

新疆2014年于田 M_s 7.3及2015年皮山 M_s 6.5地震 及其余震序列与潮汐应力的触发关系研究*

马青波¹, 解朝娣^{1♣}, 向元², 王琼², 杨思梦¹, 王英楠¹

(1. 云南大学 资源环境与地球科学学院, 云南 昆明 650091; 2. 新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 选取新疆西昆仑地区的2014年于田 M_s 7.3和2015年皮山 M_s 6.5地震及其余震序列为研究对象, 对地震目录的完备性进行了分析, 并计算了主震发震时刻, 主震震源断层面的潮汐剪应力、正应力, 得到主震震源断层面的潮汐库仑破裂应力; 再使用Schuster统计检验方法, 分析了2个余震序列的潮汐相位角分布, 研究新疆西昆仑地区中强地震及其余震活动与潮汐应力之间的触发关系。结果表明: 主震发生时, 皮山震源断层面的潮汐库仑破裂应力为正值, 而于田震源断层面的潮汐库仑破裂应力为负值, 说明潮汐应力对皮山主震有明显的触发作用, 对于田主震的触发作用不明显。同时, 计算结果表明2个余震序列与潮汐应力的统计相关参数 P 值几乎都小于5%, 说明潮汐应力对皮山和于田余震序列均有触发作用。最后ETAS模型计算结果也表明了余震序列对地震震级的弱依赖性, 可能与外界触发因素(潮汐)有关。

关键词: 2014年于田 M_s 7.3地震; 2015年皮山 M_s 6.5地震; Schuster统计检验; 潮汐应力; 地震触发

中图分类号: P315.727

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2018)01-0104-07

0 引言

受印度板块与欧亚板块的碰撞作用, 新疆塔里木盆地西南边缘的西昆仑地区构造运动十分强烈(潘家伟, 2011)。位于该地区的西昆仑地震带地震活动频繁, 1985—2011年共发生 $M_s \geq 4.0$ 地震近500次, 其中 $4.0 \leq M_s \leq 5.0$ 地震425次, $M_s > 5.0$ 地震70次。该地区的地震活动及其发震机理研究已取得了不少的进展(朱传庆等, 2008; 万永革等, 2010; 程佳等, 2014; 姜迪迪等, 2014)。吴小平等(2009)结合构造应力特点与潮汐应力触发问题, 研究了固体潮与该区地震活动的关联性, 得出该区的潮汐应力触发效应属于中等水平; 李金等(2014)提出新疆地区地震活动存在一定的优势潮汐相位。

当某区域或断层上的构造应力积累接近临界状态时, 若有恰当的潮汐应力与该构造应力叠加, 总的应力叠加效果超过了触发阈值, 就有可能触发地震。已有很多学者对潮汐触发问题进行了研究。丁

中一等(1983)选取了1957—1983年中国或中国邻近地区发生的70次较大的地震, 研究地震与潮汐应力的关系, 发现有61%的地震在一定程度上受到了潮汐应力的触发。孙长青等(2014)把青藏高原东部及其相邻地区划分成5个构造应力场分区, 研究潮汐应力触发效应, 结果表明该区域潮汐触发效应的强弱与震级大小、震源深度、构造应力场等有关。张晶等(2007)选取了1970—2007年多个7级以上强震序列, 分析了潮汐应力的触发效应, 发现共有10个强震序列与引潮力相关性比较好, 且在某些特殊区域其水平分量的方位角在多个方向上存在优势。潮汐触发效应与地震发展机理研究仍是目前地震研究的热点问题。

本文选取发生在新疆西昆仑地区的2014年于田 M_s 7.3、2015年皮山 M_s 6.5地震及其余震序列为研究对象, 首先进行地震目录完备性分析, 以确定最小完备震级 M_c ; 然后计算主震震源断层面的潮汐库仑破裂应力值, 以此分析2次主震与潮汐应力之间的触发关系。在此基础上, 确定序列中每个地震的潮汐相位角, 进而运用Schuster统计检验

* 收稿日期: 2017-08-04.

基金项目: 国家自然科学基金(41574043)资助.

♣通讯作者: 解朝娣(1981-), 副教授, 主要从事地震学研究. E-mail: xiecd@ynu.edu.cn.

方法分析地震序列与潮汐应力的统计相关性, 探讨潮汐应力对于田和皮山这2个余震序列的触发效应, 进一步研究新疆地震活动发震机理。

1 研究区构造背景

新疆是地震多发区, 地震主要集中在昆仑山、塔里木盆地等构造活动活跃的地区, 且呈现条带状分布(陈建波, 2008)。新生代以来, 西昆仑地区由于受到欧亚板块与印度板块相互作用所造成的挤压应力, 该地区的构造线呈现出北西-南东或接近东西方向(潘家伟, 2011)。由于这种挤压作用的存在, 产生了康西瓦、普鲁、西昆仑山前等多条较大规模的断裂。邹长桥等(2012)认为, 位于西昆仑山南边的西昆仑地震活动区, 由于地壳与岩石圈上地幔的解耦使得区域构造背景更为复杂。姜迪迪等(2014)在研究中国西部地区的地壳结构特征与强震活动的关系中, 发现西昆仑地区地震的震源深度达到了莫霍面深度。该地区特殊的构造背景导致大震、强震较多。2014年2月12日, 于田县发生 $M_s7.3$ 地震, 震中位于阿什库勒断裂北段(程佳等, 2014); 2015年7月3日, 皮山县发生 $M_s6.5$ 地震, 主震位于西昆仑山前断裂北缘。图1给出了2次地震序列的空间分布、主震的震源机制解、研究区域内的主要断裂分布等情况, 其中高

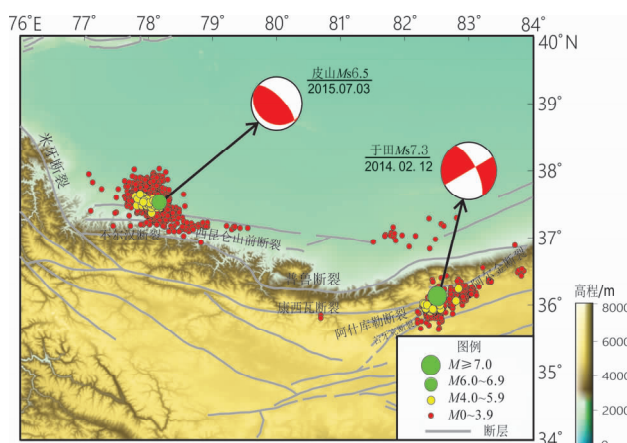


图1 研究区构造背景及2014年于田 $M_s7.3$ 地震序列、2015年皮山 $M_s6.5$ 地震序列的分布图

Fig. 1 Tectonic structure in the study area and distribution of 2014 Yutian $M_s7.3$ and 2015 Pishan $M_s6.5$ earthquake sequences

程数据来源于 USGS 公布的全球数字高程模型 GTOPO30, 其它数据的来源见表1。

2 地震数据选取

基于西昆仑地区复杂的构造背景和地震空间分布特点, 本文采用新疆地震局提供的2014年于田 $M_s7.3$ 和2015年皮山 $M_s6.5$ 地震序列精定位后的震源参数进行分析。这2个序列的主震震级均在6.0级以上, 余震序列的个数均在2000个以上, 适合统计分析。表1给出2个地震序列的主要参数和数据来源。

为使潮汐相关性的统计分析结果更准确, 本文首先对所选地震序列目录的完备性进行分析, 结果如图2所示。分析得到皮山地震序列的 $M_c = 2.0$, 序列中 $M \geq 2.0$ 地震共有1088个, b 值约为0.53; 于田地震序列的 $M_c = 2.0$, $M \geq 2.0$ 地震共1297个, b 值约为0.50。

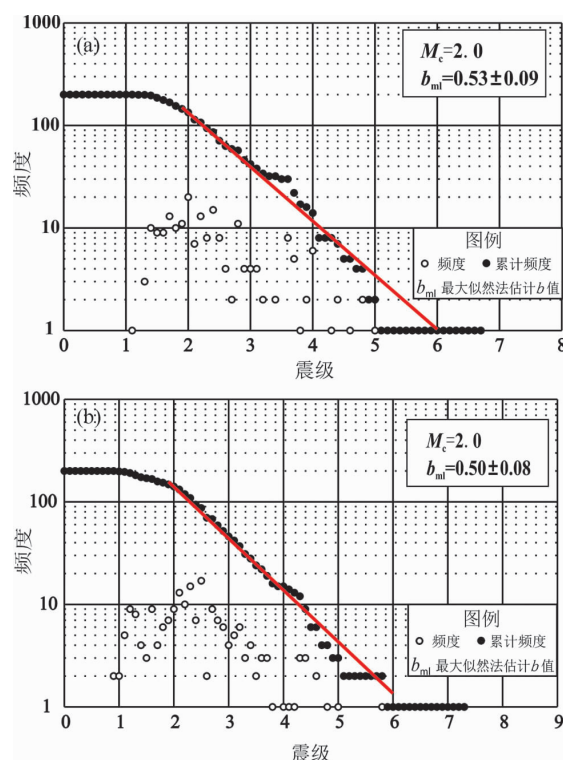


图2 2015年皮山 $M_s6.5$ (a) 和2014年于田 $M_s7.3$ 地震序列 (b) 的目录完备性分析

Fig. 2 Analysis of completeness of catalogues of 2015 Pishan $M_s6.5$ (a) and 2014 Yutian $M_s7.3$ (b) earthquake sequences

表 1 2014 年于田 $M_s 7.3$ 和 2015 年皮山 $M_s 6.5$ 地震序列主震及余震序列震源参数Tab. 1 Source parameters of 2014 Yutian $M_s 7.3$ and 2015 Pishan $M_s 6.5$ mainshocks and their aftershock sequences

地震事件	主震的震源参数											余震序列的参数				震源参数来源	
	发震时间 (北京时间)	$\varphi_N/$ (°)	$\lambda_E/$ (°)	震级	震中位置	节面 I/(°)			节面 II/(°)			余震个数	$\varphi_N/$ (°)	$\lambda_E/$ (°)	时间范围		震级范围
						走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角						
于田 M_s 7.3 地震	2014-02-12 17:19:57	36.13	82.51	7.3	于田	241	90	-22	331	68	-180	7 730	35.64 ~ 37.30	80.69 ~ 83.94	2014-02-12 ~ 2014-03-29	0.1 ~ 5.8	(李金,王琼,2015)
皮山 M_s 6.5 地震	2015-07-03 09:07:45	37.53	78.17	6.5	皮山	115	23	72	314	68	97	2 954	36.93 ~ 38.03	77.07 ~ 79.55	2015-07-03 ~ 2016-01-03	0.1 ~ 5.0	皮山 6.5 级地震专题 ^①

注: ①http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/101527/101538/20150703221340444810340/index.html.

3 研究原理和方法

3.1 潮汐应力计算方法

假设地球内部的物理性质具有球对称性, 在前人研究的基础上 (蒋骏, 张雁滨, 1995; Agnew, 2007; 李智蓉, 张晓东, 2011; 熊子瑶等, 2015), 地球内部或者表面某一点 P 在球坐标下由潮汐作用下产生的应变分量 $e_{\theta\theta}$ 、 $e_{\lambda\lambda}$ 、 $e_{\theta\lambda}$ 为:

$$\begin{cases} e_{\theta\theta} = \frac{1}{gr} \sum_{n=2}^{\infty} \left[L_n(r) \frac{\partial^2 V_n}{\partial \varphi^2} + H_n(r) V_n \right] \\ e_{\lambda\lambda} = \frac{1}{gr} \sum_{n=2}^{\infty} \left[L_n(r) \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi} \cdot \frac{\partial^2 V_n}{\partial \lambda^2} - \tan \varphi \frac{\partial V_n}{\partial \varphi} + H_n(r) V_n \right) \right] \\ e_{\theta\lambda} = -\frac{1}{gr} \sum_{n=2}^{\infty} L_n(r) \left[\left(\frac{1}{\cos \varphi} \cdot \frac{\partial^2 V_n}{\partial \varphi \partial \lambda} + \frac{\tan \varphi}{\cos \varphi} \cdot \frac{\partial V_n}{\partial \lambda} \right) \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_n 为 n 阶起潮力位; g 为地球的平均重力值; φ 为 P 点的地理纬度; r 为 P 点到地心的距离; $H_n(r)$ 和 $L_n(r)$ 为 Love 数。表述应力与应变关系的胡克定律为:

$$\sigma_{ij} = 2\mu e_{ij} + \lambda \theta \delta_{ij} \quad (2)$$

其中: λ 、 μ 为拉梅常量; θ 为体应变; σ_{ij} 为应力分量; e_{ij} 为应变分量。

将 (1) 式代入 (2) 式后, 便可将 P 点的潮汐应变分量由胡克定律转换为 P 点的应力张量。在此基础上, 根据主震的震源断层参数, 将潮汐应力张量通过矩阵旋转投影到震源断层面上, 得到潮汐剪应力 τ 、潮汐正应力 σ_n ; 然后根据库仑破裂准则, 计算得出主震断层面上的潮汐库仑破裂应力:

$$T_{cfs} = \tau + \mu' \sigma_n \quad (3)$$

其中: T_{cfs} 为断层面上因太阳和月亮引力影响所产生的库仑破裂应力, 本文中 μ' 取值 0.5, 代表断层的有效摩擦系数 (Harris, 1998; 解朝娣等, 2015)。

3.2 统计检验方法

传统的潮汐相位分析方法是计算诸如 M_j 、 M_2 等特定周期的潮汐波 (解朝娣等, 2015)。Schuster (1897) 将 Rayleigh 在 1880 年提出的时间序列统计检验原理应用到地震活动与日月相关性的统计检验当中。Schuster 统计检验 (Tanaka *et al*, 2006, 2010) 建立了潮汐现象随时间变化的函数, 并且这个函数代表了作用在地震断层上的潮汐波的总和。该检验方法通过计算地震事件所对应的潮汐相位角, 统计整个地震目录中地震事件相位角的分布情况, 分析某一时间段或某一地区是否存在优势相位角, 进而判断研究区域内的地震活动是否受到了潮汐的触发 (Tanaka *et al*, 2006, 2010; 孙长青等, 2014)。具体而言, 首先将发震时间转换为国际时, 然后采用 Gtoic2 (Matsumoto *et al*, 2001) 按照前文所述的方法计算潮汐应变, 并确定该地震事件所对应的潮汐相位角, 再将地震序列中每个地震事件对应的潮汐相位角一一标出, 最后统计分析潮汐相位角是否在特定角度附近集中。

在 Schuster 检验中, 规定第 j 个地震事件为单位向量 \mathbf{e}_j (方向由该事件对应的相位角确定, 向量的模为 1)。然后将 N 个地震事件的向量相加得到向量 \mathbf{D} , 表示为:

$$|\mathbf{D}|^2 = \left(\sum_{j=1}^N \cos \theta_j \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^N \sin \theta_j \right)^2 \quad (4)$$

式中: N 为地震事件的总数; θ_j 为第 j 个地震事件

的潮汐相位角。

如果 N 个地震事件是随机发生的，其潮汐相位角也是随机分布的。当 N 足够大 ($N > 10$) 时，和向量的长度大于或等于 $|D|$ 的概率 (Tsuruoka *et al.*, 1995) 为：

$$P = \exp\left(-\frac{D^2}{N}\right) \quad (5)$$

式中： D^2 即为向量 D 模的平方； P 值为定量描述潮汐效应触发地震活动的指标， P 值范围为 $0 \sim 1$ ， P 值越小，潮汐对地震的触发效应越明显 (李金等, 2014; 解朝娣等, 2015)。前人通常取 $P < 5\%$ 作为判断潮汐能否触发地震的标准 (Tanaka, 2010; 解朝娣等, 2015)。

3.3 ETAS 模型分析方法

由大森公式发展得到的 ETAS 模型 (Ogata, 2005, 2011; Lei *et al.*, 2008, 2011) 可以分析序列中活动性的异常变化，这对于研究地震活动性和外部触发因素有帮助。ETAS 模型假设每个地震都有触发余震的能力，此能力具有震级依赖性 (Lei *et al.*, 2013)；并给出总的地震发生率 $\lambda(t)$ 可以由先期地震触发的次级余震发生率和表示“背景”地震活动的发生率 $\lambda_0(t)$ 之和来表述：

$$\lambda(t) = \lambda_0(t) + \sum_{i: t_i < t} K_0(t - t_i + c)^{-P} e^{\alpha(M_i - M_c)} \quad (6)$$

式中： M_i 和 M_c 分别表述第 i 个地震事件的震级和地震序列的最小完备震级。一般情况下，“背景”地震活动的发生率 λ_0 为常数，不是时间 t 的函数；但如果外部触发因素存在时， $\lambda_0(t)$ 就包括构造背景活动和外部触发地震活动，分析 $\lambda_0(t)$ 就有助于分析外部触发地震活动。 K_0 ， c ， α 和 P 这些模型参数都是通过最小 AIC 准则检验给出，合适的平滑化参数 n_e 也可以通过最小 AIC 准则来确定。

4 结果分析

4.1 主震断层面上的潮汐库仑破裂应力计算结果

采用上述潮汐应力计算方法，首先计算球坐标系中于田 $M_s7.3$ 和皮山 $M_s6.5$ 主震的理论潮汐应变张量，通过胡克定律转换为应力张量，然后结合表 1 中列出的主震震源参数，计算出震源断层面上前后一天的潮汐剪应力 τ 、潮汐正应力 σ_n 和潮汐库仑破裂应力 T_{cf} 随时间变化的关系。根据相关研究 (房立华等, 2015)，2014 年于田 $M_s7.3$ 主震的震源断层面为北东向的节面，因此采用表 1 中节面 1 的参数进行计算；同理，根据相关研究 (张广伟等, 2016)，2015 年皮山 $M_s6.5$ 主震的震源断层面采用表 1 中节面 1 的参数进行计算。通过计算可以得到于田 $M_s7.3$ 和皮山 $M_s6.5$ 主震发震时，震源断面上的潮汐应力，结果如图 3 和表 2 所示。

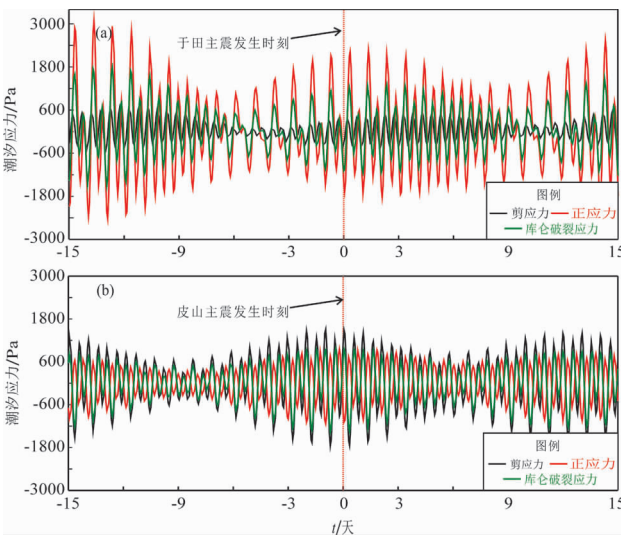


图 3 于田 $M_s7.3$ (a) 和皮山 $M_s6.5$ (b) 主震震源断面上的潮汐应力随时间变化曲线
Fig. 3 The curve of tidal stress on the fault plane of 2014 Yutian $M_s7.3$ (a) and 2015 Pishan $M_s6.5$ (b) mainshocks varied with time

表 2 于田 $M_s7.3$ 、皮山 $M_s6.5$ 主震断层面上的理论潮汐应力值

Tab. 2 The theoretical tidal stresses on the fault planes of the Yutian $M_s7.3$ and Pishan $M_s6.5$ mainshocks

地震事件	发震时间(世界时)	潮汐应力		
		剪应力/Pa	正应力/Pa	库仑破裂应力/Pa
于田 $M_s7.3$ 地震	2014-02-12 09:19:57	-380.78	-1 429.98	-1 095.77
皮山 $M_s6.5$ 地震	2015-07-03 01:07:45	1 111.25	-803.00	709.75

结合表 2 和图 3 可见, 在于田主震发震时刻, 于田主震震源断层面上的潮汐剪应力处于波谷值与波峰值之间的上升阶段, 为 -380.78 Pa , 而潮汐正应力和潮汐库仑破裂应力位于波峰值到波谷值的下降阶段, 分别为 $-1\,429.98 \text{ Pa}$ 、 $-1\,095.77 \text{ Pa}$ 。在皮山主震发震时刻, 皮山主震震源断层面上的潮汐剪应力和潮汐库仑破裂应力处于波峰值到波谷值的上升阶段, 分别为 $1\,111.25 \text{ Pa}$ 、 709.75 Pa , 潮汐正应力处于波峰值到波谷值的下降阶段, 为 -803.00 Pa 。

4.2 余震序列与潮汐应力相关性统计分析结果

使用表 1 中列出的震源参数, 对 2 个地震序列中震级大于 M_c 的所有余震事件进行潮汐相位分析, 确定各事件的潮汐相位角, 计算得到潮汐相位角的频率分布图, 于田和皮山主震的震源断层均采用表 1 中节面 1 进行分析, 结果如图 4 所示。图中显示, 统计计算得到的 P 值几乎都小于 5%。再结合图 3 和表 2 中潮汐库仑破裂应力分析结果, 可以发现潮汐应力对皮山和于田地震的余震序列均有

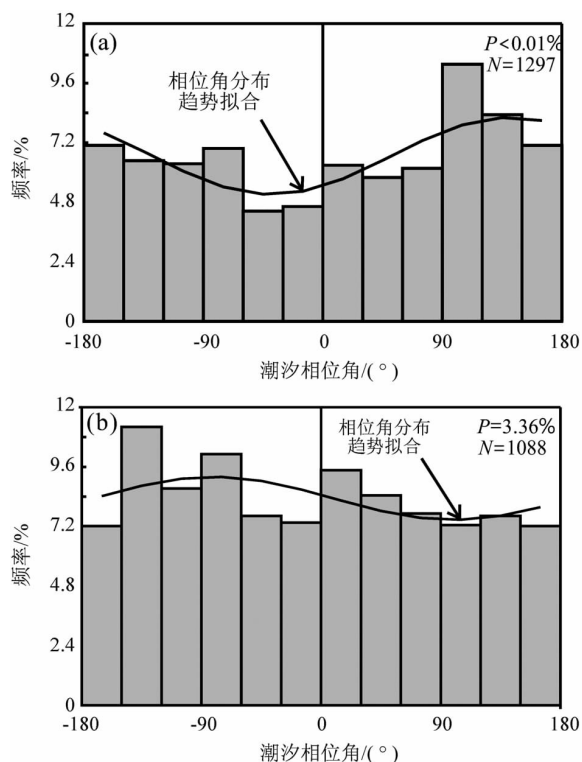


图 4 于田 $M_s7.3$ (a) 和皮山 $M_s6.5$ (b)

地震序列潮汐相位的频率分布图

Fig. 4 Frequency distribution diagram of tidal phase of Yutian $M_s7.3$ (a) and Pishan $M_s6.5$ (b) earthquake sequences

触发作用, 但是潮汐应力对于田主震的触发效果不明显, 因为于田主震断层面上受到的潮汐库仑破裂应力为负值。

4.3 ETAS 模型计算结果

从图 5 可以看出, 通过最小 AIC 准则得到的 2 个序列的 n_e 均为 14。“背景”地震活动率 ($f.s.$) 和模型的其他参数如图 5 所示。结果表明 2 个余震序列以受迫成分为主 ($f.s.>80\%$), 说明于田、皮山余震序列中 80% 以上的事件是来自于外部因素的影响, 诸如潮汐应力和其他影响因素, 其余的是大森型自触发地震。于田和皮山地震序列的模型参数 α 分别为 1.069 和 0.918, 小的 α 值表明了序列对地震震级的弱依赖性, 可以从背景地震活动中区分开 (Ogata, 1999; Lei *et al.*, 2008)。

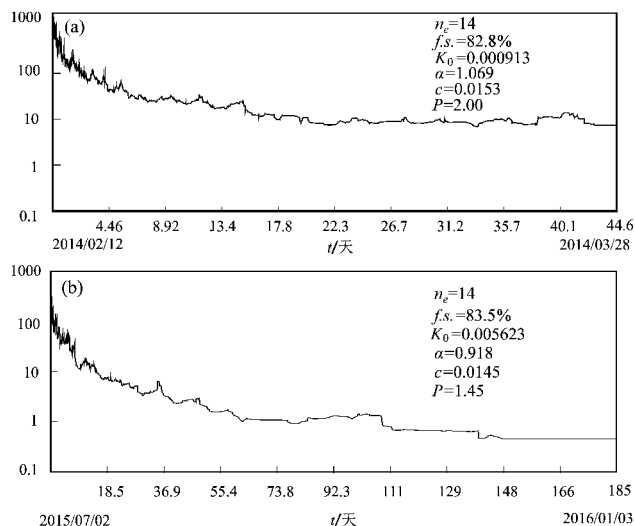


图 5 于田 $M_s7.3$ (a) 和皮山 $M_s6.5$ (b) 地震序列目录的 ETAS 分析结果

Fig. 5 ETAS analysis results of catalogs of Yutian $M_s7.3$ (a) and Pishan $M_s6.5$ (b) earthquake sequences

5 结论与讨论

本文选取新疆西昆仑地区的 2014 年于田 $M_s7.3$ 、2015 年皮山 $M_s6.5$ 两次中强地震及其余震序列进行地震潮汐触发研究。

(1) 首先通过计算主震震源断层面上的潮汐剪应力、潮汐正应力, 得到了主震震源断层面上的潮汐库仑破裂应力。结果显示: 于田主震断层面上的潮汐库仑破裂应力值为负值, 而皮山主震断层面

上的潮汐库仑破裂应力值为正值。依据地震触发的相关研究结果(Harris, 1998),正的库仑破裂应力变化超过触发阈值时,可能起到地震触发作用;而负的库仑破裂应力变化没有触发作用,甚至可能起到抑制后续地震发生的作用。但潮汐应力的地震触发作用除了与潮汐库仑破裂应力值的正负以及大小(是否超过触发阈值)有关,还与潮汐应力的时间震荡性有关(解朝娣等, 2015);潮汐触发作用的研究不能单一的以潮汐库仑破裂应力的正负作为唯一判断标准。因此,本文结果表明潮汐应力对皮山主震有明显的触发作用,而对于田主震的触发作用不明显。

(2) 通过Schuster统计检验方法,计算2个余震序列潮汐库仑破裂应力的相位角分布发现,潮汐应力对皮山地震和于田地震的余震序列均有触发作用。最后结合ETAS模型分析,也发现西昆仑地区的地震活动受到来自于外部因素的触发作用,诸如潮汐应力和其他影响因素,与大森型自触发的余震活动不一致。

新疆西昆仑地区由于受到欧亚板块与印度板块相互作用所造成的挤压应力,产生了多条较大规模的断裂,以及一系列的活动断层,而断层交汇处,是流体活动的通道,所以该地区的地热流体活动很丰富的。而流体对潮汐的拉伸作用敏感,可以凸显潮汐触发作用。这可能是该地区潮汐触发作用较为明显的主要原因。

参考文献:

陈建波. 2008. 新疆地震构造特征研究[D]. 兰州:中国地震局兰州地震研究所.
程佳,杨文,刘杰,等. 2014. 2014年2月12日新疆于田 $M_s7.3$ 地震序列及其构造背景研究[J]. 地震学报,36(3):350-361.
丁中一,贾晋康,王仁. 1983. 潮汐应力对地震的触发作用[J]. 地震学报,5(2):46-58.
房立华,吴建平,王未来,等. 2015. 2014年新疆于田 $M_s7.3$ 级地震序列重定位[J]. 地球物理学报,58(3):802-808.
姜迪迪,江为为,胥颐,等. 2014. 中国西部地区地壳结构特征与强震活动相关性研究[J]. 地球物理学报,57(12):4029-4040.
蒋骏,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,(1):72-83.
解朝娣,Lei X L,吴小平,等. 2015. 潮汐应力对2007年 $M_s6.4$ 宁洱地震震源断层成核失稳过程的影响[J]. 中国科学:地球科学,45(9):1409-1420.
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[J]. 中国地震,30(1):64-73.

李金,王琼. 2015. 2014年2月12日于田7.3级地震序列震源机制特征分析[J]. 中国地震,31(1):110-120.
李智蓉,张晓东. 2011. 潮汐应力与大震关系研究[J]. 地震,31(4):48-57.
潘家伟. 2011. 西昆仑构造地貌与阿什库勒地区活动构造研究[D]. 北京:中国地质科学院.
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.
万永革,沈正康,盛书中,等. 2010. 2008年新疆于田7.3级地震对周围断层的影响及其正断层机制的区域构造解释[J]. 地球物理学报,53(2):280-289.
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[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学,39(6):901-912.
熊子瑶,解朝娣,雷兴林,等. 2015. 云南大姚、姚安及附近地区地震活动与潮汐应力的触发关系[J]. 地震研究,38(1):66-74.
张广伟,张洪艳,孙长青. 2016. 2015年新疆皮山 $M_s6.5$ 地震震源机制及余震序列定位[J]. 地震地质,38(3):711-720.
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.
朱传庆,杨书江,李同彬,等. 2008. 塔里木盆地主要断裂的地球物理特征及与天然地震的关系[J]. 地球物理学进展,23(6):1685-1691.
邹长桥,贺日政,张智. 2012. 藏北高原地震活动性特征及其大地构造意义[J]. 地球物理学进展,27(2):429-440.
Agnew D C. 2007. Earth Tides, in Treatise on Geophysics: Geodesy, T A Herring, ed[M]. New York: Elsevier, 163-195.
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.
Lei X, Shengli M A, Jinrong S U, et al. 2013. Inelastic triggering of the 2013 $M_w6.6$ Lushan earthquake by the 2008 $M_w7.9$ Wenchuan earthquake[J]. Seismology And Geology, 35(2):411-422.
Lei X, Xie C, Fu B. 2011. Remotely triggered seismicity in Yunnan, southwestern China, following the 2004 $M_w9.3$ Sumatra earthquake[J]. J Geophys Res, 116(B8):114-123.
Lei X, Yu G, Ma S, et al. 2008. Earthquakes induced by water injection at ~3 km depth within the Rongchang gas field, Chongqing, China [J]. J Geophys Res, 113(B10):1-12, doi: 10.1029/2008JB005604.
Matsumoto K, Takanezawa T, Ooe M. 2001. GOTIC2: A program for computation of oceanic tidal loading effect[J]. J Geod Soc Japan, 47(1), 243-248.
Ogata Y. 1999. Seismicity Analysis through Point-process Modeling: A Review[J]. Pure and Applied Geophysics, 155(2):471-507.
Ogata Y. 2005. Detection of anomalous seismicity as a stress change sensor[J]. J Geophys Res, 110(B5):767-782.
Ogata Y. 2011. Pre-seismic anomalies in seismicity and crustal deformation: case studies of the 2007 Noto Hanto earthquake of $M6.9$ and

- the 2007 Chuetsu-oki earthquake of $M_6.8$ after the 2004 Chuetsu earthquake of $M_6.8$ [J]. *Geophys J Int*, 186(1):331–348.
- Schuster A. 1897. On Lunar and Solar Periodicities of Earthquakes [J]. *Nature*, 61(1449):321–321.
- 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.
- 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 ($M_w 8.5$) [J]. *Geophys Res Lett*, 37(37):195–205.
- 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.

Research on Triggering Relationship between Tidal Stress and the 2014 Yutian $M_s 7.3$ Earthquake and 2015 Pishan $M_s 6.5$ Earthquake and Their Aftershock Sequences in Xinjiang Province

MA Qingbo¹, XIE Chaodi¹, XIANG Yuan², WANG Qiong², YANG Simeng¹, WANG Yingnan¹

(1. School of Resource Environment and Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, Yunnan, China)

(2. Earthquake Agency of Xinjiang Uyghur Autonomous Region, Urumchi 830011, Xinjiang, China)

Abstract

According to the theory of tidal stress triggering, the sequences of the 2014 Yutian $M_s 7.3$ and 2015 Pishan $M_s 6.5$ earthquakes together with their aftershocks were used to study the tidal triggering of earthquakes in the western Kunlun region of the Xinjiang province. First, we analyzed the completeness of all earthquake catalogs and calculated the tidal shear stresses, tidal normal stresses and tidal coulomb failure stresses at the origin time of each earthquake using the fault planes of main shocks. Moreover, in order to study whether there exists a triggering relationship between the strong shock as well as its aftershocks in western Kunlun region and the tidal stress, we calculated the distribution of phase angles of tidal coulomb failure stresses for two earthquake sequences by using the method of Schuster test. The result shows that the coulomb failure stresses are positive on the fault at the occurrence time of Pishan mainshock. And the coulomb failure stresses for Yutian mainshock are negative. This means that the tidal triggering effect is significant for the Pishan mainshock but not obvious for the Yutian mainshock. And the Schuster test shows the P values of the sequences of the Pishan event and the Yutian event are both almost less than 5%. So, there is a tidal triggering effect on two aftershock sequences. In the final, combining with the discussion on ETAS model, it also shows the weak dependence of aftershock sequence on earthquake magnitude, which may be related with the trigger factor outside.

Keywords: 2014 Yutian $M_s 7.3$ Earthquake; 2015 Pishan $M_s 6.5$ Earthquake; Schuster test; tidal stress; earthquake triggering