科学通报 2018 年 第 63 卷 第 18 期: 1822 ~ 1828
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

唐山 *M*s7.8 级地震前中小地震与地球自转的关系

隗永刚, 陈学忠*, 李艳娥

中国地震局地球物理研究所, 北京 100081
* 联系人, E-mail: cxz8675@163.com

2018-02-04 收稿, 2018-04-30 修回, 2018-05-02 接受, 2018-06-08 网络版发表

摘要 临近强震发生前, 震源区变得极不稳定, 在震中附近地区的中小地震活动或许会对微小的应力变化敏感. 为了考察1976年7月28日河北唐山*M*s7.8级地震发生前, 震中附近地区是否存在与地球自转速率变化显著相关的地震活动, 利用舒斯特(Schuster)统计检验方法, 根据1970年1月~1976年6月期间发生的$M_L \geq 2.0$级地震, 研究了地球自转与唐山*M*s7.8级地震前发生在其破裂区及其附近地区中小地震之间的相关性. 检验结果用*P*值来评估, *P*值越低表示相关性越显著. 就不同震级范围内的地震分析了*P*值随时间的变化, 发现唐山*M*s7.8级地震前$M_L \geq 2.5$级地震存在低于1%的*P*值, 80%的地震发生时地球自转速率季节性变化处于加速状态. 进一步分析了较大空间范围(33°~44°N, 113°~122°E)内, 在研究区内*P*值处于最低值期间的空间分布, 发现低于2%的*P*值集中分布在唐山*M*s7.8级地震破裂区的东北端部. 另外, 唐山*M*s7.8级地震发生时, 地球自转速率刚经历了1次季节性变化的加速过程, 处于极大值附近. 因此, 地球自转加速对唐山*M*s7.8级地震的发生可能起到了促进作用.

关键词 唐山 *M*s7.8 级地震, 加速, 地球自转, 舒斯特检验

1976年7月28日在河北唐山发生了一次*M*s7.8级巨大地震, 唐山市的建筑物几乎全部倒塌, 遭受严重破坏, 极震区烈度高达XI度[1]. 一座工业城市瞬间被夷为平地, 使近40万人遭受伤害, 其中24万人失去生命. 这次地震之所以造成如此巨大的损失, 主要原因在于: (1) 地震强度大; (2) 地震震中位于唐山市区, 属于城市直下型地震; (3) 建筑物抗震能力较弱; (4) 震前未能预报. 地震预报, 特别是短临地震预报, 可以显著减少地震造成的损失, 特别是人员伤亡和财物损失. 但是, 由于科技水平、对地震产生的成因以及震前观测到的一些异常现象认识等方面, 还存在局限性, 在唐山*M*s7.8级地震40多年之后的今天, 仍然难以实现地震预报. 唐山*M*s7.8级地震发生之后, 不少研究者对唐山地震前出现的地震学方面的异常进行了分析[2~8], 研究内容主要涉及区域地震活动图像、震群活动、*b*值、微震震源参数等. 基于强震发生前震源附近地区断层面上已经处于不稳定状态, 微小的应力变化都可能会触发中小地震活动. 当地球匀速自转时会在地球内部产生应力, 产生的纬向正应力在赤道处最小, 在极地处最大, 但从极地到赤道变化的幅度不大; 经向正应力与纬向正应力相反, 在赤道处最大, 在极地处最小, 但从极地到赤道变化的幅度较大; 径向正应力在赤道附近最大, 为拉伸, 随着纬度增加逐渐减小, 在极地附近变为压缩. 竖直面和水平面内的剪切应力在极地和赤道处都为0, 在纬度为45°处最大[9,10]. 地球自转会在震源断层面上引起应力, 地球自转速率变化也会在震源断层面上引起应力变化, 当震源区处于极不稳定状态时, 这种应力变化或许会激发一些中小地震, 这些被激发的地震可以作为强震即将发生的前兆异常. 本文将研究1976

引用格式: 隗永刚, 陈学忠, 李艳娥. 唐山 *M*s7.8 级地震前中小地震与地球自转的关系. 科学通报, 2018, 63: 1822–1828
Wei Y G, Chen X Z, Li Y E. Relation between Earth's rotation and small earthquakes occurring before the *M*s7.8 Tangshan mainshock (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 1822–1828, doi: 10.1360/N972018-00140

© 2018《中国科学》杂志社

年唐山*M*s7.8级地震前发生在其破裂区及其附近地区的$M_L \geqslant 2.0$级地震与地球自转速率变化之间的关系.

1 资料和研究区域

图1给出了1976年唐山*M*s7.8级地震及其余震的震中位置和研究区域, 取图1中粗实线围成的区域作为研究区, 这个区域比唐山*M*s7.8级地震余震分布区域稍微大一些, 为的是保证分析时具有足够的地震数. 选取研究区内于1970年1月~1976年6月期间发生的$M_L \geqslant 2.0$级地震, 共计110次. 根据G-R关系得到的完全目录完整性震级为M_L1.6, 考虑到震级测定误差, 本文选用$M_L \geqslant 2.0$级的地震, 因为它们应是被完全记录和测定的.

地球自转速率在时间尺度上主要有“十年起伏”变化、季节性变化和短期变化. “十年起伏”变化主要与地球内部地核与地幔的耦合作用有关, 季节性变化主要由大气环流、固体潮等引起, 而短周期变化主要是大气的高频震荡和潮汐波动引起的[11]. 也有研究表明, 地球自转速率季节性变化主要是由于太阳辐射光压在南、北半球表面上不平衡分布造成的[12].

目前, 地球自转速率变化可以被精确观测到. IERS(International Earth Rotation Service)在网上公布了1962年以来每天的地球日长数据. 根据日长数据, 可以得到地球自转角速度, 如果用赤道处地面上质点的线速度的大小来代表地球自转的速率V_e, 当地球均匀转动时, 在每天24 h的标准日长情况下, 赤道处地面上地球标准自转速率V_{e0}为4.6331×10^4 cm/s. 图2中给出了地球自转速率V_e与标准自转速率V_{e0}之差ΔV_e的季节性变化的例子. 图2(b)为2013年里地球自转速率季节性变化, 具有如下特征: 每年的1~3月小幅减速, 4~7月大幅加速, 8~10月大幅减速, 11~12月小幅加速, 即“小幅减速-大幅加速-大幅减速-小幅加速”为一个变化周期, 一个变化周期里, 要经历*A*, *B*, *C*, *D*四个自转速率变化的极值点或转折点. *A*为速率次大值、*B*为速率最低值、*C*为速率最大值、*D*为速率次低值. 本文将分析唐山*M*s7.8地震前研究区内发生的$M_L \geqslant 2.0$地震与地球自转季节性变化之间的关系.

2 分析方法

我们用统计方法分析地球自转与地震发生之间的关系. 根据地球自转速率随时间的季节性变化曲线, 计算唐山*M*s7.8级地震前研究区内发生的每个$M_L \geqslant 2.0$级地震的相位角θ. 计算时规定在地球自转速率季节性变化的极大值点处, 比如图2右中*C*点, 相位角$\theta=0°$, 在*C*点左边的第1个极小值处(*B*点), 相位

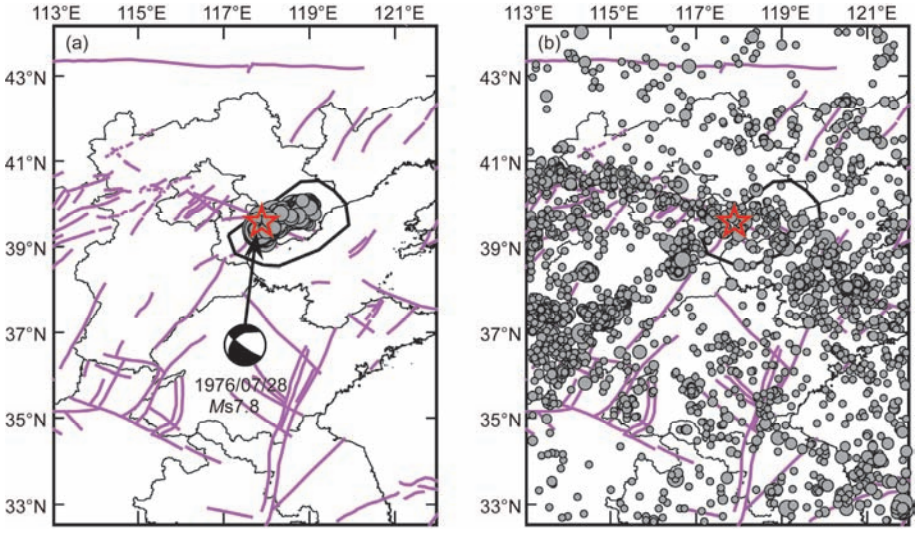


图 1 (网络版彩色)唐山*M*s7.8 级地震震中、余震分布与选择的研究区域范围. “☆”为唐山*M*s7.8 级地震. (a) 灰色圆圈为余震分布. 震源机制解来自于GCMT目录. 黑色粗实线围成的区域为选择的研究区域. (b) 中灰色圆圈为 1970 年 1 月~1976 年 6 月期间发生的$M_L \geqslant 2.0$ 地震震中分布

Figure 1 (Color online) Epicenters of the *M*s7.8 Tangshan mainshock and its aftershocks and location of the study area. The star represents the epicenter of the *M*s7.8 Tangshan mainshock. (a) Grey circles show the epicenters of aftershocks. The focal mechanism solution shown in the figure is obtained from the GCMT catalog. The enclosed region shows location of the study area. (b) Grey circles show epicenters of earthquakes ($M_L \geqslant 2.0$) that occurred from January 1970 to June 1976

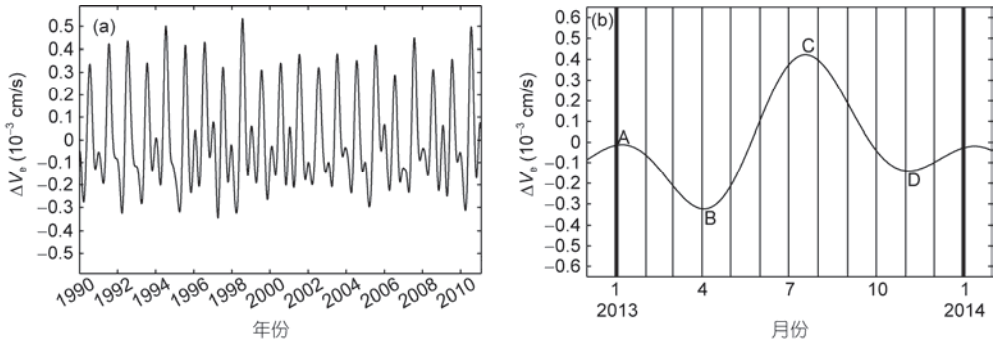


图 2 地球自转速率季节性变化. (a) 1990~2010; (b) 2013

Figure 2 The seasonal changes in rate of Earth's rotation. (a) The seasonal change from 1990 to 2010; (b) the seasonal change in 2013

角θ=−180°, 在C点右边的第1个极小值处(D点), 相位角θ=180°. 每个地震的相位角可以根据下式来计算:

$$\left.\begin{aligned}\theta &= -180^\circ \times \frac{t_0 - t_e}{t_0 - t_{-180^\circ}}, \quad t_e < t_0 \\ \theta &= 180^\circ \times \frac{t_e - t_0}{t_{180^\circ} - t_0}, \quad t_e \geqslant t_0\end{aligned}\right\}. \tag{1}$$

式中, t_e为某个地震的发生时间, t_0为离地震最近的极大值处的时间, t_{-180°和t_{180°分别表示地震前后离地震最近的2个极小值处的时间. 根据所有地震的相位角, 我们可以利用舒斯特(Schuster)统计检验方法检验地震是否发生在某一相位角周围. 对于由N个地震组成的一组地震, 检验的基本参数是[13]

$$\left.\begin{aligned}A = \sum_{i=1}^{N} \sin\theta_i, B = \sum_{i=1}^{N} \cos\theta_i \\ R = \sqrt{A^2 + B^2}\end{aligned}\right\}. \tag{2}$$

式中θ_i为第i个地震的相位角, N为地震总数. 如果地震随机发生, 与地球自转无关, A和B分布平均为零, 方差为$N/2$, 而R^2服从2个自由度的χ^2分布. 大于或等于R偶然发生的可能性是:

$$P = \mathrm{e}^{-\frac{R^2}{N}}. \tag{3}$$

这里, N>10. $0 \leqslant P \leqslant 1$, 表示拒绝地震对于地球自转是随机发生的零假设的显著性水平, 当P值越小时, 表示排斥这一假设的置信度越高. 一般地, 如果$P \leqslant$ 5%, 地震是非随机发生的[14].

3 结果

从1970年1月~1976年6月, 取2年的时间窗, 以3个月的步长将时间窗在时间轴上滑动. 根据式(2)和式(3)计算每个时间窗里的P值, 每个时间窗计算的P值的时间取其最后一个地震发生的时间, 这样可以得到P值随时间的变化. 时间窗内的实际地震数目$N \geqslant 13$(>10), 满足统计检验分析的条件.

图3(a)给出了P值随时间的变化, 图中菱形、正方形和圆等符号分别表示由$M_L \geqslant 2.0$, $M_L \geqslant 2.3$和$M_L \geqslant 2.5$的地震得到的结果. 在1974年以前, 各震级段发生的地震的P值维持在20%以上的较高值, 表明地震活动与地球自转速率季节性变化之间不存在显著相关性. 1974年6月~1975年7月这1年的时间内, 可以看到有些时候P值低于5%, 出现了地震与地球自转速率季节性变化之间显著性关系. 到1975年底, $M_L \geqslant$ 2.5的地震的P值快速降至最低值, 表明$M_L \geqslant 2.5$的地震与地球自转速率季节性变化之间存在非常显著的关联性. 图3(b)为当$M_L \geqslant 2.5$的地震P值处于最低值时地震的相角分布. 粗实线为分布的最佳拟合正弦曲线. 可以看到, 多数地震发生在相位角小于0°的区域, 即唐山Ms7.8级地震前$M_L \geqslant 2.5$级地震发生在地球自转速率季节性变化的加速阶段. $M_L \geqslant 2.5$级地震的P值反映比较显著, 在临震前其P值回返到了5%上方, 在10%以下, 这可能是在邻近地震发生前有些地区的地震已经开始失去地球自转加速的控制而恢复随机发生状态.

图4为用1974年1月1日~1975年12月31日发生的$M_L \geqslant 2.5$级地震的相位角得到的P值空间分布, 此期间研究区内发生的地震的P值处于最低值. 空间扫描的区域远大于研究区, 经纬度范围为(33°~44°N, 113°~122°E). 图4(b)为$P \leqslant 2\%$的空间分布. 可以看到, 最低P值集中出现在唐山Ms7.8级地震震中的东北部地区, 这个地区也是唐山Ms7.8级地震破裂区的东北端部, 唐山Ms7.8级地震震中位于其破裂区的西南端部.

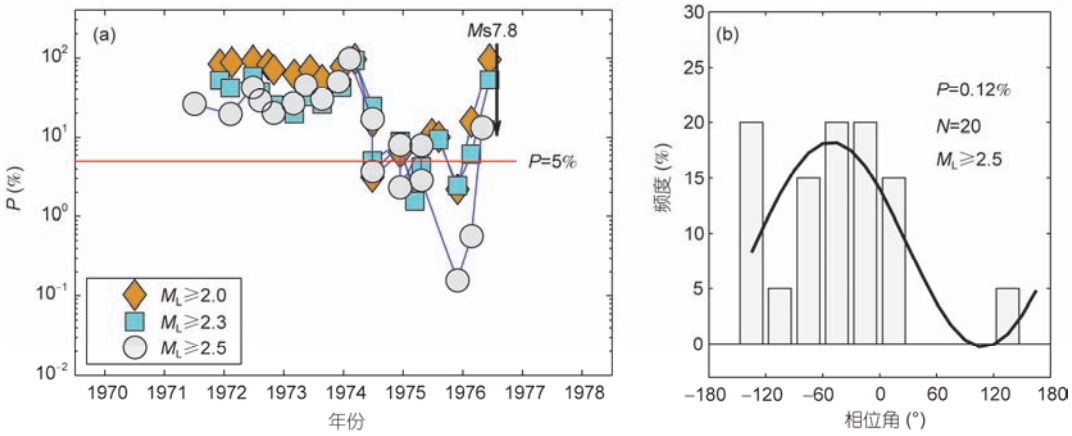


图 3 唐山*M*s7.8 级地震前研究区内*P*值随时间的变化与地震的相位角分布. (a) *P*值随时间的变化, "↓" 表示唐山*M*s 7.8 级地震. (b) 1974 年 1 月 1 日~1975 年 12 月 31 日间研究区内发生的M_L≥2.5 级地震的相位角分布, 粗实线为分布的最佳拟合正弦曲线

Figure 3 Temporal variation of *P*-value and histogram showing the phase distribution of earthquakes in the study area indicated in Figure 1. (a) Temporal variation of *P*-value, the downward arrow "↓" shows the occurrence time of the *M*s7.8 Tangshan mainshock. (b) The phase distribution of earthquakes of M_L≥2.5 that occurred in the study area indicated in Figure 1 from Janury 1, 1974 to December 31, 1975. The solid curve is the best-fit sinusoid for the frequency

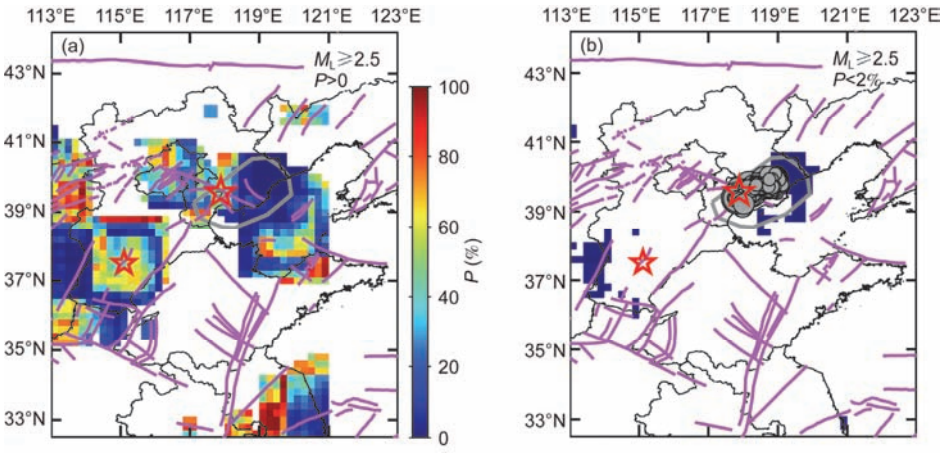


图 4 唐山*M*s7.8 级地震前 1974 年 1 月~1975 年 12 月M_L≥2.5 级地震的*P*值空间分布. 空间窗取 2°×2°, 以 0.2°的步长沿经度和纬度滑动. "☆" 为唐山*M*s7.8 级地震和 1966 年邢台*M*s7.2 级地震震中. (a) *P*>0; (b) *P*<2%

Figure 4 Spatial distribution of the *P*-value for earthquakes (M_L≥2.5) that occurred from Janury 1, 1974 to December 31, 1975 before the *M*s7.8 Tangshan mainshock. A spatial window of 2°×2° is moved by 0.2° in both the along-latitude and along-longitude directions. The star represents the epicenter of the *M*s7.8 Tangshan and the 1966 *M*s7.2 Xingtai earthquakes. (a) *P*>0; (b) *P*<2%

4 结论与讨论

强震发生前震源附近地区断层面上已经处于不稳定状态, 微小的应力变化都可能会在当地触发显著的中小地震活动. 地球自转速率变化会引起震源断层面上应力的波动变化, 当未来强震的震源区处于不稳定状态时, 这种应力变化或许会在震中附近地区引发一些中小地震活动, 这些中小地震活动或许可以作为未来强震即将发生的地震活动性前兆异常. 为了考察1976年7月28日河北唐山*M*s7.8级地震发生前, 震中附近地区是否存在与地球自转速率变化显著相关的地震活动, 我们研究了地球自转与唐山*M*s7.8级地震前发生在其破裂区及其附近地区的中小地震之间的相关性. 得到的结果显示, 唐山*M*s7.8级地震前研究区内M_L≥2.5级地震, 有2个低于1%的*P*值(置信度大于99%)分别出现在1975年底和1976年初, 表明这些地震与地球自转速率季节性变化显著

相关. 在*P*值处于最低值期间, *P*值空间分布显示, 低于2%的*P*值集中分布在唐山*M*s7.8级地震破裂区的东北端部, 80%的地震发生在地球自转速率季节性变化的加速期间, 这说明唐山*M*s7.8级地震前存在中小地震活动与地球自转速率季节性加速变化显著相关的现象. 唐山*M*s7.8级地震震中位于其破裂区的西南端部, 因此, 受地球自转速率变化触发的地震所在的地区, 不一定是未来强震初始破裂点所在之处, 但它可能是破裂区的一部分, 位于主震震中附近. 在1966年邢台*M*s7.2级地震震中以西的晋获断裂中北段也存在一个低于2%的*P*值集中分布区域, 其范围比唐山地区小, 仔细分析表明, 这个低*P*值区与1971年6月5日在山西和顺发生的M_L 5.2级地震序列有关, 截至1971年12月, 这个序列共发生$M_L \geqslant 2.5$级地震89次, 1972年再次发生了1次M_L4.7级地震序列, 1974年10月11~15日发生了7次$M_L \geqslant 2.5$级地震. 正是这7次$M_L \geqslant 2.5$级地震使这个地区的*P*值处于低值. 唐山地区的低*P*值区范围较大, 也没有较强的显著地震序列影响,显然比晋获断裂中北段低*P*值区更具有与地球自转相关联的意义. *P*<1%的空间分布显示唐山地区的低*P*值更加突出(图5). 另外, 唐山*M*s7.8级地震发生时, 地球自转速率刚经历了1次季节性变化的加速过程, 处于极大值附近(图6).

综上所述, 地球自转加速对唐山*M*s7.8级地震的发生可能起到了促进作用.

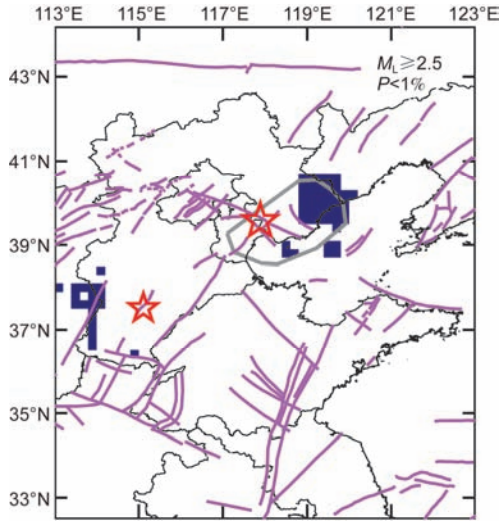


图 5 (网络版彩色)唐山地震前*P*值(<1%)空间分布

Figure 5 (Color online) Spatial distribution of the *P*-value(<1%)

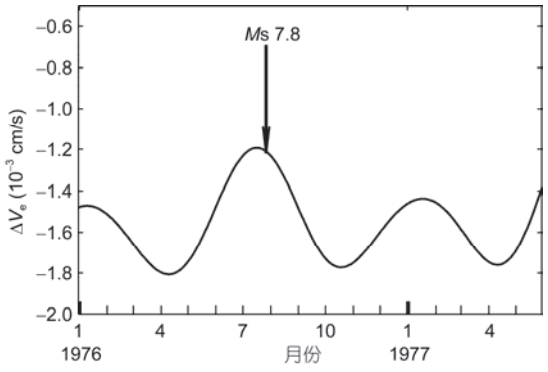


图 6 地球自转速率季节性变化与唐山*M*s7.8 级地震

Figure 6 The seasonal change in the rate of Earth's rotation and the *M*s7.8 Tangshan mainshock

参考文献

1 Yang L H, Chen G L. Intensity distribution of the Tangshan earthquake (in Chinese). Earthq Eng Eng Dyn, 1981, 1: 1–8 [杨理华, 陈国林. 唐山地震的宏观烈度分布. 地震工程与工程振动, 1981, 1: 1–8]

2 Zhu C Z, Fu C H, Luo S L. Source parameters for small earthquakes before and after the *M*=7.8 Tangshan earthquake (in Chinese). Acta Geophys Sin, 1977, 20: 265–269 [朱传镇, 傅昌洪, 罗胜利. 唐山 7.8 级地震前后微震震源参数. 地球物理学报, 1977, 20: 265–269]

3 Li Q L, Chen J B, Yu L, et al. Time and space scanning of the *b*-value-a method for monitoring the development catastrophic earthquakes (in Chinese). Acta Geophys Sin, 1978, 21: 101–125 [李全林, 陈锦标, 于绿, 等. *b* 值时空扫描——监视破坏性地震孕育过程的一种手段. 地球物理学报, 1978, 21: 101–125]

4 Zhu C Z, Fu C H, Luo S L. Study of earthquake swarms in relation to large earthquakes (north China area) (in Chinese). Acta Seismol Sin, 1981, 3: 105–117 [朱传镇, 傅昌洪, 罗胜利. 震群与大地震关系的研究. 地震学报, 1981, 3: 105–117]

5 Guo Z J, Qin B Y, Wang J. Some seismic precursors before the 1976 Tangshan earthquake. Northwest Seismol J, 1984, 6: 99–105

6 Lin H C, Jiang H K. The characteristics of the change of the regional seismic migratory velocity before the *M*s7.8 Tangshan earthquake (in Chinese). Earthq Res China, 1987, 3: 78–82 [林怀存, 蒋海昆. 唐山 *M*s7.8 级地震前区域地震迁移"速率"变化特征. 中国地震, 1987, 3: 78–82]

7 Qian Z X. Variation of *h*-value and "earthquake situation window" before and after the strong earthquakes in the northern China area (in Chinese). J Seismol Res, 1988, 11: 233–240 [钱兆霞. 华北地区强震前后的 *h* 值及"震情窗口"变化. 地震研究, 1988, 11: 233–240]

8 Xue Y, Mei S Y. The spatio-temporal evolution characteristics of general earthquake swarms and precusory swarms before and after the Tangshan earthquake (in Chinese). Earthquake, 1999, 19: 183–189 [薛艳, 梅世蓉. 唐山大前后一般震群与前兆震群时空演化特征研究. 地震, 1999, 19: 183–189]
9 Chen S L, Zhang H, Zhu G Z, et al. Global displacement and stress fields Induced by fast change of Earth's angular velocity (in Chinese). Earthquake, 2008, 28: 2–12 [陈绍林, 张怀, 朱桂芝, 等. 自转速率快速变化引起的全球位移场和应力场. 地震, 2008, 28: 2–12]
10 Wang L J, Zhang L R, Wang W, et al. Global stress field caused by the change of rate of the Earth's rotation (in Chinese). J Geomechanics, 1997, 3: 12–20 [王连捷, 张利容, 王薇, 等. 地球自转速率变化引起的全球应力场. 地质力学学报, 1997, 3: 12–20]
11 Zheng D W. Earth's rotation and the activities of ocean and atmosphere (in Chinese). Prog Astron, 1988, 6: 316–328 [郑大伟. 地球自转与大气、海洋活动. 天文学进展, 1988, 6: 316–328]
12 Song G Y. Solutions on seasonal transformation of the velocity of Earth's rotation (in Chinese). Prog Geophys, 2011, 26: 450–455 [宋贯一. 地球自转速度季节性变化的主要原因解析. 地球物理学进展, 2011, 26: 450–455]
13 Tsuruoka H, Ohtake M, Sato H. Statistical test of the tidal triggering of earthquakes: Contribution of the ocean tide loading effect. Geophys J Int, 1995, 122: 183–194
14 Heaton T H. Tidal triggering of earthquakes. Geophys J R Astr Soc, 1975, 43: 307–326

Summary for “唐山 *M*s7.8 级地震前中小地震与地球自转的关系”

Relation between Earth’s rotation and small earthquakes occurring before the *M*s7.8 Tangshan mainshock

Yonggang Wei, Xuezhong Chen* & Yan’e Li

Institue of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China
* Corresponding author, E-mail: cxz8675@163.com

The focal region of a strong approaching earthquake can become very unstable, small and moderate-sized earthquakes could respond to tiny stress changes. In this study, we focused on the *M*s7.8 Tangshan mainshock (date of occurrence: July 28, 1976), which ruptured along the Tangshan fault in the Hebei Province, China, and investigate the correlation between the variations in rate of Earth’s rotation and the occurrence of earthquakes around the focal region before the occurrence of the *M*s7.8 Tangshan mainshock. More specifically, we associated the $M_L \geqslant 2.0$ earthquakes occurring from January 1970 to June 1976 around the rupture zone of the *M*s7.8 Tangshan mainshock with the phases of the Earth’s rotation. We thus determined the signals that triggered the small earthquakes before the *M*s7.8 Tangshan mainshock. The procedure is briefly described below.

From the time series of the seasonal changes in the Earth’s rotation rate, we assigned a phase angle of the Earth’s rotation to the occurrence time of each earthquake. We defined the phase angle as 0° at each maximum of rate of Earth’s rotation, −180°and 180° at the first minimum respectively on the left and right of the maximum. The phase angle (between −180° and 180°) was assigned by 180° multiplying the time interval from the occurrence time of each earthquake to the maximum divided by the time interval from −180° to 0° (or from 0° to 180°). The rate of Earth’s rotation increases for the phase angle from −180° to 0°, and decreases for that from 0° to 180°. After determining the phase angles for all the earthquakes, we statistically test whether they concentrate near some particular angle or not by using the Schuster’s test. The results of the test were evaluated by the *P*-values. Given *N* earthquakes, the *P*-value can be calculated by Equations (2) and (3) in the text. The *P*-value ranges between 0 and 1, and represents the significance level at which we reject the null hypothesis: that earthquakes are random events with no dependence on the phase angle of the Earth’s rotation. The smaller the *P*-value, the higher is the correlation between the Earth’s rotation and earthquake occurrence. Generally, a *P*-value below 5% can sufficiently judge a significant correlation: In this case, earthquakes are non-random events. Moving a two-year time window at 3-month intervals, we calculated the temporal evolution of the *P*-value for earthquakes with various magnitudes ($M_L \geqslant 2.0$, $M_L \geqslant 2.3$ and $M_L \geqslant 2.5$). For $M_L \geqslant 2.5$ earthquakes occurring before the *M*s7.8 Tangshan mainshock, The *P*-values were below 1%. Eighty percent of the earthquakes with the lowest *P*-values occurred during the acceleration phase of the Earth’s rotation. Furthermore, by moving a spatial window of 2°×2° by 0.2°-intervals in both the latitudinal and longitudinal directions, we resolved the spatial distribution of the *P*-value within a considerably large region (33°–44°N, 113°–122°E). Low-*P*-values (below 2%) were observed in the northeastern end region of the rupture zone of the *M*s7.8 Tangshan mainshock. The rupture start point of the *M*s7.8 Tangshan mainshock, located in the southwestern end region of the rupture zone, was relatively close to the low-*P*-value region. Low-*P*-values (below 2%) were also observed in the west of the Xingtai region of Hebei. Further analysis revealed that these low-*P*-values were related to an earthquake cluster occurring in October 1974. No conspicuous low-*P*-value (below 1%) regions in other parts of north China, except in the northeastern end region of the rupture zone of the *M*s7.8 Tangshan mainshock. Additionally, at the time of the *M*s7.8 Tangshan mainshock, the Earth’s rotation had just completed an approximately maximal seasonal acceleration. We conclude that the acceleration of the Earth’s rotation promoted the *M*s7.8 Tangshan mainshock.

the *M*s7.8 Tangshan mainshock, acceceleration, Earth’s rotation, Schuster test

doi: 10.1360/N972018-00140