

太阳与地磁活动的1.3–1.7 yr振荡关系 分析*

钱雅文^{1,2} 冯松^{1,2†} 邓林华³ 刘伟行¹

(1 昆明理工大学信息工程与自动化学院 昆明 650500)

(2 中国科学院太阳活动重点实验室 北京 100012)

(3 中国科学院云南天文台 昆明 650216)

摘要 太阳和地磁活动中的1.3–1.7 yr周期研究对于理解日地空间耦合系统中可能发生的物理过程十分重要. 黑子是太阳光球层上最突出的磁场结构, A_p 指数则是表征全球地磁活动水平的重要指标. 使用同步压缩小波变换得到太阳黑子数和地磁 A_p 指数的1.3–1.7 yr周期, 并用互相关方法分析研究它们之间的相位关系. 结果如下: (1)太阳黑子数和地磁 A_p 指数的1.3–1.7 yr周期呈现间歇性的演化特征, 且随着时间的变化而不断变化; (2)地磁 A_p 指数在奇数活动周比相邻的偶数活动周的周期分量更高, 表现出上下波动的变化特性; (3)地磁 A_p 指数和太阳黑子数的相位关系不是一成不变的, 在大多数情况下地磁 A_p 指数滞后太阳黑子数, 仅在第18和第22活动周黑子数在相位上滞后.

关键词 太阳: 活动区, 太阳黑子, 方法: 数据分析

中图分类号: P182; **文献标识码**: A

1 引言

太阳和地磁活动指数的周期性演化研究是太阳和空间物理学科中的重要课题. 近半个世纪以来, 人们对太阳和地磁活动的时空演化规律已经开展了广泛的研究. 太阳活动的显著周期有27 d自转周期、11 yr Schwabe周期、154 d Rieger-type周期、80–100 yr Gleissberg周期以及1.3–1.7 yr中等尺度周期. 太阳黑子数、地磁指数和行星际磁场通常会出现1.3–1.7 yr的准周期变化特征, 但是产生这类周期的确切物理机制还未彻底研究透彻. 大多数学者认为1.3–1.7 yr周期是太阳发电机过程中固有的本征特征; Benevolenskaya^[1]提出了产生于太阳内部不同深度处的两种不同类型的发电机过程, 用来解释存在于磁通量演化中的1.3–1.7 yr周期. Knaack等^[2]发现1.3–1.7 yr周期在奇数和偶数活动周中的演化特征是不一样的. 但是, Krivova等^[3]认为1.3–1.7 yr周期可能是11 yr Schwabe周期的8次谐波. Vecchio等^[4]认为该周期与太阳活动周的双峰结构存在密

2018-07-02收到原稿, 2018-09-29收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11463003、11873089、U1531140)、云南省应用基础研究计划重点项目(2018FA035)、中国科学院太阳活动重点实验室开放课题(KLSA201715)资助

†feng.song@kmust.edu.cn

切的联系. 这些研究工作表明, 研究1.3–1.7 yr周期的时空演化特征是相当重要的, 有助于进一步理解日地空间耦合系统中可能发生的物理过程.

从上世纪90年代开始, 研究人员就对1.3–1.7 yr周期的演化特征开展研究. 1994年, Richardson等^[5]发现1987–1993年的太阳风速度数据中存在约1.3 yr的周期. Szabo等^[6]在行星际磁场中也发现了该周期. Paularena等^[7]于2013年发现在地磁Ap指数中也存在1.3–1.7 yr周期. Krivova等^[3]发现了太阳黑子数的1.3–1.7 yr周期. 虽然很多学者对该周期的演化特征进行了多方面的研究, 然而这些研究大多是1.3–1.7 yr周期是否存在于不同的太阳活动周中, 还未充分研究太阳和地磁活动中的耦合关系和相位变化. 太阳黑子数是太阳大气中磁场演化的最显著指标, Ap指数是表征全球地磁活动水平的重要参数. 本文将详细研究黑子数和地磁Ap指数的1.3–1.7 yr周期及他们之间的相位关系, 以探索太阳和地磁活动中可能发生的耦合过程.

为了研究地磁Ap指数与太阳黑子数的1.3–1.7 yr振荡关系, 我们将使用同步压缩小波变换技术进行时间序列分析, 并用互相关方法分析它们之间的相位关系. 文章的结构如下: 第2章介绍了数据来源以及我们所使用的方法, 第3章展示了实验过程和分析结果, 第4章对研究结果进行总结并进行了讨论.

2 数据获取和分析技术

2.1 数据来源

本文所使用的地磁Ap指数是世界地磁数据中心(World Data Center for Geomagnetism)提供的从1932年1月到2017年10月的月平均地磁Ap指数(<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/index.html>). 太阳黑子数是比利时皇家天文台(Royal Observatory of Belgium)提供的从1749年1月到2017年10月的月平均太阳黑子数(SILSO data, <http://www.sidc.be/silso/datafiles>). 为了与Ap指数相对应, 黑子数选取从1932年1月到2017年10月的数据进行分析. 地磁Ap指数与太阳黑子数的时间序列如图1所示, 可以看出太阳黑子数有明显的周期性变化, 而Ap指数没有明显的周期变化, 但是Ap指数的峰值要比黑子数的峰值滞后一些.

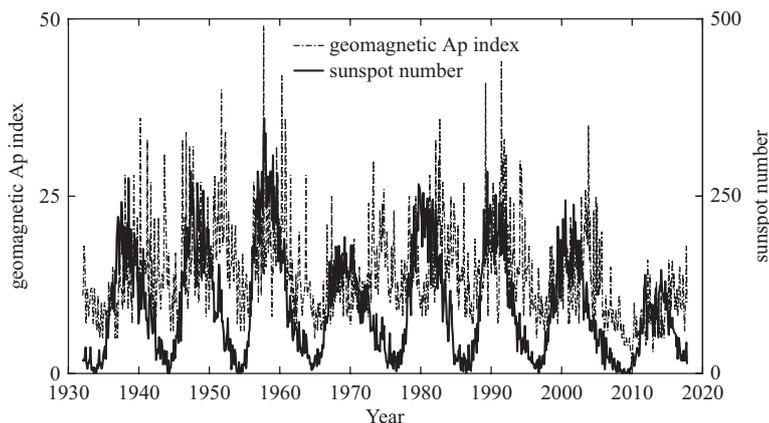


图1 地磁Ap指数与太阳黑子数随时间的变化

Fig. 1 The time variation of the geomagnetic Ap index and sunspot number

2.2 研究方法—同步压缩小波变换

同步压缩小波变换(Synchrosqueezing wavelet transform, SWT)是由Daubechies等^[8]和Thakur等^[9]提出, 该技术是在小波变换的基础上对瞬时频率进行压缩重排的算法. 这种方法提高了信号的时频分辨率, 可以将时频图中各频率成分清晰地显示出来, 此外允许对时频图进行重建来获取各频率分量的时域分量. 下面将简单介绍该时频分析方法的分析过程, 详细的处理过程见文献[8-9].

同步压缩小波变换首先对时域信号 $f(t)$ 进行连续小波变换, 得到小波系数 $W_f(a, \tau)$:

$$W_f(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t - \tau}{a} \right) dt, \quad (1)$$

式中的 a 为尺度因子, τ 为时间平移因子, $\psi^*(t)$ 是小波母函数 $\psi(t)$ 的共轭函数.

由Plancherel的定理, 在频域中进行等价变换得到的 $W_f(a, \tau)$ 可表示为:

$$W_f(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{2a\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(\xi) \hat{\psi}^*(a\xi) e^{i\tau\xi} d\xi = \frac{A}{2\sqrt{2a\pi}} \hat{\psi}^*(a\omega) e^{i\tau\omega}, \quad (2)$$

式中的 ξ 是角频率, $\hat{f}(\xi)$, $\hat{\psi}^*(\xi)$ 分别是 $f(t)$, $\psi^*(t)$ 的傅里叶变换, ω 是频率.

小波系数容易在尺度方向上发生扩散, 聚焦效果不理想, 使得时频图变得模糊. 虽然小波系数在尺度方向上有扩散, 但是其相位保持不变. 对于 $W_f(a, \tau) \neq 0$ 的任何 (a, τ) , 信号 $f(t)$ 可以用小波系数求偏导来计算瞬时频率,

$$\omega_f(a, \tau) = -i [W_f(a, \tau)]^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} W_f(a, \tau), \quad (3)$$

瞬时频率是时频表示中的脊. 为了减少淡化, 我们必须压缩这些脊周围的频率. 这是将信息从时间-尺度平面映射到时间-频率平面, 即 (a, τ) 被转换为 $(\omega_f(a, \tau), \tau)$, 这种操作称为同步压缩. 由于尺度 a 和时间 τ 是离散值, 频率变量 ω_f 和尺度变量 a 被“封装(binned)”在一起, 即仅在离散值 a_k 下计算 $W_f(a, \tau)$, 其中 $a_k - a_{k-1} = (\Delta a)_k$, k 为尺度的位置. 当从时间-尺度平面映射到时间-频率平面 $(a, \tau) \rightarrow (\omega_f(a, \tau), \tau)$ 时, 同步压缩变换 $T_f(\omega_f, \tau)$ 只有在频率范围 $[\omega_l - \frac{\Delta\omega}{2}, \omega_l + \frac{\Delta\omega}{2}]$ 中心的 ω_l 才是有效的, 其中 ω_f 是 ω_l 的集合, l 为频率的位置, $\Delta\omega = \omega_l - \omega_{l-1}$:

$$T_f(\omega_f, \tau) = (\Delta\omega)^{-1} \sum_{a_k: |\omega_f(a_k, \tau) - \omega_l| \leq \frac{\Delta\omega}{2}} W_f(a_k, \tau) a_k^{-\frac{3}{2}} (\Delta a)_k. \quad (4)$$

同步压缩变换并不影响信号的重建. 使用滤波方法, 抽取需要进一步研究的周期分量进行信号重建. 信号重建的公式为:

$$f_k(\tau) = 2R_\psi^{-1} \Re \left[\sum_l T_f(\omega_l, \tau) \right], \quad (5)$$

其中 $R_\psi = \sqrt{2\pi} \int_0^\infty \xi^{-1} \psi^*(\xi) d\xi$ 是归一化常数.

3 结果

我们对地磁Ap指数与太阳黑子数进行SWT分析,使用带通滤波器滤波(滤波周期范围为1.25–1.8 yr)得到1.3–1.7 yr周期.为了探索这两个指数之间的关系,我们使用SWT分析的逆变换对1.3–1.7 yr周期进行了信号重建.

3.1 整个时间序列的1.3–1.7 yr振荡关系

通过SWT分析,将地磁Ap指数和太阳黑子数与周期特性结合起来(如图2所示).图中的灰色部分代表功率谱,颜色深浅表示功率谱的相对变化,颜色越深代表功率谱越大.细的黑色虚线是小波影响锥(cone of influence, COI),表示连续小波系数受到远处信号影响较大的区域.本文所有SWT分析都是使用hermitian hat小波基,该小波不会影响复数域中信号的相位,在信号的奇点识别中具有突出能力.

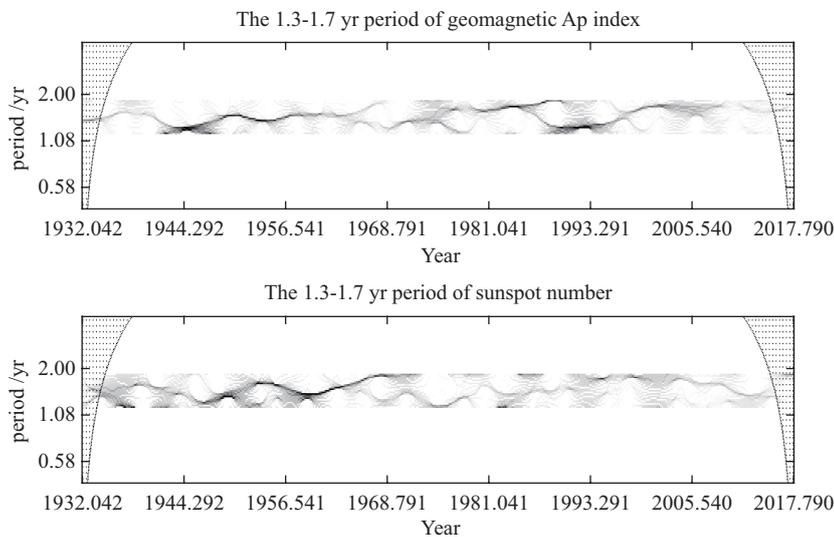


图2 地磁Ap指数和太阳黑子数的1.3–1.7 yr周期

Fig. 2 The 1.3–1.7 yr period of geomagnetic Ap index and sunspot number

从图2可以看出地磁Ap指数和太阳黑子数是存在1.3–1.7 yr周期的,这与前人的研究一致^[3,7].同时,1.3–1.7 yr周期是间歇性的,随着时间的变化而不断变化.对于地磁Ap指数的1.3–1.7 yr周期,我们发现除了24太阳活动周以外,基本上符合Obridko等^[10]提出的地磁Ap指数在不同活动周的变化规律,但是否是偶数活动周为1.3–1.4 yr,奇数活动周为1.5–1.7 yr还要进一步验证.太阳黑子数的1.3–1.7 yr周期在各个太阳活动周上并不存在很明显的变化趋势.在20–23太阳活动周两个指数的周期特性并不是很显著,并且基本上都分成了两个周期:~1.3 yr和~1.75 yr.到24太阳活动周太阳黑子数的1.3–1.7 yr周期特性不是很显著,仅仅显示出1.3 yr周期.对比地磁Ap指数和太阳黑子数的1.3–1.7 yr周期,我们认为在第20活动周以前的周期特性较为明显,并且地磁Ap指数的周期特性比太阳黑子数更加显著.

为了探索地磁Ap指数和太阳黑子数之间的关系,我们使用SWT分析的逆变换对图2中的1.3–1.7 yr周期进行了重建,得到了图3的结果.我们发现地磁Ap指数和黑子数

的相位关系在不同的活动周里是不同的, 如在第18活动周地磁Ap指数超前于黑子数, 但是在第20活动周地磁Ap指数明显滞后于黑子数. 为了确定地磁Ap指数和太阳黑子数的1.3–1.7 yr振荡关系, 我们对每个活动周进行了单独分析.

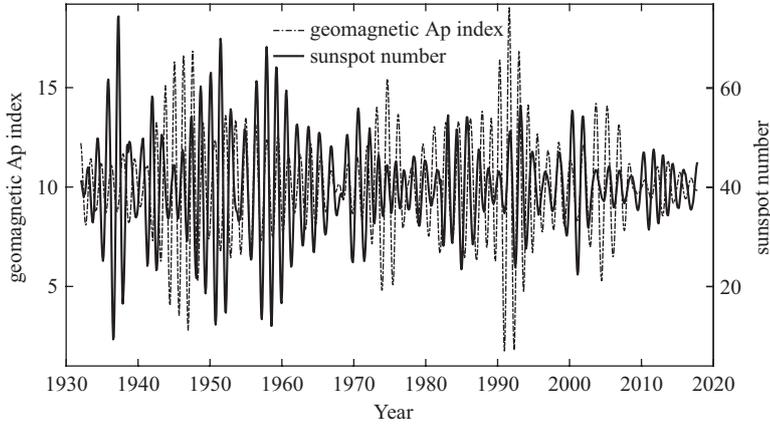


图 3 地磁Ap指数和太阳黑子数的1.3–1.7 yr周期信号

Fig. 3 The 1.3–1.7 yr periodic signals of geomagnetic Ap index and sunspot number

3.2 不同太阳活动周的1.3–1.7 yr振荡关系

为了确定地磁Ap指数和太阳黑子数在不同太阳活动周上的变化, 我们对每个活动周进行SWT分析和带通滤波. 结果显示地磁Ap指数在不同活动周的1.3–1.7 yr周期特性有细微的不同, 但并不符合Obridko等^[10]所说的一偶数活动周为1.3–1.4 yr, 奇数活动周为1.5–1.7 yr. 只是通常奇数活动周比相邻的偶数活动周的周期分量要高, 并显示出上下波动的特性. 我们在表1中给出了每个活动周的具体周期值, 可以更清楚地看到不同活动周的变化情况. 黑子数的1.3–1.7 yr周期在不同活动周的变化, 没有显示出与地磁Ap指数类似的规律.

表 1 各个太阳活动周的黑子数和地磁Ap指数的1.3–1.7 yr周期

Table 1 The 1.3–1.7 yr period of geomagnetic Ap index and sunspot numbers in each solar cycle

Solar Cycle	Geomagnetic Ap Index Period	Sunspot Number Period
17th Solar Cycle	~1.7 yr	~1.7 yr
18th Solar Cycle	~1.45 yr	~1.4 yr
19th Solar Cycle	~1.5 yr	~1.4 yr
20th Solar Cycle	1.3 yr slowly rose to 1.6 yr	~1.3 yr
21th Solar Cycle	~1.7 yr	1.4–1.6 yr
22th Solar Cycle	~1.3 yr	~1.5 yr
23th Solar Cycle	~1.8 yr	~1.75 yr
24th Solar Cycle	~1.7 yr	~1.4 yr

为了分析地磁Ap指数和黑子数的相位关系, 我们使用互相关方法对每个活动周进行了相位分析. 由于篇幅有限, 本文只在图4中给出了第17和第18活动周的1.3–1.7 yr周期(图4 (a–d))、这两个活动周上的信号重建结果(图4 (e–f))以及互相关分析的结果(图4 (g–h)). 图4 (g–h)中的横坐标表示地磁Ap指数相对于黑子数的偏移, 其中正(负)值表示向后(向前)偏移, 即地磁指数滞后(太阳黑子数滞后).

表2列出了每个活动周中Ap指数与太阳黑子数的相位关系. 从表中可以发现, 在8个太阳活动周中, 除了第18和第22活动周以外, 其余的太阳活动周都是地磁Ap指数滞后于黑子数. 第17太阳活动周中, 地磁Ap指数滞后黑子数7个月, 相关系数为0.84. 第19活动周中, 地磁Ap指数滞后黑子数1个月, 相关系数为0.77. 第20、第21和第23活动周中, 地磁Ap指数分别滞后黑子数15、16、19个月, 相关系数分别为0.68、0.54、0.75. 在第24活动周中, 地磁Ap指数滞后于黑子数6个月, 相关系数为0.27. 第24活动周的相关系数较低, 可能是因为所研究的时间跨度未包含第24活动周的整个时间段. 对于这6个活动周, 地磁Ap指数平均滞后于黑子数10.6个月. 第18活动周的黑子数滞后地磁Ap指数12个月, 相关系数为0.67. 第22活动周的黑子数滞后地磁Ap指数2个月, 相关系数为0.62. 这两个活动周上的黑子数滞后地磁Ap指数的平均值为7个月. 总的来讲是地磁Ap指数平均滞后于黑子数6.3个月, 我们认为在大多数情况下地磁Ap指数是滞后于黑子数的.

表 2 各个太阳活动周的太阳黑子数和地磁Ap指数的1.3–1.7 yr周期的相位关系
Table 2 The phase relation between sunspot number and geomagnetic Ap index of 1.3–1.7 yr period in each solar cycle

Solar Cycle	Phase Relationship	Lag Time/month	Correlation Coefficient
17th Solar Cycle	Geomagnetic Ap Index Lag	7	0.84
18th Solar Cycle	Sunspot Number Lag	12	0.67
19th Solar Cycle	Geomagnetic Ap Index Lag	1	0.77
20th Solar Cycle	Geomagnetic Ap Index Lag	15	0.68
21th Solar Cycle	Geomagnetic Ap Index Lag	16	0.54
22th Solar Cycle	Sunspot Number Lag	2	0.62
23th Solar Cycle	Geomagnetic Ap Index Lag	19	0.75
24th Solar Cycle	Geomagnetic Ap Index Lag	6	0.27

4 讨论和总结

对于地磁Ap指数和太阳黑子数的1.3–1.7 yr周期的研究, 我们得到的分析结果如下:

(1)地磁Ap指数和太阳黑子数是存在1.3–1.7 yr周期的, 并且振幅的振荡是间歇性的, 随着时间的变化而不断变化;

(2)地磁Ap指数在不同的活动周有明显的变化, 奇数活动周比相邻的偶数活动周的周期分量要高, 并显示出上下波动的特性;

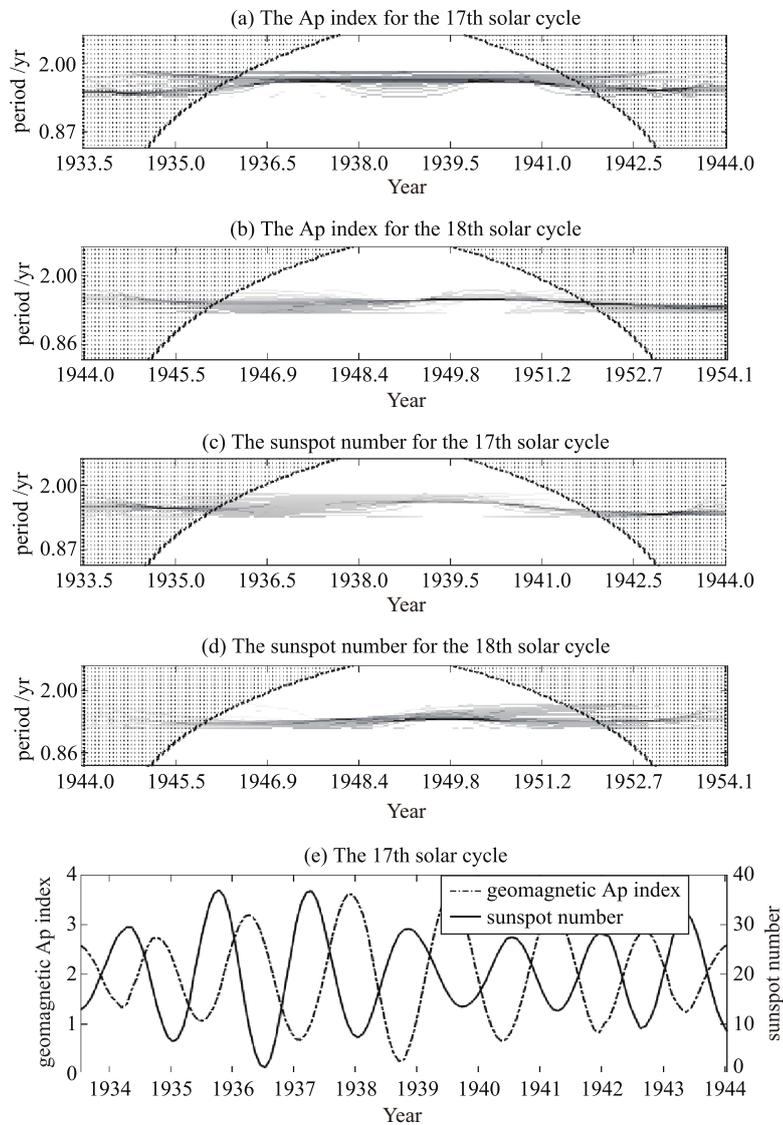


图4 第17和18太阳活动周的1.3–1.7 yr振荡关系. 第17和第18活动周的地磁Ap指数和太阳黑子数的1.3–1.7 yr周期(a–d), 第17和第18活动周上的1.3–1.7 yr周期的信号重建结果(e–f), 地磁Ap指数和黑子数在第17和18活动周上的相位关系(g–h).

Fig. 4 The relationship of the 1.3–1.7 yr oscillations between the 17th and 18th solar cycles. The 1.3–1.7 yr period of geomagnetic Ap index and sunspot numbers for the 17th and 18th solar cycles (a–d), the reconstruction of 1.3–1.7 yr periodic signals for geomagnetic Ap index and sunspot numbers in 17th and 18th solar cycles (e–f), the phase relationship between the geomagnetic Ap index and sunspot numbers in the 17th and 18th solar cycles (g–h).

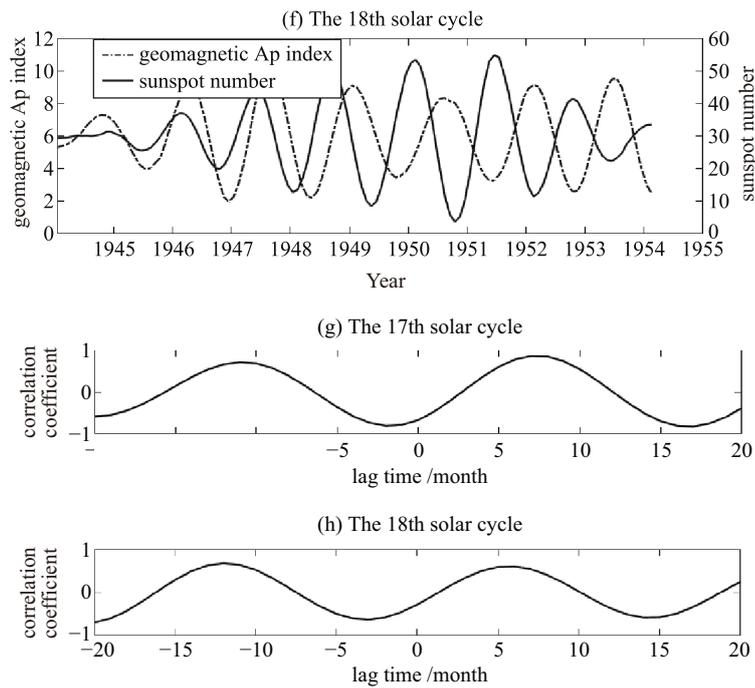


图4 续

Fig. 4 Continued

(3)在整个时间段内,地磁Ap指数和太阳黑子数的相位关系并不是始终一致的,随着时间的变化而改变.在8个太阳活动周中,有6个活动周是地磁Ap指数滞后于太阳黑子数,滞后的平均值为10.6个月.有2个太阳活动周黑子数滞后地磁Ap指数.

众所周知,太阳黑子数和地磁Ap指数分别代表太阳活动和地磁活动水平的典型指标.我们认为黑子数中的1.3–1.7 yr周期是由太阳内部位于不同深度处的两个发电机过程产生的,这可以用来解释1.3–1.7 yr周期功率谱在太阳活动周的极大期附近最大.对于活动水平较低的太阳活动周,1.3–1.7 yr周期的消失可能是由于长期的低太阳活动水平所导致的.太阳大气中的1.3–1.7 yr周期可以通过开放磁力线传输到行星际空间中,因此在行星际磁场和太阳风的时序信号中存在该周期.因此,1.3–1.7 yr周期是在太阳内部产生的,然后通过磁流浮现的方式存在于太阳大气的各个层次中,最后通过开放磁力线传输到行星际空间和地球的上层大气中,故而在大多数情况下地磁Ap指数是滞后于太阳黑子数的.对于第18和第22活动周,很奇怪的是黑子数滞后于地磁Ap指数,我们认为产生原因可能是这两个活动周的地磁Ap指数与之前活动周的黑子数相关性更高,即更多地反映出之前活动周的活动水平.由此在这两个活动周中,地磁Ap指数反映的是当前活动周的地磁活动水平和之前活动周的太阳活动水平的综合信息,导致地磁Ap指数是领先于太阳黑子数的.

参 考 文 献

- [1] Benevolenskaya E E. ApJ, 1998, 509: L49
- [2] Knaack R, Stenflo J O. A&A, 2005, 438: 349
- [3] Krivova N A, Solanki S K. A&A, 2002, 394: 701
- [4] Vecchio A, Laurenza M, Storini M, et al. AdAst, 2012, 2012: 834247
- [5] Richardson J D, Paularena K I, Belcher J W, et al. GeoRL, 1994, 21: 1559
- [6] Szabo A, Lepping R P, King J H. Twenty Years of Interplanetary Magnetic Field Variations with Periods in the Range of 10 Days to 3 Years. International Solar Wind 8 Conference, Pasadena, Jun 30, 1995
- [7] Paularena K I, Szabo A, Richardson J D. GeoRL, 2013, 22: 3001
- [8] Daubechies I, Lu J F, Wu H T. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2011, 30: 243
- [9] Thakur G, Brevdo E, Fuçkar N S, et al. SigPr, 2013, 93: 1079
- [10] Obridko V N, Shelting B D. AdSpR, 2007, 40: 1006

Analysis of the 1.3–1.7 yr Oscillation Relationship between Solar and Geomagnetic Activities

QIAN Ya-wen^{1,2} FENG Song^{1,2} DENG Lin-hua³ LIU Wei-hang¹

(1 Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500)

(2 Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

(3 Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216)

ABSTRACT The 1.3–1.7 yr periodic study of solar and geomagnetic activities is very important for understanding the possible physical processes in the solar-terrestrial coupling system. The sunspot is the most prominent magnetic field structure in the solar photosphere, and the Ap index is an important indicator of global geomagnetic activity. The 1.3–1.7 yr period of the sunspot number and the geomagnetic Ap index is obtained by the synchro-squeezing wavelet transform, and the phase relationship between them is studied by cross-correlation analysis. The main results are as following: (1) The 1.3–1.7 yr periods of the geomagnetic Ap index and sunspot number exhibit intermittent evolutionary characteristics, and change with time; (2) the geomagnetic Ap index has a higher periodic component in odd solar cycles than the neighboring even solar cycles, which is characterized by fluctuations; (3) the phase relationship between geomagnetic Ap index and sunspot number is not always consistent, in most cases the geomagnetic Ap index lags behind the sunspot number, except in the 18th and 22th solar cycles.

Key words Sun: activity, sunspots, methods: data analysis