

刘博研, 史保平, 雷建设. 2013. 汶川地震对芦山地震及周边断层发震概率的影响. 地震学报, 35(5): 642–651.  
Liu Boyan, Shi Baoping, Lei Jianshe. 2013. Effect of Wenchuan earthquake on probabilities of earthquake occurrence of Lushan and surrounding faults. *Acta Seismologica Sinica*, 35(5): 642–651.

## 汶川地震对芦山地震及周边 断层发震概率的影响<sup>\*</sup>

刘博研<sup>1),\*</sup> 史保平<sup>2)</sup> 雷建设<sup>1)</sup>

1) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所地壳动力学重点实验室

2) 中国北京 100049 中国科学院大学地球科学学院

**摘要** 大震后区域静态库仑应力变化常常被用于解释区域地震活动性速率的变化、主震断层外余震的发生以及即将失稳断层的地震发生概率的变化. 2013 年 4 月 20 日芦山  $M_s 7.0$  地震的发生重新引起了对 2008 年 5 月 12 日汶川  $M_s 8.0$  大地震的热议. 利用含(滑移)速率和状态的摩擦定律, 结合汶川大地震前后的地震活动性水平, 定量化计算了汶川地震后雅安地区发震概率的变化, 并着重解释了芦山地震发震的可能根源. 此外, 还对库仑应力明显增加的鲜水河断层和熊坡断层进行了发震概率的定量化计算, 计算结果与中国地震台网中心的地震目录基本符合. 鲜水河断层从汶川地震后至今近 5 年来未发生  $M > 6.0$  地震, 而  $M > 6.0$  的发震概率已约为 60%; 熊坡断层自汶川地震以来尚未发生  $M > 4.0$  地震, 芦山地震后  $M > 4.0$  的发震概率已接近 90%. 所以, 我们认为鲜水河断层附近将成为  $M > 6.0$  地震的重点防范地区, 熊坡地区将来仍旧存在发生中强地震的危险性.

**关键词** 含(滑移)速率和状态的摩擦定律 地震发生概率 库仑应力变化

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2013.05.003 中图分类号: P315.7 文献标志码: A

## Effect of Wenchuan earthquake on probabilities of earthquake occurrence of Lushan and surrounding faults

Liu Boyan<sup>1),\*</sup> Shi Baoping<sup>2)</sup> Lei Jianshe<sup>1)</sup>

1) Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

2) College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Static stress changes have been proposed to explain variations of seismicity rates, off-fault aftershocks and probability changes for the occurrence of impending earthquakes. The occurrence of Lushan  $M_s 7.0$  earthquake re-arouses the hot discussion about the Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake. Based on the rate-and-state dependent frictional law, combined with the seismicity analysis before and after Wenchuan earthquake, we have quantitatively calculated the probabili-

\* 基金项目 中国地震局地壳应力研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项(ZDJ2013-13)资助.

收稿日期 2013-05-09 收到初稿, 2013-08-05 决定采用修改稿.

\* 通讯作者 e-mail: liuboyan\_lby@msn.com

ty of earthquake occurrences in Ya'an area, and explained the probable causes of Lushan  $M_s 7.0$  earthquake. In addition, we have also computed the earthquake probabilities of Xianshuihe and Xiongpo faults, where the Coulomb stress also increased after Wenchuan earthquake. The results are in accordance with the earthquake catalog of the China Earthquake Networks Center. No earthquake of  $M > 6.0$  happened on the Xianshuihe fault since the Wenchuan earthquake five years ago, but the probability of  $M > 6.0$  earthquake is about 60% at present. There is no earthquake of  $M > 4.0$  occurred on Xiongpo fault in the past five years, but the probabilities of earthquake occurrence of  $M > 4.0$  is nearly 90% after the Lushan earthquake. Therefore, we propose that Xianshuihe area will become the key area to monitoring  $M > 6.0$  earthquakes, and destructive earthquakes are still likely to occur in Xiongpo area.

**Key words:** rate- and state-dependent frictional law; probabilities of earthquake occurrence; Coulomb stress change

## 引言

前人对于动态和静态应力变化的研究表明, 同震过程导致了断层的相互作用和地震的触发. 大震后区域静态库仑应力变化常常被用于解释区域地震活动性速率的变化 (Reasen-berg, Simpson, 1992; Simpson, Reasen-berg, 1994; Harris, Simpson, 1998; Toda *et al*, 1998)、主震断层外余震的发生 (Dieterich, 1972, 1994; Rybicki, 1973; Das, Scholz, 1981; Stein *et al*, 1992, 1994; Dieterich, Kilgore, 1996; Gross, Kisslinger, 1997; Gross, Bürgmann, 1998) 以及即将失稳断层的地震发生概率的变化 (Toda *et al*, 1998); 而动态模型则被用于研究由动态应力变化引起的断层间相互作用和地震的触发 (Harris, Day, 1993; Gombert *et al*, 1997, 1998). 1992 年美国 Landers 地震为我们提供了一些小范围内断层相互作用和远距离地震活动性触发的实例. King 等 (1994) 计算得到 Landers 地震对后续 Big Bear  $M_s 6.5$  地震产生的库仑破裂应力增量约为 0.2 MPa, 认为是 Landers 地震加速了 Big Bear 地震的发生. Spudich 等 (1995) 还讨论了关于 Big Bear 余震是由 1992 年 Landers 地震触发的问题, 并指出无论用动态触发还是静态触发, 都很难解释这 3.5 个小时的时间延迟. Gombert 等 (1998) 解释了摩擦失稳模型中近距离 (静态和动态) 触发和远距离 (动态) 触发的主要特征, 并讨论了静态和动态加载是怎样改变了断层的失稳时间. Harris (1998) 则详细地总结了应力触发、应力影区及其对地震危险性的影响.

关于汶川地震应力触发的相关研究受到了国内外专家学者的重视. 汶川地震震中位于龙门山断裂的中段, 震源深度 14 km (中国地震台网中心, 2013a), 破裂沿着北东走滑、西部倾斜的龙门山逆冲断层带向前扩展. 该地震引起地壳深部的岩石破裂长达 300 多千米 (陈运泰, 2008; 王卫民等, 2008). Toda 等 (2008) 利用几条主要活动断裂插值得到了汶川地震产生的应力变化分布. 万永革等 (2009) 和单斌等 (2009) 计算了汶川地震导致的周围断层应力变化, 解朝娣等 (2010) 在其基础上探讨了汶川地震引起的周边断裂应力变化后地震活动性随时间变化的情况. Parsons 等 (2008) 还初步探讨了汶川地震产生的应力变化和对周围断层的影响.

汶川地震发生近 5 年后, 2013 年 4 月 20 日 8 点 2 分 46 秒, 我国四川省雅安市芦山县

(30.3°N, 103.0°E)发生了  $M_s 7.0$  地震,震区发生大面积的滑坡和建筑物损毁.地震定位和震源机制结果显示该地震是发生在龙门山断裂带上的又一次逆冲型地震,也是汶川地震后发生在龙门山断裂带上最强的一次地震.芦山  $M_s 7.0$  地震发生在龙门山断裂带的南端,在汶川地震发生时这一地段没有发生破裂滑动.“芦山地震是否为汶川地震的余震”在学界引起了一定的争论.陈运泰等(2013)认为芦山地震是汶川地震的最强余震;王卫民等(2013)指出“芦山地震在宏观上可视为汶川地震一次‘迟到’的强余震”;而刘杰等(2013)认为两次地震的余震区存在约 45 km 的间隔,芦山  $M_s 7.0$  地震不是汶川地震的余震.

然而,无论持有哪种观点,各位专家都不否认芦山  $M_s 7.0$  与汶川  $M_s 8.0$  地震有密切的联系.汶川地震发生后,雅安芦山地区的库仑应力增加的事实是肯定的(Parsons *et al.*, 2008).那么汶川地震究竟是怎样触发芦山地震?是否还会有类似芦山地震的强余震在周围地区发生?这才是研究汶川地震后区域库仑应力变化的最主要目的和最核心的问题.

本文利用含(滑移)速率和状态的摩擦定律(Dieterich, 1994),结合汶川地震前后的地震活动性水平,深入阐述了芦山  $M_s 7.0$  地震的静态应力触发过程,从地震发生概率的变化上理解芦山地震的发震根源,并计算周边的鲜水河断层和熊坡断层的发展概率变化,从而为区域地震活动性以及危险性评价提供重要的参考.

## 1 含(滑移)速率和状态的摩擦定律

含(滑移)速率和状态的摩擦本构关系为我们提供了一个对断层属性进行复杂的定量实验观测的基本框架(Dieterich, 1979, 1981, 1994; Ruina, 1983).最简单地表述含(滑移)速率和状态的断层应力是由 Ruina(1983)基于 Dieterich(1994)的理论提出的.如果将其推广为多态变量(Rice, Gu, 1983),则可以写作

$$\tau = \sigma_n [\mu_0 + A \ln(\dot{\delta}/\dot{\delta}^*) + B_1 \ln(\theta_1/\theta_1^*) + B_2 \ln(\theta_2/\theta_2^*) + \dots] \quad (1)$$

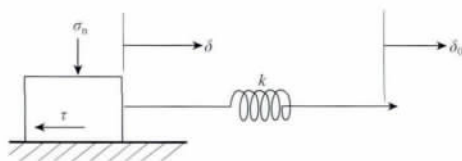


图1 弹簧-滑块模型示意图,由此得到

的滑块运动方程为:  $\tau = -k(\delta - \delta_0)$ .

其中  $\tau$  为剪切摩擦应力,  $k$  为弹簧的有效弹性系数,  $\delta$  和  $\delta_0$  分别为滑动位移和初始滑动位移

Fig. 1 Spring-slide block model. The equation of motion for the slider is  $\tau = -k(\delta - \delta_0)$ , where  $k$ ,  $\delta$ ,  $\delta_0$ ,  $\tau$  are the spring constant, the displacement of the block, the displacement of the right-hand end of the spring, and the shear friction, respectively

式中,  $\tau$  和  $\sigma_n$  分别为剪切应力和正应力,  $\dot{\delta}$  为滑移速率,  $\theta_i$  为状态变量. 参数  $\mu_0$ ,  $A$  和  $B_i$  为通过实验得到的系数. 带有星号的项为标准化常量.  $A \ln(\dot{\delta}/\dot{\delta}^*)$  表征了类似于小形变的不规则体或障碍物产生于滑动面的粘性阻力.  $B_i \ln(\theta_i/\theta_i^*)$  表征了与接触时间成正比的两表面间的化学附着状态(Kanamori, Brodsky, 2004). 假设断层的摩擦过程由一维弹簧-滑块模型描述(图1),则剪切摩擦应力  $\tau = -k(\delta - \delta_0)$ . 其中  $k$  为弹簧的有效弹性系数,  $\delta$  和  $\delta_0$  分别为滑动位移和初始滑动位移. 若剪应力变化率  $\dot{\tau}$  为常数且不等于 0, 则其加载过程由  $\tau(t) = \tau_0 + \dot{\tau}t$  描述, 那么可得到滑动速率为(Kanamori, Brodsky, 2004)

$$\dot{\delta} = \left\{ \left( \frac{1}{\dot{\delta}_0} + \frac{H\sigma_n}{\dot{\tau}} \right) \exp\left(-\frac{\dot{\tau}t}{A\sigma_n}\right) - \frac{H\sigma_n}{\dot{\tau}} \right\}^{-1} \quad (2)$$

式中,  $\dot{\delta}_0$  为初始滑动速率,  $H = -k/\sigma_n + \sum_{i=1}^n (B_i/D_{c_i})$  为模型参数 (Dieterich, 1994). 当地震过程中, 瞬态滑移速率从每秒几厘米变化到每秒几米, 或者长期滑动速率由每年几个毫米变到几个厘米时, 可以看作瞬态滑移速率无穷大 ( $1/\dot{\delta}_i = 0$ ). 此时断层突然失稳, 由此可得到失稳时间为

$$t_f = \frac{A\sigma_n}{\dot{\tau}} \ln \left( \frac{\dot{\tau}}{H\sigma_n\dot{\delta}_0} + 1 \right) \quad (3)$$

进一步, 假设第  $n$  次子事件的失稳时间  $t_f = n\Delta t$ , 其中  $\Delta t$  是第  $n-1$  次事件到第  $n$  次事件的时间间隔, 那么可以得到第  $n$  次子事件的滑动速率

$$\dot{\delta}_{n0} = \frac{\dot{\tau}}{H\sigma} \left\{ \exp \left( \frac{\dot{\tau}n\Delta t}{A\sigma_n} \right) - 1 \right\}^{-1} \quad (4)$$

在初始时刻  $t_0$ , 由于主震使得周围断层突然有一个  $\Delta\tau$  的应力加载, 那么基于弹簧-滑块模型 (图 1), 有  $k\delta_0 = \tau_0 (t < t_0)$  和  $k\delta_0 = \tau_0 + \Delta\tau (t > t_0)$ . 为保证在  $t = t_0$  时滑动位移和滑动速率是连续的, 有  $\delta(t = t_0 - \epsilon) = \delta(t = t_0 + \epsilon)$  和  $\dot{\delta}(t = t_0 + \epsilon) = \dot{\delta}(t = t_0 - \epsilon) \exp[\Delta\tau/(A\sigma_n)]$ , 即滑动速率增加了  $\exp[\Delta\tau/(A\sigma_n)]$  倍. 此时失稳时间变为

$$t_f(n) = \frac{A\sigma_n}{\dot{\tau}} \ln \left\{ \frac{\dot{\tau}}{H\sigma_n\dot{\delta}_{n0} \exp[\Delta\tau/(A\sigma_n)]} + 1 \right\} \quad (5)$$

将式 (4) 代入式 (5), 可得地震 (事件) 次数

$$n = \frac{A\sigma_n}{\dot{\tau}\Delta t} \ln \left\{ 1 + \exp \left( \frac{\Delta\tau}{A\sigma_n} \right) \left[ \exp \left( \frac{\dot{\tau}t_f(n)}{A\sigma_n} \right) - 1 \right] \right\} \quad (6)$$

此时,  $n$  和  $t_f(n)$  都是离散变量. 假设很多类型的地震是通过背景场地震活动性的扰动所引起, 而这个扰动又来自之前的地震造成的应力场状态的改变. 将瞬态地震活动性速率  $R$  定义为  $R = dn/dt_f(n)$ , 并把  $n$  和  $t_f(n)$  都看做连续函数. 当参考剪切应力变化率  $\dot{\tau}_r$  与实际剪切应力变化率  $\dot{\tau}$  相等时, 有

$$\frac{R}{r} = \left\{ \left[ \exp \left( -\frac{\Delta\tau}{A\sigma_n} \right) - 1 \right] \exp \left( -\frac{t}{t_a} \right) + 1 \right\}^{-1} \quad (7)$$

式中,  $r$  是在参考场或背景场下区域内剪切应力变化率  $\dot{\tau}_r$  下的常数稳态背景地震活动性;  $t_a$  为余震的持续时间, 即余震地震活动性恢复到背景场的特征时间, 与剪应力的加载速率相关. 根据 Dieterich (1994) 的理论, 余震持续时间可定义为  $t_a = A\sigma_n/\dot{\tau}$ . 当  $t < t_a$  时, 式 (7) 符合大森余震衰减定律; 而当  $t > t_a$  时, 地震活动性恢复到背景场  $r$  的水平. 需要说明的是, 式 (7) 中,  $R$  和  $r$  都为震级  $M$  的函数.

由于地震活动性与区域应力场有关, 那么区域应力场的改变必将导致相应的地震危险性概率的变化. 假定地震序列在时间  $t$  内, 对震级  $M$  以上的发震概率服从泊松模型 (Dieterich, Kilgore, 1996)

$$P_{\geq M} = 1 - \exp \left( - \int_0^t R_{\geq M} dt \right) \quad (8)$$

那么, 利用式 (8) 的概率分布, 结合式 (7) 可以计算在应力  $\Delta\tau$  的扰动下造成大于  $M$  级地震的发震概率.

## 2 发震概率计算

截至 2013 年 2 月 28 日, 汶川地震已有  $M > 5.0$  的余震 128 次,  $M > 4.0$  的余震 841

次,  $M > 2.0$  的余震 2174 次(中国地震台网中心, 2013b), 而且余震还在持续. 图 2 显示了汶川地震前(1970-01-01—2008-05-11)后(2008-05-12—2010-05-11)的地震分布及  $M > 2.0$  地震的年发生率. 震后汶川周边地区的应力状态发生了明显地变化(Parsons *et al*, 2008; Toda *et al*, 2008; 万永革等, 2009; 单斌等, 2009; 解朝娣等, 2010), 从而导致了地震活动性分布的显著不同.

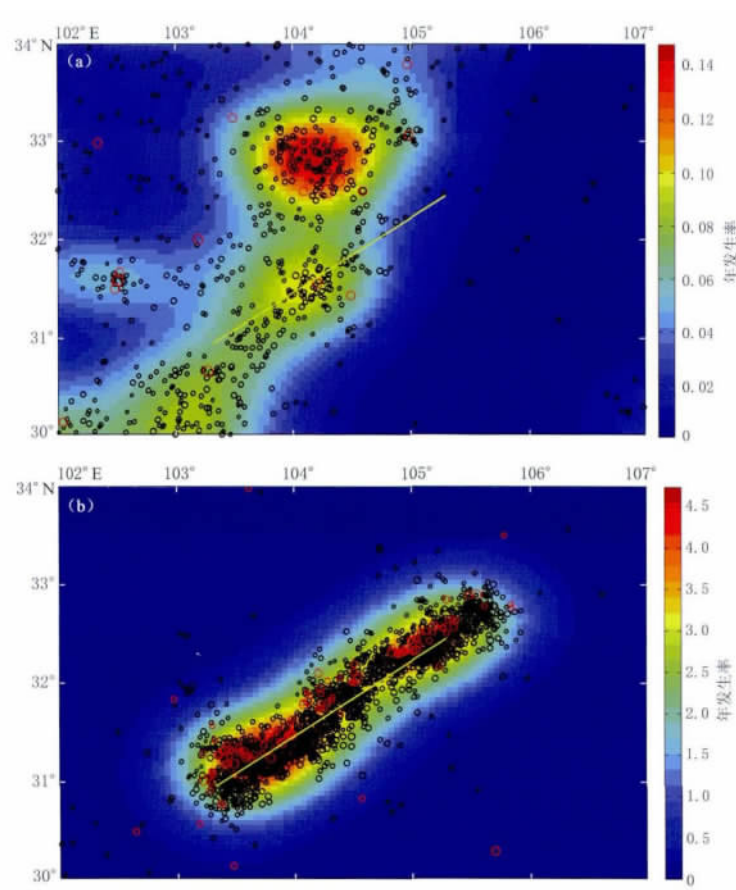


图 2 汶川地震前(a)、后(b)的  $M > 2.0$  地震分布及地震年发生率  
网格大小为  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ , 右侧色标显示的年发生率为网格内  $M > 2.0$  的年发生率. 红色圆圈代表  $M > 5.0$  地震, 黑色圆圈代表  $2.0 < M < 5.0$  地震, 灰色实线代表断层位置

Fig. 2 Distribution of  $M > 2.0$  earthquakes and seismicity rate of Longmenshan fault before (a) and after (b) Wenchuan earthquake

Red and black circles represent  $M > 5.0$  and  $2.0 < M < 5.0$  earthquakes, respectively.

The seismicity on colorbar on the right is in the grid of  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ .

The gray line is the fault

假设汶川地区的余震持续时间为 85 年(申文豪等, 2013), 大于设定震级  $M$  的地震在该地区的年发生率为 0.01 次,  $A = 0.01$ ,  $\sigma_n = 10$  MPa (Dieterich, Kilgore, 1996). 在不同应力扰动的情况下, 根据式(6)和(7)计算所得发生大于设定震级  $M$  的概率如图 3 所示. 从图 3 可见, 大应力扰动可导致地震发生率的快速上升, 因此在受到大应力扰动的地区地震发生的时间会大幅提前.

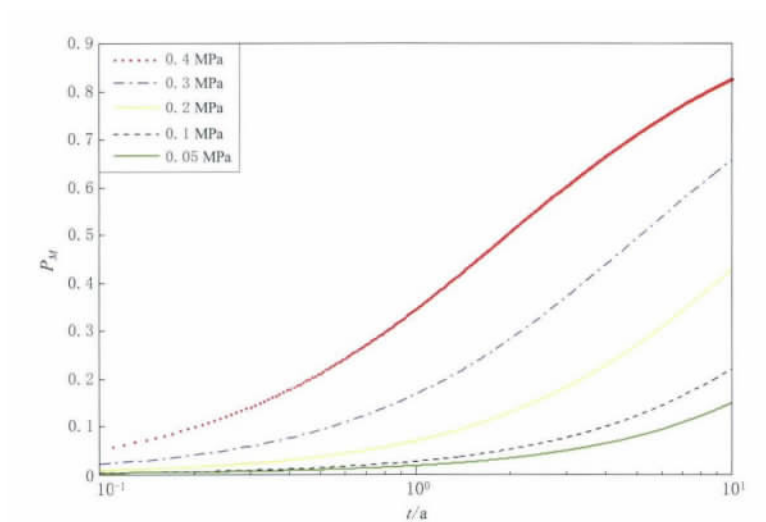
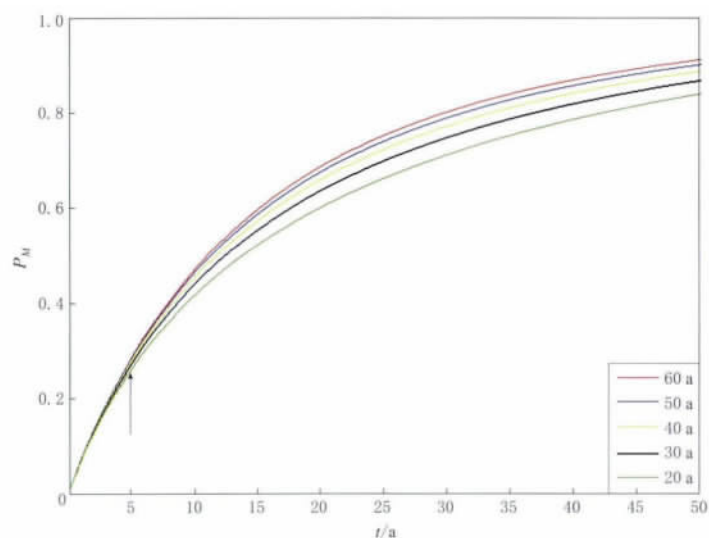
图3 不同应力扰动下发生大于设定震级  $M$  的概率变化

Fig. 3 The probability of earthquake occurrence of magnitude  $>M$  on different shear stress disturbance

对于雅安地区( $30.0^{\circ}$ — $30.7^{\circ}$ N,  $102.5^{\circ}$ — $103.5^{\circ}$ E), 汶川地震后库仑应力增加了 0.1 MPa (Parsons *et al*, 2008). 从 1970 年 1 月 1 日—2008 年 1 月 1 日, 共发生了 23 次  $M>4.0$  地震, 其中仅发生一次  $M>6.0$  的地震. 那么根据背景场地震活动性速率公式  $r_{\geq M} = N/\Delta t$  (其中  $N$  为发生大于震级  $M$  的地震次数,  $\Delta t$  为时间间隔)可以求出  $r_{\geq 6.0} = 0.0263$  次/年. 依然假设  $A=0.01$ ,  $\sigma_n=10$  MPa (Dieterich, Kilgore, 1996), 那么在汶川地震后雅安地区的地震活动性概率变化如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 发震断层的余震持续时间对于发震

图4 雅安地区发生  $M>6.0$  地震的概率变化

不同颜色曲线代表了不同的余震持续时间, 黑色箭头所指位置为现今雅安地区对应的发震概率

Fig. 4 The probability of earthquake occurrence of  $M>6.0$  in Ya'an area  
Different colors give difference aftershock durations, the black arrow shows  
the earthquake probability in Ya'an area now

概率的影响并不大,而受到扰动之后的几年内发震概率的增幅较快.芦山地震发生在汶川地震后近 5 年,而由于受汶川地震的影响,雅安地区此时发生  $M6.0$  地震的概率已经增加到 25%—30%.

事实上,汶川地震之后不仅雅安地区的库仑应力增加,其周边的鲜水河断层和熊坡断层也存在库仑应力的明显增加(Parsons *et al.*, 2008),这些断层仍然是今后需要防范的重点地区.图 5 显示了汶川地震后鲜水河断层不同震级的发震概率变化.根据中国地震台网中心给出的地震目录,从汶川地震后到 2013 年 2 月 28 日,鲜水河断层已发生  $M>4.0$  地震 10 次,其中 2010 年 4 月 27 日发生一次  $M5.0$  地震,此时  $M>5.0$  的发震概率已超过 80%,而至今未发生  $M>6.0$  的地震,而  $M>6.0$  的发震概率已约为 60%,所以鲜水河断层附近将成为  $M>6.0$  地震的重点防范地区.鲜水河断层未来发生  $M>6.0$  地震概率由表 1 给出.

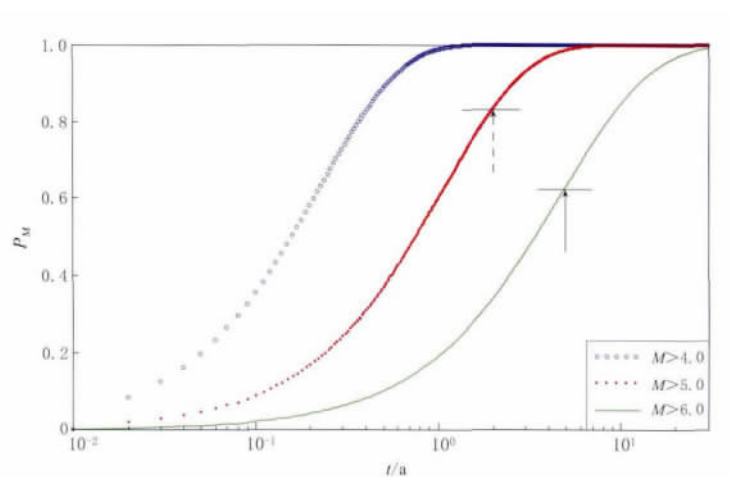


图 5 汶川地震后鲜水河断层发生地震的概率变化

实箭头所指位置为现今鲜水河断层对应的  $M>6.0$  的发震概率,虚箭头所指的位置为 2010 年 4 月 27 日发生的  $M5.0$  地震对应的发震概率

Fig. 5 The probability of earthquake occurrence of Xianshuihe fault after Wenchuan earthquake  
The black arrow shows the probabilities of earthquake occurrence of  $M>6.0$  on Xianshuihe fault at present, the dashed arrow points out the probabilities of earthquake occurrence when the  $M5.0$  earthquake happened on April 27, 2010

表 1 鲜水河断层未来发生  $M>6.0$  的地震概率

Table 1 The probabilities of earthquake occurrence of  $M>6.0$  on Xianshuihe fault

超越震级	$M>6.0$ 地震概率				
	5 a(现今)	10 a	15 a	20 a	30 a
6.0	62%	84%	93%	96%	99%

图 6 显示了汶川地震后熊坡断层不同震级的发震概率变化.根据中国地震台网给出的地震目录,从汶川地震后到 2013 年 2 月 28 日,尚未发生  $M>4.0$  地震,此时  $M>4.0$  的发震概率已接近 90%,虽然  $M>5.0$  的发震概率仅为 26%,但是该地区将来仍旧有发生中强地震的危险性.熊坡断层未来发生  $M>4.0$  地震概率由表 2 给出.



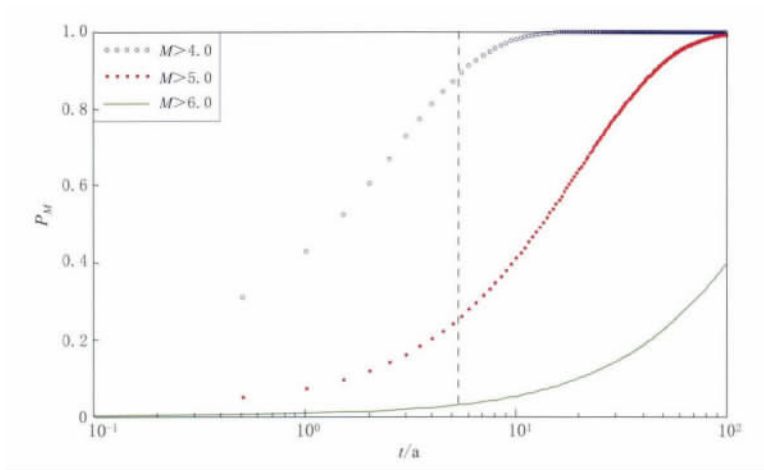


图6 汶川地震后熊坡断层发生地震的概率变化  
黑色虚线所指的位置为现今对应的发震概率

Fig. 6 The probabilities of earthquake occurrence of Xiongpo fault after Wenchuan earthquake  
The dashed line shows the probabilities of earthquake occurrence at present

表2 熊坡断层未来发生  $M>4.0$  地震概率

Table 2 The probabilities of earthquake occurrence of  $M>4.0$  on Xiongpo fault

超越震级	$M>4.0$ 地震概率				
	5 a(现今)	10 a	15 a	20 a	30 a
4.0	89%	98%	100%	100%	100%
5.0	26%	42%	55%	65%	79%
6.0	3%	5%	8%	10%	14%

3 讨论与结论

芦山  $M_s7.0$  地震的发生重新引起了对汶川地震的热议. 本文利用含(滑移)速率和状态的摩擦定律(Dieterich, 1994), 结合汶川地震前后的地震活动性水平, 从地震发生概率的变化上解释了芦山地震的发震根源; 计算得到了芦山地震发生时, 雅安地区发生  $M>6.0$  地震的概率已经增加了 25%—30%. 此外, 本文对于库仑应力增加的鲜水河断层和熊坡断层也进行了发震概率的计算. 根据中国地震台网中心给出的地震目录, 从  $M>4.0$  地震的发生情况来看, 计算结果与实际情况基本符合. 鲜水河断层从汶川地震后至今未发生  $M>6.0$  地震, 而  $M>6.0$  的发震概率已约为 60%; 熊坡断层自汶川地震以来尚未发生  $M>4.0$  地震, 此时  $M>4.0$  的发震概率已接近 90%. 所以, 我们认为鲜水河断层附近将成为  $M>6.0$  地震的重点防范地区, 熊坡地区将来仍旧有发生中强地震的危险性.

然而, 在计算过程中存在很多不确定性. 首先, 参数的选取可能带来一定误差, 比如  $A$  取 0.01,  $\sigma_n$  取 10 MPa (Dieterich, Kilgore, 1996)等, 与实际不完全一致; 其次, 库仑应力状态的计算过程依赖模型的选取, 不同研究者可能给出不同的应力变化值(Parsons *et al*, 2008; Toda *et al*, 2008; 单斌等, 2009; 万永革等, 2009; 解朝娣等, 2010). 本文仅选用 Parsons 等(2008)结果进行计算也会带来一定的误差; 最后, 地震目录特别是小震目录



的缺失使得对背景场地震活动性的估计不够准确。所以,应用条件概率模型会更具可靠性。但是由于缺乏发震断层的滑移历史、发震的准周期及上次地震至今的时间,条件概率模型在目前的研究中,尤其对我国西南地区来讲,仍然难以应用。

## 参 考 文 献

- 陈运泰. 2008. 汶川特大地震的震级和断层长度[J]. 科技导报, **26**(10): 26–27.
- 陈运泰, 杨智娴, 张勇, 刘超. 2013. 浅谈芦山地震[J]. 地震学报, **35**(3): 285–295.
- 刘杰, 易桂喜, 张志伟, 官致君, 阮祥, 龙锋, 杜方. 2013. 2013 年 4 月 20 日四川芦山  $M7.0$  级地震介绍[J]. 地球物理学报, **56**(4): 1404–1407.
- 单斌, 熊熊, 郑勇, 刁法启. 2009. 2008 年 5 月 12 日  $M_{w7.9}$  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.
- 申文豪, 刘博研, 史保平. 2013.  $M_{w7.9}$  汶川地震余震序列触发机制研究[J]. 地震学报, **35**(4): 461–476.
- 万永革, 沈正康, 盛书中, 徐晓枫. 2009. 2008 年汶川大地震对周围断层的影响[J]. 地震学报, **31**(2): 128–139.
- 王卫民, 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.
- 王卫民, 赵连锋, 李娟, 姚振兴. 2008. 四川汶川 8.0 级地震震源过程[J]. 地球物理学报, **51**(5): 1403–1410.
- 解朝娣, 朱元清, Lei Xinglin, 于海英, 虎雄林. 2010.  $M_{s8.0}$  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[J]. 中国科学: D 辑, **40**(6): 688–698.
- 中国地震台网中心. 2013a. 中国地震台网(CSN)地震目录[EB/OL]. [2013-05-05]. [http://www.csndmc.ac.cn/new-web/cgi-bin/csndmc/csn\\_catalog\\_p003.pl?mode=catalog&ot=20080512\\_0627595](http://www.csndmc.ac.cn/new-web/cgi-bin/csndmc/csn_catalog_p003.pl?mode=catalog&ot=20080512_0627595).
- 中国地震台网中心. 2013b. 中国地震台网(CSN)地震目录[EB/OL]. [2013-05-05]. [http://www.csndmc.ac.cn/new-web/data/csn\\_catalog\\_p002.jsp](http://www.csndmc.ac.cn/new-web/data/csn_catalog_p002.jsp).
- Das S, Scholz C H. 1981. Theory of time dependent rupture in the Earth[J]. *J Geophys Res*, **86**(B7): 6039–6051.
- Dieterich J H. 1972. Time dependence friction as a possible mechanism for aftershocks[J]. *J Geophys Res*, **77**(20): 3771–3781.
- Dieterich J H. 1979. Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations[J]. *J Geophys Res*, **84**(B5): 2161–2168.
- Dieterich J H. 1981. Constitutive properties of faults with simulated gouge[C]//*Mechanical Behavior of Crustal Rocks: The Handin Volume, Geophysical Monograph Series*. Washington D C: AGU: 103–120.
- Dieterich J H. 1994. A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering[J]. *J Geophys Res*, **99**(B2): 2601–2618.
- Dieterich J H, Kilgore B D. 1996. Implications of fault constitutive properties for earthquake prediction[J]. *P Natl Acad Sci USA*, **93**(9): 3787–3794.
- Gomberg J, Beeler N M, Blampied L M, Bodin P. 1998. Earthquake triggering by transient and static deformations[J]. *J Geophys Res*, **103**(B10): 24347–24358.
- Gomberg J, Blampied L M, Beeler N M. 1997. Transient triggering of near and distant earthquakes[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **87**(2): 294–309.
- Gross S, Bürgmann R. 1998. Rate and state of background stress estimated from the aftershocks of the 1989 Loma Prieta, California, earthquake[J]. *J Geophys Res*, **103**(B3): 4915–4927.
- Gross S, Kisslinger C. 1997. Estimating tectonic stress rate and state with Landers aftershocks[J]. *J Geophys Res*, **102**(B4): 7603–7612.
- 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.
- Harris R A, Day S M. 1993. Dynamics of fault interaction: Parallel strike-slip fault[J]. *J Geophys Res*, **98**(B3): 4461–4472.

- Harris R A, Simpson R. 1998. Suppression of large earthquakes by stress shadows: A comparison of Coulomb and rate-and-state failure[J]. *J Geophys Res*, **103**(B10): 24439–24451.
- Kanamori H, Brodsky E E. 2004. The physics of earthquakes[J]. *Rep Prog Phys*, **67**(8): 1429–1496.
- 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.
- Parsons T, Ji C, Kirby E. 2008. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan basin[J]. *Nature*, **454**: 509–510.
- 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.
- Rice J R, Gu J C. 1983. Earthquake aftereffects and triggered seismic phenomena[J]. *Pure Appl Geophys*, **121**(2): 187–219.
- Ruina A L. 1983. Slip instability and state variable friction laws[J]. *J Geophys Res*, **88**(B12): 10359–10370.
- Rybicki K. 1973. Analysis of aftershocks on the bases of dislocation theory[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **7**(4): 409–422.
- Simpson R W, Reasenber P A. 1994. Earthquake-induced static stress changes on central California faults[J]. *US Geol Surv Prof Pap*, **1550-F**: 55–89.
- Spudich P, Steck L K, Hellweg M, Fletcher J B, Baker L M. 1995. Transient stresses at Parkfield, California, produced by the  $M_{7.4}$  Landers earthquake of June 28, 1992: Observations from UPSAR dense seismograph array[J]. *J Geophys Res*, **100**(B1): 675–690.
- 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, King G C P, Lin J. 1994. Stress triggering of the 1994  $M=6.7$  Northridge, California, earthquake by its predecessors[J]. *Science*, **265**(5177): 1432–1435.
- 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, Stein R S, Reasenber P A, Dieterich J H, Yoshida A. 1998. Stress transferred by the 1995  $M_w=6.9$  Kobe, Japan, shock; Effect on aftershocks and future earthquakes probabilities[J]. *J Geophys Res*, **103**(B10): 24543–24565.

## 作者简介



缪 森 中国地震局地壳应力研究所研究实习员, 中国地震局地球物理研究所在职博士研究生。2009 年中国海洋大学勘查技术与工程专业毕业, 获学士学位; 2012 年中国地震局地壳应力研究所固体地球物理学专业毕业, 获硕士学位。现主要从事地球动力学数值模拟方面的研究。



赵 静 中国地震台网中心研究实习员。2012 年中国地震局地震预测研究所固体地球物理专业毕业, 获硕士学位。硕士期间主要从事块体应变与断层滑动和闭锁的研究。现主要从事 GPS 数据处理与孕震信息提取、地震前兆信息分析等方面的研究。中国地震学会会员。



刘博研 中国地震局地壳应力研究所助理研究员。2006 年中国地质大学(北京)固体地球物理专业毕业, 获学士学位; 2009 年中国科学院研究生院(现为中国科学院大学)固体地球物理学专业毕业, 获硕士学位; 2012 年中国科学院研究生院固体地球物理专业毕业, 获博士学位。曾从事强地面运动模拟、震源物理等方面的研究, 现从事断层动力学、地震活动性等方面的研究。中国地球物理学会终身会员, 美国地球物理学会(AGU)会员。



陈 石 中国地震局地球物理研究所副研究员。2009 年中国科学院研究生院(现为中国科学院大学)固体地球物理学专业毕业, 获博士学位。主要从事重磁位场数据处理及方法、地球动力学、数值建模和并行计算及可视化、地球重力场变化与地震活动性关系等方面研究。中国地球物理学会、中国地震学会终身会员。



牛安福 中国地震台网中心研究员。1986 年山东师范大学应用数学专业毕业, 获学士学位; 1989 年武汉地震研究所构造形变与地球动力学专业毕业, 获硕士学位; 2000 年中国地震局地球物理研究所固体地球物理专业毕业, 获博士学位。主要从事地形变观测、前兆机理及地震预测方面的研究。中国地震学会、欧洲地球物理学会及美国地震学会会员。



石 磊 中国地震局地球物理研究所助理研究员。2012 年中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院地球探测与信息技术专业毕业, 获博士学位。主要从事重力资料处理与反演、解释方法及其应用方面的研究。美国地球物理学会(AGU)和勘探地球物理学家学会(SEG)会员。