

李金、蒋海昆、桂荣等 2014, 新疆喀什-乌恰交汇区潮汐触发地震活动的统计检验, 中国地震, 30(1) 64~73.

# 新疆喀什-乌恰交汇区潮汐触发地震活动的统计检验

李金<sup>1)</sup> 蒋海昆<sup>2)</sup> 桂荣<sup>3)</sup> 宋金<sup>2)</sup> 冀战波<sup>4)</sup> 温少妍<sup>1)</sup>

1) 新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐市北京南路 42 号 830011

2) 中国地震台网中心, 北京 100045

3) 喀什基准台, 新疆喀什 844000

4) 中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000

**摘要** 基于 Schuster 检验及 Permutation 检验方法, 对喀什-乌恰交汇区地震活动受固体潮触发情况进行日尺度及月尺度检验。其中日尺度分别选取引潮力南北分量、东西分量及潮汐体应力作为潮汐曲线。研究结果显示, 该地区地震活动均较多的发生于 3 种潮汐的最大值(相位  $0^\circ$ ) 附近, 优势发震相位分别为  $-5.86^\circ$ 、 $6.60^\circ$  以及  $-15.52^\circ$ , 且发生地震的频次随潮汐力的增大而增加; 利用 3 种潮汐曲线(引潮力日尺度南北分量、东西分量以及潮汐体应力) 对所有地震进行 Schuster 检验所得  $p_s$  值分别为 10.52%、2.40% 以及 2.06%, Permutation 检验所得  $p_p$  值分别为 10.90%、2.40% 以及 2.06%, 其中基于引潮力东西分量及潮汐体应力的  $p_s$ 、 $p_p$  值均低于潮汐触发地震的阈值 0.05。月尺度 Schuster 检验  $p_s$  值及 Permutation 检验  $p_p$  值结果均非常小(接近于 0), 远低于潮汐触发地震阈值 0.05, 优势发震相位  $\varphi$  为  $-1.91^\circ$ , 较为接近月尺度下的固体潮最大值  $0^\circ$ (即农历朔、望)。对潮汐触发地震的统计学检验结果即东西向潮汐触发效应大于南北向触发效应的原因进行了初步解释。

**关键词:** 喀什-乌恰交汇区 固体潮触发 Schuster 检验 Permutation 检验

[文章编号] 1001-4683(2014)01-064-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

喀什-乌恰交汇区位于天山褶皱带、帕米尔弧形构造与塔里木地块 3 个构造单元的交界, 是青藏高原块体边缘地带新构造运动与形变最为强烈的地区之一(张先康等 2002), 也是我国强震活动的高发区, 历史上中强以上地震活动频繁, 曾经发生过 1902 年阿图什 8 级大地震, 1985 年乌恰 7.0 级地震, 1996 年 3 月 19 日及 1998 年 3 月 19 日分别发生了阿图什 6.1、6.9 级地震, 该区域最近一次破坏性地震为 2008 年 10 月 5 日乌恰 6.8 级地震。1997 年 1~4 月在约  $20\text{km} \times 40\text{km}$  的较小范围发生伽师强震群, 先后发生 7 次 6.0~6.9 级地震, 在同一地区如此短的时间内发生一系列的强震, 这在我国大陆地区此前未曾有过。伽师地

[收稿日期] 2013-05-03; [修定日期] 2013-10-07

[项目类别] 2013 年度震情跟踪合同制定向工作任务(2013020119) 和新疆地震局基金(201304) 联合资助

[作者简介] 李金, 男, 1986 年生。E-mail: lijn6205@163.com

区随后又发生 1998 年 8 月 2 日 6.1 级和 27 日 6.4 级地震。时隔 4 年 6 个月, 2003 年 2 月 24 日发生巴楚-伽师 6.8 级地震, 造成 268 人死亡, 重伤 2058 人, 成为建国以来新疆伤亡最多的一次破坏性地震(高国英等 2004; 赵翠萍等 2008)。

2011 年 6 月以来, 新疆地区中强地震活跃, 截止 2012 年底, 已连续发生 18 次 5 级以上地震, 形成罕见的时间上连续、空间上多带的分布格局。18 次 5 级以上地震中有 3 次发生在喀什-乌恰交汇区, 占这一时期新疆 5 级以上地震总数的 1/6, 而这一地区面积仅为新疆全区总面积的 1/25(图 1)。此外, 2011 年下半年以来新疆地区 18 次 5 级以上地震中, 11 次发生在朔、望及上、下弦时段, 而发生于喀什-乌恰交汇区的 3 次 5 级以上地震中有 2 次发生在朔、望及上、下弦时段, 显示出喀什-乌恰交汇区较高的构造应力背景及易受固体潮调制的临界特性。

关于固体潮汐应力是否影响或调制地震的发生等问题, 国内外已有许多相关研究, 多数研究持以下观点: 地震是地球内部运动的一种力学过程, 其动力来源于地球内部, 当震源区处于临界状态时, 外界因素如固体潮等的影响在一定条件下可能会引起系统的突变而发生地震(Tanaka 2010; Tanaka et al 2004; Cadicheanu et al 2007; Cochran et al 2004)。在分析地震活动与固体潮的关系时, 通常采用潮汐相位统计法(李志安等, 1994; Tsuruoka et al, 1995; 韩延本等, 1996; 黎凯武, 1998; 陈荣华, 2003; Tanaka et al 2002a, 2002b, 2004, 2006; 李金等, 2011;) , 因为潮汐相位角的分布情况可以直观地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。

为探讨喀什-乌恰交汇区地震活动的固体潮调制特征及其预测意义, 本文基于 Schuster 检验及 Permutation 检验对喀什-乌恰交汇区地震潮汐相位角进行统计分析。

## 1 数据选取及研究方法

### 1.1 数据选取

2000 年以前, 新疆尤其是南天山西段台站分布较为稀疏, 地震监测能力不强。2000 年以后, 经过大规模数字化改造, 台网的监测能力大大提高, 南天山地震带的最小完备震级  $M_c$  基本保持在  $M_L 2.0$  甚至更低(李志海等, 2011)。因此, 本研究选取喀什-乌恰交汇区 2000 年 1 月 1 日~2012 年 12 月 31 日的地震数据进行研究(图 1)。根据古登堡震级-频度关系确定研究区域完备震级下限为  $M_L \geq 2.5$ , 由此选定了本研究所用地震数据 4879 个, 其中 6.0~6.9 级 2 次, 5.0~5.9 级 31 次, 4.0~4.9 级 256 次, 3.0~3.9 级 1797 次, 2.5~2.9 级 2793 次。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 潮汐相位角的计算

为利用 Schuster 检验(Tsuruoka et al, 1995) 及 Permutation 检验(Cadicheanu et al, 2007) 研究地震活动与潮汐的关系, 首先需要计算震源所在地的潮汐力, 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 2), 选出最接近地震发生时间的应力峰值, 并指定其相

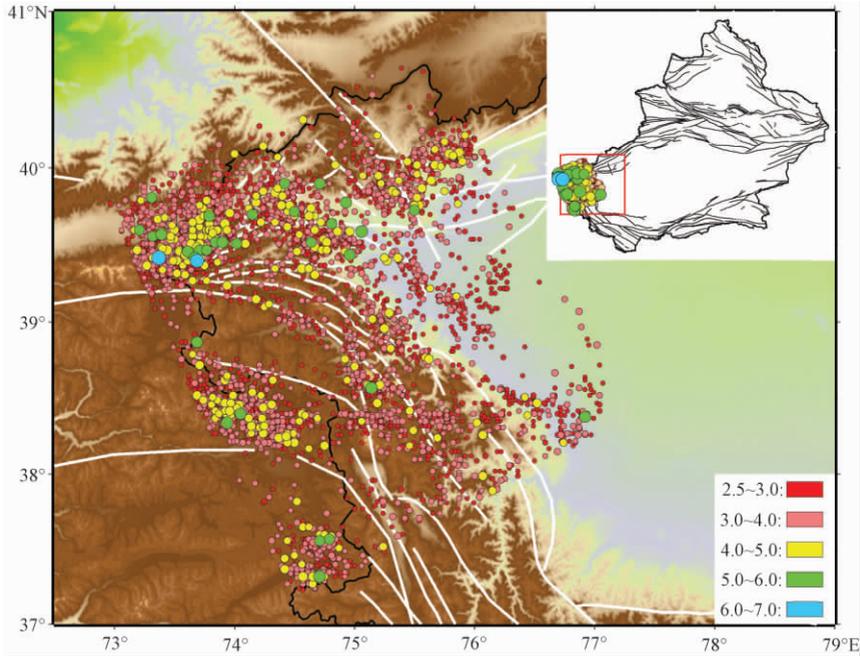


图 1 研究区域及数据

位角为  $0^\circ$  ,之前和之后波谷的相位角分别定为  $\pm 180^\circ$  ,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,而又与潮汐应力变化时程的对称与否无关。

确定了所有地震的潮汐相位角后,即可对潮汐相位角数据进行直方图统计(图 3),在研究中通常选  $30^\circ$  作为统计区间(Tanaka et al 2002a、2002b、2006)。地震活动与潮汐之间的关系可以用图 3 反映,图中的红色曲线为拟合后的曲线,通常采用余弦公式(1)进行拟合(Cadicheanu et al 2007)。

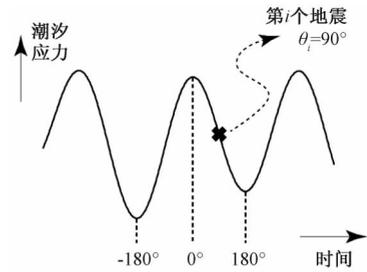
$$P(\theta) = P_0 + P_1 \cos(\theta - \varphi) \quad (1)$$

其中  $\theta$  为潮汐相位角,  $P_0$  为地震平均频度,  $P_1$  和  $\varphi$  为曲线的振幅以及曲线极大值所对应的潮汐相位角,各参数的含义见图 3。

### 1.2.2 Schuster 检验

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,这些向量的和用  $L$  来描述,  $L$  的相位角即为所有地震数据的优势相位角。  $L$  值由下式确定,其几何含义如图 4 所示。

$$L = \sqrt{A^2 + B^2}$$

图 2 潮汐相位角的确定  
(Tanaka et al 2004)

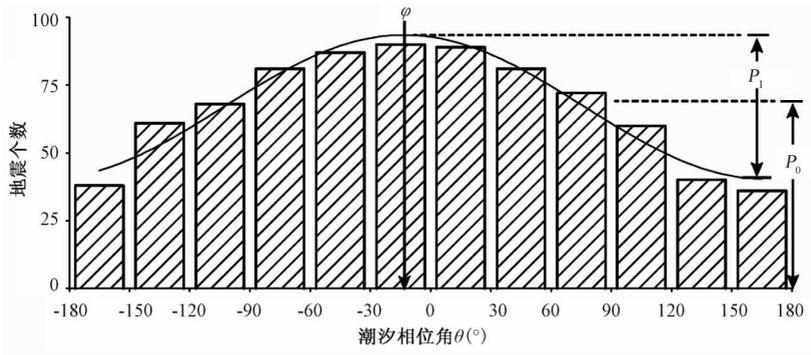


图3 理想的潮汐触发地震相位角的统计直方图及其拟合曲线(引自 Cadicheanu et al 2007)

$$A = \sum_{i=1}^N \cos\theta_i, \quad B = \sum_{i=1}^N \sin\theta_i \tag{2}$$

其中  $\theta_i$  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, 此时和向量的长度大于或等于  $L$  的概率 (Tsuruoka et al, 1995) 为

$$p_s = \exp\left(-\frac{L^2}{N}\right) \tag{3}$$

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  $p_s$  为拒绝“零假设”的显著性水平,  $p_s$  的取值范围为  $0 \sim 1$ ,  $p_s$  越小, 拒绝“零假设”的可能性越大。以往研究中, 一般将  $p_s < 5\%$  作为判断潮汐能够触发地震的阈值 (Heaton, 1975; 李金等, 2011; Tanaka et al 2010)。

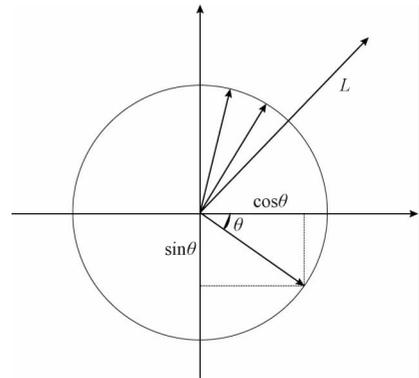


图4  $L$  的几何意义 ( $L$  为  $N$  个单位向量的和向量)

### 1.2.3 Permutation 检验

Permutation 检验又称为置换检验或随机性检验, 其广泛应用于生物医学领域, 由 Cadicheanu 等(2007) 首次用于潮汐触发地震研究。该方法也给出一个概率值  $p_p$ , 用于拒绝“零假设”(地震随机发生、与潮汐相位角无关)。

其基本思想是根据所研究的问题(本研究中为潮汐相位角分布情况) 构造一个检验统计量, 然后利用实际样本按照排列组合原理导出该统计量的理论抽样分布, 从而得到当前样本以及更极端样本的概率。本研究为成组设计的两样本分布比较, 将潮汐相位角直方图曲线拟合结果的振幅(即式(1)中的  $P_1$ ) 作为样本统计量  $A(\text{obs})$  (Cadicheanu et al 2007), 利用实际潮汐相位角样本, 按排列组合原理, 考察理论样本与实际样本是否来自同一个总体。其概率值为(荀鹏程等 2006; Cadicheanu et al 2007)

$$p_p = k/r \tag{4}$$

成组设计的两样本分布比较基本的步骤为: ①生成一个服从随机分布的潮汐相位角分布并以此作为理论样本, 其样本个数  $n$  与实际潮汐相位角样本个数相同; ②对实际样本直方

图统计结果利用式(1)进行曲线拟合后振幅为  $A_1$ ; ③将理论样本和实际样本混合后随机抽取  $n$  个潮汐相位角样本,得到新的统计量  $A$ ; ④随机试验(重复③)  $r$  次,其中  $k$  为  $A \geq A_1$  的次数。

研究中通常将  $p_p \leq 0.05$  作为拒绝“零假设”(理论样本与实际样本来自同一个总体,即地震随机发生、与潮汐相位角无关)的概率。

## 2 研究结果

### 2.1 日尺度潮汐相位角统计

在地震的孕育过程中,水平分量的构造应力对地震的发生起主导作用,在以往进行的日尺度潮汐触发地震研究中,水平分量的潮汐力与地震之间的关系往往被作为研究重点(张晶等 2006、2007; 韩延本等,1996; 陈荣华 2003; 黎凯武,1998、2000; 李延兴等 2001; 李志安等,1994)。因此,本研究首先选取引潮力南北分量和东西分量作为两种方法日尺度检验的潮汐曲线。此外,潮汐体应力(潮汐应力张量主对角线元素之和)不随坐标的旋转而变化,即不依赖于断层面就可以反映震源区整体的受力状态。因此,本文将潮汐体应力也作为 Schuster 及 Permutation 日尺度检验的潮汐曲线之一。对于潮汐体应力,  $0^\circ$  和  $\pm 180^\circ$  分别表示最大潮汐张应力以及最大潮汐压应力(Tanaka et al 2002a、2002b)。

分别选取引潮力南北、东西分量以及潮汐体应力作为潮汐曲线,对上述时空范围内的 4879 个地震确定其潮汐相位角后,采用  $30^\circ$  为间隔对  $-180^\circ \sim 180^\circ$  之间的所有地震数据进行直方图统计(图 5),发现地震多发于  $0^\circ$  附近,而在  $\pm 180^\circ$  时地震最少。这定性地表明了小地震发生个数随着潮汐力的增大而增加,这也意味着,固体潮是影响该区域中小地震活动的重要因素之一。

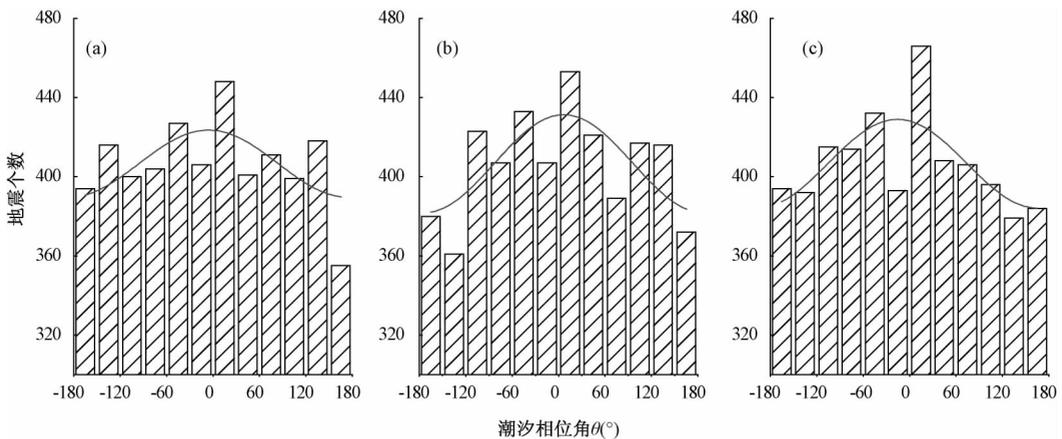


图 5 喀什-乌恰交汇区潮汐相位角统计直方图及拟合曲线

(a) 引潮力南北分量统计结果; (b) 引潮力东西分量结果; (c) 潮汐应力张量不变量统计结果  
曲线为利用最小二乘对直方图进行拟合所得结果

为进一步量化地震活动与潮汐之间的关系,对所得 3 个直方图结果利用式(1)进行最小二乘曲线拟合(Tanaka et al 2002a、2006),由 3 种潮汐分量(依次为南北分量、东西分量及

潮汐体应力) 所得的地震潮汐相位角分布的曲线最佳拟合公式分别为

$$\begin{aligned} y &= 406.58 + 16.97\cos(\theta + 5.86) \\ y &= 406.58 + 24.73\cos(\theta - 6.60) \\ y &= 406.58 + 22.38\cos(\theta + 15.52) \end{aligned} \quad (5)$$

公式(1)中 $\varphi$ 为曲线的最大值所对应的潮汐相位角,即所有地震的优势发震相位。由式(5)可见当 $\varphi$ 分别为 $-5.86^\circ$ 、 $6.60^\circ$ 、 $-15.52^\circ$ (表1),均较为接近半日潮的最大值时刻 $0^\circ$ 。此外,利用3种潮汐曲线对所有地震进行Schuster检验所得 $p_s$ 值分别为10.52%、2.40%以及2.06%,Permutation检验所得 $p_p$ 值分别为10.90%、2.40%以及2.06%,两种检验方法所得结果基本一致,其中基于引潮力东西分量及潮汐体应力的 $p_s$ 、 $p_p$ 值均低于潮汐触发地震的阈值0.05,而南北分量的 $p_s$ 、 $p_p$ 值虽未达到该阈值但仍然较低(表1)。

表1 3种潮汐分量日尺度Schuster检验 $p_s$ 值、Permutation检验 $p_p$ 值结果及直方图曲线拟合结果

研究区域	潮汐分量	Schuster 检验 $p_s$ 值(%)	Permutation 检验 $p_p$ (%)	优势发震 相位 $\varphi$ ( $^\circ$ )	最佳拟合公式
喀什-乌恰 交汇区	南北分量	10.52	10.90	-5.86	$y = 406.58 + 16.97\cos(\theta + 5.86)$
	东西分量	2.40	2.40	6.60	$y = 406.58 + 24.73\cos(\theta - 6.60)$
	潮汐体应力	2.06	3.92	-15.52	$y = 406.58 + 22.38\cos(\theta + 15.52)$

从Schuster检验 $p_s$ 值及Permutation检验 $p_p$ 值结果来看,该地区地震活动受潮汐触发较为明显。具体来看,东西分量及潮汐体应力的潮汐触发效应较南北分量明显。而从优势发震相位来看,3个分量所对应的地震活动均高于 $0^\circ$ 附近,均较为接近半日潮的最大值时刻。

## 2.2 月尺度潮汐相位角统计

为进一步考察喀什-乌恰交汇区地震活动与半月潮的关系,取每天中午12点的潮汐应力(本研究采用东西分量的数值,因潮汐各分量在月尺度的变化基本一致)数值作出半月潮曲线,在半月潮曲线中, $0^\circ$ 代表每月的大潮(即农历朔、望), $\pm 180^\circ$ 代表每月的小潮(即农历上、下弦),依次确定每个地震的潮汐相位角后进行统计。

为使统计更具有一般性,避免时空丛集地震(尤其是如余震、震群等短期内发生大量地震)对结果的影响,在月尺度统计中我们采取以年为单位,在研究区每年随机抽取50次地震进行统计,如此重复100次以减弱随机效应的影响(李金等2011)。经过上述处理,13年(2000~2012)共抽样得到65000次地震的潮汐相位角数据,其直方图统计结果如图(6)所示,对所得直方图结果同样用(1)式进行拟合,结果为

$$y = 5416.67 + 346.39\cos(\theta + 1.91) \quad (6)$$

由(6)式可知优势发震相位 $\varphi$ 为 $-1.91^\circ$ ,仍然较为接近月尺度下的固体潮最大值 $0^\circ$ (即农历朔、望)。因此,该地区地震活动在月尺度下受潮汐调制触发较为明显。对所有抽样地震进行的月尺度Schuster检验及Permutation检验所得的 $p_s$ 值和 $p_p$ 值均非常小(接近于0),均远远低于潮汐触发地震阈值0.05,进一步表明喀什乌恰交汇区地震活动在月尺度上受潮汐触发明显。

## 3 结论与讨论

本文利用Schuster检验及Permutation检验对喀什-乌恰交汇区地震活动受潮汐触发情

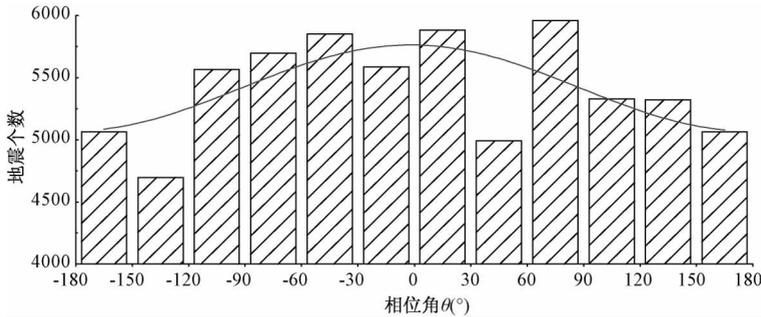


图6 喀什-乌恰交汇区地震活动月尺度潮汐相位角直方图统计结果及曲线拟合结果

况进行研究,分别进行了日尺度和月尺度的分析。主要结论如下:

(1) 由引潮力日尺度南北分量、东西分量以及潮汐体应力所得的地震潮汐相位角直方图来看,中小地震均较多发生于这3种潮汐力的最大值附近,且地震发生的个数大体上随潮汐力的增大而增加。对3种潮汐分量所得的地震潮汐相位角分布进行曲线拟合可知,其优势发震相位分别为 $-5.86^\circ$ 、 $6.60^\circ$ 、 $-15.52^\circ$ ,均较为接近潮汐力的最大值 $0^\circ$ ,表明该地区地震活动受潮汐触发较为明显。

(2) 利用3种潮汐曲线(依次为引潮力日尺度南北分量、东西分量以及潮汐体应力)对所有地震进行Schuster检验所得 $p_s$ 值分别为10.52%、2.40%以及2.06%,Permutation检验所得 $p_p$ 值分别为10.90%、2.40%以及3.92%,两种检验方法所得结果基本一致,其中基于引潮力东西分量及潮汐体应力的 $p_s$ 、 $p_p$ 值均低于潮汐触发地震的阈值0.05,而南北分量的 $p_s$ 、 $p_p$ 值虽未达到该阈值但仍然较低。进一步表明该地区地震活动在日尺度下受潮汐触发明显。

由3种潮汐分量的 $p_s$ 值及 $p_p$ 可以看出,Schuster检验和Permutation检验在考察潮汐相位角是否服从随机分布这一问题时所得结果非常相近,均属于随机性检验方法,当样本(实际相位角)个数足够多及Permutation检验实验次数足够多时,两种方法所得结果应趋于一致,且与传统经典的参数检验方法如t检验、F检验等结果近似(曾邦伟等,2008)。然而从统计检验的角度来看,Schuster检验类似于用于地震目录完整性检验的Rydelek-Sacks方法(吴忠良,1999;李宇彤等,2012),仅能用于检验具有周期性质的样本,而对于Permutation检验来说则没有这一限制,它不依赖于总体分布,而仅基于样本本身,因此较Schuster检验有其特定的优势,目前该检验方法已广泛应用于生物医学、神经和行为学、数值分类学、科技工程等多个领域(荀鹏程等,2006)。

(3) 对引潮力半月潮的统计检验结果显示,Schuster检验 $p_s$ 值及Permutation检验 $p_p$ 值结果均非常小(接近于0),远远低于潮汐触发地震阈值0.05。对月尺度下该区地震潮汐相位角直方图曲线拟合结果显示,优势发震相位 $\varphi$ 为 $-1.91^\circ$ ,较为接近月尺度下的固体潮最大值 $0^\circ$ (即农历朔、望)。

(4) 综上所述,喀什-乌恰交汇区地震活动在日尺度和月尺度受固体潮调制触发均较为显著。具体来看,在日尺度下,地震较多的发生于潮汐日变化的最大值附近;在月尺度下,地震较多的发生于潮汐月变化的最大值(即农历朔、望)附近。但地震发生的根本原因在于构

造应力的累积, 固体潮作为一种可能的外加载荷叠加, 具体哪一个方向的潮汐应力分量对地震的触发作用较强可能与该区域构造及区域应力作用状况有关。就本文研究区而言, 已有研究表明, 天山地区壳缩短呈现由西向东逐渐衰减的趋势(徐锡伟等, 2006; 张培震等, 2002), 南天山西段喀什以西地区, 速度约为 20mm/a, 喀什以东南天山西段地壳缩短速率减小, 约为 13mm/a(张培震等, 2002)。喀什-乌恰交汇区有多组北东东-北西走向的断裂, 由于构造的复杂性, 主压应力 P 轴方位较为混乱, 其南部 P 轴方位以北西向为主, 其北侧以北东向为主, 倾角平缓, 该区水平挤压和拉张作用基本相当, 而其历史中强地震破裂类型以走滑为主, 基本不存在正断类型的地震(曲延军等, 2010; 唐兰兰等, 2012)。基于以上研究, 尽管天山地区整体受到南北向不均匀的构造挤压作用(徐锡伟等, 2006), 但是喀什-乌恰交汇区地处天山褶皱带和帕米尔弧形构造的交界地区, 其主压应力方向在这一区域发生转换, 由北部的北东向转换为南部的北西向, 致使该区地震的破裂类型以走滑为主, 破裂面或与该区北东东-北西走向的断裂一致, 其发震时受到一定程度的东西向应力的作用。因此从潮汐触发地震的统计学检验来看, 东西向的触发效应大于南北向有其一定的构造原因。

致谢: 阎春恒、唐兰兰、高朝军助理研究员, 郑现博士、赵静研究实习员, 在论文完成过程中给予了诸多的帮助和有益的讨论, 在此一并表示衷心的感谢。

## 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, *地震*, **23**(1), 53~56。
- 高国英、聂晓红、夏爱国, 2004, 2003 年伽师 6.8 级地震序列特征和震源机制的初步研究, *中国地震*, **20**(2), 179~186。
- 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, *地球物理学进展*, **11**(2), 114~122。
- 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, *地震学报*, **20**(5), 545~551。
- 黎凯武, 2000, 1966~1976 年华北地震的时间特性及相关触发因素, *地震*, **20**(1), 59~64。
- 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。
- 李延兴、许力生、胡新康等, 2001, 日、月对孕震区的水平引潮力与震源机制的关系, *地震*, **21**(1), 1~6。
- 李宇彤、蒋长胜, 2012, 东北地区地震活动的 Rydelek-Sacks 周期性检验和震级-周期谱研究, *地震学报*, **34**(1), 20~30。
- 李志安、陈黎、韩延本等, 1994, 触发地震的日月引潮力, *北京师范大学学报(自然科学版)*, **30**(3), 368~372。
- 李志海、蒋长胜、黄瑜等, 2011, 新疆地震地震目录最小完整性震级和台网科学布局研究, *地震学报*, **33**(6), 763~775。
- 曲延军、王琼、聂晓红, 2010, 新疆南部构造区带与地震活动状态研究, *内陆地震*, **24**(4), 298~306。
- 唐兰兰、赵翠萍、王海涛, 2012, 2008 年新疆乌恰 6.8 级地震序列震源特征及帕米尔东北缘应力场研究, *地球物理学报*, **55**(4), 1228~1239, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.018。
- 吴忠良, 1999, 鉴别地震活动周期性和随机性的广义 Rydelek-Sacks 检验, *地震学报*, **21**(5), 487~494。
- 徐锡伟、张先康、冉勇康等, 2006, 南天山地区巴楚-伽师地震( $M_s$ 6.8)发震构造初步分析, *地震学报*, **28**(2), 161~178。
- 荀鹏程、赵杨、易洪刚等, 2006, Permutation Test 在假设检验中的应用, *数理统计与管理*, **25**(5), 616~621。
- 曾邦伟、陆芳、蔡强等, 2008, Permutation Tests 在生物医学研究中的应用以及在 SAS 中的实现, *中国卫生统计*, **25**(1), 84~88。
- 张晶、陈荣华、杨林章等, 2006, 强震前形变潮汐异常判别与机理研究, *地震学报*, **28**(2), 150~157。
- 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, *地球物理学报*, **50**(2), 448~454。
- 张培震、王琪、马宗晋, 2002, 中国大陆现今构造运动的 GPS 速度场和活动地块, *地学前缘*, **9**(2), 430~441。
- 张先康、赵金仁、张成科等, 2002, 帕米尔东北侧地壳结构研究, *地球物理学报*, **45**(5), 665~671。
- 赵翠萍、陈章立、郑斯华等, 2008, 伽师震源区中等强度地震矩张量反演及其应力场特征, *地球物理学报*, **51**(3), 782~792。

- 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.
- Cochran E S , Vidale J E , Tanaka S , 2004 , Earth tides can trigger shallow thrust fault earthquakes , *Science* , **306** , 1164 ~ 1166.
- Heaton T H , 1975 , Tidal triggering of earthquakes , *Geophys J* , **43**( 2 ) , 307 ~ 326.
- 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 , 2002a , 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* , **29** , doi: 10. 1029 / 2002GL015386.
- Tanaka S , Ohtake M , Sato H , 2002b , Evidence for tidal triggering of earthquakes as revealed from statistical analysis of global data , *J Geophys Res* , **107**( B10 ) , 2211 , doi: 2210. 1029 / 2001JB001577.
- 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 , 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 , *Tectonophysics* , **417** , 69 ~ 80.
- 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.

## A statistical analysis on tidal triggering of the earthquake in the Kashi-Wuqia intersection area , Xinjiang

*Li Jin*<sup>1)</sup> *Jiang Haikun*<sup>2)</sup> *Gui Rong*<sup>3)</sup> *Song Jin*<sup>2)</sup> *Ji Zhanbo*<sup>4)</sup> *Wen Shaoyan*<sup>1)</sup>

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

2) China Earthquake Networks Center , Beijing 100045 , China

3) Kashi Standard Seismic Station , Earthquake Administration Xinjiang Uygur Autonomous Region , Kashi 844000 , China

4) Lanzhou Institute of Seismology , China Earthquake Administration , Lanzhou 730000 , China

**Abstract** A statistical analysis on earth tide triggered earthquake activity in the Kashi-Wuqia intersection area is studied on the basis of Schuster's test and Permutation test on daily and monthly scale. The north-south , east-west component of the tidal force and tidal body stress are chosen as the tidal curve in daily scale. The results show that the earthquakes occurred more near the maximum  $0^\circ$  of the three kinds of tidal curve , and the predominant tidal phases of the earthquake are  $-5.86^\circ$  ,  $6.60^\circ$  and  $-15.52^\circ$  , and the frequency of the earthquakes increases with the increase of the tide; with three kinds of tidal curve ( the north-south , east-west component of the tidal force and tidal body stress) , the  $p_s$  of the Schuster's test for all the earthquakes are 10.52% , 2.40% and 2.06% , and the  $p_p$  of Permutation test are 10.90% , 2.40% and 2.06% . The results of  $p_s$  and  $p_p$  based on the east-west component of the tidal force and tidal body stress are below the threshold of tidal triggering of earthquakes 0.05. In the monthly scale , both the  $p_s$  and  $p_p$  are very low ( close to 0) , far below the threshold of tidal triggering of earthquakes 0.05 , and the predominant tidal phase of the earthquake is  $-18.95^\circ$  , close to the maximum  $0^\circ$  ( new moon and full moon) of the earth tide in monthly scale. With the statistical test of tidal triggering of the earthquake , we preliminary explained why the trigger effect in east-west direction is greater than that in north-south direction.

**Key words:** The Kashi-Wuqia intersection area Tidal triggering The Schuster's test  
The Permutation test