

太阳黑子数及 A_p 指数周期变化 特征的小波分析^{*}

苗 娟 田剑华

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

林振山

(南京大学大气科学系)

摘 要

应用 Morlet 小波变换方法从多个变化尺度上对 1932—2000 年的太阳黑子数及 A_p 指数的变化特征进行分析. (1) 太阳黑子数存在准 11 年、准 32 年的周期变化特征及 A_p 指数存在准 32 年、准 11 年、准 6 个月、准 27 天和准 13.9 天的周期变化特征; (2) 太阳黑子数及 A_p 指数有着相似的准 11 年周期变化, 但 A_p 指数极值的出现要比太阳黑子数极值出现滞后 1—2 年; (3) A_p 指数准 27 天的周期变化在太阳黑子活动高、低年不同, 在太阳活动低年, A_p 指数有着较稳定的准 27 天周期变化, 但在太阳活动高年, 27 天的周期变化几乎消失, 这种周期变化的消失和出现时间可在 Morlet 小波变换图中体现出来.

关键词 Morlet 小波变换; 太阳黑子数; A_p 指数

1 引言

由于小波变换分析在时域与频域同时具有良好的局部性, 它可将信号或图像分解成交织在一起的多尺度成分, 并对不同尺度 (层次) 成分采用相应时域或空域取相同步长, 从而能够不断地聚焦到所研究对象的任意微小细节^{[1]—[3]}, 近 10 多年作为工具和方法上的重大突破小波分析被广泛地应用到信号处理、地震探测、湍流、雷达监控、大气科学研究以及非线性科学等领域, 近年来我们开始把小波分析方法引入到空间科学领域.

作为太阳活动重要标记的太阳黑子数以及表征地磁活动状况的 A_p 指数的变化特征受到科学家的特别关注. Gonzalez^[4] 曾用 Fourier 变换对太阳黑子数及 A_p 指数的变化进行分析, 但由于 Fourier 变换只能分析一段时间内的时频特征, 而无法知道太阳黑子数和 A_p 指数的变化周期何时消失, 又何时出现, 而小波分析能够体现变化的详细过程. 因此本文采用 Morlet 小波变换对近 69 年太阳黑子及 A_p 指数的变化进行了多尺度分析.

2 小波分析方法简介

小波基具有正交性局部性和 k 阶消失矩阵等良好性质, 这些性质使得小波分析适合于对信号进行多尺度、局部分析以及奇异分析. 小波变换的主要思想是平移和伸缩, 小波

2002-09-26 收到原稿, 2003-11-07 收到修定稿

母函数 $\Psi(x)$ 的子小波 $\Psi_{ba}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$, 其中, $a > 0$ 为伸缩尺度, b 为平移参

数, 若 $f(x)$ 为平方可积函数, 即 $\int_{-\infty}^{+\infty} |f(x)|^2 dx < \infty$, 则其连续小波变换为

$$W_{ba}f(x) = \Psi_{ba}(x) * f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_{ba}(x)f(x)dx. \quad (1)$$

重构公式为

$$f(x) = \frac{1}{C_\Psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_{ba}f(x) \Psi_{ba}(x) \frac{da db}{a^2}. \quad (2)$$

本文使用 Morlet 小波, 其母函数为

$$\Psi(x) = e^{icx} \exp(-x^2).$$

显然, Morlet 小波是周期函数 e^{icx} 经过 Gauss 平滑得到的, 它的伸缩尺度 a 与 Fourier 分析中的周期 T 有一一对应关系: $T = \frac{4\pi}{C + \sqrt{2 + C^2}} a$, 且可分别作“模”、“实部”、“位相”的小波变换图, 进行多方位研究.

3 太阳黑子数及 A_p 指数的多尺度分析

本文计算数据取自于 NOAA 的 Space Environment Center (SEC), 太阳黑子数所用的资料为 1701—2000 年的年平均变化值, 但为了与 A_p 指数对应, 本文选取 1932—2000 年时间段的资料来讨论, A_p 指数为 1932 年 1 月—2000 年 12 月的日平均值和月平均值. 这些数据主要覆盖了第 17—22 太阳活动周和第 23 太阳活动周的上升期.

图 1、图 2 分别为 1932—2000 年年平均太阳黑子数和 A_p 指数 (A_p 指数的年平均值是通过对月平均值计算所得) 的 Morlet 小波变换的实部等值线图, 等值线图表示通过小波变化之后信号的强弱 (实线表示正值, 即信号高于定常部分的变化; 虚线表示负值, 信号低于定常部分的变化). 计算时为减小边界影响, 在资料两端对称地延伸. 由于 Morlet 子波变换的分辨尺度和傅里叶分析上的周期有很好的对应关系, 所以本文纵坐标直接标出周期.

从图 1 的正负分布, 我们可以看出年平均太阳黑子数在整个时段上有明显的准 11 年和准 32 年的周期变化. 分析图 2 我们看到, 年平均 A_p 指数也存在准 11 年及准 32 年周期变化, 但看到准 11 年周期特征在 1962—1972 年间有所改变, 之后又恢复. 比较了图 3 太阳黑子数和 A_p 指数在 10.6 年尺度上的小波变换系数的变化, 看到 A_p 指数的准 11 年变化是跟随太阳黑子数的变化而变的, 其极值的出现要比太阳黑子数极值出现滞后 1—2 年, 1962—1972 年 A_p 准 11 年周期的改变体现在 A_p 指数的小波变换系数出现了双峰. 关于 32 年周期变化情况, 由于数据资料长度的限制及对其稳定性的争议, 还有待于进一步研究.

图 4(a)—(c) 是不同时段の日平均 A_p 指数 Morlet 小波变换图 (由于数据较多, 在此只选用部分数据), 图 4(a)、图 4(b) 分别给出了 1974 上半年和下半年在 2—64 天尺度上小波分析, 可以看出 A_p 指数主要具有明显的准 27 天的周期变化特征, 同时可以看到, 准

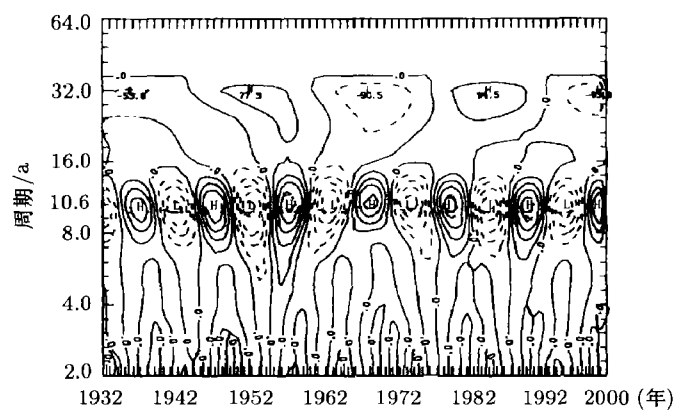
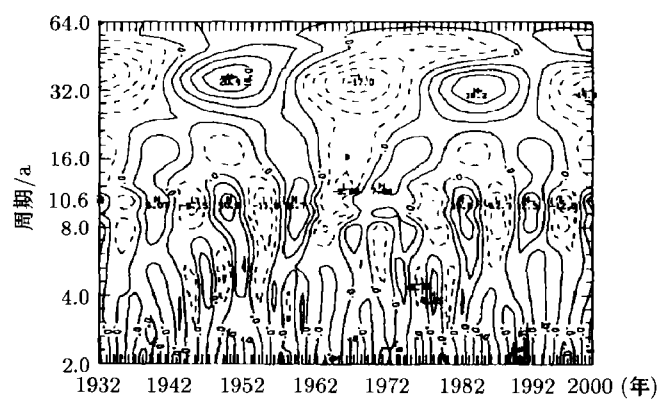
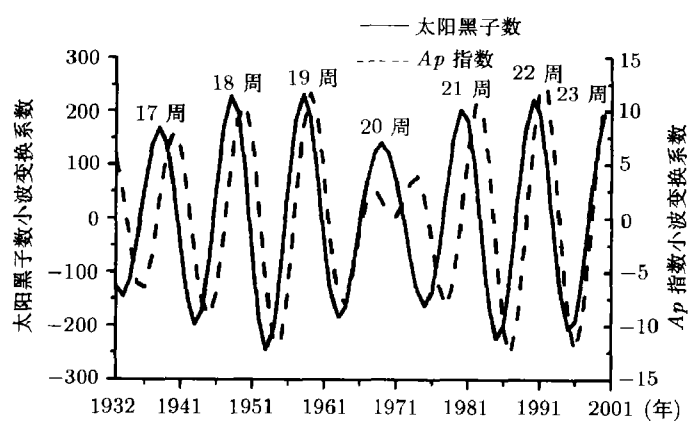
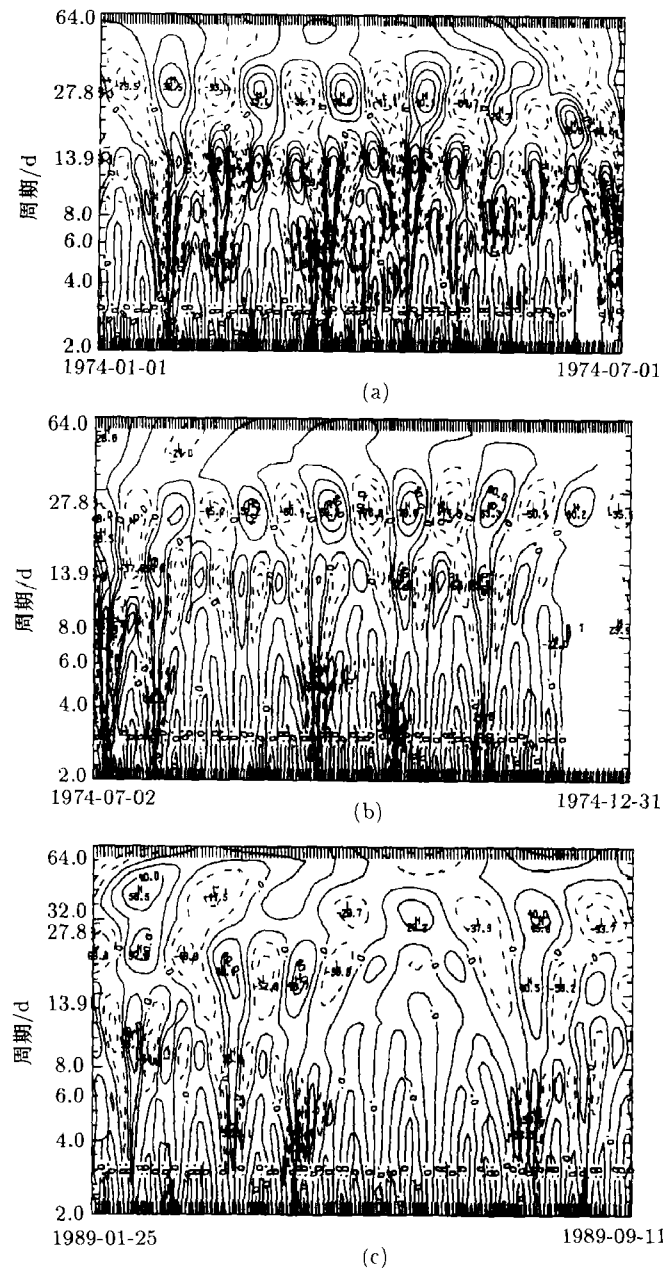


图 1 年平均太阳黑子数小波变换图

Fig.1 Morlet transform of yearly mean sunspot number

图 2 年平均 A_p 指数小波变换图Fig.2 Morlet transform of yearly mean A_p index图 3 年平均太阳黑子数与 A_p 指数在 10.6 年尺度上的比较图Fig.3 Comparing of yearly mean sunspot number and A_p index on 10.6 year level

图 4 日平均 A_p 指数小波变换图Fig.4 Morlet transform of daily mean A_p index

13.9 天的周期变化也存在. 图 4(c) 是 1989 年的变换情况, 可以看出, 准 27 天的周期发生变化, 前几个月周期出现震荡, 在后几个月周期则转化为较稳定的准 32 天, 而准 13.9 天周期变化消失. 因此, 当我们说 A_p 指数具有准 27 天或 13.9 天周期变化时是针对不同时段而言, 而这种周期变化的消失和出现时间可在 Morlet 小波变换图中体现出来; 同时也可以看出, 当原来的变化周期消失时可能有其他的周期变化出现.

对于不同时段 A_p 指数变化表现的差异, 主要是由于在太阳活动周的不同时期,

太阳自转引起的地磁活动 27 天重现性在程度上是很不相同的. 在太阳活动低年 (如 1974 年), 重现性地磁活动或地磁暴主要是由稳定的冕洞高速流引起的^{[5],[6]}, 如图 5 为 1974 年日平均 A_p 指数在 27 天尺度上的小波变换图, 可以看到在 1974 年的大部分时间里 A_p 指数存在较稳定的 27 天周期变化, 这与文献 [7] 中图 2 提到的两个稳定的冕洞相对应. 而在太阳活动高年, 地磁活动主要受太阳瞬间爆发事件的影响, 如图 6 给出了 1989 年日平均 A_p 指数在 27 天尺度上的小波变换, 可以看到有时 27 天的周期变化几乎消失了.

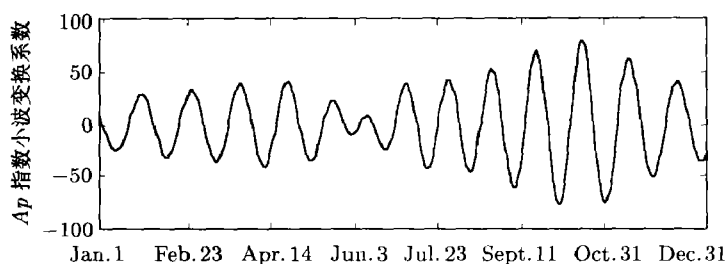


图 5 1974 年日平均 A_p 指数在 27 天尺度上小波变换图

Fig.5 Morlet transform of daily mean A_p index on 27-day level in 1974

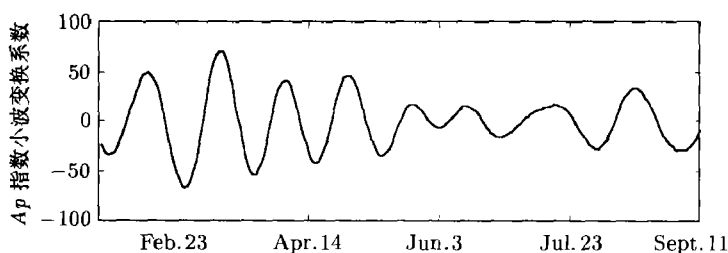


图 6 1989 年日平均 A_p 指数在 27 天尺度上小波变换图

Fig.6 Morlet transform of daily mean A_p index on 27-day level in 1989

图 7(a), (b) 是月平均 A_p 指数的 Morlet 小波变换图 (同理, 在此只选用部分数据), 从图 7 可以看出, 地磁活动在太阳活动高年 (1947—1952 年) 和太阳活动低年 (1952—1956 年) 都存在较明显的准 6 个月周期变化特征. 地磁活动呈现以准 6 个月为主的变化周期可能是由于地球绕太阳公转的黄道面与太阳赤道有 7.2° 倾角^[8].

4 结论

本文利用 Morlet 小波变换对 1932—2000 年的太阳黑子数及 A_p 指数多尺度变化特征进行了分析, 可以得出如下结论.

- (1) 太阳黑子数和 A_p 指数存在准 11 年、准 32 年的周期变化特征及 A_p 指数存在准 6 个月、准 27 天和准 13.9 天的周期变化特征.
- (2) A_p 指数的准 11 年周期的变化是跟随太阳黑子数的准 11 年周期变化而变化的,

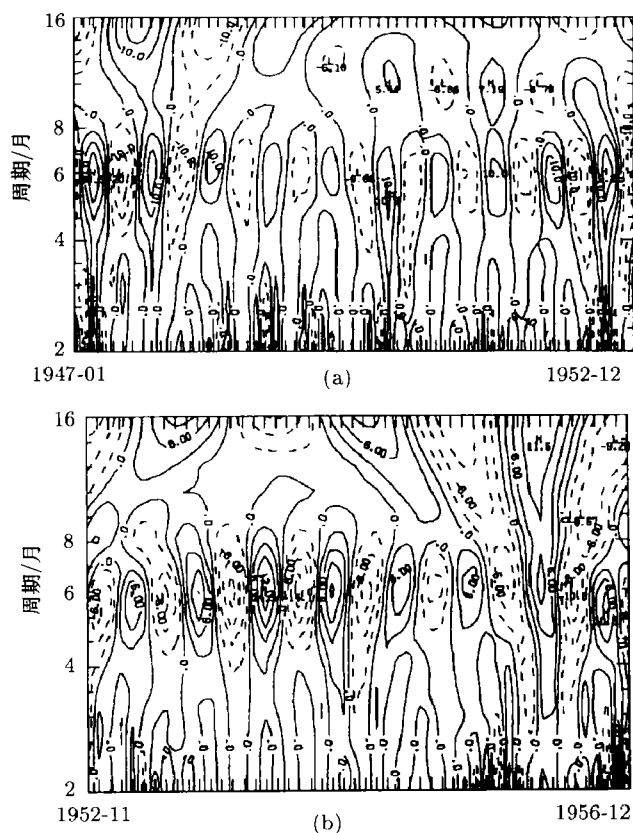
图 7 月平均 A_p 指数小波变换图

Fig.7 Morlet transform of monthly mean *Ap* index

但其极值的出现要比太阳黑子数极值出现滞后 1—2 年。

(3) A_p 指数准 27 天的周期变化在太阳黑子活动高、低年不同. 在太阳活动低年, A_p 指数有着较稳定的准 27 天周期变化, 但在太阳活动高年, 27 天的周期变化几乎消失, 这种周期变化的消失和出现时间可在 Morlet 小波变换图中体现出来.

小波变换便于多尺度地分析信号的周期性, 能够表现局部信号的实际变化特征. 我们希望在以后的工作中用这种方法更加深入地来讨论太阳黑子数及 A_p 指数的局部变化特征, 特别是进一步研究作为地磁暴先兆因素的某些空间环境参数的变化特征.

参考文献

- [1] Cui Jingtai. Wavelet Analysis. Xian: Xidian University Press, 1995. in Chinese (崔景泰. 小波分析导论. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995)
- [2] Qin Qianqing, Yang Zongkai. Applied Wavelet Analysis. Xian: Xidian University Press, 1994. in Chinese (秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994)
- [3] Lin Zhenshan, Deng Ziwan. Research on Diagnosis of Wavelet Climate. Beijing: China Meteorological Press, 1999. 21—26. in Chinese (林振山, 邓自旺. 子波气候诊断技术的研究. 北京: 气象出版社, 1999, 21—26)
- [4] Gonzalez W D. Periodic variation in the geomagnetic activity: A study based on the *Ap* index. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**:9 215—9 231

- [5] Neupert W M, Pizzo V. Solar coronal holes as sources of recurrent geomagnetic disturbance. *J. Geophys. Res.*, 1974, **79**:3 701—3 709
- [6] Sheely N R, Harvey J W. Coronal holes, solar wind streams and geomagnetic disturbances during 1977 and 1978. *Solar. Phys.*, 1981, **70**:237—245
- [7] Zhang Gongliang. Evolutions of geomagnetic corotating disturbances and coronal holes into a stable structures. *Space Phys. Detect. Tech.*, 1989, **4**(1,2):1—10. in Chinese (章公亮. 地磁共转扰动和冕洞向稳定结构的演化. 空间物理与探测技术, 1989, **4**(1,2):1—10)
- [8] Priest W, Cattani D. On the semiannual variations of geomagnetic activity and its relations to the solar corpuscular radiation. *J. Atmos. Sci.*, 1962, **19**:121—126

MORLET TRANSFORM OF SUNSPOT NUMBER AND A_p INDEX

MIAO Juan TIAN Jianhua

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

LIN Zhenshan

(Department of Atmosphere Science, Nanjing University)

Abstract

In this paper, Morlet wavelet transformation is applied to analyze the character of sunspot number and A_p index from 1932 to 2000 including solar cycle 17 to the rising phase of solar cycle 23. By the several examples selected during solar maximum and minimum respectively, three conclusion are drawn: (1) Sunspot number and A_p index both have obvious 11-year period and 32-year period, and A_p index also has 6-month period that exist in all phase, 27-day period and 13.9-day period. (2) Compared with the 11-year period of sunspot number, the maximum value of A_p index appears one or two years latter than that of sunspot number. (3) The 27-day period of A_p index is different during solar maximum and solar minimum. During solar minimum, A_p index has stable 27-day period. But during solar maximum, the character of 27-day period disappears or changes. And wavelet transformation could show detailed time when 27-day period vanishes and recurs.

Key words Morlet transform, Sunspot number, A_p index