0254-6124/2007/27(4)-265-06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Hao Lisheng, Bi Baogui, Yao Xuexiang. Analysis of solar activities and changes. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(4): 265~270

太阳活动变化分析

郝立生[1] 毕宝贵[2] 姚学祥[3]

[1](衡水市气象局 衡水 053000)

[2](中国气象局国家气象中心)

[3](河北省气象局)

摘 要 利用 Morlet 小波变换方法对太阳黑子相对数进行了分析，对太阳活动变化得出了一些有意义的结果. 太阳活动存在 10.7 a 和 101 a 的变化周期，以 10.7 a 周期最为显著. 太阳活动强弱变化存在一定的阶段性，在 1950 年发生了气候突变，之后太阳活动明显加强，未来一段时间太阳活动较弱.

关键词 小波变换；太阳活动；周期分析

中图法分类号 P 353

Analysis of Solar Activities and Changes

HAO Lisheng[1] BI Baogui[2] YAO Xuexiang[3]

[1](*Hengshui Meteorological Bureau, Hengshui* 053000)

[2](*National Meteorological Center, China Meteorological Administration*)

[3](*Hebei Province Meteorological Office*)

Abstract Solar activities have obvious effects on earth's climate. Many scientists have studied the relationship between solar activities and climate change, and a lot of papers have been published in this field. The relative sunspot numbers is an important factor in the research of solar activities. Wavelet transform is a fine method to analyze time serials periods. By using different data, the periods are different. In the past time, many scholars had analyzed solar activities by others statistical methods, found that changes of solar activity have periods of 5~6 years, 11 years, 22 years, 80~100 years, and so on. The periods are so disunity that they can't be better used to forecast change trend of solar activities. In this paper, being applied to analysis of solar activities, the wavelet transform method was introduced to analyze periods change, and found some meaningful results. The relative sunspot numbers change with periods of 10.7 year and 101 year. The 10.7 year period is remarkable, and it's amplitude varies with time. In 1935 to 2000, the amplitude of 10.7 year period are especially distinct. The solar activities exist strong or weak phases. Abrupt change occurred in 1950 year, and solar activities became stronger since 1950. It is predicled that the solar activity will be weaker in the near future.

Key words Wavelet transform, Solar activity, Periods analysis

2006-09-05 收到原稿， 2007-04-28 收到修定稿

1 引言

太阳活动及其对地球环境影响的研究受到越来越大的重视，主要是由于它与人类的生存环境和活动有着广泛密切的联系 [1]. 太阳黑子相对数是描述太阳活动非常重要的一种参数，在分析太阳活动周期时采用最多的数据就是太阳黑子相对数. 太阳黑子活动对地球气候和水文变化有一定的调制作用，这种作用或影响有时间特性和区域特性，不同时间和不同区域受到的调制作用不同.

太阳黑子数的 11 a 周期活动对我国夏季温度有明显影响，温度在 11 a 周期中有双波动. 渤海的冰情变化与太阳黑子 11 a 周期活动一致. 董安祥等 [2] 在研究太阳黑子与西北四省区 (陕、甘、宁、青) 降水关系时发现，在黑子谷年容易出现旱年，大旱年大多出现在黑子谷年，而多雨年在各个位相均可能出现. 李春晖等 [3] 对黄河流域近 50 年来的降水与太阳黑子的关系进行了研究，表明在 1951—1997 年期间，黄河流域年降水与太阳黑子在 9 a 时间尺度上呈一定的负相关关系，且降水有 1~2 a 的滞后现象. 王绍武 [4] 研究表明，在太阳活动 11 a 周期的下降期，夏季长江流域及其以南地区容易多雨洪涝. 太阳活动对地球环境和气候有如此重要的影响，对太阳黑子相对数变化规律作进一步分析是有意义的.

小波分析是近年发展起来的一种数学分析方法，与传统的傅里叶分析方法相比，主要有以下两个特点.

(1) 小波分析可以将时间序列分解成时频空间场的形式，在时域和频域同时具有良好的局部性质.

(2) 小波分析可以发现突变，可以分析出序列变化的主要周期及其在不同时段的影响大小.

自 90 年代以来，小波分析在大气科学中得到了广泛的应用，已成为分析气象要素时间序列局部变化特征的有力工具. 有些文献中使用该方法常常是对小波系数进行定性分析，对一些定量结果解释含糊不清，更由于结果分析缺乏有效的显著性检验而使分析缺乏说服力.

本文目的是结合对常用的 Morlet 小波变换分析方法的介绍，对太阳黑子相对数变化作进一步分析，以便人们更好地认识太阳活动变化规律，进一步深入研究太阳活动对地球环境的影响.

2 资料和方法

2.1 资料说明

太阳黑子相对数资料，选择美国地球物理资料中心和中国气象局国家气候中心气候系统诊断预测室整编的资料. 资料长度为 257 a, 其中，1749—1950 年的资料取自美国地球物理资料中心，1951—2005 年的资料取自国家气候中心气候系统诊断预测室整编的资料. 计算中使用的是季平均资料.

2.2 小波变换说明

小波变换选择常用的 Morlet 小波，该小波是一个由 Gauss 函数调制的连续性的平面波，如图 1 所示. 小波函数为

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} \mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega_0 t} \mathrm{e}^{-t^2/2}.$$

式中，ω_0 为角频率，对于 Morlet 小波变换，这里取 $\omega_0 = 6$.

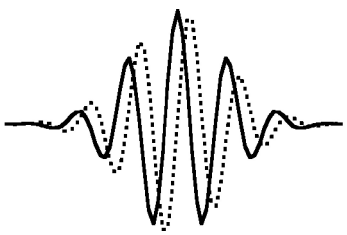


图 1 Morlet 小波 ($\omega_0 = 6$, 实线是函数实部，虚线是函数虚部)

Fig.1 Morlet wavelet Real (solid), Imaginary (dash)

离散小波变换公式为

$$W_{\mathrm{f}}(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \sum_{i=1}^{N} f(i\delta t)\psi^*\Big(\frac{i\delta t - b}{a}\Big).$$

式中，星号 (*) 表示复共轭； a 为尺度因子 (与周期和频率有关); b 为平移因子 (时间位置); i 为资料序列时间位置标号； $f(t)$ 为某气象要素时间序列; $W_{\mathrm{f}}(a,b)$ 为小波系数； δt 为资料序列时间间隔，本文资料间隔为季度， $\delta t = 0.25$. 因为小波是复数形式的，所以小波变换后的系数也是复数.

小波尺度 a 取为

$$a_j = s_0 \times 2^{j\cdot\delta j}, \quad j = 0, 1, \cdots, J;$$
$$J = \delta j^{-1} \mathrm{lb}(N\delta t / s_0).$$

其中， s_0 为小波变换的最小尺度，一般取为 $2\delta t$, δj 为尺度变化调节系数，为了更好地分析序列的细微特征，取 $\delta t = 0.125$, J 为变换所使用的小波个数，N 为资料长度.

小波功率谱定义为

$$E_{a,b} = |W_{\mathrm{f}}(a,b)|^2,$$

总体小波功率谱 E_a 表征不同尺度 a 对应的能量密度，定义为

$$E_a = \frac{1}{N}\sum_{b=1}^{N}|W_{\mathrm{f}}(a,b)|^2.$$

尺度平均小波功率谱 $E_{\bar{a},b}$ 表征某周期的小波能量随时间的变化情况，定义为

$$E_{\bar{a},b} = \frac{\delta j \delta t}{0.776}\sum_{j=j_1}^{j_2}\frac{|W_{\mathrm{f}}(a_j,b)|^2}{a_j}.$$

式中， j_1, j_2 为用于求平均的最小尺度和最大尺度的标号.

在实际应用中，有时人们把小波变换的尺度当作周期分析，这是不对的. 根据 Torrence 导出的关系 [5], Morlet 小波尺度 a 与周期 T 有如下对应关系:

$$T = \frac{4\pi a}{\omega_0 + \sqrt{2+\omega_0^2}} \approx 1.033a.$$

2.3 检验说明

小波功率谱是否显著，用红噪声或白燥声标准谱进行检验. 如果原资料序列滞后 1 的自相关系数 $r(1) > 0.1$, 则用红噪声谱检验；如果原资料序列滞后 1 的自相关系数 $r(1) \leqslant 0.1$, 则令 $r(1) = 0$, 用白噪声谱检验. 根据 Torrence 的文献 [5], 小波功率谱遵从 χ^2 分布特征. 先计算小波功率谱分布的有效自由度，给出 χ^2 分布的显著性水平，如 $\alpha = 0.05$, 然后就可以计算红噪声或白噪声的理论功率谱 P. 当某尺度小波功率谱大于理论谱时，说明这种尺度对应的周期是显著可信的. 具体检验公式如下.

(1) 小波功率谱 $E_{a,b}$ 的检验

理论功率谱:

$$P = \sigma^2 P_a \frac{\chi_2^2}{2}.$$

其中， σ^2 为原资料序列的方差,

$$\sigma^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2;$$

P_a 为红噪声或白噪声谱,

$$P_a = \frac{1 - r(1)^2}{1 + r(1)^2 - 2r(1)\cos\left(\dfrac{2\pi\delta t}{1.033a}\right)},$$

式中， $r(1)$ 为原序列滞后 1 的自相关系数； χ_2^2 为自由度 $\nu = 2$ 的 χ^2 在显著性 $\alpha = 0.05$ 的值.

如果 $E_{a,b} > P$, 说明小波功率谱是显著的.

(2) 总体小波功率谱 E_a 的检验

理论功率谱:

$$P = \sigma^2 P_a \frac{\chi_\nu^2}{\nu}.$$

其中， χ_ν^2 是自由度为 ν 的 χ^2 在显著性 $\alpha = 0.05$ 的值，自由度 $\nu = 2\sqrt{1 + \left(\dfrac{N\delta t}{2.32a}\right)^2}$, σ^2 和 P_a 的意义同前.

如果 $E_a > P$, 说明小波功率谱对应的周期是显著的.

(3) 尺度平均小波功率谱 $E_{\bar{a},b}$ 的检验

理论功率谱:

$$P = \frac{\sigma^2 \delta j \delta t P'}{0.776 a_{\mathrm{avg}}}\frac{\chi_\nu^2}{\nu}.$$

其中， χ_ν^2 是自由度为 ν 的 χ^2 在显著性 $\alpha = 0.05$ 的值， χ^2 自由度

$$\nu = \frac{2(j_2 - j_1 + 1)a_{\mathrm{avg}}}{a_{\mathrm{mid}}}\sqrt{1 + \left(\frac{(j_2 - j_1 + 1)\delta j}{0.60}\right)^2},$$

$$a_{\mathrm{avg}} = \left(\sum_{j=j_1}^{j_2}\frac{1}{a_j}\right)^{-1},$$

$$a_{\mathrm{mid}} = s_0 \times 2^{0.5(j_1+j_2)\delta j},$$

$$P' = a_{\mathrm{avg}}\sum_{j=j_1}^{j_2}\frac{P_{a_j}}{a_j},$$

σ^2 和 P_a 的意义同前. 如果 $E_{\bar{a},b} > P$, 说明小波功率谱变化是显著的.

3 太阳活动周期分析

太阳黑子是太阳光球中局部的低温、强磁场区域，而光球是指太阳大气的低层，也就是用眼睛直接看到的光亮球体. 黑子的线度从 1000 km 左右直到几万公里以上. 黑子的寿命长短不一，大多数黑子存在时间为几天, 有的大黑子寿命长达几个月. 黑子多为成群出现，每群最多可含几十个大小不等的

黑子. 太阳黑子数目的多少随时间的变化具有周期性, 最明显的周期长度为 11 a 左右, 还有更长些的周期. 11 a 左右的周期称为太阳活动周, 每一个太阳活动周一般从黑子数的一个极小开始. Le等 [6],[7] 的研究表明, 太阳黑子活动具有 11 a, 53 a 和 101 a 周期, 每个周期在不同时段振幅大小表现是不一样的. 李栋梁等 [8] 对近 1000 年太阳黑子活动进行了研究, 发现太阳黑子最显著的周期是准 11 a, 近 1000 年平均为 11.24 a, 其变化范围在 7.3~17.1 a. 活动周期在单数世纪平均值均偏长 (> 11.24 a), 5 个单数世纪的平均长度为 11.57 a. 活动周期一般在双数世纪平均值均偏短 (< 11.24 a), 5 个双数世纪的平均长度为 10.91 a. 另外, 近 1000 年中除两个时段 (1380—1500 年、1780—1820 年) 50 a 周期不显著外, 其余时段均存在显著的 50 a 周期, 特别是近 200 年来这一周期非常稳定.

图 2 为太阳黑子数 1749—2005 年的变化情况, 可以看到, 太阳黑子活动的周期性非常明显, 强弱变化具有阶段性, 1795—1835 年是太阳活动最弱的阶段, 1875—1930 年也比较弱, 1775—1795 年、1835—1875 年和 1950 年到现在太阳黑子活动比较强.

图 3 为太阳黑子活动小波变换. 图 3(a) 为 Morlet 小波系数实部分布情况, 从图 3 分析, 太阳黑子活动 11 a 左右和 100 a 左右的周期变化非常明显. 为了进一步确定变化周期, 对不同尺度、不同时间的小波功率谱进行了分析, 如图 3(b) 所示, 作图时用理论功率谱进行了标准化处理, 图 3(b) 中大于 1 的等值线是通过 95% 信度检验的区域. 可以看到,

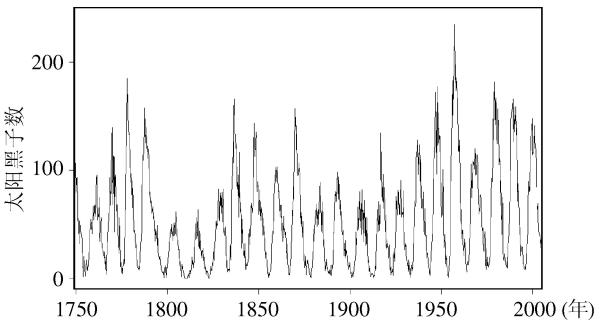


图 2 太阳黑子相对数年际变化

Fig.2 Annual change of sunspot numbers

8~12 a 的功率谱比较显著, 而 100 a 左右的功率谱没有通过 95% 的信度检验. 可见, 太阳黑子活动存在 8~12 a 和 100 a 的变化周期, 其中 8~12 a 的周期最为显著.

为了进一步确定主要周期随时间的变化情况, 对总体小波功率谱和尺度平均小波功率谱进行分析 (见图 4). 图 4(a) 所示为同一尺度小波功率谱在所有时间的累计平均值, 即总体小波功率谱, 从图 4(a) 可以看出, 只有周期为 8~12 a 的功率谱通过了 95% 的显著性水平, 尽管周期 100 a 左右的功率谱没有通过显著性检验, 但谱值也很突出. 两个功率谱峰值对应的周期分别为 10.7 a 和 101 a (已在图 4(a) 上标注). 图 4(b) 为主要周期 10~12 a 小波功率谱在同一时间的累计平均值, 即尺度平均功率谱, 从图 4(b) 可以看出, 就 10~12 a 周期变化来说, 在 1950—2000 年表现最强, 在 1840—1880 年表现也比较强, 而在其他时段表现较弱. 从 20 世纪末开始, 10~12 a 功

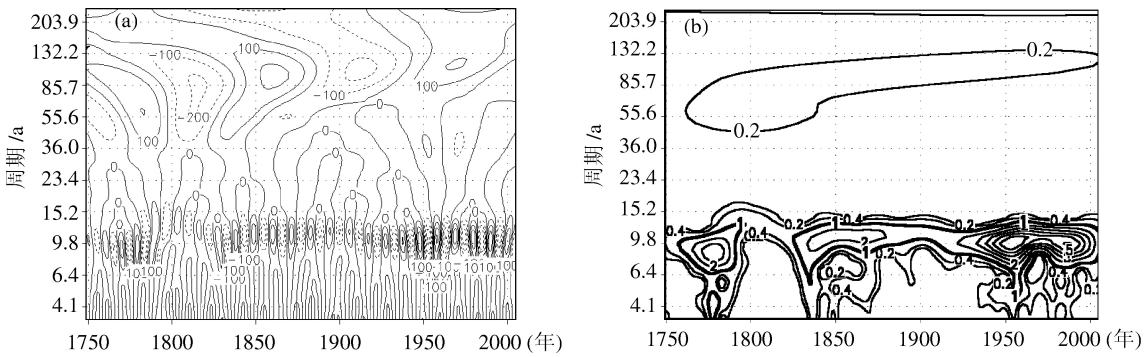


图 3 太阳黑子 Morlet 小波变换, (a) 小波系数实部, (b) 太阳黑子小波功率谱
(等值线大于 1 的区域通过了 95% 显著性检验)

Fig.3 Morlet wavelet tranform of sunspot, (a) real part of wavelet coefficients, (b) local wavelet power spectrum
(the regions of large than 1 are greater than 95% confidence lever)

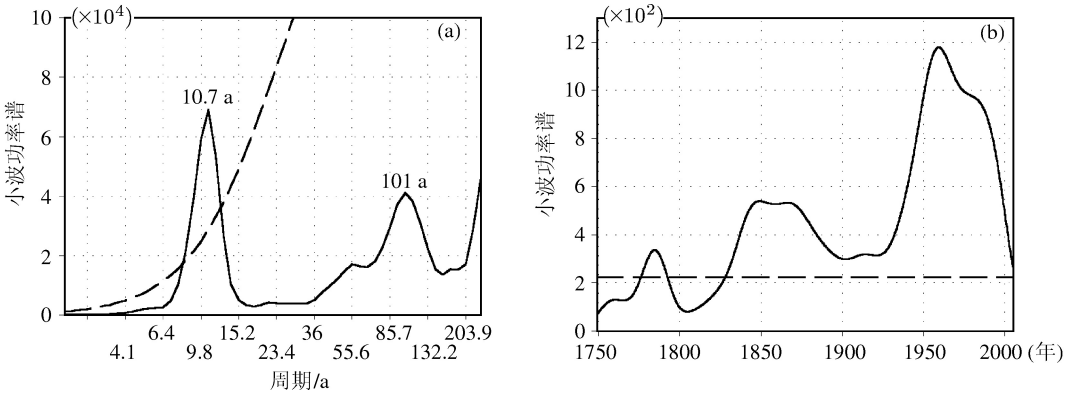


图 4　太阳黑子 Morlet 小波功率谱，(a) 总体小波功率谱 (实线为功率谱，虚线为 95% 的显著水平)，(b) 尺度平均 (10∼12 a) 小波功率谱 (实线为功率谱，虚线为 95% 的显著水平)

Fig.4　Change of Morlet wavelet power spectrum, (a) global wavelet power spectrum (solid for power, dashed for 95% confidence level), (b) scale-averaged wavelet power over 10∼12 year band for the sunspot (solid for power, dashed for 95% confidence level)

率谱迅速减小，说明未来太阳黑子活动减弱，这与 Le 等 [6],[9] 分析得到的结论是一致的.

从以上分析，可以看到太阳黑子活动存在两个明显的变化周期, 即 10.7 a 和 101 a 的变化，10.7 a 是其变化的主要周期. 在用小波分析气象时间序列周期变化时，仅用小波系数分析存在一定的局限性，不好判断周期是否显著，应结合功率谱进行定量分析. 在确定主要周期随时间如何变化时应通过尺度平均功率谱进行分析. 另外，为了使分析结果具有说服力，应对功率谱进行显著性检验.

4　太阳活动突变分析

小波变换也可以分析气象要素序列变化的突变点. 从小波变换原理可知，Morlet 小波函数是通过高斯函数调制来的，图 3(a) 所示的小波系数图上正负中心之间的密集过渡带即 0 线位置是函数的拐点位置，也就是气候趋势发生改变的位置. 因此，小波系数图上正负中心之间的密集过渡带的 0 线位置是突变点，指示了气候突变发生的时间. 对小波系数图 3(a) 进行定性分析，从 100 a 左右尺度变化看，突变发生在 1800 年、1835 年、1890 年和 1950 年附近.

检测气候突变也可用 Mann-Kendall 方法 [10]. 在原假设 H_0, 即气候序列没有变化的情况下，设此气候序列为 $x_1, x_2, \cdots, x_n$, m_i 表示第 j 个数据 x_j 前面数据大于第 j 个样本 x_j $(1 \leqslant i < j, 1 \leqslant j \leqslant n)$ 的累计数，定义统计量

$$d_k = \sum_{i=1}^{k} m_i, \quad (2 \leqslant k \leqslant n).$$

在原序列的随机独立等假定下，d_k 的均值和方差分别为

$$E[d_k] = k(k-1)/4;$$
$$\mathrm{Var}[d_k] = k(k-1)(2k+5)/72, \quad (2 \leqslant k \leqslant n).$$

将 d_k 标准化，有

$$U(d_k) = (d_k - E[d_k])/\sqrt{\mathrm{Var}[d_k]},$$

$U(d_k)$ 服从标准正态分布. 给定信度 α, 可查表得 U_α. 满足 $P(|U| = U_\alpha) = \alpha$, 由序列计算出的 $U(d_k)$ 大于 U_α 时，拒绝原假设，认为序列存在一个增长或减小的趋势，已超过纯随机因素所能达到的水平. 所有 $U(d_k)$ 绘成一条曲线 C_1. 用同样的方法对反序列进行计算，得到反序列的 $U'(d_k)$ 绘成曲线 C_2. 当曲线 C_1 超过信度线 ($\alpha = 0.05$), 即气候序列存在明显的变化趋势时，如果曲线 C_1 和 C_2 的交叉点位于信度线之间，这点便是气候突变点.

图 5 为太阳黑子突变检验结果. 可以清楚地看到，太阳黑子活动在 1950 年附近发生了气候突变，

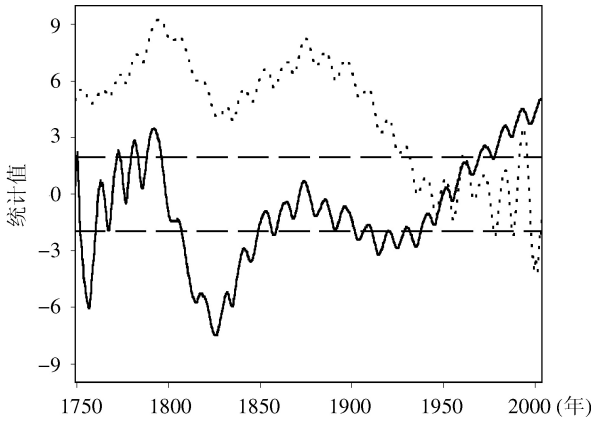


图 5 太阳黑子数变化 Mann-Kendall 突变检验 (实线为 C_1, 虚线为 C_2, 断线为 95% 显著性临界值)

Fig.5 Mann-Kendall test of sunspot numbers (solid for C_1, dotted for C_2, dashed for 95% significance level)

且从 1950 年以来, 太阳黑子活动呈加强趋势. Mann-Kendall 突变检验与小波分析结果不一样, 这说明, 图 3(a) 所示小波系数图上分析出的前几个突变是 100 a 尺度变化上的突变, 还不是各种尺度总体变化上的突变. 任何一种突变分析方法都有一定的局限性, 在实际研究中应根据情况结合使用. 例如小波分析出的突变有时只是某种尺度变化上的突变情况, 而不是总体变化的突变, 要进一步确定突变是否发生, 还要结合其他方法进一步验证.

5 小结与讨论

使用小波变换方法, 首先要选用合适的小波函数, 然后确定变换时间尺度. 在用该方法研究变化周期时, 仅用小波系数分析存在一定的不确定性, 结合小波功率谱分析比较好, 还应进行显著性检验才更可信. 在用小波变换方法进行突变分析时, 可使用小波系数图, 但应结合其他突变检验方法使用.

太阳活动存在 10.7 a 和 101 a 的变化周期, 以 10.7 a 周期最为显著. 太阳活动在 1950 年发生了气候突变, 之后太阳活动明显加强, 20 世纪末开始, 太阳黑子活动 11 a 振幅迅速减小, 未来太阳黑子活动减弱.

这里得到的太阳黑子活动周期是用季平均资料分析得到的结果, 如果用年平均或月平均资料分析, 结果会有所不同, 但主要结论是相同的. 例如, Le 用太阳黑子相对数年平均值 [6] 分析得到太阳黑子活动有 11 a, 53 a, 101 a 三个明显周期; 用月平均值 [9] 分析得到最强活动周期为 10.67 a; 此外, 还有 64.67 a, 69.31 a, 98.02 a, 105.6 a 周期, 这些周期在不同年代振幅大小表现是不一样的. 这里分析得到的结论与其并不矛盾, 11 a 和 101 a 周期的变化特征是一致的. 另外, 本文从季度平均资料分析得到未来一段时间太阳黑子活动减弱的结论, 与 Le 等 [6],[9] 用年平均资料和月平均资料分析得到的结论是一致的.

参考文献

[1] Wang Jialong *et al.* Solar activities and their effects on terrestrial environments. *Quarter. Sci.*, 2002, **22**(6):510~523. in Chinese (王家龙等. 太阳活动及其对地球环境的影响. 第四纪研究, 2002, **22**(6):510~523)

[2] Dong Anxiang *et al.* Sun activity and precipitation in northwest China. *J. Gansu Sci.*, 1999, **11**(4):14~17. in Chinese (董安祥等. 太阳活动与西北地区降水. 甘肃科学学报, 1999, **11**(4):14~17)

[3] Li Chunhui *et al.* Relationship between solar activities and precipitation in the Yellow River basin. *Meteor. Mon.*, 2005, **31**(11):42~44. in Chinese (李春晖等. 太阳活动与黄河流域降水关系分析. 气象, 2005, **31**(11):42~44)

[4] Wang Shaowu. Response of earth climate to sun activity periods. In: Zhang Jijia *et al* ed. Research of Long Term Weather Forecast and Sun-Earth Relationship. Beijing: China Oceanic Press, 1992. 43~52. in Chinese (王绍武. 地球气候对太阳活动周期的响应. 见: 章基嘉等编著. 长期天气预报和日地关系研究. 北京: 海洋出版社, 1992. 43~52)

[5] Torrence C, Campo G P. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1998, **79**(1):61~78

[6] 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

[7] Le G M. Wavelet analysis of the Schwabe cycle properties in solar activity. *Chin. J. Astron. Astrophys.*, 2004, **4**(6):578~582

[8] Li Dongliang *et al.* Prediction of 0 cm average ground surface temperature changes along Qinghai-Xizang railway. *Plateau Meteor.*, 2005, **24**(5):687~693. in Chinese (李栋梁等. 青藏高原及铁路沿线地表温度变化趋势预测. 高原气象, 2005, **24**(5):687~693)

[9] Le Guiming *et al.* Wavelet analysis of the periods with relatively most sunspot numbers. *Chin. J. Geophys*, 2004, **47**(5):743~746. in Chinese (乐贵明等. 太阳黑子相对数最强周期的小波分析. 地球物理学报, 2004, **47**(5):743~746)

[10] Ma Kaiyu *et al.* Climate Diagnosis. Beijing: China Meteorological Press, 1996. 154~156. in Chinese (马开玉等. 气候诊断. 北京: 气象出版社, 1996. 154~156)