

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2013.03.02

# 太阳风扰动传输模式研究进展

史良文<sup>1</sup>, 申成龙<sup>1</sup>, 汪毓明<sup>1</sup>, 沈 芳<sup>2</sup>

(1. 中国科学院近地空间环境重点实验室, 中国科学技术大学 地球与空间科学学院, 合肥 230026; 2. 空间天气学国家重点实验室, 中国科学院 空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

**摘要:** 随着观测手段、理论模型和数值方法的发展, 人们对各种太阳风扰动如日冕物质抛射, 以及相关的空间天气效应的认识和理解越来越深入。为获取行星际背景磁场、背景太阳风参数和日冕物质抛射、激波等太阳风扰动的传播参数, 人们建立发展了各种模式; 在这些获取的参数基础上, 建立了各种太阳风扰动的传播模式, 从而为空间天气预报提供了必要的经验和理论模型支持。根据这些模式所研究和描述物理量的不同, 将这些参数获取模式和传播预报模式分为背景磁场获取模式、背景太阳风参数获取模式、日冕物质抛射传播参数获取模式、日冕物质抛射偏转模式、日冕物质抛射(激波)传播模式以及基于三维磁流体力学的数值模拟方法, 并分别概述性地总结了各种模式的特点及其用途。

**关 键 词:** 太阳风; 日冕物质抛射; 行星际空间; 空间天气

**中图分类号:** P353.7

**文献标识码:** A

## 1 引 言

随着人类社会的不断进步, 特别是航空航天事业的不断发展, 空间灾害性天气事件, 如地磁暴和太阳高能粒子事件等, 对宇航员、航天器以及电力和通讯系统等的影响越来越多地受到人们重视。同时, 随着理论研究、观测手段和数值模拟的不断发展和进步, 人们对各种太阳风扰动特别是日冕物质抛射的传播及其空间天气效应的认识和理解越来越深入。

日冕物质抛射是太阳大气中频繁发生的大尺度爆发现象, 是灾害性空间天气的主要驱动源。在太阳附近, 日冕物质抛射驱动激波加速粒子, 被认为是太阳高能粒子事件形成的主要因素<sup>[1]</sup>; 而其本体传播到地球, 与地球磁层相互作用而引起地磁暴等事件<sup>[2,3]</sup>。因而, 与日冕物质抛射及其驱动激波相关的研究和关键技术, 包括日冕物质抛射传播参数的获取, 是空间

收稿日期: 2012-10-12; 修回日期: 2013-04-15

资助项目: 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-01); 973 项目(2011CB811403); 国家自然科学基金(41131065, 41274173, 40874075, 41121003); 中国科学院百人计划(KZCX2-YWQN511); 教育部(20113402110001)和大学基础研究计划(WK2080000031); 中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA04060801); 中国科学院知识创新工程项目(YYYJ-1110-03)

天气研究和预报中的关键问题之一。近年来,根据不同卫星的观测数据,建立了多种获取日冕物质抛射传播参数的方法,并对日冕物质抛射的传播过程进行了广泛深入的研究。同时,研究表明背景磁场分布、背景太阳风参数等参量对日冕物质抛射等太阳风扰动的传播过程具有显著影响。因此,日冕物质抛射等太阳风扰动传播过程的研究和相关模式的建立,离不开背景磁场、太阳风等参数的准确获取。

为更加深入准确地研究和预报日冕物质抛射、激波等各种太阳风扰动的传播过程及其空间天气效应,人们建立并发展了各种行星际背景磁场、背景太阳风参数和日冕物质抛射、激波等太阳风扰动传播参数模式。在这些模式的基础上,建立了各种太阳风扰动的传播模式,为太阳风扰动的空间天气预报提供了理论基础。基于这些模式所研究和描述的物理量的不同,本文分别从参数获取模式(包括背景磁场获取模式、背景太阳风参数获取模式、日冕物质抛射传播参数获取模式)与传播预播模式(包括日冕物质抛射偏转模式、日冕物质抛射(激波)传播模式和基于三维磁流体力学的数值模拟方法)两方面,概述性地总结了各种模式及其应用。

## 2 背景磁场获取模式

现有的研究表明,背景磁场可能会显著影响日冕物质抛射、激波等太阳风扰动的传播过程<sup>[4-7]</sup>。同时,准确的背景磁场强度分布是获取行星际背景太阳风参数的基础,而近地空间的局地行星际磁场强度及其极性也是空间天气中的关键影响因素。但是由于观测的限制,现在只有太阳表面的遥感磁场观测以及 1 AU 处的局地磁场观测比较普遍,而其他大部分行星际空间中的磁场的直接观测比较缺乏,只能依赖于各种模型计算获得。现在常用的背景磁场获取模式主要基于光球层磁场观测,在一定假设条下,通过求解描述磁场结构的方程,获得日冕和行星际磁场分布。最近,随着日面矢量磁场观测数据的使用,人们发展了多种非线性无力场模型来获取部分或全球的日冕磁场<sup>[8-10]</sup>。本文主要介绍广泛用于获取日冕和行星际全球磁场参数的模型:势场源表面(Potential Field Source Surface, PFSS)模型和电流片源表面(Current Sheet-Source Surface, CSSS)模型。

### 2.1 势场源表面(PFSS)模型

该模型最早由 Altschuler 和 Newkirk<sup>[11]</sup>以及 Schatten 等人<sup>[12]</sup>于 1969 年建立和发展。在势场( $\nabla \times \mathbf{B} = 0$ , 其中  $\mathbf{B}$  为磁场矢量)假设情况下,磁场是无旋场,可以引入磁场标势  $\phi$ , 满足  $\mathbf{B} = \nabla\phi$ 。可知,磁场标势  $\phi$  满足势场方程:

$$\nabla^2\phi = 0 \quad (1)$$

势场源表面模型以光球层磁场为底边界条件,对式(1)做球谐展开,并根据光球层磁场观测数据计算求得球谐系数。根据所求得的球谐系数,计算可求得从光球层到源表面之间的磁标势  $\phi$  分布,进而求得磁场分布。而在源表面外,采用磁通量守恒方法计算不同高度和不同位置处的磁场分布。通过势场源表面模型计算磁场时,源表面内存在闭合磁场,源表面外均为

开放磁场, 如图 1 所示。该模型具有输入观测简单、计算时间快等特点, 现已经广泛应用于太阳物理、空间物理研究以及空间天气预报中。相关日面磁场观测设备组 (如 Wilcox Solar Observatory, WSO<sup>①</sup>等) 根据其光球层磁场观测数据利用 PFSS 模型计算磁场分布, 并对计算得到的球谐系数进行了常规发布。同时, 该模型相关程序也可直接从 SSW(solar software)<sup>②</sup> 中获取并使用。

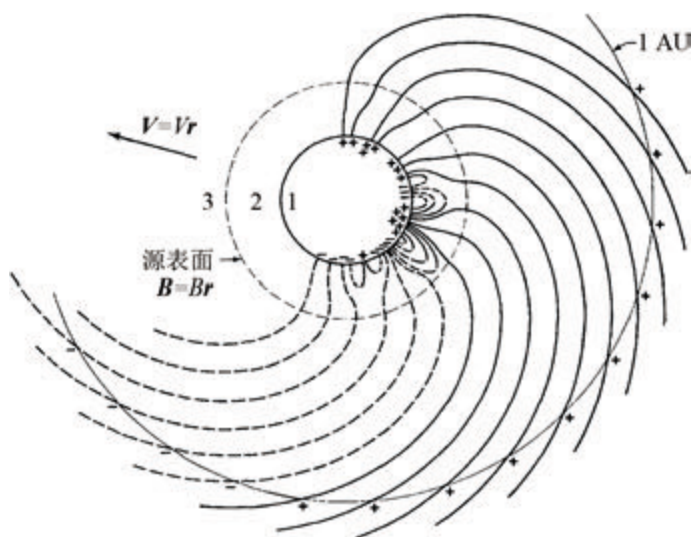


图 1 势场源表面模型示意图<sup>[12]</sup>

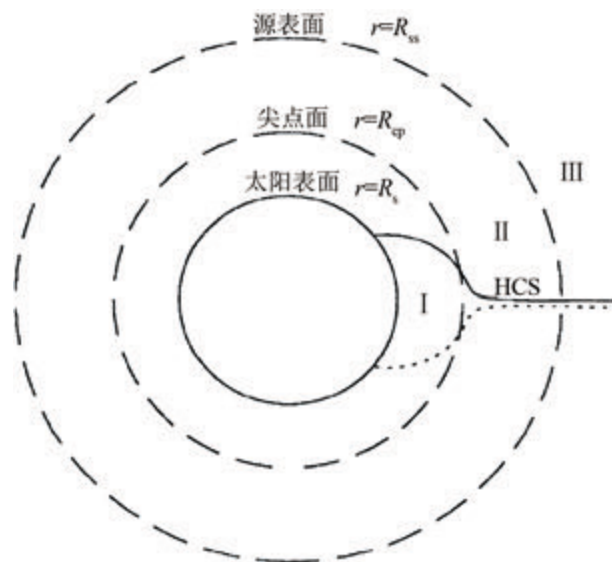
## 2.2 电流片源表面 (CSSS) 模型

该模型<sup>[13]</sup>是势场源表面模型的进一步发展和延伸。该模型把从太阳表面到 1 AU 及更远处的磁场分成三个小区域, 如图 2 所示。在太阳表面和尖点面之间的区域 (区域 I) 采用势场模型计算磁场结构; 在尖点面和源表面之间 (区域 II) 加入一个电流片, 以计算得到的尖点面磁场为底边界条件计算该区域磁场分布; 源表面以外 (区域 III), 采用磁通量守恒的方式计算磁场分布。在该模型中, 尖点面以内存在闭合的磁场结构; 在尖点面和源表面之间为开放磁场结构, 但是由于电流片的存在, 该部分磁场为非径向磁场; 在源表面以外, 磁场为径向的开放场。赵学溥等人<sup>[13]</sup>将 1977—1986 年的 CSSS 模型计算结果与地球轨道磁场观测数据进行对比, 发现该模型可以较好地预测 1 AU 处观测到的行星际磁场强度。近年来, 申成龙等人利用该模型的计算结果研究了日冕物质抛射驱动激波<sup>[14]</sup>和日冕物质抛射在日冕中的偏转<sup>[4, 5]</sup>。

PFSS 模型与 CSSS 模型通过太阳表面磁场的测量间接获取其他一些参数。近年来, 观测手段得到进一步发展: Solanki 等人<sup>[15]</sup>利用 He 10 830 Å 谱线对电流片附近的磁场进行三维重构; Tomczyk 等人<sup>[16]</sup>设计了 CoMP(Coronal Multichannel Polarimeter) 仪器用于测量日冕磁场。

<sup>①</sup><http://wso.stanford.edu>

<sup>②</sup><http://www.lmsal.com/solarsoft/>

图 2 电流片源表面模型 (CSSS) 示意图<sup>[13]</sup>

### 3 背景太阳风参数获取模式

在宁静期间,背景太阳风参数变化是引起地球空间环境变化的主要因素;同时,背景太阳风也将显著影响日冕物质抛射等太阳风扰动的传播过程。由于观测的限制,行星际空间大部分区域的背景太阳风参数不能被直接测量。现有的方法均是通过遥测数据,在一定的经验和理论模型下获取行星际空间中的背景太阳风参数。常用的太阳风参数获取模式有以下2种。

#### 3.1 基于光球层磁场观测的 Wang-Sheeley-Arge(WSA) 模型

早期的研究表明,背景太阳风速度与磁场膨胀系数存在负相关<sup>[17-19]</sup>。在此基础上,根据 WSO 光球层磁场观测,Wang 和 Sheeley 发展了用于预报背景太阳风参数的 Wang-Sheeley 模型<sup>[18]</sup>;而后,Arge 等人<sup>[20]</sup>进一步发展和完善了该模型,形成现在广泛使用的 Wang-Sheeley-Arge(WSA) 模型。发展后的 WSA 模型根据修正后的光球层磁场观测数据,使用势场源表面模型 (PFSS) 获取源表面处的磁场分布,并计算获得源表面上的磁膨胀系数。根据源表面上磁膨胀系数与太阳风速度的经验关系,进而获取行星际空间及 1 AU 处太阳风速度。该模型的计算结果可以较好地重现 1 AU 处的局地太阳风观测结果。同时,根据背景磁场的观测,该模型还可用于行星际磁场极性的预测。

该模型现已广泛应用于背景太阳风速度和行星际磁场极性的预报,美国国家大气和海洋研究中心 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 的空间天气预报中心 (Space Weather Prediction Center, SWPC) 已对该模型预报结果进行了常规的发布,如图

3<sup>①</sup>所示。

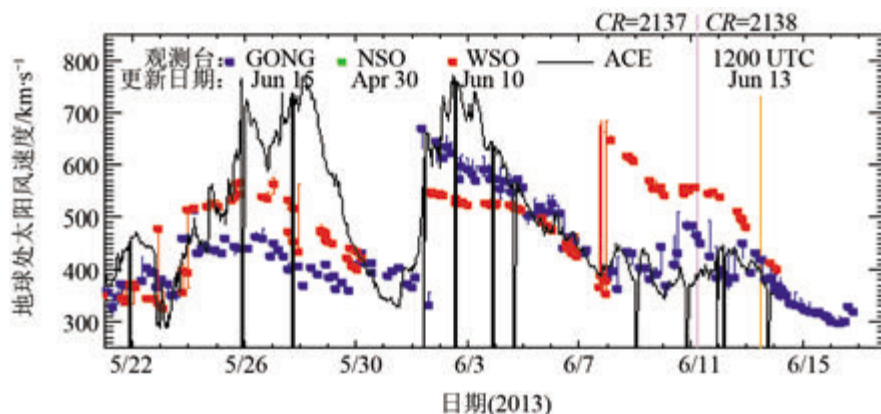


图3 Wang-Sheeley-Argge 模型提前3天对太阳风速度的预报

### 3.2 基于行星际闪烁的背景太阳风参数获取方法

行星际物质中电子密度分布的不规则性会引起射电信号的散射效应<sup>[21]</sup>。被散射的信号波动到达地球后形成衍射波谱,这种现象就是行星际闪烁 (Interplanetary Scintillation, IPS)。由于太阳风会引起日地空间中的电子密度变化,接收的行星际闪烁波谱包含视线方向 (Line of Sight, LOS) 上太阳风的速度与密度信息。利用不同视线方向上的行星际闪烁观测数据,可以建立太阳风结构模型<sup>[22-24]</sup>。在假定太阳风结构稳定的前提下,由于太阳风随着太阳自转,可用于预测背景太阳风速度等参数<sup>[23]</sup>。

日本的日地空间环境实验室 (Solar-Terrestrial Environment Laboratory) 已经对行星际闪烁连续进行了 20 多年的观测,并发展了 IPS-CAT 方法<sup>[25]</sup>用于预测背景太阳风速度等参数<sup>②</sup>。在子午工程<sup>③</sup>支持下,我国也已初步建立了行星际闪烁的观测仪器。该仪器的进一步发展及相关模型的建立,将使我国学者能根据自有的行星际闪烁观测数据获取太阳风相关参数。

## 4 日冕物质抛射 (激波) 传播参数获取模式

日冕物质抛射及其驱动激波被认为是恶劣空间天气事件的主要驱动源。日冕物质抛射及其驱动激波的传播参数 (包括传播方向、传播速度、延展宽度等) 的准确获取是空间天气研究和预报中的关键问题之一。现在常用的日冕物质抛射及其驱动激波参数获取方法有以下 4 种。

<sup>①</sup><http://www.swpc.noaa.gov/ws/>

<sup>②</sup>[http://stesun5.stelab.nagoya-u.ac.jp/ips\\_data-e.html](http://stesun5.stelab.nagoya-u.ac.jp/ips_data-e.html)

<sup>③</sup><http://www.meridianproject.ac.cn/>



#### 4.1 基于 II 型暴观测的激波速度获取方法

一般认为, 激波加速电子而形成 II 型射电暴。根据 II 型射电暴激发理论, 其激发频率与当地的电子密度相关<sup>[26]</sup>:

$$N_e = \frac{f_{pe}(\text{Hz})}{(8.98 \times 10^3)^2} \text{ cm}^{-3} \quad (2)$$

因而, 在假设背景密度随高度变化的情况下, II 型暴随时间的频率漂移可以反映激发 II 型射电暴的激波高度随时间的变化。根据不同时刻的激波高度, 可以计算获得激波的传播速度, 该方法被广泛用于空间天气预报和研究中的激波早期传播参数获取<sup>[27-30]</sup>。该模式需假设 II 型暴产生于激波的前沿位置, 实际 II 型射电暴<sup>[31, 32]</sup>特别是米波 II 型射电暴<sup>[31]</sup>的观测结果显示, II 型射电暴也可能产生于激波-流相互作用区, 因而该方法的计算结果可能与实际情况有较大的偏差。另外, 该方法所使用的密度模型很可能严重偏离真实的太阳大气密度分布, 且太阳活动对太阳大气密度分布能产生影响。因此, 该方法计算的激波传播速度可能与真实速度有较大差异。

#### 4.2 基于锥模型的日冕物质抛射参数获取方法

日冕物质抛射的直接成像观测数据主要来自于地面或空间日冕仪的投影成像观测。使用这些观测数据, 只能获取日冕物质抛射在投影平面内的传播参数。为了获取日冕物质抛射的三维传播参数, 人们建立了各种不同的描述日冕物质抛射结构的三维模型, 其中锥模型使用得最为广泛。锥模型假设日冕物质抛射具有与锥类似的结构, 不同的锥模型再配以不同的顶部形态, 图 4 给出了冰淇淋锥模型<sup>[33]</sup>的示意图。在此基础上, 根据在日冕仪中日冕物质抛射边缘轮廓或者各个位置角方向的投影速度来拟合描述立体锥的相关参数, 进而获得日冕物质抛射的三维传播参数(包括传播速度、传播方向等)。根据锥的不同顶部形态, 锥模型又分为圆锥模型<sup>[34, 35]</sup>、椭圆锥模型<sup>[36]</sup>、非对称锥模型<sup>[37]</sup>、冰淇淋锥模型<sup>[33]</sup>等, 不同锥模型获取参数的方法也不一致, 表 1 给出了几种常用锥模型比较。锥模型所获取的日冕物质抛射传播参数已被广泛用于日冕物质抛射在行星际空间传播的模拟和预报研究中。根据 ENLIL 和锥模型相结合的研究表明<sup>[38]</sup>, 利用锥模型所获结果作为 ENLIL 的扰动输入参数, 能改进对日冕物质抛射到达时间的预报。

表 1 常用锥模型总结

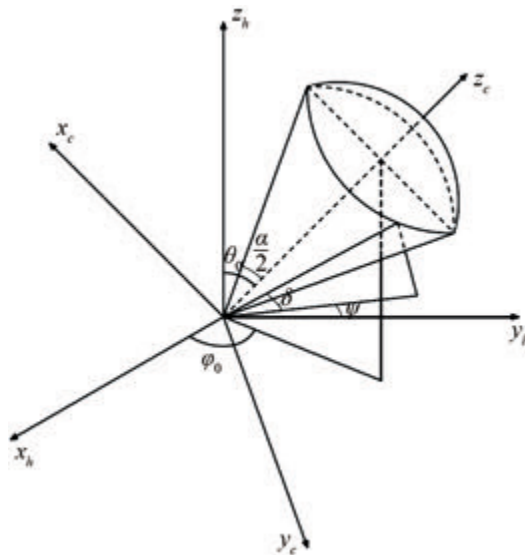
| 模型名称   | 输入数据    | 源区信息 * | 输出参数 |      |       |    | 适用范围 | 几何参数个数 | 常用的反演方法  |
|--------|---------|--------|------|------|-------|----|------|--------|----------|
|        |         |        | 角宽度  | 传播方向 | 速度 ** | 倾角 |      |        |          |
| 圆锥模型   | 单点观测    | N      | Y    | Y    | P     | N  | 部分   | 4      | 拟合轮廓     |
| 椭圆锥模型  | 单点或多点观测 | P      | Y    | Y    | P     | Y  | 所有   | 6      | 拟合轮廓     |
| 非对称锥模型 | 单点观测    | N      | Y    | Y    | D     | Y  | 所有   | 6      | 拟合不同方向速度 |
| 冰淇淋锥模型 | 单点观测    | C      | Y    | Y    | D     | N  | 所有   | 4      | 拟合不同方向速度 |

\* N: 不需要源区信息; P: 可能需要源区信息(根据单点观测); C: 需要源区信息作为初始条件。

\*\* P: 先获取不同时刻锥参数, 后通过高度拟合计算日冕物质抛射三维速度; D: 直接拟合获取三维速度。

#### 4.3 基于 GCS 模型的日冕物质抛射参数获取方法

在假设日冕物质抛射为一近似通量管位型的基础上, Thernisien 等人发展了一种基于日

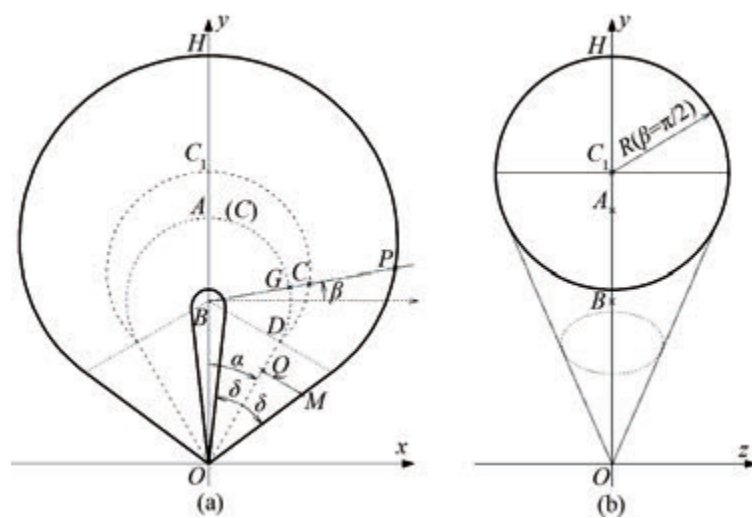
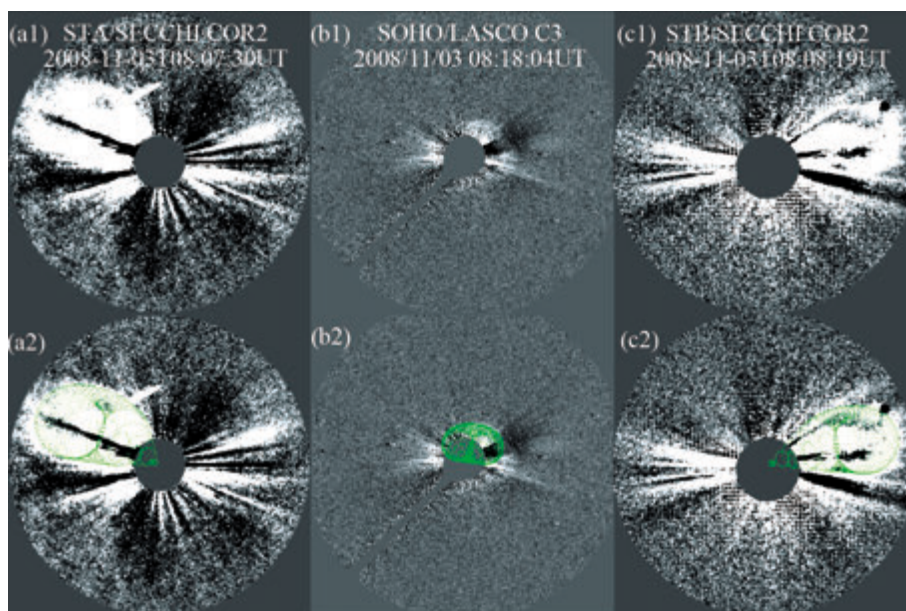
图4 冰淇淋锥模型示意图<sup>[33]</sup>

冕仪对日冕物质抛射的投影成像观测正演,以获取日冕物质抛射三维传播参数的分级圆柱壳(graded cylindrical shell, GCS)模型<sup>[39-41]</sup>。该模型根据日冕仪观测到的日冕物质抛射投影轮廓形态和亮度分布,拟合不同时刻描述日冕物质抛射三维结构和亮度图像的参数,图5给出该模型所描述の日冕物质抛射形态示意图。该模型包含9个自由参数,其中6个参数用来描述日冕物质抛射的形态,包括高度( $h$ )、经度( $\phi$ )、纬度( $\theta$ )、倾角( $\gamma$ )、半角宽( $\alpha$ )和反映通量管粗细程度的参数( $\kappa$ );另外3个参数( $N_e$ ,  $\sigma_{\text{trailing}}$ ,  $\sigma_{\text{leading}}$ )则用来描述日冕物质抛射的亮度分布。Thernisien 等人<sup>[39]</sup>给出了这9个参数的详细介绍。

该模型最早应用于 SOHO 卫星的单星观测数据。2006 年 11 月,日地关系天文台(STEREO)卫星<sup>[42]</sup>的发射升空,为我们提供了对日冕物质抛射等太阳风扰动传播的多视角、大视野观测,从而为获取更准确的日冕物质抛射三维传播参数提供了可能。GCS 模型对多星观测的应用表明,其能很好地描述多角度对同一日冕物质抛射的观测<sup>[40, 41, 43]</sup>(如图6所示)。GCS 模型获取的日冕物质抛射传播参数已被广泛用于研究日冕物质抛射的传播过程<sup>[43-46]</sup>。

#### 4.4 基于方位角的日冕物质抛射传播参数获取方法

STEREO 卫星及其所携带的 SECCHI 仪器<sup>[47]</sup>使得我们可以多视角、大视野追踪太阳风扰动从太阳附近到 1 AU 以外的传播过程。SECCHI 仪器提供了太阳风扰动传播的方位角(elongation angle)等信息,但由于观测成像的投影效应以及 Thomson 散射效应的影响,方位角与径向距离并不是简单的线性关系。为了研究日冕物质抛射的传播速度等,需要把单颗或多颗卫星获取的方位角信息转化为日冕物质抛射的传播方向、传播高度等信息。Jmap 图<sup>[48, 49]</sup>作为一种有效的转化方式,被广泛应用于基于 SECCHI 仪器观测数据来研究太阳风扰动的传播过程。

图 5 GCS 模型示意图<sup>[41]</sup>图 6 GCS 模型对 2008 年 11 月 3 日一次日冕物质抛射事件拟合结果的示意图<sup>[43]</sup>



Jmap 图是指随不同时间某一纬度方向 (一般选取黄道面内) 的日冕仪或日球成像仪时间差分观测图像的合成图, 它的横轴为时间, 纵轴一般为方位角 (Elongation) 或者高度。Jmap 图中, 太阳风扰动的传播特别是日冕物质抛射的传播常表现为黑白相间的条纹。基于 STEREO 卫星观测数据, 可获取太阳风扰动某一特征结构传播的方位角随时间的演化, 在一定的假设下, 可将方位角随时间的变化转化为距离随时间的变化。

假设日冕物质抛射在黄道面内的截面为一中心在太阳的圆, 且 Jmap 中的亮暗条纹对应于卫星和该圆的切线位置, 方位角  $\epsilon$  和日冕物质抛射的径向距离  $D$  的关系可表示为:

$$D = D_{\text{sat}} * \sin(\epsilon) , \quad (3)$$

其中  $D_{\text{sat}}$  为卫星到太阳中心的距离, 该方法即为 Point-P (PP) <sup>[50]</sup> 方法。该方法根据方位角直接计算太阳风扰动与太阳中心的距离。

在已知太阳风扰动相对于卫星和太阳连线的传播方向  $\phi_{\text{sat}}$  的情况下, 根据 STEREO 卫星的单星观测即可获取太阳风扰动的位置。假设 Jmap 中观测到的明暗条纹对应于日冕物质抛射的前沿位置, 则方位角观测数据  $\epsilon$  与扰动离太阳中心的距离  $D$  的关系可简单地根据正弦定理表示为:

$$D = \frac{D_{\text{sat}} \sin(\epsilon)}{\sin(\phi_{\text{sat}})} , \quad (4)$$

其中,  $D_{\text{sat}}$  为卫星距离太阳中心的距离。进一步假设日冕物质抛射的传播方向在行星际空间没有明显的改变,  $\phi_{\text{sat}}$  可根据 GCS 模型的结果获取。在假设日冕物质抛射的传播方向 ( $\phi_{\text{f}\phi\text{cv}}$ ) 和速度 ( $v_{\text{f}\phi\text{cv}}$ ) 不变的情况下, 该方法可进一步发展, 式 (4) 可进一步改写为:

$$v_{\text{f}\phi\text{cv}} t = \frac{D_{\text{sat}} \sin(\epsilon)}{\sin(\phi_{\text{f}\phi\text{cv}})} . \quad (5)$$

在式 (5) 的基础上, 根据同一太阳风扰动在不同时刻的方位角 ( $\epsilon$ ) 观测数据, 可拟合得到日冕物质抛射的传播方向 ( $\phi_{\text{f}\phi\text{cv}}$ ) 和速度 ( $v_{\text{f}\phi\text{cv}}$ ), 该方法称为 Fix- $\phi$  方法 <sup>[48]</sup>。

Lugaz 等人假设日冕物质抛射为一端连接于日面中心的圆, Jmap 中的明暗条纹对应于卫星和该圆的切线位置, 日冕物质抛射的传播方向 ( $\phi_{\text{hm}}$ ) 和描述日冕物质抛射的圆中心离太阳中心的距离  $D_{\text{hm}}$  的关系可表示为 <sup>[51]</sup>:

$$v_{\text{hmcv}} t = 2D_{\text{sat}} \frac{\sin \alpha}{1 + \sin(\alpha + \phi_{\text{hmcv}})} . \quad (6)$$

同上, 根据式 (6) 和不同时刻的方位角 ( $\epsilon$ ) 观测数据, 拟合可获得日冕物质抛射传播速度  $v_{\text{hmcv}}$  和传播方向  $\phi_{\text{hmcv}}$ , 该方法称为 Harmonic Mean (HM) 方法 <sup>[51]</sup>。

以上方法均是通过单颗卫星对太阳风扰动传播的方位角观测获取其传播参数, 这些方法均建立在日冕物质抛射传播方向不变、匀速传播等假设的基础上, 这与实际情况可能存在一定的偏差。刘颖等人 <sup>[52]</sup> 详细描述了这几种方法, 图 7 给出了 PP 方法 (a)、Fix- $\phi$  方法 (b) 和 HM 方法 (c) 的示意图 <sup>[52]</sup>。Lugaz <sup>[53]</sup> 系统地研究了这几种方法, 并讨论了其优劣性和适用范围。

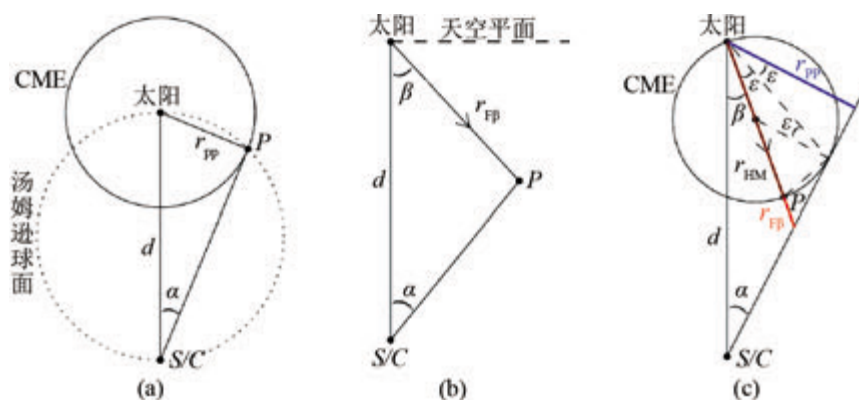


图 7 基于单星观测获取日冕物质抛射传播参数的示意图<sup>[52]</sup>

随着 STEREO 卫星观测数据的应用,人们发展了基于两颗卫星的方位角观测数据获取日冕物质抛射传播参数的方法。在假设 STEREO A 和 STEREO B 卫星观测到日冕物质抛射同一区域的情况下,刘颖等人<sup>[52]</sup>发展了三角分析法获取不同时刻的日冕物质抛射的传播方向和传播距离;在 HM 方法的基础上,Lugaz 等人<sup>[54]</sup>也发展了根据双星的方位角观测获取日冕物质抛射传播方向和距离的方法。同时,在假设日冕物质抛射沿某一已知方向传播基础上,假设日冕物质抛射为一中心向外运动的圆,根据 STEREO 卫星的双星或者同一卫星对日冕物质抛射前沿和尾部的观测,可以获得日冕物质抛射的中心距离和半径大小<sup>[43,54]</sup>。图 8 中的面板 (a) 和 (b) 分别给出了三角分析法和发展的 HM 方法的示意图。但是,由于假设的限制,不同的三维参数反演模式对同一事件计算结果存在较大的差别,不同模式的结果比较和应用范围需要进一步的深入讨论。而从极区对日冕物质抛射在黄道面内的观测,如计划中的 Solar Polar Orbit Radio Telescope (SPORT) 卫星<sup>[55]</sup>等,也可用来进一步验证各种模式所获得的传播参数的准确性。

这里介绍了部分通过单星或多星观测获取日冕物质抛射传播参数的方法,同时,还有其他许多方法也被发展和应用,比如 CME 区域拟合方法 (Mask Fitting Method)<sup>[56,57]</sup>,几何定位法 (Geometric Localisation, GL)<sup>[58]</sup>,局地修正追踪和三角分析 (Local Correlation Tracking Plus Triangulation, LCT-TR)<sup>[59]</sup>等。

## 5 日冕物质抛射偏转模式

日冕物质抛射 (激波) 能否到达是空间天气预报中非常重要的内容之一。研究表明,日冕物质抛射在传播过程中的偏转对日冕物质抛射能否到达地球会产生显著的影响<sup>[4,5,44,60-62]</sup>。因而,日冕物质抛射偏转模式的建立是预报日冕物质抛射能否到达地球的基础。

### 5.1 冕洞压迫模式

冕洞是日冕中广泛存在的结构。考虑冕洞中太阳风高速流对日冕物质抛射传播的可能

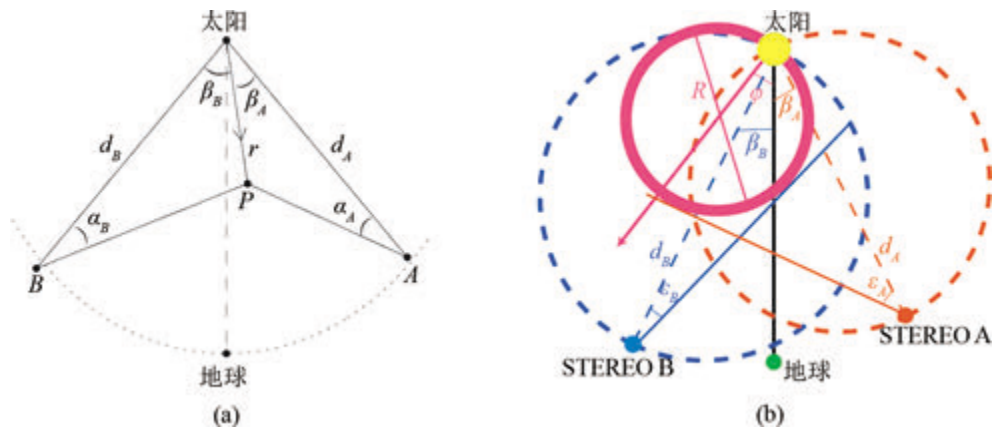


图8 基于双星观测获取日冕物质抛射传播参数的示意图

(a) 来自于刘颖等人<sup>[52]</sup>; (b) 来自于 Lugaz 等人<sup>[54]</sup>。

影响, Gopalswamy 等人<sup>[63]</sup>认为日冕物质抛射受冕洞影响会发生偏转, 进而发展了基于冕洞特征参数和日冕物质抛射源区位置的冕洞压迫模式。对于日面存在的每一个冕洞, 其对日冕物质抛射的影响强度参数为  $f \approx \frac{\langle B \rangle A}{R^2}$ , 其中  $B$  为冕洞区域内的光球层平均磁场,  $A$  为冕洞面积,  $R$  为冕洞离日冕物质抛射源区的距离, 该影响的方向沿冕洞中心指向日冕物质抛射源区。某一日冕物质抛射受所有冕洞影响, 其总因子为所有冕洞的影响因子 ( $f$ ) 的矢量叠加, 如图 9 所示。在这些冕洞的影响下, 日冕物质抛射将沿着总因子的方向偏转。利用该模式, Gopalswamy 等人<sup>[63]</sup>解释了 1 AU 处观测到的无驱动源激波现象。

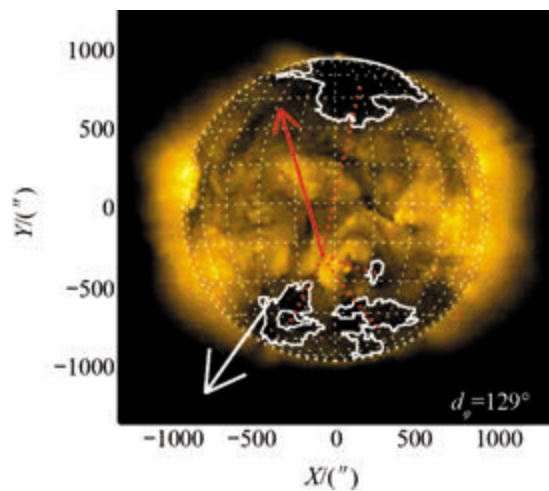
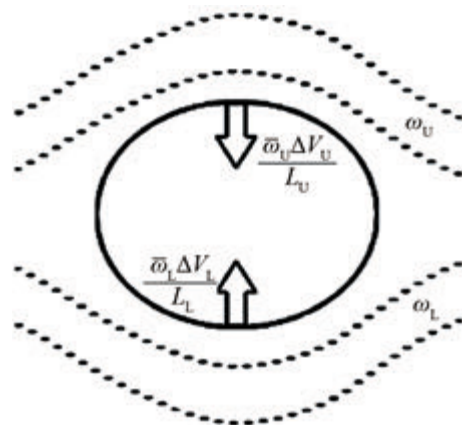
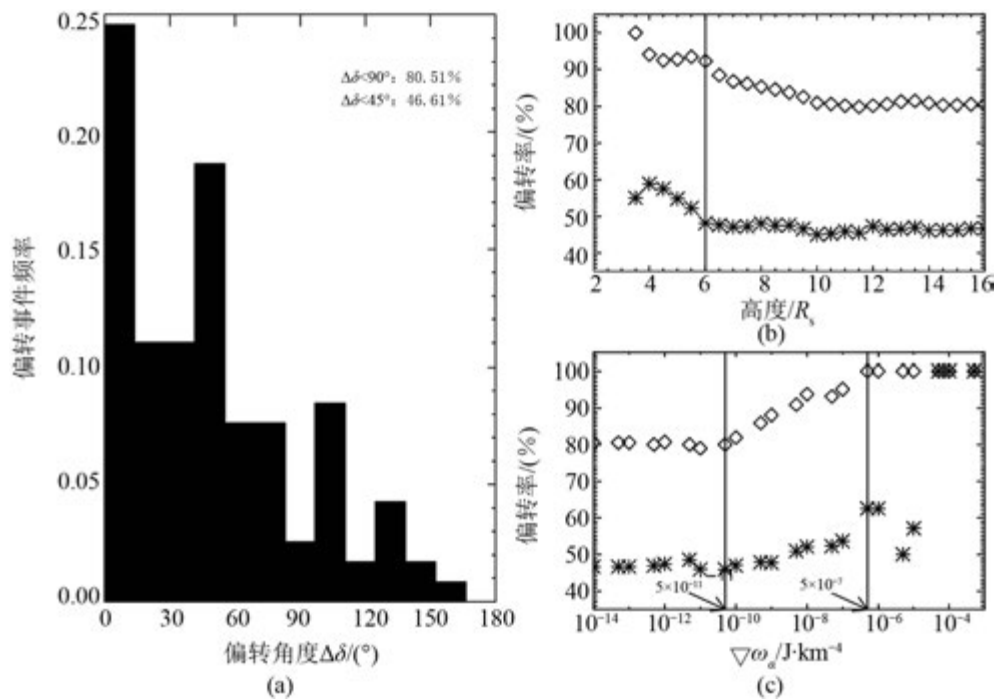
## 5.2 磁能密度梯度 (Magnetic Energy Density Gradient, MEDG) 模式

在太阳附近, 磁场强度较大, 对日冕物质抛射的传播会有显著影响。为了解释在太阳谷年日冕物质抛射向赤道方向的偏转现象, 申成龙等人<sup>[5]</sup>于 2011 年提出了背景磁场引起日冕物质抛射在太阳附近偏转的磁能密度梯度模式。日冕物质抛射在传播过程中会压缩背景磁场 (如图 10 所示), 而被压缩的背景磁场有释放能量恢复平衡状态的趋势, 在此过程中背景磁场将有力作用在日冕物质抛射上。

考虑日冕背景磁场分布的不均匀性, 压缩的背景磁场对日冕物质抛射的作用力将指向磁能密度 (磁场强度) 低的区域, 而日冕物质抛射在该力的作用下将向磁能密度低的区域偏转, 该模式计算结果与 2007 年 10 月 8 日一次日冕物质抛射事件在太阳附近的偏转观测结果吻合。桂彬等人<sup>[4]</sup>应用该模式研究 2007 年至 2008 年间的 10 个日冕物质抛射事件, 发现磁能密度梯度与日冕物质抛射偏转率正相关, 而日冕物质抛射的传播速度与日冕物质抛射偏转率负相关, 如图 11 所示。这进一步验证了日冕物质抛射在太阳附近的偏转受背景磁场控制。磁能密度梯度模式可以很好地描述和预报日冕物质抛射在太阳附近的偏转。最近, Zuccarello 等人<sup>[7]</sup>的数值模拟结果进一步验证了该模式的可靠性。

## 5.3 行星际磁场冻结 (Magnetic Field Frozen-In, MFFI) 模式

随着日冕物质抛射向外传播, 背景磁场强度逐渐减弱, 背景太阳风将显著影响日冕物质

图9 冕洞压迫模式示意图<sup>[63]</sup>图10 磁能密度梯度模式示意图<sup>[5]</sup>图11 日冕物质抛射偏转率与高度、速度、磁能密度的关系<sup>[4]</sup>



抛射的传播过程。考虑背景太阳风对日冕物质抛射传播的影响, 汪毓明等人<sup>[62]</sup>提出了行星际磁场冻结模式, 该模式可以很好地解释对地有效的日冕物质抛射源区的东西不对称性。

该模式中, 速度快于当地背景太阳风速度的日冕物质抛射将受到背景螺旋磁场的阻碍而发生东向偏转, 而速度慢于当地背景太阳风速度的日冕物质抛射将受到向西的推力而发生西向的偏转, 如图 12 所示, 偏转角度的大小与日冕物质抛射和背景太阳风的相对速度相关。进一步的工作表明, 该模式可以很好地解释到达地球的日冕物质抛射源区呈东西不对称性分布的现象<sup>[62]</sup>, 并成功地解释了爆发于 2005 年 9 月的几次大的日冕物质抛射的对地有效性 (见图 13)<sup>[61]</sup>。

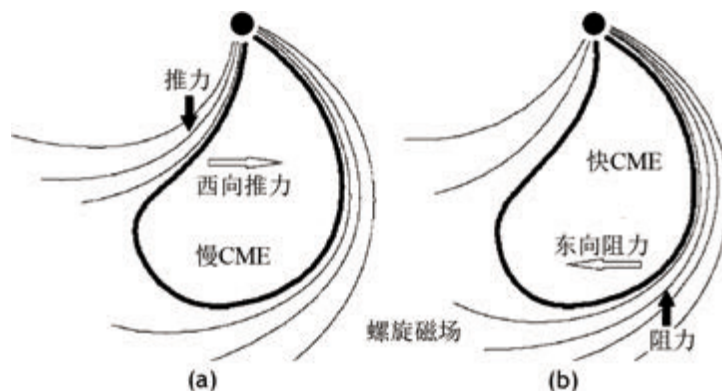


图 12 日冕物质抛射受背景太阳风影响发生偏转示意图<sup>[62]</sup>

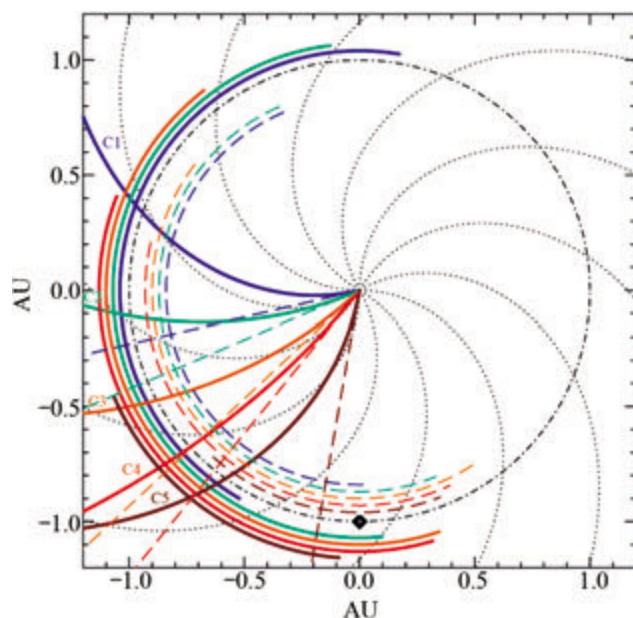


图 13 考虑偏转和不考虑偏转情况下 2005 年 9 月几次日冕物质抛射事件的对地有效性<sup>[61]</sup>

## 6 日冕物质抛射(激波)到达时间预报模式

日冕物质抛射何时到达地球是空间天气预报中的另一关键问题。现在,人们常采用一些基于动力学或磁流体力学的数值方法对日冕物质抛射(激波)的到达时间进行预报。常用的日冕物质抛射(激波)到达时间预报模式有以下4种。

### 6.1 激波到达时间(Shock Time Of Arrival, STOA)模型<sup>[27]</sup>

该模型为早期发展的预报激波到达时间的模型。模型以耀斑位置作为激波的源位置,通过 II 型射电暴的漂移频率获取激波的传输速度。在此基础上,以爆炸波理论为基础,通过求解 MHD 方程组来获取激波的传播过程。在此模型中,背景太阳风只随径向变化。该模型所需输入量为:(1)耀斑经度;(2)II 型暴开始时间;(3)耀斑持续时间;(4)背景太阳风速度(通过 1 AU 处的局地测量来获取太阳风参数);(5)II 型射电暴频率漂移率(激波传输速度)。该模型输出量为:(1)激波到达黄道面内任一位置的时间;(2)到达后的激波马赫数;(3)激波的传输时间。由于太阳高能粒子(solar energetic particles, SEP)比激波要先到达地球,秦刚等人<sup>[64]</sup>利用高能粒子的观测数据来判断激波能否到达地球。在此基础上,结合 STOA 模型,发展了 STSEP 和 STOASEP 来对激波能否到达地球以及何时到达地球进行预报。

### 6.2 行星际激波传播(Interplanetary Shock Propagation, ISPM)模型<sup>[28]</sup>

该模型假设注入太阳风的能量是驱动激波的关键参数,在此基础上,采用和 STOA 模型类似的边界条件,并考虑激波 RH 关系,以 MHD 数值模拟的方式讨论激波的传播过程。Webb 等人<sup>[65]</sup>于 2009 年进行的试验表明,ISPM 模型可以较好地预报激波的到达时间。该模型的输入量为:(1)耀斑经度;(2)II 型暴开始时间;(3)耀斑持续时间;(4)背景太阳风速度(简单的太阳风速度模型,其 1 AU 处太阳风速度为 360 km/s.);(5)II 型射电暴频率漂移率(激波传输速度)。输出量包括:(1)激波到达地球的时间;(2)激波传输时间;(3)激波达到时引起的动压跳变率;(4)激波强度指数。

### 6.3 HAF(Hakamada-Akasofu-Fry)模型

Hakamada 和 Akasofu<sup>[66]</sup>在 20 世纪 80 年代初首次提出了模拟太阳风的三维运动学模型,随后该模型进一步完善并发展成比较成熟的第一代 Hakamada-Akasofu-Fry 模型(HAFv1)<sup>[67]</sup>。该模型为运动学模型,现已发展为第二代(HAFv2)模型<sup>[68]</sup>,其输入参数包括:(1)由势场源表面(PFSS)模型得到的源表面磁场分布;(2)由 Wang-Sheeley-Arge (WSA)模式得到源表面的太阳风速度分布;(3)II 型射电暴频率漂移率(激波传输速度);(4)耀斑位置。HAFv2 的特点是采用经验的距离-时间关系,描述太阳自转导致以不同初始速度离开太阳源表面的粒子在行星际空间的相互作用。该模型输出量包括:(1)太阳风速度、密度、行星际磁场强度和极性;(2)激波到达时间。王传兵等人<sup>[69]</sup>于 2002 年改进 HAF 方法,使其可以更好地吻合日冕物质抛射传播方向的观测结果。进一步,冯学尚等人<sup>[70]</sup>于 2009 年利用数值统计方法,在 HAF 模型的基础上发展了 Database 方法。

该模型能用于模拟时变的非均匀高低速太阳风相互作用的背景结构以及由剧烈扰动引发的瞬变事件,HAFv2 被 NASA 确定为空间天气无畏计划的主要模型之一。同时,该模型也

可以用于研究无暴发事件发生时背景太阳风及其共转流相互作用区 (CIR) 等结构。McKenna-Lawlor 等人<sup>[71]</sup> 利用 HAFv2 模型, 对第 23 太阳周所有激波事件进行研究, 发现其预报精度仍较低, 且预报能力在不同太阳活动相位期间没有明显的差异。他们认为该模型的可靠性较低, 离实际应用尚有距离。

Fry 等人<sup>[29]</sup> 将 STOA, ISPM 和 HAFv2 模型对 173 个激波的到达时间预报与观测数据比较发现: 这三种模型对激波到达时间的预报没有本质的差别, 其预报的激波到达时间误差的 RMS 为 12 h; 对于扰动能否到达地球的预报存在较大的误差。表 2 给出了这几个模型对爆发于 1997 年 2 月至 2000 年 10 月的 173 个事件的预报结果及观测结果。可以看到, HAFv2 和 STOA 模型的预报更倾向于扰动能到达地球, 导致了误报率的增加; 而 ISPM 模型预报结果更倾向于日冕物质抛射不能到达地球, 这导致了漏报率的增加。

表 2 三种预报模型结果的比较<sup>[29]</sup>

| Observation | Forecast |     | STOA |    | ISPM |     | HAF |    |
|-------------|----------|-----|------|----|------|-----|-----|----|
|             | Yes      | No  | Yes  | No | Yes  | No  | Yes | No |
| Yes         | A        | c   | 53   | 15 | 36   | 32  | 58  | 10 |
| No          | B        | d   | 57   | 48 | 33   | 72  | 71  | 34 |
| Total       | a+b      | c+d | 110  | 63 | 67   | 106 | 129 | 44 |

#### 6.4 激波传播 (Shock Propagation Model, SPM) 模型

冯学尚等人<sup>[72]</sup> 从点源爆炸波在变密度、运动介质中传播的理论解析解出发, 借鉴 ISPM 模型中有关点源爆炸释放能量的经验估计方法, 并经大量观测事件的训练, 给出一种激波到达时间预报新方法——激波传播模型 (SPM)。该模型的输入参数包括太阳扰动的开始时间、X 级耀斑持续时间、初始激波速度、角宽度和背景太阳风速度, 可以输出相应激波传播到行星际空间任意径向距离处所需要的时间。对大量激波事件的预报试验表明, SPM 模型预报的绝对误差和相对误差都不大于其它国际流行预报模型 (如上述提到的 STOA、ISPM 和 HAFv2), 并且 SPM 模型本身是解析的, 一旦获取了输入参数便可以即时给出预报结果, 显示了其在空间天气实时预报中所具有的应用潜力。

## 7 基于三维磁流体力学的数值模拟方法

随着计算能力的不断提升以及对空间天气中基本过程的理解不断深入, 人们发展了各种各样的基于不同算法、网格、边界条件的描述日冕-行星际过程的三维磁流体力学 (Magnetohydrodynamics, MHD) 数值模型。这些模型主要包括 6 种。

### 7.1 空间天气框架模型

空间天气框架模型 (Space Weather Modeling Frame, SWMF)<sup>[73, 74]</sup> 由美国密西根大学牵头的空间环境建模中心 (Center for Space Environment Modeling, CSEM) 及其他十多家合作单位共同开发。该模型将不同区域的模型 (如日冕模型 (Solar Coronal models, SC)、太阳爆发事件

产生模型 (Eruptive Event models, EE)、内日球模型 (Inner Heliospheric models, IH) 等) 以标准接口耦合起来, 模块的运行和组合由 SWMF 控制。在空间天气框架模型中, 各模块可以串行运行, 也可并行运行。

## 7.2 混合日球层模型

混合日球层模型系统 (Hybrid Heliospheric Modeling System, HHMS)<sup>[75]</sup> 由美国国家海洋大气局下设的空间环境中心 (Space Environment Center, SEC) 等六家单位合作开发。混合日球层模型系统将势场源表面模型和 Han 的太阳风模型<sup>[76]</sup> 结合起来发展成为三维实时的太阳风模型, 可以利用由数值模拟得到的地球附近太阳风参数对地磁指数进行预报。

## 7.3 日冕-日球层模型

日冕-日球层模型<sup>[38, 77]</sup> (CORonal and HELiospheric model, CORHEL) 是集成空间天气建模中心 (Center for Integrated Space weather Modeling, CISM) 开发的空間天气耦合模型中的日冕和日球层模型。CORHEL 模型由日冕和日球层两个模型耦合而成, 日冕模型可以是 WSA 模式或 MAS (MHD-Around-a-Sphere model) 模型, 日球层模型则是 ENLIL (取自古代苏美尔人的风神之名) 模型。根据采用的日冕模型不同, 日冕-日球层模型分别被称为 WSA/ENLIL 和 MAS/ENLIL<sup>[78]</sup>。

## 7.4 Nakamizo 模型

日本九州大学、日本国家信息和通信技术研究院等单位发展了一个从日面出发的三维数值模型, 这个模型有以下特点: 在垂直于径向选择非结构化的网格, 网格的产生方法见 Nakamizo 等人 2009 年的文章<sup>[79]</sup>; 在径向上采用结构化网格, 径向范围为  $1 \sim 200 R_s$ , 使用 FVM 求解。这个模型将应用于日本国家信息和通信技术研究院开发的集成空间天气模拟系统。

## 7.5 太阳行星际守恒元模型

太阳行星际守恒元解元 (Solar InterPlanetary-Conservative Element Solution Element, SIP-CESE) 模型是我国空间天气学国家重点实验室的冯学尚等人<sup>[80, 81]</sup> 开发的从太阳表面出发直至行星际空间的三维数值模型。该方法实际计算中能够有效避免日地空间模拟中所涉及的球壳计算区域通常产生的极区奇性和网格收敛性问题。

## 7.6 日冕行星际模型

日冕行星际 (CORonal INterplanetary, COIN) 模型是中国空间天气国家重点实验室冯学尚等人<sup>[82]</sup> 开发的从太阳表面出发直至行星际空间的又一个三维数值模型, 这个模型也被称为区域组合模型。该模型将从日面到行星际空间的太阳风计算区域分为日冕区域 (大约为  $1 \sim 22 R_s$ ) 和行星际空间区域 ( $18 R_s \sim 1 \text{ AU}$ ) 两部分。沈芳等人<sup>[83-85]</sup> 对该方法进行了改进, 使用自治的源表面结构作为模型的初边值输入, 并对两部分区域进行了异步并行化处理。

以上简要列出了常用的各种行星际数值模型。日冕行星际过程的三维数值模型研究进展的详细情况和优劣性分析, 可参考冯学尚等人的文章<sup>[86]</sup>。上述基于磁流体力学 (MHD) 的三维数值模拟模型以光球层磁场观测作为磁场的边界条件, 根据不同的太阳风速度、密度、温度等边界条件求解磁流体力学方程组获得稳态的背景太阳风分布。在此基础上, 以不同的方



法加入日冕物质抛射或激波等扰动, 对日冕物质抛射和激波的传播过程等进行预报。这些模型在一定程度上能解释观测结果, 在太阳风速度、密度、总磁场的变化上具有较好的准确性, 但是对于各个磁场分量的变化趋势和大小的再现等问题, 仍需要进一步改进。需要指出的是, 受运行时间等因素的限制, 这些模型的预报结果均只与短期的观测或个例进行过对比。由于缺乏模型预报结果与实际观测的大量对比验证及不同模型预报结果的优劣比较, 这些模型的空间天气预报能力还需要进一步考察。

## 8 小 结

由于现有可用于行星际扰动参数获取和传播预报的模式较多, 本文只简单介绍和罗列了部分可用于预报和研究行星际背景参数和日冕物质抛射及其驱动激波传播参数的模式。在所列的模式中, 一些模式(如预报激波到达时间的 STOA 模型、ISPM 模型、HAF 模型及一些磁流体力学数值模拟模型)已被广泛用于空间天气预报的实际工作中。但是, 一些模式的精度和适用范围仍较低, 且与真实情况存在较大的偏差, 模式的适用价值仍需更进一步的验证; 同时, 一些模式没被应用到实际空间天气预报中, 其适用范围和应用效果需要进一步的检验。因此, 在广泛测试基础上建立和发展准确的、可用于预报的太阳风扰动传播模式仍是当前空间物理以及空间天气学研究中迫切需要解决的问题。

近年来, 随着观测手段的不断进步和发展, 我们对各种扰动在行星际空间中的传播有了进一步的认识。利用美国日地关系天文台 (STEREO) 卫星<sup>[87]</sup>, 人们实现了对日冕物质抛射及其他行星际扰动从太阳爆发阶段到传播至 1 AU 甚至更远处的直接成像观测。利用日地观测太阳动力学天文台 (SDO) 卫星<sup>[88]</sup>, 人们对太阳表面实现了高空间分辨率、高时间分辨率的观测, 从而对研究各种扰动的爆发过程更加深入, 而矢量磁场观测为建立更准确的背景太阳风和磁场模型提供了可能。计划中的美国 L5 点空间监测卫星、中国的夸父计划卫星<sup>[89]</sup>和太阳极轨望远镜 (SPORT) 卫星<sup>[55]</sup>等, 也将使得我们有机会更加深入地理解各种扰动在行星际空间中的传播过程, 为建立更加准确的空间天气预报模型提供基础。同时, 随着计算技术的不断发展, 各种数值模型在空间天气研究中的应用前景也越来越广, 一些利用数值模型对太阳活动及各种扰动进行预报的公司已经建立, 如美国的 Predictive Science<sup>①</sup>公司。

## 致谢

感谢中国科学院空间科学与应用研究中心冯学尚研究员的讨论。

## 参考文献:

- [1] Reames D V. Space Science Reviews, 1999, 90(3): 413

---

<sup>①</sup><http://www.preds-ci.com/corona/>



- [2] Gonzalez W, Joselyn J, Kamide Y, et al. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(A4): 5771
- [3] Zhang J, Dere K P, Howard R A, et al. *Astrophysical Journal*, 2003, 582(1): 520
- [4] Gui B, Shen C, Wang Y, et al. *Solar Physics*, 2011, 271: 111
- [5] Shen C, Wang Y, Gui B, et al. *Solar Physics*, 2011, 269(2): 389
- [6] Wei F, Dryer M. *Solar Physics* (ISSN 0038-0938), 1991, 132: 373
- [7] Zuccarello F P, Bemporad A, Jacobs C, et al. *Astrophysical Journal*, 2012, 744(1): 66
- [8] Wiegmann T, Sakurai T. *Living Reviews in Solar Physics*, 2012, 9: 5
- [9] Jiang C, Feng X, Wu S T, et al. *Astrophysical Journal*, 2012, 759(2): 85
- [10] Jiang C, Feng X, Xiang C. *Astrophysical Journal*, 2012, 755(1): 62
- [11] Altschuler M D, Newkirk G. *Solar Physics*, 1969, 9(1): 131
- [12] Schatten K H, Wilcox J M, Ness N F. *Solar Physics*, 1969, 6: 442
- [13] Zhao X, Hoeksema J T. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 19
- [14] Shen C, Wang Y, Ye P, et al. *Astrophysical Journal*, 2007, 670(1): 849
- [15] Solanki S K, Lagg A, Woch J, et al. *Nature*, 2003, 425(6959): 692
- [16] Tomczyk S, Card G, Darnell T, et al. *Solar Physics*, 2008, 247(2): 411
- [17] Wang Y M, Sheeley N R J. *Astrophysical Journal*, 1992, 392: 310
- [18] Wang Y M, Sheeley N R J. *Astrophysical Journal*, 1990, 355: 726
- [19] Wang Y M, Sheeley N R. *Astrophysical Journal*, 1995, 447: L143
- [20] Arge C, Pizzo V. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(A5): 10465
- [21] Hewish A, Scott P F, Wills D. *Nature*, 1964, 203(4): 1214
- [22] Asai K, Kojima M, Tokumaru M, et al. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103: 1991
- [23] Fujiki K, Ito H, Tokumaru M. TWELFTH INTERNATIONAL SOLAR WIND CONFERENCE. AIP Conference Proceedings Nagoya: STELab, 2010: 663
- [24] Balasubramanian V, Janardhan P, Srinivasan S, et al. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(A): 1121
- [25] Kojima M, Tokumaru M, Fujiki K, et al. *Astronomical & Astrophysical Transactions*, 2007, 26(6): 467
- [26] Priest E R. *Geophys. Astrophys. Monogr. (Dordrecht (Netherlands): D. Reidel)*, 1982: 21
- [27] Dryer M, Smart D. *Advances in Space Research*, 1984, 4(7): 291
- [28] Smith Z, Dryer M. *Solar Physics*, 1990, 129: 387
- [29] Fry C, Dryer M, Smith Z, et al. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(A2): 1070
- [30] Reiner M J, Kaiser M L, Bougeret J L. *Astrophysical Journal*, 2007, 663(2): 1369
- [31] Cho K S, Bong S C, Kim Y H, et al. *Astronomy and Astrophysics*, 2008, 491(3): 873
- [32] Shen C, Liao C, Wang Y, et al. *Solar Physics*, 2012, 282(2): 543
- [33] Xue X H, Wang C B, Dou X K. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(A): 8103
- [34] Zhao X P, Plunkett S P, Liu W. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(A): 1223
- [35] Xie H, Ofman L, Lawrence G. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: A03109
- [36] Zhao X P. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(A): 02101
- [37] Michalek G. *Solar Physics*, 2006, 237(1): 101
- [38] Taktakishvili A, Kuznetsova M, MacNeice P, et al. *Space Weather*, 2009, 7(3): S03004
- [39] Thernisien A F R, Howard R A, Vourlidas A. *Astrophysical Journal*, 2006, 652: 763
- [40] Thernisien A, Vourlidas A, Howard R A. *Solar Physics*, 2009, 256(1): 111
- [41] Thernisien A. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2011, 194: 33
- [42] Kaiser M L, Kucera T A, Davila J M, et al. *Space Science Reviews*, 2008, 136(1): 5
- [43] Shen C, Wang Y, Wang S, et al. *Nature Physics*, 2012: 1
- [44] Kilpua E K J, Pomoell J, Vourlidas A, et al. *Annales Geophysicae*, 2009, 27(1): 4491
- [45] Lugaz N, Farrugia C J, Davies J A, et al. *physics.space-ph*, arXiv.org, 2012
- [46] Vourlidas A, Colaninno R, Nieves-Chinchilla T, et al. *Astrophysical Journal*, 2011, 733(2): L23
- [47] Howard R A, Moses J D, Vourlidas A, et al. *Space Science Reviews*, 2008, 136(1): 67
- [48] Sheeley N R, Walters J H, Wang Y M, et al. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(A): 24739
- [49] Davis C J, Kennedy J, Davies J A. *Solar Physics*, 2010, 263(1): 209

- [50] Kahler S W, Webb D F. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(A): 09103
- [51] Lugaz N, Vourlidas A, Roussev I I. *Annales Geophysicae*, 2009, 27(9): 3479
- [52] Liu Y, Themisien A, Luhmann J G, et al. *Astrophysical Journal*, 2010, 722(2): 1762
- [53] Lugaz N. *Solar Physics*, 2010, 267(2): 411
- [54] Lugaz N, Hernandez-Charpak J N, Roussev I I, et al. *Astrophysical Journal*, 2010, 715(1): 493
- [55] Wu J, Sun W, Zheng J, et al. *Advances in Space Research*, 2011, 48(5): 943
- [56] Feng L, Inhester B, Wei Y, et al. *Astrophysical Journal*, 2012, 751(1): 18
- [57] Feng L, Inhester B, Mierla M. *Solar Physics*, 2013, 282(1): 221
- [58] Koning C A, Pizzo V J, Biesecker D A. *Solar Physics*, 2009, 256(1-2): 167
- [59] Mierla M, Inhester B, Marqué C, et al. *Solar Physics*, 2009, 259(1-2): 123
- [60] Filippov B P, Gopalswamy N, Lozhechkin A V. *Solar Physics*, 2001, 203: 119
- [61] Wang Y, Xue X, Shen C, et al. *Astrophysical Journal*, 2006, 646: 625
- [62] Wang Y, Shen C, Wang S, et al. *Solar Physics*, 2004, 222: 329
- [63] Gopalswamy N, Mäkelä P, Xie H, et al. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(A3): A00A22
- [64] Qin G, Zhang M, Rassoul H K. *J. Geophys. Res.*, 2009, 114(A9): A09104
- [65] Webb D, Howard T, Fry C, et al. *Solar Physics*, 2009, 256(1-2): 239
- [66] Hakamada K, Akasofu S I. *Space Science Reviews*, 1982, 31(1): 3
- [67] Akasofu S I, Fry C. *Planetary and Space Science*, 1986, 34(1): 77
- [68] Fry C D, Sun W, Deehr C S, et al. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(A): 20985
- [69] Wang C B, Zhao J K, Chen H H. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(6): 749
- [70] Feng X S, Zhang Y, Sun W, et al. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(A1): A01101
- [71] McKenna-Lawlor S M P, Fry C D, Dryer M, et al. *Annales Geophysicae*, 2012, 30(2): 405
- [72] Feng X, Zhao X. *Solar Physics*, 2006, 238(1): 167
- [73] Tóth G, De Zeeuw D L, Gombosi T I, et al. *Space Weather*, 2007, 5(6): 272, DOI: 10.1029/2006SW000272
- [74] Tóth G, Sokolov I V, Gombosi T I, et al. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(A12): A12226, DOI: 10.1029/2005JA011126
- [75] Detman T, Smith Z, Dryer M, et al. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(A7): A07102, DOI: 10.1029/2005JA011430
- [76] Han S, Wu S, Dryer M. *Computers & Fluids*, 1988, 16(1): 81
- [77] Luhmann J G, Solomon S C, Linker J A, et al. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, 66(1): 1243
- [78] Lee C, Luhmann J, Odstreil D, et al. *Solar Physics*, 2009, 254(1): 155
- [79] Nakamizo A, Tanaka T, Kubo Y, et al. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(A7)
- [80] Feng X, Zhou Y, Wu S. *Astrophysical Journal*, 2007, 655: 1110
- [81] Feng X, Yang L, Xiang C, et al. *Astrophysical Journal*, 2010, 723(1): 300
- [82] Feng X, Xiang C, zhong D, et al. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(7): 672
- [83] Shen F, Feng X, Wu S, et al. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(A6): 6109
- [84] SHEN Fang S W FENG XueShang. *SCIENCE CHINA Technological Sciences*, 2009, 52(10): 2895
- [85] Shen F, Feng X, Xiang C, et al. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2010: B1849
- [86] Feng X S, Xiang C Q, zhong D. *Sci Sin-Terrae*, 2011, 41(1): 1
- [87] Kaiser M, Kucera T, Davila J, et al. *Space Science Reviews*, 2008, 136(1-4): 5
- [88] Pesnell W, Thompson B, Chamberlin P. *Solar Physics*, 2012, 275(1-2): 3
- [89] Tu C Y, Schwenn R, Donovan E, et al. *Advances in Space Research*, 2008, 41(1): 190

## Research Progresses in Modeling the Propagation of Solar Wind Disturbances

SHI Liang-wen<sup>1</sup>, SHEN Cheng-long<sup>1</sup>, WANG Yu-ming<sup>1</sup>, SHEN Fang<sup>2</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Geospace Environment, Department of Geophysics and Planetary Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. SIGMA Weather Group, State Key Laboratory of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** With the development of observation technology, theoretical models and numerical simulation methods, people's understanding of solar wind disturbances, e.g., coronal mass ejections (CMEs), and their resultant space weather effects are continuously advanced. Various models have been developed to obtain the parameters of interplanetary magnetic field (IMF), solar wind plasma, CMEs, shocks, and other disturbances. These models have formed the necessary supports for space weather forecasting.

According to the function and purpose, these models could be classified as background IMF obtaining models, background solar wind obtaining models, CME kinematic parameters obtaining models, CME deflection models, CME (shock) propagation models and numerical MagnetoHydro-Dynamic (MHD) simulation methods. In this paper, we give a brief review of these models.

First, the background IMF models are introduced, such as the potential field source surface (PFSS) model and the current sheet-source surface (CSSS) model. Then, the Wang-Sheeley-Argé (WSA) model and the interplanetary scintillation (IPS) model, which could be used to get the background solar wind parameters, are also reviewed. In addition, the models to get the CME's propagation parameters are reviewed, for example: type II radio bursts model, various cone models, graduated cylindrical Shell (GCS) model and some triangulation models. It is important in space weather forecasting that if and when the solar wind disturbances will arrive at the Earth. In this paper, we show the coronal hole (CH) compression models, the magnetic energy density gradient models (MEDG) and the magnetic frozen-in models. These models could be used to forecast whether a CME would arrive at the Earth. In addition, we also introduce the shock time of arrival model (STOA), the interplanetary shock propagation model (ISPM), the Hakamada-Akasofu-Fry (HAF) model and the shock propagation model (SPM), which were developed to forecast solar wind disturbance arrival time. Finally, we give a brief review of MHD numerical simulation models about the propagation of the solar wind disturbance.

**Key words:** solar wind; coronal mass ejections; interplanetary space; space weather

# 太阳风扰动传输模式研究进展

作者:  
作者单位:  
  
刊名:  
  
英文刊名:  
  
年, 卷(期):

[史良文, 申成龙, 汪毓明, 沈芳, SHI Liang-wen, SHEN Cheng-long, WANG Yu-ming, SHEN Fang](#)  
[史良文, 申成龙, 汪毓明, SHI Liang-wen, SHEN Cheng-long, WANG Yu-ming\(中国科学院近地空间环境重点实验室, 中国科学技术大学 地球与空间科学学院, 合肥 230026\), 沈芳, SHEN Fang\(空间天气学国家重点实验室, 中国科学院 空间科学与应用研究中心, 北京 100190\)](#)

[天文学进展](#)

ISTIC

PKU

[Progress in Astronomy](#)

2013(3)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_twxjz201303002.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_twxjz201303002.aspx)