arXiv:2303.09221v1 [astro-ph.SR] 16 Mar 2023

太阳风流相互作用区的基于物理的模型：连接 Multi-VP 与一维磁流体动力学，以在 L1点开展业务预报

预印本

R. Kieokaew[*] R. F. Pinto [†*] E. Samara [‡] C. Tao [§] M. Indurain[*] B. Lavraud [¶] A. Brunet [‖] V. Génot [*] A. Rouillard [*] N. André [*] S. Bourdarie [**] C. Katsavrias [**] F. Darrouzet [††] B. Grison [‡‡] I. Daglis [††]

2023年3月17日

摘要

目前，我们利用拉格朗日L1点的实时太阳风监测数据，对地球辐射带空间天气的预测能力仅限于提前一小时。为减轻空间天气对通信卫星的影响，人们提出了多种框架，以延长预测的提前时间。我们开发了一种名为“Helio1D”的原型流程，可提前4天预报L1点的背景太阳风条件（速度、密度、温度和切向磁场）。该流程可预测共转相互作用区和高速流，这些现象可能会增加辐射带中的高能通量。Helio1D流程将Multi-VP模型与太阳风传播的一维磁流体力学模型相连接；前者可提供0.14天文单位处的实时太阳风产生情况。我们针对2004—2013年和2017—2018年间的时段，将Helio1D流程的太阳风速度预报与观测数据进行基准测试。我们开发了一种基于快速动态时间规整技术的框架，可持续将包含共转相互作用区的时间序列输出与观测数据进行比较，以评估该流程的性能。具体而言，我们利用此框架校准并提升该流程的业务预报性能。为提供时间和幅值不确定性，我们并行模拟多种太阳风状况，共生成21条廓线，分别对应包括地球在内的各个虚拟目标。该流程可用于提供实时的每日太阳风预报，旨在预测内磁层和辐射带的动态变化。

关键词 空间天气 · 太阳风 · 共转相互作用区

1 引言

太阳和太阳风是地球及日球层空间天气的主要驱动因素。如今，随着人类社会日益依赖受空间天气影响的空间技术，预报太阳风状况已成为一项至关重要的任务。可能产生深远影响的主要驱动因素包括由太阳爆发引起的日冕物质抛射（CMEs），以及当来自日冕洞的快速太阳

[*]天体物理与行星学研究所，UPS，CNES，CNRS，图卢兹，法国 (rkieokaew@irap.omp.eu)
[†]天体物理系/AIM，CEA/IRFU，CNRS/INSU，巴黎-萨克雷大学和巴黎大学，吉夫叙尔伊韦特，法国
[‡]CmPA，鲁汶大学，鲁汶，比利时[§]日本国立信息通信技术研究所 (NICT)，小金井市，东京，日本
[¶]波尔多天体物理实验室，波尔多大学，CNRS，佩萨克，法国[‖]ONERA/DPHY，图卢兹大学，F-31055图卢兹，法国
[**]雅典国立卡波季斯特里亚大学物理系，希腊雅典 15784
[††]比利时皇家空间航空研究所（IASB-BIRA），比利时布鲁塞尔
[‡‡]中国科学院大气物理研究所空间物理系，捷克共和国布拉格

风或高速流（HSS）取代较慢的太阳风时形成的共转相互作用区（CIRs）。尽管日冕物质抛射会引发更严重的事件，但其影响通常一两天后便会消退，而共转相互作用区／高速流事件的影响显著，在其到达后仍可持续数天 [例如 Burns 等人， 2012]。在没有日冕物质抛射的太阳活动极小期，共转相互作用区会引发低至中等强度的地磁暴，偶尔也会导致强地磁暴 [例如 Richardson 等人，2001年，Alves 等人，2006年，Tsurutani 等人，2006年，Zhang 等人，2008年，Kilpua 等人，2017年，Chi 等人， 2018]。这些由共转相互作用区驱动的地磁暴还会影响电离层和热层，导致赤道电离异常[例如 Oyedokun 等人， 2022] 以及总电子含量变化 [例如 Chakraborty 等人， 2020]。此外，共转相互作用区会影响日冕物质抛射的动力学 [例如 Liu 等人， 2019],拓宽太阳高能粒子能谱 [例如 Zhao 等人，2016年，Wijsen 等人， 2019], 并调制银河宇宙射线 [例如 Iucci 等人，1979年，Rouillard 和 Lockwood， 2007]。Cranmer 等人 [2017], 、Kilpua 等人 [2017], 、Vršnak 等人 [2017], 、Richardson [2018] 和 Yermolaev 等人 [2018] 全面综述了我们目前对共转相互作用区的物理认识及其地球效应。

位于地球同步轨道及中低地球轨道上的通信卫星，处于地球辐射带附近；辐射带环绕近地空间，其中高能电子和离子通量显著。共转相互作用区会驱动辐射带电子变化 [例如 Lam 等，2009；Hudson 等， 2021], 导致电子通量增强 [例如 Blake 等，1997；Li 等， 1997]；还会引发电子加速，尤其是在存在强南向行星际磁场（IMF Bz）分量时 [Blake 等， 1997], 某些情况下，电子甚至可达到相对论能级 [Paulikas 和 Blake，1979；Pinto 等，2018；Hudson 等，2021；Pandya 等， 2019]。研究表明，与日冕物质抛射相比，共转相互作用区之后的高速流更有效地促成多兆电子伏电子增强，能量可超过 7 MeV [Horne 等，2018；Katsavrias 等， 2019]。这是因为它们会产生南向行星际磁场与太阳风速度超过 500 千米/秒同时出现的时段，从而提高向阳侧磁层顶的磁重联率 [Borovsky 和 Denton，2006；Miyoshi 等， 2013]。
自空间技术时代开启以来，已有多份报告记录了航天器异常甚至故障，例如，共转相互作用区之后数日内，地球同步轨道上的数兆电子伏电子通量升高，导致了此类问题 [参见 Lanzerotti 的综述， 2007]。为了更好地减轻这些影响，我们需要开发一个系统，持续预测太阳风和辐射带状况。通过在拉格朗日L1点对太阳风进行实时监测（例如由先进成分探测器（ACE）进行监测），基于建模对辐射带状况进行持续实时预测的提前时间最多只有一小时，甚至更短，因为太阳风从 ACE 航天器到达磁层约需 40–60 分钟。以 Kp指数（一个反映全球极光活动的 3 小时指数）为依据，例如，SPACECAST [Horne 等人提出的 2013] 模型利用 ACE 实时数据，可提供提前 3 小时的预报。若要进一步提升现有能力，我们需要能够提供较长提前时间的持续太阳风预测。

人们已开展大量工作，致力于对地球附近的实时太阳风状况进行建模。大多数模型由两个主要部分组成：(1) 新生太阳风涌现建模；(2) 从太阳附近到地球的太阳风建模和/或传播。第一部分首先根据地面观测获得的同步图或同步图，重建日冕磁场；这通过采用简化的解析模型并进行静磁势场源表面（PFSS）外推来实现。PFSS外推与Wang-Sheeley-Arge（WSA）模型相结合，是日冕/内日球层太阳风的常用预测工具 [Arge和Pizzo，2000, Arge等人， 2004]。WSA模型与全球三维磁流体力学（MHD）“ENLIL”——一种基于物理的太阳风模型 [Odstrˇcil等人，1996，Odstrcil和Pizzo，1999，Odstrcil等人， 2004] ——相结合后，WSA-ENLIL已用于提供每日太阳风流预报。WSA-ENLIL工具还经过扩展，可通过特设流体力学锥形模型或球形磁体模型纳入日冕物质抛射 [Taktakishvili等人，2009, 2011, 2018]。美国国家海洋和大气管理局（SWPC/NOAA）下属的空间天气预报中心已投入运行WSA-ENLIL，用于提供提前1至4天的每日太阳风预测 [Pizzo等人， 2011]。WSA模型的另一种选择是球体周围磁流体力学模型（MAS），这是一种基于电阻性磁流体力学方程的全局、随时间变化的模型 [Linker等人，1999，Riley等人， 2012]。Owens等人 [2005],、Lee等人 [2009], 、MacNeice[2009a、b], 、Jian等人 [2011a、b 2015]已对WSA-ENLIL和MAS-ENLIL工具进行了广泛的基准测试。对于太阳风传播部分，也有几种计算量较小的可选方案，不过截至本文撰写时，这些方案尚未全面投入运行。其中一些模型包括日球层迎风外推（HUX） [Riley和Lionello， 2011], 弹道传播 [Dósa等人， 2018], 以及可调HUX[Reiss等人， 2020]。MacNeice等人 [2018] 和Reiss等人 [2019, 2020] 汇编了现有模型的多种组合，并建立了交叉验证框架。

近期，人们投入了更多精力，将欧洲模型结合起来并进行基准测试，以开发业务化太阳风预报服务。Multi-VP是由Pinto和Rouillard开发的日冕模型 [2017] ，它可在感兴趣的子区域内计算多个一维太阳风通量管解。与全球模型相比，这种方法的计算速度快得多，并且在关注区域（例如地球下点）的准确度更高，提前时间为1–3天 [Rouillard等人， 2020]。Multi-VP模型已与EUHFORIA[欧洲日球层预报信息资产；Pomoell和Poedts， 2018] 耦合，并经验证可用于高速流建模，

并与WSA-EUHFORIA进行比较 [Samara等人， 2021]。此外，Hinterreiter等人 [2019]和Samara等人 [2022]评估了使用EUHFORIA进行太阳风建模的整体表现。最近，Réville等人开发了Heliocast——一个兼具日冕和日球层部分的全球磁流体力学模型（本文撰写时正在JSWSC审稿中）——为法国空间天气应用研究机构提供每日太阳风预报，提前时间最长可达5天[10]。此外，研究人员利用日冕洞面积与1天文单位处太阳风速度之间的经验关系，开发了一个用于共转相互作用区/高速流预测、提前时间为4天的经验太阳风预报 [ESWF；Vršnak等人，2007年，Miloši´ć等人， 2022] 。该模型已由欧洲空间局投入运行。

在这项工作中，我们首次将 Multi-VP模型与一维磁流体力学模型 [Tao等人， 2005] 耦合，开发了一套名为“Helio1D”的自动化流程，用于太阳风共转相互作用区预报。一维磁流体力学模型最初是利用地球原位观测数据作为内边界，对木星附近的太阳风状况进行建模；后来，该模型得到扩展，为其他太阳系行星附近的太阳风状况提供业务服务 [André等人，2018], 参见 Heliopropa[11]。在此，我们针对地球下点周围的多个目标，同时模拟多种太阳风解。从本质上说，我们开发了一套流程，可提前4天对地球太阳风进行每日预报，并系统地表征时序和振幅不确定性。我们利用涵盖第23和第24太阳活动周部分时段的13年数据（2004年至2013年，以及2017年至2018年），对流程结果进行基准测试并加以校准，从而开发出业务每日太阳风预报原型。作为欧盟“地平线2020”计划 SafeSpace[12] 项目的一部分，该流程已集成至一项业务预报服务原型中，用于提供辐射带环境指标，以保障空间资产安全。

对建模结果进行评估或验证，对于了解预报的效率至关重要。若干研究采用均方根、均方误差和皮尔逊相关系数等标准指标，将建模结果与观测数据进行比较。利用这些指标，还会计算技巧评分，以评估模型的表现是否优于基准模型。在共转相互作用区/高速流区和日冕物质抛射建模研究中，一些工作还采用基于事件的验证，以判定真阳性（预测到且观测到）、假阳性（预测到但未观测到）和假阴性（未预测到但观测到），从而构建列联表 [Woodcock、 1976] 并计算探测概率 [，例如 Reiss等人， 2016]。最近，一种采用动态时间规整（DTW）算法的替代方法被用于评估太阳风建模的表现；该算法是时间序列分析中常用的一种技术 [Samara等人， 2022]。我们将采用这些指标和方法来验证该流程的结果。

本文结构如下。首先，我们介绍 Multi-VP 和一维磁流体力学模型，然后描述两者如何对接以构建 Helio1D流程。其次，我们介绍用于量化 Helio1D性能的指标和技术。第三，我们给出流程的结果，并使用经典指标和 DTW算法对结果进行评估。第四，我们讨论一种采用 DTW算法的新方法对流程进行校准。最后，我们讨论业务预报，并给出结论与展望。

2 共转相互作用区预报流程自动化

我们开发了一套流程，用于连接从近太阳区域到地球的太阳风预报。在此，我们简要介绍太阳风形成模型（Multi-VP）和太阳风传播模型（一维磁流体动力学）。随后，我们描述这两个模型如何对接，以构建自动化的 Helio1D流程。

2.1 Multi-VP

MULTI-VP [Pinto 和 Rouillard， 2017] 是一种日冕模型，覆盖了所有太阳风流形成和加速所经过的日心距离范围：介于 1 至约 30 个太阳半径之间（$R_\odot$）。它的主要优势在于采用数据驱动方法，同时考虑了太阳风流穿过高度分层的低层太阳大气时的热力学过程，因此能够对其覆盖区域内太阳风的状态做出物理上正确且符合实际的估算。MULTI-VP 无需借助经验标度定律，即可确定一整套物理量，包括太阳风速度（$\mathbf{V}$）、密度（n）、温度（T）、磁场（$\mathbf{B}$）以及次级物理量。此外，MULTI-VP 实际上会计算从太阳表面到高日冕的一组单个太阳风流，随后可将其组合起来，通过多根一维太阳风磁通管构建完整的三维太阳风解。与更传统的三维磁流体动力学模型相比，这在所需计算时间方面具有巨大优势，而且也避免了

[10]OFRAME，参见 http://www.meteo-espace.fr/. [11] http://heliopropa.irap.omp.eu/ [12] https://www.safespace-h2020.eu/

受到横向梯度强扩散的影响。实际应用中，这也使我们能够只针对特定感兴趣区域计算太阳风解，而不必覆盖整个太阳大气。

对于一维磁流体力学模型，需要通过 MULTI-VP 生成地球下点 0.14 天文单位处的太阳风特性时间序列（位于 30 $R_\odot$）。在内部，此输出通过一个数据对象定义，其中列出了所采样的磁力线（以及相应的单个太阳风流）、它们的坐标和几何形状，以及输入磁图的特性。每次进行预报时，我们都会选取地球下点周围的一系列位置（即日地连线上 0.14 天文单位处），范围延伸至方位角 15 度和纬度 15 度。纬度范围旨在涵盖磁场重建所传播的位置误差。经度范围旨在涵盖对应于太阳相对于地球自转三天的单个时间序列的方位角范围，这相当于覆盖地球下点建模时间之前一天和之后两天的范围。下一次预报以相同方式进行，生成另一个在时间上与前一个部分重叠的单个时间序列。重复此过程，持续构建长期时间序列，作为一维磁流体力学模型的输入。

2.1.1 Multi-VP数据

为了表征管线在太阳活动周期各个阶段的性能，我们需要足够长的数据集。目前可用的最长历史磁图序列来自威尔科克斯太阳天文台（WSO）。在此，我们主要获取了两组由Multi-VP基于WSO磁图处理得到的长时间数据集。第一组涵盖卡林顿自转周（CR）2024至CR 2139，对应2004年12月至2013年8月的数据。这段长达8年7个月的时间跨度涵盖了第23太阳活动周的下降期（2004—2008年）和太阳活动极小期（2009—2010年），以及太阳活动周24的上升期（2011—2013年）。第二组涵盖CR 2192至CR 2210，对应2017年6月至2018年11月的数据。这两个数据集被输入一维磁流体动力学模型。

2.2 一维磁流体力学模型

从 0.14 天文单位（30 $R_\odot$）开始，太阳风通过一维磁流体力学模型 [Tao等人， 2005] 在日球层中传播。该模型将太阳风时间序列作为随时间变化的边界条件，太阳风参数——主要是径向等离子体速度和切向速度——随时间变化（详见下文）。一维磁流体力学模型采用理想磁流体近似，将太阳风传播至目标位置，同时考虑径向方向上快流和慢流之间的相互作用。该代码在球对称坐标系中求解太阳引力作用下的理想磁流体方程。一维磁流体方程使用协同天文数值软件（CANS）[13], 的早期版本 CANS+代码 [Matsumoto等人， 2019]求解。一维磁流体力学代码由 Tao等人 [2005] 开发，用于将地球处的太阳风观测数据传播至木星上游区域；法国等离子体物理数据中心[14] 随后对其进行了扩展，使其适用于其他太阳系行星或目标航天器位置 [André等人， 2018]。该代码稳定可靠，广泛用于日球层中的太阳风传播和共转相互作用区建模 [，例如 Palmerio等人（2021）、Nilsson 等人， 2022]。

将 30 $R_\odot$ 处的MVP输出用作一维磁流体力学代码启动时的边界条件，随后该代码将这些结果传播至1天文单位处的L1点。一维磁流体动力学代码中的坐标系等同于径向-切向-法向（RTN）坐标系，其中 X轴（R）在赤道面内从太阳径向指向地球， Z轴（N）为太阳自转轴，而 Y轴（T）则补全正交归一坐标系。外边界设为1.4天文单位，此处所有物理参数的导数均趋于零。网格间距和时间步长分别设为（$1.4-0.14$）$/400$ 天文单位和150秒。为进行一维模拟，我们保留切向磁场的 B_y 分量为其物理值，同时将 B_x 固定为0.001 nT，以满足无散条件，并将 B_z 设为零（相关讨论见Tao等人 [2005] ）。我们以30分钟的采样间隔获取Multi-VP数据，并将其重采样为1小时的采样间隔；随后对这些小时平均数据进行线性插值，使每个时间步长均满足CFL（Courant-Friedrichs-Lewy）条件。

2.3 Helio1D-Multi-VP与一维磁流体力学接口

为实现两个模型之间的自动衔接，我们采取了若干步骤。Multi-VP 提供包含一整套物理参数的太阳风时间序列，包括 RTN 坐标系中的等离子体数密度、速度、温度和磁场。我们首先对时间序列进行格式转换，使其符合一维磁流体力学模型的输入格式。此处，我们采用 1 小时的时间分辨率作为输入，并以相同的 1 小时时间分辨率输出传播至 L1点的时间序列。要成功运行一维磁流体力学代码，必须满足两个条件：（1）数据长度必须至少覆盖一次太阳自转，即 27.25 天，以生成一致的共转相互作用区形成；（2）参数值必须具有物理意义（例如，等离子体数密度非负

[13]由东京大学的 T. Yokoyama 及其合作者开发，文档请参见 http://www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/netlab/pub/index.html。[14]法国等离子体物理数据中心。请参见 http://heliopropa.irap.omp.eu/。

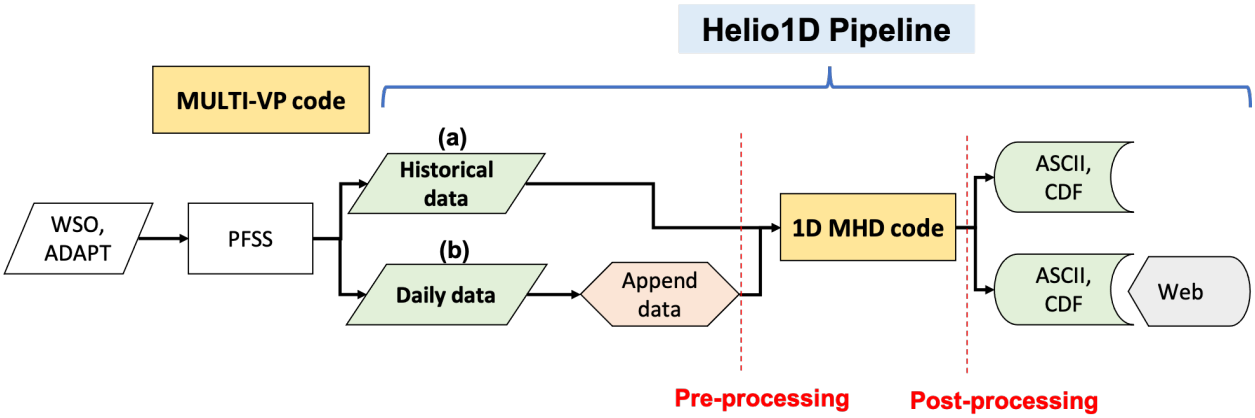


图 1：Helio1D流程示意图。

）。在某些情况下，由于磁图质量较差，Multi-VP模型可能会给出非物理的太阳风数值。我们应用一组标准来剔除非物理值（见附录），并通过对两个可用数据点进行线性插值来填补空缺。第 6 节将进一步介绍这些内容。

如图 1 所示，我们为 Helio1D流程设置了两种运行模式：(a) 包含多个卡林顿自转周的长期历史数据；(b) 时长为 1 个月的短期数据，用于每日业务预报。(a) 模式使我们能够量化流程的性能，并找出可提升其业务预报性能的校准方法。我们首先在第 4 节使用长期 Multi-VP数据对该流程进行基准测试。

3 衡量 Helio1D 的性能

本节首先介绍用于评估流程性能的指标和方法，然后给出结果并讨论流程的校准。

3.1 标准指标

我们选取三种标准指标——均方根误差（RMSE）、平均绝对误差（MAE）和皮尔逊相关系数（r）——来衡量该流程的性能。RMSE 是一种经典的逐点指标，用于比较给定点的模型值和观测值。其定义为

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T}\Sigma_{t=1}^{T}\left[V_m(t) - V_o(t)\right]^2} \tag{1}$$

其中，$V_m(t)$ 和 $V_o(t)$ 分别表示给定时间 t 处的模型值和观测值，而 T 表示时间元素的数量。平均绝对误差（MAE）是另一种衡量类似性质的指标，其定义为

$$MAE = \frac{1}{T}\Sigma_{t=1}^{T}|V_m(t) - V_o(t)| \tag{2}$$

其中，各符号的含义与 RMSE 中的定义相同。RMSE 和 MAE 的单位与参数值 $V_m(t)$ 和 $V_o(t)$ 的单位相同。与观测数据相比，RMSE 和 MAE 的值越小，表示模型预测效果越好。两项指标均为零则表示模型预测完美。

我们还引入皮尔逊相关系数（Pcc），以粗略量化两个时间序列之间的相似性。原则上，皮尔逊相关系数衡量两个数据集之间的线性关系。利用观测时间序列和模型时间序列（分别为 $V_o(t)$ 和 $V_m(t)$），Pcc 的公式为

$$Pcc = \frac{\Sigma_{t=1}^{T}\left(V_m(t) - \langle V_m(t)\rangle\right)\left(V_o(t) - \langle V_o(t)\rangle\right)}{\sqrt{\Sigma_{t=1}^{T}\left(V_m(t) - \langle V_m(t)\rangle\right)^2}\sqrt{\Sigma_{t=1}^{T}\left(V_o(t) - \langle V_o(t)\rangle\right)^2}}. \tag{3}$$

Pcc值的范围为 -1.0 至 1。0，其中 1。0表示两个时间序列之间完全正线性相关，而 -1.0 表示二者之间完全负线性相关。

此外，为了使用上述指标更具体地评估模型性能，我们将预报技巧定义为

$$Skill = 1 - \frac{MSE_{pred}}{MSE_{ref}} \tag{4}$$

其中，MSE_{pred}是预测值相对于观测数据的均方误差，MSE_{ref}是预测值相对于参考基准模型的均方误差。本文采用观测值的平均值作为参考基准模型（即气候研究中的气候平均值）。L1点的太阳风数据观测值取自高分辨率 OMNIweb 数据库 [King 和 Papitashvili, 2005]。相应时间段内 OMNI数据的平均值作为参考基准模型。技巧评分等于 1 表示预报完美，技巧评分为 0 则表示模型表现与基准模型相同。另一方面，技巧评分为负则表示模型表现不如基准模型。本报告将使用上述指标来量化模型的性能。

3.2 动态时间规整技术

尽管经典指标——均方根误差、平均绝对误差、技巧评分和 Pcc ——能够量化模型性能，但无法提供深入的信息，例如时间滞后，即模型与观测到的流界面到达时间之间的差异，而这些信息对模型评估至关重要。因此，我们还考虑一种称为动态时间规整（DTW）的替代技术。DTW 技术通过寻找最佳对齐方式来比较两个序列；在某些约束条件下，一个序列可在时间域内拉伸或压缩（即进行“规整”），以便与另一个序列匹配 [例如，Müller, 2007]。该技术最初由 Bellman 和 Kalaba [1959] 在自适应控制过程中提出，后来被应用于多个领域，尤其是语音和模式识别 [例如，Sakoe 和 Chiba, 1978年, Myers 等人, 1980]。近年来，DTW 已应用于空间天气研究，特别是用于比较模型预测的地磁指数和太阳风数据与观测数据 [例如，Laperre 等人, 2020, Owens 和 Nichols, 2021, Bunting 和 Morgan, 2022, Nilsson 等人, 2022, Samara等人, 2022]。我们首先介绍其公式，然后说明将其用于本研究的方法。

DTW 技术通过 DTW 代价矩阵，在两条序列（例如 $X = \{x_1, x_2, ..., x_{|X|}\}$ 和 $Y = \{y_1, y_2, ..., y_{|Y|}\}$）之间寻找扭曲路径，并选择总累积代价低于所有其他路径的路径。DTW代价矩阵定义如下：

$$D(i,j) = \delta(i,j) + min\{D(i-1,j-1), D(i-1,j), D(i,j-1)\} \tag{5}$$

其中，i, j分别是 X和 Y的索引，$\delta(i,j) = |x_i - y_j|$是序列 X 中的元素 x_i 与序列 Y中的元素 y_j 之间的欧几里得距离。这里，可通过回溯 DTW 代价矩阵找到最优扭曲路径（即对齐结果）；这一过程通过选择累积距离最小的前序点来完成 [例如，Berndt 和 Clifford，1994年，Keogh 和 Pazzani，2001年，Górecki 和 Łuczak， 2013]。DTW 的一个主要缺点是，元素 x_i 可能会映射到 Y中的多个元素——这一问题称为“病态映射”或“奇异点” [例如，Sakoe 和 Chiba， 1978]。为缓解这一问题，人们引入了若干约束，例如所谓的窗口约束、斜率加权和步进模式 [参见 Keogh 和 Pazzani，2001年及其中的参考文献]。此外，人们还开发了 DTW 技术的各种变体，以优化序列元素/点之间的对齐结果 [例如，Keogh 和 Pazzani，2001 年，Chu 等人，2002 年，Keogh 和 Ratanamahatana，2005 年，Salvador 和 Chan，2007年，Efrat 等人，2007年，Furtun˘a，2008年，Zhu 等人，2012年，Yadav 和 Alam，2018年及其中的参考文献]。

选择合适的 DTW 技术至关重要，因为不同算法可能会得出不同结果。本文选择 Salvador 和 Chan [2007] 开发的 FastDTW算法，因为它采用多层级方法。首先，将时间序列降采样至非常粗略的分辨率。在该粗略分辨率下找到一条扭曲路径，并将其投影至更高分辨率。随后对这条扭曲路径进行细化，再次将其投影至更高分辨率。重复投影和细化的过程，直到为原始分辨率的时间序列找到一条扭曲路径。最重要的是，由于该技术首先在粗略分辨率下寻找扭曲路径，因此特别适合捕捉时间序列中的大尺度特征，尤其是具有较大速度梯度的“共转相互作用区”。

为了使用（经典）DTW 技术计算类似于技巧评分的指标，Samara等人 [2022] 定义了序列相似度因子（SSF），用于量化模型时间序列与观测时间序列之间的相似度：

$$SSF = \frac{DTW_{score}(O, M)}{DTW_{score}(O, \langle O \rangle)}, \tag{6}$$

其中，$DTW_{score}(O, M)$ 是观测时间序列（O）与模型时间序列（M）之间计算得出的 DTW代价，而$DTW_{score}(O, \langle O \rangle)$ 是观测时间序列与基线之间的 DTW代价。此处，基线取观测时间序列（$\langle O \rangle$）的平均值。模型预报完美时，SSF 为零；当

表1：Helio1D长序列时间区间列表，以及使用相同区间的Helio1D序列与OMNI数据进行比较时计算的逐点指标。

区间	RMSE（千米/秒）	MAE（千米/秒）	FastDTW距离（千米/秒）	Pcc	技巧评分	$SSF_{normalized}$
2005年1月至6月	175	145	89	0.05	-0.79	**0.77**
2005年7月至12月	179	145	105	-0.07	-1.22	1.03
2006年1月至6月	124	98	62	0.17	-1.00	**0.84**
2006年7月至12月	178	151	81	-0.25	-1.36	**0.80**
2007年1月至6月	155	125	69	0.03	-1.11	**0.77**
2007年7月至12月	112	94	71	0.43	-0.36	**0.94**
2008年1月至6月	133	108	72	-0.02	-2.24	1.16
2008年7月至12月	124	105	60	-0.03	-2.75	1.22
2009年1月至6月	91	70	55	0.10	-0.78	1.08
2009年7月至12月	75	59	42	0.12	-1.15	1.01
2010年1月至6月	103	80	67	0.32	-0.27	**0.87**
2010年7月至12月	142	122	108	-0.07	-1.17	1.30
2011年1月至6月	159	128	97	0.07	-0.38	**0.83**
2011年7月至12月	156	129	90	0.07	-0.32	**0.79**
2012年1月至6月	167	134	101	0.08	-0.30	**0.80**
2012年7月至12月	140	110	79	0.16	-0.19	**0.84**
2013年1月至6月	184	150	95	0.22	-0.10	**0.66**
2017年7月至12月	145	117	79	0.03	-1.02	**0.95**
2018年1月至6月	123	97	58	0.01	-0.82	**0.79**
2018年7月至11月	102	80	59	0.17	-0.74	**0.90**

预报效果与基线完全相同时，SSF 等于 1；预报效果劣于基线时，SSF 大于 1。

两条序列之间计算出的 DTW代价（公式 5）等于所有最优对齐对之间的长度（即欧几里得距离）之和。因此，奇异点的存在会增加 DTW代价；在这些奇异点处，一个数据点 x_i 可能与 y_j有多个最优对齐。基线是观测到的时间序列的平均值——在所考虑的时间区间内，它是一个不随时间变化的常数。时间变化的模型与常数序列（即直线）之间的 DTW映射会包含多个奇异点。因此，我们无法直接比较两条随时间变化的序列之间的 DTW代价，与时间变化序列和（常数）基线之间的 DTW代价。为此，我们提出以下两种新指标。首先，可将归一化代价或归一化距离定义为 DTW代价与所有对齐对数量之比。该量的单位与所考虑的量相同（类似于均方根误差和平均绝对误差）。其数值对应所有映射对齐的平均距离，同时反映两条序列之间的时间差异和空间差异；我们将其称为“DTW归一化距离”。归一化SSF定义如下：

$$SSF_{normalized} = \frac{DTW_{score}(O,M)/DTW_{length}(O,M)}{DTW_{score}(O,\langle O\rangle)/DTW_{length}(O,\langle O\rangle)}, \tag{7}$$

其中， DTW_{length}表示两个序列之间所有对齐结果的数量。当 $SSF_{normalized}$小于 1 时，预报模型的表现优于基线；当其大于 1 时，预报模型的表现劣于基线。除第4.1节中的经典指标外，我们还考虑了这两个新定义的指标。

4 结果

4.1 使用长期数据的 Helio1D 性能

表1展示了每个6个月区间内，Helio1D与L1点原位观测数据对比所得的均方根误差、平均绝对误差、FastDTW归一化距离、皮尔逊相关系数、技巧评分和归一化SSF（$SSF_{normalized}$）。OMNI数据的采样间隔为5分钟，为与Helio1D数据的采样间隔一致，我们将其重采样为1小时分辨率。我们发现，2009年和2010年上半年的区间，其均方根误差、平均绝对误差和FastDTW距离相对较低；其中，2009年7月至12月区间的这三项指标均为最低。总体而言，各区间的FastDTW

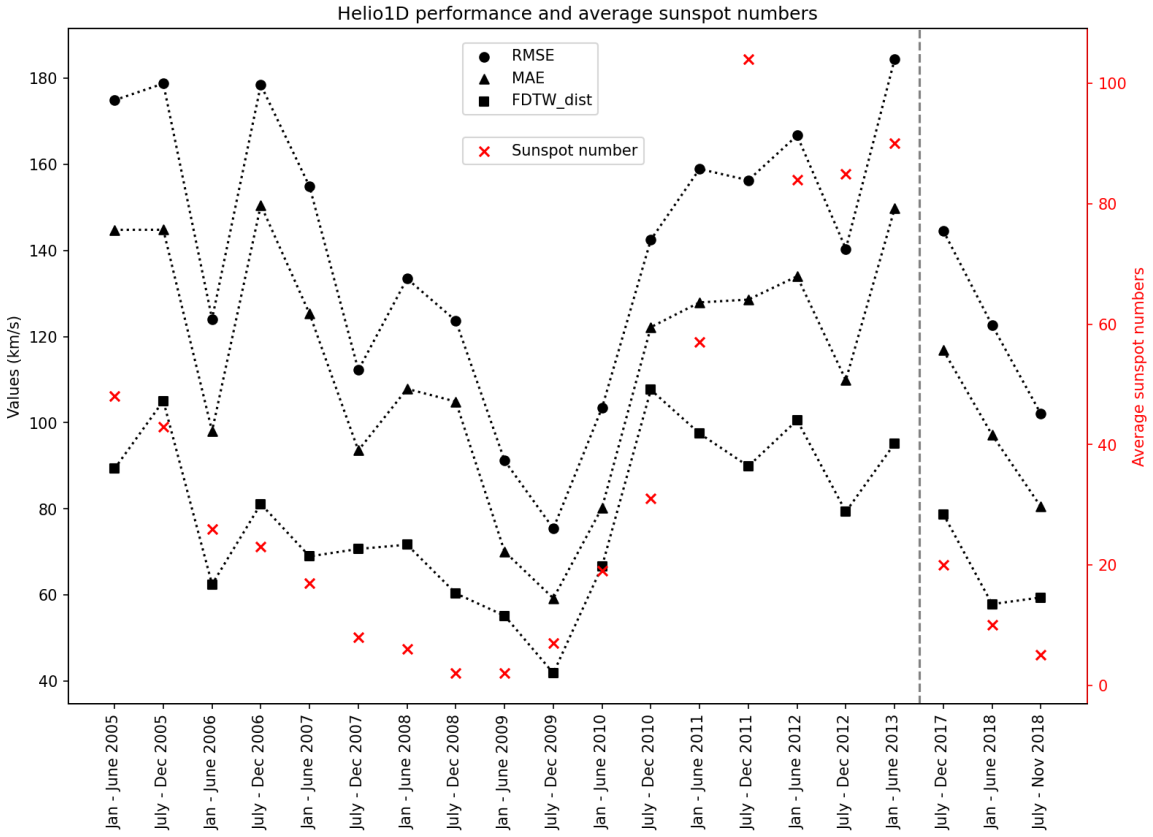


图2：各6个月区间的平均均方根误差（圆点）、平均绝对误差（三角形）和 FastDTW 归一化距离（方块）与平均太阳黑子数（十字）的关系。三项指标的数值显示在左侧纵轴（黑色），平均太阳黑子数显示在右侧纵轴（红色）。2005—2013年（第23太阳活动周）与2017—2018年（太阳活动周24）的数据由一条灰色虚线分隔。每个太阳活动周的各项指标值以点线连接。

距离均低于均方根误差和平均绝对误差。皮尔逊相关系数大多接近于零，某些区间甚至为负值，这表明Helio1D与OMNI数据之间没有线性相关性（即两组数据在定性上并不相似）。2007年7月至12月区间的皮尔逊相关系数最高，为0.43，表明Helio1D模型与OMNI数据之间存在一定的线性相关性；该区间见图3。所有区间的技巧评分均为负值，这说明尽管某些区间的误差相对较低，甚至皮尔逊相关系数为正，Helio1D的表现仍不如基准模型。相比之下，大多数区间的归一化SSF小于1（以粗体突出显示），表明Helio1D的表现确实优于基准模型。我们将在第7节讨论这些不同的度量指标。为考察Helio1D在太阳活动周期不同阶段的表现，我们在图2中绘制了这些指标与平均太阳黑子数的关系。

图2展示了 Helio1D 在表1所示各时间段内的表现，以均方根误差、平均绝对误差和 FastDTW距离为指标（左纵轴，黑色），并与相应时间段的平均太阳黑子数进行比较（右纵轴，红色）。太阳黑子数数据取自比利时皇家天文台的月平均总太阳黑子数[15]。2005年至2013年的数据对应第23太阳活动周，2017年至2018年的数据对应太阳活动周24。我们拥有的第23太阳活动周数据比太阳活动周24的数据更为完整。根据平均太阳黑子数，我们推断，第23太阳活动周的数据涵盖了2005年至2007年的下降期、2008年至2009年年中的太阳活动极小期、2009年年中至2011年的上升期，以及太阳活动极大期

[15]来源：WDC-SILSO，皇家 比利时天文台，布鲁塞尔 (https://www.sidc.be/silso/datafiles)

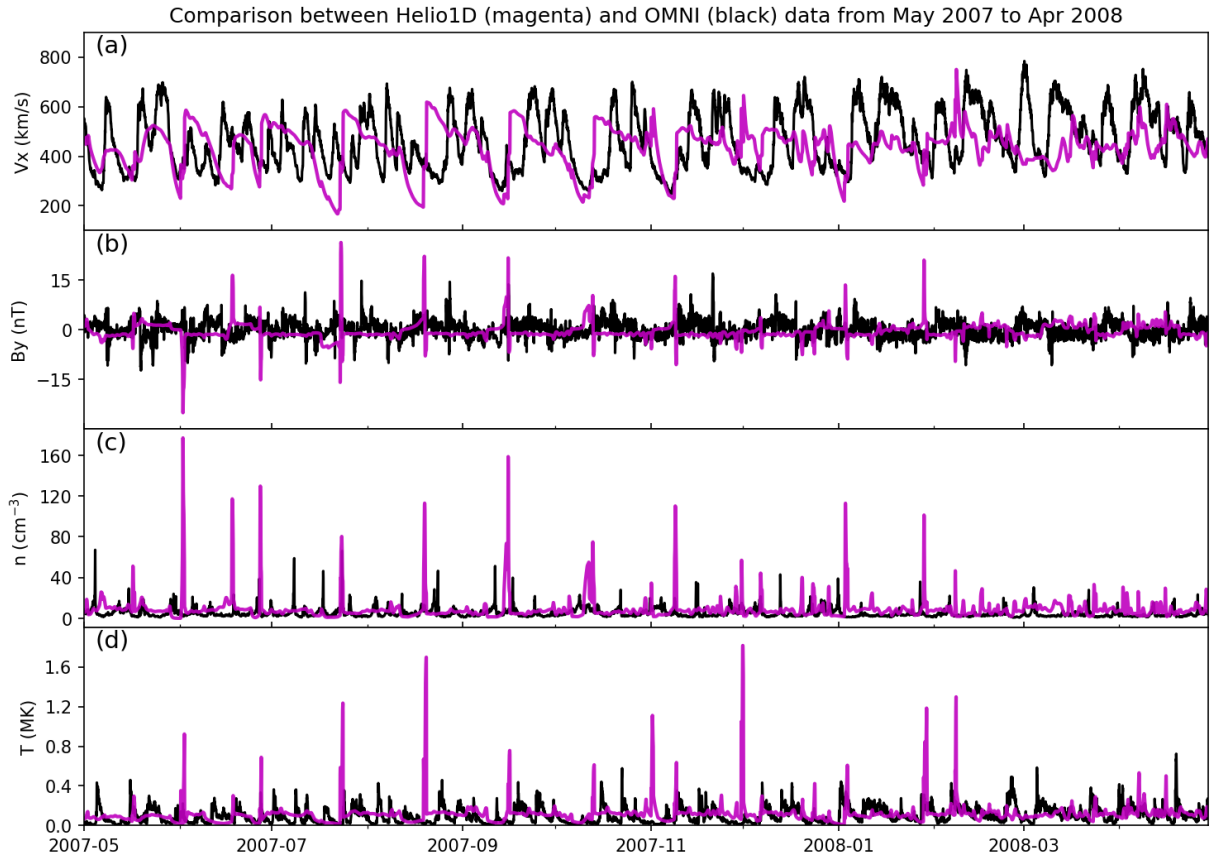


图3：比较一维磁流体力学代码（洋红色）对2007年5月和2008年4月期间OMNI数据库中的观测数据（黑色）所进行的共转相互作用区建模——（a）径向整体流速度（V_x）；（b）切向磁场分量（B_y）；（c）离子数密度（n）；以及（d）离子温度（T）。

从2012年至2013年。其余数据，即2017年年中至2018年年底的数据，对应太阳活动周24的下降期。

我们发现，所有指标值（黑色）都会随平均太阳黑子数（红色）变化。在第23太阳活动周的下降期，所有指标值都随平均太阳黑子数成比例下降。在第23太阳活动周的上升期，所有指标值大致随平均太阳黑子数上升。最显著的特征出现在太阳活动极小期和太阳活动极大期。指标值在太阳活动极小期和／或晚期衰减阶段及早期上升期达到最低值。我们发现，在2009年1月至6月平均太阳黑子数最低值出现六个月后，均方根误差、平均绝对误差和FastDTW距离达到最小值。误差在太阳活动极大期达到最高，这并不令人意外，因为太阳磁场往往会发生变化，因此较难预测。在太阳活动周24的下降期，我们发现误差随平均太阳黑子数成比例下降。这些结果表明，Helio1D的性能随太阳活动周期而变化——它在太阳活动极小期表现最佳，在太阳活动极大期表现最差。这一发现与其他现有模型的太阳风建模性能一致[例如Hinterreiter等人， 2019]。我们将在第7节进一步讨论这些结果。

为了了解 Helio1D 流程在定性方面的表现，接下来我们将模型输出与 L1点的观测数据进行对比，并对一个示例进行可视化。图 3 中，Helio1D 输出以洋红色表示，OMNI数据以黑色表示。图 3a 中，整体流速呈现出流相互作用区（即共转相互作用区）的重复模式，其特征是太阳风从慢速转变为快速；这一现象在 2007年 8 月至 11 月期间尤为明显。流界面还与 B_y 中的极性变化（见图 3b），以及密度和温度的增强（分别见图 3c 和图 3d）相对应。与观测数据相比，我们发现模型的太阳风速度在定性上吻合良好，并且模型能够正确地产生一致的共转相互作用区形成。不过，图 3c 和图 3d 中的数密度和温度

在流界面处通常高于观测值。这些较高的峰值是由于一维磁流体力学代码采用理想磁流体等离子体假设，限制了耗散，从而导致流界面处过度压缩。尽管存在一定程度的过度压缩和时间不确定性，我们认为 Multi-VP 与一维磁流体动力学之间的衔接总体上效果良好。我们还将对该流程的表现进行定性评估，并在第 5 节讨论校准。

从长期结果（未显示）来看，我们发现 Helio1D流程正确再现了共转相互作用区预期的大尺度调制，尤其是整体流动速度的调制，这表明 Helio1D流程能够正确再现太阳风的长期波动。在较短的时间尺度上，Helio1D结果与观测数据中的波动振幅存在一些不匹配。我们将在第4.2节详细量化这些差异。

4.2 Helio1D采用FastDTW技术的性能

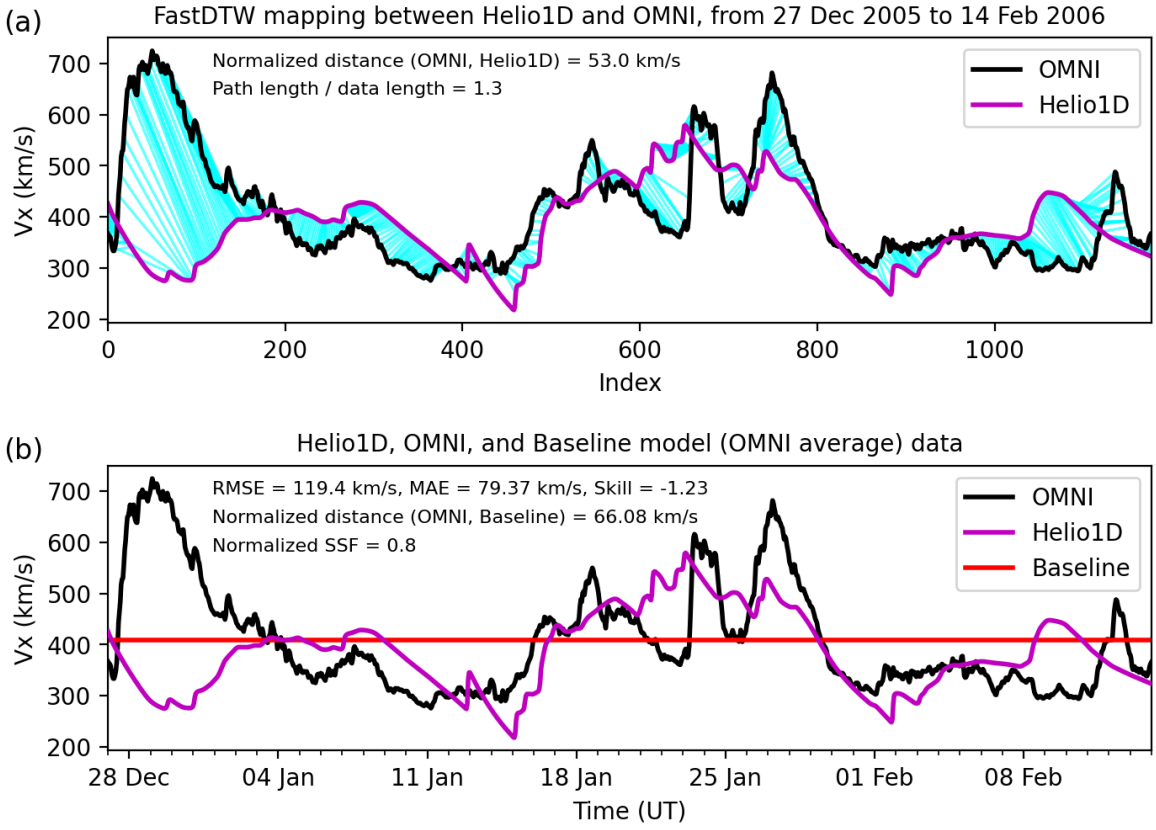


图4：FastDTW映射及性能指标示例。(a) Helio1D（紫色）预测的共转相互作用区结构与OMNI（黑色）数据之间的FastDTW映射（青色）。(b) 同一时间段内的Helio1D、OMNI和基准模型（红色）。图中标出了反映模型性能的相关数值。

由于经典指标在与真实数据比较时只能粗略反映模型性能，我们考虑采用FastDTW算法。图4展示了Helio1D与OMNI时间序列之间的FastDTW映射示例，涵盖了2005年12月27日和2006年2月14日的流界面。OMNI数据（黑色）显示出两个清晰的流界面及对应的两段高速流。可以看出，尽管存在时间延迟以及精细尺度结构上的差异，Helio1D仍正确再现了第二个流界面及其相邻的高速流时段。

图 4a 显示了 FastDTW对齐（青色），用于映射由流界面和高速流构成的大尺度特征。该时间段的归一化FastDTW距离约为 53 千米/秒。由于一个数据点可能对应多个对齐结果（例如局部峰值处），对齐对的数量等于或大于

数据点的数量。图 4a 中，我们将对齐对的数量（称为“路径长度”）与数据长度进行比较。图 4b 显示了同一时间段的 Helio1D、OMNI 和基准模型（红色）。我们注意到，Helio1D 与 OMNI数据之间的均方根误差为 119.4 千米/秒，平均绝对误差为 79.4 千米/秒。根据方程 4 得出的技巧评分为 -1.23，这表明 Helio1D 的表现不如基准模型。尽管如此，通过比较 OMNI 与 Helio1D 之间的 FastDTW映射和 OMNI 与基准模型之间的 FastDTW映射得到的归一化SSF（方程 7）为 0.8，这表明 Helio1D 模型的表现优于基准模型。
这个例子表明，尽管技巧评分为负，Helio1D模型的预测仍然有用。我们提出，可以使用FastDTW算法来映射大尺度特征，尤其是流界面和高速流。在这里，对齐结果可用于提取详细信息（即归一化FastDTW距离和归一化SSF），以表征模型性能。我们还在第5节中利用对齐结果进行模型校准。

如图4a所示，FastDTW对齐能够在时间序列中最佳匹配大尺度特征。对于给定的FastDTW映射路径，我们可以将时间差定义为 $\Delta t = t_{OMNI} - t_{1D}$，将速度差定义为$\Delta V = V_{OMNI} - V_{1D}$，其中下标OMNI表示观测数据，下标1D表示Helio1D的结果。这里，FastDTW映射中 Δt 和 ΔV的统计信息有助于研究模型在时间和幅度差异方面的性能。对于每条映射路径，$\Delta t > 0$（即 $t_{OMNI} > t_{1D}$）表示Helio1D模型结果早于观测数据；而 $\Delta t < 0$ 表示Helio1D模型结果晚于观测数据（例如存在滞后或延迟）。类似地，$\Delta V > 0$（即 $V_{OMNI} > V_{1D}$）表示Helio1D模型结果低估了观测到的速度；而 $\Delta V < 0$（即$V_{1D} > V_{OMNI}$）表示Helio1D模型结果高估了观测到的速度。我们可以通过构建 Δt 和 ΔV的分布直方图来衡量模型性能，具体如下。

图5显示了2005年到2013年间，对速度时间序列进行FastDTW对齐后获得的所有数据的 Δt 和 ΔV 直方图。根据图5a中 Δt 的直方图所拟合的高斯分布，Δt 的中位数约为2.7小时；半高全宽（FWHM），即 2.355σ，其中 σ 为标准差，约为31.8小时。在图5b中，我们对 ΔV分布应用柯西-洛伦兹分布来提取其统计特性，因为该分布最符合其形状。我们发现，ΔV的中位数为0.53千米/秒，半高全宽为34.1千米/秒。这意味着Helio1D对速度幅值的建模几乎没有系统偏差，且大多数建模结果的 ΔV在 ± 34.1 千米/秒以内。简而言之，基于覆盖第23太阳活动周部分时段的多年统计数据，与观测数据相比，Helio1D模型结果的时间差异和速度差异都很小。

利用 FastDTW 对齐信息，我们还探究了模型对不同类型太阳风的表现。例如，在图 5b 中，我们发现 ΔV分布略微偏斜，即向负值方向不对称。这表明 Helio1D 模型可能高估了太阳风速度。为详细了解模型表现，我们考察了表1中各个 6个月时间段内 Δt 和 ΔV 的直方图。具体而言，我们将太阳风分为三类：（1）慢速太阳风，速度为 $V < 400$ 千米/秒；（2）中速太阳风，速度为$400 \leq V \leq 500$千米/秒；（3）快速太阳风，速度为 $V > 500$ 千米/秒。这种分类基于观测到的太阳风。图 6 展示了一个示例，其中包含 Δt （a）和 ΔV （b）的分布，以及分别拟合慢速（黄色）、中速（绿色）和快速（蓝色）太阳风的分布拟合函数，此外还展示了所有太阳风的分布（黑色）。附录中的表1汇总了所有 6个月时间段的统计信息。

现在，我们讨论图6中利用FastDTW算法对2006年1月至6月数据得到的 Δt 和 ΔV直方图的拟合结果。对于慢速和中速太阳风，时间差中位数仅相差几小时，分别为$\Delta t_{slow} = -1.5$ 小时和 $\Delta t_{moderate} = 3.8$ 小时。相比之下，对于快速太阳风，我们得到较大的时间延迟，为 $\Delta t_{fast} = 17.5$ 小时。总体而言，在所有太阳风速度范围内，时间延迟的半高全宽约为30小时。对于速度差，我们发现慢速和中速太阳风的中位数较小，分别为 $\Delta V_{slow} = 6.2$ 千米/秒和 $\Delta V_{moderate} = 3.5$ 千米/秒。相反，快速太阳风的 ΔV中位数更大，为 $\Delta V_{fast} = 74$千米/秒。这个例子表明，Helio1D在不同太阳风速度范围内的表现确实有所不同。例如，在这一时间段内，Helio1D模型低估了快速太阳风的速度。为了考察这种特定表现是否会持续存在，接下来我们将分析整个第23太阳活动周期内各个6个月时间段的 Δt 中位数和 ΔV。

图7展示了所有风类型（a、b）、快速太阳风（c、d）和慢速太阳风（e、f）的中位数 Δt （左侧面板）和 ΔV（右侧面板）条形图。图中还将条形图与相应时间段的平均太阳黑子数进行对照，以指示太阳活动周期的各个阶段。需要指出的是，中速太阳风没有呈现出明显趋势，因此未纳入此图。总体而言，我们发现 Helio1D 的 Δt 为正（图7a），这表明 Helio1D 的时序领先于观测数据。最大的正 Δt 出现在上升期和太阳活动极大期（图 7a 中的 2012 年 1 月至 6 月）。如图7c和7e所示，快速太阳风的这一正 Δt （40小时）大于慢速太阳风（25小时）。对于所有风类型的速度差，我们发现，除上升期和太阳活动极大期外，Helio1D 得出的速度差均不超过10千米/秒（图7b）。

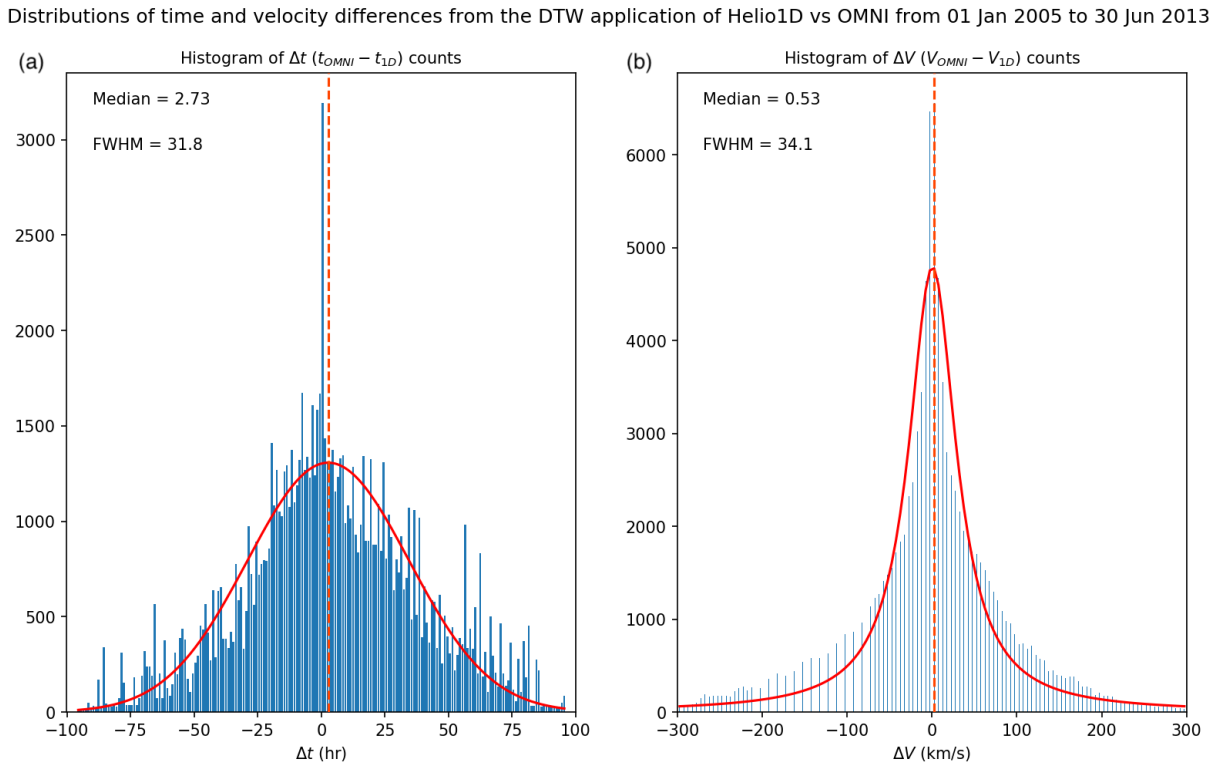


图5：2005年至2018年间，Helio1D与OMNI数据的FastDTW对齐结果所得到的（a）时间延迟和（b）速度差直方图。分别采用高斯分布（a）和柯西-洛伦兹分布（b）拟合（红色实线），以求得时间延迟和速度差的中位数（红色竖直虚线）及半高全宽。

比较不同风类型时，我们发现快速太阳风的中位数 ΔV（图7d）与慢速太阳风（图7f）有明显差异。特别是在太阳活动极小期和上升期初期，ΔV较大且为正，表明 Helio1D 低估了快速太阳风（$V_{1D} < V_{OMNI}$）的速度，低估幅度为50–150千米/秒。相比之下，在相同时间段内，慢速太阳风的 ΔV大多为负。换言之，Helio1D 高估了慢速太阳风（$V_{1D} > V_{OMNI}$）的速度。在上升期，这种高估幅度可达60千米/秒。

简而言之，我们发现，Helio1D结果（即流界面）的时序通常早于观测数据（与图3一致）。快速太阳风的这一正向 Δt 甚至更大。就速度而言，我们发现Helio1D模型低估了快速太阳风的速度，却高估了慢速太阳风的速度。这种效应在太阳活动极小期和上升期初期尤为明显。

5 流程校准

如第4.1节所述，由于流界面处的压缩过度，Helio1D通常会高估流相互作用区的等离子体数密度和温度。为缓解这一问题，我们考虑对数据进行后校准，以降低 Helio1D 输出中的极端峰值。如第4.2节所示，FastDTW 能够对模型模拟的太阳风速度与观测到的太阳风速度进行对齐。由于 FastDTW 会映射两个时间序列中的相似结构，我们据此绘制 Helio1D 与 OMNI 数据映射值的校准图。图 8 展示了 Helio1D（横轴）和 OMNI 数据（纵轴）映射后的太阳风速度的核密度估计（KDE）图，其中显示了平滑后的二维概率密度直方图。图中颜色越亮，表示概率密度越高。图 8a 中的速度数据具有较高的概率密度，且大多沿斜率为 1 的直线分布。这表明 Helio1D 模型总体上没有偏差（与图 6b 类似），且 Helio1D 得到的太阳风速度大小大多与 OMNI 数据相符。

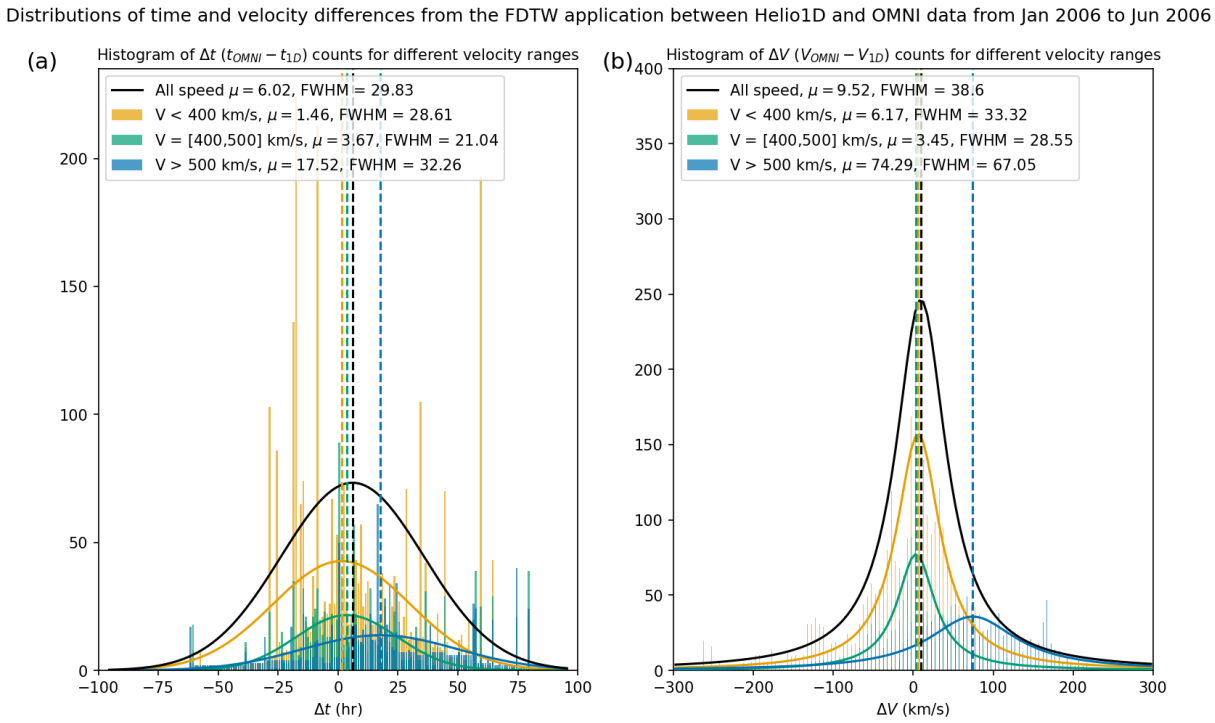


图 6：基于2006年1月至6月的 Helio1D 和 OMNI 数据，通过 FastDTW 对齐得到的（a）时间延迟和（b）速度差直方图。蓝色、红色和绿色柱分别表示慢速、中间和快速太阳风。（a）采用高斯分布拟合，得到时间延迟的中位数（μ）和半高全宽。（b）采用柯西-洛伦兹分布拟合，得到速度差的 μ 和半高全宽。图中还给出了所有太阳风速度对应的中位数和半高全宽。所有6个月区间的 μ 和半高全宽见附录。

FastDTW 对齐信息使我们不仅能够映射模型模拟和观测时间序列中的速度，还能映射等离子体密度和温度值。在图 8b 和图 8c 中，我们利用基于太阳风速度应用 FDTW 得到的映射路径，比较 Helio1D 与 OMNI 的等离子体数密度和温度。可以清楚地看到，Helio1D 得到的数密度和温度高于观测值。为降低这些高估，我们考虑采用线性回归。这里，我们对图 8b 所示的数据进行线性拟合，结果以红色实线表示。同样，我们对图 8c 中的等离子体温度应用线性拟合函数。数密度和温度的线性拟合函数的斜率均为 0.653。使用这些线性函数后，我们发现，数密度和温度峰值的大小与观测值更加吻合（未展示）。因此，我们得出结论：使用线性函数对等离子体数密度和温度进行校准，显著改善了 Helio1D 模型。我们将这些校准应用于 Helio1D 流程中的数密度和温度，以用于第 6 节所述的业务预报。

6 业务预报

现在，我们将重点转向开发 Helio1D 太阳风预报的稳定“原型”服务。为持续预测太阳风状况，我们着手处理第 2.3 节所述的若干技术问题。首先，刻画模型不确定性对于评估建模结果至关重要，这有助于规划措施，以减轻极端事件可能造成的影响。我们在第 6.1 节通过集合建模给出模型不确定性。其次，一维磁流体力学模型要求输入时间序列至少覆盖一次太阳自转，才能生成一致的共转相互作用区形成结果。Multi-VP模型的设置能够每天产生太阳风数据，包含从当天（D）到随后两天（$D+2$）共 72 小时的太阳风状况。因此，必须将 Multi-VP 产生的太阳风时间序列拼接起来，形成长度至少为 27.25 天的连续时间序列。最后，MultiVP 的输入（即磁图）可能因缺少数据或存在无效数据点而出现数据缺口和/或非物理值，也可能因数值误差而产生这些问题。第 6.2 节详细介绍了用于处理这些问题的自动化程序。

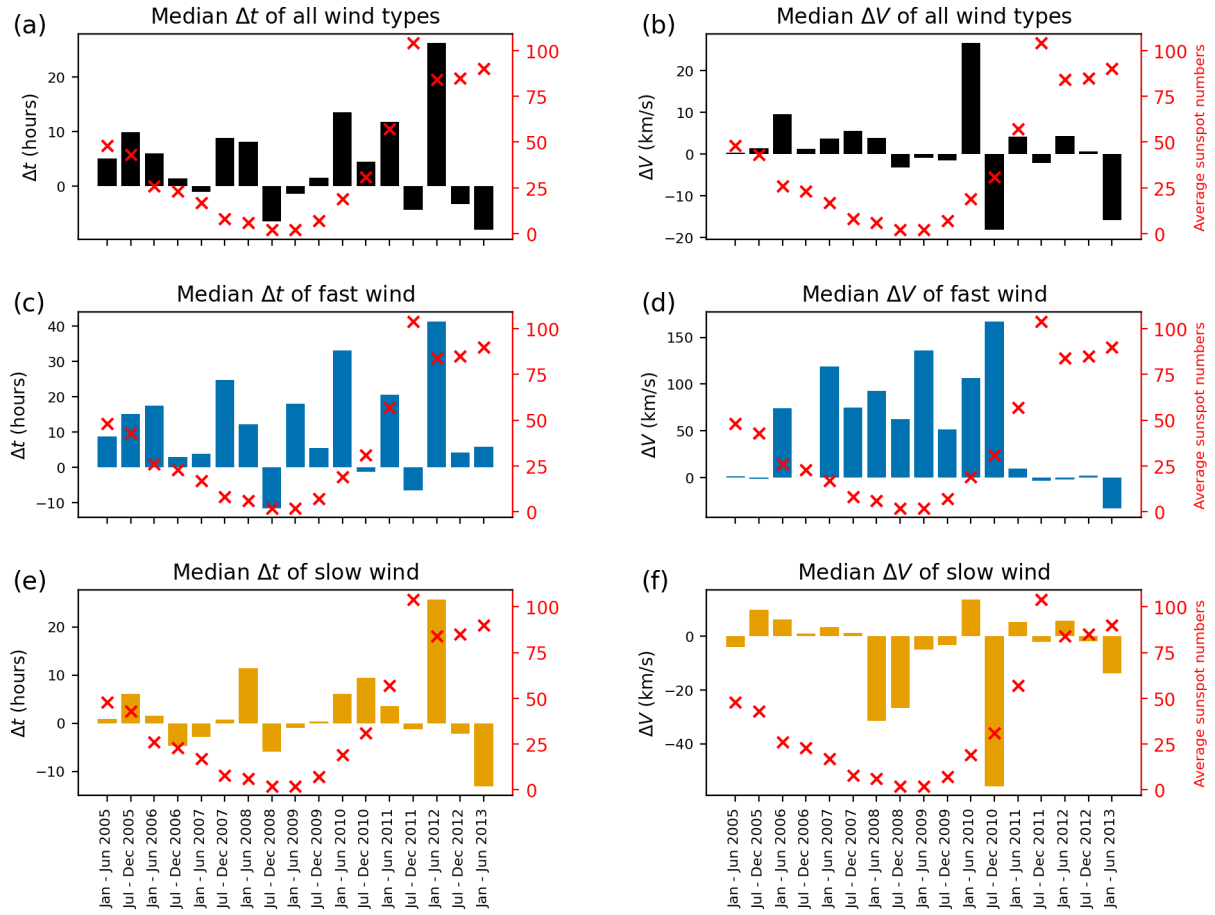


图7：FastDTW技术应用于2005—2013年各6个月时间段后得到的中位时间差（Δt；左侧面板）和速度差（ΔV；右侧面板）条形图，并叠加了表示太阳活动周期的平均太阳黑子数（红色十字，右侧纵轴）。条形图分别展示了（a、b）所有风类型、（c、d）慢速太阳风和（e、f）快速太阳风。

6.1 Helio1D基于21个虚拟目标的集合建模

我们通过考虑日球纬度和经度不确定性的范围，对 MULTI-VP 和一维磁流体力学模型进行集合预报。例如，与观测相比，太阳风结构在时间上提前或滞后的情况，可以通过考虑附近日球经度处的时间序列来纳入分析。此外，太阳风速度廓线的幅值会因日球电流片的弯曲形态及附近的速度梯度，而随日球纬度不同而变化。我们使用 WSO 的日磁图设置 Multi-VP模型，使其能够自动生成每日的一维太阳风廓线，覆盖地球下点及周围虚拟目标从 D 到 $D+2$ 的时段。周围的虚拟目标在纬度和经度方向上从地球下点延伸至 15^o；各点在纬度和经度方向上彼此间隔 5^o。这些选定点构成星形网格模式，共 21 个点，包括地球下点（见附录）。随后，将 Multi-VP 沿黄道面产生的太阳风二维图在这 21 个点上的空间截面转换为太阳风时间廓线。这 21 条时间序列输入会自动送入一维磁流体动力学模型，使其并行地将这些数据从 0.14 天文单位传播至 1 天文单位。一维磁流体力学模型的计算成本相当低；与通常的三维磁流体力学建模相比，模型同时运行 21 个虚拟目标仍然十分迅速。

图9展示了2018年3月至5月期间，Helio1D流程使用21个虚拟点得到的结果。地球下点处的Helio1D数据以蓝色显示，观测数据以黑色显示。绿色阴影表示每小时21个虚拟目标中最小值与最大值之间的数值范围。图(a)至(d)分别显示太阳风速度、切向磁场、等离子体数密度和等离子体温度。我们

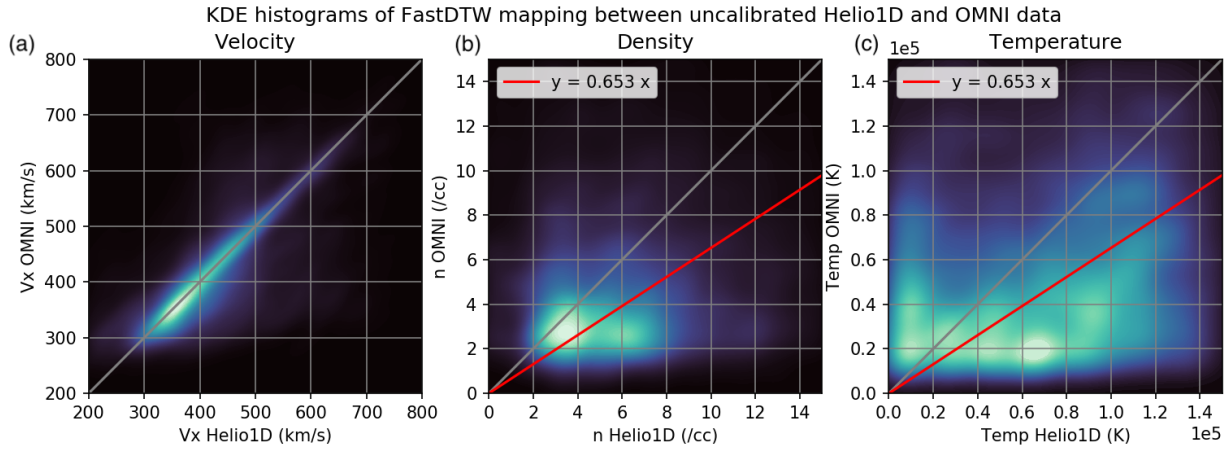


图8：Helio1D（横轴）与OMNI（纵轴）时间序列之间的FDTW对齐结果所得到的校准图：(a)太阳风速度，(b)数密度，以及(c)温度。

注意，已应用数密度和温度的线性函数后校准（见第5节）。这里，绿色阴影表示的集合离散度提供了误差范围。在此示例中，我们发现，针对地球下点建立的流界面模型似乎比观测结果滞后约两天。尽管如此，虚拟点处数值所反映的时间不确定性确实涵盖了观测到的流界面的到达时间。总体而言，我们发现，大多数观测数据点在数值和时间上都落在误差范围内，不过高速流的速度存在一些低估（与我们在第4.2节中的发现一致）。我们得出结论，与仅使用一个以地球为目标的虚拟点相比，使用21个虚拟目标进行Helio1D建模能够改善模型效果。

6.2 太阳风数据拼接与数据缺口

主要技术问题在于Multi-VP与一维磁流体动力学模型之间的自动化接口。与模型基准测试和逐案例分析不同，我们依赖Multi-VP和一维磁流体力学模型进行自动化建模。在此，Helio1D流程安排为每天在本地运行。首先，设置Multi-VP生成每日预报，数据长度为3天，涵盖从第 D 天到第 $D+2$天。我们首先对每个虚拟目标的Multi-VP数据进行拼接，方法是对第 $D-30$ 天至当前第 D 天的数据取平均，以确保时间序列输入足够长。拼接后，这段为期1个月、位于0.14天文单位处的太阳风剖面将由一维磁流体动力学模型传播，进而提供1天文单位处的太阳风剖面。由于太阳风传播到地球需要时间，我们可根据太阳风速度获得额外2至7天的提前时间。为了使Helio1D提供总计4天的提前时间，我们将一维磁流体动力学传播建模所增加的时间限制为2天。此设置旨在自动连接Multi-VP与一维磁流体动力学模型，从而提供从第 D 天到第 $D+4$ 天的每日太阳风临近预报和预报（见图1中的分支(b)）。如果没有磁图数据，程序会获取上一个太阳自转周期的磁图。该流程基于以下假设实施：与上一个太阳自转周期相比，日冕结构保持不变（即预计会出现持续、重复的共转相互作用区）。

此外，一个或两个模型都可能比预期更早终止，导致输出不完整。这是因为现实中可能会因缺少日数据（例如磁图数据）而出现数据缺口，或者数据中存在非物理值。后者可能源于某个代码的数值误差，或原始输入数据质量不佳。为防止 Helio1D流程过早终止，我们会自动搜索数据缺口和非物理值（如上所述，在当前日期的磁图不可用时，先获取上一幅磁图）。随后使用两个可用数据点之间的线性插值填补数据缺口。根据判定标准（见附录）识别出的非物理值则会被移除。之后，再使用线性插值填补由此产生的数据缺口。为消除这些处理步骤可能造成的非物理特征，我们会对数据点执行滑动平均，窗口以该数据点为中心，时长为 ± 3 小时。最后，如果输入数据或日输出数据短于预期，我们会用最新的可用值填充数据，以补足预期输出长度。为便于实际使用，我们提供给定日期 D对应的日太阳风时间序列，涵盖从第 $D-3$ 天到第 $D+4$ 天的数据。

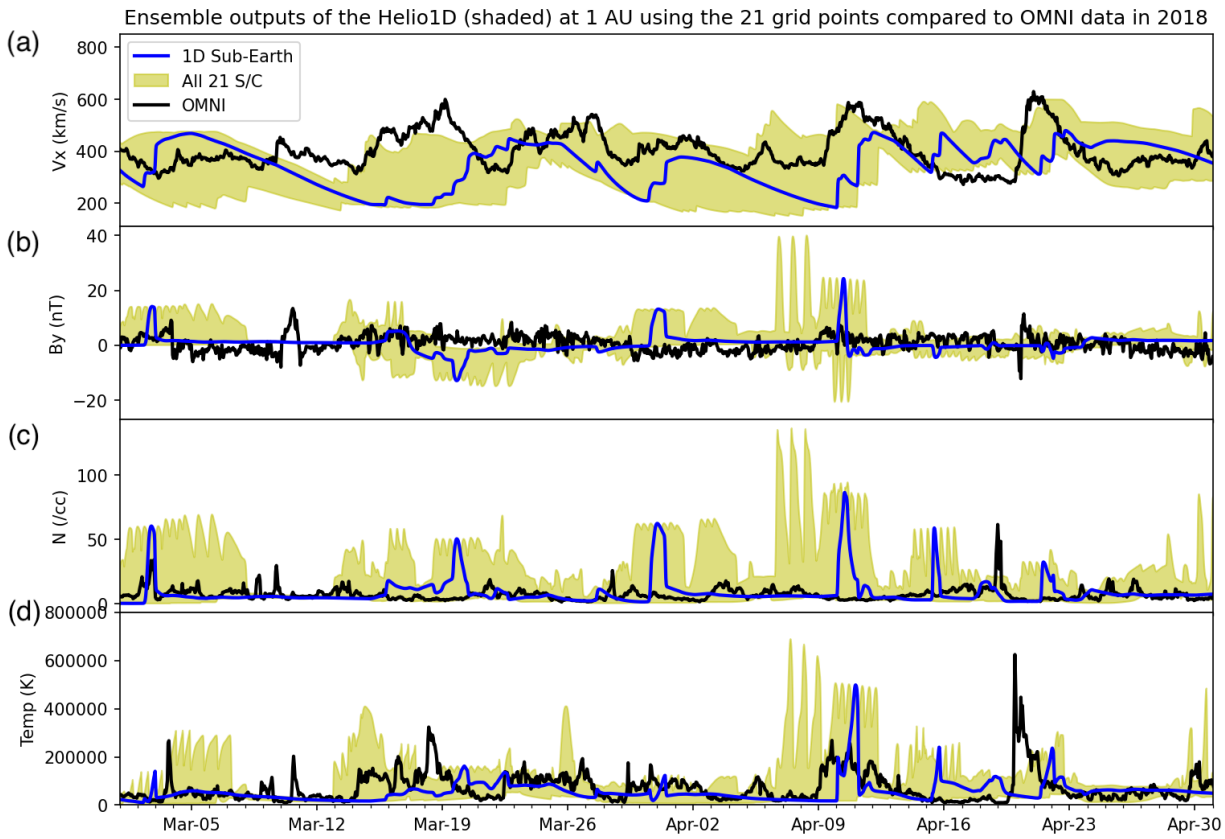


图9：Helio1D集合时间序列输出，使用21个虚拟航天器，并与2018年3月至4月的OMNI数据进行比较。Helio1D集合输出以绿色阴影表示，地球正对点处的输出以蓝色绘出。观测数据以黑线表示。

Helio1D日数据的示例图可公开获取；可通过 http://swift. irap.omp.eu/ 访问，未来也可通过欧洲航天局空间安全计划在 www.esa.int/Space_Safety/ Space_weather 获取。

7 讨论

我们开发了Helio1D流程，通过将Multi-VP用于日冕部分、将一维磁流体动力学用于行星际部分，实现太阳风建模。此次接口整合是首次尝试，旨在连接两个已开发的模型，以用于业务预报。我们使用2005—2013年和2017—2018年基于WSO磁图生成的长期Multi-VP数据，评估了该流程在第23和第24太阳活动周各个阶段的表现。除了均方根误差、平均绝对误差和技巧评分等经典指标外，我们还基于FastDTW算法设计了一项新指标。利用长期数据和这些指标，我们对主要发现讨论如下。

1. Helio1D流程的性能取决于太阳活动周期的不同阶段。我们使用每个6个月区间测得的均方根误差、平均绝对误差和FastDTW距离进行分析，发现这些指标的数值与前一个6个月区间的平均太阳黑子数呈正相关。例如，均方根误差在太阳活动极小期达到最低值80千米/秒，在太阳活动极大期达到最高值180千米/秒。总体而言，Helio1D流程在晚期衰减阶段和太阳活动极小期的幅值误差最小。

2. Helio1D流程能够稳定地模拟共转相互作用区形成。对于每个共转相互作用区，流界面处的太阳风速度剖面在定性上与观测数据一致（图3a）。因此，该模型充分纳入了共转相互作用区的大尺度物理。然而，受维度有限和理想磁流体力学假设的影响，流界面处的压缩（导致数密度和温度出现极高峰值）相较于观测数据而言相当

强。这种现象在用于太阳风传播的一维磁流体力学模型中很常见 [，例如 Zieger 和 Hansen， 2008]。为减轻这一影响，我们采用线性函数进行后校准，以降低流界面处的峰值。该线性函数是根据太阳风剖面的 FastDTW 对齐结果确定的，这些对齐结果尤其映射了流界面。

3. 利用FastDTW对齐，我们还评估了Helio1D与观测数据之间的时间和幅值差异。对于第23太阳活动周的数据，我们发现最小值 Δt 为2.7小时， ΔV为0.5千米/秒。然而，将数据划分为6个月的较短时间段，并根据速度对太阳风类型进行分类后，我们发现了不同的结果，概述如下。

3.1 对于所有太阳风类型，我们发现Helio1D的时间通常比观测数据提前约10小时。2011年末平均太阳黑子数达到峰值后的六个月，时间误差最大。与此同时，所有太阳风类型的 ΔV 在整个太阳活动周期内都保持较低水平，只有2010年太阳活动周期上升期例外。

3.2 快速太阳风的 Δt 和 ΔV 高于慢速太阳风。快速太阳风的Helio1D预测时间通常比观测数据提前10–20小时；在太阳黑子数达到最高值后的六个月，这一时间差会增至40小时。对于 ΔV，在下降期和太阳活动极小期，Helio1D流程通常会将快速太阳风的速度低估约50–100千米/秒；在上升期后段，这一差异会增至 ~ 150千米/秒。

3.3 慢速太阳风的到达时间与观测数据相差不超过 ± 10 小时，太阳活动极大期除外。对于 ΔV，Helio1D流程通常会将慢速太阳风的速度高估约20 - 40千米/秒。 ΔV 在2010年末达到最大值，为 -60 千米/秒。

与使用大型数据集进行过基准测试的现有模型相比，Helio1D流程的表现与其他同类模型一致。Owens和Riley [2017] 利用基于光球磁场卡林顿图（例如WSO）的MAS数据，在0.14天文单位处获取太阳风产生数据。具体而言，他们使用了MAS太阳风时间序列的大型集合（N = 576），其中集合成员通过对地球下点附近一定纬度范围内的太阳风解进行采样而生成。随后，利用基于流体动量方程 [（例如Pizzo，1978] ）并考虑太阳风剩余加速 [（Schwenn， 1990]）的HUX模型 [（Riley和Lionello， 2011] ），对0.14天文单位处的太阳风流进行传播。利用1996年至2016年的长时间数据，他们发现上游集合传播的中位数均方根误差为107千米/秒。Reiss等人 [2020]使用WSA模型、HUX工具以及可调HUX[（Reiss等人， 2020] ）对背景太阳风进行预报，将太阳附近至地球之间的太阳风流映射到2006年至2015年期间。他们的均方根误差介于90至122千米/秒之间，平均绝对误差则介于72至93千米/秒之间。WSA/HUX的技巧评分为负（大于-0.6），而WSA/THUX的技巧评分为正（小于0.06）。与他们的研究相比，尽管数值略高约几十千米/秒，但以平均均方根误差和平均绝对误差为特征的Helio1D流程表现与这些模型一致。然而，均方根误差和平均绝对误差是相当粗略的指标；它们无法全面反映预测和测量的各种特性，例如MacNeice等人 [2018] 及其他多位研究者所讨论的那样。

关于 Helio1D 的性能随太阳活动周期各阶段变化的情况，我们发现，我们的结果总体上与其他一维磁流体力学模型的结果一致。Zieger 和 Hansen [2008] 使用一维磁流体力学模型，对太阳风传播进行了广泛验证。他们发现，以太阳风速度再现指数为特征的日冕结构在太阳自转时间尺度上的变化，对预测效率有重要影响。这解释了 Helio1D 的结果：在没有变化的情况下，也就是在晚期衰减阶段，模型通常能够预测共转相互作用区形成，且与观测数据一致。相比之下，在变化剧烈的情况下，也就是在上升期和太阳活动极大期出现日冕物质抛射时，模型的预测结果通常与观测数据相比表现较差。

就时间而言，我们发现太阳风流到达时间存在偏差：Helio1D模拟的太阳风流通常比观测数据早到约10小时。与慢速太阳风相比，快速太阳风的这一偏差更明显。这可能是因为一维磁流体力学模型假设等离子体为理想磁流体，忽略了更精细尺度的物理过程和/或相互作用；这些过程或相互作用可能会减慢快速太阳风，或在行星际空间中加速慢速太阳风。此外，模拟的维度有限，未考虑其他方向上的传播，这也可能导致时间不匹配。就幅值而言，Helio1D低估了快速太阳风的速度，同时高估了慢速太阳风的速度。快速和慢速太阳风幅值的偏差可能源于模型缺少太阳风加速的相关物理过程。在HUX模型中，模型纳入了经验性的、特设的太阳风加速过程 [Schwenn， 1990]。由于一维磁流体力学代码最初是为模拟太阳风在外日球层中的传播而开发的 [Tao等人， 2005], 因此这一物理过程被认为不太重要，未被纳入模型。我们指出，未来改进用于内日球层的一维磁流体力学模型时，必须处理这一问题；但这不属于本研究的范围，本研究聚焦于成熟模型之间的接口。

我们的研究设计了一种新的FastDTW技术应用方法，用于详细评估Helio1D的性能。具体而言，FastDTW对齐结果编码了模型流界面与观测结构之间的最优时间延迟和幅值差异。我们指出，例如，相较于均方根误差、平均绝对误差和技巧评分，FastDTW可用于提供更多定性指标。我们还证明，FastDTW的（归一化）距离与均方根误差和平均绝对误差相关。尽管如此，FastDTW技术也有其局限性。DTW技术普遍面临的主要限制是病态映射或奇异点。因此，DTW应用所得的 Δt和 ΔV并非唯一，而取决于所设定的约束。在我们的案例中，我们将时间轴上的对齐限制在96小时以内（这相当于速度适中的太阳风从0.14天文单位传播至1天文单位所需的时间）。此外，我们特别选择FastDTW技术，是因为它先尝试在粗尺度上对结构进行映射，再逐步细化至更小尺度。我们强调，这一算法特性对于映射共转相互作用区或日冕物质抛射等大尺度太阳风结构十分理想。

最后，我们重点指出开发 Helio1D 自动化太阳风预报流程所需开展的工作。除了通过流程校准来减轻流程的局限性外，还有其他方面需要处理，包括（1）提供模型不确定性，以及（2）处理数据缺口和异常数据。研究表明，利用 Helio1D 对由 21 个太阳风解构成的集合进行建模，是一种合理的方法，尤其适合为流界面到达时间提供最坏情况情景。我们指出，还可以进一步利用集合成员来获得优化后的预报；这一方面留待未来工作探讨。最重要的是，为了开发可靠的服务，我们实施了应对数据缺口和异常数据点的策略，使流程能够自动运行，并持续提供临近预报和预报。应进一步测试这一方面，以评估其对业务预报流程的准确度、性能和稳定性的影响。这项工作尤为重要；在将该原型流程用于实际应用之前，需要在各种情形下对其进行专门测试。

8 总结

我们开发了原型流程“Helio1D”，可自动连接日冕模型“Multi-VP”和太阳风传播模型“一维磁流体力学”，从而对L1点处含有共转相互作用区的背景太阳风进行临近预报和预报。该业务原型流程每日开展太阳风建模，提前时间为4天。在本研究中，我们使用涵盖2004年末至2013年以及2017—2018年的10年数据，对Helio1D流程进行了基准测试和广泛检验。我们采用包括均方根误差、平均绝对误差和技巧评分在内的经典指标评估了流程的性能。具体而言，我们设计了一种运用FastDTW技术的新方法，用于映射共转相互作用区的大尺度太阳风结构。我们证明，该技术可用于表征Helio1D太阳风建模的详细性能。例如，我们对流界面速度剖面在时间和幅值差异方面的统计信息进行了表征。通过这一新方法，我们评估了该流程在第23太阳活动周各个阶段的性能，并研究了快速和慢速太阳风的建模偏差。我们发现，Helio1D流程在下降期和太阳活动极小期表现最佳。然而，该流程常常低估快速太阳风的速度，同时高估慢速太阳风的速度，尤其是在第23太阳活动周晚期衰减阶段至早期上升期之间。此外，Helio1D模拟的太阳风结构往往早于观测数据到达，快速太阳风的这一现象尤为明显。这些局限可能源于一维磁流体力学模型中的简化假设，例如维度有限、缺乏耗散以及太阳风加速物理描述不足。尽管如此，Helio1D流程仍能模拟出一致的共转相互作用区形成，同时计算开销较小，因此适用于业务预报。

为从逐个案例的基准测试转向业务化太阳风预报，我们实施了以下措施：（1）进行流程校准，以减轻理想磁流体力学假设导致的流界面过度压缩；（2）在包括地球下点在内的虚拟目标处，对21个太阳风解进行集合建模，以提供时序和幅值不确定性；（3）制定流程，剔除非物理数据点并自动填补数据缺口。我们指出，后两项措施对于在提供预报不确定性的同时，确保服务连续可靠至关重要。或者，也可以调整Helio1D流程，使其采用其他更可靠且分辨率更高的磁图数据源，例如美国空军光球磁通量同化输运 [ADAPT；Hickmann等人，2015年；Arge等人，2013年；Worden和Harvey， 2000]。我们强调，除了流程基准测试之外，实施相关措施以使流程全面投入业务运行也至关重要；在将流程用于实际应用之前，必须在多种情形下进一步测试。

致谢

SafeSpace项目获得了欧盟地平线2020研究与创新计划的资助，资助协议编号为870437。Tao等人 [2005] 最初开发、并用于Helio1D的太阳风传播一维磁流体力学模型，复制自CDPP提供的Heliopropa服务（http://heliopropa.irap.omp.eu）；该服务是在欧盟地平线2020研究与创新计划资助的Europlanet H2020研究基础设施行星空间天气服务（PSWS）虚拟活动期间开发的，资助协议编号为654208，之后又在欧盟地平线2020研究与创新计划资助的Europlanet H2024研究基础设施太阳—行星相互作用按需数字环境（SPIDER）虚拟活动期间得到扩展，资助协议编号为871149。IRAP的工作得到法国国家科学研究中心（CNRS）、法国国家空间研究中心（CNES）以及图卢兹第三大学（UPS）的支持。

参考文献

A. G. Burns, S. C. Solomon, L. Qian, W. Wang, B. A. Emery, M. Wiltberger, 和 D. R. Weimer。最后一个太阳活动极小期共转相互作用区/高速流风暴对热层和电离层的影响。《大气与太阳-地球物理学杂志》，83:79–87，2012年7月。doi:10.1016/j.jastp.2012.02.006。I. G. Richardson, E. W. Cliver, 和 H. V. Cane。1972—2000年太阳活动极小期和极大期条件下地磁暴的来源。《地球物理研究快报》，28(13):2569–2572，2001年。doi:10.1029/2001GL013052。M. V. Alves, E. Echer, 和 W. D. Gonzalez。以Dst指数衡量的共转相互作用区的地球效应。《地球物理研究杂志》（空间物理），111(A7):A07S05，2006年7月。doi:10.1029/2005JA011379。Bruce T. Tsurutani, Walter D. Gonzalez, Alicia L. C. Gonzalez, Fernando L. Guarnieri, Nat Gopals wamy, Manuel Grande, Yohsuke Kamide, Yoshiya Kasahara, Gang Lu, Ian Mann, Robert McPherron, Finn Soraas, 和 Vytenis Vasyliunas。共转太阳风流与重复性地磁活动：综述。《地球物理研究杂志》（空间物理），111(A7):A07S01，2006年7月。doi:10.1029/2005JA011273。Y. Zhang, W. Sun, X. S. Feng, C. S. Deehr, C. D. Fry, 和 M. Dryer。第23太阳活动周期间共转相互作用区及其地球效应的统计分析。《地球物理研究杂志》（空间物理），113(A8): A08106，2008年8月。doi:10.1029/2008JA013095。E. K. J. Kilpua, A. Balogh, R. von Steiger, 和 Y. D. Liu。太阳瞬变和流相互作用区的地球效应特性。《空间科学评论》，212(3):1271–1314，2017年。doi:10.1007/s11214-017-0411-3。Yutian Chi, Chenglong Shen, Bingxian Luo, Yuming Wang, 和 Mengjiao Xu。1995至2016年流相互作用区的地球效应。《空间天气》，16(12):1960–1971，2018年。doi:10.1029/2018SW001894。Oluwole J. Oyedokun, P. O. Amaechi, A. O. Akala, K. G. Simi, Aghogho Ogwala, 和 E. O. Oyeyemi。驱动2013年6月1日和2015年10月7日两次CIR相关地磁暴的太阳和行星际事件，以及其在美洲和非洲赤道电离异常区的电离层响应。《空间研究进展》，69(5):2168–2181，2022年3月。doi:10.1016/j.asr.2021.12.027。S. Chakraborty, S. Ray, D. Sur, A. Datta, 和 A. Paul。CME和CIR诱发的地磁暴对印度经度范围低纬电离的影响：中性大气动力学视角。《空间研究进展》，65(1): 198–213，2020年1月。doi:10.1016/j.asr.2019.09.047。Yousheng Liu, Fang Shen, 和 Yi Yang。数值模拟快速日冕物质抛射（CMEs）在行星际空间中与共转相互作用区相互作用时的传播和偏转。《天体物理学杂志》，887(2):150，2019年12月。doi:10.3847/1538-4357/ab543e。Lulu Zhao, Gang Li, R. W. Ebert, M. A. Dayeh, M. I. Desai, G. M. Mason, Z. Wu, 和 Y. Chen。共转相互作用区中高能粒子输运建模：案例研究。《地球物理研究杂志》（空间物理），121(1):77–92，2016年1月。doi:10.1002/2015JA021762。N. Wijsen, A. Aran, J. Pomoell, 和 S. Poedts。高速太阳风流附近太阳高能质子的行星际扩散。《天体物理学杂志》，624:A47，2019年4月。doi:10.1051/0004-6361/201935139。N. Iucci, M. Parisi, M. Storini, 和 G. Villoresi。瞬变宇宙射线强度变化的起源。载于国际宇宙射线会议，第3卷，国际宇宙射线会议，第438页，1979年1月。A. P. Rouillard 和 M. Lockwood。共转相互作用区对银河宇宙射线的纬度效应。《太阳物理学》，245(1):191–206，2007年9月。doi:10.1007/s11207-007-9019-1。Steven R. Cranmer, Sarah E. Gibson, 和 Pete Riley。背景太阳风的起源：对空间天气的影响。《空间科学评论》，212(3-4):1345–1384，2017年11月。doi:10.1007/s11214-017-0416-y。

ˇ Bojan Vršnak, Mateja Dumbovi´c, Jaša Calogovi´c, Giuliana Verbanac, 和 Ivana Poljanˇci´c Beljan。共转相互作用区的地磁效应。《太阳物理学》，292(9):140，2017年9月。doi:10.1007/s11207-017-1165-5。Ian G. Richardson。日球层内的太阳风流相互作用区。《太阳物理学年度评论》，15(1):1，2018年1月。doi:10.1007/s41116-017-0011-z。Yu. I. Yermolaev, I. G. Lodkina, N. S. Nikolaeva, M. Yu. Yermolaev, M. O. Riazantseva, 和 L. S. Rakhmanova。压缩区（CIR和鞘区）地球效应的统计研究。《大气与太阳-地球物理学杂志》，180:52–59，2018年11月。doi:10.1016/j.jastp.2018.01.027。M. M. Lam, R. B. Horne, N. P. Meredith, 和 S. A. Glauert。三次CIR驱动地磁暴期间辐射带电子通量的变化。《大气与太阳-地球物理学杂志》，71(10-11):1145–1156，2009年7月。doi:10.1016/j.jastp.2008.06.007。Mary K. Hudson, Scot R. Elkington, Zhao Li, Maulik Patel, Kevin Pham, Kareem Sorathia, Alex Boyd, Allison Jaynes, 和 Alexis Leali。太阳活动极小期中等强度CME和CIR驱动地磁暴的磁流体动力学-试验粒子模拟。《空间天气》，19(12):e02882，2021年12月。doi:10.1029/2021SW002882。J. B. Blake, D. N. Baker, N. Turner, K. W. Ogilvie, 和 R. P. Lepping。外辐射带相对论电子群的变化与上游太阳风和磁场测量值的相关性。《地球物理研究快报》，24(8):927–929，1997年4月。doi:10.1029/97GL00859。Xinlin Li, D. N. Baker, M. Temerin, D. Larson, R. P. Lin, G. D. Reeves, M. Looper, S. G. Kanekal, 和 R. A. Mewaldt。太阳风中的高能电子是否是外辐射带的来源？《地球物理研究快报》，24(8): 923–926，1997年4月。doi:10.1029/97GL00543。G. A. Paulikas 和 J. B. Blake。太阳风对磁层动力学的影响：同步轨道上的高能电子。《地球物理专著丛书》，21:180–202，1979年1月。doi:10.1029/GM021p0180。Victor A. Pinto, Hee-Jeong Kim, Larry R. Lyons, 和 Jacob Bortnik。导致地球同步轨道相对论电子增强和持续耗减事件的行星际参数及其预测潜力。《地球物理研究杂志》（空间物理），123(2):1134–1145，2018年2月。doi:10.1002/2017JA024902。Megha Pandya, Veenadhari Bhaskara, Yusuke Ebihara, Shrikanth G. Kanekal, 和 Daniel N. Baker。CME和CIR驱动地磁暴期间辐射带电子通量的变化：范艾伦探测器观测。《地球物理研究杂志：空间物理》，124(8):6524–6540，2019年。doi:10.1029/2019JA026771。Richard B. Horne, Mark W. Phillips, Sarah A. Glauert, Nigel P. Meredith, Alex D. P. Hands, Keith A. Ryden, 和 Wen Li。由高速太阳风流驱动的严重空间天气事件的现实最坏情景。《空间天气》，16 (9):1202–1215，2018年9月。doi:10.1029/2018SW001948。Ch. Katsavrias, I. Sandberg, W. Li, O. Podladchikova, I.A. Daglis, C. Papadimitriou, C. Tsironis, 和 S. Aminalragia- Giamini。2017年4月至5月弱地磁暴期间超相对论电子通量增强。《地球物理研究杂志：空间物理》，124(6):4402–4413，2019年。doi:10.1029/2019JA026743。Joseph E. Borovsky 和 Michael H. Denton。CME驱动风暴与CIR驱动风暴之间的差异。《地球物理研究杂志：空间物理》，111(A7)，2006年。doi:10.1029/2005JA011447。Y. Miyoshi, R. Kataoka, Y. Kasahara, A. Kumamoto, T. Nagai, 和 M. F. Thomsen。南向行星际磁场伴随的高速太阳风通过增强哨声波条件导致外辐射带相对论电子通量增强。《地球物理研究快报》，40(17):4520–4525，2013年。doi:10.1002/grl.50916。Louis J. Lanzerotti。空间天气对通信的影响，第247–268页。Springer Berlin Heidelberg，柏林，海德堡，2007年。ISBN 978-3-540-34578-7。doi:10.1007/978-3-540-34578-7_9。Richard B. Horne, Sarah A. Glauert, Nigel P. Meredith, Hannu Koskinen, Rami Vainio, Alexandr Afanasiev, Natalia Y. Ganushkina, Olga A. Amariutei, Daniel Boscher, Angelica Sicard, Vincent Maget, Stefaan Poedts, Carla Jacobs, Blai Sanahuja, Angels Aran, Daniel Heynderickx, 和 David Pitchford。地球辐射带预报和太阳高能粒子事件建模：SPACECAST近期成果。《空间天气与空间气候杂志》，3:A20，2013年5月。doi:10.1051/swsc/2013042。C. N. Arge 和 V. J. Pizzo。利用近实时太阳磁场更新改进太阳风状况预测。《地球物理研究杂志：空间物理》，105(A5):10465–10480，2000年5月。doi:10.1029/1999JA000262。C. N. Arge, J. G. Luhmann, D. Odstrcil, C. J. Schrijver, 和 Y. Li。1997年5月12日CME期间太阳风的流结构和日冕源区。《大气与太阳-地球物理学杂志》，66(15-16):1295–1309，2004年10月。doi:10.1016/j.jastp.2004.03.018。D. Odstrˇcil, M. Dryer, 和 Z. Smith。行星际激波沿日球等离子体片传播。《地球物理研究杂志：空间物理》style>，101(A9):19973–19986，1996年9月。doi:10.1029/96JA00479。

D. Odstrcil 和 V. J. Pizzo。结构化太阳风中日冕物质抛射三维传播对行星际磁场的扭曲。《地球物理研究杂志：空间物理》，104(A12):28225–28240，1999年1月。doi:10.1029/1999JA900319。Dusan Odstrcil、Victor J. Pizzo、Jon A. Linker、Pete Riley、Roberto Lionello 和 Zoran Mikic。日冕与日球层数值磁流体力学代码的初始耦合。《大气与太阳-地球物理学杂志》，66(15-16):1311–1320，2004年10月。doi:10.1016/j.jastp.2004.04.007。A. Taktakishvili、M. Kuznetsova、P. MacNeice、M. Hesse、L. Rastätter、A. Pulkkinen、A. Chulaki 和 D. Odstrcil。利用ENLIL日球层锥模型对地球轨道处日冕物质抛射预测结果进行验证。《空间天气》，7(3):S03004，2009年3月。doi:10.1029/2008SW000448。A. Taktakishvili、A. Pulkkinen、P. MacNeice、M. Kuznetsova、M. Hesse 和 D. Odstrcil。利用ENLIL日球层锥模型模拟导致特别强烈地磁暴的日冕物质抛射。《空间天气》，9 (6):06002，2011年6月。doi:10.1029/2010SW000642。Aleksandre Taktakishvili、L. Mays、K. Manoharan、L. Rastaetter 和 M. Kuznetsova。利用行星际闪烁数据改进日冕物质抛射集合建模。载于太阳、日球层与行星际环境（*SHINE 2018*），第120页，2018年7月。Vic Pizzo、George Millward、Annette Parsons、Douglas Biesecker、Steve Hill 和 Dusan Odstrcil。Wang-Sheeley-Arge-Enlil锥模型转入业务运行。《空间天气》，9(3):03004，2011年3月。doi:10.1029/2011SW000663。J. A. Linker、Z. Miki´c、D. A. Biesecker、R. J. Forsyth、S. E. Gibson、A. J. Lazarus、A. Lecinski、P. Riley、A. Szabo 和 B. J. Thompson。全太阳月期间太阳日冕的磁流体动力学建模。《地球物理研究杂志：空间物理》，104(A5):9809–9830，1999年5月。doi:10.1029/1998JA900159。Pete Riley、Jon A. Linker、R. Lionello 和 Z. Mikic。近期太阳活动极小期的共转相互作用区：全球磁流体力学建模的能力与局限。《大气与太阳-地球物理学杂志》，83:1–10，2012年7月。doi:10.1016/j.jastp.2011.12.013。M. J. Owens、C. N. Arge、H. E. Spence 和 A. Pembroke。验证太阳风速度预测的事件驱动方法：Wang-Sheeley-Arge模型中的高速增强。《地球物理研究杂志》（空间物理），110(A12):A12105，2005年12月。doi:10.1029/2005JA011343。C. O. Lee、J. G. Luhmann、D. Odstrcil、P. J. MacNeice、I. de Pater、P. Riley 和 C. N. Arge。太阳活动第23周下降期1 AU处的太阳风：三维数值模型结果与观测数据的比较。《太阳物理学》，254(1):155–183，2009年1月。doi:10.1007/s11207-008-9280-y。Peter MacNeice。社区模型的验证：识别空间天气模型时间线中的事件。《空间天气》，7(6):S06004，2009年6月a。doi:10.1029/2009SW000463。Peter MacNeice。社区模型的验证：2. 使用Wang-Sheeley-Arge模型建立基线。《空间天气》，7(12):S12002，2009年12月b。doi:10.1029/2009SW000489。L. K. Jian、C. T. Russell、J. G. Luhmann、P. J. MacNeice、D. Odstrcil、P. Riley、J. A. Linker、R. M. Skoug 和 J. T. Steinberg。ACE和Ulysses观测数据与Enlil模型结果的比较：2016—2018年卡林顿自转周的流相互作用区。《太阳物理学》，273(1):179–203，2011年10月a。doi:10.1007/s11207-011-9858-7。L. K. Jian、C. T. Russell 和 J. G. Luhmann。比较第23/24太阳活动周极小期与1 AU处的历史太阳风记录。《太阳物理学》，274(1-2):321–344，2011年12月b。doi:10.1007/s11207-011-9737-2。L. K. Jian、P. J. MacNeice、A. Taktakishvili、D. Odstrcil、B. Jackson、H. S. Yu、P. Riley、I. V. Sokolov 和 R. M. Evans。地球处太阳风预测的验证：对比CCMC安装的日冕与日球层模型。《空间天气》，13(5):316–338，2015年5月。doi:10.1002/2015SW001174。P. Riley 和 R. Lionello。将太阳风流从太阳映射至1 AU：技术比较。《太阳物理学》，270(2):575–592，2011年6月。doi:10.1007/s11207-011-9766-x。M. Dósa、A. Opitz、Z. Dálya 和 K. Szeg˝o。磁套索：一种新的太阳风运动学传播方法。《太阳物理学》，293(9):127，2018年。doi:10.1007/s11207-018-1340-3。Martin A. Reiss、Peter J. MacNeice、Karin Muglach、Charles N. Arge、Christian Möstl、Pete Riley、Jürgen Hinterreiter、Rachel L. Bailey、Andreas J. Weiss、Mathew J. Owens、Tanja Amerstorfer 和 Ute Amerstorfer。利用数值模型预报背景太阳风。II. 用于指定太阳附近太阳风速度的自适应预测系统。《天体物理学杂志》，891(2):165，2020年3月。doi:10.3847/1538-4357/ab78a0。P. MacNeice、L. K. Jian、S. K. Antiochos、C. N. Arge、C. D. Bussy-Virat、M. L. DeRosa、B. V. Jackson、J. A. Linker、Z. Mikic、M. J. Owens、A. J. Ridley、P. Riley、N. Savani 和 I. Sokolov。评估背景太阳风模型的质量。《空间天气》，16(11):1644–1667，2018年。doi:10.1029/2018SW002040。

Martin A. Reiss、Peter J. MacNeice、Leila M. Mays、Charles N. Arge、Christian Möstl、Ljubomir Nikolic 和 Tanja Amerstorfer。利用数值模型预报背景太阳风。I. 业务框架的实施。《天体物理学杂志》，240(2):35，2019年2月。doi:10.3847/1538-4365/aaf8b3。
Rui F. Pinto 和 Alexis P. Rouillard。《多磁通管太阳风模型》。《天体物理学杂志》，838(2):89，2017年4月。doi:10.3847/1538-4357/aa6398。
A. P. Rouillard, R. F. Pinto, A. Vourlidas, A. De Groof, W. T. Thompson, A. Bemporad, S. Dolei, M. Indurain, E. Buchlin, C. Sasso, D. Spadaro, K. Dalmasse, J. Hirzberger, I. Zouganelis, A. Strugarek, A. S. Brun, M. Alexandre, D. Berghmans, N. E. Raouafi, T. Wiegelmann, P. Pagano, C. N. Arge, T. Nieves-Chinchilla, M. Lavarra, N. Poirier, T. Amari, A. Aran, V. Andretta, E. Antonucci, A. Anastasiadis, F. Auchère, L. Bellot Rubio, B. Nicula, X. Bonnin, M. Bouchemit, E. Budnik, S. Caminade, B. Cecconi, J. Carlyle, I. Cernuda, J. M. Davila, L. Etesi, F. Espinosa Lara, A. Fedorov, S. Fineschi, A. Fludra, V. Génot, M. K. Georgoulis, H. R. Gilbert, A. Giunta, R. Gomez-Herrero, S. Guest, M. Haberreiter, D. Hassler, C. J. Henney, R. A. Howard, T. S. Horbury, M. Janvier, S. I. Jones, K. Kozarev, E. Kraaikamp, A. Kouloumvakos, S. Krucker, A. Lagg, J. Linker, B. Lavraud, P. Louarn, M. Maksimovic, S. Maloney, G. Mann, A. Masson, D. Müller, H. Önel, P. Osuna, D. Orozco Suarez, C. J. Owen, A. Papaioannou, D. Pérez-Suárez, J. Rodriguez-Pacheco, S. Parenti, E. Pariat, H. Peter, S. Plunkett, J. Pomoell, J. M. Raines, T. L. Riethmüller, N. Rich, L. Rodriguez, M. Romoli, L. Sanchez, S. K. Solanki, O. C. St Cyr, T. Straus, R. Susino, L. Teriaca, J. C. del Toro Iniesta, R. Ventura, C. Verbeeck, N. Vilmer, A. Warmuth, A. P. Walsh, C. Watson, D. Williams, Y. Wu 和 A. N. Zhukov。《太阳轨道飞行器任务的模型与数据分析工具》。《天文学与天体物理学》，642:A2，2020年10月。doi:10.1051/0004-6361/201935305。Jens Pomoell 和 S. Poedts。EUHFORIA：欧洲日球层预报信息资产。《空间天气与空间气候杂志》，8:A35，2018年6月。doi:10.1051/swsc/2018020。E. Samara, R. F. Pinto, J. Magdaleni´c, N. Wijsen, V. Jerˇci´c, C. Scolini, I. C. Jebaraj, L. Rodriguez 和 S. Poedts。在EUHFORIA中实现MULTI-VP日冕模型：测试案例结果及与WSA日冕模型的比较。《天文学与天体物理学》，648:A35，2021年4月。doi:10.1051/0004-6361/202039325。Jürgen Hinterreiter, Jasmina Magdalenic, Manuela Temmer, Christine Verbeke, Immanuel Christopher Jebaraj, Evan- gelia Samara, Eleanna Asvestari, Stefaan Poedts, Jens Pomoell, Emilia Kilpua, Luciano Rodriguez, Camilla Scolini 和 Alexey Isavnin。评估EUHFORIA对背景太阳风的建模表现。《太阳物理学》，294(12):170，2019年12月。doi:10.1007/s11207-019-1558-8。E. Samara, B. Laperre, R. Kieokaew, M. Temmer, C. Verbeke, L. Rodriguez, J. Magdaleni´c 和 S. Poedts。动态时间规整：评估太阳风时间序列的一种方法。《天体物理学杂志》，927(2):187，2022年3月。doi:10.3847/1538-4357/ac4af6。Bojan Vršnak, Manuela Temmer 和 Astrid M. Veronig。日冕洞与太阳风高速流：I. 太阳风参数预报。《太阳物理学》，240(2):315–330，2007年2月。doi:10.1007/s11207-007-0285-8。Daniel Miloši´c, Manuela Temmer 和 Stephan G. Heinemann。改进经验太阳风预报（eswf）——压缩效应、余纬信息与Dst预报。硕士论文，格拉茨大学，2022年7月。S. Robbins, C. J. Henney 和 J. W. Harvey。利用日冕洞进行太阳风预报。《太阳物理学》，233(2):265–276，2006年2月。doi:10.1007/s11207-006-0064-y。Chihiro Tao, Ryuho Kataoka, Hiroshi Fukunishi, Yukihiro Takahashi 和 Takaaki Yokoyama。太阳风动压增强引起的木星磁尾磁场变化。《地球物理研究杂志》（空间物理），110(A11):A11208，2005年11月。doi:10.1029/2004JA010959。N. André, M. Grande, N. Achilleos, M. Barthélémy, M. Bouchemit, K. Benson, P.-L. Blelly, E. Budnik, S. Caussarieu, B. Cecconi, T. Cook, V. Génot, P. Guio, A. Goutenoir, B. Grison, R. Hueso, M. Indurain, G.H. Jones, J. Lilensten, A. Marchaudon, D. Matthiä, A. Opitz, A. Rouillard, I. Stanislawska, J. Soucek, C. Tao, L. Tomasik 和 J. Vaubaillon。Europlanet H2020研究基础设施提供的虚拟行星空间天气服务。《行星与空间科学》，150:50–59，2018年。ISSN 0032-0633。doi:https://doi.org/10.1016/j.pss.2017.04.020。实现对行星科学与日球物理数据库及工具的开放且可互操作的访问。Frank Woodcock。用于科学和行政目的的是非预报评估。《月度天气评论》，104(10):1209–1214，1976年。

Martin A. Reiss、Manuela Temmer、Astrid M. Veronig、Ljubomir Nikolic、Susanne Vennerstrom、Florian Schöngassner 和 Stefan J. Hofmeister。使用业务化太阳风模型验证高速太阳风流预报。《空间天气》，14(7):495–510，2016年7月。doi:10.1002/2016SW001390。

Yosuke Matsumoto、Yuta Asahina、Yuki Kudoh、Tomohisa Kawashima、Jin Matsumoto、Hiroyuki R. Takahashi、Takashi Minoshima、Seiji Zenitani、Takahiro Miyoshi 和 Ryoji Matsumoto。磁流体力学模拟代码 CANS+：评估与应用。日本天文学会刊物，71(4):83，2019年8月。doi:10.1093/pasj/psz064。Erika Palmerio、Teresa Nieves-Chinchilla、Emilia K. J. Kilpua、David Barnes、Andrei N. Zhukov、Lan K. Jian、Olivier Witasse、Gabrielle Provan、Chihiro Tao、Laurent Lamy、Thomas J. Bradley、M. Leila Mays、Christian Möstl、Elias Roussos、Yoshifumi Futaana、Adam Masters 和 Beatriz Sánchez-Cano。来自太阳的两个相互作用日冕物质抛射的磁结构与传播，直至土星。《地球物理研究杂志》（空间物理），126(11):e2021JA029770，2021年11月。doi:10.1029/2021JA029770。H. Nilsson、A. Moeslinger、H. N. Williamson、S. Bergman、H. Gunell、G. Stenberg Wieser、Y. Futaana、T. Karlsson、E. Behar 和 M. Holmström。67P彗星上游太阳风速度：重建方法、模型比较与结果。《天文学与天体物理学》，659:A18，2022年3月。doi:10.1051/0004-6361/202142867。J. H. King 和 N. E. Papitashvili。太阳风空间尺度，以及 Wind 和 ACE 卫星每小时等离子体与磁场数据的比较。《地球物理研究杂志》（空间物理），110(A2):A02104，2005年2月。doi:10.1029/2004JA010649。M. Müller。动态时间规整。载于音乐与动作信息检索，第69–84页。Springer Berlin Heidelberg，柏林，海德堡，2007年。ISBN 978-3-540-74048-3。doi:10.1007/978-3-540-74048-3_4。R. Bellman 和 R. Kalaba。论自适应控制过程。《*IRE*自动控制汇刊》，4(2):1–9，1959年。doi:10.1109/TAC.1959.1104847。H. Sakoe 和 S. Chiba。用于口语词识别的动态规划算法优化。《*IEEE*声学、语音与信号处理汇刊》，26(1):43–49，1978年。doi:10.1109/TASSP.1978.1163055。C. Myers、L. Rabiner 和 A. Rosenberg。孤立词识别中动态时间规整算法的性能权衡。《*IEEE*声学、语音与信号处理汇刊》，28(6):623–635，1980年。doi:10.1109/TASSP.1980.1163491。Brecht Laperre、Jorge Amaya 和 Giovanni Lapenta。将动态时间规整作为机器学习 Dst 预报的新评估方法。《天文学与空间科学前沿》，7:39，2020年7月。doi:10.3389/fspas.2020.00039。Mathew J. Owens 和 Jonathan D. Nichols。利用太阳风原位观测生成外日球层模拟的内边界条件——I. 将动态时间规整应用于合成观测。《皇家天文学会月刊》，508(2):2575–2582，2021年12月。doi:10.1093/mnras/stab2512。Kaine A. Bunting 和 Huw Morgan。基于日冕密度的太阳风模型内边界条件。《空间天气与空间气候杂志》，12:30，2022年7月。doi:10.1051/swsc/2022026。D. Berndt 和 J. Clifford。使用动态时间规整在时间序列中发现模式。技术报告，AAAI-94数据库知识发现研讨会，1994年。Eamonn J. Keogh 和 Michael J. Pazzani。导数动态时间规整。载于*2001*年*SIAM*国际数据挖掘会议论文集，第1–11页。工业与应用数学学会，2001年4月。ISBN 978-0-89871-495-1 978-1-61197-271-9。doi:10.1137/1.9781611972719.1。Tomasz Górecki 和 Maciej Łuczak。在时间序列分类中使用导数。《数据挖掘与知识发现》，26(2):310–331，2013年。doi:10.1007/s10618-012-0251-4。Selina Chu、Eamonn Keogh、David Hart 和 Michael Pazzani。适用于时间序列的迭代加深动态时间规整，第195–212页。工业与应用数学学会，2002年。doi:10.1137/1.9781611972726.12。Eamonn Keogh 和 Chotirat Ann Ratanamahatana。动态时间规整的精确索引。《知识与信息系统》，7(3):358–386，2005年。doi:10.1007/s10115-004-0154-9。Stan Salvador 和 Philip Chan。朝着线性时间和空间内实现精确动态时间规整迈进。《智能数据分析》，11(5):561–580，2007年10月。ISSN 15714128。doi:10.3233/IDA-2007-11508。Alon Efrat、Quanfu Fan 和 Suresh Venkatasubramanian。曲线匹配、时间规整与光场：用于计算曲线间相似度的新算法。《数学成像与视觉杂志》，27(3):203–216，2007年。doi:10.1007/s10851-006-0647-0。Titus Felix Furtunˇa。语音识别中的动态规划算法。*Revista Informatica Economicˇa nr*，2 (46):94，2008年。Qiang Zhu、Gustavo Batista、Thanawin Rakthanmanon 和 Eamonn Keogh。一种新颖的动态时间规整近似方法，可实现海量时间序列数据集的随时聚类。载于*2012*年*SIAM*国际数据挖掘会议论文集，第999–1010页。SIAM，2012年。

Munshi Yadav 和 M Afshar Alam。语音中的动态时间规整（dtw）算法：综述。《国际电子与计算机工程研究期刊》，6(1):524–528，2018年。Bertalan Zieger 和 Kenneth C. Hansen。1 至 10 天文单位范围内太阳风传播模型的统计验证。《地球物理研究杂志：空间物理》，113(A8):n/a–n/a，2008年8月。ISSN 01480227。doi:10.1029/2008JA013046。Mathew J. Owens 和 Pete Riley。利用近太阳条件大型集合和简单一维“迎风”格式进行概率性太阳风预报。《空间天气》，15(11):1461–1474，2017年11月。doi:10.1002/2017SW001679。V. Pizzo。太阳风中共转流的三维模型 1：理论基础。《地球物理研究杂志：空间物理》，83(A12):5563–5572，1978年12月。doi:10.1029/JA083iA12p05563。Rainer Schwenn。行星际介质的大尺度结构，第99–181页。Springer Berlin Heidelberg，柏林，海德堡，1990年。ISBN 978-3-642-75361-9。doi:10.1007/978-3-642-75361-9_3。Kyle S. Hickmann、Humberto C. Godinez、Carl J. Henney 和 C. Nick Arge。ADAPT光球磁通量输运模型中的数据同化。《太阳物理学》，290(4):1105–1118，2015年4月。doi:10.1007/s11207-015-0666-3。C. Nick Arge、Carl J. Henney、Irene Gonzalez Hernandez、W. Alex Toussaint、Josef Koller 和 Humberto C. Godinez。利用包含背面观测数据的ADAPT地图对日冕和太阳风进行建模。载于 Gary P. Zank、Joe Borovsky、Roberto Bruno、Jonathan Cirtain、Steve Cranmer、Heather Elliott、Joe Giacalone、Walter Gonzalez、Gang Li、Eckart Marsch、Ebehard Moebius、Nick Pogorelov、Jim Spann 和 Olga Verkhoglyadova 编，《style id='14'>第13届太阳风会议，第1539卷，美国物理联合会会议系列，第11–14页，2013年6月。doi:10.1063/1.4810977。John Worden 和 John Harvey。一幅不断演变的全景磁通量图及其对光球磁通量分布的影响。《太阳物理学》，195(2):247–268，2000年8月。doi:10.1023/A:1005272502885。