

文章编号: 1671-4229(2023)06-0001-08

日地空间环境中准双年振荡的时空信息与机制研究

邓辉, 陈其佳

(广州大学 物理与材料科学学院, 广东 广州 510006)

摘要: 日地环境的准双年振荡是空间天气科学中的一个重要研究课题, 对理解太阳大气、日地空间和地球环境的耦合过程具有重要意义。准双年振荡现象在时间和空间上具有无处不在和多变的观测特征, 其确切的物理产生机制还未彻底厘清。准双年振荡存在于太阳大气的各个层次, 甚至在对流区, 在南北半球上是独立发展的。太阳准双年振荡通过开放的磁通量传输到行星际空间, 径向日球场的强度与总的开放磁通量高度相关。太阳活动在11年周期最大值附近的时间减弱间隙可被视为准双年振荡的一个组成部分。文章综述了准双年振荡最新理论的产生机制, 并讨论了支持/反驳该理论的观测特征。准双年振荡作为太阳活动的基本属性, 不仅在研究太阳发电机的动力学过程方面, 也在空间天气的预报和预警方面有着重要的现实意义。

关键词: 日地环境; 空间天气; 太阳磁场; 准双年振荡; 时空演化

中图分类号: P182.9 文献标志码: A

Spatiotemporal information and mechanism study of quasi-biennial oscillations in the solar-terrestrial space environment

DENG Hui, CHEN Qi-jia

(School of Physics and Materials Science, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The quasi-biennial oscillations (QBOs) of the Sun-Earth environment are an important research topic in space weather science, and are of great significance for understanding the coupling processes between the solar atmosphere, the solar-terrestrial space, and the terrestrial environment. The QBOs phenomenon possesses ubiquitous and extremely diverse observational features in time and space, but its exact physical generation mechanism is still not thoroughly clarified. QBOs exist in all levels of the solar atmosphere, and even in the convection zone. They develop independently in the northern and southern hemispheres. The solar QBOs propagate into interplanetary space through open magnetic flux transport. The strength of the radial heliospheric magnetic field is highly correlated with the total open magnetic flux. The time gap of weakened solar activity near the 11-year cyclic maximum can be viewed as a constituent part of the QBOs. For the generation mechanism of QBOs, this paper reviews the latest theoretical generation mechanisms, and discusses the observational features that support/refute these theories. As a fundamental property of solar activity, the QBOs are not only important for studying the dynamic processes in the solar dynamo, but also have significant practical implications for space weather forecasting and warning.

Key words: solar-terrestrial space; space weather; solar magnetic field; quasi-biennial oscillations; spatiotemporal evolution

收稿日期: 2023-07-08; 修回日期: 2023-09-30

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFF0711500); 广州市基础研究计划市校联合资助项目(2023A03J0016)

作者简介: 邓辉(1972—), 女, 教授. E-mail: denghui@gzhu.edu.cn

引文格式: 邓辉, 陈其佳. 日地空间环境中准双年振荡的时空信息与机制研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2023, 22(6): 1-8.

太阳大气、行星际空间与地球空间构成的日地空间,是地球上的人类和动植物赖以生存的空间环境。太阳多层次大气中的磁活动现象作为日地空间链条中最重要的环节之一,既对太阳风和行星际磁场的变化有着强烈的影响,同时又与地球磁层和大气层紧密耦合在一起,形成一个复杂多变的动力学系统。太阳是一个在空间和时间上持续演化的复杂天体,空间气候、大气环境和航天工程受到来自于太阳磁场的深度制约。在科技日益飞速发展的今天,特别是电子与通信等现代科技手段的飞速发展,使许多科学技术的研究及应用与日地空间环境的变化过程密切相关。

太阳大气中各种各样的磁活动现象的产生机制与演化规律还远未被完全了解,特别是日地空间环境中准周期过程的多样性和复杂性。日地空间环境中最显著的两个特征周期是 27 天自转周和 11 年活动周,它们的产生机制是被太阳和空间物理学家研究的最细致和最透彻的。除此之外,最值得深入研究的典型周期是位于 2 年左右(范围在 1~4 年)的振荡周期,被称之为日地空间环境里的准双年振荡。太阳大气里的准周期过程通常与地球的准双年振荡分开研究,因为后者的变化过程远比太阳大气准双年振荡更加均匀。但是,人们对太阳磁场和地球气候之间的确切关系还未彻底厘清,因此,不能完全排除太阳与地球的准周期过程存在某种形式的共振。

20 世纪 60 年代,研究人员发现地球大气中存在 26 个月的振荡周期^[1],该周期的发现激发了太阳和空间物理学家对太阳大气准双年振荡的研究兴趣。地球大气中的准双年振荡主要来自陆地,但也会受到 11 年太阳活动周的影响。Sakurai^[2]1979 年在霍姆塔克中微子实验中测得的太阳中微子通量中发现了准双年振荡信号。Silverman 等^[3]分析 1721—1943 年的可视极光数据,发现了 1.4 年的周期特征。Akioka 等^[4]研究表明太阳黑子群数和黑子面积中均存在 17 个月的周期信号。在此之后,太阳、空间和地球物理学家对日地空间环境中准双年振荡的相关研究迅速增加,对准双年振荡的变化规律和驱动机制也取得了进展。

从太阳内部到日球层,准双年振荡在几乎所有的日地空间环境测量中都是可见的,并且有许

多研究考虑了太阳活动指数和行星际参数的演化行为。需要指出的是,日地空间环境的准双年振荡存在尺度变化的多样性和间歇性,在太阳活动峰年时期的变化最为显著。本文对近年来日地空间环境中准双年振荡的观测特征、演化过程和产生机制进行综述,并对在日地空间灾害性天气中的应用价值进行了展望。

1 日地空间中准双年振荡的观测特征

1.1 太阳内部的准双年振荡

在 Sakurai^[2]发现太阳中微子通量中存在准双年振荡信号之后,Shirai^[5]、Vecchio 等^[6],以及 D'Alessi 等^[7]再次对太阳中微子通量中可能的准双年振荡现象进行了细致地研究。Vecchio 等^[6]采用经验模态分解技术,发现太阳中微子流量中观测到的准双年振荡与银河宇宙射线数据中存在的准双年振荡密切相关,意味着太阳磁场在中微子流量的调制中起着至关重要的作用,同时也暗示太阳辐射区深处的磁场可能呈现准两年一次的振荡现象。

D'Alessi 等^[7]假设中微子通量的准双年振荡可能是由于通过重力波的磁调制产生速率的变化。理论上重力波被束缚在辐射区,这种调制会改变辐射区的密度分布,从而改变中微子的产生率。换言之,重力波可能同时在太阳磁场的产生率和中微子之间提供一个潜在的物理联系。

日震学利用太阳的声波振荡来研究太阳内部,可以找到太阳内部存在准双年振荡的进一步证据。众所周知,声波模式的性质在整个 11 年太阳活动周内明显变化,例如振荡频率在太阳活动峰年时达到最大值^[8-12]。Howe 等^[13]在 0.72 个太阳半径处探测到太阳旋转剖面的准双年振荡信号,大部分信号在低纬度地区,周期约为 1.3 年;同时还发现准双年振荡信号是间歇性的,自 2001 年以来没有被探测到。Broomhall 等^[14]在频率偏移的周期图中发现 1.3 年的过剩功率,这种过剩的能量在不同的独立观测数据中均被观察到,意味着此信号来源于太阳。

最近的研究表明,准双年振荡信号在太阳内部的不同深度、不同纬度以及不同活动周均表现

出不同的演化特征。Inceoglu 等^[15]基于太阳和日球层空间天文台以及太阳动力学空间天文台的最新观测数据,研究表明,太阳内部的不同深度、不同纬度均存在类似准双年振荡周期信号,且这种周期信号在不同深度和纬度(半球)表现出不同的特征。在此基础上,Inceoglu 等^[16]指出这种准双年振荡周期信号的源区来自于 0.78 太阳半径之下;Mehta 等^[17]从日震学的角度研究了太阳内部准双年振荡的特征,发现相比第 23 太阳活动周,准双年振荡周期信号在第 24 太阳活动周中有所减少。

1.2 太阳大气的准双年振荡

太阳大气中最明显的磁场结构是太阳黑子。人们普遍认为准双年振荡可以在太阳黑子数和黑子面积中被观测到。Wang 等^[18]发现了太阳黑子面积的周期范围为 0.2 ~ 2.6 年,并证实了赤道偶极分量的光球磁场存在 1 ~ 3 年范围内的周期信号。Hoeksema^[19], Benevolenskaya^[20]在太阳磁场的演化中发现了 1 ~ 2 年的模式。在大规模太阳光球磁场的时间演变中,观察到大约 1.3、1.7 和 2 ~ 4 年的周期^[21-27]。

基于从 1915 年以来的 H α 暗条观测,有研究^[28-30]表明,在太阳色球层中存在准双年振荡信号。Kane^[31]在太阳磁场的活动指数中发现了准双年振荡周期信号,这些代理指标包括起源于色球层的谱斑面积及来源于电离钙线的观测数据。Özguç 等^[32]研究了 1966 年至 2001 年期间观察到的耀斑指数,发现周期为 150 天和 1.3 年。Atac 等^[33]在第 23 太阳活动周期间观察到的耀斑指数中发现了 64 天和 125 天的周期。Badalyan 等^[34]发现在较低日冕的绿线强度和磁场的相关性中有 1.3 年的周期,而 Vecchio 等^[35]发现在绿线发射中有准双年振荡信号,其周期随时间变化在 1.5 ~ 4 年的范围内。De Paula 等^[36]基于太阳黑子和太阳谱斑数据通过不同算法研究太阳光球层和色球层半球不对称特征的周期行为发现,这两组数据的半球不对称特征指数均存在 1.5 年左右和 4 年左右的周期信号。Joshi 等^[37]在研究耀斑发生率和平均磁场的周期特征时,同样发现了 2.5 年左右的周期信号。

许多作者基于几种太阳活动指数检测太阳不

同大气层中的准双年振荡^[31,38-40],发现准双年振荡从光球层、色球层和日冕层,再到地球磁层(地磁活动),以及远日层(宇宙射线)的各个层次上都有表现。

1.3 行星际空间中的准双年振荡

行星际磁场强度、太阳风速度、地磁指数和银河宇宙射线流量都是典型的日地行星际参数,能够反映太阳活动在日地空间传播过程中的空间效应。Bazilevskaya 等^[41-42]利用地面和航天器观测,探索了 1955—2004 年间观测到的太阳高能粒子事件的发生频率,发现在太阳高能粒子事件总数中的准双年振荡与其他太阳指数中的准双年振荡非常相似,特别是在强 X 射线爆发中。

Bazilevskaya 等^[41-42]还考虑到强大的地面增强现象的出现频率。当太阳高能粒子加速到足够高的能量以提高地面中子监测仪的计数率时,地面中子监测仪需要能量高于几个 GeV 以避免被地球大气吸收。Bazilevskaya 等^[41-42]发现 GeV 有时发生在太阳准双年振荡的零相位甚至负相位。日冕物质抛射、太阳高能粒子事件发生率中准双年振荡的证据太阳活动第 23 周期间突然发生地磁风暴。Laurenza 等^[26]研究了 1974—2001 年行星际质子通量中的准双年振荡,发现周期为 3.8 年和 1.7 ~ 2 年。

在行星际空间中观测到的准双年振荡的观测特征与太阳准双年振荡类似:它们的特点是周期性的间歇性和振幅变化。随着时间的推移,在太阳活动峰年的约数倍时是最大的。Rybak 等^[43]和 Lockwood^[44]均在 2001 年发现,太阳和行星际准双年振荡的时间序列之间的对应性不是完全耦合的,且太阳准双年振荡通过开放的磁通量传输到行星际空间。Wang 等^[45]更进一步表明径向日球场的强度与总的开放磁通量成比例。

最新研究表明,至少在观测分析结果的角度来看,准双年振荡和太阳的物理演化机制是密不可分的。López 等^[46]基于宇宙线流量数据发现此准双年振荡周期信号,并指出此周期信号和太阳发电机理论有关。López 等^[47]在 2023 年发现存在于宇宙线的大约 1.6 ~ 2.2 年的周期信号和影响宇宙线在日球层传播条件的太阳有关,即宇宙线的 1.6 ~ 2.2 年的周期特征和太阳有关。

2 日地空间中准双年振荡的物理机制

日地空间中准双年振荡的性质还没有完全被理解,本节将介绍一些已经在文献中讨论过的最可能的机制。大多数作者认为准双年振荡是太阳发电机制的固有现象^[22,24,29,35-40,48-57]。

有研究者用两个发电机的模型来解释太阳中的准双年振荡:一个位于对流区的底部,另一个位于靠近太阳表面以下延伸 5% 的区域(约 35 000 km)。Benevolenskaya^[48]提出了在不同深度运行的两种不同类型发电机的存在,以解释在表面磁场中观察到的准双年振荡。然而,这种结构也能解释在日震数据中观测到的特征对太阳内部磁场很敏感:当 11 年的周期处于强相位时,主发电机从外壳底部向上的浮力磁通量可以帮助将第二台发电机处理的磁通量推送到足够浅的层中,在模式上表现出可检测到的声学特征,并在太阳活动的磁活动测量中可见。当主循环处于弱相时,来自第二发电机的磁通量不会受到额外的推动,也不会有足够的浮力在表面指数中被探测到。

Wang 等^[18]使用通量传输模型并假设活动区随机出现分布的经度,模拟了太阳赤道偶极场的强度和总能量。他们的模拟产生了与准双年振荡相关的峰值,并表明与准双年振荡相关的最高峰值可能发生在太阳活动最大的 11 年周期阶段的下降过程中,这与日震学的观测完全一致。模拟数据也显示了许多在实际观测中观察到的其他特征,如多峰最大值和 1~3 年的周期性,在该范围内没有主要的周期性。

另一种解释是磁 Rossby 波在太阳差旋层中的不稳定性^[24,53,58-60],不稳定的周期取决于用来描述微分旋转和磁场强度的参数,两者都是随太阳周期变化的。因此,磁 Rossby 波的不稳定性可以解释准双年振荡的许多可观测特征,包括间歇性和可变周期性。Zaqarashvili 等^[53]发现 Rossby 波也可以解释太阳活动的不对称性。同样的过程也可以用来解释类里格尔周期的变化特性。

另一个可能对这些观察结果的解释是时空破碎。Covas 等^[61]利用二维轴对称平均场发电机模型,研究表明对于某些磁 Reynolds 数,时空碎裂发生在对流区底部附近,产生微分旋转振荡。Covas

等^[62]认为这些过程可以解释 Howe 等^[49]在对流区底部太阳自转剖面上观察到的 1.3 年的周期性的结果,且 Covas 等^[62]还发现,对于足够高的磁 Reynolds 数,时间变化成为非周期性的,可以解释 Howe 等^[63]剪切层自转速率变化中的 1.3 年周期性的间歇特征。

Ichimoto 等^[64]提出 155 天周期信号可能与用来储存或逃离对流区的时间尺度有关。Ballester 等^[65]提出在类里格尔周期性中观察到的高能量的耀斑数量和光球磁通量可能发生联系,当新的太阳黑子出现时,在已经建立的太阳黑子群中会产生高能量的耀斑。因此,活动区域可能持续 30 个旋转。Chowdhury 等^[66]认为准双年周期性可能与复杂活动区域的寿命有关。然而,太阳黑子出现周期的确切原因仍然需要更多的研究来支撑。

Simoniello 等^[67]发现日震结果与通过发电机的偶极子和四极磁性结构相互作用的时候会产生和准双年振荡一致的结果^[68-70]。偶极式发电机旁边可能存在一个非轴对称发电机^[71-72]。也有些工作^[73-74]认为,这样一个四极发电机可以解释活动经度突然改变 180 度的行为。还有工作^[75]认为,活动经度切换的周期预计与轴对称发电机相同。Simoniello 等^[67]发现主要点的活动转换在活动经度每 1.8~1.9 年。

普遍认为,在地球大气中观测到的准双年振荡是由重力波、对流和剪切层之间相互作用的角动量传递驱动的^[76]。Kumar 等^[77]证明了对角动量的类似传输通过对流区底部的重力阿尔芬波可以产生能够形成环形磁场的剪切层。

3 总 结

日地空间环境中准双年振荡的观测特征和演化行为已经被研究了几十年,但是确切的驱动机制还未完全理解透彻,在太阳大气、行星际空间和地球空间的耦合系统里,准双年振荡是无处不在的,也存在一些随机性特征,如间歇性和可变时间尺度。近几十年的研究揭示了准双年振荡的基本性质,它们的产生机制与太阳发电机的动力学过程有紧密的联系。

太阳准双年振荡通过开放磁场被转移到行星际空间,并反映在太阳风、银河宇宙线调制和地磁

活动中。准双年振荡在 11 年周期的最大值附近最为显著,与双峰结构存在内部联系。因此,准双年振荡不仅对太阳大气里的动力学过程很重要,而且对空间灾害性天气的预警和预报问题也很重要。

国内近几年陆续发射了多颗太阳观测卫星

(羲和号、夸父一号),这些卫星的长期观测数据将推进我国在太阳大气准双年振荡领域的发展。此外,地面观测设备(光学和射电)也将为揭示准双年振荡的多波段特征提供新的研究途径,从而更好地服务于空间天气的预报和预警。

参考文献:

- [1] Maeda K. Quasi-biennial cycles in cosmic ray intensity[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1967, 24(3): 320-323.
- [2] Sakurai K. Quasi-biennial variation of the solar neutrino flux and solar activity[J]. *Nature*, 1979, 278(5700): 146-148.
- [3] Silverman S M, Shapiro R. Power spectral analysis of auroral occurrence frequency[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, 88(A8): 6310-6316.
- [4] Akioka M, Kubota J, Suzuki M, et al. The 17-month periodicity of sunspot activity[J]. *Solar Physics*, 1987, 112(2): 313-316.
- [5] Shirai T. Time variation of the solar neutrino fluxes from Super-Kamiokande data[J]. *Solar Physics*, 2004, 222(2): 199-201.
- [6] Vecchio A, Laurenza M, Carbone V, et al. Quasi-biennial modulation of solar neutrino flux and solar and galactic cosmic rays by solar cyclic activity[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2009, 709(1): 1-5.
- [7] D'Alessi L, Vecchio A, Carbone V, et al. Quasi-biennial modulation of the solar neutrino flux; A "Telescope" for the solar interior[J]. *Journal of Modern Physics*, 2013, 4(4): 49-56.
- [8] Woodard M F, Noyes R W. Change of solar oscillation eigenfrequencies with the solar cycle[J]. *Nature*, 1985, 318(6045): 449-450.
- [9] Palte P L, Regulo C, Cortes T R. Solar cycle induced variations of the low L solar acoustic spectrum[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1989, 224: 253-258.
- [10] Elsworth Y, Howe R, Isaak G R, et al. Variation of low-order acoustic solar oscillations over the solar cycle[J]. *Nature*, 1990, 345(6273): 322-324.
- [11] Libbrecht K G, Woodard M F. Solar-cycle effects on solar oscillation frequencies[J]. *Nature*, 1990, 345(6278): 779-782.
- [12] Chaplin W J, Elsworth Y, Miller B A, et al. Solar p-mode frequencies over three solar cycles[J]. *The Astrophysical Journal*, 2007, 659(2): 1749-1760.
- [13] Howe R, Christensen-Dalsgaard J, Hill F, et al. Dynamic variations at the base of the solar convection zone[J]. *Science*, 2000, 287(5462): 2456-2460.
- [14] Broomhall A M, Fletcher S T, Salabert D, et al. Are short-term variations in solar oscillation frequencies the signature of a second solar dynamo? [J]. *Journal of Physics: Conference Series*. 2011, 271(1): 012025.
- [15] Inceoglu F, Howe R L, Paul T M. The quasi-biennial-oscillation-type signals in the subsurface flow fields during solar cycles 23 and 24[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, 920(1): 49-57.
- [16] Inceoglu F, Howe R L, Paul T M. Causal Interaction between the subsurface rotation rate residuals and radial magnetic field in different timescales[J]. *The Astrophysical Journal*, 2022, 925(2): 170-178.
- [17] Mehta T, Jain K, Tripathy S C, et al. Cycle dependence of a quasi-biennial variability in the solar interior[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, 515(2): 2415-2429.
- [18] Wang Y M, Sheeley Jr N R. On the fluctuating component of the Sun's large-scale magnetic field[J]. *The Astrophysical Journal*, 2003, 590(2): 1111-1120.
- [19] Hoeksema J T. Global solar magnetic fields[J]. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 1991, 43(S1): 59-69.
- [20] Benevolenskaya E E. Double magnetic cycle of solar activity[J]. *Solar Physics*, 1995, 161(1): 1-8.
- [21] Boberg F, Lundstedt H, Hoeksema J T, et al. Solar mean magnetic field variability: A wavelet approach to wilcox solar ob-

- servatory and SOHO/michelson doppler imager observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, 107(A10): SSH 15-1-SSH 15-7.
- [22] Cadavid A C, Lawrence J K, McDonald D P, et al. Independent global modes of solar magnetic field fluctuations[J]. *Solar Physics*, 2005, 226: 359-376.
- [23] Kane R P. Short-term periodicities in solar indices[J]. *Solar Physics*, 2005, 227: 155-175.
- [24] Knaack R, Stenflo J O. Spherical harmonic decomposition of solar magnetic fields[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2005, 438(1): 349-363.
- [25] Knaack R, Stenflo J O, Berdyugina S V. Evolution and rotation of large-scale photospheric magnetic fields of the Sun during cycles 21-23-periodicities, north-south asymmetries and r-mode signatures[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2005, 438(3): 1067-1082.
- [26] Laurenza M, Storini M, Giangrave S, et al. Search for periodicities in the IMP 8 charged particle measurement experiment proton fluxes for the energy bands 0.50 – 0.96 MeV and 190 – 440 MeV[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, 114(A1): A0103.
- [27] Vecchio A, Laurenza M, Meduri D, et al. The dynamics of the solar magnetic field: Polarity reversals, butterfly diagram, and quasi-biennial oscillations[J]. *The Astrophysical Journal*, 2012, 749(1): 27-36.
- [28] Obridko V N, Shelting B D. Quasi-biennial oscillations of the global solar magnetic field[J]. *Astronomy Reports*, 2001, 45: 1012-1017.
- [29] Obridko V N, Shelting B D. Occurrence of the 1.3-year periodicity in the large-scale solar magnetic field for 8 solar cycles [J]. *Advances in Space Research*, 2007, 40(7): 1006-1014.
- [30] Ivanov E V, Obridko V N, Shelting B D. Quasi-biennial oscillations of the solar magnetic fields[J]. *European Space Agency-Special Publications*, 2002, 506: 847-850.
- [31] Kane R P. Differences in the quasi-biennial oscillation and quasi-triennial oscillation characteristics of the solar, interplanetary, and terrestrial parameters[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, 110(A1): 01108.
- [32] Özgüç A, Ataç T, Rybák J. Temporal variability of the flare index (1966—2001) [J]. *Solar Physics*, 2003, 214(2): 375-396.
- [33] Ataç T, Özgüç A, Rybák J. Overview of the flare index during the maximum phase of the solar cycle 23[J]. *Advances in Space Research*, 2005, 35(3): 400-405.
- [34] Badalyan O G, Obridko V N. Solar magnetic fields and the intensity of the green coronal line[J]. *Astronomy Reports*, 2004, 48: 678-687.
- [35] Vecchio A, Carbone V. Spatio-temporal analysis of solar activity: Main periodicities and period length variations[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2009, 502(3): 981-987.
- [36] De Paula V, Curto J J, Oliver R. The cyclic behaviour in the N-S asymmetry of sunspots and solar plages for the period 1910 to 1937 using data from Ebro catalogues[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, 512(4): 5726-5742.
- [37] Joshi C, Sobha B, Erdélyi R. Periodicities in X-ray solar flare occurrences and coherency with daily mean magnetic field [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, 508(3): 3604-3610.
- [38] Valdés-Galicia J F, Velasco V M. Variations of mid-term periodicities in solar activity physical phenomena[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 41(2): 297-305.
- [39] Choudhary D P, Lawrence J K, Norris M, et al. Different periodicities in the sunspot area and the occurrence of solar flares and coronal mass ejections in solar cycle 23 – 24[J]. *Solar Physics*, 2014, 289: 649-656.
- [40] Mursula K, Vilppola J H. Fluctuations of the solar dynamo observed in the solar wind and interplanetary magnetic field at 1 AU and in the outer heliosphere[J]. *Solar Physics*, 2004, 221: 337-349.
- [41] Bazilevskaya G A, Fluckiger E O, Krainev M B, et al. Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference. August 07-15, 2001[C]. Hamburg: Under the Auspices of the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP), 2001.
- [42] Bazilevskaya G A, Makhmutov V S, Sladkova A I. Gnevyshev gap effects in solar energetic particle activity[J]. *Advances*

- in *Space Research*, 2006, 38(3): 484-488.
- [43] Rybak J, Antalova A, Storini M. The wavelet analysis of the solar and cosmic-ray data[J]. *Space Science Reviews*, 2001, 97(1/4): 359-362.
- [44] Lockwood M. Long-term variations in the magnetic fields of the Sun and the heliosphere: Their origin, effects, and implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, 106(A8): 16021-16038.
- [45] Wang Y M, Lean J, Sheeley Jr N R. Role of a variable meridional flow in the secular evolution of the Sun's polar fields and open flux[J]. *The Astrophysical Journal*, 2002, 577(1): 53-57.
- [46] López Comazzi A, Blanco J J. Short- and Mid-term periodicities observed in Neutron Monitor Counting Rates throughout solar cycles 20 – 24[J]. *The Astrophysical Journal*, 2022, 927(2): 155.
- [47] López Comazzi A, Blanco J J. Study of the relationship between sunspot number and the duration of the $\approx 1.6 - 2.2$ Year period in Neutron Monitor Counting Rates[J]. *Solar Physics*, 2023, 298(5): 67.
- [48] Benevolenskaya E E. A model of the double magnetic cycle of the Sun[J]. *The Astrophysical Journal*, 1998, 509(1): 49-52.
- [49] Howe R, Christensen-Dalsgaard J, Hill F, et al. Dynamic variations at the base of the solar convection zone[J]. *Science*, 2000, 287(5462): 2456-2460.
- [50] Krivova N A, Solanki S K. The 1.3-year and 156-day periodicities in sunspot data: Wavelet analysis suggests a common origin[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2002, 394(2): 701-706.
- [51] Ruzmaikin A, Cadavid A C, Lawrence J. Quasi-periodic patterns coupling the Sun, solar wind and the Earth[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2008, 70(17): 2112-2117.
- [52] Vecchio A, Laurenza M, Carbone V, et al. Quasi-biennial modulation of solar neutrino flux and solar and galactic cosmic rays by solar cyclic activity[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2009, 709(1): 1-5.
- [53] Zaqarashvili T V, Carbonell M, Oliver R, et al. Magnetic Rossby waves in the solar tachocline and Rieger-type periodicities [J]. *The Astrophysical Journal*, 2010, 709(2): 749-758.
- [54] Katsavrias C, Preka-Papadema P, Moussas X. Wavelet analysis on solar wind parameters and geomagnetic indices[J]. *Solar Physics*, 2012, 280: 623-640.
- [55] Laurenza M, Vecchio A, Storini M, et al. Quasi-biennial modulation of galactic cosmic rays[J]. *The Astrophysical Journal*, 2012, 749(2): 167.
- [56] Singh Y P, Gautam S. Temporal variations of short-and mid-term periodicities in solar wind parameters and cosmic ray intensity[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, 89: 48-53.
- [57] Popova E P, Yukhina N. A. The quasi-biennial cycle of solar activity and dynamo theory[J]. *Astronomy Letters*, 2013, 39: 729-735.
- [58] Lou Y Q. Rossby-type wave-induced periodicities in flare activities and sunspot areas or groups during solar maxima[J]. *The Astrophysical Journal*, 2000, 540(2): 1102-1108.
- [59] Chowdhury P, Khan M, Ray P C. Intermediate-term periodicities in sunspot areas during solar cycles 22 and 23 [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2009, 392(3): 1159-1180.
- [60] Zaqarashvili T V, Oliver R, Ballester J L, et al. Rossby waves and polar spots in rapidly rotating stars: Implications for stellar wind evolution[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2011, 532: A139.
- [61] Covas E, Tavakol R, Moss D. Spatiotemporal fragmentation as a mechanism for different dynamical modes of behaviour in the solar convection zone[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2000, 363:L13-L16.
- [62] Covas E, Tavakol R, Moss D, et al. Torsional oscillations in the solar convection zone[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2000, 360:L21-L24.
- [63] Howe R, Komm R, Hill F, et al. Rotation-rate variations at the tachocline: An update[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2011, 271(1): 012075.
- [64] Ichimoto K, Kubota J, Suzuki M, et al. Periodic behaviour of solar flare activity[J]. *Nature*, 1985, 316(6027): 422-424.
- [65] Ballester J L, Oliver R, Carbonell M. The near 160 day periodicity in the photospheric magnetic flux[J]. *The Astrophysical*

- Journal, 2002, 566(1): 505-511.
- [66] Chowdhury P, Choudhary D P, Gosain S. A study of the hemispheric asymmetry of sunspot area during solar cycles 23 and 24[J]. The Astrophysical Journal, 2013, 768(2): 188.
- [67] Simoniello R, Jain K, Tripathy S C, et al. The quasi-biennial periodicity as a window on the solar magnetic dynamo configuration[J]. The Astrophysical Journal, 2013, 765(2): 100.
- [68] Moss D. Dynamo models and the flip-flop phenomenon in late-type stars[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2004, 352(2): 17-20.
- [69] Moss D. Non-axisymmetric solar magnetic fields[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1999, 306(2): 300-306.
- [70] Fluri D M, Berdyugina S V. Flip-flops as observational signatures of different dynamo modes in cool stars[J]. Solar Physics, 2004, 224: 153-160.
- [71] Moss D, Barker D M, Brandenburg A, et al. Nonaxisymmetric dynamo solutions and extended starspots on late-type stars[J]. Astronomy and Astrophysics, 1995, 294: 155-164.
- [72] Moss D, Brooke J. Towards a model for the solar dynamo[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2000, 315(3): 521-533.
- [73] Tuominen I, Berdyugina S V, Korpi M J. Starspot cycles from Doppler imaging and photometric time series as nonlinear dynamo[J]. Astronomische Nachrichten, 2002, 323(3/4): 367-370.
- [74] Berdyugina S V, Usoskin I G. Active longitudes in sunspot activity: Century scale persistence[J]. Astronomy & Astrophysics, 2003, 405(3): 1121-1128.
- [75] Berdyugina S V, Pelt J, Tuominen I. Magnetic activity in the young solar analog LQ Hydrae-I. Active longitudes and cycles[J]. Astronomy & Astrophysics, 2002, 394(2): 505-515.
- [76] Baldwin M P, Gray L J, Dunkerton T J, et al. The quasi-biennial oscillation[J]. Reviews of Geophysics, 2001, 39(2): 179-229.
- [77] Kumar P, Talon S, Zahn J P. Angular momentum redistribution by waves in the Sun[J]. The Astrophysical Journal, 1999, 520(2): 859-870.

【责任编辑：孙向荣】