

# 太阳活动的甚长周期性变化

尹志强 \* 马利华 韩延本 \* 韩永刚

( 中国科学院国家天文台, 北京 100012; 中国科学院研究生院, 北京 100049.

\* 联系人, E-mail: [yinzhq@bao.ac.cn](mailto:yinzhq@bao.ac.cn); [hyb@bao.ac.cn](mailto:hyb@bao.ac.cn))

**摘要** 近期 Solanki 等利用树木年轮中  $^{14}\text{C}$  含量变化的测算资料, 重建了过去 10000 多年间采样间隔为 10 a 的太阳黑子数序列, Usoskin 等则利用地磁变化资料重建了过去近 7000 年间采样间隔也为 10 a 的太阳黑子数序列. 本文采用 Lomb-Scargle 谱分析方法研究了这两个序列, 得到了太阳活动的百年至千年时间尺度的周期和准周期, 它们大约为 225, 352, 441, 522 和 561 a 以及近 1000 a 和略大于 2000 a 的准周期. 同时采用小波变换方法对它们的进一步分析表明, 这些长和甚长的准周期性分量均具有较明显的时变特征, 即它们的周期长度和波动的幅度是随着时间的推移发生变化的, 并在某些时段出现较大的波动, 显示了太阳活动长期变化的复杂性.

**关键词** 太阳活动 太阳黑子 Lomb-Scargle 谱分析 小波变换

太阳活动对地球系统的动力学过程产生深远的影响, 其活动的强弱直接或间接地影响到地球上的许多地球物理现象. 许多研究已表明, 气温变化、旱涝、地震、火山活动等一些地球物理过程和自然灾害现象与太阳活动有着密切的关系. 因此, 对太阳活动的变化规律及特征的研究, 不仅为太阳物理学者所重视, 也一直受到地球科学界众多领域和学科学者的关注 [1~3].

长度约 11 a 的周期, 是太阳活动中最主要的和最早被确认的周期, 并依此划分太阳活动周. 根据相邻太阳活动周中前导黑子磁性的变化, 人们又定义了太阳活动约 22 a 的磁性周期. 研究还陆续发现太阳黑子相对数在年代际尺度上存在约 60、约 80~100 (世纪周期) 和约 200 a (双世纪周期) 等相对较长的周期性和准周期性波动 [4~8]. 但太阳黑子相对数的实际观测资料仅有约 400 年的历史, 对确认太阳活动较长的周期, 例如世纪周期和双世纪周期, 这些资料的时间跨度就显得不足, 特别是如果我们想认识太阳活动更大尺度的周期性变化, 就需要更长期的太阳活动资料. 同时, 一些时间尺度较大的自然现象, 如气候变迁、全球变暖等问题, 也被初步证明与太阳活动存在着复杂的关系, 并在近些年受到人们的特别关注 [9~11]. 在研究它们与太阳活动的关系时, 同样需要我们对更长期的太阳活动有更多的认识 and 了解. 实际上, 一些学者已在不断努力寻找可以反映更长历史时期太

阳活动的代用资料. Solanki 等人 [12] 在 2004 年发表了他们利用树木年轮中  $^{14}\text{C}$  含量变化重建的过去 10000 多年间的太阳黑子数序列的论文. 2006 年, Usoskin 等 [13] 发表了他们利用地磁变化资料重建过去近 7000 年的太阳黑子数序列的论文. 本文采用 Lomb-Scargle 谱分析和小波变换的方法对这两个重建的太阳黑子序列进行了研究 (Usoskin 的合作者 Korte 向作者赠送了他们的资料), 分析了太阳活动大尺度的周期性和准周期性波动, 并初步讨论这些准周期分量的时变特征.

## 1 长序列太阳黑子数

自然界的  $^{14}\text{C}$  具有放射性, 它主要是由银河宇宙线中的中子轰击地球大气中的  $^{14}\text{N}$  产生的. 在大气环境中, 新产生的  $^{14}\text{C}$  游离时间很短, 一般与  $\text{O}_2$  结合成  $^{14}\text{CO}_2$ , 它与大气中的  $^{12}\text{CO}_2$  化学性质相同, 混合后参与自然界的交换循环. 当太阳活动强烈时, 太阳发射的粒子流增强, 在地球周围形成对宇宙线较强的屏蔽作用, 使大气中生成的  $^{14}\text{C}$  含量下降, 导致  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  比值下降; 反之当太阳活动减弱时, 地球大气中的  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  比值增大. 这一变化信息被保留在树干中, 测量树木年轮中  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  变化的资料, 可得到反映太阳活动的信息. Solanki 等人 [12] 据此重建了跨度约 11400 年间的太阳活动序列, 数据始自公元前 9455 年至公元 1895 年, 其中 1600 年以后的部分与天文观测得到

的太阳黑子序列能够较好地吻合。他们考虑到自19世纪后期化石燃料(如煤)燃烧及后来的核试验对大气中 $^{14}\text{C}$ 的含量的影响,数据只归算到1900年以前。对 $^{14}\text{C}$ 含量的采样间隔为10 a,据此重建了10 a间隔的太阳黑子数平均值。

宇宙线撞击地球大气层时会受到太阳磁场活动和地磁场活动的调制,用放射性同位素来反演太阳活动会受到这一因素的影响,同时地磁场本身强度的变化也会受到太阳活动的调制。因此,可以从对地磁场的研究来反演太阳活动的水平。偶极矩是经常用来描述地磁场强弱的物理量,Korte和Constable通过对偶极矩的研究,利用CALSK.2模型反演了7000年来的古地磁的变化<sup>[14]</sup>,以此数据为基础,Usoskin<sup>[13]</sup>用与Solanki<sup>[12]</sup>同样的方法反演了7000年来太阳黑子数的变化,数据始自公元前4995~1995年,采样间隔同样为10 a。

当然,这样的太阳黑子数序列与用天文望远镜观测的结果相比,其精度会低一些,且10 a的数据采样间隔较大,不能用于研究太阳活动的中高频变化。但是,这样的资料采样间隔对研究太阳活动的双世纪周期及更长的周期性波动是适宜的,尤其是考虑到向历史时期延伸这样长时间的太阳活动资料序列还不多见,该序列对研究甚长期的太阳活动是非常有意义的。为叙述方便,以下这两个序列简称为S(Solanki)序列和K(Korte)序列,并绘于图1中。

## 2 数据分析

### 2.1 Lomb-Scargle 谱分析

这里采用的Lomb-Scargle(L-S)功率谱由Lomb

首先提出并经Scargle等人完善得到。把Lomb谱定义为<sup>[15,16]</sup>

$$P_N(\omega) = \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ \frac{\left[ \sum (X(t_j) - \bar{X}) \cos \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum \cos^2 \omega(t_j - \tau)} + \frac{\left[ \sum (X(t_j) - \bar{X}) \sin \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum \sin^2 \omega(t_j - \tau)} \right\}, \quad (1)$$

其中在 $t_j$ 时刻( $j=1,2,\dots,N$ )得到的观测数据为 $X(t_j)$ ,  $\bar{X}$ 为 $X(t_j)$ 的平均值,  $\sigma^2$ 为方差,  $\omega$ 为角频率, 相位 $\tau$ 由下式给出:

$$\tan(2\omega\tau) = \sum \sin 2\omega t_j / \sum \cos 2\omega t_j. \quad (2)$$

对S序列的L-S谱分析结果示于图2,可以看出,太阳活动中含有几个较为显著的周期性信号,分别约为225(双世纪周期), 352, 441, 522, 561, 987及约2270 a。从图1的原始曲线可以看出,在公元前8000年前后,太阳黑子数的值相对大一些,到公元前5000年前后变得相对较小,而在公元前2500年前后,又变得相对略大,这是谱分析的结果显示存在一个约7000 a周期的原因。进一步采用调和分析方法求出上述几个显著周期的周期参数,列于表1中。

### 2.2 小波分析

小波分析通过选取合适的基小波,可以较好地展示出非平稳时间序列的时变特征<sup>[17,18]</sup>。对近代太阳黑子相对数序列的分析表明,其中的一些周期分量,包括最主要的约11 a的周期都是不稳定的,它们具有程度不等的时变性,其周期长度和振幅随着

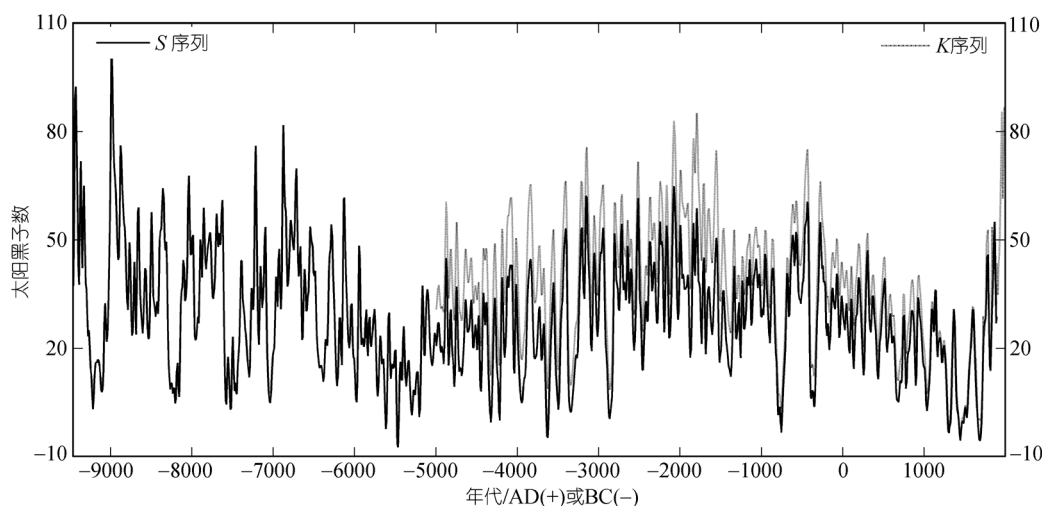


图1 太阳黑子数序列

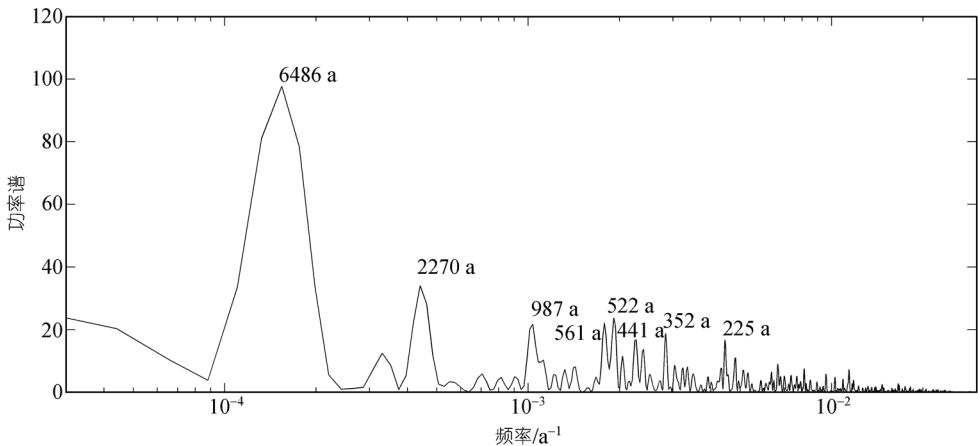


图 2  $S$  序列的 L-S 谱

表 1  $S$  序列主要长周期的周期参数

| 周期/a | 振幅   | 相位/(°) |
|------|------|--------|
| 6486 | 14.2 | 295.5  |
| 2270 | 4.9  | 7.1    |
| 987  | 3.4  | 345.2  |
| 561  | 4.2  | 50.1   |
| 522  | 4.0  | 355.2  |
| 441  | 4.0  | 276.6  |
| 352  | 4.5  | 119.4  |
| 225  | 4.1  | 11.0   |

时间的推移发生变化 [19~21]。本文采用 Morlet 小波对重建的太阳活动序列作了进一步的分析。

$S$  序列小波变换的结果置于图 3(a)中, 左边子图 为小波局域功率谱, 其中横轴表示时间, 纵轴表示周 期。黑色虚线标出了端部效应的影响区域。由于本文 主要讨论百年、千年较长时间尺度的太阳周期性和准 周期性活动的特征, 所以我们将小波分析的周期范 围设定为 32~4096 a。小波图中, 背景置为白色, 由蓝 色至红色表示能量由低到高的变化, 颜色的深浅表 示能量的相对大小(与该周期振幅的大小相对应)。黑 色实线标出了以白噪声谱为背景的 95% 的置信线。 右边子图为全局小波功率谱, 虚线标出的是以白噪 声谱为背景的 95% 的置信线。从图 3(a)中可以看出, 由 L-S 谱分析得到的几个主要的周期成分实际上都 是不稳定的, 其周期长度和振幅都随着时间的推移 发生变化, 即具有时变性。

图 3(b)为  $K$  序列的小波分析结果(采用的参数与 图 3(a)相同)。与图 3(a)相比较可以看出, 在相同的时 段中二者的形态非常相似, 这和图 1 给出的时序图中 两者比较吻合是一致的。由于小波分析中的端部效

应的影响, 我们只考察小于千年的周期成分。

对于由不同的作者采用不同的资料得到的这两 个太阳黑子数据序列, 小波分析结果显示出它们在 重合时间内表现出具有相近的准周期分量, 以及类 似的变化特征, 使它们之间具有互相印证的作用。

3 结果与讨论

谱分析的结果表明, 太阳活动序列具有明显的 长周期信号, 比较突出的几个长周期约为 225, 352, 441, 522, 561, 987, 2270 a。有人曾对  $^{14}\text{C}$  记录数据做 了谱分析, 认为  $^{14}\text{C}$  变化代表的太阳活动存在着约 105, 131, 208, 232, 385, 504, 805 和 2241 a 等周期成分 [3](<http://pubs.usgs.gov/fs/fs-0095-00/fs-0095-00.pdf>), 本文谱分析的结果与文献 [3] 的结果基本接近, 但本 文没有考虑部分幅度较小的周期。进一步的计算表 明, 在全局小波功率谱中,  $S$  序列较为明显的周期值 为 220, 517, 965, 2241 a, 这与 L-S 谱分析得出的周期 值相近。 $K$  序列的全局小波功率谱中, 小于千年的谱 峰的振幅相差不大, 其周期值分别为 214, 357, 511 和 757 a。上述几个太阳活动长周期在小波局域功率谱 中同样有所显示, 而且小波变换更清晰地展示了上 述周期性信号的时变特征。

对于双世纪周期, Ogurtsov 等人 [7] 在 2002 年对  $^{14}\text{C}$  的分析结果表明, 其周期长度的变化大约在 170~260 a 之间。我们分析  $S$  序列得出的结果与之类似, 大约在 190~220 a 之间, 并进一步表明, 该周期性信号的振 幅相对较大的时段处在公元前约 8000~6000 年间、公 元前约 4000~2700 年间、公元前约 700~50 年间、以及 公元 1500 年前后的几个时段内。约 352 和 441 a

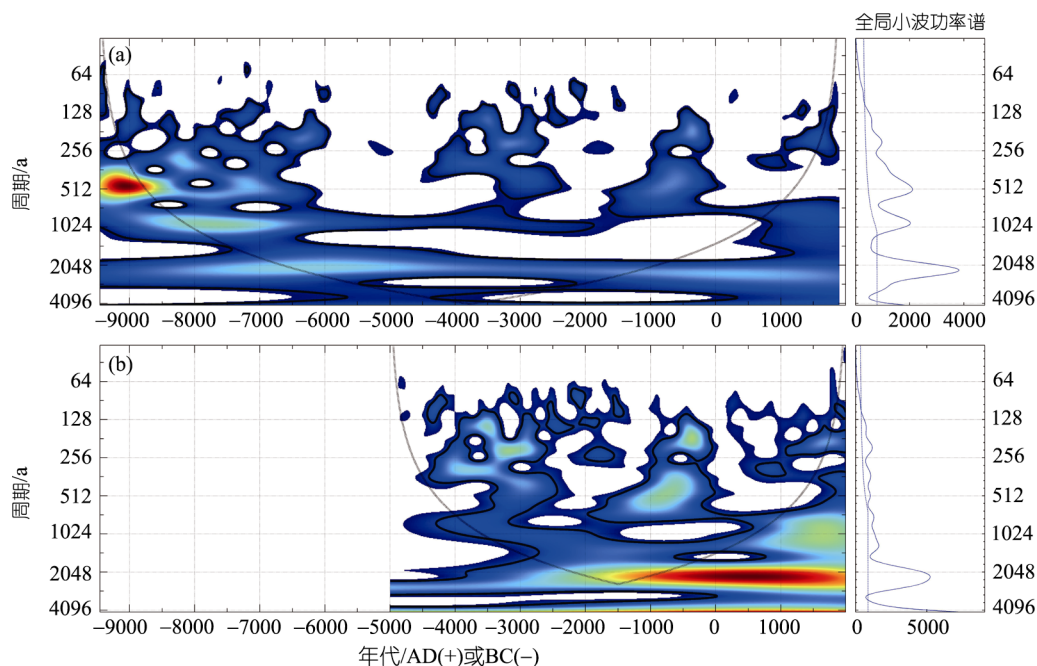


图3 太阳黑子数的小波变换图

(a) S 序列; (b) K 序列

周期的振幅与双世纪周期的相当,而时变的幅度相对更大些,只在少部分时段较明显,而且在局域小波功率谱中,这两个周期成分不同时存在。如在公元前8000年前后,约352 a的周期较明显,在公元前7000年前后则是约441 a的周期较明显,类似的还有在公元前3500年前后,由约352 a的周期转换为约441 a的周期。同样,约522和561 a周期成分时变的幅度也相对较大,从小波分析的结果看,谱分析得出的这两个周期应为约510 a的准周期时变的结果。可见这几个周期在过去的约10000年间几乎都不能稳定地保持下来,有些周期存在的时间较短,但它们在某些时段中振幅较大,因此在谱分析中会显示出这些周期分量的存在。

更长的周期分量是约千年和约双千年的周期,由图3(a)可以看到,与其他周期相比,它们较为稳定,但也是时变的。计算表明,所谓千年周期,其周期长度在更多的时间里是处在约900~960 a间,仅在极少数时段达到和略超过千年,例如在公元前2300年前后。它的总体表现是,在公元前8500~6500年间振幅相对较大,之后逐渐减小,而到约公元前2000年后,振幅变得很小,似乎表明:( )该周期不再存在;( )在公元800年前后出现的约750~800 a的周期,也许是千年周期发生较大时变的结果。双千年周期的长

度,谱分析结果显示约为2270 a,小波分析表明其处在约2040~2390 a间,并表现出近期该周期值略长,早期略短的特点。在过去的约10000年间,该周期分量振幅的时变程度相对较小。有作者对格陵兰冰心、地中海岩心以及北美花粉记录做谱分析,发现存在平均约1500 a的准周期,并被认为可能是受太阳活动影响而产生的<sup>[9,10,22]</sup>,但在本文中我们发现这一周期在太阳活动中是不明显和不确定的,只是在K序列的小波图中短期存在不稳定的长度约1300~1400 a的周期分量。

有学者分析天文观测的太阳黑子相对数,发现太阳活动的一些周期分量具有时强时弱的变化特征,时变周期的时间尺度由几十天到上百年不等,本文的研究表明,太阳活动的长波动同样具有明显的时变特征。这可能是由太阳本身的性质决定的。本工作得到的太阳活动具有的长周期信号,反映了过去10000多年间太阳活动的大尺度变化状况,这对太阳活动长期变化、气候变迁等交叉课题的研究,以及对太阳活动长期预报的研究,将具有一定的参考意义。同时,这些长周期波动具有的时变性,表现了太阳活动的复杂性。这同时也提醒我们,在开展有关的研究使用太阳活动的这些准周期以及进行太阳活动甚长期预报时,对这些大尺度的准周期波动的时变性应

当给予充分的注意. 对太阳活动长期变化的复杂性及其在气候变迁中所起的作用等问题, 也需要开展更深入的研究.

致谢 本文的研究采用了 Solanki 等人发布的重建的 11000 年太阳黑子数序列, Korte 向我们赠送了他们重建的 7000 年太阳黑子数序列, 作者对此表示衷心感谢. 本文所用小波程序是在 Torrence 和 Compo 提供的程序基础上修改的, 在此一并表示感谢.

### 参 考 文 献

- 1 Eddy J A. The maunder minimum. *Science*, 1976, 192: 1189—1202
- 2 Friis-Christensen E, Lassen K. Length of the solar cycle: An indicator of solar activity closely associated with climate. *Science*, 1991, 254: 698—700[DOI]
- 3 Damon P E, Sonett C P. Solar and terrestrial components of the atmospheric  $^{14}\text{C}$  variation spectrum. In: Sonnet C P, Giampapa M S, Matthews M S, eds. *The Sun in Time*. Tucson: University of Arizona Press, 1991: 360—388
- 4 Berdichevskaya V S. Some long-period properties of solar activity. *Astron Zhurn* (in Russian), 1976, 53: 822—826
- 5 Otaola J A, Zenteno G. On the existence of long-term periodicities in solar activity. *Solar Phys*, 1983, 89: 209—213[DOI]
- 6 Mergentaler J. On the long-period changes of solar activity. *Acta Astron*, 1984, 34(2): 263—267
- 7 Ogurtsov M G, Nagovitsyn Y A, Kocharov G E, et al. Long-period cycles of the sun's activity recorded in direct solar data and proxies. *Solar Phys*, 2002, 211(1): 371—394[DOI]
- 8 Le G M, Wang J L. Wavelet analysis of several important periodic properties in the relative sunspot numbers. *Chin J Astron Astrophys*, 2003, 3(5): 391—394
- 9 Versteegh G J M. Solar forcing of climate. 2: Evidence from the past. *Space Sci Rev*, 2005, 120: 243—286[DOI]
- 10 Bard E, Frank M. Climate change and solar variability: What's new under the sun? *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 248: 1—14[DOI]
- 11 韩延本, 郭增建, 吴瑾冰, 等. 太阳活动对中国近东西向断层 8 级大地震的可能触发. *中国科学 G 辑*, 2003, 33(6): 567—573
- 12 Solanki S K, Usoskin I G, Kromer B, et al. Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. *Nature*, 2004, 431: 1084—1087[DOI]
- 13 Usoskin I G, Solanki S K, Korte M. Solar activity reconstructed over the last 7000 years: The influence of geomagnetic field changes. *Geophys Res Lett*, 2006, 33(8): L08103(1-4) [DOI]
- 14 Korte M, Constable C G. The geomagnetic dipole moment over the last 7000 years—New results from a global model. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 236: 348—358[DOI]
- 15 Scargle J D. Studies in astronomical time series analysis. II-statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophys J*, 1982, 263: 835—853 [DOI]
- 16 Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, et al. *Numerical recipes in Fortran 77*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 569—577
- 17 Kumar P, Foufoula-Georgiou E. Wavelet analysis for geophysical applications. *Rev Geophys*, 1997, 35(4): 385—412[DOI]
- 18 Torrence C, Compo G. A practical guide to wavelet analysis. *Bull Amer Meteor Soc*, 1998, 79: 61—78[DOI]
- 19 韩延本, 韩永刚. 太阳黑子相对数变化的小波分析. *科学通报*, 2001, 46(24): 2031—2034
- 20 Le G M. Wavelet analysis of the schwabe cycles' properties of solar activity. *Chin J Astron Astrophys*, 2005, 4(6): 578—584
- 21 李可军, 苏同卫, 梁红飞. 现代黑子观测的太阳黑子活动的同步性. *科学通报*, 2004, 49(24): 2511—2516
- 22 Bond G, Kromer B, Beer J, et al. Persistent solar influence on north Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 2001, 294: 2130—2136[DOI]