

地球自转减速对 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震的作用^{*}

陈学忠¹, 王恒信², 王生文², 隗永刚¹,
郭祥云¹, 陈丽娟³, 李艳娥¹

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 2. 中国地震局第一监测中心,
天津 300180; 3. 重庆市地震局, 重庆 401147)

摘要: 本文将地球看成是一个质量分布均匀的球对称弹性球体, 给出了地球以匀角速率旋转情况下产生的应力场的解析表达式, 计算了地球匀速自转时在 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震发震断层面上产生的应力, 分析了地球自转速率变化对汶川地震发震断层的影响。结果表明, 地球自转减速有利于汶川地震发生。如果地球自转减速对汶川地震的发生起到了触发作用, 那么在震前震区或许会出现中小地震发生受到地球自转减速触发的现象。分析表明, 从 2006 年起汶川地震震中附近地区 $M_L \geq 2.7$ 地震受到地球自转减速的触发, 这从另一个侧面说明了地球自转减速对汶川地震的发生具有促进作用。

关键词: 地球自转; 触发; 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3274(2018)02-0127-10

引言

地壳中同一地区构造运动方向的统一性、大规模地壳运动的定向性以及地壳运动的周期性等, 都可以用地球自转速度变化去解释^[1]。地球自转速度的变化必然引起地球各板块之间的相对运动, 板块运动既有经向运动, 也有纬向运动^[2]。从地质力学的角度看, 天然地震是大地构造运动或者板块相对运动的结果, 地球自转与地震活动之间的关系受到广泛关注。研究发现地球自转速率的不规则变化和全球中、深震(震源深度为 70~700 km)每年释放的能量之间有较强的相关性^[3], 地球自转在地下 70~700 km 深处所产生的弹性应变能与全球中、深震每年释放的总能量在数量上是一致的^[4]。钱德勒晃动幅度的时间变化与地震能量之间具有很好的相关性可能与地球自转速度变化有关^[5], 全球强震活动随纬度的分布与地球自转动能随纬度的分布之间具有很好的一致性^[6]。全球 $M_s \geq 7.5$ 地震年频次长周期变化与地球自转速率十年起伏变化呈负相关, 即地球自转速率减速期间全球 $M_s \geq 7.5$ 地震年频次呈上升变化^[7]。1900—1992 年全球范围内发生的 7 级以上地震, 不同地区的地

^{*} 收稿日期: 2018-01-08; 修改回日期: 2018-01-24

作者简介: 陈学忠(1963-), 男, 重庆永州人, 研究员, 主要从事数学地震学与地震预报等研究。

震活动和地球自转速率十年起伏变化不同,有的地区呈正相关,如日本地区、阿留申地区、中国西部等;有的地区呈负相关,如斐济、秘鲁、黑海和美国西部^[8]。1920—1978 年全球 7.0 级以上强震月频度与地球自转季节性变化相关分析结果表明,震级在 7.0~8.1 之间的地震,其月频度与地球自转季节性变化呈正相关^[9]。也有研究表明,日长变化速率变化快以及其正负交换时会诱发地震的发生^[10]。全球地震活动与地球自转变化在时间尺度上存在着一定的全局性联系,在空间尺度上存在着一定的地区性差异,欧亚地震带(不含东南亚地区)和下加利福尼亚—阿拉斯加东部地震带的地震与地球自转变化具有较好的相关性^[11]。在海沟及其附近的重力负异常地区,地震多在地球自转加快的年份中发生;而在岛弧及其附近的重力正异常地区内,地震主要发生在自转相对减慢的年份中,这种特征可能与地球自转速率不均匀产生的附加应力状态有关^[12]。

对于中国大陆地区地震与地球自转的关系,也有不少研究结果。地球自转速率准 40 年周期变化与中国大陆地震韵律有密切关系^[13]。对于 1900—2001 年间发生的大陆不同活动地块的浅源强震,一些地块的大多数地震发生在地球自转减慢的年份中,而另一些地块的大多数地震发生在地球自转加速的年份中^[14]。不同构造地区的地震常常发生在地球自转速度长期变化的加速期间或者减速期间^[15]。在单一构造体系控制下的地区,地震与地球自转速度季节性变化的关系表现良好,发震时间相对集中在加速段或减速段,而在多种构造体系复合地带,由于构造成分复杂,因而发震时间的相对集中性表现不明显^[16]。中国西部地区 1904—2001 年间发生的 $M \geq 7.5$ 大地震,其发生的当年及前一年,地球自转速率往往处于相对加快的状态,当地球自转的季节性变化处于转折期时,大地震的频次明显增加^[17]。华北地区和江苏及其邻区中强以上地震都发生在地球自转加速度上升期至其后半年时间段以及上升期开始的 3~4 年之后^[18]。在强震前几年时间内震中附近地区的中小地震有偏向发生于地球自转速率季节性变化加速或者减速阶段的现象^[19, 20]。

从上述研究结果来看,地震与地球自转的关系是复杂的,存在多种可能,有与地球自转减速有关的,有与加速有关的,也有与地球自转无关的,还有与日长变化速率变化正负交替时有关的。不同的地区和构造条件下地震与地球自转的关系也不同。2008 年 5 月 12 日在四川汶川发生 $M_s 8.0$ 地震,本文将基于均匀完全弹性的球对称地球模型,计算地球自转在汶川地震震源处引起的附加应力,据此分析地球自转速率变化对其可能的触发作用。先计算地球匀速转动时产生的应力场,在此基础上分析地球自转速率变化时所引起的应力场变化。

1 地球在匀速转动时产生的应力场

将地球看成是一个质量分布均匀的球对称弹性球体,以匀角速率 ω 旋转。按照理论力学,地球内部的任意一点都有向心加速度,大小为 $\omega^2 r$, r 为该点到旋转轴的距离。因此,地球的每单位体积上被施以惯性离心力 $\rho \omega^2 r$, 其中 ρ 为密度,则地球在体力 $K_r = \rho \omega^2 r$ 的作用下处于平衡状态。由于对称性,选取柱坐标系,其平衡方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= -\rho \omega^2 r \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

相容方程为

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \sigma_r - \frac{2}{r^2} (\sigma_r - \sigma_\theta) + \frac{1}{1+\mu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial r^2} &= -\frac{2\rho\omega^2}{(1-\mu)} \\ \nabla^2 \sigma_\theta + \frac{2}{r^2} (\sigma_r - \sigma_\theta) + \frac{1}{1+\mu} \frac{1}{r} \frac{\partial \Theta}{\partial r} &= -\frac{2\rho\omega^2}{(1-\mu)} \\ \nabla^2 \sigma_z + \frac{1}{1+\mu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} &= -\frac{2\mu\rho\omega^2}{(1-\mu)} \\ \nabla^2 \tau_{rz} - \frac{\tau_{rz}}{r^2} + \frac{1}{1+\mu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial r \partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 Θ 为体积应力。式(1)和式(2)为非齐次微分方程, 其解可以先找出任意一组满足上述微分方程的特解, 然后再找出满足齐次微分方程的通解, 将特解与通解叠加之后, 根据边界条件得到最终解。式(1)和式(2)的一组特解如下:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r^0 &= -\frac{\rho\omega^2}{3}r^2 - \frac{\rho\omega^2(1+2\mu)(1+\mu)}{6\mu(1-\mu)}z^2 \\ \sigma_z^0 &= \frac{\rho\omega^2(1+3\mu)}{6\mu}r^2 \\ \sigma_\theta^0 &= -\frac{\rho\omega^2(1+2\mu)(1+\mu)}{6\mu(1-\mu)}z^2 \\ \tau_{rz}^0 &= \tau_{rz}^0 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

选取应力函数 $\Phi = A(3r^4z - 4z^3r^2) + B(5r^2z^3 - 2z^5) + Cr^2z + Dz^3$, 其中 A, B, C, D 为待定系数。根据应力函数与应力分量之间的关系, 可以得到:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r^1 &= [12(2\mu-3)A + 30\mu B]r^2 + [24(1-2\mu)A - 30(1+2\mu)B]z^2 + c_1R^2 \\ \sigma_z^1 &= [24(1-\mu)A + 30(\mu-1)B]r^2 + [48(\mu-2)A + 60(2-\mu)B]z^2 + c_2R^2 \\ \sigma_\theta^1 &= [12(2\mu-1)A + 60\mu B]r^2 + [24(1-2\mu)A - 30(1+2\mu)B]z^2 + c_1R^2 \\ \tau_{rz}^1 &= \tau_{rz}^1 = [48(2-\mu)A - 60\mu B]rz \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, $c_1 = \frac{2(2\mu-1)C+6\mu D}{R^2}$, $c_2 = \frac{4(2-\mu)C+6(1-\mu)D}{R^2}$ 。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_r^0 + \sigma_r^1 = a_1r^2 + b_1z^2 + c_1R^2 \\ \sigma_z &= \sigma_z^0 + \sigma_z^1 = a_2r^2 + b_2z^2 + c_2R^2 \\ \sigma_\theta &= \sigma_\theta^0 + \sigma_\theta^1 = a_3r^2 + b_3z^2 + c_1R^2 \\ \tau_{rz} &= \tau_{rz} = \tau_{rz}^0 + \tau_{rz}^1 = drz \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \alpha + 12(2\mu-3)A + 30\mu B \\ b_1 &= \beta + 24(1-2\mu)A - 30(1+2\mu)B \\ a_2 &= \gamma + 24(1-\mu)A + 30(\mu-1)B \\ b_2 &= 48(\mu-2)A + 60(2-\mu)B \\ a_3 &= 12(2\mu-1)A + 60\mu B \\ b_3 &= \beta + 24(1-2\mu)A - 30(1+2\mu)B \\ d &= 48(2-\mu)A - 60\mu B \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\alpha = -\frac{\rho\omega^2}{3}, \beta = -\frac{\rho\omega^2(1+2\mu)(1+\mu)}{6\mu(1-\mu)}, \gamma = \frac{\rho\omega^2(1+3\mu)}{6\mu} \quad (7)$$

R 为地球半径, 变换到球坐标系下, 应力分量为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r'} &= \sigma_r \cos^2 \varphi + \sigma_z \sin^2 \varphi + \tau_{rz} \sin(2\varphi) \\ \sigma_\varphi &= \sigma_r \sin^2 \varphi + \sigma_z \cos^2 \varphi - \tau_{rz} \sin(2\varphi) \\ \sigma_\theta &= \sigma_\theta \\ \tau_{r'\varphi} &= \frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_r) \sin(2\varphi) + \tau_{rz} \cos(2\varphi) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$r = r' \cos \varphi, \quad z = r' \sin \varphi$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r'} &= (a_1 r'^2 \cos^2 \varphi + b_1 r'^2 \sin^2 \varphi + c_1 R^2) \cos^2 \varphi \\ &\quad + (a_2 r'^2 \cos^2 \varphi + b_2 r'^2 \sin^2 \varphi + c_2 R^2) \sin^2 \varphi + 2dr'^2 \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi \\ \sigma_\varphi &= (a_1 r'^2 \cos^2 \varphi + b_1 r'^2 \sin^2 \varphi + c_1 R^2) \sin^2 \varphi \\ &\quad + (a_2 r'^2 \cos^2 \varphi + b_2 r'^2 \sin^2 \varphi + c_2 R^2) \cos^2 \varphi - 2dr'^2 \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi \\ \sigma_\theta &= a_3 r'^2 \cos^2 \varphi + b_3 r'^2 \sin^2 \varphi + c_1 R^2 \\ \tau_{r'\varphi} &= \frac{1}{2}[(a_2 - a_1)r'^2 \cos^2 \varphi + (b_2 - b_1)r'^2 \sin^2 \varphi + (c_2 - c_1)R^2] \sin(2\varphi) \\ &\quad + \frac{1}{4}dr'^2 \sin(4\varphi) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中, $\sigma_{r'}$ 为径向正应力, 垂直地面向上为正, σ_φ 为纬向正应力, 向北为正, σ_θ 为经向正应力, 向东为正。 $\tau_{r'\varphi}$ 为在与地球表面平行的面上沿纬向的剪切应力或在与纬向垂直的面上沿径向的剪切应力。

由边界条件

$$\left. \begin{aligned} r' = R, \varphi = 90^\circ \text{ 时}, \sigma_{r'} &= 0 \\ r' = R \text{ 时}, \sigma_{r'} = 0, \tau_{r'\varphi} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

可以得到

$$\left. \begin{aligned} c_2 &= -b_2 \\ c_1 &= -a_1 \\ a_2 - a_1 + d + c_2 - c_1 &= 0 \\ b_2 - b_1 - d + c_2 - c_1 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

由式(10)得到

$$\left. \begin{aligned} a_2 - b_2 + d &= 0 \\ a_1 - b_1 - d &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

由式(5)和式(9)得

$$\left. \begin{aligned} 24(11 - 5\mu)A + 30(1 - 5\mu)B &= -\gamma \\ 12(10\mu - 13)A + 30(1 + 5\mu)B &= \beta - \alpha \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} A &= -\frac{30\gamma(1 + 5\mu) + 30(\beta - \alpha)(1 - 5\mu)}{720(11 - 5\mu)(1 + 5\mu) - 360(10\mu - 13)(1 - 5\mu)} \\ B &= -\frac{12\gamma(10\mu - 13) + 24(\beta - \alpha)(11 - 5\mu)}{720(11 - 5\mu)(1 + 5\mu) - 360(10\mu - 13)(1 - 5\mu)} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

根据式(6)、式(7)、式(11)和式(14), 可以得到式(10)中的 a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 c_1 、 c_2 和 d 等系数。

取地壳岩石密度为 $\rho = 2.71 \text{ g/cm}^3$, 泊松比 $\nu = 0.25$, 地球半径 $R = 6371 \text{ km}$, 可以得

到地球以标准角速率 $\omega_0 = 2\pi/86400$ 弧度/秒匀速转动时产生的应力分量, 图 1 给出了深度 $h=20$ km 时其随纬度的变化。纬向正应力 σ_φ 的值在赤道处最小, 在极地处最大, 但从极地到赤道变化的幅度不大, 约 1.5 MPa; 经向正应力 σ_θ 与 σ_φ 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, 约达 85 MPa; 径向正应力 σ_r 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。剪切应力 $\tau_{r\varphi}$ 在极地和赤道处都为 0, 在纬度为 45° 处最大。

上述结果是在假设地球为一个质量均匀的球体情况下得到的, 实际地球是一个扁球体, 且质量分布存在不均匀性, 地形变化复杂。陈绍林等^[21]利用数值试验的方法, 系统分析了地球自转速率变化所引起的全球应力分布特征, 研究表明椭率对地表各个应力分量的影响在千分之几, 而地形的影响则表现为径向应力与地形正相关, 且相同高度的地形在低纬度影响较大, 纬向和经向的应力大小分别与地形在 SN 向和 EW 向的地形梯度直接相关。地形对纬向和经向应力造成的变化均为其值的百分之几。尽管本文所用地球模型与真实地球存在差异, 但是这种差异不会引起结果的本质变化, 因此, 作为一级近似, 可以将上述结果应用于地球自转产生的应力场的分析。

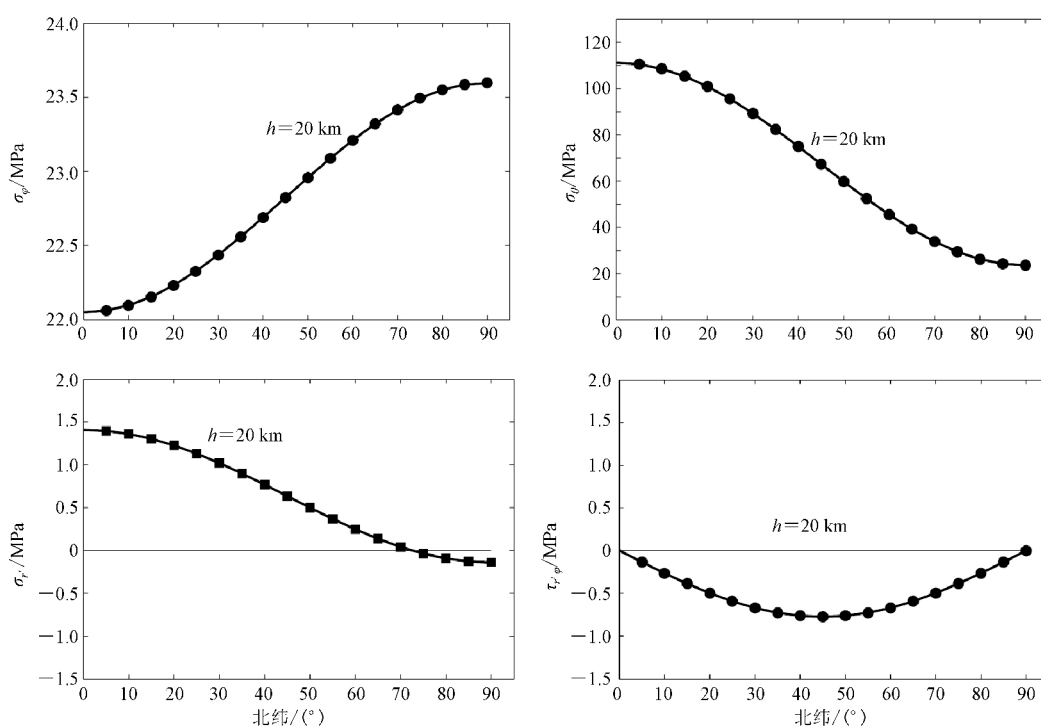


图 1 地球匀速自转情况下产生的应力场随纬度的变化

2 地球在匀速转动时在汶川地震震源断层面上产生的应力

根据震源断层面参数, 将地球匀速自转时产生的应力分量投影到震源断层面的错动方向和法向上, 可以得到地球以标准角速率匀速自转时在震源断层面上产生的正应力 σ_n 、剪切应力 τ 、有效剪切应力 $\tau_e = \tau + \mu\sigma_n$, 计算时 μ 取 0.6。根据全球 CMT 目录资料, 汶川地震的地震断层面参数列于表 1 中。计算了地球均匀自转时在 2008 年汶川 $M_S 8.0$ 地震震源断

层面上的产生的应力场,见表 2。

根据表 2 中结果,当地球以标准角速率 $\omega_0 = 2\pi/86400$ 弧度/秒匀速自转时,在汶川地震发震断层面上产生的剪切应力 $\tau = -23.8$ MPa,正应力为 $\sigma_n = 16.1$ MPa,有效剪切应力为 $\tau_e = -14.17$ MPa。当地球匀速自转时,不利于汶川地震发震断层面错动发震。地球自转速率变化也可以用日长来描述,标准日长为 24 h,其季节性变化的日长变化幅度大约为 1 ms,其相对变化量大约为 10^{-8} ,角速度的相对变化量也是 10^{-8} 。当角速度增加到 $(1+10^{-8})\omega_0$ 时,在汶川地震发震断层面上产生的有效剪切应力将减小 0.28 Pa;而当地球自转角速度减小到 $(1-10^{-8})\omega_0$ 时,在汶川地震发震断层面上产生的有效剪切应力将增加 0.28 Pa。

表 1 汶川地震发震断层面参数

北纬/(°)	东经/(°)	震级(M_S)	深度/km	断层面参数		
				走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)
31.00	103.40	8.0	19.0	231	33	138

表 2 地球均匀自转时在汶川地震断层面上产生的应力

自转角速度 ω (弧度/秒)	τ_e /MPa	τ /MPa	σ_n /MPa
$\omega_0 = 2\pi/86400$	-14.17234865	-23.81892980	16.07763525
$(1+1\times 10^{-8})\omega_0$	-14.17234893	-23.81893028	16.07763558
$(1-1\times 10^{-8})\omega_0$	-14.17234837	-23.81892933	16.07763493

3 结果与讨论

从上述对地球自转速率变化在汶川地震发震断层面上产生的应力变化分析结果表明,尽管所引起的应力变化量较小,但是地球自转减速对汶川地震的发生是有利的。本文结果是在假定地球是一个完整的刚性球体的情况下得到的,实际上地球表面不是一个完整的球壳,而是由大小不同的块体组成的。汶川地震发震断层面处于青藏块体的东边界,属于块体边界的一部分,当地球自转速率发生变化时,由于边界两边的块体质量存在差异,块体之间可能存在相对运动,因而在块体边界处引起的应力可能会比在块体内部的应力大。利用 1962 年以来日长变化数据,经过 5 年截止周期低通滤波后得到的结果(图 2),从 2004 年起至汶川地震发生时,地球自转速率长周期变化处于下降阶段。

如果地球自转减速对汶川地震的发生起到了触发作用,那么在震前震区或许会出现中小地震发生受到地球自转减速触发的现象。

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

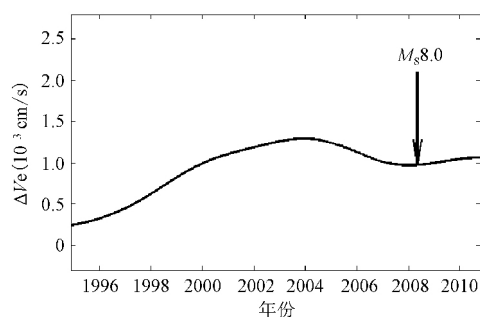


图 2 地球自转速率长周期变化与汶川 $M_S8.0$ 地震

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、固体潮以及太阳辐射光压在南、北半球表面上不平衡分布等引起,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^[22, 23]。

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变化数据。根据日长变化数据,可以得到地球自转角速度,本文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 。如果地球均匀转动,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 3 中分别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,从图中可以看出地球自转速率季节性的幅度很小,大约为 $\pm 6 \times 10^{-4}$ cm/s。季节变化具有如下特征:每年的 1~3 月减速,4~7 月加速,8~10 月减速,11~12 月缓加速,即“减速—加速—减速—缓加速”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(图 3b)。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。

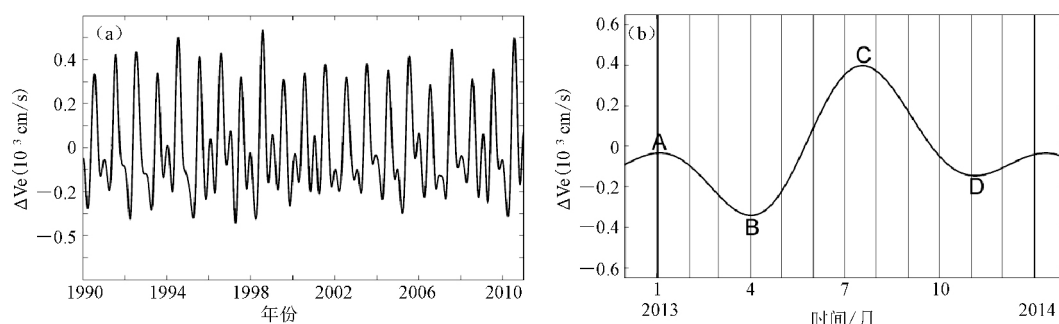


图 3 地球自转速率季节性变化

下面将分析汶川地震震区自 2000 年 1 月 1 日~2008 年 4 月 30 日发生的 $M_L \geq 2.0$ 地震与地球自转季节性变化减速之间的关系。图 4 给出了研究区域的范围,图 5 为区域内自 2000 年 1 月 1 日~2008 年 4 月 30 日发生的 $M_L \geq 2.0$ 地震的时序图。

如果地震随机发生,发生时地球自转减速与加速的可能性是一样的。假设在一段时间里发生了 N 个地震,其中 n_p 个地震发生时地球自转处于加速状态, $n_n = N - n_p$ 个地震发生时地球自转处于减速状态。如果地球自转减速对地震具有触发作用, n_p 与 n_n 之间应当存在显著差异。基于此,利用统计学中的显著检验方法来检验 n_p 与 n_n 之间是否存在显著差异,以此来分析地球自转速率变化对地震的触发作用。这种情况下可以利用符号检验法来对 n_p 与 n_n 之间的差异性进行检验。当 $N > 25$ 时,可采用如下统计检验量 Z 进行检验^[24]。

$$Z = \frac{\left(r - 0.5 - \frac{N}{2}\right)}{\frac{\sqrt{N}}{2}} \quad (15)$$

式中, r 表示 n_p 和 n_n 两者中的较大者。 Z 在显著性水平 10%、5%、2% 和 1% 下的临界值分别为 1.65、1.96、2.33 和 2.58。

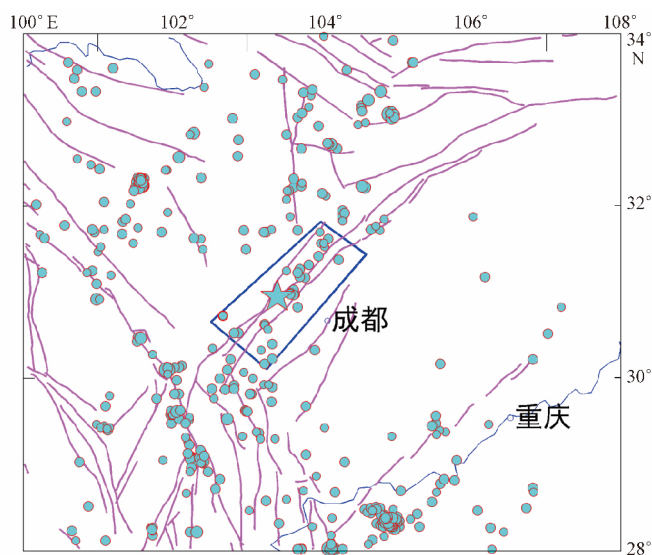


图 4 研究区域示意(“★”为汶川地震震中, 四边形围成的区域为研究区)

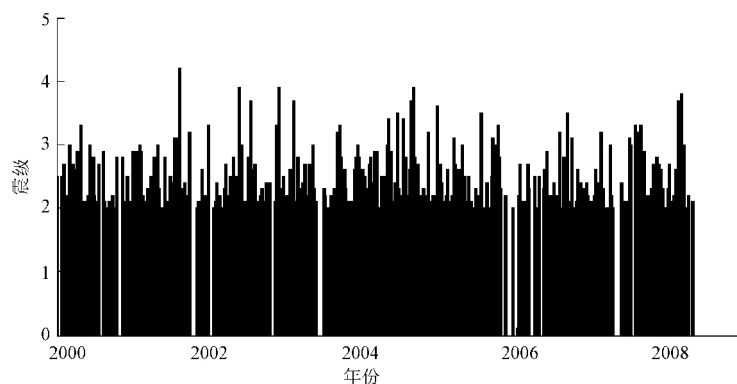


图 5 研究区域内发生的 $M_L \geq 2.0$ 地震

表 3 各时间窗内地震总数目以及在地球自转减速和加速期间发生的地震数目

时间窗 序号	地震 总数	减速期间 发生的地震数	加速期间 发生的地震数
1	34	13	21
2	33	14	19
3	32	12	20
4	34	13	21
5	40	19	21
6	38	22	16
7	37	24	13
8	36	26	10
9	30	25	5
10	28	23	5
11	32	27	5

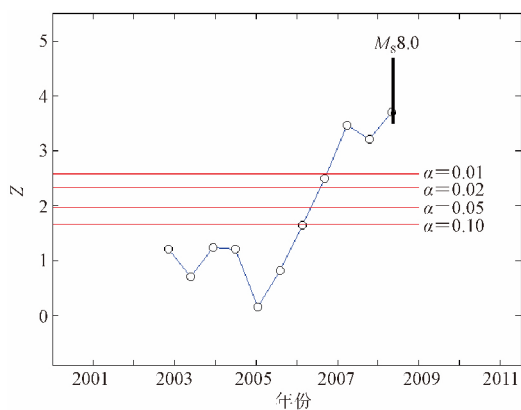


图 6 地球自转减速触发地震检验的 Z 值随时间的变化(α 为显著性水平)

从 2000 年 1 月 1 日到 2008 年 4 月 30 日, 取 1000 天的时间窗, 以 200 天滑动, 计算每个时间窗里 $M_L \geq 2.7$ 地震的 Z 值, 结果见图 6。各个时间窗内地震总数目、发生在地球自转减速和加速期间的地震数目在表 3 中给出。从图 6 中可以看出, Z 值从 2005 年初开始逐渐升高, 到 2006 年初已经达到 $\alpha = 0.1$ 的临界值, 到 2007 年初, Z 值已经远远超过 $\alpha = 0.01$ 的临界值, 说明发生在地球自转减速和加速期间的地震数目存在显著差异。从表 3 中可知, 在最后的 3 个时间窗内地球自转加速期间发生的地震只有 5 次, 显著低于减速期间发生的地震。因此, 从 2006 年起研究区内 $M_L \geq 2.7$ 地震发生受到地球自转减速的触发。这从另一个侧面说明了地球自转减速对汶川地震的发生具有促进作用。

参考文献:

- [1] 李四光. 地质力学概论[M]. 北京: 科学出版社, 1973.
- [2] 李延兴. 地幔对流、地球自转速度变化与板块运动[J]. 地壳形变与地震, 1992, 12(3): 49-54.
- [3] Stoyko A, Stoyko N. Rotation de la terre, phénomènes géophysiques et activité du soleil[J]. Bulletin Academic Royal Belique, 1969, 5(55): 279-285.
- [4] 季洪钦, 尤淑如. 地球自转不均匀性与全球中震、深震能量的相关分析及其力学关系[J]. 天文学报, 1988, 29(4): 326-332.
- [5] Kanamori H. The energy release in great earthquake[J]. J. Geophys. Res., 1977, 82(2): 2981.
- [6] 陈学忠, 李艳娥, 赵晓燕. 全球强震活动纬度分布特征及其解释[J]. 地震, 2010, 30(1): 28-35.
- [7] 马利华, 韩延本, 尹志强. 全球强震的分布及其与地球自转速率变化的关系[J]. 天文研究与技术, 2007, 4(4): 406-411.
- [8] 苏鸳鸯. 全球 7 级大震与我国地震活动的关系[J]. 地震研究, 1995, 18(2): 143-150.
- [9] 高建国. 地球自转角速度变化触发地震的初步讨论[J]. 科学通报, 1981, 26(5): 293-296.
- [10] 魏二虎, 李智强, 殷志祥. 地球自转速率变化对地震诱发作用研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(1): 1-3.
- [11] 郑大伟, 周永宏. 地球自转变化与全球地震活动关系的研究[J]. 地震学报, 1995, 17(1): 25-30.
- [12] 傅征祥. 岛弧—海沟地区浅源强震分布和地球自转[J]. 地球物理学报, 1984, 27(1): 53-63.
- [13] 赵铭. 地球自转速率变化与中国大陆地震韵律的关系[J]. 科学通报, 1990, 35(18): 1402-1405.
- [14] 傅征祥, 邵辉成, 丁香. 中国大陆浅源强震分布与地球自转速率变化的关系[J]. 地震, 2004, 24(3): 15-20.
- [15] 李启斌, 肖兴华, 李致森. 中国大陆强地震与地球自转角速度长期变化关系的初步分析[J]. 地球物理学报, 1973, 16(1): 71-80.
- [16] 虞志英, 陈业裕, 罗时芳, 等. 地球自转速度季节性变化与地震关系的初步分析[J]. 地球物理学报, 1974, 17(1): 44-49.
- [17] 韩延本, 郭增建, 赵娟, 等. 地球自转速率变化与中国西部的大地震[J]. 国际地震动态, 2003, (6): 1-6.
- [18] 冯志生, 王俊菲, 田韬, 等. 华北、江苏及邻区中强地震与地球自转加速度变化的统计关系初步研究[J]. 中国地震, 2013, 29(3): 393-398.
- [19] 陈学忠, 李艳娥, 王恒信, 等. 2004 年印尼苏门答腊 $M_w 9.0$ 地震前地震活动增强现象及其与地球自转的关系[J]. 地球物理学报, 2013, 56(1): 2-11.
- [20] 王恒信, 郭祥云, 李艳娥, 等. 地球自转对强震震中附近中小地震的影响[J]. 地震地磁观测与研究, 2013, 34(5/6): 52-60.
- [21] 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[J]. 地震, 2008, 28

(4): 1-12.

- [22] 宋贯一, 曹志成, 王吉易, 等. 地球自转速度的年变化[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1 225-1 228.
- [23] 宋贯一. 地球自转速度季节性变化的主要原因解析[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(2): 450-455.
- [24] 张敏强. 教育与心理统计学[M]. 北京: 人民教育出版社, 2002.

Effect of the Earth Rotation Deceleration on the Occurrence of the 2008 Wenchuan $M_s8.0$ Earthquake

CHEN Xue-zhong¹, WANG Heng-xin², WANG Sheng-wen², WEI Yong-gang¹,
GUO Xiang-yun¹, CHEN Li-juan³, LI Yan-e¹

(1. Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China; 2. First Crust Monitoring Center, CEA, Tianjin 300180, China; 3. Chongqing Earthquake Administration, Chongqing 401147, China)

Abstract: Stress changes produced by the earth are obtained with a spherically symmetrical and elastic sphere of uniformly-distributed mass and rotating in constant angular rate. The stress changes caused by the earth rotating in constant angular rate on the focal fault plane of the 2008 Wenchuan $M_s8.0$ earthquake are calculated. The effect of changes of the earth's rotation rate on the focal fault plane of the Wenchuan earthquake is discussed. The result shows that deceleration of the earth rotation could promote the initiation of the Wenchuan earthquake. On the other hand, if the deceleration of the earth rotation played a positive role in the Wenchuan earthquake occurrence, there could exist some small deceleration of the earth rotation-triggering earthquakes around the epicenter area of the Wenchuan earthquake. Our analysis shows that earthquakes of $M_L2.7$ around the epicenter area of the Wenchuan earthquake could be triggered by the deceleration of the earth rotation. It provides another evidence for the positive role of the deceleration of the earth rotation in the initiation of the Wenchuan earthquake.

Key words: Triggering effect; Earth rotation; the 2008 Wenchuan $M_s8.0$ earthquake