0254-6124/2014/34(1)-001–10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Song Dan, Xue Bingsen, Cheng Guosheng. Statistical analysis of solar wind velocity from ACE and STEREO-B satellites (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(1): 1-10, doi:10.11728/cjss2014.01.001

ACE 和 STEREO-B 太阳风速度的统计分析*

宋 丹[1] 薛炳森[2] 程国生[1]

1(南京信息工程大学数学与统计学院 南京 210044)

2(国家卫星气象中心 北京 100081)

摘 要 采用小波分析方法讨论了 2008－2011 年 ACE 和 STEREO-B 卫星太阳风速度的 27 天周期特性, 运用一元线性回归分析方法计算了两颗卫星太阳风速度的线性表达式, 分析和计算结果表明, ACE 和 STEREO-B 卫星探测到的太阳风速均在 8∼16 d, 16∼32 d 的频域尺度上较为显著, 在局部相同时域上, 二者太阳风速的 27 天周期均较为显著; 当太阳活动为低年时, 相关性好. 作为应用实例, 使用 STEREO-B 卫星太阳风探测数据, 预测 2012 年 10 月 1—17 日的 ACE 太阳风速度, 结果表明, 预测值与实测值趋势一致, CME 过程对预测值有一定影响. 通过本项研究, 初步统计出了 ACE 与 STEREO-B 太阳风速度的关系, 利用 STEREO-B 能够提前数天监测到即将由太阳吹向地球的太阳风特性, 为建立直观的重现型地磁暴中期预报模型奠定了基础.

关键词 ACE 卫星, STEREO-B 卫星, 太阳风速度, 小波分析

中图分类号 P 352

Statistical Analysis of Solar Wind Velocity from ACE and STEREO-B Satellites

SONG Dan[1] XUE Bingsen[2] CHENG Guosheng[1]

1(*College of Math and Statistics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044)

2(*National Satellite Meteorology Center, Beijing* 100081)

Abstract The wavelet analysis method was used to discuss the 27-day periodicities characteristic of the solar wind speed detected by ACE and STEREO-B satellites from the year of 2008 to 2011. Using the method of unary linear regression, the linear equation of solar wind speed is calculated. From the analysis and calculation results detected by ACE and STEREO-B, it is shown that the solar wind speed in 8∼16 d and 16∼32 d frequency domain is significant. The solar wind speed detected by the two satellites presents significant 27-day periodicities in parts of the same frequency domain. And it presents better correlation in the year when solar activity is low. As an application example, solar wind data detected by STEREO-B is applied to predict the solar wind speed of ACE from 1 to 17 in October, 2012. The results show that the trend of predicted values and measured values are consistent, although the CME has a certain influence on the predicted values. Through this research,

* 公益性行业 (气象) 科研专项经费项目资助 (GYHY200906013)

2013-01-15 收到原稿, 2013-07-24 收到修定稿

E-mail: songdan9792@163.com

the relationship of solar wind speed detected by ACE and STEREO-B satellites was preliminarily studied, and the solar wind speed was detected by STEREO-B a few days before it came to the Earth. This work laid the foundation to establish the medium-term forecast models for the non-recurrent geomagnetic storms.

Key words ACE, STEREO-B, Solar wind velocity, Wavelet analysis

0 引言

多年来对地磁扰动太阳源的研究结果认为, 存在两种不同的地磁扰动, 即重现型磁扰和非重现型磁扰. 其是由不同太阳源引起的, 在太阳活动的不同时段, 两种扰动源所占的比重呈现出此消彼长的特征. 前者由冕洞产生的太阳风引起, 是太阳活动低年地磁扰动的主要原因; 后者由太阳爆发造成的日冕物质抛射 (CME) 引起, 主要发生在太阳活动高年. 本文重点研究的是太阳风演化特征, 为进一步预报地磁扰动提供信息 [1−2].

太阳风是由于日冕膨胀而形成的由太阳向外发出的充满行星际空间的等离子体流. 稳态太阳风一般划分为低速流和高速流, 低速流与电流片或扇形边界相关联, 而高速流是由日冕洞加速发出的. 冕洞高速流是引发地磁扰动的重要原因之一, 特别是在太阳活动下降年和太阳活动低年, 由冕洞引起的地磁扰动在地磁活动中占主导地位. 在这些阶段, 冕洞从极区向外扩展, 伸展向赤道地区, 有时甚至穿过赤道 [3]. 由于冕洞寿命长, 发展相对其他太阳活动缓慢稳定, 因此其所引起的地磁扰动具有明显的 27 天重现性.

位于地球磁层外的卫星可以直接测量太阳风的特征. ACE (Advance Composition Explorer) 卫星于 1997 年 8 月 25 日发射, 轨道位于 L_1 点附近, 距离地球 1.5×10^6 km, 其搭载的全部仪器至今工作正常 [4]. ACE 运行在地球磁场影响范围之外的地方, 相对于地球, 其运行于太阳风的上游, 能够连续监测太阳风的变化, 可用于地磁扰动的预警. 2006 年, 美国国家航空航天局 (NASA) 成功发射 STEREO 卫星 (靠近 1 AU), 在进入预定轨道后, STEREO 两颗子卫星在地球的行星轨道上运行, 分别位于地球前后, 飞行在地球前端的称之为 STEREO-A 卫星, 后端的称之为 STEREO-B 卫星 [5], 这两颗进入轨道的卫星大约以每年 22° 的速度远离地球 [6]. 这样就围绕太阳构成了一个三点太阳风连续监测系统, 提高了太阳风及其影响的中期预报水平.

自从冕洞与太阳风高速流之间的相关性被认识以来, 对冕洞及高速流与重现型地磁活动之间的关系已有一些定性分析, 并取得了较多成果, 但是与冕洞相关的重现型地磁暴预报问题仍未得到很好的解决. STEREO-B 卫星位于地球绕日轨道后端, 远离太阳一侧, 但由于太阳自转速度是地球公转速度的 10 倍以上, 因此对于太阳风探测来说, 其位于地球上游 [7], 能够提前数日反映出太阳风特性. 由于冕洞结构稳定, 其太阳风速度短期内相对变化不大, 因此, STEREO-B 卫星的太阳风探测数据与数天后影响地球的太阳风速度密切相关, 利用这一特点, 同时参考冕洞成像监测数据, 能够定量估算影响地球的太阳风速度, 使得重现型地磁暴预报更为准确.

本文充分利用上述原理, 根据地磁扰动的重现特征, 统计分析 STEREO-B 和 ACE 卫星太阳风速度, 确认两颗卫星太阳风监测数据的相关特性. 通过对其相关性的进一步分析和数据拟合, 用 STEREO-B 卫星的太阳风速度提前预测未来到达 ACE 卫星的太阳风速, 可为重现型地磁扰动的中长期预报奠定基础.

1 ACE 与 STEREO-B 卫星太阳风速度的周期性

长期观测统计发现, 太阳是地磁活动的源头, 而太阳风速度又起到重要的决定性因素. 太阳风高速流随太阳自转是造成地磁活动具有 27 天重现性的主要原因, 为了验证利用 ACE 和 STEREO-B 卫星太阳风速度预报重现型地磁扰动的可行性, 本文利用两颗卫星时间分辨率为 1 h 的太阳风速度数据分析太阳风速度的周期性, 作为实例, 选用 2008−2011 年 ACE 卫星太阳风速度资料, 结合同时段 STEREO-B 卫星的太阳风数据, 利用小波分析研究两颗卫星的太阳风速度在相同时间段的周期以及周期信号在不同时期中的具体变化特征.

1.1　小波分析方法

小波变换是用于分析时间序列周期的一种方法, 其不仅可以揭示时间序列变化在各种时间尺度上的周期变化特征, 还能显示出各种周期信号随时间的变化 [8]. 本文选用 Morlet 小波作为小波母函数, 主要是由于 Morlet 小波变换是高斯包络下的单频率复正弦函数, 其时域及频域局部性均较好, 表达式如下:

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

取 $\omega_0=6.0$ 以满足容许性条件. 在实数域, 信号 $f(t)$ 小波变换的离散表达式为

$$W_f(a,b)=|a|^{-\frac{1}{2}}\Delta t\sum_{i=0}^{N-1}f(i\Delta t)\psi\Big(\frac{i\Delta t-b}{a}\Big).$$

定义小波功率谱为

$$E=|W_f(a,b)|^2,$$

小波总功率谱

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

其中, a 为尺度 (伸缩) 因子, b 为平移因子, Δt 为采样间隔. 小波功率谱是否显著, 可用相应红噪声标准谱进行检验 [8].

1.2　小波功率谱分析

图 1~4 分别给出了 ACE 和 STEREO-B 卫星在 2008−2009 年和 2010−2011 年间太阳风速度在时频空间上的 Morlet 小波功率谱. 图中粗黑线所包围的范围均通过了显著性 $\alpha=0.05$ 水平下的红噪声标准谱的检验, 曲线范围以内高值区域是影响锥, 在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 1 和图 2 可以看出, ACE 和 STEREO-B 卫星的太阳风速度在频域 8~16 d 及 16~32 d 尺度显著. 在 2008 年的第 200 至 300 天中, 两颗卫星都有明显的 16~32 d 周期; 而在 2009 年, 两颗卫星都没有显著的 16~32 d 周期. 从图 1 和图 2 的总体小波功率谱中可以看出, 两颗卫星的太阳风速在 8~16 d, 24~32 d, 384~512 d, 512~731 d 尺度的谱值比较突出, 后两个尺度在粗黑线以外不予考虑, 在 8~16 d, 24~32 d 这两个尺度中, ACE 卫星太阳风速度的谱值最突出点分别是 13.4 d, 26.8 d. 同样, STEREO-B 卫星也是 13.4 d, 26.8 d 谱值最为突出, 但 STEREO-B 卫星太阳风速度的 26.8 d 周期未能通过 95% 的显著性检验, 这说明 STEREO-B 卫星的太阳风速度具有一定的 26.8 d 周期性, 但只在局部时域是显著的, 有关太阳风速度周期的具体分析可参考文献 [9]. 从图 3 和图 4 可以看出, ACE 和 STEREO-B 卫星的

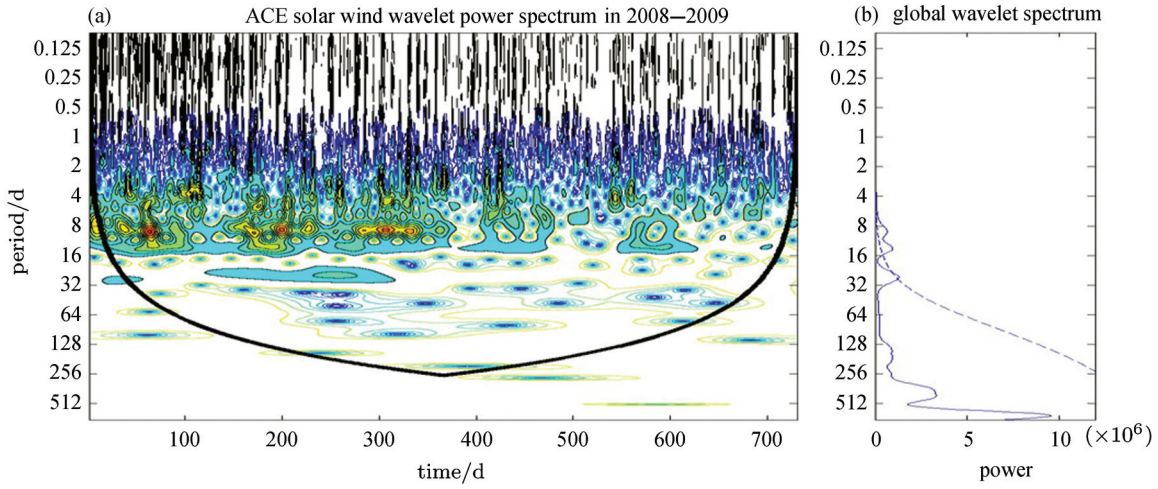


图 1　2008−2009 年 ACE 太阳风速度的 Morlet 小波功率谱 (a) 及总体小波功率谱 (b). 粗黑线所包围的范围均通过了 $\alpha=0.05$ 显著性水平下的红噪声标准谱检验, 高值区域为影响锥

Fig. 1　Morlet wavelet power spectrum (a) and global wavelet spectrum (b) of solar wind velocity from ACE in 2008−2009. Plots in/within the area surrounded by the bold black lines all pass the red noise standard spectral test with the significance $\alpha=0.05$. High value region within the curve scope is the influence cone

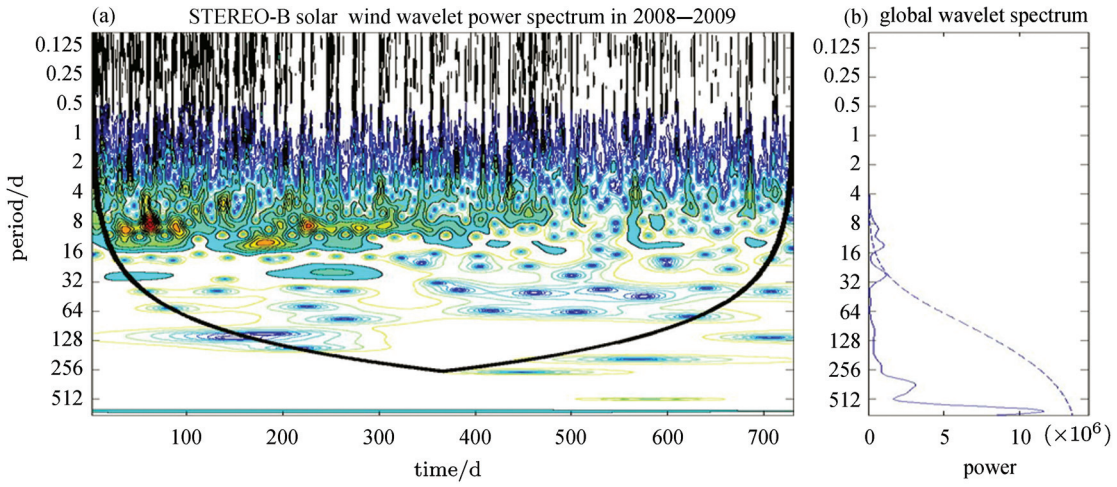


图 2 2008—2009 年 STEREO-B 太阳风速度的 Morlet 小波功率谱 (a) 及总体小波功率谱 (b). 粗黑线所包围的范围均通过了 $\alpha = 0.05$ 显著性水平下的红噪声标准谱检验, 高值区域是影响锥

Fig. 2 Morlet wavelet power spectrum (a) and global wavelet spectrum (b) of solar wind velocity from STEREO-B in 2008—2009. Plots in/within the area surrounded by the bold black lines all pass the red noise standard spectral test with the significance $\alpha = 0.05$. The high value region within the curve scope is the influence cone

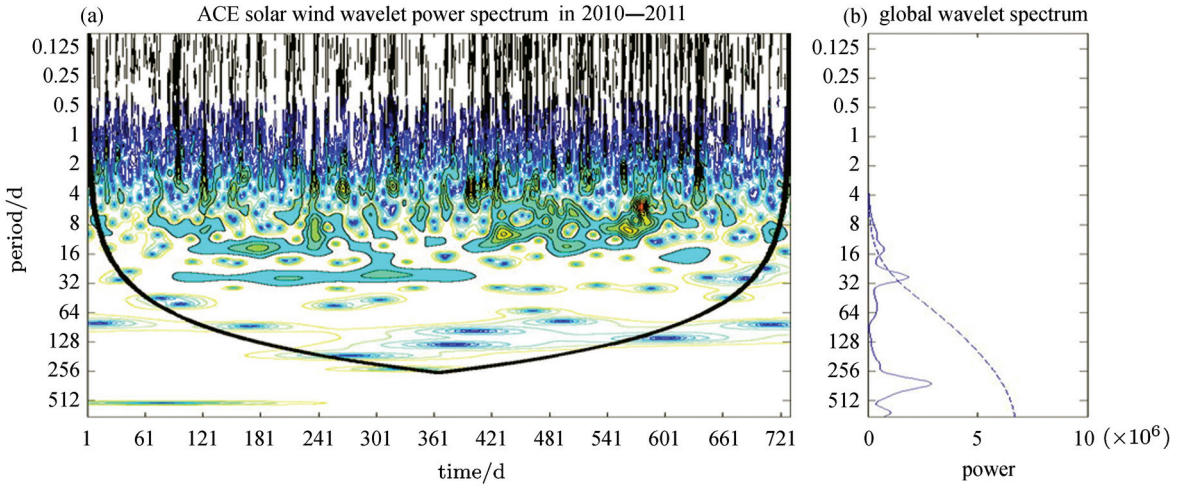


图 3 2010—2011 年 ACE 太阳风速度的 Morlet 小波功率谱 (a) 及总体小波功率谱 (b). 粗黑线所包围的范围均通过了 $\alpha = 0.05$ 显著性水平下的红噪声标准谱检验, 高值区域是影响锥

Fig. 3 Morlet wavelet power spectrum (a) and global wavelet spectrum (b) of solar wind velocity from ACE in 2010—2011. Plots in/within the area surrounded by the bold black lines all pass the red noise standard spectral test with the significance $\alpha = 0.05$. High value region within the curve scope is the influence cone

太阳风速度也都是在频域 8~16 d, 16~32 d 尺度显著, 并且在第 100 至 400 天之间, 两者都展现出 16~32 d 周期, 只是在第 100 至 240 天之间, STEREO-B 卫星太阳风速度的 16~32 d 周期没有 ACE 卫星显著. 通过图 3 和图 4 的总体小波功率谱可见, 两颗卫星的太阳风速度都是 27 d 的谱值最突出, 并且通过了 95% 的显著性检验.

以上分析可知, 在 2008—2011 年间, ACE 卫星的太阳风速度具有比较明显的 27 天周期, STEREO-B 卫星也是如此, 而且在局部的相同时域上, 两颗卫星太阳风速度的 27 天周期都是显著的. 此外发现, 2008 年和 2010 年两颗卫星太阳风速度的 27 天周期比

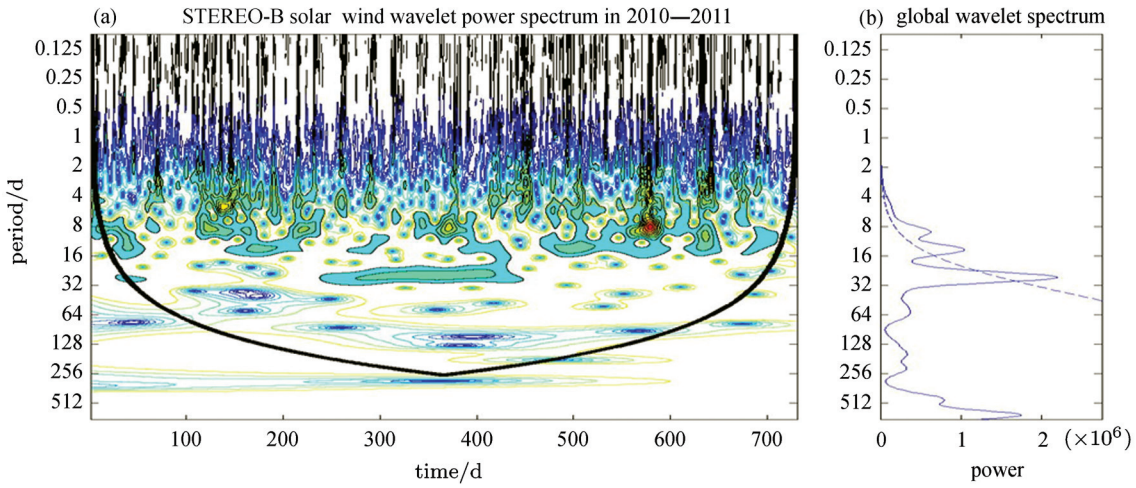


图 4　2010－2011 年 STEREO-B 太阳风速度的 Morlet 小波功率谱 (a) 及总体小波功率谱 (b). 粗黑线所包围的范围均通过了 $\alpha = 0.05$ 显著性水平下的红噪声标准谱检验, 高值区域是影响锥

Fig. 4　Morlet wavelet power spectrum (a) and global wavelet spectrum (b) of solar wind velocity from STEREO-B in 2010－2011. Plots in/within the area surrounded by the bold black lines all pass the red noise standard spectral test with the significance $\alpha = 0.05$. High value region within the curve scope is the influence cone

2009 年和 2011 年显著, 这主要是由于 2009 年为太阳活动低年, 太阳风速度较小, 很难显现出 27 天的周期, 而在 2011 年, 由于 CME 爆发较多, 太阳风速度增加的偶然性增大, 打破了太阳风的 27 天周期, 所以 16~32 d 周期不显著.

上述分析表明, 尽管非重现型 CME 使得 ACE 和 STEREO-B 卫星探测到的太阳风速度相关性变差, 但二者探测数据的变化趋势基本一致, 特别是高速太阳风都表现出明显增加. 从位置上看, STEREO-B 领先于 ACE 卫星的时间小于 9 天, 在这段时间内, 可以认为冕洞结构变化不大, 太阳风的空间分布变化也不大, 但两颗卫星与太阳赤道面的相对位置不同, 因而感受到的太阳风速度有所不同. 可以通过对探测到的太阳风速度进行相关分析, 得到确切的相关公式, 达到通过 STEREO-B 卫星探测结果预报 ACE 太阳风速度的目的.

2　ACE 与 STEREO-B 卫星太阳风速度的相关性及应用

周期性分析结果为利用 ACE 和 STEREO-B 卫星的方位差, 选择其太阳风速度来预报重现型地磁暴提供了理论基础, 下面将对两颗卫星的太阳风速度进行相关性分析, 并剔除数据中异常点, 从而给出两者回归方程.

2.1　ACE 与 STEREO-B 卫星太阳风速度的相关系数

这里选用 2008－2011 年的数据来分析两颗卫星太阳风速度的相关性, 分析中采用的是太阳风速度一天的平均值. 由于太阳自转远快于 STEREO-B 卫星和 ACE 卫星的公转速度, 且 ACE 落后于 STEREO-B 卫星, 因此, 相同的太阳风结构分别扫过两者时存在一定的相位差, 该相位差导致两颗卫星探测到冕洞高速流时有一定时间差. 通过比较不同时差下的相关系数, 找出 ACE 的最佳延迟时间, 经过计算, 给出了两颗卫星太阳风速度延迟前后的相关系数和最佳延迟时间 (见表 1), 为避免卫星数据不稳定造成的影响, 选用了一天的太阳风速度平均值进行统计. 结果显示, 地球监测到的太阳风速度变化的延迟时间大致与 STEREO-B 卫星的轨道变化相当.

从表 1 可以看出, 相较于同时刻的数据, 最佳延迟后的 ACE 与 STEREO-B 太阳风速度的相关系数有明显提高, 具有较好的相关性. 在最佳延迟后的相关系数中, 2008 年的相关系数最高, 其次分别是 2009 年和 2010 年, 最低的是 2011 年. 2008 年作为第 23 太阳周与第 24 太阳周交界的一年, 其相关系数最高,

表 1 2008—2011 年 ACE 和 STEREO-B 太阳风速度延迟前后的相关系数和最佳延迟时间

Table 1 Correlation coefficient and the best delay time of solar wind velocity from ACE and STEREO-B before and after the delay from 2008 to 2011

年	相关系数 (同时刻)	相关系数 (最佳延迟之后)	最佳延迟时间/d
2008	0.5422	0.8493	2
2009	−0.0608	0.5438	4
2010	−0.0422	0.5299	5
2011	−0.1113	0.5130	7

说明在太阳活动低年时, ACE 和 STEREO-B 卫星太阳风速度的相关性好. 在 2009—2011 年, 由于 STEREO-B 卫星约以每年 22° 的速度远离地球, 导致两颗卫星的相位差逐渐增大, 最佳延迟时间也增加, 而其相关系数却逐渐减小, 表明 ACE 和 STEREO-B 卫星太阳风速度相关系数也受两颗卫星相位差的影响, 即两颗卫星的位置对太阳风速度相关性有一定作用.

2.2 ACE 与 STEREO-B 卫星太阳风速度的线性方程

通过对两颗卫星太阳风速度相关系数的分析, 发现二者具有较好的线性相关性, 说明太阳风速度变化

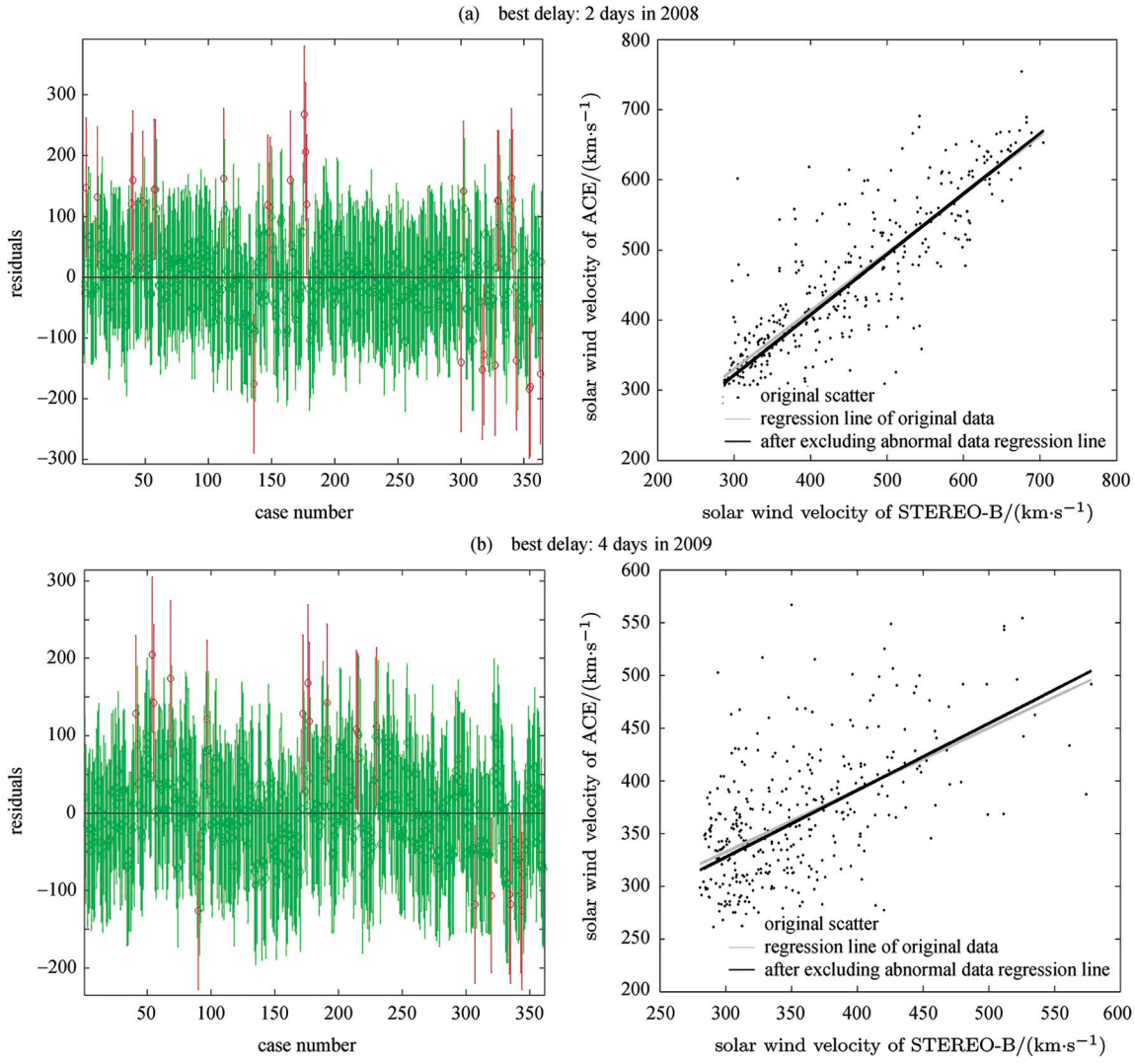


图 5 2008—2009 年 ACE 和 STEREO-B 太阳风速度所对应的残差及其散点与两条回归直线的关系

Fig. 5 Residual case of solar wind velocity from ACE and STEREO-B, their splattering and two regression straight line diagrams in 2008—2009

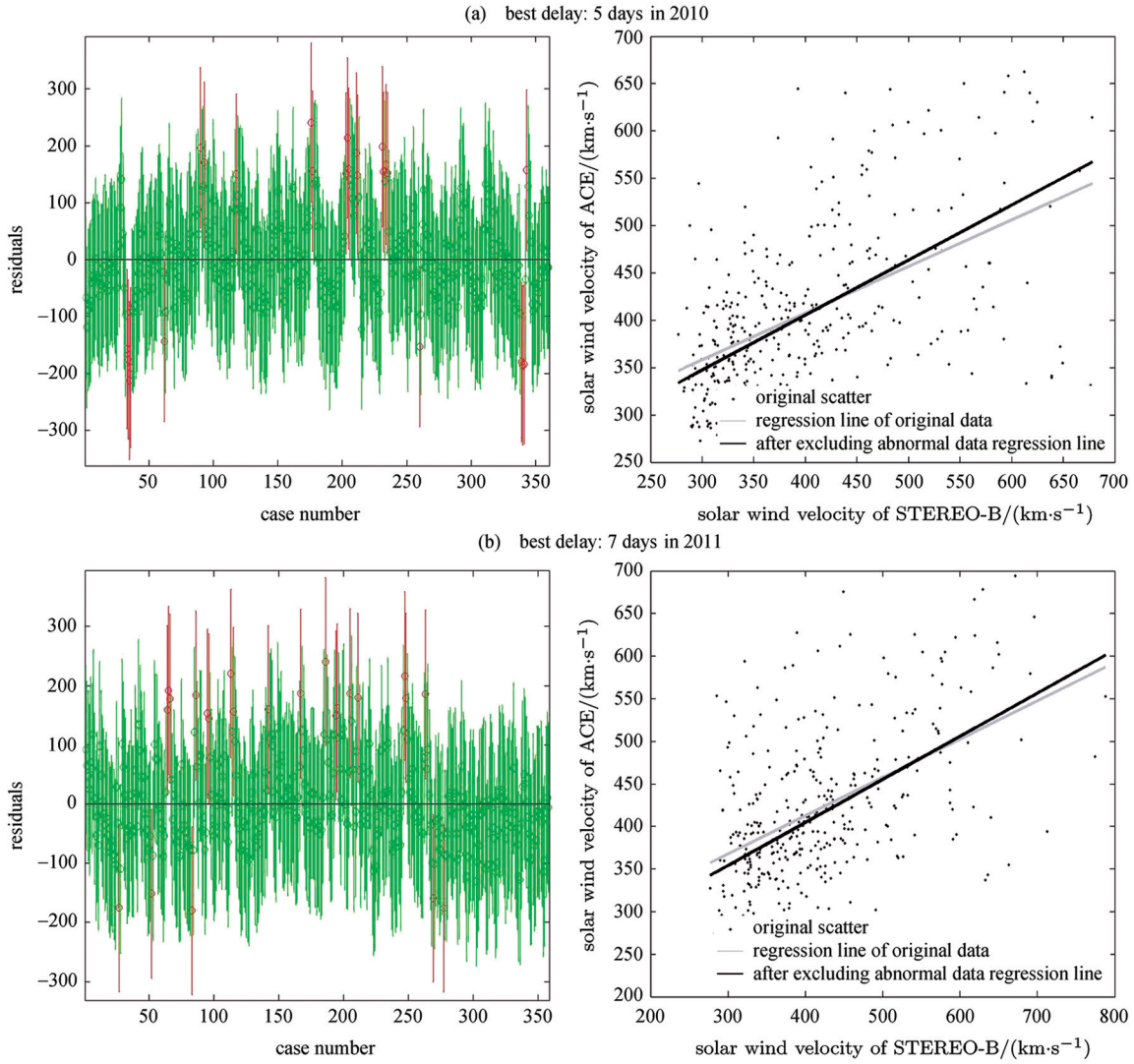


图 6　2010—2011 年 ACE 和 STEREO-B 太阳风速度所对应的残差及其散点与两条回归直线的关系

Fig. 6　Residual case of solar wind velocity from ACE and STEREO-B, their splattering and two regression straight line diagrams in 2010—2011

的周期特性同样会在两颗卫星探测数据中有所体现, 这也是本文试图通过 STEREO-B 卫星进行太阳风速度预报, 进而预报重现型地磁扰动的前提.

图 5 和图 6 给出了 2008—2011 年 ACE 和 STEREO-B 太阳风速度对应的残差结果及其散点与两条回归直线的关系 (以下所有分析都是针对最佳延迟后的数据). 图 5 和图 6 左边一列给出的是残差和残差置信区间, 横坐标表示观测序号, 纵坐标表示残差值, 图中每条竖直线段对应一组观测的残差和残差置信区间, 线段中点处圆圈所对应纵坐标为残差值的大小, 线段上端点纵坐标为置信上限, 下端点纵坐标为置信下限, 若线段与水平线 $y = 0$ 没有交点, 则可认为该组观测数据为异常数据, 从图中可以看出, 红色线段所对应的观测数据就是异常数据, 需剔除, 而绿色线段对应的数据则保留.

图 5 和图 6 右边一列给出的是最佳延迟后的散点与两条回归直线的关系, 其中, 横坐标代表 STEREO-B 的太阳风速度, 纵坐标代表 ACE 的太阳风速度, 灰色直线为实测数据对应的回归直线, 黑色直线是剔除异常数据后的回归直线, 由于受异常数据的影响, 两次回归结果并不相同, 各年具体的拟合方程列于表 2. 从表 2 可以看出, 残差分析后, ACE 和

STEREO-B 卫星太阳风速度的相关系数都在 0.6 以上. 2008−2011 年预测误差的统计列于表 3, 表中 M, m 分别为残差分析前后的实测数据总数; N, n 分别为残差分析前后预测误差在 $[-100, +100]$ 内的数据总数; T, t 分别为其占实测数据总数的比例, 残差分析后的误差在 $[-100, +100]$ 内的比例都有提升, 均在 89% 以上. 通过表 3 还可以看出, 2010 年和 2011 年在残差处理前后, 误差在 $[-100, +100]$ 内的比例相对另外两年均较低, 说明在太阳活动低年时, ACE 和 STEREO-B卫星太阳风速度的相关性好, 这是因为太阳活动低年 CME 很少, 太阳风速度的分布较为稳定.

2.3 ACE 与 STEREO-B 卫星太阳风速度相关性应用

采用上述相关性分析方法, 剔除异常数据, 找出 2012 年 1−6 月 ACE 和 STEREO-B 卫星太阳风速度的相关系数和回归方程, 结果列于表 4.

表 2 2008−2011 年残差分析前后 ACE 和 STEREO-B 太阳风速度的线性方程以及相关系数

Table 2 Linear equation and correlation coefficient of solar wind velocity from ACE and STEREO-B before and after residual analysis

年	残差分析前		残差分析后	
	相关系数	拟合方程 (红色直线)	相关系数	拟合方程 (黑色直线)
2008	0.8493	$y = 80.55 + 0.83x$	0.9233	$y = 62.3 + 0.86x$
2009	0.5438	$y = 156.04 + 0.59x$	0.6401	$y = 136.9 + 0.63x$
2010	0.5299	$y = 210.43 + 0.49x$	0.6453	$y = 173.4931 + 0.58x$
2011	0.5130	$y = 233.09 + 0.45x$	0.6260	$y = 202.3387 + 0.51x$

注 x 为 STEREO-B 太阳风速度, y 为最佳延迟后的 ACE 太阳风速度的预测值, 各表均如此

表 3 2008−2011 年残差分析前后误差在实测值 $[-100, +100]$ 之间的统计表

Table 3 Statistical form of error in the measured value between −100 and +100 before and after residual analysis

年	残差分析前			残差分析后		
	M	N	T (M/N)	m	n	t (m/n)
2008	364	327	89.8%	336	327	97.3%
2009	361	341	94.5%	342	340	99.4%
2010	360	311	86.4%	336	309	92%
2011	358	300	83.8%	335	299	89.3%

表 4 2012 年 1−6 月 ACE 和 STEREO-B 太阳风速度统计情况

Table 4 Statistical situation of solar wind velocity from ACE and STEREO-B from January 2012 to October 2012

最佳延迟时间	残差分析前		残差分析后	
9 天	相关系数	0.4576	相关系数	0.5353
	方程	$y = 263.8992 + 0.3852x$	方程	$y = 247.7271 + 0.4045x$
	T	83.5%	t	90%

在应用两颗卫星太阳风速度相关性进行预测之前, 首先对比 2012 年 10 月 3 日 STEREO-B 和 2012 年 10 月 12 日 SDO 卫星拍摄的冕洞图像 (见图 6). 从图 6 可以看出, 2012 年 10 月 3 日 STEREO-B 观察到的冕洞与 2012 年 10 月 12 日 SDO 卫星看到的冕洞为同一个冕洞, 且两者形态变化不大, 说明其比较稳定, 所发出的太阳风高速流的结构特征相似.

选择表 4 中残差分析后的方程, 用 2012 年 9 月 22 日至 10 月 8 日 STEREO-B 探测的太阳风速度 (x) 来预测该年 10 月 1−17 日 ACE 探测的太阳风速 (y), 结果如图 8 所示. 图 8 中横坐标表示的是日期 (该天的 00:00 UT), 纵坐标分别为 STEREO-B 和 ACE 的太阳风速度, 图 8 中竖直虚线对应的时间分别为 10 月 3 日和 10 月 12 日. 由于受该冕洞 (见图 7) 的影响, 从图 8(a) 反映出 10 月 3−5 日 STEREO-B 太阳风速呈上升状态, 图 8(b)10 月 12−14 日 ACE 卫星实测的太阳风速度也有所上升, 且地球在 10 月 12−14 日发生了地磁暴. 表明当受冕洞高速流影响时, STEREO-B 卫星可以先于 ACE 卫星观察到太阳风速度的上升. 在图 8(b) 中还可以发现, 误差较大处主要在 10 月 9 日末和 10 月 10 日初, 实测数据有峰值且与预测值相差较大, 原因主要是在 10 月 8−9 日, 受 CME 影响, 太阳风速度升高, 对预测有一定影响. 但 ACE 探测的太阳风速预测值与实测值趋势一致, 10 月 1−17 日, ACE 太阳风速预测误差在 $[-100, +100]$ 内的比例为 89.4%. 此次事件仅是本文进行的预报试验, 配合 STEREO-B 上的太阳成像观测得到的冕洞信息, 能够得到 STEREO-B 的太阳风速度变化情况, 可以进一步预测冕洞影响地球时太阳风速度的情况.

需要指出的是, 尽管 STREREO-B 卫星和 ACE 卫星与黄道面的相对位置有差异, 所探测到的太阳风速度来自冕洞的不同位置, 引起两颗卫星的探测数据出现较大差异, 但由于冕洞的寿命较长, 二者探测到的太阳风速度增长的趋势却是一致的, 而且, 太阳风速度的增长幅度呈正相关, 可以用来进行高速太阳风速度的预估. 在目前还没有更加可靠的中期地磁活动预报技术情况下, 可以充分利用 STEREO-B 先于地球探测到太阳风的便利. 来自 STEREO-B 的太阳风数据是进行中期地磁预报的最直接数据.

3　结论

采用小波分析对 2008−2011 年 ACE 卫星和 STEREO-B 卫星探测太阳风速度的周期性进行研究, 结果表明两颗卫星探测的太阳风速均在频域 8~16 d 及 16~32 d 尺度显著, 且在局部相同时域上, 两颗卫星太阳风速度的 27 天周期显著, 通过对两颗卫星周期性的观察, 发现太阳风高速流的发生与其位置关联性很好, 这为预报重现型地磁暴的工作提供了理论基础.

通过相关系数找出 ACE 卫星相对于 STEREO-B 卫星的最佳延后时间, 在此基础上, 计算出两颗卫星在 2008−2011 年的回归方程, 并进一步筛选数据,

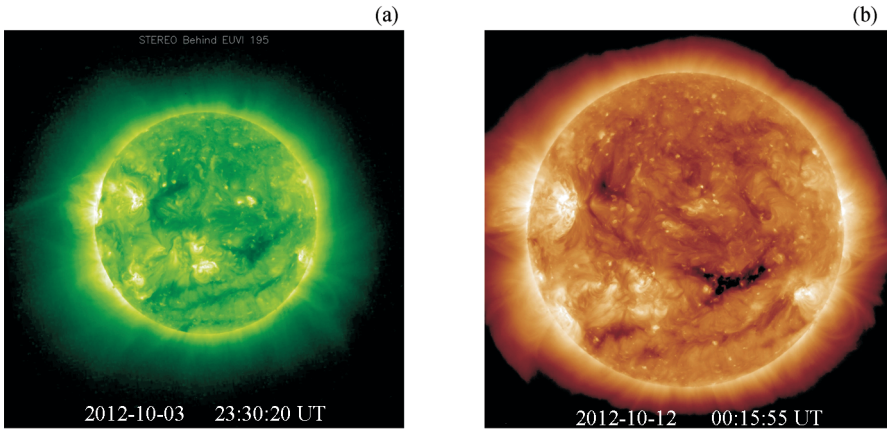


图 7　2012 年 10 月 3 日 STEREO-B(a) 和 2012 年 10 月 12 日 SDO(b) 拍摄到的冕洞图像 (中部偏右下的黑色区域)

Fig. 7　Picture of coronal hole showed in the black area at the lower right corner on 3 Oct. 2012 by STEREO-B (a) and 12 Oct. 2012 by SDO (b)

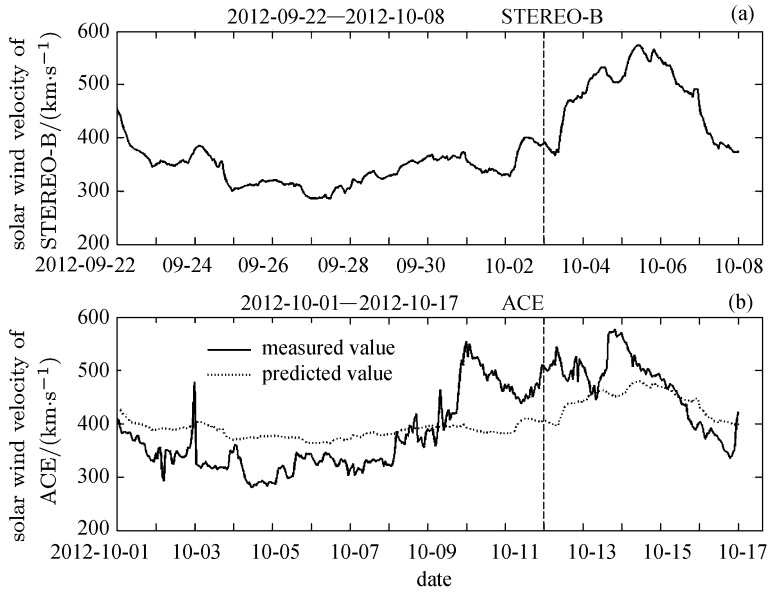


图 8 2012 年 9 月 22 日至 10 月 8 日 STEREO-B 卫星的实测值 (a) 和 2012 年 10 月 1—17 日 ACE 实测及预测值 (b)

Fig. 8 Measured value of STEREO-B from 22 Sep. 2012 to 8 Oct. 2012 (a) and measured and predicted value of ACE from 1 to 17 in Oct. 2012 (b)

最终确立方程. 在这个过程中, 发现两颗卫星的太阳风速度具有一定的相关性, 当太阳活动为低年时, 相关系数较高; 当 ACE 和 STEREO-B 卫星距离较近时, 相关系数也较高.

利用上述相关性和计算回归方程的方法, 选用 2012 年上半年的数据确定方程来预测 2012 年 10 月 1—17 日 ACE 卫星的太阳风速度. 通过本项研究, 给出 ACE 卫星与 STEREO-B 卫星太阳风速度的关系, 希望利用 STEREO-B 卫星能够提前数天监测到即将由太阳吹向地球的太阳风特性, 为开展由冕洞引起的重现型地磁暴预报研究打下基础.

致谢 太阳风数据由美国国家航空航天局 (NASA) 提供.

参考文献

[1] Huang Jing, Zhou Limin, Xiao Ziniu, *et al.* Effect of solar wind speed on the middle and high atmosphere circulation of meteorological to climatological scale [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(6):637-644. In Chinese (黄静, 周立旻, 肖子牛, 等. 天气尺度到气候尺度太阳风变速对中高纬大气环流的影响 [J]. 空间科学学报, 2013, **33**(6):637-644)

[2] Xu Xiaojun, Wei Fengsi, Feng Xueshang. Characteristics of reconnection diffusion region in the solar wind [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(6):778-784. In Chinese (徐晓军, 魏奉思, 冯学尚. 太阳风中磁场重联离子扩散区的大尺度特征 [J]. 空间科学学报, 2012, **32**(6):778-784)

[3] Xu Wenyao. Handbook of the Solar-terrestrial Environment [M]. Beijing: Science Press, 2010: 383-385. In Chinese (徐文耀. 日地环境指南 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 383-385)

[4] Starodubtsev S A, Grigoryev V G, Usoskin I G, Mursula K. Arrival of an interplanetary shocks at the Earth: A real-time forecast based on ACE spacecraft data [C]//32nd International Cosmic Ray Conference. Beijing: Chinese Society of Physics, 2011: 291-294

[5] Howard R A, Moses J D, Vourlidas A, *et al.* Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation (SECCHI) [J]. *Space Sci. Rev.*, 2008, **136**:67

[6] Williams A O, Edberg N J T, Milan S E, *et al.* Tracking corotating interaction regions from the Sun through to the orbit of Mars using ACE, MEX, VEX, and STEREO [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**:A08104

[7] Turner D L, Using X Li. Spacecraft measurements ahead of Earth in the Parker spiral to improve terrestrial space weather forecasts [J]. *Space Weather*, 2011, **9**:S01002

[8] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 1998, **79**(1):61-78

[9] Zhang Xinbo, Zhang Gongliang, Qi Guizhong. The analysis of periodic structure of solar wind velocity [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 1986, **6**(4):252-257. In Chinese (张兴波, 章公亮, 祁贵仲. 太阳风速度的周期结构分析 [J]. 空间科学学报, 1986, **6**(4):252-257)