

YANG Zicai, SHEN Fang, YANG Yi, FENG Xueshang. Analysis of present research on the WSA solar wind model (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2018, **38**(3): 285-295. DOI:10.11728/cjss2018.03.285

WSA 太阳风经验模型及其应用^{*}

杨子才^{1,2} 沈芳^{1,2,3} 杨易^{1,2} 冯学尚^{1,3}

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) 空间科学与应用技术研究院 深圳 518055)

摘要 Wang-Sheely-Argé (WSA) 模型是对准稳态太阳风的经验和物理相结合的描述, 其利用观测的日面磁图作为输入, 可以提前 3 到 4 天预测 L1 点处的太阳风速度和行星际磁场极性. WSA 模型是在 WS 模型的基础上经过若干改进形成的实时预报模式, 之后又借鉴 Distance from the Coronal Hole Boundary (DCHB) 模型的参数, 进一步改进了太阳风速度关系式, 形成了目前常见的形式. WSA 经验模型由日冕磁场模型、太阳风速度关系式和一维运动学模型三部分组成. 在实际应用过程中, 基本步骤包括观测磁图预处理、日冕三维磁场反演、计算日冕磁场参数、计算太阳风的速度分布和将太阳风映射到 1 AU 等环节. 在发展过程中, WSA 模型经历了一些细节上的调整变化, 例如观测磁图数据的来源、日冕磁场模型的类型、经验速度关系中自由系数的取值等. 许多研究对如何改善模型的预报效果进行了探索.

关键词 WSA 模型, 太阳风, 日冕磁场

中图分类号 P 353

Analysis of Present Research on the WSA Solar Wind Model

YANG Zicai^{1,2} SHEN Fang^{1,2,3} YANG Yi^{1,2} FENG Xueshang^{1,3}

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

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

3(Institute of Space Science and Applied Technology, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055)

Abstract The Wang-Sheely-Argé (WSA) model is an empirical model that can predict the background solar wind speed and Interplanetary Magnetic Field (IMF) polarity on the Earth. It utilizes the line-of-sight synoptic solar magnetograms as input to give predictions about 3 to 4 days in advance. It is an improved version of the original Wang and Sheeley (WS) model. The relationship was generalized according to the parameters of the Coronal Hole Boundary (DCHB) model. The solar wind velocity is first determined at a certain height by the expansion factor of the magnetic

^{*} 国家自然科学基金项目 (41231068, 41474152, 41531073, 41774184), 国家重点实验室专项研究基金和国家“万人计划”青年拔尖人才项目共同资助

2017-08-23 收到原稿, 2017-12-19 收到修定稿

E-mail: fshen@spaceweather.ac.cn

field and the minimum angular distance that an open field footpoint lies from nearest coronal hole boundary. And then a simple 1-D modified kinematic model (1-DMK), which includes an ad hoc method to account for stream interactions, is used to transport the wind from the corona out to the Earth. In the course of development, the WSA model has been improved gradually in the details, such as the source of synoptic magnetograms, the type of coronal magnetic field model, the values of free parameters in velocity relation, the way of mapping the solar wind to earth and so on. Many studies were devoted to improve the prediction accuracy of the WSA model, and it is widely used now in many Magnetohydrodynamic (MHD) solar wind model.

Key words WSA model, Solar wind, Coronal magnetic field

0 引言

WSA 模型是对准稳态太阳风的经验和物理相结合的描述, 其利用观测的日面磁图作为输入, 可以提前 3 到 4 天预测 L1 点处的太阳风速度和行星际磁场极性. 这两个参数是地磁活动预报的重要输入参数^[1]. WSA 模型以太阳风速度关系式为核心, 还包括日冕磁场模型和一维运动学模型. 该模型是在 WS 模型的基础上经过若干改进而形成的实时预报模式^[1], 之后又借鉴 DCHB 模型的参数, 进一步改进了太阳风速度关系式^[2], 形成了目前常见的形式.

WSA 模型经过近十几年的不断改进, 得到普遍认可和广泛应用. 就长期预报效果而言, WSA 经验模型至少与基于物理学第一原理的全球磁流体力学 (MHD) 模型相当. 目前 WSA 经验模型在空间天气预报中心 SWPC* 实时运行.

WSA 模型在发展过程中经历了一些细节上变化, 例如观测磁图数据的来源、日冕磁场模型的类型、速度关系中自由系数的取值等. 已有很多研究对如何改善模型的预报效果进行了探索. 这里对 WSA 模型的发展历史、模型的预报效果以及影响因素等进行综合分析.

1 WSA 经验模型的发展

1973 年 Krieger 等^[3]发现太阳风的高速流与靠近赤道的冕洞密切相关. 1976 年 Nolte 等^[4]发现太阳风高速流的最大速度随着与其关联的冕洞面积增加而增大. 1977 年 Levine 等^[5]发现在磁场的开场

区, 发散程度较小的磁力线对应的太阳风速度较大, 反之则反. 据此, Levine 等认为磁场的发散程度在太阳风的加速过程中有着重要的作用.

1990 年 Wang 等^[6]根据黄道面内的观测数据得到了 1 AU 处太阳风速度和日冕磁场膨胀因子 f_s 之间的定量关系, 该模型称为 WS 模型. WS 模型首先采用势场源表面 (PFSS) 模型^[7,8]得到三维日冕磁场分布, 然后在 PFSS 模型的源表面 ($R_{ss} = 2.5 R_s$) 上定义日冕磁场膨胀因子

$$f_s = \frac{R_s^2}{R_{ss}^2} \frac{B(R_s, \theta_s, \phi_s)}{B(R_{ss}, \theta_{ss}, \phi_{ss})}. \quad (1)$$

其中, $B(R_{ss}, \theta_{ss}, \phi_{ss})$ 为源表面上任意一点的磁场强度, $B(R_s, \theta_s, \phi_s)$ 为对应的磁力线在光球层足点处的磁场强度. f_s 为磁通量管在源表面和光球层上的截面面积之比, 其取值越大, 磁场就越发散. $f_s = 1$ 时, 磁场纯径向膨胀; $f_s > 1$ 时, 磁场超径向膨胀. 1 AU 处太阳风速度和日冕磁场膨胀因子的对应关系列于表 1^[6]. 由表 1 可见, 随着膨胀因子的增大, 太阳风的速度逐步减小. 通过比较三个月的预报太阳风平均

表 1 WS 经验模型中磁场膨胀因子与太阳风速度的对应关系

Table 1 Relation between flux tube expansion factor and solar wind speed in WS model

$V/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	f_s
> 650	< 3.5
$550\sim 650$	$3.5\sim 9$
$450\sim 550$	$9\sim 18$
< 450	> 18

*<http://legacy-www.swpc.noaa.gov/ws/>

速度和观测速度, 得到二者的相关系数为 0.57. 太阳风的高速流源自磁场膨胀因子较小的冕洞中心, 而低速流则源自磁场膨胀因子较大的冕洞边缘. Wang 等^[9] 将这一关系推广到高纬度区域, 当预报值与 Ulysses 在高纬度地区的观测一致时, 通过调节太阳风速度 V 与 f_s 对应关系, 模型可以反映黄道面附近高速流和低速流的大体趋势, 但是预报的高速流比例偏高.

2000 年 Arge 等^[1] 对 WS 模型做了若干改进, 主要包括: 将 WS 关系修改为连续的函数形式, 用于计算源表面 R_{ss} 上的太阳风速度分布; 考虑高速流和低速流之间的相互作用和传播时间的差异, 使用一维运动学模型将速度映射到 1 AU; 使用每日更新的磁图作为模型的输入, 实现实时预报. Arge 等的模型是 WSA 模型的雏形, 简称为 WSA-2000. 与 WS 模型不同, WSA-2000 给出的是源表面太阳风速度 V 与 f_s 关系, 一般形式为

$$V = V_s + \frac{V_f}{f_s^\alpha}. \quad (2)$$

其中速度的单位为 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, V_s 和 V_f 分别用于限定最低速度和最高速度, 自由系数 α 表征 f_s 对速度的影响. 当 $f_s \rightarrow \infty$ 时, 速度取值为最小值 V_s ; 当 $f_s \rightarrow 1$ 时, 速度取值为 $V_s + V_f$. Arge 利用 WSO 的观测磁图作为 PFSS 模型的输入来计算 f_s , 在 $V - f_s$ 关系中自由系数的取值分别为

$$\begin{aligned} V_s &= 267.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}, \\ V_f &= 410 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}, \\ \alpha &= 0.4. \end{aligned}$$

2001 年 Riley 等^[10] 为了确定行星底部 (位于 $30 R_s$) 边界条件, 在太阳风的三维 MHD 数值模拟中将太阳风速度和另一个日冕磁场的参数 (即开放磁力线在光球层的足点与冕洞边界的最小角距) 联系起来, 该模型简称为 DCHB 模型. DCHB 模型的具体形式可以表示为

$$V = V_s + \frac{1}{2}(V_f V_s) \left[1 + \tanh\left(\frac{d - \varepsilon}{\omega}\right) \right]. \quad (3)$$

其中, V_s 和 V_f 类似于 WS 模型, 用于限制最小速度和最大速度, d 代表开放磁力线距离冕洞边界的最小角距离, ε 代表低速流的宽度, ω 代表从低速流过渡到高速流的宽度. 冕洞为太阳表面的 X 射线、极紫

外辐射或者米波射线急剧降低的区域. 通常冕洞内温度和密度较其他区域低, 磁力线为开放结构. 由于没有冕洞边界的明确定义, Riley 等采用开放磁力线和闭合磁力线的边界代表冕洞的边界. 在计算过程中, 首先在光球层上得到速度的分布, 然后沿着磁力线将其投影到 $30 R_s$ 处. 根据这一关系, Riley 等得到的太阳风大尺度结构与 ULYSSES 和 WIND 卫星的观测结果一致. DCHB 模型中参数 d 和 WS 模型中 f_s 有相通之处, 但是二者不存在严格单调的对应关系, 所以两个模型得到的速度分布有区别.

2003 年 Arge 等^[2] 借鉴 DCHB 模型对 WSA-2000 模型做了进一步改进. Arge 等将 WS 模型的 f_s 参数和 DCHB 模型的 d 参数整合到一起, 太阳风速度 V 不仅与日冕磁场的膨胀因子 f_s 有关, 而且还受开放磁力线足点与冕洞边界的最小角距离的影响, 这一模型简称为 WSA 模型. 在 WSA 模型中, $5 R_s$ 处太阳风速度可以表示为

$$V = V_s + \frac{V_f}{(1 + f_s)^{a_1}} \cdot \left\{ a_2 - a_3 \exp \left[- \left(\frac{\theta_b}{a_4} \right)^{a_5} \right] \right\}^{a_6}. \quad (4)$$

其中, θ_b 的物理意义与 DCHB 模型的 d 相同, 可采用势场源表面 + Schatten 电流片 (PFSS+SCS) 模型^[11] 得到. $a_1 \sim a_6$ 为 6 个自由参数, 通常选取 $a_2 = 1.0$, $a_3 = 0.8$. V 的另外一种常见形式为

$$V = V_s + \frac{a_0}{(1 + f_s)^{a_1}} \cdot \left\{ a_2 - a_3 \exp \left[1 - \left(\frac{\theta_b}{a_4} \right)^{a_5} \right] \right\}^{a_6}. \quad (5)$$

其中, 选取 $a_0 = 1.5$ 时, 式 (5) 可以化简成式 (4) 的形式.

图 1 以式 (4) 为例给出了 WSA 模型中速度和两个磁场的关系. 其中,

$$\begin{aligned} V_s &= 250, & V_f &= 650, \\ a_1 &= 2/7, & a_2 &= 1.0, \\ a_3 &= 0.8, & a_4 &= 3.0, \\ a_5 &= 7/4, & a_6 &= 3.0. \end{aligned}$$

由图 1 可见, 当 θ_b 较小时, f_s 对速度 V 的影响较小; 随着 θ_b 增加, 速度 V 迅速增加; 当 $\theta_b \approx 2a_4$ 时, 速

度趋于不变, 此时 f_s 越小速度 V 越大.

不同模型定义的速度所在位置不同. WS 模型假设太阳风速以恒定的速度映射到 1 AU, 所以 $V-f_s$ 关系是基于 1 AU 处的太阳风观测速度得到的. DCHB 模型给出速度 V 在 $30 R_s$ 处的分布, 然后通过 MHD 模型模拟太阳风在行星际空间的传播.

WSA-2000 中首先计算的是源表面 $2.5 R_s$ 上的分布, 然后通过一维运动学模型映射到 1 AU. 2003 年 Arge 等^[2] 把改进的 WSA 模型中 SCS 模型的外边界设定为 $21.5 R_s$, 得到的速度分布即为该处的分布. 2004 年 Arge 等^[12] 又将 SCS 模型的外边界位置修改为 $5 R_s$. 在之后的应用中, 一般认为利用 SCS 模型得到的是 $5 R_s$ 处的速度分布. 实际上太阳风在日冕区域 (通常指小于 0.1 AU 的区域) 基本完成加速过程^[13], 在行星际的加速幅度比较小. 此外, 随着

径向距离的增加, 高速流和低速流之间的相互作用会一定程度上改变原有的速度结构. 因此, 假设经验模型得到的是 0.1 AU 附近的速度比较合理.

2 WSA 经验模型的基本步骤

WSA 经验模型由日冕磁场模型、太阳风速度关系式和一维运动学模型三部分组成. 其应用的基本步骤包括观测磁图预处理、日冕三维磁场反演、计算日冕磁场参数、计算太阳风速度分布和将太阳风映射到 1 AU 等.

2.1 观测磁图的预处理

模型输入的磁图是经过异常数据的改正、极区磁场的补全等处理的全日面磁场概略图. 可用的磁图数据源包括 MWO, WSO, SOLIS, GONG, MDI 及

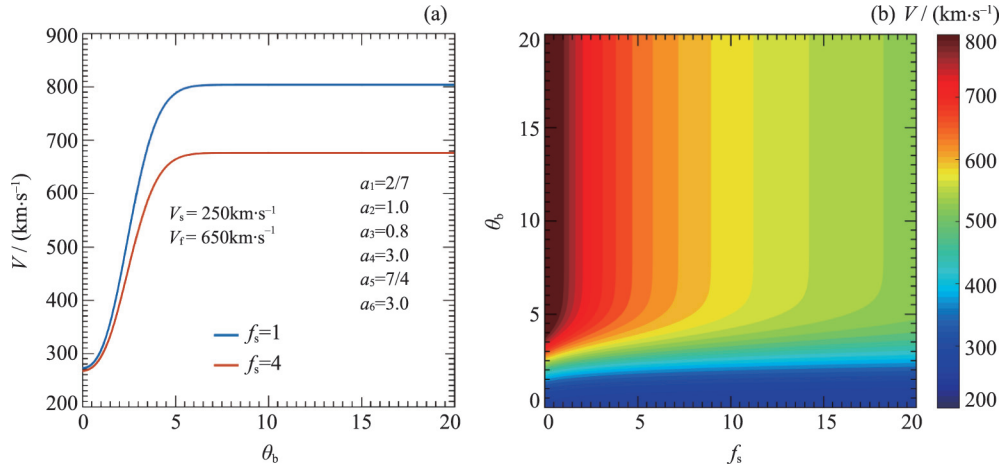


图 1 太阳风速度随 θ_b 的变化 (a) 及在 (f_s, θ_b) 空间的等值线 (b)
Fig. 1 Solar wind speed as a function of θ_b (a) and contour of speed in the (f_s, θ_b) space given by the empirical function (b)

表 2 太阳磁图的数据源

Table 2 Sources of the solar magnetograms

观测站	磁图类型	网格	可用数据起止日期	可用数据卡林周期数
WSO	视向	73×30	1976-05-27 至现在	CR1642 至 CR2194
MWO	视向	971×512	1996-06-28 至现在	CR1911 至 CR2194
GONG	径向	360×180	2006-08-25 至现在	CR2047 至 CR2194
KPVT	径向	360×180	1975-02-18 至 2003-09-26	CR1625 至 CR2007
SOLIS	径向	360×180	2003-08-30 至现在	CR2007 至 CR2194
MDI	径向	3600×1080	1996-05-05 至 2010-12-24	CR1909 至 CR2104
HMI	径向	3600×1440	2010-04-22 至现在	CR2096 至 CR2194

HMI 等, 表 2 列出了这些数据源的磁场类型、网格分辨率及时间跨度. WSO 的数据为文本格式, 单位为 μT . 其他数据源的数据均为 FITS 格式, 单位为 G-Byte. 此外, WSO 和 MWO 提供的是视向磁场数据, 需要将视向磁场数据转化成径向磁场数据, 这里假设光球层磁场基本沿着径向方向. 这些磁图的详细比较可以参考 Riley 等^[14]. 得到完整磁场概略图后, 根据需要进行进一步调整分辨率以便作为日冕磁场模型的边界条件, 例如对于 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的分辨率, 调整后的网格为 144×72 .

2.2 日冕三维磁场反演

常用的日冕磁场模型包括势场源表面 (PFSS) 模型, 势场源表面 +Schatten 电流片 (PFSS+SCS) 模型, 水平电流-电流片-源表面 (HCCSSS) 模型. PFSS 模型源表面 R_{ss} 一般位于 $2.5 R_s$, R_{ss} 以下为势场. 该源表面为等势面, 所有磁力线都朝着径向方向, 源表面以外径向磁场 B_r 按照 r^{-2} 衰减.

PFSS+SCS 模型是 PFSS 模型和 SCS 模型的组合, 其在源表面以内与 PFSS 模型相同, 在源表面以外借鉴 SCS 模型引入电流片, 磁场在非径向方向上继续膨胀直至接近均匀分布. HCCSSS 模型^[15] 引入了 R_{cp} 和 R_{ss} 两个球面, R_{cp} 一般位于 $2.5 R_s$, R_{ss} 一般位于 $14 R_s$. 而 R_{cp} 以内添加了水平电流片^[16], R_{cp} 到 R_{ss} 之间采用 SCS 模型^[8], 所有的磁力线都是开放的但不一定沿着径向方向, 源表面 R_{ss} 上所有磁力线沿径向方向. 三种日冕磁场模型的大尺度结构基本相似, 细节上有所区别. 目前最常用的

是 PFSS+SCS 模型.

2.3 计算日冕磁场参数 f_s 和 θ_b

首先, 从太阳表面出发追踪磁力线, 确定冕洞的边界. 如果磁力线最终回到太阳表面, 则记为闭合区; 如果磁力线到达表面 R_{ss} , 则记为开场区. 当所有网格点追踪完成后, 把开场区和闭合区的交界标记为冕洞的边界. 然后, 从一定的高度 (PFSS 模型为 $2.5 R_s$, PFSS+SCS 模型为 $5 R_s$, HCCSSS 模型为 $14 R_s$) 出发, 向下追踪磁力线至太阳表面, 确定磁力线的足点位置. 根据磁力线足点的位置, 计算距离冕洞边界的最小角距离 θ_b , 然后将该磁力线在源表面上的强度 $B(R_{ss}, \theta_{ss}, \phi_{ss})$ 和足点的强度 $B(R_s, \theta_s, \phi_s)$ 代入式 (1) 得到磁场的膨胀因子 f_s .

2.4 计算太阳风速度分布

WSA 经验关系中除了两个日冕磁场参数还有 8 个自由参数. 在不同的参考文献中, 这些参数的取值不同, 这可能与使用的磁图数据源、日冕磁场模型种类、研究时期等多种因素有关.

表 3 和表 4 分别列出了两种常用速度关系式中自由参数在不同文献中的取值, 同时还给出了使用的数据源和日冕磁场模型. 以 GONG 的磁图作为 PFSS+SCS 模型的输入, 得到第 2058 卡林顿周的日冕磁场参数以及速度分布, 如图 2 所示.

2.5 将太阳风映射到 1 AU

由于太阳的不停转动, 不同时刻出发的高速流和低速流在行星际发生相互作用, 从而改变原有的结构. 完整地描述太阳风在行星际的演化过程需要借

表 3 式 (4) 的 WSA 速度 ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$) 关系中的自由参数
Table 3 Free parameters for WSA model in Eq. (4)

数据源	磁场模型	V_s	V_f	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	参考文献
GONG	PFSS+SCS	240	675	0.22	1.0	0.80	2.8	5/4	3.0	[17]
MWO/WSO	PFSS+SCS	250	680	0.22	1.0	0.80	4.0	4.0	1.0	[17]
KPVT	PFSS+SCS	200	750	0.22	1.0	0.80	3.8	3.6	3.0	[18]
KPVT	PFSS+SCS	240	675	0.22	1.0	0.80	2.8	5/4	3.0	[18]
GONG	PFSS+SCS	200	675	0.29	1.0	0.80	3.0	2.0	3.0	[19]
GONG/SOLIS	PFSS	240	675	0.22	1.0	0.80	1.9	2.0	3.0	[20]
MWO	PFSS	250	680	0.33	1.0	0.80	4.0	4.0	3.5	[21]
GONG/SOLIS	PFSS	240	675	0.22	1.0	0.80	4.0	2.8	3.5	[21]

表 4 式 (5) 的 WSA 速度 ($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$) 关系中的自由参数
Table 4 Free parameters for WSA model in Eq. (5)

数据源	磁场模型	V_s	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	参考文献
MWO/MDI	PFSS+SCS	265	1.5	0.33	5.9	1.5	7.0	2.5	3.5	[12]
MWO	PFSS+SCS	265	1.5	0.29	5.8	1.6	7.5	3.0	3.5	[22]
KPVT	PFSS+SCS	265	1.5	0.33	5.8	1.6	7.5	3.0	3.5	[22]
MWO	PFSS+SCS	265	1.5	0.40	5.8	1.5	2.5	2.0	3.5	[23]
MDI	PFSS+SCS	265	1.5	0.23	6.34	1.5	2.0	1.5	3.3	[17]
MDI	PFSS	265	1.5	0.20	6.30	1.5	2.0	1.5	3.3	[17]
MDI	HCCSSS	265	1.5	0.34	6.49	1.5	2.0	1.5	3.3	[17]
MDI	HCCSSS	265	1.5	0.40	5.8	1.5	2.5	2.0	3.5	[24]
MDI	HCCSSS	265	1.5	0.40	6.1	1.4	2.5	2.0	3.4	[25]
MDI	PFSS	265	1.5	0.22	6.1	1.2	2.5	1.5	3.4	[26]

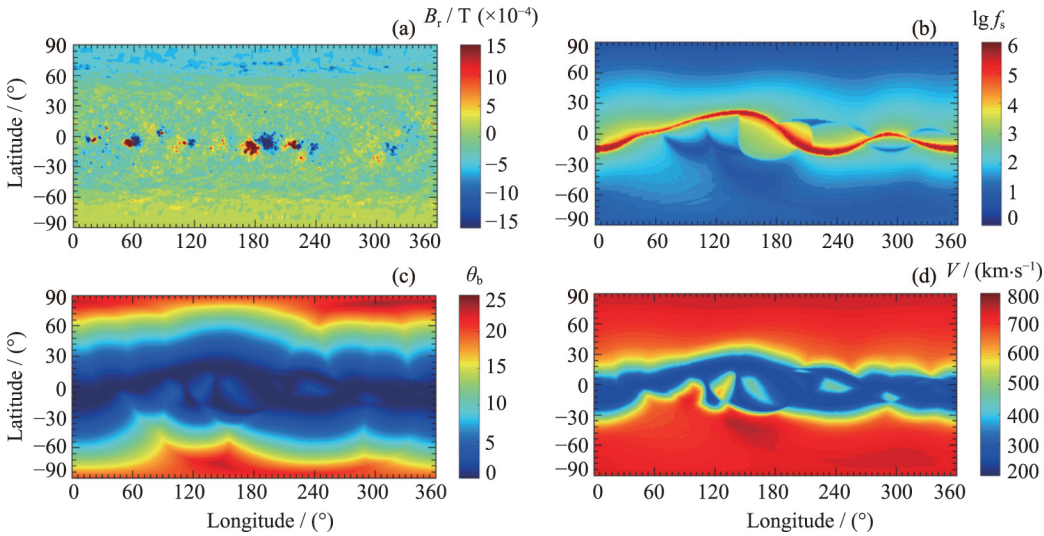


图 2 第 2058 卡林顿周的日冕磁场参数以及速度分布. (a) 观测磁图, (b) (c) (d) 分别为用 PFSS+SCS 模型得到的 $5 R_s$ 处 f_s , θ_b 及 WSA 速度分布

Fig. 2 Solar magnetogram during Carrington rotation 2058 (a), the derived f_s (b) and θ_b (c) at $5 R_s$ using PFSS+SCS model, and the solar wind speed derived by WSA model (d)

助三维磁流体力学模拟, 这需要耗费大量的计算资源
和时间. Arge 等设计了一种简单的一维运动学模型,
用于描述高低速流之间的相互作用. 以 PFSS+SCS
模型使用 $2.5^\circ\times2.5^\circ$ 的分辨率为例, 假设高速流到达
的时间与低速流到达的时间相同, 首先把 $5 R_s$ 处沿
着黄道线的 144 个单元作为第一层, 标记为中心子午
面时间. 然后, 太阳风沿着径向方向以各自恒定的速
度传播 $1/8 \text{ AU}$ 到下一层, 速度更新为

$$V_{i+1}^j = \sqrt{\frac{2}{\left(\frac{1}{V_i^j}\right)^2 + \left(\frac{1}{V_i^{j+1}}\right)^2}}.$$

(6)

重复上述过程, 可以得到地球位置的太阳风速度和到
达时间.
太阳风从源表面映射到 1 AU 大概需要 $3\sim4$ 天
的时间, 所以一般提前 $3\sim4$ 天的预报与观测符合最

好, 预报的时间精度可以达到 4.5 h. 图 3 给出了两种映射太阳风的方法的比较.

3 WSA 经验模型的预报效果

Arge 等^[1] 评估 WSA-2000 模型的预报效果时使用了预报值和 WIND 飞船观测值的相关系数、预报值的平均相对误差. 1996 年前后三年的时间内预报值和观测值的相关系数为 0.4, 平均相对误差为 15%. Arge 等认为, 虽然相关系数能够反映预报值随观测值变化的趋势, 但是低的相对误差更有预报意义, 其意味着模型能更好地区分高速流和低速流. WSA 模型只能预报稳态/准稳态背景太阳风, 不能预报瞬态扰动事件. 因此, CME 出现频率增加时, 预报效果降低. 此外, 电流片和黄道面夹角较小时, 预报效果也比较差.

Owens 等^[22] 使用 MWO 的观测磁图和 PFSS+SCS 模型研究了 WSA 模型从 1995 年到 2002 年的预报效果. 结果显示, 不同年份的均方根误差在 $75 \sim 115 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间. 太阳活动低年 (1995) 均方根误差最大, 而上升期 (1997) 最小, 但是均方根误差与太阳活动周没有明显相关性. Owens 等认为均方根误差不是很好的评价标准, 因为相对于太阳活动高年如 2000 年, 1995 年模型的预报值和测量值吻合更好, 但均方根误差却更大. 因此, Owens 等提出了基于高速流事件的评估方法, 将高速流事件分为预报正确、漏报和谎报三类. 统计结果显示, WSA 模型能够捕

捉到 72% 的高速流, 而大多数小的高速流和扰动事件未被捕捉到, 谎报的高速流幅度一般也比较小.

图 4 给出了 L1 点 WSA 模型预报值和 ACE 卫星观测数据对比. 这里以 GONG 观测磁图作为输入, 利用 PFSS+SCS 模型反演日冕磁场, 其中 PFSS 模型源表面位置设在 $2.5 R_s$, SCS 模型外边界设在 $5 R_s$, 求解时最大截断级数 $L_{\max}$ 设为 11.

针对不同年份, WSA 速度关系式中自由参数取不同数值, 得到 $5 R_s$ 处速度分布后使用一维运动学模型映射到 1 AU. 预报值的空间分辨率为 2.5° , 对应的时间为 4.5 h, 观测值为每小时平均值. 2007, 2010, 2013 和 2016 年分别为太阳活动周低年、上升期、高年和下降期. 2007 年全年有稳定的高速流存在, 所以模型预报效果也最好. 2010 年和 2013 年高速流的幅度一般低于 $600 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 相邻卡林顿周之间变化较大, 预报效果比 2007 年差. 2016 年前半年高速流的整体幅度偏低, 模型也漏掉了多个高速流事件, 但是 5 月之后预报效果明显好转.

4 WSA 经验模型的影响因素

随着 WSA 模型的不断发展和完善, 许多环节的处理方式有多种选择, 这些具体操作将对预报结果产生直接或间接的影响.

4.1 磁图数据源

不同观测台站或卫星使用的仪器不同, 后期磁图处理方法也不完全相同, 因此导致发布的磁图之间具

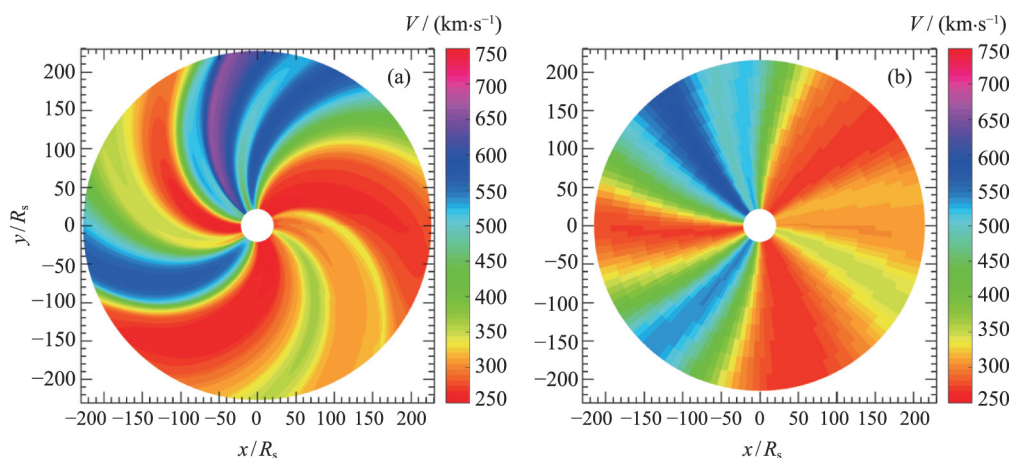


图 3 使用三维 MHD 数值模拟 (a) 及一维运动学模型 (b) 获得的黄道面内太阳风速度分布

Fig. 3 Distribution of solar wind speed in the ecliptic plane by 3D MHD simulation (a) and 1-DMK model (b)

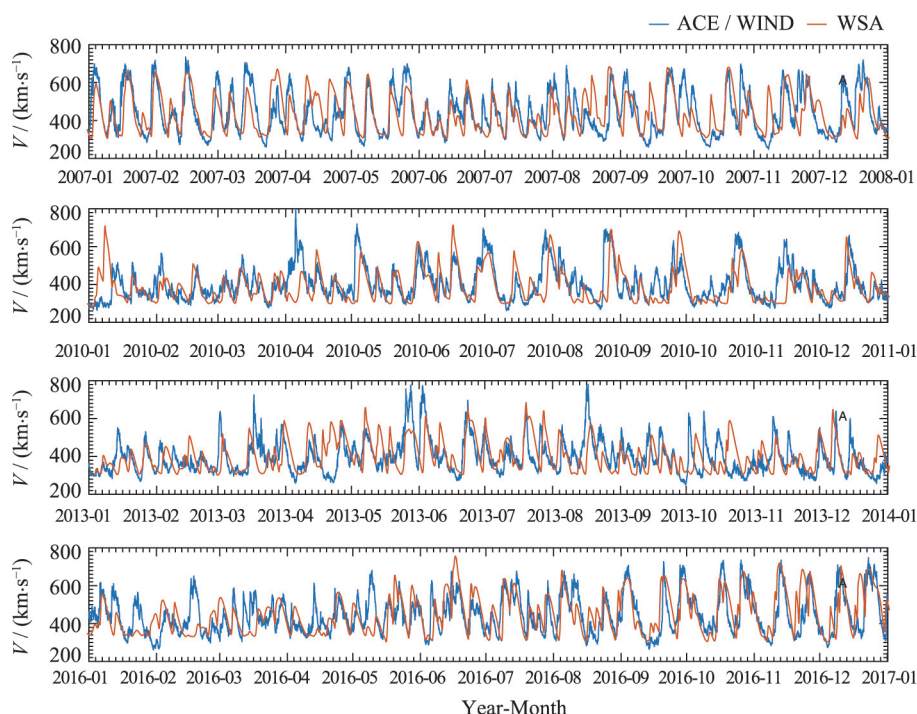


图4 WSA模型的预报值和ACE/WIND卫星观测值对比

Fig. 4 WSA solar wind speed predictions and ACE/WIND observations in 2007, 2010, 2013 and 2016

有明显差异. 例如, WSO 磁图的网格只有 73×30 , 能分辨的结构有限, 而且有严重的饱和效应^[27,28], 需要乘以一个因子才能和 MWO 的观测匹配. 此外, WSO 为单台站地基观测, 受天气条件影响较大. GONG 采用多台站联合观测, 数据的可靠性高很多, 网格分辨率也提高到 $1^\circ \times 1^\circ$. 卫星观测的分辨率高达 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, 而且不受地面气象条件的影响, 但这些精细结构中噪声水平也很高. 目前 SWPC 在线运行的 WSA 模型提供了 WSO, SOLIS 和 GONG 的结果, SOLIS 和 GONG 的效果通常优于 WSO.

4.2 磁图处理方法

Arge 等^[29] 发展了 ADAPT 模型来处理观测磁图. 该模型考虑了太阳表面较差自转、经度方向上流动、超米粒组织扩散、随机通量出现、新观测资料同化等因素, 可得到高质量全球磁场快照. Arge 等^[30] 采用 ADAPT 模型处理磁图, 获得的冕洞位置、大小、形状和传统磁图不同. Arge 等^[31] 将太阳背面的活动区添加到 ADAPT 磁图中, 在一定程度上改善了 WSA 模型的预报结果. Sun 等^[26] 提出了一种新的极区插值方法, 该方法也能改进 WSA 模型预报效果, 尤其是太阳活动低年的预报效果.

4.3 日冕磁场模型的类型

不同日冕磁场模型反演结果的差异体现在 f_s 和 θ_b 的分布上, 进而对太阳风速分布产生影响. Sun 等^[24] 研究发现, 在 WSA 模型中使用 PFSS+SCS 模型预报效果通常优于使用 PFSS 模型. Poduval 等^[32] 以均方根误差为标准比较了 HCCSSS 模型和 PFSS 模型, 发现前者预报太阳风速度的准确度是后者的 1.6 倍. Cohen^[33] 比较了分别由 MHD 模型和 PFSS 模型计算的 f_s , 发现二者在源表面上的分布明显不同. Riley^[21] 发现使用 MHD 模型得到的日冕磁场参数能够微弱提高 WSA 模型的预报效果. Jones 等^[34,35] 发展了一个新的全球日冕磁场模型, 该模型利用日冕仪的成像观测限制磁场的形态, 将其集成到 WSA 模型中有望改善预报结果.

4.4 日冕磁场模型求解方法

以 PFSS 模型为例, 使用球谐函数展开法求解时, 最大级数 $L_{\max}$ 影响冕洞分布和膨胀因子 f_s 值. $L_{\max}$ 的实际取值受限于磁图分辨率, 磁图分辨率越高, $L_{\max}$ 允许取值越大.

Poduval 等^[36] 比较了不同的 $L_{\max}$ 取值得到的 f_s 和冕洞的分布, 发现 22 级是比较合适的选择.

Sun 等^[24] 也认为 22 级是比较合理的. 因为截断级数为 9 时会过于简化底部磁场的分布, 级数增加到 72 时会出现人为波动. 可以使用有限差分法求解 PFSS 模型, 从而有效避免截断级数引起的各种问题, 使得到的日冕底部结构更贴近观测值^[37].

4.5 日冕磁场模型的自由参数

日冕磁场模型中的自由参数取值同样会影响冕洞分布和膨胀因子 f_s 取值. 以 PFSS 模型为例, 源表面的位置设在 $R_{ss} = 2.5 R_s$ 时, 行星际磁场的极性和观测结果吻合较好^[38], 但是这并非固定的取值. Sun 等^[39] 建议第 23 太阳活动周极小年的源表面位置设在 $1.8 R_s$. Lee 等^[40] 研究了第 22 和 23 太阳活动周的行星际磁场变化, 也指出源表面的位置相对于 $2.5 R_s$ 需要下调. Arden 等^[41] 研究了第 23 和 24 太阳活动周行星际磁通量的变化, 指出源表面的位置相对于 $2.5 R_s$ 需要适当提高. PFSS+SCS 模型中 R_{ss} 的位置同样可以调节. HCCSSS 模型中有三个自由参数可以调节, 包括 R_{cp} , R_{ss} 的位置以及水平电流片的高度 a , 目前常用的取值为^[42,43]

$$R_{cp} = 2.5 R_s,$$

$$R_{ss} = 14 R_s,$$

$$a = 0.2.$$

4.6 WSA 速度关系中自由系数取值

好的经验模型应可调参数少而且参数变化范围小. WSA 模型中有 8 个可调参数, 实际上没有必要. 其可调参数中仅 V_s , V_f , a_1 及 a_4 有明确的意义, 其余自由参数可以进一步简化. 太阳风速度结构随着太阳活动而显著变化, V_s 及 V_f 也随之相应改变. 此外, 调节 a_1 可以改变 f_s 贡献大小, 调节 a_4 可以控制低速流宽度. Riley 等^[21] 利用 PFSS 模型, 在自由参数空间寻找观测值和预报值相关系数最高的组合, 发现这些参数随时间变化显著. Riley 等^[44] 认为在 WSA 经验关系中, θ_b 较 f_s 占有更重要地位. 这是因为在远离伪冕流区域二者携带的信息一致性好, 而在伪冕流区域上方 f_s 通常较小, 导致 WSA-2000 模型预报速度较大, 这与观测到的伪冕流上方为低速流的事实不符. 尽管如此, f_s 在大的冕洞中仍具有调节速度分布作用, 这是 DCHB 模型不具备的.

4.7 太阳风速度映射到 1 AU 的方法

WS 模型最初使用弹道外推, 忽略高速流和低

速流之间的相互作用, 把太阳风以恒定的速度映射到 1 AU. 一维运动学方法把速度分布映射到 1 AU 的过程中考虑了高速流和低速流之间的相互作用, 但没有考虑等离子体热压和磁压对太阳风速度的影响, 所以在定量的研究中有一定的局限性. 三维 MHD 模拟可以描述行星际等离子体和磁场的相互作用, 但是需要大量计算资源和时间. Riley^[45] 提出了一种新的映射方法即迎风加速法, 这种方法简单易行, 且所得结果和 MHD 模拟相称, 体现了太阳风的动力学演化过程.

5 结语

WSA 模型提出后经历了不断完善的过程, 其最初是在 WS 模型基础上经过若干改进实现了太阳风速度和行星际磁场极性的实时预报, 之后又通过整合 DCHB 模型的核心参数, 形成目前被熟知的形式. 在 WSA 模型的应用过程中, 已有大量针对影响预报效果因素的研究, 包括磁图处理、日冕磁场模型反演、经验关系式中自由参数取值、速度分布映射到 1 AU 的方法等, 这些研究改进了 WSA 的预报效果.

WSA 模型简单实用, 可以作为独立的模型用于实时预报. 此外, 其与 MHD 模型结合可以模拟行星际背景太阳风的三维结构, 并在此基础上研究扰动事件. 目前已有的混合模型包括 WSA+ENLIL 模型^[46], WSA+HAF 模型^[47], WSA+HHMS 模型^[48], WSA+CRONOS 模型^[49], WSA+LFM 模型^[50] 等. 这些混合模型节省了计算资源, 而且取得了较好的预报效果.

致谢 太阳风数据来自于 <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>, 太阳磁场概略图来自于 <http://gong.nso.edu/>.

参考文献

- [1] ARGE C N, PIZZO V J. Improvement in the prediction of solar wind conditions using near-real time solar magnetic field updates [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(A5): 10465-10479
- [2] ARGE C N, ODSTRCIL D, PIZZO V J, *et al.* Improved method for specifying solar wind speed near the sun [C]//Proceedings of the Tenth International Solar Wind Conference. New York: AIP, 2003, **679**: 190-193
- [3] KRIEGER A S, TIMOTHY A F, ROELOF E C. A coronal hole and its identification as the source of a high velo-

- city solar wind stream [J]. *Solar Phys.*, 1973, **29**(2): 505-525
- [4] NOLTE J T, KRIEGER A S, TIMOTHY A F, *et al.* Coronal holes as sources of solar wind [J]. *Solar Phys.*, 1976, **46**(2): 303-322
- [5] LEVINE R H, ALTSCHULER M D, HARVEY J W. Solar sources of the interplanetary magnetic field and solar wind [J]. *J. Geophys. Res.*, 1977, **82**(1): 1061-1065
- [6] WANG Y M, SHEELEY JR N R. Solar wind speed and coronal flux-tube expansion [J]. *Astrophys. J.*, 1990, **355**: 726-732
- [7] ALTSCHULER M D, NEWKIRK JR G. Magnetic fields and the structure of the solar corona. I: methods of calculating coronal fields [J]. *Solar Phys.*, 1969, **9**(1): 131-149
- [8] SCHATTEN K H, WILCOX J M, NESS N F. A model of interplanetary and coronal magnetic fields [J]. *Solar Phys.*, 1969, **6**(3): 442-455
- [9] WANG Y M, SHEELEY JR N R, PHILLIPS J L, *et al.* Solar wind stream interactions and the wind speed-expansion factor relationship [J]. *Astrophys. J.*, 1997, **488** (1): L51-L54
- [10] RILEY P, LINKER J A, MIKIĆ Z. An empirically-driven global MHD model of the solar corona and inner heliosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A8): 15889-15901
- [11] SCHATTEN K H. Current sheet magnetic model for the solar corona [J]. *Cosmic Electrodyn.*, 1971, **2**: 232-245
- [12] ARGE C N, LUHMANN J G, ODSTRCIL D, *et al.* Stream structure and coronal sources of the solar wind during the May 12th, 1997 CME [J]. *J. Atmos. Solar-Terres. Phys.*, 2004, **66**(15-16): 1295-1309
- [13] SCHWENN R. Solar wind sources and their variations over the solar cycle [J]. *Space Sci. Rev.*, 2006, **124**(1/2/3/4): 51-76
- [14] RILEY P, BEN-NUN M, LINKER J A, *et al.* A multi-observatory inter-comparison of line-of-sight synoptic solar magnetograms [J]. *Solar Phys.*, 2014, **289**(3): 769-792
- [15] ZHAO X, HOEKSEMA J T. Predicting the heliospheric magnetic field using the current sheet-source surface model [J]. *Adv. Space Res.*, 1995, **16**(9): 181-184
- [16] LOW B C. Some recent developments in the theoretical dynamics of magnetic fields [J]. *Solar Phys.*, 1985, **100**(1-2): 309-331
- [17] TRAN T. Improving the Predictions of Solar Wind Speed and Interplanetary Magnetic Field at the Earth [D]. Los Angeles: University of California, 2009
- [18] MCGREGOR S L, HUGHES W J, ARGE C N, *et al.* The distribution of solar wind speeds during solar minimum: calibration for numerical solar wind modeling constraints on the source of the slow solar wind [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**(A3): A03101
- [19] WIENGARTEN T, KLEIMANN J, FICHTNER H, *et al.* Cosmic ray transport in heliospheric magnetic structures. I. Modeling background solar wind using the CRO-NOS magnetohydrodynamic code [J]. *Astrophys. J.*, 2014, **788**(1): 80
- [20] EDWARDS S J, YEATES A R, BOCQUET F X, *et al.* Influence of non-potential coronal magnetic topology on solar-wind models [J]. *Solar Phys.*, 2015, **290**(10): 2791-2808
- [21] RILEY P, LINKER J A, ARGE C N. On the role played by magnetic expansion factor in the prediction of solar wind speed [J]. *Space Wea.*, 2015, **13**(3): 154-169
- [22] OWENS M J, ARGE C N, SPENCE H E, *et al.* An event-based approach to validating solar wind speed predictions: high-speed enhancements in the Wang-Sheeley-Argé model [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**(A12): A12105
- [23] MCGREGOR S L, HUGHES W J, ARGE C N, *et al.* Analysis of the magnetic field discontinuity at the potential field source surface and Schatten Current Sheet interface in the Wang-Sheeley-Argé model [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**(A8): A08112
- [24] SUN Xudong, HOEKSEMA J T. A comparative study of different approaches and potential improvement to modeling the solar wind [C]//American Astronomical Society Meeting. Washington: American Astronomical Society, 2007, **39**: 142
- [25] SUN X, HOEKSEMA J T. Modeling Solar wind Using the Newly Calibrated MDI Magnetic Field: 1996-2008 [R]. Florida: AGU Spring Meeting, 2008
- [26] SUN X, LIU Y, HOEKSEMA J T, *et al.* A new method for polar field interpolation [J]. *Solar Phys.*, 2011, **270**(1): 9-22
- [27] SVALGAARD L, DUVAL JR T L, SCHERRER P H. The strength of the Sun's polar fields [J]. *Solar Phys.*, 1978, **58**(2): 225-239
- [28] WANG Y M, SHEELEY JR N R. Solar implications of ULYSSES interplanetary field measurements [J]. *Astrophys. J.*, 1995, **447**: L143-L146
- [29] ARGE C N, HENNEY C J, KOLLER J, *et al.* Air force data assimilative photospheric flux transport (ADAPT) model [C]//Twelfth International Solar Wind Conference. Saint-Malo, France: AIP, 2010, **1216**: 343-346
- [30] ARGE C N, HENNEY C J, KOLLER J, *et al.* Improving data drivers for coronal and solar wind models [C]//Proceedings of the 5th International Conference of Numerical Modeling of Space Plasma Flows. California: Astronomical Society of the Pacific, 2011, **444**: 99
- [31] ARGE C N, HENNEY C J, HERNÁNDEZ I G, *et al.* Modeling the corona and solar wind using ADAPT maps that include far-side observations [C]//Proceedings of the Thirteenth International Solar Wind Conference. New York: AIP, 2013, **1539**: 11-14
- [32] PODUVAL B, ZHAO X P. Validating solar wind prediction using the current sheet source surface model [J]. *Astrophys. J. Lett.*, 2014, **782**: L22
- [33] COHEN O. Quantifying the difference between the flux-

- tube expansion factor at the source surface and at the Alfvén surface using a global MHD model for the solar wind [J]. *Solar Phys.*, 2015, **290**(8): 2245-2263
- [34] JONES S I, DAVILA J M, URITSKY V M. Image-optimized coronal magnetic field models [J]. *Astrophys. J.*, 2017, **844**(2): 93
- [35] JONES S I, DAVILA J M, URITSKY V M. Optimizing global coronal magnetic field models using image-based constraints [J]. *Astrophys. J.*, 2016, **820**(2): 113
- [36] PODUVAL B, ZHAO Xuepu. Discrepancies in the prediction of solar wind using potential field source surface model: an investigation of possible sources [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**(A8): A08102
- [37] TOTH G, VAN DER HOLST B, HUANG Z G. Obtaining potential field solutions with spherical harmonics and finite differences [J]. *Astrophys. J.*, 2011, **732**(2): 102
- [38] HOEKSEMA J T, WILCOX J M, SCHERRER P H. The structure of the heliospheric current sheet: 1978–1982 [J]. *J. Geophys. Res.*, 1983, **88**(A12): 9910–9918
- [39] SUN Xudong, HOEKSEMA J T. A new source surface radius in potential field modeling during the current weak solar minimum [C]//AGU Fall Meeting. Washington DC: AGU, 2009
- [40] LEE C O, LUHMANN J G, HOEKSEMA J T, *et al.* Coronal field opens at lower height during the solar cycles 22 and 23 minimum periods: IMF comparison suggests the source surface should be lowered [J]. *Solar Phys.*, 2011, **269**(2): 367–388
- [41] ARDEN W M, NORTON A A, SUN X. A “breathing” source surface for cycles 23 and 24 [J]. *J. Geophys. Res.*, 2014, **119**(3): 1476–1485
- [42] ZHAO X P, HOEKSEMA J T, RICH N B. Modeling the radial variation of coronal streamer belts during sunspot ascending phase [J]. *Adv. Space Res.*, 2002, **29**(3): 411–416
- [43] ZHAO X P, HOEKSEMA J T. The magnetic field at the inner boundary of the heliosphere around solar minimum [J]. *Solar Phys.*, 2010, **266**(2): 379–390
- [44] RILEY P, LUHMANN J G. Interplanetary signatures of unipolar streamers and the origin of the slow solar wind [J]. *Solar Phys.*, 2012, **277**(2): 355–373
- [45] RILEY P, LIONELLO R. Mapping solar wind streams from the Sun to 1 AU: a comparison of techniques [J]. *Solar Phys.*, 2011, **270**(2): 575–592
- [46] ODSTRCIL D. Modeling 3-D solar wind structure [J]. *Adv. Space Res.*, 2003, **32**(4): 497–506
- [47] FRY C D, DRYER M, SMITH Z, *et al.* Forecasting solar wind structures and shock arrival times using an ensemble of models [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(A2): 1070
- [48] DETMAN T, SMITH Z, DRYER M, *et al.* A hybrid heliospheric modeling system: background solar wind [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**(A7): A07102
- [49] WIENGARTEN T, KLEIMANN J, FICHTNER H, *et al.* MHD simulation of the inner-heliospheric magnetic field [J]. *J. Geophys. Res.*, 2013, **118**(1): 29–44
- [50] MERKIN V G, LYON J G, LARIO D, *et al.* Time-dependent magnetohydrodynamic simulations of the inner heliosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 2015, **121**(4): 2866–2890