

太阳黑子活动对地球地震活动的影响浅析

刘双庆, 曹井泉, 张磊, 李悦

(天津市地震局, 天津 300201)

摘要:利用调和分析及小波分解与重构等信息挖掘方法,对 1749 年来的太阳黑子月统计数据,1920 年来全球地震目录 $M_s 6.0$ 以上地震年统计数据,1950 年来华北地区 $M_L 4.7$ 级以上地震目录,地球自转速率 1832—1997 年的年统计数据及 1962 年来的月统计数据,进行对比分析,研究发现:(1)在太阳活动处于强烈期时,地球大震处于高发期且略滞后 2~5 年,而此时地球自转速率处于减速期,其时间跨度约 22 年。(2)对于太阳黑子数 11 年的周期变化,在正常变化下如果处于低值期,期间地球地震活动也将增加,但地震发震时间滞后 1~2 年。考虑太阳黑子与日冕活动有继承性及延迟性的特点,我们认为引起 11 年左右的地震群活动可能不是直接受太阳黑子的影响,而是受太阳日冕活动影响。因为日冕抛射物在太阳黑子磁场弱化 1 年左右时爆发,使得太阳外层扁率增加并经常抛射一次性质量高达 10^{13} kg 的物质,从而导致地球自转速率因摄动效应而发生同步性减慢,以及地球地震活动增强。

关键词:地震活动;太阳黑子;日冕抛射物;调和分析;滞后效应

中图分类号:P315.728

文献标志码:A

文章编号:1003-1375(2013)01-0001-07

0 引言

地球属于太阳系中的一颗行星,受太阳、月球等天体的影响,地球上有着明显的固体潮及潮汐现象,其固体潮的最大幅值约 0.43 m。近年科学家们从地质学大冰期及目前观测太阳系相对银河盘面的上下穿越速率,意识到地球地质年代分段中的“纪”可能是地球随太阳系一起穿越银河系盘面的时间间隔^[1],地球上的重大地质事件可能是在穿越银河系盘内时发生的综合结果。由于观测手段的不断进步,地球约 25 800 年的进动效应从古代学者(虞喜,晋代;Hipparchus, 古希腊^[1])的质疑中演化到现在的精确度量。428 天左右的钱德勒晃动在 19 世纪发现并进行了深入研究。特别是卫星测控技术的进步,从上世纪 60 年代起开始测定地球自转速率的不稳定性,同时地球自转轴在地球极点附近也存在“画圈式”漂移,漂移半径约 12 m。而当太阳发生磁暴时,地球上的通讯受到明显干扰。这些都表明地球受外太空环境的影响。那么地球上的地震活动是否一样受其影响?目前研究发现,在新疆地区,中强以上地震常常发生在太阳黑子数下降末段及初期上升

阶段,其 $M_s 6.6$ 级以上地震报准率在 68% 以上^[2]。太阳黑子与地震活动具有负相关关系^[3]。从谱分析的角度也反映出该特点,利用 Morlet 小波分解获取到 10.7 年与 60.6 年周期的地震活动与太阳黑子活动在时间上具有明显负相关性^[4]。这些研究结论是否具有普遍性,其负相关关系在时间进度中是如何发展的,我们在本文中拟利用信号分析的调和分解及小波分解进行研究,并从引力摄动的力学方程角度对结果进行适当阐述。

1 数据来源

太阳黑子数据来自 NASA(National Aeronautics and Space Administration),时间从 1749 年 1 月到 2012 年 10 月,为月统计数据^[5]。

地球自转速率数据来自 EOC(Earth Orientation Center),分别是 1832—1997 年的年统计数据及 1962—2012 的月统计数据^[6]。

地震目录来自宋治平、张国民等^[7]2011 年编写的《全球地震目录》,中国地震局监测预报司发行的《中国地震目录,2010》^[8]、许忠淮^[9]及来自美国哈佛大学主办的“The Global Centroid-Moment-Tensor

收稿日期:2012-11-15

基金项目:中国地震局震源深度跟踪小组专项(82109);2013 年测震青年专项(20130202);天津市地震局青年基金课题(12103)

作者简介:刘双庆(1982—),男(汉族),广西桂林人,硕士,工程师,主要从事地震波观测及数据信息挖掘。

E-mail: goodmorningabc@163.com

(CMT) Project”有关中国及邻区震源机制解目录及中国地震台网中心统一编目后的近 2 年地震目录。

受观测技术的影响,1920 年以前全球 6 级以上地震可能有缺失,目录中未做余震删除。华北地区的目录参考华北地区的地震活动断裂边界(邓起东^[10])进行选择(图 1a)。对太阳黑子数,主要研究 1900 年以来的数据。地球自转速率从 1962 年起观测精度相对较高。太阳高能粒子流的测量技术尚不成熟^[11],LASCO 数据从 1996 年起观测,观测时间尚未超过太阳活动周期,在此以引用前人的研究结论为主。

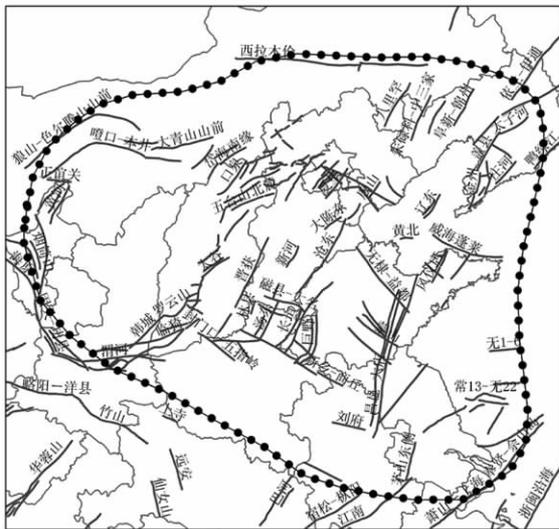


图 1a 华北地区的目录圈定范围

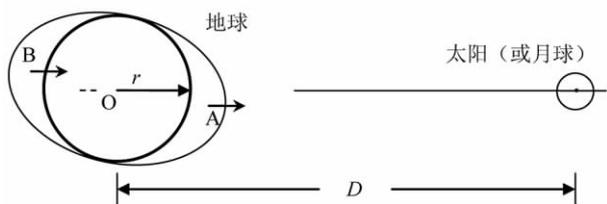


图 1b 二体摄动效应示意图

2 力学模型及数据分析方法简介

2.1 太阳、地球、月球摄动力学模型说明

由于地球不是一个刚体,在自转效应所产生的离心力的作用下,赤道半径将比极半径大,导致地球呈椭球状,其扁率因子为 $1/298.257$ 。由于扁率的存在,使得太阳、月球等天体对其产生摄动效应。

在图 1b 中,正对太阳(月球)的 A 处,其受到太阳引力得到的加速度为 $k^2 m / (D-r)^2$,其中: m 为太

阳(月球)的质量, r 为地球半径, D 是地球到太阳的距离。地心 O 处得到的加速度为 $k^2 m / D^2$,于是 A 相对于 O 点的加速度为

$$k^2 m \left(\frac{1}{(D-r)^2} - \frac{1}{D^2} \right) \approx k^2 \frac{2rm}{D^3} \quad (1)$$

这一加速度使得 A 处受到较正常海平面隆起的力,导致隆起。同理,在背向太阳的 B 点,相对于 O 点的加速度为

$$k^2 m \left(\frac{1}{(D+r)^2} - \frac{1}{D^2} \right) \approx -k^2 \frac{2rm}{D^3} \quad (2)$$

负号表示背着太阳所在的方向,也同样使 B 点受到较正常海平面隆起的力,导致隆起。因此在太阳活动与平静 2 个时期,如果对 A、B 点的隆起力出现变化,将导致地球扁率的变化,在角动量守恒的条件下,将导致地球自转速率的变化。

2.2 FFT 级数展开及小波理论简介

FFT(快速傅里叶变换)是信号调和分中,将时间域满足黎曼积分条件的信号准确变换到频率域的方法,它可以有效分析不同频率成分的信号能量所占的比重及相对初始相位。对于函数或信号数据 $f(t)$,可以展开成无限(在离散变换中等同时间域的长度)多个三角函数之和:

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{in\omega_0 t} \end{aligned} \quad (3)$$

通过分析 C_n 的大小分布,可以选择需要的频点进行信号合成。

小波实际上是在特定空间内按照称之为小波的基函数(FFT 中基函数为三角函数)对数学表达式或记录信号进行展开与逼近。与 FFT 相比,小波基函数大多为具有快速衰减、充分光滑、能量主要集中在一个局部区域的函数 $\psi(x)$ 经过伸缩与平移得到的函数集合 $\left\{ \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \right\}_{a \neq 0, b}$,其中: b 起到平移的作用, a 为伸缩因子。由于同时具有时间和频率的局部特性以及多分辨率特性,使得它对非平稳信号的处理变得相对容易。对于一个函数或信号 $f(t)$,如果进行 n 层小波分解,其分解表达式为

$$f_n(x) = \sum_{k \in Z} a_k^n \varphi(2^n x - k) \quad (4)$$

其中: $\varphi(x)$ 称为尺度函数。它与小波基函数 $\psi(x)$ 一起满足双尺度方程^[12],从而保证在一定准则下获取到小波基函数及对信号进行充分小波分解与重构。同 FFT 类似,可以通过分析分解的各系数相对大

小,有选择地对部分信号内容进行重构。

3 数据计算与分析

3.1 太阳黑子数据拟合及与全球大震的关系

首先我们对太阳黑子长趋势的起伏与全球大震关系进行分析。对太阳黑子数据(1749—2012年)进行FFT变换,可以得到约10.6年的周期存在一个大峰值。展开的傅里叶级数中,取前12项进行合成,发现前12项中随着项数的增加,低阶曲线的2个峰值(1945—1965年,1974—1994年)逐渐隆起,而阶数再增加时开始出现畸变。在这2个峰值区

上,全球6级以上地震的频段明显增大(波动幅度150左右),显示出正相关性,但是地震统计峰值却比这条低频曲线的峰值晚2~5年。这是它们关系的第1个特征。第2个特征是,除了太阳黑子这2个低频峰值的影响外,在周期更小(11年左右)的区间里,当黑子数处于低值区时(即过了一个峰值后约2~3年,到下一个峰值来临前3~4年),地震年统计数上有一个50左右的高值波动。这第2个波动显示的是负相关关系。

3.2 太阳黑子、地球自转速率和华北地震活动的关系

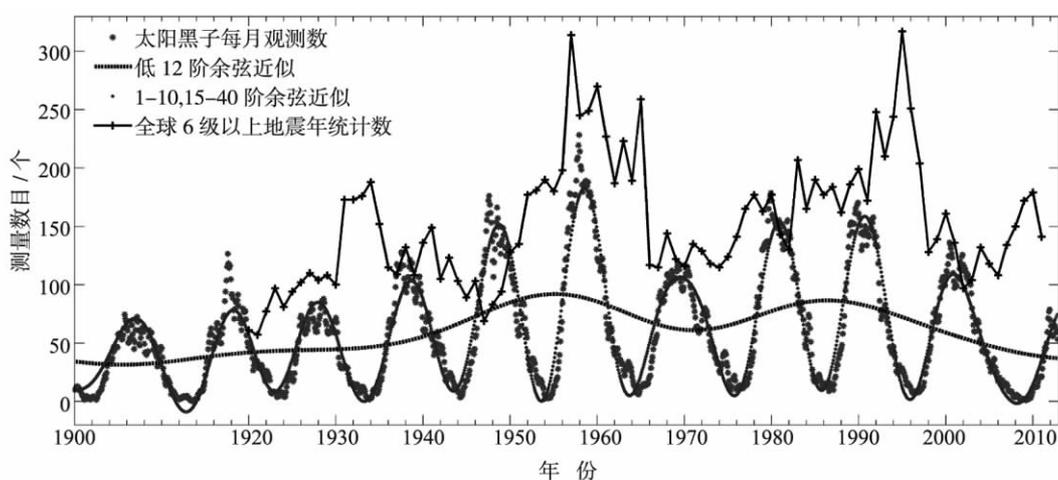


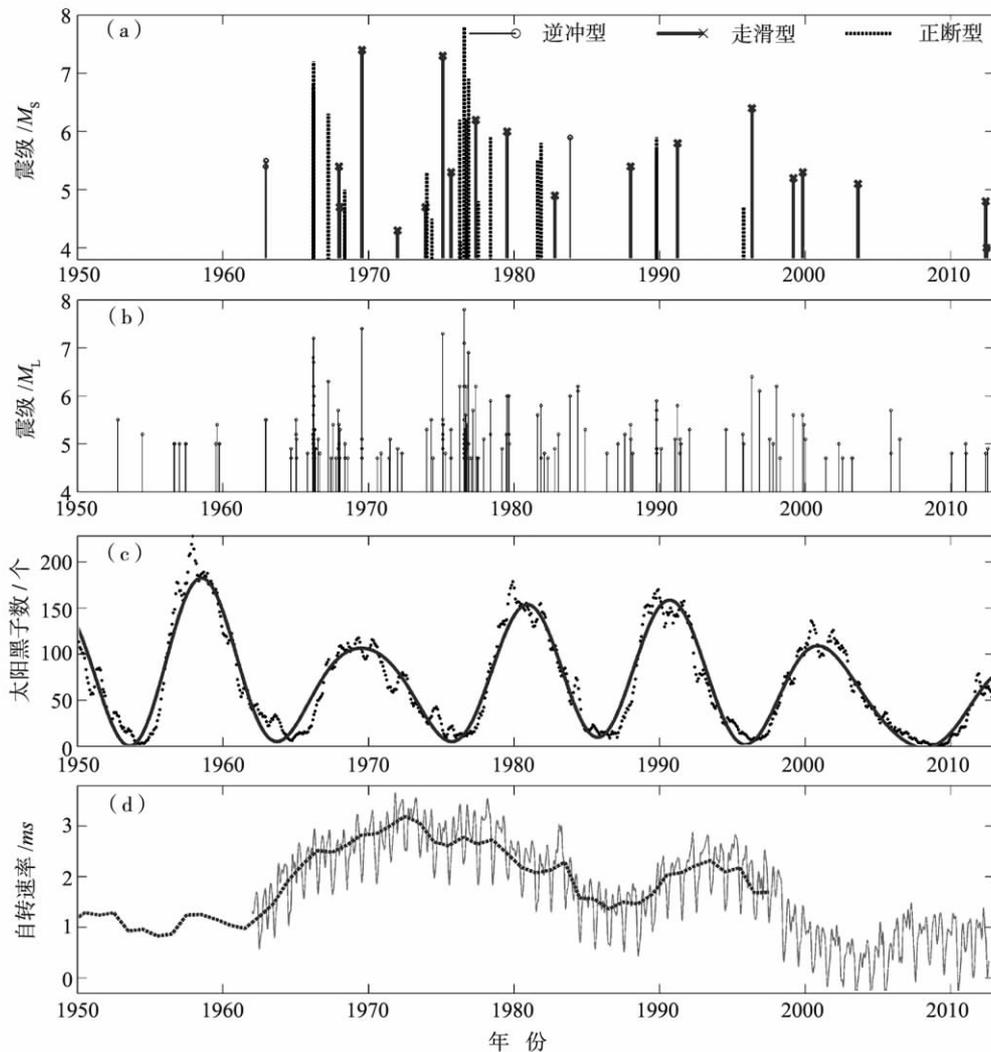
图2 太阳黑子与全球地震分析

图中:带“+”线为全球6级以上地震年统计曲线;虚线为太阳黑子FFT变换后前12阶频点重构曲线;“·”线为第1~10,15~40阶频点的太阳黑子重构曲线;“*”线为太阳黑子月统计曲线(经5点光滑处理)

图3(a)中,震源机制按滑动角进行分类, $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 为走滑, $-160^{\circ} \sim -200^{\circ}$ 为正断, $70^{\circ} \sim 110^{\circ}$ 为逆冲。我们对图3(d)的地球自转速率月统计数据做了小波分解,取出低频的变化部分(图4中的a5),以便更好比较,其d3部分的18.6年左右的波动起伏是太阳、木星、土星对地月系统综合摄动的结果^[1],而d1从1984年后,原始数据给出的方差不再是常数,这应该是引入了新的计算方式得出的。从图3(a)、3(b)中可以看出华北地区地震以走滑为主,有一部分正断,极少量逆冲。对比图3(b)、3(c)发现,1965—1970、1975—1978年华北地震比较多,且震级大。这个时期太阳黑子低频拟合曲线(图2)处于高值区的低值段,地球自转速率较快(图3d),

这个时期的地震变化显得与太阳黑子短周期(11年)起伏的关系更密切。并且1966年、1976年M-t图上的丛集区,都发生在太阳黑子峰值区前4年左右,且这个时期地球自转速率有下降的拐点(约0.5ms起伏)。

总之,太阳大周期(22年)变化,可能引发全球地震年统计波动在150左右,且引起地球自转速率2ms的起伏。而小周期(11年)的变化,可能引发全球地震年统计数50左右的波动。这个影响与华北地区地震活动有11年左右的起伏有对应性。华北地区5级以上的地震一般发生在黑子数处于低值区时(过了一个峰值后约2~3年,到下一个峰值来临前3~4年)。



图中:(a)来自许和 CMT 的震源机制分类后的 M-t 图;

(b) $M_L 4.7$ 以上地震 M-t 图^[8](增补了近 2 年数据);

(c)1950 年来的太阳黑子月统计数及低频拟合;

(d)地球自转速率,点线为 1832—1997 的年统计图,实线为 1962—2012 的月统计图,实线数据是对原数据进行 5 层 dmey 小波分解后重构的低频成分 a5(图 4)。

图 3 太阳黑子、地球自转速率与华北地震活动的关系分析

3.3 太阳黑子、地球自转速率、地震活动的物理关系浅析

太阳黑子作为太阳活动是否剧烈的重要标志之一,由于可以通过可见光及适当的辅助设备仔细观测,所以在 2000 年前就有一定记录,从 18 世纪起,其记录逐步完善。近些年发现太阳黑子存在强磁性,每一周期极性方向改变一次,太阳活动周期是它的 2 倍,为 22 年左右。太阳活动剧烈期间将向外太空抛射大量的物质,并引起太阳外圈层的形态变化。其 CME 事件(日冕物质抛射,Coronal Mass Ejection)在太阳平静期约 0.6 次/天,在活跃时段约 5

次/天(图 5b),每次抛射质量在 $1 \times 10^{11} \sim 4 \times 10^{13}$ kg 之间,平均速度 349 km/s。当 CME 强烈时,太阳扁率增加(在太阳活动周内黑子数高值时扁率较大)而趋向椭圆^[13](图 5a)。从相对性的角度分析,如果两个具有万有引力的旋转椭球的扁率增加,则根据(1)式可知,A、B 点的加速度将增加,向外隆起的力增加,隆起形变量增加,在角动量守恒的条件下,自转速率将减小(图 2、3 中 1961—1985 年太阳低频黑子活动曲线与地球自转速率对比很明显)。因此太阳黑子与地球自转速率呈负相关关系可以定性解释。

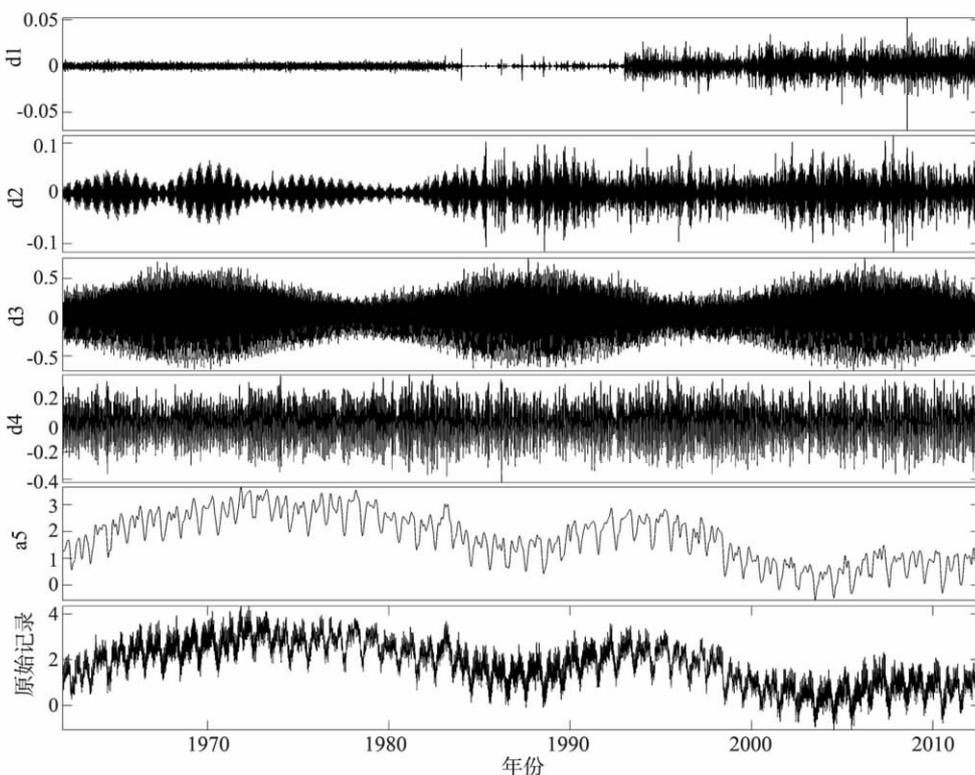
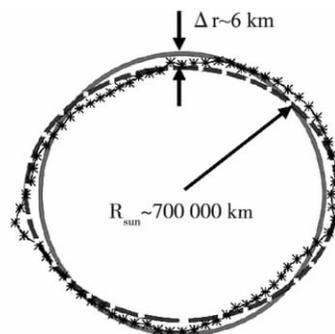


图 4 地球自转速率 dmev 小波分解

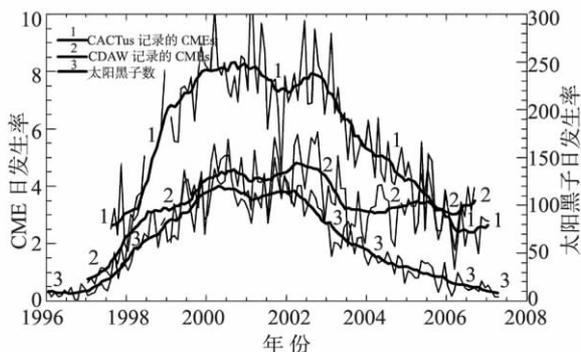
原始记录 = a5 + d1 + d2 + d3 + d4; d3 的 18.6 年周期波动非常明显.

而地球自转速率变化与地震活动的因果关系不是很清楚。一般而言,地球自转速率的变化将导致地球内部圈层力学耦合状态的改变,必然将引起地壳,特别是地震带上应力的重新分布^[14-15],从而可能诱发地震。而大地震可以导致全球自由振荡及局部地形与质量迁移^[16],这种改变亦可以影响地球的自转速率。统计结果发现时间上密集的大震群对地球自转速率具有加速的积累效应^[17]及同震效应^[18]。因此在时间上的同步性,可能也是二者相互影响的表现之一。

但是地球自转速率、地震活动往往比太阳黑子活动滞后,滞后时间 1~4 年,主要表现为 1~2 年。在地磁现象中也存在着地球磁暴滞后太阳黑子活动 1~2 年的情况^[19]。由于光从太阳到地球大约需要 8 分 19 秒,CME 到达地球时间仅需 2~5 天,因此滞后 1~2 年的这种现象使人非常困惑。随着近日卫星(特别是 LASCO 观测仪)近年观测资料的积累,发现 CME 观测数在之前存在漏测现象^[20],其发生率刚好滞后太阳黑子活动峰值 1~2 年(图 5b)。具有强磁性(黑子本影区的磁场强度可达 0.4 T)的黑子活动的减弱,可能降低了对太阳外层物质对流的影响,从而有利于大规模的太阳日冕活动及物质



(a) 太阳扁率变化,形变量放大 10 000 倍. 太阳活跃时扁率增大近似椭圆(虚线),带“*”为观测结果;



(b) 太阳黑子与 CME 发生率的时间关系,CME 比太阳黑子活动滞后 1~2 年. 图件改自文献^[11-13].

图 5 太阳外层形状变化与太阳活动强度

喷射,并且对太阳外层形状进行改变及对质量进行重新分布。而这些改变的时间恰恰与地球自转速率的变化、地球活动的增强有时间同步性。而其辐射的大量带电粒子流所产生的空间磁场变化,也给地球磁暴提供时间同步性的解释^[11]。

4 结论与建议

本文应用傅里叶级数展开、小波分解等方法,通过对地震目录、太阳黑子、地球自转速率的关系进行分析,并咨询了南京大学天文系陈鹏飞教授有关CME的一些特征及与太阳黑子的关系,得到了一些认识:

(1)扁率不为零的旋转椭球天体,当其中之一或二者扁率发生变化时,被吸引的天体的自转速率将发生变化;扁率变大,被吸引天体的自转速率减少。当CME处于强爆发时段时,地球自转速率减小(如2001年左右)。

(2)太阳黑子近90年来的2次大的峰值区(1945—1965年、1974—1994年),地球地震活动对应高值。这个时间内,太阳处于活动相对剧烈期,黑子活动和CME事件可能都很强烈(但是CME数据在1996年前可能存在漏测)。

(3)CME发生率滞后太阳黑子1~2年,这为我们解释地球自转速率、地震活动滞后太阳黑子活动1~3年的现象提供了一定的依据。

(4)地球自转速率与地震活动的因果关系。由

于观测的同步性变化量较小,二者的起始时间不是非常明确,所以二者中何为主导尚需进一步分析。但是大震后的自转速率同震效应确实存在。

(5)由于地球自转速率变化和地震活动一般在太阳黑子高度爆发(如文中22年跨度的事件),以及11年左右的小周期前1个峰值2~3年后至下一个峰值3~4年前这段时间内比较活跃,因此在这些时段,应考虑太阳活动(特别是CME)对地震活动的影响。

当然,决定事物的发展变化主要由内因引起,地球外太空环境对地球的影响要通过地球内部自身应力场的变化来增加发震的可能,太阳(黑子)活动对地震活动可能只产生诱导因素。太阳黑子活动和地震活动不存在明显准周期性的差异,也值得我们在给出太阳活动对地震活动影响时要格外慎重。可以进一步对地震目录分类,从浅震、深震、不同震源机制、不同地震断裂带、纬度带效应、两事件发生的时间前后性等因素进行分析,以获得更可靠的结论。另外,CME受早期观测技术的制约,在1996年前的数据可能不完整,近年仍在研发新的观测手段以保证CME的准确观测以及完整性,因此,CME是否可作为影响地球自转速率变化的关键因素还需进一步的检验。

致谢:南京大学陈鹏飞老师对CME与太阳黑子的关系给予了一定的指导,在此非常感谢。

参考文献:

- [1] 苏宜. 天文学新概念[M]. 北京:科学出版社,2009:22-100.
- [2] 杨马陵,塔青. 太阳黑子活动与新疆强震活动关系[J]. 内陆地震,2012,26(1):10-16.
- [3] 张桂清. 全球性地震活动与太阳活动的关系[J]. 地震学报,1998,20(4):427-431.
- [4] 尹继尧,朱元清,宋治平,等. 中国西部及邻区百年尺度周期的地震活动及其和太阳活动之间的负相关性[J]. 地球物理学报,2011,54(9):2263-2271.
- [5] Solar Influences Data Analysis Center. Sunspot Number[EB/OL]. (2013-4-1)[2012-9-16]. http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/spot_num.txt
- [6] Earth Orientation Center. Earth orientation data[EB/OL]. (2013-3-28)[2012-9-10]. <http://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.html>
- [7] 宋治平,张国民,刘杰,等. 全球地震目录[M]. 北京:地震出版社,2011:15-439.
- [8] 《中国地震目录》(公元前23世纪—公元2010年5月),中国地震局监测预报司预报管理处整编,2010,163-176.
- [9] 许忠淮. 东亚地区现今构造应力图的编制[J]. 地震学报,2001,23(5):492-501.
- [10] 邓起东,张培震,冉勇康,等. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学,2002,32(12):1020-1032.
- [11] Chen P F. Coronal Mass Ejections: Models and Their Observational Basis [J]. Living Rev. Solar Phys, 2011, 8(1):1-92.
- [12] 成礼智,王红霞,罗永. 小波的理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2004:55-106.
- [13] Tony Phillips, Hugh Hudson. NASA Spacecraft Finds the Sun is Not a Perfect Sphere [J]. NASA Goddard View, 2008,4(7):3.
- [14] 王连捷,张利容. 地球自转速率变化引起的全球应力场[J]. 地质力学学报,1997,3(3):12-20.
- [15] Gaia S, Giorgio S. Large earthquakes and Earth rotation: the role of mantle relaxation [J]. Geophys. Res. Lett, 1999, 26(7):911-914.
- [16] 陈运泰,黄立人,林邦慧,等. 用大地测量资料反演的1976年唐山地震的位错模式[J]. 地球物理学报,1979,22(3):201-217.

- [17] 顾震年. 地震引起地球自转速率变化的分析[J]. 云南天文台台刊, 1997, (2): 61-67.
- [18] Space Center staffs. How the Japan Earthquake Shortened Days on Earth[EB/OL]. (2011-3-13)[2012-8-11]. <http://www.space.com/11115-japan-earthquake-shortened-earth-days.html>
- [19] 徐文耀. 地球电磁现象物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 529-536.
- [20] 方成, 丁明德, 陈鹏飞. 太阳活动区物理[M]. 南京: 南京大学出版社, 2008: 178-298.

Some Analyses of the Impact of Sunspots Activities on Earthquakes

LIU Shuang-qing, CAO Jing-guan, ZHANG Lei, LI Yue

(Earthquake Administration of Tianjin Municipality, Tianjin 300201, China)

Abstract: In this article the data mining methods of harmonic FFT and wavelet analysis are implemented to analyze the relation between these data sets: monthly sunspots recorded from 1749; global earthquakes $\geq M_s 6$ from 1920; north China earthquakes $\geq M_L 4.7$ from 1950; annual LOD of Earth recorded from 1832 to 1997 and monthly LOD of Earth from 1962. Two main conclusions are given as: (1) during high Sun activity time, Earthquakes activities also are in a high level albeit which occurrence postponed for 2-5 years. At that time, LOD of Earth is at a low speed. This time span is about 22 years. (2) in the normal evolvement of sunspots cycle of 11 years, during the low sunspots numbers Earthquakes will be increased albeit which occurrence postponed for 1-2 years. Considering the characteristic of their occurrence subsequence and postponing between the sunspots and CME activities, we think of the 11 years change of Earthquakes activities is indirectly due to impact of the sunspots, and yet influenced by the CME. Its reason comes from the fact of the CME occurrence rate rise sharply after just 1-2 years as the sunspots magnetism descend. Strong CME will increase Sun apparent oblateness, and continually throw out a huge matter of up to 10¹³kg one time, which result in the synchronous change of LOD of Earth as the celestial perturbation and enhancement of earthquakes activities.

Key words: earthquake activities; sunspots; CME; harmonic analysis; hysteresis effect

欢迎订阅《华北地震科学》

《华北地震科学》是由河北省地震局主办的地震科学综合性学术刊物, 国内公开发行人。主要刊登地震学方面具有创新性的研究成果, 也登载地球物理、地震地质、地震工程等方面的学术论文及国内外地震科学研究的最新进展和成果。

《华北地震科学》均为季刊, 每季末出版, 每年 4 期, 每期定价 15 元, 全年定价为 60 元(含邮寄费)。2012 年继续由编辑部直接发行。凡欲订本刊的读者可通过全国非邮发报刊联合发行部或与本刊编辑部联系均可。

(1) 全国非邮发报刊联合征订服务部

邮 编: 300381

地 址: 天津市卫津南路李七庄邮局 9801 信箱全国非邮发报刊联合征订服务部

电 话: 022-23973378, 23962479

电子邮件: LHZD@public.tpt.tj.cn

(2) 本刊编辑部

邮 编: 050022

地 址: 石家庄市槐中路 262 号《华北地震科学》编辑部

电 话: 0311-85814313

电子邮件: he3g@eq-he.ac.cn