

# 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\*

熊子瑶<sup>1</sup>, 解朝娣<sup>1</sup>, 雷兴林<sup>2</sup>, 付虹<sup>3</sup>, 马青波<sup>1</sup>

(1. 云南大学 资源环境与地球科学学院, 云南 昆明 650091; 2. 日本产业技术综合研究所, 日本 筑波 305-8567;  
3. 云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:**以云南大姚、姚安及其附近地区8个 $M > 5.0$ 地震序列为研究对象, 计算了主震震源断层上的潮汐应力, 并通过Schuster潮汐相位角统计检验, 分析了该地区地震活动与潮汐应力的触发相关性, 进一步确认两者的潮汐应力触发关系。结果显示, 7个地震序列的 $P$ 值小于5%, 6个地震序列的潮汐库仑破裂应力为正值。考虑到震源参数的不确定性, 8个 $M > 5.0$ 地震序列中, 至少5个地震序列与潮汐应力存在一定的触发相关性, 说明潮汐应力对该地区地震活动具有一定的潮汐触发作用。

**关键词:**潮汐库仑破裂应力; 大姚—姚安地区; Schuster检验; 潮汐触发

**中图分类号:** P315.727

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2015)01-0066-09

## 0 引言

地处滇中地区的云南大姚、姚安一带中强地震活动十分频繁。自2000年以来, 在以姚安为圆心的半径约30 km的范围内已先后发生了2000年1月15日姚安6.5级、2003年7月21日大姚6.2级、2003年10月16日大姚6.1级和2009年姚安6.0级共4次中强地震。但该地区的地质资料和地震地质考察资料都未显示或发现任何活动断裂构造的形迹(张建国等, 2009), 吴小平等(2005)研究发现云南地区的地震活动与潮汐应力触发存在一定的相关性。

从潮汐应力和地震的孕震机制角度看, 地震的发生归因于震源处的构造应力和潮汐应力的叠加。当震源处岩石中的构造应力积累到岩石破裂滑动的临界状态时, 如果受到适当方向上的潮汐应力, 就会对地震产生一个触发作用(Sun, 1992; 吴小平等, 2005)。Sun(1992)和吴小平等(2005)研究发现天文潮汐应力场的分布与 $M \geq 7$ 地震能量分布之间存在明显的相关性。张辉等(2013)选取1900~2012年中国大陆 $M_s \geq 7.0$ 的浅源地震为研究对象, 发现在具有震源机制解

的57次强震中, 大多数强震发生在潮汐加载相位区间, 表明中国大陆 $M_s \geq 7.0$ 强震与潮汐库仑破裂应力间存在很好的相关性。张晶等(2007)讨论了在构造应力水平达到岩石破裂临界值时, 引潮力、潮汐附加应力的动态变化与地震序列之间的关系; 并选用了中国大陆1970年以来 $M \geq 7$ 地震序列资料, 分析了引潮力水平分量动态变化与强震发震时间之间的关系, 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。目前, 潮汐应力与地震活动的相关性研究, 主要从应力的角度, 分析发震断层面所受的潮汐应力与地震震源机制的关系, 并结合断层面上发震时刻潮汐应力所处相位等进行分析(Heaton, 1975; Cochran, 2004; Knopoff, 1964; 田中佐千子, 2007; 高锡铭等, 1981; 吴小平等, 2009)。

本文以云南大姚、姚安及附近地区地震序列为研究对象, 首先计算各主震震源断层面的潮汐库仑破裂应力随时间的变化, 根据峰值的大小判断潮汐与地震活动的关系。然后使用Schuster检验统计方法, 检验潮汐库仑破裂应力与地震活动的相关性, 根据 $P$ 值进一步分析潮汐与地震的触发关系, 从而研究潮汐应力与云南大姚、姚安及邻近地区中强地震活动之间的关系。

\* 收稿日期: 2014-06-11.

**基金项目:**国家自然科学基金(41104036)、云南省教育厅科学研究基金项目(2014Z009)以及云南大学资源环境与地球科学学院科研项目(2013CK002)联合资助。

## 1 构造背景

云南位于板块碰撞的交界处，是印度板块北东向挤压和青藏高原地壳物质侧移共同作用的地区。以红河断裂带为界，云南西部地区断裂活动主要是印度板块侧向挤压的结果，中东部地区断裂活动与川滇菱形块体的南南东向挤出密切相关（皇甫岗等，2000）。

云南地区  $M \geq 6$  地震主要沿着一些主要活动构造带和地震带分布，但是大姚—姚安一带位于滇中构造块体内部，没有明显的断裂构造（苏有锦，2004），却频繁发生6级地震。姚安、大姚地区地处分别以程海断裂、红河断裂和小江断裂为西北、西南和东边界的“滇中块体”内部，属于扬子准地台Ⅰ级、川滇台背斜Ⅱ级和滇中台陷Ⅲ级大地构造单元内（任纪舜等，1980）。

川滇地块的运动与攀枝花—会理间地震成因也具有一定的关系（龙峰等，2010）。攀枝花地震

带与红格断裂（也称昔格达断裂）一致。该断裂北起四川德昌以南，向南经米易、会理红格、攀枝花鱼鲊、达云南元谋及其以南的平浪，全长约240 km，在云南境内部分也称为元谋断裂或者绿汁江断裂。该断裂为现今强烈活动的深断裂，自晚第四纪以来表现为左旋走滑兼挤压逆冲运动（刘明富，2008）。同属云南的大姚、姚安临近地区的楚雄，在地质构造体系中处于云南山字型构造西翼内侧马蹄形盾地北部，西翼受青、藏、滇、缅歹字型构造东支中断影响。这样使西翼构造活动性加强，北西向断裂、褶皱发育，主压应力为南西—北东向；东部为川滇经向构造体系绿汁江断裂带，发育着近南北向褶皱、断裂以及派生“入”字型断裂；而中、北部为反时针旋卷构造<sup>①</sup>。

考虑到这些特殊的构造背景和历史地震分布活动，笔者主要选取1993年以来大姚、姚安一带的5个中强地震及其邻近的攀枝花、武定发生的3个中强地震进行分析，研究潮汐应力与地震活动之间的触发关系。研究区域及主要断裂分布如图1所示。

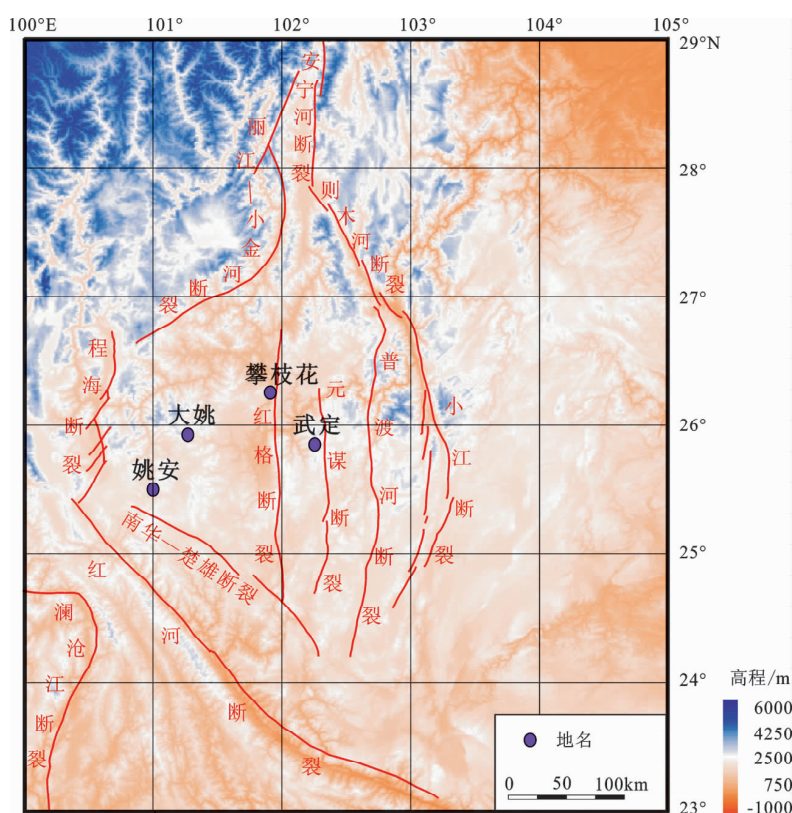


图1 云南大姚、姚安及附近地区构造背景图

Fig. 1 Tectonic background in Dayao, Yaoan and their adjacent area in Yunnan province

<sup>①</sup> <http://data.cea-ies.ac.cn/iesshare/zhenli/chuxiong5.htm>.

2 选取数据

考虑到研究区域的构造背景及发震情况等, 选用云南大姚、姚安一带及附近地区主震震级大于 5.0 且地震序列个数大于 100 的地震事件及其序列, 最终选取 8 个地震序列作为研究对

象。首先确定主震事件的断层面参数, 由于 1993 年大姚 5.5 级地震与 2000 年武定 5.1 级地震没有震源参数方面的相关研究, 故本文参考与该地震相同地区临近年份所发生地震事件的震源参数。最终所选取的这 8 个地震事件的震源参数及其余震序列的相关参数和数据来源如表 1 所示。

表 1 研究区域  $M \geq 5$  地震及其余震序列的震源参数  
Tab. 1 Focal parameters of  $M \geq 5$  earthquakes and their aftershock series in the study area

序 号	主震的震源参数								余震序列的参数					
	发震时间(北京 时)/年-月-日 时:分:秒	$\varphi_N$ /(°)	$\lambda_E$ /(°)	震级	震中 位置	走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动 角/(°)	余震 个数	$\lambda_E$ /(°)	$\varphi_N$ /(°)	时间范围(北京 时)/年-月-日	震级 范围	数据 来源
1	2008-08-30 16:30:52	26.23	101.92	6.1	攀枝花	185	83	5	580	(100.25 ~ 102.51)	(26.07 ~ 27.25)	2008-08-03 ~ 2008-12-20	1.0 ~ 6.1	(龙 锋 等,2010)
2	2009-07-09 19:19:14	25.55	101.05	6.5	姚安	304	76	-176	916	(100.57 ~ 101.12)	(25.26 ~ 25.37)	2009-07-09 ~ 2009-08-10	1.0 ~ 6.5	(张建国 等,2009)
3	2003-07-21 23:16:30	25.95	101.23	6.2	大姚	106	76	-173	550	(100.95 ~ 101.42)	(25.77 ~ 26.08)	2003-07-21 ~2003-10-16	1.0 ~ 6.2	(虎雄林 等,2013)
4	2003-10-16 20:28:03	25.92	101.30	6.1	大姚	111	83	-161	432	(101.05 ~ 101.62)	(25.80 ~ 26.10)	2003-10-16 ~2004-06-27	1.0 ~ 6.1	(虎雄林 等,2013)
5	2000-01-15 07:37:05	25.58	101.12	6.5	姚安	129	88	-170	1577	(101.00 ~ 101.98)	(25.03 ~ 25.78)	2000-01-15 ~2000-03-31	1.0 ~ 6.5	(张建国 等,2009)
6	1993-02-01 03:33:28	25.85	101.35	5.5	大姚	111	83	-161	387	(101.18 ~ 101.37)	(25.72 ~ 26.13)	1993-02-01 ~1993-04-14	1.0 ~ 5.5	(虎雄林 等,2013)
7	2000-08-21 21:25:39	25.82	102.22	5.1	武定	106	90	180	161	(101.85 ~ 102.43)	(24.53 ~ 25.97)	2000-08-21 ~2000-12-25	1.0 ~ 5.1	(马淑田, 赵薇,1997)
8	1995-10-24 06:46:52	25.83	102.32	6.5	武定	106	90	180	3972	(101.93 ~ 102.43)	(25.83 ~ 26.05)	1995-10-24 ~1996-02-03	1.5 ~ 6.5	(马淑田, 赵薇,1997)

3 原理与方法

3.1 潮汐库仑破裂应力的计算原理

假设地球内部的物理性质具有球对称性, 球坐标系中起潮力在地球表面或内部任一点的理论潮汐应变分量  $e_{\theta\theta}$ 、 $e_{\lambda\lambda}$  和  $e_{\theta\lambda}$  可表示为 (Agnew, 2007)

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

式中,  $r$  为地心半径,  $g$  为地球的平均重力,  $V_n$  为  $n$  阶起潮力,  $\varphi$  为地球内部任一点的地理纬度,  $L_n(r)$  和  $H_n(R)$  为 Love 数。再考虑应力与应变之间的胡克定律, 可以得到球坐标系下的潮汐应力分量。计算出月亮和太阳在震源处产生的潮汐应力分量, 然后按照震源机制解参数, 通过旋转矩阵将潮汐应力投影到各主震震源断层面上, 可得到断层面的潮汐正应力  $\sigma_n$  和潮汐剪应力  $\tau$ , 再根据库仑破裂应力的定义, 可得到地震震源断面上的潮汐库仑破裂应力为

$$T_{\text{cls}} = \tau + \mu' \sigma_n. \quad (2)$$

式中,  $T_{\text{cls}}$  为断层面上由潮汐引起的库仑破裂应力,  $\mu'$  为断层的视摩擦系数, 其取值范围一般为 0.2 ~

0.8 (Harris, 1998)。潮汐正应力  $\sigma_n$  和潮汐剪应力  $\tau$  代入 (2) 式, 就可计算出地震震源断层面的潮汐库仑破裂应力。

### 3.2 统计检验的原理和方法

采用 Tanaka 等 (2002a, b) 方法统计分析潮汐与地震活动之间的相关性。首先, 以初始地球参考模型 (Dziewonski, Anderson, 1981) 计算每个地震震源处的理论潮汐应力值, 然后以潮汐库仑破裂应力的计算为基础, 考查潮汐库仑破裂应力与地震活动的相关性, 分配每个地震发生时间所对应的潮汐相位角 (图 2)。以单个地震事件潮汐库仑破裂应力相位的确定为例, 对于单个地震事件, 将所计算出来的发震断面上的潮汐库仑破裂应力值依据时间变化做出曲线图, 如图 2 所示, 确定发震时刻在潮汐库仑破裂应力变化曲线中的位置。规定在潮汐库仑破裂应力变化曲线中, 一个潮汐相位角的取值范围为  $(-180^\circ \sim 180^\circ)$ , 是通过用一个  $(-180^\circ \sim 0^\circ)$  或  $(0^\circ \sim 180^\circ)$  的线性标尺分配的, 其中  $(0^\circ \sim 180^\circ)$  分别分配给符合滑动方向潮汐库仑破裂应力的最大和最小值。将  $(-180^\circ \sim 180^\circ)$  相位区间根据时间进行等分求出每一分钟所对应的相位度数, 后以  $0^\circ$  为基准, 通过发震时间与  $0^\circ$  所对应的时间差与每一分钟所对应相位度数的乘积, 即可求出发震时潮汐库仑破裂应力的相位。如一个地震发生的时间正好在最大潮汐库仑破裂应力和随后的最小潮汐库仑破裂应力之间, 则被分配一个  $\theta_i = 90^\circ$  的潮汐相位角, 如图 2 所示。

确定所有地震的相位角之后, 再通过 Schuster 检验 (Emter, 1997) 测试它们是否集中在一些特定角度附近, 以判断其是否受到潮汐触发。在该测试中把每个地震作为一个单位长度的向量, 其在二维空间的方向由前述潮汐相位角确定。对于一个包括  $N$  个事件的数据集 (即地震的总数  $N$ ), 可得到了一个长度  $D$  的向量和, 如下

$$D^2 = \left( \sum_{i=1}^N \cos \theta_i \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^N \sin \theta_i \right)^2. \quad (3)$$

当  $N$  个事件的相位角随机分布, 步幅变得随机游动。向量和的长度的概率等于或大于  $D$  时, 可近似表示为

$$P = \exp\left(-\frac{D^2}{N}\right). \quad (4)$$

式中,  $P$  值表示了地震随机分布且与潮汐相位角无关的拒绝零假设的显著水平。 $P$  值越小表明固体潮与地震发生之间的相关性越高。前人的研究一般采用  $P < 5\%$  作为判断相关性的临界值 (Emter, 1997; Tanaka et al., 2002b; Tolstoy et al., 2002a, b)。

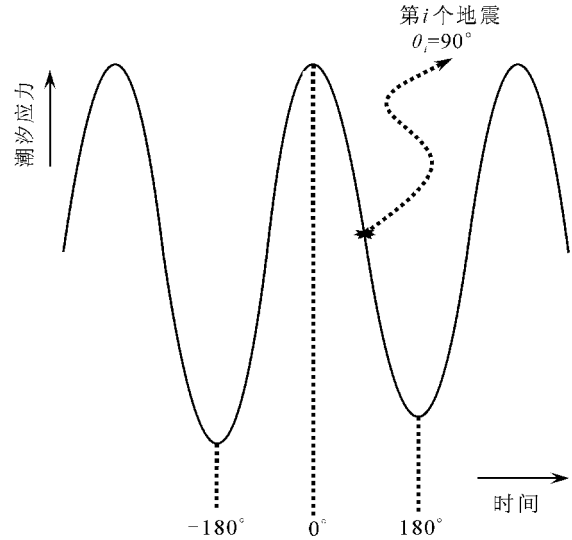


图2 潮汐相位角的确定 (离发震时刻最近的波峰为  $0^\circ$ )

Fig. 2 Definition of tidal phase angle (the nearest wave crest from original time is assigned to  $0^\circ$ )

## 4 结果分析

### 4.1 潮汐库仑破裂应力的计算结果

根据潮汐库仑破裂应力的计算原理, 及上述 8 个地震序列主震事件的震源参数, 利用表 1 中的数据, 将发震时间换算为国际时, 并取断层的视摩擦系数为 0.5, 从而求得地震震源断面上的潮汐剪应力、正应力以及潮汐库仑破裂应力随时间变化的关系, 如图 3 所示。

从图 3 中可提取主震发震时刻的潮汐应力值, 结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 在 8 个地震中, 有 6 个地震震源断面上的潮汐库仑破裂应力为正值, 而有 2 个地震的为负值。正值的潮汐库仑破裂应力即为潮汐应力与地震触发相关的表现, 说明该地区潮汐应力与地震的触发之间可能存在一定的相关性。

### 4.2 潮汐相位相关性

将 8 个地震序列的发震时间换算为国际时, 并对其进行 Schuster 统计检验, 得到了潮汐库仑破裂应力相位角频度分布图 (图 4)。

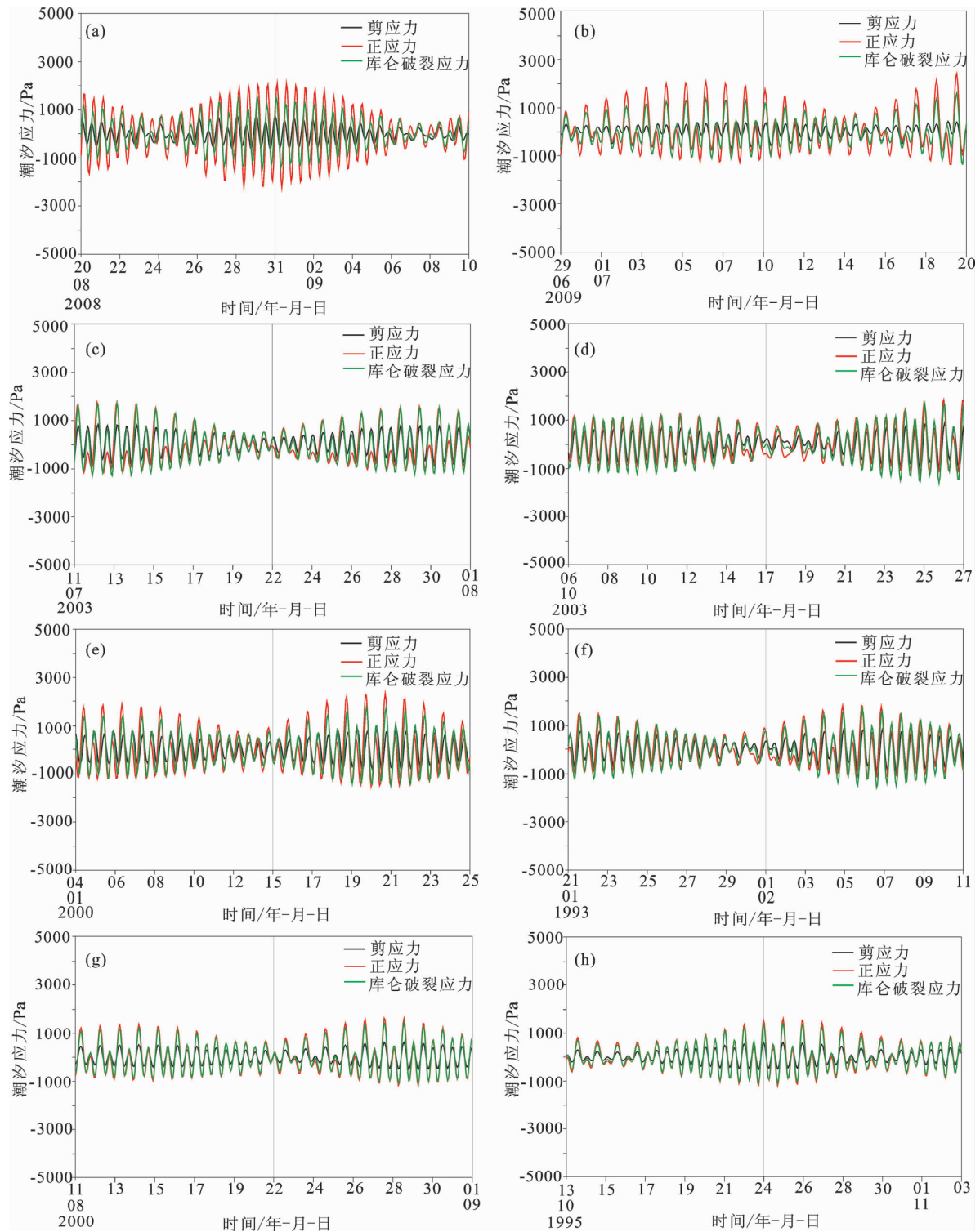


图3 主震震源断面上的潮汐剪应力、正应力及潮汐库仑破裂应力随时间的变化图

(a) 2008年8月30日攀枝花6.1级地震序列; (b) 2009年7月9日姚安6.5级地震序列; (c) 2003年7月21日大姚6.2级地震序列; (d) 2003年10月16日大姚6.1级地震序列; (e) 2000年1月15日姚安6.5级地震序列; (f) 1993年2月1日大姚5.5级地震序列; (g) 2000年8月21日武定5.1级地震序列; (h) 1995年10月24日武定6.5级地震序列

Fig. 3 Map of tidal shear stress, normal stress and tidal coulomb failure stress varying with time on the source plane of main shock

(a) Panzhihua  $M6.1$  seismic sequence on Aug. 30, 2008; (b) Yaoan  $M6.5$  seismic sequence on Jul. 9, 2009; (c) Dayao  $M6.2$  seismic sequence on Jul. 21, 2003; (d) Dayao  $M6.1$  seismic sequence on Oct. 16, 2003; (e) Yaoan  $M6.5$  seismic sequence on Jan. 15, 2000; (f) Dayao  $M5.5$  seismic sequence on Feb. 1, 1993; (g) Wuding  $M5.1$  seismic sequence on Aug. 21, 2000; (h) Wuding  $M6.5$  seismic sequence on Oct. 24, 1995

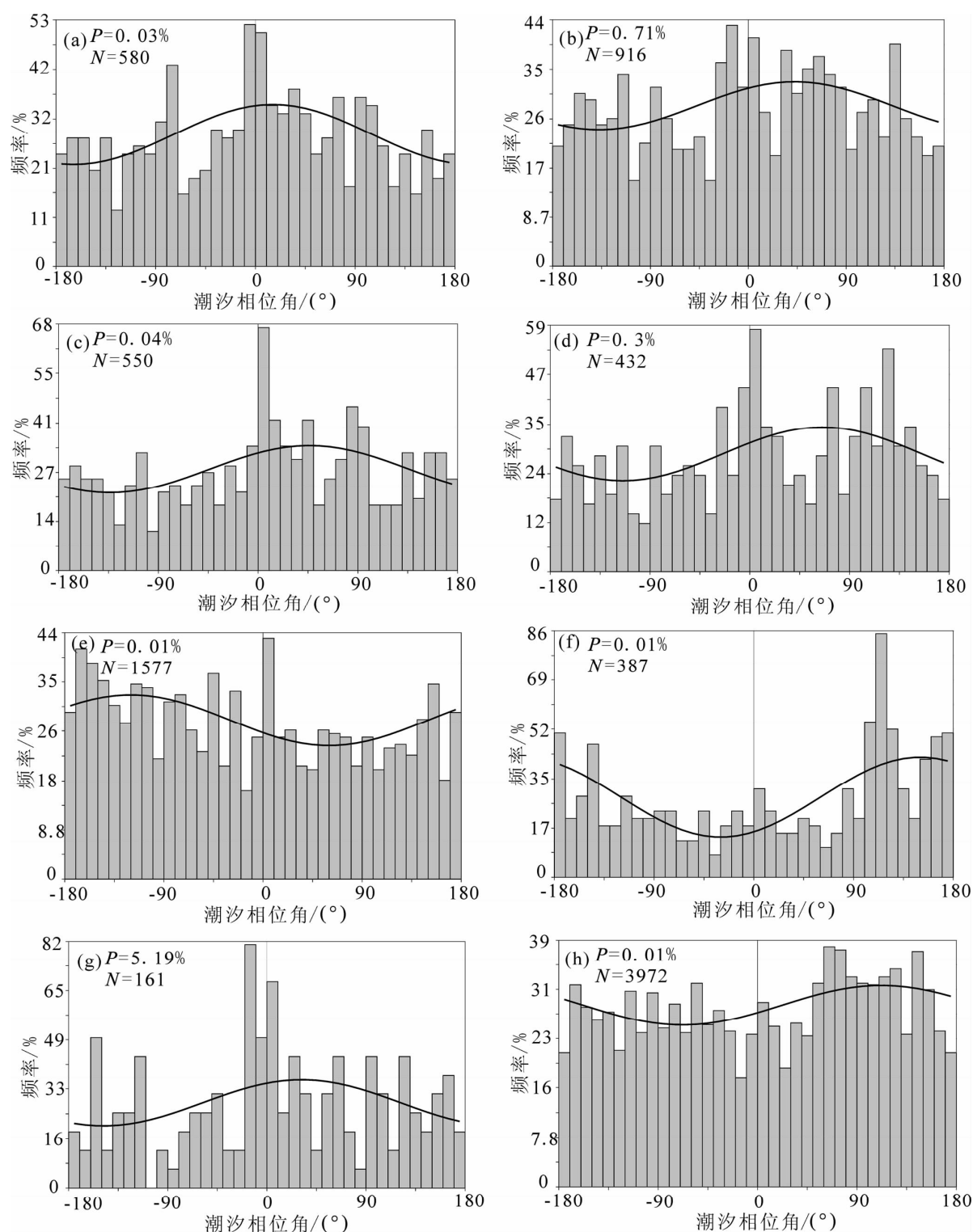


图4 地震序列潮汐库仑破裂应力相位角的频率分布图

(a) 2008年8月30日攀枝花6.1级地震序列；(b) 2009年7月9日姚安6.5级地震序列；(c) 2003年7月21日大姚6.2级地震序列；(d) 2003年10月16日大姚6.1级地震序列；(e) 2000年1月15日姚安6.5级地震序列；(f) 1993年2月1日大姚5.5级地震序列；(g) 2000年8月21日武定5.1级地震序列；(h) 1995年10月24日武定6.5级地震序列

Fig. 4 Frequency distribution of phase angles of tidal coulomb failure stress for seismic sequence

(a) Panzhihua M6.1 seismic sequence on Aug. 30, 2008; (b) Yaoan M6.5 seismic sequence on Jul. 9, 2009; (c) Dayao M6.2 seismic sequence on Jul. 21, 2003; (d) Dayao M6.1 seismic sequence on Oct. 16, 2003; (e) Yaoan M6.5 seismic sequence on Jan. 15, 2000; (f) Dayao M5.5 seismic sequence on Feb. 1, 1993; (g) Wuding M5.1 seismic sequence on Aug. 21, 2000; (h) Wuding M6.5 seismic sequence on Oct. 24, 1995



表 2  $M > 5.0$  地震震源断层面的潮汐应力计算结果Tab. 2 Calculation results of tidal stress on the source fault plane of  $M > 5.0$  earthquake

序号	发震时间(世界时) /年-月-日 时:分:秒	剪应力 /Pa	正应力 /Pa	库仑破裂 应力/Pa
1	2008-08-30 08:30:52	463.70	1054.66	991.03
2	2009-07-09 11:19:14	6.29	320.01	166.30
3	2003-07-21 15:16:30	250.69	536.10	518.74
4	2003-10-16 12:28:03	250.64	890.52	695.90
5	2000-01-14 23:37:05	-342.52	-733.43	-709.23
6	1993-01-31 19:33:28	5.57	-572.37	-280.62
7	2000-08-21 13:25:39	263.47	611.80	569.37
8	1995-10-23 22:46:52	260.28	362.63	441.60

从图 4 可以看出其中有 7 组数据的  $P$  值小于潮汐触发地震的临界值 5%，分别为 0.03%、0.71%、0.04%、0.30%、0.01%、0.01%、0.01%；而有 1 组数据的  $P$  值为 5.19%，大于潮汐触发地震的临界值 5%，较接近于临界值。

由于所研究的地震大致分布在同一区域，则可排除地质构造不同等因素的影响，观察地震的发生与震级之间关系可以看出，与潮汐应力触发相关的 80% 以上的地震为  $M \geq 6$  地震，而与潮汐应力触发相关性差的 1 次地震则为  $5 \leq M \leq 6$  的中强地震。由此可以认为，潮汐应力对于地震活动的触发往往随震级的增大关系更为紧密。

对每个主震断层面的潮汐库仑破裂应力值和统计检验的  $P$  值结果对比（表 3），结果显示有 5 个地震序列  $P < 5\%$ ，且潮汐库仑破裂应力为正值。

表 3 地震序列的潮汐触发相关性结果

Tab. 3 Results of tidal triggering correlation for seismic series

序号	发震时间(世界时) /年-月-日 时:分:秒	震级	统计检验的 $P$ 值结果	主震断层面库 破裂应力/Pa
1	2008-08-30 08:30:52	6.1	0.03%	991.03
2	2009-07-09 11:19:14	6.5	0.71%	166.30
3	2003-07-21 15:16:30	6.2	0.04%	518.74
4	2003-10-16 12:28:03	6.1	0.30%	695.90
5	2000-01-14 23:37:05	6.5	0.01%	-709.23
6	1993-01-31 19:33:28	5.5	0.01%	-280.62
7	2000-08-21 13:25:39	5.1	5.19%	569.37
8	1995-10-23 22:46:52	6.5	0.01%	441.60

## 5 讨论和结论

本文选取了云南大姚、姚安一带及其附近地区  $M > 5$  的 8 组地震序列为研究对象，对其进行 Schuster 统计检验和潮汐库仑破裂应力的计算及分析后，得出以下认识：

(1) 研究地区的多数地震活动在某一潮汐相位附近较其它相位占优势，而不是随机发生的，该地区地震活动的发生可能受到了潮汐触发作用的影响或存在潮汐相关性。

(2) 结合潮汐库仑破裂应力的计算和潮汐库仑破裂应力相位角分析的结果，对比各地震序列  $P$  值的大小及潮汐库仑破裂应力的值，可以看出，在 7 个  $P < 5\%$ ，6 个潮汐库仑破裂应力为正的序列中，有 5 个地震序列  $P < 5\%$  且潮汐库仑破裂应力为正，说明云南大姚、姚安一带及邻近地区的地震活动与潮汐应力之间确实存在一定的触发相关性。

本文的结果还表明 6 次主震震源断层面的潮汐库仑破裂应力值为正值，其中 5 次都对应着余震序列的  $P < 5\%$ 。由于余震序列的震源断层参数一般难以全面地求解，进而无法求解每个余震震源断层面的潮汐库仑破裂应力值。以主震震源断层面的潮汐库仑破裂应力，分析余震序列的潮汐触发相关性，也是解决此类问题的简化方法之一。

(3) 根据库仑破裂准则，该地区的多数地震震源断层面的潮汐库仑破裂应力为正值，说明潮汐应力对断层起到了一定的触发作用。但是由于潮汐应力的数值较小，量级最大的为  $10^3$  Pa，表明潮汐应力的触发作用较小，要在断层的成核过程趋近临界失稳状态时，施加潮汐应力触发作用，才能起到地震触发的效果。

(4) 考虑到震源参数的不确定性，8 个  $M > 5.0$  地震序列中，至少 5 个地震序列与潮汐应力存在一定的触发相关性。说明潮汐应力对该地区地震的发生确实起到了一定的诱发作用，但是其他因素的作用也可能影响了该地区的地震活动。Vidale 等 (1998) 在对潮汐应力与地震活动的相关性研究中，认为地震和潮汐之间是弱相关性；Lockner 和 Beeler (1999) 的实验研究也证实了这一结果。即潮汐对地震的影响需要断层自身的应

力状态或者滑动状态趋近临界失稳状态时, 才能起到作用。

## 参考文献:

高锡铭, 殷志山, 王威中, 等. 1981. 固体潮应力张量对地震的触发作用[J]. 地壳形变与地震, (创刊号): 4-16.

虎雄林, 解朝娣, 刘丽芳. 2013. 2003 年大姚 6.2、6.1 级地震构造应力环境及静态应力触发研究[J]. 地震研究, 36(1): 47-46.

皇甫岗, 石绍先, 苏有锦. 2000. 20 世纪云南地震活动研究[J]. 地震研究, 23(1): 1-9.

刘明富. 2008. 四川盐边红格温泉成因研究[J]. 中国煤炭地质, 20(3): 45-48.

龙锋, 张永久, 闻学泽, 等. 2010. 2008 年 8 月 30 日攀枝花—会理 6.1 级地震序列  $M_L \geq 4.0$  事件的震源机制解[J]. 地球物理学报, 53(12): 2852-2860.

马淑田, 赵薇. 1997. 1995 年 10 月 24 日云南武定  $M_S 6.5$  地震的震源机制解[J]. 地震学报, 19(3): 241-245.

任纪舜, 姜春发, 张正坤, 等. 1980. 中国大地构造及其演化[M]. 北京: 科学出版社.

苏有锦. 2004. 2003 年 7 月 21 日、10 月 16 日云南大姚 6.2 级和 6.1 级地震预测预报回顾与讨论[J]. 国际地震动态, (1): 18-21.

田中佐千子. 2007. 地球潮汐引起的地震触发作用[J]. 世界地震译丛, (2): 36-39.

吴小平, 黄雍, 冒蔚, 等. 2005. 云南地震的潮汐应力触发机制及相关天体位置图像[J]. 地球物理学报, 48(3): 574-583.

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(G 辑), 39(6): 901-912.

张辉, 张浪平, 徐辉, 等. 2013. 中国大陆  $M_S \geq 7.0$  地震与潮汐库仑破裂应力关系研究[J]. 中国地震, 29(1): 48-56.

张建国, 刘丽芳, 李西, 等. 2009. 姚安、大姚中强震区地震构造初析[J]. 地震地质, 31(3): 536-543.

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[J]. 地球物理学报, 50(2): 448-454.

Agnew D. C. . 2007. Earth Tides, in Treatise on Geophysics; Geodesy, T. A. Herring, ed[M]. New York: Elsevier, 163-195

Cochran E. S. . Vidale J. E. , Tanaka S. . 2004. Earth Tides can Trigger Shallow Thrust Fault Earthquakes[J]. Science, 306: 1164-1166.

Dziewonski A. M. , Anderson D. L. . 1981. Preliminary Reference Earth Model[J]. Phys. Earth Planet. Inter. , 25: 297-356.

Emter D. . 1997. Tidal Triggering of Earthquakes and Volcanic Events [J]//Wilhelm, H. , Zurn, W. , Wenzel, H. - G. (Eds. ) , Tidal Phenomena, Lect. Notes Earth Sci. Berlin: Springer-Verlag, 293-309.

Harris R. A. . 1998. Introduction to Special Section Stress Triggers Stress Shadows and Implications for Seismic Hazard[J]. JGR, 103(B10): 24347-24358.

Heaton T. H. . 1975. Tidal Triggering of Earthquakes [J]. Geophys J. R. Astron. Soc. , 43: 307-326.

Knopoff L. . 1964. Earth Tides as a Triggering Mechanism for Earthquakes [J]. Bull. Seism. Soc. Am. , 54(6): 1865-1870.

Lockner D. A. , Beeler N. M. . 1999. Premonitory Slip and Tidal Triggering of Earthquakes[J]. J. Geophys Res, 104(B9): 20133-20151.

Sun W. K. . 1992. Seismic Energy Distribution in Latitude and a Possible Tidal Stress Explanation. Phys [J]. Earth Planet. Inter. , 71(2): 5-21.

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  $M_W 7.5$  [J]. Geophys. Res. Lett. , 29(16): 1756.

Tanaka S. , Ohtake M. , Sato H. . 2002b. Evidence for Tidal Triggering of Earthquakes as Revealed from Statistical Analysis of Global Data [J]. J. Geophys. Res, 107(B10): 2211.

Tolstoy M. , Vernon F. L. , Orcutt J. A. , et al. . 2002. Breathing of the Seafloor: Tidal Correlations of Seismicity at Axial Volcano [J]. Geology, 30: 503-506.

Vidale J. E. , Agnew D. C. , Johnston M. J. S. , et al. . 1998. Oppenheimer, Absence of Earthquake Correlation with Earth Tides: an Indication of High Preseismic Fault Stress Rate[J]. J. Geophys. Res. , 103: 24567-24572.



## Triggering Relationship between Seismic Activity and Tidal Stress in Dayao-Yaoan and its Adjacent Area of Yunnan Province

XIONG Zi-yao<sup>1</sup>, XIE Chao-di<sup>1</sup>, LEI Xing-lin<sup>2</sup>, FU Hong<sup>3</sup>, MA Qing-bo<sup>1</sup>

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

(2. Geological Survey of Japan, AIST, Tsukuba 305 – 8567, Japan)

(3. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

### Abstract

Focused on 8 seismic sequence in Dayao and Yaoan and its adjacent area in Yunnan, we calculated the tidal stresses on the main shock fault plane, and analyzed the relationship between seismic activity and tidal stress by Schuster tidal phase angle statistical tests to further confirmed the tidal stress triggering relationship between them. The results show that the  $P$  value of 7 seismic sequences is less than 5%, and the tidal Coulomb failure stress of 6 seismic sequences is positive. Considering the uncertainty of focal shock parameters, there are at least 5 seismic sequence exists certain relevance to tidal stress triggering among 8  $M > 5.0$  seismic sequence, which shows that the seismic activity are certainly be triggered by tidal stress in the study area.

**Key words:** tidal Coulomb failure stress; Dayao-Yaoan area; Schuster test; tidal triggering