

卜萱, 罗冰显, 刘四清等. 2019. 冕洞与太阳风高速流关系的统计研究: 到达时间、持续时间和峰值强度. 地球物理学报, 62(2): 462-472, doi:10.6038/cjg2019M0570.

Bu X, Luo B X, Liu S Q, et al. 2019. Statistical study on the relationship between coronal holes and high speed streams: arrival time, duration and peak intensity. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 62(2): 462-472, doi:10.6038/cjg2019M0570.

冕洞与太阳风高速流关系的统计研究： 到达时间、持续时间和峰值强度

卜萱^{1,2}, 罗冰显^{1,2*}, 刘四清^{1,2}, 龚建村¹, 曹勇³, 王宏³

1 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 广东深圳 518055

摘要 冕洞是太阳风高速流的源区. 当冕洞出现在中低纬区域时, 太阳风高速流会扫过地球并引发地球空间环境扰动, 如地磁暴和高能电子暴等. 在太阳活动周下降年和低年, 这种类型的扰动占据主导地位. 因此, 冕洞高速流的到达时间、峰值时间、峰值强度和持续时间等, 是空间天气预报的重要内容. 本文基于 2010 年 5 月到 2016 年 12 月的 SDO/AIA 太阳极紫外图像以及 1AU 处 ACE 和 WIND 卫星的太阳风观测数据, 确定了 160 个冕洞-太阳风高速流事件, 定量计算了他们的特征参数, 包括冕洞与太阳风高速流的开始时间、峰值时间、峰值强度和结束时间, 分析了各个特征参数的分布规律, 对冕洞-高速流之间的关系进行了统计研究, 并提出了一种新的预报方法, 为基于冕洞成像观测的太阳风高速流的精准预报提供了依据.

关键词 冕洞; 太阳风; 高速流; 预报

doi:10.6038/cjg2019M0570

中图分类号 P353

收稿日期 2018-09-20, 2018-12-05 收修定稿

Statistical study on the relationship between coronal holes and high speed streams: arrival time, duration and peak intensity

BU Xuan^{1,2}, LUO BingXian^{1,2*}, LIU SiQing^{1,2}, GONG JianCun¹, CAO Yong³, WANG Hong³

1 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen Guangdong 518055, China

Abstract Coronal hole is the source of high-speed solar wind. When coronal hole appears at low latitude region of solar surface, high-speed solar wind will sweep the Earth and trigger disturbances in terrestrial space, such as geomagnetic storm and relativistic electron flux enhancement in radiation belt. Such disturbances are dominant during the declining phase and minimum of solar cycles. Therefore, the forecast of arrival time, peak time, peak intensity, and duration of high-speed solar wind are of significant importance in space weather forecasting. In this study, based on SDO/AIA images and in-situ solar wind observations by the ACE and WIND satellites at 1AU from May 2010 to December 2016, 160 coronal holes and relevant high speed streams are identified,

基金项目 国家自然科学基金(41474164), 北京市科技重大专项(Z181100002918004)和深圳科技计划项目(JCYJ20160817172025986)资助.

第一作者简介 卜萱, 女, 博士研究生, 主要研究方向为空间环境预报. E-mail: buxuanshixian@163.com

*** 通讯作者** 罗冰显, 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为空间环境预报. E-mail: luobx@nssc.ac.cn

and their characteristic parameters including beginning time, ending time, peak time, peak intensity, etc. are calculated and investigated. The distribution of each characteristic parameter is analyzed, and the statistical research on the relationship between them is carried out, which offers a basis and guidance for the accurate and quantitative prediction of high-speed solar wind based on coronal hole images.

Keywords Coronal hole; Solar wind; High speed stream; Prediction

0 引言

冕洞是日冕上低密度低温度的区域,在极紫外(EUV)和 X 射线波段呈现为黑暗区域(Munro and Withbroe, 1972). 由于日冕向外膨胀,等离子体被带到行星际空间,形成太阳风,其中的太阳风高速流来源于冕洞(Krieger et al., 1973; Nolte et al., 1976). 当高速太阳风追上他前面的低速太阳风时,在高速流的前面会形成一个等离子体压缩区,同时将其后的低速流甩的更远,形成稀疏区(Burlaga, 1975). 在压缩区内,等离子体被挤压,等离子体的温度,密度以及磁场都会达到较高的数值. 这样的结构被称为共转相互作用区(co-rotating interaction region, CIR)(Gosling et al., 1978). 如果冕洞长时间存在, CIR 就会在多个太阳自转周重复出现,引发重现性地磁暴(Smith and Wolfe, 1976; Richardson, 2006),尤其在太阳活动周下降年和低年,重现性地磁暴更加频繁(Tsurutani et al., 2006). 因此太阳风高速流的准确预报关系到由其引发的一系列空间环境扰动事件的预报,比如地磁暴,高能电子暴等.

目前太阳风高速流预报模型主要有两类:太阳风数值预报模型和太阳风经验预报模型. 太阳风数值预报模型可以模拟出 1AU 甚至更远范围里的太阳风速度、温度、密度以及磁场等参数. 太阳风预报的数值模型由两部分组成:日冕模型(比如 WSA, MAS)(Wang and Sheeley, 1990; Arge and Pizzo, 2000; Linker et al., 1999)和日球层模型(比如 ENLIL)(Odstroicil, 2003). 日冕模型利用磁图作为输入,先将磁场外推到源表面,再模拟出 $2.5 R_{\odot}$ 到 $20 \sim 30 R_{\odot}$ 的日冕环境. 之后将日冕模型得到的日冕条件作为日球层模型的输入,模拟出 1AU 以及更远处的太阳风情况. Gressl 等(2014)和 Jian 等(2015)比较了不同太阳风数值预报模型对 2007 年 1AU 处太阳风参数的预报结果,各模型预报的速度和观测速度的相关性系数均在 $0.4 \sim 0.6$ 之间.

考虑到目前的太阳风数值预报模型还有较大的

提升空间,学者们同时在研究和开发太阳风经验预报模型. 相比于复杂的数值模型,太阳风经验预报模型的计算更加快速简单. 其基本思路是:当冕洞在日面上转到朝向正对地球的位置时,在一定的延迟时间(记为 τ)后,冕洞发出的太阳风高速流就会到达地球. 通过构造定量的冕洞特征因子,如冕洞面积,就可以建立基于冕洞特征因子的太阳风经验预报模型. Nolte 等(1976)首次建立了冕洞面积和高速流速度的经验关系,之后许多学者对此进行了深入的研究,并且建立了基于冕洞面积的太阳风经验预报模型(Reiss et al., 2016; Robbins et al., 2006; Rotter et al., 2015; Veselovsky et al., 2006; Vršnak et al., 2007a, 2007b). 这些模型大都利用太阳极紫外图像计算得到冕洞面积,将前 3 个卡林顿周的冕洞面积与 1AU 处的太阳风速度按照一定的时间延迟 τ 进行线性拟合,得到的拟合函数用来预报下一个卡林顿周的太阳风速度. 通常情况下预报模型是线性的,即 $v(t+\tau) = a \times A(t) + b$, v 为太阳风速度, A 为冕洞面积. 虽然这样的经验模型可以较好地捕捉太阳风速度的变化趋势(Reiss et al., 2016; Rotter et al., 2015),但在准确描述高速流事件特征方面仍存在较大的欠缺,主要表现在:

(1) 对于高速流的传输时间 τ 处理不合理. 这些模型中 τ 被设为固定值 4 天(Reiss et al., 2016),或者由前 3 个卡林顿周的太阳风速度与冕洞面积拟合得来(Rotter et al., 2015),这样的处理没有考虑冕洞个体差异对高速流传输时间造成的影响;

(2) 计算出的太阳风高速流持续时间不准确. 在模型中,太阳风高速流与冕洞面积是一一对应的线性关系,因此,预报结果中,高速流的持续时间与冕洞的持续时间是相等的. 而真实情况是,由于冕洞膨胀因子的存在,高速流的持续时间并不等于冕洞的持续时间,往往会比冕洞的持续时间更长;

(3) 不能反映高速流速度变化的非对称性. 高速流在从太阳向地球传输的过程中,会与慢速太阳风相互作用,从而使得太阳风速度的变化呈现出非对称性,即速度上升时间和下降时间不一致. 目前的

太阳风经验预报模型没有考虑这一特征,模型预报的高速流上升时间与下降时间的比等于冕洞上升时间和下降时间的比,不符合真实情况;

(4) 模型预报的高速流峰值速度也并不十分理想.由于在构造预报函数时,并不能反映冕洞特征因子峰值与太阳风高速流速度峰值的关系,峰值速度的预报值和观测值的相关性不到 0.4(Reiss et al., 2016).

为了提升冕洞太阳风高速流预报的准确性,需要对冕洞和太阳风高速流的特征参数的关系进行深入的分析.本文将根据 Solar Dynamics Observatory/Atmospheric Imaging Assembly(SDO/AIA)太阳极紫外成像数据,确定冕洞事件的开始时间、峰值时间、峰值强度、结束时间等特征参数,根据 1AU 处 ACE 卫星与 WIND 卫星的太阳风观测数据,确定高速流事件的开始时间、峰值时间、峰值强度、结束时间等特征参数,并分析二者之间的统计特征和相关关系,为太阳风高速流的准确、精细预报提供依据.

1 数据

本文所使用的数据包括太阳极紫外成像数据和太阳风监测数据.太阳极紫外数据来自 SDO/AIA(Lemen et al., 2012),每小时一幅图像,波段为 19.3 nm,分辨率为 1024×1024 ;太阳风监测数据来自 ACE 卫星(Stone et al., 1998)和 WIND 卫星,其中,太阳风磁场数据来自 ACE 的 MAG(Smith et al., 1998),温度和速度数据来自 ACE 的 SWEPAM(McComas et al., 1998),密度数据来自 WIND 卫星的 SWE(Ogilvie et

al., 1995),时间精度均为 1 h.我们挑选了 2010 年 5 月 27 日到 2016 年 12 月 31 日期间的 160 个明确的冕洞—太阳风高速流事件,作为研究样本.

2 方法

2.1 冕洞特征参数的计算

为了计算冕洞事件的特征参数,我们定义冕洞对地有效面积(A)为:日面上 $\pm 7.5^\circ$ 经度(如图 1a 中的红线所示)中心区域范围内冕洞区域像素点所占区域内总像素点的比例.目前提取冕洞区域轮廓的方法有很多(Shen et al., 2006;Scholl and Habbal, 2008;Krista and Gallagher, 2009;Rotter et al., 2012;Verbeeck et al., 2013).其中,Shen 等(2006)利用亮度梯度在冕洞边缘处最大的原理提取冕洞;Scholl 和 Habbal(2008)利用低亮度和闭合磁场的特征提取冕洞;Verbeeck 等(2013)利用空间可能性聚类算法区分冕洞和活动区;Krista 和 Gallagher(2009)利用局部强度阈值技术提取冕洞.我们采用的是 Rotter 等(2012)的直方图阈值分割法.将太阳极紫外图像(如图 1a)亮度分布直方图中 $40 \sim 70$ DN 亮度范围内的极小值设为冕洞亮度阈值,如果该范围内不存在极小值,则将阈值设置为 55 DN.亮度小于等于阈值的区域认为是冕洞区域,亮度大于阈值的区域为非冕洞区域,初步得到较为粗糙的二进制日面图像.再对该二进制图像进行图形学腐蚀、膨胀处理,就可得到轮廓较为光滑清晰的冕洞,如图 1b,由此二进制日面图像可计算出冕洞对地有效面积 A .为了后续计算方便,我们对冕洞对地有效面积曲线进行了平滑处理.当一个冕洞从日面东半球自转经

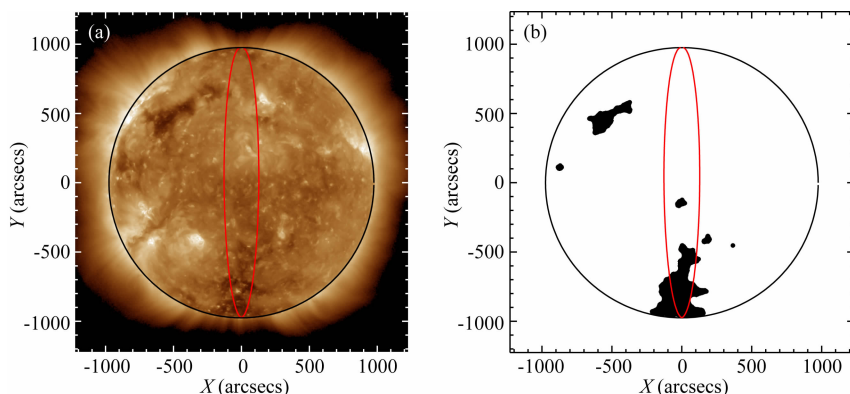


图 1 2011 年 1 月 1 日 00:00:08 的 SDO/AIA 19.3 nm 图像及提取的冕洞轮廓

(a) SDO/AIA 193 太阳图像,红线为 $\pm 7.5^\circ$ 经线;(b) 经过处理后的得到的二进制图像,黑色区域为冕洞.

Fig. 1 The SDO/AIA 19.3 nm image and the coronal hole binary map recorded on 1 January 2011 at 00:00:08 UT
(a) The original SDO/AIA image with the red lines for $\pm 7.5^\circ$ meridians; (b) The processed coronal hole binary image.

过日面中心线并到达日面西半球,面积曲线从 0(或较小值)增加到峰值然后再减小到 0(或较小值),标志着冕洞在中心区域里从出现到消失的过程,这样的过程我们视为一次冕洞事件(见图 2). 为了描述冕洞事件,我们定义以下特征参数(见表 1):

(1) 开始时间:冕洞进入中心区域的时刻,也就是

面积曲线从 0(或较小值)开始增加的时刻,记为 t_s^c ;

(2) 峰值时间:冕洞对地有效面积增加到最大值的时刻,记为 t_p^c ;

(3) 峰值面积:冕洞对地有效面积的最大值,记为 A_p ;

(4) 结束时间:冕洞离开中心区域的时刻,也就

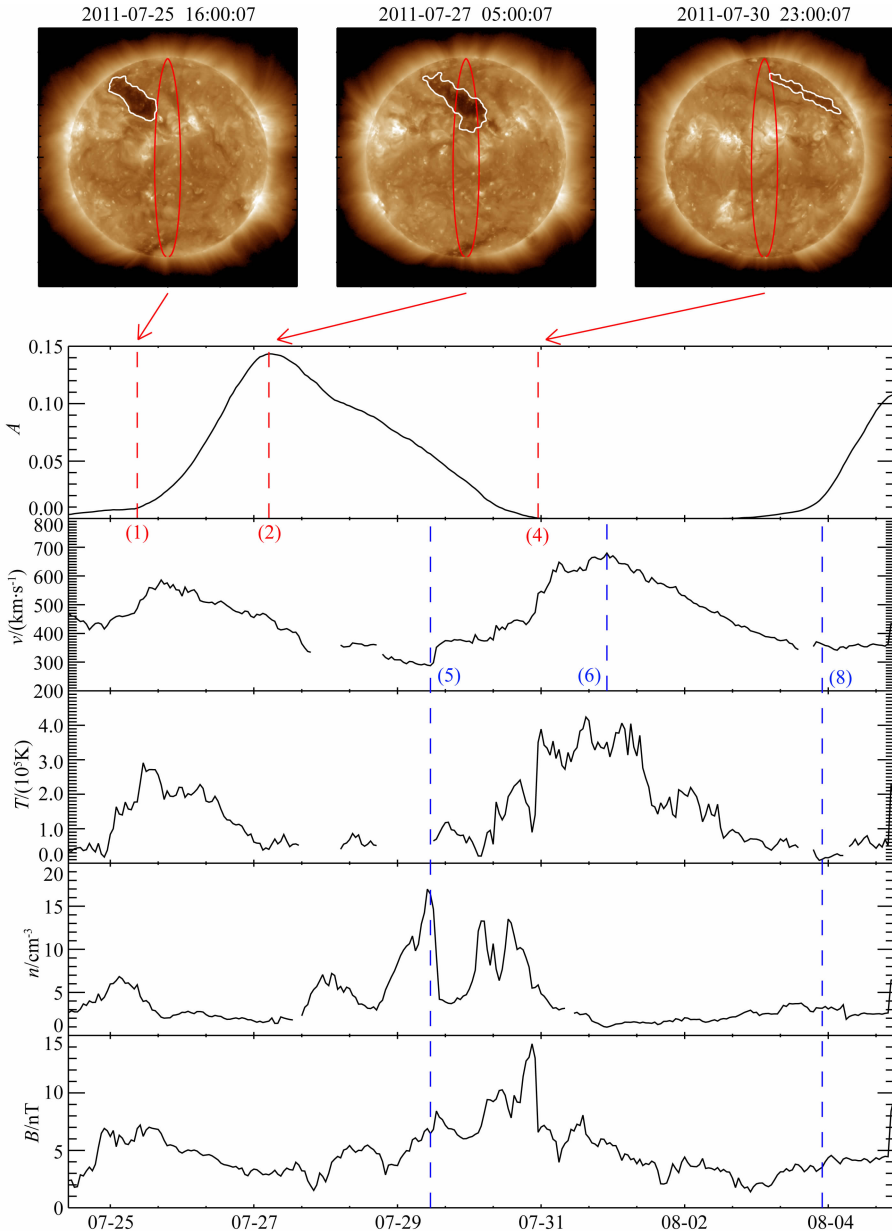


图 2 2011 年 7 月 25 日—8 月 4 日的冕洞-高速流事件

从上到下依次为 SDO/AIA 193 太阳极紫外图像、冕洞面积、1AU 处太阳风速度、质子温度、质子密度、磁场随时间的变化曲线,3 张 AIA 图像分别对应冕洞事件的开始、峰值、结束时间(红色虚线),对应于表 1 中的冕洞特征参数编号 1、2、4. 蓝色虚线从左到右依次标志高速流开始、峰值、结束时间,对应于表 1 中的高速流特征参数编号 5、6、8.

Fig. 2 A 10-day CH - HSS event from 25 July to 4 August 2011

Panels are SDO/AIA 19.3 nm images, coronal hole area, solar wind velocity, proton temperature, proton density and magnetic field profiles at 1AU from top to bottom. The three AIA images correspond to the beginning, peak and ending time (red dotted lines) of the CH event respectively, and 1, 2, 4 are the their numbers in table 1. The blue dotted lines from left to right mark the beginning, peak and ending time of the HSS event respectively, and 5, 6, 8 are the their numbers in table 1.

是面积曲线减小到 0(或较小值)的时刻,记为 t_f^c 。

由以上特征参数可推导出以下特征量:

(a) 上升时间:冕洞对地有效面积从 0(或较小值)增加到峰值所经历的时间,记为 $t_{as}^c, t_{as}^c = t_p^c - t_s^c$;

(b) 下降时间:冕洞对地有效面积从峰值减小到 0(或较小值)所经历的时间,记为 $t_{ds}^c, t_{ds}^c = t_f^c - t_p^c$;

(c) 持续时间:冕洞对地有效面积从 0(或较小值)增加到峰值然后再减小到 0(或较小值)所经历的时间,记为 $t_{dt}^c, t_{dt}^c = t_f^c - t_s^c$ 。

2.2 高速流特征参数的计算

为了识别冕洞高速流,我们分析了 1AU 处太阳风速度、温度、磁场和密度的变化特征。我们使用以下特征寻找冕洞高速流事件:(1)冕洞高速流速度相对缓慢地增加到峰值,维持一段时间后缓慢下降,(2)质子密度通常在速度开始增加时上升到较高数值,(3)在冕洞高速流期间质子温度的变化趋势类似于速度的变化趋势,(4)磁场峰值在速度峰值之前(Burlaga, 1975; Mavromichalaki and Vassilaki, 1998; Gosling, 1996; Gupta and Badruddin, 2010)(见图 2)。为了描述高速流事件,我们定义以下特征参数(见表 1):

表 1 冕洞-高速流事件特征参数

Table 1 Characteristic parameters of CH-HSS event

编号	特征参数	符号
1	CH 开始时间	t_s^c
2	CH 峰值时间	t_p^c
3	CH 峰值面积	A_p
4	CH 结束时间	t_f^c
5	HSS 开始时间	t_s^h
6	HSS 峰值时间	t_p^h
7	HSS 峰值速度	v_p
8	HSS 结束时间	t_f^h

(5) 开始时间:密度峰值对应的时刻,记为 t_s^h ;

(6) 峰值时间:速度或者温度峰值对应的时刻,记为 t_p^h ;

(7) 峰值速度:速度的峰值,记为 v_p ;

(8) 结束时间:速度或者温度下降结束对应的时刻,记为 t_f^h 。

由以上特征参数可推导出以下特征量:

(d) 上升时间:速度从背景值增加到峰值所经历的时间,记为 $t_{as}^h, t_{as}^h = t_p^h - t_s^h$;

(e) 下降时间:速度从峰值减小到背景值所经历的时间,记为 $t_{ds}^h, t_{ds}^h = t_f^h - t_p^h$;

(f) 持续时间:速度从背景值增加到峰值然后

再减小背景值所经历的时间,记为 $t_{dt}^h, t_{dt}^h = t_f^h - t_s^h$;

(g) 传输时间:高速流开始时间相对于冕洞开始时间的滞后时间,记为 $\Delta t_s, \Delta t_s = t_s^h - t_s^c$ 。

2.3 冕洞事件与高速流事件的关联

我们在冕洞事件中寻找每个高速流事件对应的源头。如果冕洞的峰值时间在高速流峰值时间(图 3 黑色圆圈所示)之前 2—6 天,我们认为该冕洞就是引发此高速流的源头。如图 3,冕洞面积曲线中的 1 号/2 号区域的冕洞事件分别对应太阳风速度曲线中的 1 号/2 号区域的高速流事件。冕洞事件与高速流事件必须一一对应。2010 年 5 月 27 日至 2016 年 12 月 31 日,我们挑选出冕洞-高速流事件 160 个,并一一确认其准确性。电子版附录中列出了这 160 个冕洞-高速流事件的特征参数。

3 分析结果

3.1 太阳风高速流传输时间及其与冕洞特征参数的关系

3.1.1 太阳风高速流传输时间直方图分析

图 4a 分析了太阳风高速流传输时间 Δt_s 的分布情况。 Δt_s 的平均值为 95.99 h,标准差为 26.21 h,即平均而言,在冕洞出现在中心区域的 95.99±26.21 h 之后,源于该冕洞的高速流到达地球。 Δt_s 为 96~120 h 的高速流最多,占 33%。 Δt_s 太短(24~48 h)和太长(144~168 h)的高速流都较少,分别占总样本数的 2%和 3%。

3.1.2 传输时间与冕洞特征参数的关系

图 4(b,c)分析了冕洞对地有效面积峰值 A_p 与高速流峰值到达地球的时间 $\Delta t_p = t_p^h - t_p^c$ 和高速流传输时间 Δt_s 的关系。图 4b 为 A_p 与 Δt_p 的散点图。图 4c 是 A_p 与 Δt_s 的散点图。灰色圆圈为全部样本,黑色实点是将全部样本按照 A_p 从小到大,以宽度 0.1 等间隔划分区间后的均值。柱状图表示各区间的样本数量。直线是样本均值的拟合结果。在拟合时,考虑到 A_p 落在区间 0.5~0.6 和 0.6~0.7 的样本各有 1 个,不具有统计意义,所以去掉最后两个样本均值点。由图 4b 可以看到,随着冕洞对地有效面积峰值的增加,高速流峰值到达地球的时间 Δt_p 变短,这与后文分析冕洞面积峰值与高速流速度峰值之间的关系是一致的。冕洞对地有效面积峰值增加,导致高速流速度峰值增加,所以高速流峰值到达地球的时间变短。由图 4c 可以看到,随着冕洞对地有效面积峰值的增加,高速流起始到达地球的时间

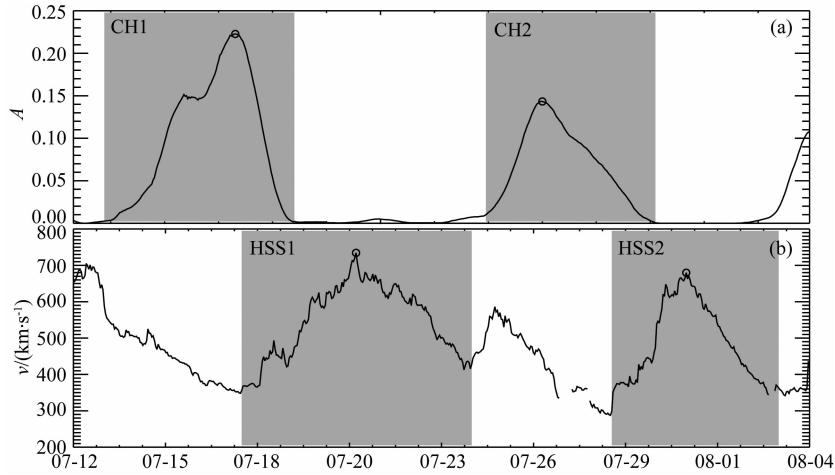


图 3 2011 年 7 月 12 日—8 月 4 日的冕洞对地有效面积(a)和太阳风速度(b)曲线

灰色阴影区域代表冕洞和高速流事件,序号相同的区域表示一个冕洞-高速流事件.1号区域为 CH-HSS 事件 1; 2号区域为 CH-HSS 事件 2. 黑色圆圈表示冕洞-高速流事件的峰值面积/速度.

Fig. 3 Coronal hole area (a) and solar wind velocity (b) profiles from 12 July to 4 August 2011

The grey area is for CH-HSS event. Regions with the same number represent one CH-HSS event. Region 1 is for CH-HSS event 1, and region 2 is for CH - HSS event 2. The black circles represent the peak areas of CH events and peak velocities of HSS events.

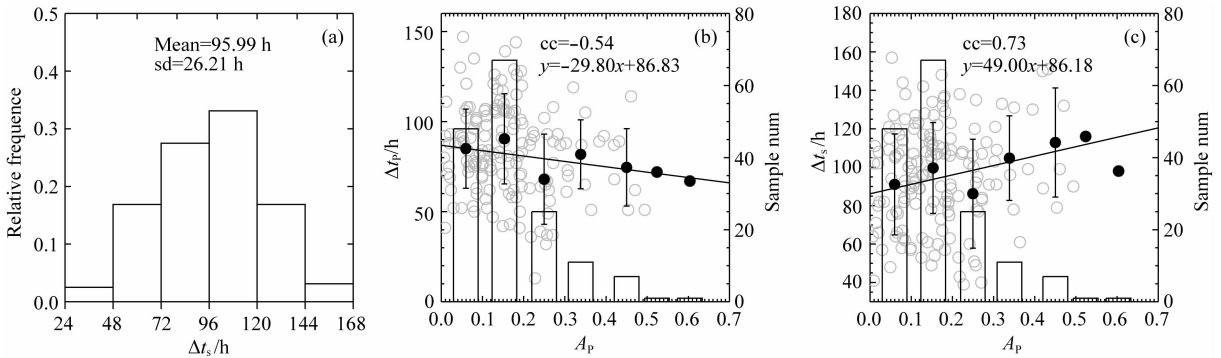


图 4 (a)太阳风高速流传输时间 Δt_s 的直方分布图; (b) A_p 与 Δt_p 的散点图; (c) A_p 与 Δt_s 的散点图

灰色圆圈为全部样本,黑色实点为各区间的样本均值,直线为拟合直线,柱状图为各区间的样本个数.

Fig. 4 (a) Histogram of HSS transmit time Δt_s ; (b) Scatter diagram of A_p and Δt_p ; (c) Scatter diagram of A_p and Δt_s . Gray circles are the data for all samples; black dots are the results of averaging over intervals of the abscissa (the mean values are given with a standard statistical error); straight lines are the fitting lines; bars are numbers of samples in intervals.

Δt_s (也就是传输时间)变长,我们初步分析其原因可能是,冕洞对地有效面积峰值越大,则冕洞越大,那么冕洞边缘离冕洞中心的张角越大,冕洞边缘发出的高速流速度越低(Riley et al., 2001),从而高速流起始到达地球的时间越长.

3.2 太阳风高速流持续时间及其与冕洞特征参数的关系

3.2.1 冕洞上升段持续时间、下降段持续时间、总持续时间直方图分析

图 5 是冕洞上升段持续时间 t_{as}^c 、下降段持续时间 t_{ds}^c 和总持续时间 t_{dt}^c 的直方分布图. 在图 5a 中,我们将冕洞上升时间 t_{as}^c 分为以下 6 个区间: 0~24 h, 24~48 h, 48~72 h, 72~96 h, 96~120 h 和 120 h

以上(120~192 h). t_{as}^c 在 24~48 h 之间的冕洞最多,约占总样本数的 52%. t_{as}^c 在 120 h 以上的高速流最少,约占总样本数的 4%. t_{as}^c 平均值为 49.89 h, 标准差为 28.27. 在图 5b 中,我们将冕洞下降时间 t_{ds}^c 分为以下 7 个区间: 0~24 h, 24~48 h, 48~72 h, 72~96 h, 96~120 h, 120~144 h 和 144~240 h. t_{ds}^c 在 24~48 h 之间的冕洞最多,约占总样本数的 42%. t_{ds}^c 在 144~240 h 的冕洞最少,约占总样本数的 2%. t_{ds}^c 平均值为 58.37 h, 标准差为 31.68. 在图 5c 中,我们将冕洞持续时间 t_{dt}^c 分为以下 6 个区间: 24~72 h, 72~120 h, 120~168 h, 168~216 h, 216~264 h 以及 264 h 以上(264~312 h). t_{dt}^c 在 72~120 h

之间的冕洞占到了所有冕洞的 46%。 t_{dt}^c 大于 264 h 的冕洞最少, 占了 2%。 t_{dt}^c 平均值为 108.26 h, 标准差为 50.47。可以看到, 平均而言, 冕洞下降段持续时间比上升段持续时间稍长, 比率约为 1.17。

3.2.2 太阳风高速流上升段持续时间、下降段持续时间、总持续时间直方图分析

图 6 是太阳风高速流上升段持续时间 t_{as}^h 、下降段持续时间 t_{ds}^h 和总持续时间 t_{dt}^h 的分布直方图。在图 6a 中, 我们将高速流的上升时间 t_{as}^h 分为以下 5 个区间: 0~24 h, 24~48 h, 48~72 h, 72~96 h 和 96 h 以上 (96~144 h)。 t_{as}^h 在 24~48 h 之间的高速流最多, 约占总样本数的 47%。 t_{as}^h 在 96 h 以上的高速流最少, 约占总样本数的 2%。 t_{as}^h 平均值为 37.65 h, 标准差为 21.19。在图 6b 中, 我们将高速流的下降时间 t_{ds}^h 分为以下 5 个区间: 0~48 h, 48~96 h, 96~144 h, 144~192 h 和 192~240 h。 t_{ds}^h 在 48~96 h 之间的高速流最多, 约占总样本数的 52%。 t_{ds}^h 在 192~240 h 的高速流最少, 约占总样本数的 1%。 t_{ds}^h 平均值为 74.39 h, 标准差为 37.94。在图 6c 中, 我们将高速流的持续时间 t_{dt}^h 分为以下 5 个区间: 0~48 h,

48~96 h, 96~144 h, 144~192 h 和 192~240 h 以及 240 h 以上 (240~336 h)。 t_{dt}^h 在 48~144 h 之间的高速流占到了所有高速流的 74%。 t_{dt}^h 小于 48 h 和大于 240 h 的高速流最少, 分别占了 6% 和 2%。这与 Xystouris 等 (2014) 和 Gupta 和 Badruddin (2010) 的结论相符。 t_{dt}^h 平均值为 112.04 h, 标准差为 51.46。可以看到, 平均而言, 高速流下降段持续时间比上升段持续时间长, 比率约为 1.97。

3.2.3 太阳风高速流时间特征参数与冕洞时间特征参数的关系

图 7 揭示了冕洞上升/下降/持续时间和高速流上升/下降/持续时间的关系。灰色圆圈为全部样本, 黑色圆圈是将全部样本按照 x 轴从小到大的宽度 24 等间隔划分区间后的均值。柱状图表示各区间的样本数量, 实线是样本均值的拟合结果, 虚线是直线 $y=x$ 。冕洞上升时间 t_{as}^c 与高速流上升时间 t_{as}^h 、冕洞下降时间 t_{ds}^c 与高速流下降时间 t_{ds}^h 、冕洞持续时间 t_{dt}^c 与高速流持续时间 t_{dt}^h 的拟合直线分别为 $y=0.53x+11.77$ 、 $y=0.86x+20.97$ 、 $y=0.85x+19.41$, 线性相关性分别为 0.90、0.91、0.95。将拟合直线与直线

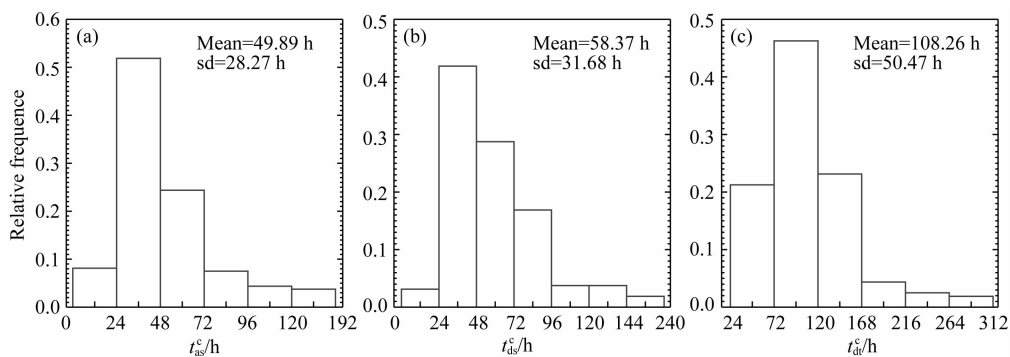


图 5 t_{as}^c , t_{ds}^c 和 t_{dt}^c 的直方分布图

Fig. 5 Histograms of CH ascending time t_{as}^c , descending time t_{ds}^c and duration t_{dt}^c

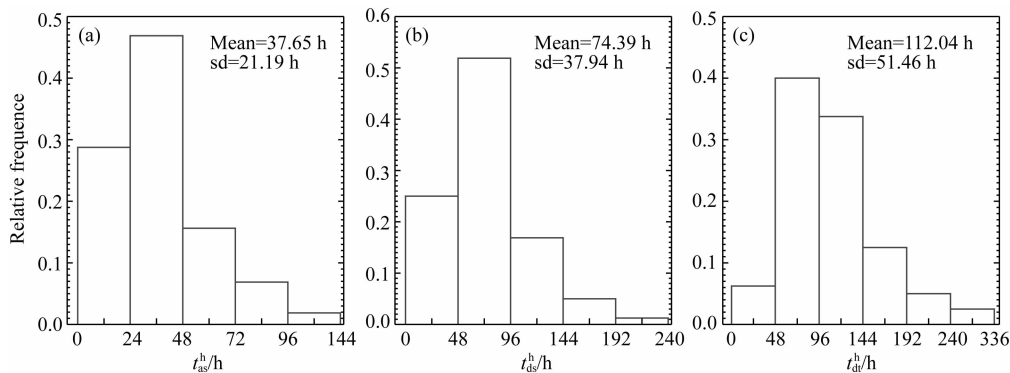


图 6 t_{as}^h , t_{ds}^h 和 t_{dt}^h 的直方分布图

Fig. 6 Histograms of HSS ascending time t_{as}^h , descending time t_{ds}^h and duration t_{dt}^h

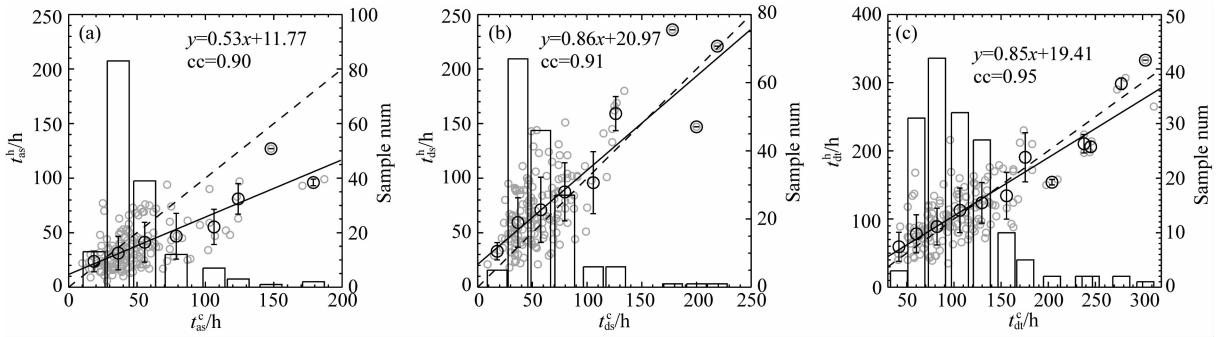


图 7 t_{as}^h 和 t_{as}^c (a), t_{ds}^h 和 t_{ds}^c (b), t_{dt}^h 和 t_{dt}^c (c) 的散点图. 灰色圆圈为全部样本, 黑色圆圈为各区间的样本均值, 柱状图为各区间的样本个数, 实线为拟合曲线, 虚线为直线 $y=x$

Fig. 7 Scatter diagrams of t_{as}^h and t_{as}^c (a), t_{ds}^h and t_{ds}^c (b), t_{dt}^h and t_{dt}^c (c). Gray circles are the data for all samples; black circles are the results of averaging over intervals of the abscissa (the mean values are given with a standard statistical error); bars are numbers of samples in intervals. The solid line is the fitting line, and the dashed line is $y=x$.

$y=x$ 比较, 发现:

(1) 上升时间拟合直线 $y=0.53x+11.77$ 与 $y=x$ 的交点为 $x=25$. 当冕洞上升时间小于 25 h 时, 约 65% 的高速流的上升时间大于冕洞上升时间; 当冕洞上升时间大于 25 h 时, 大约 76% 的高速流上升时间小于冕洞上升时间. 说明大部分高速流的上升时间小于冕洞上升时间, 原因可能是: 当冕洞上升时间较短时, 冕洞面积可以在较短时间内增加到峰值, 但高速流速度的增加需要一定的时间; 当冕洞上升时间较短时, 冕洞吹出的长时间持续的高速流, 使得其速度的增加越来越快.

(2) 下降时间拟合直线 $y=0.86x+20.97$ 与 $y=x$ 的交点为 $x=150$, 冕洞下降段时间大于 150 h 的事例只有 3 个. 对于全部样本, 大约 71% 的高速流下降时间大于冕洞下降时间, 可能的原因是: 在冕洞事件下降段, 每个时刻的冕洞对地有效面积都在减小, 那么每个时刻的高速流速度也在减小, 到达地球的时间也会变长, 导致高速流结束的时间晚于冕洞结束的时间.

(3) 持续时间拟合直线 $y=0.85x+19.41$ 与 $y=x$ 的交点为 $x=129$. 对于全部样本, 大约 57% 的高速流持续时间大于冕洞持续时间. 当冕洞持续时间小于 129 h 时, 大约 62% 的高速流持续时间大于冕洞持续时间.

大部分情况下, 高速流上升段持续时间比冕洞上升段持续时间短 (尤其当冕洞上升段持续时间超过 25 h); 高速流下降段持续时间比冕洞下降段持续时间长; 高速流持续时间比冕洞持续时间长 (尤其当冕洞持续时间小于 129 h). 对于冕洞跨度很大, 即冕洞持续时间超过 5 天时, 高速流的持续时间则

小于冕洞持续时间, 而这样的冕洞通常很少.

3.3 高速流峰值速度与冕洞峰值面积的相关性分析

图 8 分析了高速流峰值速度 v_p 与冕洞峰值面积 A_p 的关系. 灰色圆圈为全部样本, 黑色实点是将全部样本按照 A_p 从小到大以 0.1 的宽度等间距地划分区间后的样本均值, 柱状图为各区间的样本数量, 直线为 A_p 均值与 v_p 均值的拟合结果. 拟合时, 考虑到 A_p 落在区间 0.5~0.6 和 0.6~0.7 的样本各有 1 个, 不具有统计意义, 所以去掉最后 2 个样本均值点. 由此得到拟合曲线为 $y=310.64x+513.51$, A_p 与 v_p 的相关系数为 0.93.

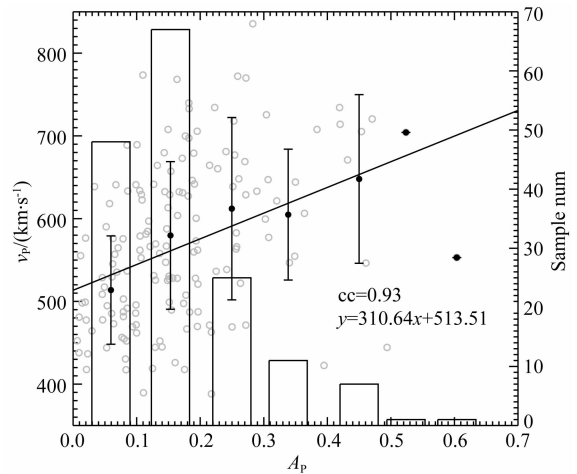


图 8 A_p 与 v_p 的散点图

灰色圆圈为全部样本, 黑色实点是全部样本划分区间后的样本均值, 直线为拟合曲线, 柱状图为各区间的样本个数.

Fig. 8 Scatter diagram of A_p and v_p

Gray circles are the data for all samples; black dots are the results of averaging over intervals of the abscissa (the mean values are given with a standard statistical error); straight line is the fitting line; bars are numbers of samples in intervals.

4 冕洞-高速流事件预报试验

针对已有经验模型的不足,参考本文结论,利用冕洞参数构造一种新的冕洞-高速流事件的预报方法(以2016年12月9日冕洞-高速流事件为例):

(1) 高速流事件开始时间利用图4b的拟合曲线 $y=49.00x+86.18$ 确定:冕洞对地有效面积峰值 A_p 约为0.52,冕洞开始时间为2016年12月2日21:00,计算得到高速流开始时间为2016年12月7日13:00,开始速度为该时间的观测速度 $356.35 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$;

(2) 高速流事件上升/下降时间利用图7的拟合曲线 $y=0.53x+11.77$ 和 $y=0.86x+20.97$ 确定:冕洞上升/下降时间为103/80 h,计算得到高速流上升/下降时间约为(四舍五入)66/110 h,从而得到峰值时间和结束时间为2016年12月10日7:00和14日21:00;

(3) 高速流峰值速度利用图8的拟合曲线 $y=310.64x+513.51$ 确定:冕洞对地有效面积峰值 A_p 约为0.52,计算得到高速流峰值速度为 $675.04 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$;

(4) 高速流上升过程(除了开始速度与峰值速度)的速度:定义高速流开始时间 $t_1 = -66$,峰值时

间 $t_2 = 0$,由点 $(-66, 356.35)$ (高速流开始时间和速度)和点 $(0, 675.04)$ (高速流峰值时间和速度)拟合得到抛物线 $v=a_1t^2+c_1$,由此计算出高速流上升过程中每小时的高速流速度;

(5) 高速流下降过程(除了结束速度与峰值速度)的速度:定义高速流峰值时间 $t_2 = 0$,结束时间 $t_3 = 110$,由点 $(0, 675.04)$ (高速流峰值时间和速度)和点 $(110, 356.35)$ (高速流结束时间和速度)(假设结束时的速度恢复到开始时的速度)拟合得到抛物线 $v=a_2t^2+c_2$,由此计算出高速流下降过程中每小时的高速流速度。

由以上方法得到该高速流事件的预报速度如图9的黑色虚曲线。图9的黑色实曲线为高速流速度的观测值,灰色实曲线为旧模型(Reiss et al., 2016)的预报值。高速流事件的开始时间,峰值时间和结束时间分别为2016年12月7日17:00,10日3:00和16日11:00,峰值速度为 $704.38 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$;Reiss等(2016)模型预报的高速流开始时间,峰值时间和结束时间分别为7日6:00,11日0:00和14日2:00,峰值速度为 $788.93 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。相比Reiss等(2016)模型的预报结果,本方法预报的高速流的开始时间,峰值时间,结束时间和峰值速度的绝对误差分别降低了约64%,85%,33%和89%。

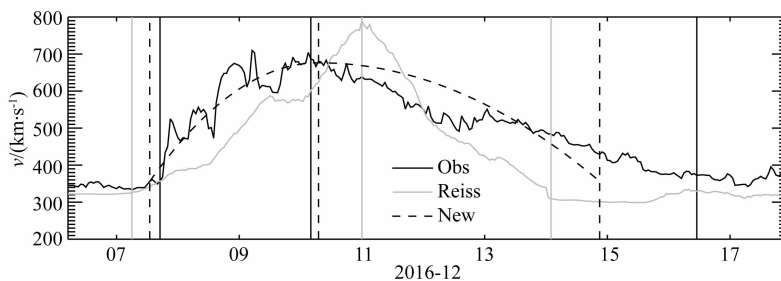


图9 2016年12月9日高速流事件1AU处太阳风速度变化曲线

黑色实曲线,灰色实曲线,黑色虚曲线分别为观测值,旧模型预报值,本文预报方法的预报值。黑色实线,灰色实线,黑色虚线分别为观测曲线,旧模型预报曲线,本文预报曲线的开始,峰值,结束时间。

Fig. 9 Solar wind velocity profiles at 1AU of the CH-HSS event on the 9th December 2016

The black solid, grey solid and black dashed curves are the observation, prediction of Reiss et al. (2016), and prediction of the new method in this article respectively. Black solid, grey solid and black dashed lines represent start time, peak time and end time from left to right for different models respectively.

5 结论

我们基于2010年5月到2016年12月的SDO/AIA太阳极紫外图像以及ACE和WIND卫星太阳风观测数据,分析了160个冕洞-高速流事件,对冕洞-高速流之间的特征和相关性进行了统计研究,得

出以下结论:

(1) 关于高速流传输时间

①高速流在冕洞出现 95.99 ± 26.21 h后到达地球,即 $t_s^h = t_s^c + 95.99 \pm 26.21$;

②冕洞对地有效面积峰值越大,高速流传输时间越长,二者之间的关系可以表示为 $\Delta t_s = 49.00A_p + 86.18$;

(2)关于冕洞与高速流持续时间

①冕洞的上升时间(均值为 49.89 ± 28.27 h)稍小于下降时间(均值为 58.37 ± 31.68 h),冕洞的形态具有较弱的不对称性,不对称性约为 1.17。冕洞形状不规则可能是冕洞不对称的原因;

②冕洞持续时间的均值为 108.26 ± 50.47 h,大部分冕洞会持续 $72 \sim 120$ h,很少有冕洞持续时间超过 216 h;

③高速流的上升时间(均值为 37.65 ± 21.19 h)明显小于下降时间(均值为 74.39 ± 37.94 h),相比冕洞,高速流的形态具有更强的不对称性,不对称性约为 1.97,这可能与高速流在传输过程中与低速太阳风的相互作用有关;

④高速流持续时间的均值为 112.04 ± 51.46 h,大部分高速流会持续 2~4 天,很少的高速流持续时间会在 10 天以上或者 2 天以下;

⑤高速流上升/下降/持续时间的长短与冕洞面积上升/下降/持续时间的长短有密切关系: $t_{as}^h = 0.53t_{as}^c + 11.77$, $t_{ds}^h = 0.86t_{ds}^c + 20.97$, $t_{dt}^h = 0.85t_{dt}^c + 19.41$;

(3)关于峰值强度

冕洞对地有效面积峰值与高速流速度峰值有较强的相关性,可表示为 $v_p = 310.64A_p + 513.51$;

(4)冕洞高速流统计预报方法

利用前述冕洞特征参数与太阳风高速流的统计关系,提出了一种太阳风高速流统计预报方法。该方法相比已有的经验预报模型,在高速流到达时间、峰值时间、峰值强度和结束时间等方面,均有较大的提升,为冕洞太阳风高速流的准确预报提供了研究基础。

致谢 本文使用的 SDO 数据来自 <http://jsoc.stanford.edu/>,使用的 ACE 太阳风数据来自 <http://www.srl.caltech.edu/ACE/>,WIND 卫星的数据来自 <https://wind.nasa.gov/>。

References

Arge C N, Pizzo V J. 2000. Improvement in the prediction of solar wind conditions using near-real time solar magnetic field updates. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 105 (A5): 10465-10479, doi: 10.1029/1999ja000262.

Burlaga L F. 1975. Interplanetary streams and their interaction with the earth. *Space Science Reviews*, 17(2-4): 327-352, doi: 10.1007/BF00718578.

Gosling J T, Asbridge J R, Bame S J, et al. 1978. Solar wind stream interfaces. *Journal of Geophysical Research*, 83(A4):

1401, doi: 10.1029/JA083iA04p01401.

Gosling J T. 1996. Corotating and transient solar wind flows in three dimensions. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 34 (35-73), doi: 10.1146/annurev.astro.34.1.35.

Gressl C, Veronig A M, Temmer M, et al. 2014. Comparative study of MHD modeling of the background solar wind. *Solar Physics*, 289(5): 1783-1801, doi: 10.1007/s11207-013-0421-6.

Gupta V, Badruddin. 2010. High-speed solar wind streams during 1996-2007: sources, statistical distribution, and plasma/field properties. *Solar Physics*, 264(1): 165-188, doi: 10.1007/s11207-010-9554-z.

Jian L K, MacNeice P J, Taktakishvili A, et al. 2015. Validation for solar wind prediction at Earth: Comparison of coronal and heliospheric models installed at the CCMC. *Space Weather*, 13 (5): 316-338, doi: 10.1002/2015SW001174.

Krieger A S, Timothy A F, Roelof E C. 1973. A coronal hole and its identification as the source of a high velocity solar wind stream. *Solar Physics*, 29(2): 505-525, doi: 10.1007/BF00150828.

Krista L D, Gallagher P T. 2009. Automated coronal hole detection using local intensity thresholding techniques. *Solar Physics*, 256(1-2): 87-100, doi: 10.1007/s11207-009-9357-2.

Lemen J R, Title A M, Akin D J, et al. 2012. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Physics*, 275(1-2): 17-40, doi: 10.1007/s11207-011-9776-8.

Linker J A, Mikić Z, Biesecker D A, et al. 1999. Magnetohydrodynamic modeling of the solar corona during Whole Sun Month. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 104 (A5): 9809-9830, doi: 10.1029/1998ja900159.

Mavromichalaki H, Vassilaki A. 1998. Fast plasma streams recorded near the earth during 1985-1996. *Solar Physics*, 183(1): 181-200, doi: 10.1023/A:1005004328071.

McComas D J, Bame S J, Barker P, et al. 1998. Solar wind electron proton alpha monitor (SWEPAM) for the advanced composition explorer. *Space Science Reviews*, 86(1-4): 563-612, doi: 10.1023/A:1005040232597.

Munro R H, Withbroe G L. 1972. Properties of a coronal "hole" derived from extreme-ultraviolet observations. *Astrophysical Journal*, 176(2): 511-520, doi: 10.1086/151653.

Nolte J T, Krieger A S, Timothy A F, et al. 1976. Coronal holes as sources of solar wind. *Solar Physics*, 46(2): 303-322, doi: 10.1007/bf00149859.

Odstreil D. 2003. Modeling 3-D solar wind structure. *Advanced in Space Research*, 32(4): 497-506, doi: 10.1016/S0273-1177(03)00332-6.

Ogilvie K W, Chornay D J, Fritzenreiter R J, et al. 1995. Swe, a comprehensive plasma instrument for the wind spacecraft. *Space Science Reviews*, 71(1-4): 55-77, doi: 10.1007/Bf00751326.

Reiss M A, Temmer M, Veronig A M, et al. 2016. Verification of high-speed solar wind stream forecasts using operational solar wind models. *Space Weather*, 14(7): 495-510, doi: 10.1002/2016SW001390.

- Richardson I G. 2006. The formation of CIRs at stream-stream interfaces and resultant geomagnetic activity. *Geophysical Monograph Series*, 167: 45-58, doi: 10.1029/167gm06.
- Riley P, Linker J A, Mikić Z. 2001. An empirically-driven global MHD model of the solar corona and inner heliosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106 (A8): 15889-15901, doi: 10.1029/2000ja000121.
- Robbins S, Henney C J, Harvey J W. 2006. Solar wind forecasting with coronal holes. *Solar Physics*, 233(2): 265-276, doi: 10.1007/s11207-006-0064-y.
- Rotter T, Veronig A M, Temmer M, et al. 2012. Relation between coronal hole areas on the sun and the solar wind parameters at 1 AU. *Solar Physics*, 281(2): 793-813, doi: 10.1007/s11207-012-0101-y.
- Rotter T, Veronig A M, Temmer M, et al. 2015. Real-time solar wind prediction based on SDO/AIA coronal hole data. *Solar Physics*, 290(5): 1355-1370, doi: 10.1007/s11207-015-0680-5.
- Scholl I F, Habbal S R. 2008. Automatic detection and classification of coronal holes and filaments based on EUV and magnetogram observations of the solar disk. *Solar Physics*, 248(2): 425-439, doi: 10.1007/s11207-007-9075-6.
- Shen C L, Wang Y M, Ye P Z, et al. 2006. Is there any evident effect of coronal holes on gradual solar energetic particle events?. *Astrophysical Journal*, 639(1): 510-515, doi: 10.1086/499199.
- Smith C W, L'Heureux J, Ness N F, et al. 1998. The ACE magnetic fields experiment. *Space Science Reviews*, 86(1-4): 613-632, doi: 10.1023/A:1005092216668.
- Smith E J, Wolfe J H. 1976. Observations of interaction regions and corotating shocks between one and five AU: Pioneers 10 and 11. *Geophysical Research Letters*, 3(3): 137-140, doi: 10.1029/GL003i003p00137.
- Stone E C, Frandsen A M, Mewaldt R A, et al. 1998. The advanced composition explorer. *Space Science Reviews*, 86(1-4): 1-22, doi: 10.1023/a:1005082526237.
- Tsurutani B T, Gonzalez W D, Gonzalez A L C, et al. 2006. Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review. *Journal of Geophysical Research*, 111 (A7): A07S01, doi: 10.1029/2005ja011273.
- Verbeeck C, Delouille V, Mampaey B, et al. 2013. The SPoCA-suite: Software for extraction, characterization, and tracking of active regions and coronal holes on EUV images. *Astronomy & Astrophysics*, 561: A29, doi: 10.1051/0004-6361/201321243.
- Veselovsky I S, Persiantsev I G, Ryazanov A Y, et al. 2006. One-parameter representation of the daily averaged solar-wind velocity. *Solar System Research*, 40(5): 427-431, doi: 10.1134/s0038094606050078.
- Vršnak B, Temmer M, Veronig A M. 2007a. Coronal holes and solar wind high-speed streams: I. Forecasting the solar wind parameters. *Solar Physics*, 240(2): 315-330, doi: 10.1007/s11207-007-0285-8.
- Vršnak B, Temmer M, Veronig A M. 2007b. Coronal Holes and solar wind high-speed streams: II. Forecasting the geomagnetic effects. *Solar Physics*, 240(2): 331-346, doi: 10.1007/s11207-007-0311-x.
- Wang Y M, Sheeley N R Jr. 1990. Solar wind speed and coronal flux-tube expansion. *Astrophysical Journal*, 355(2): 726-732, doi: 10.1086/168805.
- Xystouris G, Sigala E, Mavromichalaki H. 2014. A complete catalogue of high-speed solar wind streams during solar cycle 23. *Solar Physics*, 289(3): 995-1012, doi: 10.1007/s11207-013-0355-z.

(本文编辑 汪海英)