



李会超,张莹. 2019. 数据驱动的三维磁流体力学背景太阳风模拟研究进展. 地球物理学进展,34(4):1303-1313,doi:10.6038/pg2019CC0201. LI Hui-chao, ZHANG Ying. 2019. Advances in the data-driven three-dimensional magnetohydrodynamics ambient solar wind modelling. *Progress in Geophysics*(in Chinese), 34(4):1303-1313,doi:10.6038/pg2019CC0201.

数据驱动的三维磁流体力学背景太阳风模拟研究进展 Advances in the data-driven three-dimensional magnetohydrodynamics ambient solar wind modelling

李会超^{1,3},张莹^{2,3,4*} LI Hui-chao^{1,3}, ZHANG Ying^{2,3,4*}

1. 中国科学院国家空间科学中心,北京 100190

2. 中国科学院地质与地球物理研究所,地球与行星物理重点实验室,北京 100029

3. 中国科学院大学,北京 100049

- 4. 中国科学院地球科学研究院,北京 100029
- 1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4. Institutions of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

摘 要 三维磁流体力学背景太阳风模型是日地耦合过程研 究和空间天气数值预报的重要工具.该类模型的当前发展趋势 是数据驱动的太阳风三维磁流体力学模拟,其输入参数为随时 间变化的太阳连续观测,其模型输出为更接近真实的背景太阳 风的三维空间分布及其随时间的演化.本文总结了背景太阳风 的空间天气效应及其三维磁流体力学模型的作用和构成,综述 了数据驱动的背景太阳风三维磁流体力学模拟的近年研究进 展,展望了数据驱动模拟的未来发展方向. 关键词 磁流体力学;太阳风;数值模拟;数据驱动

中图分类号 P353 文献标识码 A doi:10.6038/pg2019CC0201 Abstract Three dimensional (3D) Magnetohydrodynamics (MHD) ambient solar wind model is a critical tool for solarterrestrial coupling process research and space weather forecast. Current development trend of such model is the data-driven 3D MHD ambient solar wind modelling, which uses continuously timevarying solar observations as input, and is able to generate 3D distribution of the ambient solar parameters and its time-dependent evolution. In this paper, the space weather effects of the ambient solar wind and the functions and ingredients of the 3D MHD ambient solar wind model are summarized. The research progress of the datadriven 3D MHD ambient solar wind model in recent years is reviewed. Discussion is made on further development of the datadriven model.

Keywords Magnetohydrodynamics; Solar wind; Numerical Simulation; Data-driven

0 引 言

空间天气,是指日冕、行星际、地球磁层、电离层和热层 中,可能对天基和地基技术系统产生危害,影响人类生存和 健康的状态(Schwenn, 2006).当今人类社会所高度依赖的 电能、通信、导航、航空等基础设施,都潜在地受到恶劣空间 天气的威胁(Eastwood *et al.*, 2017).美国甚至以总统行政命 令的方式,将应对极端空间天气事件威胁上升到国家战略的 高度(Obama, 2016).恶劣的空间天气由耀斑、日冕物质抛射 (Coronal Mass Ejection,简称 CME)等太阳爆发现象引起.在 这些爆发现象发生前,日地空间充满背景太阳风的等离子体 流.当爆发现象发生并向地球附近传播时,背景太阳风是这 些爆发现象传播的媒介.如果不能第一步准确预报背景太阳 风的状况,那么将更加不能准确预报随后发生的极端空间天 气事件(Pizzo et al., 2015).此外,背景太阳风中的流相互作 用区(Stream Interaction Region,简称 SIR)和高速流也有其本 身的空间天气效应.地球大气天气预报发展的经验表明,由 经验预报向基于物理数学理论和超级计算的数值预报的转

收稿日期 2018-09-11; 修回日期 2019-05-05. 基金项目 国家自然科学基金(41531073,41574171)资助.

投稿网址 http://www.progeophys.cn

第一作者简介 李会超,男,博士研究生,主要从事太阳风磁流体力学数值模拟研究.(E-mail: hcli@ spaceweather.ac.cn)

^{*} 通讯作者 张莹,女,副研究员,主要从事太阳风数值模拟研究.(E-mail: yzhang@ mail.iggcas.ac.cn)

变是提高预报能力的必由之路(Zeng, 2013; Bauer et al., 2015).本论文聚焦于背景太阳风数值研究和预报的工具——三维磁流体力学背景太阳风模型,介绍该模型的当前发展方向——数据驱动模型在近年来所取得的研究突破,并对其在未来的发展进行展望.

1 背景太阳风的空间天气效应

背景太阳风所携带的行星际磁场(Interplanetary Magnetic Field,简称 IMF)中,与黄道面垂直的分量一般较弱.然而,由于地磁场的偶极子轴向与黄道面的法向存在明显的夹角,且二者的相对位置会因地球的公转而发生变化,因此 IMF 平行于黄道面的分量能通过 Russell-McPherron 效应在 GSM 坐标系中产生 Z 方向的分量,使地磁活动数据中 出现一些年尺度的波动(Russell and McPherron, 1973; Lockwood *et al.*, 2016).

背景太阳风中具有更显著空间天气效应的,是 SIR 及其 后随的高速流.在 SIR 结构中,流界面(Stream Interface,简称 SI)处太阳风流的偏转会使行星际磁场产生一定的 B_2 分量, 当 B_2 为南向时,就会引发地磁暴.在 SIR 后面的高速流中, 存在着较强的阿尔芬波动,波动的时间尺度在几分钟到几小 时之间.这些波动会使高速流中产生一定的南向 B_2 分量,从 而单独引发地磁暴或加强 SIR 引发的地磁暴强度(Schwenn, 2006; Kilpua *et al.*, 2017). Alves 等(2006)对 1964—2003 年 的局地观测数据分析显示约三分之一的 SIR 引发了 Dst < -50 nT 的地磁暴. Kilpua 等(2017)对 2008 年后半年的地磁 数据和 L1 点太阳风数据的分析表明,所有的 SIR 都产生了 比较明显的地磁效应,但 SIR 期间 Dst 指数均未低于 -50 nT.

Zhang 等(2008) 通过对第 23 太阳活动周(1996-2005 年)观测数据和 HAF 模型模拟结果的综合分析发现,在太阳 活动下降期,相邻卡灵顿周(Carrington Rotation, 简称 CR)K。 指数间的相关性系数较高,说明这一时期的地磁活动主要由 复现的 SIR 引发. 由于 Russell-McPherron 效应的存在, SIR 的 对地效应在一年中的不同季节间存在系统性的差异. Richardson 和 Cane(2012) 通过分析 1964—2011 年的地磁和 太阳风数据发现,在太阳活动下降期的3~4年内,地磁暴主 要是由 SIR 和高速流产生的. 虽然 SIR 和高速流触发的主要 是中小地磁暴,但它们也能触发强地磁暴.此处所指的强地 磁暴,是在24h内最大K。指数大于8 且K。指数大于6 的时 间多于3个小时的地磁暴.此外,当CME与SIR、高速流接连 到达地球附近时,SIR、高速流还能加强 CME 产生的地磁暴 强度.由于 SIR 和高速流引发的地磁暴的持续时间一般比 CME 引发的长,从长期的累积效应上看,这类地磁暴会对神 舟载人飞船、天宫空间站等近地轨道飞行器产生更强的轨道 衰减效应(Chen et al., 2014).

背景太阳风也是影响 CME 传播的主要因素. Zhou 和 Feng(2013)对 CME 爆发的模拟显示,当 CME 的磁场结构与 日冕背景态磁场平行时, CME 爆发后将会向电流片方向偏 转;而当 CME 的磁场结构与日冕背景态磁场反平行时, CME 则会向极区方向偏转,进一步证实了之前观测分析的结论 (Wei and Dryer, 1991). CME 在行星际空间传播的过程中, 当其速度快(慢)于背景太阳风时,就会被背景太阳风减 (加)速(Jones et al., 2007; Byrne et al., 2010; Temmer et al., 2011).对于初始速度相同的 CME,当其传播路径上的 背景太阳风情况发生变化时,其从太阳传播到地球的渡越时 间就会发生明显的变化(Case et al., 2008). Owens 等 (2017)对400多个 CME 的观测分析表明,背景太阳风与 CME 的相互作用还可能使 CME 本身的结构发生变化.总 之,若对背景太阳风结构缺乏充分了解,就无法准确预报 CME 的空间天气效应(Lee et al., 2013; Cash et al., 2015; Pizzo et al., 2015).

2 三维磁流体力学太阳风模型的作用和构成

三维磁流体力学背景太阳风模型以磁流体力学方程组 为太阳风的物理模型,以计算磁流体力学为数值方法,以超 级计算机为计算工具,以数值计算结果的方式重现背景太阳 风,是空间天气学研究与应用的关键工具(Feng et al., 2011a, 2013a; Wu and Dryer, 2015).需要指出的是,当一个 三维磁流体力学背景太阳风模型建立后,引入适当的爆发产 生机制,就可以模拟 CME 事件的爆发和传播(Groth et al., 2000; Odstrcil, 2003; Zhou et al., 2012).限于篇幅和聚焦 点,本文不展开介绍 CME 模拟的内容.具体的,三维磁流体 力学太阳风模型的作用可以归纳为以下 3 个方面:

(1)三维磁流体力学太阳风模型是研究太阳风传播的 重要工具之一

受制于航天和观测技术,卫星观测仍有很大的局限. 首 先,卫星能够进行局地测量的空间范围有限,卫星仅在某一 些点和某一些轨迹上进行过系统探测. 其次,即便是在这些 有限的空间范围内,除了日地 L1 点外,其他点数据的时间连 续性较差,只有在有限的年份中,才有多颗卫星在多点进行 协同探测的机会. 再次,目前虽然能够通过一些观测分析技 术,对 EUV、白光亮度等遥感观测数据进行反演,得到一些物 理参数在日冕中的分布,但还没有能够通过遥感观测同时给 出所有太阳风参数在日冕中的完整三维分布的方法.

三维磁流体力学太阳风模型主要以太阳光球径向磁场 的全球概图为输入,模拟结果能够同时给出从太阳表面 (1Rs 附近, Rs 为太阳半径)或从日球基(0.1AU 附近, AU 为 天文单位)到行星际空间的所有太阳风参数的三维全球分 布,可以使研究者了解太阳表面的光球磁场结构与日冕中的 哪些结构相联系,而日冕中的磁场和等离子体结构在行星际 空间传播和演化后,怎样形成在局地时序数据中观察到的特 征结构.例如,在伪冕流最初的研究中,通过日冕仪观测数据 的分析及 Wang-Sheeley (WS) 经验模型的计算, Wang 等 (2007)认为伪冕流是快速太阳风的源区. 然而, 三维 MHD 太阳风模型的模拟结果和卫星局地观测数据的分析显示,行 星际空间中与伪冕流相联系的位置出现的是慢太阳风 (Riley and Luhmann, 2012). 根据伪冕流的数值模拟结果, Wang 等(2012) 找到了 WS 经验模型中存在的根本性问题: 使用源表面上的膨胀因子和 WS 模型计算太阳风速度,将会 错误的给出伪冕流处的太阳风速度.目前,虽然对于伪冕流 处产生的太阳风到底是经典的慢太阳风还是快、慢太阳风间 的中间态还存在争议,但似乎已经没有学者认为伪冕流处会 产生快太阳风(Fletcher et al., 2015).

(2)三维磁流体力学太阳风模型可用于特定条件下的 日地物理现象研究

利用三维磁流体力学太阳风模型,可以改变太阳的物理 参数,研究相应的变化规律.例如,在第23太阳活动周的下 降期和极小期,日冕和行星际太阳风结构相比前几个太阳活 动周的同一时期有较大的不同(Wang and Robbrecht, 2011): 极区冕洞的面积更小,低纬冕洞更频繁的出现,日冕和太阳 风的整体结构已经不是一个简单的偶极结构,电流片出现 比较大的弯曲,伪冕流使慢太阳风出现在了距离电流片较 远的位置. Yang 等(2011b) 对光球磁场概图中的极区磁场 进行了增强处理,在观测值的基础上叠加了一个分布为 $B_{*} = -6\sin^{7}\theta$ 的径向磁场. 将极区增强的磁场概图输入 MHD 太阳风模型后,模拟结果呈现了与前几个的太阳活动周极小 期较为相近的特征:极区冕洞增大,低纬冕洞及低纬高速流 几乎消失,电流片变得平直并回到赤道附近,慢太阳风仅出 现在电流片附近. Yang 等(2011b)的结果进一步证实,造成 第23太阳活动周下降期和极小期太阳风结构异常的一个原 因是较弱的极区磁场.

L1 点局地观测数据中,速度的增强可能由 SIR 或 CME 单独引起,也可能由二者共同引起.数值模型提供了一种识 别局地观测中速度增强原因的方法.例如,Zhang 等(2008) 使用 HAF 太阳风模型,获得了同一时期背景太阳风的模拟 结果和背景太阳风与 CME 扰动叠加的模拟结果.在观测中 出现速度增强的时间段内,如果只在背景模拟结果或扰动叠 加模拟结果中存在速度增强结构,则可判定观测中的速度增 强是由 SIR 或 CME 单独引起.而如果背景和模拟结果中均 存在速度增强,则观测中的速度增强来自于 SIR 和 CME 的 共同作用.通过这个方法,Zhang 等(2008)在 1996—2005 年 的 L1 点太阳风观测数据中识别出了 157 个仅由 SIR 引起的 速度增强,进而分析了 SIR 的对地效应.尽管 HAF 模型是运 动学而不是 MHD 太阳风模型,但由于其工作方式和 MHD 太阳风模型相似,因此 MHD 太阳风模型同样可以用于这方 面的研究.

(3)三维磁流体力学模型可用于空间天气数值预报

在电子计算机出现之前的 20 世纪初,大气数值天气预 报的先驱者 Richardson 曾经通过人力进行过数值天气试验 的初步尝试,但遭遇了严重的失败,使得当时的气象研究者 们对数值天气预报的未来发展基本不抱希望,还将使用数值 工具进行天气预报的愿景戏称为"Richardson 梦想".然而, 随着物理认识、数值方法和计算技术的发展,到 20 世纪 70 年代,数值模型的预报能力已经超过预报员根据经验进行预 报的能力.大气天气预报的发展经验表明,数值模型越早投 入业务预报,其性能就可以在研究与应用的相互促进间越早 得到提升(Zeng, 2013).

在空间天气领域,首个投入业务预报的数值模型是WSA-ENLIL 三维 MHD 太阳风模型(Millward et al., 2011).这个模型目前负责美国空间天气预报中心的近地太阳风参数预报工作,能够给出未来1~4 天的预报结果.可以期望三维 MHD 太阳风模型的能力也将不断发展提高,并在未来成为太阳风预报的主要工具.一个三维 MHD 太阳风模型,主要

由以下要素构成:

控制方程:控制方程是描述太阳风的基本物理模型.目前的磁流体力学背景太阳风模型大都采用单流体理想 MHD 方程组(Groth et al., 2000; Hayashi, 2013; Odstrcil, 2003; Feng et al., 2010)或电阻 MHD 方程组(Linker et al., 1999),也有分别计算电子和质子温度的尝试(van der Holst et al., 2010).太阳风的加速加热机制一般体现在 MHD 方程 的源项或附加方程中(Yang et al., 2011a).有些模型使用较为复杂的加热机制(van der Holst et al., 2014),有些模型则 使用相对简单的体积加热(Feng et al., 2010, 2011b, 2014a; Lionello et al., 2009; Nakamizo et al., 2009).

数值方法:采用数值求解 MHD 方程组的方法对方程组 进行差分后,才能进一步编程并运行程序.差分 MHD 方程组 的主要方法包含有限差分法、有限体积法和有限元法.在太 阳风模型中,应用最多的是有限体积法(Powell et al., 1999; Feng et al., 2003, 2011b; Tóth et al., 2012; Feng et al., 2014b; Zhang and Feng, 2015; Feng et al., 2017).解元-守恒 元格式(简称 CESE 格式)对有限体积法的概念进行了扩展, 通过时空统一的守恒关系求解流体、磁流体或其他任何可以 写成守恒形式的方程系统(Zhang et al., 2002; Jiang et al., 2012, 2010; Zhou and Feng, 2014; Wang, 2015; Yang et al., 2017),近年来在太阳风模型中得到了成功的应用(Feng et al., 2007, 2010, 2011b, 2012b, 2014a).在进行磁流体力学 模拟时,除了求解 MHD 方程组本身外,还要应用合理有效的 方法 控制 磁 场 散 度 误差(Tóth, 2000; Zhang and Feng, 2016).

网格系统:网格系统的功能是将连续的计算区域剖分成 分立的点,以便进行数值计算的.由于太阳是一球状物体,因 此太阳风模型中最常用的是球状网格.为了解决传统球状网 格的固有缺陷,近年来多片球状网格被应用到太阳风模型中 (Feng et al., 2010, 2011b, 2012b; Shiota et al., 2014).此 外,自适应网格技术也得到了一定应用(Feng et al., 2011b, 2012b, 2014a; Tóth et al., 2012).

初始条件:初始条件是在太阳风模型计算开始时给各个 网格点赋予的初值.目前,一般采用太阳风 Parker 解、PFSS 磁场外推给出定态太阳风模拟的初始条件.初始条件并不能 使系统达到平衡状态,因此要让模型进行一段时间的数值运算,松弛到定态后才能得到定态太阳风结果.松弛过程的中间态没有物理意义(Feng et al., 2010).在进行数据驱动模 拟时,定态太阳风解是时变的数据驱动模拟的初始条件 (Yang et al., 2012).

边界条件:太阳是日地空间环境变化的驱动源,太阳风参数变化的信息从靠近太阳的地方向远离太阳的地方传播.因此,内边界条件的处理对于得到与观测相符的太阳风解有着至关重要的作用.目前,太阳风模型的内边界一般设置于太阳表面附近或日球基附近(0.1AU附近).太阳表面附近的边界处理相对复杂,需要引入特征边界条件等方法耦合外部信息和计算区域内的信息(Mikić et al., 1999; Hayashi, 2005; Yang et al., 2012).日球基附近的边界处理则相对简单,直接给定全部参数即可(Odstrcil, 2003; Merkin et al., 2016).

编程实现:目前,太阳风模型使用的主流编程语言是 C

和 Fortran. 由于太阳风模型的计算量一般较大,因此需要在 并行计算机上运行,这时,也需要用到 MPI 等并行实现或 CUDA 等异构计算技术(Feng et al., 2013b). 要使太阳风模 型能够高效稳定运行、拥有较强的可扩展性,获得比较丰富 的科学产出和潜在的应用价值,需要在顶层设计和代码编写 中注重软件工程规范(Tóth, 2006).

结果后处理:要让太阳风模型的模拟结果进行有物理意 义的表达,需要对原始的模拟数据进行可视化,以概图、切面 图、局地时序图、磁力线等方式表示模拟结果.还可以通过模 拟结果正演日冕极化亮度,计算开、闭场的分布.

3 数据驱动模拟的基本概念

太阳风模型的基本输入是光球径向磁场概图. 传统的 CR 概图获取太阳光球全球磁场分布的方式是等待太阳在一 个 CR(27.275 天)内完成一次自转,将不同时刻从地球上或 日地连线上拍摄的日面磁图进行拼合. 获取 CR 概图的一个 假设是太阳光球磁场结构在一个 CR 内不发生明显的变化. 将这种磁图输入三维 MHD 太阳风模型后,进一步假设在整 个 CR 内太阳风结构不发生明显变化,通过松弛过程即可得 到整个 CR 内不随时间变化的太阳风定态结构(Feng et al., 2010; Meng et al., 2015). 然而,即便在太阳活动极小期,太 阳风结构在一个 CR 之内也会发生明显的变化. 因此采用定 态假设获得的结果虽然可以视作实际太阳风状态的平均近 似,但要更真实的重现日冕和行星际空间中的太阳风结构, 需要考虑模拟背景太阳风随时间的演化过程.

近年来,基于数据驱动的三维 MHD 太阳风模型取得了 一系列进展.数据驱动(Data-driven),是指将随时间变化的 太阳观测连续输入到模型中,驱动模型产生随时间变化的模 拟结果.相比基于定态假设的模型,数据驱动模型可以重现 日冕和行星际中的背景等离子体与磁场结构随时间演化的 过程,允许以不同速度传播的变化在行星际空间中相互作 用.此外,连续的数据驱动模拟可以保留日冕磁场演化的历 史信息,允许磁场自由能的积累,得到比定态模拟更明显的 非势场结构.数据驱动模拟的输入是随时间变化的磁场概 图,如 WSO 的天更新概图、GONG 台网的小时更新概图、 SOHO/MDI的天更新概图及 SDO/HMI 的天更新概图. 需要 指出的是,目前也有用随时间更新的某一副概图,生成定态 太阳风解的模拟(Wiengarten et al., 2013; Cash et al., 2015; Yalim et al., 2017). 这种模拟虽然没有使用 CR 平均的概 图,但由于其给出的模拟结果是定态的而不是时变的,因此 只能被纳入数据约束(Data-constrained)模拟的范畴.

数据驱动太阳风模型和定态太阳风模型有着一定的承 继关系.两者相比,数据驱动模型的改进主要集中在边界条 件的处理上.数据驱动太阳风模型之所以可以得到随时间变 化的太阳风模拟结果,就是因为由观测确定的、有物理意义 的扰动从边界处源源不断地输入到计算区域中,引发计算区 域内太阳风结构的变化.而数据驱动模型实现的难点也在边 界条件的处理上,如何将新的观测信息与计算区域内的状态 自洽耦合、如何在更新边界上物理量的同时不引发数值不稳 定性,都是模型研发过程中需要解决的问题.

4 数据驱动模拟的研究进展

按照内边界设置位置的不同,数据驱动的背景太阳风模型可以分为两类. 一类模型的内边界位于日球基, 一般在0.1 AU以上(Zhao and Hoeksema, 2010). 在这里,太阳风的加速过程已经基本完成,超磁声速的物理特性使得边界上的所有物理量都可以直接给定,无需考虑计算区域内的信息. 另一类模型的内边界位于太阳表面(1Rs)附近,通过 MHD模拟生成日冕和行星际的磁场与太阳风结构,能够对日冕结构的演化和日冕-行星际间的联系进行更深入的研究,但这类模型的边界处理更加复杂.

4.1 日球基至行星际空间的太阳风模拟

Hayashi(2012)模拟了从 50Rs 到 1250Rs 的行星际空间 中的太阳风结构. 位于 50Rs 的内边界上的速度信息由行星 际闪烁(IPS)观测推出的太阳风速度分布提供.内边界的磁 场信息由 WSO 光球磁场概图和 PFSS 外推给出. 为了避免变 化的径向磁场在内边界引入磁场散度误差, Hayashi (2012) 令内边界上磁场三分量的变化量符合势场假设,通过已知的 径向磁场变化量和势场问题,求出切向磁场的变化量.这个 工作使用的观测输入是 CR 平均的光球磁场概图和 IPS 速度 概图,但因其让模型在两个 CR 概图之间进行时变的演化, 生成的是时变而不是定态太阳风结果,因此将其归入数据驱 动太阳风模型的范畴.使用该模型, Hayashi (2012)模拟了 CR1841 到 CR1849 的太阳风状态,与局地观测数据的对比表 明模型较好的重现了太阳风变化.此外,该工作还用一个简 单的对流方程展示了数据驱动模型对于外日球层模拟的重 要性.由于太阳风速度是有限的,随着日心距离的增加,慢太 阳风和快太阳风所影响的范围将逐渐分离,外日球层中的太 阳风状态决定于不同时刻从太阳上涌出的太阳风.因此,必 须引入数据驱动的时变太阳风模拟,才能真实的刻画这个物 理性质.

Merkin 等(2016)使用 LFM-helio 三维 MHD 太阳风模 型,模拟了从 21.5 Rs 到 221.5 Rs 间的行星际太阳风结构在 2008年1月至 2008年2月的时变演化. LFM-helio 模型以 ADAPT 模式(Arge et al., 2010)处理生成的光球磁场概图为 观测输入,使用 PFSS-WSA 经验日冕模式(Arge et al., 2003; McGregor et al., 2011) 给出位于 21.5 Rs 的内边界上的径向 磁场和径向速度分布.内边界上的切向速度和切向磁场由共 转关系给出,密度和温度由经验关系给出.在进行数据驱动 模拟时,磁图的输入时间间隔为1天.为了避免磁场的变化 在模型的内边界上引入磁场散度误差, Merkin 等(2016)首 先求出与径向磁场变化对应的切向电场,再根据切向电场对 切向磁场进行修正. 模拟结果与 L1 点局地观测及 STEREO-A、STEREO-B、MESSENGER 卫星的局地观测的对比表明,太 阳风中的高速流、SIR 等特征结构,在不同日心经度有着不 同的具体表现.相比定态模拟结果,数据驱动模拟结果更好 的重现了同一特征结构在不同日心经度的局地数据中的差 异,还出现了行星际空间中磁力线的折叠等新现象.

Linker 等(2016)使用 MAS-H 三维 MHD 太阳风模型,模 拟了从 30 Rs 到 230 Rs 间的行星际太阳风结构在 2003 年 9 月 27 日至 2004 年 9 月 27 日间的时变演化. MAS-H 模型使



图 2 Feng 等(2015)模拟结果中 L1 点模拟结果与 OMNI 局地观测数据的对比 图中的红线为观测数据,蓝线为模拟结果.从左上到右下,对比的变量分别为数密度、径向速度、总磁场强度、南北向磁场和温度. Fig. 2 Comparison between simulated results and OMNI data at the L1 point in Feng *et al* (2015) The red lines are OMNI in situ measurements, and the blue lines represent simulated results. From top left to bottom right, the parameters are the proton number density, radial bulk speed, total magnetic field strength, north-south component magnetic field and the temperature.



图 3 NOAA11032 活动区的磁场结构 上面一行为数据驱动的 MHD 模拟结果,下面一行为 PFSS 外推结果.由图对比 可见 MHD 模拟结果中出现了较明显的非势场结构.本图摘自文献 Feng 等(2017). Fig. 3 3D magnetic field lines starting from the NOAA 11032 active region The MHD simulation results driven by the above behavioral data and the PFSS extrapolation results of the next behavioral data.

In MHD results, obvious non-potential structures are presented. This figure is adopted from Feng et al (2017).



图 4 2008 年 L1 点观测数据与 CESE-HLL 模型数据驱动模拟结果中的 SIR

第一行为速度观测数据,SIR 的流界面位置以蓝色实线标出. 第二行为速度模拟结果,模拟结果中的流界面及与之对应的 观测流界面位置分别以红色实线和蓝色虚线标出. 本图摘自 Li 和 Feng(2018).

Fig. 4 The position of SIRs during Year 2008 The black line represents the variation of solar wind speed from OMNI data (first row) and CESE-HLL data-driven simulated results (second row). In the first row, the blue solid lines mark stream interfaces of the SIRs from observation. In the second row, the blue dashed lines indicate stream interfaces of the SIRs from the model, and the red solid lines mark the matching stream interfaces from observation. This figure is adopted from Li and Feng (2018).

用的观测输入是 ADAPT 模式产生的每天更新的磁场概图. 在位于 30 Rs 的内边界上, 径向速度和径向磁场分布由 PFSS-WSA 经验模式给出(Arge *et al.*, 2003; McGregor *et al.*, 2011),密度由动量通量守恒给出,温度由热压平衡关 系给出(Riley et al., 2001).内边界上的切向速度和切向磁场,由 Lionello等(2013)详细描述的日冕-行星际耦合方法给出.模拟结果与L1点局地观测数据的比较表明,模型较好的重现了太阳风的大尺度结构.在时变模拟结果的全球结构中,出现了磁力线在行星际空间中的重联和新的流动结构在行星际空间中的形成等定态模拟结果中未观察到的现象.

4.2 太阳表面至行星际空间的太阳风模拟

太阳表面至行星际空间的太阳风模型,内边界位于亚磁 声速区.根据特征理论,必须自治地将计算区域内的信息和 观测输入耦合起来,才能稳定地更新边界上的物理量.这类 模型需要采用性能较好的数值格式,从而能在日冕的低等离 子体β环境下稳定计算;需要引入合理的太阳风加速加热机 制,来产生结构分明的快慢太阳风流.此外,这类模型所耗费 的计算资源较大.

目前,这类模型使用的数据源也是时变的光球径向磁场 概图.Yeh和Dryer(1985)的研究发现,当球面上的发生变化 时,球面上其他量的演化必须满足方程(1)才能保证不在球 面上引入磁场散度误差,即:

$$\frac{\partial B_r}{\partial t} = -\left(\nabla \times \boldsymbol{E}_t\right) \cdot \boldsymbol{r} , \qquad (1)$$

式中下标 t 表示在切向(θ, φ)方向上的分量, $E_t = (E_{\theta}, E_{\varphi})$,r为径向单位向量. 然而,单靠径向磁场 B_r 随时间变化的信息 不能解出两个方向的切向电场. 在使用 MAS 模型进行日冕

演化模拟时, Mikić等(1999)提出了一种用 $\frac{\partial B_t}{\partial t}$ 求解 E_t 的方法: 对 E_t 做一赫姆霍兹分解, 即:

 $E_{t} = \nabla_{t} \times \Psi r + \nabla_{t} \Phi ,$ (2)其中, ∇ , ϕ 成分在带入方程(1)后因 $\nabla \times \nabla$, ϕ =0 而消夫,因 此这部分电场信息与径向磁场变化无关.由于没有额外的观 测信息来确定 Φ ,故将其略去.之后,通过求解泊松方程 $\nabla^2 \Psi$ $=\frac{\partial B_{t}}{\partial t},即可求解出 \Psi,进而可以通过 E_{t} = \nabla_{t} \times \Psi r$ 解出电场 E_{t} ,即 E_{θ} 和 E_{ϕ} 的值.通过理想 MHD 关系 $E_{t} = -(v \times B)_{t}$,满 足方程(1)的 E, 可以为边界上速度和切向磁场的演化提供 两个限制. 仅使用 $\frac{\partial B_{t}}{\partial t}$ 和 E_{t} 提供的信息,仍不足以更新边界 上的 8 个 MHD 变量. 在 Mikić等(1999)中,内边界上的密度 和压强给成不变的均一值,而对于边界处理所需要的其他条 件只给出了"求解特征方程"这样模糊的描述,没有给出特 征方程的具体差分方法,其他研究者很难按照 Mikić等 (1999)的描述在自己的模型中实现数据驱动模拟. Yang 等 (2012)应用投影特征边界方法,首次以"菜谱式"的方式给 出了太阳表面数据驱动的边界处理方法.除了采用和 Mikić 等(1999)相同的方法由 $\frac{\partial B_{t}}{\partial t}$ 解出 E_{t} 外, Yang 等(2012)还采 用了熵守恒条件和由 Ulysses 观测确定的质量通量限制条件 (Hayashi, 2005),确定了另外两个物理限制.在投影特征方 法中,计算区域内的信息由从计算区域内向计算区域外传播 的外行波所对应的特征方程提供.在太阳表面,由于太阳风 径向速度一般较小,波速为 $v_r - c_f, v_r - c_s$ 和 $v_r - c_s$ 的特征波 均为朝向太阳传播的外行波 (c_f, c_s) 为快、慢磁声波速, c_s 为 阿尔芬波速度),因此 Yang 等(2012)使用了这三个特征波 对应的特征方程.最终,五个物理限制和三个特征方程自治 地将观测信息和计算区域内的信息融合,共同更新边界上的 物理量(Feng et al., 2012c).

为了对数据驱动方法进行验证, Yang 等(2012) 以每天 更新的 WSO 光球径向磁场概图作为观测输入,使用 SIP-AMR-CESE 三维 MHD 太阳风模型(Feng et al., 2012b) 和数 据驱动边界处理方法,模拟了 2007 年日冕磁场和太阳风结 构的演化,并将模拟结果与多种遥感观测数据做了对比:模 拟结果中开放磁力线区域在太阳表面的分布与 STEREO-A 飞船 EUVI 仪器的 195 A 观测进行了对比;模拟结果在 2.5 Rs上的密度、速度结构与 SOHO 飞船 LASCO C2 日冕仪白光 观测概图进行了对比;模拟结果正演的 Pb 亮度及模拟结果 的磁力线结构与 MLSO Mark-IV 日冕仪及 SOHO 飞船 LASCO C2 日冕仪的 Pb 亮度观测进行了对比. 对比表明,模拟结果 较好地重现了冕洞的大小和分布、冕流带的位置和形状、快 慢太阳风分布等大尺度日冕结构.由于这个工作的模拟区域 仅限于1 Rs 到 27 Rs 的日冕,因此无法将模拟结果与局地观 测直接对比. 但 Yang 等(2012) 通过将日地 L1 点和 Ulysses 卫星的局地观测沿 Parker 螺旋线反推回 0.1 AU 的方式,将 日冕模拟结果与行星际局地观测进行了间接的对比,发现模 型较好的重现了卫星局地观测中的太阳风结构.此外,数据 驱动模拟结果和定态模拟结果的比较表明,数据驱动模拟结 果中的磁场非势结构更加明显,日冕磁场拥有了更多自 由能.

目前,所有的天基和地基太阳磁场观测设备都只能从地

球附近进行观测,无法在磁场概图中更新太阳背向地球区域的磁场.因此,目前使用的磁场概图实际上与同一时刻光球 全球磁场实际的瞬时状态不完全相符.为了弥补了光球磁场 概图中部分数据不能及时更新的缺陷,Feng等(2012a)使用 光球通量传输模型(SFT)(Mackay and Yeates, 2012)生成了 1996年9月4日至10月29日间的光球磁场瞬时分布序列, 用生成的光球磁场数据驱动日冕 MHD 模型,模拟了该段时 间内从1 Rs 到35 Rs 的日冕磁场和太阳风结构.与 SOHO/ EIT、MLSO和 SOHO/LASCO等仪器获取的观测图像的对比 表明模拟结果正确的产生了冕流、冕洞等大尺度结构随时间 的演化过程.同时,在活动区之上,模拟结果中存在较为明显 的非势场结构.

Feng 等(2015) 将时变模拟的区域由日冕扩展到了从1 Rs 到1 AU 的整个日地空间,使用6h更新的 GONG 光球磁 场概图和投影特征边界条件方法驱动模型,模拟了2008年7 月1日至8月11日间的太阳风演化.对于输入磁图,首先根 据不同纬度上的太阳较差自转速度对磁图进行修正,使之更 接近真实的光球径向磁场分布.由于磁图输入的时间间隔一 般要比模型计算时间步长大,因此在计算过程中要以一定方 式计算两幅磁图之间的光球径向磁场中间态.在 Yang 等 (2012)的工作中,采用了简单的线性插值获取这个中间态, 而 Feng 等(2015)则采用了更加精确的三阶插值来获取中间 态. Feng 等(2015)还在内边界上径向磁场、密度或压强较小 的地方采取了一系列特别的处理措施,使内边界上物理量的 演化过程更加稳定.模拟结果与遥感、局地观测间的对比表 明模拟结果不但重现了日冕的大尺度结构,还较好地重现了 地球附近的局地太阳风观测. 阿尔芬临界面的高度对于太阳 风加速加热的研究有着重要的意义. Feng 等(2015)的模拟 结果表明,在与极区冕洞相关的区域,阿尔芬临界面的高度 在9~12 Rs;在与冕流相关的区域,阿尔芬临界面的高度在 4~15 Rs.

在利用 GLM-MHD 方程和一种路径守恒的 Godunov 类 解子建立一个新的三维太阳风模型的工作中, Feng 等 (2017)也采用了数据驱动的边界处理方法,从而使这个新 建立的模型具备了进行数据驱动模拟的能力.为了验证模型 性能, Feng 等(2017)以6 h 更新的 GONG 光球磁场概图为输 入,模拟了 2009 年 10 月 9 日至 12 月 29 日 1 Rs 到 6.61 Rs 间磁场和太阳风的演化过程.相比 PFSS 外推给出的结果,数 据驱动 MHD 模拟结果中 NOAA11032 活动区所在位置出现 了更强的非势结构.

Hayashi(2013)基于投影特征边界处理方法,以 CR 更新的 SOHO/MDI 光球磁场概图为输入,使用了质量通量限制和熵守恒等物理约束条件,给出了一种数据驱动的边界处理方式.与 Yang 等(2012)不同的是,Hayashi(2013)假设边界上的电场为 0.为了避免边界演化产生磁场散度误差,在内边界处理中,通过光球径向磁场的变化量求解势场问题,得出三维磁场的变化量来更新内边界上的磁场.Hayashi(2013)模拟了 1 Rs 到 250 Rs 的背景太阳风在 CR2009 至 CR2010 间和 CR2074 至 CR2075 间的演化,得到了日冕磁力线的细编等定态模拟结果中没有的现象.

5 小结与展望

三维磁流体力学背景太阳风模型是研究太阳风传播的 重要工具之一,可用于特定条件下的日地物理现象研究和空 间天气数值预报.数据驱动的三维磁流体力学背景太阳风模 型将随时间变化的太阳观测连续输入到模型中,驱动模型产 生随时间变化的模拟结果,更真实地重现时刻处于演化中的 日冕和行星际太阳风状态.第4节中所综述的两类数据驱动 模型具有各自的优势和特色:内边界位于日球基的模型实现 相对简单,有望尽快投入实用,而内边界位于太阳表面的模 型有更大的科学价值和发展空间.目前,两类模型都已经建 立了可行的数据驱动方法,均能在一些时期产生与行星际局 地观测相符的大尺度太阳风结构.内边界位于太阳表面的模 型还能在日冕中产生与遥感观测相符的大尺度结构和比定 态模拟结果更明显的非势结构.

展望未来,数据驱动的三维磁流体力学太阳风模型的进 一步研究有望在以下方面取得进展:

(1)利用更加丰富的实际观测数据作为模型的驱动源. 目前,数据驱动模型使用的观测输入只有光球径向磁场的全 球概图.近期,光球矢量磁场(即磁场三分量 $B_r, B_{\theta}, B_{\phi}$)的全 球概图已经开始产生(Liu *et al.*, 2017).两艘 STEREO 飞船 在不同角度对太阳的 EUV 观测使密度、温度在日冕底部的 三维分布反演成为可能(Frazin *et al.*, 2009; Vásquez, 2016).因此,在进一步的工作中,为了给模型提供更接近实 际的边界条件,以期产生更加接近物理实际的模拟结果,需 要考虑使用这些观测信息驱动模型运行的方法.

(2)完善模型所用的物理过程.对于背景太阳风研究, 一个尚没有搞清的问题是日冕加热和太阳风加速的确切机 制.研究者们提出了波动/湍流加速、重联/冕环开放、色球质 量供给等理论来解释日冕加热/太阳风加速过程,但每种理 论都只能解释一部分观测现象,且将它们应用到实际观测驱 动的三维 MHD 背景太阳风模型还存在障碍(Cranmer *et al.*, 2017).此外,背景太阳风模型中开放磁通量相对观测偏低, 可能是由于当前的背景太阳风模型中还没有包含全部产生 开放磁通量的物理过程(Linker *et al.*, 2017).未来,Parker Solar Probe 和 Solar Orbiter 等飞船将对日冕中的太阳风和磁 场进行局地观测,有望使日冕加热/太阳风加速研究获得新 的进展,产生更自治、更普适且能应用于三维 MHD 模型中的 物理理论,推动数据驱动的三维 MHD 太阳风模型产生更接 近实际的结果.

(3)建立模型能力的客观评价体系. 当模型进行一定的 改进后,模型对局地太阳风的重现能力是否获得了提升、获 得了多大提升,需要用定量的评估方法为模型"打分",才能 获得相应的结论.模型能力的定量评估指标,也可以作为不 同模型能力比对的依据.在太阳风模型被应用到实际的空间 天气业务预报中时,预报员可以根据这些定量指标掌握模型 的误差水平,并在进行预报时加以考虑修正(Spence *et al.*, 2004; Siscoe *et al.*, 2004).目前,已经有对定态模型的系统 性评估工作(MacNeice, 2009; Gressl *et al.*, 2014; Jian *et al.*, 2015),可将这些工作中建立的定量评估方法应用到数 据驱动模型的评估中.Li 和 Feng(2018)使用数据驱动的 CESE-HLL 太阳风模型模拟了 2008 年背景太阳风从太阳表 面到地球附近的时变演化,进行了模拟结果定量评估的初步 尝试.图4给出了从L1点的太阳风速度观测数据和 CESE-HLL 模型速度模拟结果中识别出的 SIR 结构.通过模拟结果 捕获和误报 SIR 的比例,及预报 SIR 到达时间的误差,可对 模型模拟 SIR 的能力做出定量评估.

(4)明晰模型中各个因素对模拟结果的影响.在数据驱 动模型中,数据源、数值格式、网格分辨率、加速加热方法等 方面的因素,都会对模拟结果产生影响.目前,尚没有建立对 这些因素的变化对模拟结果影响程度的理性认识,获得与观 测相符的结果一定程度上依靠的是调试经验.在大气气象和 气候预报中,集合预报方法已经得到了广泛而成功的应用 (Leutbecher and Palmer, 2008; Bauer et al., 2015). 为了反 映模型各个因素对模拟结果(也即预报)带来的不确定性, 集合预报对这些因素分别进行改动,用各个改动后的模型制 作一系列预报,来改进模型的预报效果.更重要的是,集合预 报可以将各个因素带来的不确定性进行量化,从而明确每个 因素对模型的结果的影响程度(Cloke and Pappenberger, 2008). 在进一步的工作中,应首先利用太阳风模拟结果定量 评估的有关方法(Jian et al., 2015)对模型的现有能力做出 客观评价,再利用定量评估方法为集合预报计算误差指标, 建立数据驱动的太阳风集合预报方法,搞清模型中各个因素 对模拟结果的影响程度. 近期, Owens 和 Riley (2017) 给出了 一种用较小的计算量获取较大集合预报数量的方法,为在现 有计算资源条件下开展太阳风集合预报提供了一种思路.

(5)发展实用化的数据驱动太阳风模型.从本文综述的 研究结果来看,数据驱动太阳风模型已经初步具备了可靠重 现大尺度太阳风结构的能力,有了由研究工具向应用产品转 化的可能.在转化过程中,要对模型的软件架构设计进行重 构,对模型的编码进行进一步规范,对模型的并行运行效率 进行调优,对模型的容错能力进行加强,形成自动化程度高、 人工干预少、能在可用计算资源上高效运行的实用太阳风数 值模式.同时还可以借鉴气象预报的经验,根据空间天气预 报工作的实际需求,设计数据分析方法和模式检验流程.这 样的转化工作既需要理解模型本身的科学内涵,又需要了解 业务预报的工作模式,还需要软件设计、高性能计算等方面 的能力支撑,是一项多学科、综合性、系统性的工作.此外,对 于地球附件的空间天气状况预报,CME 起着至关重要的作 用. 业务预报所使用的模型必须将 CME 爆发模型和背景太 阳风模型相结合,才能进行日常预报工作.限于篇幅和主题, 本文未对 CME 的 MHD 数值模拟进行详细的介绍,感兴趣的 读者可以参考有关文献 (Shen et al., 2014; Cash et al., 2015; Zhou and Feng 2017; Jin et al., 2016).

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力 支持!

References

Alves M V, Echer E, Gonzalez W D. 2006. Geoeffectiveness of corotating interaction regions as measured by Dst index [J]. Journal of Geophysical Research (Space Physics), 111 (A7), doi: 10. 1029/2005JA011379.

- Arge C N, Henney C J, Koller J, et al. 2010. Air Force Data Assimilative Photospheric Flux Transport (ADAPT) Model [A]. AIP Conference Proceedings, 1216: 343-346, doi: 10.1063/1. 3395870.
- Arge C N, Odstreil D, Pizzo V J, et al. 2003. Improved Method for Specifying Solar Wind Speed Near the Sun [A]. AIP Conference Proceedings, 679(1)190-193, doi: 10.1063/1.1618574.
- Bauer P, Thorpe A, Brunet G. 2015. The quiet revolution of numerical weather prediction [J]. Nature, 525: 47-55, doi: 10.1038/ nature14956.
- Byrne J P, Maloney S A, McAteer R T J, et al. 2010. Propagation of an Earth-directed coronal mass ejection in three dimensions [J]. Nature Communications, 1: 74, doi: 10.1038/ncomms1077.
- Case A W, Spence H E, Owens M J, et al. 2008. Ambient solar wind's effect on ICME transit times [J]. Geophys. Res. Lett., 35(15); L15105, doi: 10.1029/2008GL034493.
- Cash M D, Biesecker D A, Pizzo V, et al. 2015. Ensemble Modeling of the 23 July 2012 Coronal Mass Ejection [J]. Space Weather, 13 (10): 611-625, doi: 10.1002/2015SW001232.
- Chen G M, Xu J Y, Wang W B, et al. 2014. A comparison of the effects of CIR-and CME-induced geomagnetic activity on thermospheric densities and spacecraft orbits: Statistical studies [J]. Journal of Geophysical Research (Space Physics), 119(9): 7928-7939, doi: 10.1002/2014JA019831.
- Cloke H L, Pappenberger F. 2008. Evaluating forecasts of extreme events for hydrological applications: an approach for screening unfamiliar performance measures [J]. Meteorological Applications, 15(1): 181-197, doi: 10.1002/met.58.
- Cranmer S R, Gibson S E, Riley P. 2017. Origins of the Ambient Solar Wind: Implications for Space Weather [J]. Space Sci. Rev., 212 (3-4): 1345-1384, doi: 10.1007/s11214-017-0416-y.
- Eastwood J P, Biffis E, Hapgood M A, et al. 2017. The economic impact of space weather: Where do we stand? [J]. Risk Analysis, 37(2): 206-218, doi: 10.1111/risa.12765.
- Feng X S, Jiang C W, Xiang C Q, et al. 2012a. A data-driven model for the global coronal evolution [J]. Astrophys. J., 758(1): 62, doi: 10.1088/0004-637X/758/1/62.
- Feng X S, Li C X, Xiang C Q, et al. 2017. Data-driven Modeling of the Solar Corona by a New Three-dimensional Path-conservative Osher-Solomon MHD Model [J]. Astrophys. J. Suppl. Ser., 233: 10, doi: 10.3847/1538-4365/aa957a.
- Feng X S, Ma X P, Xiang C Q. 2015. Data-driven modeling of the solar wind from 1 Rs to 1 AU [J]. Journal of Geophysical Research (Space Physics), 120(12):10159-10174, doi:10.1002/2015JA021911.
- Feng X S, Wu S T, Wei F S, et al. 2003. A Class of TVD Type Combined Numerical Scheme for MHD Equations With a Survey About Numerical Methods in Solar Wind Simulations [J]. Space Sci. Rev., 107(1-2): 43-53, doi: 10.1023/A:1025547016708.
- Feng X S, Xiang C Q, Zhong D K. 2011a. The state-of-art of threedimensional numerical study for corona-interplanetary process of solar storms [J]. Sci Sin-Terrae (in Chinese), 41(1): 1-28.
- Feng X S, Xiang C Q, Zhong D K. 2013a. Numerical study of interplanetary solar storms [J]. Sci Sin-Terrae (in Chinese), 43 (6): 912-933.
- Feng X S, Xiang C Q, Zhong D K, et al. 2014a. SIP-CESE MHD model of solar wind with adaptive mesh refinement of hexahedral meshes [J]. Computer Physics Communications, 185 (7): 1965-1980, doi: 10.1016/j.cpc.2014.03.027.
- Feng X S, Yang L P, Xiang C Q, et al. 2012b. Validation of the 3D AMR SIP-CESE Solar Wind Model for Four Carrington Rotations [J]. Solar Phys., 279(1): 207-229, doi: 10.1007/s11207-012-9969-9.
- Feng X S, Yang L P, Xiang C Q, et al. 2012c. Numerical Study of the Global Corona for CR 2055 Driven by Daily Updated Synoptic Magnetic Field [A]. Numerical Modeling of Space Plasma Slows (ASTRONUM 2011) [C]: 202-208.
- Feng X S, Yang L P, Xiang C Q, et al. 2010. Three-dimensional solar wind modeling from the Sun to Earth by a SIP-CESE MHD model

with a six-component grid [J]. Astrophys. J., 723(1): 300-319, doi: 10.1088/0004-637X/723/1/300.

- Feng X S, Zhang M, Zhou Y F. 2014b. A New Three-dimensional Solar Wind Model in Spherical Coordinates with a Six-component Grid [J]. Astrophys. J. Suppl. Ser., 214(1):6, doi: 10.1088/0067-0049/214/1/6.
- Feng X S, Zhang S H, Xiang C Q, et al. 2011b. A hybrid solar wind model of the CESE + HLL method with a Yin-Yang overset grid and an AMR grid [J]. Astrophys. J., 734(1): 50, doi: 10.1088/ 0004-637X/734/1/50.
- Feng X S, Zhong D K, Xiang C Q, et al. 2013b. GPU-accelerated computing of three-dimensional solar wind background [J]. Science China Earth Sciences, 56(11): 1864-1880, doi: 10.1007/s11430-013-4661-y.
- Feng X S, Zhou Y F, Wu S T. 2007. A Novel Numerical Implementation for Solar Wind Modeling by the Modified Conservation Element/ Solution Element Method [J]. Astrophys. J., 655 (2): 1110-1126, doi: 10.1086/510121.
- Fletcher L, Cargill P J, Antiochos S K, et al. 2015. Structures in the outer solar atmosphere [J]. Space Sci. Rev., 188 (1-4): 211-249, doi: 10.1007/s11214-014-0111-1.
- Frazin R A, Vásquez A M, Kamalabadi F. 2009. Quantitative, Threedimensional Analysis of the Global Corona with Multi-spacecraft Differential Emission Measure Tomography [J]. Astrophys. J., 701 (1): 547-560, doi: 10.1088/0004-637X/701/1/547.
- Gressl C, Veronig A M, Temmer M, et al. 2014. Comparative Study of MHD Modeling of the Background Solar Wind [J]. Solar Phys., 289(5): 1783-1801, doi: 10.1007/s11207-013-0421-6.
- Groth C P T, De Zeeuw D L, Gombosi T I, et al. 2000. Global threedimensional MHD simulation of a space weather event: CME formation, interplanetary propagation, and interaction with the magnetosphere[J]. J. Geophys. Res., 105 (A11): 25053-25078, doi: 10.1029/2000JA900093.
- Hayashi K. 2005. Magnetohydrodynamic Simulations of the Solar Corona and Solar Wind Using a Boundary Treatment to Limit Solar Wind Mass Flux [J]. Astrophys. J. Suppl. Ser., 161: 480-494, doi: 10.1086/491791.
- Hayashi K. 2012. An MHD simulation model of time-dependent corotating solar wind [J]. Journal of Geophysical Research (Space Physics), 117(A8), doi: 10.1029/2011JA017490.
- Hayashi K. 2013. An MHD simulation model of time-dependent global solar corona with temporally varying solar-surface magnetic field maps [J]. Journal of Geophysical Research (Space Physics), 118 (11): 6889-6906, doi: 10.1002/2013JA018991.
- 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 [J]. Space Weather, 13 (5): 316-338, doi: 10.1002/2015SW001174.
- Jiang C W, Cui S X, Feng X S. 2012. Solving the Euler and Navier-Stokes equations by the AMR-CESE method [J]. Computers & Fluids, 54: 105-117, doi: 10.1016/j.compfluid.2011.10.006.
- Jiang C W, Feng X S, Zhang J, et al. 2010. AMR Simulations of Magnetohydrodynamic Problems by the CESE Method in Curvilinear Coordinates [J]. Solar Phys., 267(2): 463-491, doi: 10.1007/ s11207-010-9649-6.
- Jin M, Manchester W B, van der Holst B, et al. 2016. Chromosphere to 1 AU Simulation of the 2011 March 7th Event: A Comprehensive Study of Coronal Mass Ejection Propagation [J]. Astrophys. J., 834(4): 172, doi: 10.3847/1538-4357/834/2/172.
- Jones R A, Breen A R, Fallows R A, et al. 2007. Interaction between coronal mass ejections and the solar wind [J]. Journal of Geophysical Research (Space Physics), 112(A8), doi: 10.1029/ 2006JA011875.
- Kilpua E K J, Balogh A, von Steiger R, et al. 2017. Geoeffective Properties of Solar Transients and Stream Interaction Regions [J]. Space Sci. Rev., 212(3-4): 1271-1314, doi: 10.1007/s11214-017-0411-3.
- Lee C O, Arge C N, Odstrčil D, et al. 2013. Ensemble Modeling of CME Propagation [J]. Solar Phys., 285(1-2): 349-368, doi: 10.

1007/s11207-012-9980-1.

- Leutbecher M, Palmer T N. 2008. Ensemble forecasting [J]. Journal of Computational Physics, 227(7): 3515-3539, doi: 10.1016/j.jcp. 2007.02.014.
- Li H C, Feng X S. 2018. CESE-HLL Magnetic Field-Driven Modeling of the Background Solar Wind During Year 2008 [J]. Journal of Geophysical Research (Space Physics), 123(6): 4488-4509, doi: 10.1029/2017JA025125.
- Linker J A, Caplan R M, Downs C, et al. 2016. An Empirically Driven Time-Dependent Model of the Solar Wind [A]. 10TH International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows: ASTRONUM-2015 [C], 012012, doi: 10.1088/1742-6596/719/ 1/012012.
- Linker J A, Caplan R M, Downs C, et al. 2017. The open flux problem [J]. Astrophys. J., 848(1): 70, doi: 10.3847/1538-4357/aa8a70.
- Linker J A, Mikić Z, Biesecker D A, et al. 1999. Magnetohydrodynamic modeling of the solar corona during Whole Sun Month [J]. J. Geophys. Res., 104(A5): 9809-9830, doi: 10.1029/1998JA900159.
- Lionello R, Downs C, Linker J A, et al. 2013. Magnetohydrodynamic simulations of interplanetary coronal mass ejections [J]. Astrophys. J., 777(1): 76, doi: 10.1088/0004-637X/777/1/76.
- Lionello R, Linker J A, Mikic Z. 2009. Multispectral Emission of the Sun During the First Whole Sun Month: Magnetohydrodynamic Simulations [J]. Astrophys. J., 690 (1): 902-912, doi: 10. 1088/0004-637X/690/1/902.
- Liu Y, Hoeksema J T, Sun X, et al. 2017. Vector Magnetic Field Synoptic Charts from the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) [J]. Solar Phys., 292; 29, doi: 10.1007/s11207-017-1056-9.
- Lockwood M, Owens M J, Barnard L A, et al. 2016. On the origins and timescales of geoeffective IMF [J]. Space Weather, 14: 406-432, doi: 10.1002/2016SW001375.
- Mackay D H, Yeates A R. 2012. The Sun's Global Photospheric and Coronal Magnetic Fields: Observations and Models [J]. Living Reviews in Solar Physics, 9: 6, doi: 10.12942/lrsp-2012-6.
- MacNeice P. 2009. Validation of community models: Identifying events in space weather model timelines [J]. Space Weather, 7: 6, doi: 10.1029/2009SW000463.
- McGregor S L, Hughes W J, Arge C N, et al. 2011. 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]. Journal of Geophysical Research (Space Physics), 116(A3), doi: 10.1029/2010JA015881.
- Meng X, van der Holst B, Toth G, et al. 2015. Alfvén wave solar model (AWSoM): proton temperature anisotropy and solar wind acceleration [J]. Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 454(4): 3697-3709, doi: 10.1093/mnras/stv2249.
- Merkin V G, Lyon J G, Lario D, et al. 2016. Time-dependent magnetohydrodynamic simulations of the inner heliosphere [J]. Journal of Geophysical Research (Space Physics), 121(4): 2866-2890, doi: 10.1002/2015JA022200.
- Mikić Z, Linker J A, Schnack D D, et al. 1999. Magnetohydrodynamic modeling of the global solar corona [J]. Physics of Plasmas, 6(5): 2217-2224, doi: 10.1063/1.873474.
- Millward G, Biesecker D, Odstreil D, et al. 2011. Wang-Sheeley-Arge-Enlil Cone Model Transitions to Operations [J]. Space Weather, 9 (3), doi: 10.1029/2011SW000663.
- Nakamizo A, Tanaka T, Kubo Y, et al. 2009. Development of the 3-D MHD model of the solar corona-solar wind combining system [J]. Journal of Geophysical Research (Space Physics), 114(A7), doi: 10.1029/2008JA013844.
- Obama B. 2016. Executive Order: Coordinating efforts to prepare the nation for space weather events [Z]. Washington, D. C.: The White House.
- Odstreil D. 2003. Modeling 3-D solar wind structure [J]. Advances in Space Research, 32 (4): 497-506, doi: 10.1016/S0273-1177 (03)00332-6.
- Owens M J, Lockwood M, Barnard L A. 2017. Coronal mass ejections are not coherent magnetohydrodynamic structures [J]. Scientific Reports, 7: 4152, doi: 10.1038/s41598-017-04546-3.

- Owens M J, Riley P. 2017. Probabilistic Solar Wind Forecasting Using Large Ensembles of Near-Sun Conditions With a Simple One-Dimensional "Upwind" Scheme [J]. Space Weather, 15 (11): 1461-1474, doi: 10.1002/2017SW001679.
- Pizzo V J, de Koning C, Cash M, et al. 2015. Theoretical basis for operational ensemble forecasting of coronal mass ejections [J]. Space Weather, 13(10): 676-697, doi: 10.1002/2015SW001221.
- Powell K G, Roe P L, Linde T J, et al. 1999. A Solution-Adaptive Upwind Scheme for Ideal Magnetohydrodynamics [J]. Journal of Computational Physics, 154 (2): 284-309, doi: 10.1006/jcph. 1999.6299.
- Richardson I G, Cane H V. 2012. Solar wind drivers of geomagnetic storms during more than four solar cycles [J]. Journal of Space Weather and Space Climate, 2(27): A01, doi: 10.1051/swsc/ 2012001.
- Riley P, Linker J A, Mikić Z. 2001. An empirically-driven global MHD model of the solar corona and inner heliosphere [J]. J. Geophys. Res., 106(A8): 15889-15902, doi: 10.1029/2000JA000121.
- Riley P, Luhmann J G. 2012. Interplanetary signatures of unipolar streamers and the origin of the slow solar wind [J]. Solar Phys., 277(2): 355-373, doi: 10.1007/s11207-011-9909-0.
- Russell C T, McPherron R L. 1973. Semiannual variation of geomagnetic activity [J]. J. Geophys. Res., 78(1): 92-108, doi: 10.1029/ JA078i001p00092.
- Schwenn R. 2006. Space Weather: The Solar Perspective [J]. Living Reviews in Solar Physics, 3: 2, doi: 10.12942/lrsp-2006-2.
- Shen F, Shen C, Zhang J, et al. 2014. Evolution of the 12 July 2012 CME from the Sun to the Earth: Data-constrained three-dimensional MHD simulations [J]. Journal of Geophysical Research (Space Physics), 119(9): 7128-7141, doi: 10.1002/2014JA020365.
- Shiota D, Kataoka R, Miyoshi Y, et al. 2014. Inner heliosphere MHD modeling system applicable to space weather forecasting for the other planets [J]. Space Weather, 12(4): 187-204, doi: 10.1002/ 2013SW000989.
- Siscoe G, Baker D, Weigel R, et al. 2004. Roles of empirical modeling within CISM [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 66(15-16): 1481-1489, doi: 10.1016/j.jastp.2004.03. 028.
- Spence H, Baker D, Burns A, et al. 2004. Center for integrated space weather modeling metrics plan and initial model validation results [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 66 (15): 1499-1507, doi: 10.1016/j.jastp.2004.03.029.
- Temmer M, Rollett T, Mostl C, et al. 2011. Influence of the Ambient Solar Wind Flow on the Propagation Behavior of Interplanetary Coronal Mass Ejections [J]. Astrophys. J., 743 (2): 101, doi: 10.1088/0004-637X/743/2/101.
- Toth G. 2000. The $\nabla \cdot B = 0$ Constraint in Shock-Capturing Magnetohydrodynamics Codes [J]. Journal of Computational Physics, 161(2): 605-652, doi: 10.1006/jcph.2000.6519.
- Tóth G. 2006. Flexible, efficient and robust algorithm for parallel execution and coupling of components in a framework [J]. Computer Physics Communications, 174(10): 793-802, doi: 10. 1016/j.cpc.2005.12.017.
- Tóth G, van der Holst B, Sokolov I V, et al. 2012. Adaptive numerical algorithms in space weather modeling [J]. Journal of Computational Physics, 231(3): 870-903, doi: 10.1016/j.jcp.2011.02.006.
- van der Holst B, Manchester W B, Frazin R A, et al. 2010. A Datadriven, Two-temperature Solar Wind Model with Alfvén Waves [J]. Astrophys. J., 725(1): 1373-1383, doi: 10.1088/0004-637X/ 725/1/1373.
- van der Holst B, Sokolov I V, Meng X, et al. 2014. Alfvén Wave Solar Model (AWSoM): Coronal Heating [J]. Astrophys. J., 782(2): 81, doi: 10.1088/0004-637X/782/2/81.
- Vásquez A M. 2016. Seeing the solar corona in three dimensions [J]. Advances in Space Research, 57(6): 1286-1293, doi: 10.1016/j. asr. 2015.05.047.
- Wang X Y. 2015. A Summary of the Space-Time Conservation Element and Solution Element (CESE) Method: NASA/TM-2015-218743 [R]: National Aeronautics and Space Administration.

- Wang Y M, Grappin R, Robbrecht E, et al. 2012. On the nature of the solar wind from coronal pseudostreamers [J]. Astrophys. J., 749 (2): 182, doi: 10.1088/0004-637X/749/2/182.
- Wang Y M, Robbrecht E. 2011. Asymmetric sunspot activity and the southward displacement of the heliospheric current sheet [J]. Astrophys. J., 736(2): 136, doi: 10.1088/0004-637X/736/2/ 136.
- Wang Y M, Sheeley N R Jr, Rich N B. 2007. Coronal Pseudostreamers [J]. Astrophys. J., 658(2): 1340-1348, doi: 10.1086/511416.
- Wei F, Dryer M. 1991. Propagation of solar flare-associated interplanetary shock waves in the heliospheric meridional plane [J]. Solar Phys., 132(2): 373-394, doi: 10.1007/BF00152294.
- Wiengarten T, Kleimann J, Fichtner H, et al. 2013. MHD simulation of the inner-heliospheric magnetic field [J]. Journal of Geophysical Research (Space Physics), 118 (1): 29-44, doi: 10.1029/ 2012JA018089.
- Wu S T, Dryer M. 2015. Comparative analyses of current threedimensional numerical solar wind models [J]. Science China Earth Sciences, 58(6): 839-858, doi: 10.1007/s11430-015-5062-1.
- Yalim M S, Pogorelov N, Liu Y. 2017. A data-driven MHD model of the global solar corona within Multi-Scale Fluid-Kinetic Simulation Suite (MS-FLUKSS) [A]. 11th International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows [C], 012015, doi: 10.1088/ 1742-6596/837/1/012015.
- Yang L P, Feng X S, Xiang C Q, et al. 2011a. Numerical Validation and Comparison of Three Solar Wind Heating Methods by the SIP-CESE MHD Model [J]. Chinese Physics Letters, 28(3): 039601, doi: 10.1088/0256-307X/28/3/039601.
- Yang L P, Feng X S, Xiang C Q, et al. 2011b. Simulation of the Unusual Solar Minimum with 3D SIP-CESE MHD Model by Comparison with Multi-Satellite Observations [J]. Solar Phys., 271 (1-2): 91-110, doi: 10.1007/s11207-011-9785-7.
- Yang L P, Feng X S, Xiang C Q, et al. 2012. Time-dependent MHD modeling of the global solar corona for year 2007: Driven by dailyupdated magnetic field synoptic data [J]. Journal of Geophysical Research (Space Physics), 117(A8), doi: 10.1029/2011JA017494.
- Yang Y, Feng X S, Jiang C W. 2017. A high-order CESE scheme with a new divergence-free method for MHD numerical simulation [J]. Journal of Computational Physics, 349: 561-581, doi: 10.1016/j. jcp. 2017.08.019.
- Yeh T, Dryer M. 1985. A constraint on boundary data for magnetic solenoidality in MHD calculations [J]. Astrophys. Space Sci., 117 (1): 165-171, doi: 10.1007/BF00660919.
- Zeng Q C. 2013. Weather forecast-from empirical to physicomathematical theory and super-computing system engineering [J]. Physics (in Chinese), 42(05): 300-314.

- Zhang M, Feng X S. 2015. Implicit dual-time stepping method for a solar wind model in spherical coordinates [J]. Computers & Fluids, 115: 115-123, doi: 10.1016/j.compfluid.2015.03.020.
- Zhang M, Feng X S. 2016. A comparative study of divergence cleaning methods of magnetic field in the solar coronal numerical simulation [J]. Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 3: 6, doi: 10. 3389/fspas.2016.00006.
- Zhang Y, Sun W, Feng X S, et al. 2008. Statistical analysis of corotating interaction regions and their geoeffectiveness during solar cycle 23 [J]. Journal of Geophysical Research (Space Physics), 113(A8), doi: 10.1029/2008JA013095.
- Zhang Z C, John Yu S T, Chang S C. 2002. A space-time conservation element and solution element method for solving the two-and threedimensional unsteady euler equations using quadrilateral and hexahedral meshes [J]. J. Comput. Phys., 175(1): 168-199, doi: 10.1006/jcph.2001.6934.
- Zhao X P, Hoeksema J T. 2010. The magnetic field at the inner boundary of the heliosphere around solar minimum [J]. Solar Physics, 266: 379-390, doi: 10.1007/s11207-010-9618-0.
- Zhou Y F, Feng X S. 2013. MHD numerical study of the latitudinal deflection of coronal mass ejection [J]. Journal of Geophysical Research (Space Physics), 118(10): 6007-6018, doi: 10.1002/ 2013JA018976.
- Zhou Y F, Feng X S. 2014. An improved CESE method and its application to steady-state coronal structure simulation [J]. Science China Earth Sciences, 57(1), doi: 10.1007/s11430-013-4628-z.
- Zhou Y F, Feng X S. 2017. Numerical study of the propagation characteristics of coronal mass ejections in a structured ambient solar wind [J]. Journal of Geophysical Research (Space Physics), 122 (2): 1451-1462, doi: 10.1002/2016JA023053.
- Zhou Y F, Feng X S, Wu S T, et al. 2012. Using a 3-D spherical plasmoid to interpret the Sun-to-Earth propagation of the 4 November 1997 coronal mass ejection event[J]. Journal of Geophysical Research (Space Physics), 117(A1), doi: 10.1029/2010JA016380.

附中文参考文献

- 冯学尚,向长青,钟鼎坤. 2011. 太阳风暴的日冕行星际过程三维数 值研究进展[J]. 中国科学:地球科学,41(1):1-28.
- 冯学尚,向长青,钟鼎坤. 2013. 行星际太阳风暴的数值模拟研究 [J]. 中国科学:地球科学,43(6):912-933.
- 曾庆存. 2013. 天气预报——由经验到物理数学理论和超级计算 [J]. 物理, 42(05): 300-314.