

Weng Libin, Fang Hanxian, Zhang Yang, Yang Shenggao, Wang Sicheng. Correlation research between the sunspot numbers and the cosmic rays based on wavelet and cross wavelet analysis. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(1): 13-19

# 基于小波与交叉小波分析的太阳黑子与宇宙线相关性研究<sup>\*</sup>

翁利斌<sup>1</sup> 方涵先<sup>1</sup> 张 阳<sup>2</sup> 杨升高<sup>1</sup> 汪四成<sup>1</sup>

1(解放军理工大学气象学院 南京 211101)

2(解放军 61741 部队 北京 100094)

**摘 要** 利用小波分析和交叉小波分析方法, 根据太阳黑子数以及 Huancayo 和 Climax 两个测站的月均宇宙线数据, 分析了两个测站的月均宇宙线周期变化, 同时利用太阳黑子数  $R_{12}$  对 Climax 站宇宙线流量进行预测研究. 小波分析结果表明, 太阳黑子与宇宙线除存在显著的 11 年周期外, 太阳活动高年期间还存在 1~6 个月尺度的周期特性, 在第 22 太阳周活动高年时还出现了 6~8 和 1~22 个月的变化周期; 交叉小波分析结果表明, 在 130 个月左右的周期上宇宙线与太阳黑子具有显著的负相关性, 并且宇宙线的变化滞后太阳黑子约 8 个月; 分别采用预测时刻和 8 个月前的太阳黑子数, 预测相对误差为 3.8912% 和 3.2386%. 本文方法同样适用于估算其他空间天气参量之间的周期和相关性, 提高各种空间天气参量的预测或预报精度.

**关键词** 小波分析, 交叉小波, 太阳黑子数, 宇宙线

**中图分类号** P 353

## Correlation Research Between the Sunspot Numbers and the Cosmic Rays Based on Wavelet and Cross Wavelet Analysis

WENG Libin<sup>1</sup> FANG Hanxian<sup>1</sup> ZHANG Yang<sup>2</sup>

YANG Shenggao<sup>1</sup> WANG Sicheng<sup>1</sup>

1(Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101)

2(Unit 61741 of PLA, Beijing 100094)

**Abstract** The wave and cross-wavelet methods were used to analyze the periods of sunspot number and the month-averaged cosmic ray observed by Huancayo and Climax stations, and the correlation between sunspot number and the cosmic ray was discussed. As a result, spectral analysis indicates that except for the pronounced periodicities of 11 years observed both in solar sunspot and cosmic ray intensity, 1~6 months periodicities during the high solar activity, meanwhile, 6~8 and 1~22 months

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目 (40505005) 和解放军理工大学气象学院预研基金项目共同资助

2011-08-09 收到原稿, 2012-05-08 收到修定稿

E-mail: fanghx@gmail.com

periodicities in the solar cycle 22 have been detected. Cross-wavelet shows a negative correlation between the solar sunspot and the cosmic ray, and the cosmic ray intensity lag the solar activity for about 8 months. The cosmic ray intensity in Climax was predicted by the sunspot number, and the relative error decreased from 3.8912% to 3.2386%. These methods can be used to study the period and relationship of other space parameters, and to make better performance on the predicting.

**Key words** Wavelet analysis, Cross wavelet analysis, Sunspot number, Cosmic ray

## 0 引言

宇宙线来源于外太空高能粒子, 根据粒子的来源可将宇宙线分为太阳宇宙线和银河宇宙线两类<sup>[1]</sup>. 太阳宇宙线是行星际和地球空间惟一强大的粒子瞬变源, 银河宇宙线是行星际和地球空间惟一的高能粒子背景源. 这些能量极高的粒子对航天器、人体以及空间天气要素产生了诸多影响<sup>[2]</sup>, 还有学者认为宇宙线可对地球云量产生直接影响, 间接引起气候的变化<sup>[3-5]</sup>. 因此, 宇宙线研究在日地空间物理学以及气候学中占有重要的地位.

认识宇宙线的规律有助于对宇宙线进行预测研究. 目前, 一些学者已通过多种方法研究了宇宙线的周期变化. Le 等<sup>[6-7]</sup> 利用傅里叶变换研究了北京站宇宙线强度的周日、半日变化以及时间尺度更短的周期变化, Gil<sup>[8]</sup> 和 Alania<sup>[9]</sup> 研究了宇宙线流量 27 天变化周期, Valdés-Galicia<sup>[10]</sup> 利用功率谱方法得到了宇宙线 1.3 年和 1.7 年周期规律, Laurenza 等<sup>[11]</sup> 研究了宇宙线在太阳活动调制下的 11 年周期特性. 本文利用小波方法分析了 Huancayo 和 Climax 两个测站的月均宇宙线数据周期变化, 并利用分析结果对 Climax 站的宇宙线流量进行了预测研究.

## 1 数据及方法

### 1.1 数据说明

本文主要分析太阳黑子和宇宙线时间尺度较长的周期变化, 使用的数据时间采样率均为 1 个月, 其

中, 太阳黑子有月均值以及滑动平均月均值  $R_{12}$  两种, 宇宙线数据来自 Huancayo 和 Climax 两个站观测的月平均结果 (见表 1).

### 1.2 分析方法

#### 1.2.1 小波分析

本文选用 Morlet 小波<sup>[12]</sup>, 其在时域和频域上都具有良好的局部化性质. Morlet 小波函数的表达式为

$$\psi(t) = e^{-at^2} \cos(5t).$$

其中,  $a$  为缩放因子, 信号  $f(t)$  的小波变换定义为

$$W_f(a, b) = \int_R f(t) \bar{\psi}_{ab}(t) dt.$$

式中,  $\bar{\psi}_{ab}(t)$  为  $\psi_{ab}(t)$  的共轭函数,  $b$  为平移因子.

小波功率谱定义为

$$E_{a,b} = |W_f(a, b)|^2.$$

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

$$E_a = \frac{1}{N} \sum_b^N |W_f(a, b)|^2.$$

#### 1.2.2 交叉小波变换

交叉小波变换<sup>[13-16]</sup> 是将小波变换和交叉谱分析结合产生的一种新型的信号分析技术, 可以从多时间尺度的角度来研究两个时间序列在时频域中的相互关系. 设  $W_x(s)$  和  $W_y(s)$  分别为给定的两个时间序列  $x$  和  $y$  的小波变换, 则定义其交叉小波谱为

表 1 1953 年 1 月至 2006 年 10 月宇宙线观测数据信息

Table 1 Information of cosmic ray from January 1953 to October 2006

| 测站名称     | 所属国家   | 地理位置 (N, W)       | 海拔高度/m | 截止刚度/GV        |
|----------|--------|-------------------|--------|----------------|
| Climax   | U.S.A. | (39.37°, 106.18°) | 3400   | 2.99 (1980 年)  |
| Huancayo | Peru   | (-12.03°, 75.33°) | 3400   | 12.92 (1980 年) |

$W_n^{xy}(s) = W_n^x(s)W_n^{y*}(s)$ , 交叉小波变换系数较大时, 表明在该时频尺度上, 这两个函数具有较好的相关关系. 类似于傅里叶功率谱, 可定义单个时间序列的小波功率谱(能量谱)函数为  $|W_n^{xy}(s)|$ , 其值越大, 表明两者具有共同的高能量区越大, 彼此相关越显著.

与红色噪音标准谱进行比较可对连续交叉小波功率谱进行检验. 假设两个时间序列  $x$  和  $y$  的期望谱均为红色噪音谱  $P_k^x$  和  $P_k^y$ , 则交叉小波功率谱分布有如下关系式:

$$\frac{|W_n^x(s)W_n^{y*}(s)|}{\sigma_x\sigma_y} = \frac{Z_\nu(P)}{\nu} \sqrt{P_k^x P_k^y}.$$

其中,  $\sigma_x, \sigma_y$  为时间序列  $x$  和  $y$  各自的标准差.

Morlet 小波是复小波, 故自由度  $\nu$  取 2,  $Z_\nu(P)$  为与概率  $P$  有关的置信度, 当显著水平  $\alpha = 0.05$  时,  $Z_2(95\%) = 3.999$ . 先求出红色噪音功率谱 95% 的置信限上界, 当等式左端超过置信限, 则认为通过了显著水平  $\alpha = 0.05$  时红色噪音标准谱的检验, 两者相关显著.

$W_n^{xy}(s)$  的相位角可以描述时间序列  $x$  和  $y$  在时频域中的局部相对相位关系, 其显著性检验同上. 在影响锥曲线以内的区域, 可采用圆形平均相位角来定量描述两者的相位关系.

### 1.3 宇宙线预测方法

宇宙线流量与太阳活动存在明显的负相关关系, 因此, 可以利用太阳黑子数来预测宇宙线流量<sup>[17-19]</sup>. 通常采用太阳黑子数 12 个月滑动平均值  $R_{12}$  来进行预测, 目前主要有三种途径<sup>[18]</sup>: 一是直接根据宇宙线与太阳黑子数之间的相关关系建立线性预测方程; 二是根据奇偶太阳活动周内宇宙线的周期变化不同, 分别建立预测方程; 三是基于不同时段行星际磁场极性的变化特性, 分三种情况分别建立宇宙线与太阳黑子的线性关系式.

第二和第三种方法考虑了不同活动周期间太阳对宇宙线的调制作用, 可以较好地根据  $R_{12}$  给出宇宙线的预测结果, 但是太阳活动周以及行星际磁场极性的准确划分存在非常大的困难, 因此后两种方法在某些年份预测结果偏差较大. 相比较而言, 第一种方法虽然只用到太阳黑子数, 但也可取得与后两种方法相当的预测效果, 因此, 本文采用第一种方法对 Climax 站宇宙线流量进行预测研究, 预测公式如下:

$$I_{\text{Climax}} = 4359 - 4.508R_{12}.$$

式中,  $R_{12}$  为预测时刻的太阳黑子数.

利用相对误差来检验预测精度, 有

$$E_r = \frac{I_{\text{Climax}}^{\text{obs}} - I_{\text{Climax}}}{I_{\text{Climax}}^{\text{obs}}}.$$

式中,  $I_{\text{Climax}}^{\text{obs}}$  为 Climax 站宇宙线观测结果.

## 2 结果分析

太阳黑子和宇宙线均随时间发生变化. 图 1 给出了第 19~21 太阳活动周期间太阳黑子以及 Huancayo 和 Climax 站观测的宇宙线结果, 从图 1 可以看出, 在过去的 50 年中, 太阳黑子在每个周期的下降阶段持续时间一般要长于上升阶段的时间, 第 19 活动周期间的太阳黑子数最大, 高年黑子的月均值达到了 200, 第 20 和 23 活动周太阳黑子的变化趋势极为相近, 第 21 和 22 活动周无论是黑子数目还是持续时间均较为相似; 太阳活动和宇宙线流量存在明显的周期性变化, 两个台站观测的宇宙线数月均值均与太阳活动呈现反相位关系, 即宇宙线流量受到太阳活动强烈的调制作用, 高年期间流量最小, 而低年则达到最大, 但从图 1 可以明显看出宇宙线流量变化滞后太阳黑子一段时间; 不同台站的宇宙线流量观测值随太阳活动的变化率也有所不同, Huancayo 和 Climax 站极大、极小值之差相对于平均值的变化率分别为 14.70% 和 33.59%, 说明高纬地区接收的宇宙线更容易受到太阳活动影响, 这是因为能够入射到低纬地区的宇宙线能量高于高纬, 受行星际磁场影响相对较小.

### 2.1 小波分析结果

为了得到太阳黑子以及宇宙线的变化周期信息, 对这三组时间序列数据进行 Morlet 小波功率谱分析, 结果如图 2 所示.

在图 2 中, 区域越亮的地方代表此位置的功率谱越大, 粗黑线所包围的范围均通过了 95% 置信水平的红噪声标准谱检验; 曲线范围以内高值区域是影响锥, 该曲线以外的功率谱由于受到边界效应影响而不考虑. 由图 2 可以看出, 太阳黑子和宇宙线的小波功率谱在 105~158 个月(约为 9~13 年左右)尺度显著, 存在于整个时间序列内, 并且通过了显著性检验, 其中 130 个月左右的小波功率能量最为显著, 说明太阳活动以及宇宙线均存在稳定的约 11 年周期特性; 在 5 个活动周高年期间太阳黑子和宇宙线在 1~6 个

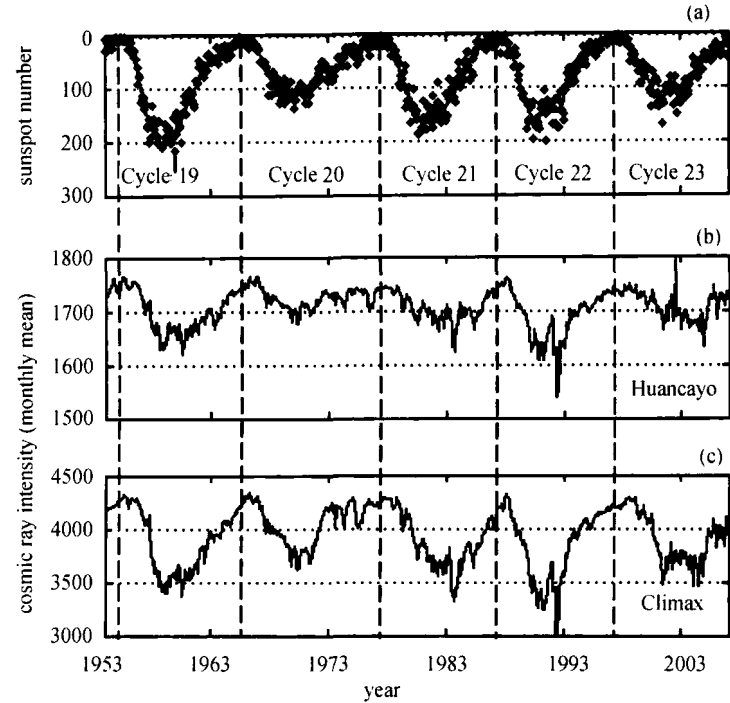


图 1 第 19~21 太阳活动周期期间太阳黑子以及 Huancayo 和 Climax 站观测的宇宙线结果. (a) 太阳黑子月均值 (黑点) 与 12 个月平滑值 (实线), (b) (c) Huancayo 和 Climax 站宇宙线月均值

Fig. 1 Intensity of cosmic rays the in Huancayo and Climax. (a) Monthly mean (dot) and smoothed (solid) sunspot number, (b) (c) monthly mean intensity of cosmic rays observed since January 1953 in Huancayo and Climax

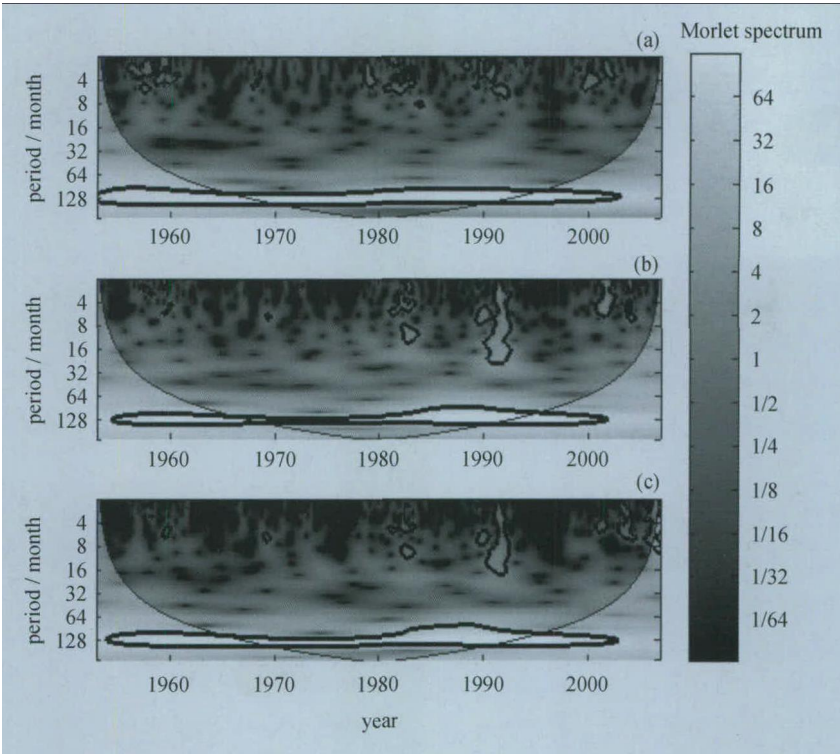


图 2 太阳黑子 (a), Huancayo (b) 和 Climax (c) 站宇宙线数据 Morlet 小波功率谱

Fig. 2 Morlet spectrum of the sunspot (a), cosmic ray observed in Huancayo (b) and Climax (c) station

月小波尺度上功率谱较高, 宇宙线在第 21 活动周高年期间存在功率谱较高的 8~10 个月的小波尺度, 而第 22 周高年还存在 6~8 个月以及 1~22 个月的小波尺度, 并且都通过了 95% 的显著性检验, 说明在太阳活动高年, 太阳活动还存在 1~6 个月的变化周期, 受其影响宇宙线包含了类似的周期特性, 但是, 其同时还可能受到太阳不同纬度地区开放磁力线的影响而出现其他中尺度的周期特性<sup>[10]</sup>.

从图 1 可看出宇宙线的变化相位滞后于太阳活动, 为定量地给出滞后时间, 对太阳黑子和两个测站的宇宙线数据进行交叉小波处理, 结果如图 3 所示.

图 3 中的交叉小波能量分布与单个时间序列的能量分布总体上较为一致. 两者共同的能量高值区在狭长的 130 个月左右的周期上表现非常突出, 这说明在该周期上两者具有显著的相关性.

在交叉小波能量谱中, 均通过显著性检验的主要能量极值区共同周期约为 11 年. 太阳黑子和宇宙线流量在此频段上表现出一致的相位差, 计算出图 3(b) 中两者的交叉相位角约为  $205^{\circ}$ , 表明太阳黑子的相位比宇宙线相位超前约 74 个月 ( $205^{\circ} \times 130/360^{\circ}$ ), 即宇宙线流量的极大值落后于太阳黑子活动高年约 74

个月, 这与图 1 中得到的近似反相位关系的结论一致. 考虑到太阳活动对宇宙线的调制作用, 即宇宙线流量低年对应于太阳活动高年, 根据图 3(b) 的计算结果, 两者之间的相位超过反相位约 8 个月 ( $25^{\circ} \times 130/360^{\circ}$ ), 表示在 130 个月尺度上太阳黑子数的变化超前于宇宙线约 8 个月. 这个结论可以作为改进利用太阳黑子数预测 Climax 站宇宙线流量方法的依据. 图 3(a) 中 Huancayo 站分析得到的结论与 Climax 站相似, 本文仅使用 Climax 站的宇宙线观测数据进行预测研究, 因此不再对 Huancayo 站进行分析.

2.2 Climax 站预测结果及分析

预测方程中的太阳黑子数  $R_{12}$  分别采用当前和提前 8 个月的数据, 对 Climax 站宇宙线流量进行预测, 结果如图 4 所示.

从图 4(a) 可以看出, 利用太阳黑子数预测的结果基本能够反映宇宙线流量的实际变化, 太阳活动低年期间的预测精度要高于高年时期, 第 19, 21 和 23 太阳活动周的下降阶段以及第 22 活动周高年期间的预测误差较大, 但在此期间利用提前 8 个月的  $R_{12}$  作为数据参数的预测精度有较为明显的提高, 更接近于真实值.

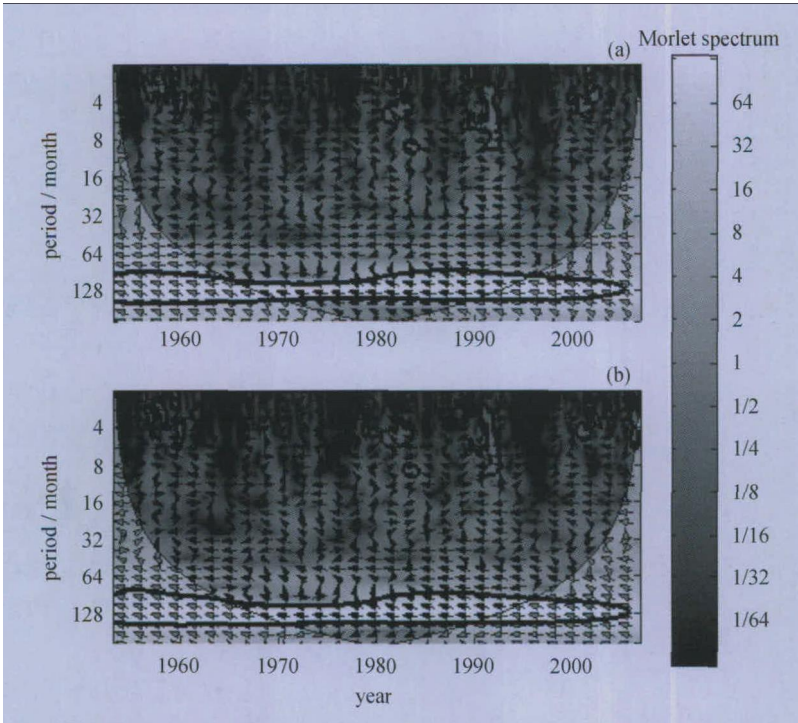


图 3 太阳黑子与宇宙线交叉小波功率谱

Fig. 3 Cross-wavelet spectrum between solar sunspot and cosmic ray observed in Huancayo (a) and Climax (b) station

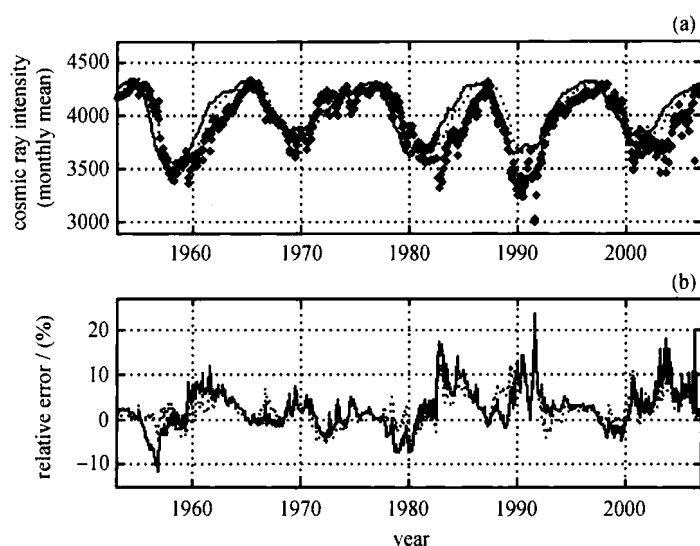


图 4 宇宙线观测值 (黑点)、当前 (实线) 和提前 8 个月 (虚线) 太阳黑子数预测结果 (a) 及其对应的相对误差 (b)

Fig. 4 (a) Intensity of cosmic rays observed (black dot), predicted in function of sunspot index  $R_{12}$  (solid line) and 8 months in advance (dashed); (b) the relative errors

图 4(b) 显示改进前后的预测相对误差绝大多数在  $-10\% \sim 20\%$  之间, 第 21 活动周的下降阶段以及 22 和 23 活动周高年期间预测误差较大, 这三个时段预测方法改进前相对误差最大值分别达到了 17.43%, 23.28% 和 19.64%, 而改进后分别为 12.65%, 21.74% 和 18.16%; 对每个月的相对误差取绝对值然后平均, 改进前后总的误差分别为 3.8912% 和 3.2386%。为验证本文提出的优化预测输入参数方案的合理性, 分别利用预测时刻之前 1~12 个月的太阳黑子数对宇宙线流量进行预测误差检验, 结果如图 5 所示。

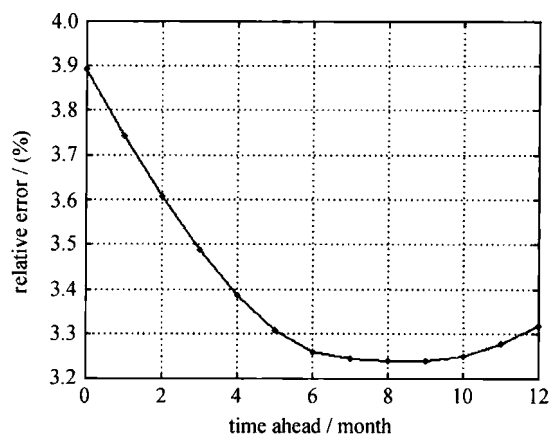


图 5 不同太阳黑子数预测宇宙线流量误差统计结果

Fig. 5 Results of relative errors of the predicted cosmic ray intensity from different sunspot index  $R_{12}$  in advance

从图 5 可以明显看出, 利用不同时间太阳黑子预测的宇宙线流量误差呈近似抛物线分布, 利用预测时刻之前 8 个月左右的太阳黑子数预测宇宙线流量的精度最高, 这也验证了使用交叉小波得出宇宙线流量变化滞后太阳黑子变化 8 个月左右的结论的合理性, 说明太阳活动变化对宇宙线的调制作用需要一定的时间才能够显示出来。

### 3 结束语

通过对太阳黑子数与宇宙线流量变化关系进行分析, 同时利用小波分析和交叉小波方法分别研究了太阳黑子及 Huancayo, Climax 两个观测站宇宙线的变化周期, 并对 Climax 站的宇宙线进行预测研究, 得到如下结论。

(1) 宇宙线流量与太阳活动呈反相位关系, 位于中纬地区的 Climax 站观测结果比低纬地区的 Huancayo 站变化幅度大, 相对于平均值的最大变化率分别为 33.59% 和 14.70%。

(2) 小波分析结果表明, 太阳黑子和宇宙线都存在明显的 105~158 个月尺度的周期变化, 在 11 年附近最为明显, 太阳活动高年期间还存在 1~6 个月的周期, 而第 21 太阳活动周的高年期间宇宙线存在 8~10 个月的周期规律, 第 22 周太阳活动高年时

还存在 6~8 个月以及 1~22 个月的周期尺度。

(3) 交叉小波分析结果表明, 太阳黑子与宇宙线在 130 个月左右的周期上具有显著的相关性, 并且近似呈现负相关关系, 计算结果显示, 在 130 个月尺度上宇宙线的变化滞后太阳黑子数约 8 个月。

(4) 利用太阳黑子数  $R_{12}$  对 Climax 站的宇宙线流量进行预测, 分别使用预测时刻和 8 个月前的太阳黑子数, 预测相对误差为 3.8912% 和 3.2386%。

日地空间是一个存在明显因果关系的耦合系统, 太阳是整个日地空间环境变化的主要源头, 但是太阳活动的影响需要一个长时间的传播或积累过程才能显现, 利用本文方法可以估算出这个时间, 以提高各种空间天气参数的预测或预报精度。

**致谢** 太阳黑子和宇宙线数据由 SPIDR 提供。

## 参考文献

- [1] Liu Zhenxing. Space Physics[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005. In Chinese (刘振兴. 太空物理学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005)
- [2] Huang Yongnian. Advance in cosmic ray space physical in China[J]. *Prog. Geophys.*, 2007, **22**(4):1046-1051. In Chinese (黄永年. 我国宇宙线空间物理学的进展[J]. 地球物理学进展, 2007, **22**(4):1046-1051)
- [3] Erlykin A D, Gyalai G, Kudela K, *et al.* On the correlation between cosmic ray intensity and cloud cover[J]. *J. Atmos. Sol-Terr Phys.*, 2009, **71**:1794. doi:10.1016/j.jastp.2009.06.012
- [4] Shaviv N J. On climate response to changes in the cosmic ray flux and radiative budget[J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, A08105, doi:10.01029/2004JA010866
- [5] Kirkby J. Cosmic rays and climate[J]. *Surv. Geophys.*, 2007, **28**:333-375
- [6] Le Guiming, Ye Zonghai, Gong Juhong, *et al.* Solar diurnal and semidiurnal variation characteristic of cosmic rays observed at Beijing neutron monitor during magnetic quiet days from solar cycle 22 to solar cycle 23[J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2002, **22**(1):21-26. In Chinese (乐贵明, 叶宗海, 龚菊红, 等. 第 22 与 23 周磁静日北京台银河宇宙线周日变化与半日变化特征[J]. 空间科学学报, 2002, **22**(1):21-26)
- [7] Le Guiming, Ye Zonghai, Gong Juhong, *et al.* Power spectrum analyses of cosmic rays observed by short time scale, biggest Beijing Superneutron monitor before the severe magnetic storm on Nov. 24, 2001[J]. *J. Grad. School Chin. Acad. Sci.*, 2002, **19**(2):163-167. In Chinese (乐贵明, 叶宗海, 龚菊红, 等. 2001 年 11 月 24 日特大磁暴前银河宇宙线短时间尺度功率谱分析[J]. 中国科学院研究生院学报, 2002, **19**(2):163-167)
- [8] Gil A, Iskra K, Modzelewska R, *et al.* On the 27-day variations of the galactic cosmic ray anisotropy and intensity for different periods of solar magnetic cycle[J]. *Adv. Space Res.*, 2005, **35**(4):687-690
- [9] Alania M V, Gil A, Iskra K, *et al.* 27-day variations of the galactic cosmic ray intensity and anisotropy in different solar magnetic cycles (1964-2004) [C]//29th International Cosmic Ray Conference, Pune: IUPAP Commission, 2005
- [10] Valdés-Galicia J F, Velasco V M, Mendoza B. Mid term cosmic ray quasi periodicities and solar magnetic activity manifestations [C]//29th International Cosmic Ray Conference, Pune: IUPAP Commission, 2005
- [11] Laurenza M, Giangravé S, Storini M, *et al.* Characteristic features of the 11-year cycle in cosmic ray data [C]//30th International Cosmic Ray Conference. Mexico, 2007
- [12] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1998, **79**(1):61-78
- [13] Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series[J]. *Nonl. Proc. Geophys.*, 2004, **11**:561-566
- [14] Yu Dandan, Zhang Ren, Hong Mei, *et al.* Correlation analysis between the west pacific subtropical high and the East Asian summer monsoon system based on cross wavelet and wavelet coherence[J]. *J. Nanjing Inst. Meteor.*, 2007, **30**(6):755-769. In Chinese (于丹丹, 张韧, 洪梅, 等. 基于交叉小波与小波相干的西太平洋副高与东亚夏季风系统的关联性分析[J]. 南京气象学院学报, 2007, **30**(6):755-769)
- [15] Yang Ruowen, Cao Jie, Huang Wei, *et al.* Cross wavelet analysis of the relationship between total solar irradiance and sunspot number[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2009, **54**(7):871-875. In Chinese (杨若文, 曹杰, 黄玮, 等. 太阳常数与太阳黑子数关系的交叉小波分析[J]. 科学通报, 2009, **54**(7):871-875)
- [16] Zhang Xiaofang, Fu Yang, Yan Wei, *et al.* Variations of high energy electrons in the geostationary orbit[J]. *Prog. Geophys.*, 2009, **24**(6):1951-1957. In Chinese (张晓芳, 符养, 严卫, 等. 地球同步轨道高能电子变化[J]. 地球物理学进展, 2009, **24**(6):1951-1957)
- [17] Badhwar G D, O'Neil. Time lag of twenty two year solar modulation [C]//Proceeding of the International Cosmic Ray Conference. Calgary, 1993
- [18] Nymmik R A, Panasyuk M I, Suslov A A. Galactic cosmic ray flux simulation and prediction[J]. *Adv. Space Res.*, 1996, **17**(2):19-30
- [19] Lantos P. Predictions of galactic cosmic ray intensity deduced from that of sunspot number[J]. *Solar Phys.*, 2005, **229**:373-385