

# 基于断层面的天山地区潮汐应力触发地震研究<sup>\*</sup>

李金, 向元, 赵彬彬, 高荣

(新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 选取2003~2014年天山地震带299个 $M_s \geq 3.5$ 地震的震源机制解资料, 利用震中位置及其附近的断层信息来确定真实断层面。在此基础上分区域计算了整个天山地震带、天山中东段、南天山西段发震时刻断层面上潮汐正应力、潮汐剪应力、潮汐库仑破裂应力对天山地区地震活动的触发作用。在计算断层面上潮汐库仑破裂应力时, 分破裂类型针对不同情况设定有效摩擦系数, 讨论其对地震的触发作用。结果表明: 天山地震带地震较多地发生于断层面上潮汐正应力的最小值附近以及潮汐剪应力的最大值附近。从潮汐库仑破裂应力结果来看, 整个天山地区地震活动受潮汐阻滑作用较为显著; 分区结果显示, 天山中东段地区斜滑型地震、南天西段正断型地震受潮汐触发作用较为显著, 其他各类型地震受潮汐阻滑作用较为显著或潮汐作用不明显。

**关键词:** 天山地震带; 潮汐应力; 潮汐触发; 断层面

**中图分类号:** P315.72

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2016)02-0230-09

## 0 引言

日月起潮力引起的固体潮在地球内部产生的周期性的应力变化即潮汐应力, 其量级约为 $10^3$  Pa, 明显小于地震应力降, 但潮汐应力的加载速率比构造应力积累的速率大两个数量级 (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 (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, Beeler, 1999)。因此, 潮汐应力对地震的发生可能有影响, 特别是对处于临界状态的断层可能有触发效应 (Aki, 1956)。基于以上观点, 国内外学者一直致力于对固体潮与地震关系的研究。张国民等 (2001) 的研究显示, 20世纪中国大陆71%的7级以上地震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1970年以来中国大陆7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, 认为引潮力与地震触发具有一定的相关性。李志安等 (1994) 统计1960年以来我国华北、西南地区65个 $M_s \geq 5.8$ 震例的引潮力变化曲线, 并按地区和

断层结构特点进行地震和引潮力关系的分析, 结果表明, 华北地区约有80%的中强地震发生在引潮力南北分量主峰前3天和后3天之内。以往关于固体潮触发地震的研究大多基于潮汐体力来考察地震的发震相位, 如果地震的发生时间集中于某些潮汐相位附近 (即存在优势相位), 则认为地震与潮汐触发有关。虽然大多数研究结果显示固体潮与地震之间具有一定的统计相关关系, 但基于潮汐体力进行的研究实际上存在一定的局限, 它忽略每个地震断层本身的性质, 没有计算影响地震发生的最关键的潮汐应力分量, 而是对所有统计的地震计算某一个固定取向的潮汐应力分量或计算潮汐应力张量不变量, 而这些潮汐分量与所研究多数地震的断层取向和发震时的滑动方向并不相关。

天山是中亚的主要山脉, 南有塔里木盆地, 北有哈萨克斯坦地盾和准噶尔盆地。由于受印度板块和欧亚板块的挤压, 构造活动持续不断, 因而天山地区的地震活动也非常活跃 (魏若平, 1993)。前期基于潮汐体力的研究结果表明, 天山中东段地区地震活动和固体潮关系密切, 利用Schuster检验得出2011年11月1日尼勒克6.0级地震受固体潮触发明显 (李金等, 2014b), 喀什—乌恰交汇区地震活动较多的发生于潮汐日变化及月变化的最大值附近 (李金等, 2014a), 表明

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2015-03-25.

**基金项目:** 新疆地震局基金 (201304、201401) 和 2015年度震情跟踪合同制定向工作任务 (2015010301、2015010113) 联合资助。

天山地震带地震活动受潮汐触发明显。但基于潮汐体力的研究终究存在诸多问题,本文在求解天山地震带较大地震(南天山西段  $M_s \geq 4.0$ , 天山中东段  $M_s \geq 3.5$ )震源机制解的基础上,开展断层面上潮汐正应力、滑动方向潮汐剪应力、潮汐库仑破裂应力对地震的触发研究。

## 1 数据选取及潮汐应力计算

### 1.1 数据选取及真实断层面判定

选取 2003 ~ 2014 年在天山地震带发生的 299 个  $M_s \geq 3.5$  地震的震源机制解资料,其中 3.0 ~ 4.0 级 123 次,4.0 ~ 5.0 级 130 次,5.0 ~ 6.0 级 39 次,6.0 ~ 6.9 级 7 次(图 1)。2003 ~ 2013 年地

震的震源机制解由高国英等(2010, 2012)提供,2013 ~ 2014 年地震的震源机制解由笔者利用 CAP 方法计算得到。

在研究发震时刻断层面的潮汐正应力、剪应力以及潮汐库仑破裂应力对地震是否具有触发作用之前,首先要确定震源机制解两个节面中哪一个是真实发震断层面。对于中强地震,根据地表破裂、余震展布等可以方便地确定发震断层面,但对于 3.0 ~ 4.0 级地震,其真实发震断层面的确定则较为复杂,常用的方法大致可分为 4 类:振幅反演法、波形反演法、震源位置分析法以及应力张量反演法(李春峰,鲁法伟,2005)。然而在实际应用中,通常选择与发震断层面近于平行的一个节面(nodal plane)作为断层面来进行研究。

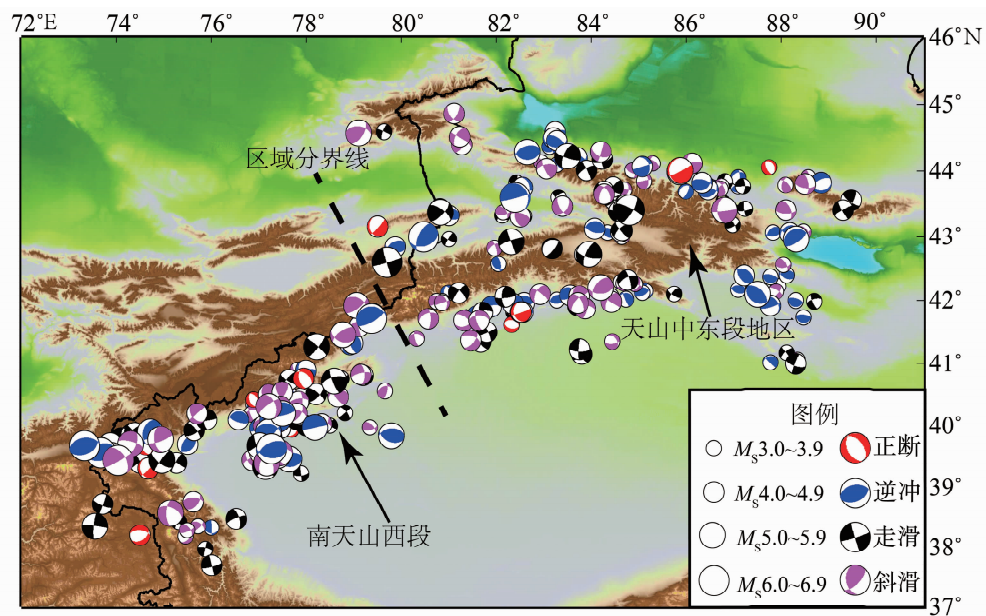


图 1 2003 ~ 2014 年天山地震带震源机制解分布图及空间划分情况

Fig. 1 Distribution of focal mechanism in Tianshan Seismic Zone between 2003 and 2014 and the spatial division in the study area

本文利用邓起东等(2002)提供的断层数据来确定震源机制解中的真实发震断层面。具体做法:找出距离震中位置最近的断层(断层长度不小于 50 km),根据断层走向,找出震源机制解两个节面中走向与断层走向偏差最小的一个节面作为真实发震断层面。根据上述思路,确定了 299 个地震的真实发震断层面。为了考察所确定发震断层面的可靠性,统计研究了真实断层面与相邻最近断层走向的角度差以及该地震与断层之间的最小距离(图 2),由统计可知,210 次地震与断层

之间的距离小于 20 km(图 2a),占总数的 73.7%,而 236 次地震所确定真实断层面的走向与其距离最近断层走向的夹角小于  $20^\circ$ (图 2b),占总数的 78.9%。由此初步认为,利用此方法所确定的真实断层面较为准确。

### 1.2 潮汐应力分解

首先需计算月亮和太阳在震源处产生的球坐标下的潮汐应力,常用的有球谐展开方法(吴小平等,2001)和基于勒夫数的计算方法(郗钦文,候天航,1986;骆鸣津等,1986;蒋俊,张雁滨,

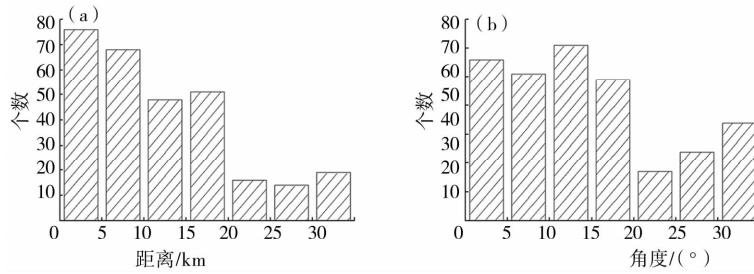


图2 地震与相邻最近的断层之间的最小距离 (a) 以及真实断层面与该断层走向的角度差 (b) 统计

Fig. 2 Statistic of the minimum distance between earthquakes and their nearest fault (a) and the angle difference of strike between true fault and the nearest fault

1995)。由已知的地震震源机制解断层走向  $\varphi_s$ , 倾角  $\delta$ , 滑动方向  $\lambda$ , 可将震源处球坐标系下的潮汐应力转换到断层面上, 从而得到断面上的潮汐正应力和剪应力。实际中, 常用断层面取向的单位矢量  $\mathbf{n}$  及滑移矢量  $\mathbf{D}$  来描述断层及其滑移方向, 即

$$\mathbf{n} = \{\alpha_{n_1}, \alpha_{n_2}, \alpha_{n_3}\}, \quad (1)$$

$$\frac{\mathbf{D}}{|\mathbf{D}|} = \{\alpha_{D_1}, \alpha_{D_2}, \alpha_{D_3}\}. \quad (2)$$

其中,  $\alpha_{n_1}, \alpha_{n_2}, \alpha_{n_3}$  是断层面空间取向的方向余弦; 而  $\alpha_{D_1}, \alpha_{D_2}, \alpha_{D_3}$  则是滑移矢量的方向余弦。稍加变换及推导, 便得到其在球坐标系中的表达式为

$$\begin{cases} \alpha_{n_1} = \sin\delta\sin\varphi_s, \\ \alpha_{n_2} = \sin\delta\cos\varphi_s, \\ \alpha_{n_3} = \cos\delta. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \alpha_{D_1} = -\cos\lambda\cos\varphi_s - \sin\lambda\cos\delta\sin\varphi_s, \\ \alpha_{D_2} = \cos\lambda\sin\varphi_s - \sin\lambda\cos\delta\cos\varphi_s, \\ \alpha_{D_3} = \sin\lambda\sin\delta. \end{cases} \quad (4)$$

为了便于推导和描述, 对球坐标系  $(r, \theta, \lambda)$  做符号代换:  $\theta \rightarrow x_1, \lambda \rightarrow x_2, r \rightarrow x_3$ 。  $\mathbf{T}^{(n)}$  为作用在断层面  $\mathbf{n}$  上的应力矢量,  $\sigma_n$  为  $\mathbf{n}$  上的正应力,  $\tau_n$  为  $\mathbf{n}$  上的剪应力, 应力张量为  $\sigma_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ )。由柯西公式 (尹祥础, 1985), 有

$$\begin{cases} \mathbf{T}^{(n)} = T_1^{(n)} \mathbf{e}_1 + T_2^{(n)} \mathbf{e}_2 + T_3^{(n)} \mathbf{e}_3; \\ T_1^{(n)} = \alpha_{n_1} \sigma_{\theta\theta} + \alpha_{n_2} \sigma_{\lambda\lambda} + \alpha_{n_3} \sigma_{r\theta}; \\ T_2^{(n)} = \alpha_{n_1} \sigma_{\theta\lambda} + \alpha_{n_2} \sigma_{\lambda\lambda} + \alpha_{n_3} \sigma_{r\lambda}; \\ T_3^{(n)} = \alpha_{n_1} \sigma_{\theta r} + \alpha_{n_2} \sigma_{\lambda r} + \alpha_{n_3} \sigma_{rr}. \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$  为坐标系三个正交坐标轴的单位矢量;  $T_1^{(n)}, T_2^{(n)}, T_3^{(n)}$  为应力矢量  $\mathbf{T}^{(n)}$  的 3 个分量。

那么便得到潮汐正应力  $\sigma_n$  和潮汐剪应力  $\tau_n$  分别为

$$\sigma_n = T_1^{(n)} \alpha_{n_1} + T_2^{(n)} \alpha_{n_2} + T_3^{(n)} \alpha_{n_3}, \quad (6)$$

$$\tau_n = (T_1^{(n)} - \sigma_n \alpha_{n_1}) \alpha_{D_1} + (T_2^{(n)} - \sigma_n \alpha_{n_2}) \alpha_{D_2} + (T_3^{(n)} - \sigma_n \alpha_{n_3}) \alpha_{D_3}. \quad (7)$$

### 1.3 潮汐库仑破裂应力

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, 因此选用库仑准则作为判别触发作用的准则。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)

$$\Delta CFS = \tau_n + \mu' \sigma_n. \quad (8)$$

式中,  $\Delta CFS$  代表断层面上由潮汐引起的库仑应力变化值;  $\tau_n$  为断层面上沿滑动方向的潮汐剪应力变化;  $\mu'$  为断层的有效摩擦系数,  $\mu' = \mu (1 - B)$ ,  $\mu$  是摩擦系数,  $B$  是 Skempton 系数, 理论范围为 0 ~ 1, 有效摩擦系数  $\mu'$  在不同的研究中取值有所差异, 通常断层的  $\mu'$  在 0.2 ~ 0.8 之间, 研究中最常用的取值是 0.4 (Fischer *et al.*, 2006; Wan *et al.*, 2004; Cochran *et al.*, 2004)。一些学者研究结果表明, 有效摩擦系数  $\mu'$  可能与断层类型相关, 它依赖于剪切应力和正应力对断层的影响, 高的剪切应力变化对应于主要的、高角度的、走滑断层上的地震活动增加, 采用相对低的有效摩擦系数; 而高的正应力变化对于逆断层上的地震活动有重要的影响, 采用相对高的有效摩擦系数比较合理 (Parsons *et al.*, 1999)。一些学者简单通过断层类型来确定有效摩擦系数的取值, 对走滑断层采取较低的  $\mu' = 0.2$ , 对逆冲断层采用较高的  $\mu' = 0.8$ , 对于正断层取  $\mu' = 0.6$  (Ali *et al.*, 2008); 此外,

也有学者认为有效摩擦系数的取值可能和断层滑动速率相关 (Parsons *et al*, 1999; 单斌等, 2009)。

## 2 结果分析

### 2.1 潮汐正应力与剪应力

通常采用潮汐相位统计法分析地震活动与固体潮的关系 (李志安等, 1994; Tsuruok *et al*, 1995; 韩延本等, 1996; 黎凯武, 1998; 陈荣华, 2003; Tanaka *et al*, 2002a, b, 2004, 2006; 李金等, 2011, 2014a, b), 因为潮汐相位角的分布情况可以直观的反映出地震活动是否集中于潮汐曲线 (日尺度或月尺度) 的某一 (某些) 相位, 从而有助于认识地震活动是否受到潮汐调制或触发。一般而言, 潮汐曲线的  $0^\circ$  为大潮 (日尺度为半日潮峰值, 月尺度称半月潮峰值或农历朔、望), 而  $\pm 180^\circ$  为小潮 (日尺度为半日潮谷值, 月尺度称半月潮谷值或农历上、下弦)。基于此, 即可分析地震活动受大潮或小潮调制, 或不受调制。

当断层面上的潮汐正应力为正时 (潮汐相位角  $-90^\circ \sim 90^\circ$ ), 其指向是离开断层面朝外, 这使得断层面上总的正压力减小, 有利于促进断层滑动; 当断层面上的潮汐正应力为负时 ( $-180^\circ \sim$

$-90^\circ$  或  $90^\circ \sim 180^\circ$ ), 其指向朝内, 使得断层面上总的正压力增加, 不利于断层的滑动。当断层面滑动方向上的潮汐剪应力为正时 (潮汐相位角  $-90^\circ \sim 90^\circ$ ), 表示潮汐剪应力方向与滑动方向一致, 使得断层面滑动方向上总的剪应力增加, 有利于促进断层的滑动; 当断层面滑动方向上的潮汐剪应力为负时 ( $-180^\circ \sim -90^\circ$  或  $90^\circ \sim 180^\circ$ ), 表示潮汐剪应力方向与滑动方向相反, 使得断层面滑动方向上总的剪应力减小, 不利于断层的滑动。

分别对所有地震断层面上的潮汐正应力和潮汐剪应力相位角采用  $30^\circ$  为统计区间进行直方图统计 (图 3), 对潮汐正应力而言 (图 3a), 地震多发生于相位角  $\pm 180^\circ$  及  $120^\circ$  附近, 而在  $0^\circ$  附近地震发生最少, 即当断层面上潮汐正应力最小时, 地震发生相对较多, 而断层面上潮汐正应力最大时, 地震发生最少。对潮汐剪应力而言 (图 3b),  $0^\circ$  及  $-120^\circ$  附近是地震的高发相位,  $0^\circ$  为滑动方向潮汐剪应力最大值时刻, 地震发生个数大体随着滑动方向潮汐剪应力的增加而增加 (除  $-150^\circ \sim -120^\circ$  等少数几个相位区间外), 表明该地区地震活动与潮汐剪应力相关性较好。由此可知, 天山地震带的地震活动较多的发生于断层面上潮汐正应力的最小值附近以及潮汐剪应力的最大值附近。

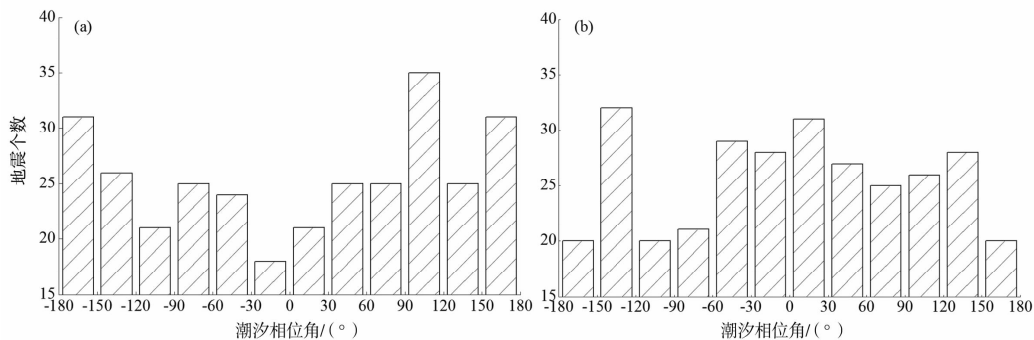


图3 所有数据的潮汐正应力 (a) 与潮汐剪应力 (b) 相位角分布

Fig. 3 The phase angle distribution of tidal normal stress (a) and tidal shear stress (b) for all data

为了进一步研究不同类型地震受潮汐触发的情况, 按照地震断层类型 (Aki, Richards, 1980) 研究地震活动和固体潮之间的关系, 划分依据如表 1 所示, 按上述标准划分后, 得到了不同断层类型地震的个数, 其中逆冲断层 70 个, 正断层 25 个, 走滑断层 111 个, 斜滑断层 93 个。

分别计算逆断层、走滑断层、斜滑断层以及正断层类型地震发震断层面上的潮汐正应力与潮

汐剪应力, 进而确定其发震时刻的潮汐相位角。

表 1 断层类型划分

Tab. 1 Classification of fault types

断层类型	滑动方向
正断层	$-120^\circ \leq \text{滑动角} \leq -60^\circ$
逆断层	$60^\circ \leq \text{滑动角} \leq 120^\circ$
走滑断层	$0^\circ \leq  \text{滑动角}  \leq 30^\circ, 150^\circ \leq  \text{滑动角}  \leq 180^\circ$
斜滑断层	$30^\circ <  \text{滑动角}  < 60^\circ, 120^\circ <  \text{滑动角}  < 150^\circ$

对不同破裂类型地震断层面的潮汐正应力、潮汐剪应力相位角同样按照上述 30° 区间进行直方图统计, 结果如图 4 所示。对于潮汐剪应力而言, 走滑断层、斜滑断层以及正断层地震均较多的发生于 0° 附近 (还有个别其他高发区间, 如走滑断层:  $-150^{\circ} \sim -120^{\circ}$ 、 $90^{\circ} \sim 120^{\circ}$ ; 斜滑断层:  $-150^{\circ} \sim -120^{\circ}$  等), 即这 3 种类型地震较多的发生于潮汐剪应力日变化的峰值附近, 表明潮汐剪应力对这 3 种类型地震的触发作用较为明显; 而对于逆冲型地震来说, 其较多的发生于潮汐剪应力的最小

值附近 (如  $-180^{\circ} \sim -150^{\circ}$ 、 $120^{\circ} \sim 150^{\circ}$  等相位区间, 均较为接近潮汐剪应力日变化的谷值)。而对于断层面的潮汐正应力而言 (图 5), 所有类型的地震在 0° 附近发生均相对较少, 而  $\pm 180^{\circ}$  附近是地震的高发相位, 即地震多发生于潮汐正应力日变化的谷值附近, 而在峰值附近发生的相对较少。

综上可知, 无论是对所有地震一起统计还是分断层进行统计, 天山地震带的地震活动基本都和断层面的潮汐剪应力成正相关, 而和潮汐正应力基本成负相关。

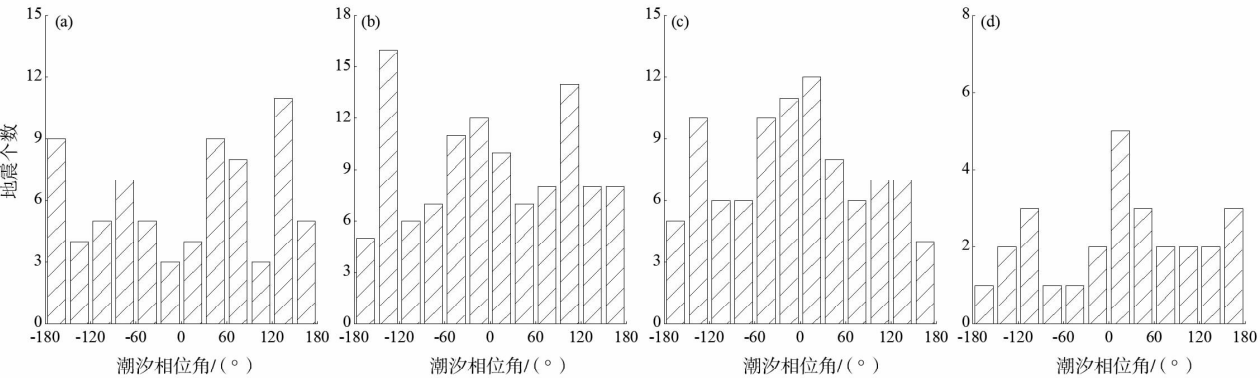


图 4 不同破裂类型地震潮汐剪应力相位角分布情况  
(a) 逆冲断层; (b) 走滑断层; (c) 斜滑断层; (d) 正断层  
Fig. 4 Phase angle distribution of tidal shear stress for different types of earthquake rupture  
(a) reverse faults; (b) strike - slip faults; (c) oblique - slip faults; (d) normal faults

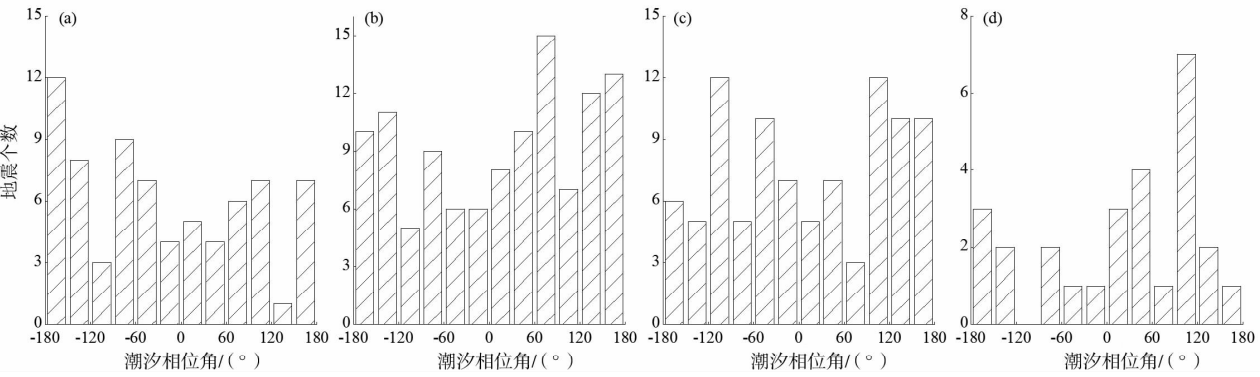


图 5 不同破裂类型地震潮汐正应力相位角分布情况  
(a) 逆冲断层; (b) 走滑断层; (c) 斜滑断层; (d) 正断层  
Fig. 5 Phase angle distribution of tidal normal stress for different types of earthquake rupture  
(a) reverse faults; (b) strike - slip faults; (c) oblique - slip faults; (d) normal faults

2.2 潮汐库仑破裂应力

在计算发震断层面的潮汐库仑破裂应力时,

首先采用常用取值  $\mu' = 0.4$  进行计算, 然后分别按照表 1 中的断层分类原则, 对不同破裂类型的地震

按照上述 $\mu'$ 的取值 ( $\mu' = 0.2$  (走滑断层),  $\mu' = 0.8$  (逆冲断层),  $\mu' = 0.6$  (正断层), 在实际计算中对斜滑类型地震参照走滑型地震,  $\mu' = 0.2$ ) 进行计算。当潮汐库仑破裂应力为正时, 表明断层滑动方向与潮汐库仑破裂应力方向一致, 潮汐对地震起到促滑作用; 当潮汐库仑破裂应力为负时, 表明断层滑动方向潮汐库仑破裂应力方向相反, 潮汐对地震起到阻滑作用。按照这个原则, 笔者对 2003 年以来天山地震带 299 个不同破裂类型地震进行了潮汐促滑 (或阻滑) 统计, 结果如表 2 所示。

表 2 天山地震带潮汐触发地震统计表  
Tab. 2 Statistics of tidal triggering earthquakes  
in Tianshan earthquake zone

地震 类型	地震 个数	$\mu' = 0.4$		按破裂类型设定 $\mu'$	
		促滑	阻滑	促滑	阻滑
走滑	111	51(45.9%)	60(54.1%)	56(50.5%)	55(49.5%)
斜滑	93	45(48.4%)	48(51.6%)	47(50.5%)	46(49.5%)
逆冲	70	34(48.6%)	36(51.4%)	29(41.4%)	41(58.6%)
正断	25	12(48%)	13(52%)	11(44%)	14(56%)

天山地震带发生的 299 个  $M_s \geq 3.5$  地震中走滑、斜滑、逆冲及正断类型地震个数分别为 111、93、70 及 25, 分别占总数的 37.1%、31.1%、23.4% 及 8.4%。当  $\mu' = 0.4$  计算潮汐库仑破裂应力时, 各类型地震 (依次为走滑、斜滑、逆冲及正断) 所占比例均低于 50%, 表明固体潮对各类地震均起到阻滑作用, 其中走滑型地震促滑比例仅为 45.9%; 当对不同破裂类型地震分别取不同的  $\mu'$  值 (走滑、斜滑:  $\mu' = 0.2$ ; 逆冲:  $\mu' = 0.8$ ; 正断:  $\mu' = 0.6$ ) 计算潮汐库仑破裂应力时, 走滑与斜滑型地震促滑与阻滑比例相当, 逆冲与正断类型地震阻滑比例高于促滑比例。由此可知, 当对天山地震带不同破裂类型地震取  $\mu' = 0.4$  时, 走滑型地震较明显的受到固体潮阻滑作用, 固体潮对其他类型地震作用不明显; 当对不同破裂类型地震分别取不同的  $\mu'$  值计算潮汐库仑破裂应力时, 逆冲及正断类型地震受固体潮阻滑作用较为明显, 走滑和斜滑型地震受固体潮作用不明显。

天山地区中强以上破坏型地震频度相对较高, 2003 年以来共发生  $M_s \geq 5.0$  地震 46 次。笔者计算了这些中强地震发震时刻断层面滑动方向的潮汐库仑破裂应力, 结果如表 3 所示, 无论如何设定  $\mu'$  (对不同破裂类型地震  $\mu' = 0.4$  或按照不同的破

裂类型设定  $\mu'$  值), 除 2 次正断型地震均受潮汐触发作用, 其他几种类型地震均受潮汐阻滑作用较为明显, 特别是走滑型地震, 受潮汐阻滑作用最为显著。

表 3 天山地震带  $M_s \geq 5.0$  潮汐触发地震统计表  
Tab. 3 Statistics of tidal triggering  $M_s \geq 5.0$  earthquakes  
in Tianshan earthquake zone

地震 类型	地震 个数	$\mu' = 0.4$		按破裂类型设定 $\mu'$	
		促滑	阻滑	促滑	阻滑
走滑	16	4(25.0%)	12(75.0%)	5(31.3%)	11(68.7%)
斜滑	15	7(46.7%)	8(53.3%)	7(46.7%)	8(53.3%)
逆冲	13	6(46.2%)	7(53.8%)	5(38.5%)	8(61.5%)
正断	2	2(100%)	0(0)	2(100%)	0(0)

为了进一步分析天山地震带不同分区地震活动受固体潮触发情况, 将天山地震带划分为天山中东段地区及南天山西段地区进行潮汐库仑破裂应力计算, 天山中东段地区和南天山西段的具体分界线见图 1。表 4 为天山中东段地区潮汐库仑破裂应力的统计结果。天山中东段地区走滑、斜滑、逆冲及正断类型地震个数分别为 72、51、41 及 14。当  $\mu' = 0.4$  计算潮汐库仑破裂应力时, 仅斜滑型地震促滑比例高于 50%, 其他 3 种类型地震潮汐促滑比例均低于 50%, 其中走滑型和正断型地震促滑比例相对较低; 当对不同破裂类型地震分别取不同的  $\mu'$  值计算潮汐库仑破裂应力时, 走滑和斜滑型地震潮汐促滑比例大于 50%, 其中斜滑型地震促滑比例最高, 逆冲和正断型地震促滑比例均较低。由此可知, 当对天山中东段地区不同破裂类型地震取  $\mu' = 0.4$  时, 斜滑型地震受潮汐促滑作用较为明显, 正断及走滑型地震受潮汐阻滑作用较为明显; 当对不同破裂类型地震分别取不同的  $\mu'$  值计算潮汐库仑破裂应力时, 斜滑型地震受潮汐促滑作用较为明显, 而逆冲及正断型地震受潮汐阻滑作用较为明显。

表 4 天山中东段潮汐库仑破裂应力触发地震统计  
Tab. 4 Statistics of tidal coulomb failure stress triggering  
earthquakes in mid-east of Tianshan area

地震 类型	地震 个数	$\mu' = 0.4$		按破裂类型设定 $\mu'$	
		促滑	阻滑	促滑	阻滑
走滑	72	33(45.8%)	39(54.2%)	37(51.3%)	35(48.7%)
斜滑	51	28(54.9%)	23(45.1%)	29(56.9%)	22(43.1%)
逆冲	41	20(48.8%)	21(51.2%)	16(39%)	25(61%)
正断	14	5(35.7%)	9(64.3%)	5(35.7%)	9(64.3%)



南天山西段地区走滑、斜滑、逆冲及正断类型地震个数分别为 39、42、29 及 11（表 5），当  $\mu' = 0.4$  计算潮汐库仑破裂应力时，南天山西段地区走滑及斜滑型地震潮汐促滑比例低于 50%，其中斜滑型地震受潮汐促滑比例最低，仅为 40.5%，而正断型地震潮汐促滑比例高达 63.6%；当对不同破裂类型地震分别取不同的  $\mu'$  值计算潮汐库仑破裂应力时，仅正断型地震受潮汐促滑比例相对较高为 54.5%，其他 3 种类型地震受潮汐促滑比例均低于 50%，其中斜滑型地震促滑比例最低，为 42.8%。由此可知，当对南天山西段地区不同破裂类型地震均取  $\mu' = 0.4$  时，正断型地震受潮汐促滑作用较为明显，斜滑及走滑型地震受潮汐阻滑作用较为明显；当对不同破裂类型地震分别取不同的  $\mu'$  值计算潮汐库仑破裂应力时，正断型地震受潮汐促滑作用较为明显，斜滑及逆冲型地震受潮汐阻滑作用较为明显。

表 5 南天山西段潮汐库仑破裂应力触发地震统计  
Tab. 5 Statistics of tidal coulomb failure stress triggering earthquakes in west segment of South Tianshan area

地震类型	地震个数	$\mu' = 0.4$		按破裂类型设定 $\mu'$	
		促滑	阻滑	促滑	阻滑
走滑	39	18(46.1%)	21(53.9%)	19(48.7%)	20(51.3%)
斜滑	42	17(40.5%)	25(59.5%)	18(42.8%)	24(57.2%)
逆冲	29	14(48.3%)	15(51.7%)	13(44.8%)	16(55.2%)
正断	11	7(63.6%)	4(36.4%)	6(54.5%)	5(45.5%)

3 结论与讨论

本研究在求解天山地震带较大地震（南天山西段  $M_s \geq 4.0$ ，天山中东段  $M_s \geq 3.5$ ）震源机制解的基础上，开展断层面上潮汐正应力、滑动方向潮汐剪应力、潮汐库仑破裂应力对地震的触发研究。其主要认识归纳如下：

（1）天山地震带地震活动和潮汐剪应力成正相关，而和潮汐正应力基本成负相关，即地震活动较多地发生于断层面上潮汐正应力的最小值附近以及潮汐剪应力的最大值附近。分破裂类型来看，走滑断层、斜滑断层以及正断层地震均较多的发生于潮汐剪应力的峰值附近，逆冲型地震在潮汐剪应力的峰值附近发生相对较少；对于潮汐正应力而言，所有类型的地震在  $0^\circ$  附近发生均相

对较少，而在  $\pm 180^\circ$  附近是地震的高发相位，即地震多发生于潮汐正应力日变化的谷值附近，而在峰值附近发生的相对较少。

（2）从整个天山地震带潮汐库仑破裂应力来看，当  $\mu' = 0.4$  时，各破裂类型地震潮汐触发比例均低于 50%，其中走滑型地震促滑比例仅为 45.9%，表明潮汐对走滑型地震阻滑作用较为明显；当对不同破裂类型地震分别取不同的  $\mu'$  值计算潮汐库仑破裂应力时，走滑与斜滑型地震促滑与阻滑比例相当，逆冲与正断类型地震阻滑比例高于促滑比例，即逆冲及正断类型地震受固体潮阻滑作用较为明显，走滑和斜滑型地震受固体潮作用不明显。

对天山地震带  $M_s \geq 5.0$  地震进行潮汐库仑破裂应力检验后发现，除 2 次正断型地震外，其他几种类型地震均受潮汐阻滑作用较为明显，特别是走滑型地震，受潮汐阻滑作用最为显著。

（3）从天山中东段地区潮汐库仑破裂应力来看，当  $\mu' = 0.4$  时，斜滑型地震受潮汐促滑作用较为明显，正断及走滑型地震受潮汐阻滑作用较为明显；当对不同破裂类型地震分别取不同的  $\mu'$  值计算潮汐库仑破裂应力时，斜滑型地震受潮汐促滑作用较为明显，而逆冲及正断型地震受潮汐阻滑作用较为明显。

（4）从南天山西段潮汐库仑破裂应力来看，当  $\mu' = 0.4$  时，正断型地震受潮汐促滑作用较为明显，斜滑及走滑型地震受潮汐阻滑作用较为明显；当对不同破裂类型地震分别取不同的  $\mu'$  值计算潮汐库仑破裂应力时，正断型地震受潮汐促滑作用较为明显，斜滑及逆冲型地震受潮汐阻滑作用较为明显。

（5）由上述基于潮汐应力的研究结果可以看出，天山地震带地震活动受固体潮触发作用并不明显，仅天山中东段地区斜滑型地震受潮汐促滑的比例高于其受阻滑的比例（其他情况由于正断型地震数量相对较少，统计结果可能不具有普遍性）。其他各分区、各类型地震活动受潮汐阻滑作用较为明显。该结果与李金等（2014a, b）在天山地区基于潮汐体力进行的研究结果有较大差异。例如基于潮汐体力的 Schuster 检验的研究结果表明，天山中东段地区中强地震前后，Schuster 检验  $p$  值通常会降低至潮汐触发地震阈值 0.05（李金等，2014a）。对 2000 ~ 2013 年喀什—乌恰交汇区

$M_L \geq 2.5$  地震进行的潮汐体力相位角统计结果也显示, 地震活动在日尺度和月尺度均较多的发生于潮汐峰值附近(李金等, 2014a)。相比于潮汐体力的研究结果, 基于潮汐应力的研究结果本身具有更扎实的物理基础, 就地震的发震机制来看, 发震断层面上潮汐应力的计算结果更能真实的反映地震受固体潮的作用情况。但就本文具体情况而言, 其结果可能仍存在一定的局限性: ①虽然尽可能收集并计算了较大地震的震源机制, 仍有部分地震由于新疆区域地震台网分布等不可控因素未能获得其震源机制解, 而对于基于潮汐体力的研究, 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, 小地震的震源机制结果难以检验; ③真实发震断层面的选取不同可能会导致最终结果的不同。由于小震的真实断层面无法确定, 为简化研究, 笔者尝试用震中位置和其附近的断层信息来确定真实断层面, 这可能会对最终结果产生一定的影响, 针对真实发震断层面的确定等问题需进一步讨论; ④研究潮汐对地震的触发作用时, 需考虑区域构造应力场和发震断层的几何参数及运动学特征; 在计算断层面的潮汐库仑破裂应力时, 有效摩擦系数  $\mu'$  的取值将直接影响最终的结果, 关于  $\mu'$  的取值问题还需深入研究; 震源深度也是潮汐触发地震研究中需要考虑的因素(孙长青等, 2014), 由于本研究中涉及到的地震震级相对较小, 震源深度多数不准确, 因此在研究过程中未进行此项研究。

上述诸多因素可能是导致天山地区潮汐体力(李金等, 2014a, b)和潮汐应力对该地区地震活动作用差异的原因, 因此通过本文研究结果不能断定天山地区地震活动不受潮汐触发或受潮汐阻滑作用较为明显。诸多因素使得貌似更为“精确”的、将潮汐应力在断层面上进行分解的计算方法具有一些不确定性。通过此后区域地震台网不断加密、对地震发震模式认识的不断加深等一系列软硬件设施的进步, 相信潮汐是否能够触发地震这一古老问题终将得到最科学的验证。

衷心感谢蒋海昆研究员的悉心的指导。广西地震局阎春恒助理研究员、新疆地震局高朝军助理研究员, 地震台网中心赵静研究实习员, 中国地震局地震预测研究所罗钧博士, 中国地震局地球物理研究所冀战波博士在课题完成过程中给

予了诸多的帮助, 文中部分图件采用 GMT 绘制, 在此表示衷心的感谢。

## 参考文献:

- 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[J]. 地震, 23(1): 53–56.
- 邓起东, 张培震, 冉勇康等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学: 地球科学, 32(12): 1020–1030.
- 高国英, 聂晓红, 龙海英. 2010. 2003–2008 年新疆区域构造应力场特征探讨[J]. 地震地质, 32(1): 70–79, DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2010.01.007.
- 高国英, 聂晓红, 龙海英. 2012. 近期新疆震源机制解与地震活动特征研究[J]. 西北地震学报, 34(1): 57–63.
- 韩延本, 李志安, 田静. 1996. 日、月引潮力变化与某些地区地震发生时间的相关研究[J]. 地球物理学进展, 11(2): 114–122.
- 蒋俊, 张雁滨. 1995. 发震断层面上潮汐有效剪切应力增量的计算与加卸载的确定[J]. 中国地震, 11(1): 72–83.
- 黎凯武. 1998. 日月引潮力触发地震的一个证据——论邢台、河间和唐山地震的时间特性[J]. 地震学报, 20(5): 545–551.
- 李春峰, 鲁法伟. 2015. 震源机制解中地震断层面与辅助面的区分方法综述[EB/OL]. (2005–10–25). [2015–03–25]. 北京: 中国科技论文在线. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200510-270>.
- 李金, 蒋海昆, 桂荣等. 2014a. 新疆喀什——乌恰交汇区地震活动潮汐触发的统计检验[J]. 中国地震, 30(1): 64–73.
- 李金, 蒋海昆, 黄瑜等. 2014b. 近期天山地震带地震活动固体潮调制的统计分析[J]. 地震, 34(2): 35–44.
- 李金, 蒋海昆. 2011. 汶川地震余震活动固体潮调制的统计分析[J]. 中国地震, 27(4): 363–375.
- 李志安, 陈黎, 韩延本等. 1994. 触发地震的日月引潮力[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 30(3): 368–372.
- 骆鸣津, 顾梦林, 睢建设等. 1986. 固体潮应变理论值的计算[J]. 地球物理学报, 29(2): 157–165.
- 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[J]. 中国科学: 地球科学, 39(5): 537–545.
- 孙长青, 阎春恒, 吴小平等. 2014. 青藏高原东部及邻区地震断层面的潮汐应力触发效应[J]. 地球物理学报, 57(7): 2054–2064, DOI: 10.6038/cjg20140703.
- 魏若平. 1993. 天山地震带多震层分布及大震前地震活动特征[J]. 内陆地震, 7(3): 286–294.
- 吴小平, 黄雍, 胡家富等. 2001. 地震主应力方向的附加潮汐应力计算及其对发震断层的作用方式研究[J]. 地震研究, 24(1): 48–54.
- 郝钦文, 候天航. 1986. 固体潮汐与引潮常数[J]. 中国地震, 2(2): 30–41.
- 尹祥础. 1985. 固体力学[M]. 北京: 地震出版社.
- 张国民, 李丽, 黎凯武等. 2001. 强震成组活动与潮汐力调制触发[J]. 中国地震, 17(2): 110–120.
- 张晶, 郝钦文, 杨林章等. 2007. 引潮力与潮汐应力对强震触发的研究[J]. 地球物理学报, 50(2): 448–454.



- Aki K, Richards P G. 1980. Quantitative Seismology[M]. San Francisco: W H Freeman and Co. .
- Aki K. 1956. Some problems in statistical seismology[J]. J Seismol Soc Japan(Zisin H) , (8):205–208.
- Ali S T, Freed A M, Calais E , *et al.* 2008. Coulomb stress evolution in Northeastern Caribbean over the past 250 years due to coseismic, postseismic and interseismic deformation[J]. Geophysical Journal International, 174(3):904–918.
- Cochran E S, Vidale J E, Tanaka S. 2004. Earth tides can trigger shallow thrust fault earthquakes[J]. Science, 12(306): 1164–1166.
- Fischer T, Kalenda P, Skalsky L. 2006. Weak tidal correlation of NW – Bohemia/Vogtland earthquake swarms[J]. Tectonophysics, 424(3–4): 259–269.
- Heaton T H. 1975. Tidal triggering of earthquakes[J]. Geophys J Int, 43(2): 307–326.
- Heaton T H. 1982. Tidal triggering of earthquakes[J]. Bull Seism Soc Am, 72(6):2181–2200.
- Lockner D A, Beeler N M. 1999. Premonitory slip and tidal triggering of earthquakes[J]. J Geophys Res B, 104(9):20133–20151.
- Parson 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]. Journal of Geophysical Research, 104(B9): 20183–20202.
- Tanaka S, Ohtake M, Sato H. 2002a. Evidence for tidal triggering of earthquakes as revealed from statistical analysis of global data[J]. J geophys Res, 107(B10): 2211, doi:2210.1029/2001JB001577.
- Tanaka S, Ohtake M, Sato H. 2002b. Spatio-temporal variation of the tidal triggering effect on earthquake occurrence associated with the 1982 South Tonga earthquake of  $M_w 7.5$ [J]. Geophys Res Lett, 29(16), doi:10.1029/2002GL015386.
- Tanaka S, Ohtake M, Sato H. 2004. Tidal triggering of earthquakes in Japan related to the regional tectonic stress [J]. Earth Planets Space, 56(5):511–515.
- Tanaka S, Sato H, Matsumura S , *et al.* 2006. Tidal triggering of earthquakes in the subducting Philippine Sea plate beneath the locked zone of the plate interface in the Tokai region, Japan[J]. Tectonophysics, 417(1–2):69–80.
- Tsuruoka H, Ohtake M, Sato H. 1995. Statistical test of the tidal triggering of earthquakes: contribution of the ocean tide loading effect [J]. Geophys J Int, 122(1):183–194.
- Wan Y G, Wu Z L, Zhou G W. 2004. Focal mechanism dependence of static stress triggering of earthquakes[J]. Tectonophysics, 390(1–4): 235–243.

## Study on Earthquake Triggered by Tidal Stress Based on Fault Plane in Tianshan Region

LI Jin, XIANG Yuan, ZHAO Binbin, GAO Rong

(Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang 830011, Urumqi, China)

### Abstract

We chose the focal mechanism solutions of 299  $M_s \geq 3.5$  earthquakes in Tianshan seismic belt during 2003 and 2014, and used the epicenter location of the selected earthquakes and the information of the fault nearby the epicenter to determine the real fault plane. On the basis of it, we calculated the trigger action of the tidal normal stress, tidal shear stress and tidal coulomb failure stress of fault plane on seismic activity in Tianshan area in origin time in each subarea which included the whole Tianshan seismic belt, the mid-east section of Tianshan seismic belt and the west section of southern Tianshan seismic belt. When we calculated the tidal coulomb failure stress on fault plane, we set the different effective friction coefficient of earthquakes in different fracture type and discussed the trigger action of tidal coulomb failure stress to the earthquake. The conclusion shows that earthquakes in Tianshan seismic belt occurred more frequently in the area near the minimum value of tidal normal stress and the maximum value of tidal shear stress on fault plane. From the result of tidal coulomb failure stress, the seismic activities were affected significantly by tidal resistance in the whole Tianshan region. The result of tidal coulomb failure stress in different subarea showed that the oblique-slip type earthquakes in mid-east section of Tianshan seismic belt and the normal fault type earthquakes in west section of southern Tianshan seismic belt were affected significantly by the tidal trigger action. The action of tidal resistance on other types of earthquakes was obvious or not obvious.

**Key words:** Tianshan seismic belt; tidal stress; tide triggering; fault plane