中国科学: 地球科学 2013 年 第 43 卷 第 6 期: 912 ~ 933
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

评 述 中国科学院学部 科学与技术前沿论坛 空间天气与人类活动专题

行星际太阳风暴的数值模拟研究

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
* 联系人, E-mail: cqxiang@spacewather.ac.cn

收稿日期: 2012-10-05; 接受日期: 2012-12-26; 网络版发表日期: 2013-05-24
国家重点基础研究发展计划(编号: 2012CB825601)、中国科学院知识创新工程重大项目(编号: KZZD-EW-01-4)、国家自然科学基金(批准号: 41031066, 41231068, 41074122, 41274192, 41074121, 41174150)和国家重点实验室专项基金资助

摘要 太阳风暴经过地球时, 地球空间环境会产生整体剧烈的灾害性变化. 行星际空间是太阳风暴吹袭地球空间的必经传输通道, 是了解日地系统空间天气整体变化过程的重要纽带. 如何减轻或避免太阳风暴所造成的损失是人类高科技时代所面临的重大前沿课题. 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, 不仅具有了解太阳风暴在行星际空间传播的动力学过程的科学意义, 还具有预测太阳风暴吹到地球的时间、强度和可能引起的地球空间天气效应方面的现实意义. 目前基于 MHD 方程数值研究行星际太阳风暴的工作已经从初期的定性原理性理论研究过渡到定量的系统性研究具体事件和数值预报试预报阶段. 现有基于物理的三维数值预报模型主要有: 美国空间环境建模中心(CSEM)开发的空间天气模型架构(SWMF)、美国集成空间天气建模中心(CISM)开发的日冕和日球层模型(CORHEL)和我国空间天气学国家重点实验室 SIGMA 研究小组开发的太阳行星际守恒元解元(SIP-CESE)三维太阳风模型. 本文将概述现有基于物理的主要三维数值预报模型的算法特点及其研究成果, 评述行星际太阳风暴的数值模拟研究在今后工作中的努力方向.

关键词
行星际太阳风暴
三维数值预报模型
空间天气

剧烈太阳爆发活动常常引发速度从数百到一两千公里每秒的日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME), 将数十亿吨乃至上百亿吨的磁化等离子体从太阳大气抛到行星际空间, 经过十几个小时到三、四天左右的时间就会到达地球附近. 此时, 地球空间环境会产生整体剧烈的变化, 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灾害性空间天气事件[1~4].

最近的特大空间天气事件要数从2003年10月中下旬到 11 月初的万圣节事件(Halloween Events). 这期间, 太阳上有 10484, 10486 和 10488 三个主要的活动区, 共记录到 143 个耀斑和至少 80 个 CMEs. 其中, 发生于 10 月 29~30 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[5], 有些事件甚至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; CMEs 中, 有 7 个事件的速度超过 2000 km s^{-1}, 13 个的能量大于 10^{32} erg. 这些快速的 CMEs 驱动的行星际激波速度也很高, ACE

中文引用格式: 冯学尚, 向长青, 钟鼎坤. 行星际太阳风暴的数值模拟研究. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 912–933
英文引用格式: Feng X S, Xiang C Q, Zhong D K. Numerical study of interplanetary solar storms (in Chinese). Scientia Sinica Terrae, 2013, 43: 912–933

卫星在 10 月 29 日和 30 日探测到的实地太阳风速度峰值高达 1850 和 1700 km s^{-1}, GOES(Geostationary Operational Environmental Satellite)卫星记录到行星际激波产生的一系列 SEPs(Solar Energetic Particles)[6], 有三次还产生了地面水平事件(Ground Level Events, GLEs).

万圣节事件对地球空间环境产生了严重的影响. 太阳风暴产生的高速磁云内部动压很大以至于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[7]; 10 月 29 日和 30~31 日发生了第 23 太阳活动周中第二和第四强的磁暴; 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. Yizengaw 等[8]利用地基和天基的联合观测进行研究发现, 从 10 月 28~30 日, 全球各个区域的电离层的总电子含量(TEC)发生了剧烈的变化, 相对于月中值, 最大增加幅度达 50%, 最大下降幅度达 70%. 与此同时, 这一系列的日地联系事件对平流层和中层的影响也很大, 从 2003 年 10 月 25 日到 11 月 14 日, 极区上部平流层的 NO_x 浓度达 180 ppbv(ppbv, part per billion by volume), 差不多是没有扰动时的 10 倍, 北极中层下部(平流层上部)在太阳质子事件后的两个星期内, 臭氧浓度减少了 50%~70%(30%~40%), 南极的臭氧含量下降幅度稍小[9].

这期间, 太阳高能粒子使一系列飞船出现异常情况[10], 有 59%的在轨飞船和 18%的船载仪器受到了万圣节事件的影响, 较严重的有单粒子翻转事件、太阳能电池板性能退化、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[11], 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, 高纬 GPS 接收一度中断, 广域增强系统(Wide Area Augment System, WAAS)在美国临近地区的服务有时中断, 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[12].

从上面简介可以看出, 灾害性空间天气对地基和天基技术系统的影响涉及社会生产生活的方方面面. 更为重要的是, 维系着当今世界经济全球化的输油、电力、通信和航天等高技术系统对空间天气变化表现得极为脆弱, 因此, 空间天气灾害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[13~17]. 另一方面, 支撑现代高科技战争的各个系统都高度依赖于空间技术, 所以没有空间安全就很难保障领土、领海和领空的安全. 因此了解空间天气的发生机制并提前几个小时到几天的时间预报灾害性的空间天气, 成为许多国家的空间天气计划和众多研究计划的目标[18~21]. 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在灾害性空间天气预报研究方面已经取得了很大的发展[22]. 这里对近几年这一领域的最新发展成果加以总结, 以便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扼要回顾, 对这一领域发展趋势进行简要评述.

1 国际研究进展

这里主要介绍美国发展较为成熟且应用较为广泛的两个三维磁流体力学(Magnetohydrodynamics, MHD)数值模式: 美国空间环境建模中心开发的空间天气模型架构和美国集成空间天气建模中心开发的空间天气耦合模型中的日冕和日球层模型. 其他的三维 MHD 模式还有美国国家海洋大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)下设的空间环境中心等单位合作开发的混合日球层模型系统[23]、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的一个从日面出发直至 1 AU[1)]的三维 MHD 数值模型[24]以及 Usmanov 发展的一个从太阳表面直到 1 AU 以远的全球三维太阳风模型[25]. 关于这些模式的简要评述请参见冯学尚等[26]的综述文章.

1.1 空间天气模型架构

由美国密西根大学及其他十多家合作单位组成的空间环境建模中心(Center for Space Environment

1) 1 AU 即 1 个天文单位, 是太阳到地球的平均距离, 在 2012 年 8 月于中国北京举行的国际天文学大会(IAU)上, 该值被定义为 149, 597, 870, 700 m, 约 215 个太阳半径

Modeling, CSEM)开发了集空间天气模拟和应用于一体的空间天气模型架构(Space Weather Modeling Frame, SWMF). SWMF 包括日冕模型、太阳爆发事件模型、内日球层模型以及其他区域模型. 各个模块可以独立运行, 也可通过标准接口耦合起来[27], 各区域模型及其耦合构成的 SWMF 结构见图 1[28].

SWMF 的日冕模型、内日球层模型及其他区域模型均采用 Roe 迎风格式[29,30](Block Adaptive Tree Solar-wind Roe-type Upwind Scheme, BATS-R-US), 采用块自适应树型结构网格, 可以根据解的物理性质对计算网格进行加密或放粗. Tóth 等[28]全面介绍了 SWMF 的整体结构以及其在各方面的最新发展, 这一模型目前已经推广到处理 Hall、半相对论性、多成分和多流体的 MHD 问题, 可以处理各向异性压力、辐射传输和热传导等效应. 日冕模型的计算区域从~1 Rs[2)] 到~24 Rs, 控制方程中添加了 Powell 磁场散度消除项和不同形式的日冕加热和太阳风加速等源项[31~33]. 日冕模型的磁场输入由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, 下部边界的温度和密度随日面经纬度变化, 以便在 1 AU 附近得到与观测接近的太阳风, 日冕模型可以为内日球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, 所以太阳爆发事件模型有多种选择, 但都是作为边界条件或者非线性扰动整合到日冕模型之中. 内日球层模型的计算区域从大约 20 Rs 直到地球附近, 通常采用直角坐标系划分网格, 计算区域常常是关于太阳不对称的矩形区域, 控制方程是理想的 MHD 方程组, 内日球模型为全球磁层模型提供上游边界条件, 内日球型和全球磁层模型的解域有部分重叠. 这个模式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, 但是对每一个事件, 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[27]利用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. 最近 Jin 等[34]利用这一模式求解双温含阿尔芬波加热的三维 MHD 方程, 对第 2077 卡林顿自转周(Carrington Rotation, CR)的背景太阳风进行了模拟研究, 结果与日冕的 EUV 和白光观测符合很好, 图 2 是模拟结果与 ACE 实地观测结果的对比. Cohen 等[35]用半圆形非稳定磁流管结构模拟了 1997 年

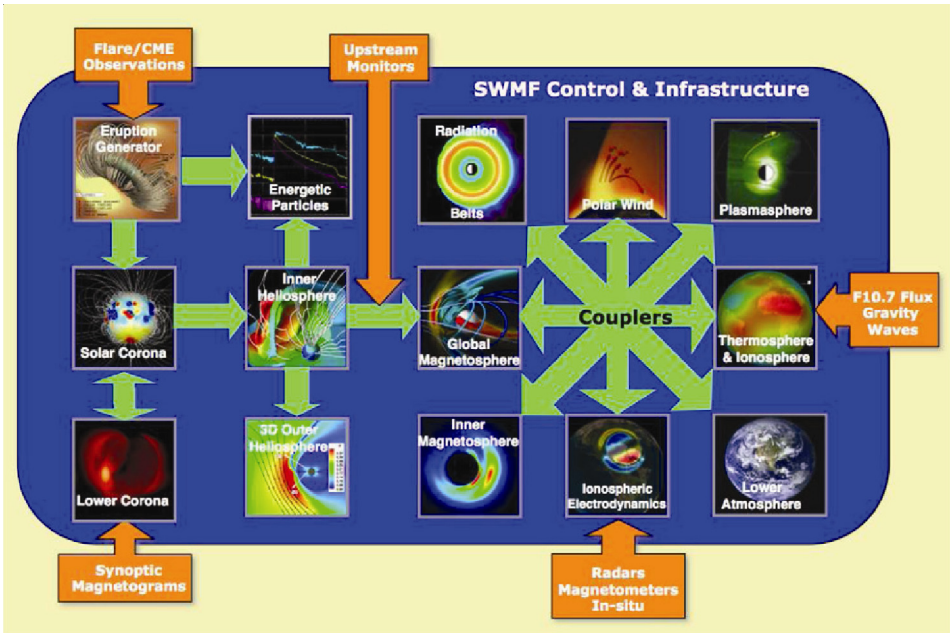


图 1　SWMF 的各区域模型(方框)及其之间的耦合(绿色箭头)[28]

2) 1 Rs=6.96×10^5 km

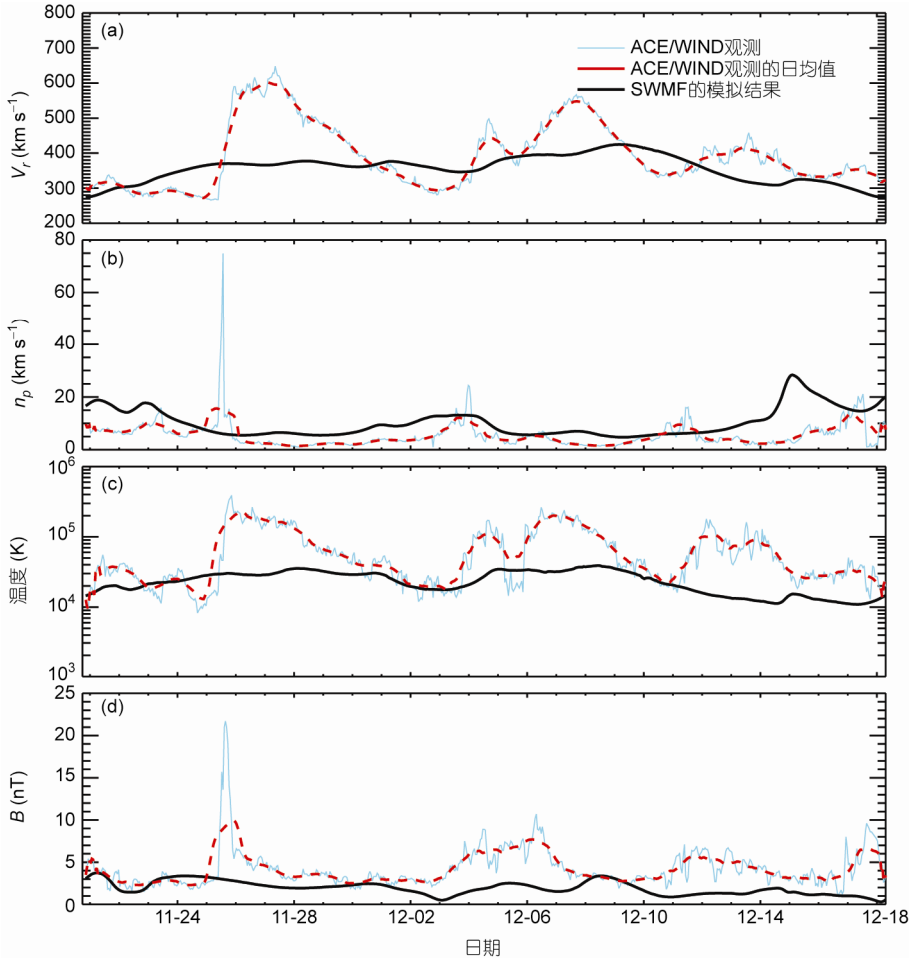


图 2　模型 SWMF 的模拟结果与观测结果的对比

(a)~(d)依次为太阳风径向速度、质子数密度、质子(电子)温度和磁场大小. 据文献[34]

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, Tóth 等[36]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 (SOlar Heliospheric Observatory/Michelson Doppler Imager)观测为边界条件进行势场展开作为输入, 方程中添加湍动加热项[37], CME 模型以修正的 Titov 和 Démoulin 磁流管模型[38]作为输入, 将模拟结果与飞船观测对比发现该模式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 3 是 SWMF 对该事件的在 1 AU 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 1 AU 处行星际磁场的分量结果与真实观测相差较大.

Lugaz 和 Roussev[39]用 SWMF 研究了 2007 年 1 月 24~25 日的 CMEs 在行星际空间的传播过程, 用模拟确定了 SMEI 和 STEREO/SECCHI 的观测事件对应的源区位置及 CMEs 在行星际空间的相互作用. 通过比较, 他们发现用接近于真实的 CME 模型而不是单纯的热压扰动进行模拟, 结果更接近局地观测, 将 SMEI 以及 STEREO 等日球层观测和接近真实的数值模拟进行比较研究, 有助于提高我们对 CMEs 之间相互作用的认识.

1.2　日冕-日球层模型

日冕-日球层模型(CORHEL)是美国集成空间天气建模中心(Center for Integrated Space weather

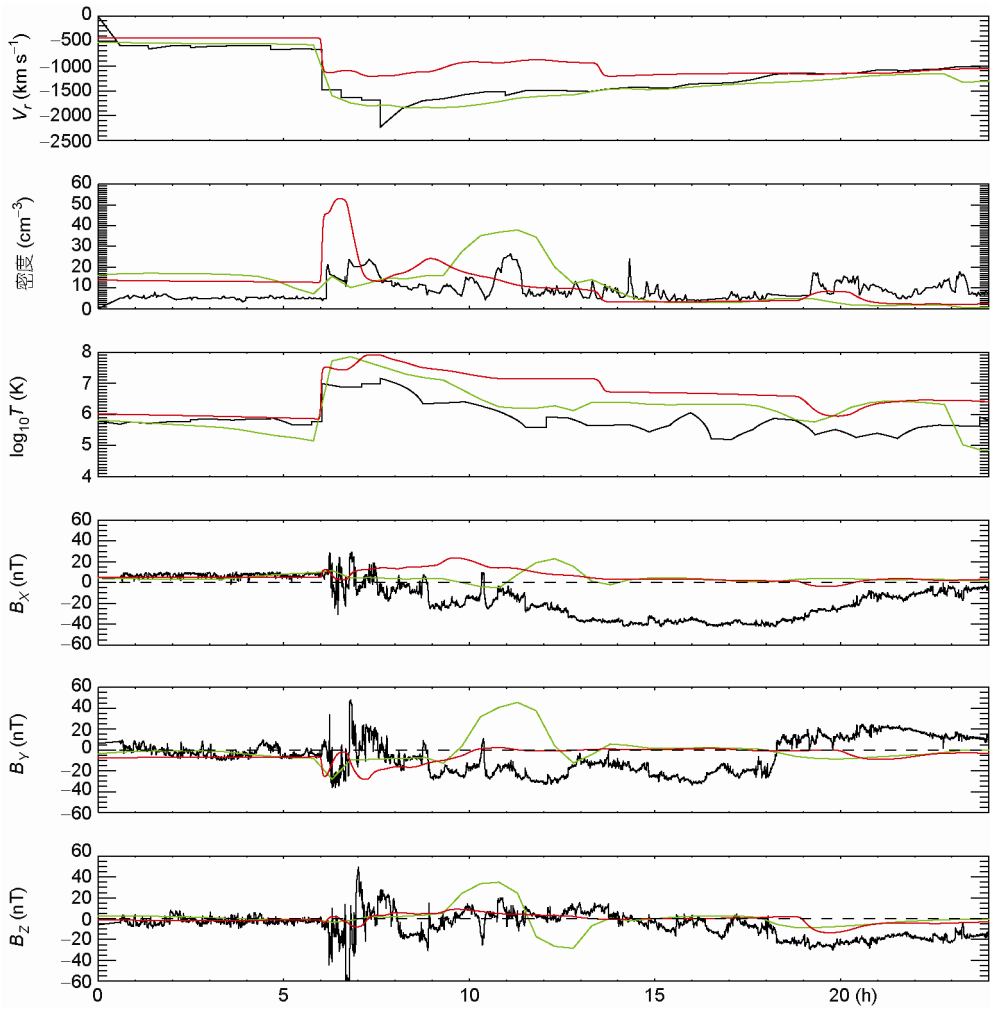


图 3　模型 SWMF 的模拟结果

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. 从上到下依次为太阳风速度、密度、温度和磁场分量. 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结果, 而绿线为沿着地球轨道移动 9°后的模拟结果. 为了与激波到达地球相符, 模拟数据的时间分别偏移了 1.8 和 3.4 h. 据文献[36]

Modeling, CISM)开发的空间天气耦合模型中的日冕和日球层模型. 日冕模型有 MAS(the MHD-Around-a-Sphere model) 或 WSA (Wang-Sheeey-Arge)两种模型供选择, 日球层模型则是 ENLIL 模型, 分别构成 WSA/ENLIL 和 MAS/ENLIL[40]. WSA 在 21.5 Rs 的输出结果和 MAS 在 30 Rs 的计算结果分别作为 WSA/ENLIL 和 MAS/ENLIL 中 ENLIL 模型的底部边界. CORHEL 所包含的模型及其输入输出见图 4[41].

WSA 模型以光球视向磁场观测为输入, 用势场-源表面(PFSS)模型获得日冕磁场, 根据源表面处(通常为 2.5 Rs)的日冕磁场相对于对应的光球磁场的膨胀因子以及磁力线在光球上的足点与开闭场边界的

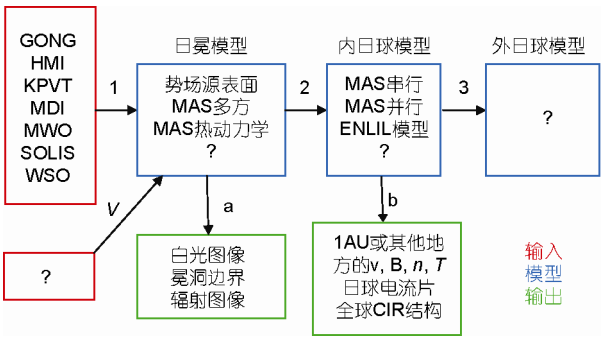


图 4　CORHEL 模型组成及其输入输出

角距离, 利用经验公式确定自某一点发出的太阳风经过加速之后的终了速度, 因此可以预报地球附近

的太阳风速度, 也经常用来作为数值模型的约束或者部分输入. MAS 是一个三维时变 MHD 有限差分日冕模型, 其中磁感应方程用 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, 求解的区域一般为 1~30 Rs, Lionello 等[42]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求解 MHD 方程的差分格式实现底部边界的电磁场条件的连续更新[43,44]. 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 ENLIL 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[45,46], 而密度采用质量守恒、温度采用总压平衡求得[40].

ENLIL 模型最初是科罗拉多大学的 Odstrcil 等开发的三维数值模型, 其计算区域为: 径向区域为从 21.5 Rs 或 30 Rs 开始, 最远可达到 10 AU, 余纬范围为 30°~150°, 经度范围为 0°~360°, 差分格式是修正的 TVDLF(Total Variation Diminishing Lax-Friedrich)格式[47], 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 的同时, 还求解 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[48].

Riley 等[45]采用 MAS 模型模拟 CRs 1913, 1892 和 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, 模拟的各个太阳活动位相的日球电流片(Heliospheric Current Sheet, HCS)结构与其对应的观测观测特征(翘曲和分布形态等)大体相符. Odstrcil[49]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. Odstrcil 等[50,51]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, 都能反映初始阶段 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的行星际空间演化过程, 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.

Owens 等[52]利用卫星从 1995 年到 2002 年在 L1 点的观测, 比较研究了 WSA, MAS/ENLIL 和 WSA/ENLIL 三个模型对太阳风参数的预测性能, 发现 WSA 和 WSA/ENLIL 性能相近, 但是 WSA 和 ENLIL 之间的接口有待进一步校准, 而 MAS/ENLIL 中 ENLIL 的下边界输入也存在进一步校准的问题. McGregor 等[53,54]利用 HELIOS 在近日点观测的太阳风速度和太阳风源区的研究结果进一步校准 WSA 模型的太阳风速度拟合公式, 并以校准后的 WSA 模型作为输入, 用 ENLIL 模型研究太阳活动极小期的太阳风速度分布特征和径向演化特征, 结果表明不同类型的太阳风的产生机制可能不同. Riley 等[55]考虑了日冕加热、热传导、辐射损失和 Alfvén 波效应, 研究了日球层完整月(WHI)期间日冕和日球层的大尺度结构, 并与 SOHO/EIT, STEREO-A 和-B 的实地观测进行了对比, 总体再现了这一时期日冕和行星际大尺度结构特征, 但是对小尺度的日冕结构、高速流和磁场极性变化出现的时间还有待完善. Riley 等[41]用 MSA/ENLIL 模型模拟研究了 CR 2060 的共转相互作用区(CIRs), 图 5 是模拟结果与观测结果的对比, 总体来说, 模拟结果再现了大部分的观测结构, 但是总有些时段, 二者相差较大. 另外, 和其他模型一样, 所得到的磁场大小比观测的要低.

最近, Lee 等[40]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[56,57], IPS(InterPlanetary Scintillation)和 SMEI(the Solar Mass Ejection Imager)的观测引入 MHD 模型的输入之中. 近来, ENLIL 与锥模型相结合在预报 CME 到达时间方面较其他模型

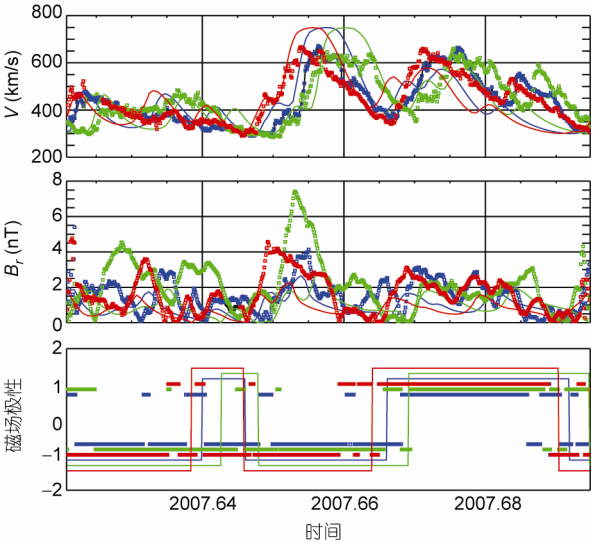


图 5　CORHEL 的模拟结果和观测的对比图

从上到下依次为 CR 2060 期间 1 AU 处的太阳风速度、径向磁场大小和磁场极性. 实线为模拟结果, 方块表示的数据点是 STEREO A(红色)、地球轨道处(蓝色)和 STEREO B(绿色)的实地观测结果. 据文献[41]

有一定程度的改善[58,59].

2　我国的发展概述

本节主要介绍我国空间天气学国家重点实验室自主开发的具有国际先进水平的日冕-行星际守恒元解元模式[22]以及太阳风暴可视化平台的研究进展. 另外, 该实验室还自主开发了日冕-行星际三维 MHD 数值模型(COIN)[60], 并应用于太阳风准稳态背景[61~63]和扰动传播[64,65]等方面的研究, 详见参考文献[26].

2.1　太阳行星际守恒元解元模型

太阳行星际守恒元解元 MHD(Solar Inter-Planetary-Conservative Element Solution Element, SIP-CESE MHD)模型是我国空间天气学国家重点实验室 Feng 等[66]开发的从太阳表面出发直至行星际空间的三维数值模型. 这一格式采用守恒形式的 MHD 方程组作为控制方程, 将时间和空间不加区别作为一个整体, 并把对空间微分作为待解变量, 假定物理量在解元(Solution Element, SE)内是光滑可微的, 而在相邻的解元之间或者在守恒元(Conservative Element, CE)内可以出现间断. Feng 等[66]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, 见图 6. 将基本物理变量和通量项在待求节点处作

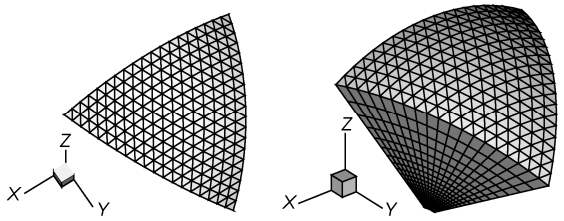


图 6　Feng 等[66]所采用多面体网格

泰勒展开, 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.

Feng 等[67]在六片网格上实现了 CESE 格式, 六片网格中每一片可通过坐标变换变为另一片, 其示意图见图 7. 使用六片网格一方面消除了极轴附近的网格汇聚和奇异性问题, 同时也能够在经纬度方向实现并行处理; 采用多重网格求解泊松方程消除磁场散度; 采用局部时间步加快计算; 将质量流量限制和投影特征边界条件相结合, 确定底部边界条件; 利用磁场扩散因子 f_s 和磁力线在光球的足点距离开闭场边界的角距离 θ_b 确定新的体积加热项.

Feng 等[69]将计算的日地区域划分为近日区(小于 6 Rs)和远日区(大于 6 Rs)两部分, 近日区采用阴阳网格系统, 便于拟合太阳冕底以及标定底部边界条件, 用 SIP-CESE 模式求解; 远日区采用直角坐标系划分网格, 便于实现采用自适应网格技术(AMR), 用 HLL(Harten-Lax-van Leer)算法求解, 二者采用接口模块耦合. 这一组合网格系统有望用于太阳风与行星大气的相互作用的数值模拟研究中, 这一网格系统的构成示意图见图 8.

Feng 等[68]和 Jiang 等[70]对原有的 CESE 算法进行了改进, 并引入了非奇异变换使得 AMR 实现容易, 计算效率得以提高. 首先他们引入非奇异变换, 将守恒形式的 MHD 方程由物理空间映射到参考空间, 仍然为守恒形式, 而且使参考空间的网格单元为长方体, 然后在参考空间用 SIP-CESE 模型求解 MHD 方程; 接着对 CESE 算法涉及的时空结点进行重组并将原来时空交错网格上的两步积分合并为一个完整的时间步,

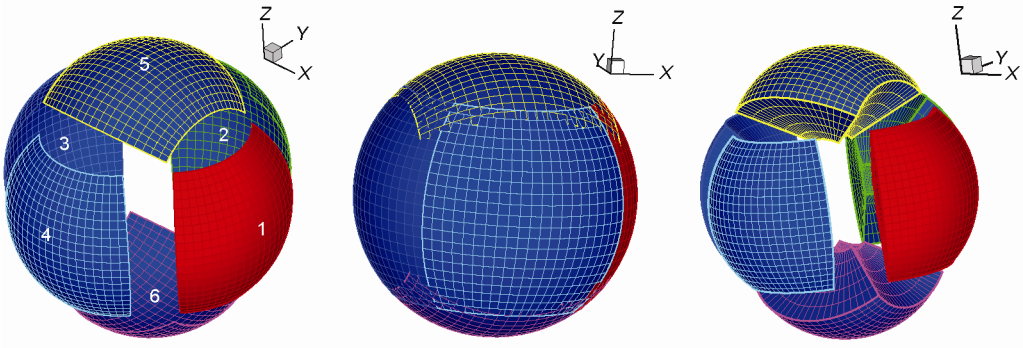


图 7　Feng 等[67,68]所采用的六片网格

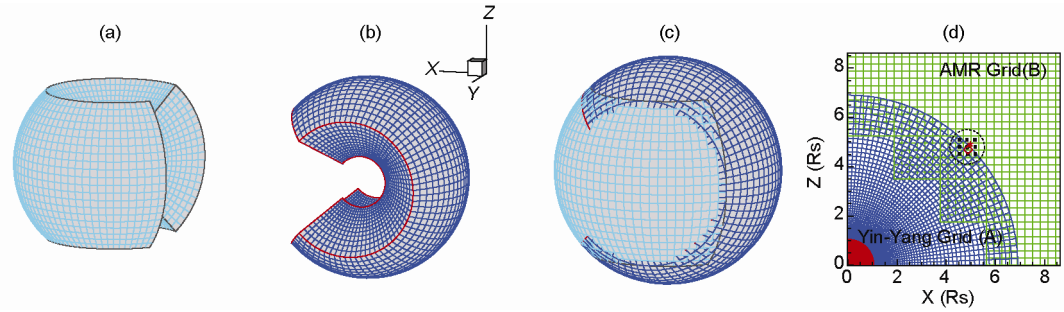


图 8　Feng 等[69]所采用的阴阳网格和 AMR 直角坐标系网格构成的组合网格系统

(a) 阴网格; (b) 阳网格; (c) 阴阳网格叠合在一起; (d) 近日区的阴阳网格和远日区的 AMR 网格的结合(赤道面截图)

最后借助于开源的 AMR 工具包 PARAMESH 实现了 AMR.

Feng 等[71]和 Yang 等[72]以及 Feng 等[73]根据每日更新的 WSO 磁场观测或表面通量传输模型, 随模拟时间步的推进, 实时更新模拟区域底部的边界条件, 并把行星际空间的局地观测映射到计算域内进行比较. 更新底部边界时, 在每一推进步, 求解一个二维球面泊松方程得到底部切向电场, 再结合投影特征边界条件完成底部边界的标定, 最后通过常用的 CESE 模型求解完成每一步的计算, 从而使底部边界处理的自洽性得到最大程度的满足.

经过上述的发展, 目前的三维 SIP-CESE MHD 具有以下特点:

(1) 利用磁场扩散因子 f_s 和磁力线在光球的足点距离开闭场边界的角距离 θ_b 确定新的体积加热项, 能够较好地区分高低速太阳风.

(2) 利用投影特征边界条件和底部质量流量限制等方法确定底部边界能够较好地再现速度、密度和温度结构.

(3) 模型对流动在时间和空间的演化采用一致的处理方式, 能够有效地保持全局和局部的通量守恒.

(4) 采用六片网格可以解决通常球坐标系下在极轴附近网格的汇聚性和奇异性问题, 同时代码实现也变得极为简捷.

(5) 引入非奇异变换将物理空间球坐标系中守恒形式的 MHD 方程映射到参考空间中长方体网格上的守恒形式方程, 使得 AMR 实现容易, 计算效率得以提高; 如果采用适当变换, 那么这种 CESE 算法无需修改就可以移植到其他坐标系(无论是直角坐标系、球坐标系、柱坐标系, 还是其他曲线坐标系).

(6) 重组 CESE 算法涉及的时空结点并将原来时空交错网格上的两步积分合并为一个完整的时间步, 这样避免了交错时空网格, 节省了存储资源, 同时解可以显示地给定在所定义的网格点上, 也使得守恒元 CE 的空间投影由原来的二十四面体简化为长方体, 守恒元界面上的通量可以通过非交错格点计算得出, 而无需借助于黎曼解或者其他模型, 从而节省了计算时间.

(7) 利用 CESE MHD 发展的日冕磁场外推为我

们利用 HMI/SDO 全球矢量磁图重建日冕磁场提供了新的可行方法.

(8) 利用下边界电场切向分量的演化方程结合投影特征边界条件, 初步实现了将底部时变的观测磁图融入模型.

下面简要介绍利用这一模型所做工作的部分结果.

2.1.1 SIP-CESE MHD 对日冕行星际太阳风稳态的研究

Feng 等[66]用 SIP-CESE MHD 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背景太阳风结构的典型变化特征. 图 9 给出了这一研究得到的密度和速度分布图.

Hu 等[74]研究了第 23 太阳活动周行星际大尺度结构和磁场的演化. 通过与 PFSS 模型和日冕白光观测的对比, 发现模拟结果可以较好地再现日球电流片的形态随太阳活动周的演化特征, 而且与日冕白光偏振亮度观测基本相符. 图 10 给出了模拟得到的第 23 太阳活动周日球电流片(HCS)和日冕磁场的演化过程. Feng 等[67]将计算区域分为六片对称的区域, 利用三维 CESE MHD 模型模拟研究了 CR 1911 的太阳风背景并与 WIND 飞船观测进行了对比, 其结果基本再现速度分布和磁场极性等观测特征. 值得注意的是, 这一模型还被用于其他研究问题, 如数值模型中所采用的不同经验加热模型的对比[75], 对 2004~2008 这一不平常的太阳活动极小期的日冕和太阳风的特征研究[76].

Feng 等[68]用改进后的 SIP-CESE MHD 模型结合 AMR 技术研究了由 CRs1967, 2009, 2060 和 2094 四个卡林顿周代表的不同太阳活动位相期间的太阳风背景, 并与 SOHO 的太阳观测和 OMNI 的行星际观测数据进行对比, 模拟结果再现了相应活动位相期日冕和行星际的许多观测特征. 图 11 是日冕的开闭场分布和 SOHO/EIT 的观测对比, 图 12 是计算得到的 1 AU 准稳态太阳风参数与 OMNI 的数据的对比.

Yang 等[72]采用考虑了太阳自转的磁流体力学(MHD)模型, 在 1~27 Rs 对太阳风背景结构进行模拟研究, 随模拟时间步的推进, 根据每日更新的 WSO 磁场观测, 实时更新模拟区域底部的边界条件, 并把行星际空间的局地观测映射到计算域内进行比较. 对 2007 年的连续模拟的结果与观测的对比研究表明: 该模式具有良好的稳定性, 计算得到的冕洞大小位

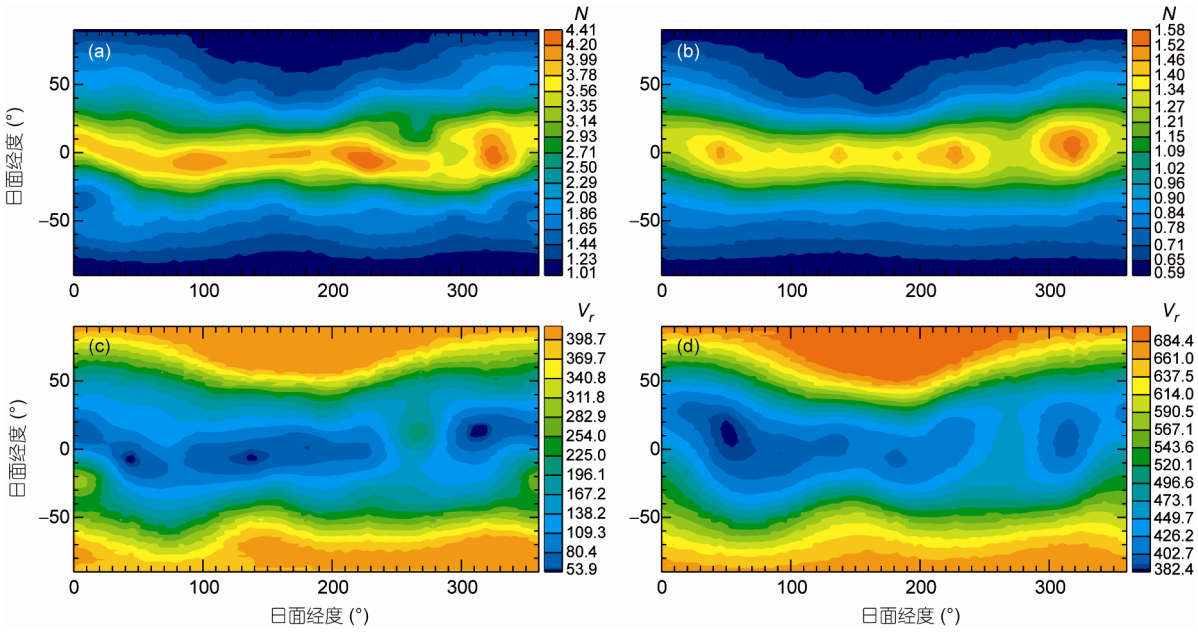


图 9 CESE 模型的模拟得到等离子体参数

(a) 2.5 R_s 表面上的密度分布(单位: 10^6 cm^{-3}); (b) 20 R_s 表面上的密度分布(单位: 10^4 cm^{-3}); (c) 2.5 R_s 表面上的速度分布; (d) 20 R_s 表面上的速度分布(单位: km s^{-1}). 据文献[66]

置以及冕旒带的分布与观测符合较好, 同时模拟的太阳风与映射到计算域的行星际空间观测在高低速流转换和行星际磁场极性等方面基本相符. 图 13 是模拟的日冕结构与观测的日冕结构的对比, 图 14 是模拟的太阳风速度和磁场极性与反推到 20 个太阳半径处的观测结果对比. Feng 等[73]则用表面通量传输模型产生底部磁场实时更新模拟区域底部的边界条件, 采用阴阳网格下的 CESE-AMR MHD 模型对 1996 年 9 月 4 日至 1996 年 10 月 29 日的日冕大尺度结构进行了连续模拟研究. 模拟结果再现了日冕的

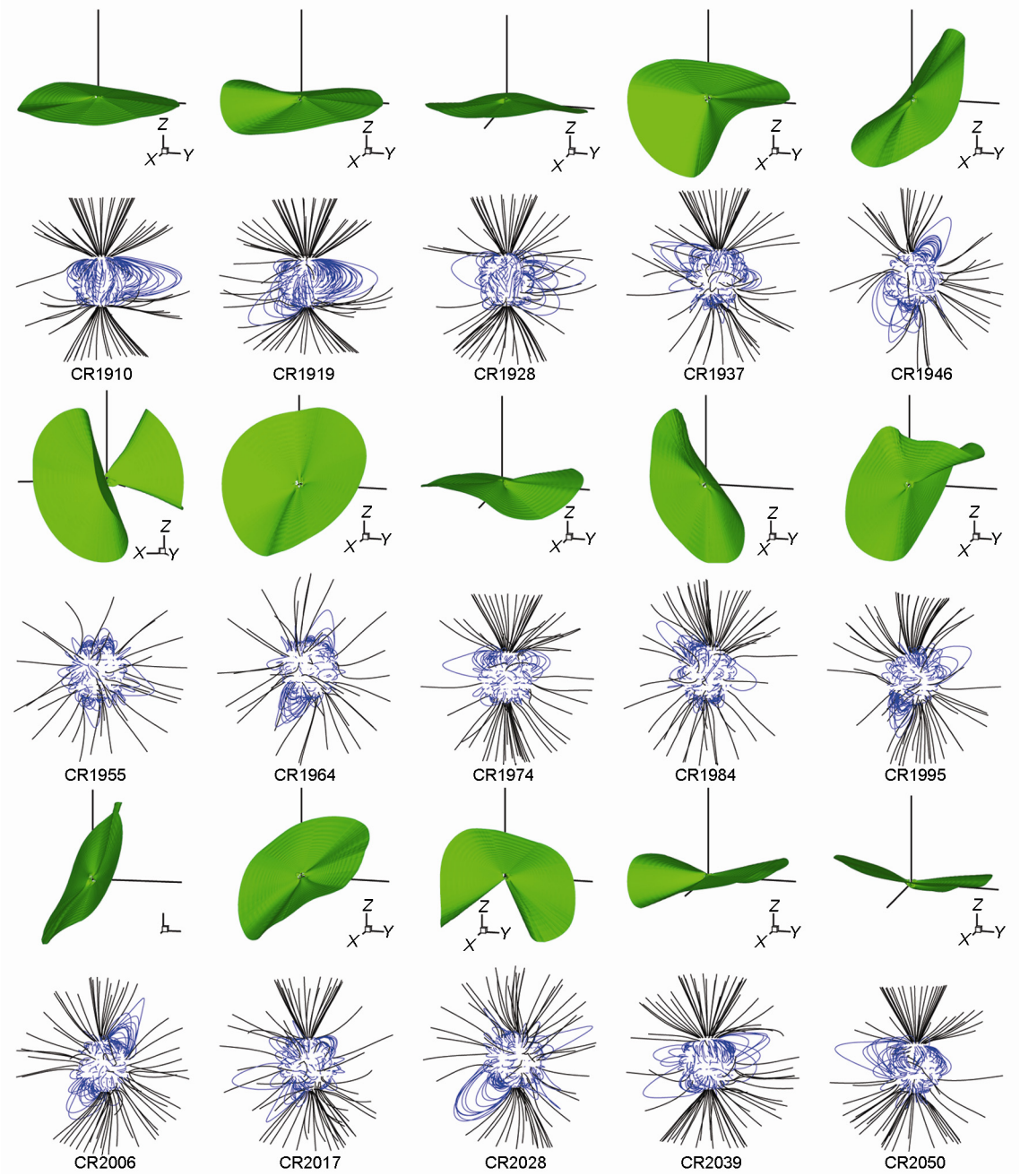


图 10　CESE 模型的模拟结果[74]

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. 每个卡林顿周的上图是 HCS 位形, 对应于 B_r=0 的等值面; 下图是日冕磁场位形图, 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

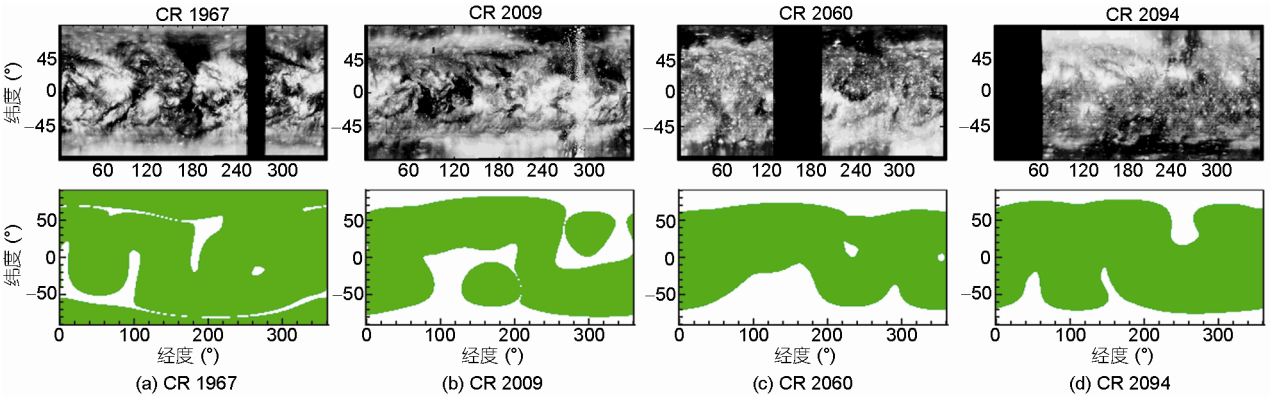


图 11　CESE 模型的模拟结果

SOHO/EIT 的观测(第一排)与模拟的日冕开闭场分布和对比(第二排). 观测的黑色区域为冕洞(对应于开放场), 模拟的绿色区域为闭场区. 据文献[68]

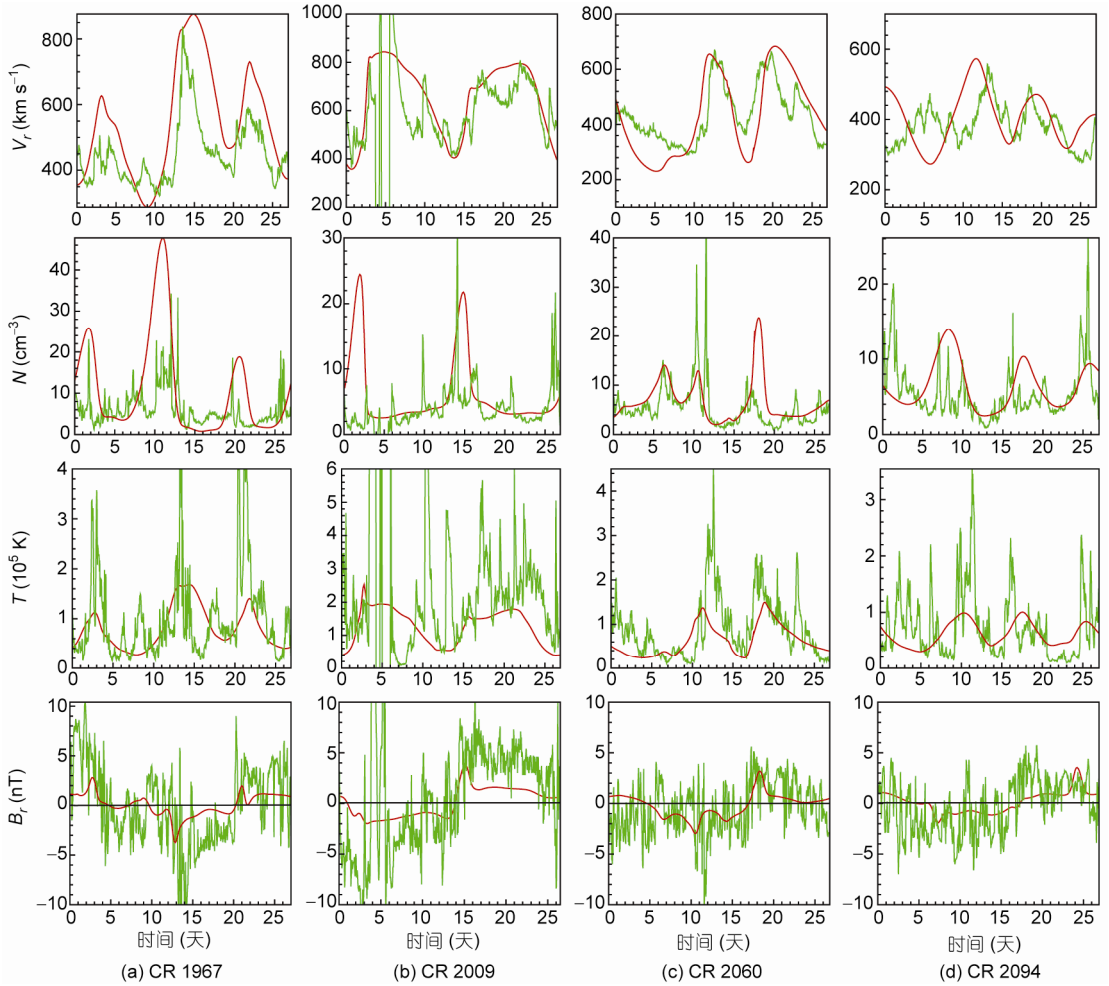


图 12　CESE 模型的模拟结果

模拟的 1 AU 太阳风参数的变化与观测数据的比较. 从上到下依次为太阳风速度 V_r、等离子体密度 N、温度 T 和径向磁场 B_r. 据文献[68]

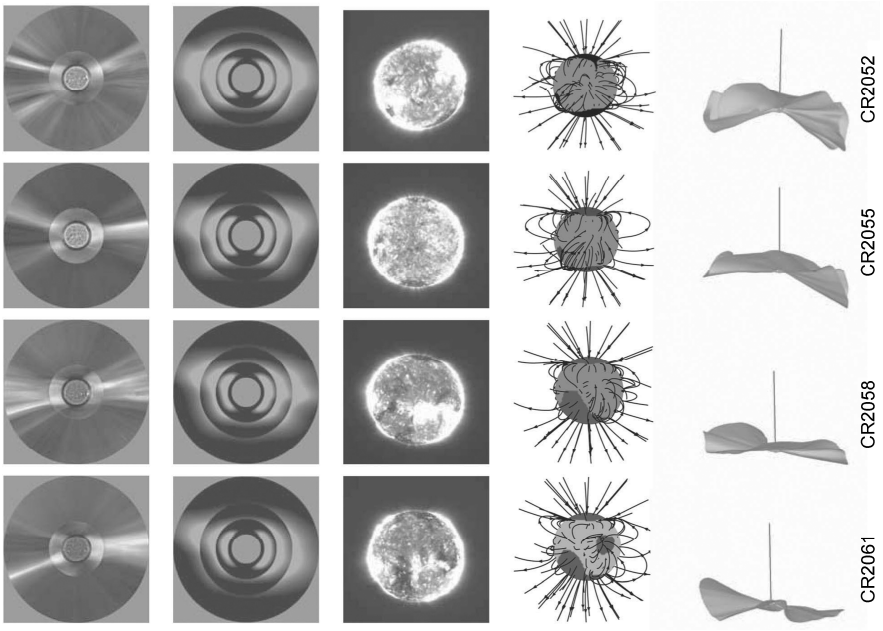


图 13　CRs 2052, 2055, 2058 和 2061 期间在经度为 90°~270°的子午面内的日冕观测和模拟结果的对比

第一列和第二列分别为观测的和模拟合成的日冕偏振亮度(pB), 径向范围为为 1.15~6 Rs. 第三列是 STEREO-A SECCHI EUVI 195 Å 在与第一列同一日期的观测, 第四列是模拟的三维磁场位形拓扑, 范围为 1~2 Rs, 日面的开场区用黑色表示, 闭场区用灰色表示, 最后一列是日球电流片的三维结构. 据文献[72]

全球结构: 冕旒、冕洞及其演化趋势, 而且对活动区上方磁场的非势性表现很好.

2.1.2　利用 SIP-CESE MHD 重构日冕磁场

Jiang 等[77,78]应用 Yin-Yang 网格下的 SIP-CESE MHD 数值模式, 提出了用非线性无力场重构局部或全球日冕磁场的松弛法. 采用更接近于日冕实际情形的全磁流体(MHD)模型, 利用简洁而高效的时空守恒数值格式进行求解. 光球面边界条件类似于挤压-松弛方法, 而计算区域的其他人工边界全部采用基于投影特征线方法的无反射边界条件. 这种边界条件可以有效的降低边界影响, 让磁力线在人为边界面上自由的移动. 我们利用此法外推了无力场的两个经典解析解. 结果证明了方法的有效性, 进一步的分析发现, 计算结果与目前国际上的最好的方法相当. 由于代码高度并行化和网格的自适应化, 该方法计算效率高, 可以直接应用于大视场的磁图, 并有望实现全球无力场外推. 图 15 是解析解、模拟结果和势场解的对比.

2.1.3　SIP-CESE 对扰动事件的模拟

Zhou 等[79,80]用这个模型研究了 1998 年 11 月 4~5 日和 1997 年 5 月 12 日的 CMEs 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. 模拟结果再现了 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 1 AU 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. 后来, 通过在模拟区域中引入高密度、高温度和高速度的磁化等离子体泡作为扰动模型, Zhou 等[81]研究了 1997 年 11 月 4 日的 CME 事件, 并与位于 L1 点的 WIND 飞船的观测进行了对比, 模拟得到的太阳风参数变化基本与观测一致. 图 16 是太阳附近 CME 的三维结构, 图 17 是模拟的太阳风参数和观测的太阳风参数的变化剖面, 其中虚线是地球西侧 30°的模拟结果, 此处的结果更接近于飞船的实地观测.

2.1.4　基于 SIP-CESE 格式实现 AMR 的几点考虑

在日冕行星际模拟中, 我们选择具有二阶精度的 CESE 格式实现 AMR, 求解 MHD 方程组, 主要基于以下几点原因.

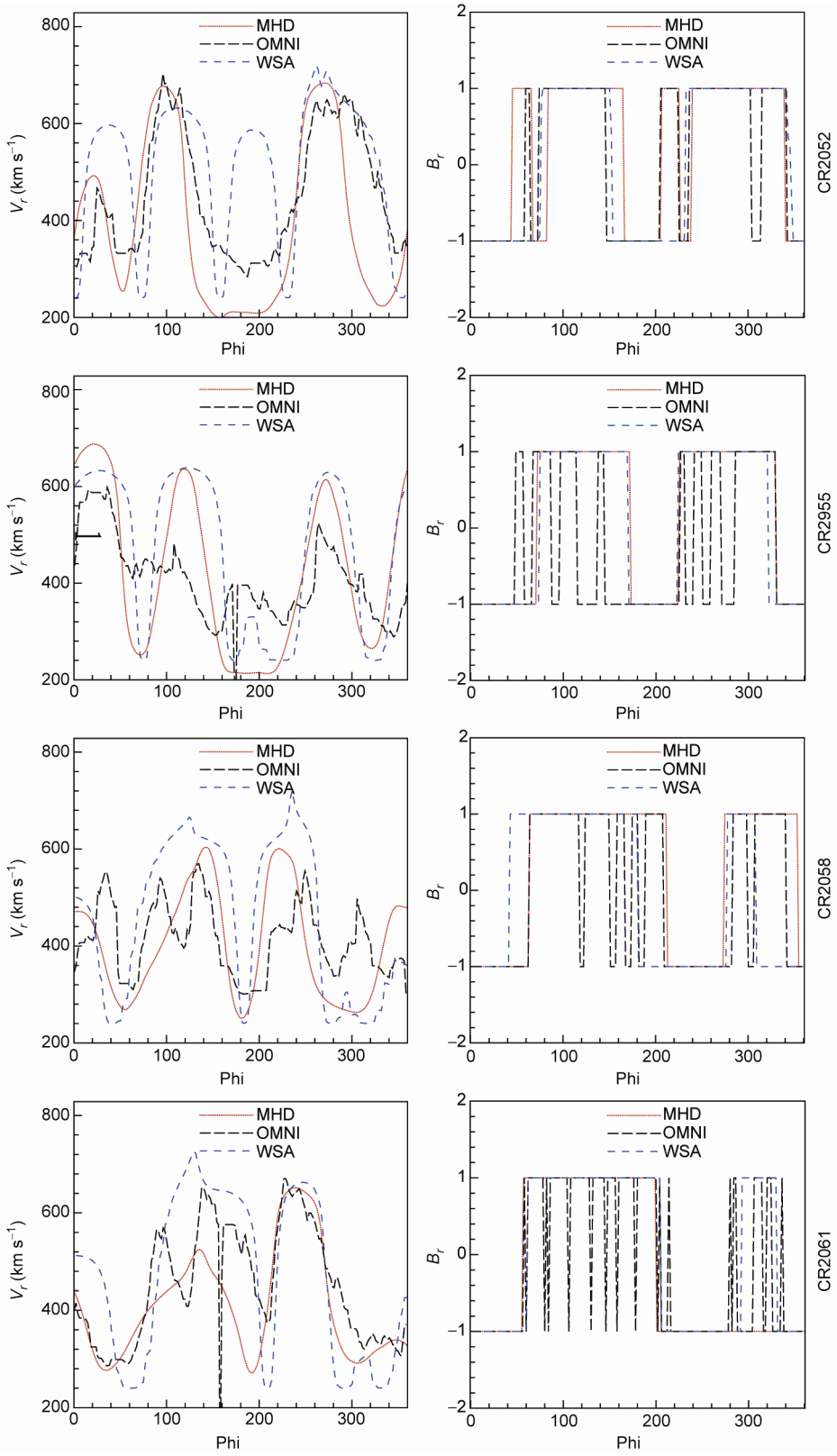


图 14　CRs 2052, 2055, 2058 和 2061 期间模拟的太阳风速度和磁场极性与反推到 20 个太阳半径处的观测结果对比

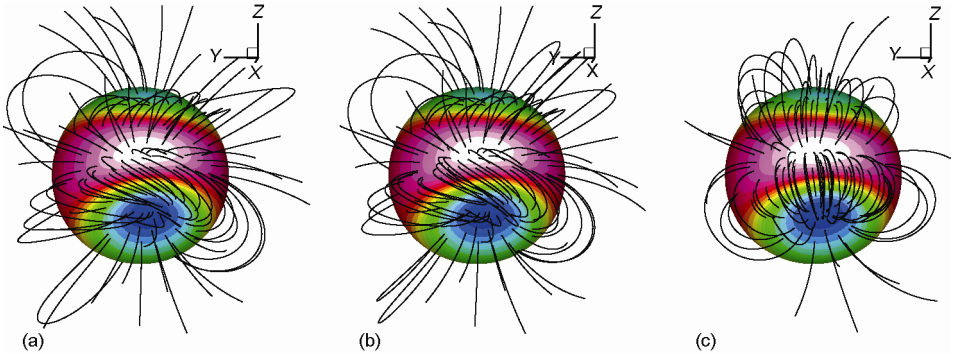


图 15　三维磁力线以及用伪彩图表示的光球径向磁场

(a) Low 和 Lou 无力场的解析解; (b) CESE 模拟结果; (c) 势场解. 据文献[78]

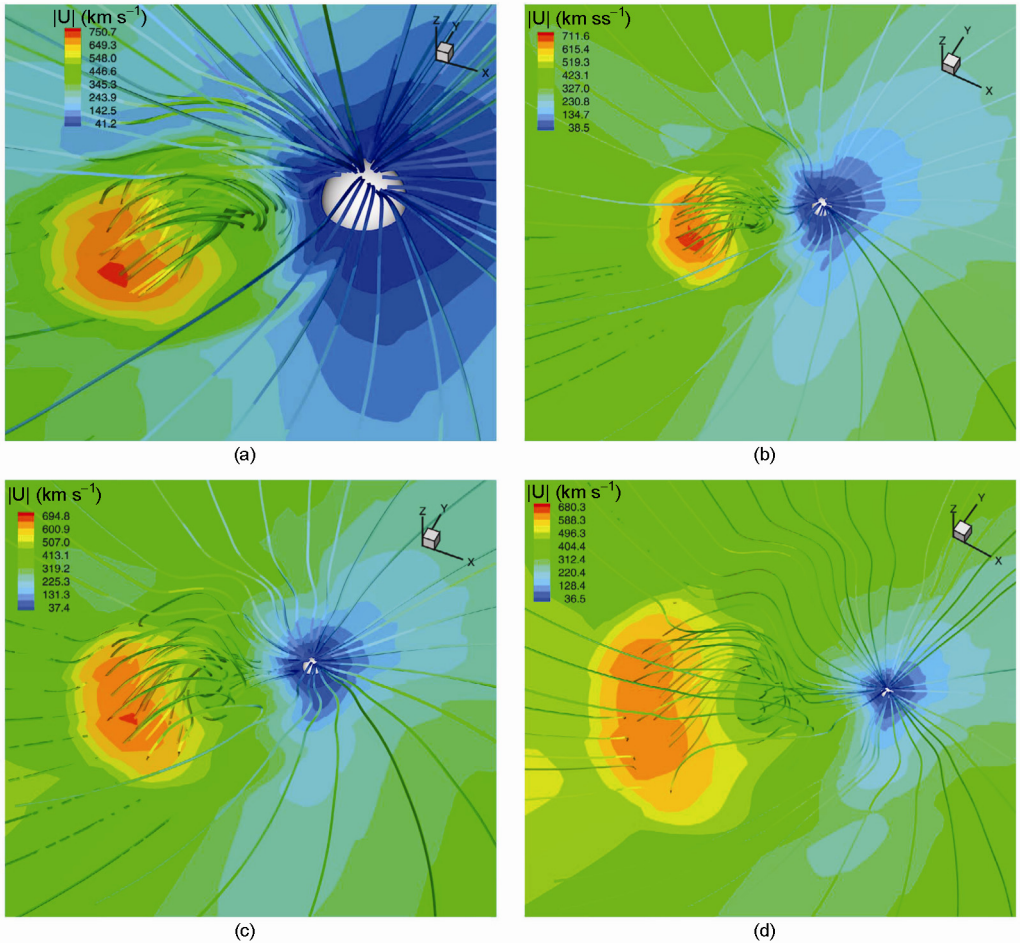


图 16　太阳附近 CME 的三维结构随时间演化

(a)~(d)分别为 1, 3, 5 和 10 h, 白色区域是太阳, 伪彩色是 *X*-*Y* 平面的速度分布, 绿色线条是三维磁力线. 据文献[81]

(1) 高阶精度的差分格式在耦合系统中激波传播的计算精度不像在光滑区那样可取得较高的精度, Majda 和 Osher[82]证明了在具有间断的耦合双曲问题中, 高阶精度的格式会降低为一阶精度. Greenough 和 Rider[83]以及 Rider 和 Kamm[84]通过定量比较: 考虑非线性时, 发现高阶格式的优势并不显著; 对于多

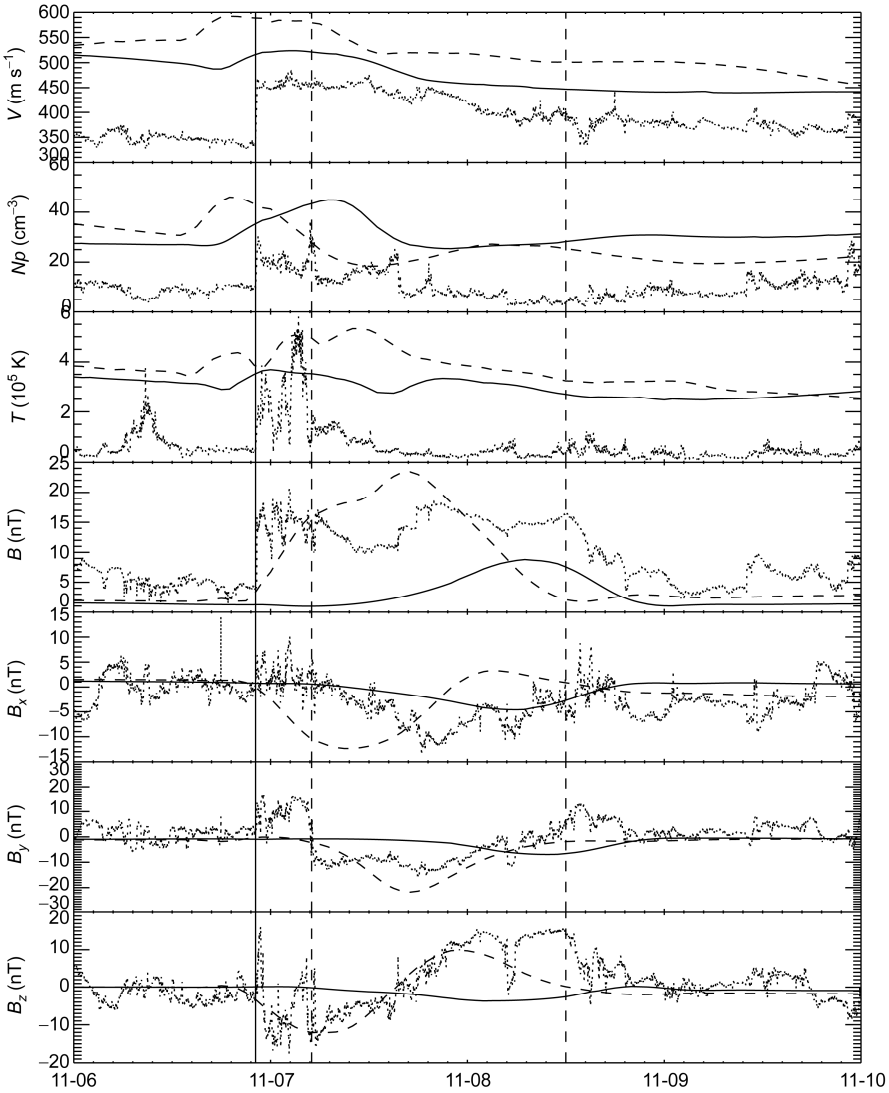


图 17　SIP-CESE 对 1997 年 11 月 4 日 CME 事件的模拟结果与 WIND 飞船观测结果的对比

点线是 WIND 飞船观测, 实线是地球轨道处的模拟结果, 虚线是地球轨道西侧 30°的模拟结果. 竖直实线为观测的激波到达时刻, 竖直虚线为观测磁云的起止时刻. 据文献[81]

维非线性问题, 高阶方法和二阶方法的结果相差不大[85]. 这些研究表明, 就对计算精度的影响而言, 网格间距是比差分格式更为重要的因素.

(2) 太阳风模拟的控制方程经常带有热传导、电阻项, 有时还用磁场散度消除算法, 因此很难保证全局的高阶精度. Tafti[86]通过数值求解不可压 Navier-Stokes 方程, 模拟湍动时发现: 二阶中心差分格式对湍动谱的分辨效果要好于高阶迎风格式, 即使用四阶中心差分近似构造关于压力的 Laplace 方程, 也不能提高全局精度.

(3) AMR 的实现过程中, 粗细网格间的通量计算和插值也会影响的高阶格式的精度, 同时高阶格式也意味着确定下边界条件时, 需要更多的虚拟网格(Ghost Cells)[67]. Shen 等[87]基于高阶的加权本质非振荡(WENO)格式实现了 AMR, 但发现在不同精度级别的网格上的结果很难保持高阶精度, 也很难保证局部质量守恒.

(4) Berger 和 Colella[88]发现传统的有限体积法下的 AMR 需要通量修正步以保证质量守恒. 应用 AMR 技术求解多维 MHD 问题必须处理磁场散度为

零[28,68,71,89]. 虽然 Berger 和 Colella[88]提出的用于 AMR 的差分格式可以保持流体力学量的守恒特性, 但是MHD中还有磁场散度为零的挑战. 正如Tóth等[28]所言, 磁场散度为零由初始条件决定, 但是 AMR 中, 如果不经过特别处理(如八波法[29], 广义拉格朗日算子法[90]和投影法[91]), 那么局部时间步迭代的应用将破坏所求稳态的磁场散度为零的条件. 值得注意的是, 方向分裂算法在每一维向的更新步不可能保持磁场散度为零[92~94], 故不适宜 AMR, 因为通量和电场的修正需要包含所有到达单元边界的波的贡献[95,96], 但是 CESE 格式无需特别处理就可以将磁场散度降低到合理水平[97,98].

(5) 此外, Jameson[99]通过对比研究表明: 如果解域内需要最细网格的区域不大于整个区域的三分之一, 那么 AMR 要比高阶精度的格式更具优势, 所选格式的阶数尽可能接近于而不必超过计算数据的精度阶数, 这样用较为低阶的格式可以节省大量存储空间而不至于太过影响精度. 在日冕行星际模拟研究中, 电流片、激波和 CIR 等需要细化网格的区域从不会超过整个日地空间的三分之一, 因此 AMR 技术适用于日冕行星际物理现象模拟.

(6) MHD 方程组常常出现退化特征值, 因此, 设计差分格式时应该尽量避免采用通量分裂和通量差分分裂(亦称为黎曼近似或者 Godunov 近似)这类基于特征分析的格式. 求解双曲系统时, 这类格式需要辨明迎风方向, 根据网格点的信息传播方向离散方程. 这一过程的实质就是根据系数矩阵在每个时空维度上的特征向量构造它的非奇异相似矩阵及其左逆, 原方程也简化为黎曼问题[100]. 根据这一思想, 现已设计出许多此类格式, 如 HLL 类格式[101~107]. MacCormack[108]与 Jiang 和 Wu[109]发展的通量矢量分裂格式. 这类格式数值粘性较高[110], 近来 Tóth 等[28]已设计出降低数值粘性的方法. Shen 等[111]注意到在 MHD 的特征系统中, 对应于 Alfvén 波的特征值对通量没有影响, 也就是说用任何值代替对应的特征值, 通量不变, 这使得基于Roe近似的黎曼解具有不确定性. 另一种低耗散高阶格式[111,112]将对流迎风压力分裂的 WENO 格式和约束输运算法结合起来, 不需要繁复的求解特征系统, 这些低耗散的格式预计可以用于未来低粘性的太阳风数值研究中.

(7) Roe 和 Balsara[113]指出, 在真解不可微的区域, 不要期望找到真解, 因此应该优先考虑基于积分而不是微分守恒律的数值方法, CESE 格式将时空作为一个整体, 采用时空积分形式描述 MHD 方程组, 通过解元守恒元求解, 相比于传统的迎风格式, 无需构造黎曼解, 完全基于时空守恒元上的积分来实现.

因此, 从某种意义上说, 空间二阶精度的 CESE 格式和自适应网格相结合, 是日冕行星际数值建模工作中的最佳选择之一.

2.2 我国行星际太阳风暴可视化技术研究的发展

研究和应用空间天气预报模式离不开数据的分析和可视化. 随着各种观测和计算技术的发展, 数据的空间和时间分辨率的不断提升, 数据量呈指数膨胀. 传统的数据分析及可视化软件在处理海量数据时效率不高, 集成模式和数据困难. 这些问题反过来限制了数值模型不能采用更高的时空分辨率运行, 以免数据无法分析. 为解决海量数据分析困难的问题并集成相关的空间天气模式, 我们开发了空间天气模式集成系统(Space Weather Integrated Modeling, SWIM). SWIM 的结构框图见图 18.

SWIM 基于模块化设计, 以 Python 和 C、Fortran 等语言混合编写而成, 使用了 NumPy、matplotlib、VTK 等数组运算和可视化软件库, 包括数据输入输出、数据处理、2 维和 3 维数据可视化和模式集成等模块. SWIM 集成了读取包括 CDF 文件格式和 SIP-CESE MHD 模型数据格式在内的多种数据格式的数据接口, 可以对数据进行多种分析和可视化操作, 例如: 坐标系转换、从时间序列数据抽取空间某点的数据、磁力线绘制、多切面分析太阳风数据、太阳风数据的体渲染、制作动画等等. 为了处理数值模式产生的海量数据, SWIM 还尝试了在并行的数值模型程序中加入独立的可视化进程, 实时地生成可视化图形, 将数据后处理(post processing)变成同时处理(co-processing); 使用多核 CPU 和 GPU 技术改造需要大量计算的算法, 加速数据处理过程. SWIM 基本形成了一个完整的空间天气模式和数据的可视化软件工具链, 我们已经使用 SWIM 提供的工具对 SIP-CESE 模型进行了实时的可视化, 集成了预报激波到达时间的数据库模型和激波渡越模型、Dst 预报模型以及 SIP-CESE 模型. SWIM 系统的可视化界面见图 19.

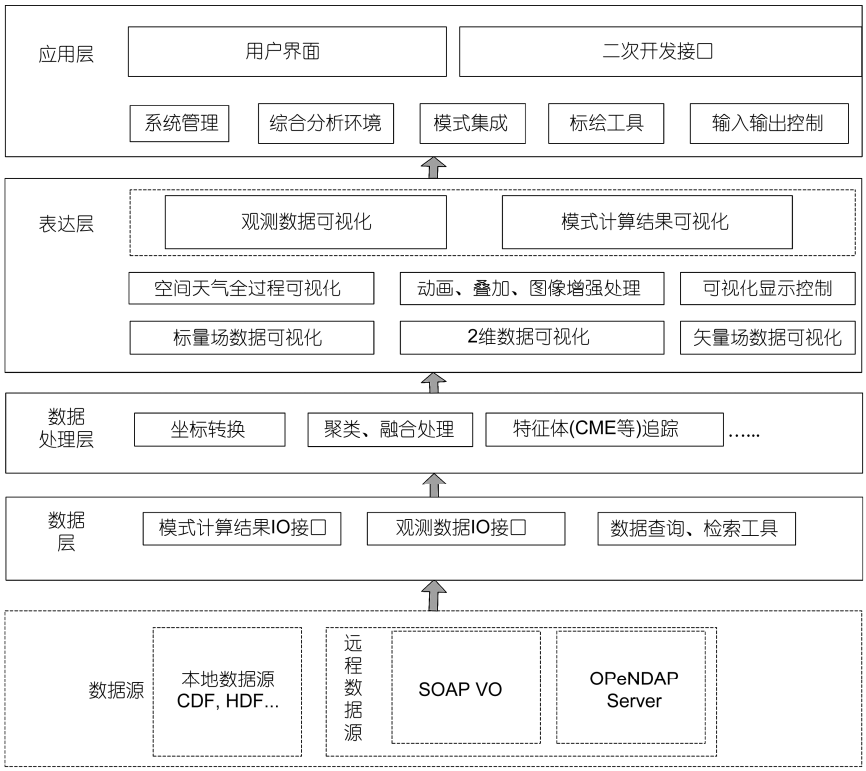


图 18　SWIM 的架构

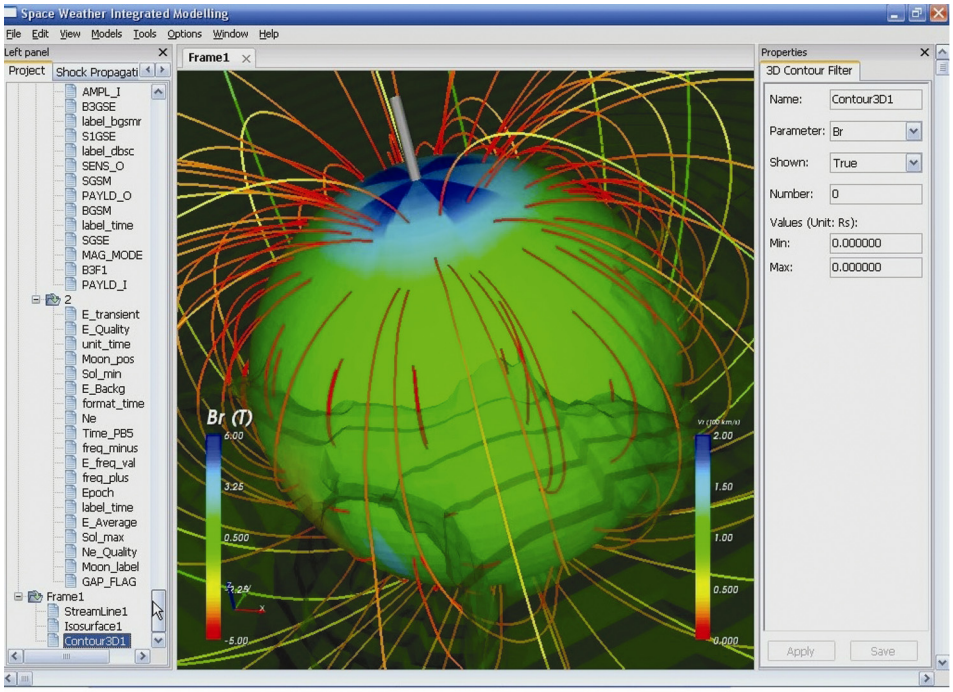


图 19　基于 SWIM 构架的可视化界面

3 未来工作展望

综上所述, 三维MHD数值模型业已成为研究和预报行星际太阳风暴的重要工具. 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. 冯学尚等[26]曾从物理、格式和计算方面对日冕行星际太阳风暴数值模拟工作中要注意的问题进行了较为完整的总结. 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). 我们认为行星际太阳风暴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) 未来诸多观测计划, 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, 这将有助于三维数值模型定量再现卫星的实地观测.

(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 CMEs 物理机制的新认识, 构建以活动区连续观测数据为输入的而且不做人为设定的日冕物质抛射模型, 探索太阳风暴的触发机制, 再现真实的爆发物理过程, 发展新的太阳风暴的扰动模式.

(3) 基于多卫星(如 WIND, ACE, SOHO, STEREO 等)联合观测以及行星际闪烁(IPS)等遥感观测, 结合模型开展不同数据同化算法(最优插值, 四维变分, 卡尔曼滤波, 集合卡尔曼滤波等)的试验比对研究, 尝试设计出适合三维 MHD 数值模型的同化方法, 以达到改善 MHD 模型的预测精度的目的.

(4) 现有的计算设施仍然难以满足三维 MHD 模拟的研究和应用需求, 建立描述太阳风暴的日冕与行星际过程的快捷高效稳定的、自适应并行 GPU 数值预报模式将成为非常具有吸引力的发展方向. 将行星际太阳风暴模型与太阳光球、色球和日冕模型以及近地磁层、电离层、热层等空间天气模式耦合, 应是我国构建涵盖日冕-行星际-近地空间天气因果链的空间天气数值定量预报初步框架的必由之路.

(5) 太阳风暴可视化系统在数据 I/O、海量数据即时可视化(*in-situ* visualization)、远程数据处理和可视化、数值模型自动运行等方面将有新的突破, 进而发展成为集成众多空间天气数据处理和可视化工具的高效管理及运行平台, 成为集成一系列的空间天气因果链模式并自动化运行的预报模式平台.

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, 我们需要加强太阳风暴数值模型研究和业务预报模式的协同发展, 实现研发与应用的有效融合. 从前面的综述我们已经看到, 将逐步实现观测、经验模型和 MHD 数值模型的三者有机结合. 我们相信经过空间天气研究者的共同努力, 太阳风暴的数值模型会得到更快的发展, 并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, 也使我国空间天气数值预报研究在不久的将来问鼎国际顶尖水平.

参考文献

1 Baker D N. How to cope with space weather? Science, 2002, 297: 1486–1487
2 王水. 空间物理学的回顾和展望. 地球科学进展, 2001, 16: 664–670
3 王水. 空间天气研究的主要科学问题. 中国科学技术大学学报, 2007, 37: 807–812
4 王水, 魏奉思. 中国空间天气研究进展. 地球物理学报, 2007, 22: 1025–1029
5 Belov A V, Gaidash S P, Ivanov K G, et al. Unusually high geomagnetic activity in 2003. Cosm Res, 2004, 42: 541–550
6 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
7 Dmitriev A V, Suvorova A V. Geosynchronous magnetopause crossings on October 29–31, 2003. Cosm Res, 2004, 42: 551–560
8 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
9 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
10 Webb D, Allen J. Spacecraft and ground anomalies related to the October-November 2003 solar activity. Space Weather, 2004, 2: S03008
11 Barbieri L P, Mahmot R E. October—November 2003's space weather and operations lessons learned. Space Weather, 2004, 2: S09002
12 Doherty P, Coster A J, Murtagh W. Space weather effects of October–November 2003. GPS Solutions, 2004, 8: 267–271
13 Baker D N. What is space weather? Adv Space Res, 1998, 22: 7–16
14 Siscoe G. The space-weather enterprise: Past, present and future. J Atmos Solar-Terr Phys, 2000, 62: 1223–1232
15 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
16 曹晋滨. 空间天气学研究进展. 中国科学院院刊, 2005, 20: 277–282
17 方成. 走进我们生活的新学科. 中国自然科学杂志, 2006, 28: 194–198
18 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 D C: American Geophysical Union, 2001. 1–10
19 魏奉思. 空间天气学的基本问题. 中国基础科学, 2000, 7: 9–13
20 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
21 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
22 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
23 Detman T, Smith Z, Dryer M, et al. A hybrid heliospheric modeling system: Background solar wind. J Geophys Res, 2006, 111: A07102
24 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
25 Usmanov A V. Goldstein M L. Three-dimensional MHD modeling of the solar corona and solar wind. In: Solar Wind Ten, Proceedings of the Tenth International Solar Wind Conference. AIP Conf Proc, 2003, 679: 393–398
26 冯学尚, 向长青, 钟鼎坤. 太阳风暴的日冕行星际过程三维数值研究进展. 中国科学: 地球科学, 2011, 41: 1–28
27 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(A12): A12226
28 Tóth G, van der Holst Bart, Sokolov I V, et al. Adaptive numerical algorithms in space weather modeling. J Comput Phys, 2012, 231: 870–903
29 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
30 Ilie R, Liemohn M W, Kozyra J, et al. An investigation of the magnetosphere-ionosphere response to real and idealized co-rotating interaction region events through global magnetohydrodynamic simulations. Proc R Soc A, 2010, 466: 3279–3303
31 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(A11): 25053–25078
32 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
33 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(A6): 12675–12696
34 Jin M, Manchester W B, van der Holst B, et al. A global two-temperature corona and inner heliosphere model: A comprehensive validation study. Astrophys J, 2012, 745: 6
35 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
36 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
37 Roussev I I, Gombosi T, Sokolov I V, et al. A three dimensional model of solar wind incorporating solar magnetogram observations. Astrophys J, 2003, 595: L57–L61
38 Titov V S, Demoulin P. Basic topology of twisted magnetic configurations in solar flares. Astron Astrophys, 1999, 351: 701–720
39 Lugaz N, Roussev I I. Numerical modeling of interplanetary coronal mass ejections and comparison with heliospheric images. J Atmos Sol-Terr Phys, 2011, 73: 1187–1200
40 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 Phys, 2009, 254: 155–183
41 Riley P, Linker J A, Lionello R, et al. Corotating interaction regions during the recent solar minimum: The power and limitations of global MHD modeling. J Atmos Sol-Terr Phys, 2012, 83: 1–10
42 Lionello R, Mikic Z, Schnack D D, et al. Magnetohydrodynamics of solar coronal plasmas in cylindrical geometry. J Comput Phys, 1998, 140: 172–201
43 Mikić Z, Linker J A, Schnack D D, et al. Magnetohydrodynamic modeling of the global solar corona. Phys Plasmas,1999, 6: 2217–2224
44 Linker J A, Lionello R, Mikić Z, et al. The evolution of open magnetic flux driven by photospheric dynamics. Astrophy J, 2011, 731: 110
45 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(A8): 15889–15901
46 Riley P, Linker J A, Mikic Z. Modeling the heliospheric current sheet: Solar cycle variations. J Geophys Res, 2002, 107: 1136
47 Tóth 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
48 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(A12): 28225–28239
49 Odstrcil D. Modeling 3D solar wind structure. Adv Space Res, 2003, 32: 497–506
50 Odstrcil D, Riley P, Zhao X P. Numerical simulation of the 12 May 1997 interplanetary CME event. J Geophys Res, 2004, 109: A02116
51 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: A02106
52 Owens M J, Spence H E, McGregor S, et al. Metrics for solar wind prediction models: Comparison of empirical, hybrid, and physics-based schemes with 8 years of L1 observations. Space Weather, 2008, 6: S08001
53 McGregor S L, Hughes W J, Arge C N, et al. The distribution of solar wind speeds during solar minimum: Calibration for numerical solar wind modeling constraints on the source of the slow solar wind. J Geophys Res, 2011, 116: A03101
54 McGregor S L, Hughes W J, Arge C N, et al. The radial evolution of solar wind speeds. J Geophys Res, 2011, 116: A03106
55 Riley P, Lionello R, Linker J A, et al. Global MHD modeling of the solar corona and inner heliosphere for the whole heliosphere interval. Sol Phys, 2011, 274: 361–377
56 Zhao X P, Plunkett S P, Liu W. Determination of geometrical and kinematical properties of halo coronal mass ejections using the cone model. J Geophy Res, 2002, 107: 1223–1231
57 Pizzo V, Millward G, Parsons A, et al. Wang-Sheeley-Arge-Enlil cone model transitions to operations. Space Weather, 2011, 9: S03004
58 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
59 Taktakishvili A, Pulkkinen A, MacNeice P, et al. Modeling of coronal mass ejections that caused particularly large geomagnetic storms using ENLIL heliosphere cone model. Space Weather, 2011, 9: S06002
60 冯学尚, 向长青, 钟鼎坤, 等. 三维太阳风结构的 Ulysses 观测和 MHD 模拟的比较研究. 科学通报, 2005, 50: 820–826
61 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
62 Shen F, Feng X S, Xiang C Q, et al. The statistical and numerical study of the global distribution of coronal plasma and magnetic field near 2.5 Rs over a 10-year period. J Atmos Sol-Terr Phys, 2010, 72: 1008–1018
63 Shen F, Feng X S, Xiang C Q. Improvement to the global distribution of coronal plasma and magnetic field on the source surface using expansion factor *fs* and angular distance θb. J Atmos Sol-Terr Phys, 2011, 77: 125–131
64 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
65 Shen F, Feng X S, Wang Y, et al. Three-dimensional MHD simulation of two coronal mass ejections' propagation and interaction using a successive magnetized plasma blobs model. J Geophys Res, 2011, 116: A09103
66 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
67 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
68 Feng X S, Yang L P, Xiang C Q, et al. Validation of the 3D AMR SIP-CESE solar wind model for four Carrington rotations. Sol Phys,

2012, 279: 207–229
69 Feng X S, Zhang S H, Xiang C Q, et al. A hybrid solar wind model of the CESE+HLL method with a Yin-Yang overset grid and an AMR grid. Astrophys J, 2011, 734: 50
70 Jiang C W, Feng X S, Zhang J, et al. AMR simulations of magnetohydrodynamic problems by the CESE method in curvilinear coordinates. Sol Phys, 2010, 267: 463–491
71 Feng X S, Yang L P, Xiang C Q, et al. Numerical study of the global corona for CR 2055 Driven by daily updated synoptic magnetic field. In: Pogorelov N V, Font J A, Audit E, eds. Numerical Modeling of Space Plasma Flows (Astronum 2011), ASP Conf. Ser. 459, 13–17 June 2011, Valencia, Spain. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2012. 202–208
72 Yang L P, Feng X S, Xiang C Q, et al. Time-dependent MHD modeling of the global solar corona for year 2007: Driven by daily-updated magnetic field synoptic data. J Geophys Res, 2012, 117: A08110
73 Feng X S, Jiang C W, Xiang C Q, et al. A data-driven model for the global coronal evolution. Astrophys J, 2012, 758: 62
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
75 Yang L P, Feng X S, Xiang C Q, et al. Numerical validation and comparison of three solar wind heating methods by the SIP-CESE MHD Model. Chin Phys Lett, 2011, 28: 039601
76 Yang L P, Feng X S, Xiang C Q, et al. Simulation of the unusual solar minimum with 3D SIP-CESE MHD Model by comparison with multi-satellite observations. Sol Phys, 2011, 271: 91–110
77 Jiang C W, Feng X S, Fan Y L, et al. Reconstruction of the coronal magnetic field using the CESE-MHD method. Astrophys J, 2011, 727: 101
78 Jiang C W, Feng X S, Xiang C Q. A new code for nonlinear force-free field extrapolation of the global corona. Astrophys J, 2012, 755: 62
79 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
80 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
81 Zhou Y F, Feng X S, Wu S T, et al. Using a 3-D spherical plasmoid to interpret the Sun-to-Earth propagation of the 4 November 1997 coronal mass ejection event. J Geophys Res, 2012, 117: A01102
82 Majda A, Osher S. Propagation of error into regions of smoothness for accurate difference approximations to hyperbolic equations. Commun Pur Appl Math, 1977, 30: 671–705
83 Greenough J A, Rider W J. A quantitative comparison of numerical methods for the compressible Euler equations: Fifth-order WENO and piecewise-linear Godunov. J Comput Phys, 2004, 196: 259–281
84 Rider W, Kamm J. How effective are high-order approximations in shock-capturing methods? Is there a law of diminishing returns? In: Groth C, Zingg D W, eds. Computational Fluid Dynamics 2004. Heidelberg: Springer, 2006. 401–405
85 Cook A W, Cabot W H, Greenough J A. A high-order method for shock-induced mixing, Tech Rep, UCRL-JC-144109, Lawrence Livermore National Laboratory, 2001
86 Tafti D. Comparison of some upwind-biased high-order formulations with a second-order central-difference scheme for time integration of the incompressible Navier-Stokes equations. Comput Fluids, 1996, 25: 647–665
87 Shen C, Qiu J M, Christlieb A. Adaptive mesh refinement based on high order finite difference WENO scheme for multi-scale simulations. J Comput Phys, 2011, 230: 3780–3802
88 Berger M J, Colella P. Local adaptive mesh refinement for shock hydrodynamics. J Comput Phys, 1989, 82: 64–84
89 Keppens R, Meliani Z, van Marle A, et al. Parallel, grid-adaptive approaches forrelativistic hydro and magnetohydrodynamics. J Comput Phys, 2012, 231: 718–744
90 Yalim M S, Vanden A D, Lani A, et al. A finite volume implicit time integration method for solving the equations of ideal magnetohydrodynamics for the hyperbolic divergence cleaning approach. J Comput Phys, 2011, 230: 6136–6154
91 Brackbill J U, Barnes D C. The effect of nonzero product of magnetic gradient and B on the numerical solution of the magnetohydrodynamic equations. J Comput Phys, 1980, 35: 426–430
92 Balsara D S. Second-order-accurate schemes for magnetohydrodynamics with divergence-free reconstruction. Astrophys J Suppl Ser, 2004, 151: 149–184
93 Gardiner T A, Stone J M. An unsplit Godunov method for ideal MHD via constrained transport. J Comput Phys, 2005, 205: 509–539
94 Gardiner T A, Stone J M. An unsplit Godunov method for ideal MHD via constrained transport in three dimensions. J Comput Phys, 2008, 227: 4123–4141
95 Balsara D S. Total variation diminishing scheme for relativistic magnetohydrodynamics. Astrophys J Suppl Ser, 2001, 132: 83–101

96 Balsara D S. Total variation diminishing scheme for adiabatic and isothermal magnetohydrodynamics. Astrophys J Suppl Ser, 1998, 116: 133–153
97 Zhang M, John Yu S T, Lin S C, et al. Solving the MHD equations by the space time conservation element and solution element method. J Comput Phys, 2006, 214: 599–617
98 Feng X S, Hu Y Q, Wei F S. Modeling the resistive MHD by the CESE method. Sol Phys, 2006, 235: 235–257
99 Jameson L. AMR vs high order schemes. J Sci Comput, 2003, 18: 1–24
100 Roe P L. Characteristic-based schemes for the Euler equations. Annu Rev Fluid Mech, 1986, 18: 337–365
101 Janhunen P A. Positive conservative method for magnetohydrodynamics based on HLL and Roe methods. J Comput Phys, 2000, 160: 649–661
102 Gurski K. An HLLC-type approximate Riemann solver for ideal magnetohydrodynamics. SIAM J Sci Comput. 2004, 25: 2165–2187
103 Miyoshi T, Kusano K. A multi-state HLL approximate Riemann solver for ideal magnetohydrodynamics. J Comput Phys, 2005, 208: 315–344
104 Fuchs F G, Mishra S, Risebro N H. Splitting based finite volume schemes for ideal MHD equations, J Comput Phys, 2009, 228: 641–660
105 Balsara D S. Multidimensional HLLE Riemann solver: Application to Euler and magnetohydrodynamic flows. J Comput Phys, 2010, 229: 1970–1993
106 Miyoshi T, Terada N, Matsumoto Y, et al. The HLLD approximate Riemann solver for magnetospheric simulation. IEEE T Plasma Sci, 2010, 38: 2236–2242
107 Ziegler U. A semi-discrete central scheme for magnetohydrodynamics on orthogonal curvilinear grids. J Comput Phys, 2011, 230: 1035–1063
108 MacCormack R W. An upwind conservation form method for ideal magnetohydrodynamics equations. AIAA Paper 99-3609, 1999, 30th Plasmadynamics and Laser Conference, 28 June–1 July 1999, Norfolk, Virginia
109 Jiang G S, Wu C C. A high-order WENO finite difference scheme for the equations of ideal magnetohydrodynamics. J Comput Phys, 1999, 150: 561–594
110 Shang J. Three decades of accomplishments in computational fluid dynamics. Prog Aerosp Sci, 2004, 40: 173–197
111 Shen Y Q, Zha G C, Huerta M A. E-CUSP scheme for the equations of magnetothydrodynamics with high order WENO scheme. AIAA Paper 2011-383, 2011, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 4–7 January 2011, Orlando, Florida
112 Shen Y, Zha G, Huerta M A. E-cusp scheme for the equations of ideal magnetohydrodynamics with high order WENO scheme. J Comput Phys, 2012, 231: 6233–6247
113 Roe P L, Balsara D S. Notes on the eigensystem of magnetohydrodynamics. SIAM J Appl Math, 1996, 56: 57–67