



评述

太阳风暴的日冕行星际过程三维数值研究进展

冯学尚*, 向长青, 钟鼎坤

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

* E-mail: fengx@spacewather.ac.cn

收稿日期: 2010-07-21; 接受日期: 2010-11-12

国家自然科学基金(批准号: 41031066, 40890162, 40874091, 40921063, 40874077, 40904050, 41074122 和 40536029)、国家基础研究发展计划项目(编号: 2006CB806304)和国家重点实验室专项基金项目资助

摘要 如何能够提前几个小时到几天的时间预报空间天气不仅是空间天气研究的重要课题, 而且也是现代科技发展对空间天气预报的重大需求. 基于物理的以强大计算能力为基础的太阳风暴日冕行星际过程三维数值研究已经成为灾害性空间天气预报建模的重要手段, 并在近几年取得了很大的发展. 本文聚焦于背景太阳风状态和太阳扰动事件在行星际空间传播的三维数值模型的发展状况, 总结现有基于物理的主要模型的算法特点及其研究成果, 评述太阳风暴的日冕行星际过程三维数值研究在今后工作中应该关注的问题. 最后指出, 随日地空间探测发展和人们对日地空间天气基本物理过程了解的不断深入, 将更多观测和对新物理过程的认识融入数值预报模型, 建立由观测约束驱动的、快捷高效稳定的、高时空分辨率的日地空间天气全球耦合数值预报模型, 是发展未来空间天气数值预报模型研究的努力方向, 它将推动空间天气预报从客观分析向数值预报转变, 加速实现数值模型对太阳风暴的全程追踪, 初步满足人类对空间天气预报的需求.

关键词

太阳风暴
日冕行星际过程
三维数值模型
空间天气

太阳风暴, 这里特指剧烈太阳爆发活动引发的速度为数百到一两千公里每秒的日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME), 它到达地球附近时, 地球空间环境会产生整体剧烈的变化, 进而引发强地磁暴、损害地球轨道飞行器、伤害宇航员并威胁电力和通讯系统的安全运行等^[1]灾害性空间天气事件. 随着人类科技的日益进步, 特别是近二、三十年来, 航天和通信等高技术领域进入了蓬勃发展时期, 迅速形成了巨大产业, 各种卫星在空间运行, 维系着当今世界经济全球化的平稳发展. 这些高技术系统却对空间天气变化表现得极为脆弱, 因此, 空间天气对人类活动的影响越来越广泛, 越来越深入, 损失也愈

加惨重^[2-5]. 这里以 2003 年 10 月中下旬到 11 月初的 Halloween 事件为例, 简要说明灾害性空间天气的影响.

2003 年 10 月下旬到 11 月, 太阳活动异常剧烈, 主要的太阳爆发源于三个活动区, 它们的 NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) 编号分别为 ARs10484, 10486 和 10488(Active Regions, ARs), 这一系列事件也被称为万圣节(Halloween)事件. 这三个活动区在 10 月中到 11 月初的两个星期内, 共记录到 143 个耀斑, 至少 80 个 CMEs. 10 月 29 日、30 日以及 11 月 4 日的耀斑是第 23 太阳活动周最强烈的几个耀斑, 耀斑级别分别为 X17.2/4B, X10.0/2B

和 X17.4/3B^[6]. 有些事件在爆发后不到半个小时, 地球轨道附近的高能质子通量就上升了约 3 个数量级. 这些太阳活动产生的 CMEs 速度快, 角宽度大, 能量高. 有 7 个超快速的 CMEs(速度大于 2000 km), 其中 28 日发生的 CME 离开日面的速度更是达到了 2500 km, 能量大于 10^{32} 尔格的 CMEs 有 13 个. 这些快速的 CMEs 产生的行星际激波速度也很高, 其中 10 月 29 日和 30 日 ACE 卫星在 1 AU 处探测到的实地太阳风速度峰值更是分别高达 1850 和 1700 km, 这是自 1972 年以来, 首次在 1 AU 附近观测到速度大于 1500 km 的高速太阳风, GOES(Geostationary Operational Environmental Satellite)卫星记录到行星际激波产生的一系列 SEPs^[7], 见图 1, 图中显示出了 6 次大的 SEP 增强(>10 MeV 通道的强度在 10 pfu 以上)及其对应的 CMEs, 其中第二、第三和第四次 SEPs 还产生了地面水平事件(Ground Level Events, GLEs), 而在整个第 23 太阳活动周只有 14 个 GLEs. 图 2 是 ACE 观测到的太阳风和行星际磁场参数^[8]. 另外, AR 10484 在转过一周之后的编号为 AR 10501, 在 11 月 18 日爆发了 M3.2~M4.5 的三个不太剧烈的耀斑, 与之相联系的 CMEs 引发了第 23 太阳活动周最强的地磁暴.

万圣节事件对地球空间环境产生了严重的影响. 太阳风暴产生的磁云等离子体速度非常高, 平均为 1000 km s^{-1} , 致使磁云内部动压很大, 当磁云穿越磁层时, 磁层受到强烈压缩, 磁层顶日下点长时间被压缩至地球同步轨道以内, 同步轨道卫星暴露在磁层磁鞘或者太阳风中. 图 3 是利用 GOES 10 卫星和 ACE (Advanced Composition Explorer)飞船的观测数据确定的一次地球同步轨道磁层顶穿越事件(Geosynchronous Magnetopause Crossings, GMC), Dmitriev 和 Suvorova^[9]发现这期间发生了还多次 GMCs.

图 2 表明 29 日和 30~31 日的太阳风速度和南向磁场分量都很大, 这导致了两次很强的磁暴, D_{st} 指数达到 -363 和 -401 nT, 是第 23 太阳周第二和第四强的磁暴, 11 月 20 日的地磁暴是第 23 周最强的, D_{st} 指数达到了 -472 nT^[10], 2003 年 10 月到 11 月地磁暴指数如图 4 所示. 下面侧重于讨论前两次磁暴期间地球空间环境的变化及其影响.

Baker 等^[11,12]分析了地球辐射带的变化发现, 从 2003 年 11 月 1 日开始后的两个星期, 峰值高能电子通量的 L 值从平时的 4.0 被压缩到 2.5. 正常情况下, 少高能电子的内外带之间的槽区($L=3$ 左右)是许多

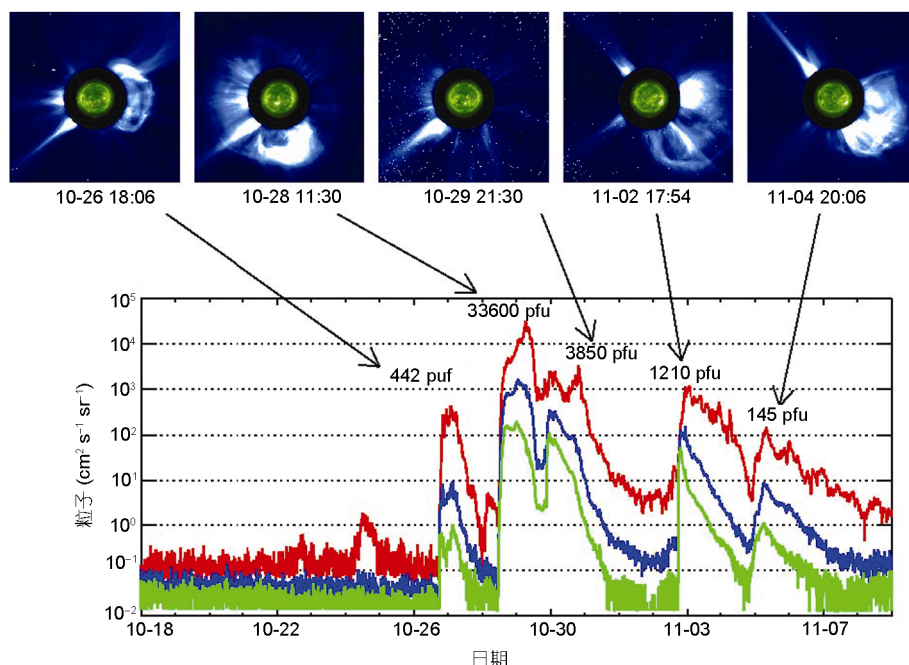


图 1 2003 年 10 月到 11 月 GOES 观测到的 SEPs 及其对应的 CMEs 的 LASCO 观测
红、蓝、绿线分别对应于 10, 50 和 100 MeV 通道的观测, 峰值强度已经标出. 此图摘自文献[7]

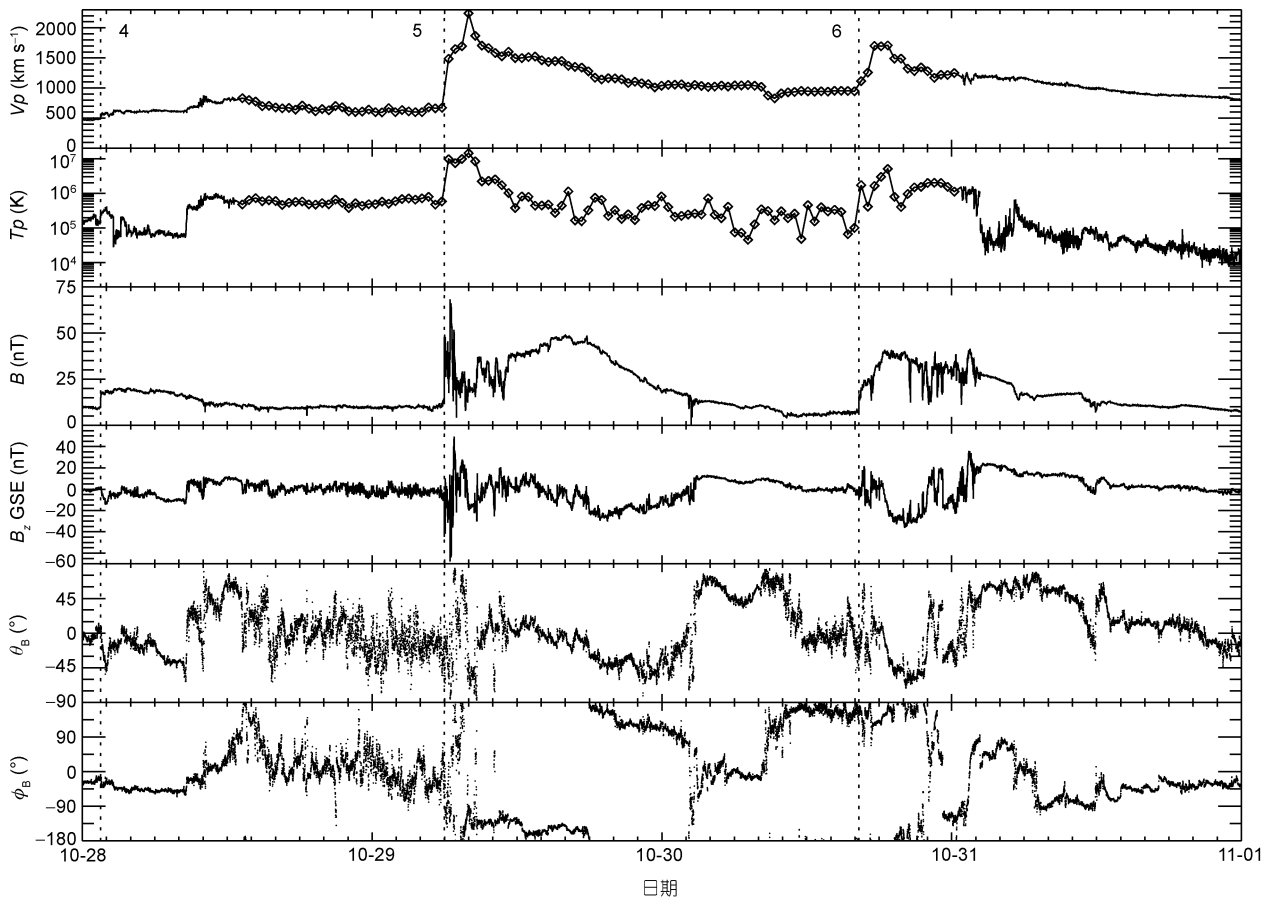


图2 ACE飞船观测到的从2003年10月28日到11月1日的太阳风质子速度、温度和磁场参数

质子数密度因数据不全没有画出. 此图摘自文献[8]

飞船轨道经过的地方, 但是2003年11月1日后近40天里, 这里却充满了2~6 MeV的高能电子. 另外, 磁暴过后, 许多高能电子通过平常的槽区进入内辐射带, 从而在内带形成了新的高能电子群. 太阳高能粒子和这些高通量的高能电子使一系列飞船出现异常情况^[13].

Yizengaw 等^[14]利用地基和天基的联合观测进行研究, 在28日8:00~9:00 UT的磁暴中, 除了高纬区和南太平洋有等离子体密度降低之外, 澳大利亚、赤道区和欧亚上空, TEC (Total Electronic Content) 普遍出现了20%~50%的增强. 在29日23:00到30日的3:00 UT的磁暴期间, 南半球大片区域电离层的电子密度出现剧烈下降, 随后扩展到低纬度区域, 赤道区的下降幅度达到70%, 只有南半球的远东极隙区有幅度为30%的较小增强, 北半球的中低纬度区域经历了中等程度的下降, 幅度为23%, 随后高

纬地区有较大的下降, 而在中低纬度区几乎恢复到宁静水平. 大约过了两天, 在磁暴的恢复相, 南半球的电子密度分布恢复到正常水平. Perevalova 等^[15]以及 Horvath 和 Lovell^[16]研究了这次超级磁暴激发的大尺度行进电离层骚扰及其对电离层 TEC 的影响.

这期间发生的太阳质子事件(SPE), 在极区一直穿透到中层大气, López-Puertas 等^[17]利用太阳同步极轨环境卫星搭载的被动大气探测迈克尔逊干涉仪 (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding, MIPAS) 对高度为6~68 km的大气成分的全球观测数据所作的研究表明: 从2003年10月25日到11月14日, MIPAS 观测到极区上部平流层的NO_x浓度达180 ppbv (ppbv=1 nL L⁻¹), 差不多是没有扰动时的10倍, 而且NO_x的增强分布很不均匀. 两个星期内, 北极极盖在40~60 km高度上的平均增量为20~70 ppbv, 南极极盖的在相同高度范围的平均增量

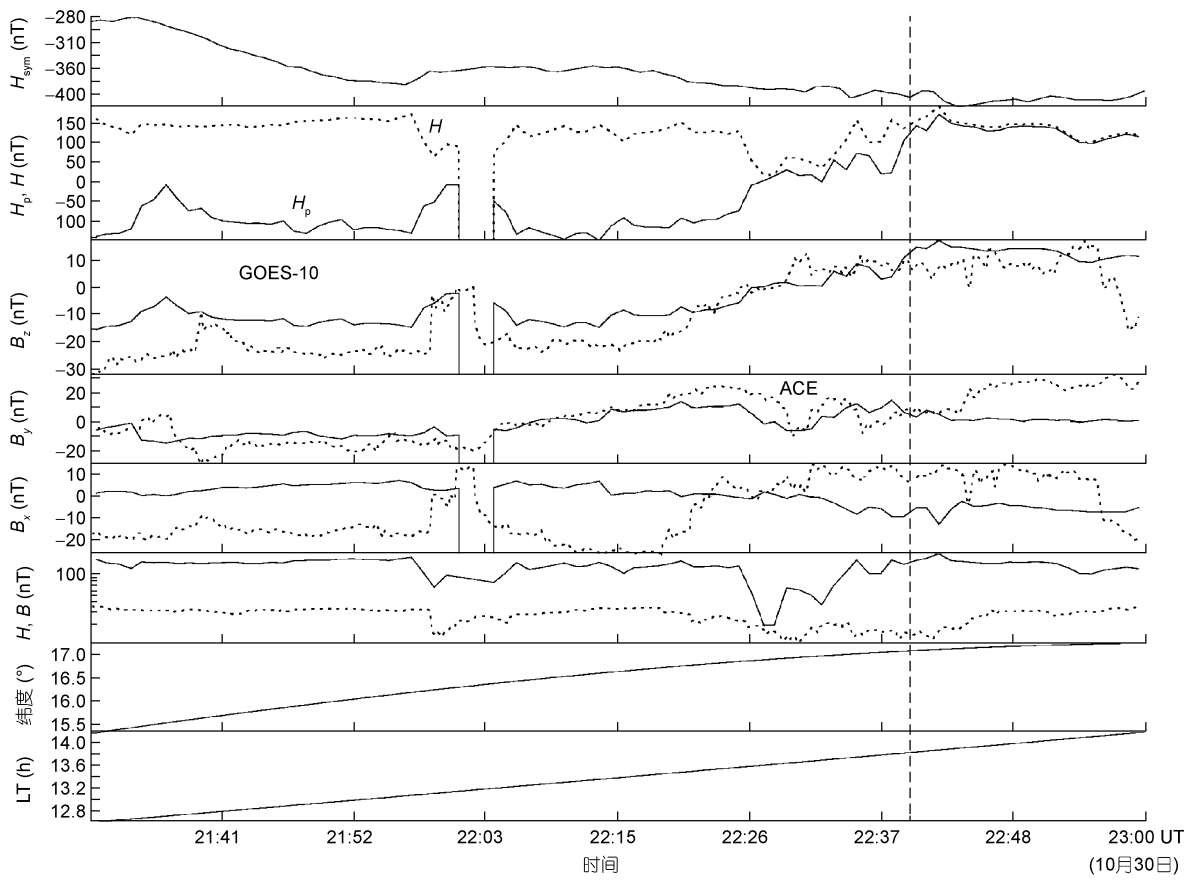


图3 根据 GOES 10 和 ACE 的观测确定的 GMC 事件

GOES 10 的 B_y, B_z 为除以 10 后的值, B_x 是除以 5 后的值. 此图摘自文献[9]

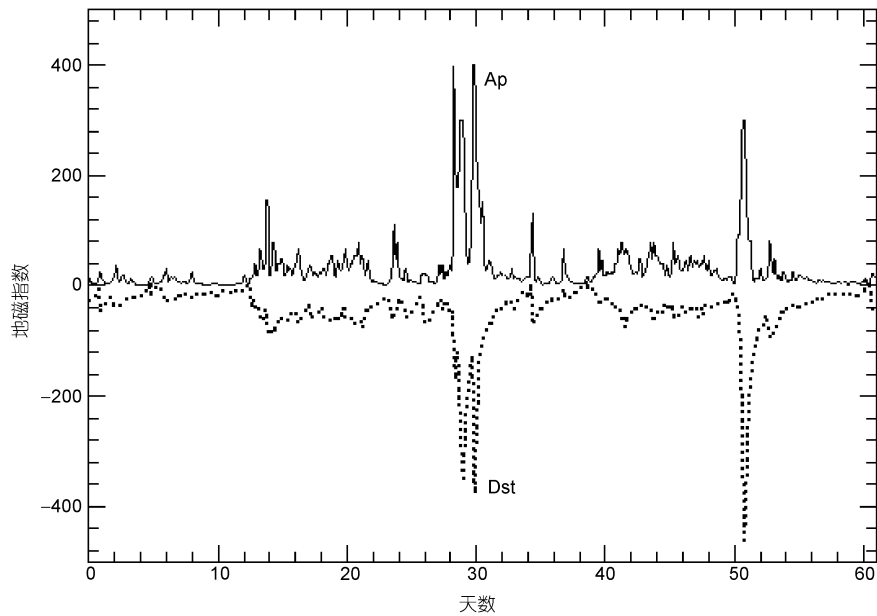


图4 2003年10月和11月的地磁指数

从2003年10月1日开始. 此图摘自文献[10]

为 10~35 ppbv, 在两个星期后, 增量减半. 与此同时, 臭氧浓度出现了下降, 北极中层下部(平流层上部)在 SPEs 后两个星期内, 臭氧浓度减少了 50%~70% (30%~40%), 南极的臭氧含量下降幅度要小一些. 此外, 这次事件对中层和平流层的中期变化也有较大影响.

据 Barbieri 和 Mahmot^[18]的总结, 有 59% 的在轨飞船和 18% 的船载仪器受到了 Halloween 事件的影响, 较严重的影响有: 单粒子翻转事件、太阳能电池性能退化、轨道动力学改变、卫星进入安全模式以及仪器关闭致使观测数据丢失或中断等. 其中 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 的火星探测卫星 Odyssey 的 MARIE 观测设备被粒子辐射彻底毁坏, 日本的 Midori 卫星彻底损坏. 这次事件的其他影响^[19]还包括高纬 GPS 接收中断, 联邦航空管理局首次发布 25000 ft (1 ft=0.3048 m) 以上的飞机乘客接受辐射剂量的预警, 广域增强系统(Wide Area Augument System, WAAS)在美国临近地区的服务中断, 磁暴产生的地磁感应电流使瑞典马尔默市南部的一个电力系统遭到破坏, 在威斯康辛和纽约的输油管中也观测到很高的地磁感应电流.

从上面事件的简要总结中可以看出, 灾害性空间天气对地基和天基技术系统的影响涉及到社会生产生活的方方面面. 更重要的是, 支撑现代高科技战争的指挥、控制、通讯、导航、侦察、预警以及精确打击等系统都高度依赖于空间技术, 所以人们关于国家安全的概念已经从领海、领空和领土安全拓展到空间安全, 没有空间安全就很难保障领土、领海和领空的安全, Hays^[20]总结了当前空间强国在民用、商用、国防和情报等领域的发展态势和特点, 提出了近期美国应该采取的空间策略.

灾害性空间天气实际上是传播到地球轨道附近的太阳风暴在地球空间和地面突然产生的对人类高度依赖的高技术活动不利的影响, 因此人们迫切希望了解空间天气的发生机制并最终能够提前几个小时到几天的时间给出预报, 这是美国国家天气计划的目标^[21], 也是许多国家一系列观测计划和研究计划的目标^[5,22,23], 构建以物理为基础的从太阳到地球空间的天气因果链模型成为欧美等发达国家的空间研究计划的重点之一^[1]. 受此重大需求的驱动, 基于物理的以强大计算能力为基础的太阳风暴的日冕行星际过程三维数值研究(以下简称三维数值模型)

在灾害性空间天气预报研究方面已经取得了很大的发展^[24]. 它已从定性的原理性理论研究过渡到定量的具体事件研究, 已发展出多种适合处理特定空间灾害性天气事件的数值算法与应用程序, 并尝试将特定事件期间太阳活动的物理条件融入初边值条件中, 进行太阳风暴传播演化的数值试验, 试图了解太阳风暴源区的边值条件对行星际扰动过程的调控作用, 理解行星际扰动的形成和演化过程, 揭示引起相应地球空间磁扰变化的行星际结构的传播和演化特征, 形成对太阳风暴事件的日冕行星际过程的数值预报实验技术. 这是自 20 世纪末至现在乃至将来很长一段时间, 空间天气研究的重要课题之一, 它的发展水平既取决于空间、地面观测和物理过程研究, 又取决于数值预报技术的发展水平. 这里对近几年这一领域的迅猛发展成果加以总结, 有助于把握未来发展的趋势, 明晰进一步研究的方向. 因此, 本文聚焦于研究背景太阳风状态和太阳风暴的行星际过程的三维数值模型的发展状况, 对目前正在发展的从太阳到行星际空间某一距离范围的三维数值模型及其模拟性能做简明回顾, 对这一领域尚存的问题和发展趋势进行简要评述.

1 主要模型

1.1 HAF 模型

Hakamada 和 Akasofu^[25]在 20 世纪 80 年代首次提出了模拟太阳风的三维运动学模型, 此后经 Sun 和 Akasofu^[26], Akasofu 和 Fry^[27]进一步完善并发展成比较成熟的第一代 Hakamada-Akasofu-Fry 模型 (HAFv1). Fry 等^[28,29]对 HAFv1 进行了改进, 成为第二代 HAF 模型 (HAFv2). 二者的计算区域都是从 $2.5R_s$ ($1R_s$ 就是一个太阳半径) 的源表面一直到日球层中十几个 AU (Astronomical Unit) 处, 其边界条件由源表面上的磁场和太阳风场构成. 该模型利用光球磁场视向观测的概图数据, 采用势场源表面模式 (Potential Field Source Surface, PFSS) 得到源表面磁场. 对于作为边界条件的连续变化的源表面背景风场, 模型假定等离子体密度在源表面的分布是均匀的, HAFv1 通过经验关系给出速度分布, HAFv2 则是根据 Wang-Sheeley-Arge (WSA) 模式^[30,31]得到的, 对于源表面上初始太阳风场中的太阳瞬变活动引起的扰动风场, 模型依据 II 型射电暴的观测获得. 该模型的

输出为日球层任意点的太阳风速度、密度和行星际磁场(Interplanetary Magnetic Field, IMF). HAFv1 和 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.

基于 HAFv1, Zhang 等^[32]通过比较有无爆发事件发生时的模拟结果, 首次区分了第 23 太阳活动周(1996~2005)的三种行星际太阳风结构: 共转相互作用区(Corotating Interaction Region, CIR), CIR 与行星际日冕物质抛射(Interplanetary Coronal Mass Ejection, ICME)的相互作用结构和 ICME, 并对 CIR 的地球物理效应进行了统计分析, 主要结果有: 总共识别出 157 个 CIR 事件, 大部分事件发生在下降相, 引入相邻卡林顿自转周 Kp 指数的相关系数来表征地磁活动的重现性程度, 证实 CIR 在重现型地磁活动中具有重要作用, 在 1AU 处, 41% 的 CIR 可以形成激波, 且多为前向激波, 但是 CIR 引发的磁暴与激波没有必然联系, 仅有 44% 有激波伴随, 当 D_{st} 指数小于 -100 nT 时, CIR 引起的磁暴的 D_{st} 指数与行星际南向磁场 B_z , 晨昏电场 E_y , 和太阳风-磁层耦合函数(ϵ)有较好的线性相关关系, CIR 引起的地磁活动具有明显的季节效应. 该工作给出了 HAF 模型在无爆发事件方面的一种新应用. 同时, Feng 等^[33]基于 HAFv1 模式利用大量虚拟事件建立了一个激波渡越时间数据库, 该数据库包括: 虚拟事件的源位置、初始激波速度、发生年份及其对应的渡越时间. 预报试验表明该数据库方法的预报能力与其他模型基本相当, 显示了该方法在空间天气预报中所具有的潜力. 而且, 该数据库方法也适用于其他太阳活动周.

HAF 模型具有模拟时变的非均匀高低速太阳风相互作用的背景结构和剧烈扰动引发的瞬变事件的能力. HAFv2 被 NASA 确定为空间天气无畏预报(Fearless Forecasting, FF)计划的模型之一. Fry 等^[29]选取了第 23 太阳活动周的极小期和上升期共 173 个激波事件进行激波到达时间的预报试验, 结果表明 HAFv2 模型的预报效果不像预料那样好, 说明 HAFv2 模型仍然有待改进, McKenna-Lawlor 等^[34]对第 23 周极大期的 166 个事件的分析得出了相似结论, Smith 等^[35]利用第 23 太阳活动周下降期的 245 个 CME 事件进行了相同研究, 结果表明对不同太阳活动位相期的事件的预测性能并无明显差异, 对半晕

状和晕状 CMEs 事件的预测性能要比对全体样本事件的预报性能高得多, 前者的准确率可达到 75%, 而后者刚刚超过 50%, 对能否到达及到达时间的总体误差来说, 下降期略好于其他活动位相, 可能是因为在扰动参数确定方面考虑了多个台站的观测. 虽然预测效果不如预期的好, 但是 HAFv2 模型具有其独特的优势: 它不仅能快速预测激波到达时间, 还能有效模拟行星际激波在非均匀太阳风介质中的传播, 提供多个激波相互作用的三维全球图像. 图 5 给出了 HAFv2 模型对 1998 年 12 月 23 日到 31 日太阳风状态的模拟结果.

与其他三维磁流体力学(Magnetic Hydro Dynamics, MHD)模型相比, HAFv1 和 HAF v2 模型具有快速稳定并能直接用观测作为输入等优点, 缺点是不能直接提供太阳风的温度、能量流量等方面的详细信息, 在处理流-流相互作用时缺少必要的物理条件, 对行星际磁场南向分量的处理还有待进一步发展.

1.2 空间天气模型架构

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了集空间天气模拟和应用于一体的 SWMF(Space Weather Modeling Frame). SWMF 将日冕模型(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)以及其他区域模型通过标准接口耦合起来, 模块的运行和组合由 SWMF 控制, 各模块可以串行运行, 也可并行运行^[36].

目前的 SC 和 IH 都是采用块自适应树型太阳风 Roe 迎风格式(Block Adaptive Tree Solar-wind Roe-type Upwind Scheme, BATS-R-US), 它是一个基于 MHD 方程组黎曼近似解的高精度迎风有限体积算法(Finite Volume Method, FVM)^[37], 格式可以根据解的要求细化或粗化计算网格. SC 的计算区域从 $\sim 1R_s$ 到 $\sim 24R_s$, 控制方程保留了磁场散度项, 考虑了万有引力、添加了不同形式的太阳风加热和加速等源项^[38~41]. SC 的下边界磁场可从光球视向磁场观测概图获得或者由偶极磁场和其他高阶项的叠加给出, 温度和密度随日面经纬度变化, 以便在 1AU 附近得到与观测接近的太阳风, 速度分量满足磁场与光球相连接的要求. SC 和 IH 之间的计算区域之间有部分重叠,

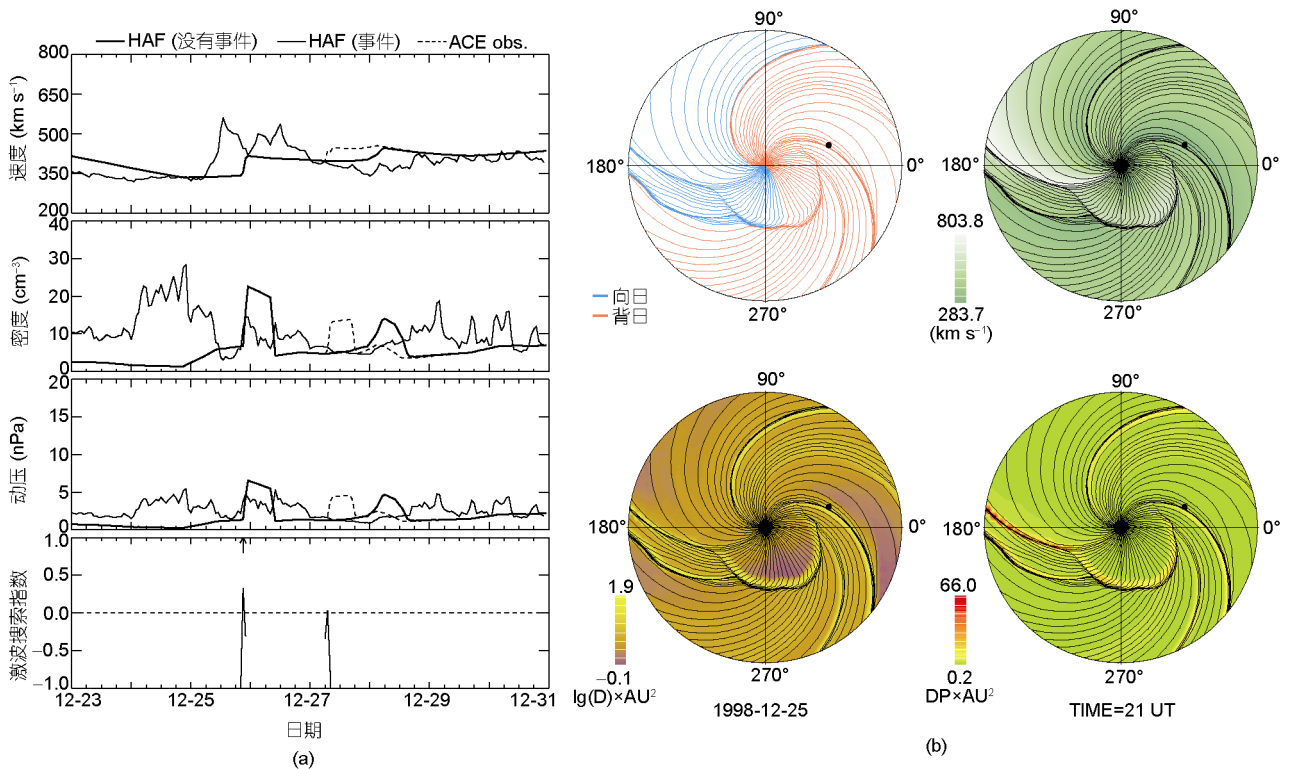


图5 模型 HAFv2 的预测事例

(a) 1998 年 12 月 23~31 日 L1 点的太阳风参数. 细实线为无瞬变事件 HAFv2 的预测结果, 虚线为有瞬变事件的预测结果, 粗实线为 ACE 实时观测的小时平均值. (b) HAFv2 的预测结果. 图示为 1998 年 12 月 25 日 21:00 UT 黄道面 2AU 以内太阳风的状况. 此时, 共转相互作用区 (CIR) 经过地球. (b) 中左上图: IMF 的扇形结构, 蓝色为向日的力线, 红色为背日的力线, 地球用 1AU 处的一个点来表示; 右上图: 黑色的 IMF 力线和速度的伪彩色图; 左下图: IMF 力线和归一化的质子数密度的伪彩色图; 右下图: IMF 力线和归一化到 1 AU 的动压伪彩色图, 红色区表示较高的动压, 绿色区表示较低的动压. 此图摘自文献[29]

以便处理极少数 CME 经过 SC 外边界时产生的亚快波速流动, SC 为其他临近区域模型提供需要的输入信息. 因为 CME 的触发机制到现在没有定论^[42-50], 所以, EE 的选择有很多种, 但它是作为 SC 模块的边界条件或者说是 SC 解的非线性扰动引入的, 在 SWMF 中已被整合到 SC 模块之中. IH 模块的计算区域从大约 $20R_s$ 直到地球附近, 并且不需要是球壳状区域, 而可以是关于太阳并不对称的矩形区域, 控制方程是理想的 MHD 方程组, IH 为全球磁层模型 (Global Magnetospheric models, GM) 提供上游边界条件, IH 和 GM 的解域有部分重叠.

这个模式的特点是各个模块可以灵活组合, 以强大的并行计算能力为基础可以实现从太阳日冕到地球空间环境的集成研究. 对大多数 CME 而言, 可以做到模拟时间少于事件的日地传播时间, 缺点是对每一个事件, 都需要重新计算背景和扰动的传播,

从而影响了计算的效率. Tóth 等^[36]对这一耦合模式从太阳到地球高层大气进行了初步联合测试, 结果表明各个模块之间能够很好地协同工作. SWMF 要求 Fortran 90 编译器、MPI(Message Passing Interface)库以及 Perl 解释器的支持, 可以在任何 Unix/linux 系统下运行, 现已移植到许多其他的系统平台和编译环境之下. Cohen 等^[51]用半圆形非稳定磁流管结构模拟了 1997 年 5 月 12 日的 CME 事件在行星际空间的传播, 其结果可以与 ACE 观测进行定性对比, 但是还不能定量地再现观测结果, 更高分辨率的磁流管可能有助于改善模拟结果. Tóth 等^[52]应用 SWMF 研究了 2003 年 10 月 28~30 日的太阳风暴在整个日地行星际空间的传播过程和对地球空间环境的影响. 稳态计算时, 磁场以 SOHO/MDI (Michelson Doppler Imager) 观测为边界条件进行势场展开作为输入, 方程中添加了加热项, CME 模型以修正的 Titov 和

Démoulin 磁流管模型^[49]作为输入, 将模拟结果与飞船观测对比发现该模式的 SC 和 IH 的模拟结果较观测偏移了约 9° , 密度、速度、温度和总磁场的时间变化剖面再现得比较好, 但是对磁场的各个分量却不够理想, 这可能是因为 CME 通量管模型并不能很好地表达真实的情况. 图 6 是 SWMF 对该事件的在 1AU 处的模拟结果. 对磁层至电离层的模拟结果则在定性上与观测一致, 主要误差来源于 1AU 处行星际磁场分量结果与真实观测相差较大.

1.3 混合日球层模型系统

混合日球层模型系统 HHMS(Hybrid Heliospheric

Modeling System, HHMS)是由美国国家海洋大气局 NOAA 下设的空间环境中心(Space Environment Center, SEC)等六家单位合作开发的. HHMS 将 PFSS 模型和 Han 的太阳风模型^[53]结合起来发展成为三维实时的太阳风模型, 目的是利用模拟得到的地球附近太阳风参数对地磁指数进行预报^[54], 它可以在背景模式和扰动模式下运行. HHMS 包括两个物理模型和两个经验模型, 两个物理模型是源表面电流片(Source Surface Current Sheet, SSCS)模型和三维时变太阳风模型(the Interplanetary Global Model Vectorized, IGMV), 两个经验模型是接口模块和用于地磁指数预报的线性预测滤波器.

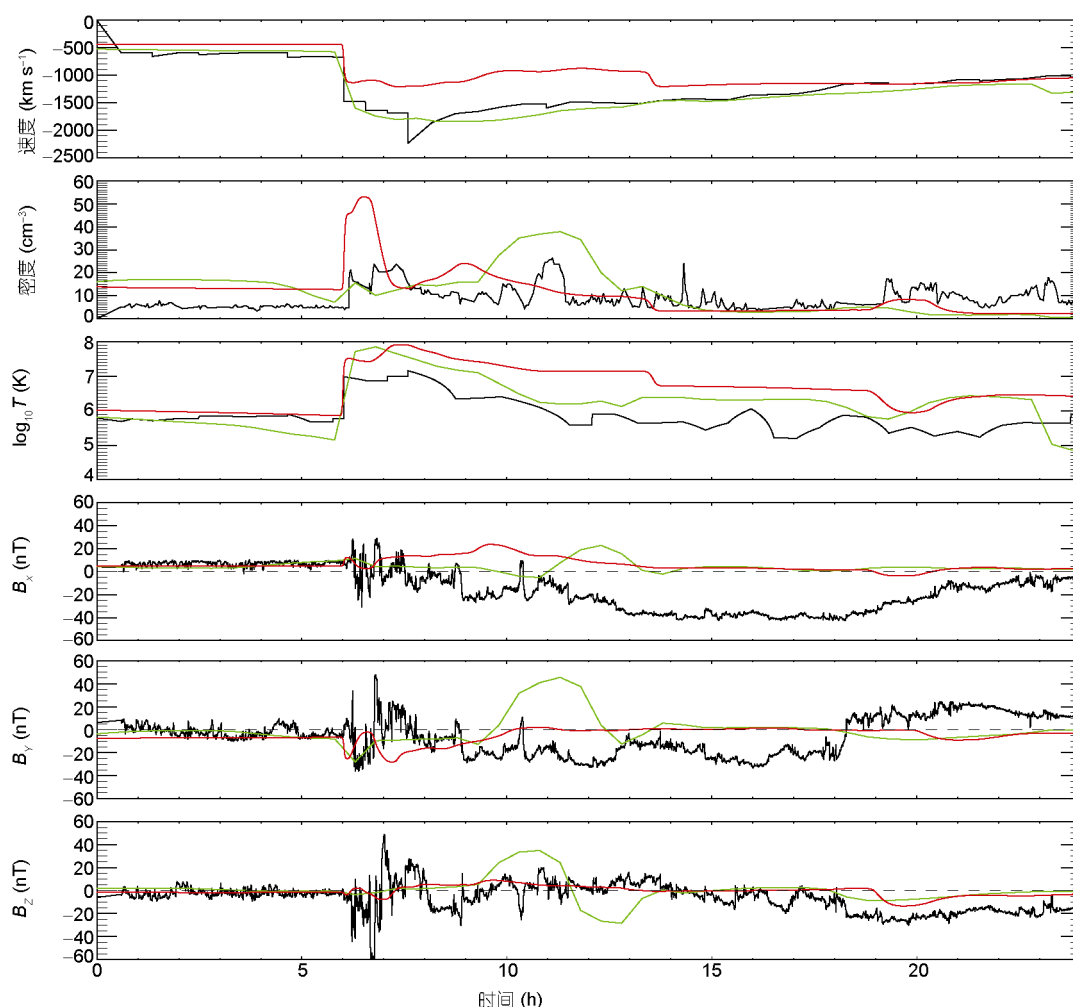


图 6 模型 SWMF 的模拟结果

2003 年 10 月 29 日观测(黑线)和模拟(红线和绿线)的太阳风参数对比图. 观测中的磁场、速度和温度数据来自 ACE, 密度数据来自 Geotail. 红线为地球处的模拟数据, 而绿线为沿着地球轨道移动 9° 后的模拟数据. 移动后的点是 CME 的最强部分. 为了与激波到达地球的观测相符, 模拟数据的时间分别偏移了 1.8 和 3.4 h. 从 2003 年 10 月 29 日 00:00 开始计时. 此图摘自文献[52]

SSCS 模型首先根据 PFSS 模型获取源表面上的径向磁场 B_r 和源表面上的磁场相对于光球磁场的膨胀因子 E_f , 接着求解以 PFSS 在源表面上的 B_r 的绝对值作为底部边界条件, 自源表面到无穷远的势场解, 得到源表面外任意球面的磁场并赋以应有的符号, 作为源表面以外的磁场. HHMS 以 SSCS 在 0.1AU 上的磁场作为 IGMV 的输入, 计算区域从 0.1AU~1.1AU, 底部边界上的参数需要指定, 外边界用外推等方法处理, 采用两步 Lax-Wendroff 差分格式. 接口模块完成 IGMV 底部边界的等离子体密度、速度和压力等参数的输入, 一般采用两个相邻观测时间的 SSCS 在 $21.5R_s$ 的结果(称为 SSCS 图)的时间插值得到每一个格点上 B_r 和 E_f 随时间的变化. 接口模块就根据 B_r 和 E_f , 通过经验关系、磁通量守恒、压力平衡、行星际磁场螺旋结构以及质量守恒来确定 IGMV 的底部边界输入, 其中质量流量通过观测用自回归的线性预测滤波器得到^[55]. IGMV 的输出是 L1 点的太阳风 8 个参数的时间变化序列. IGMV 的缺点是数值粘性高, 磁场散度没有抑制到截断误差以下, 对于 0.1AU 以下的区域没有任何动力学信息, 另外对极端的太阳风条件(IGMV 的下边界为亚快波速度流动时)不能正确模拟. 优点是实现容易速度很快, 对计算机的资源要求不高. 在扰动模式下, 扰动要么以物理量脉冲的形式的方式加在日冕底部, 并假设从开始到 $2.5R_s$ 是径向传播, $2.5R_s$ 到 IGMV 的下边界采用前面

介绍的 HAFv2 模型, 以它在 IGMV 下边界的输出作为 IGMV 模拟扰动时下边界的输入^[56], 要么直接将扰动加在 IGMV 的下边界^[57]. Freeman 和 Skapura^[58]详细介绍了如何利用 L1 点太阳风参数设计预测地磁指数的非线性预测滤波器.

Detman 等^[54]利用 1993~2002 年的太阳磁场观测研究了 HHMS 对太阳风背景的预测性能, 其预测效果因年份而异. 该模型能够模拟出太阳风高速流, 对大部分时间, 能够正确给出 IMF 的极性, 但是对诸如高速流的起止时间等细节的模拟却不够好. 图 7 给出了该模型模拟的和观测的 2002 年的太阳风速度以及 IMF 极性的时间序列图. 结果说明 SSCS 能够正确给出 $21.5R_s$ 表面上磁场的极性, 但是对速度的表示只能达到有限的成功, 而对地磁指数 A_p 的预测则直接依赖于行星际空间的预测精度, 所以说日冕行星际模型需要进一步改善, 将更多的观测用于模型的输入、提高网格的分辨率以及寻求更恰当的日冕模型和更好的接口模块是改善模型的几种途径. Smith 等^[57]以 1997 年 5 月 12 日的事件为例比较研究了 HAFv2 与 HHMS 的预测能力, 其中 CME 以 II 型射电暴推断的速度大小, 软 X-射线耀斑的持续时间构成的速度和温度脉冲作为输入, 发现背景和扰动输入的选择对 HAFv2 预测激波到达地球时间的预报结果影响很大, 单纯用 II 型射电暴推断的初始速度作为输入对模拟结果来说太高, 用太阳及日球层观测台(SOLar

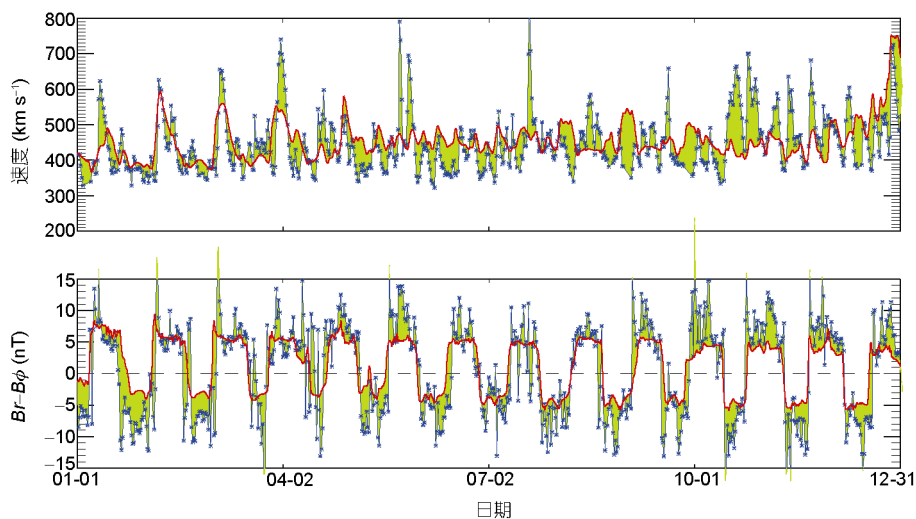


图 7 模型 HHMS 模拟结果和观测的对比图

2002 年模拟的和观测的太阳风速度和 IMF 极性的时间序列图. 带有“*”号的蓝线是 ACE 二级科学数据的 12 h 均值, 红色是模拟结果. 便于对比, 模拟和观测之间的区域用绿色填充. 此图摘自文献[54]

and Heliospheric Observatory, SOHO)的广角光谱日冕仪(Large Angle Spectrometric COronagraph, LASCO) C2 的观测就要好一些, 而背景太阳风高速流对预报结果的影响也较大, 用同样的扰动作为 HHMS 的输入, 可更好地再现观测结果, 这主要是因为 HHMS 用更新的太阳表面观测, 所得到的背景更接近真实的观测背景.

Wu 等^[56]把 HAFv2 和 HHMS 中的行星际模型 IGMV 相结合, 构成 HAFv2+3DMHD 模型, 模拟了 2003 年 10 月 25~28 日的 CME 事件, 这个模型能够模拟出两个 CME 之间及其与背景太阳风的日球电流片(Heliospheric Current Sheet, HCS)等结构相互作用的过程, 可以用这个模型来寻找 ICME 事件的太阳源, 用于理解 CME 在行星际空间的传播过程和 CME 引起 HCS 畸变等现象. 模拟所得到的速度、密度和总磁场的时间变化剖面与观测符合较好, 但是其他物理量则与观测相差较大.

1.4 日冕-日球层模型

日冕-日球层模型(CORonal and HELiospheric model, CORHEL)是集成空间天气建模中心(Center for Integrated Space weather Modeling, CISM)开发的空间天气耦合模型中的日冕和日球层模型. 科罗拉多大学等多家单位合作建立的旨在研发下一代空间科学和空间天气模型的共同协作建模中心(Community Coordinated Modeling Center, CCMC)提供其在线运行, CCMC 的详情可参见 http://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/models_at_glance.php 介绍. CORHEL 模型有日冕和日球层两个模型耦合而成, 日冕模型可以是 WSA 模型或 MAS (the MHD-Around-a-Sphere model) 模型, 日球层模型则是 ENLIL(取自古代苏美利尔人的风神之名)模型, 分别称为 WSA/ENLIL 和 MAS/ENLIL^[59]. WSA 在 $21.5R_s$ 球面上的输出结果和 MAS 在 $30R_s$ 球面上的计算结果作为 WSA/ENLIL 和 MAS/ENLIL 中 ENLIL 的底部边界. 关于 CISM 对各种模型的耦合及其他方面的研究进展可以参考 2004 年 *J. Atmos. Sol.-Terres. Phys.* 的第 66 卷专刊.

MAS 是一个三维时变 MHD 有限差分日冕模型, 控制方程中的磁感应方程用 Maxwell 方程组的两个旋度方程和欧姆定律代替, 引入矢量势表示磁场. MAS 模型求解的区域一般为 $1R_s \sim 30R_s$, Lionello 等^[60]详细介绍了所用的差分格式. MAS 模型的一大特点

是可以让光球磁场观测自洽地引入到计算区域, 并能利用连续的视向磁场观测, 在每一计算步通过求解二维球面泊松方程和正常的 MHD 方程差分格式实现底部边界的电磁场条件的连续更新^[61]. 因此该模型可以研究日冕结构的演化, 进而为日球层模型提供接近实际的输入. 其他的量则采用典型值作为输入. MAS 模型的能量方程中采用了多方过程, 因而所得到的太阳风不可能再现高低速太阳风流动, 所以与日球层模型耦合时, 在日球层模型输入中采取了根据磁场分布人为指定速度分布的特别处理方法^[62], 而密度采用质量守恒、温度采用总压平衡求得^[59].

ENLIL 模型最初是科罗拉多大学的 Odstroil 及其合作者开发的三维数值模型, 其计算区域为: 径向区域从 $21.5R_s$ 或 $30R_s$ 开始, 最远可达到 10AU, 余纬范围为 $30^\circ \sim 150^\circ$, 经度范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$, 差分格式是修正的 TVDLF(Total Variation Diminishing Lax-Friedrich)格式^[63], 可以采用维度分裂技术提高计算效率, 应用区域分解法实现并行计算, 目前还加入了并行自适应网格细化功能. 扰动模拟中的 CME 则以物理量(密度、温度和速度)的脉冲形式从底部引入. ENLIL 的特点是在计算背景的时候, 用磁单极场表示磁场, 以便于产生电流片结构, 在后处理时将追踪到底部边界上磁场为负的格点反号, 计算扰动时, 为了追踪 CME 的传播过程和磁场的极性, 在求解 MHD 方程组的同时, 还一并求解 CME 的质量连续性方程和 CME 磁场示踪粒子随太阳风的传播方程^[64].

Mikić 等^[61]展现了 MAS 模型对各个太阳活动位相的太阳风大尺度结构的模拟能力, 他们用 NSOKP (National Solar Observatory Kitt Peak)和 WSO (Wilcox Solar Observatory)的视线方向磁场观测概图作为输入进行了背景模拟, 与高山观测台的 MK(MarK)III 的 pB (polarized Brightness)观测做了比对研究, 结果说明模拟能够较好得再现太阳活动极小期和上升期的冕流结构, 可以预测 Ulysses 穿越电流片的位置, 证实了高速风源于冕洞区域, 对“完整太阳月(Whole Sun Month, WSM)”的模拟还给出了象鼻状的冕洞结构, 但是没有延伸到观测那样低的纬度. 他们随后对原来的模型进行了改进, 使之能够模拟日冕结构随时间的演化, 定性地讲, 其结果与 Ulysses 观测到的准稳态结构基本相符. Riley 等^[62]采用 MAS 模型模拟第 1913 卡林顿自转周(Carrington Rotation, CR)、CR 1892 和 CR 1947 的太阳风背景, 发现速度、密度结构

与观测可以比较好地符合, 对处于太阳活动下降期的 CR 1892 和处于太阳活动极大期的 CR 1947 的模拟表明, 结果与观测基本符合, 对各个太阳活动位相的 HCS 结构的模拟结果与对应活动位相的 HCS 位形观测特征(翘曲和分布形态等)大体相符.

Odstrcil^[65]以修正的每日更新的 WSO 视向磁场概图作为输入, 用 WSA/ENLIL 模型模拟了 CR 1891 到 CR 1894 的太阳风背景, 结果能够较好地重现行星际太阳风的速度变化特征, 但有时会出现较大的偏差. 用这个模型的直角坐标系版本对 1995 年 5 月 14~18 日的 CME 事件进行了模拟, 结果表明该模型还需改进. Odstrcil 等^[66,67]分别用 MAS/ENLIL 和 WSA/ENLIL 对 1997 年 5 月 12 日的 CME 事件的日地传播过程作了模拟, 二者结果相似, 反映了初始阶段 CME 在冕流中的膨胀过程, 随后与背景太阳风高速共转流的相互作用和在行星际空间中的演化过程, 表明背景太阳风对 CME 传播有很大影响, 并对日地联系观测台(Solar TErrestrial RElation Observatory, STEREO)的可能观测做了图象合成研究. 图 8 给出 MAS/ENLIL 模型这一研究的部分结果.

最近, Lee 等^[59]利用 WSA/ENLIL 和 HAF/ENLIL 对第 23 太阳活动周下降期的背景进行了对比模拟, 与观测比较发现, 它们都可用来确定 IMF 在太阳上的源点, 二者的结果也相似, 速度较观测为低, 而密度则较观测为高, 能较好地反映各物理量的变化趋势, 对它们的改进工作仍然在进行之中. 新一代的模型要把 CME 的最新运动学模型^[68]、IPS(InterPlanetary Scintillation)和 SMEI(the Solar Mass Ejection Imager)的观测引入输入, 详情可参见相关技术文档介绍(http://ccmc.gsfc.nasa.gov/RoR_WWW/workshops/2007/presentations/day2/Odstrcil.pdf). 最新的 ENLIL 与锥模型相结合的研究表明, 在预报 CME 到达时间方面较其他模型有一定程度的改善^[69].

1.5 Nakamizo 等的三维数值模型

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, 这个模式有以下特点: 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^[70], 在径向上采用结构化网格, 径向范围为 $1R_s \sim 200R_s$, 使用 FVM 求解. 该模型的控制方程采用共转坐标系中修正的守恒形式 MHD 方程组, 模型将磁场分解为不变的势

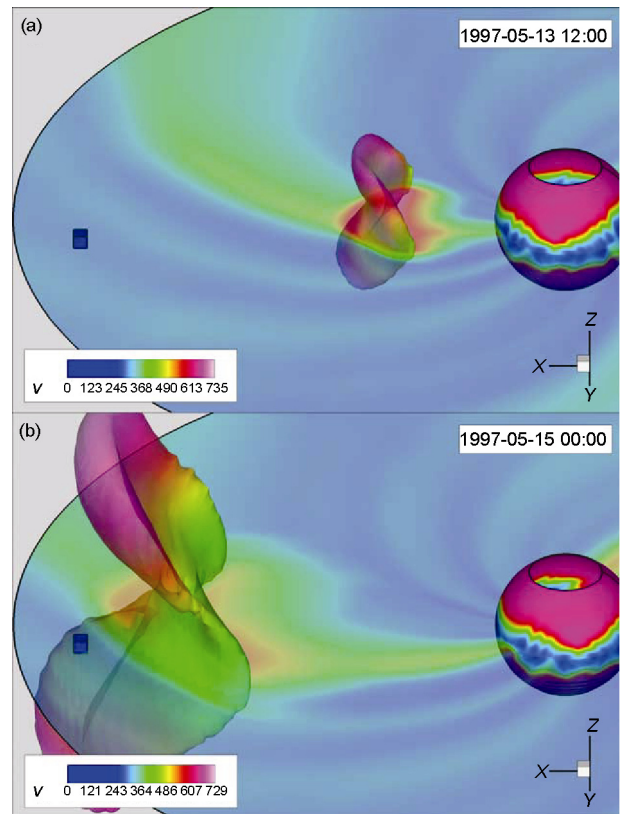


图 8 模型 MAS/ENLIL 的模拟结果

1997 年 5 月 13 日 12:00 UT(a)和 5 月 15 日 00:00 UT(b)扰动太阳风参数的可视化. 源表面上和赤道面上的速度用伪彩色表示, 赤道面上的伪彩是透明的. 注入的等离子体云用密度(以 $(R_{\text{sun}}/r)^2$ 归一化)最大值的 25% 的等值面来表示, 该等值面用速度的伪彩涂色. 地球位置用蓝色盒子表示. v 单位: km s^{-1} . 此图摘自文献[66]

场 $\mathbf{B}_0$ 和对它的偏离 $\mathbf{B}_1$ 两部分以提高计算的精度, 算法中的数值通量项采用基于本征模分解的迎风形式, 选用 TVD 特性的差分格式, MUSCL (Monotone Upwind Schemes for Scalar Conservation Laws)插值方法和连续可微的 van Albada 通量限制器, 使格式具有良好的稳定性和收敛特性^[71,72]. 计算中将速度矢量分解为沿磁场的场向分量和两个横向分量, $\mathbf{B}_1$ 分解为径向和两个横向分量, $\mathbf{B}_0$ 分解为视线方向分量($B_{0, \text{los}}$)和两个横向分量.

Nakamizo 等^[70]详细介绍了这些量在底部和顶部的边界条件, 其中 $B_{0, \text{los}}$ 采用了 WSO 的光球视向磁场观测, 底部的温度密度取观测到的典型值, 至于初始条件, 密度和热压力为静力平衡解, $\mathbf{B}$ 为势场, $\mathbf{V}$ 为 0, 这样对时间积分求得太阳风稳态, 方程中的动量和能量添加项与磁场在源表面上的扩散因子相关, 并

随径向距离指数变化. 通过调节动量和能量添加项, 该模式能够给出 CR 2028 的日冕闭合区和开场区的温度结构、冕洞的位置和形态、质量流量的分布特征, 基本再现了大尺度背景太阳风结构, 特别是速度与观测符合很好, 密度和温度次之, 磁场在细节上还不是很好. 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. 图 9 是模拟得到的稳态所表征的日面和日球全球结构的联系及模拟结果与观测的对比.

1.6 太阳行星际守恒元解元模型

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 Feng 等^[73]开发的从太阳表面出发直至行星际空间的三维数值模型. 控制方程采用守恒形式的 MHD 方程组, 模式的特点是在数值格式中将时间和空间不加区别作为一个整体, 并且对空间微分作为待解变量, 物理量在解元 (Solution Element, SE) 内假定是光滑可微的, 而在相邻的 SE 之间或者在守恒元 (Conservative Element, CE) 内可以出现间断. 这一方法的网格划分在径向方向是结构化的网格, 而在球面上采用非结构化网格, 将基本物理变量和通量项在待求节点处作 Taylor 展开, 再应用高斯定律对控制方程在时空四维控制体

上进行积分, 得到关于基本物理变量及其空间导数的非线性方程组, 应用牛顿迭代法解出新时刻的基本物理量, 基本物理变量对空间的导数通过中心差分的加权平均构造. 球面上是采取多面体分裂划分产生贴球体网格, 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. SIP-CESE 模式可以满足磁场散度为零的条件, 无需特别处理. 对边界条件的处理参见文献^[73].

Feng 等^[73]用该模式对 CR 1922 的背景太阳风结构进行了研究, 以 WSO 的磁场概图观测作为磁场的初边值输入, 并在方程中添加体积加热项, 所得到的太阳风密度、速度和磁场结构呈现出该时期的背景太阳风结构的典型变化特征. 图 10 给出了这一研究得到的密度和速度分布图.

Hu 等^[74]用这种方法研究了第 23 太阳活动周日球电流片和日冕磁场的演化. 通过与 PFSS 模型和日冕白光观测的对比, 他们发现这种方法可以较好地再现 HCS 的形态随太阳活动周的演化特征, 结果与日冕白光强度观测基本相符. 图 11 给出了模拟得到的第 23 太阳活动周日球电流片 (HCS) 和日面磁场的演化过程. 为完善 SIP-CESE 模型, Feng 等^[75]将计算区域分为六片对称的区域, 首次实现了经度纬度方向并行, 很好地克服网格在两极的奇性与收敛性问题,

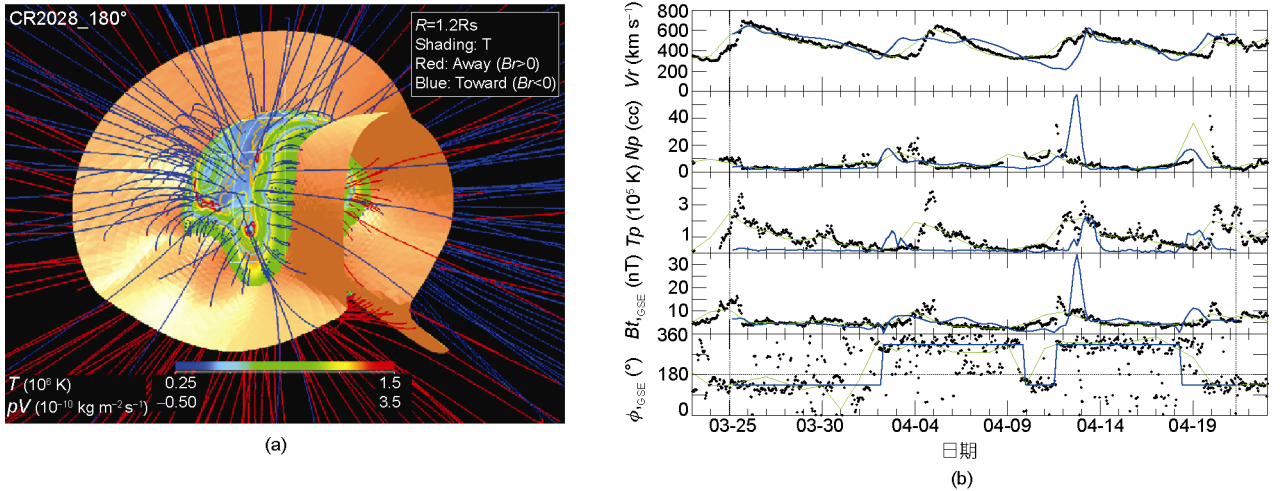


图 9 Nakamizo 等模型的模拟结果

(a) 日面和日球全球结构的联系. 此图中心经度为卡林顿 180°, 红线为离日的磁力线, 蓝线为向日的磁力线, 色阶图表示日心距为 1.2R_s 球面上的质量通量, 橙色的面表示磁中性片. (b) 模拟数据和 ACE 观测数据的对比. 水平轴是时间轴, 从 2005 年 3 月 29 日到 4 月 24 日, 竖直的点线表示 CR 2008 的开始和结束. ϕ 表示磁场极性的 IMF 和 GSM-X 轴的夹角. 黑点表示 ACE 的 1 h 均值. 绿实线是模拟数据. 此图摘自文献^[70]

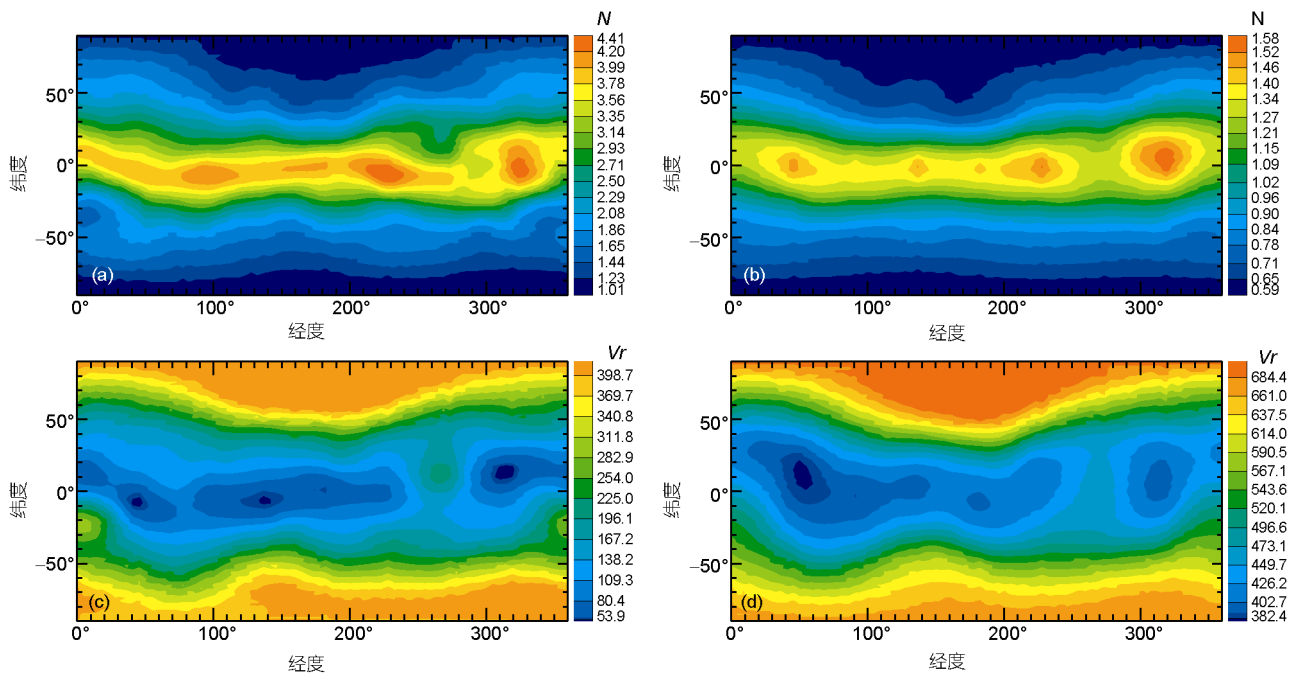


图 10 CESE 模型的模拟结果

计算得到等离子体参数. (a) $2.5R_s$ 表面上的密度分布(单位: 10^6 cm^{-3}); (b) $20R_s$ 表面上的密度分布(单位: 10^4 cm^{-3}); (c) $2.5R_s$ 表面上的速度分布; (d) $20R_s$ 表面上的速度分布(单位: km s^{-1}). 此图摘自文献[73]

引进快速多重网格技术处理磁场散度, 利用库朗数不敏感(Courant-number insensitive)方法解决了日地空间 CFL 条件的分布差异问题, 采用多重时间步迭代(multiple time stepping)加速时间积分, 在时变边界条件中利用 Ulysses 飞船观测结果限制太阳风质量流量, 在太阳风加速/加热中考虑磁场拓扑位型与开场和闭场的影响, 模拟研究了 CR 1911 的太阳风背景并与 WIND 飞船观测进行了对比, 其结果基本再现观测特征.

Zhou 等^[76,77]用这个模型分别研究了 1998 年 11 月 4~5 日的 CMEs 和 1997 年 5 月 12 日 CME 的传播和演化过程, 其中 CME 用底部边界的速度、温度和密度脉冲引入计算区域, 结果再现了 CME 的相互作用而合并的过程, CME 驱动的激波到达 1AU 的时间与观测符合较好, 磁场大小、速度、温度和密度的变化剖面与观测大体一致, 定性地再现了 1AU 处的观测, 展现了这个模型在太阳风背景和扰动传播等研究方面的应用前景^[24].

1.7 日冕行星际模式

日冕行星际(COronal INterplanetary, COIN) COIN 模式是中国空间天气国家重点实验室冯学尚

等^[78]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. 该模式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 $1\sim 22R_s$)和行星际空间区域($18R_s\sim 1\text{AU}$)两部分. 在日冕区域, 先用 TVDLF 守恒差分格式计算出新时间步的值, 再将磁场部分用 MacCormack II 型格式的计算结果替换掉, 这样处理可使磁场无源条件的误差保持在截断水平, 而在行星际空间区域用 MacCormack II 格式求解与时间无关的定态 MHD 方程组^[39,79], 这样就完成了一步求解.

Feng 等^[78]用从 CRs 1888 到 1893 的 WSO 的磁场观测作为初始边界条件, 采用类似于 Groth 等^[38]和 Manchester^[48]的方法在 MHD 方程中加入体积加热项, 研究了该时期的稳态背景. 结果表明最大密度区就在电流片附近, 纬度范围为 $\pm 20^\circ$, 这些特征为太阳活动极小期的观测所证实^[80,81], 模拟得到的电流片是这一时期电流片的平均位置, 而不是某一具体自转周的 HCS. 除了黄道面附近 $\pm 20^\circ$ 之间的区域是 $450\sim 550 \text{ km s}^{-1}$ 的低速太阳风外, 其他都是 $600\sim 800 \text{ km s}^{-1}$ 的中高速太阳风, 而从 $\pm 40^\circ$ 一直到极区的中高纬区域, 速度为 $700\sim 800 \text{ km s}^{-1}$. 数值结果也表明高

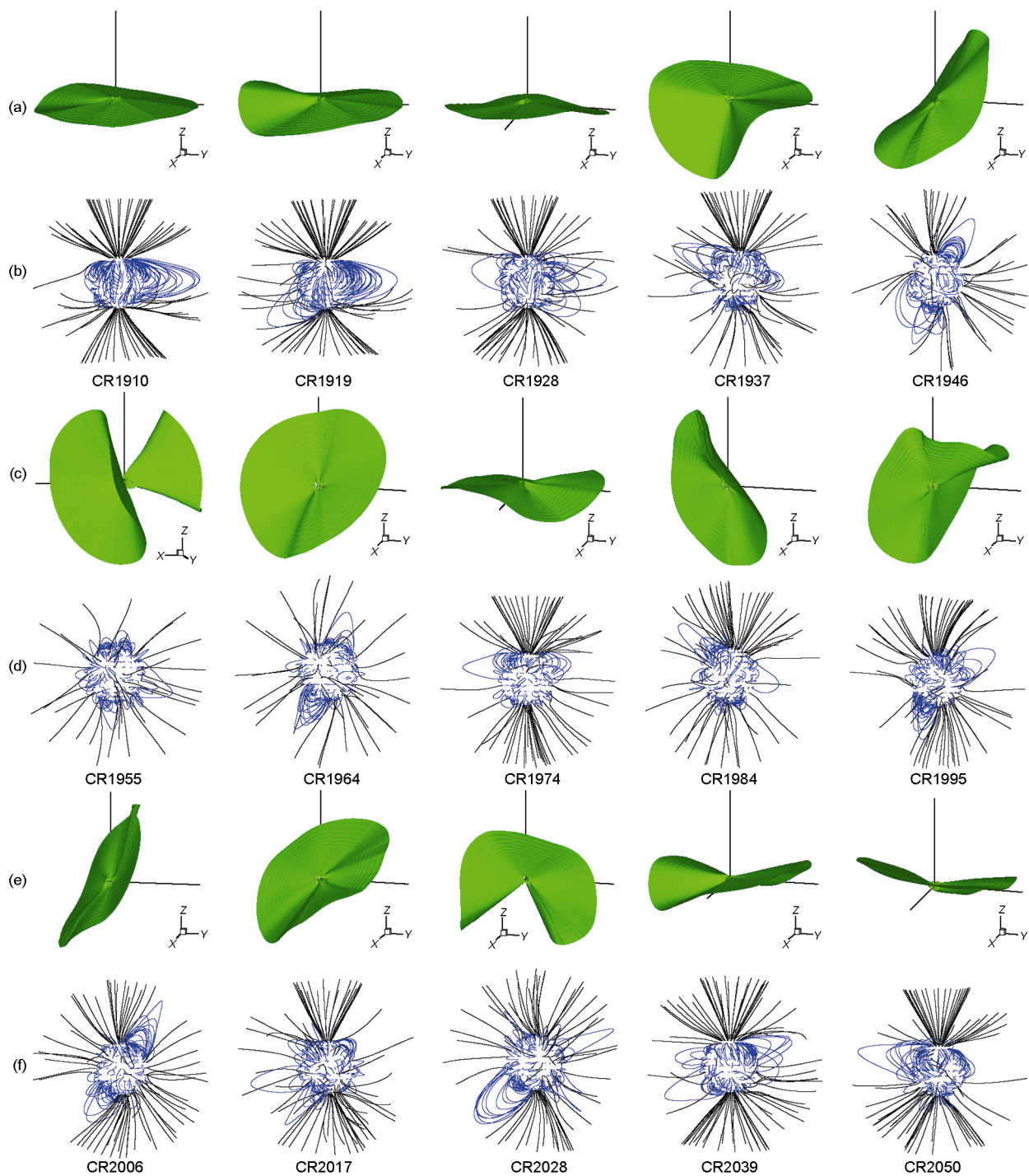


图 11 CESE 模型的模拟结果

第 23 太阳活动周日球电流片(HCS)和日面磁场的演化。根据每个卡林顿周对应的活动位相, 每 5 个卡林顿周分为一组。(a), (c)和(e)是 HCS 位形, 对应于 $B_r=0$ 的等值面; (b), (d)和(f)是日冕磁场位形图, 黑色代表开放场, 蓝色代表闭合磁力线, 注意各图磁力线在光球上的足点相同。此图摘自文献[74]

低速太阳风之间的交界面很陡, 但仍较观测为宽, 模拟结果还能再现 Ulysses 观测到的许多细节.

Shen 等^[82]用这一模式在 $2.5R_s$ - $1AU$ 的范围内对 1997 年 1 月的事件进行了数值研究. 为了自洽地确定模拟背景时的底部边界条件, 利用 Wei 等^[83]和 Xiang 等^[84]的方法, 自洽确定了源表面处的背景初始边界条件, 在 $2.5R_s$ 到 $1AU$ 的范围内进行了事件模拟, Shen 等^[85]对该方法进行了异步并行化处理, 模拟了

2003 年 11 月 13 日的 CME 事件在日地空间的演化, CME 仍然用底部边界的密度速度和温度脉冲来表示. 两次模拟结果均再现了 CME 传播过程中在经度方向上的偏转, $1AU$ 处的总磁场、密度、温度和速度剖面与观测剖面大体一致, 但是 B_y 和 B_z 的变化不够理想. 这些结果说明该模型在事件模拟方面可以高效稳定地实现, 但是尚需改进. CME 在经度方向上的偏转可参见图 12, $1AU$ 处模拟结果与观测的对比见图 13.

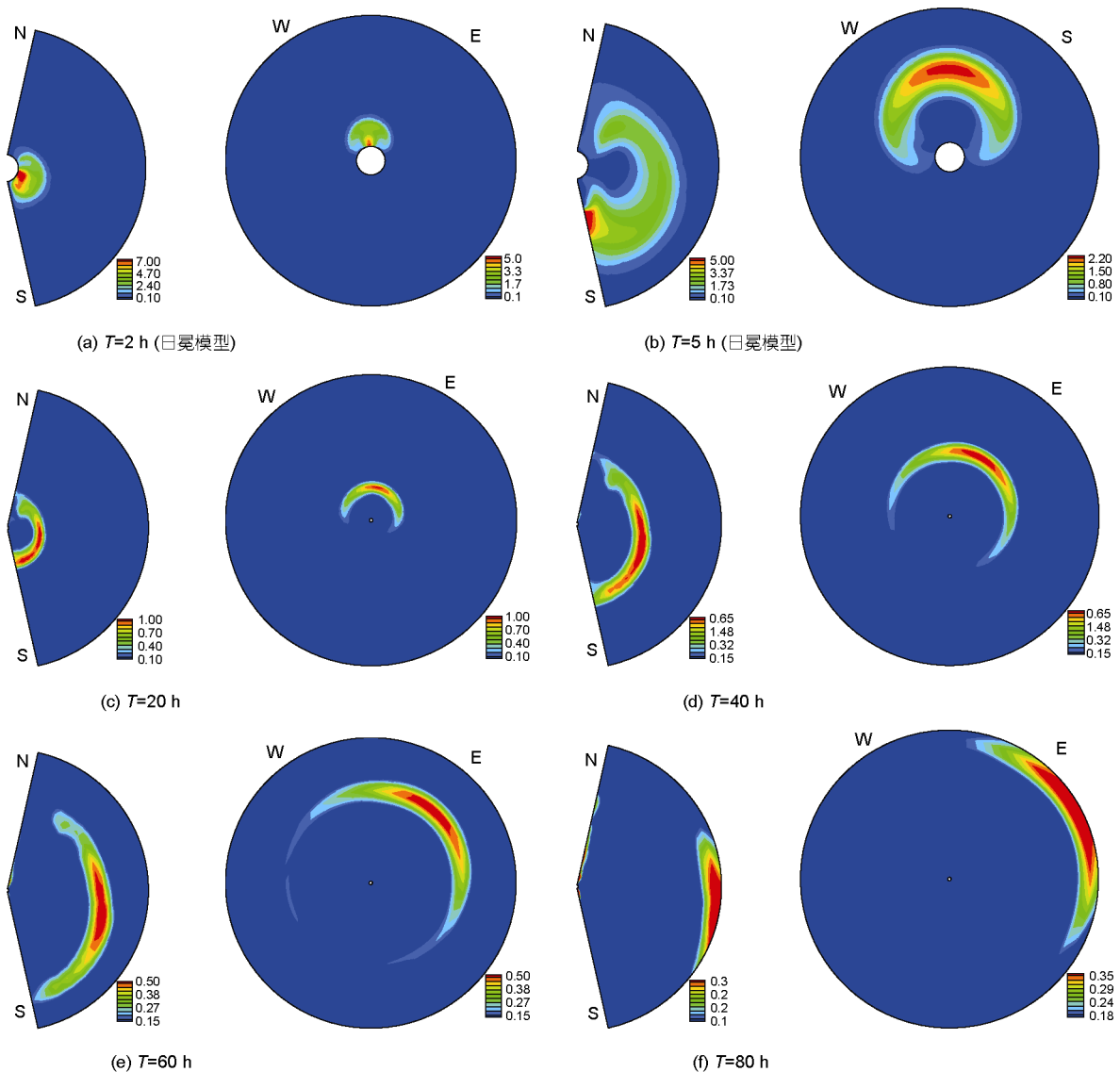


图 12 COIN 模型的模拟结果

相对密度变化等值线的演化. 每一对子图分别表示子午面和赤道面内的分布情况. 图(a)和(b)的径向区域为 $2.5R_s$ ~ $22R_s$, 分别表示施加扰动后 2 和 5 h 的相对密度分布. 图(c)~(f)的径向区域为 $2.5R_s$ ~ $215R_s$, 对应时间分别为扰动后 20, 40, 60 和 80 h. 图(a), (b)和(c)对应于 $\phi=180^\circ$ 的子午面; 图(d)对应于 $\phi=150^\circ$ 的子午面; 图(e)和(f)对应于 $\phi=135^\circ$ 的子午面. 此图摘自文献[82]

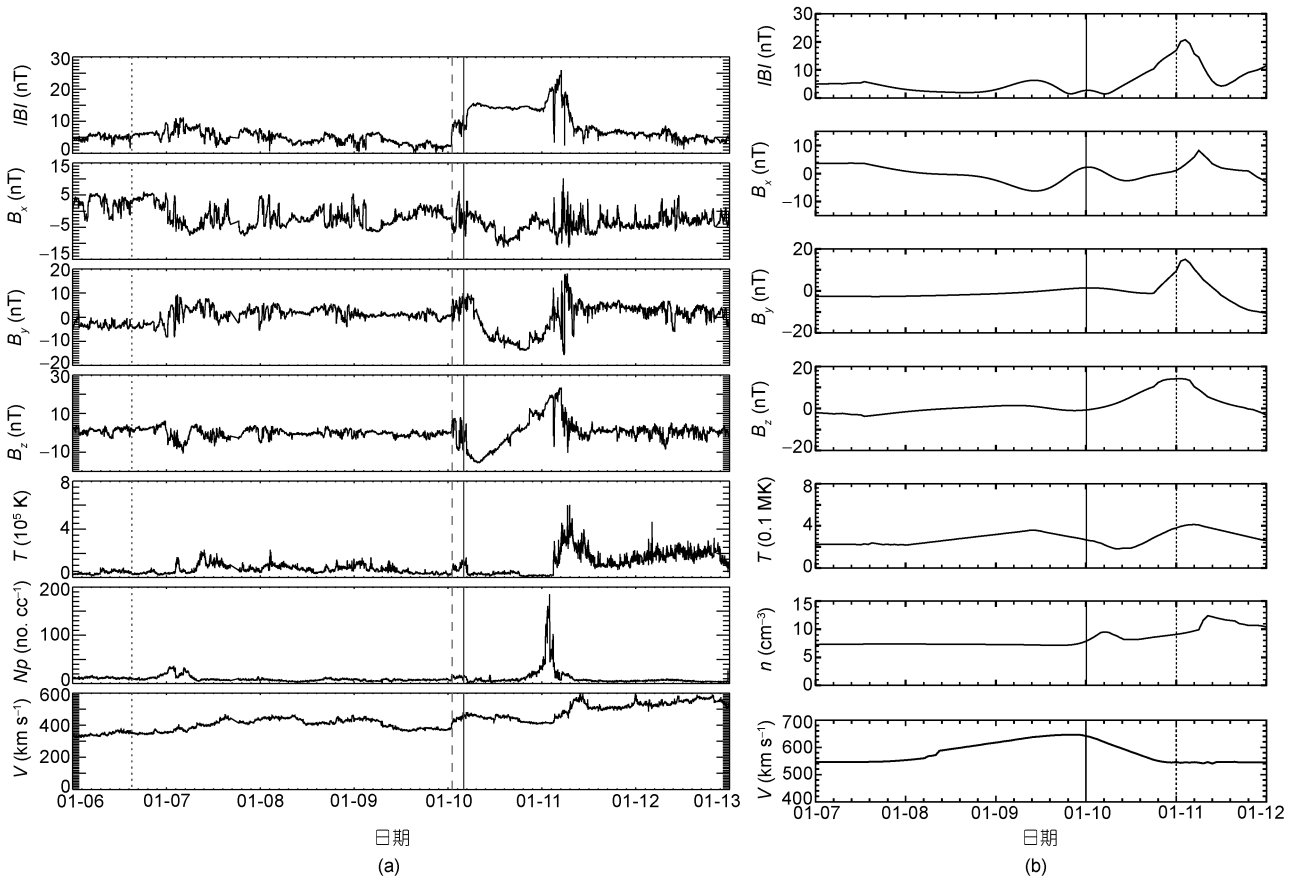


图 13 COIN 模型的模拟结果和观测的对比

(a) 1997 年 1 月 6~13 日 WIND 飞船的磁场和太阳风观测数据, 从上到下依次为总磁场大小 $|B|$, B_x , B_y , B_z 分量, 质子温度 T , 密度 N_p 和太阳风速度 V . 竖直的短虚线表示耀斑开始的时间, 竖直的长虚线表示 ICME 激波到达 WIND 的时间, 竖直的实线表示 ICME 的到达时间. (b) MHD 模拟的磁场和太阳风参数, 排列顺序和观测数据的顺序一样, 竖直的实线和短虚线分别对应于 10 日和 11 日. 此图摘自文献[82]

上面总结的七个模型, 各有特点. HAF 是纯运动学模型, 可以直接用观测作为输入, 速度快, 没有 MHD 模型特有的稳定性、计算速度等方面的限制, 但是它不能提供足够多的动力学信息, 对 IMF 的 B_z 这一关键参数的处理还有待于发展. SWMF 是一个从太阳日冕直至地球磁层电离层的多区域耦合的 MHD 模型, 各区域模型组合灵活方便, 但是对计算能力要求高, 耗时长; HHMS 将三维 MHD 与理论模型 SSCS 和经验模型——线性滤波器结合起来, 能够实时地更新观测, 对计算能力要求不太高, 但是不能提供日冕部分的动力学信息; CORHEL 模型中对日冕区和日球层区分开处理, 日冕区可以采用 HAF 模型、WSA 经验模型和 MAS 模型, 体现了模型灵活的特点, 其中 MAS 可以实现底部电磁场条件的实时更新, 便于研究日冕演化, 而 ENLIL 模型中对 CME 的处理避

免了数值重联, 而且已经与地球空间的区域模型结合起来进行联合研究; Nakamizo 等的模型在日冕和行星际空间采用统一的 MHD 模型进行处理, 带来方便的同时, 对计算能力和资源的要求也较高; SIP-CESE 不仅在日冕和行星际空间采用统一的处理方法, 而且在时间和空间也采用一致的处理方法, 它区别于所有现有太阳风模型所使用的差分格式而充分体现时空守恒的理念, Dryer^[24]指出该模式有望直接利用活动区光球磁场改善物理与数学的初始化输入; COIN 模型针对日冕和行星际的不同特点, 采用不同的处理方法, 便于提高计算效率. 上述模型所得到的结果在一定程度上能够反映观测, 比如太阳风速度、密度、总磁场的变化方面各个模型都较好, 但是对各个磁场分量的变化趋势和大小的再现等问题, 每个模型都有待改进, 才能较准确地预测太阳活动

在不同日球层位置的各种效应^[24]. 模型用观测验证现在已经是每个模型的必须工作, 不同模型相互校验虽然是一项费时的工作, 但是这方面已经出现了为数不多的研究工作^[59,74], 最近 Lugaz 和 Roussev^[86]比较研究了不同模型和不同的 CME 扰动形式对模拟结果的影响, 并与观测对比指出模拟时应该选取恰当的 CME 扰动形式.

虽然三维数值模型取得了很大的发展, 但是从上面对太阳日冕和行星际太阳风以及太阳风暴的常用模式的总结可以看出, 这个领域的模式开发还处于初步阶段, 正如 CISM 所总结的: “现有模式可以模拟出太阳活动极小期的太阳风结构, 但再现极大期的太阳风结构仍然还是一个挑战, CME 对建模者来说更是难以捉摸的圣杯.” (<http://sprg.ssl.berkeley.edu/cism/>).

以上对从太阳到行星际空间某一距离的三维数值模型做了简要的总结, 而太阳风与地球磁层电离层相互作用可能是空间天气效应最直接关注的部分. 现在以位于 L1(Lagrangian point 1)点的太阳风等离子体和 IMF 的观测数据作为边界条件, 以第一原理为基础, 已经发展出许多数值模型, 能够研究行星际太阳风对弓激波-磁层-电离层-热层系统的影响. 主要的模型有: 预报太阳高能粒子的 SOLPENCO (SOLar Particle ENgineering COde)模型^[87], 描述行星际太阳风磁层电离层耦合的全球模型有 PPMLR(Piecewise Parabolic Method with a Lagrangian Remap)-MHD^[88,89], GUMICS-4(Grand Unified Magnetosphere-Ionosphere Coupling Simulation, version 4)模型^[90-92]、BATS-R-US 模型、CTIM(Coupled Thermosphere Ionosphere Model)^[93]、OpenGGCM (Open Geospace General Circulation Model)^[94], 描述内磁层和电离层相互作用的有 RCM(the Rice Convection Model)^[95]、LFM (Lyon-Fedder-Mobarry)模型^[96]、内磁层粒子输运和加速模型(the Inner Magnetosphere Particle Transportation and Acceleration Model, IMPTAM)^[97]、Fok 等^[98]开发的环电流模型, 上述模型以及众多的各区域的经验模型已超出本综述的范围, 有关这些模型的具体评述可以参见 Watermann 等^[99]. 另外, Messerotti 等^[100]对太阳天气事件的观测建模的最新发展进行了评述, Lathuillère 等^[101]简要总结了应用于太阳大气、行星际空间以及地球磁层、电离层、热层的各种模型的输入输出及应用前景, Baker 等^[102]总结

了各个区域的模型的现状, 指出了建立从太阳到地球的空间天气因果链模型将遇到的困难和挑战.

2 进一步研究中应关注的问题

本节将从计算、物理、数值格式和数据同化方面简要说明在日冕行星际过程三维建模应该关注的问题.

2.1 计算方面

目前的三维数值模型需要耗费大量的计算资源, 包括 CPU(Central Processing Unit)、内存、磁盘、网络等. 出于经济性、可获得性和运算速度要求等方面的综合考虑, 三维数值模型一般运行在属于分布式内存架构的 Beowulf 集群上(<http://www.beowulf.org/>). 模型运算时, 有多个进程在同时运行, 彼此间通过以太网或更高速的网络进行数据交换, 达到数据互操作的目的. 模型可以通过增加进程数量加速计算, 但是加速比不是随着进程数的增加而线性增加的, 因为各进程之间必须进行数据同步才可以将计算进行下去, 而通过网络进行数据交换是一种带宽低、延迟高的操作, 在进程数达到一定的数量后, 进程间通信时间将超过数值计算时间, 此时再增加进程数量就不会获得加速. 为了模型能在更大规模的计算集群上获得较好的加速, 应该选择尽可能并行化、各进程间通信量尽可能少的算法.

三维数值模型经常采用自适应网格技术, 根据物理量变化自动加密放粗网格, 在物理量快速变化区域提高格式的分辨率, 改善计算结果在这些区域的精度, 同时也可能改善某些重要小量如 B_z 的计算结果, 又可以在物理量变化缓慢区域减少不必要的运算, 缩短计算时间^[38,51,52,63], 实现跨区域模型的耦合或者建立自日冕直至地球磁层电离层的整体数值模型. 在网格数量随时间变化的情况下, 进程的负载均衡是影响模型计算时间的关键问题之一, 为了避免出现少数进程计算时间过长而其他进程处于等待的情况, 必须在网格变化后调整进程和网格间的映射, 重新平衡分配各个进程的計算量, 进一步则要同时考虑通信量的权重. 同时, 太阳风等离子体密度、磁场等物理量在不同区域的变化可达几个数量级, 使 Alfvén 速度、等离子参数等也相应有好几个量级的变化, 从而使稳定性 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy)

条件从日冕到行星际变化很大, 也给进程间的负载均衡带来很大的困难.

三维数值模型的数据输入输出(Input and Output, IO)同样是一个不可忽视的问题, 一个算例生成的数据经常达到数百 GB(Gigabytes). 目前一般仍是采用串行 IO, 以文本文件或普通的二进制文件存储数据. 这种方式存在两个问题: 一是生成的数据文件是非自描述的文件, 不利于不同个人、不同研究组之间的交流, 给后续的处理和管理带来很大的困难; 二是需要进行 IO 的数据量较大, 会占用较多的 CPU 时间和网络带宽, 同时占用大量的磁盘空间, 给交换、备份等操作带来很大压力. 为缓解这一问题, 应该采用类似 GPFS (General Parallel File System)、Lustre 等¹⁾并行文件系统以及自描述的、内置压缩的和并行 IO 的文件格式.

如何对这些海量的数据进行各种抽取、组合, 并及时、有效的可视化是目前面临的又一主要问题. 除了采用并行文件系统和合适的文件格式外, 还须研究适合三维数值模型的可视化方式, 并使用并行计算等技术加快相关算法的计算速度, 同时达到高分辨率和少的计算时间, 以满足分析和应用的要求.

随着三维数值模型时空分辨率的提升, 模型固有的计算量不断增加, 生成的数据量也在不断增长. 现有的计算设施仍然难以满足模型研究和应用的需求, 如何应用新的计算技术加速运算也成为值得关注的问题. 使用计算卡加速计算的异构集群便是一个值得注意的方向(<http://www.top500.org/>), 在众多的异构集群中, 从可获得性(容易获取)、经济性(获得成本和运行成本低)和易掌握(有成熟的开发工具、容易学习)的角度考虑, CPU/GPU(CPU/Graphic Processing Unit)集群应该是一个较好的选择²⁾[103~105].

2.2 物理方面

目前三维太阳风研究多采用 MHD 方程组作为控制方程, 但是用理想 MHD 描述太阳风目前还存在不足. 首先, MHD 方程适于描述碰撞为主的等离子体, 但是太阳风等离子体是无碰撞的等离子体, 并且太

阳风粒子常常不是麦克斯韦分布^[106~108]; 其次太阳风有时偏离理想 MHD 方程组所要求的磁冻结条件^[109], 但是造成这种偏离的物理过程仍然不甚明了^[110]. 虽然如此, 但是 MHD 方程组直到目前仍然是三维建模的基础.

在 MHD 方程中假设多方关系并不能得到与观测相符的太阳风结构, 而日冕加热和太阳风加速问题困扰了人类近半个世纪, 却仍然没有最终的答案. 前一个问题回答太阳大气如何从 $\sim 10^4$ K 的光球在很薄的过渡区被加热到约 10^6 K 的日冕, 第二个问题则是要说明粒子怎样被加速到太阳风所观测到的速度. 现已针对活动区、闭合冕环、宁静区和开场区提出了许多不同的日冕加热机制^[111~113]. 这些模型都认为其最终能源来源于光球下的对流层^[114,115], 但是如何将对流层的一小部分机械能转换为光球之上的日冕磁自由能和热能仍然不甚明了. 一般认为, 低日冕中的冕环是通过足点连续施压驱动的小尺度间歇性的磁重联加热的^[116], 但是这种脉冲式的能量供给对太阳风加速的贡献尚未可知, 现在提出了诸多的太阳风加速理论, 如波动/湍流加速^[117,118], 重联/冕环开放模型^[119,120]以及粒子回旋波加热机制等^[121,122], Cranmer^[116]给出了相当详细的评述. 虽然理论上对日冕加热和太阳风加速还没有最终解决, 但是在数值研究中, 正如前面所总结的那样, 通过经验关系在控制方程中添加加热和加速项可再现观测到的高速和低速太阳风背景结构^[38,39,50,70,73,76~78,85], 而且非常成功. 随着理论的发展能否采用更加合理和自洽地方式处理加热和加速问题, 是一个应该关注的问题.

如果采取了恰当的初始和边界条件, 三维数值模型就能够得到与观测相符的结果, 但是目前我们还无法获得足够的观测来驱动模型的运行. 因此各种近似模型和典型观测值被用于太阳风背景模拟的初始输入和边界条件的确定之中. 用得最广泛的是密度、速度和温度用一维 Parker 太阳风解, 磁场用多极子组合或者以地基和天基的视向磁场观测作为底边界的势场解, 以它们作为输入采用时间松弛法得到自太阳表面直至行星际空间的跨阿尔芬速度的稳态太阳风解^[36,38~40,50~52,60~62,70,76~78,85], 边界条件大多

1) <http://www.ibm.com/systems/clusters/software/gpfs.html>; <http://www.lustre.org/>

2) 参见网页 <http://gpgpu.org/>; http://www.nvidia.cn/object/cuda_home.html; <http://www.khronos.org/opencv/>; <http://www.llnl.gov/visit/>; <http://developer.amd.com/gpu/Pages/default.aspx> 和以下文章 Wong H C, Wong U.H., Feng X, et al. Magnetohydrodynamics simulations on graphics processing units, submitted to Comput. Phys. Comm., 2009, arXiv.org e-print archive: <http://arxiv.org/abs/0908.4362>

采用近特征无反射边界条件, 也有工作固定底部开放场区的各物理量, 然后求解 MHD 方程组存在间断的黎曼问题以得到计算区域内的各种通量, 从而利用差分格式求解^[123]. 最近, Hayashi 等^[124]采用 MDI 的磁场作为输入, 但是不是采用概图数据, 而是采用了较差自转的“同时帧”, 发现能够更好地重构对磁场较为敏感的日冕特征. 用其他观测作为模型输入的工作还有: 利用 EIT(Extreme ultraviolet Imaging Telescope) 观测反演日冕温度^[125]; 利用行星际闪烁观测反演太阳风速度^[126]; Shen 等^[82]以 WSO 磁场和 MKIII 的 pB 等观测反演日冕磁场和日冕的电密度分布, 然后根据 Wei 等^[83]的方法利用一维 MHD 方程组的积分形式结合观测自洽地确定了 $2.5R_s$ 处的初边值条件; Mikić 等^[61]利用连续的视向磁场观测实现了底部边界的电磁场条件的连续更新. 这些工作为更多地利用观测作为输入和自洽确定初边值条件等问题开辟了新的途径.

模拟以 CMEs 为表现形式的太阳风暴在日冕和行星际空间的传播是数值空间天气研究的重要手段. 但是 CME 的触发机制一直是困扰日冕物理的难题. 目前 CME 的理论模型大体可以分为能量存储模型、能量驱动模型和热爆炸模型^[127~129]. 能量驱动模型假设磁能快速注入并驱动 CME 爆发, 尽管 CME 的日冕观测可以用这类模型中的磁通量管来描述^[130], 但是注入能量需要的 Poynting 通量并没有被观测到^[131], 热爆炸模型假设来自太阳耀斑的低日冕热能突然释放触发 CME^[132,133], 但是只能解释一部分事件, 因为许多事件无耀斑伴随^[134], 有些 CME 早于耀斑^[135]; 能量储存模型假定驱动 CME 或其他太阳活动的能量缓慢地存储在爆发前的磁场中, 光球运动使日冕磁场产生扭曲和剪切, 或者从光球浮现就已经是扭曲剪切的^[136], 活动区的这些非势场结构^[137,138]为这一假定提供了观测支持, 但是能量如何释放还没有定论, 有的认为连续的磁对消导致原系统失稳^[139,140], 有的认为是磁爆裂(break-out)引起剪切磁拱快速喷发^[141], 还有其他模型, 有关 CME 发生机制可以参考许多详尽的评述文章^[142~144]. 现在的 CME 理论大都认为 CME 的初始过程起因于双极场中的小部分日冕, 但许多观测表明 CME 或许与较大空间尺度的结构有关^[145,146]. 由上面讨论可以看出, 理论和观测还不能提供完善而清晰的关于 CME 爆发机制图像. 在 CME 的全球 MHD 数值研究中, 一般方法是在已经获得的

稳态的基础上, 在下边界引入扰动, 扰动随着时间的推移在解域内从内向外传播. 扰动的具体形式有直接在底部边界引入密度速度温度扰动^[38,39,56,73,82], 也有用通量管模型^[51,52], 最近 Wu 等^[147]用 SOHO 的 MDI 光球磁场观测研究活动区的演化以及 Hayashi 等^[124]的“同时帧”研究万圣节事件的太阳风背景为模拟 CME 提供了新的思路. 另外, 将 SDO(Solar dynamics Observatory)和 Hinode 等卫星以及地面的太阳矢量磁场观测融入到 CME 的模拟之中, 利用 STEREO, SOHO 以及计划中的 Kuafu 卫星对 CMEs 从太阳到地球的三维运动学观测结果^[148~152]约束和校验模型, 是以后研究应该关注的问题之一.

另外, 目前太阳的观测资料大都来源于地面和 1AU 黄道面的空间飞船的遥测, 对太阳风的观测来源于黄道面飞船的实地观测和 IPS 遥感, 1990 年发射的 Ulysses 首次在 1AU 以外对太阳风在纬度方向的变化进行了实地观测. 虽然这些观测资料大大地丰富了我们对于太阳风以及太阳和日球层之间的联系的认识, 但是这些有限区域的观测使得数值模型的约束条件过少, 对模拟结果与观测的对比研究也只能局限在有限的区域. 不仅如此, 这些观测还无法为许多基本的物理问题提供准确的答案, 比如, 太阳风的源、太阳风暴中磁场的断裂, 太阳高能粒子的产生等, 这是因为它们在从近太阳向外传播的过程中, 行星际空间中各种非线性过程大大地改变了它们的本来面目, 要回答这些问题必须对近太阳的等离子体、磁场、波动以及 SEP 进行实地观测, 而且是多点的同时观测, 以便捕捉这些现象的空间结构及其时间演化, 追踪到太阳源区, 对源区进行成像和光谱观测. NASA 和 ESA 正在实施的日球物理探测者(HELio-physical EXplorers, HELEX)计划将对近日区的太阳风进行实地观测. 其中计划于 2015 年发射的 Solar Orbiter 将对日心距离为 0.22 到 0.76 AU, 日面纬度在南北纬 34° 以内的太阳风等离子体、磁场、波动等进行实地探测, 计划于 2017 年发射的 Solar Wind Sentinels 将对太阳风在径向和经度方向进行多点同时实地观测, 还将对太阳背面进行观测. 除此之外, 拟于 2015 年发射的 Solar Probe Plus 将对 $9.5R_s$ 的近日区域进行观测, 计划中的 KuaFu 卫星将对太阳爆发事件的前兆进行独特的观测, 同时与 Solar Orbiter 和 Sentinels 构成独特的观测视角对日冕和日球层进行三维协同观测^[153]. 这些对以前从未涉足的区域进

行的观测不仅为我们对太阳风源区的磁场结构和动力学过程、日冕加热和太阳风加速的能量传输方式和耗散方式、太阳高能粒子的源、加速机制和输运过程以及日冕物质抛射在内日球层的传播演化提供全新的认知, 也为数值模型提供了全方位的观测约束, 需要我们对数值模型的各个方面做出与观测结果相符的改变和调整, 使数值结果与观测结果可以做全方位的对比研究. 但是如何将观测用于建立模型和约束模型, 如何将日冕加热和太阳风加速机制的最新研究成果、CMEs 的爆发及其三维结构等研究成果融合到数值模型之中, 如何利用近日的观测改善模拟结果的磁场分量等是今后数值模拟研究必须回答的问题.

2.3 格式方面

当对 MHD 方程进行差分实现时, 常采用守恒形式和非守恒形式. 虽然这两种形式在解析上没有区别, 但是对于差分格式来说却有非常重要的差别. 根据 Lax 和 Wendroff^[154]和 LeVeque^[155]的研究结果, 只有采用守恒形式才能满足跃变条件, 得到间断解的正确传播速度, 而且可以得到比采用非守恒形式更高的精度. 因此, 守恒形式下的数值格式是首选.

MHD 方程组数值格式设计中还要考虑的问题是如何保持磁场散度为零. 如果数值格式不能保持磁场散度于一定误差范围之内, 就会产生沿磁力线的虚假流动. 为了解决这一难题, 方法之一就是 Powell 等^[156,37]引入的 MHD 方程组的八波描述, 他们在 MHD 方程守恒形式的右边加上含有磁场散度的项, 从差分格式处理来说, 这种八波描述的 MHD 比常用的守恒形式 MHD 更加稳定, 精度更高. 但是 Tóth^[157]指出它不满足 Lax 定理, 即稳定性和相容性是收敛性的充要条件, 并可能导致错误的激波解, Dellar^[158]也指出它可能使质量和动量的守恒性遭到破坏. 第二种方法是约束输运(Constraint Transport, CT)法^[157-163], 它对单元界面上的磁场采用特定插值方法来实现磁场散度的控制. 第三种方法就是投影法^[164-167], 在差分格式计算完成后, 每一步解一个 Poisson 方程清除磁场散度, 这必定会增加计算量. 还有一种方法是用矢量势描述磁场, 采用交错网格将磁场散度控制^[60,62]为截断误差水平. 第四种方法是广义拉格朗日乘子法(GLM-MHD)^[168-170], 此法引入广义拉格朗日乘子, 将磁场散度的约束条件与守恒定律耦合起来, 把

MHD 方程组修正为 GLM-MHD, 通过求解 GLM-MHD 将磁场散度保持在合理水平. 为了改进磁场的计算精度, 并兼顾磁场散度为零的要求, 有些研究工作把磁场分为不变的势场和变化的次级场两部分^[70,71], 目的是避免计算原势场部分可能带来的误差. 因此, 发展更加高效、快速收敛的磁场散度消除方法是 MHD 模拟研究必须关注的问题之一.

MHD 方程的差分实现另一个需要注意的问题就是计算过程中保持密度和热压大于零, 即所谓的保持热压力正性(pressure positivity). 正如在气体动力学中, 当动压远大于内能时会遇到如何保持热压大于零的问题, 在 MHD 模拟中, 当磁压远大于热压(即等离子体 $\beta \ll 1$)时也会遇到相似的问题, 而太阳大气和地球磁层常常就属这类情形. 当试图用真实的观测作为 MHD 模拟的输入时, 这一问题变得尤为突出, 因为总能、磁能和动能的离散误差足以产生负的热压力这一非物理结果. Janhunen^[171]针对 MHD 方程组, 利用 Harten-Lax-van Leer(HLL)黎曼解, 并对源项采取特别的离散方法, 发展出了一种守恒的热压保正的差分算法, 但是这种算法耗散性很大, 所以他们将 HLL 与 Roe 方法结合起来得到既保持热压为正又有较高计算精度的算法, 同时还将磁场散度控制到截断误差量级. Fuchs 等^[172]则将 MHD 方程组分裂为流体部分和磁场部分, 流体部分的磁力作为源项处理, 磁场部分就是磁感应方程, 它用流体速度驱动磁场演化, 以此为基础他们发展了一种有限体积格式, 流体部分用二波和三波 HLL 求解, 磁场部分则用迎风格式处理, 试验表明这种方法能够较好的保持密度和热压的正性. Balsara 和 Spicer^[173]则采用另一种方法来实现热压保正, 它在非激波区域采用守恒形式的熵密度方程代替总能方程, 而在激波区域采用守恒形式的 MHD 方程组, 这样既能使得格式在激波区域能量守恒得到保证, 又能在非激波区域保持热压为正值, 区分这两种区域的方法是通过一系列的判断来实现. 因此, 密度和热压保正性也是设计差分格式时必须慎重考虑的重要因素.

在日冕行星际太阳风的大尺度模拟研究中, 磁场相对于其他量在远离日面的区域中是小量, 比如在 1AU 处, 阿尔芬马赫数对一般太阳风来说为 7.5^[174], 对 ICMEs 来说为 4.9^[175], 说明 1AU 处太阳风的磁能大约只有动能的 1%~4%, 因此, 如何设计差分格式, 使之能够分辨出对地球空间天气预报至关

重要的各个磁场分量, 是一个极为重要的问题. 它不仅与格式本身的数值精度有关, 而且还与各物理量的极值及其产生的误差密切相关, 但是目前还没有很好的处理方法.

因此, 设计适合日地空间球壳区域的新一代三维数值模型必须解决好以下问题: 高的时空分辨率、保持通量守恒、磁场零散度、密度与热压正性和准确地计算磁场分量.

2.4 数据同化

将观测数据用于改善模型的预测结果, 在气象学里称为数据同化技术. 它的实质就是将环境参数的观测数据以一种特别的方式融合到该参数的模型计算数据里, 以便在模型和观测之间取得预测上的最优, 这在地球的天气预报方面取得了巨大的成功. 现在已有工作将它用于空间天气预报的研究^[176-178], Siscoe 和 Solomon^[179]讨论了空间天气预报和气象的天气预报的不同特点, 并分析了数据同化技术的在空间天气预报中的应用特点, 对流层的天气预报处理的是一个持久性系统, 即根据现在的状态和物理规律就可以描述未来的状态, 但对边界变化不甚敏感; 空间天气预报处理的系统大多是依从性系统, 即受边界的影响较大, 而数据同化技术对持久性系统很有效果, 这是数据同化技术在空间天气预报研究中没有那么广泛应用的原因之一. 但是如果空间天气预报的某一方面偏向于持久性系统, 那么还是可以应用的, 最典型的就是在电离层中的应用, 电离层对热层的响应是一个持久性系统, 因此已经开发了一些成功的同化模型, 如 AMIE(Assimilative Mapping of Ionospheric Electrodynamics)^[177], GAIM(Global Assimilation of Ionospheric Measurements)^[178], 丰富的电离层资料为同化技术的应用提供了观测基础. 地球附近的太阳风状态可以将 SMEI 和 IPS 的观测结果加以同化改善现有的动力学和 MHD 模型的预测精度^[180], 虽然可用的观测并不多, 另外就是 IMF 的 B_y 分量的预测, 而对 B_z 分量的预测可能要将空间气候学^[181]的信息同化到模型之中; 但是磁层空间天气预报就不大适合用同化技术. Merka 等^[176]描述了同化技术的一般流程和在空间天气领域的应用方法. Dikpati^[182]将太阳磁场观测数据同化到太阳活动强度的预报模型中, 对第 24 太阳活动周的活动强度进行了预报, Mendoza 等^[183]探讨了如何利用集合卡尔曼

滤波器(Ensemble Kalman Filter)将观测数据同化到二维 MHD 模型中以用于预测空间天气. 可以期待, 在空间天气领域, 将会出现更多的同化技术应用研究.

3 趋势与展望

综上所述, 三维数值模型业已成为建立空间天气数值预报系统的重要工具. 目前的模拟研究能够较好地再现太阳活动极小期和下降期的太阳风背景结构, 但是对于太阳活动极大期附近的太阳风背景模拟仍然还需要进一步改善, 对扰动的模拟结果能够定性地再现卫星实地观测到的某些物理量的变化趋势, 但是离定量预报还有较大差距, 对于最关心的行星际磁场分量变化有时定性比较也很难做到. 这些方面的改进将有助于发展日冕-行星际-近地空间天气因果链预报模式(特别是行星际-近地空间天气变化联系的建模研究).

由于建立空间天气数值预报系统和发展第一代可操作的空间天气定量预报技术的重大需求, 借助于计算技术的日益发展, 三维数值模型在可以预见的未来将会在如下方面取得重要进展:

(1) 利用数值模式、运动学和经验模型做比对研究, 发展新的三维数值模式以及改善目前三维数值模式的输入和初边值条件的确定. 基于多种观测, 建立太阳物质与磁场输出的全球结构, 用于生成自洽初边值条件. 更多地将太阳风加速/日冕加热的物理模型及其数学描述融入数值模式, 以产生更切近实际的太阳风背景.

(2) 利用地基和天基对活动区的连续观测, 如 SDO, Hinode 和 STEREO 等, 基于对日冕物质抛射物理机制的新认识, 构建可利用连续观测数据时序输入的而且不做人为设定的日冕物质抛射模型以再现真实的物理过程, 探索太阳风暴的触发机制, 发展新的太阳风暴的扰动模式.

(3) 未来的观测, 如 Solar Orbiter, Solar Wind Sentinels, Solar Probe Plus 和 Kuafu 等, 将为太阳风源区的磁场结构及动力学过程、日冕加热及太阳风加速和日冕物质抛射的触发及传播演化等问题提供更深刻的物理认识, 以后的研究将把这些新认识融入三维数值模型. 随着太阳行星际观测资料不断积累, 与 MHD 模型相适宜的数据同化算法将会出现, 这将有助于三维数值模型定量再现卫星的实地观测.

(4) 随着计算机软件和硬件的快速发展, 以并行计算技术和异构集群技术为依托, 结合新开发的自描述内置压缩并支持并行 I/O 的数据格式, 高效稳定、高时空分辨率的三维数值模型在算法与计算技术实现上将会得到满足, 并突破观测和模拟产生的海量数据的准实时可视化瓶颈。

(5) 将日冕数值模式底部与色球或下日冕模式耦合, 将行星际与近地空间天气模式(磁层、电离层、热层模型)耦合, 构建出涵盖日冕-行星际-近地空间天气因果链的全球统一的空间天气数值定量预报系统, 但是模式的不断改进是一项长期的艰巨任务。

正如 Siscoe^[184]类比研究了地球天气预报和空间天气预报的发展历程之后认为的那样, 二者大体上都需要经历需求推动、取象预测、风暴参数量化、图象合成、成立预报中心、建立模型、基于天气图的主

观分析、基于经验模型的客观分析、数值预报和雷达及卫星追踪风暴等十个发展阶段, 目前空间天气预报正处于从基于经验模型的客观分析向数值预报过渡的阶段。这时既需要加强业务模式的开发, 又需要更深刻地理解现象, 开发更成熟的数值模型, 更准确地定位用户需求, 更坚实的研发规划, 实现从研发到业务产品快速有效转化的标准化流程, 实现研发与应用的有效融合。从前面的综述我们已经看到, 现在的空间天气建模已经从各个区域模型向建立日地空间天气全球统一耦合模型的方向发展, 从独立的运动学模型、经验模型和 MHD 数值模型到三者有机结合的方向发展, 我们相信数值模型的进一步发展将极大推动空间天气预报从客观分析向数值预报转变, 加速实现模型和卫星对太阳风暴的日地传播过程进行全程追踪预报, 更好地为人类服务。

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见。

参考文献

- 1 Baker D N. How to cope with space weather? *Science*, 2002, 297: 1486–1487
- 2 Siscoe G. The space-weather enterprise: Past, present and future. *J Atmos Solar-Terr Phys*, 2000, 62: 1223–1232
- 3 Kappenman J G. An introduction to power grid impacts and vulnerabilities from space weather. In: Daglis I A, ed. *Space Storms and Space Weather Hazards*. Dordrecht: Kluwer Academic, 2001. 335–361
- 4 Baker D N. What is space weather? *Adv Space Res*, 1998, 22: 7–16
- 5 方成. 走进我们生活的新学科. *中国自然科学杂志*, 2006, 28: 194–198
- 6 Belov A V, Gaidash S P, Ivanov K G, et al. Unusually high geomagnetic activity in 2003. *Cosm Res*, 2004, 42: 541–550
- 7 Gopalswamy N. Highlights of the October–November 2003 Extreme Events. In: Chilingarian A, Karapetyan G, eds. *Solar Extreme Events: Fundamental Science and Applied Aspects*. Yerevan: Alikhanyan Physics Institute, 2006. 20–24
- 8 Skoug R M, Gosling J T, Steinberg J T, et al. Extremely high speed solar wind: 29–30 October 2003. *J Geophys Res*, 2004, 109: A09102, doi: 10.1029/2004JA010494
- 9 Dmitriev A V, Suvorova A V. Geosynchronous magnetopause crossings on october 29–31, 2003. *Cosm Res*, 2004, 42: 551–560
- 10 Vats H M. Geo-effectiveness of solar wind extremes. *J Astrophys Astr*, 2006, 27: 227–235
- 11 Baker D N, Kanekal S G, Li X. An extreme distortion of the Van Allen belt arising from the “Hallowe’en” solar storm in 2003. *Nature*, 2004, 432: 878–881
- 12 Baker D N, Kanekal S G, Horne R B, et al. Low-altitude measurements of 2–6 MeV electron trapping lifetimes at $1.5 \leq L \leq 2.5$. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L20110, doi: 10.1029/2007GL031007.
- 13 Webb D, Allen J. Spacecraft and ground anomalies related to the October–November 2003 solar activity. *Space Weather*, 2004, 2: S03008, doi: 10.1029/2004SW000075
- 14 Yizengaw E, Moldwin M B, Dyson P L, et al. Southern Hemisphere ionosphere and plasmasphere response to the interplanetary shock event of 29–31 October 2003. *J Geophys Res*, 2005, 110: A09S30, doi: 10.1029/2004JA010920
- 15 Perevalova N P, Afraimovich E L, Voeykov S V, et al. Parameters of large-scale TEC disturbances during the strong magnetic storm on 29 October 2003. *J Geophys Res*, 2008, 113: A00A13, doi: 10.1029/2008JA013137
- 16 Horvath I, Lovell B C. Large-scale traveling ionospheric disturbances impacting equatorial ionization anomaly development in the local morning hours of the Halloween Superstorms on 29–30 October 2003. *J Geophys Res*, 2010, 115: A04302, doi: 10.1029/2009JA014922
- 17 López-Puertas M, Funke B, Gil-López S, et al. Observation of NO_x enhancement and ozone depletion in the Northern and Southern

- Hemispheres after the October–November 2003 solar proton events. *J Geophys Res*, 2005, 110: A09S43, doi: 10.1029/2005JA011050
- 18 Barbieri L P, Mahmot R E. October–November 2003's space weather and operations lessons learned. *Space Weather*, 2004, 2: S09002, doi: 10.1029/2004SW000064
- 19 Doherty P, Coster A J, Murtagh W. Space weather effects of October–November 2003. *GPS Solutions*, 2004, 8: 267–271
- 20 Hays P L. Space and the military. In: Sadeh E, ed. *Space Politics and Policy*. Netherlands: Springer, 2006. 335–369
- 21 Robinson R M, Behnke R A. The US National Space Weather Program: A retrospective. In: Song P, Singer H J, Siscoe G L, eds. *Space Weather*, Geophys Monograph 125. Washington DC: American Geophysical Union, 2001. 1–10
- 22 魏奉思, 于晟. 未来 10 年空间天气保障能力将实现新飞跃. *科技时报*, 2009 年 4 月 13 日
- 23 冯学尚. 空间天气学——21 世纪的新兴学科. *世界科技研究与发展*, 2000, 2: 50–53
- 24 Dryer M. Space weather simulation in 3D MHD from the Sun to the Earth and beyond to 100AU: A modeler's perspective of the present state of the art. *Asian J Phys*, 2007, 16: 97–121
- 25 Hakamada K, Akasofu S I. Simulation of three-dimensional solar wind disturbances and resulting geomagnetic storms. *Space Sci Rev*, 1982, 31: 3–70
- 26 Sun W, Akasofu S I. Calibration of the kinematic method of studying solar wind disturbances on the basis of a one-dimension MHD solution and a simulation study of the heliosphere disturbances between 22 November and 6 December 1977. *Planet Space Sci*, 1985, 33: 933–943
- 27 Akasofu S I, Fry C F. A first generation numerical geomagnetic storm prediction scheme. *Planet Space Sci*, 1986, 34: 77–92
- 28 Fry C D, Sun W, Deehr C S, et al. Improvements to the HAF solar wind model for space weather predictions. *J Geophys Res*, 2001, 106(A10): 20985–21001
- 29 Fry C D, Dryer M, Deehr C, et al. Forecasting solar wind structures and shock arrival times using an ensemble of models. *J Geophys Res*, 2003, 108: 1070–1089
- 30 Arge C N, Pizzo V J. Improvement in the prediction of solar wind conditions using near-real time solar magnetic field updates. *J Geophys Res*, 2000, 105: 10465–10480
- 31 Wang Y M, Sheeley Jr N R. Solar wind speed and coronal flux-tube expansion. *Astrophys J*, 1990, 355: 726–732
- 32 Zhang Y, Sun W, Feng X S, et al. Statistical analysis of corotating interaction regions and their geoeffectiveness during solar cycle 23. *J Geophys Res*, 2008, 113: A08106, doi: 10.1029/2008JA013095
- 33 Feng X S, Zhang Y, Sun W, et al. A practical database method for predicting arrivals of “average” interplanetary shocks at Earth. *J Geophys Res*, 2009, 114: A01101, doi: 10.1029/2008JA013499
- 34 McKenna-Lawlor S M P, Dryer M, Kartalev M D, et al. Near real-time predictions of the arrival at Earth of flare-related shocks during Solar Cycle 23. *J Geophys Res*, 2006, 111: A11103, doi: 10.1029/2005JA011162
- 35 Smith Z K, Dryer M, McKenna-Lawlor S M P, et al. Operational validation of HAFv2's predictions of interplanetary shock arrivals at Earth: Declining phase of Solar Cycle 23. *J Geophys Res*, 2009, 114: A05106, doi: 10.1029/2008JA013836
- 36 Tóth G, Sokolov I V, Gombosi T I, et al. Space Weather Modeling Framework: A new tool for the space science community. *J Geophys Res*, 2005, 110: A12226, doi: 10.1029/2005JA011126.
- 37 Powell K G, Philip L R, Timur J L, et al. A solution-adaptive upwind scheme for ideal magnetohydrodynamics. *J Comput Phys*, 1999, 154: 284–309
- 38 Groth C P T, De Zeeuw D L, Gombosi T I, et al. Global three-dimensional MHD simulation of a space weather event: CME formation, interplanetary propagation, and interaction with the magnetosphere. *J Geophys Res*, 2000, 105: 25053–25078
- 39 Usmanov A V, Goldstein M L, Besser B P, et al. A global MHD solar wind model with WKB Alfvén waves: Comparison with ulysses data. *J Geophys Res*, 2000, 105: 12675–12696
- 40 Roussev I I, Forbes T G, Gombosi T I, et al. A three-dimensional flux rope model for coronal mass ejections based on a loss of equilibrium. *Astrophys J*, 2003, 588: L45–L48
- 41 Wu, S T, Guo W P, Michels D J, et al. MHD description of the dynamical relationships between a flux rope, streamer, coronal mass ejection, and magnetic cloud: An analysis of the January 1997 Sun–Earth connection event. *J Geophys Res*, 1999, 104: 14789–14801
- 42 Forbes T G, Isenberg P A. A catastrophe mechanism for coronal mass ejections. *Astrophys J*, 1991, 373: 294–307
- 43 Gibson S E, Low B C. A time-dependent three-dimensional magnetohydrodynamic model of the coronal mass ejection. *Astrophys J*, 1998, 493: 460–473, doi: 10.1086/305107
- 44 Wu S T, Guo W P, Plunkett S P, et al. Coronal mass ejections (CMEs) initiation: Models and observations. *J Atmos Sol Terr Phys*, 2000, 62: 1489–1498

- 45 Chen J, Garren D. Interplanetary magnetic clouds: Topology and driving mechanism. *Geophys Res Lett*, 1993, 20: 2319–2322
- 46 Low B C. Coronal mass ejections, magnetic flux ropes, and solar magnetism. *J Geophys Res*, 2001, 106: 25141–25163
- 47 Antiochos S K, DeVore C R, Klimchuk J A. A model for solar coronal mass ejections. *Astrophys J*, 1999, 510: 485–493
- 48 Manchester W B. Buoyant disruption of magnetic arcades with self-induced shearing. *J Geophys Res*, 2003, 108(A4): 1162, doi: 10.1029/2002JA009252
- 49 Titov V S, Demoulin P. Basic topology of twisted magnetic configurations in solar flares. *Astron Astrophys*, 1999, 351: 701–720
- 50 Roussev I I, Sokolov I V, Forbes T G, et al. A numerical model of a coronal mass ejection: Shock development with implications for the acceleration of GeV protons. *Astrophys J*, 2004, 605: L73–L76
- 51 Cohen O, Sokolov I V, Roussev I I, et al. Validation of a global 3D heliospheric model with observations for the May 12, 1997 CME event. *J Atmos Sol Terr Phys*, 2008, 70: 583–592
- 52 Tóth G, De Zeeuw D L, Gombosi T I, et al. Sun-to-thermosphere simulation of the 28–30 October 2003 storm with the Space Weather Modeling Framework. *Space Weather*, 2007, 5: S06003, doi: 10.1029/2006SW000272
- 53 Han S M, Wu S T, Dryer M. A three-dimensional, time-dependent numerical modeling of supersonic, super Alfvénic MHD flow. *Comput Fluids*, 1988, 16: 81–103
- 54 Detman T, Smith Z, Dryer M, et al. A hybrid heliospheric modeling system: Background solar wind. *J Geophys Res*, 2006, 111: A07102, doi: 10.1029/2005JA011430
- 55 Detman T R, Vassiliadis D. Review of techniques for magnetic storm forecasting. In: Tsurutani B T, Gonzalez W D, Kamide Y, et al, eds. *Magnetic Storms*, *Geophys Monogr Ser* 98. Washington DC: American Geophysical Union, 1997. 253–266
- 56 Wu C C, Fry C D, Dryer M, et al. Three-dimensional global simulation of multiple ICMEs' interaction and propagation from the Sun to the heliosphere following the 25–28 October 2003 solar events. *Adv Space Res*, 2007, 40: 1827–1834
- 57 Smith Z K, Detman T R, Sun W, et al. Modeling the arrival at Earth of the interplanetary shock following the 12 May 1997 solar event using HAFv2 and 3-D MHD HHMS models. *Space Weather*, 2008, 6: S05006, doi: 10.1029/2007SW000356
- 58 Freeman J A, Skapura D M. *Neural Networks: Algorithms, Applications, and Programming Techniques*. Boston: Addison-Wesley, 1991
- 59 Lee C O, Luhmann J G, Odstrcil D, et al. The solar wind at 1 AU during the declining phase of solar cycle 23: Comparison of 3D numerical model results with observations. *Sol Phy*, 2009, 254: 155–183
- 60 Lionello R, Mikic Z, Schnack D D, et al. Magnetohydrodynamics of solar coronal plasmas in cylindrical geometry. *J Comput Phys*, 1998, 140: 172–201
- 61 Mikić Z, Linker J A, Schnack D D, et al. Magnetohydrodynamic modeling of the global solar corona. *Phys of Plasma*, 1999, 6: 2217–2224
- 62 Riley P, Linker J A, Mikic Z. An empirically-driven global MHD model of the solar corona and inner heliosphere. *J Geophys Res*, 2001, 106: 15889–15901
- 63 Toth G, Odstrcil D. Comparison of some flux corrected transport and total variation diminishing numerical schemes for hydrodynamic and magnetohydrodynamic problems. *J Comput Phys*, 1996, 128: 82–100
- 64 Odstrcil D, Pizzo V J. Distortion of interplanetary magnetic field by three-dimensional propagation of CMEs in a structured solar wind. *J Geophys Res*, 1999, 104: 28225–28239
- 65 Odstrcil D. Modeling 3D solar wind structure. *Adv Space Res*, 2003, 32: 497–506
- 66 Odstrcil D, Riley P, Zhao X P. Numerical simulation of the 12 May 1997 interplanetary CME event. *J Geophys Res*, 2004, 109: 02116, doi: 10.1029/2003JA010135
- 67 Odstrcil D, Riley P, Zhao X P. Propagation of the 12 May 1997 interplanetary coronal mass ejection in evolving solar wind structures. *J Geophys Res*, 2005, 110: 02106, doi: 10.1029/2004JA010745
- 68 Zhao X P, Plunkett S P, Liu W. Determination of geometrical and kinematical properties of halo coronal mass ejections using the cone model. *J Geophys Res*, 2002, 107(A8): 1223–1231, doi: 10.1029/2001JA009143
- 69 Taktakishvili A M, Pulkkinen S P, Chulaki A, et al. Validation of the coronal mass ejection predictions at the Earth orbit estimated by ENLIL heliosphere cone model. *Space Weather*, 2009, 7: S03004, doi: 10.1029/2008SW000448
- 70 Nakamizo A, Tanaka T, Kubo Y, et al. Development of the 3-D MHD model of the solar corona-solar wind combining system. *J Geophys Res*, 2009, 114: A07109, doi: 10.1029/2008JA013844.
- 71 Tanaka T. Finite volume TVD scheme on an unstructured grid system for three-dimensional MHD simulation of inhomogeneous systems including strong background potential fields. *J Comput Phys*, 1994, 111: 381–389
- 72 Tanaka T. Generation mechanisms for magnetosphere-ionosphere current systems deduced from a three dimensional MHD simulation of the solar windmagnetosphere-ionosphere coupling processes. *J Geophys Res*, 1995, 100: 12057–12074

- 73 Feng X S, Zhou Y F, Wu S T. A novel numerical implementation for solar wind modeling by the modified conservation element/solution element method. *Astrophys J*, 2007, 655: 1110–1126
- 74 Hu Y Q, Feng X S, Wu S T, et al. Three-dimensional MHD modeling of the global corona throughout solar cycle 23. *J Geophys Res*, 2008, 113: A03106, doi: 10.1029/2007JA012750
- 75 Feng X S, Yang L P, Xiang C Q, et al. Three-dimensional solar wind modeling from the Sun to Earth by a SIP-CESE MHD Model with a six-component grid. *Astrophys J*, 2010, 723: 300–319
- 76 Zhou Y F, Feng X S. Numerical study of successive CMEs during November 4–5, 1998. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2008, 51: 1–11
- 77 Zhou Y F, Feng X S, Wu S T. Numerical simulation of the 12 May 1997 CME event. *Chin Phys Lett*, 2008, 25: 790–793
- 78 冯学尚, 向长青, 钟鼎坤, 等. 三维太阳风结构的 Ulysses 和 MHD 模拟的比较研究. *科学通报*, 2005, 50: 820–826
- 79 Pizzo V. A three-dimensional model of corotating streams in the solar wind, 3. Magneto-hydrodynamic streams. *J Geophys Res*, 1982, 87(A6): 4374–4394
- 80 Phillips J L, Bame S J, Barnes A, et al. Ulysses solar wind plasma observations from pole to pole. *Geophys Res Lett*, 1995, 22: 3301–3304
- 81 Neugebauer M. The three-dimensional solar wind at solar activity minimum. *Rev Geophys*, 1999, 37: 107–126
- 82 Shen F, Feng X, Wu S T, et al. Three-dimensional MHD simulation of CMEs in three-dimensional background solar wind with the self-consistent structure on the source surface as input: Numerical simulation of the January 1997 Sun-Earth connection event. *J Geophys Res*, 2007, 112: A06109, doi: 10.1029/2006JA012164
- 83 Wei F S, Feng X S, Cai H C, et al. Global distribution of cor-onal mass outputs and its relation to solar magnetic field structures. *J Geophys Res*, 2003, 108(A6): 1238, doi: 10.1029/2002JA009439
- 84 Xiang C Q, Feng X S. An observation-based model of solar wind background. *Chin J Space Sci*, 2006, 26: 161–166
- 85 Shen F, Feng X S, Song W B. An asynchronous and parallel time-marching method: Application to three-dimensional MHD simulation of solar wind. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009, 52: 2895–2902, doi: 10.1007/s11431-009-0291-1
- 86 Lugaz N, Roussev I I. Numerical modeling of interplanetary coronal mass ejections and comparison with heliospheric images. *J Atmos Sol-Terres Phys*, 2010, doi: 10.1016/j.jastp.2010.08.016
- 87 Aran A, Sanahuja B, Lario D. SOLPENCO: A solar particle engineering code. *Adv Space Res*, 2006, 37: 1240–1246
- 88 Hu Y Q, Guo X C, Li G Q, et al. Oscillation of quasi-steady Earth's magnetosphere. *Chin Phys Lett*, 2005, 22: 2723–2726
- 89 Hu Y Q, Guo X C, Wang C. On the ionospheric and reconnection potentials of the Earth: Results from global MHD simulations. *J Geophys Res*, 2007, 112: A07215, doi: 10.1029/2006JA012145
- 90 Palmroth M, Janhunen P, Pulkkinen T I. Cusp and magnetopause locations in global MHD simulation. *J Geophys Res*, 2001, 106: 29435–29450
- 91 Palmroth M, Pulkkinen T I, Janhunen P, et al. Storm time energy transfer in global MHD simulation. *J Geophys Res*, 2003, 108 (A1): 1048, doi: 10.1029/ 2002JA009446
- 92 Palmroth M, Janhunen P, Pulkkinen T I. Precipitation and total power consumption in the ionosphere: Global MHD simulation results compared with Polar and SNOE observations. *Annal Geophys*, 2006, 24: 861–872
- 93 Fuller-Rowell T J, Moffett R J, Quegan S, et al. A coupled thermosphere-ionosphere model (CTIM). In: Schunk R W, ed. *STEP Handbook on Ionospheric Models*. Logan: Utah State Univ Press, 1996. 217–238
- 94 Raeder J, Wang Y L, Fuller-Rowell T. Geomagnetic storm simulation with a coupled magnetosphere-ionosphere-thermosphere model. In: Song P, Singer H J, Siscoe G L, eds. *Space Weather*. Geophys. Monograph 125. Washington DC: American Geophysical Union, 2001. 377
- 95 Toffoletto F, Sazykin S, Spiro R, et al. Inner magnetospheric modeling with the Rice Convection Model. *Space Sci Rev*, 2003, 107: 175–196
- 96 Lyon J G, Fedder J A, Mobarry C M. The Lyon-Fedder-Mobarry (LFM) global MHD magnetosphere simulation code. *J Atmos Solar-Terr Phys*, 2004, 66: 1333–1350, doi: 10.1016/j.jastp.2004.03.020
- 97 Ganushkina N Y, Pulkkinen T I, Milillo A, et al. Evolution of the proton ring current energy distribution during 21–25 April 2001 storm. *J Geophys Res*, 2006, 111: A11S08, doi: 10.1029/2006JA011609
- 98 Fok M C, Wolf R A, Spiro R W, et al. Comprehensive computational model of Earth's ring current. *J Geophys Res*, 2001, 106: 8417–8424
- 99 Watermann J, Wintoft P, Sanahuja, B, et al. Models of solar wind structures and their interaction with the Earth's space environment. *Space Sci Rev*, 2009, doi: 10.1007/s11214-009-9494-9
- 100 Messerotti M, Zuccarello F, Guglielmino S L, et al. Solar weather event modelling and prediction. *Space Sci Rev*, 2009, 147: 121–185
- 101 Lathuillère, Menvielle M, Liliensten J, et al. From the Sun's atmosphere to the Earth's atmosphere: An overview of scientific models available for space weather developments. *Ann Geophys*, 2002, 20: 1081–1104

- 102 Baker D N, Wiltberger M J, Weigela R S, et al. Present status and future challenges of modeling the Sun-Earth end-to-end system. *J Atmos Solar-Terr Phys*, 2007, 69: 3–17
- 103 Schive H Y, Tsai Y C, Chiueh T. GAMER: A graphic processing unit accelerated adaptive-mesh-refinement code for astrophysics. *Astrophys J Suppl*, 2010, 186: 457–484
- 104 Owens J D, Houston M, Luebke D, et al. GPU computing. *Proc IEEE*, 2008, 96: 879–899
- 105 Schive H Y, Chien C H, Wong S K, et al. Graphic-card cluster for astrophysics (GraCCA)—Performance tests. *New Astronomy*, 2008, 13: 418–435
- 106 Marsch E. Solar wind proton: Three dimensional velocity distributions and derived plasma parameters measured between 0.3 AU and 1 AU. *J Geophys Res*, 1982, 87: 52–72
- 107 Lin R P, Larson D E, Ergun R E, et al. Observations of the solar wind, the bow shock and upstream particles with the wind 3D plasma instrument. *Adv Space Res*, 1997, 20: 645–654
- 108 Parks G K. Why space physics needs to go beyond the MHD box. *Space Sci Rev*, 2004, 113: 97–125
- 109 Alfvén H. Electric currents in cosmic plasmas. *Rev Geophys Space Phys*, 1977, 15: 271
- 110 Birn J, Priest E. *Reconnection of Magnetic Fields: Magnetohydrodynamic and Collisionless Theory and Observations*. New York: Cambridge University Press, 2007
- 111 Marsch E. Solar wind models from the sun to 1 AU: Constraints by in situ and remote sensing measurements. *Space Sci Rev*, 1999, 87: 1–24
- 112 Hollweg J V, Isenberg P A. Generation of the fast solar wind: A review with emphasis on the resonant cyclotron interaction. *J Geophys Res*, 2002, 107: 1147, doi: 10.1029/2001JA000270
- 113 Klimchuk J A. On solving the coronal heating problem. *Solar Phys*, 2006, 234: 41–77
- 114 Abramenko V I, Fisk L A, Yurchyshyn V B. The rate of emergence of magnetic dipoles in coronal holes and adjacent quiet-Sun regions. *Astrophys J Lett*, 2006, 641: L65–L68
- 115 McIntosh S W, Davey A R, Hassler D M, et al. Observations supporting the role of magnetoconvection in energy supply to the quiescent solar atmosphere. *Astrophys J*, 2007, 654: 650–664
- 116 Cranmer S R. Coronal holes. *Living Rev Solar Phys*, 2009, 6: 3, <http://www.livingreviews.org/lrsp-2009-3>
- 117 Cranmer S R, van Ballegoijen A A, Edgar R J. “Self-consistent coronal heating and solar wind acceleration from anisotropic magnetohydrodynamic turbulence. *Astrophys J Suppl Ser*, 2007, 171: 520–551
- 118 Verdini A, Velli M, Buchlin E. Reflection driven MHD turbulence in the solar atmosphere and wind. *Earth Moon Planets*, 2009, 104: 121–125
- 119 Fisk L A. Acceleration of the solar wind as a result of the reconnection of open magnetic flux with coronal loops. *J Geophys Res*, 2003, 108: 1157
- 120 Fisk L A, Zurbuchen T H. Distribution and properties of open magnetic flux outside of coronal holes. *J Geophys Res*, 2006, 111: A09115
- 121 Galinsky V L, Shevchenko V I. Nonlinear cyclotron resonant wave-particle interaction in a nonuniform magnetic field. *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 90–93
- 122 Isenberg P A, Vasquez B J. Preferential acceleration and perpendicular heating of minor ions in a collisionless coronal hole. *Astrophys J*, 2009, 696: 591–600
- 123 Manchester IV W B, Ridley A J, Gombosi T I, et al. Modeling the Sun-to-Earth propagation of a very fast CME. *Adv Space Sci*, 2006, 38: 253–262
- 124 Hayashi K, Zhao X P, Liu Y. MHD simulations of the global solar corona around the Halloween event in 2003 using the synchronic frame format of the solar photospheric magnetic field. *J Geophys Res*, 2008, 113: A07104, doi: 10.1029/2007JA012814
- 125 Hayashi K, Benevolenskaya E, Hoeksema T, et al. Three-dimensional MHD simulation of a global solar corona using a temperature distribution map obtained from SOHO/EIT measurements. *Astrophys J Lett*, 2006, 636: 165–168
- 126 Hayashi K, Kojima M, Tokumaru M, et al. MHD tomography using interplanetary scintillation measurement. *J Geophys Res*, 2003, 108(A3): 1102, doi: 10.1029/2002JA009567
- 127 Linker J A, Mikić Z, Riley P, et al. Models of Coronal mass ejections: A review with a look to the future. In: Velli M, Bruno R, Malara F, eds. *Proceedings of the 10th International Solar Wind Conference*. New York: AIP Press, 2003. 703–710
- 128 Mittal N, Narain U. Initiation of CMEs: A review. *J Atmos Sol Terr Phys*, 2010, 72: 643–652
- 129 Mikić Z, Lee M A. An introduction to theory and models of CMEs, shocks, and solar energetic particles. *Space Sci Rev*, 2006, 123: 57–80
- 130 Chen J. Theory of prominence eruption and propagation: Interplanetary consequences. *J Geophys Res*, 1996. 101: 27499–27519

- 131 McClymont A N, Fisher G H. On the mechanical energy available to drive solar flares. In: Waite J H, Burch J L, Moore R L, eds. *Solar System Plasma Physics*. Geophysical Monograph 54. Washington DC: American Geophysical Union, 1989. 219–225
- 132 Dryer M. Coronal transient phenomena. *Space Sci Rev*, 1982, 33: 233–275
- 133 Wu S T. Numerical simulation of magnetohydrodynamic shock propagation in the corona. *Space Sci Rev*, 1982, 32: 115–129
- 134 Harrison R A. Solar Coronal mass ejections and flares. *Astro Astrophys*, 1986, 162: 283–291
- 135 Hundhausen A J. The origin and propagation of coronal mass ejections. In: Pizzo V J, Holzer T, Sime D G, eds. *Proceedings of the 6th International Solar Wind Conference August 23–28, 1987 at YMCA of the Rockies, Estes Park, Colorado*. Boulder: National Center for Atmospheric Research, NCAR/TN-306, 1988. 181–214
- 136 Démoulin P, Mandrini C H, van Driel-Gesztelyi L, et al. What is the source of the magnetic helicity shed by CMEs: The long-term helicity budget of AR 7978. *Astron Astrophys*, 2002, 382: 650–665
- 137 Canfield R C, de La Beaujardiere J F, Fan Y, et al. The morphology of flare processes and electric currents in active regions: I. Introduction and methods. *Astrophys J*, 1993, 411: 362–369
- 138 Leka K D, Canfield R C, McClymont A N, et al. The morphology of flare processes and electric currents in active regions: II. Active region 5747 (1989 October). *Astrophys J*, 1993, 411: 370–377
- 139 Forbes T G, Isenberg P A. A catastrophe mechanism for coronal mass ejections. *Astrophys J*, 1991, 373: 294–307
- 140 Lin J, Forbes T G, Isenberg P A, et al. The effect of curvature on flux-rope models of coronal mass ejections. *Astrophys J*, 1998, 504: 1006–1019
- 141 Antiochos S K, MacNeice P, Spicer D, et al. The dynamic formation of prominence condensations. *Astrophys J*, 1999, 512: 985–991
- 142 Forbes T G. A review on the genesis of coronal mass ejections. *J Geophys Res*, 2000, 105(A10): 23153–23165
- 143 Low B C. Coronal mass ejections, magnetic flux ropes, and solar magnetism. *J Geophys Res*, 106(A11): 25141–25163
- 144 Klimchuk J A. Theory of coronal mass ejections. In: Song P, Siscoe G, Singer H, eds. *Space Weather*, Geophysical Monograph 125. Washington DC: American Geophysical Union, 2001. 143–157
- 145 Zhou G P, Wang J X, Zhang J. Large-scale source regions of Earth-directed coronal mass ejections. *Astron Astrophys*, 2006, 445: 1133–1141
- 146 Zhukov A N, Veselovsky I S. Global coronal mass ejections. *Astrophys J*, 2007, 664: L131–L134
- 147 Wu S T, Wang A H, Liu A, et al. Data driven magnetohydrodynamic (MHD) model for active region (AR) evolution. *Astrophys J*, 2006, 652: 800–811
- 148 Davis C J, Kennedy J, Davies J A. Assessing the accuracy of CME speed and trajectory estimates from STEREO observations through a comparison of independent methods. *Space Sci Rev*, 2010, 263: 209–222
- 149 Mierla I M, Inhester B, Antunes A. On the 3-D reconstruction of coronal mass ejections using coronagraph data. *Ann Geophys*, 2010, 28: 203–215
- 150 Zhao X H, Feng X S, Xiang C Q, et al. Multi-spacecraft observations of the 2008 January 2 CME in the inner heliosphere. *Astrophys J*, 2010, 714: 1133–1141
- 151 De Koning C A, Pizzo V J, Biesecker D A. Geometric localization of CMEs in 3D space using STEREO beacon data: First results. *Solar Phys*, 256: 167–181
- 152 Wood B E, Howard R A, Plunkett S P, et al. Comprehensive observations of a solar minimum coronal mass ejection with the solar terrestrial relations observatory. *Astrophys J*, 2009, 694: 707–717
- 153 Tu C Y, Schwenn R, Donovan E, et al. Space weather explorer—The KuaFu mission. *Adv Space Res*, 2008, 41: 190–209
- 154 Lax P D, Wendroff B. Systems of conservation laws. *Commun Pure Appl Math*, 1960, 13: 217–237
- 155 LeVeque R J. *Numerical Methods for Conservation Laws*. 2nd ed. Berlin: Birkhauser-Verlag, 1992
- 156 Powel K G, Roe P L, Myong R S, et al. An upwind scheme for magnetohydrodynamics. In: *Proceedings of AIAA 12th Computational Fluid Dynamics Conference*. San Diego, June 1995. AIAA 1995-1704-CP, 1995. 661–674
- 157 Tóth G. The $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ constraint in shock-capturing magnetohydrodynamics codes. *J Comput Phys*, 2000, 161: 605–652
- 158 Dellar P J. A note on magnetic monopoles and the one-dimensional MHD riemann problem. *J Comput Phys*, 2001, 172: 392–398
- 159 Evans C R, Hawley J F. Simulation of general relativistic magnetohydrodynamic flows: A constrained transport method. *Astrophys J*, 1988, 332: 659
- 160 Ziegler U. A central-constrained transport scheme for ideal magnetohydrodynamics. *J Comput Phys*, 2004, 196: 393–416
- 161 Balsara D S. Divergence-free reconstruction of magnetic fields and WENO schemes for magnetohydrodynamics. *J Comput Phys*, 2009, 228: 5040–5056, doi: 10.1016/j.jcp.2009.03.038

- 162 Gardiner T A, Stone J M. An unsplit Godunov method for ideal MHD via constrained transport. *J Comput Phys*, 2005, 205: 509–539
- 163 Cunningham A J, Frank A, Varnier P, et al. Simulating magnetohydrodynamical flow with constrained transport and adaptive mesh refinement: Algorithms and tests of the AstroBear code. *Astrophys J Suppl Ser*, 2009, 182: 519–542
- 164 Brackbill J U, Barnes D C. The effect of nonzero $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ on the numerical solution of the magnetohydrodynamics. *J Comput Phys*, 1980, 35: 426–430
- 165 Balbas J, Tadmor E, Wu C C. Non-oscillatory central schemes for one- and two-dimensional MHD equations. *J Comput Phys*, 2004, 201: 261–285
- 166 Miller G H, Colella P A. High-order Eulerian Godunov method for elastic-plastic flow in solids. *J Comput Phys*, 2001, 167: 131–176
- 167 Crockett R K, Phillip C, Fisher R T, et al. An unsplit, cell-centered Godunov method for ideal MHD. *J Comp Phys*, 2005, 203: 422–448
- 168 Feng X, Zhou Y, Hu Y. A 3rd order WENO GLM-MHD scheme for magnetic reconnection. *Chin J Space Sci*, 2006, 26: 1–7
- 169 Dedner A, Kemm F, Kröner D, et al. Hyperbolic divergence cleaning for the MHD equations. *J Comput Phys*, 2002, 175: 645–673
- 170 Mignone A, Tzeferacos P, Bodo G. High-order conservative finite difference GLM-MHD schemes for cell-centered MHD. *J Comput Phys*, 2010, 229: 5896–5920
- 171 Janhunen P. A positive conservative method for magnetohydrodynamics based on HLL and Roe methods. *J Comput Phys*, 2000, 160: 649–661
- 172 Fuchs F G, Mishra S, Risebro N H. Splitting based finite volume schemes for ideal MHD equations. *J Comput Phys*, 2009, 228: 641–660
- 173 Balsara D S, Spicer D S. A staggered mesh algorithm using high order godunov fluxes to ensure solenoidal magnetic fields in magnetohydrodynamic simulations. *J Comput Phys*, 1999, 149: 270–292
- 174 Lavraud B, Borovsky J E. Altered solar wind-magnetosphere interaction at low Mach numbers: Coronal mass ejections. *J Geophys Res*, 2008, 113: A00B08, doi: 10.1029/2008JA013192
- 175 Guo J, Feng X, Zhang J, et al. Statistical properties and geoefficiency of interplanetary coronal mass ejections and their sheaths during intense geomagnetic storms. *J Geophys Res*, 2010, 115: A09107, doi: 10.1029/2009JA015140
- 176 Merka J, Merkova D, Odstrcil D. A step toward data assimilation in solar wind research. *J Atmos Sol Terr Phys*, 2007, 69: 170–178
- 177 Richmond A D, Kamide Y. Mapping electrodynamic features of high-latitude ionosphere from localized observations: Technique. *J Geophys Res*, 1988, 93: 5741–5759
- 178 Schunk R W, Scherliess L, Sojka J, et al. Global assimilation of ionospheric measurements (GAIM). *Radio Sci*, 2004, 39: RS1S02, doi: 10.1029/2002RS002794
- 179 Siscoe G, Solomon S C. Aspects of data assimilation peculiar to space weather forecasting, *Space Weather*, 2006, 4: S04002, doi: 10.1029/2005SW000205
- 180 Hick P P, Jackson B V. Heliospheric tomography: An algorithm for the reconstruction of the 3D solar wind from remote sensing observations. In: Fineschi S, Gummin M A, eds. *Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics*. Proc SPIE Inter Soc Opt Engineering, 2004, 5171: 287–297
- 181 McPherron R L, Siscoe G. Probabilistic forecasting of geomagnetic indices using solar wind air mass analysis. *Space Weather*, 2004, 2: S01001, doi: 10.1029/2003SW000003
- 182 Dikpati M. Predicting solar ‘climate’ by assimilating magnetic data into a flux-transport dynamo. *Astronom Nachrich*, 2007, 328: 1092–1095
- 183 Mendoza B O, De Moora B, Bernstein D S. Data assimilation for magnetohydrodynamics systems. *J Comput Appl Math*, 2006, 189: 242–259
- 184 Siscoe G. Space weather forecasting historically viewed through the lens of meteorology. In: Bothmer V, Daglis I A, eds. *Space Weather Physics and Effects*. Berlin Heidelberg: Springer, 2007. 5–30