

太阳活动与太阳自转速率变化关系的分析*

王婕^{1,2} 王建^{1,3†} 王琳琳¹ 孙威⁴ 肖振宇¹ 张昊¹ 梁中¹

(1 南京师范大学地理科学学院 南京 210023)

(2 常州市新桥高级中学 常州 213002)

(3 江苏省第二师范学院城市与资源环境学院 南京 211200)

(4 上海工程技术大学数理与统计学院 上海 201620)

摘要 研究发现, 太阳自转速率的变化与太阳活动之间存在一定的联系, 但是不同学者的研究结论存在着矛盾: 有的认为两者为正相关, 而有的却认为是负相关. 究竟两者之间是什么关系, 需要做进一步深入的分析. 利用EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition)等方法对太阳自转速率和太阳黑子数据序列进行相关关系以及相位关系的计算和分析, 以探讨太阳自转速率变化与太阳活动之间的关系. 研究发现: 两者的长期趋势项分量呈显著负相关; 在11 yr左右周期分量上, 观测到的太阳自转速率滞后太阳黑子的变化约2 yr时, 呈显著负相关关系, 超前3 yr时呈现次显著的正相关; 对太阳活动第12–23周各周内部太阳黑子与太阳自转速率的相关分析表明, 两者的关系比较复杂, 但负相关关系更为显著. 这为进一步理解太阳活动变化与太阳自转速率变化之间的成因联系提供了新的依据.

关键词 太阳: 自转, 太阳: 活动, 方法: 数据分析, 相互关系

中图分类号: P182; **文献标识码:** A

1 引言

一些研究发现, 太阳自转速率的变化与太阳活动之间存在一定的联系, 但是不同学者的研究结论存在着矛盾. 有的认为两者为正相关^[1–2], 有的却认为是负相关^[3–8]. 究竟两者之间是什么关系, 还需要进一步深入分析.

本文利用EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition)等方法对观测到的太阳自转速率和太阳黑子数据之间的相关关系以及位相关系进行了分析, 从而探究太阳自转速率和太阳活动之间的可能联系, 为揭示太阳活动的成因提供新的思路和依据, 这对认识太阳活动的周期性和地球气候变

化有着非常重要的意义.

2 数据

2.1 太阳黑子

太阳黑子数据来自比利时皇家天文台的太阳影响数据分析中心(Solar Influences Data Analysis Center, SIDC), 使用的是从1874至2013年的年平均太阳黑子数据.

2.2 太阳自转速率

太阳自转是太阳的一个关键特性, 太阳自转角速度在不同纬度处的大小不同, 这一现象称为太阳

2021-07-10收到原稿, 2021-10-08收到修改稿

*国家自然科学基金项目(41807437)、江苏省高校优势学科建设工程项目(164320H116)、上海工程技术大学科普专项项目(KP2105)资助

†jwang169@vip.sina.com

纬向较差自转. 通常, 太阳赤道区域的自转速度比高纬度地区快. 太阳自转速率的观测和计算, 主要分为示踪物法和光谱法. 示踪物法是通过追踪太阳活动的示踪物, 计算其在太阳表面的位移和时间得到太阳自转速率. 常用的一些示踪物有太阳黑子、光球光斑、谱斑、暗条、色球网络和冕洞.

本文利用的太阳自转速率数据来源于1874—1976年的GPR (Greenwich Photoheliographic Results)和1977—2013年的DPD (Debrecen Photoheliographic Data)数据集. 这些数据由美国国家地球物理数据中心编制, 包括观测时间、日面纬度(φ)和经度(L)以及距中央子午线距离(Central Meridian Distance, CMD)等. 利用给定的太阳黑子群在日面的位置, 可以得到太阳黑子的旋转速度. 通过将中央子午线距离差(ΔD)除以太阳黑子群经过的时间 Δt 来计算自转速率^[9]:

$$\omega = \frac{\Delta D}{\Delta t} + 0.9856, \quad (1)$$

其中, 0.9856为与地球自转相对应的修正系数. 由于地球围绕太阳运动, 使观测到的太阳自转速率与实际速率不同, 要将获得的会合旋转速率转换为恒星实际自转速率, 通过Roša等^[10]、Brajša等^[11]和Skokišc等^[12]所述的程序实现. 在计算时, 仅考虑了 $\pm 75^\circ$ 经度范围内的测量值. 此外, 小于 $8^\circ \cdot \text{d}^{-1}$ 和超过 $19^\circ \cdot \text{d}^{-1}$ 的恒星自转速率被视为错误值, 在分析中不予考虑.

太阳纬向较差自转展开式通常表示为:

$$\omega(\varphi) = A + B \sin^2 \varphi + C \sin^4 \varphi, \quad (2)$$

式中, ω 是恒星自转角速度, A 表示太阳自转速率, 一般指在纬度 $\pm 15^\circ$ 的旋转速率. B 和 C 代表纬向较差程度, B 主要代表低纬度, C 代表高纬度. 利用太阳黑子描述太阳较差自转时, 最后一项可忽略不计, 即 $C = 0$. 通过将得到的数据点拟合到(2)式中, 可以得到太阳自转速率 A .

太阳自转速率随时间变化的趋势不是很一致, 有的人认为是随时间减小的^[13], 还有人认为是增

大的^[1]. 尽管学者们对于自转速率长期趋势存在不同的意见, 但是大多数认为自转速率随时间变化呈减小的趋势. 因此, 为了得到时间序列较长且步长为1 yr的自转速率数据, 选择Ruždjak等^[8]文献中的图1 (数据范围为1880—2013年)和Balthasar等^[14]文献中的图2 (数据范围为1874—1976年)由太阳黑子群计算的自转速率数据, 该数据通过Matlab相关程序进行特征点提取得到.

我们发现在同一时段(1880—1976年)太阳自转速率的数据相关性较好, 相关系数为0.683 (显著性水平 $P < 0.01$), 对这段数据进行线性回归分析, 图1是两个太阳自转速率序列的散点图, Balthasar等^[14]的数据为自变量 x , Ruždjak等^[8]的数据为因变量 y , 两者的线性回归方程为:

$$y = 0.7267x + 4.02. \quad (3)$$

判定系数 R^2 为0.4615, 拟合方程在 $P < 0.01$ 时水平显著, 根据回归方程反演了1874—1879年和1977—2013年的数据并与原数据对比, 线性关系显著. 因此可以将1874—1976年和1880—2013年两段数据对接, 对接的数据范围是1977—2013年, 得到1874—2013年共140个数据点, 平均绝对误差为 $0.0998^\circ \cdot \text{d}^{-1}$, 平均相对误差为0.69%.

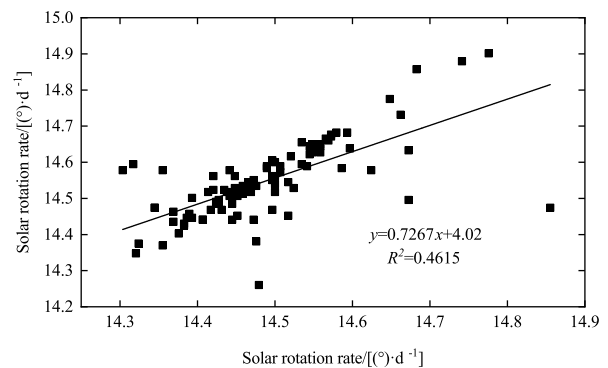


图1 Balthasar等^[14]和Ruždjak等^[8]的1880—1976年太阳自转速率数据散点图

Fig. 1 Scatter plot of solar rotation rate data from 1880 to 1976 of Balthasar et al.^[14] and Ruždjak et al.^[8]

3 分析方法

3.1 EEMD方法

针对EMD (Empirical Mode Decomposition) 方法的模态混叠问题, Wu等^[15]提出了EEMD方法, 将高斯白噪声(一个具有零均值特性的均匀分布的序列)加入待分解信号, 消除原始信号中噪声的干扰, 从而使分解出来的各个分量信息保持唯一性, 保留了真实信号, 信号的周期更加直观准确. 基于EEMD, 时间序列可以被分解为若干有物理意义的IMF (Intrinsic Mode Function)分量以及趋势项, 相比EMD分析方法更适合多尺度频率成分的太阳自转速率和太阳黑子信号的分析 and 处理.

3.2 交叉相关分析

为了进一步分析太阳黑子和太阳自转速率之间的关系, 可将两者分解获得的系列IMF分量分别进行交叉相关分析, 根据时差进行错位移动, 找出两列数据的最大相关系数, 判断它们的相位关系, 分析两者的因果关系.

交叉相关分析也称互相关分析(Cross Correlation Analysis), 是指一个序列的观测结果与另一个序列在各种滞后和超前情况下的观测结果具有相关性. 交叉相关分析有助于识别作为其他变量领先指标的变量, 或者预测一个变量相对于另一个变量会发生多少变化. 两个时间序列数据之间的相关系数在 ± 1 时相关度最高, 并在接近0时减小到最低^[16]. 对于两个具有同频率成分连续信号而言, 交叉相关函数(Cross Correlation Function)定义为:

$$R_{fg} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t + \tau)dt, \quad (4)$$

其中, $f(t)$ 和 $g(t)$ 分别为两个时间序列, t 为时间, τ 为两信号的时间差, $\tau = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, 交叉相关函数仍为周期信号, 其周期与原信号相同. ρ_{fg} 为交叉相关系数, 用其表示相关程度, 即:

$$\rho_{fg} = \frac{R_{fg}(\tau)}{\sigma_f \sigma_g}, \quad (5)$$

其中, σ_f 和 σ_g 分别是 $f(t)$ 和 $g(t)$ 的标准差, 协方差函数为

$$C_{fg}(\tau) = E(f_t - \mu_f)(g_{t+\tau} - \mu_g), \quad (6)$$

E 表示期望, f_t 为 t 时的信号, $g_{t+\tau}$ 为 t 经过时间差 τ 时的信号, μ_f 和 μ_g 分别为 $f(t)$ 和 $g(t)$ 的期望函数.

4 结果

图2和3分别给出了1874—2013年年平均太阳黑子数和由太阳黑子群数据计算得到太阳自转速率的年平均值, 图2中的数字表示太阳活动周, 图3中的虚线为太阳自转速率变化的趋势线.

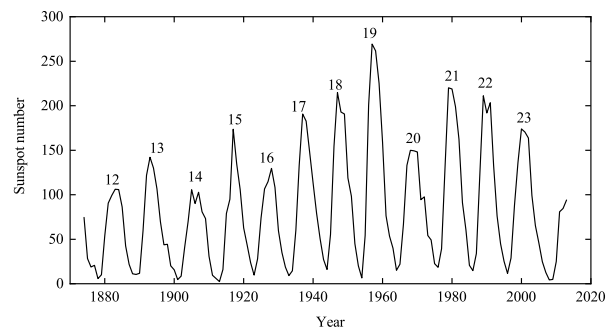


图2 1874—2013年平均太阳黑子数

Fig. 2 Yearly mean sunspot number from 1874 to 2013

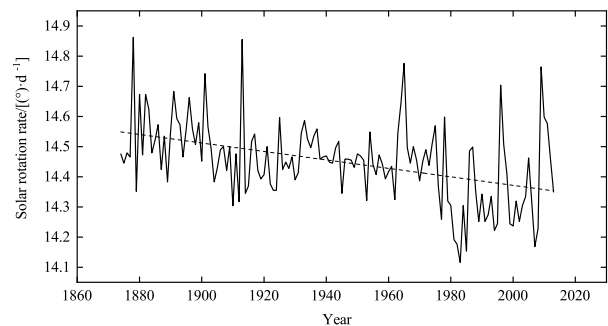


图3 1874—2013年太阳自转速率年平均值的时间序列

Fig. 3 Time-varying sequence of the yearly mean of solar rotation rate from 1874 to 2013

分别对太阳黑子数、太阳自转速率进行EEMD分析. 在进行分析时Nstd (Noise Standard deviation)的选取需要人为按经验确定, 不同信号取值不同. Wu等^[15]建议, 添加辅助白噪声的幅值标准差为信号标准差的0.2倍. 并且, 如果信号中的高频成分较多, 要适当减小Nstd, 如果信号中的低频

成分较多, 要适当增加Nstd. 我们发现Nstd较小的时候, 对模态混叠问题的作用不明显, 每个分量的曲线波动较小. 因此在分析时, 使要研究的周期分量的贡献率占较大比重, 可以得到更好的分析结果.

因此取Nstd = 0.3, NE (Number of Ensembles) = 100, 即白噪声标准差取原始序列标准差的0.3倍, 集合样本数100. 图4和图5分别为太阳黑子数和太阳自转速率多尺度分解获得的6个IMF分量和一个表示总体变化情况的趋势项Res. 从整体来看, 每个IMF分量都围绕零均值线上下波动, 为

平稳信号. IMF1分量对应波动周期最小, 其他IMF分量对应的周期长度逐渐增大, 自1874—2013年太阳黑子数逐渐增加. 各IMF分量对应的主周期及方差贡献率列于表1.

太阳黑子数的IMF分量1-6分别对应5.4-10.8 yr、10.8 yr、20 yr、35 yr、140 yr、140 yr的周期. 由方差贡献率显示, 太阳黑子的10.8 yr周期所占比重最高, 为79.22%, 其次为5.4-10.8 yr周期.

太阳自转速率的IMF分量1-6分别对应2-5.8 yr、6.36 yr、10.8 yr、35 yr、70 yr和140 yr的周期. 10.8 yr周期的贡献率为7.76%.

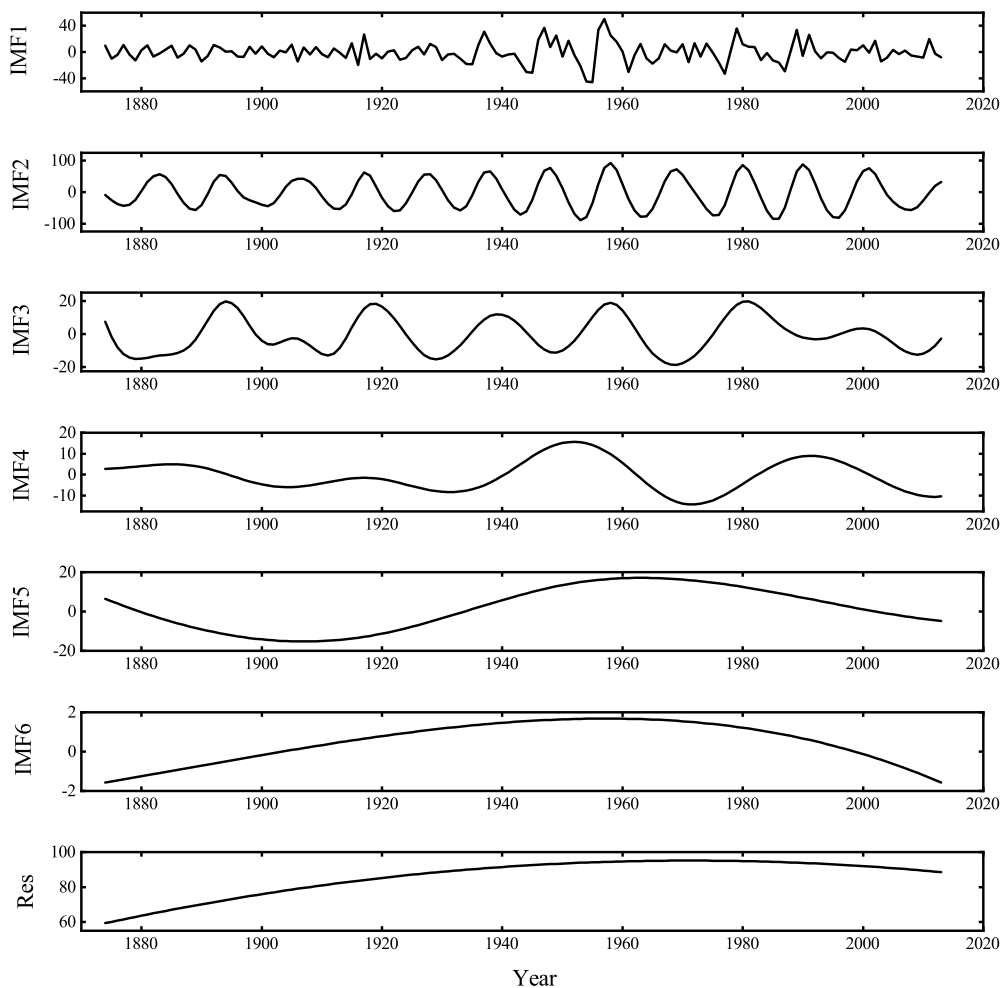


图 4 太阳黑子数的IMF分量和趋势项

Fig. 4 IMF's and trend component of the sunspot number

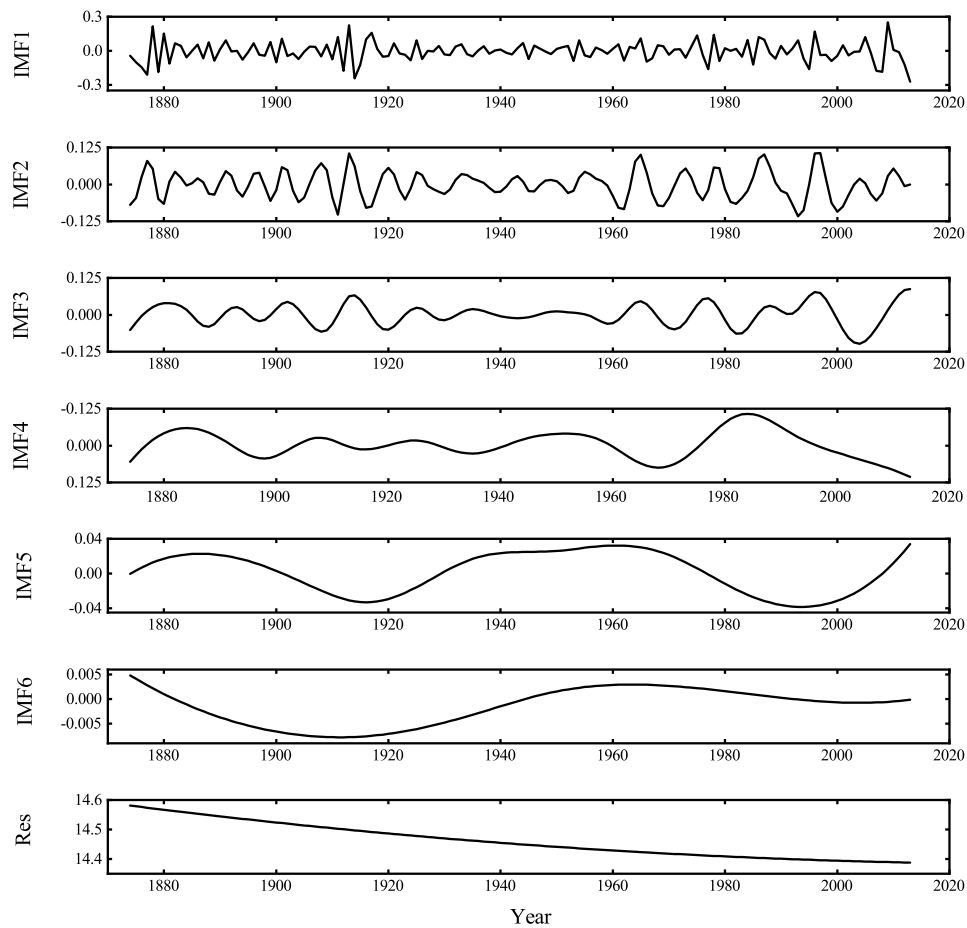


图 5 太阳自转速率的IMF分量和趋势项

Fig. 5 IMFs and trend component of the solar rotation rate

表 1 太阳黑子数和太阳自转速率的IMF分量周期及其方差贡献率

Table 1 The period and variance contribution rate of the IMFs of sunspot number and solar rotation

Component	rate					
	Sunspot number			Solar rotation rate		
	Quasi-cycle/yr	Contribution rate/%	Order	Quasi-cycle/yr	Contribution rate/%	Order
IMF1	5.4–10.8	7.62	2	2–5.8	45.46	1
IMF2	10.8	79.22	1	6.36	12.58	3
IMF3	20	3.84	4	10.8	7.76	5
IMF4	35	1.85	6	35	11.87	4
IMF5	140	3.94	3	70	3.17	6
IMF6	140	0.03	7	140	0.08	7
Res	–	3.50	5	–	19.08	2

根据表1, 太阳黑子和太阳自转速率均存在 10.8 yr 和 35 yr 的周期, 但是也存在不同的周期并且各个周期成分的方差贡献率不尽相同, 这也显示出太阳活动和太阳自转速率之间存在一定的关联, 但关系比较复杂.

4.1 整体趋势的相关关系

图6为太阳自转速率和太阳黑子的趋势项的比较, 实线表示太阳黑子的趋势项, 虚线表示太阳自转速率的趋势项. 发现两者的趋势项分量呈显著负相关, 相关系数为 -0.913 (0.01水平显著). 多个研

究表明太阳自转速率在太阳磁场增强时变慢. 1990年Howard^[17]基于活动区研究太阳自转速度变化, 发现较大的活动区旋转更慢, 当观测到的太阳表面活动变强时, 太阳磁场的自转速率变慢. Kambry等^[18]发现, 第19至21周的太阳黑子旋转速度各不相同, 弱活动周期的平均旋转速度高于强活动周期. Brun^[19]发现, 在强磁场存在的情况下, 角动量向赤道的净输送效率较低, 导致自转速率减小. 李林森^[20]认为, 对于太阳角动量损失而言, 磁制动作用对太阳自转减速起主导作用. 以上研究均表明太阳磁场对太阳自转的抑制作用.

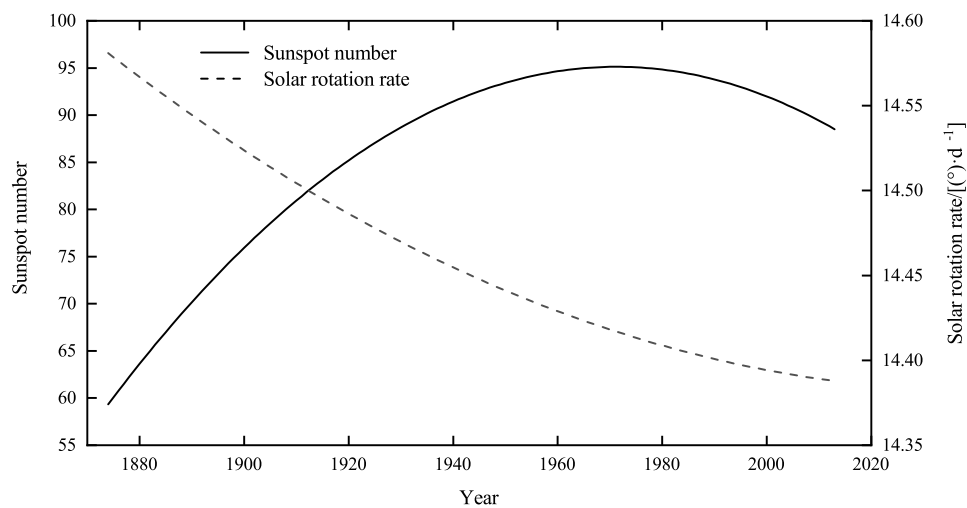


图 6 太阳自转速率和太阳黑子的趋势项比较

Fig. 6 Comparison of the trend component of solar rotation rate and sunspot number

4.2 10.8 yr 分量的相关关系

太阳活动的最主要周期约为 11 yr. 利用 EEMD 方法提取了太阳黑子和太阳自转速率变化的周期分量, 发现两者均存在 10.8 yr 的周期分量. 图 7 为利用交叉相关分析方法, 通过 IBM (International Business Machines) SPSS (Statistical Product Service Solutions) Statistics 23 数据分析软件对太阳自转速率 IMF3 与太阳黑子相应的 IMF2 分量进行相位关系分析的结果. 如图所示, 横坐标正值表示太阳自转速率变化超前太阳黑子数, 负值表示太阳自转速率变化滞后太阳黑子数. 分析发现, 相关系数

在太阳自转速率 10.8 yr 分量滞后太阳黑子 10.8 yr 分量 2 yr 时达极小值 -0.580 ; 在太阳自转速率 10.8 yr 分量超前太阳黑子 10.8 yr 分量约 3 yr 时达极大值 0.548 . 表明两者相关关系比较复杂, 既有正相关又有负相关, 但是负相关更明显一点.

4.3 太阳活动各个周内内部年变化序列的相关关系

分析了在每个太阳活动周内太阳自转速率和太阳黑子年变化序列的相关关系, 由表 2 可知, 从第 12 到第 23 太阳周, 第 12、14、19、20 太阳活动周, 太阳自转速率与太阳黑子的相关系数显著, 且显著负相关多于显著正相关, 其他周期相关性不显著.

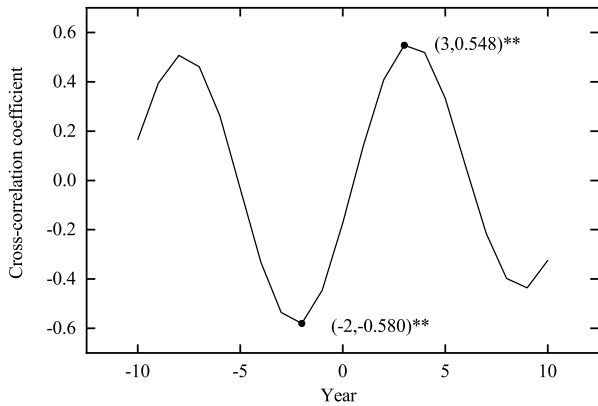


图 7 太阳自转速率的IMF3分量和太阳黑子的IMF2分量的交叉相关系数(**表示在0.01水平上显著. 图中的两点是相关系数在0.01水平上显著的极值点).

Fig. 7 The cross-correlation coefficient of the IMF3 component of the solar rotation rate and the IMF2 component of sunspot number (** indicates that cross-correlation coefficient is significant at the 0.01 level. The two points in the graph are the extreme points where the correlation coefficient is significant at the 0.01 level).

5 结论和讨论

通过利用EEMD方法和交叉相关分析方法, 对观测到的太阳自转速率与太阳黑子数据序列进行相关关系以及相位关系分析, 主要结论如下:

(1)对1874—2013年太阳自转速率和太阳黑子长期趋势项分量做相关分析, 发现太阳黑子与太阳自转速率呈显著负相关;

(2)在11 yr左右周期分量上, 观测到的太阳自转速率滞后太阳黑子的变化约2 yr时, 呈显著负相关关系, 超前3 yr左右时呈现次显著的正相关;

(3)对太阳活动12–23周各周内部太阳黑子与太阳自转速率的相关分析表明, 既有显著正相关, 也有显著负相关, 还有不显著的相关, 但是两者的负相关关系更多更显著一些.

以上从3个方面对太阳自转速率和太阳黑子的关系进行了解释, 发现两者的相关关系比较复杂, 但是总体上负相关关系更加显著一些. 为进一步理解太阳活动变化与太阳自转速率变化之间的成因联系提供了新的依据.

表 2 太阳自转速率与太阳黑子在每个太阳周的相关系数
Table 2 The correlation coefficient between the solar rotation rate and the sunspot number in each solar cycle

Solar Cycles	Correlation coefficients	
	Positive	Negative
12	0.619*	–
13	0.410	–
14	–	–0.767**
15	–	–0.217
16	–	–0.083
17	0.453	–
18	0.135	–
19	–	–0.795**
20	–	–0.704**
21	–	–0.234
22	–	–0.591
23	–	–0.357

* Significant at the 0.05 level;

** Significant at the 0.01 level.

参考文献

- [1] Heristchi D, Mouradian Z. A&A, 2009, 497: 835
- [2] Ribes J C, Nesme-Ribes E. A&A, 1993, 276: 549
- [3] Hathaway D H, Wilson R M. ApJ, 1990, 357: 271
- [4] Brajša R, Wöhl H, Ruždjak D, et al. AN, 2007, 328: 1013
- [5] Chandra S, Om Vats H, Iyer K N. MNRAS, 2010, 407: 1108
- [6] Li K J, Feng W, Shi X J, et al. SoPh, 2014, 289: 759
- [7] Obridko V N, Shelting B D. AstL, 2016, 42: 631
- [8] Ruždjak D, Brajša R, Sudar D, et al. SoPh, 2017, 292: 179
- [9] Javaraiah J. SoPh, 2013, 287: 197
- [10] Roša D, Brajša R, Vršnak B, et al. SoPh, 1995, 159: 393
- [11] Brajša R, Wöhl H, Vršnak B, et al. SoPh, 2002, 206: 229
- [12] Skokišc I, Brajša R, Roša D, et al. SoPh, 2014, 289: 1471
- [13] Brajša R, Ruždjak D, Wöhl H. SoPh, 2006, 237: 365
- [14] Balthasar H, Vazquez M, Wöhl H. A&A, 1985, 155: 87

- [15] Wu Z H, Huang N E. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1: 1
- [16] Adenomon M O, Evans P O. *International Journal of Agricultural Economics*, 2016, 1: 62
- [17] Howard R F. *SoPh*, 1990, 126: 299
- [18] Kambry M A, Nishikawa J. *SoPh*, 1990, 126: 89
- [19] Brun A S. *SoPh*, 2004, 220: 333
- [20] 李林森. *天文学报*, 2018, 59: 1

Analysis of the Relationship between Solar Activity and Solar Rotation Rate

WANG Jie^{1,2} WANG Jian^{1,3} WANG Lin-lin¹ SUN Wei⁴ XIAO Zhen-yu¹ ZHANG Hao¹
LIANG Zhong¹

(1 *School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023*)

(2 *Xinqiao Senior High School, Changzhou 213002*)

(3 *School of Urban & Resources and Environment, Jiangsu Second Normal University, Nanjing 211200*)

(4 *School of Mathematics, Physics and Statistics, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620*)

ABSTRACT It is widely believed that there is a certain connection between the change in the solar rotation rate and solar activity, but the research conclusions of different scholars are contradictory: some believe that the two are positively correlated, while some believe that the two are negatively correlated. Further analysis is needed to reliably establish the actual relationship. This paper uses EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition) and other methods to calculate and analyze the correlation between the solar rotation rate and sunspot number, as well as the phase relationship, in order to explore the relationship between the change in the solar rotation rate and solar activity. It is found that the long-term trend components of the two are significantly negatively correlated; the observed solar rotation rate lags behind the sunspot variation by about 2 years and shows a significant negative correlation, with a sub-significant positive correlation about 3 years ahead; the analysis of the correlation between sunspots and solar rotation rate within each week of the 12th–23rd weeks of solar activity shows that the relationship between the two is complex, but the negative correlation is more significant. This provides a new basis for further understanding of the causal link between changes in solar activity and changes in solar rotation rate.

Key words Sun: rotation, Sun: activity, methods: data analysis, interrelationships