

- 王辉, 曹建玲, 洪顺英, 徐岳仁, 荆凤. 2016. 2008年和2014年2次新疆于田M7地震之间的黏弹性应力转移[J]. 地震地质, **38**(3): 646–659.
- Wang H, Cao J L, Hong S Y, Xu Y R, Jing F. 2016. Viscoelastic stress transfer between 2008 and 2014 Yutian M7 earthquakes, Xinjiang[J]. *Seismology and Geology*, **38**(3): 646–659 (in Chinese).
- 王为民, 郝金来, 姚振兴. 2013. 2013年4月20日四川芦山地震震源破裂过程反演初步结果[J]. 地球物理学报, **56**(4): 1412–1417.
- Wang W M, Hao J L, Yao Z X. 2013. Preliminary result for rupture process of Apr. 20, 2013, Lushan earthquake, Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(4): 1412–1417 (in Chinese).
- 闻学泽, 杜方, 张培震, 龙锋. 2011. 巴颜喀拉块体北和东边界大地震序列的关联性与2008年汶川地震[J]. 地球物理学报, **54**(3): 706–716.
- Wen X Z, Du F, Zhang P Z, Long F. 2011. Correlation of major earthquake sequences on the northern and eastern boundaries of the Bayan Har block, and its relation to the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(3): 706–716 (in Chinese).
- 徐锡伟, 陈桂华, 王启欣, 陈立春, 任治坤, 许冲, 魏占玉, 鲁人齐, 谭锡斌, 董绍鹏, 石峰. 2017. 九寨沟地震震断层属性及青藏高原东南缘现今应变状态讨论[J]. 地球物理学报, **60**(10): 4018–4026.
- Xu X W, Chen G H, Wang Q X, Chen L C, Ren Z K, Xu C, Wei Z Y, Lu R Q, Tan X B, Dong S P, Shi F. 2017. Discussion on seismogenic structure of Jiuzhaigou earthquake and its implication for current strain state in the southeastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **60**(10): 4018–4026 (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<sub>S</sub>7.1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 (in Chinese).
- 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学: D辑, **33**(增刊1): 12–20.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, Ma J, Gan W J, Min W, Mao F Y, Wang Q. 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China[J]. *Science in China: Series D*, **46**(S2): 13–24.
- 赵立波, 赵连锋, 谢小碧, 曹俊兴, 姚振兴. 2016. 2014年2月12日新疆于田M<sub>w</sub>7.0地震源区静态库仑应力变化和地震活动率[J]. 地球物理学报, **59**(10): 3732–3743.
- Zhao L B, Zhao L F, Xie X B, Cao J X, Yao Z X. 2016. Static Coulomb stress changes and seismicity rate in the source region of the 12 February, 2014 M<sub>w</sub>7.0 Yutian earthquake in Xinjiang, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **59**(10): 3732–3743 (in Chinese).
- Aron A, Hardebeck J L. 2009. Seismicity rate changes along the central California coast due to stress changes from the 2003 M6.5 San Simeon and 2004 M6.0 Parkfield earthquakes[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **99**(4): 2280–2292.
- Beeler N M, Simpson R W, Hickman S H, Lockner D A. 2000. Pore fluid pressure, apparent friction, and Coulomb failure[J]. *J Geophys Res*, **105**(B11): 25533–25542.
- Cocco M, Hainzl S, Catali F, Enescu B, Lombardi A M, Woessner J. 2010. Sensitivity study of forecasted aftershock seismicity based on Coulomb stress calculation and rate- and state-dependent frictional response[J]. *J Geophys Res*, **115**(B5): B05307.
- Dieterich J H. 1979. Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations[J]. *J Geophys Res*, **84**(B5): 2161–2168.
- Dieterich J. 1994. A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering[J]. *J Geophys Res*, **99**(B2): 2601–2618.
- Ekström G, Nettles M, Dziewonski A M. 2012. The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13 017 earthquakes[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **200/201**: 1–9.
- 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**(2): 503–535.
- Enescu B, Mori J, Miyazawa M. 2007. Quantifying early aftershock activity of the 2004 mid Niigata Prefecture earthquake ( $M_w6.6$ ) [J]. *J Geophys Res*, **112**(B4): B04310.
- Freed A M, Lin J. 2001. Delayed triggering of the 1999 Hector Mine earthquake by viscoelastic stress transfer[J]. *Nature*, **411**(6834): 180–183.
- Harris R A. 1998. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard[J]. *J Geophys Res*, **103**(B10): 24347–24358.
- Hearn E H. 2002. Dynamics of Izmit earthquake postseismic deformation and loading of the Duzce earthquake hypocenter[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **92**(1): 172–193.
- Hu J H, Fu L Y, Sun W J, Zhang Y. 2017. A study of the Coulomb stress and seismicity rate changes induced by the 2008  $M_w7.9$  Wenchuan earthquake, SW China[J]. *J Asian Earth Sci*, **135**: 303–319.
- Ishibe T, Satake K, Sakai S, Shimazaki K, Tsuruoka H, Yokota Y, Nakagawa S, Hirata N. 2015. Correlation between Coulomb stress imparted by the 2011 Tohoku-Oki earthquake and seismicity rate change in Kanto, Japan[J]. *Geophys J Int*, **201**(1): 112–134.
- Ji C, Hayes G. 2008. Preliminary result of the May 12, 2008  $M_w7.9$  eastern Sichuan, China earthquake[EB/OL]. [2013–08–01]. <http://www.oalib.com/references/19014475>.
- Jia K, Zhou S Y, Wang R. 2012. Stress interactions within the strong earthquake sequence from 2001 to 2010 in the Bayankala block of eastern Tibet[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **102**(5): 2157–2164.
- Jia K, Zhou S Y, Zhuang J C, Jiang C S. 2014. Possibility of the independence between the 2013 Lushan earthquake and the 2008 Wenchuan earthquake on Longmen shan fault, Sichuan, China[J]. *Seismol Res Lett*, **85**(1): 60–67.
- Jia K, Zhou S Y, Zhuang J C, Jiang C S, Guo Y C, Gao Z H, Gao S S. 2018. Did the 2008  $M_w7.9$  Wenchuan earthquake trigger the occurrence of the 2017  $M_w6.5$  Jiuzhaigou earthquake in Sichuan, China?[J]. *J Geophys Res*, **123**. doi: [10.1002/2017JB015165](https://doi.org/10.1002/2017JB015165).
- Jiang Z S, Wang M, Wang Y Z, Wu Y Q, Che S, Shen Z K, Bürgmann R, Sun J B, Yang Y L, Liao H, Li Q. 2014. GPS constrained coseismic source and slip distribution of the 2013  $M_w6.6$  Lushan, China, earthquake and its tectonic implications[J]. *Geophys Res Lett*, **41**(2): 407–413.
- King G C P, Stein R S, Lin J. 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **84**(3): 935–953.
- King G C P, Cocco M. 2001. Fault interaction by elastic stress changes: New clues from earthquake sequences[J]. *Adv Geophys*, **44**: 1–38.
- Lasserre C, Peltzer G, Crampé F, Klinger Y, Van Der Woerd J, Tapponnier P. 2005. Coseismic deformation of the 2001  $M_w7.8$  Kokoxili earthquake in Tibet, measured by synthetic aperture radar interferometry[J]. *J Geophys Res*, **110**(B12): B12408.
- Li H B, Xue L, Brodsky E E, Mori J J, Fulton P M, Wang H, Kano Y, Yun K, Harris R N, Gong Z, Li C L, Si J L, Sun Z M, Pei J L, Zheng Y, Xu Z Q. 2015a. Long-term temperature records following the  $M_w7.9$  Wenchuan (China) earthquake are consistent with low friction[J]. *Geology*, **43**(2): 163–166.
- Li Y J, Chen L W, Liu S F, Yang S X, Yang X, Zhang G G. 2015b. Coseismic Coulomb stress changes caused by the  $M_w6.9$  Yutian earthquake in 2014 and its correlation to the 2008  $M_w7.2$  Yutian earthquake[J]. *J Asian Earth Sci*, **105**: 468–475.
- Luo G, Liu M. 2010. Stress evolution and fault interactions before and after the 2008 great Wenchuan earthquake[J]. *Tectonophysics*, **491**(1/4): 127–140.
- Nalbant S S, McCloskey J. 2011. Stress evolution before and after the 2008 Wenchuan, China earthquake[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **307**(1/2): 222–232.
- Ogata Y. 1988. Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes[J]. *J Am Stat Assoc*, **83**(401): 9–27.
- Ogata Y. 1998. Space-time point-process models for earthquake occurrences[J]. *Ann Inst Stat Math*, **50**(2): 379–402.
- Ogata Y, Zhuang J C. 2006. Space-time ETAS models and an improved extension[J]. *Tectonophysics*, **413**(1/2): 13–23.
- Parsons T, Ji C, Kirby E. 2008. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan

- basin[J]. *Nature*, **454**(7203): 509–510.
- Peng Y J, Zhou S Y, Zhuang J C, Shi J. 2012. An approach to detect the abnormal seismicity increase in southwestern China triggered co-seismically by 2004 Sumatra  $M_w$ 9.2 earthquake[J]. *Geophys J Int*, **189**(3): 1734–1740.
- Perfettini H, Stein R S, Simpson R, Cocco M. 1999. Stress transfer by the 1988–1989  $M$ 5.3 and 5.4 Lake Elsman foreshocks to the Loma Prieta fault: Unclamping at the site of peak mainshock slip[J]. *J Geophys Res*, **104**(B9): 20169–20182.
- Pollitz F, Vergnolle M, Calais E. 2003. Fault interaction and stress triggering of twentieth century earthquakes in Mongolia[J]. *J Geophys Res*, **108**(B10): 2503.
- 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**(5052): 1687–1690.
- Robinson R. 2005. Stress interactions within the Tangshan, China, earthquake sequence of 1976[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **95**(6): 2501–2505.
- Ruina A. 1983. Slip instability and state variable friction laws[J]. *J Geophys Res*, **88**(B12): 10359–10370.
- Steady S, Gombert J, Cocco M. 2005. Introduction to special section: Stress transfer, earthquake triggering, and time-dependent seismic hazard[J]. *J Geophys Res*, **110**(B5): B05S01.
- 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**(5086): 1328–1332.
- Stein R S. 1999. The role of stress transfer in earthquake occurrence[J]. *Nature*, **402**(6762): 605–609.
- Toda S, Lin J, Meghraoui M, Stein R S. 2008. 12 May 2008  $M$ 7.9 Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems[J]. *Geophys Res Lett*, **35**(17): L17305.
- Toda S, Enescu B. 2011. Rate/state Coulomb stress transfer model for the CSEP Japan seismicity forecast[J]. *Earth Planets Space*, **63**(3): 171–185.
- Utsu T, Ogata Y, Ritsuko S, Matsu'ura. 1995. The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity[J]. *J Phys Earth*, **43**(1): 1–33.
- Wan Y G, Shen Z K. 2010. Static Coulomb stress changes on faults caused by the 2008  $M_w$ 7.9 Wenchuan, China earthquake[J]. *Tectonophysics*, **491**(1/4): 105–118.
- Wang J J, Xu C J, Freymueller J T, Li Z H. 2017. Probing Coulomb stress triggering effects for a  $M_w > 6.0$  earthquake sequence from 1997 to 2014 along the periphery of the Bayan Har block on the Tibetan Plateau[J]. *Tectonophysics*, **694**: 249–267.
- Wang Q, Qiao X J, Lan Q G, Freymueller J, Yang S M, Xu C J, Yang Y L, You X Z, Tan K, Chen G. 2011. Rupture of deep faults in the 2008 Wenchuan earthquake and uplift of the Longmen shan[J]. *Nat Geosci*, **4**(9): 634–640.
- Wang R J, Lorenzo-Martin F, Roth F. 2006. PSGRN/PSCMP: A new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory[J]. *Comput Geosci*, **32**(4): 527–541.
- Wang Y Z, Wang F, Wang M, Shen Z K, Wan Y G. 2014. Coulomb stress change and evolution induced by the 2008 Wenchuan earthquake and its delayed triggering of the 2013  $M_w$ 6.6 Lushan earthquake[J]. *Seismol Res Lett*, **85**(1): 52–59.
- Xiong X, Shan B, Zheng Y, Wang R J. 2010. Stress transfer and its implication for earthquake hazard on the Kunlun fault, Tibet[J]. *Tectonophysics*, **482**(1/4): 216–225.
- Xu X W, Wen X Z, Han Z J, Chen G H, Li C Y, Zheng W J, Zhnag S, Ren Z Q, Xu C, Tan X B, Wei Z Y, Wang M M, Ran J J, He Z T, Liang M J. 2013. Lushan  $M_s$ 7.0 earthquake: A blind reserve-fault event[J]. *Chinese Science Bulletin*, **58**(28/29): 3437–3443.
- Zhang Y, Wang R J, Yun T C, Xu L S, Du F, Jin M P, Tu H W, Dahm T. 2014. Kinematic rupture model and hypocenter relocation of the 2013  $M_w$ 6.6 Lushan earthquake constrained by strong-motion and teleseismic data[J]. *Seismol Res Lett*, **85**(1): 15–22.
- Zhuang J C, Ogata Y, Vere-Jones D. 2002. Stochastic declustering of space-time earthquake occurrences[J]. *J Am Stat Assoc*, **97**(458): 369–380.
- Zhuang J C, Chang C P, Ogata Y, Chen Y I. 2005. A study on the background and clustering seismicity in the Taiwan region by using point process models[J]. *J Geophys Res*, **110**(B5): B05S18.