

文章编号: 1000-8349(2010)02-179-09

太阳黑子的世纪周期及对 24、25 活动周的预报

褚 哲^{1,2}, 聂清香¹, 张 军²

(1. 山东师范大学 物理与电子科学学院, 山东济南 250014; 2. 中国科学院 国家天文台 太阳活动重点实验室, 北京 100012)

摘要: 太阳活动除了具有公认的 11 a 周期以外, 还存在着一个 80~120 a 变化的世纪周期, 也称为 Gleissberg 周期。使用傅里叶变换和小波分析的方法, 分析了 1700~2008 年的年均黑子数世纪周期的变化规律。得到结果: 在太阳活动世纪周期的低谷期, 所对应 11 a 太阳周的极大年和极小年的黑子数目都比其他太阳周的低。在这 300 多年里, 世纪周期的周期长度也有变化。由世纪周期的变化趋势, 预测第 24、25 太阳活动周将处于世纪周期的低谷期。通过对以前 3 个世纪周期的谷期黑子数求平均的方法, 得到第 24、25 太阳周极大年年均黑子数为 63.6 ± 21.1 , 极小年的为 2.2 ± 2.1 。这些结果有助于理解当前太阳活动反常宁静这一现象。

关键词: 太阳活动周; 世纪周期; 黑子数; 太阳预报

中图分类号: P182.4⁺1 **文献标识码:** A

1 引 言

太阳活动是太阳大气中局部区域各种活动现象的总称。太阳黑子是太阳活动的主要标志, 其他活动现象都与黑子有密切关系。1843 年, Schwabe^[1] 首先发现太阳黑子的活动周期约 11 a, 该周期被称为 Schwabe 周期。两个太阳活动极小年之间被称为一个太阳活动周, 从 1755 年的太阳活动极小算起为第 1 活动周^[2]。黑子的周期长度并不规则, 平均周期为 11.1 a, 最短为 9.0 a, 最长为 13.6 a。太阳黑子有大有小, 有的单个, 有的成群, 为了定量地描述黑子的数量, 1848 年 Wolf 提出了“黑子相对数”的概念^[2]。1862 年 Wolf^[3] 根据当时的黑子记

收稿日期: 2009-06-30; **修回日期:** 2009-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40890161); 中国科学院创新方向性项目 (KJ CX2-YW-T04); 973 计划支持项目 (2006CB806303)

录指出太阳活动可能存在由 7 个太阳活动周组成的 78 a 周期。

如果把每个太阳活动周的极大年和极小年的黑子数分别做统计, 所得的数据就不再包含 11 a 周期的信息, 从而把长周期信息更清楚地显示出来。 Gleissberg^[4,5] 提出一种方法——对每个活动周极大年的平均黑子数做平滑, 并得到了公认的世纪周期或称 Gleissberg 周期。 Garcia 和 Mouradian^[6] 用同样的方法对每个活动周极小年的平均黑子数做平滑, 也得到了公认的世纪周期。分析结果显示世纪周期的长度在 80~120 a 范围内变化^[7]。本文也采用他们的平滑方法对 1700~2008 年间活动周极大年和极小年的年均黑子数分别做平滑处理, 得到两组数据。另外对每个太阳周的年均黑子数加和, 得到第三组数据。利用傅里叶变换和小波分析的方法分别对这些数据做分析, 从而进一步研究世纪周期的变化规律。

现在正处于第 24 太阳活动周的初期, 预报第 24、25 太阳周的黑子数是当前太阳活动预报面临的重要课题。对长期太阳活动进行预报的方法主要分为先兆法和对太阳周的统计法两大类^[8], 李可军等人^[9] 在 2001 年对太阳活动的预报方法和效果进行了统计研究, 分别比较了 63 个对第 22 周黑子数极大值的预报, 和 48 个对第 23 周的预报, 他们认为先兆法比其他预报方法更优越。近几年来, 太阳活动预报方法的研究虽然已有不少的进展, 但是对第 24 周极大年黑子年均数的预报结果却有很大的弥散^[10], 如 Kane^[11] 所列出的 43 个 24 周极大年预报值在 50~200 之间, 显示出不同的预报方法之间存在着较大的差别。可见这类研究有待发展和完善。由于太阳长周期变化对 11 a 周期的活动起到很大的调制作用^[12], 利用太阳长周期活动强弱的变化, 可以推测出未来太阳周的活动情况。本文试图通过对黑子世纪周期的研究, 建立一种可行的太阳活动的长期预报方法。

2 数据和方法

2.1 所用数据

本文所采用的数据是 1700~2008 年的年平均太阳黑子相对数 R_Z , 取自太阳影响数据分析中心 (Solar Influences Data Analysis Center, SIDC, 网址 <http://sidc.oma.be/>)。年均黑子数据覆盖了从第 -4 到第 23, 共 28 个太阳活动周, 包含了大约 3 个世纪周期。世纪周期的极大期和极小期分别用峰期和谷期来表示, 以区别于太阳活动周的极大年和极小年。

对这 28 个太阳活动周, 我们采用 Gleissberg^[4] 所建议的平滑方法, 可以得到 28 个太阳活动极大年附近的黑子数平滑值 $R_M(N)$, 其中 N 表示太阳活动极大年所对应的年份, 平滑公式为

$$R_M(N) = \frac{1}{8} \left[\sum_{i=-2}^1 R_Z(N+i) + \sum_{i=-1}^2 R_Z(N+i) \right], \quad (1)$$

这个公式表示对太阳活动极大年附近的 5 个点做平均, 中间的 3 个点在求和时算了两次。用同样的方法还可以得出 28 个太阳极小年的黑子数平滑值 $R_m(N)$, 这里的 N 表示太阳活动极小年所对应的年份; 另外通过对每个太阳活动周的统计, 还可以得到每个活动周中所有年份的年均黑子数之和 $R_T(N)$ 。上述 4 组数据 R_Z 、 $R_M(N)$ 、 $R_m(N)$ 和 $R_T(N)$

的变化曲线见图 1(a)~(d) 所示。图 1(a) 中给出的是 309 a 的年均黑子数, 从这条曲线可以非常清楚地看出黑子数的 11 a 周期。粗线表示的是黑子数据的低通滤波曲线, 截止频率为 0.02 a^{-1} , 从这条曲线可以看出年均黑子数存在着一个约为 100 a 的世纪周期, 大约包含 3 个世纪周期。(b) 和 (c) 分别表示的是太阳周极大年和极小年黑子数的平滑值随时间的变化。(d) 表示的是每个太阳周内的年均黑子数之和, 这与 Wilson^[13] 在 1988 年的所给出的月均黑子数之和相类似。从这些图中可以看出这 3 个世纪周期的谷期大约位于 1700~1720 年, 1800~1820 年和 1900~1920 年。

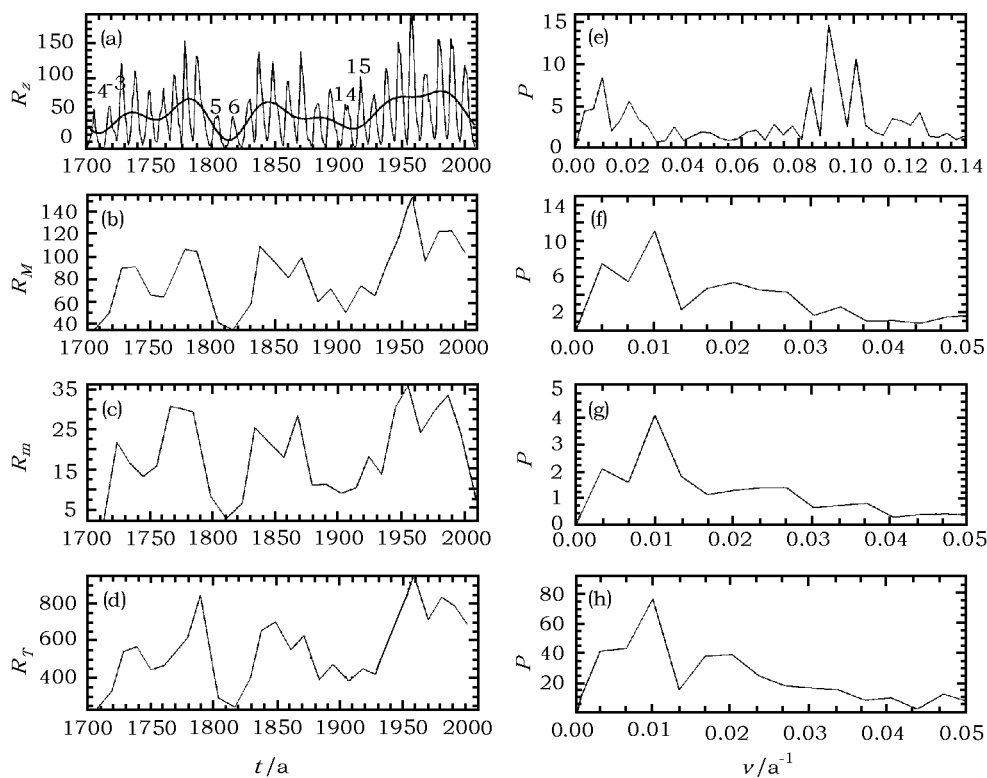


图 1 (a) 年均黑子相对数 R_z 及其低通滤波曲线, 所标的数字为太阳周序号; (b) 太阳周极大年黑子数平滑值 $R_M(N)$; (c) 太阳周极小年黑子数平滑值 $R_m(N)$; (d) 每个太阳周内年均黑子数之和 $R_T(N)$; (e)~(h) 分别对应的是 (a)~(d) 的傅里叶频谱分布。

2.2 傅里叶分析

利用傅里叶变换的方法, 可以把时间序列的信号转化为频率里功率分布的信号。我们对 300 多年间太阳黑子数进行傅里叶变换处理, 得到太阳黑子的周期性活动在相应频率上的分布信息。图 1(e) 给出了年均黑子数的频谱分布图。从频谱分布的曲线上可以看出有几个比较明显的峰, 其中频率在 0.09 a^{-1} 左右对应的是 11 a 的活动周期, 频率在 0.01 a^{-1} 左右对应世纪周期, 这与 Zhukov 和 Muzalevskii^[14] 在 1969 年, 以及 Cole^[12] 在 1973 年用傅里叶变换所得出的结果相一致。图 1(f)~(h) 中不再包含 11 a 周期的信息, 因而世纪周期的功率谱变得更明显。

2.3 小波分析

小波分析是近几年发展起来的一种对数据进行处理的数据分析方法。小波分析优于傅里叶变换的地方是，它在时域和频域都具有表征信号局部特征的能力^[15]。Torrence 和 Compo^[16]曾在文章中给出过小波分析的详细介绍。小波分析的基本原理就是把时间函数用一个小波函数进行分解，表示成为小波级数的形式。最常用的小波函数为 Morlet 小波：

$$\Psi_0(t) = \pi^{1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2}, \quad (2)$$

它是由一个复指数函数通过高斯函数的调制而得到，其中 ω_0 为小波数，一般取 $\omega_0 = 6$ 。

小波函数通过平移或者伸缩可以改变它的位置或频率。定义一个时间序列函数的连续小波变换为时间信号与平移或伸缩的小波函数的卷积：

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \cdot \psi^* \left[\frac{(n' - n)\delta t}{s} \right], \quad (3)$$

式中 x_n 表示离散的时间信号， n 表示这个信号的序列数， N 为序列的个数， δt 为时间间隔， s 表示尺度，用来伸缩小波的宽度，与周期和频率有关，* 号表示求复数的复共轭。 $W_n(s)$ 即为小波系数，小波功率谱就是对小波系数求模的平方 $|W_n(s)|^2$ 。从式 (3) 可以看到，小波系数不仅有频率的指标 s ，而且还有时间的指标 n 。对于同一个频率指标 s ，在不同时刻 $n\delta t$ ，小波系数也是不同的。这样就克服了傅里叶变换无法在时域里显示功率分布的不足。

如果把小波功率谱在时间上做平均，可以得出全局小波功率谱：

$$\overline{W^2}(s) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |W_n(s)|^2. \quad (4)$$

全局小波功率谱与傅里叶变换所得结果相似，不同之处是傅里叶变换给出的是功率随着频率的分布，而全局小波功率谱给出的是功率随周期的分布。

我们采用小波分析的方法对图 1(a)~(d) 组数据进行了分析，结果如图 2~5 所示。

图 2(a) 给出的是年均黑子数的小波功率谱，横坐标为时间，纵坐标为周期长度。从浅到深的四种灰度区域分别代表了功率谱的强度依次增强，网格线所覆盖的区域表示受到边界影响较大的地方。从这里可以看出黑色区域主要集中在 11 a 周期和世纪周期的两条水平区域。图 2(b) 给出的是全局小波功率谱。图中有 2 个很明显的周期，它们的峰值所对应的分别是 10.7 a 的 Schwabe 周期和 100.9 a 的世纪周期。图中点线表示的是 95% 的公认水平，Schwabe 周期和世纪周期均明显地超过了 95% 的公认水平。

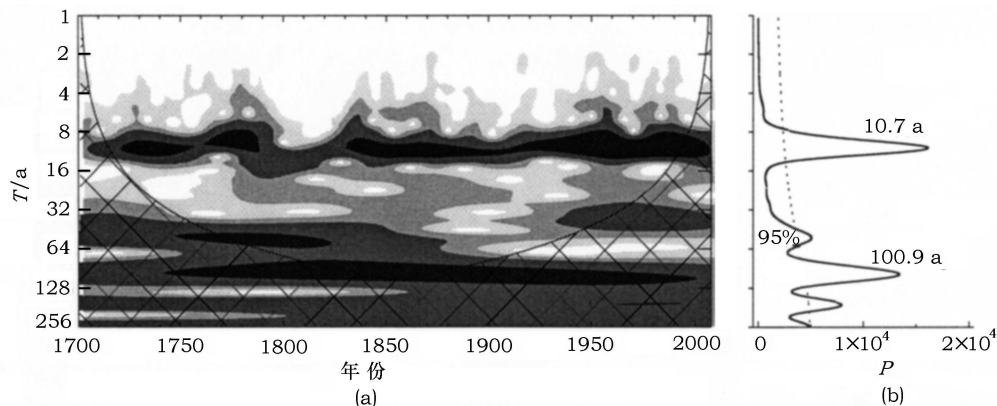


图 2 (a) 年均黑子数 R_Z 的小波功率谱; (b) 全局小波功率谱

图 3、图 4 和图 5 分别为 $R_M(N)$ 、 $R_m(N)$ 和 $R_T(N)$ 三组数据的小波功率谱, 及对应的全局小波功率谱。与图 2 相比较, 由于数据中不再包含 11 a 周期的信息, 所以小波功率谱中就只剩下一个公认的世纪周期。它们在全局小波功率谱中的峰值所对应的周期分别为 100.6 a、96.9 a 和 100.1 a, 都明显地超过了 95% 的公认水平。

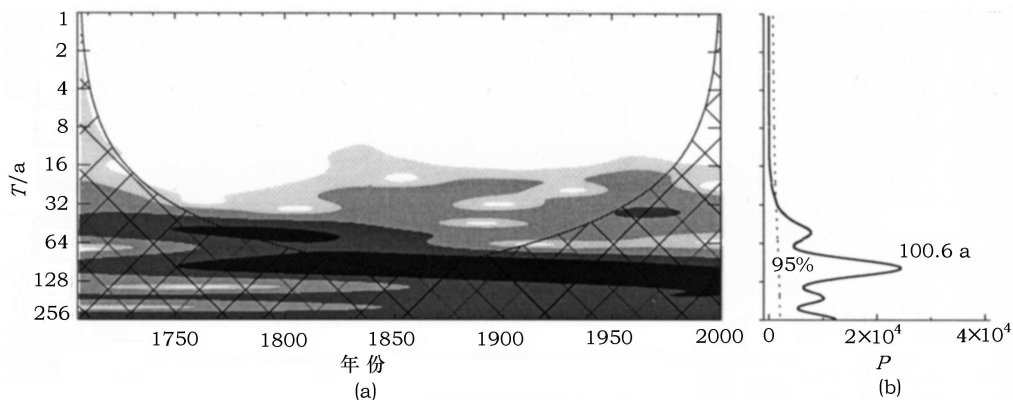


图 3 (a) 太阳极大年黑子数平滑值 $R_M(N)$ 的小波功率谱; (b) 全局小波功率谱

由于只有 309 年的黑子数据, 对于研究世纪周期来说, 数据尚不充分, 所以上面三个小波功率谱的世纪周期基本都在误差稍大的网格线之内。但是由于世纪周期特别明显, 所得的结果还是比较可靠。

我们把图 2(a) 中的小波功率谱以 80 a 周期为分界线取出世纪周期部分, 然后在每一时间点上找出功率谱最高值所对应的周期长度, 所得的结果就代表了世纪周期的长度随时间的变化, 如图 6 所示。从图中可以看出, 在这 309 a 内, 世纪周期长度的变化范围大约是 95~110 a 之间。李可军等人^[17] 利用对不同时间段内求周期长度平均值的方法, 得出了世纪周期的变化。我们的结果比他们的偏小一些, 这是由于方法上的不同而产生的差异。世纪周期的长度从 1700~1800 年逐渐减小, 在 1800 年附近世纪周期最短, 为 96 a 左右。从 1800~2008 年, 世纪周期又逐渐增长, 到 2008 年达到 109 a 左右。这种世纪周期长度的变化可能与更长的太阳活动周期有关。

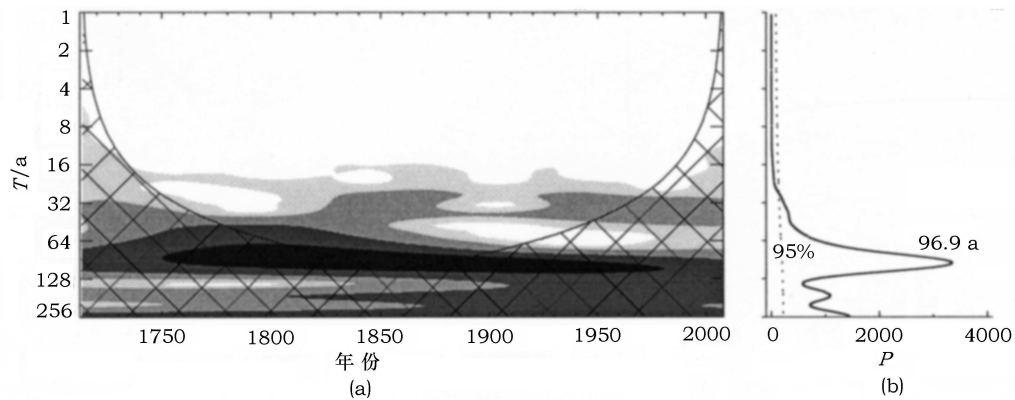


图 4 (a) 太阳极小年黑子数平滑值 $R_m(N)$ 的小波功率谱; (b) 全局小波功率谱

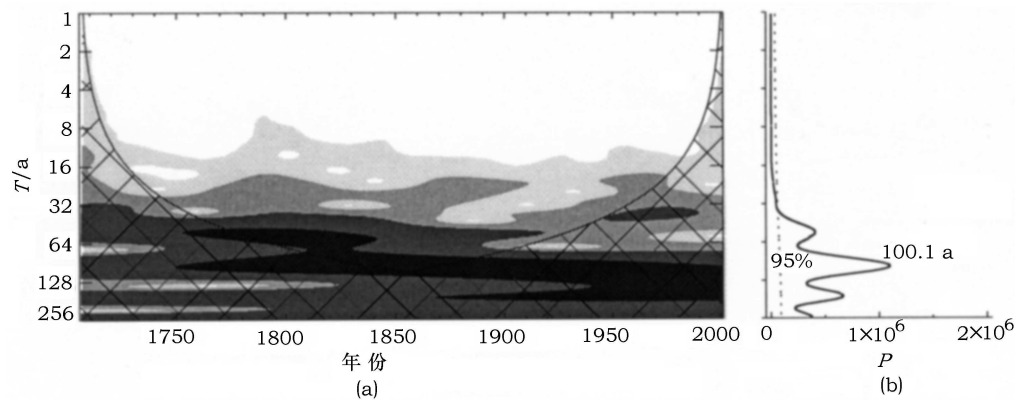


图 5 (a) 每个太阳周内年均黑子数之和 $R_T(N)$ 的小波功率谱; (b) 全局小波功率谱

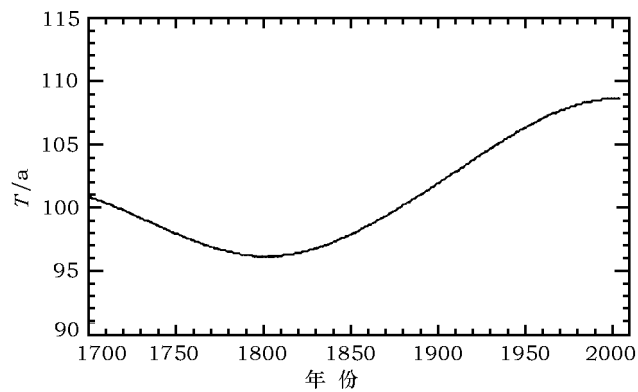


图 6 世纪周期长度的变化

2.4 对第 24、25 太阳活动周的预报

黑子的 3 个世纪周期大约分别位于 1710~1810 年、1810~1910 年、1910 年至今 (如图 1 所

示), 因此称之为 18、19、20 世纪周期。由于太阳 11 a 的活动周期受到世纪周期的调制作用, 并且从已有的数据中可以看出, 在每个世纪周期的谷期都存在着至少两个比较弱的太阳周, 所以可以推测 21 世纪周期的谷期也存在至少 2 个比较弱的太阳周。从而我们就可以分别从前面的每个世纪周期的谷期选出 2 个太阳周, 根据它们的活动水平来预测 21 世纪周期的谷期活动周。对于 18 世纪周期我们选择的是第 -4、-3 周, 对于 19 世纪周期我们选择的是第 5、6 周。20 世纪周期谷期中活动弱的太阳周分布不集中, 其中最弱的是第 14 周。我们尽量选择连续的太阳周, 所以要从 13 和 15 周中选出一个。图 1(d) 显示: 第 15 周的年均黑子数之和小于第 13 周, 这表明第 15 周的整体活动水平要低于第 13 周, 所以对于 20 世纪周期我们选择的是第 14 和 15 周。图 1(a) 中的低通滤波曲线可以说明, 世纪周期的谷期最低点正好是处在我们所选的相邻两个太阳周的中间。从所选的这些太阳周可以得出, 18 和 19 世纪的世纪周期的谷年相差 9 个太阳周, 19 和 20 世纪的世纪周期的谷期也是相差 9 个太阳周。时间跨度大约都是 100 a 左右, 这和图 6 中所示的这两个世纪周期的长度非常相近, 这也进一步验证了我们所选的谷期太阳周是合理的。我们估计 21 世纪的世纪周期的谷期在第 24、25 太阳周附近, 这结果和 20 世纪周期的谷期相差 10 个太阳周, 大约为 110 a 左右。这个时间跨度和图 6 中 20 世纪周期的长度基本吻合, 同时也可以进一步推断出 20 世纪周期的时间范围大约是 1910~2020 年。由于这些活动周都是处于世纪周期的谷期, 它们的活动强度将有一定的相似性。太阳活动的极大年和极小年的黑子数也都存在着世纪周期, 因此我们可以用第 -4、-3 周, 第 5、6 周, 第 14、15 周的极大年和极小年的黑子数, 来预报第 24、25 周的极大年和极小年的黑子数。

表 1 中列出了世纪周期谷期的太阳活动周极小年和极大年的年份, 以及所对应的年均黑子数。由现有数据所得出的第 -4 周的极小年出现在 1700 年, 1700 年之前没有数据, 但是 1700 年和第 -3 周的极小年 1712 年相差 12 a, 这已经比 11 a 的太阳活动周期, 所以我们选取 1700 年为第 -4 太阳周的极小年。另外 Usoskin 和 Mursula^[18] 也认为第 -4 周的极小年在 1700 年。最近的观测结果表明第 24 周的极小年出现在 2008 年 4 月^[19], 所以我们所用数据的起始年和结束年正好是两个太阳活动极小年。从表 1 中看出第 -4、-3 周, 第 5、6 周, 第 14、15 周, 这三对相邻极小年的时间间隔都是 12 a, 由此我们预测第 25 周的极小年比 24 周极小年晚 12 a, 即为 2020 年。通过对不同世纪周期谷期的太阳活动周求平均的方法, 我们还可以预

表 1 世纪周期谷期的太阳活动极小年和极大年的年均黑子数

活动周序号	极小年年份	极小年黑子数	极大年年份	极大年黑子数
-4	1700	5.0	1705	58.0
-3	1712	0.0	1717	63.0
5	1798	4.1	1804	47.5
6	1810	0.0	1816	45.8
14	1901	2.7	1905	63.5
15	1913	1.4	1917	103.9
24	2008	2.2±2.1(3.9) <u>2.9</u>	2012~2014	63.6±21.1(56.3)
25	2020	2.2±2.1(0.5)	2024~2026	63.6±21.1(70.9)

测第 24、25 周的极小年和极大年的黑子数。对于每个世纪周期谷期的两个活动极小年，都是第 1 个极小年的黑子数高于第 2 个极小年，所以我们对第 24、25 周极小年的黑子数给出两种预测方法：(1) 用 6 个极小年的黑子数的平均值 2.2 作为第 24、25 周极小年的黑子数，它们的标准差为 2.1；(2) 用 3 个世纪周期谷期的第一个极小年黑子数的平均值 3.9 作为 24 周极小年的黑子数，第二个极小年黑子数的平均值 0.5 作为 25 周极小年的黑子数，见表 1 中括号内数字。第 24 周极小年 2008 年的实测年均黑子数是 2.9(表 1 中划横线的数字)，与两种方法所得出的预测值相差没超过 1 个黑子数。

从表 1 中看出，第 -4、-3 周，第 5、6 周，第 14、15 周的极大年的时间间隔也都是 12 a，据此我们预测第 25 周的极大年也比 24 周的晚 12 a，但是谷期活动周的极大年和极小年的间隔却分别存在着 5、6、4 a 的结果。所以我们只能得出第 24 周的极大年可能出现在 2012~2014 年之间，第 25 周的极大年出现在 2024~2026 年之间。我们同样对第 24、25 周的极大年黑子数给出两种预测方法：(1) 用 6 个极大年的黑子数的平均值 63.6 作为第 24、25 周极大年的黑子数，它们的标准差为 21.1；(2) 用 3 个世纪周期谷期的第 1 个极大年黑子数的平均值 56.3 作为 24 周极大年的黑子数，第 2 个极大年黑子数的平均值 70.9 作为 25 周极大年的黑子数。

3 结 论

通过对 1700~2008 年的年均黑子数的傅里叶分析，证实了年均黑子数存在着 11 a 周期和 100 a 左右的世纪周期。并且每个太阳周极大年、极小年的黑子数的平滑值，以及每个活动周的年均黑子数总和都存在着约为百年的世纪周期。使用小波分析的方法也得到与傅里叶变换相一致的结果，并且从时域和频域里同时体现出世纪周期的变化。另外通过小波分析还研究了世纪周期长度的变化，我们估计世纪周期长度的变化是一种更长尺度的太阳周期活动。

通过研究 300 多年里的世纪周期长度的变化，我们推测第 24、25 太阳周处于世纪周期的谷期，因此第 24、25 周的极大年和极小年的黑子数都很低。利用对不同世纪周期的谷期求平均的方法，我们预测第 24、25 周的极大年的黑子数为 63.6 ± 21.1 ，极小年的黑子数为 2.2 ± 2.1 。其中第 24 周极小年的黑子数预测值与 2008 年的实际年均黑子数相差在 ± 1 的范围内。从 2007 年初到现在，太阳处于反常宁静的状态，已引起全世界天文学家的关注，我们的研究结果将会有助于理解这一反常现象。由于有记载的黑子观测时间还比较短，对太阳黑子世纪周期的相关问题还有待进一步的探索。

致谢

感谢 Torrence 和 Compo 在 <http://paos.colorado.edu/research/wavelets/> 网站提供了小波分析程序和相关资料。

参考文献:

- [1] Schwabe H. Astr Nachr, 1844, 21: 233
- [2] 林元章. 太阳物理导论. 北京: 科学出版社, 2000: 411

- [3] Wolf R. Astr. Mitt. Zürich, 1862, 14
- [4] Gleissberg W. Sol. Phys., 1967, 2: 231
- [5] Gleissberg W. Sol. Phys., 1971, 21: 240
- [6] Garcia A, Mouradian Z. Sol. Phys., 1998, 180: 495
- [7] Forgács-Dajka E, Major B, Borkovits T. A&A, 2004, 424: 311
- [8] 赵海娟, 梁红飞, 占腊生, 等. 天文学报, 2003, 44: 279
- [9] Li K J, Yun H S, Gu X M. A&A, 2001, 368: 285
- [10] 王家龙, 苗 娟, 刘四清, 等. 中国科学 G 辑, 2008, 38: 1097
- [11] Kane R P. Sol. Phys., 2007, 243: 205
- [12] Cole T W. Sol. Phys., 1973, 30: 103
- [13] Wilson R M. Sol. Phys., 1988, 117: 269
- [14] Zhukov L V, Muzalevskii Yu S. Soviet Astron AJ, 1969, 13: 473
- [15] 占腊生, 何娟美, 叶艺林, 等. 天文学报, 2006, 47: 166
- [16] Torrence C, Compo G P. Bull. Am. Meteor. Soc., 1998, 79: 61
- [17] Li K J, Gao P X, Su T W. Sol. Phys., 2005, 229: 181
- [18] Usoskin I G, Mursula K. Sol. Phys., 2003, 218: 319
- [19] Kilcik A, Anderson C N K, Rozelot J P, et al. ApJ, 2009, 693: 1173

The Gleissberg Cycle of the Sunspot and the Prediction for Solar Cycles 24, 25

CHU Zhe ^{1,2}, NIE Qing-xiang ¹, ZHANG Jun ²

(1. College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014, China; 2. Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories, CAS, Beijing 100012, China)

Abstract: Besides the well known 11 years period, the Sun exhibits a typical variation with a characteristic time between 80 and 120 years, which is called Gleissberg cycle. Based on the Fourier transform and wavelet analysis methods, we investigate the Gleissberg cycle using the yearly sunspot number from 1700 to 2008 intensively. The result shows that, at the valley of the Gleissberg cycles, the sunspot numbers of the maximum and minimum years are smaller than those of other solar cycles, and the period length of Gleissberg cycles also changes during the 309 years. By examining the Gleissberg cycles, we forecast that solar cycles 24 and 25 will be at the valley of Gleissberg cycle. Based on the solar cycles which were at the valleys of the Gleissberg cycles, the paper predicts that the yearly sunspot number of the maximum years of solar cycles 24 and 25 is about 63.6 ± 21.1 , and the minimum years is about 2.2 ± 2.1 . These results will help us to comprehend the abnormal quietness of the Sun recently.

Key words: solar active cycle; Gleissberg cycle; sunspot number; solar prediction