第25太阳活动周上升期的太阳风参数

Yuri I. Yermolaev、Irina G. Lodkina、Alexander A. Khokhlachev、Michael Yu. Yermolaev、Maria O. Riazantseva、Liudmila S. Rakhmanova、Natalia L. Borodkova、Olga V. Sapunova、Anastasiia V. Moskaleva

俄罗斯科学院空间研究所，俄罗斯莫斯科 117997

摘要

第23和第24太阳活动周（SC）的太阳活动和太阳风参数显著下降–。本文分析了第25太阳活动周上升期的太阳风测量数据，并将其与前几个太阳活动周的类似数据进行比较。为此，我们同时按照11年太阳周期的各个阶段以及大尺度太阳风类型（依据目录 http://www.iki.rssi.ru/pub/omni），选取了1976—2022年的OMNI数据库数据，并计算了所选数据集的参数平均值。所得结果支持这样一种假设：第25太阳活动周后续的发展将与前一个第24太阳活动周相似，即第25太阳活动周的活动将弱于第21和第22太阳活动周。

1. 引言

太阳风（SW）是由炽热的太阳日冕向行星际介质膨胀形成的，是空间研究的主要目标之一。一方面，

太阳风的直接测量始于太空时代初期 [7, 8] ，涵盖太阳活动周20—25（例如，参见太阳风测量数据库 https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni /low_res_omni [9]）。这一时期的开始处于太阳活动高峰期，而在太阳活动周22和23之间的极小期，太阳活动开始下降，并在太阳活动周23期间持续，且24 [10, 11, 12]。太阳活动的下降伴随着太阳风及其对地球磁层影响的一系列显著变化 [13, 14, 15,16,17,18, 19]: （1）日球层结构发生变化（例如，日冕物质抛射的数量及其在行星际介质中的表现有所减少，而来自冕洞的高速流及其相关的CIR压缩区域数量几乎未变）；（2）太阳风参数下降，这一现象同时出现在太阳周期的不同阶段以及不同类型的太阳风流中；（3）磁层扰动减弱，尤其是地球上磁暴的数量几乎减少了10倍。目前，太阳已经经历了第25个太阳周期的上升期（参见图1中2019—2022年期间太阳黑子年平均值的变化），这一阶段的太阳风直接测量数据已可用于研究。结合太阳观测，对这些测量数据进行分析，有助于验证预测当前太阳周期发展过程的模型，尤其是获得关于太阳、日球层以及太阳活动周峰值附近空间天气效应变化的更可靠预测 [20, 21, 22, 23]。

在我们此前的文章 [15], 中，我们分析了第21至24个太阳活动周（1976-2019年）不同阶段各类大尺度太阳风流的平均参数如何变化。为此，我们同时

按照太阳活动周相位和大尺度太阳风类型 [24], 从 OMNI数据库 [9], 中筛选数据，并计算所选数据集的参数平均值。结果表明，在太阳活动周23-24（1997-2019年），各类太阳风流在太阳活动周相应相位的参数，与太阳活动周21-22相比下降了20-40%。本研究采用类似方法筛选第25个太阳活动周上升期的 OMNI数据库数据，并首次将其与前4个太阳活动周的相似阶段进行比较，以确定当前太阳活动周与以往太阳活动周之间的异同，并预测其演变。

2. 数据与方法

在本研究中，我们使用与前一篇论文相同的信息来源 [15]: （1）1976–2022年太阳风测量的 OMNI 数据库

根据目录，识别出以下大尺度（>10^6 km）太阳风类型：准稳定类型包括（1）日球层电流片（HCS）、（2）来自日冕流带区域的慢速流（慢流型）以及（3）来自冕洞区域的快速流（快流型）；扰动类型包括（4）慢流型与快流型之间的压缩区——共转相互作用区（CIR）；（5）慢流型与快速行星际日冕物质抛射（ICME）之间的压缩区——鞘区；以及（6、7）两种行星际日冕物质抛射（ICME）：抛射体和磁云（MC）。与抛射体相比，磁云中的行星际磁场（IMF）更强且更规则，因此可将二者区分开来。所采用的太阳风现象分类已得到普遍认可（更多详情见[15] ），类型识别方法详见论文[24]。

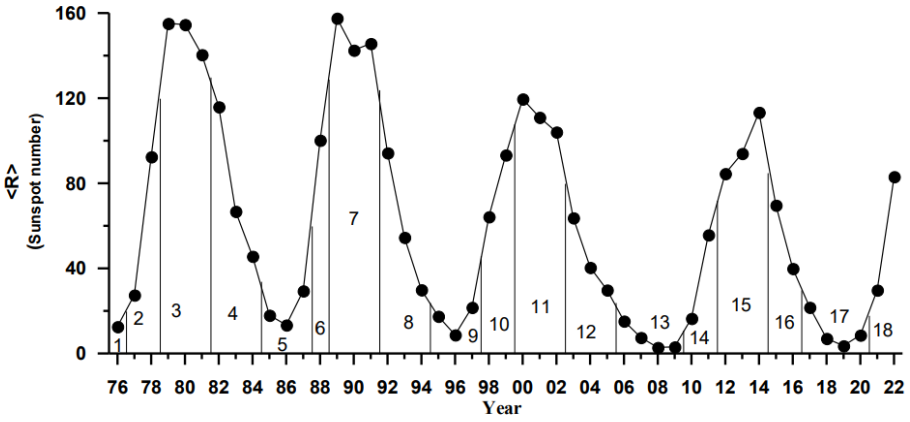

图1. 太阳黑子数的年度数据（数字和垂直线表示太阳活动周21–25各阶段的划分。）

表1. 太阳周期各阶段的平均时间间隔

无时间间隔	无太阳活动周期	太阳周期阶段	年份
1	21	极小期	1976

2		上升期	1977,1978
3		最高阶段	1979-1981
4		下降期	1982-1984
5		极小期	1985-1987
6	22	上升期	1988
7		最高阶段	1989-1991
8		下降期	1992-1994
9		极小期	1995—1997年
10	23	上升期	1998—1999年
11		最高阶段	2000—2002年
12		下降期	2003—2005年
13		极小期	2006—2009年
14	24	上升期	2010,2011
15		最高阶段	2012-2014年
16		下降期	2015年-2016年
17		极小期	2017-2020
18	25	上升期	2021-2022年

整个1976—2022年时间段被划分为18个子区间，分别对应第21至第25太阳活动周期的各个阶段（见图1和表1）。与以往研究[15,16], 不同，本研究延长了第24/25太阳活动周期极小期的阶段，涵盖2017—2020年；此外，还加入了2021—2022年的上升期。在这18个子区间中的每一个区间内，分别对8种太阳风类型（上述7种+ 及其总和）的数据进行了平均。平均区间内所有参数的统计离散度都很大，其标准差接近平均值。然而，由于所有太阳风类型（MC除外，其统计数据较少[15]）的平均数据集中测量点数量很大（~10^3），统计误差（即标准差除以测量点数量的平方根）较小，因此这些参数变化趋势具有足够的统计显著性[25]。需要指出的是，参数中离散度最大的是质子温度T；由于其服从对数正态分布[26, 27], ，我们对logT值进行了平均。

3. 结果

图2–7展示了太阳风等离子体和行星际磁场（IMF）参数按太阳活动周各阶段求平均后的时间剖面（表1）：极小期——黑色圆圈，上升期——蓝色三角形，极大期——紫色方块，下降期——绿色倒三角形，不区分阶段——红色空心方块。所有面板中右侧的点（蓝色三角形）对应第25太阳周期的上升期，这些数值构成了本研究的主要结果。由于事件数量较少，磁云数据在所有图中分布较为分散。

我们将从太阳风整体速度开始分析。如前所示，[15], 太阳风整体速度受第23至第24太阳活动周期太阳活动减弱的影响最小。图2显示，太阳风速度相当稳定，并且受太阳活动周期的编号和阶段以及太阳风类型的影响都很小。在第23太阳活动周期下降期，只有由日冕物质抛射产生的事件（鞘区、抛射体和磁云）的平均速度出现了短期升高，这与太阳

活动的短期增强有关（尤其是2003年10月至11月和2004年的极端事件）。对于不同类型的太阳风，第25太阳活动周期上升期的平均速度相较于前一个极小期的偏差小于20 km/s；这一数值明显低于标准差，并且与第24太阳活动周期初期的速度变化相一致。因此，与第24太阳活动周期上升期相比，第25太阳活动周期上升期未观察到任何特殊特征。

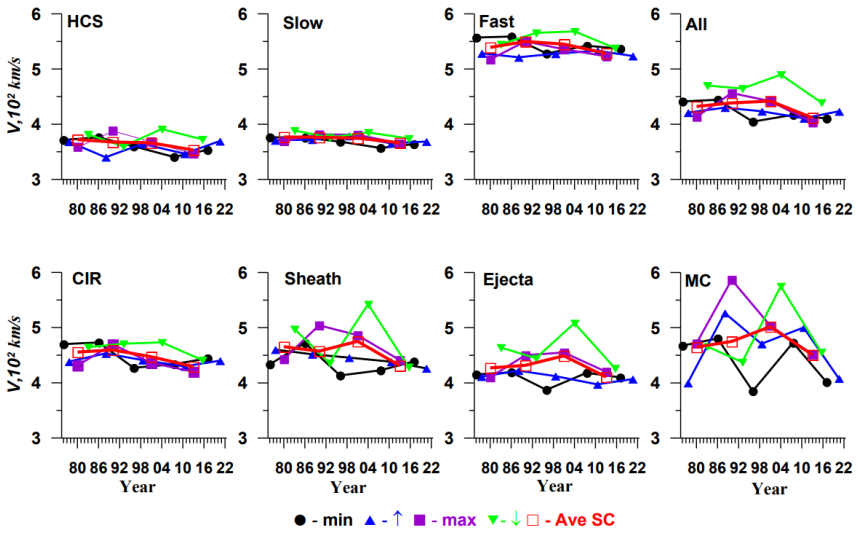

图2. 7种不同类型的太阳风（太阳层电流片 – 日球电流片、慢流型和快流型、CIR、鞘区、抛射体和磁云）

图3展示了质子温度对数 logT 的变化。尽管温度散布范围很大，但按太阳活动周各阶段取平均后，在对数尺度上得到的曲线形状相当平滑，并且在第22至24太阳活动周的峰值期和下降期，温度呈现出明显的上升趋势。可以注意到，在准静止类型的太阳风（日球电流片、慢流型和快流型）以及未按太阳风类型筛选的情况下（“全部”面板），第25太阳周期上升期的温度与前一个极小期和第24太阳活动周上升期相比，均呈现出微弱的上升趋势。对于受扰动类型的太阳风，则未观察到这一趋势。

图4展示了密度 N 的变化。尽管数值离散较大（略小于温度的离散程度），准稳态太阳风各类型的曲线相当平滑，并显示出在极小期和下降期密度值趋高的趋势。第22/23太阳活动周极小期之后，所有太阳活动周期阶段和所有太阳风类型的密度均明显下降。比较从极小期过渡到第25太阳周期上升期时密度的变化情况，可以看到其表现与此前的第24太阳活动周期相似。

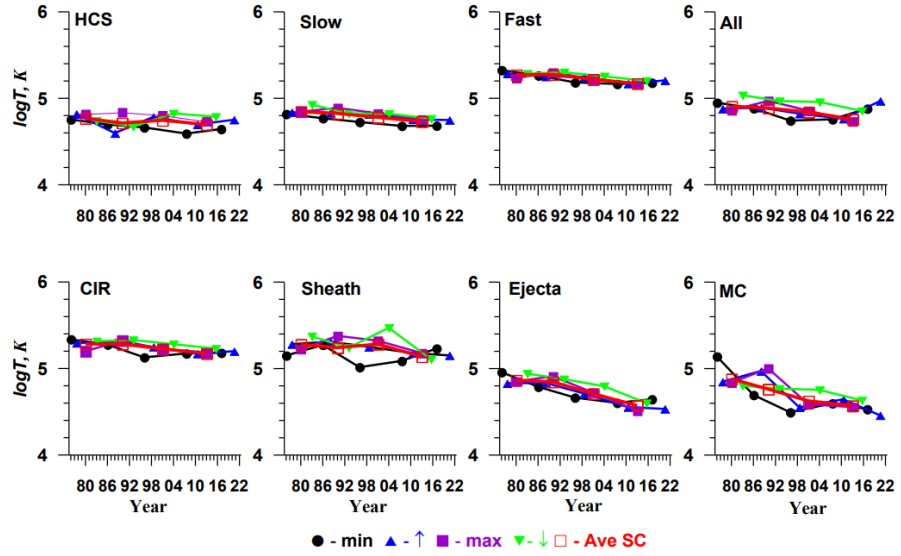

图 3. 质子温度 T 对数的时间变化曲线

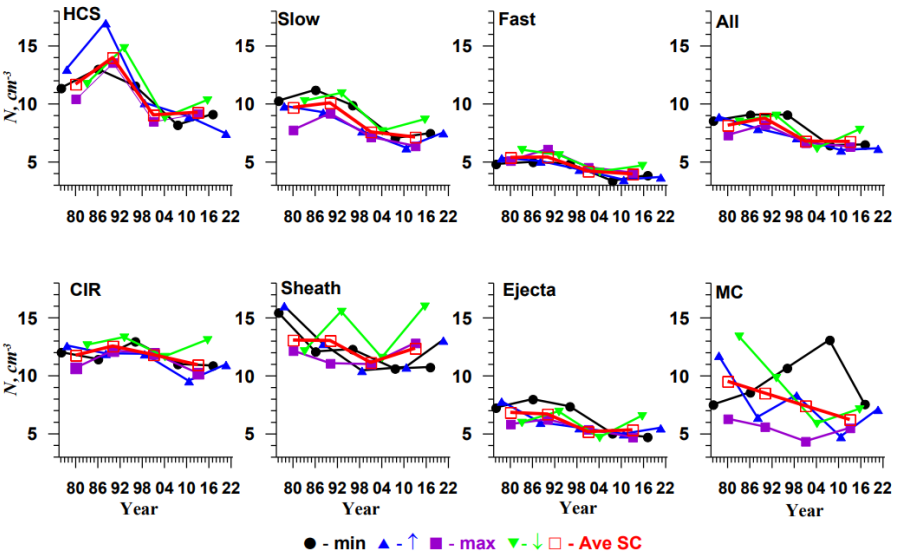

图 4. 密度 N 的时间变化曲线

图5展示了行星际磁场磁场强度 B 的时间变化曲线。对于不同类型的太阳风，曲线显示，在极大期和下降期，磁场 B 的数值较高；第22/23太阳活动周极小期之后，则观测到磁场减弱。对于准稳态太阳风（HCS、慢流型和快流型）以及未按太阳风类型筛选的数据（All 面板），参数 B 与此前第24太阳活动周期的极小期和上升期相比保持不变或略有增加。

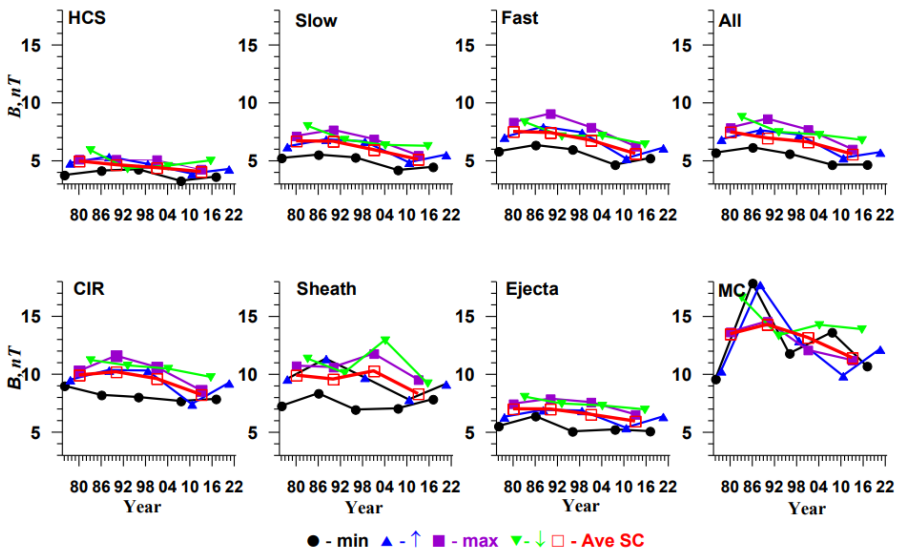

图 5. IMF 磁场强度的时间变化曲线

比较无量纲参数β的时间变化曲线，即质子热压与磁压之比（图6），是很有意义的。对于所有类型的SW，与前述图示相反，β参数在极小期上升，在最高阶段下降，并且在第23—24太阳活动周期太阳活动下降时期呈现轻微下降。在第25太阳周期的上升期，β参数的变化与之前的第24太阳活动周期相似。

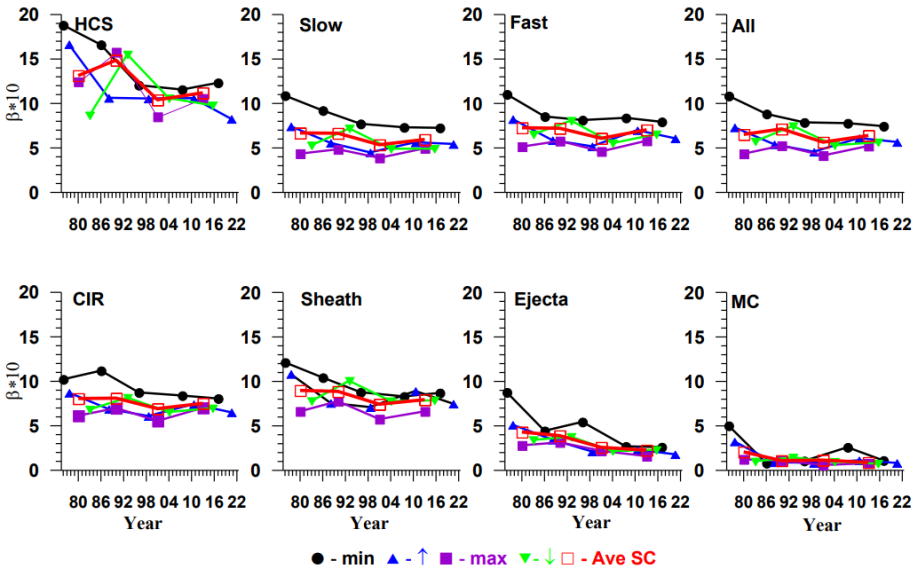

图 6. 质子 β 参数的时间变化曲线

氦丰度（α粒子的相对密度）Nα/Np如图7所示，图中显示，对于所有类型的SW参数Nα/Np在最高阶段达到

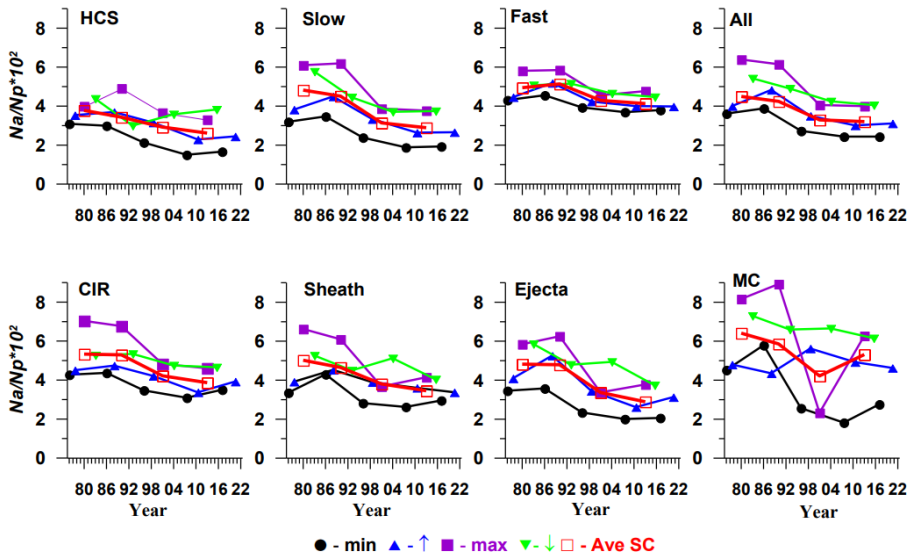

图7. 氦丰度 Nα/Np 的时间变化曲线

4. 讨论与结论

本文同时选取了 OMNI数据库 [9] 1976—2022 年的数据，既按照 11 年太阳周期的各阶段，也按照目录

我们对第25太阳周期上升期时间界限的定义（对于一个尚未结束的周期，这很难确定）相当随意。鉴于上述

未来几年太阳活动的发展预测，尤其是第25太阳周期的预测，仍存在争议，并在专业文献中受到广泛讨论

作者贡献

概念构思，Y.I.Y.；方法设计，Y.I.Y.；软件，I.G.L. 和 A.A.K.；验证，M.Y.Y.、M.O.R. 和 L.S.R.；正式分析，N.L.B.；调查研究，O.V.S.；资源提供，A.V.M.；数据整理，I.G.L.；撰写—初稿准备，Y.I.Y.；撰写—审阅与编辑，Y.I.Y.；可视化，I.G.L.；监督，Y.I.Y.。所有作者均已阅读并同意发表的稿件版本。

资金支持

本研究得到俄罗斯科学基金会资助，项目编号为 22-12-00227。

致谢

作者感谢以下数据库的创建者：**https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni**（2023年3月1日）以及 **http://www.iki.rssi.ru/pub/omni**（2023年3月1日），感谢其允许我们在本研究中使用这些数据库。

利益冲突

作者声明不存在利益冲突。

参考文献

1. Hundhausen，A.J. 日冕膨胀与太阳风；施普林格：德国柏林/海德堡，1972年。

2. Schwenn, R. 太阳风源及其在太阳周期中的变化。《空间科学评论》2006年，124，51–76。

3. Schwenn, R. 太阳周期中的太阳风源及其变化。在《太阳动力学及其对日球层和地球的影响》中；

4. Gonzalez, W.D., Tsurutani, B.T., Clua de Gonzalez, A.L., 1999. 行星际起源的地磁暴。空间科

5. Yermolaev, Yu.I.; Yermolaev, M.Yu.; Zastenker, G.N.; Zelenyi, L.M.; Petrukovich, A.A.;

6. Temmer, M. 空间天气：太阳视角。《Living Rev. Sol. Phys.》2021, 18, 4.

7. Gringauz, K.I. 利用苏联空间探测器上的带电粒子捕集器在行星际空间开展实验的一些结果。载于《第二届国际空间科学研讨会论文集》，意大利佛罗伦萨，1961年4月10日至14日；第339–553页。

8. Neugebauer, M.; Snyder, C.W. 水手2号任务：行星观测。太阳等离子体实验。《科学》1962年，138，1095。

9. King, J.H.; Papitashvili, N.E. 太阳风空间尺度以及每小时太阳风与ACE等离子体和磁场数据的比较。 *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2004年, *110*, A02209.

10. Feynman, J.; Ruzmaikin, A. 太阳的奇异行为：蒙德极小期还是格莱斯伯格周期？ 太阳物

11. Zolotova, N.V.; Ponyavin, D.I. 新的太阳活动大极小期正在进行吗？ *J. Geophys. Res.*

12. Biswas, A., Karak, B.B., Usoskin, I. 等. 太阳活动周的长期调制. Space Sci Rev 219,19 (2023年).

13. McComas, D.J.; Angold, N.; Elliott, H.A.; Livadiotis, G.; Schwadron, N.A.; Skoug, R.; Smith,

14, Gopalswamy, N., Yashiro, S., Xie, H., Akiyama, S., & Makela, P.（2015年）。第23和第24太

15, Yermolaev, Y.I.; Lodkina, I.G.; Khokhlachev, A.A.; Yermolaev, M.Y.; Riazantseva,

16, Yermolaev, Y.I.; Lodkina, I.G.; Khokhlachev, A.A.; Yermolaev, M.Y. 太阳风参数的下降

17. Yermolaev, Y.I.; Lodkina, I.G.; Khokhlachev, A.A.; Yermolaev, M.Y. 日球层状态的特点及太阳活

18. Yermolaev, Y.I.; Lodkina, I.G.; Khokhlachev, A.A.; Yermolaev, M.Y.; Riazantseva,

19. Mursula, K; Qvick, T.; Holappa, L.; Asikainen, T. 太空时代的磁暴：发生情况及其与变化的太阳活动的关系，《地球物理研究杂志：空间物理》

2022年, 127, e2022JA030830 https://doi.org/10.1029/2022JA030830

20，Javaraiah, J. 第25和第26太阳活动周会比第24太阳活动周更弱吗？《太阳物理学》292，172

21，Partha Chowdhury、Volkan Sarp、Ali Kilcik、Pratap Chandra Ray、Jean-Pierre Rozelot、

22，Lamy, P., Gilardy, H. 第25太阳活动周极小期和上升期白光日冕的状态——与过去的太阳活动

23. Du, Z.L. 太阳周期：基于相似太阳活动周方法预测第25太阳活动周在3天内平滑后的最高3小时aa指数的最大振幅。Astrophys Space Sci 368, 11（2023年）。
https://doi.org/10.1007/s10509-023-04167-5

24. Yermolaev Yu, I.; Nikolaeva, N.S.; Lodkina, I.G.; Yermolaev, M.Y. 1976—2000年大尺度太阳风现象目录。《宇宙研究》2009，47，81–94。

25 Bendat, J.S.; Piersol, A.G.《随机数据》的测量与分析；Wiley-Interscience：纽约，NY，美国，1971年；第139–258页

26. Burlaga, L. F., & Lazarus, A. J.（2000）。太阳风等离子体涨落的对数正态分布与谱：
Wind 1995–1998年。《地球物理研究杂志》，*105*（A2），2357–2364。
https://doi.org/10.1029/1999ja900442

27. Dmitriev, A. V., Suvorova, A. V., & Veselovsky, I. S.（2009）。第20至23太阳活动周期间地球轨道

28. Peguero, J.C., Carrasco, V.M.S. 对《第25太阳活动周会是一个新的道尔顿极小期吗？》的批判性评论。太阳物理学 298, 48（2023年）。https://doi.org/10.1007/s11207-023-02140-7

29. Coban, G.C., Raheem, Au., Cavus, H. 等。第25太阳活动周会是一个新的道尔顿极小期吗？太

30. Nagovitsyn, Y.A., Ivanov, V.G. 太阳活动周配对与第25太阳活动周预测。太阳物理学 298, 37

31. Prasad, A., Roy, S., Sarkar, A. 等人。使用深度学习神经网络改进对第25太阳活动周的预测。太

32. Zharkova, V.、Vasilieva, I.、Shepherd, S. 和 Popova, E.（2023年）太阳活动、太阳辐射的周

33. Javaraiah, J. 第25太阳活动周振幅及第二峰值的预测，以及基于极区磁场强度和低纬度太阳黑子