

潮汐应力对地震的触发作用*

丁中一 贾晋康 王仁
(北京大学地质系)

摘要

文中计算了由日、月引潮力在地球内产生的潮汐应力场，研究了潮汐应力对地震的触发作用。采用的地球模型是分为十五层的球对称模型。对于近30年来我国或我国邻近发生的七十次较大的地震，计算了震源处在发震时刻的球坐标系中的潮汐应力。通过坐标变换，得到了发震断层面中的正应力及沿错动矢量方向的剪应力。根据岩石的库仑剪破裂准则来判断潮汐应力对所研究的震例是否具有触发作用。结果表明，在七十个震例中，潮汐应力对其中四十三个有触发作用。对于华北地区的十八个震例，潮汐应力对其中十四个有触发作用。还可看出，对于浅源走滑型地震有较明显的触发作用，而对浅源斜滑及倾滑型地震则没有明显的触发作用。对国外七十二个震例的计算结果得到了类似的结论。最后，对华北地区中任一可能的发震地点，提出一种根据潮汐应力来预测发震的危险时间范围的方法。

一、引言

日、月对地球的引潮力是否能触发地震的问题自六十年代以来有许多人作了研究。Knopoff^[1]、Dix^[2]、Ryall^[3]、Simpson^[4]以及 Heaton^[5]等都对该问题从不同途径进行了研究，得到了不同的结论。在国内，杜品仁^[6]、高锡铭等^[7]的研究结论也是不同的。关于计算潮汐应力时所采用的地球模型，文献[5]及[6]采用竹内均^[8]提出的分层地球模型，在地球内深度为500公里及2900公里两处为不连续面；而文献[7]则采用均匀弹性球体为地球模型。

本文将按王仁等^[9]采用的分为十五层的地球模型，由弹性力学精确解的应力公式来计算潮汐应力，分别得到以日地或月地中心连线为极轴的球坐标中的应力值。在这一步计算中，先由所研究震例的震中经纬度及发震时刻，根据天文学方面的 Longman 公式算出当时月亮及太阳的天顶距 Z_m 、 Z_s 及方位角 A_m 、 A_s 。从震源深度得震源到地心的距离 r 。而 Z_m 及 Z_s 即为对月亮及对太阳的极角 θ_m 及 θ_s （误差不超过1度）。这样便得到了震源点在上述球坐标系中的坐标，于是可按文献[9]中公式算出发震时刻震源点在这些球坐标系中由日、月分别引起的潮汐应力分量。然后通过坐标变换将日、月分别的潮汐应力分量在统一的地平坐标系中表出，并进行迭加。为判断触发作用，还需作另一次坐标变换，从这些合应力分量求出发震断面上的正应力及沿断层错动矢量方向的剪应力。我们假定临震前震源处的构造应力已达到临界状态，根据岩石的库仑剪破裂准则可判断潮

* 1981年7月30日收到初稿，1982年8月14日收到修改稿。

汐应力对该次地震是否具有触发作用。如能断定潮汐应力对触发地震有某种规律性，则对地震的预测将会有参考价值。

二、地平坐标系中的潮汐应力分量

如上所述，对每个震例，可算得球坐标系中震源处月亮引起的潮汐应力分量 σ_r^m , σ_θ^m , σ_φ^m , $\tau_{r\theta}^m$ 及太阳的潮汐应力分量 σ_r^s , σ_θ^s , σ_φ^s , $\tau_{r\theta}^s$ (其余应力分量为零，因为所取模型为球对称的)。它们分别是以月地及日地中心连线为极轴的球坐标系中的值。为求日、月共同产生的潮汐应力，需将它们转换到同一坐标系中才可迭加。为此，在震源处取一新坐标系 $o'y_1y_2y_3$ (见图 1) 如下：坐标原点 o' 取在震源点， y_1 轴沿正东， y_2 轴沿正北， y_3 轴沿 oo' 铅直向上 (o 为地心)，称此坐标系为地平坐标系。例如，对考虑月亮引潮力的情形，新、旧坐标系间的方向余弦可列表如下 (参看图 1)：

	r	θ	φ
y_1	0	$\sin A_m$	$-\cos A_m$
y_2	0	$\cos A_m$	$\sin A_m$
y_3	1	0	0

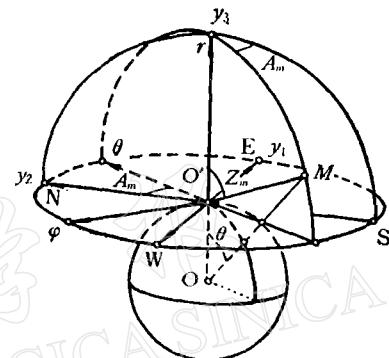


图 1 月、地连线为极轴的球坐标系与原点在震源的地平坐标系间的相对位置

这里 A_m 为月亮的方位角，也即 θ 方向与 y_2 的夹角。运用应力张量的变换公式(例如，见文献 [10]，第 200 页)便得月亮引潮力在地平坐标系中的潮汐应力分量为：

$$\begin{aligned}\sigma_{11}^m &= \sigma_\theta^m \sin^2 A_m + \sigma_\varphi^m \cos^2 A_m, \\ \sigma_{22}^m &= \sigma_\theta^m \cos^2 A_m + \sigma_\varphi^m \sin^2 A_m, \\ \sigma_{33}^m &= \sigma_r^m, \\ \tau_{12}^m &= (\sigma_\theta^m - \sigma_\varphi^m) \sin A_m \cos A_m, \\ \tau_{23}^m &= \tau_{r\theta}^m \cos A_m, \\ \tau_{31}^m &= \tau_{r\theta}^m \sin A_m.\end{aligned}$$

同理，将上式中 A_m 换成太阳的方位角 A_s ，各应力分量的上角 m 换成 s ，便得太阳在地平坐标系中的应力分量。在日、月共同作用下，震源处在地平坐标系中的潮汐应力分量则为：

$$\begin{aligned}\sigma_{11} &= \sigma_{11}^m + \sigma_{11}^s, \quad \sigma_{22} = \sigma_{22}^m + \sigma_{22}^s, \quad \sigma_{33} = \sigma_{33}^m + \sigma_{33}^s, \\ \tau_{12} &= \tau_{12}^m + \tau_{12}^s, \quad \tau_{23} = \tau_{23}^m + \tau_{23}^s, \quad \tau_{31} = \tau_{31}^m + \tau_{31}^s.\end{aligned}$$

三、断层坐标系中的潮汐应力分量

为了研究潮汐应力对地震的触发作用，需计算日、月引潮力在发震断面上产生的正

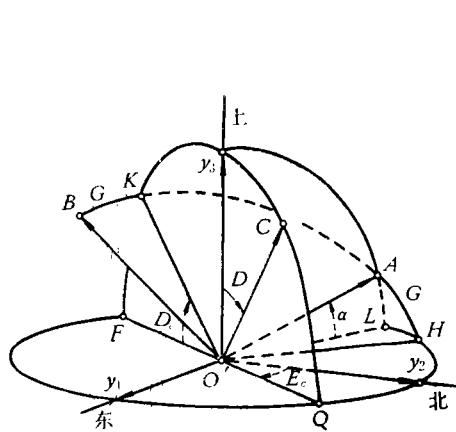


图 2 地平坐标系与断层坐标系间的相对位置

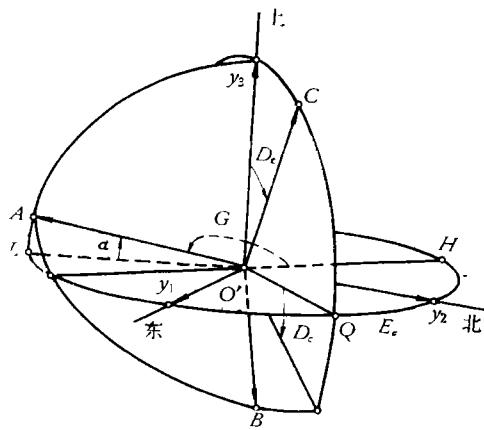


图 3 与图 2 同, 示出右旋错动情形

应力及沿错动矢量方向的剪应力。为此, 需再取一个坐标系 $O'ABC$ 。坐标原点 O' 仍在震源点, 取 C 轴沿垂直于断层面朝上的方向, A 轴在断层面内沿错动矢量的方向, B 轴使得 $O'ABC$ 构成一个右手直角坐标系。这时, 又可分为两种情形。图 2 所示为断层发生左旋错动的情形, 图 3 为右旋错动的情形。在这两幅图中, D_c 为发震断层的倾角, E_c 为断层面法线之投影与北向的夹角(向东量取为正), α 为错动矢量仰角(向上量取为正), $O'H$ 为平面 $O'AB$ 与水平面 $o'y_1y_2$ 的交线, 角 $G = \angle AO'H$, 此角 G 就是文献 [5] 中的倾斜角。坐标系 $O'ABC$ 与坐标系 $o'y_1y_2y_3$ 各坐标轴间夹角的方向余弦记为:

	y_1	y_2	y_3
A	l_1	m_1	n_1
B	l_2	m_2	n_2
C	l_3	m_3	n_3

经过推导(见附录), 得:

$$\begin{aligned}
 l_1 &= -\cos G \cos E_c - \sin G \cos D_c \sin E_c, \\
 m_1 &= \cos G \sin E_c - \sin G \cos D_c \cos E_c, \\
 n_1 &= \sin G \sin D_c, \\
 l_2 &= -\cos G \cos D_c \sin E_c + \sin G \cos E_c, \\
 m_2 &= -\cos G \cos D_c \cos E_c - \sin G \sin E_c, \\
 n_2 &= \cos G \sin D_c, \\
 l_3 &= \sin D_c \sin E_c, \\
 m_3 &= \sin D_c \cos E_c, \\
 n_3 &= \cos D_c.
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中对左旋错动情形, $|G| < 90^\circ$; 而对右旋错动, $90^\circ < |G| \leq 180^\circ$ 。特别地说, $G = 0^\circ$ 对应于左旋走滑型地震, $G = 180^\circ$ 对应于右旋走滑型地震, 而 $G = 90^\circ$ 对应于冲断运动。

对于每个震例，只要知道了它的 E_c , D_c 及 G , 便可由式(1)求出方向余弦 l_1 , m_1 等。再利用应力张量的变换公式，得出断层坐标系中的潮汐应力分量。

若震例中给出的参数为仰角 α 而不是倾斜角 G ，则可由 α 求出 G 。实际上，无论对图 2 或图 3， α 与 G 的关系均为(推导见附录)：

$$\sin \alpha = \sin G \sin D_c. \quad (2)$$

由此便得 $\sin G$ 之值。考虑到对左旋或右旋错动 G 的不同取值范围，显然，对图 2 情形应取

$$\cos G = (1 - \sin^2 G)^{1/2},$$

而对于图 3 情形，应取

$$\cos G = -(1 - \sin^2 G)^{1/2}.$$

四、判别触发作用的准则

怎样判别潮汐力是否触发地震，迄今有不同的途径。例如，Ryall 等^[3]通过分析地震频度与固体潮垂直分量变化之间的关系以判定潮汐力能否触发地震。Heaton^[5] 则研究发震时刻与潮汐应力分量取极值之间是否有一定位相关关系。一般的做法是，若潮汐力与地震的发生有某种规律性的关系，则认为有触发作用；若没有该种规律性，便认为不触发地震。但是，不存在所考察的那种规律性，还可能存在其他某种规律性。看来，应当提出一种判别触发作用的适当准则，它应能反映潮汐力与触发地震间的本质关系。

我们认为，发震时既然有断层的错动，则从力学观点来看，对于处于临界应力状态的断层，如果发震时刻断面上的潮汐应力分量促进了断层的错动，则可认为潮汐力触发了地震，反之，则认为没有触发作用。因此，我们采用岩土力学中的库仑剪破裂准则(见文献[10]，71 页)作为判别触发作用的准则(参看图 4)：

$$[\tau] = \tau_0 - \mu \sigma_n \quad (3)$$

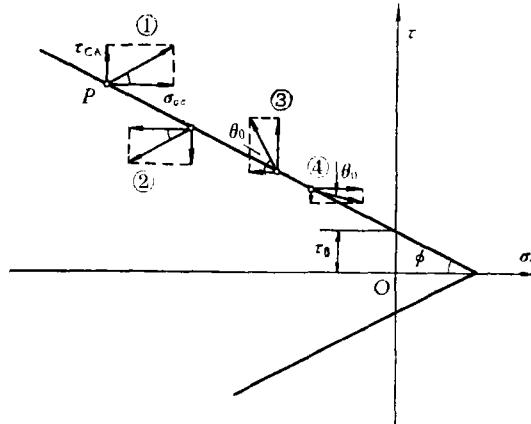


图 4 断层面上潮汐应力分量的触发作用
与库仑剪破裂准则的关系

其中 τ_0 为粘聚力, μ 为内摩擦系数, $\mu = \operatorname{tg} \phi$, ϕ 为内摩擦角, σ_n 是断面上的正应力(以拉应力为正), $[\tau]$ 即该面上抗剪能力. 式(3)在 σ_n 、 τ_n 坐标平面内所代表的破裂线为图 4 示出的两条直线.

在临震前, 设断层中的应力已达临界状态, 即设对应的应力点位于直线上. 取地震错动矢量方向为 A 轴的正向, 则沿错动矢量方向的临界剪应力必为正值, 因而临界应力点必位于上半平面那条直线上. 对任一震例, 按前述方法可算得断层面上附加的潮汐应力分量 σ_{cc} 及 τ_{ca} . 将它们迭加到临界应力分量上, 若附加量指向破裂线以外, 则认为潮汐应力触发了该次地震; 若附加量指向破裂线以内, 则认为它们不触发地震. 具体讨论可分为图 4 中所示四种情形: ①. $\sigma_{cc} > 0$ 及 $\tau_{ca} > 0$, 此时不论它们的具体值为多少, 附加量必指向破裂线以外, 因而有触发作用. ②. $\sigma_{cc} < 0$ 及 $\tau_{ca} < 0$, 则不触发. ③. $\sigma_{cc} < 0$ 而 $\tau_{ca} > 0$, 此时应计算 $\theta_0 = \operatorname{tg}^{-1}(|\tau_{ca}|/|\sigma_{cc}|)$, 若 $\theta_0 > \phi$ 则触发, 而 $\theta_0 \leq \phi$ 时为不触发. ④. $\sigma_{cc} > 0$ 而 $\tau_{ca} < 0$, 同上计算 θ_0 , 若 $\theta_0 < \phi$ 则触发, $\theta_0 \geq \phi$ 时为不触发. 对后两种情形, 判断触发作用时需知道有关断层的内摩擦系数 $\mu = \operatorname{tg} \phi$. 这里我们取 μ 在 $0.202(\phi = 11.4^\circ) - 0.746(\phi = 36.7^\circ)$ 的范围之内^[1]. 而对于情形①, 不论 θ_0 取何值, 均有触发作用, 以 $\theta_0 = 90^\circ$ 记之. 反之, 对情形②, 以 $\theta_0 = -90^\circ$ 记之.

五、计算结果及分析

对于文献[7]中所研究的自 1957 年以来我国或我国邻近发生的七十次较大的地震, 并参照有关地震资料, 按上述方法计算了潮汐应力分量, 并按上述准则判断它们对各次地震的触发作用, 结果列于附表 1. 由表 1 可看出以下几点:

1. 潮汐应力对所研究的七十个震例中的四十三个具有触发作用, 占 61%. 考虑到触发地震的因素是比较复杂的, 所得的这个比值可能说明潮汐应力对地震有一定触发作用.

2. 对于典型的浅源(深度 $H \leq 22$ 公里)走滑型 ($|\alpha| \leq 10^\circ$) 地震, 即表中第 15—25 共十一个地震, 具有触发作用的为九个, 占此类地震的 82%. 这说明潮汐应力对浅源走滑型地震有明显的触发作用.

3. 对于典型的倾滑型地震(取 $|\alpha| \geq 35^\circ$), 即表 1 中第 13, 14, 26—31 及第 63 共九个地震, 具有触发作用的只有三个. 这说明潮汐应力对倾滑型地震没有或很少有触发作用.

4. 对于华北地区的十八个地震, 即表 1 中第 1—18 个地震, 具有触发作用的为十四个, 占 78%. 可见, 潮汐应力对我国华北地区的震例, 有明显的触发作用.

另外, 对于文献[5]中所列国外的震例, 我们对其中震源深度小于 50 公里的 72 个震例按上述方法进行了计算. 其结果列于附表 2. 从该表中看出, 对 28 个浅源走滑型地震, 其中 18 个具有触发作用, 占 64%, 可认为有一定的触发作用. 对 34 个浅源斜滑及倾滑型地震, 仅 15 个有触发作用, 占 44%, 可见此类地震之触发与潮汐应力关系不大. 这两点结果与上面对国内震例的计算结果基本上是一致的.

表1 我国或我国邻近七个地震案例

序号	发生日期 (年、月、日)	时、刻 (北京时间) (时-分)	震级	纬度 φ_N	经度 λ_E	深度 (公里)	断层参数		错动仰角 α	错动方向	摩擦系数	σ_{CC} (P_a)	τ_{CA} (P_a)	θ_o (度)	判断类型	是否触发
							E_C	D_C								
1	65.1.15	23-43	5.1	35.1	111.6	10	280	64	-18	L.	0.3	-4049.0	-693.2	-90	2	否
2	66.3.8	5-49	5.8	37.3	114.9	14	111	11	11	R.	0.3	958.2	753.3	90	1	是
3	66.3.20	0-99	5.6	37.3	115.0	20	299	65	24	R.	0.3	-1174.0	408.2	19.2	3	否
4	66.3.26	23-24	5.2	37.7	115.3	15	116	74	-20	L.	0.3	673.6	137.3	90	1	是
5	68.5.15	3-78	4.7	37.2	114.8	15	207	74	-13	L.	0.3	711.9	34.8	90	1	否
6	69.7.18	21-56	5.5	38.2	119.4	(20)	110	80	15	R.	0.3	1196.0	-156.2	7.4	4	否
7	75.2.4	19-60	7.3	40.6	122.8	12	20	81	-15	L.	0.3	-2067.0	47.0	1.3	3	是
8	76.2.25	13-95	3.6	38.0	120.5	6.5	190	51	25	R.	0.44	1268.0	83.5	90	1	否
9	76.4.6	0-91	6.3	40.2	112.2	18	46	44	25	L.	0.47	1038.0	-476.5	24.7	4	否
10	76.7.28	18-76	7.1	39.7	118.7	16	119	67	-17	L.	0.3	1395.0	-339.8	13.7	4	否
11	69.7.18	13-41	7.4	38.2	119.4	35	110	80	15	R.	0.3	-2721.0	-60.4	-90	2	否
12	67.3.27	16-97	6.3	38.5	116.5	30	285	61	5	R.	0.3	-85.4	798.8	90	1	否
13	68.1.16	3-56	5.3	37.8	115.2	22	287	72	-55	R.	0.3	-2096.0	-387.2	-90	2	否
14	68.5.15	8-45	4.7	37.2	114.8	25	117	62	-47	L.	0.3	1626.0	106.8	90	1	否
15	66.3.27	2-24	5.8	37.5	115.3	20	12	88	-8	R.	0.3	269.4	505.3	90	1	否
16	69.7.19	9-87	4.7	38.2	119.4	(20)	202	75	10	L.	0.3	1138.0	405.9	90	1	是
17	75.2.6	12-42	5.4	40.8	122.5	17	349	56	-10	L.	0.3	1429.0	648.0	90	1	是
18	76.7.28	3-71	7.8	39.4	118.1	15	300	99.9	-4	R.	0.3	1834.0	631.9	90	1	否
19	60.11.9	18-73	6.7	32.8	103.7	6	137	60	2	R.	0.3	1084.0	-129.0	6.8	4	否
20	62.3.19	4-32	6.4	23.7	114.7	5	242	88	-10	R.	0.3	-802.4	35.4	4	否	
21	64.8.30	10-58	5.1	27.5	88.4	21	58	80	5	L.	0.3	-1621.0	548.9	18.7	3	否
22	70.7.31	21-18	5.4	28.5	103.6	12	261	70	7	L.	0.3	1558.0	732.8	90	1	是
23	73.2.6	18-62	7.9	31.2	100.7	17	29	89	10	L.	0.3	311.8	739.9	90	1	否
24	74.5.11	3-42	7.1	28.9	104.0	8	56	80	7	R.	0.3	175.2	-282.7	58.2	4	否
25	76.5.29	20-39	7.3	24.4	98.6	22	223	80	5	R.	0.3	2835.0	-750.7	14.8	4	否
26	67.8.30	12-37	6.8	31.6	100.3	10	334	59	-47	R.	0.3	-582.7	-98.5	-90	2	否
27	72.1.16	4-36	6.2	40.3	79.0	10	332	62	52	L.	0.3	-2090.0	915.2	23.6	3	否
28	73.3.11	16-67	4.5	31.4	116.2	6	158	79	-48	R.	0.3	-2672.0	565.1	-90	2	否
29	78.7.13	5-82	5.4	31.9	102.9	12	173	65	-45	L.	0.3	-1140.0	-387.6	-90	2	否
30	64.8.3	15-75	5.9	22.6	121.3	34	158	63	44	R.	0.3	945.2	285.3	.90	1	否
31	72.4.9	12-18	5.6	42.3	84.5	25	198	83	35	R.	0.3	-226.8	-332.6	-90	2	否
32	78.1.22	19-78	4.5	40.9	106.9	30	164	50	-17	L.	0.48	-613.9	-292.8	25.5	4	否
33	63.4.23	17-92	6.0	25.8	99.5	16	293	79	-16	R.	0.3	1071.0	924.4	90	1	否

续 表 1

序号	发震日期 (年、月、日)	时 刻 (北京时) (时-分)	震级	纬度 ϕ_N	经度 λ_E	深度 (公里)	断层参数		$\sigma_{CC}(P_o)$	$\tau_{CA}(P_o)$	θ_o (度)	判断类型	是否触发
							E _c	D _c					
34	66.2.18	11-75	5.2	26.0	103.2	5	277	60	-12	R.	0.3	-209.6	否
35	66.9.26	13-18	5.7	27.5	92.7	20	110	57	-27	R.	0.35	-1534.0	是
36	66.10.14	9-08	6.0	36.8	87.5	14	264	80	16	R.	0.47	-672.2	否
37	67.1.24	22-76	5.5	30.2	104.1	4	155	70	-12	L.	0.3	-3750.0	4
38	67.1.12	0-95	5.2	28.4	94.4	15	44	73	-25	L.	0.3	-1731.0	2
39	68.12.31	6-19	5.5	23.3	121.4	13	292	63	12	R.	0.3	466.2	2
40	70.1.5	1-01	7.7	24.3	102.7	10	21	80	-23	L.	0.3	-2375.0	4
41	70.1.5	19-82	5.9	23.9	102.7	14	50	85	-25	L.	0.3	-1286.0	2
42	70.11.18	17-26	5.5	32.2	101.3	20	92	80	20	L.	0.4	1269.0	3
43	73.11.29	21-60	4.7	32.9	111.5	9	58	68	20	L.	0.3	12.7	4
44	76.5.29	20-00	7.4	24.5	98.7	10	315	88	12	R.	0.4	606.3	1
45	76.11.7	2-07	6.7	27.5	101.1	15	108	63	-16	R.	0.3	-2573.0	4
46	77.10.19	10-73	5.2	23.4	107.5	12	27	62	20	R.	0.4	757.5	2
47	57.8.23	19-71	5.5	24.0	121.9	33	318	87	-15	L.	0.3	-697.2	4
48	57.8.27	22-19	5.5	43.2	100.2	33	196	66	-5	R.	0.3	-547.8	2
49	62.8.20	2-44	6.4	44.7	81.6	25	308	87	9	R.	0.4	159.8	2
50	63.4.19	15-58	7.0	35.7	97.0	33	260	85	13	R.	0.3	387.5	4
51	64.2.13	18-06	5.4	25.9	100.9	24	353	63	15	R.	0.3	2730.0	1
52	65.1.21	21-53	5.5	35.1	87.0	34	359	69	25	L.	0.3	-793.7	4
53	65.8.2	4-16	5.2	32.9	93.2	35	150	90	15	R.	0.3	-351.5	2
54	65.10.7	11-60	5.7	12.6	114.5	26	133	50	30	R.	0.3	-79.5	3
55	66.9.19	13-06	5.4	23.8	97.9	33	351	70	-5	R.	0.3	-319.8	4
56	66.9.21	7-62	5.2	23.8	97.9	32	3	85	-25	L.	0.3	101.7	1
57	68.3.3	0-29	5.7	29.4	100.2	31	245	85	-10	R.	0.3	2730.0	4
58	68.12.22	17-11	5.4	36.2	101.9	33	243	23	20	R.	0.3	-174.4	2
59	69.8.28	11-98	5.6	39.1	73.5	33	109	78	-5	R.	0.3	-1550.0	4
60	71.4.3	12-81	6.4	32.0	94.7	33	10	66	15	L.	0.2	-233.3	3
61	71.4.28	23-53	6.6	23.0	101.0	33	123	82	19	L.	0.3	974.8	1
62	71.8.17	2-90	5.8	28.9	103.5	33	88	85	10	L.	0.4	30.3	1
第三层(38—80公里)							67	67	-57	R.	0.3	-79.5	4
63	63.4.21	12-51	6.0	24.2	122.4	40	312	67	25	R.	0.3	133.9	3
64	78.8.16	22-93	5.0	38.3	101.0	40	242	65	-11	R.	0.3	590.9	4
65	59.11.15	18-42	6.4	38.7	75.3	40	249	68	0	L.	0.5	-810.6	26.5
66	64.3.16	9-09	5.8	37.0	95.6	50	294	68	-17	R.	0.3	2272.0	1
67	64.9.26	8-77	6.2	30.0	80.6	50	249	67	-23	R.	0.4	-179.3	3
68	65.6.18	9-31	5.0	32.1	87.6	43	252	77	1	R.	0.3	-688.8	4
69	66.10.11	18-11	5.2	28.2	103.7	41	281	85	-12	R.	0.4	3040.0	1
70	67.2.2	15-63	5.0	39.8	75.3	45	254	78	-12	R.	0.4	1511.0	4

注：表中错动方向，L代表左旋，R代表右旋。

表2 国外七十二个地震震例

年、月、日	时刻(GCT) (时·分)	震 级	深 度 (公里)	经 度	纬 度	走 向	倾 角	倾斜角 G	σ_{CC} (P_a)	τ_{PA}^{CA}	θ_0	是否触发
30—50公里深度的地震												
40.8.1	15-08	7.0	33	139.5E	44.4N	N6E	46E	90	1007	-905	42.0	否
63.7.9	05-45	5.5	33	8.2E	43.4N	N2E	40E	80	751	-941	51.4	否
63.7.18	16-58	5.2	33	29.2E	40.9N	N84W	70N	-100	3233	1135	90	否
63.10.1 ⁺	00-48	6-1/4	33	37.4W	7.6N	N5W	85E	-5	-4539	46	0.6	否
66.6.27	10-41	6-1/2	37	80.9E	29.7N	N45W	25NE	85	299	-578	62.6	否
66.10.17	21-42	7.5	38	78.6W	10.7S	N30W	12NE	90	-122	469	75.5	是
67.3.4	17-58	5.8	33	24.6E	39.2N	N82W	54S	105	18.8	-1318	36.0	否
69.2.3	21-41	6-1/2	33	127.4E	4.9N	N30W	60SW	60	1651	-313	10.7	是
70.5.31	20-23	7.8	43	78.2W	9.2S	N20W	37W	-90	1277	1661	90	是
73.6.17	03-55	7.4	49	145.8E	43N	N50E	27NW	100	-1443	2673	61.6	是
浅源走滑型地震												
36*.6.10	15-30	7+	10	123W	38N	N35W	90	180	2821	-981	19.2	是
57*.1.9	15-30	8+	10	117.5W	34.5N	N35W	90	180	3762	-631	9.5	是
65*.9.9	20-30	7+	10	123W	38N	N35W	90	180	1973	-459	13.1	否
68*.10.21	15-47	7+	10	123W	38N	N35W	90	180	-769	-488	-90	否
06.4.18	13-12	8+	10	123W	38N	N35W	90	180	2038	-572	15.7	否
32.12.21	06-10	7.3	10	118W	34N	N21W	90	180	-1143	-224	-90	否
33.8.11	01-54	6.3	8	118W	33.6N	N40W	90	180	655	-56	4.9	否
40.5.19	04-37	7	8	115.5W	32.7N	N30W	90	180	-232	-38	-90	否
47.4.10	15-58	6-1/2	8	116W	35N	N30W	90	180	707	-34	2.8	否
48.12.5	23-43	6-1/2	8	116.4W	33.9N	N54W	60NE	165	385	158	90	否
66.6.28	04-26	6	9	121W	37N	N33W	90	180	803	301	90	是
68.4.9	02-29	6-1/2	11	116W	33N	N48W	83NE	175	-1172	-464	-90	否
69.10.2	04-56	5.9	10	122.6W	38.5N	N20W	90	180	806	392	90	否
27.3.7	09-27	7.9	8	134.3E	35.3N	N25W	90	0	-556	370	33.6	否
43.9.10	08-37	7.4	20	134E	36N	N80E	90	180	2011	1004	90	否
48.6.28	07-13	7.3	10	136E	36N	N15W	90	0	-1688	252	8.5	否
69.9.9	05-15	6-1/2	5	137E	36N	N30W	90	0	-1878	964	90	否
39.12.26	23-57	8	10	39.7E	39.7N	N65W	90	180	-2701	-404	-90	否
43.12.20	14-03	7.3	10	36.6E	50.7N	N80E	90	180	1270	67	90	否
44.2.1	03-22	7.3	10	33E	41N	N80E	90	180	-22	326	86.1	否
53.9.7	19-06	7.4	10	-	27.5E	N70E	90	180	175	57.6	90	是
57.5.26	06-33	7.1	10	-	31.2E	N70E	90	180	-2306	43	1.1	否
65.3.9	17-57	5.7	18	24E	39.4N	N40E	90	180	-1195	563	25.2	否
66.8.19	12-22	6.8	10	41.6E	39.2N	N65W	90	180	1970	164	4.8	否
67.7.22	16-52	7.1	10	30.8E	40.7N	N90	90	180	2934	740	90	否

续表 2

年.月.日	时刻(GCT) (时·分)	震级	深度 (公里)	经度	纬度	走 向	倾 角	倾斜角 G	$\sigma_{cc}(P_a)$	$\tau_{ca}(P_r)$	θ_o	是否触发	
68.8.31	10-48	7.2	12	58.7E 86.3W	34N 12.1N 13.4N 34N 40.5N	N90 N45W N40W N10W N0	90 90 90 50E 54E	0 0 0 -110 -90	-1530 -4027 -1893 -657 -788	-942 -182 -1055 -444 -568	31.6 2.6 90 90 90	否 否 否 否 是	
72.12.23	06-29	6.0	5	122.8E 117.5W	12.1N 13.4N 34N 40.5N	N90 N45W N40W N10W N0	90 90 90 50E 54E	0 0 0 -110 -90	-4027 -1893 -657 -788	-444 -568	90 90 90 90 90	否 否 否 否 是	
73.3.17	08-30	7.0	10	117.5W	8	117.5W	40.5N	-90	-110 -657 -788	-283 -1146 -2216 -453 -265	90 37.0 37.0 27.9 -90	否 否 否 否 是	
72*.3.26	10-30?	8+	8	117.5W	8	117.5W	40.5N	-90	-110 -657 -788	-283 -1146 -2216 -453 -265	90 37.0 37.0 27.9 -90	否 否 否 否 是	
15.10.3	06-53	7.6	8	117.5W	8	117.5W	40.5N	-90	-110 -657 -788	-283 -1146 -2216 -453 -265	90 37.0 37.0 27.9 -90	否 否 否 否 是	
34.1.30	18-16	6.5	8	118.5W 118.1W	38N 35.7N	N65W N50E N50E N10W	73N 62SE 62SE 60W	-90 -90 -90 -90	971 1526 2216 -453	283 -1146 -2216 -453 -265	90 37.0 37.0 27.9 -90	否 否 否 否 是	
46.3.15	13-39	6-1/4	8	119W	10	118.5W	38N	-90	-90 -875	-1173 -265 -508	-1173 -265 -508	90 37.0 27.9 -90	否 否 否 否 是
52.7.21	12-25	7.7	10	118.5W	8	118.3W	38N	-90	-90 -875	-1173 -265 -508	-1173 -265 -508	90 37.0 27.9 -90	否 否 否 否 是
54.7.6	11-13	6.6	8	118.3W	8	118.3W	39.5N	-90	-748 -202 -502 -598	-431 -117 -502 -598	-431 -117 -502 -598	90 37.0 32.7 32.7	否 否 否 否 是
54.8.24	05-51	6.8	8	118.3W	8	118.3W	39.5N	-90	-748 -202 -502 -598	-431 -117 -502 -598	-431 -117 -502 -598	90 37.0 32.7 32.7	否 否 否 否 是
54.12.16	11-07	7.1	8	118.3W 111W	10	118.3W 118W	44.9N 34N	-90 -90	-748 -202 -502 -598	-431 -117 -502 -598	-431 -117 -502 -598	90 37.0 32.7 32.7	否 否 否 否 是
59.8.18	06-37	7.1	10	118.3W 118W	10	118.3W 119W	44.9N 34N	-90 -90	-748 -202 -502 -598	-431 -117 -502 -598	-431 -117 -502 -598	90 37.0 32.7 32.7	否 否 否 否 是
70.9.12	14-30	5.4	10	118.3W 118W	10	118.3W 119W	44.9N 34N	-90 -90	-748 -202 -502 -598	-431 -117 -502 -598	-431 -117 -502 -598	90 37.0 32.7 32.7	否 否 否 否 是
71.2.9	14-30	6-1/2	10	118.3W 119W	18	118.3W 119W	44.9N 34N	-90 -90	-748 -202 -502 -598	-431 -117 -502 -598	-431 -117 -502 -598	90 37.0 32.7 32.7	否 否 否 否 是
73.2.21	14-30	5-3/4	18	118.3W 119W	18	118.3W 119W	44.9N 34N	-90 -90	-748 -202 -502 -598	-431 -117 -502 -598	-431 -117 -502 -598	90 37.0 32.7 32.7	否 否 否 否 是
73.8.6	23-29	4.7	15	119W	140E	34N 35N 35N 35N	70S 34N 34N 34N	20 135 135 135	772 524 524 524	-769 -480 -480 -480	44.9 42.5 42.5 42.5	否 否 否 否 是	
23.9.1	02-58	8.2	30	144.4E	20	144.4E	39.3N 34N 34N	90 90 90	-90 -90 -90	421 125 125	423 -353 -353	90 70.6 70.6	否 否 否 否 是
33.3.2	15-31	8-1/2	20	136E	25	136E	39.3N 34N 34N	90 90 90	-90 -90 -90	421 125 125	423 -353 -353	90 71.7 71.7	否 否 否 否 是
44.12.7	04-35	8	25	136E	25	136E	39.3N 34N 34N	90 90 90	-90 -90 -90	421 125 125	423 -353 -353	90 71.7 71.7	否 否 否 否 是
46.12.20	19-19	8.2	25	141.2E	22	139E	40.4N 39N 39N	90 90 90	-127 -127 -127	203 203 203	58.0 58.0 58.0	是 是 是 是 否	
64.5.7	07-58	6.9	22	139E	20	139E	40.4N 39N 39N	90 90 90	-127 -127 -127	203 203 203	58.0 58.0 58.0	是 是 是 是 否	
64.6.16	04-01	7.4	20	146.6E	16	146.6E	41.3N 41.3N 41.3N	90 90 90	-127 -127 -127	203 203 203	58.0 58.0 58.0	是 是 是 是 否	
65.7.25	13-33	5.9	16	143.2E	15	143.2E	40.8N 40.8N 40.8N	90 90 90	-127 -127 -127	203 203 203	58.0 58.0 58.0	是 是 是 是 否	
68.5.16	00-38	8	15	141.2E	22	141.2E	46.5N 46.5N 46.5N	90 90 90	-127 -127 -127	203 203 203	58.0 58.0 58.0	是 是 是 是 否	
71.9.5	18-35	7.1	22	141.2E	22	141.2E	46.5N 46.5N 46.5N	90 90 90	-127 -127 -127	203 203 203	58.0 58.0 58.0	是 是 是 是 否	
64.10.6	14-31	6	10	24E	22	39.4N	N38W N38E N38E	-90 -90 -90	-127 -127 -127	203 203 203	58.0 58.0 58.0	是 是 是 是 否	
65.7.6	03-18	5.9	20	22.4E	22	22.4E	38.4N 39.1N 39.1N	-90 -90 -90	-127 -127 -127	203 203 203	58.0 58.0 58.0	是 是 是 是 否	
66.2.5	02-02	5.6	22	21.7E	16	21.7E	54.3E 27.8N 27.8N	-90 -90 -90	-127 -127 -127	203 203 203	58.0 58.0 58.0	是 是 是 是 否	
66.9.18	20-43	6.2	16	21.3E	15	21.3E	39.7N 39.7N 39.7N	-90 -90 -90	-127 -127 -127	203 203 203	58.0 58.0 58.0	是 是 是 是 否	
67.5.1	07-09	5.6	15	171.9E	21	171.9E	41.7S 41.7S 41.7S	-90 -90 -90	-127 -127 -127	203 203 203	58.0 58.0 58.0	是 是 是 是 否	
69.2.28	02-40	7.3	22	10.6E	10	29.5E	36N 39N 39N	-90 -90 -90	-127 -127 -127	203 203 203	58.0 58.0 58.0	是 是 是 是 否	
70.3.28	21-02	7	20	147.4W	20	147.4W	61.1N 50.3N 50.3N	-90 -90 -90	-127 -127 -127	203 203 203	58.0 58.0 58.0	是 是 是 是 否	
64.3.28	03-36	8-1/2	20	177.9E	21	177.9E	41.7S 31.8S 31.8S	-90 -90 -90	-127 -127 -127	203 203 203	58.0 58.0 58.0	是 是 是 是 否	
65.3.30	02-37	7-1/2	20	171.9E	21	171.9E	36N 36N 36N	-90 -90 -90	-127 -127 -127	203 203 203	58.0 58.0 58.0	是 是 是 是 否	
68.5.23	17-24	7.1	21	171.9E	21	171.9E	41.7S 31.8S 31.8S	-90 -90 -90	-127 -127 -127	203 203 203	58.0 58.0 58.0	是 是 是 是 否	
68.10.14	02-14	6.9	5	117E	22	10.6W	40S 40S 40S	-90 -90 -90	-127 -127 -127	203 203 203	58.0 58.0 58.0	是 是 是 是 否	
69.2.28	02-41	7.9	22	10.6W	22	10.6W	40S 40S 40S	-90 -90 -90	-127 -127 -127	203 203 203	58.0 58.0 58.0	是 是 是 是 否	

*) 表中年份打*号者为十九世纪年份,无*号者均为二十世纪年份。

六、根据潮汐应力预测华北地震

我们根据潮汐应力对华北地区地震，特别是对浅源走滑型地震有较明显触发作用的结论，提出一个按上述计算来预测华北地区地震的参考意见。由于近年来华北地区大量地震资料表明，该区域内北东向断层是右旋错动发震的，北西向断层是左旋错动发震的，则可按下述办法计算出可能发震地点的危险时间范围。

对华北地区任一个由其他预测手段认为已处于危险的可能发震地点，发震前错动矢量方向为未知的。但对倾角大的断层，可认为将发生走滑型地震，且可由断层走向为北西或北东相应确定为左旋或右旋错动，即取 $G = 0^\circ$ 或 180° 。于是可按前述方法每间隔一小时计算一个 θ_0 值。由它可确定该时刻是否具有触发作用。这样计算若干天，并统计出每天的触发次数。触发次数最多的那些天所具有触发作用的时间，即为可能发震的危险时间范围。下面通过华北地区的两个震例，来说明这种预测的可能性。

1. 邢台地震 (1966. 3. 8, 5^h29^m)

对发震前后的 18 天，每隔一小时计算一次触发的可能性，计算结果如图 5 中实线所示。在计算的 18 天中，每天的触发次数均在 12—14 次之间。发震日为 14 次，是触发次数最多的日子之一。然而，每天有 24 个计算值，似乎 14 次触发机会并不算多。但是，同样的数据，若按触发左旋错动(实际发震为右旋)的可能性作计算。结果，每天的触发次数如图 5 中虚线所示，每天为 1—11 次之间。这两条曲线的对比，显然说明当时、当地的潮汐应力有利于触发右旋错动。

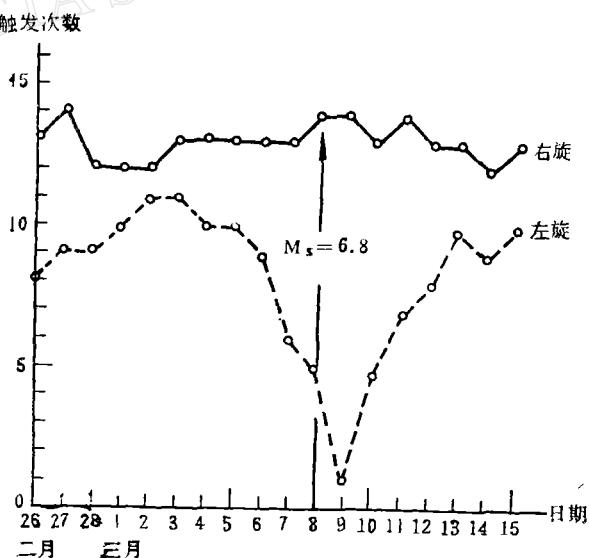


图 5 邢台地震(1966. 3. 8)前后每天的触发次数

2. 唐山地震 (1976. 7. 28, 3^h42^m)

与上例类似地计算，结果如图 6 所示。发震日前后的 18 天中，每天的触发次数在 12—15 次之间。发震日也具有最多的触发次数之一。图 6 中曲线是按实际发震的右旋

错动计算得到的。如同样数据但按左旋错动计算每天的触发次数，其数值要小得多。这里没有列出对比的曲线，它的情形与图 5 的结果类似。

通过上两个震例的分析，可以看出，上述对华北地区地震的危险时间范围的预测方法，有一定参考价值。

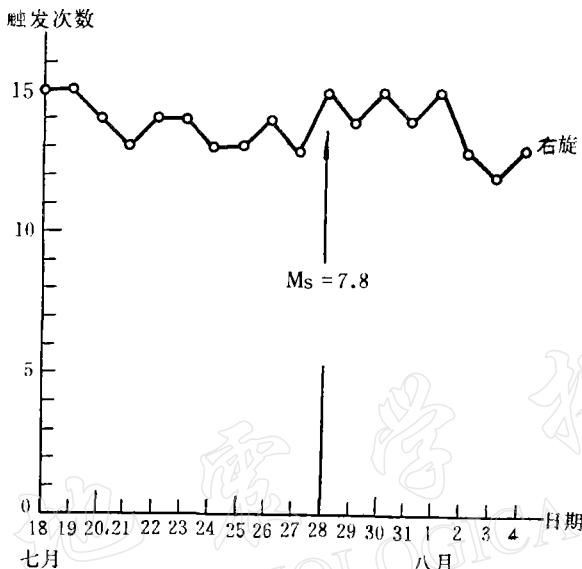


图 6 唐山地震(1976. 7. 28)前后每天的触发次数

七、几点说明

以上研究只限于对预先有断层的地震。另外，所采用地球模型为球对称的，并只考虑了固体潮的影响。若从横向非均匀的球体模型出发，并考虑到海洋潮汐的作用，估计它们将对潮汐应力分布产生较大的影响，这问题有待于进一步研究。

在本文的研究过程中，北京大学吴庆鹏、殷有泉及蔡永恩等同志提出了宝贵意见，作者谨向他们表示感谢。

附录 文中式(1)、(2)之推导

在图 2 中， $O'Q$ 及 $O'F$ 为包含矢量 \mathbf{C} 的子午面 $o'cy_3$ 与水平面的交线，故 $QO'F$ 为一直线。同时，此子午面与平面 $O'AB$ 的交线为 $O'K$ ，而平面 $O'AB$ 与水平面交线为 $O'H$ 。

$\therefore O'C \perp O'H$ (\mathbf{C} 垂直于平面 $O'AB$ ，而 $O'H$ 在此平面内)

又 $O'y_3 \perp O'H$ ，

$\therefore O'H$ 垂直于平面 $o'cy_3$ ，

则有

$$O'H \perp O'Q \text{ 及 } O'H \perp O'K.$$

为求出方向余弦 $l_i, m_i, n_i (i=1, 2, 3)$ ，只要求出 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ 各矢量在坐标系 $O'y_1y_2y_3$

中各分量。例如，对 \mathbf{A} ，在平面 $O'AB$ 中不难看出有：

$$\mathbf{A} = \cos G \mathbf{O}'\mathbf{H}_0 + \sin G \mathbf{O}'\mathbf{K}_0 \quad (a)$$

这里下角带有记号“0”的矢量代表该方向的单位矢量。在平面 $o'cy_3$ 内，有

$$\mathbf{O}'\mathbf{K}_0 = \cos D_c \mathbf{O}'\mathbf{F}_0 + \sin D_c \mathbf{y}_3. \quad (b)$$

在水平面内，易看出有

$$\mathbf{O}'\mathbf{H}_0 = -\cos E_c \mathbf{y}_1 + \sin E_c \mathbf{y}_2, \quad (c)$$

$$\mathbf{O}'\mathbf{F}_0 = -\sin E_c \mathbf{y}_1 - \cos E_c \mathbf{y}_2. \quad (d)$$

将式 (b), (c), (d) 代入式 (a)，得：

$$\begin{aligned} \mathbf{A} = & (-\cos G \cos E_c - \sin G \cos D_c \sin E_c) \mathbf{y}_1 \\ & + (\cos G \sin E_c - \sin G \cos D_c \cos E_c) \mathbf{y}_2 \\ & + (\sin G \sin D_c) \mathbf{y}_3. \end{aligned}$$

此式中三个分量依次即为 l_1 , m_1 , 及 n_1 。类似地求出其余的方向余弦。结果便得式(1)。

另外，角 α 为 \mathbf{A} 与其水平面内投影线的夹角。若将 \mathbf{A} 沿其投影线及 \mathbf{y}_3 方向分解，必有

$$n_1 = \sin \alpha.$$

但上面已推得

$$n_1 = \sin G \sin D_c,$$

$$\therefore \sin \alpha = \sin G \sin D_c.$$

这便是文中式(2)。

完全类似地对图 3 推导公式(1)、(2)。

参 考 文 献

- [1] L. Knopoff, Earth tides as a triggering mechanism for earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 54, 1865—1870, 1964.
- [2] C. H. Dix, Triggering of some earthquakes, *Proc. Japan Acad.*, XL, 6, 410—415, 1964.
- [3] A. Ryall, J. D. Van Wormer, and A. E. Jones, Triggering of microearthquakes by Earth tides, and other features of the Truckee, California, earthquake sequence of September, 1966, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 58, 215—248, 1968.
- [4] J. F. Simpson, Earth tides as a triggering mechanism for earthquakes, *Earth and Planetary Science Letters*, 2, 473—478, 1967.
- [5] T. H. Heaton, Tidal triggering of earthquakes, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 43, 307—326, 1975.
- [6] 杜品仁, 潮汐与地震关系初探, 地震科学研究, 1, 14—20, 1981.
- [7] 高锡铭, 殷志山, 王威中, 黄利娟, 李健, 固体潮应力张量对地震的触发作用, 地壳形变与地震, 创刊号, 4—16, 1981.
- [8] H. Takeuchi, On the Earth tide in the compressible earth of varying density and elasticity, *J. Fac. Sci., University of Tokyo*, Sect. II 7, part 11, 1—153, 1951
- [9] 王仁, 丁中一, 轴对称情况下地球自转速率变化及引潮力引起的全球应力场, 天文地球动力学文集, 上海天文台 1979 年编辑出版, 8—21, 1979.
- [10] 王仁, 丁中一, 殷有泉, 固体力学基础, 地质出版社, 第 71200 页, 1979.
- [11] J. C. Jaeger and N. G. W., Cook, *Fundamentals of Rock Mechanics*, 3rd. ed., p. 379, 1977.

SEISMIC TRIGGERING EFFECT OF TIDAL STRESS

DING ZHONGYI JIA JINKANG WANG REN

(*Department of Geology, Peking University*)

Abstract

The tidal stress field of a layered spherically symmetric Earth due to the Sun and Moon is used to investigate its relation with earthquake occurrence. For the 70 strong earthquakes occurred during the last 24 years in or near China, we computed the tidal stress in spherical polar co-ordinate at the focus at the time of occurrence. The normal and tangential stress components along the slip direction on the earthquake fault plane are then found by co-ordinate transformation. Coulomb's criterion of shear fracture is used to determine whether these stress components will trigger the earthquakes or not.

The results show that among the 70 earthquakes, 43 have had triggering effect and for the 18 events occurred in North China 14 of them have had triggering effect. It may be concluded that for shallow strike slip earthquakes there are significant triggering effect, while for oblique slip and dip slip earthquakes tidal stress has very little triggering effect. From 72 events occurred over other parts of the world similar conclusion is obtained.

Finally, for the purpose of earthquake prediction, a way in finding a time interval during which the tidal stress may trigger earthquake on possible faults in North China is suggested.