

2008年汶川地震前地震的固体潮触发检验

李艳娥, 陈学忠*

中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

* 联系人, E-mail: cxz8675@163.com

2018-03-20 收稿, 2018-06-11 修回, 2018-06-12 接受, 2018-07-05 网络版发表

摘要 基于初始参考地球模型(preliminary reference earth model, PREM), 使用全球矩心矩张量(global centroid-moment-tensor, GCMT)目录提供的汶川地震发震断层面参数, 计算了固体潮在其震源处的断层面上引起的附加正应力和剪切应力, 分析了汶川地震发生时固体潮应力所处的变化状态. 利用舒斯特(Schuster)统计检验方法, 对汶川地震发生前震中附近地区发生的中小地震与固体潮日潮引起的应力之间是否存在显著相关性进行了统计检验分析, 得到了表征相关性显著程度的统计量 P 值的时间变化与空间分布. 结果表明: 汶川地震发生时, 固体潮日潮引起的应力是有利于断层面错动的; 在汶川地震前 P 值出现低值($<5\%$); 汶川地震前龙门山断裂带地区, P 值的空间分布显示, 低 P 值集中分布在汶川地震破裂区南段, 位于震中东北部. 根据上述结果, 汶川地震前日潮与震中附近地区发生的地震之间存在显著相关性, 这些被触发的地震分布在汶川地震破裂区南段, 位于震中东北部. 这表明, 在汶川地震发生前震中附近地区存在中小地震被固体潮触发的现象.

关键词 汶川地震, 固体潮, 触发, 舒斯特检验

基于目前对地震成因的认识, 地震是地壳介质在构造动力的作用下, 当应力累积到破裂极限时发生快速而强烈的破裂或者已有断层重新错动所致. 固体潮在地球内部产生的附加应力可使发震断层面的应力产生波动变化, 当这种变化有利于发震断层面错动时, 就可能对地震产生触发作用. 固体潮对地震的触发作用一直是被关注的问题之一. 研究内容涉及固体潮不同应力分量对不同地区、不同构造条件下强震的触发, 涉及对地震序列的触发以及强震发生前震中附近地区中小地震的固体潮触发现象. 潮汐应力对倾滑型地震或斜滑型大地震的触发作用明显^[1-4], 潮汐流体静应力与地震的发震时刻没有明显关系, 但潮汐最大剪应力对地震有一定的触发作用, 沿断层错动矢量的潮汐剪应力对地震的触发作用更明显, 斜滑型地震与潮汐最大剪应力的位相之

间具有极好的相关性^[5]. 在中国大陆地区, 一些强震序列受到潮汐力调制触发的特征明显^[6-8], 地震活跃期内的 $M_s \geq 7.0$ 级强震受潮汐库仑破裂应力的触发更为显著^[9], 固体潮汐应力对地震的触发与地区和发震断层类型有关^[10,11], 潮汐库仑破裂应力的触发作用与纬度有关^[12,13]. 1975年辽宁海城 $M_s 7.3$ 级地震的前震序列具有固体潮触发特征^[14], 2004年印尼苏门答腊 $M_w 9.0$ 地震以及2011年日本本州 $M_w 9.1$ 地震前在震中附近地区发生的地震活动存在被固体潮触发的现象^[15-17]. 另一方面, 也有一些相反的研究结果报道. 美国加州的圣安德列斯和卡拉维拉斯断层附近以及南加州发生的小地震与潮汐应力之间的关系不明显^[18-21]. 发生在洋中脊附近的非正断层型地震被潮汐触发的现象也不明显^[4]. 在全球范围内, 地震发生不具显著的周期性^[22], $M \geq 5.0$ 浅源倾滑地震与潮汐

引用格式: 李艳娥, 陈学忠. 2008年汶川地震前地震的固体潮触发检验. 科学通报, 2018, 63: 1962-1970

Li Y E, Chen X Z. Earth tidal stress as an earthquake trigger prior to the Wenchuan earthquake, Sichuan, China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 1962-1970, doi: 10.1360/N972018-00259

剪切应力的相关性不显著,潮汐在震源断层面上引起的剪切应力或者正应力对浅源走滑地震或深源地震的触发也不甚明显^[23].甚至有研究表明火山地区的地震活动的潮汐触发现象也不明显^[24].

2008年5月12日在四川汶川发生 $M_s 8.0$ 级地震,震中位于(31°N, 103.4°E),本文中称汶川地震,下面将基于PREM地球模型^[25],计算固体潮在汶川地震震源处引起的附加正应力和剪切应力,分析固体潮对汶川地震前震中及附近地区发生的中小地震的触发作用.

1 资料和研究区域

图1给出了本文选取的研究区域和在2000年1月~2008年4月期间发生的 $M_L \geq 2.0$ 地震空间分布.由G-R关系得到的研究区域内地震的完整性震级可以达到 $M_L 1.5$,虑到震级测定误差,本文选用 $M_L \geq 2.0$ 级的地震,因为它们应是被完全记录 and 测定的.我们选择了一个180 km×80 km的四边形区域,包含2008年汶川地震的部分破裂区,发生在研究区内的 $M_L \geq 2.0$ 地震,共583次,最大震级为 $M_L 4.2$ (图2).

2 分析方法

基于PREM地球模型,计算地球内部的应力固体潮^[26].根据汶川地震发震断层面参数将计算的应力固体潮投影到其震源处的断层面上,可以得到固体潮产生的附加正应力 σ_n 和剪切应力 τ ,计算中断层面的参数使用全球矩心矩张量(global centroid-moment-tensor,

GCMT)目录提供的结果,即走向=231°,倾角=35°,滑动角=138°,深度取汶川地震震源深度($h=19$ km).由于有效剪切应力 $\tau_e = \tau + \mu \sigma_n$ 受断层面上摩擦系数 μ 的影响,断层面上的摩擦系数无法准确地得到,所以本文只分析固体潮在发震断层面上引起的正应力和剪切应力对地震的触发作用.图3为计算得到的

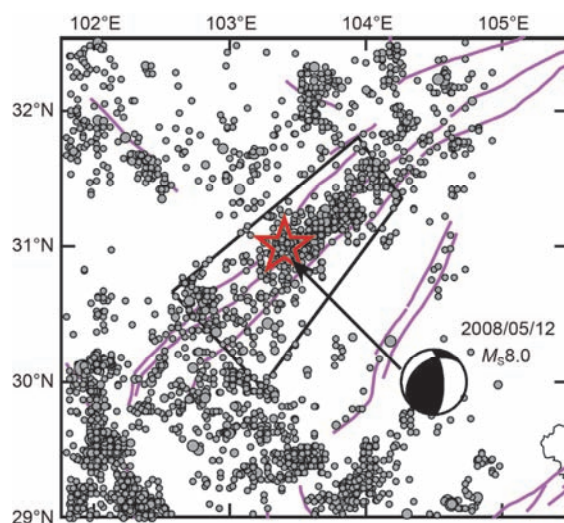


图1 (网络版彩色)在2000年1月~2008年4月期间发生的 $M_L \geq 2.0$ 地震空间分布.实线围成的四边形区域为所选择的研究区域.“☆”为汶川地震震中,震源机制解来自GCMT(global centroid-moment-tensor)目录

Figure 1 (Color online) Map showing the locations of earthquakes($M_L \geq 2.0$) from Jan. 2000 to April 2008. Solid quadrilateral region indicates the study area for this investigation. Red star is the epicentral location of the 2008 Wenchuan earthquake. Focal mechanism solution is shown from the GCMT catalog

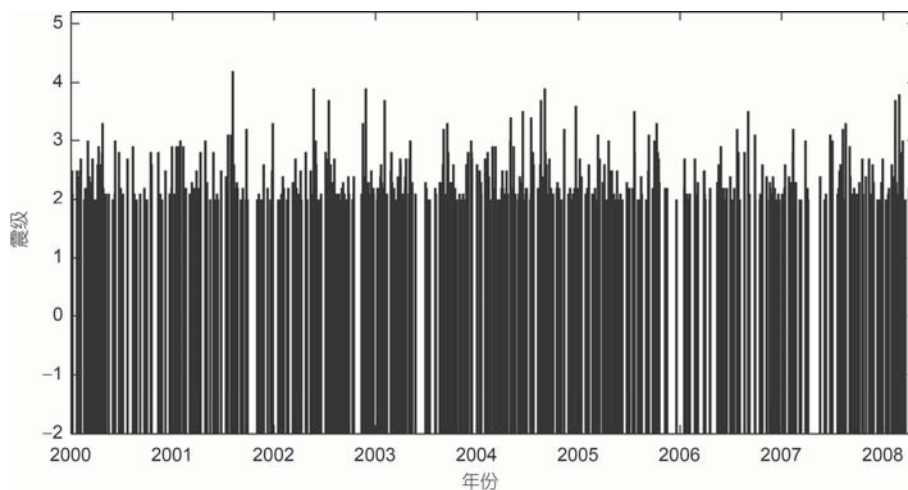


图2 研究区域内发生的 $M_L \geq 2.0$ 地震M-T图

Figure 2 Map showing the chronological orders of earthquakes of $M_L \geq 2.0$ in the study area

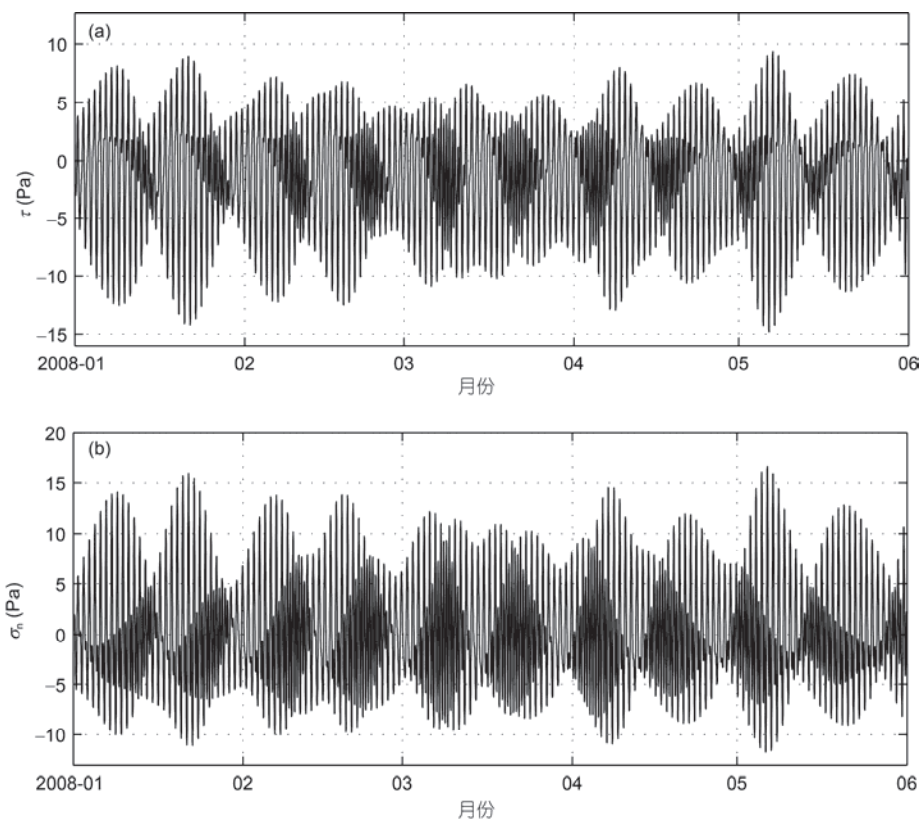


图3 固体潮在汶川地震震源深度($h=19$ km)处的断层面上产生的剪切应力 τ 和正应力 σ_n 随时间的变化

Figure 3 Temporal variation of the shear stress τ and the normal stress σ_n caused by the annually changing earth tide on the focal fault plane of the Wenchuan earthquake at depth of 19 km

固体潮在汶川地震震源深度($h=19$ km)处的断层面上产生的正应力 σ_n 和剪切应力 τ 随时间的变化. 固体潮主要包含周年潮、半年潮、月潮、半月潮、日潮和半日潮. 图4~6为从图3中分离出来的各周期潮汐在汶川地震震源断层面上产生的正应力 σ_n 和剪切应力 τ 随时间的变化. 从图中可以看出, 日潮引起的应力的变

化幅度最大, 是其他周期潮汐应力变化幅度的数倍. 汶川地震发生时, 日潮引起的断层面上的剪切应力处于峰值处, 而正应力处于谷值处. 即, 汶川地震发生时, 日潮引起的剪切应力刚刚经历了一次上升变化过程, 而正应力则经历了一次下降过程, 剪切应力与正应力的变化幅度基本相当, 约为6 Pa(图4). 正应

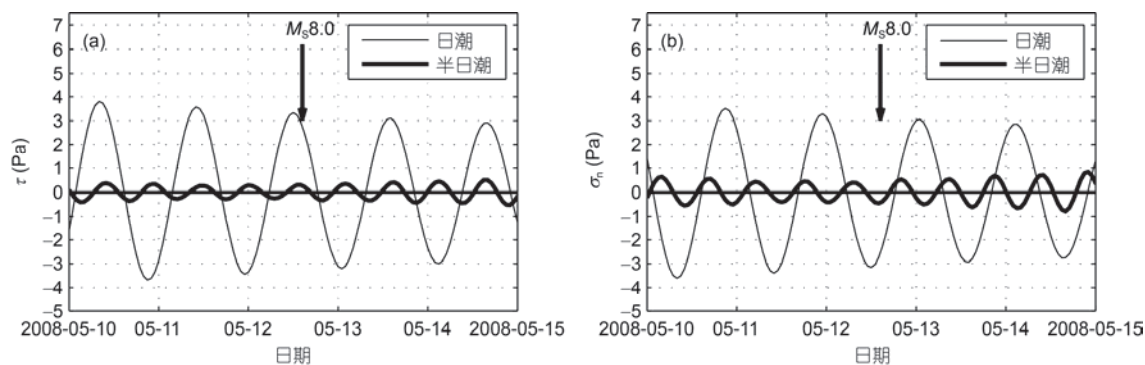


图4 日潮和半日潮在汶川地震震源断层面上引起的剪切应力 τ 和正应力 σ_n 随时间的变化, “↓”表示汶川地震的发生时间

Figure 4 Temporal variation of the shear stress τ and the normal stress σ_n induced by the earth tide with one-day or half-a-day cycle on the focal fault plane of the Wenchuan earthquake. The downward arrow “↓” shows the occurrence time for the Wenchuan earthquake

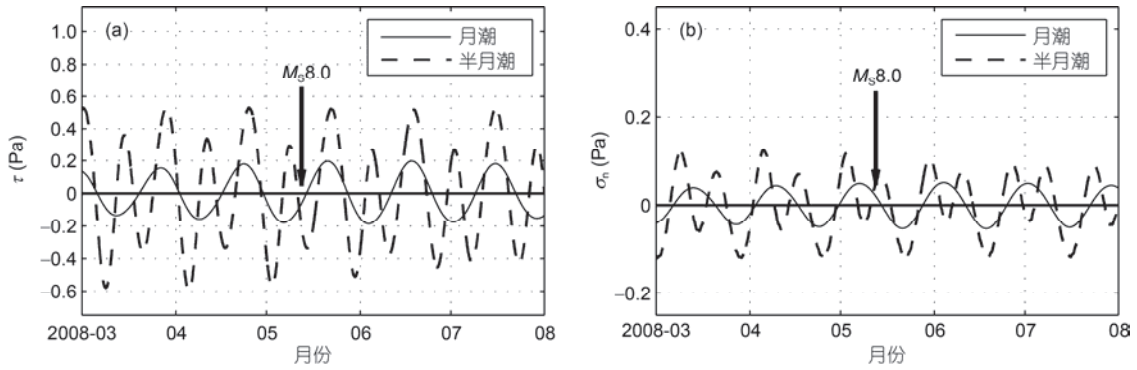


图5 月潮和半月潮在汶川地震震断层面上引起的剪切应力 τ 和正应力 σ_n 随时间的变化。“↓”表示汶川地震的发生时间

Figure 5 Temporal variation of the shear stress τ and the normal stress σ_n induced by the earth tide with one-month or half-a-month cycle on the focal fault plane of the Wenchuan earthquake. The downward arrow “↓” shows the occurrence time for the Wenchuan earthquake

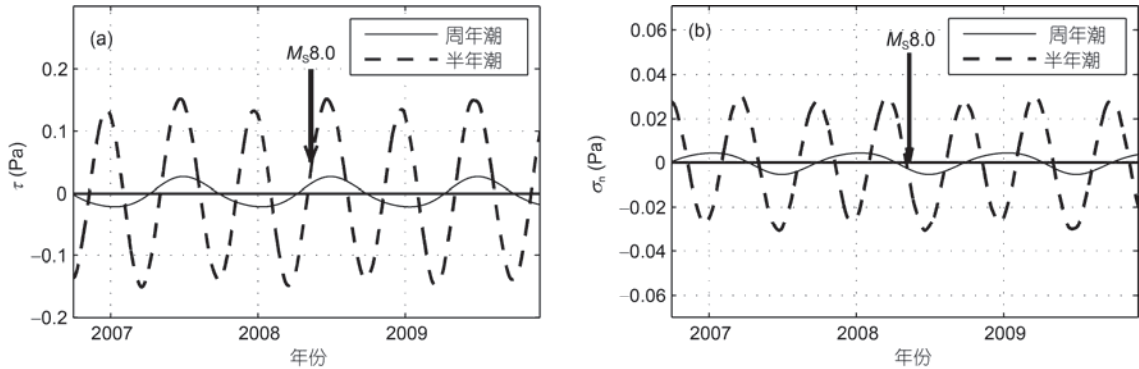


图6 周年潮和半年潮在汶川地震震断层面上引起的剪切应力 τ 和正应力 σ_n 随时间的变化。“↓”表示汶川地震的发生时间

Figure 6 Temporal variation of the shear stress τ and the normal stress σ_n induced by the earth tide with one-year or half-a-year cycle on the focal fault plane of the Wenchuan earthquake. The downward arrow “↓” shows the occurrence time for the Wenchuan earthquake

力减小有利于断层面的摩擦力增加而不利于断层面错动,但是由于摩擦系数小于1,正应力减小和剪切应力增加的综合效果是有利于断层面错动的。

由于日潮的变化幅度比其他周期潮汐变化幅度显著,我们选取日潮来分析潮汐应力与汶川地震前研究区域内发生的中小地震之间的相关性。本文借助于相位角分析方法,以研究地震潮汐应力触发的可能性。具体计算方法见文献[27],本文不再详细描述。

3 结果

从2000年1月~2008年4月,取2年的时间窗,以3个月的步长将时间窗在时间轴上滑动。根据式(2)和(3)计算每个时间窗里的 P 值,每个时间窗计算的 P 值的时间取其最后一个地震发生的时间,这样可以得到 P 值随时间的变化。

3.1 潮汐剪切应力触发检验

根据固体潮在汶川地震震断层面上产生的剪切应力随时间的变化曲线,计算研究区内每个地震的发生时刻的相位角,由此计算 P 值随时间的变化,以日潮进行计算。我们将 $M_L \geq 2.0$ 地震分震级段进行检验,得到的结果如图7(a),图中,菱形和圆分别表示由 $2.0 \leq M_L \leq 2.6$ 和 $M_L \geq 2.7$ 的地震得到的结果。图中显示,在汶川地震发生前日潮剪切应力对 $M_L \geq 2.7$ 的地震触发明显。 P 值从2007年6月开始呈逐渐下降变化形态,最小 P 值在汶川地震临震前出现。图7(b)表示 P 值为最小值时的时间窗内(2006年5月1日~2008年4月30日) $M_L \geq 2.7$ 地震的相位角分布,粗实线为分布的最佳拟合正弦曲线。 P 值为0.85%,多数 $M_L \geq 2.7$ 地震发生在负相角范围内,期间,日潮剪切应力处于上升期,即,汶川地震发生前 $M_L \geq 2.7$ 的地震受到日潮剪切应力增加的触发。如果在某个短时间内发生

了一丛地震,也有可能引起的 P 值显著降低,但此时的相角分布应呈现孤立的脉冲式的单峰形态,而图7(b)并非这种单峰形态,因此,在汶川地震临震前出现的最小 P 值并非是由于地震丛的影响所致。

图8为计算 P 值时间变化的时间窗内的地震数随时间的变化。 P 值随时间变化与地震数随时间变化之间没有关联性。当 $2.0 \leq M_L \leq 2.6$ 时,计算 P 值时间变化时每个时间窗内地震数在95~171之间;当 $M_L \geq 2.7$ 时,计算 P 值时间变化时每个时间窗内地震数在19~33之间。计算 P 值时间变化的实际样本数明显高

于 P 值样本数条件($N > 10$)。因此,样本数对 P 值时间变化不会产生根本性的影响。

为了考察汶川地震前被固体潮触发的地震与汶川地震之间在空间上的关系,选取 $1^\circ \times 1^\circ$ 的空间窗,以 0.1° 的步长沿经度和纬度滑动,对 P 值进行空间扫描,扫描的区域比研究区域大,为整个龙门山断裂带所在区域。为了保证空间窗内计算 P 值所需的足够的地震数目,时间段取震前3年,即2005年5月~2008年4月。

图9(a), (b)为 $M_L \geq 3.0$ 地震的 P 值空间分布,图(a)

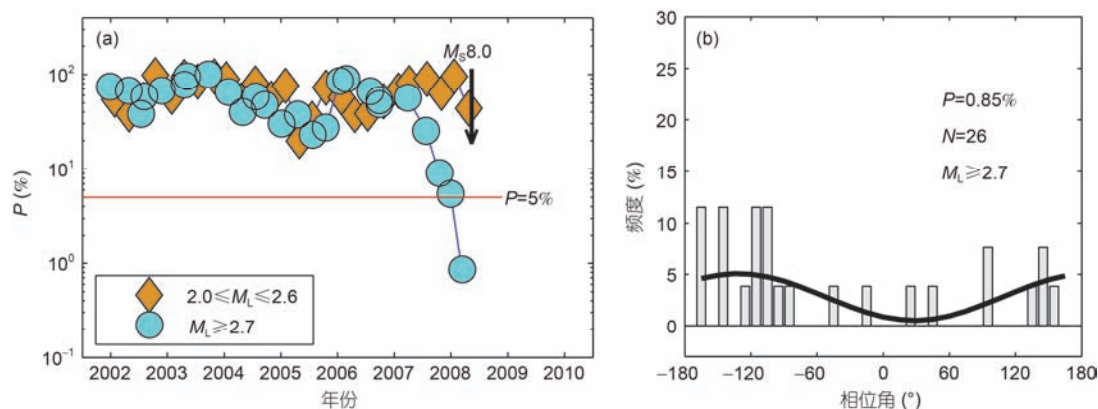


图7 (网络版彩色)汶川地震前研究区内 P 值随时间的变化与地震的相位角分布。(a) P 值随时间的变化(“↓”表示汶川地震发生时间)。“◆”和“●”分别表示 $2.0 \leq M_L \leq 2.6$ 和 $M_L \geq 2.7$ 的地震;(b) 汶川地震前(2006年5月1日~2008年4月30日) $M_L \geq 2.7$ 地震的相位角分布。粗实线为分布的最佳拟合正弦曲线

Figure 7 (Color online) Temporal variation of P -value and histogram showing the phase distribution of earthquakes in the study area indicated in Figure 1. (a) Variation in P -value vs. time (the downward arrow “↓” shows the occurrence time of the Wenchuan earthquake). Markers of diamond and circle indicate earthquakes of $2.0 \leq M_L \leq 2.6$ and $M_L \geq 2.7$ respectively. (b) Histogram showing the frequency of the phase angle of $M_L \geq 2.7$ earthquakes that occurred from May 1, 2006 to April 30, 2008 before the Wenchuan earthquake. The solid curve is the best-fit sinusoid for the frequency

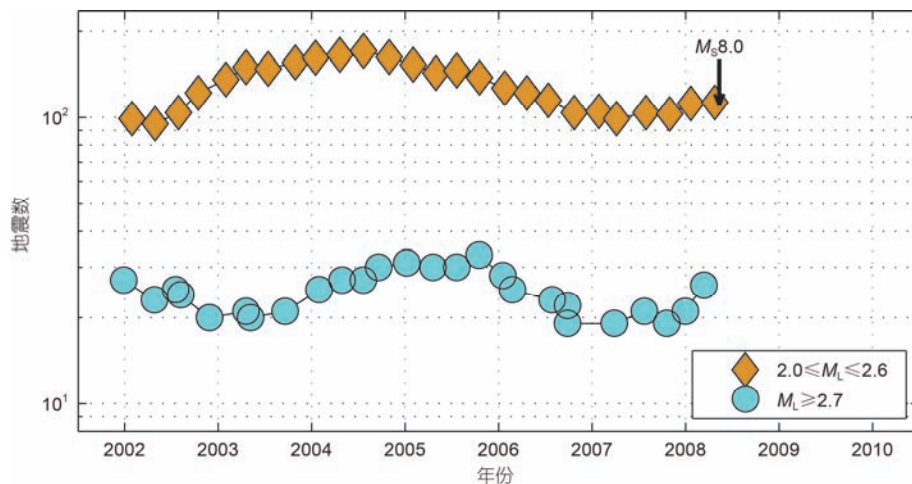


图8 (网络版彩色)计算 P 值时间变化的时间窗内的地震数

Figure 8 (Color online) Counts of earthquakes in each time window for calculating the temporal variation in P -value

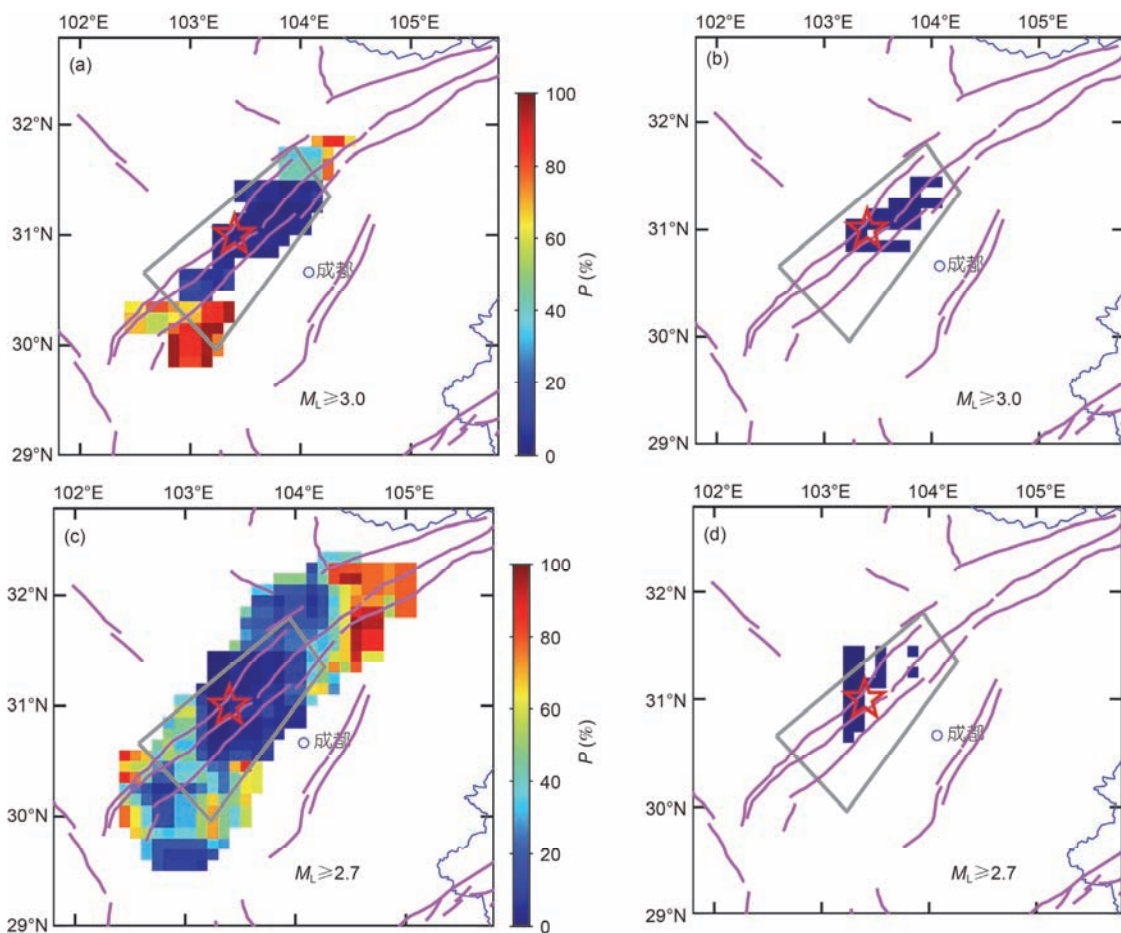


图9 汶川地震前从2005年5月~2008年4月龙门山断裂带上 P 值空间分布. 空间窗取 $1^\circ \times 1^\circ$, 以 0.1° 的步长沿经度和纬度滑动. (a), (b) $M_L \geq 3.0$ 地震; (c), (d) $M_L \geq 2.7$; (a), (c) $P > 0$; (b), (d) $P < 2\%$. “☆”为汶川地震震中

Figure 9 Spatial distribution of P -values in the time range from May 2005 to Apr. 2008 prior to the Wenchuan earthquake for semiannual tidal phase. A spatial window of $1^\circ \times 1^\circ$ is moved by 0.1° both in the along-latitude and along-longitude directions. (a), (b) $M_L \geq 3.0$; (c), (d) $M_L \geq 2.7$; (a), (c) $P > 0$; (b), (d) $P < 2\%$. “☆” indicates the epicenter of the Wenchuan earthquake

中 $P > 0$, 图9(b)中 $P < 2\%$. 可以看出, 低 P 值出现在汶川地震震中及其东北部地区, 这个地区也是汶川地震破裂区的南段. 为了考察震级下限对 P 值空间分布的影响, 图9(c), (d)给出了 $M_L \geq 2.7$ 地震的 P 值空间分布结果, 与 $M_L \geq 3.0$ 地震得到的结果基本一致. 因此, 在汶川地震发生前, 整个龙门山断裂带地区, 被固体潮触发的地震仅仅发生在其震中附近地区.

3.2 潮汐正应力触发检验

本文中, 当正应力大于0时, 表示正应力与断层面外法线一致, 断层面受拉伸作用. 由于正应力与剪切应力随时间的变化是反向的, 当剪切应力上升时, 正应力下降. 正应力下降表示断层面受到的拉伸作用减弱, 压力增加, 从而摩擦力增大. 由日潮引起的

正应力得到的 P 值随时间的变化以及空间分布与用剪切应力得到的结果完全一样, 不同的只是图7(b)中的相位角分布. 由于剪切应力与正应力之间的相位相差 180° , 当在剪切应力情况下, 多数 $M_L \geq 2.7$ 地震发生在负相角范围内时, 在正应力情况下, 多数 $M_L \geq 2.7$ 地震则发生在正相角范围内. 此时, 日潮正应力处于下降过程中, 即, 汶川地震发生前 $M_L \geq 2.7$ 的地震常常发生在日潮正应力下降期间, 汶川地震震源断层处于增压状态, 摩擦力增大. 不过, 由于剪切应力增加的幅度与正应力降低的幅度相当, 因正应力降低引起的摩擦力的增加幅度小于剪切应力增加的幅度, 因此, 在2005年5月~2008年4月期间, 多数 $M_L \geq 2.7$ 地震发生时, 固体潮总的效果是有利于汶川地震断层面错动的.

本研究利用固体潮在汶川地震震源处引起的应力来检验震中附近一个 $180\text{ km} \times 80\text{ km}$ 的区域内发生的 $M_L \geq 2.0$ 地震与固体潮之间的相关性, 这些地震并非都发生在汶川地震震中处, 用一个点的固体潮应力来代替一个区域内的固体潮应力, 对检验结果是否会有影响呢? 这要看是否会对固体潮应力随时间的变化产生影响. 地震位置的纬度变化只影响固体潮的幅度, 而不影响固体潮的相位, 因此地震位置的纬度变化对本文的结果不会产生影响. 影响固体潮相位的是地震位置的经度, 在研究区内发生的地震, 其经度在 $102^\circ \sim 105^\circ\text{E}$ 范围内, 分别以 102° 和 105°E 计算的固体潮应力来进行分析. 汶川地震震中处的纬度是 31°N , 图10给出了分别以点(31°N , 102°E)和点(31°N , 105°E)处计算的固体潮剪切应力进行检验的结果, 可以看出, P 值随时间的变化与图7(a)中的结果几乎没有差异. 因此, 研究区内发生的

地震的经度差异对结果没有显著影响.

综上所述, 汶川地震发生时, 固体潮与震前2~3年内震中附近地区发生的 $M_L \geq 2.7$ 地震之间存在显著相关性, 这些地震主要分布在汶川地震破裂区南段, 位于震中东北部. 在汶川地震发生前震中附近地区存在的 $M_L \geq 2.7$ 地震固体潮触发, 主要是由于固体潮在发震断层面上引起的剪切应力增加所致. 潮汐力在地球内部引起的应力变化在 10^3 Pa 的量级内, 比构造应力小得多, 但是, 潮汐应力变化速率通常比构造应力积累的速率大, 因此, 当震源区所受到的应力接近于破裂极限时, 潮汐应力可以成为一个触发地震发生的因素^[28]. 根据高锡铭等人^[5]的研究结果, 潮汐应力每6 h增加 0.1 Pa , 地震有可能被触发. 本文得到的结果是日潮剪切应力变化幅度为 6 Pa , 相当于每6 h增加 3 Pa , 因此, 这样的潮汐剪切应力具有触发地震的可能性.

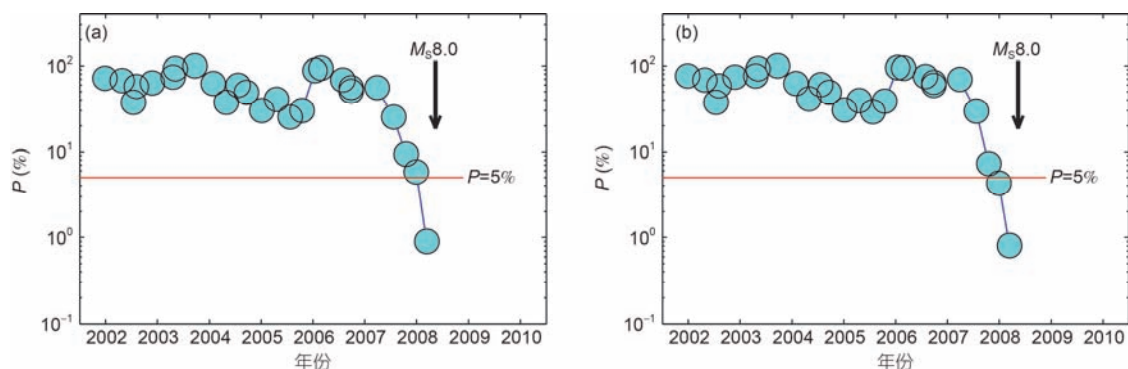


图10 (网络版彩色) P 值随时间的变化. “↓”表示汶川地震发生时间. (a) 点(31°N , 102°E)处的固体潮应力的检验; (b) 点(31°N , 105°E)处的固体潮应力的检验结果

Figure 10 (Color online) Variation in P -value vs. time. The downward arrow “↓” shows the occurrence time of the Wenchuan earthquake. (a) For shear stress calculated at (31°N , 102°E); (b) for shear stress calculated at (31°N , 105°E)

参考文献

- Cochran E S, Vidale J E, Tanaka S. Earth tides can trigger shallow thrust fault earthquakes. *Science*, 2004, 306: 1164–1166
- Heaton T H. Tidal triggering of earthquakes. *Geophys J R Astr Soc*, 1975, 43: 307–326
- Li Z R, Zhang X D. Relationship of tidal stress and large earthquakes (in Chinese). *Earthquake*, 2011, 31: 48–57 [李智蓉, 张晓东. 潮汐应力与大震关系研究. *地震*, 2011, 31: 48–57]
- Tsuruoka H, Ohtake M, Sato H. Statistical test of the tidal triggering of earthquakes: Contribution of the ocean tide loading effect. *Geophys J Int*, 1995, 122: 183–194
- Gao X M, Yin Z S, Wang W Z, et al. Triggering of earthquakes by the tidal stress tensor (in Chinese). *Acta Seismol Sin*, 1981, 3: 264–275 [高锡铭, 殷志山, 王威中, 等. 固体潮应力张量对地震的触发作用. *地震学报*, 1981, 3: 264–275]
- Li K W, Jiang Z S, Shen T. Triggering of seismic sequences by tidal stress (in Chinese). *Earthquake*, 2005, 25: 76–86 [黎凯武, 江在森, 申彤. 潮汐应力-应变对某些地震序列的调制触发. *地震*, 2005, 25: 76–86]
- Zhang J, Qi Q W, Yang L Z, et al. A study on tidal force stress triggering of strong earthquakes (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2007, 50:

- 448–454 [张晶, 郝钦文, 杨林章, 等. 引潮力与潮汐应力对强震触发的研究. 地球物理学报, 2007, 50: 448–454]
- 8 Li J, Jiang H K. A statistical analysis on Wenchuan aftershock activity triggered by earth tide (in Chinese). *Earthq Res China*, 2011, 27: 363–375 [李金, 蒋海昆. 汶川地震余震活动固体潮调制的统计分析. 中国地震, 2011, 27: 363–375]
- 9 Zhang H, Zhang L P, Xu H, et al. Relationship of $M_s \geq 7.0$ earthquakes in Chinese mainland and tidal coulomb failure stress (in Chinese). *Earthq Res China*, 2013, 29: 48–56 [张辉, 张浪平, 徐辉, 等. 中国大陆 $M_s \geq 7.0$ 地震与潮汐库仑破裂应力关系研究. 中国地震, 2013, 29: 48–56]
- 10 Zhou J C, Sun H P, Xu J Q, et al. Tidal strain and tidal stress in the earth's interior (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2013, 56: 3779–3787 [周江存, 孙和平, 徐建桥, 等. 地球内部应变与应力固体潮. 地球物理学报, 2013, 56: 3779–3787]
- 11 Sun C Q, Yan C H, Wu X P, et al. The effect of tidal triggering on seismic fault in eastern Tibetan Plateau and its neighboring areas (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2014, 57: 2054–2064 [孙长青, 阎春恒, 吴小平, 等. 青藏高原东部及邻区地震断层面上的潮汐应力触发效应. 地球物理学报, 2014, 57: 2054–2064]
- 12 Wu X P, Mao W, Huang Y, et al. Statistical analysis of tidal stress effect on seismic faults (in Chinese). *Chin J Geophys*, 1999, 42(Suppl): 65–74 [吴小平, 冒蔚, 黄雍, 等. 潮汐应力对发震断层作用的统计分析. 地球物理学报, 1999, 42(增刊): 65–74]
- 13 Xu Y J, Wu X P, Yan C H, et al. The features of tidal Coulomb failure stresses on various kinds of seismic fault (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2011, 54: 756–763 [许亚吉, 吴小平, 阎春恒, 等. 不同类型地震断层上的固体潮汐库仑破裂应力特征. 地球物理学报, 2011, 54: 756–763]
- 14 Xu S X, Wang B Q, Zhang G Y, et al. The foreshock sequence of Haicheng earthquake and earthquake swarm (in Chinese). *Acta Seismol Sin*, 1981, 3: 1–10 [许绍燮, 王碧泉, 章光月, 等. 海城地震前震系列与震群. 地震学报, 1981, 3: 1–10]
- 15 Tanaka S, Ohtake M, Sato H. Spatio-temporal variation of the tidal triggering effect on earthquake occurrence associated with the 1982 South Tonga earthquake of $M_w 7.5$. *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 1756
- 16 Tanaka S. Tidal triggering of earthquakes precursory to the recent Sumatra megathrust earthquakes of 26 December 2004 ($M_w 9.0$), 28 March 2005 ($M_w 8.6$), and 12 September 2007 ($M_w 8.5$). *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L02301
- 17 Tanaka S. Tidal triggering of earthquakes prior to the 2011 Tohoku-Oki earthquake ($M_w 9.1$). *Geophys Res Lett*, 2012, 39: L00G26
- 18 Vidale J E, Agnew D C, Johnston M J S, et al. Absence of earthquake correlation with Earth tides: An indication of high preseismic fault stress rate. *J Geophys Res*, 1998, 103: 24567
- 19 Knopoff J. Earth tides as a triggering mechanism for earthquakes. *Bull Seism Soc Am*, 1964, 54: 1865–1870
- 20 Shudde R H, Barr D R. An analysis of earthquake frequency data. *Bull Seism Soc Am*, 1977, 67: 1379–1386
- 21 Stothers R B. A search for long-term periodicities in large earthquakes of southern and central California. *Geophys Res Lett*, 1990, 17: 1981–1984
- 22 Shlien S, Toksoz M N. A clustering model for earthquake occurrences. *Bull Seism Soc Am*, 1970, 60: 1765–1787
- 23 Heaton T H. Tidal triggering of earthquakes. *Bull Seism Soc Am*, 1982, 72: 2181–2200
- 24 Rydelek P A, Sacks I S, Scarpa R. On tidal triggering of earthquakes at Campi Flegrei, Italy. *Geophys J Int*, 1992, 109: 125–137
- 25 Dziewonski A M, Anderson D L. Preliminary reference earth model. *Phys Earth Planet Int*, 1981, 25: 297–356
- 26 Zhou J C, Sun H P, Xu J Q, et al. Tidal strain and tidal stress in the earth' interior (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2013, 56: 3779–3787 [周江存, 孙和平, 徐建桥, 等. 地球内部应变与应力固体潮. 地球物理学报, 2013, 56: 3779–3787]
- 27 Wei Y G, Chen X Z, Li Y E. Relation between earth's rotation and small earthquakes occurring before the $M_s 7.8$ Tangshan mainshock (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63, doi: 10.1360/N972018-00140 [隗永刚, 陈学忠, 李艳娥. 唐山 $M_s 7.8$ 级地震前中小地震与地球自转的关系. 科学通报, 2018, 63, doi: 10.1360/N972018-00140]
- 28 Emter D. Tidal triggering of earthquakes and volcanic events. In: Wilhelm H, ed. *Tidal Phenomena, Lect Notes Earth Sciences*. New York: Springer, 1997. 293–309

Summary for “2008 年汶川地震前地震的固体潮触发检验”

Earth tidal stress as an earthquake trigger prior to the Wenchuan earthquake, Sichuan, China

Yan'e Li & Xuezhong Chen*

Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

* Corresponding author, E-mail: cxz8675@163.com

Cyclic stress variations in the crust of the earth are caused by the earth tide. Although these stress variations are small in comparison to tectonic stress, tidal stress rates are often larger than those of tectonic stress accumulation. Thus, tidal stress could be considered as one of the possible triggers for an earthquake. Many scientific studies have been conducted to examine the correlation between the earth tide and earthquake occurrence. In this study, the shear and normal stresses caused by the earth tide on the focal fault plane of the Wenchuan earthquake, Sichuan, China, are calculated using the focal mechanism solution published by the Global Centroid Moment Tensor catalog and the Preliminary Reference Earth Model. We analyzed how the tidal stresses on the fault plane changed when the Wenchuan earthquake occurred. The Schuster's test was applied to define correlations between earthquakes occurring around the epicenter area before the Wenchuan earthquake and stresses caused by the daily earth tide. A P -value was calculated and used to quantify the statistical significance of the evidence. Earthquake data used in this study were obtained from the China Earthquake Networks Center, China Earthquake Administration. The temporal variation and spatial distribution of the P -value, indicating the significance of the test, were investigated.

The obtained results show that the daily tidal stress was in favor of slip of the focal fault when the Wenchuan earthquake occurred. For earthquakes ($M_L \geq 2.7$) that occurred in the study area, the P -value began to drop in June 2007, approaching the lowest value (0.85%) very close to the occurrence time of the $M_S 8.0$ Wenchuan main shock. Most of low- P -value (<5%) were observed and the associated earthquakes occurred when the phase angle was less than zero, which would represent an increase of the shear stress. A region of low P -value situated in the near northeast of the epicenter can be found prior to the Wenchuan earthquake from the spatial distribution of P -value in the Longmenshan Fault.

It can be concluded from the above-mentioned results that significant correlations between earthquakes occurring around the epicenter area and the daily tide existed prior to the Wenchuan earthquake. These tide-triggered earthquakes were in the south part of the rupture zone of the Wenchuan earthquake, northeast of the epicenter. Therefore, tidally triggered earthquakes occurred around the epicenter area prior to the Wenchuan earthquake.

the Wenchuan earthquake, the earth tide, triggerring, the Schuster's test

doi: 10.1360/N972018-00259