

地磁急始年发生数周期特征的小波分析

乐贵明 叶宗海

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

采用小波分析方法分析了急始年发生数的时间序列的周期特征, 并对急始发生数的特征与太阳黑子相对数的特征进行了简要的对照分析, 分析结果表明, 急始发生数的周期规律与太阳黑子相对数的周期规律是有差异的. 还进行了太阳黑子相对数与急始数的相关性, 太阳黑子相对数与急始磁暴的相关性研究, 分析结果表明它们之间显著相关. 还对急始数与急始磁暴数以及其他的一些参数之间的相关性进行了分析, 最后对分析结果进行了讨论.

关键词 太阳黑子; 地磁急始; 急始磁暴; 小波分析

1 引言

地磁急始(可以简称急始, SC)是由日冕物质抛射(CME)驱动的扰动太阳风引起的, 如果CME到达磁层附近时形成较强的行星际磁场南向分量, 将引起急始型磁暴, 而磁暴是灾害性的空间天气, 磁暴期间磁层发生一系列的物理过程, 对航天器、通信、甚至对地面设备造成不利的影响, 尤其是大的磁暴. 最近几年的研究表明^{[1]~[4]}, 绝大多数急始型的大磁暴是由CME引起的, 快速CME到达磁层时往往引起急始型磁暴(地磁场水平分量突然增加, 然后大幅度下降). 其中CME到达磁层附近时形成的磁场南向分量的大小是影响磁暴强弱的一个重要因素, 最新的研究表明^[5], CME到达磁层附近时形成的磁场南向分量可以是CME本身携带的, 也可以是快速CME与背景太阳风相互作用引起的, 而且后者引起的急始型磁暴的总数不低于前者. 如果CME到达磁层时没有形成一定强度的南向分量, 那就只有急始而没有磁暴. 无论是急始磁暴还是仅仅是地磁急始, 行星际磁场都会出现一定的扰动, 都会造成银河宇宙线强度出现Forbush下降^[6], 因此, 在利用宇宙线强度的变化来预测灾害性空间天气时, 除了要注意行星际的磁场扰动外, 还应该注意扰动磁场的南向分量, 因为行星际磁场的南向分量是形成磁暴的一个非常重要的因素. 本文分析的急始数时间序列是从1886年开始记录的年发生数, 这个数量序列是一个时间序列. 过去在分析时间序列数据的周期特征时, 往往采用经典的谱分析方法如Fourier分析和近代的谱分析方法如熵谱分析, 这些谱分析方法主要缺点是不能分析信号的局部时频特征, 而小波分析能够分析信号的局部时频特征, 可以分析任意一个信号各种不同的周期特征随时间变化的情况. CME是一种强烈的太阳活动, 地磁急始和急始型磁暴都是由CME引起的, 相比之下, 地磁急始数更能反映太阳活动的剧烈程度. 因此, 本文研究急始发生的周期规律并与太阳黑子相对数的规律进行对照分析, 同时我们还进行了太阳黑

2002-05-18 收到原稿, 2003-03-02 收到修定稿

子相对数与地磁急始的相关性分析, 地磁急始与急始磁暴等的相关性分析, 并做了简要讨论.

2 数据分析

通常在太阳活动的高年, 太阳活动比较剧烈, 耀斑、质子事件与 CME 事件频繁发生, 因此, 我们先给出太阳黑子相对数的时间序列, 如图 1 所示. 从图 1 可以看到, 1957 年的太阳黑子相对数是黑子相对数序列中黑子相对数最多的 1 年. 由于急始的年发生数从 1886 年才开始有记录, 因此, 我们只给出 1886 年以后的太阳黑子相对数, 图 1 中的纵坐标太阳黑子相对数用 SRN 表示.

地磁急始的年发生数的时间序列如图 2 所示, 图 2 中的横轴为时间, 纵轴为地磁急始的数量, 标为 GSCN. 从图 2 我们可以看到, 在太阳黑子数最多的 1957 年, 地磁急始的数量并不是最多的 1 年, 地磁急始数最多的 1 年是 1989 年, 另外 1937 年和 1938 年急

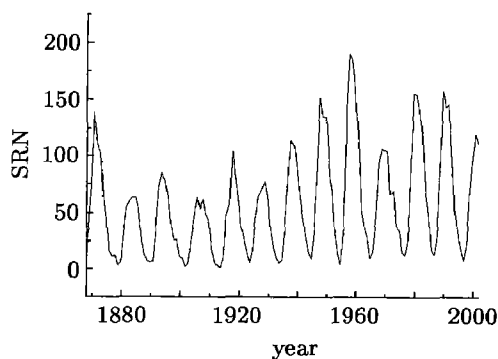


图 1 太阳黑子相对数的时间序列
Fig.1 Sunspot relative numbers series

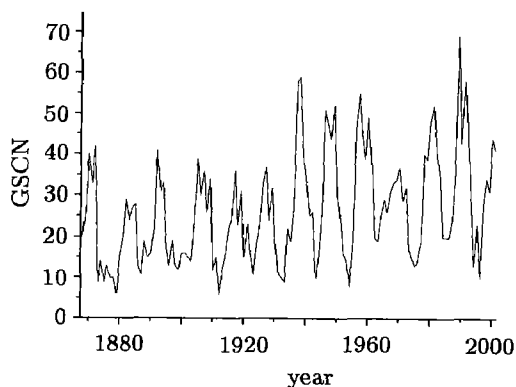


图 2 地磁急始数的时间序列
Fig.2 The geomagnetic sudden commencement number series

始的数量也比 1957 年多. 这说明, 能够到达地球引起急始的 CME 数量并不完全反映太阳黑子数的情况. 下面我们采用小波分析方法来分析图 2 所示的地磁急始年发生数的时间序列.

有些序列的规律特征难以在时间域看出来, 但在频域里面能够清楚地显示它的物理规律, 过去在分析这类信号特征时, 通常采用 Fourier 分析, Fourier 分析对为

$$f(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt. \quad (1)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\omega)e^{i\omega t} d\omega. \quad (2)$$

从式 (1)、(2) 可以看到, 某一频率的信号是由整个时间轴上的信号特征确定的, 而某一时刻的信号是由整个频率轴上的信号特征决定的. 因此, Fourier 分析无法给出信号的局部时频特征.

信号 $f(t)$ 的小波分析的定义^[7]为

$$W_f(a, b) = \int_R f(t) \bar{\Psi}_{ab}(t) dt. \quad (3)$$

其中,

$$\Psi_{ab}(t) = |a|^{1/2} \Psi(at - b). \quad (4)$$

是由 $\Psi(t)$ 经平移和缩放的结果. 允许小波函数 $\Psi(t)$ 必须满足条件

$$\int_R \Psi(t) dt = 0. \quad (5)$$

本文采用的小波为 Morlet 小波函数. Morlet 小波是 Gauss 函数与余弦函数的内积, 即本文采用的小波函数为

$$\Psi(t) = \exp(-at^2) \cos(t). \quad (6)$$

该小波满足条件 (3). 小波分析的特征是函数 $\Psi_{ab}(t)$ 做窗函数时, 该窗是自适应的, 通过改变 a, b 可以改变窗的位置和大小, 从而可以得到观测信号的各种频率 (或周期) 在各个时刻的特征, 即小波分析可以得到时变信号的局部特征.

图 3 为急始年发生数的小波分析, 其中图 3(a) 为一维小波的变换谱图, 从该图可以看到地磁急始发生数最明显的周期是 8—16 年之间的周期段, 另一个相对较弱的周期段是 32—64 年之间的周期段, 第三个是 16—32 年之间的周期段. 图 3(b) 为急始发生数的小波分析的等值线图, 从该图可以清楚地看到最明显的周期是 8—16 年之间的周期段.

在图 3(a) 中, 我们找出的最大值点对应的时间是 1948 年, 对应的周期是 10.556 年. 地磁急始年发生数最强周期出现的时间既不是太阳黑子相对数最大的 1957 年, 也不是磁暴年发生数最多的 1989 年, 而是 1948 年. 最强的周期不是 11 年, 也不是 11.2 年, 而是 10.556 年. 这也说明, 地磁急始出现的周期特征与太阳黑子相对数的周期特征是有区别的. 在 16—32 年之间的周期段, 最强的周期是 24.25 年, 出现时间是 1975 年. 在 32—64 年之间的周期段, 最强的周期是约 42.22 年, 出现时间是 1968 年.

从图 3 可以看到, 地磁急始序列较清晰的周期是低于 64 年以下的周期. 为了能够看清太阳黑子数序列与地磁急始数序列的周期差异, 我们给出了它们的一维小波变换的等值线图 (见图 4).

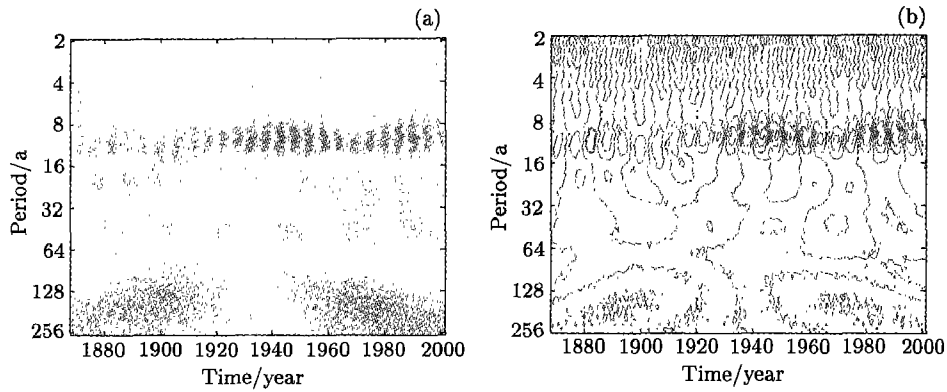


图 3 (a) 急始数的一维小波变换图, (b) 急始数一维小波变换等值线图

Fig.3 (a) The wavelet spectrum of the SC series, (b) The wavelet analysis contour of the SC series

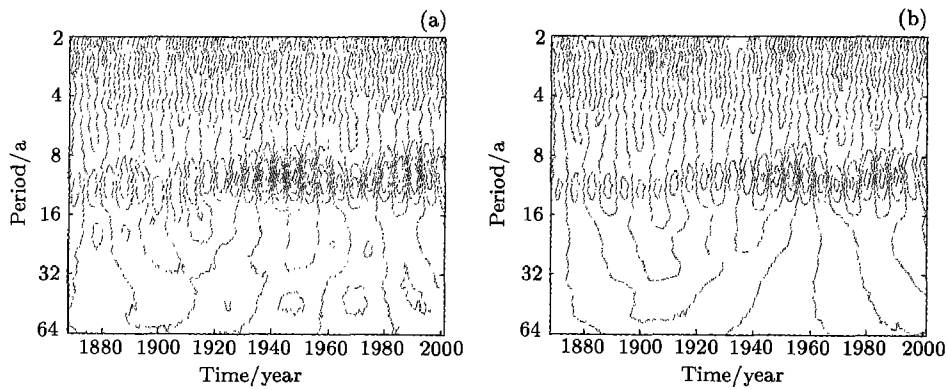


图 4 (a) 急始数一维小波变换等值线图, (b) 太阳黑子数的一维小波变换等值线图

Fig.4 (a) The wavelet analysis contour of the SC series,

(b) The wavelet analysis contour of the sunspot number series

从图 4(a) 可以看到, 地磁急始序列的 16—32 年之间的周期和 32—64 年之间的周期都比太阳黑子数序列的对应的周期要明显. 即使 11 年左右的周期两者也有差异.

下面我们进行地磁急始数与太阳黑子相对数的相关性分析. 对于任意两列离散序列 $\langle x_i \rangle, \langle y_i \rangle$, 它们的相关系数的计算公式定义为^[8]

$$r_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i = \frac{1}{n} \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s_x} \right) \left(\frac{y_i - \bar{y}}{s_y} \right). \quad (7)$$

(7) 式中的 n 为两个序列数据的长度, $\bar{x}, \bar{y}$ 为 x, y 序列的平均值, s_x, s_y 为两个序列的标准差. 依据式 (7) 进行计算, 我们得到太阳黑子相对数与急始数的相关系数为 0.8715, t 检验的公式为

$$t = \frac{r_{xy} \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}}. \quad (8)$$

由于样本数为 $n = 134$, 把 r_{xy} 和 n 代入式 (8) 得到 $t = 20.42$, 其置信度超过 99%, 说明太阳黑子相对数与急始数是高度相关的。

对于太阳黑子相对数与急始磁暴数的相关分析, 我们采用 1979 年以来的数据, 其中 1979—1999 年急始磁暴的数据我们依据国家地震局地球物理所磁暴数据库网站 * 提供的数据来统计每年急始磁暴的数目, 2000 与 2001 年的急始磁暴数则依据国家地震局的地磁报告。经过计算我们得到太阳黑子相对数与急始磁暴的相关系数为 0.849 2, 是显著相关的, 在这个同一时段的太阳黑子相对数与急始数的相关系数为 0.889 6。采取同样的方法我们进行了其他参数间的相关性分析, 分析结果是急始数与急始磁暴数的相关系数为 0.851 92, 置信度超过 99%; 急始数与总磁暴数的相关系数为 0.736 8, 置信度超过 99%。急始磁暴数与总磁暴数的相关系数为 0.924 5, 置信度超过 99%。

以上分析说明太阳黑子相对数与地磁急始数的相关性大于太阳黑子相对数与急始磁暴的相关性。另外, 我们还得到急始与急始磁暴的相关性大于急始与总磁暴数的相关性。这是很显然的, 因为, 总磁暴数包含了缓始型的磁暴数目。

3 结果与讨论

从以上分析我们发现, 急始发生数最明显的周期特征是 8—16 年之间的周期段, 在这个周期段中最强的周期是 10.556 年, 出现时间是 1948 年。两个相对较弱的周期分别为 16—32 年之间的周期段和 32—64 年之间的周期段。其中 16—32 年之间的周期段的最强周期为 24.25 年, 出现时间为 1975 年, 而 32—64 年之间的周期段的最强周期为 42.22 年, 出现时间是 1968 年。分析结果表明, 太阳黑子相对数与急始数和急始磁暴数都是显著相关的且前者的相关性高于后者。急始数与急始磁暴数和总磁暴数也是显著相关的。

急始年发生数的时间序列与太阳黑子相对数的时间序列并不是同步的, 最明显的差异首先表现在两者最大值的时间并不相同。太阳黑子相对数的最大值为 1957 年, 而急始年发生数的最大值为 1989 年, 这两个时间差异很大。急始发生数的小波分析结果指出, 最强的周期是 10.556 年, 既不是 128 个月, 也不是 11 年, 更不是 11.2 年。这个最强周期出现在 1948 年, 既不是太阳黑子相对数的最强年 1957 年, 也不是急始型磁暴年发生数的最大年 1989 年。此外, 急始序列的 16—32 年之间的周期和 32—64 年之间的周期都比太阳黑子相对数序列对应的周期要明显。因此, 急始发生数的周期特征与太阳黑子相对数的周期特征是有差异的。

由于从 1886 年就开始记录有急始的年发生数, 而急始磁暴发生数的记录要晚得多。如果采用急始磁暴数的序列来分析急始磁暴的周期特征, 则由于数据记录的长度不够而难以体现急始磁暴发生数的周期特征。本文的分析结果说明, 尽管地磁急始与太阳黑子相对数显著相关, 但两者的周期特征还是有一定的差异。因此, 急始磁暴发生规律与太阳黑子相对数, 急始磁暴的规律与急始的周期规律也可能不同, 急始磁暴的周期规律还是应该由急始磁暴数序列本身决定。因此, 我们不能完全依据太阳黑子相对数的情况来预测急始型磁暴发生数的情况, 这使依据太阳黑子相对数进行时间提前量较大的磁暴预测的难度

* <http://www.geomag.ac.cn>

增加,反之,利用地磁先兆来预测太阳黑子相对数也是非常困难的。从目前已有的对 23 周太阳黑子相对数的长期预测^{[9]—[11]}看,除少数预测较准外,多数预测与实际都有较大偏离。由于对太阳黑子相对数进行时间提前量较大的准确预测不是一件容易的事,因此,依据太阳黑子相对数来进行急始型磁暴发生数情况的长期预测就更困难。可以说,磁暴预报任重道远。

资料来源 本文的太阳相对数黑子序列取自 <http://sidc.oma.be/index.php3> 网站。地磁急始的时间序列取自 ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUDDEN_COMMENCEMENTS/。

参 考 文 献

- [1] Wang Jialong. Solar coronal mass ejections in space weather. *Prog. Geophys.*, 1999, 14(supp):8—19. in Chinese (王家龙. 日冕物质抛射——空间天气的扰动源. 地球物理学进展, 1999, 14(增刊):8—19)
- [2] Gao Yufen, Zhang Xiuling. Relations between IMF B_z events and intense magnetic storms. *Chin. J. Space Sci.*, 2000, 20(2):136—143. in Chinese (高玉芬, 张秀玲. 强地磁暴与行星际磁场南向分量. 空间科学学报, 2000, 20(2):136—143)
- [3] David F. Webb B. Coronal mass ejections: origins, evolution, and role in space weather. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2000, 28(6):1 795—1 806
- [4] Plunkett S P, Shi Tsan Wu. Coronal mass ejection (CMEs) and their geoeffectives. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2000, 28(6):1 807—1 817
- [5] Vennerstroem S. Interplanetary source of magnetic storms: A statistical study. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(A12):29 175—29 184
- [6] Kudela K, Brenkus R. Cosmic Ray Decrease and Geomagnetic Activity: List of Events 1982—2002. Frankfurt Germany: Special Workshop, 2003. 20—23
- [7] Xu Changfa, Li Guokuan. Practical wavelet method. Wuhan: Huazhong University of Science Technology Press, 2001. in Chinese (徐长发, 李国宽. 实用小波分析. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001)
- [8] Huang Jiayou. Statistical analysis and forecast methods in meteorology. Beijing: Meteorology Press, 2000. in Chinese (黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法, 北京: 气象出版社, 2000)
- [9] Tian Jianhua, Fan Quanfu. Predication of the characteristic values of the sunspot numbers for solar cycle 23. 1999, 14(supp):93—98. in Chinese (田剑华, 范权福. 第 23 太阳活动周的黑子峰值特征值预报, 地球物理学进展, 1999, 14(增刊): 93—98)
- [10] Obridko V N. Some comments on the problem of solar cycle prediction. *Solar Phys.*, 1995, 156(1):179—190
- [11] Wang Jialong, Han Yanben. Similar cycle method and a discussion of predicted monthly sunspot numbers for solar cycle 23. *Chin. J. Space Sci.*, 2000, 20(3):278—283. in Chinese (王家龙, 韩延本. 相似周方法及对第 23 周太阳黑子数月值预测的讨论. 空间科学学报, 2000, 20(3):278—283)

WAVELET ANALYSIS OF YEARLY GEOMAGNETIC SUDDEN COMMENCEMENT SERIES

LE Guiming YE Zonghai

(Center for Space Science and Applied Center, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

The coronal mass ejections (CMEs) are the most important source causing calamitous space weather. If a CME carries strong southward magnetic field component and last for a prolonged period of time then it can cause geomagnetic storm with sudden commencement, otherwise it just causes geomagnetic sudden commencement. Both geomagnetic activities have sudden commencement. The paper analyzes the geomagnetic sudden commencement number (GSCN) series with wavelet technique to get its periodic properties and the results show that the most evident periods of the GSCN are the periods around 11 years, the strongest period of the GSCN is 10.556 years and reaches its maximum in the year 1948. Two weaker periods of the GSCN are the periods during 16—32 intervals and the periods during 32—64 intervals. The strongest period for the interval 16—32 years is 24.25 years, while the strongest period for the interval 32—64 years is 42.22 years. The paper also computes the correlation coefficient between sunspot number series and geomagnetic sudden commencement number series, the correlation coefficient of the two series is 0.8896. The correlation coefficient of the sunspot number series and geomagnetic storm with sudden commencement number series is 0.8492 which is lower than 0.8896.

Though the correlation coefficient of the sunspot number data series and geomagnetic sudden commencement is high, the periodic properties of the two series are not the same. Firstly the periods of the GSCN around 11-year are not the same for the two series, secondly the periods between 16—32 years of the GSCN are more evident than that of sunspot number series, thirdly the periods between 16—32 years of the sudden commencement series are still more evident than that of sunspot number series.

Key words Solar sunspot number, Geomagnetic sudden commencement, Geomagnetic storm with sudden commencement, Wavelet