

李金、蒋海昆, 2011, 汶川地震余震活动固体潮调制的统计分析, 中国地震, 27(4), 363 ~ 375。

汶川地震余震活动固体潮调制的统计分析

李金¹⁾ 蒋海昆²⁾

1) 中国地震局地震预测研究所, 北京市复兴路 63 号 100036

2) 中国地震台网中心, 北京 100045

摘要 基于 Schuster 检验对汶川地震余震受固体潮的调制触发情况进行了系统的研究, 包括对引潮力、潮汐应力和潮汐库仑破裂应力等触发地震情况的分时段分区段研究。结果表明, 汶川北段 2008 年 7 月底至 8 月初的一组强余震受潮汐触发明显, 引潮力、潮汐正应力及潮汐库仑破裂应力经 Schuster 检验平滑后均得到基本一致的结果。此外, 汶川余震受半月潮的调制非常明显, 北段余震多发生于上、下弦时段, 南段地震多发生于上、下弦和望时段。

关键词: 汶川余震 潮汐触发 Schuster 检验

[文章编号] 1001-4683(2011)04-0363-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

日月起潮力引起的固体潮在地球内产生的周期性变化的应力即潮汐应力, 其量级为 10^3 Pa 左右, 虽然明显小于地震应力降, 但潮汐应力的加载速率却比构造应力积累的速率要大两个数量级 (Heaton, 1975、1982), 而且潮汐应力对地球内同一位置具有不断重复作用的特点, 这种潮汐的振荡性质 (而不一定是潮汐的振幅), 在潮汐应力触发中可能起更重要的作用 (Lockner et al, 1999)。因此, 潮汐应力可能对地震的发生有影响, 特别是对处于临界应力状态的断层可能有触发效应 (Aki, 1956)。基于以上观点, 国内外学者对固体潮与地震关系的研究兴趣一直不减。Heaton (1975) 研究了地震活动受潮汐应力的触发情况, 发现对浅源 (<30km) 的倾滑型地震或斜滑型大地震, 潮汐力有明显的触发作用。Tanaka 等 (2002) 研究发现, 逆断层潮汐应力与断层的剪应力具有很强的相关性, 认为当断层上的应力处于极限值附近时, 幅值较小的潮汐应力有可能触发地震。张国民等 (2001) 的研究显示, 20 世纪中国大陆 7 级以上地震的 71% 受到引潮力的调制触发, 进一步研究活跃期受调地震数, 这一比例高达 82.4%。张晶等 (2007) 利用中国大陆 1970 年以来 7 级以上的地震序列资料, 分析了引潮力水平分量变化与强震发生时间的关系, 结果显示, 在一定时、空范围内, 前震、主震及余震序列发震时刻的引潮力存在优势方向, 从而认为引潮力与地震触发具有一定的相关性。陈荣华 (2003) 根据 2001 年 2 月之前四川雅江地区几次小地震发生时刻的水平引潮力方向较为集中的特点, 对 2001 年 2 月 23 日

[收稿日期] 2011-09-02

[项目类别] 国家科技支撑计划项目 (2008BAC38B03) 资助

[作者简介] 李金, 男, 1986 年生, 在读硕士研究生。E-mail: lijn6205@163.com

蒋海昆, 通讯作者。E-mail: jianghaikun@sohu.com

四川雅江 $M_s 6.0$ 地震进行了一定程度的预测。

2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分,四川龙门山构造带发生汶川(31.0°N、103.4°E) 8.0 级大地震,受灾面积超过 10^5 km^2 ,死亡失踪人数超过 8 万人^①。主震后余震活动频繁,据中国地震台网资料,截至 2008 年底,共发生余震 41000 多次,其中 6.0~6.9 级 8 次、5.0~5.9 级 34 次、4.0~4.9 级 245 次、3.0~3.9 级 3345 次。已有研究表明,汶川地震活动受潮汐调制较为明显。蒋海昆等(2008)的研究表明,汶川主震和大多数 $M_s \geq 5.4$ 较大余震主要发生在小潮时段(上、下弦);赵小茂等(2010)统计分析了 2008 年 5 月 12 日 2009 年 9 月 30 日 5 级以上强余震与引潮力的关系,发现平行断层方向的线应变引潮力峰(谷)值时间,与汶川地震及强余震时间有较好的对应关系。另据 Li 等(2011)的最新研究结果,汶川地震前松潘-甘孜构造带发生的地震可能与潮汐有关。

在以往研究的基础上,本文利用 2008 年 5 月 12 日~12 月 31 日的汶川地震序列数据,采用 Schuster 检验方法,分时段、分区域对汶川余震受固体潮的调制触发情况进行系统的统计研究,其中包括引潮力、潮汐应力及潮汐库仑破裂应力等对地震可能的触发影响。

1 数据选取

选取 2008 年 5 月 12 日~12 月 31 日为统计研究时段。汶川地震序列时序分布如图 1 所示,由图可见两个明显的强活动时段,一是汶川地震初期 5~6 级余震频发,二是 7 月底、8 月初发生 3 次 6 级强余震。据此,粗略地以 5 月 25 日青川 6.4 级最大余震,以及 7 月底~8 月初发生的一组强余震为时间分割点,将汶川地震序列在时间上分为 3 个时段,即时段 I:2008 年 5 月 12~25 日;时段 II:2008 年 5 月 26 日~8 月 15 日;时段 III:2008 年 8 月 16 日~12 月 31 日。

在时间分段的基础上,以北川-安县附近为界,将汶川地震余震区分为南北两段。其空间分段的主要依据,一是南、北段余震破裂机制的差异,即依据汶川地震震源破裂过程的研究结果^②(王卫民等 2008;黄媛等 2008;Cheng et al 2009;华卫等 2009;张勇等 2009;程万正 2009a;郭祥云等 2010;王勤彩 2009),沿龙门山断裂的走向方向,呈现出以北川地区为界的明显南北分段特征,自 WS 至 EN 沿着主破裂带方向,震源机制类型由逆冲为主,转变为走滑为主。北东段的区域主压应力方向为 NE 向,和断裂走向一致;而西南段的区域主压应力方向为 NW 向,和断裂的走向斜交或垂直,与龙门山地区的背景主压应力方向一致(石玉涛等 2009)。二是南、北段余震活动特点的差异,即南段呈现主余型序列衰减特征,而北段呈现多震型的序列特征(图 1(b)、(c);蒋海昆等 2008;李志雄等 2009);三是构造差异及余震空间分布上的空段(Ren et al 2010;朱艾澜等 2008;蒋海昆等 2008;程万正 2009b;李志雄 2009;李传友 2008)。此外,汶川余震区南、北段在震源深度、构造岩性、地理地貌等方面也存在明显的差异。例如汶川地震余震序列的重新定位结果显示,余震序列的震源深度基本在 24km 范围内,而北川地区余震的震源深度较浅,分布在 10~20km 之间(赵博等 2011)。汶川余震破裂带的宽度和空间形态显示了强烈的分段(以安县附近为分界点)

① <http://baike.baidu.com/view/1587399.htm>

② 陈运泰等 2008 初步研究及考察结果(一):2008 年 5 月 12 日汶川特大地震震源特性分析报告 (<http://www.csi.ac.cn/sichan>)。

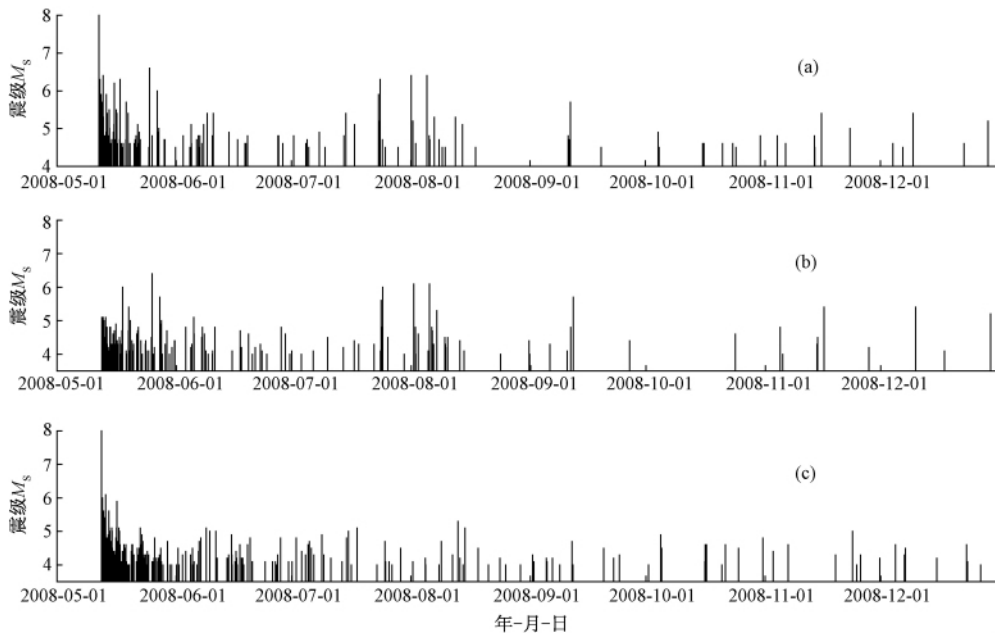


图 1 汶川地震余震区地震序列 $M-t$ 图(2008 年 5 月 12 日 ~2008 年 12 月 31 日)

(a) 汶川地震序列 $M_s \geq 4.5$ 地震; (b) 汶川北段余震序列 $M_s \geq 4$ 地震; (c) 汶川南段余震序列 $M_s \geq 4$ 地震

和非均匀特征,坚硬的彭灌杂岩对余震的非均匀性分布和汶川地震复杂的破裂过程起到了重要的控制作用(陈九辉等 2009)。张竹棋等(2010)对龙门山中央断裂带的发震断层的二维形态的反演显示,龙门山中央断裂带的发震断层系统存在明显的南北分区特征。以北川-南坝为过渡带,北川以南至清平的发震构造为二元结构,包括两部分:一是浅部高倾角的逆断层,断层倾角超过 70° ,底部深度可达 $10 \sim 15\text{km}$,逆断层位错主要分布于 10km 以上,平均位错超过 6m ;二是深部缓倾角的逆断层,反演得其倾角约 25° ,底部深度可达 30km ,位错主要分布于断层的顶部和底部,平均位错约 4m 。因此,以北川-安县附近为界,将汶川地震余震区数据分为南、北两段进行讨论有其合理之处。

依据古登堡震级-频度关系,每个时段的完备序列下限(图 2),分别为 $M_s 3.2$ 、 2.2 及 1.9 ,完备震级下限的逐渐提高,与震后流动台网的增加及序列编目力量的加强有关。震后早期阶段,由于震相叠加,许多小地震被遗漏,甚至包括许多 $M_s 3.2$ 以上地震。

2 研究方法

本文利用 Schuster 检验(Tsuruoka et al, 1995)研究了汶川地震余震与潮汐之间的关系。首先计算震源地的潮汐力(包括引潮力,断层面上的潮汐正应力、剪应力、潮汐库仑破裂应力等),地震发生时刻的相位角依据潮汐力变化的时程来进行赋值(图 3),选出最接近地震发生时间的应力峰值,并指定其相位角为 0° ,之前和之后波谷的相位角分别指定为 $\pm 180^\circ$,然后将峰、谷之间的角距离线性划分,一个潮汐峰和邻近的谷之间的时间间隔不是常数,而是由峰、谷之间的角距离决定。这样即可对这些基于相位分析的数据进行比较,又与潮汐应力变化时程的对称与否无关。

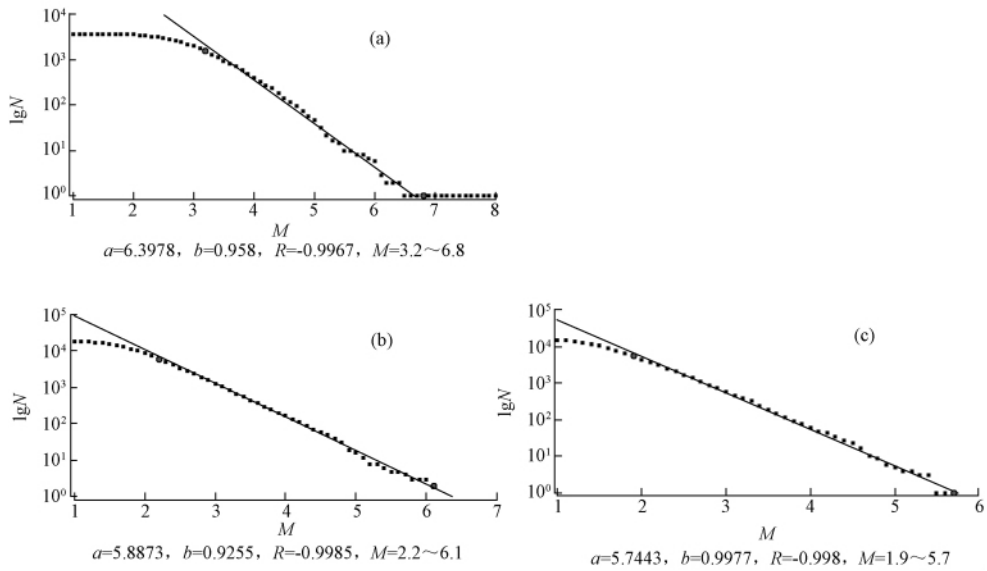


图 2 汶川地震余震序列震级-频度分布

(a) 2008 年 5 月 12 ~ 25 日; (b) 2008 年 5 月 26 日 ~ 8 月 15 日; (c) 2008 年 8 月 16 日 ~ 12 月 31 日

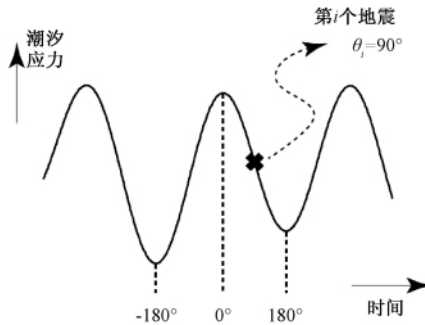


图 3 潮汐相位角的确定 (Tanaka et al 2004)

确定了所有地震的潮汐相位角后,即可通过 Schuster 检验来考察它们是否集中于某一特定的角度,即判断其是否受到潮汐触发。在 Schuster 检验中,每一个地震被表达为一个单位长度的向量,其方向由前述潮汐相位角确定,这些向量的和由 L 来描述, L 的相位角即为所有地震数据的优势相位角。 L 值由式 (1) 进行计算,其几何含义如图 4 所示。

$$\begin{cases} L = \sqrt{A^2 + B^2} \\ A = \sum_{i=1}^N \cos\theta_i, B = \sum_{i=1}^N \sin\theta_i \end{cases} \quad (1)$$

其中 θ_i 表示第 i 个地震的潮汐相位角, N 是地震总数。如果地震在时间上随机发生,则潮汐相位角应随机分布,此时和向量长度大于或等于 L 的概率 (Tsuruoka et al 1995) 为

$$p = \exp\left(-\frac{L^2}{N}\right) \quad (2)$$

若定义零假设为地震随机发生、与潮汐相位角无关,则此处的 p 为拒绝零假设的显著性水

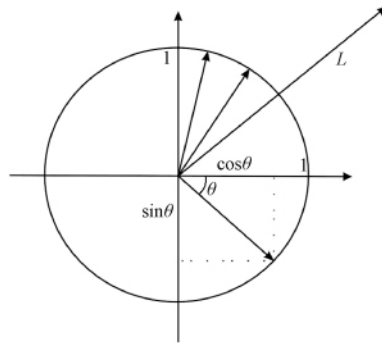


图 4 L 的几何意义 (L 为 N 个单位向量的和向量)

平 p 的取值范围为 $0 \sim 1$ 。 p 越小,拒绝零假设的可能性越大。以往研究中,一般将 $p < 5\%$ 作为判断潮汐能够触发地震的阈值(Heaton, 1975)。但实际上,这个阈值可根据实际情况及所需的置信度,进行适当调整或自行确定。

3 结果

3.1 引潮力日尺度调制的统计检验

对上述选定的时空范围内的地震进行引潮力日尺度调制的检验,结果如表 1 所示。可见除南段 4.5 级以上地震外,几乎所有时段的 p 值均大于触发阈值 0.05,这一结果与以往国外的相关研究(Tanaka 2010; Tanaka et al 2004; Cadicheanu et al 2007)基本一致,其原因可解释为原本可能存在的触发关系在一定程度上被平均效应所掩盖(吴小平等 2009)。为将这种可能被掩盖的现象揭示出来,通常的做法是对数据进行加窗口求 p 值(Tanaka 2010; Tanaka et al 2004),常用的方法有加时间窗平滑和空间窗平滑,由于汶川地震序列地震数据分布范围较小,所以仅按上述所分南、北区段做时间窗平滑。分别对南北段地震数据做以 60 天为窗口(曲线的数值取前后各 30 天范围内的地震数据算得),1 天为步长的平滑处理,结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,北段曲线在 2008 年 8 月 1 日之前和 10 月 1 日之后 p 值平滑结果相对较高,余震呈现随机发生的特点,未发现受到潮汐调制或调制不明显。但自 8 月初至 9 月底阶段,平滑 p 值相对较低,低于判定潮汐触发地震的阈值 0.05,表明余震的发生在某种程度上受潮汐影响较大。值得关注的是,这一时期尤其是 7 月底、8 月初这一时段,汶川地震序列有一个明显的强余震起伏活动(图 1(a)),此间在余震区北段发生 3 次 6 级地震及多次 5 级地震(图 1(b))。据此初步认为,这一时段余震活动的增强及这组 6 级左右强余震的发生,可能与潮汐触发存在一定的相关关系。南段 p 值平滑结果曲线(图 5)在 8 月初也出现相对降低,但并未达到潮汐触发地震的阈值 0.05。

为了进一步分析该时段内余震受潮汐调制的情况,选取 2008 年 8 月 1 日~10 月 1 日汶川地震余震区北段的序列进行 Schuster 检验。分别取震级下限为 2.5、3.0 和 3.5,其 p 值分别为 0.0471、0.0690、0.0870,均达到或非常接近潮汐触发地震的阈值,可见这一时期汶川余震活动受潮汐调制确实比较显著。分析该时段 3.0 级以上地震的潮汐相位角分布(图

表 1 汶川地震序列不同震级下限 (M_c) 引潮力调制检验 p 值统计结果

时段 (年-月-日)	全时段 (2008-05-12 ~ 12-31)		时段 I (2008-05-12 ~ 25)		时段 II (2008-05-26 ~ 08-15)		时段 III (2008-08-16 ~ 12-31)	
	M_c	p	M_c	p	M_c	p	M_c	p
北段	3.2	0.2595	3.2	0.3830	2.2	0.1434	1.9	0.2733
	3.5	0.8044	3.5	0.6758	2.5	0.4200	2.0	0.3936
	4.0	0.2555	4.0	0.1151	3.0	0.4250	2.5	0.4497
	4.5	0.1973			3.5	0.6530	3.0	0.7479
					4.0	0.9238	3.5	0.3067
							4.0	0.8191
南段	3.2	0.5646	3.2	0.4784	2.2	0.8405	1.9	0.9392
	3.5	0.4271	3.5	0.3733	2.5	0.7636	2.0	0.9555
	4.0	0.3245	4.0	0.2385	3.0	0.9977	2.5	0.5162
	4.5	0.0193			3.5	0.9244	3.0	0.8011
					4.0	0.3629	3.5	0.8780
							4.0	0.4079

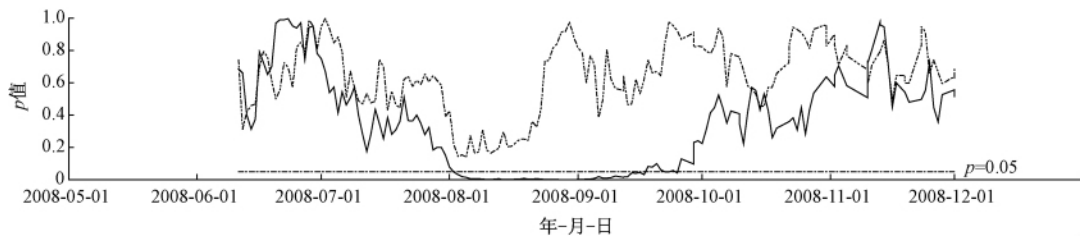


图 5 汶川地震 $M_s \geq 3.2$ 引潮力相位角 p 值 60 天长度窗口平滑结果(虚线:南段;实线:北段)

6) ,可见地震在相位角 0° 及 $\pm 150^\circ$ 附近较为集中 ,接近引潮力最大(望)或最小(朔)的时间段。

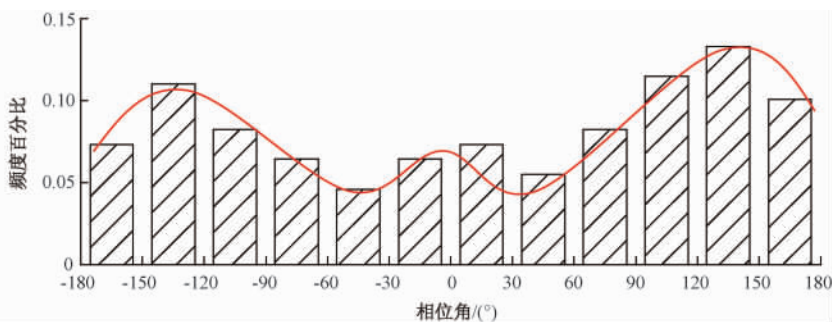


图 6 汶川地震北段 2008 年 8 月 1 日 ~ 10 月 1 日 $M_s \geq 3.0$ 引潮力 Schuster 检验相位角分布直方图(总数标准化为 1)

3.2 潮汐力半月潮调制的统计检验

进一步研究余震发生时刻与半月潮的关系 ,取每天中午 12 点的潮汐应力(本文采用南北向分量的数值 ,因各分量的相位一致或相差 180°) 数值 ,依据固体潮汐的半月潮曲线 ,依次确定每个地震的潮汐相位角 ,南、北段半月潮汐相位角统计如图 7 所示。

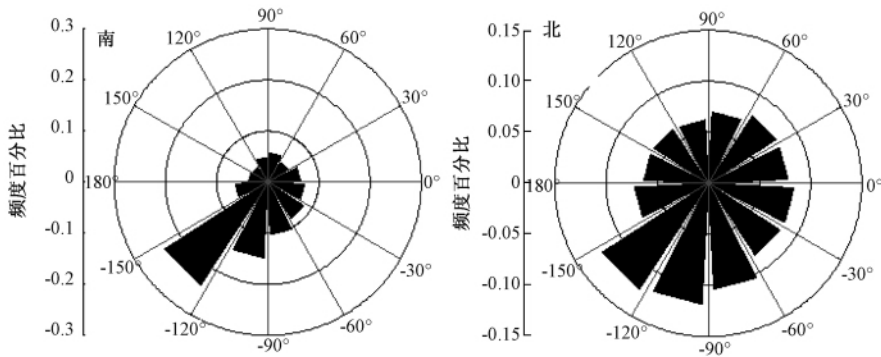


图7 汶川南(左)、北(右)段 $M_s \geq 3.2$ 引潮力半月潮相位角玫瑰图统计分布(总数标准化为100)

可见无论是南段还是北段,余震都较集中地分布于 -120° 附近,同时,分不同震级下限进行 Schuster 检验得到的 p 值亦非常小(接近于0),表明在潮汐变化的月尺度条件下,潮汐调制非常明显。但需要指出的是,由于汶川地震后早期阶段(6月份之前)余震发生频次相对较高,有可能影响了整个统计结果,而且这一时期包括汶川主震在内的多次中强地震均发生在上、下弦附近。为削弱这种余震丛集对结果的影响,采取以月为单位,对汶川地震南、北段完备目录每月随机抽取30次地震进行统计,如此重复100次以减弱随机效应的影响。Schuster 检验计算结果显示,无论南段还是北段, p 值也非常小(接近于0),仍然远远小于潮汐触发地震的阈值0.05。据此似可认定,汶川余震活动在月尺度上非常明显地受到潮汐调制。从相位角直方统计图(图8)中也可看出,南段(图8(a))地震多发于 $\pm 90^\circ$ 和 0° 附近,即上、下弦附近和大潮时段;而北段(图8(b))地震除相对多地发生于 $\pm 90^\circ$ 附近外, 180° 附近也有较多分布,即除上、下弦外,小潮时段也是一个地震的多发时段。

3.3 断层面上潮汐应力相位角检验

本文共收集了1006次汶川地震余震的震源机制结果。数据来源于张致伟等(2010)利用振幅比结合 P 波初动给出的906个 $M_L \geq 3.5$ 小震震源机制解,郑勇等(2009)对较大余震震源机制的计算结果以及胡幸平等(2008)、郭祥云等(2010)的结果,哈佛大学 CMT^③ 以及 USGS 网站^④ 公布的结果等。对来源不同的相同地震的震源机制结果经对比后保留其中较一致(先挑出两个最接近的解,然后综合几个结果,保留其中一个)的一个。震源机制两个节面基本上是 NE 及 NW 两个方向,由于难于识别小震的真实断层面,为便于统计,将 NE 向的震源机制结果统一作为节面 I、NW 向断层统一作为节面 II。基于以上数据,对汶川地震余震在断层面上进行潮汐正应力和潮汐剪应力的 Schuster 检验。

统计结果显示,正应力结果 $p = 0.9448$,剪应力结果 $p = 0.8371$,均远远高于潮汐触发地震的阈值0.05。分别对正应力和剪应力数据加时间窗口平滑,选择90天窗口长度,平滑曲线如图9所示。断层面潮汐剪应力90天窗口平滑结果仍然较大,没有达到触发阈值,而正应力在9月中旬的平滑结果较小,达到潮汐触发阈值0.05,这一时期与前述的强余震起伏

③ <http://www.globalemt.org/CMTfiles.htm>

④ <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/sopar>

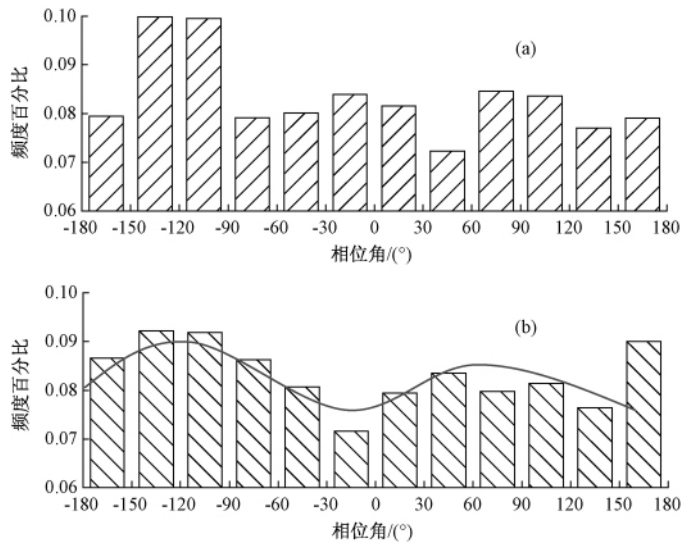


图 8 汶川地震南 (a)、北 (b) 段引潮力半月潮相位角统计
(每月随机抽取 30 次循环 100 次,总数标准化为 1)

活动有一个月左右的滞后(图 1),但是考虑到窗口长度为 90 天(曲线的数值取前后各 45 天范围内的地震数据算得),在余震区北段发生的 3 次 6 级地震及多次 5 级地震(图 1(b))仍然在这个时间范围内。据此,7 月底、8 月初这一组中强地震的起伏活动,具体来看,可能与这一时期潮汐正应力的变化有关。

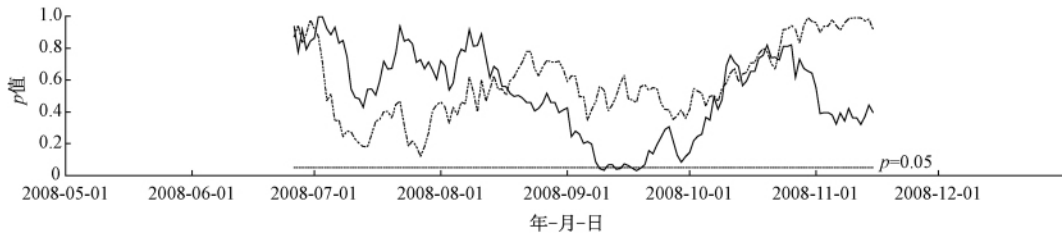


图 9 汶川地震余震断层面潮汐应力相位角 p 值 90 天长度窗口平滑结果(实线:正应力;虚线:剪应力)

分别对潮汐正应力和潮汐剪应力的相位角进行统计(图 10)。由图 10 可见,对正应力而言(图 10(a)),地震多发生于 -120° 及 0° (180°) 附近,即接近潮汐正应力最大和最小值附近;而对剪应力而言(图 10(b)) 0° (180°) 及 90° 附近也是地震的高发相位,对应潮汐剪应力最大。换言之,尽管潮汐剪应力未通过触发地震的统计检验,但在其最大值附近时段仍有相对多的地震发生;而潮汐正应力极值附近(最大或最小)则确实是地震活动的相对密集时段。

分别对汶川地震余震区南段和北段断层面上的正应力和剪应力结果进行检验(图 11),结果显示 p 值都较大,未能达到所规定的潮汐触发阈值。但北段正应力平滑后(图 11(b)),8 月中旬以后的 p 值则变得非常小,与之前引潮力(图 5)和整个余震区正应力(图 9)的平滑结果有相似之处。这意味着,这一时期北段的余震活动起伏确实与潮汐触发有关。

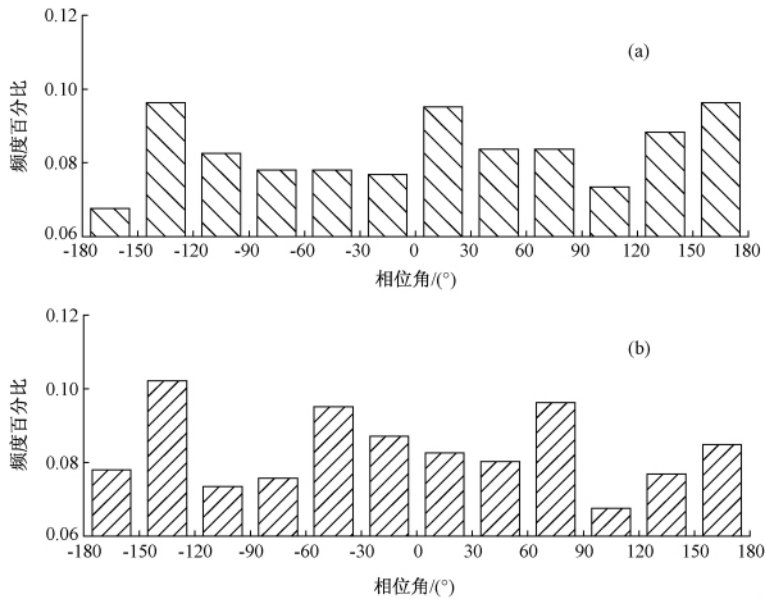


图 10 汶川地震全余震区潮汐正应力 (a)、剪应力 (b) 相位角统计结果 (总数标准化为 1)

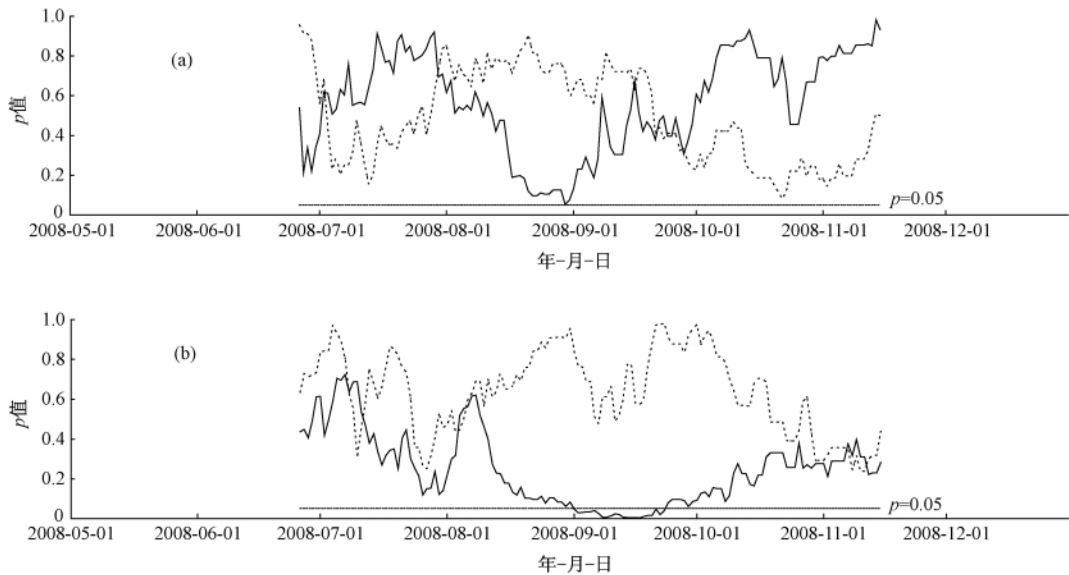


图 11 汶川地震余震南北段断层面潮汐正应力、剪应力相位角 p 值 90 天长度窗口平滑结果

(a) 南段; (b) 北段; 实线: 正应力; 虚线: 剪应力

3.4 潮汐库仑破裂应力检验

由于断层面上正应力(取张开为正)的增加和滑动方向上剪应力的增加都有利于断层错动,而这两个力对断层作用的综合效果可由潮汐库仑破裂应力来体现。发震断层面上由潮汐引起的库仑应力变化可由库仑破裂应力变化公式求得(Fischer et al 2006; Wan et al 2004; Cochran et al, 2004)

$$\Delta CFS = \Delta\tau + \mu' \Delta\sigma \quad (5)$$

式中 ΔCFS 代表断层面上由潮汐引起的库仑应力变化值; $\Delta\tau$ 为断层面上沿滑动方向的潮汐剪应力变化; μ' 为断层的有效摩擦系数 $\mu' = (1 - B)$, 是摩擦系数 B 是 Skempton 系数, 理论范围为 $0 \sim 1$, 研究中 μ' 通常取 0.4 (Fischer et al 2006; Wan et al 2004; Cochran et al, 2004)。

对余震区分南北段、分断层破裂类型进行库仑破裂应力计算, 结果如表 2 所示。由表可见, 北段逆断层的 Schuster 检验 p 值较小, 达到潮汐触发地震的阈值。进一步对北段逆断层相位角进行统计, 可见地震多发生于 45° 相位角附近(图 12), 这可能与未考虑海洋加载影响到真正的相位选择有关(Tsuruoka et al, 1995)。

表 2 对余震区及南、北段分断层破裂类型进行潮汐库仑破裂应力影响的 p 值计算结果

	不限断层	正断层	逆断层	走滑断层	斜滑断层
全段	0.5956	0.7971	0.3457	0.9664	0.8526
北段	0.4941	0.8005	0.0268	0.7314	0.3706
南段	0.4667	0.9139	0.9331	0.6791	0.3511

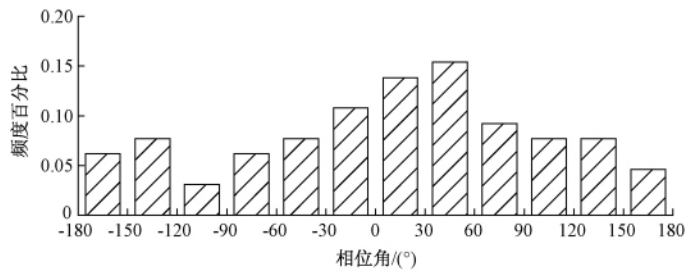


图 12 汶川地震余震区北段逆断层潮汐库仑破裂应力相位角统计(总数标准化为 1)

对整个余震区潮汐库仑破裂应力相位角进行 Schuster 检验, 90 天长度窗口的 p 值平滑结果(图 13)亦可看出 8 月初 p 值非常接近潮汐触发地震的阈值, 同样表明 7 月底、8 月初的一组中强余震活动有可能受到潮汐触发影响。

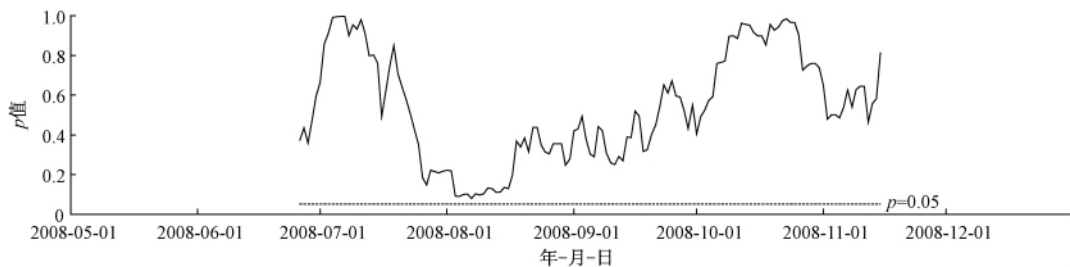


图 13 汶川地震余震区潮汐库仑破裂应力相位角 p 值 90 天长度窗口平滑结果

4 小结及讨论

本文利用 Schuster 检验的方法对汶川地震余震受潮汐触发的情况做了较为系统的研究, 分时段、分区段对引潮力、潮汐应力、潮汐库仑破裂应力与余震的关系等进行了分析。主

要结果归纳如下:

(1) 由于平均效应的影响,简单的 Schuster 检验往往无法通过统计检验,即一般 p 值较高。选择合适的时间窗口进行平滑后,余震活动与潮汐之间的统计关系往往会显现。

(2) 引潮力日尺度的统计结果显示,汶川地震余震区北段 7 月底、8 月初的强余震活动受潮汐调制明显, Schuster 检验平滑 p 值在这一时期非常小,达到 0.05 的触发阈值。进一步的相位角分布研究发现,这一时期地震多发生于 0° 和 $\pm 150^\circ$ 附近,接近引潮力最大(望)或最小(朔)的时间段,而在南段这一关系不显著,可认为不存在触发,或触发不明显。

(3) 对引潮力半月潮的统计检验显示,无论余震区南段还是北段, p 值均非常小,远远小于潮汐触发地震的阈值,因而汶川余震在月尺度上受潮汐调制非常明显。相位角统计显示,北段地震多发于月潮汐曲线的 $\pm 90^\circ$ 附近和 180° 附近,即上、下弦时段和小潮时段;南段地震则多发于月潮汐曲线的 $\pm 90^\circ$ 和 0° 附近,即上、下弦和大潮时段。

(4) 对整个余震区断层面上潮汐正应力和剪应力的检验结果显示,潮汐正应力在 9 月中旬的一段时间内,平滑结果小于触发阈值,这与北段引潮力 Schuster 检验平滑结果有类似之处。而将数据分成南、北段分别进行计算后发现,北段潮汐正应力 p 值平滑结果达到触发阈值的时间范围更宽,从而验证了此前计算结果的正确性。南段潮汐正应力虽然在 8 月中旬的一段时间内 p 值平滑结果较小,但仍未达到触发阈值。对潮汐正应力而言,地震多发生于 0° 、 180° 及 $\pm 120^\circ$ 附近,即接近潮汐正应力最大值或最小值附近。而整个余震区,无论分段计算还是整体计算,潮汐剪应力结果均未达到触发阈值。

(5) 对余震区南、北段,分断层破裂类型进行库仑破裂应力计算的结果显示,北段逆断层 Schuster 检验 p 值较小,达到潮汐触发阈值。进一步对北段逆断层相位角进行统计发现,其地震多发于 45° 附近,这可能与未考虑海洋加载影响到真正的相位选择有关(Tsuruoka et al, 1995)。

综上所述,从整体上来看,汶川地震余震区北段潮汐触发作用比南段明显,月尺度潮汐触发比潮汐日变化触发明显。引潮力触发结果比潮汐应力和潮汐库仑破裂应力触发明显。这可能有 3 方面原因:①虽然尽量收集了较大余震的震源机制,但仍有部分震源机制解缺失,而对引潮力而言,只需考虑地震目录的完备性即可;②震源机制解的计算结果有不确定之处,从 5 级以上地震震源机制解来看,不同研究者的结果之间有时仍有较大差异,更小地震的结果则更难于检验;③真实断层面的不确定性也有较大影响,为了简化研究,按照汶川地震余震的分布特点,将 NE 向的震源机制解作为真实断层面的解进行计算,而实际情况很可能并非如此。换言之,震源机制资料的完备性和准确性是考虑应力作用方向的潮汐触发研究工作的基础。由于上述震源机制的不确定性,使得貌似更为“精确”的、将潮汐应力在断层面上进行分解的计算方法,其所得结果并不比单纯考虑引潮力变化所得结果更为精确。

另外,本文因未考虑海洋潮汐加载的问题,可能会影响到最后的结果而导致无法解释一些现象,例如图 12,因为当地震涉及一个子区域时,海洋潮汐加载的忽视不大可能影响相位的选择,因为在直接固体潮之后的海洋潮汐滞后时间几乎是常数,但这样分析得到的相位未必是真正的潮汐相位(Tsuruoka et al, 1995)。

致谢:张晶研究员、郗钦文研究员、闫春恒、李智睿研究实习员及李胜乐研究员为本研究的程序编制提

供了诸多帮助,张致伟研究实习员提供了 3.5 级以上余震的震源机制解,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- 陈九辉、刘启元、李顺成等,2009,汶川 M_s 8.0 地震余震序列重新定位及其地震构造研究,地球物理学报,52(2), 390~397。
- 陈荣华,2003,引潮力对显著地震触发作用与大震关系及在雅江地震预报中的应用,地震,23(1),53~56。
- 程万正、阮祥、张致伟,2009a,汶川 8.0 级地震序列及震型判定,地震,29(1),15~25。
- 程万正,2009b,汶川 8.0 级地震序列的时-空扩展与强余震趋势的阶段估计,四川地震,133(4),1~11。
- 郭祥云、陈学忠、李艳娥,2010,2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震与部分余震的震源机制解,地震,30(1),50~60。
- 胡幸平、俞春泉、陶开等,2008,利用 P 波初动资料求解汶川地震及其余震震源机制解,地球物理学报,51(6), 1711~1718。
- 华卫、陈章立、郑斯华,2009,2008 年汶川 8.0 级地震震源参数分段特征的研究,地球物理学报,52(2),365~371。
- 黄媛、吴建平、张中天等,2008,2008 汶川 8.0 级大地震及其余震序列重新定位研究,中国科学,38(10),1242~1249。
- 蒋海昆、黎明晓、吴琼等,2008,5·12 汶川 8.0 级地震序列及相关问题讨论,地震地质,30(3),34~47。
- 李传友、叶建青、谢富仁等,2008,汶川 M_s 8.0 地震地表破裂带北川以北段的基本特征,地震地质,30(3),683~696。
- 李志雄、邵志刚、赵翠萍等,2009,汶川 8.0 级地震序列活动的分段性研究,地震,29(1),26~32。
- 石玉涛、高原、赵翠萍等,2009,汶川地震余震序列的地震各向异性,地球物理学报,52(2),398~407。
- 王勤彩、陈章立、郑斯华,2009,汶川大地震余震序列震源机制的空间分段特征,科学通报,54,2348~2354。
- 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。
- 吴小平、冒蔚、黄雍等,2009,基于不同构造分区中国地震的潮汐应力触发效应及相关天文特征,中国科学,39(6), 901~912。
- 张国民、李丽、黎凯武等,2001,强震成组活动与潮汐力调制触发,中国地震,17(2),110~120。
- 张晶、郗钦文、杨林章等,2007,引潮力与潮汐应力对强震触发的研究,地球物理学报,50(2),448~454。
- 张勇、许力生、陈运泰,2009,2008 年汶川大地震震源机制的时空变化,地球物理学报,52(2),379~389。
- 张致伟、张永久、程万正等,2010,汶川 8.0 级地震序列的小震震源机制及应力场特征,地震研究,33(1),43~49。
- 张竹琪、张培震、王庆良,2010,龙门山高倾角逆断层结构与孕震机制,地球物理学报,53(9),2068~2082。
- 赵博、石玉涛、高原,2011,汶川 M_s 8.0 地震及余震序列重新定位,地震,31(2),1~10。
- 赵小茂、王新、柯昌安等,2010,汶川地震强余震与引潮力关系的初步研究,地震地磁观测与研究,31(3),46~51。
- 郑勇、马洪生、吕坚等,2009,汶川地震强余震($M_s \geq 5.6$)的震源机制解及其与发震构造的关系,中国科学 D 辑,39(4), 413~426。
- 朱艾斓、徐锡伟、刁桂苓等,2008,汶川 M_s 8.0 地震部分余震重新定位及地震构造初步分析,地震地质,30(3),759~767。
- Aki K,1956,Some problems in statistical seismology,Zisin H 8,205~208 (in Japanese).
- Cheng W Z,Zhang Z W,2009,Ruan X. Spatio-temporal variation and focal mechanism of Wenchuan M_s 8.0 earthquake sequence, Earthquake Science,22(2),107~117.
- Cochran E S,Vidale J E,Tanaka S,2004,Earth tides can trigger shallow thrust fault earthquakes,Science,306,1164~1166.
- Fischer T,Kalenda P,Skalsky L,2006,Weak tidal correlation of NW-Bohemia/Vogtland earthquake swarms,Tectonophysics, 424,259~269.
- Heaton T H,1975,Tidal triggering of earthquakes,Geophys J,43(2),307~326.
- Heaton T H,1982,Tidal triggering of earthquakes,Bull Seism Soc Am,72(6),2181~2200.
- Ren J J,Chen G H,Xu X W,et al,2010,Surface rupture of the 2008 wenchuan,China, earthquake in the Qingping stepover determined from geomorphologic surveying and excavation and its tectonic implications,Bulletin of the Seismological Society of America,100,2651~2659.
- Lockner D A,Beeler N M,1999,Premonitory slip and tidal triggering of earthquakes,J Geophys Res,B104(9),20133~20151.
- Cadicheanu N,Ruymbeke M V,Zhu P,2007,Tidal triggering evidence of intermediate depth earthquakes in the Vrancea zone

- (Romania) ,*Nat Hazards Earth Syst Sci* **7** , 733 ~ 740.
- Tanaka S 2010 ,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* ,**37** ,L02301 ,doi: 10.1029/2009GL041581.
- Tanaka S ,Ohtake M ,Sato H 2004 ,Tidal triggering of earthquakes in Japan related to the regional tectonic stress ,*Earth Planets Space* **56** 511 ~ 515.
- Tanaka S ,Ohtake M ,Sato H 2002 ,Evidence for tidal triggering of earthquakes as revealed from statistical analysis of global data ,*J Geophys Res* **107** 2211 ,doi: 2210.1029/2001JB001577.
- Tsuruoka H ,Ohtake M ,Sato H ,1995 ,Statistical test of the tidal triggering of earthquakes: contribution of the ocean tide loading effect ,*Geophys J Int* **122** ,183 ~ 194.
- Wan Y G ,Wu Z L ,Zhou G W 2004 , Focal mechanism dependence of static stress triggering of earthquakes ,*Tectonophysics* **390** , 235 ~ 243.
- Li Q ,Xu G M 2011 ,Tidal triggering of earthquakes in Longmen Shan region: the relation to the fold belt and basin structures ,*Earth Planets Space* ,doi: 10.5047/eps.2011.06.037.

A statistical analysis on Wenchuan aftershock activity triggered by earth tide

Li Jin¹⁾ Jiang Haikun²⁾

1) Institute of Earthquake Science , CEA , Beijing 100036 , China

2) China Earthquake Networks Center , Beijing 100045 , China

Abstract A statistical analysis on Wenchuan aftershock activity triggered by tidal is systematically studied based on Schuster's test , including earthquakes triggered by tidal force , tidal stress and tidal coulomb failure stress. The results show that a group of strong aftershocks which occur at the end of July to early August in 2008 at the north of the Wenchuan are obviously triggered by earth tide. The same conclusion is drawn by Schuster's smooth test of the tidal force , tidal stress and tidal coulomb failure stress. In addition , Wenchuan aftershock activity is obviously triggered by fortnight tide. In the north , the aftershocks happened more frequently in the first quarter and the last quarter of the moon , and in the south , the aftershocks happened more frequently in the first quarter and the last quarter of the moon and the full moon.

Key words: Wenchuan aftershocks Tidal triggering Schuster's test