

# 现代黑子观测的太阳黑子活动的周期性

李可军 苏同卫 梁红飞

(中国科学院国家天文台/云南天文台, 昆明 650011. E-mail: likejun429@yahoo.com.cn)

**摘要** 黑子数、黑子面积数和黑子单元面积数表征太阳黑子活动. 对这三个指数的 1874 年 5 月至 2004 年 5 月的每月平均值进行小波分析来研究现代黑子观测的太阳黑子活动的周期性, 详细分析了它们的总功率谱和局部功率谱, 并考虑了结果的统计意义. 主要结果为: (1) 黑子数和黑子面积数的局部小波功率谱很相像, 这表明黑子数和黑子面积数的周期性是很相似的. 黑子单元面积数的局部功率谱和上述二者的局部功率谱较相似, 但细节更丰富. (2) 黑子活动的主要周期有三个, 一是约为 10.6 年(黑子单元面积数的周期略高, 为 10.9 年), 这个周期在所考虑的时间范围内都是统计上有意义的, 另两个可能的周期是约为 31 年的周期和约为 42 年的周期, 它们的总功率谱的置信度低于 95%, 但高于平均红噪声谱. 其他周期是没有统计意义的. (3) 这三个周期的局部功率在所考虑时间范围的后期高于早期. (4) 太阳黑子活动的周期性在这三个量的表现为, 总功率谱和局部功率谱均三者大体相似、细节上有差别.

**关键词** 太阳黑子数 太阳黑子面积 太阳活动周 周期

在各种太阳活动现象中, 最为醒目也最容易观测的现象是太阳黑子. 现在一般认为, 世界上最早的黑子记录是公元前 28 年 5 月 10 日, 由我国汉朝人所观测的黑子记录<sup>[1]</sup>. 在《汉书·五行志》里是这样记载的:“成帝河平元年三月乙(巳)未, 日出黄, 有黑气, 大如钱, 居日中央”<sup>[2]</sup>. 1610 年, 国外开始用望远镜断断续续地对黑子进行观测. 自 1818 年开始才有比较常规的每日黑子观测, 从而有比较可靠的黑子数据<sup>[3]</sup>. 1848 年, Wolf 首先提出用黑子相对数(也称黑子数, Wolf 数)来表示日面可见半球黑子的多寡. 黑子数的多寡和日面太阳活动现象联系很紧密, 黑子群和黑子数目增多时, 日面上其他各种活动现象(如光斑、谱斑、日珥、暗条以及耀斑等)也增强. 因此, 太阳黑子数可以代表太阳活动的平均水平<sup>[3]</sup>, 是表征太阳活动的最基本的量, 在太阳物理和日地关系物理中被广泛应用. 经广大太阳物理学家和地球物理学家的搜集分析整理, 目前, 黑子数的月平均值可推至 1749 年, 年平均值可前推到 1610 年<sup>[4]</sup>, 然而, 一般认为, 比较可靠的黑子数时间序列, 即所谓的现代太阳活动周, 从第 10 太阳活动周开始<sup>[1,5]</sup>.

和黑子数比较, 黑子面积更赋有物理意义<sup>[6]</sup>. 黑子面积的测量要晚于黑子数的观测. 连续的黑子面积测量与整理开始于 1874 年, 由 Greenwich 天文台进行. 目前, 可靠记录的每月黑子面积的完整太阳活

动周时间序列始于 12 周.

我们知道, 每月黑子数记录的是每天出现在可见日面的黑子(群)数(被月平均了), 即每天的黑子数和黑子群的加权数, 它是一种每日黑子(群)出现在可见日面的频率量, 表征的是太阳发电机产生黑子(磁场)的频率. 每月黑子面积数记录的是每天出现在可见日面的黑子的面积(月平均), 某种意义上讲, 它记录的是一种太阳磁活动的每日磁流量, 表征的是太阳发电机产生黑子的功率. 这两个量都有明确的物理意义, 是描述太阳黑子长期活动的最基本的量. 最近, 李可军等人提出了描述太阳黑子长期活动的第 3 个量: 黑子单元面积, 它定义为每月黑子面积数与每月黑子数的比<sup>[1]</sup>, 这个量表征的是黑子的平均尺度<sup>[2]</sup>, 也是描述太阳黑子长期活动的最基本的量. 因此, 描述太阳黑子长期活动的量有三个.

基于黑子数和黑子面积数在太阳物理和日地关系物理中的重要性, 单独对这两个量进行周期分析的文章很多<sup>[8-10]</sup><sup>[2]</sup>, 但很多分析中没有统计意义检验, 有些分析也没有考虑所用数据的可靠性. 小波分析是现代周期分析方法中很好的一种手段<sup>[11]</sup>. 本文将对这三个描述太阳黑子长期活动的基本量的现代太阳活动周记录(统一时间长度, 从有黑子面积测量数据的 1874 年 5 月开始), 用小波分析的方法进行周期分析, 并考虑各周期的统计意义; 比较三个量的周期

1) Li K J, Su T W, Liang H F, et al. Sunspot unit areas: a new parameter describing the long-term solar activity. *Ap Lett*, 2004 (已接收)

2) 占腊生. 长期活动特征的研究. 中国科学院云南天文台博士论文, 2003. 11~18

异同, 给出现代黑子观测的太阳黑子活动的周期性的最一般的结论.

### 1 数据与分析方法

1874年5月至2004年5月的月平均黑子数来自于网站ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOILAR\_DATA/SUNSPOT\_NUMBERS, 如图1所示. 同时段的月平均黑子面积数据来自于网站http://science.nasa.gov/ssl/solar/greenwch.htm, 如图2所示. 它们的13点平滑值也在图中显示出来了(13点平滑方法<sup>[4]</sup>在太阳活

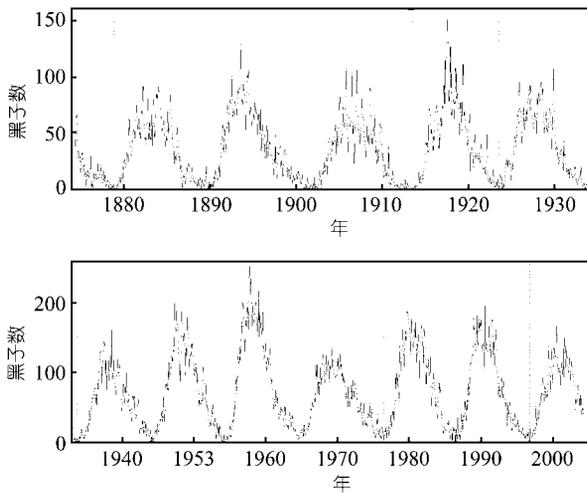


图1 1874年5月至2004年5月的每月黑子数(细实线)及其平滑值(粗实线) 垂直点线为活动周的极小时刻

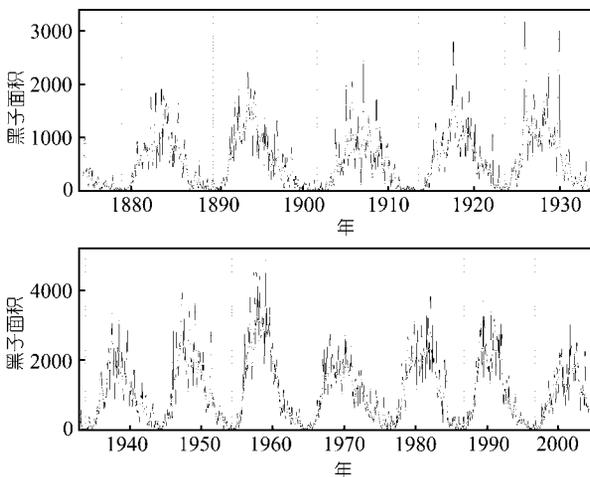


图2 1874年5月至2004年5月的每月黑子面积数(细实线)及其平滑值(粗实线) 垂直点线为活动周的极小时刻

动指数中常常用到). 太阳黑子活动的第三个描述量: 黑子单元面积, 定义为每月黑子面积数与每月黑子数的比<sup>1)</sup>, 可由上述两种数据得到, 如图3所示. 如果黑子数为零, 这时黑子面积也为零, 则黑子单元面积定义为零. 每月黑子单元面积数的13点平滑值如图3中所示.

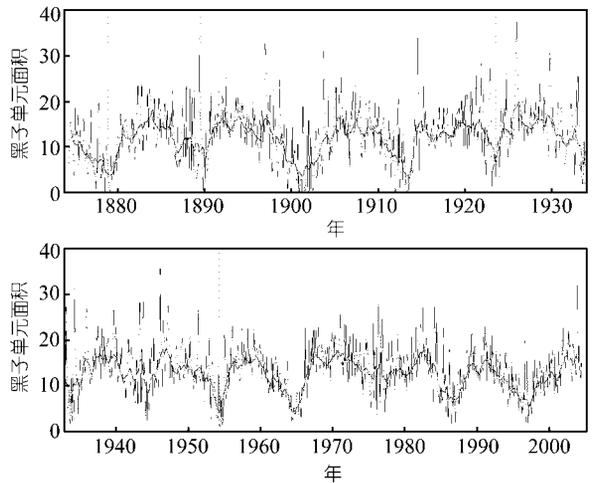


图3 1874年5月至2004年5月的每月黑子单元面积数(细实线)及其平滑值(粗实线) 垂直点线为活动周的极小时刻

小波分析是分析时间序列的功率谱局部变化的一种现代分析方法, 与通常的Fourier分析相比, 它能给出有限数据的边缘效应对周期的影响. 这里, 我们用Morlet小波<sup>[4]</sup>对这三种时间序列数据进行分析来研究现代黑子观测的太阳黑子活动的周期性. 所用小波分析计算方法见文献[11], 软件也由文献[11]提供. 我们将文献[11]的几个FORTRAN文件合并调通后用于本文计算. 得到结果后, 我们再用FORTRAN和PGPLOT编写程序作图.

### 2 现代黑子观测的太阳黑子活动的周期性

图4~6分别显示每月黑子数、每月黑子面积数、每月黑子单元面积数的局部小波功率, 功率被归一化到方差上. 图4和5显示, 黑子数和黑子面积数的局部小波功率谱很相像: 在黑色的低功率谱背景下一显见的亮带, 亮带的形状也很相像, 亮带位于通常所说的11年周期附近, 亮带在1940年后的谱功率明显高于之前; 在30~50年的周期附近有两个依稀可辩的亮带(功率略高于深黑色的背景); 高于60年的

1) 同2511页脚注1)

长周期方面, 由于边缘效应的影响较大, 结果不可靠; 在小于 11 年的短周期部分, 没有可分辨的高功率谱带. 这表明黑子数和黑子面积数的周期性是很相似的: 最显著的周期约为 11 年, 在大于 11 年的长周期方面, 可能存在两个 30~50 年的周期, 在小于 11 年的短周期方面, 即使存在周期功率谱峰, 统计上讲也是很显著的. 图 6 所示的黑子单元面积数的局部功率谱和上述二者的局部功率谱较相似: 在黑色的低功率谱背景下有一显见的亮带, 亮带位于通常所说的 11 年周期附近, 在 30~50 年的周期附近有几个依稀可辨的亮带(功率略高于深黑色的背景); 在小于 11 年的短周期部分, 有很多依稀可辨的功率谱“岛屿”, 它们的功率高于深黑色的背景. 这三个图表明这三个量的周期在大体相似(可总结为现代黑子观测的太阳黑子活动的周期性的特征)的情况下各自有各自的周期精细结构.

每月黑子数、每月黑子面积数、每月黑子单元面积数的总功率谱分别如图 7~9 所示. 三者的总功率谱也彼此相似, 特别是黑子数和黑子面积数尤为相似. 总功率谱表现出和局部功率谱相同的结论: 最为显著的周期是我们常说的约为 11 年的周期, 在长周期方面, 存在两个可能的周期, 在 30~50 之间. 在短周期方面, 虽然存在一些周期功率谱峰, 但统计上讲很不显著的. 每月黑子单元面积数的总功率谱在 0.621 年有一谱峰, 有统计意义, 是个例外. 表 1 列出了三个量的功率谱峰对应的周期. 由此表和图 7~9 知, 太阳黑子活动的最显著的周期为 10.6 年(黑子单元面积数的周期略高, 为 10.9 年), 置信水平高于 95%; 在长

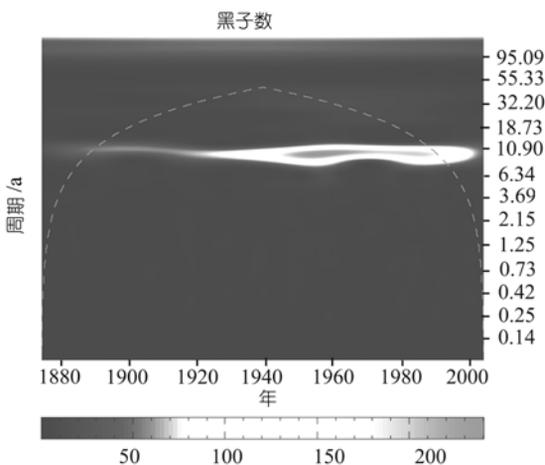


图 4 黑子数的局部功率谱  
虚线往上的区域为边缘效应影响较大(不可忽略)的区域

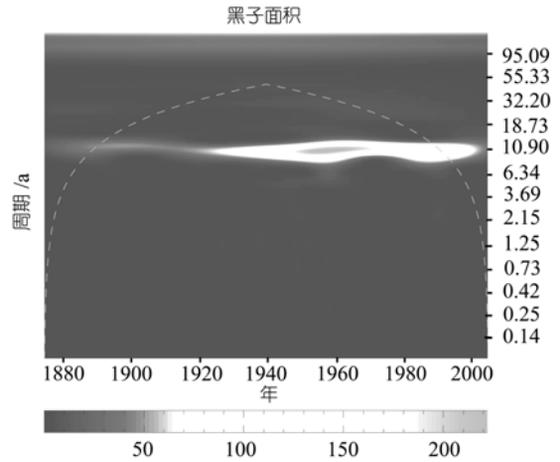


图 5 黑子面积数的局部功率谱  
虚线往上的区域为边缘效应影响较大(不可忽略)的区域

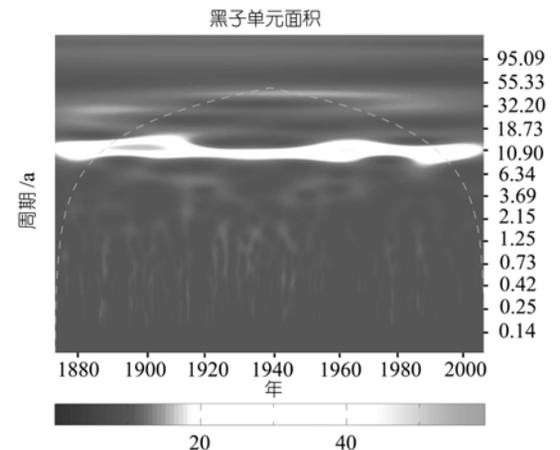


图 6 黑子单元面积数的局部功率谱  
虚线往上的区域为边缘效应影响较大(不可忽略)的区域

于 11 年周期方面, 太阳黑子活动存在两个明显的功率谱峰, 表明有两个可能的周期, 约为 31 和 42 年, 对于不同的活动指数, 数值略有差别, 这两个周期对于黑子数和黑子单元面积数, 置信水平高于平均红噪声谱, 对于黑子面积数, 置信水平低于平均红噪声谱; 在短于 11 年周期方面, 太阳黑子活动存在几个不太明显的功率谱峰, 它们的置信水平都远低于平均红噪声谱. 黑子数和黑子面积数的周期性很相似, 黑子单元面积数的周期性和这两个指数相比, 有些差别: (1) 功率谱峰基本上和另两个指数有对应的周期值, 但在 1.6 年和 3.5 年黑子单元面积数形成功率谱峰, 另两个指数没有, 在 0.4 年黑子单元面积数没有功率谱峰, 另两个指数形成功率谱峰; (2) 黑子单

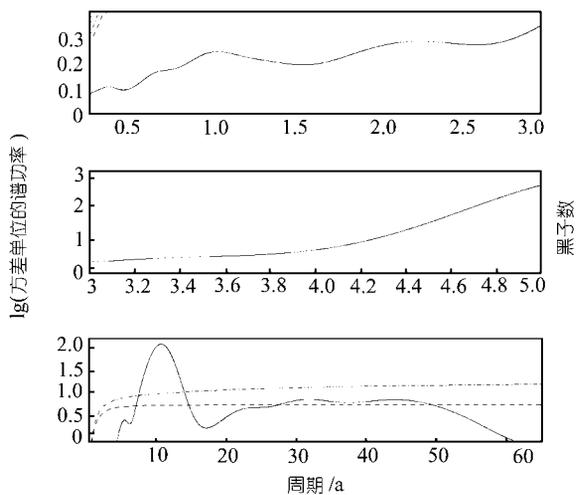


图7 黑子数的方差归一化总功率谱(实线)  
虚线为 $\alpha=0.72$ 时的平均红噪声谱<sup>[11]</sup>,点划线为95%置信水平谱

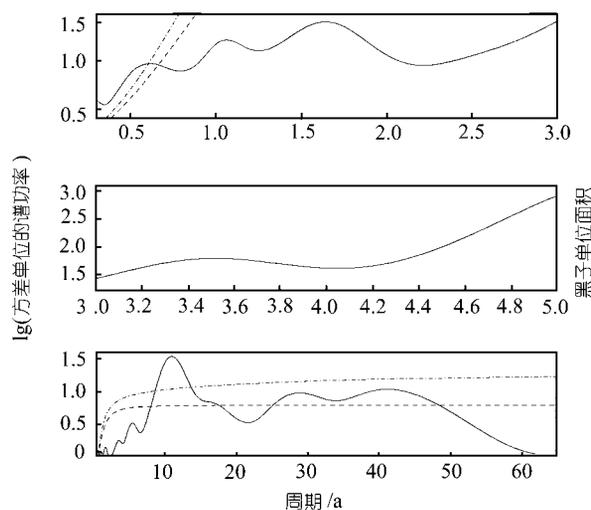


图9 黑子单元面积数的方差归一化总功率谱(实线)  
虚线为 $\alpha=0.72$ 时的平均红噪声谱,点划线为95%置信水平谱

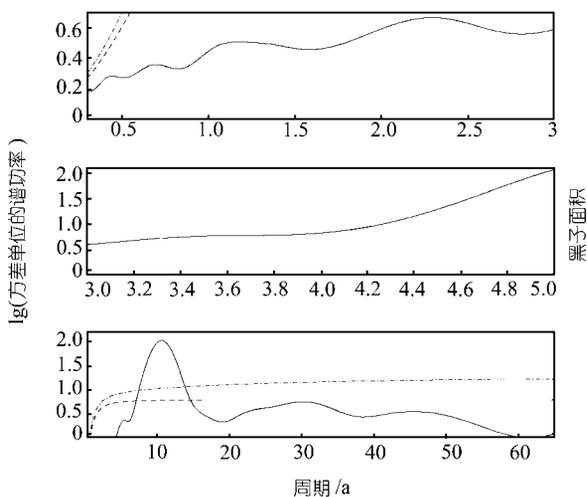


图8 黑子面积数的方差归一化总功率谱(实线)  
虚线为 $\alpha=0.72$ 时的平均红噪声谱,点划线为95%置信水平谱

元面积数在短于和长于11年周期方面,功率峰要明显,在0.6年形成的功率谱峰的置信水平高于90%,成为可能的周期;(3)黑子单元面积数的功率谱峰的周期值都要小,只是在11年周期值,要略大。

接下来,看看太阳黑子活动三个指数的较显著的三个周期的局部功率谱。每月黑子数、每月黑子面积数、每月黑子单元面积数的局部功率谱分别如图10~12所示。和前面对图4~6分析所得结果一样,黑子数和黑子面积数较显著的三个周期的局部功率谱很相像。黑子单元面积的局部功率谱和他们相比,约42年的周期很相像,但约11年的周期和约31年的周

表1 现代黑子观测的太阳黑子活动的可能的周期  
(单位:年)

黑子数	黑子面积数	黑子单元面积数
0.416	0.444	-
-	0.698	0.621
1.068	1.174	1.065
-	-	1.642
2.273	2.292	2.273
-	-	3.515
5.362	5.435	5.406
10.580	10.609	10.930
31.677	30.252	28.813
43.957	45.532	41.190

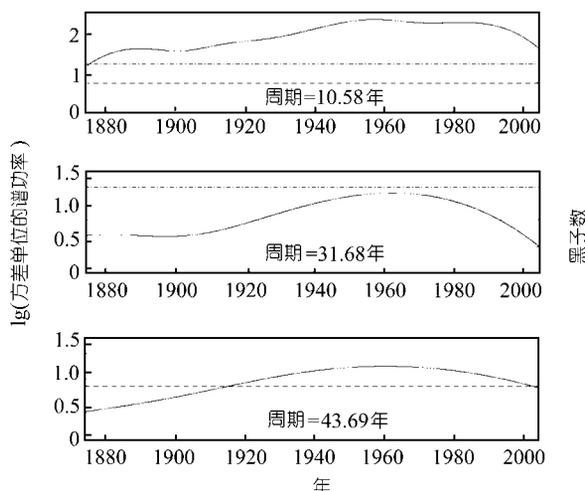


图10 黑子数的较显著的三个周期的方差归一化局部功率谱(实线)  
虚线为 $\alpha=0.72$ 时的平均红噪声谱<sup>[11]</sup>,点划线为95%置信水平谱

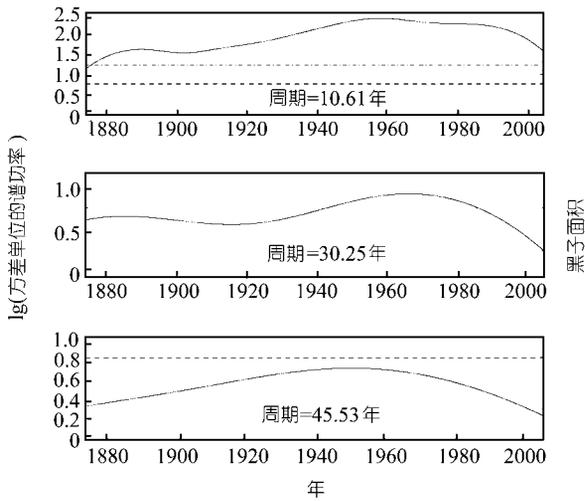


图 11 黑子面积数的较显著的三个周期的方差归一化局部功率谱(实线)

虚线为  $\alpha = 0.72$  时的平均红噪声谱 [11], 点划线为 95% 置信水平谱

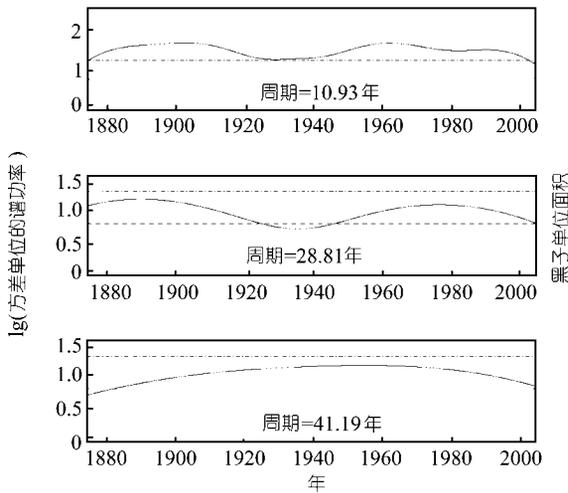


图 12 黑子单元面积数的较显著的三个周期的方差归一化局部功率谱(实线)

虚线为  $\alpha = 0.72$  时的平均红噪声谱 [11], 点划线为 95% 置信水平谱

期的局部功率谱在早期(大约 1920 年以前)被抬高了。太阳黑子活动的约 11 年的周期在所考虑的期间基本上在 95% 置信水平上。约 31 年周期的局部功率谱对于黑子数和黑子面积数, 在后期才高于平均红噪声谱, 但低于 95% 置信水平谱; 对于黑子单元面积数, 只在 1930~1950 年低于平均红噪声谱, 其他时间内高于平均红噪声谱, 但低于 95% 置信水平谱。约 42 年周期的局部功率谱对于黑子数, 在后期高于平均红噪声谱, 但低于 95% 置信水平谱; 对于黑子面积数,

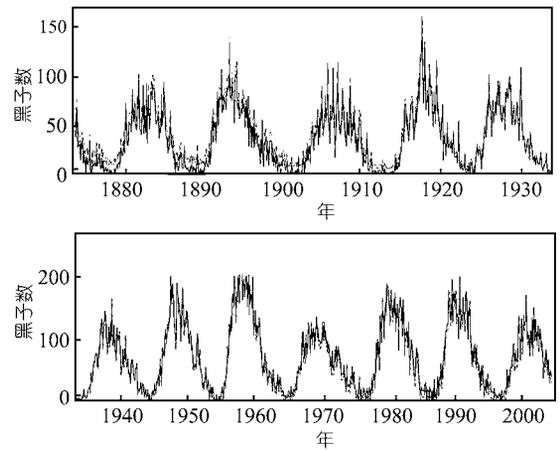


图 13 黑子时间序列数(实线)和它的小波重构时间序列(点线)的比较

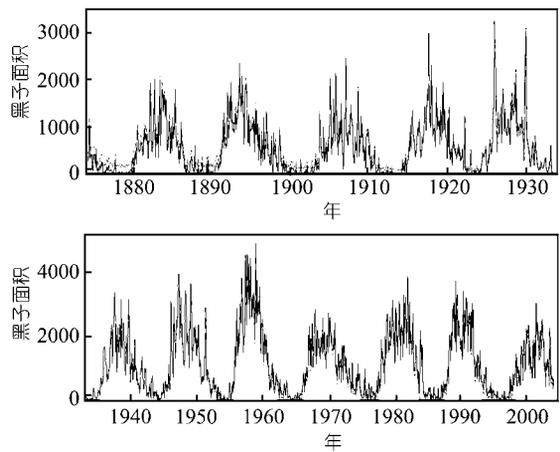


图 14 黑子面积时间序列数(实线)和它的小波重构时间序列(红线)的比较

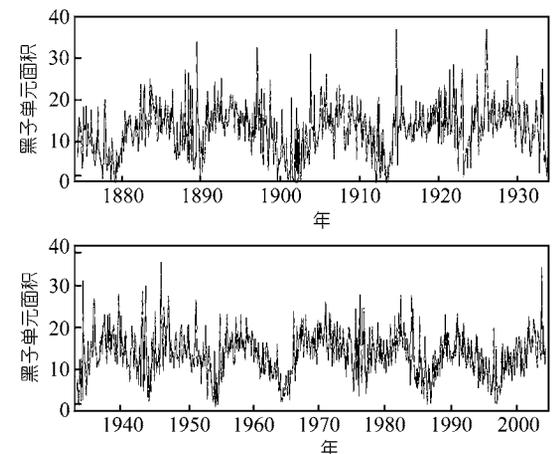


图 15 黑子单元面积时间序列数(黑实线)和它的小波重构时间序列(红线)的比较

基本上低于平均红噪声谱;对于黑子单元面积数,基本上高于平均红噪声谱,但低于95%置信水平谱。

我们对太阳黑子活动三个指数进行了小波重构<sup>[11]</sup>,来检验分析结果的正确性,重构的时间序列和原三个指数的对比如图13~15所示。黑子单元面积数和它的重构符合得非常好。黑子数和黑子面积数也符合得较好,只是在早期的几个周的极小时期和它们对应的重构有些差别,小波重构认为这些低幅度区可能存在噪声。

### 3 结果与讨论

太阳黑子活动主要由三个指数描述:黑子数、黑子面积数和黑子单元面积数。现代黑子观测一般是指第10太阳活动周以来的黑子测量。本文对这三个指数的1874年5月至2004年5月的每月平均值进行小波分析来研究现代黑子观测的太阳黑子活动的周期性,详细分析了它们的总功率谱和局部功率谱,并考虑了结果的统计意义。

黑子数和黑子面积数的局部小波功率谱很相像,这表明黑子数和黑子面积数的周期性是很相似的。黑子单元面积数的局部功率谱和上述二者的局部功率谱较相似,但细节更丰富。这可能是由于黑子单元面积数是黑子数和黑子面积数的比,比值将二者的最近几个周的增长趋势削去所致。三个量各自有各自的周期精细结构。黑子数和黑子面积数较显著的三个周期为约11年、31年和42年,它们的局部功率谱很相像。黑子单元面积的局部功率谱和它们相比,约42年的周期很相像,但约11年的周期和约31年的周期的局部功率谱在早期(大约1920年以前)被抬高了。太阳黑子活动的约11年的周期在所考虑的期间基本上在95%置信水平上。约31年周期的局部功率谱对于黑子数和黑子面积数,在后期才高于平均红噪声谱,但低于95%置信水平谱;对于黑子单元面积数,只在1930~1950年低于平均红噪声谱,其他时间内高于平均红噪声谱,但低于95%置信水平谱。约42年周期的局部功率谱对于黑子数,在后期高于平均红噪声谱,但低于95%置信水平谱;对于黑子面积数,基本上低于平均红噪声谱;对于黑子单元面积数,基本上高于平均红噪声谱,但低于95%置信水平谱。这三个周期是太阳活动的可能的周期,且在后期比早期的谱峰要高。

三者的总功率谱也彼此相似,特别是黑子数和黑子面积数尤为相似。总功率谱表现出和局部功率

谱相同的结论。在短周期方面,虽然存在一些周期功率谱峰,统计上讲,是很不显著的。太阳黑子活动的最显著的周期为10.6年(黑子单元面积数的周期略高,为10.9年),置信水平高于95%;在长于11年周期方面,太阳黑子活动存在两个明显的功率谱峰,表明有两个可能的周期,约为31和42年,对于不同的活动指数,数值略有差别。黑子数和黑子面积数的周期性很相似,黑子单元面积数的周期性和这两个指数相比,有些差别。将我们给出的黑子数的总功率谱和Prabhakarannayar等(2002)对1873~2000年的每月黑子数的小波分析的总功率谱进行比较发现,二者基本上是一致的,但他们得到了5.5年的周期,我们的结果是5.4年,我们有一个2.27年的周期功率谱峰,他们给出的图上似乎也有这个峰,但没有注明。二者的比较证实我们结果的可靠性。

我们对三个量的13点平滑值也进行了小波周期分析。平滑的结果将使太阳活动的短周期功率谱峰消失,这是可以理解的,因为13点的年平滑将削去黑子活动的季节变化。具体结果将另文给出。

致谢 本工作的一部分是在大熊湖天文台完成。感谢大熊湖天文台的王海民教授对本研究工作的支持。

### 参 考 文 献

- 1 Li K J, Zhan L, Wang J, et al. A method for the prediction of relative sunspot number for the remainder of a progressing cycle with application to cycle 23. *A&A*, 2002, 392: 301~307[DOI]
- 2 张元东, 维宝. 太阳黑子. 北京: 中国华侨出版社, 1989. 1~3
- 3 林元章. 太阳物理导论. 北京: 科学出版社, 2000. 411~418
- 4 Waldmeir M. The sunspot activity in the year 1610~1960. *Zurich Schulthess & CO AG*, 1961, 1~1
- 5 Wilson R M, Hathaway D H, Reichmann E J. On the behavior of the sunspot cycle near minimum. *J Geophys Res*, 1996, 101(A9): 19967~19972[DOI]
- 6 Li, K J. The shape of the sunspot cycle described by sunspot areas. *A&A*, 1999, 345: 1006~1009
- 7 Fligge M, Solanki S K. Inter-cycle variations of solar irradiance: Sunspot areas as a pointer. *Solar Phys*, 1997, 173: 427~439[DOI]
- 8 Prabhakarannayar S R, Radhika V N, Revathy K, et al. Wavelet analysis of solar, solar wind and geomagnetic parameters. *Solar Phys*, 2002, 208: 359~373[DOI]
- 9 Polygiannakis J, Preka-Papadema P, Moussas X. On signal-noise decomposition of time-series using the continuous wavelet transform: application to sunspot index. *MNRAS*, 2003, 343: 25~734[DOI]
- 10 Krivova N A, Solanki S K. The 1.3-year and 156-day periodicities in sunspot data: Wavelet analysis suggests a common origin. 2002, *A&A*, 394:701~706
- 11 Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79:61~78[DOI]

(2004-07-02 收稿, 2004-10-09 收修改稿)